

論文 高密度に軸方向鉄筋を配置した RC 柱の接合部に関する実験的検討

竹市 八重子*1・山口 慎*2・鈴木 裕隆*1・渡部 太郎*3

要旨: 筆者らは、型枠とせん断補強鋼材兼用の一般構造用鋼管内に、軸方向鉄筋を 20%程度と高い密度で配置した高密度 RC 柱構造の検討を行っている。今回、高密度 RC 柱と鋼製梁および 1 柱 1 杭構造の杭との接合方法にソケット方式を用いた場合の挙動を把握することを目的とし、模型試験体による正負交番載荷試験を行った。試験の結果、ソケット部への柱の埋め込み長と軸方向鉄筋定着長の組み合わせが、(1)1.5D, 33φ以上、(2)1.66D, 18φ以上 (D:柱径, φ:軸方向鉄筋径)の試験体において、終局時の部材角は 1/10 以上であり、十分な変形性能を有することがわかった。

キーワード: 高密度配筋, RC 柱, 接合部, 交番載荷試験

1. はじめに

都市部の鉄道の駅において、線路上空に人工地盤を建設する等、線路に近接した箇所では、特注品の極厚鋼管を用いた CFT 柱が多く用いられていた。こうした箇所への鋼製部材の適用は、クレーン等による短時間での架設が容易であることなどが理由として挙げられるが、特注品の極厚鋼管を使用するため RC 柱に比べ材料費が高いことが課題であった。そこで、CFT 柱に代わる構造として、柱鋼管には型枠・せん断補強兼用の一般構造用鋼管を用い、その中に軸方向鉄筋比 20%程度と高い密度で軸方向鉄筋を配置した高密度 RC 柱を考案し¹⁾、柱本体や柱と梁および杭との接合部に関する検討を行っている。

本論では、高密度 RC 柱と鋼製梁および 1 柱 1 杭構造の杭との接合方法として、従来、CFT 柱と梁や杭との接合に適用しているソケット方式を用いた場合の挙動を把握することを目的として、模型試験体による正負交番載荷試験を行ったので、その結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 試験体諸元

試験体諸元を表-1 に、試験体概要図を図-1 に示す。試験体は、高密度 RC 柱と梁又は杭との接合部を模擬したものとした。高密度 RC 柱は軸方向鉄筋比 p を全て 23%程度とし、柱のソケット鋼管への埋め込み長および軸方向鉄筋定着長、ずれ止め筋の配置を試験パラメータとした。

梁との接合部を想定した T-6, T-8 試験体は、柱の軸方向鉄筋のみをソケット部に埋め込み、T-7, T-9 試験体は、柱鋼管および軸方向鉄筋の両方をソケット部に埋め込む構造とした。ずれ止め筋は、φ6 鉄筋を用い、柱鋼管、ソケット鋼管に溶接した。一方、杭との接合部を想定した k-13, NO.1, NO.2 試験体は、柱鋼管および軸方向鉄筋の両方をソケット部に埋め込む構造とした。埋め込み長および軸方向鉄筋の定着長は、柱径 D および軸方向鉄筋径 ϕ に対して、各々 $0.8D \sim 2D$, $18\phi \sim 44\phi$ の範囲とした。なお、柱鋼管を帯鉄筋換算して算出したせん断耐力が曲げ耐力以上となり、柱部材としては曲げ破壊型となるように設計した。

使用した材料は、柱鋼管は STK400、軸方向鉄筋は

表-1 試験体諸元

試験体名	柱鋼管: STK400					軸方向鉄筋: SD390			ソケット鋼管: SS400 (※1) STK400 (※2)		外ダイアラム: SM490A		ずれ止め筋: SR235 (T-6はソケット内側のみ)	柱埋め込み長 (mm)	柱埋め込み条件					
	柱径 D (mm)	鋼管厚 t (mm)	せん断スパン a (mm)	有効高さ d (mm)	せん断スパン比 a/d	径 φ (mm)	本数 (本)	鉄筋比 p (%)	径 (mm)	厚 (mm)	外寸 (mm)	板厚 (mm)								
																径 (mm)	厚 (mm)			
T-6			1800		5.3	D16	104	23.2	470 (※1)	50	1400	36	φ6-13@20	284	梁 接合部	鉄筋のみ (埋め込み長 0.8D, 定着長 18φ) 鋼管+鉄筋 (埋め込み長 1.5D, 定着長 33φ)				
T-7	355.6	9.5	1550	338.1	4.6				470 (※1)	45	600		50	600			36	φ6-10@50	534	鉄筋のみ (埋め込み長 1.5D, 定着長 33φ)
T-8			1550		4.6				470 (※1)	50								φ6-10@50		
T-9	267.4	6.4	1550	253.0	6.1	60	23.4	508 (※1)	45				φ6-10@50			鋼管+鉄筋 (埋め込み長 2D, 定着長 44φ)				
k-13				338.1	5.0	104								710	杭 接合部	鋼管+鉄筋 (埋め込み長 2D, 定着長 22φ) 鋼管+鉄筋 (埋め込み長 1.66D, 定着長 18φ)				
NO.1	355.6	9.5	1700		5.0	D32	26	711.2 (※2)	19					590						
NO.2				339.6	5.0															

