

論文 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

深津 尚人^{*1}・山本 俊彦^{*2}・山田 和夫^{*3}・岡田 亨^{*4}

要旨：本研究は、杭頭接合部の断面積を低減した半剛接工法を対象とし、接合部の有する回転性能を評価するため静的加力実験を行った。接合部に配筋した芯鉄筋の歪分布を基に回転性能を簡略的に評価する方法を提案し、実験値と計算値の比較を行った。その結果、本実験で行った範囲において計算値と実験値はよく一致することが確認できた。また、曲げ耐力の算定において、接合部の局所的な破壊を防止する目的で使用した鋼管の軸方向の応力を考慮する必要が有るが、その負担割合について補正を行う必要があることなどを明らかにした。

キーワード：場所打ち杭, 半剛接合, 回転性能

1. はじめに

筆者らはこれまでに、場所打ち杭の杭頭接合部の断面積を減少させ、剛性を低減することによって、杭体及び基礎梁に作用するモーメントを低減し、損傷を抑制する杭頭半剛接合方法を提案してきた。静的実験を行い、部材角が1/100程度まで半剛接合部が安定した履歴性能を有すること、曲げ耐力を推定するためにはコンクリートの拘束効果を考慮する必要があることなどを確認している^{1), 2)}。

しかし、断面積の低減領域コンクリートを横拘束し、局所的な破壊を防止する目的で使用した鋼管が、軸方向に想定以上に圧縮力を負担する結果となった。

この結果を考慮し、本実験では、鋼管の厚さ及び埋込長さについて実大スケールを基にサイズを変更するとともに拘束効果などを定量的に評価するために杭径を400mmから600mmに変更した。

また、杭基礎接合部の設計を行うため、接合部の回転性能の簡略的な評価方法を提案するとともに、実験値と計算値の比較を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概要を表-1に、杭径φ600の試験体(以下φ600とする)の形状及び配筋状況を図-1に示す。図中の寸法の括弧内の数値は杭径φ400

表 1 試験体概要

	杭本体	杭体せん断補強筋	鋼管	芯鉄筋	スタブ
600N	杭径 D_p : φ 600	D6@60	外径 D_t : 450	配筋: 12-D16	形状 $L_s \times B_s \times H_s$: 1250 × 650 × 655
600I	杭長 L_p : 1440	(杭頭部 200mm は	厚さ T_t : 4.5	位置 D_r : φ 364	主筋: 6-D25
600V	主筋: 12-D19	D6@45)	長さ L_t : 90	長さ L_r : 1050	せん断補強筋: D13@125
			埋込長さ: 30		杭本体とのリアランス C : 30
400N	杭径 D_p : φ 400	D10@90	外径 D_t : 267.4	配筋: 8-D13	形状 $L_s \times B_s \times H_s$: 1000 × 450 × 650
	杭長 L_p : 1200	(杭頭部 300mm は	厚さ T_t : 3.2	位置 D_r : φ 208	主筋: 4-D25
	主筋: 12-D16	D10@70)	長さ L_t : 60	長さ L_r : 840	せん断補強筋: D13@125
			埋込長さ: 20		杭本体とのクリアランス C : 20

*1 矢作建設工業 (株) 建築技術部 工修 (正会員)

*2 大同工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 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)

*4 ヨーコン (株) 技術本部 (正会員)

の試験体(以下φ400とする)を示している。

杭体のシアパン比は全ての試験体で同一とするべきであったが、加力装置の関係からφ600では1.2、φ400では1.5とし、両端スタブ付きの形状とした。両端の接合部は杭体断面積の1/2程度となるように断面積を減少させ半剛接結合とした。断面積減少部の局所的な破壊を防止するため鋼管で補強し、杭体及びスタブにそれぞれ埋め込み部分を設けた。また、せん断力などを伝達させるために芯鉄筋を配筋した。

600Nを標準試験体とし、600Iは鋼管に軸方向の応力を伝達させないことを目的とし、鋼管の外側面及び内側面にグリースを塗布し、鋼管の端面に緩衝材(ネオプレンフォーム 幅:10mm, 厚さ:14mm)を貼付した。600Vは600Nと同一形状の試験体とし、軸力を実験変数とした。400Nは参考文献^{1), 2)}で行った試験体と比較を行うとともに鋼管による拘束効果のスケールファクターによる影響を検討するための試験体とした。

