

# 論文 L形柱梁接合部における圧縮ストラットの形成と耐力に関する検討

草野 浩之\*1・中田 裕喜\*2・田所 敏弥\*3・幸良 淳志\*2

**要旨:** 本研究では、接合部の照査法の構築を目的に、L形柱梁接合部を対象に、有限要素解析により接合部で発生する圧縮ストラットについて検討した。その結果、外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は、接合部が開く方向に対しては接合部の耐力に与える影響は小さく、閉じる方向に対しては、曲げ内半径を小さくすると接合部内に形成される圧縮ストラット幅が小さくなることに起因して、接合部の耐力が小さくなることなどがわかった。また、圧縮ストラットの幅を捉えることで、接合部の耐力を予測できる可能性を示した。

**キーワード:** L形柱梁接合部, 曲げ内半径, 帯鉄筋, 圧縮ストラット, 有限要素解析

## 1. はじめに

鉄道構造物におけるラーメン高架橋などの柱と梁の接合部は、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）<sup>1)</sup>などに示される配筋の仕様を満足するように設計され、具体的な照査は省略されている。また、接合部に損傷が生じないことを前提に剛域としてモデル化されている。一方、過去の地震において、中層梁と柱の接合部などで、斜めひび割れなどの損傷が少なからず報告されている<sup>2)</sup>。これは、地震時に接合部に発生する応力により生じたものと想定されるが、このような接合部の損傷や、接合部の損傷が構造物の性能に与える影響などは明確になっておらず、性能照査型設計法の確立を目指すコンクリート構造分野において、これらを評価できる体系が必要となっている。日本建築学会では、例えば鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説<sup>3)</sup>などで、主筋の定着破壊や斜めストラットコンクリートの圧壊など接合部の破壊に対する照査方法を示しているが、鉄道構造物は柱先行降伏であるのに対し建築物では梁先行降伏であることや配筋詳細が異なり、日本建築学会の定める照査方法をそのまま鉄道構造物に適用できるかは検討の余地があると考えられる。

そこで、本研究では、著者らが過去に実施した、L形柱梁接合部の正負交番載荷試験<sup>4)</sup>の結果について概説した上で、有限要素解析を用いて実験結果の再現性について検討した。そして、接合部内における軸方向鉄筋の曲げ内半径、接合部内の帯鉄筋量、接合部の寸法をパラメータとした有限要素解析を実施し、L形柱梁接合部内で形成される圧縮ストラットと接合部の耐力について検討を行った。

## 2. 実験の概説<sup>4)</sup>

### 2.1 実験概要

図-1に載荷装置図を、表-1に供試体の諸元を示す。

供試体は、一般的な鉄道ラーメン高架橋に用いられるL形接合部の50%程度の縮尺とした。ただし、水平部材と鉛直部材のいずれも、断面幅500mm、断面高さ500mmの正方形断面とし、支点または載荷点から部材基部までの長さは、鉛直部材、水平部材ともに1800mmとした。鉛直部材と水平部材は、いずれもピン構造により支持した。材料試験値は表-1に示すとおりであるが、軸方向鉄筋は接合部の破壊が先行するようSD490を用いている。

本実験のパラメータは、接合部内の帯鉄筋の有無と外側軸方向鉄筋の曲げ内半径  $r$  である。接合部内に帯鉄筋を配置した No.1 は、水平部材の帯鉄筋と同量の帯鉄筋を配置し、No.2 および No.3 は接合部内に帯鉄筋を配置していない。外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は、No.1 および No.2 では、鉄道の配筋仕様で規定されている  $10\phi$  ( $\phi$ : 軸方向鉄筋の径) とし、No.3 では曲げ内半径を  $3\phi$  とした。なお、内側軸方向鉄筋については、いずれの供試体も半円形フックとし、曲げ内半径は  $3.5\phi$  とした。

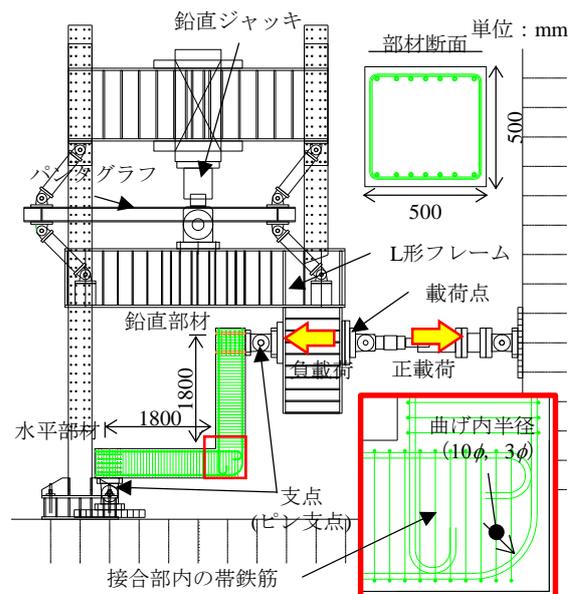


図-1 載荷装置図

\*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 修(工) (正会員)  
 \*2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 修(工) (正会員)  
 \*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究室長 博(工) (正会員)

