

論文 内部が平滑な鋼管を用いたコンクリート充填鋼管杭の曲げ変形特性

山口 雄司^{*1}・岸本 一蔵^{*2}・大野 義照^{*3}・中川隆夫^{*4}

要旨：内部が平滑な鋼管を用いるコンクリート充填鋼管杭では，鋼管断面が鋼管杭としての耐力を発揮するためには同断面より余長として杭径の2倍の長さの鋼管が存在することが必要とされている¹⁾。この規定が妥当であるかどうかについて検討した。また杭コンクリート打設時の不純物混入によるコンクリート表面の軟化が終局耐力に及ぼす影響について検討した。その結果，鋼管余長が杭径の2倍があれば所定の耐力が期待できるということ，コンクリート表面の状態は終局曲げ耐力に大きな影響を与えないということを明らかにした。

キーワード：コンクリート充填鋼管，内部が平滑な鋼管，終局曲げ耐力，変形性能

1. はじめに

掘削にかかるコスト，および掘削土の処理の問題等，様々な要因から，杭径を小さく設計する要求は非常に強い。コンクリート杭の場合，コンクリートの外側に鋼管を配置するコンクリート充填鋼管とすると，曲げ耐力およびせん断耐力が飛躍的に向上し，杭径を小さくすることが可能となりその利用価値は極めて高い。このような状況の下に，2001年に，内部が平滑な鋼管を用いるコンクリート充填鋼管杭（SB 耐震杭）の開発を目的としてSB耐震杭委員会（（財）日本建築総合試験所内 委員長：八尾眞太郎・関西大学）が発足し研究が進められ，現在実用化に至っている。

同杭の曲げおよびせん断設計式（文献1）は，内面が平滑な鋼管を用いるため，鋼管とコンクリート間の付着が存在しないことを前提として誘導されており，かつ鋼管コンクリートとしての耐力を発揮できる断面は，鋼管末端より杭径の2倍以上内側（図-1参照），即ち余長として $2D$ （ D :鋼管径）が必要とされている。しかしながら，この2倍という数値は検証されたものではない。また，同文献の終

