

# 論文 鋼桁と鋼管・コンクリート合成構造橋脚の剛結接合に関する 単調載荷実験

小林 竜太<sup>\*1</sup>・三田村 浩<sup>\*2</sup>・岸 徳光<sup>\*3</sup>・池田 憲二<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、鋼・コンクリート複合ラーメン橋の合理的な接合構造を開発することを目的として、鋼桁と外面リブ付き鋼管・コンクリート合成構造橋脚を剛結させる接合法を提案し、その基礎的な構造特性を静的単調載荷実験および弾塑性有限要素解析により検証したものである。検討の結果、提案の接合構造は優れた耐荷性能を有していることが明らかとなり、複合ラーメン橋の接合法として実務的にも十分適用可能であることが確認された。

**キーワード**：複合ラーメン橋, 接合部, 合成構造橋脚, 単調載荷実験, 弾塑性有限要素解析

## 1. はじめに

近年、耐震性の向上、建設コスト縮減および維持管理の軽減を目指した鋼・コンクリート複合ラーメン橋が積極的に採用されている。複合ラーメン橋は、死荷重がコンクリート桁に比較して軽量である鋼桁を、主として鉄筋コンクリート(RC)橋脚と剛結させた構造であり、従来のプレストレストコンクリート(PC)ラーメン橋と比較して上部構造の地震時慣性力が低減でき、その結果として基礎工を含めた下部構造の規模を縮減することができる総合的に耐震性に優れた橋梁形式である。また、支承部構造や落橋防止システムの省略が可能となることから、初期コストや維持管理コストも軽減され、コストパフォーマンスにも優れた橋梁形式の一つである。

一方、橋梁下部構造に関する新技術・新工法として、特に山岳橋梁等で多く見られる高橋脚に対する急速施工、省力化施工および耐震性の向上を目的として、従来型RC橋脚における軸方向鉄筋の代替として断面内に鋼管を配置した鋼管・コンクリート合成構造橋脚が提案・開発されている<sup>1)</sup>。従って、上述の複合ラーメン橋の下部構造に対して、この鋼管・コンクリート合成

構造橋脚が適用可能となれば、より合理的な橋梁形式を実現できる可能性をもっている。

このような観点から、本研究では鋼・コンクリート複合ラーメン橋の合理的な接合構造を開発することを目的として、鋼3主桁と外面リブ付き鋼管・コンクリート合成構造橋脚を剛に接合する手法を提案し、縮小模型を用いた静的単調載荷実験および弾塑性有限要素解析を行うことにより、その耐荷力や変形性能等の基礎的な構造特性を検証することとした。

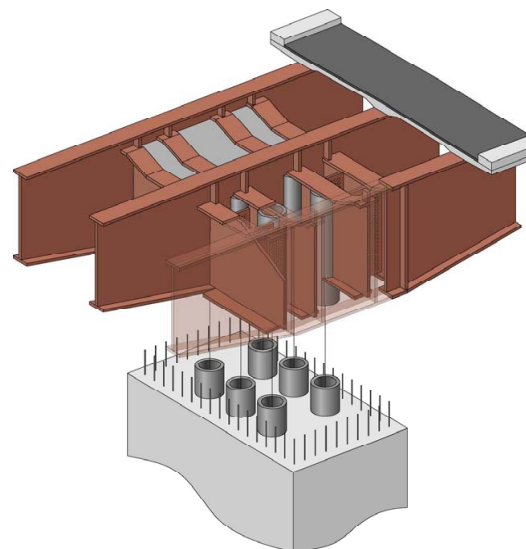


図-1 提案の接合構造の概念図

\*1 (株) ドーコン 構造部 主任技師 工修 (正会員)

\*2 (独) 北海道開発土木研究所 構造部構造研究室 主任研究員 (正会員)

\*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*4 (独) 北海道開発土木研究所 構造部構造研究室 室長 博(工) (正会員)

