

RC柱と鋼製梁による複合橋脚の載荷試験

Static Load Test of the Pier by Hybrid Structural System with Steel and RC Column

菊川 長郎

Takeo KIKUKAWA

川田工業㈱大阪支社技術部設計一課課長

坂田 正二

Shoji SAKATA

川田工業㈱大阪支社技術部設計二課係長

高田 嘉秀

Yoshihide TAKADA

川田工業㈱大阪支社技術部設計二課課長

青木 芳夫

Yoshio AOKI

川田工業㈱大阪支社技術部設計二課

渡辺 潔

Kiyoshi WATANABE

川田工業㈱富山工事事務課課長

望月 秀之

Hideyuki MOCHIZUKI

川田工業㈱大阪支社技術部設計二課

To repair the bridge in Kobe Route 3 of the Hanshin Express Highway, heavily damaged by the 1995 Great Kobe Earthquake, the pier by hybrid structural system with steel beam and RC column was utilized.

The pier by combination of structural steel beam and RC column is designed to reduce the dead load acting upon footings. Beams are steel structures, whereas plant fabricated steel beams make short lead time possible due to the simplified work at the construction site.

To verify dynamic characteristics and load resistance of a pier by hybrid structural, steel beam and RC column, an indoor load test with a 1/5 scale sample, and a field test with a full scale sample were conducted. This paper reports its details and results.

Key words : the pier by hybrid structural system with steel and RC column, load test

1. まえがき

兵庫県南部地震により被災した阪神高速道路3号神戸線におけるPC梁橋脚(P375)の復旧工事に、鋼製梁とRC柱を連結した複合橋脚(以下複合橋脚)が採用された。複合橋脚はPC梁橋脚と比較すると迅速な施工が可能であり、首都高速道路公団、日本道路公団においても研究実用化が試みられている¹⁾。複合橋脚においては、鋼製梁とRC柱との接合部の構造検討が重要となる。すなわち接合部においては、鋼製梁からの作用力(曲げ、せん断、軸力)をRC柱へ確実に伝達できる構造が求められる。

そこで、本構造形式を採用するにあたって、設計方法の妥当性および、所定の耐力を有することを実証する目的(特に、鋼製梁とRC柱との接合部の強度確認)でFEM解析、縮尺1/5供試体を用いた室内載荷試験が行われ、さらに、実構造物での挙動を確認するために現場載荷試験を実施した。

なお、1/5モデルでの室内載荷試験は、阪神高速道路公団(「阪神高速道路震災復旧対策技術委員会」「鋼構造小委員会」)の委託により、(社)日本橋梁建設協会(関西支部)で実施され、現場載荷試験は、3号神戸線復旧第14工区鋼桁・鋼製脚製作工事 川田・宇部建設工事共同事業体で実施したものである。本文は、これら一連の載荷試験結果について報告するものである。

2. 複合橋脚

(1) 概要

対象とした複合橋脚は図1に示すようにRC柱の主鉄筋を鋼製梁に貫通させ、その部分にコンクリートを充填することで、鋼製梁とRC柱を一体化させる構造形式を採用している。すなわち本形式では、RC柱の主鉄筋が、鋼製梁の締結用アンカーとしても機能することとなる。

(2) 特徴

本形式の特徴は下記のとおりである。

- ① 梁部を鋼製にすることにより、フーチングに作用する死荷重反力を低減できる。
- ② 結合部はノンプレストレス構造であるため、PC梁に

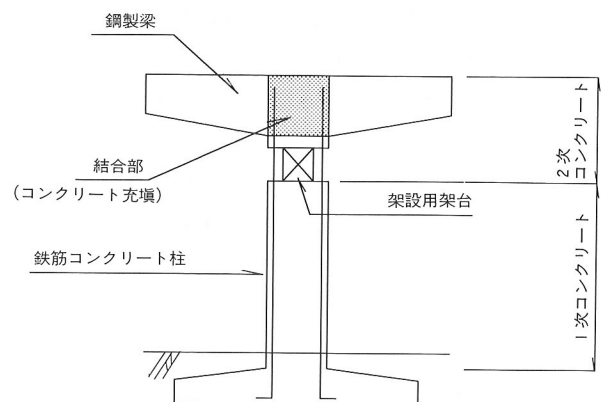


図1 複合橋脚概念図

比べて施工管理が容易である。

③ 鋼製梁部は工場製作されることから、現場工期を短縮できる。

④ 鋼製梁であることから、輸送および架設重量が小さくなり、現場施工が簡素化され工期を短縮できる。

(3) 複合橋脚の設計方針

a) 梁部の設計

梁部は、通常の鋼製橋脚梁部材と同一の設計手法を採用している。すなわち、軸力と曲げを受ける部材として応力度照査（垂直応力度、せん断応力度、合成応力度照査）および安定の照査を行っている。

