

論文 十字型試験体を用いた場所打ち鉄筋コンクリート杭の機械式定着に関する実験的研究

大石 健介*1・宇野 瑞穂*2・崔 琥*3・権 淳日*4

要旨：本研究では、杭主筋の従来型定着から機械式定着への代替可能性を確認するために、杭主筋の従来型および機械式定着を有する十字型（パイルキャップを含む両側基礎梁・上部柱・下部杭）部分架構試験体を製作し、静的正負交番繰り返し載荷実験を実施した。その結果、杭主筋の定着工法の違いによらず両試験体における各部材の破壊性状、荷重－変形関係やパイルキャップ内の杭主筋の曲率分布がほぼ同様であったため、本研究で用いた機械式定着工法は従来型定着と同程度の定着性能を有していることを確認した。

キーワード：場所打ち鉄筋コンクリート杭, 杭主筋, 機械式定着工法, 十字型試験体, 破壊性状

1. はじめに

中高層建物の大半は終局時における杭の安全性の検討を行うこととなっている。その結果、杭の曲げ耐力を高めるために、杭主筋量が大幅に増えることとなるが、それがパイルキャップ内の柱主筋、柱補強筋、梁主筋、はかま筋、ベース筋、振れ止め筋などに干渉する可能性が高くなり、配筋施工が困難になりつつある。その解決策の1つとして杭主筋の従来型の180°フック定着工法を機械式定着工法に代替することがあげられる。

そこで本研究では、杭主筋の従来型定着工法から機械式定着工法への代替可能性を確認するために、杭主筋における従来型および機械式の定着工法を用いた十字型（パイルキャップを含む両側基礎梁・上部柱・下部杭）部分架構試験体を製作し、静的正負交番繰り返し載荷実験を実施した。

本論文では、杭主筋の定着方法の違いによる各部材の荷重－変形関係、破壊性状および杭主筋の曲率分布などを比較・検討し、杭主筋の機械式定着工法の有効性を確認する。

2. 実験概要

2.1 試験体の詳細

本研究の対象建物は、文献1)の「付2. 構造設計例」を準用し、各部材の寸法および配筋を定めた。さらに、文献1)と同様な寸法を有する杭およびパイルキャップの配筋詳細は文献2)および文献3)を参照した。実大および試験体の各部材の寸法、配筋および強度を表-1に示す。試験体の大きさは実験施設の制約上、1/2スケールとした。各部材の長さはモーメントが0となる点が加力点あるいは支点になるように設計した(後述の図-2参照)。特に、杭は全長30mと想定し、試験体での長さは反曲点位置である2.35m(表-1参照)と想定した。試験体の設計では、実大の主筋比、せん断補強筋比、軸力比、せん断余裕度が同様になるように配筋および軸力を決めた。実大および試験体の各部材はすべて曲げ降伏先行型($Q_{mu} < Q_{su}$)であり、架構全体としては杭頭降伏先行型である。ここで、各部材の強度計算では、一般的な割増率を考慮し、コンクリートの圧縮強度は設計規準強度の1.3倍、鉄筋の降伏強度は規格降伏点強度+49N/mm²とした。

表-1 実大および縮小部材の寸法、配筋および強度

部材		寸法 (mm)	内法 長さ (mm)	主筋	主筋比 (%)	せん断 補強筋	補強筋比 (%)	曲げ終局 モーメント M_u (kN・m)	曲げ終局時 せん断力 Q_{mu} (kN)	せん断 終局強度 Q_{su} (kN)	せん断 余裕度 Q_{su}/Q_{mu}
杭	実大	φ1200	2350	20-D25	0.90	D16@100	0.42	2308.5	982.3	2221.8	2.26
	1/2	φ600	1175	16-D13	0.90	D10@70	0.43	267.0	227.2	545.9	2.40
基礎梁	実大	600×1500	2050	5,2-D32	1.24	4-D13@200	0.42	2801.3	1366.5	2361.0	1.73
	1/2	300×750	1025	5,2-D16	1.24	4-D6@100	0.42	350.5	341.9	590.9	1.73
柱	実大	900×900	1300	20-D32	1.96	4-D19@100	1.27	2529.4	1945.7	2603.0	1.34
	1/2	450×450	475	20-D16	1.96	4-D10@50	1.27	316.2	665.7	746.4	1.12
パイル キャップ	実大	1500×1500	1500	12-D13(6+6)	0.71	D13@200	0.06	-	-	4001.3	-
	1/2	750×750	750	8-D6(4+4)	0.71	D6@100	0.06	-	-	1025.9	-

