

論文 定着筋の配置直径を拡大した SC 杭の杭頭接合部の曲げ挙動に及ぼす杭頭側面コンクリートの影響

諏訪 裕哉*1・原田 幸博*2・島田 侑子*3

要旨: 近年, 高耐力の外殻鋼管付きコンクリート杭 (SC 杭) を採用する設計の増加に伴い, 定着筋の数量増加や太径化が進み, 基礎部配筋の過密化が問題となっている。過密配筋を回避するために杭頭部を基礎に杭径程度埋め込ませ, 杭頭側面コンクリートの支圧曲げ抵抗を考慮する設計もなされているが, 実験的な研究事例は少ない。筆者らは定着筋の配置直径を拡大することによって定着筋の数量低減を期待する工法を考案し, 杭頭側面コンクリートの支圧曲げ抵抗を把握するための繰返し水平載荷実験を行った。実験で得られた杭頭接合部の曲げ耐力は杭頭端面と杭頭側面の曲げ抵抗の累加により説明できることを示した。

キーワード: SC 杭, 杭頭接合部, 主筋定着方式, 配置直径, 支圧抵抗

1. はじめに

杭基礎は杭頭接合部の結合方法により杭頭固定度が変化することから, 杭に作用する曲げモーメントを固定度に応じて算定し, 十分な曲げ耐力を有する杭種を選定する。杭頭固定の場合, 杭頭部で曲げモーメントが最大となることから, 経済性を考慮し, 上杭のみ曲げ耐力の大きい外殻鋼管付きコンクリート杭 (以下, SC 杭) を採用する設計が多い。

SC 杭における杭頭固定接合法には, 杭頭に鉄筋を溶接して基礎内に定着させる方法 (主筋定着方式) が一般的に用いられているが, 490N/mm²級の強度を有する, 板厚が 12mm 前後の鋼管に用いる場合, 定着筋の数量が多くなり, 基礎梁等の配筋が困難になる問題がある。定着筋の数量を低減する方法として, 太径で高強度の鉄筋を用いる設計もあるが, 鉄筋の耐力に依存して溶接量や定着長が増大するため, 基礎高が増大し, 経済性が悪化する傾向にある。また, 定着筋の過密配筋を回避する方法として, 杭頭部を杭径程度埋め込み, 杭頭側面コンクリートの支圧抵抗を考慮して杭頭筋の応力伝達と併用することで定着筋の数量低減を図る方法¹⁾が知られているが, 実験的な研究事例は少ない。

筆者らは, 定着筋の数量が削減可能となる杭頭接合法を提案し, 杭頭部の根巻きコンクリートがない条件における片持ち梁形式の実大曲げ実験により提案工法の曲げ耐力評価に関する検討²⁾を行った。本論文では, 杭頭外周に補強筋を配した基礎コンクリートに接合部を埋め込んだ場合の曲げ性状を把握するために行った杭頭接合部の実大曲げ実験より, 杭頭側面コンクリートの存在が許容曲げ耐力に及ぼす影響について検討した。

2. 工法の概要

2.1 工法の構成

図-1 に本工法の概要を示す。本工法では杭と定着筋を接続する金物 (以下, 杭頭接続金物) を工場にて製作し, 現場打設後の杭頭外周部に現場溶接にて接合する。杭頭接続金物は定着筋と接続するための六角形のカプラーを二枚の開先付き鋼板で挟んだ構成となっており, 定着筋の位置を杭頭側面から片側 100mm 離すことが可能で, 定着筋の配置直径を拡大することができる。

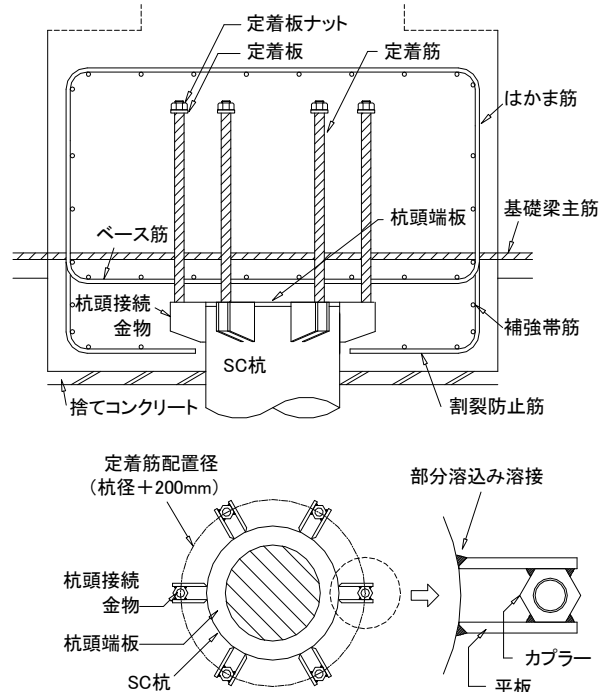


図-1 本工法の概要

*1 岡部(株) 技術開発部 修士 (工学) (正会員)