b) 柱部の設計

柱部は、通常の引張側コンクリートを無視したRC柱として設計を行っている。

c) 隅角部の設計

① せん断遅れ（シアラグ）の影響を考慮する。

② 隅角部に作用する曲げモーメントは、梁・柱のフランジ面の交点の断面力を用いる。

③ 断面力算出の際には、RC柱との定着と靱性確保を目的とした隅角部内充填コンクリートおよび定着主鉄筋を考慮しないものとする。

④ 隅角部下フランジ（圧縮フランジ）には主鉄筋の貫通孔が多数設けられるため、この断面欠損による応力集中の影響を考慮する。

3. 室内載荷試験（1/5モデル）

(1) 供試体

対象としている橋脚はT型橋脚であるが、供試体は片側の張り出し部を省略した逆L型とし、後述するように柱中心と梁先端の2点に荷重を載荷することで、接合部断面のコンクリートおよび鉄筋応力を実構造物に近似させることとした（表1参照）。また、縮尺は実構造物の1/5とし、隅角部内には、鋼板と中詰めコンクリートの合成効果を確実にするため、スタッドジベルを打設した。なお、鋼製梁部については、RC柱の圧縮側コンクリートのひずみが0.0035に達した状態においても、片持梁として計算した応力が道路橋示方書の許容値を超えないように板厚を設定した。供試体詳細図を図2に示す。

(2) 載荷荷重および載荷方法

通常、橋脚は地震時荷重により柱基部が断面決定されるが、今回の試験では、梁と柱の接合部に着目しており、この接合部に厳しい応力状態を生じさせる常時の活荷重偏載時について検討を行った。載荷荷重および載荷方法は、接合部での応力状態を実構造物と近似させるため、死荷重による軸力相当分をあらかじめ一定荷重（25t）として柱中心に載荷し、その後、鋼梁先端部に100tジャッキにより静的に荷重を載荷した。なお、柱中心の一

表1 実測値と供試体の一覧表

		単位	実構造物	1/5モデル	相似比
橋脚径		cm	440	88	1/5.0
橋脚高		m	17.100	3.500	1/4.9
主鉄筋比		—	0.0110	0.0104	1/1.06
主鉄筋径		mm	32	13	1/2.5
作用	曲げモーメント	t・m	3 874	30	1/129
断面力	軸 力	t	1 324	47	1/27
軸力比(作用軸力/軸耐力)		—	0.0420	0.0381	1/1.10
RC柱	コンクリートの圧縮応力	kg/cm ²	65.8	65.0	1/1.01
応力	鉄筋の引張応力	kg/cm ²	1 323	1 300	1/1.01

使用するコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=270\text{kg/cm}^2$

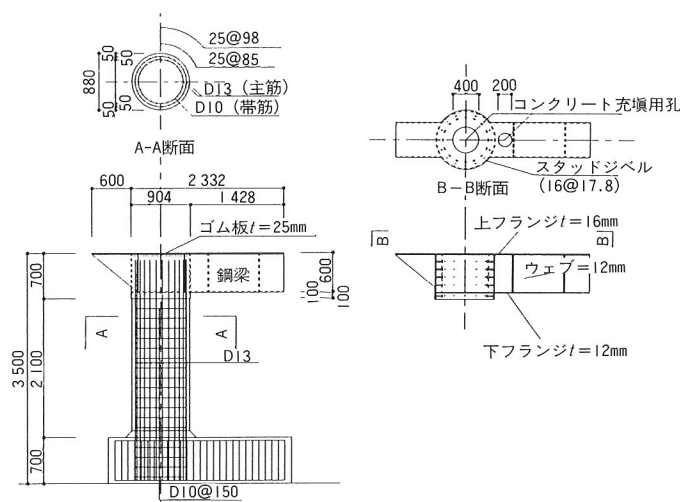


図2 供試体詳細図 (mm)

