

港大橋における格点部の強度に関する研究

小松定夫*・笹戸松二**
吉川紀***・鈴木智巳****

1. ま え が き

港大橋のような長大トラス橋の場合、比較的断面の大きい部材をガセットプレートで結合するため、格点剛結による曲げモーメントが大きく、格点設計上においてその影響を無視することができない。また、ガセットプレートの自由長も大きくなるため、局部破損の問題やフレット部の応力集中などに問題点が生じる。

本文では、以上の重要な問題点について理論的考察ならびに実験による検討を加えたので報告する。

2. 格点構造の強度に関する実験

本橋の場合、ガセットプレートの自由長が大きいため局部変形や破壊が生じることが心配されたので²⁾、格点構造部の正確な応力、変形および強度を調査するためにガセットの弾塑性領域内における応力分布、および面外変形状況を中心に調べるため、載荷実験を行った。

(1) 供 試 体

設計荷重の 1/16 の荷重に対し、模型の応力が実橋の設計応力となるようにし、模型の寸法縮尺は原則として 1/4 と決定した。ただし、模型製作上の制限から、模型構成部材の最小板厚を 4.5 mm とした。使用鋼材は SS 41 を用いた。実験対象は図-1 の格点 21 (Aタイプ) と格点 51 (Bタイプ) とした。現場継手部の高力ボルトは入手可能な最小径の W 1/2 (F 11 T) を使用し、実橋設計ボルト許容応力度と等しいボルト許容応力度で本数を

決定した。図-2 に一例として B タイプの供試体の形状寸法を示す。供試体の数は A タイプ 1 個 (ガセットプレートの応力分布を調べるための弾性実験)、B タイプ 2 個 (ガセットプレートの応力分布と局部座屈現象を調べるための弾塑性実験) とし、B タイプ 2 個のうち 1 個で図-4 に示すような載荷方法で、弾性範囲の試験を行った。これによると、ガセットプレート部の座屈よりもハンドホール部の局部座屈が先行することが予想されたので、この供試体を図-2 (a) に示すようにハンドホール部に部分的に板をあてて補強し、B-1 タイプとして使用した。残りを図-2 (b) に示すように、ハンドホール部に全面的にリブ付き板をあてて穴をふさいで補強し、ガセットプレート部で確実に座屈するようにして、これを B-2 タイプとして使用した。

(2) 実験方法

a) 載荷方法

実験は、三菱重工 (株) の神戸研究所のテストフロアを使用し、模型はフロア一面に対して水平にセットした。

① 弾性実験：A, B 両タイプとも、設計曲げモーメント/設計軸力 (M_1/P_1 , M_2/P_2) が所定の縮尺率を満足し作用応力が等価になるように、A タイプは弦材の一端から荷重 F (図-3) を、B タイプは鉛直材の一端から荷重 F (図-4) をそれぞれ軸線方向に加えた。ここに、軸力を腹材に対して偏心させることにより曲げモーメントを生じさせた。

② 弾塑性実験：B-1, B-2 タイプでは B タイプのように実橋の M/P を ① の場合と同じように保持して、

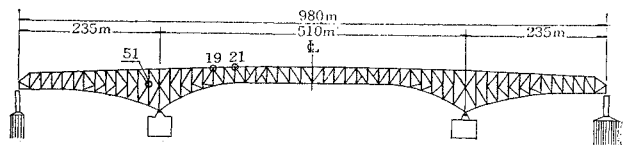


図-1 港大橋一般略図

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 阪神高速道路公団大阪第三建設部長

*** 正会員 工修 阪神高速道路公団大阪第三建設部設計第二係長

**** 正会員 工修 三菱重工(株)技術本部神戸研究所

載荷装置の能力いっぱいまで荷重を増加しても、ガセットプレートが局部破損しなかったため、ガセットプレート部を確実に座屈させるため設計荷重よりかなり不利な大きい曲げモーメントが作用するよう偏心量を大きくとり、斜材の一端から図-5に示すように載荷した。

b) 測定方法

測定は、ひずみとたわみについて行った。ひずみはガセットプレート、斜材、鉛直材について測定した。この応力分布状態を詳細に調べる目的で表裏面に多数のストレインゲージを貼付した。

