

論文 大径厚比コンクリート充填鋼管の曲げ実験の再現解析

黒田 黎奈*1・渡邊 祐太*1・河野 進*2・谷 昌典 *3

要旨： 鋼管の拘束効果を考慮したコンクリートと座屈後の耐力低下を考慮した鋼管の材料モデルを用いて、径厚比 125 以上の場所打ち鋼管コンクリート杭試験体 10 体について MS モデルを用いた数値解析を行い、モデルの妥当性を検討した。また、この MS モデルを用いて軸力比、鉄筋比を変数とした同杭のパラメタリック解析を行い、2 つの変数が曲げ耐力および軸方向縮みに与える影響を考察した。軸力比を変数とした場合、曲げ耐力および初期剛性、軸方向縮みは 0.3 で傾向が変わった。鉄筋比を変数とした場合、鉄筋比が大きいほど曲げ耐力は上昇し、繰り返し载荷時の縮みが抑制された。

キーワード： 場所打ち鋼管コンクリート杭、径厚比、MS モデル、軸縮み

1. はじめに

杭基礎構造の設計では、大地震を想定した二次設計は法的に義務付けられておらず、性能目標の設定は設計者の判断にゆだねられている。その一方で、近年の大地震では PC 杭の損傷により、上部構造の損傷が軽微であっても建物が傾斜し、継続使用が困難となる被害が報告されている^{1),2)}。

本研究で対象とする場所打ち鋼管コンクリート杭（以下、耐震杭）は超高層建物や橋などで幅広く使用されている。金子ら³⁾の 124 棟の建物を対象とした調査では、

耐震杭は径厚比（以下、 D/t ）140~170 程度のものが主に使用されており、仮に二次設計を行う場合の軸力比は -0.6~0.4 となることが示されている。しかし、日本建築学会（以下、AIJ）の設計指針⁴⁾の耐力評価式の適用範囲は D/t が 125 以下であり、適用範囲を広げる必要がある。更に、AIJ 指針では拘束コンクリートモデルを使用した解析結果と実験結果の適応性が確認されていないため、無拘束コンクリートのモデルが使用されている。そのため、ピーク後の耐力低下の予測精度が良くない。そこで、拘束コンクリートモデルの適応性を確認する必要がある。

Table 1 Specimen Details of CFST Piles and Columns

Researcher		Brown ⁷⁾						Bhusal ⁸⁾		Sakino ⁹⁾	
Specimen	Unit	Test2	Test3	Test7	Test8	Test9	Test12	No.1	No.2	EC4D4040	EC4D4060
Diameter	[mm]	610	610	508	508	610	610	600	600	450	450
Steel Thickness	[mm]	3.18	4.76	3.18	3.18	3.18	4.76	4.5	4.5	2.96	2.96
D/t	[-]	192	128	160	160	192	128	133	133	152	152
Axial Load Ratio	[-]	0						0.3	0.2~0.4	0.4	0.6
Steel tube											
Yield Strength	[MPa]	332	307	328	328	328	306	342		279	
Tensile Strength	[MPa]	487	492	479	479	474	473	435		-	
Young's Modulus	[MPa]	205,000*1						195,000		205,000*1	
Concrete											
Compressive strength	[MPa]	39.5*3	39.5*3	35.2*3	40.2*3	41.7*3	39.5*3	32.8	34.7	39.9	39.9
Young's Modulus	[MPa]	26760*2	26,760*2	25,758*2	26,924*2	27,245*2	26,855*2	26,900	26,000	26,855*2	
Reinforcing bar											
Yield Strength	[MPa]	471	471	471	458	471	458	-		-	
Young's Modulus	[MPa]	205,000*1						-		-	
Nominal Size	[mm]	22	22	19	16	19	25	-		-	
Amount	[-]	12	12	12	8	8	14	-		-	
Steel Ratio	[%]	1.60	1.60	1.69	0.78	0.78	2.43	-		-	

Axial Load Ratio : ($= N/N_{max}$). N : Axial Load, N_{max} : Maximum Axial Capacity ($= A_c\sigma_B + A_s f_y + A_{sr} f_{yr}$),
 A_c : Area of concrete, σ_B : Compressive strength of concrete, A_s : Area of steel tube, f_y : Yield strength of steel tube,
 A_{sr} : Area of reinforcing bar, f_{yr} : strength of reinforcing bar
 See section 2.3 for *1*2*3.

