

# 論文 折曲げ定着された RC 側柱下架構の破壊性状に与える多段配筋の影響

山崎 寛悦\*1・後藤 康明\*2・西村 康志郎\*3

**要旨：**鉄筋コンクリート造骨組の基礎梁で多用されている折曲げ定着による多段配筋部材を対象として、基礎梁主筋段数をパラメータとした正負繰返し変位漸増載荷の部材実験を行った。実験の結果、梁曲げ耐力がほとんど等しい部材でも基礎梁主筋の段数によって破壊形式が異なる結果となったが、既往の掻出し破壊定着耐力推定式は側柱下架構における多段配筋の場合でも適用することを示した。また、鉄筋径が太い場合や3段配筋にした場合に接合部コンクリートの破壊や定着破壊が生じた。

**キーワード：**多段配筋, 折曲げ定着, 掻出し定着破壊, 横補強筋

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）造において、基礎梁など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1段では納まらず、多段配筋となる場合がある。日本建築学会（以下、AIJ）鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>3)</sup>では付着性能や曲げ耐力の確保等の関係から2段までを原則としているが、実際の設計においては3段配筋となる場合も見られる。しかし、これまで多段配筋で折曲げ定着された鉄筋の定着性能に関する研究はほとんど行われておらず、現状ではその影響が明らかになっていないまま設計が行われている。既往の研究<sup>1)</sup>では、折曲げ定着した場合の定着破壊を側方割裂破壊、局部圧縮破壊、掻出し破壊に分類しているが側柱下架構においては破壊性状が定かではない。

本研究では、パイルキャップを有した側柱下架構において、基礎梁主筋段数をパラメータとして、正負繰返し変位漸増載荷の加力実験を行うことで、基礎梁主筋が多段配筋された場合における掻出し破壊の破壊性状と問題点の検討を行うことを目的とする。本研究で扱う掻出し破壊とは、梁主筋の外周沿いに接合部を横断して発生するひび割れ面により、折曲げ前方部のコンクリートが塊状のまま掻出される破壊である。

## 2. 基礎梁主筋段数の違う RC 側柱下架構の加力実験

### 2.1 試験体

図-1に試験体概要、表-1、表-2に材料の力学特性を示す。

試験体は、RCの側柱下架構で90度折曲げ定着した基礎梁主筋を多段配筋したものである。試験装置の都合上杭下部にスタブを設けている。試験体名は最終文字が基礎梁主筋段数(S:1段配筋, D:2段配筋, T:3段配筋)

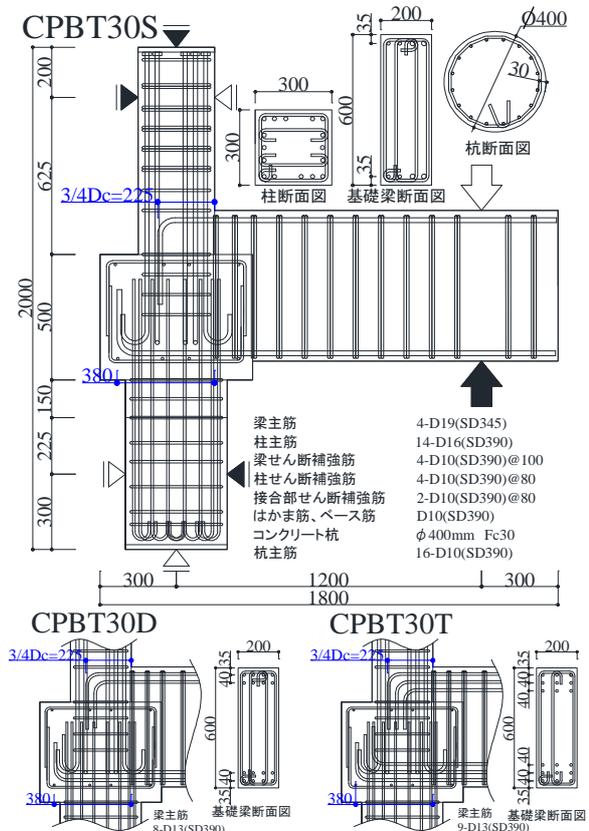


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの力学特性

試験体名	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時歪度 $\epsilon_{max}$ ( $\mu$ )	割線弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
				$E_{1/3}$	$E_{2/3}$
CPBT30S	34.9	2.20	2760	25.7	22.2
CPBT30D	27.9	2.35	2830	23.2	19.4
CPBT30T	34.2	2.40	2650	26.2	22.7

