

論文 鋼管柱内充填コンクリートに埋込まれた基礎梁主筋の定着強度に関する実験的研究

黒木 正幸*1・菊池 健児*2・本藏 達也*3・菅野 哲也*4

要旨：基礎梁主筋を鋼管柱に設けた孔に通し、内部に充填されたコンクリートに直線状に定着する新しい埋込み柱脚の性能を検討するうえで基礎資料となる、鋼管内充填コンクリート部分の定着強度を要素実験により検討した。その結果、中空厚肉鋼管を用いることで通常の角形鋼管の場合よりも高い定着強度が得られ、基礎梁主筋の降伏を保証できる見通しが得られた。

キーワード：埋込み柱脚, 基礎梁, 定着

1. はじめに

鉄骨造建物の柱脚は鉄筋コンクリート造とするのが一般的であり、その形式は露出柱脚・根巻き柱脚・埋込み柱脚に大別される。このうち、図-1 に示す埋込み柱脚は柱せいの2~3倍の埋込み長さを確保することによって高い固定度を得ることができる¹⁾。しかしながら、埋込み柱脚では柱を避けて鉄筋コンクリート(RC)造基礎梁の主筋を配筋する必要があるため、一般に基礎梁の幅は大きくなる。また、片側にしか基礎梁がない側柱の柱脚では、水平荷重時に基礎梁がない側のコンクリートにパンチングシヤー破壊が生じ、柱脚の耐力が柱の曲げ耐力を下回ることがある。このため、U形補強筋の追加

により埋込み部の柱の回転を拘束する方法が用いられている²⁾。

筆者らは角形鋼管柱の埋込み柱脚について図-2 に示すような新たな配筋法を検討している。これは仕口面からある程度入った部分の基礎梁主筋を鋼管壁に設けた孔に通し、内部に充填されたコンクリートに直線状に埋込む方法である。この配筋法により基礎梁主筋を十分に定着できれば、基礎梁の幅を必要最小限にすることができる。また、基礎梁主筋を柱に直接定着するため、U形補強筋を減らせる可能性がある。

地震などの水平荷重時における本柱脚の主な破壊モードとしては、基礎梁主筋の定着破壊・基礎梁がない側

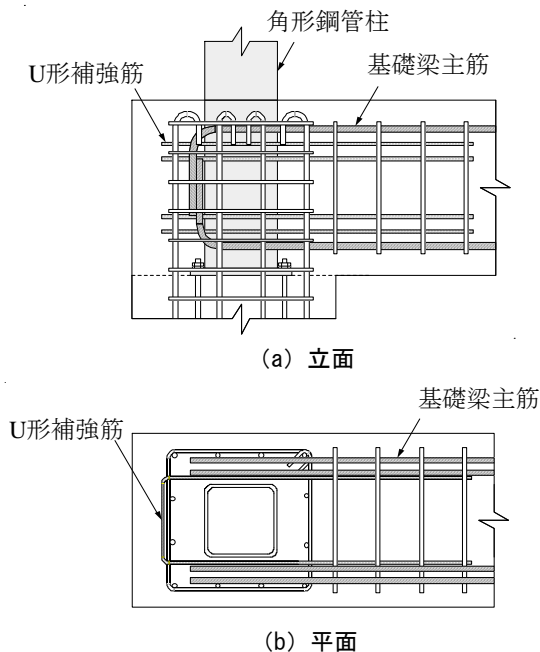


図-1 従来の埋込み柱脚の配筋状況

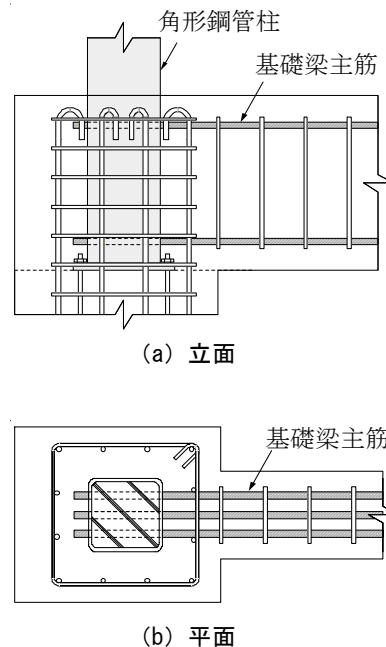


図-2 新しい埋込み柱脚の配筋状況

*1 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース助教 博士(工学) (正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博 (正会員)

