

論文 機械式定着工法を基礎梁主筋に用いた場合の追加横補強筋の効果

田中 彼方*1・杉本 訓祥*2・大西 直毅*3

要旨：日本建築学会による鉄筋コンクリート造配筋指針においては、基礎梁主筋に機械式定着工法を用いて柱断面内に定着を図る場合、下端主筋の上下に追加横補強筋を1組配置することが述べられている。本報では定着位置による部分架構の性能の違いおよび追加横補強筋の効果を検討することを目的として、非線形FEM解析によるパラメトリックスタディを実施した。柱断面外へ定着を行った仮想試験体では最大耐力の向上が見られ、定着破壊防止に一定の効果が確認できた。一方で追加横補強筋を配した仮想試験体では、定着部周辺の補強筋のひずみや梁主筋の降伏状況において改善が見られたが、最大耐力への影響は見られなかった。
キーワード：機械式定着, 基礎梁, 追加横補強筋, 柱断面外定着, コーン破壊

1. はじめに

施工性の向上を目的に、RC 建造物の柱梁接合部において、主筋端部に機械式定着板を用いて直線定着とする工法が増えており、近年基礎梁主筋における使用例も増えてきている。一方で、その場合の指針については曖昧になっている現状がある。『鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説¹⁾』(日本建築学会)では、基礎梁主筋に機械式定着工法を用いて柱断面内に定着を行う場合、下端主筋の上下に1組の追加横補強筋を配する旨が記されているが、追加横補強筋の必要性の根拠が不明確であり、追加横補強筋の量も明示されていない。

このような背景から、筆者らは基礎梁主筋に機械式定着工法を用いた杭頭接合部について解析的な検討を行ってきた²⁾。本報では既往実験を対象とした再現解析と、パラメトリックスタディについて述べる。

杭頭接合部の力学的特性が適切に再現された解析モデルを作成することを目的として、基礎梁主筋に機械式定着工法が用いられた杭頭接合部を対象とした既往実験³⁾の追跡を行った。

2.1 解析概要

(1) 試験体

試験体形状寸法を図-1に、使用材料の特性を表-1に、試験体一覧を表-2に示す。なお、図-1、表-1および表-2では、3章における仮想試験体も併せて示している。本研究では追加横補強筋の記述が下端主筋に限定されたものであり、下端主筋定着部を対象とするため、再現解析では既往実験における基礎梁主筋定着長さを通常程度の $0.8D$ (D は柱せい)としたPJ1Lと、定着長さを $0.5D$ としたPJ2Sの2体の試験体を対象とした。

2. 既往実験の再現解析 (ケーススタディ)

以降のパラメトリックスタディにおいて基準となる、

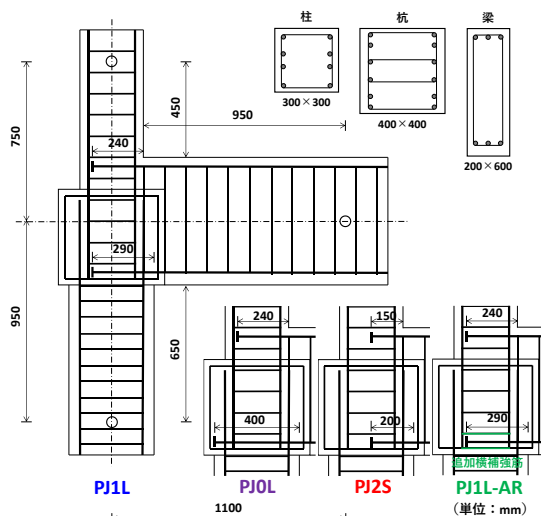


図-1 試験体形状 (柱曲げ破壊型)

表-1 材料特性

(既往実験試験体及び柱曲げ破壊型仮想試験体)

(a) コンクリート [N/mm²]

試験体	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
PJ0L	35.7	2.7 (1.97*)	2.67×10^4
PJ1L			
PJ1L-AR	37.9	2.5 (2.03*)	2.72×10^4
PJ2S			

*解析には $\sigma_t = 0.33\sqrt{\sigma_B}$ より計算した値を用いた。

(b) 鉄筋 [N/mm²]