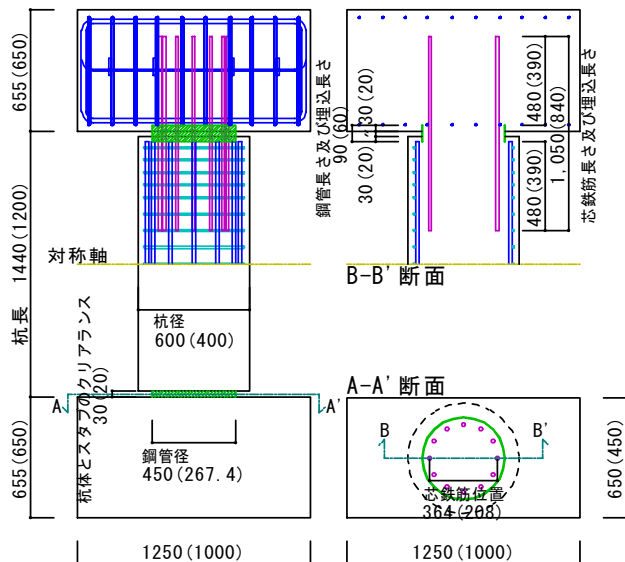


図-1 φ600 試験体形状及び配筋状況
(カッコ内の数値はφ400試験体を示す。)

2.2 実験方法

荷重状況を図-2に示す。荷重は図に示すような逆対称加力装置を用いて行った。荷重は杭体の部材角 R を制御し、鉛直アクチュエーターを2基用いて軸力 N を与え、水平アクチュエー

ターを用いて静的水平加力を行った。水平アクチュエーターは試験体の中央部に水平力が作用する位置に設置した。

加力サイクルは、 $R=1/1000$, $1/400$ で各1回、 $R=1/200$, $1/100$, $1/50$, $1/25$ で各2回、 $R=1/20$ で1回、正負繰り返し荷重を行った。

杭に作用する軸力は2種類の軸力タイプを設定した。600N, 600I, 400Nは杭頭接合部の断面減少部分において、コンクリートの長期許容圧縮応力相当の7.5MPaを作用させた。600Vは外周部など軸力が変動する杭を想定し、正加力時に12.6MPaを作用させ、負加力時に0MPaとした。

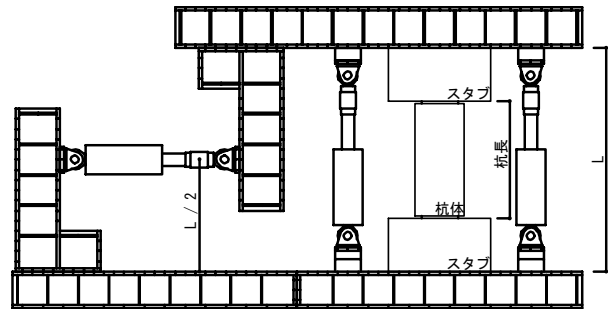


図-2 荷重状況

2.3 製作方法及び使用材料

試験体のコンクリート打設は杭体及び鋼管内部の充填を行い、その後、スタブの打設と2段階に分けて行った。

使用した鋼材及びコンクリートの材料特性を表-2、表-3に示す。コンクリートのテストピースはすべて現場封緘養生とした。

表-2 材料特性(鋼材)

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	使用箇所
D6	427	488	180	Hoop(φ400)
D10	369	490	189	Hoop(φ600)
D13	360	515	186	スタブせん断補強筋
D13	378	557	182	芯鉄筋(φ400)
D16	403	564	184	芯鉄筋(φ600)
D16	439	582	181	杭主筋(φ400)
D19	439	590	184	杭主筋(φ600)
D25	369	536	183	スタブ主筋
t3.2	282	347	192	鋼管(φ400)
t4.5	327	398	201	鋼管(φ600)

表－3 材料特性(コンクリート 加力時)

使用箇所	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
杭体, 鋼管充填	29.8	2.10	30.1
スタブ	28.7	2.28	27.1

3.実験結果及び考察

3.1 実験結果

実験によって得られた最大せん断力を表－4に示す。600Vは正負で軸応力が異なるため、各々の最大値を示した。全ての試験体において最終サイクルまで軸力を支持することが出来た。

表－4 最大せん断力

	軸応力 (MPa)	最大せん断力 (kN)
600N	7.5	512
600I	7.5	485
600V	12.6	577
	0	250
400N	7.5	145

