

論文 数値解析を用いた L 形柱梁接合部の配筋の合理化に関する研究

中山 岳彦*1・斉藤 成彦*2・佐藤 賢之介*3

要旨：ラーメン高架橋やラーメン橋脚における柱と梁の接合部では鉄筋干渉や過密配置が発生し、生産性を阻害する要因になっている。これを解消するために L 形接合部の耐荷挙動の評価や配筋方法の合理化について多くの研究が行われているが、配筋パターンを変えた実験的検討がほとんどである。そこで本論では L 形柱梁接合部を対象に、数値解析を用いてひび割れ性状や鉄筋ひずみに基づいた破壊挙動の評価を行い、配筋方法について検討を行った。その結果、ひび割れの開口を抑える方向に適切に補強鉄筋を配置することで鉄筋干渉を軽減し耐荷力の向上が可能な配筋方法を提案し、生産性改善の可能性を示した。

キーワード：L 形柱梁接合部、配筋の合理化、破壊挙動、剛体バネモデル、生産性

1. はじめに

RC 部材の接合部は、部材それぞれの配筋が交わることで鉄筋が過密になることが多く、施工段階において鉄筋の組直しや、配筋の再検討が行われるなど生産性を阻害する要因になっている¹⁾。さらに近年の大規模な自然災害の発生により構造物に対する要求性能が高まり、耐震設計では考慮する地震力の増大に伴って過密配筋となる傾向にある。

ラーメン高架橋やラーメン橋脚における柱と梁の接合部では、それぞれの部材の高密度な鉄筋が交わることで鉄筋干渉や過密配置が発生している。道路構造物におけるラーメン橋脚の柱梁接合部は、柱と梁が剛結され一体となり、作用に抵抗することを前提としているため鉄筋の配置が過密になる²⁾。また、鉄道構造物におけるラーメン高架橋の柱と梁の接合部は、鉄道構造物等設計標準・同解説³⁾に示される配筋仕様で設計され、安全側の設計で過密な配筋となっている。一方、日本建築学会では実験結果に基づいて梁曲げ降伏型の柱梁接合部のせん断強度の設計手法^{4),5)}が定められ、また塩原ら⁶⁾の研究では梁曲げ降伏型接合部の耐震設計における理論式が提案されており、様々な接合構造が提案されているが、本論文で対象とする道路や鉄道構造物は断面寸法が比較的大きく、柱先行降伏とする設計思想が異なるため、適用には課題が残る。

ラーメン橋脚や RC ボックスカルバートを対象とした L 形隅角部の耐荷挙動の評価や配筋方法の合理化について多くの研究が行われているが、主として配筋パターンを変えた実験的検討がほとんどである^{7),8),9)}。一方、著者ら¹⁰⁾は杭基礎フーチングを対象に、杭とフーチングの接合部における過密配筋の合理化について数値解析により検討を行っている。これは、数値解析を用いることで部

材の破壊挙動を詳細に分析し、合理的な鉄筋配置を提案することを試みたものである。

そこで本論では、一般的なラーメン構造物で最も接合部の耐荷力が小さいと考えられる L 形柱梁接合部を対象に、ひび割れ等の不連続現象の表現に優位性のある剛体バネモデルを用いた数値解析によって、ひび割れ性状や鉄筋ひずみに基づいた破壊挙動の評価を行ったうえで、鉄筋干渉が少なく、耐荷力を向上させることが可能な効果的な補強鉄筋の配筋方法について検討を行った。

2. L 形柱梁接合部の破壊挙動の評価

2.1 解析概要

本研究で解析対象とした試験体は、一般的な鉄道ラーメン高架橋に用いられる L 形柱梁接合部を模擬したもので、草野ら¹¹⁾、中田ら¹²⁾が実験を行った実構造物寸法の 50%程度の縮尺の試験体 4 つである。**表-1** に試験体の諸元を示す。試験体は**図-1** に示すように、柱と梁の断面寸法はいずれも高さ 500mm、幅 500mm の正方形断面で、支持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 である。軸方向鉄筋 D19、帯鉄筋 D10 (ctc 50mm) を配置した No.1 試験体が基準で、No.2~No.4 試験体は外側軸方向鉄筋の曲げ内半径、接合部内の補強鉄筋の有無、柱梁部の帯鉄筋径を変化させたものである。

