

# 論文 柱梁接合部の構造性能に及ぼす梁軸方向鉄筋の定着仕様および寸法効果の影響

吉武 謙二<sup>\*1</sup>・小川 晃<sup>\*2</sup>・小倉 大季<sup>\*3</sup>・長井 宏平<sup>\*4</sup>

要旨：土木構造物の柱梁接合部の構造性能を把握するため、実構造物の1/2程度の大型実験を実施し、断面寸法の異なる既往の実験結果と比較して、梁軸方向鉄筋の定着仕様および試験体寸法が破壊メカニズムに及ぼす影響を明らかにした。また、破壊挙動を反映した設計手法確立のため、既往の小型試験の非線形有限要素解析を実施した。その結果、寸法効果の影響は小さく、接合部を閉じる側で接合部の破壊により耐荷性能が急激に低下すること、梁軸方向鉄筋の曲げ内半径の接合部性能への影響は少ないこと、張出スラブに定着した場合、負側の耐荷性能が向上すること、などを確認した。

キーワード：柱梁接合部，定着，曲げ内半径，寸法効果，有限要素解析

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降の耐震基準の厳格化により、RC部材は高耐力化されており、鉄筋種類もSD390が標準的に用いられている。しかし、土木構造物の柱梁接合部の基本的な設計手法は昭和6年発行のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>から変更されておらず、仕様規定を満足すればせん断強度の照査などを行わなくても剛域とされている。また、使用材料の高強度化による断面寸法の縮小やハンチ寸法の縮小により、接合部体積が小さくなっており、接合部が相対的な構造的弱点となっている可能性がある<sup>2)</sup>。

現状の接合部は前述の構造性能のみならず、写真-1のように柱や梁の軸方向鉄筋が接合部において錯綜し、昭和6年以来変更のない10（は鉄筋の呼び径）という梁の軸方向鉄筋の大きな曲げ内半径のため、鉄筋が3次元的に複雑に干渉し合い施工性が低下している。また、コンクリート打設用のホースなどの吐出口や締固め用の棒形振動機の配筋内部への挿入が困難となるためコンクリートの未充填リスクも高まっている。

柱梁接合部を想定した定着に関する研究は最近なされているが<sup>3), 4), 5)</sup>、現状の配筋を反映した柱梁接合部に関する実験は極めて少ない<sup>2), 6)</sup>。

本報では、ラーメン高架橋の柱梁接合部を対象として、著者らが以前実施した実構造物の1/4程度の小型実験結果<sup>7)</sup>との寸法効果を確認することを目的として、実構造物の1/2程度の大型実験を実施した。実験要因は、梁軸方向鉄筋の定着仕様である。

小型、大型実験ともに接合部内コンクリートのせん断破壊と接合部の損傷による梁および柱軸方向鉄筋の定着

力の損失という非常に複雑な破壊モードであった。設計手法を確立するためには破壊挙動を把握することが不可欠である。このため、小型実験を対象とした非線形有限要素解析も実施し、梁軸方向鉄筋の定着仕様が破壊挙動に及ぼす影響を確認した。寸法効果の検証および小型実験の解析を実施しているため以下では小型実験についても述べる。

## 2. 研究概要

### 2.1 実験概要

#### (1) 試験体概要

試験体一覧を表-1に、試験体形状および配筋を試験体S-10、L-3、L-Sを例として図-1に示す。小型のSシリーズと大型のLシリーズの柱寸法はそれぞれ250×250mm、500×500mm、柱軸方向鉄筋比はそれぞれ2.3%、2.7%である。柱および梁の軸方向鉄筋にはSD390を、帯鉄筋にはSD345を用いた。接合部に直交する縦梁の効果



写真-1 配筋状況

\*1 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 主任研究員 博(工)(正会員)

\*2 清水建設(株) 土木事業本部 設計第一部 グループ長

\*3 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 修(工)(正会員)

\*4 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工)(正会員)