局曲げ耐力式は，現場コンクリート打設時に予測されるコンクリートの土砂スラグ，ベントナイト液の巻き込みによる不純物混入等の影響等については考慮されていない。

そこで本論文は，内部が平滑な鋼管を用いる

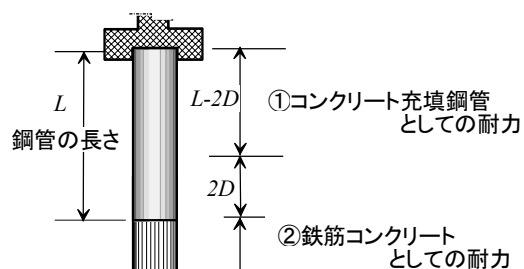


図-1 SB耐震杭

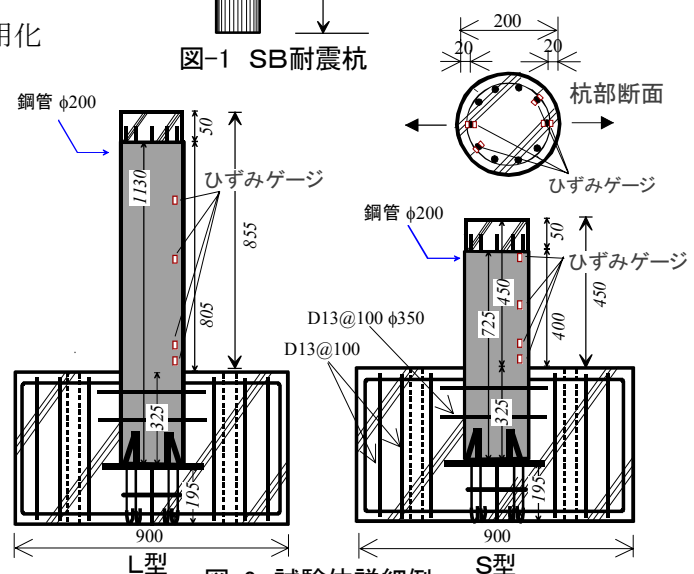


図-2 試験体詳細例

- | | | |
|--------------|-------------|-------------|
| *1 大阪大学大学院 | 工学研究科建築工学専攻 | (正会員) |
| *2 大阪大学大学院講師 | 工学研究科建築工学専攻 | 博士（工学）（正会員） |
| *3 大阪大学大学院教授 | 工学研究科建築工学専攻 | 工博（正会員） |
| *4 大阪大学大学院助手 | 工学研究科建築工学専攻 | （正会員） |

コンクリート充填鋼管杭（以下 SB 杭と略記）について、SB 杭が鋼管コンクリートとしての耐力を発揮するのに必要な鋼管の余長が 2D でよいかどうか、また打設時の不純物混入によりコンクリート表面が軟化する場合について文献 1 での終局曲げ耐力式が適用可能かどうかを検討するため、SB 杭の曲げせん断実験を行った。

1.1 終局曲げ耐力式

内部コンクリートと鋼管間の付着を期待しないことから、従来の一般加算式を用いることはできない。内部コンクリート部（RC 柱）と鋼管部を、それぞれ独立した部材として終局曲げ耐力を求め、それらを単純に加算する。

$$M_p = M_{rc} + M_{st} \quad \dots\dots (1)$$

M_p : SB 耐震杭の終局耐力 (kN.m)
 M_{rc} : RC 部の終局耐力 (kN.m)
 M_{st} : 鋼管部の終局耐力 (kN.m)

a) 鉄筋コンクリート (RC) 部

$$\bullet N_{\max} \geq N > 0.4b \cdot D \cdot F_c$$

$$M_{rc} = \{0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c\} \times \left(\frac{N_{\max} - N}{N_{\max} - 0.4b \cdot D \cdot F_c} \right) \quad \dots\dots (2)$$

$$\bullet 0.4b \cdot D \cdot F_c \geq N \geq 0$$

$$M_{rc} = \text{Max} (M_{rc1}, M_{rc2}) \quad \dots\dots (3)$$

$$M_{rc1} = 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right)$$

$$M_{rc2} = 0.5a_g \cdot \sigma_y \cdot D$$

$$\bullet 0 \leq N < N_{\min}$$

$$M_{rc} = 0.5a_g \cdot \sigma_y \cdot g1 \cdot D + 0.5N \cdot g1 \cdot D \quad \dots\dots (4)$$

a_t : 引張主筋断面積 (mm²)
 a_g : 全主筋断面積 (mm²)

σ_y : 鉄筋降伏強度 (N/mm²)

D : 柱せい (mm)

b : 柱幅 (=D) (mm)

F_c : コンクリート終局圧縮強度 (N/mm²)

$g1$: 引張鉄筋－圧縮鉄筋間距離の D に対する比

N : 柱軸方向力 (N)

$N_{\max}$: 中心圧縮時終局強度

$$(b \cdot D \cdot F_c + a_g \cdot \sigma_y) \text{ (N)}$$

$N_{\min}$: 中心引張時終局強度

$$(-0.5a_g \cdot \sigma_y) \text{ (N)}$$

b) 鋼管部

$$M_{st} = (d_p - t_p)^2 \cdot t_p \cdot \sigma_{py} \quad \dots\dots (5)$$

d_p : 鋼管の外径 (mm)

t_p : 鋼管の肉厚 (mm)

σ_{py} : 鋼管の降伏強度 (N/mm²)