たわみ測定はガセットプレートの面外変形を調べるために、ガセットプレートの自由端付近を重点的に測定し、同時に載荷状態を調べる意味で斜材、鉛直材の面外変形をも測定した。

c) 実験結果

① 弾性応力分布：図-4に代表的なガセットプレートの主応力測定結果を示す。

② 弾塑性応力分布：図-5に代表的なガセットプレートの主応力測定結果を図-6に代表的なガセットプレートの荷重-ひずみ曲線を示す。

③ ガセットプレートと斜材の接合部における部材力の推定：斜材の導入部材力の推定は、載荷側斜材端部とロードセルとの接触面の摩擦係数 μ を考慮して、図-7に示す骨組構造系での計算値と実験値を用いて行った。摩擦係数 μ の推定は各タイプの各斜材における図-7の断面 A のひずみ測定値を用いてその断面力を求め、自由片 AG についての釣り合い条件から算出した。その結果を表-1に示す。この摩擦係数を考慮して導入部材力を推定すると表-2のとおりである。軸力図、モーメント図について実験値と推定値を比較すると、それぞれ図-8,9のように、両者は良好な一致をみた。

④ 耐荷力の検討：

③ B-1タイプ；B-1タイプにおいては、現場継手部にハンドホールによる断面欠損部分が存在していたため $F=14t$ で弾性座屈を生じた。

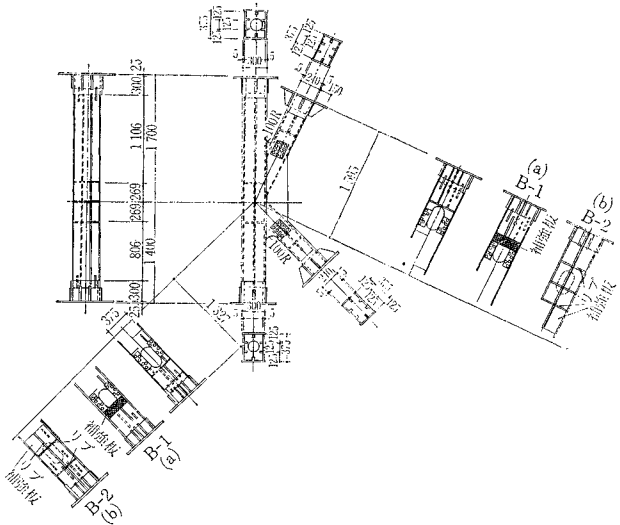


図-2 Bタイプ供試体図

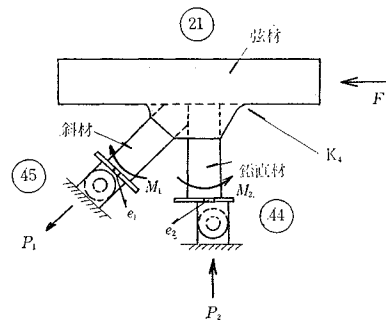


図-3 Aタイプ

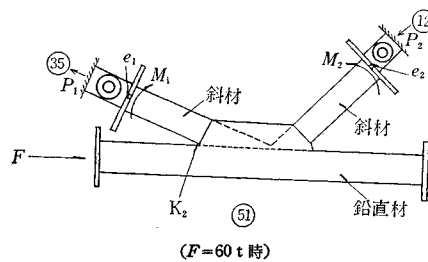
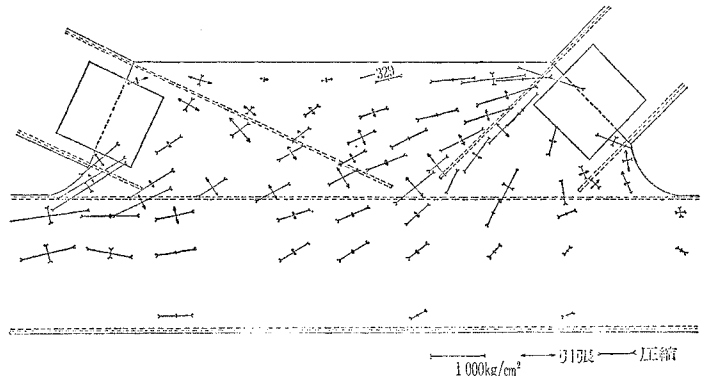