表-1 供試体諸元

供試体名	コンクリート			軸方向鉄筋			帯鉄筋			接合部			
	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	径	$f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$p_t$ (%)	径・間隔	$f_{wy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$p_w$ (%)	曲げ内半径 $r$ *1	帯鉄筋の有無
No.1	26.1	2.49	24.5	D19	530	189	0.89	D10 ctc50mm	367	179	0.57	10 $\phi$	有**2
No.2	27.0	2.60	25.9									10 $\phi$	無
No.3	23.9	2.12	24.5									3 $\phi$	無

$f_c, f_t$ : コンクリートの圧縮強度, 引張強度,  $f_{sy}, f_{wy}$ : 軸方向鉄筋および帯鉄筋の降伏強度,  $E_c, E_s$ : コンクリートおよび鉄筋のヤング係数,  $p_t, p_w$ : 部材の軸方向鉄筋比および帯鉄筋比, ※1:  $\phi$ は軸方向鉄筋の径, ※2: 部材の帯鉄筋を接合部内にも同量を配置

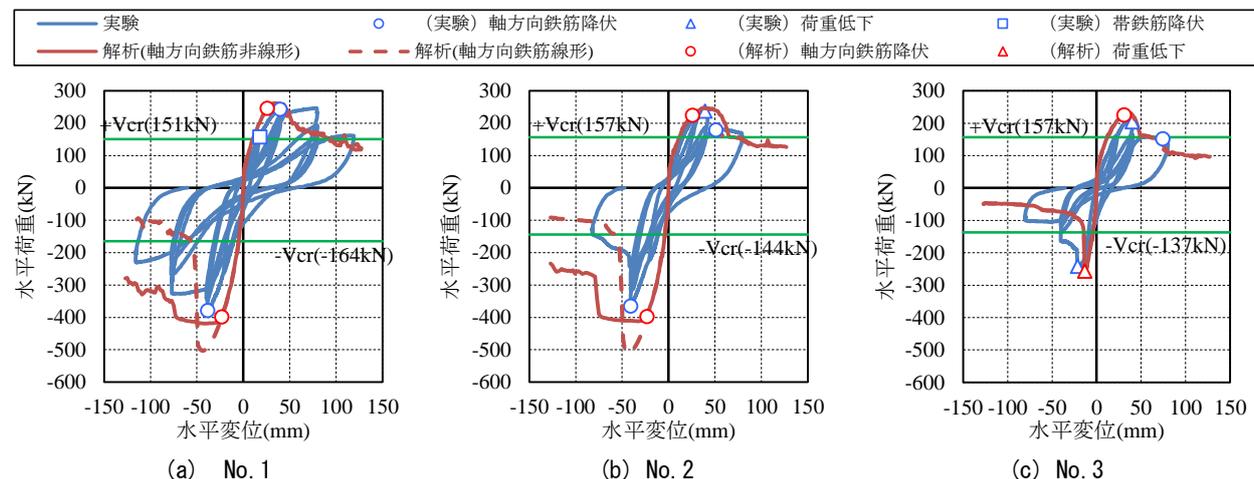


図-2 載荷点における水平荷重と水平変位の関係

載荷は、鉛直部材とパンタグラフを有するL形フレームを接続し、そのL形フレームを反力壁に設置したジャッキにより加力することで実施した。載荷方向は、図中右方向(L形接合部が開く方向)を正載荷、図中左方向(L形接合部が閉じる方向)を負載荷とした。パンタグラフおよび鉛直ジャッキにより、載荷点における鉛直方向の変位をゼロとなるように制御し、水平に載荷した。試験装置の都合により、初期軸力は考慮しなかったが、実際のラーメン高架橋と同様な地震時の軸方向力の変動や接合部に作用するせん断力を模擬した。載荷サイクルは、正載荷、負載荷ともに、接合部に斜めひび割れが発生した時点で1回繰返しを行い、その後、No.1の正載荷、負載荷で軸方向鉄筋が降伏した変位をそれぞれ+1 $\delta_y$ (39.5mm)、-1 $\delta_y$ (-38.5mm)とし、それ以降、 $\pm 1\delta_y$ の整数倍で3回繰返し載荷を行った。なお、No.2, No.3でもNo.1と同じ $\pm 1\delta_y$ を用いた。

