

論文 既製コンクリート杭を想定した鋼管巻き中実杭の曲げ性能評価実験

八田 宏志*1・向井 智久*2・渡邊 秀和*2

要旨：本実験は大地震時にも適用できる靱性のある既製コンクリート杭の実現を目標とし、鋼管で拘束された中実既製コンクリート杭を想定した曲げ性能評価実験を行い、十分な靱性能を有することの確認を目的とした。鋼管に隙間を設けることにより、コンクリートの曲げ挙動とは独立して鋼管が拘束効果を発揮したことを確認できた。また、試験体に配置した軸方向鉄筋の降伏領域の評価、鋼管による拘束効果を考慮した曲げ耐力を評価し、既往の実験結果から得られなかった知見を得た。

キーワード：既製コンクリート杭、曲げ耐力、拘束効果、中実断面

1. はじめに

過去の大地震において、建築物の構造設計時に十分な検討が明示的に求められていない部位での損傷が顕在化し、その結果、当該建築物が地震後継続使用できなくなる事例が確認されている。現行の建築基準法において一般的な建築物の杭基礎は中小地震における損傷制御を目的とした設計が行われているものの、大地震後の継続使用性を確保するための設計はほとんど行われていない。また、鋼管を用いた場所打ち鋼管コンクリート杭や SC 杭では鋼管の座屈によって早期に終局状態に至ることが報告¹⁾²⁾されており、既製コンクリート杭の靱性能を確保は技術的な課題である。

既往の実験³⁾では、既製コンクリート杭の圧縮靱性を向上させることを目的として、鋼管が座屈しないような拘束効果のみ期待した鋼管巻き中実杭（以下、単に中実杭）を想定した一軸圧縮実験が報告されている。この中実杭は、図-1 のようにパイルキャップとの間に隙間を設けることで鋼管に直接圧縮力が伝達しないような工法であり、実験の結果、中実断面の試験体では外側に取り付けた鋼管の拘束効果により一軸圧縮強度の上昇と靱性能の向上が確認できた。

また既往の実験³⁾をさらに発展させ、中実杭の構造性能を確認することを目的に静的載荷実験の結果⁴⁾より十分な靱性能を確認しているが、この実験では杭体を破壊させる設定としていなかったため、杭体の曲げ耐力を確認できなかった。そこで本論は、この中実杭単体の曲げ性能評価を目的とした実験を実施し、試験体の曲率分布等の変形状態および曲げ耐力の評価を行う。

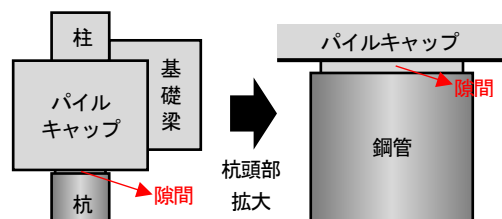


図-1 鋼管巻き中実杭概要

2. 実験概要

2.1 試験体概要

D-1 及び D-2 の 2 体の試験体による実験を行った。表-1 に試験体諸元及び材料試験結果を、図-2 に軸方向鉄筋配置図を示す。D-1 については、既往の実験⁴⁾と同じ仕様とした。D-2 については、隙間幅の適用範囲を定める目安をつけるため、設計隙間幅 120mm とし、D-1 の比較試験の位置付けとした。試験体の写真を写真-1 に示す。

表-1 試験体諸元及び材料試験結果

試験体名	外径 (mm)	長さ (m)	鋼管 (SKK490) 厚さ (mm)	軸方向鉄筋 (SD390)				隙間幅 (mm)
				外側		内側		
				本数- 呼び名	P. C. D. (mm)	本数- 呼び名	P. C. D. (mm)	
D-1	400	2	9	20-D22	310	14-D22	216	20
D-2	400	2	9	20-D22	310	14-D22	216	120

試験体名	コンクリート				
	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時歪 (%)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
D-1	71	40.9	0.21	31.7	2.13
D-2	78	45.7	0.21	31.0	3.14

試験体名	軸方向鉄筋				鋼管		
	降伏点 (MPa)	降伏時歪 (%)	ヤング係数 (GPa)	引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強さ (MPa)
D-1	443	0.241	196	624	405	205	535
D-2							