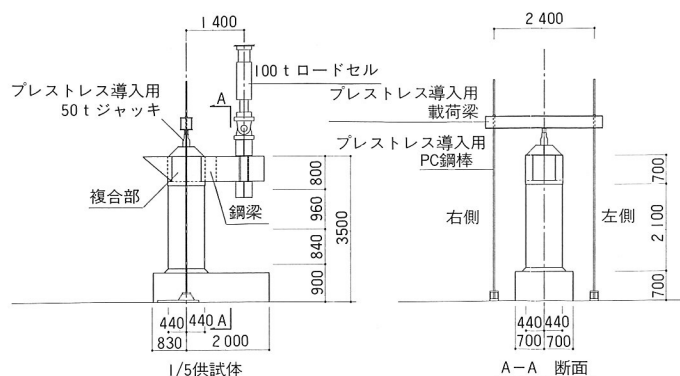


図3 試験方法（室内載荷試験）(mm)

定荷重については、隅角部内のコンクリートに力が直接伝達されないよう考慮して、鋼梁上フランジと中詰めコンクリートの間にゴム板を挿入することとした。試験方法を図3に示す。

(3) FEM解析

一般に鋼製梁の隅角部の応力は、箱断面とした簡易計算²⁾によって算出されるが、今回のようなコンクリートが充填された隅角部での応力を簡易計算で正確に求めるのは困難である。そこで、載荷試験で供試体に発生する実測ひずみのある程度正確に把握するために、供試体のFEM解析を実施した。なお、解析は、立体モデルを使用

した弾性解析であり、その際、隅角部で鋼板とコンクリートは完全合成されていると仮定した。

(4) 試験結果と考察

a) 変位

鋼製梁先端部の載荷荷重と鉛直変位との関係を図4に示す。この図より、設計荷重にあたる22 tまで載荷した時の変位曲線は、図中の全断面有効としたFEM解析値（立体モデルによる材料の非線形特性を無視した弾性解析）と比較的よく一致していることがわかる。このことから、設計荷重の範囲内では、RC柱部のコンクリートが全断面有効として働いていると言える。

しかしながら、設計荷重を超える領域では、載荷荷重が増加するに従って、変位がFEM解析結果を大きく上回る結果となっており、これは、RC柱部の引張側コンクリートがひびわれの進行に伴い剛性に寄与しなくなったことに起因するものと推察される。

b) 鋼製梁の応力

設計荷重載荷時における隅角部近傍の鋼梁フランジおよびウェブでの曲げ応力分布を図5に示す。この図より、上フランジでは図2の供試体詳細図に示すコンクリートの打設用孔($\phi=200$)の影響により、フランジ中央部の応力が小さくなっている。なお、開口を考慮したFEM解析の結果は、試験値と比較的よく一致している。

また、下フランジとウェブについては、試験値がFEM解析値と良い一致を示し、さらに、上フランジの開口を無視した梁理論による計算値にもほぼ近似する結果となった。

設計荷重時の主応力線図を図6に示す。この図より、隅角部内に発生している応力は図5の隅角部近傍の鋼梁応力に比べ小さいことが確認できる。なお、FEM解析の結果についても同様であった。

c) RC柱部の応力

RC柱の軸方向の応力分布を図7に示す。図7からわかるように、コンクリートの最大応力の発生箇所は、隅角部より下側の圧縮縁であり、その大きさについては、接合部の設計法であるRCとして計算した時の応力($\sigma_{\text{cmax}} / \sigma_{\text{cd}} = 61 / 65 \approx 0.9$)と良く一致している。次に、RC柱各段での主鉄筋における設計断面力時(22 t 載荷時)の軸方向応力を表2に示す。この表より、各段における試験値とFEM解析値が比較的良く一致している。また、表内のRCとして計算された計算値に比べすべての位置での応力が小さいことから、安全側の設計であることも確認できた。なお、今回の試験では、隅角部内コンクリートの応力計測はできなかったが、これまでの変位や隅角部鋼板の応力が、FEM解析の結果と比較的よく整合しており、このFEM解析の結果から推定すると、隅角部内の中詰めコンクリートに発生している応