*1 東京科学大学大学院 環境社会理工学院 建築学系 大学院生 (学生会員)

*2 東京科学大学 総合研究院 教授 博士 工学 (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士 工学 (正会員)

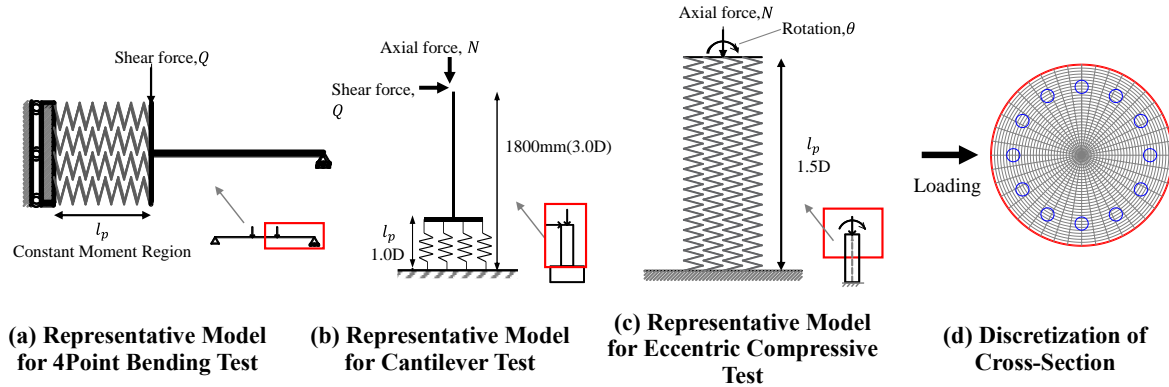


Fig.1 Equivalent Multi-Spring Model to Represent Specimens

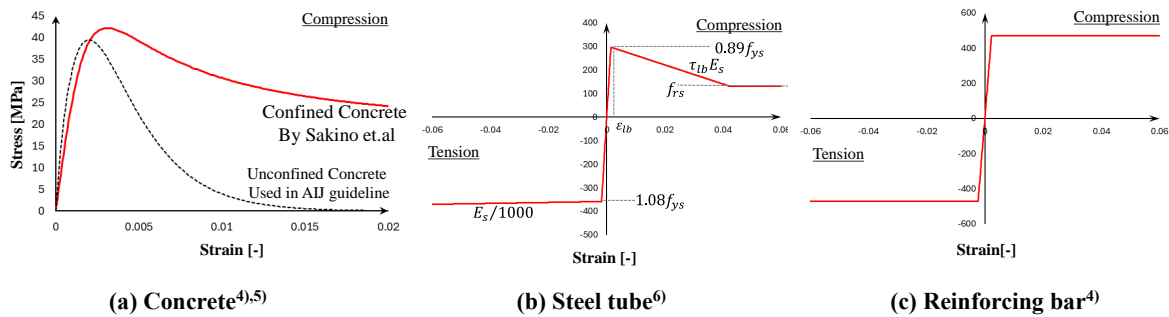


Fig.2 Stress-Strain Relations of Materials

また、既往の曲げ実験は軸力比 0~0.1 程度に留まっており、高軸力下での曲げ性能についても明らかにする必要がある。

本研究では D/t が 125 以上の耐震杭または CFT 柱の異なる荷条件での曲げ試験を精度よく再現するモデルを提案することを目的とした。解析では崎野らの拘束コンクリートモデル⁵⁾および Subedi らの座屈鋼管モデル⁶⁾をマルチスプリングモデル（以下、MS モデル）に適用し、その妥当性について検討した。

また、実験データが少ない大径厚比を有する耐震杭の軸力下での杭の挙動を明らかにする目的で、再現解析で妥当性を確認した材料モデルを用いて、軸力比および鉄筋比を変数としたパラメトリック解析を行い、曲げ耐力および軸方向縮みに与える影響について考察した。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

