

論文 機械式継手間に開孔を有する RC 梁の静的載荷実験と FEM 解析

村山 峻一朗^{*1}・笠原 崇佑^{*2}・真田 靖士^{*3}・足立 智弘^{*4}

要旨: 筆者らの既往の研究では、機械式継手を有する鉄筋コンクリート梁を対象に、カプラーにかかるせん断補強筋をカプラー端部に配筋する工法が適用可能なことを確認した。また、機械式継手と開孔が近接する場合にも本工法が同様に適用できることを確認した。そこで、本研究では本工法を適用した RC 梁の機械式継手間に開孔を設置することを目的に、機械式継手間に開孔を有する梁が一般の有開孔梁と同等のせん断性能を有することを構造実験により検証した。さらに、本工法を適用した梁の有限要素法解析を行い、梁の性能を再現できることを確認した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 有開孔梁, せん断補強筋, カプラー, 構造実験, 有限要素法解析

1. はじめに

カプラーによる機械式継手を鉄筋コンクリート (RC) 梁に適用する場合、**図-1** のようにカプラーの長さがせん断補強筋間隔より長い場合、せん断補強筋はカプラーにかけて配筋される。その結果、適切なコンクリートのかぶり厚さを確保するため、主筋を内側に配筋する必要が生じるなど、設計上、施工上の諸問題がある。そこで、筆者らはせん断補強筋をカプラー端部に配筋する工法 (以下、本工法) の開発研究を進めている^{1,2,3)}。

とくに文献1)では本工法を採用した梁並びに有開孔梁のせん断性能について、一般の RC 梁と同等の性能が得られることを、構造実験を通して検証した。上記の研究ではとくにカプラーと開孔が近接する場合を対象に検証を進めた。そこで、本研究ではカプラー間に開孔を設置することを目的に、カプラー間に開孔を有する梁が一般の有開孔梁と同等のせん断性能を有することを構造実験により検証する。また、既往の研究および本研究で扱う、本工法を適用した各種梁を対象に有限要素法解析 (以下、FEM 解析) を行い、その性能を再現することを試みる。

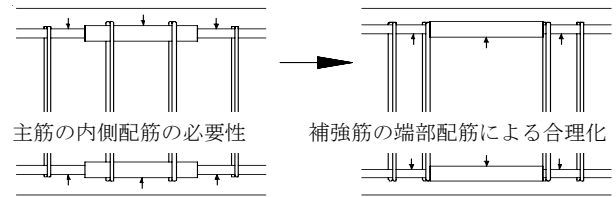
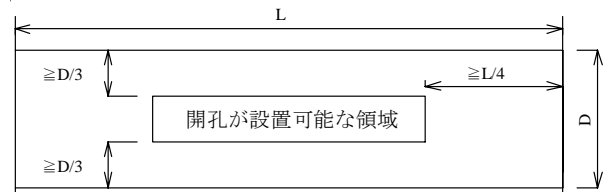
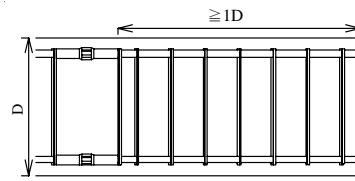


図-1 せん断補強筋の配筋方法



(a) 開孔位置



(b) 継手位置

図-2 開孔と継手位置に関する設計規定

2. 実験計画

2.1 試験体計画

10階建て事務所ビル⁴⁾の2階のRC梁を模擬した、縮尺1/2の梁試験体を計画した。実験変数は継手の有無とし、直径100mmの開孔を有する計2体の試験体を製作した。機械式継手および開孔の補強には2.2節で述べるカプラーおよび開孔補強筋を用い、それぞれ文献5), 6)の規定を満足する梁中央に設置した。**図-2**に各設計規定を示す。両試験体は、継手および開孔の設計強度が一般部の設計強度を上回るように計画した。配筋図を**図-3**に示す。