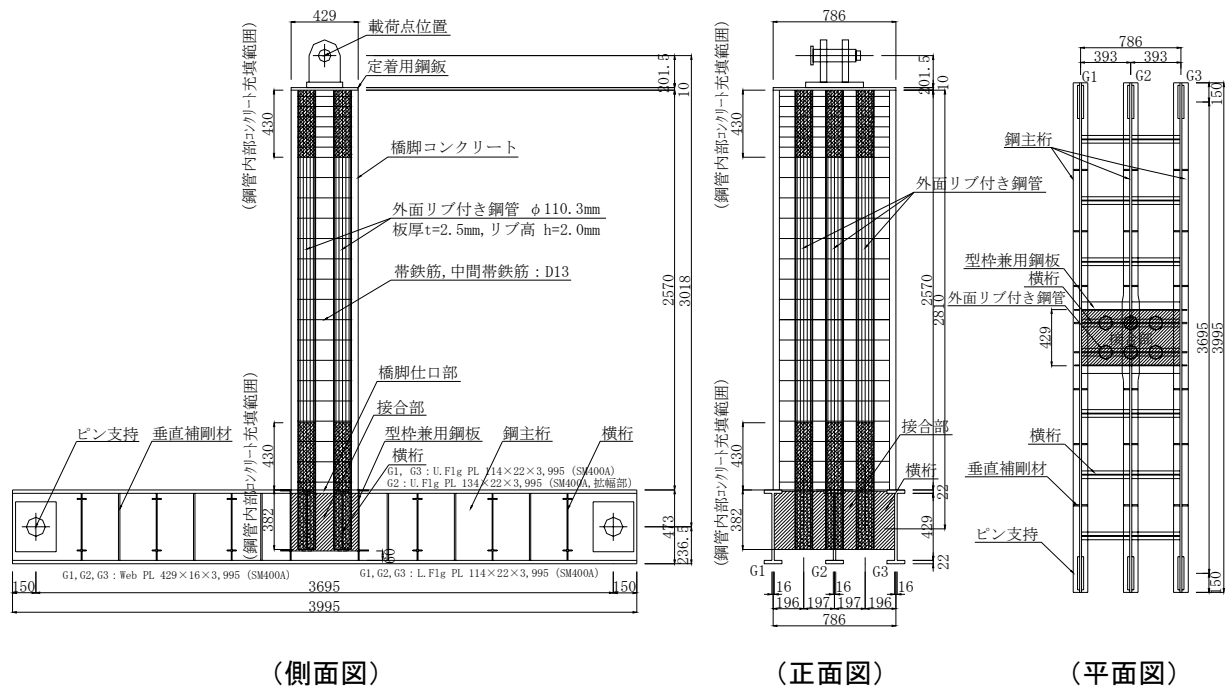


図-2 実験供試体の概要

## 2. 提案の接合構造の概要およびその特徴

提案の接合構造の概念図を図-1に示す。本構造は、橋脚断面内に配置された外面リブ付き鋼管を主桁あるいは横桁に直接連結して力を伝達させ、橋脚頂部を主桁および型枠兼用鋼板にて取り囲んで拘束することに特徴を有している。本研究では、橋脚断面内に計6本（橋軸方向2列，橋軸直角方向3列）の鋼管を配置する場合を設定し、橋軸直角方向に対する外側両端部の4本の鋼管は横桁に、内側中央の2本の鋼管は中央主桁とそれに直交する左右の横桁が交差する位置に配置することとした。ここで、鋼管は交差する鋼桁の形状に合わせて接合させるものとし、横桁と交差する外側両端部の鋼管は半割りにした状態、主桁と左右の横桁が交差する内側中央の鋼管は4つ割りにした状態でそれぞれ溶接により接合している。型枠兼用鋼板には、橋脚コンクリートあるいは軸方向鉄筋からの荷重伝達を向上させるために孔あき鋼板ジベルを配置している。なお、本接合構造は、橋脚頂部のコンクリートを主桁および型枠兼用鋼板にて取り囲む構造であり、かつ鋼管がせん断力を大きく負担することから<sup>1)</sup>、施工性にも配慮して接合

