

(11) 角形断面コンクリート充填鋼管柱における 復元力モデルの履歴法則の検証

中田 裕喜¹・池田 学²・網谷 岳夫³

¹正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: nakata.yuki.71@rtri.or.jp

²正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: ikeda.manabu.14@rtri.or.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京建設プロジェクトマネジメントオフィス 渋谷プロジェクトセンター（〒150-0002 東京都渋谷区渋谷 3 丁目 13 番 11 号 TK ビル 5 階）
E-mail: amitani@jreast.co.jp

角形断面コンクリート充填鋼管（CFT）柱を有する構造物に対し、骨組解析を用いた動的解析法によって精度の良い応答値の算定を行うためには、角形 CFT 柱の荷重変位関係における履歴法則を含めた復元力モデルが必要となる。本研究は、正方形 CFT 柱に対し、履歴法則について検証したものである。一般的な高架橋柱を想定した幅厚比 60 程度、軸力比 0.20 の実験結果に対し、円形 CFT 柱で適用性が確認されている履歴法則により、荷重変位関係の第 2、4 象限における膨らみや除荷剛性、累積エネルギー吸収量の実験結果を概ね再現できることがわかった。また、フーチングからの鋼管基部の伸出しの有無が履歴法則に及ぼす影響は小さいと想定されること、本実験の範囲で幅厚比が 80 程度より大きくなる場合は、鉄筋コンクリート柱で適用性が確認されている履歴法則により、実験結果を再現できること等がわかった。

Key Words: concrete filled tubular steel columns, square section, hysteresis law, pullout

1. はじめに

土木学会複合構造標準示方書（設計編）¹⁾（以下、複合示方書）や鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）²⁾（以下、鉄道標準）では、角形断面を有するコンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱は適用範囲であるものの、変形性能や復元力モデルの算定法の具体については提示されていない。角形 CFT 柱は、円形 CFT 柱よりも梁との施工性がよいことや、ラーメン橋脚のような橋軸方向と橋軸直角方向で地震時の応答値が大きく異なる構造物において、鋼管厚や鋼管幅を自由に設計できるといった利点がある。そのため、設計で角形 CFT 柱を適用できるように、筆者らはこれまで角形 CFT 柱の変形性能に関する実験を行い、損傷レベルの限界値や骨格曲線の算定法を提案した^{3,4)}。一方、構造物に対し、骨組解析を用いた動的解析法⁵⁾によって、精度の良い応答値の算定を行うためには、角形 CFT 柱の荷重変位関係の履歴特性（以下、履歴法則）を含めた復元力モデルが必要となる。

日本建築学会のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針⁶⁾においては、建築物の通常の設計で想定している部材角 1/100 程度以内で適用することを前提に、復元力モデルは **normal tri-linear** としてよいこととしている。ただし、より大きな部材角の場合、**normal tri-linear** では除荷剛性を大きく算定し、エネルギー吸収量を過大に評価する傾向にあることも示している。なお、鉄道ラーメン高架橋柱は、フーチングに埋め込まれた形式が一般的であるが、このフーチングからの鋼管基部の伸出しが履歴法則に及ぼす影響の取り扱いは明らかになっていない。

道路橋示方書⁷⁾においては、CFT はコンクリートが部分的に充填された鋼製橋脚を対象としているが、部分充填されたコンクリートを考慮した履歴法則は示されていない。なお、鉄道ラーメン高架橋等で用いられる CFT 柱はコンクリートの軸方向圧縮力の負担を期待するため、柱全長にわたってコンクリートを充填することが一般的である。

フーチングとの接合にソケット方式や埋込み方式を用いた円形 CFT 柱においては、一般的な径厚比であれば、

鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）部材で用いられる履歴法則⁸⁾や深田モデルにより、履歴法則をモデル化できることがわかっている⁹⁾。

本研究では、埋込み方式を用いた角形CFT柱の正負交番載荷実験³⁾から、復元力モデルにおける履歴法則について検証することを目的とした。

2. 円形 CFT 柱と RC 柱の復元力モデル

図-1に、円形CFT柱で適用性が確認されている復元力モデル（以下、CFTモデル）を示す⁹⁾。比較のために、鉄筋コンクリートの復元力モデル（以下、RCモデル）も併記した。ここで、C点はひび割れ点、Y点は軸方向鉄筋の降伏点、M点は最大耐力点、N点は部材耐力がY点まで低下した点、である。

円形 CFT 柱は、RC 柱の場合と比較して、荷重変位関係の第 2, 4 象限が膨らむ履歴特性となる。この違いを反映するために、RC モデルでは、曲げモーメントが 0 となる点から再載荷時に最大変形点を目指す⁹⁾が、CFT モデルは、過去に Y_b 点を超えている場合には、一度 Y 点

を目指し、変形が 0 の点を超えると最大変形点を目指すようにしている。この違いは、鋼材の影響が反映されたものと考えられるが、SRC 柱の場合でもみられる傾向であるため、CFT モデルは SRC 柱と同様としてよいこととしている。ただし、図中に示す除荷剛性 K_r における剛性低下率 β について、CFT モデルでは 0.3、RC モデルでは 0.4 である。