*2 千葉大学大学院 工学研究院建築学コース教授 博士 (工学)

*3 千葉大学大学院 工学研究院建築学コース准教授 博士 (工学)

2.2 工法の設計方針

本工法を用いた杭頭接合部の応力伝達機構の仮定として、杭頭接合部に作用する軸力 N と曲げモーメント M は主に杭材および杭頭接続金物の各端面から基礎コンクリートに支圧力として、定着筋に引張力もしくは圧縮力として伝達されると考える。また、曲げモーメント M の一部はせん断力 Q とともに基礎に埋め込んだ杭の側面から基礎コンクリートに支圧力として伝達されるものと考えられる。

杭頭端面の曲げ耐力は、引張側もしくは圧縮側の定着筋または圧縮側コンクリートのうち最も小さい耐力により決定されるが、本論文では鋼管杭の杭頭接合部の簡便設計として一般的に使用されている仮想鉄筋コンクリート断面による設計法³⁾(以下、仮想円柱法)で評価する。

杭頭接続金物および杭との溶接接合部の耐力は定着筋の耐力を上回るように設定する。構成部材各部の検討方法については既報⁴⁾を参照されたい。

3. 実験方法

3.1 試験体計画

本章では杭頭接合部の曲げ耐力設計における仮想円柱法による曲げモーメントおよび基礎に埋め込んだ杭頭部の支圧抵抗について把握することを目的とした、杭頭埋め込み量および杭頭側面コンクリートの補強鉄筋量を試験要素とした実大杭頭接合部の繰返し水平載荷実験について報告する。主たる実験変数は埋め込み高さであり、

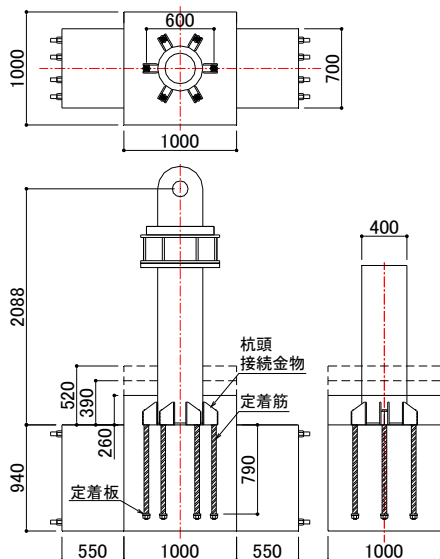


図-2 試験体の形状寸法

杭頭接続金物の溶接長に最小かぶり厚さを加えた長さを基本とした。また、埋め込み高さの増加により耐力が増加すると考え、比較試験体を2通り計画した。なお、杭頭周囲の補強鉄筋量はせん断破壊を先行させないように計画した。試験体に作用させる軸力 N は各試験体共通で-867kNとした。これは仮想円柱法により計算した杭頭端面の耐力と杭耐力がほぼ同等となる引張軸力である。

図-2に試験体形状、表-1に試験体一覧、表-2に使用鋼材の機械的性質を示す。SC杭は既製品を用い、杭径は400mm、鋼管厚さは12mm、杭鋼管の鋼種はSKK490とした。杭頭接合部は図-3に示す形状寸法の杭頭接続金物を杭に部分溶込み溶接し、これを介して定着筋を基礎コンクリートに埋め込み、呼び強度21N/mm²の普通コンクリートを1回打設することで形成した。杭埋め込み部の礎柱は立ち上り形状とし、埋め込み高さは260mm(基本試験体)、390mm(260×1.5)、520mm(260×2.0)の3通りとし、幅は杭径の2.5倍となる1000mmとした。定着筋はねじ棒鋼D38(SD490)を用い、杭頭接続金物カブラ部へ嵌め合わせる。また、定着筋の片端部には□65×12t(SS400)の定着板を設け、基礎コンクリート内に790mm定着させた。なお、定着筋は等間隔に6本配置とし、その配置直径は600mmとなる。

図-4に試験体の配筋概要を示す。各試験体共通の礎柱および基礎梁の配筋に加え、鉄筋量の異なる割裂防止筋と補強帯筋を配筋した。また、定着筋と割裂防止筋の材軸方向に貼り付けたひずみゲージの位置を併記する。基礎立ち上がり部の下端を基点とすると、定着筋は杭頭接続金物の下側へ20mm、割裂防止筋は基点高さとなる。