表-1 に解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の材料諸元を示す。これらの値は実験時の No.2 試験体の材料試験結果であり、実験では試験体によって材料の試験結果に多少の違いが生じているが、解析では比較を容易にするために全ての試験体に共通してこの値を用いた。軸方向鉄筋は SD490、帯鉄筋は SD345 相当であり、接合部が先行破壊するように設定されている。

*1 株式会社竹中土木 (学生会員)

*2 山梨大学大学院 総合研究部教授 (正会員)

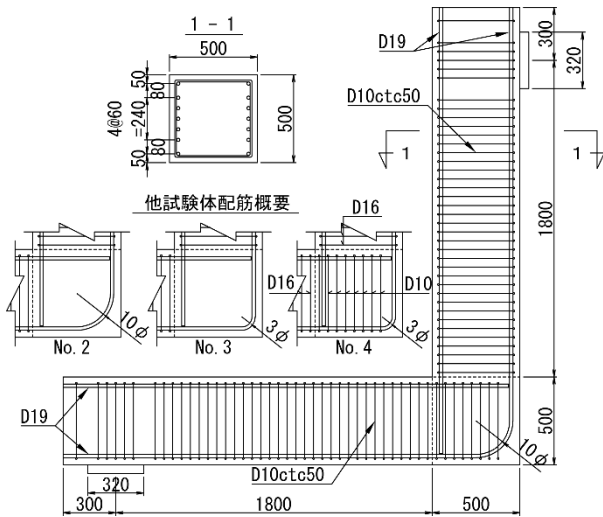
*3 山梨大学大学院 総合研究部助教 (正会員)

表－1 試験体諸元

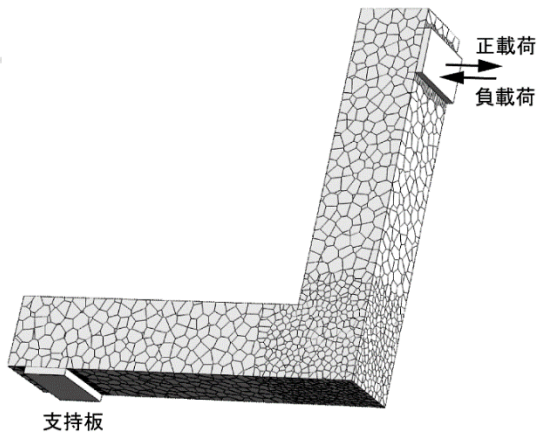
試験体名	接合部の補強鉄筋			柱、梁の帯鉄筋				軸方向鉄筋				コンクリート		
	径・間隔 (mm)	p_w (%)	曲げ内 半径※1	径・間隔 (mm)	f_{wy} (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)	p_w (%)	径	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)	p_t (%)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
No.1	D10ctc50	0.57	10 ϕ	D10ctc50	367	179	0.57	D19	530	189	0.89	27.0	2.6	25.9
No.2	—	0	10 ϕ											
No.3	—	0	3 ϕ	D16ctc50	367	179	1.59	D19	530	189	0.89	27.0	2.6	25.9
No.4	D10ctc50	0.57	3 ϕ											

p_w, p_t : 部材の補強鉄筋比, 軸方向鉄筋比, f_{wy}, f_{sy} : 補強鉄筋および軸方向鉄筋の降伏強度

E_s, E_c : 鉄筋およびコンクリートのヤング係数, f'_c, f_t : コンクリートの圧縮強度, 引張強度, ※1: ϕ は軸方向鉄筋径



図－1 L 形柱梁試験体概要(No.1 試験体)