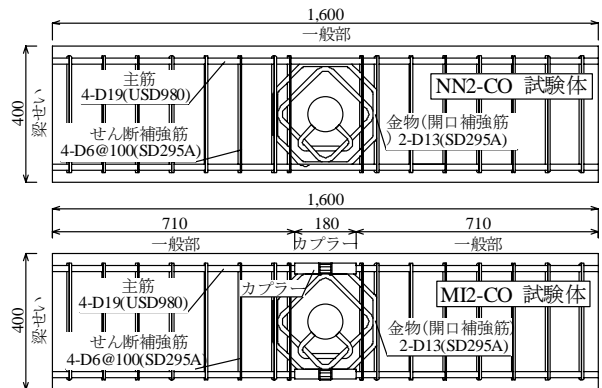


図-3 試験体配筋図

*1 豊橋技術科学大学工学部 学部生 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

*3 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 准教授・博 (工) (正会員)

*4 東京鉄鋼株式会社 開発部製品開発課 (正会員)

2.2 材料特性

試験体をせん断破壊型とするため、主筋には高強度鉄筋であるUSD980を用い、機械式継手としてカプラー(主筋はネジ節鉄筋)を使用した。実際の施工方法に合わせ2本の主筋をカプラー中央で突き合わせ、グラウト剤(エポキシ樹脂)を注入して結合した。図-4および表-1にカプラーの詳細を示す。開孔部の補強には一般に普及している補強金物を採用した。本金物はD13-295N/mm²の鉄筋を用いて加工されており、図-5に示す形状である。表-2に各試験体の製作で用いたコンクリート、鉄筋の材料試験結果をまとめる。なお、開孔補強筋は規格降伏強度295 N/mm²の1.1倍を降伏強度と見なした。

2.3 載荷計画

図-6に載荷装置を示す。同図に示すように、梁試験体を鉛直に設置し、上下のスタブを載荷装置に固定した。軸力が作用しない状態を維持しながら、正負交番で水平力を載荷した。載荷は梁(試験区間)と上スタブ境界での水平変位により制御した。載荷履歴は、表-3に示す通り、変形角(以下、R)±1/800(rad., 以下省略)のみ1サイクルとし、R=±1/400, ±1/267, ±1/200, ±1/133, ±1/100, ±1/67, ±1/50, ±1/33まで各2サイクル載荷する計画とした。尚、最終サイクルまでに両試験体の耐力が各最大耐力の80%未満に低下したことを確認した。

3. 試験結果

3.1 破壊経過と荷重-変形関係

図-7に各試験体の最終ひび割れ状況を配筋図と併せて示し、図-8に荷重-変形関係を示す。2つの試験体はほぼ同様の挙動を示した。R=1/800のサイクルで曲げひび割れ、R=1/400のサイクルで開孔部ひび割れ、R=1/267のサイクルで端部にせん断ひび割れ、R=1/200のサイクルでせん断補強筋の初降伏、圧壊の兆候はNN2-CO, MI2-COでそれぞれR=1/100, R=1/67で観測した。ここで、圧壊の兆候は縦ひび割れを観測した時点とした。R=1/50のサイクルで最大耐力の記録とともに、ほぼすべてのせん断補強筋が降伏した。また、このサイクルで主筋の付着応力が全域にわたって付着強度の計算値に到達しており、最終的には付着割裂破壊が顕著に表れた。詳細は文献3)を参照されたい。その後、R=1/33のサイクルでカバーコンクリートが剥落し、主筋が露出するに至った。R=1/33のサイクル終了までに、各試験体の耐力が最大耐力の80%を下回ったため載荷を終了した。

最終ひび割れ状況、最大耐力および荷重-変形角関係の比較より、カプラーの有無およびせん断補強筋の端部配筋によるせん断性能・変形性能への影響は観察されなかった。よって、本実験の範囲内で、カプラー間に開孔を設置しても、せん断性能に影響しないことを確認した。

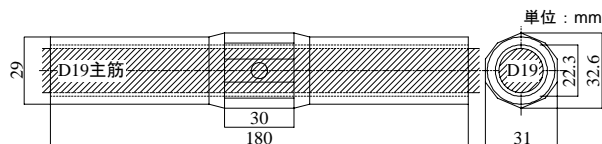


図-4 エポキシカプラー (D19 専用) の形状図

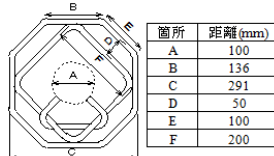


図-5 補強金物詳細

表-1 エポキシカプラー

呼び名	D19
接合鉄筋	D19
全長 (mm)	180
外径 (mm)	32.6
内径 (mm)	22.3

表-2 材料特性

コンクリート		
試験体名	NN2-CO	MI2-CO
圧縮強度 [N/mm ²]	52.3	52.8
引張強度 [N/mm ²]	3.6	3.3
弾性係数 [N/mm ²]	2.85×10 ⁴	2.82×10 ⁴
鉄筋		
呼び名	D19	D6
降伏強度[N/mm ²]	1042	332
引張強度[N/mm ²]	1135	482
弾性係数[N/mm ²]	1.67×10 ⁵	1.43×10 ⁵

