

ISSN 0386-5878

土木研究所資料 第4047号

# 土 木 研 究 所 資 料

## 鋼桁橋の設計へのFEM解析の適用 に関する研究

平成19年4月

独立行政法人 土木研究所  
構造物研究グループ橋梁チーム

Copyright © (2007) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 鋼桁橋の設計へのFEM解析の適用 に関する研究

構造物研究グループ  
橋梁チーム  
同  
同

上席研究員 村越 潤  
研究員 高橋 実  
交流研究員 吉岡 勉\*

## 要 旨

鋼多主桁橋の設計は、一般に初等はり理論に基づいた格子解析により行われている。格子解析は主桁と横桁を単純な格子構造に置き換えるものであり、計算機が普及していなかった時代において、複雑な構造をいかにして簡単に解くかに力点がおかれた頃から合理的な解析手法として用いられてきている。

一方、最近のコンピュータを中心とした設計・解析ツールの進歩には目覚ましいものがあり、ネックであった記憶容量や計算時間・手間といった課題は急速に解消されつつある。これに対応して、有限要素法による汎用解析ソフトの開発も近年盛んに進められている。その結果、複雑な構造物の挙動を解析する際にも、簡易なモデル化の工夫を考えるよりも、むしろ構造物をそのまま、またはそれに近い状態で解析することにより実際に近い挙動を再現することが可能となりつつある。

このような背景のもと、本研究では、鋼多主桁橋を対象として、主桁の最適化設計へのFEM解析の適用を試み、格子解析と比較した場合の導入効果を分析するとともに、設計への適用の観点から適切な解を得るためのモデル化手法ならびに解の評価方法を検討するものである。

キーワード：FEM解析、影響線解析、鋼多主桁橋、合理化設計

\* 交流研究員在職期間（平成15年4月～平成17年3月）  
（現）大日本コンサルタント株式会社構造事業部解析技術室

## 目 次

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 1 章 研究の概要                                | 1  |
| 1.1 背景と目的                                | 1  |
| 1.2 研究の内容                                | 3  |
| 2 章 FEM 解析における鋼多主桁橋のモデル化の検討              | 6  |
| 2.1 個別の部材に対するモデル化の検討                     | 6  |
| 2.1.1 主桁 1 本モデルによる要素分割数の検討               | 6  |
| 2.1.2 単純桁橋モデルによる要素分割数の検討                 | 12 |
| 2.1.3 応力集中部における要素分割の検討                   | 17 |
| 2.1.4 床版およびずれ止めのモデル化の検討                  | 19 |
| 2.1.5 補剛システムの影響検討                        | 22 |
| 2.1.6 支承のモデル化検討                          | 26 |
| 2.2 実橋載荷試験との比較による全体挙動に対するモデル化の検討         | 32 |
| 2.2.1 検討内容                               | 32 |
| 2.2.2 解析対象の橋梁と実橋載荷試験                     | 32 |
| 2.2.3 検討する解析モデル                          | 37 |
| 2.2.4 検討結果                               | 41 |
| 2.2.5 モデル化に関する追加検討                       | 58 |
| (1) 床版と主桁間のモデル化に関する検討                    | 58 |
| (2) 桁端部下フランジに発生する圧縮応力に関する補足説明            | 64 |
| (3) 要素分割に関する検討                           | 65 |
| 2.3 モデル化のまとめ                             | 66 |
| 3 章 格子解析と FEM 解析による影響線載荷の比較              | 68 |
| 3.1 検討内容                                 | 68 |
| 3.1.1 対象橋梁と FEM 解析モデル                    | 69 |
| 3.1.2 格子解析をベースとした連続合成桁の設計基準              | 69 |
| 3.1.3 FEM 解析を連続合成桁の主桁設計に適用する場合の考え方       | 74 |
| 3.2 影響線載荷の比較 (CASE1 : RC 床版を有する連続合成桁の場合) | 76 |
| 3.2.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 載荷位置の比較        | 77 |
| 3.2.2 発生応力の比較 (後死荷重、活荷重)                 | 82 |
| 3.3 影響線載荷の比較 (CASE2 : PC 床版を有する連続合成桁の場合) | 84 |
| 3.3.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 載荷位置の比較        | 84 |
| 3.3.2 発生応力の比較 (後死荷重、活荷重)                 | 89 |
| 3.4 影響線載荷の比較 (CASE3 : 連続非合成桁の場合)         | 91 |
| 3.4.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 載荷位置の比較        | 91 |
| 3.4.2 発生応力の比較 (後死荷重、活荷重)                 | 96 |
| 3.5 載荷面積の大きさに対する考察                       | 98 |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 4 章 FEM 解析による鋼多主桁橋の試設計          | 99   |
| 4.1 試設計内容                       | 99   |
| 4.2 鋼多主桁橋の試設計                   | 99   |
| 4.2.1 試設計の前提条件                  | 99   |
| 4.2.2 支点上の応力算出にあたっての仮定          | 102  |
| 4.2.3 格子解析と FEM 解析による設計結果の比較    | 103  |
| 4.2.4 鋼重低減効果                    | 109  |
| 4.3 構造簡略化した鋼多主桁橋の試設計            | 110  |
| 4.4 主桁本数を減らした鋼少数主桁橋の試設計         | 113  |
| 5 章 中間支点部の応力性状に与えるモデル化の影響に関する検討 | 118  |
| 5.1 検討内容                        | 118  |
| 5.2 モデル化の違いによる局部応力の比較           | 119  |
| 5.2.1 解析対象と解析モデル                | 119  |
| 5.2.2 解析結果                      | 121  |
| 5.2.3 下フランジ下面における平均応力の算出方法      | 134  |
| 5.3 局部応力により塑性化する領域の検討           | 135  |
| 5.3.1 解析方法                      | 135  |
| 5.3.2 解析結果                      | 136  |
| 5.4 疲労照査における局部応力の扱い             | 140  |
| 5.4.1 解析対象と解析モデル                | 140  |
| 5.4.2 疲労照査方法                    | 140  |
| 5.4.3 疲労照査結果                    | 142  |
| 5.5 検討結果のまとめ                    | 145  |
| 6 章 まとめ                         | 146  |
| 【参考文献】                          | 148  |
| 【成果論文】                          | 150  |
| 付属資料                            |      |
| 資料 1：主桁の許容応力度設計に FEM 解析を適用した例   | 付-1  |
| 資料 2：一定せん断流パネルモデルを用いた検討         | 付-30 |

## 1章 研究の概要

### 1.1 背景と目的

一般的な橋梁形式である鋼多主桁橋の設計は、従来より、初等はり理論に基づいた格子解析によって行われている。格子解析は主桁と横桁を単純な格子構造に置き換えるものであり、計算機が普及していなかった時代において、複雑な構造をいかにして簡単に解くかに力点がおかれた頃から合理的な解析手法として用いられてきている。

一方、最近のコンピュータを中心とした設計・解析ツールの進歩には目覚ましいものがあり<sup>1)</sup>、ネックであった記憶容量や計算時間・手間といった課題は急速に解消されつつある。これに対応して、有限要素法（Finite Element Method：以下、FEM）による汎用解析ソフトの開発も近年盛んに進められている<sup>2)</sup>。その結果、複雑な構造物の挙動を解析する際に、簡易なモデル化の工夫を考えるよりも、むしろ構造物をそのまま、またはそれに近い状態で解析することにより実際に近い挙動を再現することが可能となりつつある。

このような背景のもと、これまでも様々な方面で FEM を橋梁上部工の設計計算における種々の段階で用いるための検討が報告されてきた<sup>1~10)</sup>。また、合理化鋼少数主桁橋の設計において、限界状態設計法の考え方の中で FEM 解析を最適化アルゴリズムの中で用いることにより最適解を求める検討も行われている<sup>11~13)</sup>。しかしながら、実務設計においては、FEM 解析は、主に格子解析では適切に表現しきれない構造、部位の挙動把握や応力照査に用いられており、格子解析に代わり最適解を求めるために主体的に用いるというレベルには至っていないのが現状である。その理由としては以下のこと等が考えられる。

- ① FEM 解析では、解析の対象とする構造及び挙動によってモデル化の方法（要素種選択、要素分割数、拘束条件など）は異なるものであり、現状では解析を実施する技術者の経験的な判断に依るところが多く、意図する適切な結果を得るための適用方法を明らかにする必要があること。
- ② 格子解析では部材の平均的な応力を算出するため応力は線形分布であるが、FEM 解析では、より実現象に近い非線形の応力分布が与えられ、部位によっては許容応力度をはるかに超える応力集中が発生するため、格子解析と同様の評価方法が必ずしも適用できない場合があること。
- ③ FEM 解析を使用した自動設計計算ツールが整備されていないため、例えばモデルの断面変更を手作業で繰り返し行う必要があるなど、FEM 解析を用いる設計は現時点では非効率的であること。
- ④ 橋梁規模によっては数万～数十万要素となる FEM モデルに対し、影響線を作成し、断面変更による繰返し計算を行うためには、計算量が膨大となるため、現状では未だにコンピュータによる結果が得られるまでの計算時間が非常にかかる等の課題があること。

③、④については、コンピュータによる計算技術のさらなる進歩や橋梁設計に特化した FEM プリポスト処理ツールの整備に依存するが、①、②の課題を克服するためには、適切な解を得るためのモデル化手法や、設計に用いるための解の評価方法について明らかにすることが必要と考えられる。本研究では、鋼多主桁橋を対象に主桁の最適化設計への FEM 解析の適用を試み、格子解析と比較した場合の導入効果を分析するとともに、その検討の中で実務設計の面から適切な解を得るためのモデル化手法ならびに解の評価方法を検討する。

## 1.2 研究の内容

本研究を進める上で、本研究に関連する「疲労」、「耐荷力」、「FEM のモデル化」の各分野を専門とする大学（東京工業大学三木千寿教授、早稲田大学依田照彦教授、九州工業大学山口栄輝教授）に対して委託研究（平成 13～15 年度）を行っている。図-1.2.1 に研究の概要を示す。

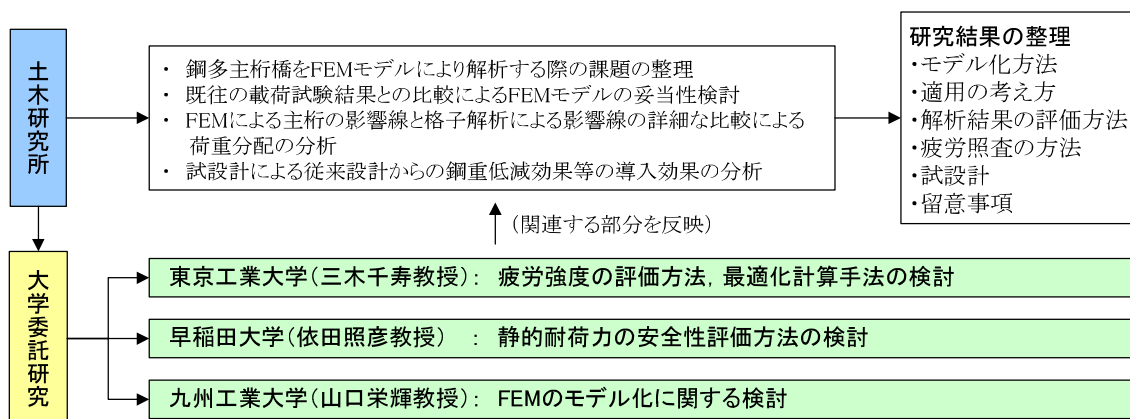


図-1.2.1 研究の概要

本資料は、図-1.2.1 に示す検討のうち、主に土木研究所において検討した内容をまとめたものである。また、本資料のうち、2.1 節に示す部材のモデル化の検討については、委託研究成果の一部を引用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

九州工業大学山口栄輝教授による研究成果：

「2 章：FEM 解析における鋼多主桁橋のモデル化の検討」のうち、以下に示す節において引用掲載させて頂いた。

2.1.1 主桁 1 本モデルによる要素分割数の検討

2.1.2 単純桁橋モデルによる要素分割数の検討

2.1.5 補剛システムの影響検討

早稲田大学依田照彦教授による研究成果：

「2 章：FEM 解析における鋼多主桁橋のモデル化の検討」のうち、以下に示す節において引用掲載させて頂いた。

2.1.3 応力集中部における要素分割の検討

2.1.4 床版およびずれ止めのモデル化の検討

以下に、本資料の構成を示す。

#### (1) 2章：FEM 解析における鋼多主桁橋のモデル化の検討

全体系のモデル化に先立ち、個別部材のモデル化の検討例として、主桁単体をシェル要素でモデル化した場合の解が収束するための最適要素分割数、床版、ずれ止め及び支承のモデル化方法等の検討を行う。その結果を踏まえ、鋼多主桁橋の上部工全体をモデル化し、使用する要素種類、要素分割数、アスペクト比等の影響について検討を行う。具体的には、静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を解析対象として、合成・非合成の格子モデルと3種類のFEMモデルを作成し、実測値と解析値との比較を通して、本研究で使用するFEM解析モデルの妥当性を確認する。

#### (2) 3章：格子解析とFEM解析による影響線載荷時の載荷状態の比較

格子モデルとFEMモデルを対象として、後死荷重（地覆、高欄、舗装の死荷重）および活荷重の影響線載荷時における影響線形状、影響線の極値、載荷面積、影響線体積、発生応力の比較を行う。検討対象の橋梁については、中間支点上の床版の合成作用に着目し、①RC床版を有する連続合成桁、②PC床版を有する連続合成桁、③連続非合成桁、の3ケースとした。

#### (3) 4章：FEM解析による鋼多主桁橋の試設計

3章で示した影響線載荷の方法を用いて、FEM解析により後死荷重及び活荷重に対して鋼多主桁橋の試設計を行い、格子解析による試設計と比較した場合の鋼重低減効果について検討する。検討対象とする橋梁は、2章で対象とした静的載荷試験データが得られている4径間連続鋼4主桁橋において床版の合成作用を変えた3橋、構造を簡略化した3径間連続鋼4主桁橋において支間長の異なる2橋及び3径間連続鋼桁橋で主桁本数を3本、2本と減らした2橋の計7橋とした。

#### (4) 5章：中間支点部の応力性状に与えるモデル化の影響に関する検討

中間支点部に発生する応力性状を対象として、モデル化の違いによる局部応力を比較検討する。具体的には、まず、ソリッド要素を用いた細メッシュモデルにより中間支点部の応力性状を把握し、このソリッドモデルにバイリニア型の応力-ひずみ構成則を与えた弾塑性解析により塑性化する領域を把握し、モデル化の違いが局部応力に与える影響について検討する。

#### (5) 6章：まとめ

本研究で得られた成果と今後の課題をまとめる。

なお、本資料に関連する主な公表論文（委託研究において関連する主な公表論文を含む）について以下に示す。

（土木研究所）

- ・ 平原伸幸，高橋実，山森誠史，徳橋亮治：設計ツールの高度化に対応した道路橋の設計に関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，I -622，2002.9.
- ・ 村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，(社)日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第 11 巻，第 43 号，pp.131-145，2004.9.
- ・ 吉岡勉，村越潤，高橋実：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化に関する一検討，土木学会第 59 回年次学術講演会，I -493，2004.9.

（大学委託研究）

- ・ 菅沼久忠，高橋実：疲労設計応力算出に用いる構造解析係数と有限要素法モデル，土木学会第 58 回年次学術講演会，I - 416，2003.9.
- ・ 原田和洋，山口栄輝，山本悟，村越潤，高橋実：鋼 I 桁橋の 3 次元有限要素解析における要素分割の影響，土木学会第 58 回年次学術講演会，I - 644，2003.9.

## 2章 FEM 解析における鋼多主桁橋のモデル化の検討

### 2.1 個別の部材に対するモデル化の検討

#### 2.1.1 主桁 1 本モデルによる要素分割数の検討（九州工業大学）

##### (1) 検討内容

主桁の応力を FEM 解析により求める際の主桁フランジおよびウェブの要素分割数の影響について検討を行う。検討ケースは、主桁に垂直補剛材を配置しない場合と、垂直補剛材を配置した場合の 2 ケースとした。

解析対象とした主桁 1 本の単純ばりを図-2.1.1.1 に示す。支間長 40m の単純ばりであり、境界条件は桁端部を単純支持としている。荷重は図-2.1.1.1 に示すように、上フランジのウェブ位置において線荷重を軸方向に線形静解析により等分布载荷させた。検討した解析モデル(要素分割数)を表-2.1.1.1 に示す。フランジ幅方向の分割数を  $f$ 、ウェブ高さ方向の分割数を  $w$ 、軸方向の分割数を  $L$  で示した。垂直補剛材を配置したモデルには、垂直補剛材を配置しないモデルと同じ分割数を用いるが、垂直補剛材幅の分割数を  $b$  として区別する。解析ソフトは NASTRAN<sup>14)</sup> を使用し、モデル化においては全て 4 節点アイソパラメトリックシェル要素 CQUAD4<sup>14)</sup> を用いている。解析モデルの要素分割の例を図-2.1.1.2 に示す。

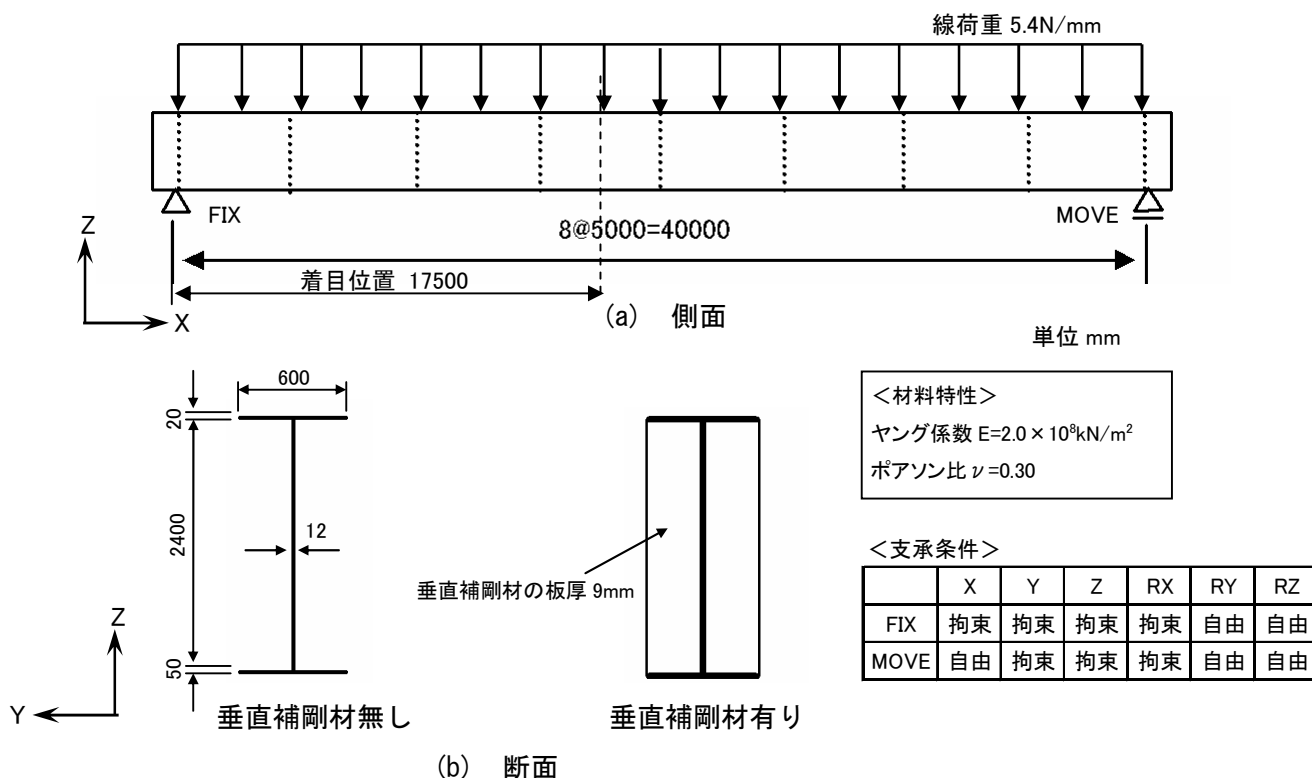
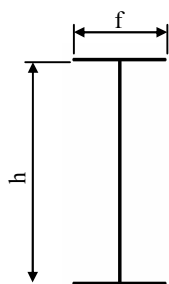


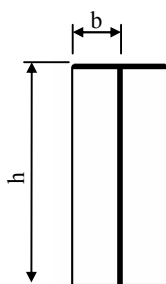
図-2.1.1.1 解析対象とした主桁 1 本の単純ばり  
(垂直補剛材が有る場合と無い場合の 2 ケースを対象)

表-2.1.1.1 要素分割数を変えてモデル化した解析モデル一覧

| モデル名         |             | フランジ全幅<br>(垂直補剛材幅)<br>の分割数<br>$f(b)$ | ウェブ全高の<br>分割数<br>$h$ | 主桁軸方向<br>の分割数<br>$L$ |
|--------------|-------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 垂直補剛材無し      | 垂直補剛材有り     |                                      |                      |                      |
| f4_h4_L64    | b2_h4_L64   | 4(2)                                 | 4                    | 64                   |
| f4_h4_L32    | b2_h4_L32   |                                      |                      | 32                   |
| f4_h8_L128   | b2_h8_L128  |                                      | 8                    | 128                  |
| f4_h8_L64    | b2_h8_L64   |                                      |                      | 64                   |
| f8_h8_L128   | b4_h8_L128  | 8(4)                                 | 8                    | 128                  |
| f8_h8_L64    | b4_h8_L64   |                                      |                      | 64                   |
| f8_h16_L256  | b4_h16_L256 |                                      | 16                   | 256                  |
| f8_h16_L128  | b4_h16_L128 |                                      |                      | 128                  |
| f16_h16_L256 | b8_h16_L256 | 16(8)                                | 16                   | 256                  |
| f16_h16_L128 | b8_h16_L128 |                                      |                      | 128                  |
| f16_h32_L512 | b8_h32_L512 |                                      | 32                   | 512                  |
| f16_h32_L256 | b8_h32_L256 |                                      |                      | 256                  |

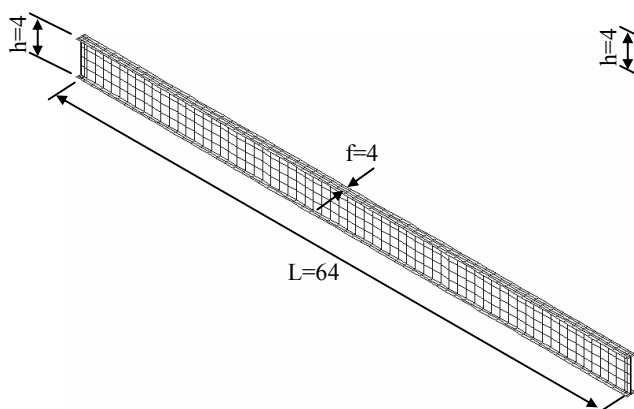


垂直補剛材無し

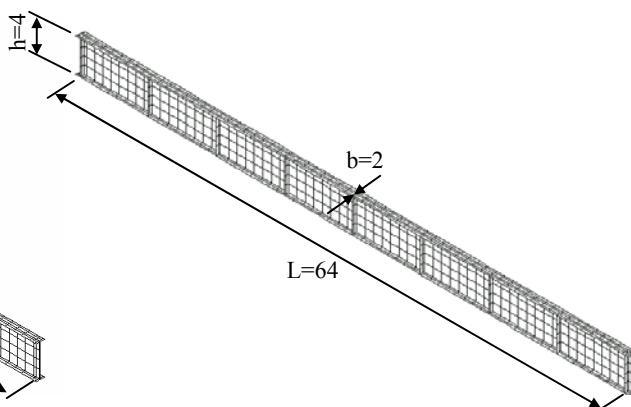


垂直補剛材有り

$f$  : フランジ全幅の分割数  
 $b$  : 垂直補剛材幅の分割数  
 $w$  : ウェブ全高の分割数  
 $L$  : 主桁軸方向の分割数



(a) 垂直補剛材無し (モデル名 : f4\_h4\_L64)



(b) 垂直補剛材有り (モデル名 : b2\_h4\_L64)

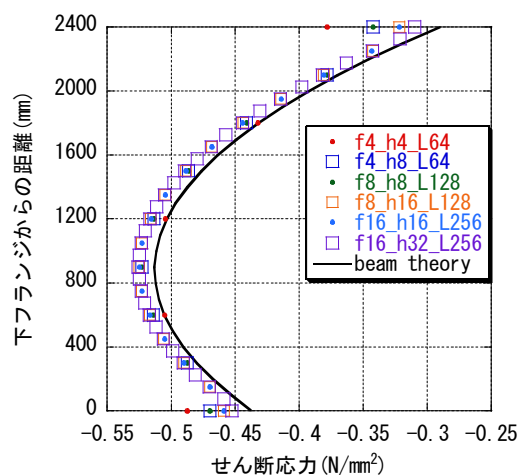
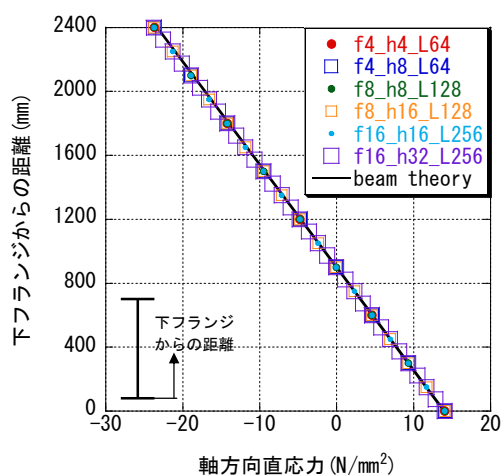
図-2.1.1.2 解析モデルの要素分割の例

## (2) 検討結果

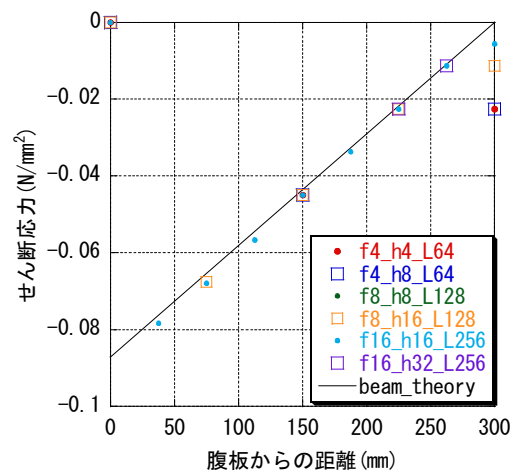
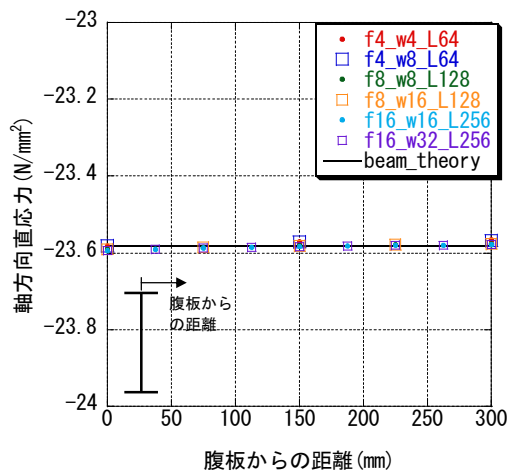
図-2.1.1.3 に垂直補剛材が無い場合における各モデルの解析結果の内、ウェブおよび上・下フランジの軸方向直応力分布およびせん断応力分布を示す。着目位置は支点から軸方向に 17.5m 離れた位置（補剛材間中央位置）である。図-2.1.1.4 に垂直補剛材が有る場合における同様の解析結果を示す。図-2.1.1.5 に下フランジから高さ方向に 600mm 離れた位置におけるウェブの軸方向直応力分布を示す。なお、FEM 解析結果の応力値は、節点を構成する各要素応力の平均により求めた節点応力を使って整理している。また、図中には初等はり理論の結果を併記した。

得られた結果を以下にまとめる。

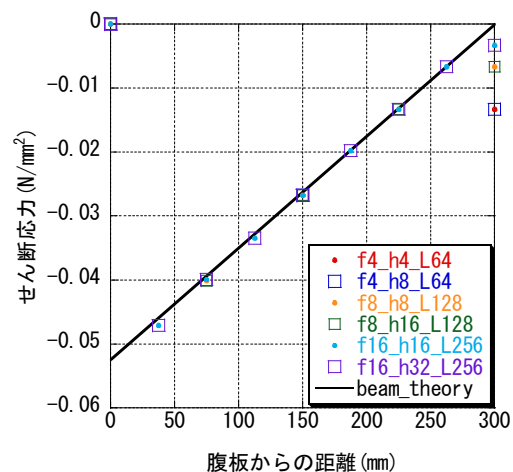
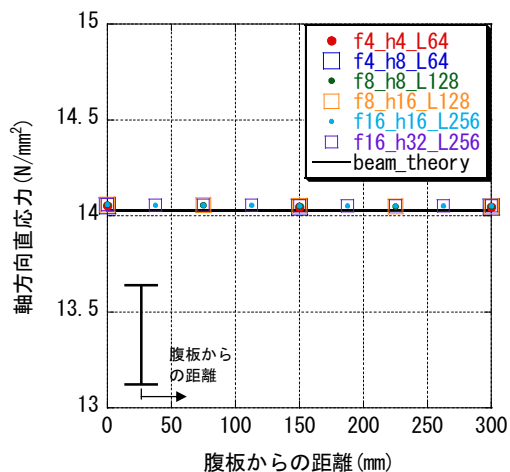
- ・ 図-2.1.1.3 より、支点から軸方向に 17.5m 離れた位置におけるウェブの軸方向直応力は、どの分割数においても直線分布となり、初等はり理論結果と良く一致する。要素分割数の違いによる差はほとんど見られない。一方、せん断応力においては、ウェブの中央部で差が見られる。初等はり理論ではせん断変形を無視しているのに対し、FEM 解析ではせん断変形を考慮しており、それが一因と考えられる。
- ・ 図-2.1.1.3 より、上・下フランジとも軸方向直応力においては、どの分割数においても直線分布となり、初等はり理論結果と良く一致する。これは、着目位置が曲げモーメントが支配的な支間中央付近であり、せん断遅れの影響が相対的に小さいために直線分布になったものと考えられる。上・下フランジのせん断応力においてはフランジの突出幅中央部においては、良い一致を示しているものの、フランジ端部（ウェブからの距離=300mm の位置）のみ、要素分割数の違いによる発生応力の差が生じている。
- ・ 図-2.1.1.4 より、支点から軸方向に 17.5m 離れた位置におけるウェブおよび上・下フランジの軸方向直応力およびせん断応力の応力分布は、垂直補剛材が有る場合でも、無い場合と同様の傾向になっている。
- ・ 図-2.1.1.5 より、ウェブ直応力の軸方向分布は、垂直補剛材が無い場合では、初等はり理論の結果と一致することがわかる。一方、垂直補剛材が有る場合では、垂直補剛材間中央部（軸方向位置 17.5m）では分割数の影響は小さく初等はり理論の結果との差は小さい（0.5%程度）が、垂直補剛材近傍では初等はり理論の結果とは異なる分布となる。垂直補剛材から軸方向に 0～0.3m の範囲では初等はり理論の応力値を約 2%下回り、0.3～1.5m の範囲では初等はり理論の応力値を約 2%上回る傾向が認められる。



(a) ウェブ

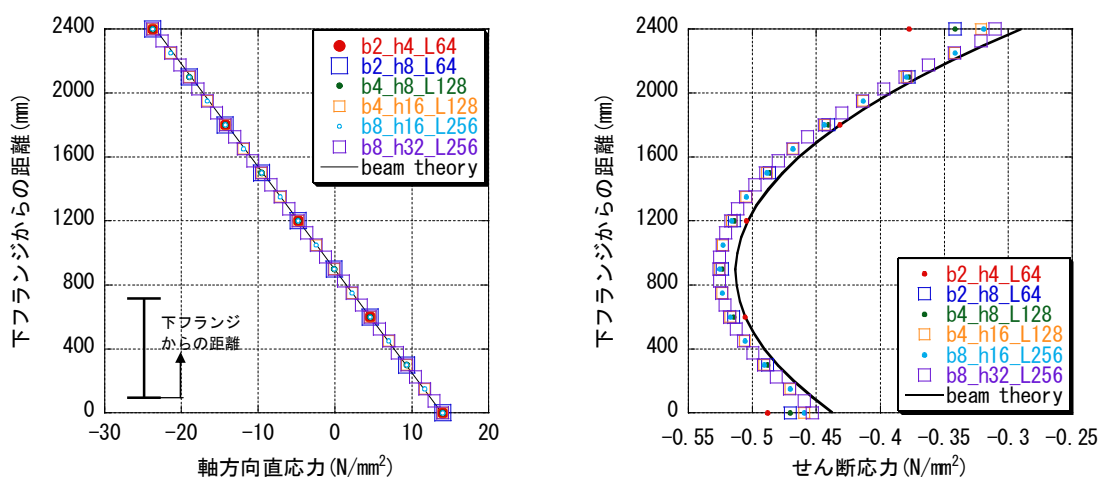


(b) 上フランジ

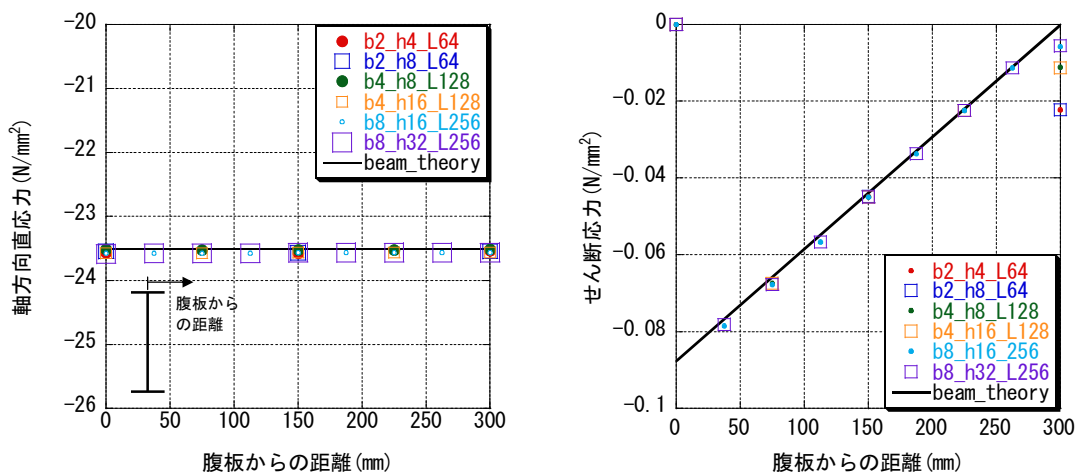


(c) 下フランジ

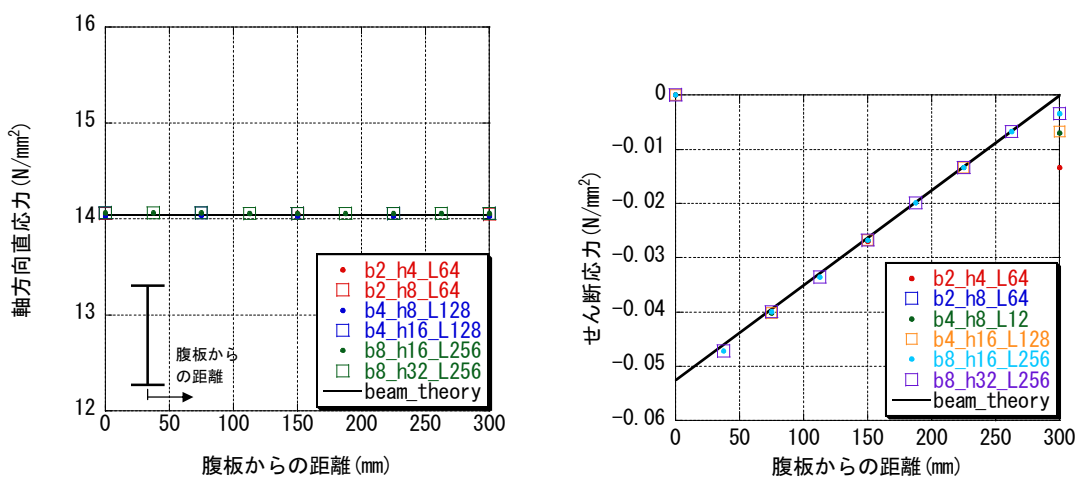
図-2.1.1.3 支点からの軸方向距離 17.5m 位置における応力分布の比較  
(垂直補剛材が無い場合)



(a) ウェブ

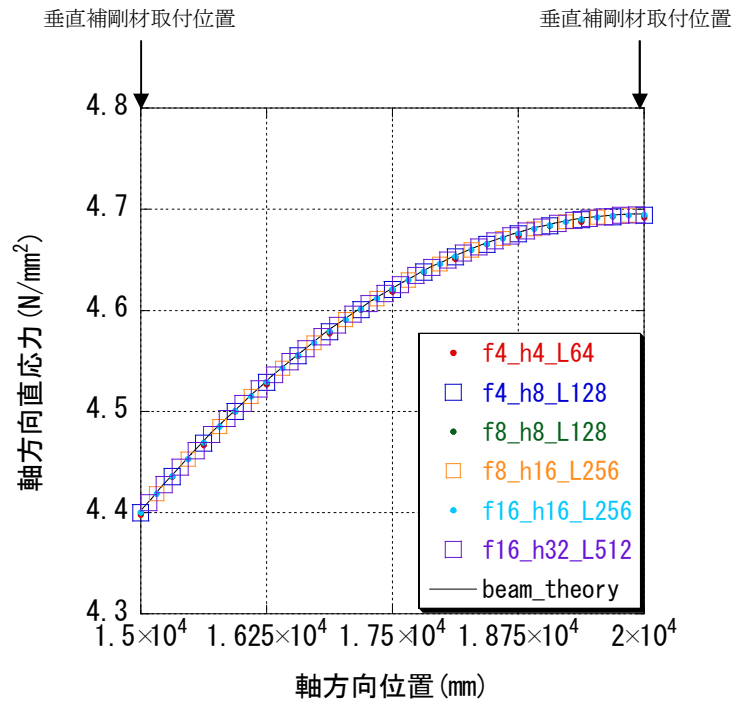


(b) 上フランジ

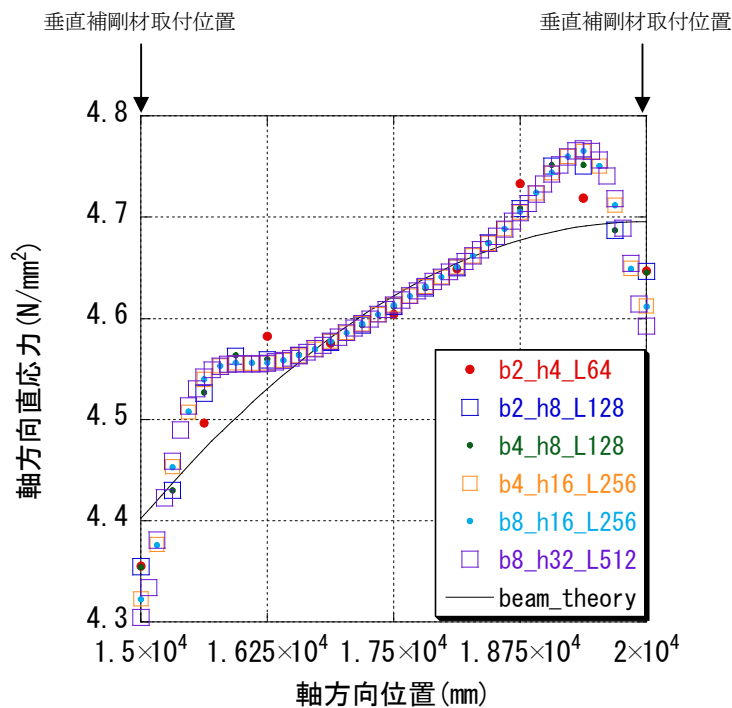


(c) 下フランジ

図-2.1.1.4 支点からの軸方向距離 17.5m 位置における応力分布の比較  
(垂直補剛材が有る場合)



(a) 垂直補剛材が無い場合



(b) 垂直補剛材が有る場合

図-2.1.1.5 下フランジから高さ方向に 600mm 離れた位置における  
ウェブ軸方向直応力分布の比較 (軸方向 15~20m の範囲)

## 2.1.2 単純桁橋モデルによる要素分割数の検討<sup>15)</sup> (九州工業大学)

### (1) 検討内容

2.1.1 に続き、単純桁橋を対象に、特に主桁ウェブに着目した要素分割数の影響について検討を行う。

解析対象の主要諸元を図-2.1.2.1 に示す。解析対象は、横桁および垂直補剛材を 5m ピッチで配置した単純合成 4 主 I 桁橋とした。荷重は等分布荷重  $p1$ 、 $p2$  からなる L 荷重<sup>16)</sup> (区分 : B 活荷重) を G1 桁の影響線から偏心载荷させた (図-2.1.2.2)。解析モデルは、対称性を考慮して支間の 1/2 のみをモデル化している。主桁、横桁、垂直補剛材には NASTRAN の 4 節点アイソパラメトリックシェル要素 CQUAD4<sup>14)</sup> を、床版には 8 節点六面体アイソパラメトリックソリッド要素 CHEXA<sup>14)</sup> を用いてモデル化を行った。主桁の要素分割数を変えてモデル化した解析モデルの一覧を表-2.1.2.1 に示す。また、解析モデル f4 の要素分割を例として図-2.1.2.3 に示す。着目部である G1 桁及び G2 桁に対しては要素分割を比較的細かくし、着目部以外の部分は比較的粗く分割した。床版の厚さ方向の分割数は、1 層または 2 層として別途比較検討を行ったところ主桁の応力に及ぼす影響は小さかったため、1 層として分割した。なお、床版コンクリートのヤング係数は鋼の 1/7、ポアソン比は 0.167 とした。

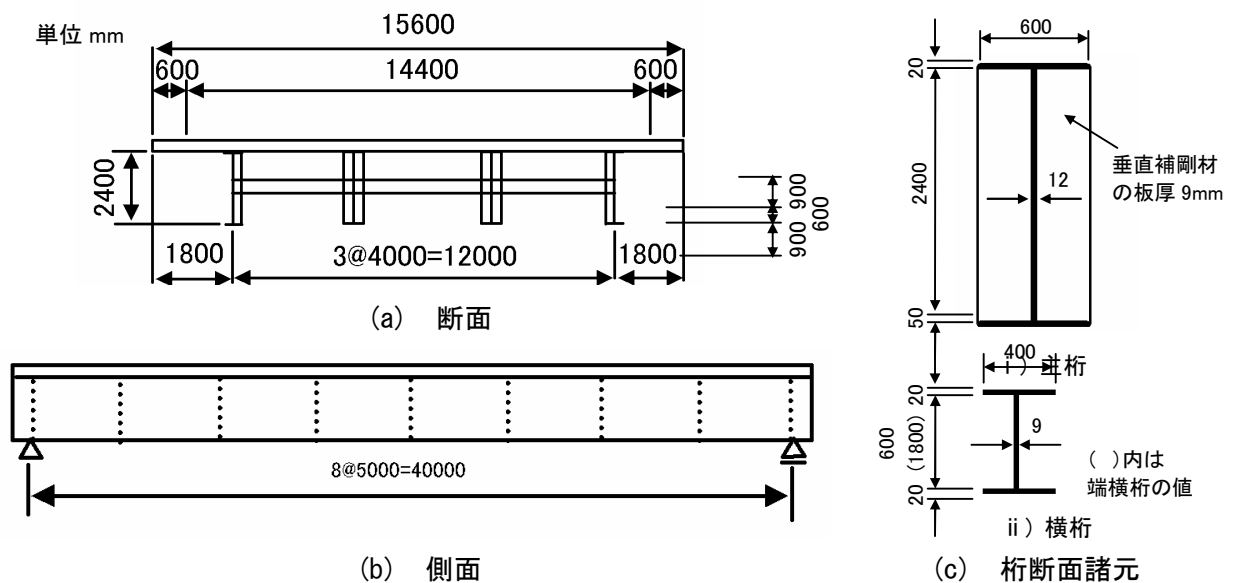


図-2.1.2.1 解析対象とした単純合成 4 主 I 桁橋

表-2.1.2.1 主桁の要素分割数を変えてモデル化した解析モデル一覧

| モデル名 | 着目部(G1,G2)       |                 | 着目部以外            |                 |
|------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|      | フランジ全幅<br>の分割数 f | ウェブ全高<br>の分割数 h | フランジ全幅<br>の分割数 f | ウェブ全高<br>の分割数 h |
| f2   | 2                | 8               | 2                | 8               |
| f4   | 4                | 16              | 2                | 8               |
| f8   | 8                | 32              | 2                | 8               |
| f12  | 12               | 48              | 2                | 8               |
| f16  | 16               | 64              | 2                | 8               |

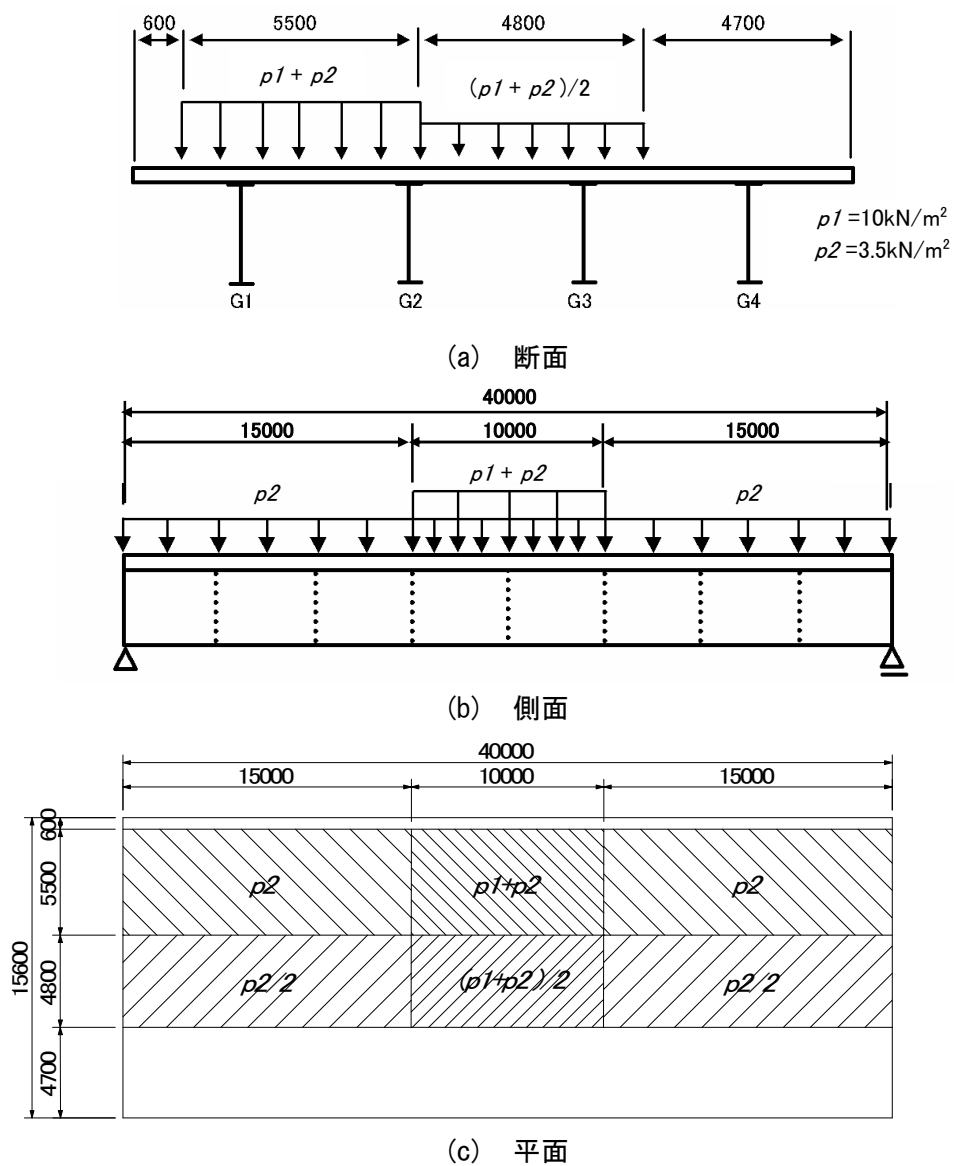


図-2.1.2.2 荷重状態 (L 荷重偏心荷)

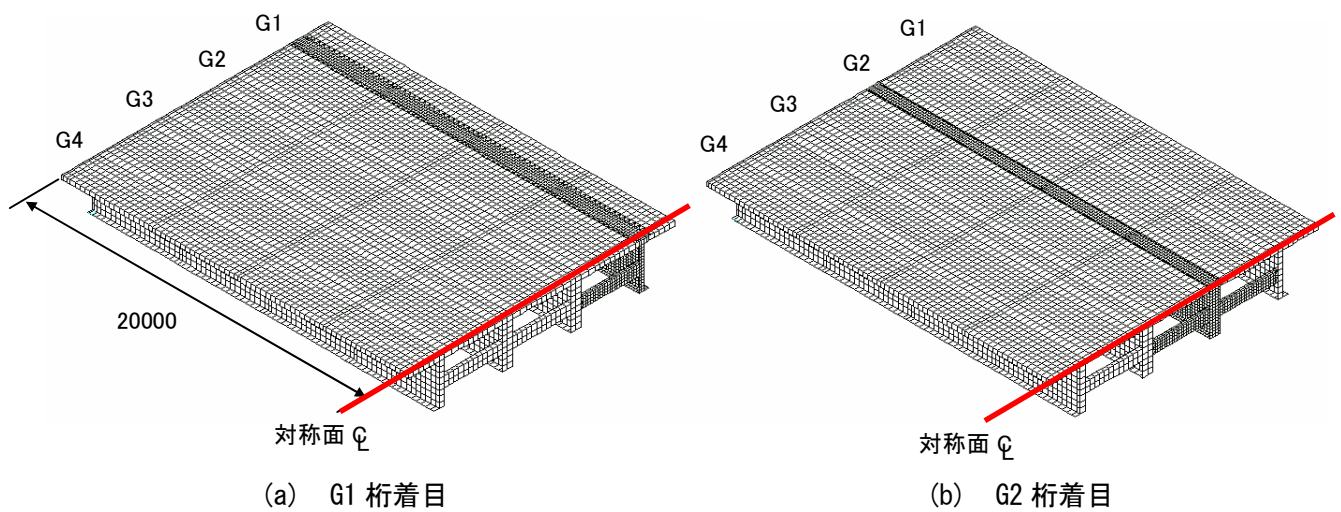


図-2.1.2.3 解析モデルの要素分割の例 (1/2 モデル, モデル f4 の場合)

## (2) 検討結果

図-2.1.2.4 に示す G1 桁の着目断面（補剛材間中央位置：A ライン、補剛材近傍 B ライン、補剛材位置：C ライン）における主桁ウェブ軸方向応力およびせん断応力の分布を図-2.1.2.5 に示す。図-2.1.2.4 に示す着目位置 a～d 点におけるウェブの要素代表長（モデル f2：300mm、モデル f4：150mm、モデル f8：75mm、モデル f12：50mm、モデル f16：37.5mm）と軸方向応力の関係を図-2.1.2.6 に、その関係を外挿することにより求めた軸方向応力の収束値に対する誤差を表-2.1.2.2 にそれぞれ示す。なお、FEM 解析結果の応力値は、節点を構成する各要素応力の平均により求めた節点応力を使って整理している。

得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 図-2.1.2.5(a) より、垂直補剛材間中央位置では、要素分割数の違いによる軸方向直応力およびせん断応力の差はほとんどみられない。
- ・ 図-2.1.2.5(b) より、垂直補剛材近傍では、軸方向直応力およびせん断応力ともに横桁フランジが取り付けられている位置で分布が乱れ、要素分割数が増えるにつれて乱れの大きさが顕著となっている。局部的な応力集中が発生しているものと考えられる。
- ・ 図-2.1.2.5(c) より、垂直補剛材位置では、軸方向直応力は横桁フランジ取り付け位置で分布が乱れているが、せん断応力は比較的乱れの少ない分布形状となっている。垂直補剛材はウェブのせん断応力分布に有効に作用している。
- ・ 図-2.1.2.6(a) より、a 点では要素の大きさを小さくするにしたいが、要素代表長と軸方向直応力の関係が直線に近づいているのがわかる。これは有限要素法の理論的検討結果<sup>17)</sup>とも合致しており、要素分割数に関する収束値が直線による外挿で求められることを示している。
- ・ 図-2.1.2.6(b)～(d) より、応力集中が発生している b 点および c 点では要素の大きさを小さくしても直線分布になつたとは判断できず、応力の収束値を求めるにはより多くの要素分割数が必要と考えられる。また、横桁フランジ取り付け位置から少し外れた d 点では、要素代表長の減少に対し、誤差が一旦大きくなるという現象が見られた。
- ・ 応力集中が発生していない a 点では、モデル f2 でも収束値との誤差は 1% 以下である。補剛材間中央位置 A ラインのようなスムーズな応力分布が得られる部位については、ウェブ高さ方向の要素分割は 8 分割程度で十分と言える。

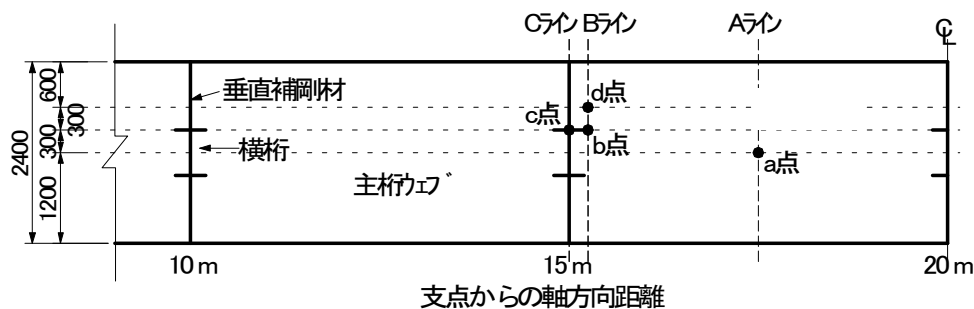
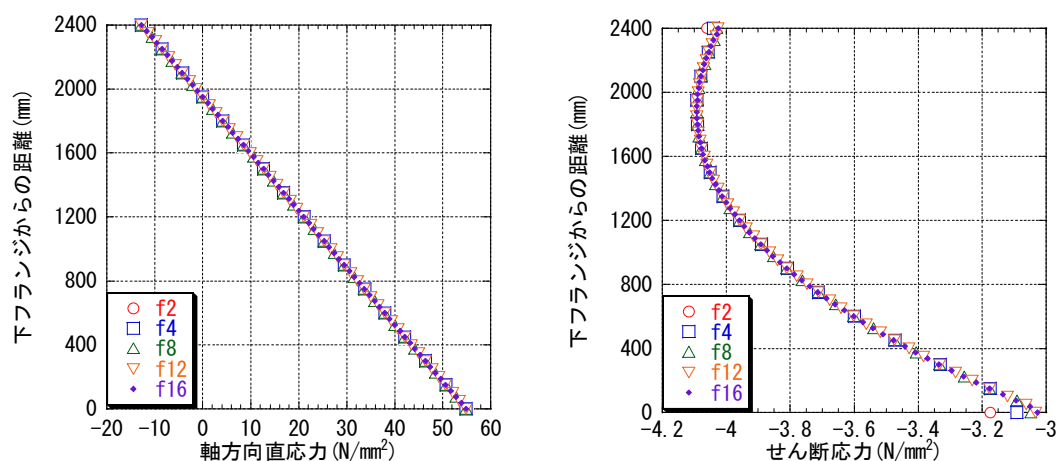
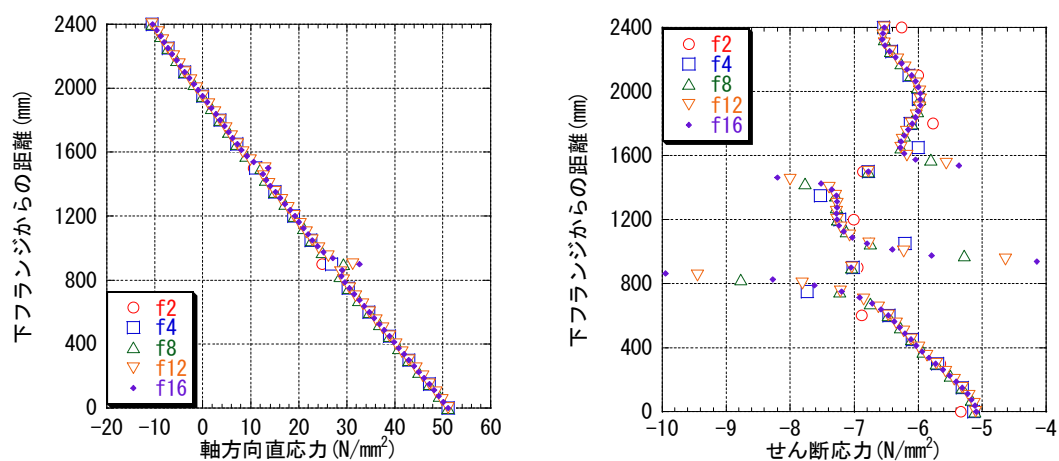


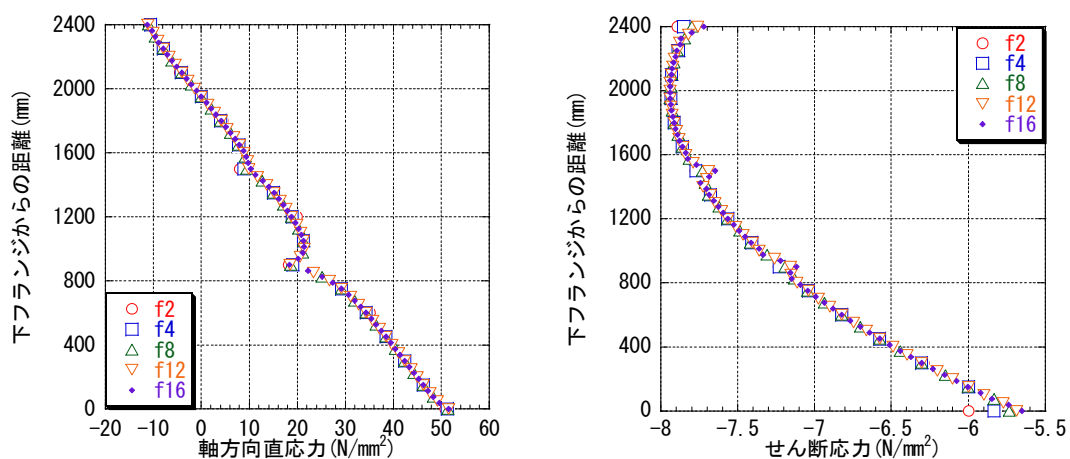
図-2.1.2.4 結果を比較する着目位置（G1 桁）



(a) 垂直補剛材間中央位置 : A ライン

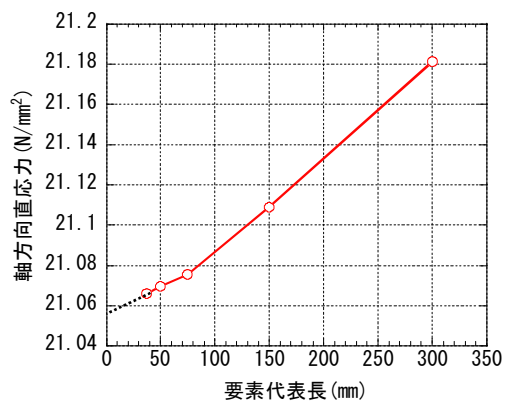


(b) 垂直補剛材近傍 : B ライン

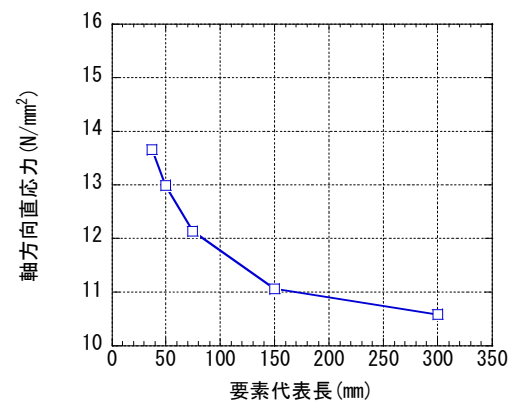


(c) 垂直補剛材位置 : C ライン

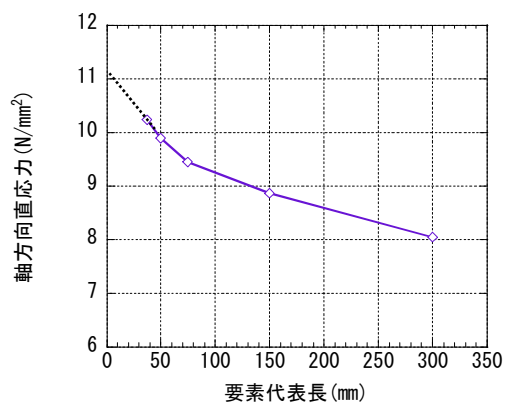
図-2. 1. 2. 5 G1 桁ウェブの応力分布の比較



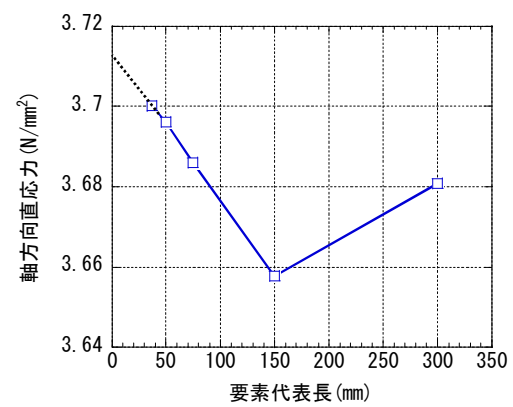
(a) 着目位置：a 点



(b) 着目位置：b 点



(c) 着目位置：c 点



(d) 着目位置：d 点

図-2.1.2.6 G1 桁ウェブの要素代表長と軸方向直応力の関係

表-2.1.2.2 軸方向応力の収束値に対する誤差

| 着目位置<br>モデル名 | a 点   | b 点    | c 点   | d 点  |
|--------------|-------|--------|-------|------|
| f2           | 0.59% | ※22.5% | 28.6% | 0.8% |
| f4           | 0.25% | ※19.0% | 21.4% | 1.4% |
| f8           | 0.09% | ※11.1% | 16.1% | 0.7% |
| f12          | 0.06% | ※4.9%  | 12.2% | 0.4% |
| f16          | 0.04% | ---    | 9.1%  | 0.3% |

※ b 点は収束値が認められないため、モデル f16 に対する誤差とした。

### 2.1.3 応力集中部における要素分割の検討（早稲田大学）

#### (1) 検討内容

FEM 解析において、要素分割数が応力集中部の結果に与える影響を検討するため、図-2.1.3.1 に示すような円孔を有する部材の平面問題を考える。このような円孔を有する広い平板が一軸引張応力を受ける場合については、引張方向に直角な直径の両端には、応力集中率 3 の最大応力が発生することが理論的に分かっている（サンプソンの定理）ので、この計算例をベンチマークテストとして、要素の一边の長さを検討する。

ここでは、板厚を変えることによって要素のサイズと板厚の比を変化させる。応力集中部周辺の要素を約 10mm 四方として要素分割したため、板厚に対する要素の一边の長さが  $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/10$ 、 $1/12$ 、 $1/20$ 、 $1/30$  になるよう、板厚を 20mm、40mm、80mm、100mm、120mm、200mm、300mm と変え、解析を行った。荷重は、モデルの両側から 1mm の引張の強制変位を与えた。図-2.1.3.2 に解析モデルを示す。

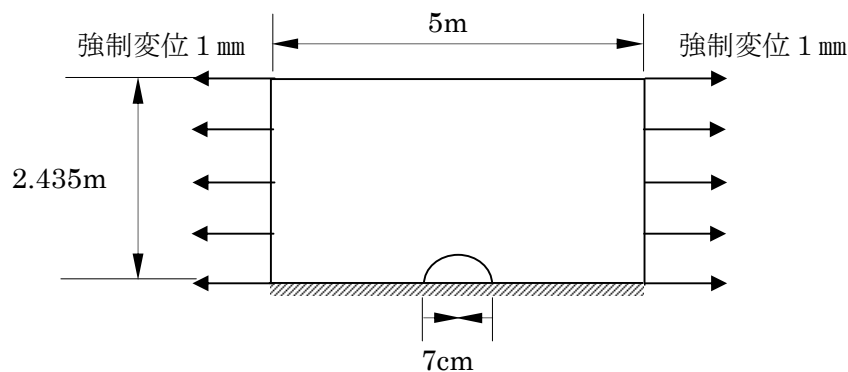


図-2.1.3.1 円孔を有する部材の平面問題

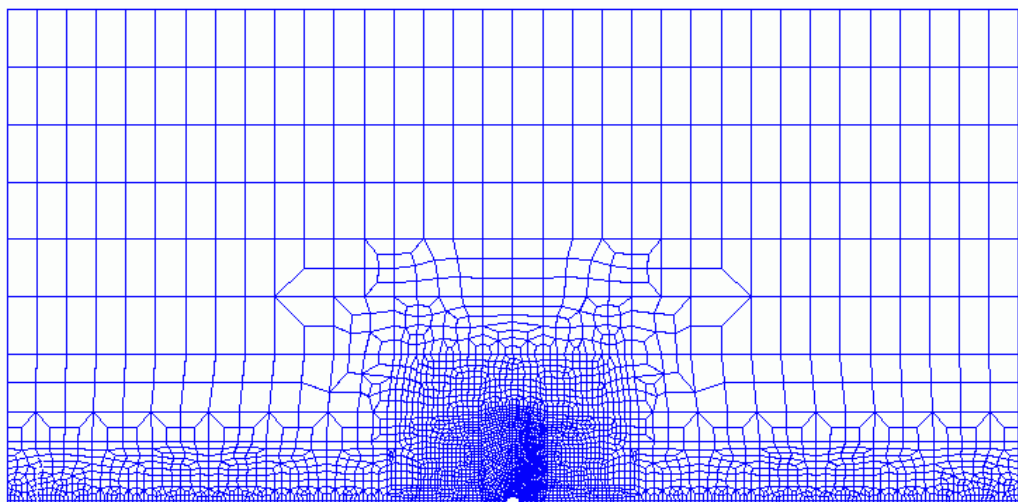


図-2.1.3.2 解析モデル

## (2) 検討結果

平板に働く平均応力と応力集中部の最大応力を比較した結果を表-2.1.3.1に、板厚と応力集中の関係を図-2.1.3.3にそれぞれ示す。

一様引張力を受ける円孔の応力集中に関する FEM 解析の結果から、板厚の大きさに対して要素の一边の長さが 1/10 前後より小さくなると応力集中率が収束してくるので、応力集中部の正しい評価には板厚の大きさに対し要素の一边の長さが 1/10 前後となるように要素分割を行うのがよいと考えられる。

今回は応力集中部の平面問題に関して検討を行ったが、3 次元問題に関しては、シェル要素の場合とソリッド要素の場合で応力集中部の正しい評価に差が生じるものと予想され、別途検討が必要である。

表-2.1.3.1 板厚と要素サイズの関係による応力集中率の変化

| 板厚に対する応力集中部の要素の一边の大きさ | 最大応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 平均応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 応力集中率 |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-------|
| 1/2                   | 346                       | 216                       | 1.60  |
| 1/4                   | 224                       | 96                        | 2.33  |
| 1/8                   | 247                       | 87                        | 2.85  |
| 1/10                  | 233                       | 90                        | 2.58  |
| 1/12                  | 233                       | 87                        | 2.69  |
| 1/20                  | 218                       | 84                        | 2.59  |
| 1/30                  | 226                       | 87                        | 2.59  |

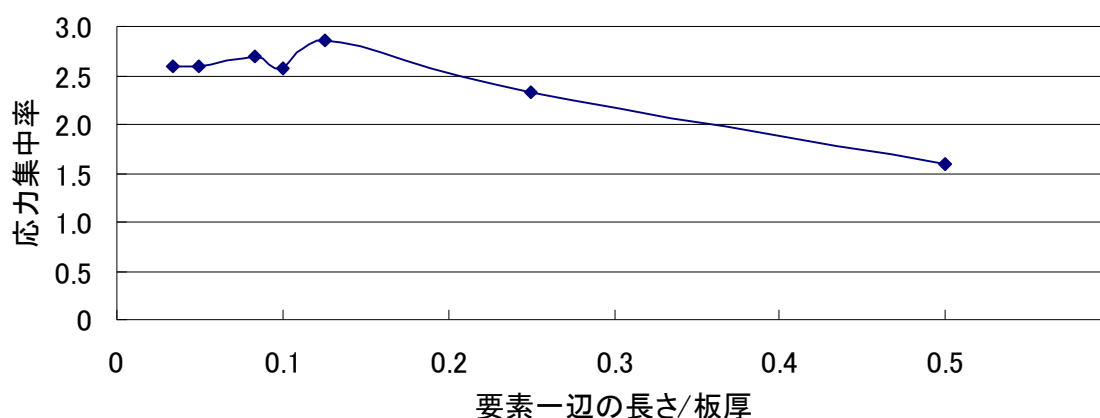


図-2.1.3.3 板厚と応力集中率の関係（要素の大きさ一定）

## 2.1.4 床版およびずれ止めのモデル化の検討（早稲田大学）

### (1) 検討内容

単純げたの鋼少数主桁橋を対象に、床版を 3 次元のソリッド要素でモデル化した文献 18) の解析結果に対して、床版をシェル要素、スタッドをはり要素（剛体もしくは弾性体）でモデル化した場合の FEM 解析を行い、床版およびずれ止めのモデル化方法について検討する。

対象とした橋梁の諸元を図-2.1.4.1 に、主桁、横桁、垂直補剛材の断面諸元を表-2.1.4.1 にそれぞれ示す。部材は床版をコンクリートとし、ヤング係数  $E$  は  $3.6 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比は  $\nu = 0.224$  とする。床版以外の鋼材は SM490 とし、ヤング係数  $E$  は  $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比は  $\nu = 0.3$  とする。スタッドの軸径  $\phi$  は 22mm とした。荷重は図-2.1.4.2 に示すように 2 組の T 荷重を想定して 10tf の集中荷重 4 点を支間中央部横桁ライン上の床版に載荷した。

図-2.1.4.3 に解析モデルを示す。橋軸直角方向に左右対称であることを考慮し、橋軸直角方向のハーフモデルとした。床版、主桁、横桁および垂直補剛材は低減積分 4 節点シェル要素とし、要素分割は 2.1.2 の結果を踏まえて主桁の幅および高さ方向を 8 分割とし、橋軸方向はアスペクト比が 1:3 以下となるような分割とした。床版および横桁の要素分割は主桁にならって同程度の大きさとなるよう配慮して分割した。スタッドははり要素を用いて床版と主桁上フランジを結合し、はり要素の材料特性を剛体または鋼とした 2 つのケースに対して検討を行う。また、横桁の有無の 2 ケースについても検討する。

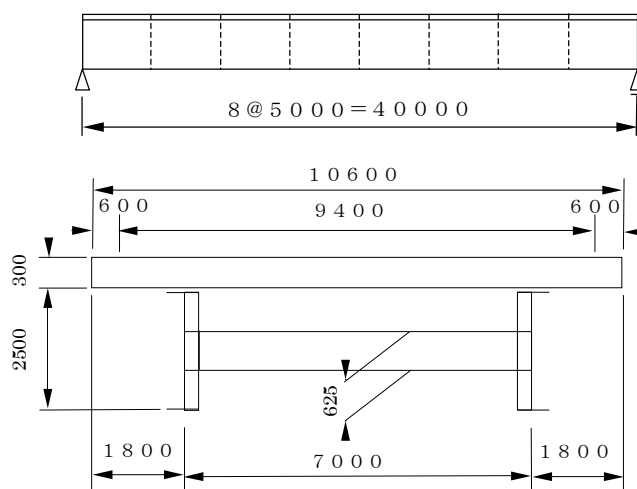
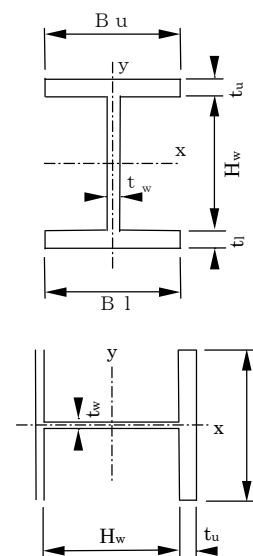


図-2.1.4.1 解析対象とした単純合成 2 主 1 桁橋

表-2.1.4.1 断面諸元

|       | 主桁   | 端横桁  | 中間横桁 | 垂直補剛材 |
|-------|------|------|------|-------|
| $B_u$ | 600  | 400  | 400  | 400   |
| $t_u$ | 28   | 20   | 20   | 20    |
| $H_w$ | 2500 | 1875 | 625  | 300   |
| $t_w$ | 12   | 9    | 9    | 9     |
| $B_l$ | 600  | 400  | 400  | ---   |
| $t_l$ | 60   | 20   | 20   | ---   |



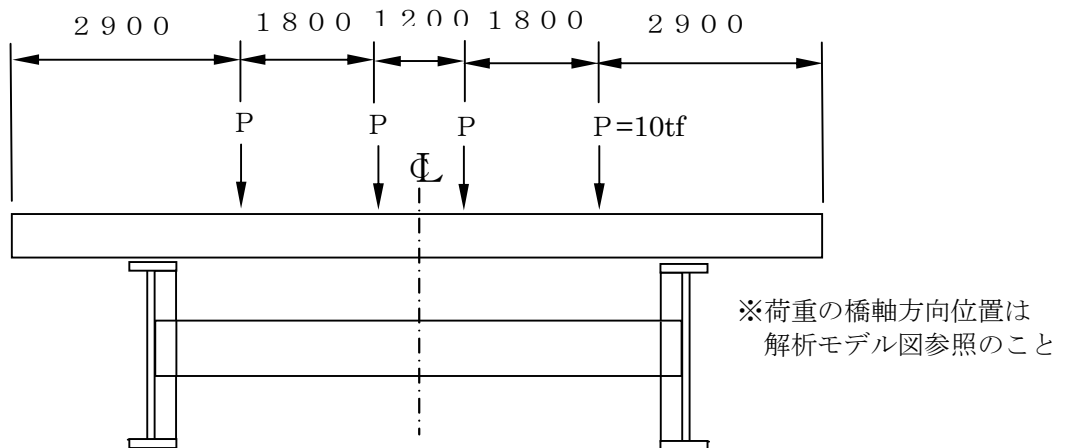


図-2.1.4.2 載荷状態

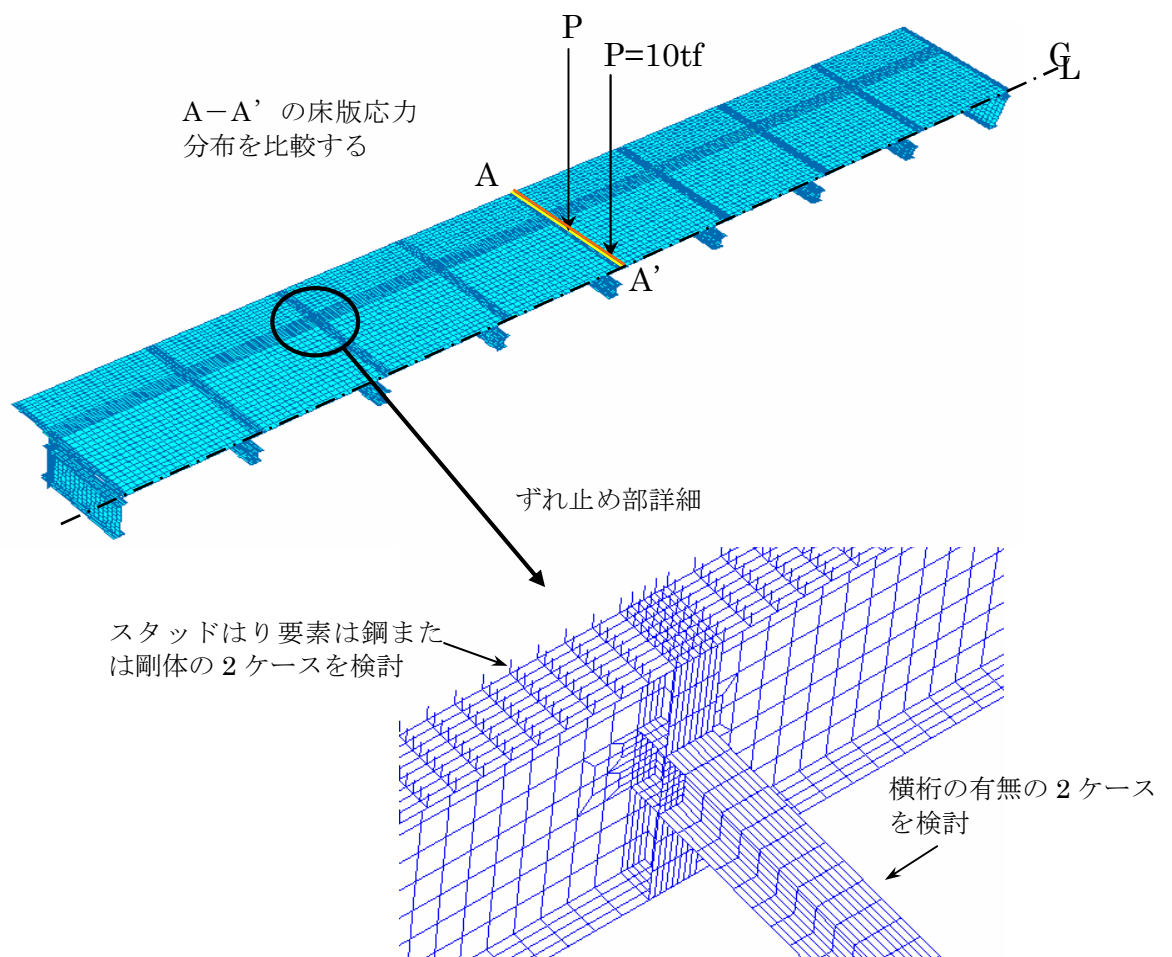
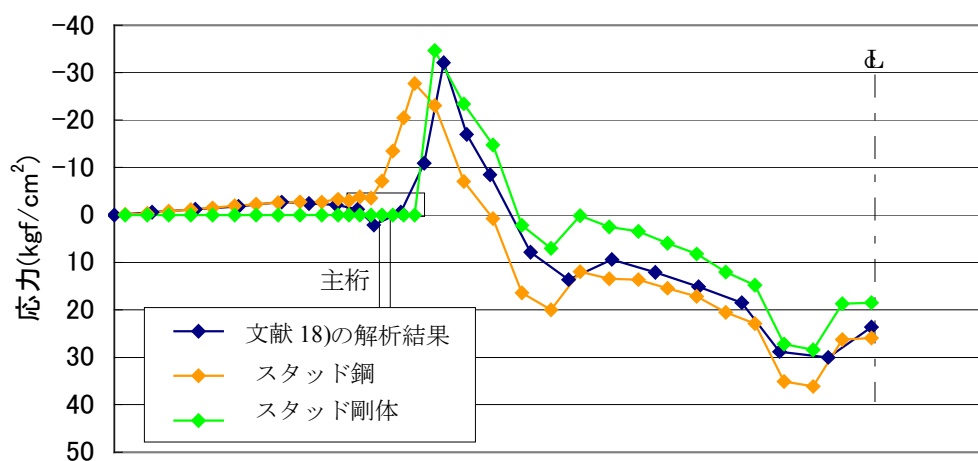


図-2.1.4.3 解析モデル（横桁ありの場合）

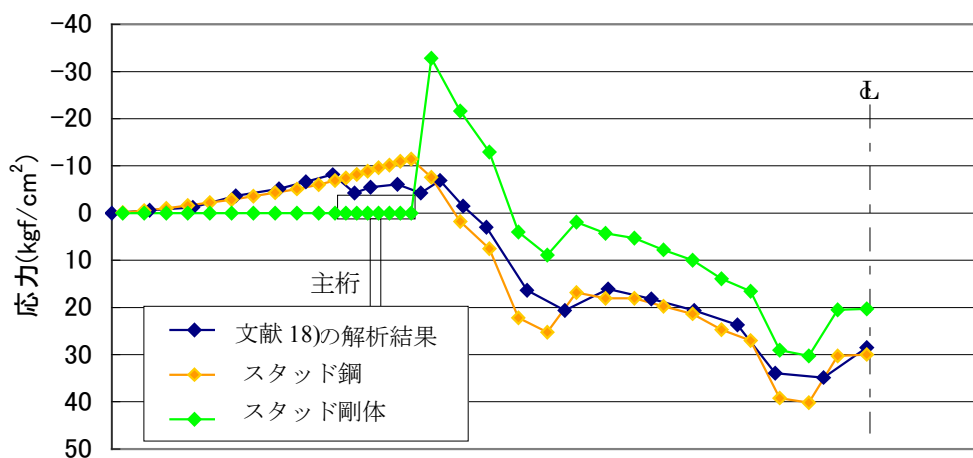
## (2) 検討結果

図-2.1.4.4に床版主筋方向の直応力分布を、スタッドはり要素を剛体または鋼（弾性体）とした場合の2ケース、および横桁の有無の2ケースについて比較したものを示す。

横桁がある場合、スタッドはり要素を剛体、鋼のどちらの場合でも床版にソリッド要素を用いた文献18)の解析結果と近い応力分布が得られている。一方、横桁がない場合では、スタッドはり要素を鋼とすると文献18)の結果と良く一致するが、剛体とした場合では大きく異なっている。したがって、床版をシェル要素とした場合のスタッドは弾性体のはり要素とすることで、横桁の有無に関わらず十分妥当な応力が得られると言える。しかしながら、今回の検討は、あくまで床版にソリッド要素を用いた場合の結果を参考値として比較したものであり、必ずしも実現象を再現できているとは言えない。また、設計段階で、ずれ止め部にどれ程度の弾性を見込むかを決定するのは非常に難しく、3次元FEM解析を主桁設計に用いる限りにおいては、床版をシェル要素、スタッドを剛体はり要素とするモデル化は実用的な精度で解を得られる簡易な方法と言える。



(a) 横桁ありの場合



(b) 横桁なしの場合

図-2.1.4.4 床版主筋方向の直応力分布の比較

### 2.1.5 補剛システムの影響検討（九州工業大学）

#### (1) 検討内容

3次元FEM解析を主桁設計に用いる場合において、設計の手間を考慮すると主桁応力の算出結果にあまり影響しない2次部材のモデル化は極力避けたい。本検討では、単純合成桁橋を対象に、横桁と垂直補剛材からなる補剛システムを取り外すことで、その役割について検討する。

図-2.1.5.1に示す解析対象とした橋梁は、2.1.2の検討橋梁と同じであり、横桁および垂直補剛材を5mピッチで配置した単純合成4主I桁橋とした。主桁の断面サイズは支間方向に一定としている。鋼材はSM490Yである。コンクリート床版の厚さは25cmであり、ヤング係数は鋼の1/7、ポアソン比は0.167とする。図-2.1.5.2に示す補剛形式の異なる3タイプについて検討を行う。荷重は、L荷重および風荷重を想定し、それぞれ図-2.1.5.3に示すように載荷した。風荷重は道路橋示方書Ⅰ共通編2.2.9<sup>16)</sup>を参照して風上側の主桁に等分布荷重 $320\text{kgf/m}^2$ を載荷させるが、壁高欄（高さ1m）に作用する風荷重は水平力およびねじれモーメントに換算（ねじれモーメントは更に鉛直方向の偶力に換算）して床版端部の節点に集中荷重として載荷した。

図-2.1.5.4に要素分割図を示す。橋軸方向の要素幅は200mm、鉛直方向の要素幅は75mmである。また、橋軸直角方向の要素幅は300mmを基本としているが、主桁近傍では150mm幅となっている。床版は8節点ソリッド要素、主桁と垂直補剛材は4節点シェル要素でモデル化している。支間中央の横桁には4節点シェル要素を用いているが、その他の横桁ははり要素でモデル化している。

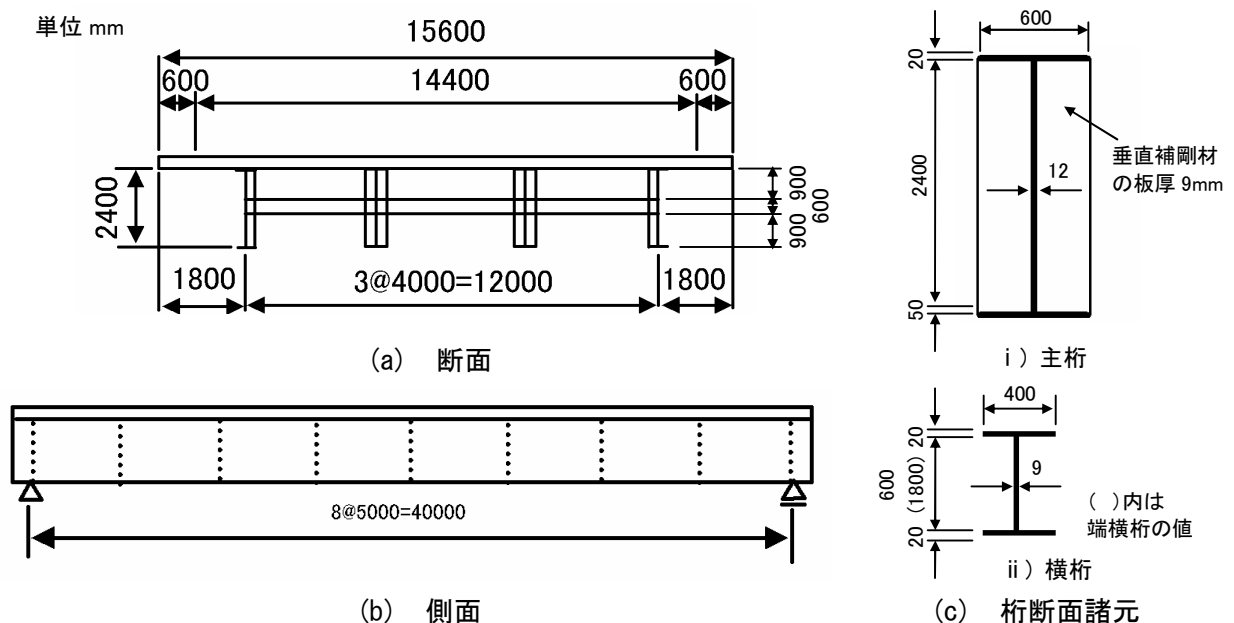


図-2.1.5.1 解析対象とした単純合成4主I桁橋

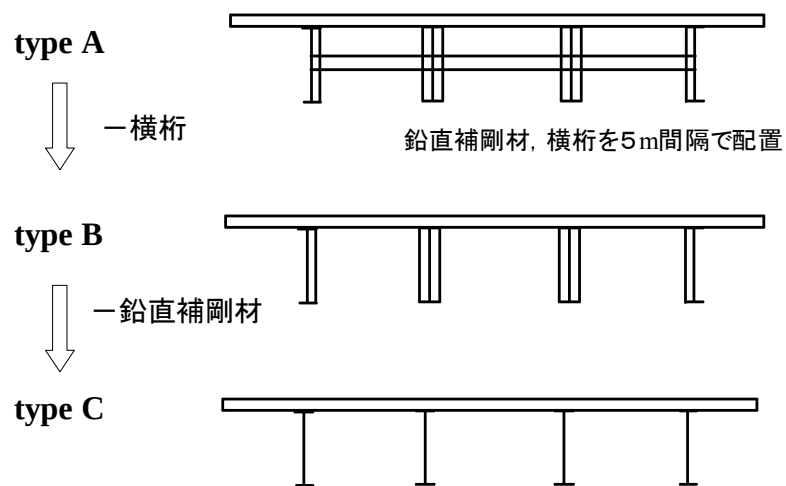


図-2.1.5.2 比較検討する補剛システムのタイプ

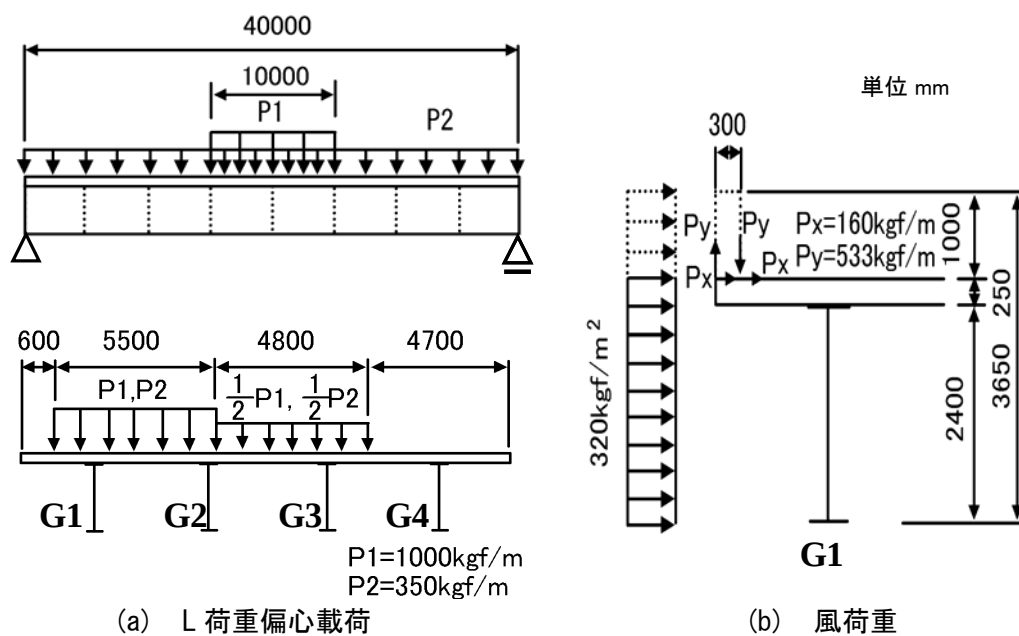


図-2.1.5.3 荷重状態

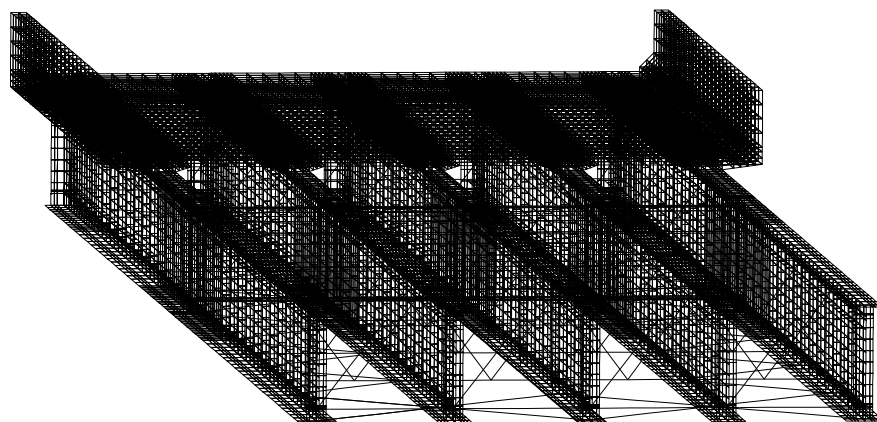


図-2.1.5.4 要素分割

## (2) 検討結果

図-2.1.5.5 に示す着目位置における L 荷重偏心載荷時のウェブ軸方向応力を図-2.1.5.6 に、風荷重載荷時のウェブ軸方向応力を図-2.1.5.7 にそれぞれ示す。

得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 図-2.1.5.6 より、L 荷重偏心載荷時では、どの着目位置においても typeA から typeC と少補剛化したときに大幅な応力増加は認められず、横桁が付いている typeA の(a)ラインでわずかに乱れが生じている程度である。
- ・ 図-2.1.5.7 より、風荷重載荷時では、垂直補剛材が付いていない typeC で大きな分布形状の違いが認められ、特に上フランジ位置に他の type と比較して大きな応力が発生している。したがって、垂直補剛材は水平荷重に対してウェブの変形抑制の役割を果たしている。座屈を考えない弾性挙動における応力値の算出に 3 次元 FEM 解析を用いる際に、死荷重、活荷重などの常時荷重に対して応力値算出を行う場合は垂直補剛材のモデル化を省略しても良いが、水平荷重に対してはそのモデル化を無視できないと言える。
- ・ L 荷重載荷、風荷重載荷のどちらにおいても横桁を省略した場合の応力分布に変化はない。したがって、今回の諸元では横桁の荷重分配機能はさほど小さくなく、逆に言えば、床版による荷重分配の影響が大きいと考えられる。

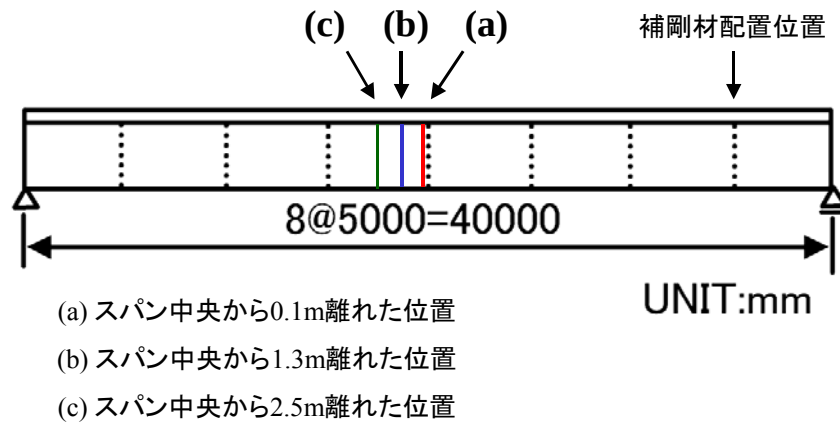
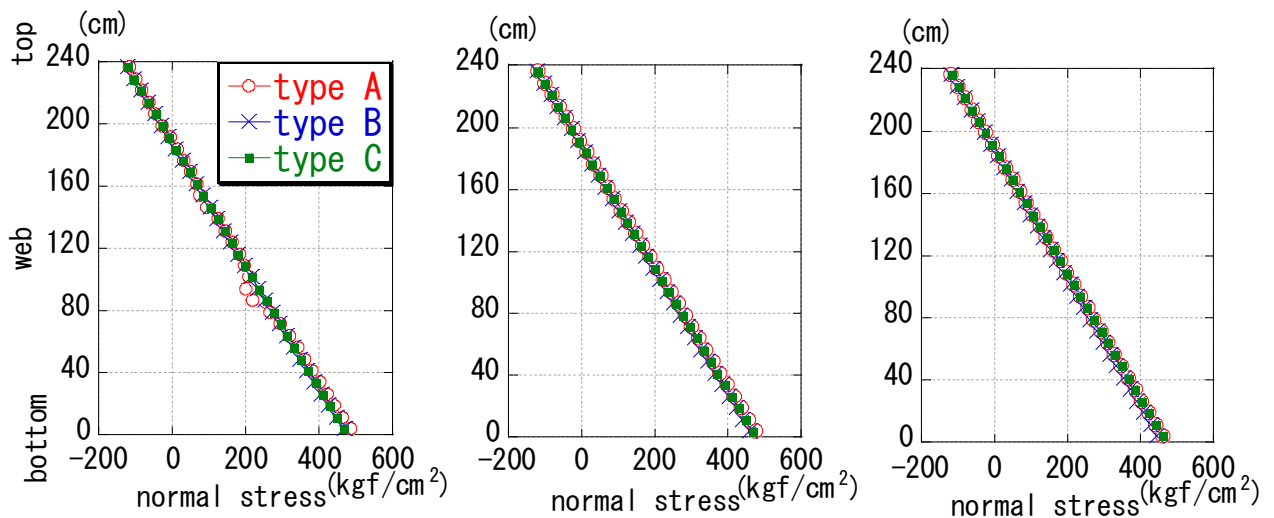


図-2.1.5.5 結果を比較する着目位置

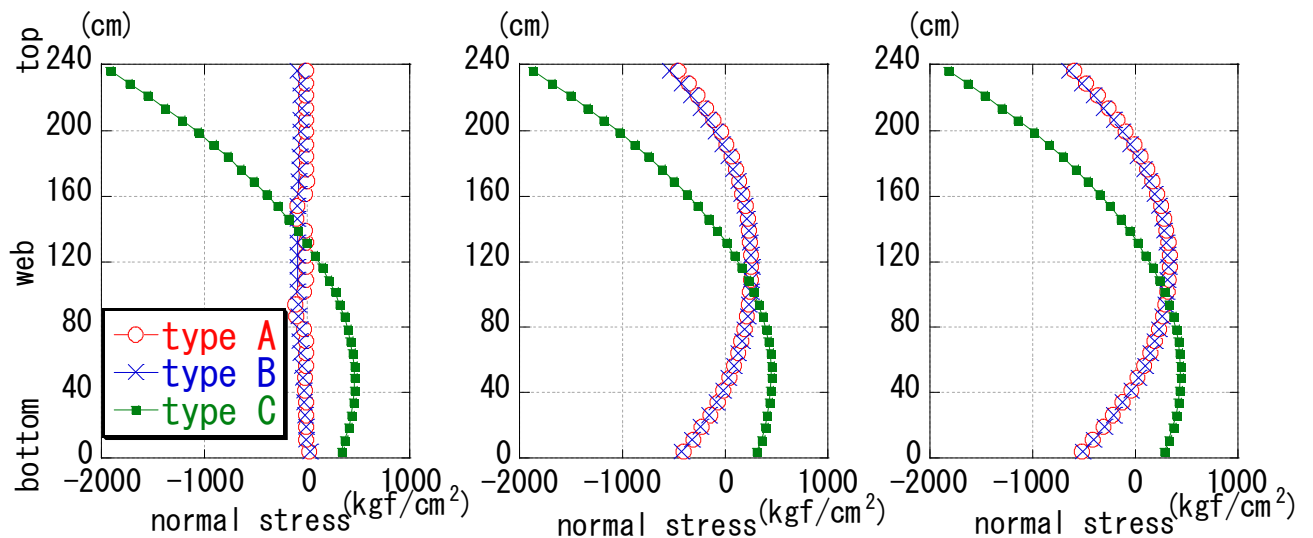


着目位置(a) ライン

着目位置(b) ライン

着目位置(c) ライン

図-2.1.5.6 G1 桁ウェブの橋軸方向直応力分布の比較 (L 荷重偏心載荷時)



着目位置(a) ライン

着目位置(b) ライン

着目位置(c) ライン

図-2.1.5.7 G1 桁ウェブの橋軸方向直応力分布の比較 (風荷重偏心載荷時)

## 2.1.6 支承のモデル化検討

### (1) 検討内容

主桁1本の連続ばりを対象に、3次元FEM解析を主桁設計に適用する場合の支承のモデル化検討を行う。従来からの初等はり理論に基づく設計では、支承の境界条件を主桁・横桁はり要素の交点に1点支持により与えているため、中間支点上では負曲げモーメントの分布が尖った形状となるが、実際には支承幅による面支持であるため曲げモーメントが低減されることが指摘されている。道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編 12.3<sup>16)</sup>では、このことを考慮して中間支点上の負曲げモーメントを最小90%まで低減して良いとしている。鋼橋の連続げた橋においても、名古屋高速道路公社の設計要領<sup>19)</sup>などでは中間支点上の負曲げモーメントを90%に低減して設計に用いることとしている。本検討では支承の境界条件を1点支持、線支持および面支持により与えた場合の支間中央のたわみ、応力、ならびに中間支点上の応力について比較検討する。なお、対象とする支承の種類は、橋軸方向の条件が固定もしくは可動の鋼製ピン支承を想定し、ゴム支承により弾性支持する場合についての検討は行っていない。

解析対象とする主桁1本の連続ばりの諸元を図-2.1.6.1に示す。荷重は、死荷重を想定した単位長さあたり25kNと、この主桁1本に対する床版の有効幅を3.5mとした場合の活荷重(L荷重の等分布荷重 $p1$ )を想定して単位長さあたり35kNとし、解析モデルには、これらの線荷重をフランジ幅0.35mで除した等分布荷重71.4kN/m<sup>2</sup>および100kN/m<sup>2</sup>を与えた。表-2.1.6.1に鋼製ピン支承を想定した支承の境界条件を示す。比較検討する各支承モデルが、この境界条件を満たすようなモデル化とする。

図-2.1.6.2に解析モデルの要素分割を示す。主桁はNASTRAN<sup>14)</sup>の4節点シェル要素CQUAD4<sup>14)</sup>でモデル化し、要素分割はフランジ幅方向4分割、ウェブ高さ方向8分割、橋軸方向の要素サイズが100mmとなる分割とし、垂直補剛材は支点上のみシェル要素でモデル化した。この主桁のモデル化方法は共通として、表-2.1.6.2に示す支承のモデル化方法のみ変更する。比較検討する支承のモデル化は、CASE1：1点支持、CASE2：線支持、CASE3：ピラミッド型に配置した剛体はり要素RBE2<sup>14)</sup>による面支持A、CASE4：CASE3にソールプレートを追加した面支持B、CASE5：全て鋼のヤング係数を持つ8節点六面体ソリッド要素CHEXA<sup>14)</sup>でモデル化した面支持C、CASE6：CASE5の支承高(回転中心の位置)を半分にした面支持C'の6ケースである。

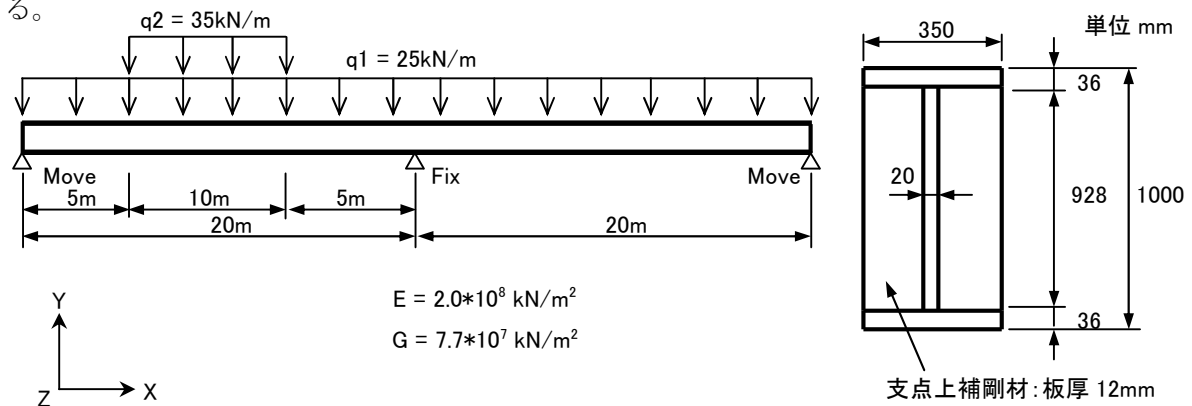


図-2.1.6.1 解析対象とした主桁1本の連続ばりの諸元

表-2.1.6.1 鋼製ピン支承を想定した支承の境界条件

|            | UX | UY | UZ | RX | RY | RZ |
|------------|----|----|----|----|----|----|
| 可動支承（端支点）  | 自由 | 拘束 | 拘束 | 拘束 | 自由 | 自由 |
| 固定支承（中間支点） | 拘束 | 拘束 | 拘束 | 拘束 | 自由 | 自由 |

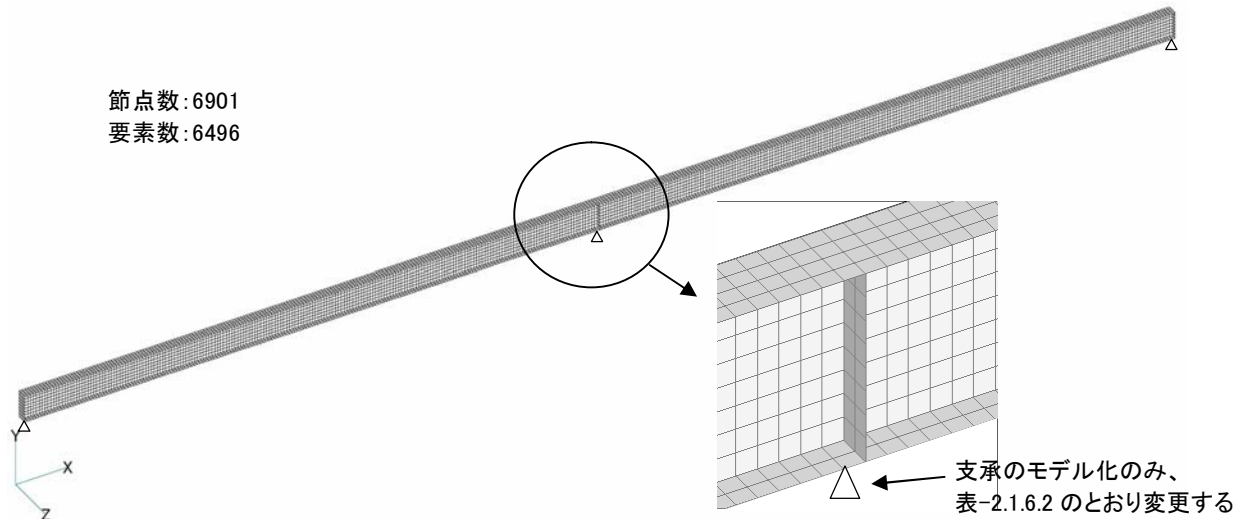


図-2.1.6.2 解析モデルの要素分割

表-2.1.6.2 比較検討する支承のモデル化ケース

| ケース | CASE1 : 1 点支持 | CASE2 : 線支持   | CASE3 : 面支持 A  |
|-----|---------------|---------------|----------------|
| 説明  |               |               |                |
| ケース | CASE4 : 面支持 B | CASE5 : 面支持 C | CASE6 : 面支持 C' |
| 説明  |               |               |                |

※ △記号の数字は拘束する方向を示す（UX : 1、UY : 2、UZ : 3、RX : 4、RY : 5、RZ : 6）。

## (2) 検討結果

鉛直たわみ、下フランジ直応力、ウェブせん断応力の値を比較する着目位置を図-2.1.6.3に示す。図-2.1.6.4にウェブ近傍位置における下フランジ直応力の橋軸方向分布を、図-2.1.6.5にウェブ近傍位置における上フランジ直応力の橋軸方向分布をそれぞれ示す。また、図-2.1.6.3に示した着目位置におけるたわみ値および応力値の比較を表-2.1.6.3に示し、図-2.1.6.6には、ソリッド要素を使って支承をモデル化した面支持Cに対する各モデルの比率をグラフ化したものを示す。これらの図表にははり理論によるたわみ値および応力値も併記した。なお、比較に用いる応力には要素中心応力を用いた。

面支持Cとの比較を通して得られた結果を以下にまとめる。なお、特に断らない限り、面支持Cとの比較にはり理論は含めず、支承のモデル化の影響のみを考察する。

- ・ 支承のモデル化方法に関わらず、支間中央の鉛直たわみおよび下フランジ直応力はほぼ同じであり、面支持Cに対する誤差はどのモデル化においても1%以下である。
- ・ 中間支点上側近の下フランジ要素 Lfs1 には直応力の応力集中が、ウェブ要素 ws1 にはせん断応力の応力集中がそれぞれ発生し、それらの要素から 200mm 程度橋軸方向に離れると応力分布に乱れはなくなる。また、応力集中の値は、1 点支持の場合が最も大きく、支承の形を考慮して線支持、面支持とすることで応力集中の値は低減され、支承自体を鋼の弾性体としてモデル化した面支持Cの場合が最も小さい。
- ・ 許容応力度法による部材の設計において、Lfs1 や ws1 のような応力集中の値をそのまま用いることは難しく、Lfs2 や ws2 のような値を用いることが考えられるが、Lfs2 や ws2 の位置における面支持C以外のモデルでの面支持Cに対する誤差は5%程度であり、支承のモデル化方法の影響は小さい。3次元FEM解析を主桁応力値の算出に用いる場合に、ソリッド要素を用いて実際の支承の形状をモデル化することは非常に手間であり、面支持Aのような剛なはり要素を用いたモデル化方法によることで、設計で用いる応力としては十分妥当な解が得られるものと考えられる。
- ・ 支承の回転中心の高さ方向の位置を変化させた面支持CとC'との結果の比較により、回転中心位置の影響は、支間中央のような一般部(v、Lfc、Lfs2、ws2)では非常に小さい。一方、応力集中部(Lfs1、ws1)では、回転中心位置を下フランジより100mm下とした面支持C'より200mm下とした面支持Cの方が応力値が5%程度大きく、回転中心の影響が見られる。したがって、支点上の局部応力を算出する場合などでは、回転中心の位置まで考慮した支承のモデル化が必要と考えられる。
- ・ 上フランジ直応力における面支持Cとはり理論を比較すると中間支点上のUfs2で7%はり理論の方が大きい(Ufs1は支点上補剛材の影響で応力が乱れた位置であり、実務設計ではUfs2のような値を用いるものと考えられる)。また、下フランジ直応力では、Lfs2で13%はり理論の方が大きい。したがって、実際の支承幅を考慮して面支持させることによりはり理論の値を90%程度に低減できると言え、1ケースのみの検討ではあるが、中間支点上の負曲げモーメントを最小90%まで低減して良いとする既往文献<sup>16), 19)</sup>の考えに概ね対応する結果が得られた。