Table 1 に解析対象試験体の諸元を示す。荷方法及び杭径や鉄筋量が異なる試験体に対して、モデルの適用性を確認するために、文献 7), 8), 9) から径厚比 125 以上の耐震杭または CFT 柱を選んだ。

Test2~12 は変数が径厚比および鉄筋比の試験体で、軸力は作用させていない。No.1, 2 は同一形状試験体で No.1 は一定軸力比 $\mu = 0.3$, No.2 は変動軸力比 $\mu = 0.2 \sim 0.4$ である。EC4D404 および EC4D4060 も同一試験体形状で、

軸力比を $\mu = 0.4, 0.6$ とそれぞれ変えている。

2.2 幾何学モデルと境界条件

モデル立面は文献 8) の 4 点支持荷は Fig.1(a) に示すように試験体全長の右半分をモデル化した。荷点にせん断力を導入し、MS モデルはモーメント一定区間に設定した。文献 9) の片持ち形式荷は Fig.1(b) に示すように杭体のみをモデル化し、MS モデルの高さは 1.0D とした。反曲点位置に実験時と等価な軸力、せん断力、モーメントを導入した。文献 5) の万能試験機に CFT 柱試験体を挿入し、偏心軸力を導入して一定曲げモーメントとなるようにした荷方法（以下、崎野らの荷方法）は Fig.1(c) に示すように試験体全長 (3.0D) の半分 (1.5D) をモデル化し、中央を完全固定、上端に軸力と回転を与えた。

Fig.1(d) に解析モデル断面分割図を示す。断面は円周方向に 40 分割、半径方向にコンクリートを 30 分割した。

2.3 材料の応力-ひずみ関係

鋼管および鉄筋のヤング係数は文献で言及されていない場合は 205,000 [MPa] とした (Table 1 中の*1)。コンクリートのヤング係数は文献で言及されていない場合は式(1)を用いて算出した。(Table 1 中の*2)

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \left(\frac{F_c}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 γ はコンクリートの単位体積質量 (= 2.3 [t/m³]) で F_c はコンクリートの最大圧縮強度である。

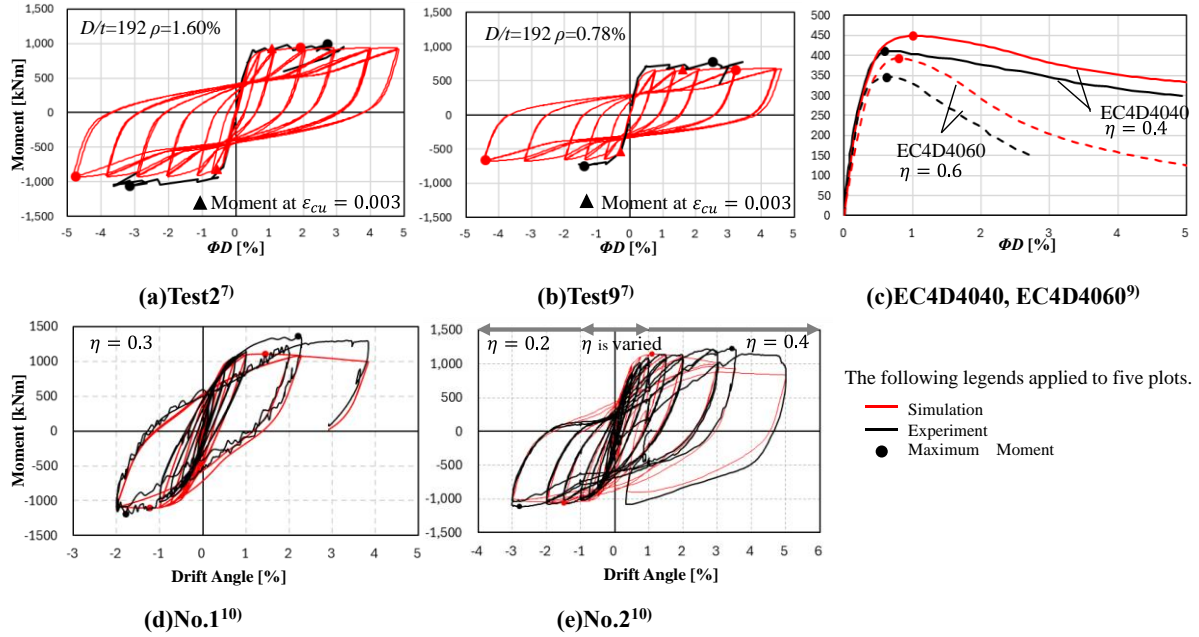


Fig.3 Flexural Moment—Non-dimensional Curvature (or Drift Angle)