*3 大分大学大学院 工学研究科建設工学専攻

*4 旭化成建材(株)

表-1 試験体の諸元と材料の力学的性質

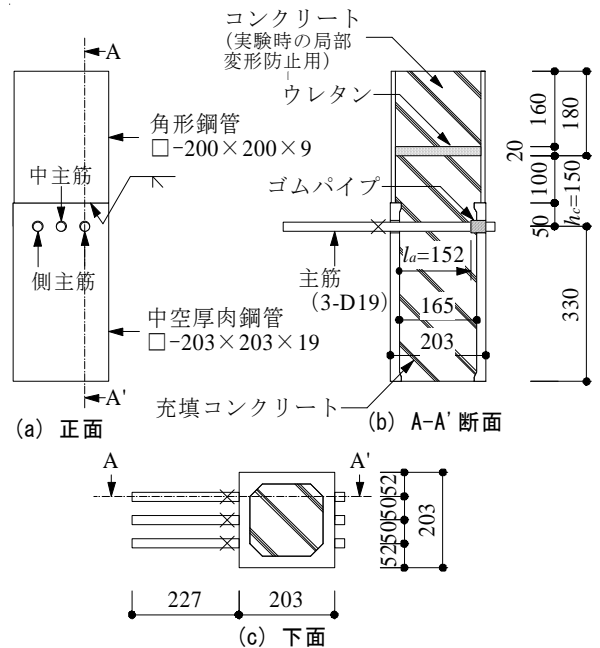
試験体	諸元				材料の力学的性質								
					コンクリート			主筋 (D19)			鋼管		
	鋼管の種類	配合強度 F (N/mm ²)	定着長さ l_a (mm)	充填高さ h_c (mm)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	降伏点強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	降伏点強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	
N21-8d150	角形鋼管	21	152 (8d)	150	23.9	1.98	22.9	523	686	189	388	473	
T21-8d150	中空厚肉鋼管				21.4	1.96	23.8				412	545	
N36-8d150	角形鋼管	36			37.0	3.22	30.5				388	473	
T36-8d150	中空厚肉鋼管				37.0	3.22	30.5				409	535	
T21-8d50	中空厚肉鋼管	21			50	22.1	1.96				22.1	412	545
T21-4d150					76 (4d)	150							

注) d : 主筋径

におけるコンクリートのパンチングシャー破壊・全体的なせん断破壊が考えられる。このうち基礎梁主筋の定着破壊は、仕口面から鋼管壁までの部分と鋼管内では性状が異なり複雑なものになると考えられる。したがって、その強度を推定することも容易ではない。一方で、鋼管内の定着のみで基礎梁主筋の降伏を保証できるとすれば、定着破壊を防止する設計は可能となる。本論は鋼管内における定着について、その基本的な強度を要素実験より検討を行ったものである。用いた鋼管は通常角形鋼管と中空厚肉鋼管である。中空厚肉鋼管は鋼管壁が厚いことと、端部に突出部があることから、充填コンクリートをより拘束できると考え使用した。

