

論文 引張および圧縮軸力を受ける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}

要旨：筆者等は既報において，内部が平滑な鋼管を用いるコンクリート充填鋼管杭について圧縮力を受ける場合の曲げ変形特性について報告した^{文献1)}。本論文では，同鋼管杭が引張軸力を受ける場合の曲げ変形特性について主として報告する。同杭の静的水平加力載荷実験の結果，引張軸力を主筋降伏時引張力の 80%とした大きな値とした場合でも，算定式^{文献2)}による曲げ耐力を確保でき，かつ十分な変形能を有していることが確認できた。

キーワード：コンクリート充填鋼管，内部が平滑な鋼管，引張軸力，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。

筆者等は，内部が平滑な鋼管を用いるコンクリート充填鋼管杭（以下 SB 杭と略記）につい

て圧縮軸力を受ける場合の曲げ変形特性を前報で報告した¹⁾。本報では主として SB 杭が引張軸力を受ける場合の曲げ変形特性について報告する。SB 杭試験体の静的加力実験を行い，終局曲げ耐力が文献 2 で推奨される算定値を満足し，かつ十分な変形能を有することを確認する。また，鋼管のスタブへの定着方法が耐力および変形性能に及ぼす影響についても検討を行った。

1.1 終局曲げ耐力式

SB 杭では，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，終局曲げ耐力算定式として一般化累加強度式を適用できない。そこで，文献 2 では，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式を提案している。以下にその式を示す。

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

M_p : SB耐震杭の終局耐力 (kNm)

M_{rc} : RC部の終局耐力 (kNm)

M_{st} : 鋼管部の終局耐力 (kNm)

a) 鉄筋コンクリート (RC) 部

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

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

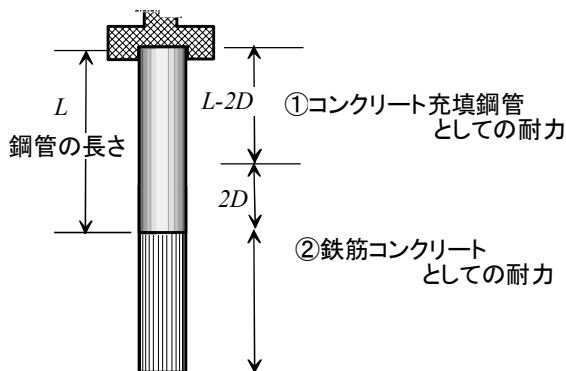


図-1 SB耐震杭

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 修士 (正会員)
 *2 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 講師 博士 (工学) (正会員)
 *3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 教授 工博 (正会員)

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

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

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

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

$$\cdot 0 \geq N > N_{\min}$$

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

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)

$g1$: 引張筋重心と圧縮筋重心との距離の全せいに対する比

N : 柱軸方向力 (N)

$N_{\max}$: 中心圧縮時終局強度
($b \cdot D \cdot F_c + a_g \cdot \sigma_y$) (N)

$N_{\min}$: 中心引張時終局強度
($-0.5 a_g \cdot \sigma_y$) (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)

