

(53) 単純圧縮力を受ける角形 CFT 短柱の 軸力－軸歪関係に関する研究

名取 良純¹・土井 希祐²

¹正会員 新潟大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2
の町 8 0 5 0)

E-mail: f12e046e@mail.cc.niigata-u.ac.jp

²正会員 新潟大学工学部建設学科 教授 博士(工学) (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町
8 0 5 0)

E-mail: mare@cc.niigata-u.ac.jp

単純圧縮力を受ける角形 CFT 短柱の実験資料を収集し、断面寸法、幅厚比、材料特性、および軸力－軸歪関係に関するデータベースを構築した。コンファインドコンクリートの応力度－歪度関係モデルに NewRC 式を用いて角形 CFT 短柱の軸力－軸歪関係を算定し、構築したデータベースに基づいて、その妥当性を示した。さらに、算定した軸力－軸歪関係を用いて、単純圧縮力を受ける CFT 短柱の初期剛性、最大耐力、およびエネルギー吸収性能について考察した。

Keywords: CFT short column, NewRC equation, axial force - axial strain relationship, maximum strength, initial stiffness, deformation performance

1. 研究背景および目的

(1) 研究背景

鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)構造やコンクリート充填鋼管(CFT)構造などの鋼コンクリート合成構造は、一般的に中高層建築物に用いられている。

鋼とコンクリートによる合成構造は、鉄骨(S)構造、鉄筋コンクリート(RC)構造に続いて発展してきた構造である。この構造は鋼とコンクリートの二つの材料の短所を相互に補い、長所を生かした合理的な構造で、耐力や変形性能に優れていることから、今後さらに普及・発展が期待される。CFT 構造は、鋼管の内部にコンクリートを充填した構造である。CFT 構造は鋼管と充填コンクリートの双方の拘束効果により、耐力および変形性能に優れている。しかし、以下に挙げる理由により、普及が遅れていた。

- ・コンクリートの充填が難しい
- ・鋼材が断面の最外縁にあるため、耐火性能が疑問視された
- ・被りコンクリートがないこと、鉄筋を配筋していないこと等から、法的に SRC 構造とは異なる特別な評価を受けなければならない。

近年、CFT 部材の構造特性に対する研究が進み、充填性の良い高強度コンクリートの開発、信頼できる充填法

の開発といった技術の進歩も著しい。

(2) 研究目的

CFT 部材については、現在まで数多くの研究が行われてきており、優れた耐力・変形性能を有することが明らかにされてきている。一方、学会規準式の適応範囲を超える高強度材料を使用した CFT 部材の採用事例も多くなっている。CFT 部材の最大耐力については学会指針式¹⁾により概ね評価することができているものの、高強度材料を使用した場合は安全余裕度が低くなる傾向にある。また、変形性能の評価式は確立されているとは言えず、実験式をベースに評価されているのが現状である。

既報^{2,3)}において、単純圧縮力を受ける CFT 短柱の実験データを収集し、試験体の形状、寸法、幅厚比、使用鋼材およびコンクリートの力学的特性、ならびに軸力－軸歪関係に関するデータベースを作成し、CFT 短柱の強度と変形性能に関する研究を行った。そこでは、NewRC 式によりコンファインドコンクリートの σ - ε 関係をモデル化し、角形 CFT 短柱の軸力－軸歪関係を算定しているが、最大強度以降の大歪域において、軸力の計算結果が実験結果を下回ることが多いことが明らかにされている。この要因として、鋼管のコンクリートコンファインド効果および歪硬化の過小評価が考えられる。本研究では、大歪形域における鋼管のコンクリートコンファイン

ド効果および歪硬化に着目し、角形 CFT 短柱の軸力-軸歪関係の再検討を行うことを目的としている。

2. データベース

(1) 対象文献

本研究では、建築学会大会梗概集 1996～2003 年、日本コンクリート工学協会 2006 年から、単純圧縮力を受ける CFT 短柱試験体に関する実験を行っている 11 文献を抽出した^{4)～14)}。

(2) 対象試験体および諸元分布

この 11 文献から、平押し载荷により実験が行われた角形試験体 80 本の試験体データを収集した。収集したデータは、断面幅、鋼管厚さ、鋼材およびコンクリート強度、軸力-軸歪関係とした。なお変形性能の検討を行うため、軸歪 3.0%以上までの軸力-軸歪関係のグラフがあるものを研究対象とした。