表 - 1 試験体および結果一覧

| シリーズ名 | 試験体名  | 柱寸法 (mm)  | 梁軸方向鉄筋の定着仕様 |           | 最大荷重            |                  | 合計吸収エネルギー (J)    | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|-------|-----------|-------------|-----------|-----------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|       |       |           | 上側          | 下側        | 正側 (kN)         | 負側 (kN)          |                  |                           |                             |                            |
| Sシリーズ | S-10φ | 250 × 250 | 曲げ内半径 10φ   | 曲げ内半径 10φ | 48.9            | -76.9            | 5,980            | 22.5                      | 2.2                         | 27.1                       |
|       | S-3φ  |           | 曲げ内半径 3φ    | 曲げ内半径 3φ  | 50.8<br>(1.04)* | -77.0<br>(1.00)  | 5,674<br>(0.95)  | 24.3                      | 2.4                         | 26.9                       |
|       | S-S   |           | 直筋 (機械式定着)  | 曲げ内半径 10φ | 49.5<br>(1.01)  | -80.2<br>(1.04)  | 6,679<br>(1.12)  | 24.0                      | 2.4                         | 26.6                       |
| Lシリーズ | L-10φ | 500 × 500 | 曲げ内半径 10φ   | 曲げ内半径 10φ | 258.3           | -437.7           | 42,161           | 36.4                      | 3.0                         | 30.0                       |
|       | L-3φ  |           | 曲げ内半径 3φ    | 曲げ内半径 3φ  | 282.7<br>(1.09) | -430.3<br>(0.98) | 41,384<br>(0.98) | 34.2                      | 2.8                         | 29.7                       |
|       | L-S   |           | 直筋 (機械式定着)  | 曲げ内半径 10φ | 278.5<br>(1.08) | -439.2<br>(1.00) | 58,344<br>(1.38) | 37.0                      | 3.0                         | 30.0                       |

\* ) 括弧内は試験体曲げ内半径10φとの比率

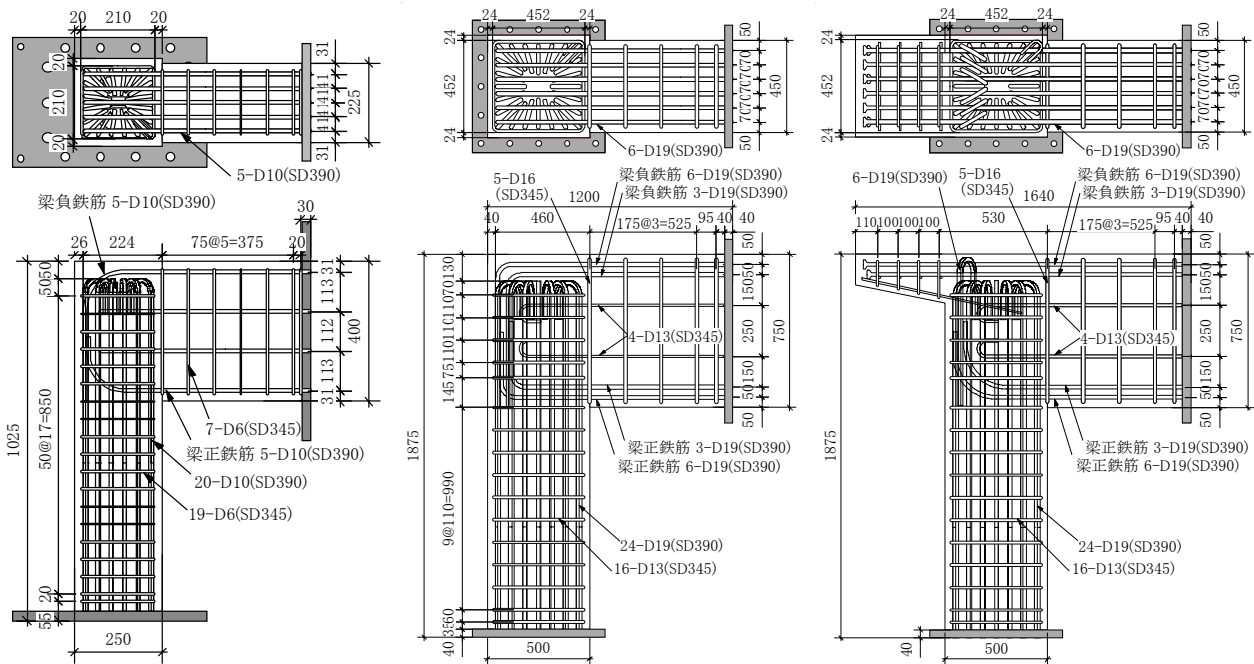


図 - 1 試験体の形状・寸法(左 : S-10 , 中央 : L-3 , 右 : L-S)

