

RC ラーメン高架橋の柱はり接合部の構造細目が耐力に及ぼす影響

中田 裕喜* 渡辺 健* 田所 敏弥*

Influence of Structural Details of Beam-to-column Joint in RC Viaducts on Capacity

Yuki NAKATA Ken WATANABE Toshiya TADOKORO

RC beam-to-column joint in a railway viaduct is designed to satisfy structural details. However, when overcrowded reinforcement arrangement measures are taken at joint or high strength rebar is applied to members, a relationship between details of reinforcement arrangement and capacity of joint is required. In this study, we carried out cyclic loading tests and 3D FEM analyses to clarify its relationship. The results show that as the inside radius of bend of longitudinal reinforcement decreases, the capacity of joint decreases because of the reduction of compressive strut width, and that the ties in the joint have little effect on the capacity, even though it increases the deformation performance.

キーワード：柱はり接合部，RC ラーメン高架橋，耐力，非線形有限要素解析，構造細目

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋の柱とはりの接合部は、図1に示すような配筋詳細やハンチなどの構造細目を遵守することで、接合部に関する具体的な照査を省略している¹⁾²⁾。このような構造細目の規定は、照査行為を簡略化できる利点がある。

接合部に関する構造細目は、古くから設計標準で規定されてきているものである。この接合部の構造細目の一つに、接合部の帯鉄筋は柱の塑性ヒンジ部と同量を配置する規定があるが¹⁾、耐震設計で考慮すべき地震力の増大による柱の塑性ヒンジ部の帯鉄筋量の増加に伴い、接合部の帯鉄筋量も増加し、過密な配筋が余儀なくされている。この事象に対応するためには、接合部の帯鉄筋と耐力等との関連性を明らかにすることが重要となる。

過去の地震被害では、寸法が比較的小さい柱と中層はりの接合部で損傷が発生している³⁾。また、近年では、軸方向鉄筋にSD490やSD685といった高強度鉄筋が適用されつつあるが、高強度鉄筋の適用によって柱やはり等の部材寸法が小さくなると、接合部も縮小されることになる。この場合、接合部の耐力が部材よりも相対的に小さくなると考えられるため、接合部の耐力等を評価可能な方法が必要となる。

そこで、本研究では、実験および非線形有限要素解析によって柱はり接合部の耐荷機構等を把握し、接合部の帯鉄筋および隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ内半径が耐力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし

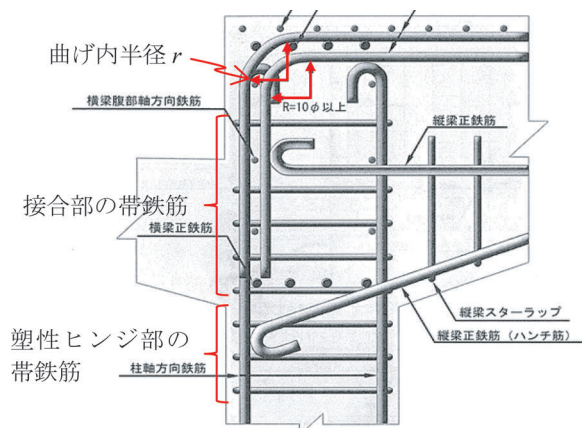


図1 接合部の構造細目の例²⁾に加筆

た。また、これらに基づき、接合部の構造細目の妥当性を検証した。

2. 実験による接合部の損傷性状と耐力の評価

2.1 実験概要

図2および表1に、供試体の概要を示す。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。水平部材と鉛直部材のいずれも、断面幅500mm、断面高さ500mmの正方形断面とした。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。材料試験結果は表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にSD490を用いている。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

供試体は、接合部の帯鉄筋の有無と、隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ内半径 r を変化させた4体を用意した。No.1, 3は接合部に帯鉄筋を配置し(帯鉄筋比 $p_w = A_w / (b_w \cdot s_s) = 0.57\%$, A_w : 区間 s_s における帯鉄筋の総断面積, b_w : 水平部材の腹部の幅, s_s : 帯鉄筋の配置間隔), No.2 および No.4 は帯鉄筋を配置していない。曲げ内半径 r は, No.1 および No.2 では, 設計標準で定められている 10ϕ (ϕ : 軸方向鉄筋の直径) とし, No.3, 4 では $r=3\phi$ とした。なお, 内側の軸方向鉄筋については半円形フックとし, 曲げ内半径は 3.5ϕ としている。