表-1 に各文献の角形試験体の試験体数と諸元の範囲を示す。また図-1～図-4 に諸元分布を示す。

表-1 試験体諸元

文献	本数	断面幅	幅厚比	鋼材降伏強度(N/mm ²)	コンクリート強度(N/mm ²)	基準化幅厚比
4	6	150	17-65	340-430	46-60	0.74-2.65
5	32	120-323	22-50	260-840	25-80	1.01-2.75
6	5	250	15-30	440-470	37-76	0.74-1.01
7	8	150	17-34	290-550	25-70	0.86-1.49
8	9	180-210	19-47	270-830	31-91	1.22-1.73
9	3	100-300	46-50	300-400	25-30	1.77-2.16
10	3	100-300	46-50	300-400	52-61	1.75-2.17
11	3	100	16-32	300-380	38	0.65-1.25
12	2	200-400	16-32	320-330	27-30	1.77-1.83
13	7	100-400	32-47	300-460	25-61	0.80-1.81
14	2	100	32	380	25	1.38
全体	80	100-400	15-65	260-840	25-91	0.74-2.75

図-1 基準化幅厚比別試験体数

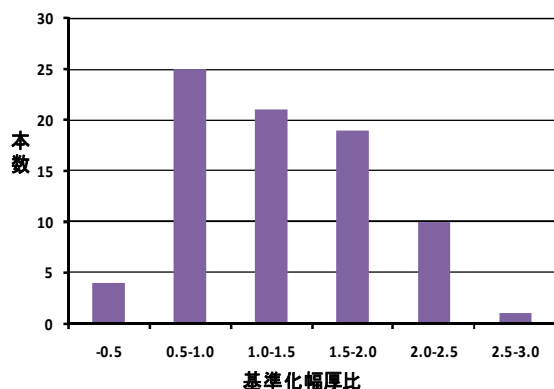


図-2 断面幅別試験体数

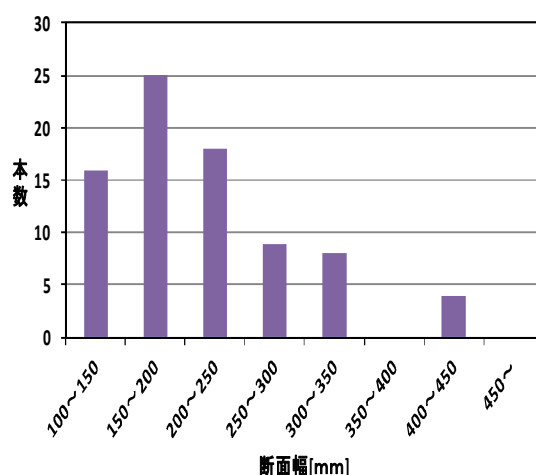


図-3 鋼材降伏強度別試験体数

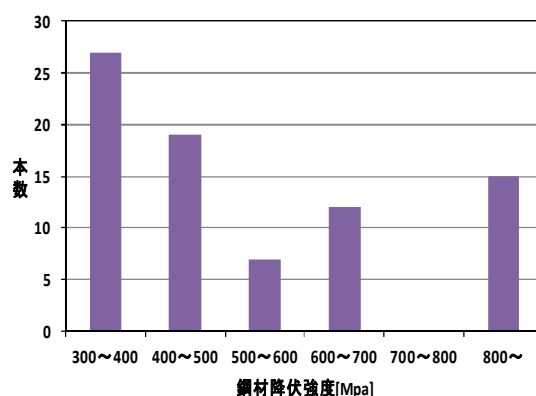
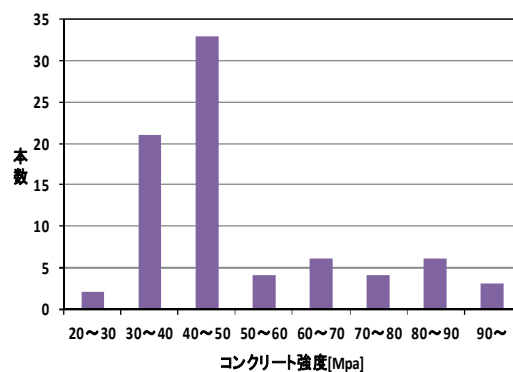


図-4 コンクリート強度別試験体



3. 研究方法

(1) 軸力-軸歪関係の算定

本研究では、CFT 短柱の軸力-軸歪関係を、鋼管およびコンクリートの各々の軸力-軸歪関係を累加して算定した。その算定式を式 (1) に示す。

$$N(\varepsilon) = {}_cN_{cB}(\varepsilon) + {}_sN_s(\varepsilon) \quad (1)$$

コンクリート部分の軸力-軸歪関係は式 (2) より算定した. また, コンクリートの σ - ε 関係は, 鋼管によるコンファインド効果を考慮できる NewRC 式により式 (3) ~ (6) に示すようにモデル化した¹⁵⁾.