は考慮していない。ここでは、梁上側軸方向鉄筋を梁負鉄筋、梁下側軸方向鉄筋を梁正鉄筋と称する。

梁の曲げ内半径が10φの試験体は現行設計基準<sup>9)</sup>に基づく配筋を想定したもので、柱および梁の軸方向鉄筋の定着長は基準値を満足している。柱軸方向鉄筋については曲げ内半径3φの半円形フックを設けることにより定着長を10φ減じている。試験体は柱の曲げ降伏モードで設計した。配筋の施工性低下は曲げ内半径の大きさに起因しているため、試験体L-3、S-3では曲げ内半径を3φとした。現状の曲げ内半径10φで曲げられた梁の正鉄筋、負鉄筋は柱の軸方向鉄筋間に配置されるため、接合部外面部の鉄筋のあきが小さくなり、コンクリート充

填性の低下を招く可能性がある。そのため、試験体L-S、S-Sでは、梁負鉄筋を曲げ下げることなく張出スラブに直線定着する場合を想定した。また、梁負鉄筋と同量の補強筋を接合部内に設置した。今回の実験では張出部の寸法を低減するため梁負鉄筋の定着に機械式定着具を用いた。梁負鉄筋の張出部における定着長は、マッシブなコンクリートに埋め込まれた機械式定着具に引抜き力が作用した場合、鉄筋の付着を除去した場合でも8φの定着長で降伏強度が確保できるという実験データ<sup>9)</sup>を参考に安全側に10φとした。

試験時のコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果をそれぞれ表 - 1、表 - 2に示す。

表 - 2 鉄筋材料試験結果

| 鉄筋種類           | 適用箇所      |          | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-----------|----------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| D10<br>(SD390) | S<br>シリーズ | 柱軸方向鉄筋   | 417                         | 179                           | 588                          |
|                |           | 梁軸方向鉄筋   | 429                         | 183                           | 633                          |
| D6<br>(SD345)  |           | 柱・梁帯鉄筋   | 348                         | 174                           | 558                          |
| D19<br>(SD390) | L<br>シリーズ | 柱・梁軸方向鉄筋 | 448                         | 186                           | 624                          |
| D13<br>(SD345) |           | 柱帯鉄筋     | 393                         | 179                           | 579                          |
| D16<br>(SD345) |           | 梁帯鉄筋     | 367                         | 181                           | 529                          |

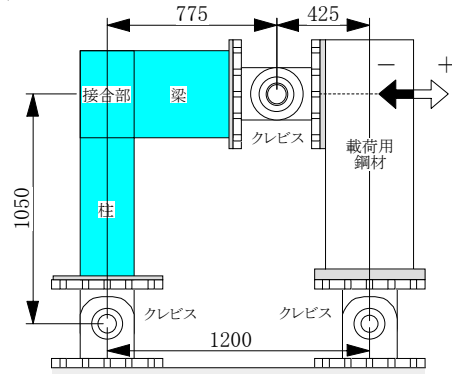


図 - 2 荷装置

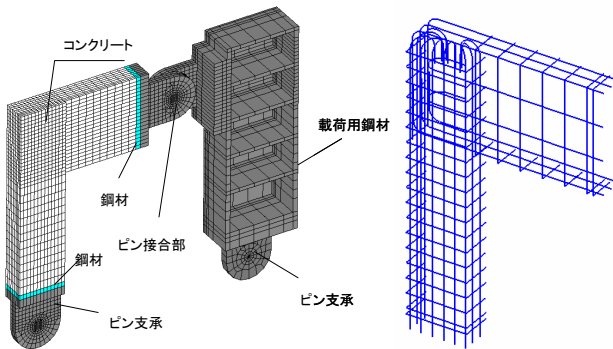


図 - 3 S-3 解析モデル (左: 全体, 右: 鉄筋)

