

既設中空鋼製橋脚のコンクリート充填による 耐震補強における水平耐力上昇の抑制方法の検討

海老澤健正¹・後藤芳顕²・古田高也³

¹正会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²フェロー会員 名古屋工業大学大学プロジェクト教授・次世代耐震工学研究所 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

1. はじめに

上部構造を支える橋脚等には中空の鋼脚柱がしばしば用いられている。これらの中空の鋼脚柱は薄肉構造であるため、設計地震動を越える地震が作用する場合には、最大耐力に到達後、柱基部に顕著な局部座屈変形が生じるので、図-1に示すように柱の水平復元力が急激に低下して十分な変形性能を確保できない場合が多い。その結果、最大耐力到達後のエネルギー吸収が不十分で、場合によっては橋脚が倒壊する危険性もある。このため、耐震性能上問題があると判断された既設の中空の鋼脚柱には何らかの耐震補強を施す必要があるが、その代表的な方法としては中空の鋼脚柱内部にコンクリートを充填する工法が挙げられる。コンクリートを充填した鋼脚柱（CFT脚柱）は、図-1のように中空の鋼脚柱と比べて水平耐力、変形性能がともに向上し、高い耐震性能を持つようになることが確認されている。

しかし、既設橋脚の耐震補強の場合、中空の鋼脚柱にコンクリートを充填すると柱自体の水平耐力すなわち水平復元力の最大値の上昇に伴い、地震時において鋼脚柱を支持する地中の基礎構造に作用する地震力も設計で想定した値より増大する。このため、増大した地震力が基礎構造に作用することで基礎に重大な損傷が生じる可能性がある。しかし、地中の基礎構造の耐震補強や地震により受けた損傷の補修は容易でない。したがって、コンクリート充填による中空の鋼脚柱の耐震補強法は元の基礎構造が補強された脚柱より高い耐力を有する場合以外には適用が難しい。コンクリート充填による既設橋脚の耐震性能向上法を常に可能にするには、柱の水平耐力の上昇を制御して基礎構造への負担を回避し、図

-1に示す「理想的な耐震補強」のように変形性能のみを高める手立てを開発することが課題である。

ここでは、コンクリート充填により既設橋脚の鋼脚柱の耐震補強を行う場合において、柱の水平耐力の上昇を抑制して、変形性能のみ高める具体的な手法の検討を行った。すなわち、低強度・低剛性の中間弱層を充填コンクリート内に配置する方法である。この中間弱層は柱の水平最大耐力到達点までは中空鋼製断面と充填コンクリート断面の合成効果を抑制する役目を持ち、CFT脚柱の耐力が中空鋼脚柱の最大耐力から大きく上昇するのを防止する。一方、最大水平耐力到達後には中間弱層が圧壊して上下の充填コンクリート層が接触することで、鋼断面とコンクリート断面が合成したCFT脚柱の機能が発揮される。その結果、鋼断面の局部座屈変形の進展が抑制され、変形性能が向上するシナリオである。

本論文では、まず、1/8スケールの円形および補剛正方形断面の中空鋼脚柱模型を対象に、充填コンクリートに設ける中間弱層の層厚と挿入位置を精緻なFE解析で検討したうえで、CFT脚柱の供試体を製作した。そして、水平1方向漸増繰り返し載荷実験を行い、中間弱層を設置しないCFT脚柱供試体、中空鋼脚柱との力学挙動を比較し、実験的に中間弱層の効果と力学特性を詳細に調べた。さらに、実験でFEモデルのキャリブレーションを行った上で、数値解析により中間弱層の層厚がCFT脚柱の履歴挙動に与える影響について検討した。

2. 中間弱層を用いたコンクリート充填の方法

提案する中間弱層を用いたコンクリート充填によ

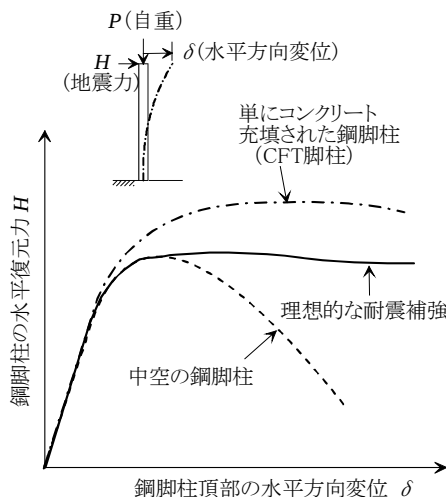


図-1 中空鋼脚柱の耐震補強

る中空鋼脚の耐震補強法では、図-2(a)のように中空鋼脚柱内部に充填するコンクリートは上下2層に分離し、中間位置に適切な層厚と強度・剛性を持つ中間弱層を配置する。これにより、CFT脚柱の最大水平耐力の上昇を抑制するとともに、鋼製柱の局部座屈変形の進展を防止し、脚柱の変形性能を向上させる。本構造では下層の充填コンクリート硬化後、中間弱層を挿入し、上層の充填コンクリートを打設する。この中間弱層は充填コンクリートとは異種材料で製作されたもので、上層充填コンクリート打設時に、上層充填コンクリートの重量を支え、上下の充填コンクリート層間に中間弱層として必要な間隔を保持できる強度と剛性を持つことが前提である。ここでは、上記のようなCFT脚柱を中間弱層を持つCFT脚柱と呼ぶ。

