

曲線 I 桁橋構造詳細部の局部応力挙動に関する静的載荷実験

Static Tests on Local Stress Behaviors of Structural Details
for Horizontally Curved I-Girder Bridge

中井 博*, 北田俊行**, 明橋克良***, 矢野直樹****

By Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Katsuyosi AKEHASHI and Naoki YANO

Presented in this study describes an experimental and analytical approach on the local stresses induced to the structural details such as junction parts of lateral gusset and rib plates connecting the flange plates of main girder and floor beam for a curved I-girder bridge. Statical tests on a multiple curved twin I-girders bridge model was carried out through various loading conditions. The test results are compared with the analytical ones for their structural details by means of finite element method. Then, the static behavior of structural details for the curved I-girder bridge are discussed herein.

1. まえがき

都市内の高速道路橋では、立地条件の制約から道路線形が複雑化し、その結果、鋼曲線桁橋が建設される機会が多くなってきている。この種の曲線桁の解析法、およびその力学的特性の解明に関する研究は、これまで数多く報告されてきている。しかし、構造詳細部を設計する際に重要な構成部材間の力学的相互作用と局部応力挙動とは、まだ十分に把握されていない。

種々な断面形状をもつ桁橋のうち、並列直線 I 桁の疲労損傷事例によると、主桁と横桁、あるいは対傾構との取合い部、および桁端切欠部などのいわゆる二次部材に多くの亀裂が発生している^{1), 2)}。したがって、より複雑な構造詳細部を有する並列曲線 I 桁では、疲労損傷の原因である局部の応力集中に着目した研究をぜひ行う必要があると考えられる。

曲線 I 桁橋に特有の静力学的特性のうち、疲労強度に影響を与えるものとしては、

- i) 腹板が曲率を有しているため、シェルのな挙動を呈し、フランジと腹板との溶接部には、面内の曲げ応力のほか、文献3)で示されたように、面外の曲げ応力が常時発生する。
- ii) 主桁の曲率によってフランジ面内に面内力が発生し、その合力は、横桁、対傾構、および横構の取付け部に集中力として伝達される。そのとき、図-1に示す点A、およびBの近傍の部材には、大きな面外曲

*	工博	大阪市立大学	教授	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
**	工博	大阪市立大学	助教授	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
***	工修	銚子横河橋梁製作所	研究所		(〒260 千葉市新港88)
****		大阪市立大学大学院	院 生	工学部土木工学専攻	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

応力が発生する。

iii) 横構、横桁、および対傾構は、地震や風などの水平荷重に抵抗する以外に、主桁間の荷重分配作用や、死・活荷重などの主荷重によって生じるねじりモーメントに抵抗する役割をもっている。そのため、横構は、一次部材として設計され、その作用力や、頻度とも、直線 I 桁橋に比べて高い。

などが挙げられる。

そこで、本文は、曲線 I 桁橋のうち、最も基本的な 2 本の I 桁を並列させた供試体を製作し、種々な载荷条件下のもとで静的実験を行うことによって、上述の挙動のうち、残された ii)、および iii) の曲線桁橋として特有力学的挙動が、構造詳細部、とくに横構ガセット取付け部、および横桁下側リブプレートに対して与える影響を解明しようとするものである。

また、ガセット取付け部の部分解析モデルを用いた F. E. M. 解析を行い、実験結果と比較・検討することにより、定量的ではないが、局部応力の定性的な挙動についての考察も試みた。

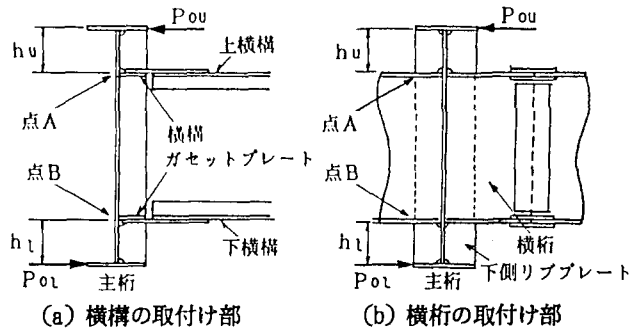


図-1 水平力を受ける横構、および横桁の取付け部

2. 実験供試体および载荷方法

(1) 実験供試体

本研究では、図-2 (a) に示すように、2 本の I 桁を並列させた曲線 I 桁橋の模型を製作した。同図 (b)、および (c) には、それぞれ本研究の着目部位である横構ガセット取付け部、および横桁下側リブプレートの詳細図を示す。

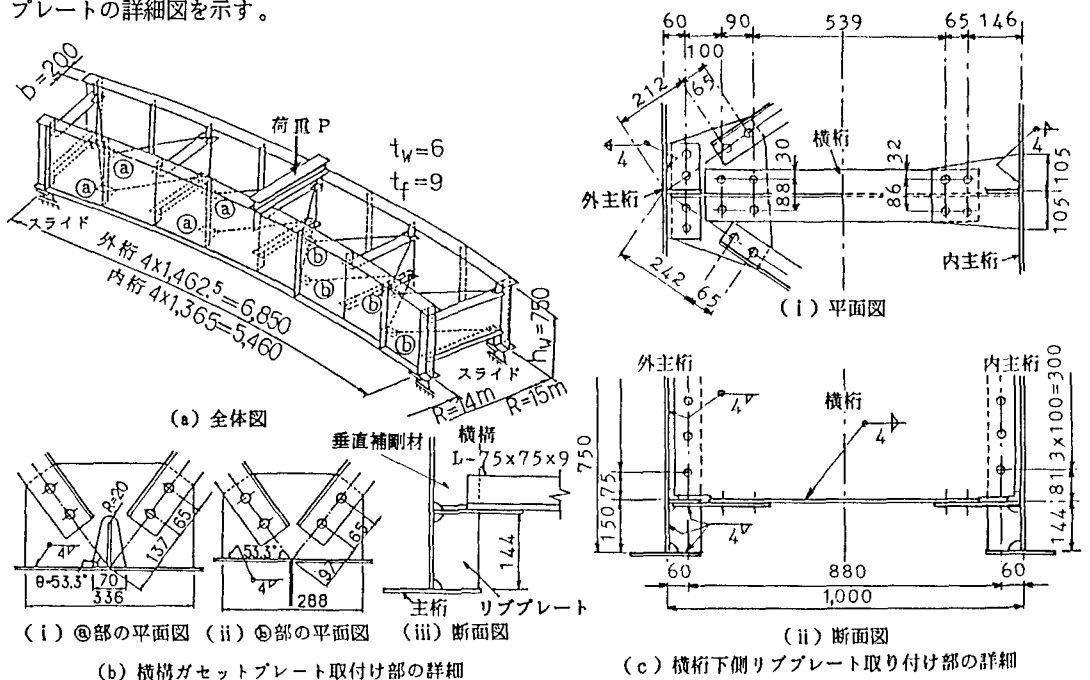


図-2 模型桁の全体図、および詳細図 (寸法単位:mm)