図中の Y_b 点は、C 点-Y 点を結ぶ線が最大曲げモーメント M_m 付近まで達する点である。骨格曲線における剛性の折れ点を Y_b 点とすることで、部材の曲げモーメントおよびこれに伴うせん断力をより実態に即して評価できることから、文献⁹⁾において設定されたものである。

以降では、角形CFT柱に対し、これらの復元力モデルにおける履歴法則の適用性を検証する。

3. 標準的な角形 CFT 柱に対する検証

(1) 実験の概要³⁾

表-1に試験体の諸元を、図-2に試験体の形状と寸法を示す。いずれも断面幅と断面高さが同一の正方形断面で

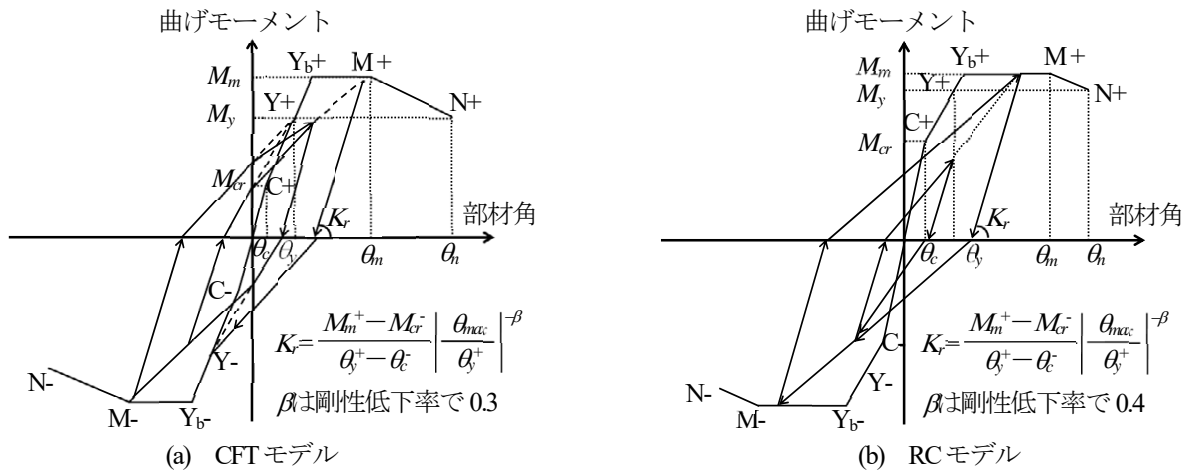


図-1 復元力モデル⁹⁾

表-1 試験体諸元

試験体名称	鋼管寸法 B(mm)		埋込み長 (mm)	板厚 t (mm)	幅厚比 B/t	せん断スパン L_a (mm)	せん断スパン比 L_a/B	材料強度 (N/mm ²)				軸力比 N'/N'_y	幅厚比パラメータ	細長比パラメータ	着目パラメータ
	断面幅	断面高さ						鋼材降伏強度	鋼材降伏ひずみ (μ)	鋼材引張強度	コンクリート圧縮強度				
RA-1	320	320	170	3.0	107	1,080	3.4	426	2,130	542	24.5	0.2	1.59	0.23	B/t
RA-2	320	320	170	4.0	80	1,080	3.4	431	2,155	541	26.1	0.2	1.20	0.23	B/t
RA-3	320	320	170	6.0	53	1,080	3.4	437	2,185	535	24.5	0.2	0.81	0.24	基本試験体
RA-4	320	320	170	8.0	40	1,080	3.4	401	2,005	556	24.4	0.2	0.58	0.24	B/t
RB-1	320	320	170	6.0	53	1,080	3.4	387	1,935	539	26.5	0.0	0.76	0.23	N'/N'_y
RB-2	320	320	170	6.0	53	1,080	3.4	437	2,185	535	27.1	0.3	0.81	0.24	N'/N'_y
K-1	360	360	581	6.0	60	1,080	3.0	434	2,141	538	20.2	0.2	0.90	0.21	基本試験体
K-2	360	360	581	6.0	60	1,800	5.0	434	2,141	538	27.2	0.2	0.90	0.35	L_a/B
K-3	360	360	581	12.0	30	1,080	3.0	377	1,999	554	22.3	0.2	0.43	0.21	B/t
K-4	360	360	581	6.0	60	2,300	6.4	458	2,328	596	25.2	0.2	0.93	0.46	L_a/B
K-5	360	360	581	4.5	80	2,300	6.4	411	2,143	557	26.3	0.2	1.20	0.44	$B/t, L_a/B$
K-6	360	360	581	6.0	60	1,080	3.0	389	1,743	565	26.6	0.4	0.81	0.21	N'/N'_y
K-7	360	360	701	6.0	60	1,080	3.0	496	2,420	607	55.8	0.2	0.95	0.25	鋼,コン強度
K-8	360	360	701	4.5	80	1,080	3.0	433	2,082	583	30.7	0.2	1.18	0.21	B/t