また、文献 7) のコンクリート強度は $150 \times 300\text{mm}$ のシリンダー強度に基づいているため、 100×200 シリンダー強度へと式(2)を用いて変換した。(Table 1 中の*3)

$$f'_{cy150} = 0.96f'_{cy100} \quad (2)$$

ここで、 f'_{cy150} は $150 \times 300\text{mm}$ のシリンダー圧縮強度で、 f'_{cy100} は $100 \times 200\text{mm}$ のシリンダー圧縮強度である。

Fig.1 に解析で用いた各材料の応力-ひずみ関係を示す。コンクリートは崎野ら⁹⁾の拘束コンクリートモデルで、式(3)~(7)により表される。無拘束コンクリートと比べて最大圧縮強度が上昇し、圧縮強度時ひずみ以降の強度低下が小さい。

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{VX+(W-1)X^2}{1+(V-2)X+W^2} \cdot f'_{cc} \quad (3)$$

$$(X = \varepsilon_{c0}/\varepsilon'_{cc}, V = E_c \cdot \varepsilon'_{cc}/f'_{cc})$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = K = \left(1 + 4.1 \frac{f_l}{f'_c}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = \begin{cases} 1.0 + 4.7(K-1) & K \leq 1.5 \\ 3.4 + 20(K-1) & K > 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c0} = 0.94f'_c{}^{\frac{1}{4}} \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$f_l = \left(\frac{2t}{D-2t}\right) \cdot \alpha_{\theta} f_{ys} \quad (7)$$

ここで、 ε_{c0} は無拘束コンクリートの圧縮強度時ひずみ、 f'_{cc} 、 ε'_{cc} は拘束コンクリートの圧縮度および圧縮強度時ひずみ、 t は鋼管厚、 D は杭径、 α_{θ} は鋼管の円周方向の応力と鋼材の降伏応力の比、 f_{ys} は鋼管の降伏応力である。

鋼管は Subedi ら⁶⁾が提案した座屈による耐力低下を考慮したモデルで、式(8)~(11)により表される。径厚比を考慮したひずみ λ で応力を降下させて座屈を模擬したモ

Table 2 Comparison of Experiment and Simulation Results⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾

(a) Maximum Flexural Moment

	Experiment [kNm]		Simulation [kNm]		Exp./Sim.[-]	
	+	-	+	-	+	-
Test2	988	1046	974	-	1.01	1.07
Test3	1163	1212	1156	-	1.00	1.04
Test7	555	705	610	-	0.90	1.15
Test8	470	521	485	-	0.96	1.07
Test9	778	747	767	-	1.01	0.97
Test12	1338	1367	1320	-	1.01	1.03
No.1	1354	1192	1103	1108	1.22	1.07
No.2	1224	1116	1143	1057	1.07	1.05
EC4D4040	409.8	-	448	-	0.91	-
EC4D4060	346.9	-	392	-	0.88	-

+: Positive Loading Side -: Negative Loading Side

(b) Non-dimensional Curvature (or Drift Angle) at Maximum Flexural Moment

	Experiment[%]		Simulation[%]		Exp./Sim.[-]	
	+	-	+	-	+	-
Test2	2.7	3.6	3.2	-	0.84	0.75
Test3	3.1	3.9	3.1	-	1.0	1.25
Test7	2.1	3.42	2.9	-	0.74	1.17
Test8	1.7	2.9	2.9	-	0.58	1.00
Test9	2.5	1.3	3.2	-	0.78	0.40
Test12	2.4	2.8	2.5	-	0.96	1.12
No.1	2.2	1.7	1.4	1.2	1.69	1.38
No.2	3.4	2.7	1.2	1.6	2.83	1.68
EC4D4040	0.67	-	1.0	-	0.66	-
EC4D4060	0.70	-	0.80	-	0.87	-