## (2) 加力方法

実験では実構造物で反曲点となる柱と梁のスパン中央部に図 - 2 のようにピンを設置し、梁側のピンと連結した荷重用鋼材を介して3ヒンジラーメンの梁高さ中央を載荷することにより接合部の応力状態を再現した。載荷は柱の変形角(0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3%)を制御変位として正負交番繰返しで実施した。柱の変形角は柱上端断面中央部と柱下端のクレビス中心との水平相対変位より算定した。繰返し回数は1.5, 2%で3回, それ以外では1回とした。正側は接合部を開く方向, 負側は閉じる方向である。繰返し回数は1.5, 2%で3回, それ以外では1回とした。Lシリーズでは荷装置の制約により柱と梁の位置を入れ替えた。柱および梁の降伏を確認するため, 柱および梁と接合部の境界面での軸方向鉄筋のひずみを計測した。

## 2.2 解析概要

解析はSシリーズを対象としてATENA 3D<sup>10)</sup>を用いて実施した。解析モデルを試験体S-3を例として図 - 3に示す。試験体および荷条件の対称性を考慮して, 解析モデルは試験体の奥行き方向半分のみとした。解析は正側・負側ともに荷梁を強制変位にて1方向に単調荷した。荷状況を正確に再現するため, ピン支承や荷重用鋼材などもモデル化した。

コンクリートおよび荷重用鋼材やピン支承などの鋼材には8節点アイソパラメトリック要素を, 鉄筋には埋め

込み鉄筋要素を用いた。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の構成則は実験時の材料試験結果を多直線近似して設定した。コンクリート要素は, ひび割れ発生およびポストピーク以降の軟化挙動を考慮した。荷重用鋼材やピンは弾性要素とした。

軸方向鉄筋および帯鉄筋は, CEB-FIP MODEL CODE 1990<sup>11)</sup>を参考に鉄筋とコンクリート間の付着 - すべり挙動をモデル化した。対称性を考慮するため対称面上にある帯鉄筋の節点ではすべりを考慮していない。また, 対称面上にある軸方向鉄筋の断面積や周長などは実特性の半分とした。試験体S-Sの機械式定着具位置では鉄筋とコンクリート間のすべりが生じないとした。試験体と荷重用鋼材を連結するピン接合部はピン中心の節点を結合した。

## 3. 実験および解析結果

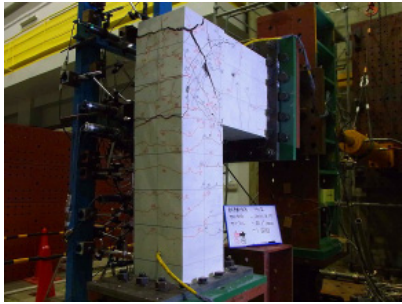
### 3.1 試験体の破壊進展状況比較

-2%の1サイクル目終了後の試験体の破壊状況を写真 - 2に, 試験結果一覧を表 - 1に示す。各試験体の柱のせん断力と変位の関係を図 - 4に示す。いずれの試験体も正側で引張軸力, 負側で圧縮軸力が柱に作用するため, 正側と比較して負側の最大荷重が大きくなった。

Sシリーズでは各試験体ともに±0.1%の1サイクル目で柱に, 0.5%のサイクルまでに梁上下にひび割れが発生した。±1%のサイクルで柱の軸方向鉄筋が降伏した。

試験体S-10, S-3では正側の荷重低下は+1%のサイクルで生じた接合部内の梁負鉄筋の曲げ下げ部に沿ったひび割れが, +1.5%のサイクルで拡大・進展した時点で生じた。負側では-1%のサイクルで生じた接合部対角線上のせん断ひび割れが, -1.5%のサイクルの繰返し時に拡大・進展し, 繰返しとともに荷重が低下した。正側と比較して負側の荷重低下は急激であった。試験体S-Sでは正側では梁負鉄筋を曲げ下げたS-10, S-3と同様の破壊挙動であった。しかし, 負側ではせん断ひび割れの拡大・進展が遅く荷重低下が小さかった。