$${}_c N_{cB}(\varepsilon) = {}_c A \cdot {}_c \sigma(\varepsilon) \quad (2)$$

$${}_c \sigma(\varepsilon) = \frac{A \cdot X + (D-1) \cdot X^2}{1 + (A-2) \cdot X + D \cdot X^2} \times {}_c \sigma_{cB} \quad (3)$$

$${}_c \sigma_{cB} = \sigma_P + \kappa \cdot \rho_h \cdot \sigma_{hy} \quad (4)$$

$$\sigma_P = \mu \cdot {}_c \sigma_B = 1.0 \cdot {}_c \sigma_B \quad (5)$$

$$\kappa = \kappa_S \cdot \left(\frac{d''}{C} \right) \cdot \left(1 - \frac{S}{2D_c} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \kappa_S &= 11.5, & S &= 0 \\ X &= \frac{\varepsilon_c}{{}_c \varepsilon_{co}}, & A &= \frac{E_c \cdot \varepsilon_{co}}{{}_c \varepsilon_{cB}} \end{aligned}$$

鋼管の σ - ε 関係は完全弾塑性であると仮定し, その軸力-軸歪関係は式(7)により算定した. この際, 鋼管の二重使いを避けるために, 鋼管断面積からコンファインド効果に寄与する部分の断面積を控除した断面積を使用する. なお, CFT 短柱の場合, 鋼管に局部座屈が発生した後, 応力の再配分が生じ, コンクリートの軸力負担率が高くなると考えられることから, 局部座屈による鋼管の耐力低下の影響は考慮していない.

$${}_s N_c(\varepsilon) = {}_s A \cdot (1 - \alpha) \cdot {}_s \sigma(\varepsilon) \quad (7)$$

式 (1) ~ (7) において,

${}_c A$: コンクリート断面積

${}_s A$: 鋼材断面積

ρ_h : 横補強材体積比

α : 分担率

σ : 横補強材降伏応力

S : 横補強材間隔

d'' : 鋼管厚

C, D_c : 鋼管内幅

${}_c \sigma_{cB}$: コンファインドコンクリートの強度

${}_c \sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度

ε_{co} : コンファインドコンクリート強度時歪

ε_c : コンクリートの軸方向歪

E_c : コンクリートの始源剛性

(2) 鋼管のコンファインド効果の検討

角形 CFT 短柱は, 最大強度以降の大変形域における強度の計算結果が実験結果を下回ることが多いことが明ら

かにされている²³⁾. この要因として, 鋼管のコンクリートコンファインド効果, および歪硬化の過小評価が考えられる. 大変形域における鋼管のコンクリートコンファインド効果の検討をするにあたって NewRC 式の式(6)における κ_S を $\kappa_S' = \beta \times \kappa_S$ ($\beta = 2.0$) とし最大強度, 初期剛性, エネルギー吸収性能の評価精度の確認を行った. しかし, 鋼管のコンファインド効果だけでは最大強度以降の大歪域における耐力上昇を考慮に入れることができない (図-5 参照).

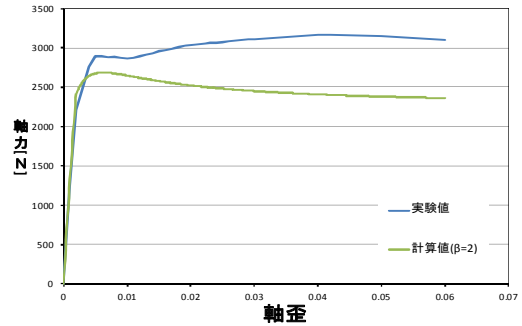


図-5 計算値($\beta=2$)と実験値との比較

(3) 歪硬化の検討

鋼管のコンクリートコンファインド効果について再検討を行った結果, コンファインド効果のみでは角形 CFT 短柱の大歪域における耐力の上昇を適切に評価するには不十分であるという結果が得られた. そこで, コンクリートコンファインド効果に加え, 鋼管の歪硬化を考慮に入れることとした.

本研究において検討に用いたデータベースの試験体において, 鋼管の断面幅は 150~250mm 程度のものが多いこと, 使用鋼材は STKR400 と想定されることから, 類似の鋼管の引張試験事例および鋼管製作過程における加工硬化を考慮して σ - ε 関係を以下の様に設定した. 鋼管の σ - ε 関係に歪度 0.2%の位置からのオフセット線 (式 (8)) を設定し, 降伏応力度線とオフセット線の交点より新たに鋼管の歪硬化を考慮した応力度線 (式 (9)) を設定した (図-6 参照).

$$\sigma_o = E_s \cdot (\varepsilon + 0.002) \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} {}_s \sigma(\varepsilon) &= E_s \cdot \varepsilon, & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ {}_s \sigma(\varepsilon) &= \sigma_y, & (\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_y + 0.002) \\ {}_s \sigma(\varepsilon) &= \sigma_y + 0.01E_s \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y - 0.002), & (\varepsilon_y + 0.002 < \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに,

E_s : 鋼材ヤング係数

ε : 軸歪度

ε_y : 降伏歪度

新たに算定した $\sigma(\varepsilon)$ を用いて角形 CFT 短柱の軸力-軸歪度関係 (式(1)) を算定する. 図-7 に軸力-軸歪関係算定例を示す. 歪硬化を考慮に入れることにより大歪域にける耐力上昇を考慮に入れ, κ_s の修正のみの計算値を上回り, より実験値に近い値をとることができる.

