

景観を考慮した鋼製橋脚の設計・製作

大阪第一建設部 設計課 吉川 紀
計画部 計画第一課 松浦 健二
大阪第一建設部 設計課 山内 幸裕
大阪第三建設部 設計課 中村 忠春

要 約

近年、都市高速道路は、都市内構造物として景観への配慮が要求されており、鋼製橋脚においても例外ではない。本報告は鋼製橋脚の景観への配慮として ① 柱の各コーナー部に曲面を設けた事例 ② 梁先端部に曲面を設けた事例等を報告するものである。

特に前者の場合は、曲面部を構造部材として用いており、設計製作に細心の注意を払っている。さらに材料試験、FEM解析現場載荷試験を通じて設計の妥当性を確認している。

材料試験ではSM58材の曲げ半径 $12t$ (t : 板厚) の冷間曲げ加工による材料劣化の有無を確認し特に問題がないことを明らかにした。

FEM解析及び現場載荷試験では、今回採用した梁腹板差し込み構造の応力の流れを確認した。この結果短形断面に比べせん断遅れの影響が比較的小ないため、隅角部では奥村・石沢の式、柱部では有効巾を考慮した梁理論を用いた設計で安全側になることを明らかにした。後者は曲面部を化粧板で処理しており化粧板の設計の考え方について紹介している。

まえがき

最近の傾向として、都市高速道路においても都市内構造物としての景観への配慮が要求されており、RC構造物では従来から構造物全体に丸みを持たせる等の景観を考慮した設計を実施している。

阪神高速道路はそのほとんどが高架構造であり、高架下は街路などに利用されている場合が多いことから、橋脚位置に制約を受け鋼製橋脚を用いて対処することが多い。このため、現在鋼製橋脚は橋脚基数約5000基のうち約500基と全体の約10%を占めており、鋼製橋脚に対しても景観を考慮した設計の必要性が高まっている。

本文は、当公団で最初の試みとして橋脚の各コーナー部に曲面を設け、柔らかさを強調した鋼製橋脚の設計・製作について報告するものである。

1. 曲面を持たせた部材を本体に使用した例

1-1 橋脚の概要

大阪第一建設部では、大阪湾岸線南伸部浜寺高砂工区で柱部のコーナー部に半径500mmの曲面を設けた鋼製橋脚を設計施工している(写真-1, 2, 図-1)。採用した柱断面図を図-2に示す。梁部は従来通りの矩形断面である。試験施工は2基について行い、すべてT型単柱である。

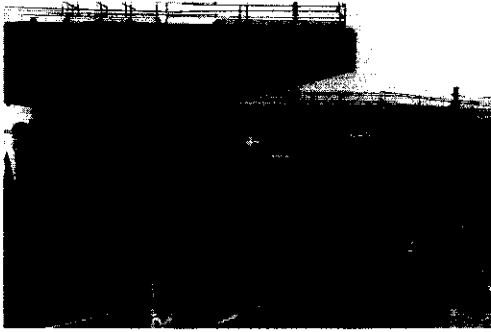


写真 - 1

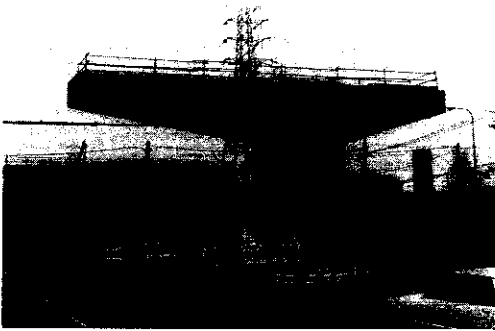


写真 - 2

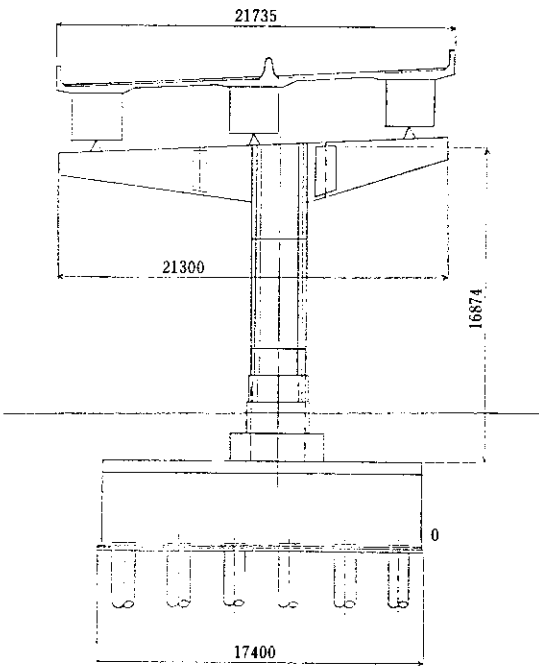


图 - 1 桥脚一般图

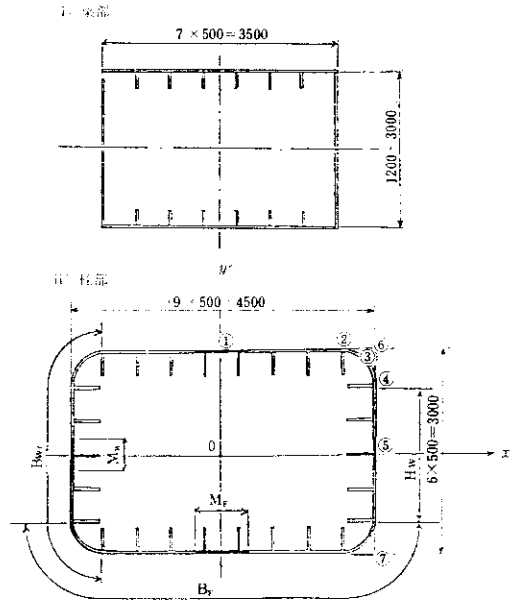


图 - 2 断面图

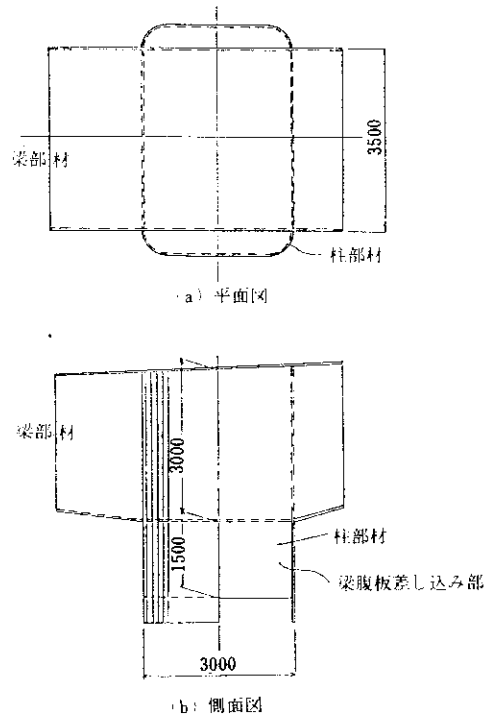


图 - 3 隅角部

隅角部の構造は図-3の通りである。梁腹板は腹板高の $\frac{1}{2}$ を柱内部へ差し込む構造としている。

本橋脚の設計・施工上、特に着目した点は以下の通りである。これらは各段階で十分検討を行い一応の成果を得ている。

- ① 曲面を持つ矩形断面の有効巾の考え方。
- ② 隅角部でのシャープ、梁腹板差し込み部の応力の伝達等の応力集中箇所がないかどうか。
- ③ 鋼板の最小曲げが約 $10t$ となり、鋼板のじん性が低下していないか (t は板厚 mm)。

