

鋼管形式による杭頭半剛接接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究

山田和夫*1 関俊力*2 河邊拓也*3 伴幸雄*4

- *1 愛知工業大学 工学部都市環境学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)
- *2 愛知工業大学 大学院工学研究科生産・建設工学専攻 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)
- *3 株式会社青島設計 構造設計部 (〒460-0011 愛知県名古屋市中区大須4-14-51)
- *4 矢作建設工業株式会社 地震工学技術研究所 (〒480-1101 愛知県愛知郡長久手町熊張茨ヶ廻間1533-74)

要旨：本研究では、鋼管によって補強された杭頭半剛接接合部の1軸圧縮特性について一連の実験的検討を行った。その結果、鋼管の埋込みが浅いほどひび割れは杭頭部に集中し、鋼管による割裂き効果が著しくなること、鋼管の埋込みが深くなると、鋼管による割裂き効果よりもコア部コンクリートに対する鋼管によるコンファインド効果が卓越するようになり、杭頭半剛接接合部の最大圧縮耐力および圧縮靱性は一般的に向上すること、鋼管とコンクリート間に界面処理を施して界面摩擦を低減させても、杭頭半剛接接合部の最大圧縮耐力はそれほど影響を受けないが、最大耐力後の耐荷性能は若干劣ること、などが明らかとなった。

キーワード：場所打ち杭、杭頭半剛接工法、鋼管形式、1軸圧縮特性、割裂き効果、コンファインド効果

1. まえがき

筆者らは、別報^{1,2,3,4)}において、基礎と杭頭との接合部を杭体の破壊が杭頭部に集中するように断面積を減少させ、かつ接合部の局所的な破壊の防止およびじん性を確保する目的で断面減少部を鋼管および芯鉄筋により補強した杭径が400mmおよび600mmの杭頭半剛接接合部モデル試験体を用いて、杭頭半剛接接合部の曲げせん断挙動および純曲げ挙動について一連の検討を行い、部材角が1/100程度までは安定した履歴特性が確保できること、並びに接合部の回転性能は、芯鉄筋のひずみ分布から概略評価できることなどを明らかにした。また、杭径400mmの杭頭半剛接接合部および断面減少鋼管コンクリート部の正負繰返しおよび単調漸増載荷時の1軸特性に及ぼす鋼管の肉厚および細長比、並びに鋼管の軸力負担の影響について検討^{5,6,7,8)}を行い、断面減少鋼管コンクリート部の1軸圧縮特性は、鋼管によるコンファインド効果と軸力

負担分を考慮することによって精度良く予測できるが、杭頭半剛接接合部の耐力が鋼管の杭体部への貫入により杭体が割られ裂かれることによって決まる場合には、危険側の予測となることなどを明らかにした。

本研究では、引き続き場所打ち杭を対象とした鋼管形式による杭頭半剛接工法の確立を目的とした基礎的研究として、杭径を実大寸法に近い600mmに設定した漸増繰返し1軸圧縮荷重を受ける杭頭半剛接接合部の力学挙動に及ぼす鋼管の埋込み深さおよび鋼管とコンクリート間の界面摩擦性状の影響について一連の実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、Table 1 およびFig. 1に示すように、杭体部がφ600×600mmで杭頭断面減少部をφ450×30mmに設定したモデル試験体を用いて、杭頭半剛接接合部の単

Table 1 Outline of experiment

Specimen No.	Detail of section reducing steel tube part						Detail of RC pile part					
	Surface treatment	Thickness (mm)	Depth (mm)	Diameter (mm)	Length (mm)	Core steel bar		Size (mm)	Main steel bar		Hoop	
						Arrangement	Pc (%)		Arrangement	Pg (%)	Arrangement	Pw (%)
P-00-N	—	—	—	—	—	—	—	φ600×600	12-D19	1.22	D10@90	0.26
P-10-N	Non treatment	4.5	10	φ450	50	12-D16	1.50	φ600×600	12-D19	1.22	300~600mm from top:D10@90 (300mm from top:D10@70)	0.26 (0.34)
P-30-N			30		90							
P-90-N			90		210							
P-10-S	Friction reducing	4.5	90	φ450	50	12-D16	1.50	φ600×600	12-D19	1.22	300~600mm from top:D10@90 (300mm from top:D10@70)	0.26 (0.34)
P-30-S			30		90							
P-90-S			10		210							

