

論文 基礎梁を2段配筋としたRC基礎梁外柱杭接合部の破壊機構に梁主筋定着方法が及ぼす影響に関する実験的研究

小路 貴也*1・大西 直毅*2・西村 康志郎*3

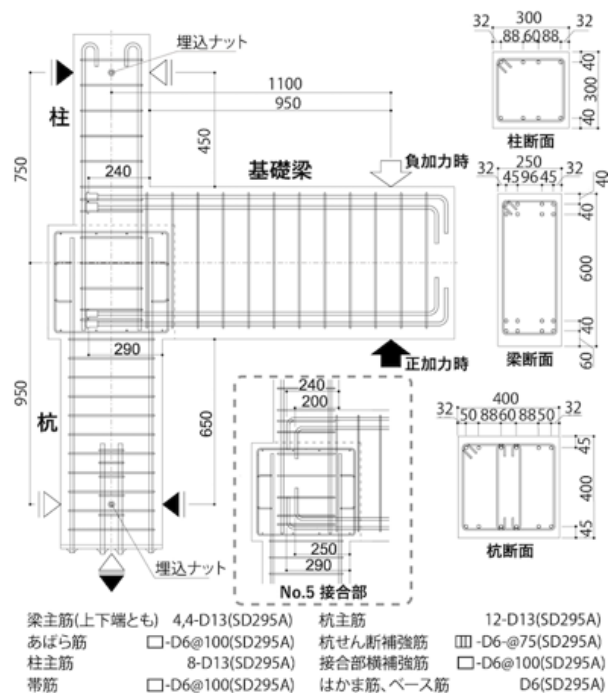
要旨：現在、基礎梁主筋定着方法の違いが破壊の進行した時の基礎部柱脚の応力状態に与える影響についての検討が十分になされていない。本研究では接合部定着方法の異なる2体の基礎梁外柱杭接合部の加力実験を行った。その結果、機械式定着では梁主筋定着部周辺のコンクリート損傷が大きく、梁下端引張時には変形角2%で荷重低下が起きた。梁上端引張時には折曲げ定着と比べて機械式定着の方が最大耐力は大きく、変形角2%まで著しい荷重低下は見られなかった。さらに梁上端引張時の降伏耐力と最大耐力を評価するモデルを2段配筋に拡張し、このモデルによる計算値は両試験体で実験値を安全側に精度よく評価できた。

キーワード：折曲げ定着, 機械式定着, ト形接合部, 基礎梁, 2段配筋, パイルキャップ

1. はじめに

近年は過密配筋解消や施工簡略化の為に基礎梁主筋の柱への定着に機械式定着が採用されている。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¹⁾では最下層の降伏ヒンジを柱脚に設けることを原則としているため、基礎梁主筋の定着部の近くに降伏ヒンジを生じることを許容している。しかし、基礎梁主筋の機械式定着部が柱脚の塑性化に与える影響についてあまり検討がなされていない。また基礎梁の定着端を柱内に設ける場合には定着端を通る斜めひび割れが生じ、柱の曲げ耐力に影響を及ぼす可能性がある。

鉄筋コンクリート造において、基礎梁等の設計応力が大きく必要主筋量が多くなる部材では、主筋が多段配筋となる場合がある。そこで本研究では、既往の研究²⁾³⁾の1段配筋の試験体に続き、柱曲げ降伏する2段配筋の機械式定着と90°折曲げ定着の試験体2体の加力実験を行い、定着方法の違いが接合部材の性能に与える影響を検討した。また、梁上端引張時の実験値が計算値を下回ったことに注目し、耐力計算モデルを考察して検討に加えた。



図一1 試験体図面

表一1 試験体諸元

試験体名		No. 4	No. 5
柱	せん断補強筋比 (%)	0.21	
梁	主筋定着方法	機械式	90°折曲げ
	引張主筋比 (%)	正: 0.75	負: 0.72
柱梁曲げ強度比		正: 1.26	負: 1.48

表一2 コンクリートの力学特性

試験体名	圧縮強度		割裂引張強度	縦弾性係数
	28日強度	実験日		
	σ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_t (MPa)	E_c (GPa)
No. 4	32.4	35.3	2.33	23.4
No. 5		36.2	2.57	23.3