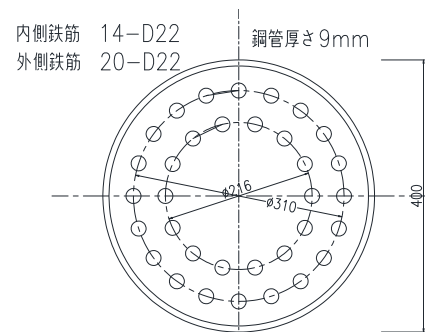


図-2 軸方向鉄筋配置図

*1 (一社)コンクリートパイル・ポール協会 (建築研究所交流研究員) 修士(工学) (正会員)

*2 (国研)建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)



写真-1 試験体 (奥：D-1, 手前：D-2)

2.2 載荷方法

(1) 試験装置概要

載荷方法は、「JIS A 5373：プレキャストプレストレストコンクリート製品一付属書E」⁵⁾に準じ、図-3に示すように、長さLのくいを支持スパン L_1 で支え、スパンの中央に曲げ耐力に相当する荷重Fを2点載荷した(せん断スパン1mで荷重Fを2点載荷した)。また、D-1及びD-2の両端には、支持スパンを確保するため、外径400mm、鋼管厚12mm、長さ1.5mのSC杭を溶接で接続した。

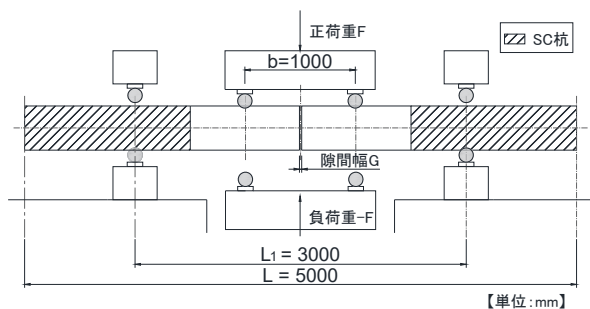


図-3 載荷方法

(2) 加力サイクルについて

載荷は(一財)日本建築センターの「遠心力高強度プレストレストコンクリートくい評価基本方針」⁶⁾のPRCくいの軸力一定漸増変位正負交番繰返し曲げ試験の試験方法を参考とし、各荷重階で3回繰り返した。実際の載荷サイクルについては表-2に示す。なお、変形角の算出方法は、「3.1 曲げモーメント-変形角関係」に示す。

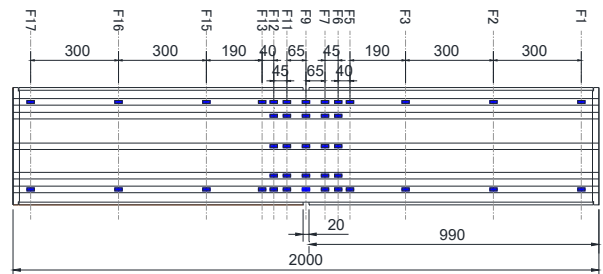
表-2 加力サイクル

サイクル	変形角R (%)	繰返し回数 (回)	D-1試験体	D-2試験体
1	0.13	3	○	○
2	0.25		○	○
3	0.50		○	○
4	0.75		○	○
5	1.00		○	○
6	1.50		○	○
7	2.00		○	○
8	2.50		○	○
9	3.00		○	○
10	3.50		○	—
11	4.00		○	—

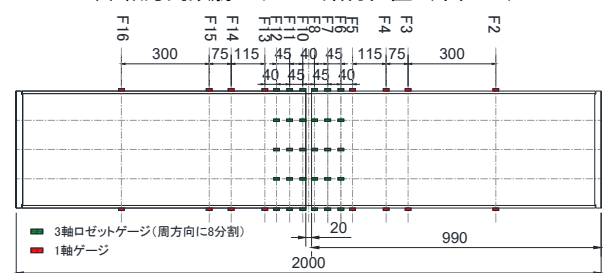
○印は実際に加力したサイクル

2.3 計測方法

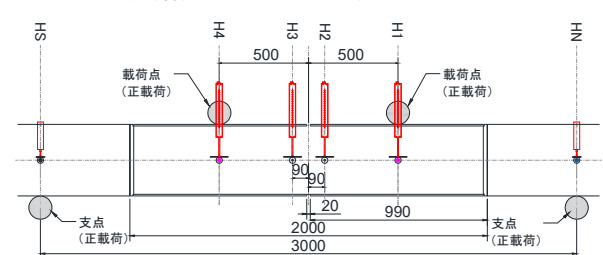
計測位置として、ひずみゲージおよび変位計の位置を図-4に示す。この計測位置は中実杭の構造性能を確認することを目的とした既往実験結果⁴⁾に対応している。図は代表例として、D-1の計測位置を示している。