1-2 設計の概要

梁部は二軸対称断面を有する箱形断面とみなし、曲げによる垂直応力度の計算には有効巾を考慮した。

隅角部は図-4に示す計算モデルに置換し、公団基準に従って設計した。

柱部の応力度の計算は以下のように仮定して行っ

た。記号は図-2に示す。

- ① 総断面はフランジ巾 B_f と腹板高 H_w とする。
- ② フランジの有効巾(面内方向)は B_f とする。
- ③ 腹板の有効巾(面内方向)は B_w とする。
- ④ 曲げ剛度は有効巾内の断面を有効とし求める。
- ⑤ 圧縮応力を受ける補剛板の最小板(道示Ⅱ 3, 2, 3)の計算に必要な応力勾配 ϕ は点⑥⑦の応力度を用いて求める。
- ⑥ 円弧部の補剛材間隔は展開長を用いる。
- ⑦ せん断流及びねじり剛度の算出にはリブを含める。
- ⑧ 断面諸定数は曲線フランジとして求める。

1-3 使用鋼材についての検討

柱断面に使用する鋼板(SM58Q, $t = 45\text{mm}$)は最小半径が $12t$ の冷間曲げ加工を行うため、シャルピー試験を実施し、材質の劣化によるじん性の

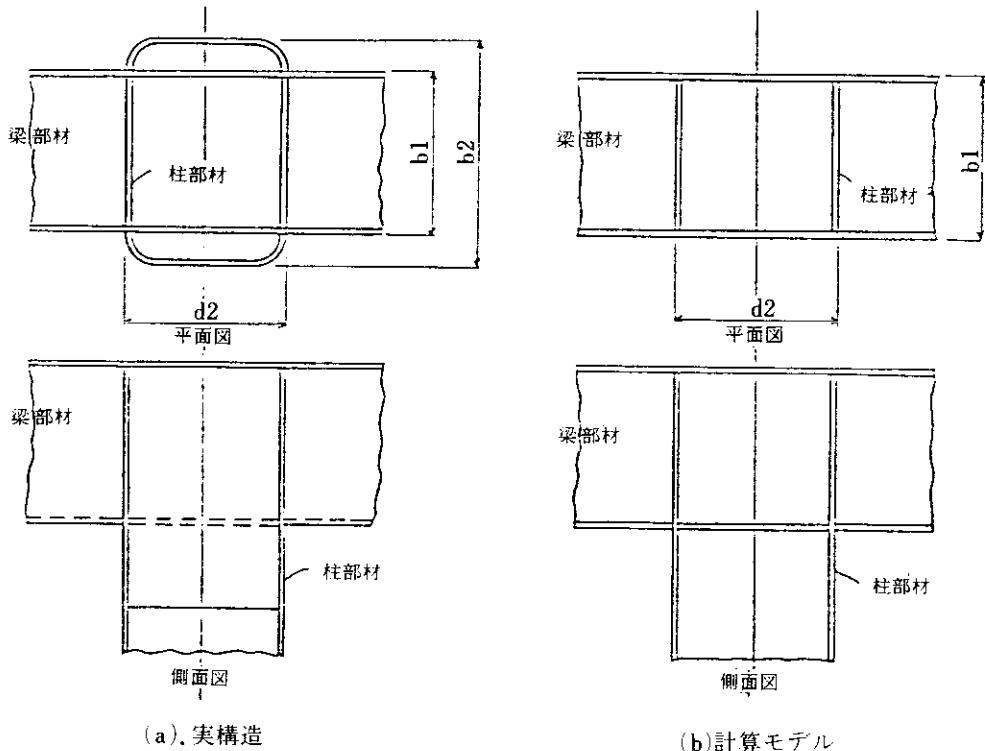


図-4 計算モデル

低下を調査した。

試験はJIS Z 2242に従って実施した。供試体は実構造物と同様の鋼板を曲げ外面に曲げ半径12t相当の5%塑性歪を生ずるようにプレス加工し、その外面から採取した。なお比較のため、表-1に示す4種類の供試体について、それぞれ試験温度-60℃、-30℃、±5℃、+30℃の4段階で試験を行った。

