

# 引張軸力を受けるコンクリート充填鋼管部材の 復元力特性の評価方法に関する研究

小川 剛士

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管(CFT)部材が引張軸力を受けると、充填コンクリートが鋼管の横方向の収縮を拘束する(鋼管が2軸引張状態になる)ことなどにより、中空鋼管に比べて軸耐力および軸方向剛性が増大する。文献1,2で角形断面および円形断面の試験体の中心引張実験を行い、軸耐力や軸方向剛性が増大することを示している。しかし、設計に用いられている「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」<sup>3)</sup>(以下、CFT指針)の引張軸力を受けるCFT部材の復元力特性モデルでは、円形断面では拘束効果による軸耐力の増大が考慮されているものの、角形断面の軸耐力や、円形断面および角形断面の軸方向剛性は、中空鋼管と等しいとして拘束効果が考慮されていない。本研究では追加で行った径厚比50の円形CFT部材の中心引張実験の実験結果と文献1,2の実験結果より、引張軸力を受けるCFT部材の軸耐力および軸方向剛性について精査する。そして文献4で東らが行った中心引張軸力を受ける円形CFT部材の弾塑性解析の結果も参照し、引張軸力を受けるCFT部材の復元力特性の評価方法を提案する。

## 2. 検証に用いる試験体

本研究で径厚比50の円形CFT部材の中心引張実験を行ったが、紙面の都合上割愛し、詳細は文献5を参照されたい。表1に検証に用いる試験体の一覧を示す。文献1,2,5の試験体形状、鋼管および加力装置は同じである。鋼管はSTK400およびSTKR400で、鋼管の力学性状をより純粋にするため、鉄骨製作後に残留応力除去焼鈍(625℃で1時間保持した後除冷)が施されている。コンクリートのシリンダー強度は55.6~83.1N/mm<sup>2</sup>であり、試験体形状および加力装置は文献1を、その他の詳細は文献1,2,5を参照されたい。なお、鋼管とコンクリートの断面積を角隅部外側の曲げ半径を2.0t(t:板厚)として算定する。

## 3. 復元力特性の評価

### 3.1 提案する復元力特性モデル

中心引張力を受けるとCFTはある軸力を超えたあたりから不規則なひずみの増大がみられ、その後軸方向剛性および軸耐力の増大を示し、降伏に至る。このよう

なCFT部材の特性を踏まえ、東らは文献6で2つの復元力特性を提案している。四折れ線のモデルAはコンクリートのひび割れが全て同時に生じると仮定したもので、三折れ線のモデルBではひび割れが最大軸耐力に至るまでに徐々に生じると仮定したモデルであり、実際のCFT部材の挙動はこの間にあると考えられる。モデルA,Bともに充填コンクリートにひび割れが発生するまでの軸方向剛性を $_{cft}K_i$ とし、モデルAではひび割れ発生時荷重 $_{cft}N_{cr}$ に達したときに応力の増大を伴わずにひずみが増大し、 $_{cft}N_{cr}$ をひび割れ後の軸方向剛性 $_{cft}K$ で除して求められるひずみに至る。その後の軸方向剛性は $_{cft}K$ で一定とし、応力が充填コンクリートの横拘束による軸耐力の増大を含んだ引張軸耐力 $_{cft}N_u$ に達して降伏する。モデルBでは $_{cft}N_{cr}$ に達した後に剛性低下を生じるが、その後の軸方向剛性は一定とし、 $_{cft}N_u$ を $_{cft}K$ で除して求められるひずみに至ったときに降伏する。なお、各モデルとも降伏後の軸耐力は一定とし、ひずみ硬化は無視している。

### 3.2 引張軸耐力

$\xi$ を充填コンクリートの拘束効果による耐力の増大を表す係数とし、CFTの引張軸耐力 $_{cft}\sigma_u$ を $_{cft}\sigma_u = \xi \cdot s \cdot \sigma_u (s \cdot \sigma_u$ :中空鋼管の引張軸耐力)として評価する。文献1,2,5では $\xi$ の実験値の算出に、軸方向ひずみ $\varepsilon=1.0\%$ 時の耐力 $\sigma_u$ を用いていたが、実験結果には降伏棚がみられるものの、そこにおいても軸方向応力が変動しており、耐力実験値を1点の耐力で代表させるのは、実験結果の全体を捉えていない可能性がある。そこで本研究では塑性領域でのエネルギー吸収量が実験結果と復元力特性モデルで等しくなるように耐力実験値 $_{cft}\sigma_u$ を定めることとした。具体的には図1に示す通りである。なお、この方法で算出した $_{cft}\sigma_u$ と文献1,2,5の $\varepsilon=1.0\%$ 時耐力は最大で1.3%の相違があるが、ほぼ等しい値となっている。