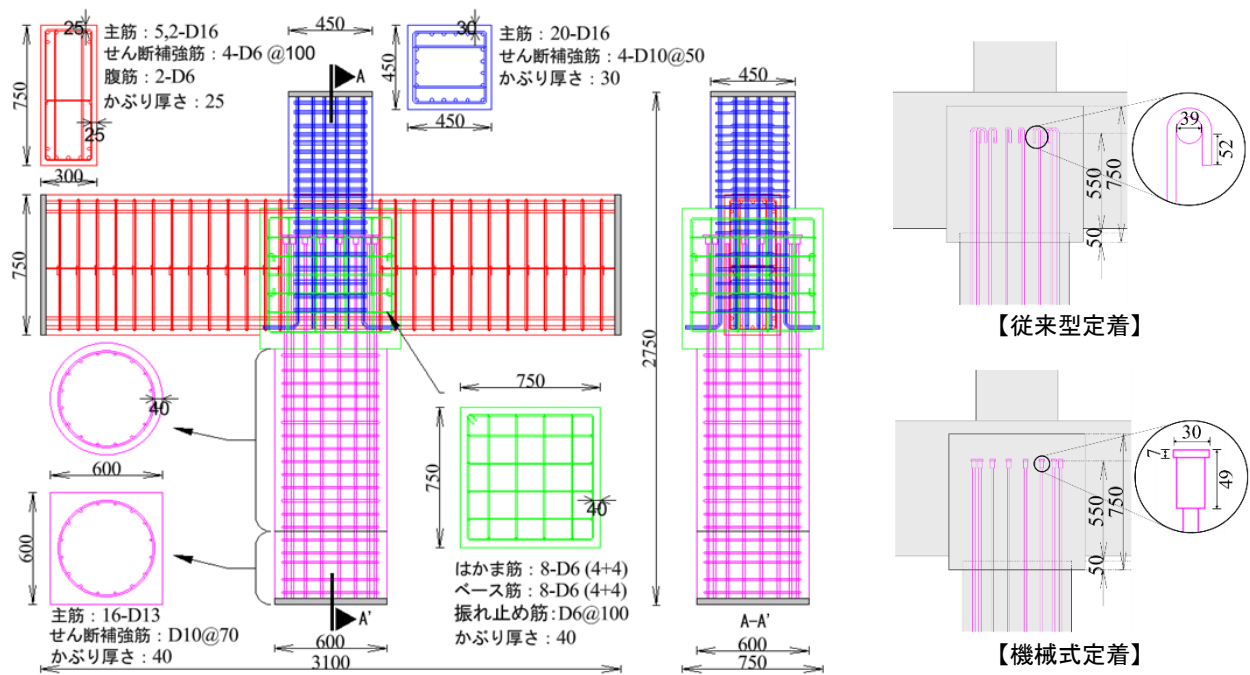
* 表中のパイルキャップにおいて、主筋ははかま筋とベース筋を、せん断補強筋は振れ止め筋を示す。

*1 静岡理科大学大学院 理工学研究科 システム工学専攻 (学生会員)

*2 静岡理科大学 理工学部建築学科 (学生会員)

*3 静岡理科大学 理工学部建築学科 教授 博士(工博) (正会員)

*4 大阪工業大学 工学部建築学科 准教授 博士(工博) (正会員)



図－1 機械式定着試験体の配筋および定着工法の詳細（単位：mm）

上記の内容に基づき定めた試験体の詳細を図－1 に示す。同図に示すとおり、本研究では、杭、柱、基礎梁、パイルキャップからなる建物中央基礎部を想定した十字型接合部を対象とする。また、杭は円形断面としたが、杭の下部はジャッキによる支点とするため（後述の図－2 参照），ジャッキが当たる部分は曲面ではなく平面とした。実験パラメータは杭主筋の定着工法（従来型の 180°フック定着工法および機械式定着工法，定着長さは 550mm と同様（文献 4）より，規定のうち，最大定着長さ 40D 以上（D：杭主筋径）を採用）とし，計 2 体の試験体（従来型定着試験体および機械式定着試験体）を製作し，静的正負交番繰返し载荷実験を行った。ここで，機械式定着具は図－1 に示す形状のものをを用いた。