なお、ひずみ時効処理は曲げ加工材を250℃で1時間保持後除冷した。また応力除去焼鈍では570℃で2.5時間保持した。

結果を図-5に示す。曲げ加工材B、Cは素材

表-1 供試体の種類

供試体	処理方法
A	素材
B	曲げ加工
C	曲げ加工+ひずみ時効処理
D	曲げ加工+応力除去焼鈍

Aに比べて温度-30℃以上で約5%の劣化がみられるが、すべて基準値を満足しており、特に問題がないといえる。

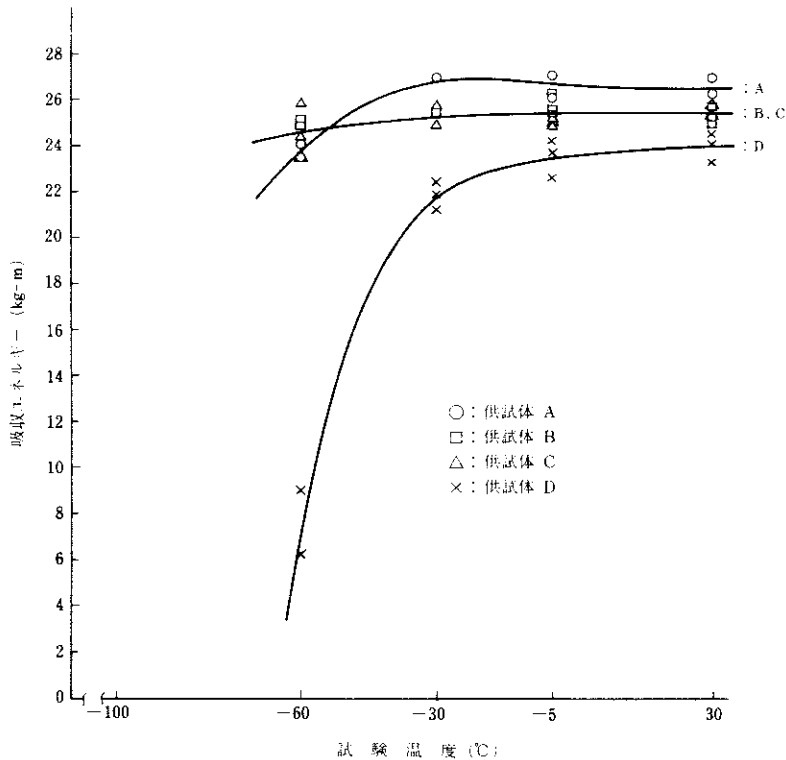


図-5 シャルピー試験結果

1-4 製作の概要

従来の鋼製橋脚に比べ特に留意した点及び組立方法について述べる。

曲げ加工は曲率の精度や曲げ巾等の断面形状保持が重要であるため、図-6に示すような厳重な精度管理を行った。この外、曲げ加工部の塑性変形量のバラツキをおさえ局部的な過大塑性変形を防止するため、40~50mm程度の小ピッチでプレス加工を実施した。

組立て段階で所定の調整が出来るよう図-7に示す通り、曲げ加工鋼板を基部から梁部まで一体継ぎを行い、隣接ブロックとの関連や腹板面と縦継手部の位置関係とを確保した状態で一括再けがきや再切断を行った。これは組立て後の製品精度の確保や部材の目違い等を防止することにもなる。

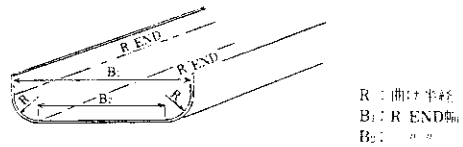


図-6 曲げ精度の管理項目

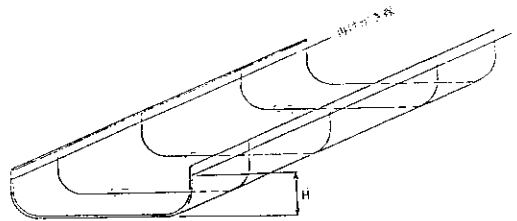


図-7 再けがき・再切断要領

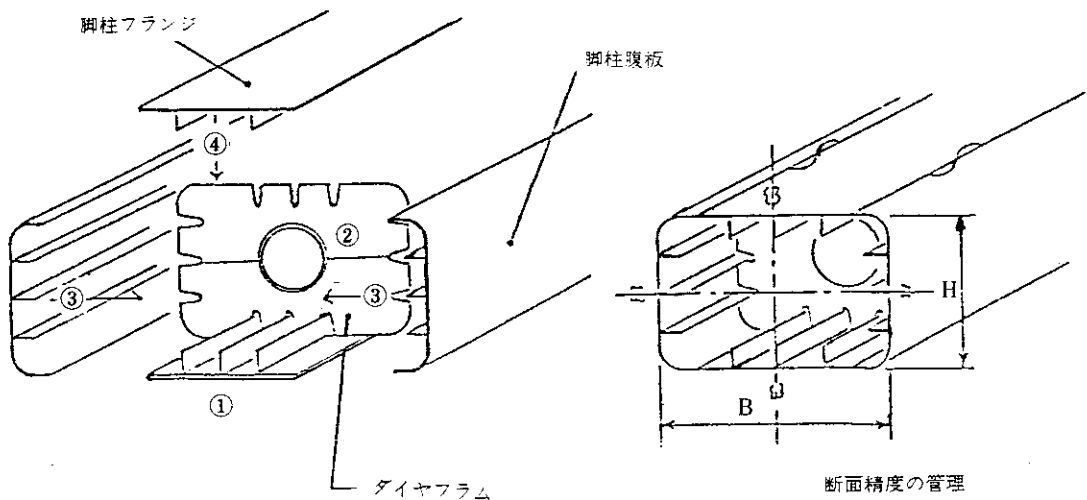


図-8 ストレートブロックの組立順序と要領

脚柱部の組立ては図-8に示す順序で行った。また隅角部でロックは図-9に示す順序で行っている。

なお、脚部の現場継手は景観を考慮して、現場溶接継手を採用している。

本橋脚の欠点として、隅角ブロックが大きくなり、かなり重くなることがあげられる。これは①柱部が梁腹板の差し込みと柱腹板の2枚構造になっ

ていること、②さらに構造上、隅角部に現場溶接継手を設けることが困難なこと、③柱部が梁部からそれぞれ500mm両側に張出すことになり、柱の必要巾に対して橋軸方向に余分に1m長くなること、などの理由による。このため、本ブロックは陸送が困難となり、台船による輸送を行い、附近の公共埠頭より水切後、トレーラーを用いて現地に搬入している。

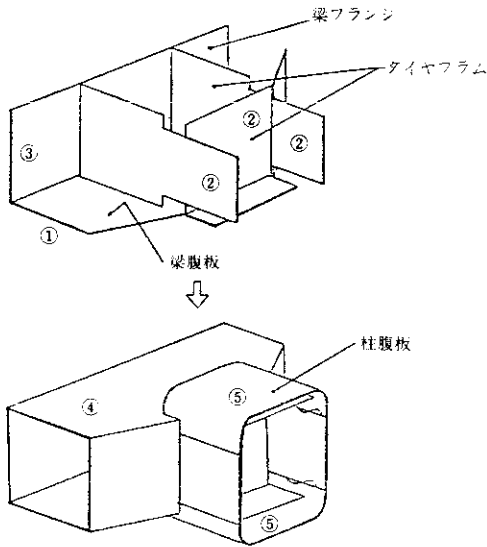


図-9 隅角ブロックの組立順序

1-5 構造解析

本橋脚は隅角部の梁腹板と柱腹板とが面違いになっているため割り込み方式にしている。さらに柱腹板の応力の流れを良くするために梁腹板の一部を柱に差し込む構造を採用している。このため従来の構造とは異ったものになり、その安全性をFEM解析や実橋載荷実験（以下：実験）で確認した。実験については後節で記述する。

構造解析には汎用プログラムのNASTRANを使用した。構造及び荷重の対称性から全体構造物の半分を解析モデルとした。図-10に要素分割部を示す。要素はすべて板要素である。