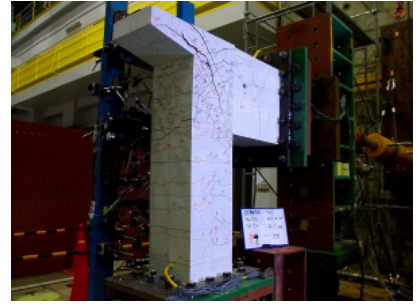




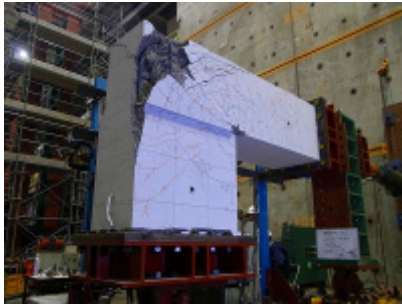
(a) 試験体 S-10



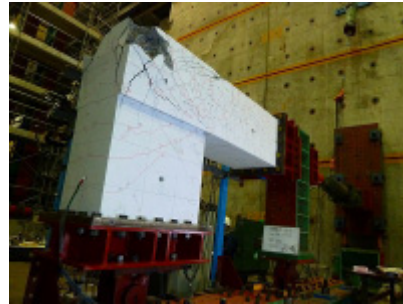
(b) 試験体 S-3



(c) 試験体 S-S



(d) 試験体 L-10

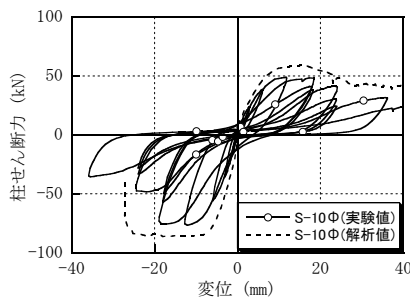


(e) 試験体 L-3

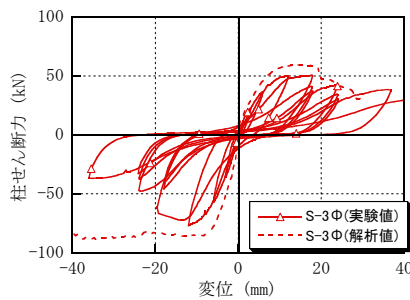


(f) 試験体 L-S

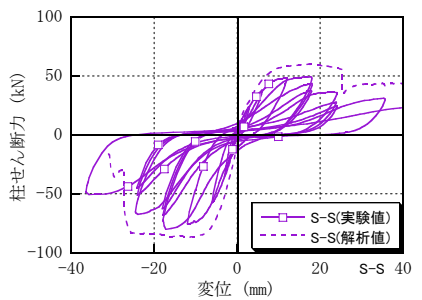
写真 - 2 破壊状況 (-2%の1サイクル目終了後)