2. 試験体

試験体の諸元と材料の力学的性質を表-1に、試験体の形状と寸法を図-3に示す。試験体の主筋は基礎梁の上端主筋を想定している。試験体数は主筋定着部に通常角形鋼管(□-200×200×9)を用いたもの2体と、上下端に5mmの突出部がある中空厚肉鋼管(□-203×203×19)を用いたもの4体の計6体である。角形鋼管を用いた試験体では、全長を一本の鋼管で製作した。一方、中空厚肉鋼管を用いた試験体では、図-3に示すように中空厚肉鋼管と角形鋼管を接合した。主筋の本数と種類は全試験体共通で、3-D19である。鋼管壁の孔径は27mmで、主筋径(19mm)に対して8mmの余裕がある。これは、実施工において柱間隔よりも長尺の主筋を配筋する際、主筋を若干斜めにして鋼管壁の孔に通すことを想定したためである。継手を設けることにより、鋼管壁の孔に通す主筋を短尺のものとする場合は、孔の大きさに余裕はそれほど必要ないと考えられる。



注) × : ひずみゲージの位置, 寸法単位: mm

図-3 試験体の形状と寸法 (試験体 T36-8d150)

試験体名の最初の文字は鋼管の種類を示し、Nが通常の角形鋼管を、Tが中空厚肉鋼管を用いた試験体であることを示す。次の数字はコンクリートの配合強度を示し、21と36(N/mm²)の試験体がある。ハイフンの後の数字と文字 d は定着長さを示す。定着長さは載荷側を起点として主筋径 d の8倍を基本とし、その半分の $4d$ とした試験体が1体ある。定着長さの調整は、主筋をゴムパイプで覆うことにより行った。最後の数字は主筋断面の中心から測ったコンクリートの充填高さを示す。充填高さは150mmを基本とし、1体のみ50mm(中空厚肉鋼管の天端まで)とした試験体がある。

表-2 コンクリートの配合表

試験体	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
N21-8d150	20	4.9	71.2	3.2	49.2	185	260	874	938	3.1
T21-8d150		20.9	59.5	3.6	49.0	184	310	851	909	3.1
T21-8d50										
T21-4d150										
N36-8d150		18.2	47.8	3.8	46.5	176	366	798	954	4.4
T36-8d150										

表-2 にコンクリートの配合表を示す。粗骨材の最大寸法は 20 mm である。なお、主筋のあき寸法（主筋の外間寸法）は 28.5 mm である。

図-4 に主筋の形状を示す。また、表-3 には主筋の詳細寸法と、国分らが定義した主筋の付着性能に関する特性値（せん断面積比 SA、支圧面積比 BA）³⁾を示す。本論では、実験の初期段階で三本の主筋の引張力をそろえる調整が容易な、ねじふし鉄筋を用いた。この鉄筋は支圧面積係数 BA が一般に使用頻度の高い竹ふし鉄筋の 2 倍弱であるため、付着すべり剛性は高いものである。しかし、せん断面積係数 SA は竹ふし鉄筋の 7 割強であり、4.1 節に示す式(1)⁴⁾によれば、引抜け強度（割裂ひび割れが生じることなく、ふし頂部を連なる面でコンクリートがせん断破壊し主筋が引抜ける場合の定着強度）は竹ふし鉄筋の 7 割強である。

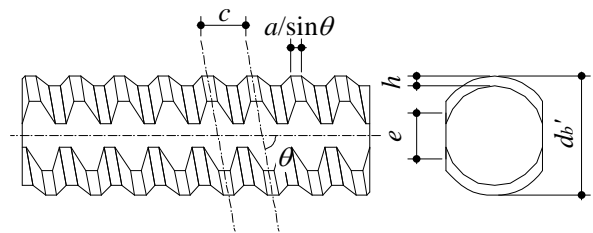


図-4 主筋の形状

表-3 主筋の詳細寸法と付着に関する特性値

種類	最外径 d_b' (mm)	ふし 間隔 c (mm)	ふし 高さ h (mm)	ふし 頂部 の幅 a (mm)	切落 し幅 e (mm)	ふし 傾斜 角 θ (deg.)	公称 周長 ψ (mm)	せん 断面 積係 数 SA	支圧 面積 係数 BA
D19	21.50	8.00	1.75	2.00	8.40	80	60	0.63	0.165