荷重は, 図2に示すL形フレームを用いて実施した。鉛直ジャッキにより, 荷重点における鉛直方向の変位がゼロとなるように制御しつつ, 水平方向に正負交番荷重を行った。接合部が開く側を正荷重, 接合部が閉じる側を負荷重とした。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 の正荷重, 負荷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, $\pm 1\delta_y$ の整数倍で3回繰返し荷重を行った。なお, No.2~4 も No.1 と同じ $\pm 1\delta_y$ を用いた。

2.2 実験結果

図3に水平荷重と水平変位の関係を, 図4に接合部の損傷状況を示す。正荷重時は, 荷重の増加に伴い, 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, 接合部に斜めひび割れが発生した。負荷荷時は, 曲げひび割れが発生した後, 接合部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。また, 主な

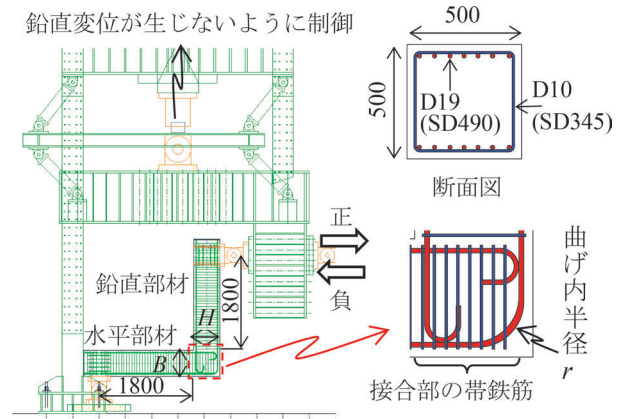


図2 供試体および荷重概要 (単位: mm)

表1 供試体諸元

(a) 供試体一覧

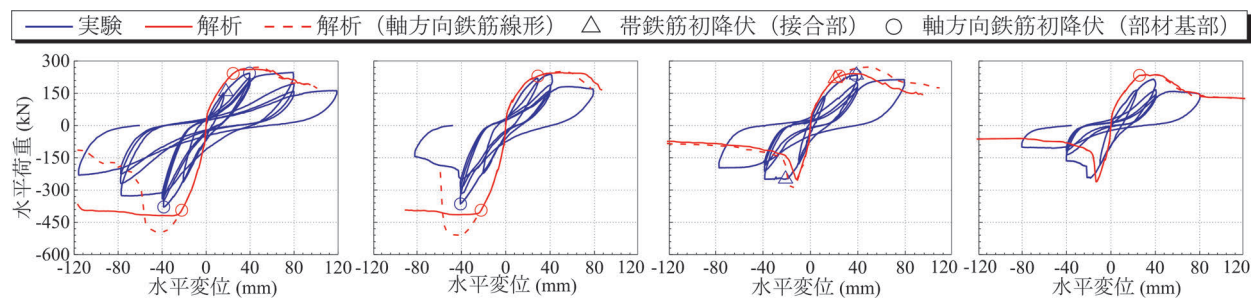
供試体名	コンクリート			柱はり接合部			軸方向鉄筋				柱, はりの帯鉄筋		
	f'_c (N/mm^2)	f_t (N/mm^2)	E_c (N/mm^2)	径, 間隔 (mm)	p_w^{*1} (%)	曲げ内半径 r	径	f_{sy} (N/mm^2)	E_s (N/mm^2)	p_t (%)	径, 間隔 (mm)	f_{wy} (N/mm^2)	p_w (%)
No.1	26.1	2.5	24.5	D10, 50	0.57	10ϕ	D19	530	179	0.89	D10, 50	367	0.57
No.2	27.0	2.6	25.9	—	0	10ϕ		527	195		D16, 50	370	1.59
No.3	21.9	1.9	24.8	D10, 50	0.57	3ϕ		530	179		D10, 50	367	0.57
No.4	23.9	2.1	24.5	—	0	3ϕ							

f'_c : コンクリートの圧縮強度, f_t : コンクリートの割裂引張強度, E_c , E_s : ヤング係数, f_{sy} , f_{wy} : 降伏強度, p_t : 引張鉄筋比, p_w : 帯鉄筋比, A_w : 区間 s_s における帯鉄筋の総断面積, b_w : 水平部材の腹部の幅, s_s : 帯鉄筋の配置間隔

*1: $p_w = A_w / (b_w \cdot s_s)$ で算定

(b) コンクリートの示方配合

供試体名	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
No.1	13	73.5	53.2	202	275	906	824	2.75
No.2~4	13	75.6	54.6	202	267	934	806	2.67



