

鉄骨梁と鋼板巻き RC 柱接合構造の耐荷性能に関する実験および解析的研究

Experimental and Analytical Study on Load-carrying Capacity of SC Beam to Steel Plate Lining Column Connection

三桶 達夫*, 黒田 智也**, 柳沼 謙一***, 福浦 尚之****
Tatsuo Mioke, Tomoya Kuroda, Kenichi Yaginuma, Naoyuki Fukuura

- * 工修 大成建設株式会社, 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
- ** 東日本旅客鉄道株式会社, 東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目 2 番 6 号)
- *** 東日本旅客鉄道株式会社, 東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目 2 番 6 号)
- **** 博(工) 大成建設株式会社, 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

This paper presents an investigation of the experimental study on structural behaviors of connection, especially diaphragm connection and connection panel, between concrete-filled square shaped steel beam and concrete-filled square tubular steel reinforced column subjected to incremental loading.

The analytical results are verified through comparison with results of finite element analysis and a experiment. Moreover, it is indicated that these dimensional analyses are available for evaluation of these type of connections..

Key Words: SC beam, steel plate lining column, load-carrying capacity, beam to column connection, FEM

キーワード: SC 梁, 鋼板巻き柱, 耐荷性能, 柱梁接合部, 有限要素解析

1. はじめに

近年, 鉄道高架橋に景観性やメンテナンスの軽減等を目的とした柵を用いない背割れ式 RC ラーメン高架橋が多く採用されるようになった。

一方, 施工条件の厳しい駅部の高架橋においては, RC 構造と比べ施工性という点で優位である鉄骨を用いたラーメン高架橋が用いられる場合があり, 近年はコンクリート充填鋼管によるソケット接合¹⁾なども用いられている。

今回, 施工上の制約条件が大きい鉄道高架橋工事において, 背割れ部を有する鉄骨梁と鋼板巻き RC 柱の複合ラーメン高架橋を採用し, 梁と柱の接合構造について耐荷性能試験¹⁾並びに解析を実施したので, そこで得られた知見について報告する。

2. 構造概要

本稿で対象とする鉄道高架橋は, 駅部 12.5m, 駅中間部 15.0m のスパン長を標準とした背割れ式複合ラーメン高架橋である。今回採用した複合ラーメン高架橋は, 鉄骨梁 (SC (鉄骨コンクリート) 構造または S 構造), 鋼板巻き RC 柱の構造で, 梁と柱の接合部は鋼管に外ダイヤフラムを設けた構造とし柱に被せるようなキャップ構造である。キャップ部の鉄筋はこれまで実施した研究²⁾から, 柱から必要定着長分 (1.5D かつ 30φ 以上, D: 角型鋼管短辺長, φ: 鉄筋径) の鉄筋を接合部に差し込む事とし, 鋼管内をコンクリートで充填すること

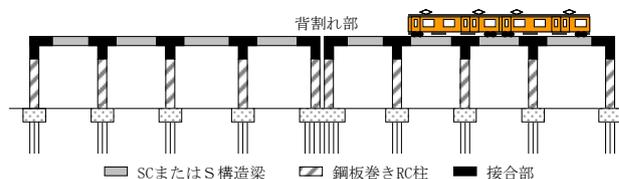


図-1 複合ラーメン高架橋概要

により一体構造とした。

また, 接合部の鋼管内にフレア溶接にて鉄筋を配置し, 鋼管とコンクリートの付着力の向上を図ることとした。更に, 施工性を向上させ, 急速施工を可能とするために, RC 柱の帯鉄筋とコンクリート型枠を兼ねた鋼板を RC 柱外側に巻く構造とした。図-1 に本稿で紹介する複合ラーメン高架橋概要図を図-2, 写真-1 に接合部構造を示す。なお, SC 梁はコンクリートを完全充填した鉄骨箱梁構造となっている。

3. 構造上の課題

対象とする高架橋は背割れ部を有する構造であることから背割れ部の接合部においては, 図-2 に示すように物理的に外ダイヤフラムを設けることができない箇所が発生し, 耐力不足が懸念された。そこで, 梁と柱の接合部に着目し耐荷性能試験並びに解析を実施することとした。

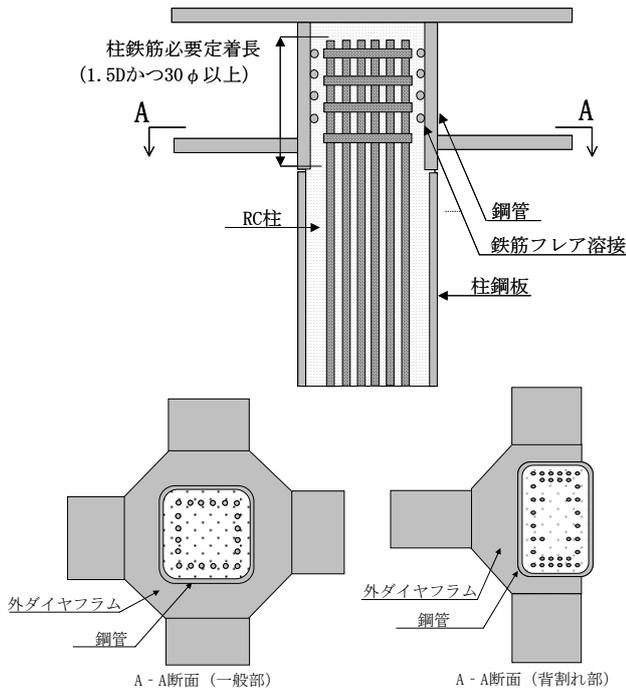


図-2 接合部構造

表-1 材料試験結果

(a) 鋼材

| 板厚 (鉄筋径) | 材質 | 降伏点 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び (%) | ヤング率 ($\times 10^5$ N/mm ²) |
|-------------|--------|-----------------------------|------------------------------|-----------|---|
| 6mm | SM400B | 354 | 443 | 30.4 | 2.15 |
| 9mm | SM400B | 288 | 436 | 31.0 | 2.07 |
| 12mm | SM400B | 282 | 434 | 32.3 | 2.08 |
| D16 | SD390 | 459 | 683 | 18.0 | 1.94 |
| D10 | SD345 | 382 | 529 | 18.9 | 1.90 |

