

021
ISSN 0386—5878
土研資料 第2123号

土 木 研 究 所 資 料
第2123号

共和高架橋載荷試驗報告書

昭和59年 6 月

建設省土木研究所
構造橋梁部橋梁研究室

Copyright ©1984 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 Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

共和高架橋載荷試験報告書

橋梁研究室 室 長 佐 伯 彰 一
研究員 西 川 和 廣
滝 沢 晃

要 旨

ここ数年、構造物各部のディテールに起因すると見られる疲労損傷例がいくつか報告されるようになり、今後も増加してゆく傾向が見られるが、これまでの事例が少なく、効果的な対策について不明な点が多い。

橋梁研究室では、疲労により主げたと横げたおよび対傾構の取付け構造に損傷を受けた「共和高架橋」の載荷試験および解析を行い、クラックの発生原因と補修方法について検討した。

載荷試験の結果、クラック発生付近には、大きな圧縮応力の集中が認められた。また、この部分の応力は主げた間の沈下量の差に起因するものである。

解析による補強工法の検討の結果、クラックを確実に防ぐには、主げたと横げたの上フランジを連結することが必要である。

キーワード： 共和高架橋，載荷試験，疲労損傷，補強工法

ま え が き

道路橋においては、活荷重による疲労の影響は小さく、設計上の考慮は鋼床版橋を除けば必要がないとされてきており、事実、損傷事例は特殊な場合に限られている。しかし、ここ数年、構造物各部のディテールの選び方に起因すると見られる疲労損傷例がいくつか報告されるようになり、今後とも増加してゆく傾向が見られる。

橋梁における疲労は、(1)主部材の溶接部や切欠き部の疲労と、(2)2次部材接合部などにおける2次応力、変形の拘束および板材の面外変形などが原因となる疲労とに大きく分けることができる。いわゆる疲労設計の対象となり得るのは、部材の応力状態が比較的明確な(1)のケースにはほぼ限られるが、これによると見られる損傷例はほとんど報告されていない。現在および将来において問題となると思われるのはむしろ(2)のケースであるが、この場合局所的な応力が問題となるため設計時に考慮することが難しく、またこれまでの事例が少ないため、効果的な対策についても不明な点が多い。当面は、事例の分析とその蓄積が重要であると考えられる。

建設省土木研究所橋梁研究室では、昭和57年12月疲労により主げたと横げたおよび対傾構の取付け構造に損傷を受けた「共和高架橋」の載荷試験を行う機会を得た。ここに報告するのは、同橋の試験車両による載荷試験と解析の結果およびこれらに基づくクラックの発生原因と補修方法についての検討結果である。

昭和59年 6月

建設省土木研究所

構造橋梁部 橋梁研究室

室 長 佐 伯 彰 一

研究員 西 川 和 廣

滝 沢 晃

目 次

ま え が き

1. 共和高架橋の概要と損傷状況	1
1.1 共和高架橋の概要	1
1.2 損傷状況	8
1.3 損傷状況の再調査	12
2. 載荷試験	14
2.1 測定対象支間	14
2.2 載荷試験の種類	14
2.3 静的載荷試験	16
2.4 動的載荷試験	45
2.5 載荷試験結果のまとめ	61
3. 解析による損傷原因の検討	63
3.1 目 的	63
3.2 解析の対象	63
3.3 解析方法	63
3.4 格子げたの計算（解析Ⅰ）	63
3.5 平面ラーメンのFEM解析（解析Ⅱ）	65
3.6 クラック発生原因の検討	65
3.6.1 横げた一端げた接合部のAクラック	65
3.6.2 Bクラック，Cクラック	70
4. 各種補強工法の効果について	73
4.1 検討の方法	73
4.2 補強工法の種類	73
4.3 各補強工法の効果	73
5. 結 言	87

1. 共和高架橋の概要と損傷状況

1.1 共和高架橋の概要

共和高架橋は、国道23号愛知県大府市共和町に位置しており、昭和41年に架設され、損傷が発見されるまでに約16年経過している（図-1.1 aの地図参照）。

国道23号は、国道1号の名古屋バイパスとしての性格と、名古屋港と背後の工業地帯とを結ぶ産業道路としての性格を合わせて持っている。このため、交通量、とりわけ大型車両の交通量が多く、輸出用の自動車を満載したトレーラーが、そのうちかなりの割合を占めている。表-1.1 a および b は、同橋の前後において行われた交通量調査の一例を参考までに示したものである。日交通量は位置によりかなり異なるが4～9万台/日で、そのうち大型車両（1および8ナンバー）の割合が、日中（7～24時）で約50%、深夜には70～90%にも達する。

本高架橋の一般図を図-1.1 b に示す。今回損傷が発見されたのは、図-1.1 b に示した第2工区に当る部分である。図中主げた間に描かれている縦げたは、損傷発見時に工事中であった床版補強のための増けたであり、竣工当時は無かったものである。

本橋の諸元は位置によって多少異なるが、代表的な諸元は表-1.1 c に示す通りであり、上下線が一体の部分（写真-1.1 a）と分離している部分（写真-1.1 b）がある。車線数は基本的には片側3車線となっている。本橋は竣工当時としてはごく普通の橋梁であったはずであるが、最近の橋梁と較べて次のような特徴を指摘することができる。

i) 支間が20～21 mと、連続げた橋としては非常に短い。

ii) 床版厚がかなり小さい（19 cm）。

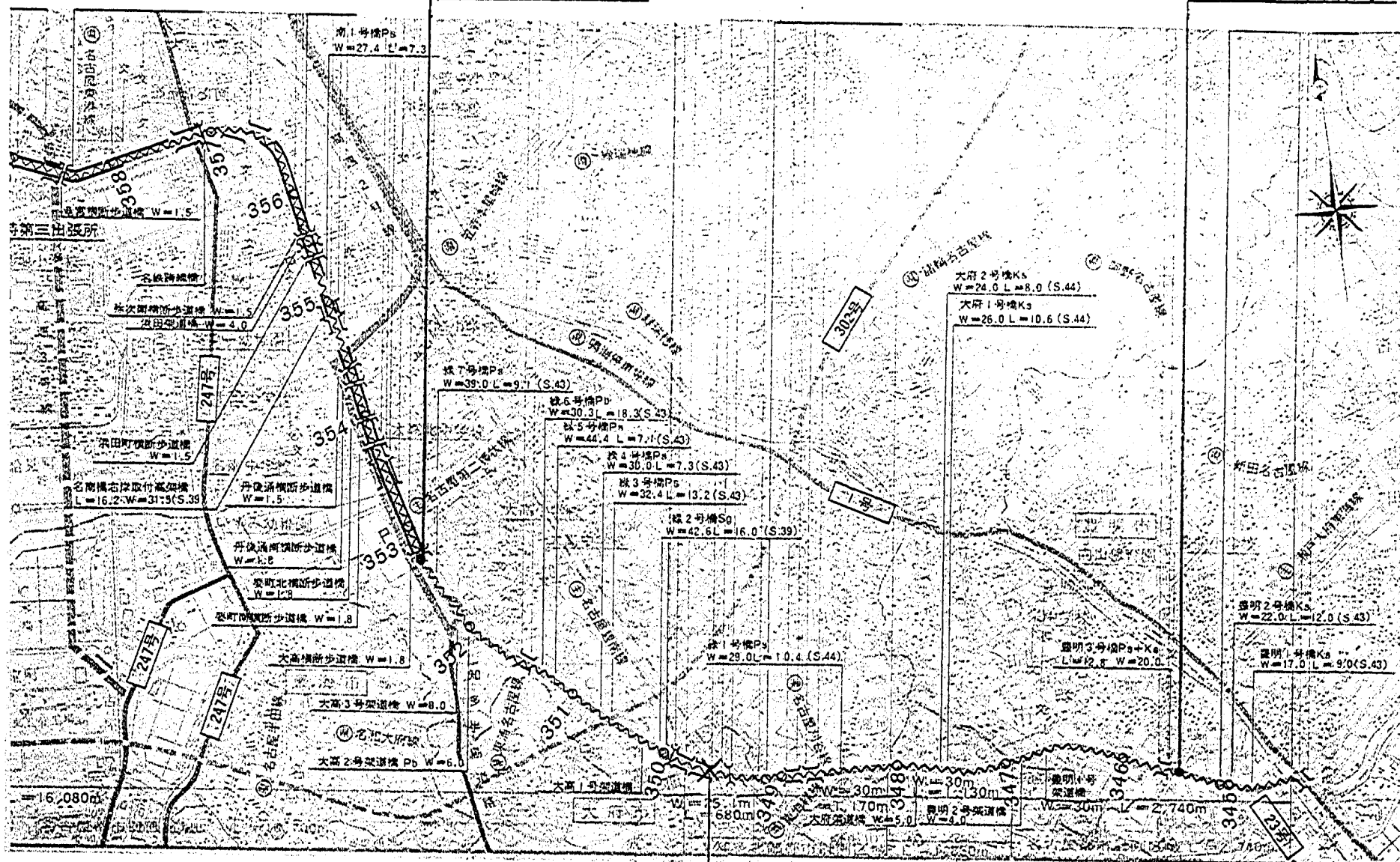
iii) i), ii) の結果として、鋼げた高が小さく、活荷重が全荷重に占める割合が比較的大きい。

iv) 主げた間隔が平均3.3 mと現在の標準よりかなり大きい。

v) 主げたと荷重分配横げたあるいは中間対傾構との取付け部は、旧標準設計に準じており、取付け位置が主げた上フランジに接近している（図-1.1 c）。

(交通量調査観測点)
名古屋市緑区大高町

(交通量調査観測点)
愛知県豊明市栄町



共和高架橋
大府市共和町

図-1.1 a 国道23号平面図

.....

時間	SEQ	歩行者	自転車				牛馬車荷車				二輪車類				乗用自動車類								貨物自動車類												合計																																						
			軽自動車(乗用)				乗用車				バス				小計				軽自動車(貨物)				小型(貨物車)				貨客車				普通貨物車					特殊車類(特種・特殊)				小計																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60													
7~8	0:1					0					0				0						5					3:8		1:9	4:5			6				1:9	8:9			3:0			1:4	6			3:2	5			7:7	0			9:8			1:3	6:9			3:3	5:8										
8~9	0:2					0					0				0						1:0					2:2		1:1	7:3			1:1			1:2	0:6			3:7			1:6	4			3:4	6			9:7	2			1:4	8			1:6	6:7			2:8	7:3										
9~10	0:3					0					0				0						3					1:6			4:9	4		1:9			5:2	9			2:2			1:3	4			3:2	9			1:2	4:4			2:0	1			1:9	3:0			2:4	5:9										
10~11	0:4					0					0				0						4					1:3			4:9	4		1:9			5:2	6			1:9			1:1	7			3:8	1			1:2	4:7			2:0	1			1:9	6:5			2:4	9:1										
11~12	0:5					0					0				0						5					1:3			5:6	0		2			5:7	5			2:8			1:7	3			3:5	5			1:2	9:5			1:3	2			1:9	8:3			2:5	5:8										
12~13	0:6					0					0				0						1:0					9			4:9	5		1:4			5:1	8			3:2			1:2	7			2:5	7			1:2	0:2			1:8	6			1:8	0:4			2:3	2:2										
13~14	0:7					0					0				0						5					1:1			4:6	5		3			4:7	9			1:7			1:6	1			3:5	2			1:0	6:5			1:7	4			1:7	6:9			2:2	4:8										
14~15	0:8					0					0				0						9					1:4			5:0	9		1:8			5:4	1			3:0			1:6	9			3:7	6			1:1	2:0			1:5	6			1:8	5:1			2:3	9:2										
15~16	0:9					0					0				0						8					7			6:2	7		9			6:4	3			4:2			1:7	7			3:6	5			1:1	6:5			1:5	3			1:9	0:2			2:5	4:5										
16~17	1:0					0					0				0						1:2					1:4			6:8	2		3:0			7:2	6			4:0			2:5	1			4:6	5			1:0	5:7			1:1	7			1:9	3:0			2:6	5:6										
17~18	1:1					0					0				0						1:5					2:3			1:0	0:3		2:7			1:0	5:3			2:4			2:0	4			5:2	9			8:0	7			8:2			1:6	4:6			2:6	9:9											
18~19	1:2					0					0				0						8					2:6			1:1	6:3		1:8			1:2	0:7			3:1			1:6	2			4:0	5			7:2	1			7:1			1:3	9:0			2:5	9:7											
小計	9:1					0					0				0						9:4					2:0	6		9:6	1:0		1:7	6			9:9	9:2			3:5	2			1:9	8:5			4:4	8:5			1:2	6:6	5			1:7	1:9			2:1	2:0	6			3:1	1:9	8					
19~20	1:3					0					0				0						7					1:7			1:1	3:0		6			1:1	5:3			3:3			1:0	6			3:0	0			7:7	0			5:3			1:2	6:2			2:4	1:5											
20~21	1:4					0					0				0						3					1:0			8:2	1		2			8:3	3			1:3			6:2			1:8	7			8:5	6			3:6			1:1	5:4			1:9	8:7												
21~22	1:5					0					0				0						4					8			6:6	0		3			6:1	1			1:0			5:1			1:1	8			8:2	2			4:8			1:0	2:9			1:6	4:0												
22~23	1:6					0					0				0						3					8			3:3	1		4			3:4	3			4			1:4			7:8			7:6	7			4:3			9:0	6			1:2	4:9													
23~24	1:7					0					0				0						0					1			2:0	3		2			2:0	6			3			9			4:8			7:3	9			3:2			8:3	1			1:0	3:7													
24~1	1:8					0					0				0						3					3			1:4	9		1			1:5	3			6			1:3			2:8			6:3	3			2:2			7:0	2			8:5	5													
1~2	1:9					0					0				0						0					1			8:9		1			-9	1			1			8			1:7			7:2	7			3:8			7:9	1			8:8	2														
2~3	2:0					0					0				0						1					0			4:3		2			4:5			4			0			4			5			6:4	5			3:8			6:9	2			7:3	7												
3~4	2:1					0					0				0						0					0			3:7		2			3:9			3			0			6			1:6			5:9	7			2:3			6:4	2			6:8	1												
4~5	2:2					0					0				0						0					1			5:5		0			5:6			5			2			3:0			1:7			6:9	3			3:2			7:7	4			8:3	0												
5~6	2:3					0					0				0						1					2			8:7		1			1:0	2			7			2:8			3:1			9:4	8			7:3			1:0	8:7			1:1	8:9														
6~7	2:4					0					0				0						1					1			6:4	8		9			6:6	7			1			5:7			1:2	9			9:5	5			1:0	9			1:2	6:0			1:9	2:7											
小計	9:2					0					0				0						2:3					6:1			4:1	9:3		4			4:2	9:9			8:9			3:6	8			9:7	4			9:1	5:2			5:4	7			1:1	1:3	0			1:5	4	2:9								
合計	9:3					0					0				0						1:1	7				2:6	7		1:3	8:0	3		2			2:2	1			1:4	2:9	1			4:4	1			2:3	5:3			5:4	5:9	2			1:8	1:7			2:2	6:6			3:2	3:3	6			4:6	6	2:7

[illegible]

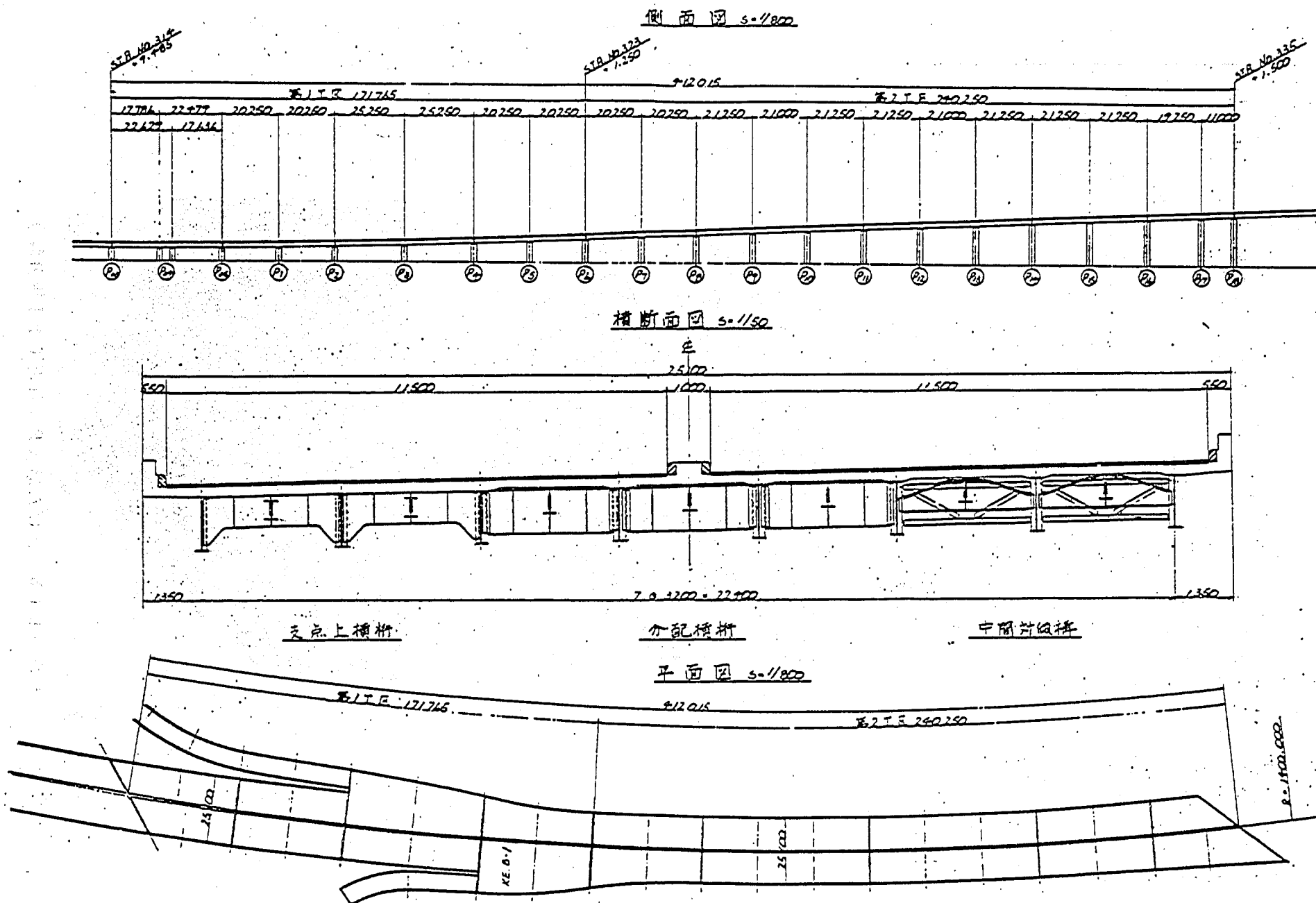


圖-1.1 b 共和高架橋一般圖

表-1.1c 共和高架橋の諸元

型 式	2 径間連続非合成格子鈑桁	3 径間連続非合成格子鈑桁
支 間	20.000 m + 20.000 m	21.000 m + 21.000 m + 21.000 m
橋 長	40.590 m	63.500 m
巾 員	500 + 11,500 + 500	500 + 11,500 + 1,000 + 11,500 + 500
橋 格	1 等橋 (T - 20 , L - 20)	1 等橋 (T - 20 , L - 20)
縦断勾配	4.0 % (標準)	4.0 %
横断勾配	2.0 % (標準)	2.0 %
舗 装	アスファルト舗装 $t = 6.0$ cm	アスファルト舗装 $t = 6.0$ cm
床 版	R C 床版 $t = 19.0$ cm	R C 床版 $t = 19.0$ cm

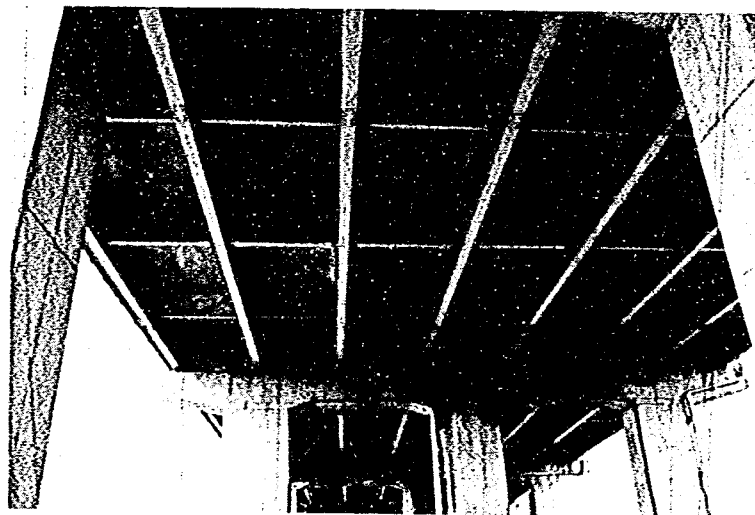


写真-1.1a 主げた形状 P 12 付近 (上下線一体)

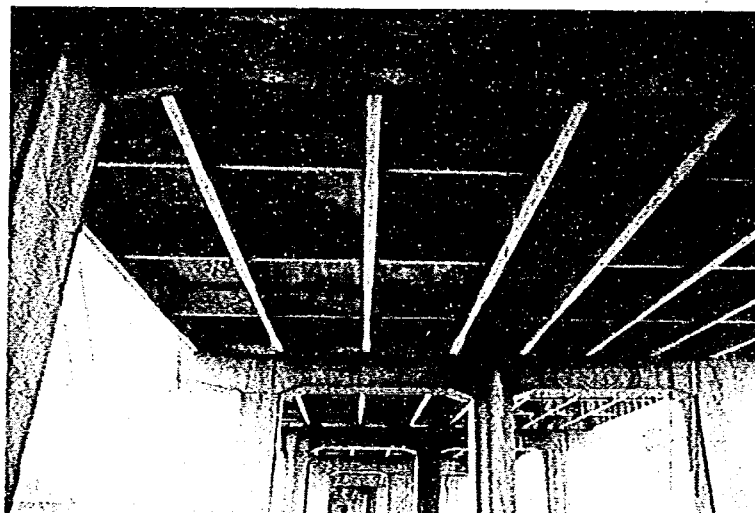
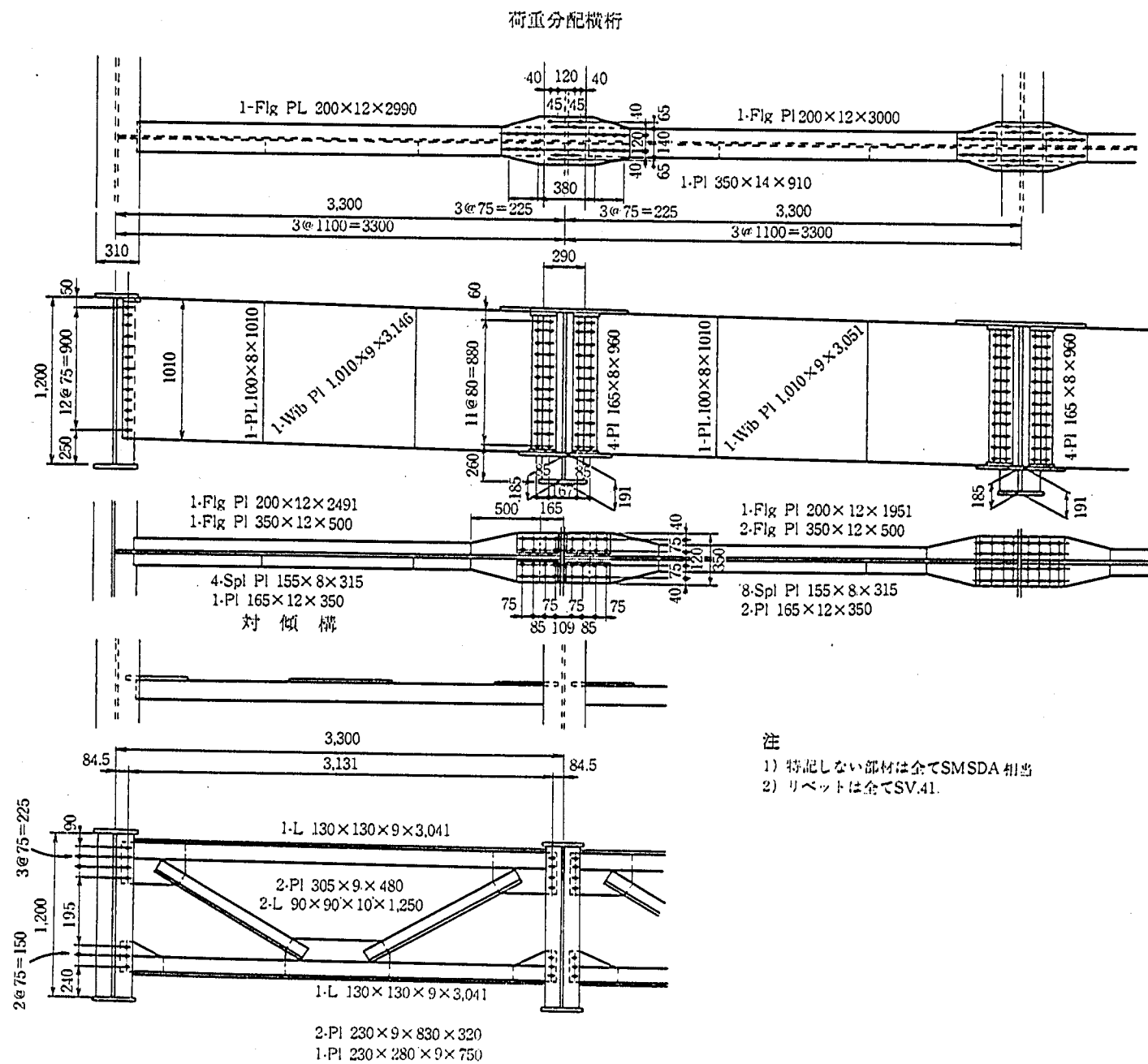


写真-1.1b 主げた形状 P 6 付近 (上下線分離)



注

- 1) 特記しない部材は全てSMSDA相当
- 2) リベットは全てSV.41.

図-1.1c 横げたおよび対傾構全体図

1.2 損傷状況

本橋の疲労損傷は、床版補強のための縦げた増設工事の際に発見された。その時点で行われた工区全体における損傷分布調査の結果を図－1.2 a および表－1.2 に示す。

ここでは、発生したクラックを次の3つのタイプに分類している。

(1) Aタイプ(写真－1.2 a および図－1.2 b～e)

荷重分配横げたおよび対傾構を主げたに取付けるのに用いられている垂直補剛材と主げた上フランジとの溶接部に生じたクラックで、塗装に割れを生じた程度のもことから、全断面を貫通したものまで色々な程度のもが見られる。小規模のものがすべて横げた側に生じていることから考えると、きれつの発生は同溶接部の横げた側端部から始まり、主げたウェブ方向へ成長していったものと推測される。また、図－1.2 b～dに見られるように、クラックはすみ肉溶接余盛部の中央にまず現われ、のど厚部を切断する形で成長している。このことは、クラックの発生点が溶接止端の応力集中部ではなく、ルート部であることを示すものである(図－1.2 e)。

このタイプのクラックは最も数が多く、次のような特徴がある。

- i) 荷重分配横げたあるいは対傾構を取付けた垂直補剛材に限られる。
- ii) 貫通きれつは荷重分配横げたを取付けた端主げたの垂直補剛材に限られる。
- iii) すべて正のモーメント領域である。

(2) Bタイプ(写真－1.2 b および図－1.2 f)

荷重分配横げたを取付けた端主げたの垂直補剛材上端のスカーラップ、あるいは補剛材と主げたウェブの溶接にクラックが入ったものである。スカーラップでは加工時の凹凸から、溶接部では補剛材側の溶接止端からクラックが発生している。Bタイプのクラックは全数で5ヶ所であるが、1例を除いて貫通したAタイプのクラックを伴っている。なお、単独で発生した1例の場合はスカーラップからのきれつである。

(3) Cタイプ(写真－1.2 c および図－1.2 g, h)

主げたウェブと上フランジとのすみ肉溶接止端に沿い、ウェブに入ったクラックである。クラックはウェブを貫通しており、最大クラック長は20 cmにも及んでいる。このタイプはすべて端主げたの荷重分配横げた取付け部に生じており、貫通したAタイプのクラックを伴っている。

クラックは溶接止端に沿って成長した後、下方に方向を変えている。ウェブ両面でのクラックを比較したところ、先端付近でのクラック面は、ウェブに対し傾斜しており、横げたにより内側に引張られる力が働いていることがわかった。

以上のほか、表－1.2 に横げたと補剛材を連結するリベットのゆるみがあげられている。これは同連結部の上から1～2本のリベットにゆるみが生じたもので、この部分には前述のクラックは2ヶ所しか発生していない。

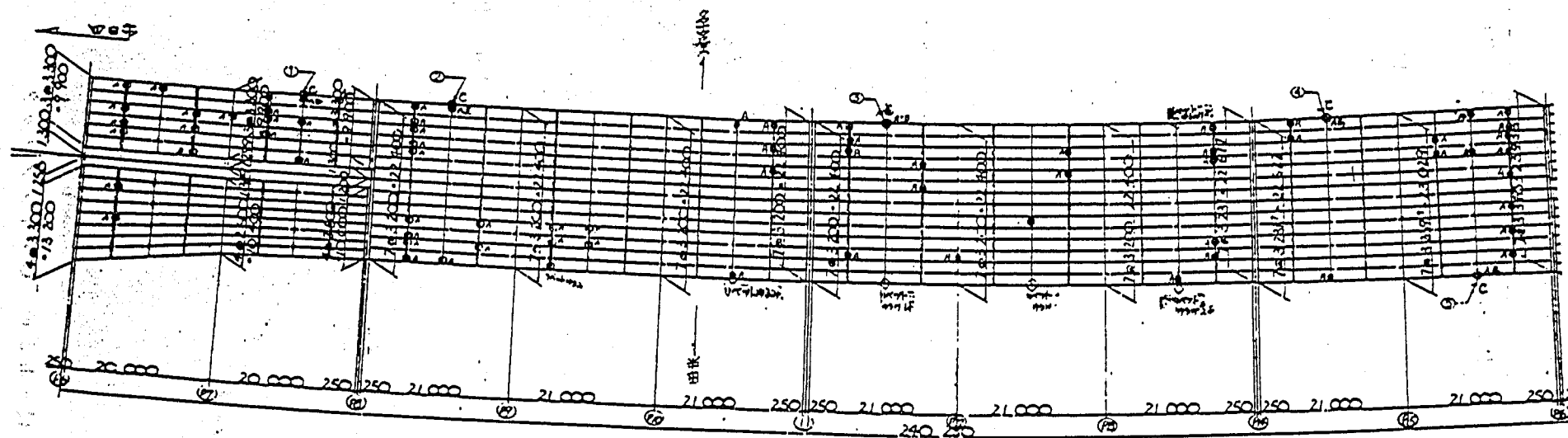
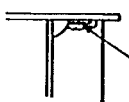
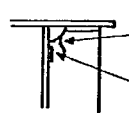
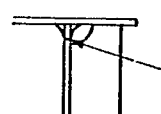


図-1.2 a 損傷分布調査

表-1.2 損傷部調査表

	P6~P8	P8~P11	P11~P14	P14~P16	P16~P18	計
A タイプ  溶接の横割れ	ヶ所 17	21	16	16	0	70
B タイプ  スチフナーの母材割れ or 溶接の縦割れ	2	1	1	1	0	5
C タイプ  主桁ウェブの割れ	1	1	1	2	0	5
リベットのゆるみ	0	1	4	1	0	6

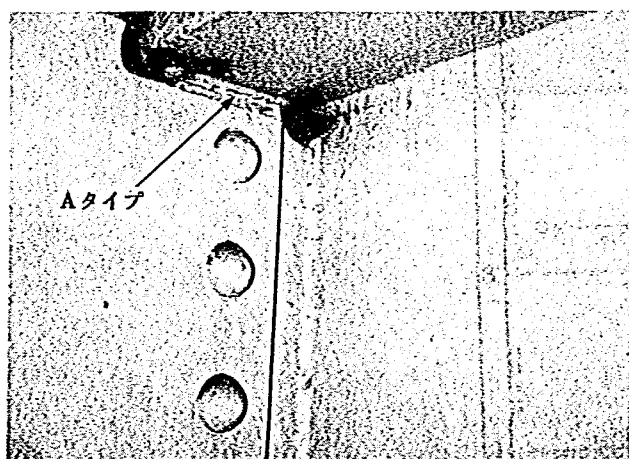


写真-1.2 a Aタイプクラック

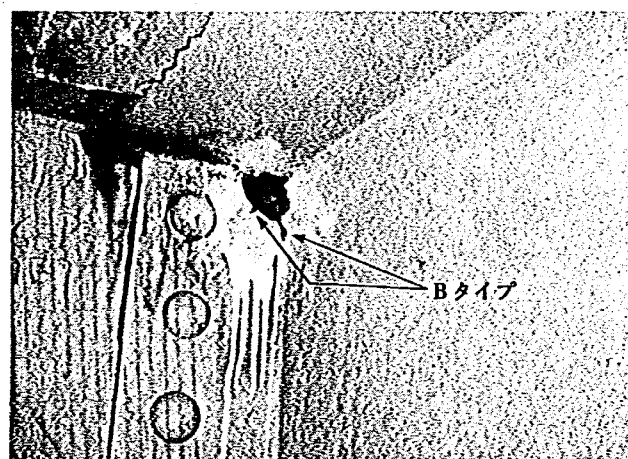


写真-1.2 b Bタイプクラック

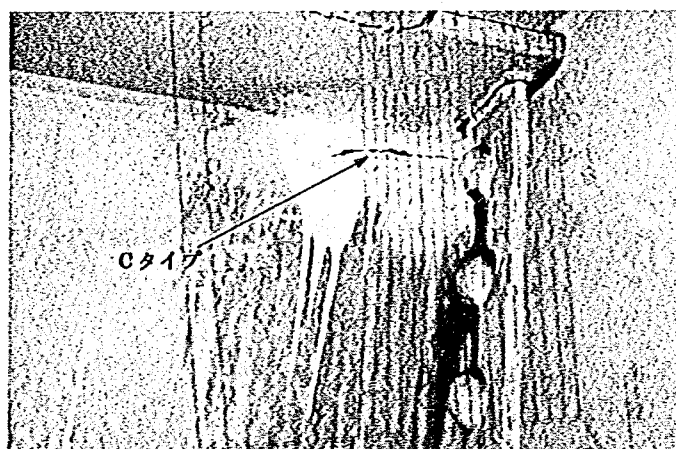


写真-1.2 c Cタイプクラック

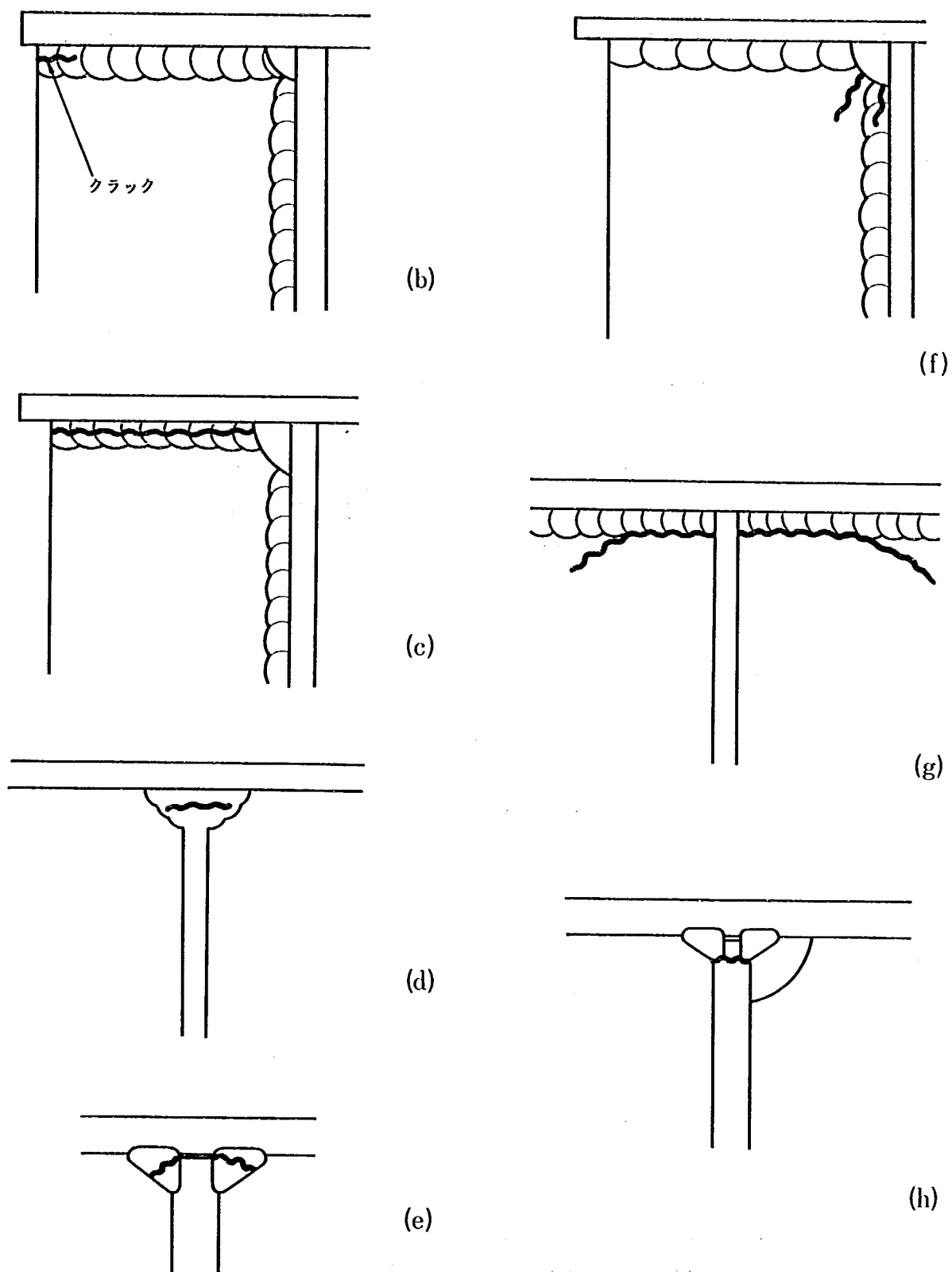
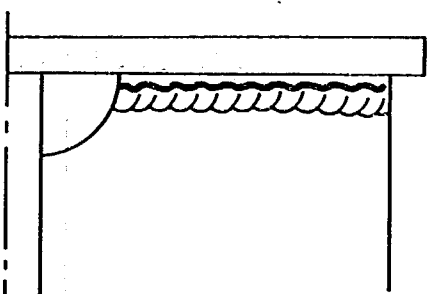
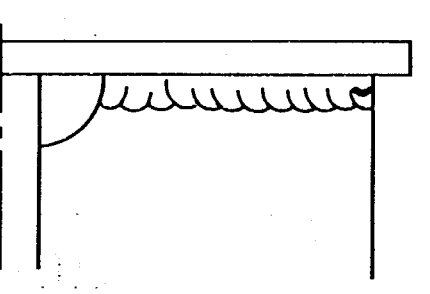
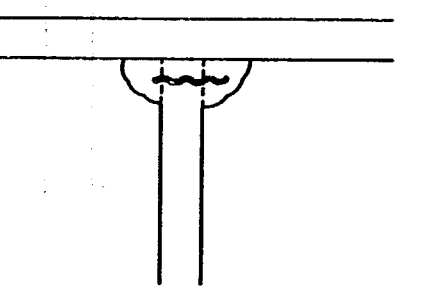
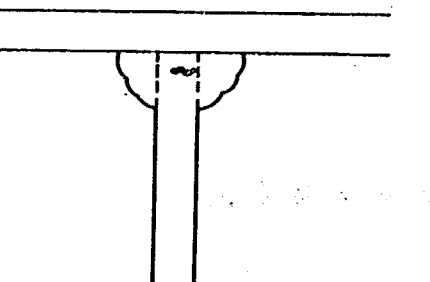


図-1.2 クラック発生図

1.3 損傷状況の再調査

計測の対象とした P14～P16 間については、横げたおよび対傾構取付け部の垂直補剛材と上フランジとのすみ肉溶接部の損傷状況を改めて詳細に調査した。この調査の主な目的は次の通りである。

- I) 前述の調査で A タイプの発生位置に若干疑問があるので確認する。すなわち、上フランジ同志をテンションプレートで連結した横げたと中げたの交差部にクラックが本当に発生しているかどうか。
- II) A タイプクラックの成長の程度を全数について確認する。調査は、すべての該当部分にできる限り接近し、必要に応じて局部をこするなど、単なる汚れを誤ってクラックと判断しないように配慮した。結果を図－1.3 に示す。また、A クラックの成長度については、次のように分類した。

A - 1 	●：すみ肉溶接全長が破断しているもの（2ヶ所）
A - 2 	●：側面に 1～2 cm 成長したもの（7ヶ所）
A - 3 	●：すみ肉溶接正面にのみクラックが見られるもの（15ヶ所）
A - 4 	○：クラックか、塗装の割れのみかはっきりしないもの（18ヶ所）

観察の結果、次のような傾向が指摘される。

- I) すみ肉溶接部の完全な破断は端げたと横げたの交点の2ヶ所だけに見られる。その他のクラックは、すべてA-2, 3および4で比較的小さいものである。
- II) 荷重分配横げた取付部では、端げた部のみにクラックが見られ、中げたとの取付部には損傷は見られない。
- III) 対傾構取付け位置の補剛材には、多数(38ヶ所)のクラックが見られたが、いずれも小規模なものである。

クラックの発生位置は、けたの自由端に近い対傾構の取付け部に多く、中間支点側では比較的少ない。また、端げた、中げたの区別なくあらゆる場所に見られる。

以上のことから、Aタイプクラックの発生は横げたあるいは対傾構からの水平力の伝達を主げた上フランジを介さずに行う形式の取付け構造に集中しており、特に端主げたと横げたの取付け部の損傷が著しいということがいえる。

そのほか、BおよびCタイプのクラックは、 $P_6 \sim P_7$ に単独のBタイプのクラックが一ヶ所あるほかは、すべてAタイプクラックが成長し補剛材と上フランジの溶接が切れた場合にのみ生じている。また、その位置はすべて端げたと荷重分配横げたの交差部に限られている。

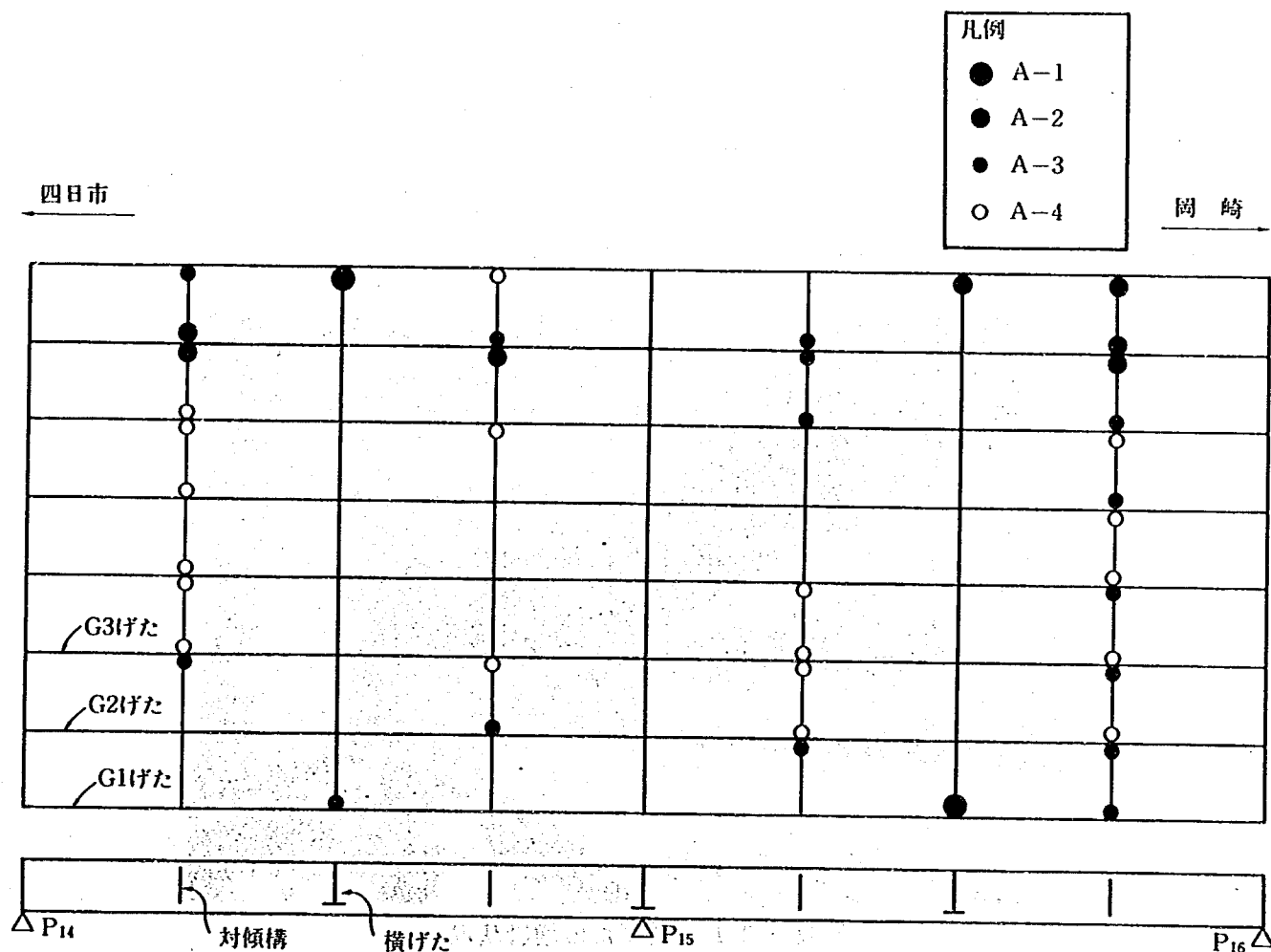


図-1.3 損傷状況の再調査

2. 載 荷 試 験

2.1 測定対象支間

前述したように、本橋では縦げたの増設工事を行っており、すでにかかなりの部分が完成している（写真－2.1 参照）。そこで、測定の対象をまだ縦げた増設が行われていない $P_{14} \sim P_{16}$ 間の 2 径間連続げた部（図－1.2 a）とした。当該部の支間は $21\text{ m} + 21\text{ m}$ ，I 断面非合成 8 主げた橋で、主げた間隔は $3,232\text{ mm} \sim 3,348\text{ mm}$ と岡崎方面（図中右）に近づくにしたがって漸増している。また、上下線は一体構造で、車線数は上下各 3，計 6 車線である。

