

高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭構法の開発 Development of Cast-in-place Concrete pile with High-strength Longitudinal Bar

熊田 健太* 郡司 康浩*
Kenta Kumada Yasuhiro Gunji
新井 寿昭**
Toshiaki Arai

要 約

近年、場所打ちコンクリート杭は建物の高層化・重量化に伴って主筋が過密化する傾向にあり、コンクリートの充填不良による品質低下や杭主筋と基礎梁主筋の干渉による施工性の低下が問題となっている。そこで、規格降伏点が 590 N/mm^2 、 685 N/mm^2 の高強度鉄筋に着目し、杭主筋に適用することで過密配筋を防止する場所打ちコンクリート杭構法を開発した。このような高強度鉄筋の杭主筋への適用を想定した既往の研究は少なく、本開発ではコンクリートとの付着性能や重ね継手の力学的性能への安定液浸漬の影響を実験で確認した。また、高強度鉄筋を用いた杭体の曲げせん断実験で地震時の損傷過程や変形性能を把握し、平面保持を仮定した断面の曲げ解析によって、曲げモーメントと曲率の関係は終局限界状態まで概ね評価可能であることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 高強度鉄筋の付着性能確認実験
- § 3. 高強度鉄筋の重ね継手性能確認実験
- § 4. 杭体の構造性能確認実験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

近年、場所打ちコンクリート杭には建物の高層化・重量化に伴う常時および地震時の荷重増大に対応するため、拡底杭工法が多く採用されている。拡底杭工法では経済性の観点から杭の軸部径を縮小させるため、特に杭頭部では主筋が過密化する傾向にある。杭主筋の過密化はコンクリートの充填不良や杭主筋と基礎梁主筋との干渉など杭体の品質や施工性の低下につながる恐れがある。

杭体の品質を確保するためには、施工段階の品質管理^{例えは¹⁾}だけでなく、設計段階においても過密配筋を防止するための配慮や構法選択は重要である。設計段階における杭の過密配筋対策の一つとして、杭頭固定度を低下させ杭頭曲げモーメントの低減を図る特殊工法の採用が考えられる。しかしながら、設計クライテリアや施工条件によっては採用が制限されるケースもあるため、

特殊な装置や施工を伴わず、従来の設計・施工方法を大きく変えずに対策可能な構法の開発は合理的である。

このような観点から、杭主筋の高強度化は従来の設計・施工方法の延長で実現可能な過密配筋対策である。従来、杭主筋には規格降伏点が 490 N/mm^2 以下の鉄筋（以下、普通強度鉄筋）が用いられてきたが、近年では規格降伏点が 590 N/mm^2 、 685 N/mm^2 級の鉄筋（以下、高強度鉄筋）が開発され、上部構造物において既に実用化されている。

表一1に杭主筋に高強度鉄筋を適用する場合の課題を示す。杭主筋に高強度鉄筋を用いた場所打ちコンクリート杭に関する既往の実験は限定的であり、構造性能に関する知見は少ない。また、場所打ちコンクリート杭工事では、安定液中に鉄筋籠を浸漬した状態でコンクリート打設が行われるが、このような条件下での高強度鉄筋の付着性能や高強度鉄筋同士の重ね継手性能に関する知見も少ない。

そこで、本研究ではこれらの課題に対する知見を蓄積する目的で表一1に示す3つの実験を実施し、設計手法を構築することで高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭構法を開発した。本報では、これらの実験概要について報告する。

§ 2. 高強度鉄筋の付着性能確認実験

杭頭定着筋に用いる高強度鉄筋の付着性能に関する研

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所

表一 杭主筋に高強度鉄筋を適用する場合の課題

No.	課題	実験	鉄筋の安定液浸漬
1	高強度鉄筋の付着性能に対する安定液浸漬の影響	付着性能確認実験	有
2	高強度鉄筋同士を重ね継手した場合に必要な重ね継手長さ	重ね継手性能確認実験	有
3	高強度鉄筋を主筋に用いた杭体の曲げ耐力の評価方法	構造性能確認実験	無