*1 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室 工修

*3 東日本旅客鉄道 (株) 東京工事事務所 工事管理室 副課長 工修 (正会員)

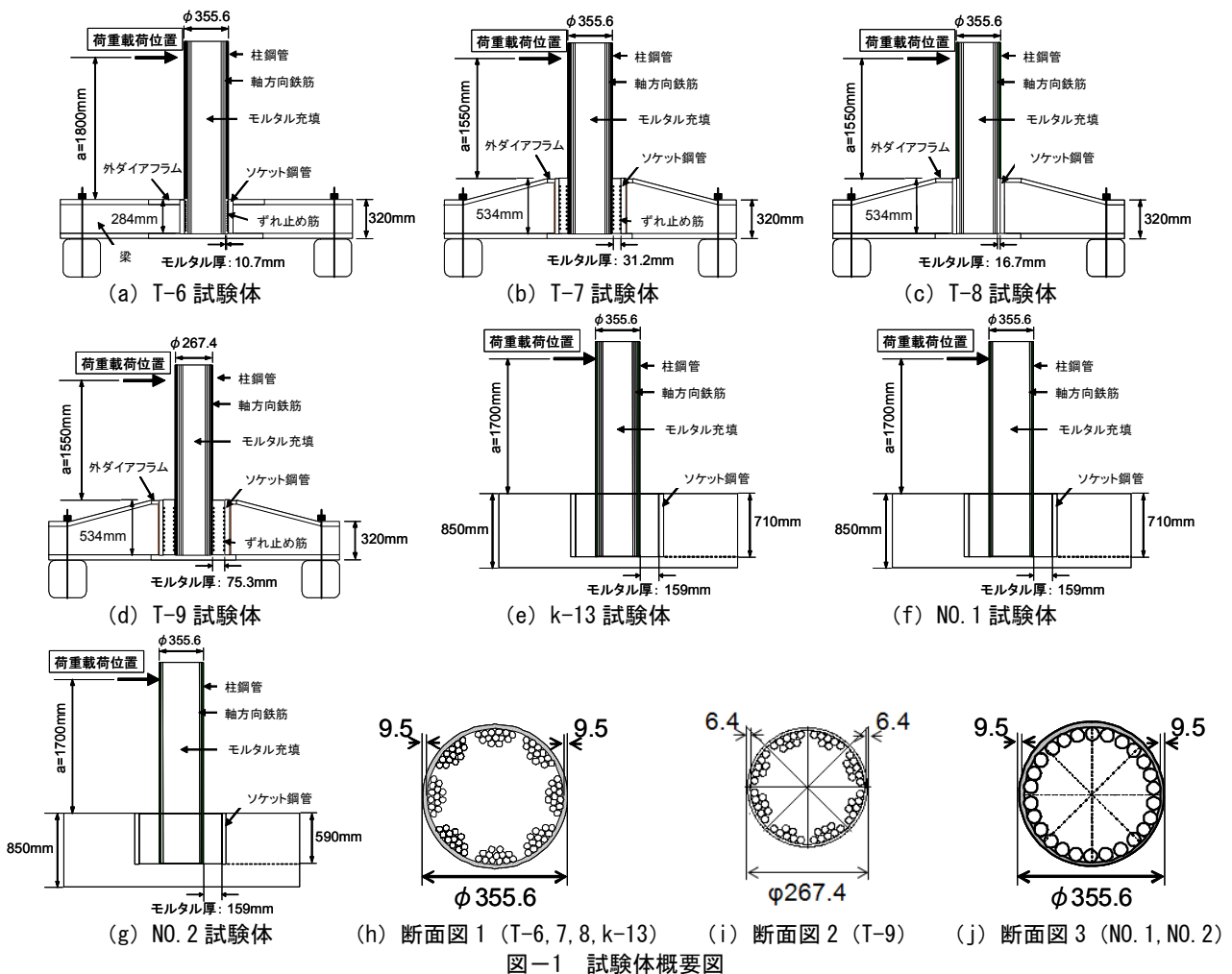


図-1 試験体概要図

SD390, ソケット鋼管はSS400又はSTK400, 外ダイアフラムはSM490Aとし, 充填するモルタルの呼び強度は 40N/mm^2 とした。

2.2 荷重方法

荷重装置の概要を図-2に示す。荷重方法は, 高密度RC柱部材がソケット部から抜け出すことに対して厳しい条件となることを想定し, 軸力は作用させず, 荷重点に水平力を正負交番荷重した。実験における降伏点の定義は, 荷重方向45度位置のいずれかの最外縁の軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時とした。その時の荷重を降伏荷重, 変位を降伏変位 δy とし, 荷重サイクルは $10\delta y$ までは降伏変位 δy の整数倍毎, $10\delta y$ 以降は偶数倍毎の荷重を基本とした。ただし, k-13試験体については, $2\delta y$ 以降は偶数倍毎の荷重とした。

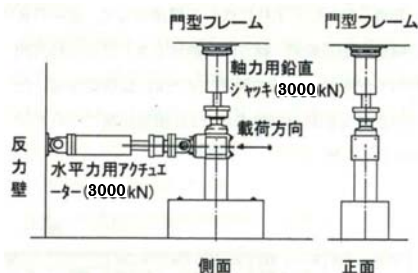


図-2 荷重装置概要

3. 試験結果

3.1 損傷状況

全ての試験体において, 荷重方向45度位置の軸方向鉄筋は, 降伏ひずみに達した。本実験において, 終局は, 最大荷重後, 荷重点荷重が降伏荷重を下回った時点と定義した。各試験体について, 終局時の損傷状況を写真-1~7に示す。また, 写真-1~7に併記した部材角とは, 荷重点変位をせん断スパンで除した値である。

(1) 梁接合部試験体 (T-6, T-7, T-8, T-9 試験体)