CFTの引張軸耐力実験値を中空鋼管のそれで除した値(以下、強度上昇率)と幅・径厚比の関係を図2に示す。強度上昇率は幅・径厚比による影響は明確にはみられない。両断面の平均の強度上昇率は1.08程度である。

引張軸力を受けるCFT部材の拘束効果について明らかにするために、既往の中心引張軸力を受ける円形

表1 検討対象の試験体一覧<sup>1)2)5)</sup>

試験体名	断面形状 幅・せい 径 (mm)	B/t	載荷 パターン	鋼材の機械的性質		引張軸耐力				軸方向剛性						文 献 番 号	
				$s\sigma_y^{*1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$sE^{*2}$ ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	実験値 $ex\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	CFT 中空	計算値 <sup>*3</sup> $cfi\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ発生前		ひび割れ発生後						
									実験値 計算値	実験値 計算値	実験値 計算値	実験値 計算値	CFT 中空	計算値 <sup>*4</sup> $cfiK$ ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	実験値 計算値		
RV29	角形 B=175	31.3	単調	288	1.83	323	—	2.19		—						1	
RC29						354		1.10	349	1.02	4.73	4.65	1.02	2.27	1.03		2.21
RC29-R			繰返し	362	1.12	1.04	4.63	1.00		2.49	1.14		1.13				
RV39		38.7	単調	309	2.03	343	—	2.24		—						1	
RC39						362		1.06	371	0.98	5.31	5.55	0.96	2.47	1.10		2.21
RC39-R		繰返し	368	1.08	1.00	5.58	1.00	2.38		1.07	1.08						
RV39-2		38.6	単調	304	2.17	320	—	2.23		—						2	
RC39-2						340		1.06	346	0.98	5.91	6.01	0.98	2.16	0.97		2.21
CV31		円形 D=216.3	32.8	単調	343	2.09	352	—	2.16		—						1
CC31							377		1.07	380	0.99	4.82	4.70	1.03	2.21	1.04	
CC31-R	繰返し			379	1.08	1.00	4.95	1.05	2.27		1.06	1.02					
CV48	50.2		単調	368	2.13	353	—	2.05		—						1	
CC48						387		1.10	381	1.02	6.27	6.39	0.98	2.40	1.17		2.21
CC48-R	繰返し		384	1.09	1.01	6.67	1.04	2.23		1.08	1.00						
CV50	50.2		単調	326	2.22	314	—	2.01		—						5	
CC50						344		1.10	337	1.02	6.53	6.87	0.95	2.23	1.11		2.21

\*1  $s\sigma_y$ : 鋼管の降伏応力度。3.1節の引張軸耐力と同様の方法で算出した。\*2  $sE$ : 鋼管のヤング係数。原点と軸方向ひずみ0.1%時の点の割線剛性とした。\*3: 各中空鋼管耐力実験値に $\xi=1.08$ を乗じた値。\*4:  $sE=2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とし、 $\varphi=1.08$ を乗じた値。