究²⁾や、安定液に浸漬した普通強度鉄筋の付着性能に関する研究³⁾はあるが、安定液中に浸漬された高強度鉄筋の付着性能に関する知見は少ない。そこで、高強度鉄筋の杭主筋への適用を想定し、安定液への浸漬が高強度鉄筋の付着性能に及ぼす影響を確認した。

2-1 試験体概要

表一に試験体パラメータ、図一に試験体形状、表二に材料試験結果を示す。主な実験因子は、コンクリート強度、定着長さや安定液浸漬の有無である。試験体は幅1300mm、高さ1980mmのコンクリートに定着された1本の高強度鉄筋であり、鉄筋の規格降伏強度は685N/mm²(D32ねじ筋)である。この規格降伏強度は日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁴⁾」(以下、RC規準)の適用範囲外であるが、本実験ではRC規準に準じて必要定着長さを設定した。また、B-30-52d-Gと30-52d-Gの試験体の鉄筋には、ひずみゲージを貼付して鉄筋に生じるひずみ分布を確認した。なお、コンクリートの上端面から10d(d:鉄筋の呼び径)の範囲の鉄筋には、付着劣化の影響を避ける目的でブチルゴムとビニールテープを巻いて付着除去区間を設けた。

表二に安定液の配合を示す。安定液はベントナイト系の転用泥水を想定し、比重が施工管理値の一般的な範囲の上限に相当するように、粘性土と砂質土を同表中の比率で配合した模擬土を混入させた。また、表二には安定液の比重、粘性とpHの測定結果を併記した。作製した安定液は一般的な安定液に比べて鉄筋の付着性能に不利な条件と考えられる。

写真一に鉄筋表面への安定液の付着状況を示す。鉄筋は型枠内ではなく別容器内(塩ビ管)で安定液に浸漬させた(同写真a)。浸漬開始から24時間経過後に鉄筋を安定液から取り出し、付着した安定液(同写真b)が剥がれ落ちないように型枠内で配筋し、コンクリートを打設した。

2-2 実験方法

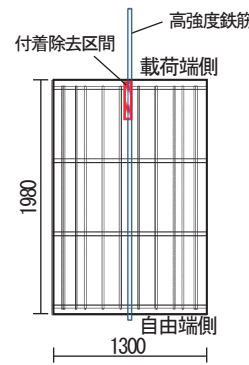
鉄筋の引張力は試験体を反力床上にPC鋼棒で固定し鉄筋上端に治具を接続して油圧ジャッキで与えた。加力は荷重制御とし、鉄筋の長期許容応力度の1.5倍相当を2回、鉄筋の規格降伏強度の95%相当を2回繰り返した後、引張強度の95%相当まで単調引張加力した。

鉄筋に作用させる引張荷重は油圧ジャッキの荷重計で計測した。また、鉄筋とコンクリートの相対変位量(以下、抜け出し量)は、コンクリート側面を不動点として、

表二 実験No.1の試験体パラメータ

試験体名	安定液	σ_B (N/mm ²)	定着長さ	ひずみゲージ
B-60-36d	あり	60	36d (1152mm)	なし
60-36d	なし	60	36d (1152mm)	
B-30-52d-G	あり	30	52d (1664mm)	あり
30-52d-G	なし	30	52d (1664mm)	

σ_B : コンクリートの計画強度, d: 鉄筋の呼び径, 鉄筋 D32



表三 材料試験結果 (実験No.1)

鉄筋			
降伏強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	降伏ひずみ μ
712.2	1.81×10 ⁵	930.5	3933

コンクリート			
No.	目標強度 N/mm ²	呼び強度	ヤング係数 N/mm ²
1	30	21	29.5
2	60	52	68.7
3			67.6

図一 試験体形状

表四 安定液の配合

安定液配合		模擬土配合		安定液試験結果		
ベントナイト	CMC	粘性土	砂質土	比重	粘性(s)	pH
5%	0.20%	16%	5%	1.15	32.78	9