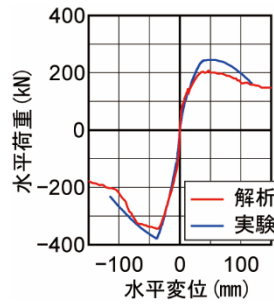


図－2 解析モデル

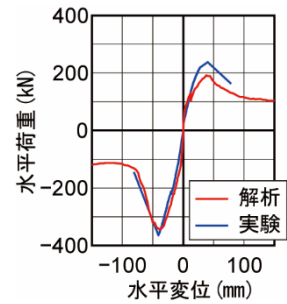
実験では、梁部の支持板を固定したうえで柱部載荷板を鉛直方向の変位がゼロとなるように制御し、水平方向に載荷されている。載荷方向は、L 形接合部が開く方向が「正載荷」、閉じる方向が「負載荷」となる。解析も同様の載荷方法とするが、実験は正負交番載荷であるのに対し、解析では計算労力の軽減のため、正載荷・負載荷それぞれ単調漸増載荷とした。

2.2 解析モデル

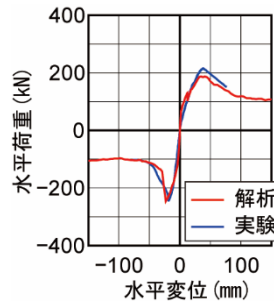
解析には、RC 部材の破壊挙動解析に実績のある離散型の解析手法である 3 次元剛体バネモデル (RBSM) を



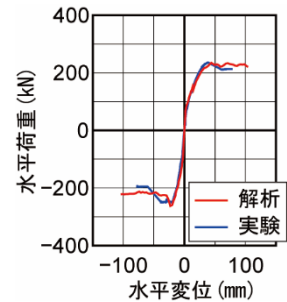
図－3 荷重－変位関係
(No.1 試験体)



図－4 荷重－変位関係
(No.2 試験体)



図－5 荷重－変位関係
(No.3 試験体)



図－6 荷重－変位関係
(No.4 試験体)

用いた。RBSM は、ひび割れを伴う RC 部材の耐荷性状を比較的良好に再現できることが確認されている。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の力学モデルは文献¹⁰⁾を参照されたい。

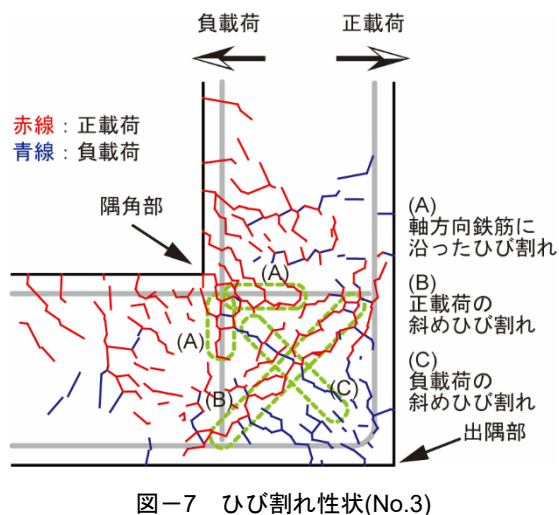
図－2 に解析モデルを示す。接合部のひび割れ挙動を再現できるように、接合部付近の要素寸法の平均を 30mm 程度とし、柱梁部については計算の労力を低減させるために、その 2 倍程度の大きさとした。

2.3 荷重－変位関係

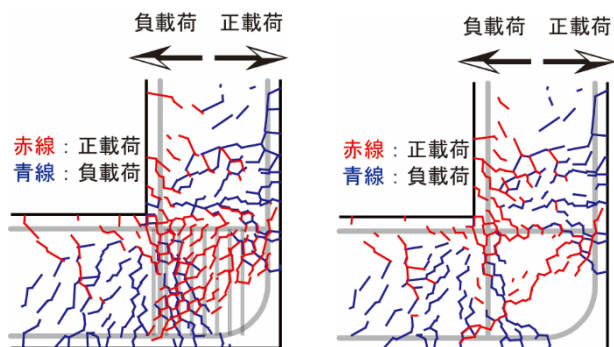
図－3～図－6 に解析で得られた各試験体の荷重－変位関係を示す。図には実験^{11),12)}で得られた正負交番載荷のピーク値を結んだ包絡線を併せて示した。また表－2 には、実験と解析における正載荷、負載荷それぞれの最大水平荷重を示した。これらより解析結果は実験結果を一部で過小評価している部分があるものの、概ねよく対応していることが確認できる。