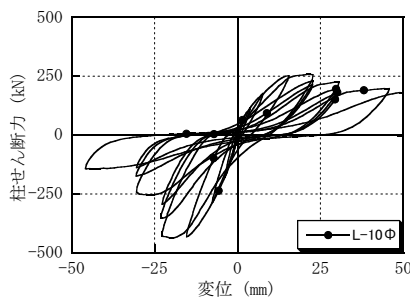
(a) 試験体 S-10



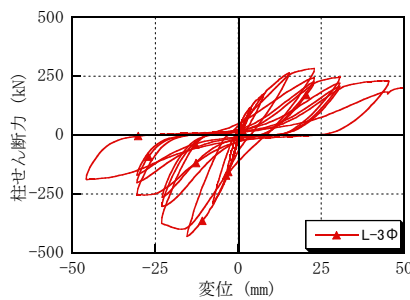
(b) 試験体 S-3



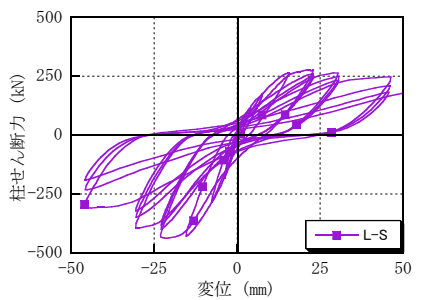
(c) 試験体 S-S



(d) 試験体 L-10



(e) 試験体 L-3



(f) 試験体 L-S

図 - 4 柱せん断力 - 変位関係

Lシリーズはコンクリート強度が高かったため、接合部性能を高く評価している可能性があるが、破壊モードはいずれの定着仕様もSシリーズと同様であり、載荷初期に柱および梁にひび割れが発生し、正側では柱主筋降伏後に徐々に荷重が低下した。負側では試験体L-10、L-3は接合部対角線上にせん断ひび割れが拡大・進展し、繰り返すとともに荷重が急激に低下したが、試験体L-Sはせん断ひび割れの発生が遅く、荷重低下が小さかった。

Lシリーズ、Sシリーズともに正側の最大荷重は曲げ内半径が3の試験体は10のものと比較して4~9%高く、負側では両者の差は2%以内であった。曲げ内半径が10の試験体では曲げ下げられた梁負鉄筋への圧縮力や引張力により、梁負鉄筋に沿ったひび割れが拡大・進展し、最終的な被り剥落領域は3のものより大きかった。

張出スラブに定着したものは曲げ内半径が10のものと比較して正側で1~8%、負側で0~4%高かった。これ

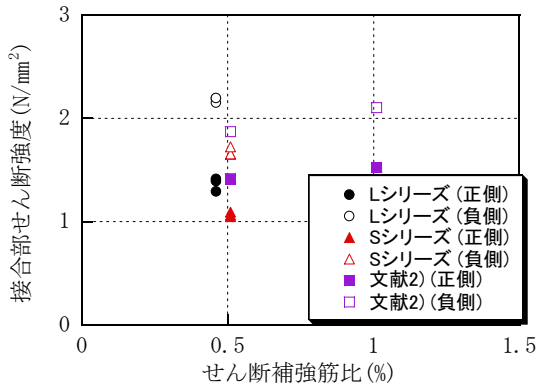
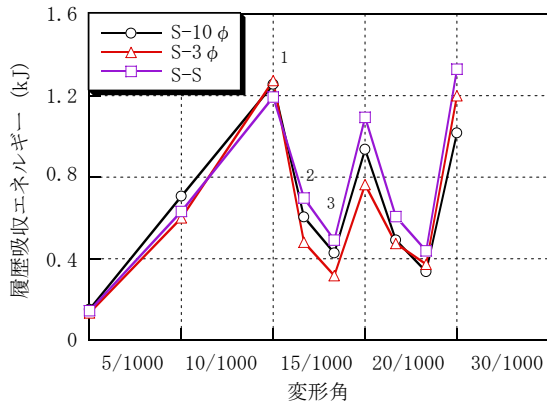
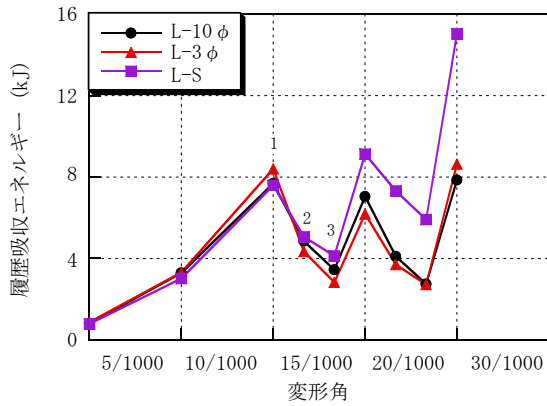