計算結果から変位図及び応力等高線図を作成し検討を加えた。活荷重載荷状態での応力等高線図を図-11, 12 に示す。

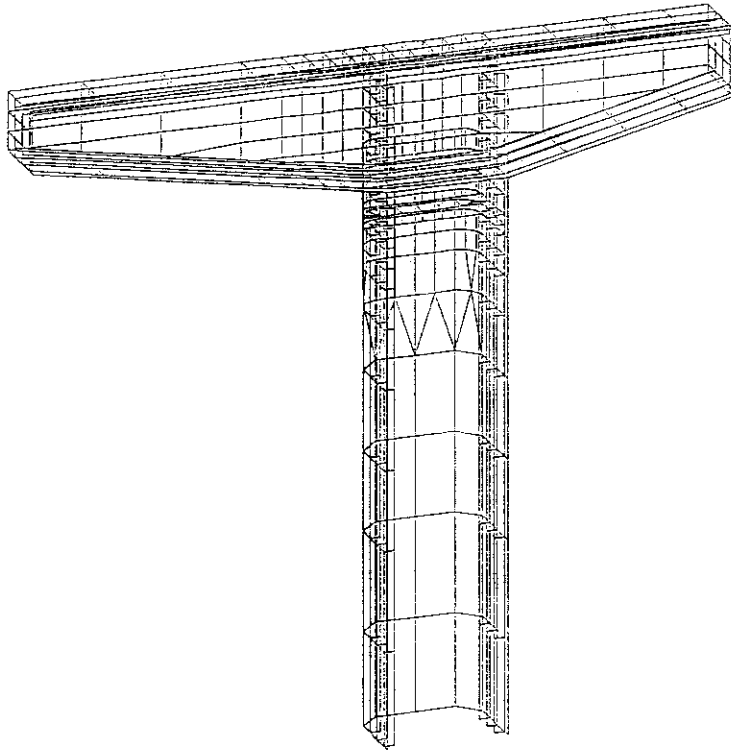


図-10 FEM解析用モデル（要素分割）

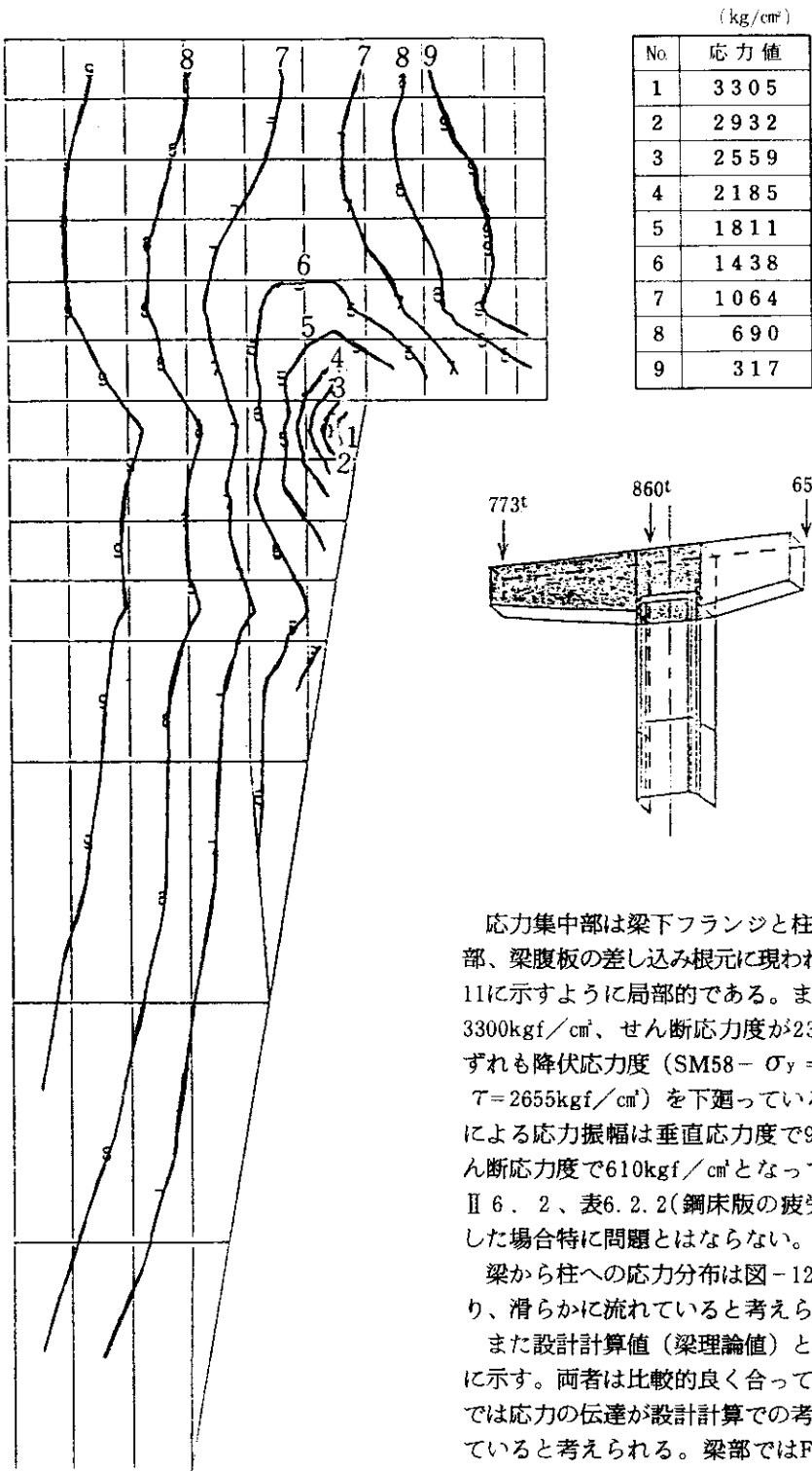
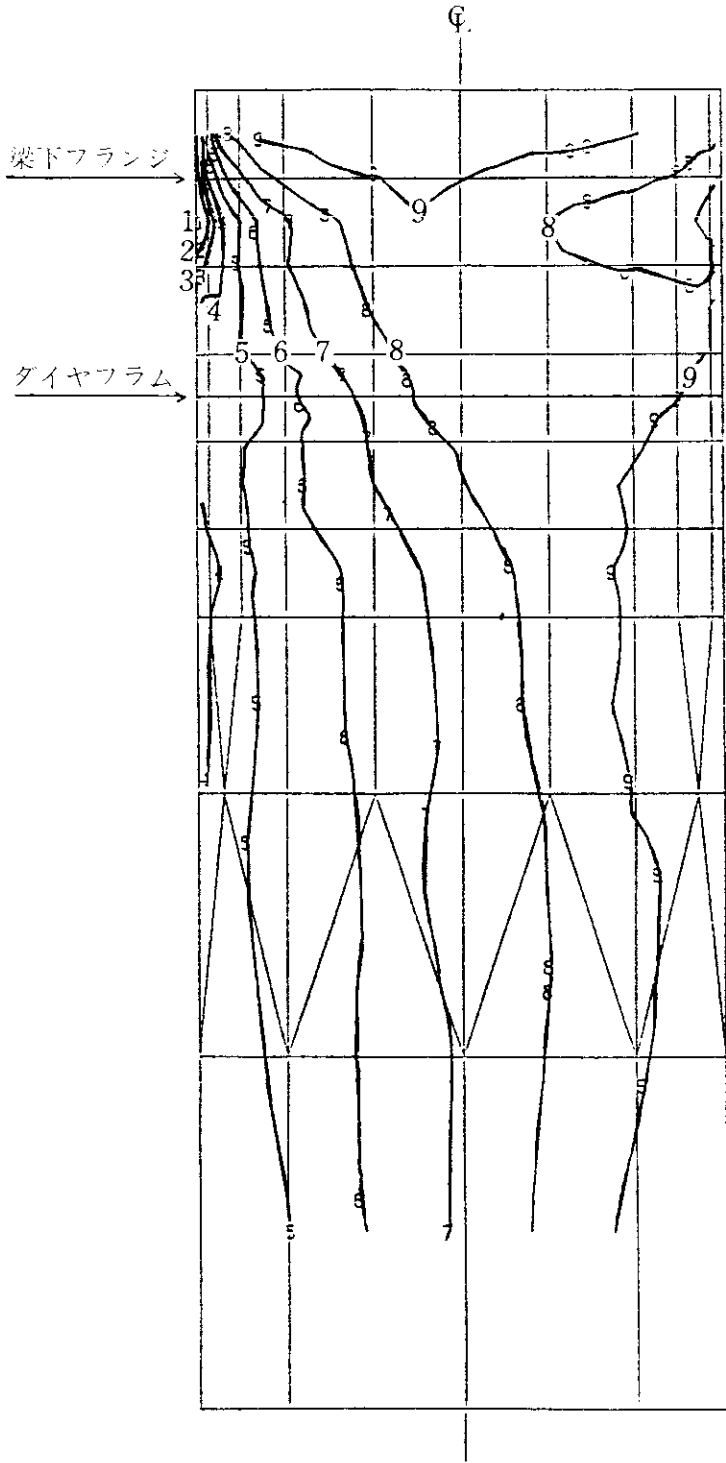