部位	降伏強度	ヤング係数
梁主筋 D19 (SD345)	395	1.86×10^5
柱・杭主筋 D13 (SD345)	344	1.89×10^5
補強筋 D6 (SD295A)	389	1.98×10^5

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 講師 博士 (工学) (正会員)

(2) モデル化手法

解析はコンクリート系部材の非線形有限要素解析プログラム『FINAL⁴⁾』を用いて、3次元の解析を行った。図-2に解析モデル例を示す。解析モデルは試験体の対称性を考慮して、試験体の断面幅方向中央で分割した1/2部分をモデル化し、切断面の節点はすべて幅方向変位を拘束した。境界条件は実験と同様に柱頭をピン・ローラー支持、杭脚をピン支持として梁端を加力する条件とし、各部材を線材置換したときの切断面上の節点に拘束条件を付与および加力を行っている。その際、支持点および加力点と断面幅方向に同一座標上にある節点は、これら切断面上の節点に対して従属するように条件を与えた。

コンクリートには六面体要素を用い、柱・杭・基礎梁の主筋、せん断補強筋及びパイルキャップの補強筋は線材要素（トラス要素）でモデル化した。なお、柱・杭・基礎梁主筋についてはコンクリート要素と線材要素の間

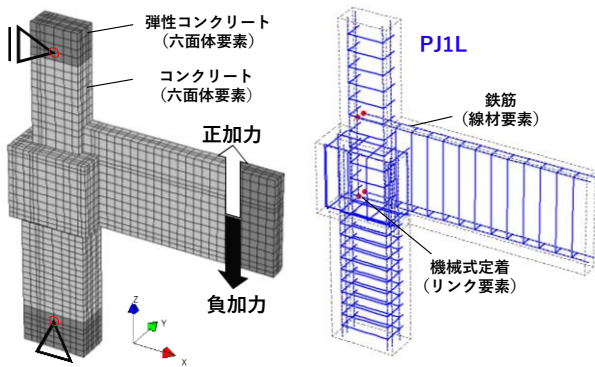


図-2 解析モデル(PJ1L)

に接合要素（ライン要素）を用いて付着すべりを考慮しているが、その他の補強筋についてはコンクリート要素と共有節点とし、付着すべりを考慮していない。また、機械式定着部についてはリンク要素を用い、コンクリート要素に対して剛接としている。

(3) 材料構成則

コンクリートは基本的な非線形特性が考慮されたものとした。具体的にはテンションスティフニング特性には出雲らのモデル⁵⁾を用い、ひび割れ後の引張軟化特性を考慮している。圧縮側の応力度ひずみ度曲線については修正 Ahmad モデル⁶⁾を用い、長沼の提案式⁷⁾によりひび割れ後の圧縮強度および圧縮強度時ひずみを低減している。また、コンクリートの破壊条件は Ottosen の提案式⁸⁾に従った。圧縮強度到達後のひずみ軟化域モデルには修正 Ahmad モデル⁹⁾を用い、ひび割れ後のせん断伝達特性には長沼らの提案したモデル⁷⁾を用いた。ライン要素における付着応力度—すべり量関係には Naganuma らのモデル⁹⁾を用い、その際付着強度点におけるすべり量は 1.0mm とし、部材の付着強度は付着信頼強度¹⁰⁾、接合部内の付着強度は接合部内通し主筋の付着強度¹⁰⁾と同様に算定した。

(4) 加力方法

解析では実験と同じように柱をピン・ローラー支持、杭をピン支持として、梁に対して変位制御による正負繰り返し漸増変位を与えた。したがって、梁に加える鉛直力の反力は杭に軸力として作用するようになっており、柱には軸力は作用していない。加力履歴についても実験