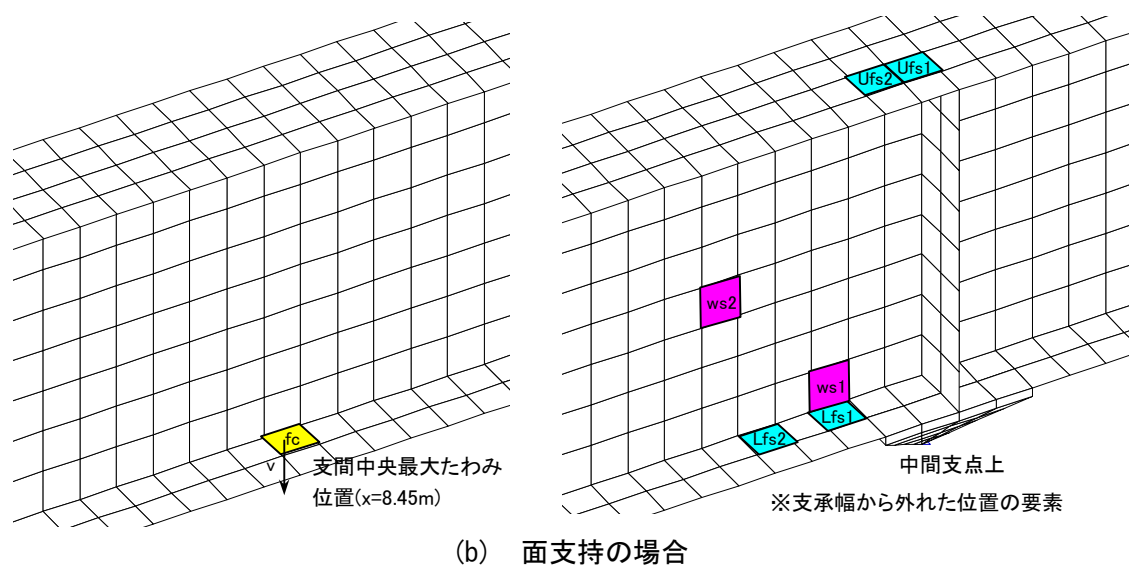
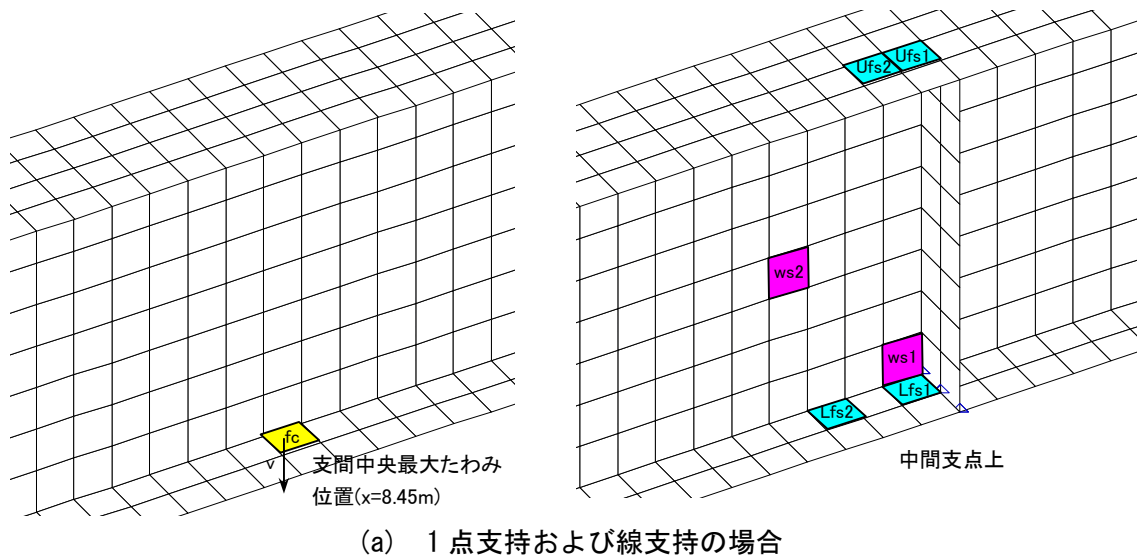


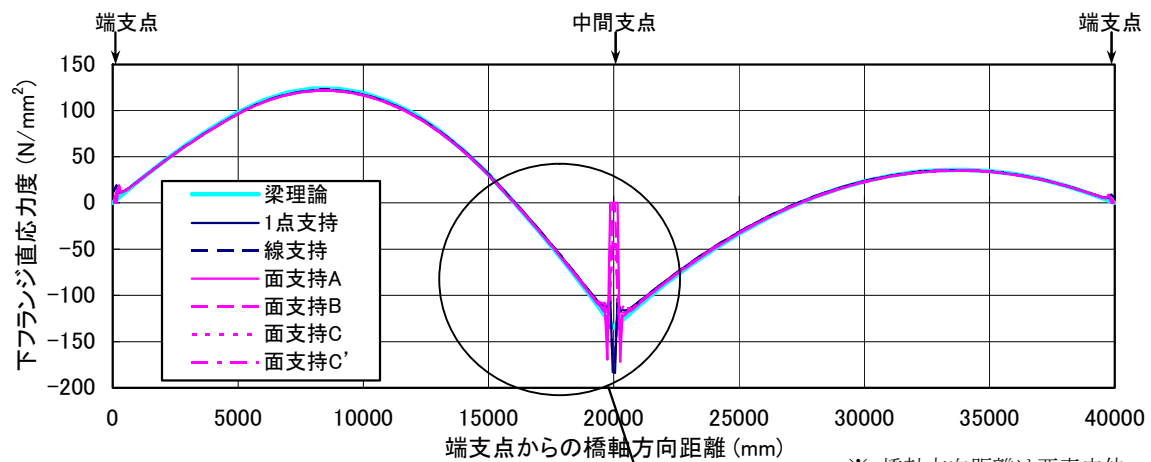
図-2.1.6.3 着目位置

表-2.1.6.3 着目位置におけるたわみ値および応力値の比較

| 着目記号<br>ケース | 最大たわみ(mm)    | 下フランジ直応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) |               |               |
|-------------|--------------|--------------------------------|---------------|---------------|
|             | v            | Lfc                            | Lfs1          | Lfs2          |
| 梁理論         | -44.2 (0.98) | 124.5 (1.02)                   | -132.7 (0.88) | -122.0 (1.13) |
| 1点支持        | -45.4 (1.00) | 122.5 (1.00)                   | -183.1 (1.21) | -114.5 (1.06) |
| 線支持         | -45.4 (1.00) | 122.5 (1.00)                   | -172.2 (1.14) | -112.6 (1.04) |
| 面支持A        | -44.8 (0.99) | 121.6 (1.00)                   | -169.7 (1.12) | -115.6 (1.07) |
| 面支持B        | -45.0 (0.99) | 121.8 (1.00)                   | -149.4 (0.99) | -113.3 (1.05) |
| 面支持C        | -45.3 (---)  | 122.1 (---)                    | -151.1 (---)  | -108.3 (---)  |
| 面支持C'       | -45.2 (1.00) | 122.1 (1.00)                   | -144.0 (0.95) | -108.7 (1.00) |

| 着目記号<br>ケース | 上フランジ直応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) |              |              | ウェブせん断応力 (N/mm <sup>2</sup> ) |             |
|-------------|--------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------|
|             | Ufc                            | Ufs1         | Ufs2         | ws1                           | ws2         |
| 梁理論         | -124.5 (1.04)                  | 132.7 (1.03) | 129.2 (1.07) | 28.9 (0.56)                   | 28.3 (0.92) |
| 1点支持        | -119.9 (1.00)                  | 134.6 (1.04) | 124.3 (1.03) | 68.1 (1.32)                   | 32.2 (1.05) |
| 線支持         | -119.9 (1.00)                  | 134.6 (1.04) | 124.3 (1.03) | 57.3 (1.11)                   | 31.7 (1.03) |
| 面支持A        | -119.0 (1.00)                  | 126.5 (0.98) | 119.1 (0.98) | 63.7 (1.24)                   | 29.9 (0.97) |
| 面支持B        | -119.2 (1.00)                  | 128.0 (0.99) | 120.2 (0.99) | 58.7 (1.14)                   | 30.3 (0.99) |
| 面支持C        | -119.4 (---)                   | 129.1 (---)  | 121.2 (---)  | 51.5 (---)                    | 30.7 (---)  |
| 面支持C'       | -119.4 (1.00)                  | 129.8 (1.00) | 121.5 (1.00) | 48.2 (0.94)                   | 30.6 (1.00) |

※ ( )内は、面支持Cに対する比率を示す。また、梁理論はせん断変形を考慮していない。



※ 橋軸方向距離は要素中伸一でプロットしている。

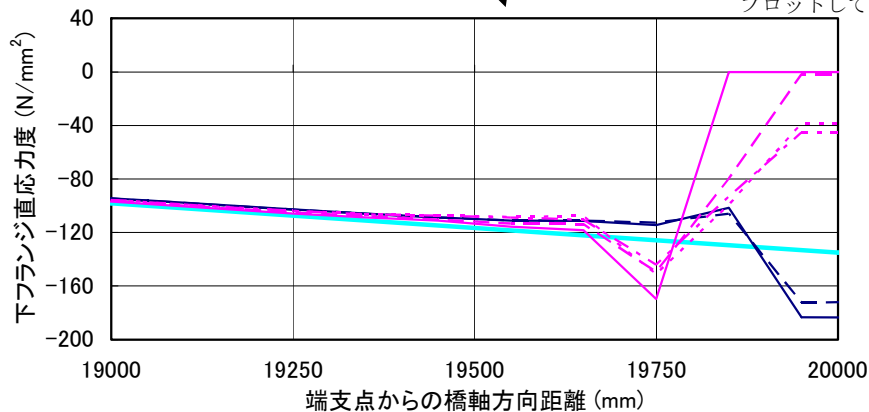


図-2.1.6.4 下フランジ直応力の橋軸方向分布（ウェブ近傍位置）

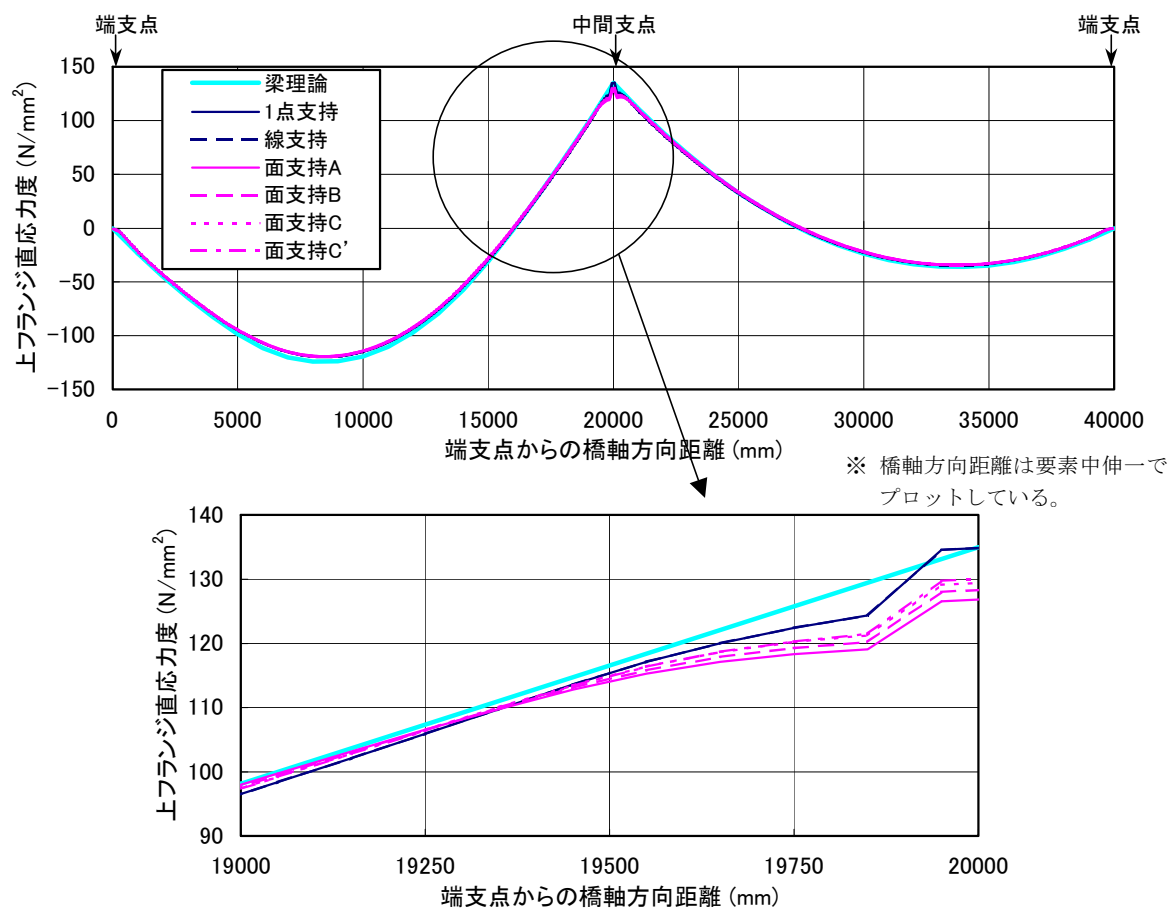


図-2.1.6.5 上フランジ直応力の橋軸方向分布（ウェブ近傍位置）

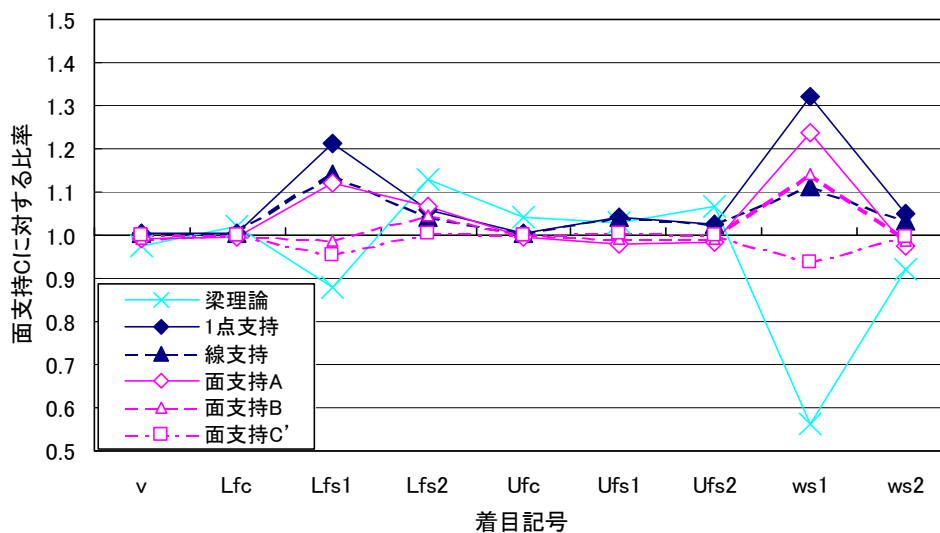


図-2.1.6.6 着目位置におけるたわみ値および応力値のはり理論に対する比率

## 2.2 実橋載荷試験との比較による全体挙動に対するモデル化の検討

### 2.2.1 検討内容

静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を解析対象として、合成・非合成の格子解析モデルと 3 種類の FEM 解析モデルを作成する。各種載荷ケースの実測値と各モデルの解析値との比較を通して、格子解析と FEM 解析の差異を評価するとともに、設計への適用を想定したモデル化の方法について検討する。

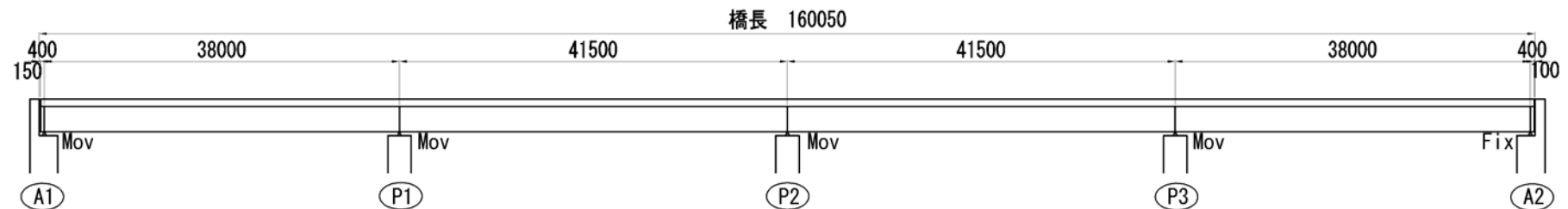
### 2.2.2 解析対象の橋梁と実橋載荷試験<sup>20)</sup>

FEM 解析の対象とした橋梁は、4 径間連続非合成鈹桁橋（日本道路公団上信越自動車道栃木川橋下り車線、平成 7 年竣工）である。図-2.2.1 に橋梁の概要を示す。本橋では、竣工前に試験車両を用いた静的載荷試験が行われており<sup>20)</sup>、解析値との比較に際して、その試験結果を利用した。

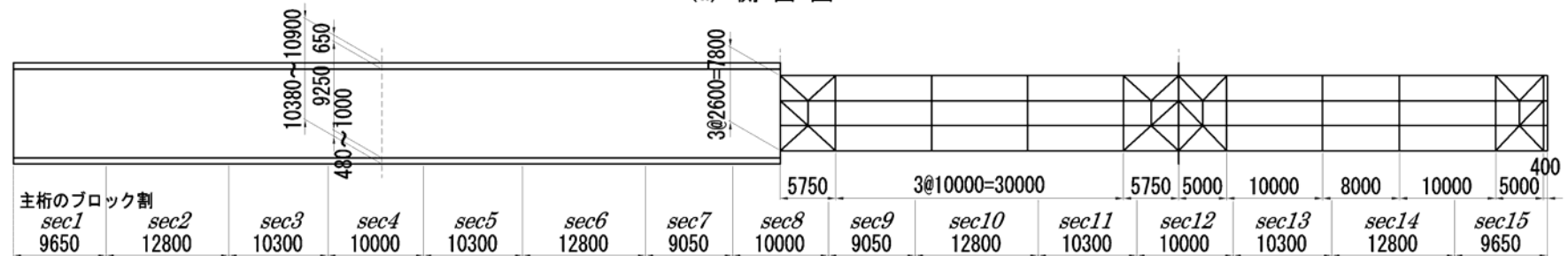
栃木川橋下り線は、橋長約 160m、幅員約 10.4~10.9m、桁高 2.2m、主桁本数 4 本、主桁間隔 2.6m である。構造の合理化として、横桁間隔を最大 10m とし、従来のトラス形式の分配対傾構から充腹形式の分配横桁に替え、下横構は支点部に隣接するパネル部のみに設置して中間パネル部は省略している。また、床版にはプレキャスト PC 床版（桁とは非合成）を用いている。床版厚は床版支間中央で 210mm、主桁直上で 290mm（ハンチを含む）である。表-2.2.1 に鋼材（主桁、横桁、垂直補剛材、水平補剛材、下横構）の断面構成を示す。主桁のブロック分割長は図-2.2.1(b)の平面図に示すとおりである。本橋の架設は、地組立ヤードにて桁上に PC 床版を載せた状態で全断面を送り出す工法を用いているため、主桁下フランジには送り出し架設用のスライドルールが取り付けられ、架設後もそのままの状態に残っている（図-2.2.1(c)参照）。

図-2.2.2 に載荷試験時の試験車両および載荷ケース、表-2.2.2 に試験車両の軸重を示す。試験には総重量約 20tf の 3 軸の大型ダンプトラック 4 台が使用されている。載荷ケースは支間中央部における荷重分配性状の把握を目的とした載荷ケース（幅員方向の中心載荷 CASE1、偏心載荷 CASE3 および CASE5）と、中間支点上の負曲げモーメント領域の挙動の把握を目的とした載荷ケース（幅員方向の中心載荷 CASE2、偏心載荷 CASE4 および CASE6）が実施されている。

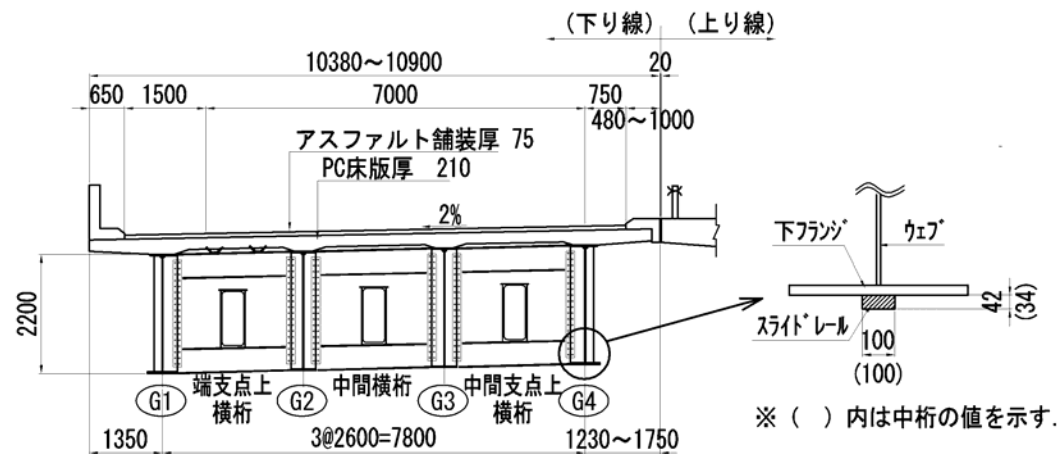
図-2.2.3 に主桁の鉛直変位および橋軸方向ひずみの測定位置を示す。ひずみゲージの貼付け位置は、支点上のソールプレートや横桁取り付け用ガセットプレート等を考慮して A2 橋台側に 1.0m 程度ずらしている（写真-2.2.1 参照）。



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 断面図

# < 設計条件 >

道路規格：第1種第3級

設計速度：V=80km/h

橋梁形式：4径間連続鋼非合成鈹桁橋

支承形式：密閉ゴム支承板支承（BP・B沓）

設計荷重：活荷重 TL-20, TT-43

幅員構成：全幅員 10.380~10.900m

有効幅員 9.250m

道路線形：平面曲線 R=3200m, 3195m

縦断勾配 2.857%直線下り勾配

横断勾配 2.0%直線片勾配

使用鋼材：SS400, SM490Y, H.T.B M22 (S10T)

PC床版：コンクリート  $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$

鉄筋 SD345

橋軸方向および橋軸直角方向の2方向緊張  
プレキャスト床版より床版間はPC継手連結

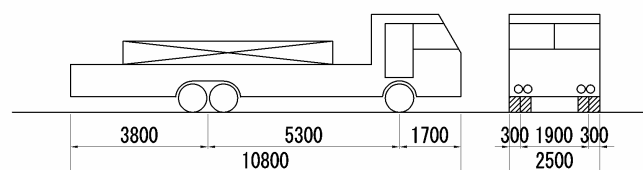
図-2.2.1 載荷試験が行われた橋梁の上部工一般図

表-2.2.1 鋼材の断面構成

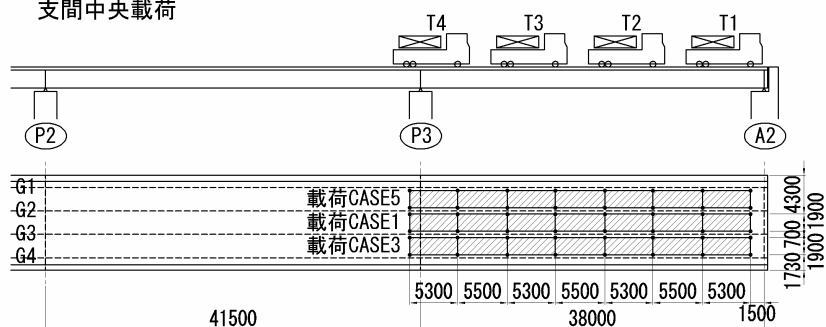
| ブロックNO. |                    |    | 主 桁    |      |                               |      |          |      |                     |      |
|---------|--------------------|----|--------|------|-------------------------------|------|----------|------|---------------------|------|
|         |                    |    | G1桁    |      | G2桁                           |      | G3桁      |      | G4桁                 |      |
| sec1    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 300                           | x 22 | 300      | x 22 | 430                 | x 28 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2147   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2150                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 25 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 22 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec2    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 32 | 300                           | x 25 | 300      | x 25 | 430                 | x 32 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2134   | x 12 | 2153                          | x 12 | 2153     | x 12 | 2140                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 34 | 460                           | x 22 | 460      | x 22 | 550                 | x 28 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec3    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 430                 | x 25 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2147   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2153                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 25 | 460                           | x 19 | 460      | x 19 | 550                 | x 22 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec4    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 410                           | x 22 | 410      | x 22 | 430                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2142   | x 12 | 2148                          | x 12 | 2148     | x 12 | 2140                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 30 | 460                           | x 30 | 460      | x 30 | 550                 | x 30 |
|         | 材質                 |    | SM570  |      | SM570                         |      | SM570    |      | SM570               |      |
| sec5    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 25 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 310                 | x 28 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2153   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2150                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 22 | 460                           | x 19 | 460      | x 19 | 550                 | x 22 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec6    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 30 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 310                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2151   | x 12 | 2165                          | x 12 | 2165     | x 12 | 2151                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 19 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 19 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec7    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 22 | 300                           | x 16 | 300      | x 16 | 310                 | x 22 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2156   | x 12 | 2168                          | x 12 | 2168     | x 12 | 2159                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 22 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 19 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec8    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 450    | x 28 | 300                           | x 28 | 300      | x 28 | 440                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2142   | x 12 | 2144                          | x 12 | 2144     | x 12 | 2140                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 30 | 460                           | x 28 | 460      | x 28 | 550                 | x 30 |
|         | 材質                 |    | SM570  |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec9    | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 22 | 300                           | x 16 | 300      | x 16 | 310                 | x 22 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2156   | x 12 | 2168                          | x 12 | 2168     | x 12 | 2159                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 22 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 19 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec10   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 30 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 310                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2151   | x 12 | 2165                          | x 12 | 2165     | x 12 | 2151                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 19 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 19 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec11   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 350    | x 25 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 310                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2153   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2148                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 22 | 460                           | x 19 | 460      | x 19 | 550                 | x 22 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec12   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 410                           | x 22 | 410      | x 22 | 470                 | x 30 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2142   | x 12 | 2148                          | x 12 | 2148     | x 12 | 2138                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 30 | 460                           | x 30 | 460      | x 30 | 550                 | x 32 |
|         | 材質                 |    | SM570  |      | SM570                         |      | SM570    |      | SM570               |      |
| sec13   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 300                           | x 19 | 300      | x 19 | 470                 | x 25 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2147   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2150                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 25 | 460                           | x 19 | 460      | x 19 | 550                 | x 25 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec14   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 32 | 300                           | x 25 | 300      | x 25 | 470                 | x 32 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2136   | x 12 | 2153                          | x 12 | 2153     | x 12 | 2136                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 32 | 460                           | x 22 | 460      | x 22 | 550                 | x 32 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
| sec15   | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 490    | x 28 | 300                           | x 22 | 300      | x 22 | 470                 | x 28 |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2147   | x 12 | 2162                          | x 12 | 2162     | x 12 | 2147                | x 12 |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 550    | x 25 | 460                           | x 16 | 460      | x 16 | 550                 | x 25 |
|         | 材質                 |    | SM490Y |      | SM490Y                        |      | SM490Y   |      | SM490Y              |      |
|         |                    |    | 横桁     |      | 垂直補剛材                         |      | 水平補剛材    |      | 下横構                 |      |
|         | 上フランジ <sup>*</sup> | mm | 200    | x 10 | 支点上: 269 x 12<br>中間: 140 x 12 |      | 130 x 12 |      | CT<br>144x204x12x10 |      |
|         | ウェブ <sup>*</sup>   | mm | 2180   | x 9  |                               |      |          |      |                     |      |
|         | 下フランジ <sup>*</sup> | mm | 200    | x 10 |                               |      |          |      |                     |      |
|         | 材質                 |    | SS400  |      | SS400                         |      | SS400    |      | SS400               |      |

※ 解析では、スライドレール断面積を主桁下フランジ幅で除し、得られた換算厚を下フランジ厚に加算して用いている(外桁+8mm, 中桁+7mm)。表中の値は換算値を示す。

試験車両の諸元



支間中央載荷



中間支点上載荷

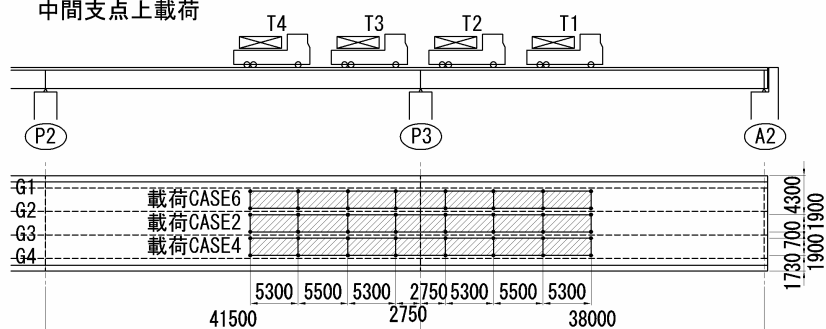
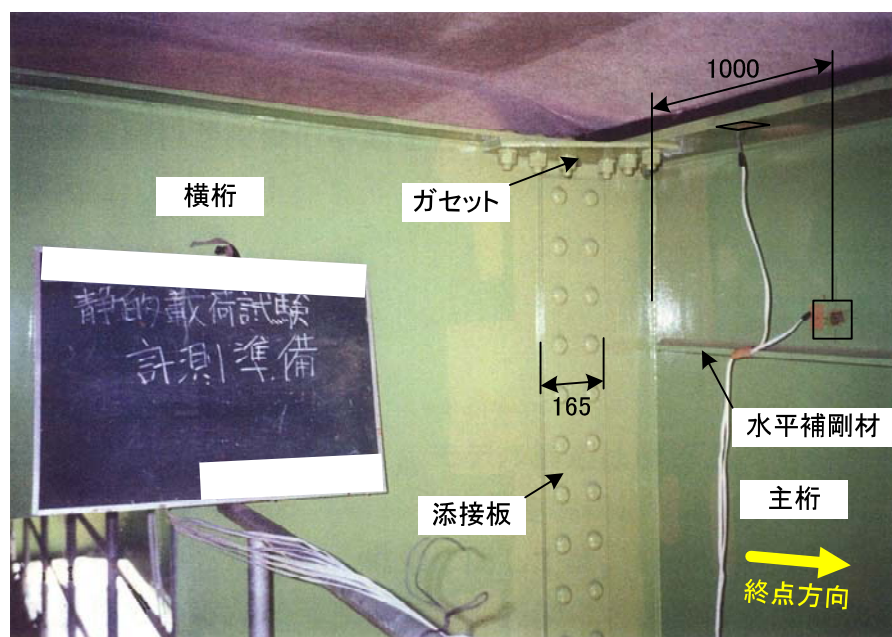
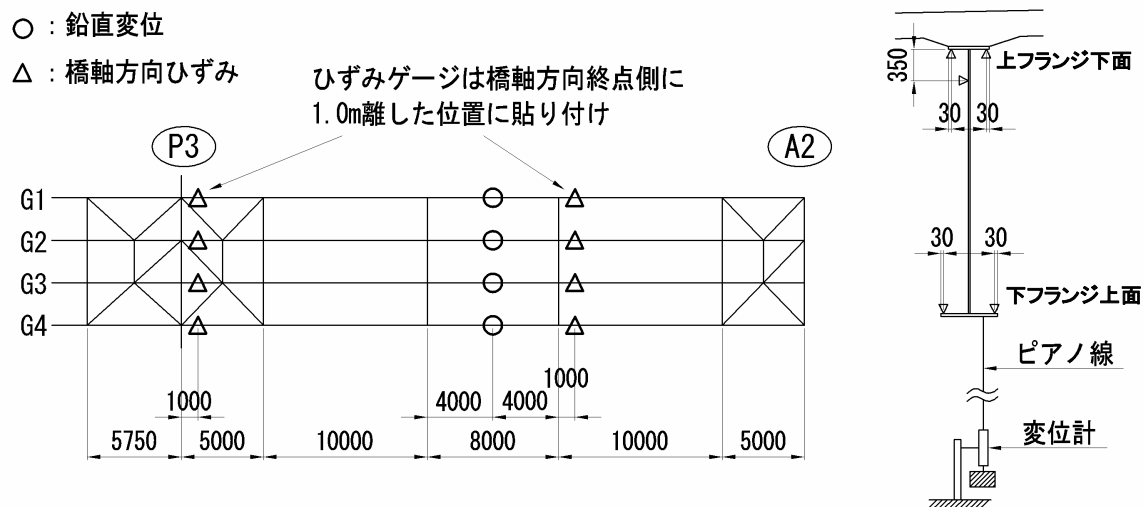


図-2. 2. 2 試験車両および載荷ケース

表-2. 2. 2 試験車両の軸重

| 試験車両名称 | 前輪軸重 | 後輪軸重  | 合 計   |
|--------|------|-------|-------|
|        |      |       | (tf)  |
| T1     | 5.19 | 15.57 | 20.76 |
| T2     | 5.53 | 15.10 | 20.63 |
| T3     | 6.65 | 15.01 | 21.66 |
| T4     | 6.00 | 15.00 | 21.00 |

※後輪は2軸であるが、1軸として計上.



### 2.2.3 検討する解析モデル

解析モデル作成にあたっての橋梁諸元は図-2.2.1中の値を使用した。道路線形に関しては、平面線形  $R=8$ 、縦断勾配および横断勾配を 0%と簡便化し、全幅員を約 10.5m (右張出し長約 1.4m) と一定にした。実橋における初期変形等は考慮していない。また、図-2.2.1(c)に示されるスライドレールが主桁の剛性に寄与するものと考え、当初の架設設計計算に従い、スライドレールの断面積を下フランジ幅で除し、その換算厚を下フランジ厚に加算することにより考慮した(表-2.2.1参照)。

また、図-2.2.4に各解析モデルの要素分割の概要を、表-2.2.3に各解析モデルの要素の種類と要素分割数等をそれぞれ示す。解析におけるヤング係数、ポアソン比および支承条件はすべての解析モデルで共通とし、表-2.2.4に示すとおりとした。支承のモデル化は、合成・非合成の格子モデルおよび FEM モデル A、B は表-2.1.6.2で示したような 1 点支持でモデル化し、FEM モデル C は剛体はり要素をピラミッド型に配置した面支持でモデル化した。以下に、各解析モデルの概要を記す。

#### (1) 格子非合成モデル

床版は考慮せずに、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化した。格子非合成モデルは、対象橋梁の設計時に使用されたモデルである。最大要素サイズは 0.5m とした。

#### (2) 格子合成モデル

格子非合成モデルと同様、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化するが、床版の合成作用を考慮するため、床版および壁高欄の断面剛性を主桁はり要素の断面剛性に加算した完全合成桁モデルである。ここで、同モデルを比較対象とした理由としては、長期供用期間を経た RC 床版を有する非合成橋梁においても合成挙動を示すという既往の研究を参考にしたことによる<sup>6) 21) 22)</sup>。なお、主桁間隔が 2.6m と比較的狭いため床版の有効幅は全幅有効とし、壁高欄の断面剛性は近傍である G1 桁のみに加算した。最大要素サイズは、格子非合成モデルと同様に、0.5m とした。

#### (3) FEM モデル A

床版の橋軸方向の合成作用を考慮するだけではなく、荷重の横分配作用などを見込むため、床版自体を FEM 要素として直接モデル化した。床版は床版断面の図心軸位置にシェル要素としてモデル化し、主桁および横桁は主桁鋼断面としての図心軸位置にはり要素としてモデル化し、そのシェル要素とはり要素の鉛直方向間を剛体はり要素で結んだモデルとした。支承条件はこの剛体はり要素の下端に与えた。このモデルは、格子合成モデルと後述する FEM モデル B の中間的なモデルである。

壁高欄はオフセットはり要素でモデル化した。床版はコンクリート全断面を有効とし、床版内の鉄筋は無視した。また、ハンチは床版シェル要素の板厚をハンチ高分厚くすることで考慮した。

なお、シェル要素の最大サイズは  $0.50\text{m} \times 0.57\text{m}$ 、最大アスペクト比は 1:3 であり、比較的細かく分割したモデルである。また、垂直補剛材、水平補剛材、下横構等はモデル化していない。

#### (4) FEM モデル B

下横構をトラス要素、それ以外の部材（床版、壁高欄、主桁、横桁）を全てシェル要素で配置したモデルである。また、図-2.2.4 に示すように床版と上フランジの完全合成挙動を表現するため、シェル要素間の結合材を剛なはり要素でモデル化した。床版はモデル A と同様にコンクリート全断面を有効とし、床版内の鉄筋は無視した。また、ハンチは床版シェル要素の板厚をハンチ高分厚くすることで考慮した。モデル A と比較して、下横構と結合材をモデル化するとともに、主桁と横桁のモデル化をシェル要素としているため、より実構造に近い形状にモデル化したものといえる。なお、シェル要素の最大サイズは  $1.14\text{m} \times 2.75\text{m}$ 、最大アスペクト比は 1:10 であり、比較的粗く分割したモデルである。

#### (5) FEM モデル C

垂直補剛材をシェル要素として、壁高欄をオフセットはり要素としてモデル化している点を除いて FEM モデル B と同じにしたモデルである。ただし、最大要素サイズを  $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$  とし、最大アスペクト比を 1:3 としており、モデル B と比べて細かく分割したモデルである。なお、壁高欄にはオフセットはり要素を用いたが、シェル要素を用いた場合と比較して、主桁の変形および応力にはほとんど影響しないことを事前に確認している。

解析に使用したソフトウェアは、汎用有限要素プログラム「NASTRAN ver. 2001.0.9」<sup>14)</sup>である。モデル化には特殊な要素の使用は避け、シェル要素、はり要素、オフセットはり要素、剛体はり要素およびトラス要素を用いた。シェル要素には 4 節点アイソパラメトリックシェル要素 CQUAD4<sup>14)</sup>（数値ロッキングを回避するために低減積分を適用している要素。1 節点 6 自由度。ただし、面内回転は K6ROT<sup>14)</sup>で回転剛性を 100 とした。）を用いた。はり要素にはせん断変形を考慮した Timoshenko はり要素 CBEAM<sup>14)</sup>（1 節点 6 自由度）を用い、オフセットはり要素にはこの CBEAM にオフセットベクトルを与えたものを用いた。剛体はり要素には RBE2<sup>14)</sup>を用い、トラス要素には CROD<sup>14)</sup>（1 節点 2 自由度（並進変位と軸回りの回転））を用いた。また、解析は線形静的解析で実施した。

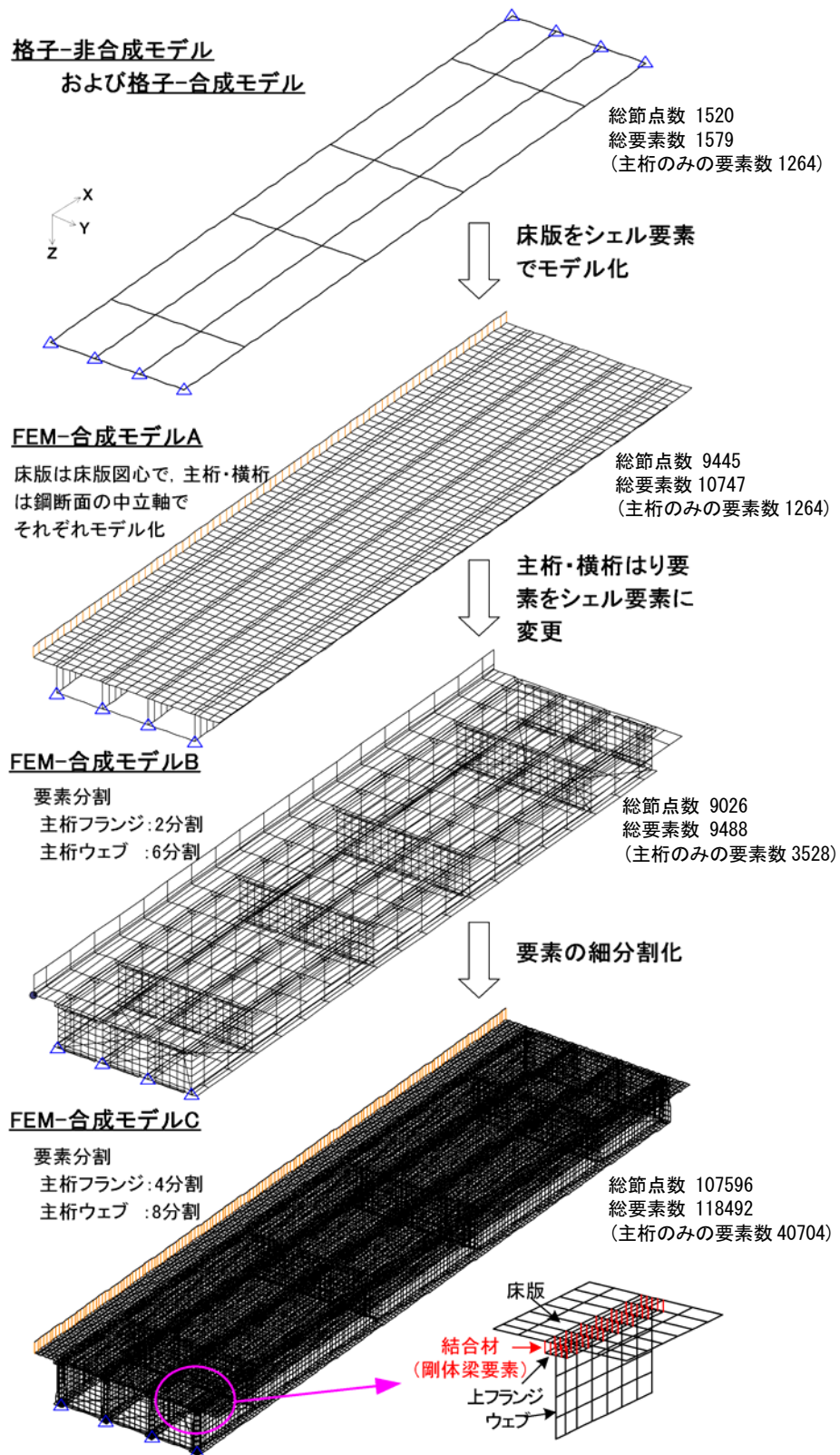
表-2.2.3 各解析モデルの要素種類と分割数

| 解析モデル<br>部材名称       |       | 簡易モデル ← 詳細モデル  |                |                 |                |                   |
|---------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
|                     |       | 格子-非合成         | 格子-合成          | FEM-合成A         | FEM-合成B        | FEM-合成C           |
| 床版                  | 床版    |                | (一)            | □               | □              | □                 |
|                     | ハンチ   |                |                | □               | □              | □                 |
|                     | 壁高欄   |                | (一)            | □               | □              | □                 |
|                     | 地覆    |                |                |                 |                |                   |
| 主桁                  | ウェブ   | —              | —              | —               | □              | □                 |
|                     | フランジ  |                |                |                 | □              | □                 |
|                     | 垂直補剛材 |                |                |                 |                | □                 |
|                     | 水平補剛材 |                |                |                 |                |                   |
| 横桁                  | ウェブ   | —              | —              | —               | □              | □                 |
|                     | フランジ  |                |                |                 | □              | □                 |
| 横構                  | 下横構   |                |                |                 | ---            | ---               |
| 高力ボルト継手部            |       |                |                |                 |                |                   |
| 架設用スライドレール          |       | (一)            | (一)            | (一)             | □              | □                 |
| ※ (結合材)             |       |                |                | —               | —              | —                 |
| 4径間分の総節点数           |       | 1520           | 1520           | 9445            | 9026           | 107596            |
| 4径間分の総要素数<br>(主桁のみ) |       | 1579<br>(1264) | 1579<br>(1264) | 10747<br>(1264) | 9488<br>(3528) | 118492<br>(40704) |
| 最大要素サイズ             |       | 0.50m          | 0.50m          | 0.50×0.57m      | 1.14×2.75m     | 0.25×0.25m        |
| 最大アスペクト比            |       |                |                | 1:3             | 1:10           | 1:3               |

凡例) □ : シェル要素      — : はり要素      — : 剛体はり要素  
□ : オフセットはり要素      --- : トラス要素  
(一) : 断面剛性を主桁のはり要素に加算  
空欄はモデル化していない部材を示す。  
※ 結合材とは床版と主桁上フランジの合成作用を表すための部材のこと。

表-2.2.4 全モデル共通の解析条件

| 項 目   |    | 内 容                                                                                                        |            |      |      |            |           |
|-------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|------|------------|-----------|
| 解析タイプ |    | 線形静的解析                                                                                                     |            |      |      |            |           |
| ヤング係数 |    | 鋼材(主桁, 横桁, 補剛材, 横構) : $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$<br>コンクリート(床版, 壁高欄) : $3.3 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ |            |      |      |            |           |
| ポアソン比 |    | 鋼材(主桁, 横桁, 補剛材, 横構) : 0.30<br>コンクリート(床版, 壁高欄) : 1/6                                                        |            |      |      |            |           |
| 支承条件  |    | 橋軸方向                                                                                                       | 橋軸直<br>角方向 | 鉛直方向 | 橋軸回り | 橋軸直<br>角回り | 鉛直軸<br>回り |
|       | 固定 | 拘束                                                                                                         | 拘束         | 拘束   | 自由   | 自由         | 自由        |
|       | 可動 | 自由                                                                                                         | 拘束         | 拘束   | 自由   | 自由         | 自由        |



※ 1径間のみ図示しているが、解析は全径間モデル化して実行している。

図-2.2.4 各解析モデルの要素分割の概要（1径間分）

#### 2.2.4 検討結果

各解析モデルにおける解析結果から、変形図および橋軸方向直応力コンター図（主桁をはり要素としたモデルでは鉛直曲げモーメントコンター図）を図-2.2.5(a)～(e)に示す（本来は、変形図と応力コンター図（または曲げモーメントコンター図）を同時表示することは望ましくはないが、図中では便宜的に同時に表示している。）。また、支間中央の鉛直変位、支間中央および中間支点上の主桁フランジ直応力度について、図-2.2.3 に示した計測点（主桁フランジ直応力度の計測点は、上フランジは下面、下フランジは上面）での実測値と解析値の比較結果を表-2.2.5(a)～(f)に示す。支間中央載荷においては支間中央位置での鉛直変位および直応力度を、中間支点上載荷においては中間支点上位置での直応力度をそれぞれ示している。また、図-2.2.6(a)～(c)は表-2.2.5(a)～(f)を図化したものである。図-2.2.6(d)には主桁鋼断面に発生する直応力分布を示す。

主桁をはり要素としたモデル（格子非合成モデル、格子合成モデル、FEM モデル A）では、断面力として解が得られるため、曲げモーメントを受けるはりとして一般的な手法により応力を算出した。ただし、FEM モデル A の場合、床版と主桁の図心位置のずれを考慮したモデル化により主桁には曲げに伴う軸力が発生するため、曲げモーメントと軸力を同時に受けるはりとして応力を算出した。

図-2.2.6を見ると、検討した解析モデルの中で最も詳細にモデル化した FEM モデル C では、実測値(●)と解析値(▲)は全体的に良く一致する結果となったが、完全に一致するまでには至っていない。この要因としては、材料のばらつきにより実際の床版剛性が解析での仮定値より大きい可能性があること、アスファルト舗装が剛性として寄与する可能性があること、支承の水平機構や回転機構を完全自由とした解析条件が実際は摩擦抵抗により少し拘束された条件となる可能性があることなどが考えられる。これらの要因を解析モデルに取り込めれば実測値との誤差はより小さくできると考えられるが、本章の主眼は、設計で用いることを想定した解析モデルの検討であるため、そこまでの検討は行わなかった。

以下に、図-2.2.4 に示すモデル化順序に従って、図-2.2.6 について主な結果を述べる。

##### (1) 床版と桁の合成作用の影響

床版と桁の合成作用を無視した格子非合成モデルでは、解析値(◇)は実測値(●)に対して鉛直変位で 4～5 倍、下フランジ直応力度で 2～3 倍と大きくなっている。一方、床版の合成作用を考慮したその他のモデル（格子合成モデル、FEM モデル A,B,C）では、解析値は全体的に実測値に近い値を示している。このことから、対象橋梁は非合成桁として設計されているが、合成桁として挙動しているものと考えられる。

##### (2) 床版のモデル化の影響

実測値(●)に対して、床版をシェル要素でモデル化した FEM モデル A と、床版の橋軸方向の断面剛性を主桁はり要素の剛性に含める形でモデル化した格子合成モデルとの比較を行う。

FEM モデル A(×)の場合、全ての荷重ケースで変位、応力ともに実測値と概ね一致している。一方、格子合成モデル(◆)の場合、中心荷重 CASE1,2 では変位、応力ともに実測値に比較的近いが、偏心荷重 CASE3～6 では荷重直下の桁では変位および応力が実測値より大きくなり、荷重から離れた桁では逆に小さくなる傾向が見られる。特に支間中央偏心荷重 CASE3,5 では外桁 G4 の下フランジ応力度は、実測値に比べて 40～50%程度大きい(図-2.2.6(c) iii))。すなわち、FEM モデル A と比較して、格子合成モデルでは実橋での荷重の横分配を適切に算定できていないことが確認された。

### (3) 主桁の要素種類の影響

実測値(●)に対して、主桁をはり要素とした FEM モデル A とシェル要素とした FEM モデル C の比較を行う。FEM モデル A の解析値(×)は、偏心荷重 CASE3～6 で変位、応力とも実測値に対して若干の差が見られるものの概ね一致している。一方、FEM モデル C の解析値(▲)は、前述のとおり全解析モデルの中で実測値と最も良く一致している。したがって、FEM モデル A でも実挙動を概ね表現できること、また FEM モデル C のように主桁をシェル要素でモデル化することにより、実挙動をより適切に表現できることが確認された。

### (4) 要素分割の影響

実測値(●)に対して、要素分割の異なる FEM モデル B(□)と FEM モデル C(▲)の比較を行う。両モデルにおける支間中央荷重での鉛直変位と下フランジ直応力度はほぼ一致しているが、中間支点上荷重 CASE2,4,6 での下フランジ直応力度に差が見られ、FEM モデル B の解析値は実測値よりも 20～30%程度小さい結果となっている(図-2.2.6(c) ii) iv) vi))。FEM 解析は近似解法であり、要素分割が粗いと解析精度が低下することが一般的に知られている。両モデルの比較においても、応力の伝達が一様である支間中央部には差が見られないものの、支承反力により複雑な応力状態となる中間支点上では FEM モデル B の解析精度が低下したと類推される。

### (5) 検討結果のまとめ

以上の検討結果より、実測値に近い計算値を得るためには、主桁と床版の図心位置のずれを考慮して主桁・横桁はり要素と床版シェル要素をモデル化することが必要であり、主桁・横桁をシェル要素とすることで、解析精度はより向上することがわかった。また、要素分割については、支間中央では粗くモデル化しても要素サイズの影響をほとんど受けないこと、中間支点上では支承反力により応力状態が複雑となるため比較的細かい分割が必要となることがわかった。

なお、参考までに 20tf 荷重車 4 台が縦列荷重した時の荷重直下の桁における実変位比(鉛直変位の実測値／解析値)および実応力比(下フランジ直応力の実測値／解析値)という形で各ケースについて整理したものを図-2.2.7 に示す。FEM モデル C のようなモデル化であれば、実変位比 0.8～1.2、実応力比 0.9～1.1 の範囲で収まっている。

また、図-2.2.8に20t 荷重車が橋上に満載した時の各桁における実変位比および実応力比を示す。ここで、満載した荷重としては、各載荷ケースが同時に作用した場合を考え、その時の実測値および解析値は各載荷ケースの結果を重ね合わせるにより求めた。FEM モデルC のようなモデル化であれば、実変位比 0.7～0.8、実応力比 0.8～1.2 となり、荷重車 4 台が縦列載荷した時と比較して実変位比は低下し、実応力比は範囲が拡がりばらつきが大きくなっている。

※コンター単位はkNm

符号は正が上側膨となるモーメント

負が下側膨となるモーメント

(通常の土木系ソフトとは逆なので注意)

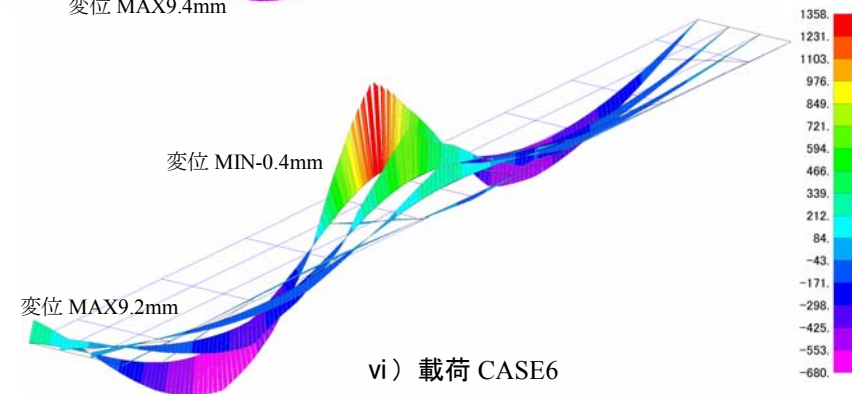
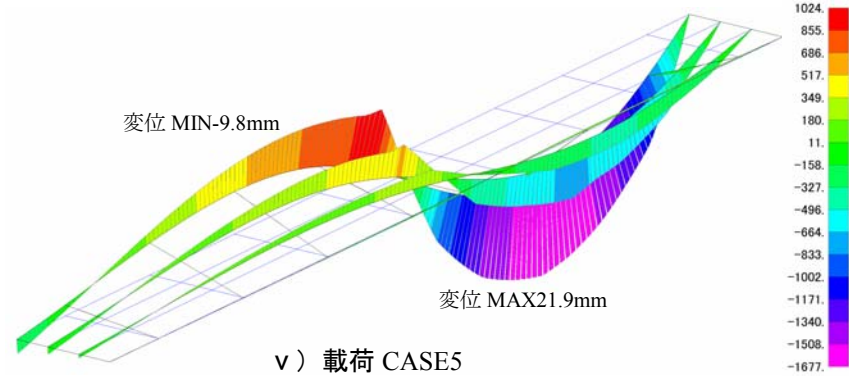
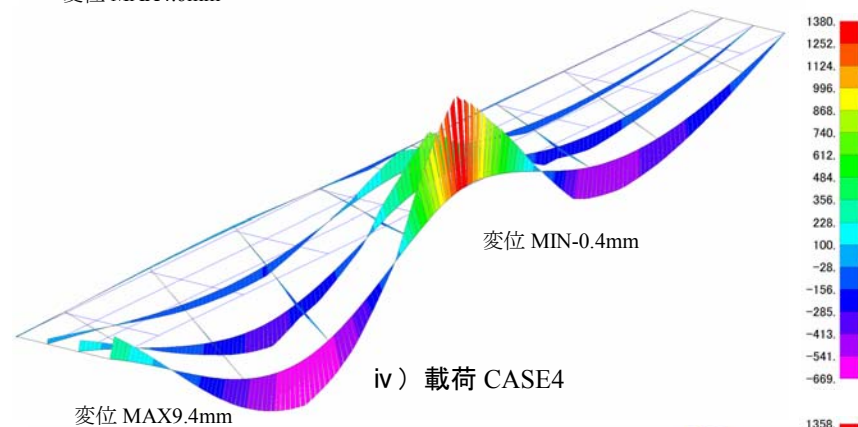
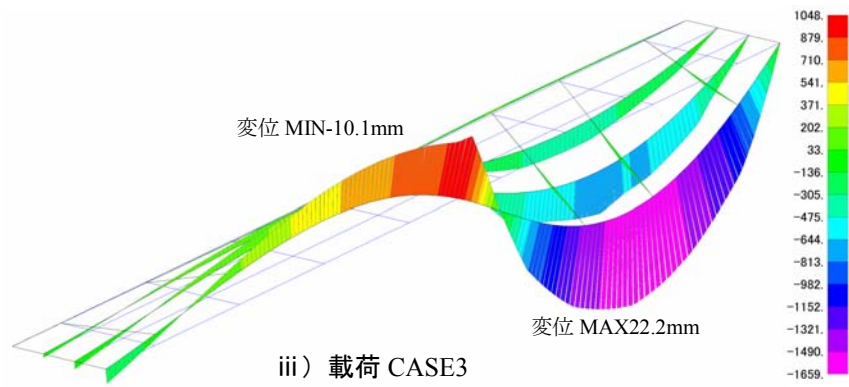
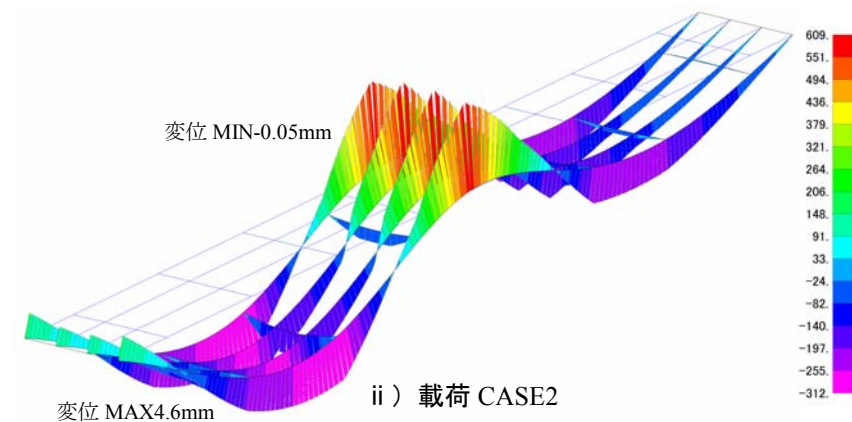
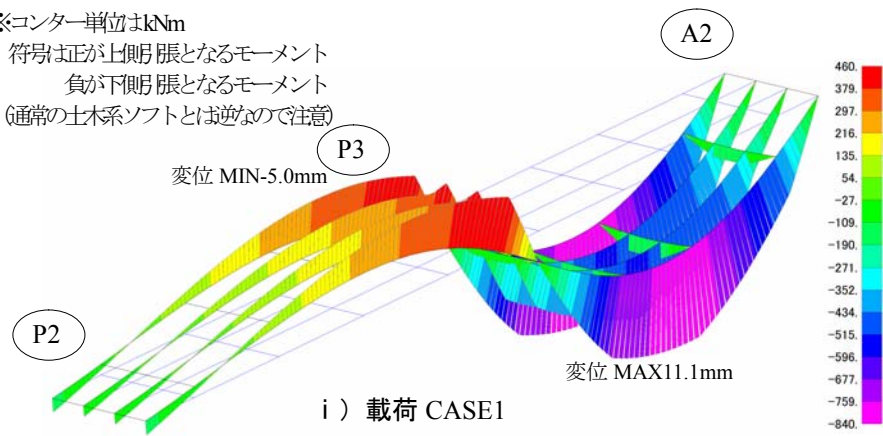


図-2.2.5(a) 格子非合成モデルの解析結果 (変形および鉛直曲げモーメント)

※コンター単位はkNm

符号は正が上側膨となるモーメント  
負が下側膨となるモーメント

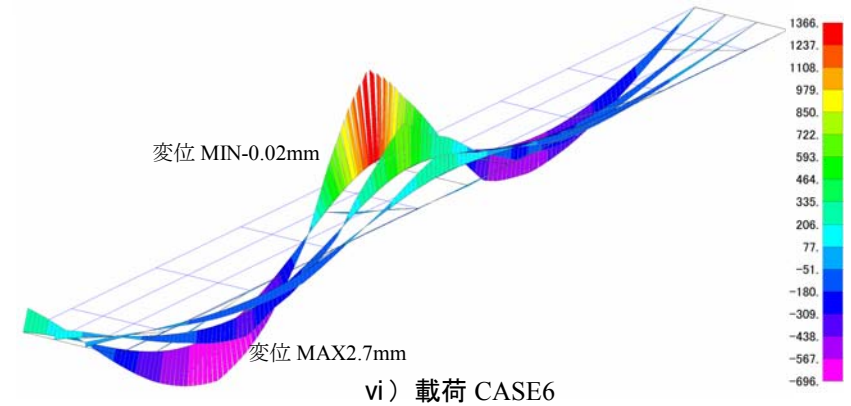
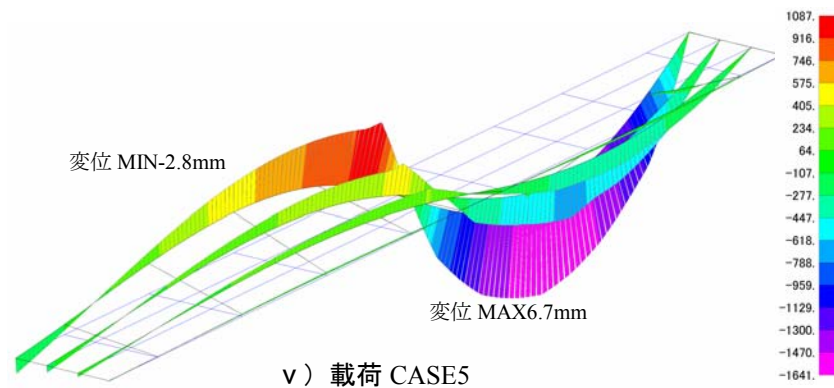
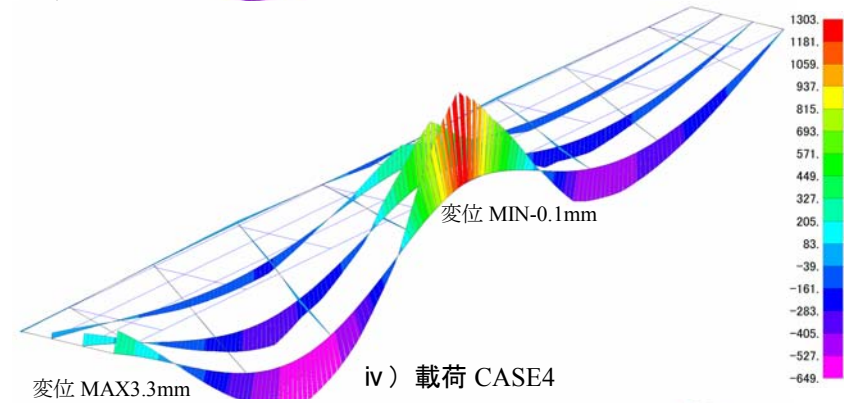
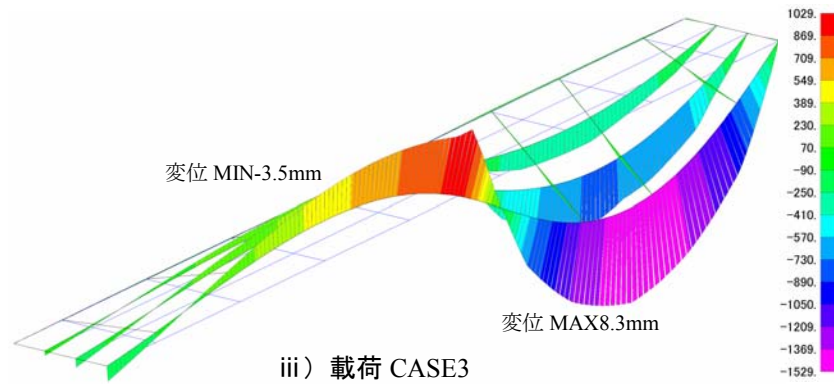
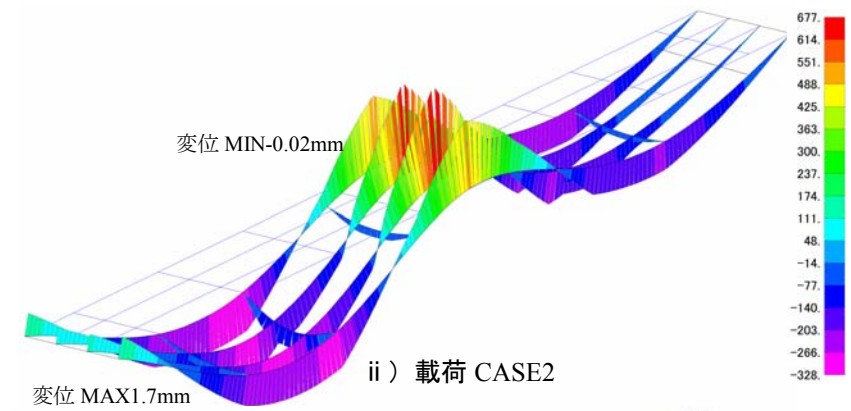
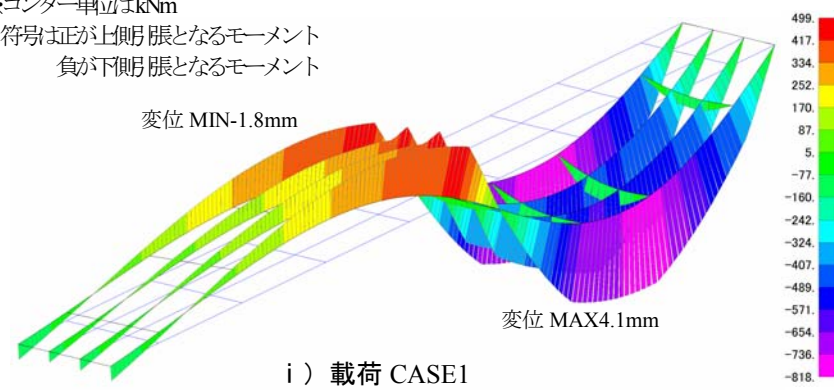


図-2. 2. 5(b) 格子合成モデルの解析結果（変形および鉛直曲げモーメント）

※主行および横行のみ表示

コンター単位はkNm

符号は正が上側引張となるモーメント

負が下側引張となるモーメント

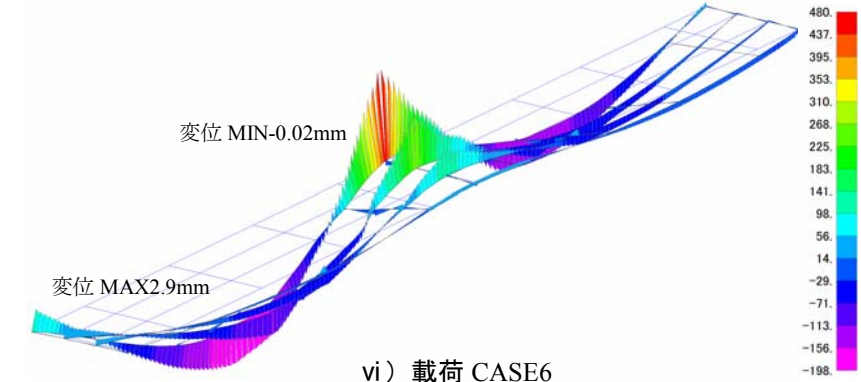
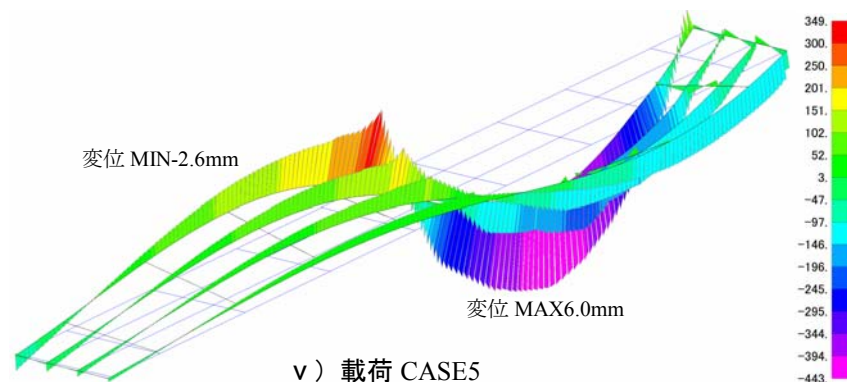
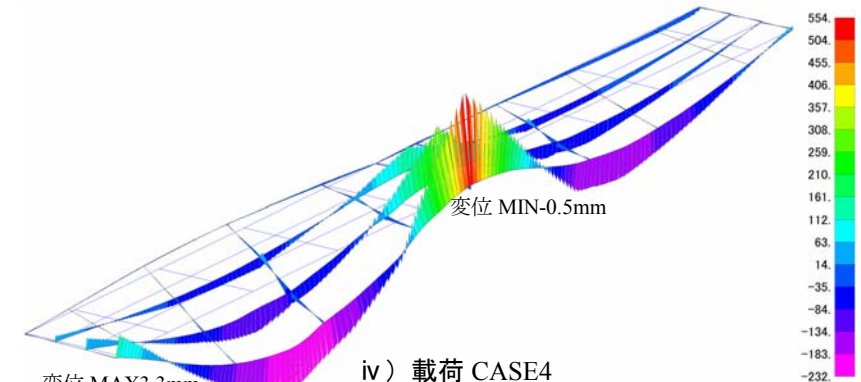
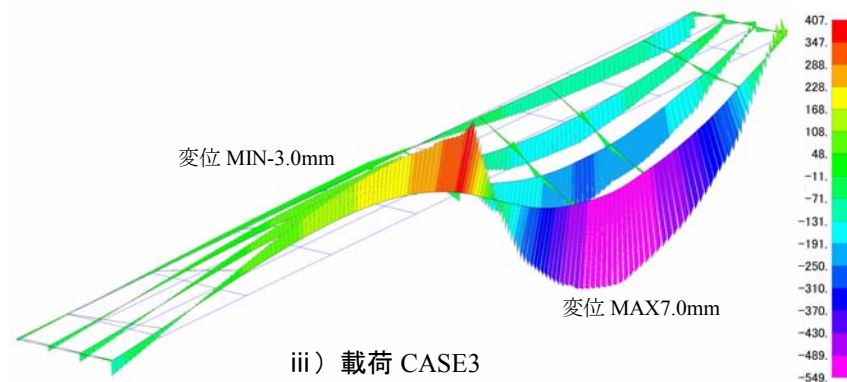
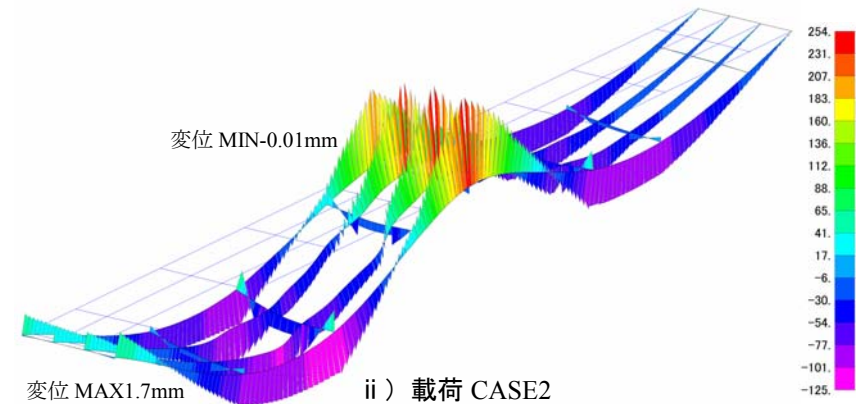
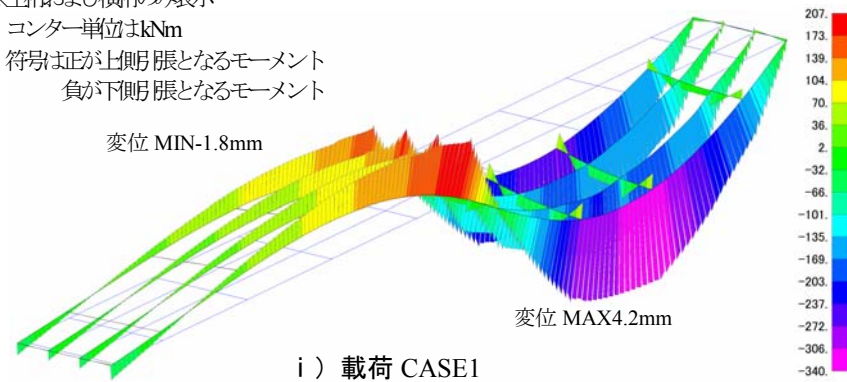


図-2.2.5(c) FEM モデル A の解析結果（変形および鉛直曲げモーメント）

※主行および横行のみ表示  
 コンター単位はkN/m<sup>2</sup>  
 符号は正が引張応力、負が圧縮応力

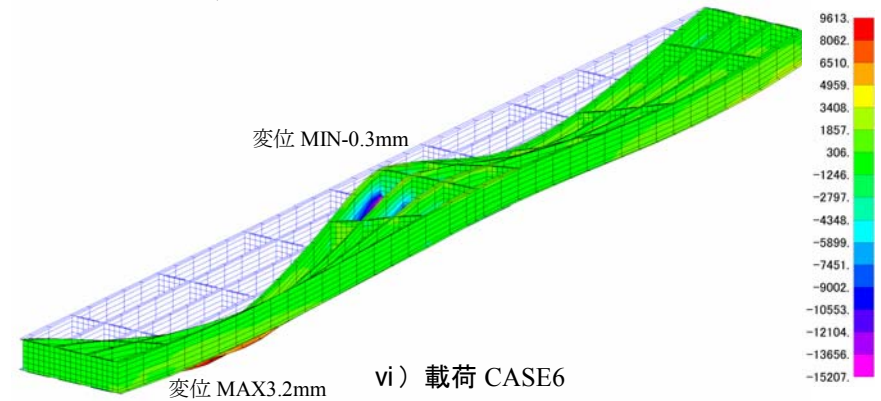
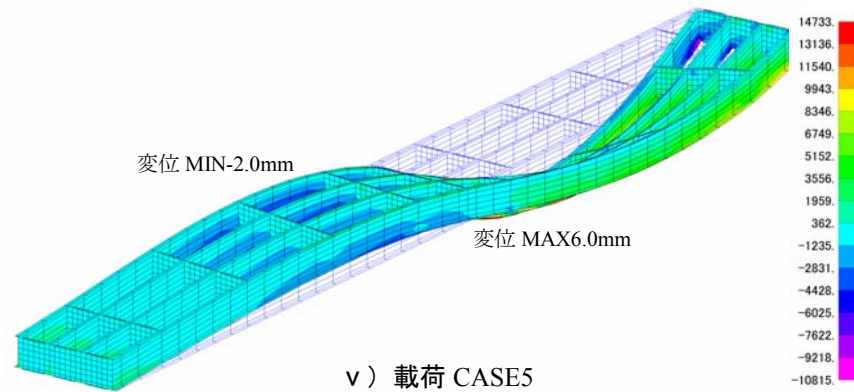
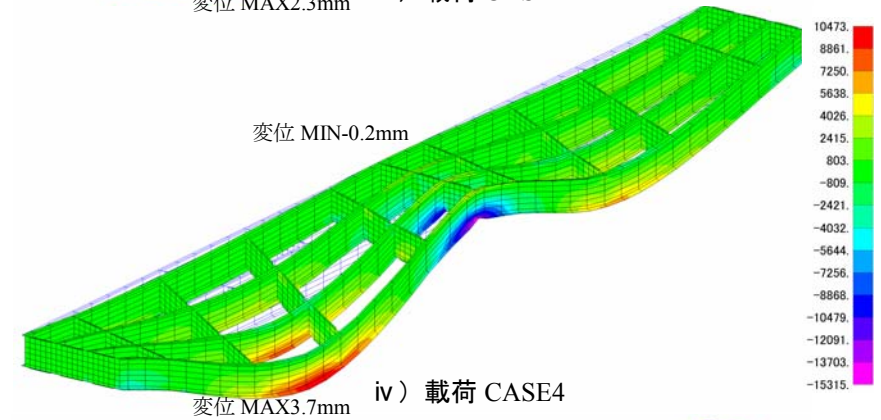
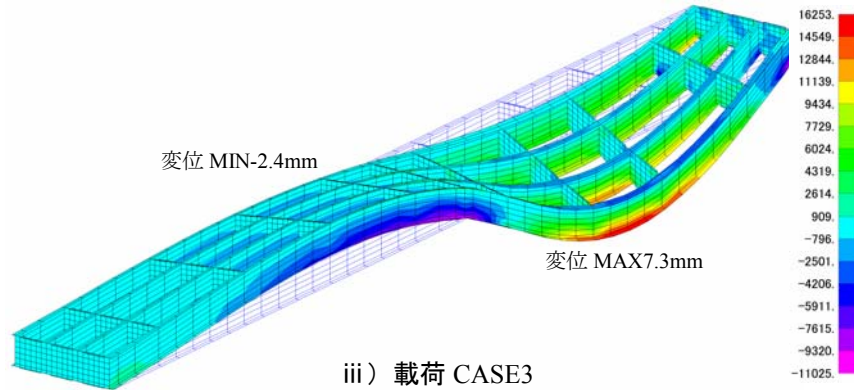
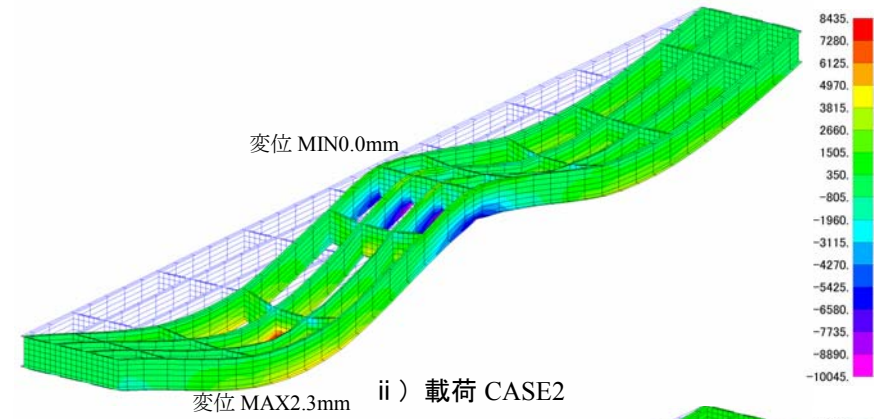
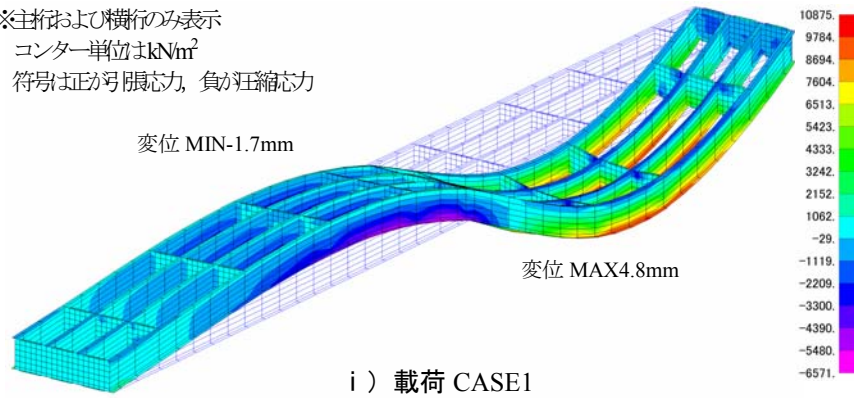


図-2. 2. 5(d) FEM モデル B の解析結果（変形および直応力度）

※主行および横行のみ表示  
 コンター単位はkNm<sup>2</sup>  
 符号は正が引張応力、負が圧縮応力

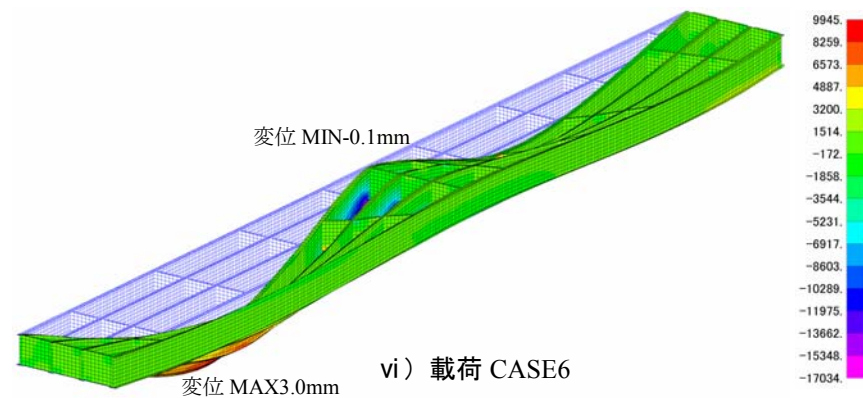
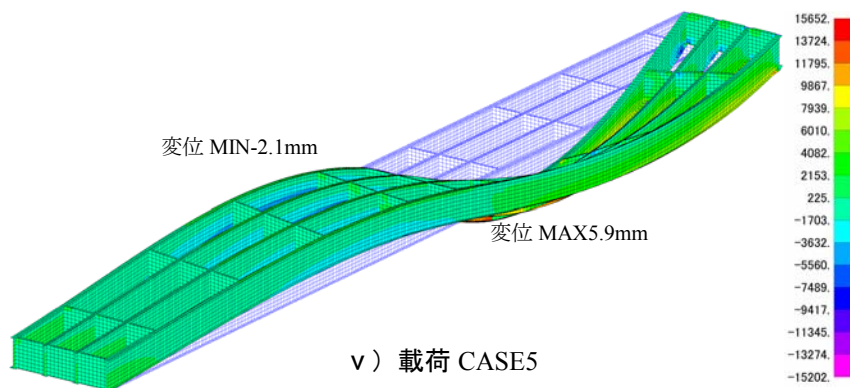
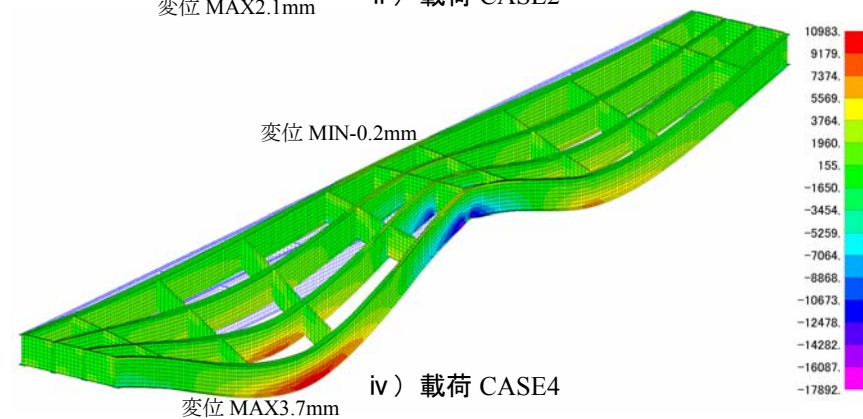
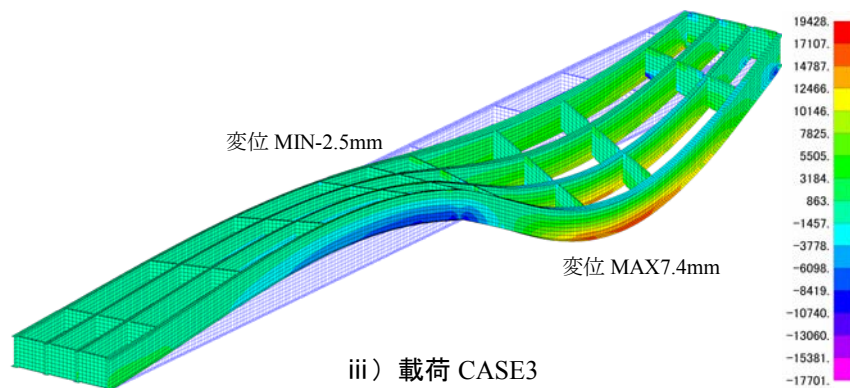
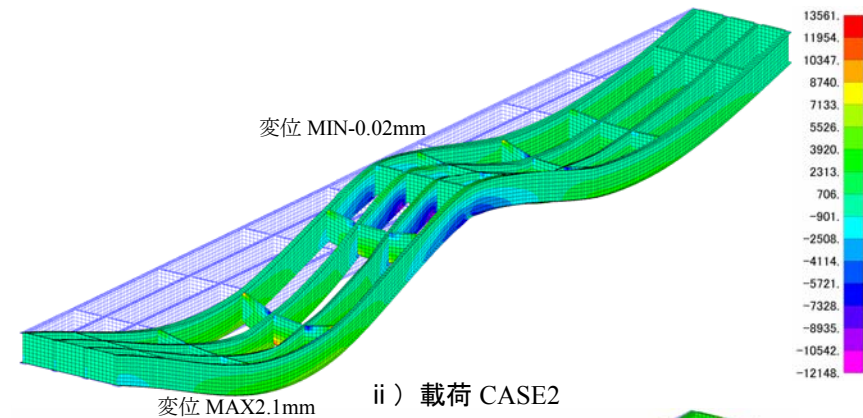
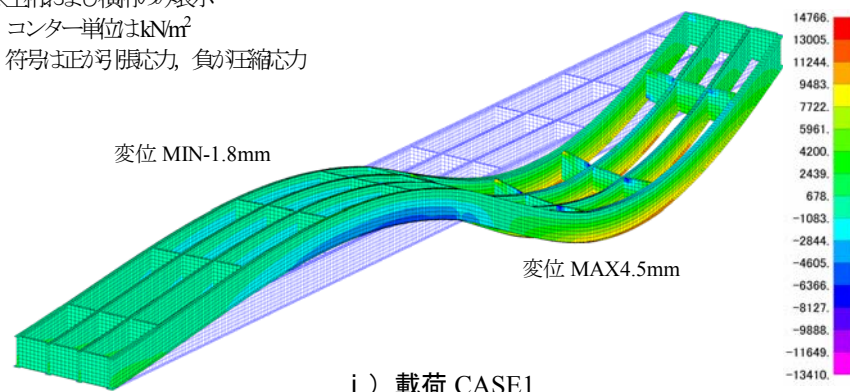


図-2.2.5(e) FEM モデル C の解析結果（変形および直応力度）

表-2.2.5 解析値と実測値との比較表

(a) 支間中央載荷における主桁の鉛直変位 (単位: mm)

| 解析ケース |          | G1桁           | G2桁           | G3桁           | G4桁           |
|-------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CASE1 | 実橋計測値    | -3.06         | -3.30         | -3.34         | -2.46         |
|       | 格子非合成モデル | -10.58 (246%) | -10.97 (232%) | -11.03 (230%) | -10.76 (338%) |
|       | 格子合成モデル  | -3.21 (5%)    | -3.83 (16%)   | -4.12 (23%)   | -4.08 (66%)   |
|       | FEMモデルA  | -3.30 (8%)    | -3.72 (13%)   | -4.01 (20%)   | -4.20 (71%)   |
|       | FEMモデルB  | -3.78 (24%)   | -4.23 (28%)   | -4.39 (32%)   | -4.27 (73%)   |
|       | FEMモデルC  | -3.71 (21%)   | -4.21 (28%)   | -4.40 (32%)   | -4.29 (74%)   |
| CASE3 | 実橋計測値    | -1.33         | -2.50         | -4.08         | -4.85         |
|       | 格子非合成モデル | 0.45 (-134%)  | -7.13 (185%)  | -14.69 (260%) | -22.13 (356%) |
|       | 格子合成モデル  | 0.08 (-106%)  | -2.71 (8%)    | -5.50 (35%)   | -8.22 (69%)   |
|       | FEMモデルA  | -1.24 (-7%)   | -3.14 (26%)   | -5.07 (24%)   | -6.95 (43%)   |
|       | FEMモデルB  | -2.13 (60%)   | -3.61 (45%)   | -5.23 (28%)   | -6.66 (37%)   |
|       | FEMモデルC  | -2.01 (51%)   | -3.54 (42%)   | -5.21 (28%)   | -6.69 (38%)   |
| CASE5 | 実橋計測値    | -4.58         | -3.86         | -2.53         | -0.54         |
|       | 格子非合成モデル | -21.82 (377%) | -14.50 (276%) | -7.07 (179%)  | 0.38 (-171%)  |
|       | 格子合成モデル  | -6.69 (46%)   | -4.62 (20%)   | -2.42 (-4%)   | -0.20 (-62%)  |
|       | FEMモデルA  | -5.44 (19%)   | -4.18 (8%)    | -2.85 (13%)   | -1.54 (185%)  |
|       | FEMモデルB  | -5.75 (25%)   | -4.59 (19%)   | -3.29 (30%)   | -2.11 (291%)  |
|       | FEMモデルC  | -5.61 (22%)   | -4.60 (19%)   | -3.30 (31%)   | -2.13 (294%)  |

※ ( )内は, 誤差=(解析値-実橋計測値)/実橋計測値×100 を示す.

(b) 支間中央載荷における主桁の相対変位 (単位: mm)

| 解析ケース |          | G1-G2        | G2-G3        | G3-G4        |
|-------|----------|--------------|--------------|--------------|
| CASE1 | 実橋計測値    | 0.24         | 0.04         | -0.89        |
|       | 格子非合成モデル | 0.39 (63%)   | 0.06 (48%)   | -0.27 (-70%) |
|       | 格子合成モデル  | 0.62 (157%)  | 0.29 (575%)  | -0.03 (-96%) |
|       | FEMモデルA  | 0.41 (73%)   | 0.30 (593%)  | 0.19 (-121%) |
|       | FEMモデルB  | 0.45 (88%)   | 0.16 (274%)  | -0.13 (-85%) |
|       | FEMモデルC  | 0.50 (108%)  | 0.19 (340%)  | -0.11 (-87%) |
| CASE3 | 実橋計測値    | 1.18         | 1.58         | 0.77         |
|       | 格子非合成モデル | 7.57 (543%)  | 7.56 (379%)  | 7.45 (867%)  |
|       | 格子合成モデル  | 2.78 (137%)  | 2.80 (77%)   | 2.72 (253%)  |
|       | FEMモデルA  | 1.90 (62%)   | 1.93 (22%)   | 1.88 (144%)  |
|       | FEMモデルB  | 1.48 (26%)   | 1.62 (3%)    | 1.43 (86%)   |
|       | FEMモデルC  | 1.53 (30%)   | 1.67 (6%)    | 1.48 (92%)   |
| CASE5 | 実橋計測値    | -0.72        | -1.33        | -1.99        |
|       | 格子非合成モデル | -7.33 (918%) | -7.43 (459%) | -7.45 (274%) |
|       | 格子合成モデル  | -2.08 (188%) | -2.19 (65%)  | -2.22 (12%)  |
|       | FEMモデルA  | -1.26 (75%)  | -1.33 (-0%)  | -1.31 (-34%) |
|       | FEMモデルB  | -1.16 (61%)  | -1.29 (-3%)  | -1.18 (-41%) |
|       | FEMモデルC  | -1.01 (40%)  | -1.29 (-3%)  | -1.18 (-41%) |

※ 相対変位とは, 各主桁間の鉛直変位差を意味する.

(c) 支間中央載荷における主桁の上フランジ直応力度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

| 解析ケース |          | G1桁          | G2桁          | G3桁          | G4桁          |
|-------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CASE1 | 実橋計測値    | -0.30        | -0.50        | -0.30        | -0.90        |
|       | 格子非合成モデル | -19.01 ##### | -16.56 ##### | -16.60 ##### | -19.42 ##### |
|       | 格子合成モデル  | -0.85 (185%) | -1.41 (181%) | -1.54 (412%) | -2.35 (161%) |
|       | FEMモデルA  | -1.10 (266%) | -0.78 (57%)  | -1.28 (326%) | -2.61 (190%) |
|       | FEMモデルB  | -0.85 (185%) | -1.40 (179%) | -1.69 (464%) | -1.97 (119%) |
|       | FEMモデルC  | -0.53 (78%)  | -1.52 (205%) | -1.69 (464%) | -1.52 (69%)  |
| CASE3 | 実橋計測値    | 0.00         | -0.60        | -0.80        | -1.30        |
|       | 格子非合成モデル | 0.57 #####   | -12.88 ##### | -23.45 ##### | -37.42 ##### |
|       | 格子合成モデル  | 0.02 #####   | -1.21 (102%) | -2.18 (173%) | -4.39 (237%) |
|       | FEMモデルA  | 0.75 #####   | -1.33 (122%) | -2.50 (213%) | -4.70 (262%) |
|       | FEMモデルB  | -0.13 #####  | -1.09 (82%)  | -2.28 (185%) | -3.44 (164%) |
|       | FEMモデルC  | -0.20 #####  | -1.05 (75%)  | -2.43 (204%) | -2.96 (128%) |
| CASE5 | 実橋計測値    | -0.20        | -0.50        | -0.40        | -0.40        |
|       | 格子非合成モデル | -36.73 ##### | -23.27 ##### | -12.78 ##### | 0.50 (-224%) |
|       | 格子合成モデル  | -1.66 (730%) | -1.79 (258%) | -1.08 (170%) | -0.13 (-68%) |
|       | FEMモデルA  | -2.31 #####  | -1.20 (140%) | -1.01 (154%) | 0.11 (-126%) |
|       | FEMモデルB  | -1.69 (743%) | -1.53 (207%) | -0.99 (146%) | -0.72 (81%)  |
|       | FEMモデルC  | -1.17 (487%) | -1.60 (221%) | -0.85 (113%) | -0.76 (91%)  |

※ “#####”は、1000%以上の誤差を示す。

計測値および解析値は上フランジ下面での値。

(d) 支間中央載荷における主桁の下フランジ直応力度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

| 解析ケース |          | G1桁           | G2桁         | G3桁         | G4桁           |
|-------|----------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| CASE1 | 実橋計測値    | 8.40          | 8.90        | 9.00        | 9.20          |
|       | 格子非合成モデル | 15.69 (87%)   | 12.95 (46%) | 12.99 (44%) | 15.67 (70%)   |
|       | 格子合成モデル  | 9.94 (18%)    | 9.02 (1%)   | 9.85 (9%)   | 11.35 (23%)   |
|       | FEMモデルA  | 10.29 (23%)   | 8.74 (-2%)  | 9.28 (3%)   | 11.68 (27%)   |
|       | FEMモデルB  | 9.51 (13%)    | 9.87 (11%)  | 10.09 (12%) | 10.00 (9%)    |
|       | FEMモデルC  | 9.51 (13%)    | 9.66 (9%)   | 9.98 (11%)  | 10.29 (12%)   |
| CASE3 | 実橋計測値    | 2.40          | 7.80        | 11.40       | 15.30         |
|       | 格子非合成モデル | -0.47 (-120%) | 10.08 (29%) | 18.34 (61%) | 30.21 (97%)   |
|       | 格子合成モデル  | -0.19 (-108%) | 7.77 (-0%)  | 14.01 (23%) | 21.21 (39%)   |
|       | FEMモデルA  | 4.55 (89%)    | 9.25 (19%)  | 11.77 (3%)  | 17.15 (12%)   |
|       | FEMモデルB  | 5.61 (134%)   | 9.01 (15%)  | 11.71 (3%)  | 14.45 (-6%)   |
|       | FEMモデルC  | 4.94 (106%)   | 8.93 (14%)  | 11.55 (1%)  | 15.30 (0%)    |
| CASE5 | 実橋計測値    | 12.60         | 10.30       | 7.50        | 3.70          |
|       | 格子非合成モデル | 30.32 (141%)  | 18.20 (77%) | 10.00 (33%) | -0.40 (-111%) |
|       | 格子合成モデル  | 19.32 (53%)   | 11.47 (11%) | 6.93 (-8%)  | 0.62 (-83%)   |
|       | FEMモデルA  | 14.73 (17%)   | 10.05 (-2%) | 8.59 (14%)  | 4.95 (34%)    |
|       | FEMモデルB  | 13.29 (5%)    | 10.92 (6%)  | 8.60 (15%)  | 5.46 (48%)    |
|       | FEMモデルC  | 13.53 (7%)    | 10.89 (6%)  | 8.86 (18%)  | 5.39 (46%)    |

計測値および解析値は下フランジ上面での値。

(e) 中間支点上載荷における主桁の上フランジ直応力度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

| 解析ケース |          | G1桁           | G2桁          | G3桁         | G4桁           |
|-------|----------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| CASE2 | 実橋計測値    | 0.40          | 0.70         | 0.50        | 1.70          |
|       | 格子非合成モデル | 14.05 #####   | 19.59 #####  | 19.52 ##### | 13.99 (723%)  |
|       | 格子合成モデル  | 0.51 (29%)    | 2.03 (189%)  | 2.12 (323%) | 1.50 (-12%)   |
|       | FEMモデルA  | 1.64 (311%)   | 3.05 (336%)  | 3.30 (560%) | 2.40 (41%)    |
|       | FEMモデルB  | 1.12 (181%)   | 2.10 (200%)  | 2.22 (345%) | 1.54 (-10%)   |
|       | FEMモデルC  | 0.52 (29%)    | 0.81 (16%)   | 0.99 (99%)  | 1.20 (-29%)   |
| CASE4 | 実橋計測値    | 0.30          | 0.40         | 1.10        | 5.20          |
|       | 格子非合成モデル | -1.44 (-579%) | 10.43 #####  | 23.30 ##### | 33.41 (542%)  |
|       | 格子合成モデル  | -0.07 (-123%) | 1.03 (158%)  | 2.42 (120%) | 3.90 (-25%)   |
|       | FEMモデルA  | 0.09 (-70%)   | 1.80 (350%)  | 4.04 (267%) | 5.28 (1%)     |
|       | FEMモデルB  | 0.39 (29%)    | 1.58 (295%)  | 2.71 (146%) | 2.63 (-49%)   |
|       | FEMモデルC  | 0.38 (26%)    | 1.01 (153%)  | 1.36 (24%)  | 1.76 (-66%)   |
| CASE6 | 実橋計測値    | 3.60          | 2.20         | 0.70        | 1.20          |
|       | 格子非合成モデル | 33.56 (832%)  | 23.43 (965%) | 10.41 ##### | -1.45 (-221%) |
|       | 格子合成モデル  | 1.38 (-62%)   | 2.12 (-4%)   | 0.96 (37%)  | -0.07 (-106%) |
|       | FEMモデルA  | 3.91 (8%)     | 3.30 (50%)   | 1.59 (127%) | 0.33 (-72%)   |
|       | FEMモデルB  | 1.86 (-48%)   | 2.24 (2%)    | 1.40 (99%)  | 0.49 (-59%)   |
|       | FEMモデルC  | 0.31 (-91%)   | 0.83 (-62%)  | 0.85 (22%)  | 0.57 (-53%)   |

※ “#####”は、1000%以上の誤差を示す。 計測値および解析値は上フランジ下面での値。

(f) 中間支点上載荷における主桁の下フランジ直応力度 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

| 解析ケース |          | G1桁           | G2桁           | G3桁           | G4桁           |
|-------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CASE2 | 実橋計測値    | -9.30         | -12.10        | -11.70        | -6.30         |
|       | 格子非合成モデル | -11.17 (20%)  | -14.56 (20%)  | -14.51 (24%)  | -10.93 (74%)  |
|       | 格子合成モデル  | -6.39 (-31%)  | -11.07 (-9%)  | -11.56 (-1%)  | -7.20 (14%)   |
|       | FEMモデルA  | -7.44 (-20%)  | -10.60 (-12%) | -10.96 (-6%)  | -8.22 (30%)   |
|       | FEMモデルB  | -6.15 (-34%)  | -8.51 (-30%)  | -8.30 (-29%)  | -6.11 (-3%)   |
|       | FEMモデルC  | -7.41 (-20%)  | -11.21 (-7%)  | -11.28 (-4%)  | -7.81 (24%)   |
| CASE4 | 実橋計測値    | -3.50         | -7.00         | -14.90        | -15.90        |
|       | 格子非合成モデル | 1.14 (-133%)  | -7.75 (11%)   | -17.32 (16%)  | -26.11 (64%)  |
|       | 格子合成モデル  | 0.84 (-124%)  | -5.65 (-19%)  | -13.21 (-11%) | -18.73 (18%)  |
|       | FEMモデルA  | 0.05 (-101%)  | -6.08 (-13%)  | -13.26 (-11%) | -18.58 (17%)  |
|       | FEMモデルB  | -1.06 (-70%)  | -4.67 (-33%)  | -10.54 (-29%) | -12.82 (-19%) |
|       | FEMモデルC  | -0.86 (-76%)  | -5.73 (-18%)  | -14.38 (-3%)  | -17.51 (10%)  |
| CASE6 | 実橋計測値    | -16.30        | -14.10        | -7.50         | -4.30         |
|       | 格子非合成モデル | -26.69 (64%)  | -17.42 (24%)  | -7.74 (3%)    | 1.13 (-126%)  |
|       | 格子合成モデル  | -17.11 (5%)   | -11.56 (-18%) | -5.22 (-30%)  | 0.34 (-108%)  |
|       | FEMモデルA  | -17.37 (7%)   | -12.05 (-15%) | -5.66 (-25%)  | -0.38 (-91%)  |
|       | FEMモデルB  | -12.62 (-23%) | -10.42 (-26%) | -4.41 (-41%)  | -0.87 (-80%)  |
|       | FEMモデルC  | -17.03 (5%)   | -14.22 (1%)   | -5.92 (-21%)  | -0.99 (-77%)  |

計測値および解析値は下フランジ上面での値。

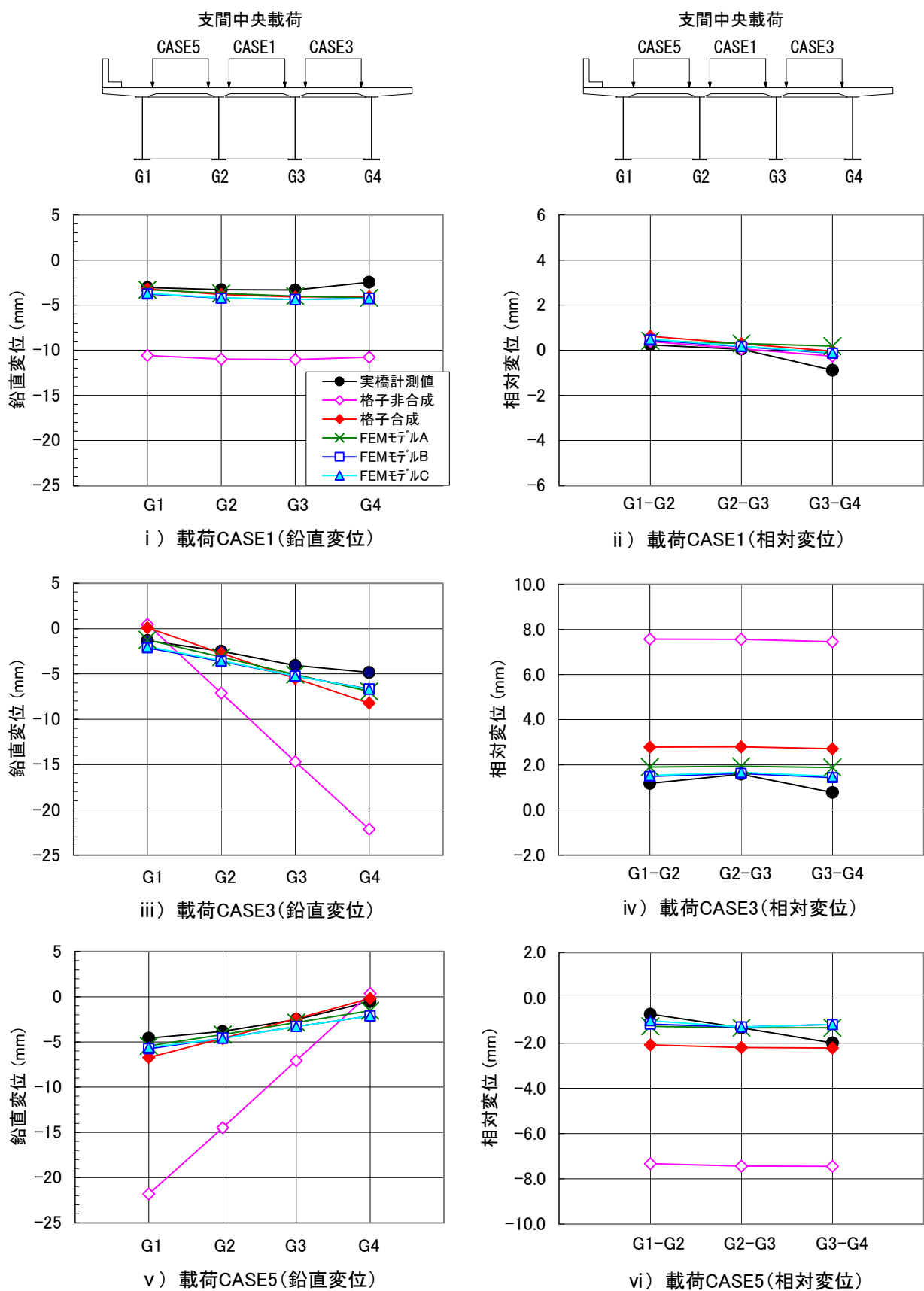
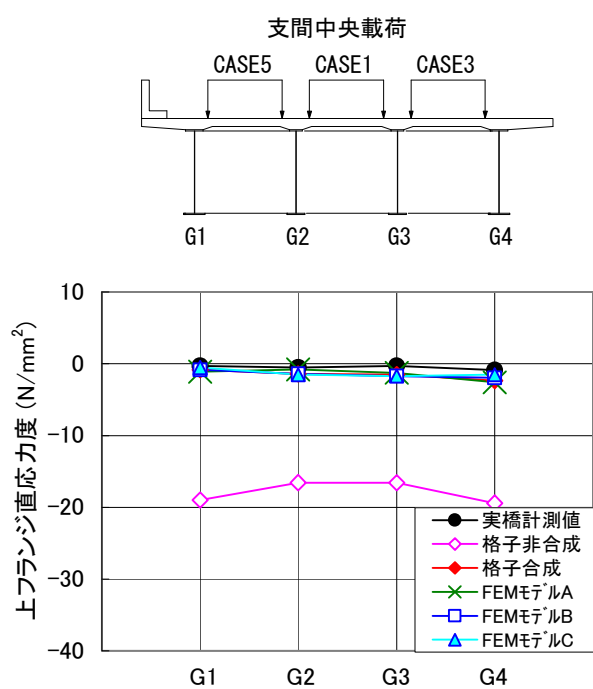
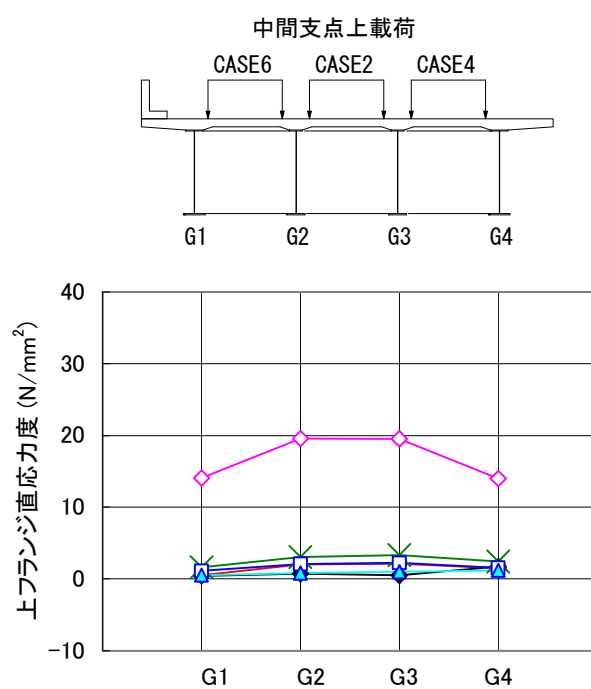


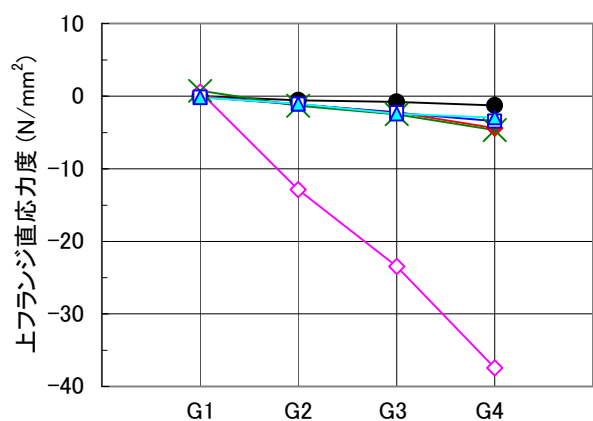
図-2.2.6(a) 解析値と実測値との比較 (鉛直変位および相対変位)



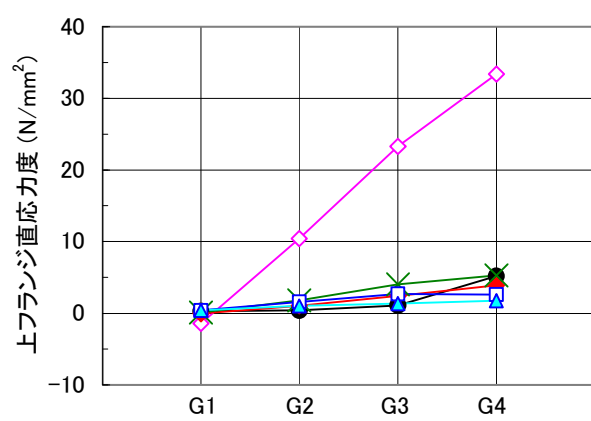
i) 載荷CASE1



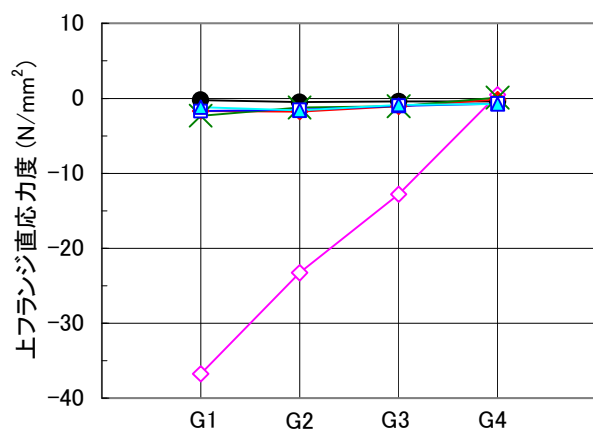
ii) 載荷CASE2



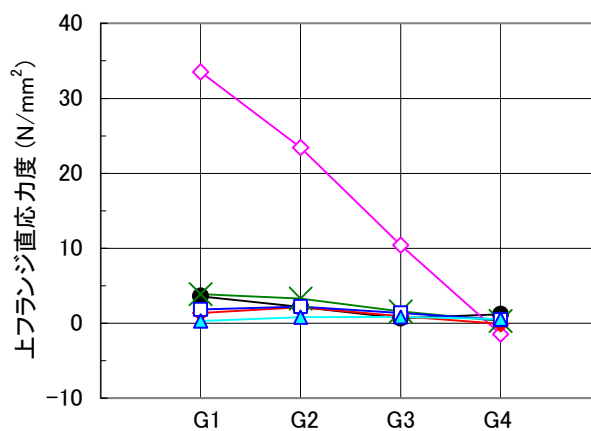
iii) 載荷CASE3



iv) 載荷CASE4



v) 載荷CASE5



vi) 載荷CASE6

比較は上フランジ下面位置.