表-2 鉄筋の力学特性

使用部位	呼び名 (種類)	降伏応力度 $\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪度 $\epsilon_s$ ( $\mu$ )	最大応力度 $\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ヤング係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
梁主筋	D19(SD345)	397	2270	581	22.9	175
	D13(SD390)	440	2300	597	21.1	200
柱主筋	D16(SD390)	439	2720	586	24.6	169
補強筋						
杭主筋	D10(SD390)	468	2310	638	16.6	208
はかま筋						

\*1 千代田化工建設(株) (元北海道大学大学院 院生) 修 (工) (正会員)  
 \*2 北海道大学大学院 工学研究院空間性能システム部門教授 博 (工) (正会員)  
 \*3 北海道大学大学院 工学研究院空間性能システム部門准教授 博 (工) (正会員)

を表し、計3体制作した。いずれの試験体も掻出し破壊が先行するようにし、梁断面は200mm×600mm、梁主筋にはCPBT30Sに4-D19(SD345)、CPBT30Dに8-D13(SD390)、CPBT30Tに9-D13(SD390)を使用し、梁曲げ耐力がほぼ同じとなるように設計した。梁主筋の折曲げ半径は各段筋共通して46mmとした。外側筋の水平投影定着長を $225\text{mm}(3/4D_c)$ とし、2段目筋、3段目筋の水平投影定着長をそれぞれ185mm、125mmとした。上端梁主筋の折曲げ余長は梁主筋段数に依らずパイルキャップ内に $10d_b$  ( $d_b$ :梁主筋径)埋め込んだ。柱断面は300mm×300mm、柱主筋は14-D16(SD390)を配し、補強筋は4-D10(SD390)@80を全試験体共通して配筋した。杭はパイルキャップ直下のみ $\phi 400\text{mm}$ の円断面とし、主筋に16-D10(SD390)を配し、リング補強筋D10(SD390)@75を配した。

コンクリートは設計基準強度を $30\text{N/mm}^2$ とし、梁を横倒しにして試験体の側面から打設した。

## 2.2 加力方法

図-2に加力装置概要を示す。

試験体の基礎梁反曲点に配置した2000kN水平ジャッキで強制変位を与えて水平加力を行った。上柱端部、スタブ端部はローラー支持、柱反曲点はダブルピン支持とした。加力は試験体の安定させるために20kN程度の柱軸力を導入後、基礎梁反曲点位置に正負繰返し漸増強制変位を与えた。加力制御は変位制御で、1Cycle Peakを梁の部材角(以下 $R_b$ )= $2 \times 10^{-3}\text{rad}$ とし、その後Peak変位を $R_b=5, 10, 15, 20, 30 \times 10^{-3}\text{rad}$ と増加させながら同一Peak変位を2回ずつ繰り返し行い、最終12Cycle Peakを $R_b=40 \times 10^{-3}\text{rad}$ とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状および荷重変形関係