図-11 梁腹板の最小主応力分布図

応力集中部は梁下フランジと柱フランジの交差部、梁腹板の差し込み根元に現われているが、図-11に示すように局部的である。また圧縮応力度が3300kgf/cm²、せん断応力度が2300kgf/cm²といずれも降伏応力度 (SM58- $\sigma_y = 4600\text{kgf/cm}^2$ 、 $\tau = 2655\text{kgf/cm}^2$) を下廻っている。また活荷重による応力振幅は垂直応力度で980kgf/cm²、せん断応力度で610kgf/cm²となっているが、道示Ⅱ6.2、表6.2.2(鋼床版の疲労強度)を準用した場合特に問題とはならない。

梁から柱への応力分布は図-12に示すようになり、滑らかに流れていると考えられる。

また設計計算値(梁理論値)との比較を図-13に示す。両者は比較的良く合っており、特に柱部では応力の伝達が設計計算での考え方通り行われていると考えられる。梁部ではFEM解析に薄板のせん断変形によるせん断遅れ現象がみられるのが特徴的である。



(kg/cm²)

No.	応力値
1	1711
2	1519
3	1327
4	1134
5	942
6	750
7	558
8	366
9	174

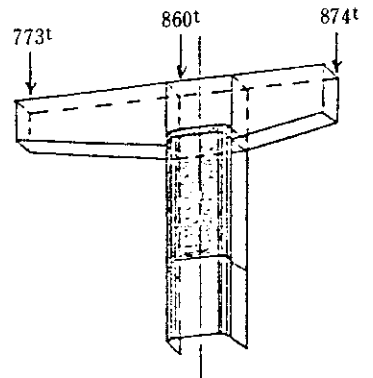


図-12 柱腹板の最小主応力分布図

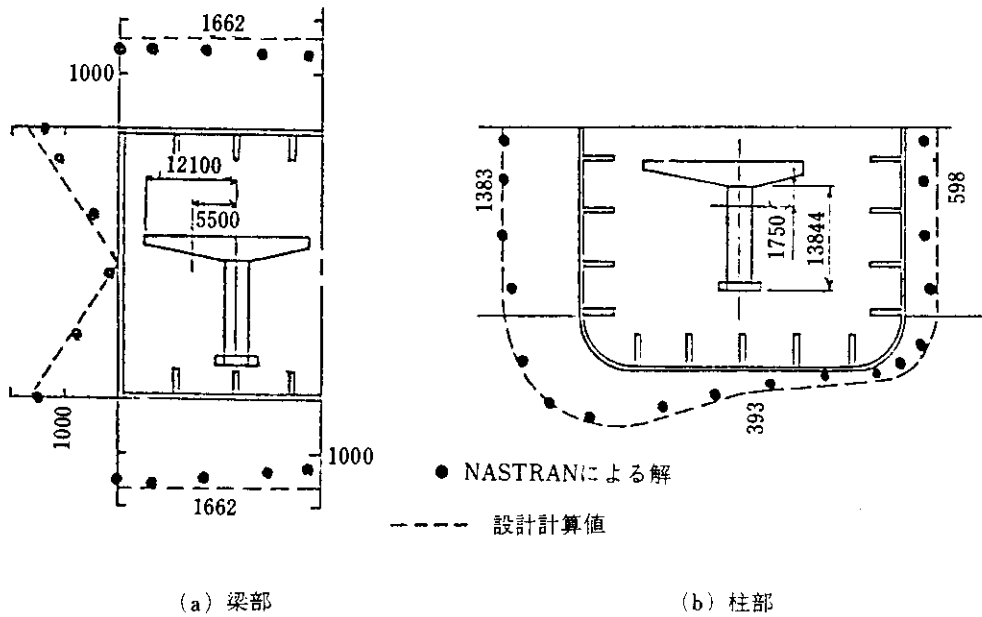


図-13 垂直応力分布

1-6 実橋載荷実験

これまでの成果を基に、実橋の安全性を確認するため実験を行った。

実験は図-14に示すように、橋脚中心から8.2 m離れたフーチング上に反力杭（鋼管杭：φ800 mm）を設け、油圧ジャッキにより静的荷重を載荷して行い、梁・柱各部の変位や応力を計測した。

実験の概要

日時：昭和61年5月25日 13:00～15:00

載荷方法（図-14）：静的載荷3回

（1サイクル $p = 0^t \rightarrow 40^t \rightarrow 70^t \rightarrow 100^t \rightarrow 70^t \rightarrow 40^t \rightarrow 0^t$ ）