図-2.2.6(b) 解析値と実測値との比較 (上フランジ直応力度)

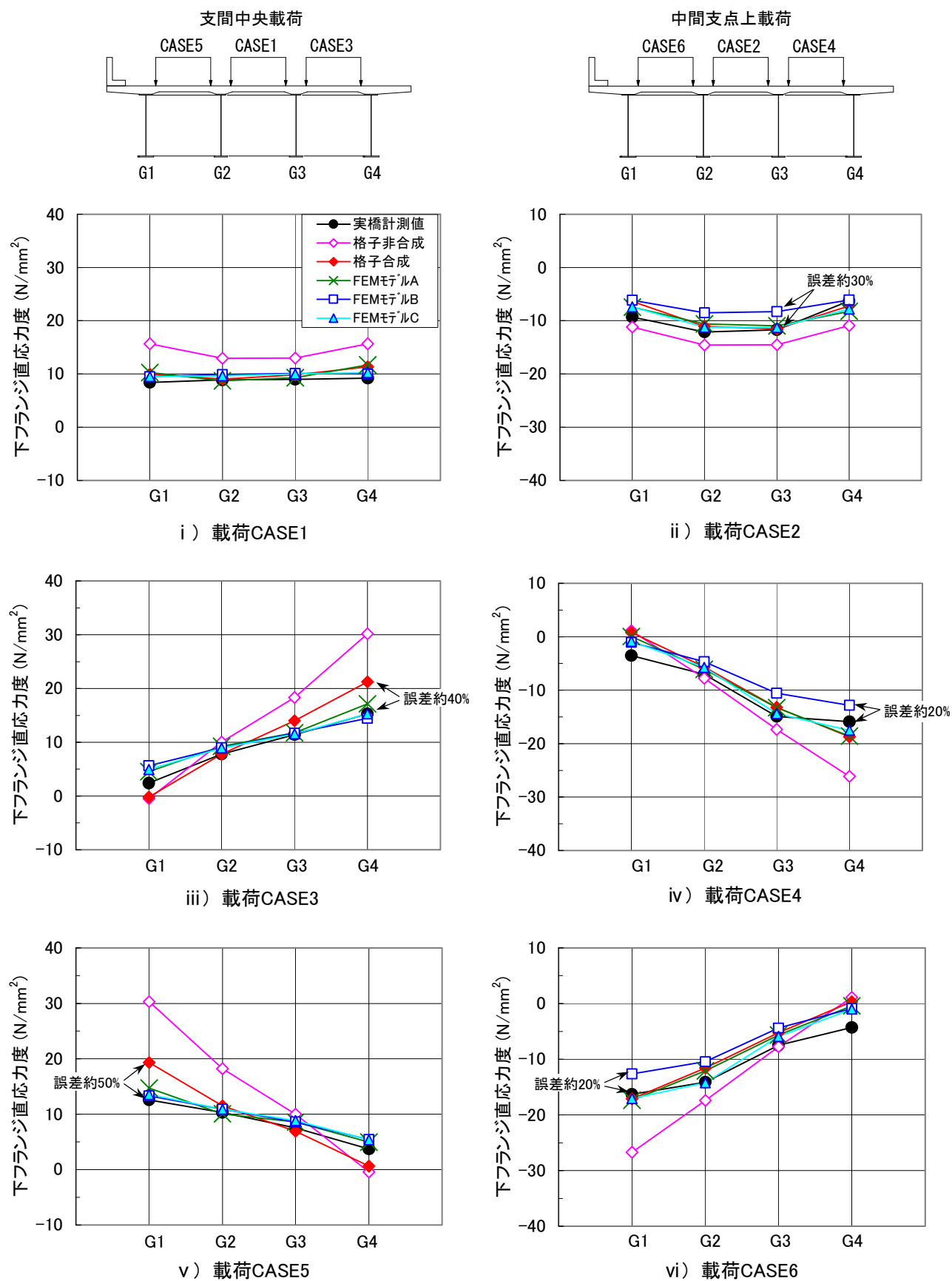
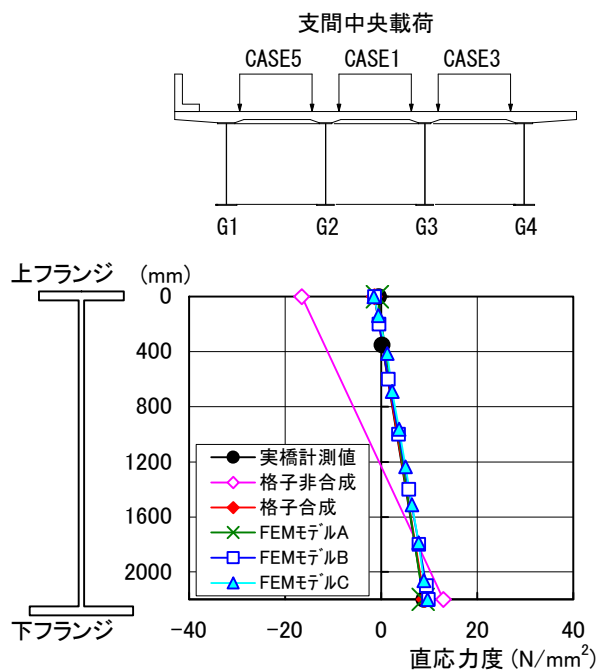
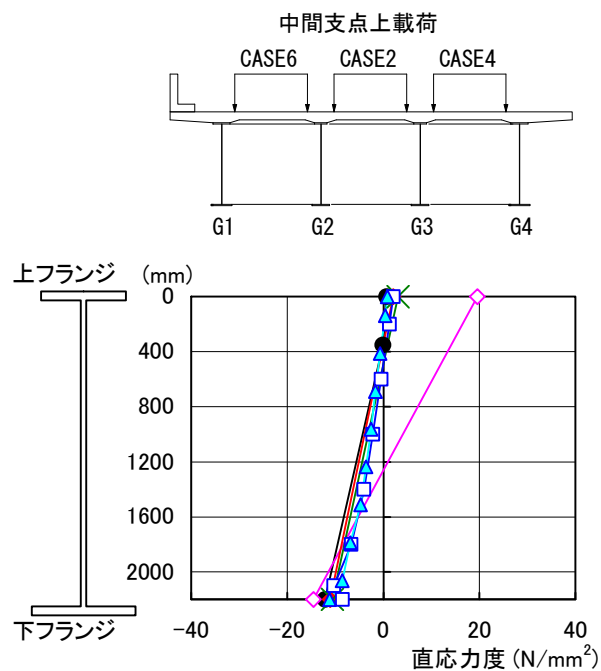


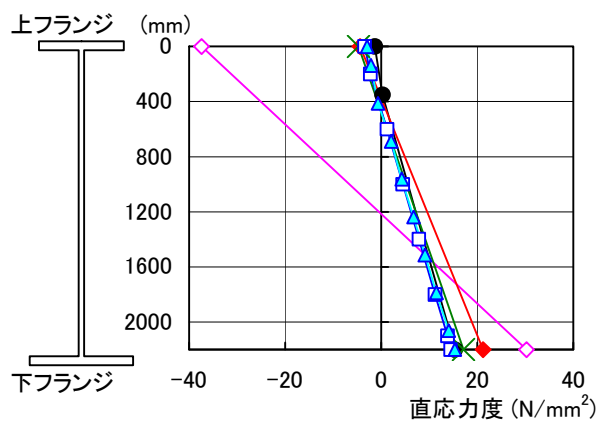
図-2.2.6(c) 解析値と実測値との比較（下フランジ直応力度）  
 比較は下フランジ上面位置.



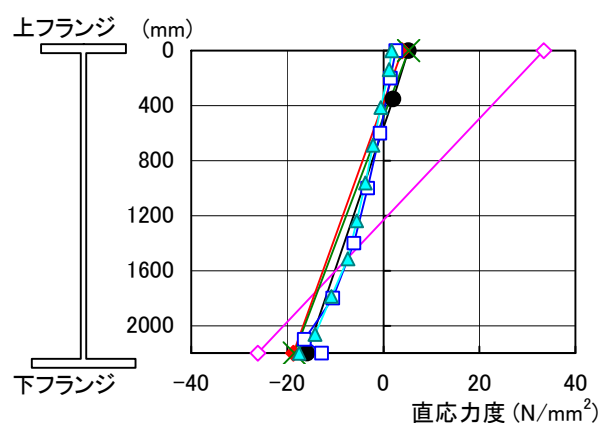
i) 載荷CASE1(G2桁)



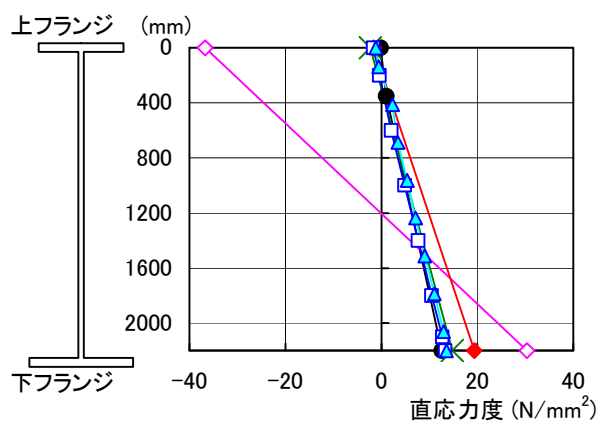
ii) 載荷CASE2(G2桁)



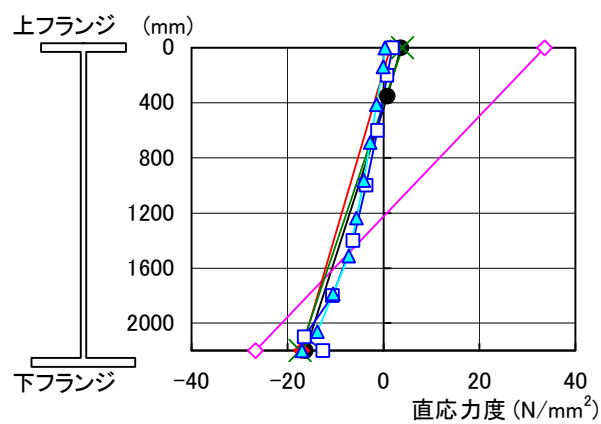
iii) 載荷CASE3(G4桁)



iv) 載荷CASE4(G4桁)

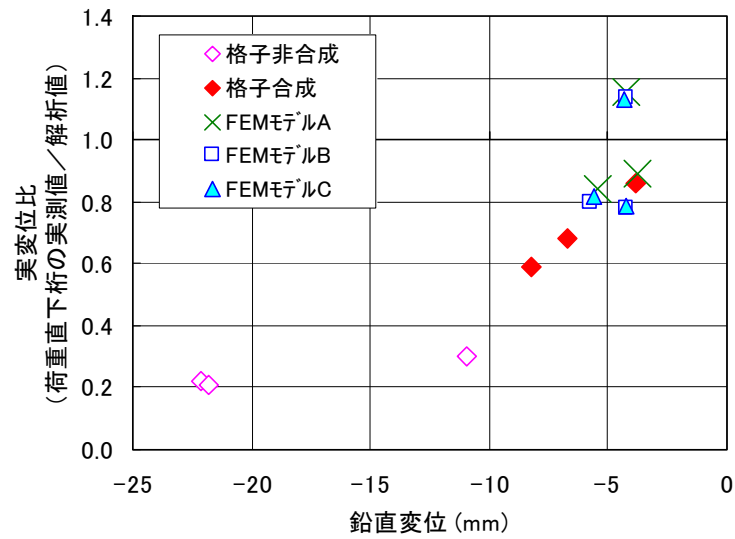


v) 載荷CASE5(G1桁)

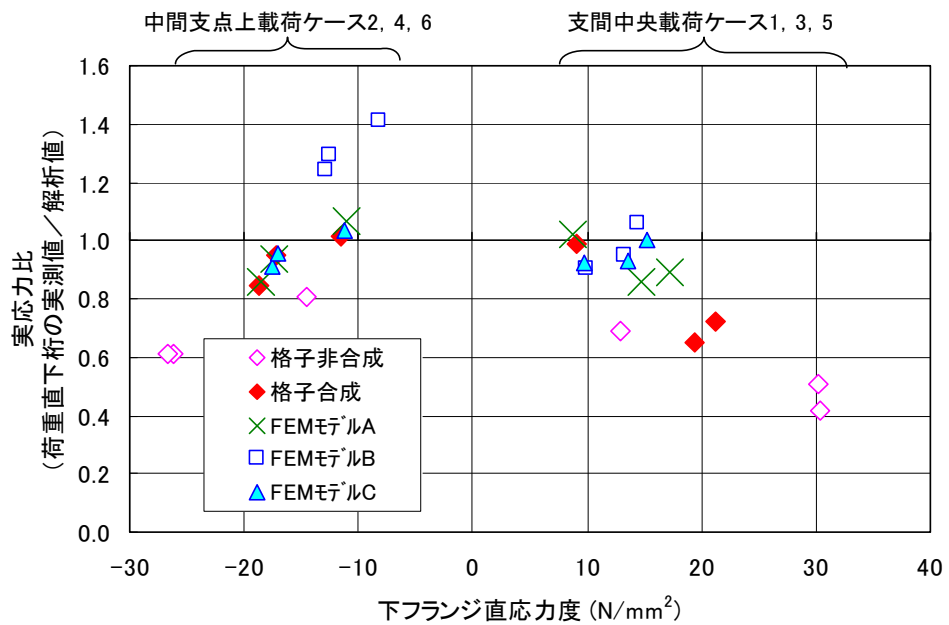


vi) 載荷CASE6(G1桁)

図-2.2.6(d) 解析値と実測値との比較 (主桁高さ方向の直応力分布)

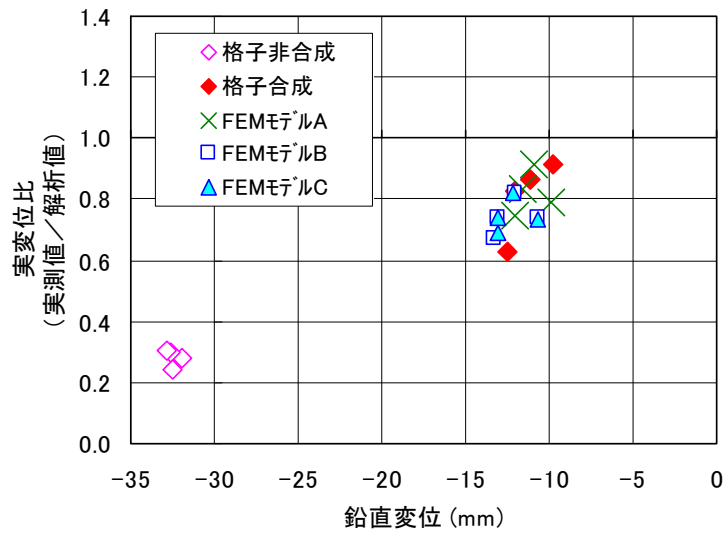


(a) 支間中央載荷ケースにおける鉛直変位の実変位比

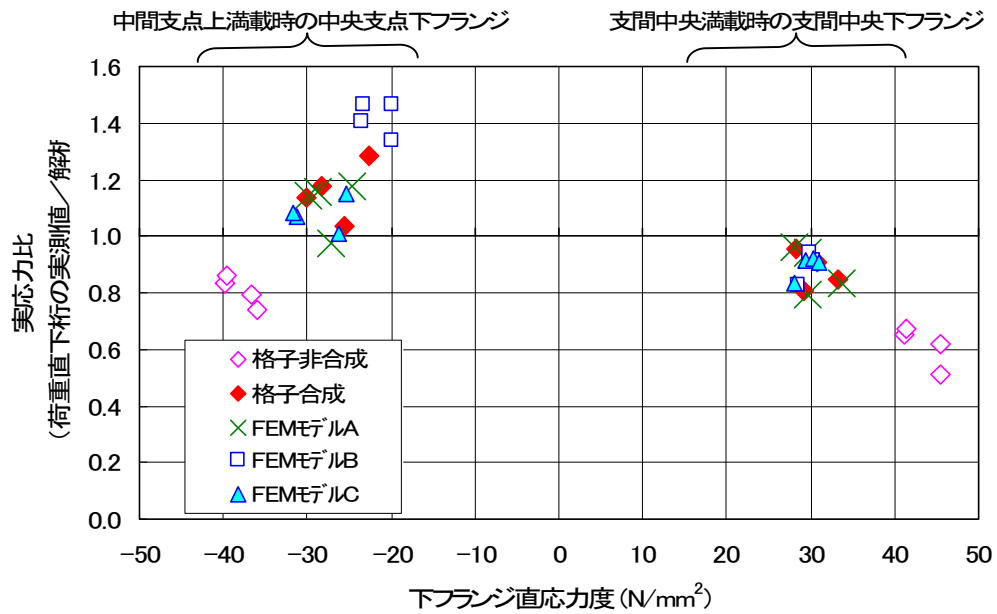


(b) 下フランジ直応力の実応力比

図-2.2.7 荷重車 4 台縦列載荷時（各載荷ケース）の実変位比および実応力比



(a) 支間中央満載時における鉛直変位の実変位比



(b) 下フランジ直応力の実応力比

※支間中央満載時 : 荷重 CASE1, CASE3, CASE5 の線形重ね合わせ

中間支点上満載時 : 荷重 CASE2, CASE4, CASE6 の線形重ね合わせ

図-2.2.8 荷重車満載時を想定した場合の実変位比および実応力比

## 2.2.5 モデル化に関する追加検討

### (1) 床版と主桁間のモデル化に関する検討

2.2.4 の検討結果より、床版をシェル要素、主桁および横桁をはり要素とした FEM モデル A のようなモデル化でも実挙動を概ね表現できることがわかった。ところで、床版をシェル要素、主桁・横桁をはり要素とするモデル化には、FEM モデル A のような剛体はり要素を用いて床版－主桁間を繋ぐ方法以外に、主桁・横桁はり要素にオフセットはり要素を適用する方法等が考えられる。ここでは、FEM モデル A に類似したモデルとして表-2.2.6 に示すその他 2 種類のモデルを考え、実測値との比較検討を行う。

追加検討した 2 種類のモデル（FEM モデル A'、A''）について以下に概要を説明する。

**FEM モデル A''**： 床版－主桁の図心位置の高さ方向のずれを無視して、主桁・横桁はり要素を床版シェル要素と節点共有により結合させたモデルである。解析に用いる主桁の断面定数は、床版図心を原点として算出することで主桁の偏心量を無視することを補った（面内方向の断面 2 次モーメントがモデル A、A' と比べて 3 倍以上となる）。応力計算においては、床版を含めた合成断面としての断面定数を用いる。

**FEM モデル A'**： 床版－主桁の図心位置のずれを考慮するために、主桁・横桁をオフセットはり要素としたモデル(CBEAM<sup>14</sup>)にオフセットベクトルを与えたモデル)である。オフセットはり要素の場合、入力したオフセットベクトルが解析内部で自動的に剛体要素として扱われるため、剛体はり要素 RBE2<sup>14</sup>で直接モデル化することと同じように床版－主桁の図心位置のずれを考慮できる。支承の境界条件は、オフセット下端に節点がないため床版位置に与えることになり、この点が FEM モデル A とは異なる。

表-2.2.6 FEM モデル A に類似したモデルの概要

|                         | FEMモデルA''                                                                                                                                                                              | FEMモデルA'                                                                                                                                                       | FEMモデルA                                                 |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 概要図                     | <p>※主桁・横桁は床版と節点共有により結合。</p>                                                                                                                                                            | <p>※オフセット表示されているが、主桁・横桁は床版と節点共有により結合。</p>                                                                                                                      | <p>※主桁・横桁は床版と節点共有により結合。</p>                             |
| モデル化方針                  | 床版－主桁の図心位置の高さ方向のずれを無視して、主桁・横桁はり要素を床版シェル要素と節点共有により結合させたモデル。                                                                                                                             | FEMモデルA''に対して、床版－主桁の図心位置のずれを考慮するために、主桁・横桁をオフセットはり要素としたモデル。                                                                                                     | FEMモデルA'に対して、オフセットベクトルを剛体はり要素で直接モデル化し、支承条件をその下端に与えたモデル。 |
| 解析に用いる主桁の断面定数           | 床版－主桁の図心位置のずれを無視したモデルであるため、床版図心を原点として算出した鋼断面としての断面定数<br>例) 代表断面 (G4-sec14) の断面定数<br>$A=0.06267\text{m}^2$ $I_y=0.1766\text{m}^4$<br>$I_z=0.0008318\text{m}^4$ $J=0.00001810\text{m}^4$ | 主桁図心位置を原点として算出した鋼断面としての断面定数<br>例) 代表断面 (G4-sec14) の断面定数<br>$A=0.06267\text{m}^2$ $I_y=0.05253\text{m}^4$<br>$I_z=0.0008318\text{m}^4$ $J=0.00001810\text{m}^4$ | FEMモデルA'と同じ                                             |
| 応力計算式                   | 床版－主桁に高さ方向のずれが無いことより軸力が発生しないため、曲げモーメントを受けるはりとして次式により応力計算を行う。<br>$\sigma_s = \frac{M}{I_y} y_s$ ここで、合成断面としての断面定数を上式に用いる。                                                                | 曲げに伴う軸力が発生するため、曲げモーメントと軸力を同時に受けるはりとして次式により応力計算を行う。<br>$\sigma_s = \frac{N}{A_s} + \frac{M}{I_{ys}} y_s$ ここで、鋼断面としての断面定数を上式に用いる。                                | FEMモデルA'と同じ                                             |
| 4径間分の総要素数<br>(主桁のみの要素数) | 9479 [節点数8177]<br>(1264)                                                                                                                                                               | 9479 [節点数8177]<br>(1264)                                                                                                                                       | 10747 [節点数9445]<br>(1264)                               |

解析結果の中から、支間中央偏心载荷 CASE3 における鉛直変位と下フランジ応力度を図-2.2.9 に示す。この図には比較のため、格子合成モデルおよび FEM モデル C の結果も併せて示す。

FEM モデル A' の解析値 (+) を見ると、荷重直下の G4 桁下フランジ直応力度は格子合成モデル (◆) より大きくなっていることに対し、G4 桁鉛直変位では格子合成モデルよりも小さくなっており、荷重分配に関して変位と応力で傾向が一致しない。これは、解析に用いた主桁の断面定数と応力計算で用いた断面定数のそれぞれがモデルに対して適していないことを示しており、床版—主桁間の偏心量を無視して同一面内でモデル化することは不適切であると言える。

一方、FEM モデル A' の解析値 (—) は、格子合成モデル (◆) と概ね一致しており、FEM モデル A に比べて実橋の荷重分配を適切に算定できていない結果となっている。これは、FEM モデル A' における支承の境界条件を与えた位置が主因と考えられる。

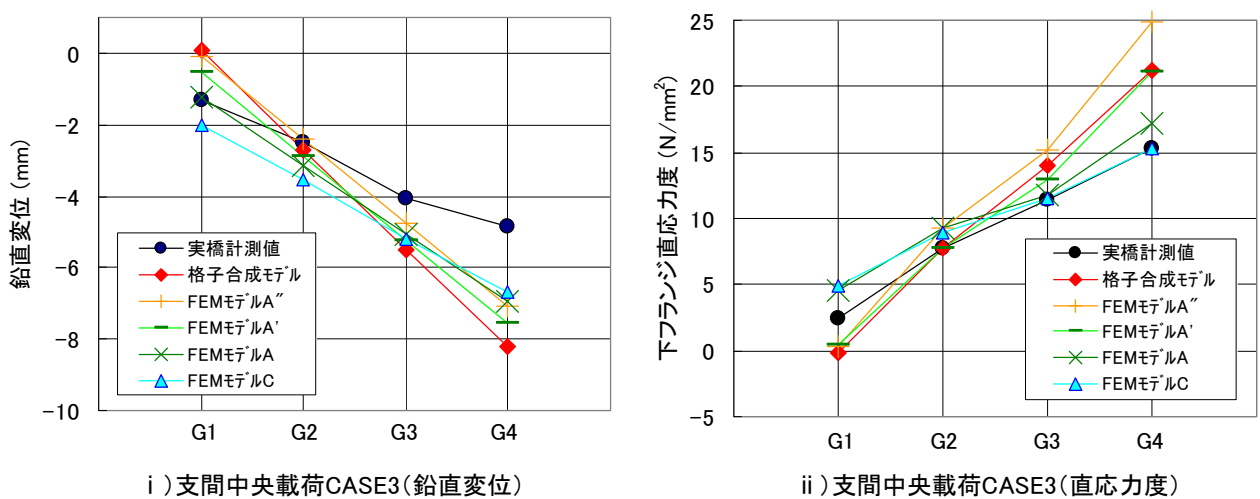


図-2.2.9 FEM モデル A に類似したモデル化による荷重分配の違い

支承条件を与える位置の違いが及ぼす影響について、より詳細に調べるために、FEM モデル A、A' のモデル化方針に従った簡易な単径間 2 主桁モデルを作成し、载荷 CASE3 のような支間中央偏心载荷を行った。図-2.2.10 にその解析結果から得られた変形図、断面力図および応力図を示す。

まず、主桁の鉛直曲げモーメント図を比較すると、ほぼ等しい分布であり、最小値が一致している。次に主桁の軸力図を見ると、モデル A の荷重直下の G2 桁では、支間中央に引張力が発生し、固定支承側の桁端では逆に圧縮力が発生している。また、G1 桁側にも引張力が発生している。モデル A' では、モデル A のような軸力分布にはなっておらず、引張力の最大値はモデル A の方が約 20% 小さい。床版の橋軸方向応力コンター図を見ると、モデル A' の G2 桁側で、支間中央に圧縮応力が発生し、固定支承側の桁端に引張応力が発生しており、モデル A とは応力分布が顕著に異なる。

主桁の軸力や床版の橋軸方向応力に見られるような支間中央と桁端との力の反転は、そりねじりの影響と考えられる。図-2.2.11 に示すように、モデル A、A' のようなモデルは擬似的なボックス構造であり、偏心载荷で断面がねじられると対角点の符号が等しくなるようなそりねじり変形を起こし、そりねじりが支承で拘束されることによりそりねじり応力が発生する。したがって、

モデル A では支承条件を主桁位置に与えたため主桁に、モデル A'では床版位置に与えたため床版にそれぞれそりねじり応力が発生したものと考えられる。モデル A では、荷重直下の G2 桁でそりねじり応力が支間中央の曲げに伴う引張力を打ち消す方向の圧縮力として作用し、G1 桁でそりねじり応力が引張力として作用しており、結果的に曲げに伴う引張力を荷重から遠い方の桁に分配する形となっている。

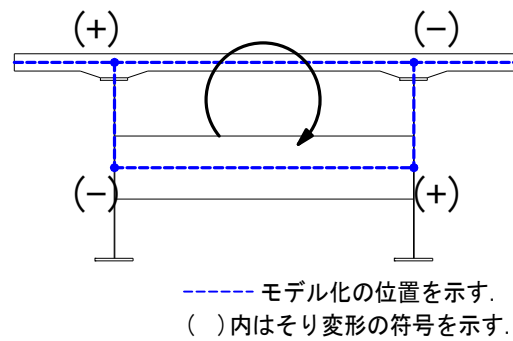


図-2.2.11 プレートガーダーのそり変形の概念

モデル A'では、床版にそりねじり応力が発生するため、G2 桁には曲げに伴う引張力だけが分布し、G1 桁に分配していない。したがって、モデル A、A'の主桁応力分布の違いを模式的に表した図-2.2.12 に示すように、モデル A では主桁に発生したそりねじり応力の分だけ上下フランジの直応力が低減されることになる。このように、支承条件の位置に起因するそりねじり応力の表現の相違が、図-2.2.9 に示した荷重分配の相違に繋がるものと考えられる。

以上の検討結果から、床版をシェル要素、主桁・横桁をはり要素とするモデル化に際しては、床版－主桁間の偏心量を考慮するとともに、実構造に即して支承条件を主桁位置に与える必要があることがわかった。このようなモデル化により、格子モデルではこれまで一般に無視されてきたそりねじりによる応力度を考慮することができ、実橋の荷重分配を適切に表現できることが確認された。

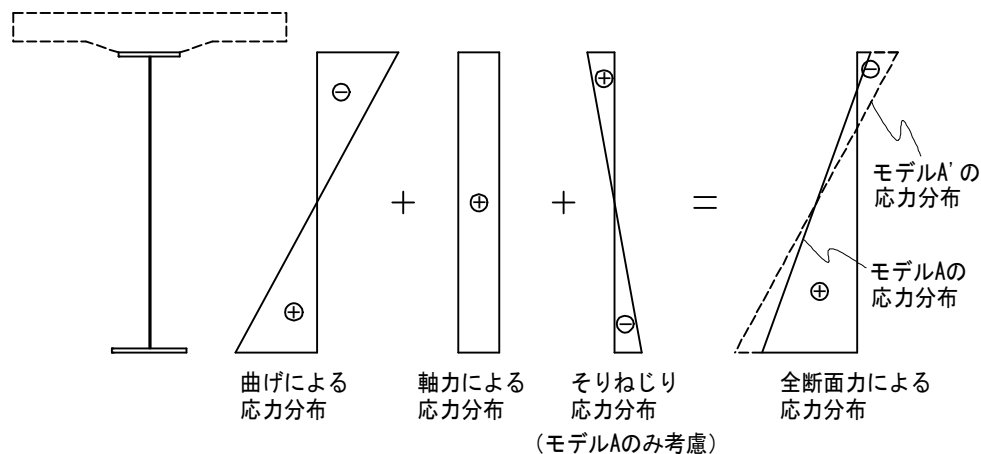
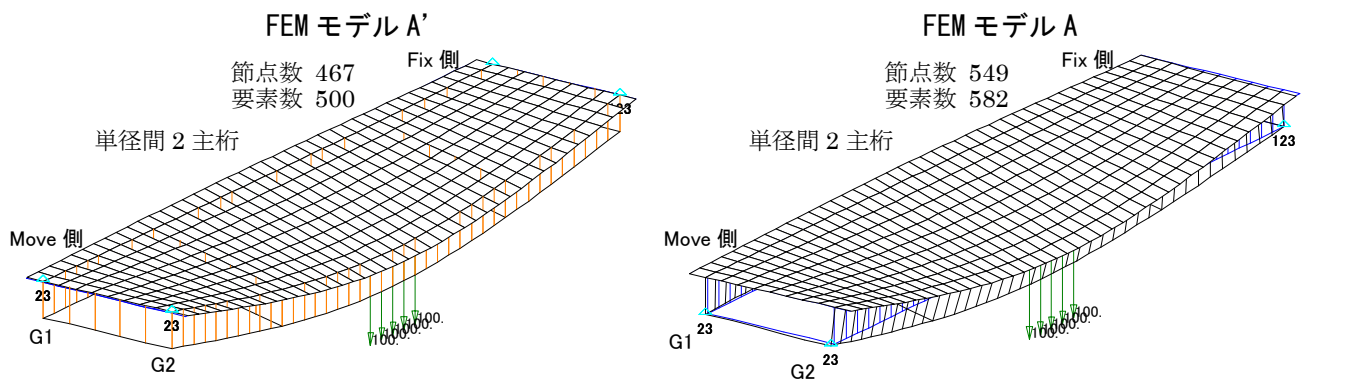
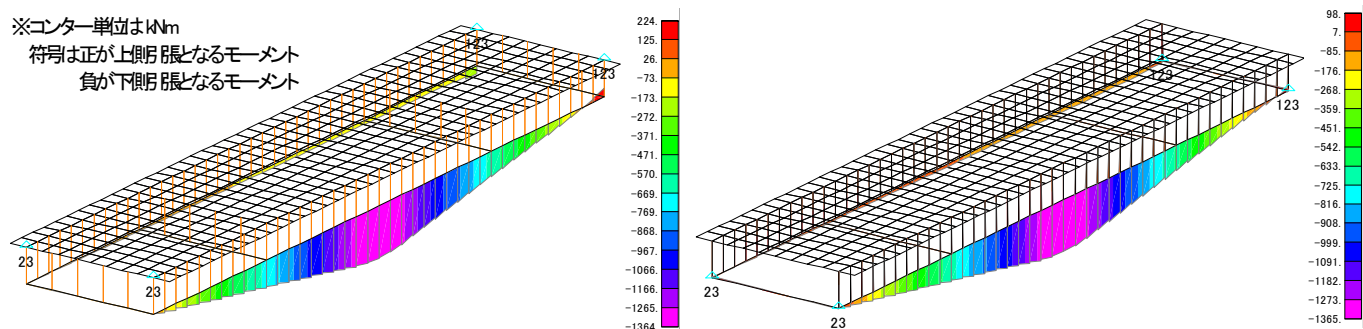


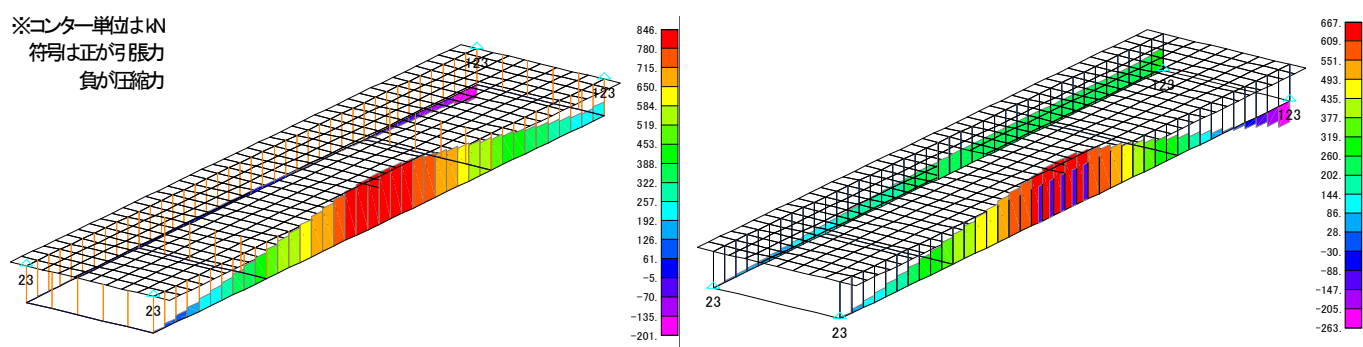
図-2.2.12 モデル A、A' の主桁応力分布の違い



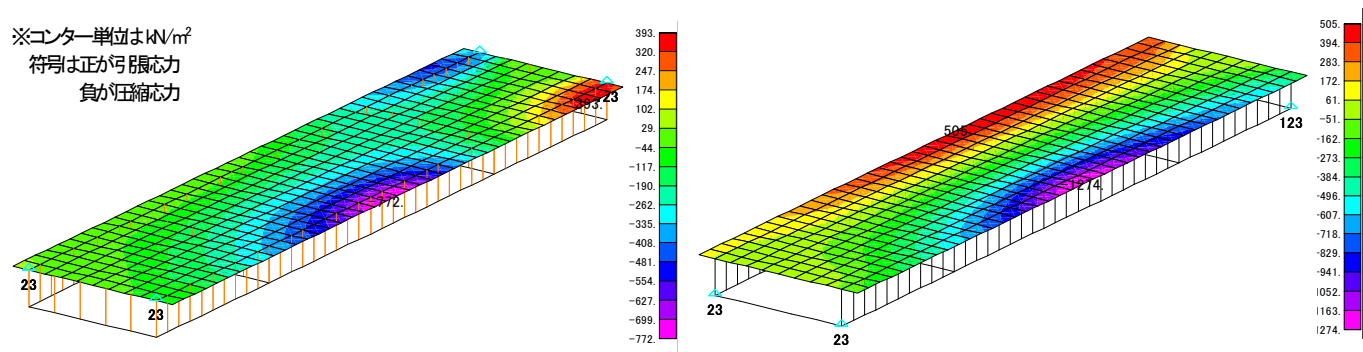
(a) 支間中央偏心载荷における全体変形



(b) 支間中央偏心载荷における主桁の鉛直曲げモーメント



(c) 支間中央偏心载荷における主桁の軸力



(d) 支間中央偏心载荷における床版の橋軸方向応力コンター

図-2.2.10 簡易な単径間 2 主桁モデルによる解析結果

なお、この擬似ボックス構造より発生するそりねじり分の剛性を格子モデルに付加させることで、格子モデルにおける荷重分配特性が改善されると考えられるが、橋軸方向に連続する主桁および床版、断続的に配置される横桁もしくは横構で形成される擬似ボックスのそりねじり定数を算出することは難しく、現時点では定式化できていない。

そこで、擬似ボックスとしてのそりねじり分を考慮して、格子合成モデルの主桁はり要素に入力されている純ねじり定数  $J$  を係数倍したときの感度分析を行った。合成桁断面の純ねじり定数は図-2.2.13 の算出モデルを基に(2.2.1)式を用いて算出した。なお、(2.2.1)式には表-2.2.1 で示した G2 桁の第 1 断面 (sec1) の諸元を純ねじり定数の例として示した。

図-2.2.14 に格子合成モデルの純ねじり定数を 1 倍、10 倍、100 倍したときの感度解析結果を示す。純ねじり定数を 10 倍とすることで、実測値および FEM モデル C の解析結果と良く一致している。

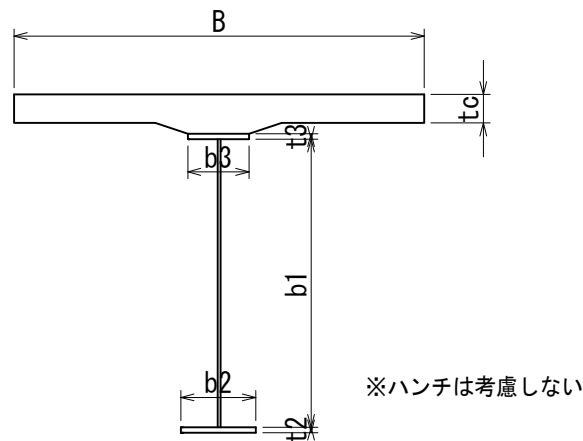


図-2.2.13 合成桁の純ねじり定数  $J$  の算出モデル

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{3} \sum_i \left( b_i \cdot t_i^3 \right) + \frac{1}{3n} \cdot B \cdot t_c^3 \\
 &= \frac{1}{3} \left( 2162 \times 12^3 + 460 \times 16^3 + 300 \times 22^3 \right) + \frac{1}{3 \times 5.4} \times 2600 \times 210^3 = 0.0015 m^4
 \end{aligned}
 \tag{2.2.1}$$

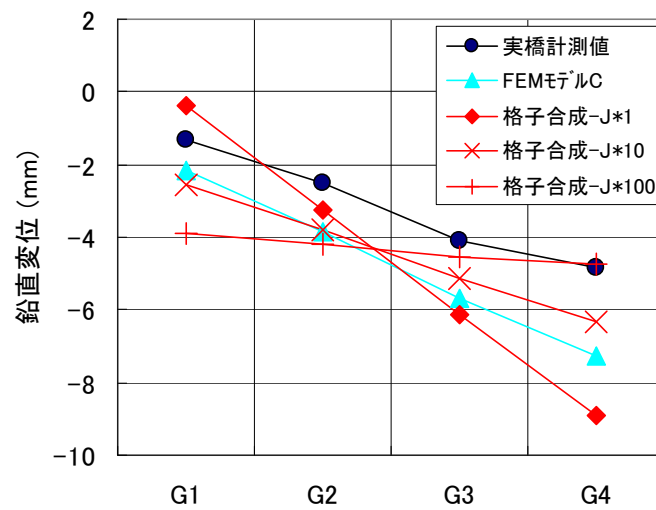
ここで、 $b_i$  : 鋼桁を構成する鋼板の長さ(mm)

$t_i$  : 鋼桁を構成する鋼板の板厚(mm)

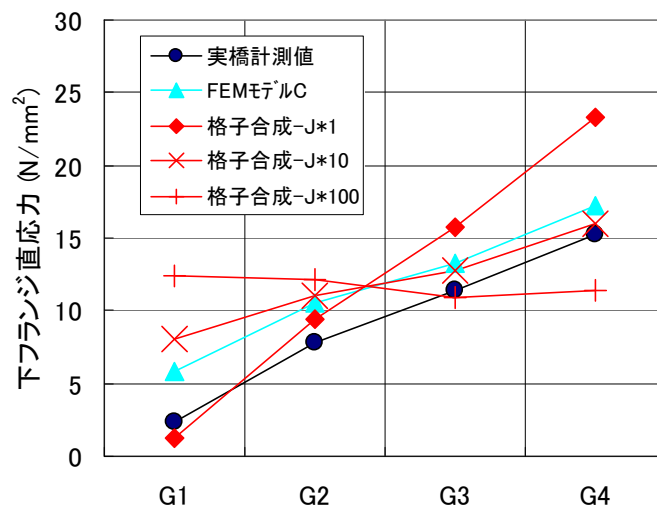
$B$  : 床版の幅(mm) ※ここでは全幅有効とした。

$t_c$  : 床版の厚さ(mm)

$n$  : 床版のせん断弾性係数  $G_c$  と鋼材のせん断弾性係数  $G_s$  の比 ( $=G_s/G_c$ )



(a) 支間中央の鉛直変位

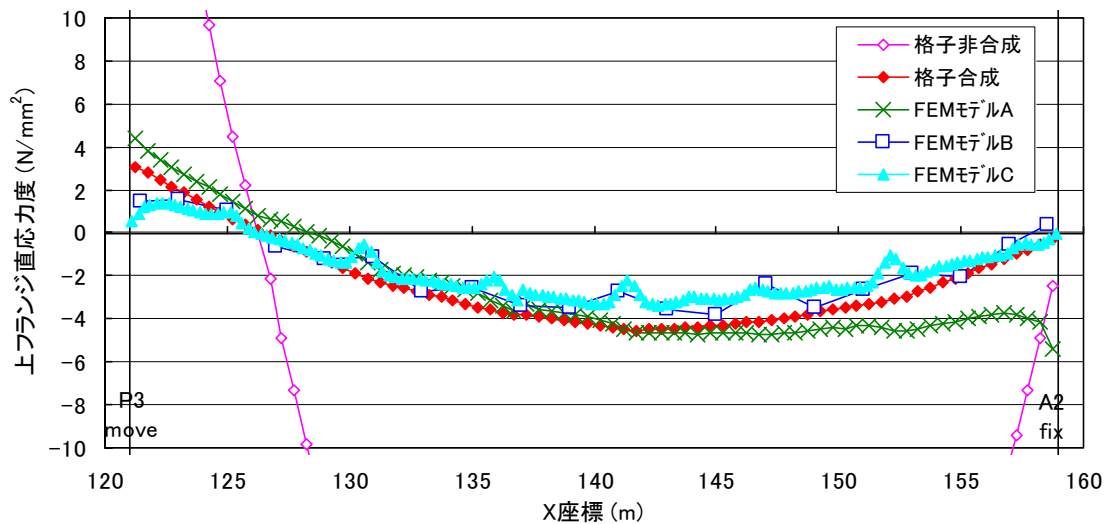


(b) 支間中央の下フランジ直応力

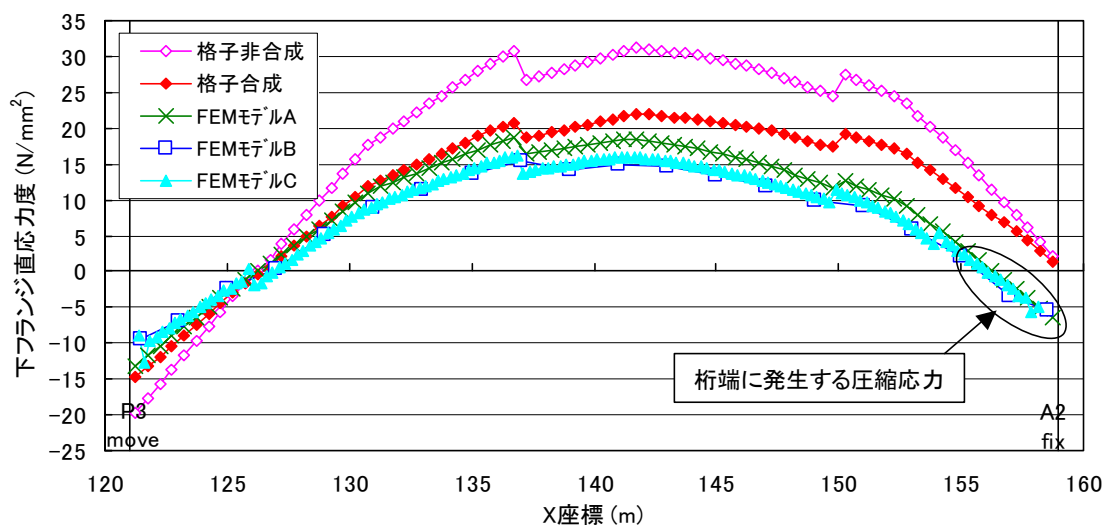
図-2.2.14 格子合成モデルの主桁ねじれ定数を係数倍したときの感度解析結果（载荷 CASE3）

## (2) 桁端部下フランジに発生する圧縮応力に関する補足説明

2.2.4 項では言及していないが、図-2.2.15 に示すように FEM モデル A、モデル B、モデル C では、固定支承側の桁端部下フランジに圧縮応力が発生している。この応力は、固定・可動の橋軸方向の支承条件を有し、鉛直荷重を受ける単純ばりもしくは連続ばりのはり理論に基づく解析では理論的に発生しない応力である。この桁端応力が発生する原因は、前項 2.2.5(1)の考察と同様に、プレートガーダーの断面が擬似的なボックス構造として挙動をすることによりそりねじり変形が発生し、A2 橋台側の橋軸方向の支承条件が拘束であることによりそりねじり応力が生じたためと考えられる。したがって、2.1.6 項で検討したような主桁 1 本の連続ばりの FEM モデルでは、そりねじり変形が小さいために桁端部に圧縮応力は発生しない。桁端部領域の部材設計で支配的となるほどの影響はないが、FEM 解析を設計に用いる場合の注意点の一つである。



(a) 上フランジ直応力の橋軸方向分布



(b) 下フランジ直応力の橋軸方向分布

図-2.2.15 載荷 CASE3 における G4 桁フランジ直応力の橋軸方向分布

### (3) 要素分割に関する検討

2.2.4 項の検討結果より、床版、主桁および横桁をシェル要素とする FEM モデル B、C のようなモデル化に際して、中間支点上では支承反力により応力状態が複雑となるため比較的細かい分割が必要となることがわかった。ここで、FEM モデル C の要素分割（フランジ幅方向 4 分割に対してアスペクト比 1:3 とした分割）が、中間支点上において妥当な解を与えるかどうかは検討の余地があるため、要素分割について追加検討を行った。

図-2.2.16 は主桁の要素分割の影響について、最大要素辺長とアスペクト比により整理した結果を示している。支間中央では要素サイズの影響を受けずに解析値はほぼ一定である。中間支点上では実測値と大きな差はないものの局所的な応力集中が生じるため要素サイズを小さくするに従って下フランジ直応力が増加する傾向が見られる。この中間支点上の下フランジに発生する応力集中に対する設計上の取扱い方法については 5 章で検討する。

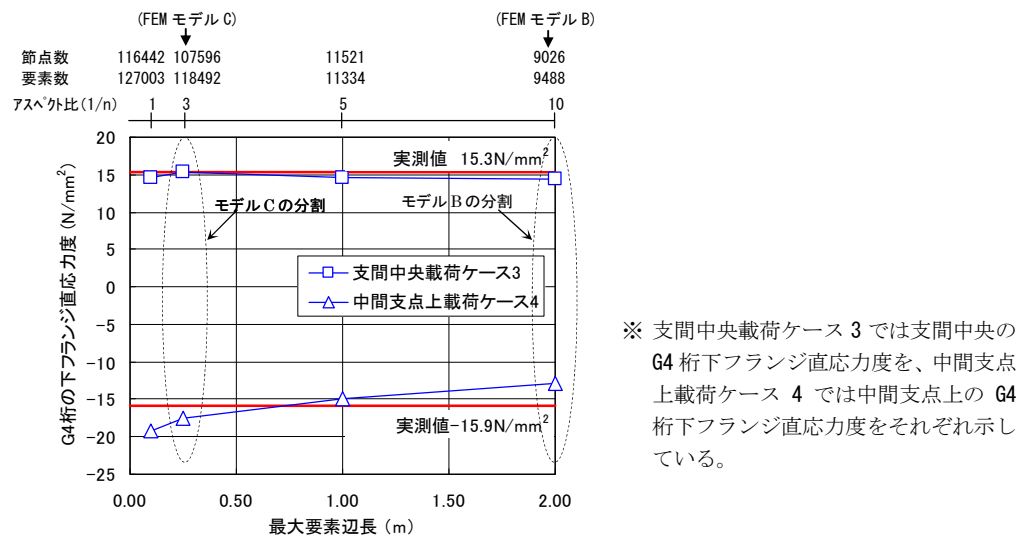


図-2.2.16 主桁をシェル要素とした場合の要素分割の影響

### 2.3 モデル化のまとめ

2.1 節および 2.2 節の検討結果から、鋼多主桁橋の主桁設計に立体 FEM 解析を適用する場合のモデル化手法を以下にまとめる。なお、ここで言う主桁設計に適用する場合とは、立体 FEM 解析結果を許容応力度法による主桁部材の設計に用いる場合のことを意味し、床版の設計に用いる場合や、局部応力を正確に求める場合のモデル化手法ではないことを付記しておく。

表-2.3.1 に立体 FEM 解析を主桁の設計に使用する場合のモデル化の方針を示す。また、図-2.3.1 に表-2.3.1 に従って作成した FEM モデルをそれぞれ示す。

主桁および横桁は、はり要素を用いる場合とシェル要素を用いる場合で、より解析精度の向上が期待できるシェル要素を用いることとした。要素分割については、フランジ幅方向を 4 分割、ウェブ高さ方向を 6 分割とし、橋軸方向の分割は、フランジ幅方向およびウェブ高さ方向の一辺に対しアスペクト比 1:5 以下とすることを基本とし、中間支点上については複雑な応力状態となり要素分割の影響を大きく受けるためアスペクト比 1:3 以下に分割することとした。また、支承部のモデル化は、剛体はり要素を使って支承幅と高さをピラミッド型で表し、集約節点に境界条件を与えることで、支承反力が支承幅内で分散することを表現した。

床版は、実務設計でのモデル化の手間を考慮してソリッド要素ではなく、シェル要素を用いることとした。主桁上フランジとの結合は、完全合成桁となるよう剛体はり要素を用いて結合し、したがって、主桁上の床版の要素分割は上フランジの要素分割と同じにした。主桁間（フランジ端から端の間）の要素分割は 4 分割とし、張出し部もこれと同程度とした。ハンチ、壁高欄、地覆については、構造部材としてその剛性を期待しない従来設計の考えを踏襲して、モデル化していない。

2 次部材のモデル化として、特に横荷重載荷時における主桁ウェブの応力性状に影響を与える垂直補剛材をシェル要素でモデル化した。水平補剛材は主桁ウェブの許容応力度以下の応力性状に与える影響は小さいと判断し、モデル化しなかった。下横構は、偏心荷重に対する主桁のねじれ作用に与える影響が無視できないため、トラス要素でモデル化した。また、継手部の添接板や高力ボルト、ガセットプレートなどについては、主桁の平均応力に与える影響が小さいものと考え、モデル化は行わなかった。

表-2.3.1 設計で使用するための FEM モデル化の方針

| 部材名称       | 使用要素  | 要素分割 | アスペクト比  | 重量 |
|------------|-------|------|---------|----|
| 床版         | 床版    | □    | 床版支間4分割 | 考慮 |
|            | ハンチ   |      |         | 〃  |
|            | 壁高欄   |      |         | 〃  |
|            | 地覆    |      |         | 〃  |
| 主桁         | ウェブ   | □    | 全高6分割   | 〃  |
|            | フランジ  | □    | 全幅4分割   | 〃  |
|            | 垂直補剛材 | □    | 全幅1分割   | 〃  |
|            | 水平補剛材 |      |         | 〃  |
| 横桁         | ウェブ   | □    | 全高6分割   | 〃  |
|            | フランジ  | □    | 全幅2分割   | 〃  |
| 横構         | 下横構   | ---  |         | 〃  |
| 高力ボルト継手部   |       |      |         | 無視 |
| 架設用スライドレール |       |      |         | 〃  |
| (結合材)      | —     |      |         | 〃  |

凡例) □ : シェル要素      --- : トラス要素      — : 剛体はり要  
空欄はモデル化していない部材を示す。

※ 結合材とは床版と主桁上フランジの合成作用を表すための部材のこと。

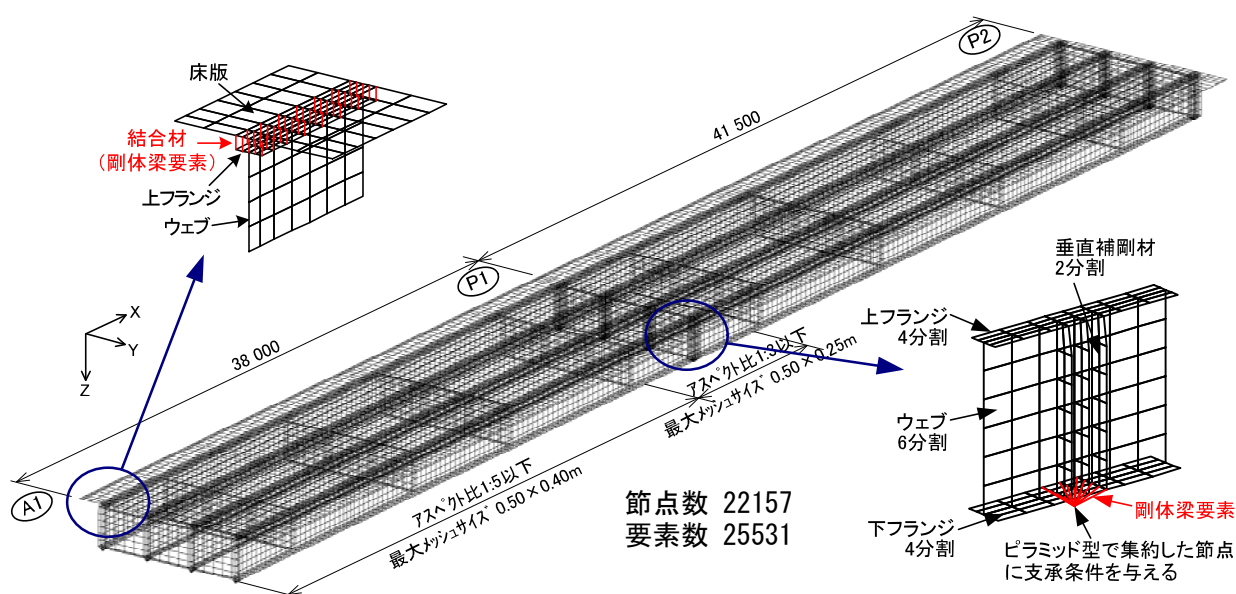


図-2.3.1 設計で使用する FEM 解析モデル

### 3 章 格子解析と F E M解析による影響線載荷の比較

#### 3.1 検討内容

本章では、同一の対象橋梁に対して、FEM 解析と格子解析により影響線を算出し、その相違を比較するとともに、影響線を用いて着目部位が最も不利になる載荷状態およびその状態で発生する主桁の死荷重応力および活荷重応力を比較する。FEM 解析による影響線の作成にあたっては、本研究で開発した FEM 影響線解析プログラムを用いた。なお、それらの比較は、中間支点上の床版の合成作用に着目して以下の 3 ケースに対して検討を行う。

CASE1：床版のひび割れにより床版コンクリートの剛性を無視して設計する場合  
(RC 床版を有する連続合成桁の設計を想定：以下、合成桁 RC と称する)

CASE2：床版に引張応力が発生しても床版コンクリートを有効として設計する場合  
(PC 床版を有し、且つ、橋軸方向にプレストレスする連続合成桁の設計を想定：以下、合成桁 PC と称する)

CASE3：全橋にわたって床版の合成作用を無視して設計する場合  
(連続非合成桁の設計を想定：以下、非合成桁と称する)

### 3.1.1 対象橋梁と FEM 解析モデル

対象橋梁は 2.2 節で検討対象とした 4 径間連続非合成鈑桁橋（図-2.2.1）に対して、検討する 3 ケースに即して以下の変更を加えたものとした。

CASE1 では、非合成桁として設計されている主桁を、鋼材・床版重量を鋼断面のみで抵抗し橋面荷重（舗装、壁高欄など）・活荷重に対して合成断面で抵抗する活荷重合成桁に変更した。また、床版をプレキャスト PC 床版から設計基準強度  $30\text{N/mm}^2$  の RC 床版に変更し、ひび割れを許容するプレストレスしない連続合成桁橋とした。CASE2 では、活荷重合成桁に変更するのみで、床版は設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  のプレキャスト PC 床版のままとした。CASE3 では、床版を設計基準強度  $30\text{N/mm}^2$  の RC 床版に変更するのみで、主桁は非合成桁のままとした。

これらの条件変更の下、計算を簡略化するため 4 径間のうち 2 径間のみを対象に（支間割は  $38\text{m}+38\text{m}$  の等径間、橋軸方向の支承条件は可動+可動+固定とした）、格子解析により再設計した桁断面に対して FEM モデルを作成した。要素種選択、要素分割数等のモデル化方針および解析モデルは、2 章で示した表-2.3.1 および図-2.3.1 のとおりである。ただし、CASE3 の連続非合成桁の設計においては、床版と上フランジとを繋ぐ結合材を剛な軸剛性のみを有するトラス要素 CROD<sup>14)</sup>とし、床版に発生するせん断力のみ主桁に伝達するモデルとした。

### 3.1.2 格子解析をベースとした連続合成桁の設計基準

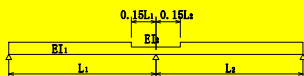
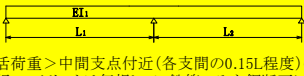
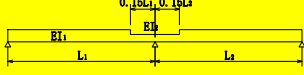
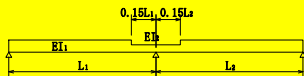
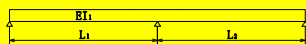
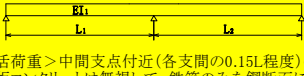
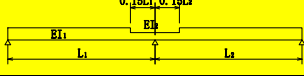
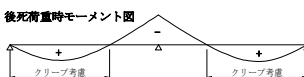
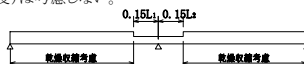
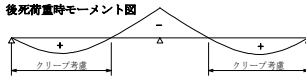
FEM 解析を連続合成桁の主桁設計に適用することに先立ち、既往の連続合成桁の設計基準から活荷重の載荷方法、床版ひび割れ幅の制御方法、ずれ止めの設計方法などの調査を行った。国内の連続合成桁設計に関する主な技術資料としては以下の 4 つが挙げられる。

- ① (社)日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)，1996.3<sup>23)</sup>
- ② 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計要領 IV その他，2001.4<sup>19)</sup>
- ③ (社)日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成 2 主桁橋の設計例と解説，2001.7<sup>24)</sup>
- ④ (財)高速道路技術センター：PC 床版鋼連続合成 2 主桁橋の設計・施工マニュアル，2002.3<sup>25)</sup>

表-3.1.1 にそれぞれの設計基準の内容を比較したものを示す。

表-3.1.1 既往の連続合成桁設計基準の内容比較

| 項目                   | PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)<br>平成8年3月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                                                 | 鋼構造物設計要領 IVその他<br>平成13年4月 名古屋高速道路公社                                                                                                                                                               | PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の<br>設計例と解説 平成13年7月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                                                           | PC床版鋼連続合成2主桁橋の設計・施工マニュアル<br>平成14年3月 (財)高速道路技術センター                                                                                                                                                               |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 適用範囲              | 橋軸方向にはプレストレスしない場所打ちPC床版を有する連続合成鋼1桁(鋼桁本数2～3本の少数主桁)                                                                                                                                   | P1～2<br>・現場打ちRC床版を有する鋼1断面および鋼箱断面プレートガーダー<br>・床版支間3.3m以下<br>・橋軸方向にプレストレスする場合はジャッキアップダウン工法を推奨                                                                                                       | 1.1.1<br>・場所打ちPC床版を有する連続合成鋼2主1桁(橋軸方向RC構造、橋軸直角方向PRC構造)<br>・床版支間5.5m<br>・適用支間50m                                                                                                                     | P1, P4, P5<br>・場所打ちPC床版を有する連続合成鋼2主1桁(橋軸方向RC構造、橋軸直角方向PRC構造)<br>・床版支間6.0m程度<br>・適用支間60m以下<br>・橋軸方向にプレストレスする場合はジャッキアップダウン工法を使用                                                                                     |
| 2. 設計一般              |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                 |
| 2.1 設計の基本            | 設計は許容応力度法を原則とするが、負の曲げモーメントを受ける床版コンクリートに対してはひび割れを許容し、ひび割れ幅の制御を取り入れた設計(全ての荷重組み合わせで共通)                                                                                                 | P7<br>ひび割れ制限の考え方<br>①D+(PS) : ひび割れを許さない<br>②D+(PS)+CR+SH : ひび割れを許さない<br>③D+(PS)+CR+SH+L : ひび割れ幅制限<br>D: 死荷重、L: 活荷重、PS: プレストレス<br>CR: クリーブ、SH: 乾燥収縮                                                | 1.2.1<br>中間支点上の床版は、RC構造であるため、ひび割れを許容し、ひび割れ幅の制御を取り入れた設計を行う(全ての荷重組み合わせで共通)                                                                                                                           | P69～70<br>中間支点部の床版設計に関してランク付けされている。<br>＜橋軸方向がPRC程度の構造の場合＞<br>Cランク: 活荷重以外の主荷重で引張応力を許さない<br>主荷重+温度差でひび割れ幅制限を行う<br>Dランク: 活荷重以外の主荷重でひび割れを許さない<br>主荷重+温度差でひび割れ幅制限を行う<br>＜橋軸方向がRC構造の場合＞<br>Eランク: 活荷重以外の主荷重でひび割れ幅制限を行う |
| 2.2 仮定剛度と仮定鋼重        | 特に規定されていない                                                                                                                                                                          | 仮定剛度と実剛度の比: $\pm 10\%$ 以下<br>仮定鋼重と実鋼重の比: $\pm 10\%$ 以下                                                                                                                                            | 1.3.1<br>特に記述されていない                                                                                                                                                                                | 仮定剛度と実剛度の比: $\pm 10\%$ 以下<br>仮定鋼重と実鋼重の比: $\pm 5\%$ 以下                                                                                                                                                           |
| 3. 床版                |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                 |
| 3.1 使用材料(床版コンクリート)   | $\sigma_{ck}$ は30N/mm <sup>2</sup> 以上で、35N/mm <sup>2</sup> を標準                                                                                                                      | P5<br>$\sigma_{ck}$ =30N/mm <sup>2</sup> を標準                                                                                                                                                      | 1.4.1<br>$\sigma_{ck}$ =40N/mm <sup>2</sup>                                                                                                                                                        | P3<br>$\sigma_{ck}$ =40N/mm <sup>2</sup> を標準                                                                                                                                                                    |
| 3.2 鋼材とコンクリートのヤング係数比 | ＜主桁の弾性変形、不静定力および断面力を算出する場合の鋼桁と床版コンクリートのヤング係数＞<br>死荷重、活荷重、温度変化: $n=7$<br>クリープ: $n=14$<br>乾燥収縮: $n=21$<br>＜主桁の応力計算を行う場合のヤング係数比＞<br>上記に同じ<br>＜床版の応力を算出する場合の鉄筋とコンクリートのヤング係数比＞<br>$n=15$ | P9, P53<br>H8橋建要領とほぼ同じ<br>プレストレス: $n=7$ を追加                                                                                                                                                       | 1.3.2<br>＜主桁の弾性変形、不静定力および断面力を算出する場合の鋼桁と床版コンクリートのヤング係数＞<br>全荷重とも $n=7$<br>＜主桁の応力計算を行う場合のヤング係数比＞<br>死荷重、活荷重、温度変化: $n=7$<br>クリープ: $n=14$<br>乾燥収縮: $n=21$<br>＜床版の応力を算出する場合の鉄筋とコンクリートのヤング係数比＞<br>$n=15$ | P24, P27<br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                                           |
| 3.3 床版の鉄筋量と配置        | ＜中間支点部(負曲げ領域)＞<br>鉄筋量: ひび割れ制限の照査を満足する量を配置<br>配置: 外的荷重による応力勾配と乾燥収縮による応力勾配が逆となるため、床版の上下で同ピッチ配置<br>＜支間中央部＞<br>鉄筋量: ブロック施工の順序や、乾燥収縮、温度変化によって引張応力を受ける可能性があるため、最小鉄筋量1.0%以上を配置             | P10<br>＜中間支点部(負曲げ領域)＞<br>鉄筋量: 道示Ⅱで規定されている量を配置(最小鉄筋量2.0%、周長率0.0045mm/mm <sup>2</sup> 以上)<br>配置: 床版の上下で同ピッチ配置<br>死荷重時の曲げモーメントの分布に対し、圧縮側に30D以上定着<br>＜支間中央部＞<br>鉄筋量: 最小鉄筋量1.0%<br>配置: 上側は下側の1/2の鉄筋を配置 | 1.4.3<br>＜中間支点部(負曲げ領域)＞<br>鉄筋量: 道示Ⅱで規定されている量を配置(最小鉄筋量2.0%、周長率0.0045mm/mm <sup>2</sup> 以上)<br>配置: 記述なし<br>＜支間中央部＞<br>特に記述なし                                                                         | P69<br>＜中間支点部(0.15L区間)＞<br>鉄筋量: 最小鉄筋量2.0%、長支間床版には道示Ⅱの周長率の規定は適さないため除外<br>配置: 床版の上下で同ピッチ配置<br>最小鉄筋量は0.15L区間に配置<br>＜支間中央部＞<br>鉄筋量: 最小鉄筋量1.0%<br>配置: 0.15L区間以外に配置                                                   |
| 3.4 床版の有効幅           | 断面力算出時、応力計算時ともに道示Ⅱの有効幅を考慮して合成断面の断面剛性を算出する。                                                                                                                                          | P11<br>後死荷重・活荷重の断面力算出時は道示Ⅱの有効幅<br>不静定モーメント算出時は全幅有効<br>応力計算のときは道示Ⅱの有効幅                                                                                                                             | 1.5.3<br>1.5.4<br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                        | P47～49<br>P92～93<br>断面力算出時、応力計算時ともに道示Ⅱの有効幅を考慮して合成断面の断面剛性を算出する。<br>主桁間隔の大きい少数主桁橋に対しても道示Ⅱの規定を適用できるか、立体FEM解析により検討している。                                                                                             |
| 3.5 主桁作用と床版作用との重ね合わせ | 照査法: 床版作用、主桁作用のそれぞれに対して最も不利になる載荷状態について応力度を算出し、その合計に対して照査<br>許容応力度: コンクリートは40%割増し<br>鉄筋は40%割増し(道示Ⅱでは20%)                                                                             | P11～12<br>照査法: H8橋建要領と同じ<br>許容応力度: コンクリートは40%割増し<br>鉄筋は20%割増し                                                                                                                                     | 1.4.7<br>照査法: H8橋建要領と同じ<br>許容応力度: コンクリートは40%割増し<br>鉄筋は20%割増し                                                                                                                                       | P69<br>照査法: 床版作用(T荷重)＋主桁作用(L荷重)×0.6の重ね合わせに対して照査<br>許容応力度: コンクリートも鉄筋も割増しは考慮しない                                                                                                                                   |
| 3.6 クリーブ、乾燥収縮、温度差    | 全て道示Ⅱに準拠<br>クリープ: クリーブ係数 $\phi$ 1=2.0<br>乾燥収縮: 最終収縮度 $\epsilon_s=20 \times 10^{-5}$<br>クリープ係数 $\phi$ 2=4.0<br>温度差: 温度差10℃<br>線膨張係数 $\alpha=1.2 \times 10^{-6}$                      | P12～13<br>特に規定されていない(H8橋建要領に準拠)                                                                                                                                                                   | H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                                          | P28<br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                                                |

| 項目                                      | PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)<br>平成8年3月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                         | 鋼構造物設計要領 IVその他<br>平成13年4月 名古屋高速道路公社                                                                                                                          | PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の<br>設計例と解説 平成13年7月 (社)日本橋梁建設協会 | PC床版鋼連続合成2主桁橋の設計・施工マニュアル<br>平成14年3月 (財)高速道路技術センター                                                                                                                                                                                                                                        |                  |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 4. 解析                                   |                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                              |                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                  |
| 4.1 床版の打設ステップを考慮した解析                    | 特に規定されていない(床版死荷重を全量打設終了後に載荷。打設ステップは考慮しない)<br>変形の算出においては、施工順序の影響を考慮                                                                                          | P32 床版死荷重による断面力および変形の算出においては、打設ステップを考慮した解析を行う(逐次合成の施工時死荷重解析)。<br>打設第2ステップ以降の断面力算出においてはそれ以前に打設した床版範囲を合成断面とする。<br>クリープ、乾燥収縮および温度差は、床版の全量打設完了後から発生するものとして解析を行う。 | 1.5.1 特に記述されていない<br>1.5.2 応力照査、変形照査ともに打設ステップは考慮していない     | H13名公社要領と同じ P49～51                                                                                                                                                                                                                                                                       |                  |
| 4.2 後死荷重・活荷重に対する断面力算出時の仮定剛度             | 中間支点付近(各支間の0.15L程度)の床版コンクリートは無視して、鉄筋のみを鋼断面に考慮<br>                          | P15 中間支点付近も含む橋梁全長にわたり合成断面(鋼桁+床版コンクリート)を考慮<br>                              | 1.5.3 H13名公社要領と同じ                                        | P24, P90 <後死荷重>中間支点付近も含む橋梁全長にわたり合成断面(鋼桁+床版コンクリート)を考慮<br><br><活荷重>中間支点付近(各支間の0.15L程度)の床版コンクリートは無視して、鉄筋のみを鋼断面に考慮<br> | P45～47<br>P49～51 |
| 4.3 後死荷重・活荷重に対する弾性変形の算出時の仮定剛度           | 中間支点付近(各支間の0.15L程度)の床版コンクリートは無視して、鉄筋のみを鋼断面に考慮<br><br>※道示Ⅱでは合成断面により算出とされている | P15 中間支点付近も含む橋梁全長にわたり合成断面(鋼桁+床版コンクリート)を考慮<br>                              | 1.5.3 H13名公社要領と同じ                                        | P24, P90 <後死荷重>中間支点付近も含む橋梁全長にわたり合成断面(鋼桁+床版コンクリート)を考慮<br><br><活荷重>中間支点付近(各支間の0.15L程度)の床版コンクリートは無視して、鉄筋のみを鋼断面に考慮<br> | P45～47<br>P49～51 |
| 4.4 クリープ、乾燥収縮および温度差に対する不静定モーメント算出時の仮定剛度 | 中間支点付近も含む橋梁全長にわたり合成断面(鋼桁+床版コンクリート)を考慮<br>                                  | P15 H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                | 1.5.4 H8橋建要領と同じ                                          | P24, P90 H8橋建要領と同じ P45～47<br>P49～51                                                                                                                                                                                                                                                      |                  |
| 4.5 クリープを考慮する範囲                         | 後死荷重時の正曲げモーメント領域のみにに対してコンクリートのクリープによる応力移行を考慮<br>後死荷重時モーメント図<br>          | P18 H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                | 1.5.4 H8橋建要領と同じ                                          | P27 特に規定されていない                                                                                                                                                                                                                                                                           |                  |
| 4.6 乾燥収縮を考慮する範囲                         | 支間部のみ考慮し、中間支点付近(各支間の0.15L程度)は考慮しない。<br>                                  | P19 後死荷重時の正曲げモーメント領域のみにに対してコンクリートのクリープによる応力移行を考慮<br>後死荷重時モーメント図<br>      | 1.5.4 H8橋建要領と同じ                                          | P27 特に規定されていない                                                                                                                                                                                                                                                                           |                  |
| 4.7 温度差を考慮する範囲と計算ケース                    | 中間支点付近も含む橋梁全長にわたり温度差を考慮する。<br>鋼桁が高温になる場合と床版コンクリートが高温になる場合の2ケースについて計算する。                                                                                     | P17 H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                | 1.5.4<br>1.6.6 H8橋建要領と同じ                                 | P27 H8橋建要領と同じ P49～51                                                                                                                                                                                                                                                                     |                  |

| 項目                              | PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)<br>平成8年3月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 鋼構造物設計要領 IVその他<br>平成13年4月 名古屋高速道路公社                                                                                                                                                                                                                                                                                     | PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の<br>設計例と解説 平成13年7月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                                                        | PC床版鋼連続合成2主桁橋の設計・施工マニュアル<br>平成14年3月 (財)高速道路技術センター                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 5. 応力計算                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |        |
| 5.1 後死荷重・活荷重に対する応力計算時の断面        | 正曲げモーメント:合成断面で抵抗<br>負曲げモーメント:鉄筋を含めた鋼断面で抵抗                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | P17<br><br>床版に発生する引張応力度がコンクリートの曲げひび割れ強度 $\sigma_{ct}/3.5$ を超過する領域:鋼断面で抵抗<br>それ以外の領域:合成断面で抵抗<br>$\sigma_{ct}=0.6/(h^{1/3})\cdot0.23(\sigma_{ck})^{2/3}$                                                                                                                                                                  | 1.6.1<br><br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                          | P26<br><br>H8橋建要領と同じ<br><br>P49～51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |        |
| 5.2 クリープ、乾燥収縮および温度差に対する応力計算時の断面 | 単ケース毎の荷重により応力計算するのではなく、荷重を組み合わせた状態(主荷重)での応力で、合成断面にするか鋼断面にするか判断する。この際、床版コンクリートの応力度が引張応力になった場合は、鋼断面で応力計算する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | P15<br><br>単ケース毎の荷重により応力計算するのではなく、荷重を組み合わせた状態(主荷重)での応力で、合成断面にするか鋼断面にするか判断する。この際、床版コンクリートの応力度が $\sigma_{ct}/3.5$ 以上の引張応力になった場合は、鋼断面で応力計算する。                                                                                                                                                                              | 1.6.1<br><br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                          | P59<br><br>H8橋建要領と同じ<br><br>P45～47<br>P49～51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |        |
| 5.3 発生曲げモーメントの取り扱い              | 特に規定されていない(発生した曲げモーメントをそのまま応力計算に用いる)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 後死荷重以降の全ての荷重ケースにおいて、中間支点上の発生曲げモーメントは90%に低減する。                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1.6.3<br><br>後死荷重以降の全ての荷重ケースにおいて、中間支点上の発生曲げモーメントは道示Ⅲに従い低減する。<br><br>$M_1=M-qa^2/8$ ただし、 $M_1\geq0.9M$<br>M1:中間支点上の設計曲げモーメント<br>M:中間支点上の曲げモーメント<br>$q=R/a$<br>R:中間支点の反力<br>a:断面の図心位置における反力の橋軸方向幅 | P45～46<br>P91<br><br>H8橋建要領と同じ<br><br>P45～47<br>P49～51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |
| 6. ひび割れ照査                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |        |
| 6.1 許容ひび割れ幅                     | 0.2mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | P10,<br>P40～41<br><br>土木学会コンクリート標準示方書に従い、<br>$W_a=0.005C \leq 0.2\text{mm}$<br>C: ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり(mm)                                                                                                                                                                                                                  | 1.4.5<br><br>H14技術センターと同じ                                                                                                                                                                       | P69～70<br><br>土木学会コンクリート標準示方書の特に厳しい腐食環境の規定に従い、<br>$W_a=0.0035C$<br>C: ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり(mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | P75    |
| 6.2 ひび割れ照査に用いる荷重の組み合わせ          | 死荷重D+活荷重L                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | P38<br><br>死荷重D+活荷重L+クリープCR+乾燥収縮SH+(プレストレスPS)                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1.4.6<br><br>計算例は後死荷重のみ                                                                                                                                                                         | P69～70<br><br>死荷重D+活荷重L×0.6+クリープCR+乾燥収縮SH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | P73～75 |
| 6.3 ひび割れ照査式                     | 支間部:初期ひび割れ状態<br>$\sigma_s = \sigma_{ct} \cdot K_c / P \leq \sigma_{wa}$<br>$\sigma_s$ : ひび割れ位置における鉄筋の応力度<br>$\sigma_{ct}$ : 有効引張強度(=0.8 $\sigma_{ct}$ )<br>Kc:床版内における応力勾配<br>P:鉄筋比(=As/Ac)<br>$\sigma_{wa}$ : ひび割れ幅と鉄筋応力の関係図より求めた許容ひび割れ幅が発生するときの鉄筋応力<br>中間支点上付近:完全ひび割れ状態<br>$\sigma_s = \sigma_{sn} + 0.4 \sigma_{ct} / (\alpha_{st} \cdot P) \leq \sigma_{wa}$<br>$\sigma_{sn}$ :鉄筋+鋼桁の断面で算出した鉄筋応力<br>$\alpha_{st}$ : (鋼桁+鉄筋のAf I0)/(鋼桁のAs Is) | P35～41<br><br>土木学会コンクリート標準示方書に従い、<br>$W = \{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \cdot (\sigma_s / E_s + \epsilon') \leq W_a$<br>c: ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり(mm)<br>Cs:鉄筋中心間隔(mm)<br>$\phi$ :鉄筋径(mm)<br>$\sigma_s$ :鉄筋+鋼桁の断面で算出した鉄筋応力<br>Es:鉄筋のヤング係数(N/mm2)<br>$\epsilon'$ :コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、一般に $150 \times 10^{-6}$ | 1.4.6<br><br>H8橋建要領と同じ                                                                                                                                                                          | P69～70<br><br>基本的には土木学会コンクリート標準示方書に従うが、テンションスティピングを考慮する。<br>$W = \{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \cdot (\sigma_{se} / E_s + \epsilon') \leq W_a$<br>$\sigma_{se} = \sigma_s - \beta \sigma_{ct} \{1 / \rho_s - 1 / (\rho_s \alpha_{st})\}$<br>c: ひび割れに抵抗する鉄筋の純かぶり(mm)<br>Cs:鉄筋中心間隔(mm)<br>$\phi$ :鉄筋径(mm)<br>$\sigma_{se}$ :テンションスティピングを考慮した鉄筋平均応力度<br>Es:鉄筋のヤング係数(N/mm2)<br>$\epsilon'$ :コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、一般に $150 \times 10^{-6}$<br>$\sigma_s$ :鉄筋+鋼桁の断面で算出した鉄筋応力<br>$\beta$ :テンションスティピングによる付着の程度を表す係数=0.2<br>$\sigma_{ct}$ :コンクリート有効引張強度<br>$\rho_s$ :鉄筋比<br>$\alpha_{st}$ : (鋼桁+鉄筋のAf I0)/(鋼桁のAs Is) | P76～79 |

| 項目                   | PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)<br>平成8年3月 (社)日本橋梁建設協会                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 鋼構造物設計要領 IVその他<br>平成13年4月 名古屋高速道路公社                                                        | PC床版を有するプレストレスしない連続合成2主桁橋の<br>設計例と解説 平成13年7月 (社)日本橋梁建設協会 | PC床版鋼連続合成2主桁橋の設計・施工マニュアル<br>平成14年3月 (財)高速道路技術センター                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. ずれ止めの設計           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 7.1 ずれ止めの種類、径、最大最小間隔 | 種類: φ 19、φ 22、φ 25、全高150mm程度の頭つきスタッドジベル<br>最大間隔: 床版厚の3倍、または60cm以下<br>最小間隔(橋軸方向): 5d(d: 軸径)、または10cm以上<br>最小間隔(直角方向): d+3cm                                                                                                                                                                                                                                         | P25<br>種類: φ 19、φ 22の頭つきスタッドジベル<br>最大間隔: 規定なし(H8橋建と同じ)<br>最小間隔: 規定なし(H8橋建と同じ)              | 1.6.5<br>特に記述されていない                                      | 種類: φ 19、φ 22の頭つきスタッドジベル<br>最大間隔: 60cm以下(床版厚の3倍の規定は削除)<br>最小間隔(橋軸方向): 5d(d: 軸径)、または10cm以上<br>最小間隔(直角方向): d+3cm                                                                                                                                                                        |
| 7.2 桁端部の許容せん断力       | 方針: 乾燥収縮および温度差により生じるせん断力は、床版の自由端部において床版の有効幅の範囲に設けるずれ止めで負担させる。<br>許容せん断力:<br>$Q_a = 9.4d^2 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5)$<br>$Q_a = 1.72dH \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d < 5.5)$<br>Q <sub>a</sub> : スタッドの許容せん断力(N/本)<br>d: スタッドの軸径(mm)<br>H: スタッドの全高(mm)<br>σ <sub>ck</sub> : 設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )                                                | P24, P26<br>道示の規定に従う(H8橋建要領と同じ)<br>照査に用いるせん断力には、中間支点の拘束により発生する不静定曲げモーメントによるせん断力を考慮することを明文化 | 1.6.5<br>特に記述されていない                                      | 方針: 乾燥収縮および温度差により生じるせん断力は、床版の自由端部において主桁間隔(主桁間隔 ≥ 支間の合計長 L/10 のときは L/10) の範囲に設けるずれ止めで負担させる。<br>許容せん断力: H/d ≥ 5.5 を前提として<br>$Q_a = 12.0d^2 \sqrt{\sigma_{ck}}$<br>Q <sub>a</sub> : スタッドの許容せん断力(N/本)<br>d: スタッドの軸径(mm)<br>H: スタッドの全高(mm)<br>σ <sub>ck</sub> : 設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> ) |
| 7.3 中間支点部のせん断耐力      | 破壊状態に対する照査式:<br>$n = (A_c \cdot \sigma_{ck} + A_s \cdot \sigma_y) / Q_r$<br>$Q_r = 2.5Q_a$<br>n: ずれ止め必要本数<br>A <sub>c</sub> : 床版コンクリートの有効断面積<br>σ <sub>ck</sub> : コンクリートの圧縮強度(設計基準強度)<br>A <sub>s</sub> : 鉄筋の断面積<br>σ <sub>y</sub> : 鉄筋の降伏応力<br>Q <sub>r</sub> : スタッドジベルの設計せん断耐力<br>Q <sub>a</sub> : スタッドジベルの許容せん断力<br><br>※中間支点部のずれ止めは許容応力度法に基づく照査も行う(橋軸方向の照査のみ) | P26~29<br>特に規定されていない<br>許容応力度法による照査のみ行う(橋軸方向の照査のみ)                                         | 特に記述されていない                                               | 特に規定されていない<br>許容応力度法による照査のみ行う(橋軸方向の照査のみ)                                                                                                                                                                                                                                              |
| 7.4 横桁取付部のずれ止めの引抜き照査 | 少数主桁では設計上無視できない橋軸直角方向の曲げモーメントが作用するため、ずれ止めに発生する引抜き力の照査を行う                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | P29<br>特に規定されていない                                                                          | 特に記述されていない                                               | 少数主桁では設計上無視できない橋軸直角方向の曲げモーメントが作用するため、ずれ止めに発生する引抜き力の照査を行う                                                                                                                                                                                                                              |
|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                            |                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

※            は、本章における影響線載荷の比較を行うにあたって特に関連する項目を示す。

### 3.1.3 FEM 解析を連続合成桁の主桁設計に適用する場合の考え方

連続合成桁の設計では、負曲げモーメントの作用する中間支点上における床版の合成作用の取扱い方が重要となるが、本検討における格子解析を用いた場合の方法は、前項①の設計基準<sup>23)</sup>（特に表-3.1.1で網掛けした項）に従い、図-3.1.1に示す方法とした。この方法は、活荷重に対する断面力の算出にあたっては中間支点から両側支間長の15%領域を「鉄筋+鋼断面」とし、残りの領域を合成断面とした仮定剛度により算出し、また、応力の算出にあたっては、求めた断面力から判断される負曲げ領域を「鉄筋+鋼断面」とし、残りの領域を合成断面とした実剛度により算出するものであり、この場合、断面力を算出する仮定剛度と応力を計算する実剛度で、床版の合成作用を取扱う範囲が異なることとなる。

一方、FEM 解析では、断面力を算出することなく直接的に応力が得られることから、本検討では、中間支点付近における RC 床版のひび割れの状態を評価し、「鉄筋+鋼断面」の範囲に反映させる方法を用いた。図-3.1.2に FEM 解析における活荷重応力の算出方法を示す。CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合、先ず、FEM 解析より床版の影響線を求め、床版にひび割れ強度  $\sigma_{ct}$  を超える応力が発生する範囲を求めた。次に、その範囲の RC 床版のコンクリートを無視して鉄筋のみの剛性へ低減したモデルへ変更し、FEM 解析により影響線を再計算した。着目部位に最も不利となる載荷状態は、2 回目の影響線から算出した。なお、ひび割れの判定に用いた曲げひび割れ強度  $\sigma_{ct}$  は土木学会コンクリート標準示方書<sup>27)</sup>に従い、以下の(3.1.1)式により算出した。CASE2 および CASE3 では、ひび割れ判定は行わず、1 回目で算出した影響線から求めた応力で終了となる。

$$\sigma_{ct} = 0.6 / (h^{1/3}) \cdot 0.23 \sigma_{ck}^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.1.1)$$

ここで、 $h$  : 床版厚 (=0.21m)

$\sigma_{ck}$  : 設計基準強度 (=30 N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ct}$  : 曲げひび割れ強度 (=2N/mm<sup>2</sup>)

今回対象とした解析モデルでは、載荷点数 7350、影響面数約 60 万（全節点数×変位 6 成分＋全要素数×応力 6 成分）となる。参考までに計算時間は OS: Microsoft Windows Xp Professional、CPU: Xeon 3.00GHz×1、メモリ: 2GByte のワークステーションを用いて約 10 時間であり、出力ファイルに使用したディスク容量は約 20GByte であった。

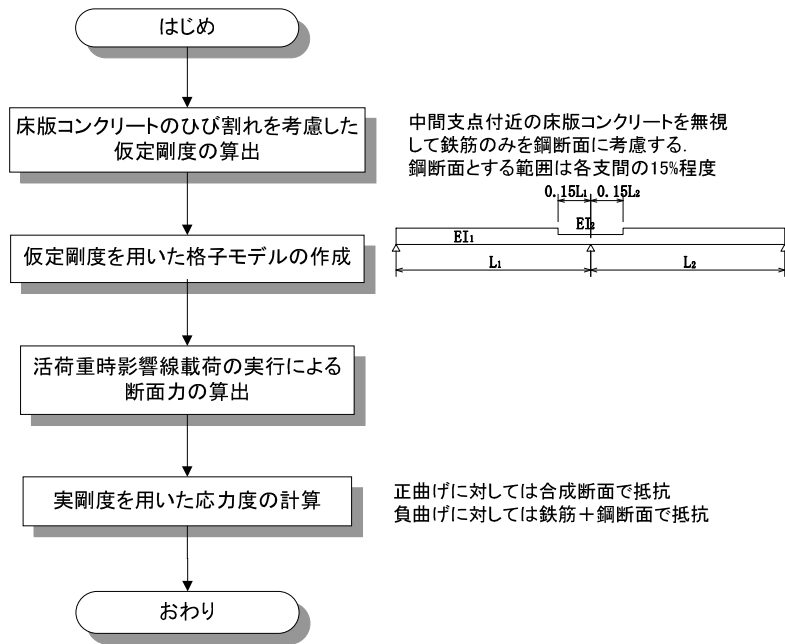


図-3.1.1 格子解析における活荷重応力算出方法

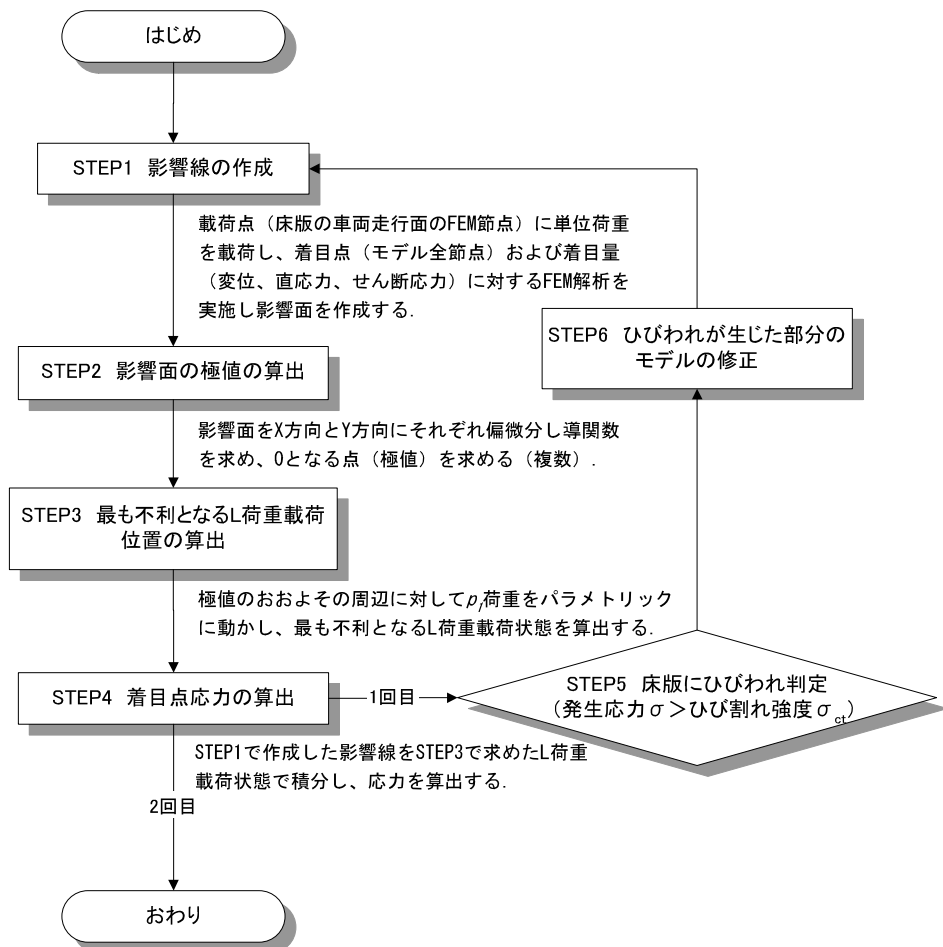


図-3.1.2 FEM 解析における活荷重応力算出方法  
(CASE1 : RC 床版を有する連続合成桁の場合)

### 3.2 影響線載荷の比較（CASE1：RC 床版を有する連続合成桁の場合）

ここでは、CASE1 の場合における、表-3.2.1 に示す部位および応力成分に着目した場合の格子解析と FEM 解析により算出される影響線形状、影響線ピーク、L 荷重の等分布荷重  $p1$ （以下、 $p1$  荷重という）、および発生応力の比較を行う。なお、発生応力については、床版打設後の荷重である後死荷重および活荷重に対象を限定して比較検討する。

表-3.2.1 比較検討において着目する部位と応力成分

| 部位   |       |       | 応力成分           |
|------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4 | 支間中央  | 下フランジ | 直応力 $\sigma_x$ |
|      | 中間支点上 | 下フランジ | 直応力 $\sigma_x$ |
|      | 中間支点上 | ウェブ   | せん断応力 $\tau$   |
| 中桁G3 | 支間中央  | 下フランジ | 直応力 $\sigma_x$ |
|      | 中間支点上 | 下フランジ | 直応力 $\sigma_x$ |
|      | 中間支点上 | ウェブ   | せん断応力 $\tau$   |

ここで、G4 主桁は外桁の代表で G1 主桁と同様の発生応力であり、G3 主桁は中桁の代表で G2 主桁と同様の発生応力である。また、検討の簡略化のため支間長 38m の等径間としていることより、支間中央の発生応力は A1-P1 間と P1-P2 間で同値であり、ここで言う支間中央とは特に断らない限り A1-P1 間を指す。

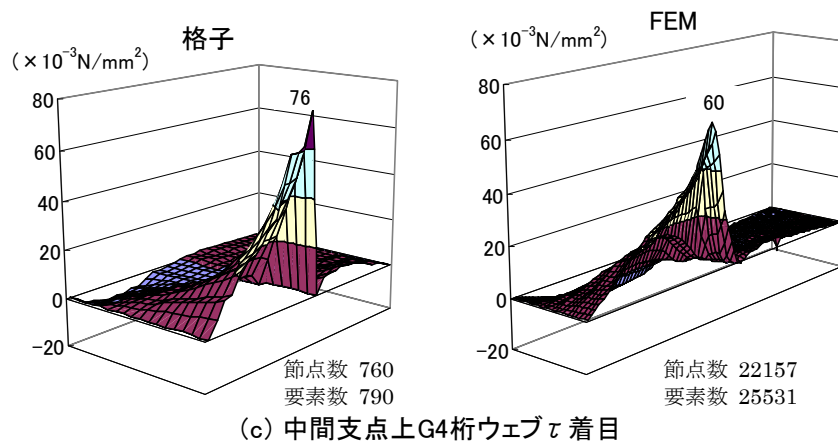
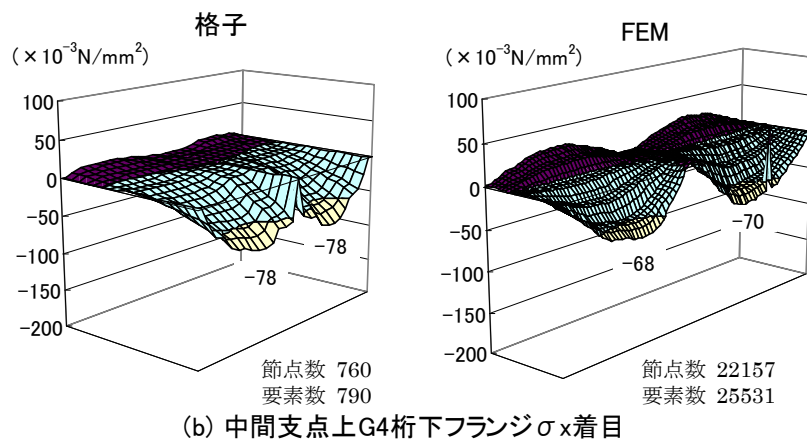
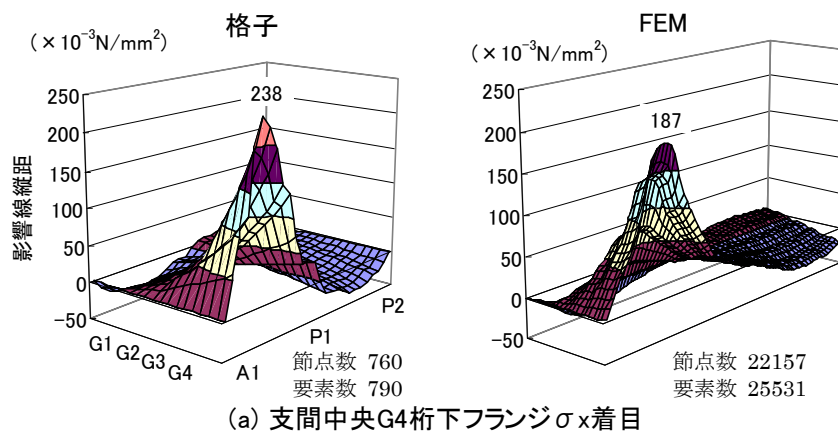
### 3.2.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 荷重位置の比較

図-3.2.1 に表-3.2.1 の部位および応力成分に着目した場合の格子解析と FEM 解析により算出される影響面を示す。図中の縦軸 ( $z$  軸) は単位荷重 (1kN) を載荷したときの着目位置の発生応力 (影響線縦距) である。図-3.2.2 に、図-3.2.1 の影響面の各桁位置での分布と、最も不利な応力を発生させる  $p1$  荷重の載荷位置を示す。また、図-3.2.3 に、図-3.2.1 の影響面のピーク位置での横断分布と  $p1$  荷重載荷位置を示す。

各着目部位ともに幅員方向の影響線形状に差が見られる。また、影響線のピークは FEM 解析の方が総じて小さくなる傾向が見られる。

以下、各着目部位についての比較結果をまとめる。

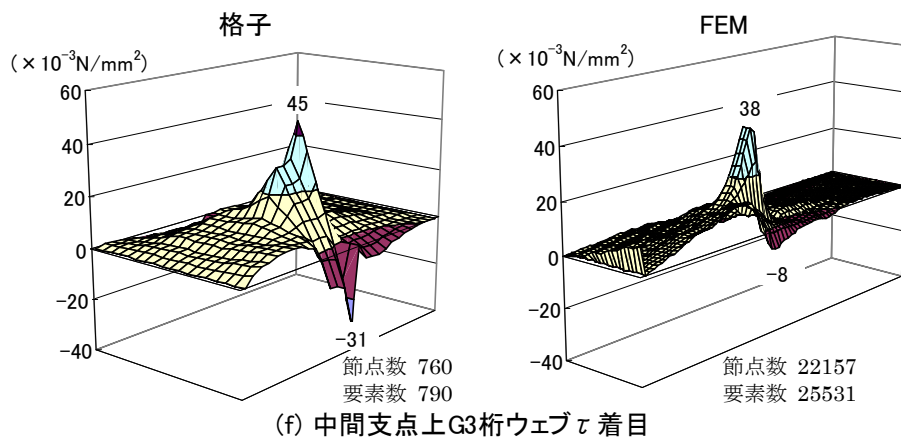
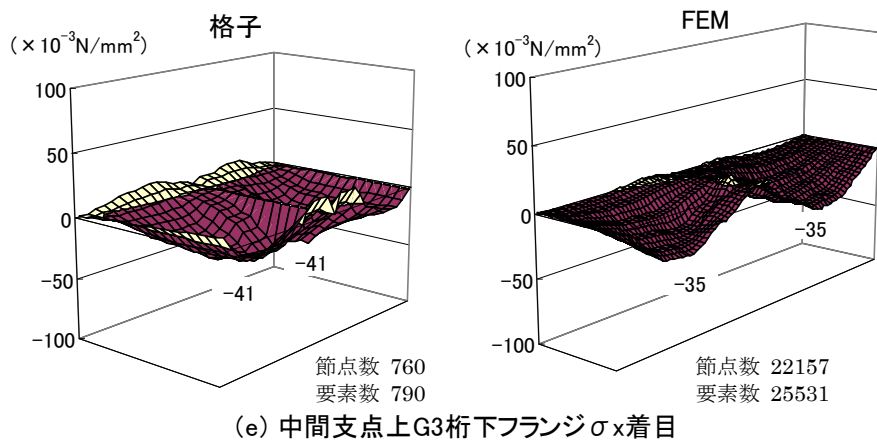
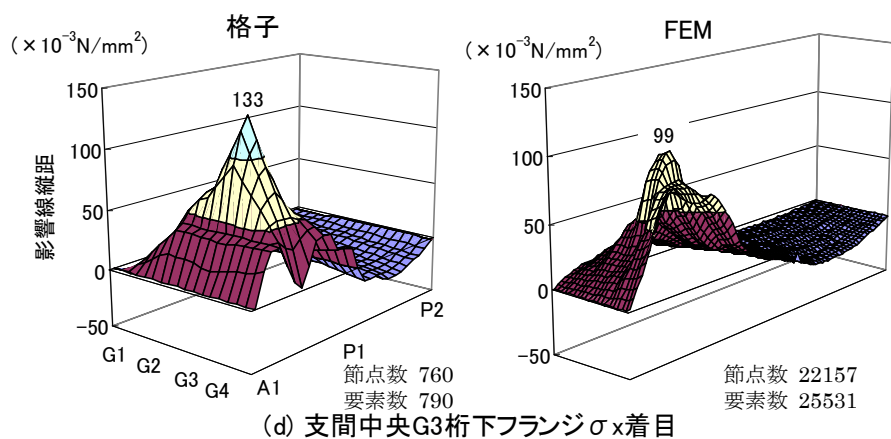
- ・ 支間中央 G4 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 21%小さい (図-3.2.1(a))。最大応力を与える  $p1$  荷重の位置はほぼ一致している (図-3.2.2(a)、図-3.2.3(a))。
- ・ 中間支点上 G4 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、格子解析の場合、第 1 支間と第 2 支間で完全対称分布となるのに対し、FEM 解析の場合わずかに非対称の分布となり、ピークの値は格子より約 10%小さい (図-3.2.1(b))。最大応力を与える  $p1$  荷重の橋軸方向位置は約 1m ずれる結果となっている (図-3.2.2(b)、図-3.2.3(b))。
- ・ 中間支点上 G4 桁ウェブのせん断応力  $\tau$  では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 21%小さい (図-3.2.1(c))。また、 $p1$  荷重の橋軸方向位置が約 1.5m ずれており、影響線形状にも顕著な違いが見られる (図-3.2.2(c)、図-3.2.3(c))。
- ・ 支間中央 G3 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 26%小さい (図-3.2.1(d))。特に幅員方向の影響線形状に顕著な違いが見られ、FEM 解析の方がピークが下がって山の裾が広がっている形状となっている (図-3.2.2(d)、図-3.2.3(d))。最大応力を与える  $p1$  荷重の位置は幅員方向に約 0.6m ずれている。
- ・ 中間支点上 G3 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、G4 桁で見られたような非対称性はなく、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 15%小さい (図-3.2.1(e))。支間中央と同様、幅員方向の影響線形状に顕著な違いが見られ、格子解析では G3 桁上にピークがみられるのに対し、FEM 解析では G4 桁側の幅員端にピークがみられる (図-3.2.2(e)、図-3.2.3(e))。最大応力を与える  $p1$  荷重の位置は幅員方向に約 0.9m ずれている。
- ・ 中間支点上 G3 桁ウェブのせん断応力  $\tau$  では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 16%小さい (図-3.2.1(f))。また、 $p1$  荷重の位置には大きな差がないが、橋軸方向の影響線形状には顕著な違いが見られる (図-3.2.2(f)、図-3.2.3(f))。



ピーク値

| 着目                       | 格子  | FEM | 比率  |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$  | 238 | 187 | 79% |
| 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ | -78 | -70 | 90% |
| 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$       | 76  | 60  | 79% |

図-3.2.1(a~c) 格子と FEM 解析より算出される影響面 (CASE1: 合成桁 RC の場合)



ピーク値

| 着目                       | 格子  | FEM | 比率  |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$  | 133 | 99  | 74% |
| 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ | -41 | -35 | 85% |
| 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$       | 45  | 38  | 84% |

図-3.2.1(d～f) 格子と FEM 解析より算出される影響面 (CASE1 : 合成桁 RC の場合)

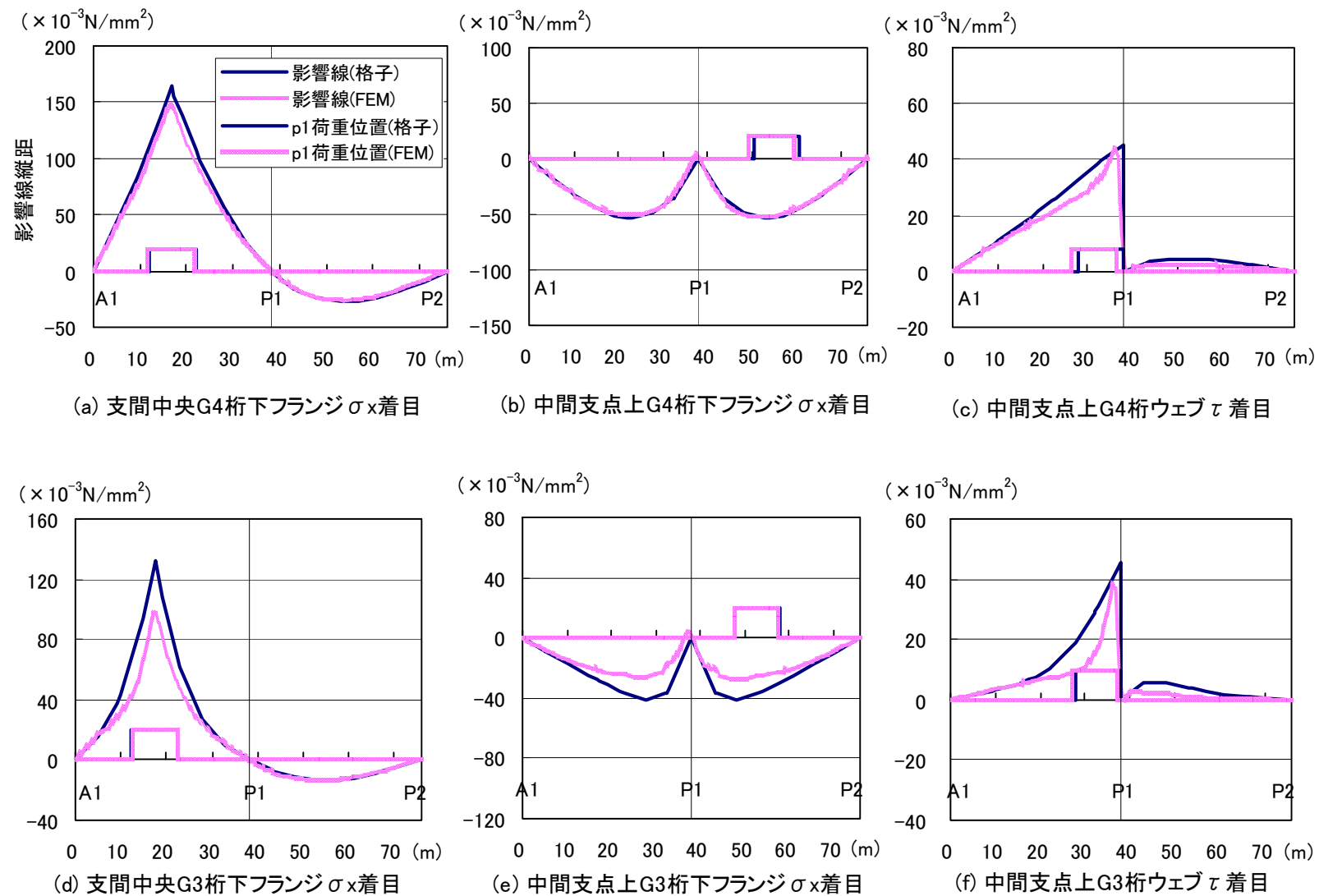


図-3.2.2 格子とFEM解析より算出される各桁上の影響線と $p1$ 荷重載荷位置の比較 (CASE1: 合成桁RCの場合)