写真-1に最終破壊状況、写真-2にCPBT30Tの基礎梁取り付け面の最終破壊状況、図-3に復元力特性を示す。

(1) 最大耐力  $R_b=+10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ までの破壊性状

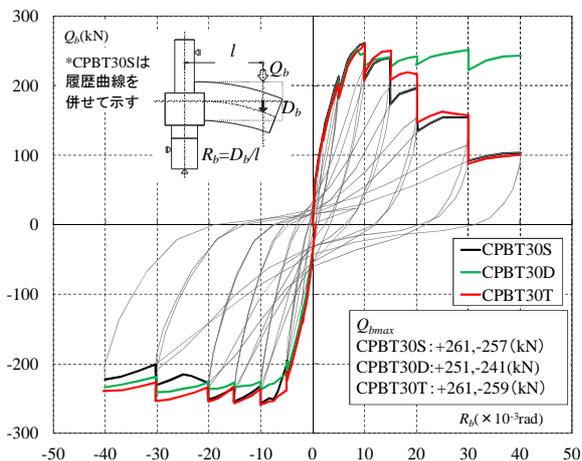


図-3 復元力特性

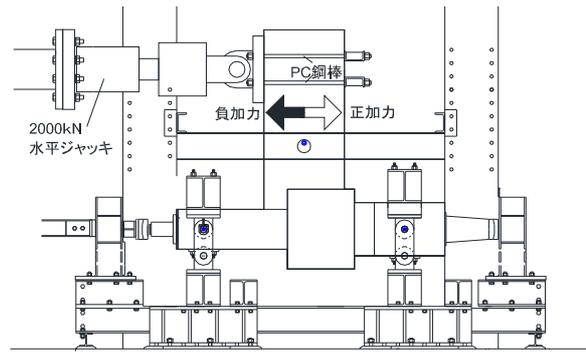


図-2 加力装置概要

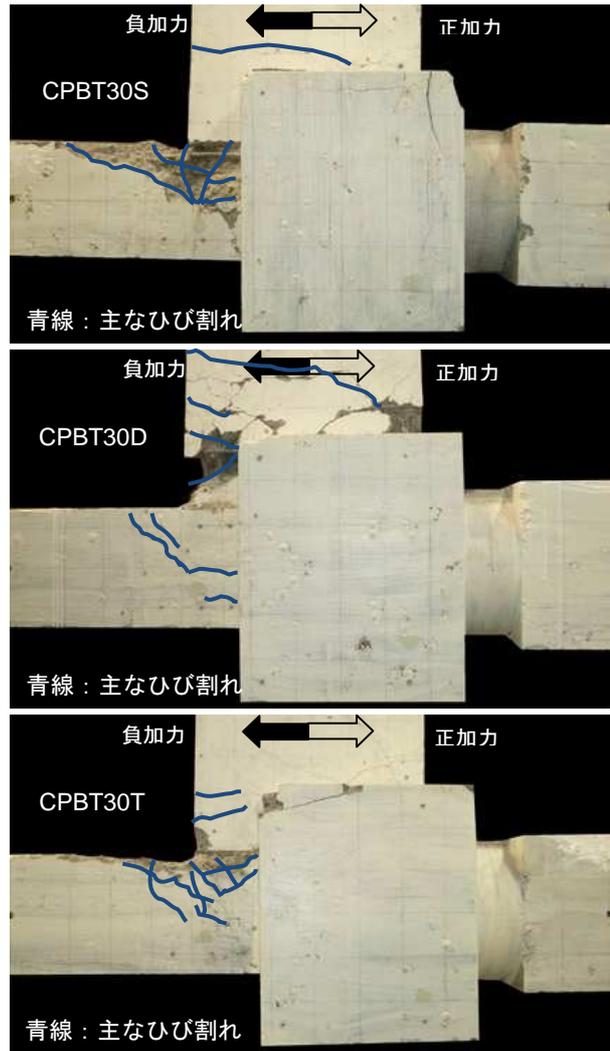


写真-1 最終破壊状況



写真-2 最終破壊状況(パイルキャップ)

全試験体とも基礎梁曲げひび割れ、基礎梁せん断ひび割れ、柱曲げひび割れ、杭曲げひび割れが発生した。更に CPBT30S, CPBT30T では大きな柱せん断ひび割れ、接合部斜めひび割れが発生したが、CPBT30D では柱せん断ひび割れ、接合部斜めひび割れは発生しなかった。

$R_b=+10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ 付近で CPBT30S, CPBT30T のパイルキャップ梁取付け面に柱側から杭側に向かい広がるようにひび割れが発生したが、CPBT30D ではパイルキャップ梁の取付け位置にひび割れが発生した。