(a) No.1 ($p_w=0.57\%$, $r=10\phi$) (b) No.2 ($p_w=0\%$, $r=10\phi$) (c) No.3 ($p_w=0.57\%$, $r=3\phi$) (d) No.4 ($p_w=0\%$, $r=3\phi$)

図3 水平荷重と水平変位の関係

— 正載荷 — 負載荷 太線：主たる斜めひび割れ 数値：主たる斜めひび割れ発生時の水平荷重 (kN)

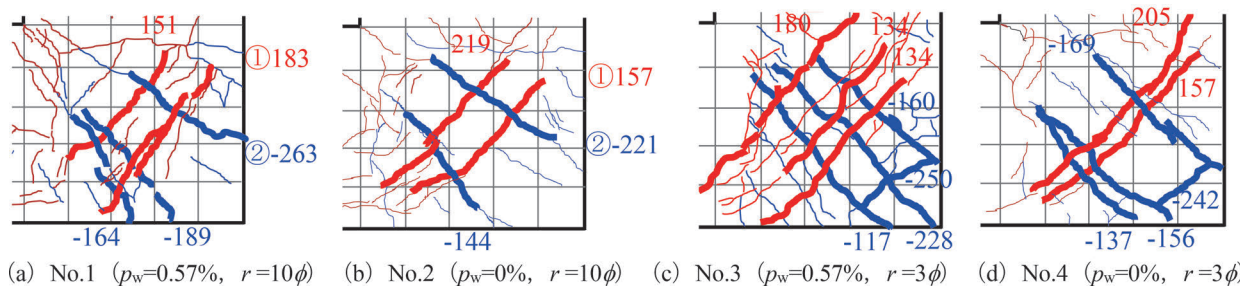


図4 接合部の損傷状況（コンクリートがはく落する直前）

る斜めひび割れが発生するときの水平荷重や発生箇所は概ね同等であった。

図5に、図4に示した主たる斜めひび割れ①、②を跨ぐパイゲージで計測した変位を示す。計測変位には、主たる斜めひび割れ周辺のコンクリートの微細なひび割れや弾性変位も含むが、主たる斜めひび割れ幅が大半を占めていると考えられる。また、計測が可能であった $2\delta_y$ までの結果を示している。帯鉄筋を配置しても、斜めひび割れ①、②の計測変位に顕著な違いはみられず、帯鉄筋による拘束は小さい結果となった。

No.1の正載荷、負載荷時、No.2の負載荷時およびNo.3の正載荷時には軸方向鉄筋は降伏した。それ以外では、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等により荷重低下が生じた。なお、接合部に帯鉄筋を配置しているNo.1およびNo.3は、水平荷重の最大値 P_{max} に達するまでに、斜めひび割れの近傍で帯鉄筋が降伏した。

図3からわかるように、 r は正載荷時の P_{max} に顕著な影響を与えないが、負載荷時においては、 r が小さくなると P_{max} は低下した。接合部の帯鉄筋の有無については、図5に示したとおり P_{max} 程度までは帯鉄筋による拘束が小さいため、 P_{max} にはあまり影響を与えないが、変形性能を向上させる結果となった。