中間弱層を持つCFT脚柱の地震荷重作用下での耐荷メカニズムとしては、鋼脚柱に局部座屈変形が生じる以前は、図-2(b)のように上下層が接触しないため中空鋼製断面と充填コンクリート断面の合成効果が生じない。その結果、中間弱層の層厚と強度・剛性を調整することでCFT脚柱耐力の上昇が抑制できる。最大耐力到達後には鋼脚柱に局部座屈変形が生じるので、図-2(c)のように中間弱層が圧壊して充填コンクリートの上下二層が接触し、鋼製断面と充填コンクリート断面の合成効果が生じる。その結果、柱の耐力到達後の領域で局部座屈変形の進展が抑制され、復元力の低下も防止される。これにより、変形性能が向上する仕組みである。

3. 中間弱層を持つCFT脚柱供試体と載荷実験

既往の実験供試体^{1)~3)}と同様の1/8スケールの円形

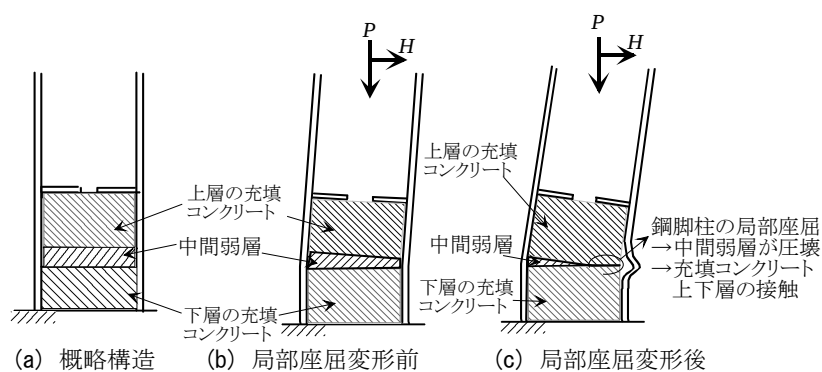


図-2 中間弱層を持つコンクリート充填鋼脚柱

断面および正方形補剛断面鋼脚柱模型を対象とする。これらの円形ならびに正方形断面の鋼脚柱に、コンクリートを充填しない無充填脚柱、コンクリートを充填した通常のCFT脚柱、充填コンクリート内に中間弱層を持つCFT脚柱の3種類の供試体を用意する。CFT脚柱の場合は、いずれも充填コンクリート（設計基準強度 $\sigma_{ck} = 18\text{MPa}$ ）をダイヤフラム直下（正方形断面脚柱：高さ650mm、円形断面脚柱：高さ524mm）まで打設する。中間弱層の材質には発泡スチレンボードを用いる。これは、発泡スチレンボードはほとんど変形せずに打設される上層コンクリート自重を支持できること、圧縮荷重下で層が圧壊するまでの強度・剛性が非常に小さいことが理由である。なお、実験では、実物と異なり、発泡スチレンボード設置後にダイヤフラムの溶接を行うので、ある程度の耐熱性が必要なこと、実験室レベルで加工しやすいことなども考慮した。中間弱層の層厚と挿入位置については、4.で示す数値解析により正方形断面脚柱の事前解析を実施して決定した。すなわち、図-1の理想的な耐震補強のように、水平荷重－水平変位関係の包絡線において、無充填脚柱と比べた際の最大耐力の上昇が小さく、かつ、ピーク後の耐力低下が少なく変形能が大きいものを選定した。すなわち、入手性を考慮し5mm発泡スチレンボードを2枚接着した10mmを中間弱層の層厚と定め、挿入位置を決定した。円形断面脚柱についてもこの層厚を準用し、挿入位置を決定した。

実験での載荷方法としては、まず死荷重に相当する鉛直軸力（中空鋼脚柱に対する軸力比0.15）を一定に保持した状態で、初期降伏変位 δ_0 を基準振幅として水平変位制御による1方向振幅漸増型の両繰りの繰り返しを与える。本実験の目的がCFT化による脚柱の変形性能向上効果を確認することにあるので、塑性率 δ/δ_0 が15程度の領域まで対象にする必要がある。そこで、水平の載荷装置のストローク長が250mmであることから、柱高さを低くして載荷点高さを1200mmと設定した。用いた供試体を表-1

表-1 供試体諸元

(a) 正方形断面供試体			(b) 円形断面供試体		
パネル幅	B (mm)	300	鋼管外径	D (mm)	262.9
パネル板厚	t (mm)	4	板厚	t (mm)	4
リブ高さ	h_r (mm)	29	ダイヤフラム間隔	h_d (mm)	524
リブ板厚	t (mm)	4	ダイヤフラム厚	t_d (mm)	9
ダイヤフラム間隔	h_d (mm)	325	載荷点高さ	h (mm)	1200
ダイヤフラム厚	t_d (mm)	9	コンクリート充填高さ	h_c (mm)	524
載荷点高さ	h (mm)	1200	径厚比パラメータ	R_t	0.09
コンクリート充填高さ	h_c (mm)	650	細長比パラメータ	λ	0.37
幅厚比パラメータ	R_R	0.51	軸力比	P/P_0	0.15
幅厚比パラメータ	R_F	0.49	軸力	P (kN)	195.2
細長比パラメータ	λ	0.2	降伏水平荷重	H_0 (kN)	58.4
最適剛比	γ/γ^*	2.36	降伏水平変位	δ_0 (mm)	4.39
軸力比	P/P_0	0.15			
軸力	P (kN)	276.6			
降伏水平荷重	H_0 (kN)	124.8			
降伏水平変位	δ_0 (mm)	3.8			