2. 実験計画

2.1 試験体概要

図一1に試験体図面を、表一1から表一3に試験体諸元及び各材料特性を示す。コンクリートの引張強度と弾性係数は実験日の試験値である。D6(SD295A)の降伏強度は0.2%オフセット耐力としている。試験体2体の試験体名をNo.4, No.5とした。No.4は梁主筋を機械式定着とし、No.5は90°折曲げ定着としている。試験体の形状は平面ト形で、断面寸法(幅×せい)は柱が300×300mm, 基礎

*1 北海道大学 大学院工学院 修士課程 (学生会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授 博士(工学) (正会員)

表-3 鉄筋の力学特性

呼び径(規格)	降伏強度	引張強度	ヤング係数
	σ_y (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	E_s (GPa)
D13 (SD295A) 梁	354	504	194
D13 (SD295A) 柱・杭	338	481	192
D6 (SD295A)	392*	557	199

*0.2%オフセット耐力

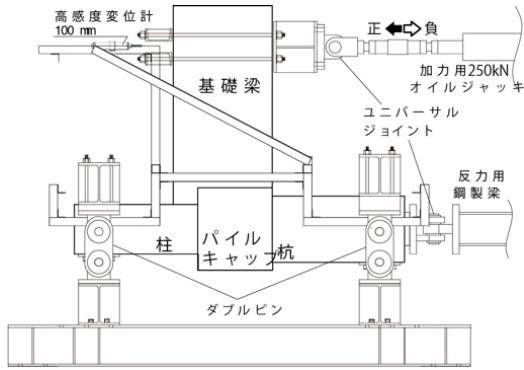


図-2 加力計測装置

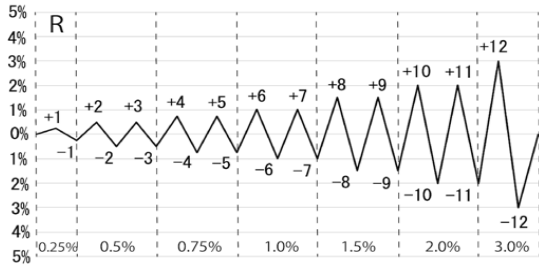


図-3 加力計画

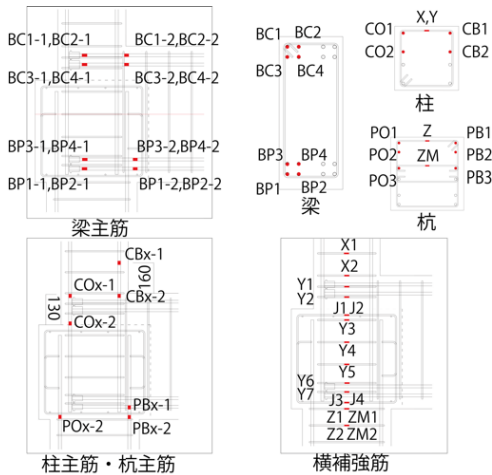


図-4 ひずみゲージ貼付位置

梁が 250×600mm, 杭が 400×400mm で, 柱の材軸から梁の加力点までが 1100mm, 梁の材軸から柱と杭の支点までがそれぞれ 750mm, 950mm である。また両試験体とも基礎梁主筋はネジ節鉄筋を使用している。

降伏点を分かりやすくするために, 杭の断面形状は矩形として柱と杭に中段筋を設けないこととした。梁は両試験体で上端・下端共に 2 段配筋(4,4-D13)とした。

梁主筋の定着長さは鉄筋コンクリート造計算規準・同

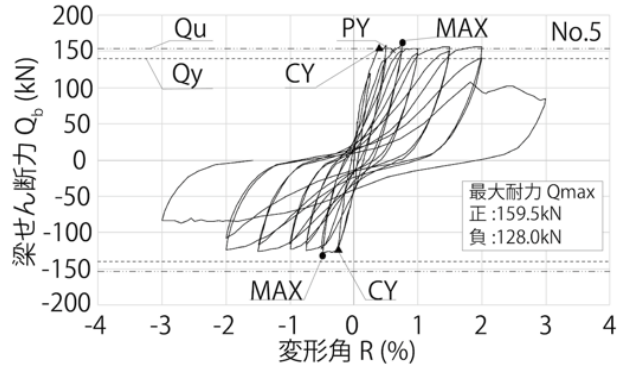
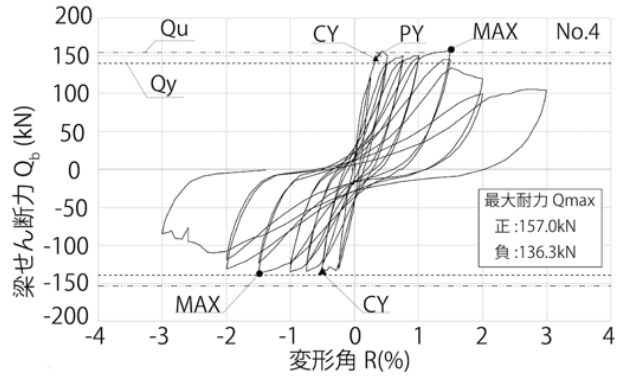