3.2 破壊状況

図－3に $R=1/100$ 終了時及び加力終了時における杭体に発生したひび割れの分布状況を示す。

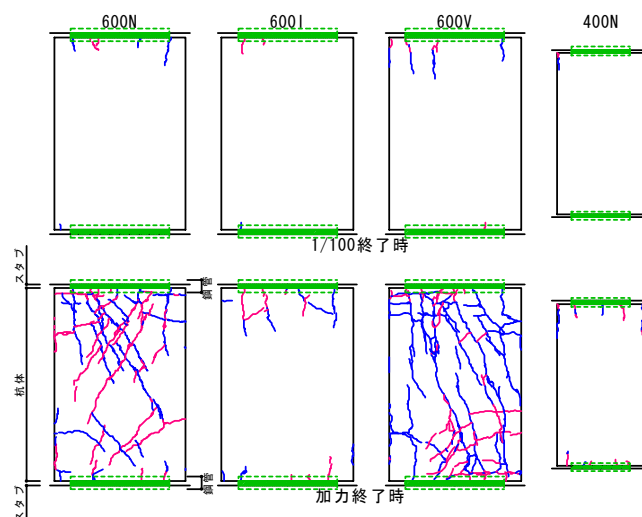
$R=1/100$ 終了時では全ての試験体において杭体の端部に軸方向のひび割れが発生している。これは鋼管部が杭体にめり込むことによって、杭端部に割れ裂きによるひび割れが発生したと考えられる。また、杭中央部にはひび割れがほとんど発生していない。

600Nでは $R=1/50$ ($Q=445kN$)にせん断ひび割れが発生した(写真－1)。しかし、鋼管に軸方向応力の絶縁処理を行った600Iでは600Nでせん断ひび割れが発生した時点のせん断力以上のせん断力が作用したが、せん断ひび割れは最終サイクルまで発生しなかった(写真－1)。これは、鋼管の設置状況の違いから、600Nでは、鋼管が杭体にめり込むことによって局所的な損傷が発生し、この損傷がせん断ひび割れ発生 の要因となった可能性がある。

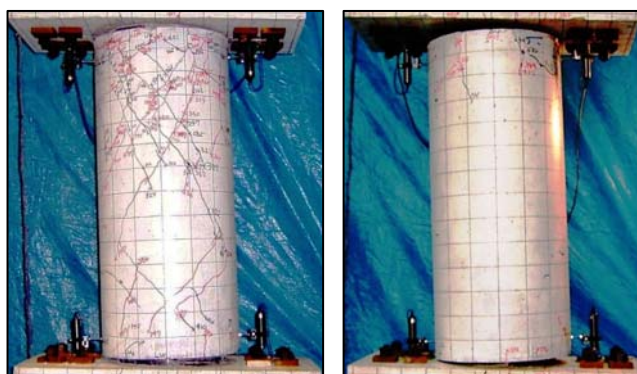
600Vは杭中央部にせん断ひび割れが発生している。しかし、せん断ひび割れは12.6MPaの軸

応力を導入している正加力時に発生し、ひび割れ幅は600Nのせん断ひび割れ幅と比較すると大きい。また、0MPaの軸応力とした負加力時にはせん断ひび割れは発生せず、曲げひび割れが発生している。

400Nは軸方向のひび割れは進展するが、最終サイクルまで杭中央部にはひび割れは発生していない。これはシアスパン比の違いが影響したと考えられる。鋼管の埋込長さが5倍となっている参考文献¹⁾のNo.4試験体では、鋼管の埋込み端面に沿った円周方向のひび割れが発生したが、400Nは最終サイクルまでこのようなひび割れは発生しなかった。この結果から、鋼管の埋込長さが杭頭接合部の破壊状況に影響を与えることが分かった。



図－3 ひび割れ状況 (杭体展開図)



600N

600I

写真－1 破壊状況 (加力終了時)

3.3 回転性能

3.3.1 計算方法及び定義

杭頭接合部の有する回転性能(モーメントー回転角関係)を接合部の断面減少領域における断面を用い計算を行う。モーメントは断面の軸方向に発生する力(以下軸方向力とする。)から計算し、回転角は芯鉄筋に発生する歪から計算する。回転性能の簡略的な計算方法のフローを図-4に示す。圧縮側端部の歪、中立軸位置を仮定し、平面保持の条件を用い断面の歪分布状態を計算する。ここで、コンクリート、芯鉄筋、鋼管の材料特性を代入し各々が負担する軸方向力を計算する。コンクリートの材料特性は鋼管による拘束効果を考慮し、日本建築学会のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針³⁾に従い補正を行った。鋼管は軸方向の応力を負担しない場合(以下 Case 1 とする)と圧縮側のみ軸方向の応力を負担する場合(以下 Case 2 とする)の2種類を用いる。次に各々が負担する軸方向力の合計と軸力が平衡状態となるまで中立軸位置を変更し、平衡状態となったとき、曲げモーメントの計算を行う。