表－2 最大水平荷重(実験と解析の比較)

荷重状態	試験体	載荷方向	実験値 (kN)	解析値 (kN)	比率 (解析/実験)
最大水平荷重 V_{max}	No.1	正載荷	247	207	0.84
		負載荷	-379	-345	0.91
	No.2	正載荷	238	191	0.80
		負載荷	-365	-343	0.94
	No.3	正載荷	215	187	0.87
		負載荷	-245	-246	1.00
	No.4	正載荷	235	234	1.00
		負載荷	-250	-262	1.05

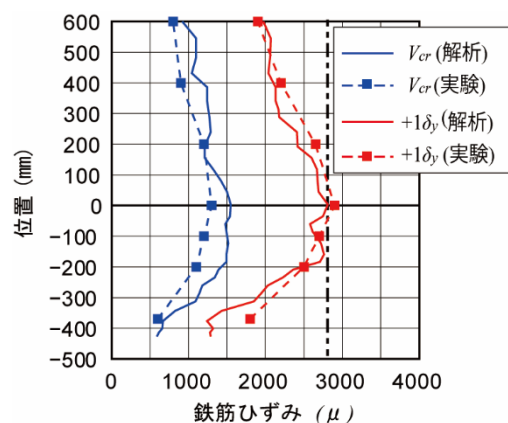


図－7 ひび割れ性状(No.3)

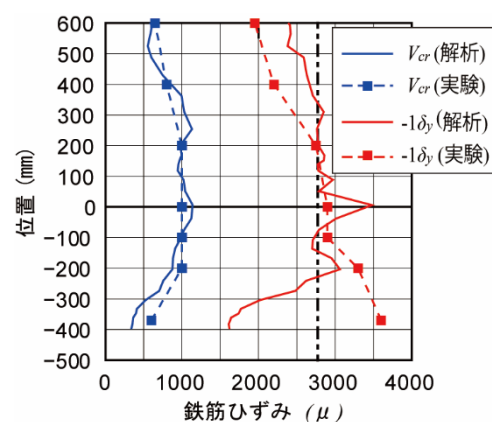


図－8 ひび割れ性状(No.1) 図－9 ひび割れ性状(No.2)

No.1 試験体に対して No.2 試験体は接合部内の補強鉄筋をなくしたものである。図－3 と図－4 から、接合部の補強鉄筋は最大水平荷重後の荷重低下を緩やかにする効果があるが、最大水平荷重に与える影響は小さいことが分かる。また、図－4 と図－5 から、外側軸方向鉄筋の曲げ内半径を小さくした No.3 試験体では、正載荷側では最大水平荷重に大きな変化は生じないが、負載荷側では最大水平荷重が低下し、実験時に観察された接合部の破壊に伴う急激な荷重低下を示すことを解析でも確認できた。図－6 より、曲げ内半径を小さくし、接合部にせん断補強筋を配置した No.4 試験体についても、解析と実験は概ね対応していることが分かる。



図－10 正載荷時内側軸方向筋ひずみ分布(No.1)



図－11 負載荷時外側軸方向筋ひずみ分布(No.1)

2.4 ひび割れ性状

図－7 に最大水平荷重直後の No.3 試験体について、解析より得られたひび割れ性状を示す。図より、正載荷時には隅角部から軸方向鉄筋に沿ったひび割れ (A) と、隅角部から出隅部への対角線 (以下、対角線) 方向と直交する向きに斜めひび割れ (B) が発生し、負載荷時には対角線と平行な向きに斜めひび割れ (C) が発生した。これらは実験のひび割れ¹⁾⁾と対応しており、解析はひび割れ性状をよく再現できている。また図－8～図－9 にその他の試験体のひび割れ性状を示す。これらについても実験のひび割れ性状をよく再現できている。