表-2 充填コンクリートの圧縮強度

正方形断面 CFT	正方形断面 中間弱層あり	円形断面 CFT	円形断面 中間弱層あり
28.33	28.27(下層) 28.22(上層)	27.67	28.49(下層) 28.37(上層)

(単位:MPa)

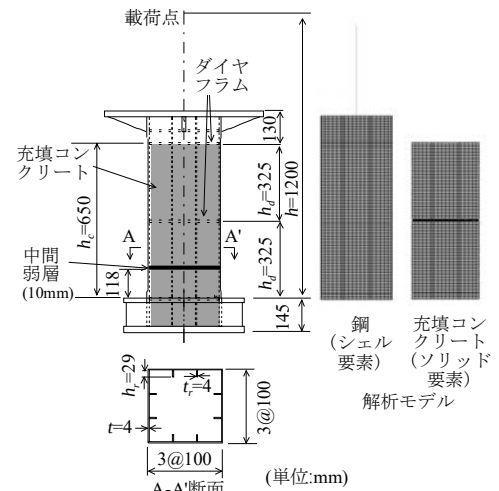
および図-3に示す。また、材料試験により得られた充填コンクリートの圧縮強度を表-2に、実験で用いた鋼材の材料定数および材料試験で得られた応力-ひずみ関係を表-3、図-4に示す。

4. 中間弱層を持つ CFT 脚柱の解析手法

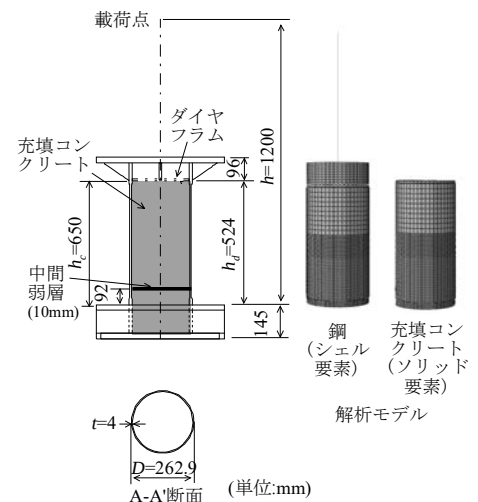
CFT 脚柱の水平荷重下の履歴挙動は充填コンクリートの 3 軸圧縮応力下の挙動、鋼管の局部座屈挙動、さらにコンクリートと鋼部材の界面での接触・離間と摩擦を伴う相互作用に影響されるので、CFT 脚柱の挙動を正確に解析するためにはこれらの挙動全てを考慮する必要がある。著者らは、このような挙動を考慮して、繰り返し荷重を受ける円形断面や正方形断面の CFT 脚柱を対象とした精緻な FE 解析モデルを開発し、実験との比較によりその精度を検証した^{1)~7)}。本検討で用いた中間弱層を持つ CFT 脚柱のモデルは上記の FE 解析モデルに中間弱層のモデルを新たに導入したものである。なお、数値解析には非線形汎用解析ソフト ABAQUS⁸⁾を使用した。

(1) CFT 脚柱のモデル化

CFT 脚柱の解析モデルでは、鋼部材には繰り返し構成則として三曲面モデル^{9)~12)}を導入した厚肉シェル要素 S4R を用いるとともに、充填コンクリートに



(a) 正方形断面供試体



(b) 円形断面供試体

図-3 実験供試体

は損傷塑性モデルを導入したソリッド要素 C3D8R と仮想ひび割れモデルを併用した。仮想ひび割れ界面の滑りを伴う開閉挙動を表すために接触ばねとせん断ばねを挿入した。接触ばねは圧縮にのみ抵抗するばねであり、その単位面積当たりの剛性はコンクリートの圧縮剛性の 100 倍に相当する $2.4 \times 10^{12} \text{ N/m}^3$ とし、せん断ばねは線型弾性として単位面積当たりの剛性は $2.764 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ とした^{4),6)}。鋼とコンクリート界面には基本的には接触対を用いた。

以上のモデル化で、CFT 脚柱における鋼部材の局部座屈、拘束される充填コンクリートの弾塑性圧縮挙動とひび割れ挙動、さらに、鋼部材と充填コンクリート界面での接触・離間と摩擦挙動を直接考慮できる。ただし、接触対は数値的安定性を欠く場合も多く、このような場合には界面挙動を近似的に表す接触ばねを用いた。接触ばねによるモデル化では離間・接触や滑りが変形前にばねで結ばれた節点間の相対変位で近似的に評価されるので、界面での相対

表-3 三曲面モデルのパラメータ

供試体	部材	鋼種	板厚	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ν	ε_{yp}	f_b	β	ρ	κ	ξ
正方形	パネル・リブ	SM400	4mm	216	326	546	0.3	0.0210	0.65	100	2.0	3	0.87
正方形・円形	ダイヤフラム	SM400	9mm	221	337	556	0.3	0.0191	0.65	100	2.0	3	0.78
円形	パイプ	STK400	4mm	221	400	502	0.3	0.0074	0.65	150	2.0	2	0.91

表-4 損傷塑性モデルのパラメータ

供試体	E_c (GPa)	f'_c (MPa)	σ_{t0} (MPa)	ν_c	K_c	$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	e	ψ
正方形	21.69	30.75	2.41	0.15	0.67	1.16	0.1	30°
円形	23.29	27.96	2.16	0.16	0.70	1.10	0.2	10°