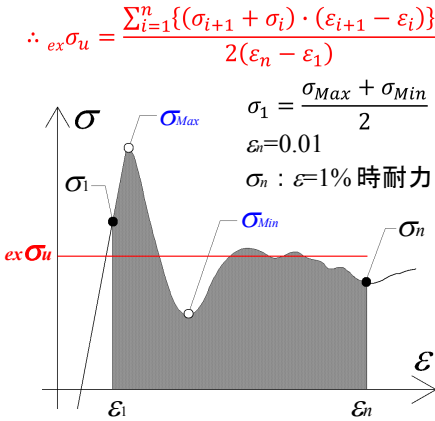


図1 耐力実験値の算出方法のモデル

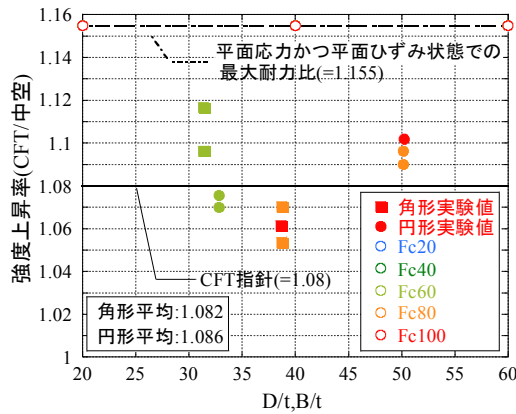


図2 強度上昇率と幅・径厚比の関係

CFT部材の弾塑性解析による検討を行う<sup>4)</sup>。鋼管に関してはヤング係数、ポアソン比および降伏応力度をそれぞれ $2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、0.3、325N/mm<sup>2</sup>とし、コンクリートに関しては、ヤング係数およびポアソン比を日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010)」によるものとしている。その他の解析概要に関しては文献4を参照されたい。

解析においてCFTの中空鋼管よりの強度上昇率は径厚比およびコンクリート強度によらず一定値であり、平面ひずみかつ平面応力状態における最大値と等しい。また、解析結果は実験結果を上回っている。東らの解析で考慮に入っていない耐力に影響する因子としては、1)板厚方向応力、2)材軸方向に不連続に存在し、有限の幅を持つコンクリートのひび割れ等が挙げられる。

### 3.3 ひび割れ発生前の軸方向剛性

ひび割れ発生前の軸方向剛性実験値 $exK_i$ を原点と後述するひび割れ発生時荷重 $cfiN_{cr}$ の1/3の応力時の測定点の割線剛性とする<sup>2)</sup>。CFTではコンクリートにひび割れが

生じる前にも、鋼管のポアソン比がコンクリートのそれよりも大きいため拘束効果が生じると考えられる。しかし、ひび割れ発生前の軸方向剛性 $cfiK_i$ のモデル化においてはこれを無視し、「 $cfiN_{cr}$ までは鋼管と充填コンクリートは軸方向応力のみが生じる(1軸応力状態)」<sup>6)</sup>ものとする<sup>2)</sup>と、 $cfiK_i$ は、中空鋼

管と充填コンクリートの剛性の和、即ち $cfiK_i = sE \cdot sA + cE_i \cdot cA$ ( $sE, sA$ :それぞれ中空鋼管のヤング係数と断面積、 $cE_i, cA$ :それぞれコンクリートの引張ヤング係数と断面積)と表現できる。ここで $cE_i$ は文献7より圧縮ヤング係数 $cE_c$ と等しいとし、 $cE_c$ は圧縮試験から得られた結果を用いる。

ひび割れ発生前の軸方向剛性の実験値 $exK_i$ と計算値 $cfiK_i$ の関係を図3に示す。 $exK_i$ と $cfiK_i$ の比の平均値はほぼ1であり、5%以内に収まっていることから、ひび割れ発生前の軸方向剛性 $cfiK_i$ は中空鋼管と充填コンクリートの剛性の和で評価できると考えられる。

### 3.4 ひび割れ発生時荷重

「充填コンクリートにひび割れが生じるまでは、鋼管、充填コンクリートとも線形弾性体であると仮定し、加えてコンクリートと鋼管は1軸応力状態(周方向、半径方向の応力の存在を無視)にあり、それぞれの軸方向ひずみは同じである」<sup>6)</sup>とすると、CFTのひび割れ発生時荷重 $cfiN_{cr}$ はひび割れ発生前の軸方向剛性とコンクリートの引張ひずみの積、即ち $cfiN_{cr} = cfiK_i \cdot c\sigma / cE_i$ ( $c\sigma$ :コン