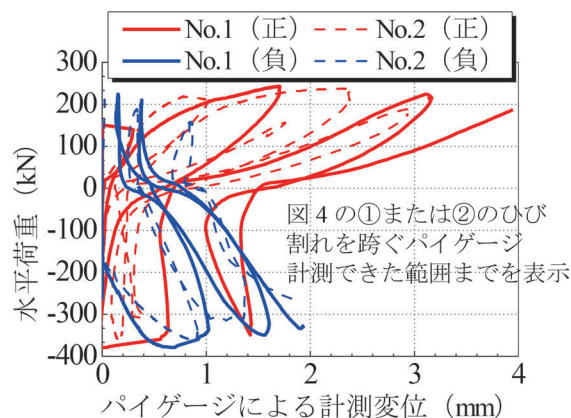


図5 パイゲージによる計測変位

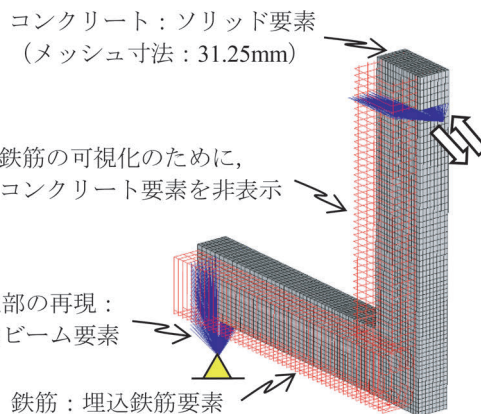


図6 解析モデル

3. 配筋詳細が耐荷機構と耐力に及ぼす影響

3.1 解析概要

非線形有限要素解析により、接合部の耐荷機構や配筋詳細が耐力に及ぼす影響を検討する。図6に、解析モデルを示す。解析は、汎用有限要素解析コード DIANA ver.10.2 を用い、三次元でモデル化した。コンクリートはソリッド要素、鉄筋は軸方向の剛性のみを考慮した埋込み鉄筋要素とし、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放物線モデルを、引張側は軟化勾配を適用した Hordijk⁴⁾ のモデルを用いた。コンクリートの破壊エネルギーは、設計標準¹⁾ および中村らの式⁵⁾ 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 Al-Mahaidi⁶⁾ のモデルを適用した。鉄筋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は、かぶりが小さいことによる影響を考慮するため、鳥らの付着応力すべり関係⁷⁾ に対し、付着力を40%に低減したモデルを用いることとした。解析では、正側（開く側）と負側（閉じる側）の

それぞれに対し、一方向の単調載荷とした。

3.2 実験結果の再現

図3に、解析で得られた水平荷重と水平変位の関係を併記した。解析は、 P_{max} までの剛性を過大に評価する傾向にはあるものの、概ね実験結果を再現できている。なお、図中には、軸方向鉄筋の応力ひずみ関係を線形とした解析結果も併記したが、水平・鉛直部材基部の軸方向鉄筋が降伏した載荷方向については、降伏の影響を受けるため、軸方向鉄筋の応力ひずみ関係を線形にすることで P_{max} は増加する。

図7に、No.1, 2 ($r=10\phi$)の P_{max} における最大主ひずみの分布を示す。解析は、実験における曲げひび割れや接合部に発生する主たる斜めひび割れについても再現できている。なお、解析は、実験における軸方向鉄筋および接合部の帯鉄筋のひずみ分布を概ね再現できていることを別途確認している⁸⁾。

非線形有限要素解析により、接合部の損傷性状や耐力を再現可能であることを示した。以降では、非線形有限要素解析により、配筋詳細が耐荷機構や耐力に及ぼす影響を検討する。

3.3 接合部の帯鉄筋の影響

ここでは、水平・鉛直部材の降伏の影響を排除して接合部の耐力を検証するために、軸方向鉄筋の応力ひずみ関係は線形とした。表2に、解析パラメータを示す。 $p_w=0.29\%$, $r=5, 7\phi$, 図2に示す接合部の高さ H と幅 B の比 $H/B=1.6$ としたケースや、T形⁹⁾および十字形の接合部に対しても実施した。なお、T形および十字形の接合部は、L形と同一の断面、部材長さを用いて再現したものである。また、帯鉄筋のみの影響を検討するため、コンクリートの圧縮強度は 27N/mm^2 , 引張強度は 2.6N/mm^2 ,

mm^2 , ヤング係数は 25.9kN/mm^2 , 帯鉄筋の降伏強度は 345N/mm^2 , 鉄筋のヤング係数は 200N/mm^2 に統一した。

図8に、 P_{max} に対する p_w の影響を示す。L形接合部の $H/B=1.6$ における $r=7, 10\phi$ の負荷荷時は、部材が曲げ圧縮破壊したため、図には示していない。L形の $H/B=1.6$ の場合に、 p_w が増加すると若干 P_{max} は増加す

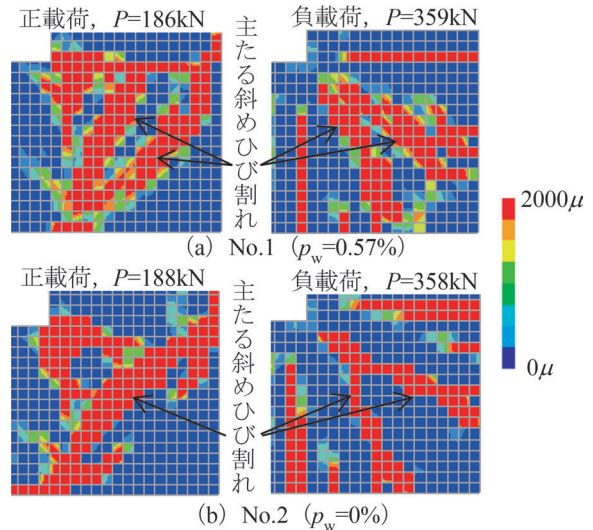


図7 最大主ひずみ分布 ($r=10\phi$)