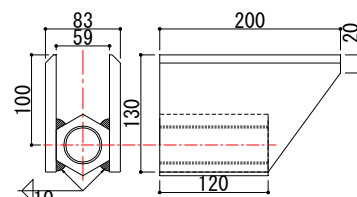


図-3 杭頭接続金物の形状寸法

表-2 鋼材の機械的性質

部材	呼び・板厚	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)
定着筋	D38	SD490	524.1	712.1	73.6	13.3
杭鋼管	12t	SKK490	414.0	561.5	73.7	38.0
平板	12t	SN490B	351.7	540.6	65.1	35.6
補強鉄筋	D16	SD345	380.7	558.7	68.1	18.4
	D13	SD295A	342.3	480.7	71.2	19.3

※ 下線は0.2%オフセット耐力を示す

表-1 試験体の一覧

試験体	杭	定着筋(ねじ筋)				杭頭接続金物			基礎コンクリート						
		鋼種	呼び径	本数(本)	定着長(mm)	鋼種	配置径(mm)	溶接長さ(mm)	種別	呼び強度	材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)	埋込高さ(mm)	割裂防止筋	補強帯筋
6-D38-A3R	φ400 -12t	SD490	D38	6	790	SN490B	600	200	普通	21	27	32.2	260	4-D13	D13@150
29											34.1	390	4-D16	D16@150	
34											34.0	520	4-D16	D16@100	

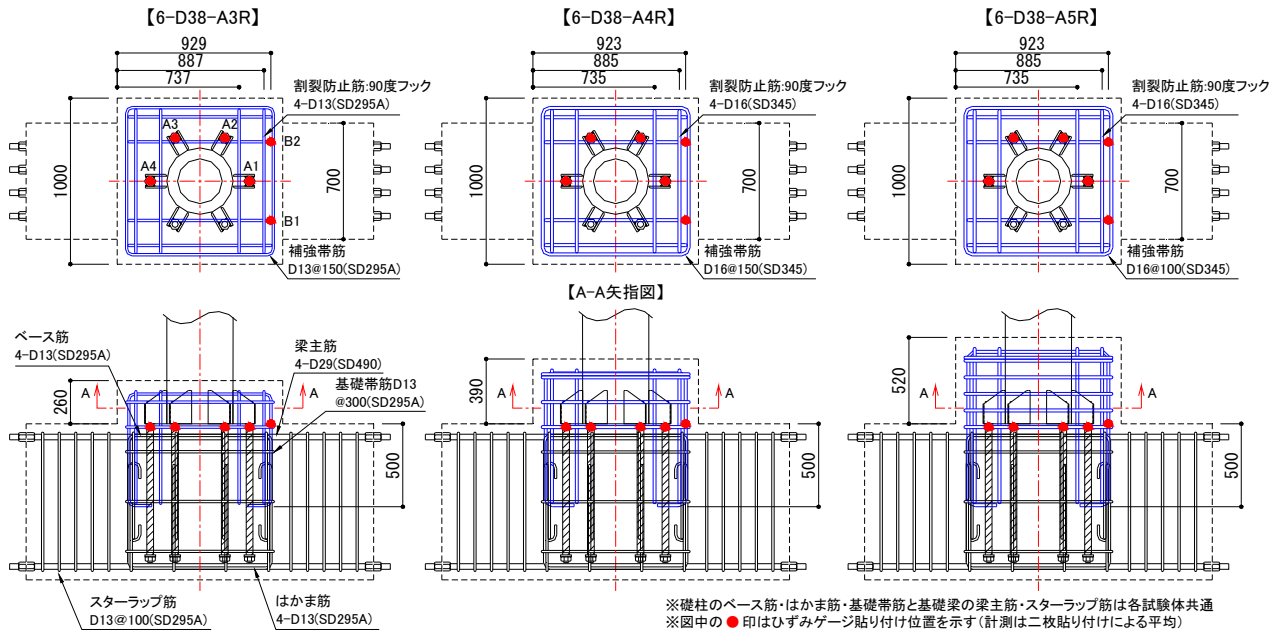


図-4 試験体の配筋概要

3.2 荷方法

図-5 に実験装置の概要を示す。試験体は二方向荷重装置に、杭とパイルキャップおよび基礎梁を上下逆転させた状態で設置した。加力は鉛直方向ジャッキによって所定の軸力を保持し、荷重梁を介して設置したアクチュエータにより水平荷重した。荷重計画は杭の部材角 R による変位制御とし、 $R=1/400, 1/300, 1/200, 1/100, 1/50, 1/30, 1/20$ rad の正負交番漸増繰返し荷重とした。なお、杭の部材角 R は荷重点の水平変位 δ_1 を荷重点から杭頭端面下面までの距離 2088mm で除した値となる。杭の変形は変位計 δ_v と δ_2 、回転角は杭頭部 θ_1 および基礎コンクリート部 θ_2 に設置した傾斜計により測定し、実験結果の検討に用いる杭頭接合部の回転角 θ は θ_1 から θ_2 を差し引き、試験体据付部における回転変形の影響を除いた。

