

土 木 研 究 所 資 料

部材応力の長期計測による鋼橋モニタリングに関する検討

平成16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構造チーム

Copyright © (2004) 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。

部材応力の長期計測による鋼橋モニタリングに関する検討

構造物研究グループ	橋梁構造チーム	上席研究員	村越 潤
		主任研究員	麓 興一郎
		研 究 員	高木 伸也※
		研 究 員	能勢 和彦
		交流研究員	次村 英毅※※

要旨

鋼道路橋の部材応力や変位等の実橋計測については、これまでも数多くの調査研究が行われており、例えば、荷重車による静的・動的挙動計測や交通供用下での応力頻度計測等の結果は橋梁の状態診断に広く活用されている。ただし、長期連続モニタリングで取得されるデータの橋梁の状態の経時変化把握への活用といった点に関しては、変状の監視可能性や維持管理における現場ニーズ等検討しておくべき課題は多い。

本資料では鋼橋の維持管理支援へのモニタリング技術の適用性についての基礎検討として、実橋での 1 年間の応力、変位等の計測データを基に経時的な変状や供用状態の変化の把握への適用性について検討した結果について報告する。

キーワード：鋼橋、モニタリング、ひずみ、応力、変位、応力頻度

※ 現 国土交通省 関東地方整備局

※※ 現 ㈱ドーコン（交流研究員在職期間 平成 14 年 4 月から平成 16 年 3 月）

はじめに

過去に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進展していく中で、これらの橋梁を健全な状態で適切に維持管理していくために、構造物の状態を定量的、かつ効率的に把握、評価するための点検・診断技術が求められている。

モニタリング技術とは、対象物にセンサを設置し、ひずみ、振動等の物理量を長期間測定し、分析することによって、対象物の状態変化を捉えようとするものであり、これまでも多くの調査研究が行われており¹⁾³⁾、既に長大橋の動態観測⁴⁾等様々な形で活用されている。しかしながら、大半を占める中小規模の橋梁に対して、目視主体の橋梁点検等の維持管理業務を支援する観点からのモニタリング技術の適用性や活用方法については必ずしも十分に整理されているわけではない。これらの技術を維持管理のどの場面で、どのように適用するのかといった点について十分検討した上で、維持管理の中での位置付けを整理しておくことが必要と考えられる。

中小規模の鋼道路橋においても、荷重車による静的・動的挙動計測や交通供用下での応力頻度計測等は数多く行われており、計測結果は橋梁の状態診断等の基礎データとして広く活用されている。ただし、長期連続モニタリングで取得されるデータの橋梁の状態の経時変化把握への活用といった点に関しては、変状の監視可能性や維持管理における現場ニーズ等検討しておくべき課題は多い。

本資料では、橋梁各部の応力のモニタリングを主な対象として、経時的な変状や供用状態の変化の把握への適用性についての基礎検討として、実橋での1年間の連続計測データを基に検討した結果について報告する。なお、供用中の橋梁を1～数年程度モニタリングしても、構造安全性に影響を与えるような変状を捉えモニタリングの適用性を評価することは困難に近い。ここでは、連続計測により得られる情報の利用可能性を探ることが重要と考え、そのような観点から種々のデータ整理、分析を試みた。

目 次

はじめに

1. 計測概要	1
2. 対象橋梁	2
3. 計測方法	4
4. 計測内容	9
4. 1 荷重車走行時の応力変動計測	9
4. 2 応力、変位及び温度の時間変動計測	9
5. 計測結果	10
5. 1 荷重車走行時の応力波形及び 72 時間応力頻度分布	10
5. 2 応力、変位、気温の時間・日変動	15
5. 3 応力、変位と気温の関係	19
5. 4 応力、変位、気温の 7 日間平均値	22
6. まとめ	23
参考文献	24
参考資料	25
参考資料－1 モニタリング技術の適用対象の整理	27
参考資料－2 荷重車走行時の各部位における応力波形	29
参考資料－3 主桁支間中央下フランジの等価応力範囲等の時間変動	44
参考資料－4 各部位における応力等の時間変動	46
参考資料－5 応力、変位と気温の関係	48
主な投稿論文	51

1. 計測概要

損傷が発見され損傷部位が特定された後の変状の進展性の監視や供用状態の変化の監視としてのモニタリングの限界や適用性を検討するために、実橋において 20ton 荷重車の動的載荷試験を実施するとともに、2003 年 2 月 26 日から 2004 年 2 月 25 日までの 1 年間、応力、気温、桁端変位等の長期計測（オフラインにより 1 ヶ月毎にデータを回収）を実施した。

なお、計測期間中、約 30 日間（7/21～7/26、8/9～8/27、9/3～9/5）は落雷等により電源が落ちてしまったために、5 日間（1/26～1/30）は計測ミスのためにデータが欠損している。

2. 対象橋梁

対象とした橋梁は、一般国道 17 号の鋼単純非合成 I 桁橋（関東地方整備局大宮国道工事事務所管内 備前渠橋）である。写真－1 に橋梁の状況、図－1 に一般図を示す。架設年次は平成 3 年（平成 2 年道路示方書適用）で、日大型車交通量は 5,288 台/車線（平成 11 年センサス調査結果）である。なお、橋下からの目視調査では、鋼部材、支承、床版に特に損傷や変状は確認されていない。



(a) 橋梁全景



(b) 桁下の状況

写真－1 計測対象とした橋梁

単位: mm

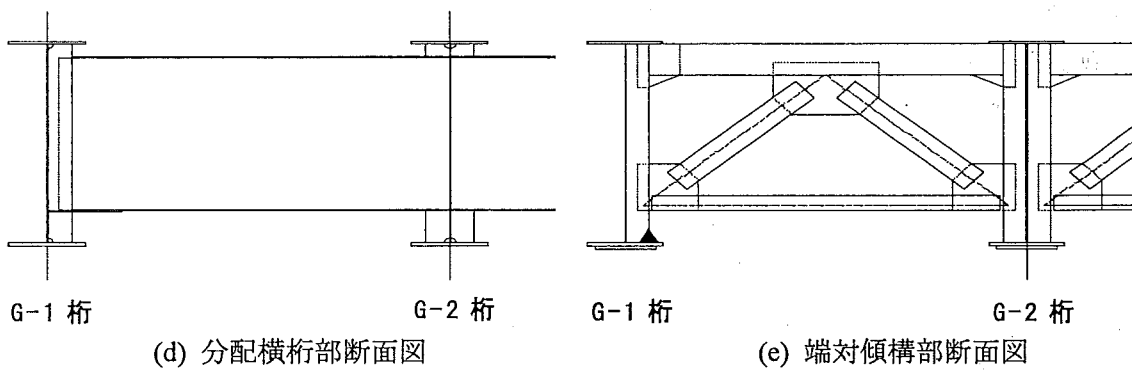
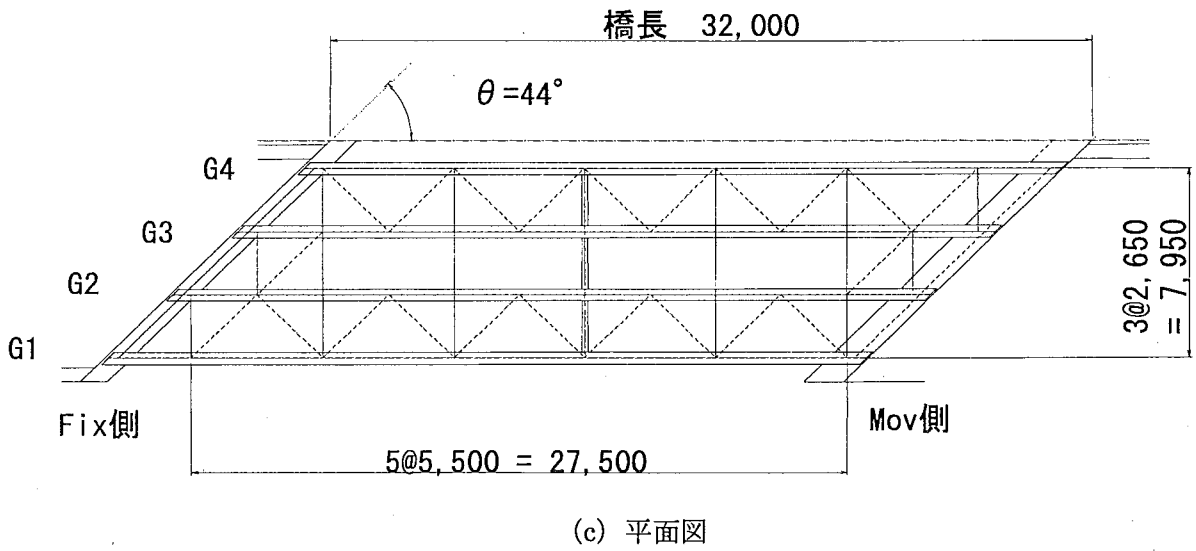
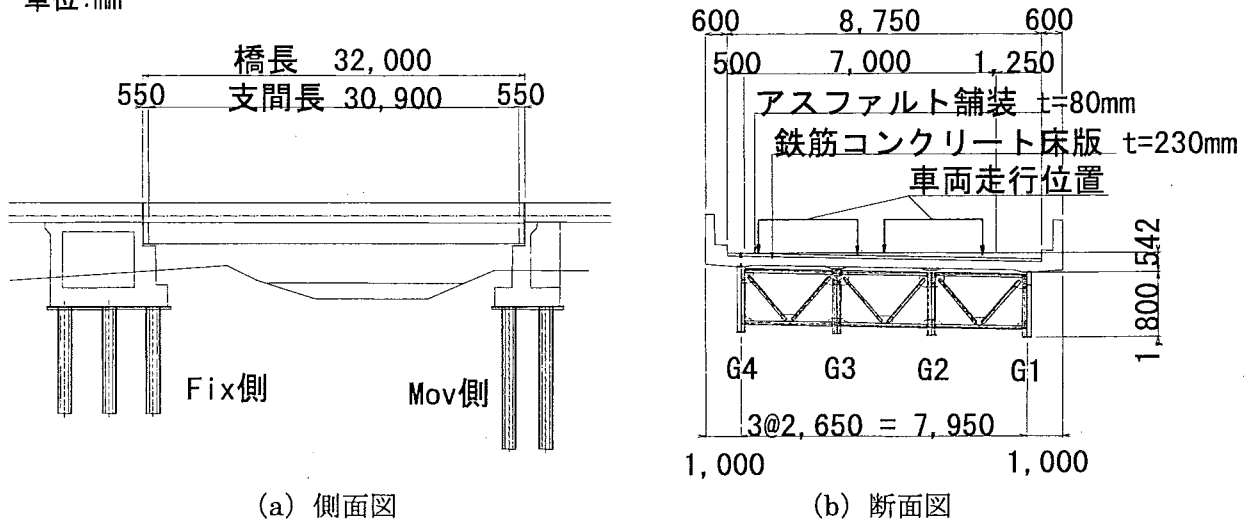


図-1 橋梁一般図

3. 計測方法

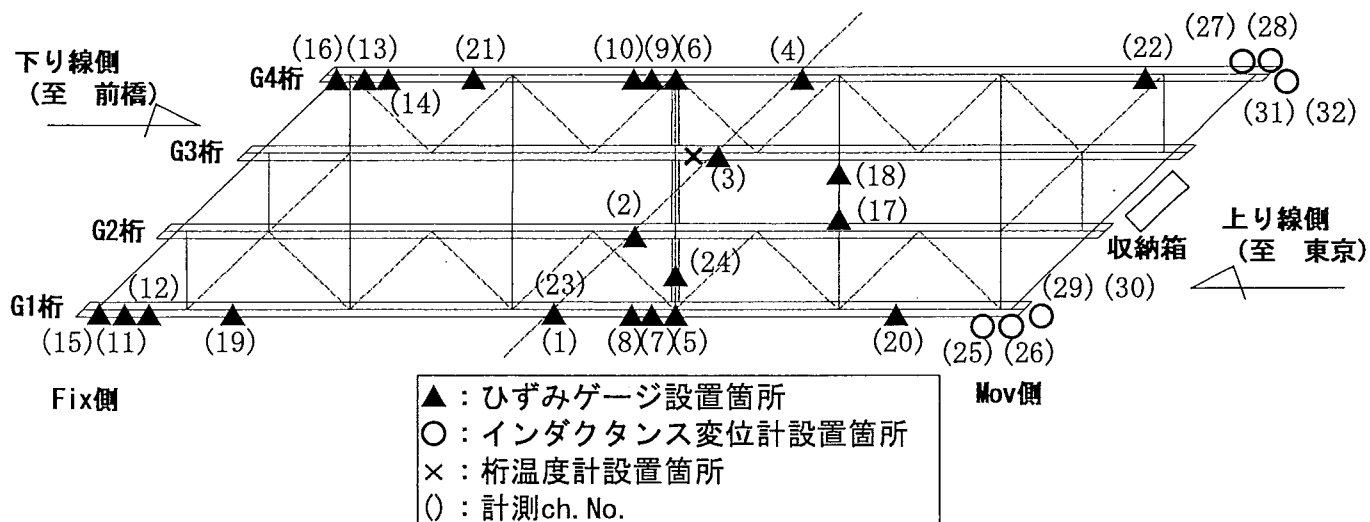
モニタリング対象としては、構造物の安全性や疲労耐久性の評価に直接的につなげられる物理量であるひずみ、変位を対象とした。また、温度変化に伴う応力変動を把握するために桁温度、気温も計測した。表－１に計測に使用した機器（橋梁に設置する機器）を示す。

また、図－２にひずみゲージ、変位計、鋼材（主桁）表面温度計測のための熱電対、温度計の設置位置を示す。図－３にセンサ設置位置の詳細を示す。表－２に各位置での測定項目を示す。ひずみゲージについては、主桁の挙動を把握するために主桁支間中央下フランジに貼付したほか、局部的に高い応力が想定され疲労の影響が考えられる部位に貼付した。また、G3 桁支間中央下フランジ上面において桁温度、気温を計測するとともに、G1、G4 桁の移動側支承周りにおいて桁変位を計測した。なお、商用電源（100V15A）及び取り出し用コンセントについては固定支承側（前橋側）の橋台上 G2－G3 桁間に事前に設置した。

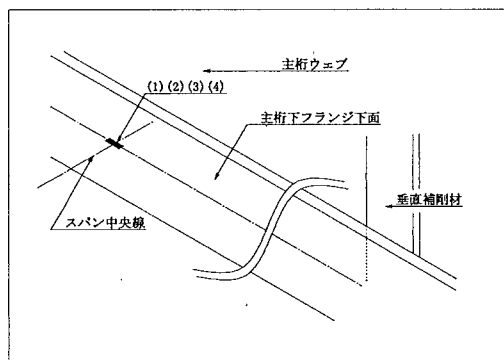
写真－２に収納箱内の計測機器の設置状況、及び支承部における計測機器の設置状況を示す。

表－１ 使用機器

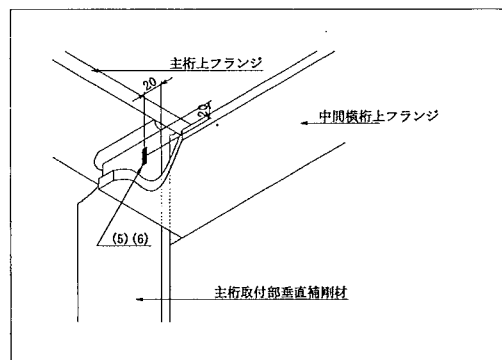
名称	数量	仕様等
ひずみゲージ（溶接型）	2	東京測器：ゲージ長 8mm ゲージ幅 1.2mm
ひずみゲージ（接着式）	18	東京測器：ゲージ長 8mm ゲージ幅 1.5mm
ひずみゲージ（接着式）	6	東京測器：ゲージ長 1mm ゲージ幅 1.5mm
変位計	8	東京測器：差動トランス型
熱電対	2	東京測器：シールド付
ブリッジボックス	26	共和電業：
延長ケーブル	25	4 芯－両端 NDIS プラグ付（20m/本）
ヒストグラムレコーダ	2	東京測器：
同 電源ボックス	1	東京測器：
同 制御プログラム	－	東京測器：
ノートパソコン	－	
インターフェイス	1	IEEE PC カード
データロガー	1	東京測器：
同 スイッチボックス	1	東京測器：20ch.用
収納箱	1	日東工業：L:1000mm、h:800mm、D:300mm 簡易型除湿器付属



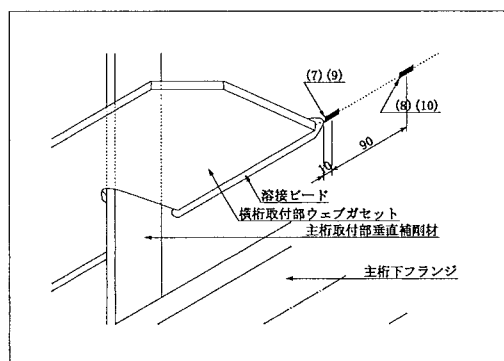
図ー2 センサ設置位置 (平面図)



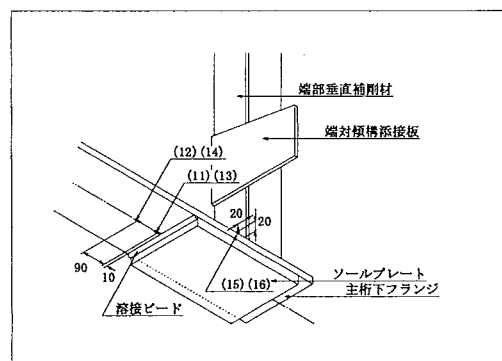
(a) 主桁支間中央下フランジ下面



(b) 横桁取付部垂直補剛材上端部

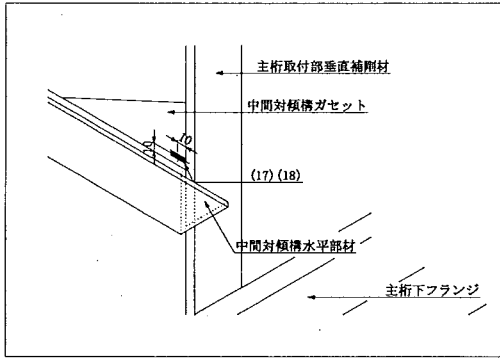


(c) 横桁取付部ウェブガセット

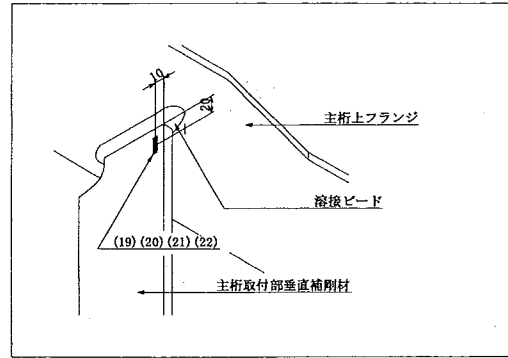


(d) 支承ソールプレート前面

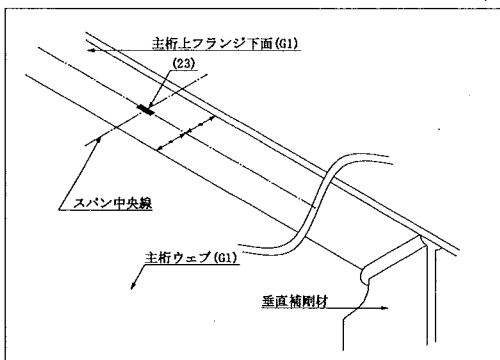
図ー3 センサ設置位置詳細



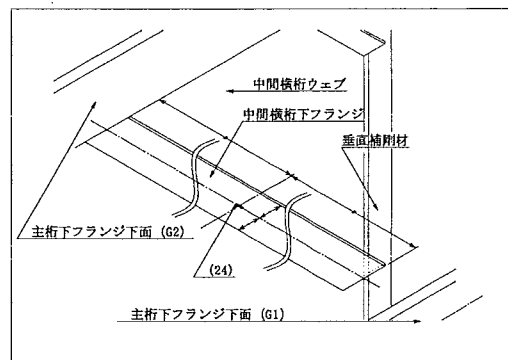
(e) 中間対傾構下側ガセット



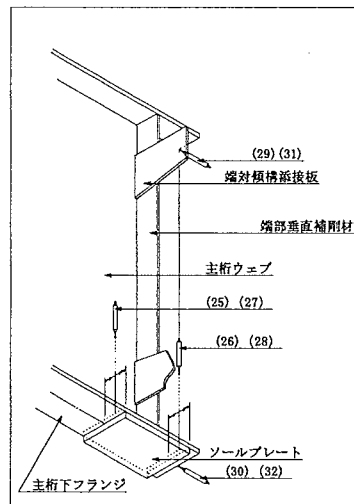
(f) 垂直補剛材上端部



(g) 支間中央上フランジ下面



(h) 中間横桁下フランジ下面

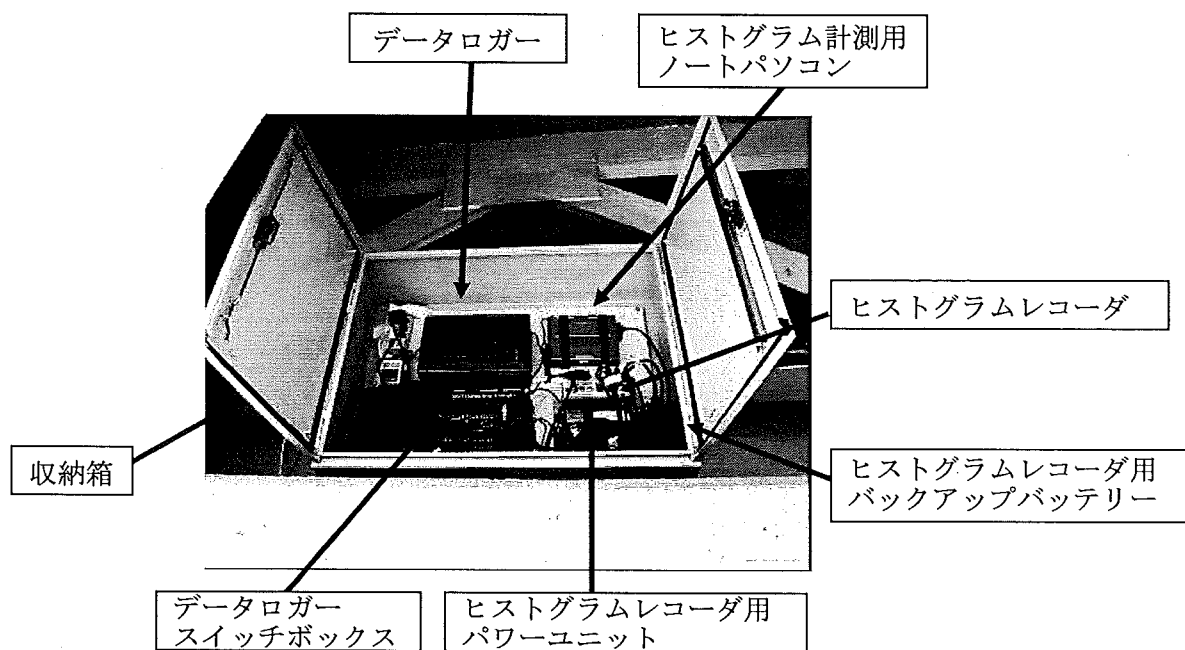


(i) 桁端部 (変位)

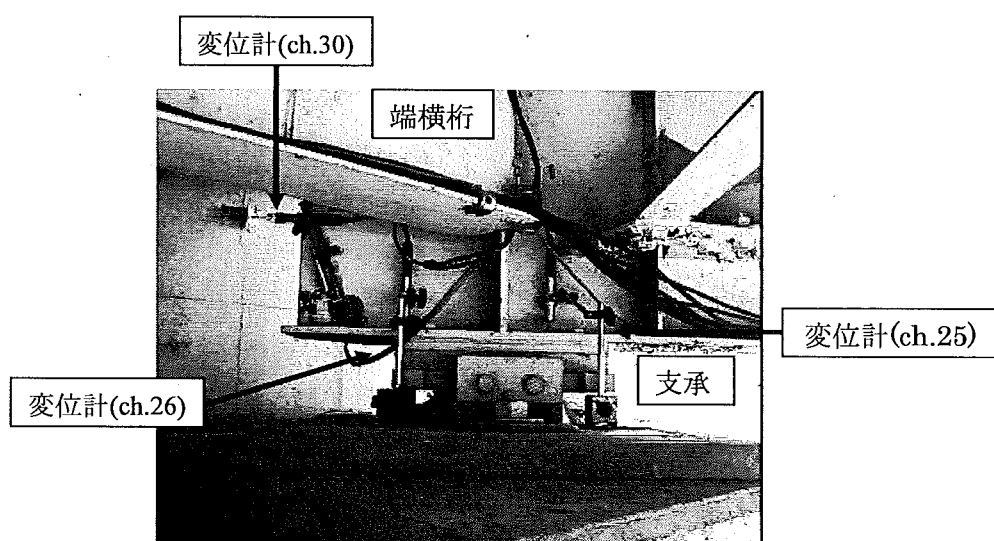
図-3 センサ設置位置詳細

表－２ ひずみ及び変位の測定位置

測定項目	測定 ch.No	測定位置
ひずみ	1	G1 桁 支間中央 下フランジ下面
	2	G2 桁 支間中央 下フランジ下面
	3	G3 桁 支間中央 下フランジ下面
	4	G4 桁 支間中央 下フランジ下面
	5	中間横桁 G1 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）
	6	中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）
	7	G1 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 10mm）
	8	G1 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 100mm）
	9	G4 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 10mm）
	10	G4 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 100mm）
	11	G1 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 10mm）
	12	G1 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 100mm）
	13	G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 10mm）
	14	G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 100mm）
	15	G1 桁 Fix 側支点上垂直補剛材下端部（止端より 20mm）
	16	G4 桁 Fix 側支点上垂直補剛材下端部（止端より 20mm）
	17	中間対傾構下側ガセット（G2 桁側）（止端より 10mm）
	18	中間対傾構下側ガセット（G3 桁側）（止端より 10mm）
	19	G1 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Fix 側）
	20	G1 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Mov 側）
	21	G4 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Fix 側）
	22	G4 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Mov 側）
	23	G1 桁 支間中央 上フランジ下面
	24	中間横桁下フランジ下面中央（G1～G2 桁間）
変位	25	G1 桁 Mov 側支点 下フランジソールプレート前面（鉛直方向）
	26	G1 桁 Mov 側支点 下フランジソールプレート後面（鉛直方向）
	27	G4 桁 Mov 側支点 下フランジソールプレート前面（鉛直方向）
	28	G4 桁 Mov 側支点 下フランジソールプレート後面（鉛直方向）
	29	G1 桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部（水平方向）
	30	G1 桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部（水平方向）
	31	G4 桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部（水平方向）
	32	G4 桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部（水平方向）



(a) 収納箱内



(b) 支承部

写真-2 計測機器の設置状況

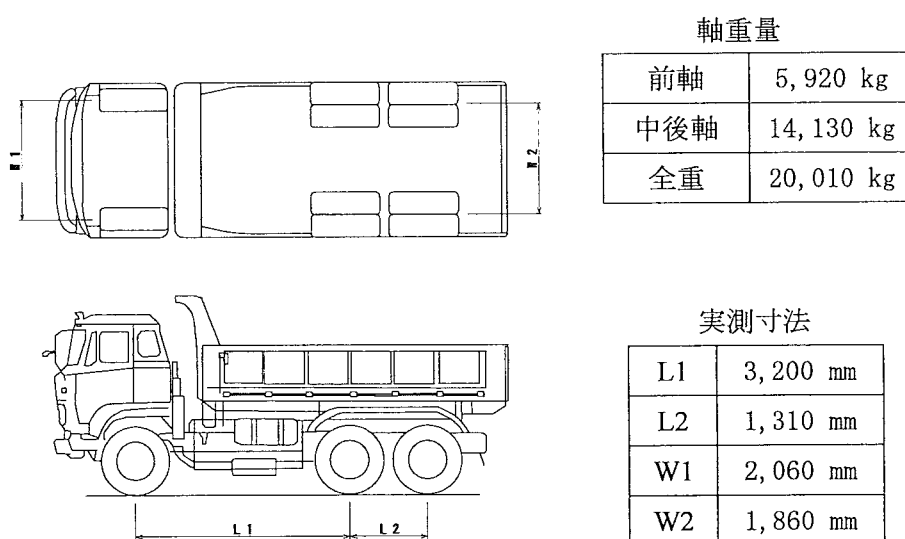
4. 計測内容

4. 1 荷重車走行時の応力変動計測

20ton 荷重車（ダンプトラック：前軸 5.9ton、後タンデム軸 14.1ton、図－4）を上下各車線に速度（60km/h と 40km/h）を変えてそれぞれ 2 回ずつ、計 8 回(2×2×2)単独走行させ、その際の各部の応力波形を計測した。

4. 2 応力、変位及び温度の時間変動計測

交通供用下における、各部の応力、桁端変位、温度の計測を実施した。応力については、レインフロー法（時刻歴波形より応力範囲を計数）及びタイム法（時刻歴波形より 0.005 秒毎に応力を計数）により 1 時間単位の応力頻度分布として計測し、これより時間または日単位の平均応力（以下、それぞれ時間平均応力、日平均応力と言う。）と等価応力範囲（3 乗平均値の 3 乗根）を算出した。桁変位及び温度については、20 分間毎に計測を行った。また、得られた応力頻度分布より、各部位における疲労の影響を概略把握するための参考値として、修正マイナー則を用いて疲労損傷度を算出した。



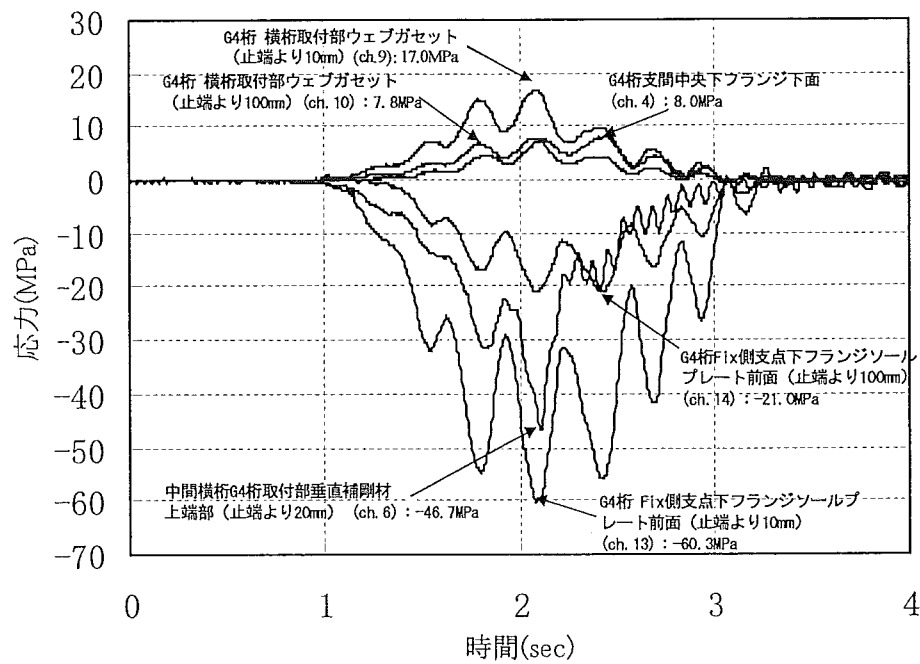
図－4 荷重車の諸元

5. 計測結果

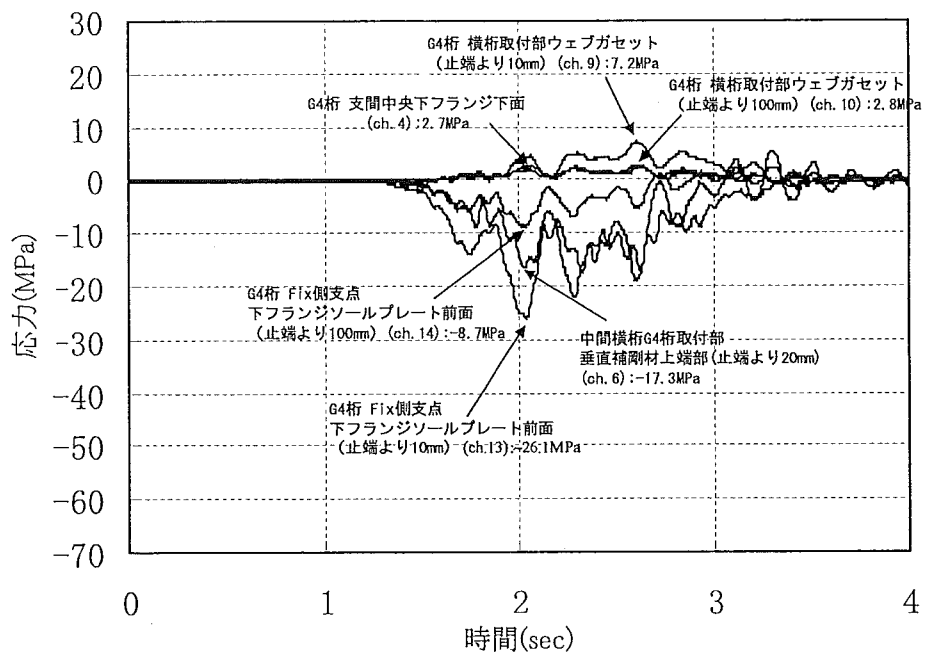
5. 1 荷重車走行時の応力波形及び 72 時間応力頻度分布

図－5 に荷重車が下り、及び上り車線（G4 桁側、及び G1 桁側）を 60km/h で走行した場合の主な部位の応力波形を示す。また、表－3 に荷重車走行時の 24 箇所の応力波形から求めた応力の最大値、最小値を示す。

図－6 に平日 3 日間（2/26～2/28）の応力頻度分布例を示す。これまでに損傷事例が報告されている部位において、溶接止端から 10mm の位置を基本に計測したが、ソールプレート前面（止端より 10mm）(ch.13)と中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）(ch.6)において比較的高い応力が生じている。計測値をホットスポット応力⁵⁾と仮定して、平日 3 日間の応力頻度を用いてソールプレート前面（止端より 10mm）(ch.13)、中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）(ch.6)（それぞれ E 等級、F 等級^{5) 6)}と仮定）の 50 年間疲労損傷度（3 日間の応力が 50 年間作用すると仮定）を計算すると、それぞれ 18、14 であり、今回計測した部位の中では疲労上厳しい値となっている（表－4 参照）。また、応力頻度分布によると、20ton 荷重車載荷時の応力範囲に対して概ね最大 3～4 倍程度の応力範囲が生じている。