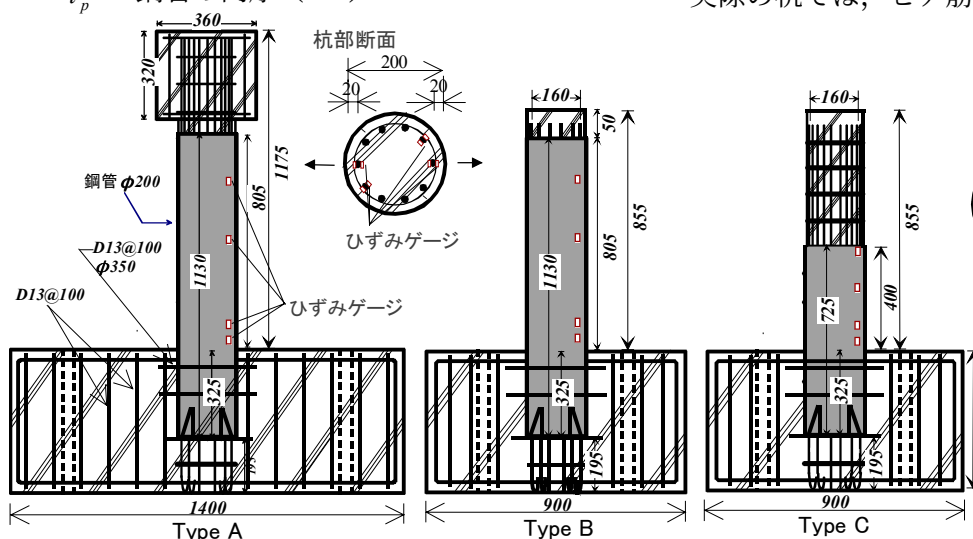


図-2 試験体詳細例

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	作用軸力	鋼管鋼材特性		試験体形状 (図2)	鋼管固定方法 (図3)	载荷装置 (図4)
			降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]			
1	-08N	-0.8a _g σ _y	337.3	410.0	Type A	円盤底鉄板溶接	b
2	-08H	-0.8a _g σ _y	224.5	360.0	Type A	ヒゲ筋溶接	b
3	0N-V	0	363.9	432.4	Type A	円盤底鉄板溶接	b
4	0N-Ho	0	233.5	369.3	Type B	円盤底鉄板溶接	a
5	03N	0.3a _c F _c	349.6	428.8	Type B	円盤底鉄板溶接	a
6	03SP	0.3a _c F _c	242.0	370.1	Type C	円盤底鉄板溶接	a

σ_{py} : 鋼管の降伏強度 (N/mm²)

2. 実験概要

2.1 試験体種類

試験体一覧を表-1 に、試験体詳細図を図-2 に示す。試験体は全て同じ直径(200mm)を持つ円形断面である。

文献 2 では、算定式の適用範囲は引張軸力 $-0.5a_g \sigma_y$ (σ_y : 主筋降伏強度, a_g : 主筋全断面積) 以下と規定されているが、本試験体 No.1,2 は、引張軸力 $-0.8a_g \sigma_y$ を作用させ実験を行う。これはより大きな引張軸力が作用する条件下において、前述の算定式の耐力を確保し、かつ十分な変形性能を有していることを確認することを目的とするためである。既報、および本報で用いた試験体では、鋼管部のスタブへの定着を確実にするため、鋼管をスタブ部へ 325mm 埋め込ませ、更に端部に直径 150mm の円形の底板を溶接で取り付けている (図-3(a))。一方、実際の杭では、ヒゲ筋を配し定着する手法が

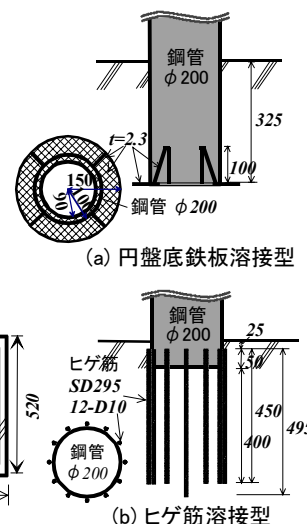


図-3 鋼管端部形状詳細図

表-2 コンクリート材料特性

圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
27.60	1.61

表-3 主筋鋼材材料特性

降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
458.0	537.4

一般的であることから、定着方法の差による耐力および変形性能などへの影響を確認するため、試験体 No.2(-08H)では、ヒゲ筋を用いた定着方法とした。同試験体では、スタブ部の埋め込み長さを75mmとし、スタブ面より25mmの位置から定着用鉄筋（ヒゲ筋：D13 290mm 12本）を鋼管外周部に溶接した形状としている（図-3(b)）。

引張試験体と圧縮試験体では、試験体形状および荷重装置が異なる（図-2,4）。試験体 No.3, 4 試験体は、それらの違いが、耐力および変形性能への影響がないことを確認することを目的としたもので、作用軸力は共に0である。

試験体 No.5, 6 は、圧縮軸力 $0.3a_cF_c'$ (F_c' : コンクリート設計強度, a_c : 杭全断面積) を作用させた試験体である。試験体 No.5 は(1)式を誘導した際に用いられたものと同じ仕様の試験体（鋼管長 $4D$: 800mm）、試験体 No. 6 は鋼管長が $2D$ (D : 鋼管径) 400mm と短く、鋼管とコンクリート間の力の伝達が No.5 試験体に比べて困難と思われる試験体である。この場合の耐力および変形性能を確認することが目的である。