部内には帯鉄筋や中間帯鉄筋を配置しないものとした。また、接合部内では鋼桁を貫通させるような軸方向鉄筋は配置していない。

## 3. 実験供試体および載荷実験の概要

図-2に実験供試体の概要を示す。供試体は実験装置の制約および部材製作上の制限から、実構造に対する1/7縮尺模型とした。また、載荷実験は実験装置の制約から実構造に対して天地を逆にした状態で実施している。実験供試体は、上部工は主桁支間長3,695mm，桁高473mmの鋼3主桁である。一方，下部工は長辺786mm，短辺429mmの矩形断面橋脚であり，断面内には直径110.3mm，板厚2.5mmの外面リブ付き鋼管を計6本配置している。鋼管の接合部内への埋め込み深さは横桁の下端に合わせるものとした。なお，接合部内と橋脚仕口部から430mm（橋脚断面短辺長）上方まで，および載荷点近傍の鋼管内部には局部座屈を防止するために間詰めコンクリートを充填している。鋼管の外面リブは間隔40mmのスパイラル状とし，リブ高およびリブ天端幅はそれぞれ2mm，4mmとした。橋脚部に配置した軸方向鉄筋はD16を約100mmピッ

チで 1 段配置し、D13 を用いた帯鉄筋および中間帯鉄筋を高さ方向に 130mm ピッチで配置している。鋼桁と鋼管の溶接方法は、鋼桁腹板に対しては鉛直方向にすみ肉溶接とし、鋼桁フランジに対しては水平方向の完全溶け込み溶接とした。写真-1 に鋼桁と鋼管の接合状況を示す。

実験での荷重方法は静的単調荷重とし、荷重は油圧ジャッキにより橋脚頂部に上部工重量に相当する所定の軸方向圧縮力 ( $P_v=148\text{kN}$ , 応力換算で  $0.44\text{MPa}$ ) を作用させた後、水平変位を単調増加させるようにして荷重している。なお、供試体の支持条件は主桁端部から 150mm 内側の桁高中心位置において回転のみを許容するピン支持とした。表-1, 2 には硬化コンクリートおよび各種鋼材の力学的特性を示している。

#### 4. 数値解析の概要

提案する接合構造の構造特性を数値解析的にも検証するために、汎用の構造解析プログラム DIANA を用いた弾塑性有限要素解析を実施した。図-3 に有限要素モデルを示す。解析モデルは、実験時と同様に逆 T 型にモデル化し、構造の対称性から 1/2 モデルとした。適用した有限要素タイプは、鋼桁および鋼管にはシェル要素、鉄筋には DIANA に組み込まれている埋め込み鉄筋要素、コンクリートに対してはソリッド要素である。なお、実験時および実構造では、鋼管には外面リブ付き鋼管、型枠兼用鋼板には孔あき鋼板ジベルを採用していることから、簡略化して鋼-コンクリートの要素間はいずれも完全付着を仮定した。コンクリート要素に用いた材料構成則は、圧縮領域においては材料試験から得られた圧縮強度  $f_c$  を用いて  $5,000\mu$  の圧縮ひずみまではコンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $5,000\mu$  ひずみ以降は初期弾性係数  $E_c$  の 1/100 倍で  $0.2 f_c$  まで線形的に軟化するモデルとした。また、引張領域は初期弾性勾配で引張強度  $f_t$  (圧縮強度の 1/10 倍) まで線形的に増加し、その後は終局ひずみ  $\epsilon_u$  まで線形軟化するモデルとした。ここで、終局ひずみ  $\epsilon_u$  は引張鉄



写真-1 鋼桁と鋼管の接合状況

表-1 硬化コンクリートの力学的特性

| 打設箇所 | 圧縮強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン比 |
|------|------------|------------|-------|
| 橋脚部  | 28.4       | 24.4       | 0.20  |
| 接合部  | 28.2       | 23.8       | 0.19  |

表-2 各種鋼材の力学的特性

| 鋼材種 | 材質     | 降伏強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 伸び (%) |      |
|-----|--------|------------|------------|--------|------|
| 鋼管  | STK400 | 353.0      | 432.0      | 38.0   |      |
| 鋼桁  | SM400A | 283.4      | 440.1      | 30.8   |      |
| 鉄筋  | D13    | SD345      | 362.0      | 538.8  | 28.4 |
|     | D16    |            | 367.9      | 549.1  | 27.4 |