図-4 Bタイプガセットプレート主応力分布図

表-1 推定摩擦係数 μ

タイプ	μ_N			μ_M			μ 平均
	⑤-⑫	⑤-⑳	平均	⑤-⑫	⑤-⑳	平均	
B-1	0.198	0.178	0.189	0.240	0.238	0.239	0.214
B-2	0.247	0.178	0.213	0.232	0.146	0.189	0.201

注：① μ_N ：軸力成分による摩擦係数
 ② μ_M ：曲げ成分による摩擦係数

① B-2 タイプ；ガセットプレート自由端部で局部破損箇所の載荷荷重に対するひずみ変化を，図-6 に示す。これによると，荷重の増加とともにガセットプレート自由端部付近では $F \approx 18 t$ で降伏状態になったと思われ

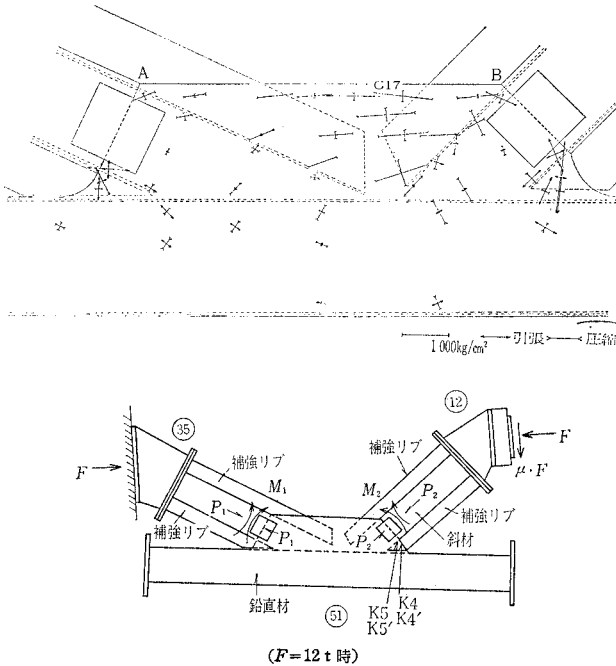


図-5 B-2 タイプガセットプレート主応力分布

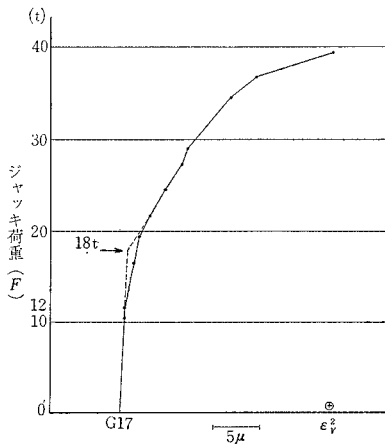


図-6 図-5 の測点 G17 における荷重-ひずみ曲線

表-2 ガセットプレート導入部材力 ($P=12t$)

タイプ	部材	部材力			備考
		軸力 $P(t)$	曲げモーメント $M(t \cdot m)$	$M/P(m)$	
B-1	⑤-⑫	-11.00	-5.66	0.514	
	⑤-⑳	-8.97	-1.93	0.215	
B-2	⑤-⑫	-10.91	-5.83	0.534	
	⑤-⑳	-9.05	-2.27	0.250	

れる。図-5 に示すコーナー部 K5 (表面), K5' (裏面) の平均弾性限界荷重は $F \approx 8 t$, K4 (表面), K4' (裏面) については $F \approx 14 t$ であった。