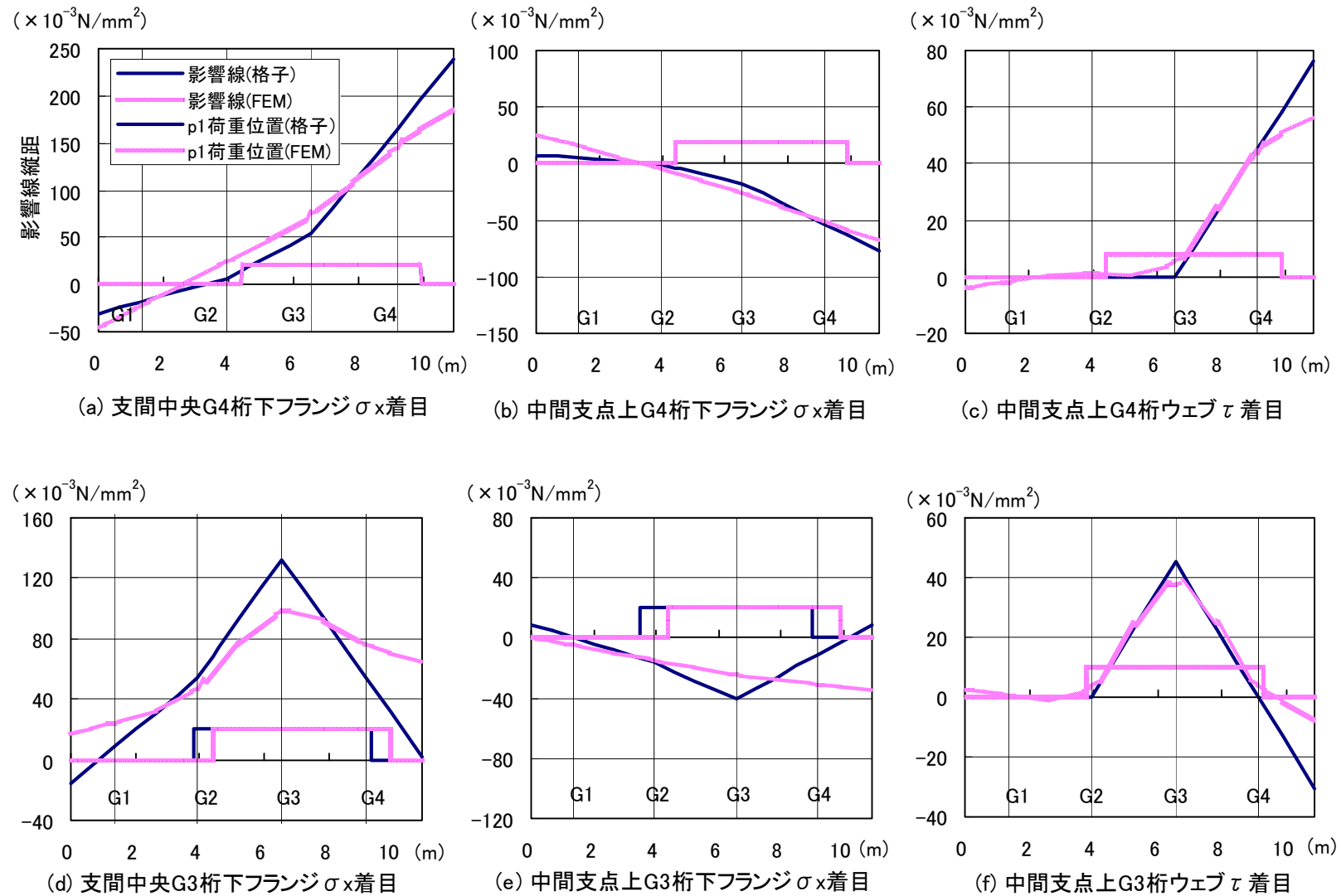


図-3.2.3 格子と FEM 解析より算出される幅員方向の影響線と  $p1$  荷重載荷位置の比較 (CASE1 : 合成桁 RC の場合)

### 3.2.2 発生応力の比較（後死荷重、活荷重）

#### (1) 後死荷重応力

表-3.2.2 に着目部位における後死荷重時（舗装・地覆・高欄の死荷重）の発生応力の比較を示す。

以下に比較結果をまとめる。

- ・ 等分布荷重である舗装荷重の発生応力は、G4 桁では格子解析より FEM 解析の方が 10%前後大きく、G3 桁では同程度か、わずかに FEM 解析の方が小さい。
- ・ 幅員両端の線荷重である地覆・高欄荷重の発生応力は、G4 桁では格子解析より FEM 解析の方が 30～40%小さく、先に示した図-3.2.3(a～c)からも明らかなように影響線のピークの差がそのまま発生応力の差となって現れている。一方、G3 桁では FEM 解析の方が 3 倍以上大きく、図-3.2.3(d～f)から荷重分配に起因する幅員方向の影響線形状の相違が原因と考えられる。
- ・ 後死荷重応力では、G4 桁は FEM 解析の方が発生応力は小さくなり、G3 桁は FEM 解析の方が発生応力は大きくなる。

表-3.2.2 後死荷重応力の比較（CASE1：合成桁 RC の場合）

| 着目点と着目量 |       |                                          | 解析モデル   | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|-------|------------------------------------------|---------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4    | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 21.0  | 14.2  | 0.67           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 10.5  | 12.0  | 1.15           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 31.5  | 26.2  | 0.83           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | -27.6 | -18.9 | 0.69           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | -12.5 | -13.2 | 1.06           |
|         |       |                                          | 合計応力    | -40.1 | -32.1 | 0.80           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$                      | 地覆・高欄応力 | 10.6  | 6.2   | 0.59           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 4.3   | 3.9   | 0.91           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 14.8  | 10.1  | 0.68           |
| 中桁G3    | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 2.9   | 13.9  | 4.85           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 12.9  | 12.4  | 0.96           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 15.8  | 26.3  | 1.67           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | -0.8  | -15.1 | 19.68          |
|         |       |                                          | 舗装応力    | -15.2 | -15.3 | 1.00           |
|         |       |                                          | 合計応力    | -16.0 | -30.3 | 1.89           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$                      | 地覆・高欄応力 | -0.8  | 2.7   | -3.35          |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 4.1   | 3.6   | 0.87           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 3.3   | 6.3   | 1.89           |

※単位は、発生応力(N/mm<sup>2</sup>)

## (2) 活荷重応力

表-3.2.3 に着目部位における活荷重時発生応力の比較を示す。同表には参考として、L 荷重の載荷面積および影響面体積も併せて示している。ここでいう影響面体積とは、着目量が最大応力の場合は影響面の+側の体積、最小応力の場合は-側の体積のことであり、L 荷重の等分布荷重  $p2$ （以下、 $p2$  荷重）による発生応力は、この影響面体積に荷重強度を乗じたものである。

以下に比較結果をまとめる。

- ・ 得られた影響線から着目部位が最も不利となる L 荷重の載荷状態を求めると、L 荷重の載荷面積は、どの着目部位においても FEM 解析の方が 20%程度大きくなる。
- ・ 格子解析に対する FEM 解析の活荷重応力の比率は、影響面体積の比率に近い値を示しており、 $p1$  荷重および  $p2$  荷重の強度差による重み付けの影響が小さいことから、 $p1$  荷重による発生応力の差より  $p2$  荷重による発生応力の差の方が最終的な活荷重応力の差に支配的と考えられる。ただし、中間支点上のウェブせん断応力では、活荷重応力の比率と影響面体積の比率に差が見られることから、 $p1$  荷重による発生応力の差の影響が出ていると考えられる。
- ・ 活荷重応力では、G4 桁は FEM 解析の方が発生応力は 10%程度大きくなり、G3 桁では同程度か FEM 解析の方がわずかに小さくなる。

表-3.2.3 活荷重応力の比較 (CASE1 : 合成桁 RC の場合)

| 着目点と着目量 |       |                             |         | 解析モデル | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|-------|-----------------------------|---------|-------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 |       | 305   | 365   | 1.19           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 9568  | 10423 | 1.09           |
|         |       |                             | 活荷重応力   |       | 93.3  | 100.4 | 1.08           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 |       | 416   | 502   | 1.21           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 7883  | 9163  | 1.16           |
|         |       |                             | 活荷重応力   |       | -52.7 | -61.4 | 1.17           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 |       | 394   | 421   | 1.07           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 2728  | 2648  | 0.97           |
| 中桁G3    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 |       | 297   | 349   | 1.17           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 10279 | 10005 | 0.97           |
|         |       |                             | 活荷重応力   |       | 94.6  | 90.6  | 0.96           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 |       | 570   | 689   | 1.21           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 9107  | 9043  | 0.99           |
|         |       |                             | 活荷重応力   |       | -55.5 | -55.1 | 0.99           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 |       | 524   | 617   | 1.18           |
|         |       |                             | 影響面体積   |       | 2525  | 2146  | 0.85           |
|         |       |                             | 活荷重応力   |       | 24.6  | 18.6  | 0.75           |

※単位は、影響面体積( $\times 10^3 \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ )、載荷面積( $\times 10^6 \text{mm}^2$ )、発生応力( $\text{N/mm}^2$ )

影響面体積は、着目量がmaxのとき+側の体積を、minのとき-側の体積をそれぞれ示す

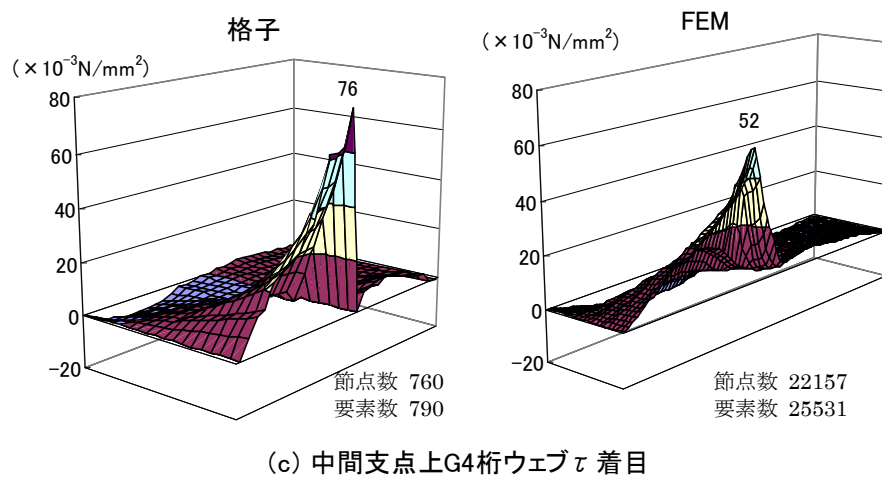
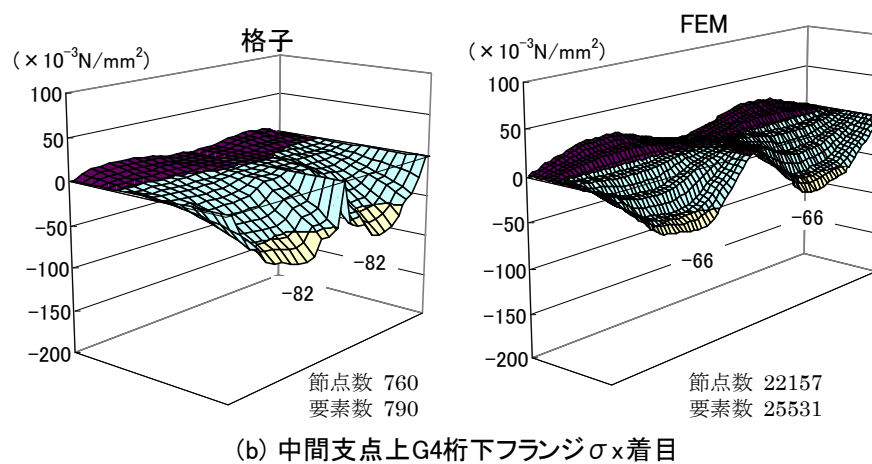
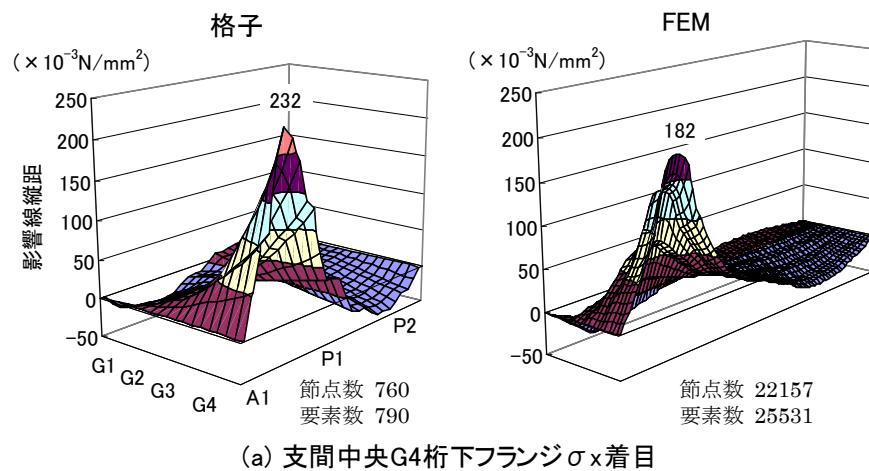
### 3.3 影響線載荷の比較（CASE2：PC 床版を有する連続合成桁の場合）

CASE1 と同様に、CASE2 の場合における影響線形状および発生応力等の比較を行う。着目する部位および応力成分は CASE1 の表-3.2.1 と同様である。

#### 3.3.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 載荷位置の比較

図-3.3.1 に表-3.2.1 の部位および応力成分に着目した場合の格子解析と FEM 解析により算出される影響面を示す。図-3.3.2 に、図-3.3.1 の影響面の各桁上の分布と、最も不利な応力を発生させる  $p1$  荷重の載荷位置を示す。また、図-3.3.3 に、図-3.3.1 の影響面のピーク位置での横断分布と  $p1$  荷重載荷位置を示す。

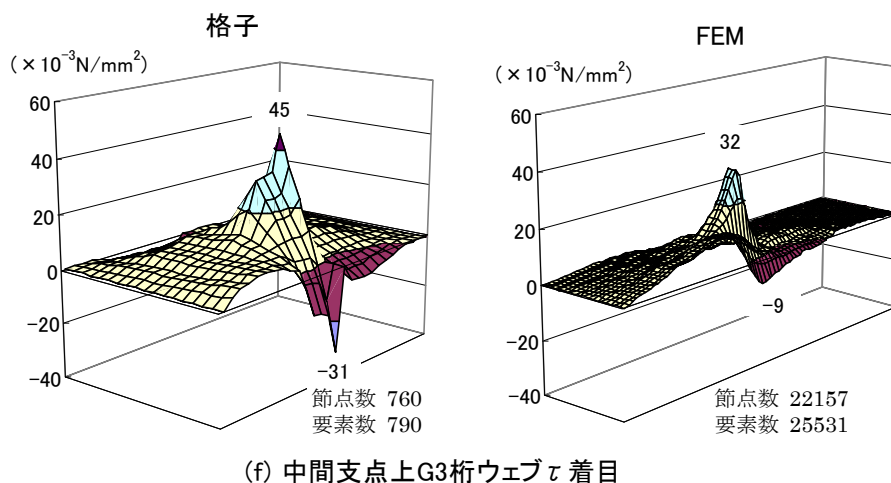
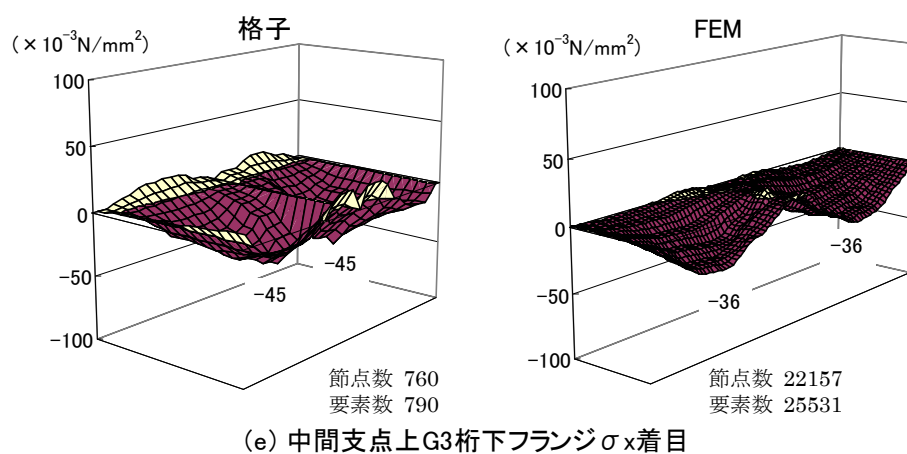
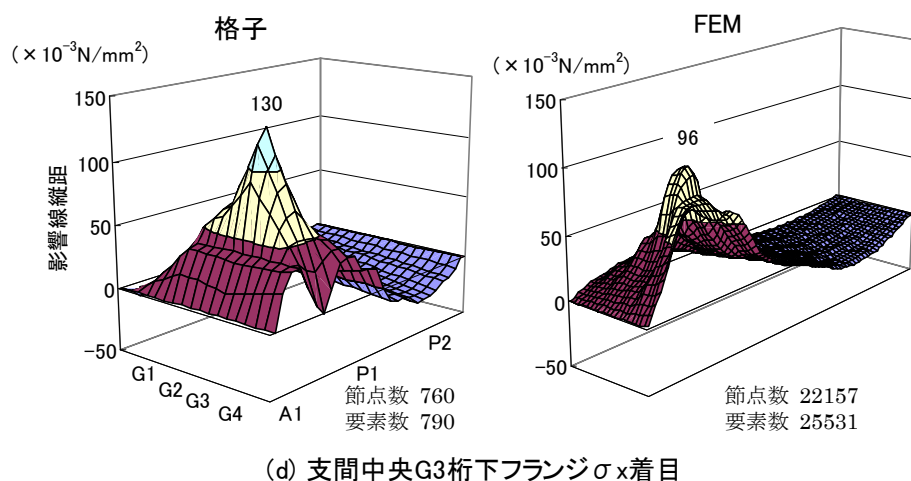
格子解析と FEM 解析より算出した影響線形状および影響線ピークを比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。CASE1 と CASE2 の比較においては、格子解析では中間支点上の床版剛性を全断面有効とすることで力が中間支点上に流れ、中間支点上の下フランジ直応力およびウェブせん断応力に着目した場合の影響線ピークは CASE1 と比べてわずかに大きくなり、FEM 解析では中間支点上の下フランジ直応力およびウェブせん断応力に着目した場合の影響線ピークは CASE1 と大差は見られない。



ピーク値

| 着目                       | 格子  | FEM | 比率  |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$  | 232 | 182 | 78% |
| 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ | -82 | -66 | 81% |
| 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$       | 76  | 52  | 69% |

図-3.3.1(a~c) 格子と FEM 解析より算出される影響面 (CASE2: 合成桁 PC の場合)



ピーク値

| 着目                       | 格子  | FEM | 比率  |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$  | 130 | 96  | 74% |
| 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ | -45 | -36 | 81% |
| 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$       | 45  | 32  | 70% |

図-3.3.1 (d～f) 格子と FEM 解析より算出される影響面 (CASE2 : 合成桁 PC の場合)

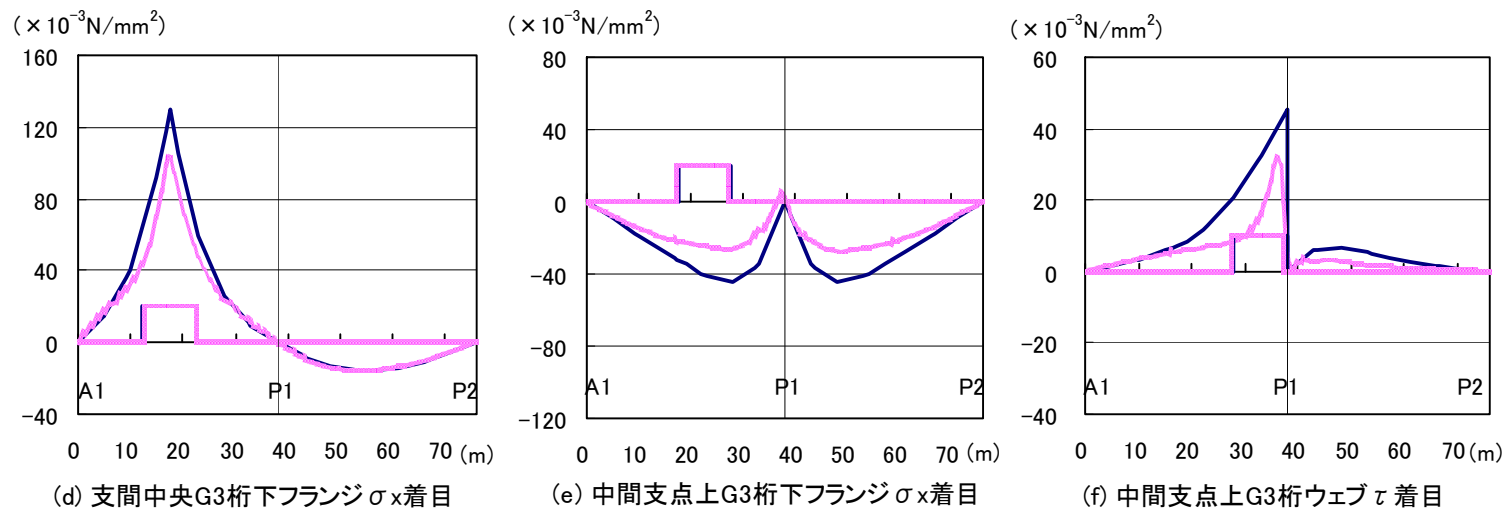
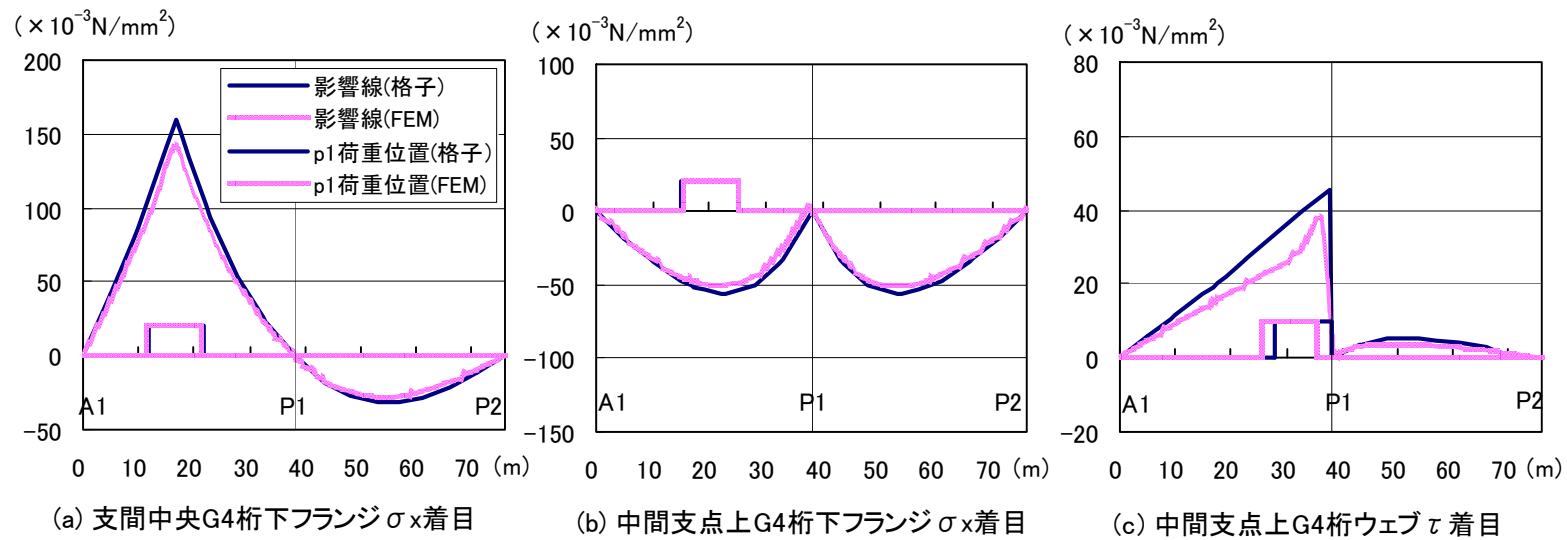


図-3.3.2 格子とFEM解析より算出される各桁上の影響線と $p1$ 荷重載荷位置の比較 (CASE2: 合成桁PCの場合)

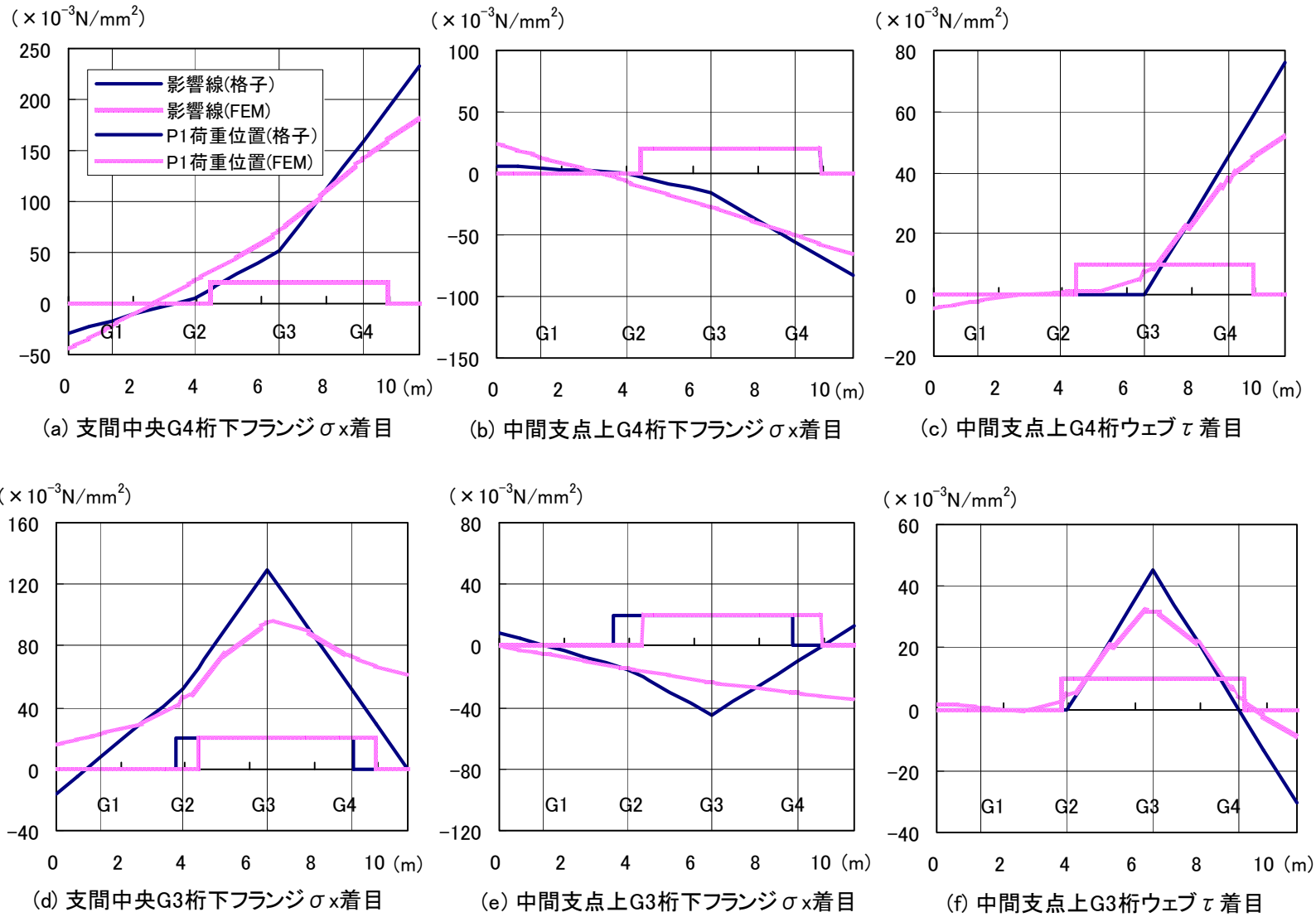


図-3.3.3 格子と FEM 解析より算出される幅員方向の影響線と  $p1$  荷重載荷位置の比較 (CASE2 : 合成桁 PC の場合)

### 3.3.2 発生応力の比較（後死荷重、活荷重）

#### (1) 後死荷重応力

表-3.3.2 に着目部位における後死荷重時発生応力の比較を示す。

格子解析と FEM 解析より算出した後死荷重応力を比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。

CASE1 と CASE2 の比較においては、床版剛性を全断面有効とすることで、格子解析、FEM 解析ともに中間支点上の下フランジ直応力が 5%程度大きくなり、逆に支間中央の下フランジ直応力は 10%程度小さくなった。

表-3.3.2 後死荷重応力の比較（CASE2：合成桁 PC の場合）

| 解析モデル   |       |                                          |         | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|-------|------------------------------------------|---------|-------|-------|----------------|
| 着目点と着目量 |       |                                          |         |       |       |                |
| 外桁G4    | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 19.3  | 12.4  | 0.64           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 9.2   | 10.3  | 1.13           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 28.5  | 22.7  | 0.80           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | -29.4 | -19.5 | 0.66           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | -12.6 | -13.9 | 1.10           |
|         |       |                                          | 合計応力    | -42.1 | -33.4 | 0.79           |
|         |       | ウェブ <sup>*</sup><br>$\tau_{max}$         | 地覆・高欄応力 | 11.1  | 6.2   | 0.56           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 4.3   | 3.9   | 0.90           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 15.4  | 10.1  | 0.66           |
| 中桁G3    | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 1.5   | 11.9  | 7.72           |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 11.3  | 10.6  | 0.94           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 12.9  | 22.5  | 1.75           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | 0.6   | -15.7 | -27.68         |
|         |       |                                          | 舗装応力    | -15.8 | -15.9 | 1.01           |
|         |       |                                          | 合計応力    | -15.2 | -31.6 | 2.07           |
|         |       | ウェブ <sup>*</sup><br>$\tau_{max}$         | 地覆・高欄応力 | -1.2  | 2.6   | -2.27          |
|         |       |                                          | 舗装応力    | 4.3   | 3.6   | 0.84           |
|         |       |                                          | 合計応力    | 3.2   | 6.3   | 1.97           |

※単位は、発生応力(N/mm<sup>2</sup>)

## (2) 活荷重応力

表-3.3.3 に着目部位における活荷重時発生応力の比較を示す。

格子解析と FEM 解析より算出した活荷重応力を比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。

CASE1 と CASE2 の比較においては、床版剛性を全断面有効とすることで、格子解析、FEM 解析ともに中間支点上の下フランジ直応力が 5%程度大きくなり、逆に支間中央の下フランジ直応力は 5%程度小さくなった。

表-3.3.3 活荷重応力の比較 (CASE2 : 合成桁 PC の場合)

| 着目点と着目量 |       |                             | 解析モデル   | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|-------|-----------------------------|---------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 | 305   | 344   | 1.13           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 9171  | 9849  | 1.07           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 89.5  | 96.0  | 1.07           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 | 404   | 512   | 1.27           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 7953  | 9234  | 1.16           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | -53.5 | -61.7 | 1.15           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 | 436   | 455   | 1.05           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 2752  | 2570  | 0.93           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 25.9  | 22.4  | 0.87           |
| 中桁G3    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 | 297   | 348   | 1.17           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 9823  | 9475  | 0.96           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 90.9  | 86.3  | 0.95           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 | 563   | 694   | 1.23           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 9469  | 9445  | 1.00           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | -58.3 | -56.9 | 0.98           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 | 523   | 656   | 1.25           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 2672  | 2175  | 0.81           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 25.5  | 17.8  | 0.70           |

※単位は、影響面体積( $\times 10^3 \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ )、載荷面積( $\times 10^6 \text{mm}^2$ )、発生応力( $\text{N/mm}^2$ )

影響面体積は、着目量がmaxのとき+側の体積を、minのとき-側の体積をそれぞれ示す

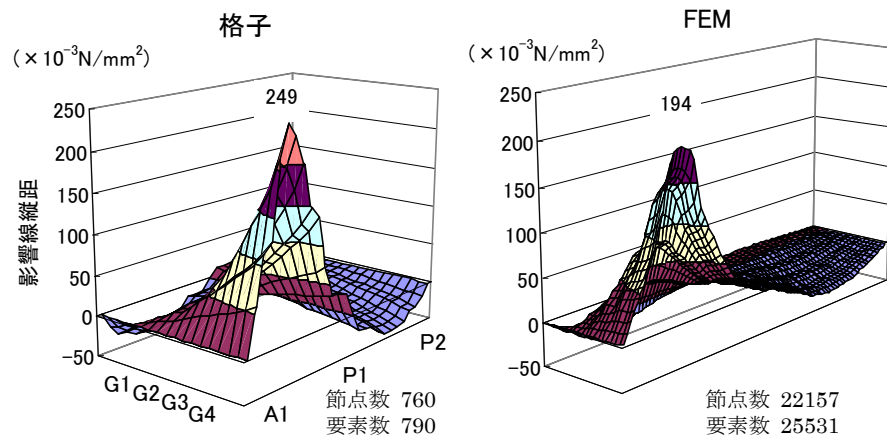
### 3.4 影響線載荷の比較（CASE3：連続非合成桁の場合）

CASE1 および CASE2 と同様に、CASE3 の場合における影響線形状および発生応力等の比較を行う。着目する部位および応力成分は CASE1 の表-3.2.1 と同様である。

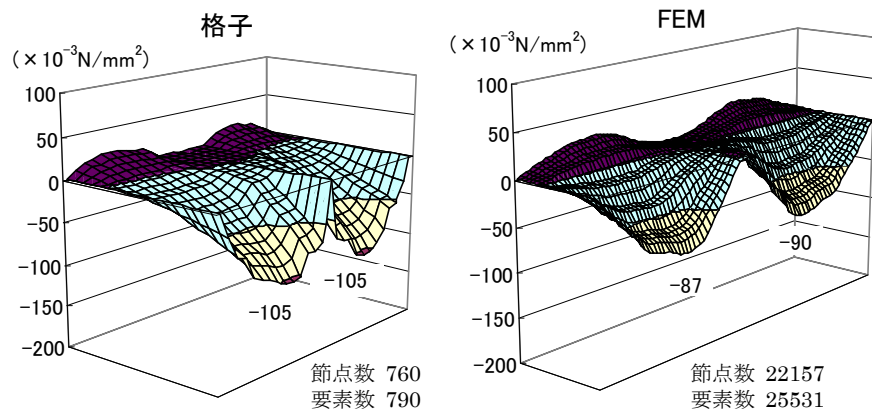
#### 3.4.1 影響線ピークおよび等分布荷重 $p1$ 載荷位置の比較

図-3.4.1 に表-3.2.1 の部位および応力成分に着目した場合の格子解析と FEM 解析により算出される影響面を示す。図-3.4.2 に、図-3.4.1 の影響面の各桁上の分布と、最も不利な応力を発生させる  $p1$  荷重の載荷位置を示す。また、図-3.4.3 に、図-3.4.1 の影響面のピーク位置での横断分布と  $p1$  荷重載荷位置を示す。

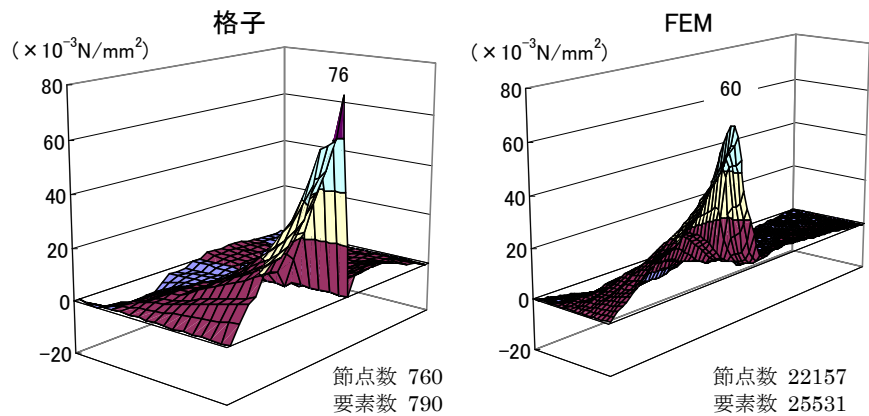
格子解析と FEM 解析より算出した影響線形状および影響線ピークを比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。CASE1 と CASE3 の比較においては、床版剛性を全橋にわたって無視することで、格子解析、FEM 解析ともに下フランジ直応力に着目した場合の影響線ピークが大きくなり、特に中間支点上の下フランジ直応力では CASE1 と比べて影響線ピークが 30%程度大きくなった。



(a) 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



(b) 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目

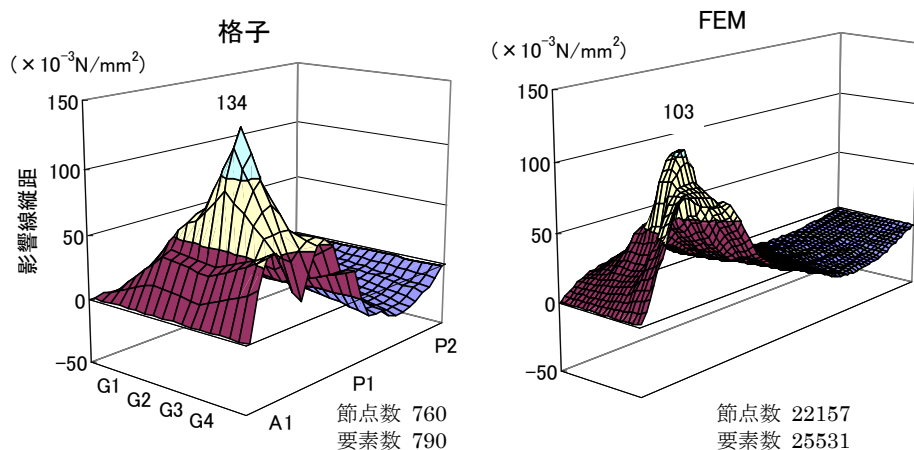


(c) 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$ 着目

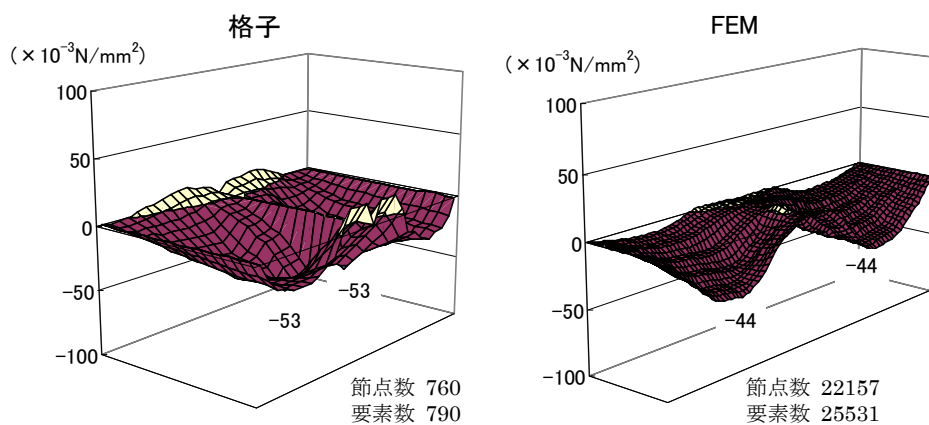
ピーク値

| 着目                       | 格子   | FEM | 比率  |
|--------------------------|------|-----|-----|
| 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$  | 249  | 194 | 78% |
| 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ | -105 | -90 | 86% |
| 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$       | 76   | 60  | 79% |

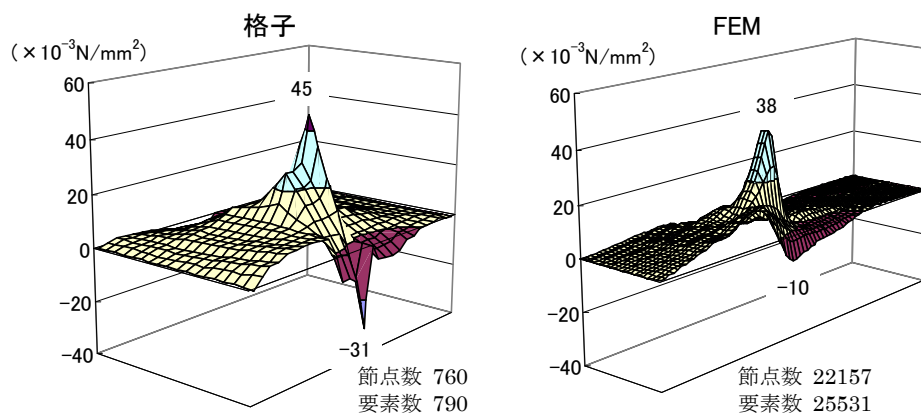
図-3.4.1(a~c) 格子とFEM解析より算出される影響面 (CASE3: 非合成桁の場合)



(d) 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



(e) 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目

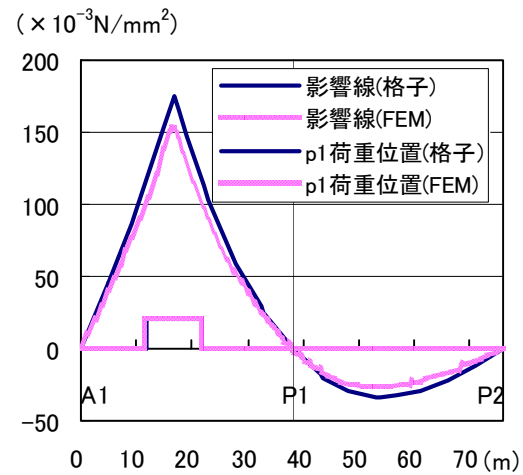


(f) 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$ 着目

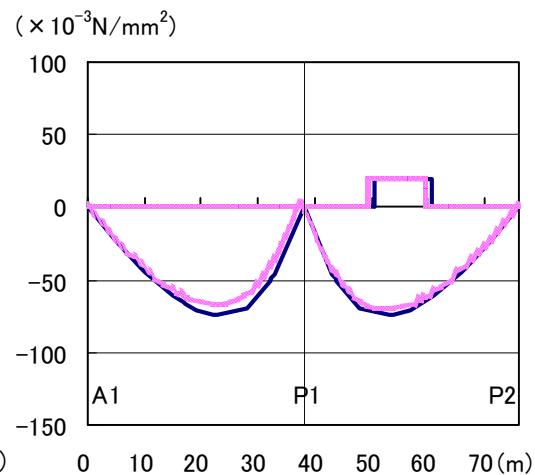
ピーク値

| 着目                       | 格子  | FEM | 比率  |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$  | 134 | 103 | 77% |
| 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ | -53 | -44 | 84% |
| 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$       | 45  | 38  | 84% |

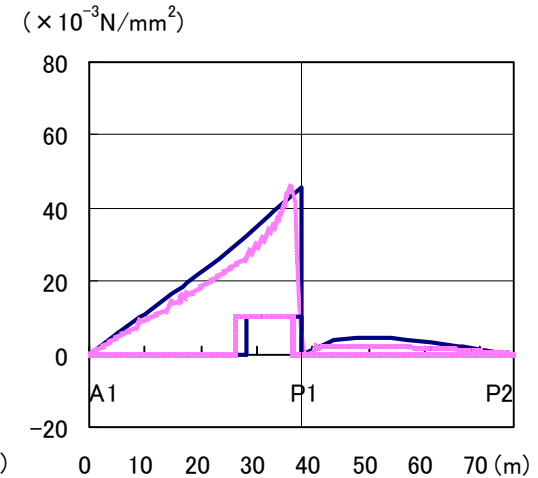
図-3.4.1(d~f) 格子とFEM解析より算出される影響面 (CASE3: 非合成桁の場合)



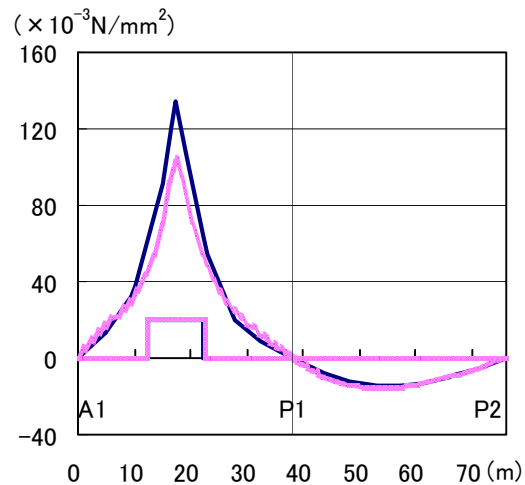
(a) 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



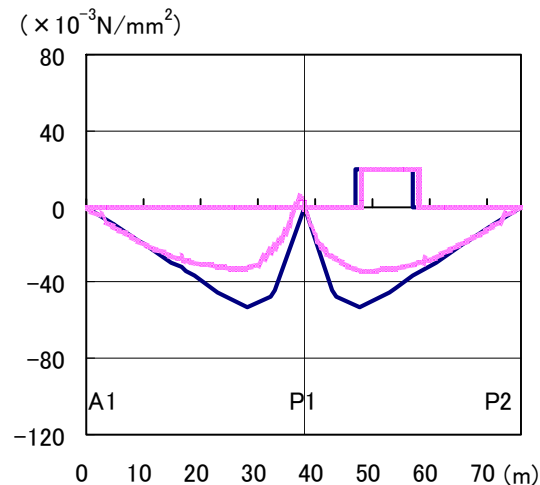
(b) 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



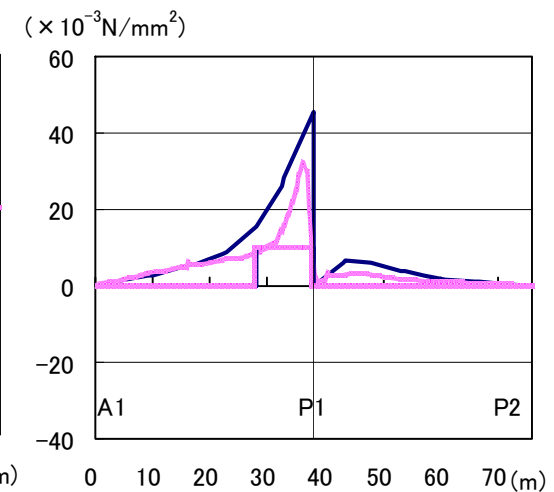
(c) 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$ 着目



(d) 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目

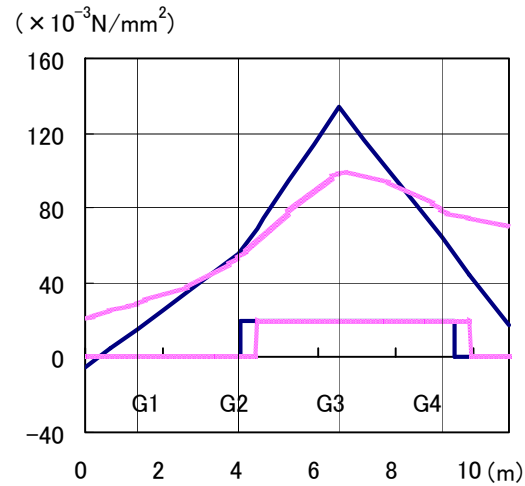


(e) 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目

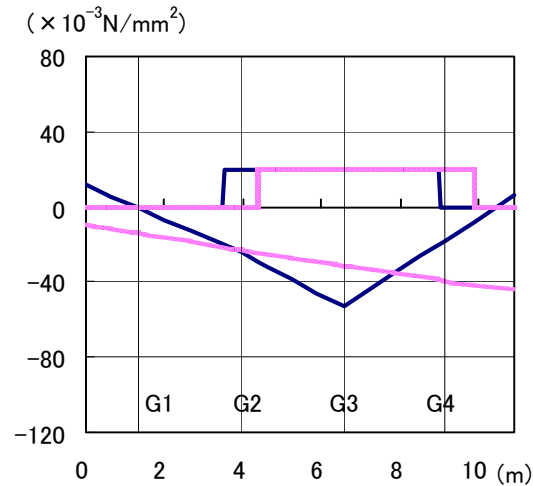


(f) 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$ 着目

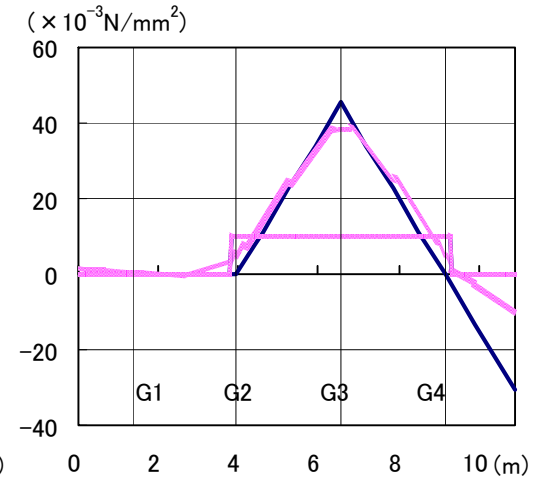
図-3.4.2 格子と FEM 解析より算出される各桁上の影響線と  $p/$  荷重載荷位置の比較 (CASE3: 非合成桁の場合)



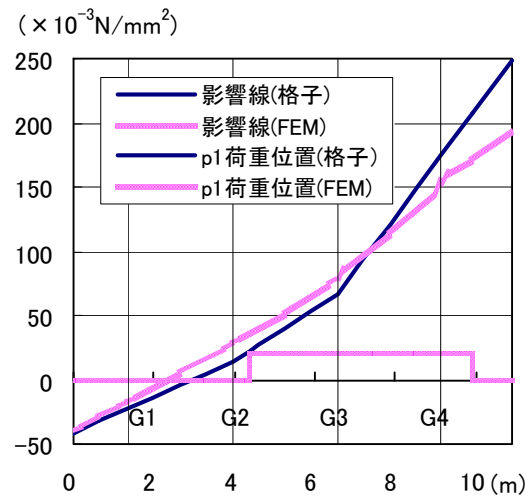
(d) 支間中央G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



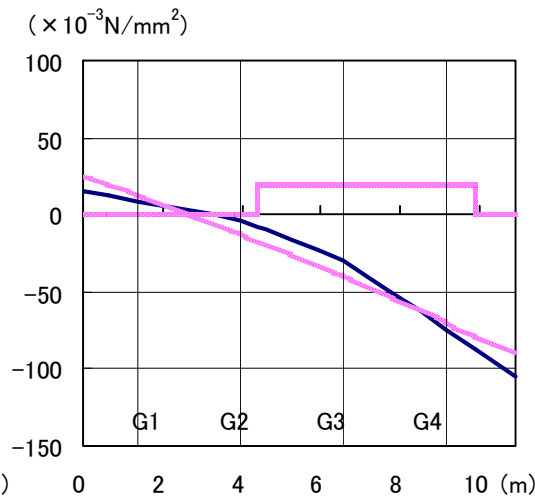
(e) 中間支点上G3桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



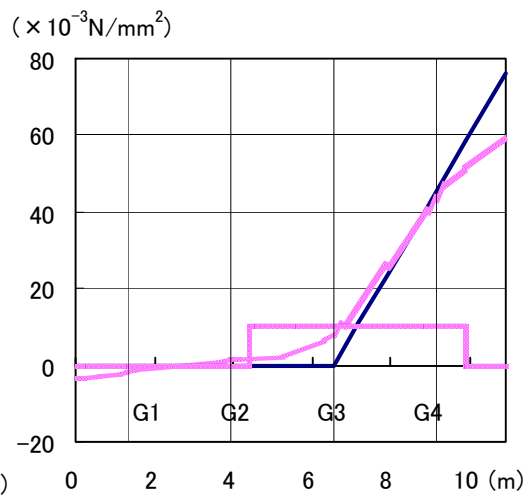
(f) 中間支点上G3桁ウェブ $\tau$ 着目



(a) 支間中央G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



(b) 中間支点上G4桁下フランジ $\sigma_x$ 着目



(c) 中間支点上G4桁ウェブ $\tau$ 着目

図-3.4.3 格子とFEM解析より算出される幅員方向の影響線と $p1$ 荷重荷位置の比較 (CASE3: 非合成桁の場合)

### 3.4.2 発生応力の比較（後死荷重、活荷重）

#### (1) 後死荷重応力

表-3.4.2 に着目部位における後死荷重時発生応力の比較を示す。

格子解析と FEM 解析より算出した後死荷重応力を比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。

CASE1 と CASE3 の比較においては、床版剛性を全橋にわたって無視することで、格子解析、FEM 解析ともに中間支点上の下フランジ直応力が CASE1 と比べて 30～50%大きくなった。

表-3.4.2 後死荷重応力の比較（CASE3：非合成桁の場合）

| 解析モデル<br>着目点と着目量 |       |                                          |         | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|------------------|-------|------------------------------------------|---------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4             | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 18.9  | 14.6  | 0.77           |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | 11.3  | 12.3  | 1.09           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | 30.3  | 27.0  | 0.89           |
|                  | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | -35.5 | -27.7 | 0.78           |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | -18.5 | -20.0 | 1.08           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | -54.0 | -47.8 | 0.88           |
|                  |       | ウェブ <sup>*</sup><br>$\tau_{max}$         | 地覆・高欄応力 | 10.0  | 6.5   | 0.65           |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | 4.5   | 4.0   | 0.89           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | 14.5  | 10.5  | 0.73           |
| 中桁G3             | 支間中央  | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{max}}$ | 地覆・高欄応力 | 6.9   | 14.0  | 2.02           |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | 12.8  | 12.4  | 0.97           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | 19.7  | 26.4  | 1.34           |
|                  | 中間支点上 | 下フランジ <sup>*</sup><br>$\sigma_{x_{min}}$ | 地覆・高欄応力 | -6.1  | -20.1 | 3.32           |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | -20.4 | -20.7 | 1.01           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | -26.5 | -40.8 | 1.54           |
|                  |       | ウェブ <sup>*</sup><br>$\tau_{max}$         | 地覆・高欄応力 | 0.0   | 2.2   | -64.52         |
|                  |       |                                          | 舗装応力    | 4.1   | 3.4   | 0.84           |
|                  |       |                                          | 合計応力    | 4.0   | 5.6   | 1.38           |

※単位は、発生応力(N/mm<sup>2</sup>)

## (2) 活荷重応力

表-3.4.3 に着目部位における活荷重時発生応力の比較を示す。

格子解析と FEM 解析より算出した活荷重応力を比較した場合の傾向は、CASE1 の RC 床版を有する連続合成桁の場合と概ね一致している。

CASE1 と CASE3 の比較においては、床版剛性を全橋にわたって無視することで、格子解析、FEM 解析ともに中間支点上の下フランジ直応力が CASE1 と比べて 30～50%大きくなった。

表-3.4.3 活荷重応力の比較 (CASE3 : 非合成桁の場合)

| 着目点と着目量 |       |                             | 解析モデル   | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|-------|-----------------------------|---------|-------|-------|----------------|
| 外桁G4    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 | 305   | 320   | 1.05           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 10948 | 10936 | 1.00           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 105.8 | 106.1 | 1.00           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 | 438   | 539   | 1.23           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 11771 | 12845 | 1.09           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | -78.5 | -85.9 | 1.09           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 | 395   | 426   | 1.08           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 2892  | 2702  | 0.93           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 26.9  | 24.7  | 0.92           |
| 中桁G3    | 支間中央  | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{max}}$ | L荷重載荷面積 | 305   | 348   | 1.14           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 10608 | 10586 | 1.00           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 97.6  | 95.4  | 0.98           |
|         | 中間支点上 | 下フランジ<br>$\sigma_{x_{min}}$ | L荷重載荷面積 | 587   | 694   | 1.18           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 12148 | 12229 | 1.01           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | -73.6 | -72.6 | 0.99           |
|         |       | ウェブ<br>$\tau_{max}$         | L荷重載荷面積 | 551   | 561   | 1.02           |
|         |       |                             | 影響面体積   | 2488  | 2078  | 0.84           |
|         |       |                             | 活荷重応力   | 24.0  | 18.3  | 0.76           |

※単位は、影響面体積( $\times 10^3 \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ )、載荷面積( $\times 10^6 \text{mm}^2$ )、発生応力( $\text{N/mm}^2$ )

影響面体積は、着目量がmaxのとき+側の体積を、minのとき-側の体積をそれぞれ示す

### 3.5 載荷面積の大きさに対する考察

前節までの比較結果で、床版の合成作用を変えたいずれのケースにおいても、線荷重である地覆・高欄荷重では発生応力が格子解析と比べて FEM 解析の方が小さくなり、等分布荷重である舗装荷重や L 荷重では逆に FEM 解析の方が発生応力が大きくなる傾向が見られた。そこで、この傾向を更に明確にするため、活荷重の載荷面積を徐々に大きくして（単位荷重→T 荷重→p1 荷重→L 荷重）、格子解析と FEM 解析による発生応力の差を比較した。

図-3.5.1 に活荷重の載荷面積の大きさの違いによる各部における格子解析と FEM 解析による発生応力比率を示す。幅員方向の影響線形状の違いからもわかるように、FEM 解析による活荷重応力は、載荷面積が比較的小さい場合には格子解析に比べ小さいが、L 荷重のように載荷面積が大きくなると逆に格子解析の場合と同程度か、それ以上になるという傾向が見られた。また、L 荷重では、最も不利な応力を発生させるように載荷するという過程において、FEM 解析より算出した影響線形状が格子解析のものとは違って山のピークが下がって裾が広がるということに起因して、L 荷重の載荷面積が FEM 解析の方が大きくなる。つまり、橋上の荷重強度の総和が FEM 解析の方が大きいため、照査方法を同等とした場合には不合理な結果となる。すなわち、現行の道路橋示方書に従い最も不利な応力を発生させるように L 荷重を載荷するという影響線載荷による設計では、格子解析の代わりに FEM 解析を応力計算に適用しても、桁断面の大幅な縮小化には繋がらない可能性が示唆される。この点については、モデル化精度の違いを構造解析係数として考慮する等、別途、構造解析の信頼性を適切に考慮することが必要と考えられる。

なお、以上の結果には、3.1.3 で示した格子解析と FEM 解析における影響線算出方法の違いによる影響が含まれる。しかし、別途、格子解析においても FEM 解析の影響線算出方法(図-3.1.2 参照)に従って解析を実施したところ、主要断面（支間中央、中間支点上）では格子解析と FEM 解析の比較において影響線算出方法の違いによる発生応力に大きな差は見られず、床版のひび割れを仮定した範囲の境界付近に多少の差が見られる程度であった。したがって、影響線算出方法の違いによる影響は無視し得るものと考えられる。

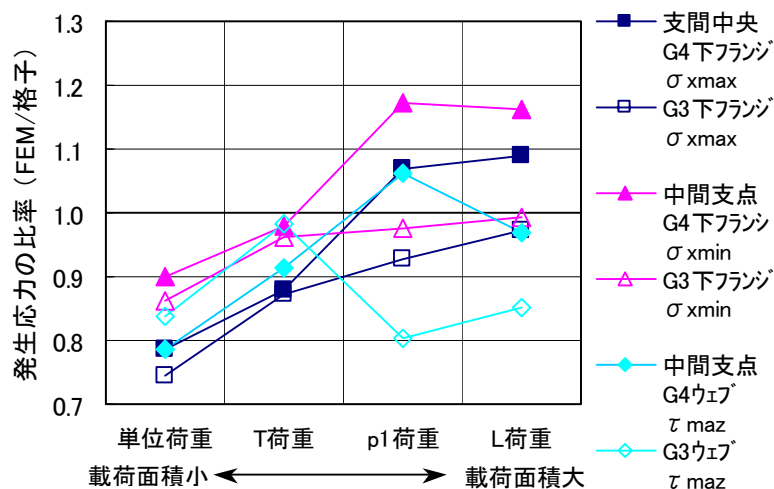


図-3.5.1 載荷面積の大きさによる発生応力の比較

## 4章 FEM 解析による鋼多主桁橋の試設計

### 4.1 試設計内容

3章で示した影響線載荷の方法を用いて、FEM 解析により鋼多主桁橋の試設計を行う。設計対象とする橋梁は、4.2 節では、2章で検討対象とした4径間連続鋼4主桁橋を見本に床版の合成作用の取り扱いを3章と同様に変えた3橋とした。4.3 節では、構造を簡略化（下横構・対傾構の省略および横桁間隔の拡大）した3径間連続鋼4主桁橋において支間長の異なる2橋とした。4.4 節では、3径間連続鋼少数主桁橋で主桁本数を3本、2本と減らした2橋とした。いずれの橋梁に対しても格子解析により試設計した結果との比較を通して、FEM 解析により設計した場合の鋼重低減効果を示す。

なお、本章では代表断面における主桁の設計結果および鋼重低減効果のみを示すことにし、その他の部材（床版、横桁、補剛材、下横構）の設計結果の詳細は付属資料1に示す。

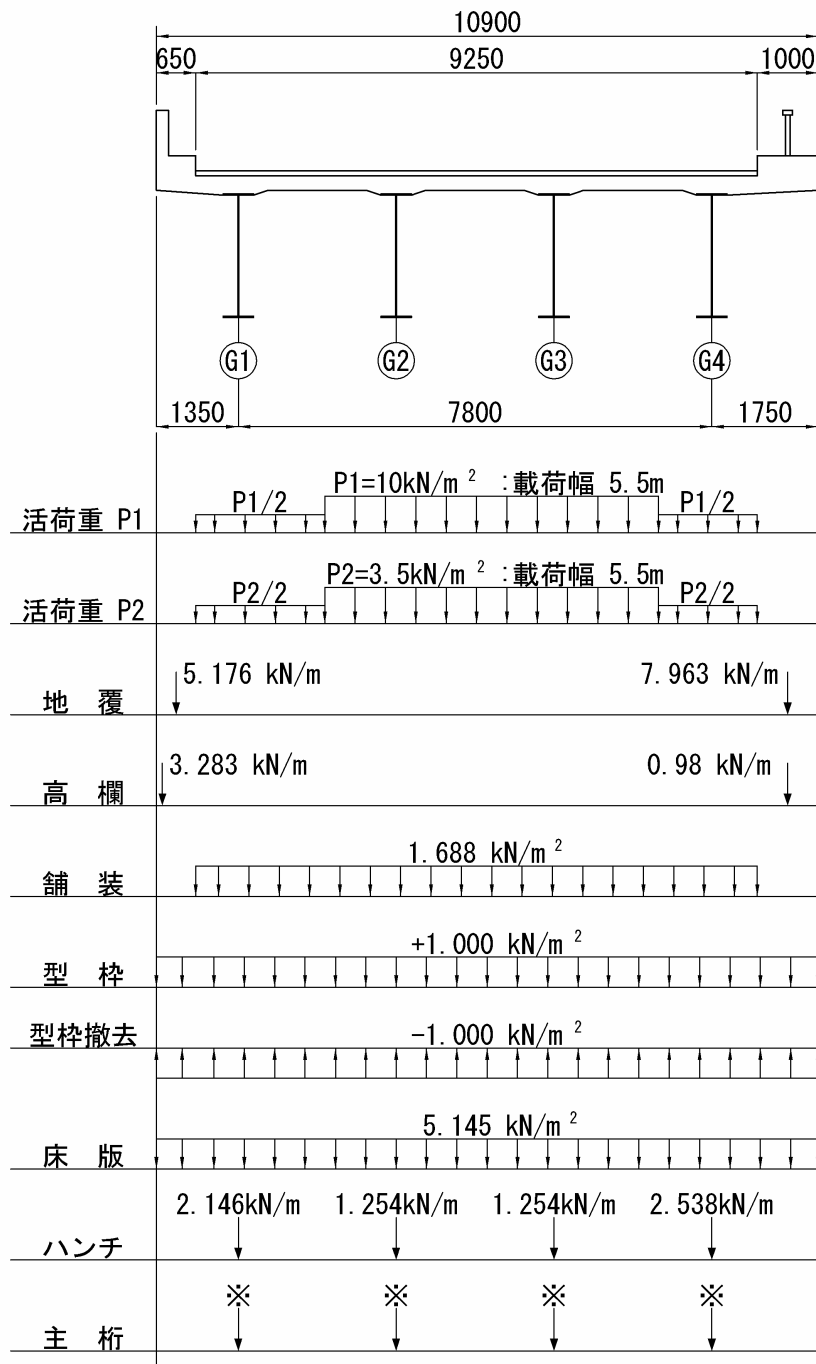
### 4.2 鋼多主桁橋の試設計

#### 4.2.1 試設計の前提条件

3章で示した方法（影響線を用いて着目部位が最も不利になる載荷状態のときに発生する主桁の活荷重応力を求める方法）と同じ方法を用いて FEM 解析により桁断面設計を行い、格子解析による場合との設計断面諸元の比較および鋼重の比較を行う。このとき、床版の合成作用は3章と同様、CASE1：床版のひび割れにより床版コンクリートの剛性を無視して設計する場合、CASE2：床版に引張応力が発生しても床版コンクリートを有効として設計する場合、CASE3：全橋にわたって床版の合成作用を無視して設計する場合の3ケースとする。設計対象は2章の栃木川橋下り線に3.1.1項で示した変更を加えたものとし、設計に使用する FEM 解析モデルは2.3節で示した図-2.3.1のとおりである（格子モデル（節点数760、要素数790）、FEMモデル（節点数22157、要素数25531））。

設計にあたっては、鋼道路橋設計ガイドライン（案）<sup>29</sup>の適用により各主桁でフランジ幅およびウェブ厚を一定にすることとした。ただし、ウェブ厚については、水平補剛材が1段で収まらない場合は板厚差1mm以内で変化させた。照査に用いる応力は橋軸方向の直応力とし、合成応力度の照査では直応力とせん断応力とを組み合わせた。設計で考慮する荷重は、図-4.1.1に示す前死荷重、後死荷重、活荷重および地震荷重とし、温度変化、支点沈下、床版コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響は考慮していない。

図-4.1.2に FEM 解析による設計で最適断面を決定するためのフローを示す。本設計では、コンピュータによる最適化設計を行っていないため、格子解析で決められた断面を初期値とし、断面の最適化の仕方については設計技術者の判断により行い、各荷重状態での FEM 解析を繰り返す行うことで断面を決定する。設計変数は上下フランジ幅・厚およびウェブ高・厚の計6個とし、材質に関しては初期値である格子計算のものを踏襲する。最適化の過程において上下フランジ幅やウェブ高が変化した場合でも、内部の要素分割数は一定とし、従って各要素のアスペクト比は変化する。



※主桁鋼重は、主桁+補剛材の鋼重

図-4.1.1 荷重載荷図（合成桁）

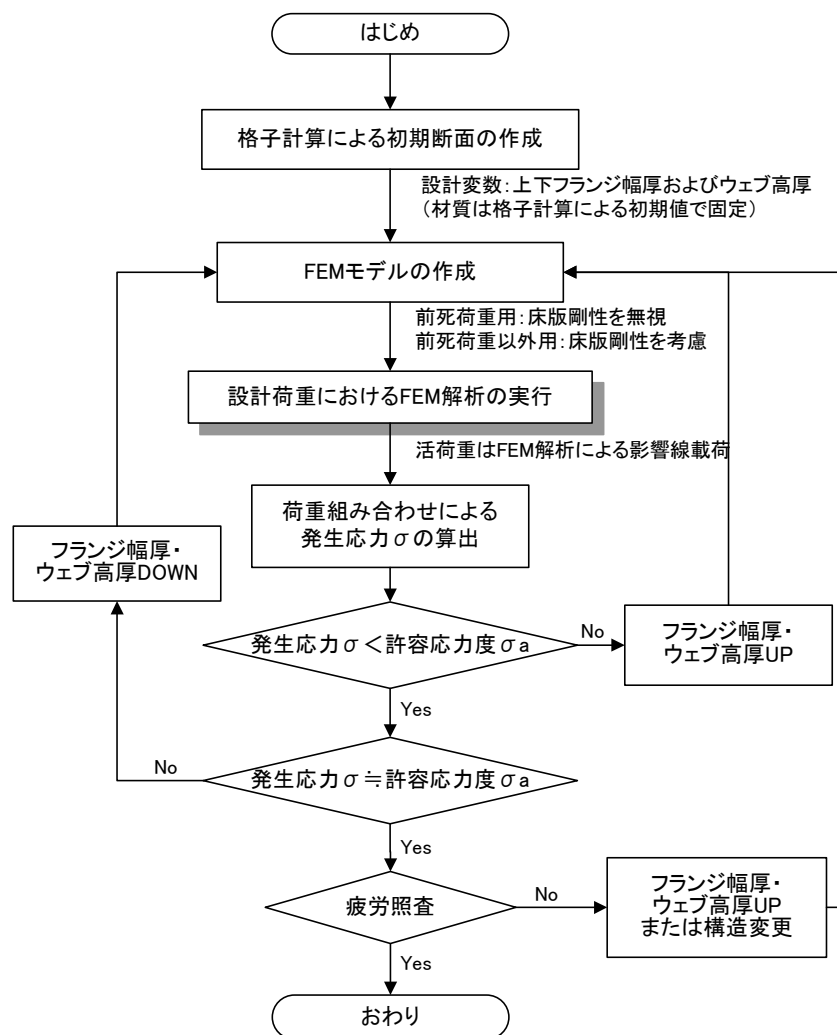
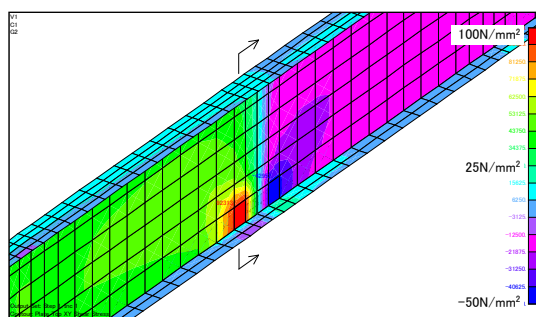


図-4.1.2 FEM 解析による設計の最適化フロー

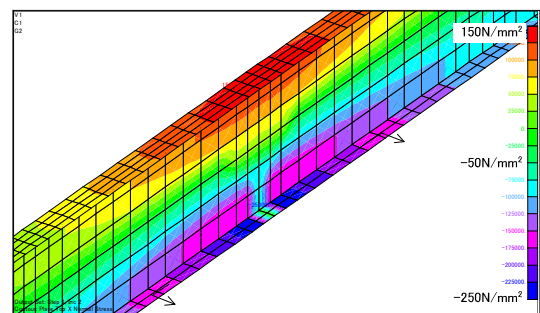
#### 4.2.2 支点上の応力算出にあたっての仮定

FEM 解析結果を設計に用いる場合、図-4.2.1(a)および図-4.2.2(a)に示すように中間支点付近で、ウェブにせん断応力の集中が、下フランジに橋軸方向直応力の集中がそれぞれ発生する。ウェブのせん断応力集中については、図-4.2.1(b)に示すように支点上の垂直補剛材をモデル化してもわずかに低減される程度であり、ウェブ内のせん断応力は一定と仮定している格子解析とは大きく異なる。なお、図-4.2.1 および図-4.2.2 は床版の合成作用を CASE1 とした場合のものを示したが、CASE2 および CASE3 でも同様の傾向となる。

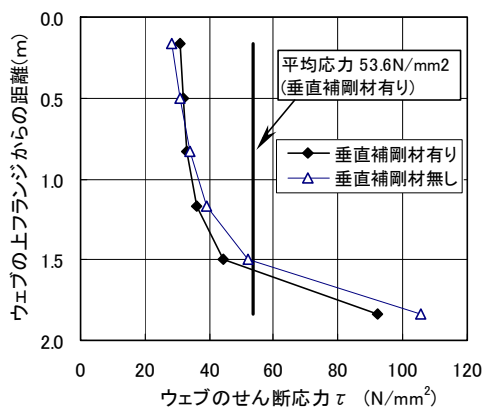
このため、平均応力をベースとする許容応力度法による設計を行う場合には、主桁の設計時に、この境界条件の影響による局部応力の取扱いを検討する必要がある。ここでは、ウェブのせん断応力集中については、ウェブの高さ方向で平均化し、この平均せん断応力を主桁ウェブの設計に用いることにした(図-4.2.1(b))。また、下フランジの橋軸方向直応力については、ソールプレート近傍の応力集中範囲以外の応力を 6 次多項式の曲線で内挿し、スムーズな応力分布を仮定し、この曲線の最大値を主桁下フランジの設計に用いることとした(図-4.2.2(b))。このような内挿や平均化の是非については 5 章で検討する。



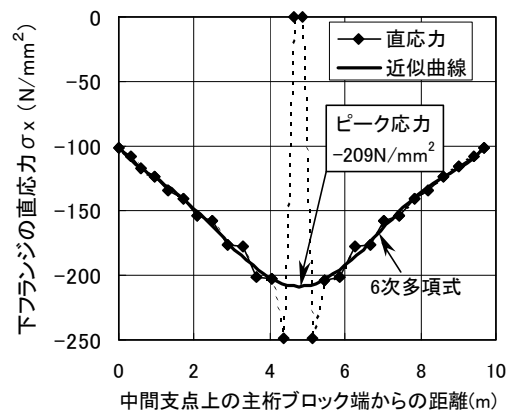
(a) 死荷重+活荷重時のせん断応力のコンター  
(図中は垂直補剛材の表示を省略)



(a) 死荷重+活荷重時の直応力のコンター  
(図中は垂直補剛材の表示を省略)



(b) せん断応力の平均値



(b) 直応力分布の近似曲線

図-4.2.1 中間支点上のウェブのせん断応力

図-4.2.2 中間支点上の下フランジの直応力

#### 4.2.3 格子解析と FEM 解析による設計結果の比較

##### (1) CASE1 : RC 床版を有する連続合成桁の場合

表-4.3.1 に格子解析と FEM 解析により設計された主桁断面(外桁 G4 と中桁 G3 の代表断面)における断面構成および応力照査の比較を、図-4.3.1 に主桁フランジの板厚差をそれぞれ示す。

支間中央の外桁、中桁ともに格子解析と FEM 解析でほぼ同じ断面となった。これは、前述のとおり、活荷重の載荷面積が大きいいため、発生応力に顕著な差が生じなかったためと考えられる。一方、中間支点上の外桁上下フランジは、FEM 解析の場合に板厚を 4~8mm 薄くすることできた。CASE1 の設計では全体的に見て外桁が板厚減となり、中桁が板厚増となっている。

表-4.3.1 格子解析と FEM 解析により設計された代表断面の応力照査比較 (CASE1)

##### (a) 外桁 G4

| 照査断面位置        |       |                   | A1~P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1橋脚支点上    |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 400 × 18   | 400 × 19   | 400 × 31   | 400 × 23   | 400 × 13   | 400 × 13   |
|               | ウェブ   | mm                | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 12  | 1800 × 12  | 1800 × 10  | 1800 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 550 × 30   | 550 × 30   | 550 × 37   | 550 × 31   | 550 × 20   | 550 × 16   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -135       | -133       | 157        | 170        | -99        | -95        |
|               | 後死荷重  | 〃                 | -3         | -3         | 29         | 18         | -3         | -2         |
|               | 活荷重   | 〃                 | -14        | -11        | 56         | 50         | -11        | -10        |
|               | 死+活   | 〃                 | -152 < 210 | -147 < 210 | 242 < 255  | 238 < 255  | -113 < 210 | -107 < 210 |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | 〃                 | 87         | 87         | -118       | -117       | 71         | 72         |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 24         | 17         | -32        | -22        | 26         | 17         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 93         | 95         | -62        | -72        | 106        | 114        |
|               | 死+活   | 〃                 | 204 < 210  | 199 < 210  | -212 < 219 | -211 < 219 | 203 < 210  | 203 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 12 < 120   | 12 < 120   | 64 < 145   | 67 < 145   | 13 < 120   | 12 < 120   |
| 架設時           |       |                   | -135 < 135 | -133 < 135 | -118 < 274 | -117 < 274 | -99 < 126  | -95 < 128  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.95 ≤ 1.2 | 0.91 ≤ 1.2 | 1.13 ≤ 1.2 | 1.14 ≤ 1.2 | 0.95 ≤ 1.2 | 0.94 ≤ 1.2 |

##### (b) 中桁 G3

| 照査断面位置        |       |                   | A1~P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1橋脚支点上    |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 400 × 13   | 400 × 13   | 400 × 14   | 400 × 15   | 400 × 13   | 400 × 13   |
|               | ウェブ   | mm                | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 400 × 22   | 400 × 21   | 400 × 35   | 400 × 36   | 400 × 17   | 400 × 18   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -109       | -121       | 170        | 182        | -76        | -87        |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 1          | -2         | 5          | 16         | 0          | -1         |
|               | 活荷重   | 〃                 | -10        | -11        | 62         | 47         | -9         | -8         |
|               | 死+活   | 〃                 | -118 < 210 | -134 < 210 | 237 < 255  | 245 < 255  | -85 < 210  | -96 < 210  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | 〃                 | 96         | 98         | -110       | -112       | 68         | 73         |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 9          | 20         | -5         | -18        | 2          | 14         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 96         | 83         | -68        | -57        | 110        | 101        |
|               | 死+活   | 〃                 | 201 < 210  | 201 < 210  | -183 < 193 | -187 < 193 | 180 < 210  | 188 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 12 < 120   | 10 < 120   | 51 < 145   | 60 < 145   | 13 < 120   | 9 < 120    |
| 架設時           |       |                   | -109 < 126 | -121 < 128 | -110 < 241 | -112 < 241 | -76 < 126  | -87 < 128  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.93 ≤ 1.2 | 0.92 ≤ 1.2 | 1.02 ≤ 1.2 | 1.11 ≤ 1.2 | 0.75 ≤ 1.2 | 0.81 ≤ 1.2 |

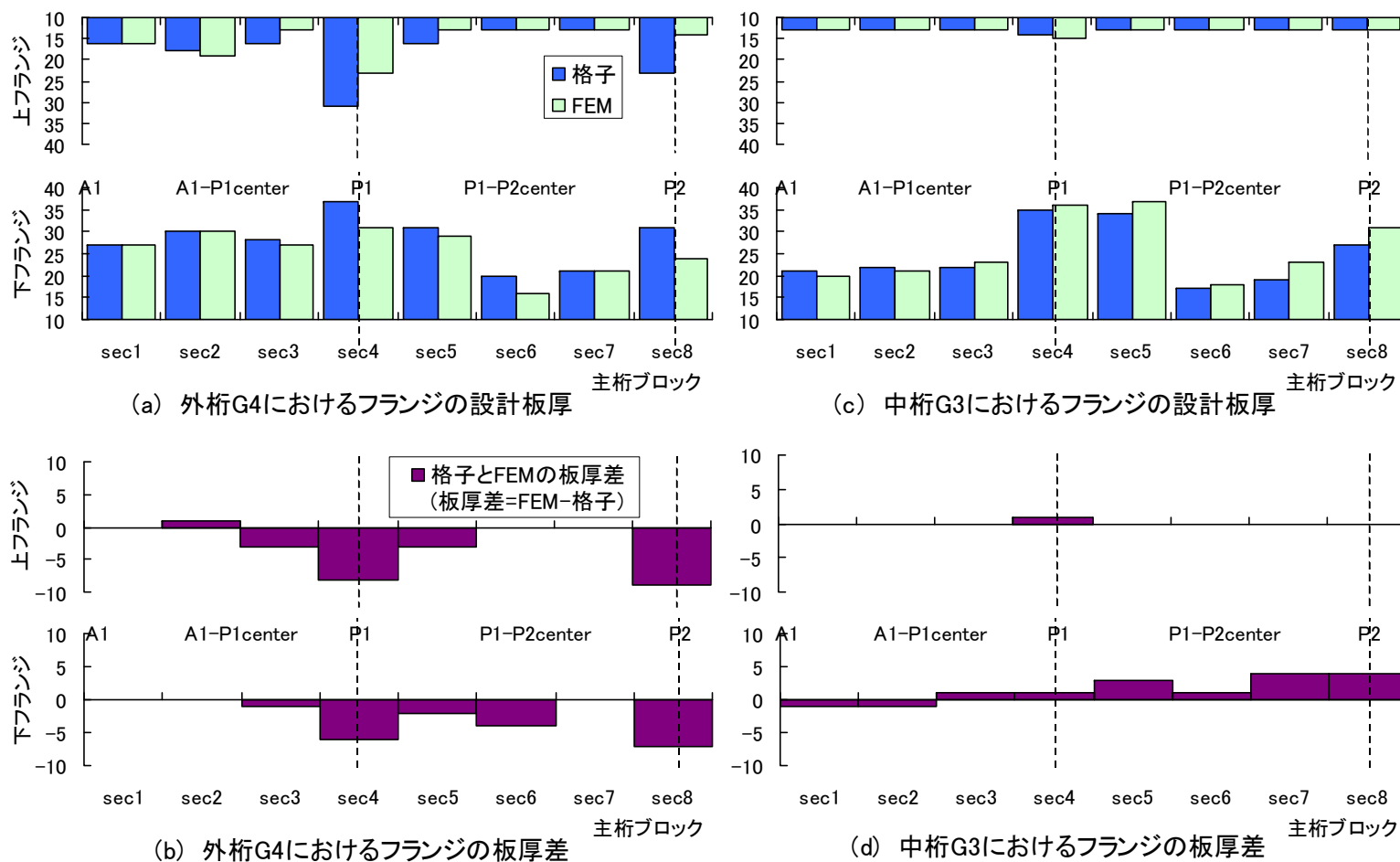


図-4.3.1 格子解析と FEM 解析により設計された主桁フランジの板厚差 (CASE1: 合成桁 RC の場合)

(2) CASE2 : PC 床版を有する連続合成桁の場合

表-4.3.2 に格子解析と FEM 解析により設計された主桁断面 (外桁 G4 と中桁 G3 の代表断面) における断面構成および応力照査の比較を、図-4.3.2 に主桁フランジの板厚差をそれぞれ示す。

支間中央の外桁、中桁ともに格子解析と FEM 解析ではほぼ同じ断面となり、中間支点上の外桁、中桁下フランジは、FEM 解析の場合に板厚を 5mm 程度薄くすることできた。また、CASE2 の設計では全体的に見て外桁と中桁で同程度の板厚減であった。

CASE1 と比較すると全体的に板厚増減となる領域が狭く、CASE2 の PC 床版を有する連続合成桁の場合では、格子解析および FEM 解析による設計断面に大差はないことがわかった。

表-4.3.2 格子解析と FEM 解析により設計された代表断面の応力照査比較 (CASE2)

(a) 外桁 G4

| 照査断面位置        |       |                   | A1~P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1橋脚支点上    |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 400 × 21   | 400 × 18   | 400 × 13   | 400 × 13   | 400 × 13   | 400 × 13   |
|               | ウェブ   | mm                | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 12  | 1800 × 12  | 1800 × 10  | 1800 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 550 × 29   | 550 × 28   | 550 × 34   | 550 × 29   | 550 × 18   | 550 × 17   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -134       | -134       | 218        | 210        | -105       | -98        |
|               | 後死荷重  | 〃                 | -2         | -3         | 5          | 1          | -1         | -2         |
|               | 活荷重   | 〃                 | -13        | -10        | 15         | 8          | -10        | -8         |
|               | 死+活   | 〃                 | -149 < 210 | -147 < 210 | 238 < 255  | 219 < 255  | -116 < 210 | -108 < 210 |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | 〃                 | 94         | 92         | -122       | -120       | 80         | 73         |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 16         | 16         | -24        | -22        | 15         | 13         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 94         | 95         | -69        | -72        | 106        | 105        |
|               | 死+活   | 〃                 | 204 < 210  | 203 < 210  | -215 < 219 | -214 < 219 | 201 < 210  | 191 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 15 < 120   | 13 < 120   | 64 < 145   | 64 < 145   | 14 < 120   | 12 < 120   |
| 架設時           |       |                   | -134 < 137 | -134 < 135 | -122 < 274 | -120 < 274 | -105 < 126 | -98 < 126  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.96 ≤ 1.2 | 0.95 ≤ 1.2 | 1.16 ≤ 1.2 | 1.15 ≤ 1.2 | 0.93 ≤ 1.2 | 0.84 ≤ 1.2 |

(b) 中桁 G3

| 照査断面位置        |       |                   | A1~P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1橋脚支点上    |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 400 × 14   | 400 × 14   | 400 × 13   | 400 × 13   | 400 × 13   | 400 × 13   |
|               | ウェブ   | mm                | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 12  | 1800 × 10  | 1800 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 400 × 23   | 400 × 21   | 400 × 45   | 400 × 39   | 400 × 14   | 400 × 13   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -124       | -121       | 208        | 203        | -90        | -88        |
|               | 後死荷重  | 〃                 | -2         | -1         | 4          | 3          | -1         | -1         |
|               | 活荷重   | 〃                 | -9         | -11        | 13         | 7          | -7         | -7         |
|               | 死+活   | 〃                 | -135 < 210 | -133 < 210 | 225 < 255  | 213 < 255  | -98 < 210  | -96 < 210  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | 〃                 | 101        | 101        | -114       | -112       | 88         | 84         |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 17         | 18         | -16        | -18        | 10         | 11         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 82         | 83         | -57        | -58        | 102        | 101        |
|               | 死+活   | 〃                 | 200 < 210  | 202 < 210  | -187 < 193 | -188 < 192 | 200 < 210  | 196 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 16 < 120   | 10 < 120   | 62 < 145   | 61 < 145   | 12 < 120   | 9 < 120    |
| 架設時           |       |                   | -124 < 128 | -121 < 128 | -114 < 241 | -112 < 240 | -90 < 126  | -88 < 126  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.92 ≤ 1.2 | 0.93 ≤ 1.2 | 1.12 ≤ 1.2 | 1.14 ≤ 1.2 | 0.92 ≤ 1.2 | 0.88 ≤ 1.2 |

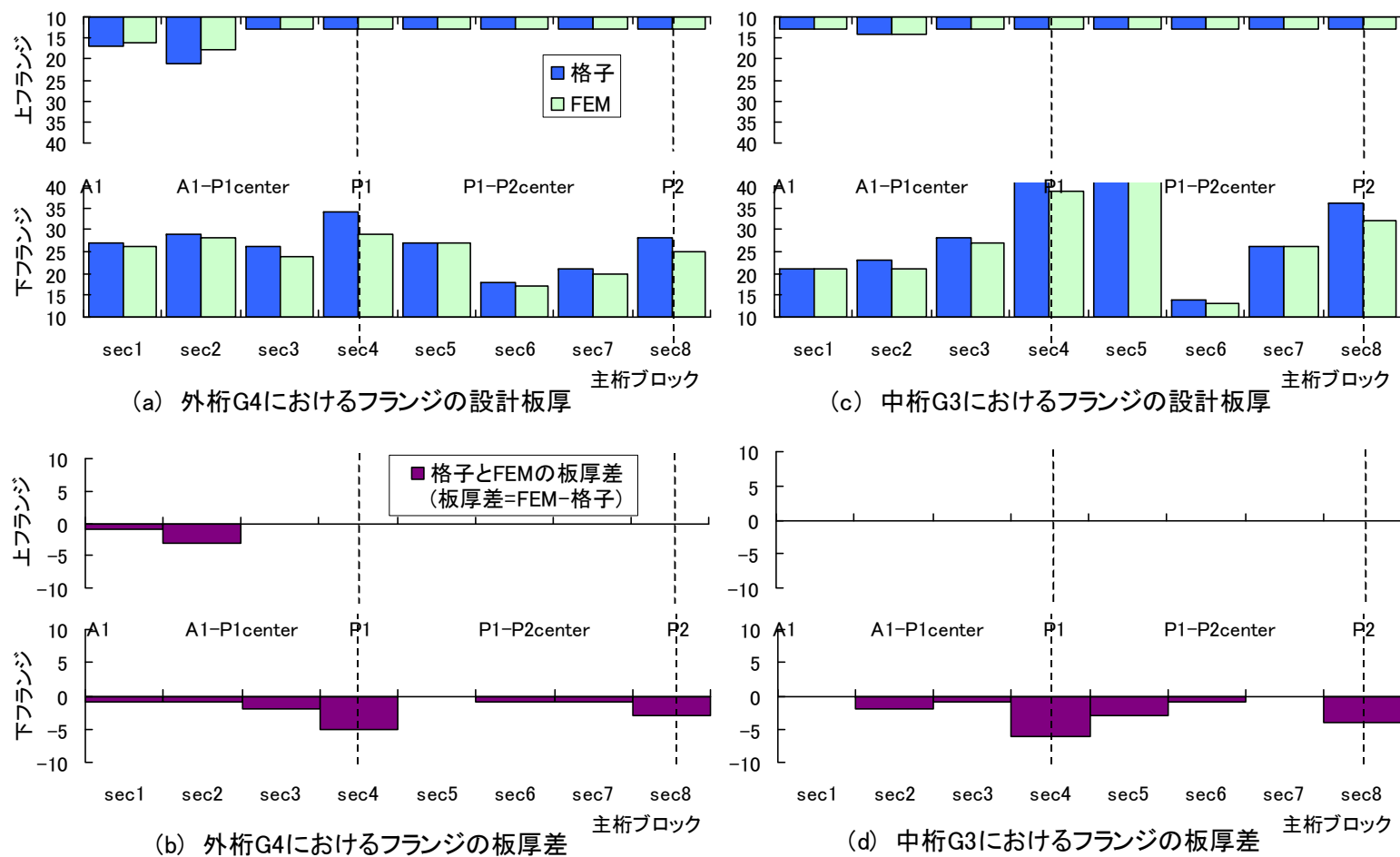


図-4.3.2 格子解析と FEM 解析により設計された主桁フランジの板厚差 (CASE2: 合成桁 PC の場合)

### (3) CASE3：連続非合成桁の場合

表-4.3.3に格子解析とFEM解析により設計された主桁断面(外桁G4と中桁G3の代表断面)における断面構成および応力照査の比較を、図-4.3.3に主桁フランジの板厚差をそれぞれ示す。

CASE1およびCASE2の場合の設計と異なり、中間支点上の外桁、中桁上下フランジは格子解析とFEM解析でほぼ同じ断面となり大きな板厚減はできなかったが、逆に支間中央の特に中桁ではFEM解析を設計に用いることで板厚を最大10mm薄くすることができた。また、全体的に板厚増減となる領域が広く、CASE3の連続非合成桁の場合では、格子解析およびFEM解析による設計断面は注目すべき差がみられる。

表-4.3.3 格子解析とFEM解析により設計された代表断面の応力照査比較 (CASE3)

#### (a) 外桁 G4

| 照査断面位置        |       |                   | A1～P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1～P2支間中央  |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 450 × 38   | 450 × 40   | 450 × 32   | 450 × 34   | 450 × 26   | 450 × 21   |
|               | ウェブ   | mm                | 2000 × 10  | 2000 × 10  | 2000 × 11  | 2000 × 11  | 2000 × 10  | 2000 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 550 × 31   | 550 × 32   | 550 × 34   | 550 × 31   | 550 × 22   | 550 × 17   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 死荷重   | N/mm <sup>2</sup> | -91        | -97        | 150        | 146        | -78        | -78        |
|               | 活荷重   | 〃                 | -102       | -107       | 93         | 90         | -114       | -124       |
|               | 死+活   | 〃                 | -193 < 210 | -204 < 210 | 243 < 255  | 236 < 255  | -192 < 210 | -202 < 210 |
| $\sigma_{sl}$ | 死荷重   | 〃                 | 90         | 98         | -129       | -129       | 76         | 75         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 102        | 107        | -80        | -82        | 111        | 118        |
|               | 死+活   | 〃                 | 192 < 210  | 205 < 210  | -209 < 219 | -211 < 219 | 187 < 210  | 193 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 14 < 120   | 14 < 120   | 67 < 145   | 66 < 145   | 13 < 120   | 12 < 120   |
| 架設時           |       |                   | -91 < 137  | -97 < 155  | -129 < 274 | -129 < 274 | -78 < 126  | -78 < 155  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.86 ≤ 1.2 | 0.97 ≤ 1.2 | 1.12 ≤ 1.2 | 1.14 ≤ 1.2 | 0.85 ≤ 1.2 | 0.94 ≤ 1.2 |

#### (b) 中桁 G3

| 照査断面位置        |       |                   | A1～P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            | P1～P2支間中央  |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               |       |                   | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 400 × 24   | 400 × 13   | 400 × 19   | 400 × 22   | 400 × 19   | 400 × 13   |
|               | ウェブ   | mm                | 2000 × 10  | 2000 × 10  | 2000 × 11  | 2000 × 11  | 2000 × 10  | 2000 × 10  |
|               | 下フランジ | mm                | 400 × 24   | 400 × 14   | 400 × 36   | 400 × 34   | 400 × 15   | 400 × 13   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      | SM490Y     | SM490Y     |
| $\sigma_{su}$ | 死荷重   | N/mm <sup>2</sup> | -100       | -104       | 157        | 149        | -74        | -77        |
|               | 活荷重   | 〃                 | -90        | -95        | 86         | 85         | -104       | -118       |
|               | 死+活   | 〃                 | -190 < 210 | -199 < 210 | 243 < 255  | 234 < 255  | -178 < 210 | -195 < 210 |
| $\sigma_{sl}$ | 死荷重   | 〃                 | 100        | 101        | -117       | -116       | 81         | 77         |
|               | 活荷重   | 〃                 | 90         | 93         | -65        | -68        | 113        | 118        |
|               | 死+活   | 〃                 | 190 < 210  | 194 < 210  | -182 < 193 | -184 < 193 | 194 < 210  | 195 < 210  |
| $\tau$        |       |                   | 14 < 120   | 11 < 120   | 46 < 145   | 47 < 145   | 10 < 120   | -9 < 120   |
| 架設時           |       |                   | -100 < 128 | -104 < 131 | -117 < 241 | -116 < 241 | -74 < 126  | -77 < 123  |
| 合成応力度         |       |                   | 0.83 ≤ 1.2 | 0.91 ≤ 1.2 | 1.01 ≤ 1.2 | 1.01 ≤ 1.2 | 0.86 ≤ 1.2 | 0.87 ≤ 1.2 |

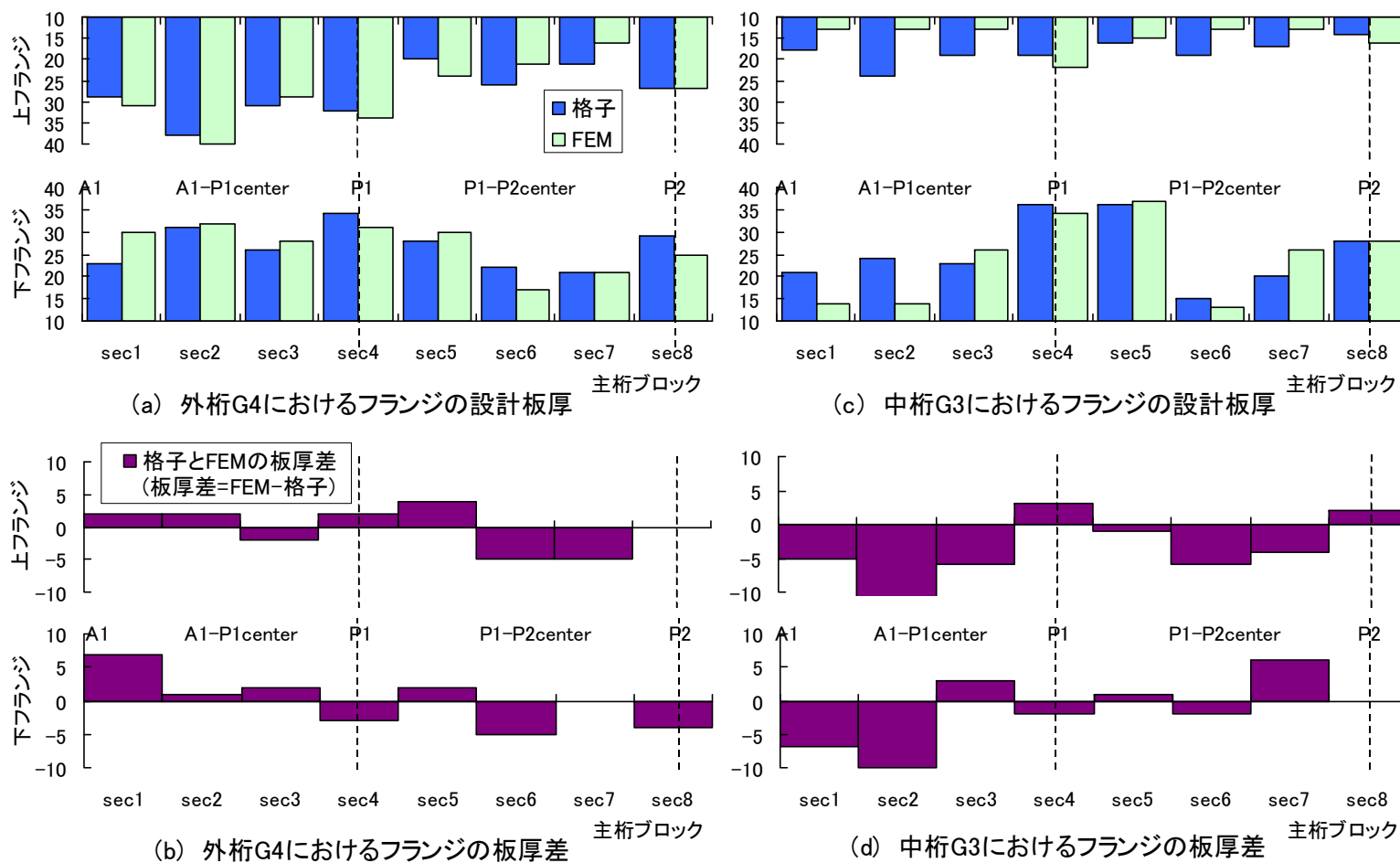


図-4.3.3 格子解析と FEM 解析により設計された主桁フランジの板厚差 (CASE3 : 非合成桁の場合)

#### 4.2.4 鋼重低減効果

図-4.4.1 に各種条件に従って設計された主桁とその他(主桁以外の部材)の鋼重の比率を示す。主桁鋼重には補剛材の鋼重は含めていない。その他部材の鋼重には垂直・水平補剛材、横桁および下横構の鋼重が含まれ、それらの合計とした。FEM 解析結果を用いて設計した場合、格子解析結果を用いた場合と比較して今回の橋梁では 1~2%の鋼重低減にとどまった。

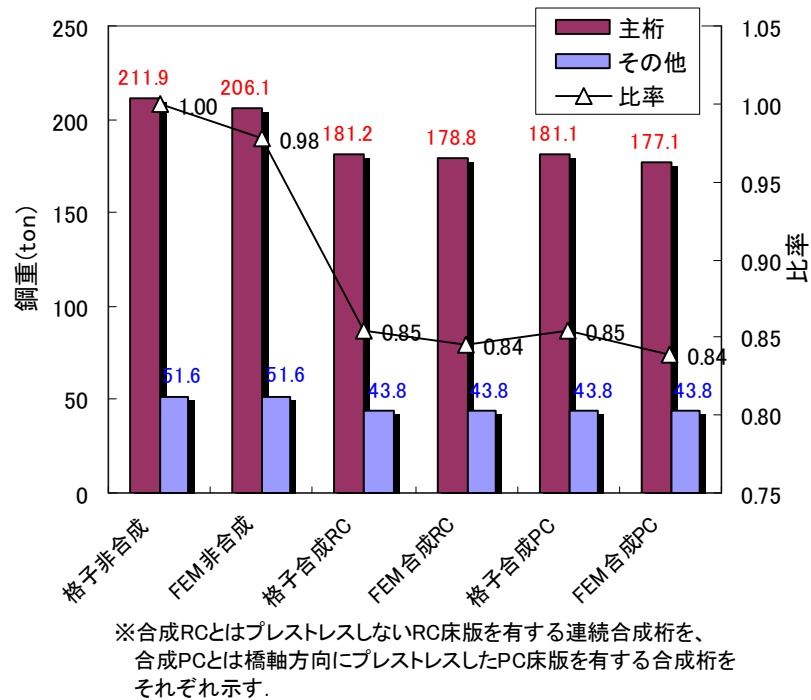


図-4.4.1 各種条件により設計された鋼重とその比率

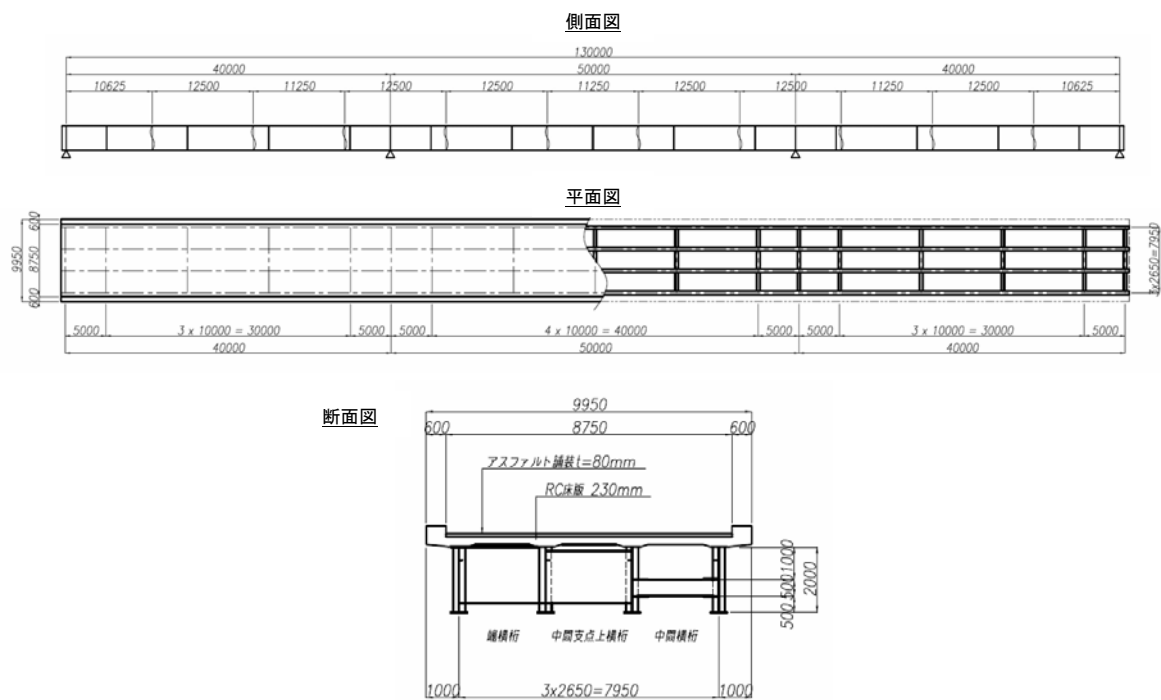
### 4.3 構造簡略化した鋼多主桁橋の試設計

4.2 節までは、各種 2 次部材が取り付けられた従来形式の鋼多主桁橋に対して試設計を行い、鋼重低減の効果を検討した。本節では、合理的な鋼多主桁橋の上部工形式として、下横構・対傾構を省略するとともに横桁間隔を大きくした構造形式を考え、このように構造簡略化がなされた支間長の異なる以下の 2 橋に対する立体 FEM 解析を用いた試設計を行う。

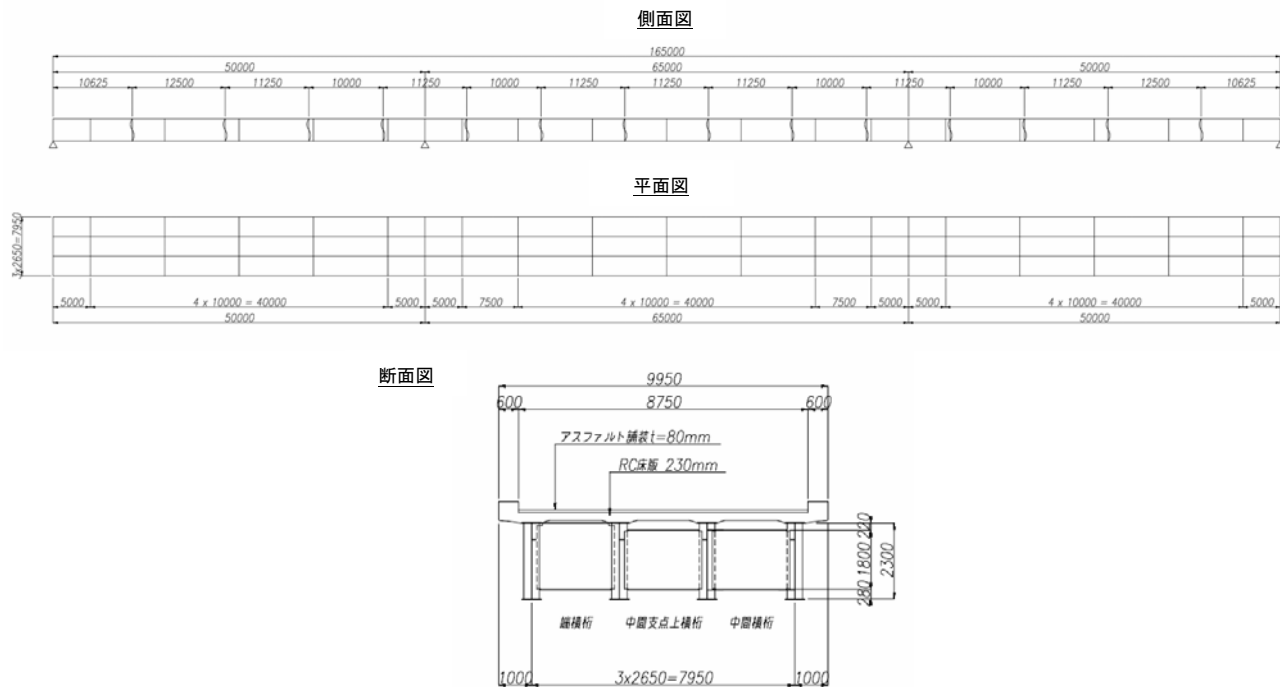
- ① 支間長 40m+50m+40m で RC 床版を有する 3 径間連続合成 4 主桁橋  
(以下、簡略化 40m モデルと称する)
- ② 支間長 50m+65m+50m で RC 床版を有する 3 径間連続合成 4 主桁橋  
(以下、簡略化 50m モデルと称する)

図-4.5.1 に橋梁諸元の概要を示す。4 章で設計した橋梁の諸元（図-2.2.1 参照）と大きく違う点は、径間数、支間割、床版張出し長、下横構の有無、横桁の形状である。FEM モデルは 2.3 節で示した方法と同様にモデル化し、FEM 解析による影響線載荷方法は 3 章の CASE1 と同様な方法を用いた。FEM 解析による設計手法は 4.2 節と同様の方法を用いた。また、比較のため、格子解析による同橋梁の設計と、橋梁諸元は同じで下横構・対傾構が取り付けられた従来橋梁の格子解析による設計を行った。

図-4.5.2 に構造簡略化による鋼重比較を示す。簡略化橋梁を FEM 解析で設計した場合、格子解析で設計した場合と比較して 2～3%の鋼重低減となり、前項までの栃木川橋の設計結果（図-4.4.1 参照）よりも FEM 解析を設計に用いた場合の効果が若干増している。その理由について言及するには試設計の数が少ないが、床版の張出し長を今回の橋梁では栃木川橋の張出し長より短くしたことにより、格子解析と FEM 解析での幅員方向の影響線の形状に違いが生じたためではないかと考えられる。また、簡略化 40m モデルと簡略化 50m モデルによる鋼重低減率はほぼ同程度であり、FEM を設計に用いた場合の鋼重低減効果において支間長の影響は小さい可能性があることがわかった。

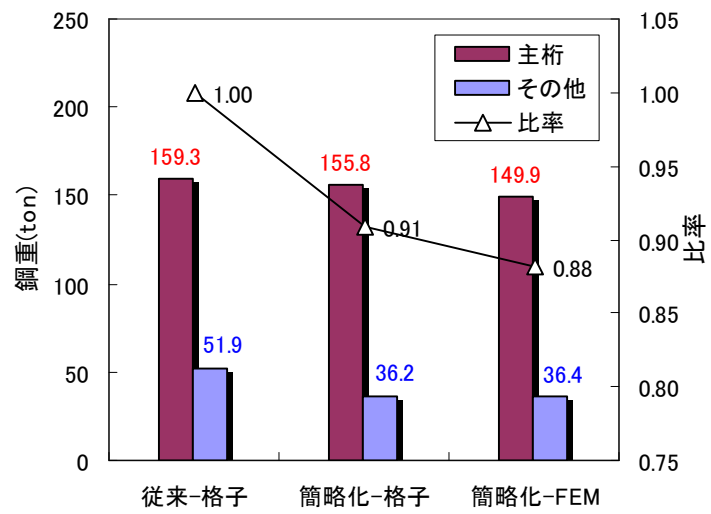


(a) 簡略化 40m モデル

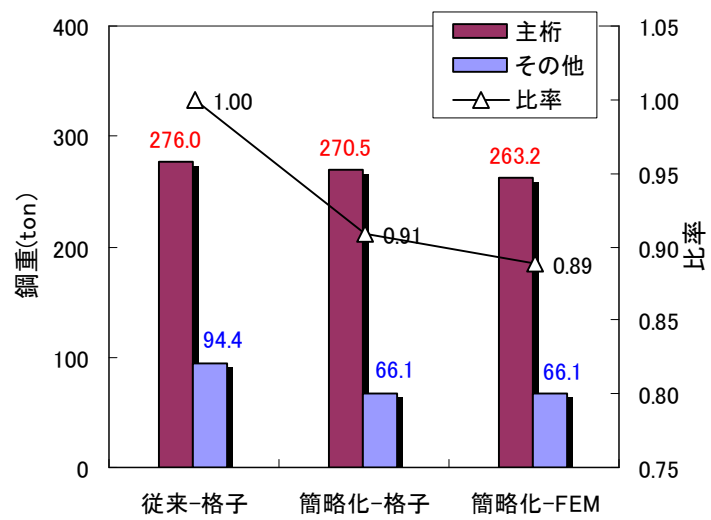


(b) 簡略化 50m モデル

図-4.5.1 構造を簡略化した3径間連続合成4主鈑桁橋の橋梁諸元の概要



(a) 簡略化 40m モデル



(b) 簡略化 50m モデル

図-4.5.2 構造簡略化した鋼多主桁橋を設計した場合の鋼重比較

#### 4.4 主桁本数を減らした鋼少数主桁橋の試設計

本節では、構造等を省略化し合理化を図った鋼少数主桁橋を想定して、立体 FEM 解析を用いた試設計を行い、これまでと同様に鋼重低減効果を検討する。設計対象とした橋梁は、主桁本数の異なる以下の 2 橋とする。また、主桁間隔の違いによる影響線形状の相違の影響を確認するため、各橋梁とも全幅員を一定にして主桁間隔を変えた 3 ケースで検討する。