計測項目

- ① 梁腹板と柱腹板の面違いによる梁部への影響を調べるため隅角部の梁断面の応力計測。
- ② 梁腹板差し込み部の梁腹板の応力分布を調べるための梁腹板の応力計測。
- ③ 梁腹板差し込み先端部近傍の応力集中の程度を調べるため柱腹板の内外面の応力計測。
- ④ 曲げ加工部の応力分布状態を調べるため、柱断面の応力計測。

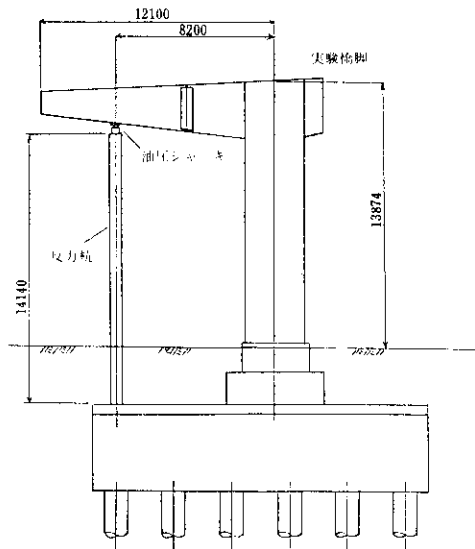


図-14 実験橋脚と実験方法

- ⑤ たわみに対する曲げ剛度の取り方を検討するため、梁先端の鉛直変位及び柱天端の水平変位の計測。

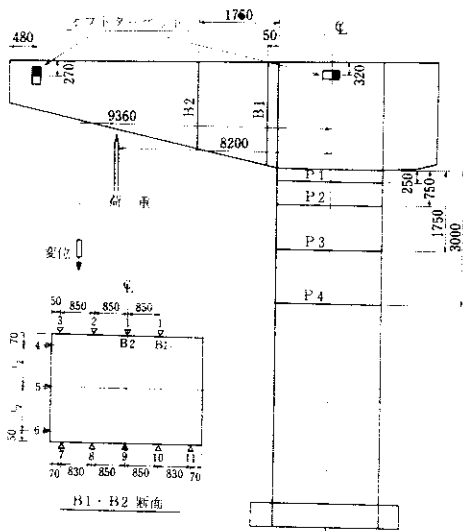


図-15 測定位置図

梁・柱部の測定断面位置を図-15に示す。なお変位はオプトフォローを用いて計測した。

梁断面・柱断面の100t載荷時での代表的な応力分布を図-16, 17に示す。また同様に隅角部の応力分布としてP-1断面の結果を図-18に示す。また、梁腹板差し込み先端部の柱部の応力分布を図-19に示す。併せて、同様の載荷状態でのFEM解析値、梁理論値を図-16~19に示し比較検討を行った。

実験結果をFEM解析結果とは良く一致しており、梁腹板差し込みによる効果もほぼ理論通りであった。また従来から用いられている梁理論や奥村・石沢の式、及び今回採用した有効巾の考え方などと比較すると以下の通りである。