両試験体は杭の定着工法だけが異なり，その他はすべて同様である。コンクリート打設は 2 回に分けて行った。1 回目の打設は杭のパイルキャップ内への埋め込み長さまで（実大の 1/2 の 50mm，基礎梁の最下部レベル）とし，2 回目の打設の前に杭の埋め込み部の目荒らしを行い，基礎梁・パイルキャップ・柱の打設を行った。

2.2 材料試験結果

コンクリート設計規準強度は文献 1)を準用し，27kN/mm²を用いた。表－2 にコンクリートの材料試験結果を示す。同表に示すように，供試体の圧縮強度は設計値を 15～21%上回った。主筋および補強筋はすべて異形棒鋼 SD345 を用いた。その結果を表－3 に示す。同表より，鉄筋径によってばらつきはあるものの，鉄筋の規格降伏点強度の 1.1～1.2 倍の結果となった。なお，表－2 および表－3 に示す各値は 3 サンプルの平均値である。

2.3 加力計画

本実験の载荷システムの立面図を図－2 に示す。同図より，载荷は両側基礎梁の上下に設置したジャッキから行う。柱の上部および杭の下部は特殊なピンおよびローラー治具を有する両側のジャッキで固定され，固定面の中央では反曲点となりモーメントが 0 となる。载荷方法は，反時計回りの加力（左側基礎梁は上から下へ，右側基礎梁は下から上へ同時に加力）を正方向加力とし，時計回りの加力（左側基礎梁は下から上へ，右側基礎梁は上から下へ同時に加力）を負方向加力とした。正方向加力時に各部材に生じるモーメント分布は図－2 に示すとおりである。また，軸力は柱軸力比 0.1 となるように

表－2 コンクリートの材料試験結果

部材	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
杭	31.1	2.72×10 ⁴	2.74
柱，基礎梁 パイルキャップ	32.8	2.67×10 ⁴	3.05

* 表中の各値は 3 サンプルの平均値である。

表－3 鉄筋の材料試験結果

直 径	使 用 箇 所	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D6	パイルキャップ主筋・ 補強筋／基礎梁補強筋	394	587	1.79×10 ⁵
D10	柱および杭補強筋	417	581	1.91×10 ⁵
D13	杭主筋	400	576	1.88×10 ⁵
D16	柱および基礎梁主筋	402	549	1.82×10 ⁵

* 表中の各値は 3 サンプルの平均値である。

664kN の一定軸力を与えた（コンクリートの圧縮強度は実験日に実施した表-2の柱の値(32.8N/mm²)を用いた）。

図-3 に本実験の加力計画を示す。同図より、両側基礎梁の平均部材角を 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.67%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 3.0%まで 2 回ずつ载荷する計画とした。

2.4 計測計画

図-4 に本試験体の計測位置を示す。

各種変位の計測のため、柱および杭の加力点中央部の正面および背面に鉄製計測フレーム（図-4 の水色）を、ユニバーサルジョイントを介して固定した。計測フレームは試験体の鉛直方向の伸縮を抑制しないよう杭の固定部には鉛直方向に長方形の貫通孔を設けており、試験体の鉛直伸縮を測る変位計を設置した。また、計測フレームの正面および背面の基礎梁の両側に変位計を設置し、両側基礎梁の変位を計測した。加力の際の制御は両側基礎梁で計測した変位による平均部材角で行った。

杭および柱の部材角を算定するため、各部材の危険断面部の部材角算定用変位計（断面せいの両側に設置）と危険断面を除いた部分の部材角算定用変位計をそれぞれ設置し、両者の部材角の和で各部材の全体部材角を算定した（後述の図-6(b)および(c)）。

各部材の主筋およびせん断補強筋の主要な箇所（危険断面を含む）に歪ゲージを貼り付け、歪の測定を行った。さらに、ひび割れ幅の測定は各部材角の除荷時にクラックスケールを用いて目視により行った。

両側基礎梁のせん断力はその上下に設置されているジャッキに取り付けたロードセルから計測した。一方、杭および柱のせん断力（後述の図-6(b)および(c)）は後述の 4.1 節で述べるように基礎梁のせん断力に基づいて算出した。