## 2.2 実験結果

図-2に各ケースの実験および解析により得られた載荷点位置における水平荷重と水平変位の関係を、図-3にNo.3における-1 $\delta_y$ 時の接合部の損傷状況を示す。

正載荷時は、荷重の増加に伴い、図-3に示す隅角部からひび割れが発生し、接合部内の軸方向鉄筋に沿って進展した。その後、部材基部に曲げひび割れが発生し、接合部内に斜めひび割れが発生した。負載荷時は、部材基部に曲げひび割れ、接合部の図中右側面および下面に

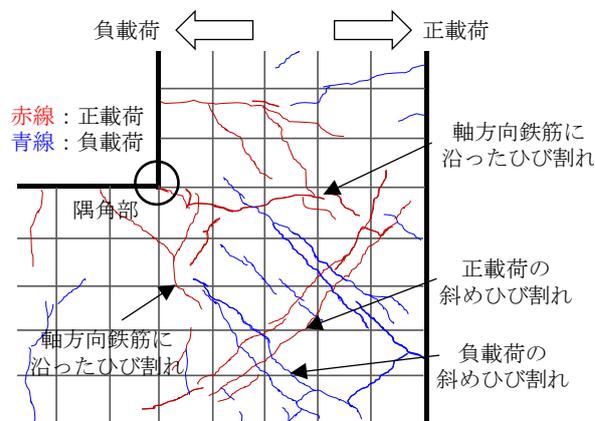


図-3 No.3における接合部の損傷状況(-1 $\delta_y$ 時)

曲げひび割れが発生し、接合部内に斜めひび割れが発生した。なお、このひび割れの発生順序はいずれの供試体でも同様であった。斜めひび割れ発生荷重 $V_{cr}$ は、正載荷時はいずれの供試体も顕著な差はなく、負載荷時はNo.1, No.2, No.3の順に小さくなった。No.1の接合部内に配置した帯鉄筋は、 $V_{cr}$ を超えた直後に斜めひび割れ近傍に設置したひずみゲージにおいて降伏ひずみに達した。 $\pm 1\delta_y$ 時は、No.1は正載荷負載荷ともに軸方向鉄筋が降伏、No.2は正載荷では軸方向鉄筋が降伏せず荷重低下が生じ、負載荷では軸方向鉄筋が降伏、No.3は正載荷負載荷ともに軸方向鉄筋は降伏せず、接合部に発生した斜めひび割れの開口により荷重低下が生じた。 $\pm 2\delta_y$ の1回目は、

No.2, No.3 は $\pm 1 \delta_y$ の荷重から大きく低下し, No.1 は概ね同程度の水平荷重を保持した。No.1 は $\pm 2 \delta_y$ の繰り返し荷重および $\pm 3 \delta_y$ の荷重で水平荷重が低下した。

### 3. 解析の概要

図-4 に解析モデルの模式図を示す。解析は、汎用有限要素解析コード DIANA ver.10.2 を用い、三次元有限要素解析を実施した。解析モデルは、供試体のすべてを三次元でモデル化した。なお、図-4 は半分のコンクリート要素を非表示としている。コンクリートはソリッド要素とした。鉄筋は軸方向の剛性のみを考慮した埋め込み鉄筋要素とし、軸方向鉄筋の折り曲げ部は 10mm 程度で要素を分割することで折り曲げ定着部の曲線を再現した。実験で用いたピン支点を再現するため、ピン支点の回転中心と水平部材および鉛直部材の支点部のソリッド要素を剛なビーム要素で接続した。コンクリートは圧縮側には軟化を考慮した Parabolic のモデル<sup>5)</sup>を、引張側は軟化勾配を適用した Hordijk のモデル<sup>6)</sup>を用いた。なお、コンクリートや鉄筋の強度などは実験と同じ値を用い、コンクリートの破壊エネルギーは、既往の文献<sup>1),7)</sup>に基づき算定した。ひび割れは固定ひび割れモデルとし、ひび割れ面でのせん断力の伝達については、ひび割れ幅によりせん断力が低下する Al-Mahaidi のモデルを適用した。鉄筋は、4 章の再現性の検証ではバイリニア型とし、降伏後の剛性は初期剛性の 1/100 とした。鉄筋とコンクリートとの付着力は、島ら<sup>8)</sup>が提案した付着応力すべり関係を参考に算定した。なお、解析では正荷重もしくは負荷重方向に一方荷重とした。