○ : 実験値

▲ () : FEM解析値

---< > : 梁理論による値

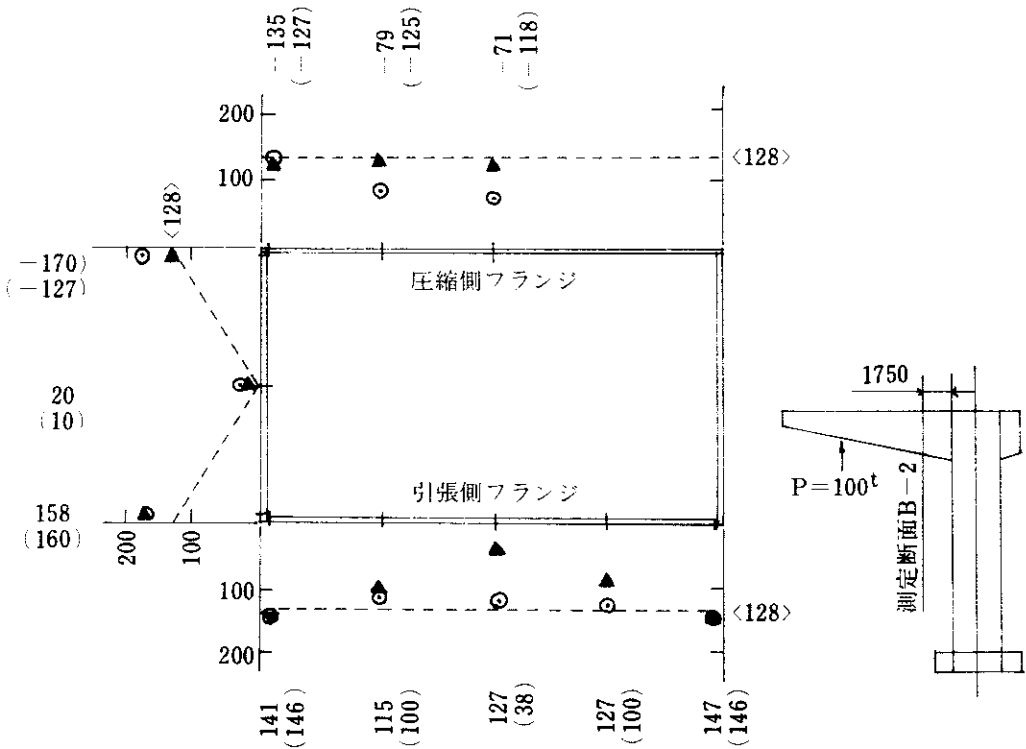


図-16 測定断面梁部B-2の応力分布

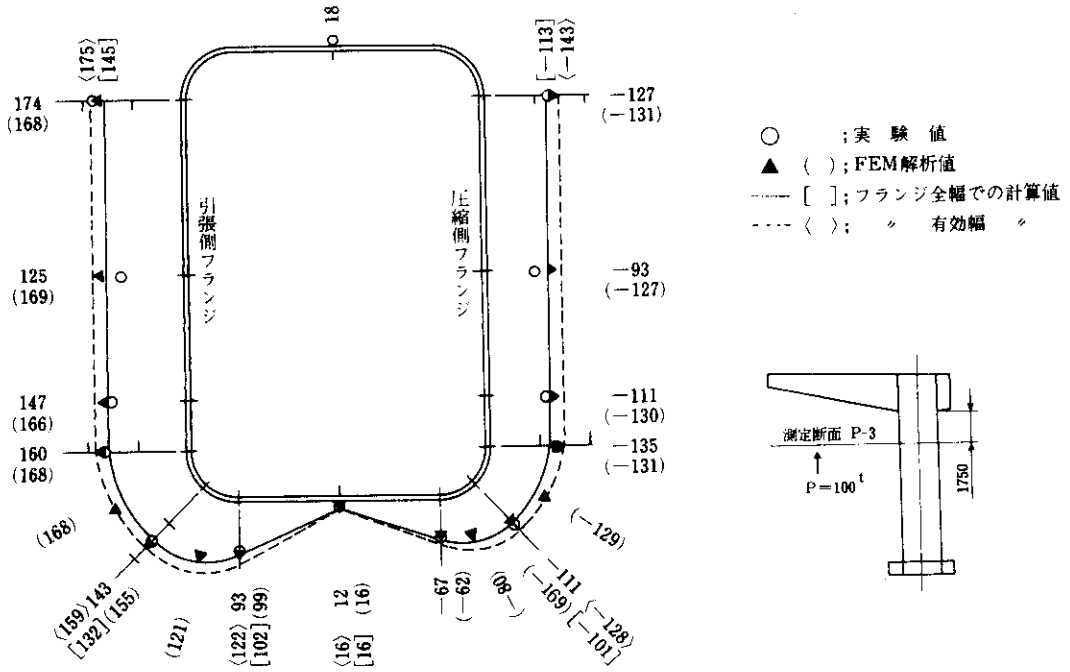


図-17 測定断面柱部P-3の応力分布

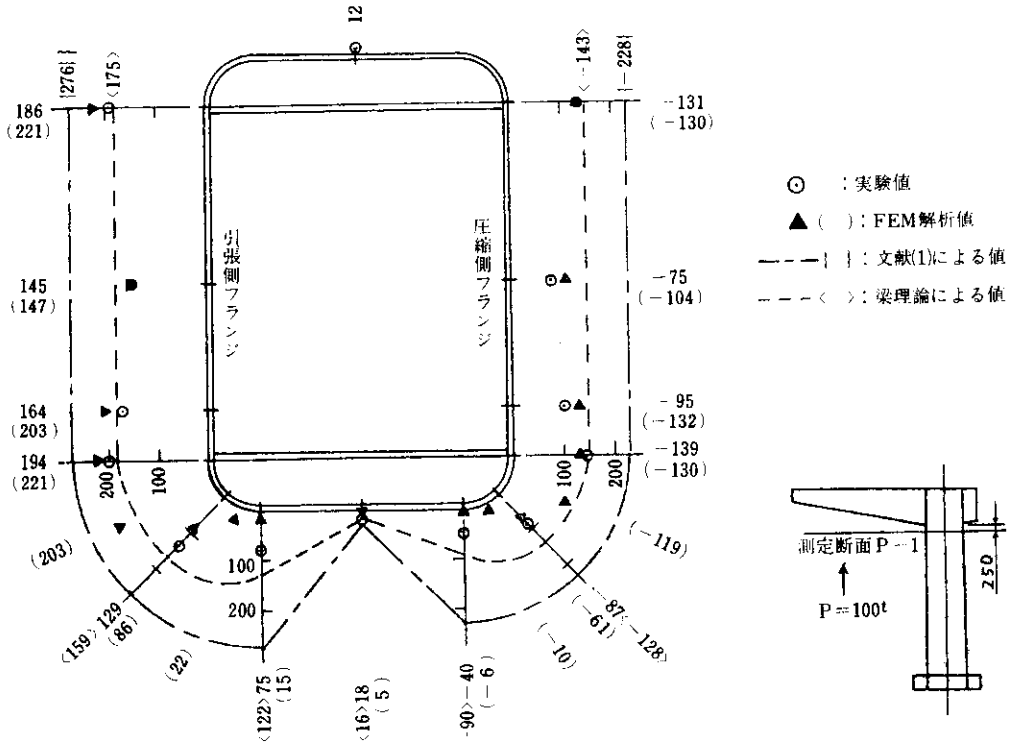


図-18 測定断面柱部P-1の応力分布(隅角部)

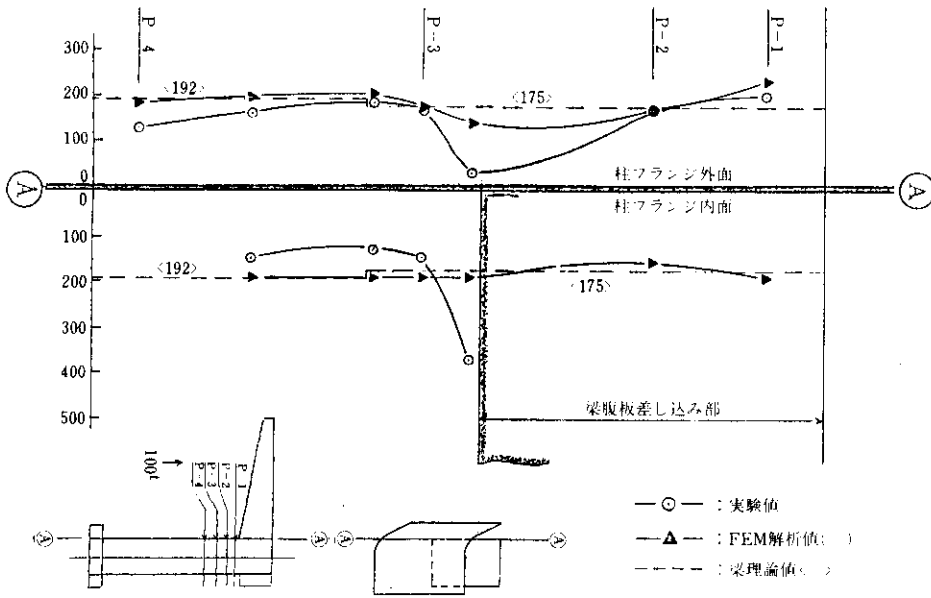


図-19 梁腹板先端部の柱部応力分布

- ① 隅角部の梁下フランジ（断面B-1）は応力集中があり、奥村・石沢の式の約1.8倍になった。
- ② 隅角部から距離 $B/2$ （ B ：柱巾）離れた測定断面2、隅角部の測定断面1は奥村・石沢の式の約0.7倍となり、せん断遅れの影響が小さい。
- ③ 柱の測定断面位置2、3は、今回採用した有効巾による梁理論値と良く一致した。
- ④ 柱の測定断面位置4から下はフランジ全巾有効とした計算値と良く一致した。

なお、鉛直変位・水平変位ともフランジ巾を全巾有効として梁理論により計算した値と良く合っており（図-20, 21）、今回採用した隅角部の梁腹板差し込み構造は梁部と柱部とを十分に剛結しているものと思われる。

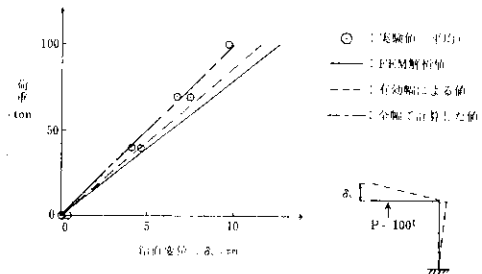


図-20 梁先端の鉛直変位 (δ_v)