写真一 鉄筋表面への安定液の付着状況

変位計で加力方向への鉄筋の変位量を計測した。

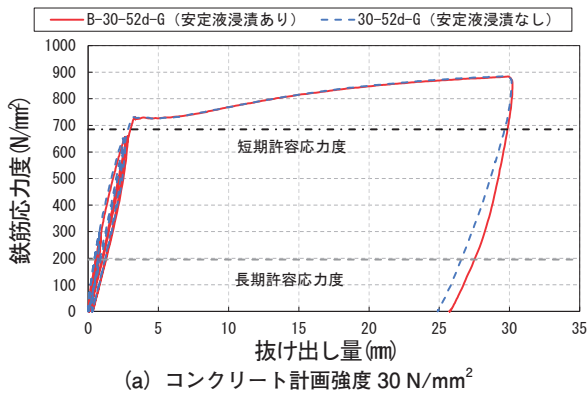
2-3 実験結果および考察

図二に鉄筋の引張応力度と抜け出し量の関係を示す。鉄筋の引張応力度はジャッキ荷重を鉄筋の公称断面積で除した値であり、抜け出し量は2箇所の計測点を平均した。同図より、両試験体とも引張強度の95%相当まで荷重を保持しており、安定液浸漬の有無による違いは認め

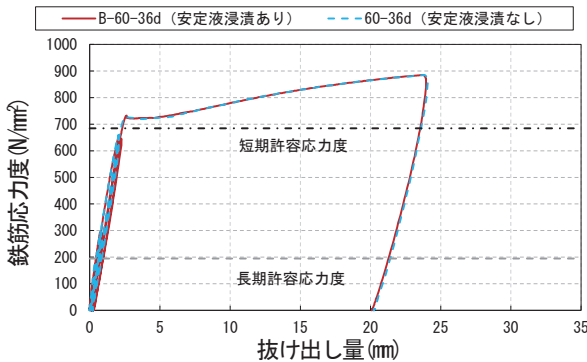
られない。また、実験終了後においてもコンクリートのひび割れは確認されなかった。

図-3に鉄筋のひずみ分布を示す。鉄筋のひずみは自由端側のコンクリート面から約700~1600mmの範囲で主に発生し、安定液浸漬の有無で有意な差は認められない。また、自由端側のコンクリート面から11dの範囲では、鉄筋の引張強度の95%まで加力しても、ひずみはほとんど生じていない。

以上の結果から、安定液への浸漬が高強度鉄筋の附着性能に及ぼす影響は認められず、RC規準の算定方法で高強度鉄筋のコンクリートへの必要定着長さを安全側に評価できると考えられる。



(a) コンクリート計画強度 30 N/mm²



(b) コンクリート計画強度 60 N/mm²

図-2 鉄筋の引張応力度と抜け出し量の関係

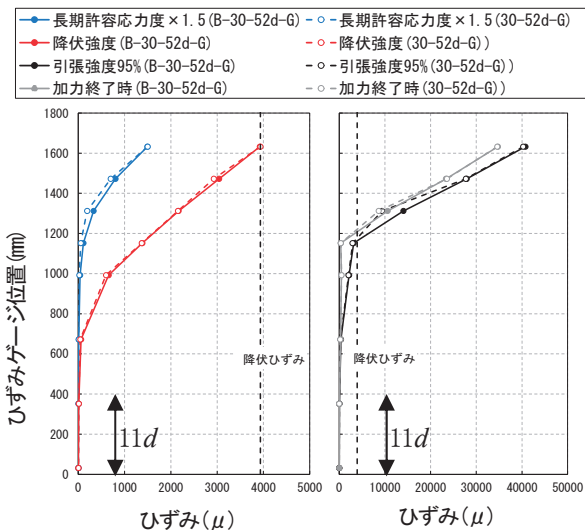


図-3 鉄筋のひずみ分布

§ 3. 高強度鉄筋の重ね継手性能確認実験

上部構造物で使用される高強度鉄筋同士の継手には、機械式継手が一般的に用いられているのに対して、場所打ちコンクリート杭の主筋の継手には重ね継手が用いられている。一方で、RC規準には高強度鉄筋同士の重ね継手長さは示されていない。そこで、高強度鉄筋同士の重ね継手の力学的性能と安定液浸漬の有無による影響を確認した。