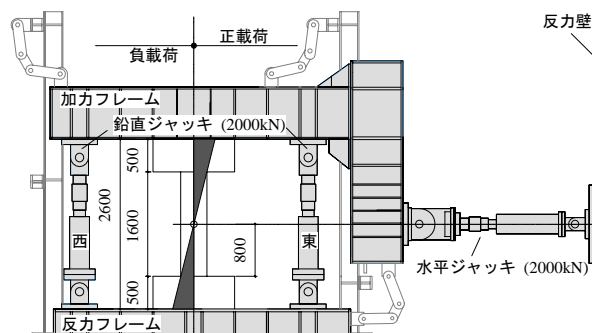
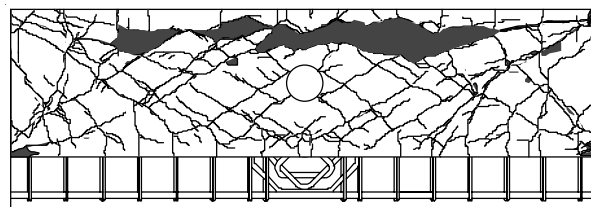


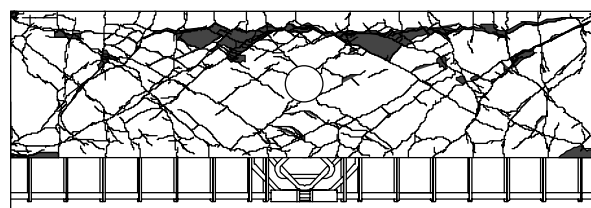
図-6 載荷装置

表-3 載荷履歴

変形角 (×10 ⁻² rad)	0.125	0.25	0.375	0.5	0.75
回数	1	2	2	2	2
変形角 (×10 ⁻² rad)	1.00	1.50	2.00	3.00	
回数	2	2	2	2	



NN2-CO



MI2-CO

図-7 最終ひび割れ状況

3.2 実験値と設計用計算値の比較

実験により得られたせん断耐力と設計用計算値を比較する。ここで荒川 mean 式⁷⁾より算出した Q_{su} と修正広沢式 Q_{suo} ⁸⁾、両試験体の実験値および安全率を表-4 に示す。各試験体の安全率はおよそ3割程度確保されており、両試験体とも安全側に評価された。

3.3 損傷状況

目視によるひび割れ幅の観察を $R=1/50$ の1回目のサイクルまで実施した。図-9 に各変形角への1回目のサイクル正側除荷時における最大残留ひび割れ幅の推移を示す。変形角 0.0 から 1.0 までは左軸を、1.0 から 2.0 までは右軸を参照されたい。 $R=1/100$ まではばらつきがあるが、いずれも 0.2mm 以下である。 $R=1/100$ 以降は、およそ同様の最大残留ひび割れ幅であった。カプラーの有無による損傷性能の有意な違いは観察されなかった。開孔周囲の損傷状況に着目すると、ひび割れ観測を通して、残留ひび割れ幅が 0.2mm を上回ることはなかった。

4. 解析方法

4.1 解析対象

解析対象とする試験体の略図を図-10 に示す。試験体は、既往の研究で用いた試験体2体¹⁾と本研究で実験対象とした2体の計4体で、試験体のパラメータは開孔の有無および継手の有無である。NN2は無開孔継手なしの試験体、MI2は無開孔継手ありの試験体、NN2-COは有開孔継手なしの試験体、MI2-COは有開孔継手ありの試験体である。なお、その他の構造詳細は共通である。

