

論文 場所打ち杭の杭頭半剛接接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究

岡田 亨^{*1}・山田 和夫^{*2}・山本 俊彦^{*3}・伴 幸雄^{*4}

要旨：本研究では、単調漸増繰返し1軸圧縮荷重を受ける場所打ち杭の杭頭半剛接接合部の力学挙動について一連の実験的検討を行った。その結果、耐力が断面減少部の圧壊によって決まる場合には、杭頭半剛接接合試験体の最大圧縮耐力は、鋼管によるコンファインド効果を考慮することによってかなりの精度で予測できるが、計算結果は若干安全側の評価となること、耐力が鋼管の杭体部への貫入により杭体が割り裂かれることによって決まる場合には、埋設された鋼管先端近傍のコンクリート内部および帯筋にひずみ度が集中し、最大圧縮耐力の計算結果は危険側の評価となること、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、漸増繰返し1軸圧縮特性、コンファインド効果

1. はじめに

筆者らは、前報¹⁾⁻³⁾において、基礎と杭頭との接合部を曲げ耐力が杭体部の1/2程度となるように断面を減少させ、杭の破壊が杭頭部に集中するように半剛接接合とした杭径400mmのモデル場所打ち杭を用いて、杭頭半剛接接合部の正負繰返し1軸挙動、曲げせん断挙動および純曲げ挙動に及ぼす鋼管肉厚および軸力の影響について一連の検討を行い、鋼管肉厚が3.2mm以上であれば、断面減少部の鋼管が局部座屈することも無く、1/100の部材角までは安定した履歴特性が確保できることを確認した。ただし、杭頭半剛接接合モデル試験体の終局耐力以降に杭頭半剛接接合部がピン状態となって以後の圧

縮加力が不可能となったため、圧縮耐力後の大変形領域における1軸圧縮特性については、十分に解明することができなかった。

そのため、本研究ではこの点を踏まえて、引き続き基礎と杭頭とを半剛接接合とした接合方法の確立を目的とした基礎的研究の一つとして、加力条件が実構造物における基礎と杭との境界条件に近くなるように設定した漸増繰返し圧縮荷重を受ける場所打ち杭の杭頭半剛接接合部の力学挙動について一連の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、表－1および図－1に示すよう

表－1 実験の概要

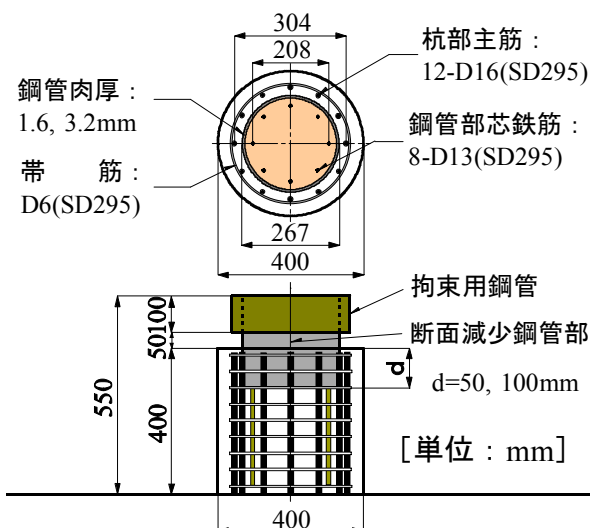
試験体 記 号	鋼 管 部 詳 細						杭 部 詳 細				
	肉 厚 (mm)	埋込み (mm)	外 径 (mm)	全 長 (mm)	芯 鉄 筋		寸 法 (mm)	主 筋		せん断補強筋	
					配筋	Pc(%)		配 筋	Pg(%)	配 筋	Pw(%)
F- 50	—	—	—	—	—	—	φ 400 × 550	12-D16	1.90	D6@ 50	0.32
F-100	—	—	—	—	—	—				D6@100	0.16
T16-100- 50	1.6	100	φ 267	250	8-D13	1.81	φ 400 × 400	12-D16	1.90	D6@ 50	0.32
T32-100- 10	3.2	100								D6@ 10	1.60
T32-100- 25	3.2	100								D6@ 25	0.64
T32-100- 50	3.2	100								D6@ 50	0.32
T32-100-100	3.2	100								D6@100	0.16
T32- 50- 50	3.2	50	φ 267	200						D6@ 50	0.32