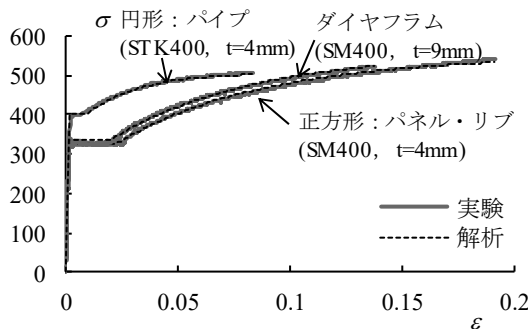
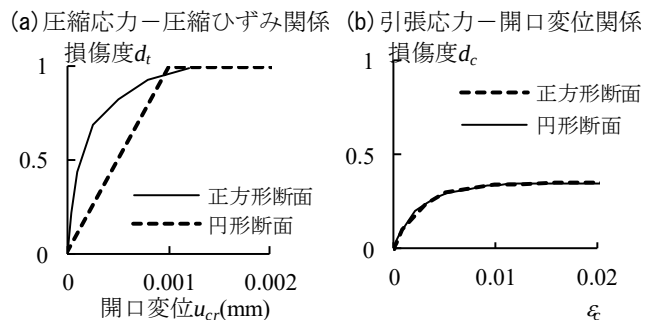
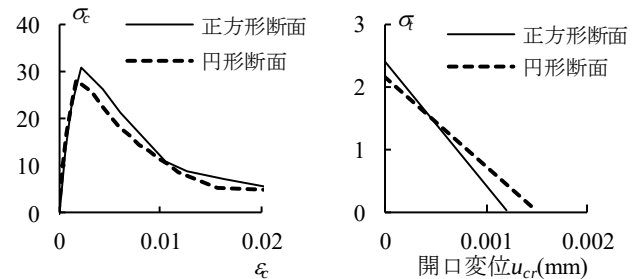


図-4 鋼材の1軸引張応力-引張ひずみ関係



(c) 損傷度-圧縮ひずみ関係 (d) 損傷度-開口変位関係

図-5 充填コンクリートの材料モデル

変形が大きく生じる場合には誤差が大きくなる。そこで、ここでは、計算の効率化のために、局部座屈時に離間が大きくなる充填コンクリートと補剛パネル・鋼管の界面には精度の良い接触対を用い、離間や滑りが小さい縦リブ、ダイヤフラムと充填コンクリートの界面には近似的な接触ばねを用いた。接触ばねの剛性は仮想ひび割れに用いた接触ばねと同様とするが、これらの界面での摩擦の影響は小さいことからせん断ばねについては省略した。面積的には、充填コンクリートと鋼パネルや鋼管との界面が最も大きく、この部分に精度の良い接触対を用いるのは妥当と考える。また、鋼材と充填コンクリートとの界面には、コンクリートの乾燥収縮を考慮して初期間隙を与える。この間隙の大きさはコンクリート標準示方書¹³⁾に示されている収縮ひずみ 200×10^{-6} に相当する値とした。

表-3に解析に用いた鋼材の三曲面モデルのパラメータを示す。これらのパラメータうち繰り返しのパラメータ β 、 ρ 、 κ は過去の繰り返し試験での値を用いた。それ以外のパラメータは1軸引張試験をもとに決定した。以上の三曲面モデルによる1軸引張試験の解析結果と実験結果を図-4に示す。また、充填コンクリートの応力-ひずみ関係、損傷度については、設計基準強度等条件が同一で、本実験の圧縮強度との差異が大きい既往の実験^{1),3)}で同定し

た表-4のパラメータ値と図-5の関係をを用いた。鋼とコンクリート間の摩擦については、円形断面脚柱では0.2、摩擦の影響の小さい矩形断面脚柱では無視した。

FEモデルでの要素分割は、図-3に示すように正方形断面脚柱では鋼パネルを水平方向に20分割、高さ方向に64分割とし、円形断面脚柱では鋼管を周方向に48分割、高さ方向に77分割とした。充填コンクリートは、これらの鋼部材のシェル要素の節点と対応するように要素分割した。脚柱供試体の頂部から載荷点までは剛な治具により結合されているので、この部分は剛性を十分大きくしたはり要素B31で表した。さらに、脚柱基部の上ベースプレート以下も剛体と仮定し、初期剛性が実験と一致するように載荷直角方向軸まわりの回転ばねを与えた。この回転剛性は、正方形断面脚柱で $4.1 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 、円形断面脚柱で $8.0 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ とした。それ以外の回転および並進変位の自由度は拘束した。

(2) 中間弱層のモデル化

中間弱層については、鉛直ばねとせん断ばねによりモデル化する。鉛直ばねは、圧縮のみを受け持ち、その構成則は図-6に示すようなバイリニア型と

した．中間弱層の圧縮剛性に相当する 1 次剛性はコンクリートの圧縮剛性と比べて非常に小さいことから，ここでは簡易的にその 10^{-6} 倍である $2.4 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ とし，中間弱層が圧壊した後の 2 次剛性は充填コンクリートの仮想ひび割れ界面に用いたの接触ばねと同一とした．図-6(b) に中間弱層の素材である発泡スチレンボードの載荷試験による圧縮応力—圧縮変位関係を示すが，実験では層厚 10mm に対し圧縮変位が約 8mm となると圧縮応力の増大が顕著になった．これを踏まえ，層厚に対して 20% 小さい 8mm で中間弱層が圧壊したと判断し，モデル化ではこれを 1 次剛性から 2 次剛性へ変化する点とした．せん断ばねについてはコンクリートの仮想ひび割れ界面に用いたせん断ばねと同様とした．