デルである。鉄筋は降伏強度を折れ点に持つバイリニア型の応力-ひずみ関係である。

$$\varepsilon_{lb} = (0.2139\lambda^{-1.413}) \cdot \frac{f_{ys}}{E_s} \quad (8)$$

$$\tau_{lb} = -0.04\lambda^{0.48} + 0.003 \quad (9)$$

$$f_{rs} = 0.35f_{ys} \left[\ln \left(\frac{2t}{D-2t} \frac{f_{ys}}{f'_c} \right) + 3 \right] \geq 0.20f_{ys} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{D}{t} \cdot \frac{f_{ys}}{E_s} \quad (11)$$

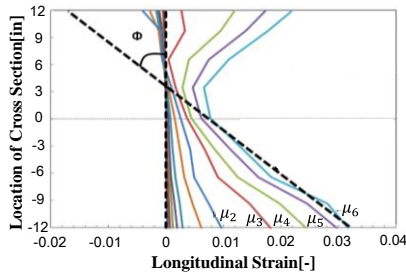
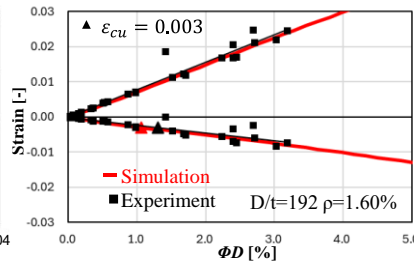
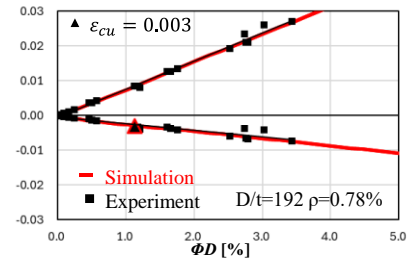


Fig.4 Axial Strain Distribution in Experiment⁸⁾



(a) Test2



(b) Test9

Fig.5 Axial Strain—Non-dimensional Curvature Relations

ここで f_{ys} は鋼管の降伏強度、 t は鋼管厚、 D は杭径、 f'_c はコンクリート圧縮強度である。

3. 解析モデルの妥当性の検証

3.1 曲げモーメント-部材角関係

Table 2 に実験と解析から得られた最大耐力および最大耐力到達時の無次元化曲率（または部材角）の比較を示す。無次元化曲率（以下、 ϕD ）は曲率に杭径 D を乗じたものである。Brown らの実験結果は軸力比 0 のため $P-\delta$ 効果は考慮しないが、Bhusal らと崎野らは実験および解析で $P-\delta$ 効果を考慮した値を示している。

Fig.3(a), (b)に Test2, 9 の曲げモーメント- ϕD 関係を示す。なお、横軸の ϕD は、3.2 節で説明する見かけ上の値、解析はモーメント一定区間の値である。Brown らの実験結果は自重によるたわみを除去した後の値で、解析も実験と同じ状況を模擬した。Table 2 に示す通り最大耐力は Test2~12 の 6 ケースで誤差 7% 以内で捉えることが出来た。また、Fig.3 に示していない 4 ケースも鋼管破断まで曲げモーメント- ϕD 関係を精度よく再現することができた。

Fig.3(c)に崎野らの EC4D4040 と EC4D4060 の曲げモーメント- ϕD 関係を示す。なお、横軸の ϕD は、実験・解析共に杭中央から上下 1.0D の区間の変形から求めた曲率に杭径 D を乗じた値である。曲げモーメント- ϕD 関係の概形を捉えることができたが、解析が実験の曲げモーメントより 1 割程度大きくなった。崎野ら⁹⁾は本稿とほぼ同様のコンクリートと鋼材の応力-ひずみ関係を使用し、曲げ解析を行った。その結果、曲げモーメント耐力の予測値が実験値を本稿と同程度上回ることを報告しており、本稿でも同様の結果が得られたことになる。