##### ① 支間長 40m+50m+40m で RC 床版を有する 3 径間連続合成 2 主桁橋

(以下、簡略化 2 主桁モデルと称する)

ケース 1：主桁間隔 5.5m の場合

ケース 2：主桁間隔 6.3m の場合

ケース 3：主桁間隔 7.1m の場合

##### ② 支間長 40m+50m+40m で RC 床版を有する 3 径間連続合成 3 主桁橋

(以下、簡略化 3 主桁モデルと称する)

ケース 1：主桁間隔 3.6m の場合

ケース 2：主桁間隔 3.8m の場合

ケース 3：主桁間隔 4.0m の場合

図-4.6.1 に橋梁諸元の概要を示す。支間割りおよび構造簡略化の度合は 4.3 節の簡略化 40m モデル（4 主桁）と同じであり、全幅員は旧日本道路公団で実績の多い 11m 級とした。FEM モデルは 2.3 で示した方法と同様にモデル化し、FEM 解析による影響線載荷方法は 3 章の CASE1 と同様な方法を用いた。FEM 解析による設計手法は 4.2 節と同様の方法を用いた。

図-4.6.2 に鋼少数主桁橋を設計した場合の鋼重比較を示す。2 主桁モデルでは、格子解析で設計した場合と比較して FEM 解析で設計した場合 2~3%の鋼重低減となり、主桁間隔が比較した中で最も狭く床版張出し長が広いケース 1 の鋼重低減効果が最も大きかった。また、3 主桁モデルでは、3~5%の鋼重低減となり、主桁間隔が比較した中で真ん中のケース 2 の鋼重低減効果が最も大きかった。以上より、全幅員に対する主桁間隔および床版張出し長のバランスにより、FEM 解析を設計に用いた時の効果は変化することがわかった。

図-4.6.3 に主桁本数の違いによる FEM 解析を設計に用いた場合の鋼重低減効果の比較を示す。なお、同図に示した 4 主桁とは前項の簡略化 40m モデルのことである。今回、設計対象とした橋梁の諸元（支間割り、全幅員）では、3 主桁の場合が最も鋼重低減効果が大きかった。この理由を図-4.6.4 に示す幅員方向の影響線形状の比較から考察すると、3 主桁の場合では床版の荷重分配作用に対する床版支間のバランスが良く、格子解析との差が大きいためと考えられ、2 主桁の場合では床版支間が広すぎるため床版の荷重分配作用の程度が 3 主桁の場合と比べて小さいためではないかと考えられる。

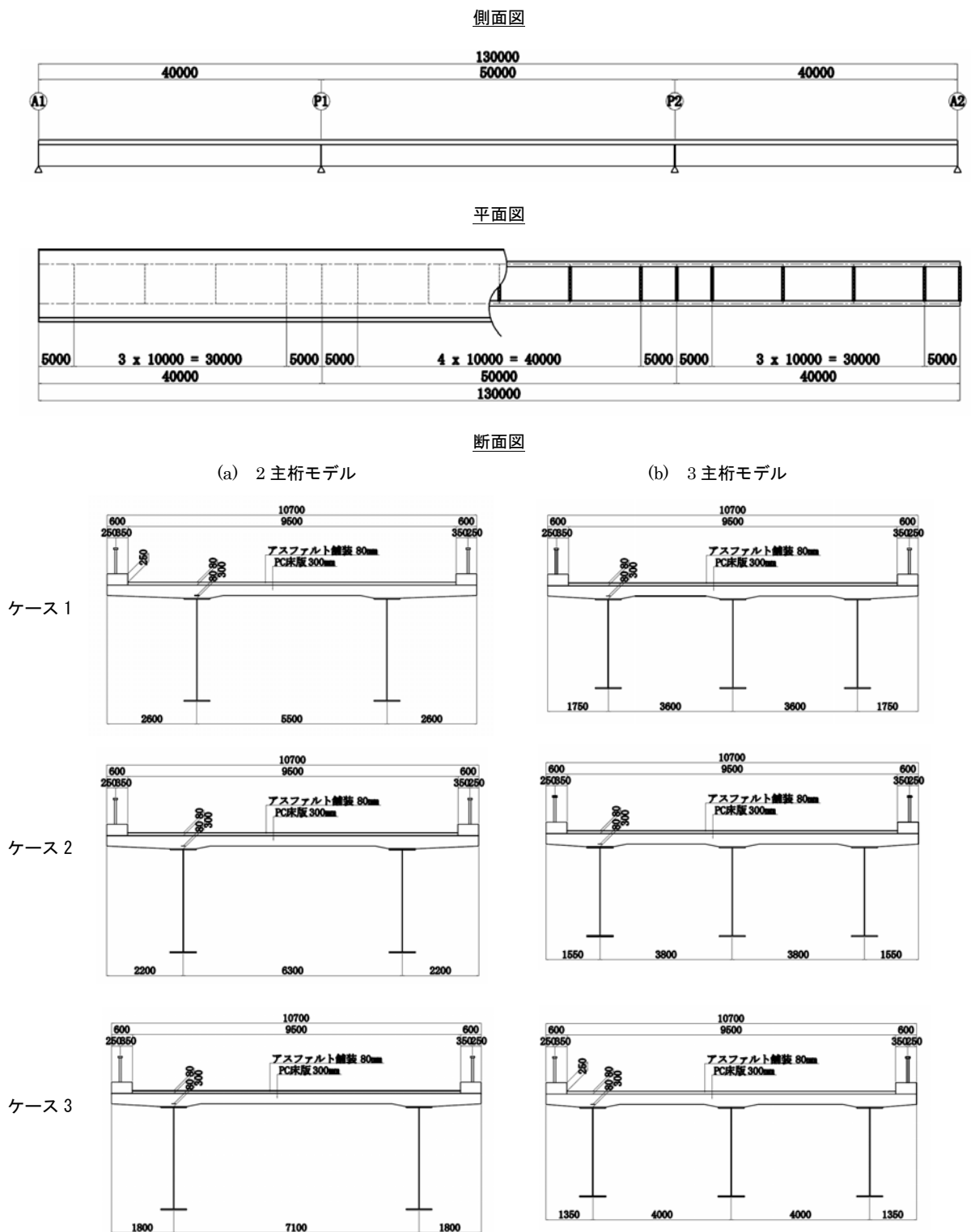
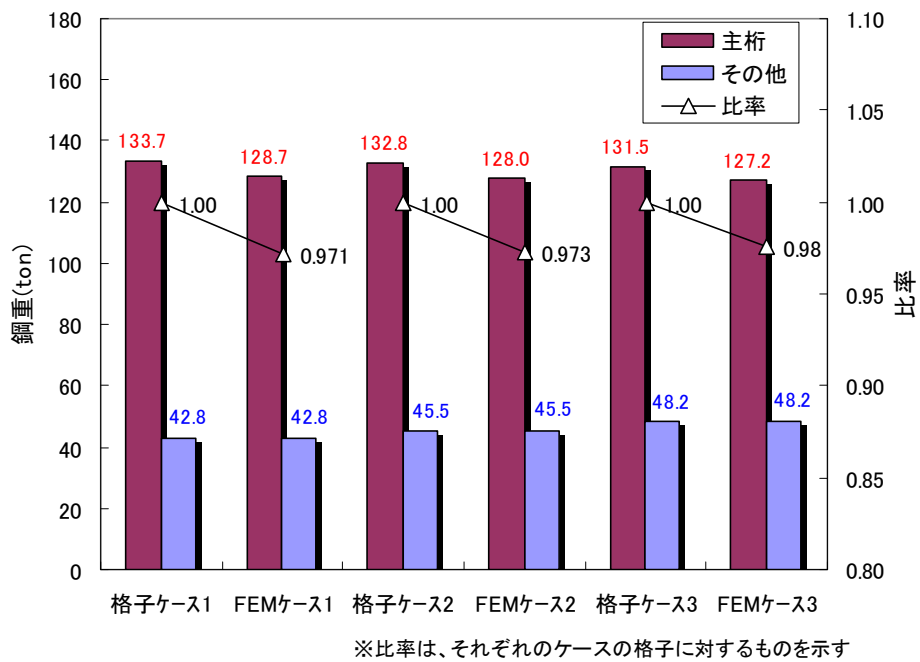
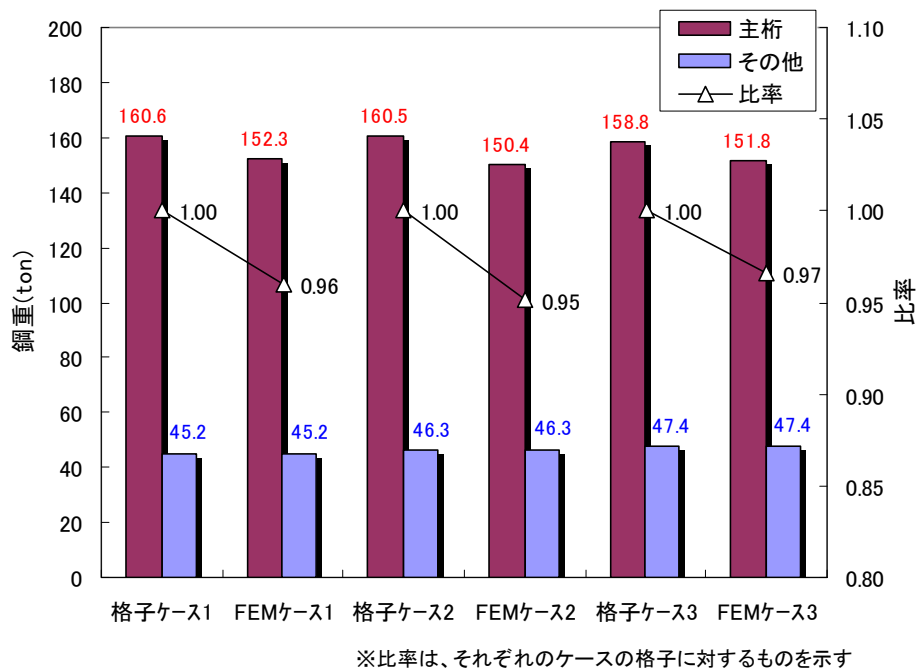


図-4. 6. 1 設計対象として想定した鋼少数主桁橋の橋梁諸元の概要



(a) 簡略化 2 主桁モデル



(b) 簡略化 3 主桁モデル

図-4.6.2 合理化鋼少数主桁橋を設計した場合の鋼重比較

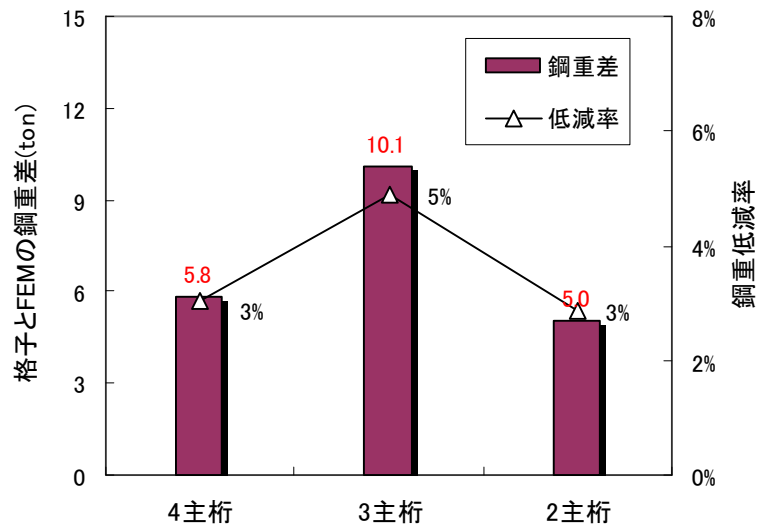
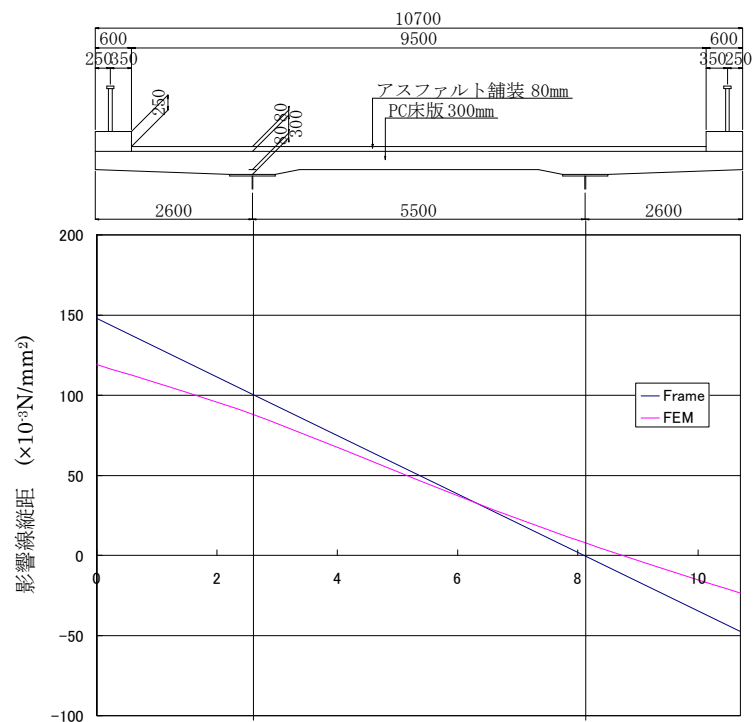
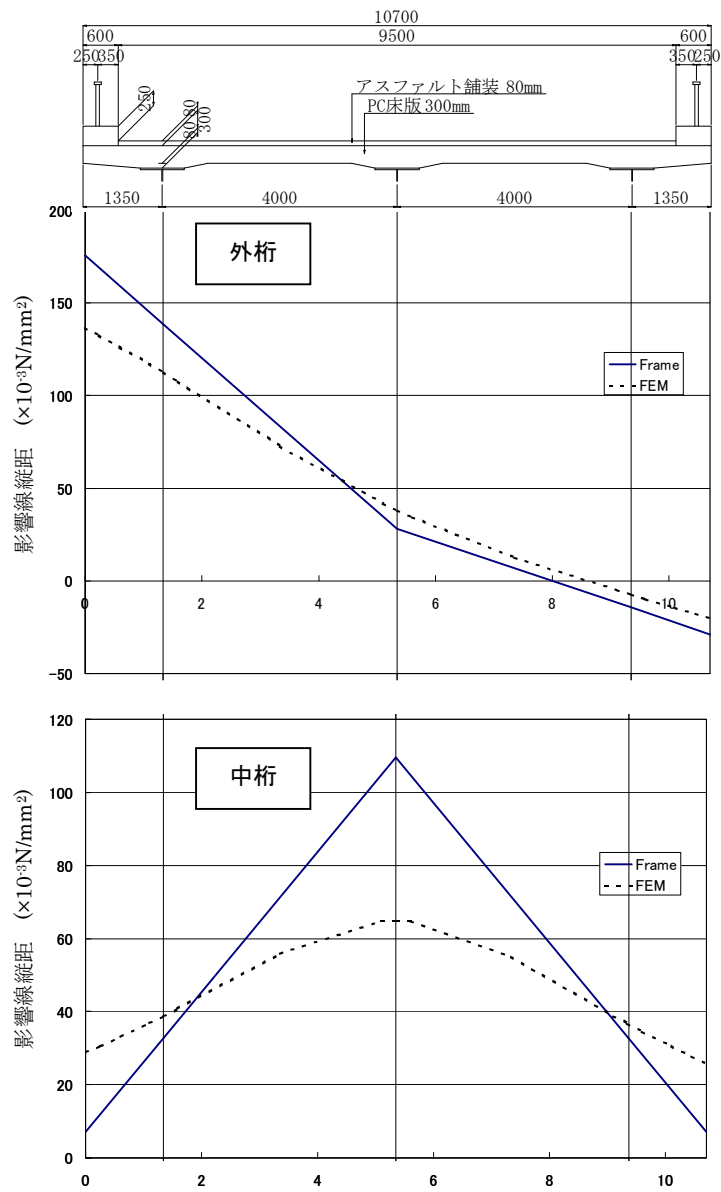


図-4. 6. 3 主桁本数の違いによるの鋼重低減効果の比較



(a) 支間中央下フランジ直応力に着目した場合の影響線（簡略化 2 主桁モデル）

図-4. 6. 4 主桁本数の違いによるの幅員方向の影響線形状の比較



(b) 支間中央下フランジ直応力に着目した場合の影響線（簡略化3主桁モデル）

図-4.6.4 主桁本数の違いによるの幅員方向の影響線形状の比較（つづき）

## 5章 中間支点部の応力性状に与えるモデル化の影響に関する検討

### 5.1 検討内容

前章までの FEM 解析を用いた主桁設計では、4.2.2 項で示したように中間支点部で発生した応力集中を、ウェブのせん断応力集中についてはウェブの高さ方向で平均化し、下フランジの橋軸方向直応力についてはソールプレート近傍の応力集中範囲以外の応力を 6 次多項式の曲線で内挿し、各部材の応力照査に用いることとした。本章では、このような内挿や平均化により得られた応力と応力集中部の応力性状との関係を確認するため、FEM により局部応力の算出を行い、主にモデル化の違いによる応力集中の違いを分析する。また、応力集中部に対する照査方法について若干の考察を加える。なお、検討を簡略化するため、連続合成桁の中間支点部を I 桁の片持ばりに置き換え、支点部の応力集中を扱うことにする。

5.2 節では、応力集中部の応力性状を把握するため、ソリッド要素を用いた要素分割の細かいモデル（最小要素サイズ 2mm 立方、以下、細ソリッドモデルという）で線形弾性解析を行い、その結果をシェル要素を用いた要素分割の細かいモデル（最小要素サイズ 2mm 四方、以下、細シェルモデルという）やはり理論による結果と比較する。ここで、本来は正確な応力分布形状として実測値を用いるべきではあるが、このような支点上ソールプレート近傍の局部応力の分布を詳細に計測した例は見あたらないこと、実測値の場合、荷重作用が複雑であり厳密な意味での比較とならない可能性があることから、ここでは、細ソリッドモデルによる結果を真値に近い参考値として扱うことにした。この細ソリッドモデルによる結果から部材の応力照査に用いるための平均応力を算出し、前章までの設計で用いてきた要素分割程度のシェルモデル（最小要素サイズ 50mm 四方、以下、設計用シェルモデルという）による結果と比較する。

5.3 節では、上述した片持ばりの細ソリッドモデルに、バイリニア型の応力-ひずみ構成則を与えて材料非線形解析（弾塑性解析）を行って塑性化する領域について検討する。

5.4 節では、2 径間連続 4 主 I 桁橋の中間支点上に細ソリッドモデルを適用した上部工全体モデルにより局部応力を求め、この応力を基に疲労照査を試みる。疲労照査に用いる応力は、鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>29)</sup>を参考にして、橋軸方向の応力分布より求めたホットスポット応力（B 法）とする。

なお、いずれの検討においても解析ソフトウェアは汎用有限要素プログラム「NASTRAN ver.2001.0.9」<sup>14)</sup>を使用し、シェル要素には 4 節点アイソパラメトリックシェル要素 CQUAD4<sup>14)</sup>（数値ロッキングを回避するために低減積分を適用している要素。1 節点 6 自由度。ただし、面内回転は K6ROT<sup>14)</sup>で回転剛性を 100 とした。）を用いた。ソリッド要素には主として 8 節点六面体アイソパラメトリックソリッド要素 CHEXA<sup>14)</sup>および若干ではあるが 6 節点三角柱アイソパラメトリックソリッド要素 CPENTA<sup>14)</sup>（いずれのソリッド要素についても数値ロッキングを回避するためにバブル関数補間付低減せん断積分を適用している要素。1 節点 3 自由度。）を用いる。

## 5.2 モデル化の違いによる局部応力の比較

### 5.2.1 解析対象と解析モデル

応力集中部の応力性状を把握するため、ソリッド要素を用いた細メッシュモデルで線形弾性解析を行い、その結果をシェル要素を用いた細メッシュモデルやはり理論と比較する。

図-5.2.1 に解析対象とした片持ばりを示す。最小 2mm 立方のソリッド要素でモデル化することを考慮し、部材長は 5m とし、上下フランジの板厚は同じとした。荷重は、この I 桁 1 本に対する床版の有効幅を 3.7m とした場合の活荷重 (L 荷重) を想定して単位長さあたり 50kN (=  $(10\text{kN/m}^2 + 3.5\text{ kN/m}^2) \times 3.7\text{m}$ ) とし、解析モデルにはこの線荷重 50kN/m をフランジ幅 0.35m で除した等分布荷重  $142.9\text{kN/m}^2$  を与えた。

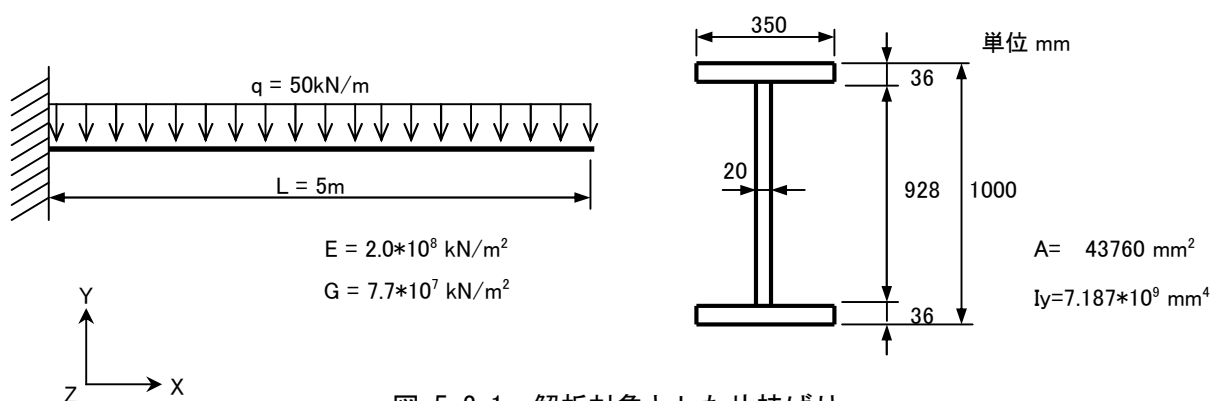


図-5.2.1 解析対象とした片持ばり

この片持ばりをはり理論により解くと以下ようになる。

固定端の曲げモーメント  $M = -qL^2 / 2 = -625\text{kNm}$

固定端のせん断力  $Q = qL = 250\text{kN}$

固定端の圧縮応力  $\sigma_x = My / I = -625 * 10^6 * 500 / 7.187 * 10^9 = -43.5\text{ N/mm}^2$

固定端のせん断応力  $\tau = Q / A_w = 250 * 10^3 / 18560 = 13.5\text{ N/mm}^2$

自由端の鉛直変位  $\delta y = -qL^4 / 8EI = -2.72\text{mm}$

細ソリッドモデルおよび細シェルモデルの FEM 要素分割図を、図-5.2.2 および図-5.2.3 にそれぞれ示す。鋼桁のモデル化は応力集中部から離れるに従って徐々に粗くした。支承は鋼製ピン支承を想定して、細ソリッドモデル、細シェルモデルともに上沓側をソリッド要素でモデル化した。ただし、ソールプレート本体、ソールプレートと下フランジを接合するための溶接ビード、ならびに支点上垂直補剛材はモデル化していない。細ソリッドモデルは約 41 万要素、細シェルモデルは約 13 万要素となった。

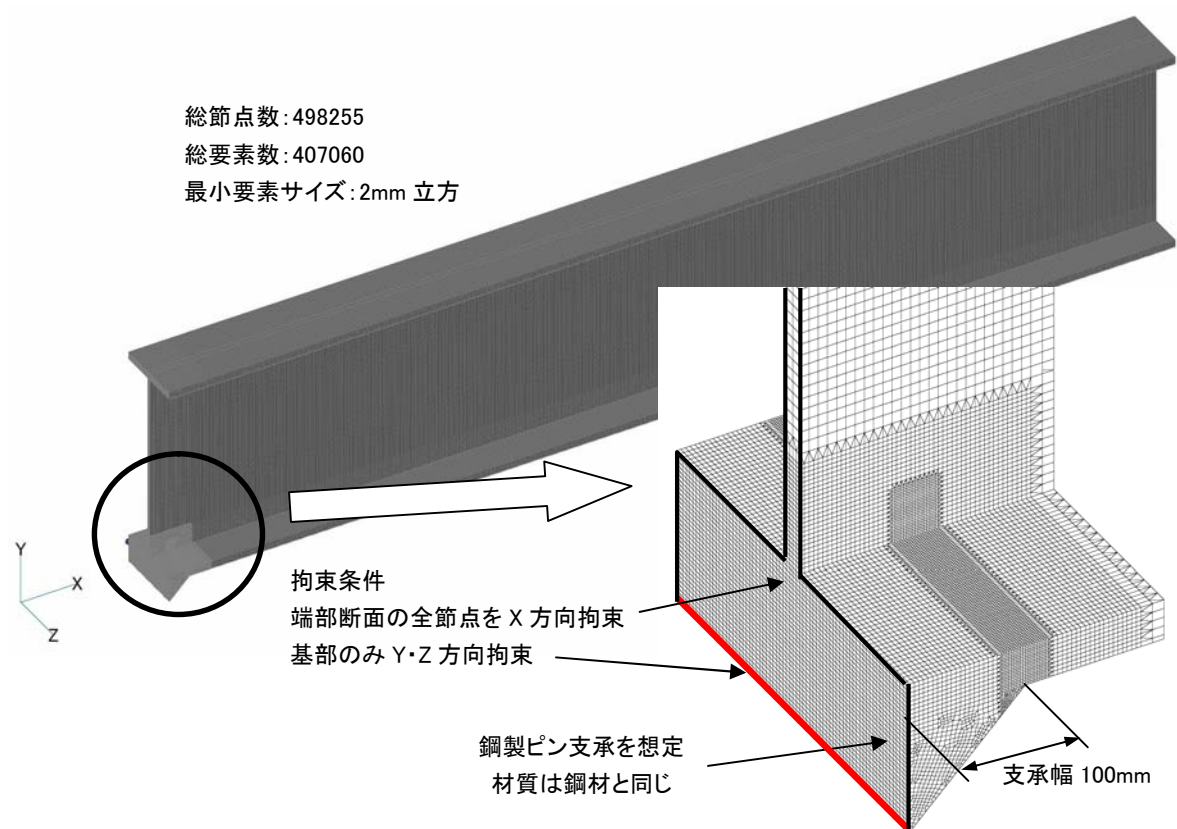


図-5.2.2 細ソリッドモデル

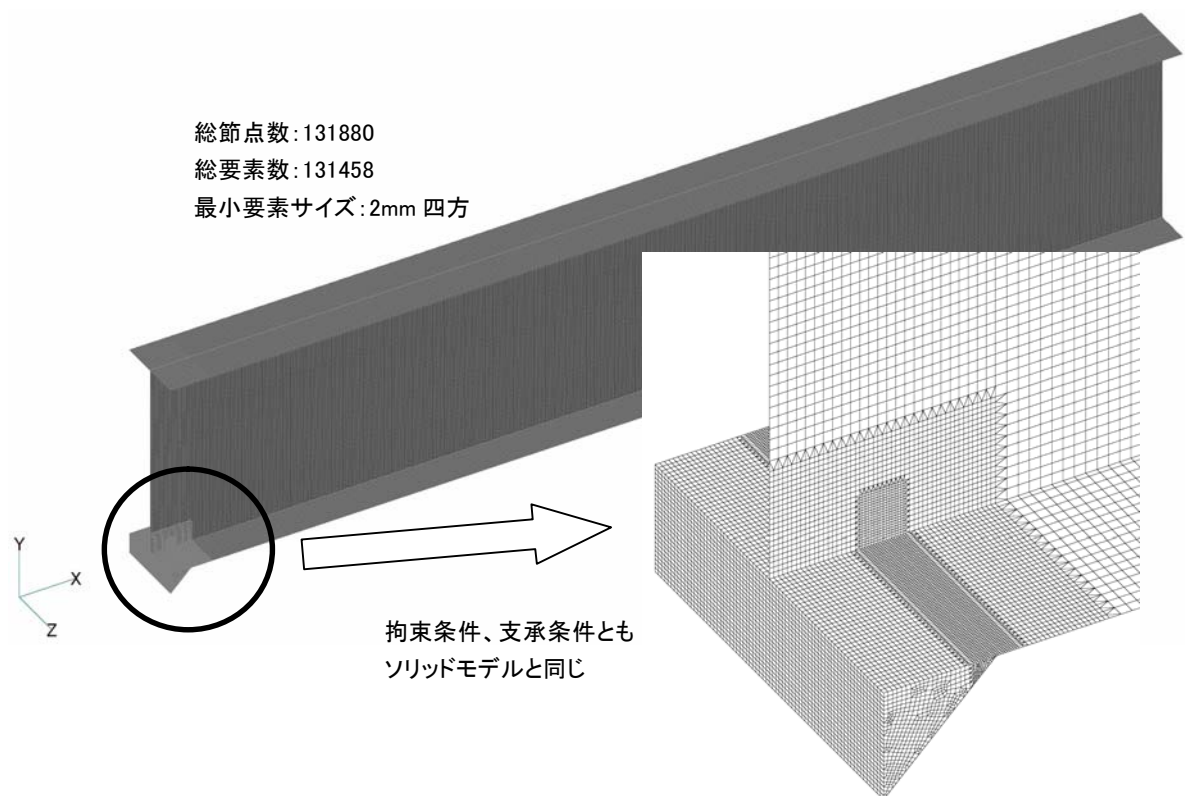


図-5.2.3 細シェルモデル

## 5.2.2 解析結果

### (1) 下フランジ直応力 $\sigma_x$ の比較

以下、主な結果を図表に示す。

#### 1) コンター比較

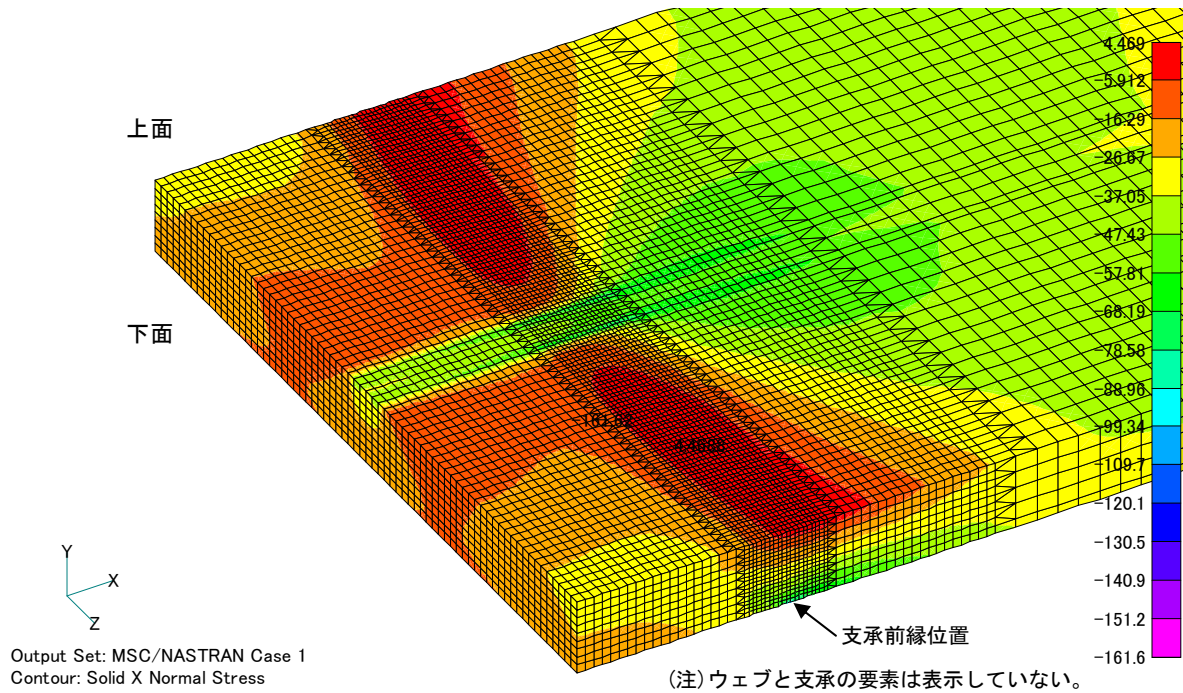


図-5.2.4 細ソリッドモデルの直応力  $\sigma_x$  コンター（下フランジ上面）

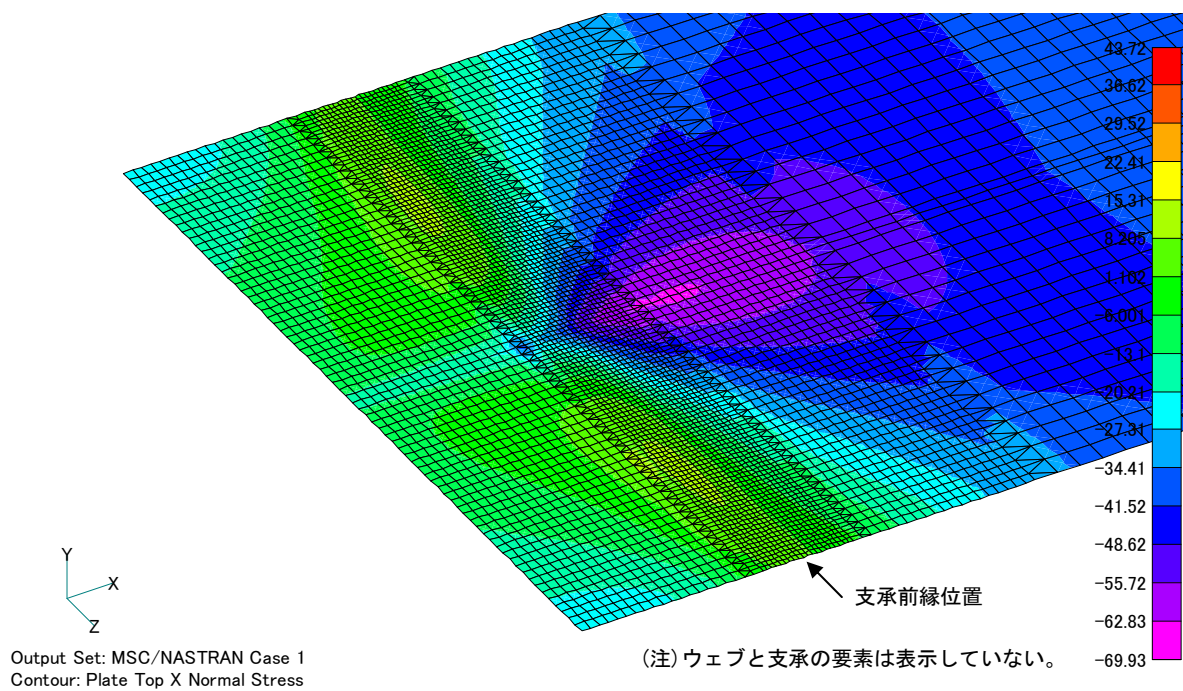


図-5.2.5 細シェルモデルの直応力  $\sigma_x$  コンター（下フランジ上面）

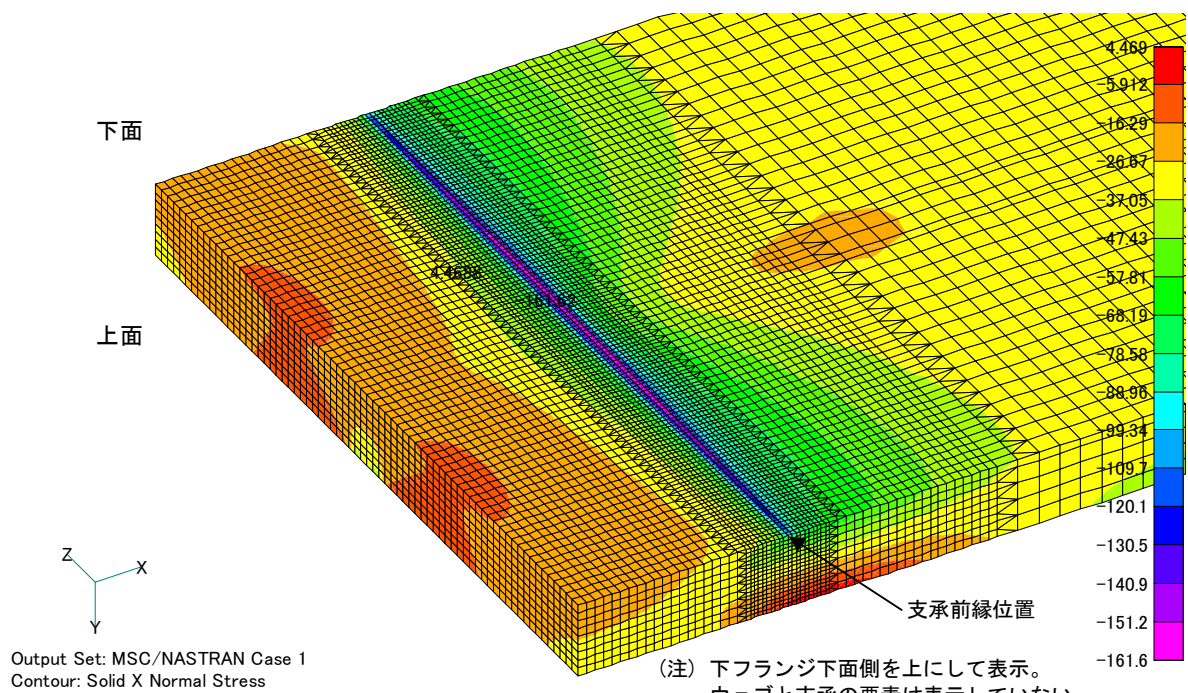


図-5.2.6 細ソリッドモデルの直応力 $\sigma_x$ コンター（下フランジ下面）

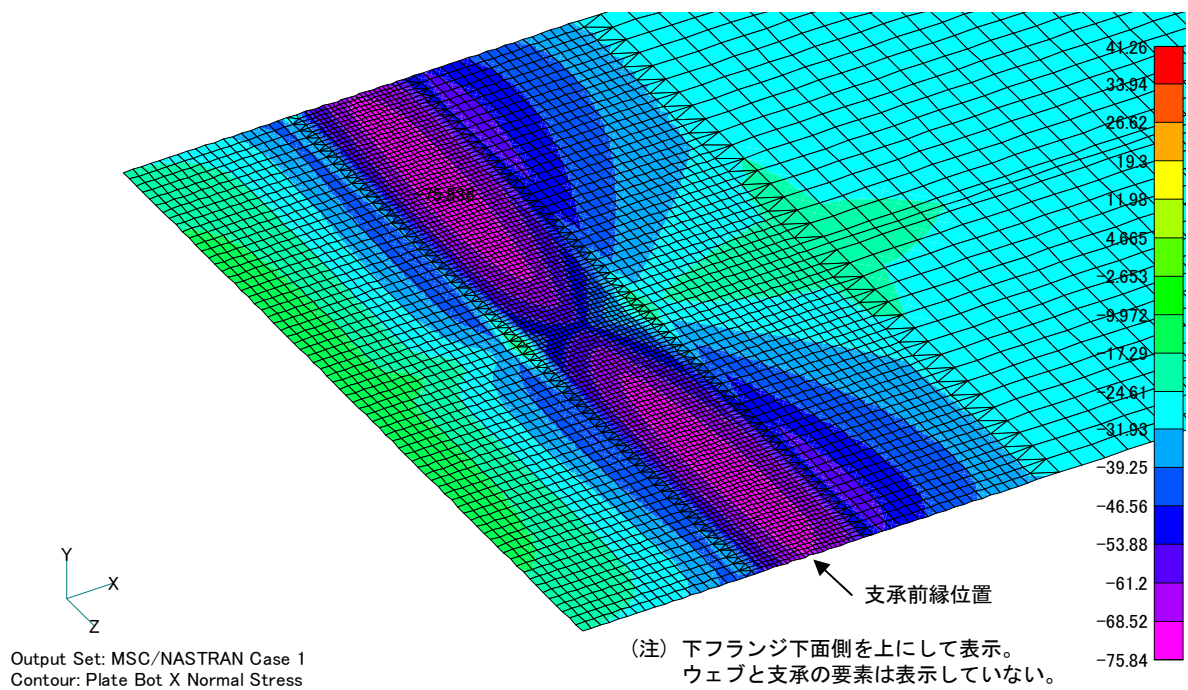


図-5.2.7 細シェルモデルの直応力 $\sigma_x$ コンター（下フランジ下面）

## 2) 橋軸方向分布の比較

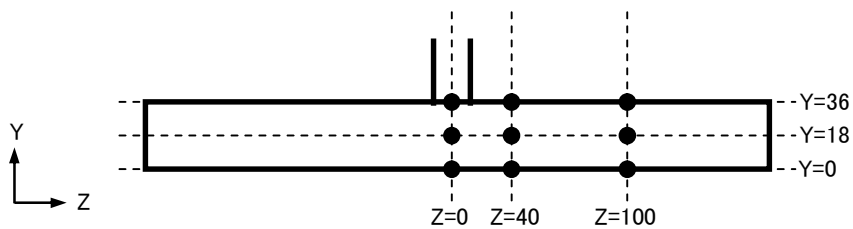
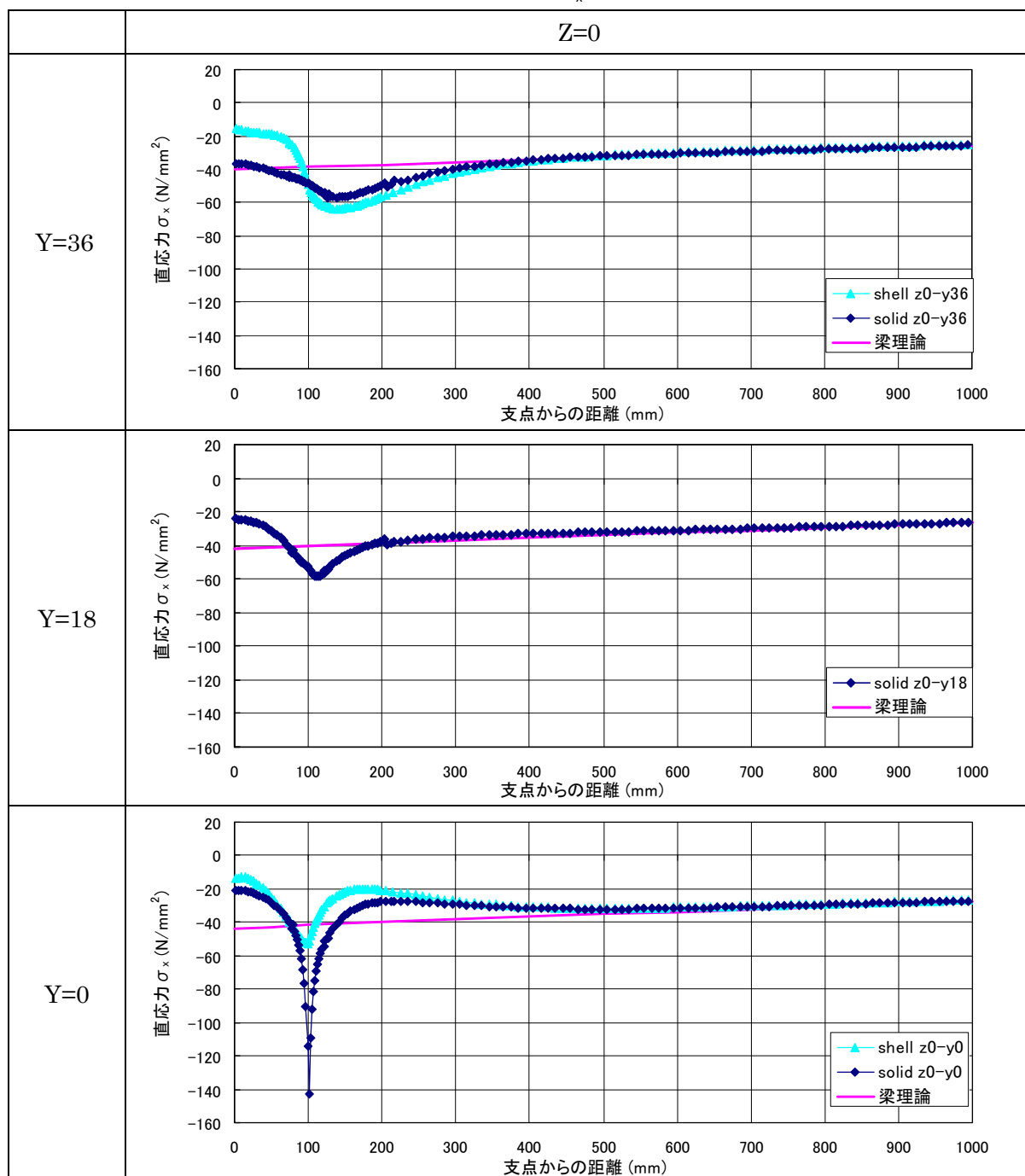
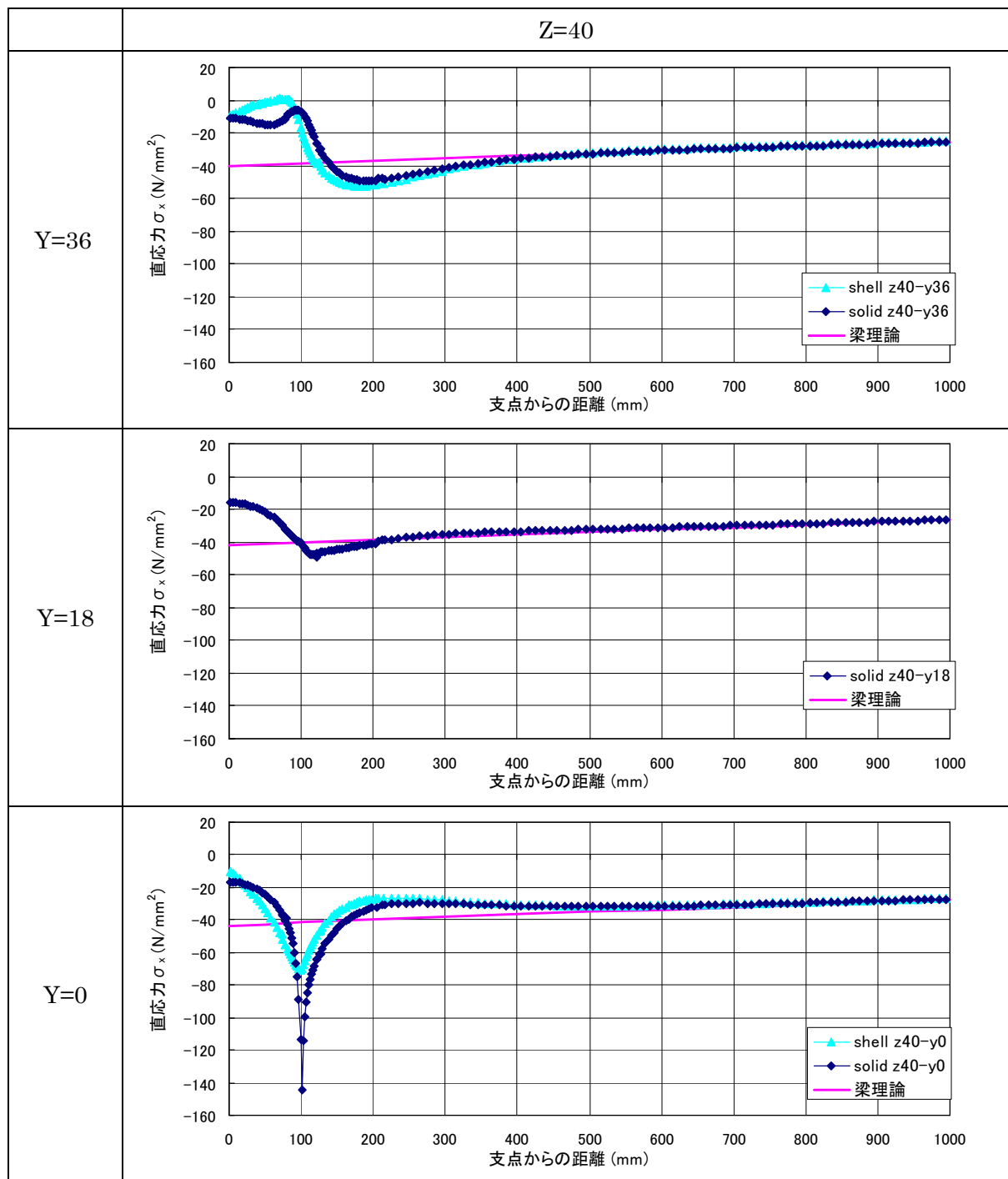
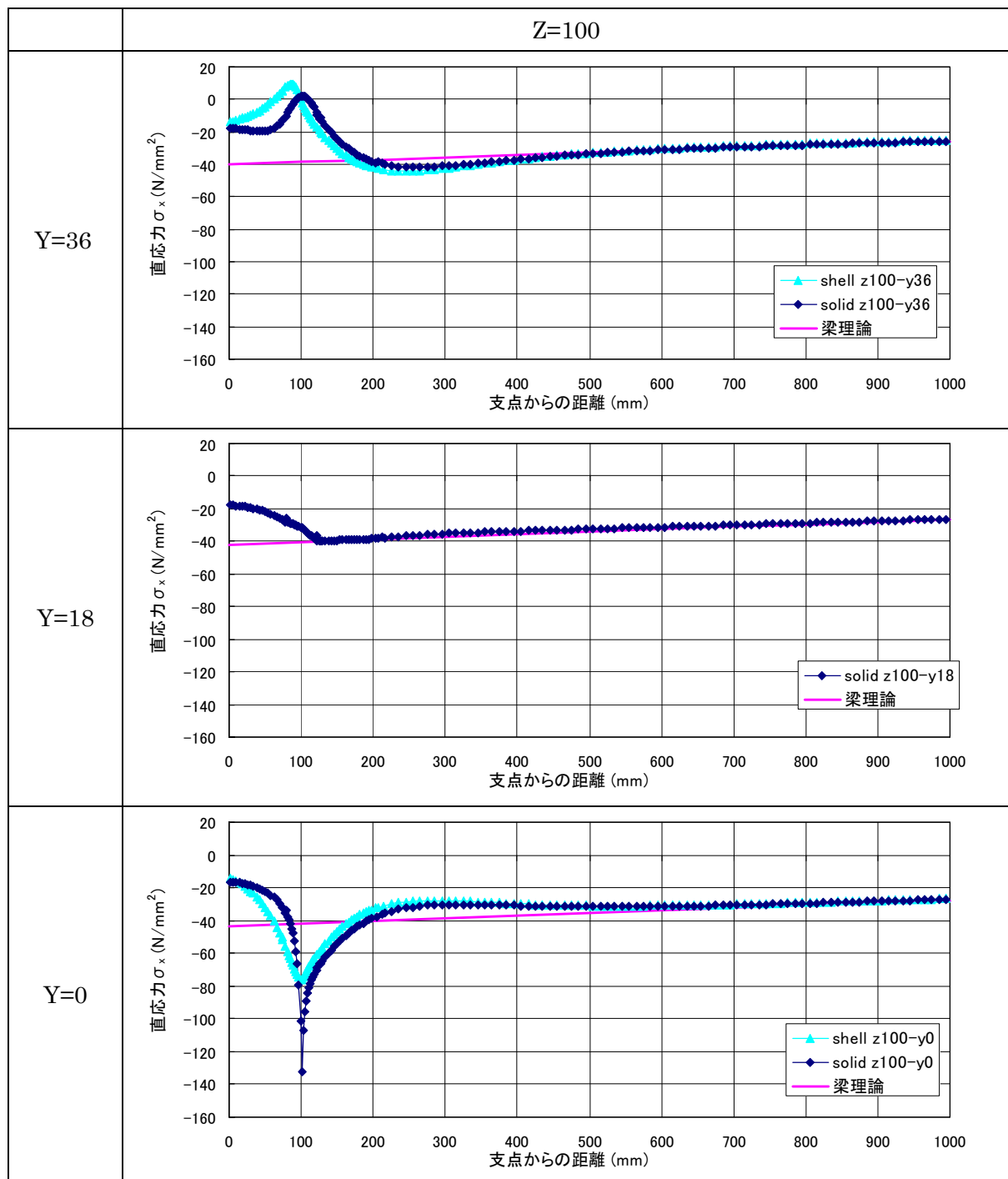


図-5.2.8 橋軸方向分布の比較位置

表-5.2.1 下フランジ直応力  $\sigma_x$  の橋軸方向分布比較







### 3) 幅方向分布の比較

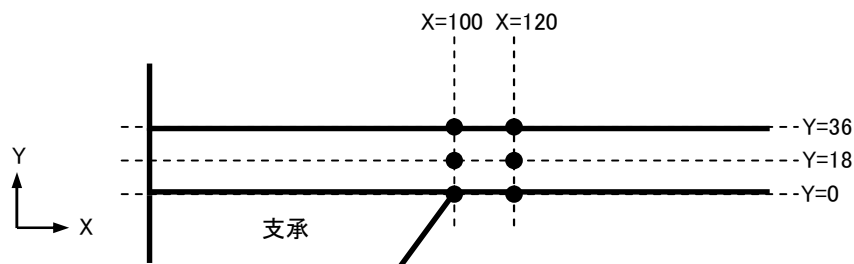
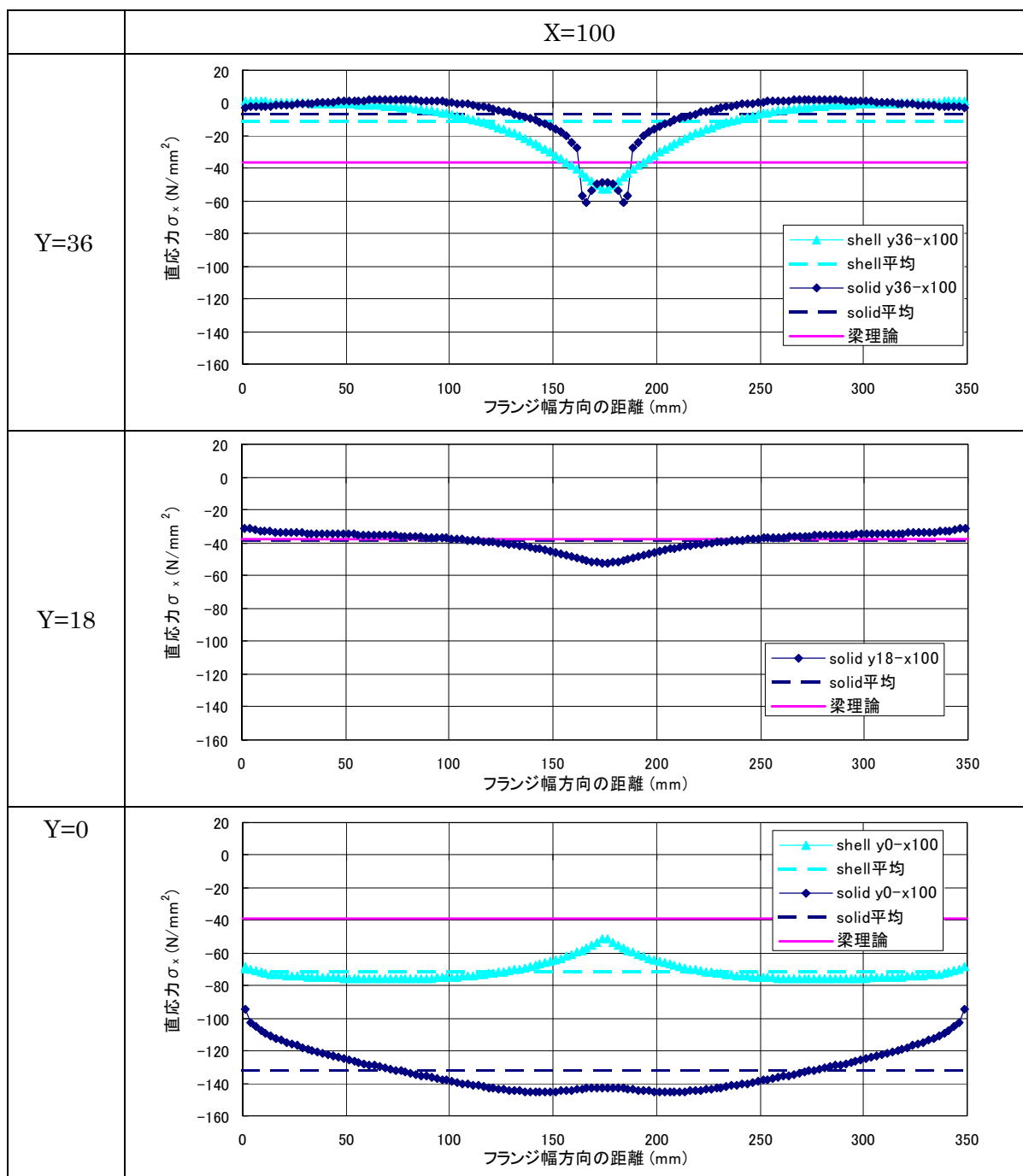
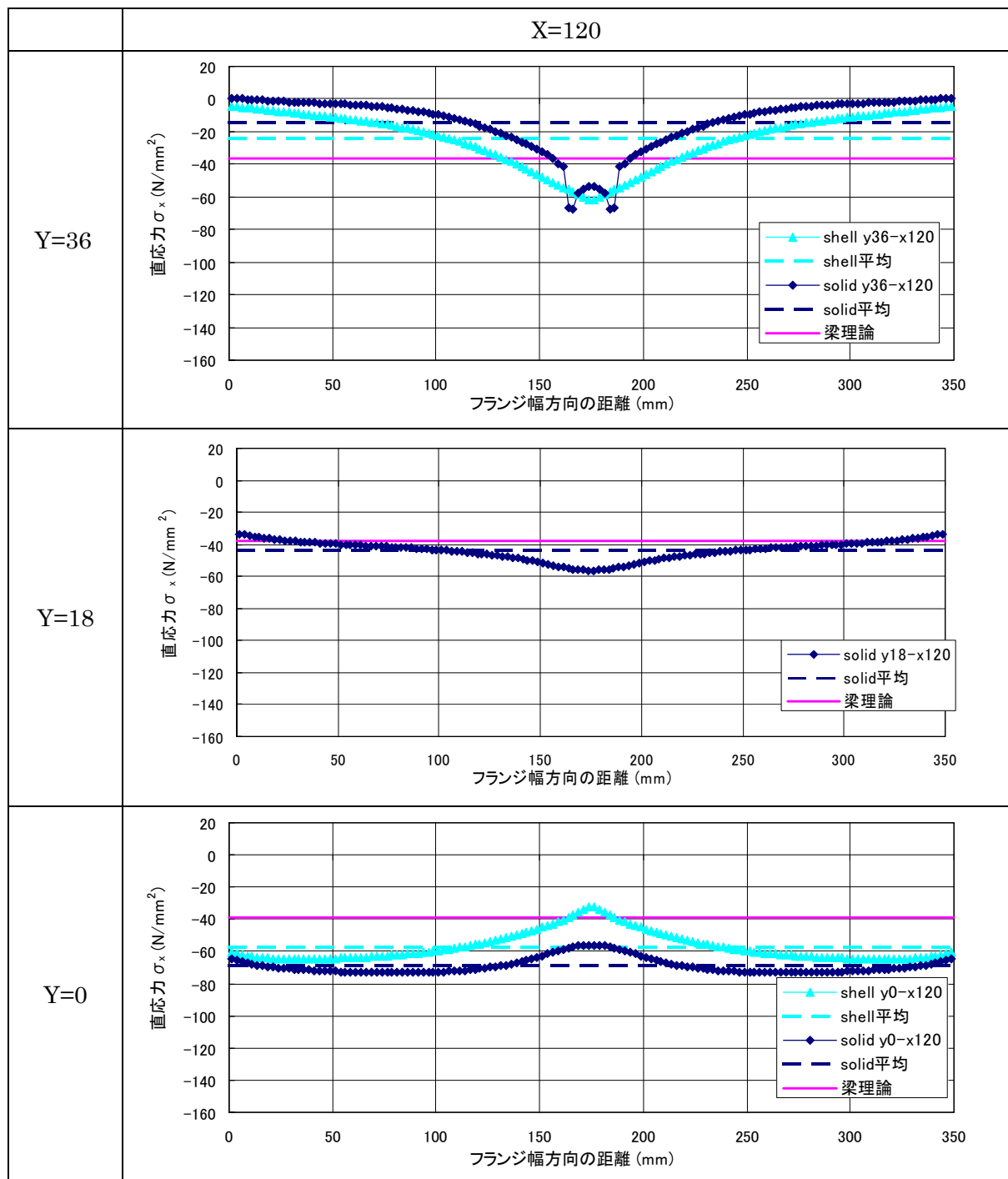


図-5. 2. 9 幅方向分布の比較位置

表-5. 2. 2 下フランジ直応力 $\sigma_x$ の幅方向分布比較



(注) 図中の shell 平均、solid 平均とは、フランジ幅方向(Z 方向)に対して応力分布が一定となるように平均化した応力を意味する。



(注) 図中の shell 平均、solid 平均とは、フランジ幅方向(Z方向)に対して応力分布が一定となるように平均化した応力を意味する。

#### 4) 板厚方向分布の比較

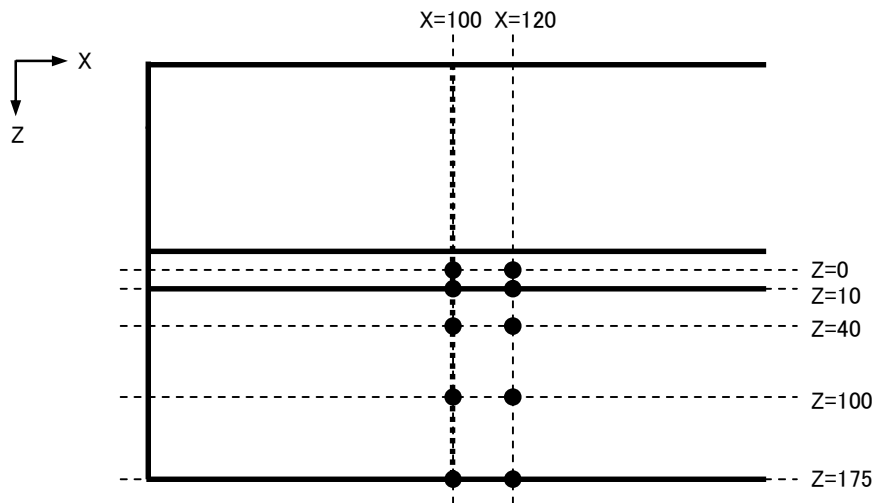
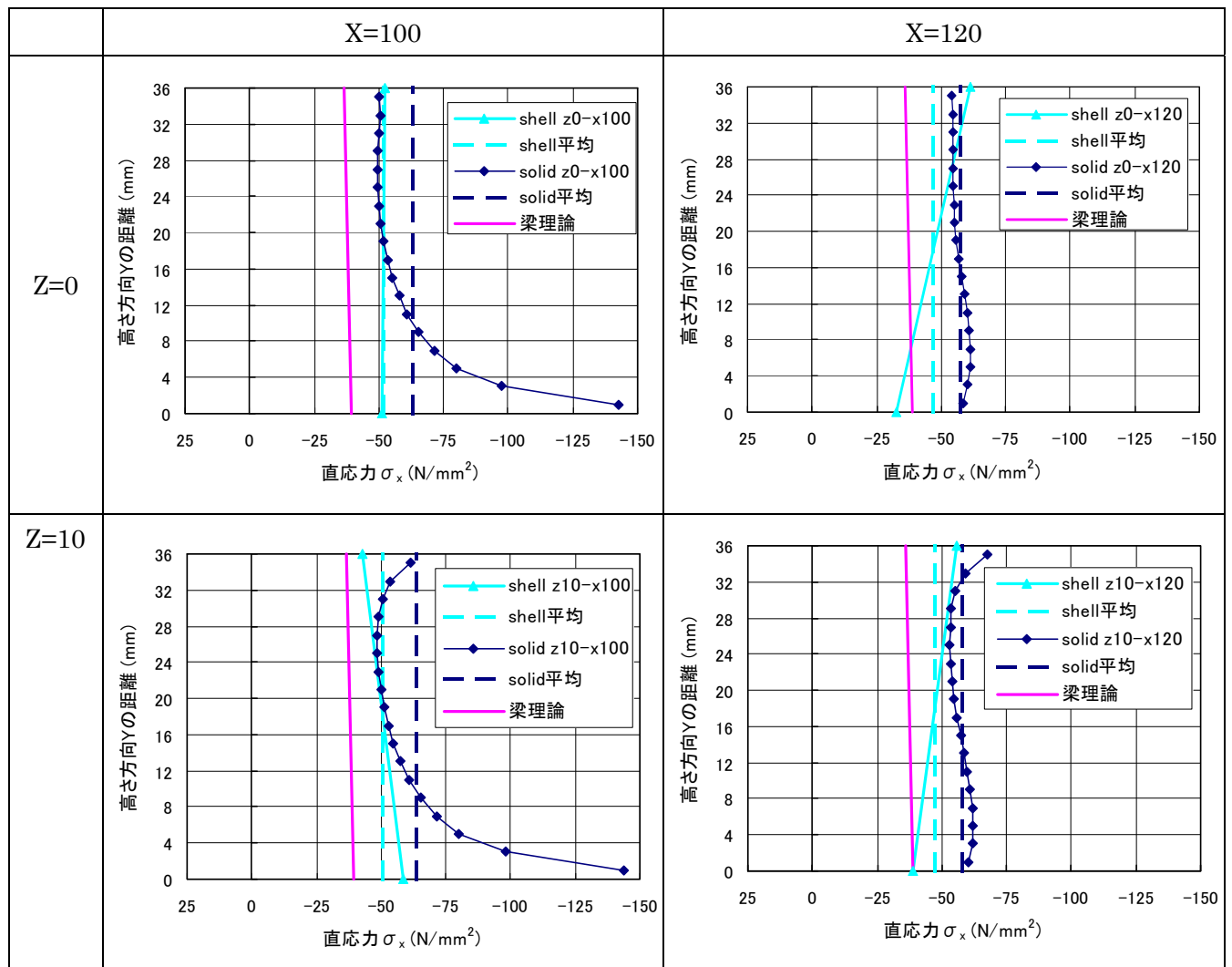


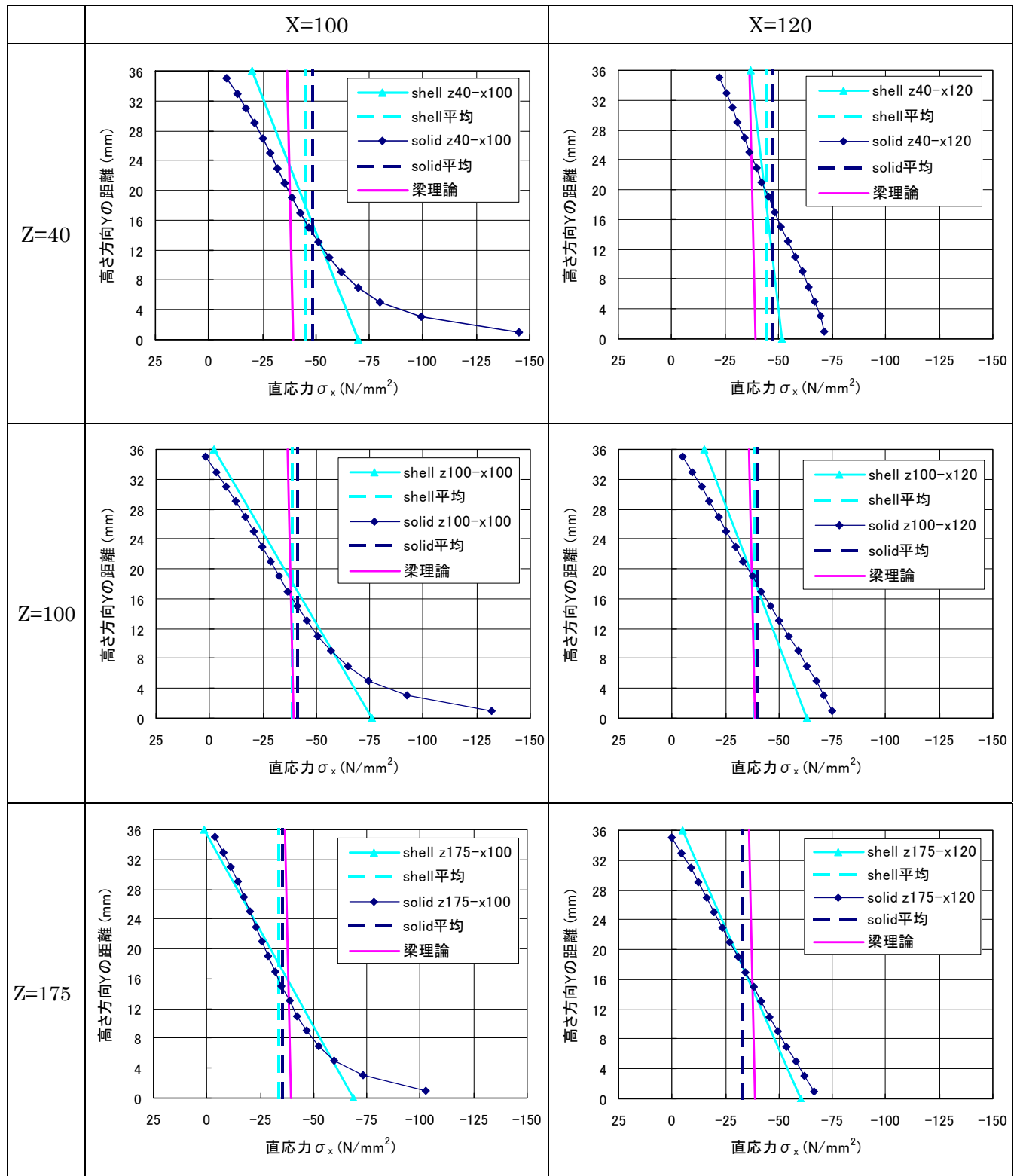
図-5. 2. 10 板厚方向分布の比較位置

表-5. 2. 3 下フランジ直応力 $\sigma_x$ の板厚方向分布比較



(注) 図中の shell 平均、solid 平均とは、フランジ板厚方向(Y 方向)に対して応力分布が一定となるように平均化した応力を意味する。

表-5.2.3 下フランジ直応力 $\sigma_x$ の板厚方向分布比較（つづき）



（注）図中の shell 平均、solid 平均とは、フランジ板厚方向(Y 方向)に対して応力分布が一定となるように平均化した応力を意味する。

## 5) 応力集中部の応力値と比率

表-5.2.4 応力集中部の応力値と比率

| 着目位置<br>(x, y, z) | 梁理論<br>① | 細シェル<br>② | 細ソリッド<br>③ | 比率<br>②／① | 比率<br>③／① | 比率<br>③／② | ピーク応力の<br>比率③(最大値)<br>／②(最大値) |
|-------------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|
| (100, 0, 0)       | -41.8    | -51.3     | -142.8     | 1.2       | 3.4       | 2.8       | 1.9                           |
| (100, 0, 40)      | -41.8    | -69.8     | -144.8     | 1.7       | 3.5       | 2.1       |                               |
| (100, 0, 100)     | -41.8    | -75.8     | -131.9     | 1.8       | 3.2       | 1.7       |                               |
| (120, 0, 0)       | -41.4    | -32.4     | -56.1      | 0.8       | 1.4       | 1.7       | 1.2                           |
| (120, 0, 40)      | -41.4    | -51.6     | -68.4      | 1.2       | 1.7       | 1.3       |                               |
| (120, 0, 100)     | -41.4    | -62.8     | -73.2      | 1.5       | 1.8       | 1.2       |                               |

※ ②、③の網掛部は、要素応力の最大値を示す。

## 6) 下フランジ直応力 $\sigma_x$ 比較結果のまとめ

- $\sigma_x$ の橋軸方向(x)分布を見ると、下フランジ下面では幅方向(z)のどの位置でも細シェルモデルより細ソリッドモデルの方が大きく、ピーク値は1.9倍となる。また、両モデルとも $150 < x < 400\text{mm}$ の範囲で応力の跳ね返りが見られる。一方、上面ではピークに顕著な差は見られないが、細シェルモデルではピークの橋軸方向位置に差が見られる。
- $\sigma_x$ の幅方向(z)分布を見ると、総じて一様分布とはなっておらず、せん断遅れの影響が見られる。細ソリッドモデルでは下フランジ上面のウェブ付け根位置で応力集中が発生し、ウェブ位置からz方向に離れると下フランジ上面では圧縮応力から引張応力に転じている。
- $\sigma_x$ の板厚方向(y)分布を見ると、 $x=100\text{mm}$ で発生していた下面のピークは $x=120\text{mm}$ 位置では無くなっている。また、ウェブ近傍( $z=0, 10\text{mm}$ )ではソリッド平均はシェル平均より20%程度大きくなっており、下フランジの板厚内だけでは力のつり合いが成立していない。ウェブ、上フランジも含めたI断面の応力分布を考えれば力のつり合いが成り立つものと考えられる。

## (2) ウェブせん断応力 $\tau_{xy}$ の比較

以下、主な結果を図表に示す。

### 1) コンター比較

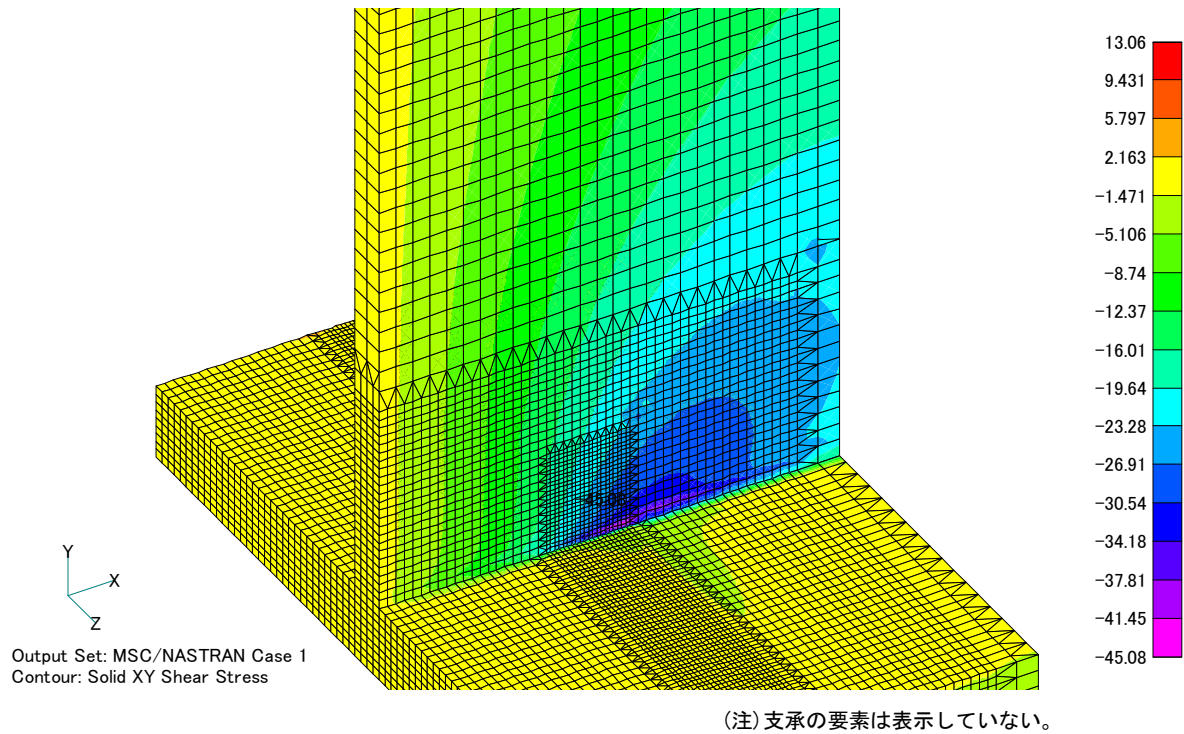


図-5. 2. 11 細ソリッドモデルのせん断応力  $\tau_{xy}$  コンター

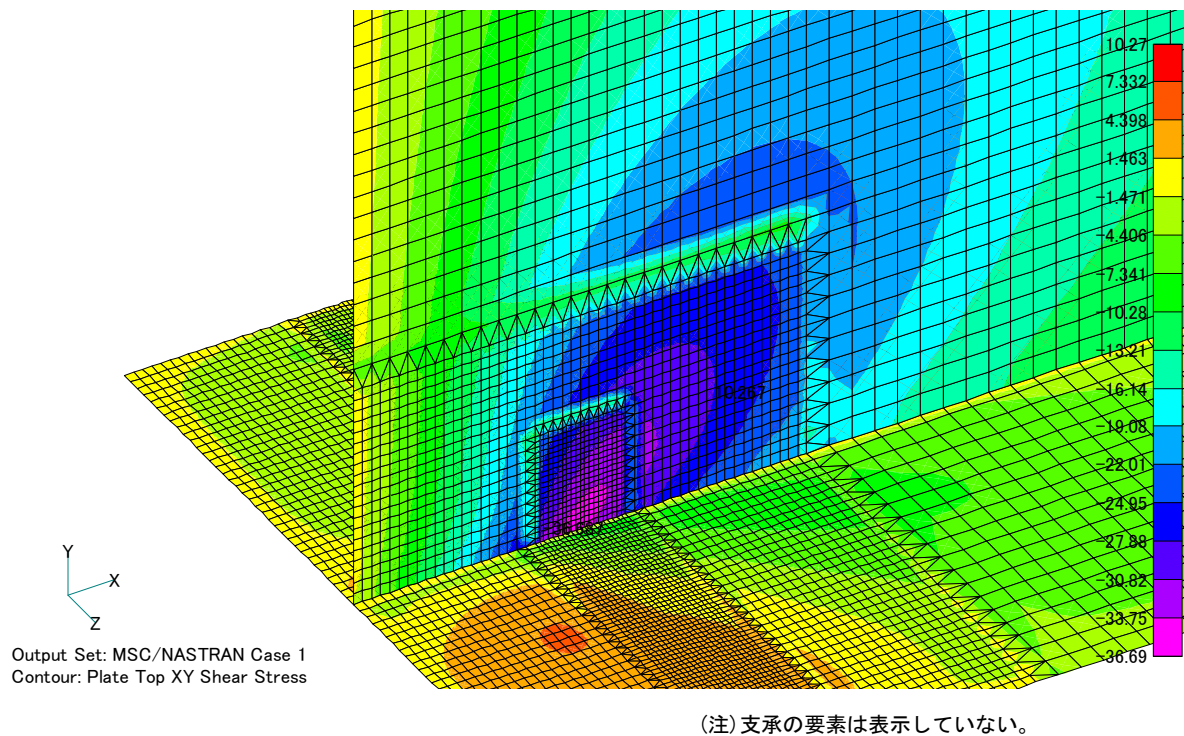


図-5. 2. 12 細シェルモデルのせん断応力  $\tau_{xy}$  コンター

## 2) ウェブ高さ方向分布の比較

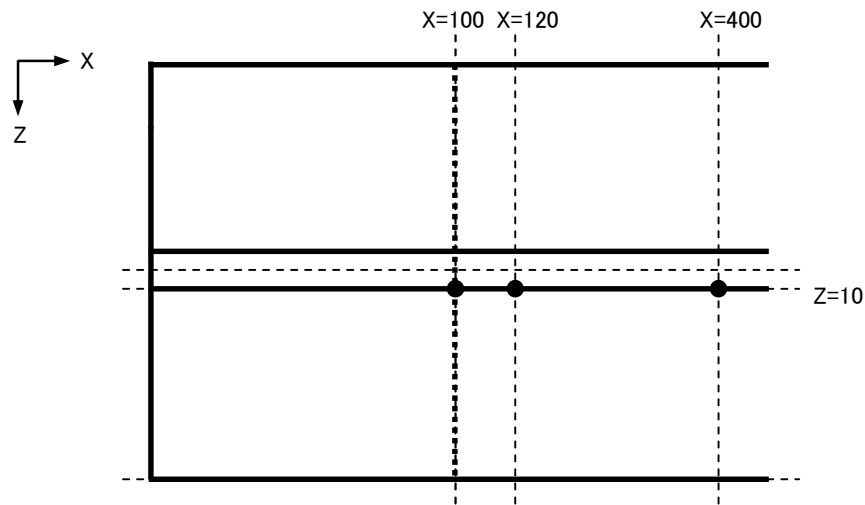


図-5.2.13 ウェブ高さ方向分布の比較位置

表-5.2.5 ウェブせん断応力  $\tau_{xy}$  の高さ方向分布比較

|      | X=100 | X=120 |
|------|-------|-------|
| Z=10 |       |       |
|      | X=400 |       |
| Z=10 |       |       |

(注) 図中の shell 平均、solid 平均とは、ウェブ高さ方向(Y 方向)に対して応力分布が一定となるように平均化した応力を意味する。

### 3) 橋軸方向分布の比較

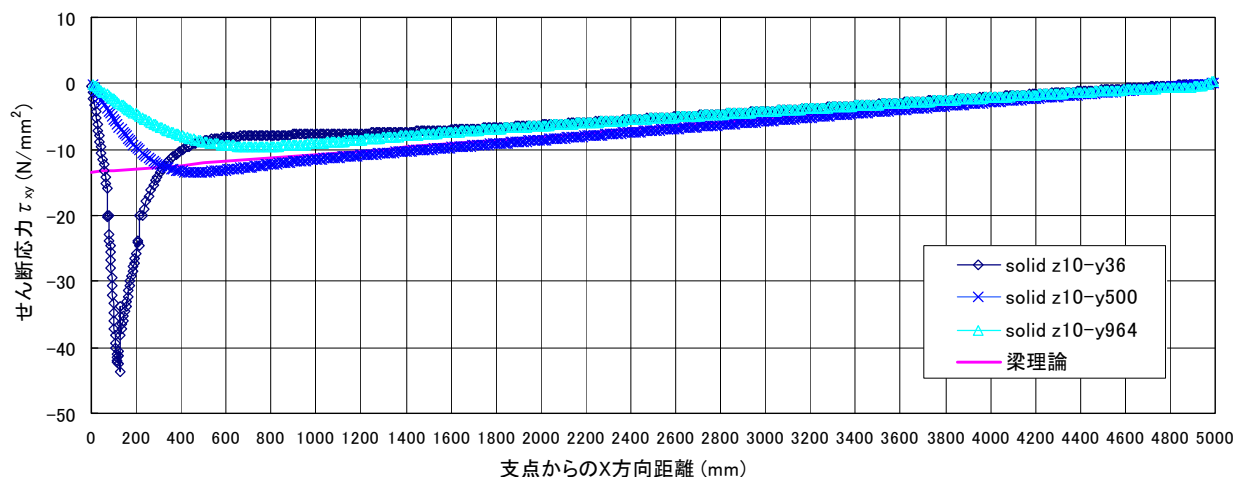


図-5.2.14  $z=10\text{mm}$  で  $y=36\text{mm}$ 、 $500\text{mm}$ 、 $964\text{mm}$  の各位置におけるウェブせん断応力  $\tau_{xy}$  の橋軸方向分布

### 4) 応力集中部の応力値と比率

表-5.2.6 応力集中部の応力値と比率

| 着目位置<br>(x, y, z) | 梁理論<br>① | 細シェル<br>② | 細ソリッド<br>③ | 比率<br>②／① | 比率<br>③／① | 比率<br>③／② | ピーク応力の<br>比率③(最大値)<br>／②(最大値) |
|-------------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|
| (100, 36, 10)     | -13.2    | -36.3     | -35.9      | 2.8       | 2.7       | 1.0       | 1.2                           |
| (120, 36, 10)     | -13.2    | -30.0     | -42.5      | 2.3       | 3.2       | 1.4       |                               |
| (400, 302, 10)    | -12.4    | -14.9     | -14.9      | 1.2       | 1.2       | 1.0       |                               |

※ ②、③の網掛部は、要素応力の最大値を示す。

### 5) ウェブせん断応力 $\tau_{xy}$ 比較結果のまとめ

- ・ 細シェルモデルのピークは  $x=100\text{mm}$  位置で発生しているのに対し、細ソリッドモデルでは  $x=120\text{mm}$  付近で発生し、ピークの値は約 20%ソリッドモデルの方が大きい。
- ・ ウェブ高さ方向分布の平均値は、細ソリッドモデル、細シェルモデル、はり理論の 3 者でそれほど大きな差は見られない。
- ・ 細シェルモデル、細ソリッドモデルともに、 $x=400\text{mm}$  ぐらい支点から離れると応力集中は減少し、はり理論における中立軸位置付近で最大値が発生するというせん断流理論に近い結果が得られた。

### 5.2.3 下フランジ下面における平均応力の算出方法

ここでは、格子解析（はり理論）で求まる公称応力に相当する応力（設計で用いる平均応力）を FEM 解析を用いて算出する方法について考える。

文献 30)では、溶接止端の位置に発生する応力集中を以下の 3 つの応力に分類している。

- ① 溶接止端部の微視的な形状に起因する局部応力  $\sigma_{11}$
- ② 継手の全体形状に起因する局部応力  $\sigma_{12}$
- ③ 公称応力  $\sigma_n$

また、図-5.2.15 に示すように①の溶接止端の微視的な形状に起因する局部応力  $\sigma_{11}$  は溶接止端より板厚の0.3倍離れた位置でほぼ消滅するとしている。一方、今回の片持ばりに対して、局部応力 ( $\sigma_{11}$  と  $\sigma_{12}$ ) の影響がほとんど無視し得るとみなせる位置を調べるために、はり理論から求める公称応力で無次元化した下フランジ下面の直すると、図-5.2.16 のようになる。図より、要素関わらず、溶接止端より下フランジ板厚の10~20倍の位置で局部応力と公称応力の比が1.0となり、局部応力 ( $\sigma_{11}$  と  $\sigma_{12}$ ) は無視できるとしている。

一事例に過ぎないが、溶接止端より板厚の 10~20 倍離れた位置までの応力分布から直線外挿する方法を用いることで、FEM 解析より得られる下フランジ直応力は公称応力と同程度となり、FEM 解析による設計と格子解析による設計の違いは、床版や横桁に起因する荷重分配の差に集約できるものと考えられる。また、シェル要素を用いた中間支点上付近の要素分割は、中間支点より板厚の 10~20 倍離れた位置の応力が算出できるような分割が一つの目安になるのではないかと考えられる。

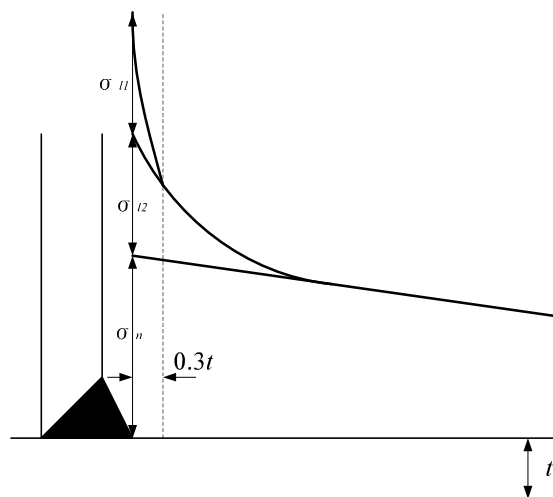


図-5.2.15 溶接止端の応力集中の区分<sup>30)</sup>

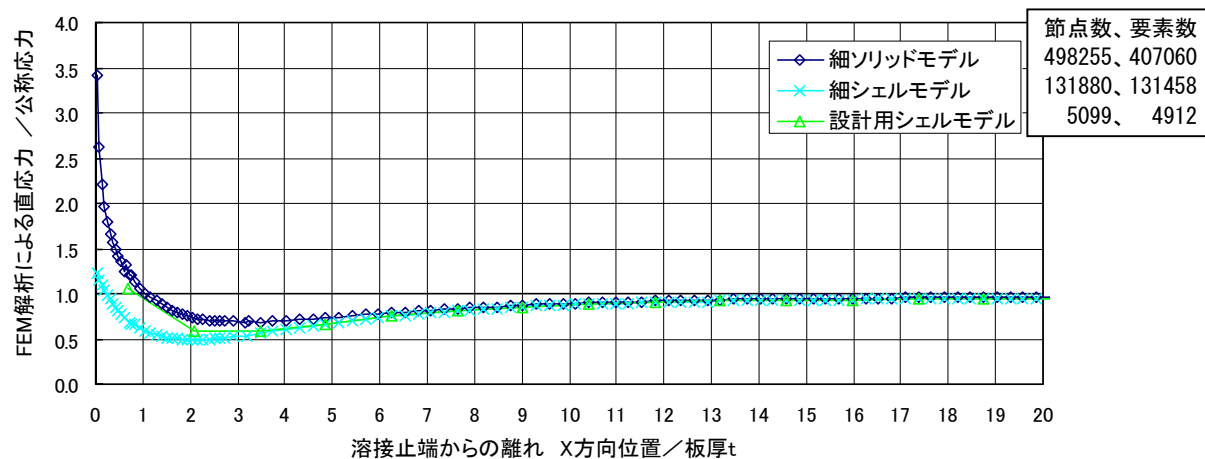


図-5.2.16 公称応力で無次元化した下フランジ下面直応力の分布

### 5.3 局部応力により塑性化する領域の検討

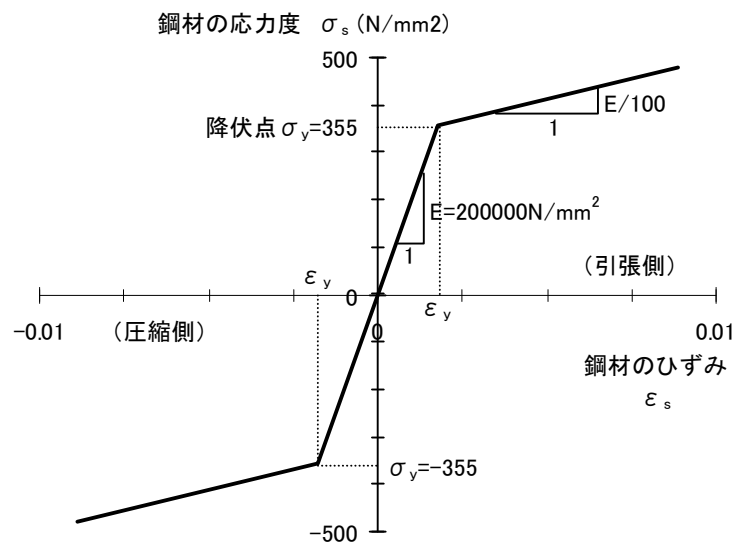
#### 5.3.1 解析方法

中間支点部の設計においては、一般に応力集中の影響を考慮した応力照査を行わないが、本節では、片持ばりのソリッドモデルを用いて支承前縁を対象として材料非線形解析（弾塑性解析）を行い（幾何学的非線形は考慮していない）、塑性化する領域を線形弾性解析の場合と比較する。

解析モデルは図-5.2.2のとおりであり、応力集中が発生する中間支点部の要素に図-5.3.1に示す材料非線形特性を与えた。多軸応力状態における降伏条件は(5.3.1)式に示す von Mises の条件を用い、初期降伏点は鋼材 SM490Y を想定して  $\sigma_y = 355 \text{ N/mm}^2$  とした。降伏後は鋼材のひずみ硬化を考慮して、初期剛性の 1/100 の剛性を与えた。図-5.2.1 に示した等分布荷重による载荷条件下では、中間支点上の下フランジに発生する応力集中がほぼ消滅する位置（橋軸方向に板厚の 10 倍程度）となる  $X=360\text{mm}$  付近におけるはり理論より求まる公称応力は、表-5.2.1 より、約  $40 \text{ N/mm}^2$  となっている。このため、本節における検討で用いる荷重としては、 $X=360\text{mm}$  付近におけるはり理論より求まる公称応力が、許容曲げ圧縮応力度の  $200 \text{ N/mm}^2$  程度となるように、図-5.2.1 に示した等分布荷重を 5 倍（約  $40 \text{ N/mm}^2 \times 5 \div 200 \text{ N/mm}^2$  程度）とした  $250\text{kN/m}$  の等分布荷重を载荷した。なお、解析ソフトウェアは汎用有限要素プログラム「NASTRAN ver.2001.0.9」<sup>14)</sup>を用いた。また、収束判定基準は変位・荷重・仕事量に対して 0.01 以下を許容誤差とし、ニュートンラプソン法を用いて反復計算を行った。

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (5.3.1)$$

ここで、 $\sigma_M$  : von Mises の相当応力



※単軸応力状態における特性であり、実際は多軸応力状態であるためポアソン効果が加味される。

図-5.3.1 鋼材の非線形特性

### 5.3.2 解析結果

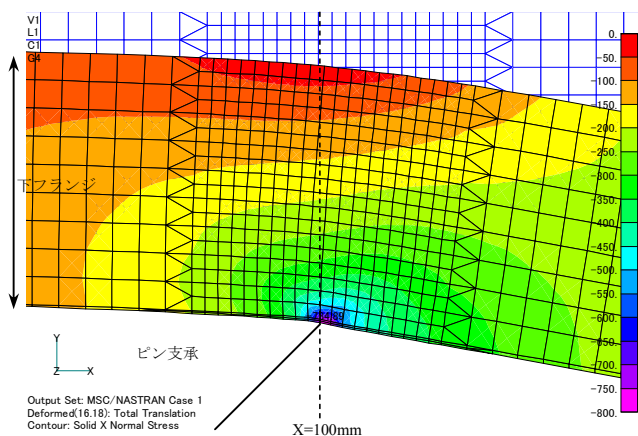
図-5.3.2 に、下フランジに発生する応力コンターの線形弾性解析と材料非線形解析（弾塑性解析）との比較において、 $Z=40\text{mm}$  位置（ $X=100\text{mm}$  前後）における  $X$ - $Y$  平面内の応力コンターを示し、図-5.3.3 に下フランジ下面における  $X$ - $Z$  平面内の応力コンターを示す（本来は、変形図と応力コンター図を同時表示することは望ましくはないが、図中では便宜的に同時に表示している。）。また、図-5.3.4 には最も直応力  $\sigma_x$  の値が大きい  $X100$ - $Y0$ - $Z40$  位置の要素における  $\sigma - \varepsilon$  関係の比較を示す。

図-5.3.2(e) と (f) の比較より、板厚内における Mises 相当応力  $\sigma_M$  が降伏点  $\sigma_y$  を超える範囲は、線形弾性解析と材料非線形解析（弾塑性解析）とで形は微妙に異なるものの面積にそれほど大きな差はなく、材料非線形解析（弾塑性解析）では  $\sigma_y$  を超える領域内で応力の再配分が行われているものといえる。また、その領域の直径は板厚に対して  $1/4$  程度と小さい。図-5.3.3(e) と (f) の比較においても同様に、 $X$ - $Z$  平面内における降伏点  $\sigma_y$  を超える領域は線形弾性解析と材料非線形解析（弾塑性解析）とで顕著な差はなく、材料非線形解析（弾塑性解析）では  $\sigma_y$  を超える範囲内で応力の再配分が行われている。なお、いずれの解析においても直応力  $\sigma_x$  と最小主応力  $\sigma_{\min}$  が降伏点  $\sigma_y$  を超える領域には、顕著な差は見られず、せん断応力に比べて橋軸方向直応力が卓越している応力性状であることがわかる。

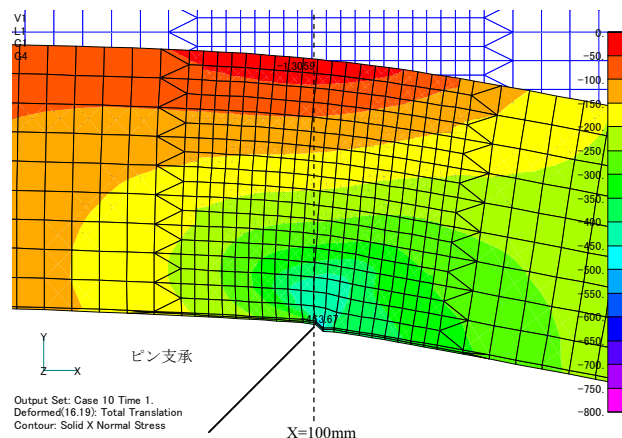
なお、図-5.3.2 より、 $X=100\text{mm}$  付近の下フランジ下面において、最も絶対値の大きい最小主応力  $\sigma_{\min}$  は、線形弾性解析では約  $890 \text{ N/mm}^2$ 、材料非線形解析（弾塑性解析）では、約  $530 \text{ N/mm}^2$  という高い応力が得られた。しかし、これらの高い応力が得られている狭い領域の応力の評価については、FEM 解析におけるモデル化による影響を受ける等により、必ずしも確立されているわけではないので、ここでは、降伏点  $\sigma_y$  を超える応力の領域の相対比較のみを行った。

図-5.3.4 に示す  $X100$ - $Y0$ - $Z40$  位置の要素における  $\sigma - \varepsilon$  関係の比較を見ると、材料非線形解析（弾塑性解析）における Mises 相当応力の最大ひずみ（=約  $0.6\%$ ）は一般的な溶接構造用圧延鋼材の破壊ひずみ（伸び $\geq 23\%$ ）に対して十分に余裕がある。また、Mises 相当応力における  $\sigma - \varepsilon$  曲線とグラフの  $x$  軸がなす面積（=ひずみエネルギー）を比較すると、線形弾性解析は  $\triangle OAB$ =約  $0.88$ 、材料非線形解析（弾塑性解析）は  $\square OCDE$ =約  $1.91$  であり、材料非線形解析（弾塑性解析）の方がひずみエネルギーが 2 倍以上大きい。これは、材料非線形解析（弾塑性解析）では応力集中部の応力は降伏応力で頭打ちとなるが、ひずみは最も応力集中度の高い要素に集中した結果と考えられる。

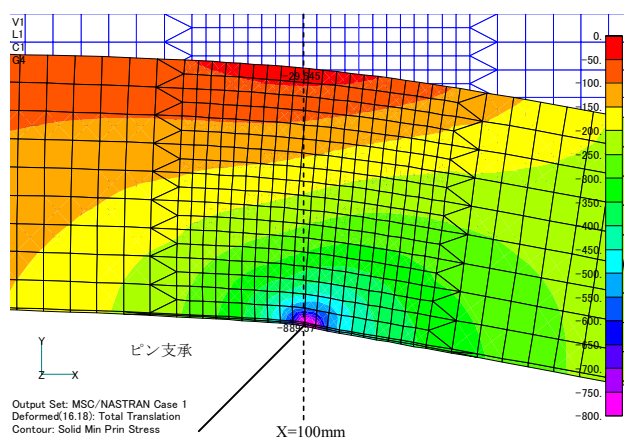
片持ばりを対象とした簡易化した一事例ではあるが、中間支点部における塑性化する領域はごく小さく、最大ひずみも破断ひずみに対して十分に余裕があることが確認された。



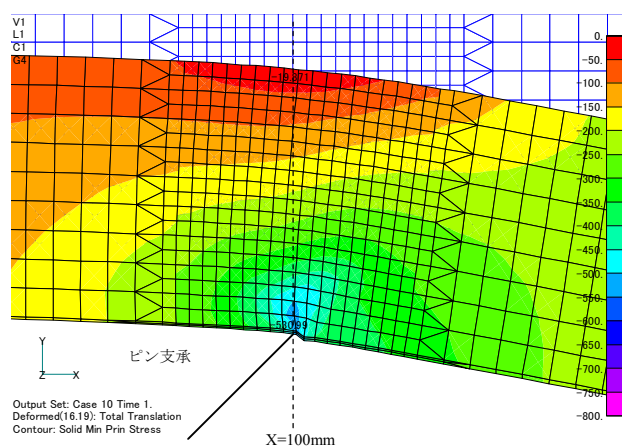
(a) 直応力  $\sigma_x$  (線形弾性解析)



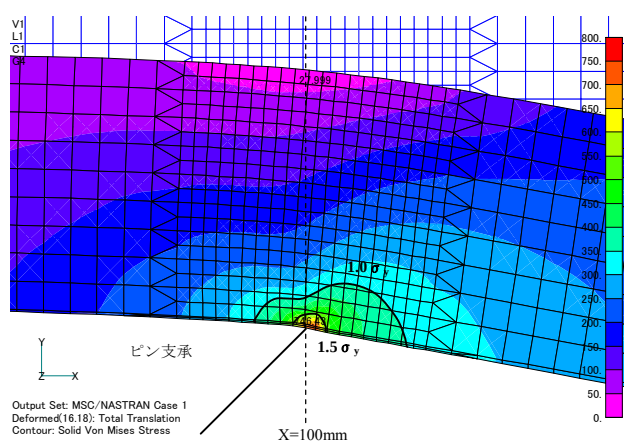
(b) 直応力  $\sigma_x$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))



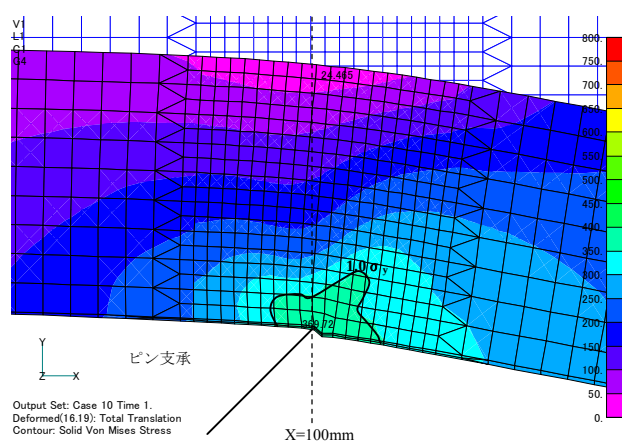
(c) 最小主応力  $\sigma_{\min}$  (線形弾性解析)



(d) 最小主応力  $\sigma_{\min}$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))

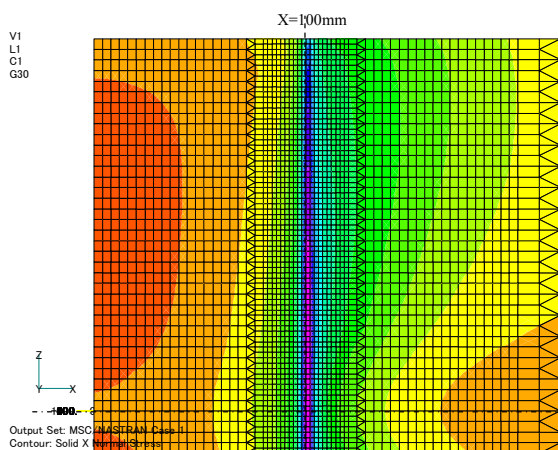


(e) Mises 相当応力  $\sigma_M$  (線形弾性解析)

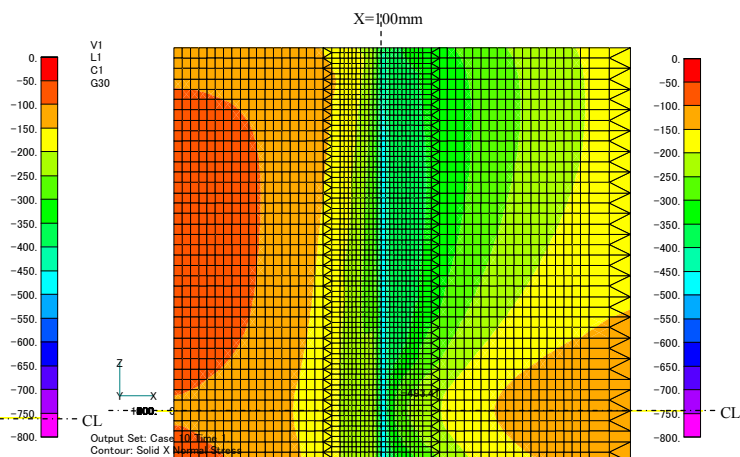


(f) Mises 相当応力  $\sigma_M$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))

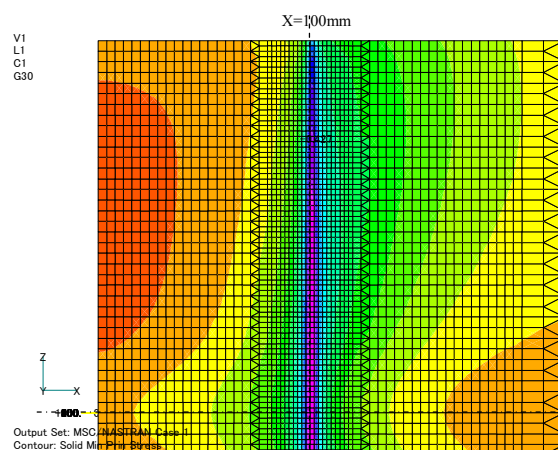
図-5.3.2 下フランジ応力コンターの比較 (Z=40mm 位置の X-Y 平面)



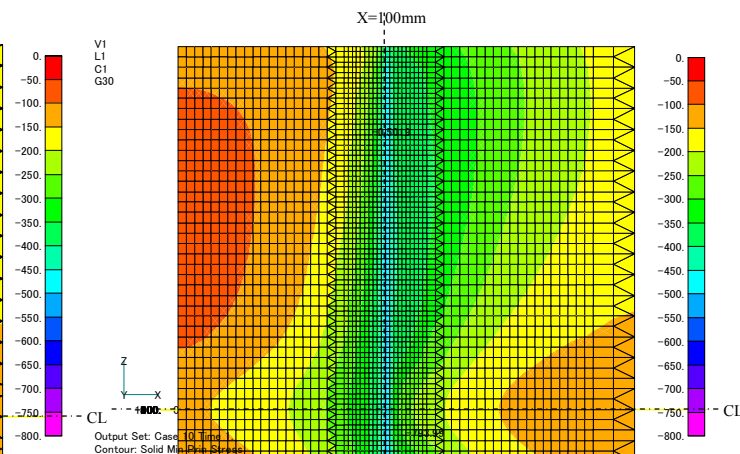
(a) 直応力  $\sigma_x$  (線形弾性解析)



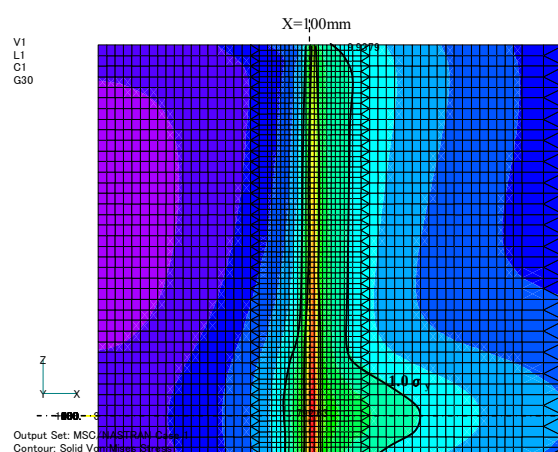
(b) 直応力  $\sigma_x$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))



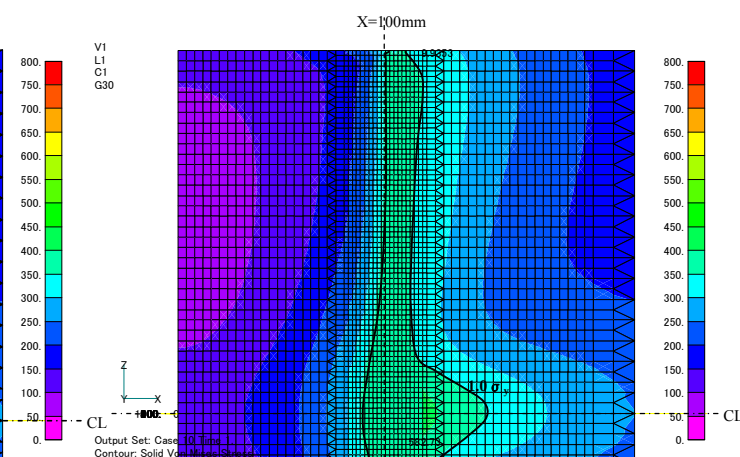
(c) 最小主応力  $\sigma_{\min}$  (線形弾性解析)