*1 ヨーコン(株) 技術本部技術部主任 (正会員)

*2 愛知工業大学 工学部都市環境学科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*3 大同工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*4 矢作建設工業(株) 建築技術部技術グループ課長 (正会員)



図－１ 試験体の形状・寸法（Ｔシリーズ）

表－２ コンクリートの調合表

呼び 強度	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
N21	61.0	284	173	870	919	2.85

表－３ 材料試験結果

(a) コンクリート

試験 材 齢	密 度 (g/cm ³)	強度試験結果		ヤング 係 数 (GPa)
		引 張 (MPa)	圧 縮 (MPa)	
28日	2.20	1.88	20.1	—
40日	2.14	1.57	19.6	22.5
55日	2.15	1.68	19.5	21.6

〔注〕 材齢28日は標準水中養生試験体、材齢40および55日は封緘養生試験体で、それぞれ杭の実験直前および直後の結果。

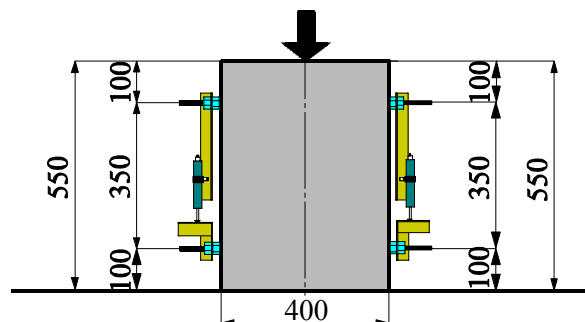
(b) 鉄 筋

種 類	呼び名	降伏点 (MPa)	引 張 強 さ (MPa)	ヤング 係 数 (GPa)
芯鉄筋	D13	353	511	186
主 筋	D16	340	497	190
帯 筋	D 6	427	499	186

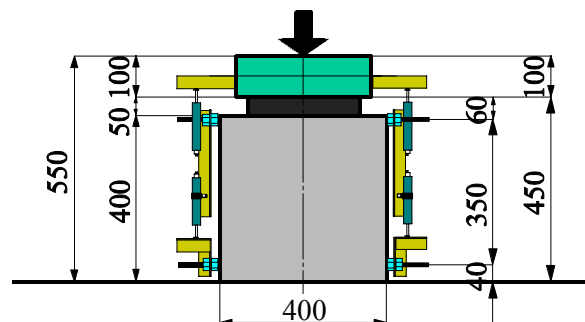
(c) 鋼 管

種 類	肉 厚 (mm)	降伏点 (MPa)	引 張 強 さ (MPa)	ヤング 係 数 (GPa)
T16	1.6	322	403	196
T32	3.2	342	442	208

に、杭体部がφ400×400mmで杭頭断面減少部の鋼管をφ267×50mmに設定した杭頭半剛接合試験体（杭頭シアスパン比約1.2の部分抽出）の単調漸増繰返し1軸圧縮特性に及ぼす鋼管の肉厚（t：1.6および3.2mmの2種類）および埋込み深さ（d：50および100mmの2種類）、並びに鋼管埋込み部近傍の杭体の帯筋間隔（S＝



(a) Fシリーズ試験体



(b) Tシリーズ試験体

図－２ 加力・測定要領（単位：mm）

10, 25, 50および100mmの4種類（杭頭から200mmの区間）、ただし、200mm以上の区間は一律S＝50mm）の影響について調査を行った。また、比較のために帯筋間隔をS＝50および100mm（ $P_w=0.32$ および0.16%）に設定した杭体のみの試験体（φ400×550mm）も調査した。なお、杭体部は主筋を12-D16（ $P_g=1.90\%$ ）、鋼管部には芯鉄筋を8-D13（ $P_c=1.81\%$ ）で配筋した。

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N21、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表を決定した。本実験で用いたコンクリートの標準調合表を表－2に示す。杭試験体は、骨材がかぶり部にも均等に行き渡るように注意してコンクリートの打設を行った後に約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、6～8週であった。コンクリート、鉄筋および鋼管に関する材料試験結果を表－3に示す。