測定の際に注目したのは、最も大きな損傷を受けた部分と同じディテールを有し、かつ損傷の小さい端げた（G 1 げたと呼ぶ）と荷重分配横げたが交差する部分、および比較的小規模なクラックが多数発生した中だけ（G 2 と呼ぶ）と対傾構との取付け部である（図－2.1）。

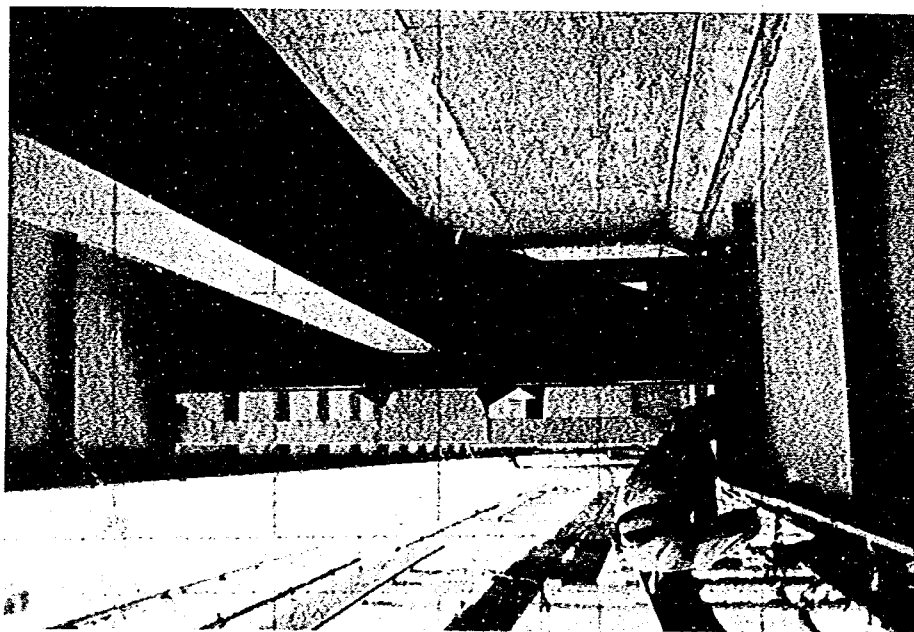
2.2 载荷試験の種類

载荷試験は 2 日に分け、それぞれ静的および動的载荷試験を行った。

静的载荷試験は注目する横げたおよび対傾構の近傍に荷重車を静的に載せて各部の応力を測定するもので、可能な限り多くの点の応力を測定し、各部材および損傷部の応力分布および主応力等について詳細に把握することを目的としている。

一方、動的载荷試験は、測定支間を荷重車が通過する際に損傷部が受ける応力履歴を計測することにより、損傷原因を探るための補足的な資料を得ようとするものである。

いずれの試験も、上下 6 車線を完全に規制した状態で行った。なお、荷重車の諸元は図－2.2 に示す通りで、示方書の T-20 荷重に近いものとした。



写真－2.1 縦げたの増設状況

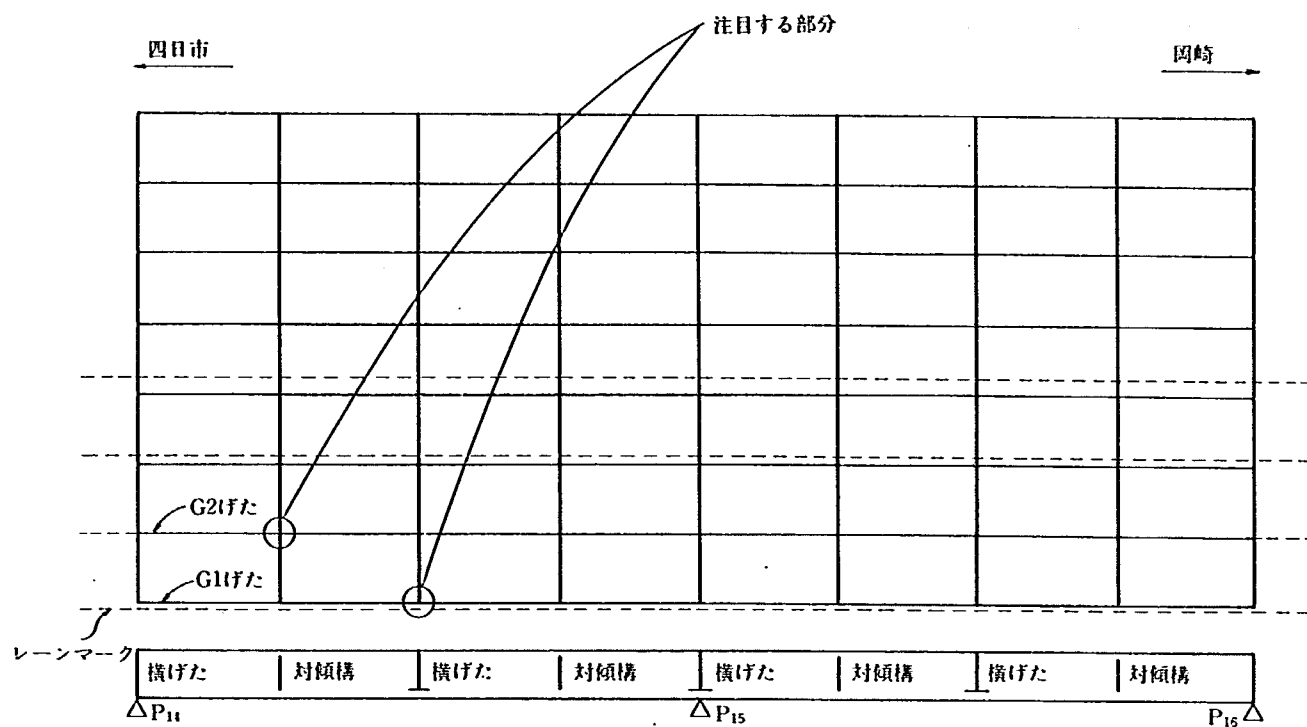


図- 2. 1 測定対象支間および着目点

2 軸8^t 積ダンプ

前輪 6.4^t
 後輪 13.6^t
 総重量 20.0^t
 積載物 砕石

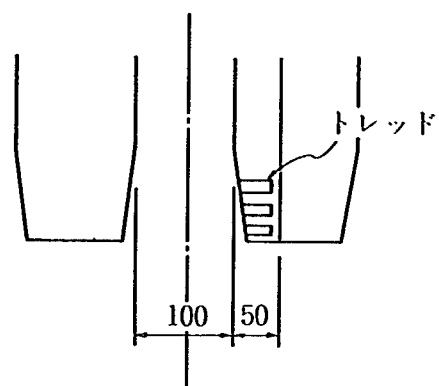
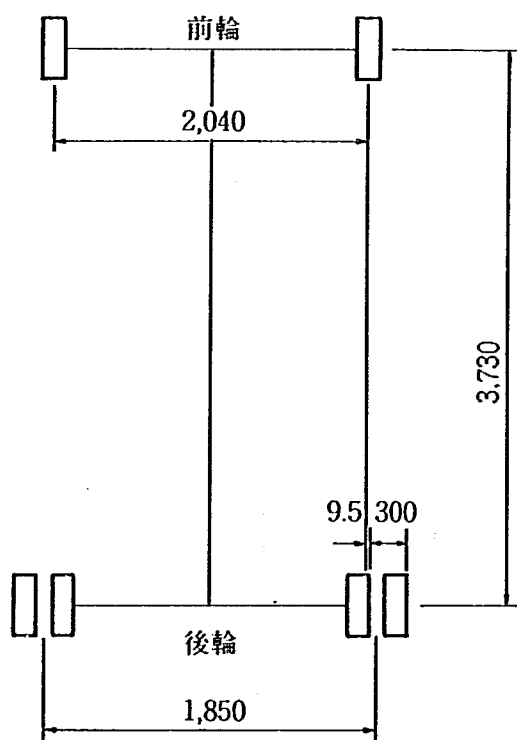


図- 2. 2 荷重車諸元

2.3 静的載荷試験

2.3.1 載荷条件

本橋における主げたとレーンマークの位置は、図-2.1に示すようにほぼ一致している。そこで、本試験では後の検討を簡単にするため橋面に主げたの位置をマークし、その中央に荷重車を載せることにした。

載荷条件は、次の6ケースである。

ケース1：G1～G2げた間、後輪横げた直上（図-2.3 a，写真-2.3 a）

ケース2： " ，後輪対傾構直上（図-2.3 b，写真-2.3 b）

ケース3：G2～G3げた間、後輪横げた直上（図-2.3 c，写真-2.3 c）

ケース4： " ，後輪対傾構直上（図-2.3 d，写真-2.3 d）

ケース5：ケース1において外側後輪がG1げたの直上になるように水平移動
（図-2.3 e，写真-2.3 e）

ケース6：ケース5からさらに後輪位置を左側縁石一杯に移動（図-2.3 f，写真-2.3 f）

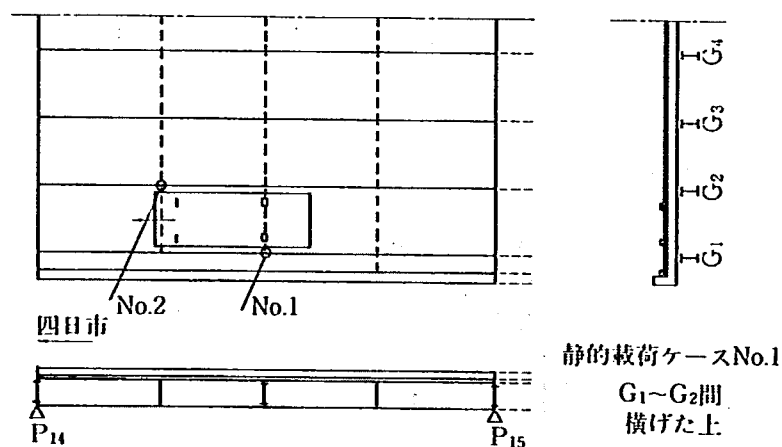


図-2.3 a 載荷条件 ケース1

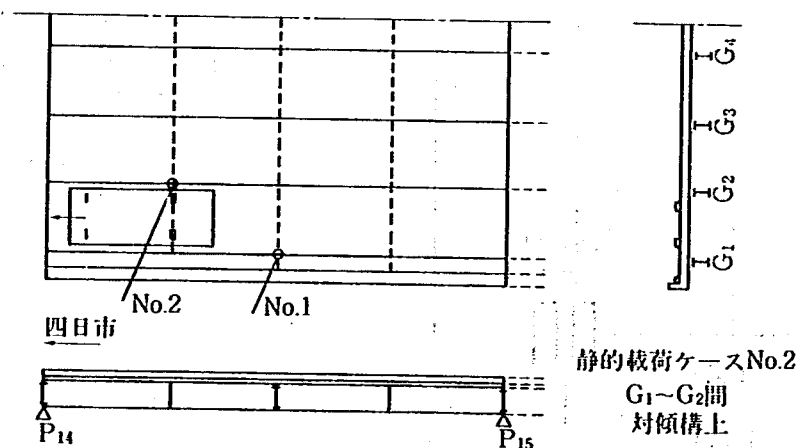


図-2.3 b 載荷条件 ケース2

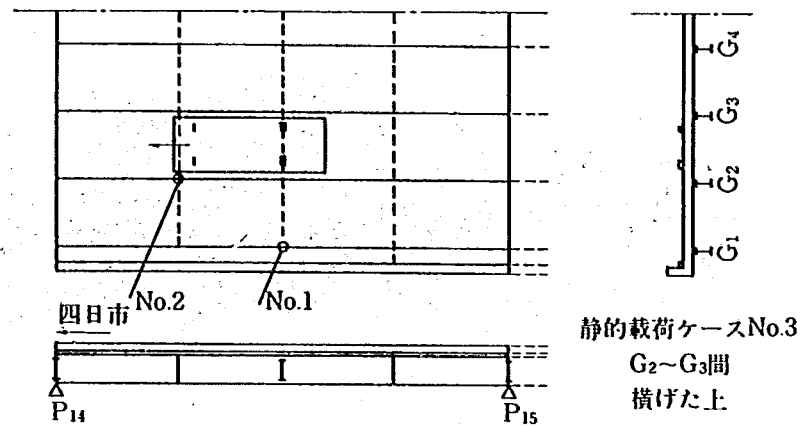


図-2.3 c 荷重条件 ケース 3

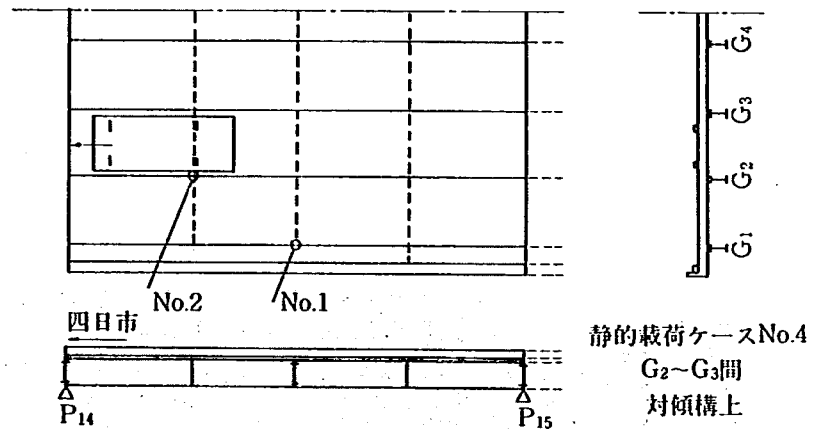


図-2.3 d 荷重条件 ケース 4

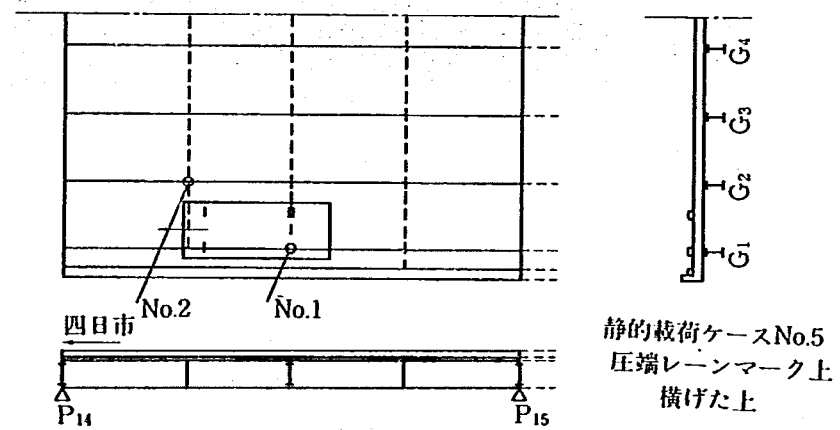


図-2.3 e 荷重条件 ケース 5

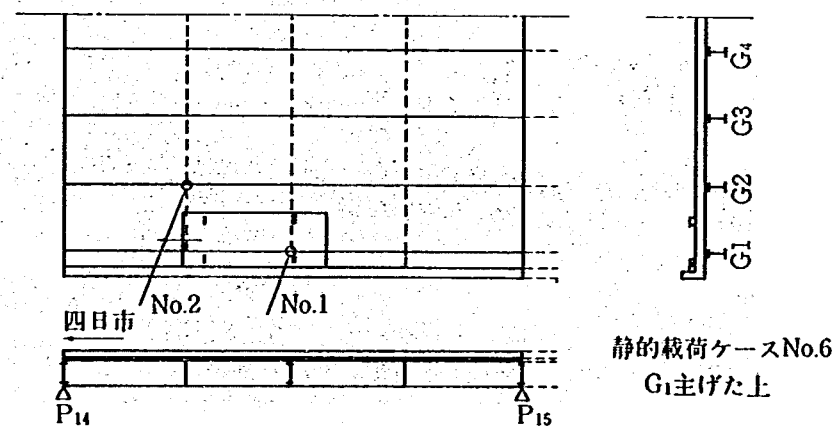


図-2.3 f 荷重条件 ケース 6

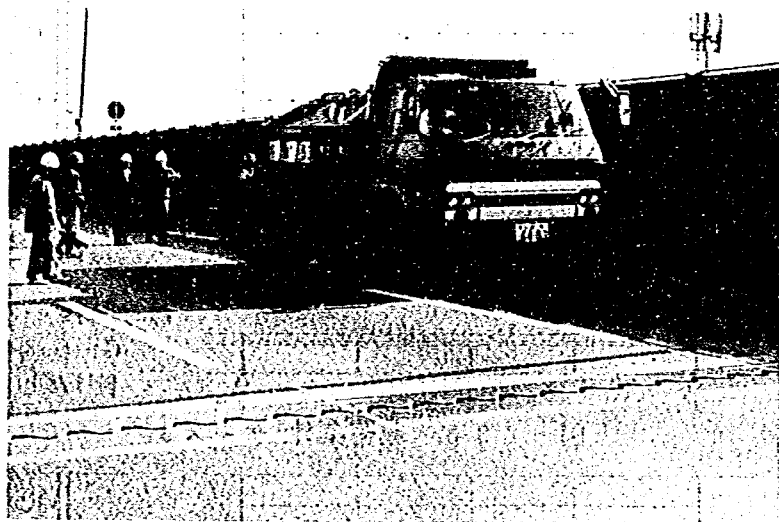


写真-23a ケース1

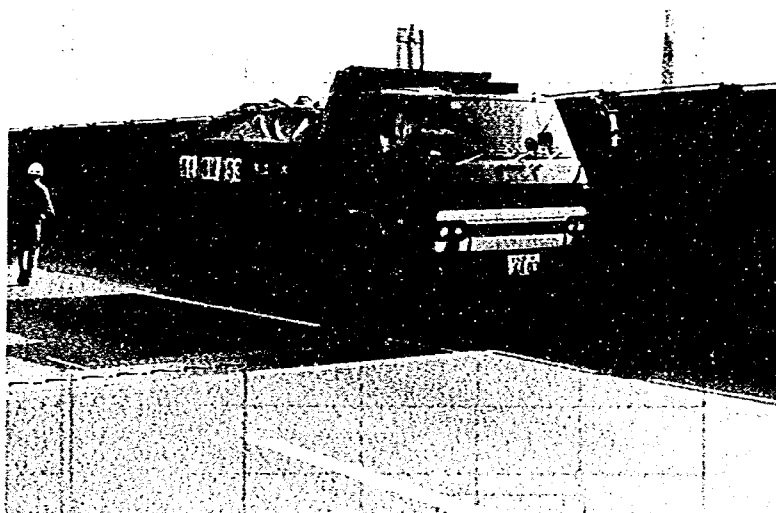


写真-23b ケース2

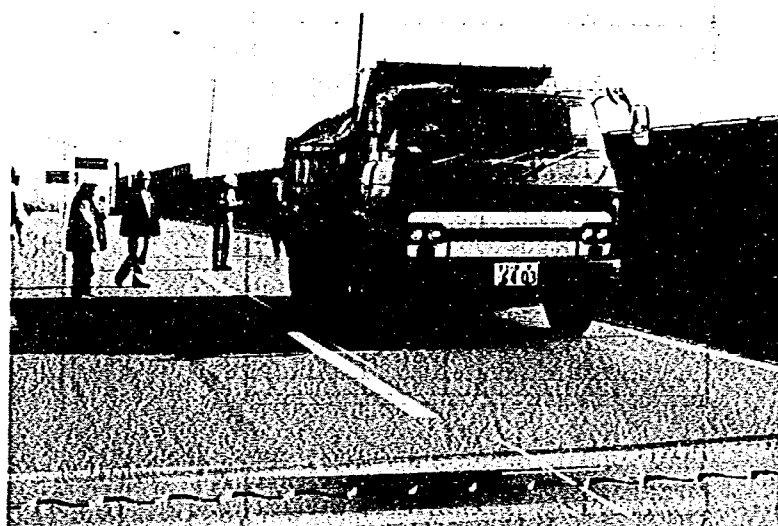


写真-23c ケース3

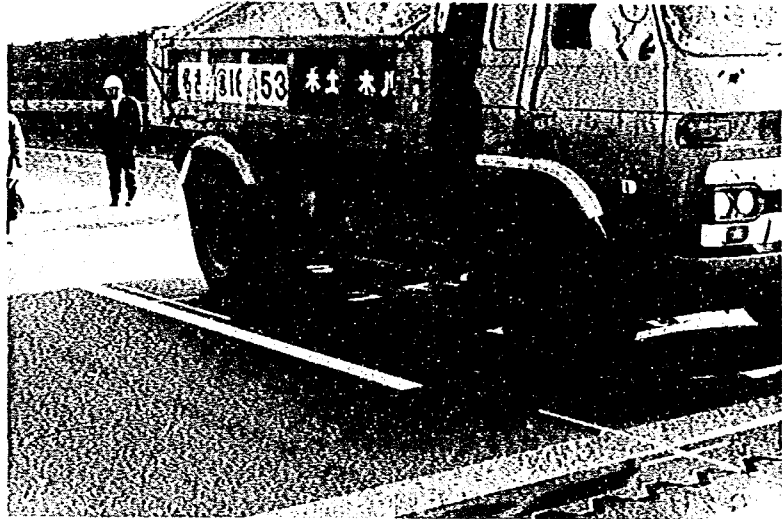


写真-2.3.d ケース 4



写真-2.3.e ケース 5

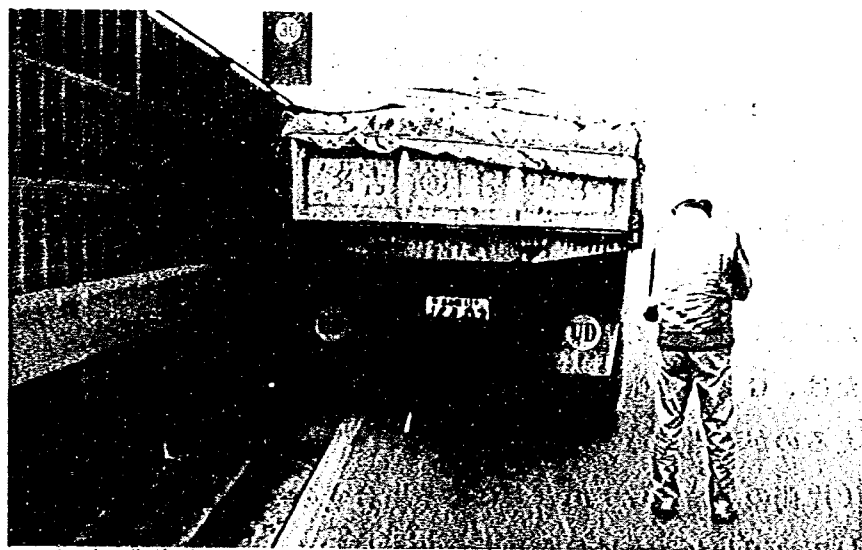


写真-2.3.f ケース 6

2.3.2 ひずみ計測位置

図-2.4(1)および(2)に、ひずみゲージの貼付け位置と測定するひずみの方向を示した。ひず

みの計測は、自動多点ひずみ測定器により行った。

2.3.3 計測結果

計測したひずみより算出した、各部の主応力図を図-3.1~6に示す。ここで各図は以下の内容を表わしている。

図-3.1(1) G1げたー横げた取付け部の補剛材

〃 (2) 横げたウェブ

〃 (3) G1げたウェブ補剛材背面

〃 (4) 〃 補剛材側

〃 (5) G2げたー対傾構取付け部の補剛材

〃 (6) G2げたウェブG1げた側

図-3.1~6は、それぞれ載荷ケース1~6に対応する。

(1) G1げたー横げた取付け部の補剛材(図-3.1~6(1))

いずれの載荷ケースにおいても、Aクラックの始点とみられるすみ肉溶接の横げた側端部には、大きな応力集中が見られる。特に、ケース1および3では $1,000 \text{ kg/cm}^2$ 、あるいはそれ以上の応力度が計測された。しかし、いずれも応力の符号は負であり、クラック発生に必要な引張り応力はどの場合にも認められない。

また、スカーラップ周辺の応力についても、ケース5を除けば荷重の位置による応力分布および方向の変化はほとんどみられない。スカーラップに接する2つのすみ肉溶接(補剛材ー上フランジ、補剛材ーウェブ)端付近は、溶接に沿ったかなり大きなせん断応力が存在するものと考えられる。単独のクラック発生が1例あった、スカーラップ中央付近には、かなり大きな応力が存在するが、これも圧縮である。

(2) 横げたウェブ(図-3.1~6(2))

横げたウェブの応力も、ケース5の場合を除けばその主応力方向に大きな差は見られない。横げた中央およびG2げた寄りでは、下フランジに横げた軸方向の引張応力が見られ、G1げた付近では逆に上フランジ付近に引張応力がみられる。下フランジ付近は(おそらくG1げた下端がフレキシブルなため)応力が小さくなっている。横げたの応力状態から推測すると、

i) G2げたがG1げたに対し常に相対的に沈下している。

ii) G1げたは、G2げた側に横げたにより引張られている。

のように考えるのが妥当であろう。

ケース5(片側の車輪がG1の直上にある場合)のみ少し応力分布が異なり、G1げたがG2げたに対して沈下したように見られる。しかし、さらに車輪を端に寄せたケース6においては、ケース1~4と同様の傾向となっており、不可解な結果となっている。いずれにしても、実際の交通による載荷条件はケース1あるいは3がほとんどであると考えられるので、ここではこれ以上言及しないことにする。

ケース1～4の結果がほとんど同じ傾向を持つということは、(1)の結果と一致するが、格子げた理論から推して、ケース1の条件でG2がG1より沈下するとは考え難い。計測に誤りがないとすれば、格子げたを解く際に考慮しない、床版の連続性がこのような結果をもたらしたことも考えられる。

(3) G1げたウェブ補剛材背面(図-3.1～6(3))

この部分には2軸圧縮の主応力がみられるが、絶対値は大きいものでない。

(4) G1げたウェブ補剛材側(図-3.1～6(4))

背面に比べてやや応力が大きく、特に鉛直方向の主応力が目立つが、最大でケース1の 550 kg/cm^2 程度であり、符号も負であることから、今後もCクラックの単独発生はないものと予想される。

(5) G2げた一対傾構取付け部の補剛材(図-3.1～6(5))

荷重車の位置を変えたケース2と4を比較すると、発生する応力の符号が全く反対になっているのがわかる。すなわち、補剛材側を車両が通過した場合には圧縮、反対側の場合は引張応力が主体となっている。クラック発生位置である主げた上フランジとのすみ肉溶接G1げた側端付近では、溶接線にはほぼ垂直な主応力が存在しており、その値は引張側約 350 kg/cm^2 、圧縮側約 850 kg/cm^2 とかなり大きく、すみ肉溶接におけるクラック発生に十分な応力振幅である。この点だけを見るかぎり、中げた一対傾構取付け部の補剛材と主げた上フランジとの溶接部は、端げた一横げた取付け部の場合よりも厳しい応力下にあり、クラックもより発生し易い条件にあるといえる。しかし、損傷状況を見ると、確かにクラックの発生自体は多くなっているが、大規模なクラックにはなっていない。これは、おそらく発生したクラックを成長させるために十分な応力が、クラックの背後に存在していないためと考えられる。この点については、後で詳しく検討する。

(6) G2げたウェブG1げた側

主げたウェブと上フランジの接合部付近に、車両の位置により符号が反転する応力が存在しており、偏心して取付けられている対傾構の側で少し値も大きくなっているが、それらの値は大きいものではなく、この部分の単独のクラック発生は考えられない。

図-3.7(1)および(2)は、対傾構の軸方向応力を示したものである。斜材と下弦材の応力は、その大きさに多少の変化はあるものの、荷重車の位置を変えても符号は変わっていない。上弦材のみが荷重車の位置により符号を変えており、補剛材の応力状態と対応している。言い換えれば、斜材、下弦材は横げた挙動とよく似ており、横げた同様に荷重分配機能を有していると考えられるのに対し、上弦材は別の力(変形か)に対して抵抗しているように見られる。

応力の大きさ自体は横げたの場合に比べて小さく、横げた程損傷部に与える影響は大きくないものと考えられる。

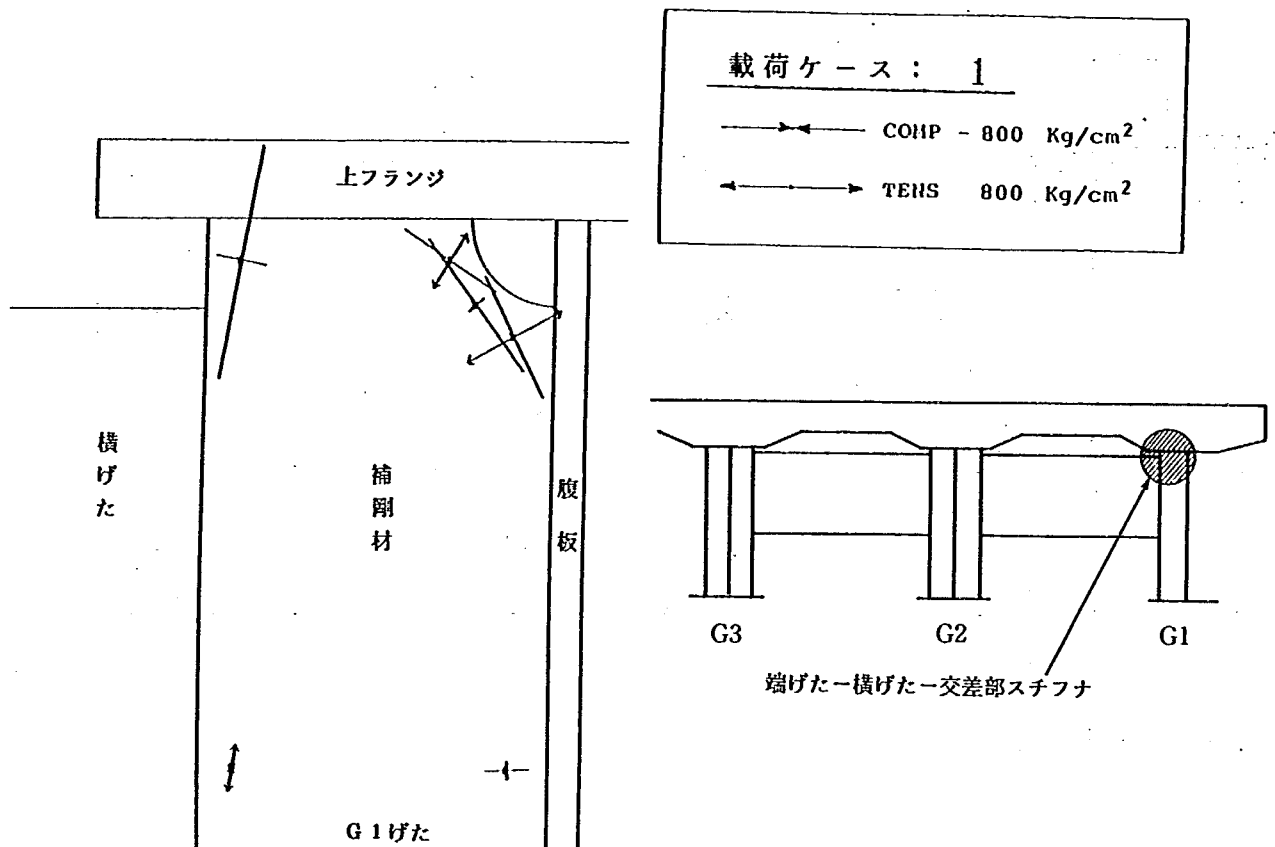


図-3.1(1) G1げた-横げた取付部の補剛材主応力図

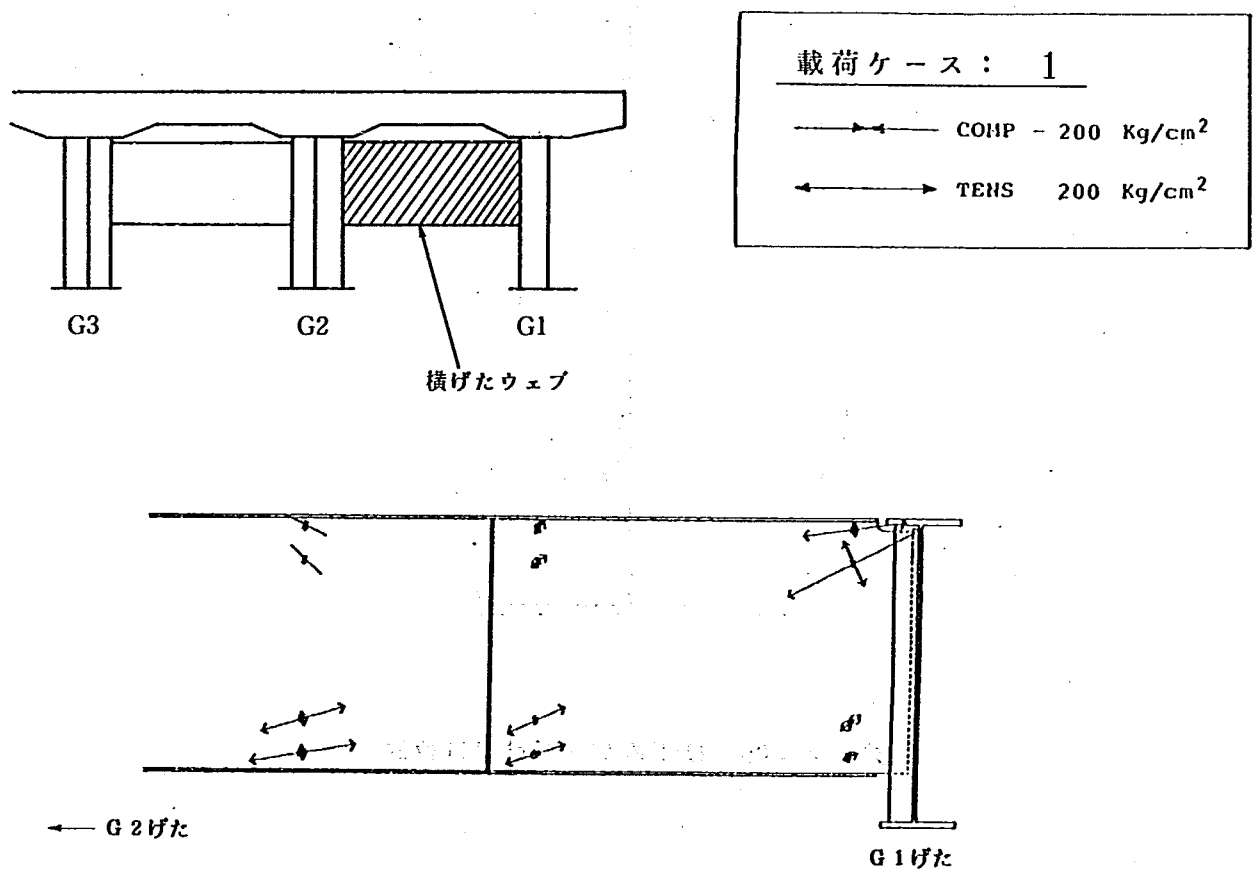


図-3.1(2) 横げたウェブ主応力図

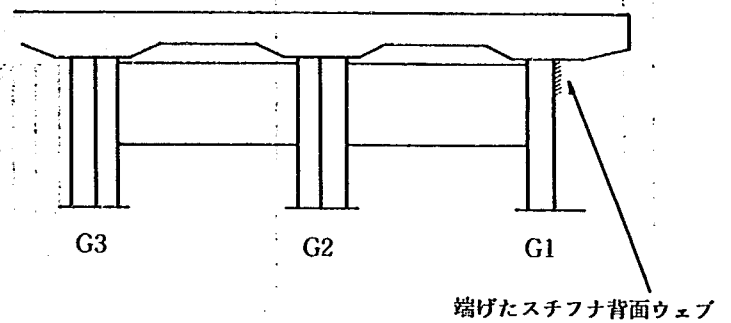
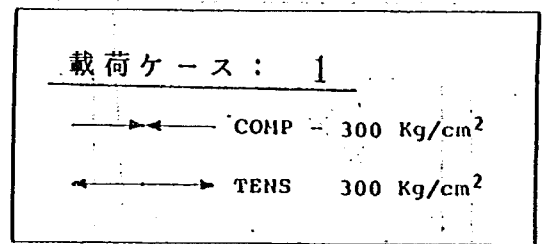
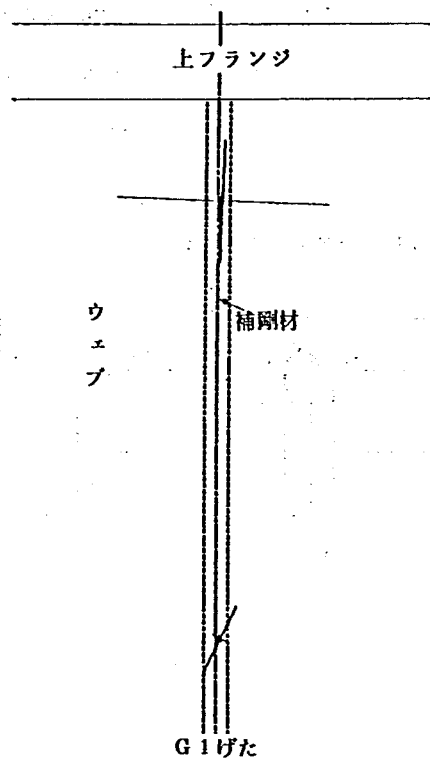


図- 3.1 (3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

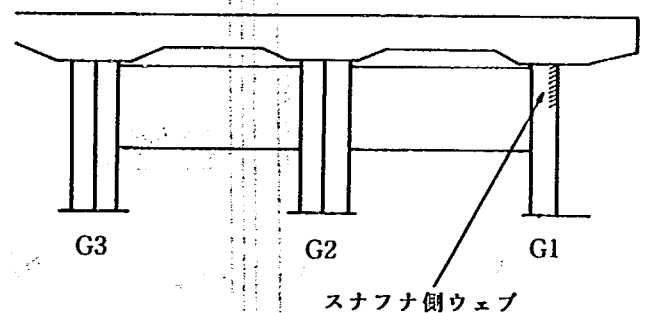
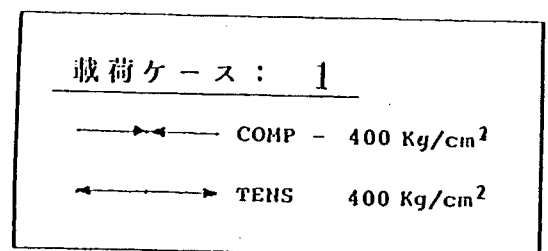
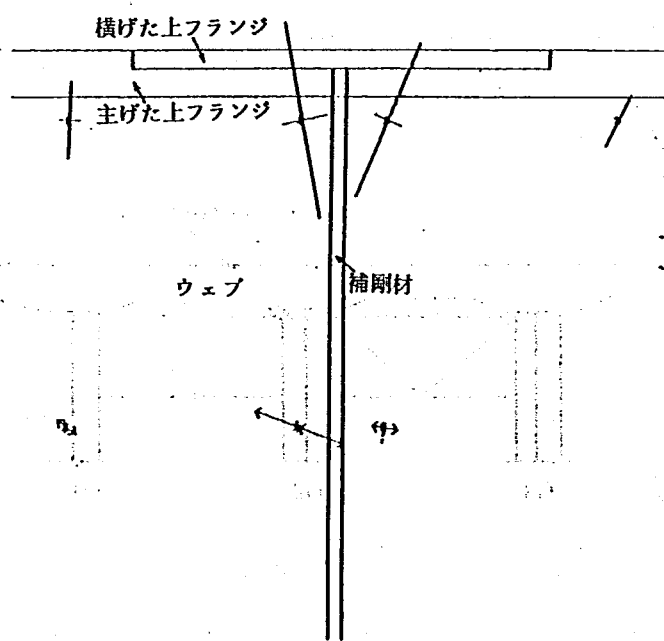