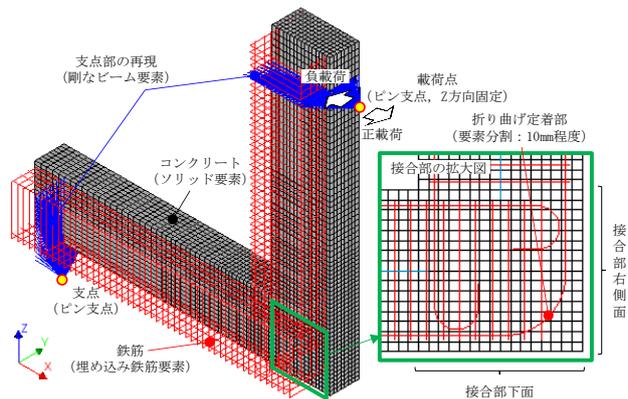


図-4 解析モデル

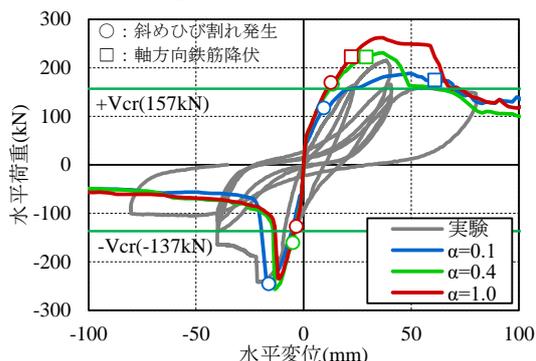


図-5 水平荷重と水平変位の関係

### 4. 有限要素解析を用いた実験の再現性の検証

島らの付着応力すべり関係はマッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の引抜試験から導出されたものであるため、本供試体のようなコンクリートの拘束が小さく軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じるような場合には、あるひずみに対する付着応力を低減する必要がある。そこで、式(1)に示すように、島らの付着応力すべり関係に付着応力を低減するための係数  $\alpha$  を乗じることとした。

$$\tau_d = \alpha \cdot 0.9 f_c^{2/3} (1 - e^{-40(S/\phi)^{0.6}}) \quad (1)$$

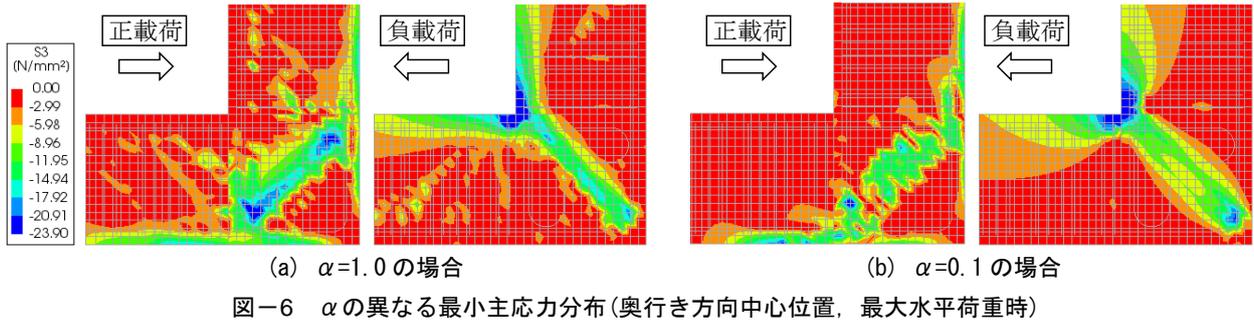
ここに、 $\tau_d$ : 付着応力,  $f_c$ : コンクリートの圧縮強度,  $S$ : 鉄筋とコンクリートの相対変位,  $\phi$ : 鉄筋の直径である。検討に用いる  $\alpha$  は、付着応力すべり関係をそのまま適用した  $\alpha=1.0$ , 既往の研究<sup>9)</sup>を参考に設定した  $\alpha=0.4$ , 付着応力を極端に低減した  $\alpha=0.1$  で検討した。

図-5 に最大水平荷重  $P_{max}$  が接合部の破壊により決定された No.3 と  $\alpha$  を変化させた解析の載荷点における水平荷重と水平変位の関係を示す。正荷重時は  $\alpha$  が 1.0, 0.4, 0.1 の順で  $P_{max}$  が低下し、負荷荷重時は  $P_{max}$  に顕著な