2. 実験概要

試験体一覧 (No.1～8) を表-1 に示す。試験体は全て同じ大きさの直径(20cm)を持つ円形断面を有し、杭部長さが 855mm の L 型、450mm の S 型、L 型と同じ形状で鋼管のない RC 型とに大別される。(図-2 に L 型、S 型を例として示す。) L 型は文献 1 の耐力算定式誘導時に用いられた標準型の試験体タイプである。L 型試験体のうち、試験体 No.5 は、コンクリート打設時において、コンクリートの土砂スラグ、ベントナイト液等の巻き込みによるコンクリート表面の軟化した状態を想定し、鋼管内面に厚さ約 2mm のビニルシートを全面に密着させ、その後コンクリートを打設した (付録 1)。S 型は鋼管長が 2D (400mm) でかつ、杭部長さが 450mm と短いため、L 型試験体に比べて試験体に作用するせん断力が大きく、即ちモーメント勾配が大きい状態で載荷される。従って、鋼管とコン

クリート間の力の伝達が極めて厳しい条件を想定したものである。RC 型は鋼管のない鉄筋コンクリート試験体である。使用した鋼管は厚さ 2.3

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	試験体種類	軸力比	杭部長さ [mm]	鋼管部長さ [mm]	載荷方法
1	01L	L型	0.1	855	805	繰り返し
2	01S	S型		450	400	
3	01RC	RC型			—	
4	03L	L型	0.3	855	805	
5	03L-Vi	L型 *				
6	03RC	RC型			—	
7	03S	S型		450	400	一方向
8	03S-S	S型				

* 鋼管内側にビニルシートを巻いた

表-2 鋼材の力学的特性

	降伏強度 ρ_{sy} [N/mm ²]	引張強度 ρ_{su} [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [N/mm ²]
主筋 (D6)	410.4	514.4	1.97×10^5
帯筋 (D6)	390	490	1.80×10^5
鋼管	366.3	447.1	2.23×10^5

mmの平板鋼板を加工したもので、鋼管の内径は約 196 mmである。また主筋は異形棒鋼 D6(SD295)を 10 本、鋼管から約 20mm 内側に等間隔で円周状に配筋した。載荷軸力比（軸力比 $=N/\rho_B \cdot A_p$ 、 N ：載荷軸力、 ρ_B ：4 週圧縮強度、 A_p ：杭全断面積）は 0.3, 0.1 とした。

使用した鋼管は厚さ 2.3 mmの鋼板を管に加工したもので、鋼管の内径は 195.6 mmである。また主筋は異形棒鋼 SD295 D6 を 10 本、鋼管から内側に 20mm の間隔で円周状に配筋した。

2.1 試験体種類

2.1.1 使用材料の力学的性質

コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したレディミクストコンクリート（呼び強度 24N/mm²、スランプ 18cm、粗骨材 16mm、細骨材率 5mm 以下）である。コンクリートの 4 週圧縮強度は 31.0 N/mm²である。また、鋼管素材の降伏強度は 366.3 N/mm²、主筋に用いた異形鋼棒（D6）の鉄筋降伏強度は 410.4 N/mm²である（表-2）。

2.1.2 載荷方法および測定項目

載荷装置図を図-3 に示す。載荷方法は正負交番の繰り返し載荷（No.8 試験体のみ一方向漸増載荷）とし、載荷パターンは、試験体頂部での変形が部材角で、1/200, 1/100, 1/65, 1/40, 1/30, 1/20, 1/15, 1/10 とした。繰り返し回数は各部材角毎 3 回である。加力は、水平

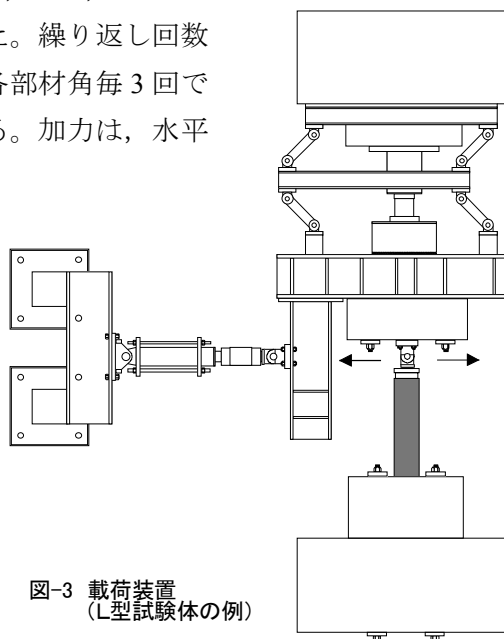


図-3 載荷装置
(L型試験体の例)