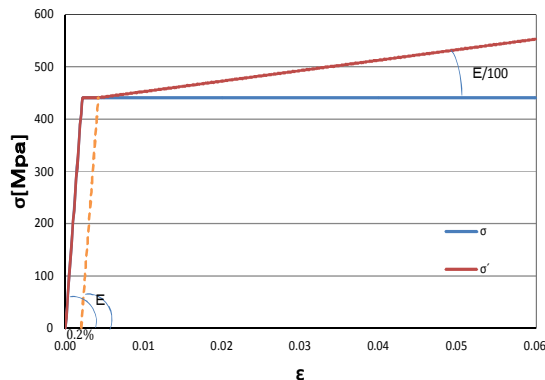


図-6 鋼管の歪硬化モデル

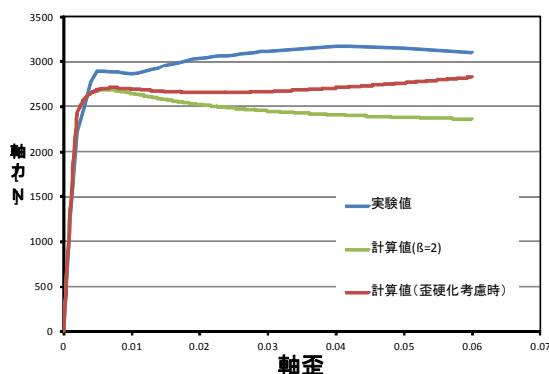


図-7 軸力-軸歪関係算定例

(4) 分担率の検討

コンクリートのコンファインド効果に寄与する鋼管断面積の割合を分担率 α と定義する (式(7)).

各試験体毎に α の値を 0 から 1.0 の範囲において 0.05 刻みで変化させて, 軸力-軸歪関係を算定し, 実験結果と比較する. その中で, 図-8 に示すように, 軸歪 3%までの範囲における計算による軸力-軸歪関係曲線と実験における軸力-軸歪関係曲線の囲む面積 (S1+S2) が最小となる α を適正分担率とする. 適正分担率と基準化幅厚比の関係を図-9 に示す. ばらつきは大きいものの, 適正分担率と基準化幅厚比には正の相関が認められ, 図-9 より以下のような回帰式が求められた.

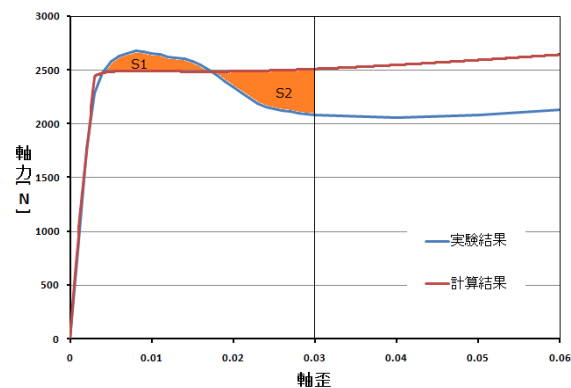


図-8 軸力-軸歪関係の比較

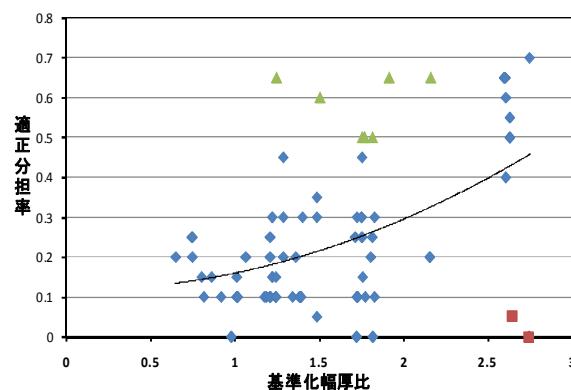
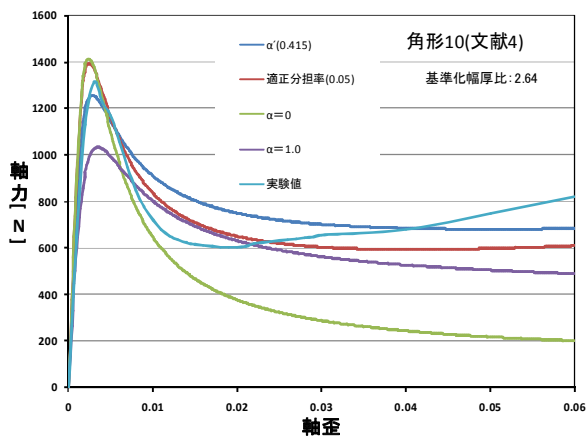