表-2 仮想試験体一覧

試験体名	柱曲げ破壊型仮想試験体				梁曲げ破壊型仮想試験体			
	PJ0L	PJ1L	PJ2S	PJ1L-AR	PJ0L-CF	PJ1L-CF	PJ2S-CF	PJ1L-CF-AR
柱	300mm×300mm				400mm×400mm			
主筋／補強筋	4-D13 (SD345) / 2-D6@100*		同左 +2×2-D6		4-D22 (SD490) / 4-D10@75*		同左 +2×2-D6	
杭	400mm×400mm				400mm×400mm			
主筋／補強筋	6-D13 (SD345) / 4-D6@75				6-D22 (SD490) / 4-D10@75			
梁	200mm×600mm				300mm×600mm			
主筋／補強筋	3-D19 (SD345) / 2-D6@100				3-D22 (SD490) / 3-D13@75			
定着長さ(下端)	400mm	290mm	200mm	290mm	400mm	290mm	200mm	290mm

*接合部補強筋は全ての仮想試験体で 2-D6@100 とした。

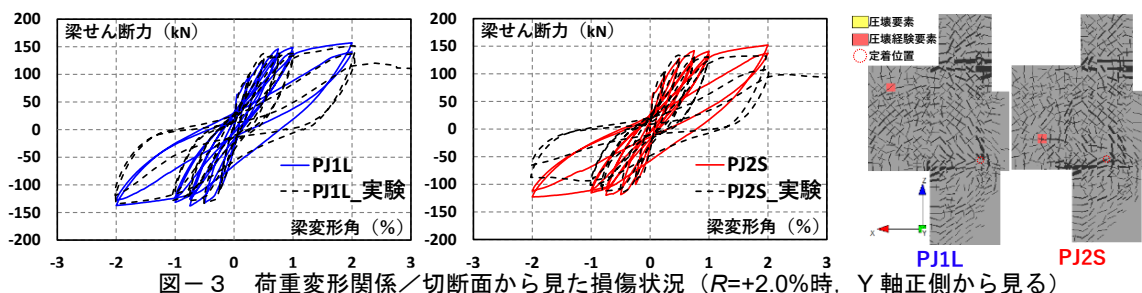


図-3 荷重変形関係／切断面から見た損傷状況 (R=+2.0%時, Y軸正側から見る)

と同様に、加力点変位を柱の材軸から加力点までの距離 1100mm で除した値を変形角 R とし、 $R=0.25\%$, 0.5% , 0.75% , 1.0% , 2.0% , 3.0% となる点を各サイクルのピークとし、 $R=0.75\%$ からは2回ずつ繰り返して加力を行った。

2.2 解析結果

解析結果の荷重変形関係および損傷状況を図-3に示す。一般に、FEM 解析においては定着部の抜け出しによる破壊に伴う急激な耐力低下を再現することが難しく、実験で定着破壊が起きた PJ2S の負側においては、解析は耐力を過大評価するとともに、低下傾向は必ずしも再現できていない。一方で、本研究で対象としている正側（下端引張）の加力においては、耐力を比較的精度よく再現できている。また、損傷状況についても、杭への損傷の広がり方に2体で差異が見られる。すなわち、定着長さの違いによる、定着部を起点とした斜めひび割れ（コーン状破壊面）に違いが生じる様子はよく表現できている。以上の結果から本解析モデルは、本研究で対象とする下端引張の加力においては、実現象をよく追跡できており、追加横補強筋の有効性の検討が可能と判断した。

3. パラメトリックスタディ

3.1 解析概要

梁主筋定着部に最も厳しい応力状態が生じる状況での追加横補強筋の効果を確認することを目的として、柱曲げ破壊型の試験体 PJ1L, PJ2S に対して、梁曲げ破壊型（一部はコーン破壊を想定）の仮想試験体 PJ1L-CF, PJ2S-CF を作成した。さらに PJ1L, PJ1L-CF について梁下端主筋定着位置を背面側の柱断面外まで伸ばし、定着長さを $1.3D$ とした仮想試験体 PJ0L, PJ0L-CF と、梁下端主筋定着部の上下に1組の追加横補強筋を配した仮想試験体 PJ1L-AR, PJ1L-CF-AR を作成した。試験体一覧を表-2に、梁曲げ破壊型仮想試験体の使用材料の特性を表-3に、各種強度計算値を表-4に示す。また梁曲げ破壊型仮想試験体の試験体形状を図-4に、解析モデル

表-3 材料特性（梁曲げ破壊型仮想試験体）

(a) コンクリート [N/mm²]