(a) 下り車線 60km/h 走行時

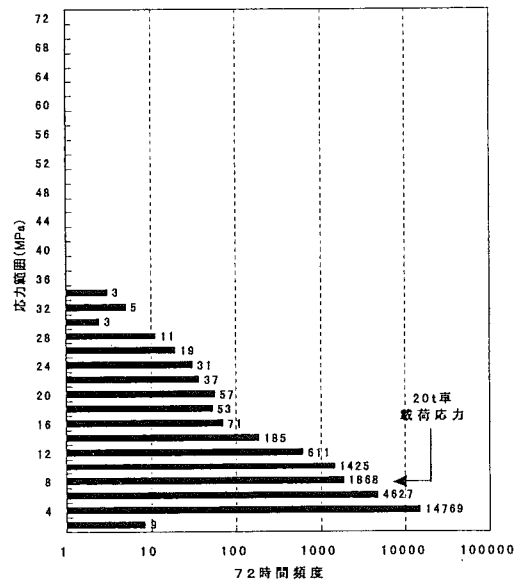


(b) 上り車線 60km/h 走行時

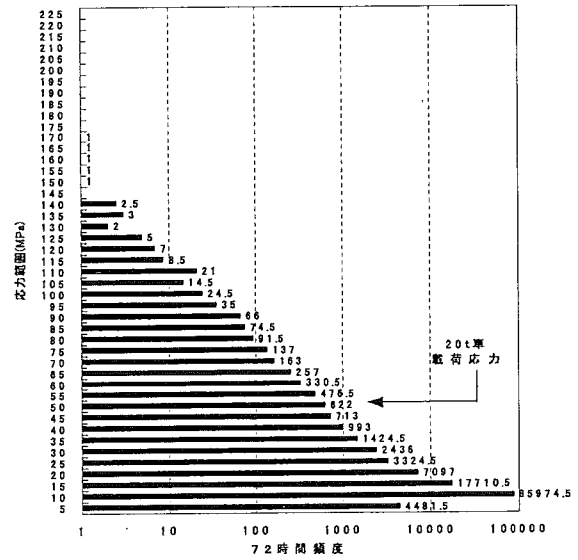
図-5 荷重車走行時の主な部位の応力波形

表－３ 荷重車走行試験における応力波形の最大値・最小値

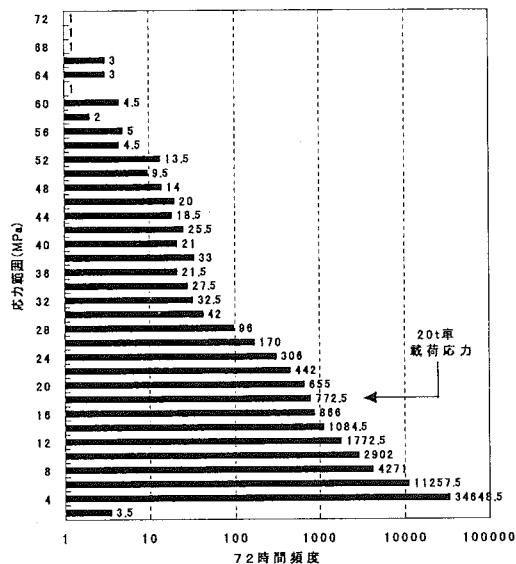
試験ケース 計測部位		上り車線荷重車走行試験				下り車線荷重車走行試験			
		60km/h		40km/h		60km/h		40km/h	
		2回目		2回目		2回目		2回目	
		最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)
計測 ch.No	計測部位名称								
1	G1 桁 支間中央 下フランジ下面	8.2	－0.7	6.4	－0.2	2.5	－0.4	2.2	－0.5
2	G2 桁 支間中央 下フランジ下面	8.7	－0.8	8.4	－0.5	4.7	－0.5	4.1	－0.6
3	G3 桁 支間中央 下フランジ下面	4.9	－0.4	4.4	－0.4	9.3	－0.5	8.2	－0.4
4	G4 桁 支間中央 下フランジ下面	2.7	－0.6	2.2	－0.3	8.0	－0.4	7.1	－0.3
5	中間横桁 G1 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）	0.5	－44.8	0.4	－43.7	1.3	－16.0	0.5	－14.3
6	中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部（止端より 20mm）	0.4	－17.3	0.2	－15.6	1.0	－46.7	0.5	－37.0
7	G1 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 10mm）	11.3	－1.0	10.3	－0.4	3.2	－1.5	2.7	－1.4
8	G1 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 100mm）	6.3	－0.5	5.7	－0.4	1.8	－0.5	1.6	－0.7
9	G4 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 10mm）	7.2	－0.6	6.4	－0.2	17.0	－0.7	13.7	－0.9
10	G4 桁 横桁取付部ウェブガセット（止端より 100mm）	2.8	－0.5	2.8	－0.3	7.8	－0.4	6.4	－0.2
11	G1 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 10mm）	2.5	－32.7	0.0	－27.3	1.8	－7.1	2.0	－8.3
12	G1 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 100mm）	1.3	－12.5	0.1	－10.0	1.2	－3.1	0.9	－3.4
13	G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 10mm）	5.2	－26.1	1.4	－20.6	2.1	－60.3	2.3	－51.3
14	G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面（止端より 100mm）	2.4	－8.7	1.4	－7.0	0.8	－21.0	1.0	－17.9
15	G1 桁 Fix 側支点上垂直補剛材下端部（止端より 20mm）	3.8	－5.7	2.4	－4.8	4.7	－9.1	3.7	－8.3
16	G4 桁 Fix 側支点上垂直補剛材下端部（止端より 20mm）	0.8	－5.2	0.4	－5.1	1.0	－16.7	0.8	－13.0
17	中間対傾構下側ガセット（G2 桁側）（止端より 10mm）	32.5	－0.2	26.4	－0.2	2.5	－4.7	3.3	－1.0
18	中間対傾構下側ガセット（G3 桁側）（止端より 10mm）	15.9	－0.8	13.9	－0.3	24.5	－0.5	22.3	－0.3
19	G1 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Fix 側）	2.2	－6.0	1.5	－7.6	0.6	－0.4	1.0	－0.3
20	G1 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Mov 側）	0.8	12.2	0.4	－8.6	0.8	－0.4	0.9	－0.6
21	G4 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Fix 側）	0.4	－0.9	0.3	－0.9	0.8	－10.5	0.7	－11.6
22	G4 桁 端部床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部（Mov 側）	0.8	－0.5	0.8	－0.4	2.1	－7.8	1.8	－7.7
23	G1 桁 支間中央 下フランジ下面	0.3	－1.0	0.2	－1.1	0.2	－0.8	0.3	－0.5
24	中間横桁下フランジ下面中央（G1～G2 桁間）	5.5	－0.3	5.4	－0.2	1.0	－0.3	1.3	－0.3



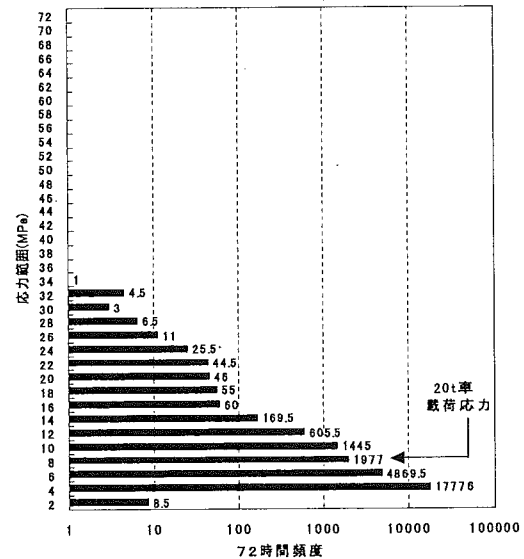
(a) G4 桁 支間中央 下フランジ下面 (ch. 4)



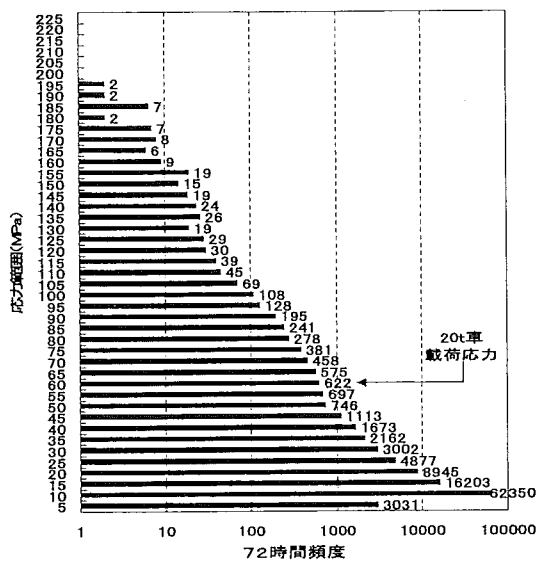
(b) 中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部 (止端より 20mm) (ch. 6)



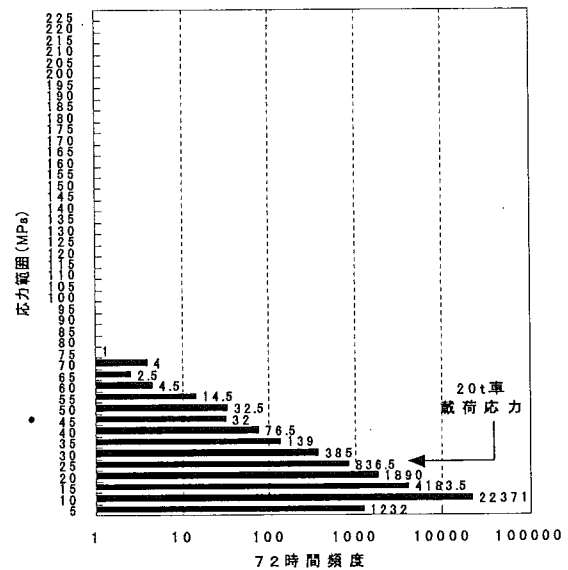
(c) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch. 9)



(d) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 100mm) (ch. 10)



(e) G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch. 13)



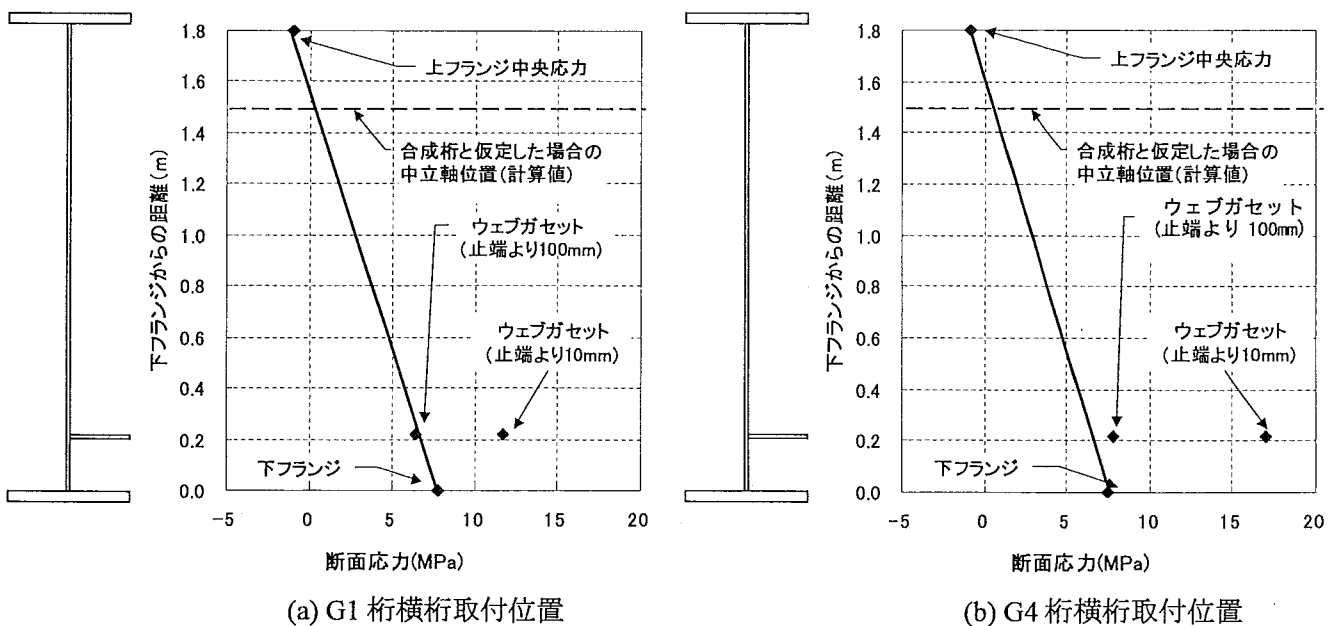
(f) 中間対傾構下側ガセット (G3 桁側) (止端より 10mm) (ch. 18)

図-6 平日 3 日間の応力頻度分布の例

図－7に荷重車走行時（応力最大時）の G1 桁及び G4 桁横桁取付け位置の主桁断面の断面応力分布を示す。なお、上下フランジ応力測定位置（支間中央）は横桁取付位置とずれているため、横桁取付位置に換算して示した。上下フランジ、ウェブガセット（止端より 100mm 位置）の応力はほぼ直線関係にあり、その中立軸位置は、合成桁と仮定し、かつ床版の有効幅を考慮した場合の中立軸位置に近いことがわかる。一方、止端 10mm 位置での応力は止端 100mm 位置に対して、1.8 倍（G1 桁）、2.4 倍（G4 桁）生じており、横構等からの作用力による局部的な面外曲げ応力の影響を受けているものと推測される。

表－4 平日 3 日間の応力頻度を用いた 50 年換算疲労損傷度

橋梁部位	等級	50 年換算 疲労損傷度
ウェブガセット（止端より 10mm）	G	1.6
ウェブガセット（止端より 100mm）	G	0.21
ウェブガセット（回帰式より推定）	G	0.14
ソールプレート前面（止端より 10mm）	E	18
ソールプレート前面（止端より 100mm）	E	0.91
中間横桁取付垂直補剛材（G4 桁）	F	14
対傾構下弦材（G3 側）	H	14



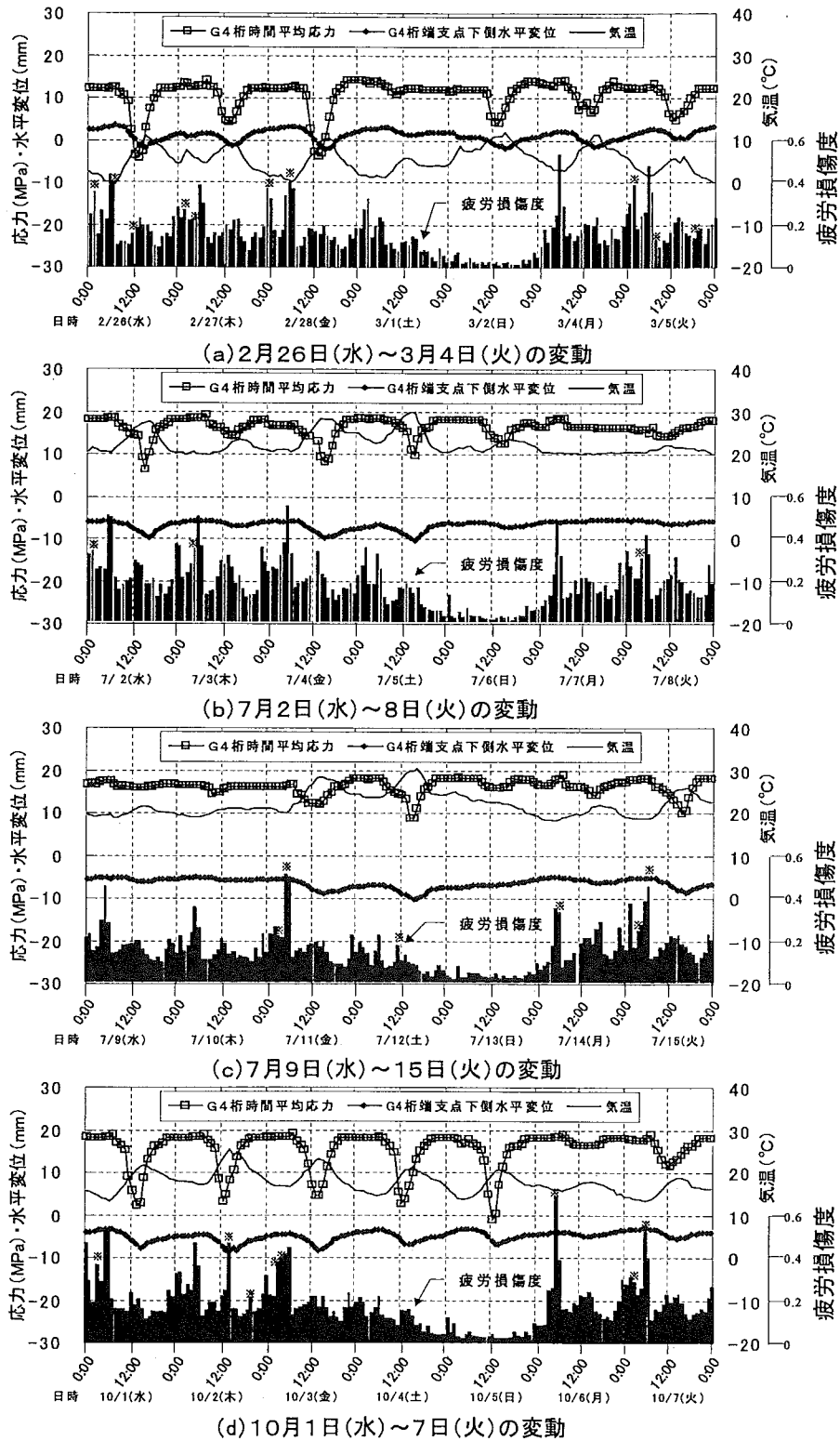
図－7 主桁断面の応力分布

5. 2 応力、変位、気温の時間・日変動

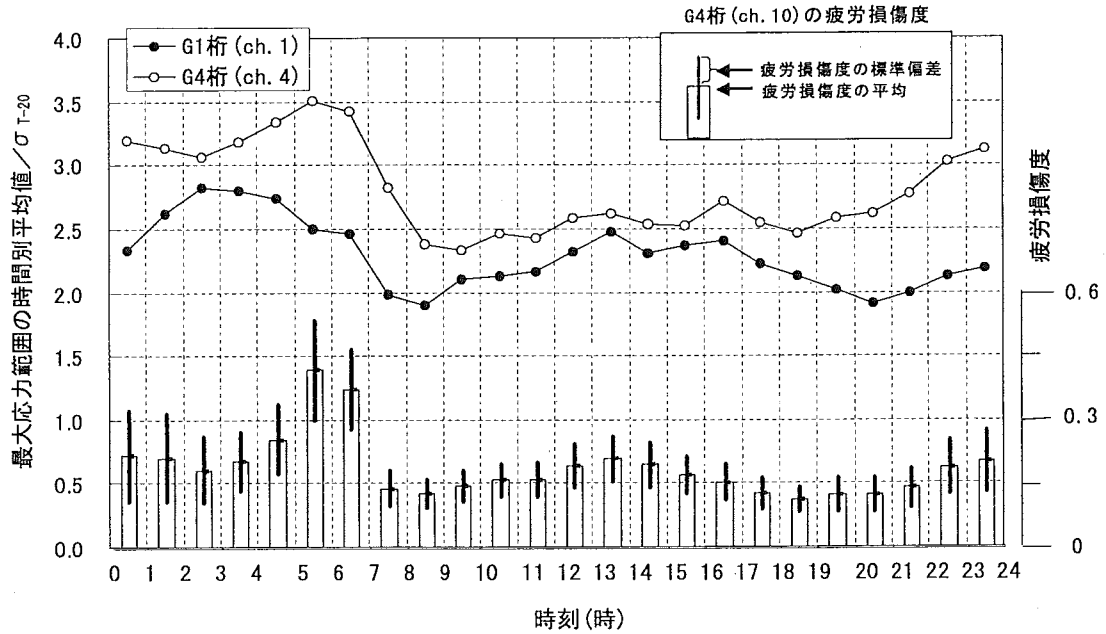
図－8に G4 桁支間中央下フランジについて時間平均応力、可動支承側の桁下端水平変位（橋台側への変位が負）及び気温の時間変動を示す。図中の疲労損傷度は G4 桁ウェブガセット位置（止端より 100mm 位置、G 等級と仮定）での時間単位の応力頻度分布より求めた 50 年間疲労損傷度を示し、※印は 32MPa（20tonf 車載荷時応力の 4 倍）以上の応力範囲が計測された時間帯を示している。なお、疲労損傷度は応力範囲の 3 乗と頻度に比例するため、両者がピークとなる時間帯は必ずしも一致していない。水平変位及び応力ともに気温との相関が見られる。また、疲労損傷度の平日の変動を見ると、深夜から明け方頃と、正午過ぎ頃の時間帯において、活荷重の荷重条件が疲労上厳しくなる傾向が伺える。

図－9に G4 桁支間中央下フランジについて、時間別（2 月 26 日から 1 年間の平日（月曜日から金曜日）における時間別に処理）の 50 年間疲労損傷度の平均値及び標準偏差、荷重車走行時の最大応力（以下、 σ_{T-20} ）に対する最大応力範囲の平均値の比率を示す。G4 桁疲労損傷度については、年間を通して図－8 と同様の傾向が見られるが、深夜から明け方頃にかけてはばらつき（標準偏差）が大きいこと、（最大応力範囲の時間別平均値）/ σ_{T-20} との相関性が高いことがわかる。また、G1 桁(ch.1)と G4 桁(ch.4)の（最大応力範囲の時間別平均値）/ σ_{T-20} の比較により、夜間の下り車線（G4 桁側）の活荷重条件が厳しいことも伺える。

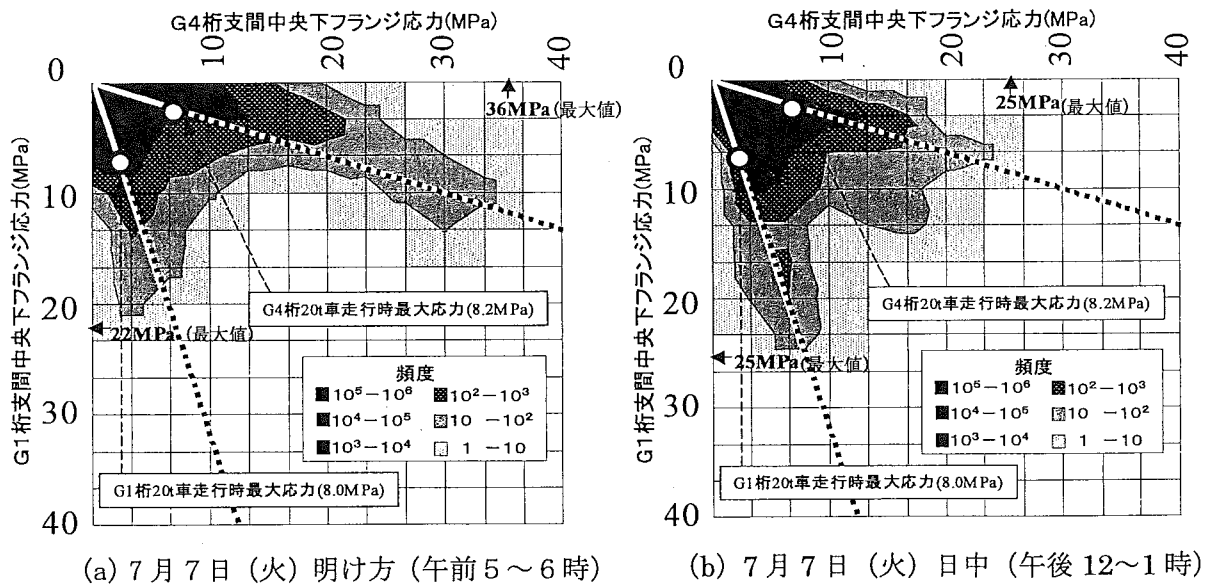
今回の計測では車両重量計測を行っていないため車両の重量実態は不明であるが、ここでは 2 次元タイム法により、上下各車線（G1 桁側、G4 桁側）応力の相関図を描き、活荷重の荷重状態の分析を試みた。図－10 に、2 次元タイム法で計測した G1 桁及び G4 桁支間中央下フランジ応力の 2 次元の頻度分布の例を示す。対象は図－8 中の期間中に大きな応力範囲が生じた時間帯（※印、7 月 7 日(月) 午前 5～6 時）、及び交通量が多くかつ疲労損傷度の比較的高い時間帯（同日午後 12～1 時）とした。図中には、各桁上への 20tonf 車載荷時の応力も示している。明け方では 20tonf 車載荷時応力に沿って頻度が集中しており各車線載荷時に対する応力分布の傾向が見られ、橋梁上への車両の同時載荷は少ないものと推測される。また、G4 桁側の下り車線では 20tonf 車載荷時応力の約 4.4 倍程度の応力が生じており、同倍程度の重車両が走行しているものと推測される。一方、昼間は交通量が多いため、上下車線に車両が同時載荷する機会が多いと考えられ、明け方の分布の傾向とは異なっている。



図－8 G4 桁支間中央下フランジにおける時間平均応力と水平変位



図一 9 G4 桁支間中央下フランジにおける時間別の疲労損傷度と最大応力範囲の平均値



図一 10 2次元タイム法による G1 桁と G4 桁の応力頻度の相関

図-11 に G4 桁支間中央下フランジ下面(ch.4)の日平均応力、日最大応力範囲及び日等価応力範囲の 1 年間にわたる変動を示す。図中の疲労損傷度は G4 桁横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch.10) での日単位の応力頻度分布より求めた 50 年間疲労損傷度を示している。日平均気温は季節変化とともに漸増漸減を示しているが、日平均応力も同様に变化しているのが確認できる。週間変動を見ると、土、日曜日において各諸量ともに相対的に応力が小さく、大型車交通量の影響と推測される。

表-5 に G4 桁横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch.10) での日単位の応力頻度分布より求めた 50 年間疲労損傷度の曜日別の平均値と標準偏差を示す。疲労損傷度は火曜日から木曜日が相対的に大きく、土、日曜日前後の月、金曜日では若干小さくなっている。なお、ウェブガセット位置では、図-7 に示したように局所的な面外曲げ応力の影響を受けているものと考えられ、同位置の疲労損傷度の評価を行う際には面外曲げ等の影響も別途考慮する必要がある。

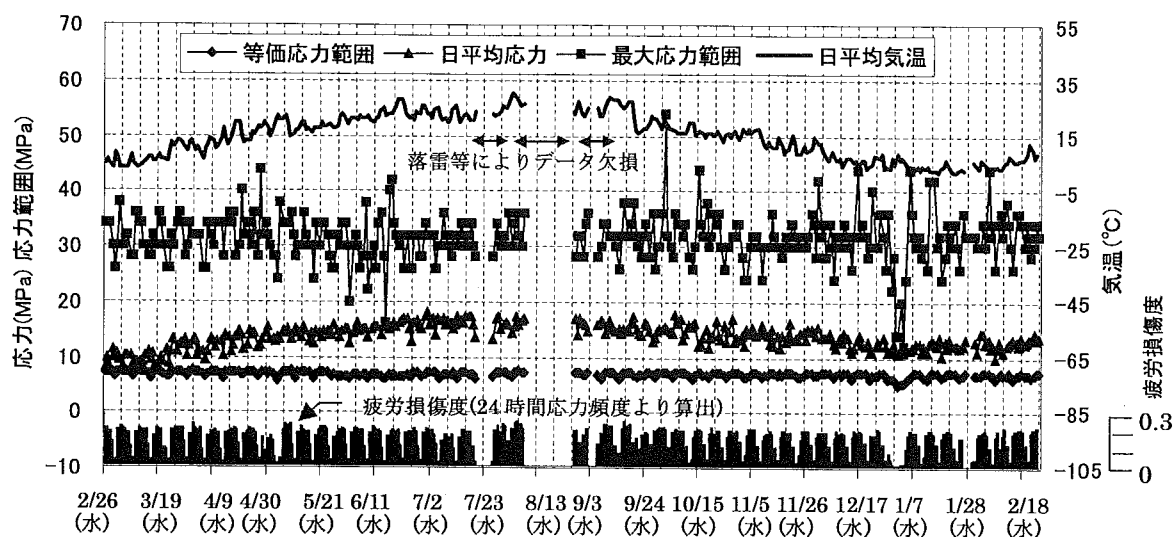


図-11 G4 桁支間中央下フランジ下面における日平均応力、日応力範囲、疲労損傷度

表-5 曜日別の 50 年換算疲労損傷度

曜日	50 年換算疲労損傷度	
	平均値	標準偏差
月	0.16	0.045
火	0.20	0.032
水	0.21	0.019
木	0.21	0.016
金	0.20	0.025
土	0.12	0.018
日	0.03	0.007

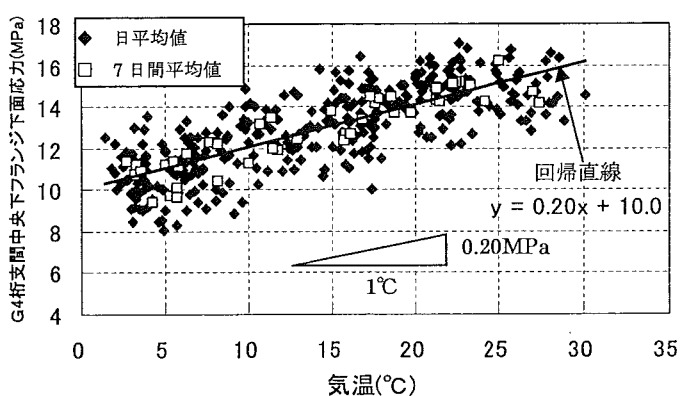
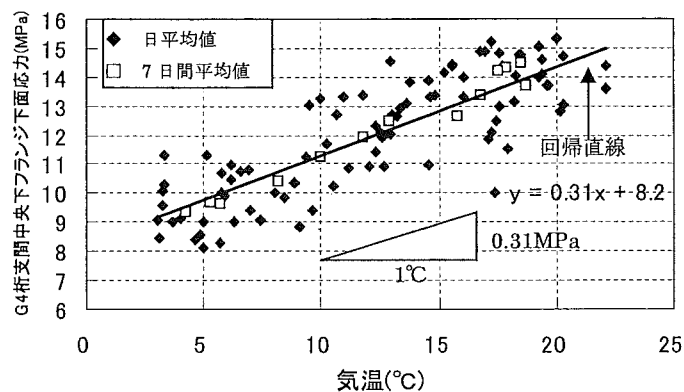
5.3 応力、変位と気温の関係

図-12 に主な計測部位における日平均応力と日平均気温の関係を 3 ヶ月（2003 年 2/26~5/25）と 1 年間（2003 年 2/26~翌年 2/25）のそれぞれの場合について示す。図中には 7 日間平均値とした場合の結果と一次回帰式を併せて示す。

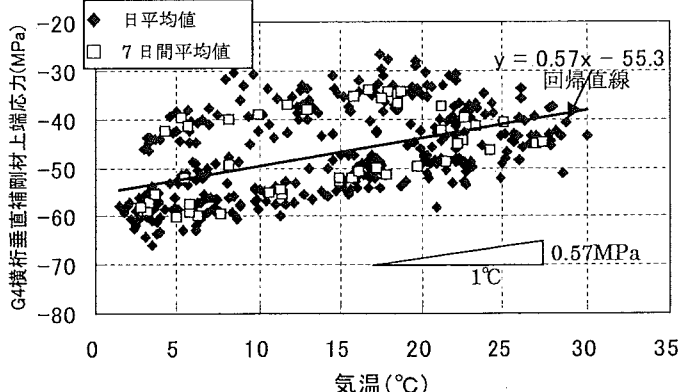
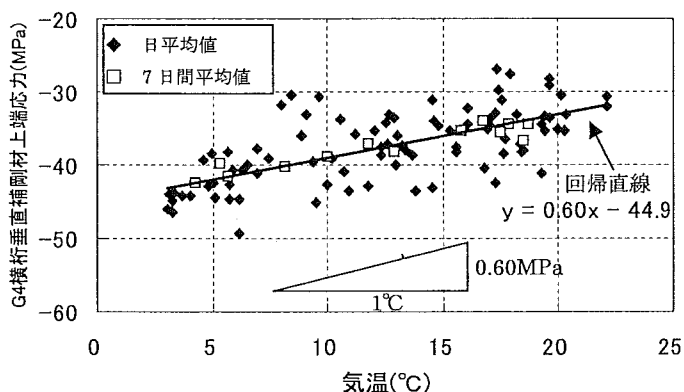
表-6 に同様にして求めた各部位の一次回帰式の勾配（気温変化に対する応力変化量）と相関係数を、3 ヶ月（2/26~5/25）及び 1 年間の場合について示す。ソールプレート前面を除き、7 日間平均値で見ると応力と気温の相関が非常に高いことがわかる。

表-6 主な計測部位における応力と気温（7 日間平均値）の相関

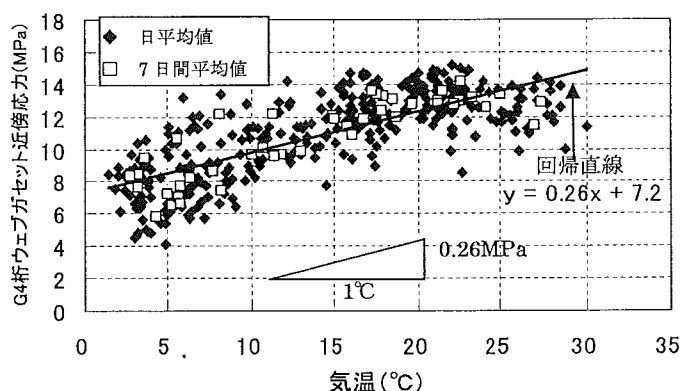
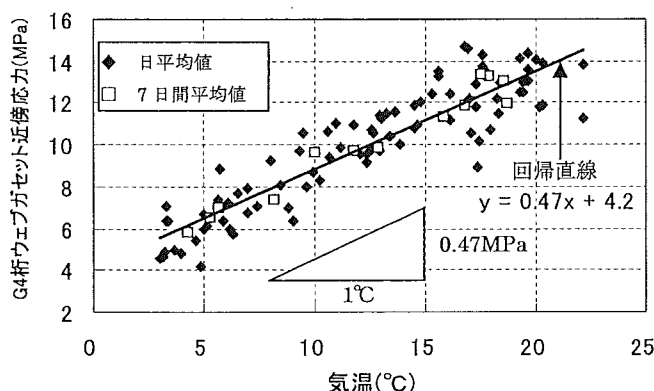
計測部位	期間	応力変化量 (MPa/°C)	相関係数
G4 桁 支間中央 下フランジ下面	3 ヶ月	0.31	0.99
	1 年間	0.20	0.90
中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部 (止端より 20mm)	3 ヶ月	0.60	0.94
	1 年間	0.57	0.50
G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm)	3 ヶ月	0.47	0.98
	1 年間	0.26	0.85
G4 桁 Fix 側支点 ソールプレート前面 (止端より 10mm)	3 ヶ月	0.31	0.88
	1 年間	-0.15	-0.36



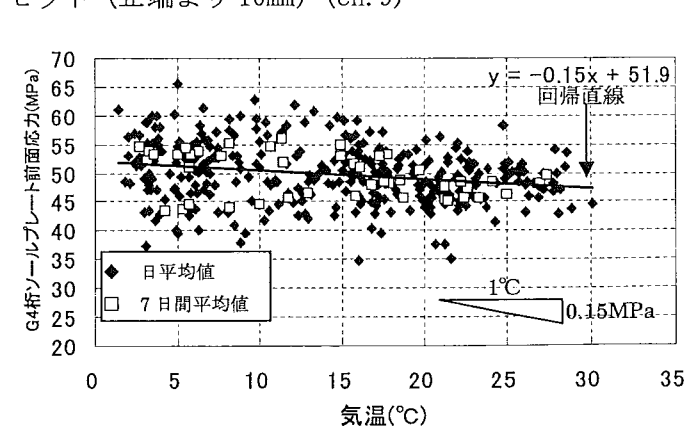
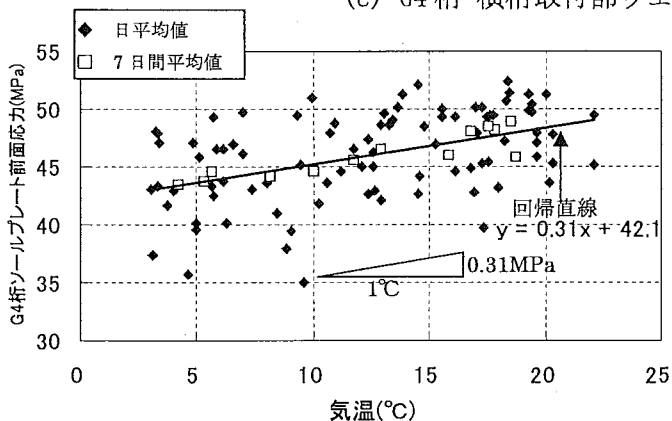
(a) G4 桁支間中央下フランジ下面 (ch. 4)



(b) 中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部 (止端より 20mm) (ch.6)



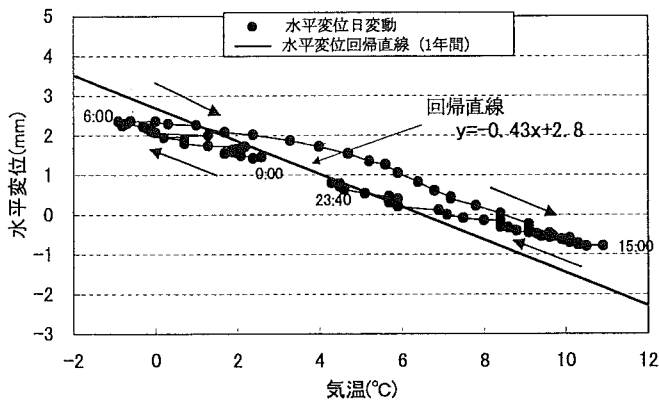
(c) G4 桁 横桁取付部ウェブガゼット (止端より 10mm) (ch. 9)



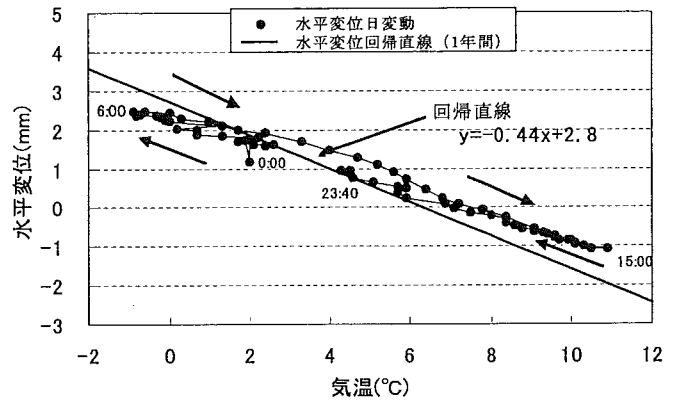
(d) G4 桁 Fix 側支点 下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch. 13)

図-12 主な計測部位における日平均応力と日平均気温の関係

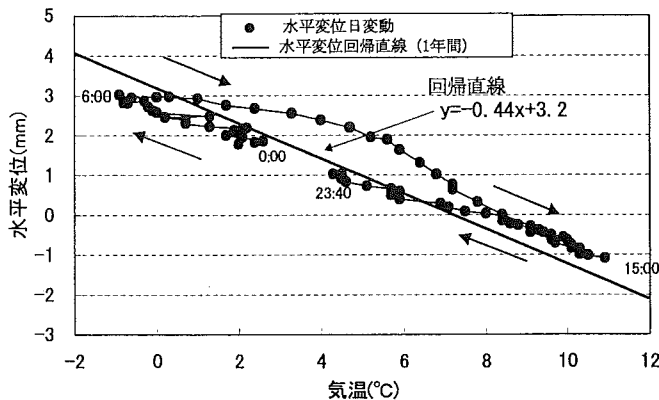
図-13にG1桁、及びG4桁の桁端における1日間(2月26日)の水平変位(橋台側への変位が負)と気温との関係を示す。図中には1年間の計測結果より求めた一次回帰式を示している。桁端の水平変位と気温との間には高い相関が見られる。ここで、鋼材の線膨張係数 12×10^{-6} から求まる主桁の伸び量は単純計算すれば 10°C に対し 3.7mm となるが、実測値は概ね同程度の移動量となっている。