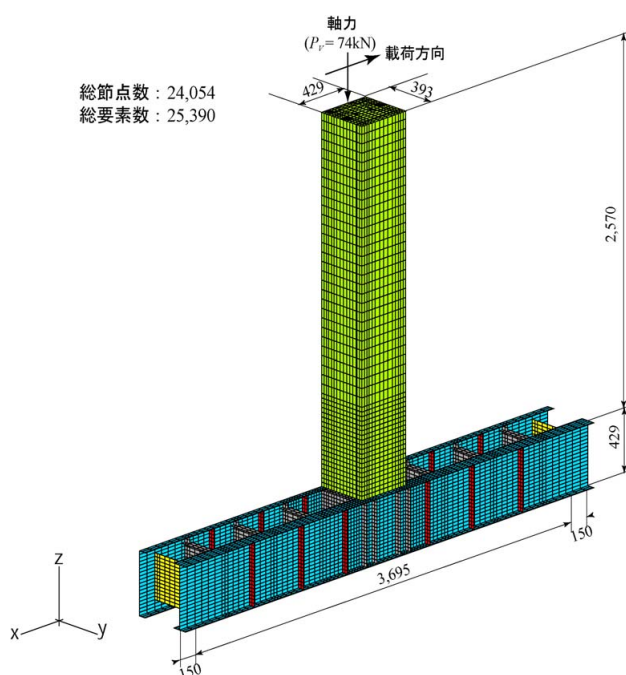


図-3 有限要素モデル

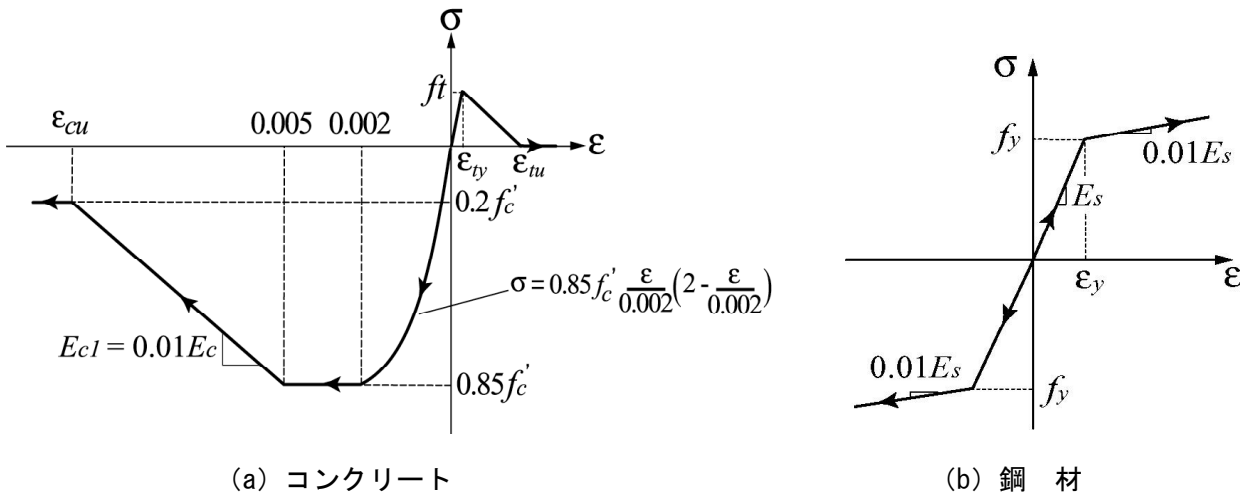


図-4 数値解析に用いた各材料の応力-ひずみ特性

筋の降伏ひずみ  $\epsilon_y$  と等しい値を設定している。一方、鋼部材および鉄筋要素には、降伏後の塑性硬化を考慮した等方弾塑性体モデルを適用した。塑性硬化係数は弾性係数の 1/100 倍とした。解析で与えた入力荷重は、実験時と同様に橋脚頂部に所定の軸圧縮力を与えた後、荷重点位置で水平変位を単調増加させるように入力している。図-4には数値解析で用いたコンクリートおよび鋼材の応力-ひずみ特性を示している。