3-1 試験体概要

表-5に試験体パラメータ、図-4に試験体形状、表-6に材料試験結果を示す。主な実験因子は、安定液浸漬の有無、コンクリート強度と重ね継手長さなどである。1つの試験体は幅1200mm、高さ1420mmのコンクリート中の2組の重ね継手であり、相互に影響しないように600mm離して埋め込まれている。重ね継手長さはRC規準と日本建築学会「基礎部材の強度と変形性能」⁵⁾(以下、部材指針)を準用して設定した。J-B-30-55d-GとJ-B-60-38d-Gのケースでは、鉄筋にひずみゲージを貼付してひずみ分布を確認した。なお、前章の実験と同様に、コンクリートの上端面から10d(d:鉄筋の呼び径)の範囲に附着除去区間を設けた。

表-4と同配合の安定液を型枠内に充填し、鉄筋を24時間浸漬させた。その後、型枠内から安定液を排出し、コンクリートを打設した。

3-2 実験方法

鉄筋の引張力は載荷端側の2本の鉄筋を治具に接続し油圧ジャッキで同時に与えた。加力制御及び計測方法は

表-5 実験 No.2 の試験体パラメータ

試験体名	安定液	σ_B N/mm ²	重ね継手長さ	ひずみゲージ
J-30-55d	なし	30	55d (1045mm)	なし
J-B-30-55d		30	55d (1045mm)	
J-B-60-38d		60	38d (722mm)	
J-B-30-40d	あり	30	40d (760mm)	あり
J-B-30-55d-G		30	55d (1045mm)	
J-B-60-38d-G		60	38d (722mm)	

表-6 材料試験結果 (実験 No.2)

鉄筋			
降伏強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	降伏ひずみ μ
696	1.90×10^5	890.7	3667

コンクリート			
No.	目標強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²
1	30	32.6	3.14×10^4
2	60	69.6	3.98×10^4

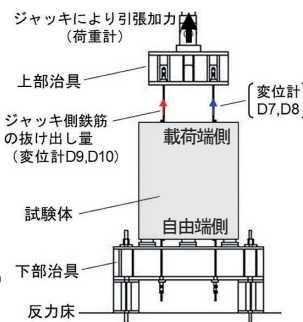


図-4 試験体形状

§2の実験と同様であるが、抜け出し量は鉄筋1本あたり2箇所計測した変位量の平均値である。

3-3 実験結果および考察

図-5に鉄筋の引張応力度と抜け出し量の関係を示す。

同図 a) より、規格降伏強度を超えて引張強度の95%相当まで荷重を保持しており、附着性能確認実験と同様に安定液浸漬の有無による違いは認められない。また、同図 b) のコンクリート強度が異なる場合においても、規格降伏強度を超えて引張強度の95%相当まで荷重を保持した。

図-6にJ-B-30-55d-Gについて、サイクルピーク時の鉄筋のひずみ分布を示す。同図より、荷重が大きくなるにつれて、ひずみの生じる範囲がジャッキ側鉄筋では上端から、反対側の鉄筋では下端から進展していくことが確認できる。なお、規格降伏強度の95%相当以降の荷重においても両側の鉄筋に微小なひずみの部分が認められることから、RC規準による重ね継手長さの設定方法は、応力伝達に必要な重ね継手長さを安全側に評価できると考えられる。

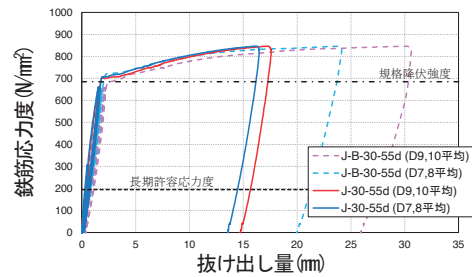
以上より、限られた条件での実験であるが、重ね継手の力学的性能に安定液浸漬による影響は見られず、RC規準による重ね継手長さの設定方法は、高強度鉄筋同士の応力伝達に必要な重ね継手長さを安全側に評価できた。