ある。

RA および RB シリーズは、RA-3 を基本試験体として、幅厚比 B/t (RA-1, 2, 4) と軸力比 N/N_y (RB-1, 2) をパラメータとしている。これらの試験体 (図-2(a)) は、鋼管基部を底鋼板に直接溶接してリブで補強した構造とし、角形鋼管は平板を曲げ加工して溝型断面とした後、ウェブ面中央を閉合している。すなわち、鋼管基部の伸出しが無い試験体である。

Kシリーズの試験体 (図-2(b)) は、K-1を基本試験体として、 B/t (K-3, 5, 8) と N/N_y (K-6), せん断スパン比 L_d/B (K-2, 4, 5), 鋼管の引張強度 f_t およびコンクリートの圧縮強度 f_{ca} (K-7) をパラメータとしている。いずれも鋼管をコンクリートのフーチング内に埋込み、底鋼板に4辺を完全溶込み溶接により接合したものである。すなわち、鋼管基部の伸出しを有する試験体である。

なお、鋼管部分の荷重分担率 $\alpha (=N_{sp}/(N_{sp}+N_q))$, N_{sp} : 鋼管部分の分担軸力, N_q : 充填コンクリートの分担軸力) について、作用軸力を鋼管および充填コンクリートそれぞれの部分で均衡して分担させる観点から、 α を 0.2 ~ 0.9 とすることとしている¹⁾²⁾。本試験体では、 B/t の小さい RA-1, K-8 はそれぞれ 0.14, 0.19, その他は 0.20 ~ 0.69 となっており、RA-1, K-8 は α が適用範囲外であるこ

とに留意する必要がある。

荷重方法は、鉛直方向に一定軸力を与えた状態で、せん断スパンの位置にて、水平方向に正負交番荷重を行った。水平荷重では、圧縮側または引張側の鋼管のひずみが、表-1 に示す降伏ひずみに達したときの水平変位 δ_y を基準とし、 $1\delta_y, 2\delta_y, \dots, \pm n\delta_y$ (n は整数) で各サイクル3回繰返し荷重を行った。RA・RB シリーズは、最大荷重に到達してから荷重が低下し始め、降伏荷重以下となるまで実施した。K シリーズは、鋼管にき裂が発生し、荷重が繰返しに伴い大きく低下した時点で荷重を終了した。

(2) 基本試験体に対する検証

RA-3 および K-1 に対し、復元力モデルの履歴法則の検証を行う。図-3, 4 に、荷重変位関係と累積エネルギー吸収量の実験結果と CFT モデルの履歴法則の計算値の比較を示す。履歴法則の検証が目的であるため、骨格曲線や荷重の折り返し点は実験結果と一致させた。また、文献³⁾に従い、鋼管降伏後の折れ曲がり点 (Y_b 点) を考慮した。なお、鋼管のき裂の発生以降においては、履歴が不安定となり、また設計上許容できる損傷状況ではないため、検証から除外することを基本とした。実験値および計算値ともに、エネルギー吸収量は、各 δ_y における荷