4試験体ともに, $2\delta y$ からソケット鋼管内のモルタルの浮きや剥離が認められた。T-6試験体は, ソケット鋼管内のモルタルが破壊されると共に柱がソケット部から抜け出し, その抜け出し量は, 終局時 ($3\delta y$:部材角 $1/20$) に約1cm, 荷重終了時 ($10\delta y$:部材角 $1/6$) に約4cmであった。なお, ソケット部からの柱の抜け出し量とは, 荷重前に柱鋼管の基部(梁又はフーチング天端)にマーキングした位置とソケット鋼管天端位置の差とし, 計測は各荷重サイクルの終了時(変位0mm)とした(以下, 同様)。

T-8試験体は, ずれ止め筋がないためソケット部のモルタルごと柱が抜け出すような破壊性状が見られ, 終局時 ($7\delta y$:部材角 $1/8$) の抜け出し量は約2cm, 荷重終了時 ($12\delta y$:部材角 $1/5$) は約5cmであった。なお, T-6, T-8



3δy : 部材角 1/20
写真-1 T-6 試験体



4δy : 部材角 1/10
写真-2 T-7 試験体



7δy : 部材角 1/8
写真-3 T-8 試験体



7δy : 部材角 1/6
写真-4 T-9 試験体



6δy : 部材角 1/6
写真-5 k-13 試験体



7δy : 部材角 1/5
写真-6 NO.1 試験体



5δy : 部材角 1/8
写真-7 NO.2 試験体

試験体 共に鋼管のはらみ出しは見られなかった。

柱鋼管もソケット部に埋め込んだT-7 試験体は、2δy (部材角1/20) からソケット部のモルタルが徐々に競り上がり、3δy (部材角1/14) で柱鋼管のソケット天端高さ付近がはらみ出し、その後はモルタルが破壊されると共に徐々に柱鋼管の抜け出しが生じた。載荷終了時 (6δy: 部材角1/7) の抜け出し量は約4cm であった。なお、載荷終了後、柱鋼管を引き抜いてソケット埋め込み部の損傷状況を確認したところ、ソケット鋼管天端高さから140mm程度下の位置で柱鋼管が全周破断していた。

