

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04322

研究課題名(和文) 中空鋼製橋脚柱のコンクリート充填による耐震補強工法での耐力上昇の抑制法

研究課題名(英文) The method to restrict the increase of strength of hollow steel bridge pier by in-filled concrete for seismic retrofitting

研究代表者

海老澤 健正 (Ebisawa, Takemasa)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90332709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：中空鋼製柱を耐震補強する場合、内部にコンクリートを充填する方法(CFT化)が多く用いられている。本研究では柱のCFT化に伴って生じる柱の耐力上昇を抑制するために、充填コンクリートに中間弱層を設けた2相構造にし、弱層に適切な強度、剛性、層厚、挿入位置を設定することで、耐力上昇を制御する。鋼製柱の静的繰返し載荷実験により中間弱層導入効果を検証するとともに、数値解析によりその挙動を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中空鋼製柱のCFT化は必ずしも望ましくない耐力上昇をもたらす。既設構造では基礎の補強が困難であるので、基礎の耐力がCFT化で上昇した柱の耐力を下回ることも稀ではなく、地震時に基礎の損傷が先行すると柱が十分な耐震性能を発揮できないという問題が生じる。充填コンクリートに中間弱層を設けた2相構造を導入することで、CFT柱の変形性能を保持しつつ耐力上昇を抑制するという従来のCFT化では不可能であった2つの要素を独立に制御ができるようになる。したがって、従来CFT化による鋼製柱の耐震補強法でのネックであった上記問題は、本試みにより解消され、CFT化による耐震補強が容易になる。

研究成果の概要(英文)：For seismic retrofitting of the hollow steel pier, the method that concrete is filled in the pier is often used. In this study, to restrict increasing of the strength of the pier by in-filled concrete, the middle weak layer is introduced in the in-filled concrete. The increasing of the strength of the pier is controlled by appropriate strength, stiffness, thickness and position of the weak layer. The effect of the weak layer was examined by the static tests of the steel piers and the behavior of static tests was predicted by the numerical analysis.

研究分野：耐震工学，構造工学，計算力学

キーワード：耐震設計 鋼製橋脚 補強 CFT 変形能 耐力

1. 研究開始当初の背景

橋梁等を支持する橋脚等の柱として中空の鋼製柱がしばしば用いられる。これらの中空の鋼製柱では、柱基部に局部座屈変形が生じるため変形能に乏しく、最大耐力到達後には水平復元力が急激に低下(図 1<a>)し、倒壊に至る場合も想定される。このような中空鋼製柱の耐震性能向上策として多く用いられているのが鋼製柱内部にコンクリートを充填して CFT 柱とする工法である。この鋼製柱の CFT 化は図 1のように中空の鋼製柱と比べて変形性能を大きく向上させるが、同時に柱の耐力上昇をもたらす。しかし、既設構造では地中の基礎構造の補強が困難であるので、基礎の耐力が CFT 化で上昇した柱の耐力を下回る場合も稀ではなく、地震時に基礎の損傷が先行し、柱が十分な耐震性能を発揮できない場合も多い。したがって、現状では、CFT 化による鋼製柱の耐震補強が適用できるのは柱の耐力上昇に対応できる余剰耐力を既設の基礎構造が持っている場合に限定される。この現状を打開し、CFT 化による耐震補強法を広く既設の鋼製柱に適用可能とするために、図 1<c>のように CFT 化で生じる柱の耐力上昇を制御し、変形能のみを向上する実用的な方法の開発が切望されている。

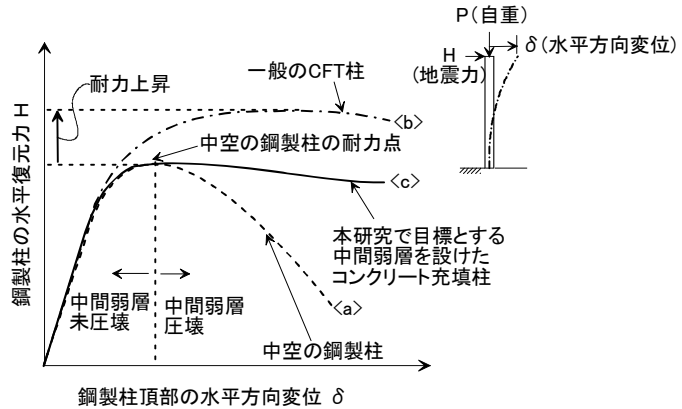


図 1 CFT 柱の水平復元力—水平変位関係

2. 研究の目的

中空断面鋼製柱の CFT 化で生じる柱の耐力上昇を制御し、変形能のみを向上する簡便で実用的な方法の開発を目的とする。

研究代表者らが独自に開発した精緻な FE モデルにより CFT 化した鋼製柱の変形能向上および耐力上昇の機構を詳細に検討した結果、CFT 化での耐力上昇が生じる原因として、柱に作用する曲げ圧縮力が鋼管の局部座屈後も充填コンクリートで支持されることであることが判明した(図 2)。そして、この局部座屈発生位置の充填コンクリートに低剛性・低強度の材料からなる一定層厚の中間弱層(図 3)を設けた 2 相構造にして曲げ圧縮力に対する充填コンクリートの支持力を低減させる比較的簡単な手法によれば、CFT 化による柱の変形性能の向上に影響を与えずに柱の耐力を低減できることがわかった。ここでは、さらに、中間弱層の強度、剛性、層厚、挿入位置を広範囲に変化させることで CFT 化による耐力上昇を定量的にコントロールすることの可能性を検討する。すなわち、CFT 柱の変形性能を保持しつつ耐力上昇を抑制するという従来の CFT 化では不可能であった 2 つの要素を独立に制御することを目指す。