⑤ 考 察：

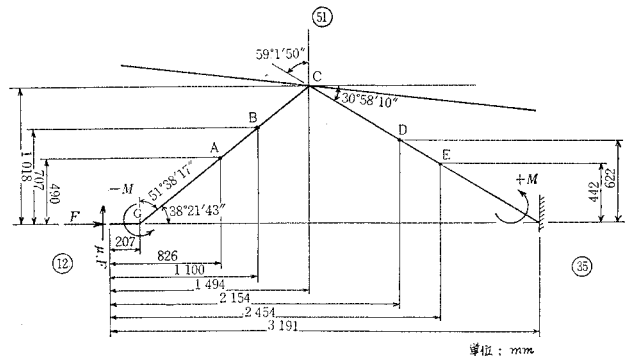
① ガセットプレートの変位；荷重の増加とともに図-5 の自由端 AB においてガセットプレート自体の局部的な面外鉛直方向変形が徐々に増加し， $F=12 t$ において最大 0.17 mm を生じた。

② ガセットプレートの応力分布；フランジプレート兼用部分，およびその近傍のガセットプレート内の主応力は，斜材軸方向を向いていることが図-4 より明らかとなった。他の荷重載荷状態においても同様である。

③ ガセットプレートの応力度；表-3 はガセットプレートの応力度について計算値と実験値を比較したもので，これによると両者はほぼ良好な一致を示している。

④ ハンドホール；圧縮部材に対してハンドホールを用いた場合は，弾性座屈を生じる恐れがあるので十分な注意を要する。

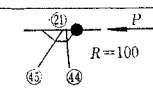
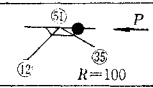
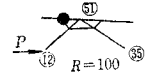
⑤ ガセットプレートコーナー部の応力集中係数；タイプにおける応力集力係数を求めると表-



A点：⑤①-⑫，斜材断面力計測位置
 B点：ガセットプレートと斜材の接合部
 C点：両斜材軸線交点
 D点：ガセットプレートと斜材の接合部
 E点：⑤①-⑳，斜材断面力計測位置
 単位：mm

図-7 骨組構造系

表-4 応力集中係数

タイプ	ジャッキ重 $P(t)$	基準応力* $\sigma_0(kg/cm^2)$	コーナー部 最大応力 $\sigma(kg/cm^2)$	応集中係数 $\alpha = \sigma/\sigma_0$	備考
A	60	-1478	-1659 (図-3のK4)	1.122	
B	60	-1671	-2583 (図-4のK2)	1.546	
B-1	12	735	1197 (図-5のK5, K5')	1.629	

注：* は基準応力、斜材とガセットプレートとの連結部断面における直応力。

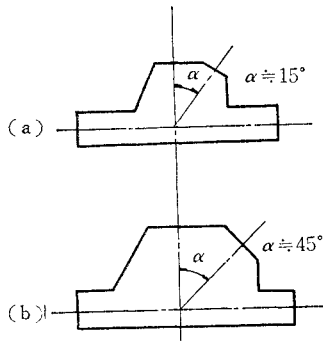


図-10

プログラム名：FZNE-1

節点総数： ≤ 1000

要素総数： ≤ 1000

b) 応力分布

図-12においては弦材軸力がガセットプレートにどのような応力分布を生じるかを調べた。

その結果、弦材からの軸方向垂直応力度のガセットプレートへの影響範囲が明確になった。それによると、ガセットプレートと弦材の腹板との突合せ溶接箇所を弦材の腹板から 250 mm の位置に決め、ガセットプレートの板厚を 25 mm に低減させても、溶接部およびガセットプレートにおける応力度は許容応力度より十分低いことが判明した。図-13 は軸力および端モーメントが作用した場合であるが、同様の傾向が認められた。

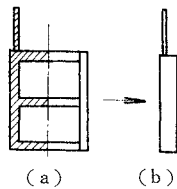


図-11

(2) 立体解析

3.(1) では、平面応力問題としてガセットプレート全体を考えてきたが、ここでは、箱断面のコーナー部隅肉溶接のマイクロ割れ等と与える影響も大きいフィレット部の応力集中を重点的に調べるために、最も複雑な構造を有する 図-1 の格点 19 を立体モデルとして有限要素法で応力解析を行った。

a) 計算モデル

モデルは、原形に忠実にリブなども含めた立体形とした(図-14)。この部材は部材縦軸線と左右対称なので部材の中心より半分を計算の対象とし、その切断面の境界条件は切断面の x 方向の変位はないとした。また、本モデルの支点条件は格点 20 の方の端部の x, y, z 方向の変位を固定した。計算上の三角形要素分割を図-14の()内に示す。