T-9試験体は、3δy (部材角1/15) で柱鋼管のソケット天端高さ付近にはらみ出しが発生し、ソケット部表面のモルタル剥離は認められたが、7δy (部材角1/6) で鋼管亀裂、軸方向鉄筋破断が生じるまで柱鋼管の顕著な抜け出しは見られなかった。

(2) 杭接合部試験体 (k-13, NO.1, NO.2 試験体)

3 体の試験体とも、2δy からソケット鋼管内のモルタルの浮きや剥離が認められた。k-13試験体については、4δyで柱鋼管がソケット天端高さ付近ではらみ出し、6δy (部材角1/6) の段階で軸方向鉄筋の破断が発生した。8δy 載荷終了後、10δyを旨した載荷の途中で柱鋼管に亀裂が発生し、載荷を終了した。なお、柱鋼管のソケット部からの顕著な抜け出しは確認されなかった。

NO.1試験体は、3δy (部材角1/13) で柱鋼管がソケット天端高さ付近ではらみ出し、8δy載荷時に柱鋼管の亀裂が発生した。柱鋼管のソケット部からの抜け出しが見られ、軸方向鉄筋の破断は確認されなかった。

NO.2試験体は、2δy (部材角1/19) の段階で柱鋼管とソ

ケット部モルタルの間に7mm程度の隙間が発生し、柱鋼管とソケット内モルタルの間に縁切れが生じた。4δy (部材角1/10) で柱鋼管のはらみ出しは見られたが、その後はらみ出しの顕著な進展は見られず、軸方向鉄筋の破断は確認されなかった。5δy (部材角1/8) 載荷時の抜け出し量は約3.5cmで、載荷終了時 (9δy載荷後) の抜け出し量は約10cmであった。なお、NO.1, NO.2試験体は、載荷装置のストローク限界により、載荷を終了した。

本試験では、早い段階で終局を迎えたT-6試験体を除いた6試験体について、埋め込み長D (D:柱径) と軸方向鉄筋定着長φ (φ:鉄筋径) の組み合わせが、(1) 1.5D, 33φ以上、(2) 1.66D, 18φ以上で、柱の抜け出しが発生したとしても、終局時に部材角で1/10以上を示すことが確認できた。

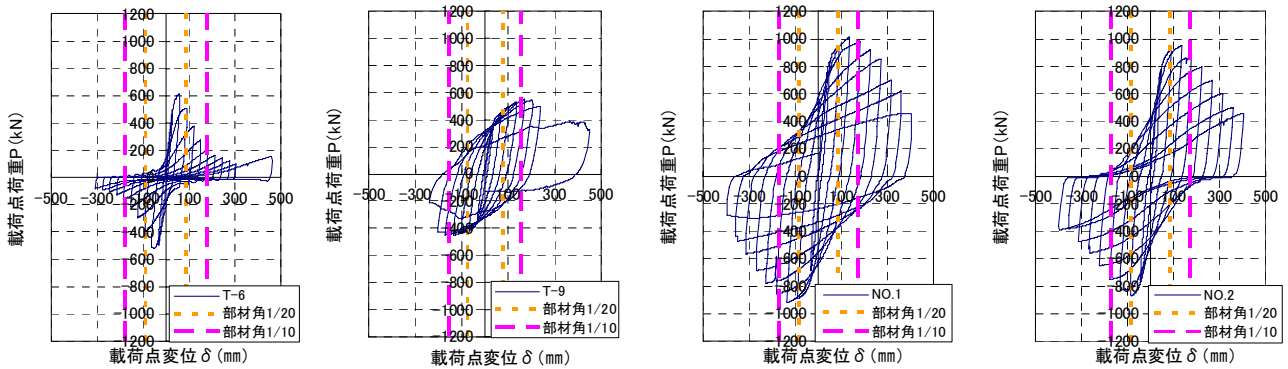
3.2 荷重-変位関係

図-3に載荷点荷重と変位関係の例、図-4にT-6~9試験体における荷重と部材角の関係、図-5にk-13, NO.1, NO.2試験体における荷重と部材角の関係を示す。

(1) 梁接合部試験体 (T-6, T-7, T-8, T-9 試験体)