§4. 杭体の構造性能確認実験

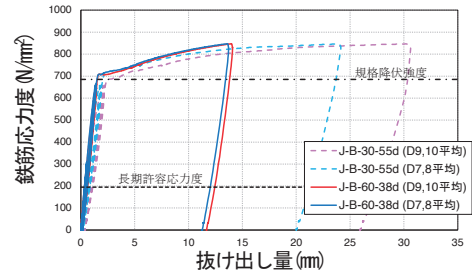
場所打ちコンクリート杭の構造性能を確認するための既往の実験としては、最大杭径800mm規模での杉山らの事例⁶⁾、主筋に高強度鉄筋を適用した篠原らの事例⁷⁾などがある。ただし、極めて稀に発生する地震動に対する安全性を検証した事例は少ない。そこで、主筋に高強度鉄筋を用いた杭体の曲げせん断実験を実施し、構造性能を確認した。

4-1 試験体概要

表-7に試験体パラメータ、図-7に試験体形状の一例と表-8に材料試験結果を示す。試験体は同一形状の全5体であり、安定液を用いずに気中で打設して製作した。杭径は600mm、試験区間(杭体)は内法高さ2700mm(せん断スパン比1.35)であり、上下にスタブ(紙面奥行き方向の寸法は1600mm)を有する。杭主筋には規格降伏強度が685N/mm²の竹節鉄筋を使用した。主な実験因子は主筋比、コンクリート強度と軸力比であり、試験体No.1~No.3の全ての条件は部材指針⁵⁾の適用範囲内で設定した。試験体No.4の軸力比は部材指針における圧縮側の適用範囲の上限である+0.4とし、コンクリート強度は他のケースに比べて主筋強度とのバランスを考慮して部材指針の適用範囲外となるFc=60N/mm²とした。また、試験体No.5の軸力比は部材指針の適用範囲外



a) 安定液浸漬の有無による違い



b) コンクリート強度と重ね継手長さによる違い

図-5 鉄筋の引張応力度と抜け出し量の関係

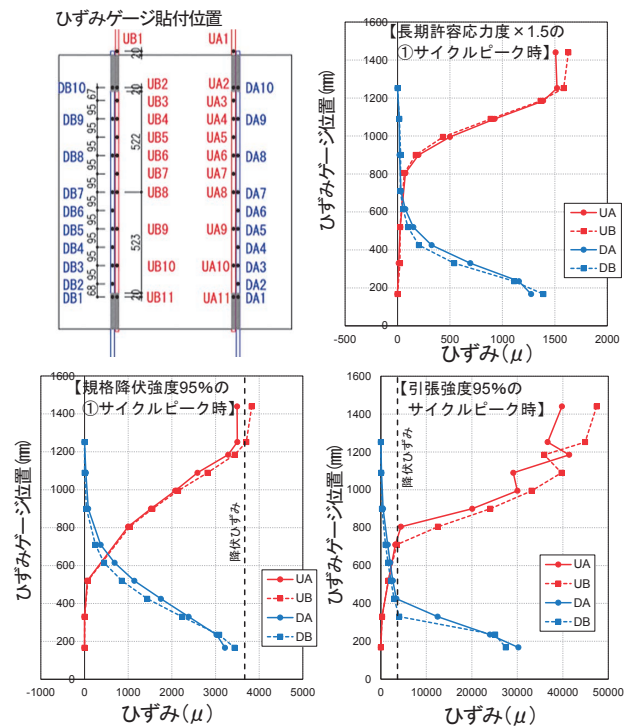


図-6 J-B-30-55 d-G のひずみ分布

となる-0.2とし、主筋比をPg=1.82%とした。なお、杭体にはスパイラル状の高強度せん断補強筋(SBPD1275/1420)を使用し、せん断破壊が曲げ破壊よりも先行しないようにした。