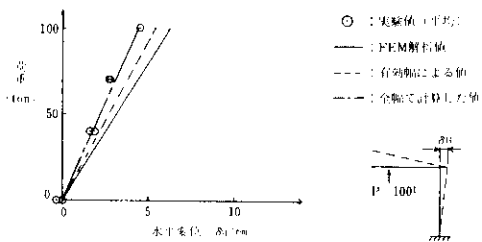


図-21 柱先端部の水平変位 (δ_H)

1-7 まとめ

鋼製橋脚のコーナー部に半径500mmへ曲面を持たせるために採用した今回の構造についてまとめると以下の通りである。

- ① SM58材は10t程度の曲げ加工であれば特に問題にならない。
- ② 本構造は、通常の矩形橋脚に比べせん断遅れの影響が比較的に小さいため、隅角部の設計は奥村・石沢の式で検討すれば十分である。
- ③ ただし、梁下フランジと柱フランジとの交差部は応力集中があるため、今後構造を検討する必要がある。(通常の橋脚も同様)
- ④ 梁腹板差し込み構造は、先端部の板曲げにらる局所的な応中集中がみられるが梁部と柱部とを十分な剛性を確保して一体化しており概ね妥当である。
- ⑤ 柱部は有効巾を考慮した梁理論を用いて設計を行えば安全側となり十分である。
- ⑥ 本設計では隅角ブロックが大きいかつ重くなるので、今後さらに構造ディテールを検討する必要がある。

2. 曲面を持たせるため化粧板を使用した例

2-1 概要

大阪湾岸線朝潮橋工区は、旧大阪国際見本市会場内(八幡屋公園用地)を通加している。昭和61年度には、残りの見本市施設が撤去される予定であり、八幡屋公園(11.1ha)を、西大阪地域の核

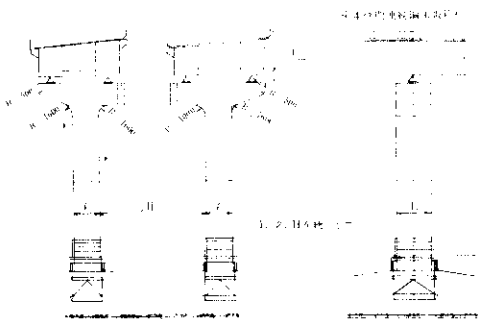


図-22

となる都市公園として整備することが決り、すでに八幡屋公園基本計画設計競技も行なわれ、優秀作品も決定している。このため公園内の鋼製橋脚に対して、景観を配慮した設計(図-22)を行なったので、以下その点について述べる。

2-2 景観を配慮した構造(写-3)

- ① 構造計算から部材寸法を決めると、各橋脚の最適部材寸法はまちまちになるが、できるかぎり外形寸法を統一した。
- ② 柱間隔及び固定脚以外の柱の大きさを同じとした。
- ③ 橋脚梁の端部と箱桁外ウェブ面とを合わせた。(図-22“b”部)
- ④ 橋脚の各コーナー部に円弧曲線を入れ柔らか味を出した。

写真-3



2-3 曲線部の構造

円弧ハンチ形隅角部近傍には、上部工の支承があり上部工の荷重伝達及び円弧フランジ近傍の補強方法が複雑となる。また構造部材としての実績がない等の理由により化粧板形式とした。板厚については製作時のひずみ、曲げ加工を考慮して $t=6\text{mm}$ (SS41)とし、化粧板($R=1000, 1600\text{mm}$ の円弧板)の橋脚本体への取付を容易にするため1m程度の間隔でリブ($620 \times 19 \times 620$)を配置した構造にした。(図-23)

取付方法は、リブを橋脚本体に取付、次に曲げ加工し内面塗装(A-2仕様)した化粧板をリブ及び本体に押し当ててリブにスポット溶接、まわりをスミ肉溶接で取付た。

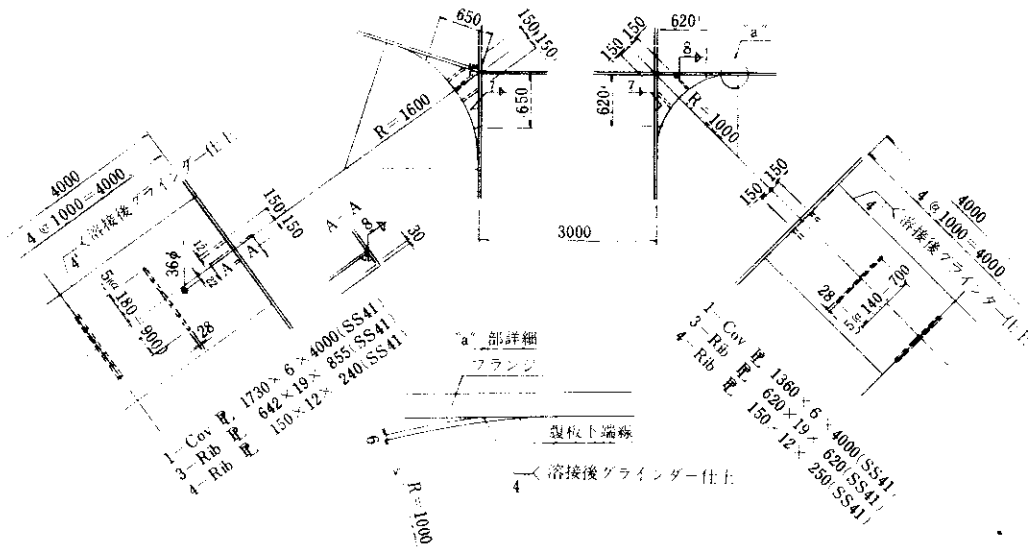


図-23 隅角部化粧板詳細

あとがき

鋼製橋脚のコーナー部に曲面を設け、柔らかさを出した設計、特に曲面を一次部材として使用した場合の設計上の問題点、①隅角部の構造、②曲面部の有効巾、③曲げ加工などの諸問題について一応解決している。また、化粧板を使用した場合の事例についても紹介した。都市高速道路の景観に対する要求は高まる一方である。今や現場溶接は当り前の時代である。今回の試みも、さらに一般的に普及する可能性がある。それまでに残された問題点を一つずつ地道に解決していく技術的な努力が必要でないかと思われる。

最後に設計施工にあたり、御指導を賜りました大阪市立大学 中井教授、大阪大学 堀川助教授、京都大学 渡辺助教授、大阪市立大学 北田助教授、また直接設計・施工を担当しました(株)佐世保重工業、(株)栗本鉄工所の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団；設計基準第2部 昭和60年4月
- 2) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説・鋼橋編 昭和55年2月
- 3) 堀川浩甫；冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化、土木学会論文報告集第300号 P13~P20 昭和55年8月