注) $SA = (c - a/\sin\theta)(\pi \cdot d_b' - 2e)(\psi \cdot c)$
 $BA = \{(d_b' - h)\pi - 2e\}h/(\psi \cdot c)$

3. 実験方法

本研究に用いた実験装置を図-5 に示す。主筋の位置が支持スパンの中央となるように試験体を設置し、3 本の主筋に対して単調の引張力を静的に载荷した。支点は

主筋位置から鋼管せい の 1 倍程度離れた位置に設けた。これは、支点が主筋位置に近いと、支点反力が一種の拘束力となり主筋の定着性状に大きく影響すると考えたためである。

変位の測定項目は各主筋の自由端におけるすべり量

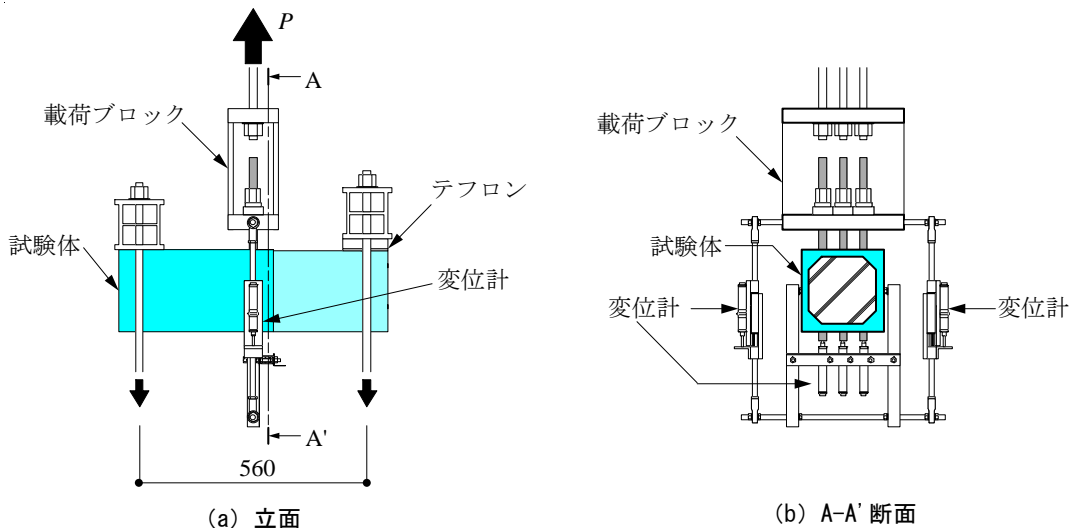


図-5 実験装置

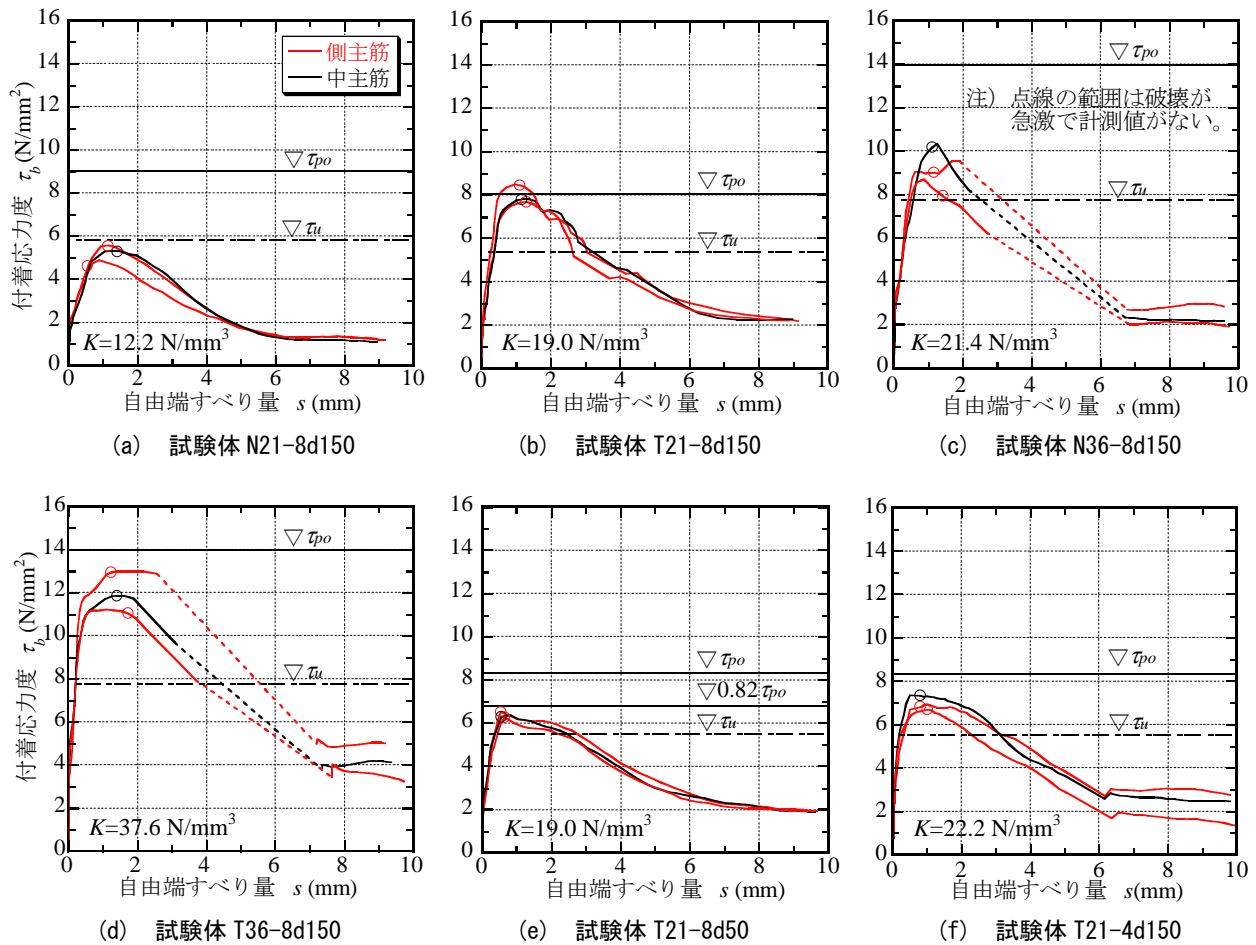


図-6 付着応力度と自由端すべり量の関係

と荷重ブロックの変位であり、これらは鋼管のせい中央に固定された架台に設置した変位計により測定した。また、各主筋に作用する荷重を検出するため、主筋の定着区間外にひずみゲージを貼付した(図-3 参照)。

4. 実験結果および考察

4.1 破壊性状

図-6 に実験により得られた側主筋と中主筋それぞれの付着応力度 τ_b と自由端すべり量 s の関係を示す。ここで、 τ_b は各主筋の負担荷重を、公称周長と定着長さの積で除したものである。各主筋の負担荷重は、全荷重 P を主筋のひずみ度の割合で分配して求めた。 τ_b - s 関係上の○印は、最大荷重 P_{\max} 時を示す。また、図中の K は自由端すべり量が 0.25mm 時の剛性 (3 本の主筋の平均値) を示す。

すべての試験体は、主筋が降伏することなく、定着破壊した。側主筋と中主筋は断面内における存在位置は異なるが同様の τ_b - s 関係を示し、定着強度 $\tau_{b\max}$ に至った後は急激なすべり量の増加と付着応力度の低下がみられた。コンクリート強度が高い試験体 N36-8d150・T36-8d150 では、それが特に脆性的であった。

試験体 N21-8d150・N36-8d150・T36-8d150 については、実験終了後に鋼管を取り除き、充填コンクリートのひび割れ状況を確認した。その結果を図-7 に示す。鋼管内のコンクリートには主筋に沿った割れひび割れが確認され、コーン状のひび割れは全く見られない。