図- 3.1 (4) G1 げたウェブ補剛材側

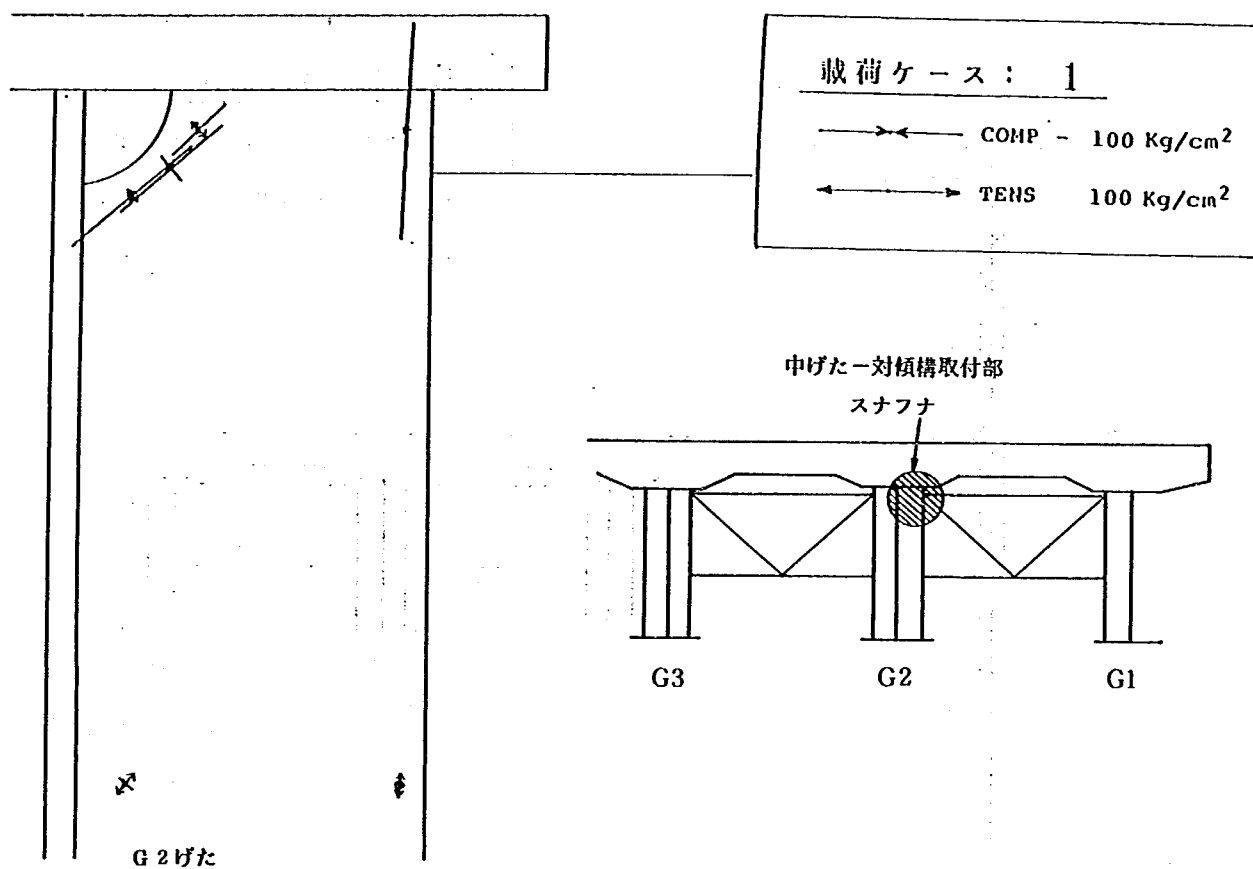


図- 3. 1 (5) G 2 げた一対傾構取付け部の補剛材

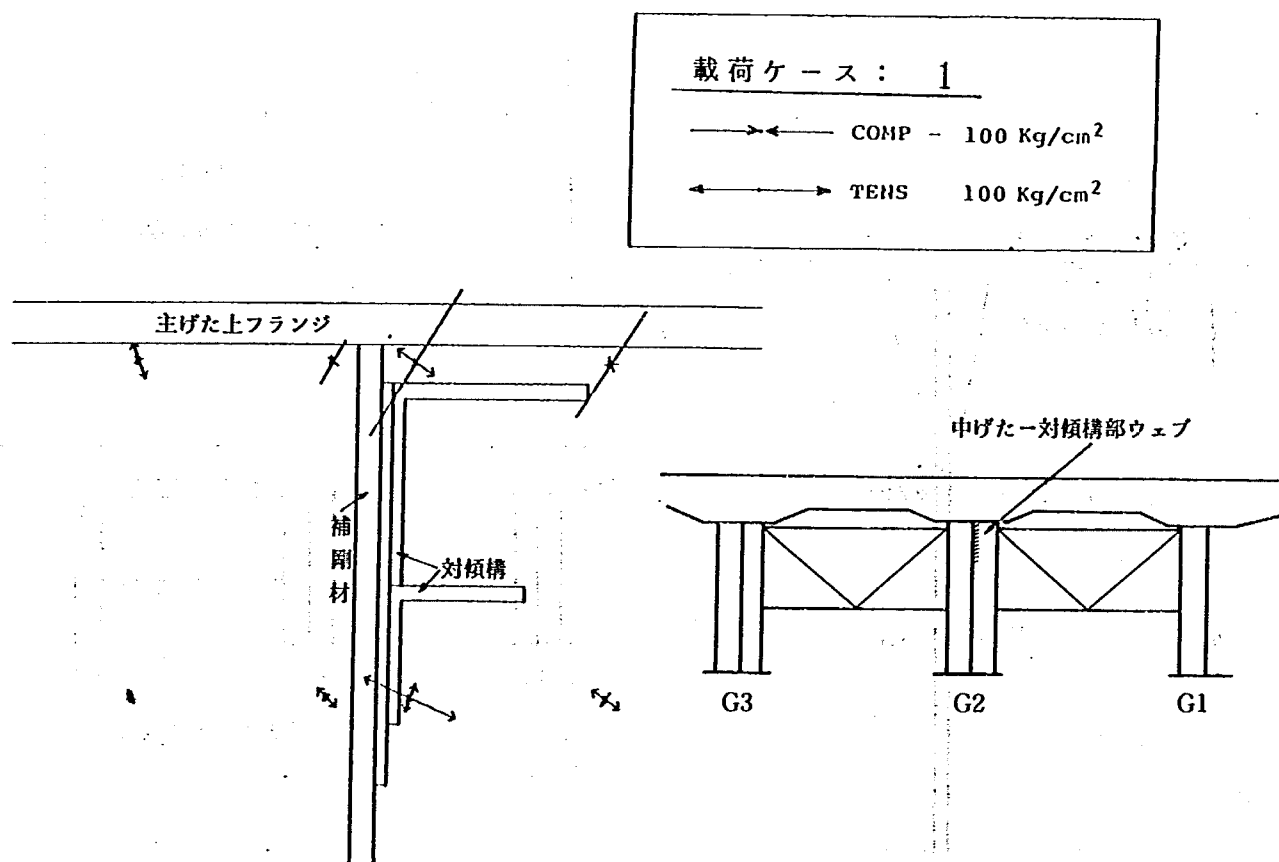


図- 3. 1 (6) G 2 げたウェブ G 1 げた側主応力図

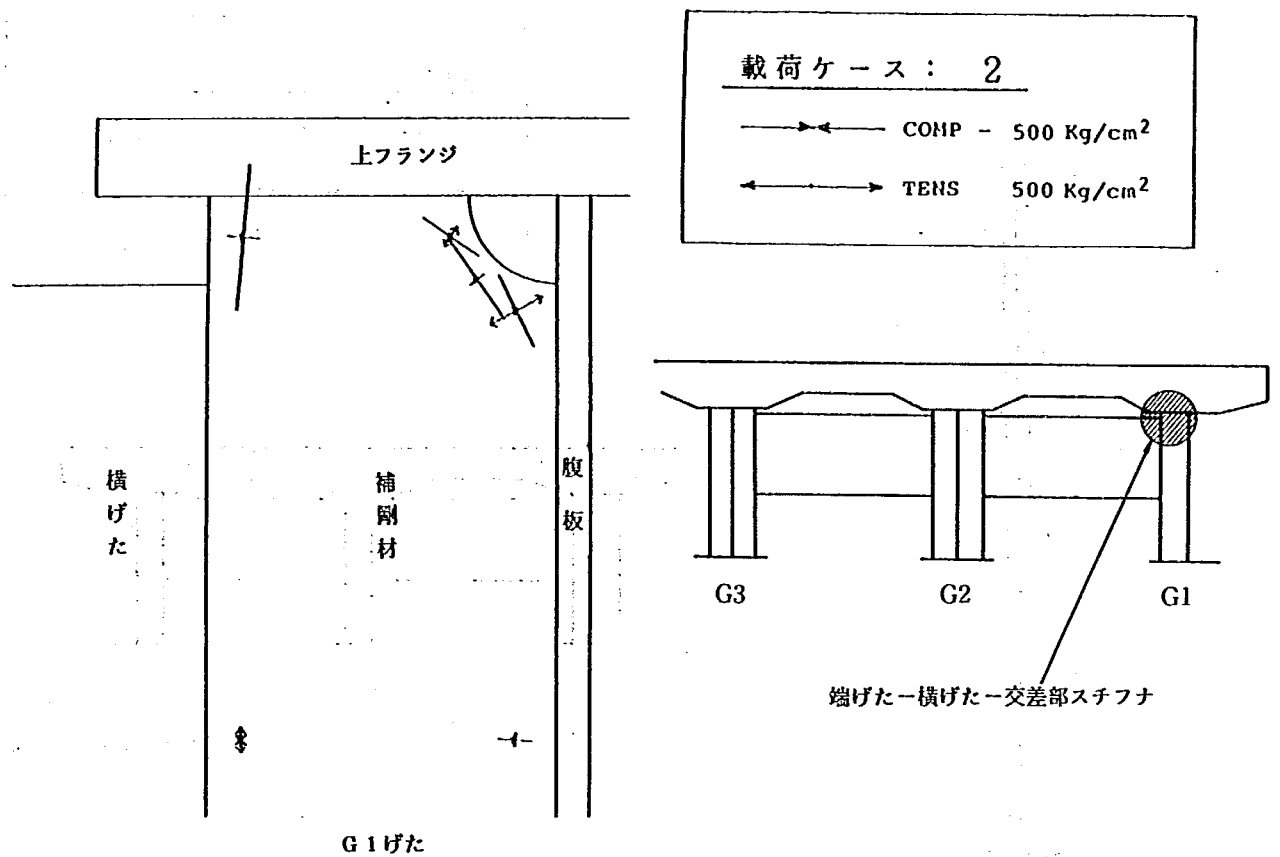


図-3.2(1) G1 げたー横げた取付部の補剛材主応力図

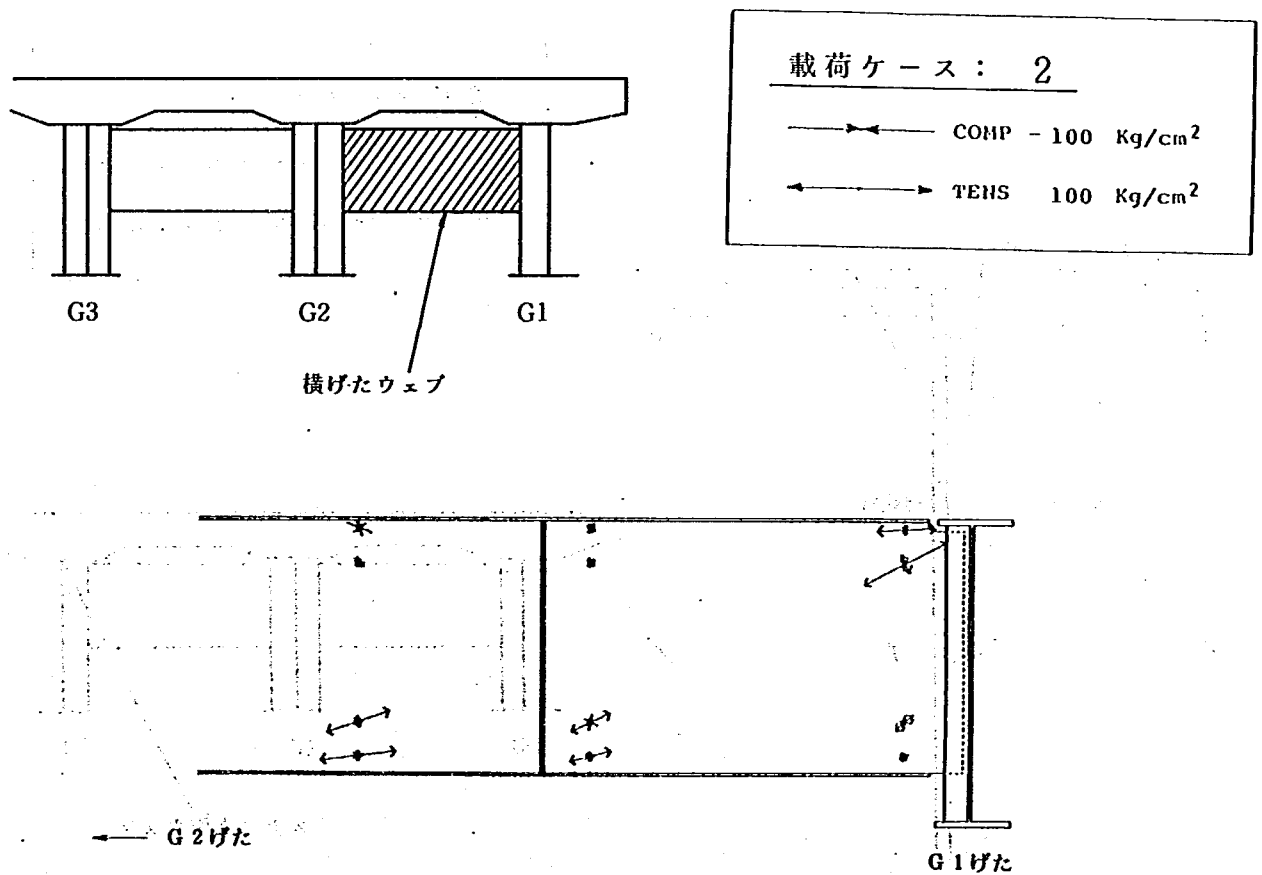


図-3.2(2) 横げたウェブ主応力図

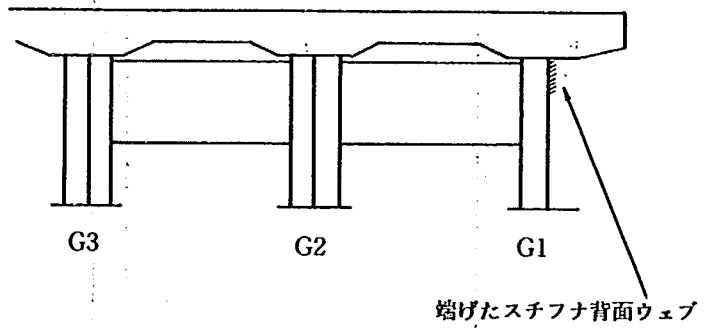
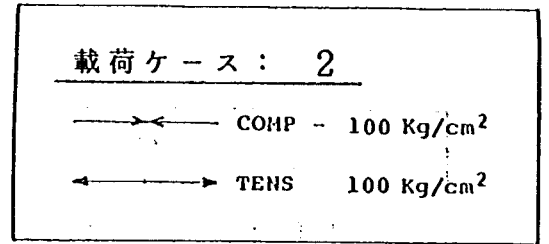
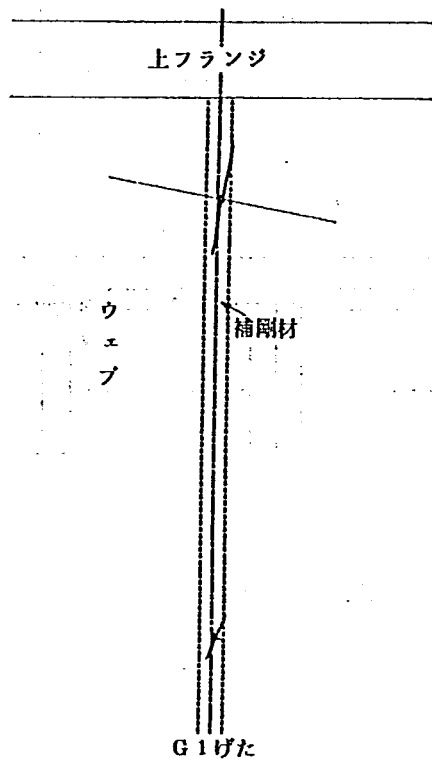


図-3.2(3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

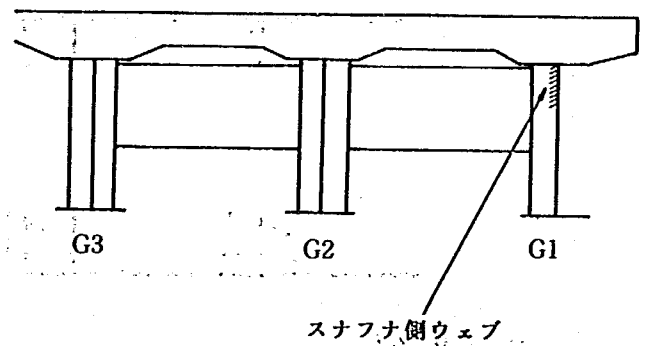
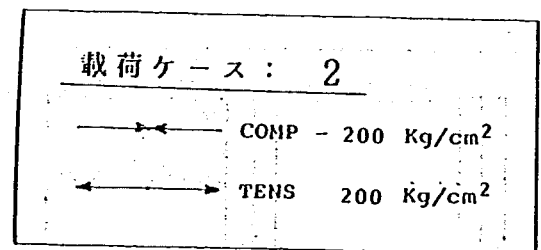
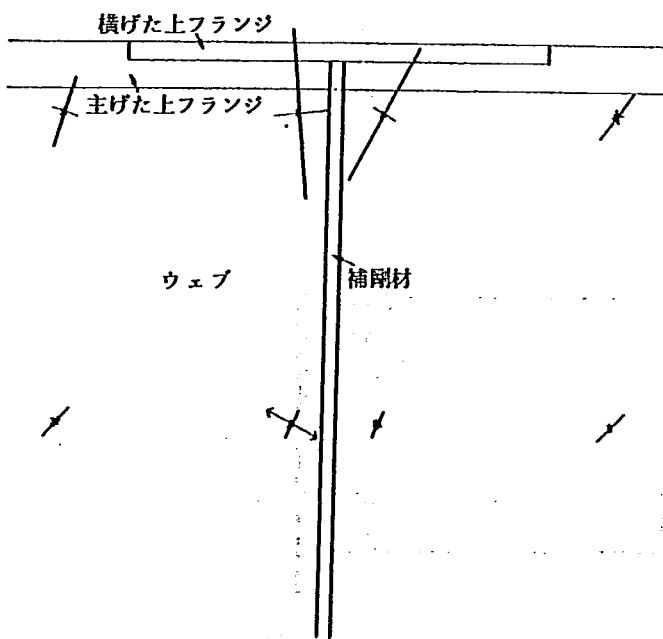


図-3.2(4) G1 げたウェブ補剛材側

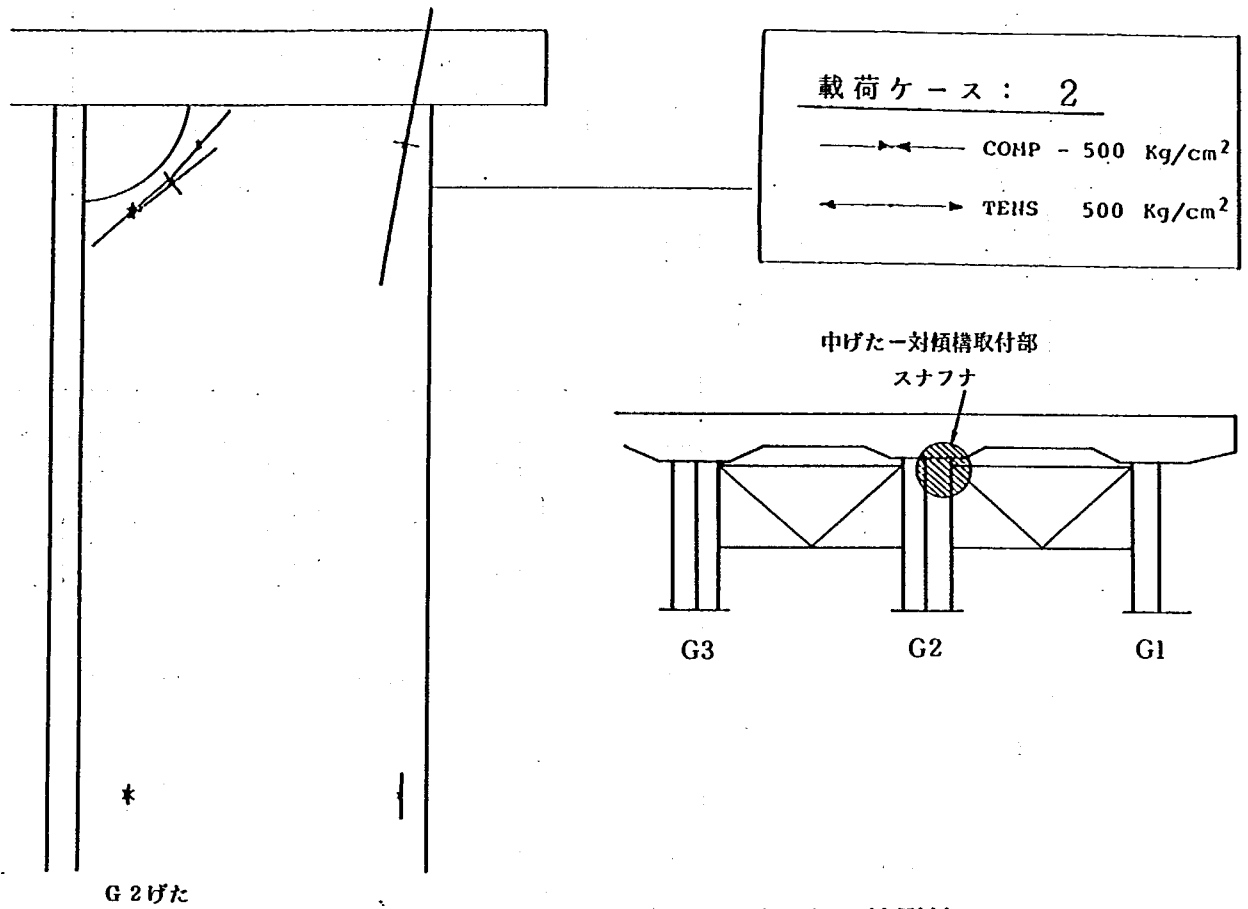


図-3.2(5) G2 げた一対傾構取付け部の補剛材

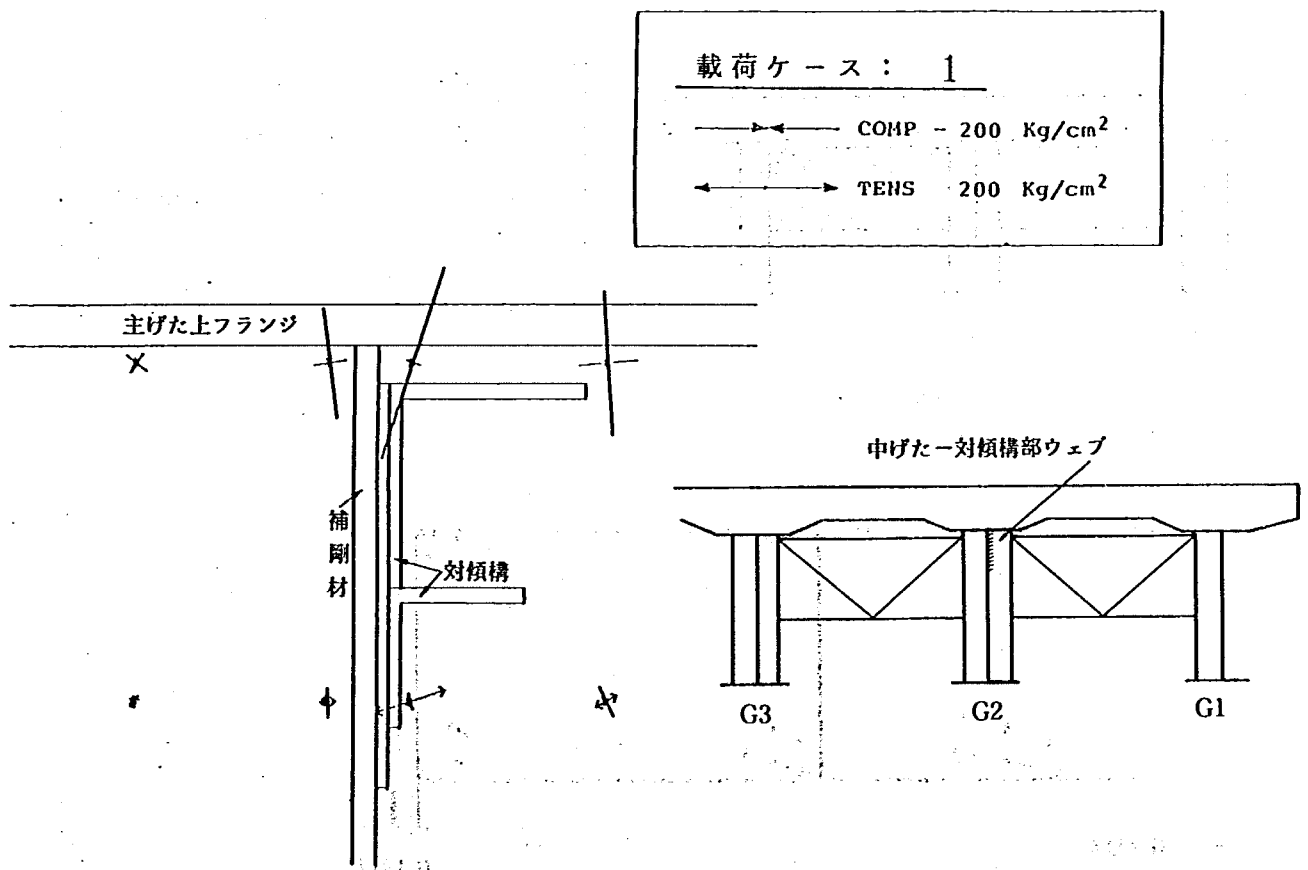


図-3.2(6) G2 げたウェブ G1 げた側主応力図

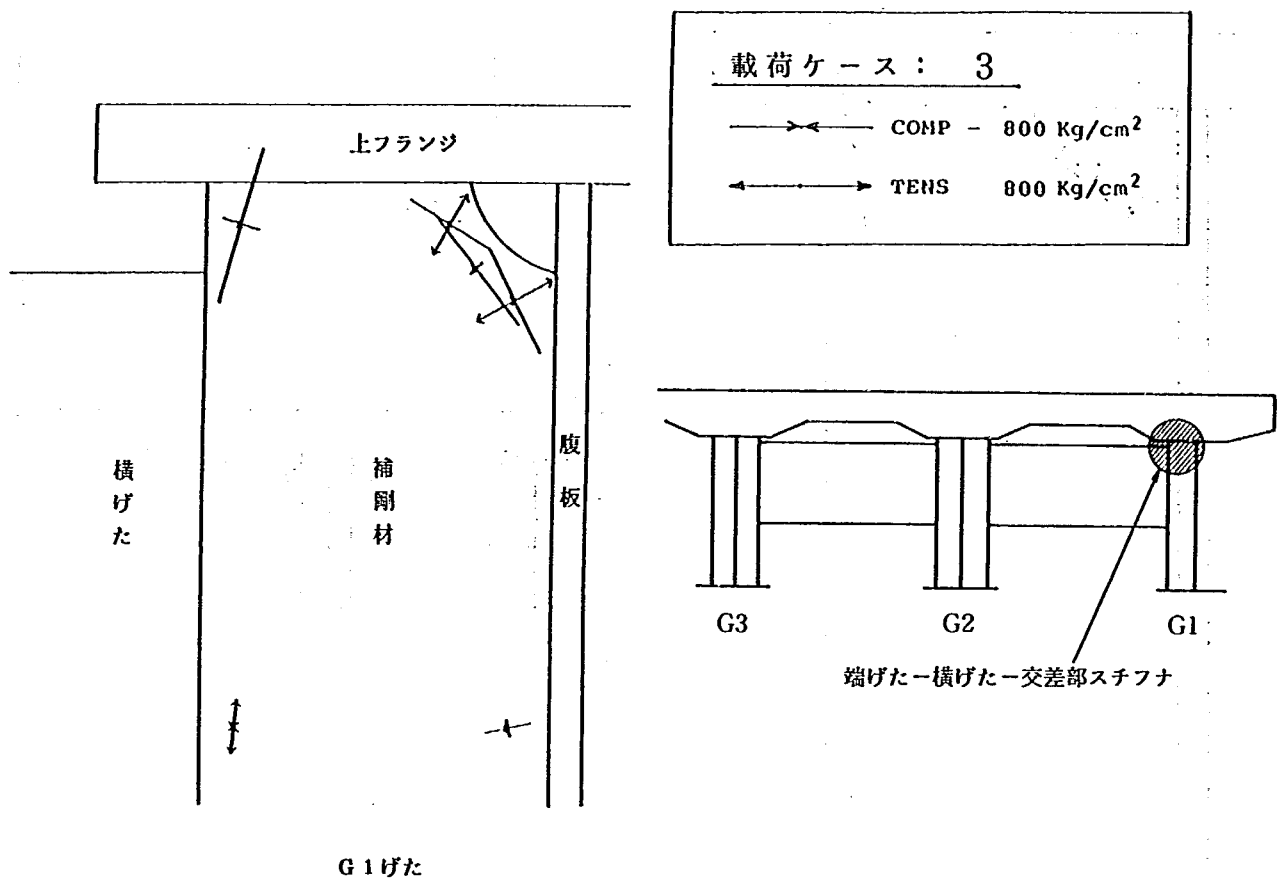


図-3.3(1) G1 げた-横げた取付部の補剛材主応力図

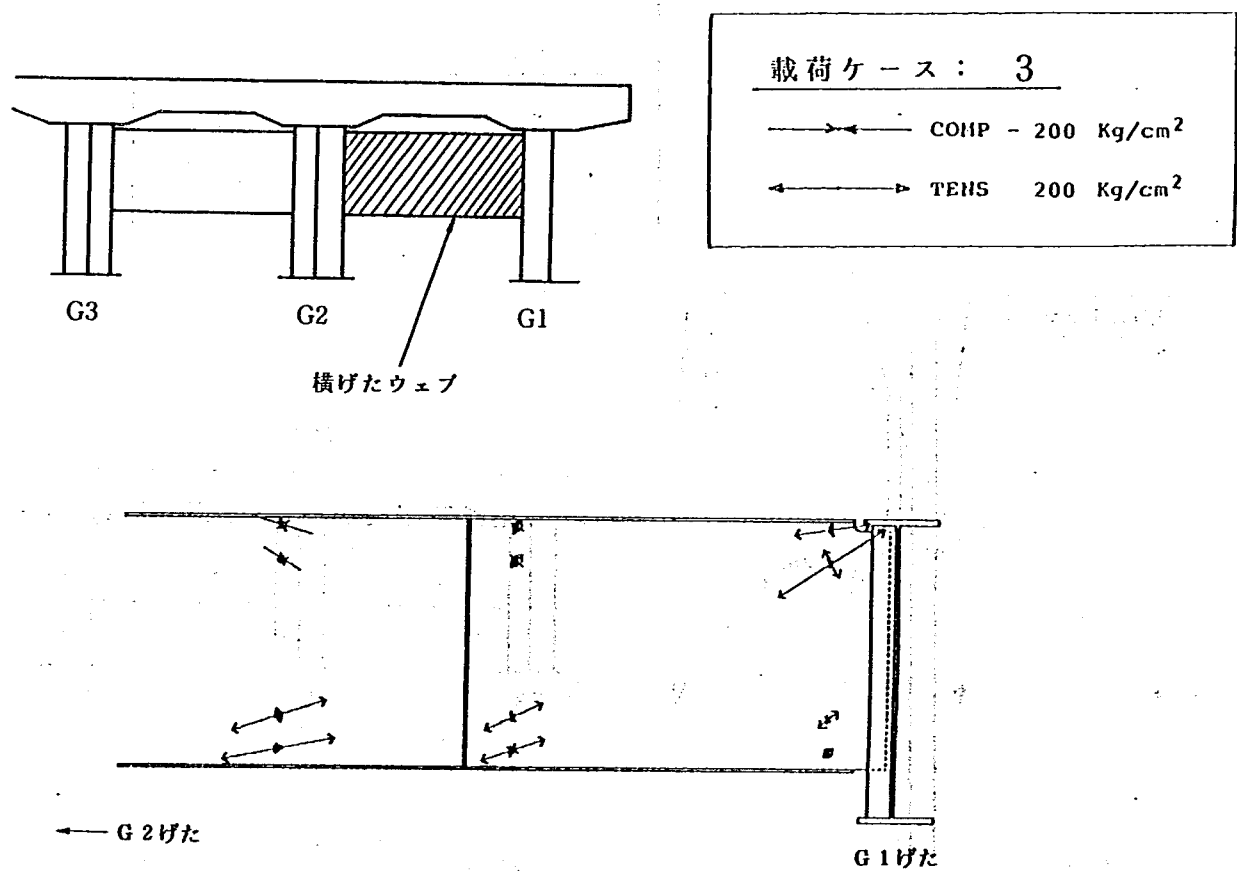


図-3.3(2) 横げたウェブ主応力図

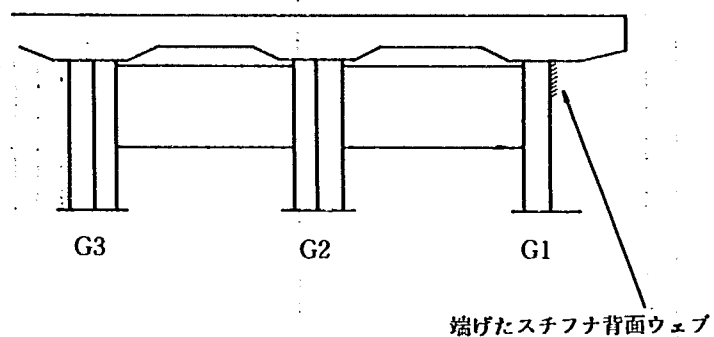
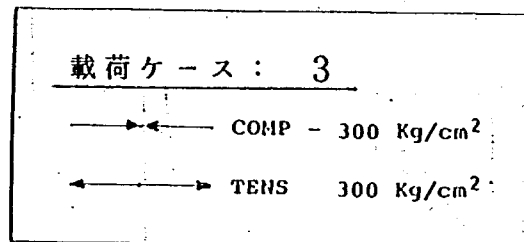
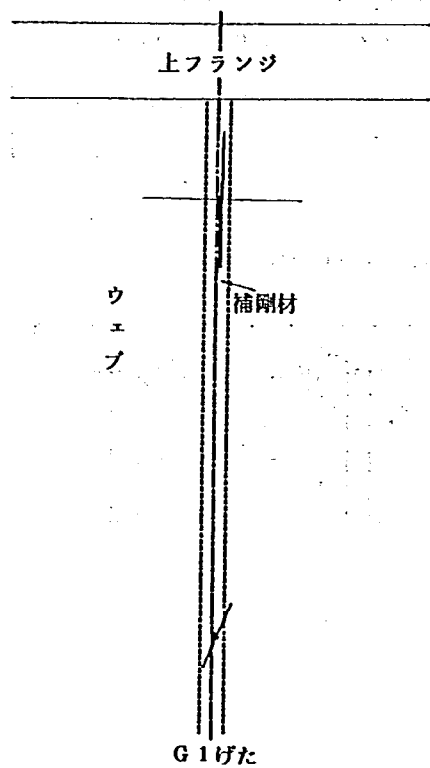


図-3.3(3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

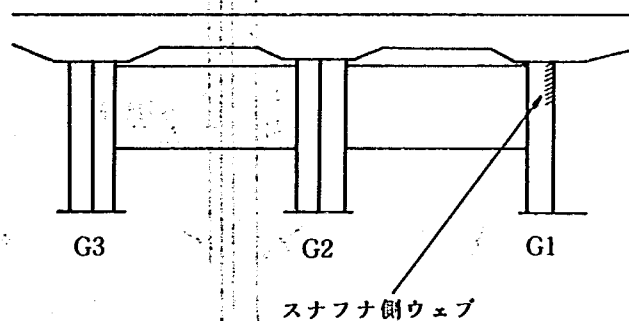
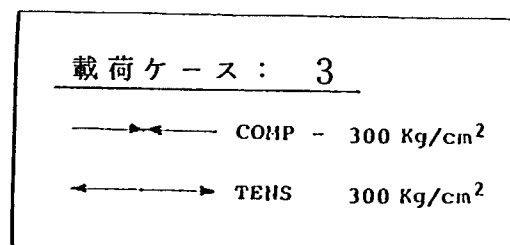
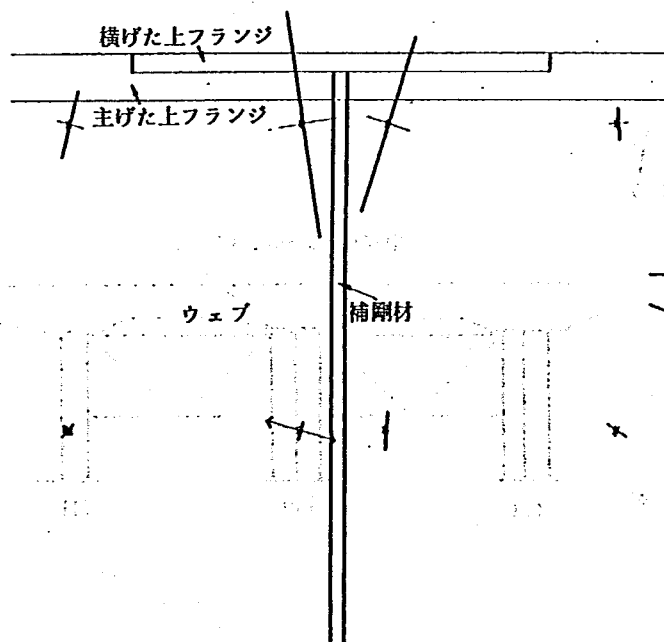