3. 実験結果

3.1 破壊経過

図-5 に両試験体の最終破壊状況を示す。以下の部材角は加力制御を行った両側基礎梁の平均部材角で表す。

従来型定着試験体は部材角 0.1%の時点で杭と梁に曲げひび割れが発生し、その後部材角 0.4%では柱にも曲げひび割れが発生した。一方、基礎梁では部材角 0.2%から、杭では部材角 0.4%から一部の曲げひび割れが曲げせん断ひび割れに進展した。また、部材角 0.4%で杭の危険断面の主筋の降伏が確認された。部材角 0.67%では杭にコンクリート圧壊が見られ、部材角 1.5%では柱にもコンクリート圧壊が見られた。部材角 2.0%で杭の主筋に座屈が確認され、その後部材角 3.0%の負方向加力の 1 回目のサイクルで杭の主筋が破断したため、実験を終了した。実験終了までパイルキャップには目立った損傷は見られなかった。本試験体は、部材角 1.0%で梁の最大耐力は

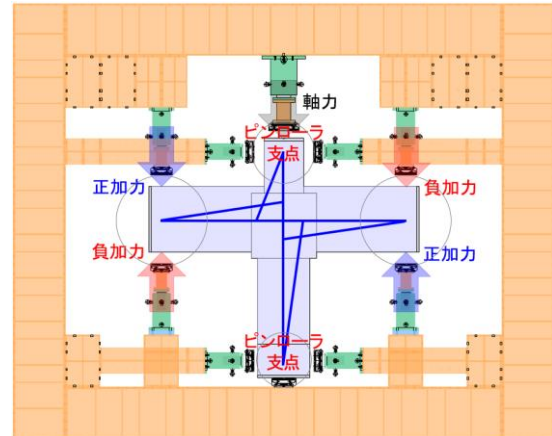


図-2 加力装置（正面）

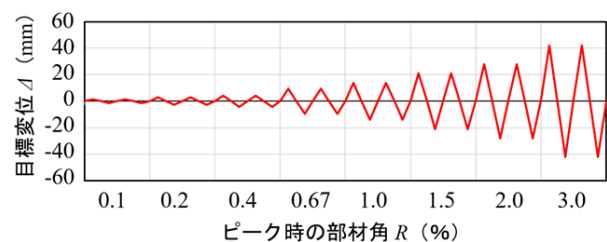


図-3 加力計画

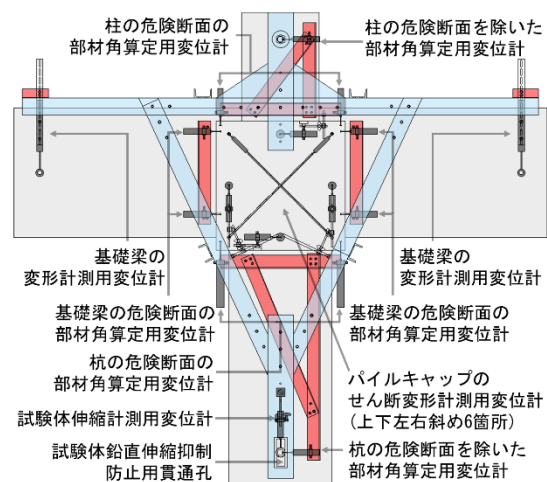
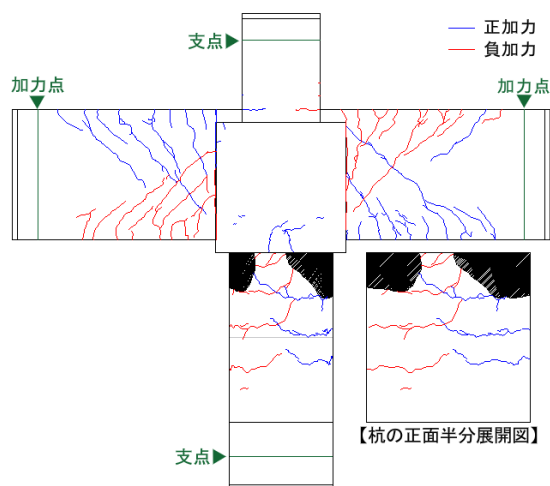