方向、垂直方向共に杭端部のコンクリート部に対して行っており、鋼管部は直接加力を受けず、内部コンクリートを介して力を受けることになる。測定箇所は、水平方向変位を試験体頂部で、試験体頂部、スタブ面より 10cm, 20cm および 40cm の位置で、鋼管および鉄筋のひずみは、S 型では、スタブ面より 2.5cm, 7.5cm, 20.0cm の位置、L 型では、スタブ面より 2.5cm, 7.5cm, 40.5cm, 60.5cm の位置において測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 軸力導入時に鋼管に伝達される軸力

鋼管とコンクリート間の付着がないことを基本に誘導されており、従って、鋼管に作用する軸力は 0 が前提である。このことを検証した一例を図-4 に示す。同図は試験体 No.4, 5, 7（軸力比 0.3 の L 型, L-Vi 型, S 型試験体）について軸力導入直後から、変形角 1/200 経過後に水平変位が 0 になった時点の鋼管の軸力大きさを、スタブに最も近い位置のひずみゲージ（スタブより 2.5cm）により測定した値である。同図によれば、L-Vi 型, S 型試験体では導入時においても殆ど軸力」に対し、L 型試験体では 60N/mm²の軸力が作用している。この値は鋼管とコンクリートの間の付着が完全で平面保持の仮定が成り立つとして計算した場合の値の約 5 割に相当するが、その値は水平載荷開始直後に急激に低下し、10N/mm²程度となった。そこで、10N/mm²程度の軸力が鋼管に作用するときの