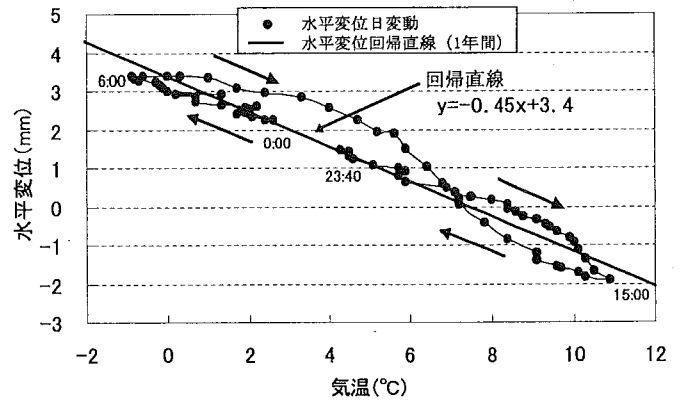
(a) G1桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部(ch. 29)



(b) G1桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部(ch. 30)



(c) G4桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部(ch. 31)



(d) G4桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部(ch. 32)

図-13 桁端水平変位と気温の関係

5. 4 応力、変位、気温の7日間平均値

日平均値については日々の交通状況や温度変化の影響によるばらつきが大きいことから、長期的な傾向を捉えるために、上記結果や文献2)を踏まえ、日平均応力と日最大応力範囲の n 日間平均値を用いて計測データを整理した。前者は変状等の進展に伴う応力変化を捉えるための指標、後者は活荷重に対する部材の安全性の余裕を概略把握するための指標としての活用を想定したものである。ここで日平均応力の週間変動の傾向を踏まえ $n=7$ とした。

図-14 に一例として、G4 桁支間中央下フランジ下面(ch.4)における日平均応力及び日最大応力範囲の7日間平均値(ただし、日最大については土、日曜日を除く5日間を考慮)、G4 桁端水平変位(移動側の下側)の7日間平均値の変動を示す。前述のとおり応力、変位と気温の相関は高く、両者は気温の変化に対応していることがわかる。図中には実線により、温度補正(図-13 に示した回帰式による)した結果を示しているが、ほぼ水平であり、1年間を通して多少のばらつきはあるものの特異な変化は見られない。

なお、1年間の計測期間中に地震(橋梁付近で震度1の地震を9回、震度2の地震を7回観測)等による大きな外力の作用や変状の発生はなく、応力的に特異な変化は計測データからは確認されなかった。また、日最大応力範囲の5日間平均値については23~40MPaであり、かつ、計測期間中の最大応力範囲は54MPaであり、同一部の設計活荷重応力度(L-20 荷重に対して72MPa)と比較して小さいことが確認された。

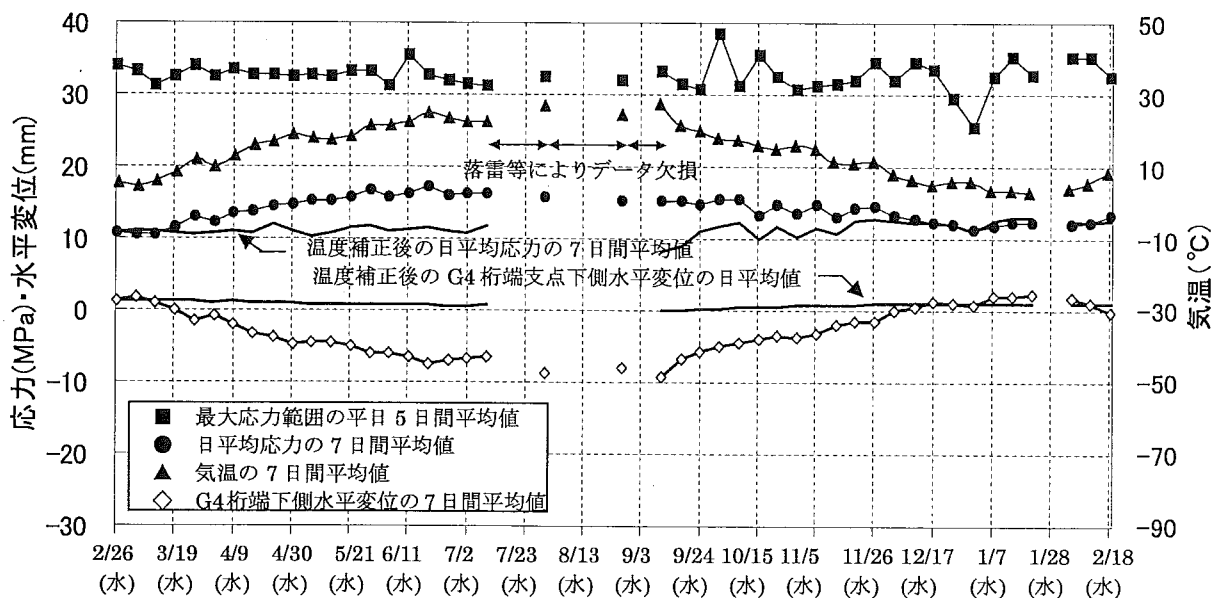


図-14 G4 桁支間中央下フランジ応力の7日間平均

6. まとめ

鋼道路橋を対象に、状態監視に関する基礎検討として、非合成単純鋼 I 桁橋の長期連続計測を実施し、1 年間の主桁応力、桁端変位計測データについて分析を行った。以下に主な結果をまとめる。

- (1) 主桁における時間単位、日単位の疲労損傷度の計測結果より、大型車交通の影響と考えられる活荷重応力の時間別、曜日別の変動傾向が確認された。また、これまで疲労損傷の報告がなされているソールプレート溶接部、垂直補剛材上端溶接部では相対的に局部応力が高いことが確認された。
- (2) 橋梁各部の応力及び桁端変位と気温との間に高い相関があることを確認した。また、温度変化に伴う各部の応力、変位の変化量を把握した。
- (3) 1 年間の連続計測で得られたデータの中から、主桁応力、主桁桁端変位の 7 日間平均値を用いて、両者の変動が温度応力に依存するものであること、温度応力以外に応力、変位について特異な性状変化が見られないことを確認した。

最後に今回の実橋計測にあたって、ご協力頂いた大宮国道事務所の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

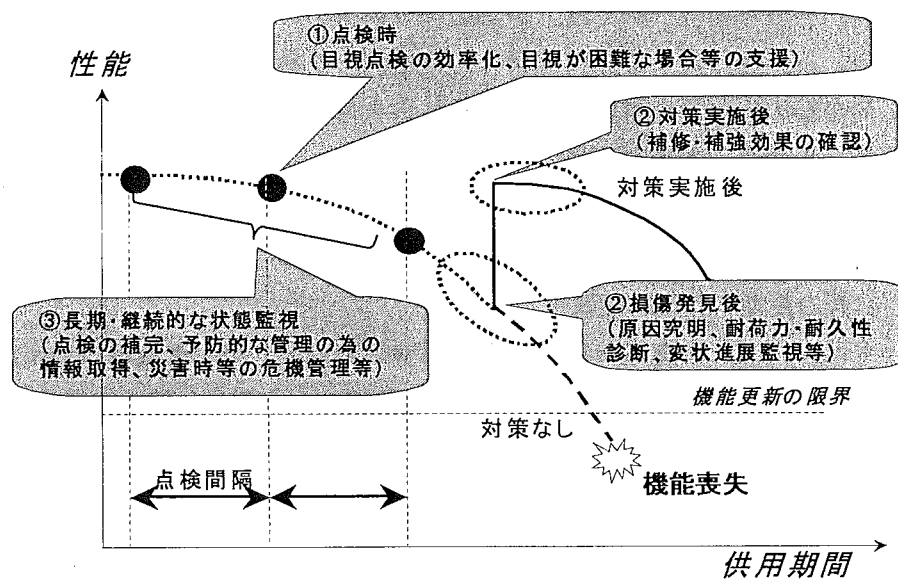
- 1) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：IntelliGent BridGe/Structure and Smart MonitorinG 研究の動向：土木学会論文集 No.654/I-52, pp.1-12, 2000.
- 2) 例えば、建設省：既設構造物の点検・補修システムの開発 [橋梁の長期監視システムの開発]報告書,官民連帯共同研究,1991.
- 3) 例えば、三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林裕介：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発：土木学会論文集 No.686/VI-52, pp.31-40, 2001.
- 4) 例えば、阿部和智, 天野耕一：明石海峡大橋動態観測システム, 本四技報 No.86, pp.29-34, 1998.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 7) 村越潤, 麓興一郎, 高木伸也, 次村英毅：部材応力のモニタリングによる鋼橋の状態監視に関する基礎検討, 土木技術資料 Vol.45 No.8, pp.26-31, 2003.
- 8) 村越潤, 麓興一郎, 高木伸也, 次村英毅：既設鋼 I 桁橋における応力・変位測定結果の分析：土木学会年次学術講演会講演概要集第 I 部 58 卷, pp.807-808, 2003.
- 9) 村越潤, 麓興一郎, 高木伸也, 次村英毅：応力頻度測定結果を基にした既設橋の疲労損傷度の評価に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 I 部 58 卷, pp.833-834, 2003.
- 10) 村越潤, 麓興一郎, 高木伸也, 次村英毅：部材応力の長期計測による鋼橋モニタリングに関する基礎検討：鋼構造論文集 Vol.11 No.43, pp.159-169, 2004.
- 11) Xia, Y., Fujino, Y., Abe, M. and Murakoshi, J. : Short-term and long-term health monitoring experience of a short highway bridge: case study, Bridge Structure, Vol.1, pp.43-53, 2005.3.
- 12) 公門和樹, 森猛, 村越潤, 麓興一郎, 次村英毅：疲労損傷度モニタリングセンサーによる実橋モニタリング, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 I 部 59 卷, pp.261-262, 2004.

参考資料

参考資料－１ モニタリング技術の適用対象の整理

モニタリングという表現は、一般に長期・連続的な監視（例えば、長大橋の動態観測や車両重量計測等）の意味合いで使われているが、ここでは、構造物の状態を把握し、健全度を評価するための点検・診断技術全般を対象として、これらの技術の維持管理における適用対象の整理を行った。

付図－１．１に構造物の健全度の概念図と、維持管理の各場面でのモニタリング技術による支援イメージを示し、付表－１．１にモニタリング技術の適用対象を適用場面と計測方法により分類して示す。また、以下に付図－１．１に示す各場面における適用対象についてまとめる。



付図－１．１ モニタリング技術による維持管理支援イメージ

付表－１．１ モニタリングの適用対象と計測方法

計測方法 適用場面	連続的 (橋梁に機器を設置)	不連続的 (時系列に計測)
事前対応 (変状発生前)	・地震時等の変状監視等	・点検の効率化 ・目視点検が困難な部位 の状態把握
事後対応 (損傷発見後、 対策実施後)	・損傷に対する原因究明、対策検討が必要な場合 ・耐荷力、耐久性の診断が必要な場合 ・対策後の変状の進展性の監視 ・補修補強対策後の効果確認 等	

（１）点検時における目視点検等の支援

目視主体の点検時において、客観的・定量的なデータを必要とする場合や、目視では把握できない部材内部や点検しにくい（近接しにくい）部位の状態を把握する必要がある場合が適用対象と考えられる。この場合、多数の橋梁に対して適用可能な技術であることが重要な条件と考えられ、そのためには低コストの、点検の効率化を図ることが可能な技術であることが必要である。あるいは、構造物としての重大損傷の予防に資する技術の場合には、多少のコスト増であっても、損傷の想定される橋梁・構造部位を絞り込んだ上での適用が考えられる。

（２）損傷発見後、対策実施後の調査支援

耐荷力の診断が必要な場合（例えば、損傷に伴う耐荷力の減少や橋の使用条件の変化が想定される場合）、損傷に対する原因究明や対策検討のために応力状態等を把握する必要がある場合、何らかの応急的な対策を講じた後に恒久対策実施までの安全性に係る状態を監視する必要がある場合、対策実施後の効果確認のために状態を把握する必要がある場合等が適用対象と考えられる。

（３）橋梁の状態の長期・継続的な監視

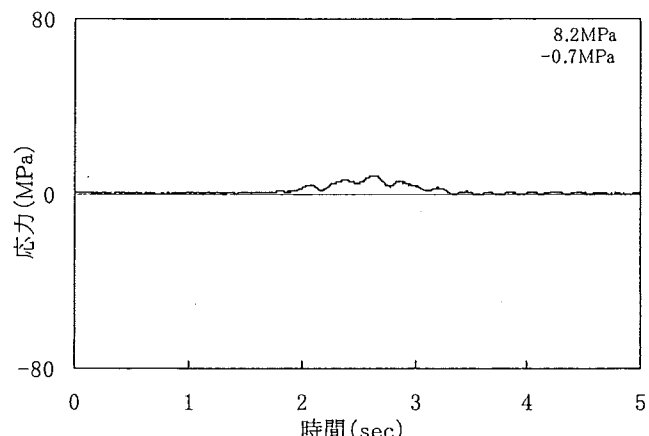
これについては、（１）と適用対象が重なる部分があるが、データ取得方法が連続的か不連続的かという点で異なることから別項目として整理した。橋梁状態を継続的に監視し、目視点検の補間、効率化や安全性の向上を目的とした適用が考えられるが、費用対効果、センサの長期耐久性・信頼性等の技術的課題、維持管理における位置付け等十分な検討が必要である。一つの位置付けとして、予防的な維持管理への活用といった観点から、例えば、特定の橋梁を対象として、それらを当該路線・地域の活荷重や腐食環境等の供用状態を長期モニタリングするセンサとして、また地震時等災害時の被災情報検知のセンサとして活用することが考えられる。後者の場合には、早期に被災状況を把握し、初動体制に反映させることが目的であることから、必然的にリアルタイム検知のための連続計測とする必要がある。

道路橋へのモニタリング技術の適用に当たっては、以上のように適用対象、必要性及びその効果を検討した上で、それに見合った技術を抽出することが重要である。

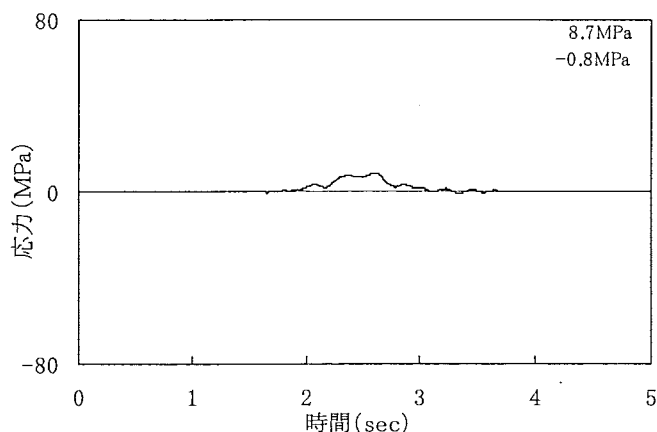
参考資料－２ 荷重車走行時の各部位における応力波形

付図－２．１～２．１２に、荷重車走行時の各計測位置（２４箇所）での応力波形を示す。なお、各載荷ケースについて、２回の計測を行っているが、ほぼ同じ波形が得られたことから、図中には１回分（２回目）の計測結果を示している。

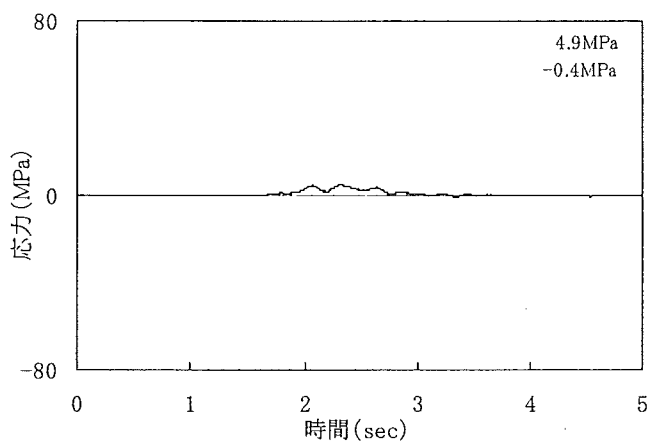
付図－２．１３～２．１６に、主な計測部位の応力波形を重ね合わせて示す。



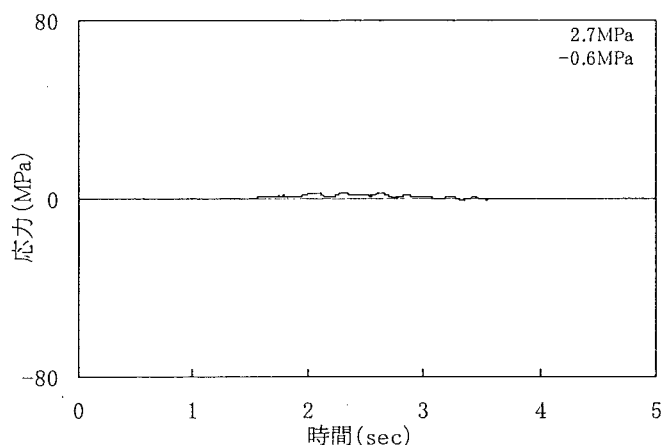
(a) G1 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.1)



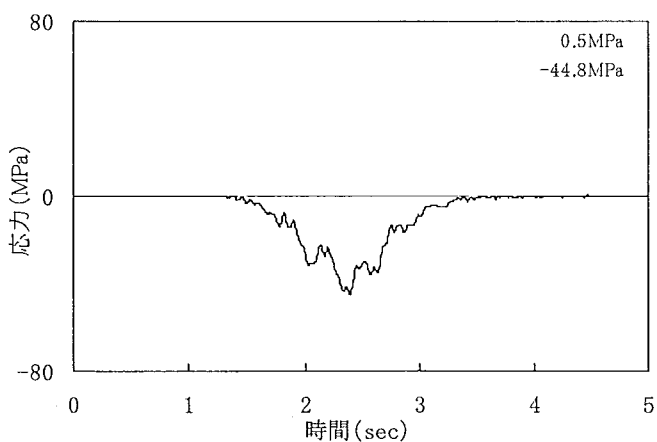
(b) G2 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.2)



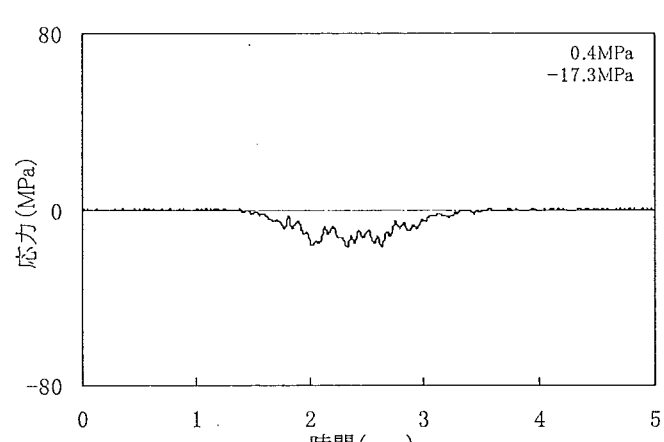
(c) G3 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.3)



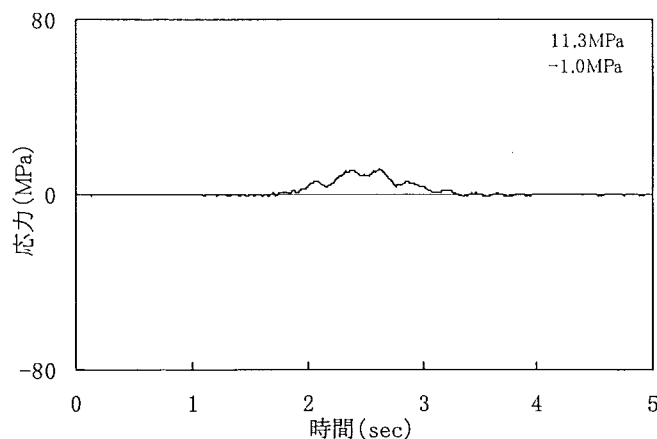
(d) G4 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.4)



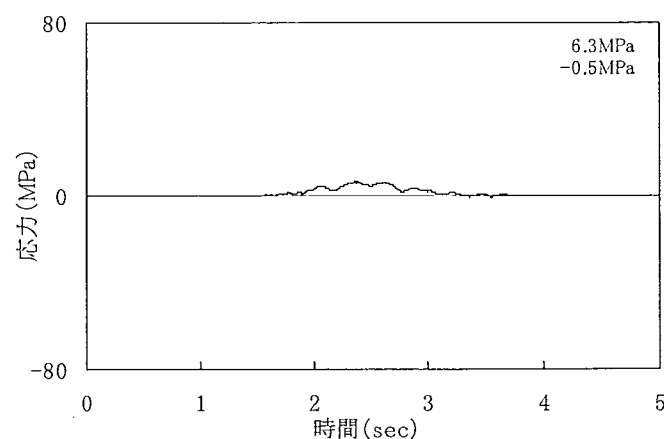
(e) 中間横桁 G1 桁取付部垂直補剛材上端部(ch.5)



(f) 中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部(ch.6)

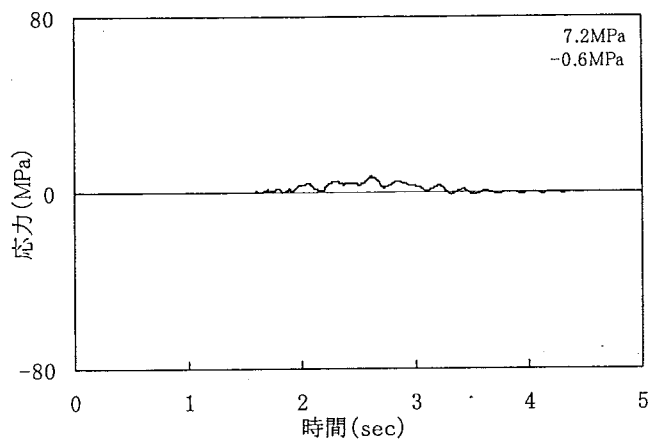


(g) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット(止端より 10mm) (ch.7)

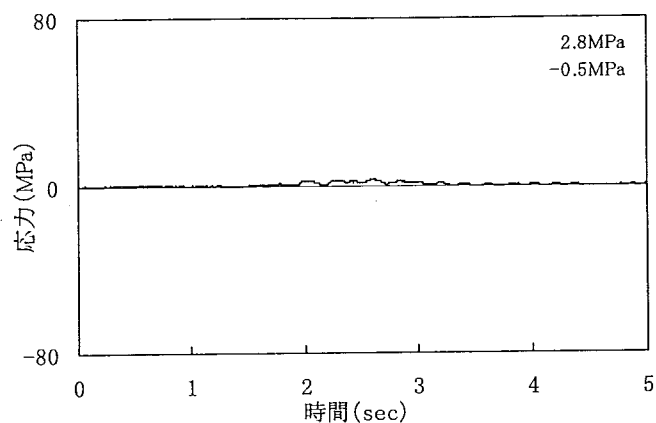


(h) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット(止端より 100mm) (ch.8)

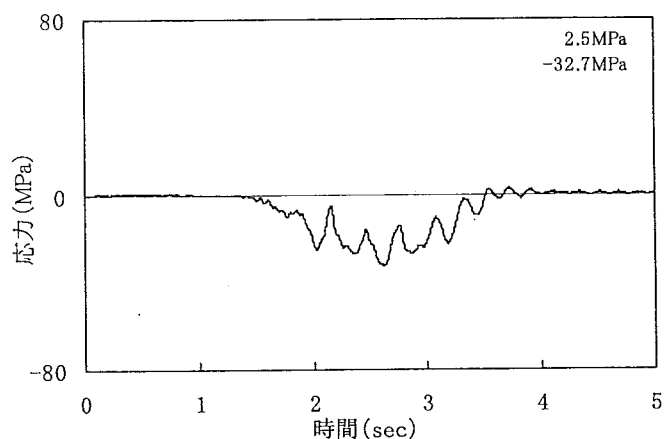
付図-2.1 上り車線走行時 走行速度:60km/h (2回目)



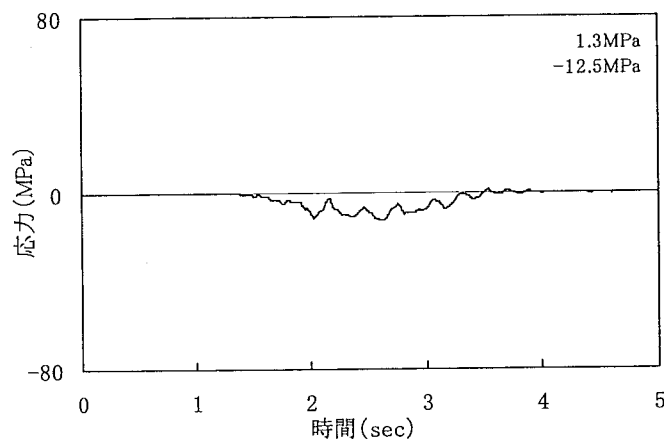
(a) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch.9)



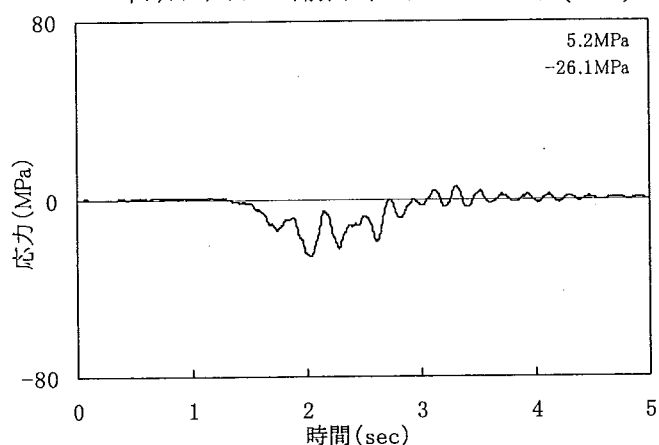
(b) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 100mm) (ch.10)



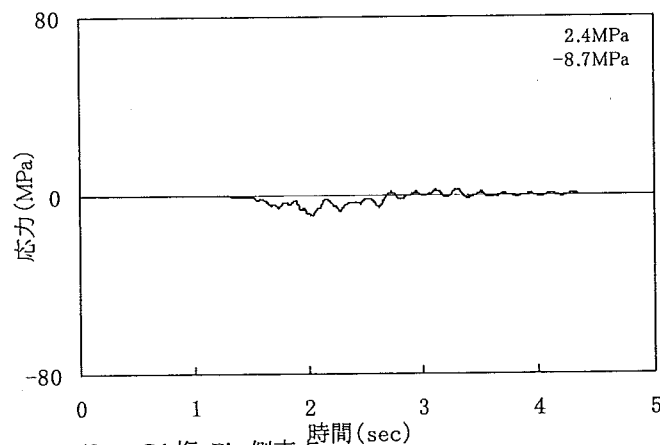
(c) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.11)



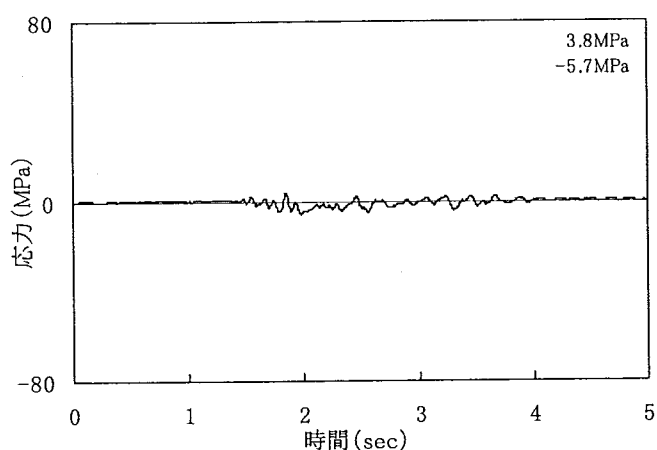
(d) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.12)



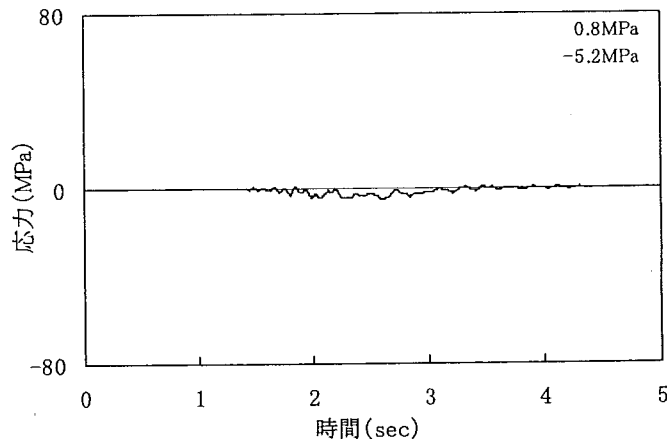
(e) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.13)



(f) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.14)

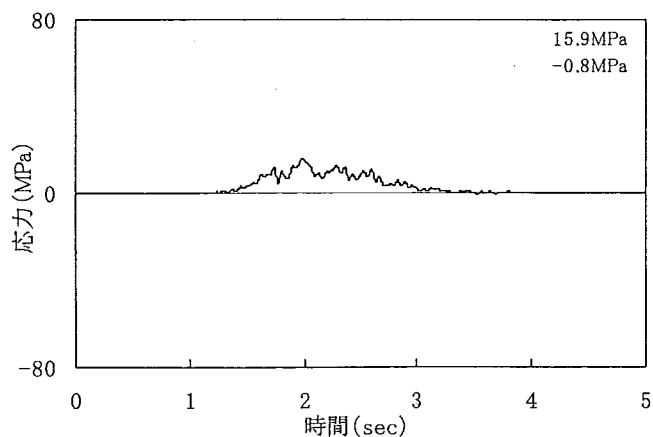
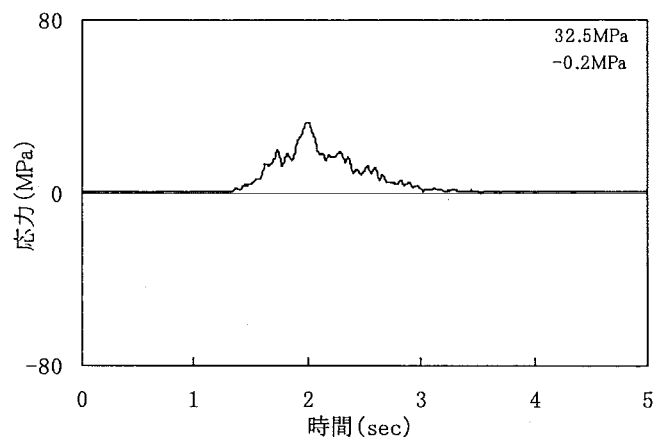


(g) G1 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.15)

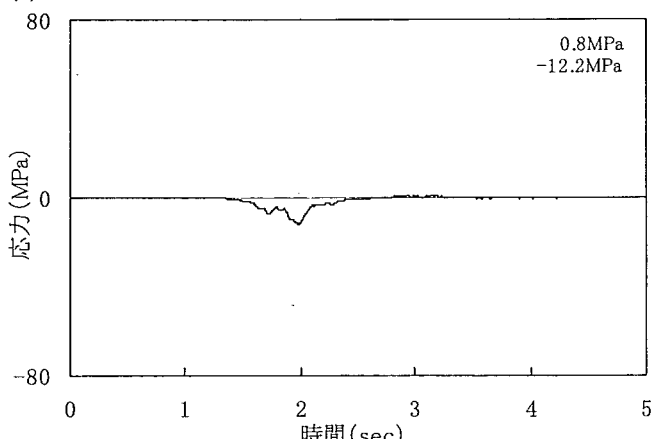
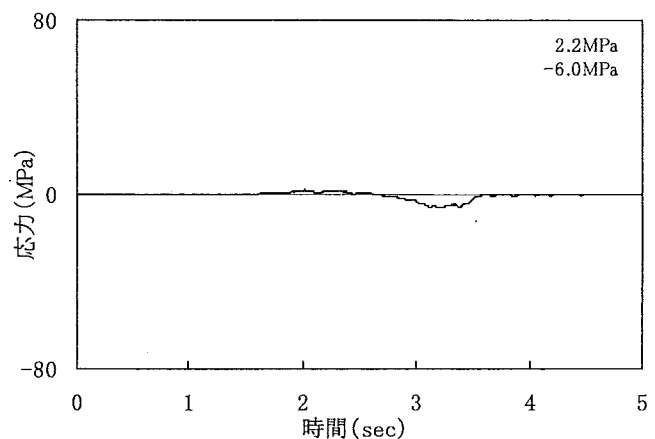


(h) G4 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.16)

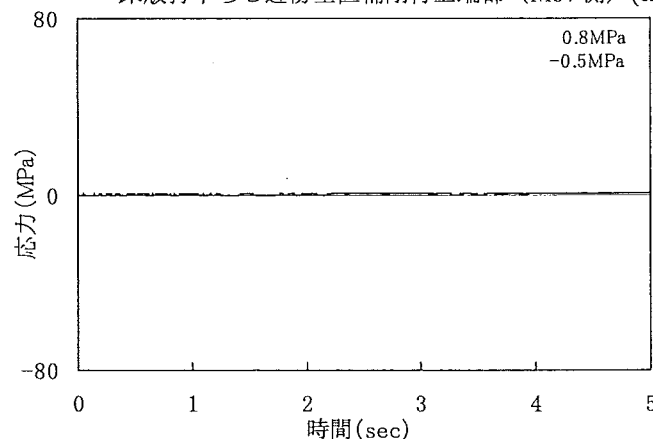
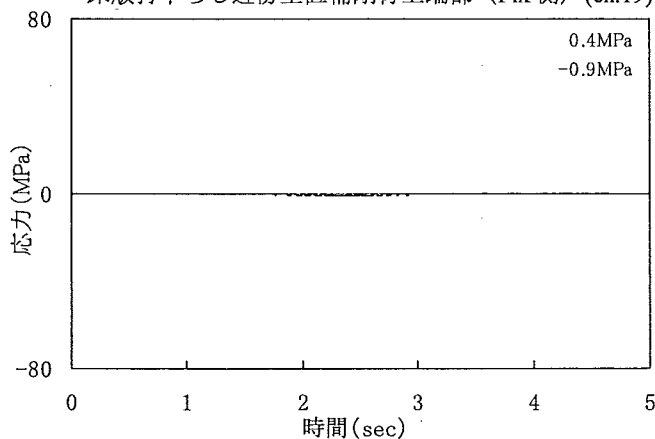
付図-2.2 上り車線走行時 走行速度:60km/h (2回目)



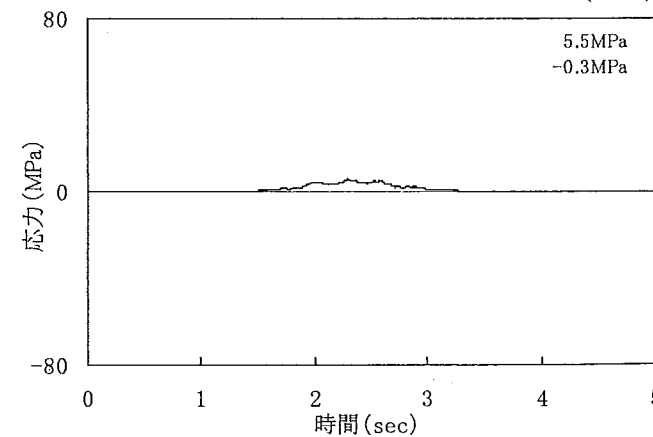
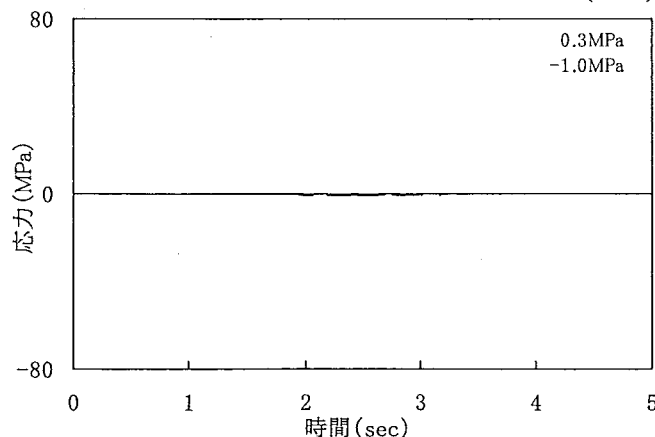
(a) 中間対傾構下側カセット (G2 桁側) (止端より 10mm) (ch.17) (b) 中間対傾構下側カセット (G3 桁側) (止端より 10mm) (ch.18)



(c) G1 桁 端部 床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.19) (d) G1 桁 端部 床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.20)