表2 解析パラメータ

供試体形状 ^{※1}	H/B	柱はり接合部の帯鉄筋比 p_w (%)	曲げ内半径 r ^{※2}
L形	1.0	0.00	3ϕ
T形	1.6	0.29	5ϕ
十字形		0.57	7ϕ
			10ϕ

H : 接合部の高さ, B : 接合部の幅

※1: L形接合部は正側と負側の載荷を実施

※2: L形接合部の外側に沿う軸方向鉄筋

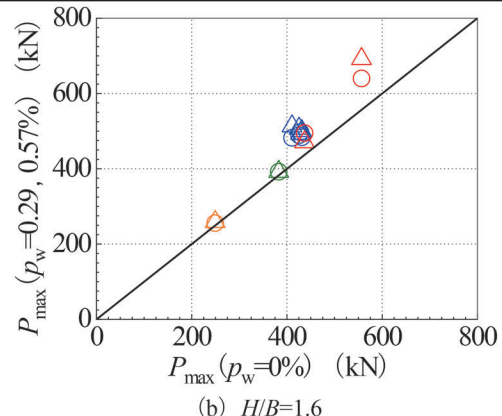
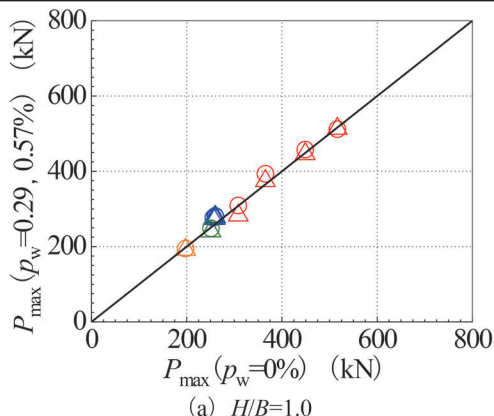


図8 接合部の帯鉄筋の効果 (解析)

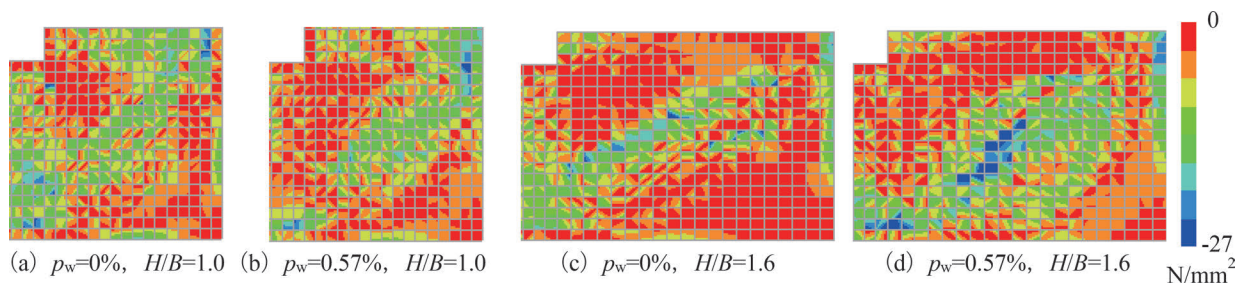


図9 最小主応力分布 ($r=10\phi$, 正載荷, P_{\max} 時)

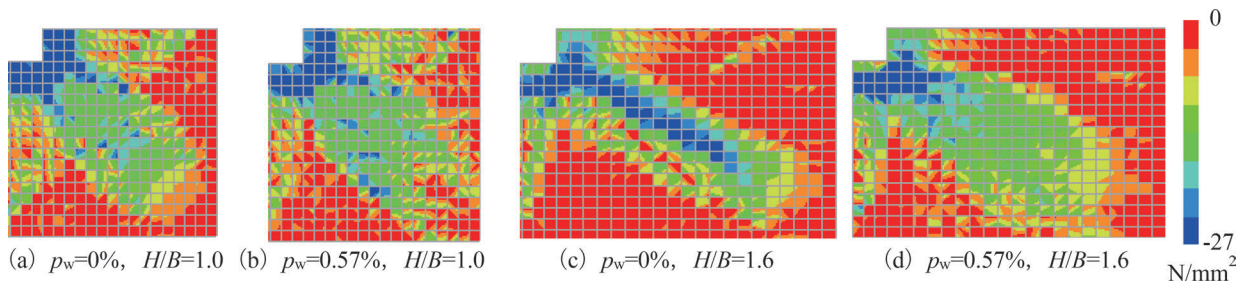


図10 最小主応力分布 ($r=10\phi$, 負載荷, P_{\max} 時)