埋め込み長および定着長が0.8D, 18φ (D:柱径, φ:鉄筋径, 以下同様) であるT-6試験体は、2δy (部材角1/29) で最大荷重となり、3δy (部材角1/20) と早い段階で降伏荷重を下回る結果となった。履歴形状は、最大荷重以降、スリップ形となる傾向がみられた。

図-4の包絡線で比較すると、T-6試験体とT-8試験体は、正負で若干差は見られるが、降伏点までは同じような挙動を示した。T-7試験体は、柱鋼管がソケット部に埋め込まれており、柱鋼管が曲げモーメントに対して抵抗した



(a) T-6 試験体 (b) T-9 試験体 (c) NO.1 試験体 (d) NO.2 試験体
 図-3 荷重と変位関係の例

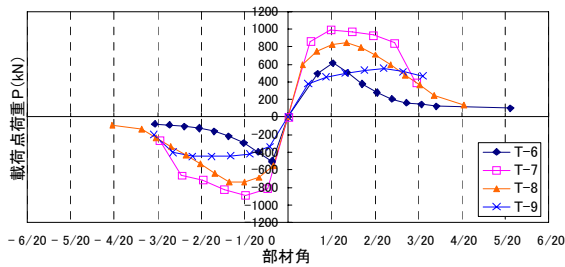


図-4 荷重と部材角の関係(1)

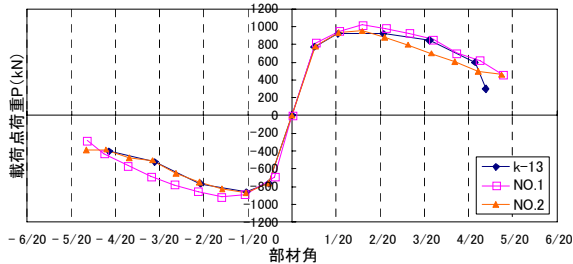


図-5 荷重と部材角の関係(2)

ため、柱鋼管径が同型であるT-6, T-8試験体よりも、荷重は大きくなる結果となった。

T-6試験体よりも埋め込み長および定着長が1.5D, 33φと大きいT-8 試験体は、T-6試験体 よりも荷重の低下が緩やかで、最大荷重もT-6試験体より大きくなった。4δy (部材角1/15) で最大荷重を示した後7δy (部材角1/8) で降伏荷重を下回った。

柱鋼管と鉄筋をソケット部に埋込み、埋め込み長および定着長を1.5D, 33φとしたT-7 試験体は、2δy (部材角1/20) で最大荷重を示した。その後、4δy (部材角1/10) で降伏荷重を下回り、荷重低下は3体のうち最も緩やかであったが、6δy (部材角1/7) で急激に荷重が低下した。載荷終了後、柱鋼管を引き抜いてソケット埋め込み部の損傷を確認したところ、ソケット天端高さから約140mm下の位置で柱鋼管が全周破断していたことから、急激な荷重低下はこの柱鋼管の破断によるものと推測される。

T-9試験体については、紡錘形の履歴ループを描き、5δy (部材角1/9) まで荷重は増加した。7δy (部材角1/6) で軸方向鉄筋破断および柱鋼管引張側で亀裂が発生し、その結果荷重が急速に低下して降伏荷重を下回った。

(2) 杭接合部試験体 (k-13, NO.1, NO.2 試験体)

k-13試験体は、2δy (部材角1/19) で最大荷重を示し、その後6δy (部材角1/6) で降伏荷重を下回った。同様に、NO.1とNO.2試験体は、ともに3δy (部材角1/13) で最大荷重となり、それぞれ7δy (部材角1/5) と5δy (部材角1/8) で降伏荷重を下回った。3試験体について、損傷状況に違いは見られるものの、荷重-変位関係の包絡線に顕著な違いは確認できなかった。

3.3 実験結果に関する考察

(1) 損傷状況

代表的な試験体について、図-6~10に各載荷サイクル(引き側) ピーク変位時における載荷方向最外縁の軸方向鉄筋および鋼管のひずみ分布図、図-11にひずみ計測箇所を示す。使用したひずみゲージは、大ひずみまで計測可能な塑性域ゲージとした。なお、ひずみ分布グラフにおいて、一部折れ線が不連続となっている箇所は、変形に伴うひずみゲージの剥離等により計測が不可能となったことを示す。