Fig.3(d), (e)に No.1, No.2 の曲げモーメント-部材角関係を示す。横軸の部材角は実験と解析共に反曲点水平変位をせん断スパン 3.0D で除したものであり、曲げモーメント-部材角関係の実験結果は $P-\delta$ 効果を考慮した文献 10) を引用したものである。No.1 は一定軸力であるが、

正側荷重と負側荷重で実験耐力が異なっている。そのため、正側と負側の平均値と解析を比較すると、最大耐力の実験/解析は 1.15 となった。No.1, No.2 で正側荷重の部材角 2% 以降の実験と解析の包絡線の対応が悪くなる。履歴曲線は、精度よく再現できたが、部材角が大きいサイクルにおける原点付近のループは実験より膨らんだ。

3.2 鋼管の軸ひずみ-部材角関係

Fig.4 に Brown らが論文で示した、塑性化後の耐震杭断面に起こる軸ひずみ分布を示す。 $\mu 1 \sim \mu 6$ は鉄筋降伏時変位に対する塑性率を示す。このようにして得られた実験結果と、今回の解析のひずみ- ϕD 関係を Fig.5(a),(b) に示す。ただし、同図における圧縮縁ひずみは、平面保持を仮定して、Fig.4 における引張側鋼管最外縁ひずみと試験体中央のひずみを外挿して求めた鋼管圧縮最外縁での計算ひずみである。実験のひずみは解析結果赤線の上に分布しており、解析結果は鋼管破断前まで実験のひずみを精度よく再現できている。図に示していない 4 ケースも、実験結果と解析結果の対応が良かった。

4. パラメトリックスタディ

大径厚比を有する耐震杭に軸力を作用させた既往研究は少ないので、3 章で比較的再現精度が高かった Brown ら試験体について軸力比 η と鉄筋比 ρ を変数とするパラメトリック解析を行い、軸方向縮みと曲げモーメント-

Table 3 Specimen Details

Case	Specimen	Diameter [mm]	Steel Thickness [mm]	D/t	Reinforcing Bar Ratio, ρ [%]	Axial Load Ratio, η	Axial Load [kN]
1	RCFT1	610	3.18	192	1.6	0.1	1545
	RCFT2					0.2	3091
	RCFT3					0.3	4637
	RCFT4					0.4	6183
	RCFT5					0.5	7729
2	RCFT3	610	3.18	192	1.6	0.3	4637
	RCFT6				2.43	0.28	4637

Material details of Test2 are used in simulation.
Axial Load Ratio is defined in the footnote of Table 1.

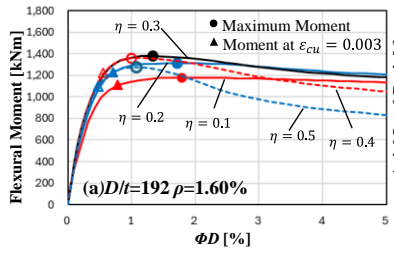


Fig.6 Flexural Moment—Non-dimensional Curvature of case1

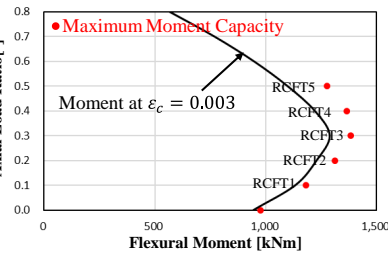


Fig.7 $\eta - M$ Interaction and Simulated Moment Capacities

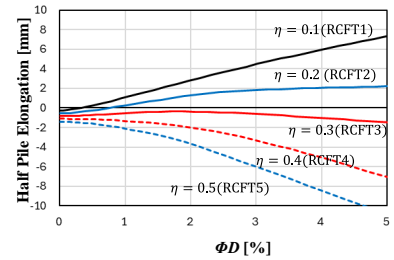


Fig.8 Pile Elongation—Non-dimensional Curvature Relations

Table 4 Comparison of Flexural Moment

Axial Load Ratio	M_{max} [kNm]	$M_{0.3\%}$ [kNm]	$\frac{M_{max}}{M_{0.3\%}}$
0	974	944	1.03
0.1	1180	1133	1.04
0.2	1312	1229	1.07
0.3	1381	1288	1.07
0.4	1364	1221	1.12
0.5	1277	1097	1.16