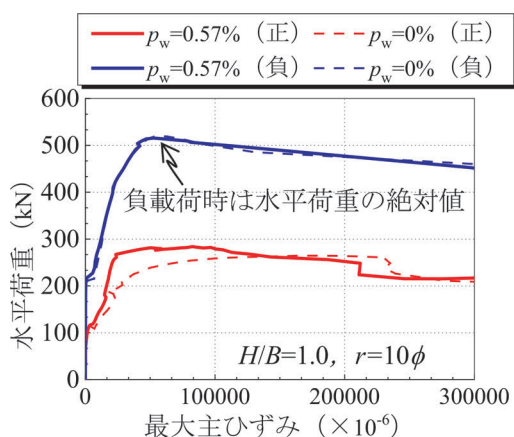


図11 最大主ひずみの最大値の履歴

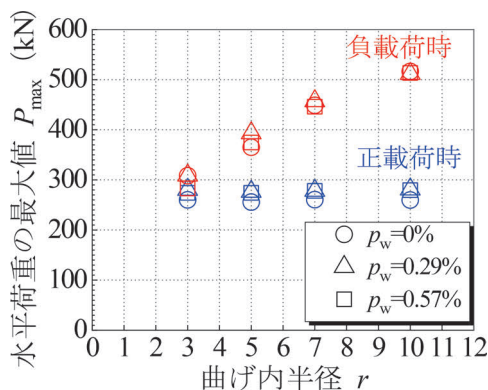


図12 曲げ内半径 r の影響 (解析, $H/B=1.0$)

る傾向にある。 $p_w=0\%$ の P_{\max} に対する $p_w=0.29$ または 0.57% の P_{\max} の比は、 $H/B=1.0$ で平均1.03、 $H/B=1.6$ で平均1.11であった。

図9および図10に最小主応力分布を示す。正載荷時には水平部材と鉛直部材の曲げ圧縮縁同士を結ぶように、負載荷時には水平および鉛直部材の曲げ圧縮縁と曲げ内半径部を結ぶように圧縮ストラットが形成される耐荷機構であることがわかる。 $H/B=1.0$ の場合、 p_w が増加しても、圧縮ストラットの形状に違いはみられない。一方、 $H/B=1.6$ の場合、 p_w が増加すると圧縮ストラットの幅は幾分増加した。

図11に、図7に示した接合部の主たる斜めひび割れが発生した要素に着目し、コンクリートの最大主ひずみの最大値の履歴を示す。図11の負載荷時の水平荷重は

絶対値(正)として示している。 p_w が増加すると、正載荷時には最大主ひずみが抑制される傾向にはあるが、負載荷時は同等な結果となった。

3.4 曲げ内半径の影響

図12に、 P_{\max} に対する r の影響を示す。解析の条件は、3.3節と同様である。正載荷時の P_{\max} は r の影響をほとんど受けないが、負載荷時は r が小さくなると P_{\max} は低下した。

図13および図14に、最小主応力分布を示す。正載荷時には、 r が変化しても、圧縮ストラットに違いはみられず、負載荷時には、 r が小さくなるほど、圧縮ストラットの幅が小さくなる結果となった。これは、正載荷時には、鉛直部材と水平部材の曲げ