図-3.3(4) G1 げたウェブ補剛材側

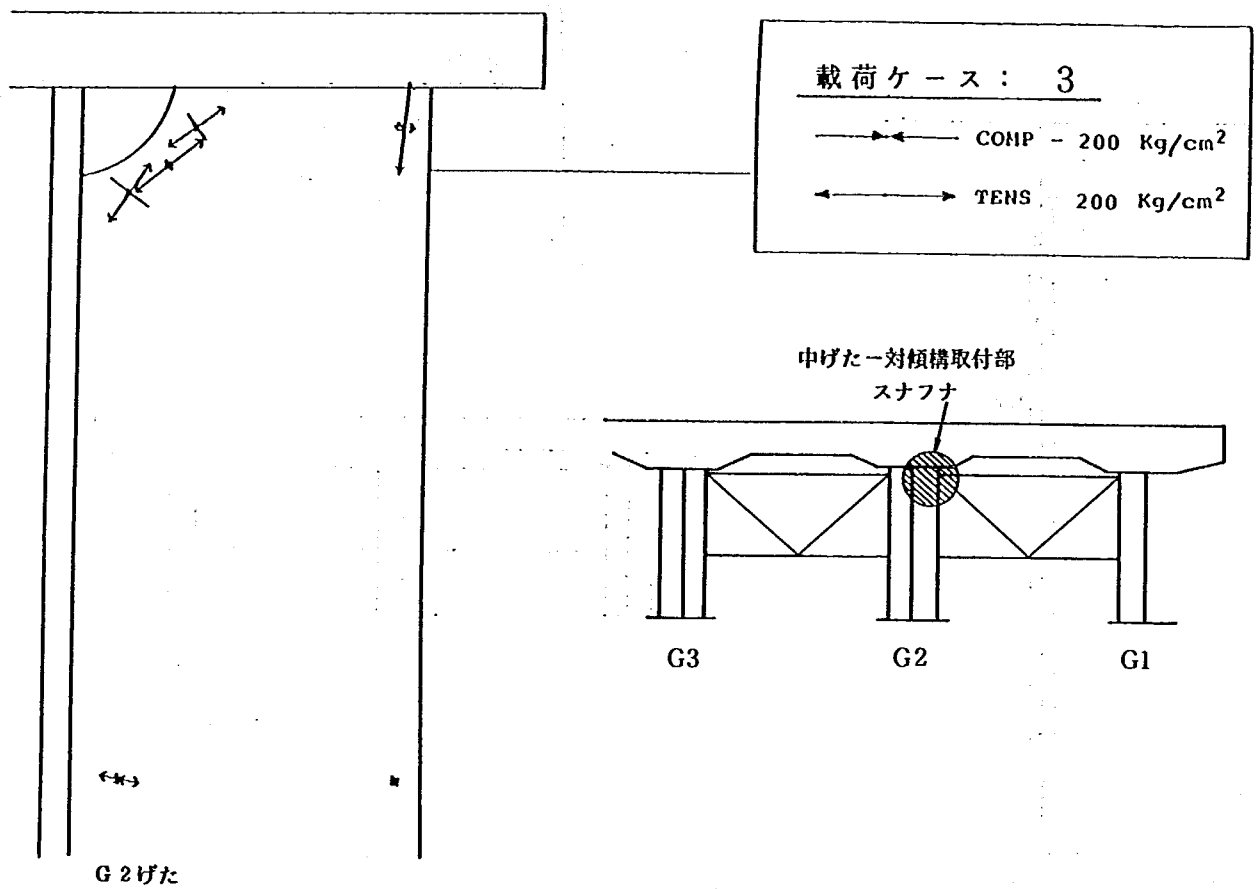


図-3.3(5) G 2 げた一対傾構取付け部の補剛材

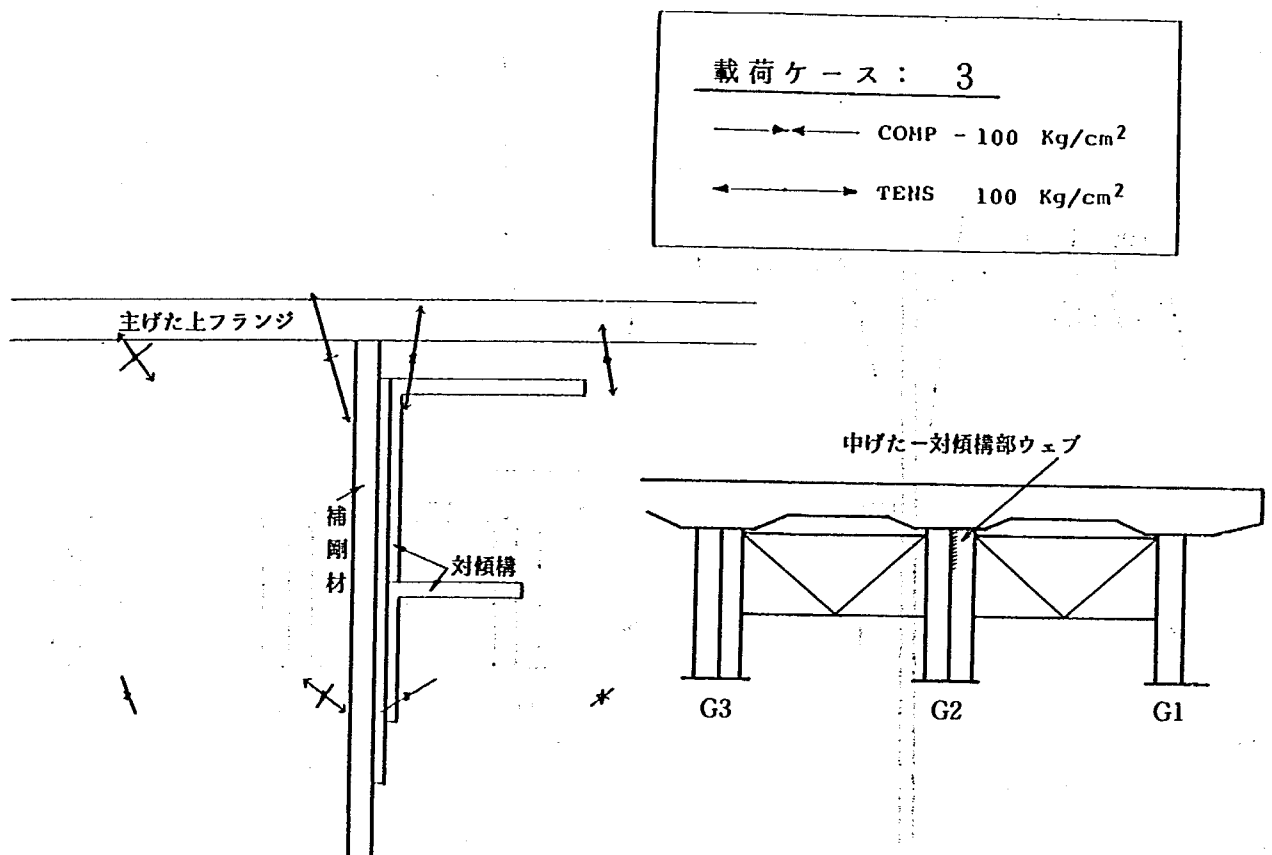


図-3.3(6) G 2 げたウェブ G 1 げた側主応力図

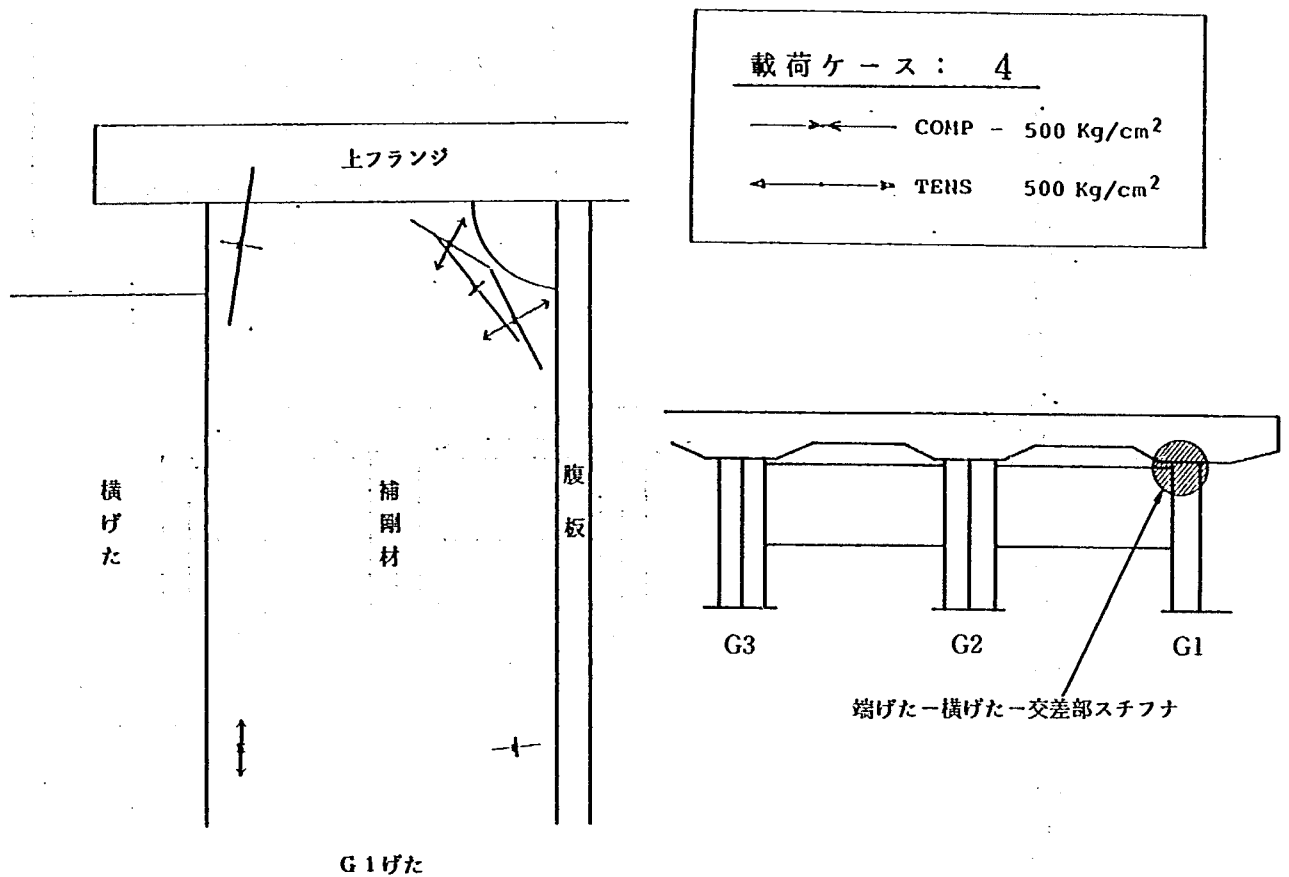


図-3.4(1) G1 げたー横げた取付部の補剛材主応力図

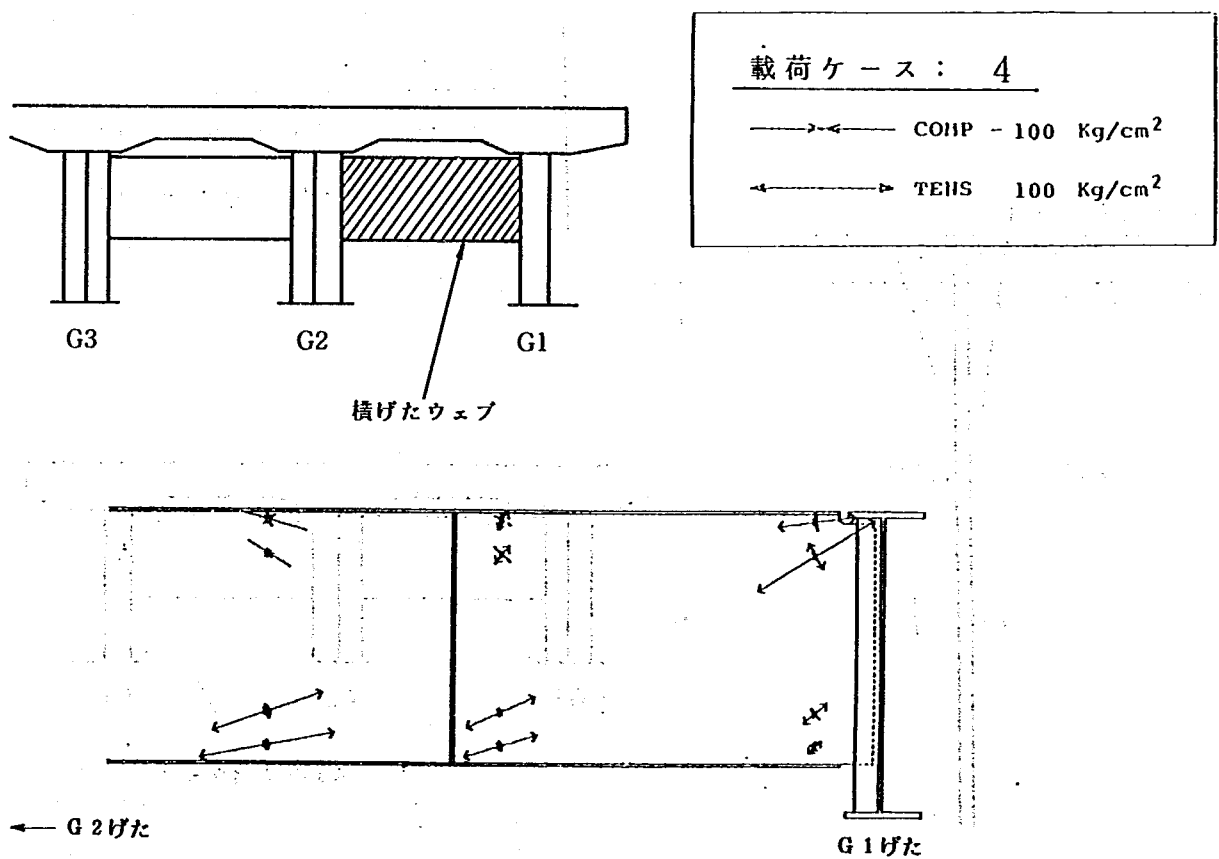


図-3.4(2) 横げたウェブ主応力図

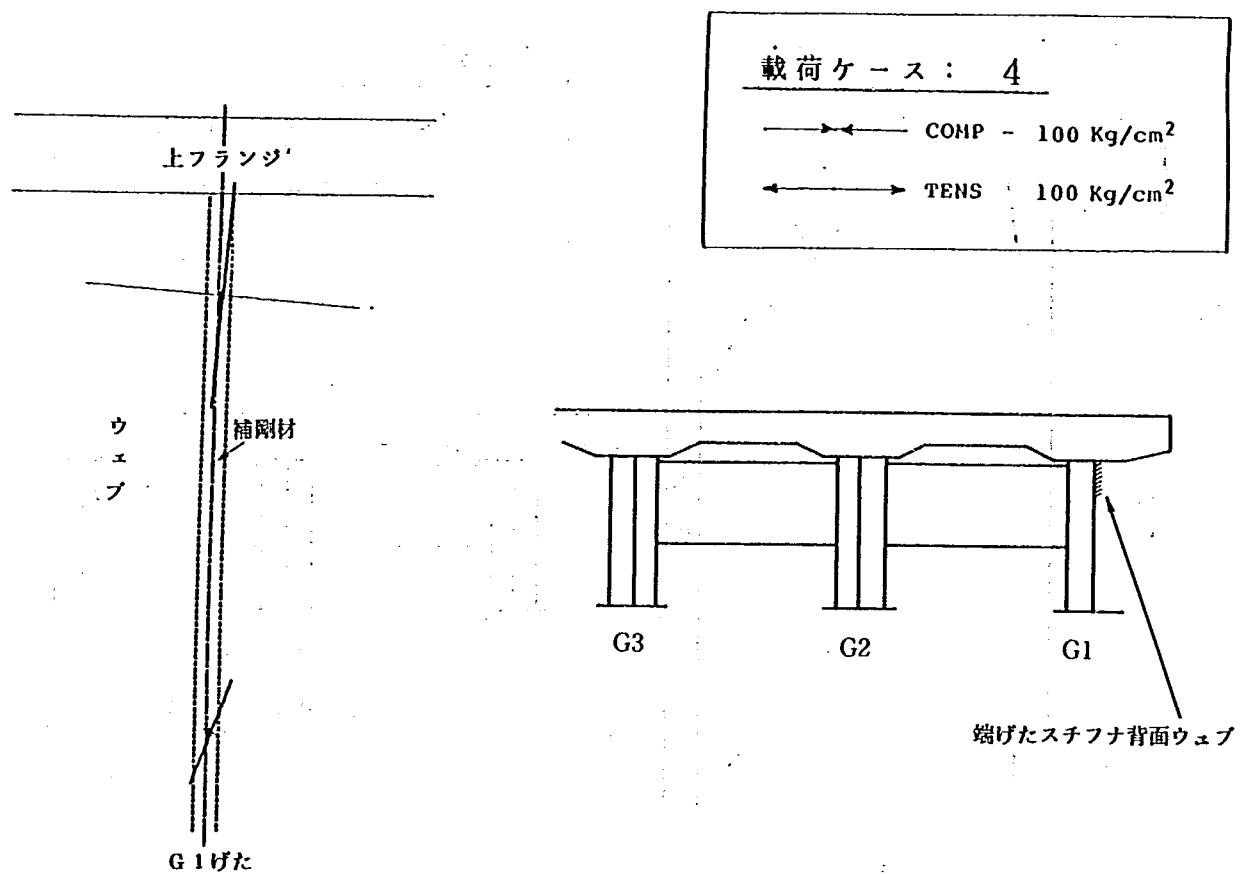


図-3.4(3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

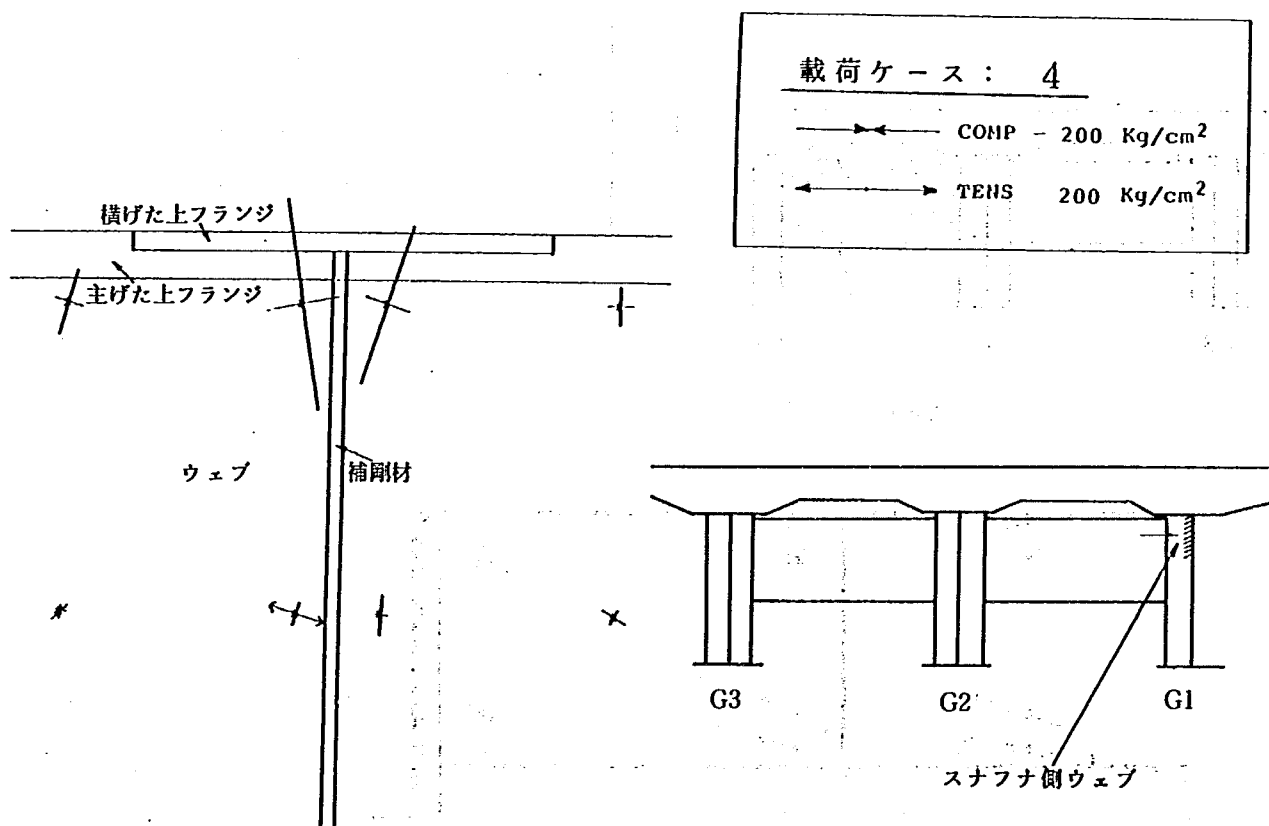


図-3.4(4) G1 げたウェブ補剛材側

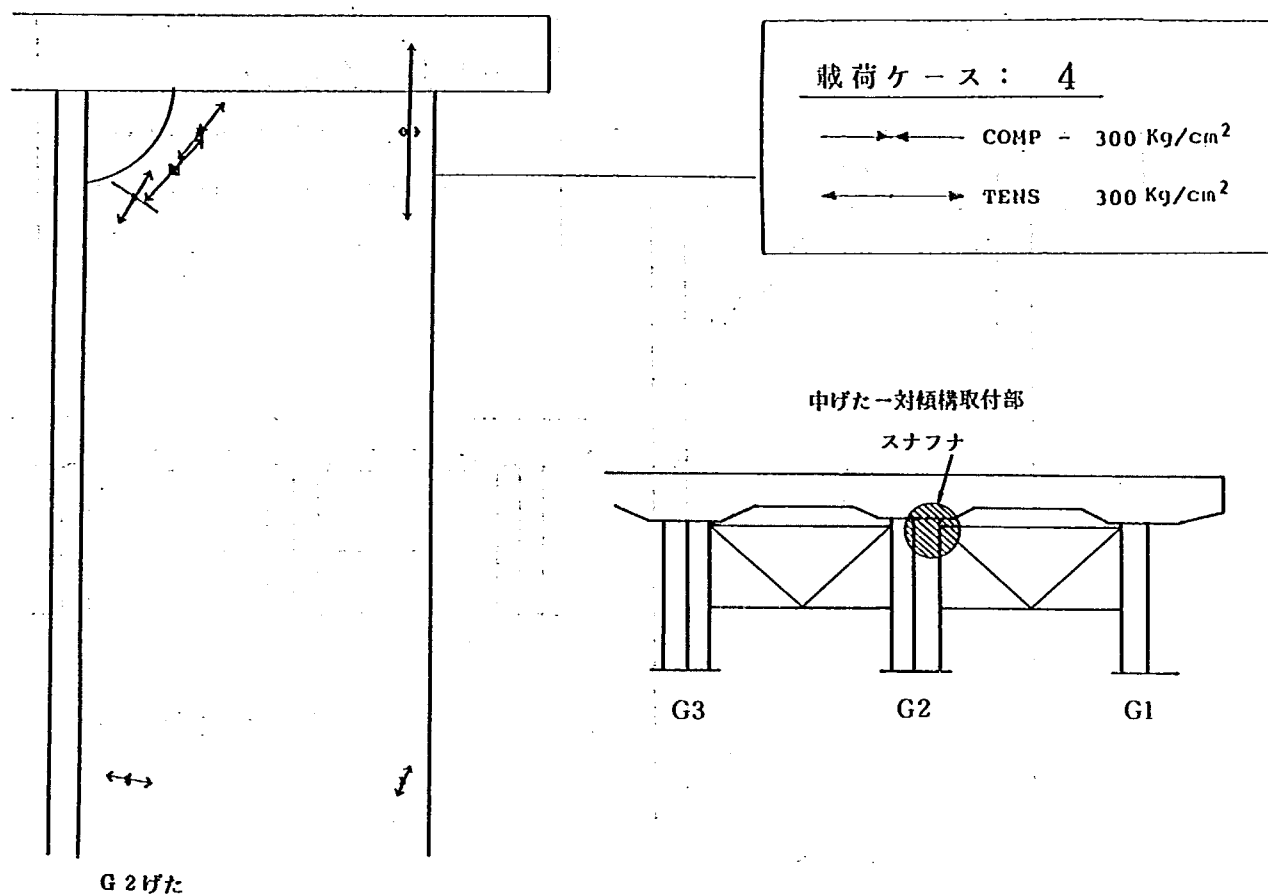


図- 3. 4 (5) G 2 げた一対傾構取付け部の補剛材

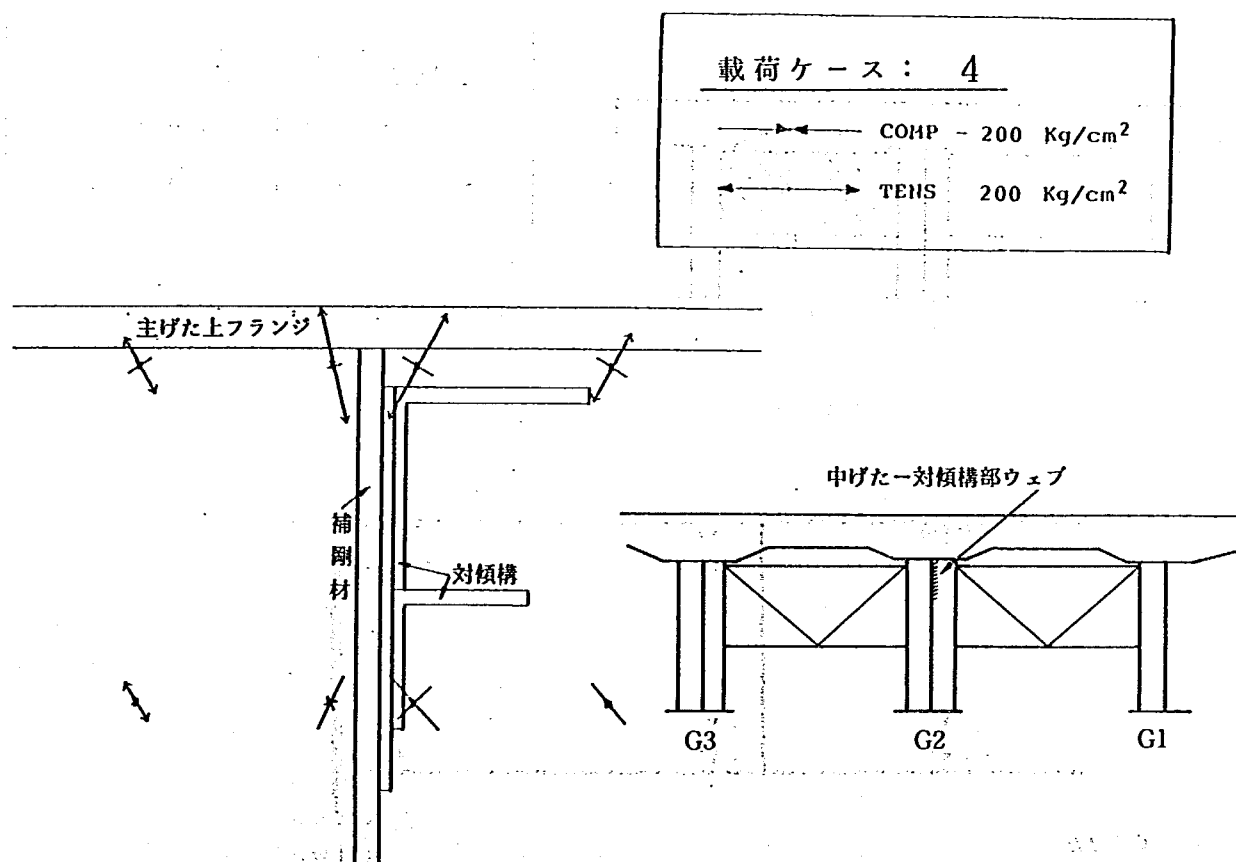


図- 3. 4 (6) G 2 げたウェブ G 1 げた側主応力図

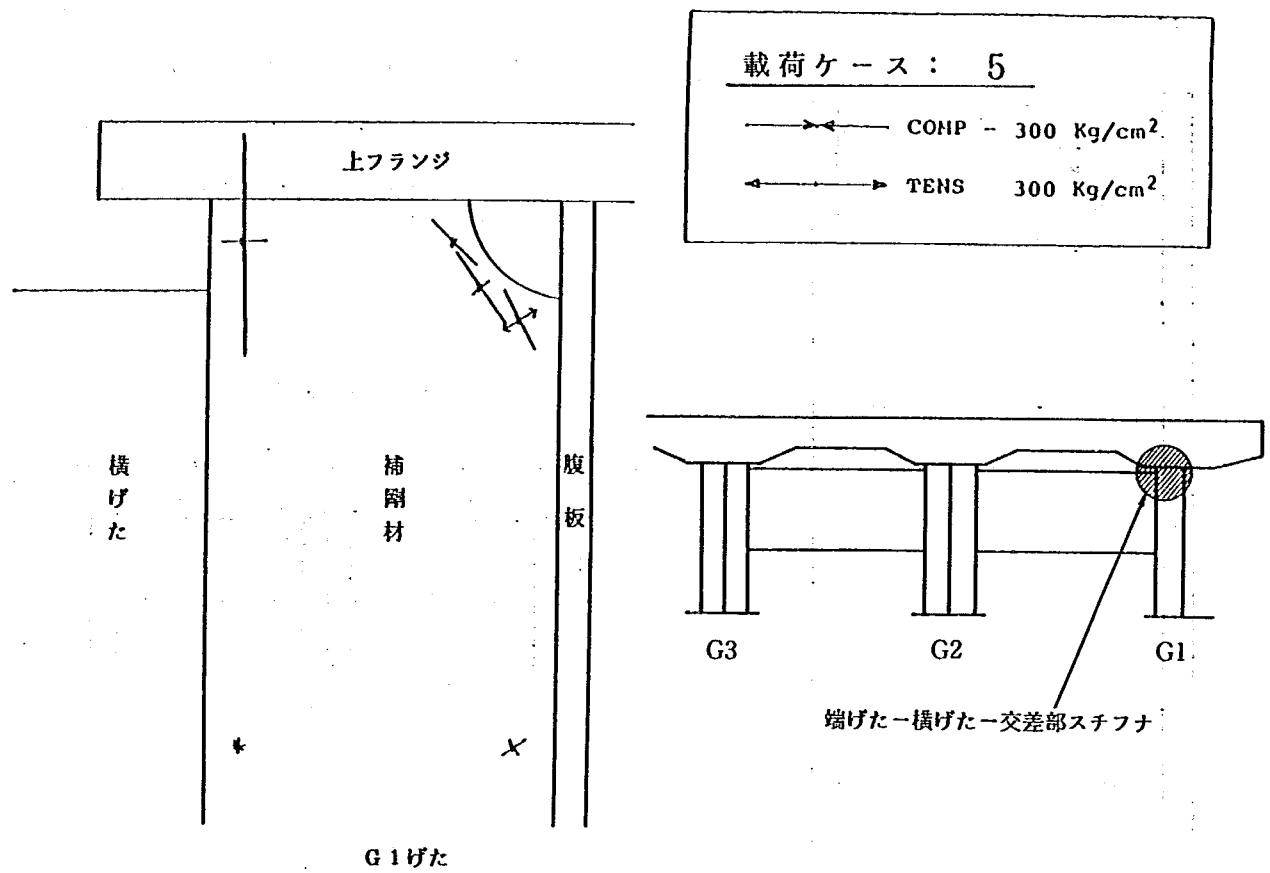


図-3.5(1) G1げたー横げた取付部の補剛材主応力図

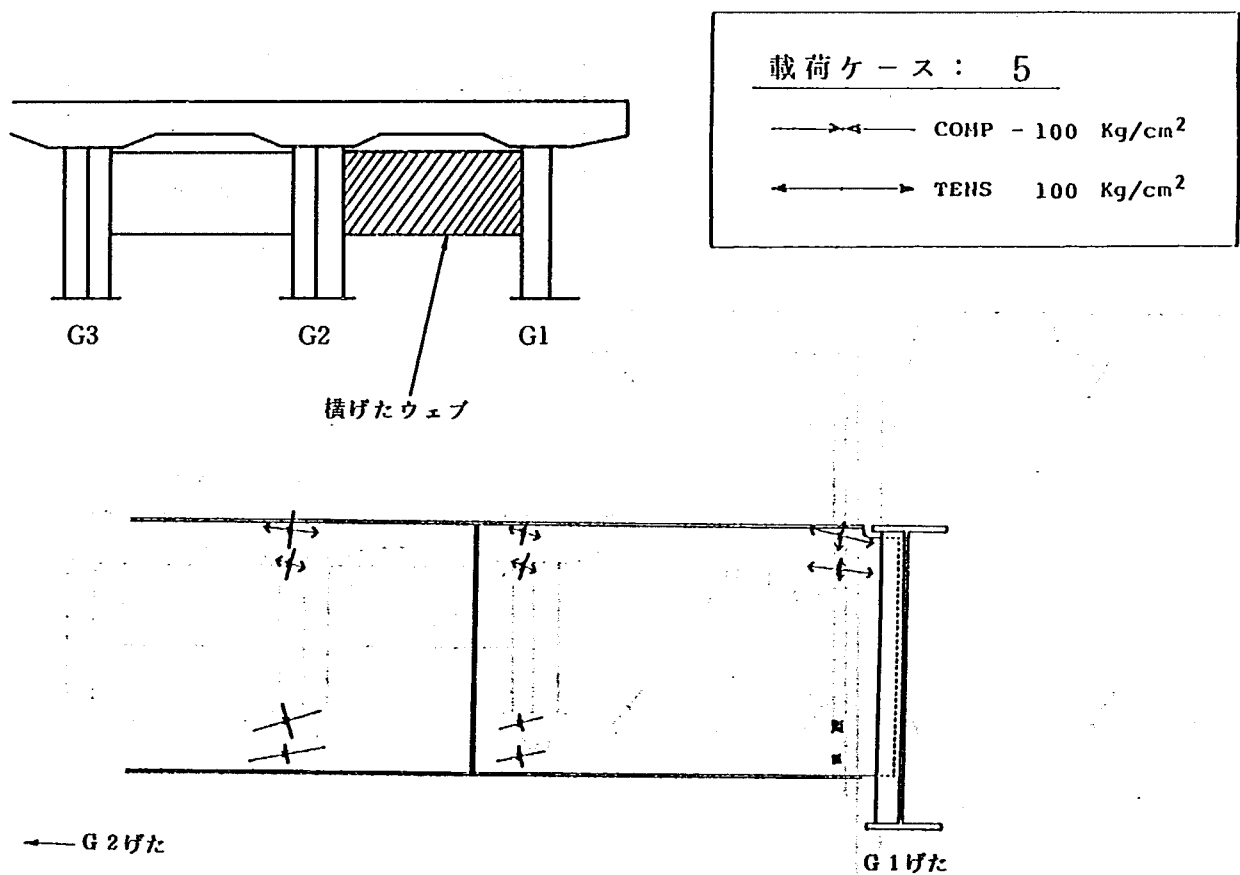


図-3.5(2) 横げたウェブ主応力図

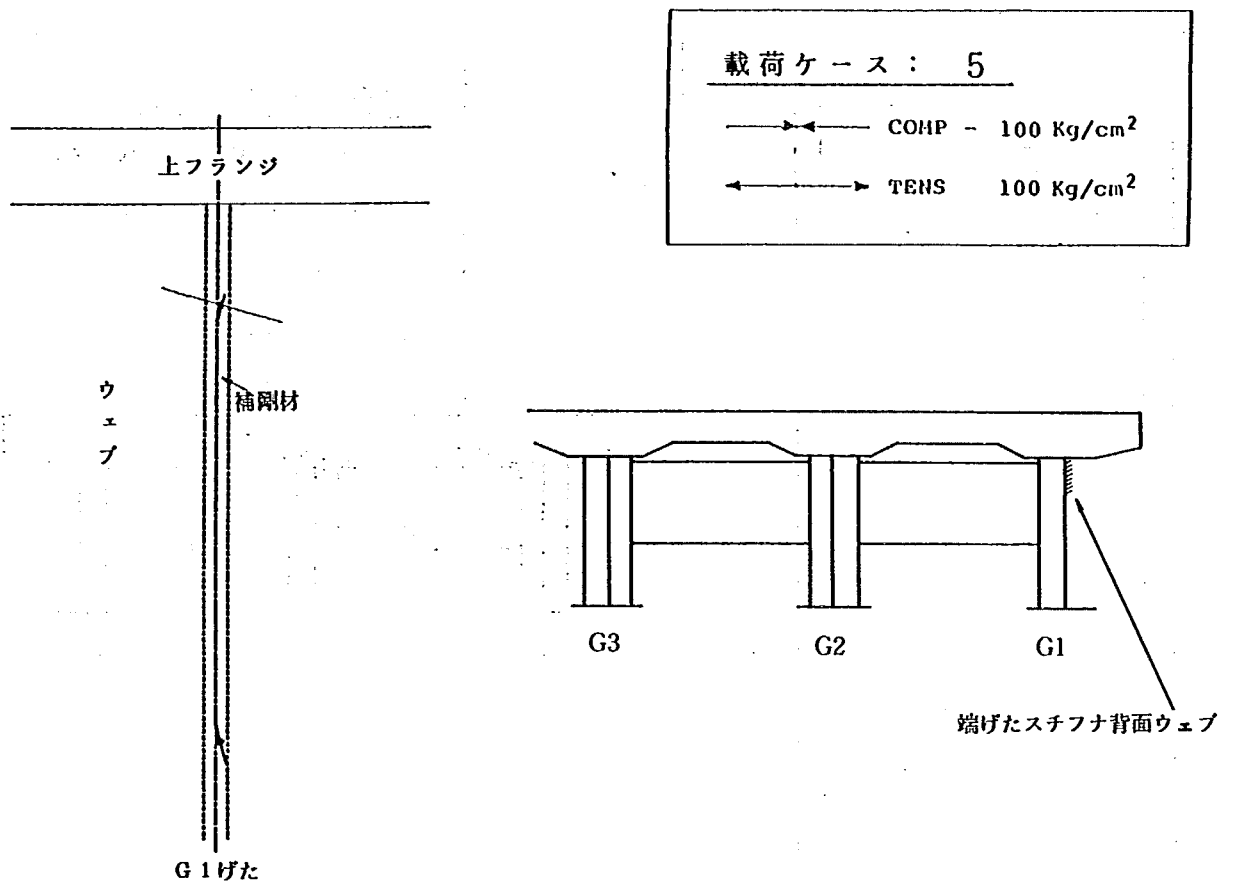


図-3.5(3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

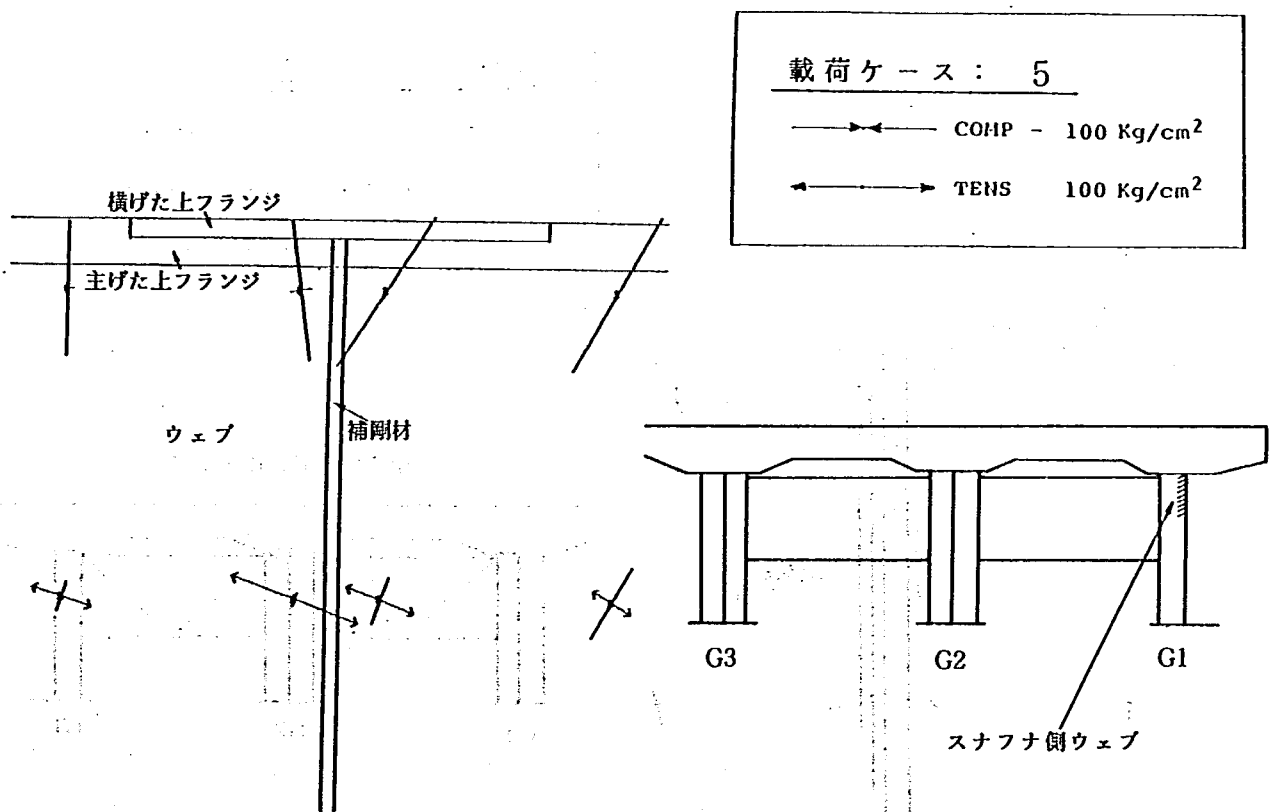


図-3.5(4) G1 げたウェブ補剛材側

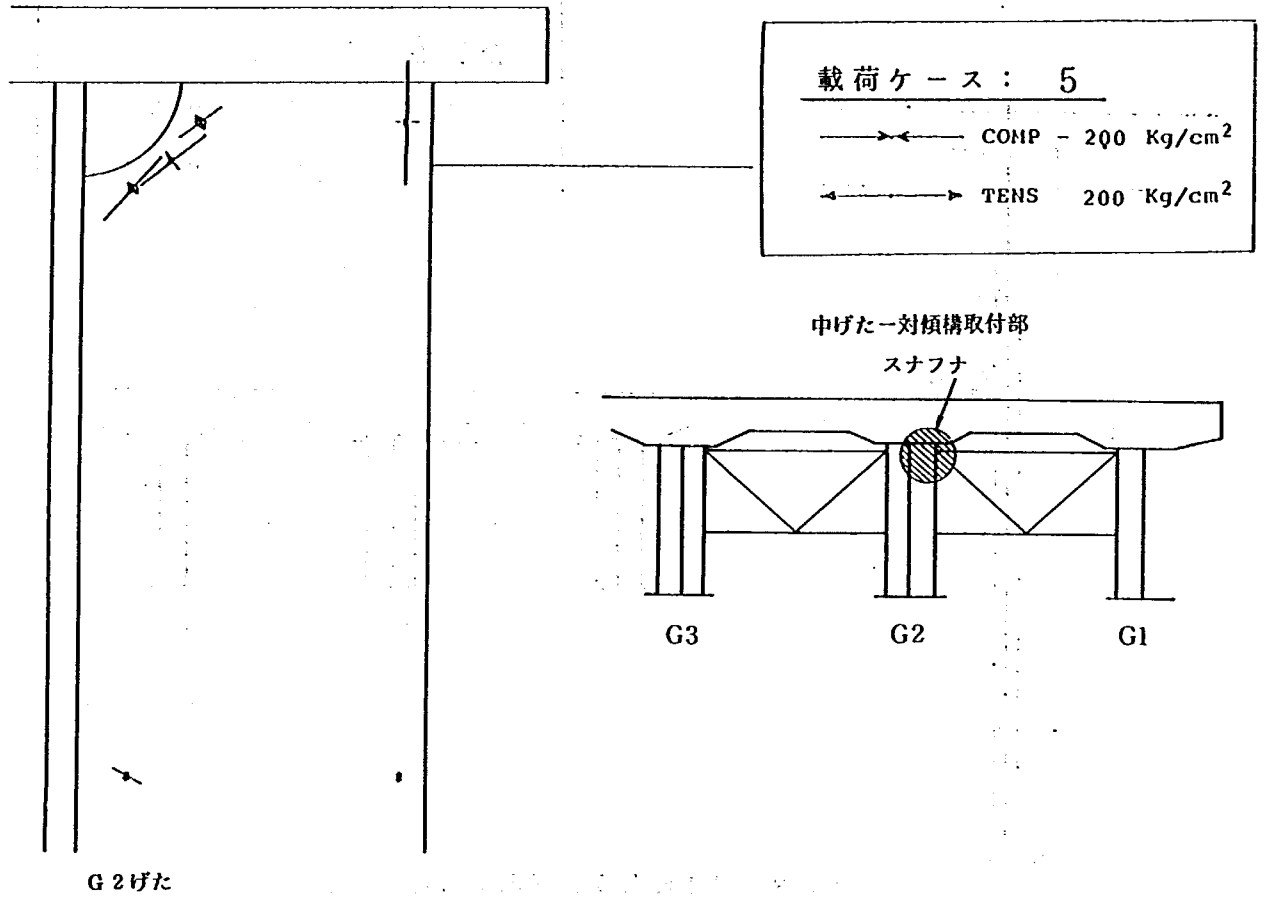


図 - 3. 5 (5) G 2 げた - 対傾構取付け部の補剛材

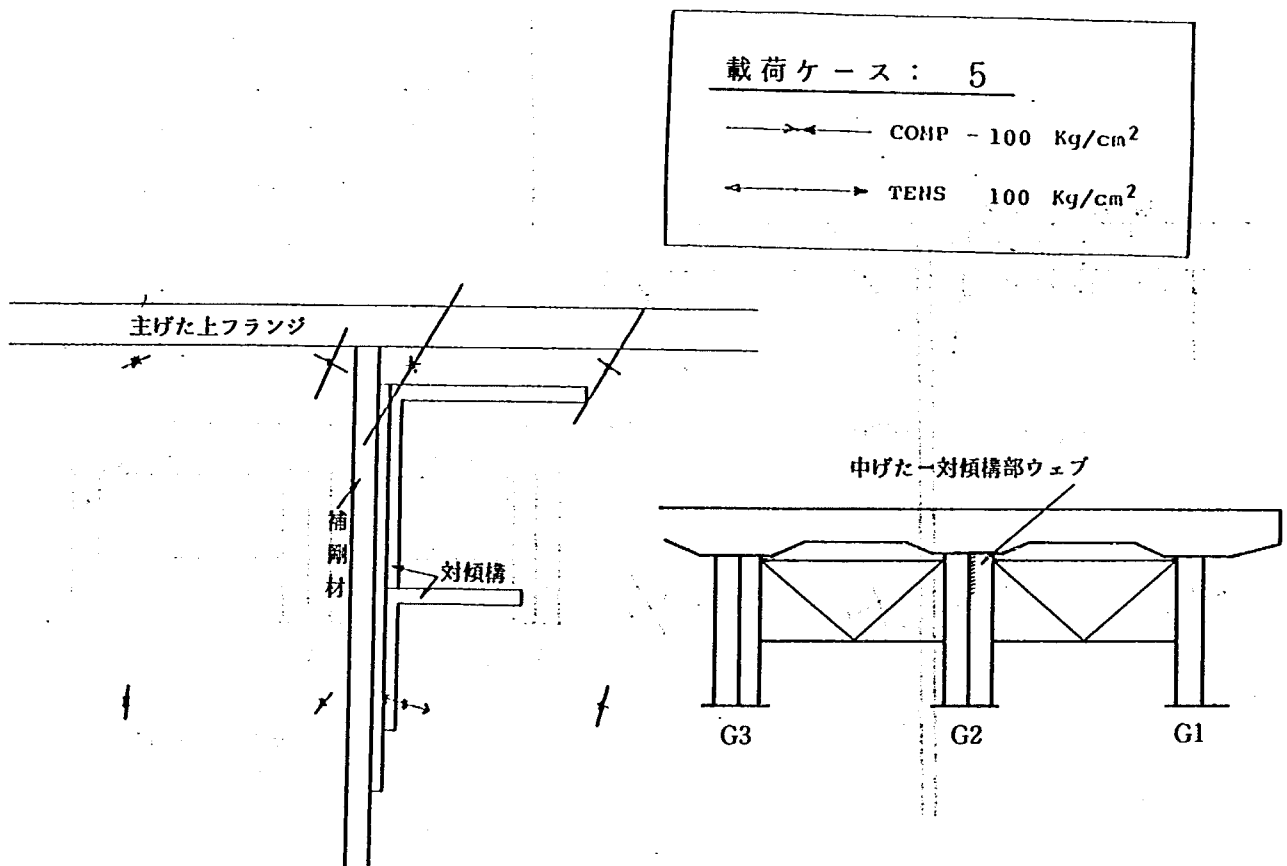


図 - 3. 5 (6) G 2 げたウェブ G 1 げた側主応力図

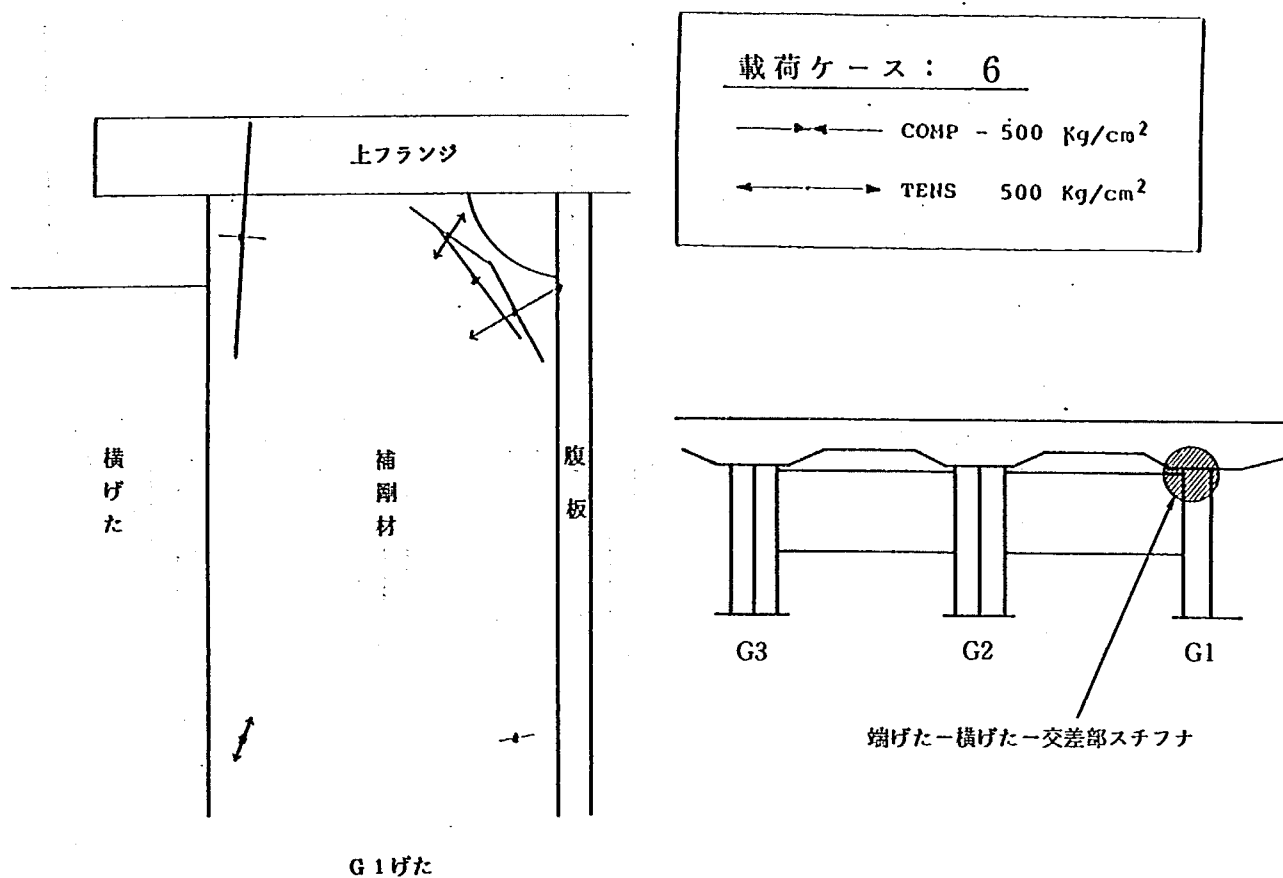


図-3.6(1) G1 げたー横げた取付部の補剛材主応力図

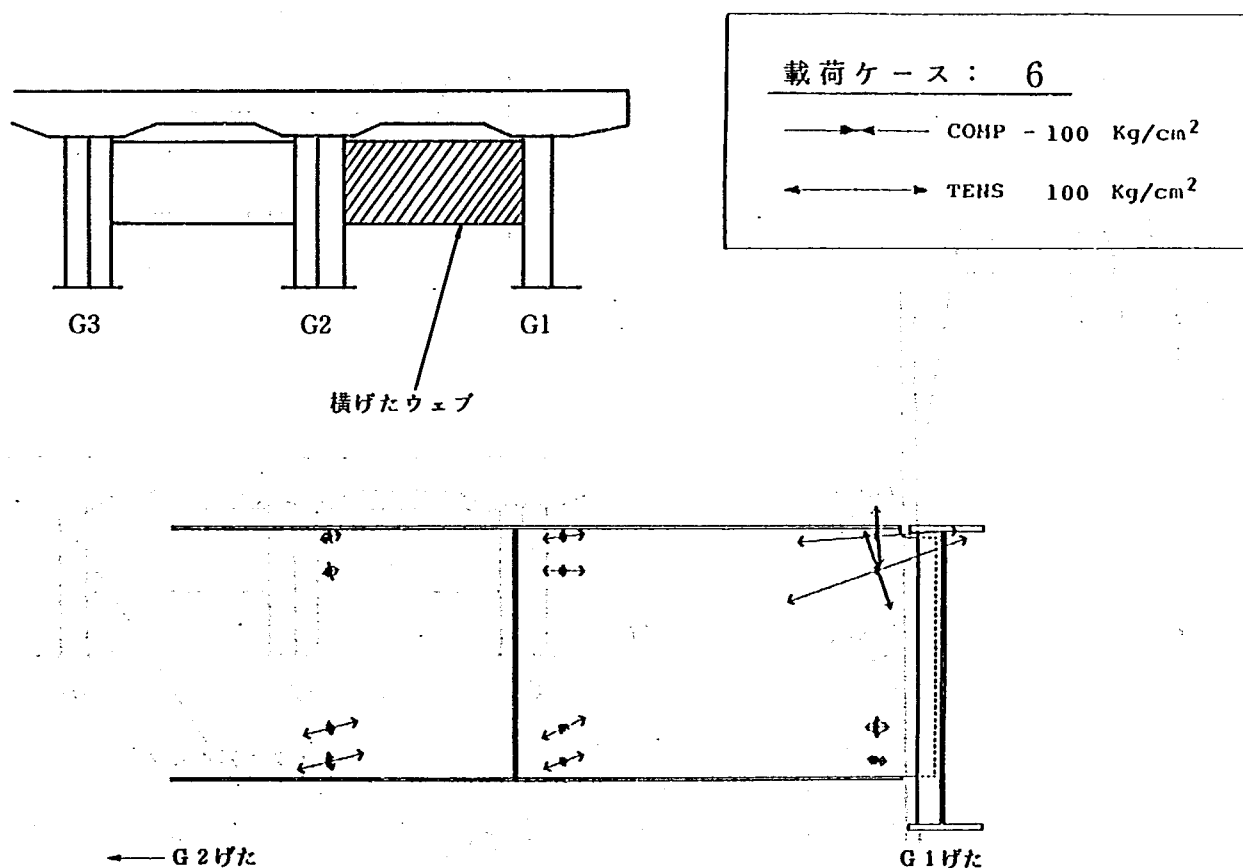


図-3.6(2) 横げたウェブ主応力図

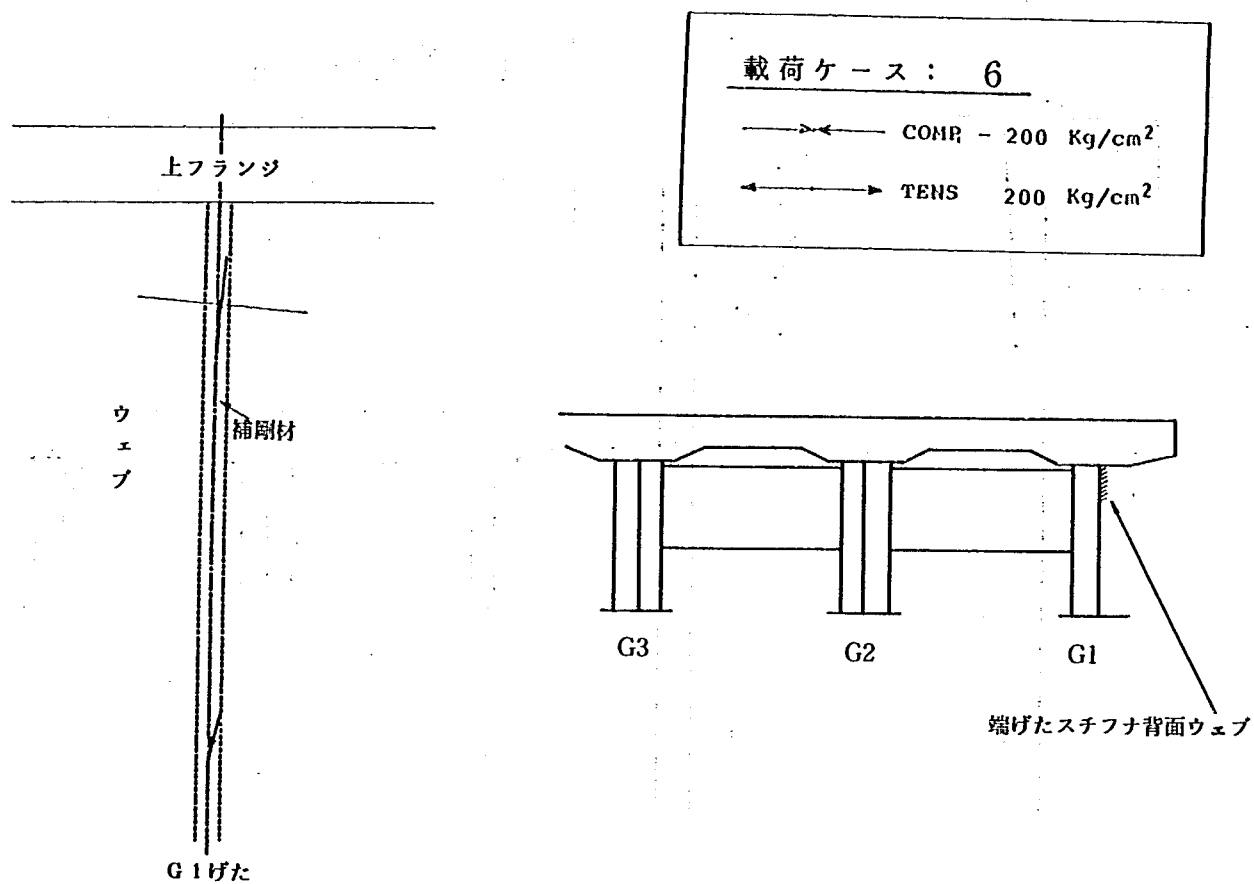


図 - 3. 6 (3) G1 げたウェブ補剛材背面主応力図

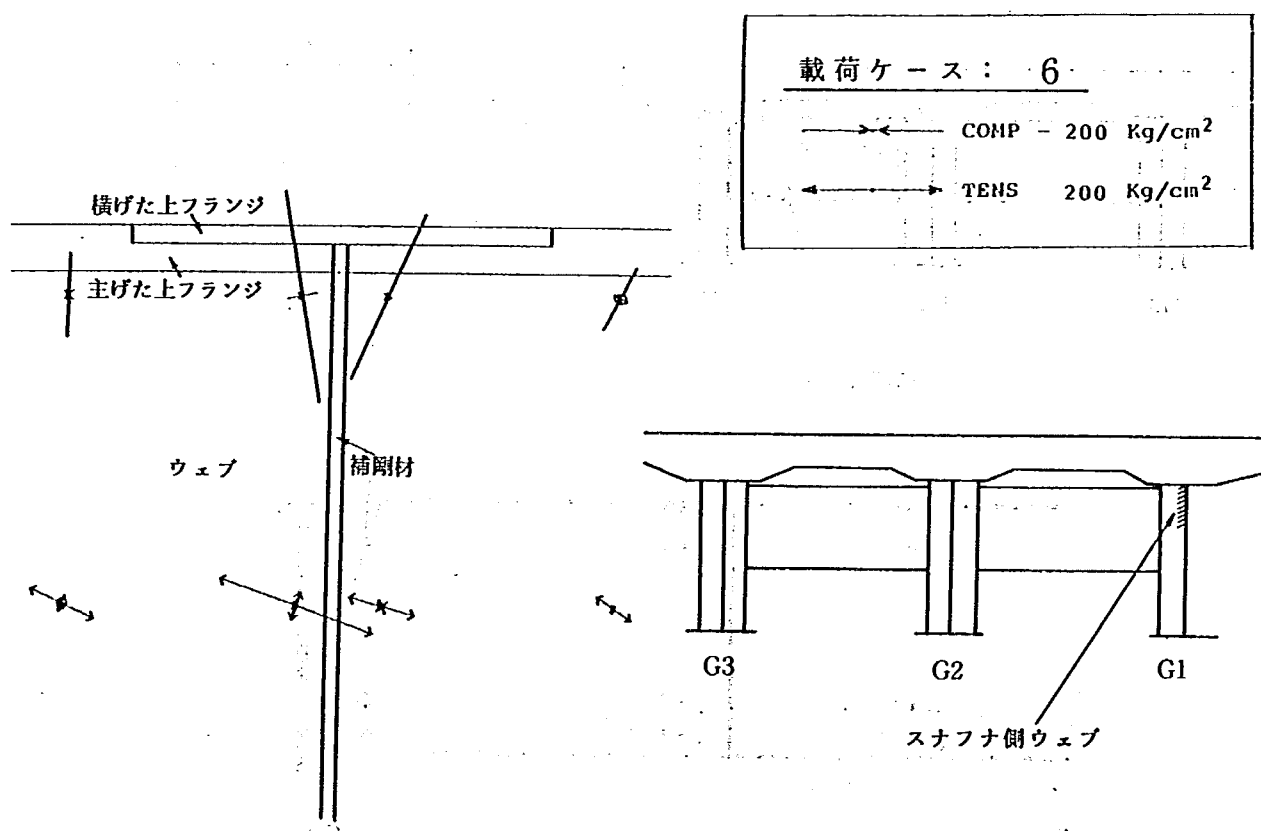


図 - 3. 6 (4) G1 げたウェブ補剛材側

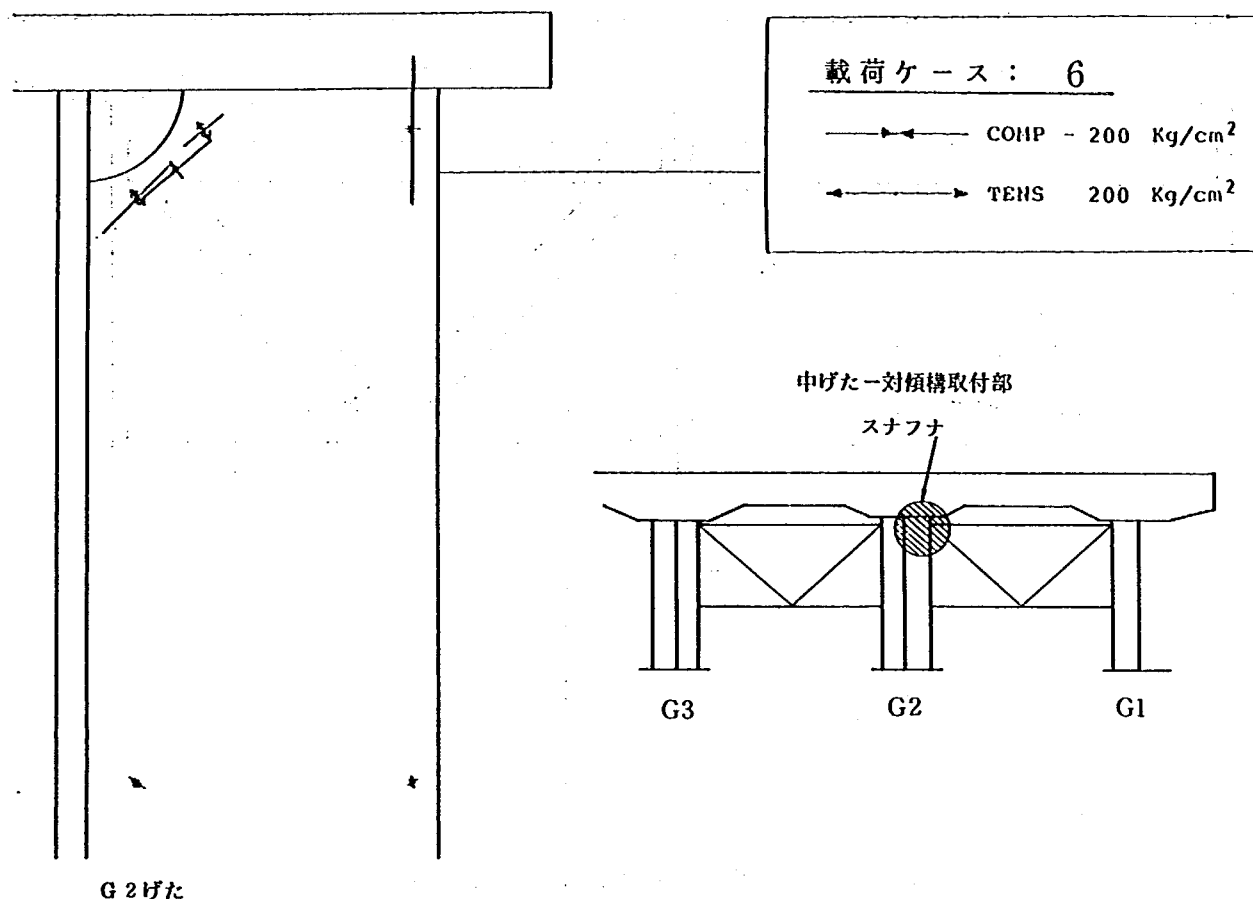


図 - 3. 6 (5) G 2 げた一対傾構取付け部の補剛材

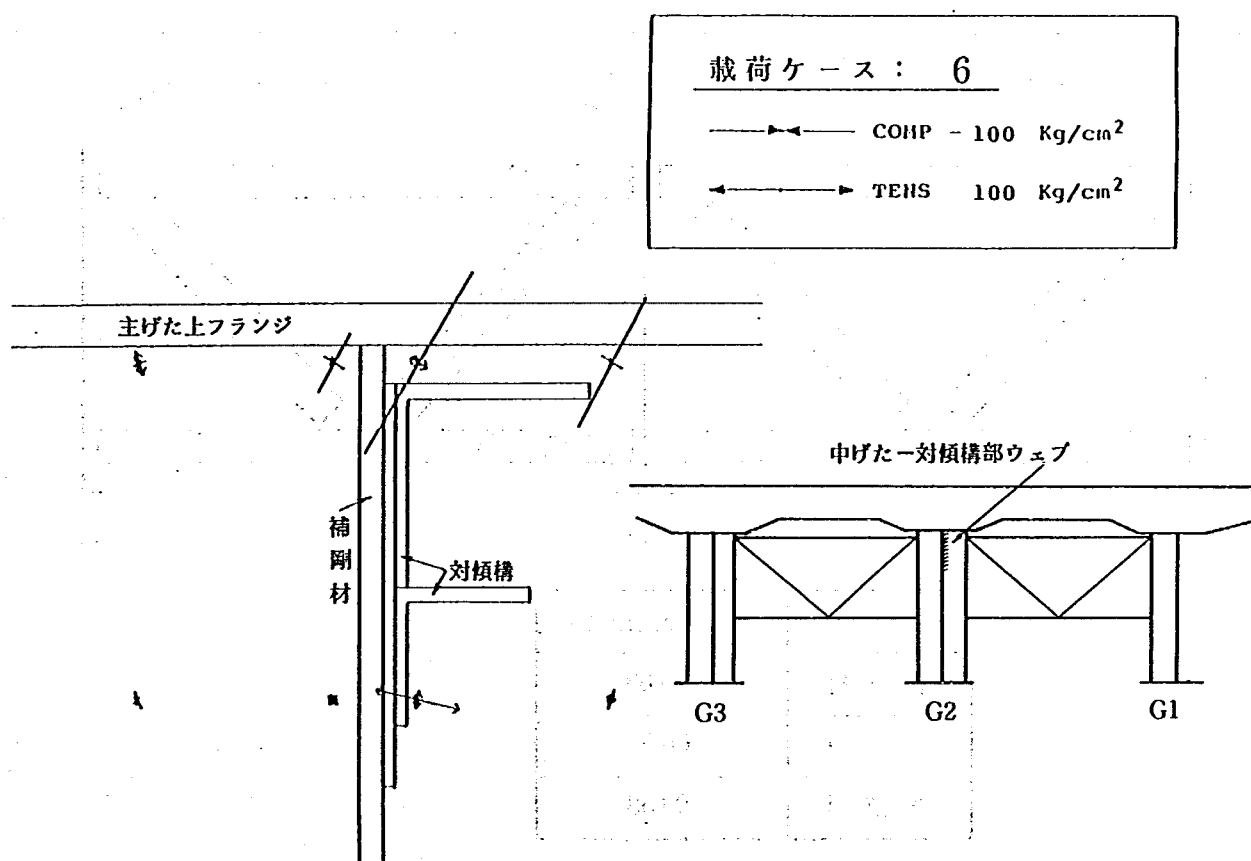
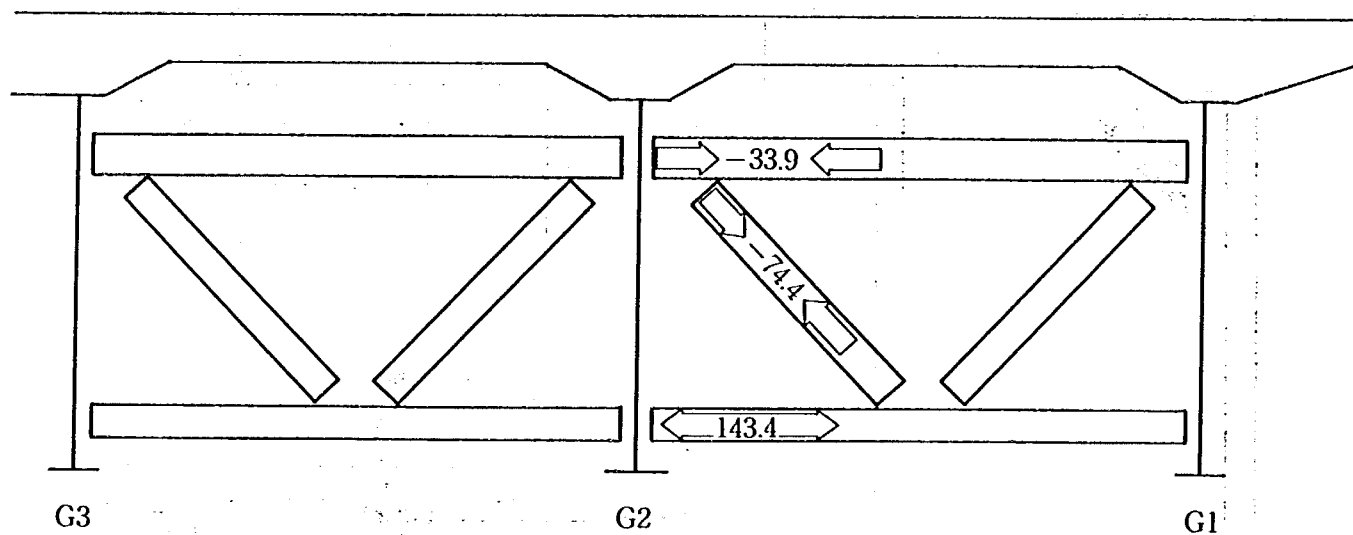
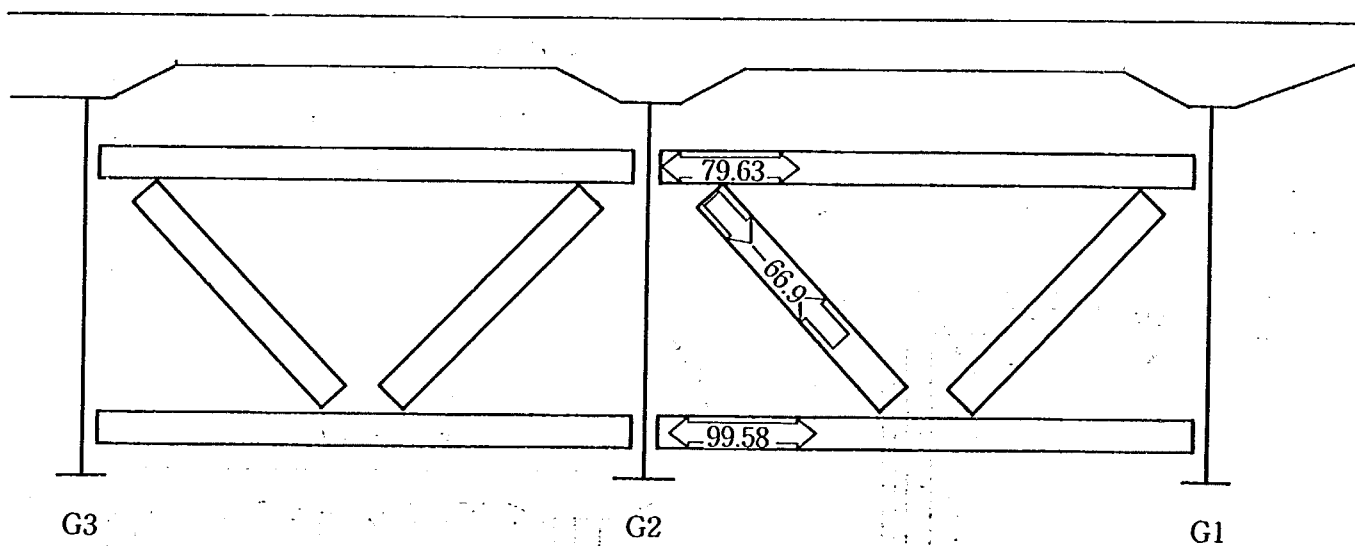


図 - 3. 6 (6) G 2 げたウェブ G. 1 げた側主応力図



	$\sigma_N(\text{kg/cm}^2)$
上弦材	-33.9
斜材	-74.4
下弦材	143.4

図-3.7(1) 対傾構軸力図(載荷ケース2)



	$\sigma_N(\text{kg/cm}^2)$
上弦材	79.63
斜材	-66.9
下弦材	99.58

図-3.7(2) 対傾構軸力図(載荷ケース4)

2.4 動的載荷試験

2.4.1 載荷条件

荷重車の走行位置は、次の3ケースである（図-4.1(a)~(c)、写真-4.1(a)~(c)）。

ケース1：G1-G2げたの中央部を走行（静的載荷のケース1，2に対応）

ケース2：G2-G3げたの中央部を走行（静的載荷のケース3，4に対応）

ケース3：荷重車の左側車輪（後軸）が、G1げた直上を通過するように走行（静的載荷のケース5に対応）