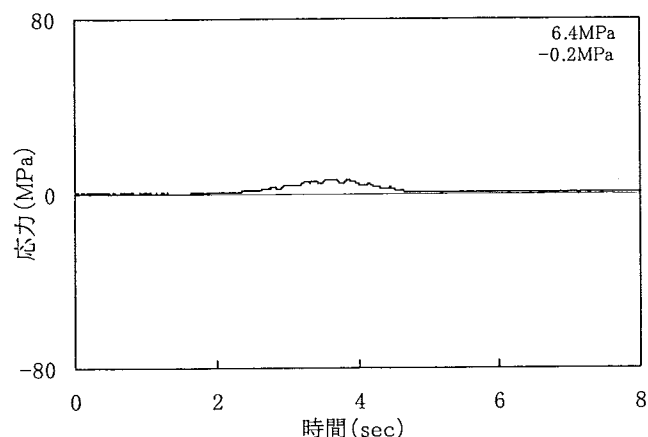


(e) G4 桁 端部 床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.21) (f) G4 桁 端部 床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.22)

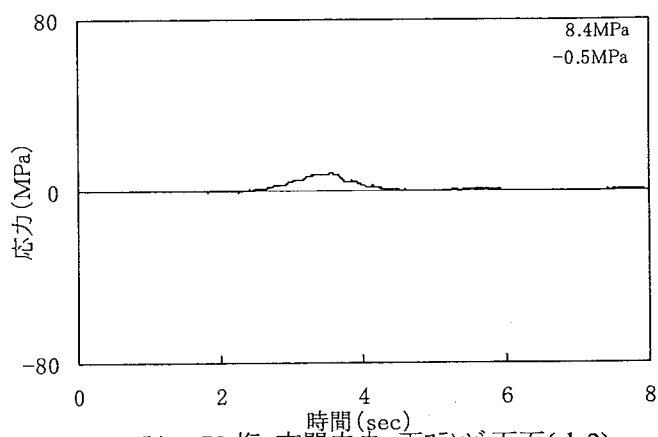


(g) G1 桁 支間中央 上フランジ下面(ch.23) (h) 中間横桁下フランジ下面中央 (G1~G2 桁間) (ch.24)

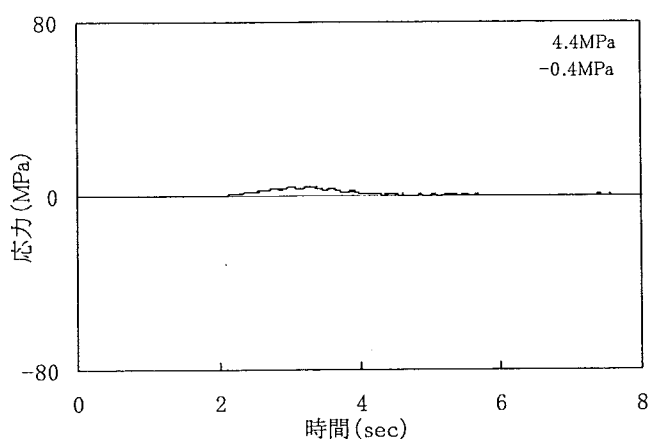
付図-2.3 上り車線走行時 走行速度:60km/h (2 回目)



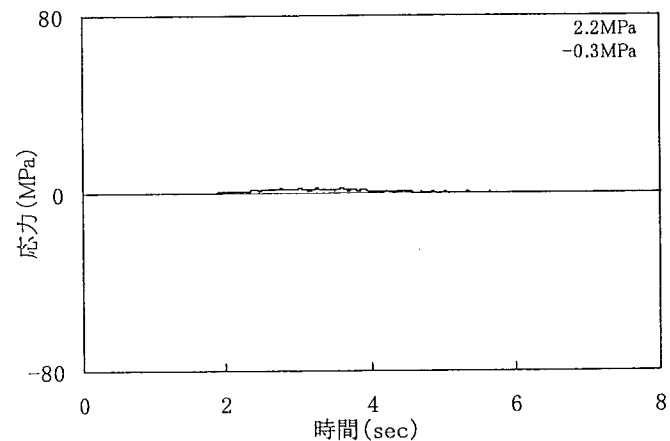
(a) G1 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.1)



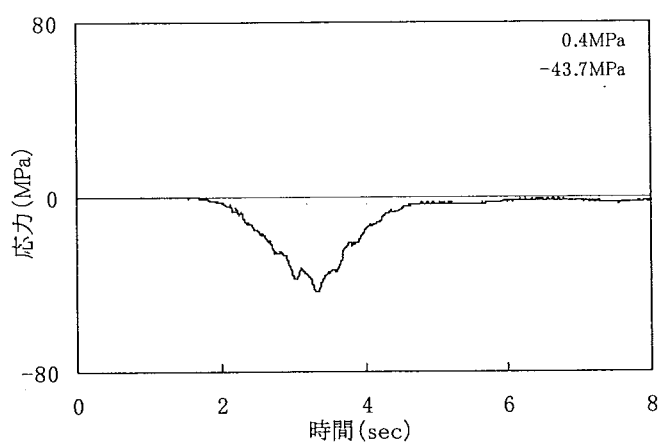
(b) G2 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.2)



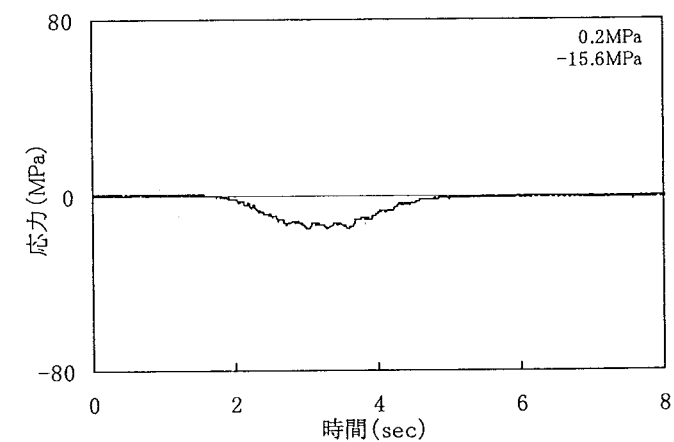
(c) G3 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.3)



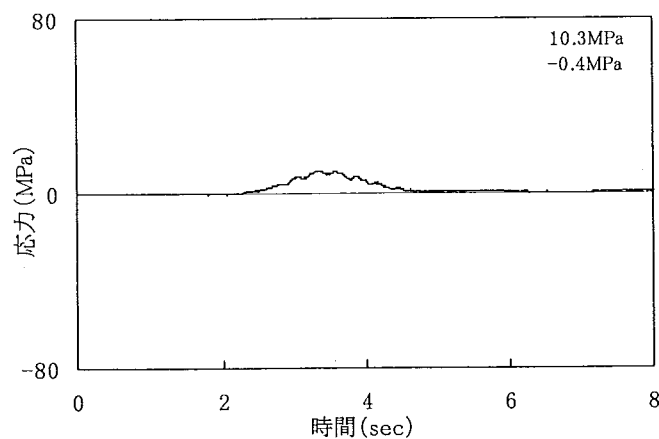
(d) G4 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.4)



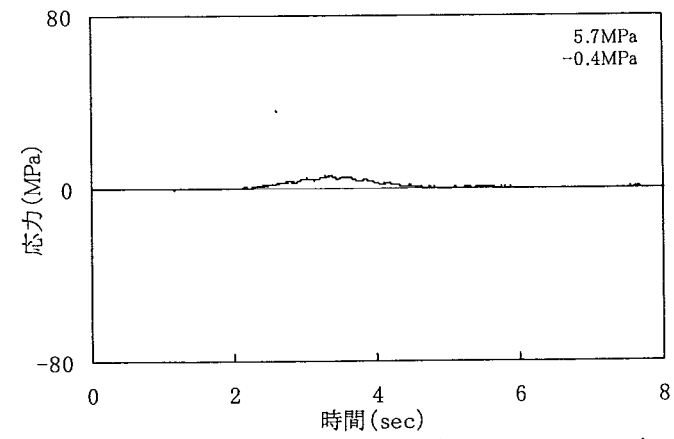
(e) 中間横桁 G1 桁取付部垂直補剛材上端部(ch.5)



(f) 中間横桁 G4 桁取付部垂直補剛材上端部(ch.6)

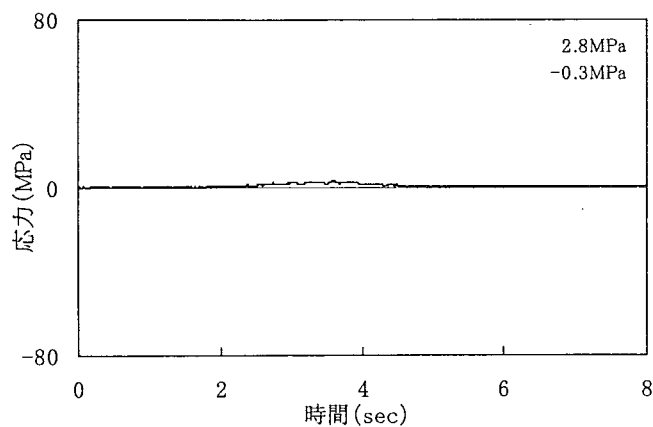
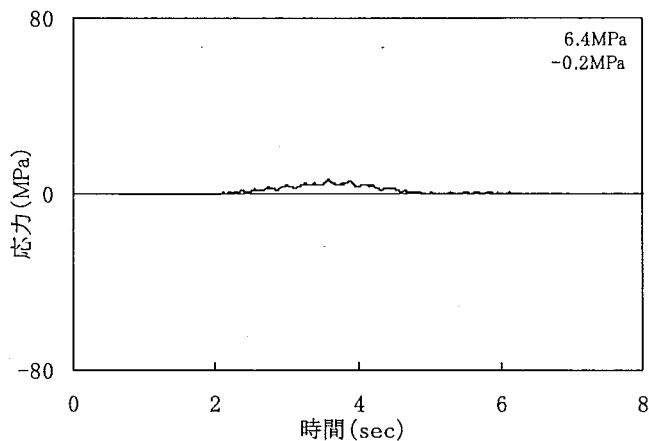


(g) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット(止端より 10mm)(ch.7)

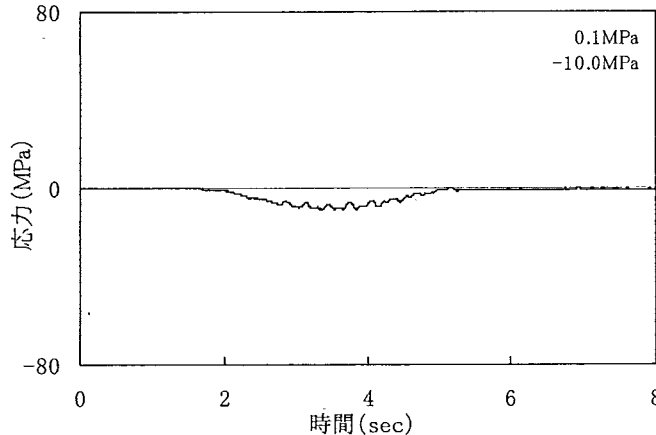
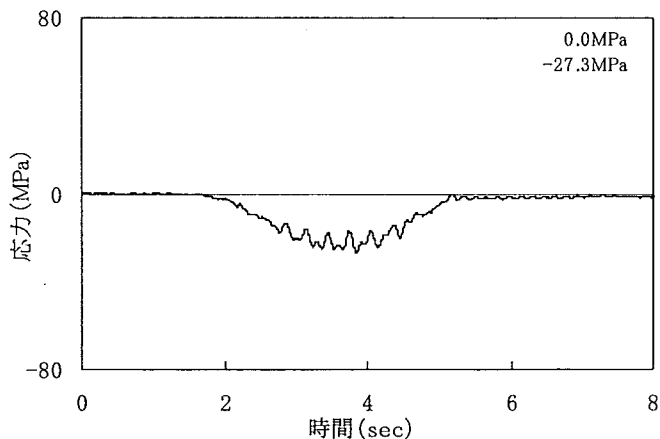


(h) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット(止端より 100mm)(ch.8)

付図-2.4 上り車線走行時 走行速度:40km/h (2回目)

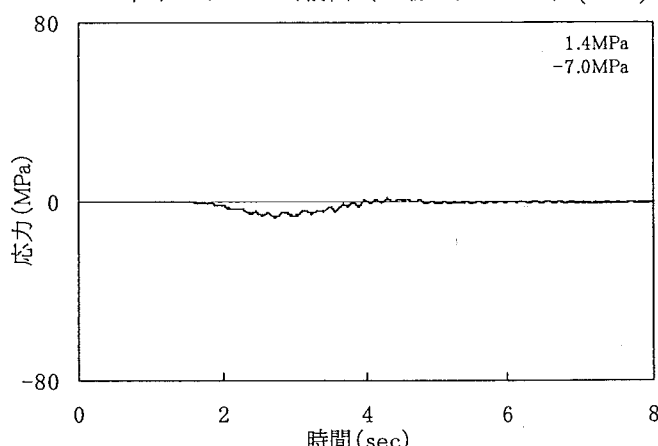
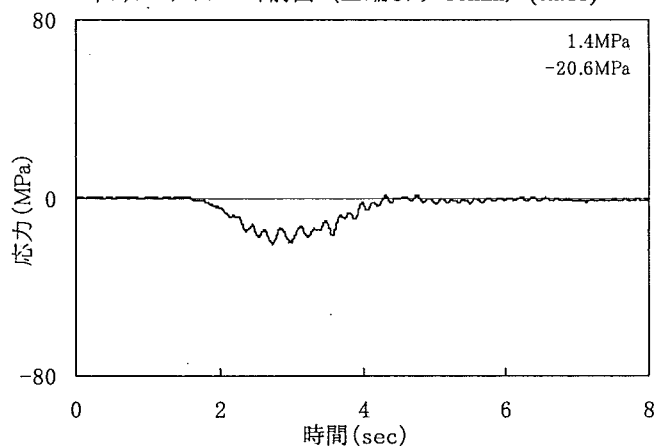


(a) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch.9) (b) G4 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 100mm) (ch.10)



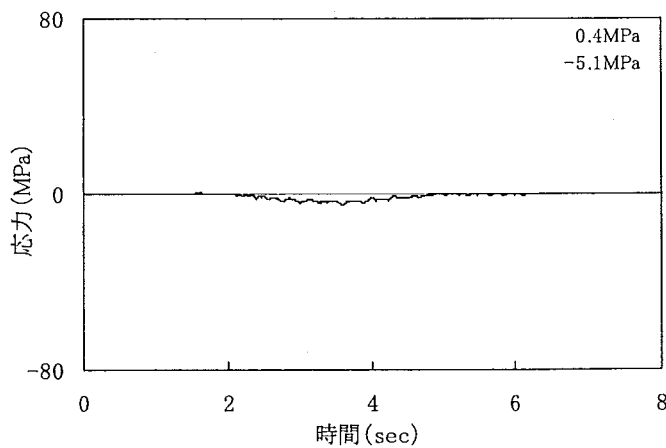
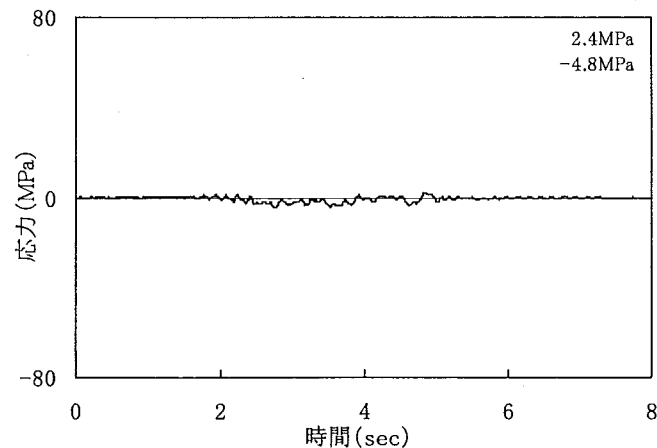
(c) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.11)

(d) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.12)



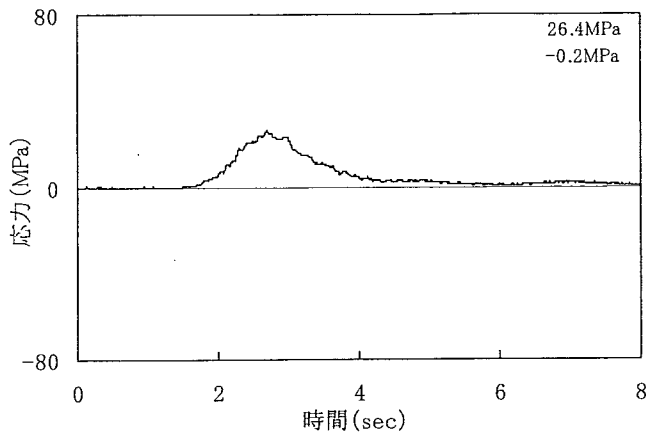
(e) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.13)

(f) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.14)

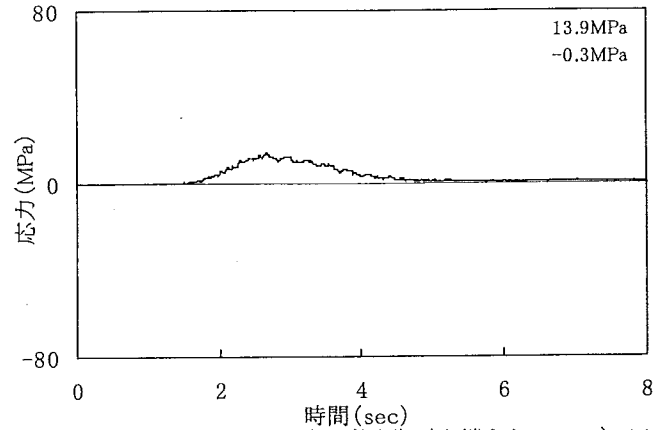


(g) G1 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.15)

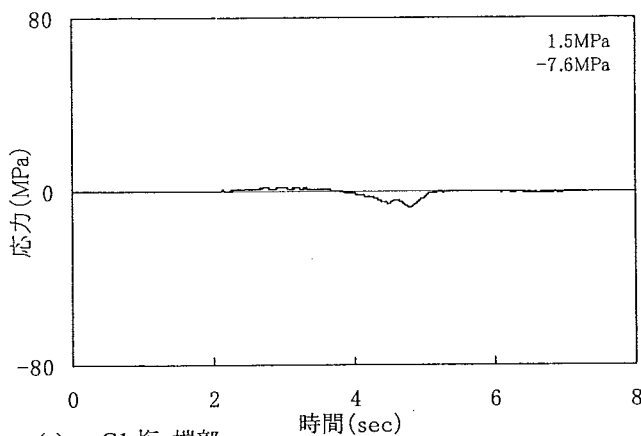
(h) G4 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.16)



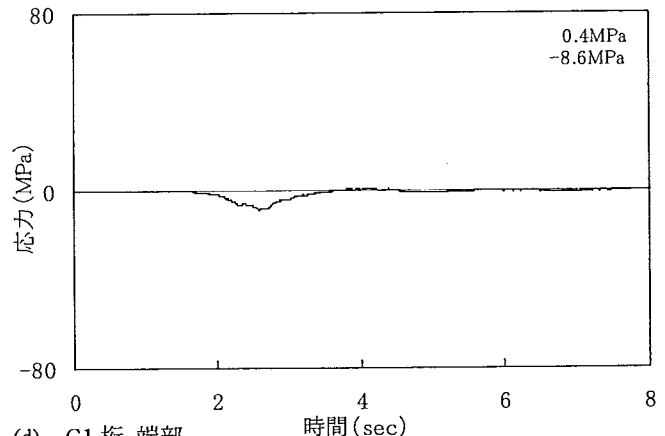
(a) 中間対傾構下側がセット (G2 桁側) (止端より 10mm) (ch.17)



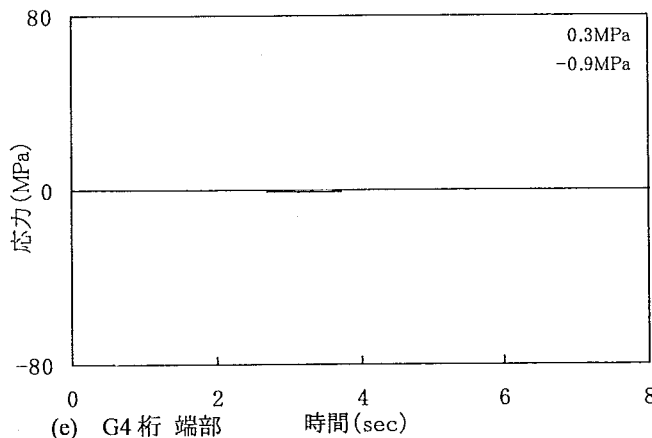
(b) 中間対傾構下側がセット (G3 桁側) (止端より 10mm) (ch.18)



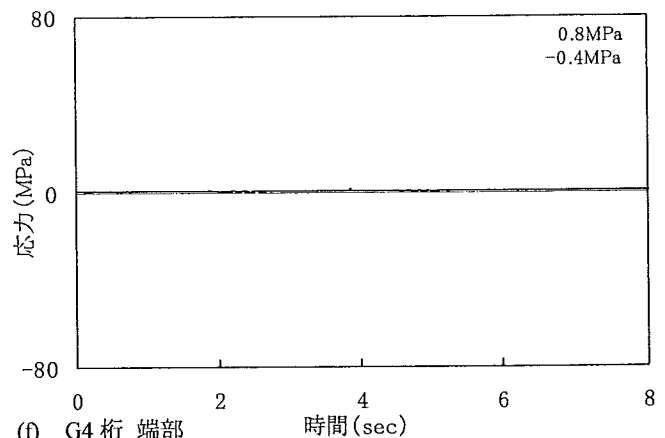
(c) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.19)



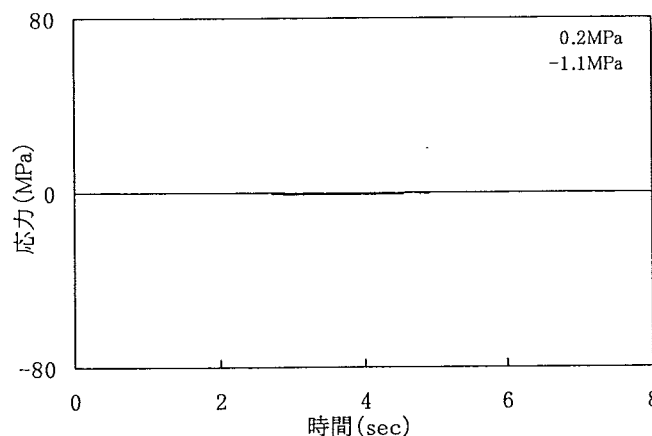
(d) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.20)



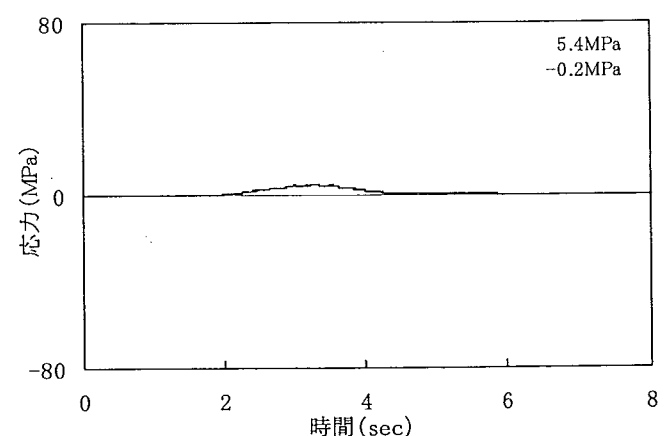
(e) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.21)



(f) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.22)

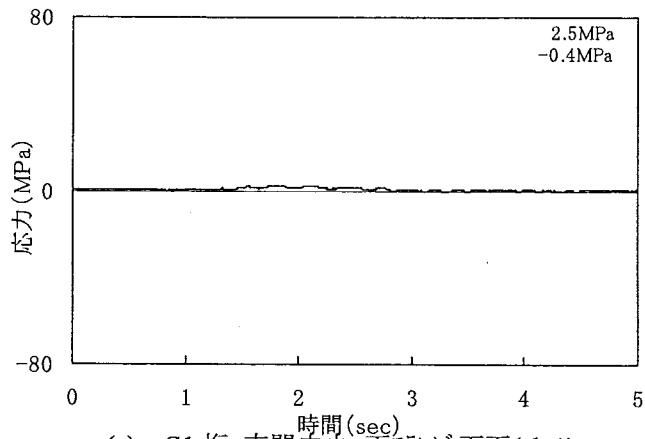


(g) G1 桁 支間中央 上フランジ下面(ch.23)

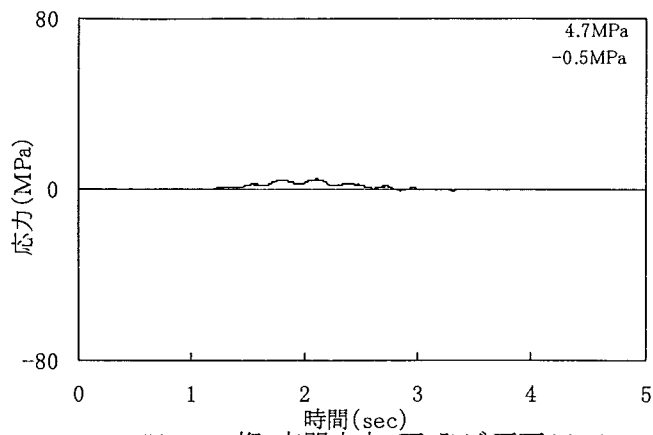


(h) 中間横桁下フランジ下面中央 (G1~G2 桁間) (ch.24)

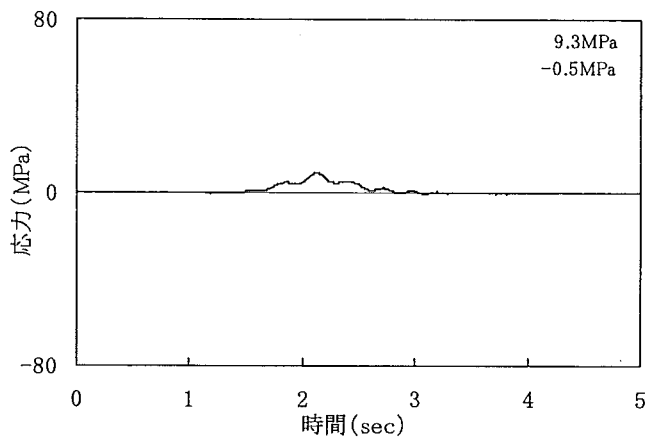
付図-2.6 上り車線走行時 走行速度:40km/h (2 回目)



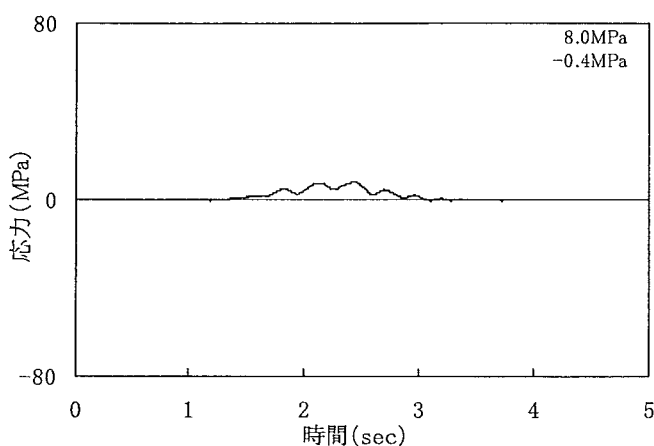
(a) G1 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.1)



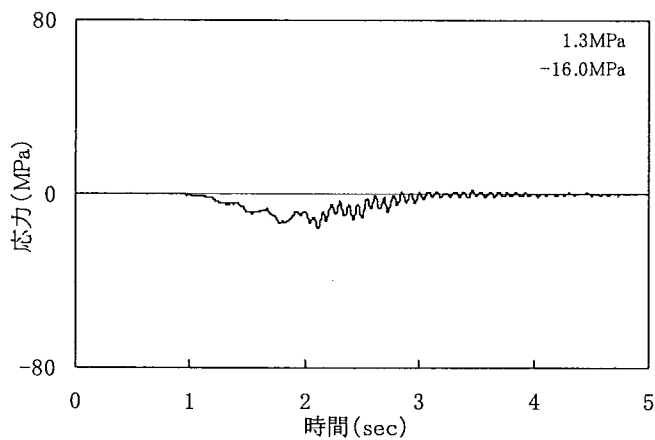
(b) G2 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.2)



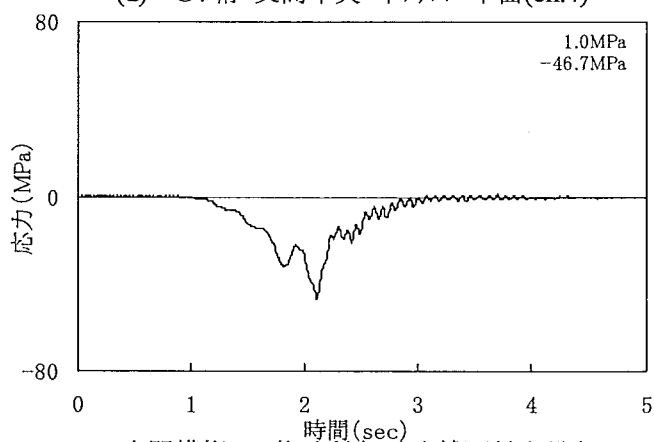
(c) G3 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.3)



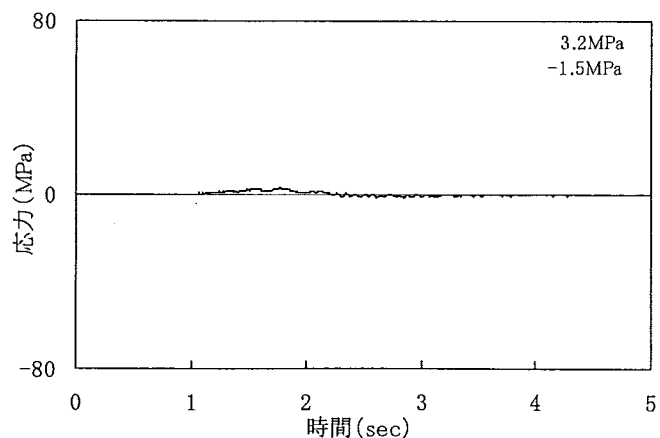
(d) G4 桁 支間中央 下フランジ 下面(ch.4)



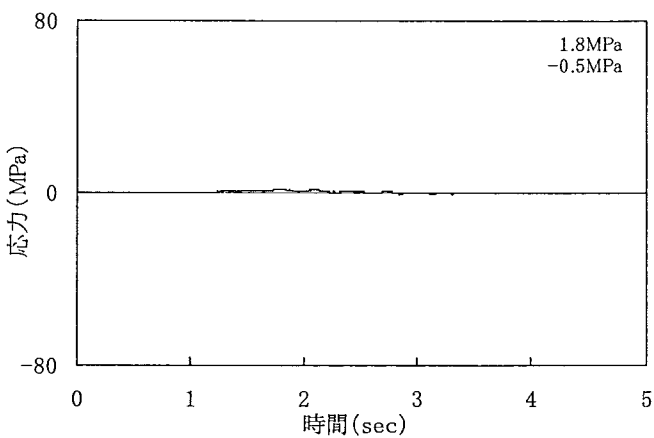
(e) 中間横桁 G1 桁 取付部 垂直補剛材 上端部(ch.5)



(f) 中間横桁 G4 桁 取付部 垂直補剛材 上端部(ch.6)

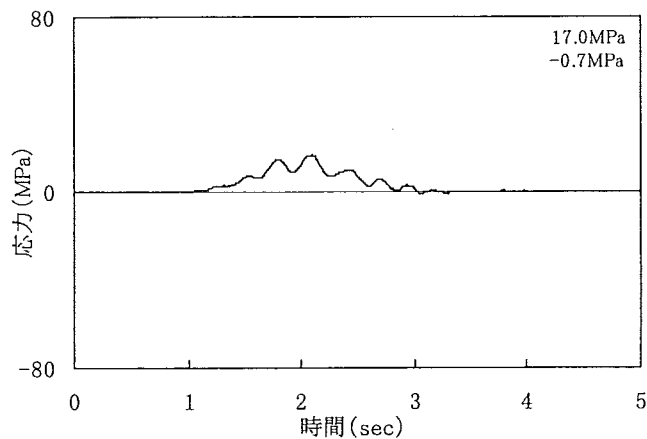


(g) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 10mm) (ch.7)

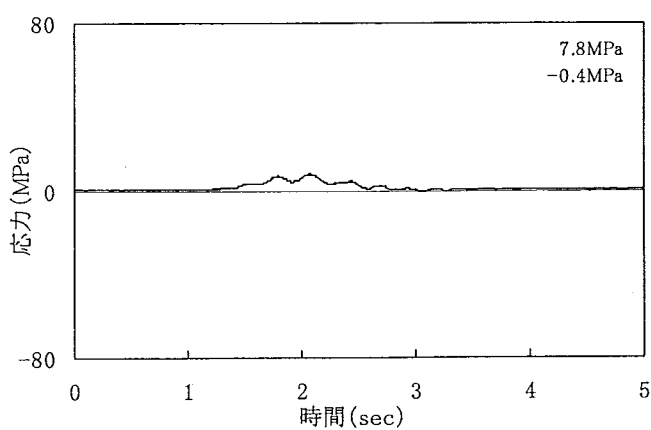


(h) G1 桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 100mm) (ch.8)

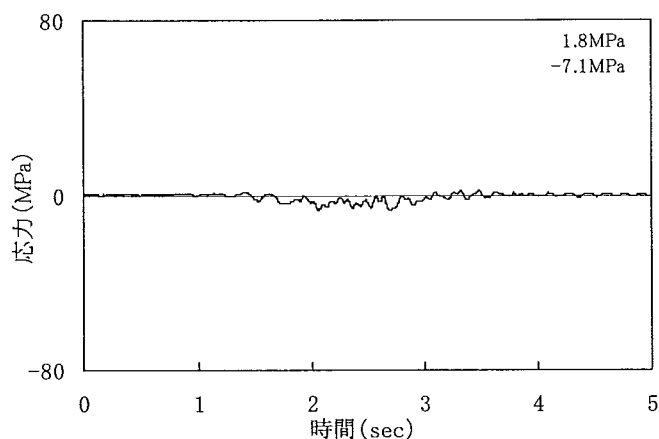
付図-2.7 下り車線走行時 走行速度:60km/h (2回目)



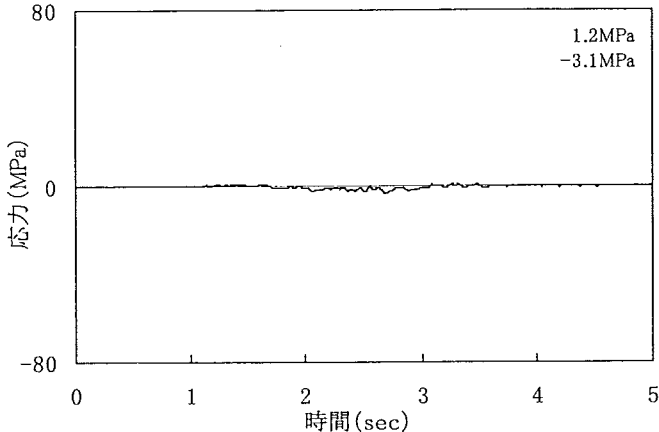
(a) G4 桁 横桁取付部ウェブカセット (止端より 10mm) (ch.9)



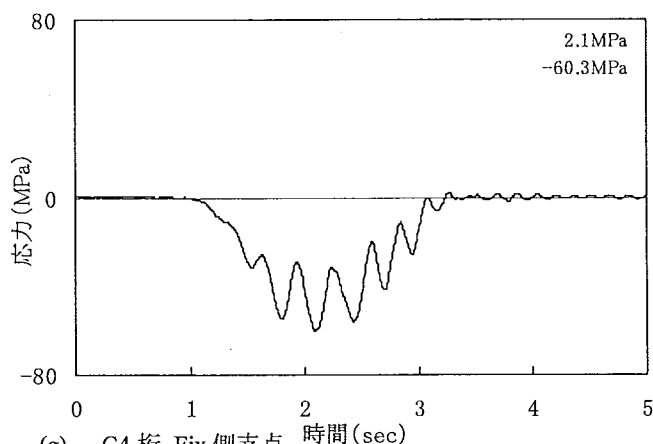
(b) G4 桁 横桁取付部ウェブカセット (止端より 100mm) (ch.10)



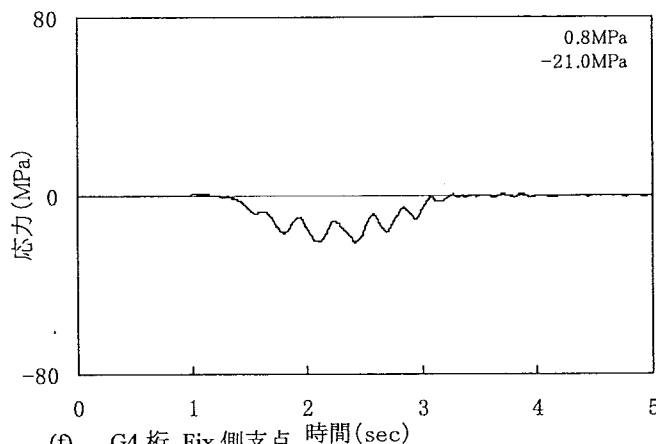
(c) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.11)