4.2 解析モデル

本研究では FINAL⁹⁾ を用いて3次元の FEM 解析を計画した。なお、解析モデルは試験体形状の対称性を利用して、断面幅方向中央で切断した1/2の部分をモデル化した。図-11に全試験体に共通の解析モデル概要、図-12に材料モデル、図-13に各試験体に固有のモデル化方法を示す。材料特性は NN2, MI2 は文献1), NN2-CO, MI2-CO は表-2を参照されたい。

(a) コンクリート

コンクリートは8節点アイソパラメトリック要素に置換した。構成則については、圧縮応力-ひずみ関係は修正 Ahmad モデル¹⁰⁾を用いた。コアコンクリートでは、3軸応力下の破壊条件として Ottesen の4パラメータモデルを用いた。また、畑中らの係数¹¹⁾により、最大強度およびひずみの上昇を考慮した。一方、カバーコンクリートは拘束による強度上昇を考慮しないモデルとした。引張側は、出雲らの提案するモデル¹²⁾の係数 $C=0.4$ (異形鉄筋を用いる場合)を採用した。コンクリートのひび割れ後のせん断伝達モデルは Al-mahaidi モデル¹³⁾を用い、ひび割れ直交方向の引張ひずみの関数としてせん断剛性の

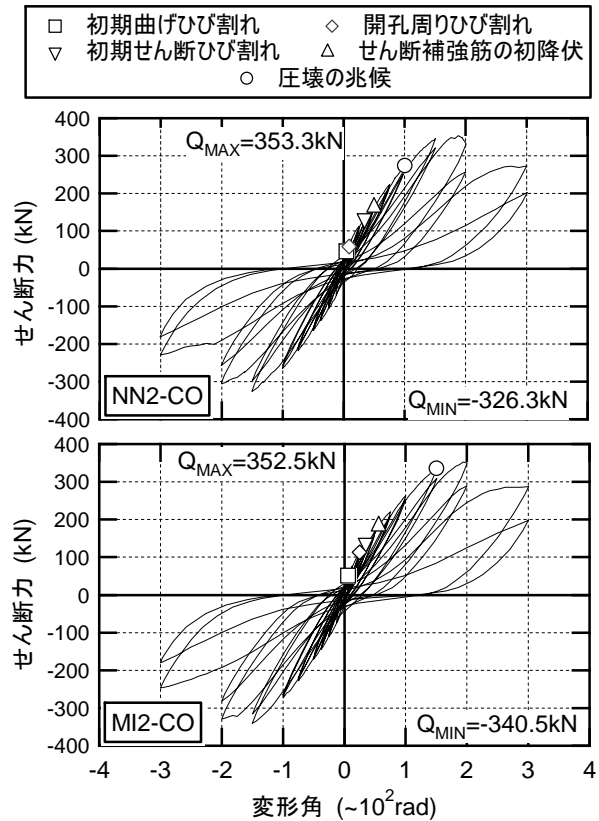


図-8 荷重-変形関係

表-4 設計用計算値との比較

試験体	実験値 (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{suo} (kN)	安全率 実験値/ Q_{su}
NN2-CO	353.3	273.0	279.0	1.29
MI2-CO	352.5	273.0	279.0	1.29