4. 実験結果

4.1 履歴性状

図-6 に各試験体の曲げモーメント M と回転角 θ の関係を示す。履歴は埋め込み高さによらず紡錘形となった。各試験体には 4.2 節で示すようなひび割れが生じたが、せん断補強筋の抵抗により急激な耐力低下は見られなかったことから、補強筋を配した杭頭側面コンクリートと杭頭接合部は相互が一体となって変形したと考えられる。

表-3 に実験結果の一覧を示す。杭頭接合部の変形要因は定着筋の降伏が支配的と考えられるが、構造各部の変形が接合部全体への変形に及ぼす影響を考慮し、降伏モーメントの実験値 jM_y は合成構造の降伏耐力評価でよく用いられる Slope factor 法⁵⁾によって、 $M-\theta$ 関係の接線剛性が初期剛性の $1/3$ となる曲げモーメントと定義した。なお、4.3 節で示す定着筋と補強筋のひずみ状況より求め

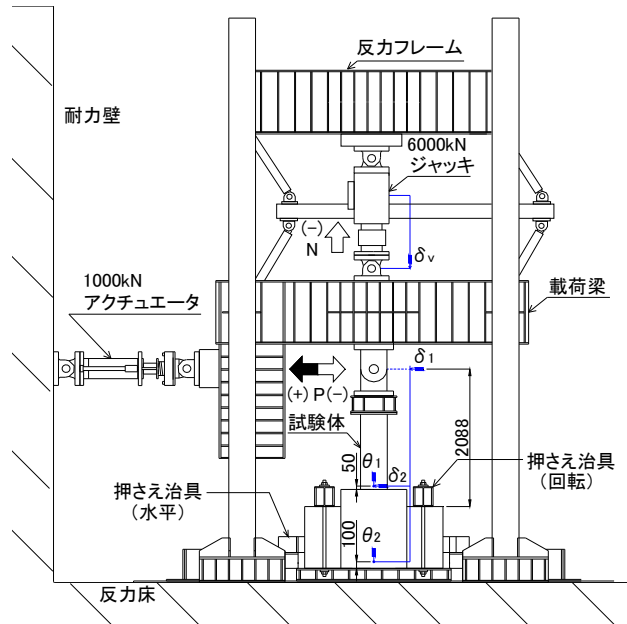


図-5 実験装置の概要

表-3 実験結果の一覧

試験体	降伏耐力時			最大耐力時		降伏順序
	せん断 jQ_y (kN)	曲げ jM_y (kNm)	回転角 θ_y (rad)	曲げ jM_{max} (kNm)	回転角 θ_{max} (rad)	
6-D38-A3R	335	700	0.009	991	0.066	定着筋→補強筋
6-D38-A4R	410	856	0.010	1140	0.067	定着筋→補強筋
6-D38-A5R	463	967	0.010	1396	0.065	補強筋→定着筋

た、 jM_y 時の定着筋および補強筋の応力度より降伏順序を確認している。最大曲げモーメント jM_{max} は各試験体において $\theta=0.06$ rad 程度において記録し、 $R=1/20$ rad 到達時においても耐力低下は示さなかった。 jM_y と jM_{max} は埋め込み高さが高いほど大きくなり、6-D38-A3R に対して A4R は約 1.2 倍、A5R は約 1.4 倍の耐力となった。