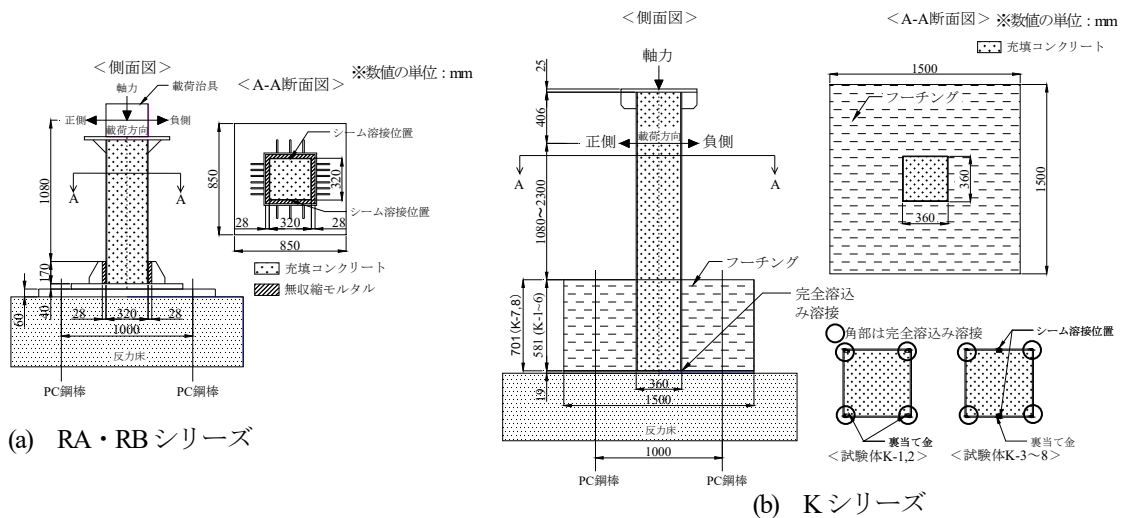


図-2 試験体の形状と寸法

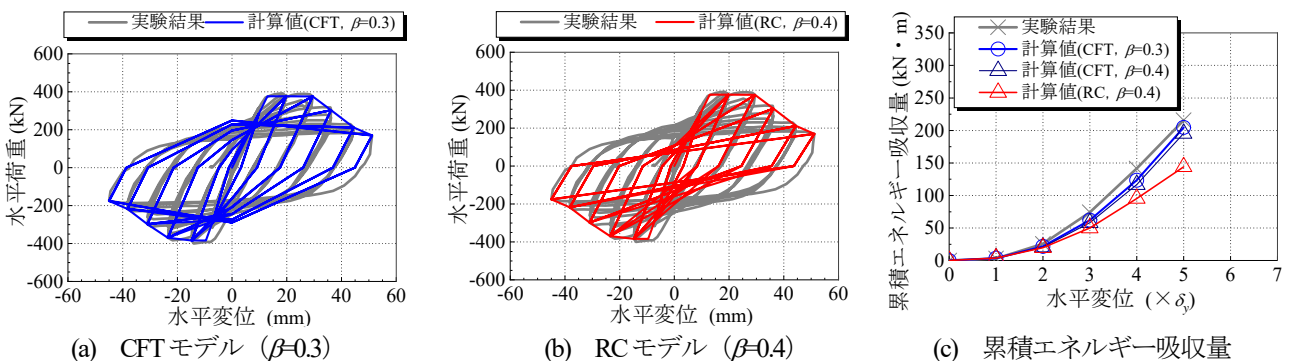


図-3 RA-3 に対する履歴法則の適用性の検証

重変位関係のループで囲まれる面積である。

RA-3とK-1の B/t はそれぞれ53, 60, N/N_y は0.20であるが, RCモデルの履歴法則では, 実験の荷重変位関係の第2, 4象限における膨らみを再現できていない。一方, 円形CFT柱で適用性が検証されているCFTモデルの履歴法則では, 第2, 4象限における膨らみを良好に再現できている。

累積エネルギー吸収量について, いずれの試験体も, RCモデルの計算値では, 実験結果を過少に算定する結果となった。CFTモデルの計算値では, 特にRA-3の水平変位が大きい場合に, 算定精度が向上している。なお, 剛性低下率 β を0.4と0.3とした場合のCFTモデルの結果を示したが, β が累積エネルギー吸収量に及ぼす感度は小さく, 角形(正方形)CFT柱であっても, $\beta=0.3$ とすることで, 除荷剛性や累積エネルギー吸収量を概ね再現できると考えられる。

RA-3とK-1は, 埋込み部以外での諸元がやや異なるた

め, 厳密な比較は困難であるものの, 累積エネルギー吸収量の実験値と計算値の関係に顕著な違いはみられないことから, 鋼管基部の伸出しの有無が履歴法則に及ぼす影響は小さいと想定される。

以降では, 各パラメータを変化させた実験結果に対し, CFTモデル($\beta=0.3$)の適用性を検証する。

4. パラメータが履歴法則に及ぼす影響

(1) 幅厚比 B/t の影響

B/t のみが異なる実験結果($N/N_y=0.20$)に対し, 復元力モデルの履歴法則の適用性を検証する。

図-5に, RA-1($B/t=107$)とRA-2($B/t=80$), RA-4($B/t=40$), K-8($B/t=80$), K-3($B/t=30$)の荷重変位関係の実験結果と, CFTモデルの履歴法則の計算値の比較を示す。RA-1については, RCモデルとの比較について