試験片 鋼板: JIS Z 2201 5号試験片, 鉄筋: JIS Z 2201 2号試験片

(b) コンクリート

| 供試体材令 (日) | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング率 ($\times 10^4$ N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) |
|--------------|------------------------------|---|------------------------------|
| 11 (試験日) | 31.0 | 2.36 | 2.87 |

4. 荷重実験

4.1 試験体概要と計測及び荷重方法

本実験に用いた試験体および荷重の概要を図-3に示す。試験体は想定構造物の約1/2とした。

鋼板の溶接は、裏当て金を使用した全断面溶接を基本とした。接合部への鉄筋埋込長は625mm (1.56×短辺長, 角型鋼管400mm×600mm, 39φ, φ:鉄筋径16mm)とし、鋼管と鉄骨梁は溶接にて一体化させた。また、本接合構造は、所定の構造性能を満足した上でかつ十分な施工性を有することを目標としていることから、柱鋼板と鋼管は一体とはせず突合せ構造とした。

鋼材の材質はSM400B、鉄筋はSD390/345を用いた。コンクリートは設計基準強度27N/mm²、最大粗骨材寸法20mm、早強セメント、スランプ15cmを用いた。試験体に用いた材料の強度試験結果を表-1に示す。なお、コンクリートの打設方向については、その影響は小さいものと判断し、実際の施工とは逆方向から行なった。

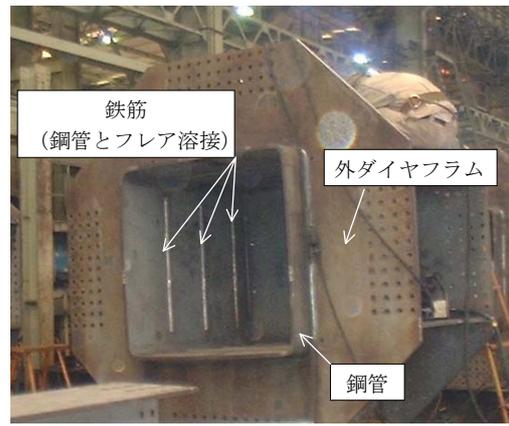
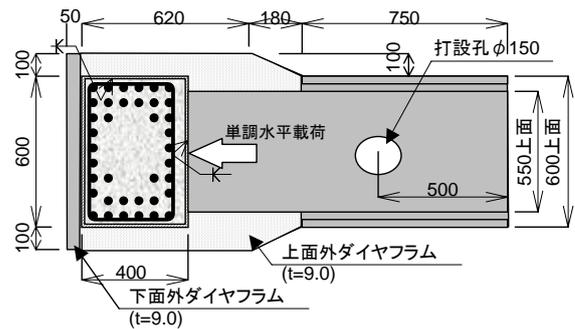
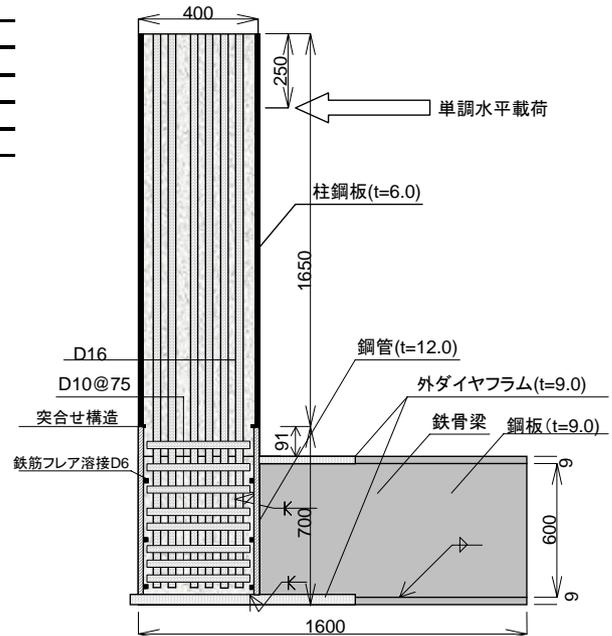


写真-1 接合部構造



(a) 試験体平面 (単位 mm)



(b) 試験体側面 (単位 mm)

図-3 試験体及び荷重概要

本実験では接合部の耐荷・変形状に注目することから、荷重は基本的に単調水平荷重とし、柱の軸力は作用させなかった。また、試験体は鉄骨梁上部に鋼材を渡してPC鋼棒を緊張することにより反力床に固定した。荷重方向は鋼板巻きRC柱内側から外側への片押しとし、目地部における引張縁主鉄筋のひずみが全て降伏ひずみに達した後、いったん除荷し残留変位を確認した後、漸増荷重