図-9 適正分担率分布及び近似曲線

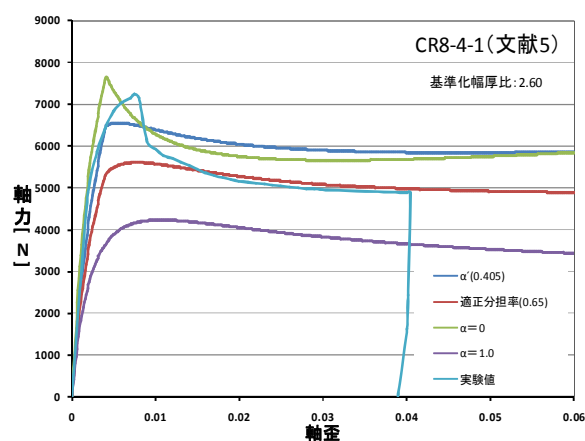
$$\alpha' = 0.0286X^2 + 0.0503X + 0.0815 \quad (10)$$

ここに, X : 基準化幅厚比

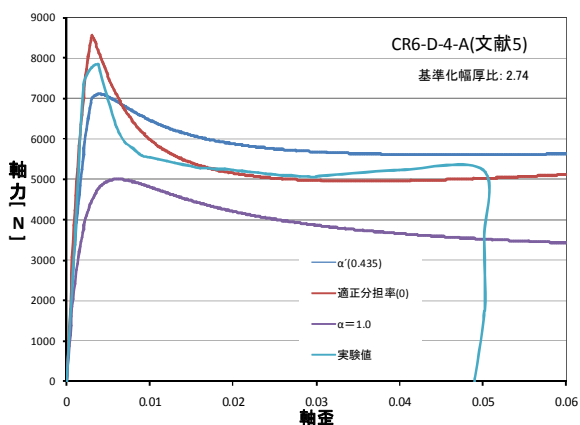
図-10～図-18 に, 回帰曲線付近から離れている試験体について, $\alpha=0$, $\alpha=1.0$, 試験体毎の適正分担率, および式(10)より求めた α' 使用時の軸力-軸歪関係, ならびに実験結果を併せて示す. 角形 CFT 短柱の場合, α の変化による軸力-軸歪関係の計算結果への影響は鋭敏ではない³⁾. 試験体毎の適正分担率が回帰式による分担率 α' より大幅に低い試験体(図-9 中に ■ で示す)についてみると, α' による軸力-軸歪関係と実験結果がほぼ同等の適合度を示している (図-10～図-11 参照). また, 試験体毎の適正分担率が α' より大幅に上回っている試験体(図-9 中に ▲ で示す)については, 適正分担率による計算結果と比較して, α' による計算結果が最大強度付近では実験結果に近くなっている一方, 最大強度以降の大歪域では実験結果を上回ることが多くなっているものの, 概ね一致している (図-12～図-18 参照). よって, この式(10)による α' により分担率を評価してよいと考えられる.



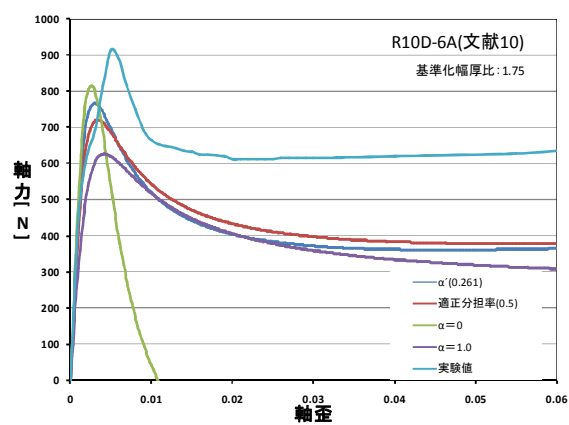
图一10 軸力-軸歪關係 (角形10)



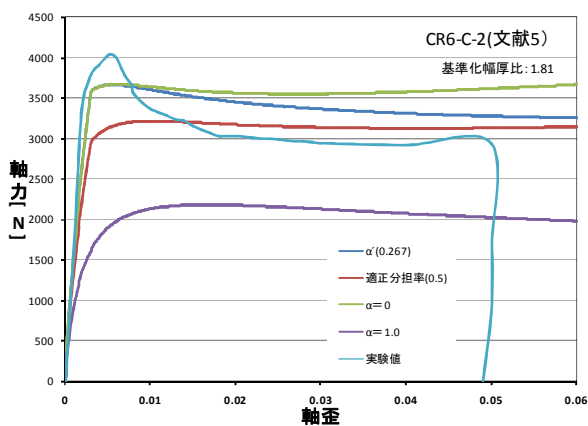
图一13 軸力-軸歪關係 (CR8-4-1)