共和高架橋を通過する車両の速度は一般にかなり速く、60～80 km/hと推定されるが、アプローチ部の長さに制約があり、かつゆるい登り坂であったこと、荷重車が砂利を満載していたことなどから同条件での載荷はできず、40 km/h一定となるように走行した。走行位置の誤差は、チョークによるマーキングが、トラック前輪のトレッド部（約5 cm）と重なることを目標とした。このため誤差は±2.5 cm程度以内と考えられる。

2.4.2 ひずみ計測位置

静的載荷試験で使用したひずみゲージのうち、計測可能な枚数を選んで使用し、動ひずみアンプを用いて計測し、磁気テープに記録した。ひずみの計測位置とその番号は、図-2.4(1)~(2)を参照のこと。

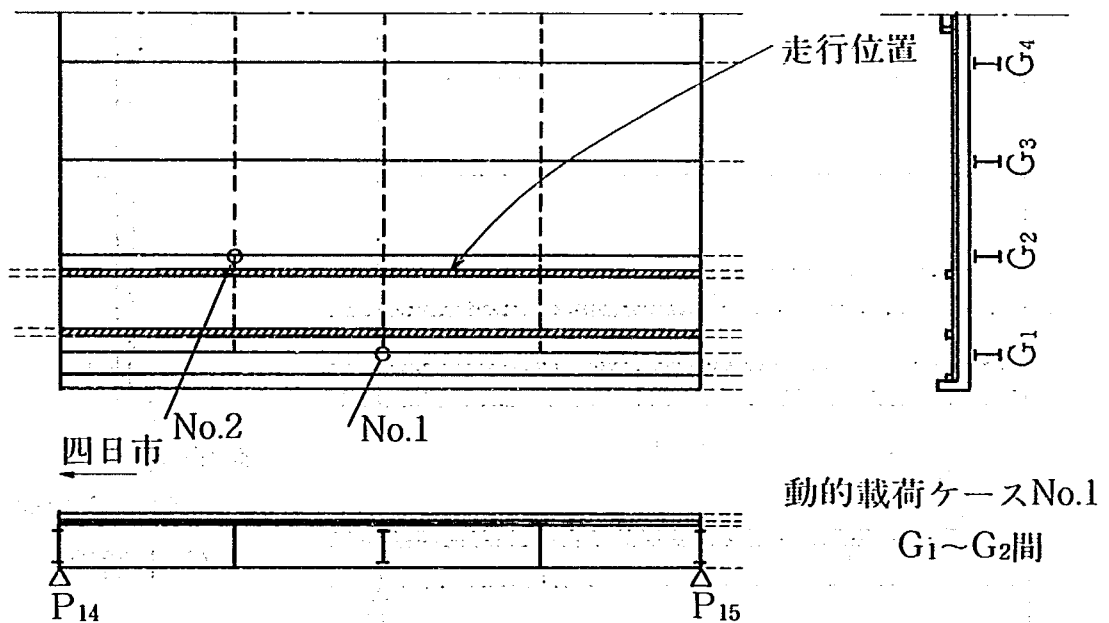
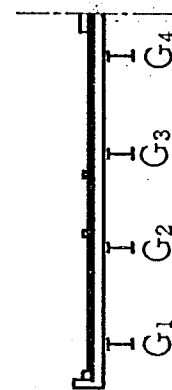
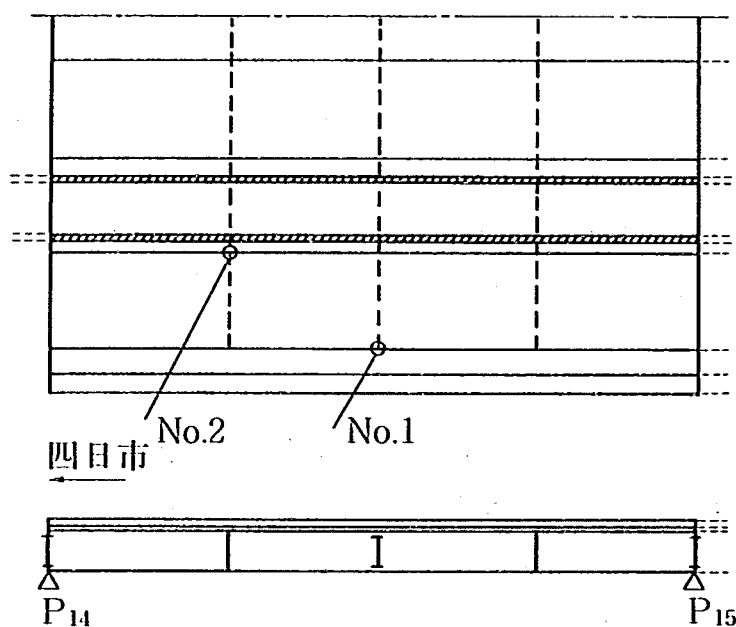
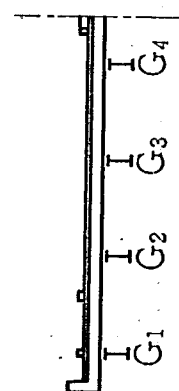
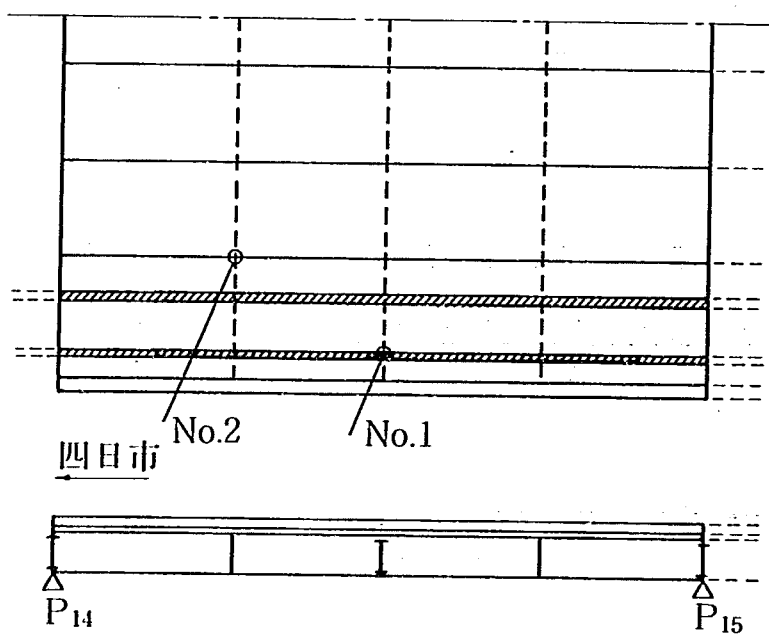


図-4.1(a) 動的載荷ケース1



動的載荷ケースNo.2
G₂~G₃間

図-4.1(b) 動的載荷ケース2



動的載荷
ケースNo.3
G₁上通過

図-4.1(c) 動的載荷ケース3

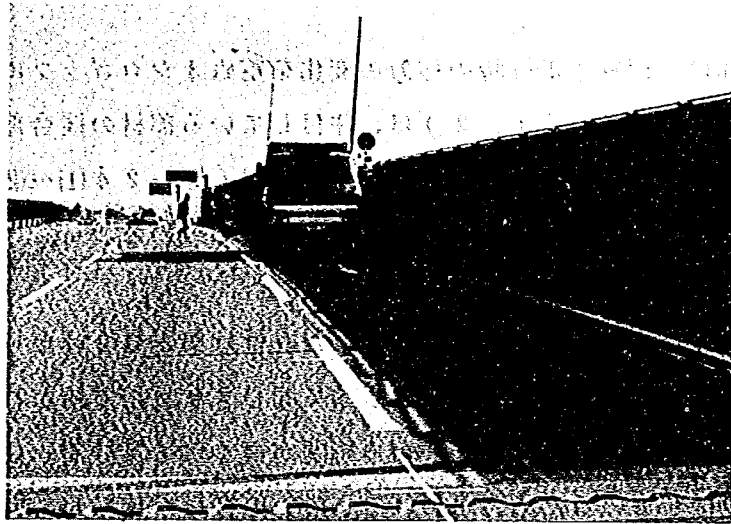


写真-4.1 a 載荷ケース 1



写真-4.1 b 載荷ケース 2

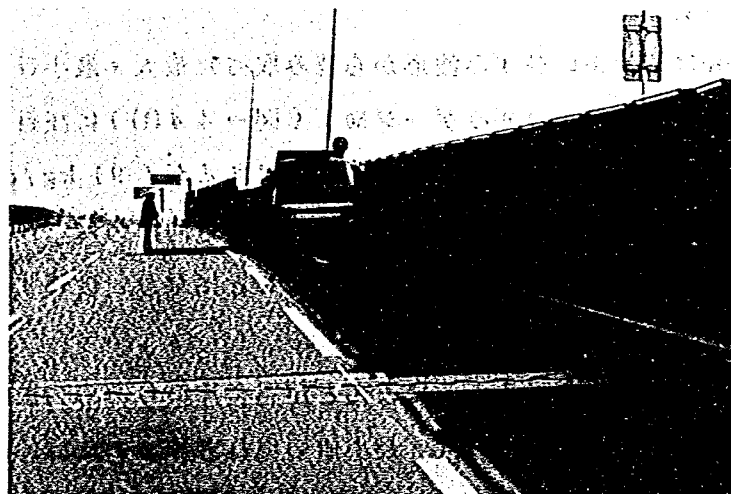


写真-4.1 c 載荷ケース 3

2.4.3 計測結果

図-4.3(1)~(6)は、荷重車走行時の応力の変化を電磁オシログラフに描かせたものである。データ毎の記号の左側の数字(1, 2)は、注目している部材の接合部(1; G1~横げた, 2; G2~対傾構)を示す。右側の数字はゲージNoで(図-2.4(1)~(2)参照)、XおよびYはそれぞれ水平鉛直方向のひずみ成分であることを表わしている。

(1) ひずみ波形

ひずみ波形に注目すると、G1げた-横げた取付け部とG2げた-対傾構取付け部の波形に大きな違いがあることがわかる。図はすべて同じスケールで描かれているが、前者の方が、後者に比べて応力が発生している時間が長くなっている。G1げた側では、隣接支間を荷重車が走行しているためと思われる、応力の符号が反転している部分を含め、ひずみが出始めてから消えるまでに約2.2秒を要しているのに対し、G2げた側では約0.7秒とかなり短くなっている。これは、荷重車が全橋を通過する時間と、横げた間を通過する時間にそれぞれほぼ相当する。また、G2げた側のひずみ波形(特に図-4.3(2), 2-1Y)には荷重車の前輪と後輪の通過が明らかにわかるのに対し、G1げた側のひずみ波形にはこのような区別はあらわれず、大きな滑らかな山が1つだけ現われている。

以上の結果は、次のように説明できよう。すなわち、横げたや対傾構と主げたとの接合部に2次応力を発生させる要因としては、Ⅰ)主げた間の沈下量の差によるもの、Ⅱ)接合部付近を車輪が通過した際の床版の変形に起因するもの、の2つが考えられるが、G1げた側ではⅠ)が、G2げた側ではⅡ)が主体となって作用していると考えるのが妥当であろう。この点は、後で補修方法を考える上で重要だと考えられる。

(2) ひずみの符号

計測されたひずみの符号を調べると、対応する静的試験の結果と全く一致する。静的試験結果の中に、常識的な予想と反する結果が出たと書いたが、計測上の誤りのためではないことが、これで明らかである。

(3) 最大・最小応力度

図-4.4(1)~(8)は、前出のひずみ波形から読み取った最大・最小ひずみを応力に換算して示したものである。G1側、ひずみゲージNo1(図-4.4(1))に注目すると一般に圧縮応力が主体であるが、載荷ケース2の場合にわずかではあるが(91 kg/cm^2)引張り応力が生じているのがわかる。したがって、この位置での鉛直方向応力は、最大 $+91 \text{ kg/cm}^2$ 、最小 -908 kg/cm^2 、応力範囲 999 kg/cm^2 ということになり、後述するクラックが発生し成長する条件を一応満たしていることになる。

一方、G2側の計測結果を見ると、ほとんどが完全片振りの応力振幅($0 \rightarrow$ 引張り or 圧縮)を受けていることがわかる。最大・最小値の現れ方については、静的載荷試験の結果とほぼ同様である。

(4) 衝撃の影響

今回の試験では、とくに衝撃の影響についての検討は行っていないが、対応する動的載荷試験と静的載荷試験の結果を比べると、すべて動的試験の計測値が小さくなっており、衝撃の影響は、発生する応力を小さくするように働いていることがわかる。