図-5 荷重変形角関係

解説⁴⁾の 17 条の必要定着長さを満たすよう, No.4 では 2 段とも柱面より 240mm とし, No.5 は折曲げ定着のため 1 段目のみ柱面より 240mm で 2 段目は 200mm とした。試験体は No.4 と No.5 とともに柱曲げ降伏が先行するように計画されている。

2.2 加力及び計測方法

図-2 に加力装置と計測フレーム概要を示す。柱と杭をダブルピンで支持し, 梁反曲点位置にオイルジャッキで正負交番荷重を与え, 変位を制御しながら加力した。図-3 に加力計画を示す。加力は梁の加力点変位を柱材軸から加力点までの距離で除した変形角 R で制御し 0 サイクルの 20kN の後 R=0.25%,0.5%,0.75%,1%,1.5%,2%,3% と正負でピーク変位を漸増させ, 0.5%以降は 2 回ずつ加力した。加力方向は梁が下端引張となる向きを正方向, 上端引張となる向きを負方向とし, 反力は杭主筋が溶接されている鋼板に接合された鋼製梁で受けている。梁に加えた水平力によって杭には正加力時には引張軸力, 負加力時には圧縮軸力が作用する。

計測フレームを柱と杭に埋め込んだ高ナットにピン・ローラーで支持し, 計測フレームに取り付けた高感度変位計で加力点と支持点との相対変位, 柱と梁と杭のそれぞれの部材回転角, 接合部端部での部材回転角, パイルキャップ回転角を計測した。

鉄筋のひずみは図-4 の位置に貼付したひずみゲージで測定した。柱主筋には梁主筋との交差位置およびパイルキャップ上面との交差位置の 2 箇所を表裏 2 枚ずつ, 杭主筋には梁主筋との交差位置およびパイルキャップ

下面との交差位置の2箇所を表裏2枚ずつ、梁主筋には主筋端部に加えて上端主筋は柱面との交差位置、下端主筋は杭面との交差位置にひずみゲージを貼付した。試験体形状は幅方向中央に関して対称なので、ひずみゲージを幅方向の中央から打設面側の主筋にのみ貼付し、その他の鉄筋についても打設面側に貼付した。

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係

図一五に両試験体の梁せん断力と変形角 R との関係を示す。図中の点線 Q_y と二点鎖線 Q_u はそれぞれ梁上端面を危険断面とした柱の断面解析による曲げ降伏計算値、曲げ終局計算値を梁せん断力に換算したものである。CY は柱主筋が降伏した点、PY は杭主筋が降伏した点、MAX は最大耐力を發揮した点を示している。

No.4 は正加力と負加力ともに $R=1.5\%$ で最大耐力 ($157\text{kN}, -136\text{kN}$) を記録した。No.5 は正加力では $R=0.75\%$ で、負加力では $R=0.5\%$ で最大耐力 ($160\text{kN}, -128\text{kN}$) を記録した。両試験体で正加力時は実験値が断面解析による計算値を上回ったが、負加力時は断面解析による計算値に達しなかった。また、No.4 の $R=+2.0\%$ のサイクル途中で柱の曲げせん断ひび割れの拡幅とともに大きな耐力の低下が見られた。

3.2 破壊性状

図一六に $R=\pm 0.75\%$ (4Cycle) の加力後の除荷時に記録した両試験体のひび割れ図、写真1に加力終了後の写真を示す。両試験体 $R=\pm 0.25\%$ において柱、梁、杭の各部位で曲げひび割れが発生した。また、杭を除いて両試験体で $R=-0.5\%$ までに柱と梁にせん断ひび割れが発生した。 $R=\pm 0.25\%$ に両試験体でパイルキャップにひび割れが発生し、加力を進めるにつれて柱や杭の斜めひび割れと繋がった。

加力終了後の写真を比較すると、No.4 は梁上端筋定着部周辺のコンクリートの損傷が大きく、柱脚の広範囲が損傷した。No.5 は梁主筋沿いが損傷し、パイルキャップには No.4 には見られない縦のひび割れが生じており、梁側柱主筋沿いのコンクリートの損傷も見られる。