2.5 鉄筋ひずみ分布

接合部に補強鉄筋が配置された No.1 試験体について、解析と実験で得られた鉄筋ひずみ分布を分析した。

図－10 に正載荷時の内側 (引張側) の軸方向鉄筋のひずみ分布を示した。ここに V_{cr} は、正載荷時の斜めひび割れ (B) の発生荷重を表す。図の縦軸は柱基部を 0mm とし軸方向鉄筋の位置を示す。図より、柱基部付近でひずみが大きくなり、正載荷の降伏時 ($+1\delta_y$) にかけてひずみが増大していることが分かる。また、図－11 に負載荷時の外側 (引張側) の軸方向鉄筋のひずみ分布を示し

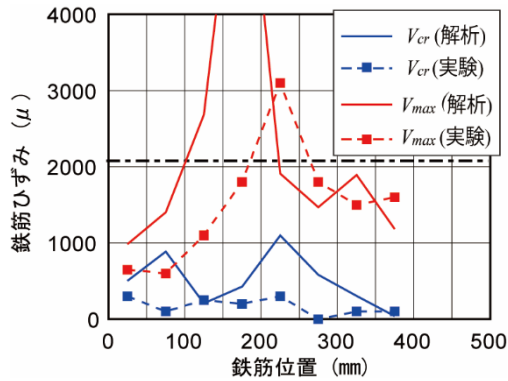


図-12 正載荷時補強鉄筋ひずみ分布(No.1)

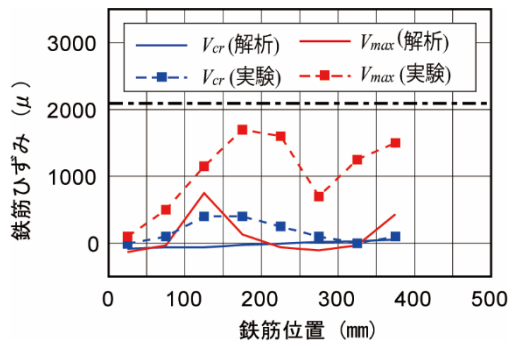


図-13 負載荷時補強鉄筋ひずみ分布(No.1)

た。こちらも柱の載荷部から柱基部に向かってひずみが増える傾向であることが分かる。負載荷の降伏時 ($-1\delta_y$) に接合部内のひずみ分布に違いが生じている理由は、実験に比べて解析の方が基部に近い位置でひび割れが生じているためである。

図-12に、正載荷時の接合部の中心高さ位置における補強鉄筋ひずみ分布を示した。ここに V_{max} は、最大水平荷重時を表す。図の横軸は梁部材基部を 0mm として、接合部側に配置した補強鉄筋の位置を示す。図-8より、斜めひび割れ (B) が発生した箇所と補強鉄筋が降伏した箇所は対応していることが分かる。解析と実験では発生したひずみの大きさに違いはあるものの、荷重の増加に伴いひび割れ (B) が開口したことによって補強鉄筋が降伏する状況が再現できている。また、負載荷時の接合部内の補強鉄筋ひずみ分布を図-13に示したが、負載荷時の斜めひび割れ (C) が生じていないことにより、補強鉄筋は降伏ひずみまで達していないことが確認できる。なお、実験に比べて解析のひずみが小さいのは、実験は正負交番載荷であることが原因の一つと考えられる。

2.6 外側軸方向鉄筋の曲げ内半径の影響

図-4 (No.2) と図-5 (No.3) より、軸方向鉄筋の曲げ内半径を小さくした場合に、正載荷側では最大水平荷重は概ね同等の値を示しているが、負載荷側では最大水平荷重が小さくなり、最大水平荷重を示した後に急激に

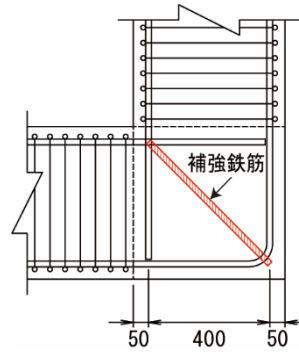


図-14 補強鉄筋概要
(Case1)