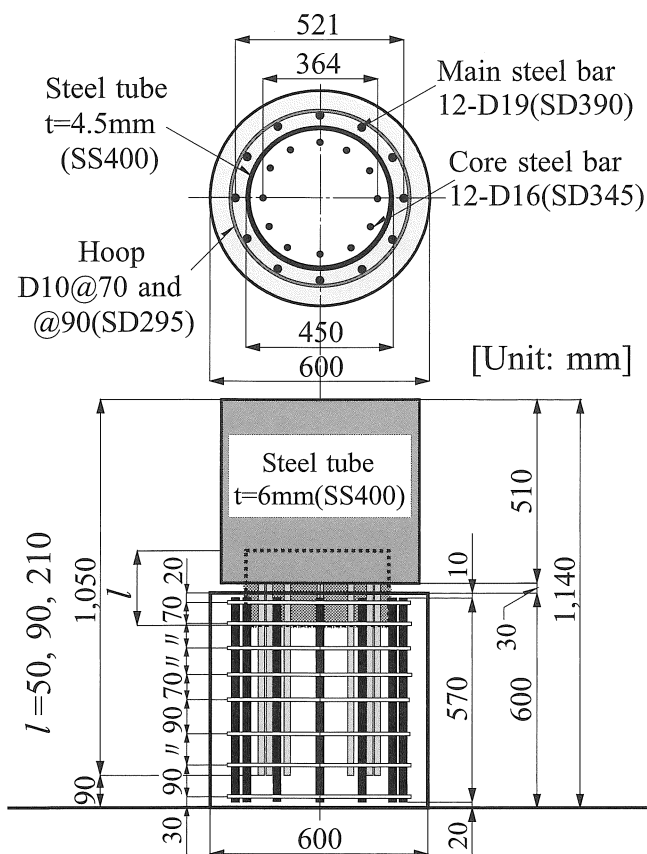


Fig.1 Detail of Specimen

調漸増繰返し1軸圧縮特性に及ぼす鋼管の埋込み深さ（断面減少部の鋼管長さが一律に30mmで基礎部・杭体部への埋込み深さがd=10、30および90mm（鋼管の全長はl=50、90および210mm）の3種類）、並びに鋼管とコンクリート間の界面処理（無処理および摩擦低減処理（鋼管の表裏側面にグリスを塗布した後にポリ塩化ビニルフィルムを貼付し、かつ鋼管上下端に接するコンクリートからの軸力伝達を防ぐために鋼管上下端面に厚さ10mmのポリウレタン製の緩衝材を貼付した）の2種類）の影響について調査を行うとともに、比較のために、杭体だけの試験体（φ600×600mm、Pg=1.22%、Pw=0.26%）についても調査を行った。なお、杭体部は、長さ570mmの主筋を12-D19（Pg=1.22%）、帯筋を杭頭から300mmの区間がD10@70（Pw=0.34%）および300mm以上の区間がD10@90（Pw=0.26%）で配筋し、鋼管部には長さ1,050mmの芯鉄筋を12-D16（Pc=1.50%）で配筋した。また、基礎部はパイルキャップを想定して、杭体部に比べて十分に剛となるように厚さ6.0mmの鋼管で補強した鋼管コンクリートとした。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作に際しては、コンクリートの呼び強度をN30、設計スランプを18cmとし、普通ポルトランドセメント、瀬戸産の山砂（最大寸法：5mm、表乾密度：2.56g/cm³）・山砂利（最大寸法：25mm、表乾密度：2.61g/cm³）およびAE減水剤を使用して調合を決定した。本実験で用いたコンクリートの標準調合表をTable 2 に示す。

Table 2 Mix proportion of concrete

Nominal strength	W/C (%)	Unit content (kg/m ³)				Admixture
		Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	
N30	48.1	368	177	735	979	3.69

Table 3 Test results of used materials

(a) Concrete

Age (days)	Density (g/cm ³)	Strength (MPa)		Young's modulus (GPa)
		Tension	Compression	
28	2.24	2.88	31.4	—
38	2.20	2.20	27.1	25.8
52	2.20	2.69	29.0	23.8

[Notes] Age=28 days: Water curing specimen, Age=38 Seal up curing specimens before and after experiments, respectively.

(b) Reinforcing bars

Kind of steel bar	Nominal name	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Core	D16	391	551	186
Main	D19	445	635	191
Hoop	D10	364	509	201

(c) Steel tube

Specimen No.	Thickness of tube (mm)	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
T45	4.5	296	362	229
T60	6.0	353	451	206

杭試験体は、杭体部と基礎部を同時に製作した。コンクリートの打設に際しては、試験体製作上の都合により杭体部が上側、基礎部が下側となるようにして、骨材がかぶり部にも均等に行き渡るように注意しながらコンクリートの打設を行い、棒状パイププレートによる締固めを十分に行った後に約2週間で脱型し、以後試験直前まで実験室内でシート養生を行った。試験材齢は5~7週であった。なお、使用コンクリートの力学的性質を調べるためにコンクリート打設時にφ10×20cmの供試体を同時に製作し、材齢28日（標準水中養生）、並びに実験直前および直後（封緘養生）の時点で圧縮強度試験および引張強度試験を行った。コンクリート、鉄筋および鋼管に関する材料試験結果を一覧表にしてTable 3 に示す。

2.3 加力および測定方法

加力要領をFig. 2に示す。杭頭半剛接合モデル試験体の圧縮載荷に際しては、4,400kNアクチュエーター2基を使用し、原則として除荷開始変位を0.2、0.5、1.0、2.0、4.0、7.0、10、15および20mm（全測定区間：630mm（断面

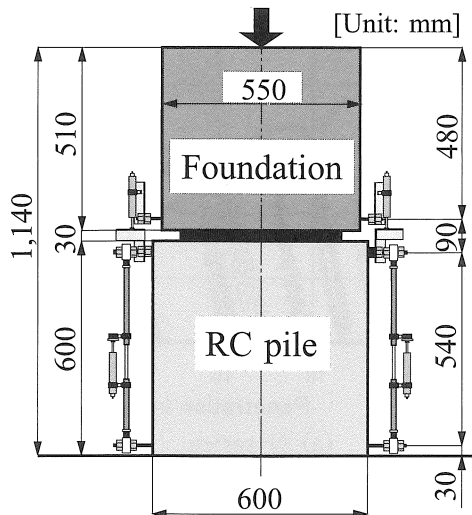


Fig.2 Loading and measurement method

減少鋼管部めり込みの測定区間：90mm、杭体部軸変位の測定区間：540mm)、前掲Fig.2参照)に設定した静的な漸増繰返し1軸圧縮荷重を行った。なお、荷重中の鋼管のめり込み変位(本研究では、Fig.2に示す断面減少部の検長90mmの区間で測定した変位を鋼管のめり込み変位とした)および杭体部の材軸変位(Fig.2に示す杭体部の検長540mmの区間で測定した変位)の計測には、それぞれストローク25mmおよび50mmの高感度ひずみゲージ式変位計を使用して荷重-めり込み量・軸変位関係を測定するとともに、断面減少鋼管中央部表面、鋼管部芯鉄筋、杭体部主筋および帯筋の所定位置に貼付したひずみゲージを用いて各種の荷重-ひずみ度関係の測定、並びに各繰返しサイクル毎にひび割れ状況の観察を肉眼で行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 破壊状況