供試体の設計は、阪神高速道路公団・曲線桁設計の手引き（案）⁴⁾に準じて行った。その際、寸法諸量については、実橋のうちで曲率パラメーターが最も厳しくなるように決定している。また、腹板の幅厚は、上記の基準には従っていない。

(2) 載荷方法

実験供試体への荷重の載荷方法としては、スパン中央に梁を渡し、その梁を介して鉛直荷重を載荷した。また、載荷ケースについては、次の4ケース（全6種類）とした。

i) Case 1（横桁取付け部の下側リブプレート無し）

スパン中央の横桁取付け部の下側リブプレートを取り付けない状態で静的載荷を行い、リブプレートを取付けた状態における挙動と比較する。これによって、前述のii)のフランジの曲率によって生ずる水平力が、ウェブギャップ部の力学的挙動に与える影響を調べる。

ii) Case 2（基本系）

Case 1の静的実験終了後、スパン中央の横桁取付け部の下端にリブプレートをすみ肉溶接で取り付ける。そして、Case 1と同様に、スパン中央の両主桁間の中心に荷重を載荷する。なお、他の載荷ケースの挙動との比較・検討するため、以下、この載荷ケースを基本系と呼ぶことにする。

iii) Case 3（偏心載荷）

この載荷ケースは、基本系に対して荷重を主桁間の中心から外桁側へ偏心載荷する場合（Case 3 O：偏心距離 $e = 6.2\text{cm}$ ）と、内桁側へ偏心載荷する場合（Case 3 I：偏心距離 $e = 10.2\text{cm}$ ）との2種類とする。なお、偏心距離 e については、載荷フレームの寸法の制約から決定している。

iv) Case 4（仮床版）

この載荷ケースは、供試体の上フランジの上にH形鋼を固定した状態で、Case 2と同様に、スパン中央の主桁間の中心に荷重を載荷するものである。

実橋においては、床版が荷重分配、および水平方向の剛性に寄与する。そして、この寄与は、その他の部材に比べて著しく大きい⁵⁾。とくに、床版はねじりモーメントに対して大きな抵抗を有するため、上横構は、あまりねじりに寄与しないものと考えられる。

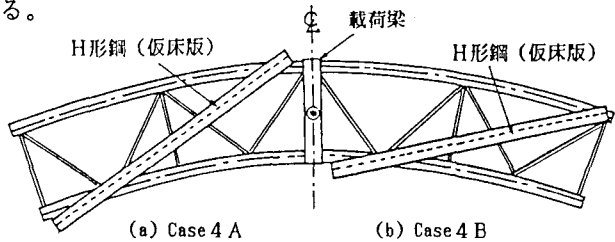


図-3 Case 4（仮床版）の平面図

そこで、この載荷ケースでは、曲げ剛度が小さく、ねじりモーメントのみに有効に働く床版を意図して、H形鋼を用いている。以下では、このH形鋼を、仮床版と呼ぶことにする。なお、この載荷ケースでは、図-3に示すように、仮床版を2種類の組み合わせで取り付けたCase 4 A、およびCase 4 Bについて実験を行う。

3. 横桁取付け部の挙動

(1) 横桁下側リブプレートの既住の設計法

主桁の曲率に起因する水平力の作用により、横桁取付け部下側のリブプレートに、大きな応力を発生させることは、先に述べたとおりである。いま、図-4を参照にすると、本実験供試体には、次式で与えられる水平力 $P_{0,i}$ 、および $P_{1,i}$ が作用する。

$$P_{0,i} = \frac{\sigma_{b0,i} \left(A_f + \frac{A_w}{3} \right)}{R_{0,i}} \cdot L_{1,2} \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに、

$P_{o,i}$: 外桁、あるいは内桁に作用する水平力(kgf)

$\sigma_{bo,i}$: 外桁、あるいは内桁の下フランジの垂直応力(kgf/cm²)

$R_{o,i}$: 外桁、あるいは内桁の曲率半径(cm)

$L_{1,2}$: 外桁、あるいは内桁フランジの固定点間距離(cm)

A_f : フランジの断面積(cm²)

A_w : 中立軸より下フランジに至るまでの腹板断面積(cm²)

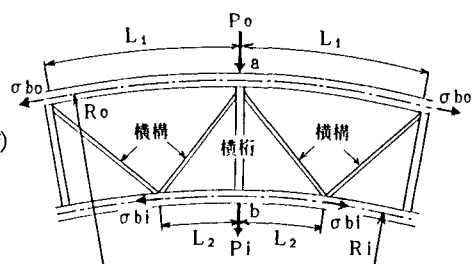
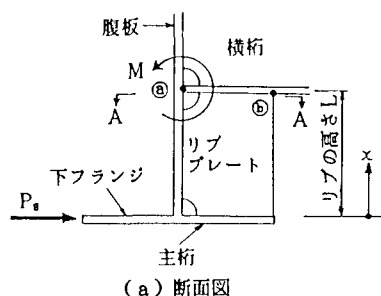
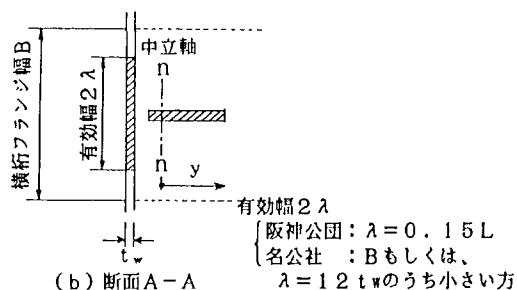