(d) 最小主応力  $\sigma_{\min}$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))



(e) Mises 相当応力  $\sigma_M$  (線形弾性解析)



(f) Mises 相当応力  $\sigma_M$  (材料非線形解析 (弾塑性解析))

図-5.3.3 下フランジ応力コンターの比較 (下フランジ下面の X-Z 平面)

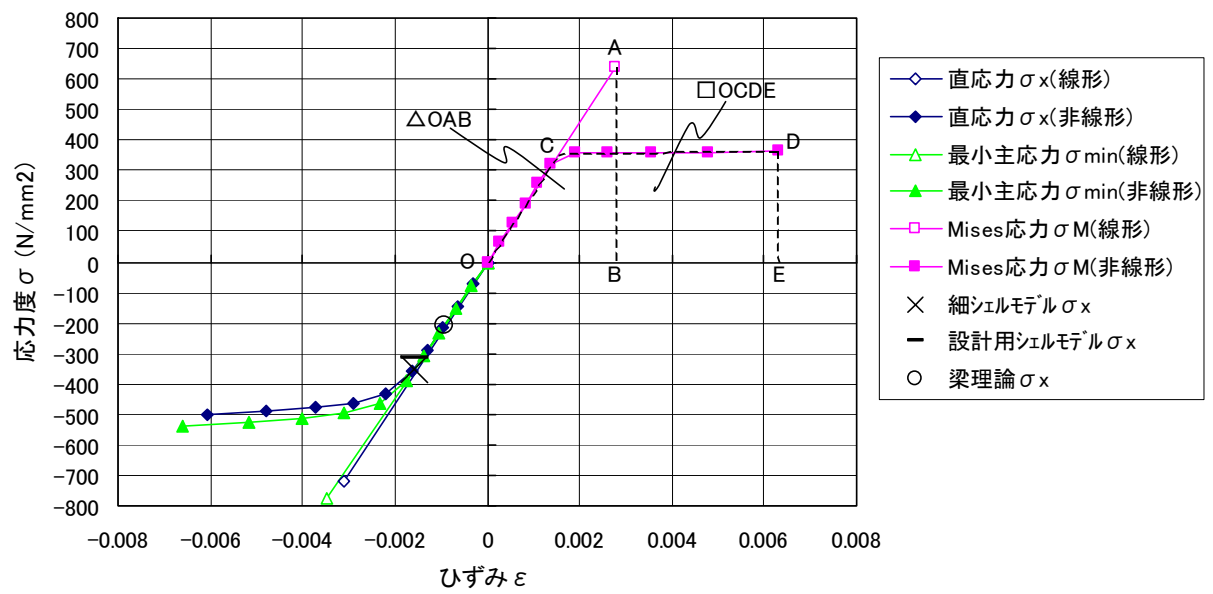


図-5.3.4 中間支点上応力集中部の $\sigma - \epsilon$ 関係の比較 (x100-y0-z40 位置の要素)

## 5.4 疲労照査における局部応力の扱い

本節では、外桁の中間支点部に細ソリッドモデルを適用した 2 径間連続 4 主 I 桁橋の全体モデルにより局部応力を算出し、この応力を直接用いることによる疲労照査を試みた。

### 5.4.1 解析対象と解析モデル

図-5.4.1 に解析対象とした 20m+20m の 2 径間連続 4 主 I 桁橋の桁断面を示す。主桁は応力集中部の要素分割を極力細かくできるように断面寸法の小さい H 形鋼を想定して、格子解析による概略設計レベルの部材設計を行い、諸元を決定した。疲労設計荷重は、T 荷重の片側が G4 桁の直上となる位置でレーン載荷を行った。

図-5.4.2 に解析モデルを示す。T 荷重直下である G4 桁の中間支点上付近にはソリッド要素 CHEXA<sup>14)</sup>を用い、最小 2mm 立方で要素分割を行った。それ以外の鋼桁および RC 床版はシェル要素 CQUAD4<sup>14)</sup>でモデル化した。支承は鋼製のピン支承を想定し、着目部である G4 桁中間支点上のみソリッド要素 CHEXA<sup>14)</sup>を用いて実際の構造形状をモデル化した。支承の境界条件は剛体はり要素 RBE2<sup>14)</sup>でピラミッド型に集約した節点に固定支承 (XYZ 拘束)、可動支承 (YZ 拘束) のそれぞれの条件で空間拘束することで与えた。鋼材のヤング係数は  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、床版コンクリートは  $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  とし、中間支点上の床版はひび割れを想定して片側支間の 15% 領域を鉄筋のみの断面剛性に低減させることを基本とした。

### 5.4.2 疲労照査方法

疲労照査に用いる中間支点上の下フランジ応力集中部の最大応力範囲は、最も不利となる単位荷重載荷から算出するが、本研究で開発した FEM 影響線載荷プログラムは用いず、格子解析から最も不利となるおおまかな位置を決め、その周辺を手動で試行錯誤的に載荷することで最も不利となる位置を決定した。次に、中間支点上の下フランジ応力集中部の橋軸方向応力分布に対して文献 29) に示す B 法 (a 点=0.5t、b 点=1.5t) を適用し、ソールプレート端のホットスポット応力を算出した。疲労設計曲線は文献 29) を参考に、非仕上げの溶接継手を想定して E 等級の曲線を用いた。

検討ケースは以下の 2 ケースとした。

CASE1 : 中間支点上の床版は全断面有効であり、中間支点のピン支承が健全な状態の場合 (Y、Z 方向のみ拘束)

CASE2 : 中間支点上の床版はひび割れを考慮して鉄筋のみとし、中間支点のピン支承が機能不全な状態の場合 (X、Y、Z 方向および X 軸回り、Y 軸回りを拘束)

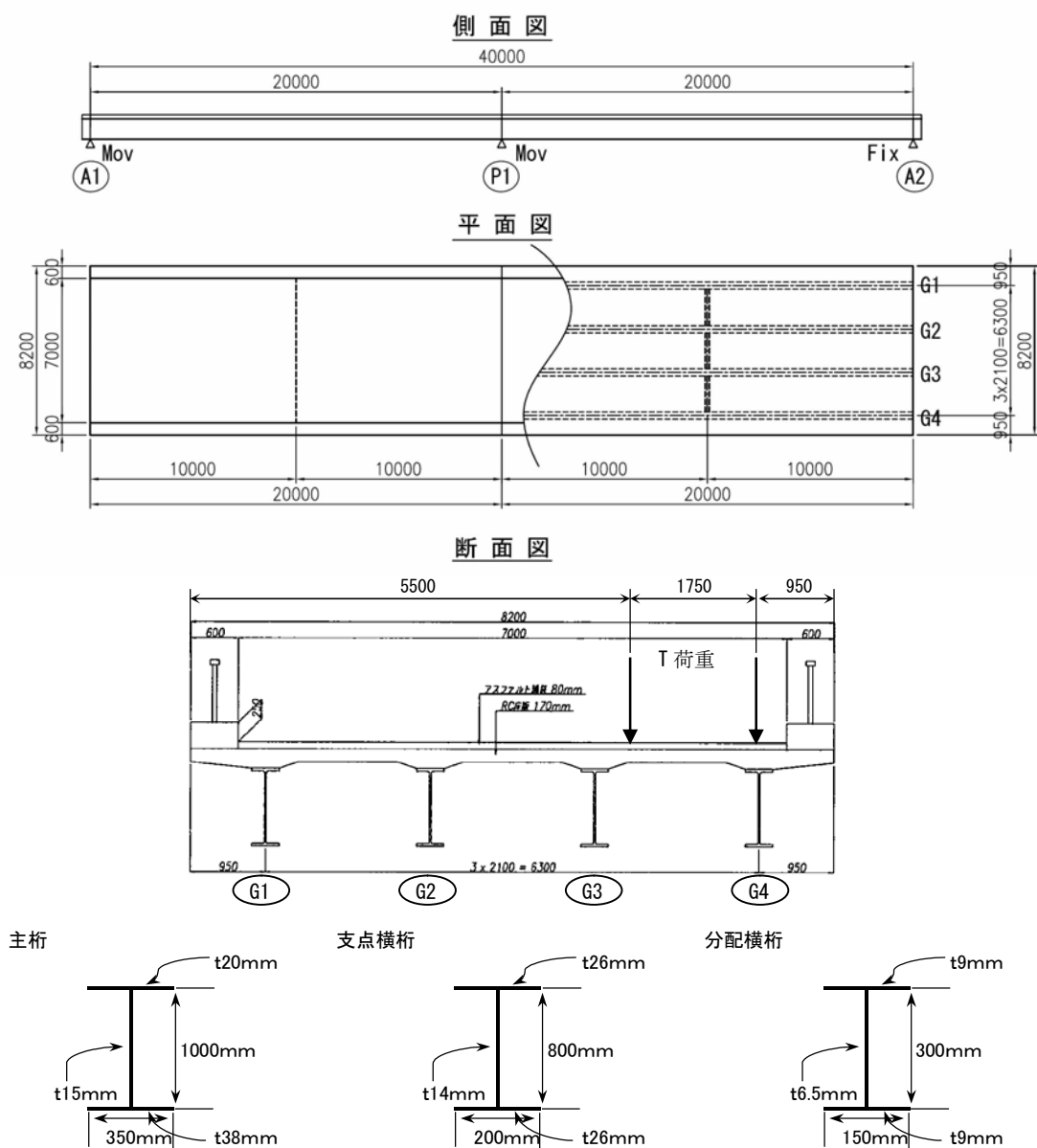


図-5.4.1 解析対象とした2径間連続4主桁橋の桁断面

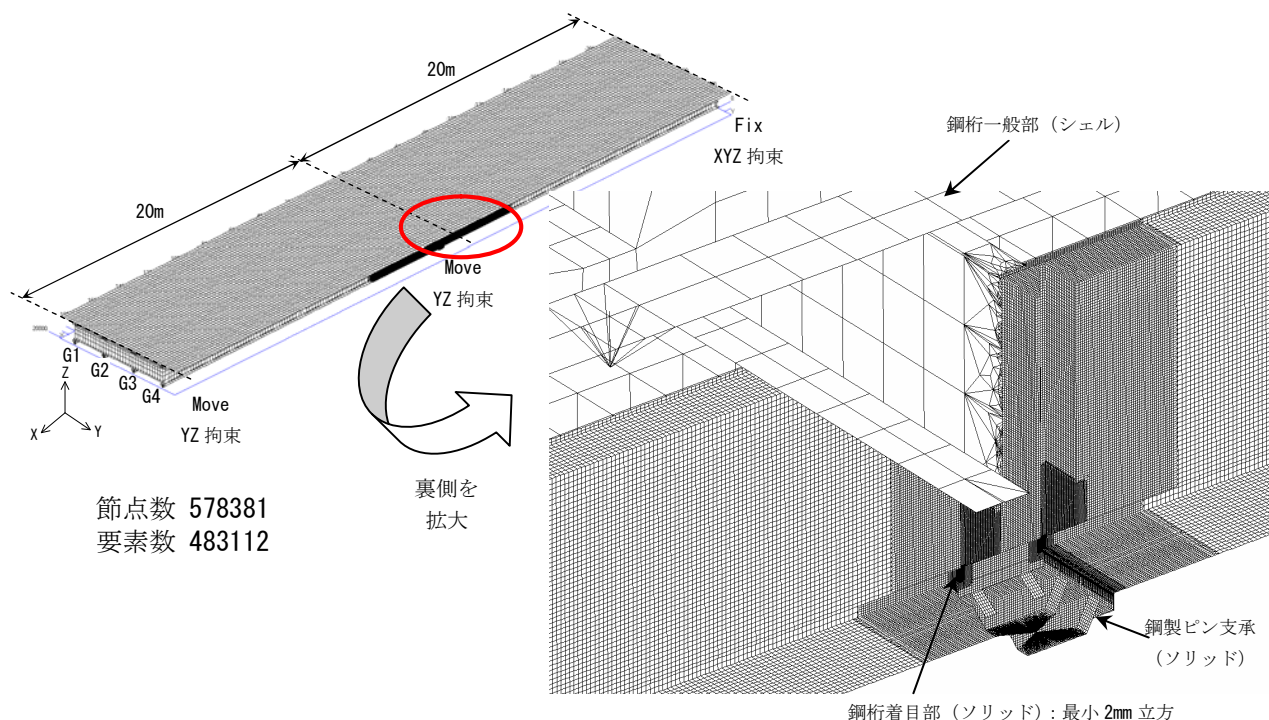


図-5.4.2 解析モデル

#### 5.4.3 疲労照査結果

疲労照査を行う着目点（着目要素）は、図-5.4.3に示す中間支点上の G4 下フランジ下面でソールプレートの溶接止端ラインとウェブラインが交差する要素 A である。図-5.4.4に着目要素 A に対する直応力  $\sigma_x$  の G4 桁上の影響線を示す。最も不利となる疲労設計荷重の载荷位置は、中間支点上を原点として第二径間側 7m の位置となった。

表-5.4.1(a)に着目要素 A における、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を用いた疲労照査結果を示す。同表にはホットスポット応力を用いた照査結果のほか、参考としてピーク応力を用いた照査結果と、比較のため同橋梁を格子解析で疲労照査した結果を併せて示す。格子解析では、中間支点上の床版はひび割れを考慮して鉄筋のみを断面剛性として考慮し、中間支点のピン支承は健全な状態（Y、Z 方向のみ拘束）として計算を行った。

表-5.4.1(a)を見ると、支承が健全な状態である CASE1 ではホットスポット応力から求めた最大応力範囲は E 等級の打ち切り限界以下であり、疲労照査を満足している。一方、床版のひび割れを考慮し支承が機能不全の状態である CASE2 の場合ではホットスポット応力から求めた最大応力範囲は打ち切り限界以上となり照査を満足しない。表-5.4.1(b)に CASE2 の場合における累積損傷度を考慮した疲労照査結果を示す。日大型車交通量  $ADTT$  は 3000 台/日、設計供用期間  $Y$  は 100 年として照査した。CASE2 では累積損傷度が 4.3 となり、25 年程度で累積損傷度が 1 となる結果となった。以上、一事例ではあるが、中間支点上の下フランジに発生する局部応力に対して、支承の拘束条件によっては疲労照査を満足しなくなる可能性がある計算結果が得られることがわかった。

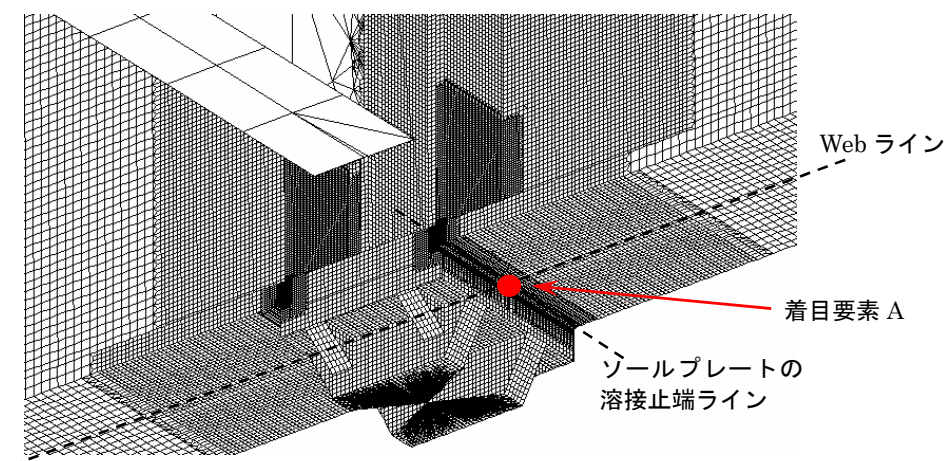


図-5.4.3 疲労照査を行う着目位置（着目要素）

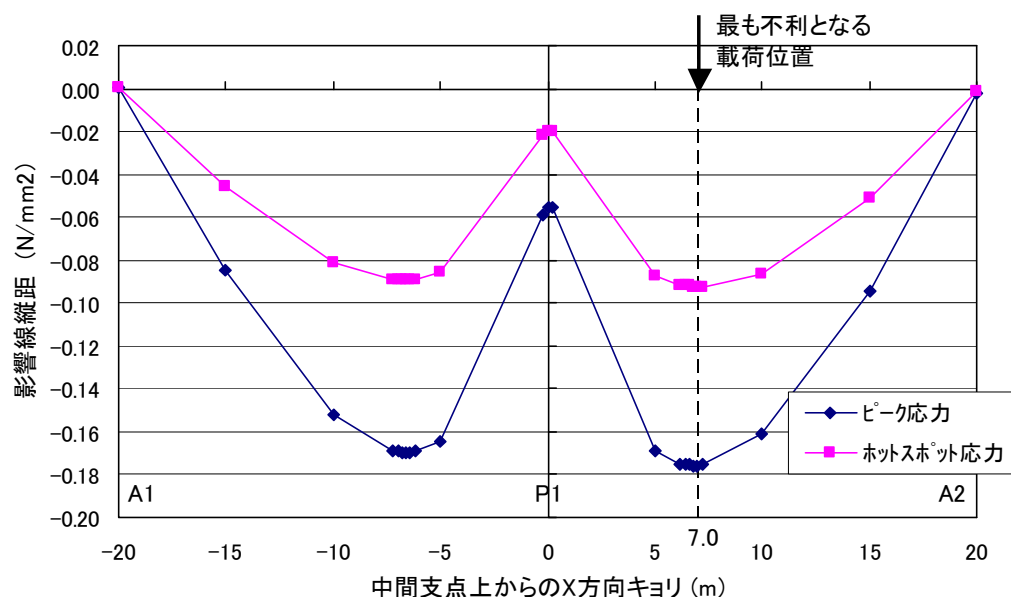


図-5.4.4 着目要素 A における直応力  $\sigma_x$  の G4 桁上影響線（CASE1 の例）

表-5.4.1 着目要素 A における疲労照査結果

(a) 一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を用いた疲労照査

| 解析ケース     |       | T荷重載荷時の<br>直応力 $\sigma_x$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 衝撃係数<br>$i_f$ | 構造解析<br>係数<br>$\gamma_a$ | 最大応力範囲<br>$\Delta \sigma_{\max}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 一定振幅応力<br>打ち切り限界<br>$\Delta \sigma_{ce} \cdot C_R \cdot C_t$ | 判 定<br>$\Delta \sigma_{\max} < \Delta \sigma_{ce} \cdot C_R \cdot C_t$ |          |
|-----------|-------|---------------------------------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------|
|           |       |                                                   |               |                          |                                                          |                                                              |                                                                        | 照査用応力    |
| FEM<br>解析 | CASE1 | ホットスポット                                           | 39.8          | 0.143                    | 1.00                                                     | 45.5                                                         | 72.6                                                                   | OK       |
|           |       | ピーク(参考)                                           | 75.4          | 0.143                    | 1.00                                                     | 86.2                                                         | 72.6                                                                   | OUT (参考) |
|           | CASE2 | ホットスポット                                           | 89.5          | 0.143                    | 1.00                                                     | 102.3                                                        | 72.6                                                                   | OUT      |
|           |       | ピーク(参考)                                           | 181.2         | 0.143                    | 1.00                                                     | 207.1                                                        | 72.6                                                                   | OUT (参考) |
| 格子解析      |       | 公称応力                                              | 31.8          | 0.143                    | 1.00                                                     | 36.4                                                         | 72.6                                                                   | OK       |

注1) T荷重には、活荷重補正係数  $\gamma_{T1}$  ( $=\text{Log}20+1.5=2.80$ )、同時載荷係数  $\gamma_{T2}$  ( $=1.00$ ) を乗じている。

注2) 強度等級: FEM解析、格子解析ともに“E等級” ( $\Delta \sigma_{ce} = 62 \text{ N/mm}^2$ )

注3) CASE1: 床版は全断面有効であり、中間支点のピン支承が健全な状態の場合

CASE2: 中間支点上の床版のひび割れを考慮し、中間支点のピン支承が機能不全な状態の場合

格子解析: 中間支点上の床版のひび割れを考慮し、中間支点のピン支承が健全な状態の場合

表-5.4.1 着目要素 A における疲労照査結果（つづき）  
(b) 累積損傷度を考慮した疲労照査

CASE2 のホットスポット応力を用いた(a)の照査が満足しなかったため、累積損傷度を考慮した疲労照査を行う。

$$\text{疲労設計曲線: } \Delta\sigma_{i,j}^m \times N_{i,j} = 2 \times 10^6 \times \Delta\sigma_f^m \times (C_R \times C_t)^m$$

$$\text{基本許容応力範囲} \quad \Delta\sigma_f = 80 \quad \text{N/mm}^2 \quad (\text{E 等級の時})$$

$$\text{変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界} \quad \Delta\sigma_{ve} = 29 \quad \text{N/mm}^2 \quad (\text{E 等級の時})$$

$$\text{平均応力に関する補正係数} \quad C_R = 1.30 \quad (\text{完全片振り圧縮})$$

$$\text{板厚に関する補正係数} \quad C_t = \sqrt[4]{25/38} = 0.90$$

$$\text{疲労設計曲線の傾き指数} \quad m = 3 \quad (\text{直応力を受ける継手})$$

応力範囲

$$\text{レーン 1} \quad \Delta\sigma_{1,1} = 102.3 \text{ N/mm}^2 > \Delta\sigma_{ve} \cdot C_R \cdot C_t$$

$$\Delta\sigma_{1,2} = 102.3 \text{ N/mm}^2 > \Delta\sigma_{ve} \cdot C_R \cdot C_t$$

疲労寿命の算出

$$\text{レーン 1} \quad N_{1,1} = \left( 2 \times 10^6 \times 80^3 \times (1.30 \times 0.90)^3 \right) / 102.3^3 = 1.53 \times 10^6$$

$$N_{1,2} = \left( 2 \times 10^6 \times 80^3 \times (1.30 \times 0.90)^3 \right) / 102.3^3 = 1.53 \times 10^6$$

設計供用期間に考慮する疲労設計荷重の載荷回数:  $nt_i$

$$nt_i = ADTT_{sLi} \times \gamma_n \times 365 \times Y$$

$ADTT_{sLi}$ : 一方向一車線（車線  $i$ ）あたりの日大型車交通量

$$ADTT_{sLi} = ADTT / n_L \times \gamma_L$$

$$\gamma_n : \text{頻度補正係数} \quad \gamma_n = 0.03$$

$$Y : \text{設計供用期間} \quad Y = 100 \quad (\text{年})$$

$$ADTT : 1 \text{ 方向あたりの日大型車交通量} \quad ADTT = 3000 \quad (\text{台/日})$$

$$n_L : \text{車線数} \quad n_L = 1 \quad (\text{レーン})$$

$$\gamma_L : \text{車線交通量の偏りを考慮するための係数} \quad \gamma_L = 1.0$$

$$nt_1 = 3000 / 1 \times 1.0 \times 0.03 \times 365 \times 100 = 3.29 \times 10^6$$

累積損傷度:  $D$

$$D = \sum (nt_i / N_{i,j}) = nt_1 / N_{1,1} + nt_1 / N_{1,2}$$

$$= 3.29 \times 10^6 / 1.53 \times 10^6 + 3.29 \times 10^6 / 1.53 \times 10^6 = 4.30 > 1 \quad (\text{OUT})$$

## 5.5 検討結果のまとめ

本章で検討した結果を以下にまとめる。

- (1) 中間支点部の応力集中部の応力性状を把握するため、I 断面の片持ばりを対象として、細ソリッドモデルを用いて解析を行うとともに、細シェルモデルおよびはり理論による解析結果と比較した。その結果、応力分布形状は細シェルモデルおよびはり理論と異なり、下フランジ直応力  $\sigma_x$  のピーク値ははり理論と比べて 3.5 倍、細シェルモデルと比べて 1.9 倍大きくなり、ウェブせん断応力  $\tau_{xy}$  のピーク値ははり理論と比べて 3.2 倍、細シェルモデルと比べて 1.2 倍大きくなった。
- (2) FEM 解析における要素の種類（シェル、ソリッド）および要素分割に関わらず、ソールプレート溶接止端から板厚の 10～20 倍程度離れた位置までの応力分布から直線外挿する方法により求めた応力を部材の応力照査で用いる平均応力とすることで、はり理論による公称応力とほぼ等しくなることがわかった。
- (3) 中間支点部の支承前縁を対象として、片持ばりのソリッドモデルで材料非線形解析（弾塑性解析）を行い塑性化する領域を算出した結果、線形弾性解析による場合と大きな差は見られず、材料非線形解析（弾塑性解析）では塑性化領域内で応力の再配分が行われていることが確認された。また、塑性化する領域の直径は板厚に対して 1/4 程度と小さく、最大ひずみも破断ひずみに対して十分に余裕があることが確認された。

以上、中間支点部の応力性状とモデル化の影響について検討を行った。限定した設計条件に対する一事例に過ぎないが、細ソリッドモデルを用いた応力集中部の塑性化領域の検討により、この応力集中を直接的に考慮していない現行設計の意味を理解する上で有用な結果が得られた。また、FEM 解析より求めた応力の応力照査への適用方法としては、ソールプレートの溶接止端から板厚の 10～20 倍程度離れた位置までの応力分布から直線外挿することにより求めた応力は、主桁一本を対象にした場合の公称応力と同程度となるため、FEM 解析による設計と格子解析による従来設計の違いは、床版や横桁に起因する荷重分配の差に集約できる可能性が示された。

## 6章 まとめ

本研究では、立体 FEM 解析を鋼多主桁橋の主桁の最適化設計に適用することを試み、格子解析と比較した場合の鋼重低減効果の検討を行った。また、その中で安定した解を得るためのモデル化手法ならびに解の評価方法の提案を試みた。

本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を対象として、格子解析と FEM 解析を行い、各種載荷ケースの応答値と計算値との比較を行った。その結果、格子解析（床版と主桁間は合成）と比較して、床版、主桁および横桁を 4 節点シェル要素としたモデルによる FEM 解析の方が、主桁応力・変位の実測値に近い結果が得られることが確認された。また、床版のみシェル要素とし、主桁および横桁をはり要素としたモデルでも、実測値に概ね近い結果が得られた。
- (2) 床版の桁との合成作用を考慮・部分的考慮・無視と変えた 3 ケースに対して、FEM 解析および格子解析から算出したそれぞれの影響線および発生応力の比較を行った。その結果、床版合成作用を変えたいずれのケースにおいても、FEM 解析の場合、外桁中桁の下フランジ直応力およびウェブせん断応力に着目した影響線のピーク値については 10～30%小さくなるものの、活荷重の影響線載荷面積が広がるため、活荷重応力は格子解析の場合と同程度か、それ以上になる傾向が見られた。
- (3) FEM 解析により主桁の断面設計を行い、格子解析による場合との断面諸元および鋼重の比較を行った。その結果、鋼多主桁橋の試設計例として本研究で対象とした有効幅員 9.25m、支間長約 40m の 4 径間連続 4 主 I 桁橋では、格子解析による従来設計とほぼ鋼重が変わらないことが確認された。
- (4) 合理的な鋼多主桁橋上部工形式として、下横構・対傾構を省略するとともに横桁間隔を広げた構造形式の橋梁を想定し、FEM 解析により試設計を実施した。その結果、格子解析による場合と比べて約 3%の鋼重低減となり、橋梁諸元の違いで鋼重低減効果が変化することがわかった。また、支間長を 40m および 50m とした場合の試設計結果より、FEM 解析を設計に用いた場合の鋼重低減効果において支間長の影響は小さい可能性があることがわかった。
- (5) 近年、実績が増えている鋼少数主桁橋を想定して、主桁本数を 2 本および 3 本とした場合の合理化橋梁を FEM 解析により試設計した。その結果、全幅員に対する主桁間隔および床版張出し長のバランスにより鋼重低減効果に変化すること、幅員 11m 級であれば 3 本主桁が最も FEM 解析の適用効果が見られた。
- (6) 中間支点部の応力集中部の応力性状を把握するため、I 断面の片持ばりを対象として、細ソリッドモデルを用いて解析を行うとともに、細シェルモデルおよびはり理論による解析結果と比較した。その結果、応力分布形状および各種の応力のピーク値は細シェルモデルやはり理論と比べて約 1.2～3.5 倍大きくなった。また、FEM 解析における要素の種類（シェル、ソリッド）および要素分割に関わらず、ソールプレートの溶接止端から板厚の 10～20 倍程度離れた位置までの応力分布から直線外挿する方法により求めた応力を部材の応力照査で

- 用いる平均応力とすることで、はり理論による公称応力とほぼ等しくなることがわかった。
- (7) 中間支点部の支承前縁を対象として、片持ばりのソリッドモデルで材料非線形解析（弾塑性解析）を行い塑性化する領域を算出した結果、線形弾性解析による場合と大きな差は見られず、材料非線形解析（弾塑性解析）では塑性化領域内で応力の再配分が行われていることが確認された。また、塑性化する領域の直径は板厚に対して 1/4 程度と小さく、最大ひずみも破断ひずみに対して十分に余裕があることが確認された。

本研究では、道路橋示方書に従って許容応力度法により部材応力の照査を行ったが、安全率に関して格子解析と FEM 解析を適用した場合の解析精度の違いを考慮していない。本来、これらの解析や解析ツールの信頼性の違いに応じた安全余裕の検討や、それを考慮できるような照査法の検討が必要と考えられる。

上記結果については、鋼多主桁橋の設計において、あくまでも、解析手法のみを格子解析から FEM 解析に変えた場合の影響によるものである。今後、それぞれの解析手法の解析精度を考えた安全余裕の設定やそれを考慮可能な照査法の検討が必要と考えられる。

#### 【謝辞】

本研究を行うにあたり、東京工業大学三木千寿教授、早稲田大学依田照彦教授、九州工業大学山口栄輝教授には疲労、座屈、FEM に関する学術的かつ理論的見解をご教授いただいたほか、一部検討を実施していただいた。また、2.2 節で解析対象とした栃木川橋の載荷試験等に関する資料については、日本道路公団（研究当時）より提供していただいた。

ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 西川和廣, 中谷昌一, 小野潔, 中洲啓太: 超高性能ゲーム機時代の橋梁設計, (財)土木研究センター, 土木技術資料, 第43巻, 第1号, pp.50-55, 2001.1.
- 2) 特集 応用力学の深淵, (社)土木学会, 土木學會誌, Vol.85, pp.5-63, 2000.8.
- 3) 土木学会鋼構造委員会新技術小委員会設計法ワーキンググループ: ロングライフブリッジへの道(上)(中)(下), 橋梁と基礎, 1997.7,9,10.
- 4) 黒田充紀, 永井真嗣, 藤野陽三, 柄川伸一, 川井 豊: 並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1073-1080, 1996.3.
- 5) 鋼構造新技術小委員会: 最終報告書(設計法研究), 土木学会, 1996
- 6) 三木千壽, 山田真幸, 長江進, 西浩嗣: 既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.281-294, 2000.4.
- 7) 本州四国道路橋公団: 鋼上部構造の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン(案), 1993.9.
- 8) 中藺明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋 吉宏, 秋山 洋, 佐々木保隆: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(上), -連続合成桁における中間支点部の設計-, 橋梁と基礎, pp.27-35, 2002.2.
- 9) 中藺明広, 稲葉尚文, 大垣賀津雄, 川口喜史: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(中), -腹板の少補剛設計法-, 橋梁と基礎, pp.47-54, 2002.3.
- 10) 中藺明広, 安川義行, 稲葉尚文, 坂本純男, 大垣賀津雄, 済藤英明: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(下), -床版およびずれ止めの設計法-, 橋梁と基礎, pp.33-39, 2002.4.
- 11) 菅沼久忠, 小西拓洋, 三木千寿: FEM と最適化ソフトの組合せによる鋼橋最小重量化設計の試み, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.3, pp.225-233, 2000.8.
- 12) 小西拓洋, 富澤雅幸, 三木千寿: FEM と数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み, 土木学会論文集, No.717/I-61, pp.23-36, 2002.10.
- 13) 小西拓洋, 高橋和也, 三木千寿: 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.91-103, 2000.7.
- 14) MSC.Nastran 2001 クイックリファレンスガイド, エムエスシーソフトウェア(株), 2001.
- 15) 原田和洋, 山口栄輝, 山本悟, 村越潤, 高橋実: 鋼 I 桁橋の 3 次元有限要素解析における要素分割の影響, 土木学会第 58 回年次学術講演会, I - 644, 2003.
- 16) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, III コンクリート橋編, 2002.3.
- 17) 山口栄輝, 久保喜延: 有限要素解析における応力算定法に関する一研究, 構造工学論文集, vol44A, pp.21-28, 1998.3.
- 18) 長井正嗣, 本田晃英, 中山康士, 坂井藤一, 八部順一: 合成 2 主 I 桁橋の対称鉛直荷重下の断面変形挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 3 巻, pp.297-304, 1995.11.
- 19) 名古屋高速道路公社: 鋼構造物設計要領 IV その他, 2001.4.

- 20) 池田博之，緒方辰男，白水晃生：鈑桁構造の合理化，土木学会，第 49 回年次学術講演会概要集，1994.9.
- 21) 山田真幸，Satorn PENGPHON，三木千壽，市川篤司，入部孝夫：RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1161-1168，2001.3.
- 22) 山田真幸，三木千壽，市川篤司：既設非合成桁橋梁の RC 床版と主桁上フランジ間で生じるせん断応力と実耐荷力評価，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1113-1120，2002.3.
- 23) (社)日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)，1996.3.
- 24) (社)日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成 2 主桁橋の設計例と解説，2001.7.
- 25) (財)高速道路技術センター：PC 床版鋼連続合成 2 主桁橋の設計・施工マニュアル，2002.3.
- 26) 長井正嗣：合成桁橋の設計，橋梁と基礎，pp.45-48，2002.8.
- 27) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.3.
- 28) (財)建設物価調査会：鋼道路橋設計ガイドライン(案)，1998.5.
- 29) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4.
- 30) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，1994.6.

#### 【成果論文】

- 1) 平原伸幸,高橋実,山森誠史,徳橋亮治:設計ツールの高度化に対応した道路橋の設計に関する研究,(社)土木学会,第57回年次学術講演会講演概要集 I 部門,I-622,pp.1243-1244,平成 14 年 9 月(2002.9.).
- 2) 村越潤,高橋実,吉岡勉,野中哲也,加藤修:FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討,(社)日本鋼構造協会,鋼構造論文集,第 11 巻第 43 号,pp.131-145,2004.9.
- 3) 吉岡勉,村越潤,高橋実:FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化に関する一検討,第 59 回年次学術講演会講演概要集 I 部門,I-493,pp.983-984,平成 16 年 9 月(2004.9.).

## 設計ツールの高度化に対応した道路橋の設計に関する研究

独立行政法人 土木研究所 正会員 平原伸幸  
 同上 正会員 高橋 実  
 同上 正会員 山森誠史  
 同上 正会員 ○ 徳橋亮治

**1. はじめに** 初等はり理論に基づいた格子解析など従来の設計手法は、計算機が普及していなかった時代から合理的な手段として用いられている。しかし、近年の計算機の飛躍的な性能向上により設計ツールが高度化された現在では、より精度の高い設計手法の実現が可能であり、これまでも様々な方面での研究が報告<sup>1)~5)</sup>されているものの、設計ツールとして本格的に用いられているとは必ずしもいえない。

このような背景のもと、本研究では立体 FEM 解析を用いた鋼道路橋の傾向を把握し、設計段階での問題点を整理することを目的とした。

**2. 対象橋梁** 図-1 に対象とした橋梁一般図を示す。橋種は、橋長 102.5m、幅員 11.6m の 3 径間連続非合成鋼桁橋（桁高 1.9m、間隔 2.4m、床版厚 230mm）で、支間中央に荷重分配横桁、橋軸方向に 5.7m 間隔で中間対傾構、下横構が配置される鋼桁橋である。

**3. 解析手法** 図-2 に有限要素分割図を、表-1 に各解析ケース（Case1,2,3）で使用した要素を示す。

モデルに汎用性をもたせるため、特殊な要素の使用は避け、4 節点シェル要素と梁要素のみとした。主桁と床版は梁要素で結合させ、実橋の非合成桁がもつレキシビリティ<sup>6)</sup>を考慮した剛性<sup>6)</sup>を使用した。

図-3 に荷重載荷パターンを示す。活荷重は道路橋示方書の B 活荷重とした。P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 荷重が共に着目部材に最も不利となる位置（ここでは TYPE-A、TYPE-B、TYPE-C の 3 箇所）を格子解析より決定して載荷した。

なお、格子解析との比較を想定したため、荷重抵抗係数設計法などの概念は今回は導入していない。汎用解析コードは MSC/NASTRAN を使用した。

**4. 解析結果と考察** 図-4 に G1 桁に着目した各モデルの応力、変形量の分布図を、表-2 に各桁に着目した解析結果の数値比較を示す。評価の対象は主桁のみとした。

応力の算出に際しては、可能な要素に関しては応力成分の組合せ結果である Von Mises の相当応力を用い

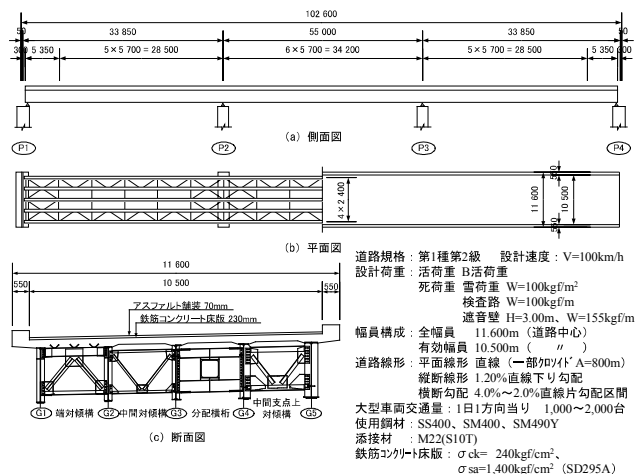


図-1 対象橋梁一般図

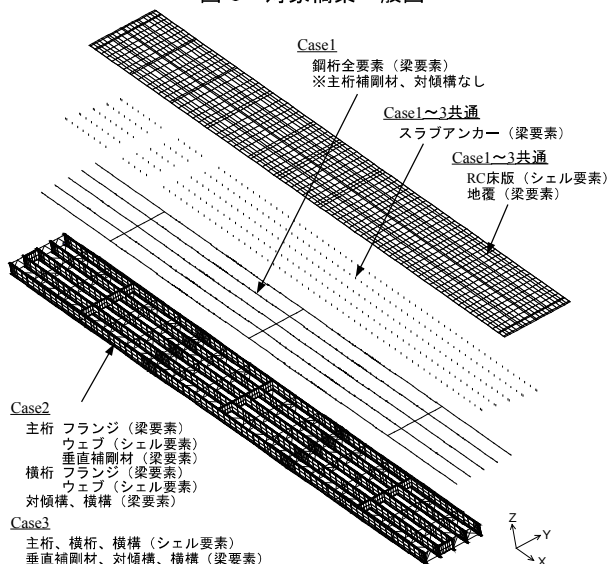


図-2 有限要素分割図

表-1 使用要素一覧表

| 解析ケース         | 使用要素       |              |               |
|---------------|------------|--------------|---------------|
|               | 簡易要素       | CASE 1       | CASE 2        |
| 部材名称          | CASE 1     | CASE 2       | CASE 3        |
| 床版            | 床版         | □            | □             |
|               | 地覆         | —            | —             |
|               | ウェブ        | □            | □             |
| 主桁            | フランジ       | □            | □             |
|               | 垂直補剛材      | —            | —             |
|               | 水平補剛材      | —            | —             |
| 横桁            | ウェブ        | □            | □             |
|               | フランジ       | —            | □             |
| 対傾構           | 端支材        | —            | —             |
|               | 端対傾構       | —            | —             |
|               | 中間支材       | —            | —             |
|               | 中間対傾構      | —            | —             |
| 下横構           | —          | —            | —             |
| スラブアンカー(結合要素) | —          | —            | —             |
| 節点数           | 2332       | 5186         | 10652         |
| 要素数(主桁のみ)     | 4369 (660) | 10491 (6774) | 14475 (10758) |

凡例) □: シェル要素 —: 梁要素 (全剛性考慮)  
 「□」: オフセット梁要素 —: 梁要素 (軸力のみ考慮)  
 ※空欄はモデル化していない要素を示す

キーワード 鋼多主桁橋、設計手法、FEM 解析、格子解析

構造物研究グループ(橋梁構造) 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 TEL 0298-79-6793 FAX 0298-79-6739

たが、断面力として解を得る要素では、従来同様に応力換算する手法を用いた。

格子解析との比較では、最も簡易な有限要素（主桁断面が一つの梁要素）を用いた **Case1** においても、応力においては概ね 30% 程度の低減効果が見られ、変形量においても同様の傾向となった。さらに、**Case2** から **Case3** へと要素を高次化するに従い、減少傾向がみられた。各ケースを比較すると、**Case1** に対してウェブをシェル要素とした **Case2** は、6% 程度の応力低下が見られたが、**Case2** に対してフランジをシェル要素とした **Case3** は変形量に影響は見られるものの、応力に関しては、ほとんど低下は見られなかった。

なお、最も詳細な有限要素を使用した **Case3** は、現状ではモデル作成段階における解析者の自由裁量に依存するところが多く、またその違いが解析結果に及ぼす影響も無視できないため、今後さらなる検討が必要である。

**5. おわりに** 以上より、鋼上部工全体系に立体 FEM 解析を用いることで、生じる問題点について一部整理することができた。今後は、本解析モデルを基にさらなる検討を行い、設計ツールの高度化に対応した設計手法の確立に結び付けたい。

#### 【参考文献】

- 1) 西川・中谷・小野・中洲：超高性能ゲーム機時代の橋梁設計，土木技術資料，43-1，pp.50-55，2001
- 2) 菅沼・小西・三木：FEM と最適化ソフトの組合せによる鋼橋最小重量化設計の試み，応用力学論文集，Vol.3，pp.225-233，2000
- 3) 鋼上部構造の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン（案），本州四国道路橋公団，1993
- 4) 鋼構造新技術小委員会：ロングライフブリッジへの道，橋梁と基礎，1997.7～10
- 5) 鋼構造新技術小委員会：最終報告書（設計法研究），土木学会，平成 8 年
- 6) 小松・佐々木：不完全合成格子桁橋の理論と近似解法について，土木学会論文集，第 329 号，pp.27-37，1983.1

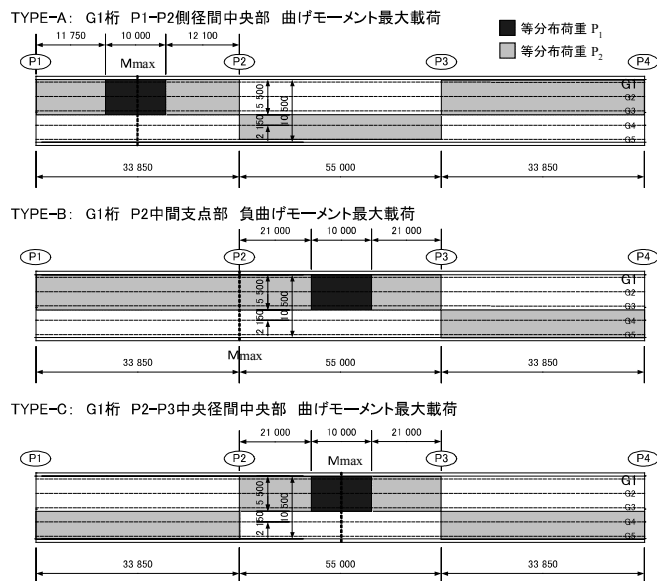


図-3 荷重荷重パターン図

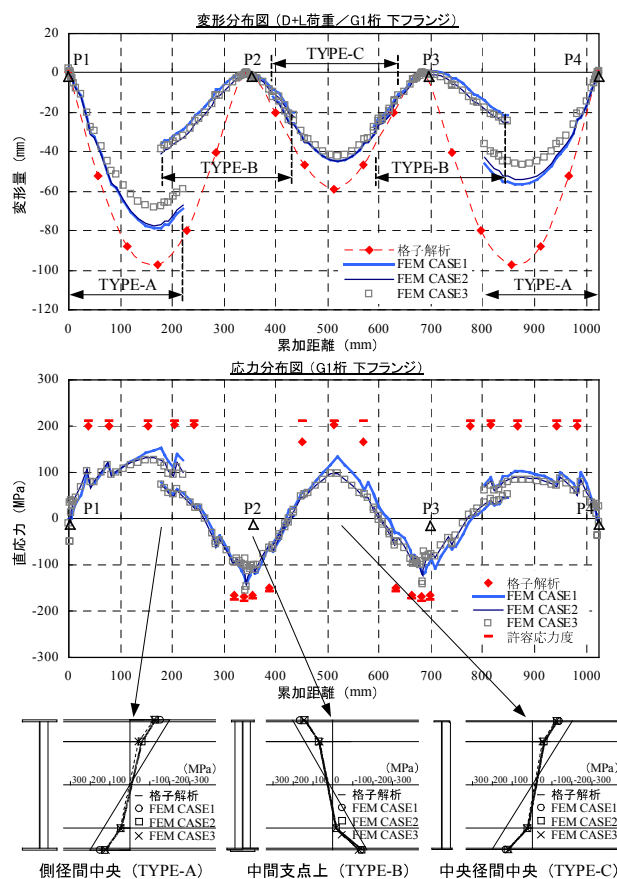


図-4 主桁分布図（G1桁）

表-2 解析結果 着目最大応力比較表（単位：MPa）

| 荷重タイプ  | G1桁 上フランジ |         |          |  |
|--------|-----------|---------|----------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B  | TYPE-C   |  |
| 格子解析   | -204      | 203     | -202     |  |
| CASE 1 | -152 75%  | 168 83% | -135 67% |  |
| CASE 2 | -133 65%  | 143 70% | -124 61% |  |
| CASE 3 | -121 60%  | 144 71% | -119 59% |  |

| 荷重タイプ  | G1桁 下フランジ |          |         |  |
|--------|-----------|----------|---------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B   | TYPE-C  |  |
| 格子解析   | 200       | -149     | 167     |  |
| CASE 1 | 152 76%   | -140 94% | 135 81% |  |
| CASE 2 | 132 66%   | -144 97% | 97 58%  |  |
| CASE 3 | 122 61%   | -112 75% | 98 59%  |  |

| 荷重タイプ  | G2桁 上フランジ |         |          |  |
|--------|-----------|---------|----------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B  | TYPE-C   |  |
| 格子解析   | -203      | 203     | -198     |  |
| CASE 1 | -135 67%  | 150 74% | -115 58% |  |
| CASE 2 | -133 66%  | 146 72% | -121 61% |  |
| CASE 3 | -97 48%   | 139 68% | -135 68% |  |

| 荷重タイプ  | G2桁 下フランジ |          |         |  |
|--------|-----------|----------|---------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B   | TYPE-C  |  |
| 格子解析   | 185       | -131     | 131     |  |
| CASE 1 | 135 73%   | -120 92% | 115 87% |  |
| CASE 2 | 125 68%   | -127 97% | 99 76%  |  |
| CASE 3 | 120 65%   | -107 81% | 100 77% |  |

| 荷重タイプ  | G3桁 上フランジ |         |          |  |
|--------|-----------|---------|----------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B  | TYPE-C   |  |
| 格子解析   | -203      | 204     | -176     |  |
| CASE 1 | -135 67%  | 163 80% | -114 65% |  |
| CASE 2 | -132 65%  | 149 73% | -123 70% |  |
| CASE 3 | -114 56%  | 170 83% | -67 38%  |  |

| 荷重タイプ  | G3桁 下フランジ |          |         |  |
|--------|-----------|----------|---------|--|
| 解析ケース  | TYPE-A    | TYPE-B   | TYPE-C  |  |
| 格子解析   | 179       | -137     | 137     |  |
| CASE 1 | 135 76%   | -131 96% | 114 83% |  |
| CASE 2 | 128 72%   | -134 98% | 109 79% |  |
| CASE 3 | 121 68%   | -109 80% | 101 74% |  |

注）表中の百分率は格子解析との比較を示す

## FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討

### A Study on Application of FEM Analysis to the Design of Steel Girder Bridge

村越 潤\*      高橋 実\*\*      吉岡 勉\*\*\*      野中哲也\*\*\*\*      加藤 修\*\*\*\*\*

Jun MURAKOSHI   Minoru TAKAHASHI   Tsutomu YOSHIOKA   Tetsuya NONAKA   Osamu KATOU

**ABSTRACT** By recent development of design tools by computer, FEM analysis has been widely used in structural design for various structures. From the point of view of rational design of steel girders, FEM-based design combined with optimization procedure is expected to be more effective than that based on beam theory analysis. In this study, a 3D-FEM model was first made for a continuous steel multi-girders on which truck loading experiment was conducted, and validity of the model was checked compared with the measured stress data. Weight reduction effect of girders by re-designing using FEM influence line analysis was examined.

Key Words: FEM, 影響線解析, 鋼多主桁橋, 最適化設計

*FEM, influence line analysis, plate girder, Optimum design*

#### 1. はじめに

一般的な橋梁形式である鋼多主桁橋の設計は、従来より、一般に初等はり理論に基づいた格子解析により行われている。格子解析は主桁と横桁を単純な格子構造に置き換えるものであり、計算機が普及していなかった時代において、複雑な構造をいかにして簡単に解くかに力点がおかれた頃から合理的な解析手法として用いられてきている。

一方、最近のコンピュータ能力の向上に伴う設計・解析ツールの進歩には目覚ましいものがあり<sup>[1]</sup>、ネックであった記憶容量や計算時間・手間といった課題は急速に解消されつつある。これに対応して、有限要素法 (Finite Element Method : 以下、FEM) による汎用解析ソフトの開発も近年盛んに進められている<sup>[2]</sup>。その結果、複雑な構造物の挙動を解析する際にも、簡易なモデル化の工夫を考えるより、むしろ構造物をそのまま、またはそれに近い状態で解析することにより実際に近い挙動を再現することが可能となりつつある。

このような背景のもと、これまでも様々な方面

で FEM を橋梁上部工の設計計算の種々の段階で用いるための検討が報告されてきた<sup>[1~10]</sup>。また、鋼少数主桁橋の設計において、限界状態設計法の考え方の下で FEM 解析を最適化アルゴリズムの中で用いることにより最適解を求める検討も行われている<sup>[11~13]</sup>。しかしながら、実務設計においては、FEM 解析は、主に格子解析では適切に表現しきれない構造、部位の挙動把握や応力照査に用いられており、格子解析に代わり最適解を求めるために主体的に用いるというレベルには至っていないのが現状である。その理由には、FEM 解析を使用した自動設計計算ツールが整備されていないため、例えばモデルの断面変更を手作業で繰り返す必要があるなど、FEM 解析を用いる設計は現時点では非効率的であること等が大きな理由の一つとして考えられる。

本研究では、鋼多主桁橋を対象として、主桁の最適化設計への FEM 解析の適用を試み、モデル化の方法について検討するとともに、格子解析と比較した場合の鋼重低減効果を明らかにするものである。まず2章では、静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を対象に、格子解析と FEM 解析を行い、各種載荷ケースの実測値と解析値との比較を通して、格子解析と FEM 解析の差異を評価するとともに、本研究で使用する FEM 解析モデルの妥当性を確認する。3章では、2章で得られた解析モデルを基に、L 荷重載荷のための影響線形状、最も不利になる L 荷重の載荷状態、お

\* 工修 土木研究所 構造物研究グループ橋梁構造チーム  
上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

\*\* 修(工)    "    "    研究員 (    "    )

\*\*\* 修(工)    "    "    交流研究員(    "    )

\*\*\*\* 博(工) ヤマト設計㈱ 名古屋支店企画開発部 部長  
(〒460-0002 名古屋市中区丸の内 3-17-6)

\*\*\*\*\*    "    東京本店設計部  
(〒135-0031 東京都江東区佐賀 1-1-3)

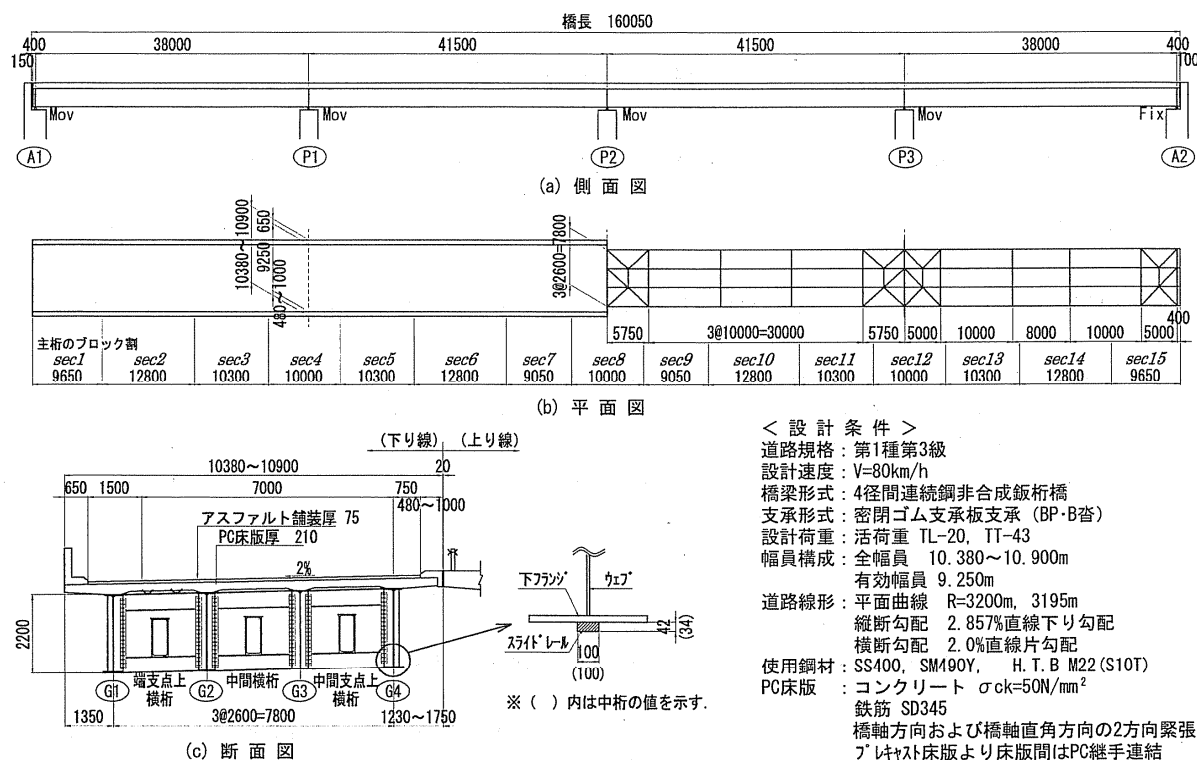


図-1 荷重試験が行われた橋梁の上部工一般図<sup>[14]</sup>

よび活荷重時の発生応力を算出し、格子解析との比較を行う。また、その比較から FEM 解析を主桁の設計に用いた場合の断面合理化の効果や課題について考察する。4 章では、実際に FEM 解析を用いて断面最適化を行い、格子解析との比較により鋼重低減の効果を示す。

## 2. FEM 解析による鋼多主桁橋のモデル化の検討

### 2.1 検討内容

静的荷重試験データが得られている鋼連続多主桁橋を解析対象として、合成・非合成と仮定した場合の格子解析モデルと 3 種類の FEM 解析モデルを作成する。各種荷重ケースの実測値と各モデルの解析値との比較を通して、格子解析と FEM 解析の差異を評価するとともに、本研究で使用する FEM 解析モデルの妥当性を確認する。

### 2.2 解析対象の橋梁と実橋荷重試験<sup>[14]</sup>

FEM 解析の対象とした橋梁は、4 径間連続非合成鉄桁橋（日本道路公団上信越自動車道栃木川橋下り線、平成 7 年竣工）である。図-1 に橋梁の概要を示す。本橋では、竣工前に試験車両を用いた静的荷重試験が行われており<sup>[14]</sup>、解析値との比較に際して、その試験結果を利用した。

栃木川橋下り線は、橋長約 160m、幅員約 10.4

～10.9m、桁高 2.2m、主桁本数 4 本、主桁間隔 2.6m である。構造の合理化として、横桁間隔を最大 10m とし、従来のトラス形式の分配対傾構から充腹形式の分配横桁に替え、下横構は支点部に隣接するパネル部のみに設置して中間パネル部は省略している。また、床版にはプレキャスト PC 床版（桁とは非合成）を用いている。床版厚は床版支間中央で 210mm、主桁直上で 290mm（ハンチを含む）である。表-1 に主要鋼材の断面諸元を示す。本橋の架設は、地組立ヤードにて桁上に PC 床版を載せた状態で全断面を送り出す工法を用いているため、主桁下フランジには送り出し架設用のスライドレールが取り付けられ、架設後もそのままの状態に残っている（図-1(c)参照）。

図-2 に荷重試験時の試験車両および荷重ケース、表-2 に試験車両の軸重を示す。試験には総重量約 20tf の 3 軸の大型ダンプトラック 4 台が使用されている。荷重ケースは支間中央部における荷重分配性状の把握を目的とした荷重ケース（幅員方向の中心荷重ケース 1 および偏心荷重ケース 3）と、中間支点上の負曲げモーメント領域の挙動の把握を目的とした荷重ケース（幅員方向の中心荷重ケース 2 および偏心荷重ケース 4）が実施されている。

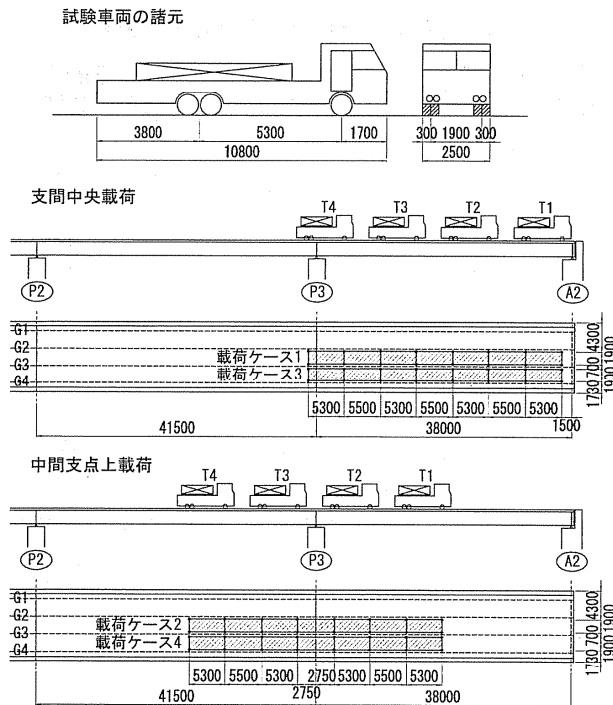


図-2 試験車両および載荷ケース<sup>[14]</sup>

## 2.3 解析モデル

解析モデルの作成にあたって、橋梁諸元には図-1中の値を使用した。道路線形に関しては平面線形  $R=\infty$ 、縦断勾配および横断勾配を 0% と簡略化し、全幅員を約 10.5m (G4 側張出し長約 1.4m) と一定にした。実橋における初期変形等は考慮していない。また、図-1(c) に示されるスライドレールが主桁の剛性に寄与するものと考え、当初の架設計算に依り、スライドレールの断面積を下フランジ幅で除し、その換算厚を下フランジ厚に加算することにより考慮した (表-1 参照)。

図-3 に各解析モデルの要素分割の概要を、表-3 に要素の種類と要素分割数を示す。解析におけるヤング係数、ポアソン比および支承条件はすべての解析モデルに共通とし、表-4 に示すとおりとした。

### (1) 格子非合成モデル

床版は考慮せずに、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化した。格子非合成モデルは、対象橋梁の設計時に使用されたモデルである。最大要素サイズは 0.5m とした。

### (2) 格子合成モデル

格子非合成モデルと同様、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化するが、床版の合成作用を考慮するため、床版および壁高欄の断面剛性

表-1 主要鋼材の断面諸元<sup>[14]</sup>

| 断面諸元 |       | 主 桁              |                      | その他           |
|------|-------|------------------|----------------------|---------------|
|      |       | P3支点上<br>(sec12) | P3-A2支間中央<br>(sec14) | 横桁            |
| G1桁  | U-flg | 490 × 28         | 490 × 32             | 200 × 10      |
|      | Web   | 2142 × 12        | 2136 × 12            | 2180 × 9      |
|      | L-flg | 550 × 30         | 550 × 32             | 200 × 10      |
|      | 材質    | SM570            | SM490Y               | SS400         |
| G2桁  | U-flg | 410 × 22         | 300 × 25             | 垂直補剛材         |
|      | Web   | 2148 × 12        | 2153 × 12            | 支点上: 269 × 12 |
|      | L-flg | 460 × 30         | 460 × 22             | 中間: 140 × 12  |
|      | 材質    | SM570            | SM490Y               | SS400         |
| G3桁  | U-flg | 410 × 22         | 300 × 25             | 水平補剛材         |
|      | Web   | 2148 × 12        | 2153 × 12            |               |
|      | L-flg | 460 × 30         | 460 × 22             | 130 × 12      |
|      | 材質    | SM570            | SM490Y               | SS400         |
| G4桁  | U-flg | 470 × 30         | 470 × 32             | 下横構           |
|      | Web   | 2138 × 12        | 2136 × 12            | CT 144 × 204  |
|      | L-flg | 550 × 32         | 550 × 32             | × 12 × 10     |
|      | 材質    | SM570            | SM490Y               | SS400         |

注1) 主桁は代表的な断面を示す。

注2) 解析では、スライドレール断面積を主桁下フランジ幅で除し、得られた換算厚を下フランジ厚に加算して用いる (外桁+8mm, 中桁+7mm)。

表-2 試験車両の軸重<sup>[14]</sup>

| 試験車両名称 | 前輪軸重 | 後輪軸重  | 合 計   |
|--------|------|-------|-------|
| T1     | 5.19 | 15.57 | 20.76 |
| T2     | 5.53 | 15.10 | 20.63 |
| T3     | 6.65 | 15.01 | 21.66 |
| T4     | 6.00 | 15.00 | 21.00 |

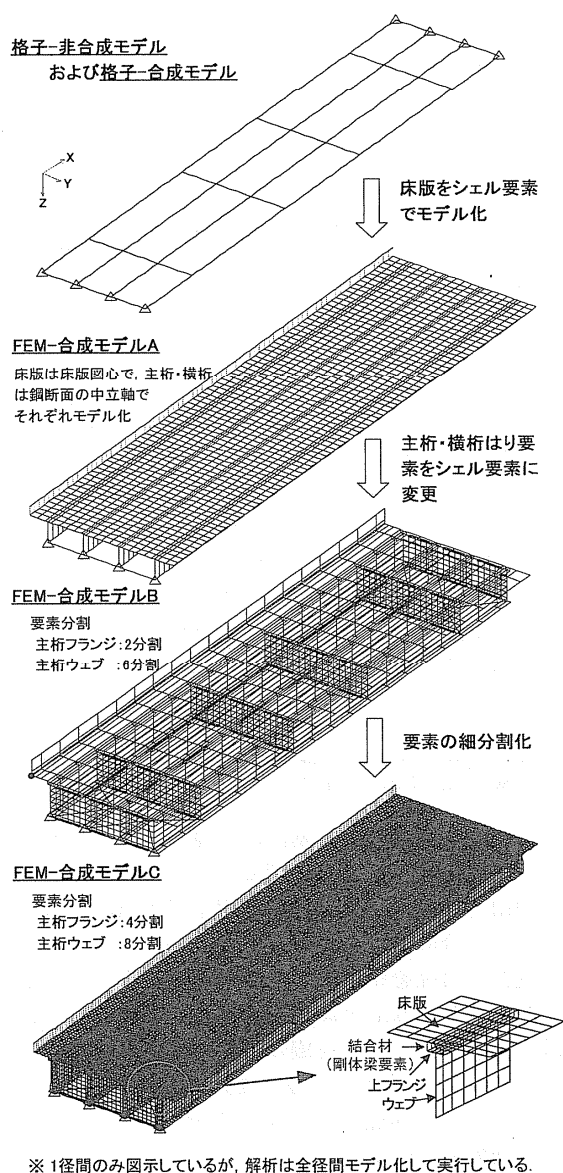
※後輪は2軸であるが、1軸として計上。

を主桁はり要素の断面剛性に加算した完全合成桁モデルである。ここで、同モデルを比較対象とした理由としては、長期供用期間を経た RC 床版を有する非合成橋梁においても合成挙動を示すという既往の研究を参考にしたことによる<sup>[6,15,16]</sup>。なお、主桁間隔が 2.6m と比較的狭いため床版の有効幅は全幅有効とし、壁高欄の断面剛性は近傍である G1 桁のみに加算した。最大要素サイズは、格子非合成モデルと同様に、0.5m とした。

### (3) FEM モデル A

床版の橋軸方向の合成作用を考慮するだけではなく、荷重の横分配作用などを見込むため、床版自体を FEM 要素として直接モデル化した。床版は床版断面の図心軸位置にシェル要素としてモデル化し、主桁および横桁は主桁鋼断面としての図心軸位置にはり要素としてモデル化し、そのシェル要素とはり要素の鉛直方向間を剛体はり要素で結んだモデルとした。支承条件はこの剛体はり要素の下端に与えた。このモデルは、格子合成モデルと後述する FEM モデル B の中間的なモデルである。

壁高欄はオフセットはり要素でモデル化した。床版はコンクリート全断面を有効とし、床版内の鉄筋は無視した。また、ハンチは床版シェル要素の板厚をハンチ高分厚くすることで考慮した。な



※ 1径間のみ図示しているが、解析は全径間モデル化して実行している。

図-3 各解析モデルの要素分割の概要  
(1 径間分)

お、シェル要素の最大サイズは  $0.50\text{m} \times 0.57\text{m}$ 、最大アスペクト比は 1:3 であり、比較的細かく分割したモデルである。また、垂直補剛材、水平補剛材、下横構等はモデル化していない。

#### (4) FEM モデル B

下横構をトラス要素、それ以外の部材(床版、壁高欄、主桁、横桁)を全てシェル要素で配置したモデルである。また、図-3 に示すように床版と上フランジの完全合成挙動を表現するため、シェル要素間の結合材を剛体はり要素でモデル化した。モデル A と比較して、主桁と横桁をシェル要素とするとともに、下横構をモデル化しており、実構

表-3 各解析モデルの要素種類と分割数

| 部材名称      | 解析モデル  |        |                            |                            |                            |
|-----------|--------|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|           | 格子-非合成 | 格子-合成  | FEM-合成A                    | FEM-合成B                    | FEM-合成C                    |
| 床版        | 床版     | (一)    | □                          | □                          | □                          |
|           | ハンチ    |        | □                          | □                          | □                          |
|           | 壁高欄    | (一)    | □                          | □                          | □                          |
| 主桁        | 地覆     |        |                            |                            |                            |
|           | ウェブ    | —      | —                          | □                          | □                          |
|           | フランジ   |        |                            | □                          | □                          |
|           | 垂直補剛材  |        |                            |                            | □                          |
| 横桁        | 水平補剛材  |        |                            |                            |                            |
|           | ウェブ    | —      | —                          | □                          | □                          |
| 横構        | フランジ   |        |                            | □                          | □                          |
|           | 下横構    |        |                            | --                         | --                         |
| 高力ボルト継手部  |        |        |                            |                            |                            |
| 架設用スライド   | (一)    | (一)    | (一)                        | □                          | □                          |
| ※ (結合材)   |        |        |                            |                            |                            |
| 4径間分の総節点数 | 1520   | 1520   | 9445                       | 9026                       | 107596                     |
| 4径間分の総要素数 | 1579   | 1579   | 10747                      | 9488                       | 118492                     |
| (主桁のみ)    | (1264) | (1264) | (1264)                     | (3528)                     | (40704)                    |
| 最大要素サイズ   | 0.50m  | 0.50m  | $0.50 \times 0.57\text{m}$ | $1.14 \times 2.75\text{m}$ | $0.25 \times 0.25\text{m}$ |
| 最大アスペクト比  |        |        | 1:3                        | 1:10                       | 1:3                        |

凡例 □ : シェル要素    — : はり要素    — : 剛体はり要素  
 □ : オフセットはり要素    -- : トラス要素  
 (一) : 断面剛性を主桁の梁要素に加算  
 空欄はモデル化していない部材を示す。  
 ※ 結合材とは床版と主桁上フランジの合成作用を表すための部材のこと。

表-4 全モデル共通の解析条件

| 項 目   | 内 容                                                   |      |            |      |      |            |           |
|-------|-------------------------------------------------------|------|------------|------|------|------------|-----------|
| 解析タイプ | 線形静的解析                                                |      |            |      |      |            |           |
| ヤング係数 | 鋼材(主桁, 横桁, 補剛材, 横構) : $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ |      |            |      |      |            |           |
|       | コンクリート(床版, 壁高欄) : $3.3 \times 10^4 \text{N/mm}^2$     |      |            |      |      |            |           |
| ポアソン比 | 鋼材(主桁, 横桁, 補剛材, 横構) : 0.30                            |      |            |      |      |            |           |
|       | コンクリート(床版, 壁高欄) : 1/6                                 |      |            |      |      |            |           |
| 支承条件  |                                                       | 橋軸方向 | 橋軸直<br>角方向 | 鉛直方向 | 橋軸回り | 橋軸直<br>角回り | 鉛直軸<br>回り |
|       | 固定                                                    | 拘束   | 拘束         | 拘束   | 自由   | 自由         | 自由        |
|       | 可動                                                    | 自由   | 拘束         | 拘束   | 自由   | 自由         | 自由        |

造に近い形状にモデル化している。なお、シェル要素の最大サイズは  $1.14\text{m} \times 2.75\text{m}$ 、最大アスペクト比は 1:10 であり、比較的粗く分割したモデルである。

#### (5) FEM モデル C

垂直補剛材をシェル要素として、壁高欄をオフセットはり要素としてモデル化している点を除いてモデル B と同様のモデルである。ただし、最大要素サイズを  $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$  とし、最大アスペクト比を 1:3 としており、モデル B と比べて細かく分割したモデルである。なお、壁高欄にはオフセットはり要素を用いたが、シェル要素を用いた場合と比較して、主桁の変形および応力にはほとんど影響しないことを事前に確認している。

解析に使用したソフトウェアは、汎用有限要素プログラム「NASTRAN Ver. 2001.0.9」<sup>[17]</sup>である。モデル化には特殊な要素の使用は避け、シェル要素、はり要素およびトラス要素<sup>[17]</sup>を用いた。シェル要素には選択的低減積分の 4 節点アイソパラメ

トリックシェル要素 CQUAD4 (数値ロッキングを回避するために非適合モードの変位関数を適用した要素) を用いた。はり要素にはせん断変形を考慮した Timoshenko はり要素 CBEAM を、オフセットはり要素にはこの CBEAM にオフセットベクトルを与えたものを用いた。トラス要素には CROD を用いた。また、解析は線形静的解析とした。

## 2.4 検討結果

図-4 に支間中央の鉛直変位、支間中央および中間支点上の主桁下フランジ応力について、解析値と実測値の比較結果を示す。

最も詳細にモデル化した FEM モデル C では、実測値(●)と解析値(▲)は全体的に良く一致する結果となったが、完全に一致するまでには至っていない。この要因としては、床版の実剛性と解析上の仮定値との相違、支承の水平・回転機構の実挙動とモデル化の相違などが考えられる。

以下に、図-3 に示すモデル化順序に従って、図-4 について主な結果を述べる。

### (1) 床版の合成作用の影響

床版の合成作用を無視した格子非合成モデルでは、解析値(◇)は実測値(●)に対して鉛直変位で4~5倍、下フランジ直応力度で2~3倍と大きくなっている。一方、床版の合成作用を考慮したその他のモデル(格子合成モデル、FEM モデル A,B,C) では、解析値は全体的に実測値に近い値を示している。このことから、対象橋梁は非合成桁として設計されているが、合成桁として挙動しているものと考えられる。

### (2) 床版のモデル化の影響

実測値(●)に対して、床版をシェル要素でモデル化した FEM モデル A と、床版の橋軸方向の断面剛性を主桁はり要素の剛性に含める形でモデル化した格子合成モデルとの比較を行う。

FEM モデル A (×) の場合、全ての荷重ケースで変位、応力ともに実測値と概ね一致している。一方、格子合成モデル(◆)の場合、中心荷重ケース 1,2 では変位、応力ともに実測値に比較的近いが、偏心荷重ケース 3,4 では荷重直下の桁の場合、変位、応力が実測値より大きくなり、荷重から離れた桁では逆に小さくなる傾向が見られる。特に支間中央偏心荷重ケース 3 では外桁 G4 の下フランジ応力度は、実測値に比べて約 40% 大きい(図-4(b) ii))。すなわち、FEM モデル A と比較して、格子合成モデルでは実橋での荷重の横分配を適切に算定できていないことが確認された。

ここで、床版と主桁間のモデル化の方法としては、FEM モデル A のモデル化の他に、図-5 に示すように、剛体はり要素を使用する代わりにオフセットはり要素を適用する方法が考えられる(以下、このモデルを FEM モデル A' と呼ぶ)。オフセットはり要素の場合、入力したオフセット量とその方向が解析プログラムの中で自動的に剛体要素として扱われるため、剛体はり要素で直接モデル化することと等しい。しかし、FEM モデル A' では床版と主桁が節点共有により結合し、オフセット端には節点がないため、支承の境界条件を床版位置で与えることになり、この点が FEM モデル A と異なる。図-6 に偏心荷重ケース 3 に対する両モデルによる解析結果を示す。FEM モデル A' の解析値(—)は格子合成モデル(◆)に近い値を示しており、床版をモデル化したにも関わらず実橋の荷重の横分配を適切に算定できていない結果となっている。これは、FEM モデル A' における支承の境界条件を床版位置で与えたことが原因と考えられ、格子モデルと床版シェル要素を併用する際には、支承条件を与える高さ方向の位置に注意を要することが確認された。

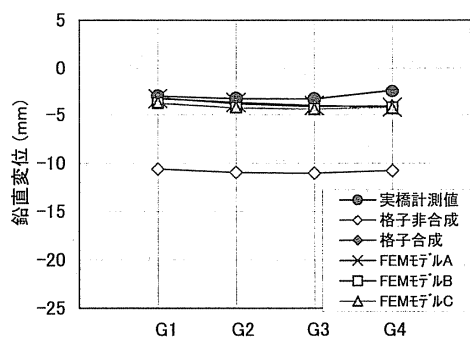
### (3) 主桁の要素種類の影響

実測値(●)に対して、主桁をはり要素とした FEM モデル A とシェル要素とした FEM モデル C の比較を行う。FEM モデル A の解析値(×)は、偏心荷重ケース 3,4 で変位、応力とも実測値に対して若干の差が見られるものの概ね一致している。一方、FEM モデル C の解析値(▲)は、前述のとおりの全解析モデルの中で実測値と最も良く一致しており、FEM モデル A でも実挙動を概ね表現できること、また FEM モデル C のように主桁をシェル要素でモデル化することにより、実挙動をより適切に表現できることが確認された。

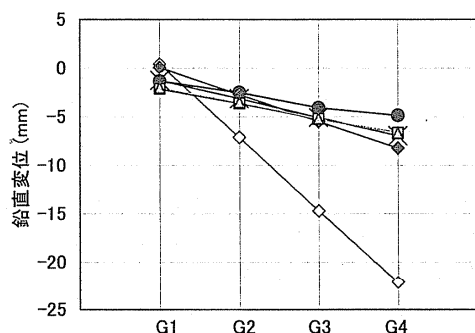
### (4) 要素分割の影響

実測値(●)に対して、要素分割の異なる FEM モデル B (□) と FEM モデル C (▲) の比較を行う。両モデルにおける支間中央荷重での鉛直変位と下フランジ直応力度はほぼ一致しているが、中間支点上荷重での下フランジ直応力度の差が見られ、FEM モデル B の解析値は実測値よりも 20~30% 程度小さい結果となっており(図-4(c) i) ii))、支承反力により応力状態が複雑と考えられる中間支点上では要素分割の違いが解析結果に影響を与えているものと推測される。

図-7 は主桁の要素分割の影響について、最大要素辺長とアスペクト比により整理した結果を示している。支間中央では要素サイズの影響を受けず

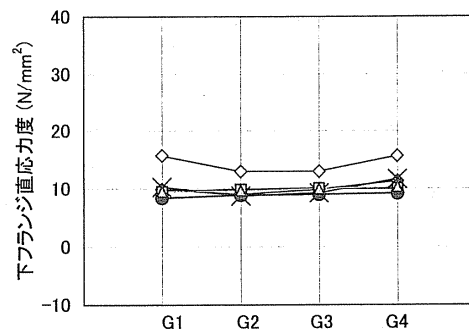


i) 支間中央載荷ケース1(鉛直変位)

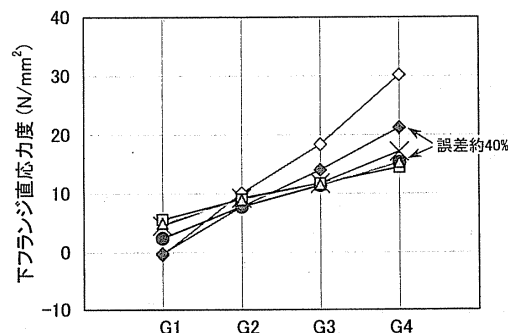


ii) 支間中央載荷ケース3(鉛直変位)

(a) P3-A2支間中央の鉛直変位

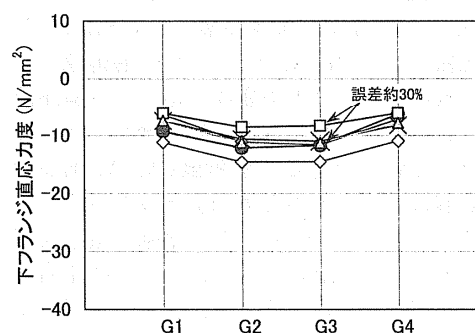


i) 支間中央載荷ケース1(直応力度)

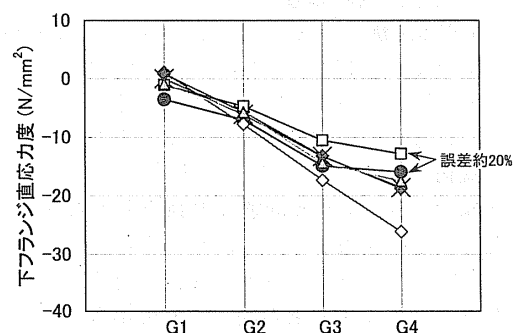


ii) 支間中央載荷ケース3(直応力度)

(b) P3-A2支間中央の下フランジ直応力度

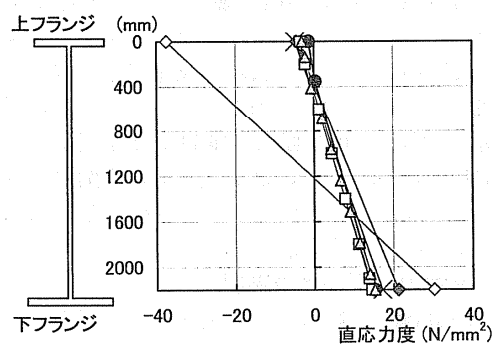


i) 中間支点上載荷ケース2(直応力度)

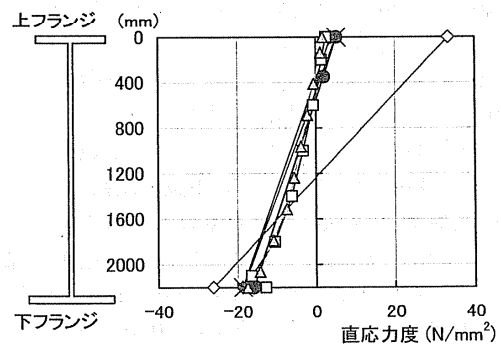


ii) 中間支点上載荷ケース4(直応力度)

(c) P3支点上の下フランジ直応力度



i) 支間中央載荷ケース3(応力分布)



ii) 中間支点上載荷ケース4(応力分布)

(d) G4桁高さ方向の直応力分布

図-4 解析値と実測値との比較

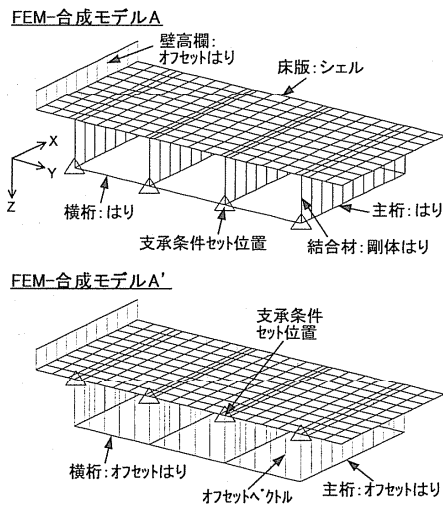


図-5 FEM モデル A, A' の概要

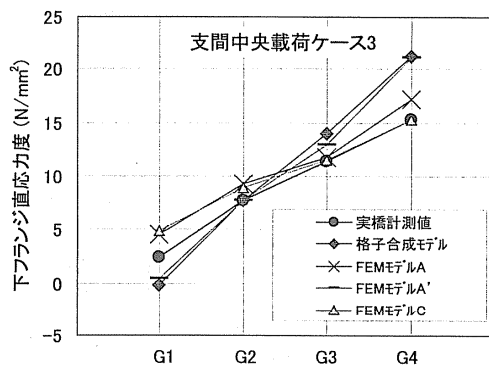


図-6 モデル化による荷重分配の違い

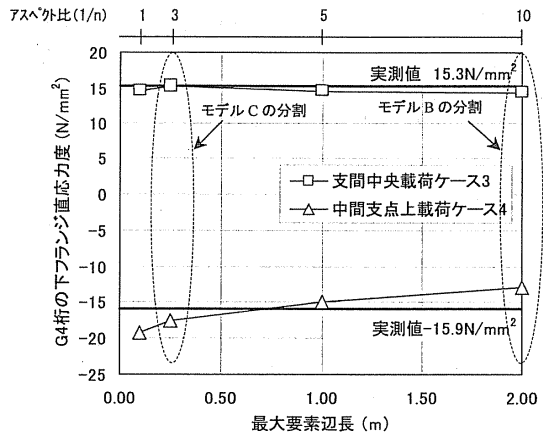
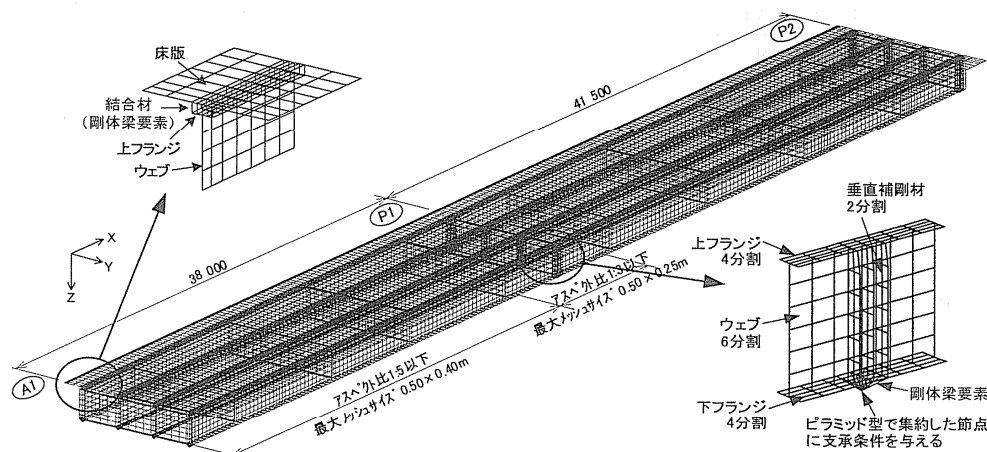


図-7 主桁をシェル要素とした場合  
の要素分割の影響

表-5 3章以降のFEMモデル化の方針

| 部材名称       | 使用要素 | 要素分割    | アスペクト比                | 重量 |
|------------|------|---------|-----------------------|----|
| 床版         | □    | 床版支間4分割 |                       | 考慮 |
| ハンチ        |      |         | 支間中央付近は<br>1:5以下      | 〃  |
| 壁高欄        |      |         |                       | 〃  |
| 地覆         |      |         |                       | 〃  |
| 主桁         | □    | 全高6分割   | 中間支点上付近<br>は<br>1:3以下 | 〃  |
| フランジ       | □    | 全幅4分割   |                       | 〃  |
| 垂直補剛材      | □    | 全幅1分割   |                       | 〃  |
| 水平補剛材      |      |         |                       | 〃  |
| 横桁         | □    | 全高6分割   | 1:5以下                 | 〃  |
| フランジ       | □    | 全幅2分割   |                       | 〃  |
| 横構         | 下横構  | ---     |                       | 〃  |
| 高力ボルト継手部   |      |         |                       | 無視 |
| 架設用スライドレール |      |         |                       | 〃  |
| (結合材)      | —    |         |                       | 〃  |

※ 凡例および注釈は表-3と同じ



※ 3章では2径間をモデル化. 4章では4径間をモデル化.

図-8 設計で使用する FEM 解析モデル

に解析値はほぼ一定である。中間支点上では実測値と大きな差はないものの局所的な応力集中が生じるため要素サイズを小さくするに従って下フランジ直応力が増加する傾向が見られる。

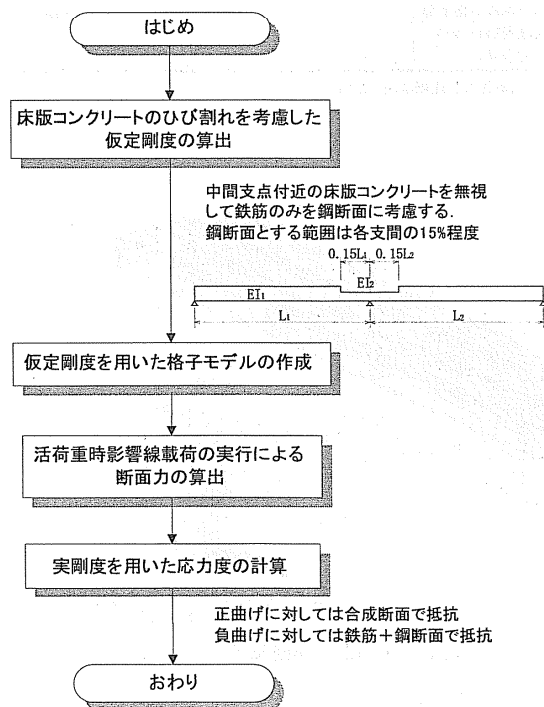
## 2.5 モデル化のまとめ

前節 2.4 の結果より、実測値に近い計算値を得るためには、主桁と床版の図心位置のずれを考慮して主桁・横桁はり要素と床版シェル要素をモデル化することが必要であり、また、主桁・横桁をシェル要素とすることで、解析精度はより向上することがわかった。以上の点を考慮して、3 章以降の検討では主として FEM モデル C に準じた解析モデルを用いることとした。表-5 にモデル化の方針を、図-8 に表-5 に従って作成した FEM モデルをそれぞれ示す。要素分割については、支間中央では要素サイズの影響をほとんど受けないため比較的粗くし、中間支点上では応力集中の影響が見られるため実測値を踏まえ、FEM モデル C 程度の要素分割とした。

## 3. 格子解析と FEM 解析による影響線の比較

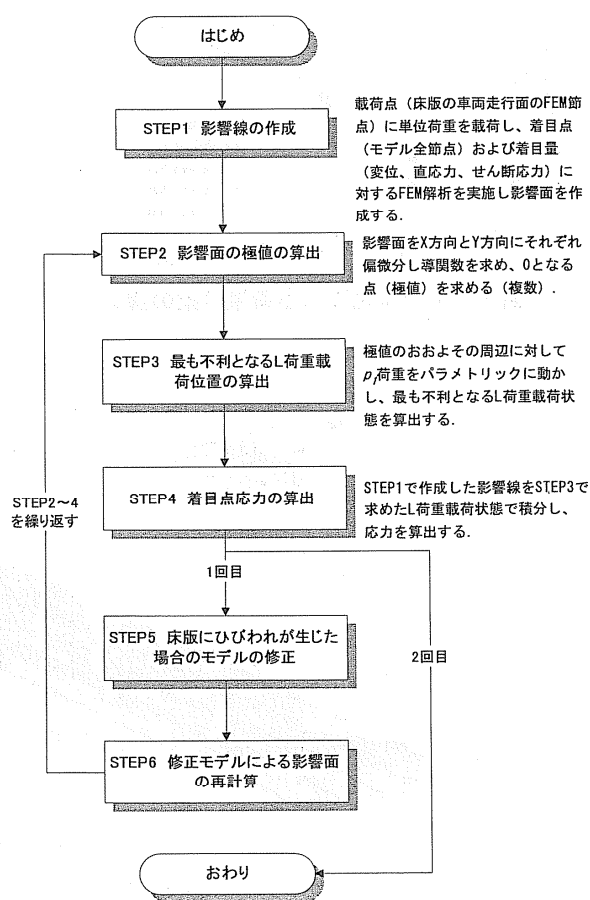
### 3.1 検討内容と対象橋梁

本章では、同一の対象橋梁に対して、FEM 解析と格子解析による影響線を算出し、その相違を比較するとともに、影響線を用いて着目部位が最も



不利になる載荷状態およびその状態で発生する主桁の活荷重応力を比較する。なお、FEM 解析による影響線の作成にあたっては、今回の研究で開発した FEM 影響線解析プログラムを用いた。

対象橋梁は 2 章の橋梁 (図-1) に以下の変更を加えたものとした。主桁は非合成桁として設計されているが、ここでは、鋼材・床版重量を鋼断面のみで抵抗し、橋面荷重 (舗装、壁高欄など) ・活荷重に対して合成断面で抵抗する、活荷重合成桁に変更した。また、床版をプレキャスト PC 床版から設計基準強度  $30\text{N/mm}^2$  の RC 床版に変更し、ひび割れを許容するプレストレスしない連続合成桁橋とした。これらの条件変更の下、計算を簡略化するため 4 径間のうち 2 径間のみを対象に、格子解析により再設計した桁断面に対して FEM モデルを作成し、格子解析と FEM 解析による影響線比較を行った。活荷重の載荷には道路橋示方書<sup>[18]</sup>の B 活荷重 (L 荷重) を用いた。要素種選択、要素分割数等のモデル化方針および解析モデルは、先に示した表-5 および図-8 のとおりである。



### 3.2 格子解析と FEM 解析による影響線の算出方法の違い

ひび割れを許容する連続合成桁の設計では中間支点上における床版の合成作用の取扱い方が重要となる。格子解析では、例えば文献[19,20]によれば、活荷重に対する断面力の算出にあたっては中間支点から両側支間長の15%領域を「鉄筋+鋼断面」とし、残りの領域を合成断面とした仮定剛度により算出し、また、応力の算出にあたっては、求めた断面力から判断される負曲げ領域を「鉄筋+鋼断面」とし、残りの領域を合成断面とした実剛度により算出する方法が一般的に実務設計で用いられているとされている。この場合、断面力を算出する仮定剛度と応力を計算する実剛度で、床版の合成作用を取扱う範囲が異なるが、本章(および4章)では、この方法を用いることにした。図-9に格子解析における影響線算出方法を示す。

一方、FEM 解析では、断面力を算出することなく直接的に応力が得られることから、本論文では、中間支点付近における RC 床版のひび割れの状態を評価し、「鉄筋+鋼断面」の範囲に反映させる方法を用いた。図-10に FEM 解析における影響線の算出方法を示す。まず、FEM 解析より床版の影響線を求め、床版にひび割れ強度  $\sigma_{ct}$  を超える応力が発生する範囲を求めた。次に、その範囲の RC 床版のコンクリートを無視して鉄筋のみの剛性へ低減したモデルへ変更し、FEM 解析により影響線を再計算した。着目部位に最も不利となる荷重状態は、2 回目の影響線から算出した。なお、ひび割れの判定に用いた曲げひび割れ強度  $\sigma_{ct}$  は土木学会コンクリート標準示方書<sup>[21]</sup>に従い、次式により算出した。

$$\sigma_{ct} = 0.6 / (h^{1/3}) \cdot 0.23 \sigma_{ck}^{2/3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで、 $h$  : 床版厚 (=0.21m)

$\sigma_{ck}$  : 設計基準強度 (=30 N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ct}$  : 曲げひび割れ強度 (=2N/mm<sup>2</sup>)

### 3.3 検討結果

#### (1) 影響線ピークおよび等分布荷重 $pI$ 荷重位置の比較

図-11に格子解析と FEM 解析により算出される G4 主桁に着目した場合の影響面(支間中央の下フランジ直応力  $\sigma_x$ 、中間支点の下フランジ直応力  $\sigma_x$  およびウェブせん断応力  $\tau$ )を示す。図中の縦軸 ( $z$  軸) は単位荷重 (1kN) を載荷したときの着目位置の発生応力(影響線縦距)である。図-12に、図-11の影響面の G4 桁位置における分布と、

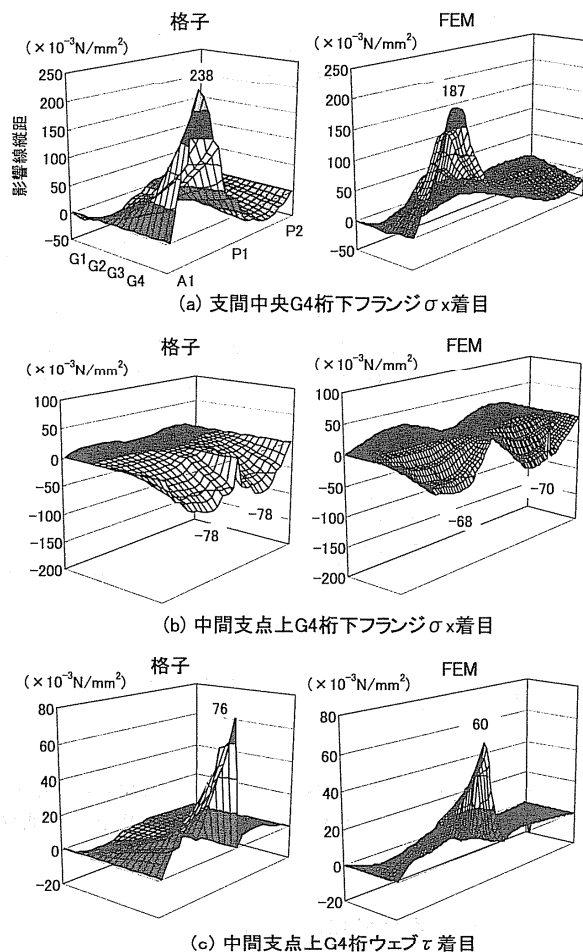


図-11 格子と FEM 解析より算出される影響面

最も不利な応力を発生させる L 荷重の等分布荷重  $pI$  (以下、 $pI$  荷重という。) の荷重位置を示す。また、図-13に、図-11の影響面のピーク位置での横断分布と  $pI$  荷重荷重位置を示す。

各着目部位ともに幅員方向の影響線形状に差が見られる。また、影響線のピークは FEM 解析の方が総じて小さくなる傾向が見られる。以下、各着目部位についての比較結果をまとめる。

①支間中央 G4 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が 21% 小さい(図-11 (a))。最大応力を与える  $pI$  荷重の位置はほぼ一致している(図-12 (a)、図-13 (a))。

②中間支点上 G4 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  では、格子解析の場合、第1支間と第2支間で完全対称分布となるのに対し、FEM 解析の場合わずかに非対称の分布となり、ピークの値は格子より約 10%小さい(図-11 (b))。最大応力を与える  $pI$  荷重の橋軸方向位置は約 1m ずれる結果と

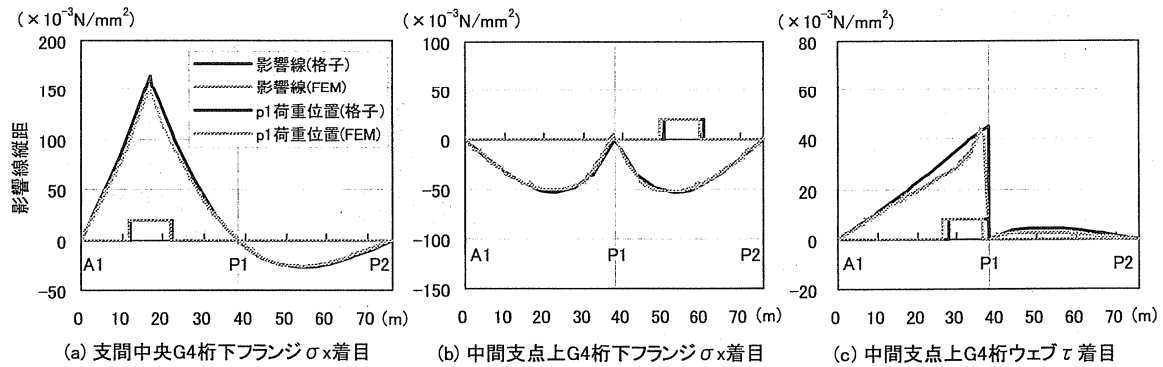


図-12 格子とFEM解析より算出される外桁G4上の影響線と $p_1$ 荷重載荷位置の比較

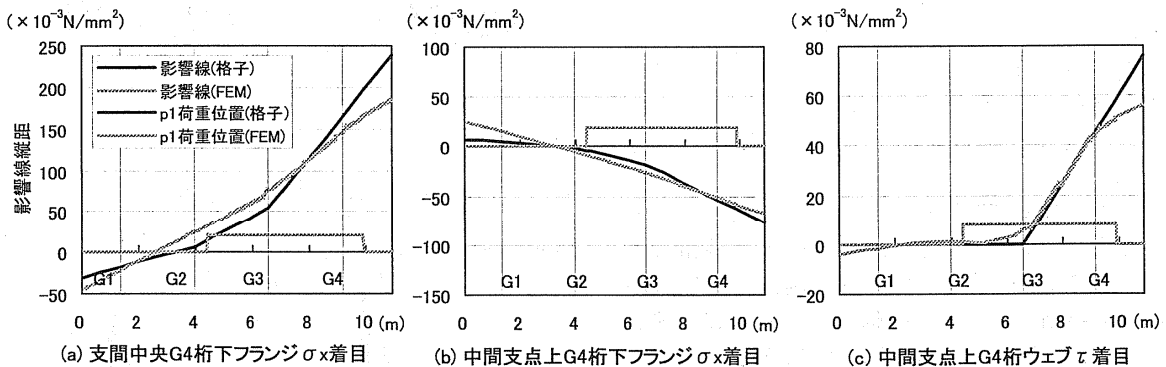


図-13 格子とFEM解析より算出される幅員方向の影響線と $p_1$ 荷重載荷位置の比較

表-6 影響面体積および活荷重応力の比較

| 着目点と着目量 |                        | 解析モデル | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|------------------------|-------|-------|-------|----------------|
| 支間中央    | G4下フランジ $\sigma_x$ max | 影響面体積 | 9568  | 10423 | 1.09           |
|         |                        | 活荷重応力 | 93.3  | 100.4 | 1.08           |
| 中間支点上   | G4下フランジ $\sigma_x$ min | 影響面体積 | -7883 | -9163 | 1.16           |
|         |                        | 活荷重応力 | -52.7 | -61.4 | 1.17           |
|         | G4ウェブ $\tau$ max       | 影響面体積 | 2728  | 2648  | 0.97           |
|         |                        | 活荷重応力 | 25.8  | 23.9  | 0.93           |

※単位は、影響面体積( $\times 10^6 \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ )、発生応力( $\text{N/mm}^2$ )  
影響面体積は、着目量がmaxのとき+側の体積を、minのとき-側の体積をそれぞれ示す

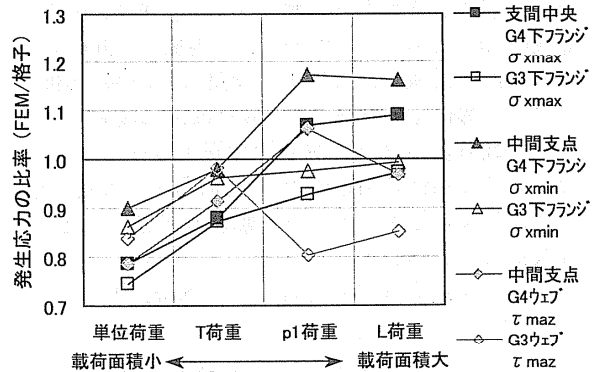


図-14 載荷面積の大きさによる発生応力の比較

なっている(図-12 (b)、図-13 (b))。

- ③中間支点上 G4 桁ウェブのせん断応力 $\tau$ では、ピーク値は格子解析に比べ FEM 解析の方が21%小さい(図-11 (c))。また、 $p_1$ 荷重の橋軸方向位置が約1.5mずれており、影響線形状にも顕著な違いが見られる(図-12 (c)、図-13 (c))。

## (2) 活荷重応力の比較

表-6 に直目部位における影響面体積の比較と、着目部位が最も不利になる載荷状態における活荷

重応力の比較を示す。格子解析に対する FEM 解析の活荷重応力の比率は影響面体積の比率に近い値を示している。

図-14 に活荷重の載荷面積の大きさの違いによる各部における格子解析と FEM 解析による発生応力比率を示す。幅員方向の影響線形状の違いからもわかるように、FEM 解析による活荷重応力は、載荷面積が比較的小さい場合には格子解析に比べ小さいが、L荷重のように載荷面積が大きくなると逆に格子解析の場合と同程度か、それ以上にな

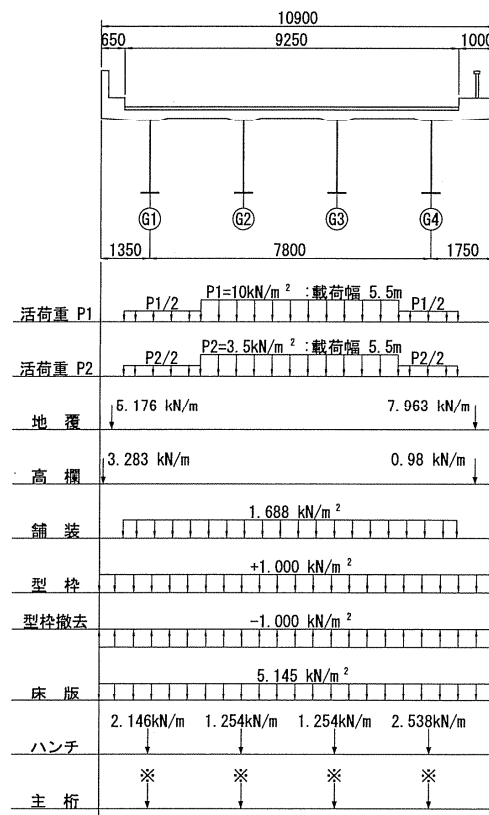
っている傾向が見られる。すなわち、現行の道路橋示方書に従い最も不利な応力を発生させるようにL荷重を載荷するという影響線載荷による設計では、FEM解析を主桁設計に適用しても、桁断面の大幅な縮小化には繋がらない可能性が示唆される。

なお、以上の結果には、3.2に示した格子解析とFEM解析における影響線算出方法の違いによる影響が含まれる。しかし、別途、格子解析においてもFEM解析の影響線算出方法(図-10参照)に従って解析を実施したところ、主要断面(支間中央、中間支点上)では格子解析とFEM解析の比較において影響線算出方法の違いによる発生応力の大きな差は見られず、床版のひび割れを仮定した範囲の境界付近に多少の差が見られる程度であった。したがって、影響線算出方法の違いによる影響は無視し得るものと考えられる。

#### 4. FEM解析による断面最適化の検討

##### 4.1 設計を行うための前提条件

3章で示した影響線を用いて着目部位が最も不利になる載荷状態のときに発生する主桁の活荷重応力を求める方法と同じ方法を用いてFEM解析



※主桁鋼重は、主桁+補剛材の鋼重

図-15 荷重載荷図(合成桁)

により桁断面設計を行い、格子解析による場合との比較を行う。設計対象は3章と同様の橋梁とし、設計に使用するFEM解析モデルは先に示した図-8のとおりである。

設計にあたっては、鋼道路橋設計ガイドライン(案)<sup>[22]</sup>の適用により各主桁でフランジ幅およびウェブ厚を一定にすることとした。ただし、ウェブ厚については、水平補剛材が1段で収まらない場合は板厚差1mm以内で変化させた。照査に用いる応力は橋軸方向の直応力とし、合成応力度の照査では直応力とせん断応力とを組み合わせた。設計で考慮する荷重は、図-15に示す前死荷重、後死荷重、活荷重および地震荷重とし、温度変化、支点沈下、床版コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響は考慮していない。

図-16にFEM解析による設計で最適断面を決定するためのフローを示す。本設計では、コンピュータによる最適化設計を行っていないため、格子解析で決められた断面を初期値とし、断面の最適化の仕方については設計技術者の判断により行い、各荷重状態でのFEM解析を繰返し行うことで断面を決定する。設計変数は上下フランジ幅厚およびウェブ高厚の計6個とし、材質に関しては初期値である格子計算のものを踏襲する。最適化の過程において上下フランジ幅やウェブ高が変化した

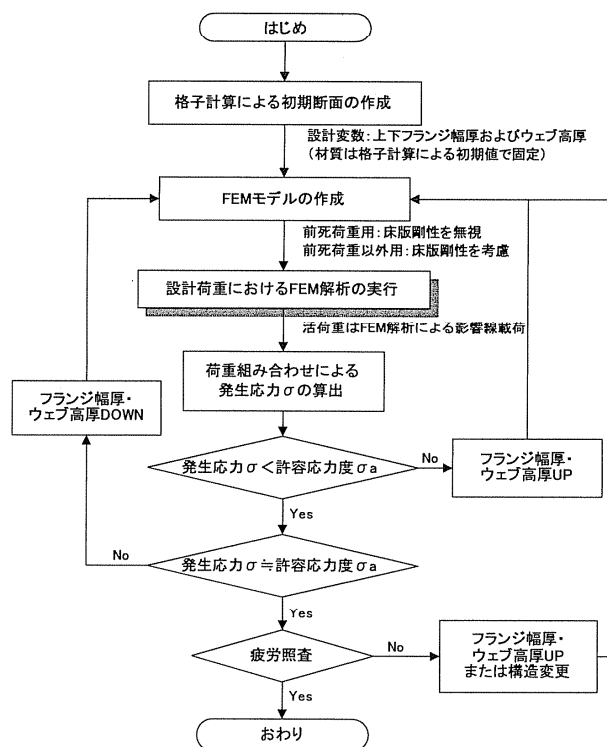


図-16 FEM解析による設計の最適化フロー

場合でも、内部の要素分割数は一定とし、従って各要素のアスペクト比は変化する。

なお、本設計では主桁の設計に重点を置き、その他の部材（垂直補剛材、水平補剛材、横桁、下横構）は概略程度に設計し鋼重を算出する。

#### 4.2 支点上の応力算出にあたっての仮定

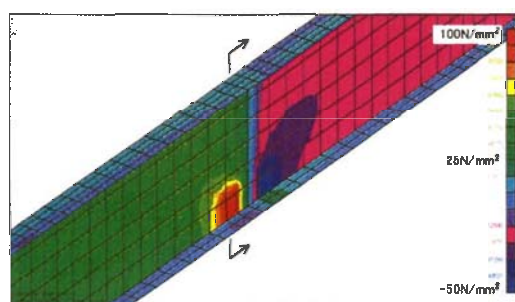
FEM 解析を用いる場合、図-17(a)および図-18(a)に示すように中間支点付近で、ウェブにせん断応力の集中が、下フランジに橋軸方向直応力の集中がそれぞれ発生する（鉛直方向応力の応力集中としては、中間支点上のウェブで最大約 $90\text{N/mm}^2$ が発生した）。なお、図-17(b)に示すように、ウェブのせん断応力集中は支点上の垂直補剛材をモデル化してもわずかに低減される程度であり、ウェブ内のせん断応力は一定と仮定している格子解析とは大きく異なる。

このため、平均応力をベースとする許容応力度法を使用する限りは、主桁の設計時に、この境界条件の影響による局部応力の取扱いを工夫する必要がある。ここでは、ウェブのせん断応力集中については、ウェブの高さ方向で平均化し、この平均せん断応力を主桁ウェブの設計に用いることに

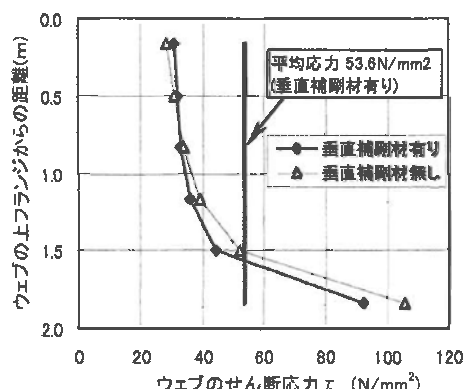
した（図-17(b)）。また、下フランジの橋軸方向直応力については、ソールプレート近傍の応力集中範囲以外の応力を6次多項式の曲線で内挿し、スムーズな応力分布を仮定し、この曲線の最大値を主桁下フランジの設計に用いることとした（図-18(b)）。このような内挿や平均化の是非については検討が必要であるが、ここでは省略した。

#### 4.3 設計結果の比較と鋼重低減率

表-7に格子解析とFEM解析により設計された主桁断面（外桁G4と中桁G3の代表断面）における断面構成の比較を、表-8に外桁G4の代表断面における応力照査の比較をそれぞれ示す。支間中央の外桁、中桁ともに格子解析とFEM解析ではほぼ同じ断面となった。これは、前述のとおり、活荷重の載荷面積が大きいと、発生応力に顕著な差が生じなかったためと考えられる。一方、中間支点上の外桁上下フランジは、FEM解析の場合に板厚を $4\sim 8\text{mm}$ 薄くすることできた。図-19に主桁フランジの板厚差を示す。板厚差プラスがFEM設計の板厚増を、板厚差マイナスがFEM設計の板厚減を示しており、今回の設計対象では全体的に見て外桁が板厚減となり、中桁が板厚増となつて

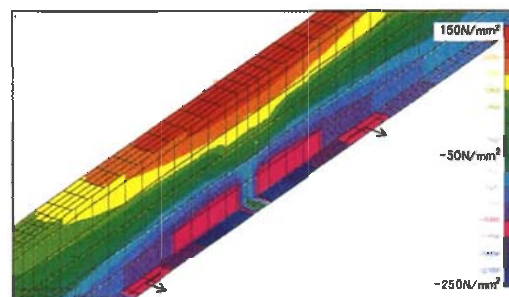


(a) 死荷重+活荷重時のせん断応力のコンター  
(図中は垂直補剛材の表示を省略)

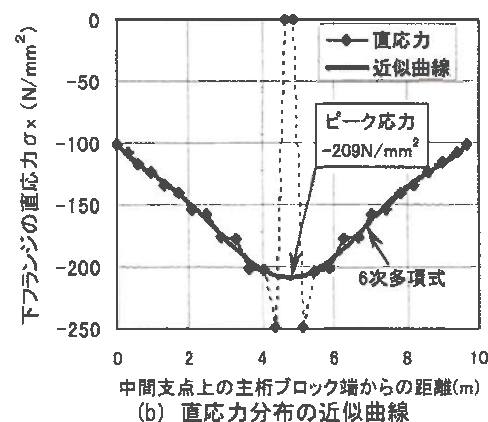


(b) せん断応力の平均値

図-17 中間支点上のウェブのせん断応力



(a) 死荷重+活荷重時の直応力のコンター  
(図中は垂直補剛材の表示を省略)



(b) 直応力分布の近似曲線

図-18 中間支点上の下フランジの直応力

表-7 格子とFEM解析により設計された主桁断面  
(外桁 G4 と中桁 G3 の代表断面)の比較

| 外桁G4  |     | A1~P1支間中央 | P1支点上     | P1~P2支間中央 |
|-------|-----|-----------|-----------|-----------|
| 上フランジ | 格子  | 400 × 18  | 400 × 31  | 400 × 13  |
|       | FEM | 400 × 19  | 400 × 23  | 400 × 13  |
| ウェブ   | 格子  | 1800 × 10 | 1800 × 12 | 1800 × 10 |
|       | FEM | 1800 × 10 | 1800 × 12 | 1800 × 10 |
| 下フランジ | 格子  | 550 × 30  | 550 × 37  | 550 × 20  |
|       | FEM | 550 × 30  | 550 × 31  | 550 × 16  |

| 中桁G3  |     | A1~P1支間中央 | P1支点上     | P1~P2支間中央 |
|-------|-----|-----------|-----------|-----------|
| 上フランジ | 格子  | 400 × 13  | 400 × 14  | 400 × 13  |
|       | FEM | 400 × 13  | 400 × 15  | 400 × 13  |
| ウェブ   | 格子  | 1800 × 10 | 1800 × 10 | 1800 × 10 |
|       | FEM | 1800 × 10 | 1800 × 10 | 1800 × 10 |
| 下フランジ | 格子  | 400 × 22  | 400 × 35  | 400 × 17  |
|       | FEM | 400 × 21  | 400 × 36  | 400 × 18  |

表-8 外桁 G4 における応力照査の比較

| 照査断面位置        |       |                   | A1~P1支間中央  |            | P1橋脚支点上    |            |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| 鋼材断面          | 上フランジ | mm                | 格子         | FEM        | 格子         | FEM        |
|               | ウェブ   | mm                | 400 × 18   | 400 × 19   | 400 × 31   | 400 × 23   |
|               | 下フランジ | mm                | 1800 × 10  | 1800 × 10  | 1800 × 12  | 1800 × 12  |
|               | 材質    |                   | 550 × 30   | 550 × 30   | 550 × 37   | 550 × 31   |
|               |       |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM570      |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -135       | -133       | 157        | 170        |
|               | 後死荷重  | 〃                 | -3         | -3         | 29         | 18         |
|               | 活荷重   | 〃                 | -14        | -11        | 56         | 50         |
|               | 死+活   | 〃                 | -152 < 210 | -147 < 210 | 242 < 255  | 238 < 255  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | 〃                 | 87         | 87         | -118       | -117       |
|               | 後死荷重  | 〃                 | 24         | 17         | -32        | -22        |
|               | 活荷重   | 〃                 | 93         | 95         | -62        | -72        |
|               | 死+活   | 〃                 | 204 < 210  | 199 < 210  | -212 < 219 | -211 < 219 |
| $\tau$        |       |                   | 12 < 120   | 12 < 120   | 64 < 145   | 67 < 145   |
| 架設時           |       |                   | -135 < 135 | -133 < 135 | -118 < 274 | -117 < 274 |
| 合成応力度         |       |                   | 0.95 ≤ 1.2 | 0.91 ≤ 1.2 | 1.13 ≤ 1.2 | 1.14 ≤ 1.2 |

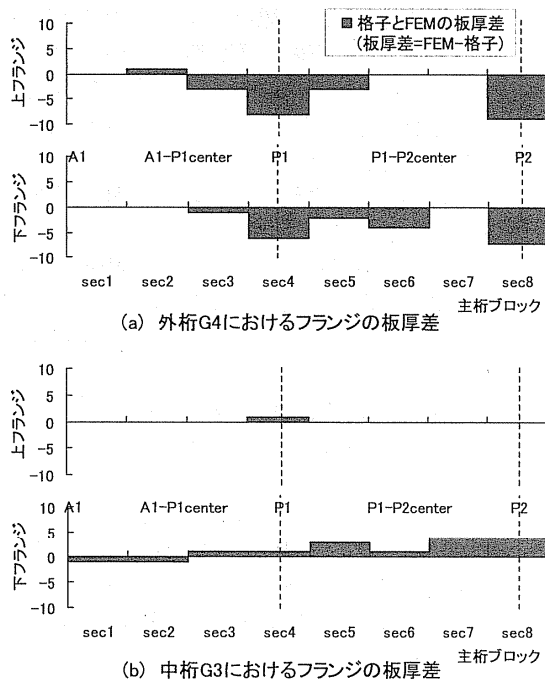


図-19 格子とFEM解析により設計された主桁フランジの板厚差

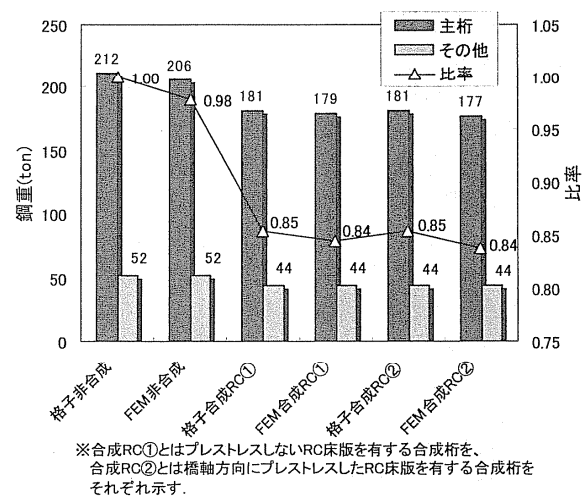


図-20 各種条件により設計された主桁鋼重とその比率

いる。

図-20 に各種条件に従って設計された主桁とその他(主桁以外の部材)の鋼重および主桁鋼重の比率を示す。図には非合成桁として FEM 解析(床版と主桁は鉛直方向の荷重のみを伝達し、水平方向の合成を無視した FEM 解析)により設計した結果(図中の FEM 非合成)と、ジャッキアップ等の方法により橋軸方向にプレストレスした RC 床版を有する合成桁(ひびわれ無しとし、床版のコンクリート剛性を全橋にわたって有効)として設計した結果(図中の格子合成 RC②および FEM 合成 RC②)も併せて示す。主桁鋼重には補剛材の鋼重は含めていない。その他部材の鋼重には垂直・水平補剛材、横桁および下横構の鋼重が含まれ、それらの合計とした。FEM 解析を用いて設計した場合、格子解析と比較して今回の橋梁では 1~2%の鋼重低減にとどまった。

## 5. まとめ

立体 FEM 解析を鋼多主桁橋の主桁の最適化設計に適用することを試み、格子解析と比較した場合の鋼重低減効果の検討を行った。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 静的荷重試験データが得られている鋼連続多主桁橋を対象として、格子解析と FEM 解析を行い、各種荷重ケースの応答値と計算値との比較を行った。その結果、格子解析(床版と主桁間は合成)と比較して、床版、主桁および横桁を 4 節点シェル要素としたモデルによる FEM 解析の方が、主桁応力・変位実測値に近い結果が得られることが確認された。また、床版のみシェル要素とし、主桁および横桁をはり要素としたモデルでも、実測値に概ね近い結果が得られることがわかった。
- (2) FEM 解析および格子解析から算出したそれぞれの影響線および発生応力の比較を行った。その結果、FEM 解析の場合、外桁での下フランジ直応力およびウェブせん断応力に着目した影響線のピーク値について 20%程度小さくなるものの、活荷重の影響線荷重面積が広がるため、活荷重応力は格子解析の場合と同程度か、それ以上になる傾向が見られた。
- (3) FEM 解析により主桁の断面設計を行い、格子解析による場合との断面諸元および鋼重の比較を行った。その結果、本論文で対象とした有効幅員 9.25m、支間長約 40m の鋼多主桁連続橋では、格子解析による従来設計とほぼ鋼重が変わらないことが確認された。

本論文の 3,4 章で行った検討は一橋梁を対象としたが、FEM 解析を鋼多主桁の断面設計に適用した場合の概略の鋼重低減効果や算出応力の扱いにあたっての課題等を確認できたと考えている。ただし、鋼重低減効果に関して一般性のある結論を得るには、橋梁諸元(橋長、支間割り、幅員、主桁本数、主桁間隔等)をパラメータとした一連の試設計を行う必要がある。また、本研究では、道路橋示方書に従って許容応力度法により、種々の仮定の下で部材応力の照査を行ったが、FEM 解析を適用した場合の算出応力の扱いや照査法については今後議論の必要な課題と考えられる。

## 謝辞

本論文で解析対象とした栃木川橋の荷重試験等に関する資料については、日本道路公団より提供して頂いた。関係各位にここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 西川和廣・中谷昌一・小野潔・中洲啓太：超高性能ゲーム機時代の橋梁設計, (財)土木研究センター, 土木技術資料, 第 43 巻, 第 1 号, pp.50-55, 2001.1.
- [2] 特集 応用力学の深淵, (社)土木学会, 土木學會誌, Vol.85, pp.5-63, 2000.8.
- [3] 土木学会鋼構造委員会新技術小委員会設計法ワーキンググループ：ロングライフブリッジへの道(上)(中)(下), 橋梁と基礎, 1997.7,9,10.
- [4] 黒田充紀, 永井真嗣, 藤野陽三, 柄川伸一, 川井 豊：並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1073-1080, 1996.3.
- [5] 鋼構造新技術小委員会：最終報告書(設計法研究), 土木学会, 1996
- [6] 三木千壽・山田真幸・長江進・西浩嗣：既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.281-294, 2000.4.
- [7] 本州四国道路橋公団：鋼上部構造の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン(案), 1993.9.
- [8] 中藪明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋 吉宏, 秋山 洋, 佐々木保隆：PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(上), -連続合成桁における中間支点部の設計-, 橋梁と基礎, pp.27-35, 2002.2.
- [9] 中藪明広, 稲葉尚文, 大垣賀津雄, 川口喜史：

- PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法(中), -腹板の少補剛設計法-, 橋梁と基礎, pp.47-54, 2002.3.
- [10]中藺明広, 安川義行, 稲葉尚文, 坂本純男, 大垣賀津雄, 済藤英明: PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法(下), -床版およびずれ止めの設計法-, 橋梁と基礎, pp.33-39, 2002.4.
- [11]菅沼久忠・小西拓洋・三木千寿: FEMと最適化ソフトの組合せによる鋼橋最小重量化設計の試み, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.3, pp.225-233, 2000.8.
- [12]小西拓洋, 富澤雅幸, 三木千寿: FEMと数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み, 土木学会論文集, No.717/I-61, pp.23-36, 2002.10.
- [13]小西拓洋, 高橋和也, 三木千寿: 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.91-103, 2000.7.
- [14]池田博之, 緒方辰男, 白水晃生: 鈑桁構造の合理化, 土木学会, 第49回年次学術講演会概要集, 1994.9.
- [15]山田真幸, Satom PENGPHON, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫: RC床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.3.
- [16]山田真幸, 三木千壽, 市川篤司: 既設非合成桁橋梁のRC床版と主桁上フランジ間で生じるせん断応力と実耐荷力評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1113-1120, 2002.3.
- [17]MSC.Nastran 2001 クイックリファレンスガイド, エムエスシーソフトウェア(株), 2001.
- [18](社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 2002.3.
- [19](社)日本橋梁建設協会: PC床版を有すプレストレスしない連続合成桁設計要領(案), 1996.3.
- [20]長井正嗣: 合成桁橋の設計, 橋梁と基礎, pp.45-48, 2002.8.
- [21](社)土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3.
- [22](財)建設物価調査会: 鋼道路橋設計ガイドライン(案), 1998.5.