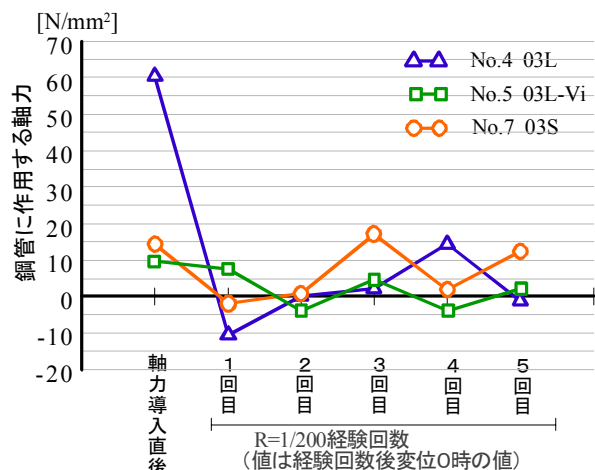


図-4 鋼管に作用する軸方向力の変化

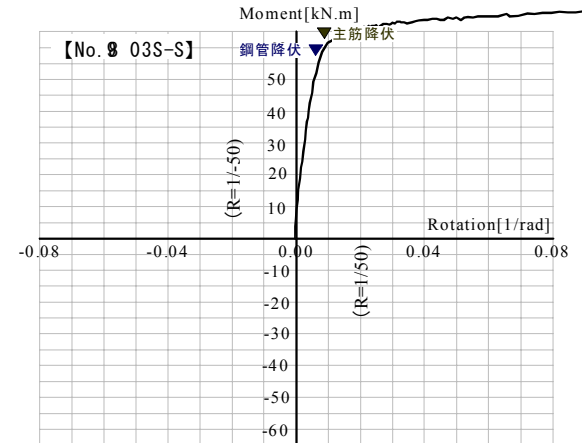
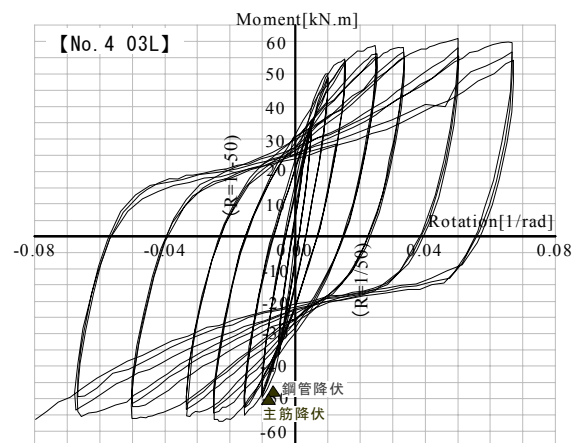
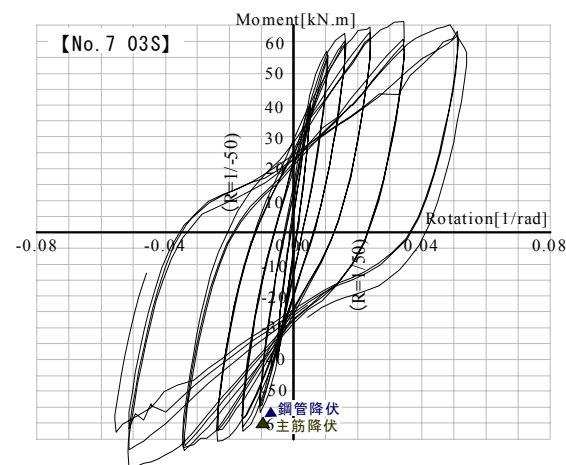