(2) 最大耐力  $R_b=+10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ 以降の破壊性状

$R_b=+20.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ までに CPBT30S, CPBT30T では柱せん断ひび割れが伸展して 80%まで耐力低下したが、CPBT30D では基礎梁曲げひび割れ、梁せん断ひび割れが伸展して 95%程度の耐力低下に留まった。その後  $R_b=+40.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ までに CPBT30S, CPBT30T では主に柱せん断ひび割れ、接合部斜めひび割れが拡幅し、柱とパイルキャップそれぞれの基礎梁取付け面側が盛り上がるように顕著に破壊して 40%まで耐力低下した。これに対して CPBT30D では基礎梁危険断面位置のひび割れが顕著に拡幅するのみで 90%程度の耐力を維持していた。

(3) 負加力時の破壊性状

全試験体とも負加力時の破壊性状は同じであった。最大耐力  $R_b=-10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ までに主に基礎梁曲げひび割

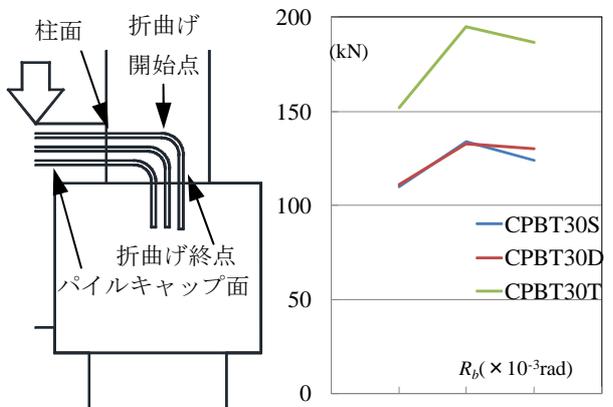


図-4 計測位置

図-5 梁主筋引抜き力(柱面)

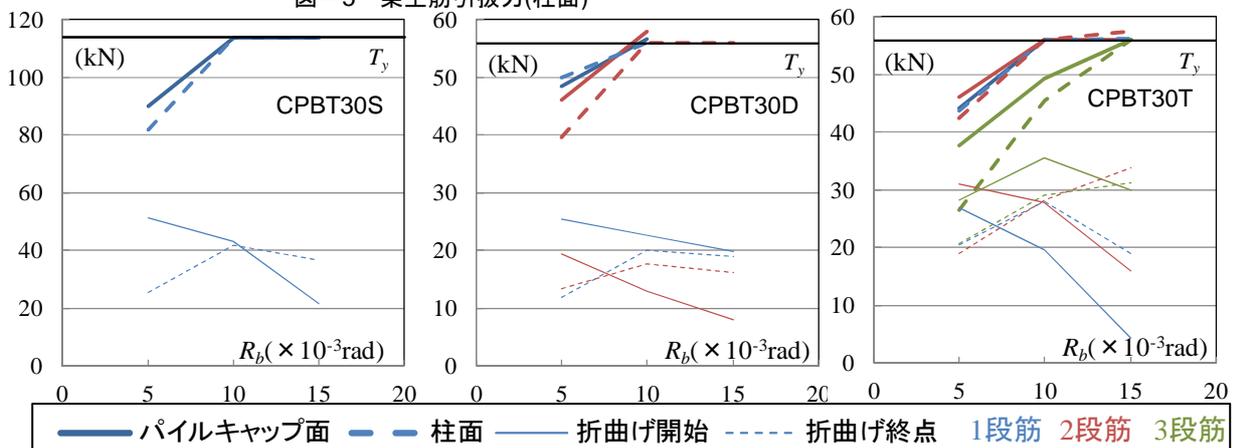


図-6 梁主筋 1 本あたりの鉄筋応力

れ、基礎梁せん断ひび割れが発生した。その後  $R_b=-20.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ までに基礎梁付根において曲げひび割れが拡幅し、その後パイルキャップの基礎梁底面付近のコンクリートが大きく剥落した。