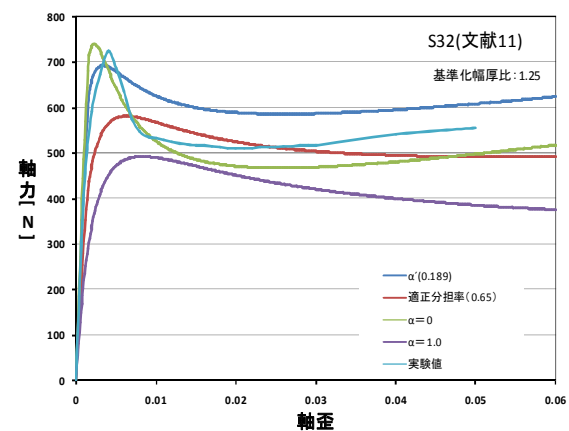
图一11 軸力-軸歪關係 (CR-6-D-4-2)



图一14 軸力-軸歪關係 (R10D-6A)



图一12 軸力-軸歪關係 (CR6-C-2)



图一15 軸力-軸歪關係 (S32)

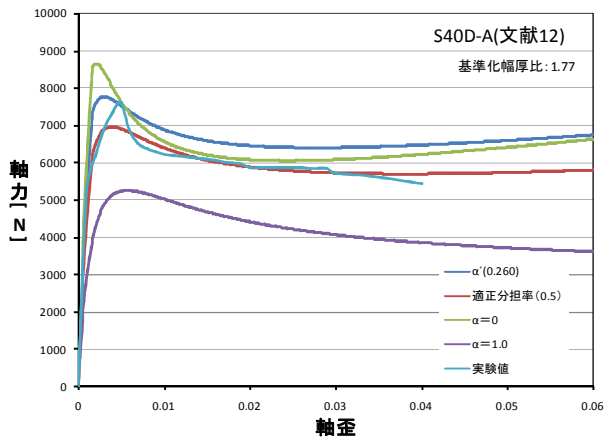


図-16 軸力-軸歪関係 (S40D-A)

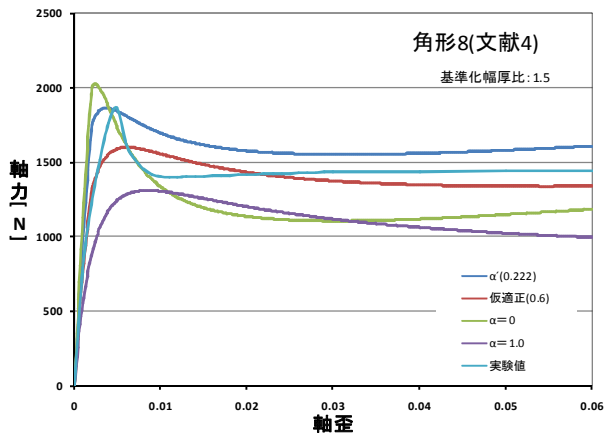


図-17 軸力-軸歪関係 (角形 8)

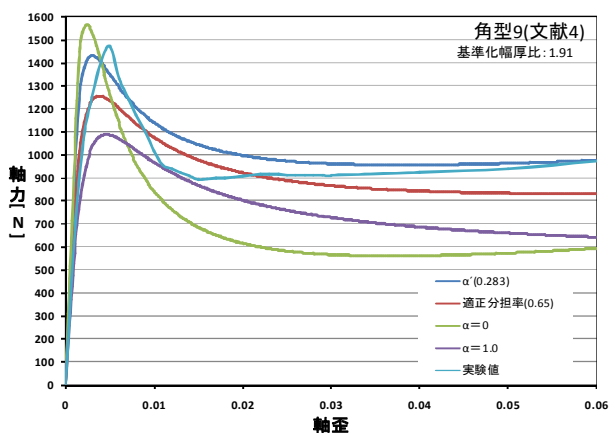


図-18 軸力-軸歪関係 (角形 9)

(5) 最大強度・初期剛性・エネルギー吸収性能の検討

新たに求めた α により, 歪硬化を考慮した CFT 短柱の新たな軸力 - 軸歪関係を算定した. この軸力-軸歪関係に基づいて算定した最大強度, 軸歪 3%までのエネルギー吸収性能, 初期剛性の計算値を実験値と比較した. 表-2 に, 計算値/実験値の平均値および標準偏差を示す. また, 図-19~図-21 に計算値/実験値と基準化幅厚比との関係, 図-22~図-24 に計算値/実験値とコンクリート圧縮強度との関係を各々示す.