図-4 計測位置（背面）

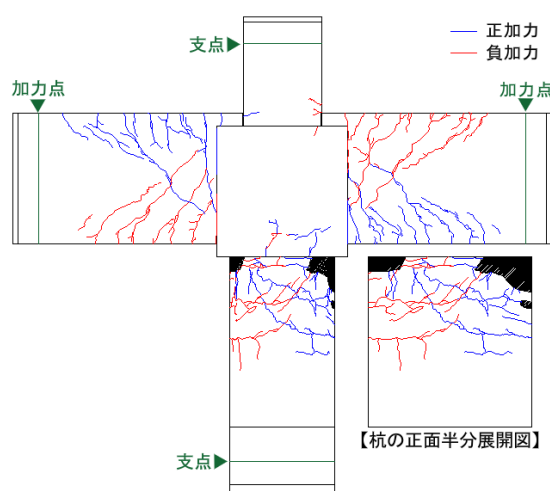
282.6kN、杭および柱の最大耐力は 329.7kN（後述の式(3)より算定）をそれぞれ記録した。

機械式定着試験体の各部材のひび割れ発生状況、鉄筋の降伏、圧壊および鉄筋の座屈などの破壊性状は従来型定着試験体とほぼ同様であった。本試験体では、部材角 3.0%の正方向加力の 2 回目のサイクルで杭の主筋が破断したため、実験を終了した。本試験体は、部材角 1.0%で梁の最大耐力は 287.6kN、杭および柱の最大耐力は 335.5kN（後述の式(3)より算定）を記録した。

両試験体は計算上、杭頭降伏先行型であったが、実験でも杭主筋が先に降伏しており、他の部材より杭の損傷が著しく進展することが確認できた。



(a) 従来型定着試験体



(b) 機械式定着試験体

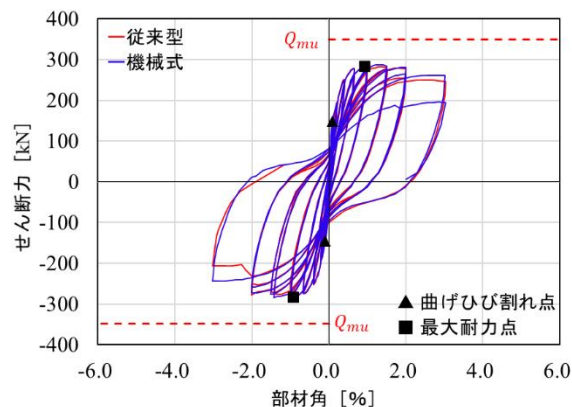
図－5 最終破壊状況

3.2 荷重－変形関係

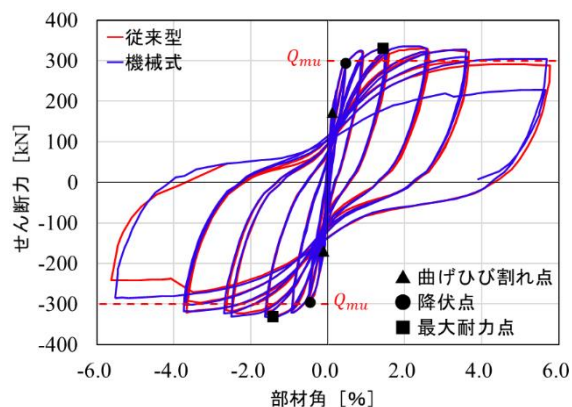
図－6 に両試験体の各部材の荷重－変形関係をせん断力の計算結果と併せて示す。ここで、せん断力の計算については後述の 4.2 節で詳細に述べる。以下の部材角は加力制御を行った両側基礎梁の平均部材角で表す。

従来型定着試験体は、部材角 1.0%の正方向加力の 1 回目のサイクルにおいて梁の最大耐力は 282.6kN を、杭および柱の最大耐力は 329.7kN（後述の式(3)より算定）をそれぞれ記録したが、部材角 2.0%まで基礎梁、杭および柱に荷重の著しい低下はなく、耐力を維持する結果となった。その後、部材角 3.0%の負方向加力の 1 回目のサイクルで杭の主筋が破断し、耐力が最大耐力の約 70%となったため、実験を終了した。