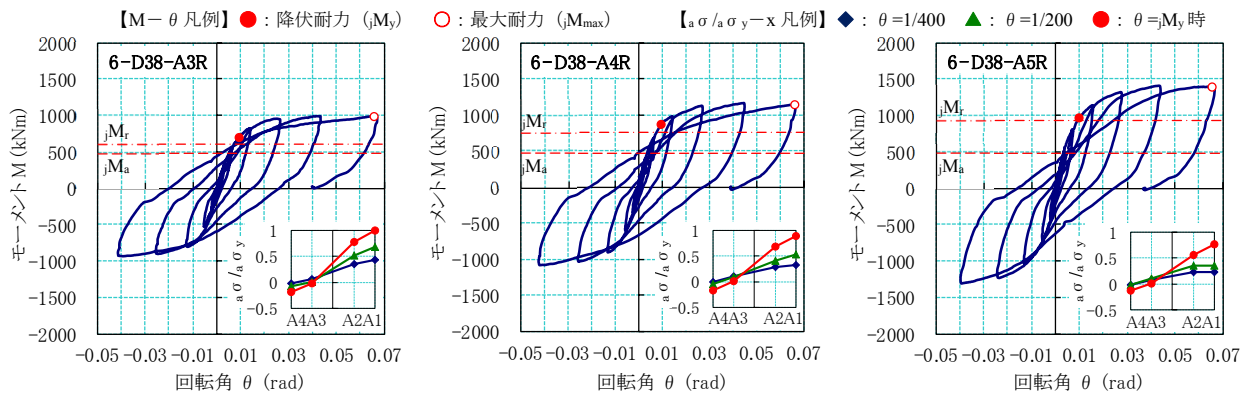


図-6 杭頭接合部の曲げモーメントと回転角の関係および定着筋の位置と応力度比の関係（右下）

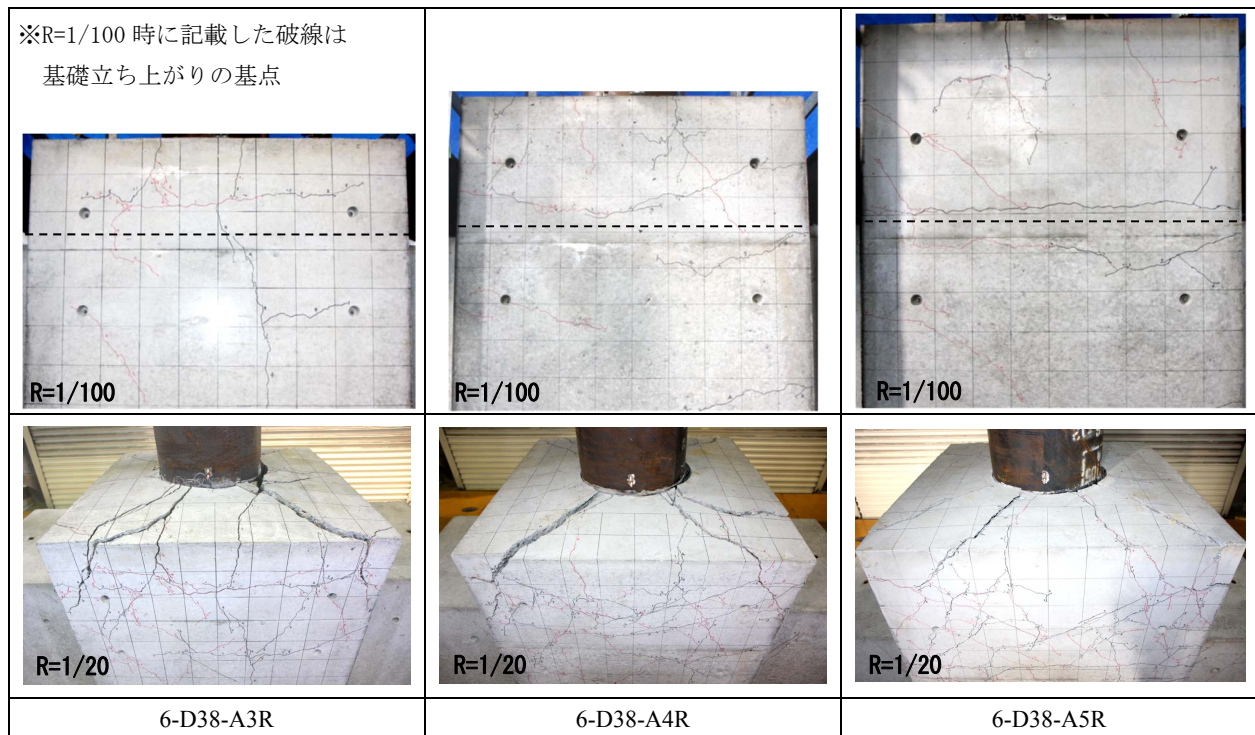


写真-1 基礎コンクリートのひび割れ状況

4.2 ひび割れ状況

(1) 降伏耐力時

写真-1 に R=1/100 rad 時のひび割れ状況を示す。これは、各試験体の降伏曲げモーメント実験値 jM_y にほぼ対応する。各試験体ともにひび割れが僅かに生じているが、杭頭側面の支圧力によるコーン状のひび割れや破壊は発生していない。また、6-D38-A4R/A5R 試験体において曲げひび割れが生じ、6-D38-A5R 試験体では礎柱を横断するようにひび割れが伸展した。