図-4 実験供試体に発生する水平力



(a) 断面図



(b) 断面A-A

図-5 水平力によって発生する面外曲げと腹板の有効幅の取り方

この水平力によって、図-5 (a) の点⊗には、次式で与えられる曲げモーメントMが作用する。

$$M = P_{o,i} \times L$$

----- (2)

ここに、

$P_{o,i}$: 外桁、あるいは内桁に作用する水平力

L : リブプレートの高さ (外桁: 150mm、内桁: 144mm)

その結果、腹板、およびリブプレートには、それぞれ面外、および面内の曲げ応力が生ずる。阪神高速道路公団⁴⁾ (以下、略して阪神公団と称する) と名古屋高速道路公社⁵⁾ (以下、略して名古屋公社と称する) との設計基準によれば、それらの応力算定法は、図-5 (b) に示すように、腹板長手方向の有効幅の取り方に相違がある。しかし、考え方は、基本的に同じである。

(2) 横桁取付け部の実測応力

実験供試体の外桁、および内桁の実測応力値を、それぞれ図-6、および7に示す。なお、これらの図中、(a) には、リブプレートがない場合 (Case 1) の腹板に発生する応力分布を、また (b) には、リブプレートを取り付けた場合 (Case 2) の横桁取付け部の下側リブプレート、およびその近傍の腹板に発生する荷重10tfを載荷したときに相当した主応力分布も示してある。

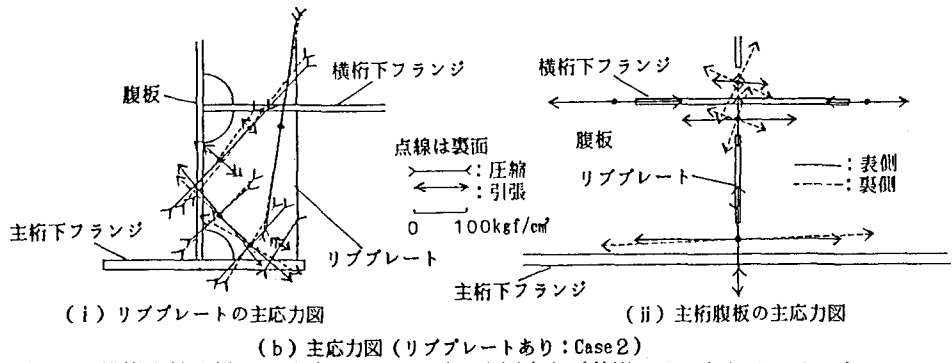
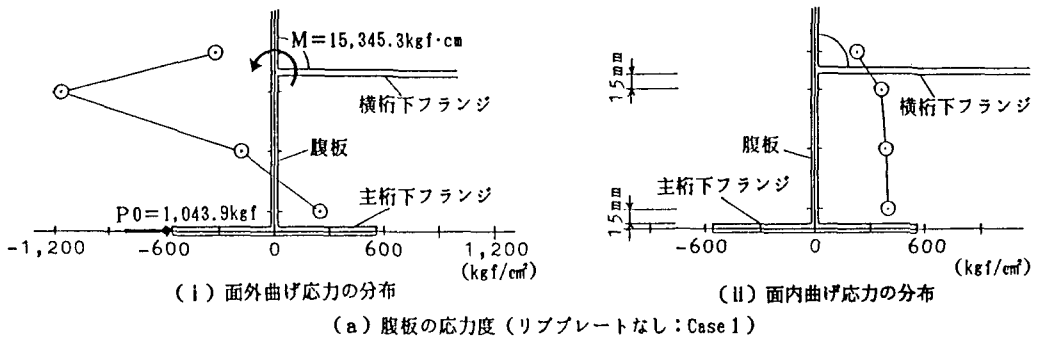


図-6 横桁取付け部のリブプレートにおける実測応力 (外桁, $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$)

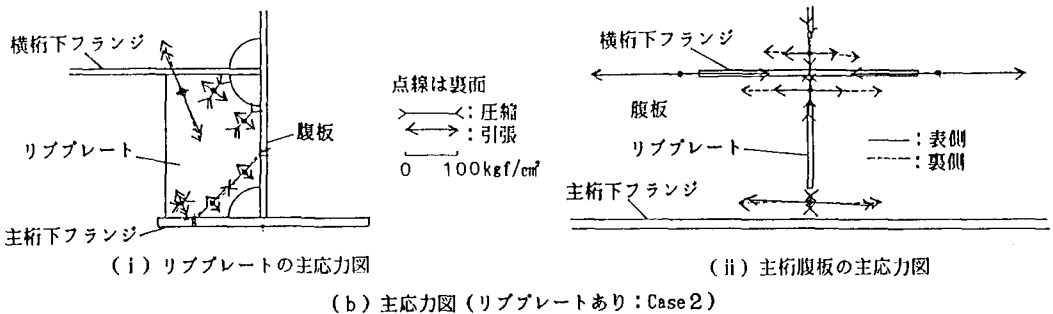
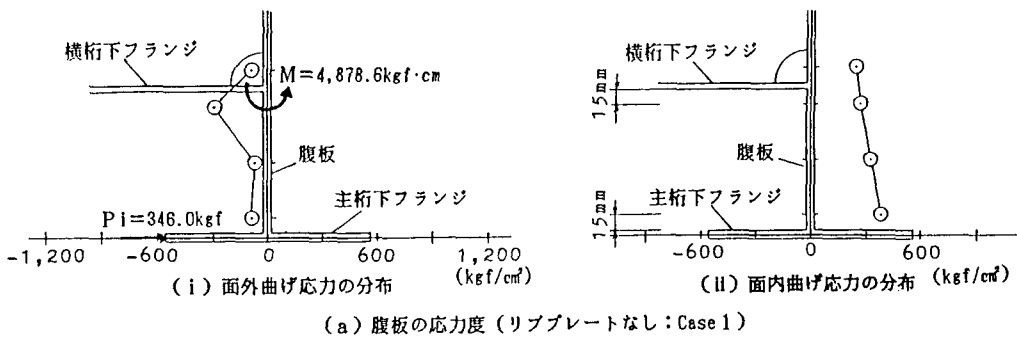