5. 実験結果

図-7 および図-8 に正方形断面脚柱と円形断面脚柱を対象とした無充填脚柱，CFT 脚柱，中間弱層を持つ CFT 脚柱それぞれについて実験で得られた水平荷重—水平変位の履歴曲線と履歴曲線の包絡線を示す．図-9 には鉛直変位—サイクル関係を示す．

まず，正方形断面脚柱について検討する．図-7 より，無充填脚柱のピーク点 ($-3u_0$ ， $-1.43H_0$) に比べて，通常の CFT 脚柱のピーク点は ($-7u_0$ ， $-2.11H_0$) であり，変形能が大幅に向上するとともに，耐力も約 1.5 倍に増加した．一方，中間弱層を持つ CFT 脚柱では， $-4u_0$ で最大荷重 $-1.58H_0$ に到達後に荷重が最大荷重の 81% まで低下したが，図-7(d) の包絡線に示すように $\pm 8u_0$ で荷重が再び上昇し，無充填脚柱と比べてかなり変形能が改善されていることがわかる．その一方，最大耐力の上昇は 10% 程度にとどまっており，中間弱層を導入することで，耐力上昇を抑制し，変形性能を向上させることが可能であることがわかる．また，図-9(a) に示す脚柱頂部の沈下量を表す鉛直変位の推移を見ると，5 サイクル目までは中間弱層を持つ CFT 脚柱の沈下量は，無充填脚柱とほぼ同様に推移し，その後，沈下量の増加は鈍化するものの 9 サイクル目まで沈下は継続した．そして，沈下量が中間弱層として導入した発泡スチレンの厚さ 10mm 近傍に到達すると沈下量の増加は大幅に減少した．これは水平荷重が再上昇したサイクル (8 サイクル目) とほぼ一致する．したがって，中間弱層圧壊後は上下のコンクリート層が接触することで通常の CFT 脚柱のように上部ダイヤフラムを介して充填コンクリートに鉛直荷

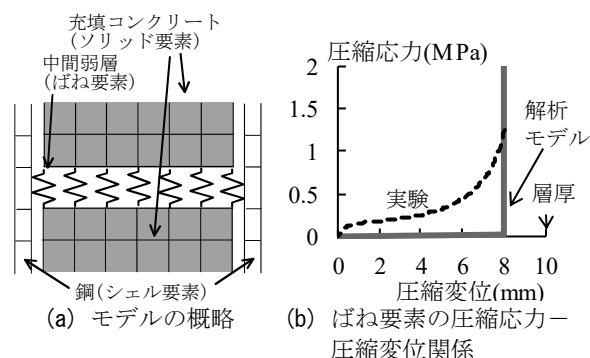


図-6 中間弱層のモデル化

重が伝達されるようになり，図-7(d) のように水平耐力が再上昇したと考えられる．なお，中間弱層を持つ CFT 脚柱の場合，水平耐力の第一ピーク点までは無充填脚柱とほぼ等しくなるように中間弱層を導入したが，実験では図-7(d) のように最大耐力が若干大きく，沈下量もやや小さくなった．これは，中間弱層を持つ CFT 脚柱では内部にコンクリートが充填されているため，無充填脚柱と異なり補剛パネルの局部座屈による変形が内側へ凹むことができず，凸型のみになることによるものと考えられる．

次に，円形断面脚柱に関して図-8 をもとに検討する．無充填脚柱でのピーク点 ($-3.8u_0$ ， $-1.47H_0$) に比べて CFT 脚柱でのピーク点は ($-6u_0$ ， $-2.07H_0$) であり，正方形断面脚柱同様に，変形能が大幅に向上するが，耐力も約 1.4 倍に増加した．一方，図-8(c) に示すように，中間弱層を持つ脚柱での水平荷重—水平変位の包絡線は，ピーク点までは無充填脚柱とほぼ一致し，最大耐力も $-1.52H_0$ でほとんど上昇しなかった．その後，耐力は低下したが，8 サイクル目で低下が止まり包絡線は約 $0.8H_0$ でほぼ一定値で推移した．また，図-9(b) に示す鉛直変位の推移についても，途中までは無充填脚柱とほぼ同様であり，7～8 サイクル目で沈下量が中間弱層の厚さである約 10mm に到達すると沈下量の増加率が小さくなっている．したがって，正方形断面脚柱と同様，円形断面脚柱も中間弱層が圧壊して上下のコンクリート層が接触すると，水平耐力の低下が止まるという現象を確認できた．ただし，この供試体では中間弱層が圧壊して水平耐力が再上昇するまでかなりの耐力低下が生じており，導入した正方形断面脚柱と等しい中間弱層の厚さ 10mm は円形断面脚柱には過大であったといえる．より薄い層厚が適切であったと考えられる．ここでは，事前の FE 解析を省略して簡易的に矩形断面脚柱と等しい中間弱層の層厚を準用したが，実験から，脚柱断面形状による層厚の影響は大きいことが判明した．したが