差がないことが確認できる。図-6 に、 $\alpha=1.0, 0.1$  の最大水平荷重時の最小主応力分布を示す。正荷重時は、 $\alpha=1.0$  の場合は  $\alpha=0.1$  の場合に比べて圧縮ストラットの幅や応力が大きくなっており、負荷荷重時は、 $\alpha=1.0$  の場合と  $\alpha=0.1$  の場合とで顕著な差がない。これは、正荷重時は、付着応力が大きい場合、半円形フック周辺の直筋部分における付着応力が圧縮ストラットに貢献した結果が反映されたものであると考えられる。一方、負荷荷重時は、付着応力が大きい場合、接合部の右側面および下面に発生する曲げひび割れにより曲げ内半径付近の直筋部分で圧縮ストラットが形成されにくくなっているものと考えられる。この影響を明らかにすることを目的に、接合部の右側面および下面 (図-4 参照) に曲げひび割れが発生しないよう接合部のコンクリートの引張側のみ弾性にした解析を実施したところ、負荷荷重時においても付着応力を大きくすると、接合部の圧縮ストラットの幅および接合部の耐力が増加することを確認している。

図-5 から解析は、 $\alpha=0.4$  を用いることで実験の  $V_{cr}$  および  $P_{max}$  を比較的精度よく評価できる結果となった。図-2 に  $\alpha=0.4$  とした解析結果を併記したが、いずれのケースも解析は実験に比べて初期剛性をやや高く評価するものの、 $P_{max}$  を概ね再現できている。

なお、図-2 には、軸方向鉄筋を弾性とした解析結果もあわせて示しているが、軸方向鉄筋が降伏した No.1, No.2 の負荷荷重で  $P_{max}$  が増加した。以後は、接合部が本来



有する耐力について検討するため軸方向鉄筋を弾性とし、 $\alpha=0.4$ として検討することとする。

## 5. 圧縮ストラットと接合部耐力の関係

### 5.1 解析の概要

解析モデルは、3.と同様とするが、コンクリートの圧縮強度は  $27\text{N/mm}^2$ 、引張強度は  $2.6\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は  $25.9\text{kN/mm}^2$  とし、軸方向鉄筋は弾性で、弾性係数は  $200\text{kN/mm}^2$  とした。

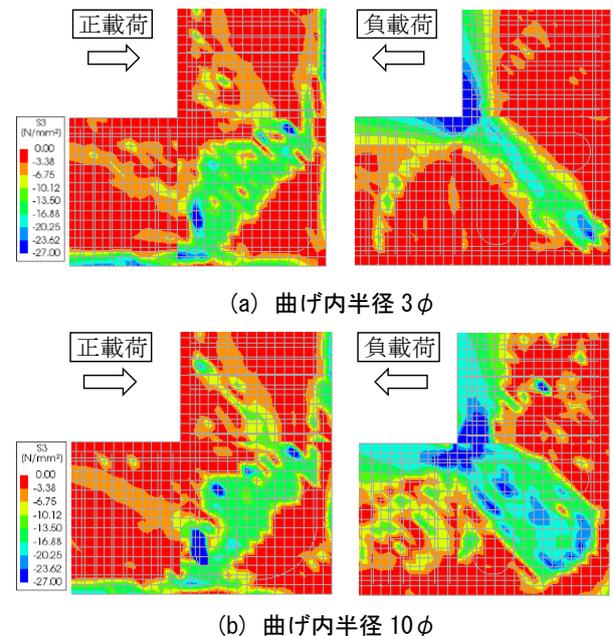
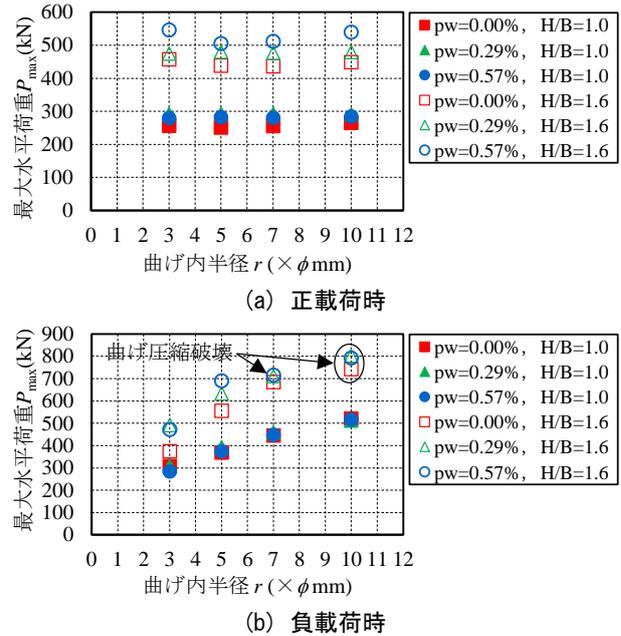
本検討での解析パラメータは、外側軸方向鉄筋の曲げ内半径  $r$ 、帯鉄筋比  $p_w$ 、接合部の寸法とした。外側軸方向鉄筋の曲げ内半径  $r$  は、 $3\phi$ 、 $5\phi$ 、 $7\phi$ 、 $10\phi$  とした。帯鉄筋比は  $p_w=0\%$ 、 $0.29\%$ 、 $0.57\%$  とした。なお、帯鉄筋の間隔は  $50\text{mm}$  とし、 $p_w$  の調整は帯鉄筋断面積で行った。接合部の寸法については、鉛直部材高さ  $H$  を  $500\text{mm}$ 、水平部材高さ  $B$  を  $500\text{mm}$  としたケースと、実構造物の  $H/B$  に近い  $H=800\text{mm}$ 、 $B=500\text{mm}$  としたケースとした。