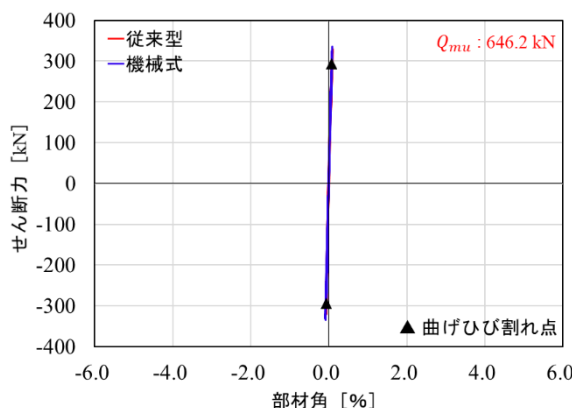
機械式定着試験体は、部材角 1.0%の正方向加力の 1 回目のサイクルにおいて梁の最大耐力は 287.6kN を、杭および柱の最大耐力は 335.5kN（後述の式(3)より算定）を記録したが、従来型定着試験体と同様に部材角 2.0%まで各部材の著しい耐力低下は見られなかった。その後、部



(a) 基礎梁（せん断力・部材角とも両梁の平均）



(b) 杭



(c) 柱

図－6 各部材の荷重－変形関係

材角 3.0%の正方向加力の 2 回目のサイクルで杭の主筋が破断し、耐力が最大耐力の約 62%となったため、実験を終了した。

図－6 に示すように、両試験体の各部材の荷重－変形関係はほぼ一致していることがわかる。また、図－6(a)および(c)に示すように、杭が終局に至るまで基礎梁は降伏に至っておらず、柱はほぼ弾性に留まった。以上のことから、本研究で使用した杭の機械式定着工法は、180°フックの従来型定着工法とほぼ同程度の定着性能が発揮できることを確認した。

4. 各部材の強度の算定

4.1 基礎梁の計測せん断力から杭・柱のせん断力の算定

本実験では、両側基礎梁のせん断力はその上下に設置されているジャッキに取り付けたロードセルから計測されるが、杭および柱のせん断力はその両側に設置されているジャッキにロードセルが取り付けられていないため（図-2 参照），両側基礎梁の計測せん断力データを利用して算出する必要がある。以下に，本研究で用いた杭および柱のせん断力の算定方法を示す。

図-7 に十字型部分架構の各部材におけるせん断力およびモーメント分布の概略図を示す。同図に示すように，両側基礎梁にせん断力（ $Q_{左梁}$ および $Q_{右梁}$ ）を加えると，柱梁の交点でモーメントの釣合いが成立する（式(1)および式(2)）。なお，十字型部分架構の水平力は杭と柱のせん断力だけとなるため，杭と柱のせん断力は等しくなる（ $Q_{杭} = Q_{柱}$ ）。この条件下で式(2)を杭のせん断力 $Q_{杭}$ で整理すると式(3)のようになる。図-6(b)および(c)に示す杭および柱のせん断力は式(3)で計算したものである。

$$M_{左梁} + M_{右梁} = M_{杭} + M_{柱} \quad (1)$$

$$Q_{左梁} \times l + Q_{右梁} \times l = Q_{杭} \times h_{杭} + Q_{柱} \times h_{柱} \quad (2)$$

$$Q_{杭} (= Q_{柱}) = \frac{(Q_{左梁} + Q_{右梁}) \times l}{h_{杭} + h_{柱}} \quad (3)$$

4.2 各部材の終局強度の算定

実験結果の整合性を確認するため，各部材の終局強度を算定し，実験結果と比較する。

梁，柱および杭の曲げ終局モーメント M_u は式(4)～式(6)よりそれぞれ求める。

$$M_{u,梁} = 0.9a_t\sigma_y d \quad (4)$$

$$M_{u,柱} = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bD\sigma_B}\right) \quad (5)$$

$$M_{u,杭} = 0.8a_t\sigma_y d + 0.5Nd \left(1 - \frac{N}{bd\sigma_B}\right) \quad (6)$$

ここで， $M_{u,梁}$ ， $M_{u,柱}$ および $M_{u,杭}$ は梁，柱および杭の曲げ終局モーメント（N・mm）， a_t は引張鉄筋断面積（mm²，円形断面の杭は全鉄筋断面積（ a_g ）の1/4）， σ_y は主筋の降伏強度（N/mm²，表-3 参照）， d は部材の有効せい（mm，梁においては圧縮縁から引張鉄筋中心までの距離，円形断面の杭においては等価長方形断面の有効せい，ここでは， $d=0.9D$ ）， D は部材せいあるいは直径（mm）， N は軸力（N）， b は部材の幅（mm，円形断面の杭においては等価長方形断面の幅，ここでは， $b=(\pi/4)D$ ）， σ_B はコンクリート圧縮強度（N/mm²，表-2 参照）である。