Fig.3(a)~(g)は、本実験で得られた杭試験体の最大耐力時の破壊状況を試験体別に示したものである。これらの図によれば、杭体部のみの試験体(図(a)参照)では、破壊が杭下部(コンクリート打設面が試験体下面)に集中しており、コンクリート強度の部位の変動による影響が観察される。これに対して、杭頭半剛接合試験体では、鋼管の埋込みが浅いほど杭頭部にひび割れが集中する傾向が認められ、鋼管の杭体部への貫入により杭体部が割れ裂かれる現象(本研究では、このことを単に鋼管による割裂き現象と呼ぶことにする)が著しくなっていることを示唆している。また、杭頭断面減少部の鋼管とコンクリート間に界面処理を施して摩擦を低減させた試験体(Sシリーズ)では、鋼管とコンクリート間に界面処理を施していない試験体(Nシリーズ)に比べて、若干ではあるが杭頭部近傍のひび割れ本数が多くなっているのが読み取れる。

3.2 最大耐力

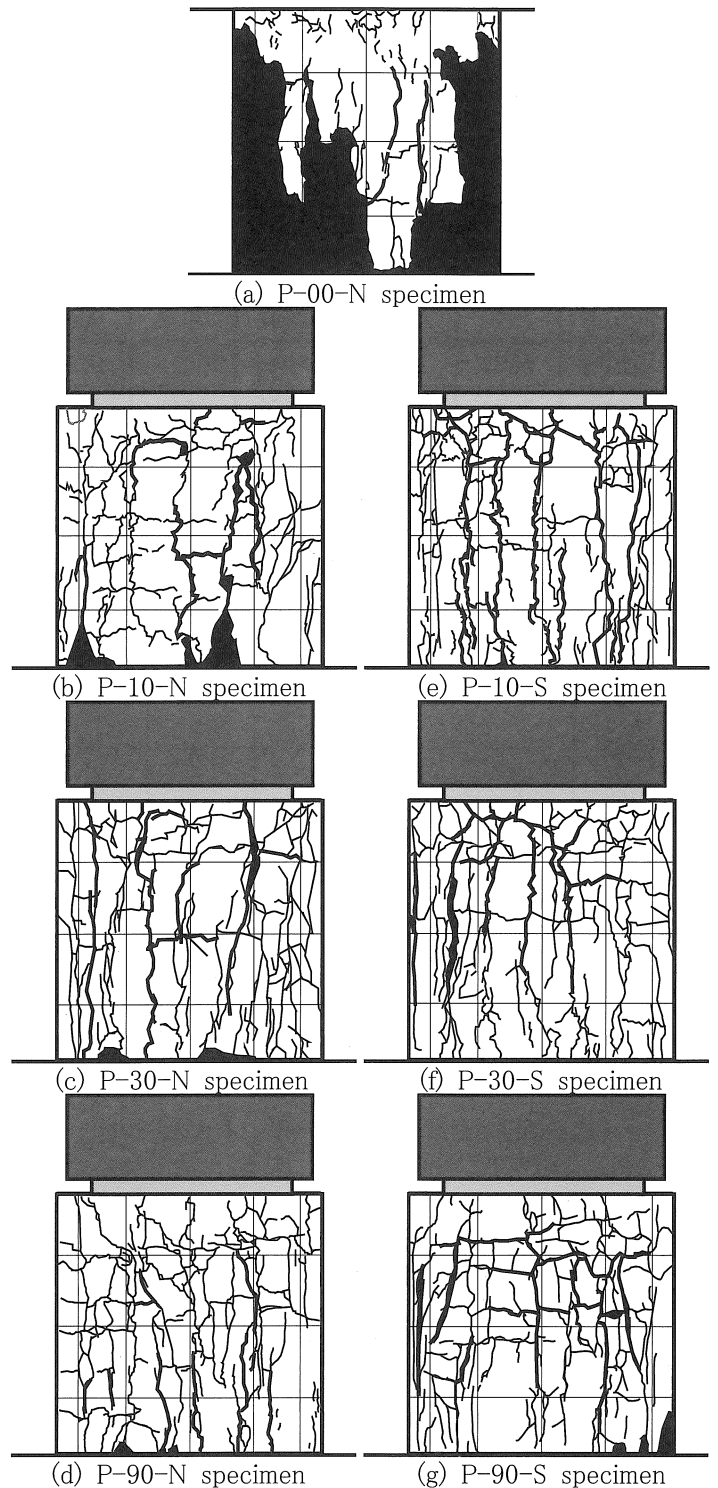


Fig.3 Fracture patterns at compressive strength

Table 4 は、本実験によって得られた杭試験体の最大圧縮耐力、最大耐力時の全軸変位(鋼管のめり込み変位+杭体部の材軸変位(Fig.2参照))および断面減少中央部位置の相対する2本の芯鉄筋のひずみ度の平均値を一覧表にして示したものである。また、Fig.4およびFig.5は、それぞれ杭試験体の最大圧縮耐力に及ばず鋼管の埋込み深さおよび鋼管とコンクリート間の界面処理の影響を示したものである。これらの表および図によれば、杭

Table 4 Test results of semi-rigid-RC pile head joints

Specimen No.	Test results			Analytical results	
	P_c (kN)	δ_c (mm)	ϵ_c (μ)	P_{cc} (kN)	P_{cc}/P_c
P-00-N	8576	1.50	—	9461	1.10
P-10-N	7043	3.50	-3077	7082	1.01
P-30-N	7056	2.92	-3056	7082	1.00
P-90-N	7990	4.82	-8948	7082	0.89
P-10-S	6892	3.73	-4946	5218	0.76
P-30-S	7084	2.83	-4600	5218	0.74
P-90-S	7988	3.13	-11793	5218	0.65

[Notes] P_c : Compressive strength obtained by experiment,
 δ_c : Total displacement at compressive strength,
 ϵ_c : Strain of core steel at compressive strength,
 P_{cc} : Analytical results calculated by superposed strength equation.