### 5.2 曲げ内半径の大きさが接合部の耐力に与える影響

#### (1) 曲げ内半径と最大水平荷重の関係

図-7 に曲げ内半径  $r$  と載荷点における最大水平荷重  $P_{\max}$  の関係を示す。破壊形態は、 $H/B=1.6$  で  $r=7\phi$ 、 $p_w=0.29\%$ 、 $0.57\%$  としたケースおよび  $H/B=1.6$  で  $r=10\phi$  としたケースの負載荷は水平部材基部の曲げ圧縮破壊、それ以外は接合部の破壊であった。負載荷時の曲げ圧縮破壊荷重  $V_{\text{mu}}$  の計算値は、 $730\text{kN}\sim 810\text{kN}$  程度と軸力の影響により変動はあるものの、曲げ圧縮破壊に至った解析ケースは概ね  $V_{\text{mu}}$  と同程度の  $P_{\max}$  となった。正載荷時は  $r$  に関わらず、 $P_{\max}$  に顕著な差はないが、負載荷時は  $r$  を  $10\phi$  から小さくすると、 $P_{\max}$  が大きく低下していることが確認できる。

図-8 に  $r=3\phi$ 、 $10\phi$  としたケースの最小主応力分布を示す。正載荷時は  $r$  に関わらず接合部内に形成される圧縮ストラットに顕著な差はなく、負載荷時は  $r$  が小さくなると圧縮ストラットの幅が小さくなることを確認できる。このことから、正載荷時は  $r$  の大きさが  $P_{\max}$  に与える影響は小さいが、負載荷時は曲げ内半径周辺から隅角部の方向に圧縮ストラットが形成されるために、 $r$  の大きさが  $P_{\max}$  に与える影響が大きいと考えられる。



#### (2) 曲げ内半径と圧縮ストラットの関係

曲げ内半径の大きさが負載荷時の耐力に及ぼす影響を

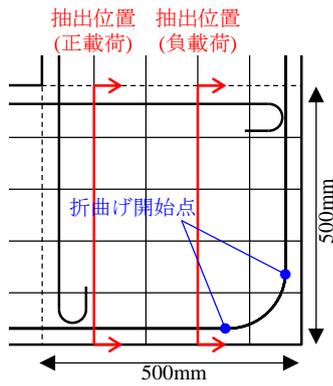
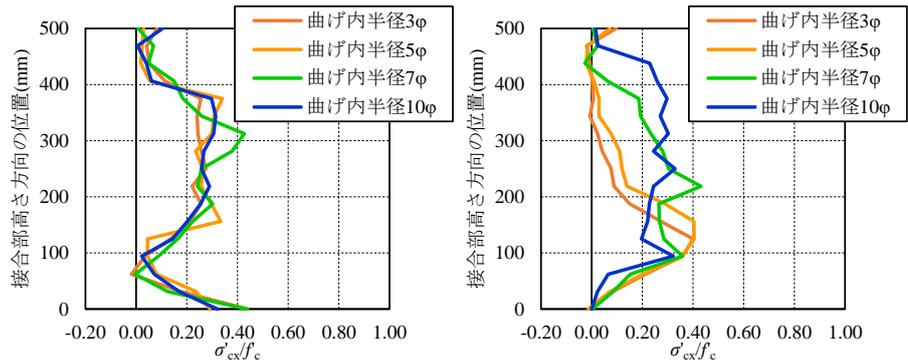


図-9 応力抽出位置



(a) 正載荷時

(b) 負載荷時

図-10 圧縮応力の水平方向成分の分布 ( $H/B=1.0$ , 最大水平荷重時)

検討するため、 $r$  と接合部内に形成される圧縮ストラットの関係について検討する。ここでの検討は、破壊形態が接合部の破壊となった結果を用いて実施した。抽出する圧縮応力は水平方向成分とした。抽出する点は、図-9に示すように、最小主応力が卓越する位置、すなわち正載荷時は内側軸方向鉄筋の周辺で、負載荷時は折り曲げ定着周辺で、かつ応力分布が滑らかに変化している位置とした。なお、奥行き方向の位置は、本検討では奥行き方向の中心位置とした。