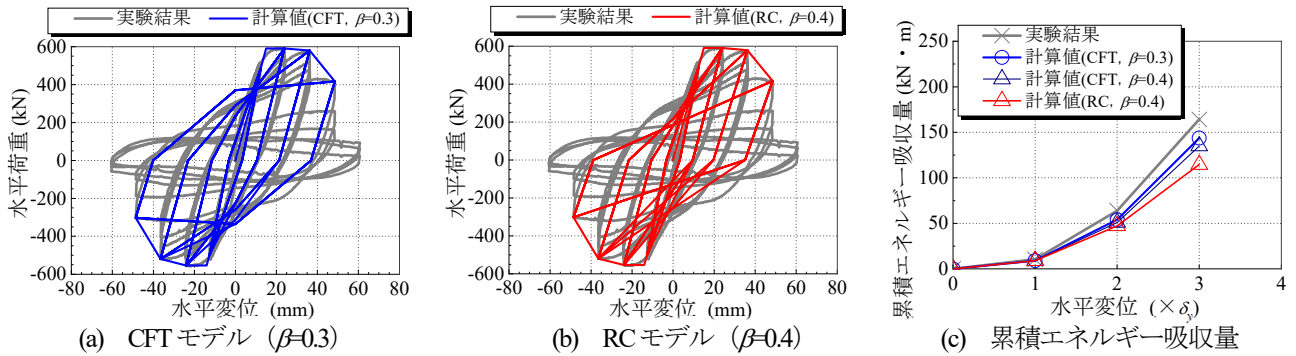


図4 K-1に対する履歴法則の適用性の検証

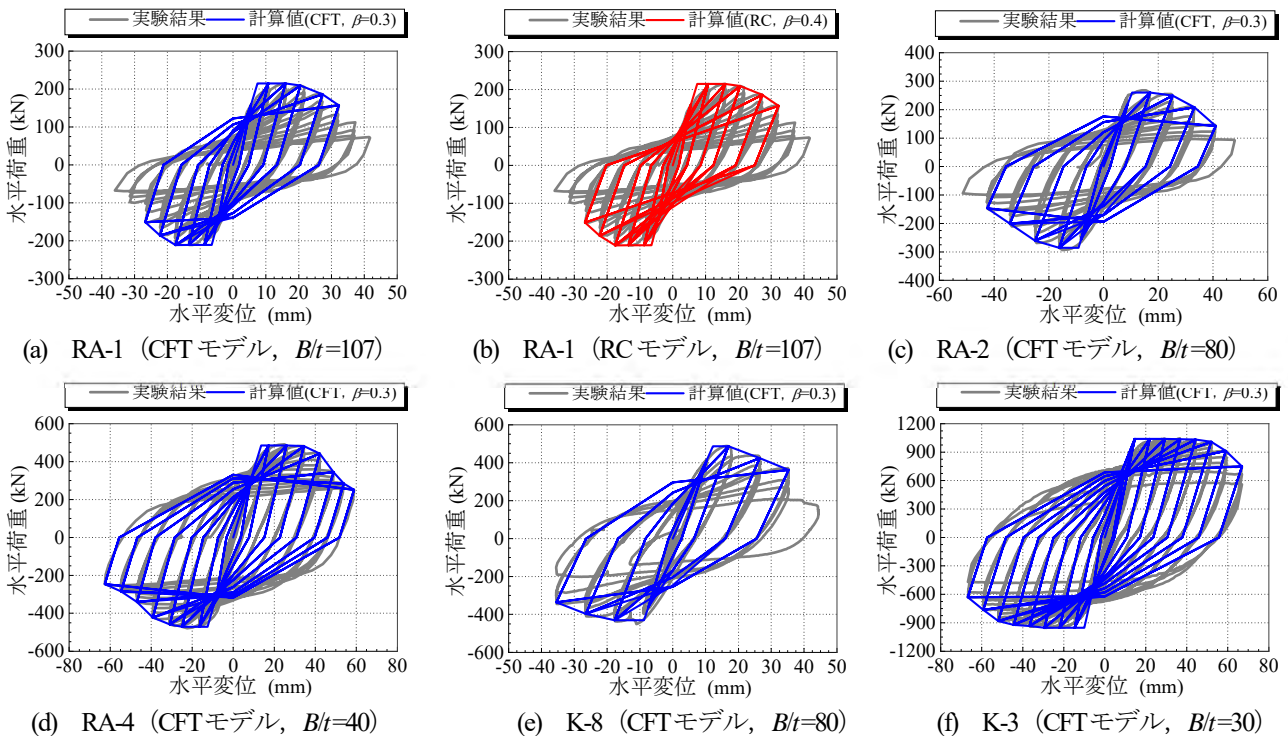


図5 幅厚比に対する履歴法則の適用性の検証

も示した。RA シリーズ, K シリーズのいずれも, B/t が小さくなるほど, 実験の第 2, 4 象限における膨らみは大きくなる傾向にあった。これは, 円形 CFT 柱や SRC 柱において, 径厚比が小さくなる場合, 鉄骨比が大きくなる場合の傾向と同様である⁸⁾。

図-6 に, RA-1, RA-2, RA-4 の累積エネルギー吸収量の実験結果と, CFT モデルおよび RC モデルの比較を示す。 $B/t \leq 80$ では, CFT モデルの履歴法則および累積エネルギー吸収量の計算値は, 実験結果を概ね再現できている。一方, $B/t=107$ では, CFT モデルの履歴法則および累積エネルギー吸収量の計算値は, 実験の第 2, 4 象限における膨らみや, 累積エネルギー吸収量を大きく算定する結果となった。 B/t が 80 程度より大きくなる場合は, RC モデルの履歴法則を適用するのがよいと考えられる。