M_{max} : Maximum Moment
 $M_{0.3\%}$: Moment at $\epsilon_c = 0.003$

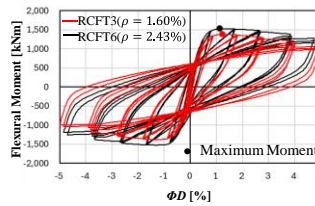


Fig.9 Flexural Moment—Non-dimensional Curvature of case2

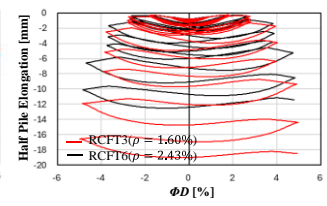


Fig.10 Half Pile Elongation—Non-dimensional Curvature Relations of Case2

ϕD 関係について検討する。Table 3 に解析ケースの諸元をまとめた。Case1 は同一形状の試験体に $\eta = 0.1 \sim 0.5$ の軸力を作用させた。Case2 は鉄筋比 ρ のみが異なる 2 試験体に RCFT3 の $\eta = 0.3$ の軸力を作用させた。材料諸元は 2.3 の Test2 の値を使用した。

4.1 軸力比の影響

軸力比 η を変数とした Table 3 の Case1 について、単調軸荷に対する曲げモーメント— ϕD 関係を求め、Fig.6 に示した。図中の丸印は最大曲げモーメント耐力 (M_{max})、三角印はコンクリートの曲げ圧縮縁ひずみ ϵ_c が 0.3% 時の曲げモーメント ($M_{0.3\%}$) である。なお $\epsilon_c = 0.3\%$ は AIJ 指針における耐震杭の安全限界状態の曲げモーメントに対応する圧縮縁限界ひずみを用いた。

初期剛性は $\eta = 0.3$ のときに最大となり、 $\eta = 0.5$ のときに最も小さく $\eta = 0.3$ の初期剛性の -14% となった。但し、初期剛性は $M_{max}/3$ 点と原点の割線剛性である。

曲げモーメント耐力は、 $\eta = 0.1$ から 0.3 とするにしたがって増加し、 $\eta = 0.3$ から 0.5 とするにしたがって減少した。この M_{max} と $M_{0.3\%}$ を比較したものが Fig.7 および Table 4 である。Table 4 から $M_{max}/M_{0.3\%}$ は η が大きくなるにしたがって大きくなるのがわかっている。つまり、2.3 節の拘束コンクリートモデルを用いた場合、Case1 の試験体 5 体においては、 $\epsilon_c = 0.3\%$ 時の耐力を用いると実験結果を安全側に評価できた。

また、ピーク後の曲げモーメントの低下勾配は、 η が大きくなるほど負勾配が大きくなり、曲げモーメント耐力

がより早く劣化する。但し、 $\eta = 0.5$ であっても、RC 杭や既製杭のような脆性的な破壊にはならないと考えられる。

Fig.8 に杭の軸伸び— ϕD 関係を示す。軸伸びは、試験体全長の伸びを指す。 $\eta = 0.1, 0.2$ は単調伸び、 $\eta = 0.4, 0.5$ は単調縮み、 $\eta = 0.3$ は $\phi D = 2\%$ を境に伸びから縮みへと変化した。

4.2 鉄筋比の影響

Fig.9 に鉄筋比 ρ を変数とした Table 3 の Case2 について、同一軸力を作用させたときの曲げモーメント— ϕD 履歴曲線を示す。軸荷はサイクルを 3 回繰り返して正負交番軸荷とした。 ρ によらず初期剛性はほぼ変わらないが、 ρ が大きいほどピークおよびその後の曲げモーメントが 1 割程度大きくなった。また、後述する Fig.10 の RCFT3 の繰り返し軸荷における縮み量は Fig.8 の単調軸荷の縮み量よりも $\phi D = 2.5\%$ 以降急激に大きくなる。そのため、軸方向縮み量を単調軸荷で予測する場合、繰り返しによる縮みが考慮されていないため、過少に予測していることに注意する必要がある。