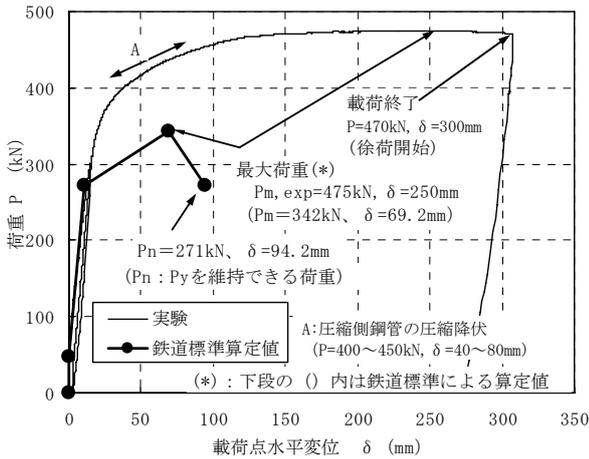


図-4 荷重 - 水平変位関係

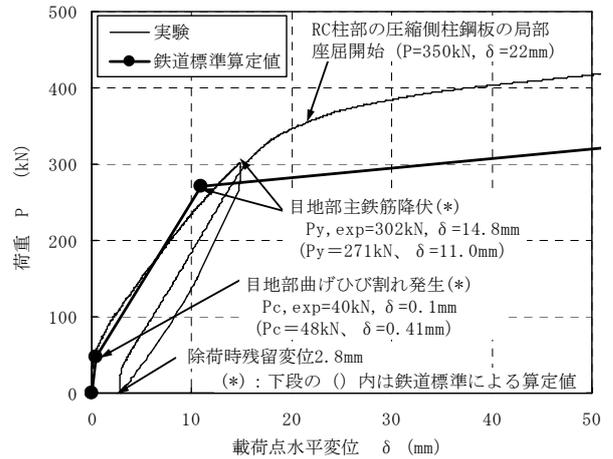


図-5 荷重 - 水平変位関係 (水平変位 0~50mm)



写真-2 試験終了時試験体状況



写真-3 試験終了時試験体状況 (写真-2 中 a 部拡大)

にて押し切った。計測項目は鋼管柱変位、接合部目開き変位および鋼管、柱鋼板、鉄筋のひずみとした。なお、ここで言う目地部とは、柱鋼板と接合部鋼管との境界部をさす。

4.2 実験結果

(1) 実験結果と鉄道構造物等設計標準による骨格曲線算定値との比較

図-4,5 に荷重 - 水平変位関係を、写真-2,3 に試験終了時の試験体の状況を示す。

図-4,5 に示されるように、目地部主鉄筋降伏時の荷重 P_y は 302kN、その時の水平変位は 14.8mm、除荷時の残留変位は 2.8mm であり、最大荷重 P_m は 475kN、その時の水平変位は 250mm であった。また、実験は使用した 2000kN ジャッキのストロークの性能より水平変位 300mm で載荷を終了した。実験終了時の部材変形角は約 1/5 (柱高 1650mm に対し柱水平変位 300mm) であった。

試験から得られた耐力および変形性能について、鉄道構造物等設計標準³⁾ (以下「鉄道標準と称する」) において採用されている鉄筋コンクリート部材端部の曲げモーメントと部材角の関係の算定方法を用いて実験値の比較を行った結果を図-4,5 に示す。なお、鉄道標準による骨格曲線の算出には、柱鋼板 (板厚 $t=6.0\text{mm}$) を帯鉄筋に

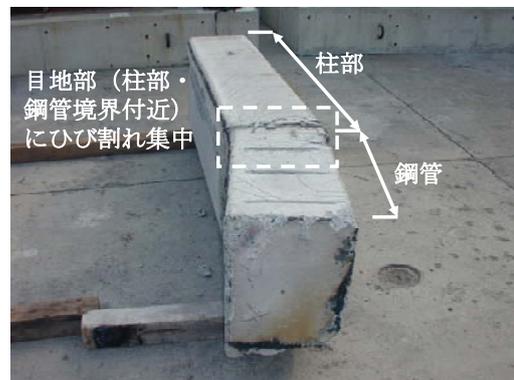


写真-4 柱・接合部コンクリート状況 (試験終了時)



写真-5 柱・接合部境界付近状況 (試験終了時)



写真-6 柱鋼板・接合部鋼管状況 (試験終了時)

換算し (帯鉄筋比 $P_w=2.0\%$) 算出した。これより、目地部ひび割れ発生荷重 P_c は実験値, 算定値ともほぼ一致していた。また、目地部主鉄筋降伏時における荷重 P_y とその時の水平変位についても実験値と鉄道標準³⁾による算定値はほぼ同等であった。また、写真-4, 5 に示すように、試験終了後に鋼管柱及び接合部内部の鉄筋コンクリートのひび割れ状況を観察した結果、目地部 (柱部, 鋼管境界) 周辺にひび割れが集中しており接合部中のコンクリートには相対的にひび割れが少なかった。これらより、コンクリート接合部に埋め込まれた鉄筋のコンクリートへの定着は十分確保されており、また、接合部に埋め込まれたコンクリート全体が抜け出すような挙動は示していないことがわかる。以上より、本実験ケースのような外ダイヤフラムを設けることが出来ない、背割れ接合部においても耐力不足は生じず、設計上必要としている性能を十分有しているといえる。

(2) 最大荷重についての検討

実験値と鉄道標準³⁾による算定値の最大耐力比は約 1.4 倍であり実験値が算定値を大きく上回った。(実験値 475kN, 算定値 342kN)