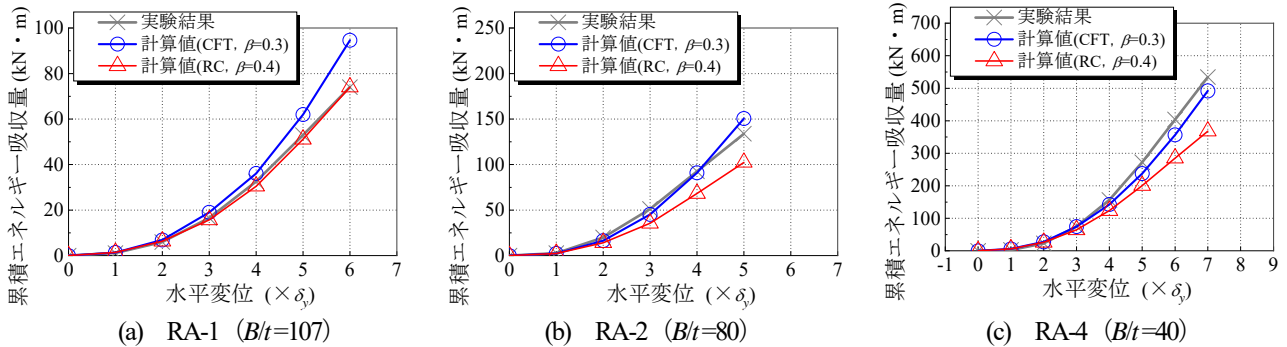


図-6 幅厚比に対する累積エネルギー吸収量の比較

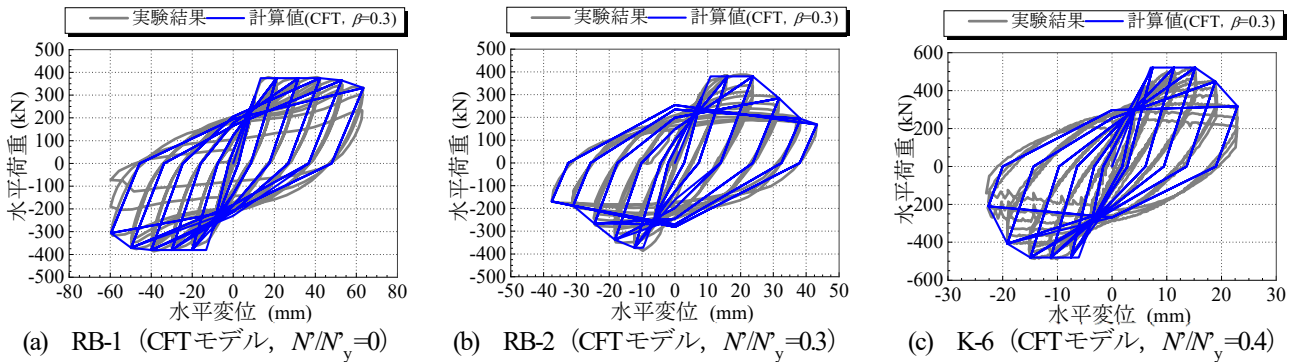


図-7 軸力比に対する履歴法則の適用性の検証

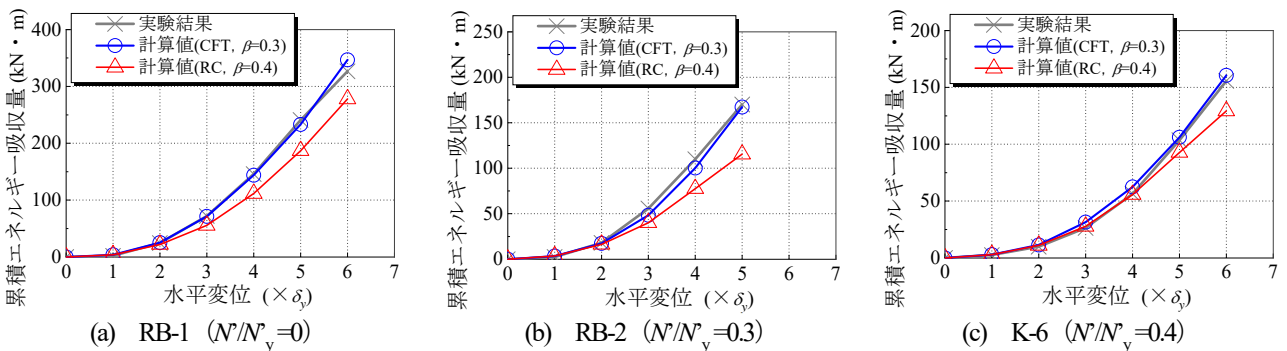


図-8 軸力比に対する累積エネルギー吸収量の比較

(2) 軸力比 N/N_y の影響

N/N_y のみが異なる実験結果 ($B/t=60$ 程度) に対し, 復元力モデルの履歴法則の適用性を検証する。

図-7 に, RB-1 ($N/N_y=0$) と RB-2 ($N/N_y=0.3$), K-6 ($N/N_y=0.4$) の荷重変位関係の実験結果と, CFT モデルの履歴法則の計算値の比較を示す。 N/N_y が大きくなると, 実験の第 2, 4 象限における膨らみは, 若干ではあるが小さくなる傾向にあった。これは, SRC 柱の場合と同様の傾向である⁸⁾。

図-8 に, RB-1 と RB-2, K-6 の累積エネルギー吸収量の実験結果と, CFT モデルおよび RC モデルの比較を示す。 $N/N_y \leq 0.3 \sim 0.4$ において, 累積エネルギー吸収量の計算値は実験結果を概ね再現できている。

(3) せん断スパン比 L_d/B の影響

L_d/B のみが異なる実験結果 ($B/t=60$ または 80 , $N_y/N_y=0.20$) に対し, 復元力モデルの履歴法則の適用性を検証する.