試験体	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
全試験体	36.0	1.98*	2.59×10^4 *

*引張強度は $\sigma_t = 0.33\sqrt{\sigma_B}$ より、ヤング係数は文献11)より圧縮強度から算定した。

(b) 鉄筋 [N/mm²]

部位	降伏強度	ヤング係数
主筋 D22 (SD490)	539*	2.05×10^5
補強筋 D6,D10,D13 (SD345)	379.5*	2.05×10^5

*規格値の1.1倍とした。

例を図-5に示す。なお、追加横補強筋の位置については、上側は帯筋の中で最も下端主筋に近いものと同じ位置に、下側は基礎かご筋と同じ位置にそれぞれ帯筋と同種の鉄筋を配筋した。その他の解析概要については再現解析と同様とした。

3.2 解析結果

(1) 荷重変形関係

各試験体の荷重変形関係を図-6に、切断面から見た損傷状況を図-7に示す。全体的に想定した破壊時の梁せん断力に達しており、概ね想定した破壊モードとなった。特に PJ2S-CF については定着長さの影響で、梁曲げ耐力に達しておらず、損傷状況を見ても定着部の外側は大きく開いており、定着部の内側はコンクリートの圧壊が見られるため、コーン破壊を生じたと判断した。また、柱曲げ破壊型・梁曲げ破壊型どちらのケースでも、定着長さが長い順に最大耐力が大きい結果となった。一方で追加横補強筋の有無に関しては、両ケースとも、最大耐力に対する影響はほとんど見られなかった。損傷状況については、特に梁曲げ破壊型の仮想試験体では定着長さの違いによる損傷状況の差が強く見られた。

また、最大耐力余裕度（解析値/計算値）と、各種破壊モードの耐力余裕度の関係を図-8に示す。コーン破壊を含めた接合部の破壊に対する余裕度が大きいほど最大耐力余裕度も大きいことが見て取れ、定着部や接合部

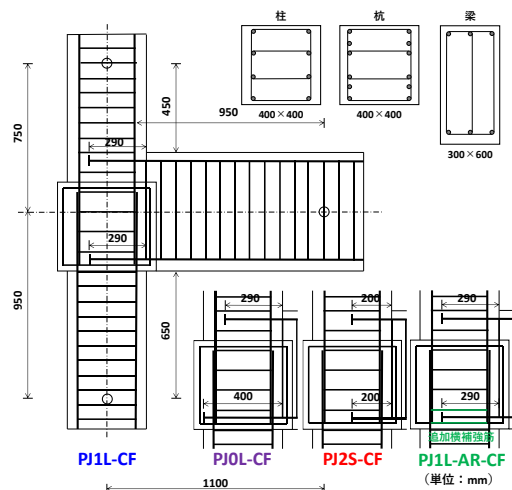


図-4 試験体形状（梁曲げ破壊型）

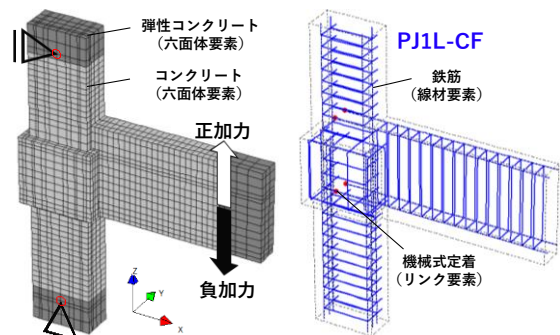


図-5 解析モデル(PJ1L-CF)

の性能と部分架構の性能との間には相関があることが示唆された。コーン破壊耐力に余裕があるPJ1L-CFとPJ1L-CF-ARの比較では、柱断面内定着としても、追加横補強筋は最大耐力を向上させる効果は見られなかった。