主筋は異形棒鋼 D6 (SD295) を 10 本用い、鋼管から約 20mm 内側（円形断面中心から約 80mm）に等間隔で円周状に配筋した（図-2）。

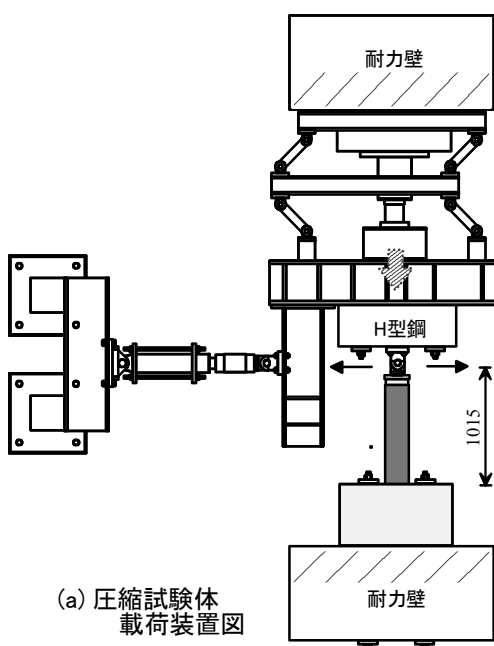
また、鋼管は厚さ 2.3 mmの平板鋼板を加工したもので、鋼管の内径は約 196 mmである。

2.2 使用材料の力学的性質

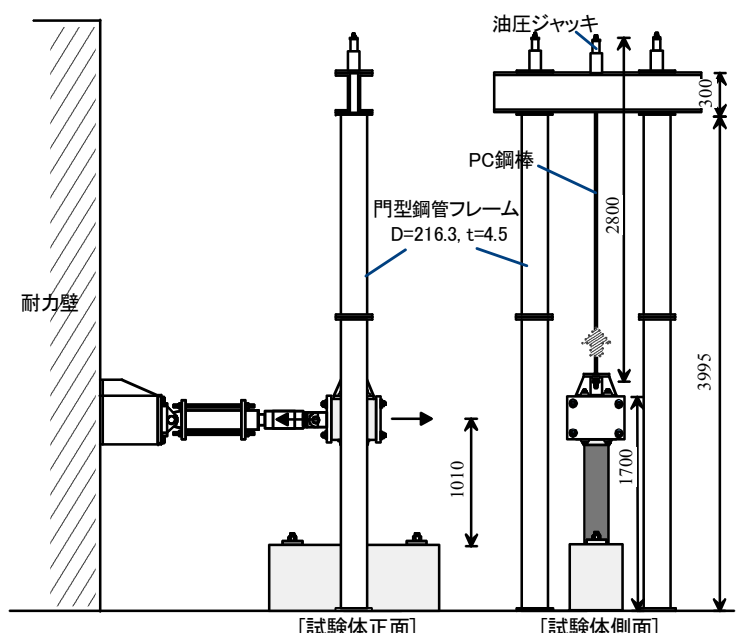
コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したレディミクストコンクリート（呼び強度 24N/mm^2 、スランプ 18cm）で、4 週圧縮強度は 27.6N/mm^2 である（表-3）。主筋 D6 の降伏強度は 458.0N/mm^2 である（表-4）。鋼管鋼材については荷重後、荷重による影響の少ない部分を切り出し加工し、各試験体について 2 本の引張試験を行い、力学的性質を調べた。その平均値を表-1 に示す。

2.3 荷重方法および測定項目

荷重装置図を図-4 に示す。荷重方法は正負交番の繰り返し荷重とし、荷重パターンは、試験体頂部での変形が部材角で $1/200$, $1/100$, $1/65$, $1/40$, $1/30$, $1/20$ とした。繰り返し回数は各部材角毎正負各 3 回である。水平方向加力および軸力導入は、杭端部のコンクリート部分に対して行っている。従って、鋼管部は直接加力を受けることはなく、内部コンクリートを介して外力を受ける。軸力は一定値を保持するよう制御を行った。水平変位についてはダイヤルゲージを用いて、スタブ面より 2.5cm, 7.5cm, 40cm,