図 - 5 接合部せん断強度



(a) Sシリーズ



(b) Lシリーズ

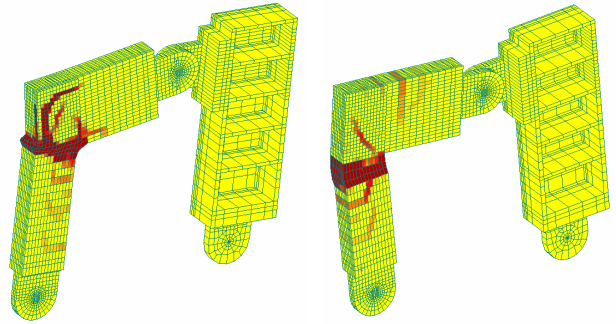
図 - 6 履歴吸収エネルギー比較

は、張出スラブへの定着と接合部内の補強筋が接合部のせん断強度の向上に寄与したためであると考えられる。

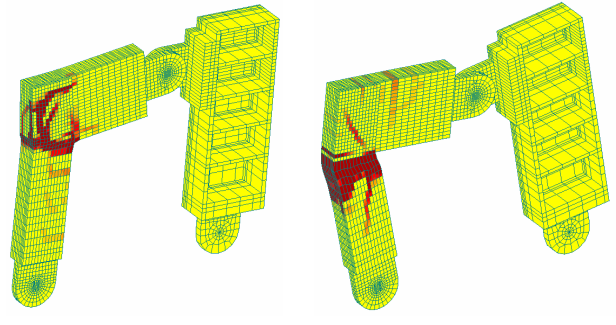
接合部のせん断強度とせん断補強筋比関係を図 - 5 に示す。接合部のせん断強度は最大荷重を文献 12) と同様に、接合部の有効幅と柱せいの積で除して算出した。図内には文献 2) の結果も併記した。試験体寸法が大きい L シリーズの方が S シリーズと比較してせん断強度が高かったが、この原因は今後の課題である。

### 3.2 履歴吸収エネルギー量比較

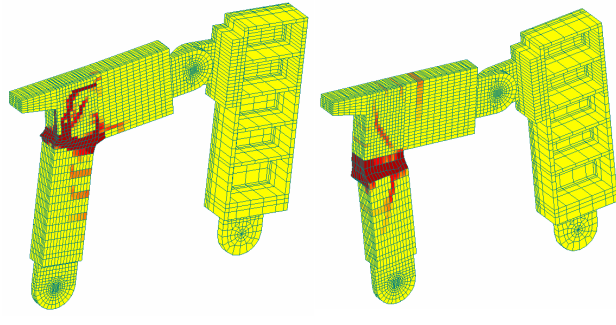
履歴吸収エネルギーと変形角の関係を図 - 6 に、履歴吸収エネルギーの総和を表 - 1 に示す。履歴吸収エネルギー



(a) 試験体 S-10



(b) 試験体 S-3



(c) 試験体 S-S

図 - 7 荷重低下時における最大主ひずみ・変形図

ギーは各変形角での柱せん断力 - 変位関係の履歴ループが囲んだ面積であり、変形角が 1.5, 2% の場合は全てのサイクルで示した。

曲げ内半径が 3 の試験体の 10 の試験体に対する合計履歴吸収エネルギーの比率は L シリーズで 98%、S シリーズで 95% とほぼ同等であった。载荷過程における各サイクルによる履歴吸収エネルギーも L シリーズと S シリーズともに曲げ内半径が 10 と 3 の試験体では顕著な差異は見られなかった。梁負鉄筋を張出スラブに直線定着した場合は、曲げ内半径が 10 のものと比較して、S シリーズでは 1 割程度、L シリーズでは 4 割程度高くなった。

このように、破壊モードに及ぼす試験体寸法の影響は小さく、負側で柱軸方向鉄筋降伏後に接合部のせん断破壊により耐荷性能が急激に低下すること、曲げ内半径が 10 と 3 の試験体では最大荷重や履歴吸収エネルギー