図-9, 10 に, K-2 ($L_d/B=5.0$), K-4 ($L_d/B=6.4$), K-5 ($L_d/B=6.4$) の荷重変位関係および累積エネルギー吸収量について, 実験結果と CFT モデルまたは RC モデルの計算値の比較を示す. 図-4 に示した K-1 ($L_d/B=3.0$) と K-2, K-4 を比較すると, L_d/B が大きくなることで, CFT モデルの累積エネルギー吸収量の計算値に対し, 実験値がやや小さくなる傾向にある. これは, L_d/B が大きくなると, 塑性ヒンジ以外の曲げ変形の寄与が大きくなることが一因と考えられる. ただし, K-2, K-4 の計算値は, 累積エネルギー吸収量の実験値を概ね再現できている.

K-5 ($B/t=80$) は, 累積エネルギー吸収量は RC モデルの計算値により概ね再現できる結果となった. これは, K-5 は B/t がやや大きいためと考えられる.

(4) 材料強度の影響

高強度材料を用いた K-7 と K-1 を比較することで, 材料強度の違いに対する復元力モデルの履歴法則の適用性を検証する. K-1 のコンクリート圧縮強度 $f_c=20.2\text{N/mm}^2$, 鋼管の降伏強度 $f_y=434\text{N/mm}^2$ に対し, K-7 の $f_c=55.8\text{N/mm}^2$, $f_y=496\text{N/mm}^2$ である.

図-11, 12 に, K-7 の荷重変位関係および累積エネルギー吸収量について, 実験結果と CFT モデルまたは RC モデルの計算値の比較を示す. 図-4 に示した K-1 と比較すると, 材料強度が大きくなることで, CFT モデルの累積エネルギー吸収量の計算値に対し, 実験値が小さくなる傾向にあるが, 計算値は累積エネルギー吸収量を概ね再現できる結果となった.

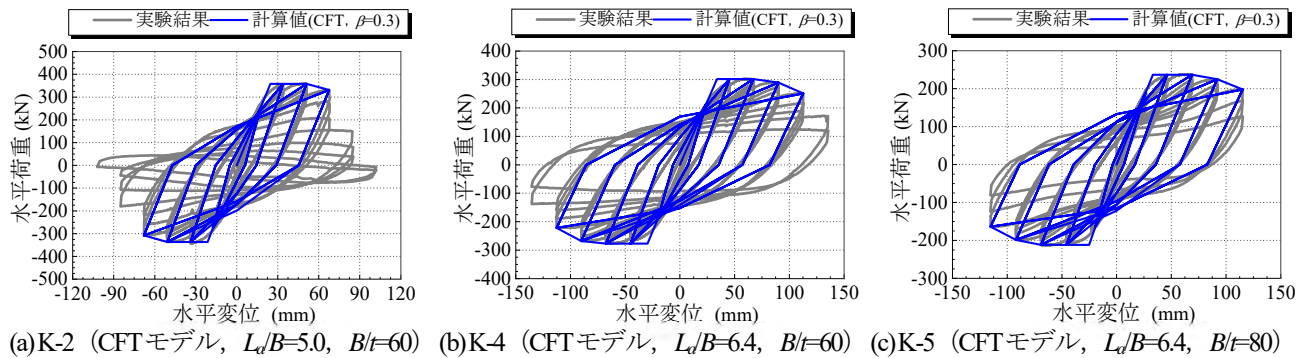


図-9 せん断スパン比に対する履歴法則の適用性の検証

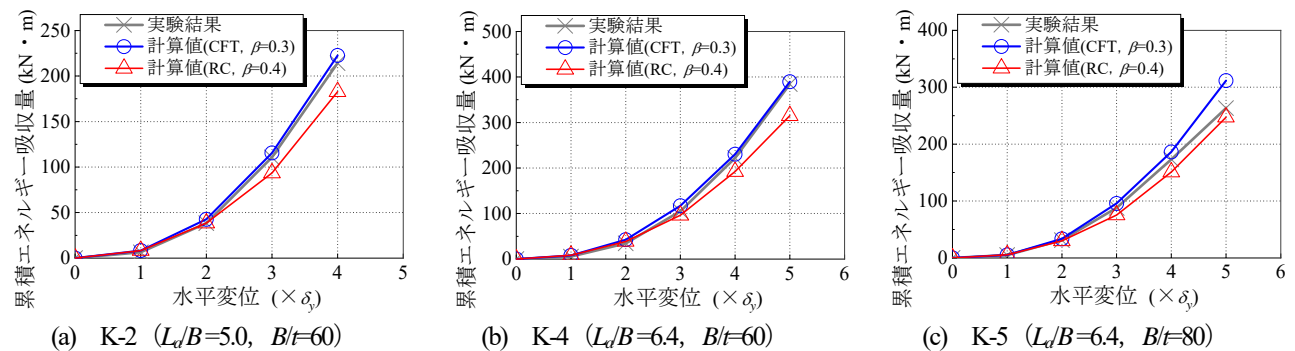


図-10 せん断スパン比に対する累積エネルギー吸収量の比較

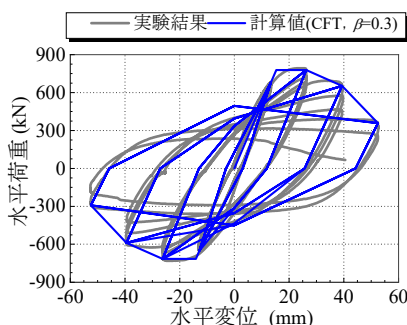


図-11 材料強度に対する履歴法則の適用性の検証 (K-7)