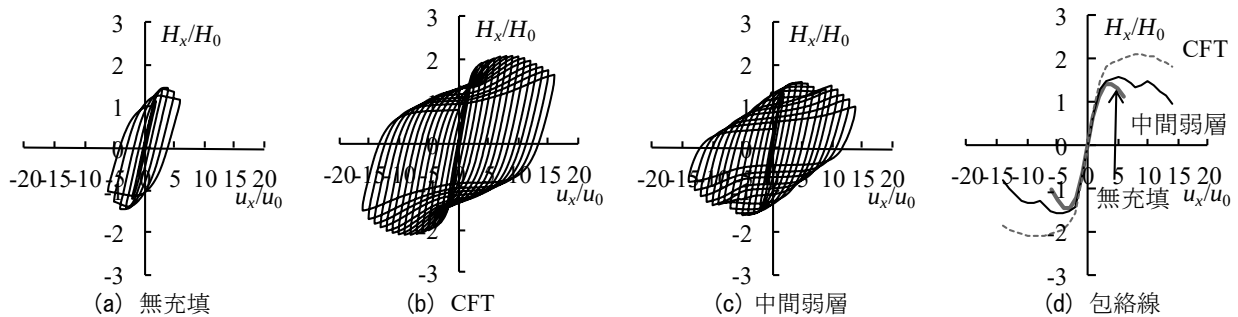


図-7 正方形断面脚柱頂部の水平荷重—水平変位関係（実験）

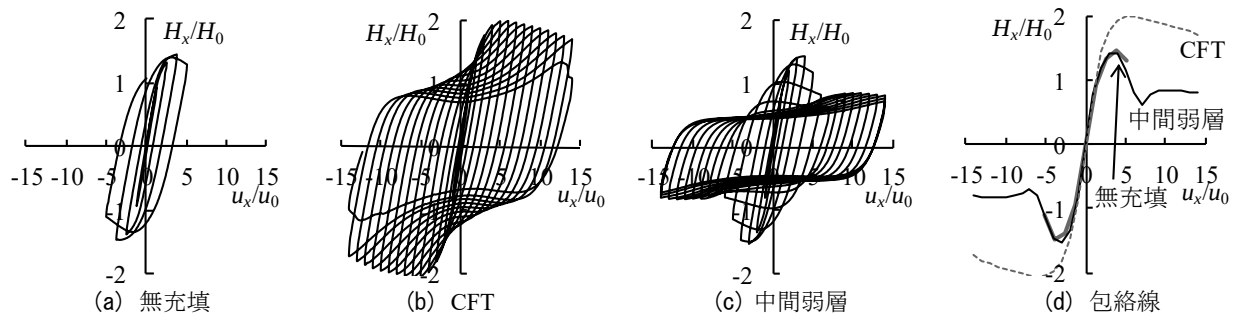


図-8 円形断面脚柱頂部の水平荷重—水平変位関係（実験）

って、断面形状や諸元の異なる脚柱の場合、FE 解析による中間弱層の効果の事前検討は重要といえる。なお、正方形断面脚柱と異なり、中間弱層を持つ円形断面 CFT 脚柱の場合、図-8(d)のように中間弱層が圧壊する以前の挙動は無充填脚柱とほぼ同一である。これは、円形断面脚柱の場合、無充填脚柱であっても局部座屈変形は外側へ生じるため、充填コンクリートの有無によらず局部座屈変形モードがほとんど変わらないことによると考えられる。

6. FE モデルによる実験の再現解析

4. の FE モデルを用いた各実験の再現解析結果として、正方形断面および円形断面の無充填脚柱、CFT 脚柱、中間弱層を持つ CFT 脚柱の水平荷重—水平変位関係を図-10、図-11 に示す。また、鉛直変位—サイクル関係を図-12 に示す。

図-10～図-12 を見ると、正方形断面および円形断面の無充填脚柱および CFT 脚柱については、ほぼ実験結果は数値解析により再現できていることがわかる。一方、中間弱層を持つ CFT 脚柱の挙動に関して数値解析結果は実験と若干差異になっている。すなわち、正方形断面の中間弱層を持つ CFT 脚柱では、図-10(c)、図-12(a)のように、耐力の再上昇が生じるタイミングが解析結果のほうが1～2サイクル早く生じている。また、耐力の回復が大きく、サイクルが進むと無充填脚柱の最大耐力を上回るようになり、CFT 脚柱の包絡線に近づいていく。これは、図-

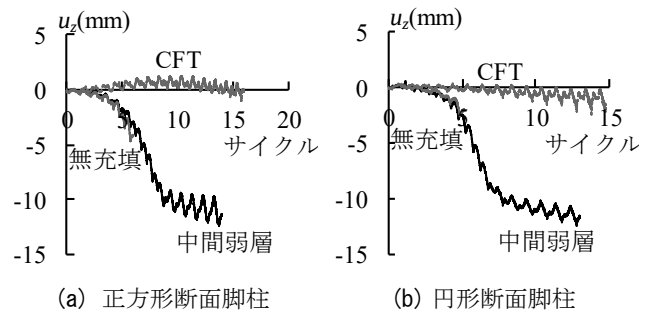


図-9 脚柱頂部の鉛直変位の推移（実験）

12(a)に示すように、数値解析による沈下の度合いが早い段階で鈍化することから、実験に比べて早いサイクルで充填コンクリートの上下層が接触し、鉛直力が充填コンクリートに伝達されたことによると考えられる。円形断面の中間弱層を持つ CFT 脚柱でも、図-11 のように、解析結果の方が1サイクル程度早く耐力の再上昇が生じ、上昇量も大きくなった。これは、図-12(b)に示すように、円形断面脚柱においても鉛直変位の沈下の度合いが早期に鈍化するからである。