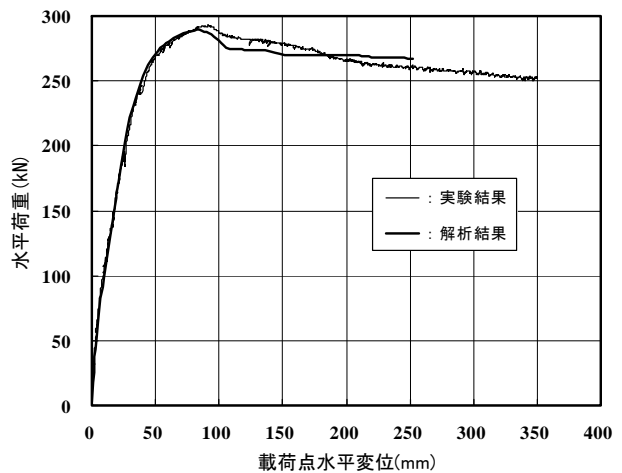


図-5 水平荷重-荷重点水平変位関係

## 5. 実験・解析結果および考察

### 5.1 水平荷重-水平変位関係

図-5には水平荷重と荷重点水平変位の関係を実験結果と解析結果と比較して示している。図より、実験結果に着目すると、水平荷重 150kN（水平変位 16.8mm）で橋脚仕口部の軸方向鉄筋の一部が降伏し、250kN 程度までは荷重が直線的に増加し、その後荷重増加率が低下して最大水平荷重の約 290kN に到達した。最大荷重到達後は変位の増加とともに圧縮側かぶりコンクリートが徐々に剥離して荷重が緩やかに低下した。実験はジャッキストロークの限界に達した段階（ $\delta=350\text{mm}$ ）で荷重を終了したが、この変位レベルにおいても最大荷重の 80% 以上を保持していた。なお、この時点においては接合部に顕著な損傷は確認されていない。一方、数値解析は最大耐力近傍までの挙動に着目しているため

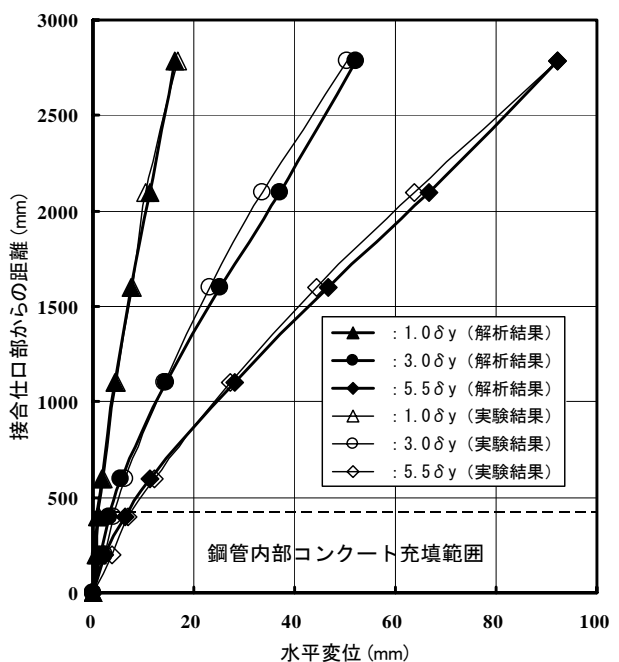


図-6 橋脚の高さ方向水平変位分布

水平変位 250mm までの結果を示しているが、最大荷重時までは実験結果と精度良く一致していることが分かる。また、大ひずみ領域となるポストピーク挙動に関しても比較的精度良く再現されている。図-6には各変位レベルにおける橋脚の高さ方向水平変位分布を実験と解析と比較して示している。図中の点線は鋼管内部コンクリートの充填高さを示している。これより、橋脚部の変位分布性状は実験と解析で精度良く一致していることが分かる。また、鋼管内部のコンクリート充填範囲を境界として変形曲率に変化しており、充填コンクリートによる変形抑制効果が顕著に現れていることが分かる。