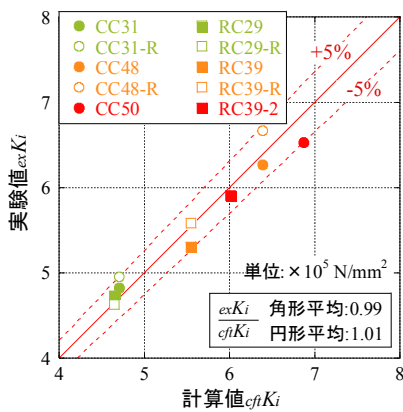


図3 ひび割れ発生前の軸方向剛性の実験値 $exK_i$ と計算値 $cftK_i$ の比較

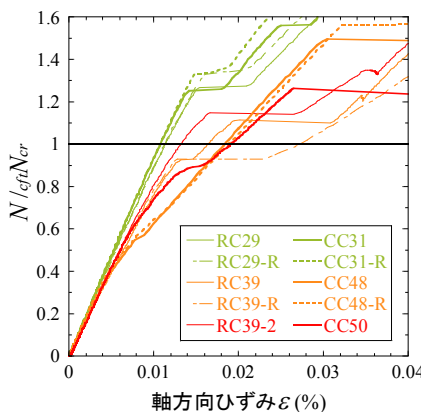


図4  $N/cftN_{cr}$ と軸方向ひずみ $\varepsilon$ の関係

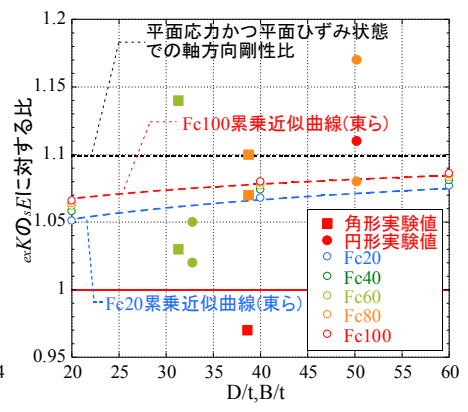


図5  $exK$ の $\varepsilon E$ に対する比(剛性上昇率)と幅・径厚比の関係

クリートの直接引張強度)と表現できる。ここでコンクリートの直接引張強度の評価方法は明確に定まっていないので、文献8より直接引張強度は割裂引張強度と同一とし、野口らのコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_b$ からの割裂引張強度推定式 $\sigma_c\sigma=0.291 \cdot c\sigma_b^{0.637}$ を用いることとする。 $\varepsilon E$ は原点と3.1節で算出した中空鋼管の耐力実験値の60%の応力時の測定点の割線剛性とする。これは60%までは測定値が線形的であるが、70%を超えた付近から線形性が崩れ(これは材端の補強の影響で板曲げが生じたためと考えている)、これ以降の測定値は正確でないと判断したためである。

実験結果の荷重 $N$ を $cftN_{cr}$ で無次元化した $N/cftN_{cr}$ と軸方向ひずみ $\varepsilon$ の関係を図4に示す。ここで $\varepsilon$ は鋼管の溶接部を含まない2面の、1面に材軸中央の上下に2枚ずつ貼付した計4枚のひずみゲージ(検長60mm)の測定値の平均値である。ゲージ貼付位置は文献1を参照された。  $N/cftN_{cr}=1$ 付近でひずみの不規則な増大がみられた。これは充填コンクリートにひび割れが生じたためだと考えられる。以上よりひび割れ発生時荷重をひび割れ発生前の軸方向剛性とコンクリートの引張ひずみの積で評価できると考えられる。

### 3.5 ひび割れ後の軸方向剛性

充填コンクリートの拘束効果やテンションステイニングによる中空鋼管からの剛性の増大を表す係数を $\varphi$ とし、CFTのひび割れ後の軸方向剛性 $cftK$ を $cftK=\varphi \cdot \varepsilon E$ として評価する。本報ではひび割れ後の軸方向剛性の実験値 $exK$ を、CFTの実験で得られた $\sigma-\varepsilon$ 関係における原点と3.1節で算出した耐力実験値 $ex\sigma_u$ の90%(以下、 $ex\sigma_{90}$ )の応力時の測定点の割線剛性とする。ここで $ex\sigma_{90}$ を用いるのはひび割れによる軸方向ひずみの不規則な増減がほぼ終了し、降伏前の鋼管の軟化の影響を大きく受けないと、実験結果を検証して判断したためである。なお、繰返し载荷の場合は、1サイクル目で $ex\sigma_{90}$ に達して

いないため、2サイクル目の $\sigma-\varepsilon$ 関係を用いている

CFTのひび割れ後の軸方向剛性 $exK$ を中空鋼管の軸方向剛性 $\varepsilon E$ で除した値(以下、剛性上昇率)と幅・径厚比の関係を図5に示す。CFTのひび割れ後の軸方向剛性は中空鋼管より概ね高く、ばらつきが大きい。