回転角の計算は、断面減少部分の変形以外にも、鋼管部のめり込み及び芯鉄筋の抜け出しなどを考慮しなければならない。そこで、芯鉄筋の歪から回転角を算定する方法を提案する。図-5に芯鉄筋の歪分布の例として600N及び400Nの $R=1/400$, $1/200$, $1/100$ の圧縮側及び引張側の最外端に位置する芯鉄筋の歪分布状況を示す。縦軸は芯鉄筋の長さ方向の位置を示し、縦軸の $-525 \sim 525$, $-420 \sim 420$ は芯鉄筋の長さ L_r を示す。横軸は芯鉄筋に発生する歪を示す。図中の実線は実験値を示す。実験値は中央部の歪が $1000 \mu \sim 2000 \mu$ の範囲内において中央部で最大歪を発生し、一定の割合で低下し、端部で歪が0に収束する傾向を示している。この傾向を踏まえ、図中に中央部に実験値を端部で歪が0となるような歪分布状況(以下 t 分布とする)を仮定し、破線で示す。ここで、芯鉄筋の変形量を、歪を積分することによって求める。各サイクル

のピーク時で中央部の歪が $1000 \mu \sim 2000 \mu$ の範囲内における実験変形量 δ_1 (図-5実線領域)と中央部の歪を実験値と同一とし歪分布をt分布と仮定した変形量 δ_2 (図-5破線領域)の比(δ_1 / δ_2)を表-5に示す。600φでは圧縮側で0.96程度、引張側で1.1程度、400φでは圧縮側で0.85、引張側で0.8となっている。芯鉄筋に細径のD13を用いた400Nは、歪が中央部に集中する傾向にあり、付着性能が良いことを示している。

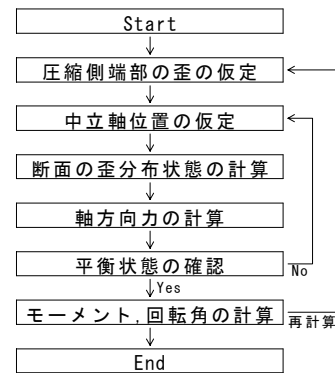


図-4 計算フロー

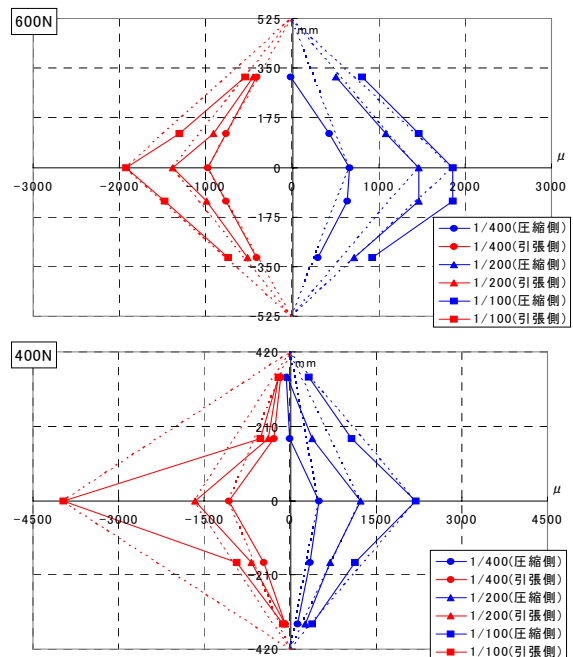


図-5 芯鉄筋歪分布状況

表-5 芯鉄筋変形量比

使用箇所	圧縮 α	引張 β
600N	0.91	1.11
600I	0.96	1.05
600V	1.02	1.13
Ave.(600φ)	0.96	1.10
400N	0.85	0.80

ここで、平衡状態となった時点の歪状態が t 分布となると仮定し、芯鉄筋の変形量を、歪を積分することによって計算する。このとき、表-5を参考に各試験体の変形量の補正を行う。次に変形量から接合部の変形角 θ を計算する(図-6)。