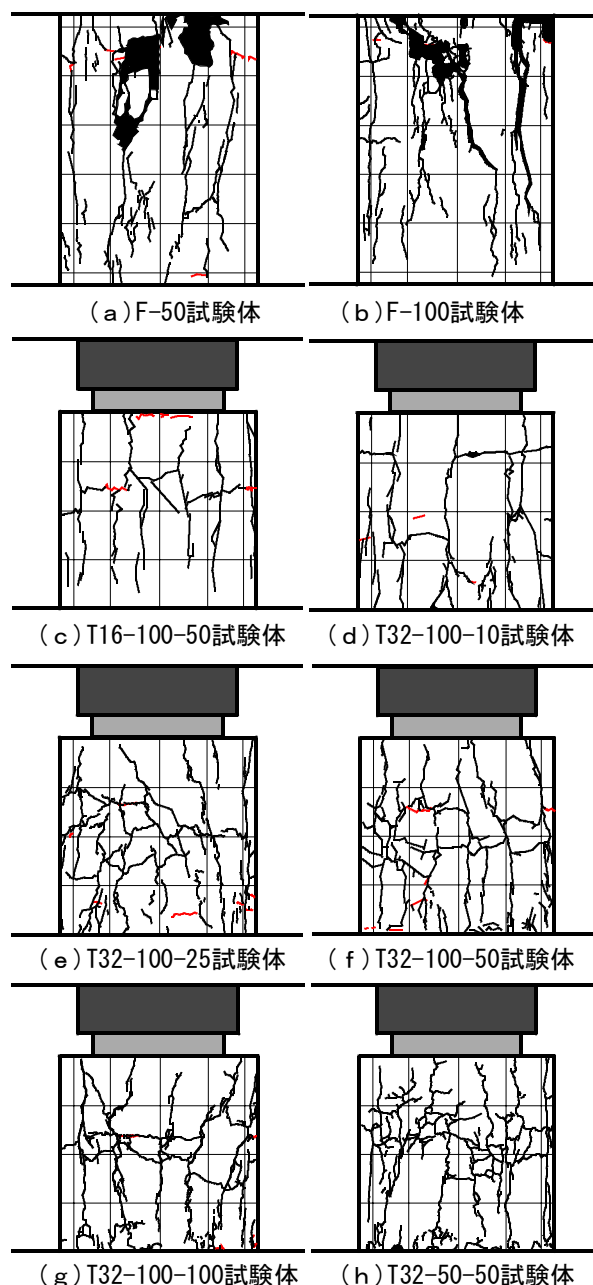
2.3 加力および測定方法

加力要領を図－２に示す。圧縮載荷に際しては6,000kN耐圧試験機を使用し、原則として除荷開始変位を0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 7.0, 10.0, 15.0 および20.0mm（測定区間長：410mm）に設定して静的な単調漸増繰返し1軸圧縮載荷を行った。なお、圧縮加力の際に、杭試験体の終局耐力以降に杭頭半剛接合部が不安定なピン状態となるのを防止するために、耐圧試験機の球座を第1サイクルのピーク荷重時に固定した。また、載荷中の杭体部の材軸変位および鋼管部めり込み変位の計測には、それぞれストローク25 および50mmの高感度ひずみゲージ式変位計を使用し、荷重－変位関係を測定するとともに、コンクリート内部の所定位置に埋め込んだモールドゲージと鋼管部芯鉄筋、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－ひずみ関係の測定、並びに各繰返しサイクル毎にひび割れ状況を観察した。

3. 実験結果とその考察

3.1 破壊状況

図－３（a）～（h）は、本実験で得られた杭試験体の最大圧縮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、杭体のみの試験体（図（a）および（b）参照）では、いずれの場合も破壊が杭上部に集中しており、試験体下面の載荷板による拘束の影響が観察されるが、帯筋間隔の影響はそれほど明確には認められない。これに対して、杭頭半剛接合部試験体（図（c）～（h）参照）のうち、最大圧縮耐力到達前に断面減少部の鋼管が局部座屈したT16-100-50およびT32-100-10試験体では、変形が断面減少部に集中するため、最大耐力時のひび割れ本数は比較的少なくなっているが、断面減少部の鋼管が局部座屈しなかったその他の試験体では、鋼管の杭体部への貫入により杭体部が割り裂かれる現象（本研究では、このことを単に割裂き現象と呼ぶことにする）が著しいため、鋼管埋込み深さ位置（杭上端部からT32-50-50試験体は50mm、その他の試験体は