図-10に $r$ の異なる解析結果から得られた圧縮応力の水平方向成分の分布を示す。図は接合部内の帯鉄筋を配置せず、 $H/B$ を1.0とした解析結果を示しており、圧縮応力はコンクリートの圧縮強度で正規化している。図-10から、 $P_{max}$ 時における $\sigma'_{cx}/f_c$ の最大値は、正載荷、負載荷に関わらず、いずれのケースも0.3~0.4程度で、ある一定領域で分布するとともに、 $r$ に依存しない結果となった。一方で、分布の形状は、正載荷時はいずれのケースも顕著な差はないが、負載荷時は $r$ が小さくなるにつれて圧縮ストラットの幅も小さくなることを確認できる。なお、 $H/B=1.6$ では、 $\sigma'_{cx}/f_c$ の最大値は多少のばらつきはあるものの0.4~0.6程度であり、 $H/B=1.0$ の場合と同様に、 $r$ が小さくなるにつれて圧縮ストラットの幅も小さくなる傾向にあることを確認している。

ここで、既往の文献<sup>10)</sup>を参考に、圧縮ストラットの幅 $w$ を $\sigma'_{cx}/f_c=0.1$ における鉛直方向高さとして定義する。図-10から負載荷時の $w$ を算定し、 $r$ との関係を示すと図-11のとおりとなる。負載荷時における $w$ は $r$ と相関があり、 $r$ を小さくすると $w$ が小さくなるのがわかる。なお、同じ $r$ では、 $H/B$ が1.6の場合は $H/B$ が1.0の場合に比べて $w$ が小さくなった。本検討では、圧縮応力を水平方向の応力 $\sigma'_{cx}$ としているため、 $H/B=1.0$ と1.6の違いは圧縮ストラットの角度 $\theta$ に起因していると考えられる。そこで、図-11において、 $w$ を隅角部と曲げ内半径の頂点を結ぶ直線に直交する方向の幅 $w'$ とすると図-12のとおりとなり、 $r$ と $w'$ の関係は $H/B$ に依存しない結果と