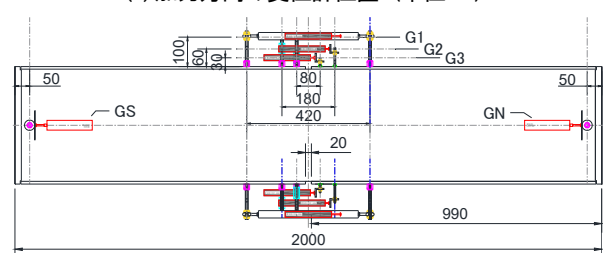
(a) 軸方向鉄筋のゲージ貼付位置 (単位 mm)



(b) 鋼管のゲージ貼付位置 (単位 mm)



(c) 加力方向の変位計位置 (単位 mm)



(d) 軸方向の変位計位置 (単位 mm)

図-4 D-1 試験体の計測位置

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係

本実験では、図-3に示すように支持点スパン $L=3.0$ m、試験区間 $b=1.0$ mとしているので、せん断スパンは1.0mとなる。油圧ジャッキから読取った荷重Fに対して曲げモーメントMは、式(1)で表される。また変形角Rは、隙間部分から載荷点までの変位を、隙間部分を除いた距離で除した値の式(2)で表される。

$$M = F/4(L_1 - b) \quad (1)$$

$$R = (\delta_c - \delta_b)/L_b \cdot 100 \quad (2)$$

M : 図-3 の荷重方法で杭体中央部にかかる曲げモーメント (kN・m)

F : 荷重 (kN), L_1 : スパン (m), b : 曲げスパン (m)

R : 変形角 (%)

L_b : 隙間境界部から荷重点までの距離 (mm) ; D-1 は 490mm, D-2 は 440mm

δ_b : 荷重点の変位 (図-4, (C), H1 と H4 の東西の合計 4 箇所) の平均値 (mm)

δ_c : 隙間部近傍の変位 (図-4, (C), H2 と H3 の東西の合計 4 箇所) の平均値 (mm)

各試験体の降伏時及び最大耐力時、終局時の変計角は表-3 に示す結果となった。試験体の破壊状況は、写真-2 に示す通り、D-1 については図-4 (a) の F9 断面の下部の鉄筋が、D-2 については図-4 (a) の F9 断面の上部の鉄筋が破断した。

図-5 に D-1 の荷重変形関係を示す。正側荷重 $R=+2.5\%$ 以降に緩やか耐力低下が確認された。 $R=+4.0\%$ の 3 回目の加力時 (▲のプロット) に荷重が下がったが、試験体に異常は確認されなかった。正側荷重 $R=+4.5\%$ の 1 回目の加力時 (▲のプロット) に下縁引張側の鉄筋が破断していることを確認した後、除荷し、荷重を終了した。

図-6 に D-2 の荷重変形関係を示す。正側荷重 $R=+2.5\%$ 以降に緩やか耐力低下が確認された。D-1 試験体と比較すると、最大耐力が低い値であった。 $R=+2.0\%$ の 3 回目の加力時 (▲のプロット) に荷重が下がったが、試験体に異常は確認されなかった。負側荷重 $R=-3.5\%$ の 1 回目の加力時 (▲のプロット) に上縁引張側の鉄筋が破断していることを確認した後、除荷し、荷重を終了した。また、図-7 に D-1 と D-2 の曲げモーメント-変形角 R 関係の骨格曲線を示す。D-2 は D-1 よりも最大耐力が正側で 8.3%, 負側で 7.6% 小さくなった。また、鉄筋降伏が発生した変形角は、D-1 は $R=+0.39\%$, D-2 は $R=-0.37\%$ でほぼ同等の変形で鉄筋の降伏が確認された。また、D-1 では $R=+4.5\%$ の 1 回目の加力時、D-2 では負側荷重 $R=-3.5\%$ の 1 回目の加力時で鉄筋破断しており、D-2 の方が早く破断した。