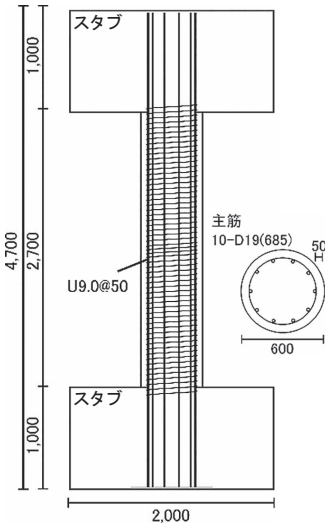
4-2 実験方法

図-8に荷重装置を示す。加力方法は荷重開始時に試験体に所定の軸力を与えた後、軸力一定のまま試験体中心位置に水平力を加えることで、杭体中央を反曲点とした逆対称モーメントが生じるようせん断力を与えた。荷重サイクルは部材変形角R(試験体上下端の相対水平

表一七 実験 No.3 の試験体パラメータ

試験体 No.	主筋比 P _g (%)	せん断補強筋比 P _w (%)	設計基準強度 F _c (N/mm ²)	軸力比 η (-)	作用軸力 N(kN)
1	1.01 (10-D19)	0.14 (U9@150)	30	-0.1	-944
2		0.21 (U9@100)		0.2	1,702
3			0.4	3,551	
4		0.42 (U9@50)	60	0.4	6,379
5	1.82 (18-D19)	0.83 (U12.6@50)	30	-0.2	-1,880

$P_g = a_g / A_c$ a_g : 主筋全断面積, A_c : 杭の断面積 ($A_c = \pi D^2 / 4$)
 $P_w = a_w / (D \cdot x)$ a_w : 1組のせん断補強筋の断面積,
 x : せん断補強筋のピッチ
 $\eta = N / (\sigma_B \cdot A_c)$



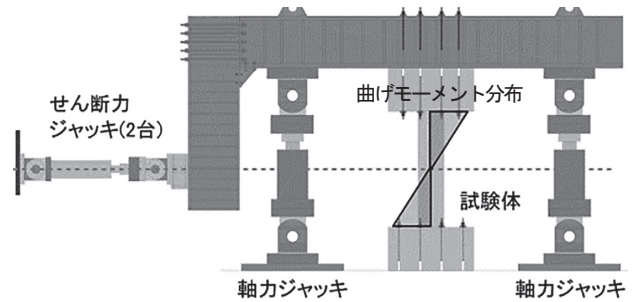
図一七 試験体形状

表一八 材料試験結果 (実験 No.3)

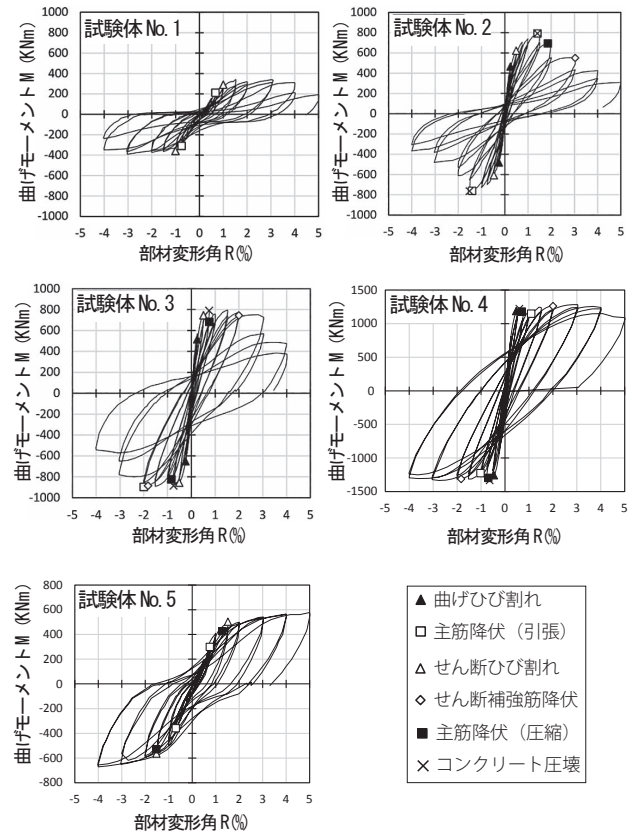
試験体 No.	コンクリート (杭体)	
	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
1	33.4	28,937
2	30.1	28,302
3	31.4	28,988
4	56.4	32,903
5	33.3	28,142