図-7 横桁取付け部のリブプレートにおける実測応力 (内桁, $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$)

リブプレートを取り付けていないCase 1 の面外曲げ応力分布図から、主桁の曲率に起因した水平力のために、横桁が取り付く主桁腹板には、大きな面外曲げが発生していることがわかる。そして、この場合、外桁側で最大1,149kgf/cm²（内桁側で最大191kgf/cm²）の面外曲げ応力が発生しており、リブプレートによる補強の必要性が、これらの結果から確認された。

(3) 設計基準との比較・検討

リブプレートが取り付けられているCase 2 に対して、リブプレートに発生する応力の評価をするため、阪神公団⁴⁾、ならびに名公社⁶⁾の設計基準において、リブプレートの断面設計に用いられている合成応力度 σ_z と実験値とを比較した結果を、表－1 に示す。

ここで、同表の参照図に示した各測点 i における合成応力度 σ_z は、以下の諸式より算定した。

a.) 計算値
$$\sigma_{zi} = \sqrt{\sigma_i^2 + 3\tau_i^2} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここに、
$$\sigma_i = (M_i / I) \cdot y_i = (P_o \cdot x_i / I) \cdot y_i \quad \text{-----} \quad (4)$$

：リブプレートに発生する垂直応力度

I：有効断面の中立軸 n－n に関する断面2次モーメント（図－5、および表－1 参照）

$$\tau_i = P_o / A \quad \text{-----} \quad (5)$$

：リブプレートに発生するせん断応力度

A：リブプレートの有効断面積

b.) 実験値
$$\sigma_{zi} = \sqrt{\sigma_{xi}^2 + 3\tau_i^2} \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここに、
 σ_{xi} ：鉛直方向の垂直応力度
 τ_i ：せん断応力度

表－1 横桁下側のリブプレートに発生する合成応力度の比較（単位：kgf/cm²，1kgf/cm²=0.098MPa）

項目 測定点	実験値	阪神公団 ⁴⁾	名公社 ⁶⁾	実験値 阪神公団	実験値 名公社	参照図
外 桁	1	355	356	0.997	0.944	
	2	578	657	0.879	0.916	
	3	353	335	1.053	1.053	
	4	160	341	0.469	0.470	
	5	310	358	0.865	0.917	
	6	367	338	1.085	1.095	
内 桁	1	75	118	0.635	0.600	
	2	195	218	0.894	0.933	
	3	99	111	0.891	0.891	
	4	58	113	0.513	0.513	
	5	79	119	0.663	0.705	
	6	100	112	0.892	0.900	

同表から、阪神公団⁴⁾、および名公社⁶⁾の基準による算定値は、実験値と比較すると、多少のばらつきはあるものの、ほぼ一致していることがわかる。このことから、それぞれのリブプレートの設計法は、妥当なものであるといえる。

しかし、図－6、および図－7の（b）主応力図の（ii）主桁腹板の主応力図に示されているとおり、腹板のスカーラップ部については、表裏で曲げモーメントが発生している箇所もあり、設計の際に考慮されていない応力も発生している。このような局部における面外挙動は、疲労損傷の原因となりやすいので、十分

な注意が必要である。そのためには、たとえばスカーラップを設けないリブプレートを採用するなど、構造的な工夫が望まれる。

4. 横構軸力とその検討

(1) 横構軸力の算出方法

一般に、直線 I 桁の横構は、風や地震荷重などの横荷重に抵抗させるもので、いわゆる 2 次部材として設計されている。しかしながら、曲線 I 桁では、フランジの曲率による付加力（式（1）と図-4 参照）のほか、活荷重の偏載によるねじりモーメントにも抵抗させるため、直線 I 桁に比べて大きな軸力が発生する。しかも、これらの応力は重なり合って常時作用するため、曲線 I 桁の横構は、1 次部材として設計しなければならない。阪神公団の基準⁴⁾によると、以下のような設計が行われている。

a. フランジの曲率による付加力のために生ずる横構軸力

図-8 に示すように、フランジの曲率による付加力 P_o によって発生する横構軸力 N_{d1} 、および N_{d2} は、次式で計算される。

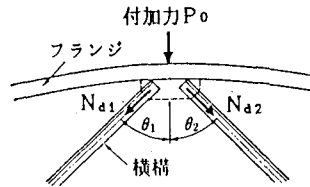


図-8 フランジ付加力により発生する横構軸力

$$N_{d1} = P_o \frac{\sin \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)}, \quad N_{d2} = P_o \frac{\sin \theta_1}{\sin (\theta_1 + \theta_2)} \quad \text{----- (7) }_{1,2}$$

ここに、

θ_1, θ_2 : 横構の取付け角度

b. 活荷重の偏載荷によって生ずる横構軸力

図-9 (a) に示すように活荷重が偏載して、同図 (b) に示すよう、全橋断面にねじりモーメント T が作用するとき、横構に発生する図-10 に示す軸力 N_{d1} 、および N_{d2} は、次式で計算される。

$$N_{d1} = -\frac{Q_T}{\cos \theta_1}, \quad N_{d2} = \frac{Q_T}{\cos \theta_2} \quad \text{----- (8) }_{1,2}$$