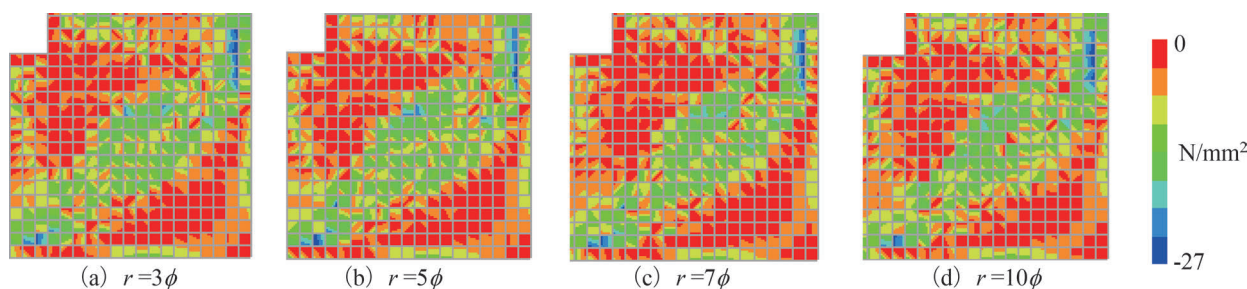


図 13 最小主応力分布 ($\rho_w=0.29\%$, $H/B=1.0$, 正載荷, P_{max} 時)

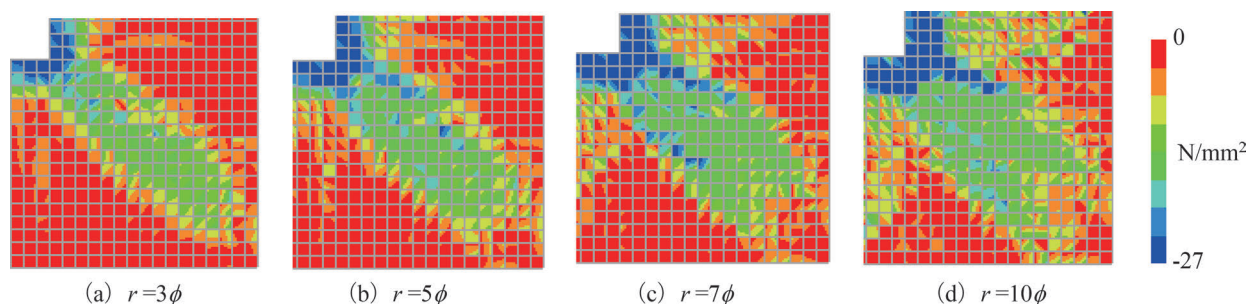


図 14 最小主応力分布 ($\rho_w=0.29\%$, $H/B=1.0$, 負載荷, P_{max} 時)

圧縮縁同士を結ぶように圧縮ストラットが形成される耐荷機構であるため、 r が直接的に圧縮ストラットに寄与せず、 P_{max} に影響を与えなかったと考えられる。負載荷時においては、鉛直部材および水平部材の曲げ圧縮縁と、曲げ内半径部を結ぶように圧縮ストラットが形成される耐荷機構であり、曲げ内半径部が圧縮ストラットの反力となることから、圧縮ストラットの幅は r に依存し、 P_{max} に顕著な影響を与えたと考えられる。

4. 接合部に関する構造細目の検討

4.1 接合部の帯鉄筋

接合部の帯鉄筋は、柱の塑性ヒンジ部と同量を配置するといった構造細目¹⁾は、1992年制定の鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）で導入されたものであり、実験的検討¹⁰⁾等や当時の配筋量を踏まえて設定されたものである。接合部は修復が困難であることなどから、接合部に大きな損傷が生じないように、柱やはりといった隣接する部材の損傷を先行させることが一般的である。このような設計思想の場合、接合部の耐力以降の変形を許容せず、所定の耐力や剛性を確保することが必要となるが、接合部の帯鉄筋は P_{max} に顕著な効果がなかったこと、構造細目が設定された検討¹⁰⁾における接合部の帯鉄筋量を踏まえると、過度な帯鉄筋を配置している可能性がある。

そこで、接合部の帯鉄筋は、せん断力に対して必要となる柱のせん断補強鉄筋と同量以上を配置することを提案する。これは、柱のせん断補強鉄筋比は塑性ヒンジに

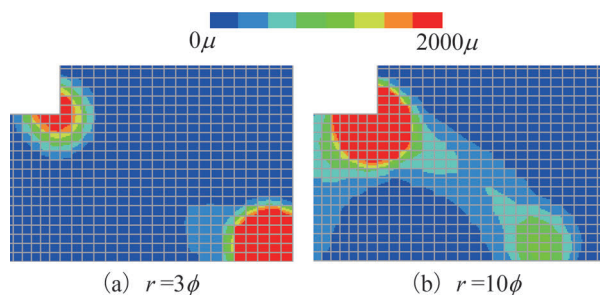


図 15 平均化正規化累加ひずみエネルギー \bar{W}_n の分布 ($\rho_w=0.29\%$, $H/B=1.6$, 負載荷, P_{max} 時)