表-3 各試験体の降伏時及び終局時の変計角

試験体名	試験体の状況	変形角 (%)	モーメント (kNm)	降伏箇所
D-1	鉄筋降伏	引張 ● +0.39	509	図2, (a), F9下縁
	鉄筋降伏	圧縮 ● +0.46	576	図2, (a), F9上縁
	鋼管降伏	上縁 ● +0.68	694	図2, (b), F8上縁
	鋼管降伏	下縁 ● -0.56	-635	図2, (b), F8下縁
	最大耐力	正側荷重 ▲ +1.92	815	—
	最大耐力	負側荷重 ▲ -3.00	842	—
D-2	終局 (鉄筋破断)	▲ +3.15	679	—
	鉄筋降伏	引張 ● -0.37	-443	図2, (a), F9上縁
	鉄筋降伏	圧縮 ● -0.44	-543	図2, (a), F9上縁
	鋼管降伏	上縁 ● +1.74	656	図2, (b), F7上縁
	鋼管降伏	下縁 ● -0.68	-639	図2, (b), F7下縁
	最大耐力	正側荷重 ▲ +2.43	747	—
	最大耐力	負側荷重 ▲ +2.99	778	—
	終局 (鉄筋破断)	▲ -0.95	-513	—



【D-1, 破壊状況 (下縁引張側の鉄筋破断)】



【D-2, 破壊状況 (上縁引張側の鉄筋破断)】

写真-2 試験体の破壊状況

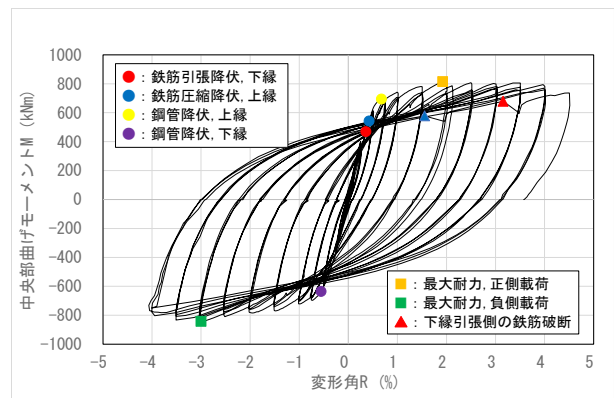


図-5 D-1, 荷重変形関係

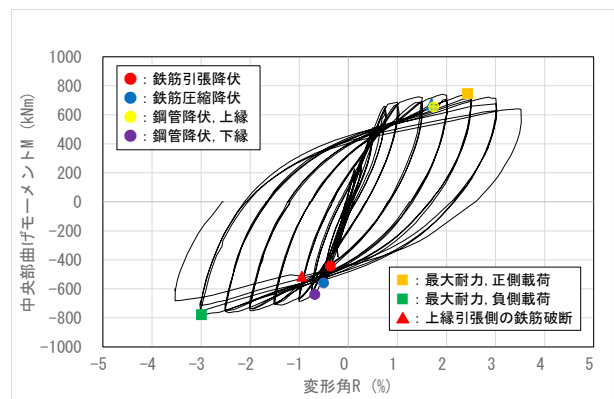


図-6 D-2, 荷重変形関係

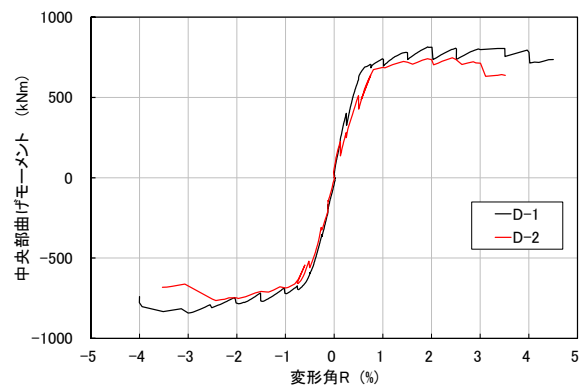


図-7 D-1 と D-2 の比較, 曲げモーメント-変形角関係

3.2 降伏状況

軸方向鉄筋については、貼付したひずみゲージの値が降伏ひずみを超過した時を降伏点とした。鋼管の降伏は、表面に貼付した 3 軸ひずみゲージの値とミーゼスの降伏条件により判定した。軸方向鉄筋及び鋼管の降伏時の変形角、鋼管降伏時の最小主応力と最大主応力は表-4 に示す通りであった。