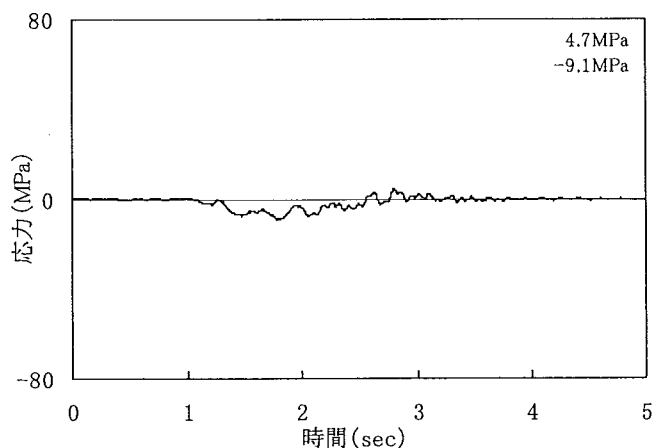
(d) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.12)



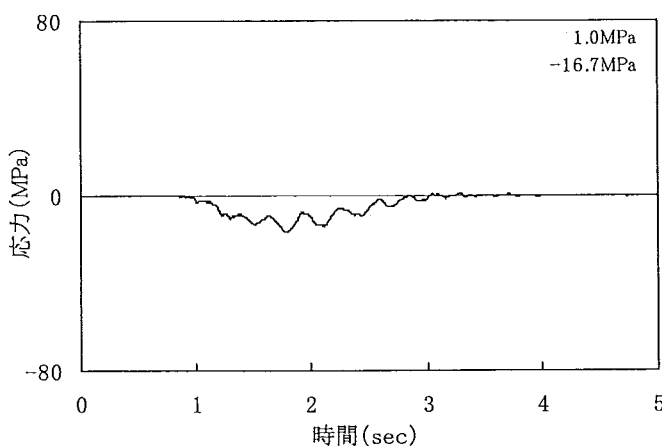
(e) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.13)



(f) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.14)

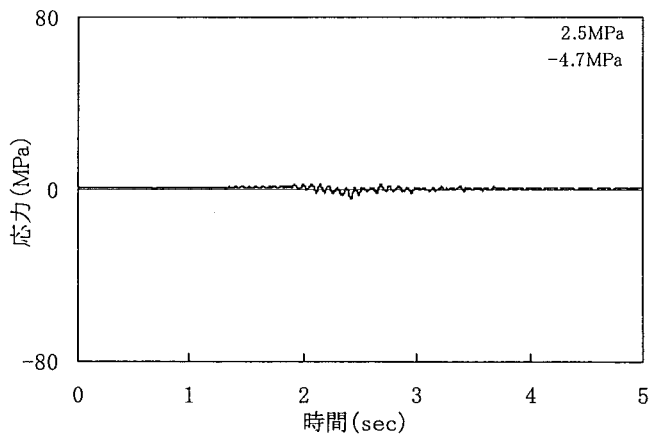


(g) G1 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.15)

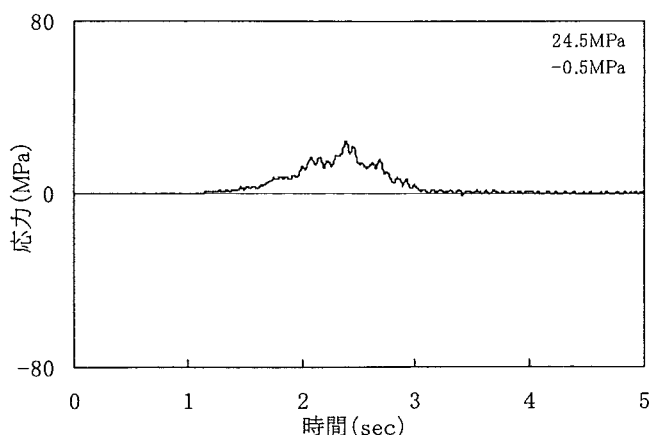


(h) G4 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.16)

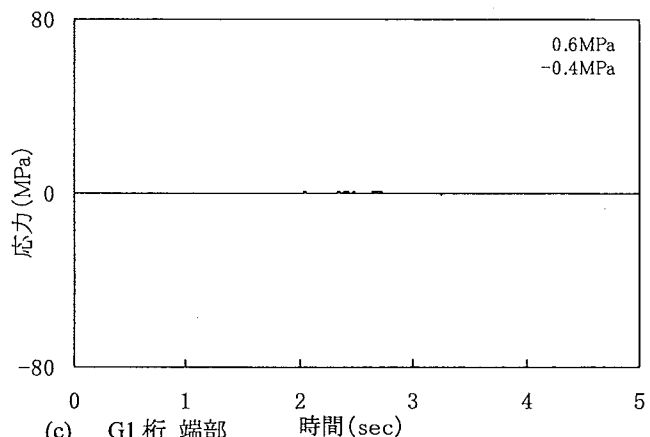
付図-2.8 下り車線走行時 走行速度:60km/h (2回目)



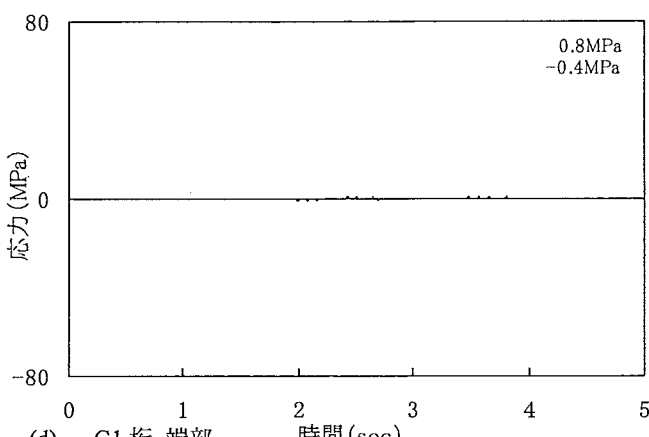
(a) 中間対傾構下側カセット (G2 桁側) (止端より 10mm) (ch.17)



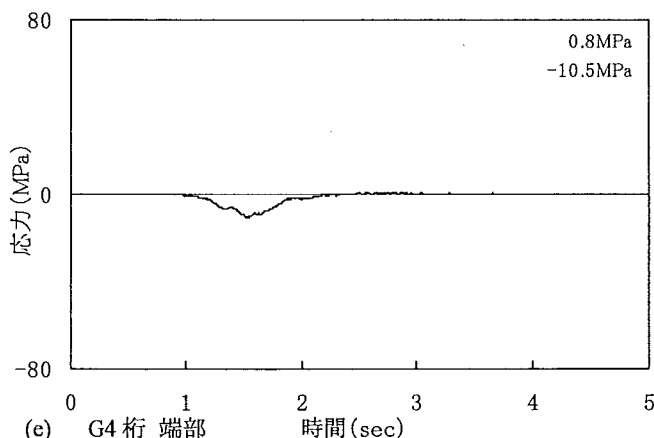
(b) 中間対傾構下側カセット (G3 桁側) (止端より 10mm) (ch.18)



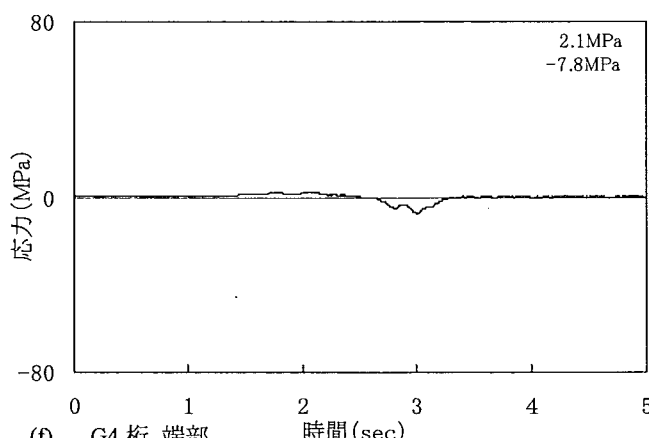
(c) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.19)



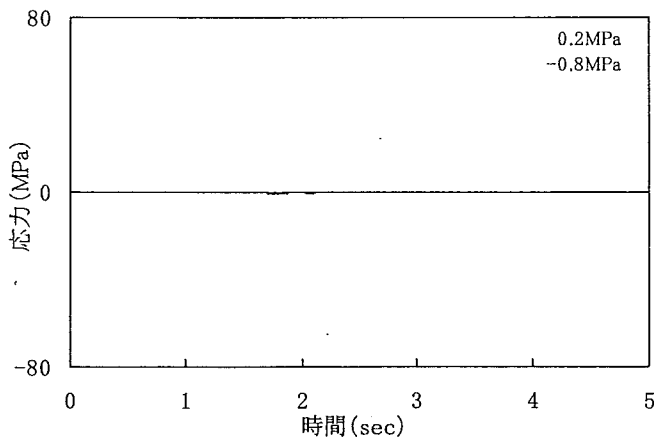
(d) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.20)



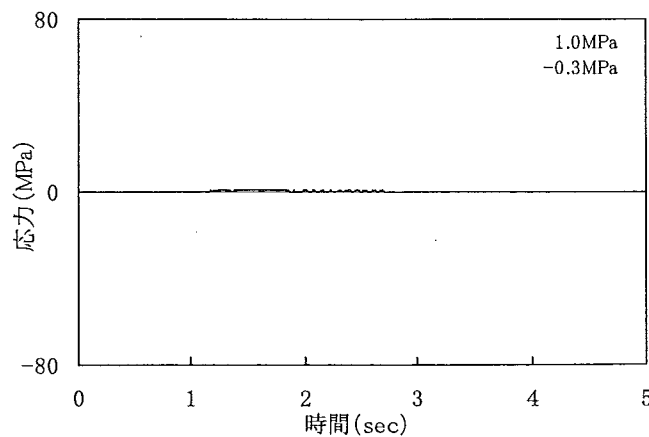
(e) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.21)



(f) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.22)

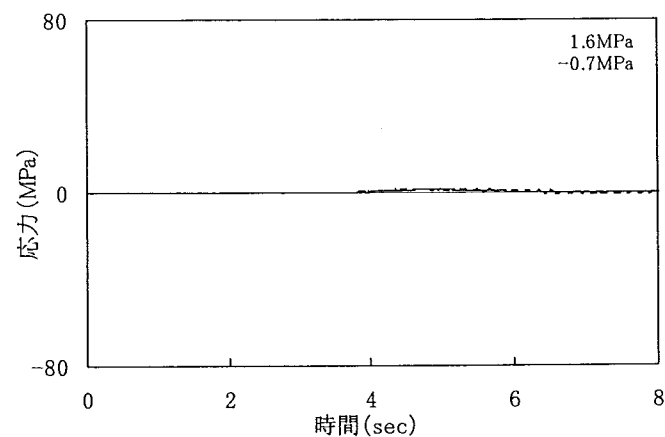
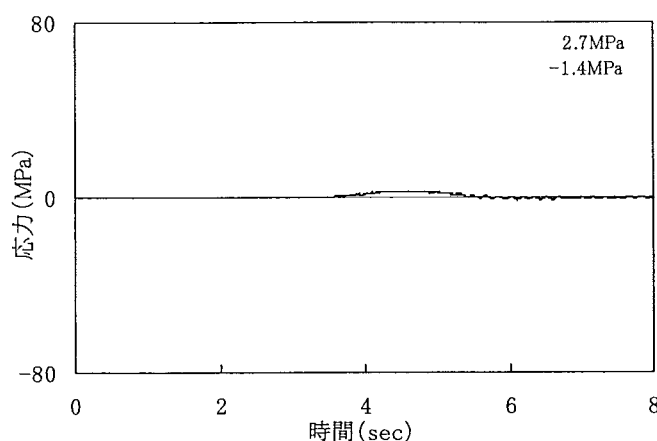
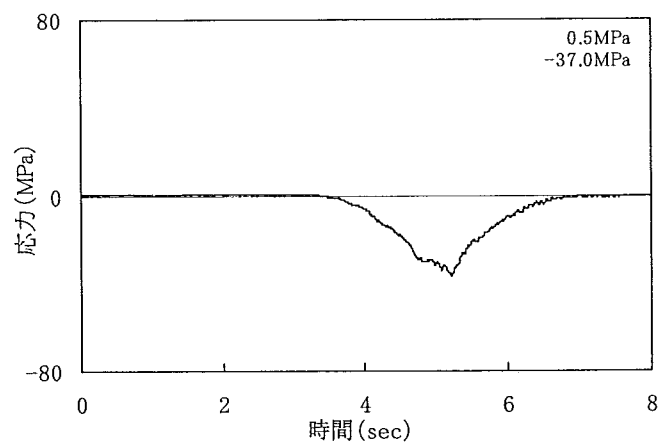
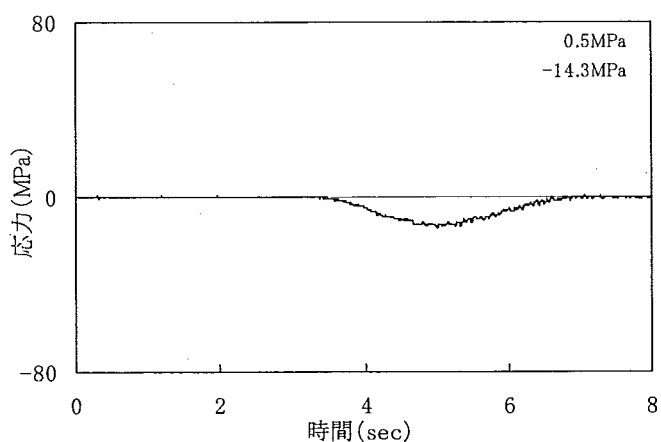
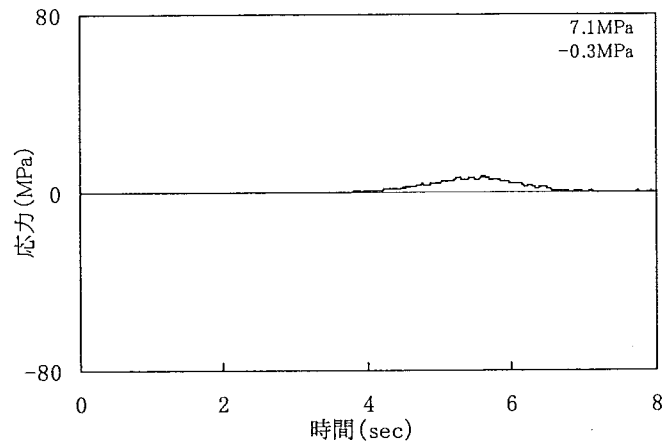
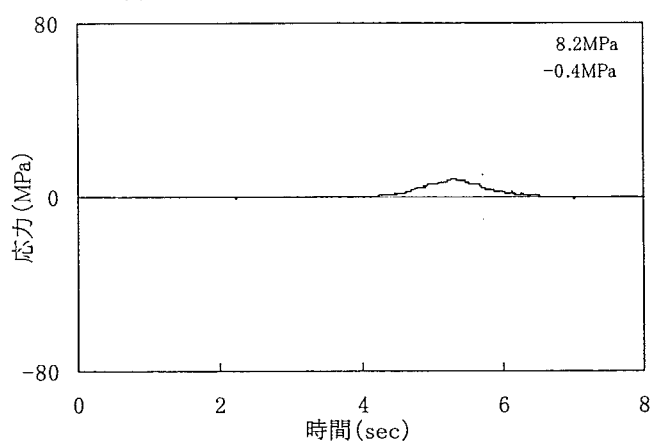
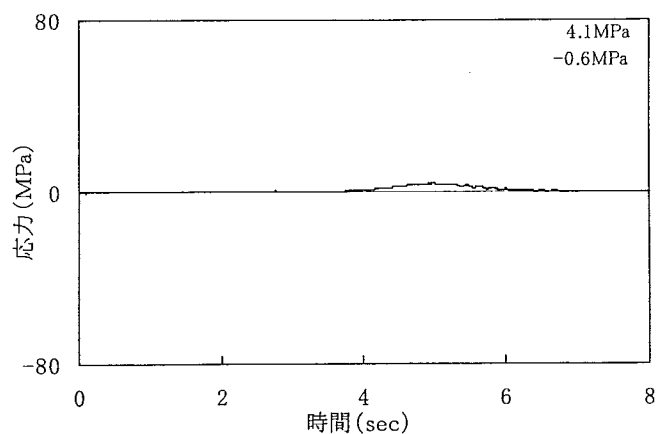
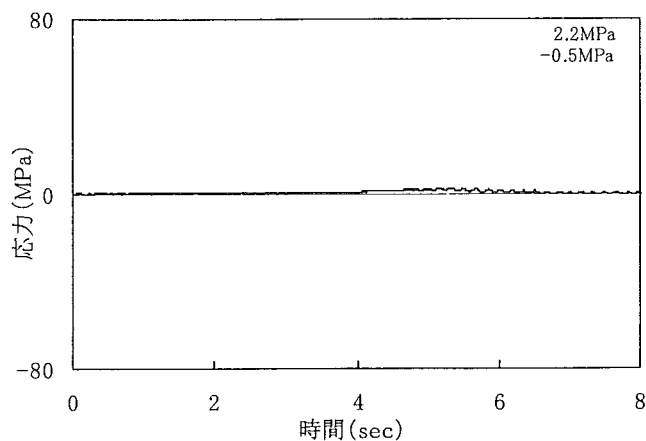


(g) G1 桁 支間中央 上フランジ下面(ch.23)

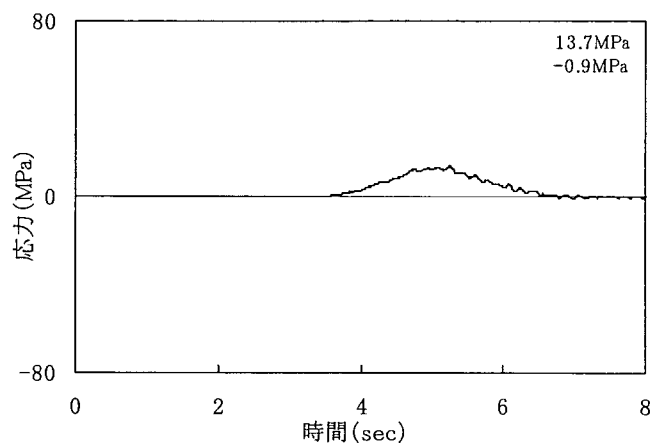


(h) 中間横桁下フランジ下面中央 (G1~G2 桁間) (ch.24)

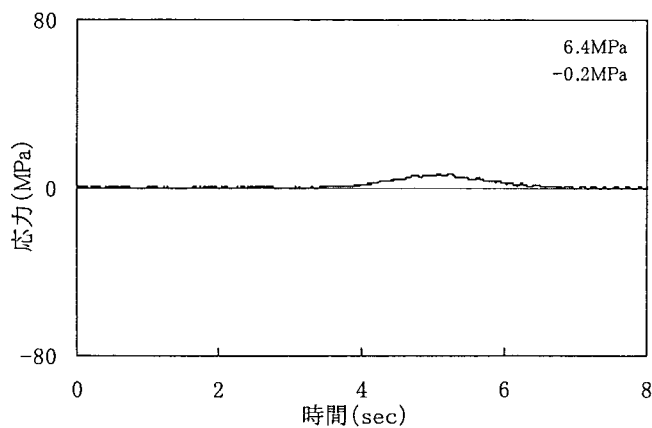
付図-2.9 下り車線走行時 走行速度:60km/h (2 回目)



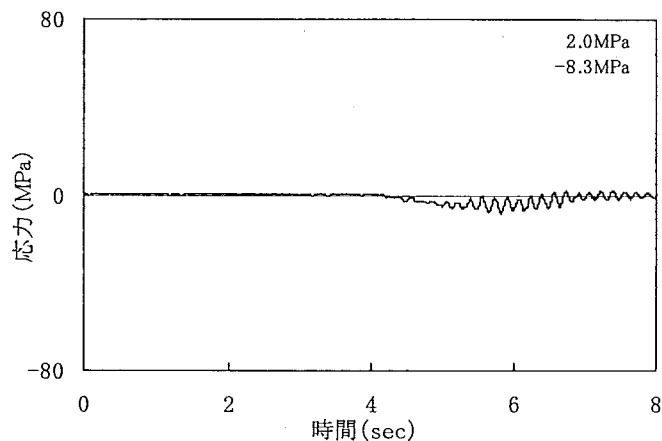
付図-2.10 下り車線走行時 走行速度:40km/h (2回目)



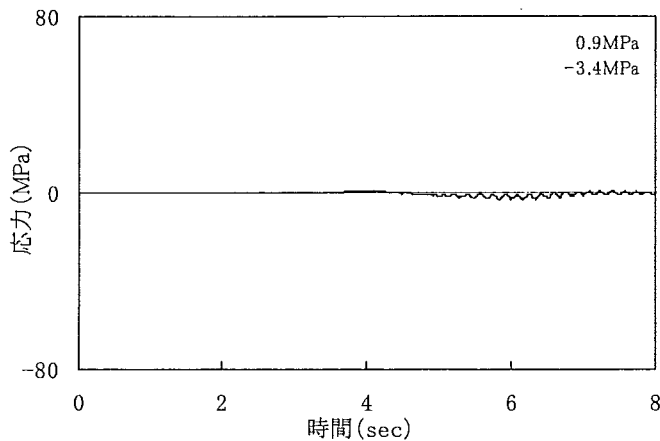
(a) G4 桁 横桁取付部ウェブカセット (止端より 10mm) (ch.9)



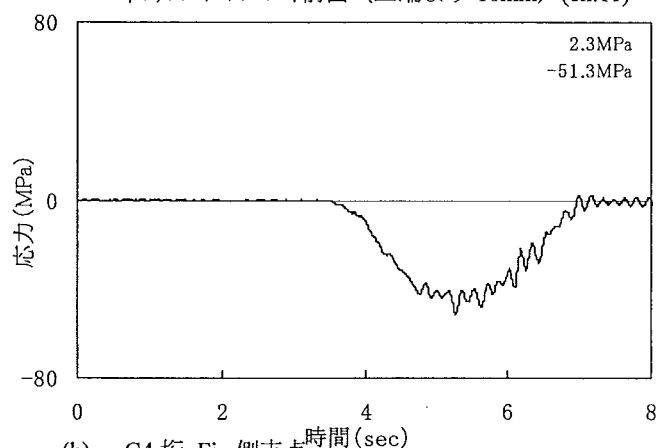
(b) G4 桁 横桁取付部ウェブカセット (止端より 100mm) (ch.10)



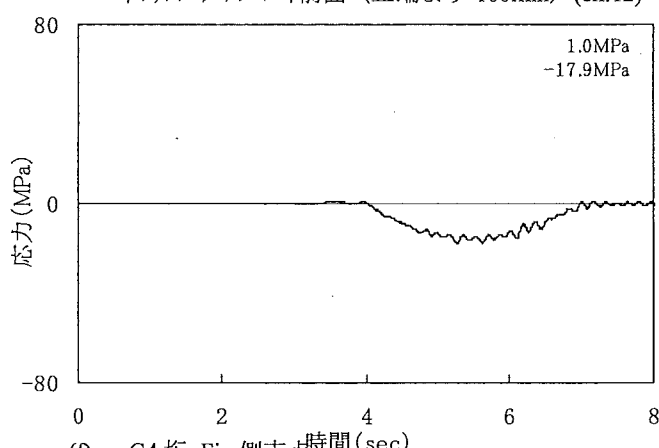
(c) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.11)



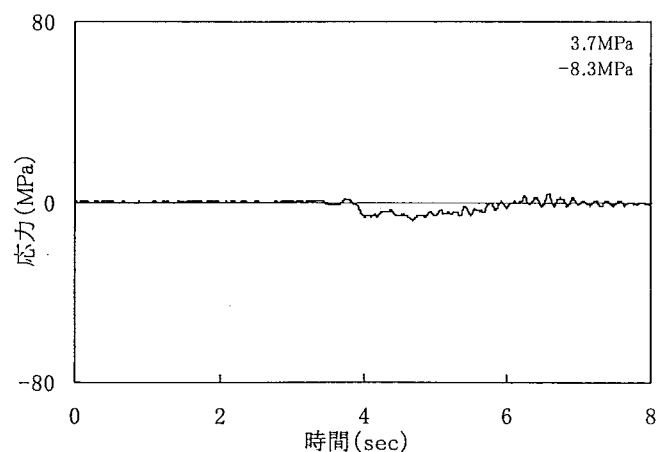
(d) G1 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.12)



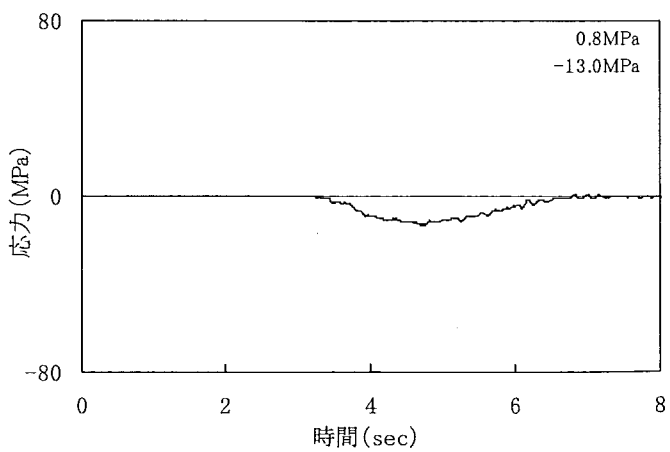
(e) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 10mm) (ch.13)



(f) G4 桁 Fix 側支点
下フランジソールプレート前面 (止端より 100mm) (ch.14)

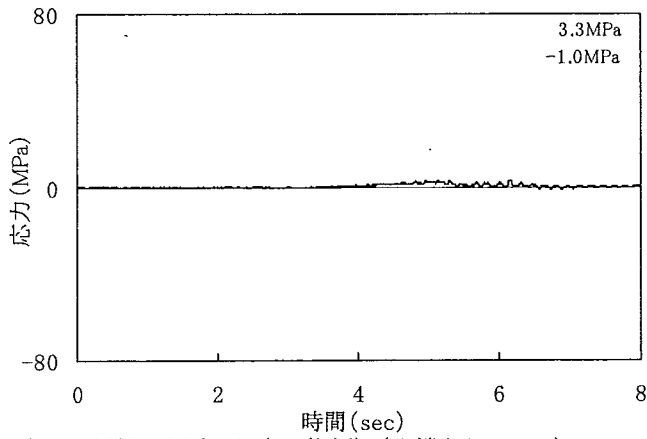


(g) G1 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.15)

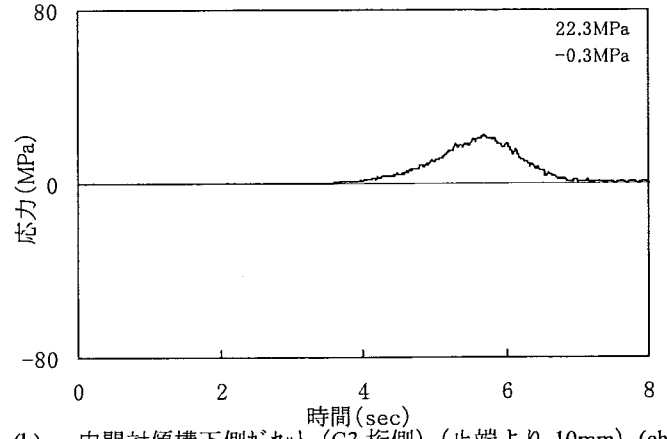


(h) G4 桁 Fix 側支点上
垂直補剛材下端部 (止端より 20mm) (ch.16)

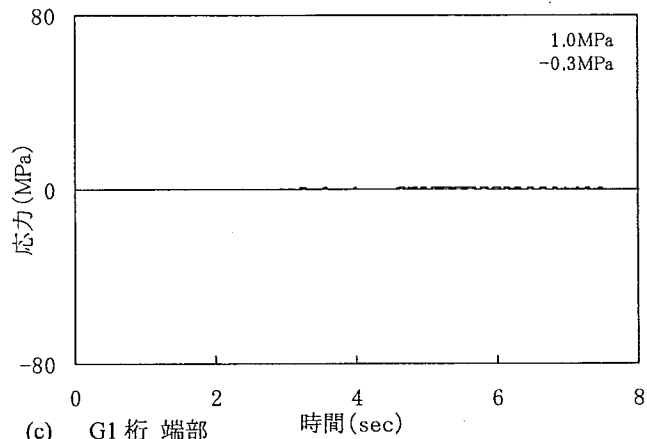
付図-2.11 下り車線走行時 走行速度:40km/h (2回目)



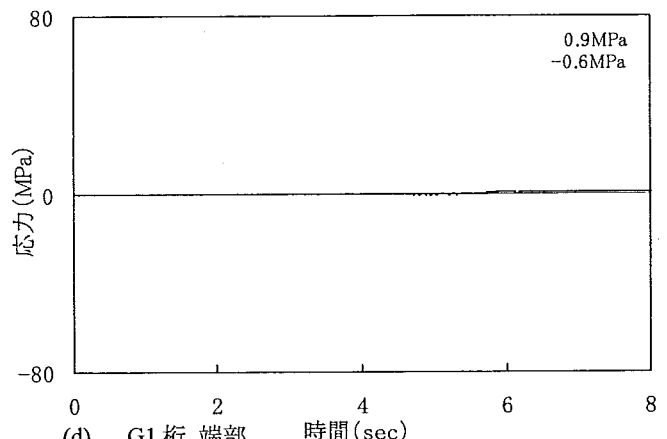
(a) 中間対傾構下側がセット (G2 桁側) (止端より 10mm) (ch.17)



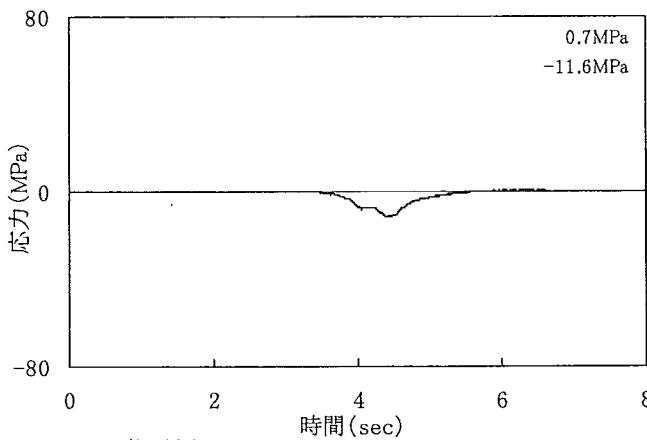
(b) 中間対傾構下側がセット (G3 桁側) (止端より 10mm) (ch.18)



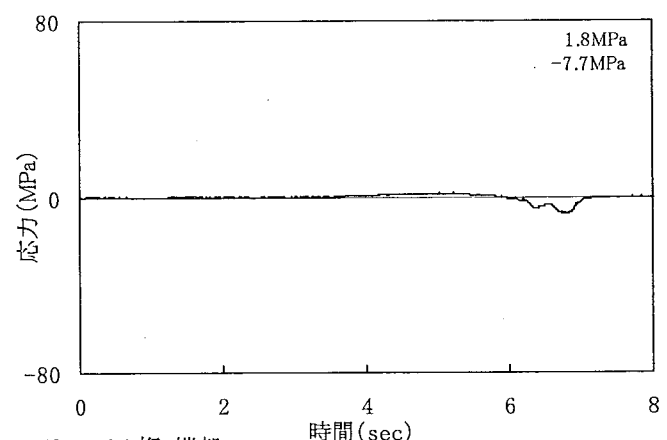
(c) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.19)



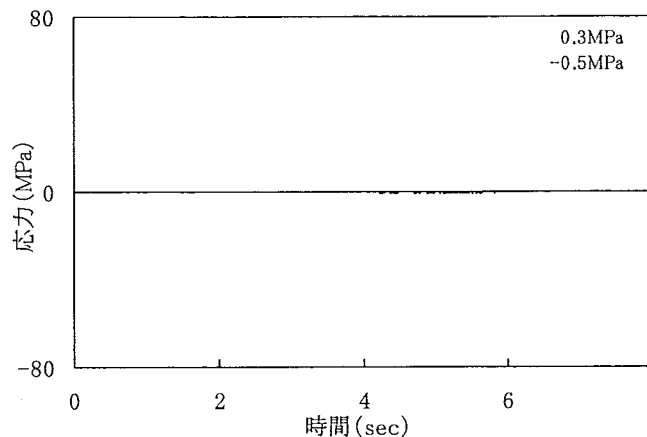
(d) G1 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.20)



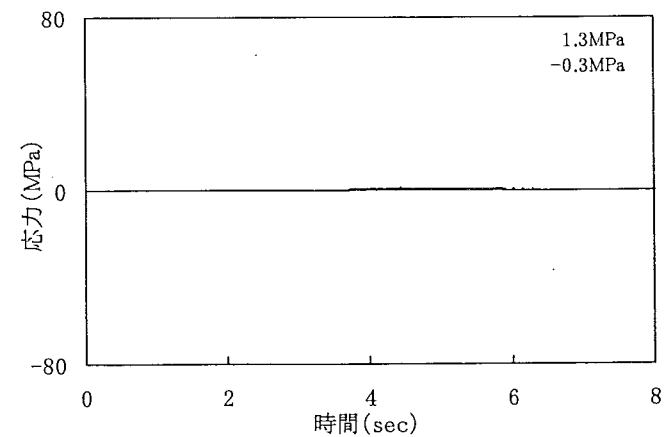
(e) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Fix 側) (ch.21)



(f) G4 桁 端部
床版打下ろし近傍垂直補剛材上端部 (Mov 側) (ch.22)

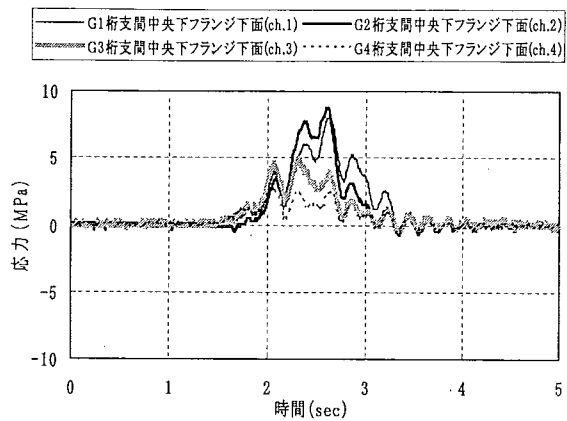


(g) G1 桁 支間中央 上フランジ下面(ch.23)

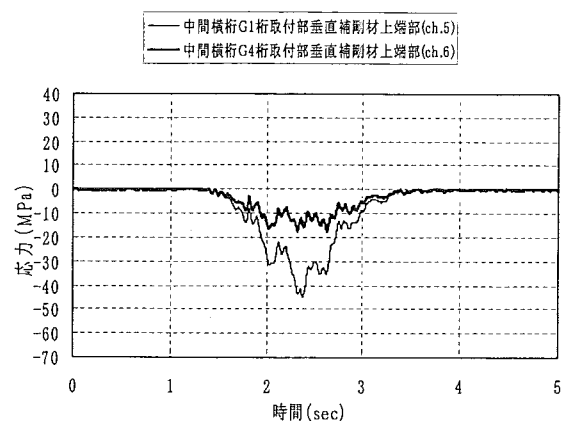


(h) 中間横桁下フランジ下面中央 (G1~G2 桁間) (ch.24)

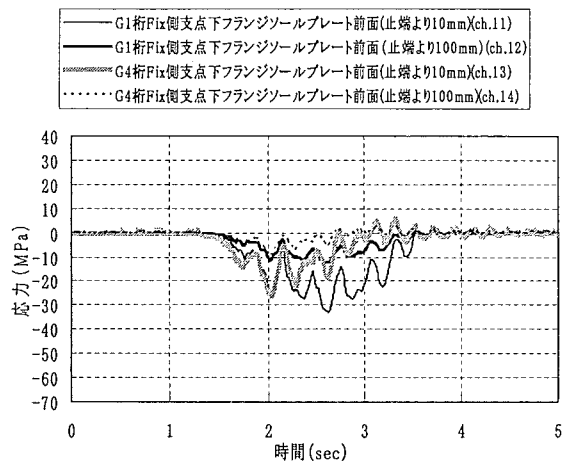
付図-2.12 下り車線走行時 走行速度:40km/h (2 回目)