拘束効果が軸方向剛性に与える影響を明らかにするため、3.2節で述べた解析のパラメトリックスタディの結果と、鋼管の周方向ひずみが生じないとした平面応力かつ平面ひずみ状態での剛性上昇率を図5に示す。東らは解析結果より、剛性上昇率は径厚比およびコンクリート強度の影響を受けると述べている。しかし、径厚比およびコンクリート強度の違いによる差異は、実験結果のばらつきよりも小さい。東らの解析で考慮に入っていない軸方向剛性に影響する因子としては、3)実際の材料定数の仮定値との差異、4)テンションステイニング、5)側圧によるコンクリートの剛性低下等が挙げられる。事実、鋼管のポアソン比によって剛性上昇率は最大で6%程度差が生じる結果となっている<sup>9)</sup>。

### 4. 実験結果と提案モデルの $\sigma-\varepsilon$ 関係の比較

本来ならば $\xi$ と $\varphi$ は $cft\sigma_u$ や $cftK$ に影響を及ぼす因子として定式化されるべきものであるが、現状では定式化を行う上で情報が十分ではない。そのため、まず $\xi$ と $\varphi$ をそれぞれ各試験体の強度上昇率と剛性上昇率とし、それらを用いてモデルの妥当性を検証する。提案する復元力特性モデル(モデルA,B)およびCFT指針のモデルを用いて求めた $\sigma-\varepsilon$ 関係と、実験結果の $\sigma-\varepsilon$ 関係の比較の例を図6に示す。紙面の都合で示していないが全ての実験結果は、モデルAとモデルBの $\sigma-\varepsilon$ 関係の間に入っており、CFT指針のモデルよりも実験結果によく適合しており、モデル化は妥当であるといえる。

次に実験結果および既往の弾塑性解析の結果より $\xi$ と $\varphi$ の定量的な評価方法を行う。 $\xi$ に関して、3.1節より解析結果は実験値を大きく上回っており、適切に評価で

きていないと考えられる。そこで本研究では $\xi$ に関して実験結果より評価するものとし、幅・径厚比による影響は明確にはみられなかったこと、CFT指針で認められていない角形断面CFTにも円形断面CFTと同程度の耐力上昇がみられたことから、CFT指針の円形断面CFTと同じ1.08を $\xi$ として提案する。 $\varphi$ に関して、3.5節より解析結果の変数による差異は実験結果のばらつきに比して小さく適切に評価できていないと考えられる。そのため本研究では $\varphi$ を実験結果より評価するものとし、簡便のため幅・径厚比によらず、中空鋼管の軸方向剛性を下回るRC39-2を除いた試験体の剛性上昇率の平均値1.08を $\varphi$ として提案する。図10に提案した $\xi$ と $\varphi$ を用いて ${}_{cft}\sigma_u$ および ${}_{cft}K$ を算出し、その場合の復元力特性モデルと実験結果の $\sigma$ - $\varepsilon$ 関係の比較の例を示す。ここで鋼管のヤング係数 $sE$ およびコンクリートの圧縮ヤング係数 $cE$ を、設計に用いられる $sE=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 $cE$ はRC規準によるものとした。 $\varphi$ の増大を実験結果の平均値で評価しているため、(a)(c)の試験体のようにひび割れ後の軸方向剛性を適切に評価できていないものがある。しかしモデルは概ね実験結果を捉えることができている。

## 5. まとめ

既往の実験結果と、東らの弾塑性解析の結果の考察からひび割れ後の軸方向剛性と引張軸耐力の定量的な評価方法を提案した。この評価式で定めた $\xi$ と $\varphi$ を用いた復元力特性モデルは実験結果を概ね捉えることができしており、評価式はほぼ妥当であると考えられる。しかしながらモデルの妥当性をさらに確実なものにするためには、試験体数を増やし、実験結果との適合性を確認する必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 井本 他: 引張軸力を受けるコンクリート充填鋼管部材の力学性状に関する実験的研究, 日本建築学会(以後、AIJ)九州支部報告, 2012
- 2) 黒崎 他: 引張軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管部材の力学性状に関する実験的研究 その4, AIJ九州支部報告, 2017
- 3) 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年
- 4) 東 他: 引張軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管部材の力学性状に関する実験的研究 その5, AIJ九州支部報告, 2014
- 5) 小川 他: 引張軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管部材の力学性状に関する実験的研究 その5, AIJ大会学術講演梗概集(東北), 2018
- 6) 東 他: 引張軸力を受けるコンクリート充填鋼管部材の復元力特性に関する研究 その1, AIJ大会学術講演梗概集(北海道), 2013
- 7) 東 他: 引張軸力を受けるコンクリート充填鋼管(CFT)部材の復元力特性に関する基礎的研究, AIJ九州支部報告, 2013
- 8) 金子 他: 気乾および湿潤コンクリートの直接・割裂各引張疲労特性に関する研究, AIJ構造系論文報告集, 1991
- 9) 野口 他: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, AIJ構造系論文報告集, 1995