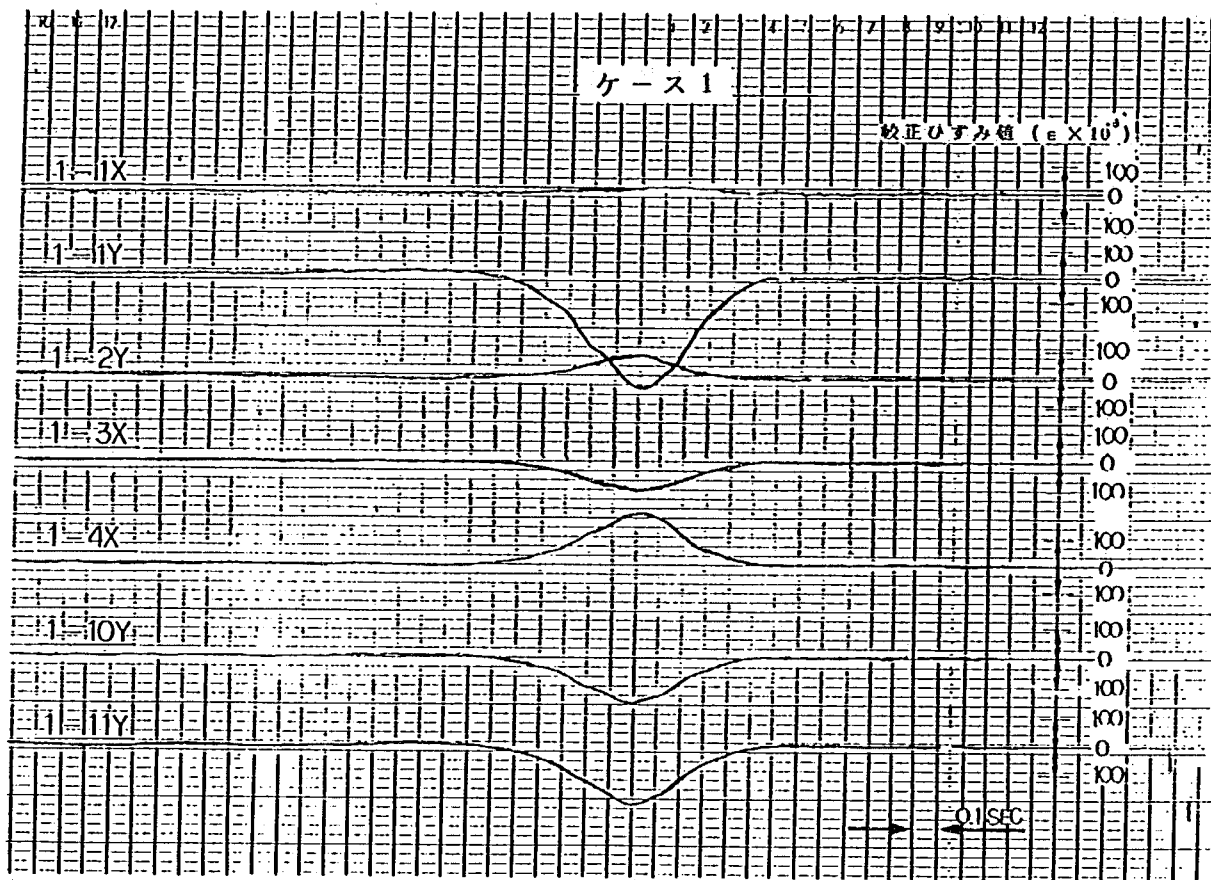


図-4.3(1) 動的載荷試験結果

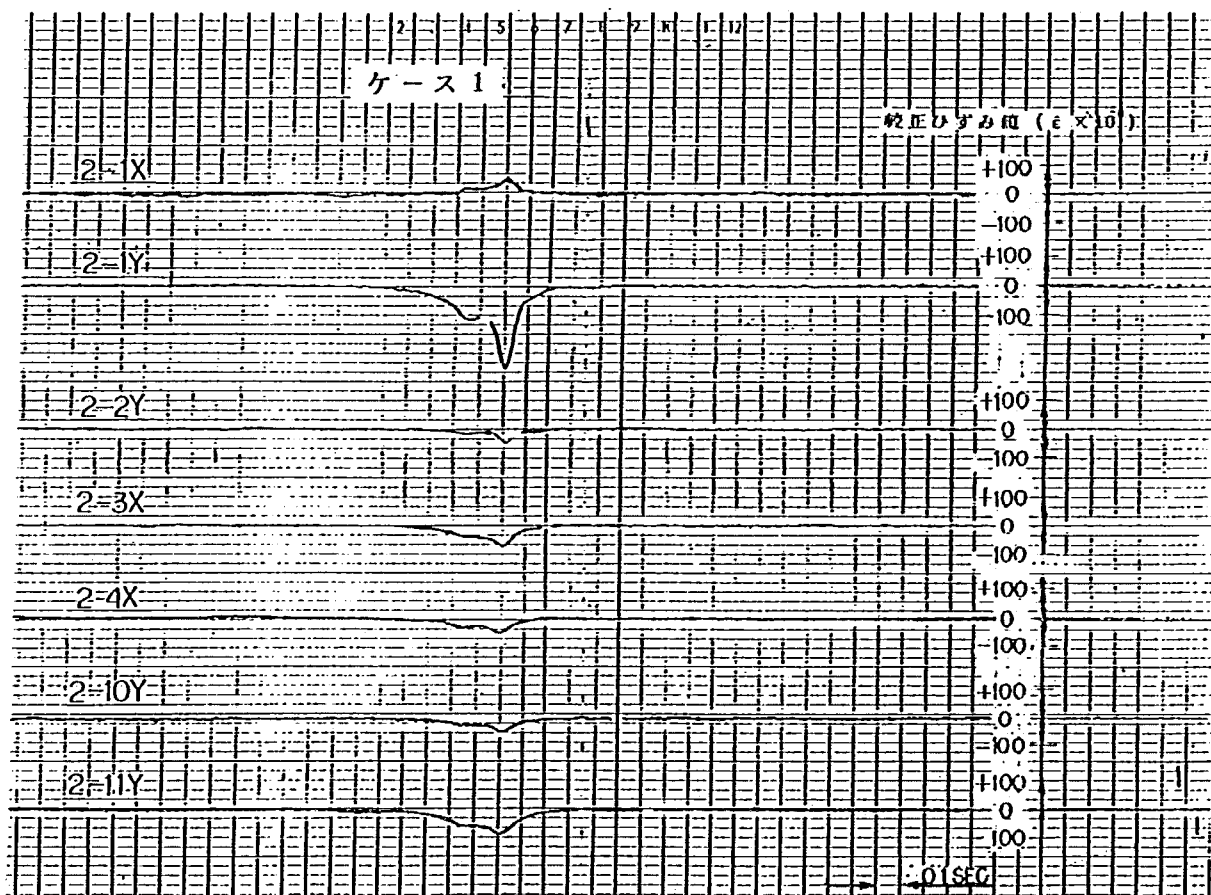


図-4.3(2) 動的載荷試験結果

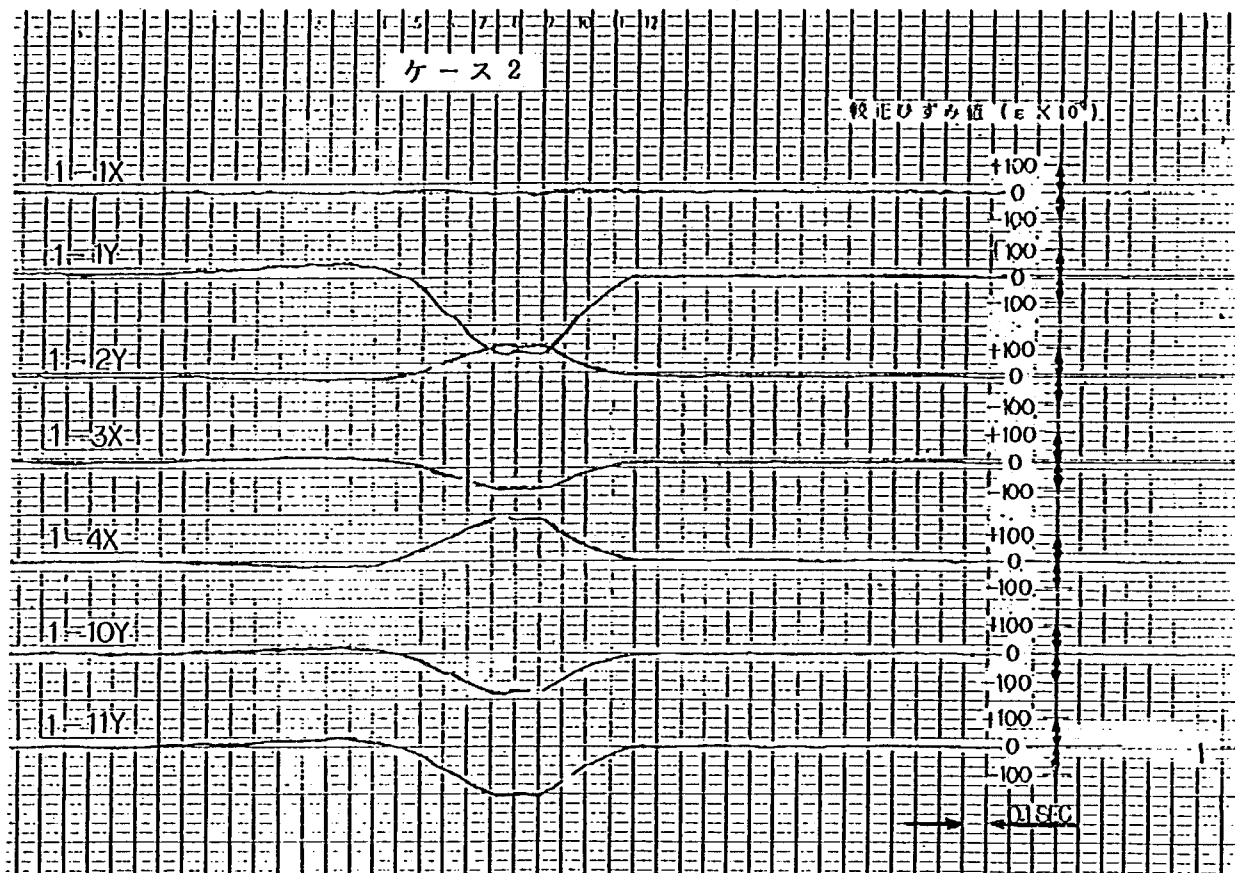


図-4.3(3) 動的載荷試験結果

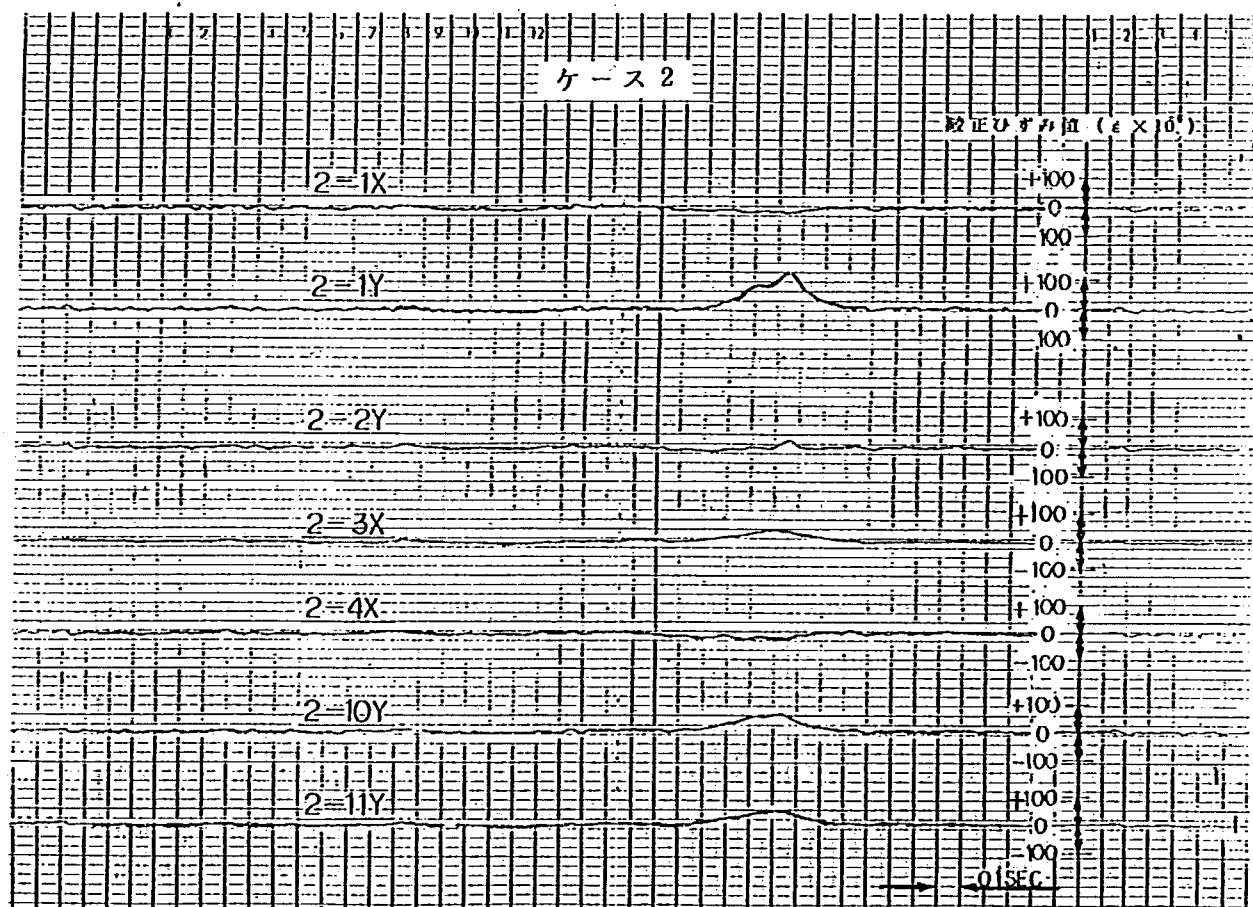


図-4.3(4) 動的載荷試験結果

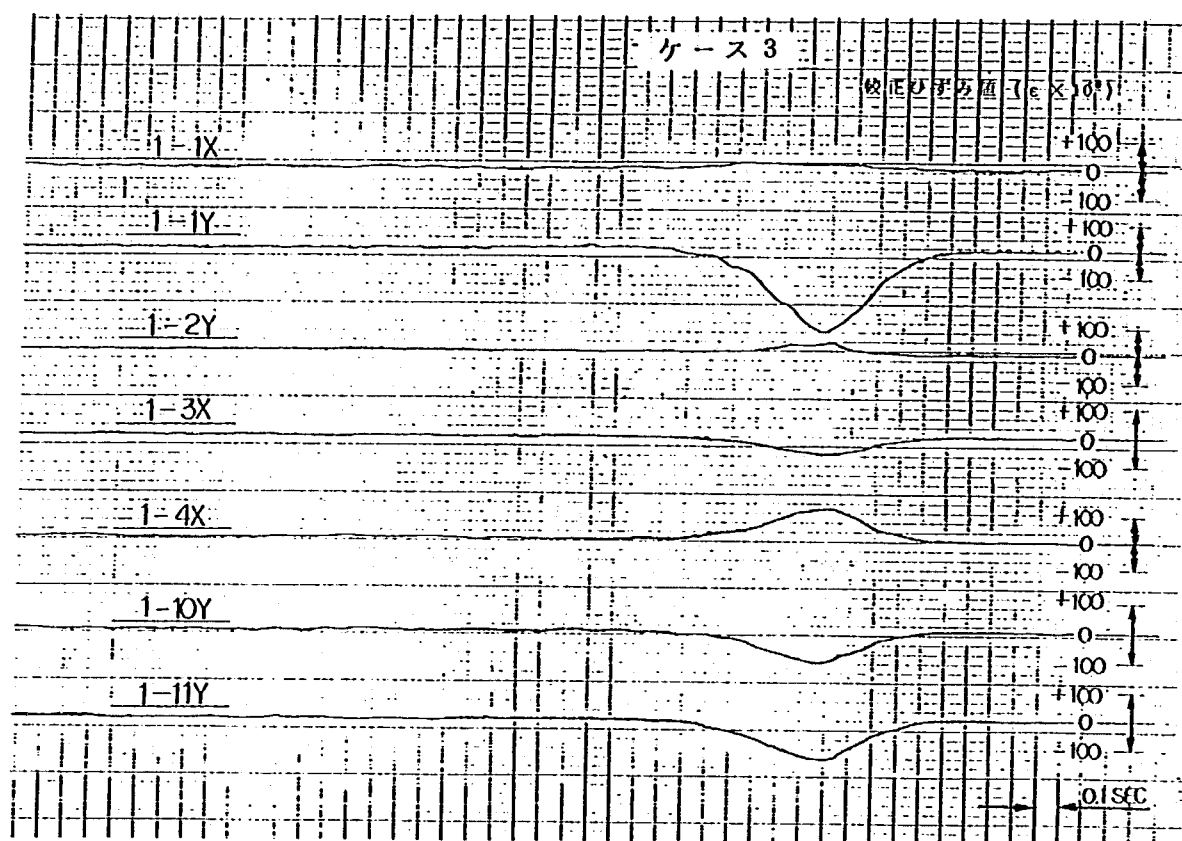


図-4.3(5) 動的載荷試験結果

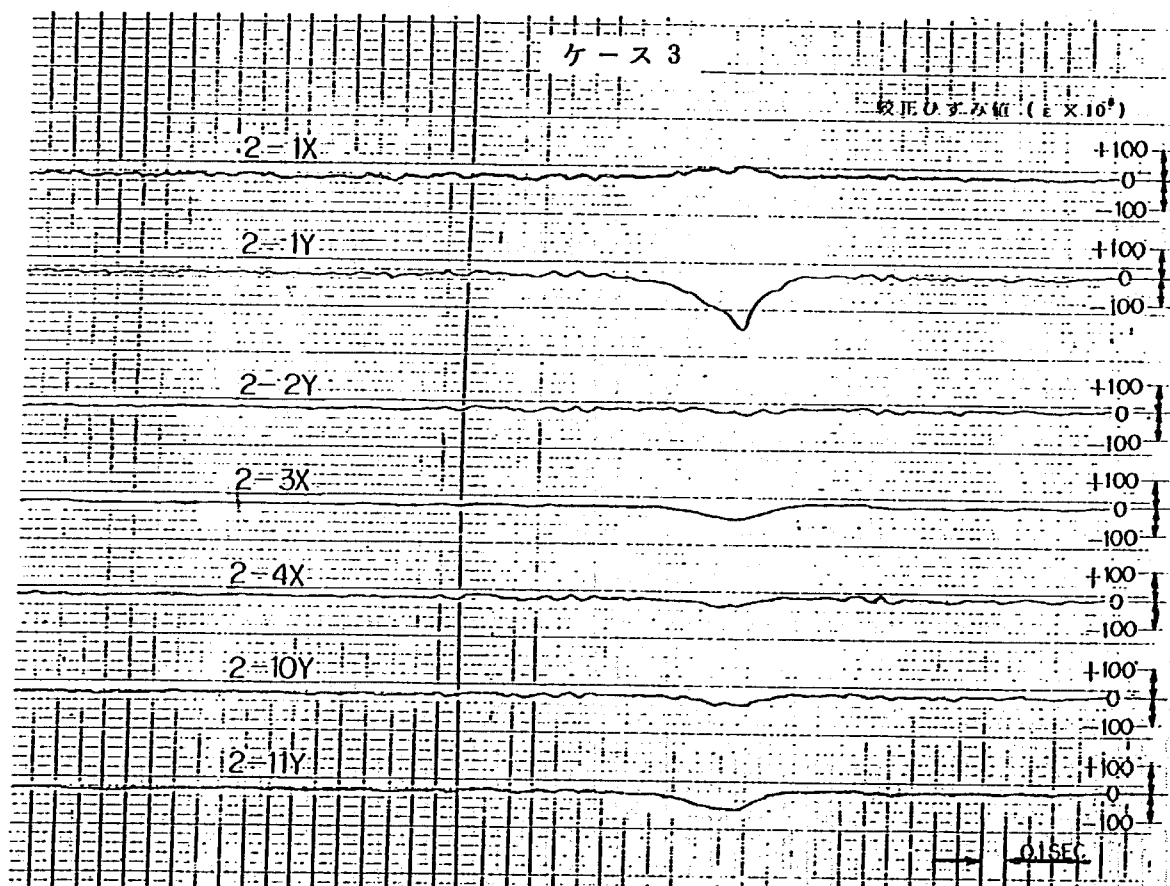


図-4.3(6) 動的載荷試験結果

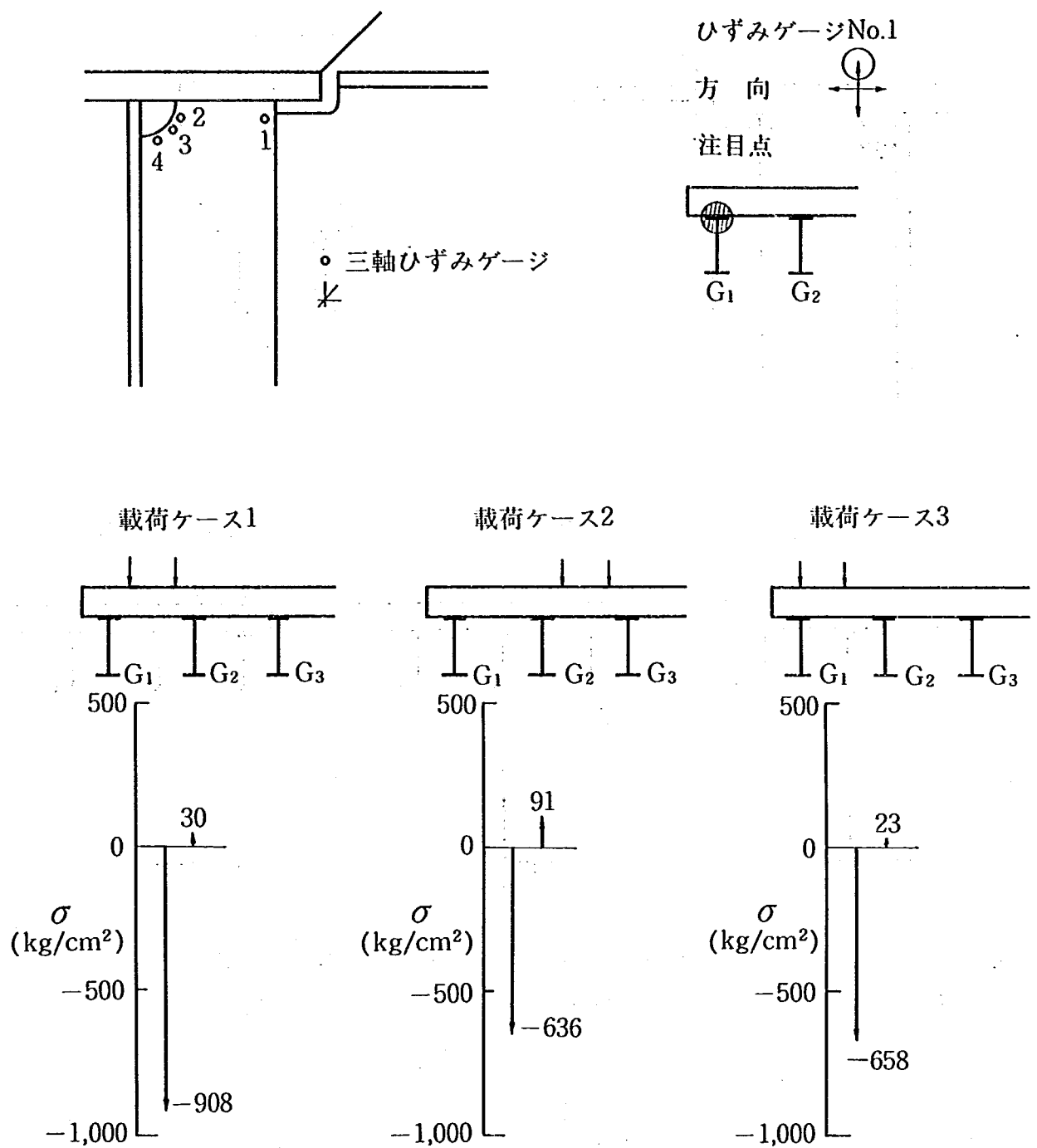


図-4.4(1) 動的载荷試験結果

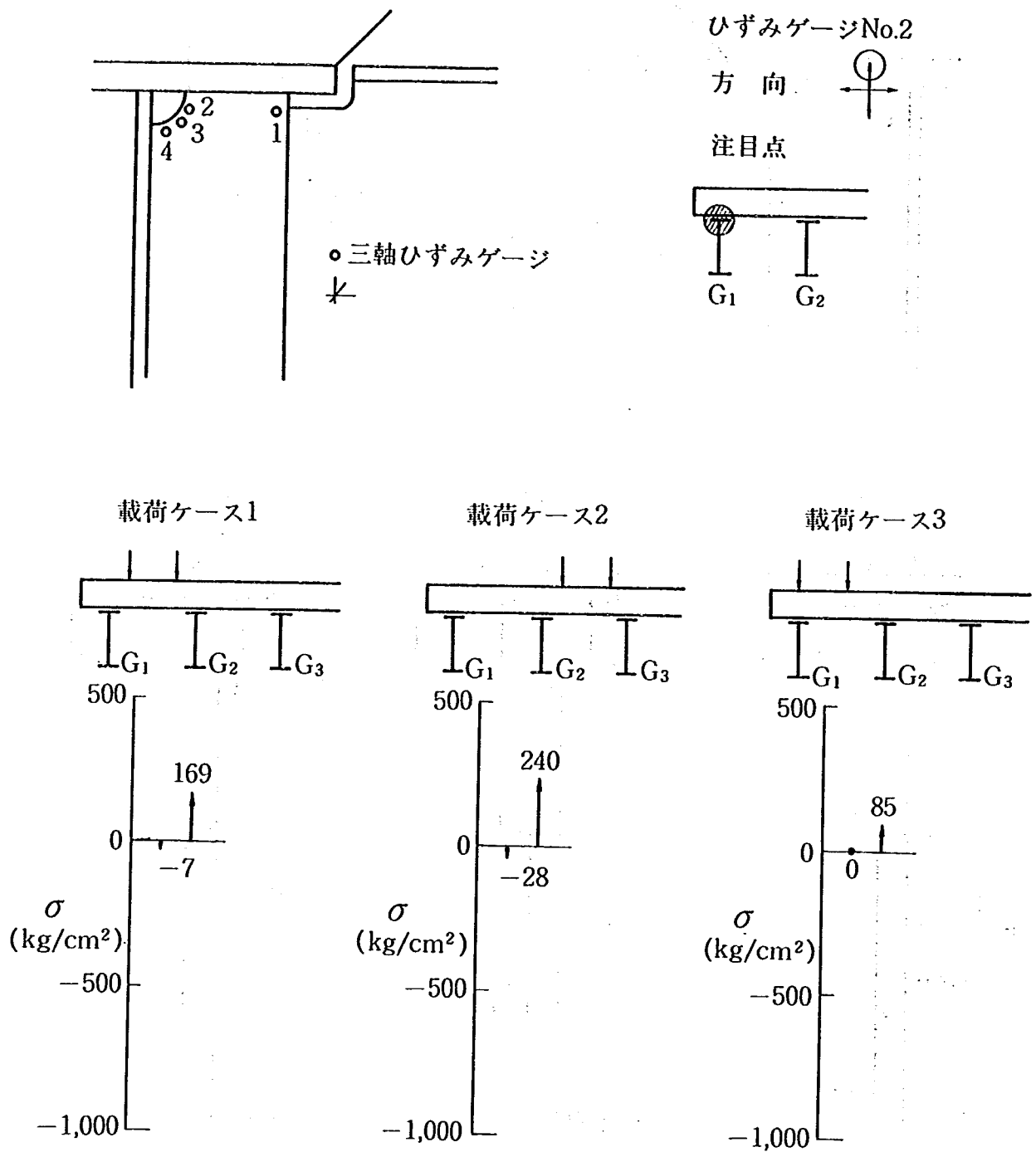


図-4.4(2) 動的載荷試験結果

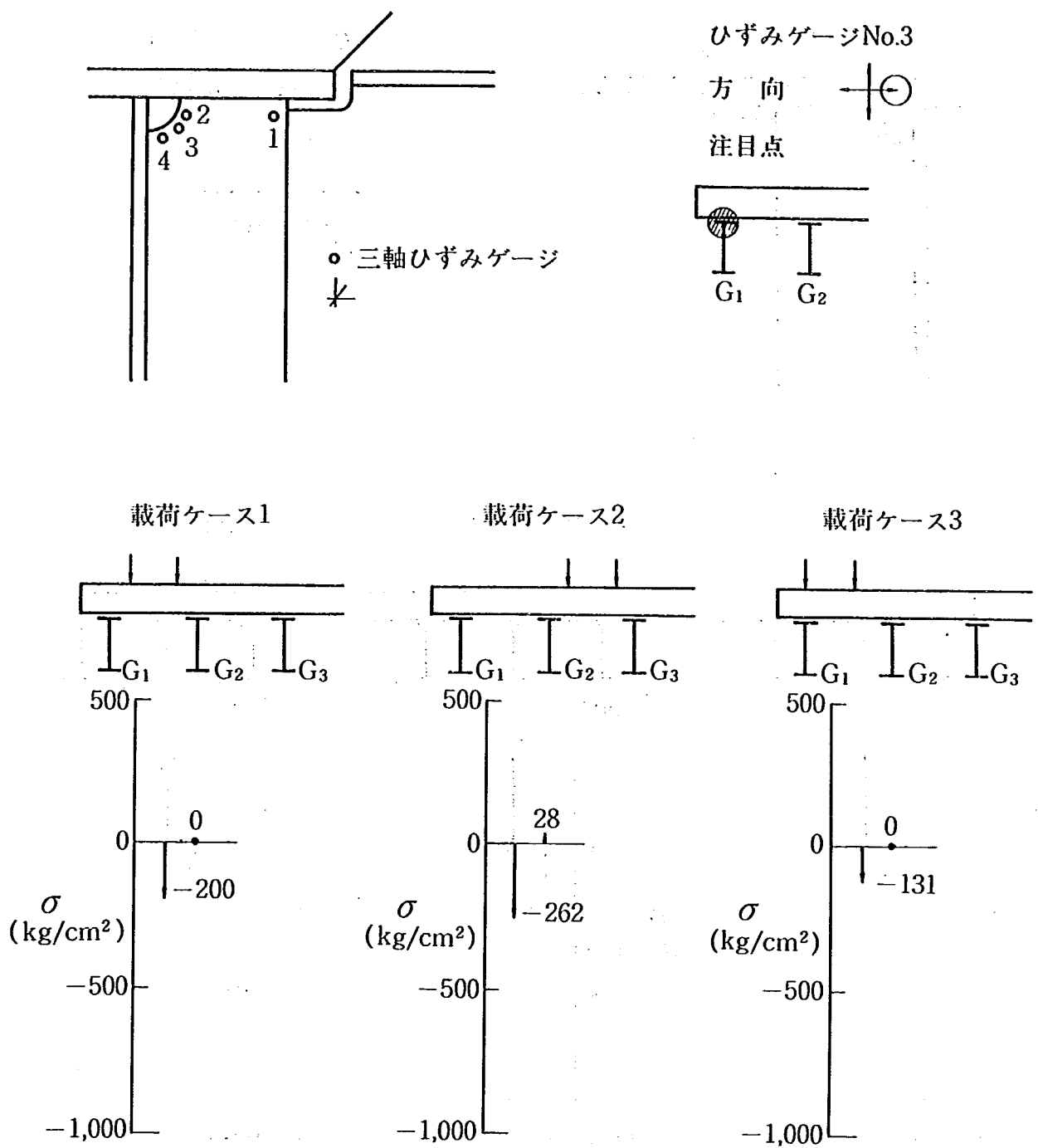
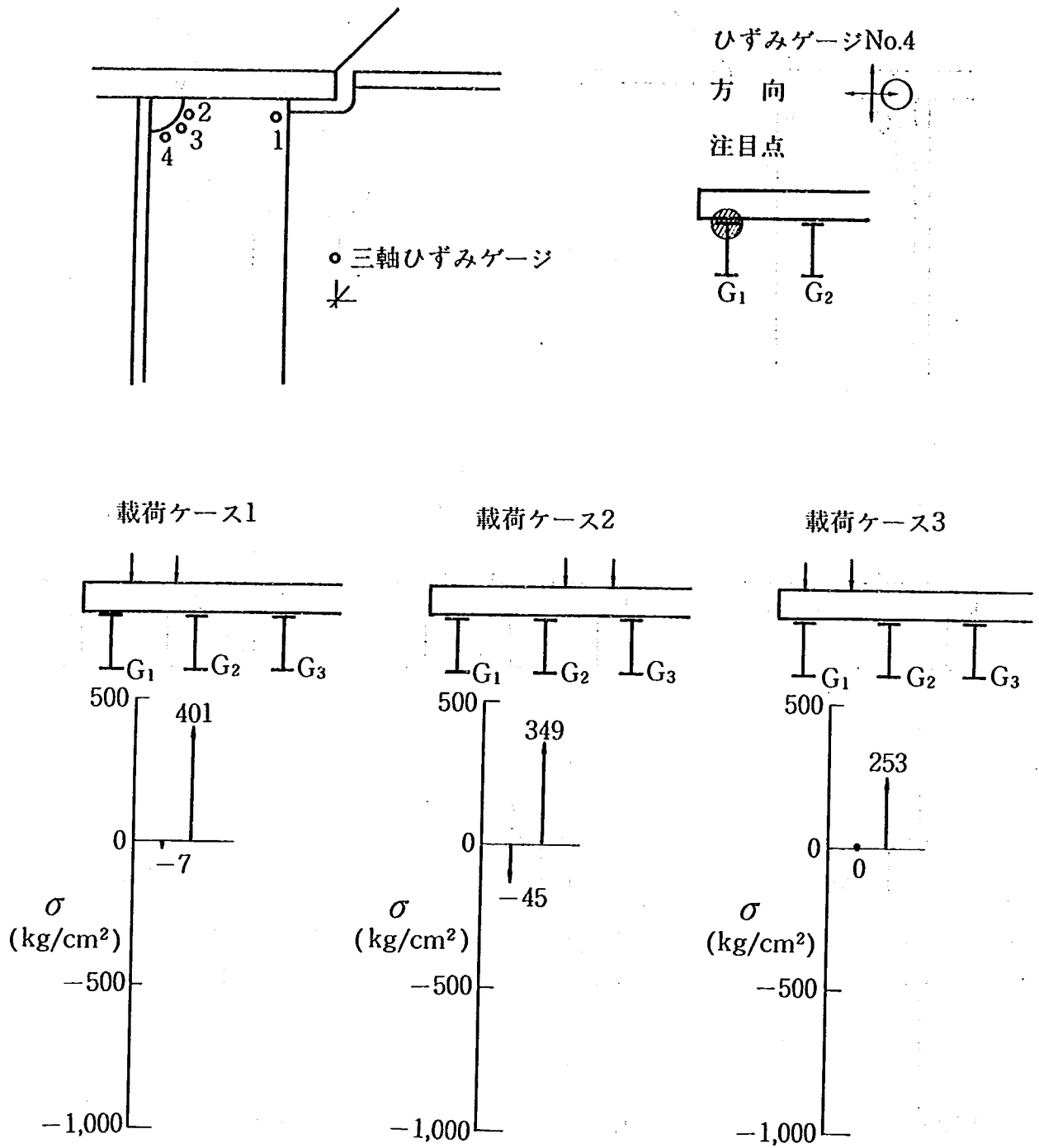
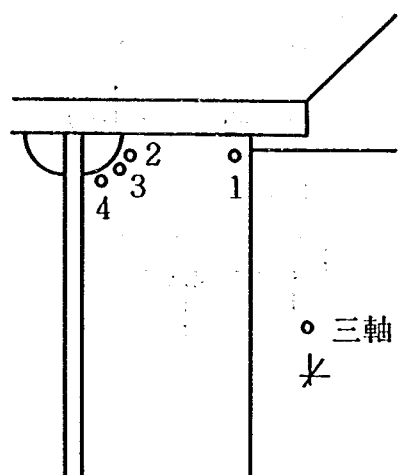


図-4.4(3) 動的載荷試験結果





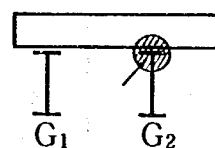
○ 三軸ひずみゲージ
✱

ひずみゲージNo.1

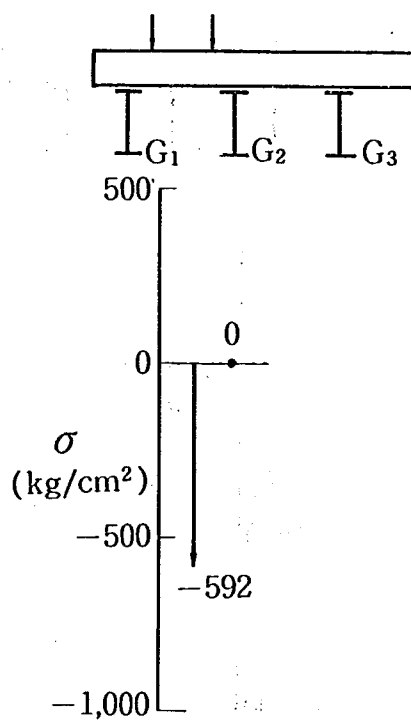
方 向



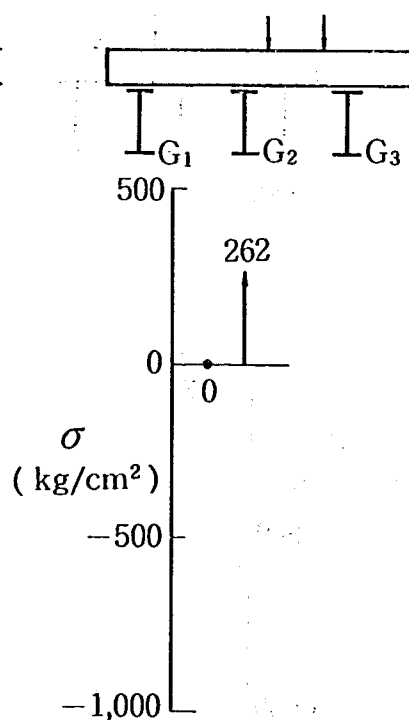
注目点



載荷ケース1



載荷ケース2



載荷ケース3

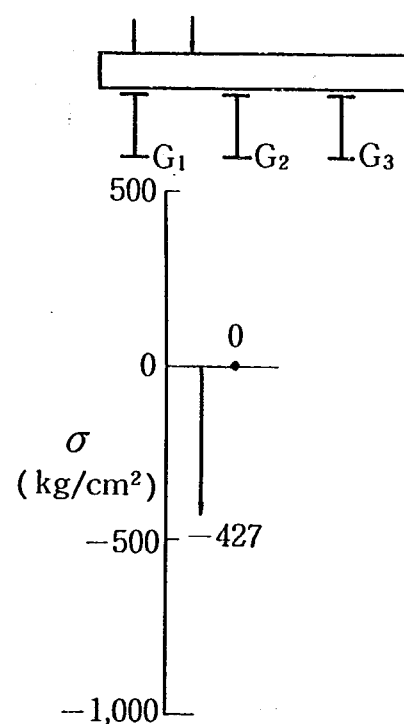


図-4.4(5) 動的載荷試験結果

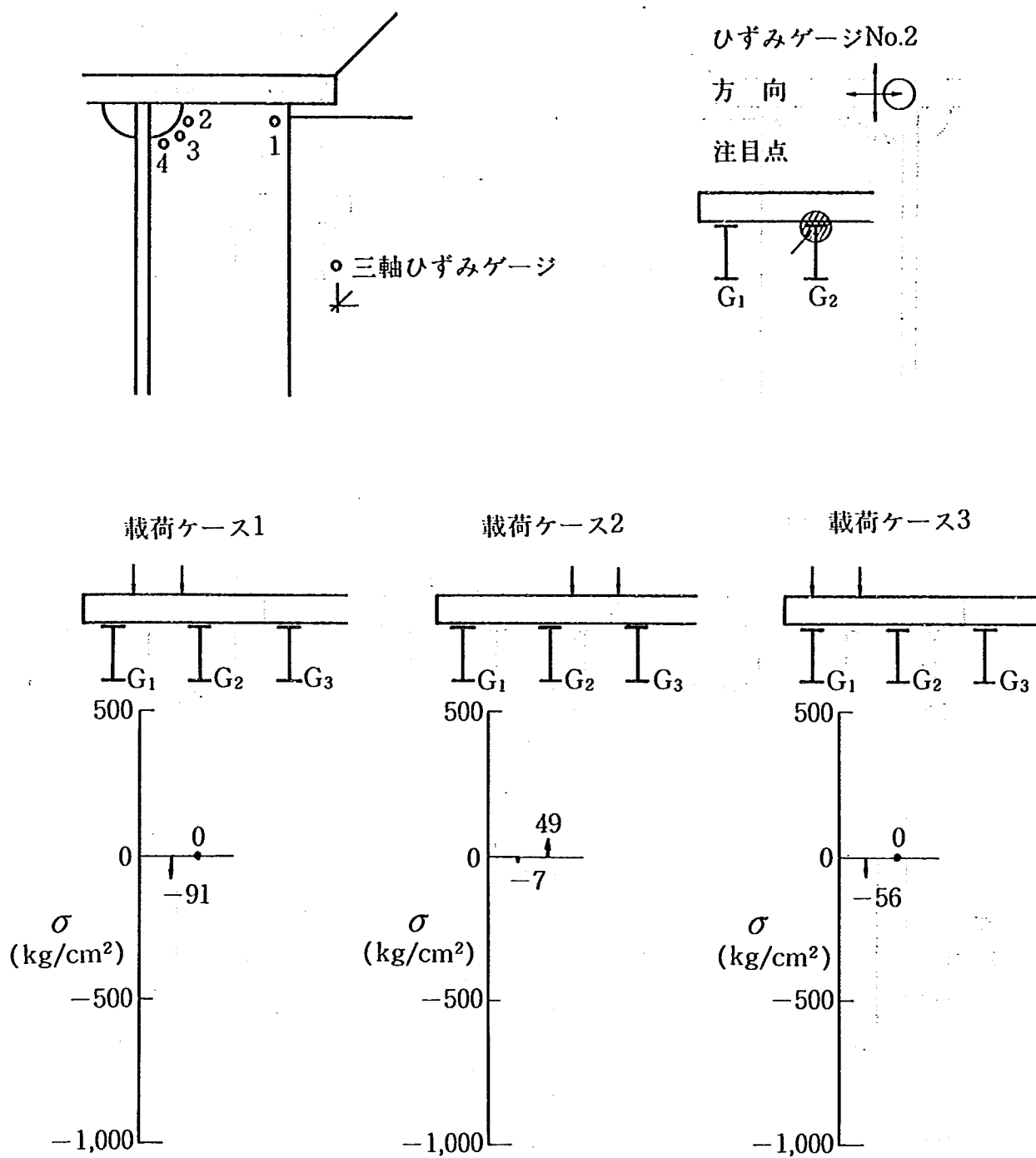


図-4.4(6) 動的載荷試験結果

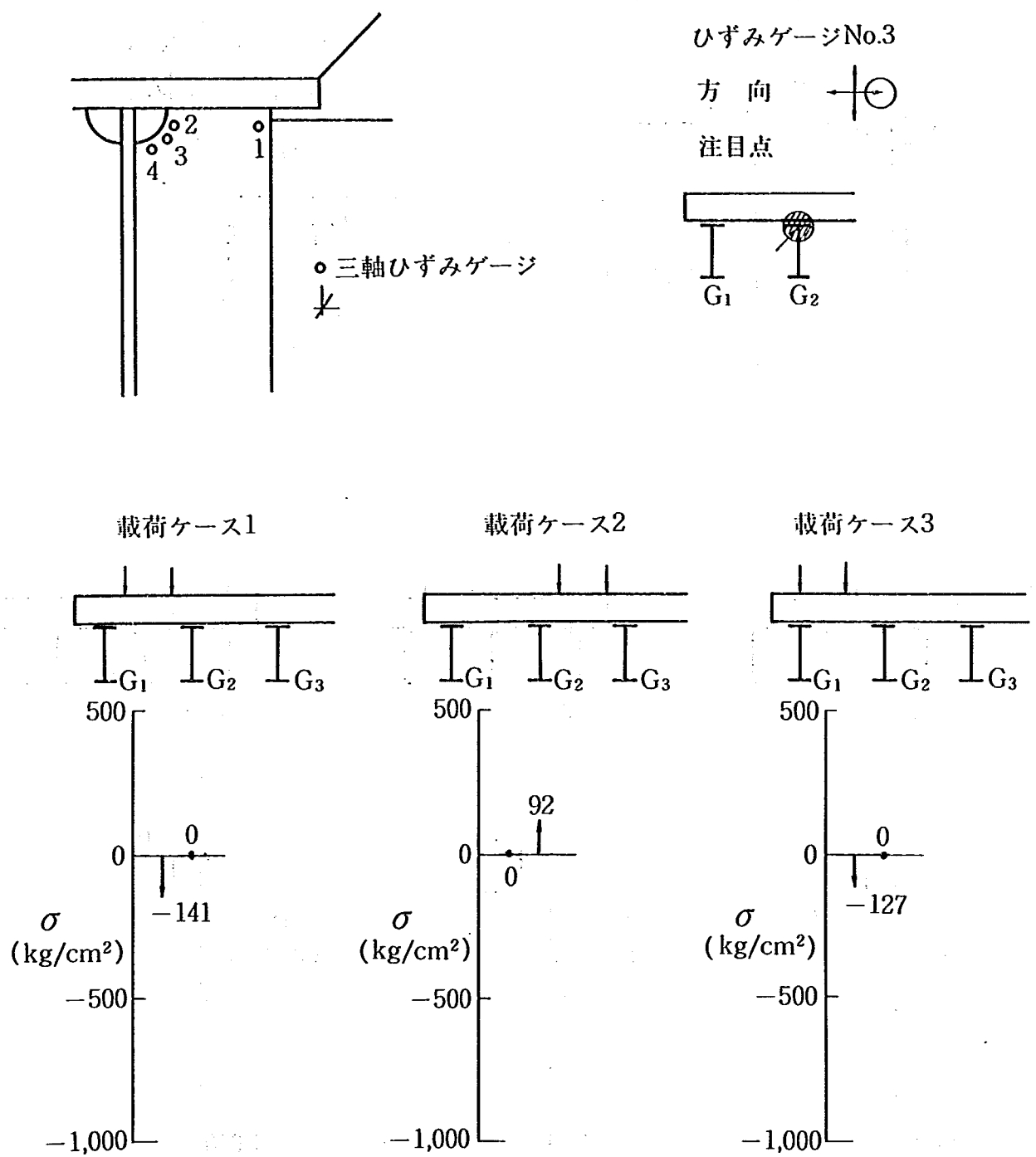


図-4.4(7) 動的載荷試験結果

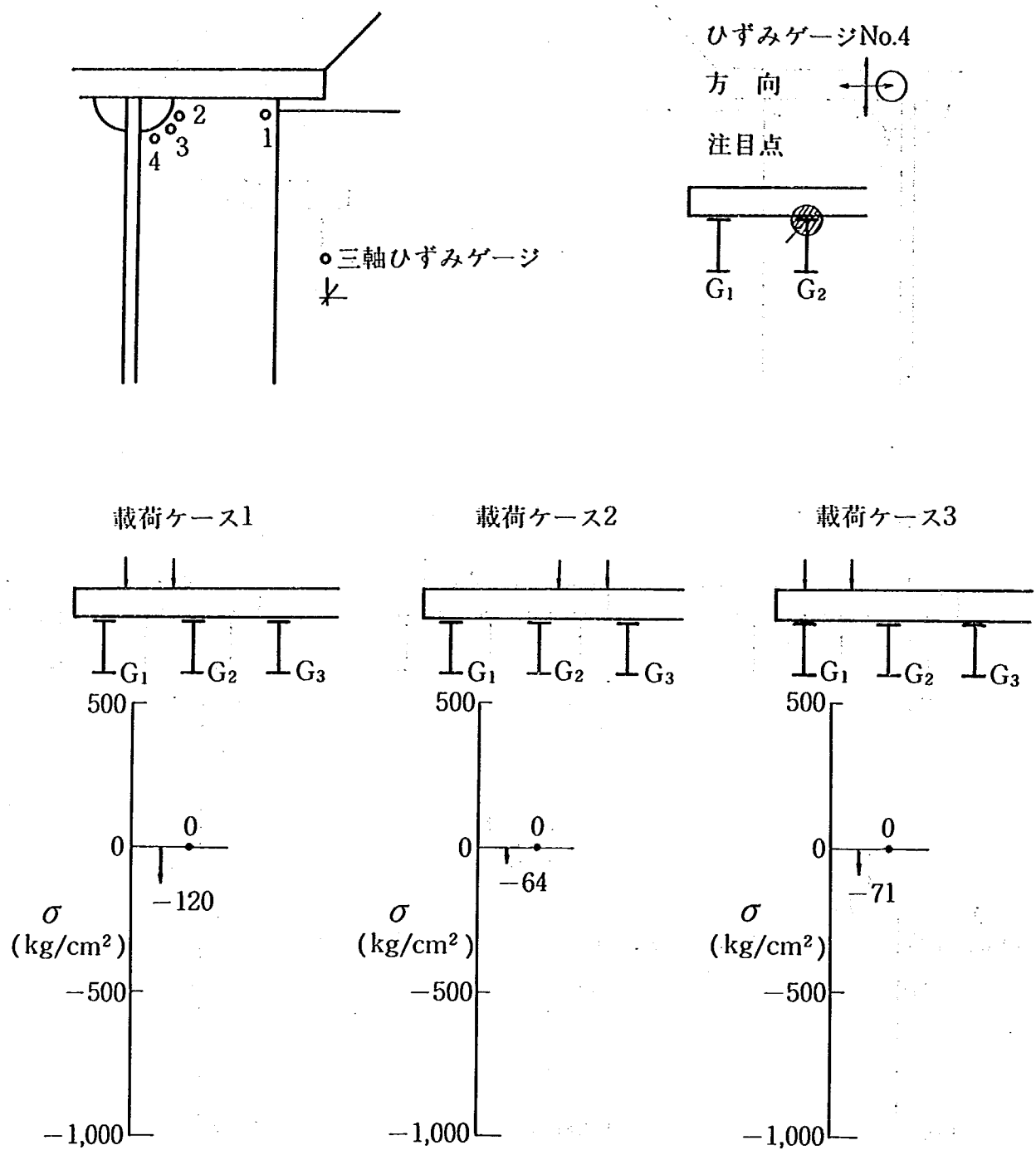


図-4.4(8) 動的載荷試験結果

2.5 载荷試験結果のまとめ

一般に疲労クラックが発生し成長するためには、次の条件の存在が必要であるといわれている。

- Ⅰ) クラックの始点となる応力集中が存在すること(切欠き、溶接欠陥等)。
- Ⅱ) 当該応力集中部の疲労限応力範囲を超える繰返し応力が存在すること。変動応力を受ける部材において、変動応力の一部でも疲労限応力範囲を超えていれば、その他の小さな繰返し応力すべても疲労クラックの発生に寄与するという研究がある。
- Ⅲ) 繰返し応力の少なくとも一部が引張り応力であること。残留応力の存在により、圧縮領域のみの繰返し応力によってもクラックが発生することがあるが、多くの場合、クラックの成長に伴って残留応力が解放されるため、クラックの成長が自然に止まる傾向がある。

以上の点を頭に入れて計測結果を整理すると、次のようになる。

(1) Aクラック発生箇所

同じようなタイプのクラックが、横げた一端主げた接合部と対傾構一中主げた接合部の補剛材上端に見られるが、計測の結果、それぞれ別々に論じるのが適当と考えられる。

Ⅰ) 横げた一端主げた接合部のAクラック

Aクラックの始点とみられる補剛材上端中げた側には、かなり大きな鉛直方向の圧縮応力が生じる。その最大値は静的载荷では約 $1,200 \text{ kg/cm}^2$ 、動的载荷では約 900 kg/cm^2 と、応力に直角なすみ肉溶接の疲労限応力範囲 ($600 \sim 700 \text{ kg/cm}^2$ と推測される) を上回っている。

また、荷重車が連続している隣接支間のG2-G3げた間を通過する際に、最大約 90 kg/cm^2 の引張り応力が発生する。

以上の点より、Aクラックの発生条件を一応満たしているものと考えられる。

Ⅱ) 対傾構一中主げた接合部のAクラック

Ⅰ) の場合と異なり、荷重車がG2げたのどちら側を通過するかにより、発生する応力の符号が逆転する。応力範囲の大きさは、静的载荷で約 $1,200 \text{ kg/cm}^2$ (うち引張り側約 350 kg/cm^2)、動的载荷で約 850 kg/cm^2 (うち引張り側約 250 kg/cm^2) であった。クラック発生の要因としては、Ⅰ) よりもむしろ揃っているように思われる。

(2) Bクラック発生箇所

1例のみ単独のクラックを発生したスカーラップ中央部付近には、スカーラップの円周に沿ったかなり大きな応力 (約 900 kg/cm^2) がみられるが、常に圧縮側の応力である。したがって、このクラックの発生には、近傍の溶接を施工した際に生じた大きな残留応力が影響したことが予想され、また、もしそうだとすれば、このクラックはすでに停留していることも考えられる。

他のBクラックはすべて貫通したAクラックを伴っており、クラック発生位置もスカーラップ下端のすみ肉溶接止端部と、少し異なっている。この部分は、Aクラックが発生していない状態でも 500 kg/cm^2 程度の引張り応力を受けており、Aクラックが発生した後、さらに厳しい条

件となり、クラックが発生し得ることは容易に想像できる。

(3) Cクラック発生箇所

損傷部付近の主げたウェブには、 550 kg/cm^2 程度の鉛直方向圧縮応力が見られるが、背面の応力も圧縮であり、上フランジの首ふり等大きな変形が生じているとは考えられない。したがって、Cクラック単独の発生は今後ともないものと考えられる。

以上のほか、注目すべき点について述べる。

- (4) 横げたウェブの主応力図を見るかぎり、横げたの変形状態は、荷重の位置にかかわらずG 2 げたがG 1 げたに対し沈下しているかのように見える。この傾向はG 1 げた補剛材の応力が、荷重の位置に関係なく常に一定の傾向を有していることと一致する。
- (5) 補剛材に発生する応力は、Ⅰ) 主げた間の沈下量の差によるものと、Ⅱ) 床版の変形に起因するものとに分けることができ、横げた部ではⅠ) が、対傾構部ではⅡ) が主体となって作用しているものと考えられる。
- (6) 端げたと対傾構の交差部については計測を行っていないが、前述した2箇所の性質を合わせて有していることが予想される。ただし、損傷の程度が比較的軽いことから推して、横げたとの交差部程は厳しい状態ではないものと考えられる。

3. 解析による損傷原因の検討

3.1 目 的

この解析の目的は、クラックの発生および伝播の原因をより詳しく検討することにあるが、同時に、補修方法の検討を行う際に、その効果を確認することを目的としている。

3.2 解析の対象

解析の対象は、最も損傷の程度が大きかった横げた一端主げた取付け部とし、対傾構部については、この結果から推することにした。

3.3 解析方法

解析は次の示す3つの段階より成る。

解析Ⅰ 格子げたの計算

8主げた2径間連続橋全体を格子げたとして解き、横げた位置におけるG1、G2げた間沈下量の差を、各載荷ケース毎に求める。

解析Ⅱ 平面ラーメンのFEM解析

解析対象部分を、主げた、横げたおよび床版からなる平面ラーメンと考え、解析Ⅰで求めた主げた間の沈下量の差を外力としてFEMにより解く。次章の補修方法の検討は、すべてこのレベルの解析をもとにしている。

解析Ⅲ 詳細FEM解析

損傷を受けたディテールを抽出し、より細かいメッシュによるFEM解析を行う。なお、これはクラック発生原因の検討にのみ用いた。

3.4 格子げたの計算（解析Ⅰ）

対象とした格子げたのモデルを図-5.1に示す。本橋は非合成げた橋であるが、実際には合成げたに近い挙動をしていることが予想されるため、主げたの断面剛性は合成げたとして計算した。横げたについては鋼げたのみ考慮した。

荷重は静的載荷試験のケース1および3に相当する位置に荷重車の後輪荷重（6.8 t × 2）を載せ、前輪荷重は無視した（前輪荷重も考慮した沈下量の測定値も参考までに図中に（ ）付で示した）。

図-5.2に計算結果を示す。載荷ケース1および5では、G1げたがG2に対し沈下し、ケース3では逆になっている。

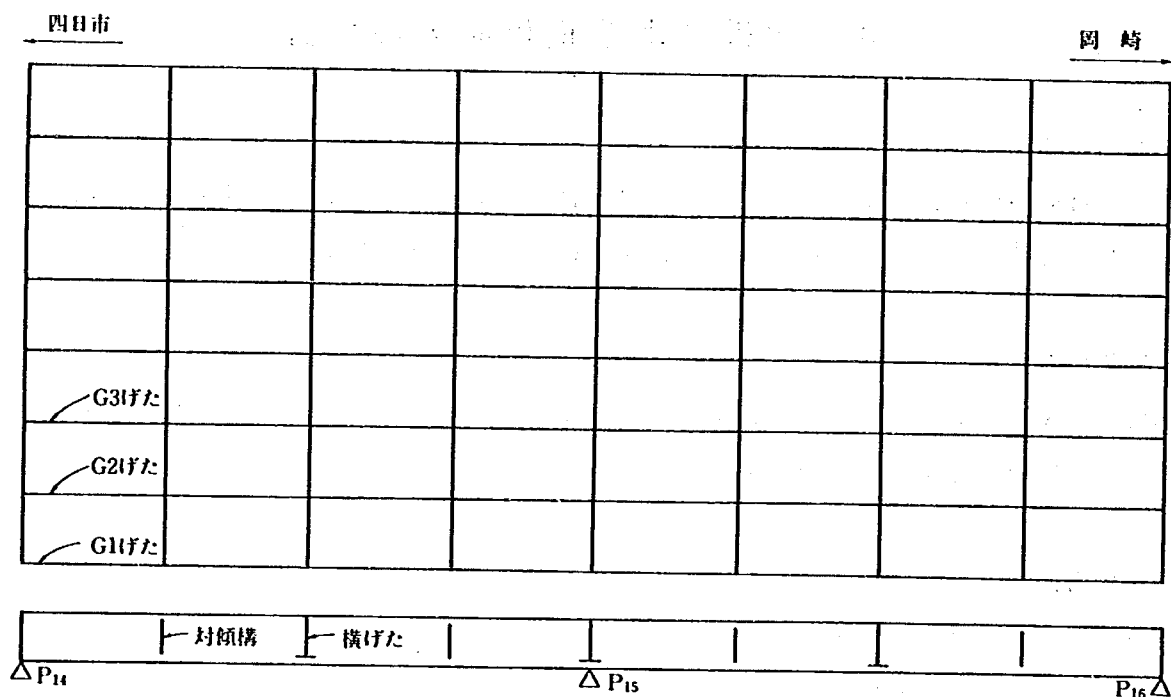
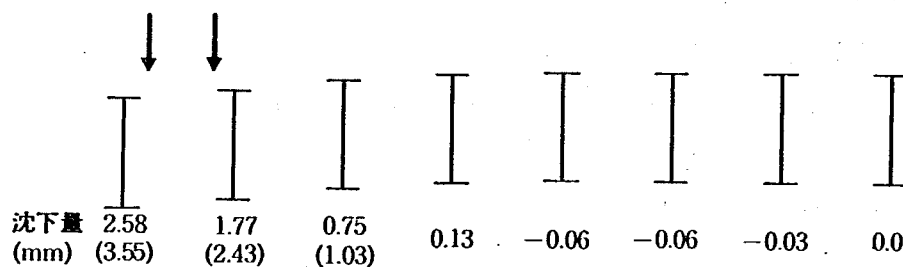
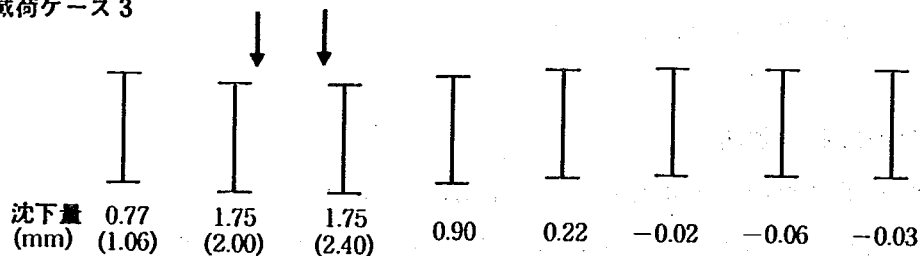