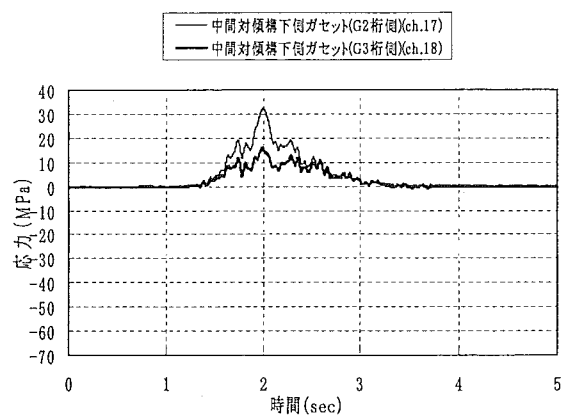
(a) 主桁下フランジ下面



(b) 垂直補剛材上端部

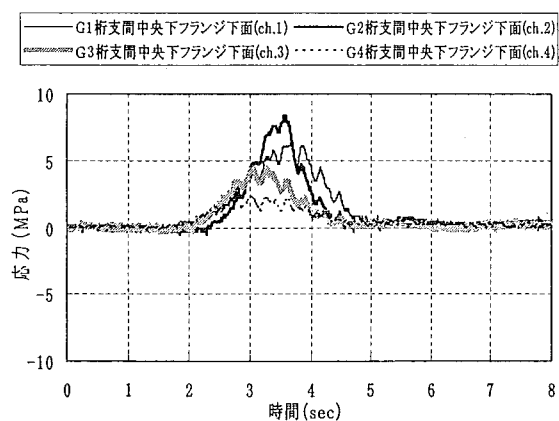


(c) 下フランジソールプレート前面

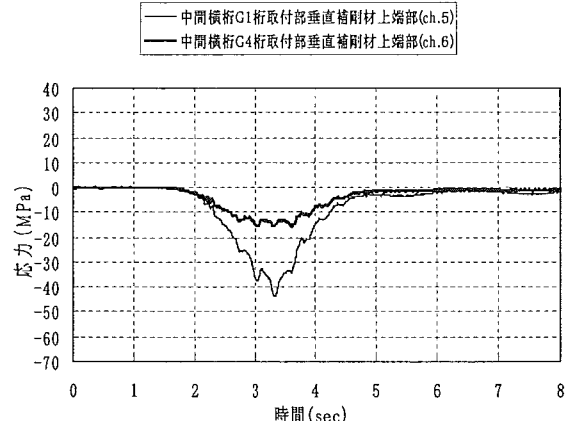


(d) 中間対傾構下側ガセット

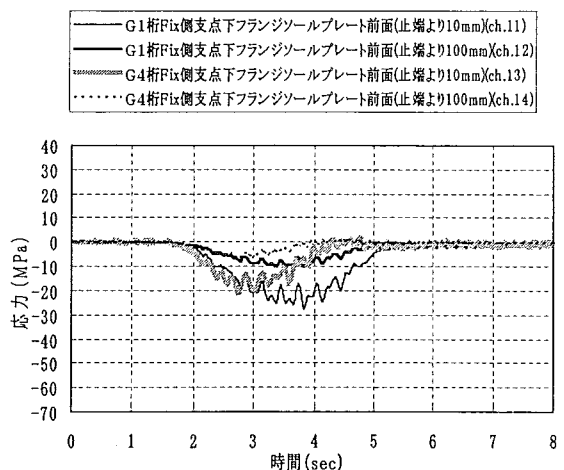
付図-2.13 上り車線走行時(60km/h)の各部の応力波形



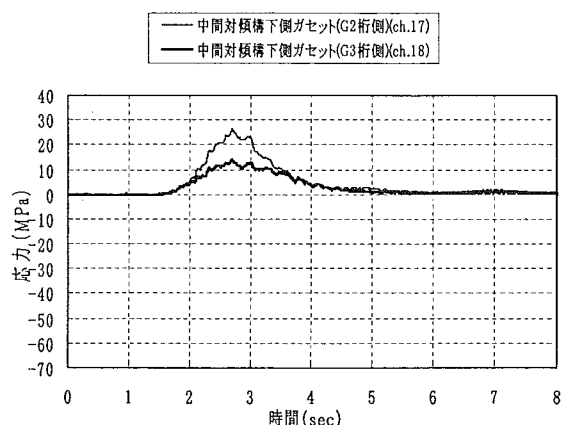
(a) 主桁下フランジ下面



(b) 垂直補剛材上端部

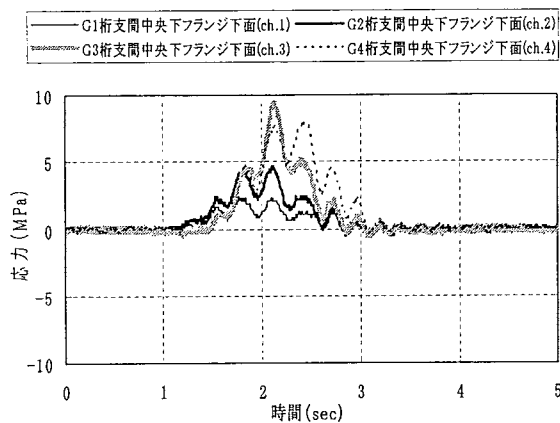


(c) 下フランジソールプレート前面

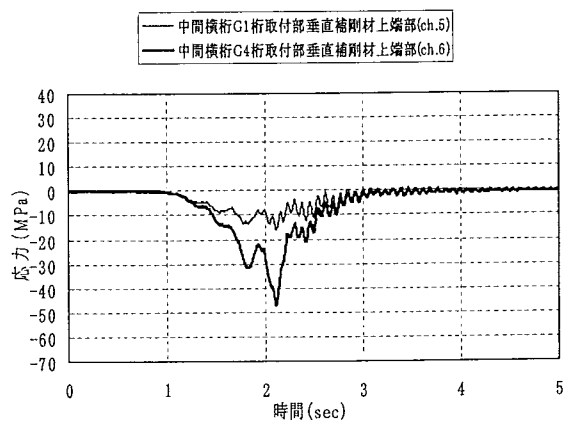


(d) 中間対傾構下側ガセット

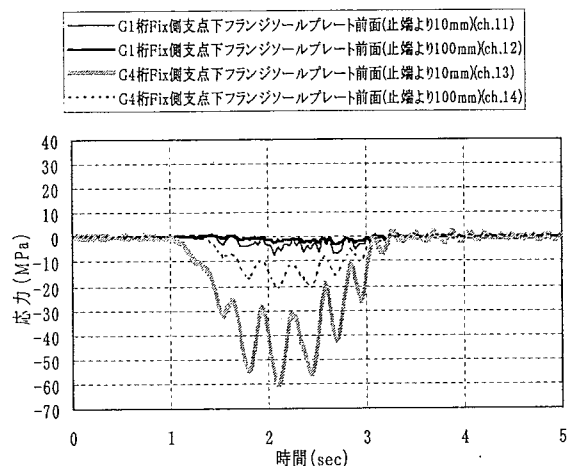
付図-2.14 上り車線走行時(40km/h)の各部の応力波形



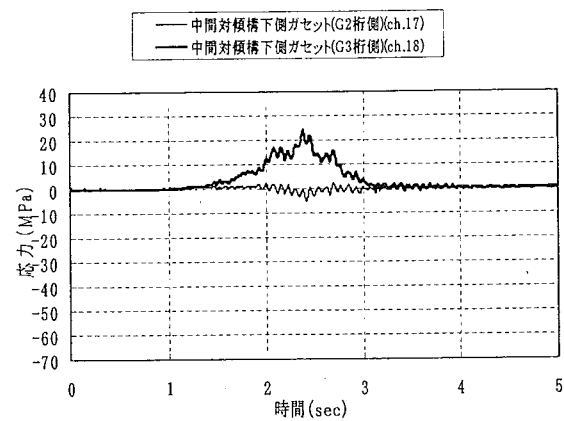
(a) 主桁下フランジ下面



(b) 垂直補剛材上端部

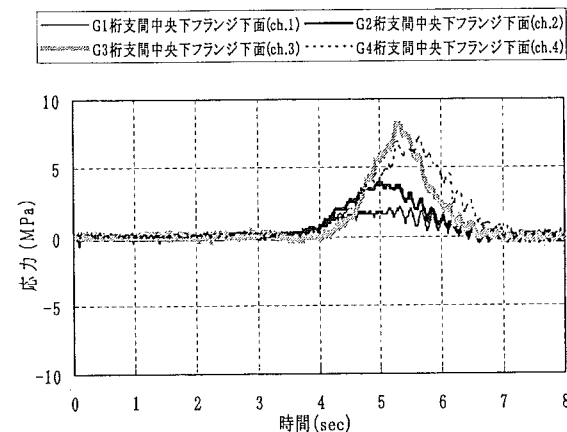


(c) 下フランジソールプレート前面

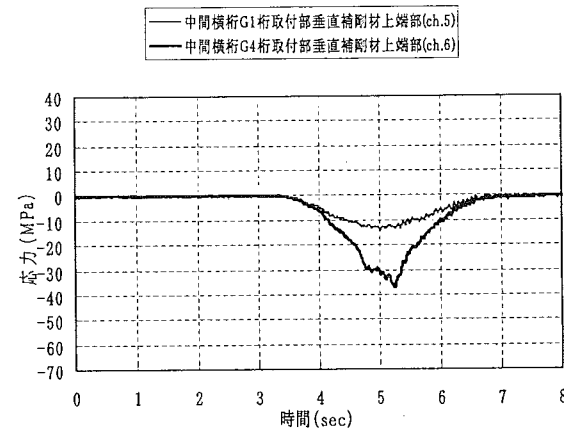


(d) 中間対傾構下側ガセット

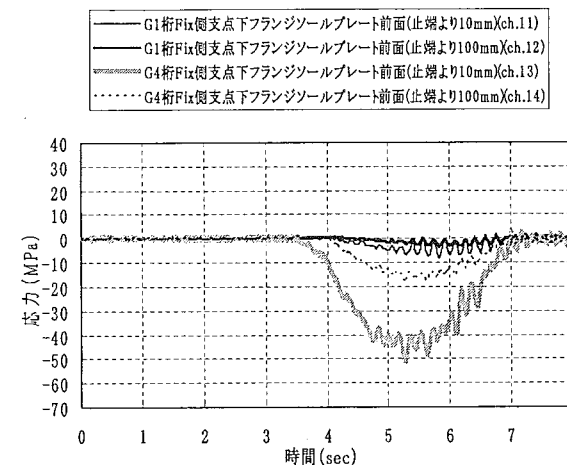
付図-2.15 下り車線走行時(60km/h)の各部の応力波形



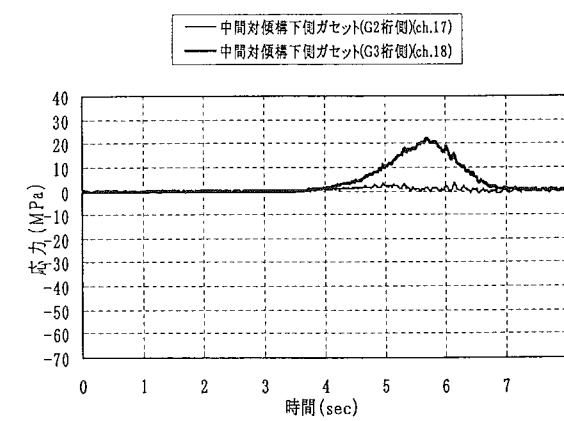
(a) 主桁下フランジ下面



(b) 垂直補剛材上端部



(c) 下フランジソールプレート前面



(d) 中間対傾構下側ガセット

付図-2.16 下り車線走行時(40km/h)の各部の応力波形

参考資料－３ 主桁支間中央下フランジの等価応力範囲等の時間変動

付表－３．１に、G1桁 支間中央 下フランジ下面 (ch.1)、及び G4桁 支間中央 下フランジ下面(ch.4)について、応力範囲頻度分布より求めた時間帯別の等価応力範囲平均値、最大応力範囲平均値/ σ_{T-20} 、G4桁 横桁取付部ウェブガセット (止端より 100mm) (ch.10)の 50年換算疲労損傷度平均値等を示す。対象期間は 2003 年 2 月 26 日から 2004 年 2 月 25 日の 1 年間で、期間中の日々の計測結果を時間帯別に統計処理し平均値を算出したものである。

付表－３．１ 等価応力範囲平均値等の時間帯別計測

(a) 全曜日対象

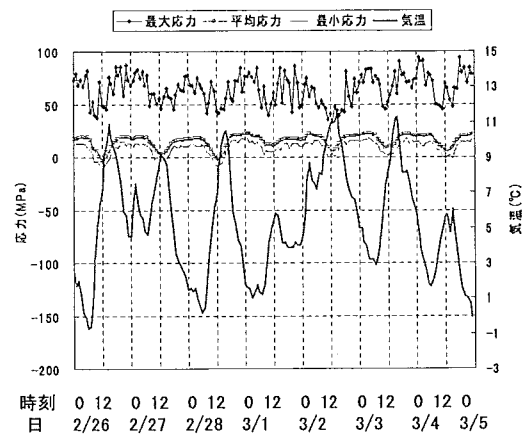
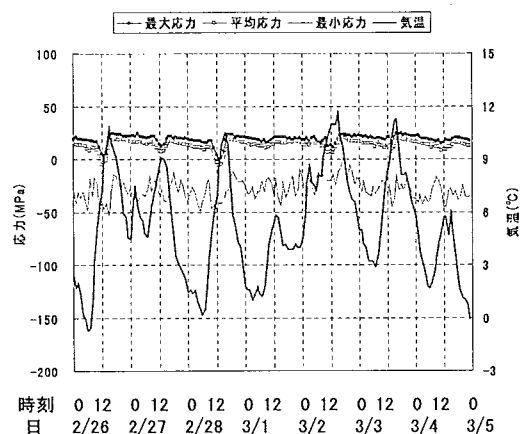
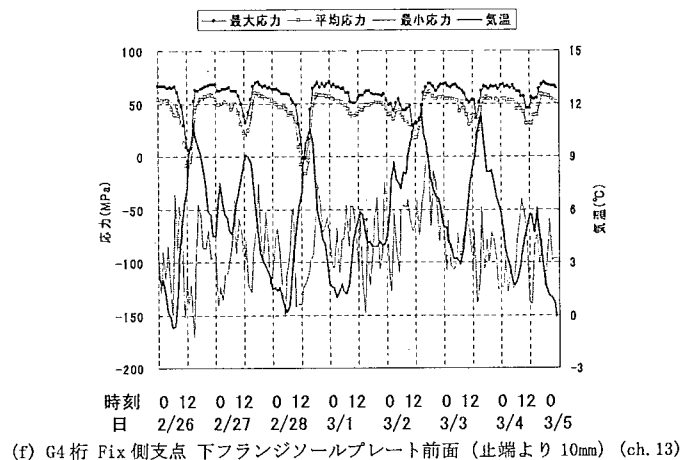
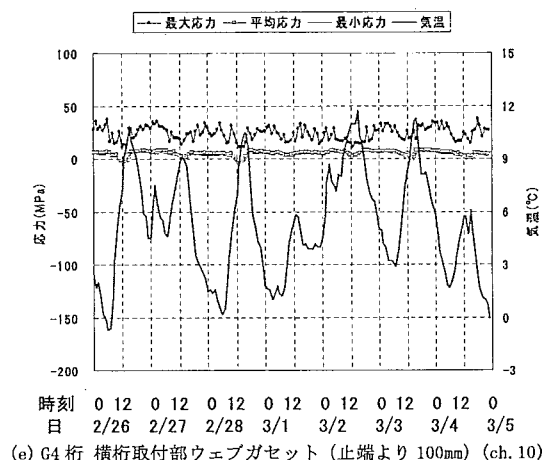
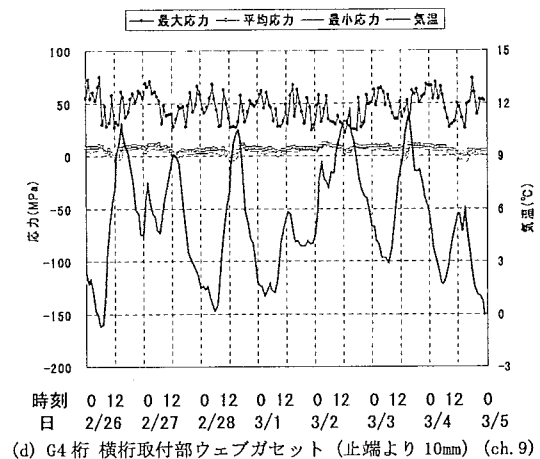
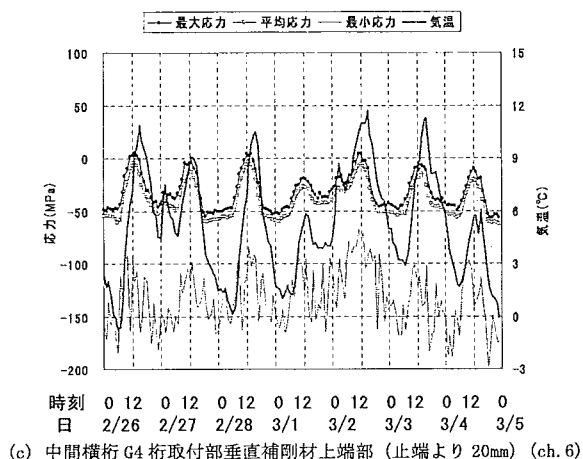
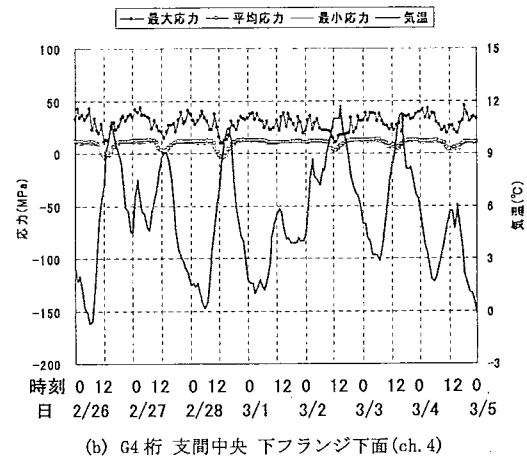
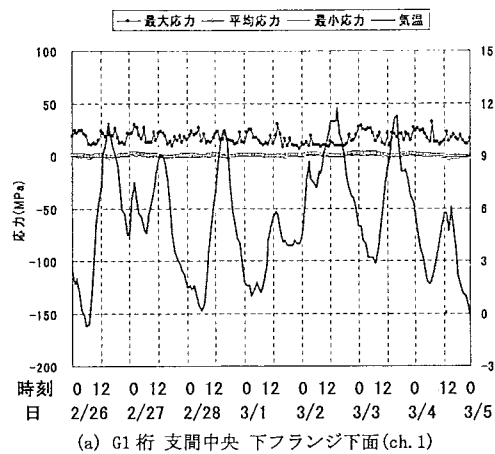
時刻	等価応力範囲平均値 (MPa)		最大応力範囲平均値/ σ_{T-20}		応力頻度平均		50年換算疲労損傷度	
							平均値	標準偏差
	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G4桁(ch.10)	
0時～1時	6.6	7.5	2.2	3.0	212	235	0.19	0.11
1時～2時	6.9	7.3	2.4	3.0	258	254	0.19	0.11
2時～3時	7.3	7.0	2.6	3.0	298	262	0.17	0.08
3時～4時	7.1	6.9	2.6	3.0	366	288	0.18	0.08
4時～5時	6.8	7.3	2.6	3.1	354	287	0.21	0.11
5時～6時	6.4	7.7	2.4	3.2	344	373	0.34	0.18
6時～7時	6.2	7.5	2.3	3.1	294	372	0.30	0.15
7時～8時	6.0	6.9	1.9	2.6	195	209	0.12	0.05
8時～9時	5.8	6.4	1.9	2.3	241	236	0.11	0.04
9時～10時	6.0	6.1	2.0	2.2	314	296	0.12	0.05
10時～11時	6.1	6.1	2.0	2.3	305	312	0.13	0.06
11時～12時	6.0	6.2	2.1	2.3	266	298	0.13	0.06
12時～13時	6.1	6.4	2.2	2.4	241	309	0.16	0.08
13時～14時	6.1	6.6	2.3	2.4	231	309	0.17	0.08
14時～15時	6.0	6.5	2.2	2.4	230	303	0.16	0.08
15時～16時	6.1	6.4	2.2	2.4	222	279	0.14	0.07
16時～17時	6.1	6.4	2.2	2.5	203	245	0.13	0.06
17時～18時	6.0	6.4	2.1	2.4	179	211	0.11	0.05
18時～19時	6.1	6.4	2.0	2.3	169	188	0.10	0.04
19時～20時	6.0	6.6	1.9	2.4	163	182	0.10	0.05
20時～21時	6.1	6.6	1.8	2.4	153	176	0.10	0.05
21時～22時	6.3	6.7	1.9	2.5	166	191	0.11	0.06
22時～23時	6.4	7.2	2.0	2.8	183	209	0.15	0.08
23時～24時	6.5	7.3	2.1	3.0	191	217	0.16	0.09

(b) 平日（月火水木金）対象

時刻	等価応力範囲平均値 (MPa)		最大応力範囲平均値/ σ_{T-20}		応力頻度平均		50年換算疲労損傷度	
							平均値	標準偏差
	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G1桁(ch.1)	G4桁(ch.4)	G4桁(ch.10)	
0時～1時	6.8	7.6	2.3	3.2	245	264	0.22	0.11
1時～2時	7.1	7.3	2.6	3.1	301	289	0.21	0.10
2時～3時	7.5	6.9	2.8	3.1	351	302	0.19	0.08
3時～4時	7.2	6.9	2.8	3.2	436	338	0.21	0.07
4時～5時	6.9	7.6	2.7	3.3	416	336	0.26	0.08
5時～6時	6.4	8.1	2.5	3.5	405	444	0.42	0.12
6時～7時	6.3	7.8	2.5	3.4	342	444	0.38	0.10
7時～8時	6.0	7.1	2.0	2.8	217	233	0.14	0.04
8時～9時	5.8	6.4	1.9	2.4	279	274	0.13	0.03
9時～10時	5.9	6.1	2.1	2.3	373	353	0.15	0.04
10時～11時	6.1	6.2	2.1	2.5	366	377	0.16	0.04
11時～12時	5.9	6.3	2.2	2.4	315	360	0.16	0.04
12時～13時	6.1	6.6	2.3	2.6	285	370	0.20	0.05
13時～14時	6.1	6.8	2.5	2.6	275	372	0.21	0.05
14時～15時	6.0	6.6	2.3	2.5	273	366	0.20	0.05
15時～16時	6.1	6.5	2.4	2.5	265	336	0.17	0.04
16時～17時	6.2	6.6	2.4	2.7	240	296	0.16	0.04
17時～18時	6.1	6.5	2.2	2.5	209	253	0.13	0.04
18時～19時	6.1	6.6	2.1	2.5	194	224	0.12	0.03
19時～20時	6.0	6.8	2.0	2.6	187	219	0.13	0.04
20時～21時	6.1	6.9	1.9	2.6	176	212	0.13	0.04
21時～22時	6.3	7.0	2.0	2.8	192	228	0.14	0.04
22時～23時	6.3	7.5	2.1	3.0	216	251	0.19	0.06
23時～24時	6.4	7.6	2.2	3.1	223	260	0.21	0.07

参考資料－４ 各部位における応力等の時間変動

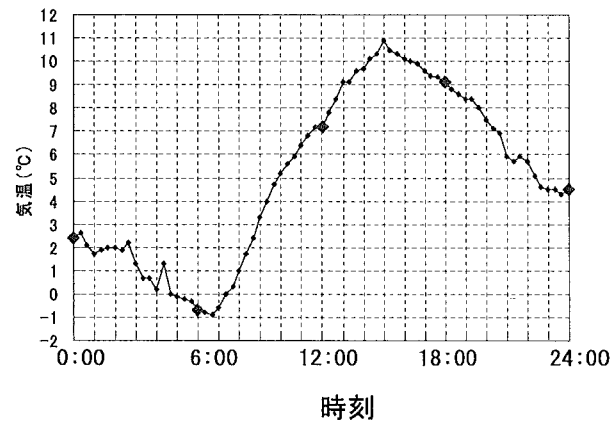
付図－４．１に２月２６日(水)から３月４日(火)(計測開始直後の１週間)の橋梁主要部位のタイム法最大応力（１時間単位）、平均応力（１時間単位）、最小応力（１時間単位）および気温の時間変動を示す。



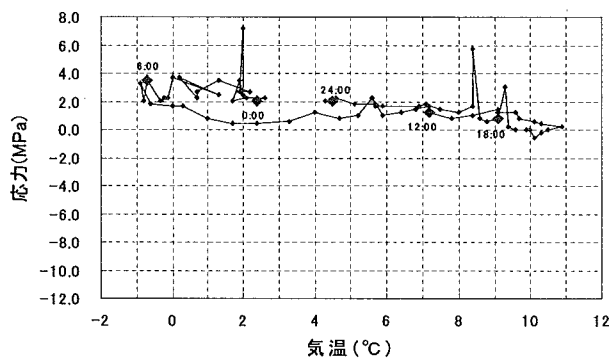
付図-4.1 各部位の応力、気温の時間変動

参考資料－５ 応力、変位と気温の関係

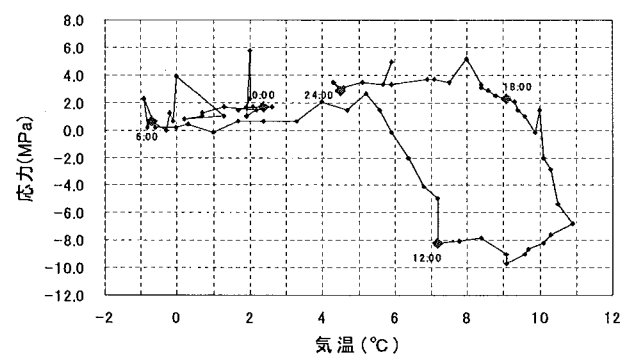
付図－５．１、５．２にそれぞれ 2003 年 2 月 26 日における気温の 24 時間変動、気温と G1 桁 支間中央下フランジ下面(ch.1)、G4 桁 支間中央 下フランジ下面(ch.4)の応力の 24 時間変動を示す。付図－５．３に 2 月 26 日における気温と桁端水平変位の 24 時間変動を示す。付図－５．４に 2 月 26 日における気温と桁端鉛直変位の 24 時間変動を示す。



付図－５．１ 気温の 24 時間変動

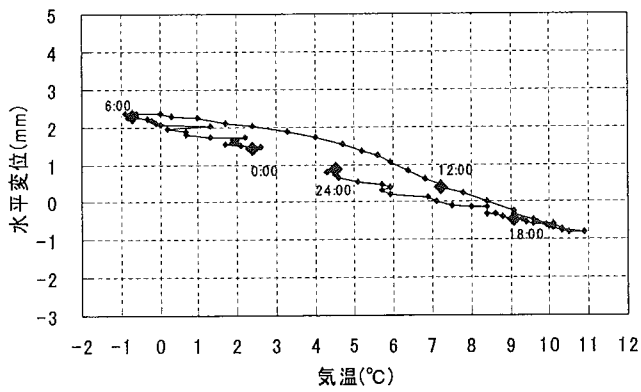


(a) G1 桁 支間中央 下フランジ下面(ch.1)

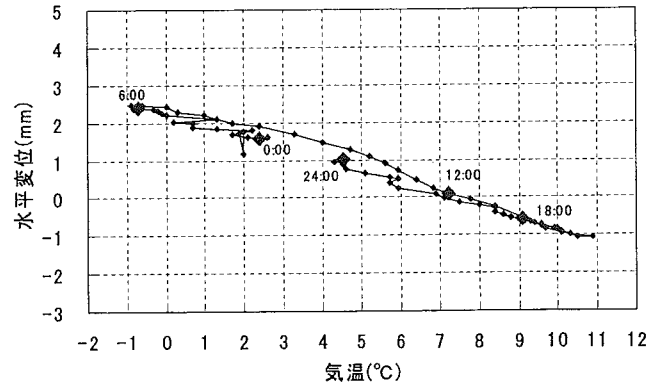


(b) G4 桁 支間中央 下フランジ下面(ch.4)

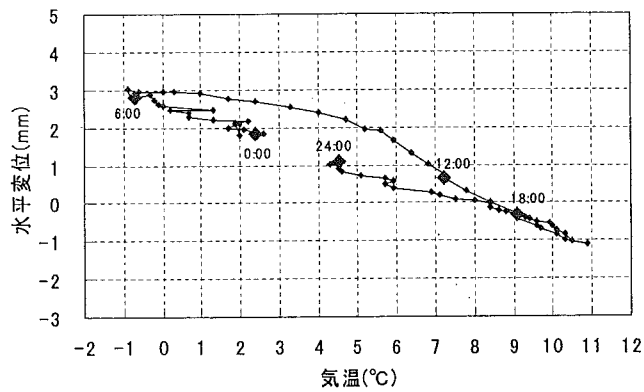
付図－５．２ 応力と気温の 24 時間変動



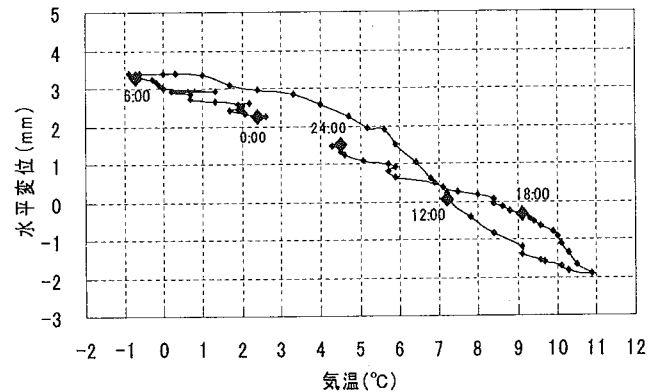
(a) G1 桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部 (ch. 29)



(b) G1 桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部 (ch. 30)

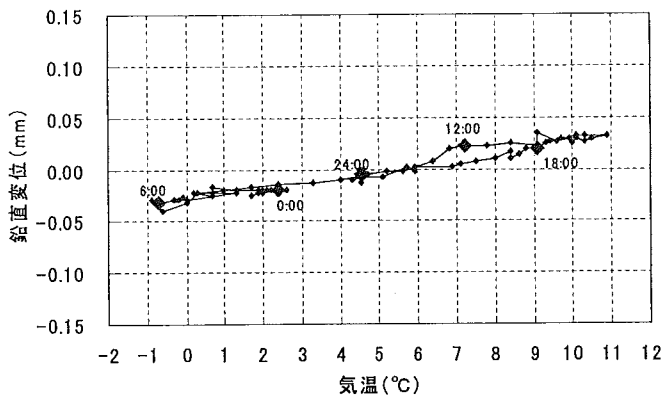


(c) G4 桁 Mov 側支点 垂直補剛材上端部 (ch. 31)

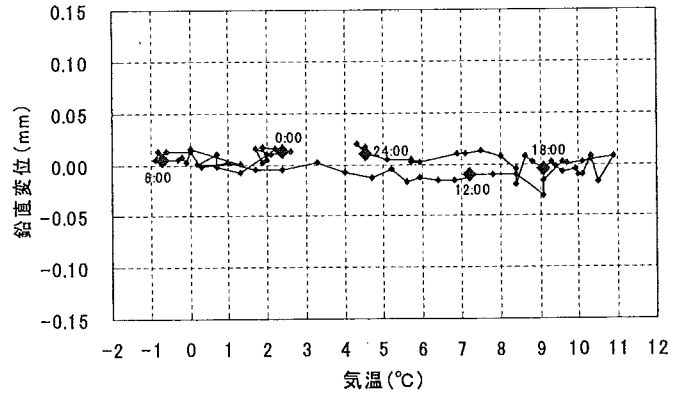


(d) G4 桁 Mov 側支点 垂直補剛材下端部 (ch. 32)

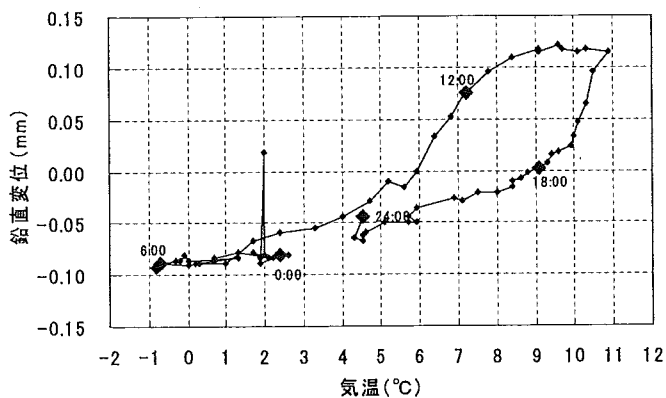
付図－5.3 気温と桁端水平変位の 24 時間変動



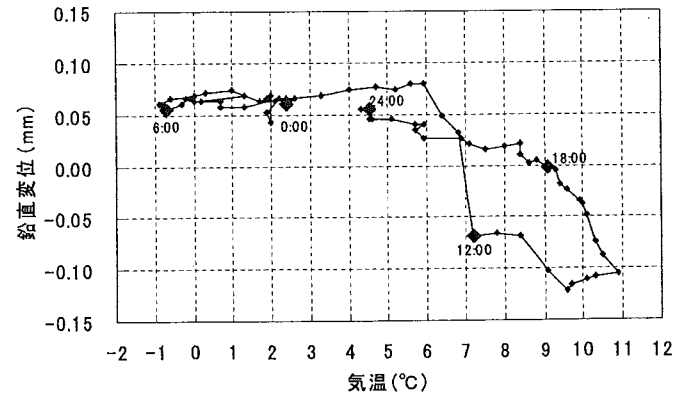
(a) G1 桁 Mov 側支台下フランジソールプレート前面 (ch. 25)



(b) G1 桁 Mov 側支台下フランジソールプレート後面 (ch. 26)



(c) G4 桁 Mov 側支台下フランジソールプレート前面 (ch. 27)



(d) G4 桁 Mov 側支台下フランジソールプレート後面 (ch. 28)

付図－5.4 気温と桁端鉛直変位の 24 時間変動

主な投稿論文

◆ 特集：橋梁の維持管理・補修補強 ◆

部材応力のモニタリングによる鋼橋の状態監視に関する基礎検討

村越 潤* 麓 興一郎** 高木伸也*** 次村英毅****

1. はじめに

道路橋ストックの高齢化が進展していく中で、これらの橋梁を健全な状態で適切に維持管理していくために、構造物の状態を定量的、かつ効率的に把握、評価するための点検・診断技術が求められている。

モニタリング技術とは、対象物にセンサを設置し、ひずみ、振動等の物理量を長期間測定し、分析することによって、対象物の状態変化を捉えようとするものであり、これまでも多くの調査研究が行われており^{1)~3)}、既に長大橋の動態観測⁴⁾等様々な形で活用されている。しかしながら、大半を占める中小規模の橋梁を対象とした場合、現行の橋梁点検等の維持管理業務を支援する観点から、モニタリング技術の適用性や活用方法については必ずしも十分整理されているわけではない。これらの技術を維持管理のどの場面で、どのように適用するのかといった点について十分検討した上で、維持管理全体の中での位置付けを整理しておくことが必要と考えられる。

本文では、鋼橋の維持管理支援へのモニタリング技術の適用性について整理するとともに、橋梁各部の応力、変位のモニタリングを対象として、経時的な変状や供用状態の変化の把握への適用性について、実橋での長期計測データを基に検討した結果について報告する。

2. モニタリング技術の適用対象の検討

モニタリングという表現は、一般に長期・連続的な監視（例えば、長大橋の動態観測や車両重量計測等）の意味合いで使われているが、ここでは、構造物の状態を把握し、健全度を評価するための点検・診断技術全般を対象として、これらの技術の維持管理における適用対象の整理を行った。

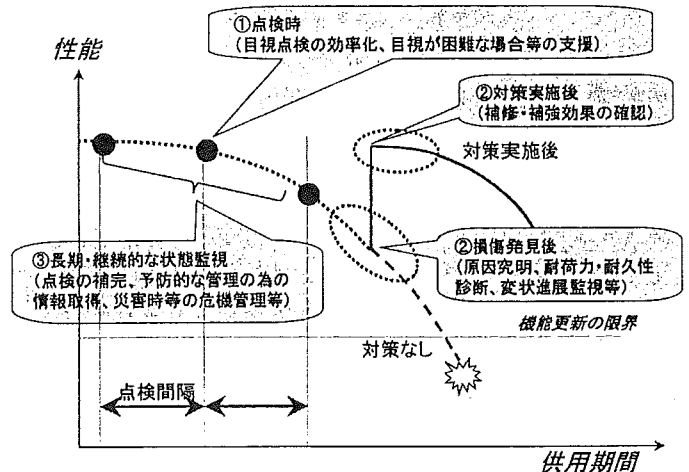


図-1 モニタリング技術による維持管理支援イメージ

表-1 モニタリングの適用対象と計測方法

計測方法 適用対象	連続的 (橋梁に機器を設置)	不連続的
事前対応 (変状発生前)	・ 地震時等の変状監視 等	・ 点検の効率化 ・ 目視点検が困難な部位の状況把握 等
事後対応 (損傷発見後、 対策実施後)	・ 損傷に対する原因究明、対策検討が必要な場合 ・ 耐荷力、耐久性の診断が必要な場合 ・ 対策後の変状の進展性の監視 ・ 補修補強対策後の効果確認 等	

図-1に構造物の健全度の概念図と、維持管理の各場面でのモニタリング技術による支援イメージを示し、表-1にモニタリング技術の適用対象を適用場面と計測方法により分類して示す。以下に、図-1に示す各場面における適用対象についてまとめる。

①点検時における目視点検等の支援

目視主体の点検時において、客観的・定量的なデータを必要とする場合や、目視では把握できない部材内部や点検しにくい（近接しにくい）部位の状態を把握する必要がある場合が適用対象と考えられる。この場合、多数の橋梁に対して適用可能な技術であることが重要な条件と考えられ、そのためには低コストの、点検の効率化を図ること