3.2 鉄筋の応力状態

図-4 に歪ゲージによる梁主筋応力計測位置、図-5 に柱面位置の梁主筋引抜き力、図-6 に各試験体の梁主筋 1 本あたりの鉄筋応力、図-7 に各変形時における柱横補強筋の応力を示す。鉄筋の応力は材料試験結果を基に繰返し加力の完全弾塑性モデルを作成し、実験時に歪ゲージから得られた値を応力に換算した。なお、青文字は降伏、赤文字は歪硬化域に至ったことを示し、応力変換モデルの都合でひずみ硬化域に達した Cycle Peak までを有効とした。梁主筋引抜き力とは梁せん断力により基礎梁柱面位置に発生するモーメントと同位置の基礎梁断面における梁主筋引抜き力と応力中心距離で算出したモーメントの釣り合いから算出したもので梁主筋各段 1 列の鉄筋合力を示す。梁主筋引抜き力の算出には各段目筋の応力中心距離の平均値を用いた。

(1) 最大耐力以前の応力状態  $R_b=+5.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$

CPBT30S, CPBT30T では CPBT30D と比べて主筋段数に関わらず折曲げ開始部と折曲げ終点部の応力が大きく CPBT30S, CPBT30T は CPBT30D に比べて最大耐力以前から支圧部の負担が大きく梁主筋に近い柱横補強筋柱せい方向に応力が生じ始めている。柱横補強筋柱幅方向は 3 体ともほとんど変わらず応力が増加しなかった。

(2) 最大耐力時の応力状態  $R_b=+10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$

全試験体で基礎梁主筋がパイルキャップ面位置と柱面位置で降伏し、CPBT30D のみパイルキャップ面位置で歪硬化域に達した。

CPBT30S は梁主筋径が他試験体より太いためパイルキャップ内への埋め込み長さが長い。そのためパイルキャップ内の柱横補強筋柱せい方向に大きな応力が生じたと考えられる。

CPBT30D は基礎梁パイルキャップ面位置の曲げひび割れが拡幅したため梁主筋パイルキャップ面位置がひずみ硬化域に達し、最大耐力以前と比べて梁主筋以外の鉄筋に大きな応力変化はみられなかった。

CPBT30T は外側筋から内側筋の順に定着部支圧力が大きくなり、外側筋の支圧部が内側筋の支圧部に影響を与えていることがわかる。梁主筋に近い柱横補強筋柱せい方向について、定着部支圧力が増加して降伏したと考えられる。ここで、定着部支圧力は折曲げ部内側のコンクリートに生じる応力で、折曲げ開始点と折曲げ終点の鉄筋歪から算出した鉄筋応力の合成した大きさを表す。

柱横補強筋柱幅方向については CPBT30S, CPBT30T については応力が増加したが、CPBT30D についてはあまり応力が増加していない。これは最大耐力時までパイルキャップ梁取付け面において、柱側から杭側にかけて外に開くような斜めひび割れが発生したためであると考えられる。

(3) 最大耐力以降の応力状態  $R_b = +15.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$

CPBT30S では梁主筋折曲げ開始部と終点の応力が減少し、最大耐力時と比べて柱横補強筋は柱幅方向及び柱せい方向で応力が増加し、最終的に降伏した。

CPBT30D では最大耐力時からの耐力低下がほとんどなく、基礎梁主筋折曲げ定着部の応力状態も最大耐力時と比較してほとんど変わらなかった。また鉄筋歪の計測値から最大耐力時に基礎梁主筋柱面位置、パイルキャップ面位置で歪が増大していた。

CPBT30T では最大耐力時と比較して基礎梁主筋折曲げ開始部の応力が減少し、2 段目筋、3 段目筋の折曲げ終点の応力が上昇した。また、基礎梁主筋が柱面位置でひずみ硬化域に達した。柱横補強筋は CPBT30S と同様にパイルキャップ内の柱横補強筋とその柱幅方向も降伏した。

3.3 定着部直線部付着応力度

図-8 に直線部付着応力-部材角の関係、図-9 に各試験体の梁主筋 1 本あたりの直線部付着応力度-部材角の関係を示す。直線部付着応力は柱面位置の応力と折曲げ開始点の応力の差から求め、全梁主筋の付着応力の総和である。