b) 応力解析

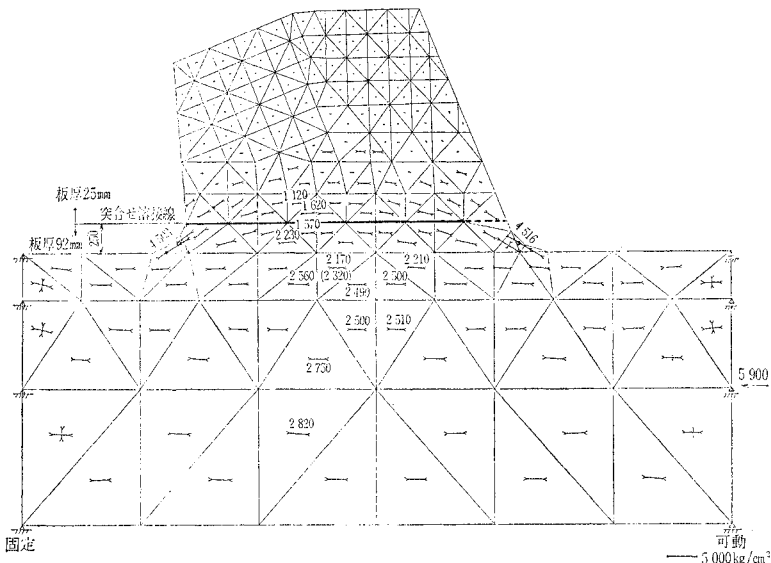
応力計算にあたり下記の仮定を設けた。

- ① 断面を構成する板の面外曲げは考慮しない。
- ② 横構の連結による応力は考慮しない。
- ③ 計算はすべて静的弾性解析である。

格点 19 に対する荷重状態としては、
 ㊸ 死荷重+活荷重、
 ㊹ 死荷重、の 2 ケースを考慮した。

分割された要素に流入する節点荷重は直接ガセットプレートより載荷せず、ガセットプレートに接続する各部材より載荷させた。

計算は ASKA を使用した。使用電算機は CDC 6600 であ



弦材に軸力のみが作用した場合の垂直応力分布：ガセット板厚 25 mm (SM 58)
 弦材板厚 92 mm (SM 58)

図-12 上弦材格点(図-10(a)に相当)

る。

c) 応力分布

ガセットプレートの終端部の断面の急変する部分に応力が集中している。

溶接線上の垂直応力はガセットプレート終端部に集中しており、その部分のみ大きくなっているが、平均的には設計応力度と傾向が一致している。一方、弦材のウェブとフランジの隅肉溶接線上のせん断応力については集中は見られない。しかし、計算結果から腹材ガセット部のせん断応力の分布を調べると、コーナー部隅肉溶接部に比較的大きなせん断力が生じていることが認められた。この傾向は、格点部でガセットプレートの断面積が増加するため、フランジ応力の一部が腹板に移行するためと考えられる。

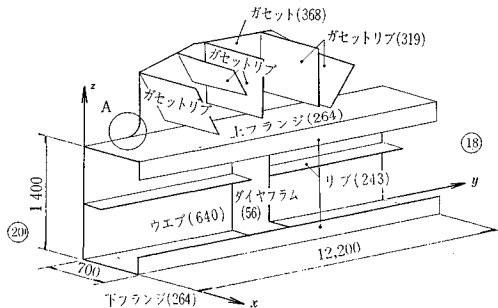
d) フィレット部における応力集中に対する検討

図-5, 12, 13 およびその他の計算結果からわかるように、フィレット部に大きな応力集中を生じていることが明確になったので、この応力集中とフィレット部の曲率半径 R の関係を次に調べた。

① 構造モデル：立体解析に用いたモデルからフィレット部を立体的に取り出し、 $R=400$ mm の円曲線および $R=600+200$ mm の複合曲線の場合について行った。