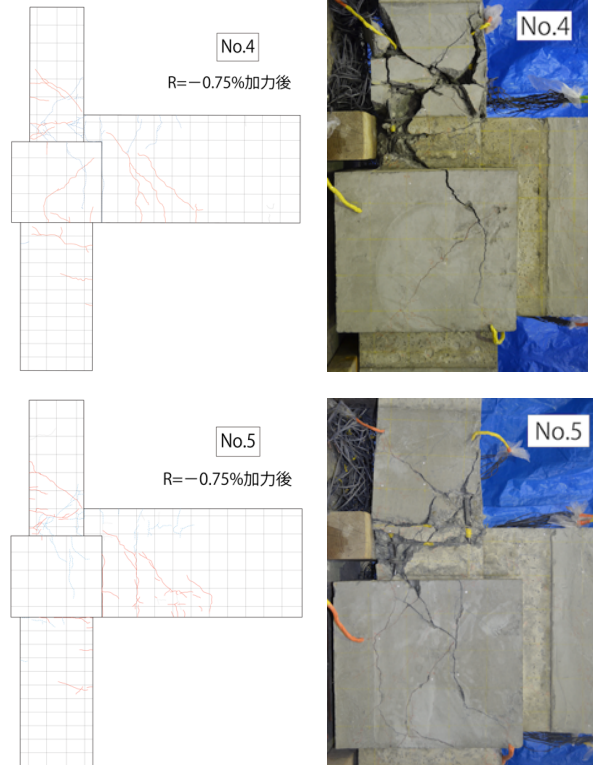
3.3 梁主筋ひずみ

図一七に梁主筋のサイクルピーク時のひずみを示す。横軸はサイクルであり、左側が正加力、右側が負加力時の引張鉄筋のひずみを示している。梁主筋は両試験体で正負ともに降伏しなかった。

3.4 柱主筋ひずみ

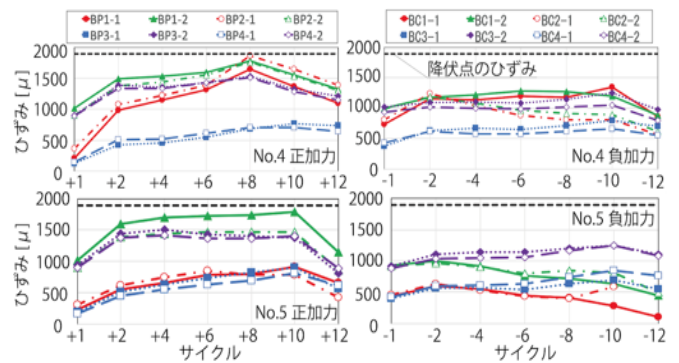
図一八に柱主筋のサイクルピーク時のひずみを示す。横軸はサイクルであり、左側が正加力、右側が負加力時の引張鉄筋のひずみを示している。