(a) 圧縮試験体荷重装置図



(b) 引張試験体荷重装置図

図-4 荷重装置図

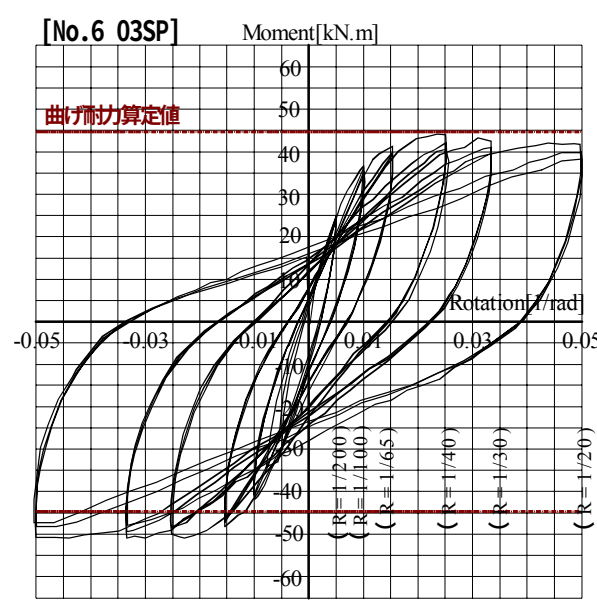
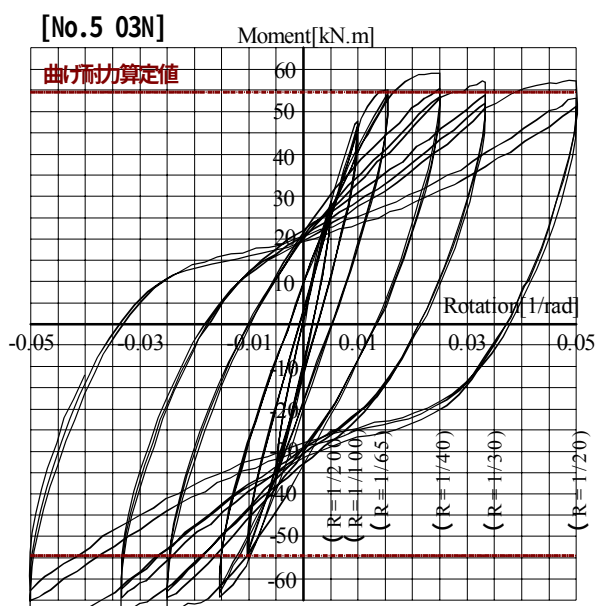