図-6より、T-7試験体は、2δy以降軸方向鉄筋ひずみの顕著な増加は認められなかった。これは、柱がソケット部モルタルから抜け出していたことが影響していると推測できる。また、T-6試験体およびT-8試験体においても同様な傾向がみられ、それぞれ2δyおよび4δy以降の軸方向鉄筋のひずみ増加はあまりみられなかった。

図-7より、T-9試験体については、載荷サイクルの増加にしたがい、鉄筋および柱鋼管ひずみの増加が認められた。また、鉄筋と柱鋼管のひずみを比較するとほぼ同程度で推移していることから、柱鋼管および軸方向鉄筋の抜け出しが生じなければ、鋼管と軸方向鉄筋は概ね一体として挙動することがわかった。

図-8より、杭接合部を想定したk-13試験体(埋め込み長2D, 軸方向鉄筋定着長44φ)については、T-9試験体同様、載荷サイクルの増加に従いひずみ値が増加する傾向がみられ、柱鋼管の顕著な抜け出しは確認されなかった。一方、NO.1およびNO.2試験体については、柱鋼管のソケ

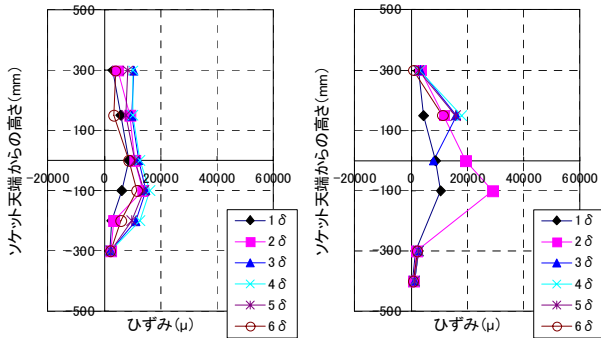


図-6 ひずみ分布図 (T-7 試験体)

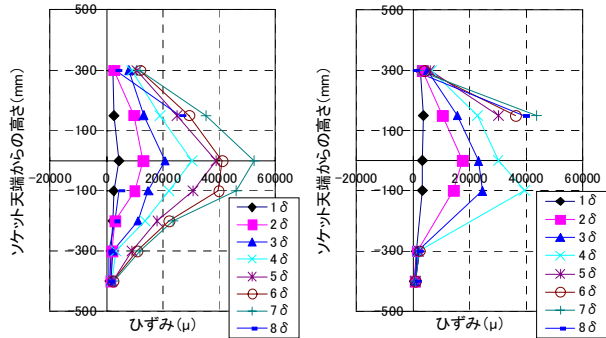


図-7 ひずみ分布図 (T-9 試験体)

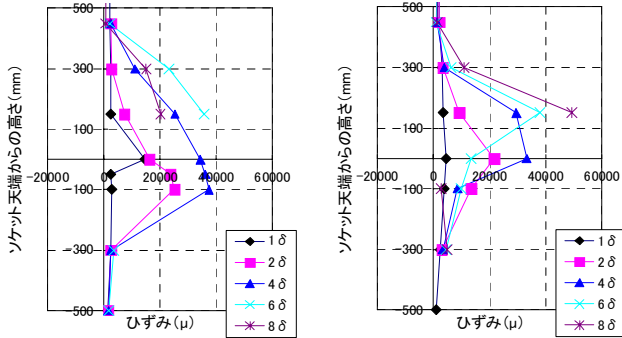


図-8 ひずみ分布図 (k-13 試験体)

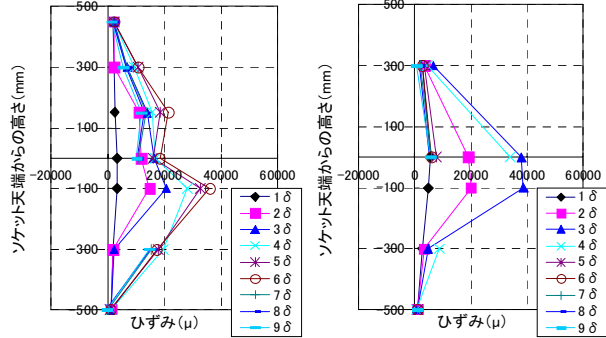


図-9 ひずみ分布図 (NO.1 試験体)