正加力時は、両試験体で+2サイクルの加力中に外側柱

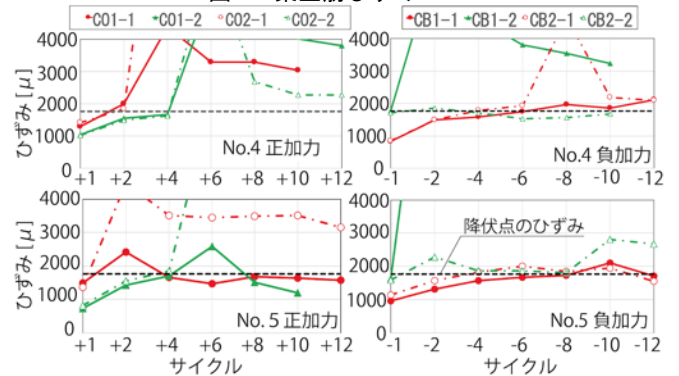


図一六 ひび割れ図

写真一 加力後の写真



図一七 梁主筋ひずみ



図一八 柱主筋ひずみ

主筋の梁上端位置が初めて降伏した。負加力時は、両試験体で-2サイクルの加力中に梁側柱主筋の梁上端位置が初めて降伏した。

3.5 横補強筋ひずみ

図一九に横補強筋のサイクルピーク時ひずみを示す。縦軸は梁の引張主筋からの距離である。横補強筋が 0.2%

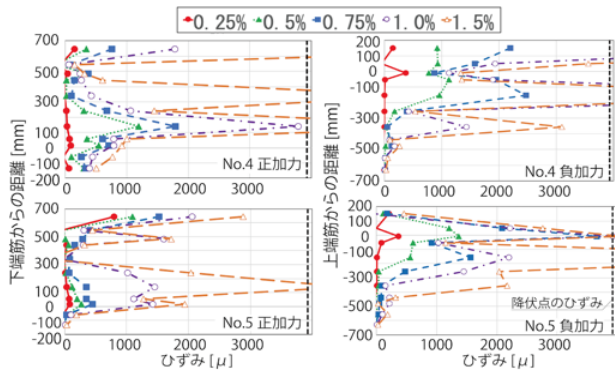


図-9 横補強筋ひずみ

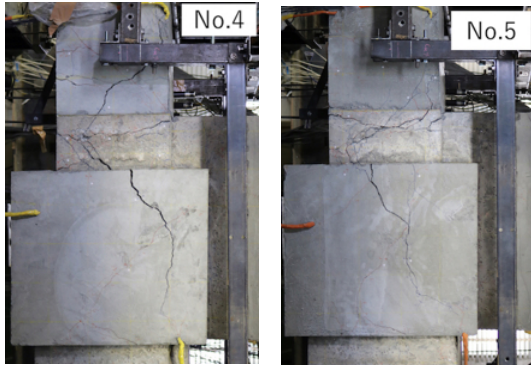


写真-2R=-1.5%時の破壊状況写真

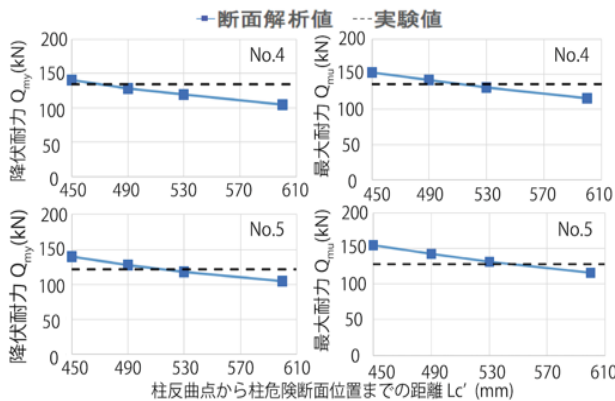


図-10 柱の危険断面位置を変更した計算値

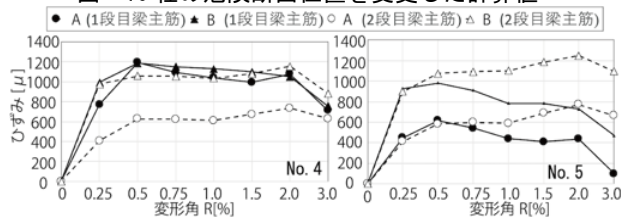


図-11 基礎梁上端主筋のひずみ

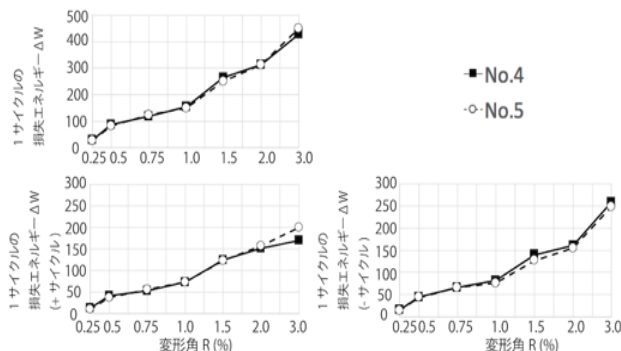


図-12 履歴エネルギー

オフセット耐力に達する時のひずみを点線で示している。両試験体の最大耐力時のひずみに着目すると、正加力時に No.4 は図 4 の X1,Y3,Y5 で降伏していたが、No.5 は降伏していなかった。負加力時に No.4 は X1,Y3 で降伏していたが、No.5 は降伏していなかった。

4. 考察

4.1 接合部定着方法による破壊性状の違い

写真-2 に $R=-1.5\%$ 時点の両試験体の試験体写真を示す。両試験体で、柱梁の入隅部から定着端付近に向かうひび割れがあり、加えて定着端付近から柱側とパイルキャップ側に斜めひび割れが見られた。機械式定着の No.4 は 1 段目梁主筋の定着端付近からひび割れが発生している。90° 折り曲げ定着の No.5 は No.4 よりも梁側の浅い位置に柱の斜めひび割れは見られるものの幅は狭く、代わりに柱梁入隅部から梁主筋定着端付近に向かうひび割れの幅が目立った。