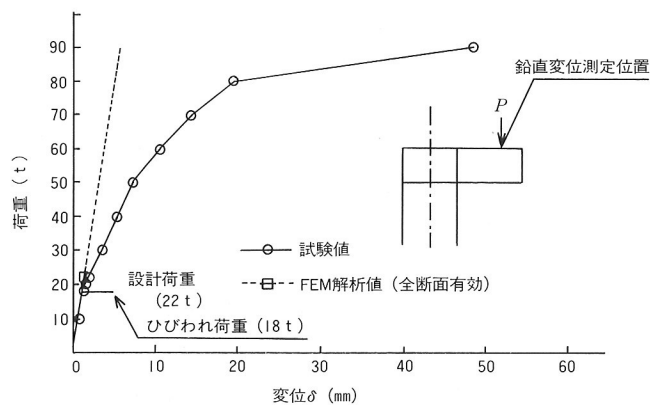


図4 荷重-鉛直変位曲線

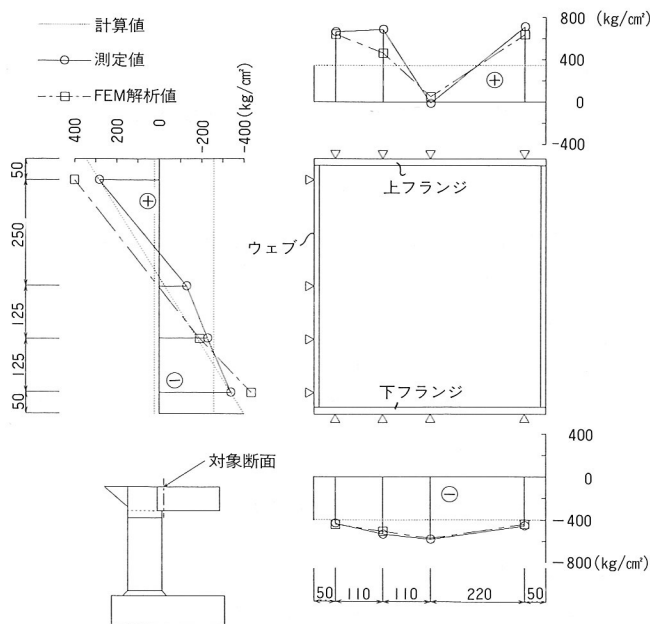


図5 垂直応力分布

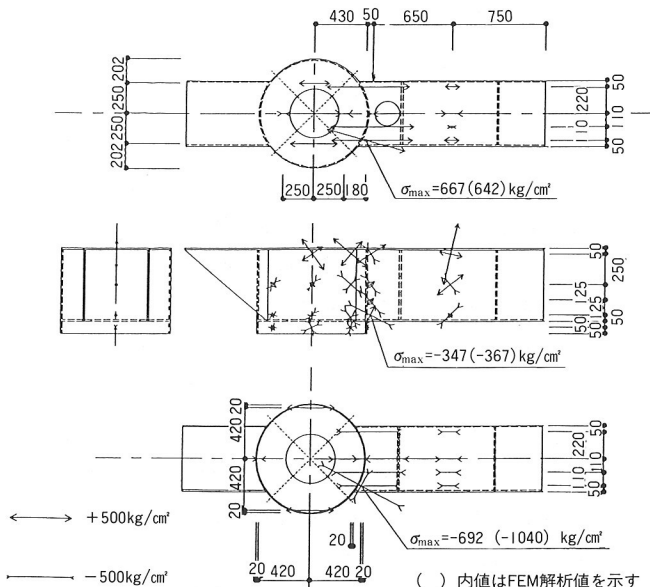


図6 鋼製梁の主応力線図（室内載荷試験）

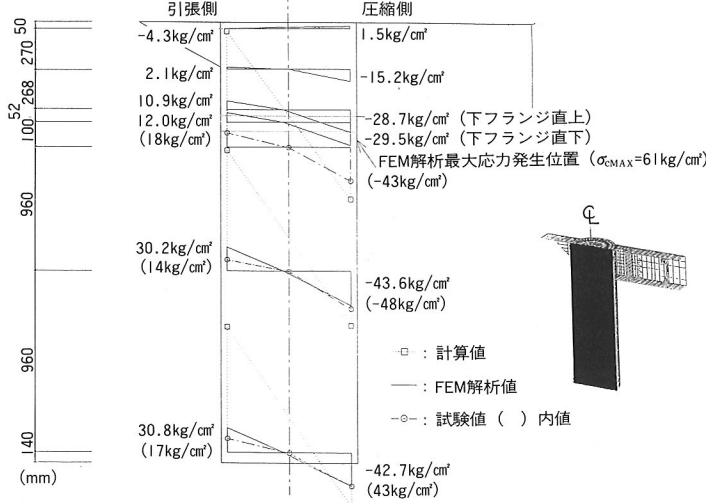
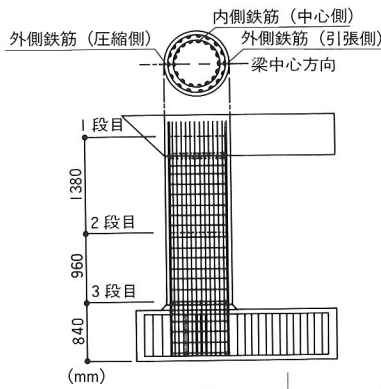