(2) 鉄筋の降伏状況

各試験体の鉄筋の降伏状況を図-9に示す。柱曲げ破壊型では、全ての試験体で1回目の+0.75%のサイクルで柱と杭の主筋が降伏した。また、梁曲げ破壊型では定着

長さの短いPJ2S-CFを除いて梁主筋が降伏したものの、PJ1L-CFが1回目の+2.0%のサイクルだったのに対して、PJ0L-CFとPJ1L-CF-ARは1回目の+1.0%のサイクルで梁下端主筋が降伏した。これは、定着長さが長いことや追加横補強筋を配したことで下端主筋の抜け出しが抑制され、同一変形時に主筋に生じる力がPJ1L-CFに比べて大きくなったためと考えられる。したがって、特に梁曲げ破壊型の架構では、定着長さや追加横補強筋は梁主筋

表-4 仮想試験体の最大耐力値および各種強度計算値 [kN] ()内の値は各破壊に対する余裕度

試験体	柱曲げ破壊型仮想試験体				梁曲げ破壊型仮想試験体			
	PJ0L	PJ1L	PJ2S	PJ1L-AR	PJ0L-CF	PJ1L-CF	PJ2S-CF	PJ1L-CF-AR
最大耐力 (解析値)	162.7	157.1	152.1	159.6	379.9	373.2	305.9	374.6
梁曲げ耐力	194.5 (1.35)				357.8 (1.00)			
柱曲げ耐力	144.0 (1.00)				917.0 (2.56)			
杭曲げ耐力	144.6 (1.00)				816.1 (2.28)			
梁せん断耐力	332.6 (2.31)				1084.7 (3.03)			
柱せん断耐力	281.0 (1.95)				1096.3 (3.06)			
杭せん断耐力	337.6 (2.34)				1225.0 (3.42)			
接合部せん断強度	749.3	543.2	374.6	543.2	861.5	624.6	430.7	624.6
接合部入力せん断力	165.9				412.1			
接合部余裕度	(4.52)	(3.27)	(2.26)	(3.27)	(2.09)	(1.52)	(1.05)	(1.52)
接合部降伏 β_j	(1.26)	(1.03)	(0.82)	(1.16)	(1.36)	(1.10)	(0.85)	(1.14)
コーン破壊定着耐力	1061.5	757.7	512.6	792.6	1187.1	882.0	583.1	916.0
梁降伏時引張力	340.1				625.8			
コーン破壊余裕度	(3.12)	(2.23)	(1.51)	(2.33)	(1.90)	(1.41)	(0.93)	(1.46)

*全て正側加力時(下端引張時)で計算し、曲げ耐力とせん断耐力はその時の梁せん断耐力に換算して表記している。曲げ耐力は略算式¹²⁾より、部材および接合部のせん断強度とコーン破壊定着耐力は文献(10)を参照して、また接合部降伏に伴う強度低下率 β_j は文献(13)を参照して算定した。