FE モデルによる解析で中間弱層を持つ CFT 脚柱の水平耐力の再上昇が早く生じた理由としては、解析に用いた中間弱層のばねの構成関係を剛な載荷板によるスチレンボードの圧縮試験で求めたため、2次のばね剛性が過大に評価されたことが考えられる。これにより、中間弱層を介して早期に充填コンクリートが鉛直荷重を支持したので、早期の水平耐力の上昇につながったといえる。実際の中間弱層のスチレンボードは、剛性の低い、また接触面に凹凸

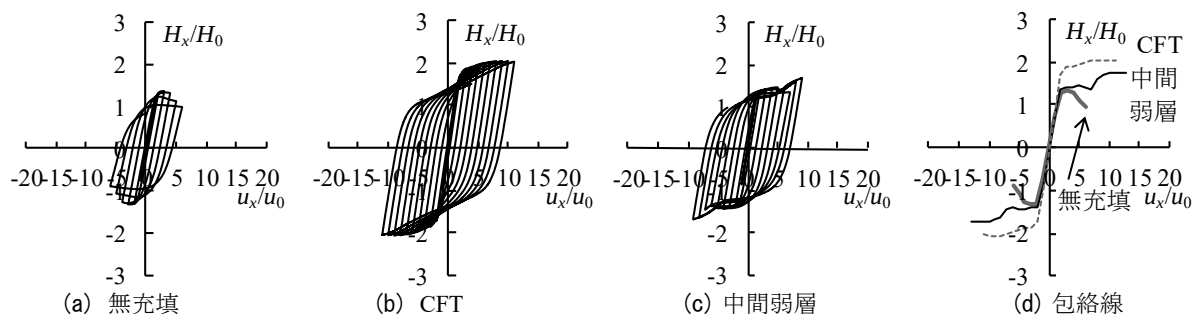


図-10 正方形断面脚柱頂部の水平荷重—水平変位関係（解析）

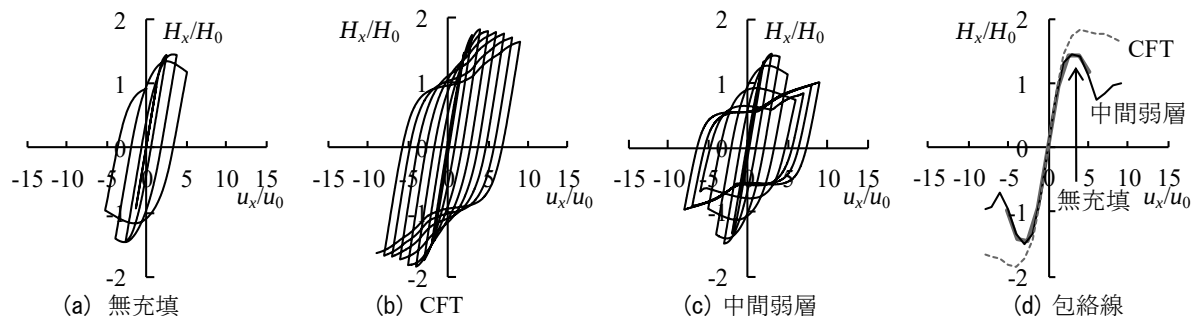


図-11 円形断面脚柱頂部の水平荷重—水平変位関係（解析）

のある上下のコンクリート表面を介して載荷されるので、接触後のばねの剛性が低いと考えられる。

FE モデルには上記のような問題点はあるものの、中間弱層を導入した正方形断面、円形断面の CFT 脚柱としての特徴的な挙動である載荷当初は無充填脚柱に近い挙動を表し、中間弱層が圧壊し上下コンクリートが接触すると充填コンクリートに鉛直力が作用し水平耐力が再上昇するという一連の挙動特性については再現できている。このことから、中間弱層のモデル化について今後改善の余地はあるものの、提示した FE モデルは中間弱層を持つ CFT 脚柱の挙動特性を予測できる有用なモデルと言える。

7. 中間弱層の層厚の影響

載荷実験から、中間弱層を持つ CFT 脚柱はその水平耐力を無充填脚柱の耐力から上昇するのを抑制しつつ、変形能を高めることができることを確認した。とくに、正方形断面の脚柱についてはほぼ想定通りの満足できる結果が得られた。一方、円形断面脚柱については最大耐力の上昇を抑えることはできたが、変形能が確保された耐力レベルが最大耐力から 20%程度低下したものであった。これは、正方形断面脚柱で算定した中間弱層層厚 10mm を円形断面脚柱の中間弱層にも準用したからであり、層厚が大きかったことによると考えられる。そこで、ここでは、充填コンクリートによる効果が早期に生じるよ

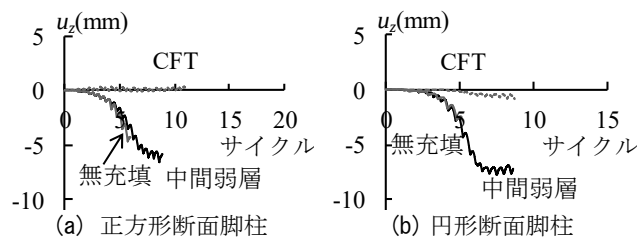


図-12 脚柱頂部の鉛直変位の推移（解析）

うに、円形断面脚柱において中間弱層の層厚を 2.5mm, 5mm と薄くして FE モデルによる解析を行った。解析では、これらの層厚で用いる中間弱層のばねの 1 次剛性と 2 次剛性の変化点をそれぞれ 2mm と 4mm に設定した。