表-4 鋼材の降伏時の変形角、最小主応力と最大主応力

試験体名	軸方向鉄筋		鋼管			
	区分	降伏時の変形角(%)	区分	降伏時の変形角(%)	最大主応力(MPa)	最小主応力(MPa)
D-1	引張降伏	+0.39	上縁	+0.68	400	-7
	圧縮降伏	+0.46	下縁	-0.55	400	-1
D-2	引張降伏	-0.37	上縁	+1.74	427	65
	圧縮降伏	-0.44	下縁	-0.68	378	-13

また、試験体の変形が進むにつれ、軸方向鉄筋が降伏している範囲が広がっていく様子が見られた。そこで、変形角と軸方向鉄筋の降伏範囲を検討するため、図-8 のように軸方向鉄筋降伏範囲長さ Lp_n 及び Lp_s を定義して計算を行った。 Lp_n 及び Lp_s は、試験体中央部を起点とし、試験体北側を正、試験体南側を負とし、そこから降伏と判断された歪みゲージ位置までの長さとして計算した。鉄筋の降伏は、歪みゲージ(図-4, (a) 参照)の値の絶対値が鉄筋の降伏歪み $2410 \mu\epsilon$ を一度でも超えた場合、それ以降値が小さくなくても降伏していると判断した。 Lp_n 及び Lp_s は、北側と南側の軸方向鉄筋のそれぞれで計算し、また、試験体上部と下部の 4 箇所 で計算した値を平均して計算を行った。

D-1, D-2 とともに正負での違いはなかったため、正側加力時の軸方向鉄筋降伏範囲長さの計算結果を図-9 に示す。D-1, D-2 とともに変形角 $R=+0.75\%$ 時に著しい変動が見られた。また、D-1 の圧縮降伏した範囲は 4.0% 変形角時点で、 $0.71D$ 、D-2 の圧縮降伏した範囲は 3.0% 変形角時点で、 $0.49D$ であった。

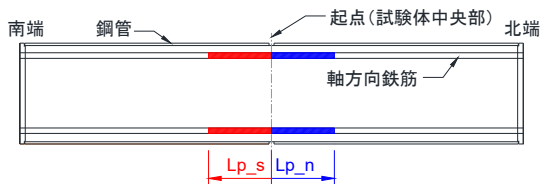


図-8 軸方向鉄筋降伏範囲

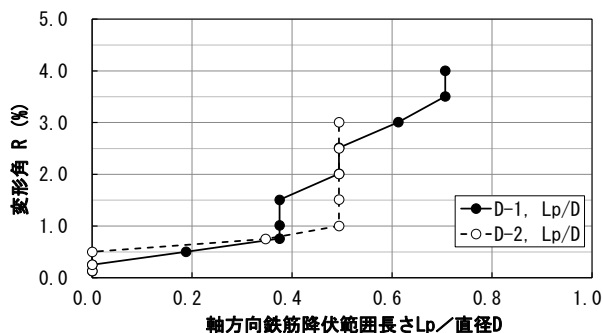


図-9 軸方向鉄筋降伏範囲長さ

3.3 試験体の変形状況

(1) RC 部の曲率分布

図-10, 11 に試験体の軸方向鉄筋に貼付した歪みゲージの値を用いて計算(図-4, (a) の上段外側の鉄筋と下段外側の鉄筋のひずみ分布の勾配を計算)を行った曲率分布の計算結果を示す。図-10, 11 の横軸(試験体中央部からの位置)は試験体中央部を起点とし、試験体北側を正、試験体南側を負とした。図-10, 11 では正側加力時のみを示しているが、負側加力時でも同様の傾向であった。

鉄筋とコンクリート間の付着は良好だったことを考えると、この軸方向鉄筋の歪み値に基づく曲率分布は鋼管内の RC 部の曲率分布と考えられる。D-1 については、変形角 $R=+0.50\%$ 時に著しく変動があり、それ以降については、試験体中央部とその近傍の曲率は、ほぼ同じような値であった。D-2 については、変形角 $R=+0.75\%$ 時に著しく変動があり、それ以降については、試験体中央部とその近傍の曲率は、D-1 と比較すると多少ばらつきはあるが、ほぼ同じような値であったと判断する。