配置される帯鉄筋比の1/2~2/3程度の事例が多く、この場合、設定時に想定していた接合部の帯鉄筋量程度となること、また柱に必要な曲げ耐力やせん断耐力が大きいほど、柱のせん断補強鉄筋量は多くなり、柱のせん断補強鉄筋量は柱から接合部に導入される断面力に相関があること等を踏まえたものである。ただし、接合部の帯鉄筋は用心鉄筋としての役割を有し、柱やはりの軸方向鉄筋の定着にも寄与する。また、建築規準¹¹⁾では、接合部の帯鉄筋は接合部の剛性の維持に寄与すること、軸方向力を保持するためにコンクリートを拘束する必要があるので等も示されていることを踏まえ、建築規準を参考に、柱のせん断補強鉄筋比で0.3%以上配置するのがよいと考える。

4.2 ラーメン隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ内半径

設計標準では、ラーメン隅角部の外側に沿う軸方向鉄

筋の曲げ内半径 r を 10ϕ 以上にすることとしている。ここでは、 r の設定の妥当性について検証する。

図 15 に、平均化した正規化累加ひずみエネルギー \overline{W}_n^{12} の分布を示す。 \overline{W}_n はコンクリートの圧縮損傷を表す指標であり、 $1500\sim 2000m$ に達すると、コンクリートが圧壊することを意味する。また、図では、一般的な柱とはりの断面寸法の比率を考慮して、 $H/B=1.6$ の結果を示している。 $r=10\phi$ の場合、水平部材が曲げ圧縮破壊していると考えられる結果ではあったが、曲げ内半径部での圧縮損傷は小さい。一方、 $r=3\phi$ の場合においては曲げ内半径部での圧縮損傷が卓越した。 r を 10ϕ から小さくすると、徐々に曲げ内半径部での圧縮損傷が卓越するものであるが、従来どおり $r=10\phi$ 程度以上により、曲げ圧縮部での支圧破壊を抑制できる結果となった。

本稿では、接合部の耐荷機構や配筋詳細が P_{max} に与える影響を明らかにした。構造細目の設定時に想定した接合部の配筋詳細や、高強度の軸方向鉄筋を用いた場合等で接合部の寸法が従来から大きく異なる場合は、非線形有限要素解析と損傷指標¹²⁾等を用いるなどして照査するのがよい。

5. まとめ

- (1) 接合部の帯鉄筋は、接合部の変形性能の向上に寄与するが、耐力には顕著な効果がないことがわかった。
- (2) 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、閉じる方向に対しては、曲げ内半径を小さくすると、接合部の耐力が小さくなることがわかった。
- (3) 接合部が開く方向では水平部材と鉛直部材の曲げ圧縮縁同士を結ぶように、閉じる方向では水平および鉛直部材の曲げ圧縮縁と曲げ内半径部を結ぶように圧縮ストラットが形成される耐荷機構であることがわかった。また、閉じる方向では、曲げ内半径が圧縮ストラットの幅に大きな影響を与えることを明らかにした。
- (4) 接合部の構造細目について検討した。接合部の帯鉄筋は、柱のせん断補強鉄筋と同量以上を配置することを提案した。これにより、帯鉄筋量は従来よりも削減され、過密配筋を抑制できる。また、ラーメン隅角部の外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は、従来どおり 10ϕ 以上とすることで、曲げ圧縮部での支圧破壊を抑制できることを確認した。

文 献

- 1) 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
- 2) 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 配筋の手引き，鉄道総合技術研究所，2005
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター：特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」，SED，第37号，2011
- 4) Hordijk, A.D., "Local Approach to Fatigue of Concrete," Delft University of Technology, 1991.
- 5) Nakamura, H. and Higai, T., "Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete," JCI-C51E Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.259-272, 1999.
- 6) AL-MAHAIDI, R.S.H., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members," Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1979.
- 7) 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387号/V-6，pp.165-174，1987
- 8) 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
- 9) 西村脩平，中田裕喜，渡辺健，田所敏弥，安保知紀：柱と梁の断面高さが等しいT形柱梁接合部の損傷過程および解析による評価の検討，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，V-602，2018
- 10) 渡辺忠朋，松本信之：じん性を考慮した耐震設計法に関する研究（その2）—RC高架橋の部材接合部の強度と変形性能—，鉄道総研報告，Vol.5，No.9，pp.21-30，1991
- 11) 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，日本建築学会，1999
- 12) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書（設計編），土木学会，2017