### 5.2 橋脚仕口部の曲げモーメントー回転角関係

図-7には橋脚仕口部の曲げモーメントー回転角関係を実験結果と解析結果と比較して示している。ここで、曲げモーメントは水平荷重に橋脚仕口部から載荷点までの距離を乗じて算出し、回転角は橋脚仕口部近傍の4隅点における鉛直方向変位量から算出した。なお、図中(点線)には道路橋示方書に準拠して計算した橋脚仕口部の設計降伏曲げモーメントおよび設計終局曲げモーメントも併せて示している。図より、実験結果、解析結果ともに終局(最大)曲げモーメントは  $M_u=800\text{kNm}$  程度であることが分かる。一方、設計終局曲げモーメントは  $M_{ud}=552\text{kNm}$  であり、各材料の実強度が設計強度よりも高かったため実測値は設計値の約1.5倍であった。以上より、接合部は橋脚部における設計終局耐力の1.5倍以上の耐荷力を有しており、このことは接合部が橋脚部に先行して終局状態に至ることのないことを示している。なお、数値解析で得られた回転角が実験結果と比較して大きく評価されている。これは、実験では橋脚仕口部近傍に設置した回転角計測用の変位計位置よりも上方において損傷が集中してひび割れの開口が増加したが、数値解析では橋脚仕口部の直上において損傷が集中したためである。しかしながら、最大曲げモーメント近傍までは数値解析結果は実験結果を精度良く再現している。

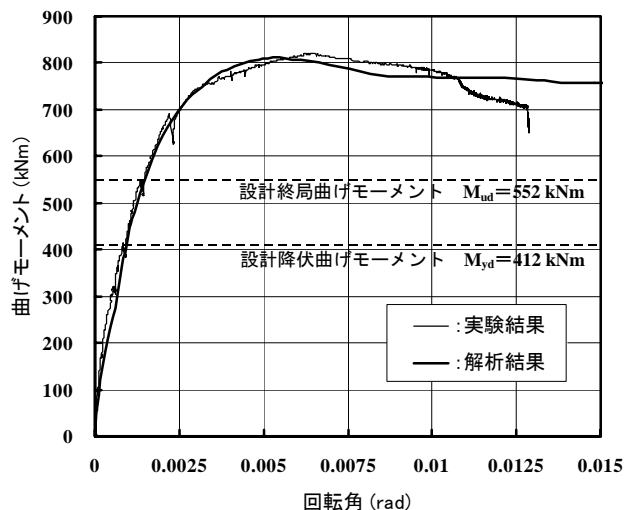
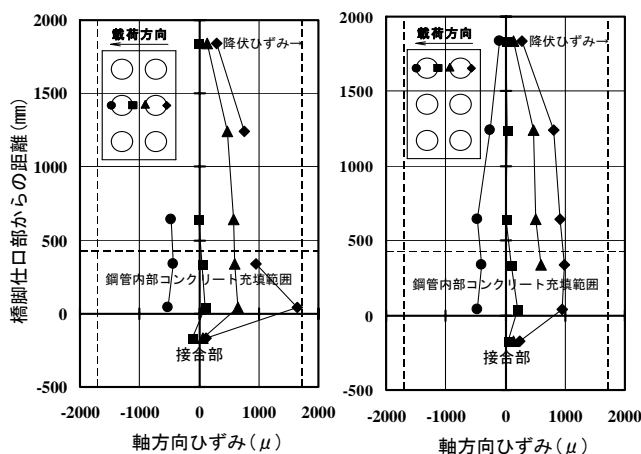
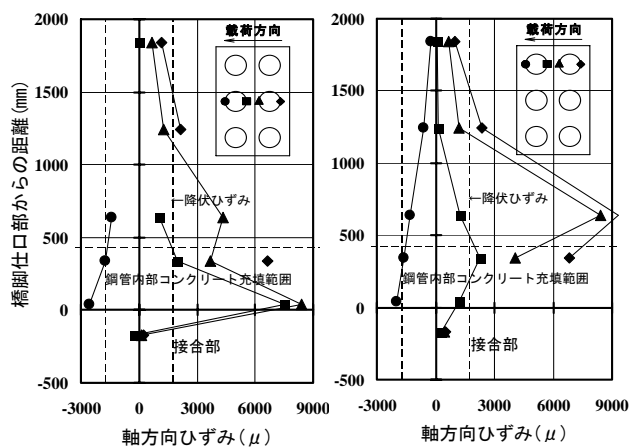