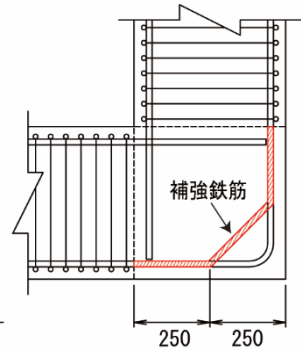


図-15 補強鉄筋概要
(Case2)

荷重が低下することが分かる。これは図-9 (No.2) より、曲げ内半径 10ϕ の場合には負載荷時に対角線と並行して発生する斜めひび割れ (C) と外側軸方向鉄筋の曲げ部が交わることでひび割れの発生を抑える効果があったが、図-7 (No.3) より、曲げ内半径が 3ϕ になると斜めひび割れ (C) と軸方向鉄筋の曲げ部が交差しなくなることで局所的な破壊が進行し、急激な荷重低下を招いたと考えられる。これにより斜めひび割れ (C) に直交する鉄筋量を確保することが負載荷時の接合部の耐力に影響することが分かる。

2.7 接合部内の補強鉄筋の影響

図-3 (No.1) と図-4 (No.2) および表-2 より、接合部内への補強鉄筋の配置は最大水平荷重後の荷重低下を緩やかにする効果はあるが、最大水平荷重への影響は小さいことが分かる。図-8 (No.1) と図-9 (No.2) より、正載荷時には隅角部から軸方向鉄筋に沿って生じるひび割れ (A) や対角線と直行する斜めひび割れ (B) が、負載荷時には対角線と並行に生じる斜めひび割れ (C) が接合部の耐力に影響することから、接合部内のかぶり付近に鉛直に配置された補強鉄筋の効果は小さかったことが考えられる。一方で、接合部内のコンクリートを拘束し、ひび割れを分散する効果があるため、最大水平荷重後の変形特性を向上させる役割があると考えられる。

3. 接合部内の効果的な配筋の検討

3.1 解析概要

前章で、外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は負載荷側で最大水平荷重および変形性能に影響を与え、正載荷側では大きな影響がないことを確認した。また、鉛直に配置した接合部内の補強鉄筋は最大水平荷重に対しては大きな影響を及ぼさないことが確認された。これらの検討の結果を踏まえ、ここでは接合部内の効果的な配筋について解析的に検討を行う。接合部内の過密配筋を解消する観点から、曲げ内半径が 3ϕ で鉛直の補強鉄筋を配置しない No.3 試験体をベースに、正載荷、負載荷それぞれに効

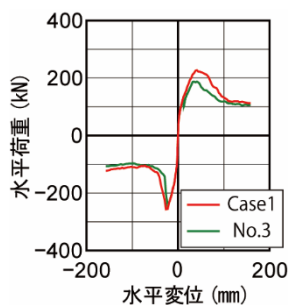


図-16 荷重－変位関係
(Case1)

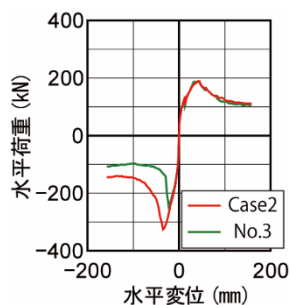


図-17 荷重－変位関係
(Case2)

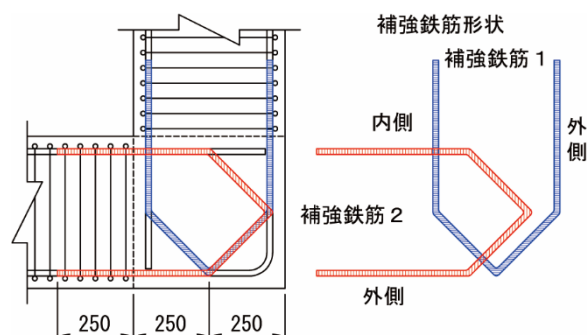


図-18 補強鉄筋概要(Case3)