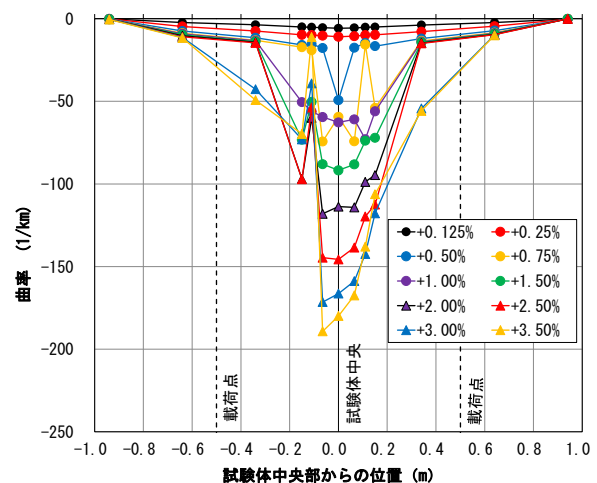


図-10 D-1, 軸方向鉄筋のひずみに基づく曲率分布(正載荷)

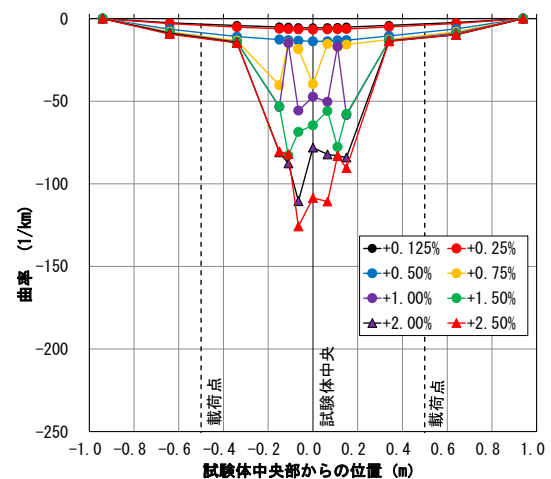


図-11 D-2, 軸方向鉄筋のひずみに基づく曲率分布(正載荷)

(2) 局所領域計測値から算出した曲率分布

図-12, 13 に局所領域計測値から算出した曲率分布を示す。この曲率は、試験体鋼管部に軸方向に取り付けた曲率計測用の変位計（図-4, (d) 参照）の計測値を用いて式(3)により計算を行った。図-12, 13 から、試験体上下に設けた隙間を含む範囲で最も区間長が短い変位計（D-1 は G3 の変位計、D-2 は G2 の変位計）から算出した曲率が大きく、このことから、鋼管は、杭体 RC 部とは異なり、隙間部の変形が支配的であることがわかる。これは、鋼管とコンクリート間の付着による軸方向の一体性がなかったためと考えられる。

$$i\phi = \frac{i\delta t - i\delta b}{iB \cdot ih} \quad (3)$$

$i\phi$: 区間 i の曲率 (1/mm)

$i\delta t, \delta b$: 区間 i に設置した変位計の計測値（上側が t , 下側が b ）(mm)

iB : 区間 i の幅で、区間 i に設置した軸方向変位計の芯々距離 (mm)

ih : 区間 i の軸方向長さ (mm)