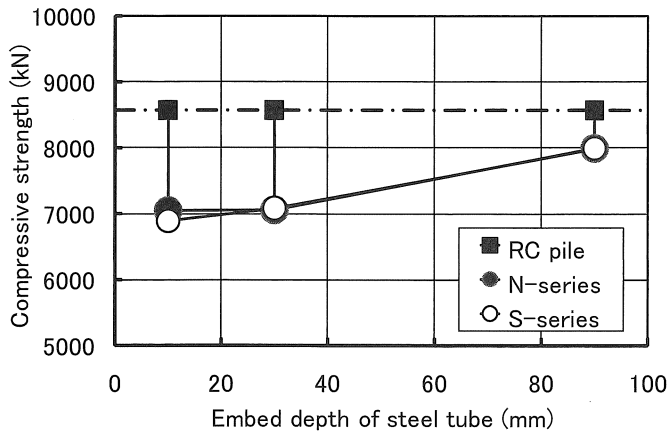


Fig.4 Effects of embed depth of steel tube on compressive strength

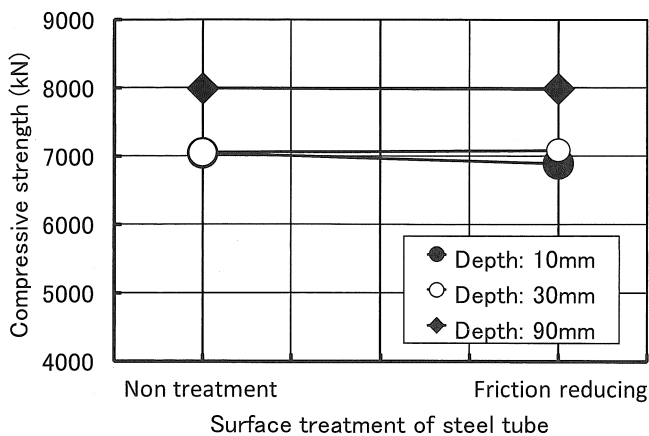
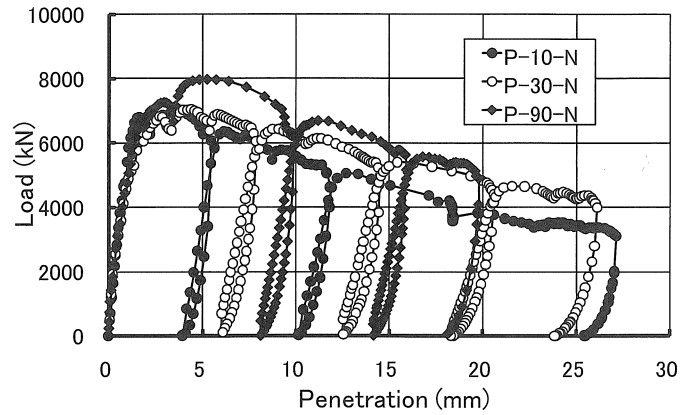
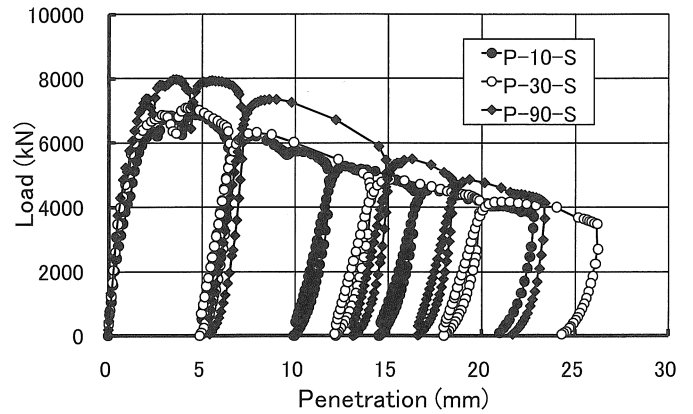


Fig.5 Effects of surface treatment of steel tube on compressive strength

試験体の最大圧縮耐力(P_c)は、鋼管の埋込みが深くなるに従って増大する傾向を示しているが、鋼管とコンクリート間に界面処理を施していないNシリーズの試験体では、埋込み深さが10mmと30mmの試験体の耐力差が殆ど認



(a) N-series

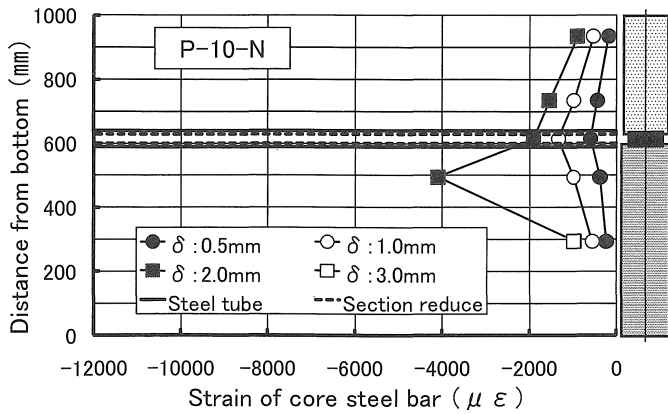


(b) S-series

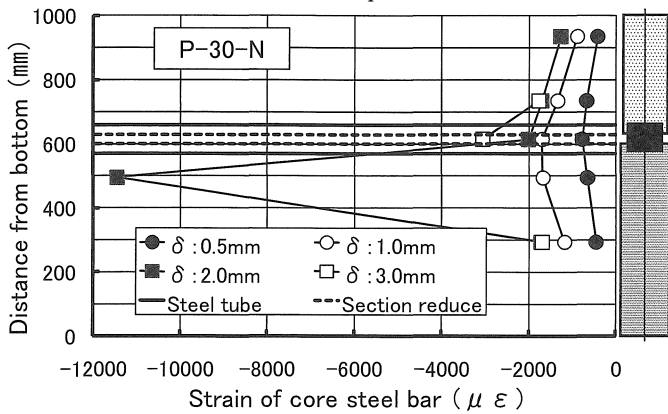
Fig.6 Effects of embed depth of steel tube on load-penetration relation

