

(41) 鋼製梁とRC柱を組み合わせた

複合橋脚 (1/5 供試体) の静的載荷試験

Static Load Test for the Pier by Mixed Structural System with Steel Beam and RC Column.

(scale of the test piece 1:5)

中島 裕之\*

鈴木 肇\*\*

堀江 佳平\*\*\*

By Hiroyuki NAKAJIMA, Iwao SUZUKI and Yoshihei HORIE

In the construction of the pier by mixed structural system with steel beam and RC column, its easy to erect the steel beam and its short, to work in site. And the reaction with dead load is reduced more than that of RC pier and RC beam. In these reasons, this mixed pier is planing to the broken piers by (Hanshin) Earthquake of the Hanshin road way bridge.

Befor the planing, in order to clear the quality of this structure, a static load test was carried out used the specimen.

In the test, confirmations were carried out for the validity of this design calculation paying a special attention to the fracture mode of this structure.

1. まえがき

異種材料である鋼とコンクリートを合成させ元の材料をはるかに上回る性能を持たせることのできる合成構造は、近年、さまざまな分野で使用され大きな成果を挙げてきている。ここで取り上げるのは、T型橋脚の柱部をRC構造、梁部を鋼構造とし隅角部で一体とした合成構造であり、ここでは複合橋脚と呼ぶ。

本構造形式には、コンクリート梁と比べてフーチングに作用する死荷重反力を小さくできることや、工事現場において短期間に鋼製梁部を架設できるので梁下空間の交通閉鎖時間の短縮化を図れること、および鋼製梁と鉄筋コンクリート柱との結合にプレストレスを導入しないので、梁部天端におけるPC鋼材の定着装置がなく上部工の支承位置の制約や施工管理の煩雑さもある程度解消されることなどの利点があり、阪神大震災で被災した橋脚を再構築するときの構造形式の一つとした。

上述した複合橋脚の採用にあたっては、鋼製梁と鉄筋コンクリート柱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）を鉄筋コンクリート柱へ確実に伝達できる構造が求められる。既に、山田、小林<sup>1)</sup>らは、接合部の構造として、鉄筋コンクリート柱と同等以上の強度を確保し、かつ構造の単純化を図る観点から、図-1に示すように、鉄筋コンクリート柱の鉄筋を鋼製梁部まで延長し、その部分にコンクリートを充填して一体化する構造を提案している。

ここでは、鋼製梁と鉄筋コンクリート柱の接合部の強度確認や、設計方法の妥当性および本構造形式が、所定の耐荷力を有することを実証するために、現在実際に計画されている複合橋脚の1/5縮尺の供試体を用いて静的載荷試験を行った結果について述べることにする。