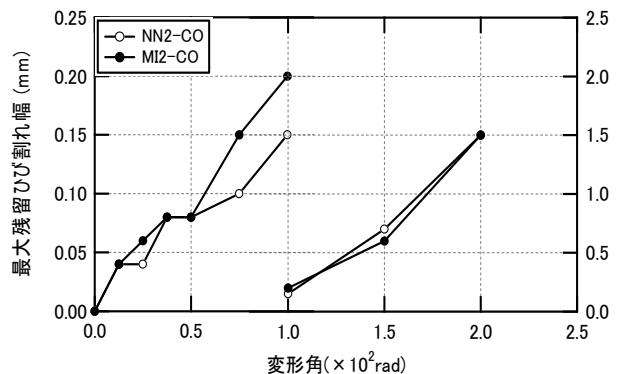


図-9 残留ひび割れの推移

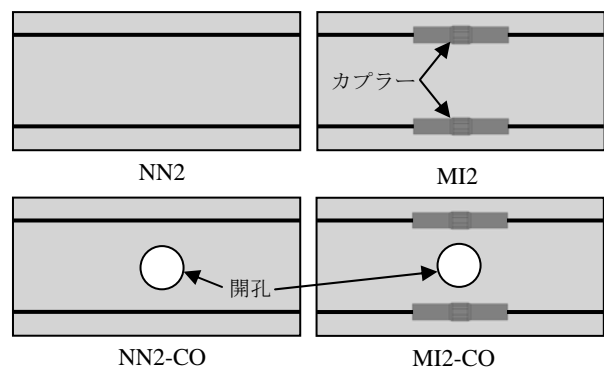


図-10 試験体略図

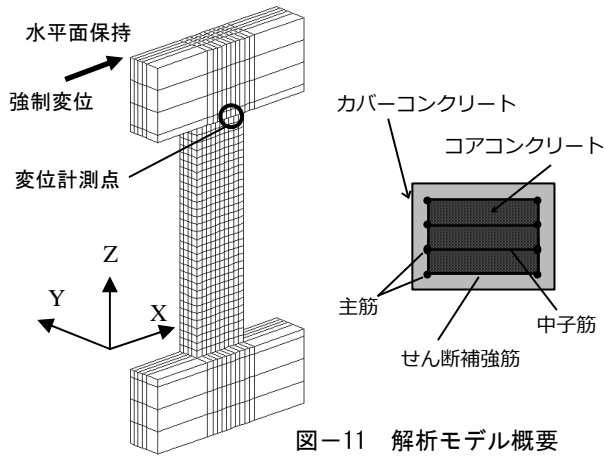


図-11 解析モデル概要

低下を表現した。また、本解析では非線形ポアソン効果を考慮するモデル¹⁴⁾とした。採用した各材料モデルを図-12a)~c)に示す。

(b) 鉄筋要素

主筋、せん断補強筋および開孔補強筋は2節点トラス要素により構成した。なお、開孔補強筋については図-13に示すように菱形に置き換えモデル化したため、実物と同等の補強効果を表現するために断面積を2倍とした。開孔部は、φ100に内接する8角形の空洞とした。構成側はbilinearモデル(降伏後の剛性低下率:1/1000)とした。

(c) カプラー

カプラー小口の支圧力の評価に重点を置き、カプラーは8節点アイソパラメトリック立体要素で構成し、支圧面積と等断面の矩形とした。構成側は鉄筋と同様である。

(d) 付着

鋼材とコンクリート間の付着は、主筋のトラス要素とコンクリート要素間およびカプラーの立体要素(長手方向側面)とコンクリート要素間に物理的な大きさを持たない接合要素を定義した。主筋とコンクリート間およびカプラー表面とコンクリート間の付着応力-すべり特性には、図-12 d)に示すCEB-FIP Model Code 1990¹⁵⁾に基づき異径鉄筋、丸鋼鉄筋の条件をそれぞれ与えた。ただし、強度到達までの特性にはElmorsiらのモデル¹⁶⁾を用いた。

(e) 支圧力

カプラー端部の支圧力を考慮するため、図-14に示すように、カプラーとコンクリート間には、圧縮側は十分な剛性を持ち、引張側は剥離が生じる物理的な大きさを持たない接合要素を挿入した¹⁷⁾。

4.3 荷重方法

荷重に際しては、下スタブ底面は固定端、上スタブ上面は水平方向に対してのみローラー支持とし、逆対称曲げモーメントを維持した。荷重方法は水平方向への単調荷重とした。ただし、水平荷重は図-11における変位計測点での変位を制御した。