められない。ただし、Fig. 5によれば、杭頭半剛接合部の最大圧縮耐力は、本実験の範囲では鋼管とコンクリート間の界面処理の影響を殆ど受けていないが、これは、界面処理を施して鋼管とコンクリート間の摩擦を低減させても、高荷重レベルの段階になると界面処理を施していない鋼管と同程度の軸力を鋼管が負担するようになり、最大圧縮耐力に大差がなくなるためと考えられる。なお、断面積を杭体部の約56%に減少させた杭頭半剛接合試験体の耐力は、杭体だけの試験体(P-00-N試験体)の80~90%程度となっている。

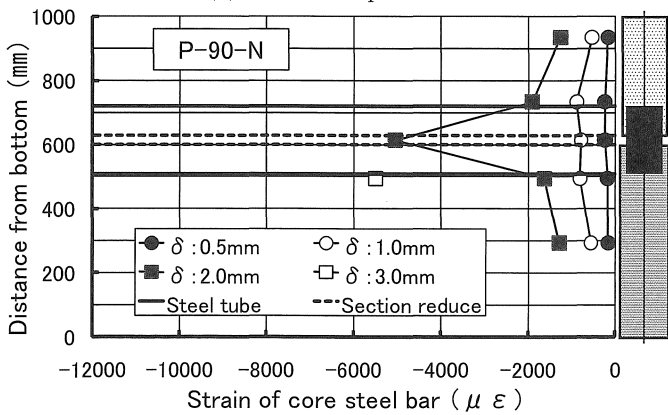
ところで、表中には、累加強度式を用いて算定した最大圧縮耐力に関する計算結果(P_{cc})も併示してあるが、鋼管とコンクリート間に界面処理を施していないNシリーズの場合には、鋼管の埋込み深さが30mmまでの範囲では、実験結果と計算結果とは比較的良く一致しているのに対して、鋼管の埋込み深さ90mmになると、累加強度式による計算結果は、実験結果よりも約10%の過小評価となっている。この原因としては、鋼管の埋込みが深くなると、鋼管による割裂き効果よりも鋼管によるコンファインド効果の方が卓越するようになることが挙げられる。一方、界面処理を施して摩擦を低減させたSシリーズの場合には、前述のように、鋼管とコンクリート間に界面処理を施して摩擦を低減させても、高荷重レベルの段階



(a) P-10-N specimen

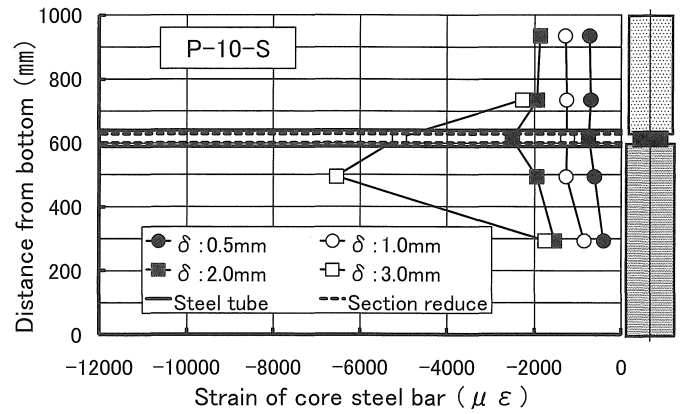


(b) P-30-N specimen

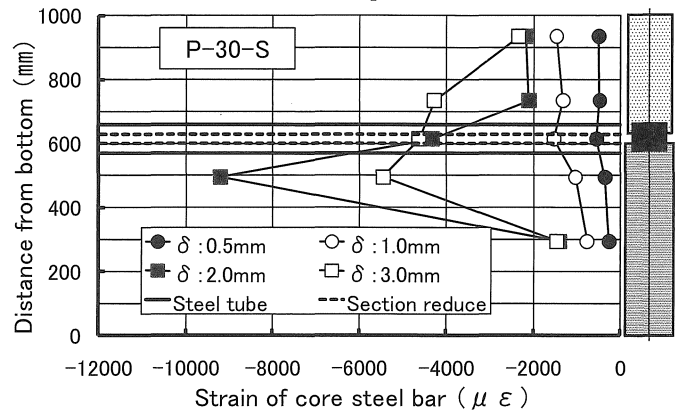


(c) P-90-N specimen

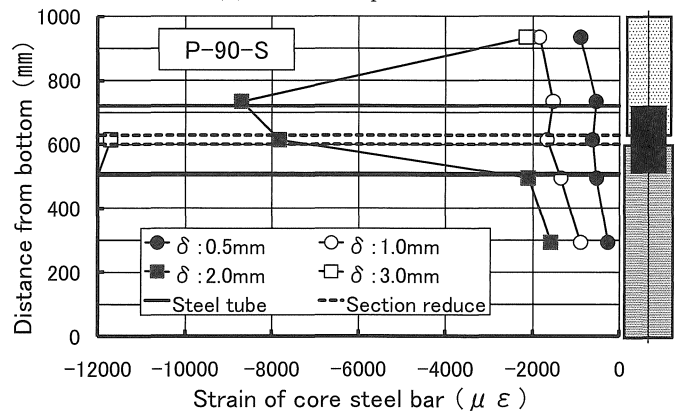
Fig.7 Strain distributions of core steel bar (N-series)