(2) 最大耐力時

写真-1 に R=1/20 rad 時のひび割れ状況を示す。これは最大曲げモーメント実験値 jM_{max} に対応する。特徴的なひび割れは基礎上面の杭中心から 45° 方向に伸展したひび割れであった。基礎上面のひび割れは基礎側面に生じた曲げひび割れや定着筋の引張に伴う縦方向のひび割れに続いて発生したが、ひび割れ幅は最大となった。

4.3 ひずみ状況

図-6 に定着筋の降伏点に対する部材角 R=1/400, 1/200 rad および jM_y 時の応力度比を M- θ 履歴と併せて示す。これより、杭頭接続金物と定着筋の接合部は jM_y 時において平面保持が成り立ち、引張側定着筋の応力度は埋め込み高さが高いほど小さくなることが確認できた。また、定着筋とほぼ同立面位置における割裂防止筋のひずみが顕著に生じた。表-4 に定着筋と割裂防止筋の降伏点に対する R=1/400, 1/200 rad および jM_y 時の応力度比を示す。これより、定着筋と補強筋の双方が応力伝達に寄与し、 jM_y はいずれかの鉄筋降伏により決定したと考えられる。

表-4 定着筋 (A1) と割裂防止筋 (B平均) の応力度比

試験体	定着筋 $a\sigma/a\sigma_y$			割裂防止筋 $b\sigma/b\sigma_y$		
	1/400	1/200	jM_y	1/400	1/200	jM_y
6-D38-A3R	0.43	0.68	1.00	0.16	0.26	0.59
6-D38-A4R	0.33	0.52	0.88	0.33	0.62	0.94
6-D38-A5R	0.23	0.35	0.75	0.59	0.94	0.99

5. 杭頭接合部の曲げ耐力評価

5.1 杭頭端面の曲げ抵抗

本章では実験結果と既往の評価法による耐力計算から、本試験体の耐力機構と評価法を検討する。杭頭端面の曲げ抵抗 jM_a は仮想円柱法により式(1)にて計算した。

$$jM_a = \left(X_o + \frac{I_n}{S_n} \right) N \quad (1)$$

ここで、 I_n : 仮想断面の応力分布が作る中立軸に対する断面二次モーメント(mm⁴)、 S_n : 仮想断面の応力分布が作る中立軸に対する断面一次モーメント(mm³)、 X_o : 仮想断面図心から中立軸までの距離(mm)

ただし、 X_o は引張側もしくは圧縮側の定着筋の降伏応力度または圧縮側コンクリートの圧縮強度から決まる軸力 N のうち、最も小さい曲げモーメントを与える値とする。なお、仮想断面の直径は杭頭埋め込み量が少なく、周辺のコンクリートに対して補強鉄筋のない試験体による実験結果で得られた知見²⁾を採用し、杭径+320mm(定着筋の配置直径に鉄筋のかぶりを想定し、片側 60mmを加えたもの)とした。

表-5に降伏耐力の実験値 jM_y と仮想円柱法による計算値 jM_a を示す。 jM_y は $jM_a=471\text{kNm}$ を大きく上回ることから、杭頭端面の曲げ抵抗以外の抵抗要因として、杭周辺コンクリートの支圧曲げ抵抗の存在が推測できる。

5.2 杭頭側面の曲げ抵抗

杭頭接合部全体としての耐力を jM_r とすると、 jM_r は jM_a と杭頭埋め込み部の周辺コンクリートが支圧抵抗により負担する曲げモーメント jM_c または杭頭埋め込み部側面の鉄筋コンクリート柱としての曲げモーメント jM_b の小さい方との耐力の累加により得られると考えられる。

jM_c は文献¹⁾と同様に、曲げモーメントに対する回転支圧抵抗とせん断力に対する水平支圧抵抗の和からなると仮定する。ただし本研究では実験値との比較のため、杭頭端面での曲げモーメントの釣り合いを考える点が異なり、式(2)にて計算する。図-7に計算モデルを示す。