最大強度およびエネルギー吸収性能については実験値/計算値が基準化幅厚比, およびコンクリート強度によらずほぼ一定の値となり精度よく評価できているといえる. また, 初期剛性は試験体の大半の実験値/計算値が 1.0 を下回っているものの標準偏差が小さくなっており, 概ね精度よく評価できているといえる.

表-2 各数値の実験値/計算値の平均値・標準偏差

		最大強度	初期剛性	エネルギー吸収性能
歪硬化 非考慮時	平均値	1.051	0.948	1.019
	標準偏差	0.084	0.074	0.125
歪硬化 考慮時	平均値	1.078	0.941	1.059
	標準偏差	0.077	0.137	0.102

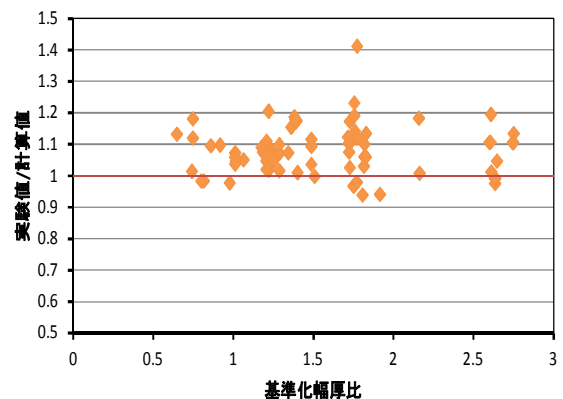


図-19 実験値/計算値(最大強度)

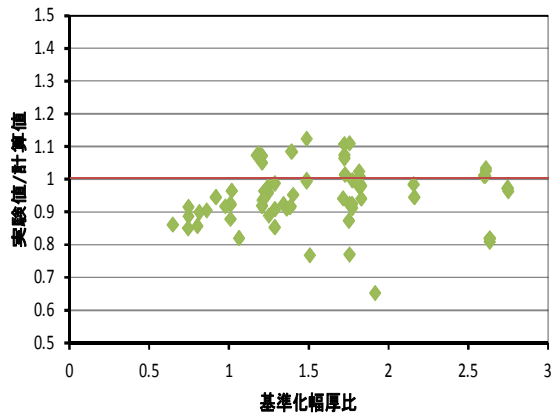


図-20 実験値/計算値(初期剛性)

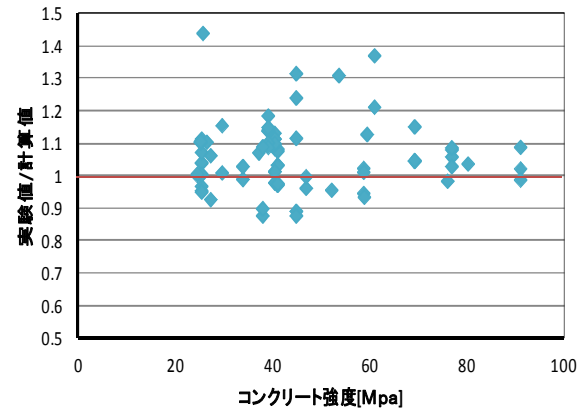


図-23 実験値/計算値(初期剛性)

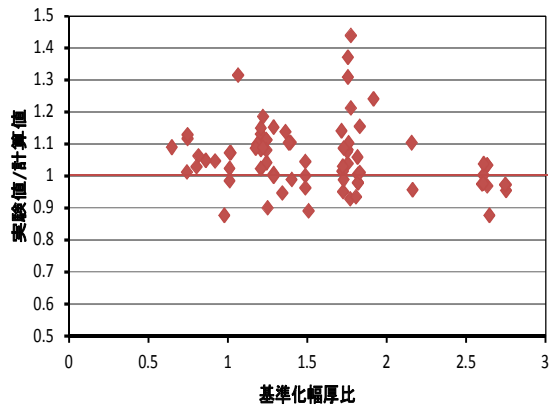


図-21 実験値/計算値(エネルギー吸収性能)

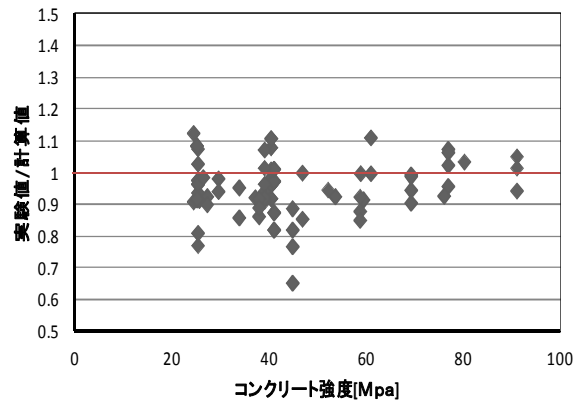


図-24 実験値/計算値(エネルギー吸収性能)