\* 阪神高速道路公団 工務部設計課 課長      \*\* 阪神高速道路公団 工務部設計課 調査役  
\*\*\* 阪神高速道路公団 工務部設計課 係長

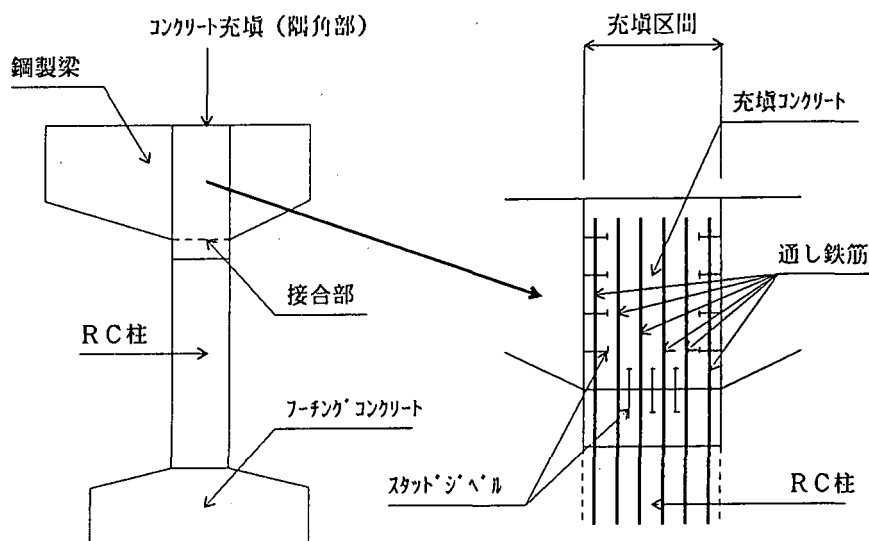


図-1 複合橋脚概念図

## 2. 試験の概要

### 2. 1 供試体の設計

対象としている橋脚形状は、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し型とし、載荷方法により、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た。また、縮尺は、実構造物の1/5とし、隅角部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製作上問題とならない程度にスタッドジベルを設けた。

接合部をふくむ柱部は、RCとして計算を行い（表-1参照）、鋼製梁部については、表-5内に示すRC柱の圧縮側コンクリートのひずみが0.0035に達したときに鋼製梁を片持梁として計算した応力が、道示の許容値内になるように板厚を設定した。

表-1 RC柱（接合部）の実構造物と供試体の比較

|                                  | 単位                 | 実構造物   | 1/5供試体 | 相似比    |
|----------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| 橋脚径                              | c.m                | 440    | 88     | 1/5.0  |
| 橋脚高                              | m                  | 17.100 | 3.500  | 1/4.9  |
| 主鉄筋比                             | —                  | 0.0110 | 0.0104 | 1/1.08 |
| 主鉄筋径                             | mm                 | 32     | 13     | 1/2.5  |
| 作用曲げモーメント                        | t.m                | 3,878  | 30     | 1/129  |
| 断面力軸力                            | t                  | 1,324  | 40     | 1/27   |
| 軸力比 ( $\sigma_N / \sigma_{ck}$ ) | —                  | 0.030  | 0.027  | 1/1.1  |
| RC柱応力（コンクリートの圧縮応力）               | kg/cm <sup>2</sup> | 85.8   | 85.0   | 1/1.01 |
| （接合部）鉄筋の引張応力                     | kg/cm <sup>2</sup> | 1,323  | 1,300  | 1/1.01 |

表-2 コンクリートの配合

| 粗骨材<br>最大寸法<br>(mm) | スランプ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水/セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |       | No. 70 |
|---------------------|--------------|------------|-----------------------|-------------|--------------------------|-----|-----|-----|-------|--------|
|                     |              |            |                       |             | W                        | C   | S   | G   | セメント  |        |
| 15                  | 8(18)        | 4.5        | 50.7                  | 51.8        | 198                      | 387 | 851 | 814 | p.987 |        |

### 2. 2 供試体の製作

供試体は、図-2に示すような丸柱1体のみ製作した。鉄筋コンクリート柱の鉄筋は、D13（SD295A）の鋼材を用い、コンクリートは、設計基準強度を実構造物と同様な270kg/cm<sup>2</sup>とし、スランプは、基準の8cmからワーカビリティを増すために流動化剤を用い18cmとした。なお、配合表を表-2に、コンクリートと鋼材の材料試験結果をそれぞれ表-3、

表-4に示す。また、接合部のコンクリートの打設方向は、実際に想定している打設方向と同じように鋼梁の上面の開口より打設した。

表-3 コンクリートの材料試験結果

| 使用コンクリート | 試験時<br>材令<br>(日) | 試験時<br>圧縮強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>Ec<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 柱部コンクリート | 15               | 244                                  | 228,787                              |

表-4 鋼材の材料試験結果

| 種別            | 降伏強度<br>$\sigma_y$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>$\sigma_u$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>Ey<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) |
|---------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| D13鉄筋(SD295A) | 35.2                                        | 49.8                                        | 2.09E+08                             | 28.0      |
| t=12(SS400)   | 28.8                                        | 44.8                                        | —                                    | 31.0      |
| t=16(SS400)   | 29.8                                        | 45.2                                        | —                                    | 31.0      |