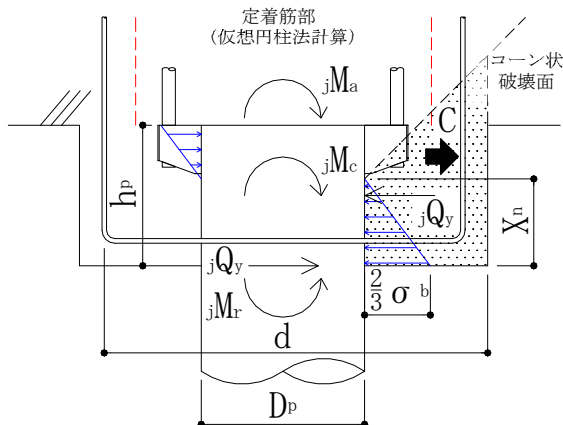


図-7 計算モデル

$$jM_c = \frac{2}{3} \sigma_b \cdot \frac{D_p h_p^2}{6} + \frac{h_p}{3} \cdot jQ_y \quad (2)$$

ここで、 σ_b : 基礎コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 D_p : 杭径(mm)、 h_p : 杭埋め込み高さ(mm)、 jQ_y : 降伏時せん断力(kN)

また、 jM_b は割裂防止筋を主筋とした単鉄筋断面と仮定して、式(3)にて計算する。

$$jM_b = \frac{7}{8} \cdot a_i \cdot f_i \cdot d \quad (3)$$

ここで、 a_i : 接合部の鉄筋コンクリート断面における引張鉄筋の総断面積(mm²)、 f_i : 鉄筋の引張降伏応力度(N/mm²)、 d : 引張鉄筋図心と圧縮コンクリート縁までの距離(mm)

式(2)および式(3)より jM_c および jM_b を計算し、小さい方の耐力を jM_a と累加し、接合部耐力 jM_r を得た。表-5に実験値 jM_y と仮想円柱法のみによる計算値 jM_a および累加耐力の計算値 jM_r の比較として示す。杭周辺コンクリートの耐力を考慮することで、降伏耐力の計算値は実験値をよく表現でき、埋め込み高さの違いに関わらず、降伏時累加耐力は実験値を 10%前後安全側に評価した。

表-5 実験値と計算値の比較

試験体	実験値	計算値				耐力比	
	降伏 jM_y (kNm)	仮想円柱 jM_a (kNm)	側面支圧 jM_c (kNm)	基礎曲げ jM_b (kNm)	累加 jM_r (kNm)	仮想円柱 jM_a/jM_y	累加 jM_r/jM_y
6-D38-A3R	700	471	126	264	597	0.67	0.85
6-D38-A4R	856	471	284	459	755	0.55	0.88
6-D38-A5R	967	471	489	459	930	0.49	0.96

※ 太字は累加耐力に採用した杭頭側面の耐力を示す

6. 杭周辺コンクリートの補強効果

本章では5章で示した杭頭接合部の曲げ耐力評価モデルが成立するために必要となる、杭周辺コンクリートのコーン状破壊に対する補強筋の拘束効果について検討する。図-7のモデルにおいて、 jM_c および jM_b の発現は杭頭側面の支圧合力 C によるコーン状破壊が生じないことが前提となる。本研究では C を式(4)~式(5)にて算定する。式(5)は杭頭部に作用する曲げに対する回転支圧抵抗とせん断力に対する水平支圧抵抗の和がコンクリートの許容圧縮応力度に達した状態より導いた。

$$C = \frac{1}{3} \cdot \sigma_b \cdot X_n \cdot D_p \quad (4)$$

$$X_n = \frac{\frac{2}{3} \sigma_b}{2 \cdot \left(\frac{2}{3} \sigma_b - \frac{jQ_y}{D_p \cdot h_p} \right)} \cdot h_p \quad (5)$$

ここで、 C : 杭周辺コンクリートに作用する支圧合力(kN)、 X_n : 杭の回転支圧により生じる抵抗力の基礎下端から中立軸までの距離(mm)

表-6 コーン状破壊に関する耐力評価値の一覧

試験体	C(=Q _{CR}) (kN)	X _n (mm)	A _c (mm ²)	Q _p (kN)	割裂防止筋		補強帯筋		Q _r (kN)	φ ₁	Q _{CR} ' (kN)	C/Q _{CR} '
					呼び径	有効本数	呼び径	有効本数				
6-D38-A3R	657	153	452,955	532	D13	4	D13	2	347	0.36	774	0.85
6-D38-A4R	1,002	221	520,508	628	D16	4	D16	4	907	0.41	1,263	0.79
6-D38-A5R	1,212	291	591,177	712	D16	4	D16	5	1,058	0.47	1,453	0.83

今回の実験ではコーン状破壊が生じず、 jM_c もしくは jM_b が発揮された。このときの C を算定し、表-6 に示す。なお、 jM_b で杭頭側面の曲げ耐力が決定した試験体 6-D38-A5R については、C の算定に際し、回転支圧抵抗として負担可能なコンクリート応力度 σ_b を、式(2)で $jM_c = jM_b$ とおいて逆算することで求めた。