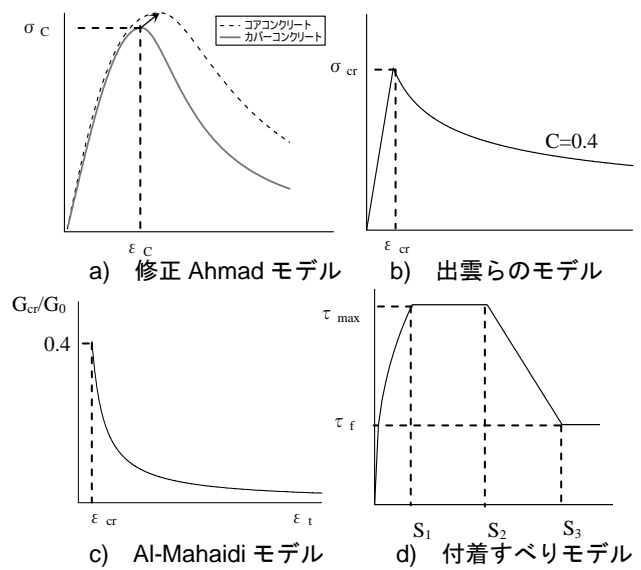


図-12 材料モデル

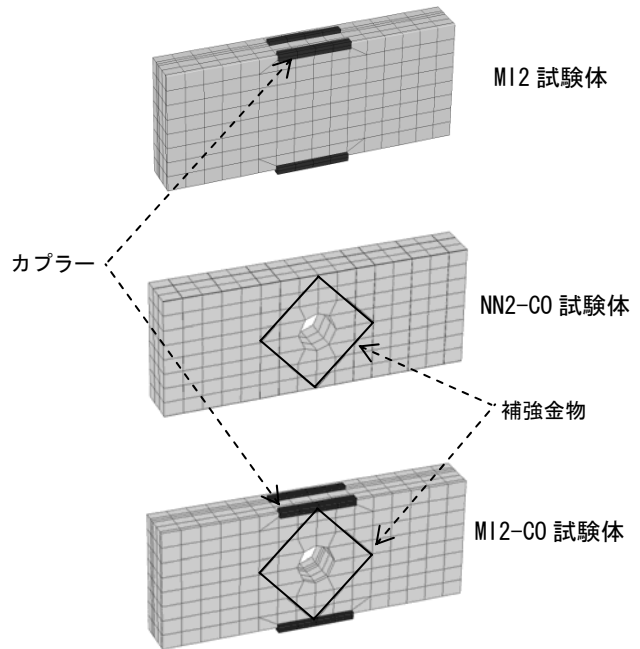
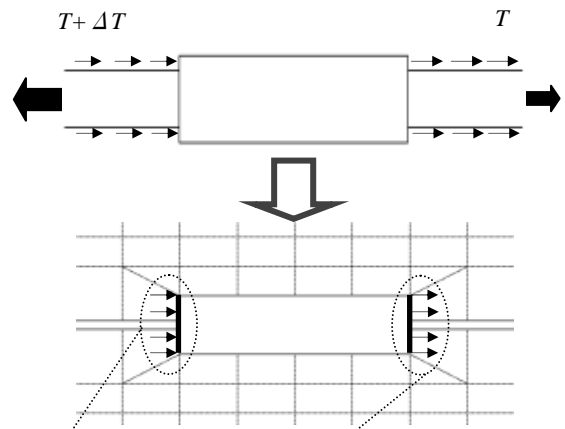