ここに、

$$Q_T = 2q a$$

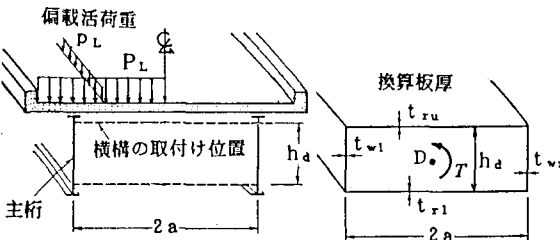
: 幅 $2a$ の横構パネルに発生する軸力

$$q = T / (4 \cdot a \cdot h_d)$$

: 準箱桁内に流れるせん断流

$2a$: 準箱桁の幅

h_d : 準箱桁の高さ



(a) 横構をもつ曲線 I 桁

(b) 準箱桁

図-9 ねじりを受ける準箱桁

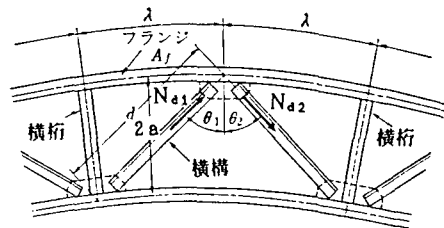


図-10 ねじりによって発生する横構軸力

c. 実測ひずみによる横構軸力

本実験では、横構の軸力が横構ガセットプレート取付け部の挙動に影響を与える度合いが大きいと考えられるため、各載荷ケースごとに横構の軸力を測定した。

ここで、横構の軸力の算出の際は、横構がガセットプレートを通じて偏心結合した梁の挙動をするため、軸力成分以外に曲げ成分も発生することに注意しなければならない。すなわち、図-11に示すように、横構の取付け位置で接合面に働いている軸力 N は、横構の断面図心軸においては、軸力 N と曲げモーメント M との成分に分けられる。

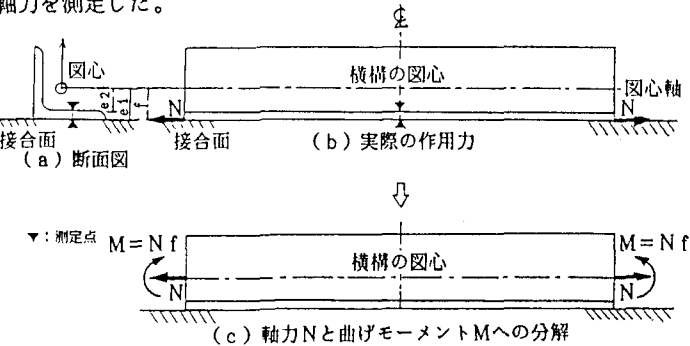


図-11 横構軸力の算定方法

そのときの測点 i での応力 σ_i は、次式で求められる。

$$\sigma_i = E \epsilon_i = \frac{N}{A_d} + \frac{M}{I} e_i = N \left(\frac{1}{A_d} + \frac{e_i \cdot f}{I} \right) \quad \text{-----} \quad (9)$$

ここに、

E : ヤング係数 ($=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 205.8 GPa)

A_d : 横構の断面積 ($=12.69 \text{ cm}^2$)

I : 横構の断面2次モーメント ($=64.4 \text{ cm}^4$)

ϵ_i : 各測点のひずみ

e_i : 各測点から図心に至るまでの距離

f : 接合面から横構図心に至るまでの距離 ($=2.17 \text{ cm}$)

そこで、横構中央の上下面に貼付したストレインゲージ $i=1$ 、および2のひずみ値 ϵ_i から求められる軸力の平均値、すなわち

$$N = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{E \epsilon_i}{\frac{1}{A_d} + \frac{e_i \cdot f}{I}} \quad \text{-----} \quad (10)$$

を、横構の軸力の実験値としている。

また、実験供試体の静力学的な全体挙動を評価するため、弾性線形の有限要素法を用いて解析を行った。解析モデルの要素は、フランジ、腹板、および垂直補剛材に対して板要素を用いている。横構には、オフセット梁を用い、各格点において直接剛結している。ただし、ガセットプレートは、考慮していない。また、支点条件としては、すべてローラー支持としている。

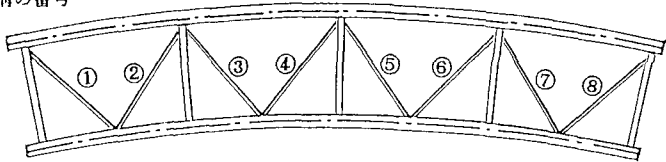
(2) 横構軸力の比較・検討

表-2には、横構軸力の実験値と解析値、あるいは設計計算値との比較した結果を示す。なお、表中の数値は、載荷荷重を 10 tf としたときの換算値である。そして、表中の比率 A は、各載荷ケースにおける横構軸力の解析値と実験値との比率である。また、比率 B は、基本系であるCase 2の実験値に対する他のケースの実験値との比率を意味する。

表-2 横構軸力の比較 (単位: kgf/cm², 1kgf/cm²=0.098MPa)

部材	載荷方法												構造系								
	Case 2				Case 3 O				Case 3 I				Case 4 A				Case 4 B				
	実験値	解析値	設計値	比率A	実験値	解析値	比率A	比率B	実験値	解析値	比率A	比率B	実験値	解析値	比率A	比率B	実験値	解析値	比率A	比率B	
上	①	-972	-1,171	1,738	0.83	-1,243	-1,419	0.88	1.28	-581	-737	0.79	0.60	-218	90	-2.43	0.22	-741	-1,047	0.71	0.76
	②	779	980	1,270	0.79	973	1,234	0.79	1.25	354	537	0.66	0.45	39	-202	-0.19	0.05	538	800	0.67	0.69
	③	-679	-812	-1,408	0.84	-764	-964	0.79	1.12	-401	-549	0.73	0.59	-125	88	-1.42	0.18	-520	-694	0.75	0.77
	④	12	193	27	0.06	262	309	0.85	—	-134	-21	6.38	—	16	-186	-0.08	1.33	18	101	0.17	1.51
	⑤	-12	193	27	-0.06	31	309	0.10	—	-110	-21	5.24	9.39	-164	-186	0.88	—	-159	101	-1.57	—
横	⑥	-750	-812	-1,408	0.92	-610	-964	0.63	0.81	-479	-549	0.87	0.64	-23	88	-0.27	0.03	-450	-694	0.65	0.69
	⑦	785	980	1,270	0.80	772	1,234	0.63	0.98	377	537	0.70	0.48	-94	-202	-0.46	-0.12	441	800	0.55	0.56
	⑧	1,066	-1,171	-1,738	0.91	-1,065	-1,419	0.75	1.00	-652	-737	0.88	0.61	-109	90	-1.21	0.10	-767	-1,047	0.73	0.72
	⑨	896	1,172	1,738	0.76	1,173	1,422	0.82	1.31	503	736	0.68	0.56	1,171	1,240	0.94	1.31	1,041	1,189	0.88	1.16
	⑩	-767	-977	-1,270	0.79	-1,042	-1,229	0.85	1.36	-346	-537	0.64	0.45	-999	-1,066	0.94	1.30	-891	-969	0.92	1.16
下	①	656	841	1,408	0.78	849	990	0.86	1.29	424	580	0.73	0.65	804	971	0.83	1.23	785	855	0.92	1.20
	②	-6	-123	-27	-0.05	-255	-253	1.01	—	189	109	1.73	—	-234	-284	0.82	—	-159	-138	1.15	—
	③	-88	-123	-27	-0.71	-124	-253	0.49	1.41	55	109	0.50	-0.63	-172	-284	0.60	1.95	-9	-138	0.06	0.10
	④	732	841	1,408	0.87	718	990	0.73	0.98	550	580	0.95	0.75	695	971	0.72	0.95	670	855	0.78	0.92
	⑤	-808	-977	-1,270	0.83	-903	-1,229	0.73	1.12	-456	-537	0.85	0.56	-874	-1,066	0.82	1.08	-741	-969	0.76	0.92
⑥	1,066	1,172	1,738	0.91	1,158	1,422	0.81	1.09	723	736	0.98	0.68	1,155	1,240	0.93	1.08	997	1,189	0.84	0.93	