コーン状破壊に対する補強筋の拘束効果に関する既往の知見としては、露出柱脚アンカーボルト引抜力によるコーン状破壊防止検討⁹⁾が知られており、コンクリートの有効投影面に基づくコーン状破壊抵抗と併せてコーン状破壊部に配置された横補強筋が抵抗することが示されている。本研究ではこれを参考に、支圧合力 C によるコーン状破壊に対して、有効投影面積 A_c と割裂防止筋および補強帯筋の寄与を仮定した。 A_c は実験結果より、平面方向は杭中心より 45° 方向、鉛直方向は中立軸 X_n より 45° 方向の直線より求められる矩形面積とした。コーン状破壊の耐力式を式(6)~式(8)に示す。

$$Q_{CR} = Q_p + \phi_1 \cdot Q_r \quad (6)$$

$$Q_p = \phi_2 \cdot 0.31 \sqrt{\sigma_b} \cdot A_c \quad (7)$$

$$Q_r = a_s \cdot f_t \quad (8)$$

ここで、 Q_{CR} : 支圧合力 C によるコーン状破壊に対する抵抗力(kN)、 Q_p : 基礎コンクリートのコーン状破壊耐力(kN)、 Q_r : コーン状破壊部に配置する全補強筋の総引張降伏耐力(kN)、 ϕ_1 : コーン状破壊部に配置する補強筋の拘束効果を表す実験係数、 ϕ_2 : コーン状破壊部耐力の低減係数(=2/3)、 A_c : コーン状破壊面の有効投影面積(mm²)、 a_s : コーン状破壊部に配置する補強筋の総断面積(mm²)

表-6 にコーン状破壊に関する耐力評価値の一覧を示す。式(7)によるコーン状破壊耐力 Q_p は式(4)で求めた支圧合力 C よりも小さい値となったが、本実験の試験体形状ではコーン状破壊が発生していない。これより、 Q_p を上回る荷重についてはコーン状破壊部に配置した補強筋が負担したと考える。式(6)で $Q_{CR}=C$ とおき、式(7)と式(8)を代入して補強筋の引張降伏耐力に対する寄与率 ϕ_1 を求めると、 ϕ_1 は 0.36~0.47 となった。

一方、学会指針⁹⁾においては、コーン状破壊によるアンカーボルト引抜耐力に対して寄与する、コーン状破壊部に配置された鉄筋の耐力は引張降伏耐力の 70%である

ことが示されている。表-6 に $\phi_1=0.7$ とした Q_{CR} の計算値 Q_{CR}' を併記する。本研究で算定した支圧合力 C は Q_{CR}' に対して 20%程度小さい値であった。以上より、補強筋の寄与率には余裕があったと推測できるが、降伏時はもとより終局時においてもコーン状破壊による耐力低下が生じていない実験結果から、本工法における補強筋の寄与率の妥当性については検証が難しい。これについては、今後の研究課題としたい。

7. まとめ

定着筋の拡径配置が可能な杭頭接続金物を用い、杭頭埋め込み量を試験要素とした実大実験を行った。本実験の範囲において、杭頭接合部の降伏耐力および最大耐力は埋め込み高さが高いほど大きくなる結果が得られ、降伏曲げ耐力については杭頭端面の仮想円柱法による耐力に杭頭部周辺のコンクリート耐力を累加することで、実験で得られた降伏モーメントを評価できることが確認された。

参考文献

- 1) 杉村義広, 平出 務編: 杭頭接合部の力学的挙動に関する研究, 建築研究報告, No.129, pp.66-73, 1990.9
- 2) 諏訪裕哉, 渡辺 亨, 平山貴章: 定着筋の配置径を拡大した SC 杭杭頭接合部の実大曲げ実験 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.479-480, 2016.8
- 3) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案) 第 1 版, 日本建築学会, pp.175-202, 2017.3
- 4) 渡辺 亨, 平山貴章, 諏訪裕哉, 森田耕次: 杭頭アンカーを拡径配置した外殻鋼管付きコンクリート杭の杭頭接合部の力学挙動, 鋼構造論文集, Vol.24, No.93, pp.1-16, 2017.3
- 5) 独立行政法人建築研究所 - 社団法人日本鉄鋼連盟共同研究: 鋼構造建築物の構造的な性能評価試験法に関する研究, 委員会報告書, pp.83-85, 2002.4
- 6) 日本建築学会編: 鋼構造接合部設計指針 第 3 版, 日本建築学会, pp.299-300, 2013.7