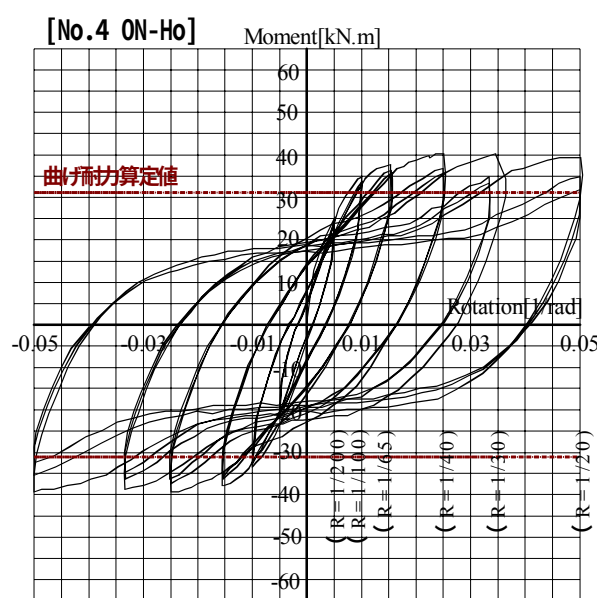
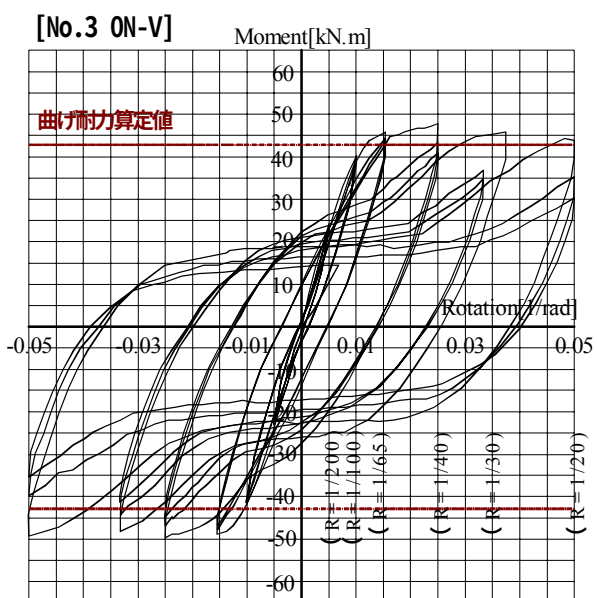
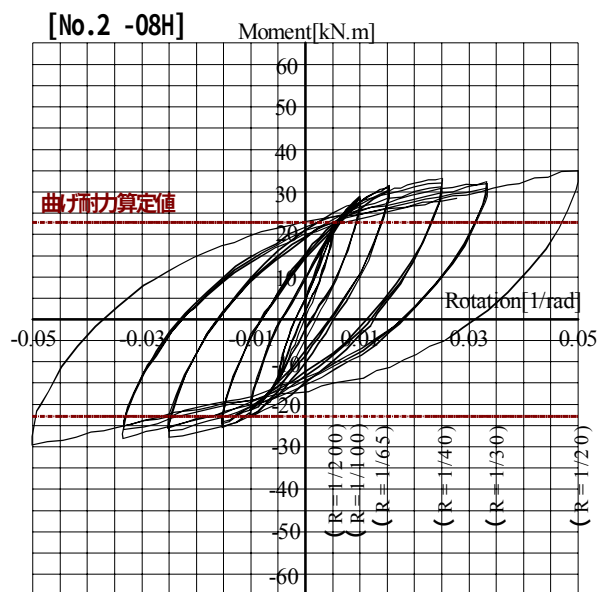
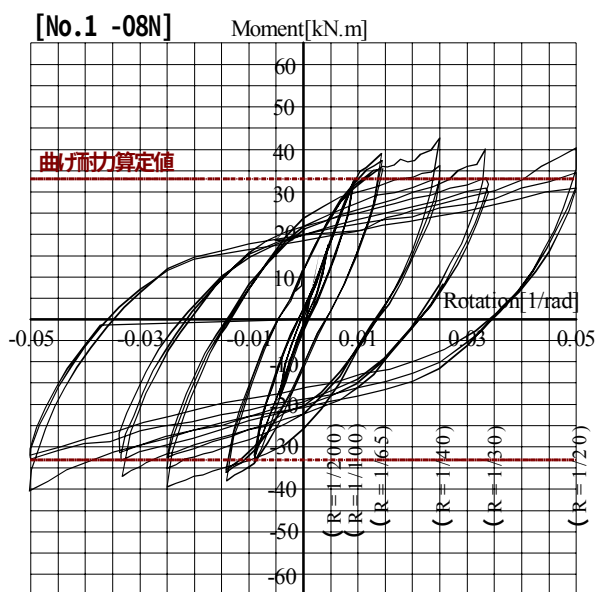