## 2. 3 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予め一定荷重（25 t）として柱中心に載荷し、その後、鋼梁先端部に100 tジャッキにより静的に荷重を載荷した。ただし、柱の固定荷重については、直接柱内のコンクリートに力が伝達されないように鋼梁上フランジと中詰めコンクリートの間にゴム板を入れた（図-3参照）。

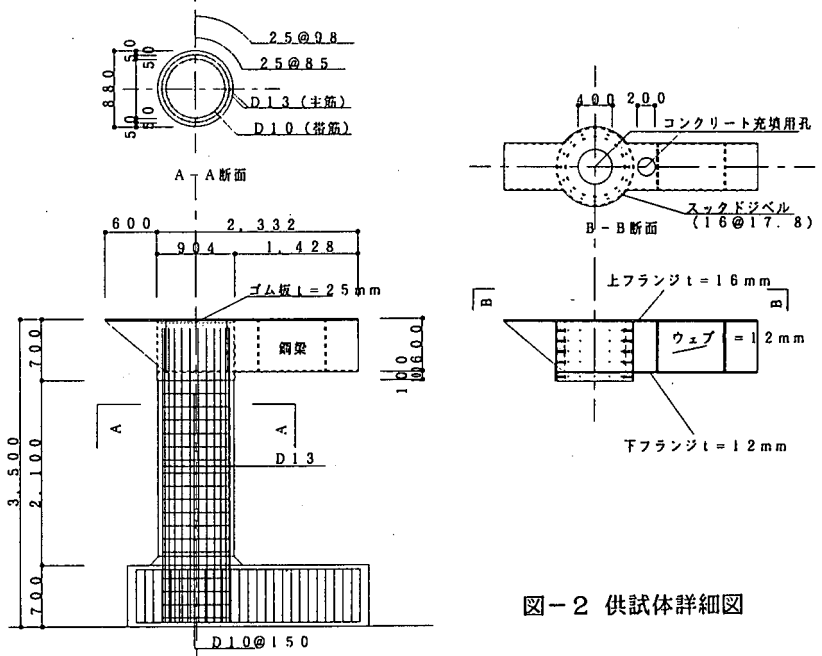


図-2 供試体詳細図

表-5 載荷荷重および発生応力

|               |             | 単位                 | 設計荷重時<br>(常時) | ひびわれ時<br>( $M_c$ 作用時) | 降伏時<br>( $M_y$ 作用時) | 終局時<br>( $M_u$ 作用時) |
|---------------|-------------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 柱軸方向荷重        |             | t                  | 25            | ←                     | ←                   | ←                   |
| ジャッキ荷重        |             | t                  | 22            | 15                    | 50                  | 75                  |
| 作用<br>断面力     | 梁 曲げモーメント   | t·m                | 21.1          | 14.4                  | 48.0                | 72.0                |
|               | せん断力        | t                  | 22.0          | 15.0                  | 50.0                | 75.0                |
|               | 柱 曲げモーメント   | t·m                | 30.0          | 21.0                  | 70.0                | 105.0               |
|               | 軸力          | t                  | 48.0          | 40.0                  | 75.0                | 100.0               |
| 鋼製梁<br>(柱付根部) | 上フランジの応力    | kg/cm <sup>2</sup> | 348           | 238                   | 785                 | 1,178               |
|               | ウェブの応力      | kg/cm <sup>2</sup> | 400           | 273                   | 910                 | 1,384               |
|               | 下フランジの応力    | kg/cm <sup>2</sup> | 157           | 107                   | 357                 | 535                 |
|               | コンクリートの圧縮応力 | kg/cm <sup>2</sup> | 85.0          | 44.8                  | 152.0               | -                   |
| RC柱<br>(接合部)  | 鉄筋の引張応力     | kg/cm <sup>2</sup> | 1,300         | 802                   | 3,520               | -                   |
|               | 鉄筋の付着応力     | kg/cm <sup>2</sup> | 8.2           | 5.1                   | 22.8                | -                   |

ひびわれ時  $M_c$  --- コンクリート引張縁が  $\sigma_{ct}$  に達したとき  
(示すV5.4.2 解5.4.1~3に準拠)