実験では、目地部の柱鋼板は図-5 に示すように 350kN で圧縮側で局部座屈が開始され、図-4 に示すとおり鋼管では 400kN~450kN で圧縮降伏していた。また、写真-6 に示すように、圧縮側目地部鋼板には局部座屈が生じているのがわかる。これは、柱の変形に伴い柱鋼板と鋼管が接触し、局所的な鋼板の座屈の発生と供に広い範囲で鋼板を介して圧縮力の伝達が生じ、柱耐力が増大したものと考えられる。

一般的に鋼管内に充填されたコンクリートは、鋼管による拘束効果によって圧縮強度や終局ひずみが通

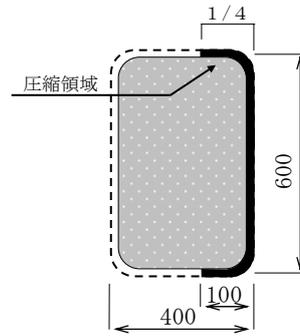


図-6 圧縮力伝達を考慮した耐力算定

表-2 圧縮力伝達を考慮した耐力算定結果

| | 実験値 | 算定値 | |
|------------|------|-----------|---------|
| | | 鋼板巻き RC 柱 | |
| | | 圧縮力伝達考慮なし | 圧縮力伝達考慮 |
| P_y (kN) | 302 | 271 | 309 |
| P_m (kN) | 475 | 342 | 443 |
| P_m/P_y | 1.57 | 1.26 | 1.43 |

P_y :目地部主鉄筋降伏時荷重, P_m :最大荷重

常の場合に比べ増加するとされているが、柱鋼板及び鋼管ひずみの測定結果および試験体の目視観察に基づき、本検討では柱鋼板と鋼管との間で圧縮力が伝達された場合の柱の耐力を側面の鋼板の約 1/4 の範囲が圧縮に寄与するものと仮定し算定した (図-6, 写真-6)。算定の結果、表-2 に示す通り最大荷重 P_m は実験値 475kN に対し、算定値 443kN とほぼ同等であり、柱耐力の増大は、柱変形に伴う圧縮側の柱鋼板、鋼管の突合せ部を介した圧縮力の伝達に起因するものといえる。

5. 3次元非線形有限要素解析による実験のシミュレーション

5.1 解析の目的

本実験を対象に3次元非線形有限要素解析によるシミュレーションを行い、実験結果の妥当性および本接合構造の耐荷挙動について更なる検討を行った。主な着目点を以下に示す。

- ・接合部、柱部のコンクリートと鋼板との付着状況
- ・細部の応力、ひずみ状態
- ・最大荷重にいたる耐荷機構

5.2 解析モデル

解析は、3次元非線形有限要素法によった。使用プログラムは汎用解析コードABAQUSであり、これにコンクリートのひび割れ発生による非線形挙動を回転ひび割れモデル⁴⁾に基づきプログラム化したユーザーサブルーチンを組み込み、解析を行った。回転ひび割れモデルは主ひずみ軸と主応力軸が一致するように応力状態を定める

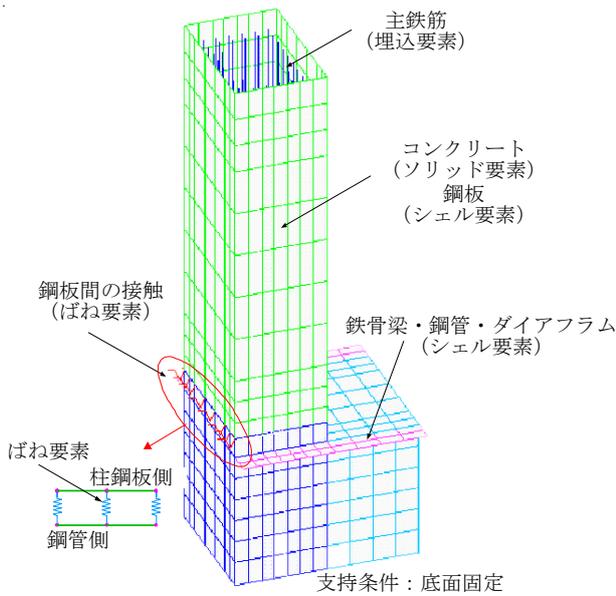


図-7 解析モデル

モデルであり、基本的にコンクリートの1軸応力-ひずみ関係のみでひび割れ挙動を表現することができる。

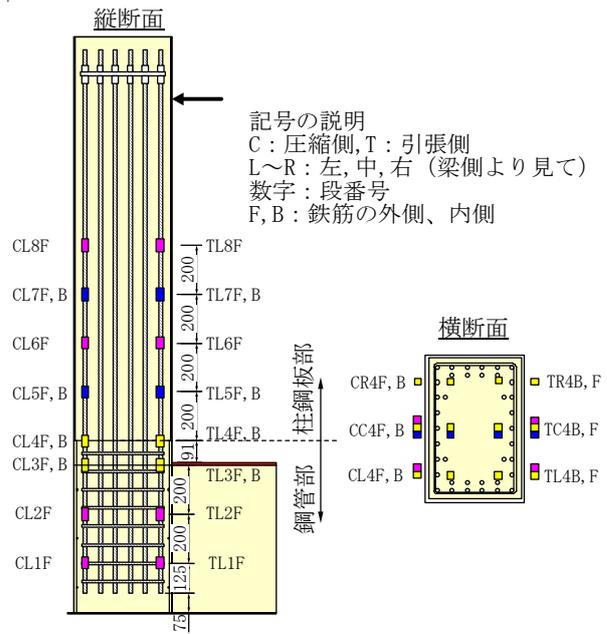
解析に用いたコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、圧縮強度試験結果とコンクリート標準示方書⁵⁾に示される応力-ひずみ関係に基づき設定した。引張挙動については、ひび割れ発生限界値を材料試験による引張強度で定義し、ひび割れ発生限界以降はコンクリートの見かけの剛性低下を考慮して引張ひずみ500 μ で応力分担が0となるように線形低下させることとした。また、鋼材についても材料試験結果に基づき応力-ひずみ特性を設定した。