図-5 M(モーメント)-R(変形角)関係

60cm, および試験体頂頭部の位置の値を計測した。鉄筋および鋼管のひずみは箔ひずみゲージにより, スタブ面より 2.5cm, 7.5cm, 40cm, 60cm の位置で計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 終局曲げ耐力

図-5 に各試験体のモーメントー変形角関係を示す。同図中に曲げ耐力算定値を一点鎖線で表しているが, 変形角 $R=1/65$ の時点では全試験体において実験値が算定値を上回っていることがわかる。また, 全ての試験体の変形角 $1/20$ での大変形においても耐力低下が小さく, エネルギー吸収能の大きな安定した履歴性状を示していることがわかる。

各試験体の曲げ耐力の実験値・算定値一覧を表-5 に, それらの比較を図-6 に示す。なお, 算定値は(1)式により, 実験値は実用上の有効性を考慮して, 変形角 $1/65$, $1/40$ までの実験値の正側と負側の最大値の平均値を採用した。

図-6 より, すべての試験体において算定式の曲げ耐力を満足していることが確認できる。鋼管長が $2D$ と短い鋼管部を持つ試験体 No.6(03SP)では, 他の試験体に比べて余裕度がやや小さくなっている。これは, 同試験体の鋼管内側部分にコンクリートの打設不良箇所

所があり(図-7), この箇所曲げヒンジが発生したためである。ただし, 実験値は算定値を上まわっている。その他の試験体については, 算定式耐力に対して, 実験値が 10%以上の余裕を有しており, 文献 2 で提案されている鋼管余長としての長さ $2D$ (図-1 参照) は妥当であることがわかる。

3.2 内部コンクリートと鋼管のずれ量の検討

SB 杭では鋼管とコンクリート間に付着がないために, 耐力算定式は鋼管に軸力が作用しないことを前提として導かれている。部材角 $R=1/200$ では鋼管, RC 部ともに弾性域であるので, 断面内のひずみ分布について平面保持を仮定し, 鋼管部, RC 部のスタブから 2.5cm の位置でのひずみ分布の変化を図-8 に示した。軸力導入直後, 引張軸力, 圧縮軸力のどちらが作用する試験体においても, 鋼管部に応力はほとんど作用しておらず, RC 部のみに軸力が作用しているのが確認できる。また, 変形角 $1/200$ の時点においても, 鋼管部の中立軸位置はほぼ断

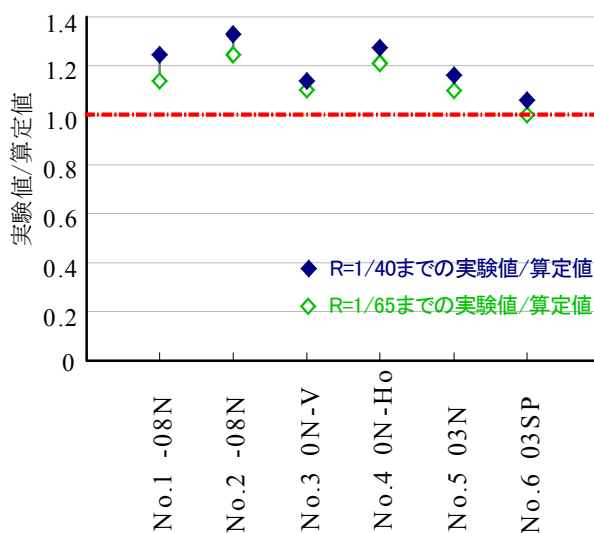


図-7
試験体No.6
載荷後様子

表-5 実験値・算定値 耐力一覧

No.	試験体名	実験値 [kN・m]		算定値 [kN・m]			実験値/算定値	
		～1/65	～1/40	RC部	鋼管部	SB杭	～1/65	～1/40
1	-08N	37.47	41.04	2.98	29.99	32.97	1.14	1.24
2	-08H	28.53	30.43	2.98	19.96	22.94	1.24	1.33
3	0N-V	47.25	48.74	10.53	32.36	42.89	1.10	1.14
4	0N-Ho	37.80	39.79	10.53	20.77	31.30	1.21	1.27
5	03N	59.66	63.22	23.26	31.10	54.36	1.10	1.16
6	03SP	44.73	47.47	23.26	21.52	44.78	1.00	1.06

図-6 実験値/算定値

面中央にあり、かつ、RC 部のひずみの傾きと同様のひずみ分布（鋼管部と RC 部のひずみの勾配がほぼ平衡）となっていることから、RC 部と同等の曲げ変形が発生していると判断できる。他の試験体についても同様の傾向であることから、鋼管部に軸力は作用せず、鋼管部、RC 部はそれぞれが独立にかつ同等量の曲げ変形を生じていることが確認できる。

4. まとめ

内部が平滑な鋼管を用いるコンクリート充填鋼管杭（以下 SB 杭と略記）に対する静的加力実験より、以下の知見を得た。

- 1) 主筋降伏時引張力の 80% に相当する非常に大きな引張軸力を作用させた場合でも、算定式 (1)～(5) による曲げ耐力を満足し、かつ十分な変形能を有している。
- 2) 鋼管と内部コンクリート間の付着はなく、鋼管に対する軸力の作用はほとんど認められない。