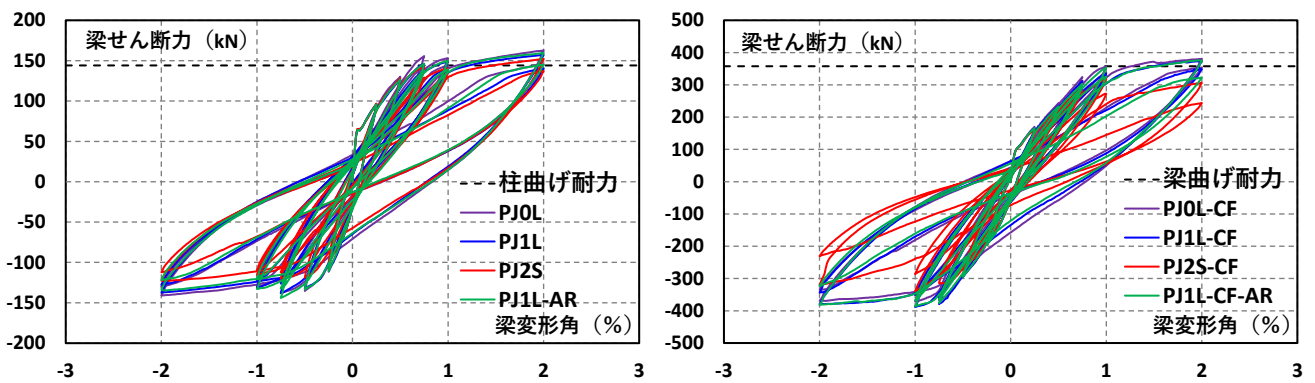


図-6 荷重変形関係

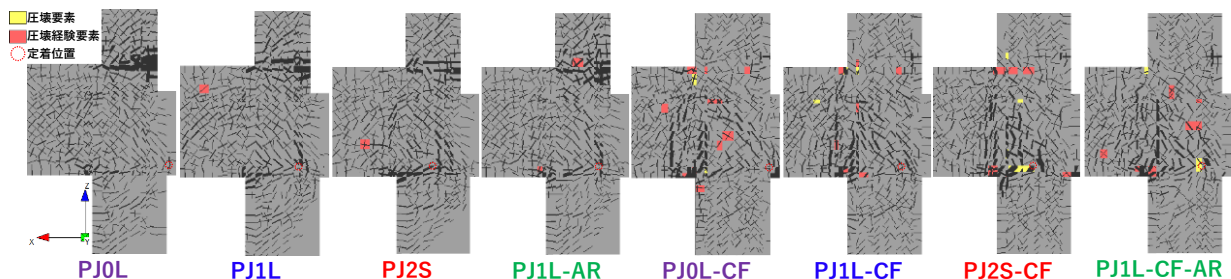


図-7 切断面から見た損傷状況 (R=+2.0%時, Y軸正側から見る)

の降伏やその変形角に影響を与える可能性が示唆された。

また、補強筋の降伏状況を見ると、追加横補強筋を配した試験体の方が、周辺の補強筋の降伏がやや抑えられてはいるが、梁曲げ破壊型仮想試験体では、全体的に補強筋が降伏に至る荷重レベルであったため、追加横補強筋による周囲の補強筋の負担を明確に低減する効果は見られなかった。

(3) 梁下端主筋周辺の補強筋の応力負担

梁下端主筋定着端および補強筋の負担引張力分布を図-10に、補強筋のひずみ分布を図-11に示す。なお、定着端の負担引張力は、定着端全体で負担する引張力を、補強筋の引張力は、中子筋を含めた補強筋全体で負担する引張力を、補強筋のひずみは補強筋1本あたりの平均ひずみを示している。

鉄筋の負担引張力を見ると、柱断面外に定着を行ったPJ0L, PJ0L-CFでは付着長さが長くなるため、結果として定着端が負担する引張力が小さくなっており、反対にPJ2S, PJ2S-CFでは定着端の引張力が大きくなっている。またPJ0L, PJ0L-CFでは梁下端主筋定着部周辺の補強筋の負担引張力やひずみがPJ1L, PJ1L-CFに比べて大幅に低減されていることがわかる。以上のことから、柱断面外定着は、定着長さの効果として定着端部の応力を小さ

くし、定着部周辺の損傷を抑制する効果もあり、抜け出し防止の観点から非常に有効であるといえる。

一方、PJ1L-AR, PJ1L-CF-ARにおいて追加横補強筋は、同じ位置の補強筋が負担する引張力と同程度の引張力を負担しており、PJ1L, PJ1L-CFと比較しても、下端主筋定着部周辺の補強筋の負担を軽減するほどの効果は見られなかった。補強筋のひずみ分布を見ても、追加横補強筋により周囲の補強筋のひずみがやや軽減されていることから、下端主筋定着部の損傷の抑制効果はあると考えられるが、有効性という点では柱断面外定着ほどではなかった。

4. まとめ

本報では、基礎梁主筋に機械式定着工法を用いた杭頭接合部について、非線形FEM解析によるパラメトリックスタディを実施し、定着長さや追加横補強筋の効果を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 再現解析においては、全体的に定着破壊に伴う耐力低下を再現できないものの、本研究で対象としている下端引張の範囲において、荷重変形関係および損傷状況ともに良い精度のモデルが得られた。
- (2) パラメトリックスタディでは、コーン破壊や接合部