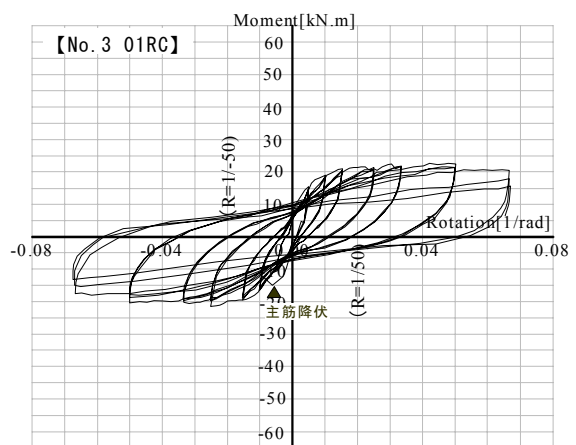
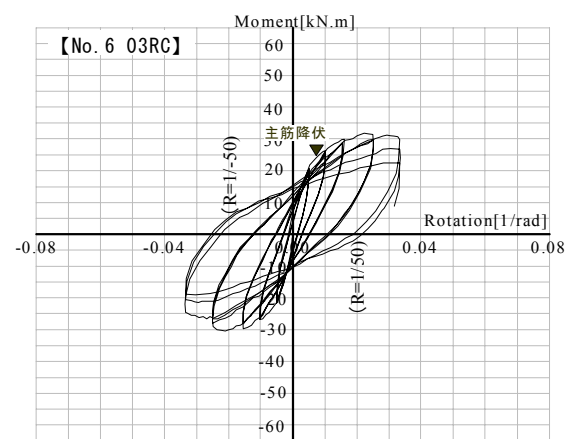
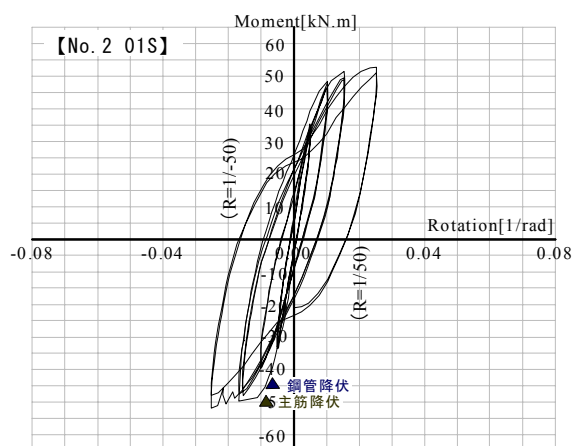
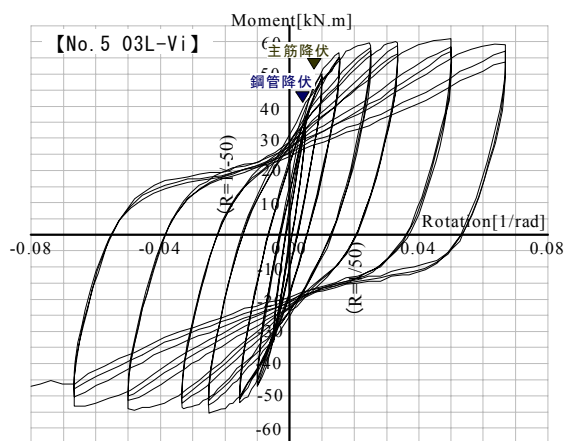
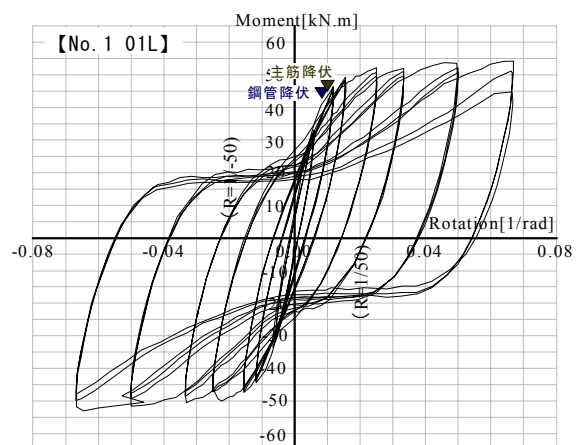