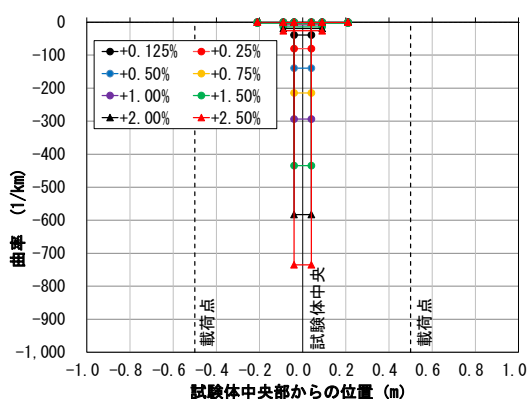


図-12 D-1, 局所領域計測値から算出した曲率分布

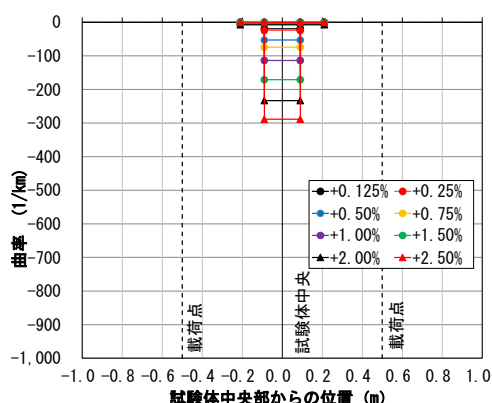


図-13 D-2, 局所領域計測値から算出した曲率分布

4. 耐力評価

(1) 断面解析モデル

表-1 の材料試験結果から実施する解析は下記の 2 種類とし、鋼管の拘束効果の評価を変えている。Case2 では既往の

文献³⁾から計算した値とした。

Case1.....鋼管の拘束効果を無視した。

Case2.....鋼管の拘束効果によるコンクリートの圧縮強度の上昇率を下記の式で計算した。

コンクリートの材料モデルは鋼管による拘束効果を考慮し、図-14 のようにコンクリートの圧縮強度を上昇させたモデルとし、引張側の応力は負担しない。コンクリートの終局歪みは文献⁶⁾の実験結果から 4.0% とする。ここで、D-1 試験体及び D-2 試験体の材料モデルの諸元は、表-5 のように示す。Case1 では鋼管による拘束効果を考慮せず、コンクリート強度は材料試験結果をそのまま用い、終局歪みを 0.003 として計算を行った。また、Case2 では、圧縮強度 σ_{cc} は、式(4)、式(5)により計算した結果を用いる。鉄筋は完全弾塑性モデルとし、ヤング係数 192 (GPa)、降伏強度 443 (MPa) のモデルとする。

$$\sigma_{cc} = \alpha \gamma_U \cdot \sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad (4)$$

$$\sigma_r = \frac{2t}{D-2t} \cdot \alpha \cdot \sigma_y \quad (5)$$

σ_{cc} : 拘束されたコンクリートの圧縮強度 (MPa)

$\alpha \gamma_U$: コンクリートの強度低減係数で、 $\alpha \gamma_U = 1.0$ とする。

k : 拘束係数で、 $k=4$ とする。 D : 試験体直径 (mm)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa) t : 鋼管厚さ (mm)

σ_r : コンクリートに作用する側圧 (MPa)

α : 周方向応力成分比で、 $\alpha=1.0$ とする。

σ_y : 鋼材降伏強度 (MPa)

E_c : コンクリートのヤング係数 (GPa)

σ_{as1} : コンクリートの短期許容応力度 $2/3.5 \cdot \sigma_{cc}$ (MPa)

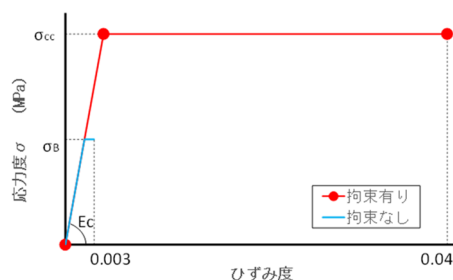


図-14 コンクリート材料モデル（圧縮が正）

表-5 解析で使ったコンクリートの材料定数

解析ケース	E_c (GPa)	σ_B (MPa)	σ_{cc} (MPa)	σ_{cc} / σ_B	σ_{as1} (MPa)
D-1_Case1	31.7	40.9	40.9	1.00	23.4
D-1_Case2	31.7	40.9	117.2	2.87	67.0
D-2_Case1	31.0	45.7	45.7	1.00	26.1
D-2_Case2	31.0	45.7	122.0	2.67	69.7

(2) 短期許容曲げモーメント

短期曲げモーメントの比較（実験値/計算値）を表-6に示す。Case1については、D-1の実験値/計算値は1.01、D-2の実験値/計算値は1.00であり、Case2については、D-1試験体の実験値/計算値は0.94、D-2試験体の実験値/計算値は0.94であった。Case1の場合は余裕度がなく、Case2の場合はやや危険側の評価となる。このことから短期許容曲げモーメントの計算値は安全側となるように低減係数を設定する必要がある、どのように評価を行うかが今後の課題となる。なお、短期許容到達後のピーク時に圧縮側のコンクリートにひび割れがなく、その後の R_r/R_p （短期許容曲げモーメント到達後のピーク後の変形角 R_r /短期許容曲げモーメント到達後のピーク時の変形角 R_p ）は最大で0.20であった。