また，梁，柱および杭の曲げ終局時せん断力 Q_{mu} は，式(4)～式(6)より求めた梁，柱および杭の曲げ終局モーメント

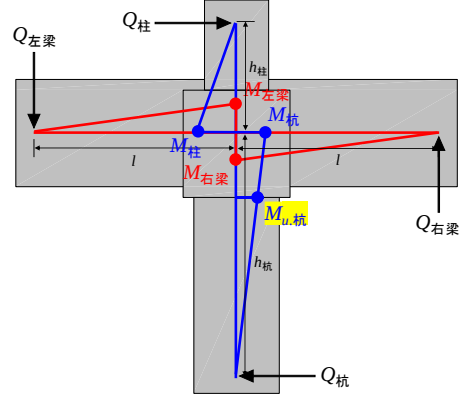


図-7 各部材のせん断力およびモーメント分布

メント M_u を，各部材の内法長さおよび内法高さで除した式(7)～式(9)よりそれぞれ求められる。

$$Q_{mu,梁} = M_{u,梁}/l_0 \quad (7)$$

$$Q_{mu,柱} = M_{u,柱}/h_{0柱} \quad (8)$$

$$Q_{mu,杭} = M_{u,杭}/h_{0杭} \quad (9)$$

ここで， $Q_{mu,梁}$ ， $Q_{mu,柱}$ および $Q_{mu,杭}$ は梁，柱および杭の曲げ終局時せん断力（N）， l_0 ， $h_{0柱}$ および $h_{0杭}$ は梁，柱および杭の内法長さおよび内法高さ（mm）である。

一方，前述したとおり，杭の下部支点は理想的には反曲点となり，モーメントが0となるが，杭下部の断面形状の変化などにより完全にピン支点にならず反曲点が部材内に生じる可能性がある。本研究では杭のモーメントが0となる箇所を特定するため，杭主筋の歪データから杭の高さ方向の曲率分布を確認した。両試験体の正方向および負方向加力時における杭主筋が降伏する前までの部材角である0.4%までの曲率分布を図-8に示す。同図より，両試験体・両加力方向ともに，杭の危険断面での曲率が他の箇所より増加する一方，支点より高い歪ゲージ貼り付け箇所の最下段で曲率がほぼ0になっていることがわかる。この結果から，杭の内法高さ $h_{0杭}$ は支点から危険断面までではなく，歪ゲージ貼り付け箇所の最下段から危険断面までの距離とした。ここで，機械式定着試験体のパイルキャップ内における最上段の右側の歪ゲージは実験前の断線によりデータがない。

梁，柱および杭のせん断終局強度 Q_{su} は荒川 mean 式³⁾である式(10)～式(12)よりそれぞれ求める。

$$Q_{su,梁} = \left\{ \frac{0.068p_t^{0.23}(\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} \right\} bj \quad (10)$$

$$Q_{su,柱} = \left\{ \frac{0.068p_t^{0.23}(\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} bj \quad (11)$$

$$Q_{su,杭} = \left\{ \frac{0.068p_t^{0.23}(\xi\sigma_B + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w\sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} bj \quad (12)$$

ここで， $Q_{su,梁}$ ， $Q_{su,柱}$ および $Q_{su,杭}$ は梁，柱および杭のせん

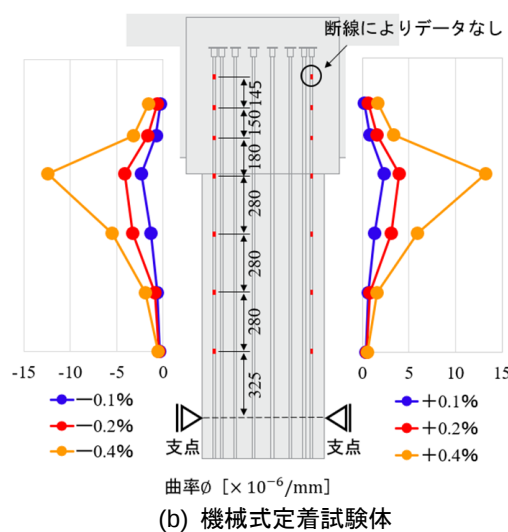
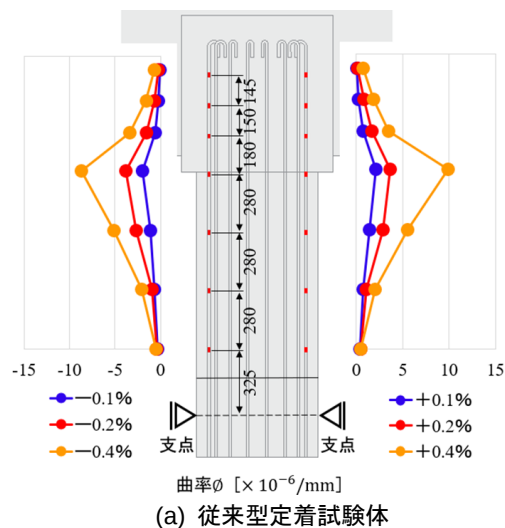