図7 コンクリートの軸方向応力分布

力は上部にいくほど小さくなるといえる。

d) RC柱のひびわれ分布および破壊状況

試験は、梁先端部の変形が増大しても荷重の増加が見られなくなった時点で終了し、この状態を供試体の破壊と定義した。その時のひびわれ分布および破壊状況をそれぞれ図8、写真1に示す。最初のひびわれは、載荷荷重が18 tの時点で接合部近傍の打継目よりコンクリートの引張縁側から円周方向へ発生した。以後、柱の最小かぶり位置である帯鉄筋位置(15cmピッチ)に合うように、引張縁側から円周方向へ発生している。また、最大荷重は、約90 tで、初期ひびわれの発生位置となったコンクリート打継目付近の圧縮縁側で、表面コンクリートの剝離が発生した。なお、接合部には異常が見られなかった。

e) 耐荷力

接合部近傍のRC柱部の圧縮縁側コンクリートと引張縁側鉄筋の荷重-ひずみ曲線を図9に示す。図9から、降伏時および終局時の耐荷力は、計算値に比べるとともに約1.2倍の耐荷力を有しているのが確認できた。

4. 現場載荷試験(実橋脚)

(1) 対象橋脚

本試験で対象とした橋脚は、図10に示すように、高さが9.2mで梁の長さが17.3mなるT型橋脚であり、RC柱

表2 主鉄筋応力

段数		外側鉄筋応力 (kg/cm ²)				内側鉄筋応力 (kg/cm ²)			
		計算値	解析値	試験値	解/試	計算値	解析値	試験値	解/試
1 段目	圧縮側	-602	-131	-55	2.4	-487	-106	-62	1.7
	中央	358	-21	-25	0.8	358	-21	-25	0.8
	引張側	1 318	33	34	1.0	1 198	30	33	0.9
2 段目	圧縮側	-605	-342	-434	0.8	-540	-305	—	—
	中央	373	-75	-98	0.8	363	-73	—	—
	引張側	1 350	230	297	0.8	1 127	192	—	—
3 段目	圧縮側	-606	-333	-349	1.0	-533	-293	—	—
	中央	388	-74	-71	1.0	367	-70	—	—
	引張側	1 382	218	172	1.3	1 154	182	—	—

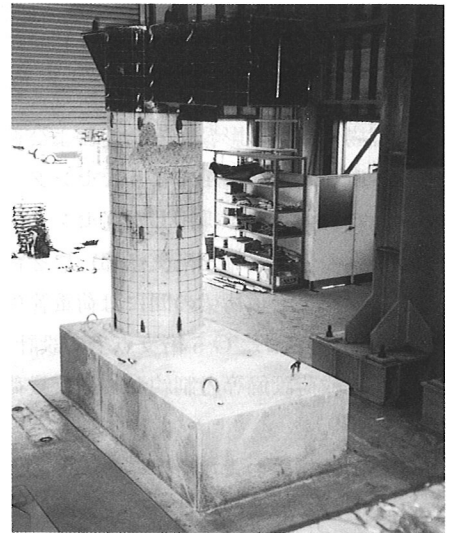


写真1 破壊状況

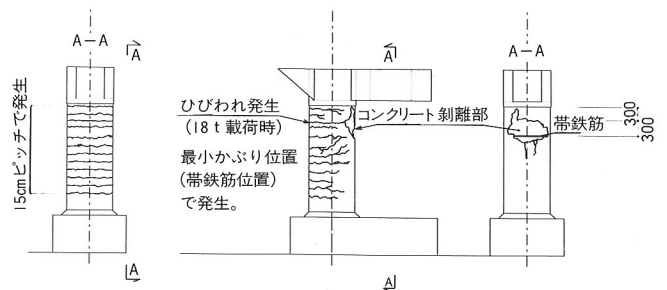


図8 ひびわれ分布図

	試験値 (t)	計算値 (t)	試/計
ひびわれ時モーメント P_c	18.0	15.0	1.2
降伏時モーメント P_y	60.0	50.0	1.2
終局時モーメント P_u	90.0	75.0	1.2