表-6 短期許容曲げモーメント（実測値/計算値）

解析ケース	短期許容モーメントの 決定要因	計算値 (kNm)	実験値 (kNm)	実験値/ 計算値	R_r/R_p
D-1 Case1	コンクリート	158	159	1.01	0.20
D-1 Case2	コンクリート	452	424	0.94	0.18
D-2 Case1	コンクリート	182	181	1.00	0.08
D-2 Case2	コンクリート	475	447	0.94	0.17

(3) 最大耐力

各試験体の最大耐力の比較（実験値/計算値）を表-7に示す。D-1、D-2ともに実験値/計算値は解析ケースによる差異が認められた。Case1については、D-1試験体の実験値/計算値は、正側載荷で1.53、負側載荷で1.58であった。D-2試験体の実験値/計算値は、正側載荷で1.38、負側載荷で1.44であった。このことからCase1については、安全側の評価であると判断できる。Case2については、D-1試験体の実験値/計算値は、正側載荷で1.12、負側載荷で1.16であった。D-2の実験値/計算値は、正側載荷で1.02、負側載荷で1.06であった。このことから、両試験体とも拘束効果によるコンクリート強度上昇分を考慮することで実験結果をおおよそ適切に評価できているといえる。

表-7 最大耐力（実測値/計算値）

試験 体名	解析 ケース	計算値 (kNm)	実験値 (kNm)		実験値/計算値	
			正側載荷	負側載荷	正側載荷	負側載荷
D-1	Case1	534	815	842	1.53	1.58
	Case2	727			1.12	1.16
D-2	Case1	542	747	778	1.38	1.44
	Case2	731			1.02	1.06

5. まとめ

本論文では、拘束効果を期待した鋼管巻き中実杭の曲げ性能を特定するために、曲率分布等の変形状および曲げ耐力について検討を行った。既往の実験結果⁴⁾では、杭体を破壊させる設定としていなかったが、本実験で中実杭単体の曲げ耐力を確認することができた。得られた知見を以下に示す。

1) コンクリート杭部と外側の鋼管の曲率分布を比較した結

果、鋼管端部に隙間を設けることで、杭部とは独立して鋼管が挙動したことを確認した。鋼管は端部の隙間部のみの変形が大きくなっており、同様に鋼管自体はほとんど変形していなかった。

- 2) 軸方向鉄筋の降伏領域の検討を行った結果、D-1の圧縮降伏した範囲は4.0%変形角時点で、0.71D、D-2の圧縮降伏した範囲は3.0%変形角時点で、0.49Dであった。
- 3) 靱性性能については、D-1試験体は既往の実験結果⁷⁾と同様に変形角 $R=4.0\%$ 以上を確認したが、D-2は変形角 $R=4.0\%$ に満たなかった。
- 4) 今回の実験結果から、短期京曲げモーメントについては、低減係数を設定する必要がある、今後の課題となる。最大耐力については、拘束効果によるコンクリート強度上昇分を考慮することで実験結果をおおよそ適切に評価できているといえるが、D-2については余裕度（最大耐力の実験値/計算値）があまりないことが懸念事項である。

6. 今後の課題

- ・D-2の実験結果の余裕度（耐力の実験値/設計値）から、今後は隙間幅の適用範囲の検討が課題となる。
- ・今回は軸力なしの条件で曲げ性能の評価を行ったが、設計式を提案するためには、圧縮軸力下での曲げ実験の蓄積が今後の課題となる。

謝辞

本研究は（国研）建築研究所指定課題「既存鉄筋コンクリート造建築物の地震後継続使用のための耐震性能評価技術の開発」に基づくもので、共同研究「地震後継続使用に向けた杭基礎の耐震性能評価手法の開発」にてより実施致しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 向井智久ほか：大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究、建築研究資料第195号、2019.10
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説、2017.3
- 3) 渡邊秀和ほか7名：圧縮靱性を持つ既製コンクリート杭の一軸圧縮実験、日本建築学会技術報告集、Vol. 27, No. 66, pp. 726-731, 2021.6
- 4) 宮原清ほか10名：アンボンド鋼管巻き中実杭の載荷実験 その1～その2、日本建築学会学術講演梗概集、pp593-596, 2021.9
- 5) JIS A 5373 :プレキャストプレストレストコンクリート製品、2016
- 6) 日本建築センター：遠心力高強度プレストレストコンクリートくい評定基本方針、2012.3