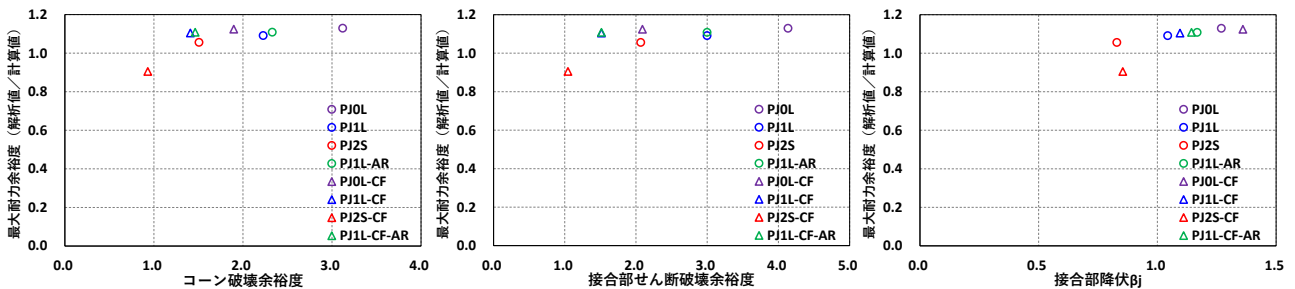


図-8 耐力余裕度関係

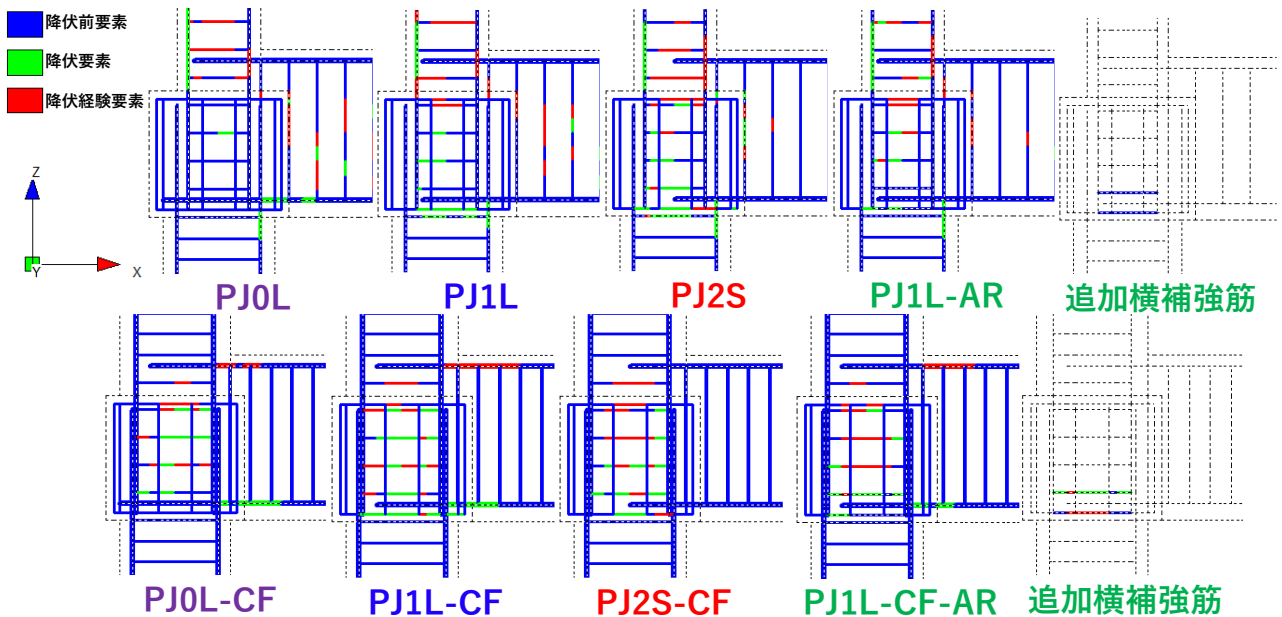


図-9 主筋と補強筋の降伏状況 (R=+2.0%時)