図-13 解析モデル詳細



圧縮：十分な剛性で抵抗 引張：剥離が生じる

図-14 支圧力のモデル化

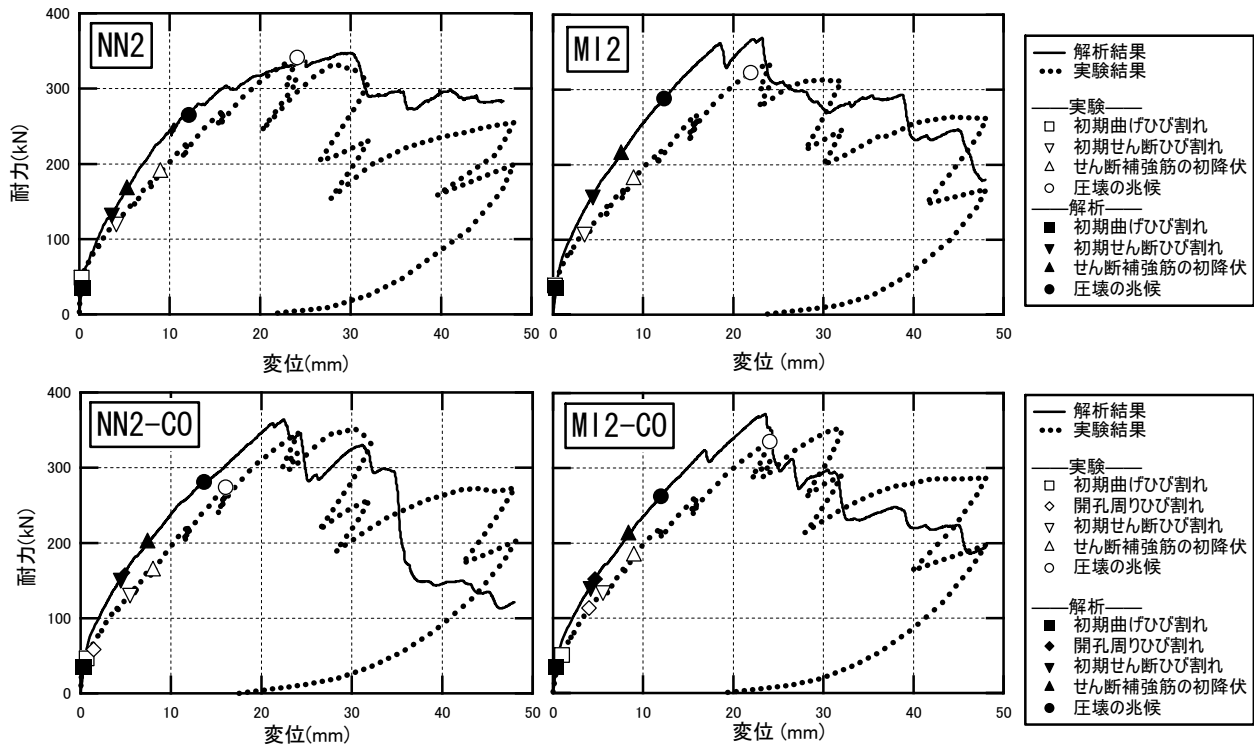


図-15 包絡線の比較

表-5 せん断耐力の実験値と解析値の比較

試験体名	NN2	MI2	NN2-CO	MI2-CO
実験値(kN)	341.3	338.3	353.3	352.5
解析値(kN)	334.4	368.9	363.9	371.8

5 解析結果

5.1 破壊経過と荷重-変形関係の比較

図-15 に解析より得られた各試験体の荷重-変形関係を実験結果の包絡線と比較する。また、表-5 では各試験体のせん断耐力の実験値と解析値を比較する。以下では、項目ごとに実験結果の再現性をまとめる。

(a) 剛性

各試験体ともに初期剛性を忠実に再現できた。曲げひび割れ後の2次剛性についても比較的良く捉えることができたが、同一変形に対する強度を若干高めに評価した。最大耐力後の軟化勾配については実験と解析が大きくかい離れた試験体がある。ただし、本解析では繰り返し荷重による影響を考慮していないため、軟化域の挙動の再現は困難と判断される。

(b) 破壊イベント

図-15 より、破壊イベントの発生順序をおよそ良好に捉えることができた。コンクリートの圧壊以外の各イベントの発生点は、実験と解析が比較的良く対応した。なお、解析でのコンクリートの圧壊の兆候は、一つのコンクリート要素が圧壊し軟化域に入った時点と定義した。同図より、コンクリートの圧壊はNN2-COを除き、解析の方がより早期に発生した。実験では目視による観測のため、両者に差異が生じたと考えられるが、圧壊が観察された箇所は、実験・解析ともに部材端部であった。開孔部の初期ひび割れ発生はNN2-COでは解析が実験よりも遅れたが、MI2-COではほぼ同変形時に発生した。

(c) 最大耐力および最大耐力時変形

表-5 より、NN2 では解析値が実験値を若干下回り、その他の試験体ではやや上回ったが、誤差は最大でも10%未満でありせん断耐力の再現精度は高い。

次に、図-15 において、最大耐力時の変形性能について着目する。無開孔の試験体では、およそ同程度の変形性能を表現できたが、有開孔の試験体では解析値が実験値の8割程度の変形性能を示した。

5.2 損傷状況の比較

図-16 に実験と解析の最大耐力時のひび割れ状況を比較する。黄色で示す要素は軟化域に入ったコンクリート要素を表す。各試験体ともに、若干の差異はあるものの、せん断ひび割れの傾きを良好に表現できた。MI2 では中央部が損傷しなかったことが再現できたが、NN2 では軽度の損傷が生じた。これはNN2のみ最大耐力を記録した変形角が大きいことが原因だと考えられる。

次に、NN2-CO、MI2-COの開孔部周囲に着目する。開孔部周囲のせん断ひび割れの傾きや、発生箇所を良好に再現できた。また、継手の有無により損傷性能に有意な違いがなかった実験結果も、およそ再現できた。しかし、全試験体に共通して、解析では部材端部の曲げによる損傷を過大に評価する結果となった。