(a) P-10-S specimen



(b) P-30-S specimen



(c) P-90-S specimen

Fig.8 Strain distributions of core steel bar (S-series)

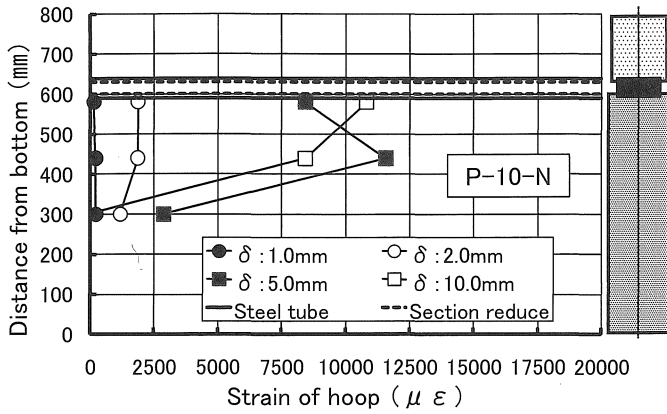
になると鋼管がある程度の軸力を負担するようになるため、鋼管の軸力負担を無視視した累加強度式による計算結果は、実験結果に対して0.65~0.76の過小評価となっており、鋼管の軸力負担を考慮したNシリーズに対する計算結果と比較的良く一致しているのがわかる。

3.3 変形特性

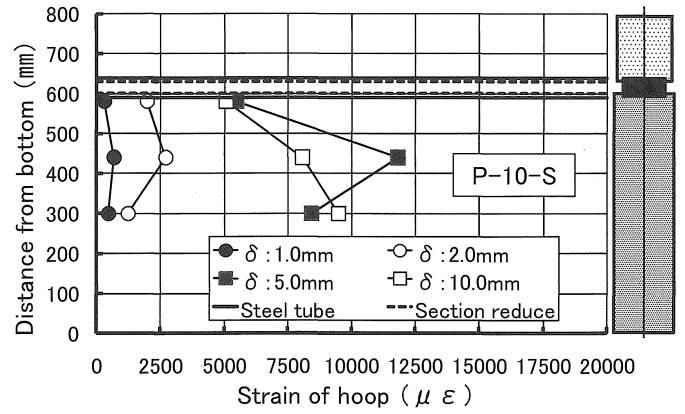
Fig. 6(a)および(b)は、それぞれ鋼管とコンクリート間に界面処理を施していないNシリーズおよび界面処理を施して摩擦を低減させたSシリーズ試験体の荷重-めり込み量関係に及ぼす鋼管の埋込み深さの影響を示したものである。これらの図によれば、界面処理の有無に関わらず、鋼管の埋込みが深い試験体の変形特性は、前述

のように、埋込みの浅い試験体に比べて鋼管による割裂き効果よりもコア部コンクリートに対する鋼管によるコンファインド効果の方が卓越するため、最大圧縮耐力は大きく全体的に靱性的な挙動を示しているのがわかる。また、鋼管とコンクリート間の界面処理の有無によって、最大圧縮耐力および最大耐力時における鋼管のめり込み量は殆ど影響を受けていないが、最大耐力後の耐荷性能は、界面処理を施して摩擦を低減させたSシリーズの試験体の方が若干劣っているのが読み取れる。

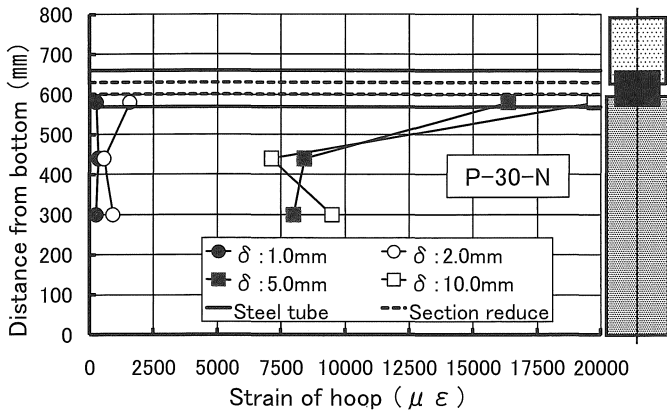
Fig. 7およびFig. 8は、それぞれNシリーズおよびSシリーズの試験体によって得られた芯鉄筋に貼付したひずみゲージの位置（試験体下端からの距離）と各除荷変位時