Fig.10 に 3 回繰り返して正負交番軸荷による軸方向伸び— ϕD 関係を示す。 ρ によらず $\phi D = 1.5\%$ までは初期の状態から伸びる方向へ変形が進んだが、その後の繰り返しサイクルで伸びから縮みへと変化した。縮みが $\phi D = 4\%$ 以降急速に進展した。 $\phi D = 5\%$ 終了時には RCFT6 が 12mm、RCFT3 が 19mm 縮んだ。いずれの試験体も ϕD が大きくなるにしたがって縮みが進展したが、 ρ が大きいほど縮み

量は小さくなった。

さらに軸力比を一定にした場合の単調載荷の解析を行い、曲げモーメント— ϕD 関係に同様の傾向があることを確認した。しかし、軸方向縮みは ρ が1.60%から2.43%へ増加すると軸力が4637kNから4964kNへ増加する。このため、RCFT3よりRCFT6の鉄筋比増加による軸力の増加分が大きく、RCFT6の方が軸縮みが早い傾向がみられた。

5. まとめ

本研究では大径厚比を有するコンクリート充填鋼管試験体10体を対象に曲げモーメント—部材角関係を再現できる解析モデルの検討を行った。その後、4点支持載荷モデルの、6ケースについて曲げせん断解析を行い、軸力比および鉄筋比の軸方向変形への影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- Brownら、Bhusalら、崎野らの実験を対象に曲げモーメント—無次元化曲率(部材角)関係を再現した。Brownらの試験体では鋼管破断まで曲げモーメント—無次元化曲率関係を精度よく再現することが出来た。Bhusalらの試験体では部材角2%程度まで曲げモーメント—部材角関係を精度よく再現することが出来た。崎野らの試験体では曲げモーメント—無次元化曲率関係の外形を捉えることはできたが、耐力が1割程度大きくなった。
- 軸力比を変数としたパラメトリック解析より、軸力比と曲げモーメント耐力の関係は軸力比0.3で増加減少傾向が転じる。AIJ指針のコンクリート曲げ圧縮縁ひずみ $\varepsilon_c = 0.3\%$ に基づく安全余裕度($M_{max}/M_{0.3\%}$)は軸力比が大きいかほど大きくなる傾向が見られた。
- 鉄筋比が大きくなるほど曲げモーメント耐力は大きくなり、同一軸力下では繰り返し載荷による軸縮みが抑制される効果が確認された。

謝辞

本研究は、耐震杭協会の補助を受けました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 日本建築学会東北支部：2011年東日本大震災災害調査報告，pp.38-43, 2013.5
- 2) 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告，pp.318-319, 2018
- 3) 金子治：大地震に対する耐震設計におけるコンクリート杭の適用条件に関する実態調査，日本建築学会技術報告書集，第23，第53号，pp87-92, 2017.2
- 4) 日本建築学会：基礎構造部材の強度と変形性能，pp.101-127, 2022.3
- 5) 崎野健治，蜷川利彦，中原浩之，山口達也：高強度材料を用いたコンクリート充填円形鋼管柱の単調曲げ性状，日本建築学会構造工学論文集，Vol.49B，pp.465-472, 2003.3
- 6) Subedi, N.: Structural behavior of cast-in-place concrete-filled steel tube piles Doctoral dissertation, Tokyo Institute of Technology, 2022
- 7) Brown, N.K., Kowalsky, M.J. and Naum J.M.: Impact of D/t on seismic behavior of reinforced concrete filled steel tubes, Journal of Constructional Steel Research, pp.111-123 Volume 107, 2015.4
- 8) Bhusal, S et al.: Experimental investigation on flexural behavior of cast-in-place concrete-filled steel tube piles with large D/t under large axial loads, AIJ 大会学術講演梗概集，pp.513-514, 2023.9
- 9) 崎野健治，蜷川利彦，松本勝憲：コンクリート充填円形鋼管柱の曲げ性状に関する研究，JCI 年次論文報告集，Vol.18, No.2, pp.1289-1294, 1996
- 10) 黒田黎奈，河野進，今井康幸，谷昌典：場所打ち鋼管コンクリート杭の曲げ性能についての解析的研究，AIJ 大会学術講演梗概集，pp.405-406, 2024.8