直線部付着応力度とは、基礎梁主筋の柱面位置から折曲げ開始部までの直線部付着応力度を表したもので、柱面位置の応力と折曲げ開始点の応力の差から求め、付着面積で割った。直線部付着長さは 1 段目筋が 161mm, 2 段目筋が 121mm, 3 段目筋が 81mm である。

CPBT30S, CPBT30D の 2 段目筋は最大耐力後に傾きが低下したことにに対し、CPBT30T では最大耐力後も一様に上昇した。付着応力度がおよそ  $9\text{N}/\text{mm}^2$  付近で傾きが急激に低下した。また、鉄筋径が細い CPBT30D よりも

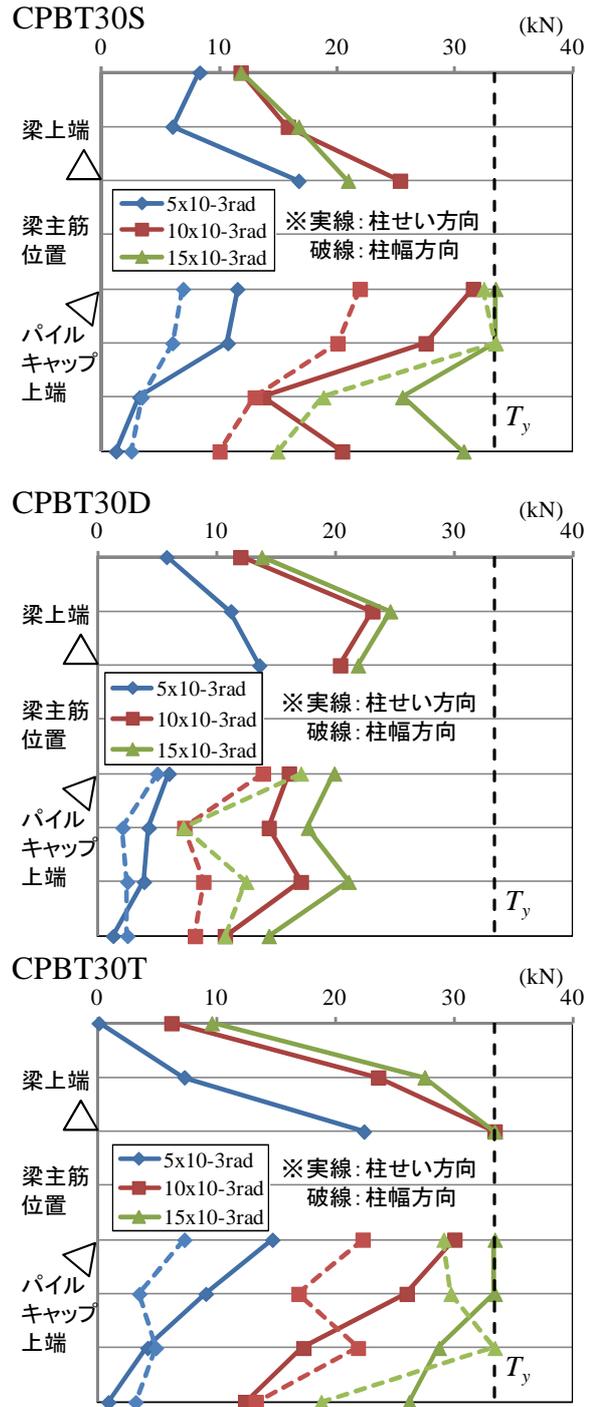


図-7 柱横補強筋応力の推移(正加力時)

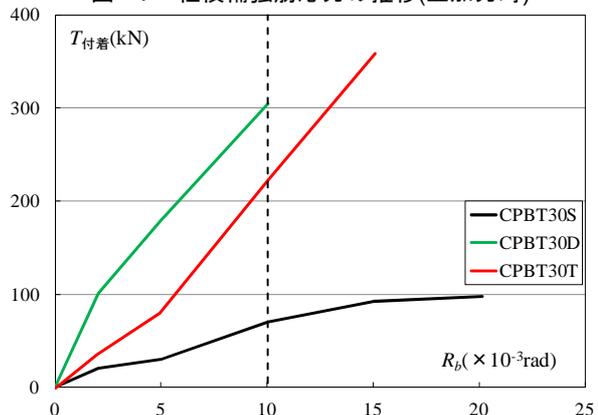


図-8 直線部付着応力  $T_a$ -部材角  $R_b$  の関係

鉄筋径が太い CPBT30S の方が付着応力が小さい。また CPBT30D と CPBT30T は 1 列の梁主筋本数が多いにも関わらず CPBT30T の方が付着応力が明らかに小さい。つまり 2 段配筋よりも 3 段配筋にしたほうが付着性能が低下する結果となった。