(2004年 2 月23日原稿受理)

## FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化に関する一検討

|       |     |        |
|-------|-----|--------|
| 土木研究所 | 正会員 | ○ 吉岡 勉 |
| 同上    | 正会員 | 村越 潤   |
| 同上    | 正会員 | 高橋 実   |

**1. はじめに** 鋼道路橋上部構造の設計は、従来より、初等はり理論に基づいた格子解析により行われている。一方、現在ではコンピュータの急速な発達に伴い、パソコンレベルでも立体 FEM 解析ができるほど設計ツールの高度化が進んでいる。鋼道路橋の設計においても FEM 解析を設計の標準的な手法として導入することで、より合理的な上部構造の開発に繋がるものと考えられる。本検討では、鋼多主桁橋を対象に FEM 解析の適用性を検討するため試設計を実施した。また、格子解析による従来設計と比較した場合の鋼重低減効果の分析を行ったので報告する。

**2. 対象橋梁と検討方法** 図-1 に対象橋梁の上部工一般図を示す。橋長約 160m、幅員約 10.5m、桁高 2.2m、主桁本数 4 本、主桁間隔 2.6m の 4 径間連続非合成鋼桁橋である。対象橋梁の主桁は、非合成桁として設計されているが、ここでは、鋼材・床版重量を鋼断面のみで抵抗し、橋面荷重（舗装、壁高欄など）・活荷重を合成断面で抵抗する、いわゆる活荷重合成桁に変更した。また、床版をプレキャスト PC 床版から設計基準強度  $30\text{N/mm}^2$  の RC 床版に変更し、ひび割れを許容するプレストレスしない連続合成桁橋とした。これらの条件変更のもと、3 章では計算を簡略化するため 4 径間のうち 2 径間のみを対象に、格子解析により再設計した桁断面と同一な断面で FEM モデルを作成し、条件を揃えた上で格子と FEM の影響線比較を行う。また、4 章では全径間を対象に、当初設計とは異なる条件の橋梁を格子解析と FEM 解析のそれぞれで最適桁断面を設計し、鋼重低減効果を分析する。

図-2 に設計に用いた FEM 解析モデルを示す。床版、主桁および横桁を 4 節点シェル要素、下横構をトラス要素で配置したモデルである。壁高欄、地覆およびハンチは、従来設計では構造部材として扱わないためモデル化していない。また、同図に示すように床版と上フランジの合成挙動を表現するため、シェル要素間の結合材を剛体梁要素でモデル化した。支承部のモデル化は、剛体梁要素を使って支承幅と高さをピラミッド型で表し、集約節点に境界条件を与えることで支承反力が支承幅内で分散することを表現した。なお、集約節点の高さ方向位置は想定した支承高 40cm の 1/2 点とした。要素分割は、主桁フランジの幅方向に 4 分割、主桁ウェブの高さ方向に 6 分割とし、橋軸方向の分割は、支間中央付近をアスペクト比 1:5 以下に、応力伝達の複雑な中間支点上付近をアスペクト比 1:3 以下になるように分割した。

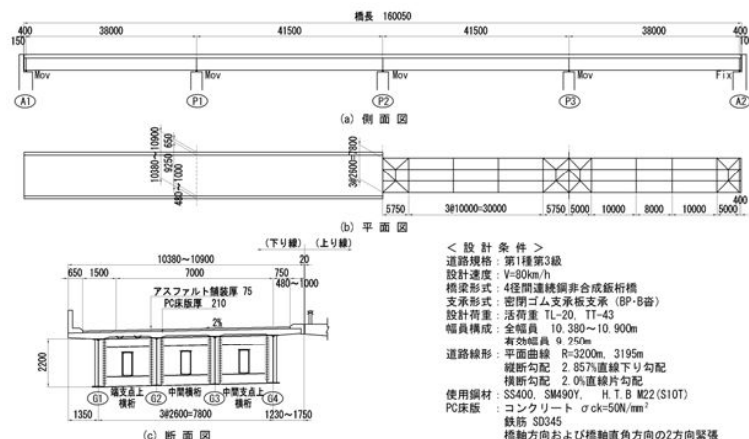


図-1 対象橋梁の上部工一般図

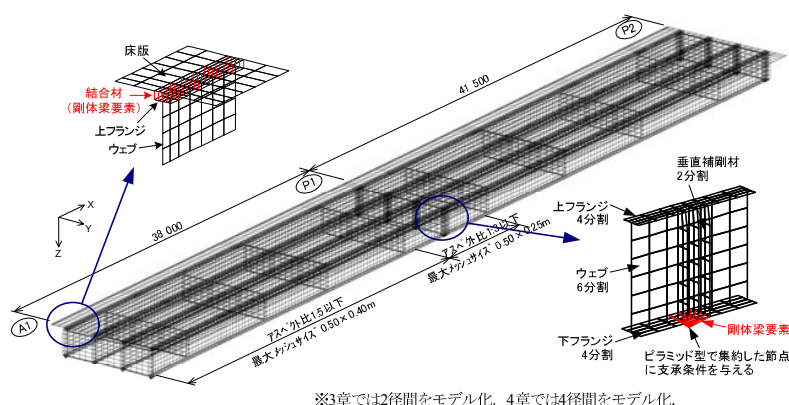


図-2 FEM 解析モデル

キーワード 鋼多主桁橋, FEM 解析, 格子解析, 影響線解析

構造物研究グループ(橋梁構造) 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 TEL 029-879-6793 FAX 029-879-6739

**3. 格子と FEM による影響線の比較** 活荷重の荷重にあたっては FEM 解析を設計に用いる場合でも従来設計同様、影響線により着目部位が最も不利となる荷重状態を求めることを考える。また、連続合成桁の設計では中間支点上における床版の合成作用の取扱いが重要である。格子解析では中間支点から両側支間長の 15% 領域を「鉄筋+鋼断面」として曲げ剛性を算出し、残りの領域を合成断面とする方法が実務レベルでは一般的に用いられており、それを踏襲した。FEM 解析では、RC 床版のひび割れの状態を評価し（ひび割れ強度  $\sigma_{ct}$  以上をひび割れとして判定）、「鉄筋+鋼断面」の範囲に反映させる方法を用いた。

このような方法により求めた代表的な部位での影響線の 3 次元グラフを図-3 に示す。支間中央 G4 桁下フランジの直応力  $\sigma_x$  着目では、ピークの値が格子に比べ FEM の方が 21% 小さい。中間支点上 G4 桁下フランジ応力の直応力  $\sigma_x$  着目では、第 1 支間と第 2 支間で完全対称分布となる格子に対し、FEM ではやや非対称の分布となり、ピークの値は格子より 10% 小さい。これは FEM と格子で荷重分配効果が異なることを示している。一方、表-1 に示す影響面体積および活荷重（L 荷重）時発生応力の比較を見ると、支間中央 G4 桁下フランジの最大直応力  $\sigma_{x_{max}}$  では 8%、中間支点上 G4 桁下フランジの最小直応力  $\sigma_{x_{min}}$  では 17%、FEM の方が大きくなり、影響線ピークの差から逆転している。このことは、荷重面積を徐々に大きくして発生応力を比較した図-4 からわかるように、荷重面積が比較的狭い状態であれば FEM の発生応力は格子に比べ小さくなるが、荷重面積が大きくなると格子と同等か、それ以上になることを示している。

**4. 設計結果と考察** 設計荷重を前死荷重、後死荷重、活荷重および地震荷重に限定し、FEM 解析により発生する応力を用いて許容応力度法に基づき設計を行った。図-5 に設計断面から算出した鋼重を示す。同図には、非合成桁として設計した結果も併せて示す。FEM 解析を用いて設計した場合、非合成桁では約 2% の鋼重低減となり、合成桁では約 1% の鋼重低減となった。

**5. おわりに** FEM 解析により鋼多主桁橋の主桁設計を行い、格子解析による場合との比較を行った結果、本論文で対象とした有効幅員 9.25m、支間長約 40m の連続合成桁橋では、格子解析による従来設計とほぼ鋼重が変わらないことがわかった。今後は、様々なタイプの鋼桁橋の試設計を行うとともに、設計ツールの高度化に即した設計手法の見直し（構造解析係数の導入など）が必要と考えられる。

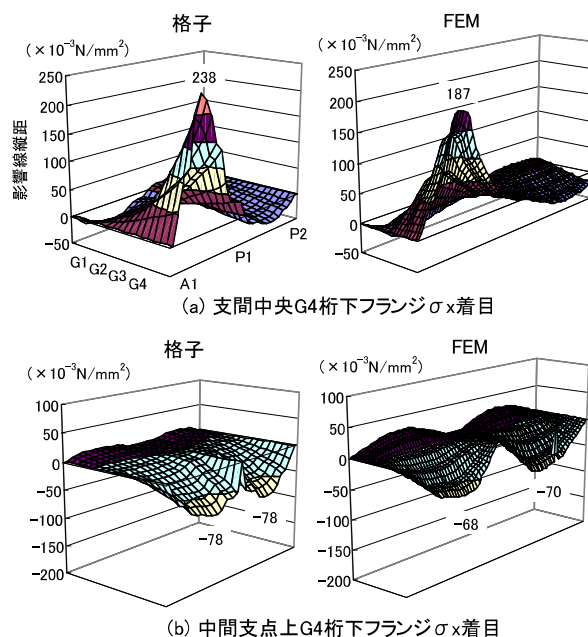


図-3 格子と FEM の 3 次元影響面グラフ

表-1 影響面体積および活荷重応力の比較

| 解析モデル   |                            |       | 格子    | FEM   | 比率<br>(FEM/格子) |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|----------------|
| 着目点と着目量 |                            |       |       |       |                |
| 支間中央    | G4下フランジ $\sigma_{x_{max}}$ | 影響面体積 | 9568  | 10423 | 1.09           |
|         |                            | 活荷重応力 | 93.3  | 100.4 | 1.08           |
| 中間支点上   | G4下フランジ $\sigma_{x_{min}}$ | 影響面体積 | -7883 | -9163 | 1.16           |
|         |                            | 活荷重応力 | -52.7 | -61.4 | 1.17           |
|         | G4ウェブ $\tau_{max}$         | 影響面体積 | 2728  | 2648  | 0.97           |
|         |                            | 活荷重応力 | 25.8  | 23.9  | 0.93           |

※単位は、影響面体積( $\times 10^6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$ )、発生応力( $\text{N/mm}^2$ )

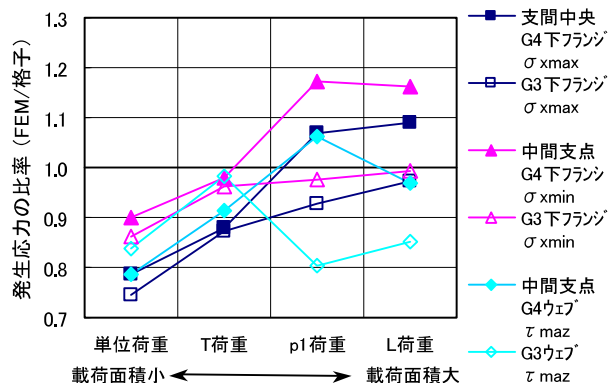


図-4 荷重面積の大きさによる発生応力の比較

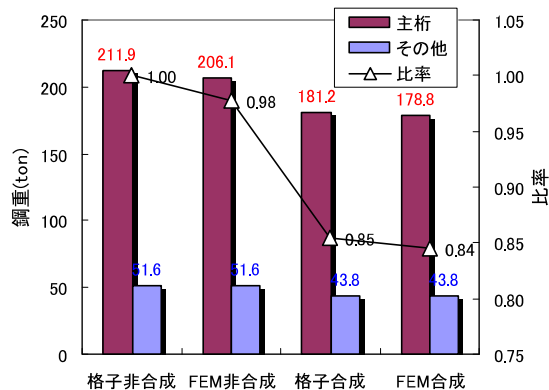


図-5 各設計での鋼重とその比率

## 付 属 資 料

資料 1 : 主桁の許容応力度設計に FEM 解析を適用した例

資料 2 : 一定せん断流パネルモデルを用いた検討

## 付属資料1：主桁の許容応力度設計にFEM解析を適用した例

4.2節で示した鋼多主桁橋の試設計のうち、床版のひび割れにより床版コンクリートの剛性を無視して設計する場合(CASE1)の計算例を示す。

### 1. 設計条件

|                  |   |                 |                                                   |        |
|------------------|---|-----------------|---------------------------------------------------|--------|
| 形                | 式 | 鋼4径間連続合成鈑桁橋     |                                                   |        |
| 活                | 荷 | 重               | B活荷重                                              |        |
| 橋                |   | 長               | 160.000m                                          |        |
| 支                | 間 | 長               | 38.000m + 41.500m + 41.500m + 38.000m             |        |
| 全                | 幅 | 員               | 10.900m                                           |        |
| 有                | 効 | 幅               | 員 9.250m                                          |        |
| 斜                |   | 角               | 90° 00' 00”                                       |        |
| 大型車計画交通 : 500台未満 |   |                 |                                                   |        |
| 床                |   | 版               | RC床版 210mm ( $\sigma_{ck}$ =30N/mm <sup>2</sup> ) |        |
| 舗                |   | 装               | アスファルト舗装 75mm                                     |        |
| 横                | 断 | 勾               | 配 : LEVEL                                         |        |
| 縦                | 断 | 勾               | 配 : LEVEL                                         |        |
| 鋼                |   | 材               | SM490Y、SM570、SS400、S10T                           |        |
| 適 用 基 準 等        |   | 道 路 橋 示 方 書・同解説 | 平成14年3月                                           | 日本道路協会 |
|                  |   | 鋼道路橋設計便覧        | 昭和54年2月                                           | 日本道路協会 |
|                  |   | 鋼道路橋の疲労設計指針     | 平成14年3月                                           | 日本道路協会 |

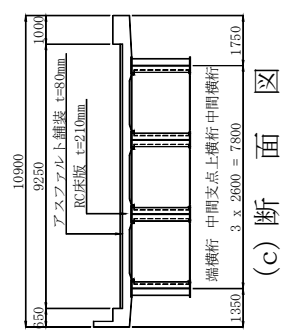
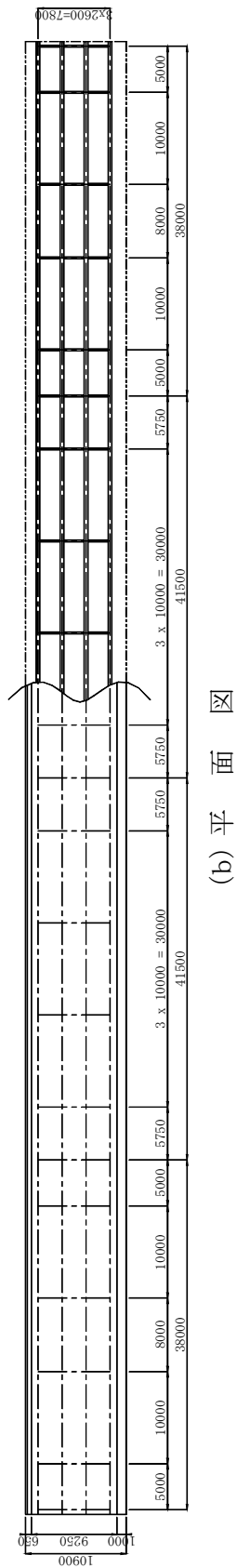
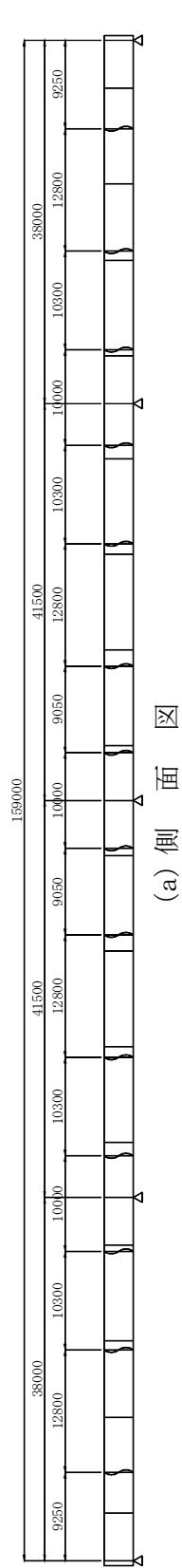


図-付-1.1 一 般 図

## 2. RC床版の設計

### (1) 床版厚の決定

道示Ⅱ 8.2.5より、床版厚を決定する。

#### 1) 支間中央部

$$\begin{aligned} d_0 &= 30 L + 110 \\ &= 30 \times 2.6 + 110 = 188 \\ d &= 188 \times 1.10 = 207 > 160 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### 2) 片持ち部

$$\begin{aligned} d_0 &= 80 L + 210 \\ &= 80 \times 0.35 + 210 = 238 \\ d &= 238 \times 1.10 = 262 > 160 \text{ mm} \end{aligned}$$

ハンチ高を80mmとすると、

$$d = 207 + 80 = 287 > 262 \text{ mm}$$

∴ 床版厚 : 210 mm  
ハンチ高 : 80 mm

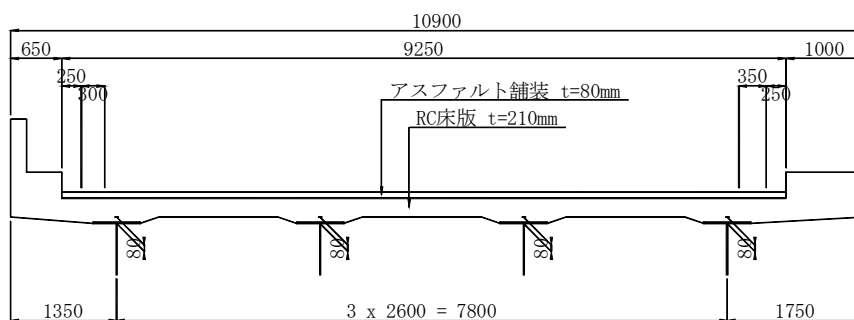


図-付-1.2 RC床版の寸法形状

(2) 床版の設計

(1) で決定した断面でRC床版の設計を行う。ここではその結果のみを表示する。  
なお、主鉄筋の配置及び、片持床版の設計条件は、下図に示す。また、上フランジの幅は400mmと仮定して計算を行う。

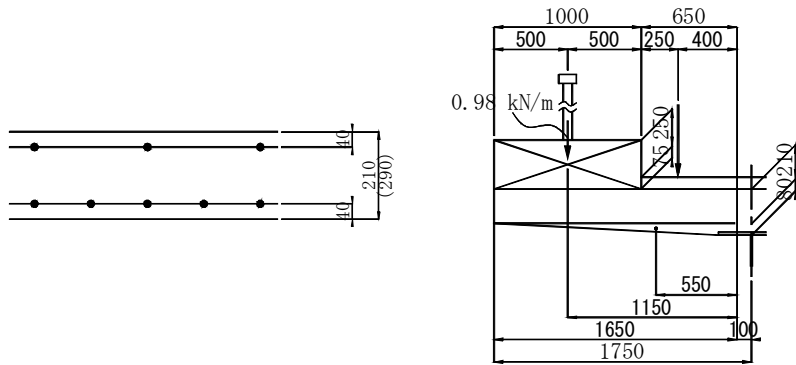


図-付-1.3 主鉄筋の配置と片持部床版形状

表-付-1.1 RC床版の照査

| 照 査 位 置     |     |               | 単位                   | 中間床版<br>(端支間) | 中間支点上床版   |
|-------------|-----|---------------|----------------------|---------------|-----------|
| 断面<br>力     | 床版厚 | H             | cm                   | 21.0          | 29.0      |
|             | 主鉄筋 | M1            | (kN・m/m)             | 35.423        | -35.754   |
|             | 配力筋 | M2            | (kN・m/m)             | 24.000        | -----     |
| 断面          | 主鉄筋 | サイズ           |                      | D-19          | D-19      |
|             |     | 上ピッチ          | (cm)                 | @ 220         | @ 110     |
|             |     | 下ピッチ          | (cm)                 | @ 110         | @ 220     |
|             | 配力筋 | サイズ           |                      | D-16          | -----     |
|             |     | 上ピッチ          | (cm)                 | @ 240         | -----     |
|             |     | 下ピッチ          | (cm)                 | @ 120         | -----     |
| 応<br>力<br>度 | 主鉄筋 | $\sigma_{cc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 5.2 < 8.5     | 3.1 < 8.5 |
|             |     | $\sigma_{sc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 96 < 140      | 64 < 140  |
|             | 配力筋 | $\sigma_{cc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 5.5 < 8.5     | -----     |
|             |     | $\sigma_{sc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 112 < 140     | -----     |

| 照 査 位 置     |     |               | 単位                   | 片持ち床版<br>(中間部) | 片持ち床版<br>(桁端部) |
|-------------|-----|---------------|----------------------|----------------|----------------|
| 断面<br>力     | 床版厚 | H             | cm                   | 29.0           | 29.0           |
|             | 主鉄筋 | M1            | (kN・m/m)             | 65.959         | 116.684        |
|             | 配力筋 | M2            | (kN・m/m)             | 19.000         | -----          |
| 断面          | 主鉄筋 | サイズ           |                      | D-19           | D-22           |
|             |     | 上ピッチ          | (cm)                 | @ 110          | @ 100          |
|             |     | 下ピッチ          | (cm)                 | @ 220          | @ 100          |
|             | 配力筋 | サイズ           |                      | D-16           | -----          |
|             |     | 上ピッチ          | (cm)                 | @ 240          | -----          |
|             |     | 下ピッチ          | (cm)                 | @ 120          | -----          |
| 応<br>力<br>度 | 主鉄筋 | $\sigma_{cc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 5.8 < 8.5      | 8 < 8.5        |
|             |     | $\sigma_{sc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 118 < 140      | 133 < 140      |
|             | 配力筋 | $\sigma_{cc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 4.4 < 8.5      | -----          |
|             |     | $\sigma_{sc}$ | (N/mm <sup>2</sup> ) | 89 < 140       | -----          |

### (3) 中間支点上の最小鉄筋量、及び周長率の照査

本橋は、連続合成桁で設計されるため、中間支点上における最小鉄筋量及び周長率を満足する必要があるため、道示Ⅱ 11.2.3 により照査する。

支点上は、中間部より1ランク上の鉄筋を用い、上下同ピッチに配置する。

#### 1) 床版の有効幅

##### a) 側径間G4桁中間支点部

$$a = 400 + 2 \times 80 = 560 \text{ mm}$$

従って、

$$b1 = 1750 - 560 / 2 = 1470 \text{ mm}$$

$$b2 = 1300 - 560 / 2 = 1020 \text{ mm}$$

$$Le = 0.2L = 0.2 \times (38 + 41.5) = 15.9 \text{ m}$$

$$b1/Le = 1470 / 15900 = 0.092 > 0.02 < 0.3$$

$$\begin{aligned} \lambda 1 &= \{1.06 - 3.2(b1/Le) + 4.5(b1/Le)^2\}b1 \\ &= (1.06 - 3.2 \times 0.092 + 4.5 \times 0.092^2) \times 1470 \\ &= 1181 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b2/Le = 1020 / 15900 = 0.064 > 0.02 < 0.3$$

$$\begin{aligned} \lambda 2 &= \{1.06 - 3.2(b2/Le) + 4.5(b2/Le)^2\}b2 \\ &= (1.06 - 3.2 \times 0.064 + 4.5 \times 0.064^2) \times 1020 \\ &= 891 \text{ mm} \end{aligned}$$

有効幅

$$B = 1181 + 560 + 891 = 2632 \text{ mm}$$

##### b) 側径間G2,G3桁中間支点部

a)より、以下のようになる。

$$B = 891 + 560 + 891 = 2342 \text{ mm}$$

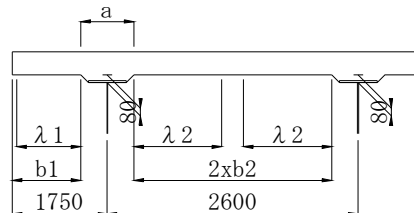


図-付-1.4 有効幅

#### 2) 最小鉄筋量の照査

##### a) 側径間G4桁中間支点部

上・下側鉄筋は、D19 x 21

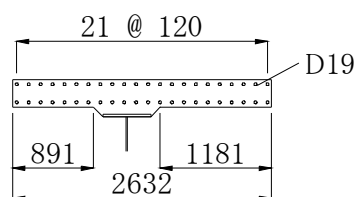
$$2.865 \times 21 \times 2 = 120.3$$

床版コンクリートの断面積

$$263.2 \times 21.0 = 5527.0 \text{ cm}^2$$

鉄筋比

$$p = As/Ac = 120.3 / 5527.0 = 0.022 > 0.02$$



##### b) 側径間G2,G3桁中間支点部

上・下側鉄筋は、D19 x 19

$$2.865 \times 19 \times 2 = 108.9$$

床版コンクリートの断面積

$$234.2 \times 21.0 = 4918.0 \text{ cm}^2$$

鉄筋比

$$p = As/Ac = 108.9 / 4918.0 = 0.022 > 0.02$$

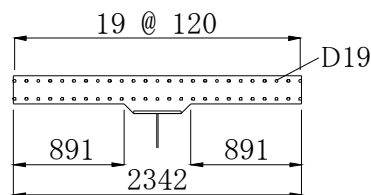


図-付-1.5 鉄筋の配置

### 3) 周長率の照査

#### a) 側径間G4桁中間支点部

鉄筋の周長の総和 D19 x 21

$$6 \times 21 \times 2 = 252 \text{ cm}$$

$$\text{周長率} = 252 / 5527.0 = 0.046 \text{ cm/cm}^2 > 0.045 \text{ cm/cm}^2$$

#### b) 側径間G2,G3桁中間支点部

鉄筋の周長の総和 D19 x 19

$$6 \times 19 \times 2 = 228 \text{ cm}$$

$$\text{周長率} = 228 / 4918.0 = 0.046 \text{ cm/cm}^2 > 0.045 \text{ cm/cm}^2$$

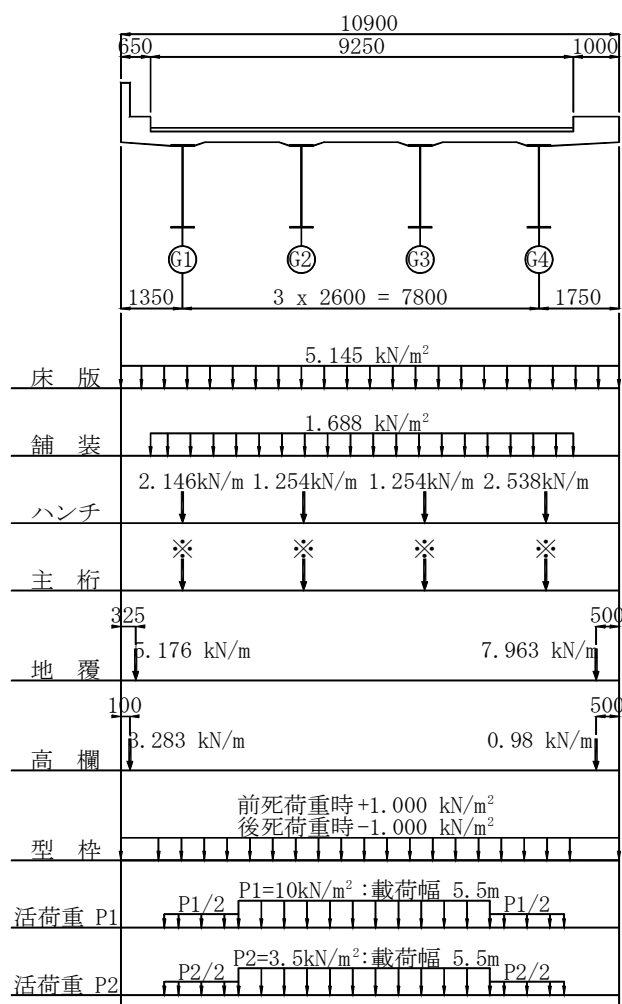
G1側の計算は省略する。

### 3. 主桁の設計

#### (1) 荷重

本橋は活荷重合成桁として設計するので、鋼桁と床版の死荷重は鋼桁が負担し、それ以外の荷重(後死荷重)及び活荷重は合成断面が負担することとなる。

格子解析では、仮定鋼重を算出し、それを死荷重として载荷しているが、FEMで設計を行う場合、実鋼重を用いることができるので、仮定鋼重の算出が不要になる。上部工の荷重载荷図を下図に示す。



※印は、断面位置によって重量が異なる。

図-付-1.6 上部工の荷重载荷

#### (2) 断面の決定方針

FEMで断面を決定するにあたり、骨組み解析を先行して行い、それをFEMで設計する際の初期値にする。次に繰り返し計算を行い、あらゆる断面が許容応力度以下になるよう断面を修正して使用断面を決定する。なお、板厚等の入力に際しては、道示Ⅱ 4.1.2、4.2.2、及び4.2.3の規定を満足するように注意する。

衝撃係数は、本試設計では、設計簡略化のため、一律0.227とする。

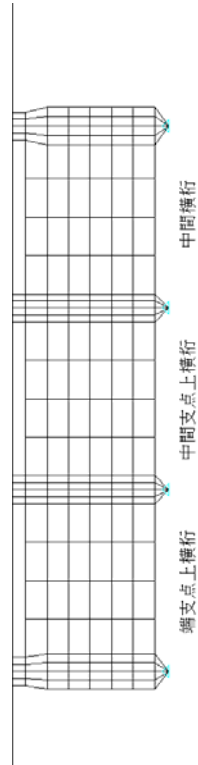
本橋の設計に用いた有限要素分割、及び決定した断面を次項以降に示す。



(a) 平面図



(b) 側面図



(c) 断面図

図-付-1.7 橋梁全体の有限要素分割

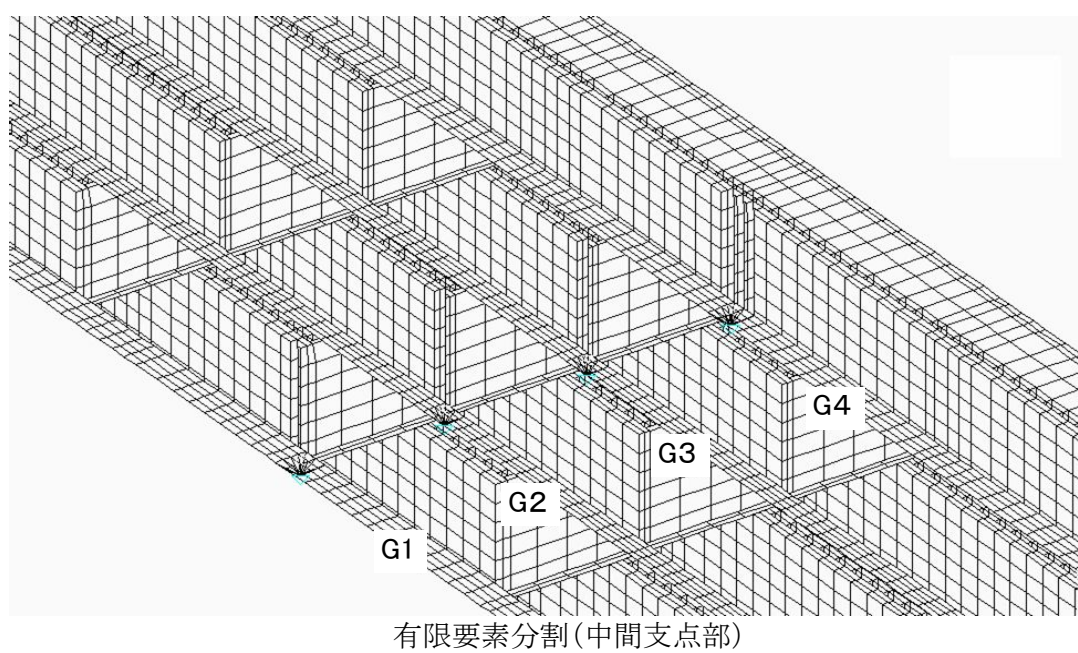
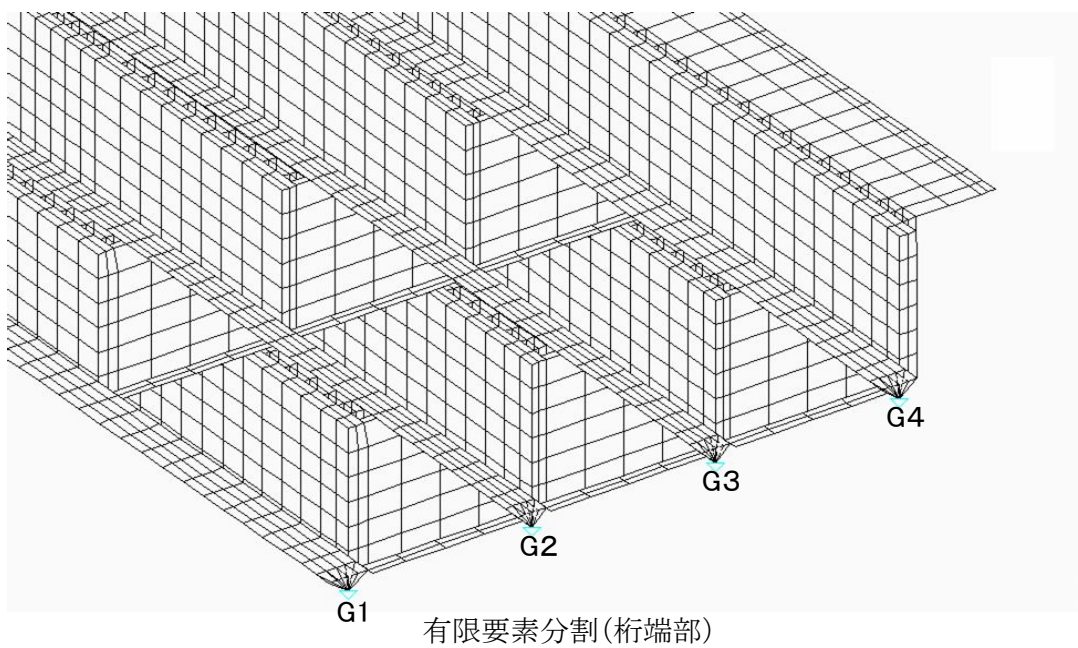


図-付-1.8 桁端部と中間支点部の有限要素分割

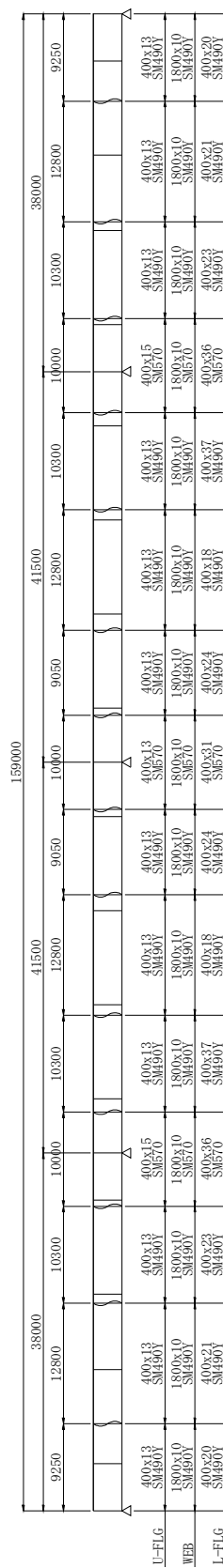
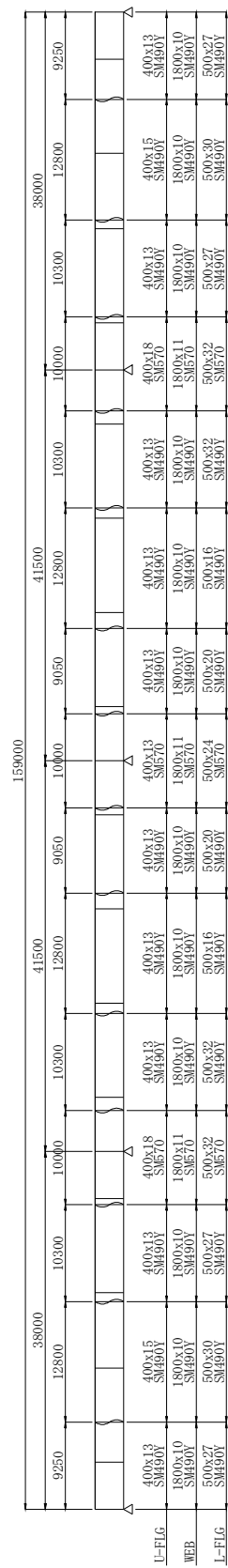


図-1.9 断面構成図

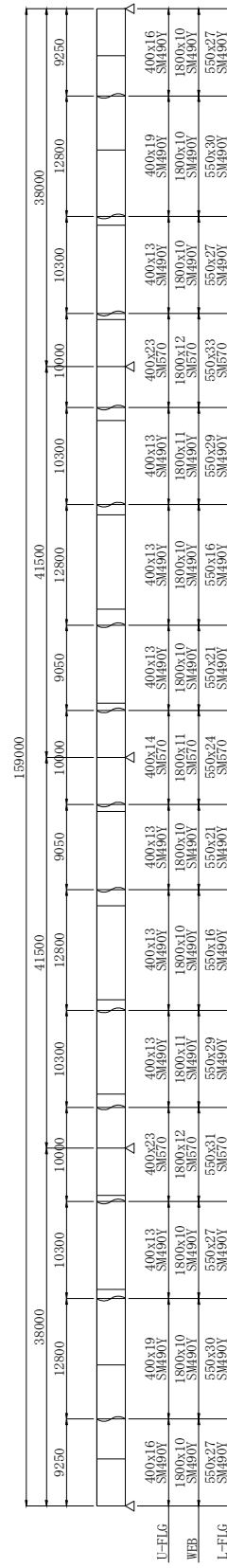
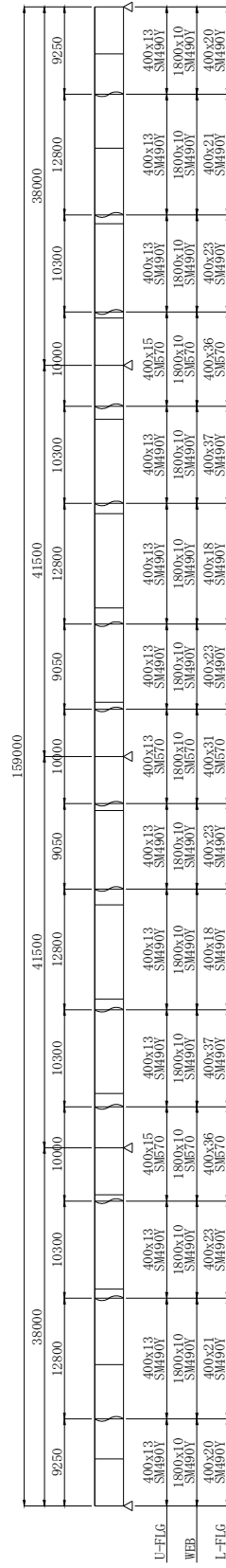


図-付-1.9 断面構成図(つづき)

## (3)応力照査

断面の照査位置は、主桁添接位置、及び支間中央部(応力が最大になる位置)とする。なお、本橋は対称の橋であるため、応力の照査位置の半分は省略する。  
FEMによる解析結果を以降にまとめる。なお、橋軸方向応力で評価する。なお、合成応力の照査に用いる応力は、橋軸方向の応力とする。

## ①G1桁

表-付-1.2 主桁の照査

| 照査断面位置        | m                 | 9.250             | 15.000     | 22.050     | 32.350     | 38.000     | 42.350     | 52.650     | 59.050     | 65.450     | 74.500     | 79.500     |
|---------------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 鋼材断面          | U-FLG             | mm                | 400 x 13   | 400 x 15   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 18   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   |
|               | WEB               | mm                | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 11  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 11  |
|               | L-FLG             | mm                | 500 x 27   | 500 x 30   | 500 x 27   | 500 x 27   | 500 x 32   | 500 x 32   | 500 x 32   | 500 x 16   | 500 x 20   | 500 x 24   |
|               | 材質                |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | -123       | -132       | -101       | 78         | 170        | 115        | -53        | -83        | -61        | 64         |
|               | 後死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | -2         | -3         | -2         | 5          | 17         | 9          | -1         | -2         | -1         | 5          |
|               | 活荷重               | N/mm <sup>2</sup> | -11        | -13        | -13        | 38         | 52         | 40         | -9         | -12        | -11        | 34         |
|               | 死+活               | N/mm <sup>2</sup> | -135 < 210 | -148 < 210 | -115 < 210 | 121 < 210  | 239 < 255  | 164 < 210  | -64 < 210  | -96 < 210  | -72 < 210  | 103 < 210  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | 78         | 83         | 64         | -42        | -108       | -60        | 45         | 66         | 50         | -44        |
|               | 後死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | 17         | 17         | 14         | -6         | -22        | -10        | 12         | 17         | 12         | -9         |
|               | 活荷重               | N/mm <sup>2</sup> | 83         | 102        | 99         | -57        | -75        | -52        | 116        | 119        | 109        | -65        |
|               | 死+活               | N/mm <sup>2</sup> | 179 < 210  | 201 < 210  | 178 < 210  | -105 < 134 | -204 < 212 | -122 < 134 | 172 < 210  | 202 < 210  | 171 < 210  | -117 < 134 |
| $\tau$        | N/mm <sup>2</sup> | -28 < 120         | 12 < 120   | 30 < 120   | 60 < 120   | 66 < 145   | -61 < 120  | -29 < 120  | 12 < 120   | 26 < 120   | 52 < 120   | 59 < 145   |
| 架設時           | N/mm <sup>2</sup> | -123 < 128        | -132 < 139 | -101 < 128 | -42 < 168  | -131 < 265 | -60 < 168  | -53 < 128  | -83 < 128  | -61 < 128  | -44 < 168  | -120 < 265 |
| 合成応力度         |                   | 0.78 ≤ 1.2        | 0.93 ≤ 1.2 | 0.78 ≤ 1.2 | 0.86 ≤ 1.2 | 1.13 ≤ 1.2 | 1.09 ≤ 1.2 | 0.73 ≤ 1.2 | 0.94 ≤ 1.2 | 0.71 ≤ 1.2 | 0.95 ≤ 1.2 | 1.16 ≤ 1.2 |
| 判定            |                   | OK                | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

## ②G2桁

| 照査断面位置        | m                 | 9.250             | 15.000     | 22.050     | 32.350     | 38.000     | 42.350     | 52.650     | 59.050     | 65.450     | 74.500     | 79.500     |
|---------------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 鋼材断面          | U-FLG             | mm                | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 15   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   |
|               | WEB               | mm                | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  |
|               | L-FLG             | mm                | 400 x 20   | 400 x 21   | 400 x 23   | 400 x 23   | 400 x 36   | 400 x 37   | 400 x 37   | 400 x 18   | 400 x 24   | 400 x 31   |
|               | 材質                |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | -107       | -120       | -89        | 72         | 179        | 106        | -53        | -84        | -63        | 66         |
|               | 後死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | -2         | -2         | -2         | 3          | 17         | 8          | -1         | -1         | -1         | 4          |
|               | 活荷重               | N/mm <sup>2</sup> | -8         | -12        | -10        | 31         | 47         | 35         | -7         | -9         | -8         | 33         |
|               | 死+活               | N/mm <sup>2</sup> | -117 < 210 | -134 < 210 | -100 < 210 | 106 < 210  | 243 < 255  | 149 < 210  | -61 < 210  | -94 < 210  | -72 < 210  | 103 < 210  |
| 3             | 前死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | 91         | 97         | 68         | -52        | -110       | -60        | 47         | 70         | 54         | -47        |
|               | 後死荷重              | N/mm <sup>2</sup> | 14         | 19         | 15         | -7         | -18        | -9         | 13         | 14         | 12         | -7         |
|               | 活荷重               | N/mm <sup>2</sup> | 76         | 86         | 78         | -50        | -59        | -40        | 96         | 104        | 92         | -52        |
|               | 死+活               | N/mm <sup>2</sup> | 182 < 210  | 202 < 210  | 161 < 210  | -108 < 111 | -188 < 193 | -108 < 111 | 156 < 210  | 188 < 210  | 159 < 210  | -105 < 111 |
| $\tau$        | N/mm <sup>2</sup> | -21 < 120         | -9 < 120   | 22 < 120   | 49 < 120   | 60 < 145   | -50 < 120  | -27 < 120  | 9 < 120    | 25 < 120   | 47 < 120   | -57 < 145  |
| 架設時           | N/mm <sup>2</sup> | -107 < 128        | -120 < 128 | -89 < 128  | -52 < 139  | -135 < 241 | -60 < 139  | -53 < 128  | -84 < 128  | -63 < 128  | -47 < 139  | -123 < 240 |
| 合成応力度         |                   | 0.78 ≤ 1.2        | 0.93 ≤ 1.2 | 0.62 ≤ 1.2 | 1.11 ≤ 1.2 | 1.12 ≤ 1.2 | 1.12 ≤ 1.2 | 0.60 ≤ 1.2 | 0.81 ≤ 1.2 | 0.62 ≤ 1.2 | 1.05 ≤ 1.2 | 1.08 ≤ 1.2 |
| 判定            |                   | OK                | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

③G3桁

表-付-1.2 主桁の照査 (つづき)

| 照査断面位置        |       | m                 | 9.250      | 15.000     | 22.050     | 32.350     | 38.000     | 42.350     | 52.650     | 59.050     | 65.450     | 74.500     | 79.500     |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 鋼材断面          | U-FLG | mm                | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 15   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   |
|               | WEB   | mm                | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  |
|               | L-FLG | mm                | 400 x 20   | 400 x 21   | 400 x 23   | 400 x 23   | 400 x 36   | 400 x 37   | 400 x 37   | 400 x 18   | 400 x 23   | 400 x 23   | 400 x 31   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -109       | -121       | -91        | 74         | 182        | 109        | -55        | -87        | -65        | 68         | 164        |
|               | 後死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -2         | -2         | -2         | 3          | 16         | 8          | -1         | -1         | -1         | 4          | 15         |
|               | 活荷重   | N/mm <sup>2</sup> | -8         | -11        | -9         | 29         | 47         | 35         | -7         | -8         | -8         | 30         | 50         |
|               | 死+活   | N/mm <sup>2</sup> | -118 < 210 | -133 < 210 | -101 < 210 | 107 < 210  | 245 < 255  | 153 < 210  | -62 < 210  | -96 < 210  | -73 < 210  | 102 < 210  | 228 < 255  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | 93         | 98         | 70         | -53        | -112       | -61        | 48         | 73         | 56         | -50        | -104       |
|               | 後死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | 14         | 20         | 15         | -7         | -18        | -9         | 13         | 14         | 12         | -7         | -17        |
|               | 活荷重   | N/mm <sup>2</sup> | 75         | 83         | 76         | -48        | -57        | -39        | 94         | 101        | 89         | -50        | -65        |
|               | 死+活   | N/mm <sup>2</sup> | 181 < 210  | 201 < 210  | 160 < 210  | -107 < 111 | -187 < 193 | -109 < 111 | 155 < 210  | 188 < 210  | 157 < 210  | -107 < 111 | -186 < 192 |
| $\tau$        |       | N/mm <sup>2</sup> | -21 < 120  | -10 < 120  | 22 < 120   | 49 < 120   | 60 < 145   | -50 < 120  | -27 < 120  | 9 < 120    | 25 < 120   | 47 < 120   | -58 < 145  |
| 架設時           |       | N/mm <sup>2</sup> | -109 < 128 | -121 < 128 | -91 < 128  | -53 < 139  | -137 < 241 | -61 < 139  | -55 < 128  | -87 < 128  | -65 < 128  | -50 < 139  | -128 < 240 |
| 合成応力度         |       |                   | 0.77 ≤ 1.2 | 0.92 ≤ 1.2 | 0.61 ≤ 1.2 | 1.10 ≤ 1.2 | 1.11 ≤ 1.2 | 1.14 ≤ 1.2 | 0.60 ≤ 1.2 | 0.81 ≤ 1.2 | 0.60 ≤ 1.2 | 1.08 ≤ 1.2 | 1.10 ≤ 1.2 |
| 判定            |       |                   | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

④G4桁

| 照査断面位置        |       | m                 | 9.250      | 15.000     | 22.050     | 32.350     | 38.000     | 42.350     | 52.650     | 59.050     | 65.450     | 74.500     | 79.500     |
|---------------|-------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 鋼材断面          | U-FLG | mm                | 400 x 16   | 400 x 19   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 23   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 13   | 400 x 14   |
|               | WEB   | mm                | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 12  | 1800 x 11  | 1800 x 11  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 10  | 1800 x 11  |
|               | L-FLG | mm                | 550 x 27   | 550 x 30   | 550 x 27   | 550 x 27   | 550 x 31   | 550 x 29   | 550 x 29   | 550 x 16   | 550 x 21   | 550 x 21   | 550 x 24   |
|               | 材質    |                   | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM490Y     | SM570      |
| $\sigma_{su}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -126       | -133       | -119       | 95         | 170        | 135        | -59        | -95        | -70        | 75         | 169        |
|               | 後死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | -2         | -3         | -2         | 5          | 18         | 10         | -1         | -2         | -1         | 5          | 17         |
|               | 活荷重   | N/mm <sup>2</sup> | -9         | -11        | -11        | 39         | 50         | 40         | -8         | -10        | -9         | 33         | 54         |
|               | 死+活   | N/mm <sup>2</sup> | -136 < 210 | -146 < 210 | -132 < 210 | 139 < 210  | 238 < 255  | 185 < 210  | -69 < 210  | -105 < 210 | -79 < 210  | 112 < 210  | 240 < 255  |
| $\sigma_{sl}$ | 前死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | 83         | 87         | 68         | -46        | -117       | -70        | 48         | 72         | 55         | -46        | -108       |
|               | 後死荷重  | N/mm <sup>2</sup> | 17         | 17         | 14         | -6         | -22        | -11        | 12         | 17         | 12         | -8         | -23        |
|               | 活荷重   | N/mm <sup>2</sup> | 79         | 95         | 94         | -52        | -72        | -50        | 107        | 114        | 105        | -58        | -84        |
|               | 死+活   | N/mm <sup>2</sup> | 179 < 210  | 199 < 210  | 177 < 210  | -105 < 142 | -210 < 219 | -130 < 142 | 166 < 210  | 203 < 210  | 172 < 210  | -112 < 139 | -215 < 219 |
| $\tau$        |       | N/mm <sup>2</sup> | -30 < 120  | 12 < 120   | 33 < 120   | 66 < 120   | 67 < 145   | -61 < 120  | -28 < 120  | 12 < 120   | 28 < 120   | 57 < 120   | 65 < 145   |
| 架設時           |       | N/mm <sup>2</sup> | -126 < 132 | -133 < 135 | -119 < 132 | -46 < 178  | -143 < 274 | -70 < 178  | -59 < 132  | -95 < 128  | -70 < 128  | -46 < 174  | -130 < 274 |
| 合成応力度         |       |                   | 0.79 ≤ 1.2 | 0.91 ≤ 1.2 | 0.79 ≤ 1.2 | 0.85 ≤ 1.2 | 1.13 ≤ 1.2 | 1.10 ≤ 1.2 | 0.68 ≤ 1.2 | 0.94 ≤ 1.2 | 0.73 ≤ 1.2 | 0.87 ≤ 1.2 | 1.16 ≤ 1.2 |
| 判定            |       |                   | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

#### (4)たわみの照査

たわみは、死荷重時と活荷重時に分けて算出するが、ここでは、活荷重たわみに  
 関して照査することとする。

表-付-1.3 たわみの照査

| 位 置   | G1     |        | G2     |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|
|       | 18.000 | 58.950 | 18.000 | 58.950 |
| 活荷重   | 43.0   | 51.5   | 37.0   | 42.8   |
| 許容たわみ | 76.0   | 83.0   | 76.0   | 83.0   |
| 判 定   | OK     | OK     | OK     | OK     |

| 位 置   | G3     |        | G4     |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|
|       | 18.000 | 58.950 | 18.000 | 58.950 |
| 活荷重   | 37.9   | 40.1   | 46.1   | 54.5   |
| 許容たわみ | 76.0   | 83.0   | 76.0   | 83.0   |
| 判 定   | OK     | OK     | OK     | OK     |

単位:mm

#### (5)疲労の照査

疲労の照査は、一番厳しいと思われる横桁フランジと主桁フランジとの接続部とし、  
 対象とする場所も、支間中央部・支点上の横桁とする。

横桁と主桁フランジはボルト接合とする。

照査位置及び荷重の載荷位置は下図に示す。設計で考慮する期間は100年とする。

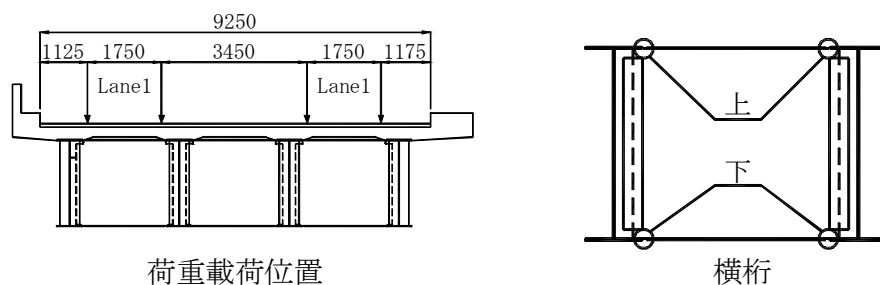


図-付-1.10 照査位置及び荷重の載荷位置

表-付-1.4 疲労照査

|    |     | 累積損傷度 | Lane 1 |        |     | Lane 2 |        |     | 等級 | 判定 |
|----|-----|-------|--------|--------|-----|--------|--------|-----|----|----|
|    |     |       | 最大応力範囲 | 打切り限界  | 損傷度 | 最大応力範囲 | 打切り限界  | 損傷度 |    |    |
| G1 | ① 上 | -     | 3.17   | 109.20 | -   | 1.99   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ① 下 | -     | 76.85  | 84.00  | -   | 3.12   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 上 | -     | 7.45   | 84.00  | -   | 3.91   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 下 | -     | 33.23  | 109.20 | -   | 2.42   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 上 | -     | 1.76   | 109.20 | -   | 1.83   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 下 | -     | 71.56  | 84.00  | -   | 2.82   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 上 | -     | 4.77   | 84.00  | -   | 2.41   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 下 | -     | 36.12  | 109.20 | -   | 1.78   | 109.20 | -   | D  | OK |
| G2 | ① 上 | -     | 3.12   | 109.20 | -   | 2.99   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ① 下 | -     | 57.03  | 84.00  | -   | 28.99  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 上 | -     | 8.53   | 84.00  | -   | 8.37   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 下 | -     | 22.88  | 109.20 | -   | 11.55  | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 上 | -     | 2.77   | 109.20 | -   | 2.82   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 下 | -     | 52.80  | 84.00  | -   | 26.76  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 上 | -     | 4.94   | 84.00  | -   | 3.58   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 下 | -     | 25.56  | 109.20 | -   | 13.34  | 109.20 | -   | D  | OK |
| G3 | ① 上 | -     | 1.76   | 109.20 | -   | 6.38   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ① 下 | -     | 30.03  | 84.00  | -   | 60.35  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 上 | -     | 6.47   | 84.00  | -   | 13.63  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 下 | -     | 12.38  | 109.20 | -   | 24.32  | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 上 | -     | 1.67   | 109.20 | -   | 5.91   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 下 | -     | 27.43  | 84.00  | -   | 57.10  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 上 | -     | 3.90   | 84.00  | -   | 8.41   | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 下 | -     | 13.96  | 109.20 | -   | 27.43  | 109.20 | -   | D  | OK |
| G4 | ① 上 | -     | 2.68   | 109.20 | -   | 6.96   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ① 下 | -     | 7.11   | 84.00  | -   | 83.13  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 上 | -     | 4.00   | 84.00  | -   | 16.49  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ② 下 | -     | 2.34   | 109.20 | -   | 35.63  | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 上 | -     | 2.44   | 109.20 | -   | 5.96   | 109.20 | -   | D  | OK |
|    | ③ 下 | -     | 6.77   | 84.00  | -   | 81.01  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 上 | -     | 3.42   | 84.00  | -   | 11.70  | 84.00  | -   | D  | OK |
|    | ④ 下 | -     | 3.50   | 109.20 | -   | 40.79  | 109.20 | -   | D  | OK |

単位:N/mm<sup>2</sup>

- ①: 第一径間中央  
 ②: P1支点上  
 ③: 第二径間中央  
 ④: P2支点上

#### 4. 補剛材の設計

##### (1) 断面力

##### ①鉛直反力

常時の鉛直反力は、FEM解析結果より算出し、風・地震時における鉛直反力は、水平力によって生じるねじりに伴う鉛直反力である。その結果を下表にまとめる。  
なお、表中の数字は許容応力度の割増係数を考慮した値である。

表-付-1.5 鉛直反力の集計

|       |    | 常時(D)  | 常時(D+L) | 風時     | 地震時    |
|-------|----|--------|---------|--------|--------|
|       |    | 1.00   | 1.00    | 1.25   | 1.50   |
| A1,A2 | G1 | 463.7  | 941.7   | 387.0  | 436.0  |
|       | G2 | 374.5  | 817.9   | 299.0  | 265.1  |
|       | G3 | 387.1  | 825.9   | 308.6  | 258.1  |
|       | G4 | 533.8  | 1026.7  | 443.3  | 388.1  |
| P1,P2 | G1 | 1361.6 | 2161.9  | 1135.5 | 1132.8 |
|       | G2 | 1257.9 | 2064.6  | 1004.7 | 853.3  |
|       | G3 | 1278.9 | 2079.3  | 1015.2 | 866.2  |
|       | G4 | 1581.2 | 2407.7  | 1310.4 | 1280.5 |
| P3    | G1 | 1169.9 | 1951.0  | 982.3  | 998.1  |
|       | G2 | 1118.9 | 1920.3  | 891.9  | 762.5  |
|       | G3 | 1153.2 | 1947.5  | 916.3  | 785.4  |
|       | G4 | 1358.5 | 2165.5  | 1132.5 | 1123.6 |

単位:kN

(2) 支点上補剛材(A1,A2)

支点上の補剛材は、道示Ⅱ 10.5.2によって設計する。  
支点上の補剛材は、下図のように取り付ける。

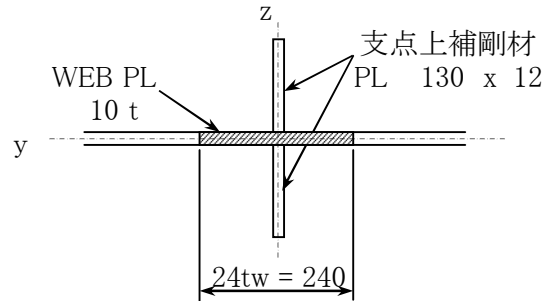


図-付-1.11 支点上補剛材

|              |     |   |    |   |                           |
|--------------|-----|---|----|---|---------------------------|
| 2 - Stiff PL | 130 | x | 12 | = | 3120                      |
| 1 - Web PL   | 240 | x | 10 | = | 2400                      |
|              |     |   |    |   | <hr/>                     |
|              |     |   |    |   | $A_g = 5520 \text{ mm}^2$ |

$$A_g' = 2 - \text{Stiff PL} \times 1.7 = 3120 \times 1.7 = 5304 \text{ mm}^2$$

$$A_g = 5520 > A_g' = 5304$$

よって、有効断面積は 5304 を用いる。

・鉛直方向応力度の照査

断面諸定数は以下のようになる。

$$I_y = \frac{12 \times 270^3}{12} = 19600000 \text{ mm}^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = \sqrt{\frac{19600000}{5304}} = 60.8 \text{ mm}$$

有効座屈長  $l$  は、道示Ⅱ 3.2.1より、 $h_w$ の半分とする。

$$\frac{l}{r_y} = \frac{h_w}{2r_y} = \frac{2000}{121.6} = 16.5 < 75$$

$$\sigma_{ca} = 210 - 1.5 \times \left( \frac{l}{r_y} - 15 \right) = 208 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{SM490Y相当})$$

$$b/t = 10.8 > 10.5$$

$$\sigma_{ca} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{SM490Y相当})$$

支点反力

$$S = 1027 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{S}{A_g} = \frac{1027 \times 10^3}{5304} = 194 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 208 \text{ N/mm}^2 \cdots \text{OK}$$

(2) 中間支点上補剛材(P1～P3)

支点上の補剛材は、道示Ⅱ 10.5.2によって設計する。  
支点上の補剛材は、下図のように取り付ける。

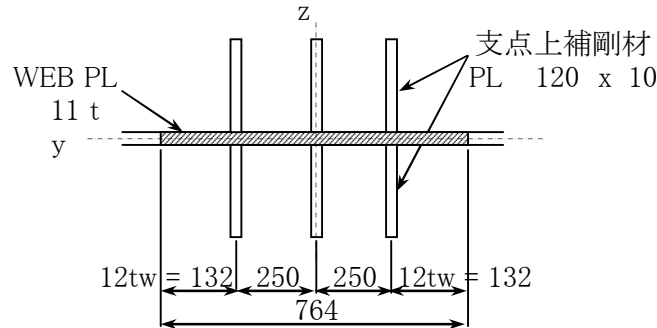


図-付-1.12 中間支点上補剛材

|              |     |   |    |   |                            |
|--------------|-----|---|----|---|----------------------------|
| 6 - Stiff PL | 120 | x | 10 | = | 7200                       |
| 1 - Web PL   | 764 | x | 11 | = | 8404                       |
|              |     |   |    |   | $A_g = 15604 \text{ mm}^2$ |

$$A_g' = 6 - \text{Stiff PL} \times 1.7 = 7200 \times 1.7 = 12240 \text{ mm}^2$$

$$A_g = 15604 > A_g' = 12240$$

よって、有効断面積は 12240 を用いる。

•鉛直方向応力度の照査

断面諸定数は以下のようになる。

$$I_y = \frac{10 \times 251^3}{12} \times 3 = 39500000 \text{ mm}^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}} = \sqrt{\frac{39500000}{12240}} = 56.8 \text{ mm}$$

有効座屈長  $l$  は、道示Ⅱ 3.2.1より、 $h_w$ の半分とする。

$$\frac{l}{r_y} = \frac{h_w}{2r_y} = \frac{2000}{113.6} = 17.6 < 75$$

$$\sigma_{ca} = 210 - 1.5 \times \left( \frac{l}{r_y} - 15 \right) = 206 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{SM490Y相当})$$

$$b/t = 12 > 10.5$$

$$\sigma_{ca} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{SM490Y相当})$$

支点反力

$$S = 2408.0 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{S}{A_g} = \frac{2408 \times 10^3}{12240} = 196.7 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 206 \text{ N/mm}^2 \cdots \text{OK}$$

### (3) 垂直補剛材

垂直補剛材の設計は、道示Ⅱ 10.4.3、10.4.4により設計する。以下にその結果のみを示す。  
本橋は対称の橋であるため、応力の照査位置の半分は省略する。

表-付-1.6 垂直補剛材の照査

| 照査位置   |                   | SEC-1      | SEC-2      | SEC-3      | SEC-4      | SEC-5      |
|--------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 曲げ応力度  | N/mm <sup>2</sup> | 76         | 148        | 148        | 125        | 204        |
| せん断応力度 | N/mm <sup>2</sup> | 28         | 16         | 29         | 53         | 66         |
| 補剛材間隔  | mm                | 2500       | 2500       | 2000       | 1250       | 1000       |
| 補剛材断面  |                   | 110 x 9    | 110 x 9    | 110 x 9    | 110 x 9    | 130 x 10   |
| 必要剛度   | mm <sup>4</sup>   | 671000     | 671000     | 1063000    | 2716000    | 6142000    |
| 補剛材剛度  | mm <sup>4</sup>   | 3993000    | 3993000    | 3993000    | 3993000    | 7323000    |
| 間隔照査   |                   | 0.46 ≤ 1.0 | 0.41 ≤ 1.0 | 0.63 ≤ 1.0 | 0.91 ≤ 1.0 | 0.99 ≤ 1.0 |
| 判定     |                   | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

| 照査位置   |                   | SEC-6      | SEC-7      | SEC-8      | SEC-9      | SEC-10     |
|--------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 曲げ応力度  | N/mm <sup>2</sup> | 204        | 125        | 96         | 110        | 211        |
| せん断応力度 | N/mm <sup>2</sup> | 66         | 48         | 23         | 44         | 59         |
| 補剛材間隔  | mm                | 958        | 1250       | 2500       | 2000       | 1150       |
| 補剛材断面  |                   | 130 x 10   | 110 x 9    | 110 x 9    | 110 x 9    | 120 x 10   |
| 必要剛度   | mm <sup>4</sup>   | 6142000    | 2716000    | 671000     | 1063000    | 4269000    |
| 補剛材剛度  | mm <sup>4</sup>   | 7323000    | 3993000    | 3993000    | 3993000    | 576000     |
| 間隔照査   |                   | 0.96 ≤ 1.0 | 0.78 ≤ 1.0 | 0.38 ≤ 1.0 | 0.96 ≤ 1.0 | 0.96 ≤ 1.0 |
| 判定     |                   | OK         | OK         | OK         | OK         | OK         |

### (4) 水平補剛材

水平補剛材は、道示Ⅱ 10.4.6、10.4.7により設計する。以下にその結果のみを示す。

表-付-1.7 水平補剛材の照査

| 照査位置  |                 | SEC-1    | SEC-2    | SEC-3    | SEC-4   | SEC-5   |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 補剛材間隔 | mm              | 2500     | 2500     | 2000     | 1250    | 1000    |
| 補剛材断面 |                 | 130 x 11 | 130 x 11 | 120 x 10 | 110 x 9 | 110 x 9 |
| 必要剛度  | mm <sup>4</sup> | 6824000  | 6824000  | 5449000  | 3403000 | 2732000 |
| 補剛材剛度 | mm <sup>4</sup> | 8055000  | 8055000  | 5760000  | 5760000 | 5760000 |
| 判定    |                 | OK       | OK       | OK       | OK      | OK      |

| 照査位置  |                 | SEC-6   | SEC-7   | SEC-8    | SEC-9    | SEC-10  |
|-------|-----------------|---------|---------|----------|----------|---------|
| 補剛材間隔 | mm              | 958     | 1250    | 2500     | 2000     | 1150    |
| 補剛材断面 |                 | 110 x 9 | 110 x 9 | 130 x 11 | 120 x 10 | 110 x 9 |
| 必要剛度  | mm <sup>4</sup> | 2618000 | 3403000 | 6824000  | 5449000  | 3142000 |
| 補剛材剛度 | mm <sup>4</sup> | 5760000 | 5760000 | 8055000  | 5760000  | 5760000 |
| 判定    |                 | OK      | OK      | OK       | OK       | OK      |

## 5. 中間横桁の設計

ここで用いる横桁は分配横桁として以下のとおりとする。

主桁断面

|              |      |   |    | A (cm <sup>2</sup> ) | y (cm) | Ay (cm <sup>3</sup> ) | Ay <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> ) | I0 (cm <sup>4</sup> ) | Ay <sup>2</sup> +I0 (cm <sup>4</sup> ) |
|--------------|------|---|----|----------------------|--------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| 1 -PL        | 400  | x | 23 | 92.0                 | -91.2  | -8386                 | 764366                             | 41                    | 764407                                 |
| 1 -PL        | 1800 | x | 12 | 216.0                | 0      | 0                     | 0                                  | 583200                | 583200                                 |
| 1 -PL        | 550  | x | 30 | 165.0                | 91.5   | 15098                 | 1381421                            | 124                   | 1381545                                |
| $\Sigma A =$ |      |   |    | 473.0                |        | 6712                  |                                    |                       | 2729152                                |

$$e_s = 6712 / 473.0 = 14.2 \text{ cm}$$

$$I_s = 2729152 - 473.0 \times 14.2^2 = 2633776 \text{ cm}^4$$

横桁断面

|              |      |   |    | A (cm <sup>2</sup> ) | y (cm) | Ay (cm <sup>3</sup> ) | Ay <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> ) | I0 (cm <sup>4</sup> ) | Ay <sup>2</sup> +I0 (cm <sup>4</sup> ) |
|--------------|------|---|----|----------------------|--------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| 1 -PL        | 200  | x | 10 | 20.0                 | -90.5  | -1810                 | 163805                             | 2                     | 163807                                 |
| 1 -PL        | 1800 | x | 9  | 162.0                | 0      | 0                     | 0                                  | 437400                | 437400                                 |
| 1 -PL        | 200  | x | 10 | 20.0                 | 90.5   | 1810                  | 163805                             | 2                     | 163807                                 |
| $\Sigma A =$ |      |   |    | 202.0                |        | 0                     |                                    |                       | 765014                                 |

$$e_s = 0 / 202.0 = 0.0 \text{ cm}$$

$$I_s = 765014 - 202.0 \times 0^2 = 765014 \text{ cm}^4$$

参考までに、格子剛度は以下のとおりである。

$$Z = \left( \frac{L}{2a} \right)^3 \times \frac{I_Q}{I_v} = \left( \frac{38}{2 \times 2.6} \right)^3 \times \frac{765014}{2633776}$$

$$= 113$$

## 6. 主桁添接の設計

主桁添接には、2面摩擦接合を用い、道示Ⅱ 6.3.5、6.3.8～6.3.13の規定に従って設計する。照査の対象はG1,G2とし、G3,G4の照査は省略する。

### ①G1桁

表-付-1.8 主桁添接の形状とボルト配置

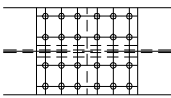
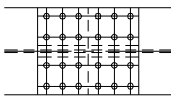
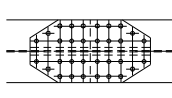
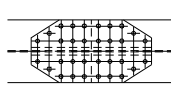
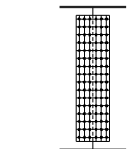
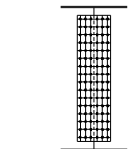
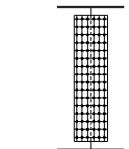
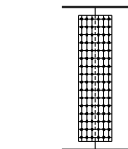
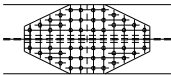
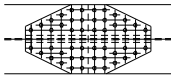
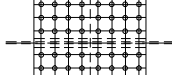
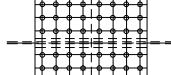
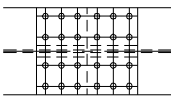
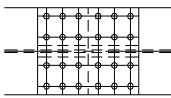
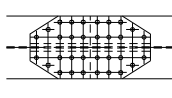
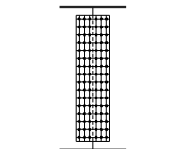
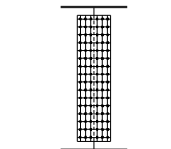
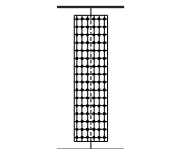
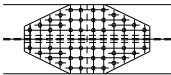
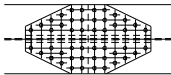
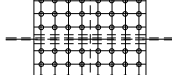
|       |       | 9.250                                                                               | 22.050                                                                              | 32.350                                                                              | 42.350                                                                                |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 上フランジ | 母材断面  | 400 x 15                                                                            | 400 x 15                                                                            | 400 x 18                                                                            | 400 x 18                                                                              |
|       | 応力度   | -135                                                                                | -115                                                                                | 121                                                                                 | 164                                                                                   |
|       | ボルト本数 | 24                                                                                  | 24                                                                                  | 32                                                                                  | 32                                                                                    |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                            |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |    |    |    |    |
| ウェブ   | 母材断面  | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 11                                                                           | 1800 x 11                                                                             |
|       | 応力度   | 179                                                                                 | 178                                                                                 | 121                                                                                 | 164                                                                                   |
|       | ボルト本数 | 102                                                                                 | 102                                                                                 | 102                                                                                 | 102                                                                                   |
|       | 添接板   | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |   |   |   |   |
| 下フランジ | 母材断面  | 500 x 30                                                                            | 500 x 30                                                                            | 500 x 32                                                                            | 500 x 32                                                                              |
|       | 応力度   | 179                                                                                 | 178                                                                                 | -105                                                                                | -122                                                                                  |
|       | ボルト本数 | 60                                                                                  | 60                                                                                  | 72                                                                                  | 72                                                                                    |
|       | 添接板   | 1 - 500 x 13<br>2 - 225 x 15                                                        | 1 - 500 x 13<br>2 - 225 x 15                                                        | 1 - 500 x 15<br>2 - 225 x 17                                                        | 1 - 500 x 15<br>2 - 225 x 17                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |  |  |  |  |

表-付-1.8 主桁添接の形状とボルト配置（つづき）

|       |       | 52.650                                                                              | 65.450                                                                              | 74.500                                                                              |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 上フランジ | 母材断面  | 400 x 13                                                                            | 400 x 13                                                                            | 400 x 13                                                                            |
|       | 応力度   | -64                                                                                 | -72                                                                                 | 103                                                                                 |
|       | ボルト本数 | 24                                                                                  | 24                                                                                  | 24                                                                                  |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |    |    |    |
| ウェブ   | 母材断面  | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           |
|       | 応力度   | 172                                                                                 | 171                                                                                 | -117                                                                                |
|       | ボルト本数 | 102                                                                                 | 102                                                                                 | 102                                                                                 |
|       | 添接板   | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |   |   |   |
| 下フランジ | 母材断面  | 500 x 32                                                                            | 500 x 20                                                                            | 500 x 24                                                                            |
|       | 応力度   | 172                                                                                 | 171                                                                                 | -117                                                                                |
|       | ボルト本数 | 60                                                                                  | 60                                                                                  | 60                                                                                  |
|       | 添接板   | 1 - 500 x 14<br>2 - 225 x 15                                                        | 1 - 500 x 9<br>2 - 225 x 9                                                          | 1 - 500 x 11<br>2 - 225 x 13                                                        |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |  |  |  |

②G2桁

表-付-1.9 主桁添接の形状とボルト配置

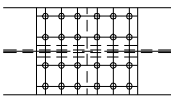
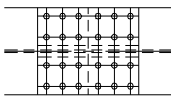
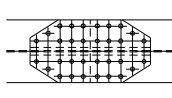
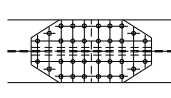
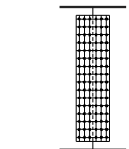
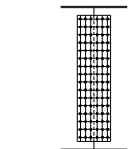
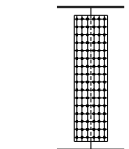
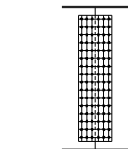
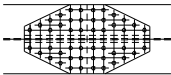
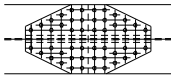
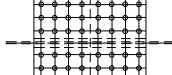
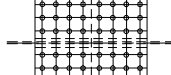
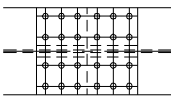
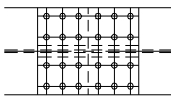
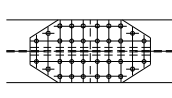
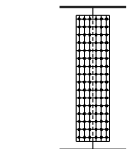
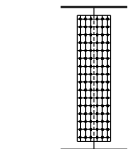
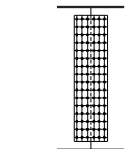
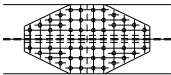
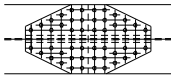
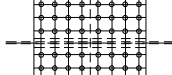
|       |       | 9.250                                                                               | 22.050                                                                              | 32.350                                                                              | 42.350                                                                                |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 上フランジ | 母材断面  | 400 x 13                                                                            | 400 x 13                                                                            | 400 x 15                                                                            | 400 x 18                                                                              |
|       | 応力度   | -117                                                                                | -100                                                                                | 106                                                                                 | 149                                                                                   |
|       | ボルト本数 | 24                                                                                  | 24                                                                                  | 32                                                                                  | 32                                                                                    |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                            |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |    |    |    |    |
| ウェブ   | 母材断面  | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                             |
|       | 応力度   | 182                                                                                 | 161                                                                                 | -108                                                                                | 149                                                                                   |
|       | ボルト本数 | 102                                                                                 | 102                                                                                 | 68                                                                                  | 68                                                                                    |
|       | 添接板   | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |   |   |   |   |
| 下フランジ | 母材断面  | 400 x 21                                                                            | 400 x 23                                                                            | 400 x 36                                                                            | 400 x 36                                                                              |
|       | 応力度   | 182                                                                                 | 161                                                                                 | -108                                                                                | -108                                                                                  |
|       | ボルト本数 | 36                                                                                  | 36                                                                                  | 64                                                                                  | 64                                                                                    |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 11                                                         | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 17<br>2 - 175 x 19                                                        | 1 - 400 x 17<br>2 - 175 x 19                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                                |
|       | 添接板形状 |  |  |  |  |

表-付-1.9 主桁添接の形状とボルト配置（つづき）

|       |       | 52.650                                                                              | 65.450                                                                              | 74.500                                                                              |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 上フランジ | 母材断面  | 400 x 15                                                                            | 400 x 13                                                                            | 400 x 13                                                                            |
|       | 応力度   | -61                                                                                 | -72                                                                                 | 103                                                                                 |
|       | ボルト本数 | 24                                                                                  | 24                                                                                  | 32                                                                                  |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 9                                                          |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |    |    |    |
| ウェブ   | 母材断面  | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           | 1800 x 10                                                                           |
|       | 応力度   | 156                                                                                 | 159                                                                                 | -105                                                                                |
|       | ボルト本数 | 102                                                                                 | 102                                                                                 | 102                                                                                 |
|       | 添接板   | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        | 2 - 1660 x 9                                                                        |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |   |   |   |
| 下フランジ | 母材断面  | 400 x 37                                                                            | 400 x 24                                                                            | 400 x 31                                                                            |
|       | 応力度   | 156                                                                                 | 159                                                                                 | -105                                                                                |
|       | ボルト本数 | 56                                                                                  | 40                                                                                  | 56                                                                                  |
|       | 添接板   | 1 - 400 x 14<br>2 - 175 x 16                                                        | 1 - 400 x 9<br>2 - 175 x 11                                                         | 1 - 400 x 15<br>2 - 175 x 16                                                        |
|       | 材質    | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              | SM490Y                                                                              |
|       | 添接板形状 |  |  |  |

## 7. 補剛材まとめ

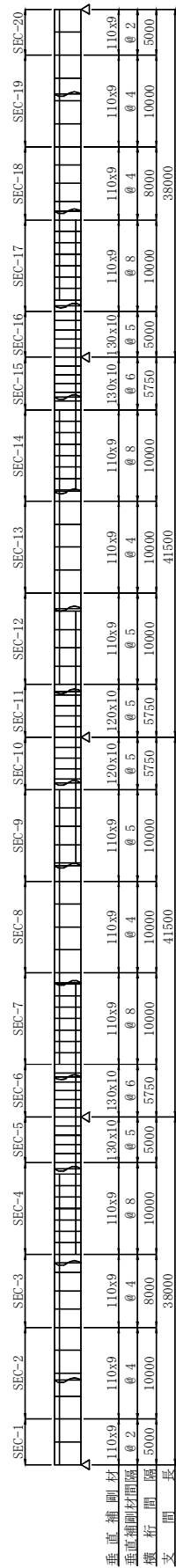


図-付-13 垂直補剛材間隔、及び断面

## 8. 端支点上横桁の設計

端支点上横桁の設計荷重は、死荷重、活荷重、風荷重、及び地震荷重の組合せとする。

### (1) 断面力の算出

#### ① 曲げモーメント

活荷重は、T荷重及びL荷重による断面力のうち、大きいほうで設計する。

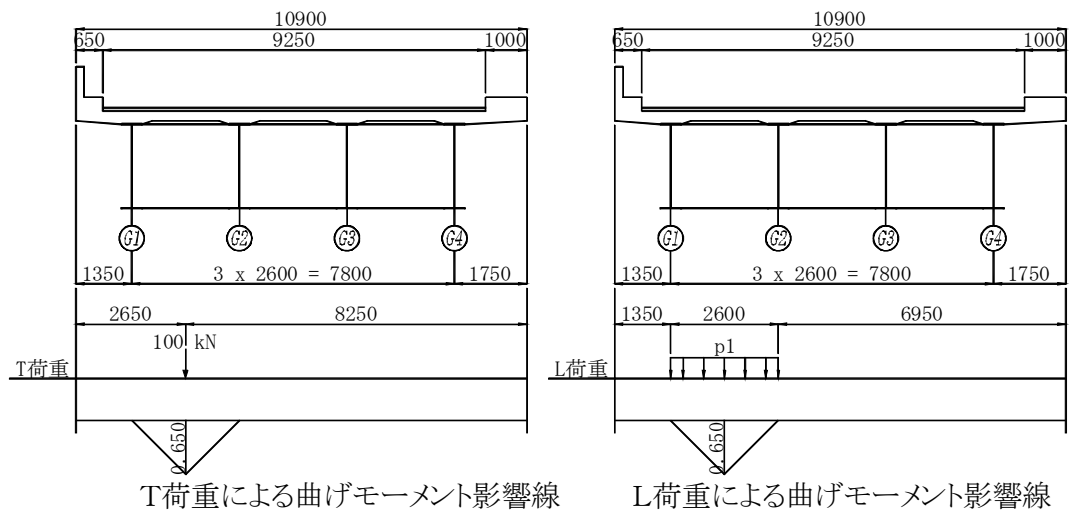
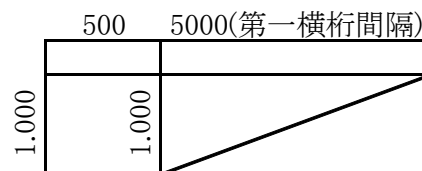


図-付-1.14 端支点上横桁の曲げモーメントの影響線

ここで、L活荷重は第一横桁までを影響線範囲とし、その反力影響線を以下のようにする。  
なお、支点上から桁端部までの距離は500mmとする。



$$p1 = (10.0 + 3.5) \times 3.000 = 40.500 \text{ kN/m}$$

$$\text{衝撃係数 } i = 20 / (50 + L) = 20 / (50 + 2.600) = 0.380$$

$$\text{T荷重 } M_T = 100 \times 0.650 \times (1 + 0.380) = 89.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{L荷重 } M_L = 40.5 \times 0.845 \times (1 + 0.380) = 47.227 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

設計曲げモーメントは上記の値のうち最大のもの(89.7 kN・m)を用いる。

## ②せん断力

活荷重は、T荷重及びL荷重による断面力のうち、大きいほうで設計する。

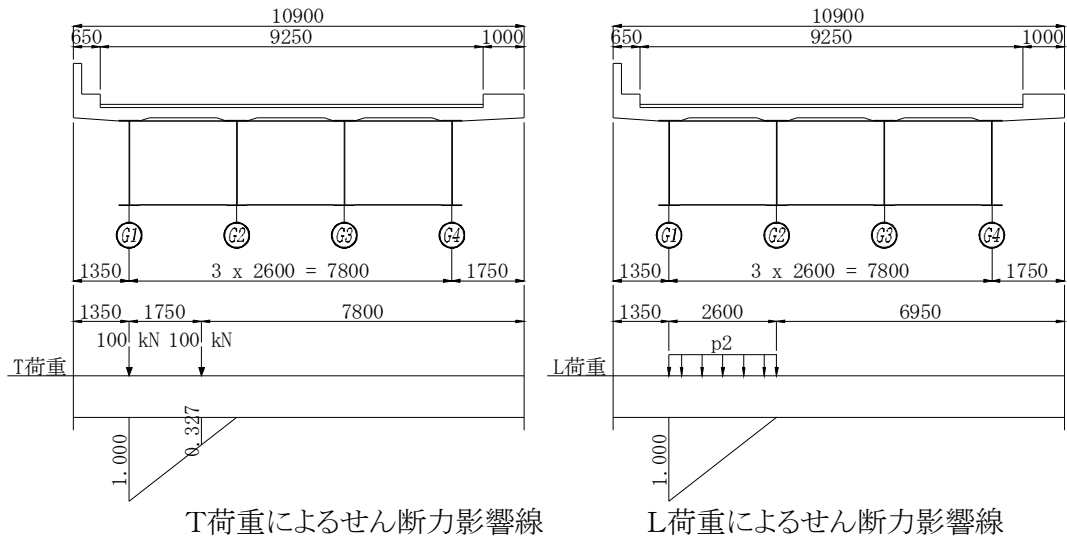


図-付-1.15 端支点上横桁のせん断力の影響線

ここで、L活荷重は曲げモーメント同様第一横桁までを影響線範囲とする。

$$p_1 = (12.0 + 3.5) \times 3.000 = 46.500 \text{ kN/m}$$

$$\text{衝撃係数 } i = 20 / (50 + L) = 20 / (50 + 2.600) = 0.380$$

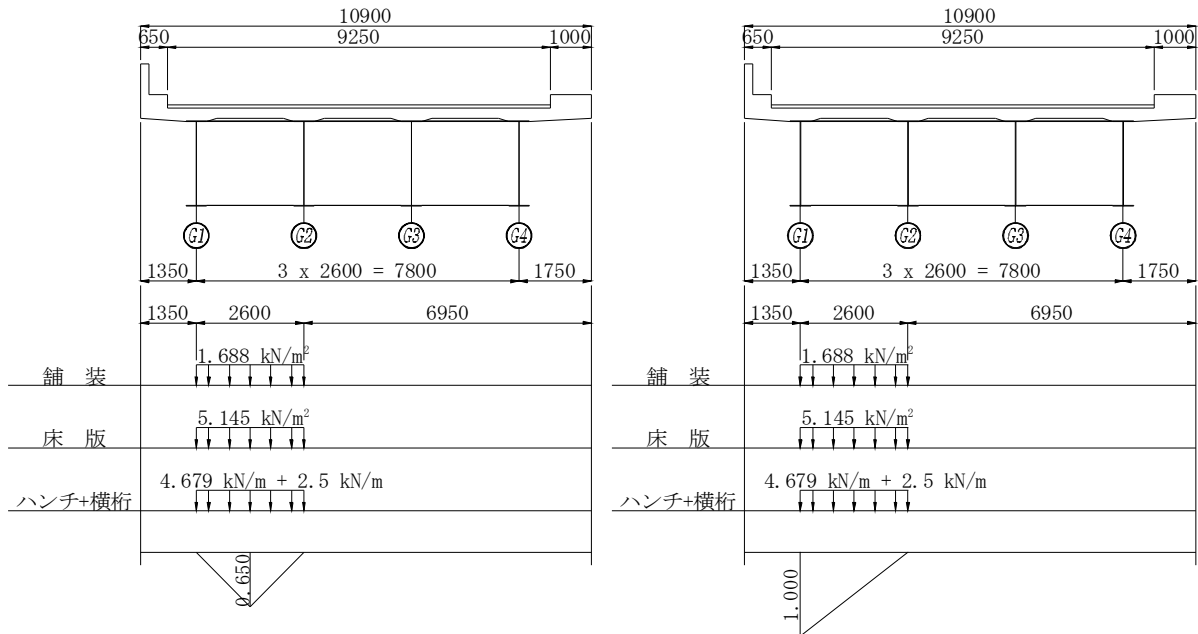
$$\text{T荷重 } S_T = 100 \times 1.327 \times (1 + 0.380) = 183.126 \text{ kN}$$

$$\text{L荷重 } S_L = 46.5 \times 1.300 \times (1 + 0.380) = 83.421 \text{ kN}$$

設計せん断力は上記の値のうち最大のもの(183.126 kN)を用いる。

### ③死荷重

死荷重のうち、ハンチ+横桁は影響線による载荷とせず、全重量を有効とする。



死荷重による曲げモーメント影響線 死荷重によるせん断力影響線  
図-付-1.16 端支点上横桁の死荷重による曲げモーメントとせん断力の影響線

#### 曲げモーメント

|        |   |       |   |       |   |       |   |             |
|--------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------------|
| 舗装     | = | 1.688 | x | 0.845 | x | 3.000 | = | 4.279 kN・m  |
| 床版     | = | 5.145 | x | 0.845 | x | 3.000 | = | 13.043 kN・m |
| ハンチ+横桁 | = | 7.179 | x | 0.845 |   |       | = | 6.066 kN・m  |
| 合計     |   |       |   |       |   |       | = | 23.388 kN・m |

#### せん断力

|        |   |       |   |       |   |       |   |           |
|--------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-----------|
| 舗装     | = | 1.688 | x | 1.300 | x | 3.000 | = | 6.583 kN  |
| 床版     | = | 5.145 | x | 1.300 | x | 3.000 | = | 20.066 kN |
| ハンチ+横桁 | = | 7.179 | x | 1.300 |   |       | = | 9.333 kN  |
| 合計     |   |       |   |       |   |       | = | 35.981 kN |

## (2) 断面計算

端横桁の断面二次モーメント

2 - FLG PL 200 x 10 (SM400)

1 - WEB PL 1800 x 9 (SM400)

$$I = 765014.0 \text{ cm}^4$$

$$y = 90.5 \text{ cm}$$

曲げ応力度

$$\sigma = M/I \cdot y = 13.4 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 109.3 \text{ N/mm}^2$$

せん断応力度

$$\tau = S/A_w = 13.5 \text{ N/mm}^2 < \tau_a = 80.0 \text{ N/mm}^2$$

合成応力度の照査

$$(\sigma_c / \sigma_{ca})^2 + (\tau / \tau_a)^2 = 0.04 \leq 1.2$$

## 付属資料 2：一定せん断流パネルモデルを用いた検討

### 1. 連続鉄桁橋におけるトラック車両載荷の検討

#### 1. 1 検討内容

本編の 2.2 節で対象とした静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を解析対象として、要素分割数を変えた 2 種類の一定せん断流パネルモデルによるトラック車両載荷解析を行う。トラック車両による各載荷ケースの実測値や、格子モデル(非合成・合成の 2 種類)・FEM モデル(A、B、C モデルの 3 種類)の解析値(計 5 種類)との比較を通して、一定せん断流パネルモデル(A、B モデルの 2 種類)の解析精度を検討する。各種の解析モデルの概要図を図-付-2.1.1 に示す。格子モデル(非合成・合成の 2 種類)・FEM モデル(A、B、C モデルの 3 種類)の解析条件(総節点数、使用ソフトウェア、各部材のモデル化で使用した要素名、応力の算出方法等)については、本編の 2.2 節を参照されたい。

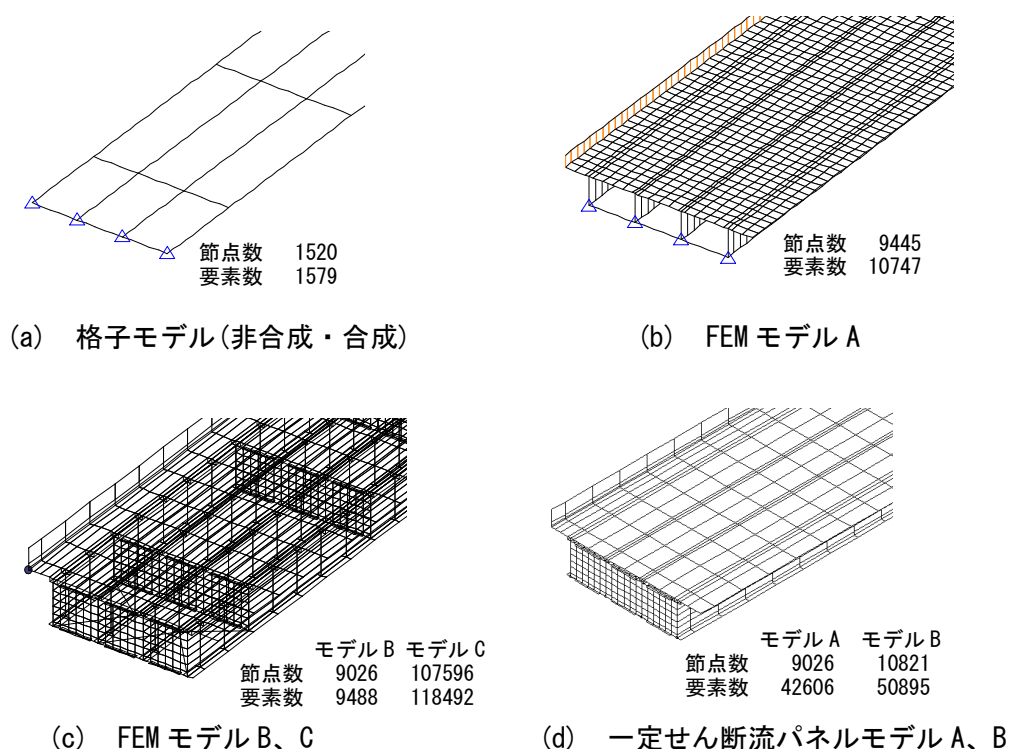


図-付-2.1.1 各種の解析モデルの概要図

#### 1. 2 一定せん断流パネルモデル

一定せん断流パネル要素とは、せん断応力のみに抵抗する板要素とその外周に曲げに伴う垂直応力のみを負担するはり要素から構成される要素であり、図-付-2.1.2 に示すような内力分布の関係がある。応力の算出方法等の詳細については付属参考文献 2), 3) に示されているので、参照されたい。ここでは、この「一定せん断流パネル+縁部材」を「一定せん断流パネル要素」と称することとする。

FEM モデル B に対して、要素分割数やハンチのモデル化等の条件を全て同じとし (FEM モデル B については「本文 2.2.3 検討する解析モデル」の(4)FEM モデル B を参照)、FEM モデル B に

におけるシェル要素を一定せん断流パネル要素に換えた一定せん断流パネルモデル A を作成した（図-付-2.1.3、総節点数 9026、総要素数 42606）。また、一定せん断流パネルモデル A に対して、着目点とする支間中央付近と中間支点上付近のみを要素サイズ 0.25m×0.25m に細分割化した一定せん断流パネルモデル B を作成した（図-付-2.1.4、総節点数 10821、総要素数 50895）。

なお、解析ソフトは「鋼橋自動設計製図システム APOLLO, 立体構造解析システム Analyzer」（付属参考文献 4）参照）を使用し、要素種類は 4 節点要素 SHPANEL（一定せん断流パネル板要素とはり要素を重合せた要素。1 節点 6 自由度。）を用いた。また、一定せん断流パネルモデルの要素数は、一定せん断流パネル板要素とはり要素の合計数を表記した。