図- 5. 1 FEM解析 (I) モデル

载荷ケース 1



载荷ケース 3



载荷ケース 5

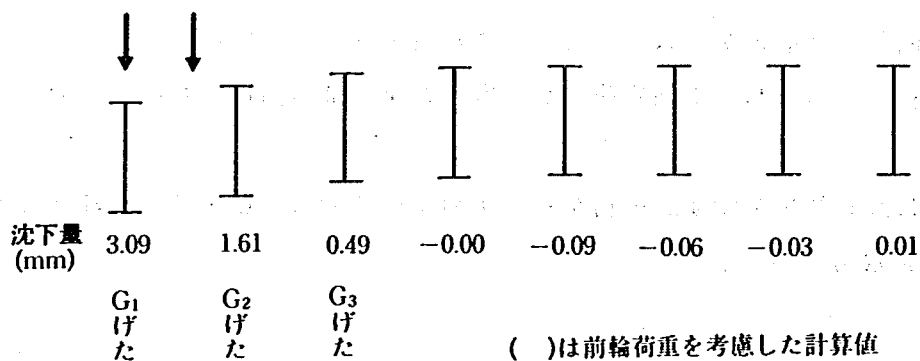


図- 5. 2 主げたの横げた位置での沈下量
(後輪位置：横げた直上)

3.5 平面ラーメンのFEM解析(解析Ⅱ)

基本とするモデルは、補強や縦げた増設をしていない原形を対象とし、図-5.3に示すように要素分割した。

モデルの支持条件は図-5.4に示すように、G2げたの回転を拘束した状態でG1、あるいはG2上に载荷するものと、両主げた下端を単純支持として、床版上に後輪荷重を載せるものの3種類を適宜用いた。また、前2ケースについては、解析Ⅰで求めた主げた間の沈下量の差を外力とした。

主げたのウェブおよびフランジについては、その有効巾を2.4tと仮定したが、RC床版の有効巾についてはその影響が大きいものと考え、0.6m(3t)、1.2m(6t)、および5.0m(25t)の3段階について比較を行った。1.2mというのは、横げたがRC床版と合成して働くと考えた場合の有効巾にほぼ相当する。

図-5.5(1)~(5)にその結果を示す。(1)および(2)は、载荷ケース1の場合、すなわちG1がG2に対して沈下した場合で、それぞれの有効巾を1.2mおよび5.0mとしたときの、横げたウェブの主応力分布を示したものである。これを計測結果(図-3.1(2))と比べると、主応力の方向は一致するものの、符号が全く逆になっていることがわかる。一方、図-5.5(3)~(5)、すなわちケース3の場合を計測結果(図-3.3(2))と比べると、G2げた側上部の応力がやや大きいこと以外は、ほぼ一致した主応力分布となっている。そこで、ケース3の解析結果を比較すると、3者とも本質的な差はないことがわかる。以上より、ここでは床版の有効巾を1.2mとして以下の検討を進めることにする。

载荷試験のところでも述べたように、計測された横げたおよびその取付け部の補剛材の主応力分布は、常識的な予想に反し、荷重車がG1~G2げた間にある場合(ケース1)、G2~G3げた間にある場合も、絶体値の多少の違いを除けばほぼ等しいことが明らかである。この理由としては、格子げたの計算を行う際の床版の評価の仕方に問題があるものと思われる。すなわち、格子げたを解く場合、床版はそれぞれの主げたの曲げ剛性およびねじれ剛性に寄与するものとして考慮されるが、その連続体としての挙動については無視されるのが普通である。しかし、今回のような問題の検討を行うためには、床版面内方向軸力の存在が大きな影響を及ぼすものと考えられ、これがケース1について、実際の挙動に合った結果が得られなかった原因となったものと考えられる。

しかし、幸いなことに、横げたの応力状態は、ケース3に対する解析によりケース1および3の状態を定性的評価することが可能と思われるので、以下の検討はケース3の解析結果を中心にを行い、必要に応じてケース1についても触れることにする。

3.6 クラック発生原因の検討

3.6.1 横げた一端げた接合部のAクラック

図-5.6(1)および(2)は、補剛材と上フランジ接合部付近の要素について求めた主応力と鉛直

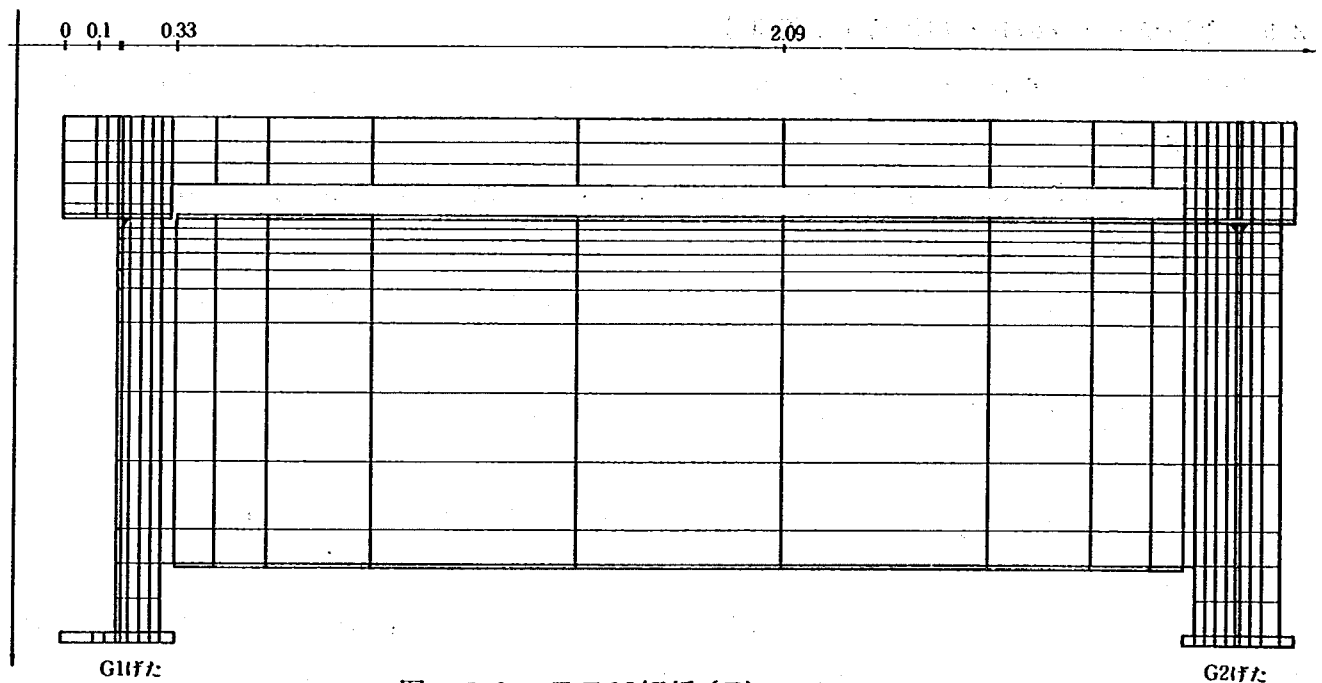


図 - 5.3 FEM解析(Ⅱ)モデル

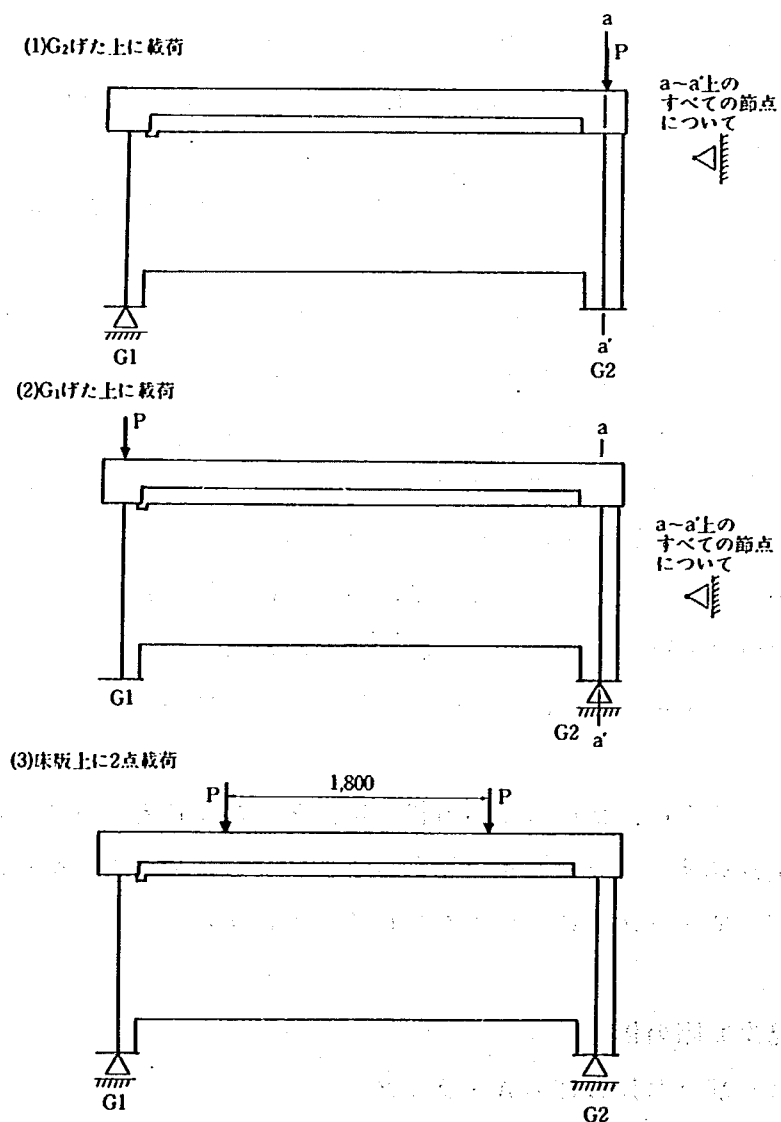
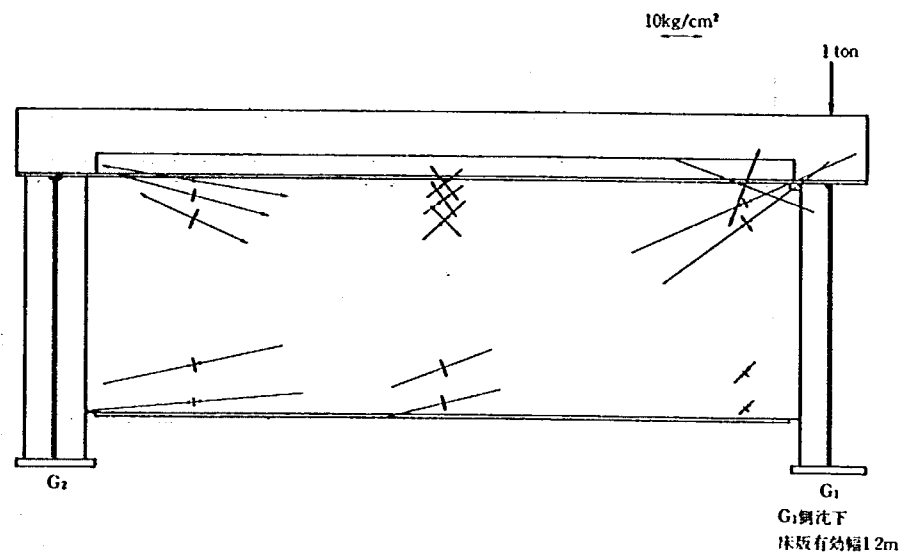
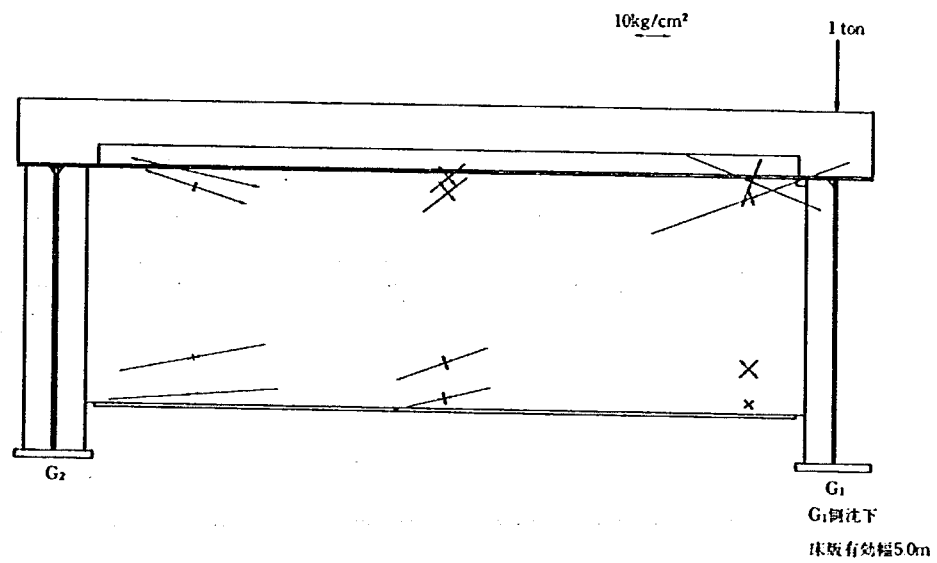


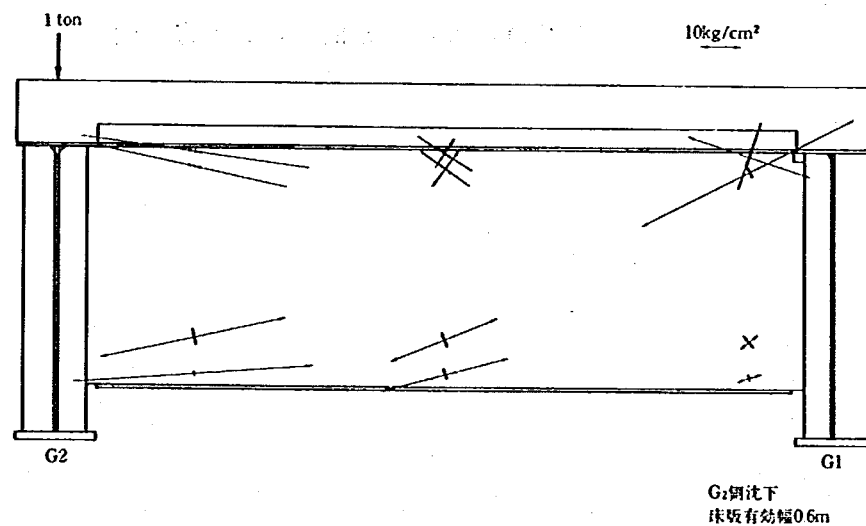
図 - 5.4 載荷位置と支持条件(解析Ⅱ)



図－ 5. 5 (1) F E M解析による横げたの主応力図



図－ 5. 5 (2) F E M解析による横げたの主応力図



図－ 5. 5 (3) F E M解析による横げたの主応力図

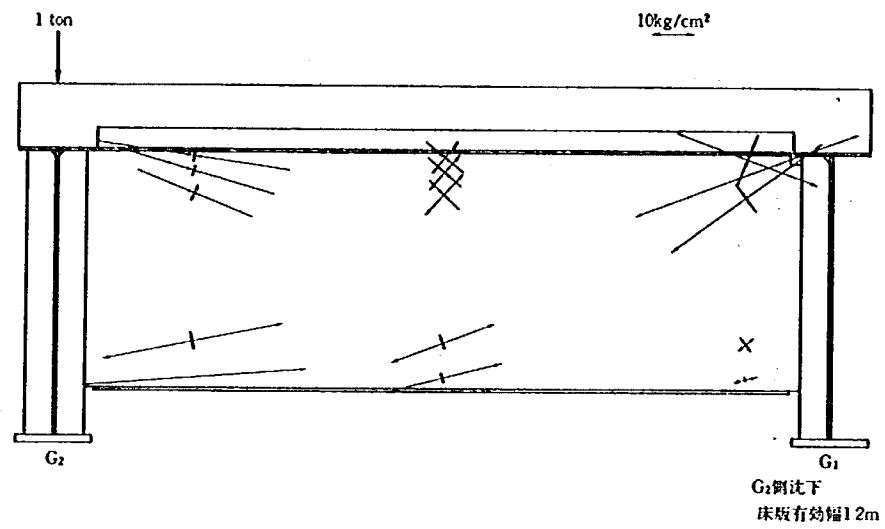


図 - 5. 5 (4) F E M解析による横げたの主応力図

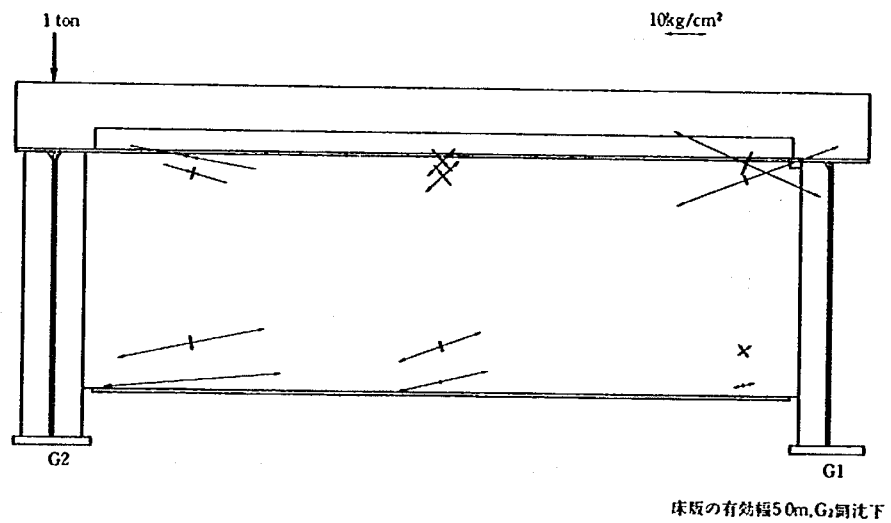


図 - 5. 5 (5) F E M解析による横げたの主応力図

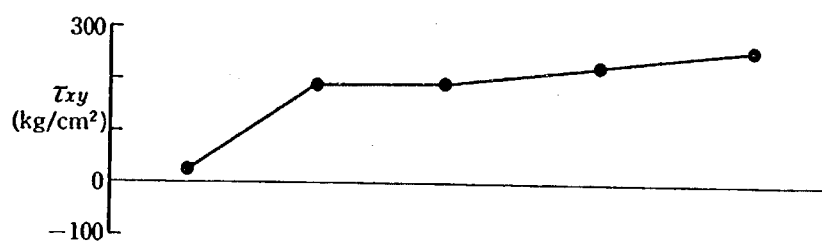
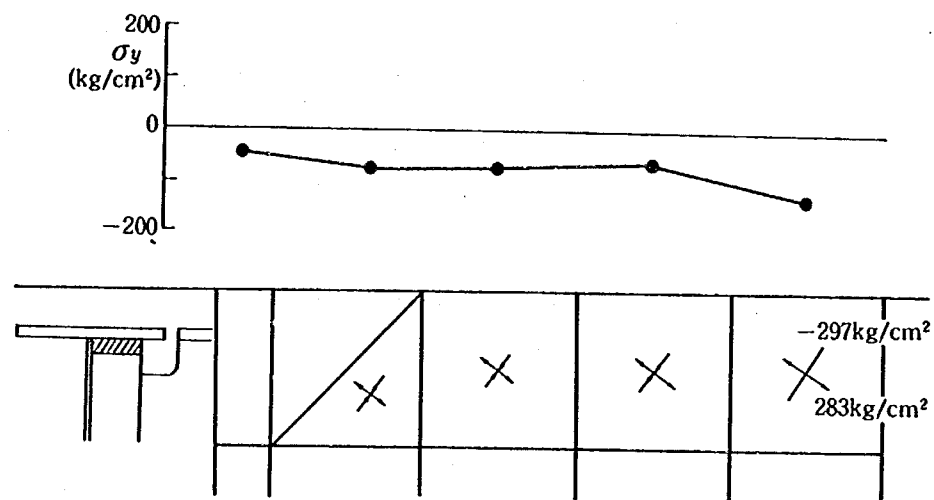


図- 5. 6 (1) 端げたスチフナ上端の応力分布 (ケース 3)

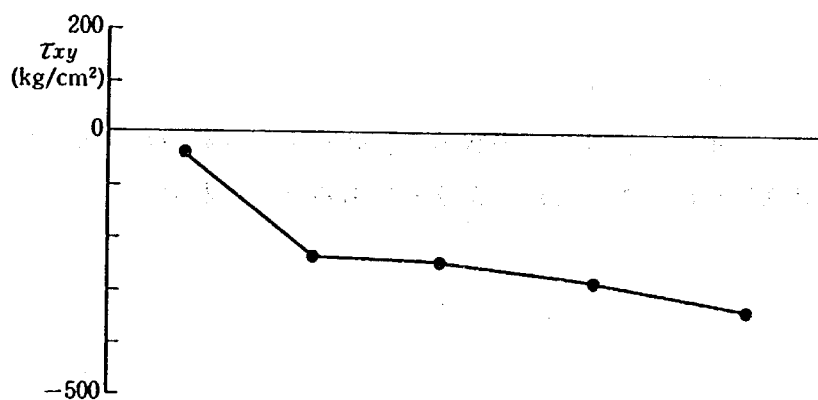
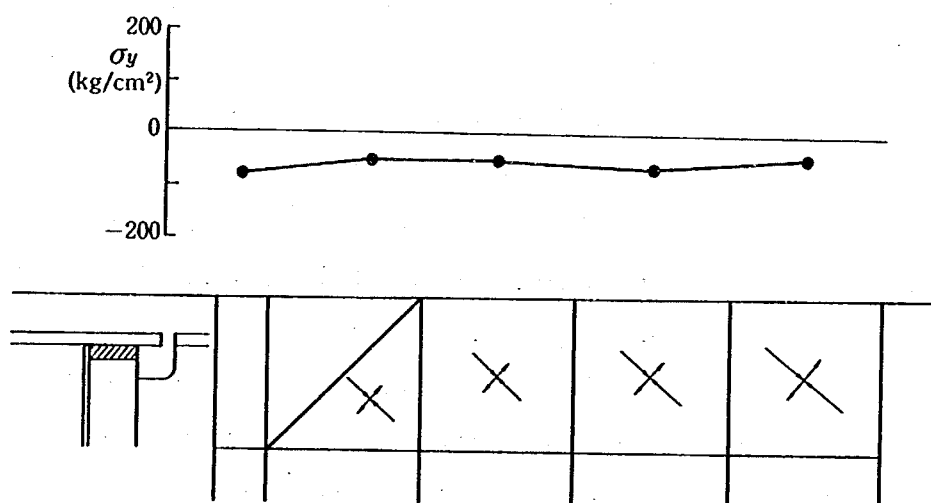


図- 5. 6 (2) 端げたスチフナ上端の応力分布 (ケース 1)

方向応力 (σ_y) および溶接線方向のせん断応力を示したものである。図-5.6(1)はケース3について計算したものであるが、要素が粗いためAクラック始点付近の応力集中は明確に出ていないが、スカーラップ付近の応力の状況は計測結果とよく一致している。図を見るかぎり、Aクラックに垂直な応力はそれ程大きくなく、かつ圧縮側である。これに対し、クラックに沿う方向のせん断応力がやや大きくなっている。

図-5.6(2)は、ケース1についてG1げたが相対的に沈下するとして計算したものであるが、横げたの応力と同様、計測値と応力の符号が逆になっており、検討の対象とはなり難い。

損傷部付近の応力状態をさらに詳しく知るため、図-5.7(1)の黒塗りの部分を拡大し、図-5.7(2)の要素分割を用いたFEM解析を行った(解析Ⅲ)。ここで、上フランジと接する部分を固定とし、解析Ⅱで求めた接点応力を入力として用いた。載荷ケースはケース3のみである。

計算結果を図-5.8(1)に、計測値を5.8(2)に示す。ここでは、Aクラックの始点付近の応力集中を見ることができる。最大圧縮応力の方向が少し計測値と異なるが、ほぼ鉛直方向であること、2軸圧縮になっていることについては一致している。一方、スカーラップ付近の応力についてもその方向および符号が計測値とよく一致している。ただし、応力の大きさは、計測値に比べ半分以下となっている。したがって、補剛材と上フランジの溶接部には、計算値よりもかなり大きなせん断応力が作用しているものと思われる。

以上の結果からAクラックの発生および伝播の状況について推測すると次のようになる。

- i) クラックの発生は、すみ肉溶接中げた側端に生じる大きな圧縮応力、および連続する支間を車両が通過する際に生ずる比較的小さな引張り応力により形成される繰返し応力に、溶接時の残留応力が加わったために生じたものと考えられる。
- ii) ある程度の大きさに成長したクラックは、背後のせん断応力により溶接線に沿って伝播したものである。この部分で主引張り応力と直角な方向に伝播しなかったのは、すみ肉溶接ルート部の応力集中の影響によるものと考えられる。

同じように、クラックの発生は多いが、大きな伝播を見ていない対傾構-主げた接合部のクラックについて考えてみると、対傾構の場合には、伝播に必要なせん断力、すなわち対傾構が主げたを引張る力が、横げたの場合程大きくないものと推測される。これは、計測の結果とも一致する。

3.6.2 Bクラック、Cクラック

B、Cクラック発生箇所付近の応力状態は、計測値と計算値がよく一致しており、それぞれの発生原因は計測結果のところで述べた通りであろうと思われる。

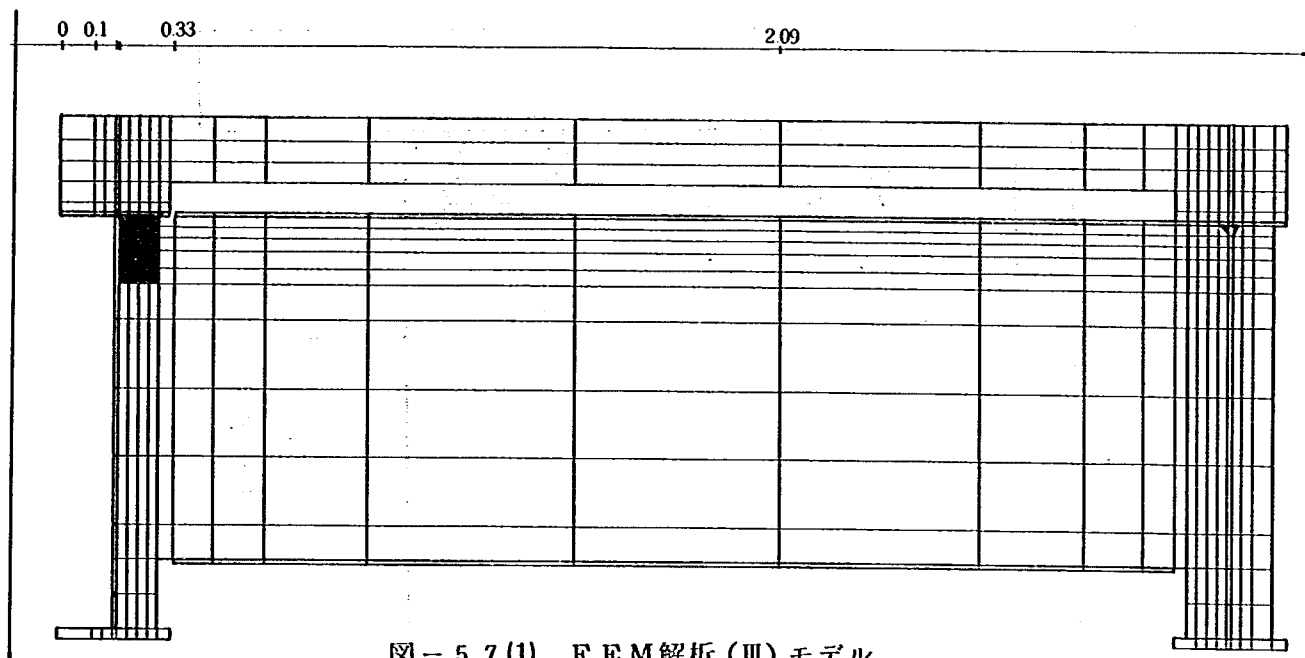


図-5.7(1) FEM解析(Ⅲ)モデル

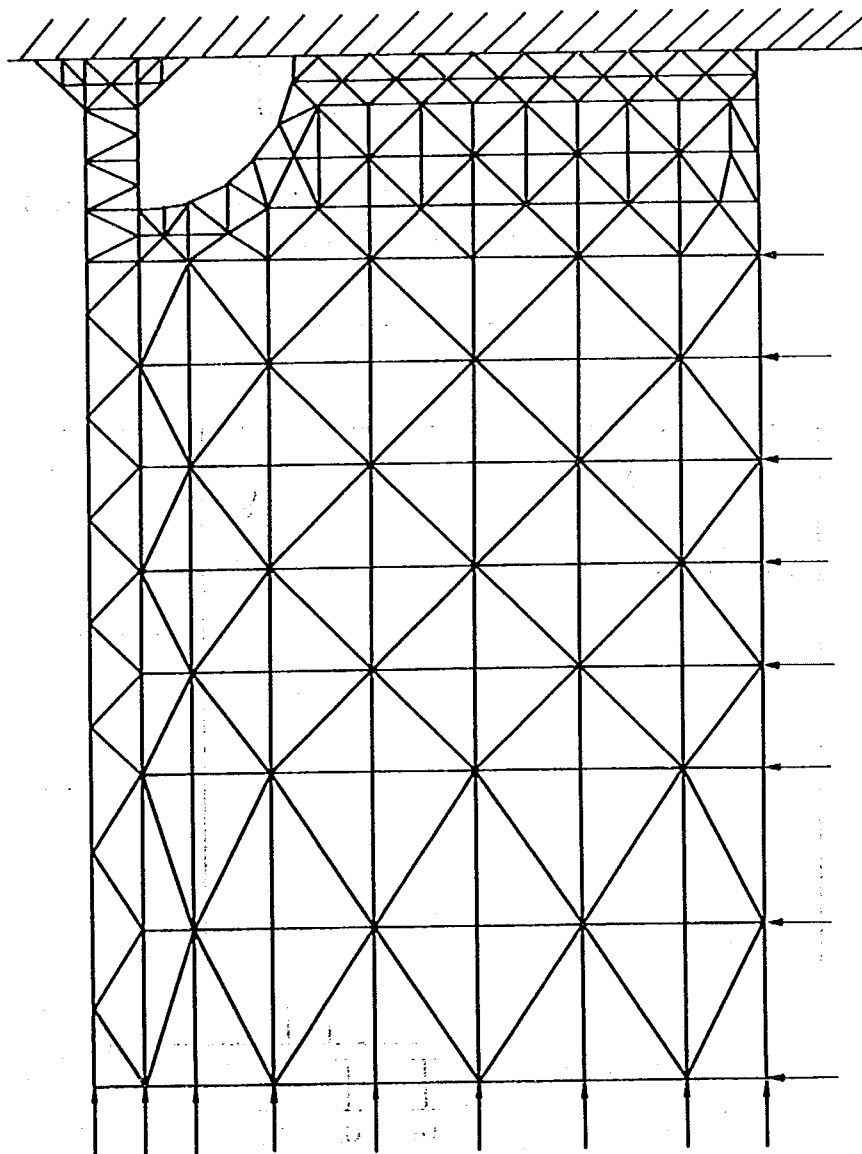


図-5.7(2) FEM解析(Ⅲ)モデル

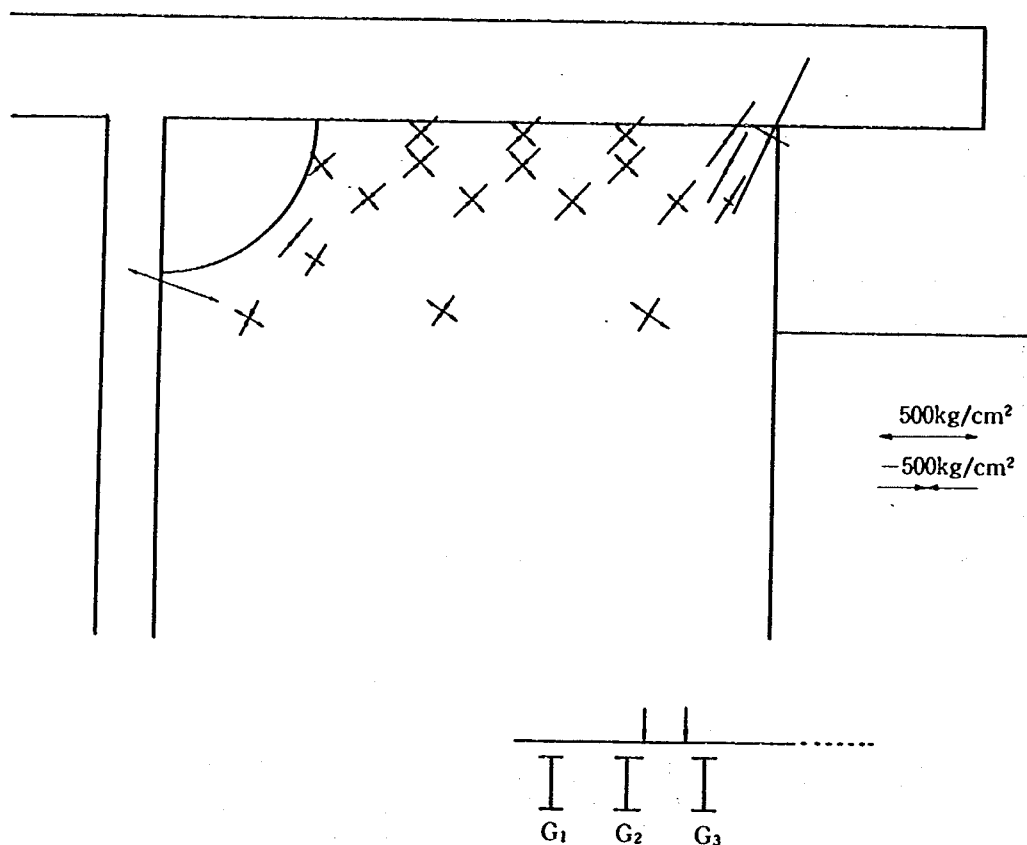


図- 5. 8 (1) 端げたスチフナ上端付近の主応力分布 (詳細 F E M)
($G_2 \sim G_3$ 間, 載荷ケース 3)

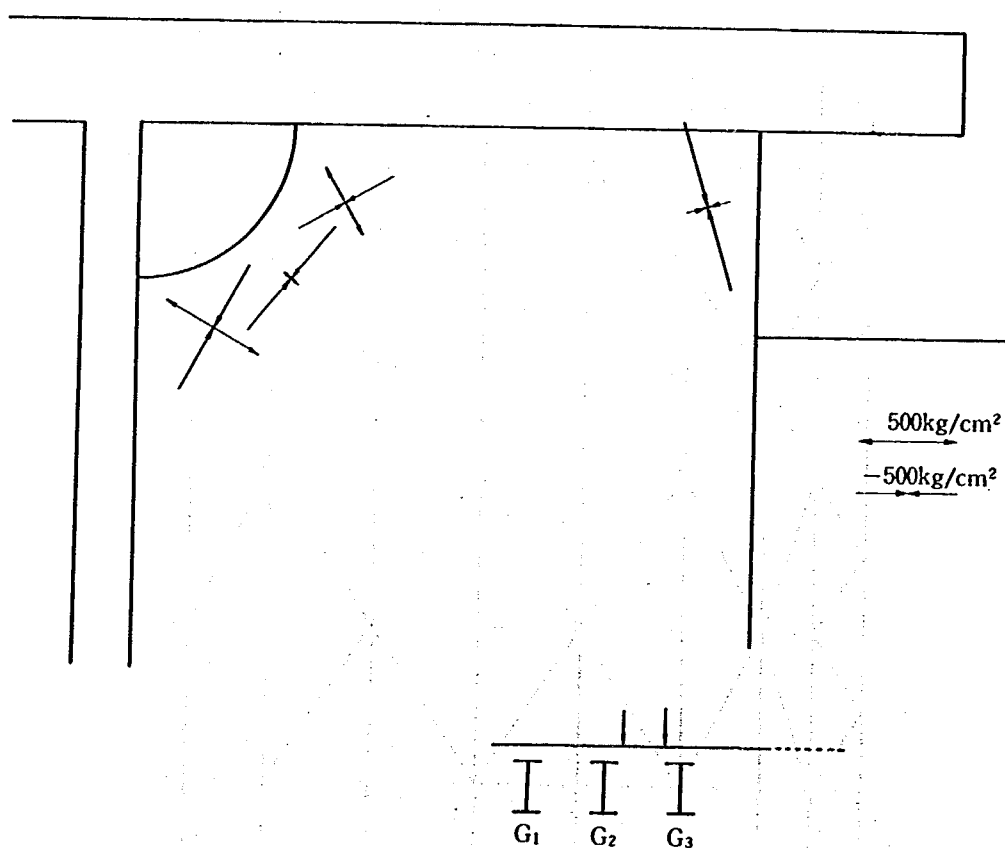


図- 5. 8 (2) 端げたスチフナ上端付近の主応力分布 (実験値)
($G_2 \sim G_3$ 間, 載荷ケース 3)

4. 各種補強工法の効果について

4.1 検討の方法

補強の効果の検討には、解析Ⅱで用いたモデルを使用し、適宜要素を加える形で原形の場合と比較した。

3章までの結果によれば、CクラックとBクラックのほとんどは、Aクラックの貫通後に生じたものと考えられるので、補強の効果としては、Aクラックおよび単独で発生したBクラックを防ぐことが重要であると考えた。具体的には、Aクラックの発生要因と考えられる、補剛材—上フランジ溶接端部の鉛直応力とその背後のせん断応力を軽減すること、およびBクラック単独発生の要因と思われる、スカーラップ円周に沿った応力を小さくすることに重点をおいた。

ここでは、大規模な損傷、すなわちAクラックの貫通およびB、Cクラックについては現場溶接により原形復旧した状態を前提とした解析を行った。

4.2 補強工法の種類

ここで検討する補強工法は、次に示すものおよびその組合わせである。

(1) T形材の補剛材背面への添加

下図のように、T断面の部材を補剛材背面のウェブにボルトにより添接し、横げた接合部の曲げ剛性を高めようとするものである。

上端を上フランジに溶接する方法と、現場溶接を避けて溶接しない方法とが考えられる。

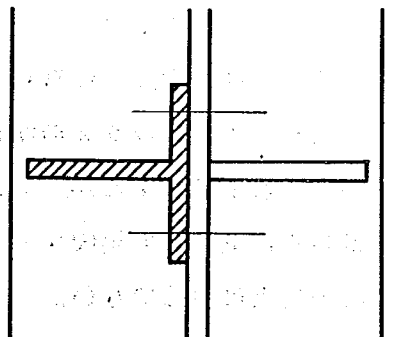
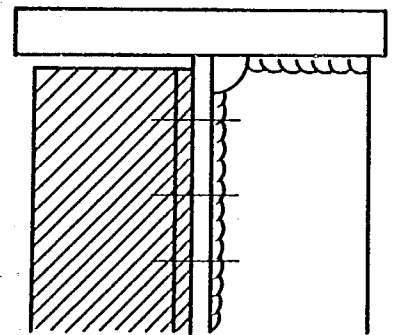
(2) 主げた上フランジと横げた上フランジの連結

横げた上フランジに生じる引張り力を、主げた上フランジに直接伝達し、補剛材の負担を軽減しようとするものである。

(3) 一部リベットの撤去

横げたウェブと補剛材に取付けているリベットのうち、上端の2本を撤去しようというもので、リベットのゆるみを生じた箇所には、クラックがわずかししか生じていないということ(1章参照)からの発想である。

以上のほか、現在工事が完了している縦げた増設による影響についても検討の対象とした。



4.3 各補強工法の効果

図-6.1(1)~(11)および6.2(1)~(11)に、補強を施した場合の横げた取付け部周辺の応力状態を示した。とくに、図-6.2は、補剛材と上フランジの接合部に注目し、鉛直方向

応力および溶接線方向のせん断応力を示したものである。

以下は、それぞれについて説明する。

① 補強なし（図－6.1(1), 6.2(1)）

原形の状態でG2げたが沈下した場合の応力状態であり、比較用に用いる。

② T形材取付け、フランジとの溶接はしない。（図－6.1(2), 6.2(2)）

鉛直方向の応力はかなり減少している。また、せん断応力についても20%程度減少しており、一応の効果は期待できる。

③ フランジの連結（図－6.1(3), 6.2(3)）

横げたからの横力が、直接主げた上フランジに伝達されるため、せん断応力はほとんどゼロに近づいている。値は小さいが、ほぼ一定の鉛直方向応力が残っているが、解析上の支点条件の影響であることも考えられる。

き裂の発生、伝播の要因はほとんど取除かれているものと思われる。

④ ②と③の組合せ（図－6.1(4), 6.2(4)）

③の場合に比べ、鉛直方向応力がさらに減少しており、補強の効果はより確実と思われる。

⑤ T形材の取付け、溶接（図－6.1(5), 6.2(5)）

横げた取付け部と上フランジとの間の接合がより剛となるため、この部分に作用する力が増大しているように見受けらる。鉛直方向応力の絶体値は減少しているが、逆に引張り応力となっている点に不安がある。また、せん断応力についてはかなり増加しており、補強法としては逆効果となる可能性が高い。さらに、補剛材と主げたウェブ間の引張り応力が非常に大きくなっており、Bクラックの単独発生を促すおそれもある。

⑥ ⑤とリベット撤去の組合せ（図－6.1(6), 6.2(6)）

リベット2本分に相当する、横げたの一部（図－6.1(6)斜線部）の弾性係数を通常の1/100として計算したものである。せん断応力の減少という面では、リベットを撤去しない場合よりもやや良好であるが、鉛直方向の応力成分が、端部に著しく集中する傾向が見られる。したがって、補強方法として妥当だとは考えられない。

以上の結果より、クラックの発生および伝播を完全に防ぐためには、何らかの方法で主げたと横げたのフランジを連結する必要があるものと考えられる。また、T形材を背面の補剛材として取付け、上フランジに溶接しない方法にも多少の効果が期待される。しかし、他の方法については、逆の効果となるおそれが強く、採用すべきではないと考えられる。

次に縦げた増設の影響について見てみることにする。

図－6.1および6.2の(7)は、①の状態に縦げたを挿入したものである。鉛直方向応力については若干減少するが、せん断応力は逆に増加する傾向がある。したがって、主げた間の沈下量の差に主として起因すると考えられる、横げた一端げた取付け部の損傷に対しての縦げた増設の効果は明確でない。

図－6.1および6.2の(8)および(9)は、両主げたを単純支持し、床版上に輪荷重を載せたもの

である。縦げたを増設した場合には、鉛直方向応力、せん断応力、さらに主応力そのものも20～30%減少している。したがって、床版の変形が主な要因となったと考えられる、対傾構取付け部の損傷に対しては、縦げたの増設は良い形で影響するものと期待される。

図-6.1および6.2の(10)および(11)は、前の2つのケースを重ねたもの、すなわち、床版上に輪荷重を載せ、かつそれによりG2げたが沈下すると仮定したものである。これは、現実の荷重や支持条件と大きく異なるため、応力の絶対値を問題にすることはできないが、縦げたを増設した場合に、やや有利な応力状態となっていることは指摘できる。

以上の比較により、縦げたの増設が横げた取付け部分の損傷に及ぼす影響を予想することは難しいが、対傾構取付け部については多少の補強効果を期待できるものと考えられよう。

図-6.1 縦げたの増設による応力分布の変化 (単位: kg/cm^2)
(対傾構取付け部)

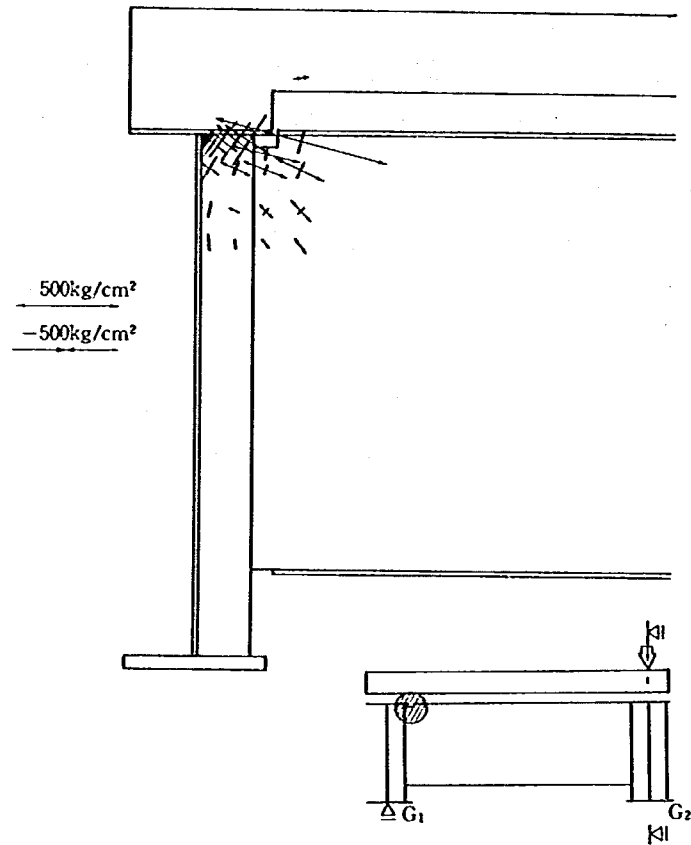


図 - 6. 1 (1) 補剛材，横げたの主応力分布図
(補強なし， G_2 上に載荷， G_2 げた沈下)