解析モデルを図-7に示す。コンクリートはソリッド要素、鉄筋は埋込(トラス)要素、鋼板およびダイアフラムはシェル要素でモデル化した。鋼板とコンクリートの付着には摩擦を考慮した。目地部背面側の鋼板間の接触は、圧縮時には剛なバネとして作用し引張時には力を伝達しないばね要素でモデル化した。ここで解析モデルにおける支持条件は底面の鋼板要素を完全固定とした。図-8に解析結果との比較に用いた実験の計測データ位置を示す。

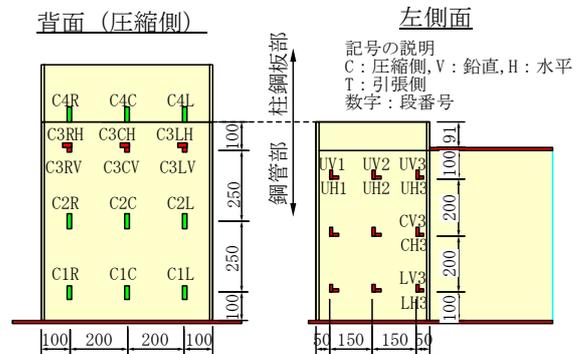
5.3 接合部、柱部のコンクリートと鋼板との付着状況

試験体のモデル化においては、鋼管とコンクリートとの相互作用についてはこれを摩擦挙動で表現することとした。その摩擦係数は、パラメータ解析と実験結果の荷重-ひずみ曲線・鉄筋のひずみを比較して決定した。

パラメータ解析における摩擦係数の基準値としては日本建築学会の鋼構造限界状態設計指針・同解説⁶⁾に示される柱脚におけるベースプレートとコンクリートの終局時の摩擦係数(=0.5)を用いた。まず、図-9に示すように鋼管部の摩擦係数を変化させた解析結果と実験結果を比較した。鋼管とコンクリートとの摩擦係数を0.5から上げていくと、荷重-変位の勾配は大きくなり実験値に近づく傾向を示した。試験体の鋼管部内面にはフ



(a) 主鉄筋ゲージ計測位置・記号



b) 厚肉鋼管ひずみ背面部計測位置・記号

図-8 実験での計測位置

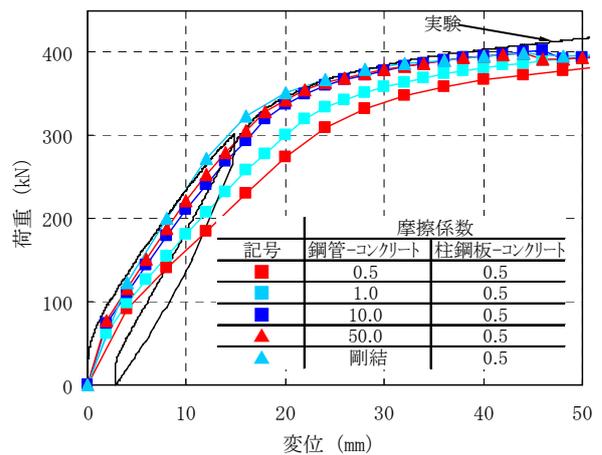
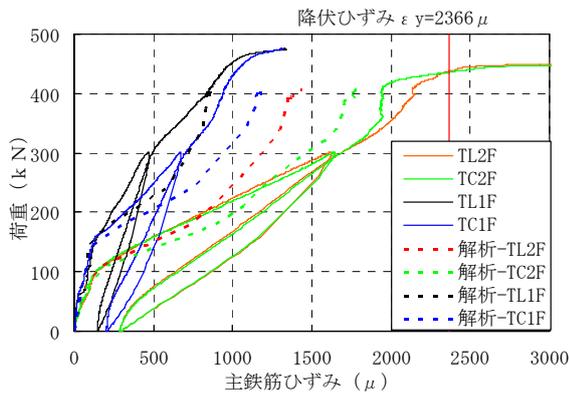
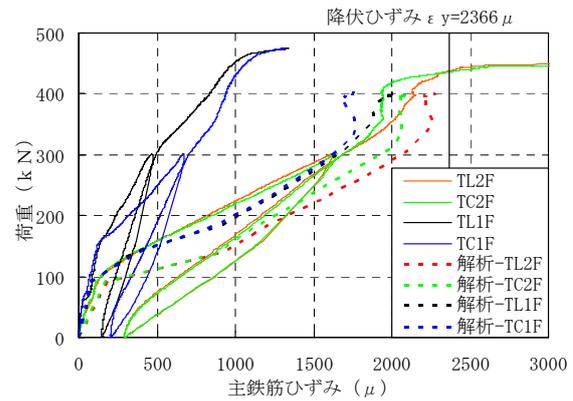


図-9 摩擦係数をパラメータとした比較解析

レア溶接したズレ止め用の鉄筋が設置されており、さらに鋼管によるコンクリートの拘束効果もあることから鋼板とコンクリートとの付着性状が向上していたことが、解析においてはみかけ上の摩擦係数の増大として表現できていると考えられる。これは、実験では鋼管部よりの大