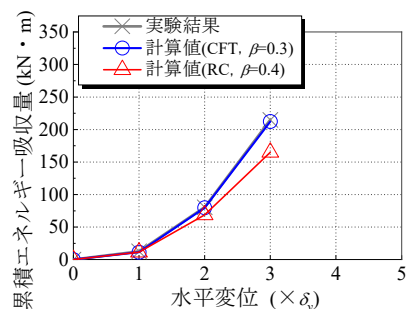


図-12 材料強度に対する累積エネルギー吸収量の比較 (K-7)

5 結論

本研究では、埋込み方式を用いた角形 CFT 柱の正負交番載荷実験から、復元力モデルにおける履歴法則について検証した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 幅厚比 $B/t=60$ 程度、軸力比 $N/N_y=0.20$ の実験結果に対し、円形 CFT 柱で適用性が確認されている復元力モデル（以下、CFT モデル）の履歴法則により、荷重変位関係の第 2, 4 象限における膨らみや除荷剛性、累積エネルギー吸収量を概ね再現できることがわかった。一般的なラーメン高架橋柱の諸元 ($B/t=60$ 程度以上¹⁰⁾ に対しては、CFT モデルの履歴法則を適用してよいと考えられる。また、フーチングからの鋼管基部の伸出しの有無が履歴法則に及ぼす影響は小さいと想定される結果が得られた。
- 2) 幅厚比 B/t が大きくなるほど、荷重変位関係の第 2, 4 象限における膨らみや、累積エネルギー吸収量は小さくなることがわかった。本実験の範囲において、 B/t が 80 程度より大きくなる場合は、RC モデルの履歴法則を適用するのがよいと考えられる。
- 3) 軸力比 N/N_y 、せん断スパン比 L_d/B 、材料強度が大きくなるほど、第 2, 4 象限における膨らみや、累積エネルギー吸収量は若干小さくなる傾向がみられたが、本実験の範囲では、CFT モデルの履歴法則により概ね再現できることがわかった。

なお、本実験の範囲外の諸元となる場合は、土木構造物の各限界状態に対応する、フーチングからの鋼管基部

の鋼管の伸出しも考慮した損傷レベル限界点や骨格曲線の評価方法と併せて、別途検討が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：2014 年制定 複合構造標準示方書，2014.
- 2) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，2016.
- 3) 網谷岳夫，池田学，井上佳樹，青木千里，山田正人：角形断面コンクリート充填鋼管柱における鋼管基部の伸び出しを考慮した変形性能評価法，鋼構造論文集，第 96 号，pp.1-15，2017.
- 4) 中田裕喜，網谷岳夫，池田学，岡本大：長方形断面を有するコンクリート充填鋼管柱の部材性能に関する実験的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74，No.5，pp.II_20-II_31，2018.
- 5) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012.
- 6) 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.
- 7) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 8) 池田学，村田清満，渡邊忠朋，瀧口将志，木下雅敬：SRC 部材の変形性能と復元力特性，鉄道総研報告，Vol. 13，No. 4，pp. 29-34，1999.
- 9) 村田清満，山田正人，池田学，瀧口将志，渡邊忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の復元力モデル，土木学会論文集，No.661/I-53，pp.43-55，2000.
- 10) 土木学会：複合構造レポート 16 コンクリート充填鋼管適用技術の現状と最先端，2021.

(Received August 25, 2023)

VERIFICATION OF HYSTERESIS LAW OF HYSTERESIS MODEL FOR CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS WITH SQUARE SECTION

Yuki NAKATA, Manabu IKEDA and Takeo AMITANI

In order to calculate the response value with high accuracy by the dynamic analysis method using frame analysis for a structure with square concrete filled steel tubular (CFT) columns, hysteresis model including the hysteresis law is required. In this study, the hysteresis law was verified for a square CFT column. For the experimental results with a width-thickness ratio of about 60 and an axial force ratio of 0.20, it was found that the swelling in the 2nd and 4th quadrants of the load-displacement relationship, unloading stiffness and accumulated energy absorption can be roughly reproduced by the hysteresis law of hysteresis model for circular CFT columns. In addition, it was confirmed that pullout of steel tube from the member joint has little effect on the hysteresis law, and that when the width-to-thickness ratio is greater than about 80, the experimental results can be reproduced by the hysteresis law of hysteresis model for RC columns.