### 3.4 定着部支圧力

図-10 に各試験体の梁主筋 1 本あたりの定着部支圧力一部材角の関係を示す。

全試験体共通して、 $R_b = +5.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ 時に定着部支圧力の傾きが急激に低下し、最大耐力時  $R_b = +10.0 \times 10^{-3}(\text{rad})$ 時に定着部支圧力の最大を迎えた。最大耐力以降 CPBT30S, CPBT30T は急激に定着部支圧力が低下したが、CPBT30D は定着部支圧力の低下はほとんど見られず、1 段筋、2 段筋ともにほぼ一定の値を示した。

### 3.5 耐力

表-3 に耐力一覧、表-4 に各耐力式を適用する際の設定値を示す。表中の赤文字は想定破壊形式に対応する耐力を示す。各耐力推定にはパイルキャップを考慮せずに柱断面  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、梁断面  $200\text{mm} \times 600\text{mm}$  の外柱梁架構と想定して特性値を与えて算出した。また掻出し破壊定着耐力推定式<sup>1)</sup>においては、多段配筋の場合に用いる定着長  $L'_{dh}$  の明確な定義がないため、正加力時、負加力時ともに各梁主筋の柱面からの定着長  $L_{dh}$  の平均値  $L'_{dh}$  を用いて求めた。また、材軸方向の梁筋両側にそれぞれ  $L'_{dh}$  を取る  $45^\circ$  の仮定破壊面におけるコンクリートと補強筋の抵抗力の和により耐力を推定する。

梁曲げ耐力算定にはパイルキャップ面位置の断面解析を行い、圧縮コンクリートの歪が 0.3% に達するときの値とした。

接合部せん断終局耐力については靱性保証型耐震設計指針式を用いた。しかしすべての試験体の正加力時において最大耐力が接合部せん断終局耐力計算値を上回っているが、これは接合部有効幅にパイルキャップ幅を考慮せず柱幅を用いたため、実際には計算において耐力を過

小評価していると考えられる。

全試験体で最大耐力時に梁主筋が降伏したが CPBT30S, CPBT30T では梁曲げ耐力には達していないことから、梁曲げ破壊していないと考えられる。CPBT30D は最大耐力実験値と梁曲げ耐力計算値が精度の良い値を示したことから梁曲げ破壊をしたと考えられる。

## 4. 破壊形式の特定

以上より、全試験体ともに梁主筋の降伏により最大耐力が決定した。正加力時において梁曲げ終局耐力に近いにも関わらず破壊形式は、CPBT30S は接合部に大きな損傷の破壊、CPBT30T は梁曲げ降伏以降の掻出し定着破壊、CPBT30D は梁曲げ破壊、負加力時は全試験体で梁曲げ破壊であると考えられる。

CPBT30S と CPBT30D の違いについて、最大耐力時の基礎梁主筋引抜力は同等であった。その上で 3.3 節から基礎梁主筋径が太いほうが付着抵抗力は小さく、また柱取合い部に横補強筋がないことから鉄筋径の太い CPBT30S では折曲げ定着部支圧力に起因して接合部コンクリートの破壊が起きたと考えられる。

CPBT30D と CPBT30T の違いについて、2 段配筋よりも 3 段配筋の場合の方が直線部付着応力が小さく、折曲げ部に加わる支圧応力が大きいことが折曲げ定着部のコンクリートの破壊に影響して CPBT30T では耐力低下を