図-6 中の横軸に平行な実線は、式(1)による引抜け強度 τ_{po} の計算値を示す。式(1)は RC 造柱において顕著な付着割れひび割れが生じることなく主筋が付着破壊する場合の強度算定式として提案⁴⁾されたものである。

$$\tau_{po} = 0.60 \sigma_B \cdot SA \quad (1)$$

ここに、 σ_B はコンクリートの圧縮強度、 SA はせん断面積係数である。 σ_B には表-1 に示す数値を、 SA には表-3 に示す数値を用いている。

また、横軸に平行な一点鎖線は式(2)による付着強度 τ_u を示す。式(2)は鉄筋コンクリート造柱梁接合部内における主筋の付着強度の設計式⁵⁾である。

$$\tau_u = 0.7 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \sigma_B^{2/3} \quad (2)$$

ここに、 σ_0 は柱の圧縮軸方向応力度で、本論の試験体

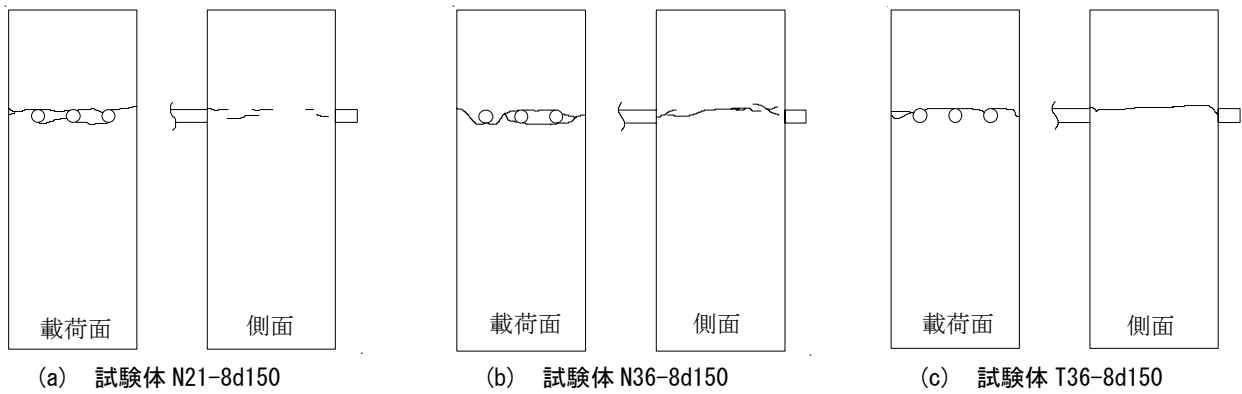


図-7 充填コンクリートのひび割れ状況

の場合は零である。

中空厚肉鋼管を用いた試験体 T21-8d150 では、すべての主筋の定着強度 τ_{bmax} 実験値と引抜き強度の計算値がよく一致している。これは、主筋とコンクリートの付着に期待した定着強度の上限値が得られていることを意味している。また、コンクリートの充填高さが 50 mm と小さい試験体 T21-8d50 については、主筋周辺のコンクリート強度が梁の上端主筋の場合と同等であるとみなし計算値 τ_{po} を 0.82 倍に低減すれば、実験値と計算値は概ね一致する。ここに、0.82 は文献 6) に示される梁の上端主筋に対するその他の主筋の付着強度比 1.22 の逆数である。

その他の試験体では、すべての主筋の τ_{bmax} 実験値が引抜き強度の計算値を下回っており、定着強度は主筋に沿うコンクリートの割裂により支配されたと考えられる。これらの試験体の定着強度実験値は、通常角形鋼管を用いた二つの試験体 (N21-8d150・N36-8d150) では τ_u 計算値で概ね妥当に評価できている。一方、中空厚肉鋼管を用いた試験体 T36-8d150 では実験値が τ_u 計算値の約 1.5 倍で、定着長さが短い試験体 T21-4d150 では実験値が τ_u 計算値の約 1.3 倍となっている。