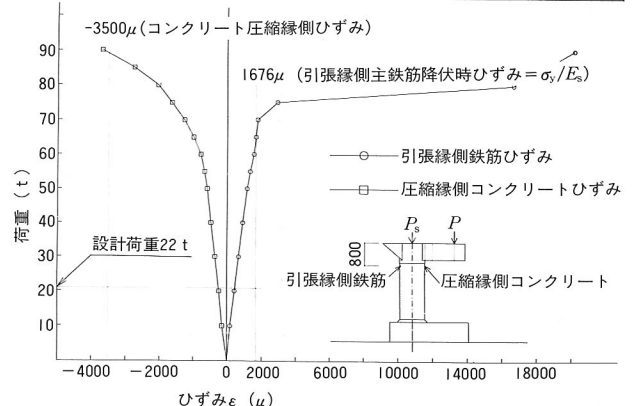
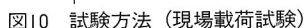


図9 鉄筋およびコンクリート荷重-ひずみ曲線



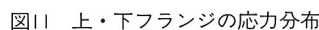
(2) 載荷荷重および載荷方法

(3) 試験結果および考察

a) 変位

表3 最大載荷荷重時における変位

The plan view shows a rectangular bridge deck cross-section. A vertical dashed line divides the deck into two halves. On the left side, labeled '(山側)' (Mountain Side), there are three observation points: D-V3-E, D-V2-E, and D-V1-E. On the right side, labeled '(海側)' (Sea Side), there are three observation points: D-V1-E, D-V2-E, and D-V3-E. Below the main deck section, there is a smaller section with four observation points: D-H1, D-H2, D-H3, and D-H4. The distances between these points are indicated as 800 mm, 1900 mm, 1900 mm, and 750 mm respectively. The overall width of the deck is labeled as $\phi 1$.



b) 鋼製梁の応力

c) RC柱部のひずみ

柱部鉄筋およびコンクリートの鉛直方向ひずみ分布を図13に示す。図13より、鉛直方向のひずみは、隅角部ダイヤフラム近傍を除けばおおむね直線的な勾配を有した分布であることがわかる。また、RC柱部の一般部における断面内のひずみ分布は、引張側コンクリートおよび巻

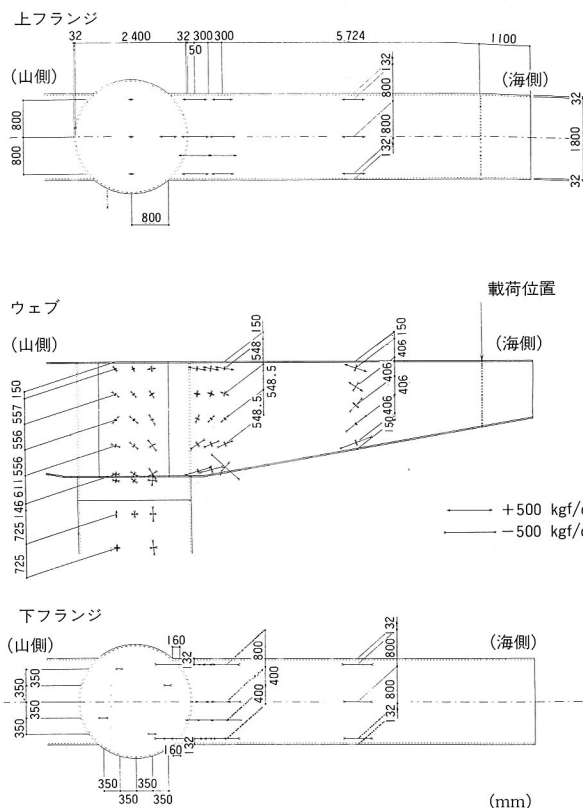


図12 鋼製梁の主応力線図（現場載荷試験）

立て鋼板を抵抗断面として有効と考えて算出した計算値と非常によく一致した結果となっている。これは載荷荷重が小さいこともあり、全断面有効としての剛性を有したことに起因するものと推察される。

d) 充填コンクリート内の鉄筋応力

隅角部内主鉄筋の発生応力状況を図14に示す。図14より、充填コンクリート内の引張側鉄筋応力は、上フランジ近傍でほとんど発生していない。しかしながら、下フランジ近傍に向かうに従って発生応力が直線的に大きくなっており、充填コンクリート内の主鉄筋に徐々に応力が伝達されている状況が確認できる。この結果は、1/5モデルでのFEM解析と同様の傾向を示していた。