はほぼ同等であり、曲げ内半径の接合部性能に及ぼす影響は小さいこと、張出部に梁負鉄筋を直線定着した場合、負側の耐荷性能が向上すること、が確認できた。

### 3.3 解析結果

解析におけるせん断力 - 変位関係を図 - 4 に、正側、負側の最大荷重後の荷重低下時における最大主ひずみコンター・変形図を図 - 7 に示す。変形図は変形量を3倍している。いずれの試験体も正側では柱および梁の軸方向鉄筋が、負側では柱の軸方向鉄筋が降伏した。正側では実験と同様に接合部内の梁負鉄筋付近と柱の接合部側に最大主ひずみが卓越し、荷重が緩やかに低下した。梁の定着仕様によって最大主ひずみの卓越する角度が異なっている。負側では接合部の対角線上と柱の接合部側に最大主ひずみが卓越したが、せん断ひび割れの進展・拡大による急激な荷重低下は生じず、実験での破壊パターンと異なった。

解析では正側の荷重応答は実験を概ね再現できたが、負側は変形性能を過大評価した。負側の解析ではせん断破壊による荷重低下が生じず、柱の接合部側に損傷が集中し柱部材が降伏に至ったためであると考えられる。

### 4. まとめ

ラーメン高架橋の接合部性能を把握するため、梁軸方向鉄筋の定着仕様を実験要因とした直交梁のない実構造物の1/2程度の大型実験を実施し、既往の実験結果と比較した。また、破壊挙動を反映した設計手法確立のため、小型実験を対象とした非線形有限要素解析を実施した。今回の検討範囲で、得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験体寸法が破壊モードに及ぼす影響は小さく、負側で柱軸方向鉄筋降伏後に接合部のせん断破壊により耐荷性能が急激に低下する。
- (2) 梁の軸方向鉄筋の曲げ内半径が3 と10 の場合、最大荷重や破壊性状、履歴吸収エネルギーはほぼ同等であり、曲げ内半径の接合部性能に及ぼす影響は小さい。
- (3) 張出部に梁負鉄筋を直線定着した場合、せん断ひび割れ発生後においても定着力の減少が少なく、負側の耐荷性能が向上する。
- (4) 解析では正側の破壊はおおむね再現できたが、負側の接合部の破壊が再現できず、損傷領域が実験とは異なり接合部の変形性能を過大評価する。

### 謝辞

有限要素解析を実施するに当たり貴重なアドバイスを頂きました(株)計算力学研究センターの三輪健治氏、ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書，1931.9
- 2) 渡辺忠朋・松本信之・三島徹也：鉄道ラーメン式高架橋における柱・はり接合部が部材じん性に及ぼす影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.525-530，1991.
- 3) 田所敏弥・谷村幸裕・徳永光宏・米田大樹：高架橋接合部における機械式定着を用いた定着部の静的引張特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.691-696，2009.
- 4) 吉武謙二・小倉大季・小川晃：高架橋接合部の柱および梁主鉄筋の鉛直・水平あきが付着特性に及ぼす影響，第65回土木学会年次学術講演会，V-555，pp.1109-1110，2010.9
- 5) 長井宏平・大胡賢一：機械式定着具を用いた定着部の損傷時における静的定着性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.601-606，2010.
- 6) 吉住陽行・内田康一・矢野栄二郎・服部尚道・黒岩俊之・北沢宏和・谷村幸裕・田所敏弥・徳永光宏：RCラーメン高架橋の柱梁接合部における柱軸方向鉄筋の定着性能に関する実験的検討，第64回土木学会年次学術講演会，V-500，pp.997-998，2009.9
- 7) 吉武謙二，小川晃，小倉大季，前之園司：梁および柱の軸方向鉄筋の定着仕様が接合部性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.2，pp.541-546，2012.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，2004.4
- 9) 木村克彦・小川晃・出羽克之・吉武謙二・前之園司：Tヘッド鉄筋の拡径部径および埋込長さが定着性能に及ぼす影響，第61回土木学会年次学術講演会，V-574，pp.1143-1144，2006.9
- 10) Cervenka Consulting Ltd：ATENA Program Documentation Part 1 Theory，2012.3
- 11) “CEB-FIP MODEL CODE 1990”，CEB，1991.
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1999