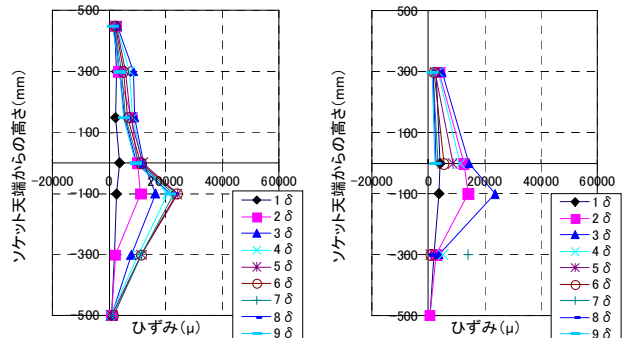


図-10 ひずみ分布図 (NO.2 試験体)

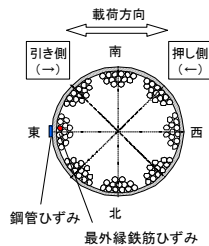


図-11 ひずみデータ計測箇所

ット天端付近のひずみ値は $3\delta y$ 以降増加は確認できず、軸方向鉄筋についても载荷サイクルの増加に伴う顕著なひずみ値の増加はみられなかった(図-9, 10)。また、ソケット天端から-300mmの高さと-500mmの高さにおける軸方向鉄筋ひずみ値に着目すると、k-13試験体は-300mmと-500mm位置でほぼ同程度の小さなひずみとなっており、軸方向鉄筋がモルタルとの付着により定着が確保されていると考えられる。一方、NO.1とNO.2試験体は、载荷ステップの進捗に伴い、ソケット天端から-300mmの高さの軸方向鉄筋のひずみ値がそれぞれ10000

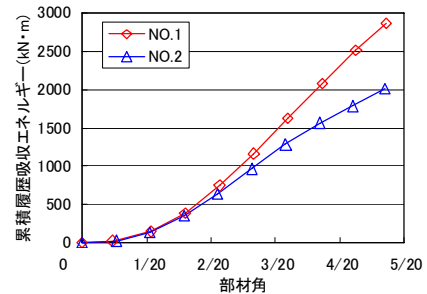
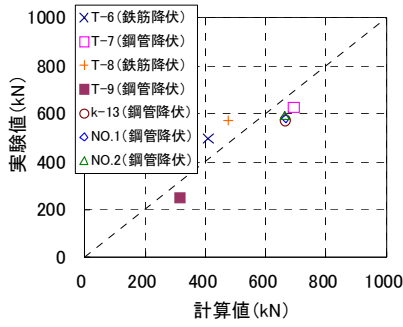


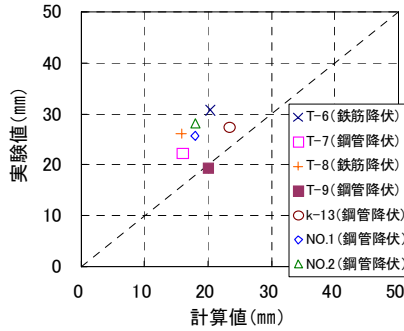
図-12 各载荷サイクルにおける累積履歴吸収エネルギー

μ 以上となっており、k-13試験体と比較しても軸方向鉄筋に大きな応力が発生していることから、埋め込み深さを考慮するとモルタルとの付着による定着は切れていたと推測できる。NO.1とNO.2試験体は、k-13試験体よりも、外部の損傷状況からソケット部から柱鋼管の抜け出し量が大きかったことは確認できたが、柱鋼管内部の軸方向鉄筋も同様に抜け出していたものと推測できる。

図-12に、NO.1試験体とNO.2試験体における累積履歴吸収エネルギーの比較を示す。ここで、累積履歴吸収エネルギーとは、荷重-変位関係の履歴ループの面積を载荷サイクルごとに累積した値とした。両試験体が最大荷重となった $3\delta y$ (部材角 $1/13$)時までは、ほぼ同程度の累積履歴吸収エネルギー値を示すが、NO.2試験体が降伏荷重を下回った $5\delta y$ 時には、NO.1試験体の累積履歴吸収エネルギーに対して8割程度、 $9\delta y$ 時には7割程度と徐々に差が大きくなった。これより、柱の埋め込み長および軸方向鉄筋の定着長が短い程、ソケット部から柱部材の抜け出し量は大きく、履歴吸収エネルギーは小さくなる