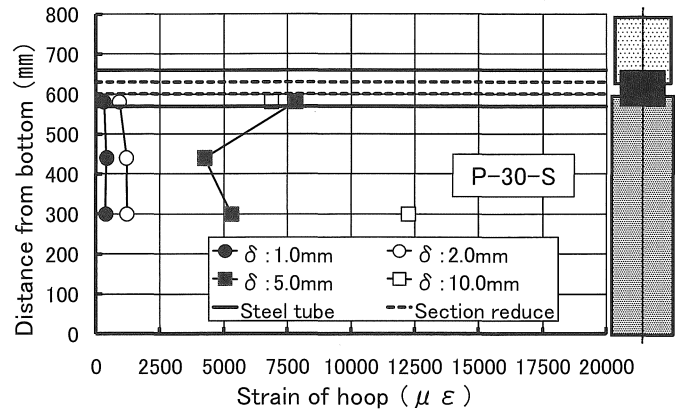
(a) P-10-N specimen



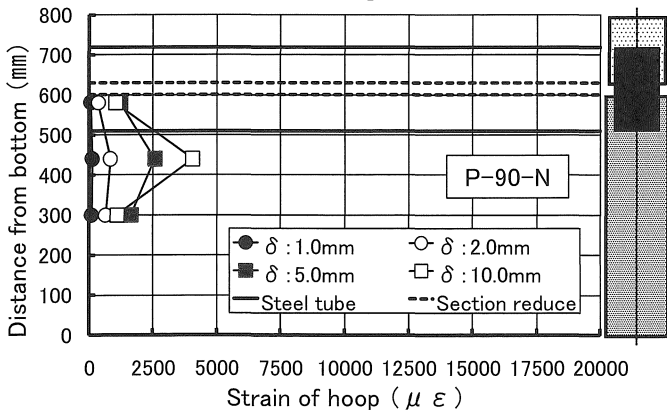
(a) P-10-S specimen



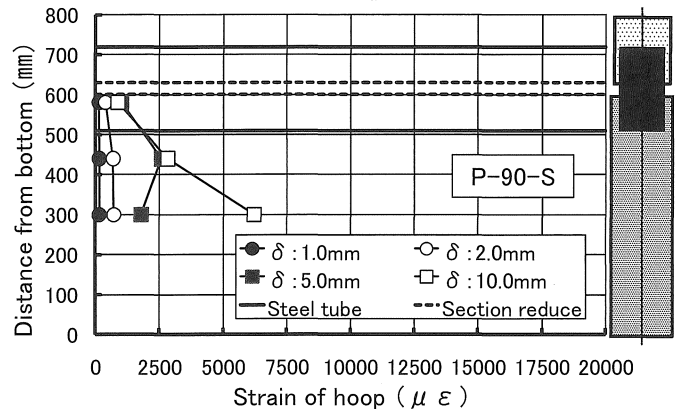
(b) P-30-N specimen



(b) P-30-S specimen



(c) P-90-N specimen



(c) P-90-S specimen

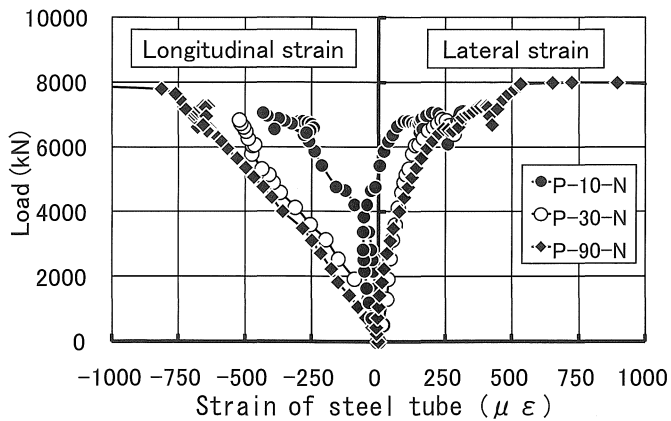
Fig.9 Strain distributions of hoop (N-series)

Fig.10 Strain distributions of hoop (S-series)

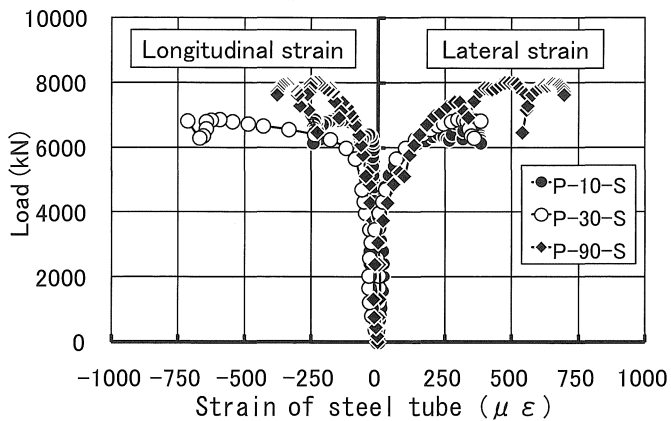
のひずみ度との関係を示したものである。なお、図中の実線および破線は、それぞれ鋼管埋設領域および断面減少領域であることを示す。これらの図によれば、鋼管とコンクリート間の界面処理の有無に関わらず、鋼管の埋込みが浅いP-10およびP-30試験体では、断面減少鋼管部よりも深い位置の杭体部で芯鉄筋のひずみ度は集中しているが、埋込みの深いP-90試験体では、鋼管による割裂き現象が顕著ではないためか、断面減少鋼管部で芯鉄筋のひずみ度が集中する傾向を示している。なお、芯鉄筋のひずみ度分布に及ぼす鋼管とコンクリート間の界面処理の影響については、明確な影響は認められなかった。

Fig. 9およびFig. 10は、それぞれNシリーズおよびSシ

リーズの試験体によって得られた杭体部の帯筋に貼付したひずみゲージの位置（試験体下端からの距離）と各除荷変位時のひずみ度との関係を示したものである。ただし、実線および破線は、前掲のFig. 7およびFig. 8と同様にそれぞれ鋼管埋設領域および断面減少領域であることを示す。これらの図によれば、いずれの試験体も帯筋のひずみ度は、荷重の増大とともにコンクリートのポアソン効果に応じて増大する傾向を示しているが、特に、鋼管の埋込みの浅いP-10およびP-30試験体では、杭頭部に近い位置（試験体下端から440mmまたは580mmの位置）の帯筋ほど、ひずみ度が大きくなっているのがわかる。これに対して、鋼管の埋込みの深いP-90試験体では、鋼管



(a) N-series



(b) S-series

Fig.11 Effects of embed depth of steel tube on load-strain relation of steel tube