3) 鋼管と内部コンクリートは独立して挙動しているが、その変形量はほぼ等しい。

4) 鋼管長が $2D$ (D は鋼管径) と短い場合でも、算定式で求まる終局曲げ耐力値を満足する。これは、文献 2 で提案されている鋼管余長としての長さ $2D$ (図-1 参照) が妥当であることを示している。

【参考文献】

- 1) 山口雄司，岸本一蔵，大野義照，中川隆夫：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，コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.2，pp.1681-1686，2003
- 2) 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
- 3) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975.11

【謝辞】 本研究は SB 耐震杭委員会の協力を得て行いました。研究を進めるにあたり、本学助手の中川隆夫氏，本学院生（現 日建設計）仁科誠治氏，井口貴雄氏，李德基氏，本学 4 回生（現 本学院生）任旭氏に御協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

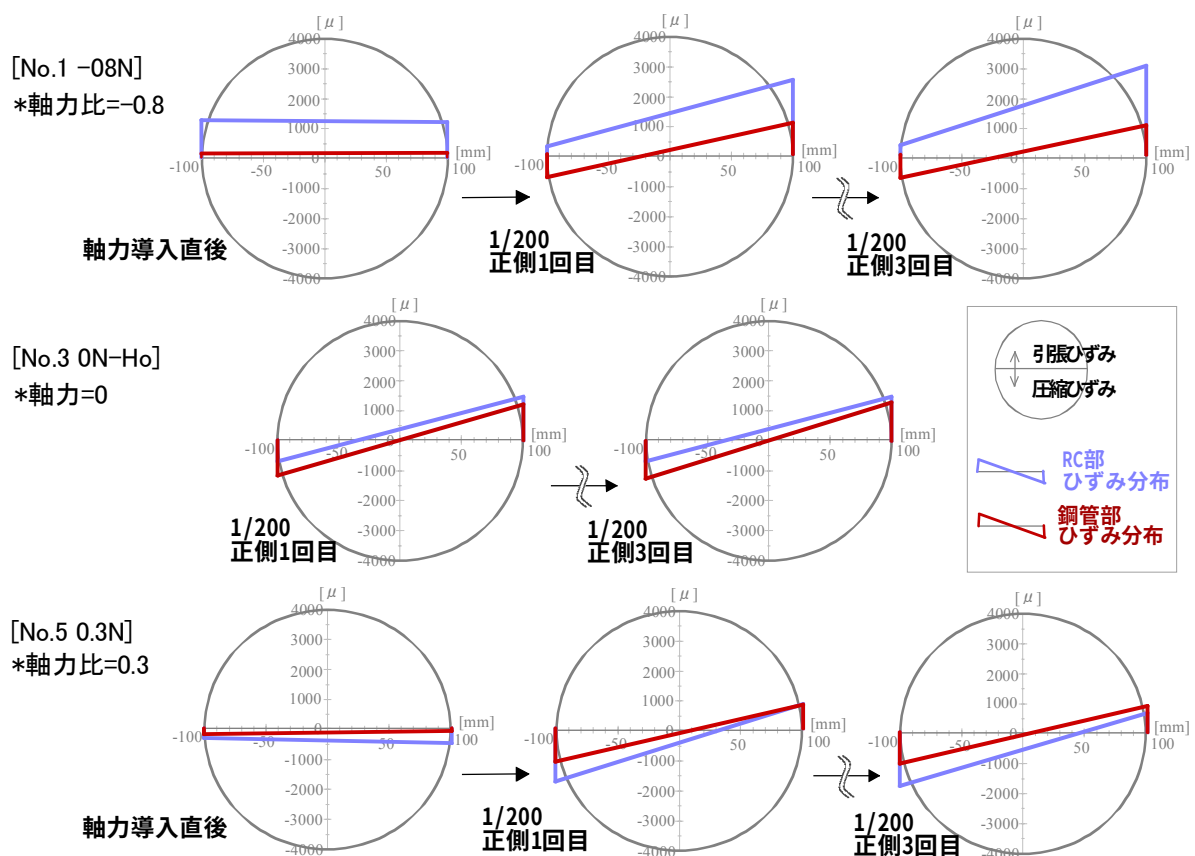


図-8 R=1/200における鋼管部・RC部のひずみ分布変化