(a) 降伏荷重



(b) 降伏変位

図-13 降伏荷重、降伏変位の計算値と実験値の比較

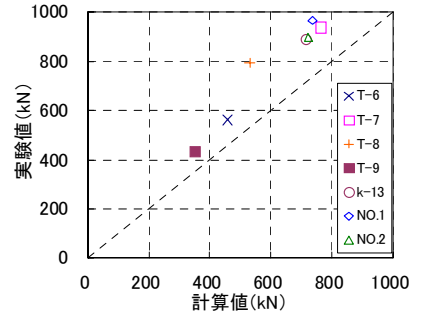


図-14 最大荷重の計算値と実験値の比較

傾向を示すことがわかった。

(2) 計算値との比較

図-13に、降伏荷重および変位の計算値と実験値の比較、図-14に最大荷重の計算値と実験値の比較を示す。計算値は、鉄道構造物等設計標準の曲げ耐力計算式²⁾に基づき算出した。なお、柱鋼管をソケット部に埋め込んだタイプは、柱鋼管についても軸方向鉄筋に換算した。降伏荷重と変位の算出にあたっては、柱鋼管をソケット部に埋め込んだタイプは (T-7, T-9, k-13, NO.1, NO.2 試験体)、荷重方向45度位置の柱鋼管ひずみが降伏ひずみに達した時の値とし、柱鋼管をソケット部に埋め込まないタイプ (T-6, T-8 試験体) は、荷重方向45度位置の軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時の値とした。

柱鋼管をソケット部に埋め込んだ試験体の降伏荷重 (鋼板降伏時荷重) は、計算値より実験値が小さくなる傾向がみられ、今回の実験範囲における計算値に対する実験値の割合は0.8~0.9程度であった。一方、降伏変位については、T-9試験体は計算値と実験値が同程度であったが、それ以外は計算値に対して実験値の方が1.2~1.6倍程度大きくなり、ばらつきがみられた。

また、柱鋼管をソケット部に埋め込まない試験体は、計算値に対して実験値の方が降伏荷重 (鉄筋降伏時荷重) は1.2倍程度、降伏変位は1.5~1.7倍程度となった。

最大荷重については、全ての試験体において実験値が計算値より大きくなり、計算値に対して実験値が1.2~1.5倍程度の値となった。

4. おわりに

本論では、線路上空に人工地盤を建設する際に多く用いられているCFT柱に代わる高密度RC柱を対象に、柱と鋼製梁および杭とのソケット接合部について、柱部材のソケット部への埋め込み長および軸方向鉄筋定着長を主なパラメータとして正負交番荷重試験を行い、その結果を報告した。本試験の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 梁接合部を想定した試験体 (T-6, T-7, T-8) において、ソケット部埋め込み長および軸方向鉄筋定着長の違いに関わらず、降伏点までの挙動は3試験体間に顕著な差は認められなかった。ただし、埋め込み長0.8Dで定着長22φの試験体 (T-6) については、早い荷重段階で降伏荷重を下回る結果となった (3δy : 部材角 1/20)。一方、埋め込み長2D、定着長33φを確保した試験体 (T-9) は、柱のソケット部からの顕著な抜け出しはみられなかった。
- (2) 杭接合部を想定した試験体 (k-13, NO.1, NO.2) において、今回の試験条件ではソケット部への埋め込み長が1.66D以上および軸方向鉄筋定着長18φ以上で、損傷状況や荷重ループには違いがみられるものの、荷重変位関係の包絡線に大きな差異はみられなかった。ただし、埋め込み長および軸方向鉄筋の定着長が短いほど、履歴吸収エネルギーは小さくなる傾向がみられた。
- (3) ソケット部への柱の埋め込み長と軸方向鉄筋定着長の組み合わせが、(1)1.5D、33φ以上、(2)1.66D、18φ以上の試験体において、ソケット部から柱の抜け出しが確認されたものもあるが、全ての試験体において終局時の部材角は1/10以上であった。よって、実際の構造物に本構造を適用した場合、上記の条件を満たせば、必要な変形性能は十分に確保できるといえる。
- (4) 降伏荷重については、柱鋼管をソケット部に埋め込んだタイプは実験値/計算値が0.8~0.9程度、埋め込まないタイプは1.2倍程度となり、最大荷重については、1.2~1.5倍程度の値となった。

参考文献

- 1) 小林寿子, 小林薫: 高密度配筋 RC 柱の変形挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, NO.2, pp.1663-1668, 2009.7
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物, 丸善, 2004.4