図－３ 最大耐力時の破壊状況

100mm）よりも深い領域のひび割れ本数が多くなっているのが読み取れる。なお、杭上端部から200mmの領域の帯筋を25mm間隔で配筋したT32-100-25試験体では、帯筋によるコンファインド効果によりこの領域のひび割れ本数が試験体下部に比べて若干少なくなっている。

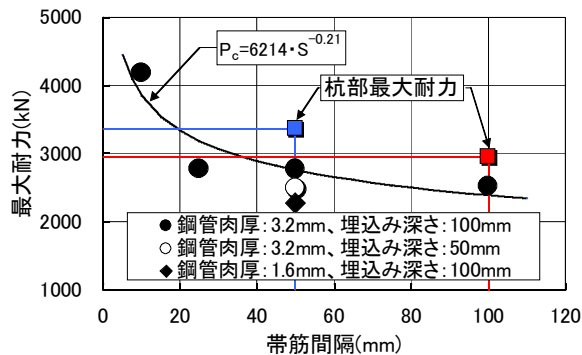
3.2 最大耐力

表－４は、本実験によって得られた杭試験体の最大圧縮耐力、最大耐力時の軸変位、断面減少部位置の芯鉄筋およびコンクリートのひずみ度を一覧表にして示したものであり、図－４は、

表－４ 実験結果および計算結果一覧

試験体 記 号	最大圧縮耐力の実験値				最大圧縮耐力の計算値					
	P_c (kN)	δ_c (mm)	ε_c (μ)	ε_m (μ)	P_{cc}^{*1} (kN)	耐力比 P_{cc}/P_c	P_{cc}^{*2} (kN)	耐力比 P_{cc}/P_c	P_{cc}^{*3} (kN)	耐力比 P_{cc}/P_c
F- 50	3,361	1.78	-8,152	—	—	—	—	—	3,267	0.97
F-100	2,950	1.95	-11,125	—	—	—	—	—	3,267	1.11
T16-100- 50	2,269	10.03	-20,907	-31,703	2,234	0.98	2,354	1.04	1,883	0.83
T32-100- 10	4,185	12.15	-30,811	-35,170	3,265	0.78	3,378	0.81	2,359	0.56
T32-100- 25	2,773	3.57	-14,571	-12,283	3,265	1.18	3,378	1.22	2,359	0.85
T32-100- 50	2,769	5.09	-17,077	-16,253	3,265	1.18	3,378	1.22	2,359	0.85
T32-100-100	2,519	6.94	-21,294	-10,902	3,265	1.30	3,378	1.34	2,359	0.94
T32- 50- 50	2,489	2.91	-15,456	-5,783	3,265	1.31	3,378	1.36	2,359	0.95

[注] P_c ：最大圧縮耐力の実験結果、 δ_c 、 ε_c および ε_m ：それぞれ最大圧縮耐力時の軸変位、断面減少部
芯鉄筋のひずみ度および断面減少部コンクリートのひずみ度、 P_{cc}^{*1} 、 P_{cc}^{*2} および P_{cc}^{*3} ：鋼管による
コンファインド効果をそれぞれエンドクロニック理論とコンクリート充填鋼管構造設計施工指針により
考慮した場合、並びに鋼管によるコンファインド効果を無視した場合の最大圧縮耐力の計算結果。