が可能な技術であることが必要である。あるいは、構造物としての重大損傷の予防に資する技術の場合には、多少のコスト増であっても、損傷の想定される橋梁・構造部位を絞り込んだ上での適用が考えられる。

②損傷発見後、対策実施後の調査支援

耐荷力の診断が必要な場合（例えば、損傷に伴う耐荷力の減少や橋の使用条件の変化が想定される場合）、損傷に対する原因究明や対策検討のために応力状態等を把握する必要がある場合、何らかの応急的な対策を講じた後に恒久対策実施までの安全性に係る状態を監視する必要がある場合、対策実施後の効果確認のために状態を把握する必要がある場合等が適用対象と考えられる。

③橋梁の状態の長期・連続的な監視

これについては、①と適用対象が重なる部分があるが、データ取得方法が連続的か不連続的かという点で異なることから別項目として整理した。橋梁状態を連続的に監視し、目視点検の補間、効率化や安全性の向上を目的とした適用が考えられるが、費用対効果、センサの長期耐久性・信頼性等の技術的課題、維持管理における位置付け等十分な検討が必要である。一つの位置付けとして、予防的な維持管理への活用といった観点から、例えば、特定の橋梁を対象として、それらを当該路線・地域の活荷重や腐食環境等の供用状態を長期モニタリングするセンサとして、また地震時の被災情報検知のセンサとして活用することが考えられる。

以上のように、道路橋へのモニタリング技術の適用に当たっては、適用対象、必要性及びその効果を検討した上で、それに見合った技術を抽出することが重要と考えられる。

3. 応力、変位計測データに基づく鋼橋の状態監視に関する検討

前章2. ②のケースを対象としたモニタリング（損傷が発見され損傷部位が特定された後の変状の進展性の監視や、供用状態の変化の監視）の限界や適用性を見極めるために、現在、(i) 変状が発生した場合の橋梁各部の応力変化や、(ii) 実橋の交通供用下における応力変動の把握のための基礎検討を行っている。

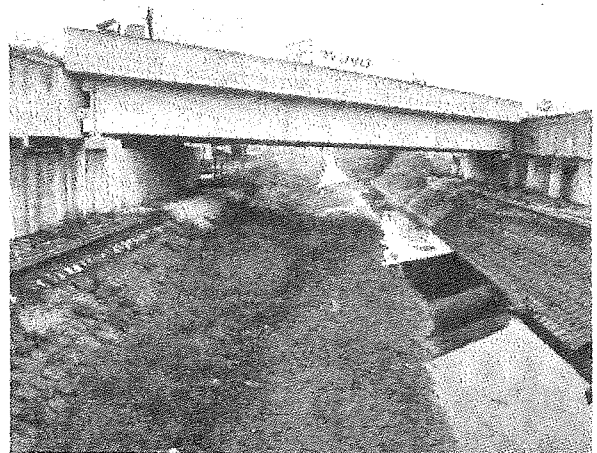
前者 (i) については、応力等により把握可能な

変状の程度を判断するために、土研構内の試験橋をモデル橋として、擬似的変状前後の応力計測及び3次元FEMによる変状に対する応力解析を検討中である。後者 (ii) については、実橋において20ton荷重車の動的載荷試験を実施するとともに、現在、約1年間を目途に、応力及び桁端変位の長期計測を実施中である。

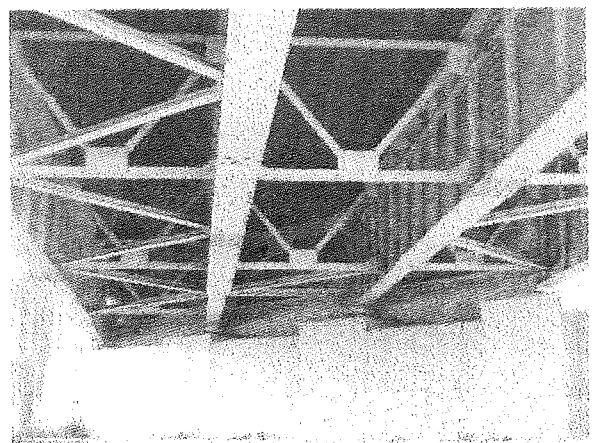
以下、後者の実橋計測について、動的載荷試験及びこれまでに得られた約3ヶ月間の計測データについて、整理、分析した結果をまとめる。

3.1 対象橋梁

対象とした橋梁は、一般国道17号の鋼単純非合成I桁橋（関東地方整備局大宮国道工事事務所管内）である。写真-1に橋梁の状況を、図-2に一般図を示す。架設年次は平成3年（平成2年道示適用）で、日大型車交通量は5288台／車線（平成11年センサス調査）である。なお、橋下からの目視調査では、鋼部材、支承、床版に特に損傷、変状は確認されていない。



(a) 橋梁全景



(b) 桁下の状況

写真-1 計測対象橋梁

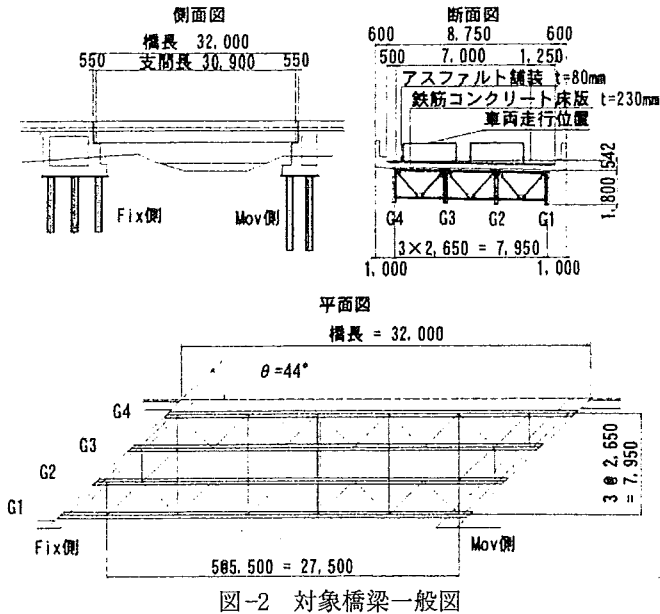


図-2 対象橋梁一般図

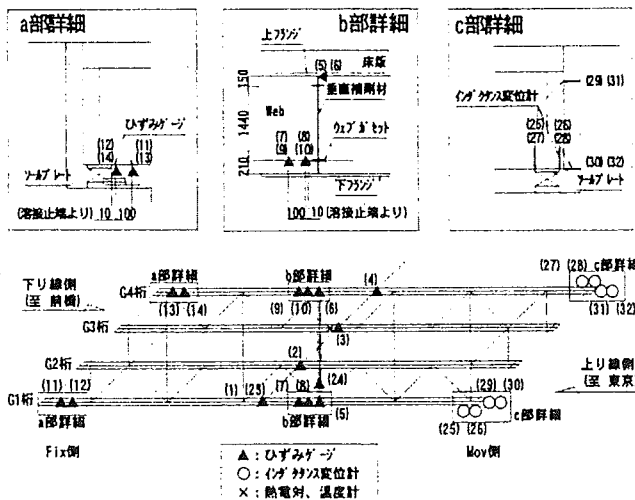


図-3 センサ設置位置

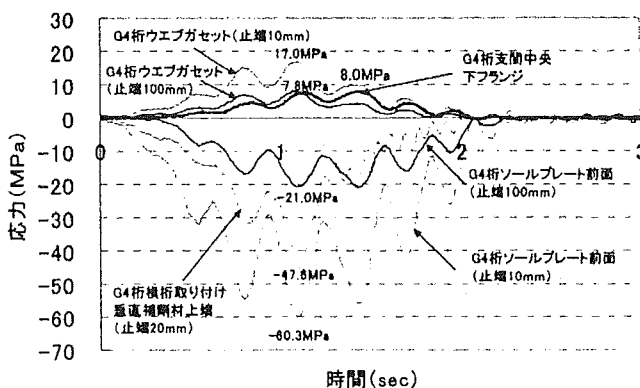


図-4 20t荷重車走行時の応力波形

3.2 計測方法

モニタリング対象としては、構造物の安全性や疲労耐久性の評価に直接的につなげられる物理量であるひずみ、変位を対象とした。また、温度変化に伴う応力変動を把握するために桁温度、気温

も計測した。図-3に主要なひずみゲージ、変位計、鋼材（主桁）表面温度計測のための熱電対、温度計の設置位置を示す。ひずみゲージについては、主桁の挙動を把握するために主桁支間中央下フランジに貼付したほか、局部的に高い応力が想定され疲労の影響が考えられる部位に貼付した。また、G3桁支間中央下フランジ上面において桁温度、気温を計測するとともに、G1、G4桁の移動側支承周りにおいて桁変位を計測した。以下に、計測内容を示す。

(1) 荷重車走行時の応力変動計測

20tonf荷重車（ダンプトラック：前軸5.9tonf、後タンデム軸14.1tonf）を上下各車線に速度60km/hで単独走行させ、その際の各部の応力を計測した。

(2) 応力、変位及び温度の時間変動計測

交通供用下における、各部の応力、桁端変位、温度の計測を実施中である。応力については、レインフロー法（時刻歴波形より応力範囲を計数）及びタイム法（時刻歴波形より一定時間間隔毎に応力を計数）により1時間単位の応力頻度分布として計測し、これより時間または日単位の平均応力（以下、それぞれ時間平均応力、日平均応力と言う。）と等価応力範囲（3乗平均値の3乗根）を算出した。桁変位及び温度については、20分間毎に計測を行っている。また、得られた応力頻度分布より、各部位における疲労の影響を概略把握するための参考値として、修正マイナー則を用いて疲労損傷度を算出した。

3.3 計測結果

(1) 荷重車走行時の応力波形及び応力頻度分布

図-4に20tonf荷重車を下り車線（G4桁側）に走行させた場合のG4桁側の主要部位の応力波形を、図-5に平日3日間の応力頻度分布例を示す。これまでに損傷事例が報告されている部位において、溶接止端から10mmの位置を基本に計測したが、ソールプレート前面部と横桁取り付け垂直補剛材上端部において比較的高い応力が生じている。計測値をホットスポット応力⁵⁾と仮定して、平日3日間の応力頻度を用いて支承ソールプレート溶接部、垂直補剛材上端部（それぞれE等級、F等級^{5) 6)}と仮定）の50年間疲労損傷度（3日間の応力が50年間作用すると仮定）を計算すると、それぞれ18、14であり、今回計測し

た部位の中では疲労上厳しい値となっている。また、応力頻度分布によると、20tonfの載荷時の応力範囲に対して概ね最大3～4倍程度の応力範囲が生じている。

(2) 応力、変位、気温の時間・日変動

図-6にG4桁における支間中央下フランジの時間平均応力、可動支承側の桁下端水平変位（橋台

側への変位が負）及び気温の時間変動を示す。

図中の疲労損傷度はG4桁ウェブガセット位置（止端より100mm位置、G等級と仮定）での時間単位の応力頻度分布より求めた50年間疲労損傷度を示し、※印は32MPa（20tonf車載荷時応力の4倍）以上の応力範囲が計測された時間帯を示している。なお、疲労損傷度は応力範囲の3乗と頻度に比例するため、両者がピークとなる時間帯は必ずしも一致していない。

水平変位及び応力ともに気温との相関が見られる。また、疲労損傷度の平日の変動を見ると、深夜から明け方頃と、正午過ぎ頃の時間帯において、活荷重の載荷条件が疲労上厳しくなる傾向が伺える。

図-7にG4桁支間中央下フランジの日平均応力、日最大応力範囲及び日等価応力範囲の日変動を示す。図中の疲労損傷度はG4桁ウェブガセット位置での日単位の応力頻度分布より求めた50年間疲労損傷度を示している。日平均気温は季節変化とともに漸増しているが、日平均応

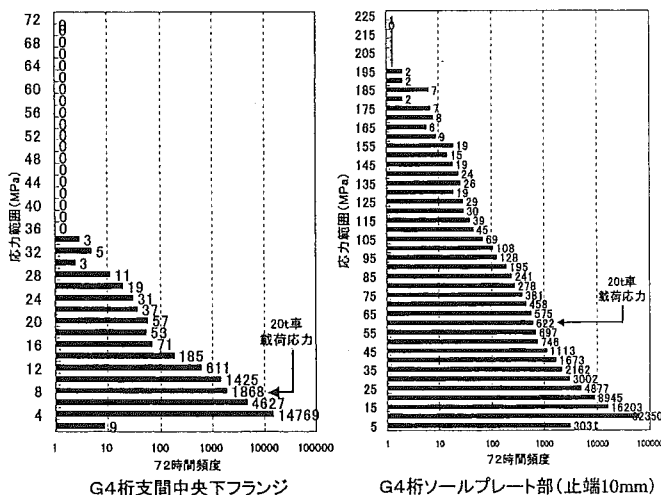


図-5 平日3日間の応力頻度分布の例

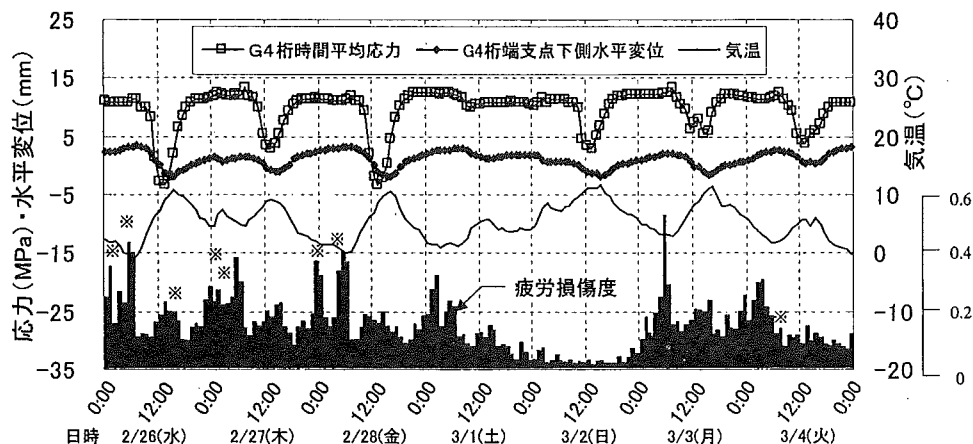


図-6 G4桁支間中央下フランジ時間平均応力、水平変位の変動

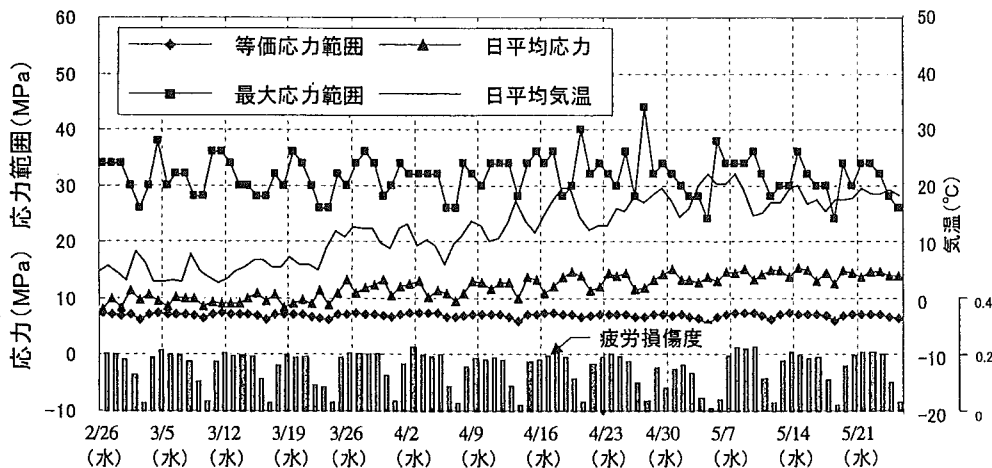


図-7 G4桁支間中央下フランジ日平均応力、日応力範囲、疲労損傷度の変動

表-2 曜日別50年換算疲労損傷度

曜 日	50年換算疲労損傷度	
	平均値	標準偏差
月	0.17	0.039
火	0.20	0.036
水	0.21	0.018
木	0.21	0.014
金	0.19	0.035
土	0.11	0.023
日	0.03	0.007

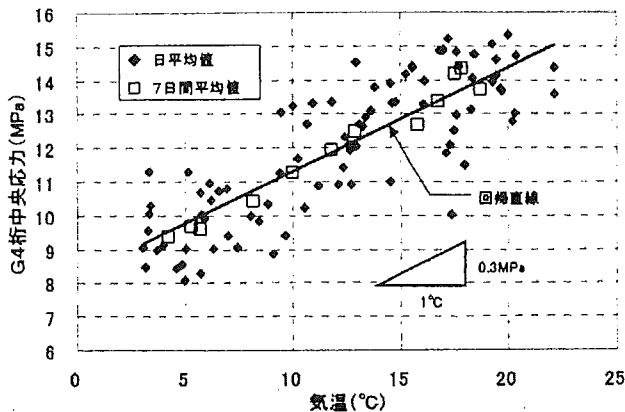


図-8 G4桁支間中央下フランジ日平均応力と日平均気温の関係

表-3 各計測部位における応力と気温（7日間平均値）の関係

計測部位	応力変化量 (MPa/°C)	相関係数
支間中央下フランジ下面	0.31	0.99
横桁取付垂直補剛材 上端（溶接止端 20mm）	0.60	0.96
ウェブガセット近傍 （溶接止端 10mm）	0.47	0.98
ソールプレート前面 （溶接止端 10mm）	0.31	0.87

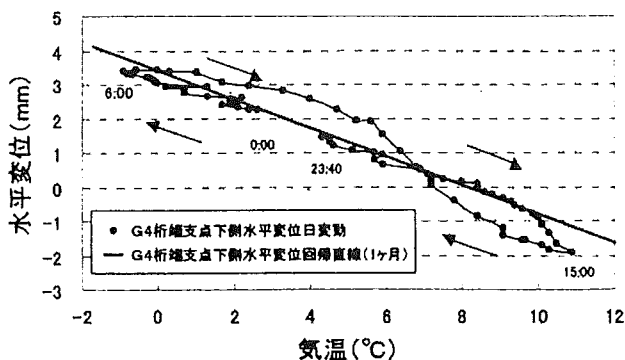


図-9 桁温度と桁端水平変位の関係

力も同様に変化しているのが確認できる。

週間変動を見ると、土、日曜日において各諸量ともに相対的に応力が小さく、大型車交通量の影響と推測される。表-2に曜日別の疲労損傷度の平均値と標準偏差を示すが、火～木曜日にかけて相対的に大きく、土、日曜日前後の月、金曜日では若干小さくなっている。

なお、20tonf荷重車載荷時に、止端10mm位置での応力は止端100mm位置に対して2倍程度生じており（図-4参照）、横構等からの作用力による局所的な面外曲げ応力の影響を受けているものと推測される。同位置の疲労損傷度の評価を行う際には面外曲げ等の影響も別途考慮する必要がある。

(3) 応力、変位と気温の関係

図-8にG4桁支間中央下フランジにおける日平均応力と日平均気温の関係を示す。図中には7日間平均値とした場合の結果と一次回帰式を併せて示す。また、表-3に同様にして求めた各部位の一次回帰式の勾配（気温変化に対する応力変化量）と相関係数を示す。日平均値のばらつきは大きいですが、7日間平均値で見ると応力と気温の相関が高いことがわかる。

図-9にG4桁端支点下側における1日間の水平変位（橋台側への変位が負）と気温との関係を示す。図中には34日間（2月末～3月末）の計測結果より求めた一次回帰式を示している。桁端の水平変位と気温との間には高い相関が見られる。ここで、鋼材の線膨張係数 12×10^{-6} から求まる主桁の伸び量は単純計算すれば 10°C に対し3.7mmとなるが、実測値は概ね同程度の移動量となっている。

なお、図中には示していないが、G4桁上端及びG1桁上下端における変位と気温の関係もほぼ同様の挙動を示している。

(4) 応力、変位、気温の7日間平均値

日平均値については日々の交通状況や温度変化の影響によるばらつきが大きいことから、長期的な傾向を捉えるために、上記結果や文献²⁾を踏まえ、日平均応力と日最大応力範囲のn日間平均値を用いて計測データを整理した。

前者は変状等の進展に伴う応力変化を捉えるための指標、後者は活荷重に対する部材の安全性の余裕を概略把握するための指標としての活用を想定したものである。ここで日平均応力の週間変動

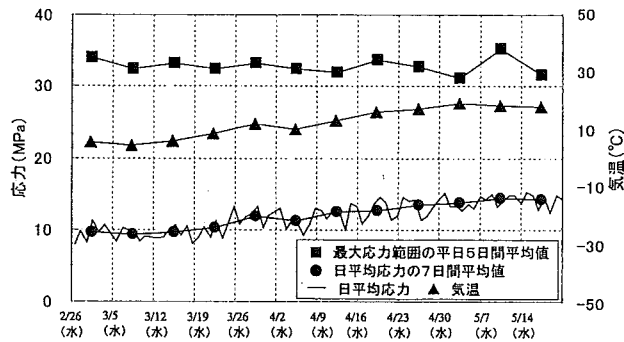


図-10 G4桁支間中央下フランジ応力の7日間平均値

の傾向を踏まえ $n=7$ とした。

図-10に一例として、G4桁支間中央下フランジにおける日平均応力、日最大応力範囲の7日間平均値（ただし、日最大については土、日曜日を除く5日間を考慮）の変動を示す。

前述のとおり平均応力と平均気温の相関は高く、応力は気温の変化に対応していることがわかる。なお、約3ヶ月間の計測期間中に地震（橋梁付近で震度2の地震を3回観測）等による大きな外力の作用や変状の発生はなく、応力的に特異な変化は計測データからは確認されなかった。

また、日最大応力範囲の5日間平均値については34～40MPaであり、同一部位のL-20荷重載荷時の設計活荷重応力度（72MPa）と比較して小さいことが確認された。

4. まとめ

鋼道路橋を対象として、モニタリング技術の適用対象について検討するとともに、状態監視に関する基礎検討としての実橋計測を実施し、約3ヶ月間の応力、変位計測データについて分析を行った。以下に主な結果をまとめる。

①モニタリング技術が必要と考えられる事例につ

いて検討を行い、維持管理の各場面における適用対象について整理を行った。

- ②主桁における時間単位、日単位の疲労損傷度の計測結果より、大型車交通の影響と考えられる時間別、曜日別の活荷重応力の傾向を把握した。
- ③橋梁各部の応力及び桁端変位と気温との間に高い相関が見られることを確認するとともに、温度変化に伴う各部の応力、変位の変化量を把握した。

現在、計測を継続中であり、今後、長期計測データを基に橋梁の状態監視への適用性や活用方法について検討する予定である。

最後に、今回の実橋計測に当たって、ご協力頂いた大宮国道工事事務所の皆様に紙面を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring 研究の動向，土木学会論文集No.654/I-52, 2000.7.
- 2) 例えば，建設省：既設構造物の点検・補修システムの開発〔橋梁の長期監視システムの開発〕報告書，官民連帯共同研究，1991.3.
- 3) 例えば，三木、水ノ上、小林：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発，土木学会論文集No.686/VI-52, 2001.9.
- 4) 例えば，阿部、天野：明石海峡大橋動態観測システム，本四技報，No.86, 1998.9.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.4.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.

村越 潤*



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム首席研究員

Jun MURAKOSHI

麓 興一郎**



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム主任研究員

Koichiro FUMOTO

高木伸也***



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム研究員

Shinya TAKAGI

次村英毅****



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム交流研究員

Hideki TSUGIMURA

既設鋼 I 桁橋における応力・変位測定結果の分析

独立行政法人土木研究所 正会員 ○高木伸也
 独立行政法人土木研究所 正会員 村越 潤
 独立行政法人土木研究所 正会員 麓興一郎
 独立行政法人土木研究所 正会員 次村英毅

1. はじめに

橋梁モニタリング（供用下における活荷重や温度の変化に対する応力・変位の状態把握及び橋梁各部の疲労耐久性の評価）の基礎検討として、実橋において 20ton 荷重車の動的載荷試験を実施し、続いて約半年間の温度、応力、桁端変位等の計測を実施している。本文では、動的載荷試験の結果及び計測結果の一部についての分析結果を報告する。

2. 対象橋梁

対象とした橋梁は、一般国道 17 号の橋梁（国土交通省関東地方整備局大宮国道工事事務所管内）で、単純非合成 I 桁である。図 1 に対象橋梁の一般図を示す。架設年次は平成 3 年（平成 2 年道示）で、日大型車交通量は 5288 台/車線（平成 11 年センサス調査結果）である。遠望からの目視調査では鋼部材、支承、床版に特段の損傷は見つかっていない。

3. 計測方法

図 2 にひずみゲージ、変位計、温度計の設置位置を示す。主桁支間中央下フランジ、局部的に高い応力が想定される部位を対象に応力を計測した。また、G 4 桁側において支間中央下フランジ位置において気温、桁温度を計測するとともに、G 1、G 4 桁の移動側支承周りに変位計測を行った。以下に、計測内容を示す。

(1) 荷重車走行時の応力変動計測

20tonf 荷重車（ダンプトラック：前軸 5.9tonf、後タンデム軸 14.1tonf）を上下車線に速度 60km/h で単独走行させ、その際の各部の応力を計測した。

(2) 応力、変位及び温度の時間変動計測

ヒストグラムレコーダーにより、各部の応力を、レインフロー法及びタイム法(0.01sec 間隔)により、1 時間単位で頻度分布計測を行っている。また、温度及び変位については、データロガーにより、20 分間毎に計測を行っている。得られた応力頻度分布より、修正マイナー則を用いて各部の継手等級を想定し疲労損傷度を求めた。

4. 計測結果

(1) 荷重車走行時の応力波形及び応力頻度分布

図 3 に 20tonf 荷重車を下り車線に走行させた場合の G 4 桁を中心とした主要部位の応力波形を、図 4 に平日 3 日間の応力頻度分布例を示す。図 3 中には最大値も併せて示す。これまでに既設橋において疲労損傷が発見されている部位（横桁取付け垂直補剛材上端部、ソールプレート前面部、横構ウェブガセット）において、

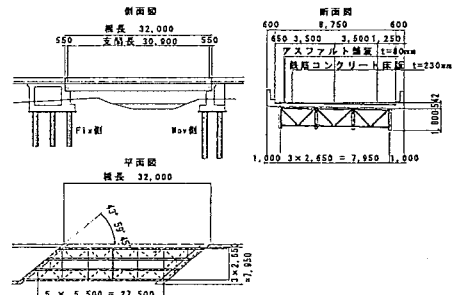


図 1 対象橋梁一般図

▲：ひずみゲージ設置箇所
 ○：ひずみ変位計設置箇所
 ＊：温度計設置箇所

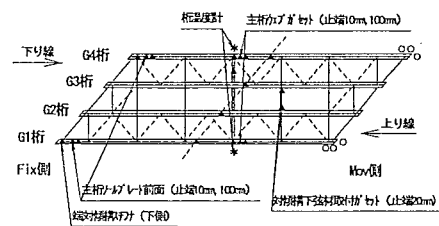


図 2 センサー設置位置

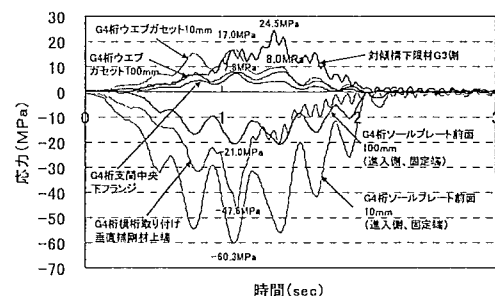


図 3 20t 荷重車走行時の応力波形

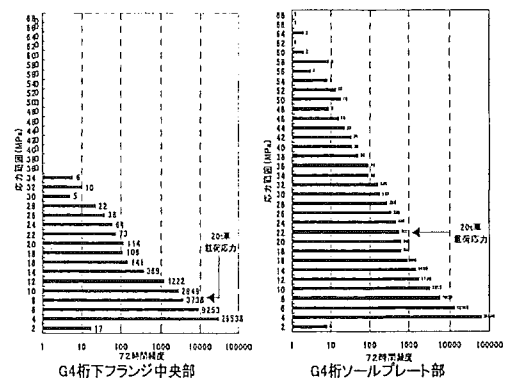


図 4 平日 3 日間の応力頻度分布

キーワード：実橋計測、応力頻度、動的波形、温度ひずみ

連絡先：〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 TEL：(0298)79-6793 FAX：(0298)79-6739

溶接止端から 10mm の位置を基本に計測したが、相対的に高い応力が生じている。計測値をホットスポット応力と仮定して、平日 3 日間の応力頻度を用いて支承ソールプレート溶接部（E 等級と仮定）、スチフナ上端部（F 等級と仮定）の 50 年間疲労損傷度を計算すると、それぞれ 18.0、13.6 となっている。また、図 4 より各部位で分布形状は異なるが、20tonf の載荷時の応力範囲に対して概ね 3～4 倍程度の応力範囲が生じている。

図 5 に下フランジ応力が最大となった時点での G 4 桁支間中央の断面応力分布を示す。止端から 10mm の位置の応力が大きくなっているが、図 3 中の横桁取付け垂直補剛材上端の応力波形との対応関係から、主桁としての曲げ応力に加えて、横桁からの作用力によって面外曲げ応力が作用しているものと推測される。図中に示すウェブガセット位置での 3 応力（止端より 10mm、100mm、上下フランジ応力より求めた推定値（下フランジ応力の 0.88 倍））に対して、ウェブガセット継手（G 等級と仮定）の 50 年間換算疲労損傷度はそれぞれ 1.6、0.21、0.14 となっており、計測位置により疲労寿命に違いが見られる。

（2）応力、変位及び温度の時間・日変動の計測

図 6、図 7 に、G4 主桁について、時間単位及び日単位で整理した、主桁支間下フランジの応力、桁温度、気温、可動支承側の桁下端水平変位（橋台側への変位が負）、およびウェブガセット継手の 50 年間換算疲労損傷度（図 5 中のガセット位置推定値を用いて計算）の変動を示す。時間変動をみると、水平変位及び応力ともに桁温度との相関が見られる。日変動を見ると、土、日曜日において最大・等価応力範囲の減少が見られるが、大型車交通量の減少による影響と推測される。

また、図 8 に G 4 主桁温度と桁上下端の変位（橋台側への変位が負）の時間変動の関係を示す。図中には 34 日間（2 月末～3 月末）の計測結果より求めた一次回帰式を示している。桁端の水平変位と部材温度との間には高い相関性が見られる。図中には示していないが、G 1 桁上下端の変位もほぼ同様の関係であった。ここで、鋼材の線膨張係数 12×10^{-6} から求まる主桁の伸び量は単純計算すれば 10°C に対し 3.7mm となるが、実測値は概ね同程度の移動量となっている。

5. おわりに

今後、長期計測結果を詳細に分析するとともに、計測結果を基にした橋梁の状態の評価への活用方法について検討していく予定である。

謝辞

実橋計測に当たって、ご協力頂いた大宮国道工事事務所関係各位に感謝する次第である。

<参考文献>

- 1)建設省：既設構造物の点検・補修システムの開発[橋梁の長期監視システムの開発]報告書，官民連帯共同研究，平成 3 年 3 月
- 2)西川，村越，山本：実橋における長期ひずみ計測結果の分析，土木学会第 46 回年次学術講演会概要集，平成 3 年 3 月
- 3)西川，山本，鹿嶋：温度変化に伴う橋梁の挙動に関する計測結果の分析，土木学会第 47 回年次学術講演会概要集，平成 3 年 3 月

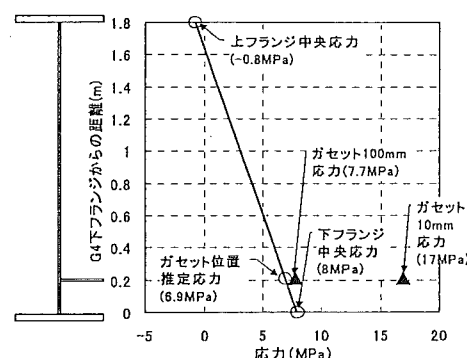


図 5 G4 桁支間中央断面応力分布

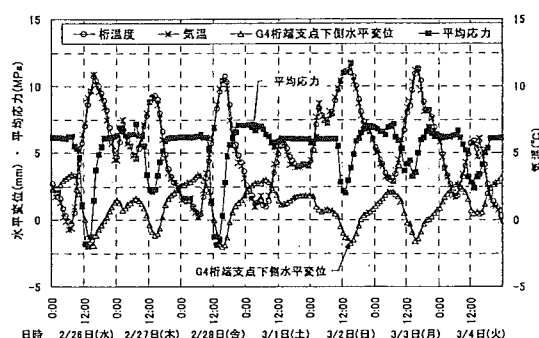


図 6 気温、桁温度及び水平変位、平均応力の時間変動

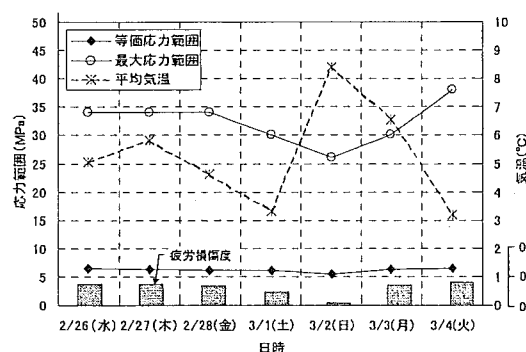


図 7 気温、応力範囲及び疲労損傷度の日変動

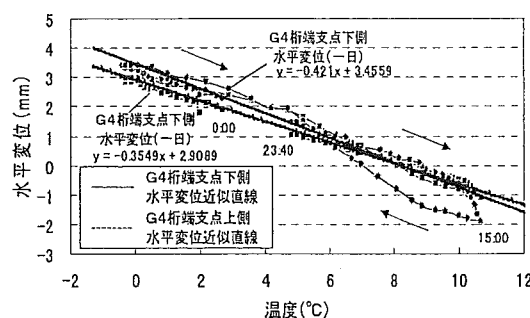


図 8 桁温度と支承水平変位の関係

部材応力の長期計測による鋼橋モニタリングに関する基礎検討

A Study on Structural Monitoring of Steel Bridges by Stress Measurement

高木 伸也^{*} 村越 潤^{**} 麓 興一郎^{***} 次村 英毅^{****}

Shinya TAKAGI^{*}, Jun MURAKOSHI^{**}, Koichiro FUMOTO^{***}, Hideki TSUGIMURA^{****}

ABSTRACT Monitoring technologies for grasping the structural conditions of old and deteriorating bridges quantitatively are needed in order to support preventive and maintenance work of such bridges. Various monitoring researches have been done so far and several monitoring systems have already been put into practice mainly for long-span bridges. However, there have been few cases of long-term structural monitoring focusing on durability of bridges. It is important to research what kind of information long-term monitoring can offer us and how we should measure and use the data effectively for supporting maintenance work. This paper describes application of monitoring technologies to steel highway bridges, and analyzes the measured stress data obtained by 1-year-monitoring on an actual highway bridge.