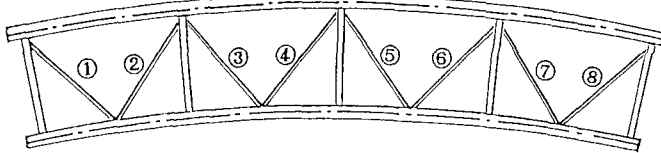
横構の番号



注記:

設計値：阪神公団の基準によるもの⁴⁾
比率A＝実験値/解析値
比率B＝実験値/実験値 (Case 2)
で、—を引いたものの比率は、値が大きくなりすぎるため、ここでは省略した。

横構の番号



注記:

設計値: 阪神公団の基準によるもの⁴⁾
 比率A=実験値/解析値
 比率B=実験値/実験値 (Case 2)
 で、—を引いたものの比率は、値が大きくなりすぎるため、ここでは省略した。

まず、Case 2 の設計計算値について調べてみると、実験値や解析値と比較して2倍近く評価されており、安全側のものになっていることがわかる。また、すべての実験値とF.E.M. 解析値とを比較してみると、作用力の小さいスパン中央寄りの部材④、および⑤については、大きなばらつきが見られる。しかし、支点に近い作用力の大きな部材①～③、および⑥～⑧については、全体を平均するとほぼ80%とよく一致している。

つぎに、Case 2 (基本系)、Case 3 O (外桁偏心)、およびCase 3 I (内桁偏心) の比率Bを比較すると、Case 3 O の実験値は、Case 2 と比べて、上・下横構とも大きくなっている。また、逆にCase 3 I では、小さくなっている。解析値についても同様な傾向を示しており、この原因は、荷重載荷の位置により発生するねじりモーメントの大きさの相違が、軸力の変化として現われたためであると考えられる。

さらに、Case 4 の横構①と⑧との比率Bに対する平均値を調べると、Case 4 A では、上横構の軸力が16%とCase 2 に比較して大幅に低減し、下横構の軸力が120%と少し大きくなっている。一方、Case 4 B では、上横構が74%、また下横構が105%で、Case 4 A と同様な傾向が現われている。

以上の結果から、実験供試体の上フランジを仮床版 (H型鋼) で固定するだけでも、上横構の軸力を低減できることが確認できた。このことから、床版によって主桁上フランジが全面にわたって拘束されている実橋では、上横構が曲線 I 桁橋全体の力学的挙動に寄与する効果は少なく、活荷重によって発生する上横構の軸力は、小さいものと考えられる。

5. 横構ガセットプレートの取付け部の挙動

(1) 横構ガセットプレートの取付け部の実測応力

Case 3 O, 3 I、および4 Aにおける横構ガセットプレート取付け部近傍の主応力図を、抜粋して図-12に示す。これらは、いずれも外桁のスパン中央における下フランジの垂直応力が許容応力度 σ 。(=1,400 kgf/cm²=137.2MPa)に達したときのものである。また、図中には、横構軸力、およびガセット取付け部の垂直補剛材位置における腹板の応力度も付記してある。