4.2 降伏耐力と最大耐力

(1) 正加力時

No.4 は $R=0.5\%$ で柱主筋と杭主筋が続けて降伏し、柱と杭の曲げひび割れが拡幅した。そして $R=1.5\%$ で最大耐力を発揮した。最大耐力時は柱の曲げせん断ひび割れとパイルキャップに入った斜めひび割れの拡幅が目立った。 $R=2.0\%$ のサイクル途中で柱の曲げせん断ひび割れの拡幅とともに大きく耐力が低下した。No.5 は $R=0.5\%$ で柱主筋が降伏し、柱の曲げひび割れの拡幅が見られた。そして $R=0.75\%$ で杭主筋が降伏し最大耐力を発揮した。最大耐力時は柱の曲げひび割れと曲げせん断ひび割れの拡幅が目立った。両試験体で降伏耐力や最大耐力は柱の曲げによって決まったと考えられる。

(2) 負加力時

No.4 は $R=0.5\%$ の加力中で柱主筋が降伏し、柱の曲げひび割れの拡幅や定着端付近から柱側とパイルキャップ側に斜めひび割れの発生が見られた。その後も柱の曲げひび割れと定着端付近から柱側、パイルキャップ側に伸びる斜めひび割れの拡幅が進み、 $R=1.5\%$ で最大耐力を発揮した。No.5 は $R=0.5\%$ の加力中で柱主筋が降伏し、 $R=0.5\%$ で最大耐力を発揮した。最大耐力時は柱の曲げひび割れの拡幅や定着端付近から柱側とパイルキャップ側に伸びる斜めひび割れの発生が見られた。

4.3 断面解析で想定する危険断面位置

両試験体で梁上端引張時の実験値が断面解析の計算値を下回っている。破壊状況から柱曲げひび割れが梁上面より下側の 1 段目梁主筋付近に発生しており、断面解析時の危険断面は梁上面よりパイルキャップ側に想定すべきだと考えられる。図-10 に柱の危険断面位置を変更した計算値を示す。図-10 のグラフの横軸は柱反曲点から柱危険断面までの距離であり 450mm で梁上面、

490mm で 1 段目梁主筋位置, 530mm で 2 段目梁主筋位置, 600mm でパイルキャップ面となっている。降伏耐力の実験値は梁側柱主筋の梁上面位置のひずみゲージで初めて降伏が確認された時の耐力としている。

危険断面を 1 段目梁主筋位置にした計算値と実験値を比較すると, No.4 は降伏耐力では実験値が計算値を上回ったが, 最大耐力では実験値は計算値を下回った。No.5 は降伏耐力と最大耐力で実験値は計算値を下回り, 危険断面を 2 段目梁主筋位置とした計算値とよく対応した。

4.4 基礎梁上端主筋のひずみ

図-11 に両試験体の基礎梁上端主筋のひずみ推移を示す。A が主筋定着端から 50mm 位置に貼付した歪み, B が柱面位置に貼付した歪みを示している。図中のひずみは 1 段目, 2 段目梁主筋でそれぞれ 2 本の主筋のひずみの平均値となっている。梁危険断面は柱面なので, 本来は付着が働いて B の歪みが A よりも大きくなる。しかし, No.4 の 1 段目梁主筋を用いた A と B のひずみ挙動は概ね一致しており, No.4 においては梁下端引張時に柱脚部に発生した損傷によって梁上端筋 1 段目周りのコンクリートが破壊され, 梁上端引張時に付着力が発揮されなかったと考えられる。両試験体で変形角 $R=1.5\%$ 時点の 1 段目梁主筋の A と B の差から付着応力度を計算すると, No.4 は $\tau=0.33$ (N/mm²), No.5 は $\tau=1.19$ (N/mm²) となり, No.5 は No.4 と比べて付着力が働いていた。

4.5 履歴エネルギーの比較

両試験体の 1 サイクルの履歴エネルギーを変形角 0.25% から 3.0% で比較したグラフを図-12 に示す。正加力時と負加力時を合計したグラフでは 0.25% から 3.0% の間で No.4 と No.5 に大きな差は見られなかった。両試験体に共通して正加力時よりも負加力時で多くのエネルギーを消費している。No.5 は +3.0% 時に 1 段目梁主筋の定着部周辺の損傷が目立ち, 柱の変形も著しく履歴エネルギーは No.4 より 18.2% 高くなった。