4.2 鋼管形状の影響

図-8 に実験により得られた主筋群としての定着強度 τ_{bu} に基づく主筋の軸方向応力度 σ_s とコンクリート圧縮強度 σ_B の関係を示す。ここで、図に示しているのは、定着長さが $8d$ の試験体の結果である。主筋群としての定着強度 τ_{bu} は次式により評価した。

$$\tau_{bu} = \frac{P_{max}}{n \cdot \psi \cdot l_a} \quad (3)$$

ここに、 P_{max} : 最大荷重、 n : 主筋本数、 ψ : 主筋の公称周長、 l_a : 定着長さである。

中空厚肉鋼管を用い σ_B が 37.0 N/mm^2 である試験体 T36-8d150 の主筋の応力度 σ_s は、実線で示す SD345 鉄筋の規格降伏点強度を上回っている。これは、直線状の定

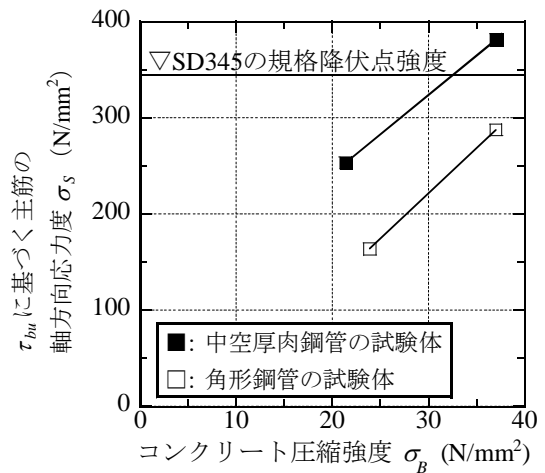


図-8 τ_{bu} に基づく主筋の軸方向応力度とコンクリート圧縮強度の関係

着であっても中空厚肉鋼管を使用すれば、それほど高強度のコンクリートでなくても、鋼管柱内の充填コンクリート部分における定着のみで基礎梁主筋の降伏を保証できることを示唆している。一方、低強度のコンクリートや通常角形鋼管を用いる場合には、鋼管柱内の充填コンクリート部分における定着のみでは不十分で、仕口面から鋼管までの定着にも期待する必要がある。

次に剛性について検討する。本柱脚において図-1 に見られる U 形補強筋をどの程度減らせるかは、定着強度のみならず剛性にも大きく依存する。図-9 に自由端すべり量が 0.25mm 時の剛性 K と σ_B の関係を示す。中空厚肉鋼管を用いた場合の剛性は、通常角形鋼管の場合の 1.5 倍以上となっている。

本論の実験では形状の異なる二種類の鋼管を用いたが、中空厚肉鋼管を用いたほうが通常角形鋼管の場合よりも高い定着強度・剛性が得られた。これは鋼管壁が厚肉であることと、端部に突出部があることによって割裂ひび割れの拡幅を抑制する効果が高いことが要因であると考えられる。ただし、どちらの要因がより支配的かという点は今後の研究課題である。