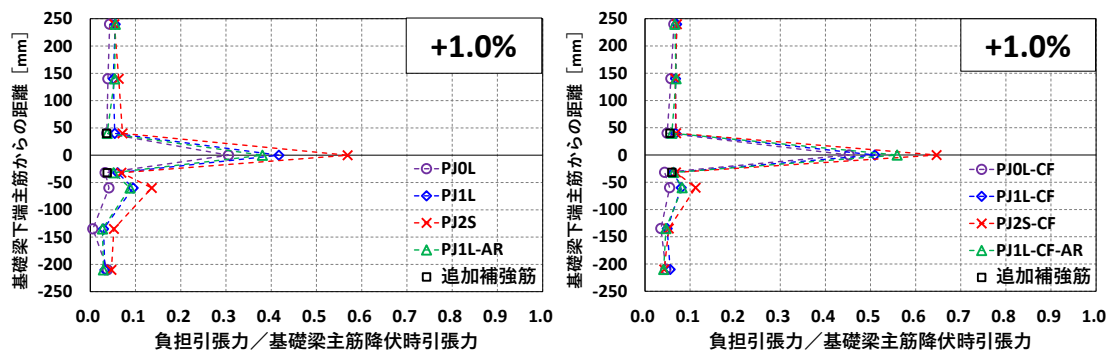


図-10 基礎梁主筋と補強筋の負担引張力 ($R=+1.0\%$ 時)

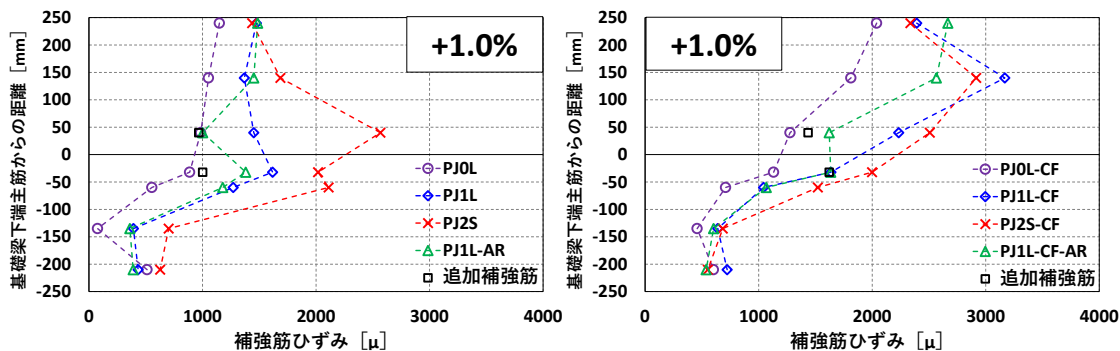


図-11 補強筋のひずみ分布 ($R=+1.0\%$ 時)

の破壊に対する余裕度大きい試験体ほど、最大耐力の解析値が計算値を上回る傾向にあり、定着部の性能は部分架構の性能と相関があることが示された。

- (3) 柱断面外への定着は部分架構の最大耐力の向上および定着破壊防止の観点から非常に有効であることが示された。
- (4) 追加横補強筋は、本報のように梁曲げ破壊型（コーン破壊耐力に余裕がある場合）の架構では、主筋が降伏する変形角や補強筋のひずみを小さくし、ある程度応力を負担することが確認されたものの、最大耐力を向上させる効果は見られなかった。

謝辞：本研究は、ニューテック研究会に設置された「機械式定着工法研究委員会」の研究の一部として実施した。関係各位の研究活動支援に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説，2021
- 2) 田中彼方，杉本訓祥，大西直毅，迫田丈志，清原俊彦，小池拓矢：機械式定着工法を用いた RC 柱－基礎梁部分架構に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp. 419-420, 2024.7
- 3) 大西直毅，西村康士郎，山口悠太：機械式定着具を梁主筋に用いた外柱基礎梁接合部における梁主筋定着長さとのせん断補強筋比の影響，日本建築学会構造系論文集，第 743 号，pp. 167-177, 2018.1
- 4) CTC 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINALhttp://www.engineering-eye.com/FINAL/index.html

(閲覧日：2024/12/25)

- 5) 出雲淳一，島弘，岡村甫：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，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9
- 6) 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
- 7) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文報告集，第 421 号，pp.39-48，1991.3
- 8) Ottosen, N. S. : A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp. 527-535, Aug. 1977
- 9) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H. : Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August., 2004
- 10) 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
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所，建築研究所：2020 年版建築物の構造関係技術基準解説書，2020
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説，2021