4.6 負加力時の耐力評価モデル

本節では梁上端引張時の耐力について考察する。過去に大西らにより接合部が 1 段配筋で機械式定着の耐力評価モデル⁵⁾が提案されている。このモデルを 2 段配筋の試験体に適用するために図-13 のようなモデルを考える。図-13 中の D は柱幅, C_c は柱主筋のかぶり厚さ, C_b は梁主筋のかぶり厚さ, s は横補強筋の間隔, L_c' は柱反曲点から梁上面までの距離である。

斜めひび割れは機械式定着では 1 段目梁主筋の定着端の中心から入り, 90° 折り曲げ定着では 1 段目梁主筋の柱面から l_a (2 段目梁主筋定着長さ) の点に 45° の角度で入ると想定した。ただし, 90° 折り曲げ定着で想定する斜めひび割れに関しては過去の実験²⁾³⁾⁵⁾を含め基礎梁主筋が 90° 折り曲げ定着である試験体が 1 体しかない

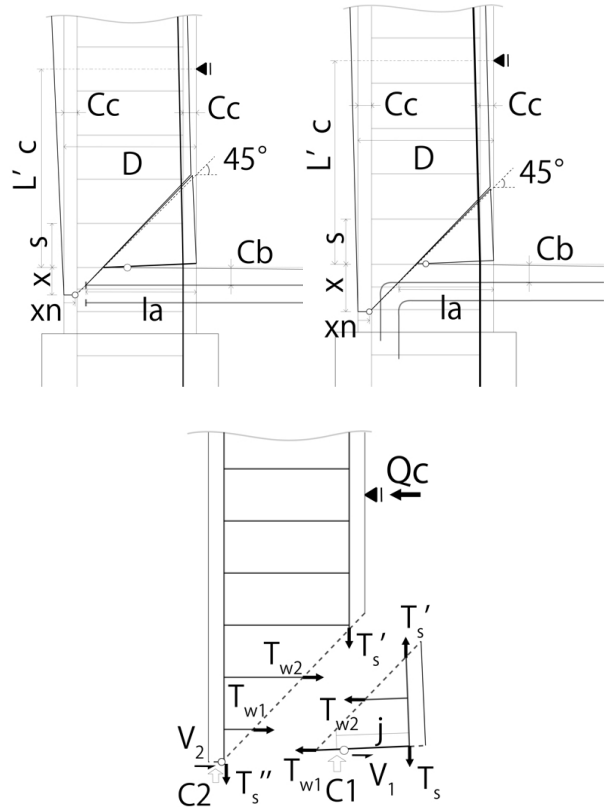


図-13 耐力評価モデル
表-4 梁上端引張時の耐力比較

実験値	No. 4		No. 5	
	降伏耐力 (kN)	133.6	0.5%	121.2
最大耐力 (kN)	136.3	1.5%	128.0	0.5%
断面解析	降伏耐力 (kN)	139.7	139.8	
	終局耐力 (kN)	153.9	154.4	
耐力評価モデル	降伏耐力 (kN)	125.8	116.4	
	終局耐力 (kN)	132.8	125.2	

ことから, 想定しているひび割れ位置は検討を重ねる必要があると考えられる。柱のフリーボディの斜め 45° の断面に平面保持を仮定して中立軸深さ x_n を求め, この中立軸位置を回転中心と仮定した。柱主筋と梁引張主筋近くの横補強筋がひび割れの開きに抵抗する。柱のフリーボディには柱せん断力 Q_c , 主筋の引張力 T_s' , 主筋の圧縮力 T_s'' , 横補強筋の引張力 T_{w1}, T_{w2} , コンクリートの圧縮力 C_2 , コンクリートと主筋のせん断力の合力 V_2 が作用している。今回は柱の引張主筋降伏時と圧縮縁ひずみがコンクリートの終局ひずみ $\epsilon_u=0.003$ に達した時の 2 パターンで計算し, 実験値との比較を行った。

降伏時の計算ではコンクリートを線形弾性とし, 引張主筋の引張力は図-13 の T_s' とした。 T_s' は図-13 の三角形部分のフリーボディのモーメントの釣り合いから, $T_s' = T_s - sT_{w2}/j$ とし, $j = 0.9(l_a - c_c - c_b)$ と仮定した。