図-7 橋脚仕口部の曲げモーメントー回転角関係



(a) 降伏時



(b) 最大荷重時

図-8 実験の鋼管各点におけるひずみ分布

### 5.3 鋼管の軸方向ひずみ分布性状

図-8には、実験で得られた軸方向鉄筋降伏時および最大荷重時における各鋼管の軸方向ひずみ分布を示している。図より、降伏時のひず



み分布に着目すると、一部で計測不能であったが内側鋼管、外側鋼管ともにほぼ類似したひずみ分布を示していることが分かる。ひずみは内側鋼管の引張側における橋脚仕口部において $1,600\mu$ 程度発生しているが、その他の計測位置も含め、いずれも降伏域には達していない。また、接合部内の鋼管の発生ひずみは最大でも $250\mu$ 程度であり、橋脚部に比較して極端に小さいことが分かる。一方、最大荷重時に着目すると、接合部内の発生ひずみは最大でも $500\mu$ 程度であり、ひずみレベルは依然として小さいことが分かる。なお、その他の計測位置においては、引張側鋼管がいずれも橋脚仕口部から $640\text{mm}$ の範囲で降伏点を超える大きなひずみが発生しており、この領域では鋼管の降伏による橋脚部の塑性変形が顕著であることが分かる。

#### 5.4 実験終了後の供試体の損傷状況

写真-2には実験終了後の供試体の損傷状況を接合部近傍で拡大して示している。実験ではジャッキストロークの制限から水平変位 $350\text{mm}$ （降伏変位の約20倍）の段階で荷重を終了した。しかしながら、この変位レベルにおいても圧縮側かぶりコンクリートが剥離する程度の損傷であり、軸方向鉄筋や鋼管の座屈および破断等の明瞭な損傷は確認されていない。引張側においては水平方向の曲げひび割れが橋脚仕口部から約 $800\text{mm}$ の範囲に集中し、それより上方では $100\text{mm}$ 程度の一定間隔で橋脚自由端まで発生した。なお、目視による検証の限りでは接合部には顕著な損傷は認められず、鋼桁も健全な状態であった。本実験では、荷重終了後に鋼桁を切断する等によって接合部内の損傷状況を確認していないが、鋼管に発生したひずみレベルや実験時の目視観察等から判断すると、接合部内はほぼ健全な状態を保持していると推察される。

## 6. 結論

本研究では、鋼・コンクリート複合ラーメン橋の合理的な接合構造を開発することを目的として、鋼桁と合成構造橋脚を剛結させる接合法



写真-2 実験終了後の供試体の損傷状況

を提案し、その基礎的な構造特性を単調荷重実験および弾塑性有限要素解析により検証した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 本構造は、降伏変位の20倍に相当する変位レベルにおいても最大耐力の80%を保持しており、優れた耐荷力および変形性能を有している。また、提案の数値解析手法を用いることにより、橋脚部の弾塑性挙動を比較的精度良く再現可能である。
- 2) 接合部は、橋脚基部における破壊を想定した設計終局耐力の1.5倍以上の耐荷力を有している。
- 3) 接合部内の鋼管ひずみは、最大荷重時においても弾性範囲内のひずみレベルであった。
- 4) 本構造の終局状態は、橋脚仕口部近傍すなわち橋脚部における塑性ヒンジ化であることが確認され、接合部が橋脚部に先行して破壊に至ることのないことを検証できた。

#### 参考文献

- 1) 三上 浩, 田村多佳志, 岸 徳光, 池田憲二: 外面リブ付き鋼管を用いた合成構造橋脚の耐荷性状に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1433-1444, 2001.