埋設位置（試験体下端から580mmの位置）の帯筋のひずみ度は、荷重が増大しても殆ど変化しておらず、埋設鋼管の先端近傍（試験体下端から300mmまたは440mmの位置）にある帯筋のひずみ度の方が大きくなる傾向を示している。なお、帯筋のひずみ度分布に及ぼす鋼管とコンクリート間の界面処理の影響については、前述の芯鉄筋の場合と同様に、明確な影響は認められなかった。

Fig. 11(a)および(b)は、それぞれNシリーズおよびSシリーズの試験体の断面減少鋼管部表面に貼付した2軸ひずみゲージによって得られた荷重-縦および横ひずみ度関係に及ぼす鋼管の埋込み深さの影響を示したものである。これらの図によれば、鋼管とコンクリート間に表面処理を施していないNシリーズ試験体では、縦および横ひずみ度のいずれも同一荷重時のひずみ度は、鋼管の埋込みが深くなるに従って増大する傾向を示しているが、鋼管とコンクリート間に表面処理を施して摩擦を低減させたSシリーズ試験体では、最大圧縮荷重の50%程度以下の低荷重レベルにおいては、縦および横ひずみ度は殆ど増大しておらず、荷重-ひずみ度関係に及ぼす鋼管の埋込み深さの影響についても、上記のNシリーズの場合ほど明確には認められない。ただし、高荷重レベルの段階になると、縦および横ひずみ度は、荷重の増大に伴って急激に増大しており、界面摩擦を低減させた場合であっ

ても、鋼管によるコンファインド効果と軸力負担効果が最大圧縮耐力に影響を及ぼしていることがわかる。

4. 結論

- (1) 鋼管とコンクリート間の界面処理の有無に関わらず、鋼管の埋込みが浅いほど、杭頭部にひび割れが集中し、鋼管による割裂き効果が著しくなる。
- (2) 鋼管の埋込みが深いほど、鋼管による割裂き効果よりもコア部コンクリートに対する鋼管によるコンファインド効果が卓越するため、杭頭半剛接合部の最大圧縮耐力および圧縮靱性は一般的に向上する。
- (3) 鋼管とコンクリート間に界面処理を施して界面摩擦を低減させても、杭試験体の最大耐力はそれほど影響を受けないが、最大耐力後の耐荷性能は若干劣る。

謝辞:

本実験とデータ整理に際して、多大なるご助力を得た愛知工業大学大学院生の巻幡悠佑君（現：西松建設（株））、並びに愛知工業大学学部学生の井本順也君、鵜飼淳之君、榊原陽一君、笹原一馬、澤田英也君、下地康夫、土屋忠之および美濃羽動君に対して謝意を表します。

また、本実験は、愛知工業大学耐震実験センターで実施し、研究費の一部として、愛知工業大学耐震実験センターの研究費を使用したことを付記し、謝意を表する。

参考文献:

- 1) 深津尚人ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 26、No. 2、pp. 919-924(2004)
- 2) 深津尚人ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合に与える軸力の影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 27、No. 2、pp. 1633-1638(2005)
- 3) 伴幸雄ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合部の曲げ終局強度に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 27、No. 2、pp. 1639-1644(2005)
- 4) 深津尚人ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合部が有する回転性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 28、No. 2、pp. 1669-1674(2006)
- 5) 岡田亨ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合部の1軸特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 27、No. 2、pp. 1627-1632(2005)
- 6) 岡田亨ほか：場所打ち杭の杭頭半剛接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 28、No. 2、pp. 1675-1680(2006)
- 7) 山田和夫ほか：鋼管で補強された杭頭半剛接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No. 61、pp. 204-210(2008)
- 8) 山田和夫ほか：鋼管で補強されたコンクリートの1軸圧縮特性に及ぼす調合の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 30、No. 1、印刷中(2008)

FUNDAMENTAL STUDY ON UNIAXIAL COMPRESSIVE BEHAVIOR OF SEMI-RIGID-PILE HEAD JOINT REINFORCED BY STEEL TUBE

Kazuo YAMADA^{*1}, Toshikatsu SEKI^{*2}, Takuya KAWABE^{*3} and Yukio BAN^{*4}

- *1 AICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Urban Environment, Faculty of Engineering (1247, Yagusa, Yachigusa-cho, Toyota-shi, Aichi 470-0392, Japan)
- *2 AICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Graduate School of Engineering, Production and Construction Engineering Course (1247, Yagusa, Yachigusa-cho, Toyota-shi, Aichi 470-0392, Japan)
- *3 AOSHIMA DESIGN CO., LTD., Structural Design Department, (4-14-51, Ohsu, Naka-ku, Nagoya-shi, Aichi 460-0011, Japan)
- *4 YAHAGI CONSTRUCTION CO., LTD., Technical Research Laboratory of Seismic Technology, (1533-74, Ibaragabasama, Kumabari, Ngakute-cho, Aichi-gun, Aichi 480-1101, Japan)

ABSTRACT: In this study, the uniaxial compressive behaviors of semi-rigid-pile head joint reinforced by steel tube were investigated. The results obtained by the experiments can be summarized as follows:

- 1) The fracture zones are more concentrated in the top portion of concrete pile with decreasing the embed depth of steel tube, and the splitting effects for the concrete pile caused by the penetration of steel tube become remarkable, independently of the surface treatment between the steel tube and the concrete.
- 2) The uniaxial compressive strength and compressive ductilities improve with increasing the depth of embed steel tube, because the confined effects of concrete reinforced by the steel tube on the uniaxial compressive performance are distinguished with increasing the depth of embed steel tube, as compared with the splitting effects for the concrete caused by the steel tube.
- 3) The uniaxial compressive strength and the load carrying capacity in the large deformation range slightly decrease with reducing the surface friction between the steel tube and the concrete.

KEYWORDS: Cast-in-place concrete pile, Semi-rigid-pile head joint method, Steel tube type, Uniaxial compressive behavior, Splitting effect, Confined effect