ここまでの計算で、ある圧縮側端部の歪を有するときのモーメント及び回転角が計算できる。ここで、圧縮側端部の歪を漸増させ、再度モーメント及び回転角を計算する。この過程を繰り返すことによって杭頭接合部が有する回転性能の評価を行うとともに、芯鉄筋が降伏した時点のモーメント及び回転角の計算、モーメントの最大値の計算を行う。

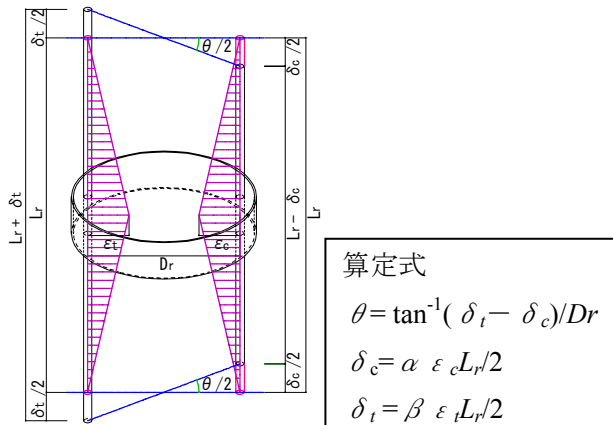


図-6 回転角(計算値)の定義

3.3.2 計算結果

接合部に発生するモーメントおよび接合部の

回転剛性の計算結果を表-6、表-7に示す。表-6は芯鉄筋が降伏した時点のモーメント及び回転剛性の実験値及び計算結果を、表-7は最大モーメントの実験値及び計算結果を示す。鋼管の絶縁処理を行った600Iでは鋼管の軸方向の応力の負担が期待できないためCase1を用い、その他の試験体ではCase2を用いた。図-7は各試験体のモーメントと回転角の関係及び芯鉄筋降伏時の実験値、計算値を示す。

芯鉄筋降伏時、モーメントの実験値 / 計算値は0.93~1.12となっている。回転剛性の実験値 / 計算値は0.72~1.33とモーメントと比較し、実験結果との差が大きい。前項で示した回転角の計算方法によって評価を行えることを示した。Case2では芯鉄筋が降伏した時点で鋼管についても降伏している。しかし、実験では芯鉄筋が降伏した時点で鋼管に発生している歪は700~1000程度となっている。この結果から、Case2では鋼管の軸方向応力の負担を過大評価しており、実際にはコンクリートが計算より軸方向力を多く負担していると考えられる。鋼管の絶縁処理を行った600Iでは芯鉄筋降伏時の鋼管に発生した歪は50μ程度であった。実験値が計算値を上回った要因としてコンクリートが計算値以上の軸方向力を負担していることが考えられる。

最大耐力時に、モーメントの実験値 / 計算値

表-6 計算結果(芯鉄筋降伏時)

試験体	実験値			計算値		実験値/計算値		鋼管の軸方向力の負担
	軸応力 MPa	モーメント kN・m	回転剛性 ×10 ³ kN・m/rad	モーメント kN・m	回転剛性 ×10 ³ kN・m/rad	モーメント	回転剛性	
600N	7.5	308.1	40.2	294.1	55.5	1.05	0.72	Case2
600I	7.5	272.3	52.7	242.4	39.5	1.12	1.33	Case1
600V	12.6	354.2	64.5	382.8	59.3	0.93	1.09	Case2
400N	7.5	74.5	10.7	66.4	10.0	1.12	1.07	Case2

表-7 計算結果(最大モーメント)

試験体	実験値			計算値		実験値/計算値		鋼管の軸方向力の負担
	軸応力 MPa	モーメント kN・m	モーメント kN・m	モーメント kN・m	モーメント	モーメント		
600N	7.5	386.0	374.5	386.5	374.5	1.03	Case2	
600I	7.5	386.5	297.4	386.5	297.4	1.30	Case1	
600V	12.6	474.2	450.7	474.2	450.7	1.05	Case2	
	0	180.4	202.0	180.4	202.0	0.89		
400N	7.5	97.5	81.4	97.5	81.4	1.20	Case2	

は0.89~1.20となっている。芯鉄筋降伏時と同様に Case2 では鋼管の軸方向力を過大評価する結果となった。

600N と 600I を比較すると最大モーメントに大きな差が無いことがわかった。この結果から、600N で鋼管の軸方向力の負担している力を 600I ではコンクリートが負担していると推測される。