図-5 モーメント-部材角関係

終局曲げ耐力への影響を概略的に検討するために、鋼管部の全塑性モーメントを、作用軸力を考慮することができる式により求め（文献 2）、また、RC 部の終局曲げ耐力を鋼管に作用する軸力大きさを減少させて計算して求めた。その結果、終局曲げ耐力低下の程度はおよそ程度 1%（No.4 試験体）と非常に小さい値であった。この傾向は他の試験体でも同様であった。以上より、本杭において鋼管に作用する軸力は 0 であるという前提条件を満足していると言える。

3.2 曲げ耐力と変形能

図-5 に各試験体のモーメントー変形角関係を示す。同図より、No.2 (01S)を除く全ての試験体の変形角 1/20 での繰り返し載荷時に安定した履歴性状を示していることがわかる。特に、シアスパン比が小さく、大きなせん断力を受ける S 型試験体 No.7 (03S)においても安定した履歴を示している。なお、No.2 (01S)試験体では試験体頭部のピン治具取り付け部のコンクリートに載荷中圧壊が生じ、繰り返し載荷途中に同部分の損傷が極度に進行したため載荷を終了している。他の試験体については載荷最終時まで上

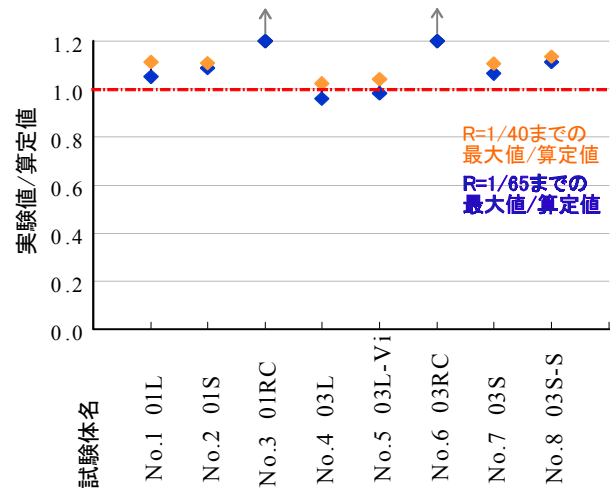


図-6 実験値と算定値の比較

記のような現象はみられなかった。

表-3 に実験値と文献 1 の算定式(1)の計算値を示す。また図-6 に表-3 で示す実験値と算定式の値の比較を算定式を 1 として示している。なお、実験値の最大荷重は大変形域で発生するものもあるが、実用上の有効性を考慮し、 $R=1/65$ と $R=1/40$ 時点の 2 点において、それぞれの変形角以下での最大値について検討した。断面解析値は、断面を加力方向に 100 分割したファイバーモデルにより平面保持の仮定を用いて計算した。主筋降伏強度およびコンクリートの圧縮

表-3(a) 実験値 ($R=1/65$ 以下の変形時の曲げ耐力)と各計算値との比較

No.	試験体名	実験値 [kN*m] ($R=1/65$ 以下)	提案式 [kN*m]	実験値/提案式	断面解析値 [kN*m]	
					$\rho_y=366.3[\text{N/mm}^2]$	$\rho_{su}=477.1[\text{N/mm}^2]$
1	01L	49.3	47.0	1.05	52.8 (1.07)	60.2 (1.22)
2	01S	51.1	47.0	1.09	52.8 (1.03)	60.2 (1.18)
3	01RC	20.9	14.1	1.48	16.4 (0.78)	16.4 (0.78)
4	03L	55.2	57.6	0.96	57.8 (1.05)	64.6 (1.17)
5	03L-Vi	56.7	57.6	0.98	57.8 (1.02)	64.6 (1.14)
6	03RC	30.0	24.7	1.22	24.9 (0.83)	24.9 (0.83)
7	03S	61.2	57.6	1.06	57.8 (0.94)	64.6 (1.06)
8	03S-S	64.0	57.6	1.11	57.8 (0.90)	64.6 (1.01)

表-3(b) 実験値 ($R=1/40$ 以下の変形時の曲げ耐力)と各計算値との比較

No.	試験体名	実験値 [kN*m] ($R=1/40$ 以下)	提案式 [kN*m]	実験値/提案式	断面解析値 [kN*m]	
					$\rho_y=366.3[\text{N/mm}^2]$	$\rho_{su}=477.1[\text{N/mm}^2]$
1	01L	52.2	47.0	1.11	52.8 (1.01)	60.2 (1.15)
2	01S	52.0	47.0	1.11	52.8 (1.02)	60.2 (1.16)
3	01RC	21.6	14.1	1.53	16.4 (0.76)	16.4 (0.76)
4	03L	58.8	57.6	1.02	57.8 (0.98)	64.6 (1.17)
5	03L-Vi	59.8	57.6	1.04	57.8 (0.96)	64.6 (1.08)
6	03RC	31.8	24.7	1.29	24.9 (0.78)	24.9 (0.78)
7	03S	63.6	57.6	1.10	57.8 (0.94)	64.6 (1.02)
8	03S-S	65.3	57.6	1.13	57.8 (0.90)	64.6 (0.98)

* ()内は断面解析値をそれぞれ実験値で除した値

強度は表-2 の値を使用し、鋼管の引張・圧縮強度については、降伏強度 ($\rho_y=366.3\text{kN/mm}^2$) の他に、杭耐力の上限値を検討する目的で引張強度 ($\rho_{su}=477.1\text{kN/mm}^2$) を用いた 2 つのケースについて計算した。なお、鉄筋の応力度-ひずみ度関係は完全断塑性、コンクリートは応力上昇域を二次関数、下降域を直線で定義し、鋼管によるコンファインド効果については考慮していない。