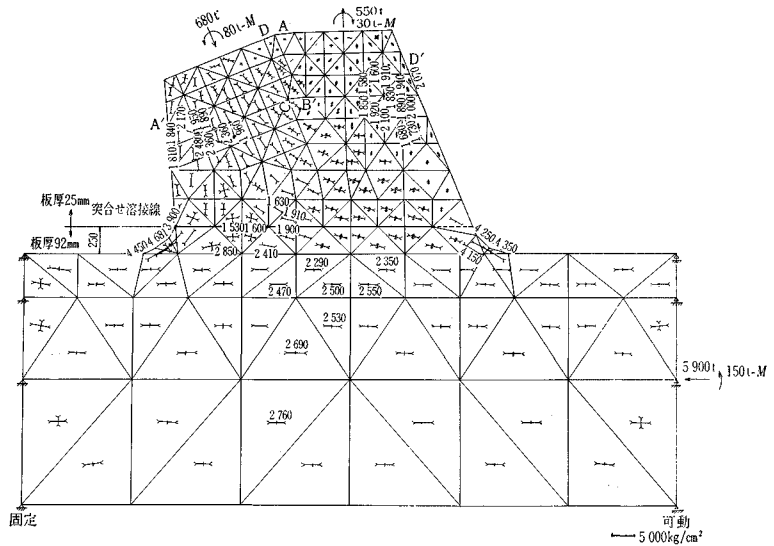
② 計算条件

③ 図-14 のコーナー部Aを立体として、部分的に取り出した局部構造モデルの周辺条件は、図-14 に示す立体モデル全体について計算された同じ箇所の変形および応力と一致するように定めた。



A: 局部構造モデル
(): 三角形要素数
その他部材 (288): 斜材, 鉛直材のフランジ

図-14 立体構造モデル



弦材および腹材に軸力と曲げが作用した場合の垂直応力分布: ガセット板厚 25 mm (SM58)
弦材板厚 92 mm (SM58)

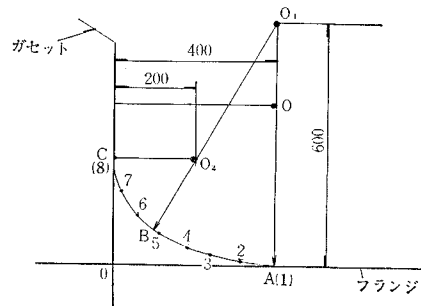
図-13 上弦材格点 (図-10 (a) に相当)

④ K-R 終端部の応力分布を明確にするため、三角形要素を密に割った。

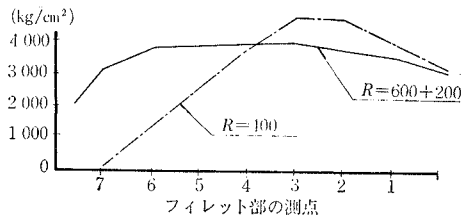
③ 考察:

① 曲率半径 R を大きくした方が最大応力が 10%程度低くなったが、断面変化がゆるやかになり応力の大きい区間が長くなる (図-15)。

② 応力集中係数 α を $R=400$ mm, $R=600+200$ mm



\overline{AB} =中心 O_1 とする $R=600$ mm の円弧
 \overline{BC} =中心 O_2 とする $R=200$ mm の円弧
(a) $R=600+200$ mm の複合曲線



(b) 合成応力度

図-15 フィレット部の応力分布

の場合について設計応力に対して比較すると、

- 1) ウェブ面の最大応力 σ_x^W に対して
 $R=400\text{ mm}$; 応力集中係数は $\alpha_x^W=1.53$
 $R=600+200\text{ mm}$; 応力集中係数は $\alpha_x^W=1.36$
- 2) フランジ面の最大応力 σ_x^F に対して
 $R=400\text{ mm}$; 応力集中係数は $\alpha_x^F=1.43$
 $R=600+200\text{ mm}$; 応力集中係数は $\alpha_x^F=1.30$