降伏時  $M_y$  --- 柱引張縁側の鉄筋のひずみが降伏ひずみ  $\epsilon_{sy}$  に達したとき  
(示すV5.4.2 解5.4.4~8に準拠)

終局時  $M_u$  --- 柱圧縮縁側のコンクリートのひずみが0.0035に達したとき  
(示すV5.4.2 解5.4.4~8に準拠)

## 2. 4 供試体の理論値の計算

供試体に発生する実測歪みを評価するために理論値を計算した。一般に鋼製梁の隅角部の設計は、箱断面とした簡易計算<sup>2)</sup>によって計算されるが、今回のようなコンクリートが充填された隅角部では、簡易計算で正確な理論値を得ることは難しい。そこで、ある程度正確な理論値を把握するために供試体のFEM解析を実施した。解析は、立体モデルを使用した弾性解析を行い、その際の鋼板とコンクリートとは完全合成されていると仮定した。

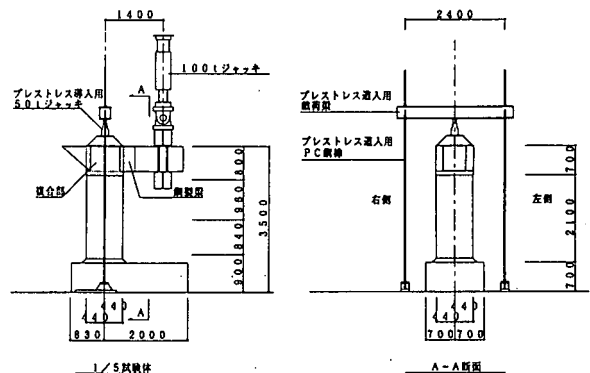


図-3 試験概要図

### 3. 試験結果の概要と考察

#### 3. 1 設計断面力時の挙動

##### (1) 変位

図-4は、鋼梁先端部の荷重載荷点における荷重-鉛直変位曲線を示したものである。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。

ただし、設計荷重を越える領域では、載荷荷重が増加するに従い変位が増大し、FEM解析結果と大きく相違している。これは、RC柱部のコンクリートのひびわれが進行し、剛性が低下したことに起因する。

##### (2) 鋼梁応力分布

図-5は、設計荷重時における隅角部近傍の鋼梁フランジおよびウェブ各面での垂直応力分布を示したものである。この図より、試験値の応力分布については、上フランジ面では図-2供試体詳細に示すコンクリートの打設用孔(φ200)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（図中の計算値は開口が無いと仮定した値を示している）。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、下フランジについては、フランジ中央部の応力がフランジ端部の応力にくらべて大きな値を示している。

図-6に、設計荷重時の主応力線図を示す。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くらべ小さいことが確認できる。FEMの結果についても同様であった。

##### (3) コンクリートおよび主鉄筋の応力分布

図-7は、コンクリート柱の軸方向の応力分布を示したものである。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力は上部にいくほど小さくなっている。