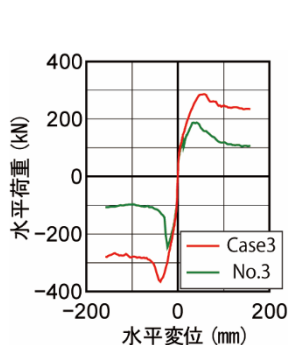


図-19 荷重－変位関係
(Case3)

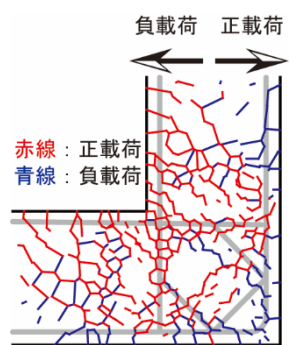


図-20 ひび割れ性状
(Case3)

果のある補強鉄筋を提案する。

正載荷時に発生する主要なひび割れの一つは、対角線と直角方向に生じる斜めひび割れ (B) であることから、正載荷時に効果のある補強鉄筋の配置として、ひび割れ (B) に直交する補強鉄筋を配置したモデルを Case1 とした (図-14)。また、負載荷時に発生する主要なひび割れは対角線に並行に生じる斜めひび割れ (C) であることから、斜めひび割れ (C) に直交する補強鉄筋を配置したモデルを Case2 とした (図-15)。なお、どちらのモデルも補強鉄筋は D19 とし、奥行き方向に 4 列配置した。提案する配筋は、曲げ内半径を大きくとったうえで鉛直の補強鉄筋を配置する場合よりも、接合部内の配筋やコンクリートの打設が容易になるものと考えられる。

表-3 最大水平荷重 (No.3 との比較)

荷重状態	試験体	載荷方向	解析値 (kN)	比率 ($V_{\max} / V_{\max}^{\text{No.3}}$)
最大水平荷重 $V_{\max}$	Case1	正載荷	227	1.21
		負載荷	-257	1.04
	Case2	正載荷	189	1.01
		負載荷	-326	1.33
	Case3	正載荷	286	1.53
		負載荷	-366	1.49
	No.3 (解析)	正載荷	187	1.00
		負載荷	-246	1.00

3.2 解析結果

図-16 に Case1 の荷重－変位関係を示す。表-3 より、正載荷側の最大水平荷重が No.3 に比べて 21%ほど向上しており、補強鉄筋が正載荷時に発生する斜めひび割れ (B) の開口を抑える効果があったことが分かる。一方で、負載荷側に対してはほとんど補強の効果を果たさないことも確認された。

図-17 に Case2 の荷重－変位関係を示す。Case2 では補強鉄筋が斜めひび割れ (C) を抑制する効果を発揮するため、負載荷側の最大水平荷重が No.3 に比べて 33%ほど向上しており、急激な荷重低下も若干緩和されていることが分かる。ただし、この場合も正載荷に対しては補強効果がほとんどないことが確認された。

この結果を踏まえて、正載荷、負載荷ともに効果のある補強鉄筋として Case1 と Case2 の特徴を併せ持った補強鉄筋の配置の案を図-18 に示す。図に示すように 2 個のコの字型の鉄筋を重ね合わせることで、接合部に生じる主要なひび割れに多く直交する配置にしたものである。Case1, Case2 と同様に奥行き方向に D19 で 4 列配置したモデルを Case3 とする。ただし、実際の鉄筋では、折り曲げ部を曲げ内半径の規定に沿った鉄筋形状にする必要がある。

図-19 に解析より得られた Case3 の荷重－変位関係を示す。表-3 より、提案した補強鉄筋を配置することで No.3 に比べて最大水平荷重が正載荷側は 53%、負載荷側は 49%ほど向上し、負載荷側では No.1 と同等の耐力力となっている。また最大水平荷重後の荷重低下も緩やかになり、変形性能も改善できることが分かる。図-20 より、図-8 (No.1) と比べて接合部内のひび割れの分散性は低下しているが、斜めひび割れ (B) に直交する補強鉄筋量の増大による効果であることが確認できる。最大水平荷重時の補強鉄筋のひずみを示した図-21、図-22 より、正載荷、負載荷共に降伏ひずみ付近までひずみが増加している箇所が多いことから、補強鉄筋が効果的な配置となっていることが確認できる。また、最大水平荷重後の荷重低下が緩やかになって変形性能が向上しているのは、接合部内で補強鉄筋が重ね合わさること