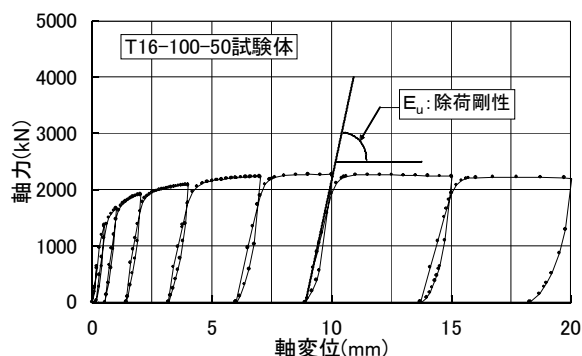


図－４ 圧縮耐力と帯筋間隔との関係

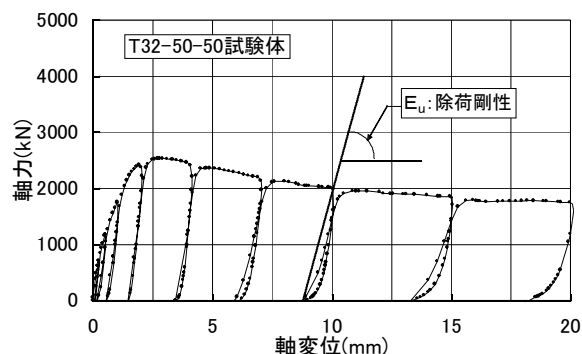
最大圧縮耐力と杭体部の帯筋間隔との関係を示したものである。これらの表および図によれば、杭試験体の最大圧縮耐力(P_c)は、耐力が鋼管の杭体部への割裂きで決まった帯筋間隔が25mm以上の場合には、帯筋間隔が密になるとともに直線的に増大しているが、耐力が断面減少部の圧壊で決まった帯筋間隔が10mmの場合には急増しており、鋼管埋込み部近傍の帯筋を密に配筋することによって鋼管の杭体部への割裂き現象を抑制できることがわかる。ただし、鋼管の肉厚が薄くなるほど鋼管の軸力負担力およびコアコンクリートに対するコンファインド効果が低下すること、鋼管の埋込み深さが浅くなるほど杭体部における鋼管の定着が十分ではないために鋼管の杭体部への割裂き現象が著しくなること、などによって杭頭半剛接合試験体の耐力は低下する傾向を示している。図－４中には、帯筋が50および100mm間隔で配筋されている

杭体（F-50およびF-100試験体）の最大圧縮耐力も併示してあるが、断面積を杭体部の約50%に減少させた杭頭半剛接合試験体の耐力は、帯筋間隔が50mmの場合に杭体の68～82%、100mmの場合に85%となっている。また、最大圧縮耐力時の断面減少部のひずみ度（ ε_c または ε_m ）は、鋼管の杭体部への割裂き現象が著しくなるほど減少する傾向は認められるが、それでも $5,800 \sim 35,000 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、最大圧縮耐力時の断面減少部は高ひずみ領域にある。

1軸圧縮荷重を受ける鋼管コンクリートの力学特性は、鋼管によるコンファインド効果のために、プレーンコンクリートに比べて著しく向上することが知られている。前掲の表－４中には、鋼管によるコンファインド効果をエンドクロニック理論⁴⁾およびコンクリート充填鋼管構造設計施工指針⁵⁾により考慮して算定した最大圧縮耐力(P_{cc}^{*1} および P_{cc}^{*2})も併示してあるが、断面減少部の圧壊により試験体の耐力が決まったT16-100-50試験体（鋼管肉厚：1.6mm、帯筋間隔：50mm）の場合については、実験結果と計算結果とは比較的よく一致しているのがわかる。ただし、試験体の耐力が上記のT16-100-50試験体と同様に断面減少部の圧壊により決まったT32-100-10試験体（鋼管肉厚：3.2mm、帯筋間隔：10mm）の場合には、計算結果 P_{cc}^{*1} および P_{cc}^{*2} は、実験結果に対してそれぞれ0.78およ