表-4 各耐力算定時設定値

単位:mm

		加力方向	CPBT30S	CPBT30D	CPBT30T
掻出し定着耐力	$L'_{dh}$ :各段筋の定着長 $L_{dh}$ の重心	+	224	204	184
		-	380	360	340
	$b_e$ :柱幅-(1段に配筋された鉄筋本数×鉄筋径)		224	248	261
梁曲げ耐力	加力点から想定破壊面までの距離	+	柱面までの距離:1050		
		-	パイルキャップ面までの距離:900		
接合部せん断耐力	$j_b e$ :接合部有効幅		梁幅と柱幅の平均値:250		

表-3 耐力一覧

梁主筋せん断力  $Q(\text{kN})$

試験体名	最大耐力 $exp Q_{max}$	柱曲げ $BC Q_{bu}$	柱せん断 $BC Q_{su}$	梁曲げ $BB Q_{bu}$	梁せん断 $BB Q_{su}$	接合部せん断 $BJ Q_{su}$	側方割裂 $BC Q_{uside}$	掻出し $BC Q_{urake}$	
CPBT30S	+	261	280(0.93)	294(0.89)	273(0.96)	315(0.83)	253(1.03)	702(0.37)	269(0.97)
	-	257	319(0.80)	336(0.76)	273(0.94)	315(0.82)	507(0.51)	1062(0.24)	614(0.42)
CPBT30D	+	251	280(0.90)	279(0.90)	255(0.98)	291(0.86)	186(1.35)	1170(0.21)	217(1.15)
	-	241	319(0.75)	319(0.76)	255(0.95)	291(0.83)	388(0.62)	1650(0.15)	563(0.43)
CPBT30T	+	261	280(0.93)	293(0.89)	286(0.91)	266(0.98)	183(1.43)	1176(0.22)	217(1.20)
	-	259	319(0.81)	335(0.77)	286(0.91)	266(0.97)	399(0.65)	1868(0.14)	555(0.47)

【備考】

掻出し破壊定着耐力推定式<sup>1)</sup>

$$cal.T_{AR} = (T_c + T_w) \cdot 9.8 \text{ (N)}$$

$T_c$ : コンクリートの抵抗力(kgf)  $T_w$ : 補強筋の抵抗力(kgf)

$$T_c = 2L'_{dh} \cdot b_e \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot (1 + 6.32\sigma_0 / \sigma_B) / \sin\theta$$

$$T_w = k_w \cdot a_w \cdot \sigma_{wy}$$

$L'_{dh}$ : 定着投影長さ  $= d_b/2$   $k_w$ : 横補強筋有効係数  $= 0.7$

$b_e$ : 接合部有効幅

$a_w$ : 梁筋の上下  $L'_{dh}$  区間に配筋

$\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

された横補強筋の全断面積

$\sigma_0$ : 柱軸応力度

$\sigma_{wy}$ : 横補強筋の降伏応力度

$\theta$ : ストラット角度

\* 靱性式の  $L'_{dh}$  と異なる点に注意

招いたと考えられる。

以上より梁主筋の配筋のみを実験パラメータとした本研究において2段配筋が最良の結果であると考えられる。

## 5. 結語

パイルキャップを有した側柱下架構において、基礎梁主筋が多段配筋された場合における破壊性状の検討の結果、以下の知見を得た。

- 1) 1段配筋の場合、多段配筋に比べて梁主筋とパイルキャップ面の距離が大きくなるため、補強筋がない場合には折曲げ定着部支圧力によりコンクリートの破壊が顕著となる。
- 2) 側柱下架構において、2段配筋よりも3段配筋の場合の方が付着性能が低下するため、それぞれ支圧部に作用する力が大きくなり定着破壊が起こる可能性がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤 C：23560658）の助成を受けたものである。本研究の一部を東京工業大学応用セラミックス研究所共同利用研究(一般 B)として行った。また試験体の製作にあたり、太平洋セメント（株）よりセメントを提供して頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 城 攻, 後藤康明, 柴田拓二: RC 柱梁接合部の内に定着される 90° 折曲げ筋の破壊モードと定着性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.159-164, 1993.6
- 2) 日本建築学会編: 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, 丸善, pp.259-268, 1999.8
- 3) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 丸善, pp.229-256, 2010.2