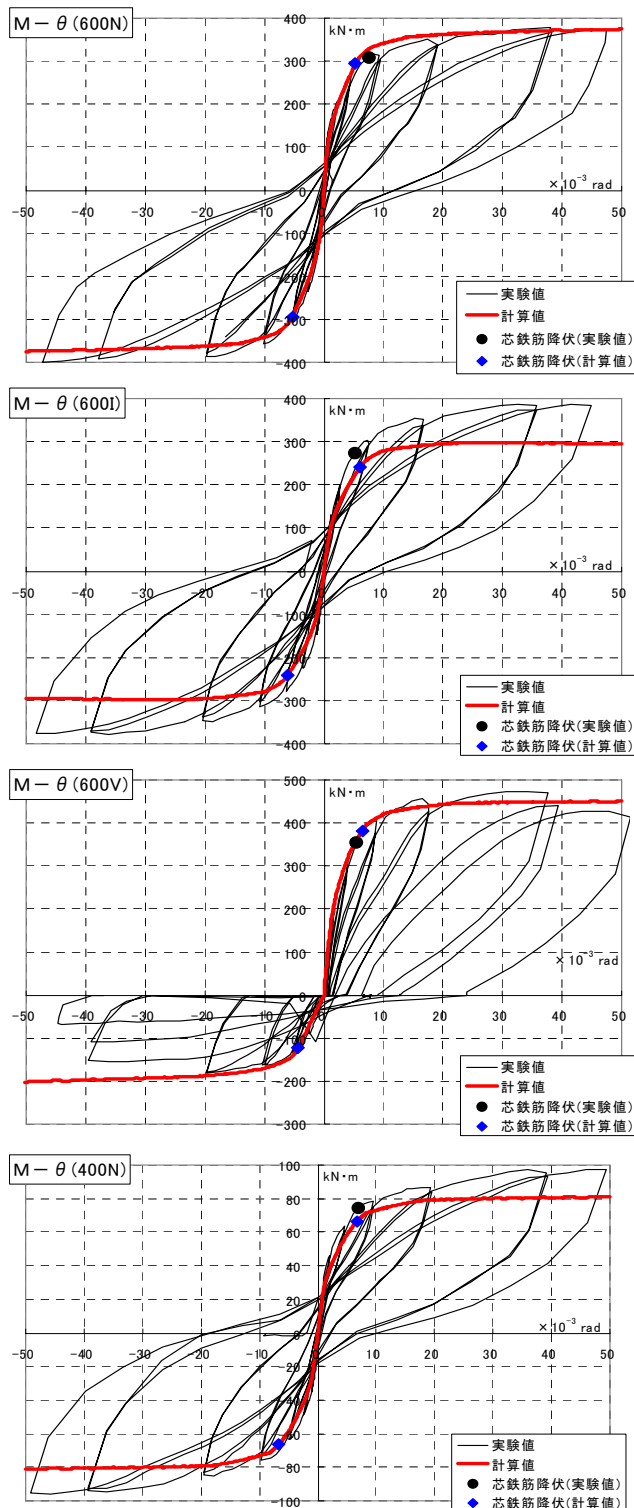


図-7 M-θ関係

よって、鋼管が軸方向力を負担するその他の試験体ではコンクリートに関して、負担能力に余裕があったと考えられる。

600N と 400N の曲げ耐力の計算結果を比較すると、400N は実験値が計算値を大きく上回る結果となった。これは、シアスパン比の違いにより、せん断による影響が小さかったことが理由として考えられる。

以上の結果から、本実験で行った範囲において前項に示した計算方法による計算値と実験値が一致することが確認できた。また、鋼管の軸方向力の負担について考慮する必要があるが、その負担の割合について補正を行う必要があることが分かった。

4. まとめ

本研究では、杭頭接合部を半剛接合とした実験を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 芯鉄筋に発生する歪発生状況から簡略的に接合部の回転性能を算定する方法を提案し、その実験値との整合性を確認した。
- 2) 曲げ耐力の算定において、鋼管の軸方向力の負担を考慮する必要があるが、その負担割合について補正を行う必要がある。

謝辞

本実験の遂行とデータ整理に際してご助力を得た大同工業大学山本研究室、愛知工業大学山田研究室の皆様に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.919-924, 2004
- 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集, Vol.27, No.2, pp.1633-1638, 2005
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997