図-8 杭主筋の曲率分布

断終局強度 (N), p_t は引張鉄筋比 (%、円形断面の杭においては $p_g/4$), p_g は主筋比 (%、 $=100a_g/bd$), $M/(Qd)$ はせん断スパン比 (本試験体では, l_0/d , $h_{0\text{柱}}/d$, $h_{0\text{杭}}/d$), ξ は場所打ち鉄筋コンクリート杭の施工の品質管理に関わる係数 (通常 0.75 以下, 高品質 1.0 以下, 本研究では 1.0), p_w はせん断補強筋比, σ_{wy} はせん断補強筋の降伏強度 (N/mm^2 , 表-3 参照), σ は軸応力度 (N/mm^2), j は応力中心間距離 (mm, $=7d/8$) である。

以上の計算式で求めた各部材の強度の精算値を表-4 に示すとともに、図-6 の各部材の荷重-変形関係の実験結果と併せて示す。表-4 に示すように、想定した材料強度の割増率や杭の内法高さの相異によって当初想定した各部材の強度値およびせん断余裕度 (表-1 参照) と若干異なるものの、各部材の曲げ降伏先行型であること、架構全体では杭頭降伏先行型であることは同様である。また、図-6 に示すように、杭の終局強度の計算結果は実験結果と概ね一致した。また、基礎梁および柱の終局強度の計算結果は実験時の最大荷重より大きくな

表-4 各部材の強度の精算値

部材	曲げ終局 モーメント M_u (kN) *1	曲げ終局時 せん断力 Q_{mu} (kN) *2	せん断 終局強度 Q_{su} (kN) *1,*2	せん断 余裕度 Q_{su}/Q_{mu}
杭	251.8	299.7	611.8	2.04
基礎梁	357.6	348.9	574.4	1.65
柱	306.9	646.2	733.4	1.13

*1 計算の際には表-2 および表-3 に示す値をそれぞれ用いた。

*2 杭の内法高さは図-8 に示す曲率分布から求めた値を用いた。

り、基礎梁は降伏に至っておらず、柱はほぼ弾性にとどまった実験結果と整合する結果となった。さらに図-8 より、部材角 0.4% において機械式定着試験体の危険断面での曲率が若干大きいものの、パイルキャップ内における両試験体の曲率分布はほぼ同様であったため、本研究で用いた機械式定着工法の有効性が確認された。

5. まとめ

本研究では、杭主筋の機械式定着工法への代替可能性を確認するため、杭主筋の従来型および機械式定着を用いた 1/2 スケール十字型部分架構試験体を用いて静的載荷実験を行った。本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 両試験体の各部材の荷重-変形関係がほぼ一致したことから、本研究で使用した杭の機械式定着工法は従来型定着工法を代替できることを確認した。
- (2) 杭の終局強度の計算結果は実験結果と概ね一致した。基礎梁および柱の終局強度の計算結果は実験時の最大荷重より大きくなり、実際の破壊性状と整合した。
- (3) 本研究の対象建物である中層の鉄筋コンクリート造建物では、杭頭が基礎梁および柱より先に降伏することが計算上および実験結果から明らかになった。

今後の研究として、同様な構造詳細を持つト型試験体の機械式定着に関する実験を行う予定である。また、パイルキャップに大きな損傷が生じなかった実験結果から、パイルキャップの小型化とそれに伴う機械式定着長さの短縮化について検討する予定である。

謝辞

本研究の実験にあたって、大谷製鉄株式会社・製品開発企画部の小寺耕一郎氏、永淵英生氏に奨学寄附金を含めた多大なご支援をいただきました。また、実験の実施にあたって、大阪工業大学の権淳日研究室の学生にご協力いただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2019
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針 (案)・同解説, 2017
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, 2021