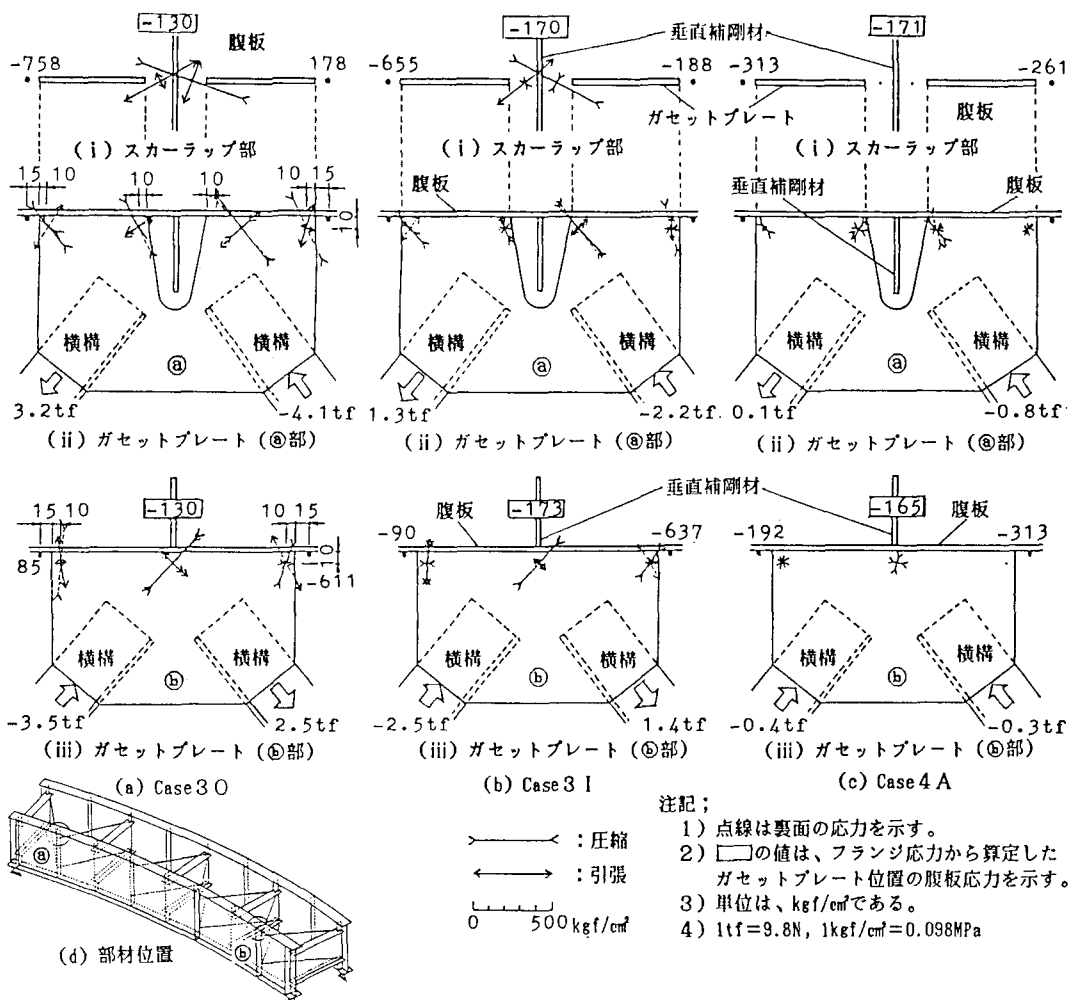


図-12 横構ガセットプレート取付け部近傍の主応力図

この図から、スカーラップを有する横構ガセットプレート (㊸) の取付け部に発生する局部応力挙動を定性的に要約すると、以下のとおりである。

- i) ガセットプレートのスカーラップ近傍：その表裏で、ほぼ同じ方向に、しかも同じ大きさの応力が発生している。そして、これらは横構軸力に依存している。
- ii) ガセットプレート端部：表裏で、方向、および大きさにばらつきがあり、曲げ応力も発生している箇所がある。しかし、これらの大きさは、横構軸力の作用方向に依存している。
- iii) スカーラップ部の腹板：垂直補剛材を境にして、左右の応力の正負が逆転するような面外曲げ挙動を示している。また、その左右の符号は、横構軸力の作用方向に依存している。
- iv) ガセットプレート端部の腹板：垂直補剛材位置において換算した主桁の垂直応力と比較すると、圧縮の横構軸力が作用している側の端部では引張側に、また引張の場合には圧縮側に助長される傾向がある。

上述のことは、スカーラップのない横構ガセットプレート (㊸) の取付け部でも、iii) を除き、同様なことがいえる。しかし、この種のガセットプレートでは、局部的な面外曲げは発生せず、疲労の面から安全であると判断される。また、図中にないスパン中央付近のガセットについては、主桁腹板の曲げ応力の影響があると考えられた。ところが、ガセット端部の腹板には大きな応力が発生していたものの、ガセットの主応力の方向およびその大きさは、主として軸力の作用方向およびその大きさに依存していた。

(2) ガセットプレートの局部応力の解析と検討

a. 解析モデル

上述のように、横構ガセットプレートの取付け部では、主桁の応力特性のみから予想できない複雑な挙動を示している。それらをさらに詳しく検討するため、図-13に示すように、ズームアップした部分解析モデル⁷⁾を作成し、有限要素法⁸⁾を用いた弾性線形の解析を試みた。

これらのモデルは、実験供試体と同じ曲率を有しており、橋軸方向に桁高、また深さ方向に桁高の半分をとっている。さらに、中立軸 $n-n$ を単純支持辺とし、モデル中央の面内作用力から算定した等価節点力を桁両端の腹板、およびフランジの節点に作用させている。また、横構軸力、および面内作用力は、実験値 (Case 30) から求められたものを用いた。

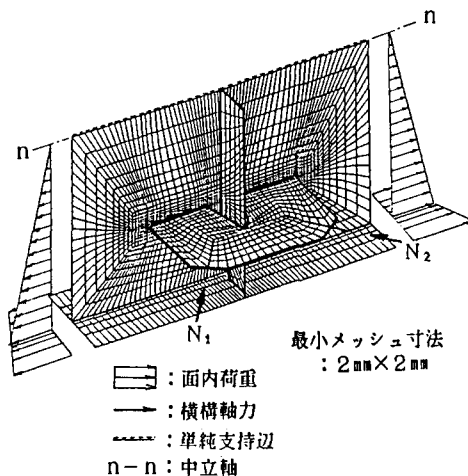


図-13 ガセット取付け部の部分解析モデル

最後に、F.E.M. 解析のメッシュ割りについては、解析モデルの構造、および作用荷重の特性に応じて、メッシュの寸法を小さくすればするほど、局部の応力を過大に評価することがある。しかし、ここでは、ガセットプレートの取付け部の定性的な局部の応力挙動をより視覚的に把握するため、最小メッシュ寸法を $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ という小さなものにした。すなわち、今回の解析は、定量的なものではなく、あくまでガセットが取り付く主桁腹板の定性的な局部の応力挙動を把握することを目的にしていることに留意されたい。

b. 解析結果

横構ガセットプレートの取付け部の腹板における橋軸方向応力の分布の一例を、図-14に示す。同図には、実験値、面内作用力のみを載荷した場合 ($N_1 = N_2 = 0$) の解析結果、および横構と腹板との狭角を 53.3° 、および 40° (実験供試体は、 53.3°) とした場合の解析値も示してある。