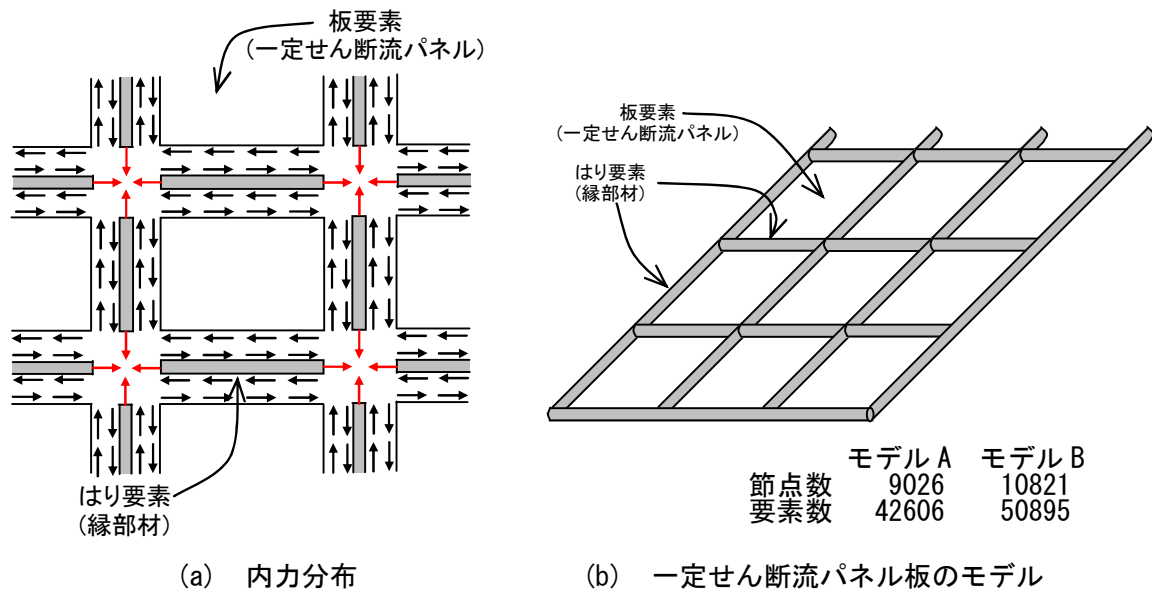


図-付-2.1.2 一定せん断流パネル要素の概念（付属参考文献 1）、2）より引用）

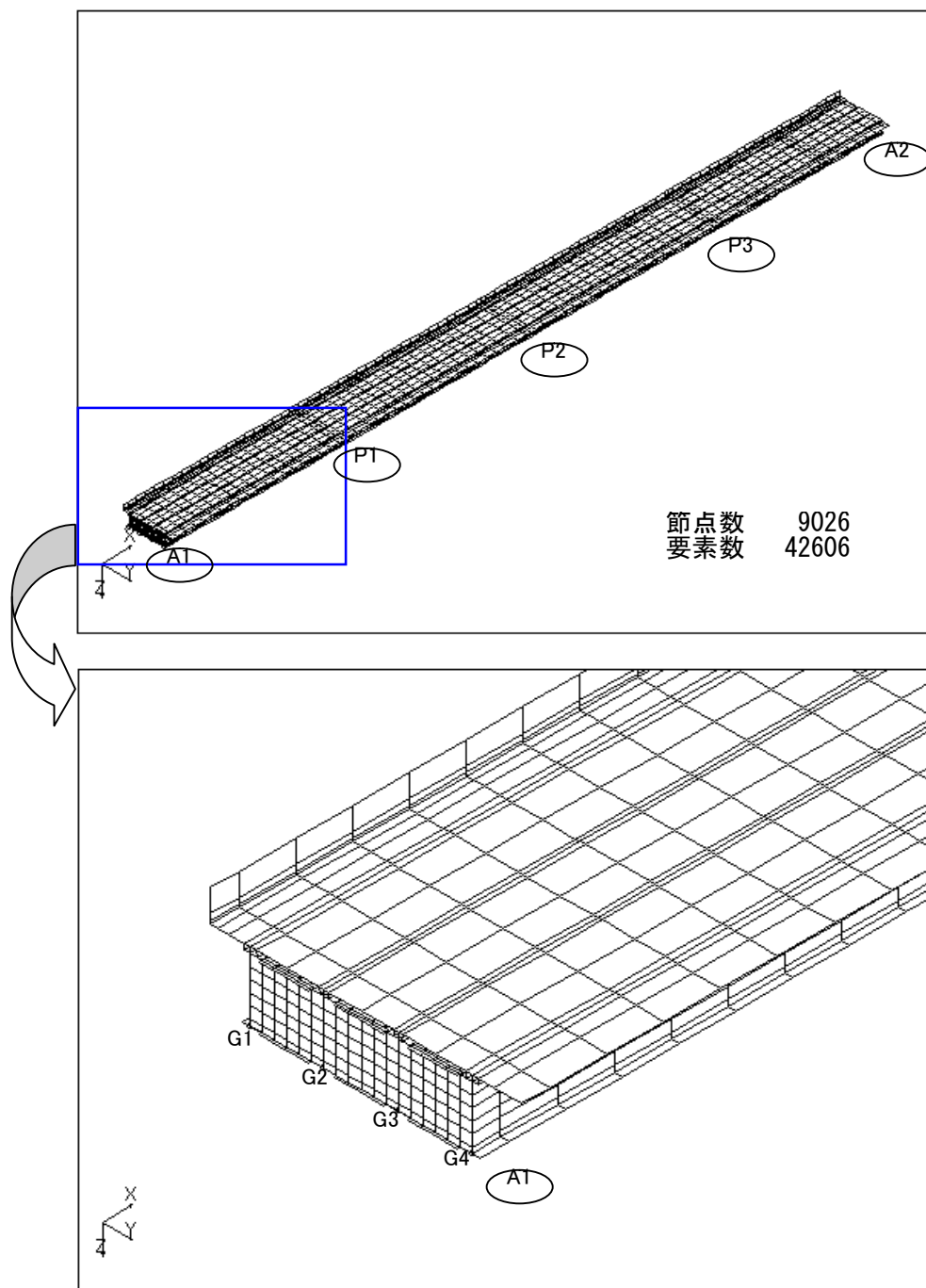


図-付-2. 1. 3 一定せん断流パネルモデルAの要素分割状況

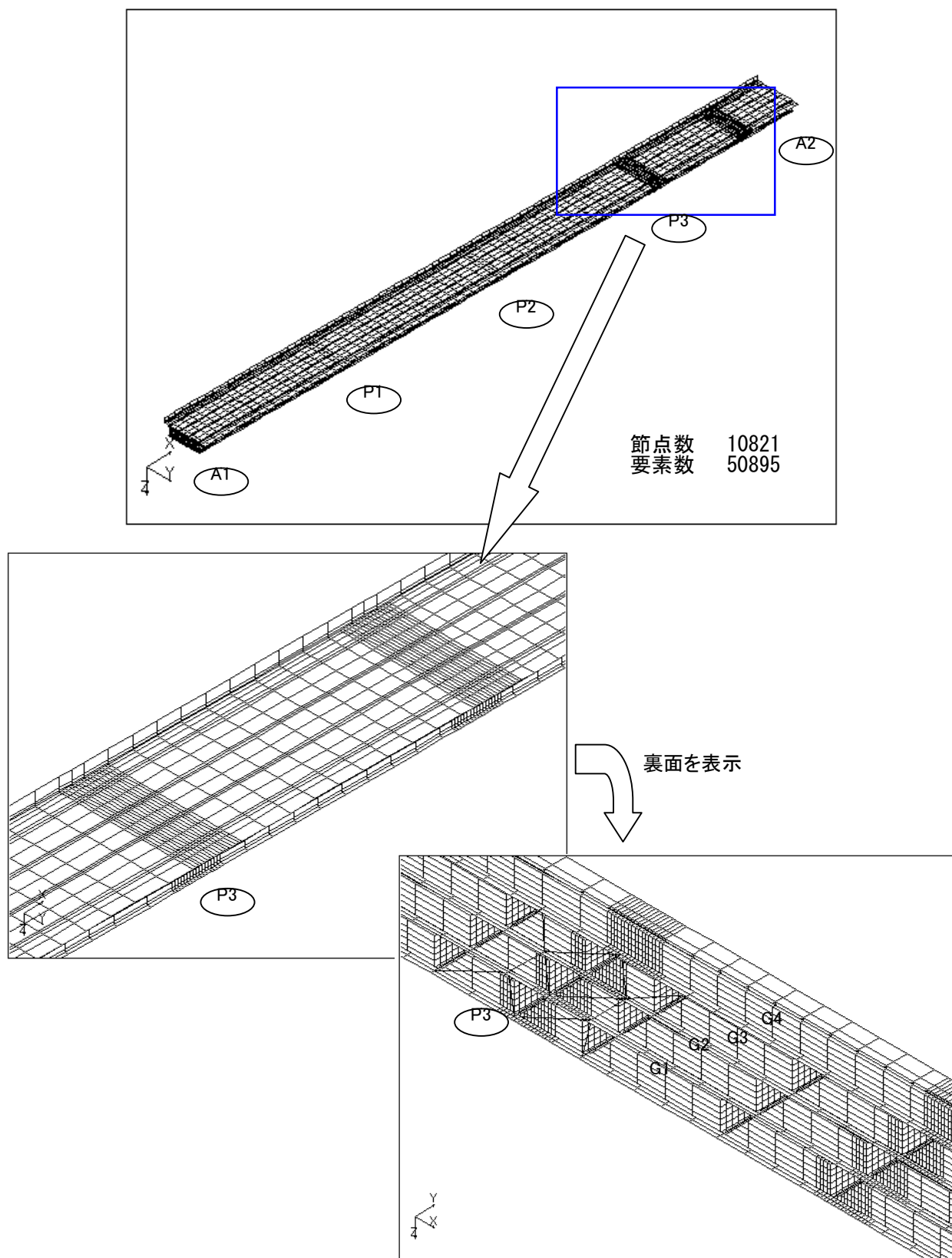
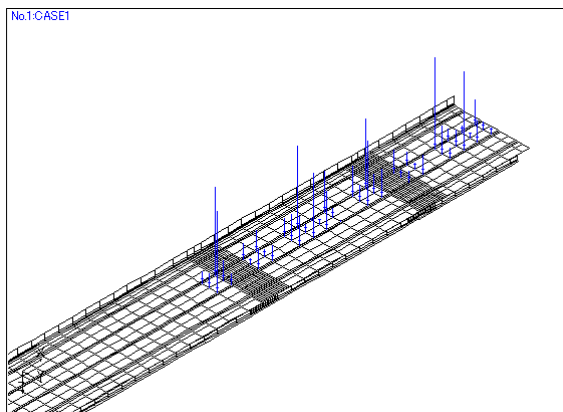
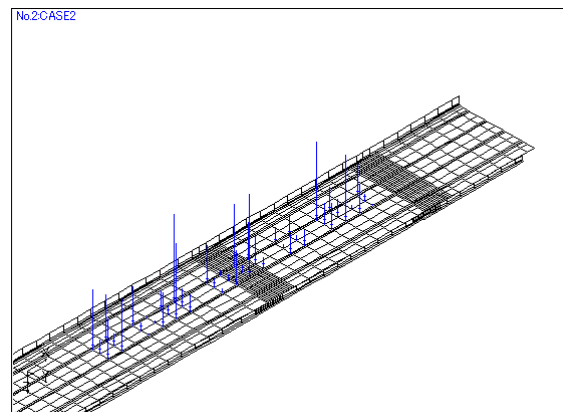


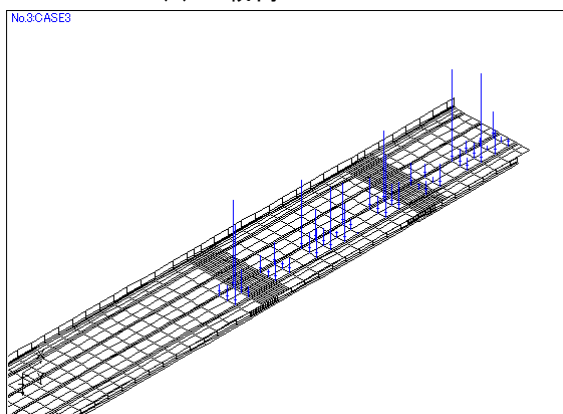
図-付-2.1.4 一定せん断流パネルモデルBの要素分割状況



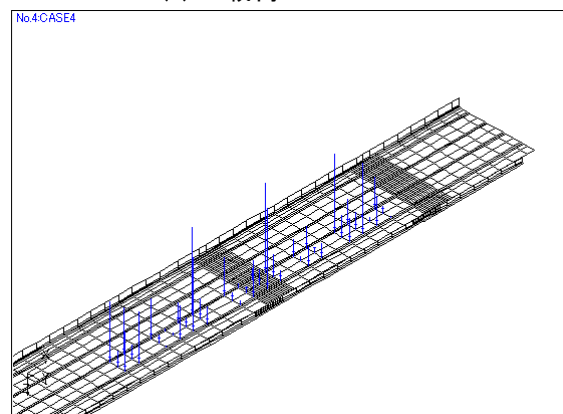
(a) 載荷 CASE1



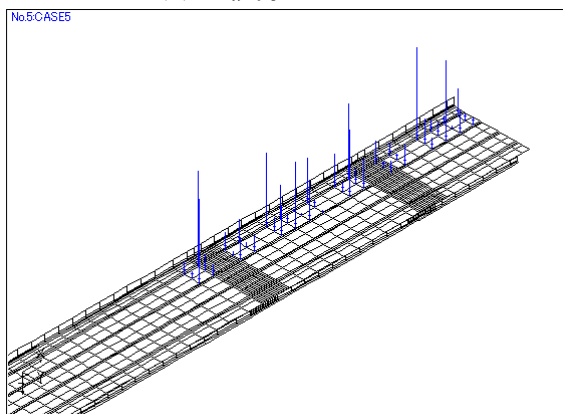
(b) 載荷 CASE2



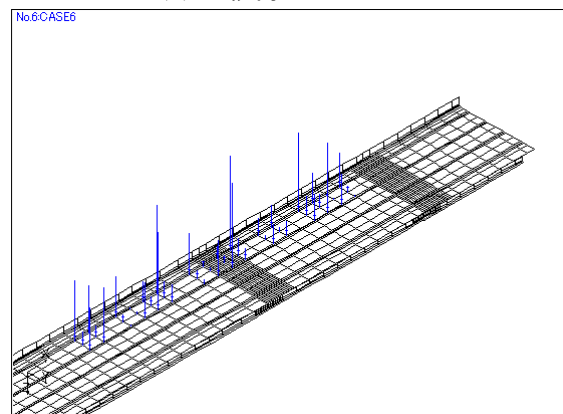
(c) 載荷 CASE3



(d) 載荷 CASE4



(e) 載荷 CASE5



(f) 載荷 CASE6

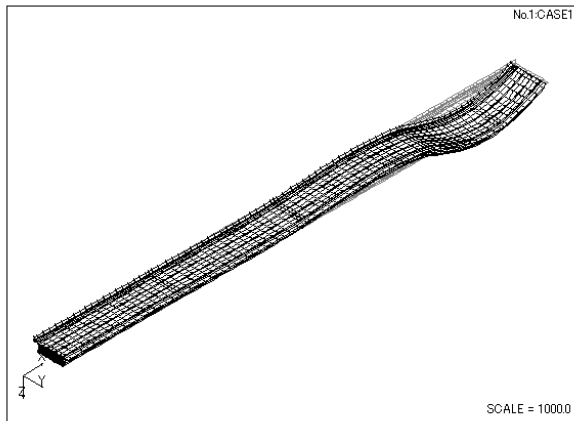
図-付-2.1.5 一定せん断流パネルモデルBのトラック荷重載荷状況

### 1. 3 検討結果

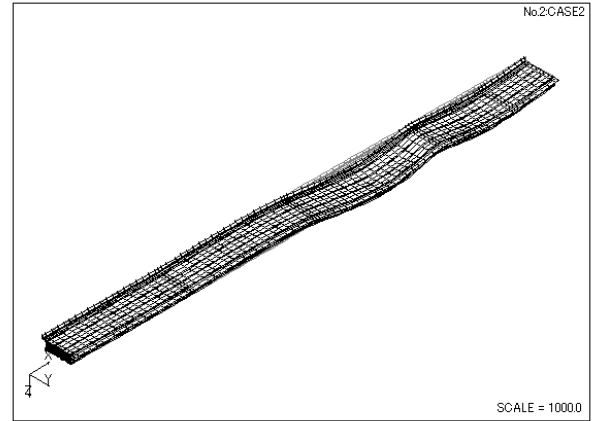
一定せん断流パネルモデルの場合の変形図を図-付-2.1.6 および図-付-2.1.7 に示す。支間中央の鉛直変位、支間中央および中間支点上の主桁フランジ直応力度について、実測値と解析値の比較結果を表-付-2.1.2(a)～(f)に示す。支間中央載荷においては支間中央位置での鉛直変位および直応力度を、中間支点上載荷においては中間支点上位置での直応力度をそれぞれ示している。また、図-付-2.1.8(a)～(c)は表-付-2.1.2(a)～(f)を図化したものである。

得られた結果を以下にまとめる。

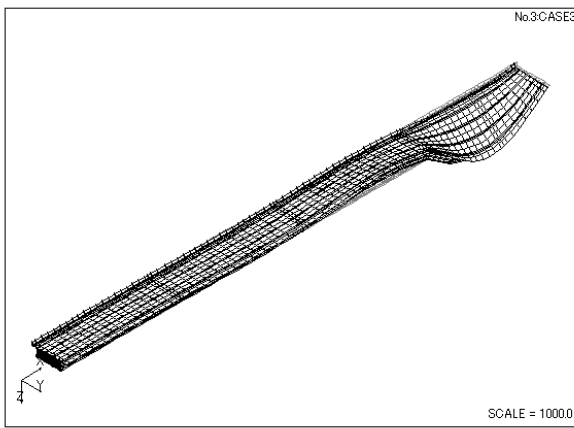
- ・ 着目部位の要素分割数を変えた一点せん断流パネルモデル A とモデル B で、支間中央載荷時の鉛直変位および下フランジ直応力度に顕著な差は見られないが、上フランジ直応力度においては要素分割の粗いモデル A の方がやや応力度が大きい。
- ・ 支間中央載荷時の鉛直変位では、実測値に比べて一定せん断流パネルモデルの解析値は大きくなる傾向があり、実測値と良い一致を示している FEM モデル A、B、C と比べるとやや精度が低下している。
- ・ 支間中央載荷時の下フランジ直応力度では、一定せん断流パネルモデルの解析値は実測値と良い一致を示しているが、中間支点上載荷では実測値より一定せん断流パネルモデルの解析値が小さく、FEM モデル B の解析値と傾向が類似している。



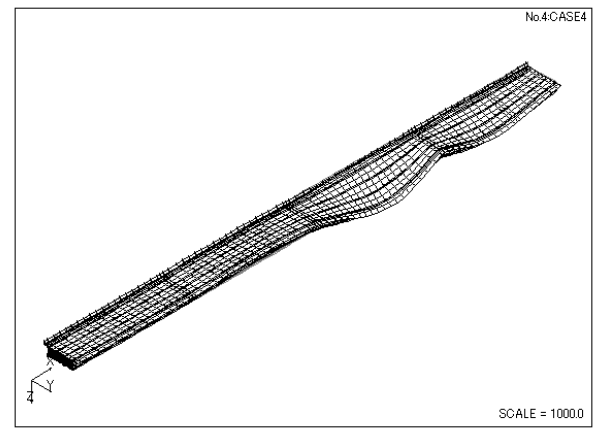
(a) 載荷 CASE1



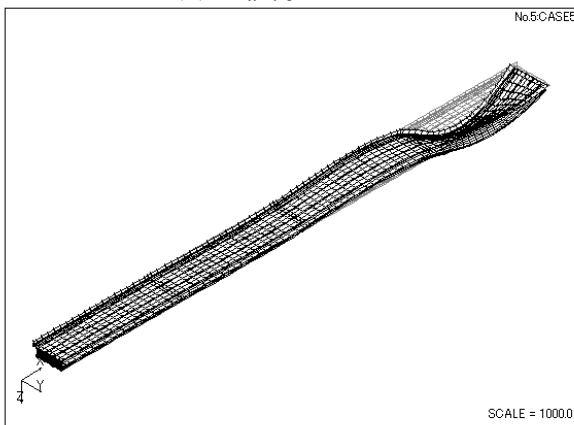
(b) 載荷 CASE2



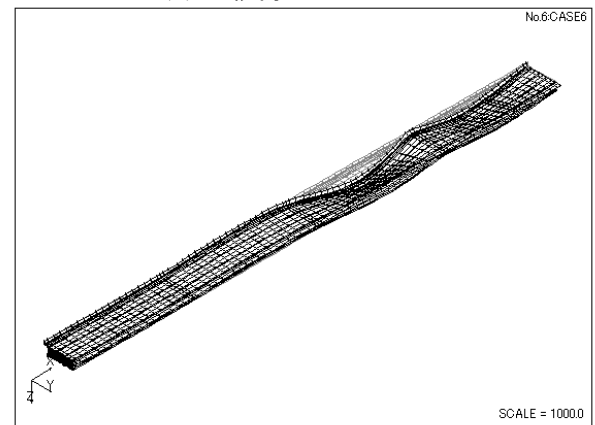
(c) 載荷 CASE3



(d) 載荷 CASE4

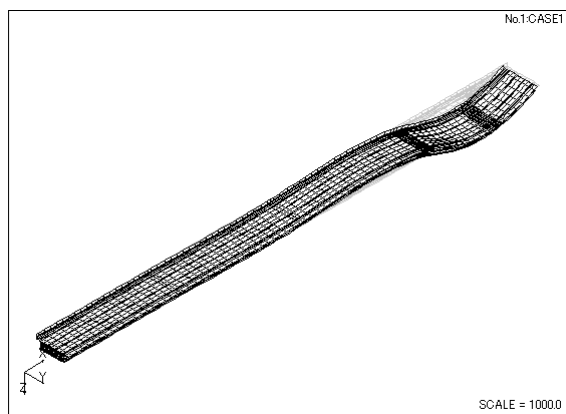


(e) 載荷 CASE5

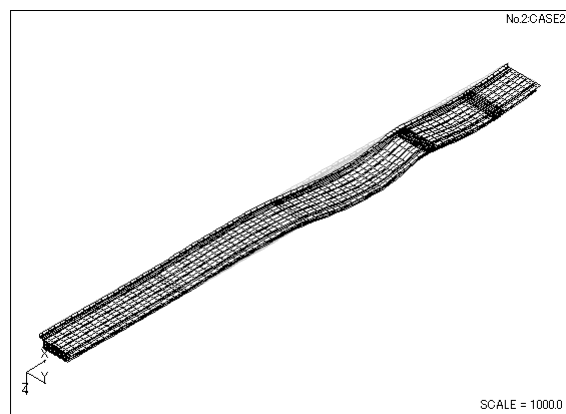


(f) 載荷 CASE6

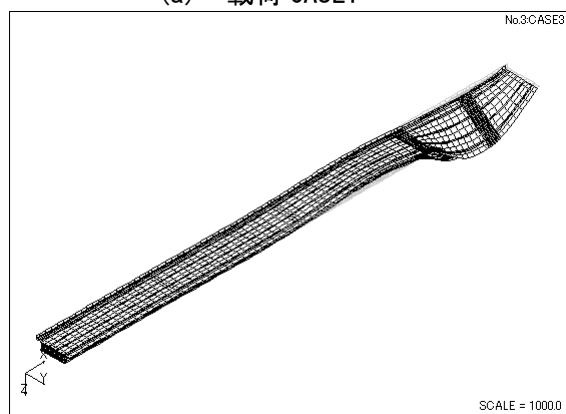
図-付-2. 1. 6 一定せん断流パネルモデルAの変形図



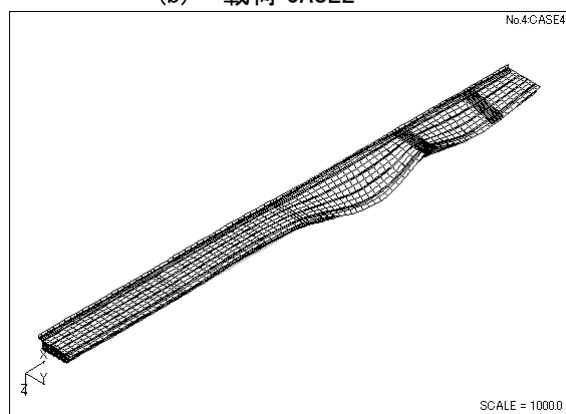
(a) 載荷 CASE1



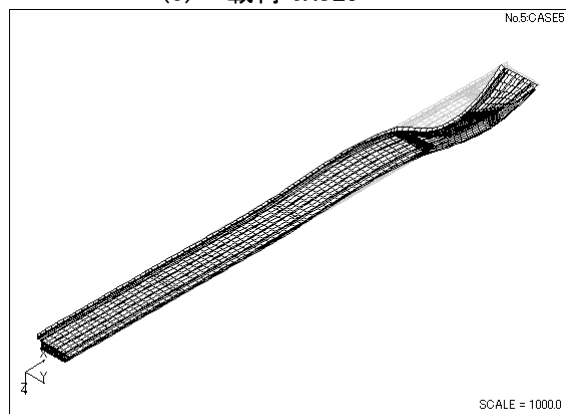
(b) 載荷 CASE2



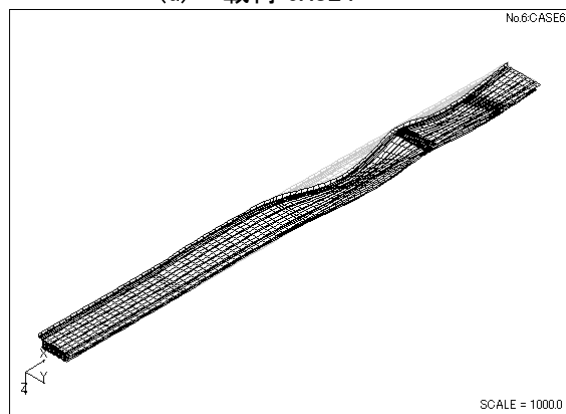
(c) 載荷 CASE3



(d) 載荷 CASE4



(e) 載荷 CASE5



(f) 載荷 CASE6

図-付-2.1.7 一定せん断流パネルモデルBの変形図

表-付-2.1.2 解析値と実測値との比較表  
(a) 支間中央載荷における主桁の鉛直変位 (単位: mm)

| 解析ケース |            | G1桁           | G2桁           | G3桁           | G4桁           |
|-------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CASE1 | 実橋計測値      | -3.06         | -3.30         | -3.34         | -2.46         |
|       | 格子非合成モデル   | -10.58 (246%) | -10.97 (232%) | -11.03 (230%) | -10.76 (338%) |
|       | 格子合成モデル    | -3.21 (5%)    | -3.83 (16%)   | -4.12 (23%)   | -4.08 (66%)   |
|       | せん断パネルモデルA | -4.85 (58%)   | -5.52 (67%)   | -5.74 (72%)   | -5.58 (127%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -4.66 (52%)   | -5.25 (59%)   | -5.47 (64%)   | -5.29 (115%)  |
|       | FEMモデルA    | -3.30 (8%)    | -3.72 (13%)   | -4.01 (20%)   | -4.20 (71%)   |
|       | FEMモデルB    | -3.78 (24%)   | -4.23 (28%)   | -4.39 (32%)   | -4.27 (73%)   |
|       | FEMモデルC    | -3.71 (21%)   | -4.21 (28%)   | -4.40 (32%)   | -4.29 (74%)   |
| CASE3 | 実橋計測値      | -1.33         | -2.50         | -4.08         | -4.85         |
|       | 格子非合成モデル   | 0.45 (-134%)  | -7.13 (185%)  | -14.69 (260%) | -22.13 (356%) |
|       | 格子合成モデル    | 0.08 (-106%)  | -2.71 (8%)    | -5.50 (35%)   | -8.22 (69%)   |
|       | せん断パネルモデルA | -2.11 (59%)   | -4.43 (77%)   | -6.99 (71%)   | -9.21 (90%)   |
|       | せん断パネルモデルB | -2.05 (54%)   | -4.21 (68%)   | -6.56 (61%)   | -8.65 (78%)   |
|       | FEMモデルA    | -1.24 (-7%)   | -3.14 (26%)   | -5.07 (24%)   | -6.95 (43%)   |
|       | FEMモデルB    | -2.13 (60%)   | -3.61 (45%)   | -5.23 (28%)   | -6.66 (37%)   |
|       | FEMモデルC    | -2.01 (51%)   | -3.54 (42%)   | -5.21 (28%)   | -6.69 (38%)   |
| CASE5 | 実橋計測値      | -4.58         | -3.86         | -2.53         | -0.54         |
|       | 格子非合成モデル   | -21.82 (377%) | -14.50 (276%) | -7.07 (179%)  | 0.38 (-171%)  |
|       | 格子合成モデル    | -6.69 (46%)   | -4.62 (20%)   | -2.42 (-4%)   | -0.20 (-62%)  |
|       | せん断パネルモデルA | -7.88 (72%)   | -6.20 (61%)   | -4.14 (64%)   | -2.28 (323%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -7.43 (62%)   | -5.87 (52%)   | -3.92 (55%)   | -2.17 (302%)  |
|       | FEMモデルA    | -5.44 (19%)   | -4.18 (8%)    | -2.85 (13%)   | -1.54 (185%)  |
|       | FEMモデルB    | -5.75 (25%)   | -4.59 (19%)   | -3.29 (30%)   | -2.11 (291%)  |
|       | FEMモデルC    | -5.61 (22%)   | -4.60 (19%)   | -3.30 (31%)   | -2.13 (294%)  |

※ ( )内は、誤差=(解析値-実橋計測値)/実橋計測値×100 を示す。

(b) 支間中央載荷における主桁の相対変位 (単位: mm)

| 解析ケース |            | G1-G2        | G2-G3        | G3-G4        |
|-------|------------|--------------|--------------|--------------|
| CASE1 | 実橋計測値      | 0.24         | 0.04         | -0.89        |
|       | 格子非合成モデル   | 0.39 (63%)   | 0.06 (48%)   | -0.27 (-70%) |
|       | 格子合成モデル    | 0.62 (157%)  | 0.29 (575%)  | -0.03 (-96%) |
|       | せん断パネルモデルA | 0.67 (179%)  | 0.22 (423%)  | -0.16 (-82%) |
|       | せん断パネルモデルB | 0.59 (146%)  | 0.22 (401%)  | -0.18 (-80%) |
|       | FEMモデルA    | 0.41 (73%)   | 0.30 (593%)  | 0.19 (-121%) |
|       | FEMモデルB    | 0.45 (88%)   | 0.16 (274%)  | -0.13 (-85%) |
|       | FEMモデルC    | 0.50 (108%)  | 0.19 (340%)  | -0.11 (-87%) |
| CASE3 | 実橋計測値      | 1.18         | 1.58         | 0.77         |
|       | 格子非合成モデル   | 7.57 (543%)  | 7.56 (379%)  | 7.45 (867%)  |
|       | 格子合成モデル    | 2.78 (137%)  | 2.80 (77%)   | 2.72 (253%)  |
|       | せん断パネルモデルA | 2.32 (98%)   | 2.55 (62%)   | 2.23 (189%)  |
|       | せん断パネルモデルB | 2.15 (83%)   | 2.35 (49%)   | 2.09 (171%)  |
|       | FEMモデルA    | 1.90 (62%)   | 1.93 (22%)   | 1.88 (144%)  |
|       | FEMモデルB    | 1.48 (26%)   | 1.62 (3%)    | 1.43 (86%)   |
|       | FEMモデルC    | 1.53 (30%)   | 1.67 (6%)    | 1.48 (92%)   |
| CASE5 | 実橋計測値      | -0.72        | -1.33        | -1.99        |
|       | 格子非合成モデル   | -7.33 (918%) | -7.43 (459%) | -7.45 (274%) |
|       | 格子合成モデル    | -2.08 (188%) | -2.19 (65%)  | -2.22 (12%)  |
|       | せん断パネルモデルA | -1.68 (133%) | -2.06 (55%)  | -1.86 (-7%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -1.56 (117%) | -1.95 (46%)  | -1.75 (-12%) |
|       | FEMモデルA    | -1.26 (75%)  | -1.33 (-0%)  | -1.31 (-34%) |
|       | FEMモデルB    | -1.16 (61%)  | -1.29 (-3%)  | -1.18 (-41%) |
|       | FEMモデルC    | -1.01 (40%)  | -1.29 (-3%)  | -1.18 (-41%) |

※ 相対変位とは、各主桁間の鉛直変位差を意味する。

表-付-2.1.2 解析値と実測値との比較表（つづき）  
(c) 支間中央載荷における主桁の上フランジ直応力度（単位：N/mm<sup>2</sup>）

| 解析ケース |            | G1桁          | G2桁          | G3桁          | G4桁          |
|-------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CASE1 | 実橋計測値      | -0.30        | -0.50        | -0.30        | -0.90        |
|       | 格子非合成モデル   | -19.01 ##### | -16.56 ##### | -16.60 ##### | -19.42 ##### |
|       | 格子合成モデル    | -0.85 (185%) | -1.41 (181%) | -1.54 (412%) | -2.35 (161%) |
|       | せん断パネルモデルA | -0.69 (130%) | -1.26 (151%) | -1.55 (415%) | -1.65 (84%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -0.28 (-7%)  | -0.32 (-35%) | -0.39 (30%)  | -0.47 (-48%) |
|       | FEMモデルA    | -1.10 (266%) | -0.78 (57%)  | -1.28 (326%) | -2.61 (190%) |
|       | FEMモデルB    | -0.85 (185%) | -1.40 (179%) | -1.69 (464%) | -1.97 (119%) |
|       | FEMモデルC    | -0.53 (78%)  | -1.52 (205%) | -1.69 (464%) | -1.52 (69%)  |
| CASE3 | 実橋計測値      | 0.00         | -0.60        | -0.80        | -1.30        |
|       | 格子非合成モデル   | 0.57 #####   | -12.88 ##### | -23.45 ##### | -37.42 ##### |
|       | 格子合成モデル    | 0.02 #####   | -1.21 (102%) | -2.18 (173%) | -4.39 (237%) |
|       | せん断パネルモデルA | -0.13 #####  | -1.12 (87%)  | -2.09 (161%) | -2.78 (114%) |
|       | せん断パネルモデルB | -0.11 #####  | -0.34 (-43%) | -0.51 (-37%) | -0.71 (-45%) |
|       | FEMモデルA    | 0.75 #####   | -1.33 (122%) | -2.50 (213%) | -4.70 (262%) |
|       | FEMモデルB    | -0.13 #####  | -1.09 (82%)  | -2.28 (185%) | -3.44 (164%) |
|       | FEMモデルC    | -0.20 #####  | -1.05 (75%)  | -2.43 (204%) | -2.96 (128%) |
| CASE5 | 実橋計測値      | -0.20        | -0.50        | -0.40        | -0.40        |
|       | 格子非合成モデル   | -36.73 ##### | -23.27 ##### | -12.78 ##### | 0.50 (-224%) |
|       | 格子合成モデル    | -1.66 (730%) | -1.79 (258%) | -1.08 (170%) | -0.13 (-68%) |
|       | せん断パネルモデルA | -1.15 (473%) | -1.35 (169%) | -0.99 (148%) | -0.64 (61%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -0.39 (96%)  | -0.36 (-27%) | -0.31 (-23%) | -0.20 (-51%) |
|       | FEMモデルA    | -2.31 #####  | -1.20 (140%) | -1.01 (154%) | 0.11 (-126%) |
|       | FEMモデルB    | -1.69 (743%) | -1.53 (207%) | -0.99 (146%) | -0.72 (81%)  |
|       | FEMモデルC    | -1.17 (487%) | -1.60 (221%) | -0.85 (113%) | -0.76 (91%)  |

※ “#####”は、1000%以上の誤差を示す。

計測値および解析値は上フランジ下面での値。

(d) 支間中央載荷における主桁の下フランジ直応力度（単位：N/mm<sup>2</sup>）

| 解析ケース |            | G1桁           | G2桁         | G3桁         | G4桁           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| CASE1 | 実橋計測値      | 8.40          | 8.90        | 9.00        | 9.20          |
|       | 格子非合成モデル   | 15.69 (87%)   | 12.95 (46%) | 12.99 (44%) | 15.67 (70%)   |
|       | 格子合成モデル    | 9.94 (18%)    | 9.02 (1%)   | 9.85 (9%)   | 11.35 (23%)   |
|       | せん断パネルモデルA | 9.37 (12%)    | 9.73 (9%)   | 10.06 (12%) | 10.12 (10%)   |
|       | せん断パネルモデルB | 9.32 (11%)    | 9.20 (3%)   | 9.51 (6%)   | 9.78 (6%)     |
|       | FEMモデルA    | 10.29 (23%)   | 8.74 (-2%)  | 9.28 (3%)   | 11.68 (27%)   |
|       | FEMモデルB    | 9.51 (13%)    | 9.87 (11%)  | 10.09 (12%) | 10.00 (9%)    |
|       | FEMモデルC    | 9.51 (13%)    | 9.66 (9%)   | 9.98 (11%)  | 10.29 (12%)   |
| CASE3 | 実橋計測値      | 2.40          | 7.80        | 11.40       | 15.30         |
|       | 格子非合成モデル   | -0.47 (-120%) | 10.08 (29%) | 18.34 (61%) | 30.21 (97%)   |
|       | 格子合成モデル    | -0.19 (-108%) | 7.77 (-0%)  | 14.01 (23%) | 21.21 (39%)   |
|       | せん断パネルモデルA | 5.78 (141%)   | 8.89 (14%)  | 12.15 (7%)  | 14.11 (-8%)   |
|       | せん断パネルモデルB | 5.69 (137%)   | 8.77 (12%)  | 11.41 (0%)  | 13.38 (-13%)  |
|       | FEMモデルA    | 4.55 (89%)    | 9.25 (19%)  | 11.77 (3%)  | 17.15 (12%)   |
|       | FEMモデルB    | 5.61 (134%)   | 9.01 (15%)  | 11.71 (3%)  | 14.45 (-6%)   |
|       | FEMモデルC    | 4.94 (106%)   | 8.93 (14%)  | 11.55 (1%)  | 15.30 (0%)    |
| CASE5 | 実橋計測値      | 12.60         | 10.30       | 7.50        | 3.70          |
|       | 格子非合成モデル   | 30.32 (141%)  | 18.20 (77%) | 10.00 (33%) | -0.40 (-111%) |
|       | 格子合成モデル    | 19.32 (53%)   | 11.47 (11%) | 6.93 (-8%)  | 0.62 (-83%)   |
|       | せん断パネルモデルA | 12.49 (-1%)   | 11.08 (8%)  | 8.47 (13%)  | 5.61 (51%)    |
|       | せん断パネルモデルB | 12.13 (-4%)   | 10.40 (1%)  | 8.24 (10%)  | 5.40 (46%)    |
|       | FEMモデルA    | 14.73 (17%)   | 10.05 (-2%) | 8.59 (14%)  | 4.95 (34%)    |
|       | FEMモデルB    | 13.29 (5%)    | 10.92 (6%)  | 8.60 (15%)  | 5.46 (48%)    |
|       | FEMモデルC    | 13.53 (7%)    | 10.89 (6%)  | 8.86 (18%)  | 5.39 (46%)    |

計測値および解析値は下フランジ上面での値。

表-付-2.1.2 解析値と実測値との比較表（つづき）  
 (e) 中間支点上載荷における主桁の上フランジ直応力度（単位：N/mm<sup>2</sup>）

| 解析ケース |            | G1桁           | G2桁          | G3桁         | G4桁           |
|-------|------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| CASE2 | 実橋計測値      | 0.40          | 0.70         | 0.50        | 1.70          |
|       | 格子非合成モデル   | 14.05 #####   | 19.59 #####  | 19.52 ##### | 13.99 (723%)  |
|       | 格子合成モデル    | 0.51 (29%)    | 2.03 (189%)  | 2.12 (323%) | 1.50 (-12%)   |
|       | せん断パネルモデルA | 1.30 (224%)   | 2.80 (300%)  | 2.87 (473%) | 1.60 (-6%)    |
|       | せん断パネルモデルB | 0.25 (-37%)   | 0.29 (-58%)  | 0.29 (-42%) | 0.33 (-80%)   |
|       | FEMモデルA    | 1.64 (311%)   | 3.05 (336%)  | 3.30 (560%) | 2.40 (41%)    |
|       | FEMモデルB    | 1.12 (181%)   | 2.10 (200%)  | 2.22 (345%) | 1.54 (-10%)   |
|       | FEMモデルC    | 0.52 (29%)    | 0.81 (16%)   | 0.99 (99%)  | 1.20 (-29%)   |
| CASE4 | 実橋計測値      | 0.30          | 0.40         | 1.10        | 5.20          |
|       | 格子非合成モデル   | -1.44 (-579%) | 10.43 #####  | 23.30 ##### | 33.41 (542%)  |
|       | 格子合成モデル    | -0.07 (-123%) | 1.03 (158%)  | 2.42 (120%) | 3.90 (-25%)   |
|       | せん断パネルモデルA | 0.41 (36%)    | 1.83 (358%)  | 3.61 (228%) | 3.26 (-37%)   |
|       | せん断パネルモデルB | 0.08 (-75%)   | 0.27 (-33%)  | 0.49 (-56%) | 0.53 (-90%)   |
|       | FEMモデルA    | 0.09 (-70%)   | 1.80 (350%)  | 4.04 (267%) | 5.28 (1%)     |
|       | FEMモデルB    | 0.39 (29%)    | 1.58 (295%)  | 2.71 (146%) | 2.63 (-49%)   |
|       | FEMモデルC    | 0.38 (26%)    | 1.01 (153%)  | 1.36 (24%)  | 1.76 (-66%)   |
| CASE6 | 実橋計測値      | 3.60          | 2.20         | 0.70        | 1.20          |
|       | 格子非合成モデル   | 33.56 (832%)  | 23.43 (965%) | 10.41 ##### | -1.45 (-221%) |
|       | 格子合成モデル    | 1.38 (-62%)   | 2.12 (-4%)   | 0.96 (37%)  | -0.07 (-106%) |
|       | せん断パネルモデルA | 2.51 (-30%)   | 3.15 (43%)   | 1.61 (130%) | 0.43 (-64%)   |
|       | せん断パネルモデルB | 0.44 (-88%)   | 0.31 (-86%)  | 0.24 (-66%) | 0.09 (-93%)   |
|       | FEMモデルA    | 3.91 (8%)     | 3.30 (50%)   | 1.59 (127%) | 0.33 (-72%)   |
|       | FEMモデルB    | 1.86 (-48%)   | 2.24 (2%)    | 1.40 (99%)  | 0.49 (-59%)   |
|       | FEMモデルC    | 0.31 (-91%)   | 0.83 (-62%)  | 0.85 (22%)  | 0.57 (-53%)   |

※ “#####”は、1000%以上の誤差を示す。

計測値および解析値は上フランジ下面での値。

(f) 中間支点上載荷における主桁の下フランジ直応力度（単位：N/mm<sup>2</sup>）

| 解析ケース |            | G1桁           | G2桁           | G3桁           | G4桁           |
|-------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CASE2 | 実橋計測値      | -9.30         | -12.10        | -11.70        | -6.30         |
|       | 格子非合成モデル   | -11.17 (20%)  | -14.56 (20%)  | -14.51 (24%)  | -10.93 (74%)  |
|       | 格子合成モデル    | -6.39 (-31%)  | -11.07 (-9%)  | -11.56 (-1%)  | -7.20 (14%)   |
|       | せん断パネルモデルA | -5.01 (-46%)  | -6.33 (-48%)  | -6.33 (-46%)  | -5.57 (-12%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -5.05 (-46%)  | -6.28 (-48%)  | -6.08 (-48%)  | -5.40 (-14%)  |
|       | FEMモデルA    | -7.44 (-20%)  | -10.60 (-12%) | -10.96 (-6%)  | -8.22 (30%)   |
|       | FEMモデルB    | -6.15 (-34%)  | -8.51 (-30%)  | -8.30 (-29%)  | -6.11 (-3%)   |
|       | FEMモデルC    | -7.41 (-20%)  | -11.21 (-7%)  | -11.28 (-4%)  | -7.81 (24%)   |
| CASE4 | 実橋計測値      | -3.50         | -7.00         | -14.90        | -15.90        |
|       | 格子非合成モデル   | 1.14 (-133%)  | -7.75 (11%)   | -17.32 (16%)  | -26.11 (64%)  |
|       | 格子合成モデル    | 0.84 (-124%)  | -5.65 (-19%)  | -13.21 (-11%) | -18.73 (18%)  |
|       | せん断パネルモデルA | -1.57 (-55%)  | -4.03 (-42%)  | -8.62 (-42%)  | -9.86 (-38%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -1.54 (-56%)  | -4.03 (-42%)  | -8.76 (-41%)  | -9.62 (-40%)  |
|       | FEMモデルA    | 0.05 (-101%)  | -6.08 (-13%)  | -13.26 (-11%) | -18.58 (17%)  |
|       | FEMモデルB    | -1.06 (-70%)  | -4.67 (-33%)  | -10.54 (-29%) | -12.82 (-19%) |
|       | FEMモデルC    | -0.86 (-76%)  | -5.73 (-18%)  | -14.38 (-3%)  | -17.51 (10%)  |
| CASE6 | 実橋計測値      | -16.30        | -14.10        | -7.50         | -4.30         |
|       | 格子非合成モデル   | -26.69 (64%)  | -17.42 (24%)  | -7.74 (3%)    | 1.13 (-126%)  |
|       | 格子合成モデル    | -17.11 (5%)   | -11.56 (-18%) | -5.22 (-30%)  | 0.34 (-108%)  |
|       | せん断パネルモデルA | -8.33 (-49%)  | -8.26 (-41%)  | -3.73 (-50%)  | -1.50 (-65%)  |
|       | せん断パネルモデルB | -8.92 (-45%)  | -7.88 (-44%)  | -3.58 (-52%)  | -1.43 (-67%)  |
|       | FEMモデルA    | -17.37 (7%)   | -12.05 (-15%) | -5.66 (-25%)  | -0.38 (-91%)  |
|       | FEMモデルB    | -12.62 (-23%) | -10.42 (-26%) | -4.41 (-41%)  | -0.87 (-80%)  |
|       | FEMモデルC    | -17.03 (5%)   | -14.22 (1%)   | -5.92 (-21%)  | -0.99 (-77%)  |

計測値および解析値は下フランジ上面での値。

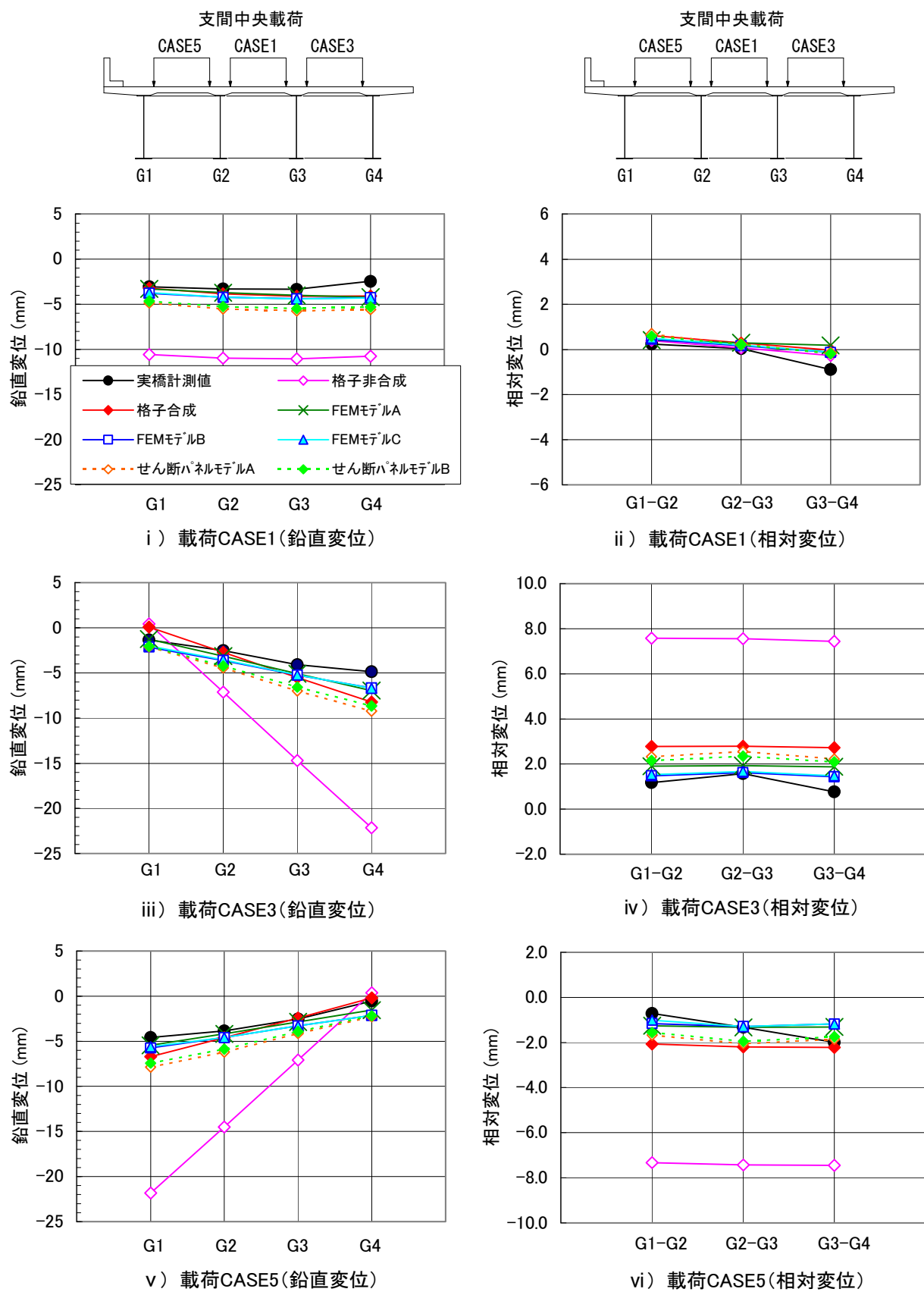


図-付-2. 1. 8(a) 解析値と実測値との比較 (鉛直変位および相対変位)

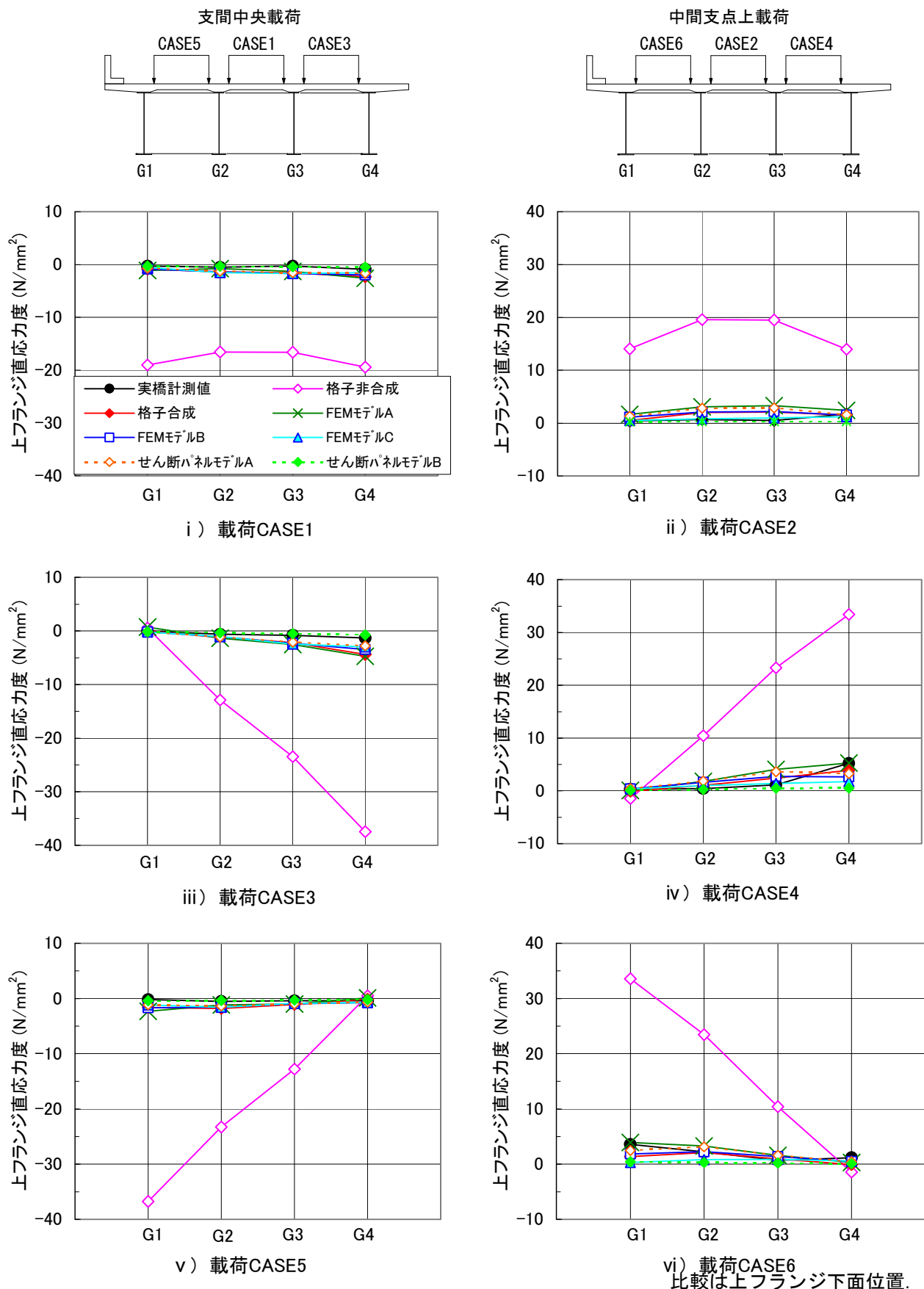
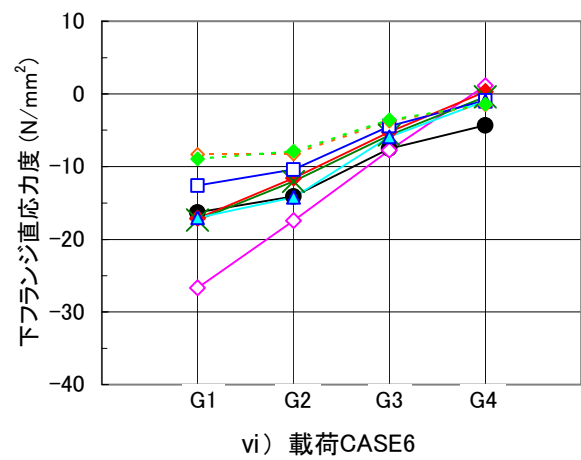
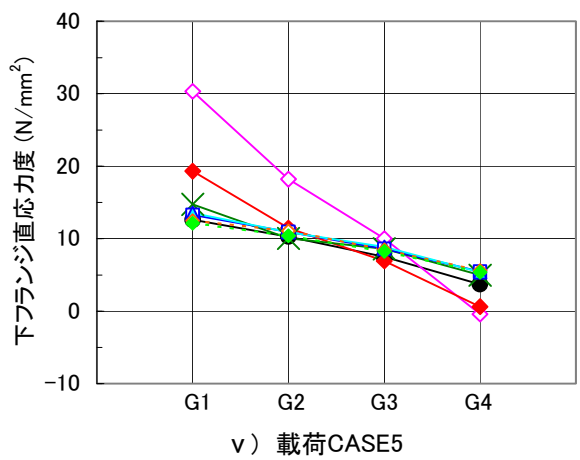
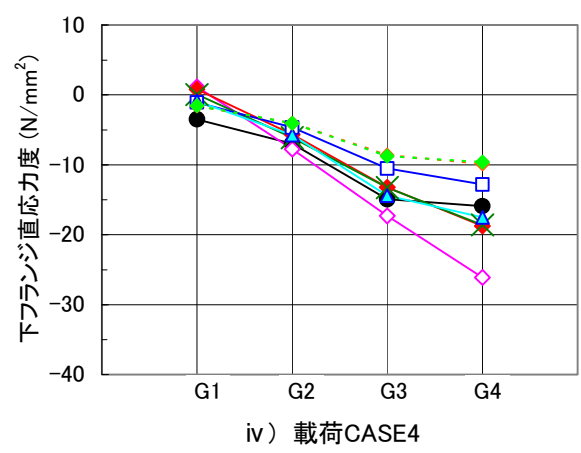
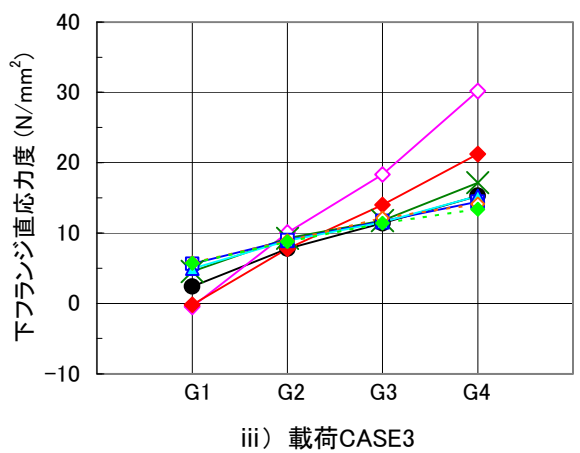
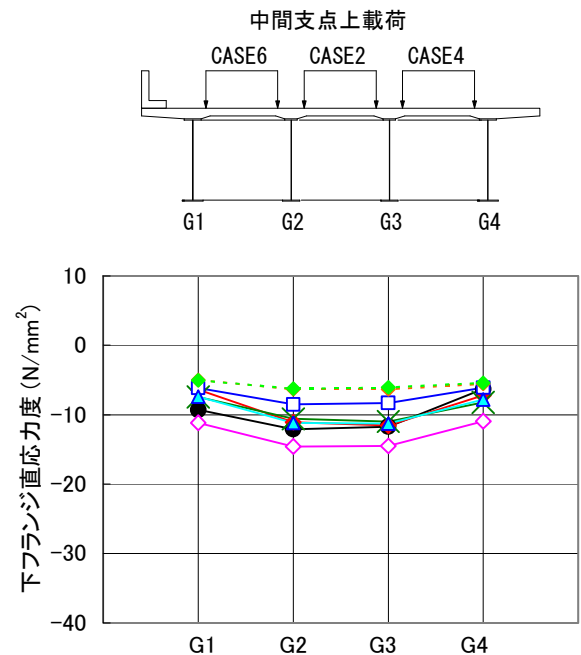
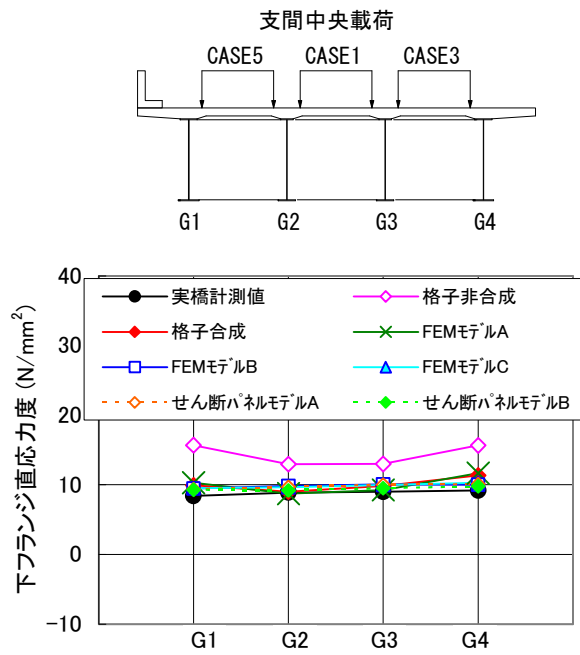


図-付-2.1.8(b) 解析値と実測値との比較 (上フランジ直応力度)



比較は下フランジ上面位置.

図-付-2. 1. 8(c) 解析値と実測値との比較 (下フランジ直応力度)

## 2. 連続鉄桁橋におけるT荷重レーン載荷の検討

### 2. 1 検討内容

前章の1. に示した7種類の解析モデル（格子非合成モデル、格子合成モデル、FEMモデルA、FEMモデルB、FEMモデルC、一定せん断流パネルモデルA、一定せん断流パネルモデルB）を用いて、T荷重によるレーン載荷（移動載荷）をシミュレーションし、それぞれのT荷重の位置に対して、支間中央および中間支点部の各部位における直応力およびたわみの変動を検討する。また、T荷重のレーン載荷によって算出される着目部位の最大応力範囲 $\Delta\sigma$ について検討する。

図-付-2.2.1にT荷重の載荷レーンを示し、図-付-2.2.2に着目位置および着目量を示す。

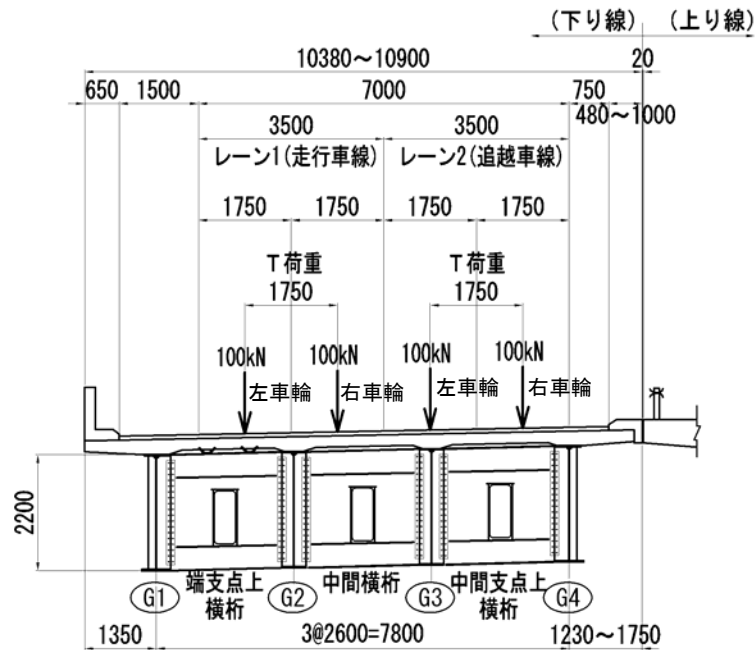
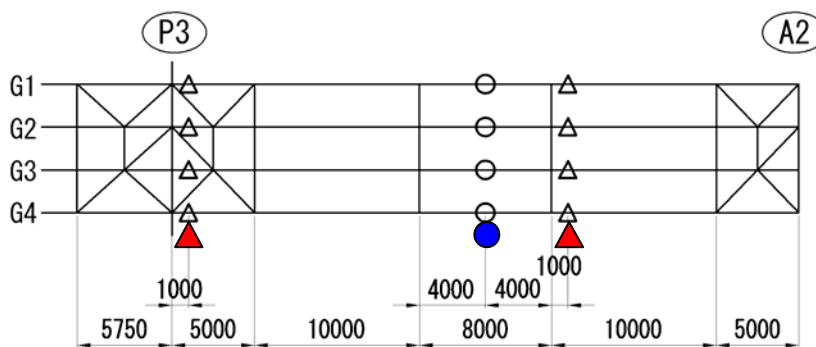


図-付-2.2.1 T荷重の載荷レーン

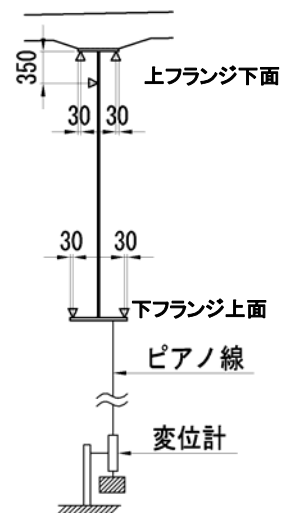
○：鉛直変位

△：橋軸方向直応力 $\sigma_x$



※前章までの静的載荷試験の着目と同位置

図-付-2.2.2 着目位置と着目量



## 2. 2 検討結果

### (1) G4 桁下フランジ直応力の影響面と影響線

G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  に対する影響線と影響面を以下に示す。

#### (a) 格子非合成モデル

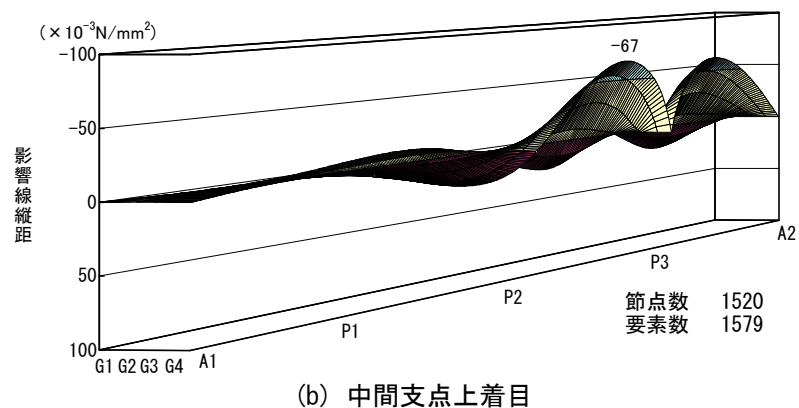
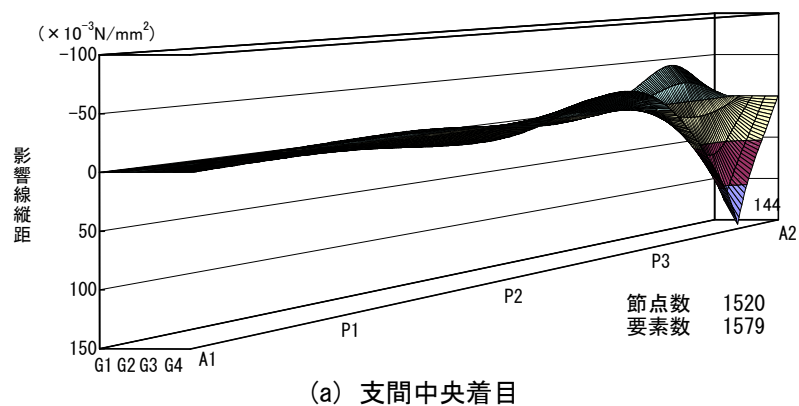


図-付-2. 2. 3 格子非合成モデルによる G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面

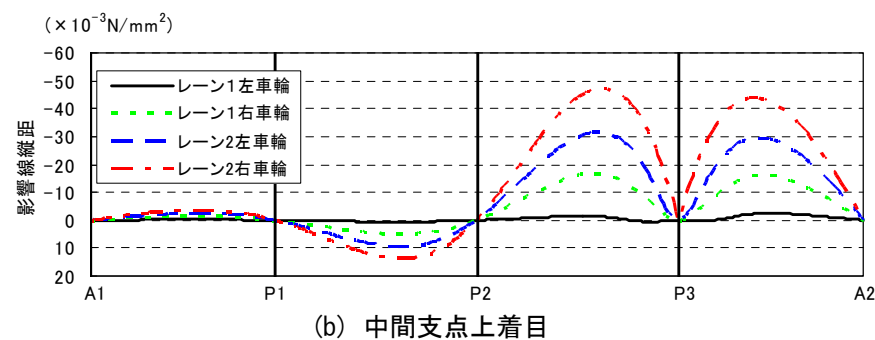
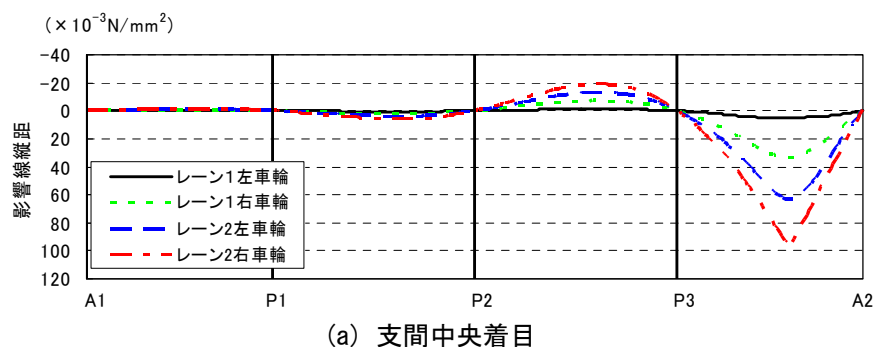


図-付-2. 2. 4 格子非合成モデルによる G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

(b) 格子合成モデル

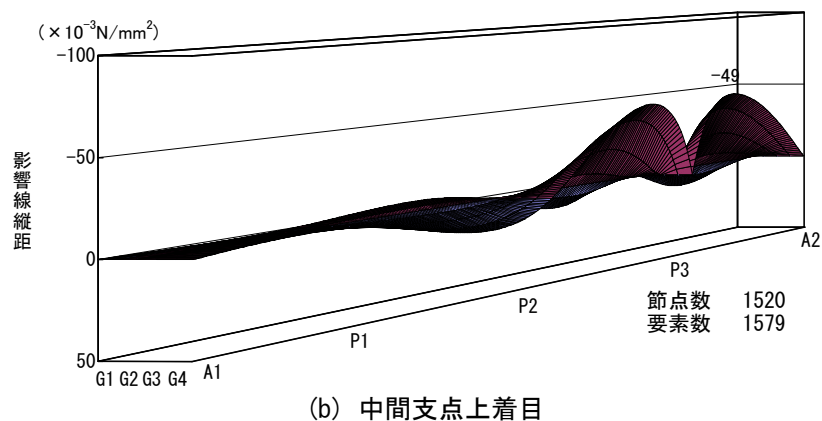
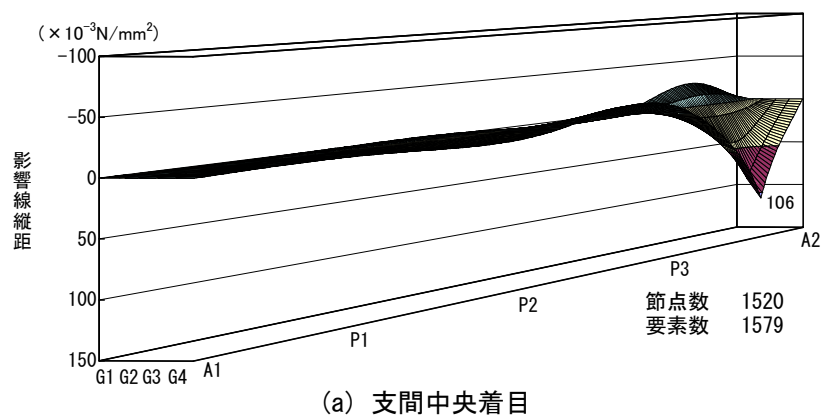


図-付-2.2.5 格子合成モデルによる G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面

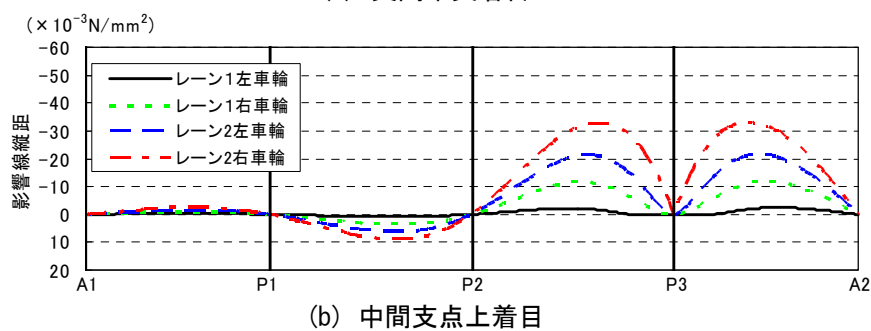
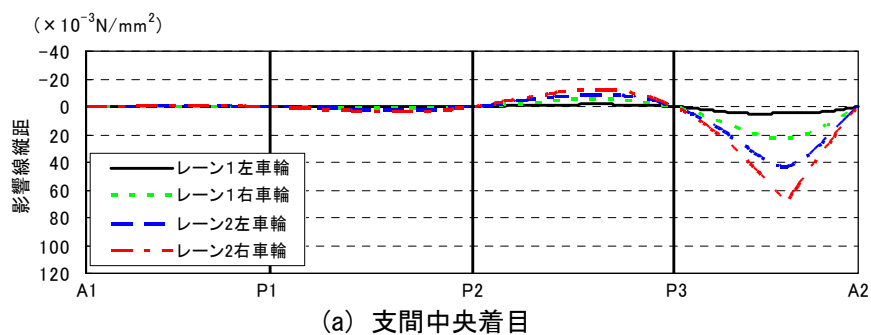


図-付-2.2.6 格子合成モデルによる G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

(c) FEM モデル A

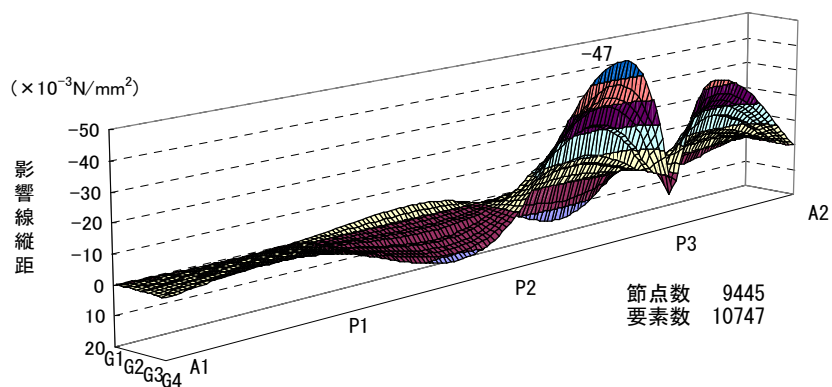
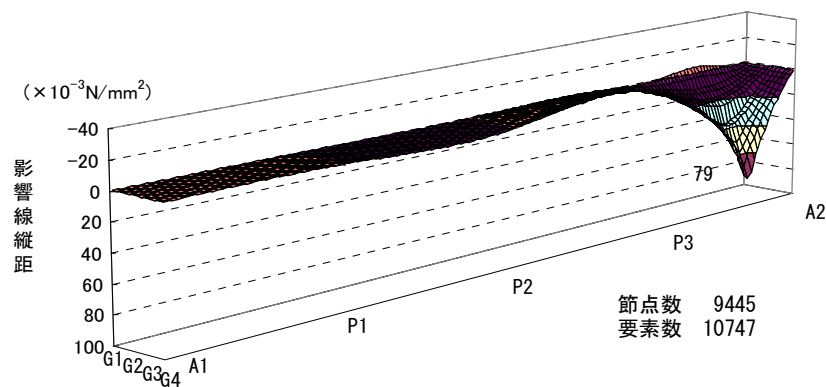


図-付-2.2.7 FEM モデル A による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面

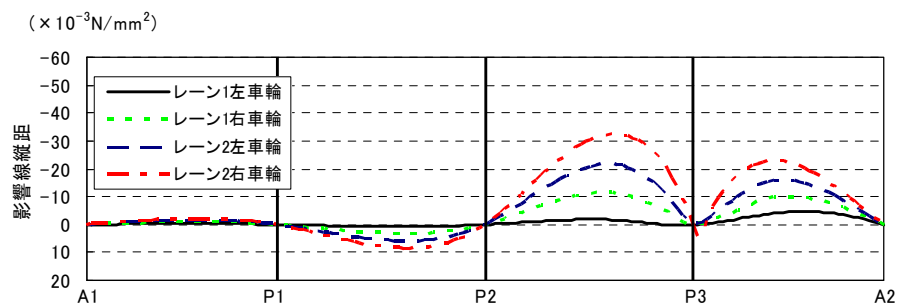
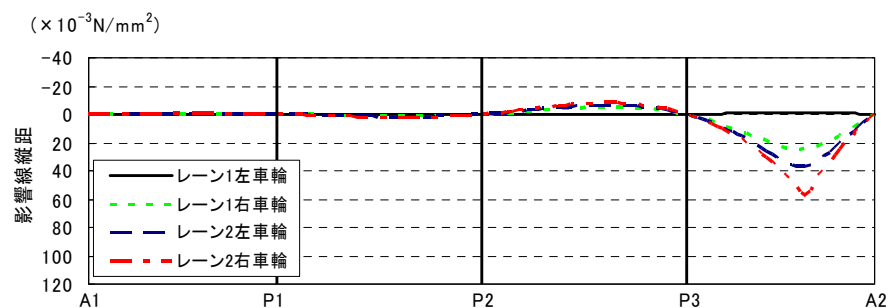
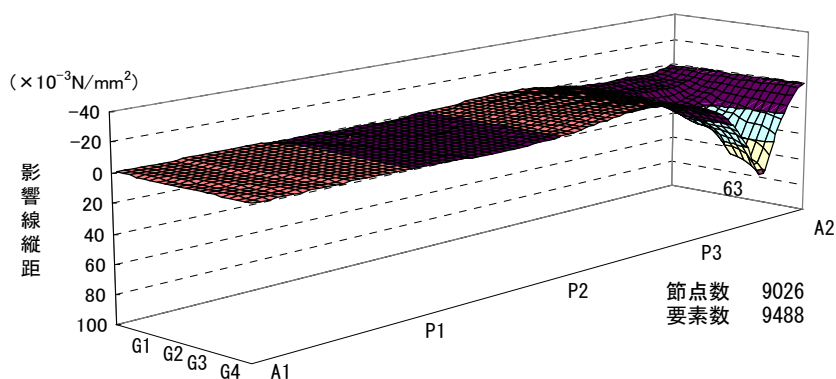
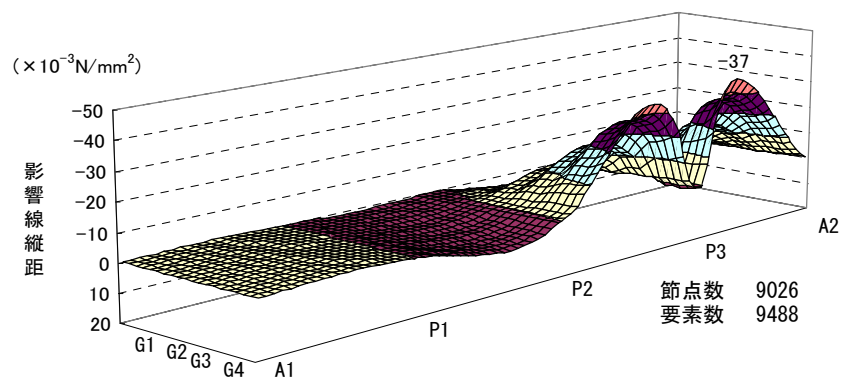


図-付-2.2.8 FEM モデル A による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

(d) FEM モデル B

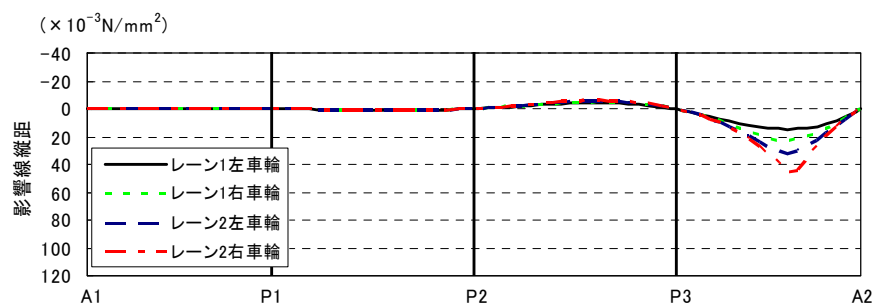


(a) 支間中央着目

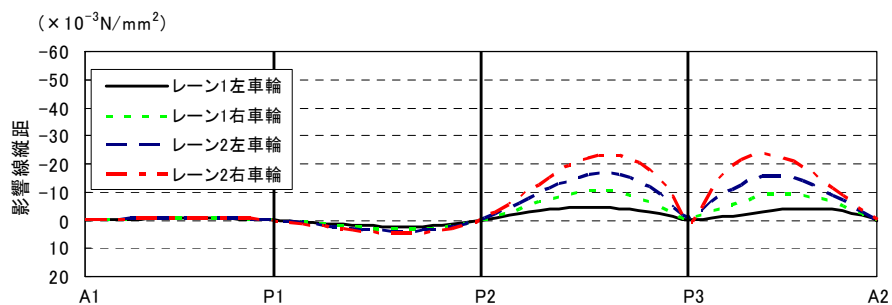


(b) 中間支点上着目

図-付-2.2.9 FEM モデル B による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面



(a) 支間中央着目



(b) 中間支点上着目

図-付-2.2.10 FEM モデル B による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

(e) 一定せん断流パネルモデル A

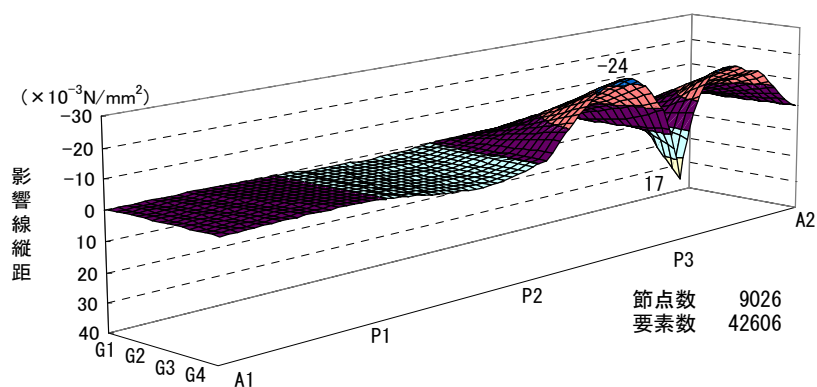
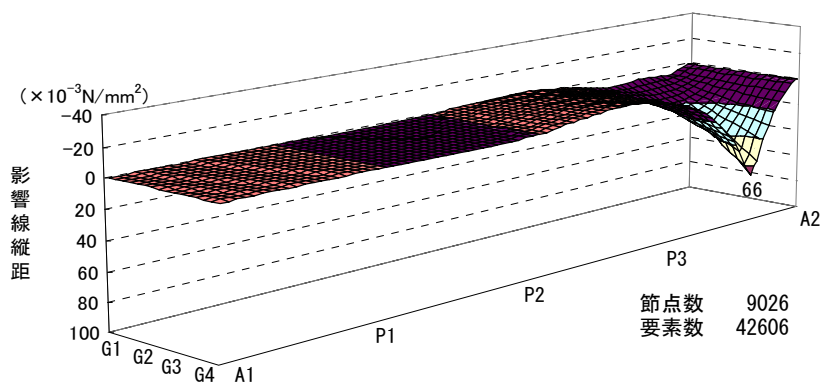


図-付-2.2.11 一定せん断流パネルモデル A による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面

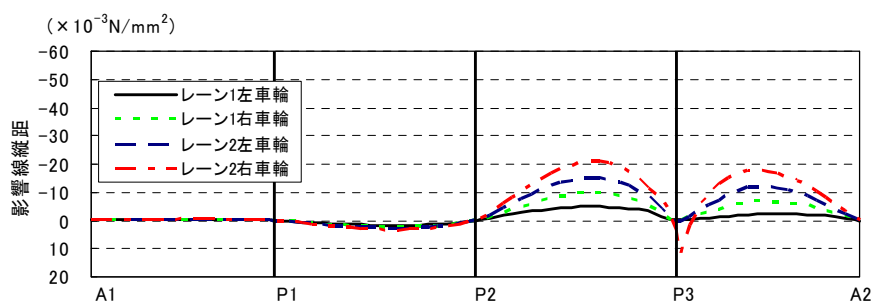
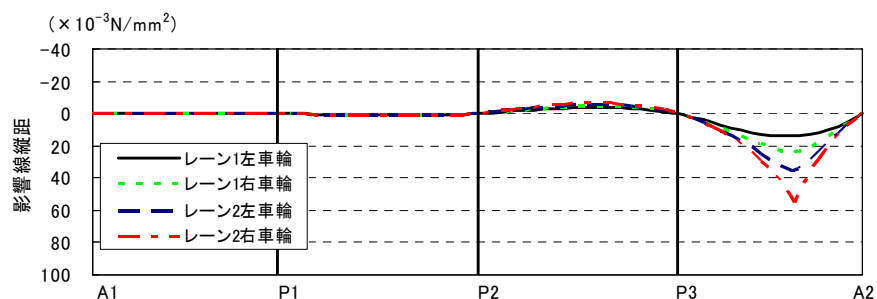


図-付-2.2.12 一定せん断流パネルモデル A による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

(f) 一定せん断流パネルモデル B

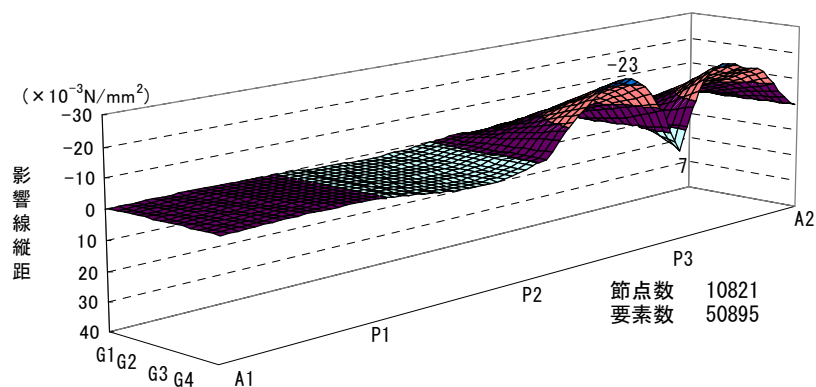
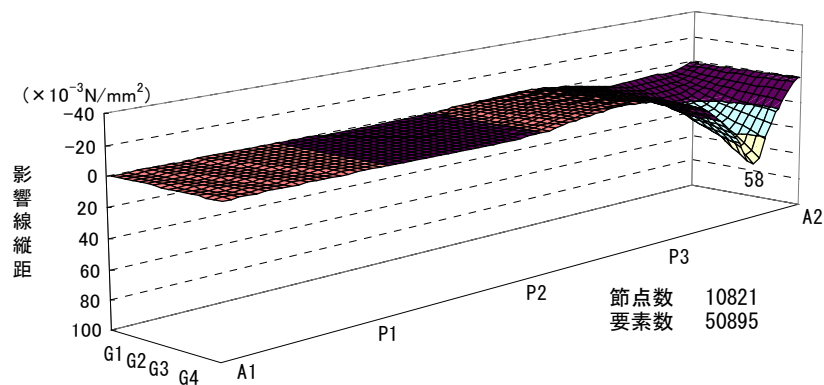


図-付-2.2.13 一定せん断流パネルモデル B による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響面

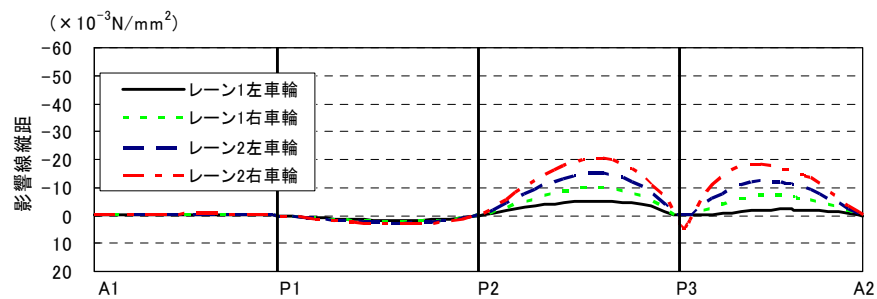
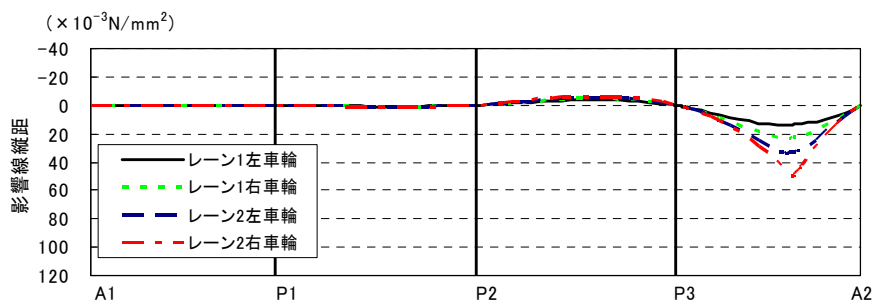


図-付-2.2.14 一定せん断流パネルモデル B による G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  の影響線

## (2) 各解析モデルの G4 桁下フランジの直応力の影響線比較

G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  着目におけるレーン 2 右車輪位置の影響線を各解析モデルで比較したものを以下に示す。

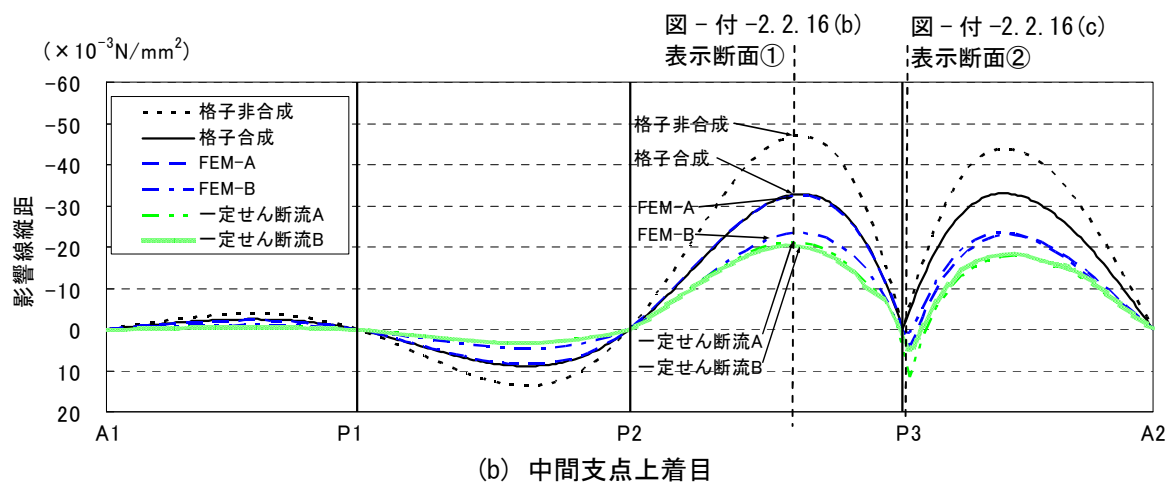
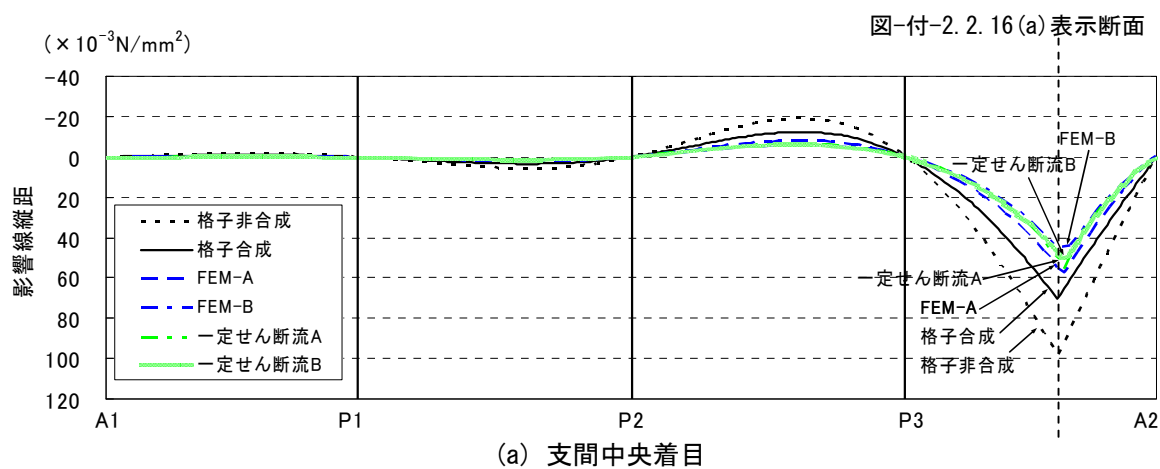


図-付-2. 2. 15 G4 桁下フランジ直応力  $\sigma_x$  着目におけるレーン 2 右車輪位置の影響線比較

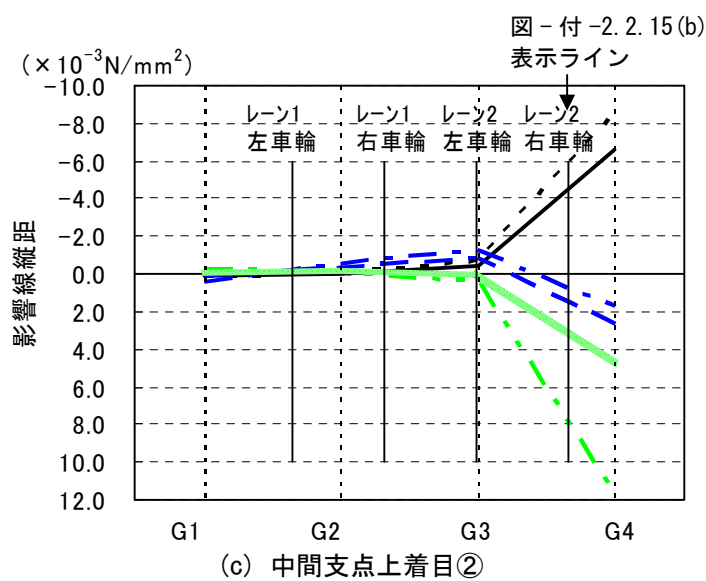
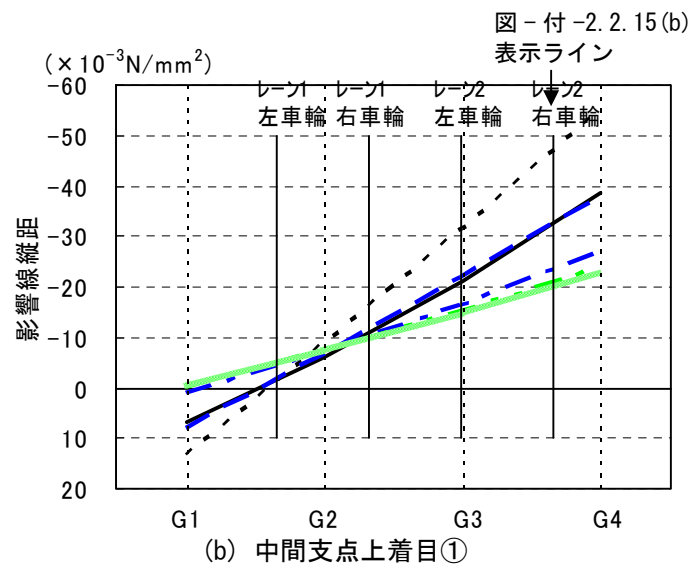
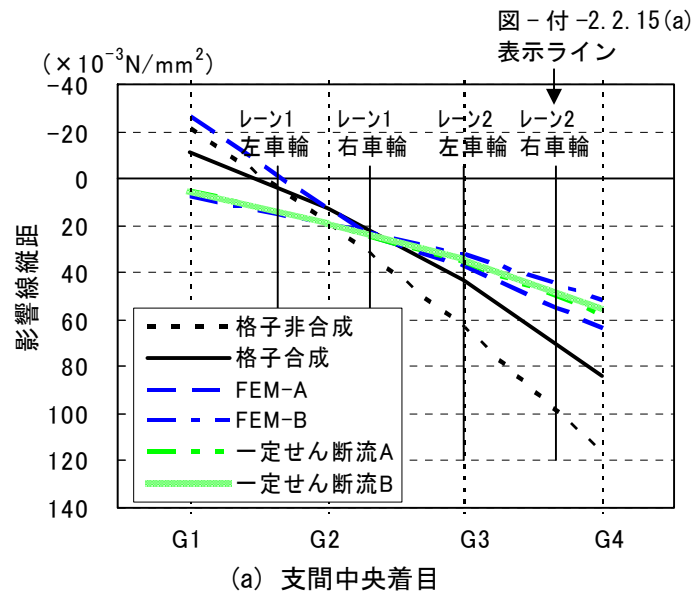


図-付-2.2.16 G4 桁下フランジ $\sigma_x$  着目における幅員方向の影響線比較

### (3) G4 桁下フランジの最大応力範囲

G4 桁下フランジにおける応力の最大値、最小値、最大応力範囲の結果一覧を以下に示す。

表-付-2.2.1 G4 桁下フランジの最大応力

|               | 支間中央着目     |             | 中間支点上着目    |            |
|---------------|------------|-------------|------------|------------|
|               | レーン1       | レーン2        | レーン1       | レーン2       |
| 格子非合成モデル      | 3.8 (0.99) | 16.1 (1.83) | 0.5 (0.97) | 2.3 (2.31) |
| 格子合成モデル       | 2.8 (0.72) | 11.3 (1.29) | 0.4 (0.79) | 1.5 (1.53) |
| FEMモデルA       | 2.5 (0.65) | 9.5 (1.07)  | 0.4 (0.75) | 1.4 (1.45) |
| FEMモデルB       | 3.7 (0.97) | 7.7 (0.87)  | 0.5 (0.96) | 0.9 (0.86) |
| FEMモデルC       | 3.9 —      | 8.8 —       | 0.6 —      | 1.0 —      |
| 一定せん断流パネルモデルA | 3.8 (0.99) | 9.0 (1.02)  | 0.4 (0.71) | 1.2 (1.22) |
| 一定せん断流パネルモデルB | 3.7 (0.97) | 8.3 (0.95)  | 0.4 (0.72) | 0.6 (0.59) |

表-付-2.2.2 G4 桁下フランジの最小応力

|               | 支間中央着目      |             | 中間支点上着目     |             |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|               | レーン1        | レーン2        | レーン1        | レーン2        |
| 格子非合成モデル      | -0.9 (0.90) | -3.2 (2.52) | -1.9 (1.38) | -7.9 (1.92) |
| 格子合成モデル       | -0.7 (0.74) | -2.1 (1.66) | -1.4 (1.05) | -5.4 (1.33) |
| FEMモデルA       | -0.7 (0.69) | -1.5 (1.17) | -1.6 (1.20) | -5.4 (1.33) |
| FEMモデルB       | -0.9 (0.97) | -1.1 (0.90) | -1.5 (1.11) | -4.0 (0.98) |
| FEMモデルC       | -1.0 —      | -1.3 —      | -1.4 —      | -4.1 —      |
| 一定せん断流パネルモデルA | -0.8 (0.89) | -1.2 (0.96) | -1.5 (1.10) | -3.6 (0.89) |
| 一定せん断流パネルモデルB | -0.8 (0.89) | -1.2 (0.94) | -1.5 (1.12) | -3.6 (0.87) |

表-付-2.2.3 G4 桁下フランジの最大応力範囲

|               | 支間中央着目     |             | 中間支点上着目    |             |
|---------------|------------|-------------|------------|-------------|
|               | レーン1       | レーン2        | レーン1       | レーン2        |
| 格子非合成モデル      | 4.7 (0.98) | 19.4 (1.92) | 2.4 (1.26) | 10.1 (1.98) |
| 格子合成モデル       | 3.5 (0.73) | 13.5 (1.34) | 1.9 (1.00) | 6.9 (1.35)  |
| FEMモデルA       | 3.2 (0.66) | 11.0 (1.09) | 2.0 (1.07) | 6.9 (1.35)  |
| FEMモデルB       | 4.7 (0.97) | 8.8 (0.88)  | 2.1 (1.08) | 4.9 (0.95)  |
| FEMモデルC       | 4.8 —      | 10.1 —      | 1.9 —      | 5.1 —       |
| 一定せん断流パネルモデルA | 4.7 (0.97) | 10.3 (1.02) | 1.9 (1.00) | 4.8 (0.95)  |
| 一定せん断流パネルモデルB | 4.6 (0.95) | 9.5 (0.94)  | 1.9 (1.01) | 4.1 (0.81)  |

※1：( ) 内の値は FEM モデル C に対する比率

※2：変動応力に関する各補正（活荷重の補正、衝撃の影響、構造解析係数）は行っていない。

#### (4) G4 桁支間中央たわみの影響線

G4 桁支間中央たわみ着目の影響線を以下に示す。

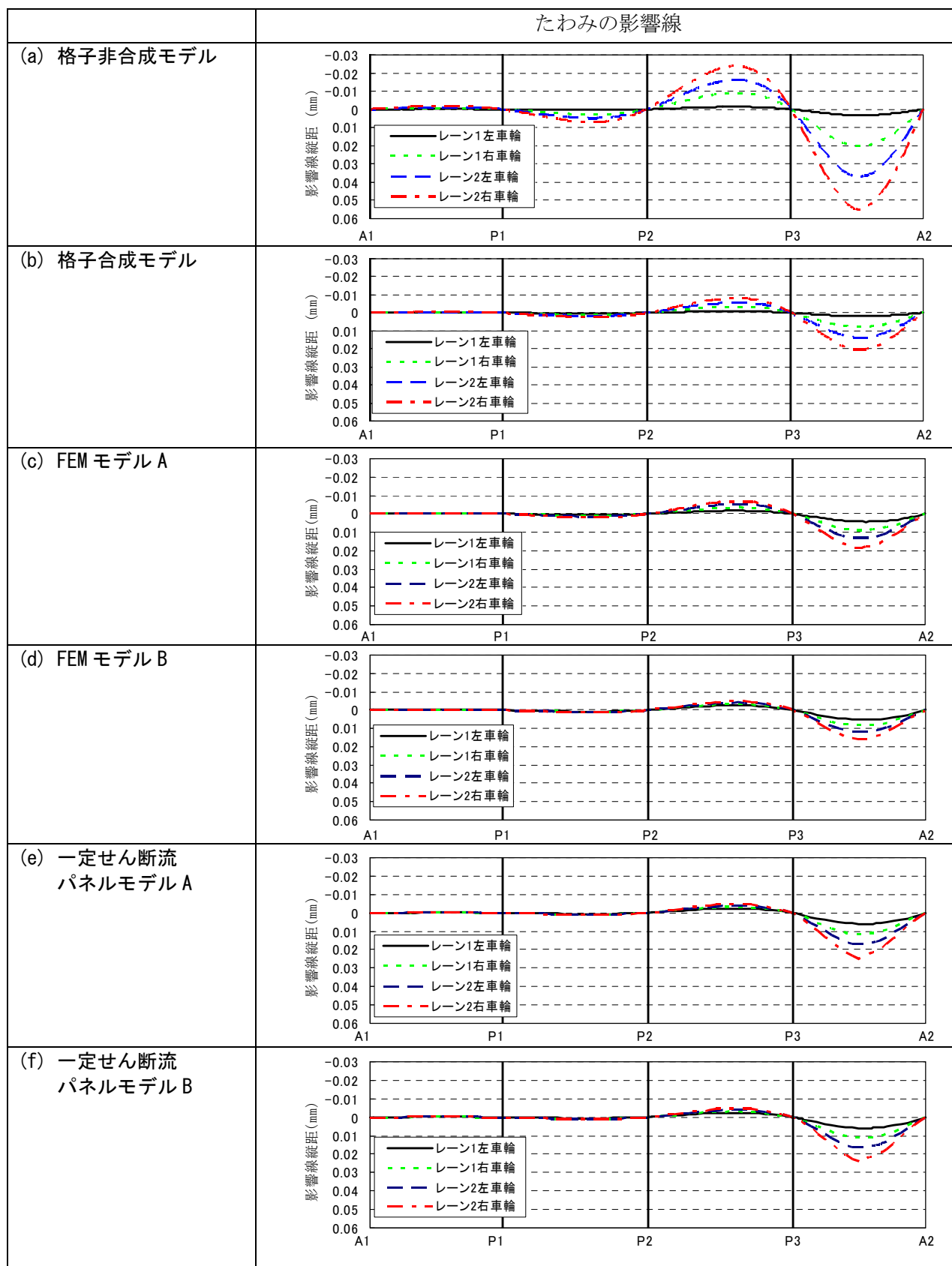


図-付-2.2.17 G4 桁支間中央たわみの影響線

(5) 各解析モデルの G4 桁支間中央たわみの影響線比較

G4 桁支間中央たわみ着目におけるレーン 2 右車輪位置の影響線を各解析モデルで比較したものを以下に示す。

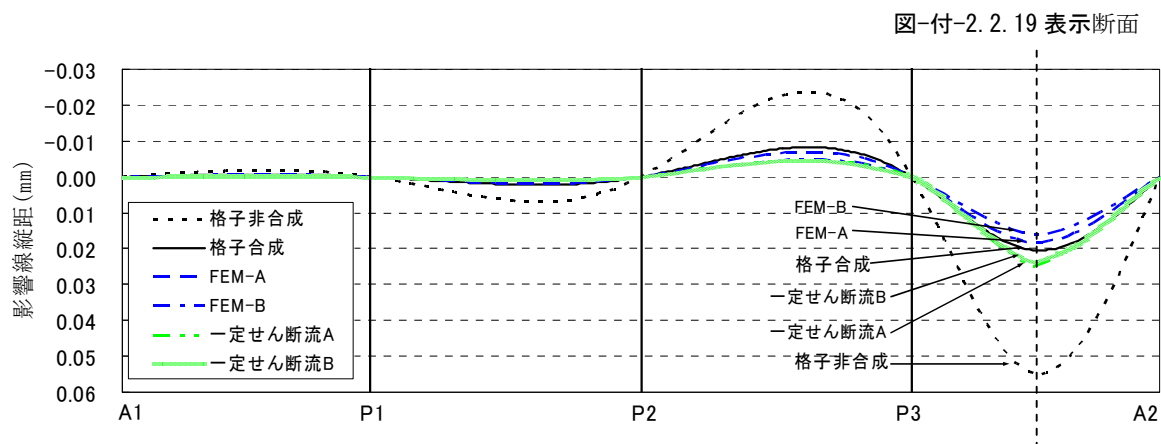


図-付-2.2.18 G4 桁支間中央たわみ着目におけるレーン 2 右車輪位置の影響線比較

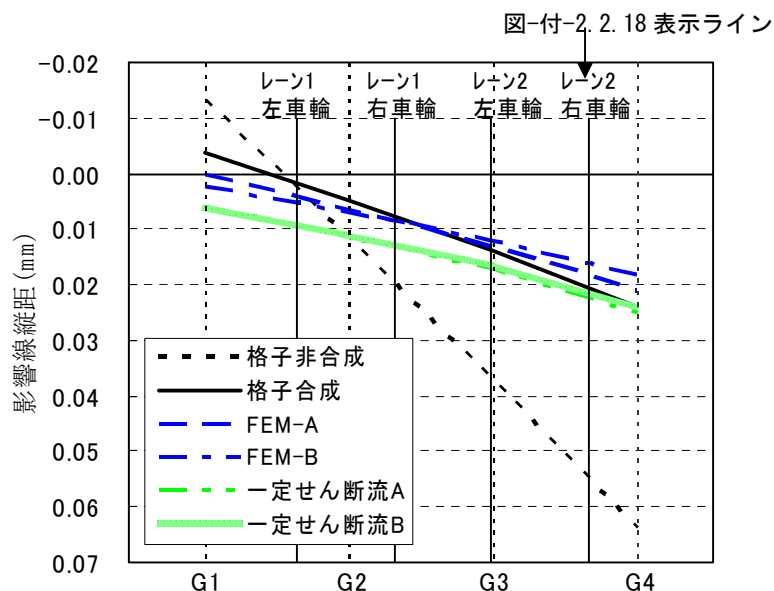


図-付-2.2.19 G4 桁支間中央たわみ着目における幅員方向の影響線比較

## 2. 3 検討結果

検討結果を以下に示す。

### (1) 格子非合成モデルについて

トラック車両を複数台載荷した前章 1. の検討結果と同様に、床版の合成作用を無視した格子非合成モデルでは他の解析モデルに比べて応力が大きい傾向が見られる。最大応力範囲を FEM モデル C と比較すると、レーン 1 では 0.98～1.26 倍と近いが、レーン 2 では 1.92～1.98 倍と差が大きい。

### (2) 格子合成モデルについて

格子合成モデルの応力は格子非合成モデルの場合より減少する。最大応力範囲を FEM モデル C と比較すると、レーン 1 では 0.73～1.00 倍と近いが、レーン 2 では 1.34～1.35 倍と差が大きい。

### (3) FEM モデル A, B, C について

FEM モデル B, C の最大応力範囲は比較的近い結果となっているが、FEM モデル A では中間支点上着目の影響線において P2～P3 支間のピーク値と P3～A2 支間のピーク値に差が見られ、この影響でレーン 2 の最大応力範囲は FEM モデル C の 1.35 倍と差が大きい。

### (4) 一定せん断流パネルモデル A, B について

- ・一定せん断流パネルモデル A, B の最大応力範囲を比較すると、要素分割の細かいモデル B の方が最大応力範囲は小さくなる傾向が見られるものの、顕著な差ではない。
- ・一定せん断流パネルモデルの最大応力範囲は、FEM モデル C と比較して 0.81～1.02 倍と近く、一定せん断流パネルモデルを用いれば、FEM モデル C と同程度の精度が得られるといえる。
- ・図-付-2. 2. 16(c)に示すとおり、中間支点上近傍の G4 桁下フランジ  $\sigma_x$  は、FEM モデルと一定せん断流パネルモデルでは引張応力となっており、これは下フランジの板曲げの影響と考えられる。この板曲げ応力は FEM モデルよりも一定せん断流パネルモデルの方が大きくなる傾向が認められる。
- ・G4 桁の支間中央たわみ着目の影響線比較では、トラック車両を複数台載荷した前章 1. の検討結果と同様に、一定せん断流パネルモデルのたわみは FEM モデルより大きくなる傾向が見られる。

**【付属参考文献】**

- 1) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 木内耕治: 道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研究—一定せん断流パネルを用いた解析法の検討—, 国土技術政策総合研究所資料, 第 296 号, 2006.1.
- 2) 尾下里治, 江川定利: 鋼床版合形式橋梁の解析方法に関する一提案, 土木学会論文集, No.516 /VI-27, pp.197-206, 1995.6.
- 3) 結城洋一・尾下里治: 一定せん断流パネルを用いた合成桁の床版解析の検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, I -578, 2005.9.
- 4) (株)横河技術情報: 鋼橋自動設計製図システム APOLLO, 立体構造解析システム Analyzer, Ver2.29.0.0, オンラインヘルプ, 2006.5.19.

---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4047 April 2007

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754