曲率半径 R を大きくすると、応力集中係数がかなり小さくなることが判明した。

4. 港大橋におけるガセットプレートの設計基準

(1) 板厚算定式

鋼材の種類にかかわらず、次式により算出した値を標準とする。

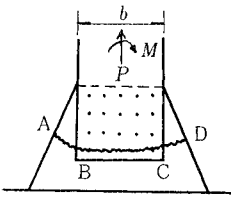
$$t = \frac{10^5}{3\sigma} \left(\frac{P}{b} + 3 \times 10^3 \times \frac{M}{b^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

- ここに t : ガセットプレートの板厚 (mm)
 P : そのガセットで連絡される腹材に作用する軸力 (t)
 M : そのガセットで連絡される腹材に作用する曲げモーメント (t・m)
 b : そのガセットで連絡される腹材のガセット面に接する部分の幅 (mm)
 σ : 鋼材の許容応力度 (kg/cm²)

図-16

【解 説】

図-13の最大応力線 A, B, C, D 付近に相当する応力度は最大で、たかだか 2500 kg/cm² であるので、使用鋼材 SM 58 の許容応力度 2600 kg/cm² に満たないことから推察すると、式によれば十分安全であると考えられる。道路橋示方書の式 (10.3.1) は最大応力線 A, B, C, D を 2.0b としているが、本橋においては有限要素法による検討の結果 1.5b とした⁹⁾。また、式 (1) については模型 A タイプ、B タイプによる弾性実験においても、設計荷重下において許容応力度以内に入っていることを確認した。



A, B, C, D: 最大応力線
 $(AB+BC+CD=1.5b)$

図-16

(2) ガセットプレートと弦材の接合法

ガセットプレートは弦材のウェブを、フランジ面から 250 mm 伸ばしたところで板継ぎを行う。

【解 説】

3. (1), b) 図-13 参照。

(3) 自由長の大きい増長の補強方法

a) ガセットプレートの縁端を補剛しなくてもよい最大自由長について

① 自由辺が一樣な圧縮応力を受ける場合

ガセット材質	最大自由長 (a/t)
SS 41	76
SM 50	61
SM 58	53

② 自由辺が一端で圧縮応力、他端で引張応力を受ける場合

ガセット材質	最大自由長 (a/t)
SS 41	91
SM 50	73
SM 58	54

b) 補剛リブの剛性について

ガセットプレートの自由辺をリブのついた両端単純支持の柱として $l/r=60$ になるようにリブを決めること。リブの材質は SS 41 とする。

【解 説】

AASHO の規定を適用すると、材質 SS 41 の場合、自由長と板厚の比が 130 となり、実験 (「2.」参照) の供試体の場合、リブで補剛の必要が生ずる。そこで、実験の結果ではかなり不利な状態で載荷しても座屈を生じなかったので——ガセットプレートの板厚を式 (1) で求めた場合は、補剛に対して AASHO の規定を使用しなくてよいと思われるが——安全のためリブで十分に補強することにした。

a) ① については、次のように考えた。すなわち AASHO において、Ⓐ: 周辺単純支持の板厚規定 b/t と、Ⓑ: ガセットプレートの自由長に対する規定 a/t との関係が、Ⓐ $\times 1.9$ =Ⓑ となっている。そこで、これを日本の場合に適用すると、SM 58 の場合、道路橋示方書において、 $b/t=28$ であるから $a/t=28 \times 1.9=53$ 、同様にして、SM 50, SS 41 を上述のように決めた。一方、

a) ② については、a) ① より安全側になるので単純に a) ① の値を道示 3.2.2 のただし書の値を採用して、1.2 倍に緩和することにした。

b) について リブの剛度の決め方は、ガセットプレートの自由辺をリブのついた両端単純支持の柱として $l/r=60$ になるように決めた。このときのリブ付きガセットプレートの自由辺における柱としての許容圧縮応力度は、SM 58 に対して $\sigma_{ca}=1634\text{ kg/cm}^2$ である。図-4 の実測結果から、ガセットプレート自由辺の応力度は約 300 kg/cm²、このときの斜材応力度は約 600 kg/cm² であった。もし、斜材応力度が許容応力度 $\sigma_{ca}=2600\text{ kg/cm}^2$ になったときのガセットプレート自由辺の応力度