軸方向の釣り合いで中立軸深さ x_n は次式による。

$$\frac{1}{2} b E_c \frac{x_n^2}{D - c_c - x_n} - A_s' E_s \frac{c_c - x_n}{D - c_c - x_n} - A_s E_s = 0 \quad (1)$$

最大耐力時はストレスブロックの方法を用いてコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみ ϵ_u に達した時の軸方向の釣り合いで中立軸深さ x_n を次式により求める。 x_n は最大耐力時の値が降伏時よりも大きくなるように設定されている。

$$bx_n\beta_1\beta_3f_c = \frac{c_c - x_n}{x_n} \epsilon_{cu} A'_s E_s + T'_s \quad (2)$$

コンクリートの圧縮強度 f_c とヤング係数 E_c , E_s は材料試験値とし、ストレスブロックの係数 β_1, β_3 はいずれも0.85とした。

柱のフリーボディのモーメントの釣り合いから、降伏時の柱せん断力 Q_{cy} は次式から求める。

$$Q_{cy} = \frac{xT_{w1} + (x+s)T_{w2} + (D - c_c - x_n)T'_s + (c_c - x_n)T''_s + \left(\frac{2x_n}{3}\right)C_2}{L'_c + x} \quad (3)$$

同様に最大耐力時の柱せん断力 Q_{cu} は次式となる。

$$Q_{cu} = \frac{xT_{w1} + (x+s)T_{w2} + (D - c_c - x_n)T'_s + (c_c - x_n)T''_s + \left(1 - \frac{\beta_1}{2}\right)x_n C_2}{L'_c + x} \quad (4)$$

梁上面から圧縮鉄筋中心の距離 x は次式となる。

$$x = D - l_a - x_n + c_b \quad (5)$$

横補強筋の引張力 T_{w1} , T_{w2} は仮定した斜めひび割れ位置でのコンクリートの軸方向ひずみに鉄筋のヤング係数と断面積を乗じた値とし、降伏強度を上回る場合は降伏強度時の引張力とした。

表-4に断面解析による耐力計算値と耐力評価モデルにより求められる耐力を梁せん断力に換算したものを示す。実験値の行の耐力値の右列には変形角を示している。実験値で、柱主筋降伏時とは梁側柱主筋の梁上面位置のひずみゲージで初めて降伏が確認された時の耐力である。表-4から両験体で、梁上端引張時の耐力評価モデルを用いて計算した降伏時と最大耐力時の計算値は実験値に対して約6%の誤差で安全側に評価できた。

5. まとめ

2段配筋基礎梁の主筋を機械式定着と90°折り曲げ定着とした外柱基礎梁接合部の正負繰返し変位漸増載荷実験を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 機械式定着では、定着金物周辺のコンクリートの損傷が大きく、柱脚のほうへも広範囲に損傷が見ら

れた。折り曲げ定着では、梁主筋の直線定着部や柱主筋沿いのコンクリートに損傷が見られ、柱脚の損傷は比較的小さく、パイルキャップには機械式定着の試験体には見られなかった縦ひび割れを生じた。

- 2) 直線定着部の付着力は、折り曲げ定着では確認されたが、機械式定着では非常に小さかった。これは、梁下端引張時に柱脚部に発生した損傷によって梁上端1段目周りのコンクリートが破壊され、梁上端引張時に付着力が発揮されなかったからと考えられる。
- 3) 梁上端引張時の耐力について、柱の斜めひび割れと曲げひび割れの位置で切断するモデルを2段配筋に拡張することで、計算値は降伏耐力と最大耐力の実験値を約6%の誤差で安全側に評価できた。ただし、90°折り曲げ定着の耐力評価モデルで想定している斜めひび割れ位置の妥当性に関しては検討を重ねる必要がある。

謝辞

本研究はJSPS科研費(16K18179)の助成を受けた。

参考文献

- 1) 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，2006
- 2) 柳原泰平，山口悠太，大西直毅，西村康志郎，小路貴也：機械式定着具を梁主筋に用いたRC基礎梁外柱接合部の破壊機構に関する実験研究その1 実験計画と破壊性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.89-90，2018.9
- 3) 小路貴也，柳原泰平，山口悠太，大西直毅，西村康志郎：機械式定着具を梁主筋に用いたRC基礎梁外柱接合部の破壊機構に関する実験研究その2 荷重変形関係と考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.91-92，2018.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造計算規準・同解説，2010
- 5) 大西直毅，西村康志郎，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の定着長さや柱のせん断補強筋比の影響，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第743号，pp.167-177，2018.1