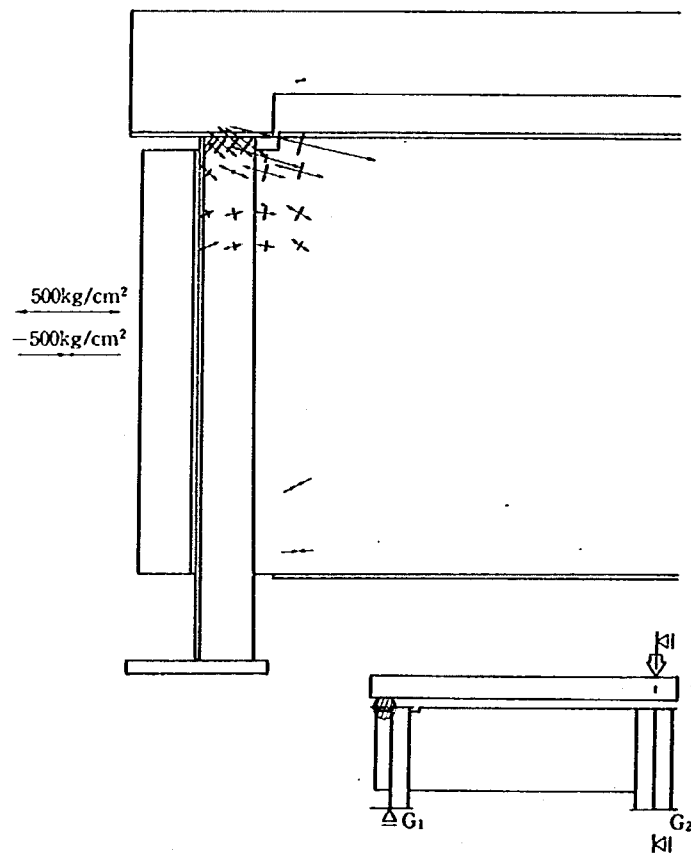


図 - 6. 1 (2) 補剛材，横げたの主応力分布図
(T 形材取付け)

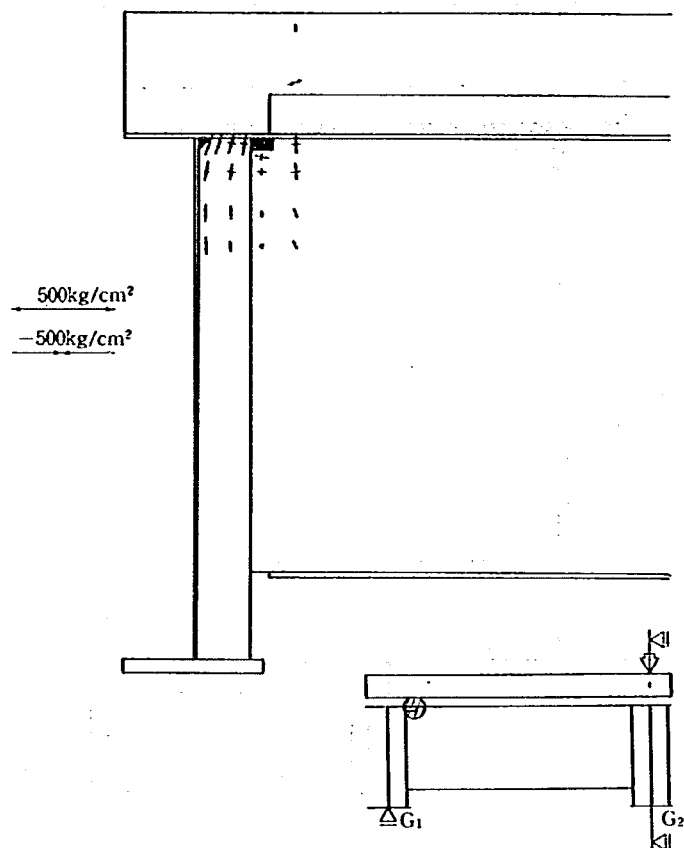


図-6.1(3) 補剛材，横げたの主応力分布図
(フランジ連結)

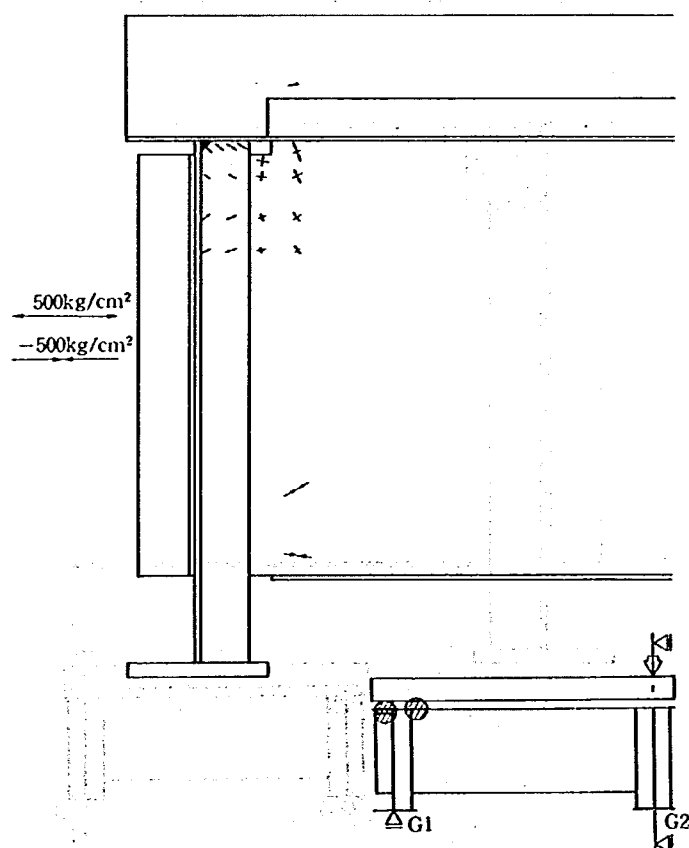


図-6.1(4) 補剛材，横げたの主応力分布図
(フランジ連結，T形材取付)

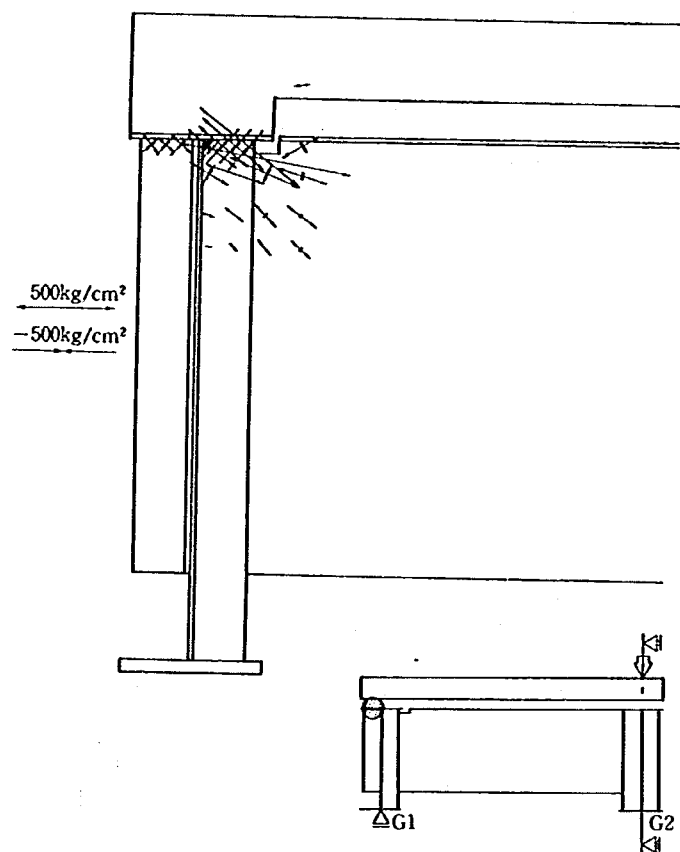


図 - 6.1 (5) 補剛材，横げたの主応力分布図
(T 形材取付け・溶接)

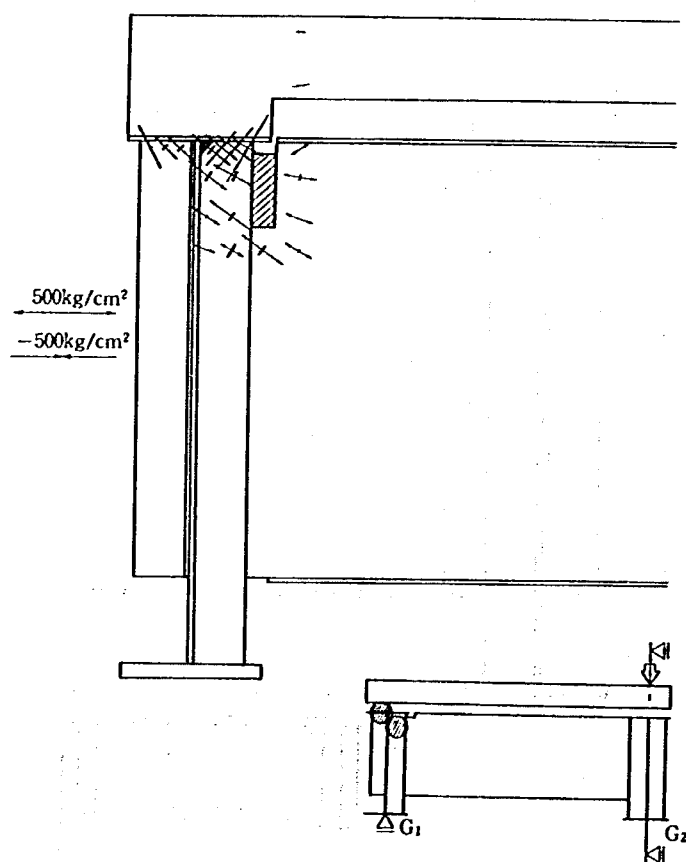


図 - 6.1 (6) 補剛材，横げたの主応力分布図
(T 形材取付け・溶接，リベット撤去)

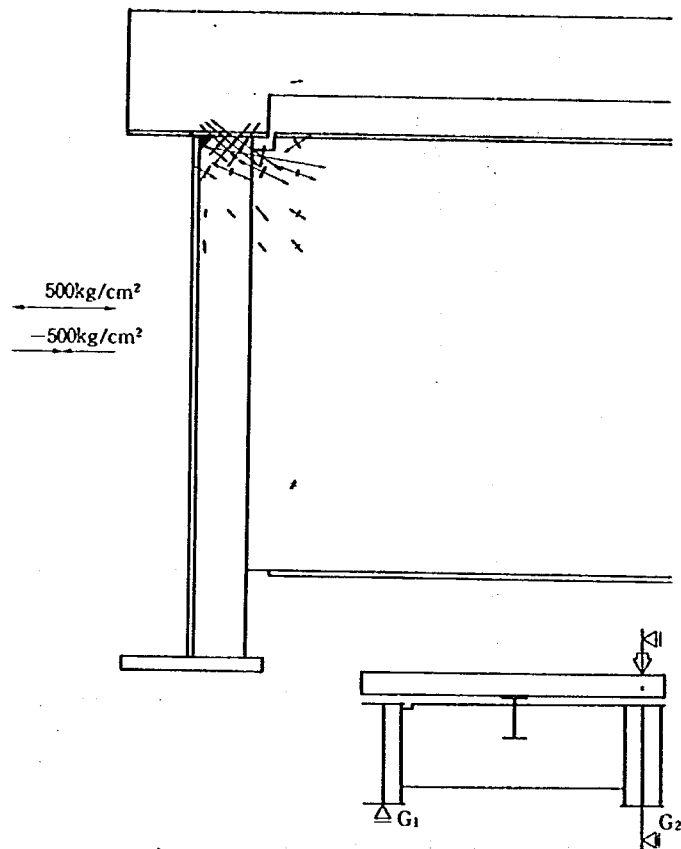


図 - 6. 1 (7) 補剛材，横げたの主応力分布図
(縦げた有)

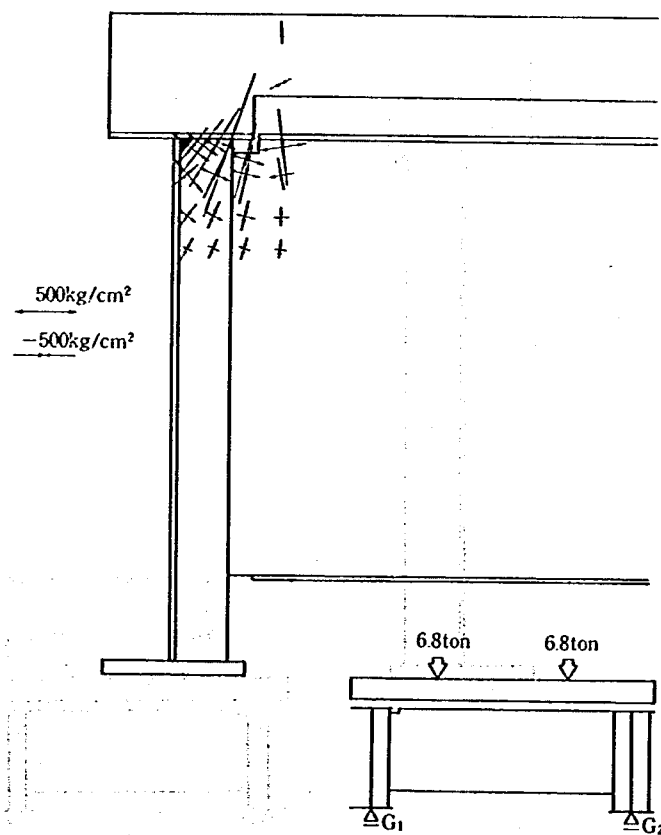


図 - 6. 1 (8) 補剛材，横げたの主応力分布図
(床版上に載荷，主げた沈下なし)

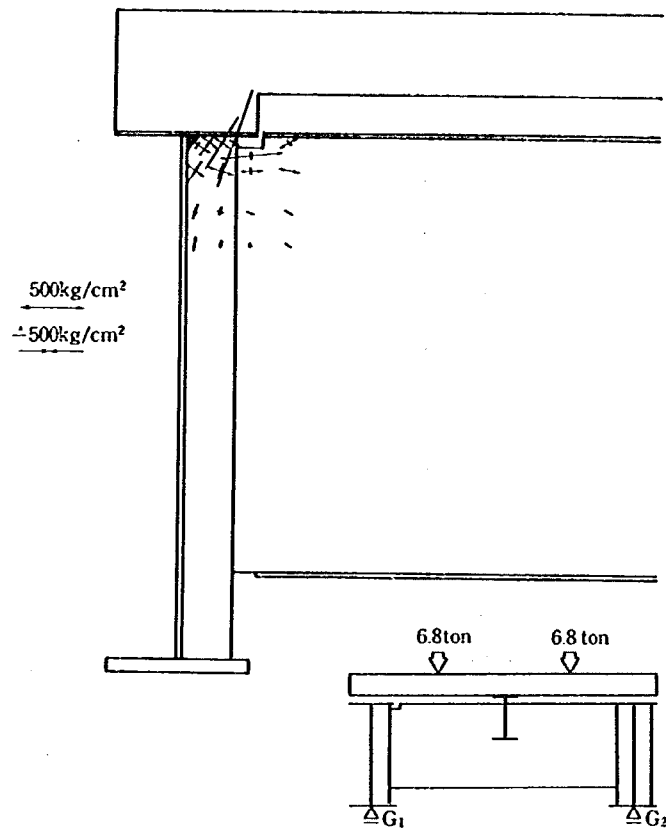


図 - 6. 1 (9) 補剛材，横げたの主応力分布図
(縦げた有，床版上に載荷，主げた沈下なし)

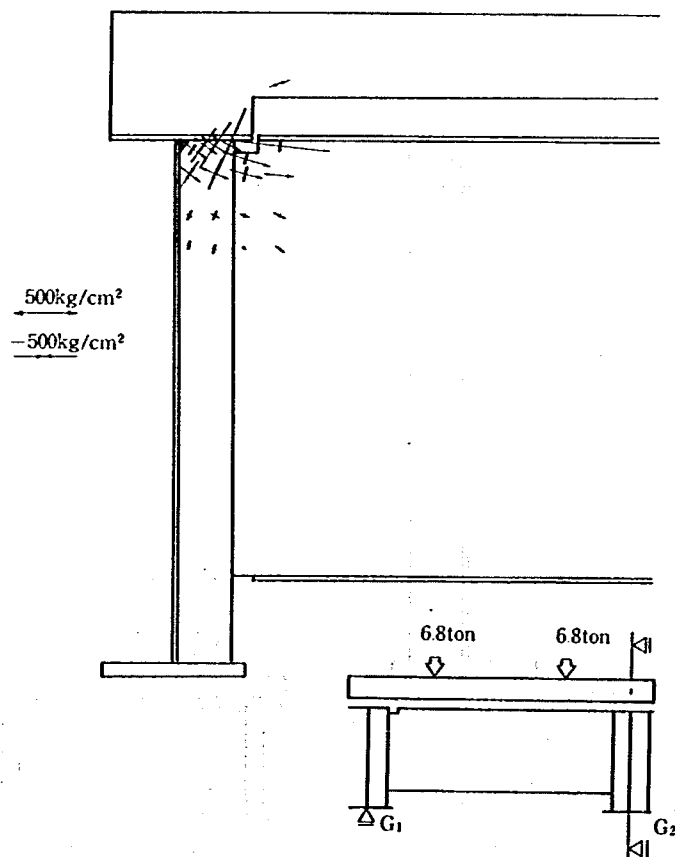


図 - 6. 1 (10) 補剛材，横げたの主応力分布図
(床版上に載荷，G 2 げた沈下)

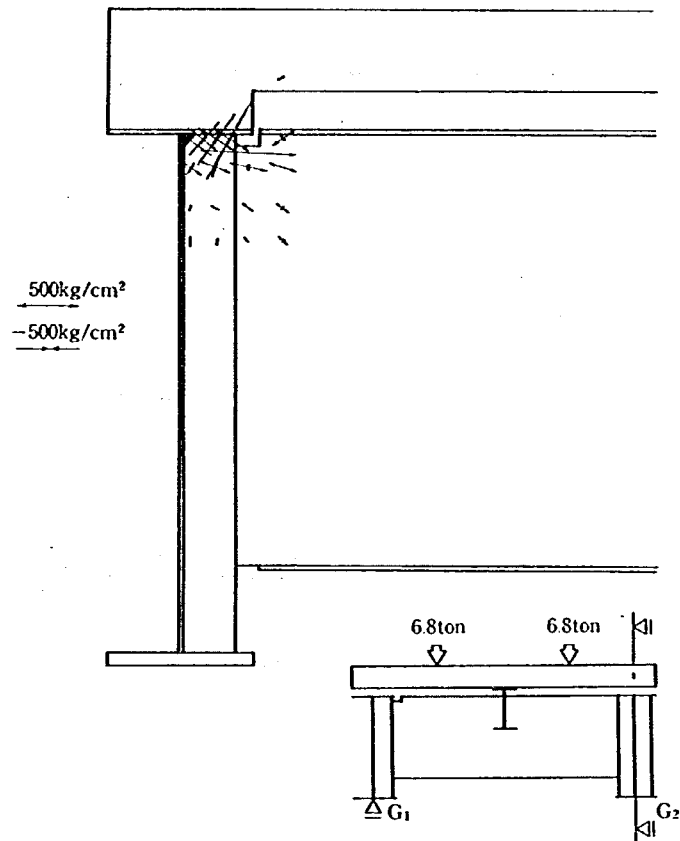


図 - 6. 1 (1) 補剛材，横げたの主応力分布図
(縦げた有，床版上に載荷，G 2 げた沈下)

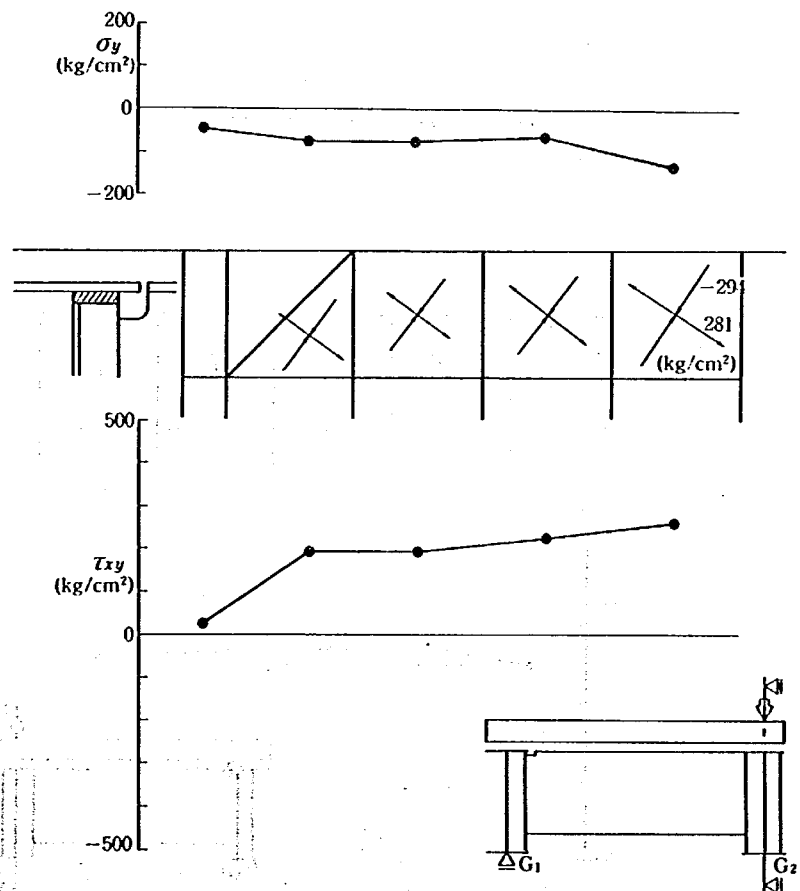


図 - 6. 2 (1) 横げた取付け部周辺の応力
(補強なし)

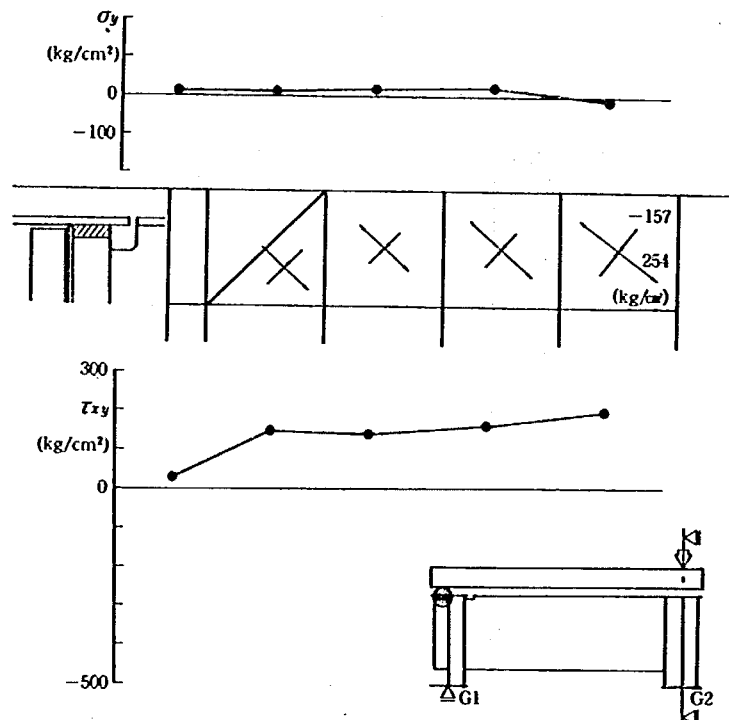


図 - 6. 2 (2) 横げた取付け部周辺の応力
(T 形材取付け)

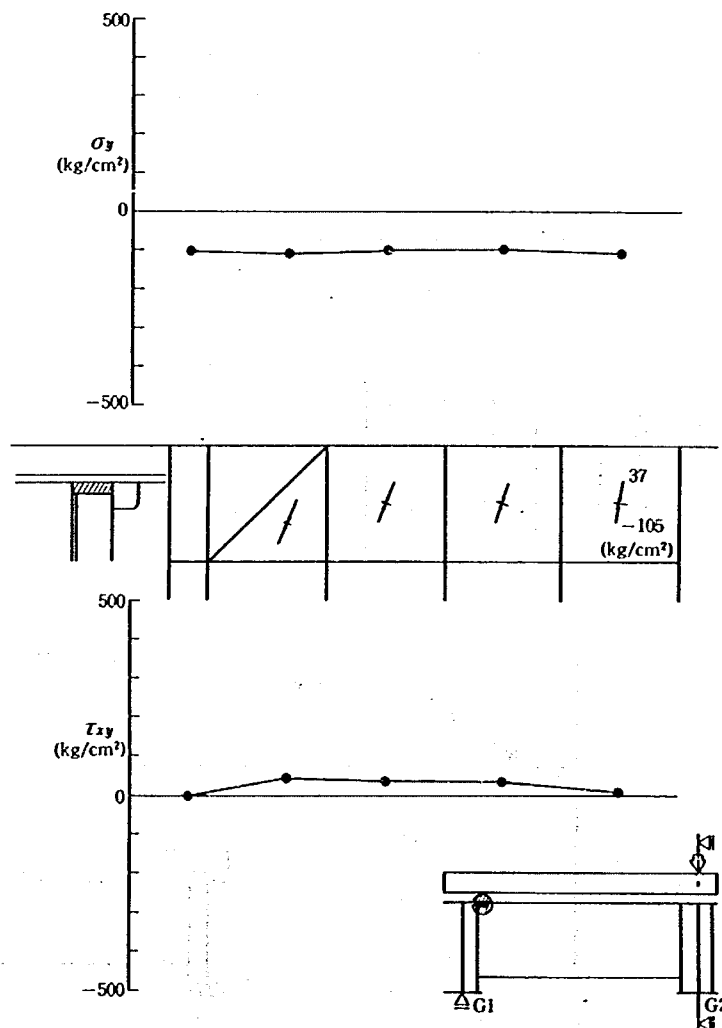


図 - 6. 2 (3) 横げた取付け部周辺の応力
(フランジ連結)

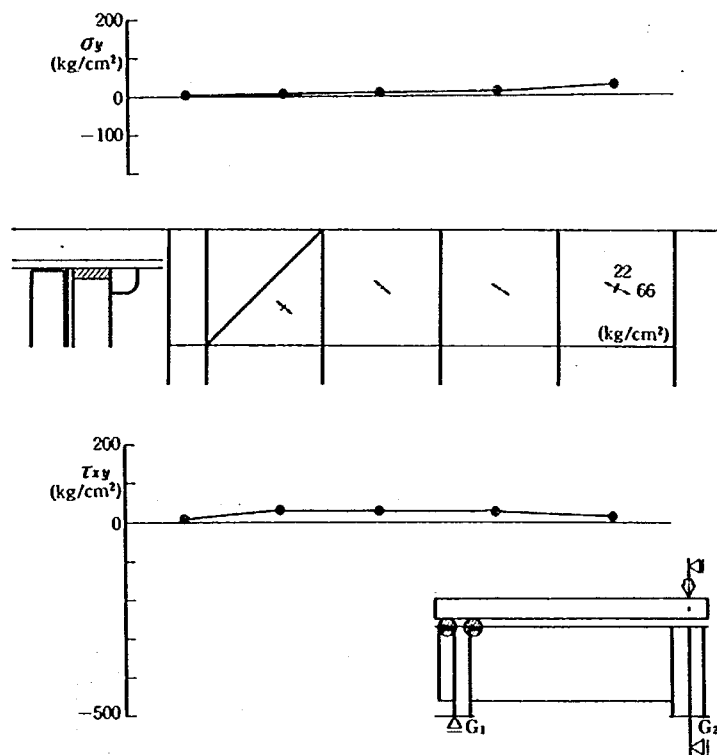


図 - 6. 2 (4) 横げた取付け部周辺の応力
(フランジ連結, T 形材取付け)

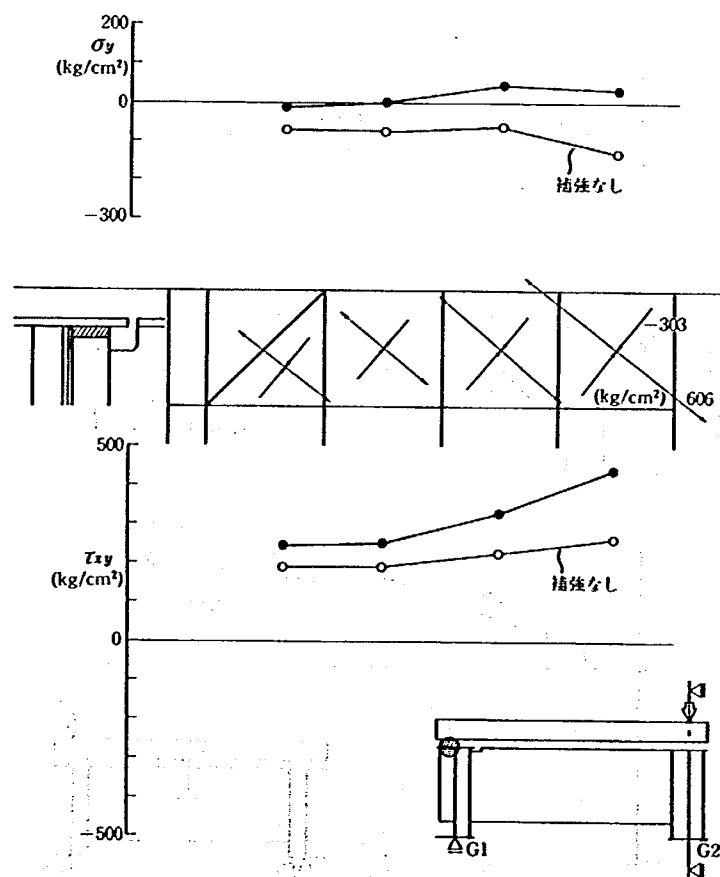


図 - 6. 2 (5) 横げた取付け部周辺の応力
(T 形材取付け・溶接)

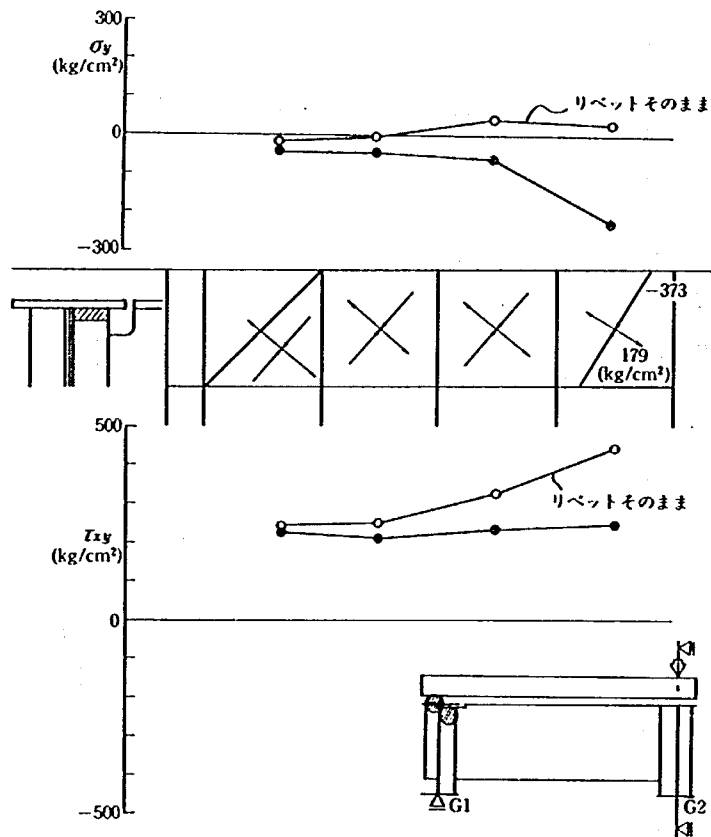


図- 6. 2 (6) 横げた取付け部周辺の応力
(T 形材取付け・溶接, リベット撤去)

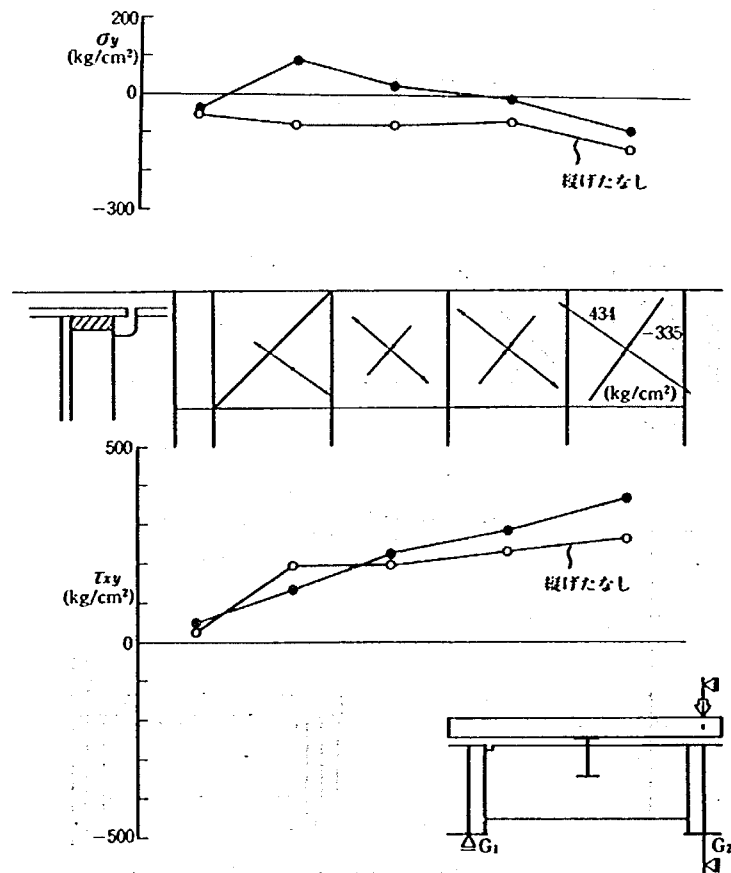


図- 6. 2 (7) 横げた取付け部周辺の応力
(縦げた有)

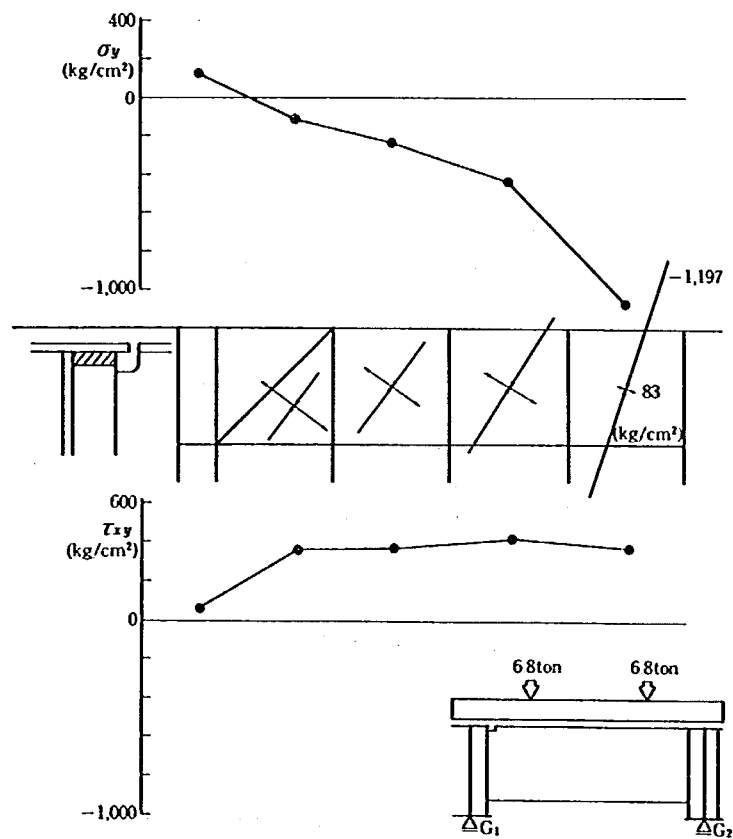


図 - 6. 2 (8) 横げた取付け部周辺の応力
(床版上に載荷)

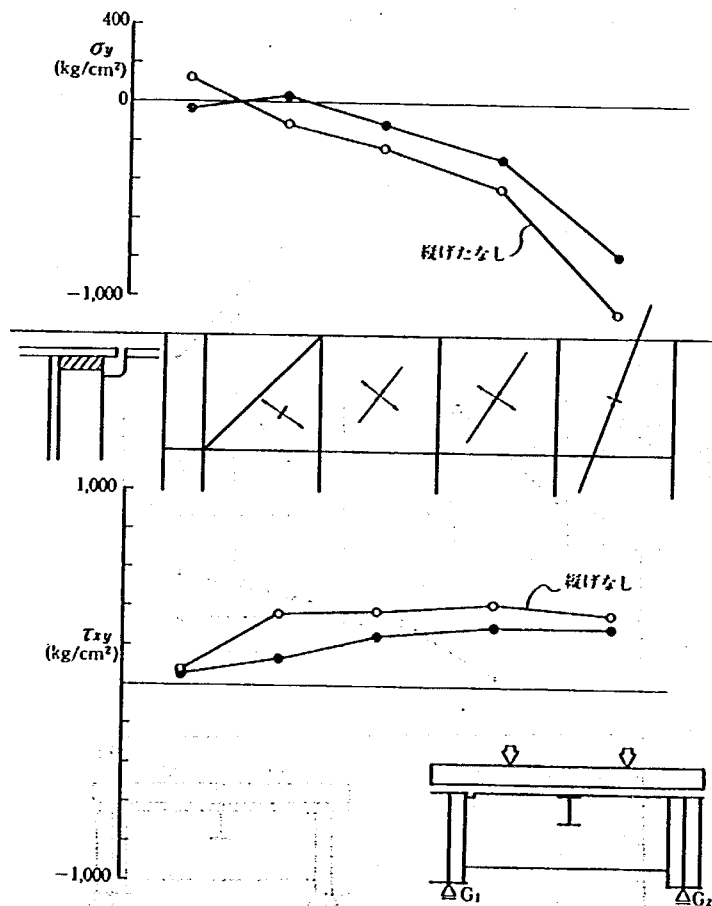


図 - 6. 2 (9) 横げた取付け部周辺の応力
(縦げた有, 床版上に載荷)

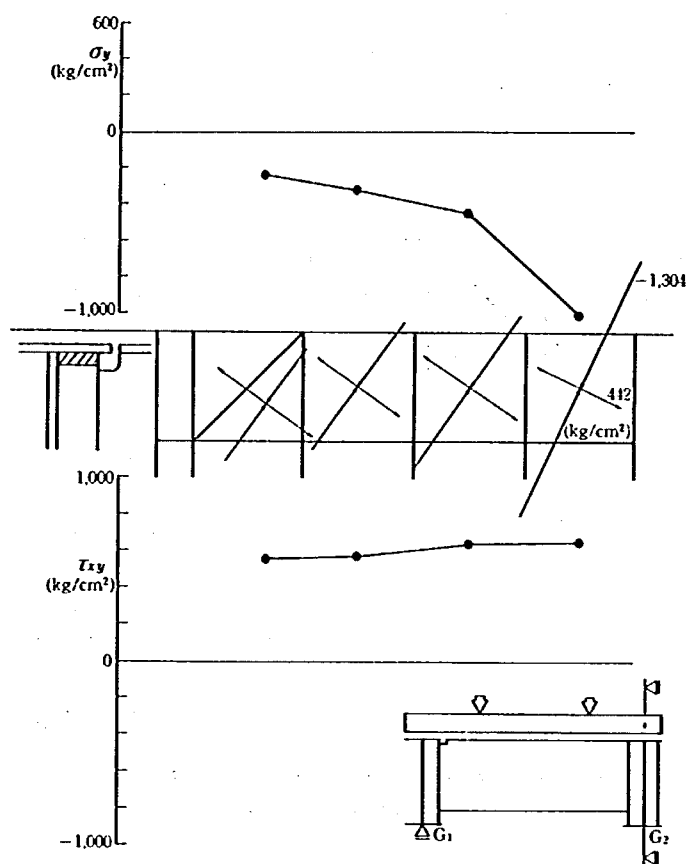


図- 6. 2 (10) 横げた取付け部周辺の応力
(床版上に载荷, G_2 げた沈下)

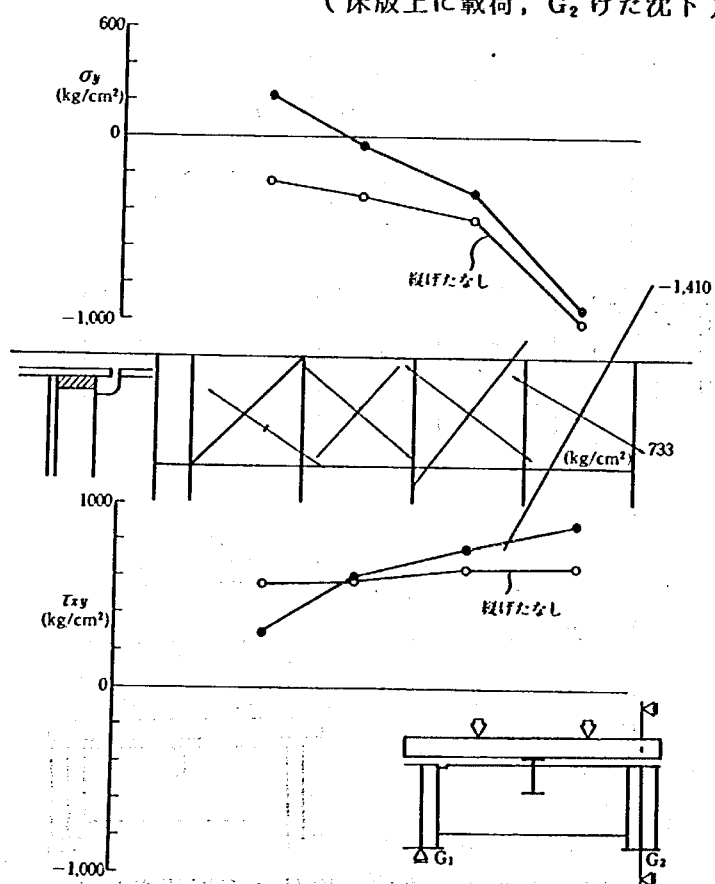


図- 6. 2 (11) 横げた取付け部周辺の応力
(縦げた有, 床版上に载荷, G_2 げた沈下)

5. 結 言

共和高架橋の載荷試験と有限要素法を用いた解析を行った結果、その疲労損傷原因と補強方法について以下に述べる点を明らかにすることができた。

- (1) 最も疲労損傷のひどいのは、横げた一端主げた取付け部の垂直補剛材上端付近であり、そのほとんどが補剛材と主げた上フランジのすみ肉溶接中げた側端から発生したクラック（Aクラック）である。その他のクラック、すなわち補剛材と主げたウェブのすみ肉溶接のスカーラップ部から発生したクラック（Bクラック）と主げたのウェブと上フランジのすみ肉溶接止端に発生したクラック（Cクラック）は、すべてAクラックが溶接部を完全に切断した後に生じたものと考えられる。したがって、Aクラックの発生を防ぐ対策を考えることが重要である。

また、スカーラップ中間付近に単独に入ったクラックが一例だけあることから、この部分の繰返し応力にも注意する必要がある。

- (2) 載荷試験の結果、Aクラックの発生点付近には、大きな圧縮応力の集中が認められた。動的載荷試験の結果、この応力は車両が連続する隣接支間を通過する際に、圧縮応力の1/10程度の引張り応力となることがわかり、残留応力の存在とともにクラックの発生の原因となったものと考えられる。

また、動的試験より、この部分の応力は、主として主げた間の沈下量の差に起因するものであることが明らかである。

- (3) 解析結果は、G2～G3主げた間に荷重車がある場合の性状を良く表わすことができるが、G1～G2主げた間に荷重車がある場合については、全く計測値と異なる結果を与える。これは、格子げたを解く際に床版の支間直角方向の連続性を無視してしまうためと考えられる。したがって、この種の2次応力問題の検討を行う場合には、全橋レベルの段階から立体FEM等を用いて、橋梁各部材の機能および性質をできるだけ忠実に再現する必要がある。
- (4) 解析の結果によれば、補剛材と上フランジの溶接に沿って、かなり大きなせん断応力が働いており、Aクラックの貫通には、この力が関与しているものと考えられる。
- (5) 解析による補強工法の検討の結果、Aクラックの発生を確実に防ぐには、主げたと横げたのフランジを連結することが必要であることが明らかである。
- (6) 縦げたの増設がこの部分に及ぼす影響は、今回の検討の範囲では明確ではない。
- (7) 以上より、横げた一端主げた取付け部については、微小のもの以外は原形復旧し、特に被害の程度の大きい箇所についてはフランジの連結を、他の部分についても今後の追跡調査を行う必要がある。
- (8) 次に、対傾構と主げた（中げた）の取付け部に発生した、Aクラックと同等のクラックについて述べる。このクラックは、発生数が多いが微少なものであり、クラックの成長が非常に遅いかすでに停留している可能性がある。
- (9) 計測および解析の結果、Aクラックの発生位置には、車両の通過するレーンにより、かなり大

きな引張りおよび圧縮応力が交互に発生し、クラックの発生する条件としては、横げた部よりも揃っている。しかし、溶接線に沿ったせん断力は、横げたの場合に比べて非常に小さい。したがって、これらのクラックは、今後も非常に遅いスピードで成長するか、あるいは停留してしまうことが考えられる。

- (10) 動的載荷試験の結果、この部分には輪荷重の影響が直接現われており、横げたの場合と違って、床版のたわみにより生じる2次応力が主要となったものと考えられる。
- (11) 解析の結果、縦げたの増設は、輪荷重による床版のたわみの影響を減ずる傾向がある。したがって、対傾構部の損傷は、いたずらに溶接等の手を加えず、追跡調査を続けるのが適当であると考えられる。

共 和 高 架 橋
載 荷 試 験 報 告 書

土木研究所資料第 2123 号
昭和 59 年 6 月 (1984)
建設省土木研究所橋梁研究室
佐伯彰一，西川和廣，
滝沢 晃

キーワード； 共和高架橋， 載荷試験， 疲労損傷， 補強工法

要 旨

疲労により主げたと横げたおよび対傾構の取付け構造に損傷を受けた「共和高架橋」の載荷試験および解析を行い、クラックの発生原因と補修方法について検討したものである。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
橋梁研究室
御中

No. 021

No. 021

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第2123号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