σ は $\sigma = (2600 \times 300) / 600 = 1300 \text{ kg/cm}^2$ である。すなわち、 $\sigma < \sigma_{ca}$ である。

AASHO ではリップつきガセットプレートの剛度の規定はなく、オーバン橋においては非常に小さなリップが設けられており、 $l/r=85$ 程度である。本橋においては、上述のように安全側をとり、 $l/r=60$ として設計を行う。

(4) フィレット部の R について

ガセットプレートのフィレット部は応力集中を生じるので、フィレットの R を安全側に $R=600+200 \text{ mm}$ の複合曲線とする。

【解説】

2.(2).c) ⑤ 5) の実験結果や、3.(2).d) ③ 2) に述べた有限要素法による結果からも明らかなように、曲率半径を大きくすると応力集中は緩和されることが判明した。しかし、材料がむだになり製作上ハンドリングが難しくなる。また、美観上からもよくない。そこで、応力集中率 $\alpha=1.3$ になる程度の複合曲線 $R=600+200 \text{ mm}$ を採用した。 $\alpha=1.3$ を考慮した場合の箱断面コーナー部の隅肉溶接部の設計強度は規定される、あらゆる応力状態に対して十分であった⁹⁾。

(5) ハンドホールは設けない。

【解説】

2.(2).c) ⑤ 4) 参照。

5. あとがき

① 港大橋における格点部の設計に適用した基準式の妥当性を検討するため、実験および有限要素法による解析を行った結果を述べた。

② 二次曲げモーメントを受けるガセットプレートの自由辺の局部座屈および腹材の添接部の強度についての設計資料を得るための模型実験について述べた。

この結果が長大トラス橋の格点構造の設計の多少なりとも参考になれば幸いである。

本実験ならびに理論的検討は、南港連絡橋技術委員会の委員長である小西一郎京大教授を始め、各委員の方々のご指導によるものであるので感謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書，昭和47年10月。
- 2) アメリカ合衆国州道路技術官協会 (AASHO)。
- 3) 笹戸松二・河井章好：南港連絡橋上部工の設計とその問題点 (上，下)，橋梁と基礎，1973年6月，7月。
- 4) Schaper: Feste stählerne Brücken.

(1973.7.23・受付)

東京都文京区本郷5-5-18 ☎113 山海堂 * 図書案内

振替東京194982 ☎816-1611

著者等が長年の調査・研究の成果を
まとめた今後の指導書——発売中

生物による水質調査法

津田松苗・森下郁子著 A5判・256頁 2000円

推薦 ■ 飯塚敏夫 建設省河川局河川計画課長

本書は、一般の河川技術者や水質保全に従事する技術者を対象に生物学的な調査法を教育するための教科書であって、本書が関係者の座右の書として役立つものであることを信じ、広く江湖に迎えられることを期待する。

主要目次 I編 河川概説／水中の生物／生物学的水質判定 (水質汚濁と生物相・生物学的水質階級)／生物学的水質調査の実例 (普通の河川のマクロな生物相・寝屋川、安成川、大和川、紀の川等の生物学的水質判定他)／川の諸条件と魚の分布 II編 湖とダム湖湖／湖における生物学水質判定の実例 (琵琶湖・手賀沼・印旛沼・霞ヶ浦他)／ダム湖／ダム湖の生物学的水質調査の実例 (青蓮寺ダム湖／天ヶ瀬ダム湖／岩尾内ダム湖他)

土木工事施工法

白石俊多著 B5判・240頁 2800円

改訂増補 最新測量機器便覧

日本測量機器工業会編 A5判・380頁 1300円

『土木施工』5月号臨時増刊 予価 800円

土木施工管理技術検定

土木工事技術者学科試験問題48年度1，2級問題解説と解答試案 試験にそなえて法規関係，施工計画，工程管理，安全管理，品質管理等問題と解説 1級土木施工管理技術検定宅地試験問題と解答試案 わが受験体験記，談ほか

4月末日発売

1級土木技術者学科試験問題と解説 1200円

2級土木技術者学科試験問題と解説 1200円

48年度1，2級学科試験問題解答試案付

土木施工管理技士受験講座全5巻

土木施工研究会編 各A5判 1000円