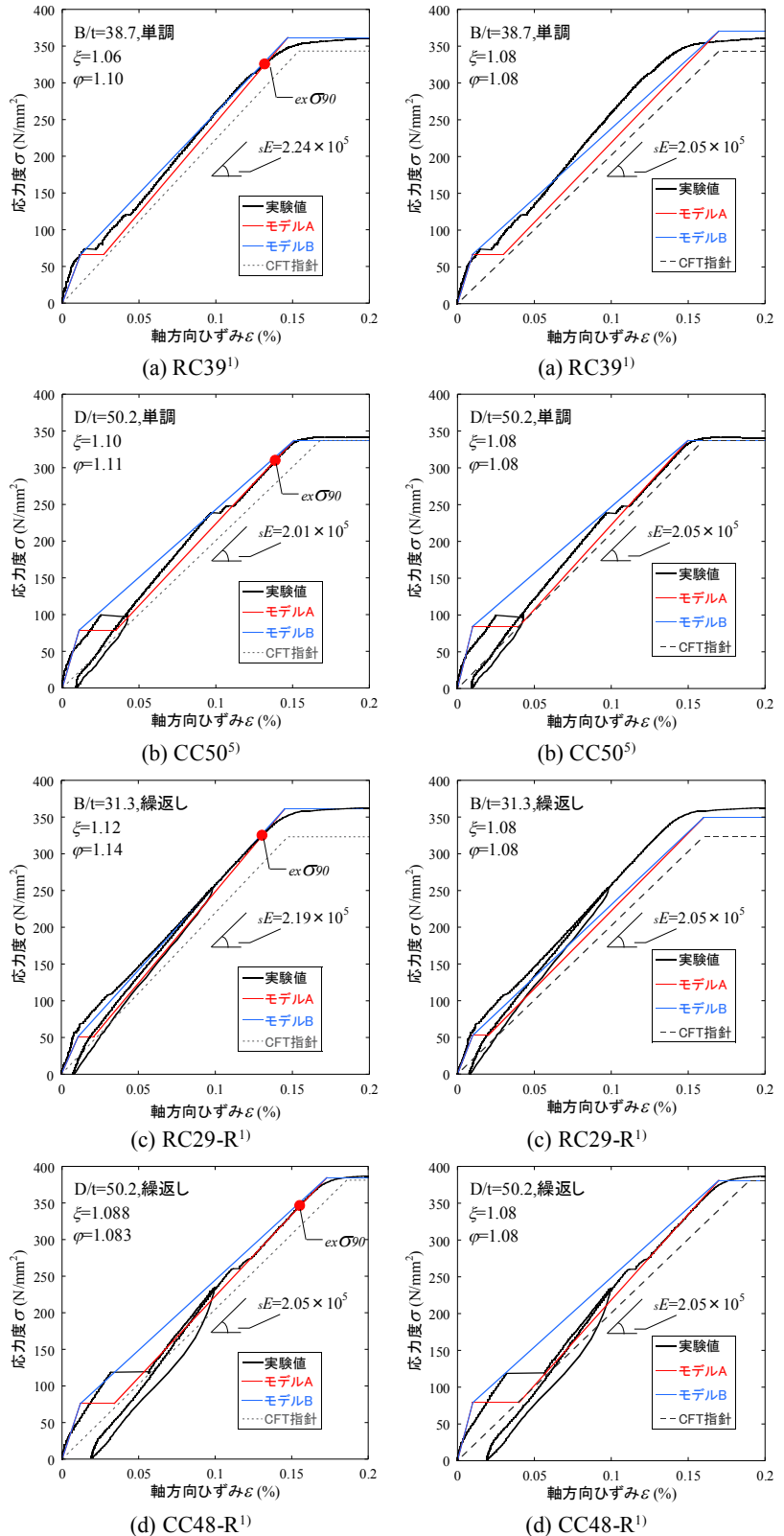


図6 提案モデルと実験結果の比較( $\xi, \varphi$ : 各実験結果)

図7 提案モデルと実験結果の比較( $\xi=1.08, \varphi=1.08$ )