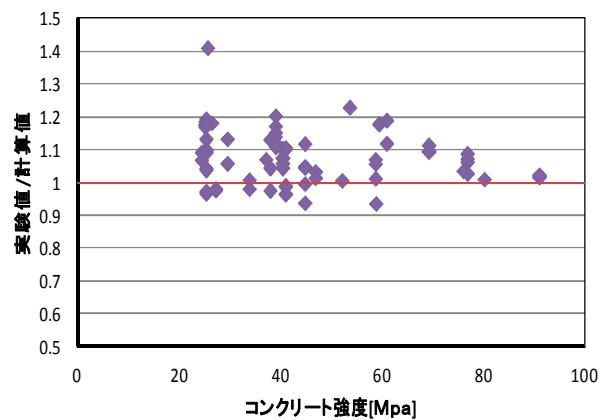


図-22 実験値/計算値(最大強度)

4. まとめ

- ・鋼管によるコンクリートのコンファインド効果のみでは角形CFT短柱の大歪域における耐力の上昇を評価することができない。
- ・鋼管の歪硬化を考慮に入れることにより、大歪域にわたる角形CFT短柱の軸力-軸歪関係を概ね精度良く評価することができる。
- ・鋼管の歪硬化を考慮に入れて算定した軸力-軸歪関係により、角形CFT短柱の最大強度およびエネルギー吸収性能を概ね精度良く評価することができる。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.
- 2) 竹内真平他：単純圧縮力を受ける CFT 柱部材の強度と変形性能に関する研究，平成 23 年度日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集，構造Ⅲ，2011.8
- 3) 竹内真平他：単純圧縮力を受ける CFT 短柱の強度と変形性能に関する研究，第 19 回鋼構造年次論文報告集第 19 巻，pp487-494, 2011.11
- 4) 小森淳他：充填鋼管コンクリート柱の力学的基本特性－中心圧縮および曲げせん断実験，日本建築学会梗概集，構造Ⅱ，pp1595－1596, 1994.9
- 5) 向井昭義他：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究（CFT－2）コンクリート充てん鋼管柱の軸圧縮特性 その 2．角形断面柱の実験結果日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp735－736, 1995.8
- 6) 渡辺英義他：コンクリート充填鋼管柱の構造性能に関する研究（その 4）実験結果及び検討（短柱圧縮実験），日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp773－774, 1995.8
- 7) 高巢幸二他：圧縮力を受けるコンクリート充填角形鋼管の耐力と挙動，日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp779－780, 1995.8
- 8) 馬場武志他：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究（CFT－10）コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状その 2 コンクリート充填鋼管柱の中心圧縮実験，日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp1025-1250, 1999.9
- 9) 山本貴正他：コンクリート充てん鋼管短柱の応力－ひずみ関係に及ぼす寸法効果に関する実験的研究（その 2），日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp1249－1250, 1999.9
- 10) 水野泰則他：コンクリート充てん鋼管短柱の応力－ひずみ関係に及ぼす寸法効果に関する実験的研究（その 5），日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp1165－1166, 2000.9
- 11) 菅田裕樹他：長方形断面 CFT の中心圧縮性状に関する実験的研究 その 1 実験概要，日本建築学会梗概集Ⅲ，pp1103－1104, 2001.9
- 12) 山本貴正他：コンクリート充てん鋼管短柱の応力－ひずみ関係に及ぼす寸法効果に関する実験的研究（その 7），日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp1107－1108, 2001.9
- 13) 山本貴正他：コンクリート充てん鋼管短柱の応力－ひずみ関係に及ぼす寸法効果に関する実験的研究（その 11），日本建築学会梗概集，構造Ⅲ，pp1163－1164, 2003.9
- 14) 山本貴正他：CFT 短柱の軸圧縮特性に及ぼす断面形状の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，pp1297－1302, 2006.
- 15) 平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書 (C-7)コンファインドコンクリートの力学特性に関する資料のとりまとめ 国土開発技術センター 1993.

Study on Axial Force - Axial Strain Relationship of Rectangular CFT Short Column under Compressive Axial Force

Yoshizumi NATORI and Mareyasu DOI

Experimental data of CFT short columns under simple compressive load have been collected, and the database on shape of cross section, size, width-thickness ratio, material properties, and axial force to axial strain relationship of specimens have been constructed. Axial force to axial strain relationship of CFT short column is calculated by use of NewRC equation for modeling stress-strain relationship of confined concrete. It has aimed to study the initial stiffness, the maximum strength, and the energy absorption performance of CFT short columns based on the database.