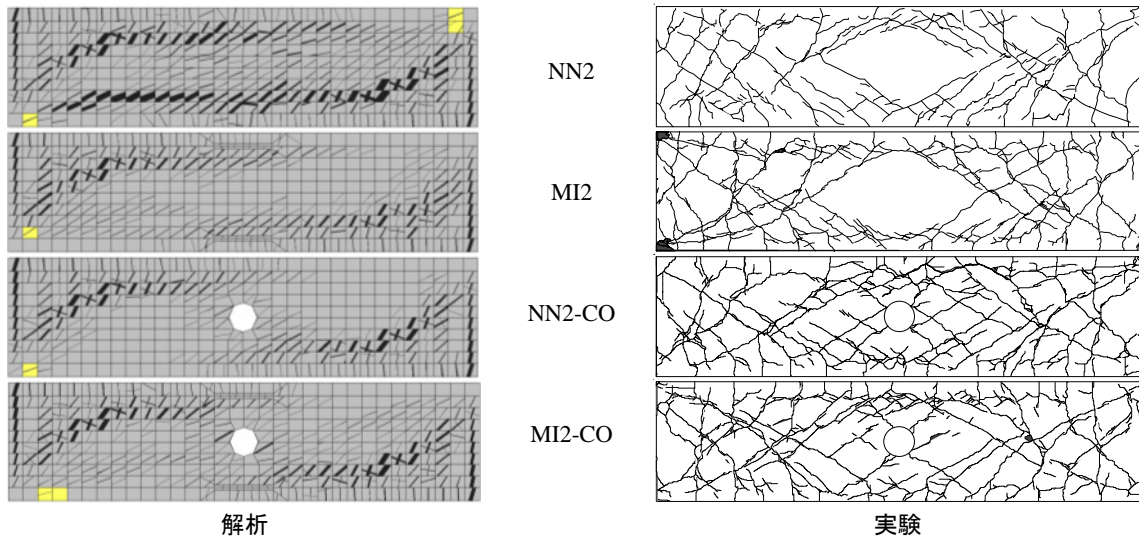


図-16 損傷状況の比較 (最大耐力時)

6 まとめ

カプラーによる機械式継手間に開孔を有する梁と、一般の有開孔梁の構造実験を行った。また、カプラーと開孔の有無をパラメータとする3次元FEM解析を行い、実験との整合性を比較した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

1. カプラー間に開孔を有する梁のせん断性能（せん断強度と損傷状況）は一般の有開孔梁と同等であることを確認した。
2. FEM解析よりせん断性能、破壊イベントの発生点を比較的良好に評価できた。
3. 各試験体の損傷状況について、FEM解析は試験体のせん断による損傷を良好に再現できたが、部材端部の曲げひび割れを過度に評価する結果となった。

参考文献

- 1) 笠原崇佑, 若松希旭, 真田靖士, 足立智弘: 機械式継手と開孔が近接するRC梁のせん断性能に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.253-258, 2011.7
- 2) 小西大介, Nguyen Khanh, 真田靖士, 足立智弘: カプラーを有するRC梁のせん断性状に補強筋配置が与える影響の実験的検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.661-666, 2011.7
- 3) 笠原崇佑, 村山峻一郎, 真田靖士, 足立智弘ほか: 機械式継手間に開孔を有するRC梁の静的荷重実験, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.403-406, 2011.8
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算用資料集, pp.213-280, 2002.1
- 5) 日本鉄筋継手協会: 鉄筋継手工事標準仕様書機械式継手工事, 2009.9
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造配筋指針・同解

説, 2003.11

- 7) 国土交通省住宅局建築指導課ほか: 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2007
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010.2
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V99 HELP
- 10) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163-170, 1995.8
- 11) 畑中重光ほか: 低側圧3軸圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次論文集, 12-2, pp.719-724, 1990
- 12) 出雲淳一ほか: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文集, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 13) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 14) 長沼一洋: 非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp.109-116, 1996.7
- 15) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993
- 16) Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K.: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000.
- 17) 梁生鈿, 柏崎隆志, 野口博: 機械式継手を有するRC柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.295-300, 2011.7