また、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発生し、その大きさについては、

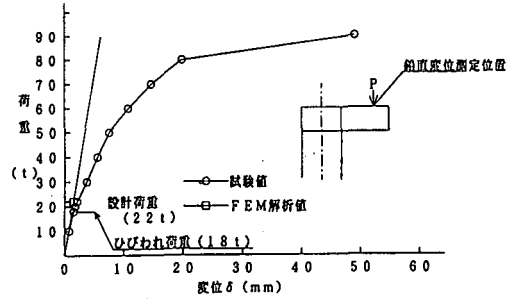


図-4 荷重-鉛直変位曲線図

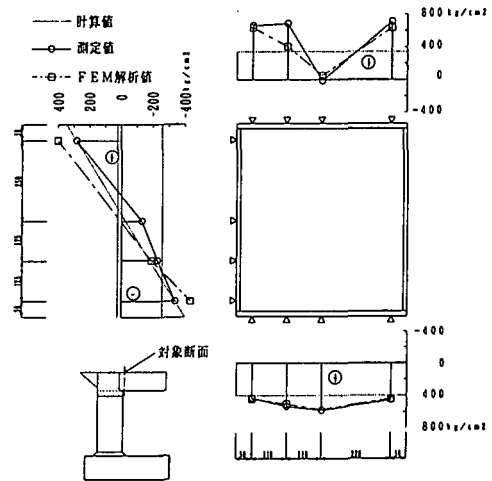


図-5 隅角部近傍の垂直応力分布図

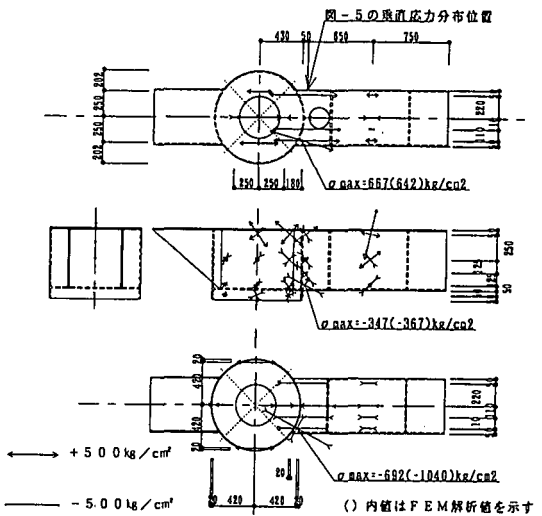


図-6 鋼梁主応力線図

接合部の設計法であるRCとして計算した時の応力 ( $\sigma_{cMAX}=61/\sigma_{cd}=65\text{kg/cm}^2=0.9$ ) と良く一致している。

表-6は、RC柱各段での主鉄筋における設計断面力時(22t 載荷時)の軸方向応力が示されている。この図より、各段における試験値とFEMによる解析値が合っているのが確認できる。

また、表内のRCとして計算された計算値にくらべて全ての位置での応力が小さいことから、設計上の安全側であることも確認できた。

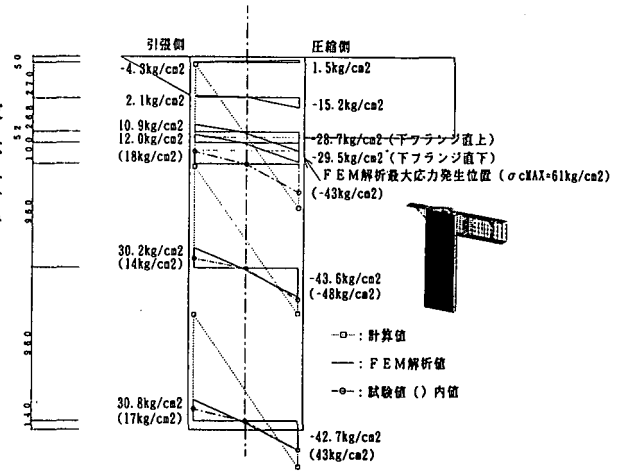
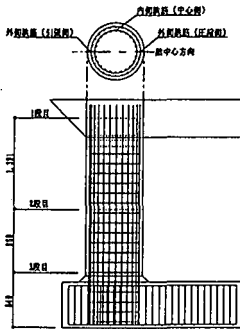


図-7 コンクリート軸方向応力分布図

表-6 主鉄筋応力



| 段 数  |     | 外側鉄筋応力<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |      |      |     | 内側鉄筋応力<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |      |     |     |
|------|-----|---------------------------------|------|------|-----|---------------------------------|------|-----|-----|
|      |     | 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 | 1318                            | 33   | 34   | 1.0 | 1198                            | 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 | 1350                            | 230  | 297  | 0.8 | 1127                            | 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 | 1382                            | 218  | 172  | 1.3 | 1154                            | 182  | —   | —   |