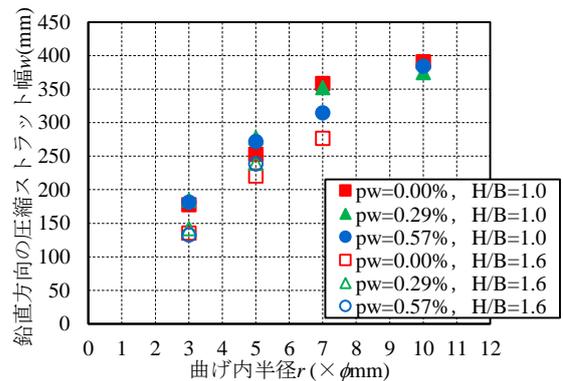


図-11  $r$  と  $w$  の関係

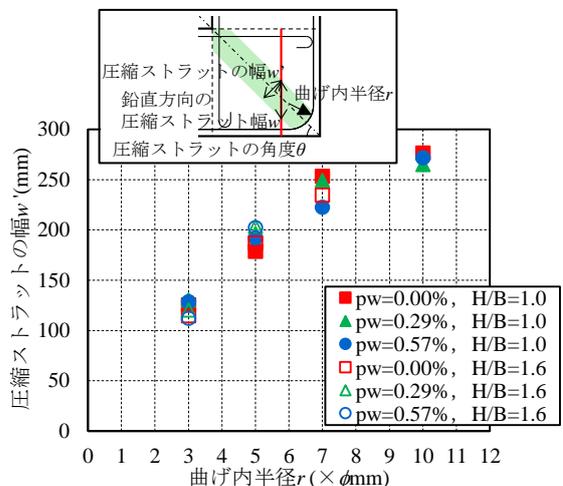


図-12  $r$  と  $w'$  の関係

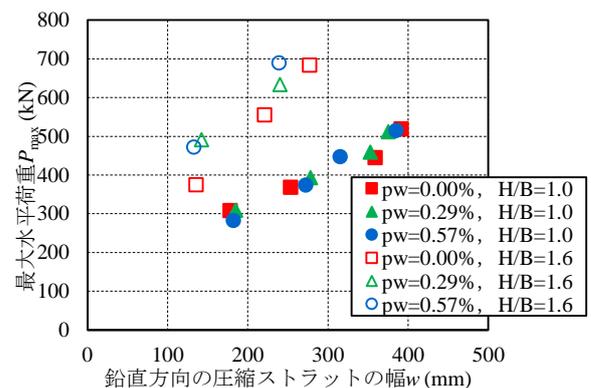


図-13  $w$  と  $P_{max}$  の関係

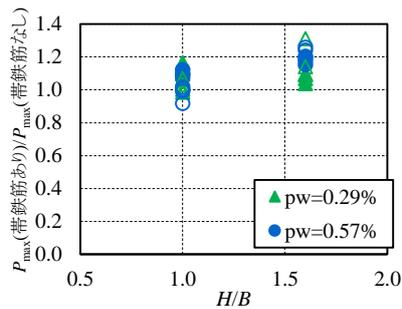


図-14 H/Bと $P_{max}$ の関係

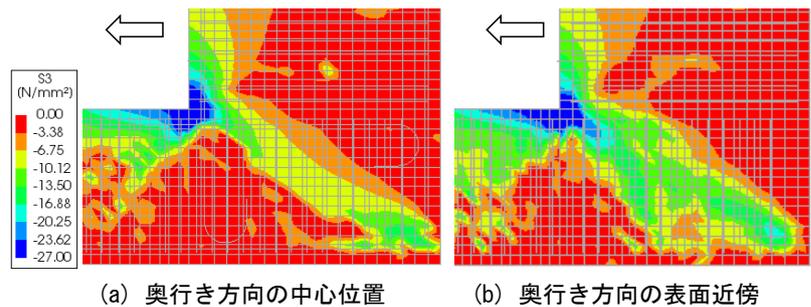


図-15 出力位置による最小主応力分布の違い(最大水平荷重時)

なった。

図-13に、負荷荷重時の $w$ と $P_{max}$ の関係を示す。 $w$ は $P_{max}$ と相関があり、 $w$ が小さくなると $P_{max}$ が低下することが確認できる。以上を踏まえると、 $r$ と $w$ の関係を明らかにすれば、 $P_{max}$ を予測できる可能性があることがわかった。

### 5.3 帯鉄筋比が最大水平荷重に与える影響

図-14に $H/B$ と最大荷重 $P_{max}$ の関係を示す。図中のプロットは、塗りつぶしが正荷重、白抜きが負荷重を示している。なお、縦軸は $p_w$ が0.29%と0.57%の $P_{max}$ を、 $p_w$ が0%の $P_{max}$ で除した値である。最大水平荷重の比は $H/B$ を1.0とした場合は平均1.00で、 $H/B$ を1.6とした場合は1.15であった。図-15に $H/B=1.6$ 、 $p_w=0.57\%$ の負荷荷重時の最小主応力分布の例を示す。帯鉄筋の効果により奥行き方向の中心位置に比べて奥行き方向の表面近傍の圧縮ストラット幅は大きくなっていることが確認できる。一方で、 $H/B=1.0$ としたケースでは、奥行き方向の中心位置と奥行き方向の表面近傍で圧縮ストラット幅に顕著な差はなかった。そのため、 $H/B=1.6$ のケースでは帯鉄筋の効果が相対的に大きくなったと考えられる。

## 6. おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 有限要素解析に用いる鉄筋とコンクリートの付着特性は、島らの付着応力すべり関係を40%に低減することで、実験結果を再現できることを示した。
- (2) 接合部に配置される外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は、接合部が開く方向に対しては、接合部の耐力に与える影響は小さいことを示した。一方、閉じる方向に対しては、曲げ内半径を小さくすると、接合部内に形成される圧縮ストラット幅が小さくなることに起因して、接合部の耐力が小さくなることがわかった。
- (3) 鉛直部材と水平部材の断面高さの比 $H/B$ が1.6の場合、接合部内に帯鉄筋を配置することで、奥行き方向の表面近傍での圧縮ストラットの幅が大きくなり、接合部の耐力を向上させる効果を有している結果となった。一方で、 $H/B$ が1.0の場合、奥行き方向の中

心位置と奥行き方向の表面近傍での圧縮ストラットの幅は顕著な差はなく、接合部の耐力に与える影響は小さい結果となった。

- (4) 圧縮ストラットの幅を捉えることで、接合部の耐力を予測できる可能性を示した。

## 参考文献

- 1) (財)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，丸善，2004。
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：SED 第37号「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」，2011。
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，丸善，1999。
- 4) 草野浩之，中田裕喜，田所敏弥，安保知紀：接合部内の配筋諸元がL形RC柱梁接合部の破壊性状に及ぼす影響，第15回日本地震工学シンポジウム，pp.51-60，2018。
- 5) Feenstra, P. H.: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete PhD thesis, Delft University of Technology, 1993.
- 6) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 7) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.
- 8) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165-174，1987。
- 9) 松本隆明，檜貝勇，斉藤成彦：かぶり厚が異形鉄筋の付着性状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集，Vol.26, No.2, pp.823-828，2004。
- 10) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983。