主筋	
降伏点 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
748	202,200

せん断補強筋	
降伏点 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
1,417	207,936



図一八 荷重装置



図一九 杭体脚部の曲げモーメント M と部材変形角 R の関係

変位 δ / 試験区間長 2700 mm) で制御し, $\pm 0.125\%$ を 1 サイクル, 以降は $\pm 0.25\%$, $\pm 0.50\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$ を 2 サイクルずつ, No.3 を除き $+5.0\%$ (正側) で片押しした後, 除荷して実験を終了した。

4-3 実験結果

図一九に杭体脚部の曲げモーメント M と部材変形角 R の関係を示す。同図中には損傷状況のプロットを記載しており, 縦軸の曲げモーメント M は軸力による付加曲げ (P- δ 効果) を考慮した補正值である。

試験体 No.1 は, 引張軸力を導入した際に曲げひび割れが発生し, $R=0.7\%$ と早い段階で外端の主筋が引張降伏した。その後, せん断ひび割れが発生し, $R=1.5\%$ 以降の曲げモーメント M がほぼ横ばいに推移した。

試験体 No.2 と No.3 は, $R=0.25\%$ 時に曲げひび割れが発生し, 剛性低下が生じた後, コンクリートの圧壊により最大曲げモーメントに達した。最大曲げモーメントに到達後, No.2 の曲げモーメントは徐々に低下したが, No.3 の曲げモーメントは, ほぼ横ばいに推移しており, 両者には軸力比による差が認められた。

試験体 No.4 は, $R=0.5\%$ 時に杭体脚部に曲げひび割れが発生し剛性低下が生じた。その後, $R=0.7\%$ 付近で脚部のコンクリートが圧壊したものの曲げモーメントの低下は認められず, ほぼ横ばいに推移した。その後, $R=$

4.0% 時点で引張側最外端の主筋が破断し曲げモーメントの低下が認められ, 高圧縮軸力下においても高い靱性を発揮した。

No.5 は, 引張軸力を導入した際に円周方向に連続的なひび割れが発生し, No.1 と同様に $R=0.7\%$ で主筋が引張降伏した。その後, $R=1.5\%$ で主筋の圧縮降伏とせん断ひび割れが発生したが, 曲げモーメントは緩やかに増加し, $R=5.0\%$ 時点においても曲げモーメントの低下は認められなかった。

写真一2に各試験体の最終破壊状況を示す。いずれの試験体も損傷は, 試験区間内端部の 1.0 D (D: 杭径) 内に集中して発生しており, 破壊形式は曲げ降伏先行型であった。また, 主筋の付着割裂破壊と考えられる脆性的な損傷は確認されず, 最終荷重段階まで杭体として軸力保持性能を有していた。各試験体の損傷は次の通りである。

No.1 は主筋の引張降伏に伴う曲げひび割れが発生し,

No.2 と No.3 はかぶり部分のコンクリートが剥落し、No.3 は主筋が座屈した。No.4 は杭外端脚部のコンクリートが圧壊・剥離し、その逆側の引張側最外端の主筋が破断した。No.5 はコンクリートの剥離は確認されなかったが、主筋降伏に伴う杭体の曲げひび割れ及びスタブ端部からの抜け出しが確認された。

4-4 実験結果と解析結果の比較

図-10 に正加力サイクルピーク時の杭体の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係について、各試験体の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果の曲率は杭体脚部 1.0D 区間の変位計の値により算定し、曲げモーメント M は杭脚部の値を用いた。解析結果は杭の曲げ耐力の評価として広く用いられている平面保持を仮定した断面解析⁵⁾ の値である。解析値の算定に用いた材料定数は表-8 の材料試験結果を用いた。また、断面解析に必要な主筋およびコンクリートの応力-ひずみ関係はバイリニア（弾完全塑性型）とし、コンクリートの引張応力に抵抗しない設定とした。なお、限界ひずみはコンクリートを 3000μ （圧縮側）、主筋を 10000μ とし限界ひずみに達した時点で計算を終了した。図-10 より、実験結果と解析結果の傾向は概ね良い対応を示し、いずれの試験体でも断面解析による限界ひずみ時の曲げモーメント M は、実験結果に対して小さい結果となった。このことから、杭主筋に高強度鉄筋を用いて既往の断面解析の方法で実験結果を安全側に評価することが可能である。