(a) T16-100-50試験体



(b) T32-50-50試験体

図-5 荷重-変位関係の例

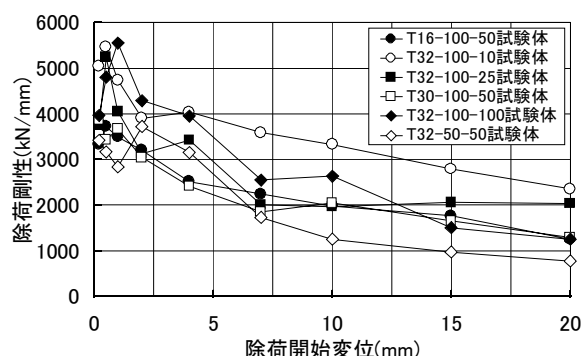
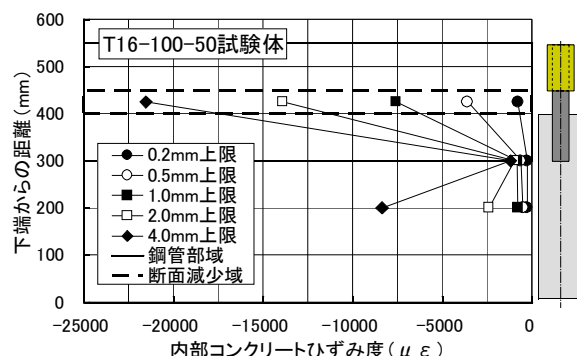
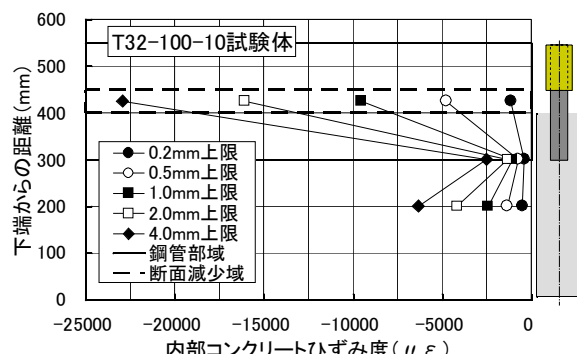


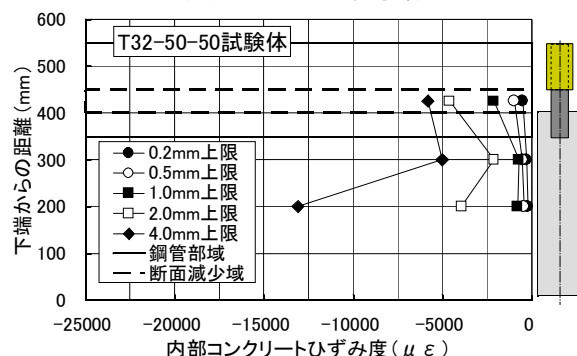
図-6 除荷剛性と除荷変位との関係



(a) T16-100-50試験体



(b) T32-100-10試験体



(c) T32-50-50試験体

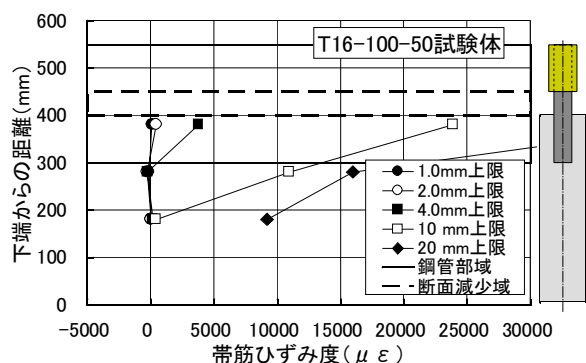
図-7 コンクリート内部のひずみ分布の例

び0.81倍の過小評価となっている。これは、帯筋の過密配筋によって鋼管に対する杭体部の拘束効果が著しくなり、耐力に及ぼす断面減少部の細長比 ($H/D=0.19$) の影響が卓越したためと考えられる。なお、本解析では、鋼管の横拘束効果のみに着目し、断面減少部の H/D の影響および杭体部の帯筋による拘束効果の影響に関しては考慮していないため、今後FEM解析等を行って検討する必要がある。また、試験体の耐力が鋼管の杭体部への割裂きで決まった試験体では、計算結果はその割裂き現象に応じて1.2～1.4倍程度に実験結果を過大評価している。