図-6 より、 $R=1/65$ 時点では No.4 (03L)と No.5 (03L-Vi)試験体が算定式の値を下回るものの、 $R=1/40$ では全ての試験体が算定式の値を上回っていることが確認できる。前述したが S 型はシアスパン比が約 3 で、通常杭が地震時に受ける外力条件と比べると極めて小さい値となっており、力の伝達に関して L 型よりもかなり厳しい条件であるため、実験値が算定式を満足すれば鋼管余長 2D の妥当性が検証できると考えられる。従って、コンクリート充填鋼管杭としての耐力を発揮するための鋼管余長は、杭径の 2 倍あればよく、また、No.5 (03L-Vi)試験体の結果よりコンクリート表面が軟化している場合であっても算定式で計算される曲げ耐力を満足することが確認できた。

3.3 内部コンクリートと鋼管のずれ量の検討

既往の鋼管内部にリブが付いた鋼管杭では鋼管とコンクリートが一体になって挙動すると考えているが、本実験における平板鋼管を用いた SB 杭では鋼管とコンクリートの間に付着がな

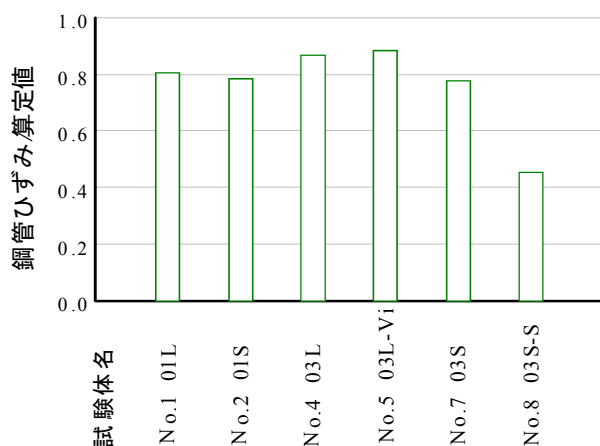


図-7 鋼管とコンクリートのずれ量

いために別々の挙動をして、鋼管とコンクリートの間にずれが生じることになる。このずれ量の程度について検討する。

スタブに最も近い位置のゲージ (スタブより 2.5cm) について、主筋に貼付したゲージによる計測値を基に、断面内のひずみの平面保持を仮定した場合に得られる鋼管のひずみ値、即ち鋼管-コンクリート間の付着が完全であると仮定した場合のひずみ値と、鋼管に貼付したひずみゲージより直接得られた値との比較を比率により示したものが図-7 である。同図より、前者に対する後者の割合は約 0.8 となっている。

4. まとめ

本実験より、以下のことが明らかになった。

- 1) 鋼管長が短く、鋼管とコンクリート間の力の伝達が極めて厳しい条件を想定した S 型試験体においても、実験値が算定式(1)で求まる終局曲げ耐力を満足する。したがって、鋼管余長が 2D あれば算定式の耐力を発揮できる。
- 2) コンクリート表面が軟化した状態を想定した試験体についても算定式で求める終局曲げ耐力を確保している。
- 3) 部材変形角 1/200 の変形での鋼管ひずみは、鋼管-コンクリート間の付着が完全であると仮定した場合に予想されるひずみの値のおよそ 8 割である。

[参考文献]

- 1) 財団法人 日本建築総合試験所：建築技術性能証明評価概要報告書 SB 耐震杭工法，2001.5
 - 2) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975.11
(付録 1) 著者等は平成 14 年に SB 鋼管杭のコンクリート打ち込み実大実験 (杭径 1700mm と 1400mm) を行っている。現場打設、養生後、鋼管頭部を切り出し、鋼管を切断することにより、鋼管内部のコンクリート状態を調査した。報告が未発表のため文献として参照することはできないが、内部コンクリートは中実に打設されていたが、表面コンクリートのヤング係数がやや低い結果となっていた。
- [謝辞] 本研究を進めるにあたり、本学院生仁科誠治、井口貴雄氏に御協力頂きました。ここに感謝の意を表します。