§5. まとめ

本研究では高強度鉄筋を杭主筋に用いた場所打ちコンクリート杭構法を開発するため、種々の実験を実施した。その結果、高強度鉄筋の付着性能及び重ね継手性能に対する安定液浸漬の影響は確認されず、RC 規準をもとに高強度鉄筋の定着長さ及び重ね継手長さを安全側に評価できることを確認した。

また、本報で示した杭体の構造性能確認実験においては、最終荷重段階まで軸力保持性能を損なわず、高い変形性能を有していることを確認した。また、既往の断面解析の方法で、杭体の $M-\phi$ 関係を概ね評価することが可能である。

謝辞. 本報は、安藤ハザマ、佐藤工業、鉄建建設、東急建設、戸田建設、奥村組、長谷工コーポレーション、三井住友建設との共同研究の成果の一部をまとめたものである。

また、広島工業大学 金子治教授には貴重なご指導とご助言を受けた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 日本建設業連合会：場所打ちコンクリート杭の品質

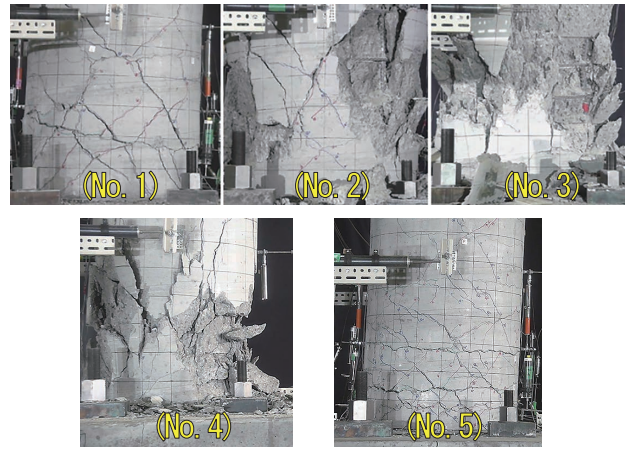


写真-2 各試験体の最終破壊状況

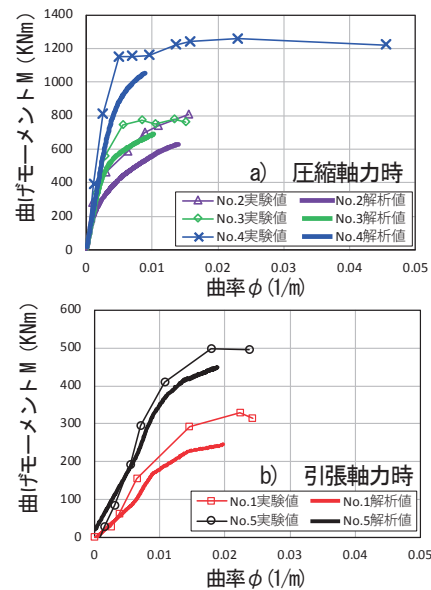


図-10 各試験体の実験結果と解析結果の比較

- 管理のポイント, 2017 年
- 2) 藤井高広ほか：高強度鉄筋の付着性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 731-732, 2016 年
- 3) 藤井衛ほか：場所打ちコンクリート杭築造時における鉄筋とコンクリートの付着強度の低下防止に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 592 号, pp. 91-96, 2005 年
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018 年
- 5) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能, 2022 年
- 6) 杉山智昭ほか：場所打ちコンクリート杭の構造性能(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 573-574, 2018 年
- 7) 篠原保二ほか：高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ち杭の軸力の違いが曲げ性状に及ぼす影響(その1 実験概要および実験結果, その2 検討と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 779-782, 2011 年