(a) 鋼管-コンクリート間摩擦係数：10.0



(b) 鋼管-コンクリート間摩擦係数：0.5

図-10 荷重-鋼管部主鉄筋ひずみ関係

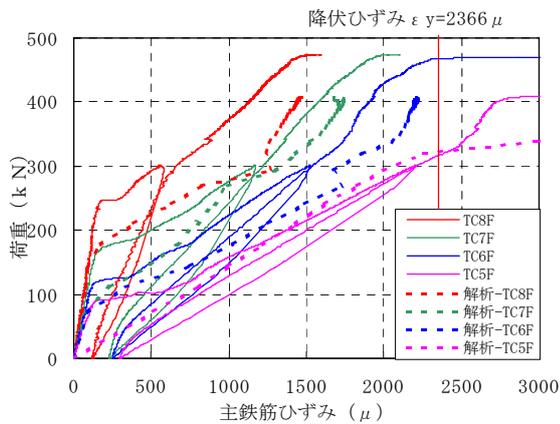


図-11 荷重-柱鋼板部主鉄筋ひずみ関係

(柱鋼板-コンクリート間摩擦係数：0.5)

きな抜け出しが観察されなかったこととも一致している。
 鋼管内の鉄筋定着部の実験結果と解析結果の比較を行った結果より、鋼管と内部コンクリートとの摩擦係数を10.0と定めることで実験結果をよく再現できることがわかった(図-10)。柱鋼板とコンクリート間についても摩擦係数0.5から100までの範囲でパラメータ解析をおこなった結果、主鉄筋のひずみに大きな違いが認められなかったため、基準値の0.5を用いた。図-11に柱鋼板-コンクリート間摩擦係数を0.5、鋼管-コンクリート間摩擦係数を10.0とした場合の荷重と柱鋼板部主鉄筋ひずみ関係を示す。

5. 4 実験と解析結果の比較

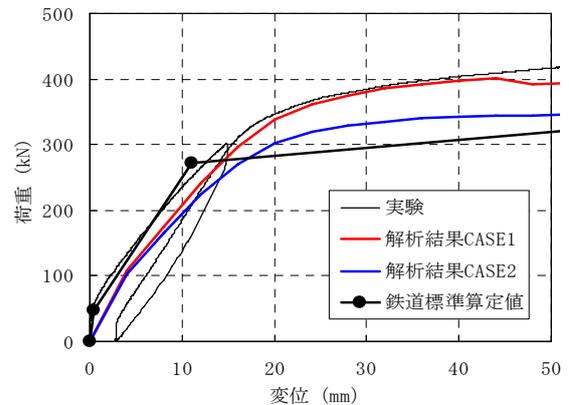
前項で設定した鋼板とコンクリートとの摩擦係数を用いて、実験と解析の比較を行った。解析ケースを以下に示す。

CASE1：柱鋼板と鋼管との接触を考慮しない

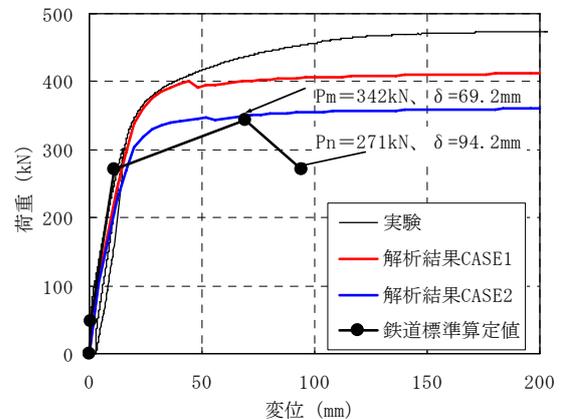
CASE2：柱鋼板と鋼管との接触を考慮する

(1) 荷重-変位関係

荷重-変位関係について実験と解析結果との比較結果を図-12に示す。CASE2については、最大荷重レベルまでは解析結果は鉄道標準³⁾による骨格曲線とほぼ一致していた。CASE1においては約400kNまでは実験結果と良好に一致していた。



(a) 変位 0~50mm



(b) 変位 0~200mm

図-12 荷重-変位関係比較

(2) 荷重-ひずみ関係

荷重と各部ひずみの関係について、実験結果と解析結果の比較を以下に示す。図-13に示す荷重-圧縮側鋼管ひずみ関係より、実験と解析は同様の傾向を示していた。図-14に示す荷重-圧縮側柱鋼板ひずみ関係では、柱鋼板が座屈する荷重(350kN)までは左側(C4L)については実験と解析は同様の傾向を示すものの、それ以外については若干異なる傾向であった。柱鋼板が薄い(6mm)こと