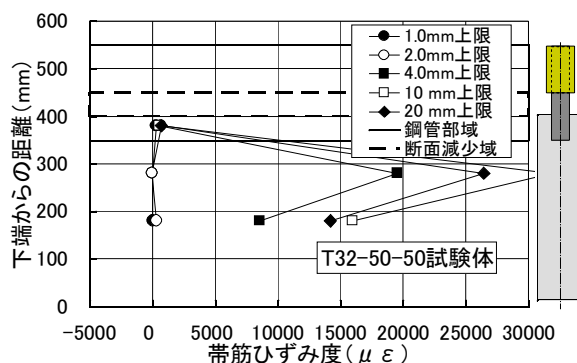
3.3 変形特性

図-5は、本実験によって得られた荷重-軸変位関係の例を、また図-6は、図-5に示す繰返し荷重-軸変位関係から求めた試験体の除荷剛性と除荷開始変位との関係を示したものである。図から明らかなように、除荷剛性は、載荷初期の段階ではあまり明確ではないが、除荷開始時の変位の増大および杭体部の帯筋間隔が粗くなるに従って低下する傾向を示している。

図-7(a)～(c)は、コンクリート断面中心部に埋設したモールドゲージの位置(試験体下端からの距離)とひずみ度との関係を試験体別に示した例である。これらの図によれば、最大圧縮耐力に至るまでの破壊過程において、断面



(a) T16-100-50試験体



(b) T32-50-50試験体

図－8 帯筋のひずみ分布の例

減少部の鋼管の局部座屈が観察され、試験体の耐力が断面減少部の圧壊で決まったT16-100-50およびT32-100-10試験体では、断面減少部（試験体下端から425mmの位置）にひずみ度が集中しているが、鋼管の杭体部への割裂き現象を伴う破壊過程を示したT32-50-50試験体の場合は、試験体下端から200および300mmの位置におけるコンクリートのひずみ度が破壊の進展とともに集中する傾向を示している。なお、図には示していないが、その他の試験体についても、鋼管の杭体部への割裂き現象の程度に対応するコンクリート内部のひずみ分布が観察された。

図－8は、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）とひずみ度との関係を示した例である。ただし、実線部は、前掲の図－7と同様に鋼管部領域であることを示す。図によれば、いずれの試験体も帯筋のひずみ度は、加力の進行とともにコンクリートのポアソン効果に応じて増大しており、特に、断面減少部の鋼管で局部座屈が観察されたT16-100-50試験体では、杭頭部に近い位置（試験体下端から390mmの位置）にある帯筋ほど、また断面減少部の鋼管が座屈せずに鋼管の杭体部への割裂き現象が著しかったT32-50-50試験体では、埋設鋼管の先端近傍（試験体下端から290mmの位置）にある帯筋ほど、ひずみ度が大きくなっている。さらに、紙数の関係で図には示していないが、杭体頭部から200mmの間を帯筋間隔が10mmの過密配筋を行ったT32-100-10試験体の場合には、過密配筋から通

常配筋（帯筋間隔：50mm）に変化する位置（試験体下端から190mmの位置）のひずみ度が最も大きくなるなど、杭試験体の破壊モードに応じた帯筋のひずみ分布を示すことがわかった。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すると、およそ以下のようにまとめられる。

- 1) 耐力が断面減少部の圧壊によって決まる場合については、鋼管によるコンファインド効果を考慮することにより、杭頭半剛接合部の圧縮耐力を予測することができるが、計算結果は若干安全側の評価となる。
- 2) 耐力が鋼管の杭体部への割裂き現象で決まる場合は、埋設鋼管先端近傍のコンクリート内部および帯筋にひずみ度が集中し、圧縮耐力の計算結果は危険側の評価となる。

謝 辞

本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する。

参考文献

- 1) 岡田 亨, 山田和夫, 山本俊彦, 伴 幸雄: 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
- 2) 深津尚人, 山本俊彦, 山田和夫, 岡田 亨: 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, 2005.6
- 3) 伴 幸雄, 山本俊彦, 山田和夫, 岡田 亨: 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, 2005.6
- 4) 谷川恭雄, 山田和夫: エンドクロニック理論のコンクリート工学への適用, コンクリート工学, Vol.21, No.1, pp.31-43, 1983.1
- 5) 日本建築学会編: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, pp.62-63, 1997.10