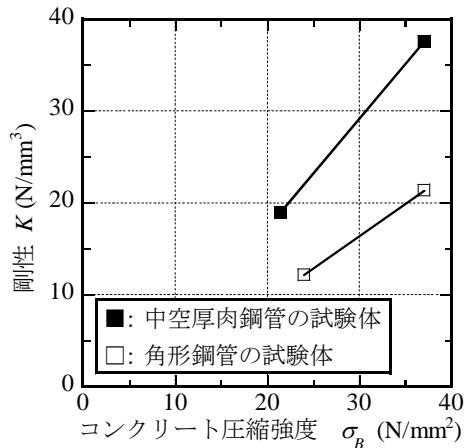


図-9 自由端すべり量が0.25mm時の K と σ_B の関係

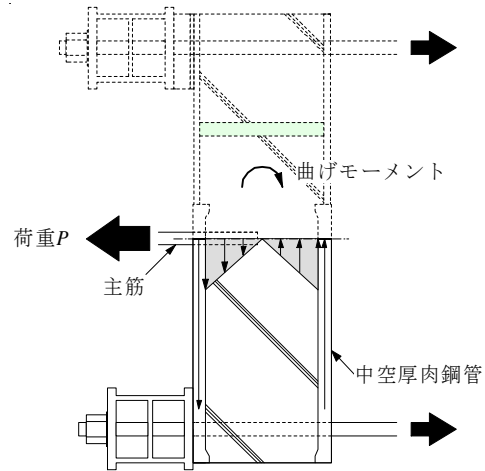


図-10 曲げモーメントにより主筋定着位置の断面に生じる垂直応力度の分布

4.3 コンクリート充填高さの影響

図-6 (b) と図-6 (e) より、主筋断面の中心から測ったコンクリートの充填高さ $h_c = 50$ mm の試験体 T21-8d50 の定着強度 τ_{bmax} は、 $h_c = 150$ mm の試験体 T21-8d150 のそれよりも低い。4.1 節の検討において、 $h_c = 50$ mm の試験体の τ_{bmax} は主筋周辺のコンクリート強度を梁の上端主筋の場合と同等であると見なして低減することにより説明できた。一方、 $h_c = 150$ mm の試験体の τ_{bmax} は特にコンクリート強度を低減することなく説明できた。以上より、 $h_c = 150$ mm の場合はコンクリート脆弱層への定着にはなっていないと考えられる。

4.4 定着長さの影響

図-6 (b) と図-6 (f) を比較すると、定着長さが短い試験体 T21-4d150 は、コンクリートの充填高さが試験体 T21-8d150 と等しいにもかかわらず、定着強度 τ_{bmax} が若干低い。これには試験体に発生する曲げモーメントの影響が考えられる。図-10 に曲げモーメントにより主筋定着位置の断面に生じる垂直応力度の分布を弾性の範囲で模式的に示す。このように、試験体 T21-4d150 では主筋の定着部分がすべて曲げ引張側にあることから、コンクリートによる主筋の拘束が少ない状態となり、定着強度を低下させることが可能性として考えられる。一方、二つの試験体により得られた定着強度はばらつきの範囲内にあり、定着長さによる定着強度の顕著な違いはない可能性もある。このため、定着長さの影響についてはさらに実験データを蓄積した上で検討する必要がある。

5. まとめ

本論では、基礎梁主筋を鋼管柱内の充填コンクリートへ直線状に埋込んだ場合の定着強度について実験研究を行った。得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) 中空厚肉鋼管を用いることで角形鋼管の場合よりも

高い定着強度が得られ、基礎梁主筋の降伏を保證できる見通しが得られた。

- (2) 主筋の中心から測ったコンクリート充填高さが150mmの場合は、主筋の引抜け強度の実験値を特にコンクリート強度を低減することなく説明できた。
- (3) 充填コンクリートの曲げ引張側にのみ主筋を定着すると、全せいにわたって定着した場合よりも低い定着強度が得られたが、なお実験データの蓄積が必要である。

謝辞

試験体に用いたねじふし鉄筋は、東京鉄鋼(株)より提供して頂いた。実験に際し、大分大学技術職員・平松強氏の協力を得た。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：鋼構造接合部設計指針，p.292，2006.3
- 2) 同上，pp.294-296，2006.3
- 3) 国分正胤，岡村甫：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集，第202号，pp.103-113，1972.6
- 4) 黒木正幸，菊池健児，崎野健治，山川哲雄：外部PC鋼棒により横補強されたRC柱における異形鉄筋の付着割裂強度，日本建築学会構造系論文集，第603号，pp.131-138，2006.5
- 5) 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，p.255，1999.8
- 6) 藤井栄，森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第1報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験研究—，日本建築学会論文報告集，第319号，pp.47-55，1982.9