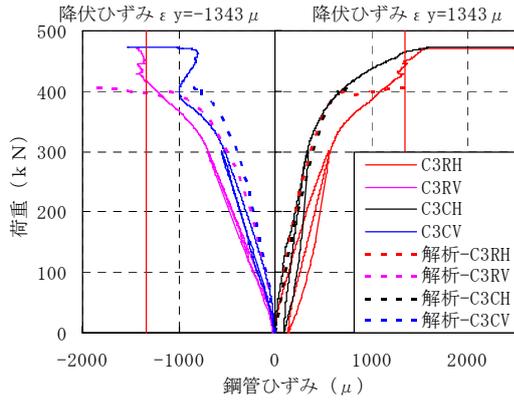


図-13 荷重-圧縮側鋼管ひずみ関係

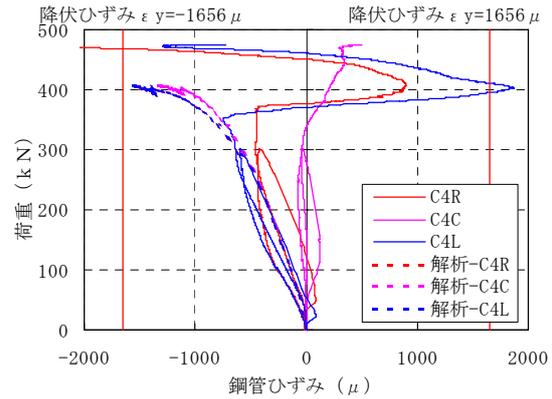


図-14 荷重-圧縮側柱鋼板ひずみ関係

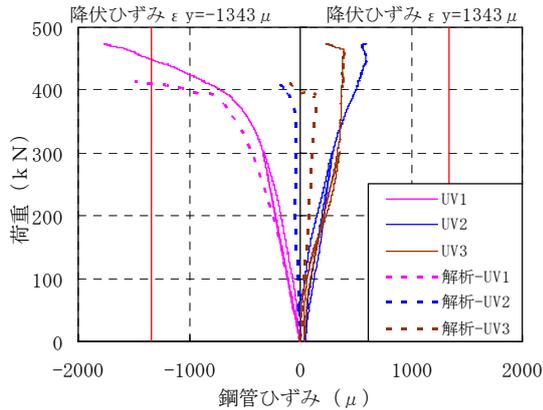


図-15 荷重-鋼管側面部ひずみ関係 (1)

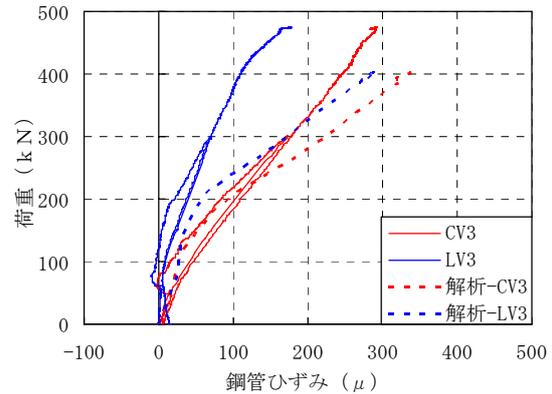


図-16 荷重-鋼管側面部ひずみ関係 (2)

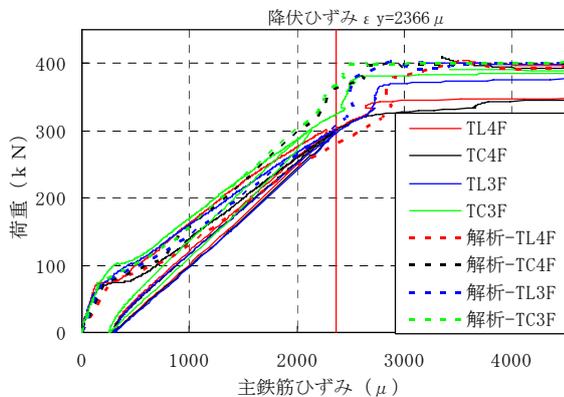
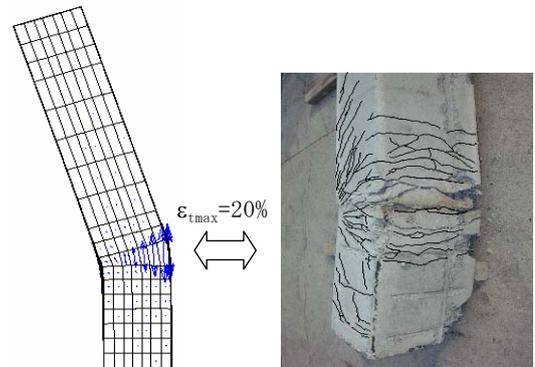


図-17 荷重-RC柱引張側鉄筋ひずみ



(a) 解析最大荷重時引張主ひずみ (b) 実験ひび割れ状況
図-18 試験体ひび割れ状況の比較

から、実験では荷重載荷の初期から鋼管との接触による柱鋼板の局所的なコンクリートからの剥離による変形が生じていたことが原因と推察される。

図-15, 16 に示す荷重-鋼管側面部ひずみ関係では、圧縮側 (UV1) および下部側面 (CV3, LV3) については実験と解析は、ほぼ同様の傾向を示していた。また、図-17 に示す荷重と RC 柱の引張側鉄筋ひずみ関係は、実験と解析は良好に一致していた。図-18 に、実験終了時における試験体のひび割れ状況と最大荷重時における解析での引張主ひずみ分布を示す。これより、解析においても柱鋼板と鋼管の突合せ部にひび割れによる損傷が集中していることがわかる。これは、実験時に鋼管部のコンクリー