5. まとめ

室内載荷試験および現場載荷試験の結果から以下の事項が確認できた。

- ① RC柱部の応力測定結果は、柱部全断面有効として算出した計算値やFEM解析値とよく一致しており、引張側コンクリートを無視したRC柱としての計算値がかなり安全側となっていることが確認された。
- ② 隅角部内の鋼板応力レベルは、隅角部近傍の応力レベルより小さく、鋼製梁からの応力は、隅角部内の充填コンクリートにも分担され、隅角部内の鉄筋を介してRC柱部に伝達されることと推察された。
- ③ 1/5モデルでの室内載荷試験から、橋脚の破壊は、RC柱部で起こり、接合部に異常は認められなかった。

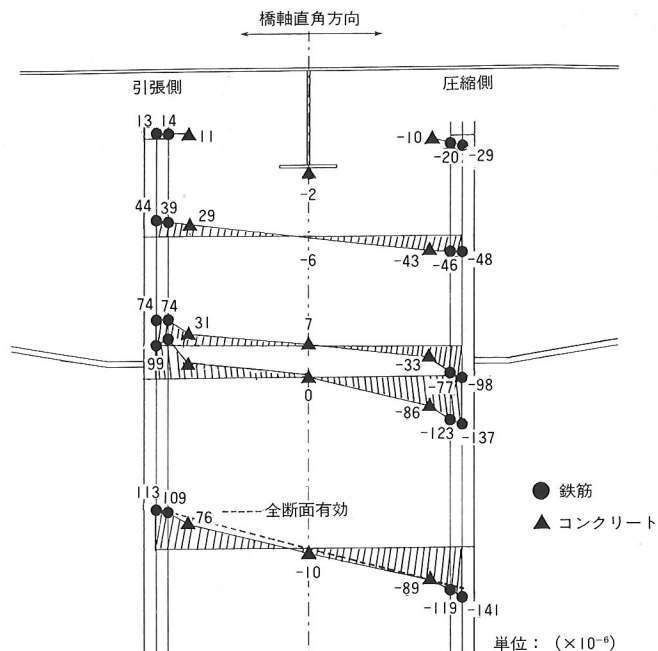


図13 コンクリートの鉛直方向ひずみ分布

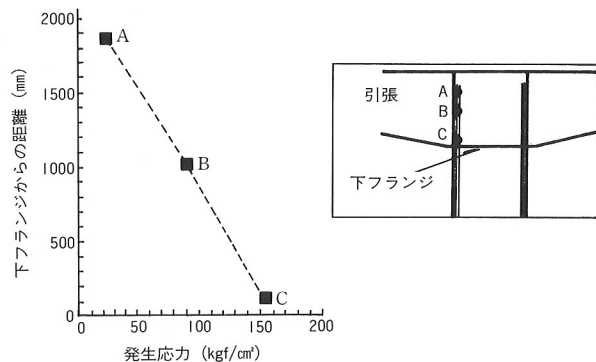


図14 隅角部内の鉄筋応力

つまり、本構造形式は、接合部に弱点を有する構造形式でないことが確認できた。また、破壊時の荷重は設計荷重（活荷重偏載時）相当の約4倍（=90 t/22 t）であった。

これらのことから、本構造形式の設計方法の妥当性および安全性が確認できたと考えられる。

最後に、本試験を実施するに際し、多大なご協力を承った皆様に深く感謝します。

参考文献

- 1) たとえば、秋元・山田・飯村・小林・由井：鋼・コンクリート混合構造橋脚の接合部に関する研究（その1），土木学会年次学術講演会概要集，1991.9.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1990.2.
- 3) 阪神高速道路公団：設計基準 第2部 構造物設計基準（橋梁編），1994.7.
- 4) 阪神高速道路公団：RC柱～鋼製梁複合構造静的載荷試験報告書，1995.7.