### 3. 2破壊に至るまでの挙動

#### (1) ひびわれ分布および破壊状況

試験は、梁先端部の荷重の大きさを徐々に上げていき、変形が増大し荷重の増加が見られなくなった時点で終了した。この状態を供試体の破壊と定義した。図-8は、その時のひびわれ分布および破壊状況を示している。この図より、最初のひびわれは、載荷荷重が18t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、柱の軸方向に最小かぶり位置である帯鉄筋位置に合うように約15cmピッチで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90t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剥離が発生した。なお、接合部には、異常が見られなかった。

#### (2) 耐荷力

次頁図-9は、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-ひずみ曲線を示し

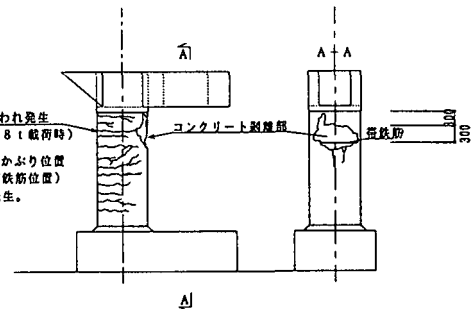


図-8 ひび割れ分布図

ている。この図から、降伏時および終局時の耐荷力は、計算値に比べてともに約1.2倍の耐荷力を有しているのが確認できた（表-7参照）。また、図-10に試験終了後の供試体の解体状況を示す。この図からわかるように、隅角部内に異常は全く見られなかった。

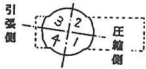
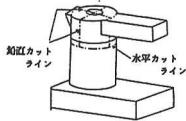
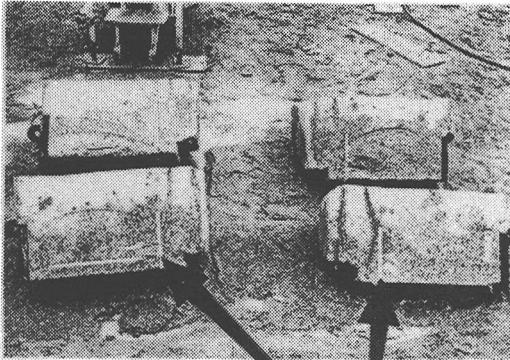


図-10 供試体解体状況図

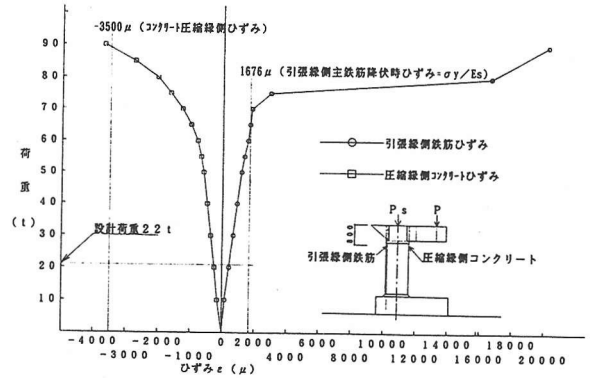


図-9 鉄筋およびコンクリート荷重-ひずみ曲線図

表-7 ひびわれ時、降伏時および終局時荷重

|                  | 試験値<br>(t) | 計算値<br>(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 |

#### 4. 結論

今回のRC柱～鋼製梁複合橋脚（1/5試験体）静的載荷試験の結果より、以下の事項が確認できた。

- (1) 設計荷重時の隅角部内の鋼板応力レベルは、隅角部近傍の鋼梁部に発生している応力より小さかった。
- (2) 設計荷重時の接合部の応力レベルは、コンクリートを全断面有効とした解析値と比較的よく一致していた。
- (3) 破壊は、RC柱部で破壊し、接合部には異常がなかった。また、その時の荷重は設計荷重（活荷重偏載時）相当の約4倍（ $=90\text{ t}/22\text{ t}$ ）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が、今後、さらに接合部の評価法および応力伝達機構を明らかにするため、実橋脚による実験を行い、本構造のより一層の妥当性について確認することとしている。

最後に、本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（山田 善一委員長）」、「同鋼構造小委員会（渡邊 英一主査）」の指導のもとで（社）日本橋梁建設協会（関西支部）の協力で実施したものである。本研究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) 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.