解析結果を図-13、図-14 に示す。これによると、中間弱層を薄くするほど上下の充填コンクリートが接触するタイミングが早まる。層厚 5mm では耐力低下が顕著ではない段階で耐力の再上昇が生じており、耐力低下を抑えて変形能を向上させることができてきている。一方、層厚を 2.5mm した場合には、脚柱耐力が無充填脚柱の最大耐力を上回って増加した。したがって、中間弱層の層厚は 2.5mm 以上で 5mm までの範囲で設定するのがよいと考えられる。今後、実験による検証が必要である。

8. まとめ

既設中空鋼脚柱の耐震補強において、鋼脚柱内部にコンクリートを充填する CFT 化は変形能を大幅に向上させる容易でかつ効果的な手法である。しかし

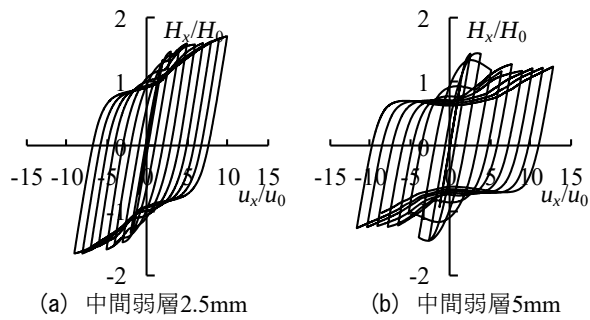


図-13 円形断面脚柱頂部の水平荷重—水平変位関係 (中間弱層の層厚の影響)

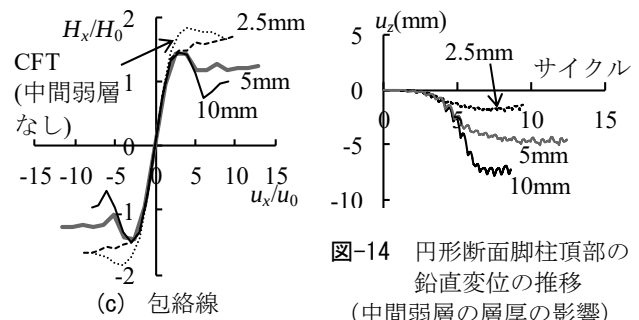


図-14 円形断面脚柱頂部の鉛直変位の推移 (中間弱層の層厚の影響)

ながら、コンクリートを充填することにより脚柱の最大耐力も同時に上昇するため、無充填脚柱を前提に設計された基礎構造の耐力を上回る可能性がある。このような場合には、基礎の補強も必要になるためコンクリートの充填は必ずしも容易な耐震補強法にならない。そこで、本研究では、充填コンクリートを上下2層に分離してその間に低強度・低剛性の中間弱層を導入することで、CFT化した脚柱の最大耐力の上昇を抑え変位能のみを向上させる簡便な無充填脚柱の耐震補強法を提案し、その効果を実験ならびに精緻なFE解析で検討した。検討の結果、適切な中間弱層を挿入すると、CFT化した脚柱の耐力上昇がほとんどなく変位能のみ向上させることが可能であることがわかった。ただ、適切な中間弱層は鋼脚柱の形状や諸元に影響されるので、その設定には中間弱層の挙動が正確に再現できるFEモデルを用いて事前に検討する必要がある。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費16H02359、16K18140の助成をいただいた。また、正方形断面脚柱実験の一部は名古屋高速道路公社の受託研究、円形断面脚柱実験の一部は阪神高速道路株式会社の研究助成によるものである。

参考文献

- 1) 後藤 芳顕, 関一優, 海老澤健正, 呂西林: 地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp.101-120, 2013.
- 2) Goto, Y., Ebisawa, T. and Lu X.: Local Buckling Restraining Behavior of Thin-Walled Circular CFT Columns under Seismic Loads, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol.140, No.5, pp.04013105-1-14, 2014.
- 3) 金井宏英, 大岩俊則, 後藤芳顕, 海老澤健正: 2方向繰返し荷重を受けるコンクリート充填矩形断面鋼製橋脚のFEM解析, 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-036, pp.71-72, 2012.

- 4) 後藤芳顕, Ghosh Prosenjit Kumar, 川西直樹: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰返し挙動のFEM解析, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.487-504, 2009.
- 5) Goto, Y., Ghosh, P. K. and Kawanishi, N.: Nonlinear finite element analysis for hysteretic behavior of thin-walled circular steel columns with in-filled concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol.136, No.11, pp.1413-1422, 2010.
- 6) 後藤芳顕, 水野貢介, Ghosh Prosenjit Kumar, 藤井雄介: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰返し挙動のFEM解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.816-835, 2010.
- 7) Goto, Y., Mizuno, K. and Ghosh, P. K.: Nonlinear finite element analysis for cyclic behavior of thin-walled stiffened rectangular steel columns with in-filled concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol.138, No.5, pp.571-584, 2012.
- 8) Dassault Systems Simulia Corp.: ABAQUS/Standard user's manual, 2014.
- 9) 後藤芳顕, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.189-206, 1998.
- 10) Goto, Y., Wang, Q. Y. and Obata, M.: FEM analysis for hysteretic behavior of thin-walled column, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.11, pp.1290-1301, 1998.
- 11) 後藤芳顕, 江坤生, 小畑誠: 2方向繰返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集, No.790/I-70, pp.181-198, 2005.
- 12) Goto, Y., Jiang, K. and Obata, M.: Stability and ductility of thin-walled circular steel columns under cyclic bidirectional loading, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol.132, No.10, pp.1621-1631, 2006.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書「耐震性能照査編」, 2002.