Keywords : 鋼橋, モニタリング, ひずみ, 応力, 変位, 応力頻度

Steel bridge, Monitoring, Strain, Stress, Displacement, Stress frequency

1. はじめに

過去に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進展していく中で、これらの橋梁を健全な状態で適切に維持管理していくために、構造物の状態を定量的、かつ効率的に把握、評価するための点検・診断技術が求められている。

モニタリング技術とは、対象物にセンサを設置し、ひずみ、振動等の物理量を長期間測定し、分析することによって、対象物の状態変化を捉えようとするものであり、これまでも多くの調査研究が行われており¹⁾³⁾、既に長大橋の動態観測⁴⁾等様々な形で活用されている。しかしながら、大半を占める中小規模の橋梁を対象とした場合、現状の目視主体の橋梁点検等の維持管理業務を支援する観点から、モニタリング技術の適用可能性や活用方法については必ずしも十分に整理されているわけではない。これらの技術を維持管理のどの

場面で、どのように適用するのかといった点について十分検討した上で、維持管理全体の中での位置付けを整理しておくことが必要と考えられる。

鋼橋の応力(ひずみ)等のモニタリングについては、数多くの調査研究が行われており、荷重車による挙動・振動測定や交通供用下での応力頻度測定等による橋梁の状態診断は既に一般的に行われている。ただし、長期連続モニタリングで取得されたデータの維持管理支援への活用といった点に関しては、橋梁の変状、供用状態等の監視可能性等実橋レベルにおいて検討しておくべき点は多い。

本文では、最初に鋼橋の維持管理支援へのモニタリング技術の適用性について整理する。次に、橋梁各部の応力のモニタリングを主な対象として、経時的な変状や供用状態の変化の把握への適用性について、実橋での1年間の連続計測データを基に検討した結果について報告する。なお、供用中の橋梁を1～数年程度モニタリングしても、構造安全性に影響を与えるような変状を捉えモニタリングの適用性を評価することは困難に近い。本論文では、連続計測により得られる情報の利用可能性を探ることが重要と考え、そのような観点から種々のデータ整理、分析を試みた。

2. モニタリング技術の適用対象の検討

モニタリングという表現は、一般に長期・連続

^{*}独立行政法人 土木研究所

構造物研究グループ(橋梁構造) 研究員
(〒305-8516 つくば市南原1番地6)

^{**}工修 独立行政法人 土木研究所

構造物研究グループ(橋梁構造) 上席研究員

^{***}独立行政法人 土木研究所

構造物研究グループ(橋梁構造) 主任研究員

^{****}独立行政法人 土木研究所

構造物研究グループ(橋梁構造) 交流研究員

的な監視（例えば、長大橋の動態観測や車両重量計測等）の意味合いで使われているが、ここでは、構造物の状態を把握し、健全度を評価するための点検・診断技術全般を対象として、これらの技術の維持管理における適用対象の整理を行った。

図-1に構造物の健全度の概念図と、維持管理の各場面でのモニタリング技術による支援イメージを示し、表-1にモニタリング技術の適用対象を適用場面と計測方法により分類して示す。以下に、図-1に示す各場面における適用対象についてまとめる。

①点検時における目視点検等の支援

目視主体の点検時において、客観的・定量的なデータを必要とする場合や、目視では把握できない部材内部や点検しにくい（近接しにくい）部位の状態を把握する必要がある場合が適用対象と考えられる。この場合、多数の橋梁に対して適用可能な技術であることが重要な条件と考えられ、そのためには低コストの、点検の効率化を図ることが可能な技術であることが必要である。あるいは、構造物としての重大損傷の予防に資する技術の場合には、多少のコスト増であっても、損傷の想定される橋梁・構造部位を絞り込んだ上での適用が考えられる。

②損傷発見後、対策実施後の調査支援

耐荷力の診断が必要な場合（例えば、損傷に伴う耐荷力の減少や橋の使用条件の変化が想定される場合）、損傷に対する原因究明や対策検討のために応力状態等を把握する必要がある場合、何らかの応急的な対策を講じた後に恒久対策実施までの安全性に係る状態を監視する必要がある場合、対策実施後の効果確認のために状態を把握する必

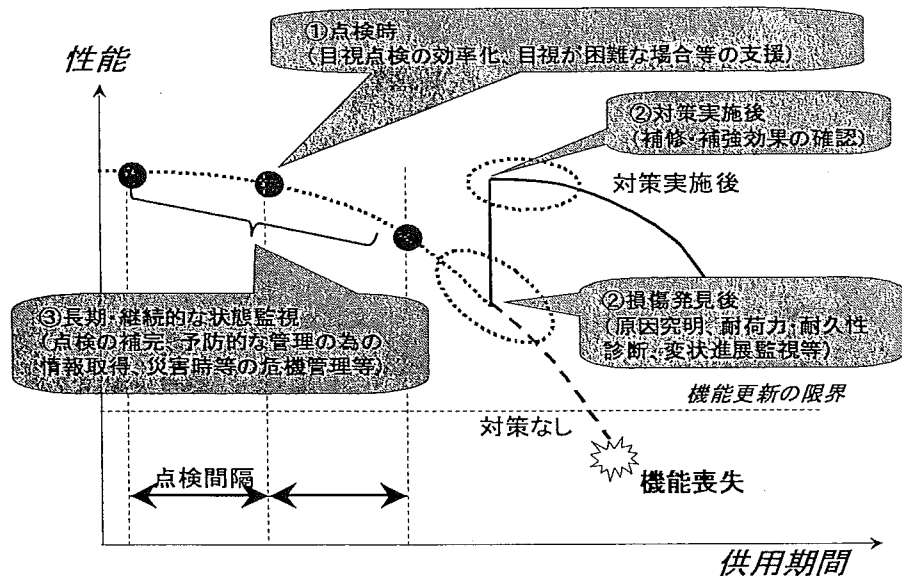


図-1 モニタリング技術による維持管理支援イメージ

表-1 モニタリングの適用対象と計測方法

計測方法 適用場面	連続的 (橋梁に機器を設置)	不連続的 (時系列に計測)
事前対応 (変状発生前)	・地震時等の変状監視等	・点検の効率化 ・目視点検が困難な部位の状態把握
事後対応 (損傷発見後、 対策実施後)	・損傷に対する原因究明、対策検討が必要な場合 ・耐荷力、耐久性の診断が必要な場合 ・対策後の変状の進展性の監視 ・補修補強対策後の効果確認 等	

要がある場合等が適用対象と考えられる。

③橋梁の状態の長期・継続的な監視

これについては、①と適用対象が重なる部分があるが、データ取得方法が連続的か不連続的かという点で異なることから別項目として整理した。橋梁状態を継続的に監視し、目視点検の補間、効率化や安全性の向上を目的とした適用が考えられるが、費用対効果、センサの長期耐久性・信頼性等の技術的課題、維持管理における位置付け等十分な検討が必要である。一つの位置付けとして、予防的な維持管理への活用といった観点から、例えば、特定の橋梁を対象として、それらを当該路線・地域の活荷重や腐食環境等の供用状態を長期モニタリングするセンサとして、また地震時等災害時の被災情報検知のセンサとして活用することが考えられる。後者の場合には、早期に被災状況を把握し、初動体制に反映させることが目的であ

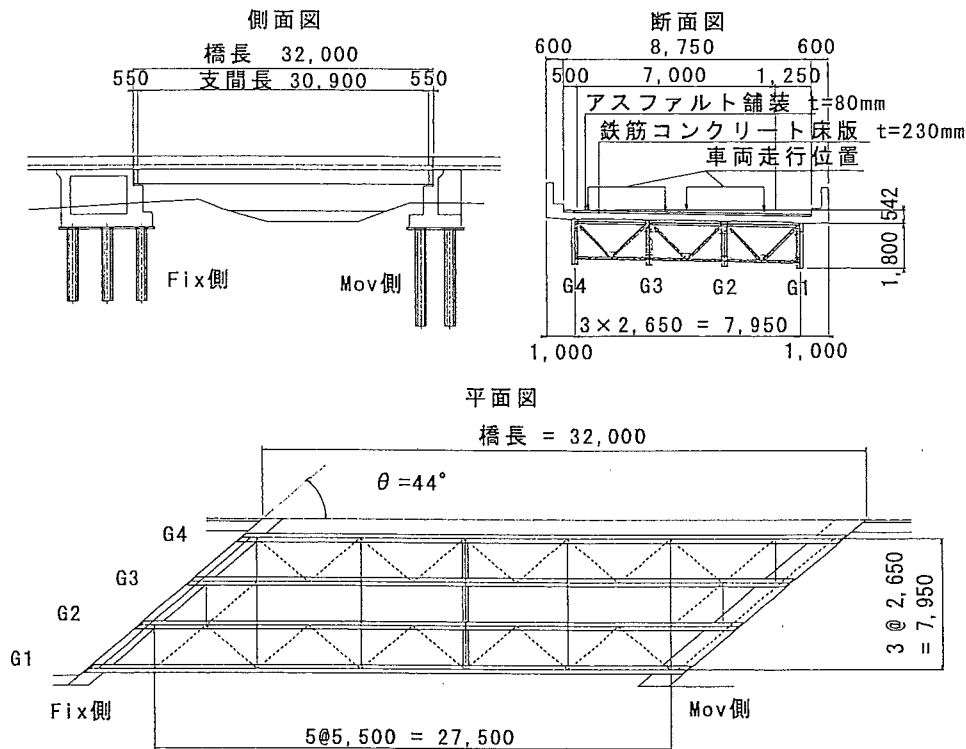


図-2 対象橋梁一般図

ることが重要と考えられる。

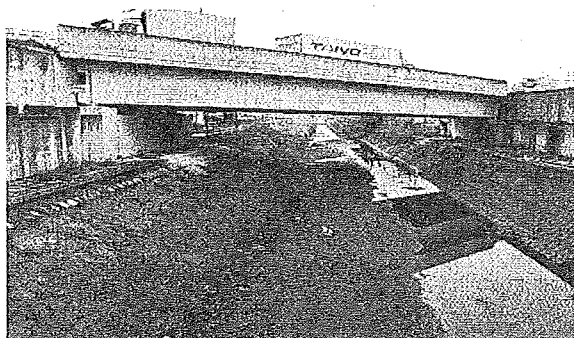
3. 応力、変位計測データに基づく鋼橋の状態監視に関する検討

前章2. ②のケースを対象としたモニタリング（損傷が発見され損傷部位が特定された後の変状の進展性の監視や、供用状態の変化の監視）の限界や適用性を検討するために、実橋の交通供用下における応力変動の把握のための基礎検討を行った。実橋において 20tonf 荷重車の動的載荷試験を実施するとともに1年間（2003年2月26日より2004年2月25日）、応力及び桁端変位の長期計測（オフラインにより1ヶ月毎にデータを回収）を実施した。

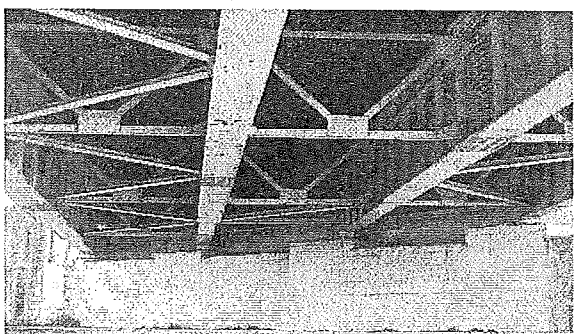
以下、実橋計測について、動的載荷試験及び1年間に得られた計測データについて、整理、分析した結果をまとめる。なお、計測期間中、約30日間(7/21～26, 8/9～27, 9/3～5)は、落雷等により電源が落ちてしまったため、また5日間(1/26～1/30)は計測ミスのためデータが欠損している。

3.1 対象橋梁

対象とした橋梁は、一般国道17号の鋼単純非合成I桁橋（関東地方整備局大宮国道工事事務所管内）である。写真-1に橋梁の状況を、図-2に一般図を示す。架設年次は平成3年（平成2年道示



(a) 橋梁全景



(b) 桁下の状況

写真-1 計測対象橋梁

ることから、必然的にリアルタイム検知のための連続計測とすることが必要である。

以上のように、道路橋へのモニタリング技術の適用に当たっては、適用対象、必要性及びその効果を検討した上で、それに見合った技術を抽出す

図-6に荷重車走行時（応力最大時）のG1桁及びG4桁横桁取付け位置の主桁断面の断面応力分布を示す。なお、上下フランジ応力測定位置（支間中央）は横桁取付け位置とずれているため、横桁取付け位置に換算して示した。上下フランジ、ウェブガセット 100mm 位置の応力はほぼ直線関係にあり、その中立軸位置は、合成桁と仮定し、かつ床版の有効幅を考慮した場合の中立軸位置に近いことがわかる。

一方、止端 10mm 位置での応力は止端 100mm 位置に対して、1.8 倍(G1桁)、2.4 倍(G4桁)生じており、横構等からの作用力による局部的な面外曲げ応力の影響を受けているものと推測される。

(2) 応力、変位、気温の時間・日変動

図-7にG4桁支間中央下フランジについて時間平均応力、可動支承側の桁下端水平変位（橋台側への変位が負）及び気温の時間変動を示す。

図中の疲労損傷度はG4桁ウェブガセット位置（止端より 100mm 位置、G等級と仮定）での時間単位の応力頻度分布より求めた 50 年間疲労損傷度を示し、※印は 32MPa（20tonf 車載荷時応力の 4 倍）以上の応力範囲が計測された時間帯を示している。なお、疲労損傷度は応力範囲の 3 乗と頻度に比例するため、両者がピークとなる時間帯は必ずしも一致していない。水平変位及び応力ともに気温との相関が見られる。また、疲労損傷度の平日の変動を見ると、深夜から明け方頃と、正午過ぎ頃の時間帯において、活荷重の載荷条件が疲労上厳しくなる傾向が伺える。

図-8にG4桁支間中央下フランジについて、時間別（2月26日から9ヶ月間の平日（月～金曜）における時間別に処理）の 50 年間疲労損傷度の平

均値及び標準偏差、荷重車走行時の最大応力（以下、 σ_{T-20} ）に対する最大応力範囲の平均値の比率を示す。G4桁疲労損傷度については、年間を通して図-7と同様の傾向が見られるが、深夜から明け方頃にかけてはばらつき（標準偏差）が大きいこと、（最大応力範囲平均値）/ σ_{T-20} との相関性が高いことがわかる。また、G4桁とG1桁の（最大応力範囲平均値）/ σ_{T-20} の比較により、夜間の下り車線の活荷重条件が厳しいことも伺える。

今回の計測では車両重量計測を行っていないため車両の重量実態は不明であるが、ここでは2次元タイム法により、上下各車線（G1桁側、G4桁側）応力の相関図を描き、活荷重の載荷状態の分析を試みた。図-9に、2次元タイム法で計測したG1桁及びG4桁支間中央下フランジ応力の2次元の頻度分布の例を示す。対象は図-7中の期間中に大きな応力範囲が生じた時間帯（※印、7月7日（月）午前5～6時）、及び交通量が多くかつ疲労損傷度の比較的高い時間帯（同日午後12～1時）とした。図中には、各桁上への20tonf車載荷時の応力も示している。明け方では20tonf車載荷時応力に沿って頻度が集中しており各車線載荷時に対する応力分布の傾向が見られ、橋梁上への車両の同時載荷は少ないものと推測される。また、G4桁側の下り車線では20tonf車載荷時応力の約4.4倍程度の応力が生じており、同倍程度の重車両が走行しているものと推測される。一方、昼間は交通量が多いため、上下車線に車両が同時載荷する機会が多いと考えられ、明け方の分布の傾向とは異なっている。

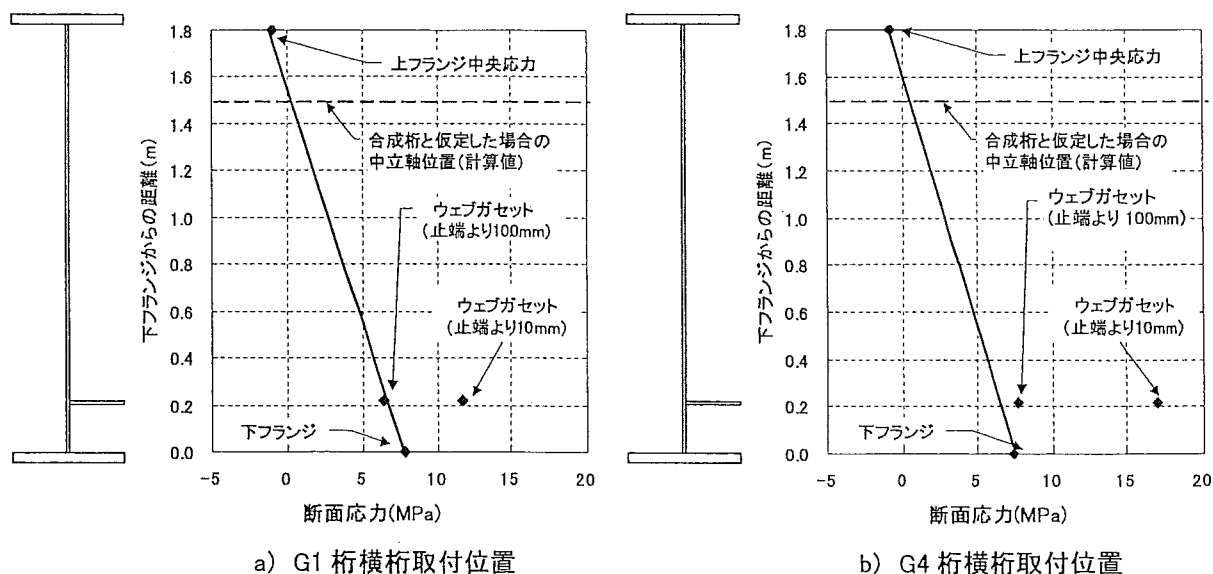
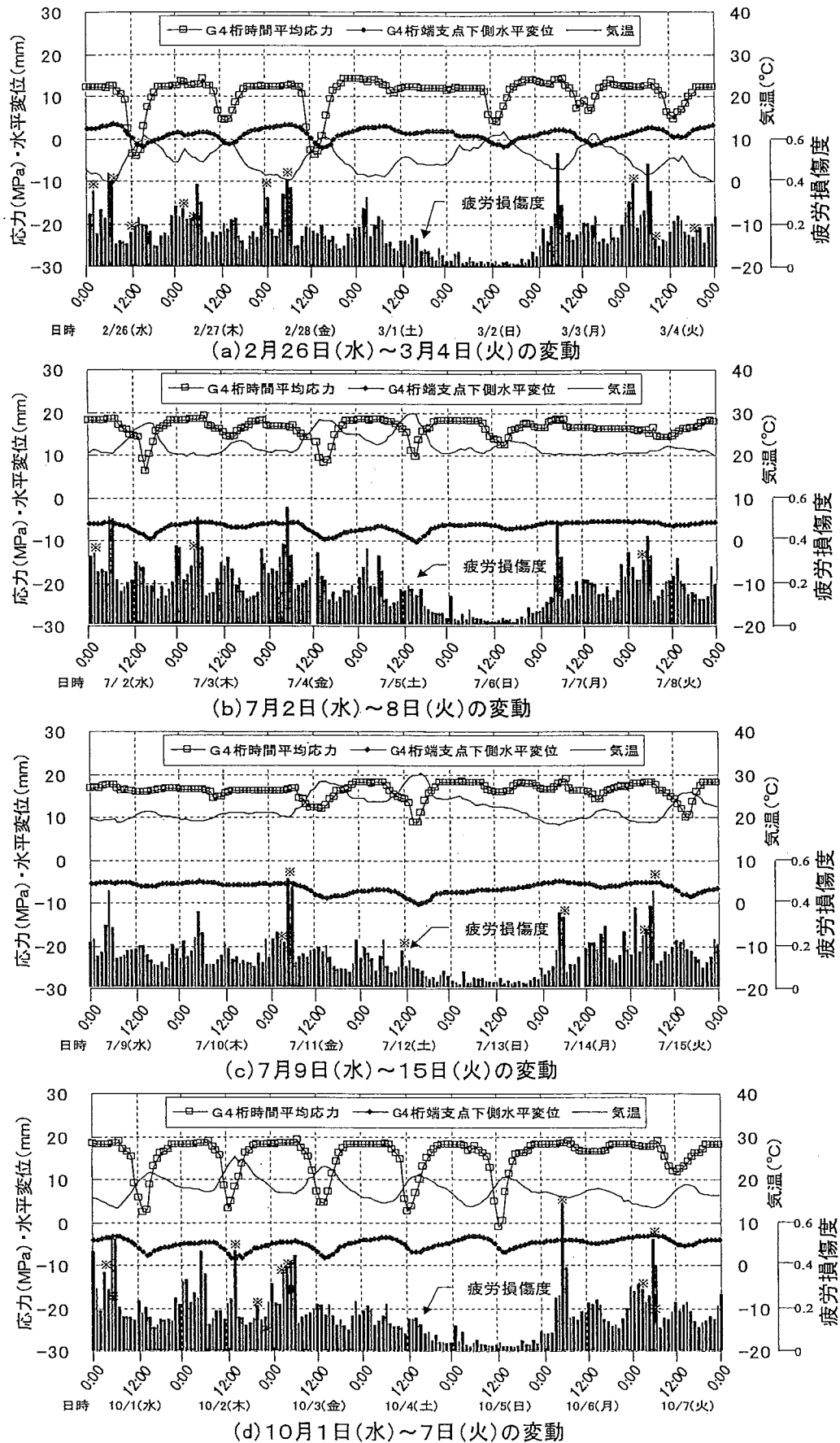


図-6 各主桁断面応力分布



図ー7 G4桁支間中央下フランジ時間平均応力、水平変位の変動

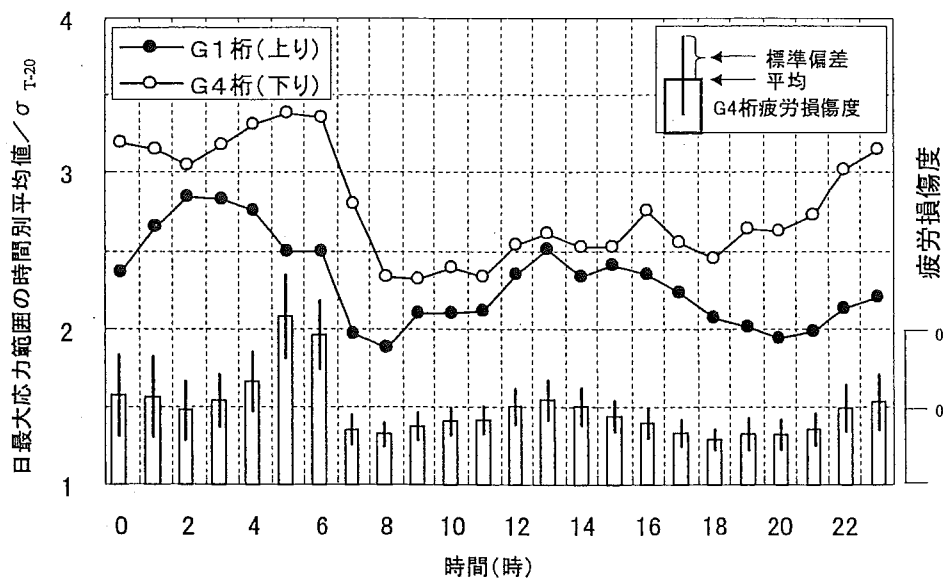
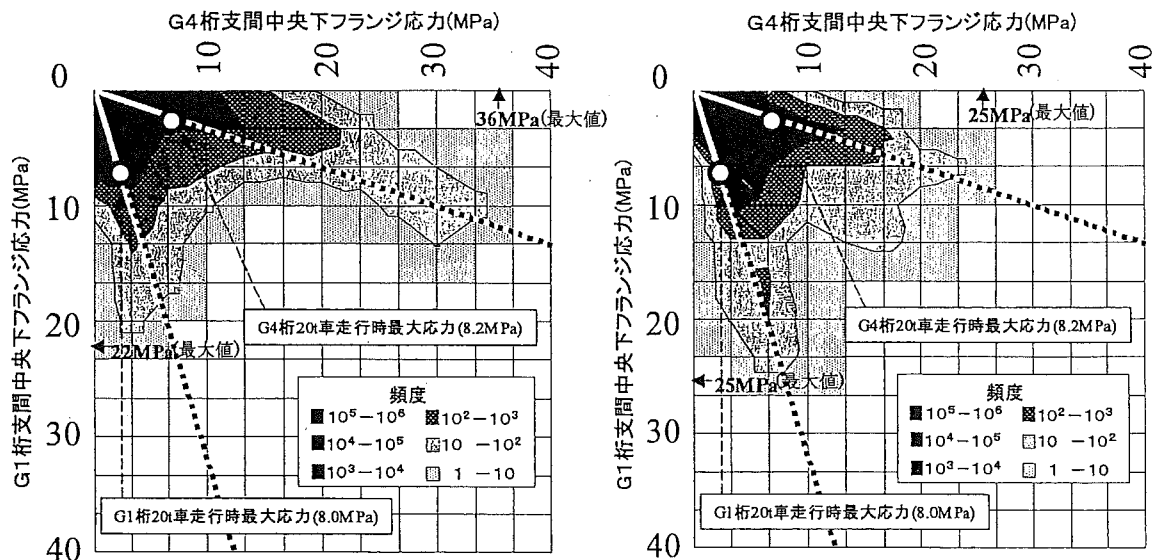


図-8 G4 桁支間中央下フランジにおける時間別の疲労損傷度と最大応力範囲の平均値



(a) 7月7日(火) 明け方(午前5~6時)

(b) 7月7日(火) 昼午後 12~1時

図-9 2次元タイム法による G1 桁と G4 桁の応力頻度の相関

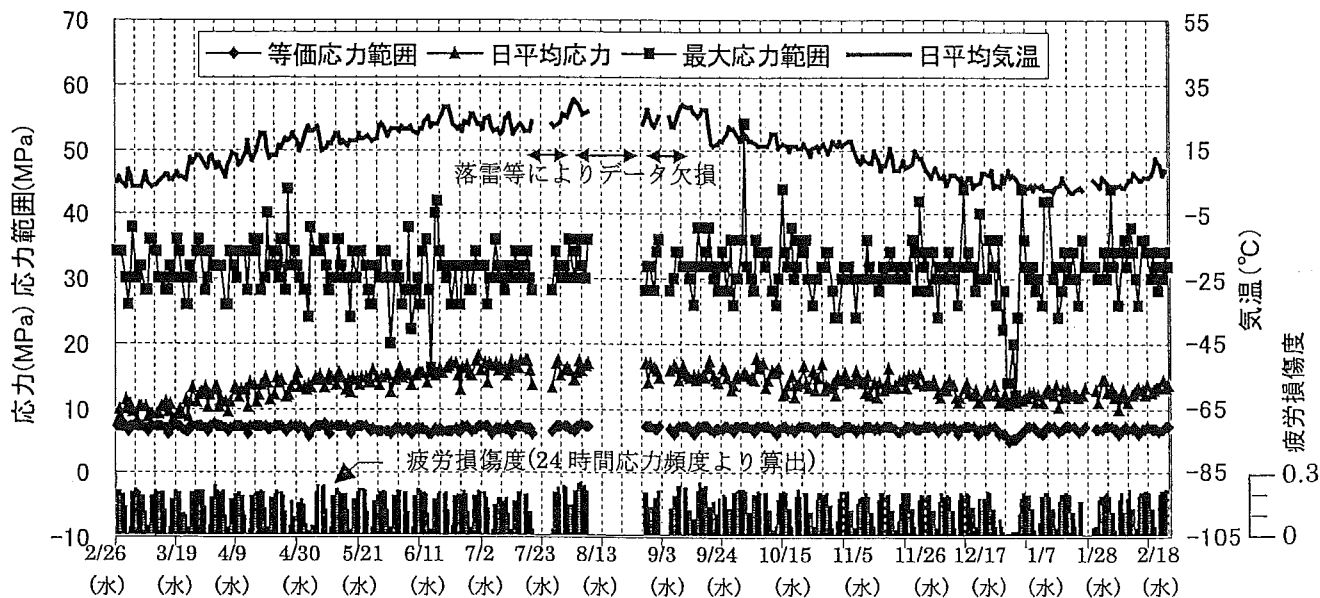


図-10 G4 桁支間中央下フランジ日平均、日応力範囲、疲労損傷度の変動

表-3 曜日別の50年換算疲労損傷度

曜日	50年換算疲労損傷度	
	平均値	標準偏差
月	0.16	0.045
火	0.20	0.032
水	0.21	0.019
木	0.21	0.016
金	0.20	0.025
土	0.12	0.018
日	0.03	0.007

図-10にG4桁支間中央下フランジの日平均応力、日最大応力範囲及び日等価応力範囲の約1年間にわたる日変動を示す。図中の疲労損傷度は

G4桁ウェブガセット位置での日単位の応力頻度分布より求めた50年間疲労損傷度を示している。日平均気温は季節変化とともに漸増漸減を示しているが、日平均応力も同様に変化しているのが確認できる。週間変動を見ると、土、日曜日において各諸量ともに相対的に応力が小さく、大型車交通量の影響と推測される。表-3に曜日別の疲労損傷度の平均値と標準偏差を示すが、疲労損傷度は火～木曜日にかけて相対的に大きく、土、日曜日前後の月、金曜日では若干小さくなっている。なお、ウェブガセット位置では、図-6に示した

ように局部的な面外曲げ応力の影響を受けているものと考えられ、同位置の疲労損傷度の評価を行う際には面外曲げ等の影響も別途考慮する必要がある。

(3) 応力、変位と気温の関係

図-11にG4桁支間中央下フランジにおける日平均応力と日平均気温の関係（1年間、2/26～翌年2/25）を示す。図中には7日間平均値とした場合の結果と一次回帰式を併せて示す。また、表-4に各部位の一次回帰式の勾配（気温変化に対する応力変化量）と相関係数を3ヶ月（2/26～5/25）と1年間（2/26～翌年2/25）の場合で示す。例外はあるものの、7日間平均値で見ると応力と気温の相関が非常に高いことがわかる。

図-12にG4桁端支点下側における1日間の水平変位（橋台側への変位が負）と気温との関係を示す。図中には1年間の計測結果より求めた一次回帰式を示している。桁端の水平変位と気温との間には高い相関が見られる。ここで、鋼材の線膨張係数 12×10^{-6} から求まる主桁の伸び量は単純計算すれば 10°C に対し 3.7mm となるが、実測値は概ね同程度の移動量となっている。なお、図中には示していないが、G4桁上端及びG1桁上下端における変位と気温の関係もほぼ同様の挙動を示している。

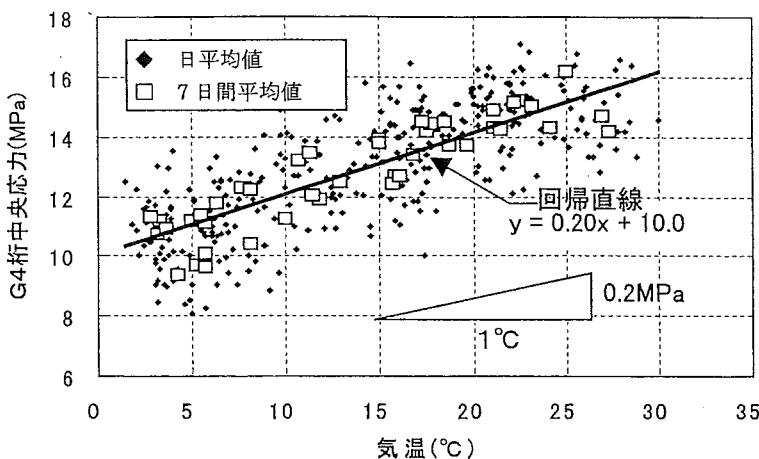


図-11 G4桁支間中央下フランジ日平均応力と日平均気温の関係

表-4 各計測部位における応力と気温(7日間平均値)の関係

計測部位	期間	応力変化量 (MPa/°C)	相関係数
支間中央下フランジ下面	3ヶ月	0.31	0.99
	1年間	0.20	0.90
横桁取付垂直補剛材上端 (20mm)	3ヶ月	0.60	0.94
	1年間	0.57	0.50
ウェブガセット近傍(10mm)	3ヶ月	0.47	0.98
	1年間	0.26	0.85
ソールプレート前面(10mm)	3ヶ月	0.31	0.88
	1年間	-0.15	-0.36

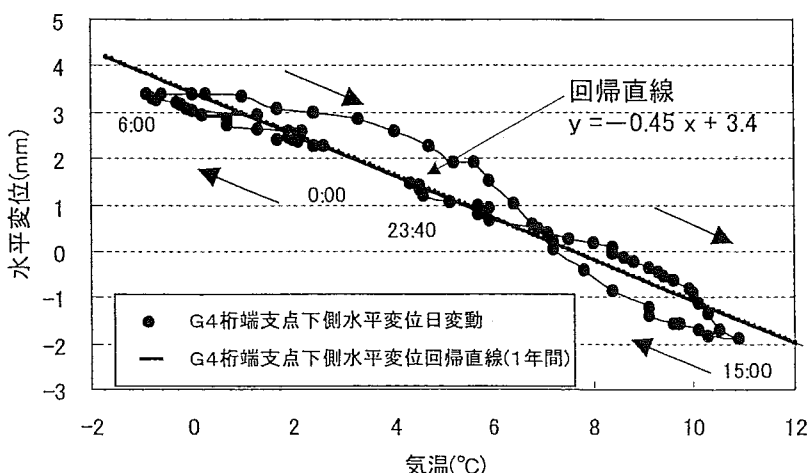


図-12 気温と桁端水平変位の関係

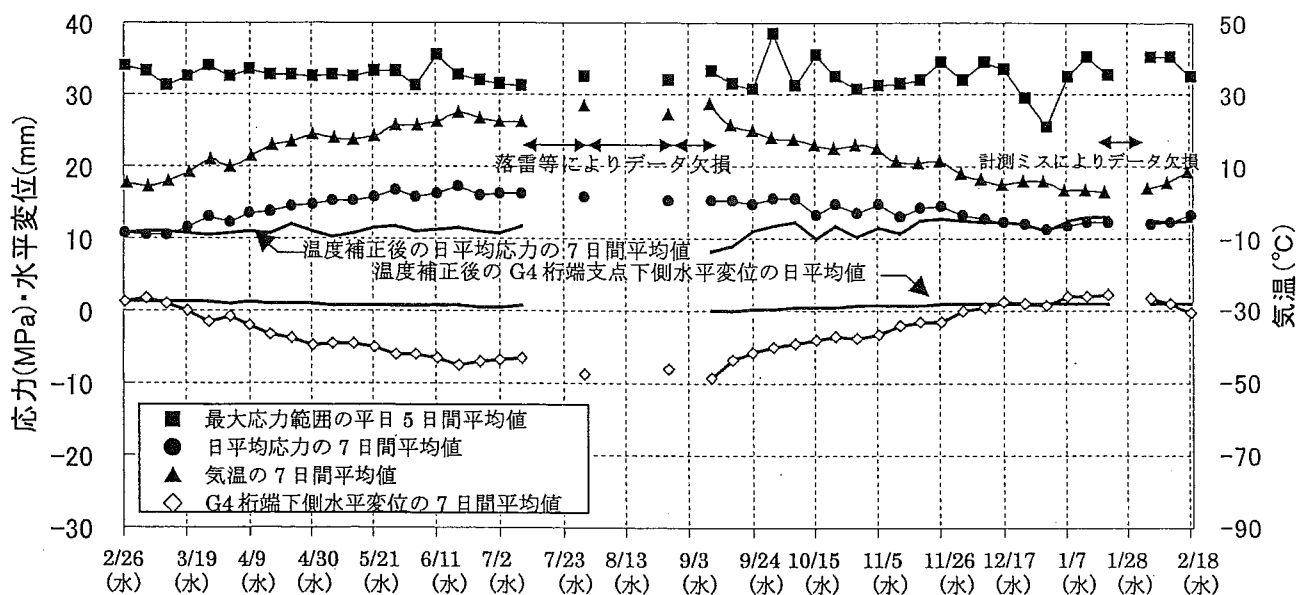


図-13 G4桁支間中央下フランジ応力の7日間平均値

(4) 応力、変位、気温の7日間平均値

日平均値については日々の交通状況や温度変化の影響によるばらつきが大きいため、長期的な傾向を捉えるために、上記結果や文献²⁾を踏まえ、日平均応力と日最大応力範囲の n 日間平均値を用いて計測データを整理した。前者は変状等の進展に伴う応力変化を捉えるための指標、後者は活荷重に対する部材の安全性の余裕を概略把握するための指標としての活用を想定したものである。ここで日平均応力の週間変動の傾向を踏まえ $n=7$ とした。

図-13に一例として、G4桁支間中央下フランジにおける日平均応力及び日最大応力範囲の7日間平均値(ただし、日最大については土、日曜日を除く5日間を考慮)、G4桁端水平変位(移動側の下側)の7日間平均値の変動を示す。前述のとおり応力、変位と気温の相関は高く、両者は気温の変化に対応していることがわかる。図中には実線により、温度補正(図-11、12に示した回帰式による)した結果を示しているが、ほぼ水平であり、1年間を通して多少のばらつきはあるものの特異な変化は見られない。

なお、1年間の計測期間中に地震(橋梁付近で震度1の地震を9回、震度2の地震を7回観測)等による大きな外力の作用や変状の発生はなく、応力的に特異な変化は計測データからは確認されなかった。また、日最大応力範囲の5日間平均値については23~40MPaであり、かつ、計測期間中の最大応力範囲は54MPaであり、同一部の設計

活荷重応力度(L-20 荷重に対して72MPa)と比較して小さいことが確認された。

4.まとめ

鋼道路橋を対象として、モニタリング技術の適用対象について検討するとともに、状態監視に関する基礎検討として、非合成単純鋼I桁橋の長期連続計測を実施し、1年間の主桁応力、桁端変位計測データについて分析を行った。以下に主な結果をまとめる。

- ①維持管理業務支援の観点から点検、健全性評価、補修補強等の各場面について、モニタリング技術が必要と考えられる事例について検討を行い、モニタリング技術の適用対象の整理を行った。
- ②主桁における時間単位、日単位の疲労損傷度の計測結果より、大型車交通の影響と考えられる活荷重応力の時間別、曜日別の変動傾向が確認された。また、これまで疲労損傷の報告がなされているソールプレート溶接部、垂直補剛材上端溶接部では相対的に局部応力が高いことが確認された。
- ③橋梁各部の応力及び桁端変位と気温との間に高い相関があることを確認した。また、温度変化に伴う各部の応力、変位の変化量を把握した。
- ④長期連続計測の中から、主桁応力、主桁桁端変位の7日間平均値を用いて、両者の変動が温度応力に依存するものであること、温度応力以外に応力、変位について特異な性状変化が見られないことを確認した。

最後に、今回の実橋計測に当たって、ご協力
頂いた大宮国道工事事務所の皆様に紙面を借り
て感謝申し上げます。

＜参考文献＞

- 1) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小
委員会：Intelligent Bridge/Structure and Smart
Monitoring 研究の動向，土木学会論文集
No.654/I-52,2000. 7.
- 2) 例えば、建設省：既設構造物の点検・補
修システムの開発[橋梁の長期監視シス
テムの開発]報告書,官民連帯共同研
究,1991. 3.
- 3) 例えば、三木,水ノ上,小林：光通信網を使用し
た鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステム
の開発、土木学会論文集 No.686/VI-52,2001.9.
- 4) 例えば、阿部,天野：明石海峡大橋動態観測シ
ステム,本四技報,No.86,1998. 9.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同
解説,技報堂出版,1993. 4.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指
針,2002. 3.

(2004年 1 月14日原稿受理)