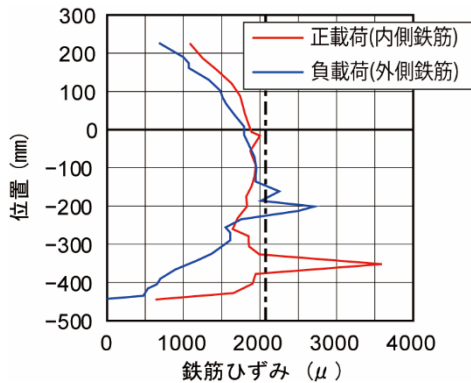


図-21 補強鉄筋 1 ひずみ分布(Case3)

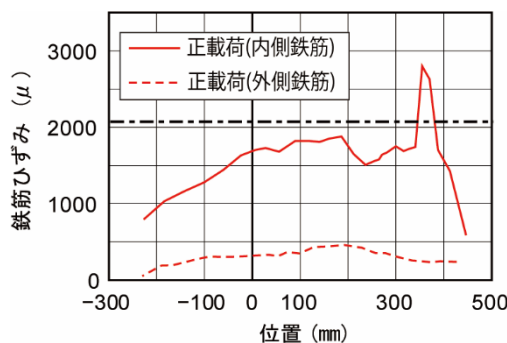


図-22 補強鉄筋 2 ひずみ分布(Case3)

閉じた形となり，コンクリートを拘束する効果があったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では，過密配筋となる傾向にある L 形柱梁接合部の実験試験体を対象に RBSM を用いた数値解析を行い，実験結果との比較や接合部の破壊挙動の詳細な分析を行った。さらにその分析結果に基づき，接合部の耐荷性状の改善を目的とした補強鉄筋の配置を提案し，数値解析による検証を試みた。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 実験試験体の数値解析結果は実験結果とよく対応しており，ひび割れ性状や鉄筋ひずみから鉄筋の配置が破壊挙動に及ぼす影響を評価することができた。
- 2) 外側軸方向鉄筋は曲げ内半径を大きくすることで負載荷時に発生する接合部内の対角線方向のひび割れに交わり，最大水平荷重を増加させていることが確認された。
- 3) 接合部内の鉛直方向補強鉄筋は接合部に発生する主要なひび割れに直接対応していないため最大水平荷重に与える影響は少ないが，最大水平荷重後

の変形特性を向上させる役割があることが確認された。

- 4) 接合部内に生じる主要なひび割れに直交するように補強鉄筋を適切に配置することで，最大水平荷重の増加やその後の変形性能の改善が可能な配筋例を示した。本検討より，数値解析結果に基づいた配筋方法の合理化の可能性について示すことができた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリー148，2016
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，2017
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1991
- 5) 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，1999
- 6) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：梁曲げ降伏型接合部の耐震設計，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.640，pp.1145-1154，2009
- 7) 幸左賢二，安田扶律，藤井康男：開削トンネル隅角部の耐震性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.20，No.3，pp.1057-1062，1998
- 8) 渡辺博志，河野広隆：L 型 RC 隅角部の強度と変形特性に関する検討，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.59-73，2000
- 9) 玉野慶吾，桑野淳，後藤隆臣，平陽兵：主鉄筋の定着に機械式定着を用いた RC 隅角部に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.613-618，2016
- 10) 中山岳彦，斉藤成彦，佐藤賢之介：数値解析による杭基礎フーチングのせん断破壊挙動の評価，構造工学論文集，Vol.68A，pp.685-692，2022
- 11) 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，日本地震工学シンポジウム，pp.51-60，2018
- 12) 中田裕喜，西村脩平，渡辺健，田所敏弥：L 形 RC 柱はり接合部における帯鉄筋による補強効果に関する一考察，土木学会年次学術講演，2020