同図 (a) から、ガセットプレートの取付け止端部では、スカーラップ側で主桁の面内作用応力の 10 倍、また反対側で 2.5 倍程度の応力集中が発生しており、表裏で大きな面外曲げ挙動を呈していることがわかる。また、スカーラップ側の実測値は、解析結果とほぼ一致している。しかし、止端部では解析値とはかけ離れており、この部位で発生する応力を定量的に評価したものではないことがわかる。

ところで、F.E.M. 解析結果によると、スカーラップ部の腹板には最大 60kgf/mm^2 の応力が発生している。これは、実験値と比較しても相当大きな差異があり、先に述べたとおり、定量的に局部応力をとらえていないといえる。しかしながら、スカーラップ側の止端部と、その反対側の止端部との応力集中の度合いとを比較すれば、定性的には、スカーラップ側の方が、より厳しい条件下にあることがわかる。

つぎに、同図 (b) に示した面内作用力のみを載荷した解析結果によると、上記のような応力分布は呈していない。このことから、上述の応力集中現象、および面外挙動は、横構軸力の影響が大きく寄与しているものと考えられる。

また、横構の取り付け角度の影響は、あまり見られない。すなわち、同図 (c) からわかるように、狭角が小さい場合は、わずかに応力度が小さくなるものの、ほぼ同様な傾向を示している。

なお、ここで用いた部分解析モデルは、すべて曲率を有している。ちなみに、曲率を無限大とした直線桁の場合でも、同様な傾向を示しており、曲線桁としての顕著な特徴はみられなかった。

最後に、一般に用いられている疲労設計用の S-N 曲線は、一軸応力状態を対象にして設定されている。そのため、ここで明らかにしたような面外挙動を呈する構造詳細部では、危険側の設計となることも考えられるので、今後、検討を加える必要があろう。

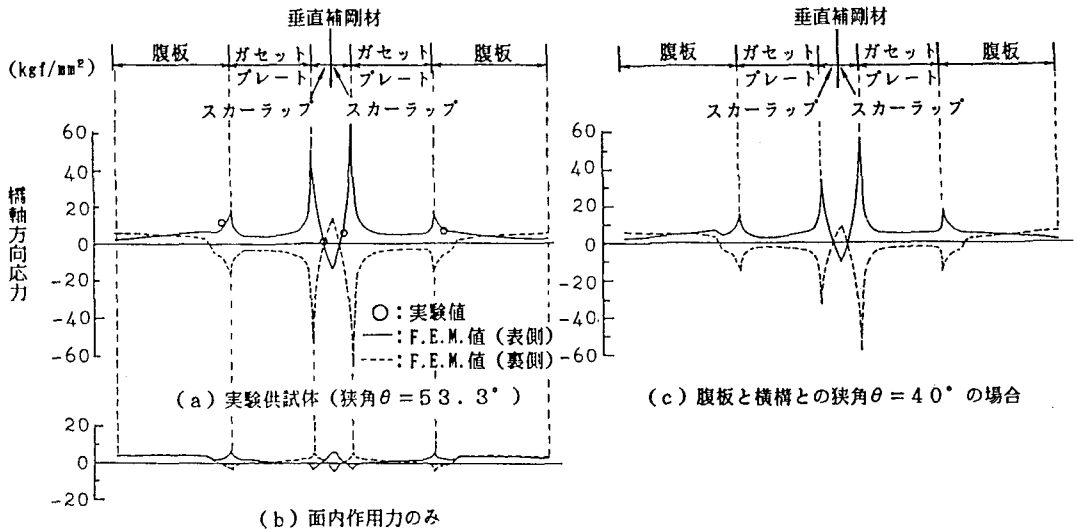


図-14 横構ガセットプレート取付け位置における腹板の橋軸方向の応力度の分布 ($1\text{kgf/cm}^2=0.098\text{MPa}$)

8. まとめ

本研究は、2本の主桁を有する曲線I桁橋の模型を製作し、横構ガセットプレート、および横桁下側のリブプレート取付け部などの構造詳細部に着目した静的実験を種々な載荷ケースのもとで行い、それらの局部応力挙動を把握することによって、疲労強度に影響を与える要因について考察した。さらに、F.E.M.解析によって、ガセットプレートの取付け部の定性的な局部応力挙動に関する検討も試みた。

その結果、並列曲線I桁橋の構造詳細部のうち、スカーラップを有する横構ガセットプレート、および横桁下側リブプレートの近傍には、大きな局部応力が発生していることが確認された。そして、疲労強度の面から、それらの構造詳細部の損傷の可能性が高いことが予想される。

しかしながら、本文で示したような疲労損傷の発生が危惧されるディテールについては、現在のところ、実橋で損傷事例があまり報告されていない。したがって、今後、曲線桁橋を維持・管理する際には、これらの構造詳細部に十分な注意を払って点検してゆく必要があるものと考えられる。

最後に、この研究を行うに当たり、文部省の科学研究費一般研究Bの補助を受けた。

参考文献

- 1) 岩崎雅紀・名取暢・深沢誠・寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策、横河橋梁技報、Vol. 18、1989年、pp. 36～52
- 2) 中井博：都市高速道路橋の疲労損傷事例、橋梁と基礎、Vol. 24、1990年2月、pp. 23～31
- 3) Nakai, H., Kitada, T., Ishizaki, H., and Akehashi, K.: An Experimental Study on Fatigue Strength of Web Plates for Horizontally Curved Plate Girders, Proc. of JSCE, No. 416/I-13, April 1990, pp. 1195～1215
- 4) 阪神高速道路公団：曲線桁設計の手引き（案）、1988年10月
- 5) 尾下里治・金子俊一：直線、曲線および斜角の合成I桁橋の立体解析、土木学会論文集、第374号、1986年10月、pp. 339～348
- 6) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準、I 鋼橋編、1984年4月
- 7) 北田俊行・大塚久哲・古田秀博・明橋克良：鋼橋二次部材に発生する局部応力の一解析手法、日本鋼橋造協会、第13回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第13巻、1989年7月、pp. 105～109
- 8) Structural Research & Analysis Corporation: COSMOS/M Ver. 1.52A、1989年1月

(1990年10月12日受付)