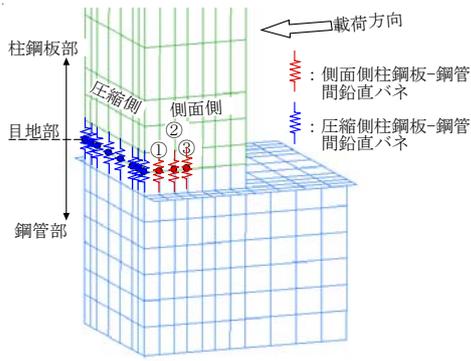
トがほとんど抜け出していなかった状況とも一致していた。

以上の比較より、解析は試験体各部のひずみについても実験での挙動を概ね表現できていると考えられる。

5.5 最大荷重に至る耐荷機構

CASE2 の解析においては、荷重が実験結果より小さな値を示す傾向にあった。そこで、この解析ケースを基準としてパラメータ解析を行った。

写真-6 に示すように、実験では柱鋼板の局所的な座屈変形により、側面においても柱鋼板と鋼管が接触して圧縮力が伝達されていたと考えられる。そこで、この現象を解析で表現するために、便宜的ではあるが柱鋼板と鋼



- ・ケース0：圧縮側 (●) のみ=CASE2
- ・ケース1：圧縮側 (●) +側面 (●①)
- ・ケース2：圧縮側 (●) +側面 (●①, ②)
- ・ケース3：圧縮側 (●) +側面 (●①, ②, ③)

図-19 バネ要素設置範囲とパラメータ解析ケース

管が解析上離れている状態でも圧縮力が作用するようにバネ特性を設定し、現象の再現を試みた。図-19 にバネの設置範囲・パラメータ解析ケースを示す。

パラメータ解析の結果を図-20 に示す。便宜的なバネ特性を与える範囲を広くしていくことで、最大荷重は増加していった。ケース3では、最大荷重に至る過程での剛性は実験結果よりも高いが、最大荷重は450kNと実験と同程度であり、4. で示したRC断面計算とほぼ一致していた。これらの解析結果から、実験においては突合せ部圧縮側の柱鋼板の局部座屈の後、徐々に側面の柱鋼板が鋼管と接触していき圧縮力を分担する範囲が広がっていくことで耐力の上昇に寄与していったものと考えられる。

以上の解析検討により、実験における最大荷重に至るまでの挙動を再現でき、そのメカニズムを明らかにすることができたと考える。

6. まとめ

今回行った梁柱接合部の耐力確認試験および非線形有限要素解析による実験のシミュレーションより得られた知見を以下に示す。

- 1) 実験結果と鉄道標準の方法による骨格曲線との比較より、外ダイヤフラムを設けることができない背割れ接合部においても本接合構造は変形能・耐力ともに一般の鉄筋コンクリート部材の接合部と同等以上であることが示された。
- 2) 解析条件の設定のために実施したパラメータ解析と実験結果との比較より、実験結果における荷重-変位関係における剛性は鋼管とその内部のコンクリートの摩擦による影響を大きく受けることが明らかとなった。これについては、鋼管内のフレア溶接した鉄筋によるせん断補強及びフープ筋などが、接合部におけるコンクリートや鉄筋の定着性能の向上に有効に寄与すると考えられる。実験においても、鋼管内コンクリートは試験過程において有害な抜け出しは認められず、接合部に埋め込まれた鉄筋の定着は確保されていた。

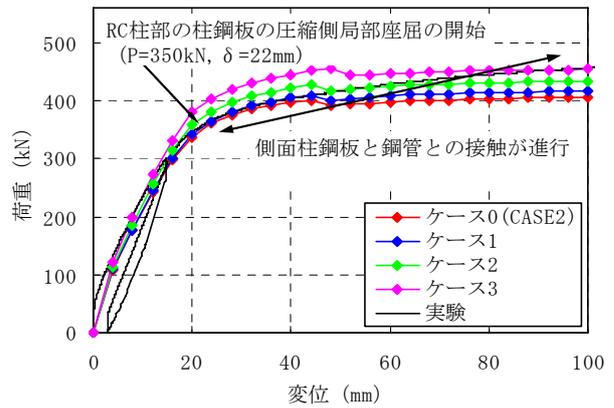


図-20 荷重-変位関係パラメータ解析結果

- 3) CASE1 の柱鋼板と鋼管の接触を考慮しないケースの解析結果については、荷重-変位関係は鉄道標準にもとづく骨格曲線計算値と良く一致していた。また、実験を模擬したCASE2の基準モデルの解析結果については、解析結果は内部の鉄筋や鋼板の応力状態の実験結果と概ね整合していたが、耐力は実験値より小さくなる傾向を示していた。
- 4) CASE2 の基準モデルの解析において、荷重が実験結果より小さな値を示す傾向に対してパラメータ解析を行った。これらの解析結果から、実験においては突合せ部圧縮側の柱鋼板の局部座屈の後、徐々に側面の柱鋼板が鋼管と接触していき圧縮力を分担する範囲が広がっていくことで耐力が上昇していったものと考えられる。
- 5) 鋼管接合面でのバネ、および鋼管とコンクリートの接触等をモデル化した3次元非線形解析は有効であり、今後、実験と解析を併用することでSCとRCの接合部の開発に寄与できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物，丸善，2002.12
- 2) 黒田智也，杉崎向秀，中本康晴，柳沼謙一，佐藤清一，工藤伸司：中央線三鷹・立川間連続立体交差化工事における高架橋の鉄骨梁・鋼板巻き RC 柱接合部の設計について，SED-STRUCTURAL ENGINEERING DATA- ISSN 0919-6692 NO.26 2006.5，東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター
- 3) 山田正人，小林寿子，築嶋大輔，山内俊幸：鋼管コンクリートの簡易な継手について，SED-STRUCTURAL ENGINEERING DATA- ISSN 0919-6692 NO.18 2002.5，東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター
- 4) 鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999.10
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No50 コンクリート構造の非線形解析技術研究小委員会成果報告，2003.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.3
- 7) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，1998.
(2006年9月11日受付)