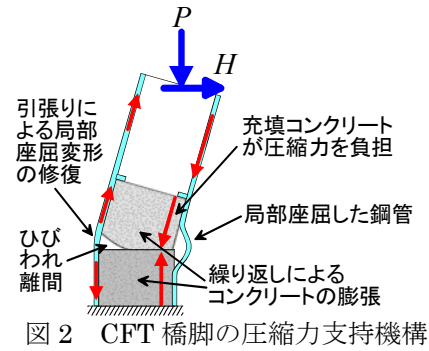


図 2 CFT 橋脚の圧縮力支持機構

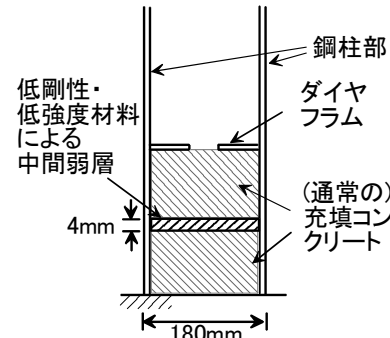


図 3 中間弱層を導入した CFT 柱

表 1 供試体諸元

(a) 矩形断面		(b) 円形断面	
断面外幅 (mm)	300	鋼管外径 (mm)	262.9
板厚 (mm)	4.0	板厚 (mm)	4.0
水平降伏変位 δ_0 (mm)	3.8	水平降伏変位 δ_0 (mm)	4.39
水平降伏荷重 H_0 (kN)	124.8	水平降伏荷重 H_0 (kN)	58.4
幅厚比パラメータ R_R	0.51	径厚比パラメータ R_t	0.09
幅厚比パラメータ R_F	0.49	軸力比 P/P_y	0.15
補剛材剛比 γ/γ^*	2.36		
軸力比 P/P_y	0.15		

3. 研究の方法

(1) 中間弱層を設けた CFT 柱模型を用いた静的載荷試験による挙動検証

1/8 スケールの円形および正方形断面鋼脚柱模型を対象として、CFT 脚柱では充填コンクリートをダイヤフラムまで打設する。中間弱層には発泡スチレンボードを用いるが、これは、ほぼ変形なしに上層コンクリート自重を支持できること、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。中間弱層の層厚と挿入位置

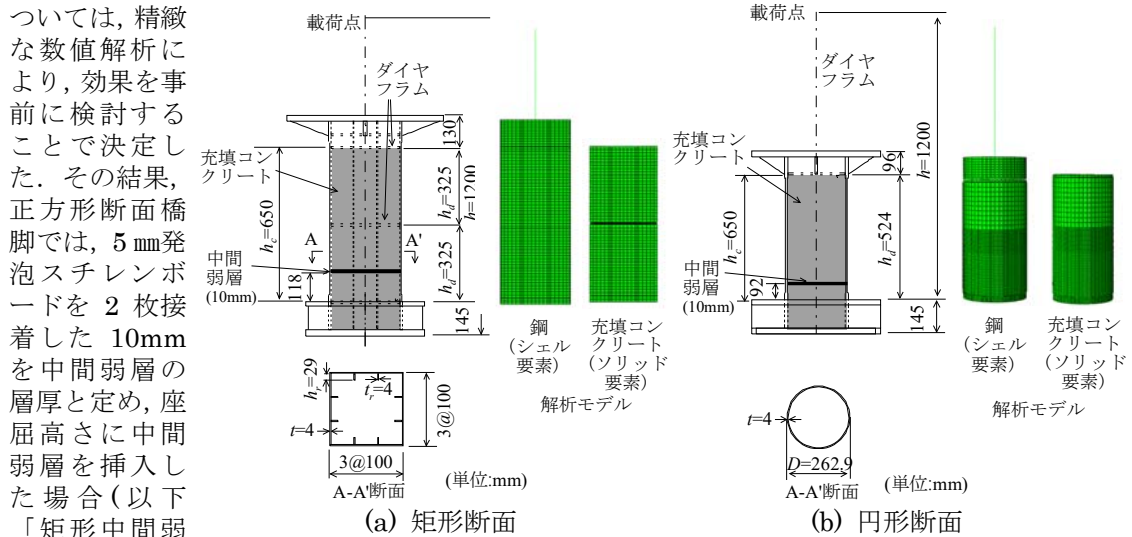


図 4 実験供試体

については、精緻な数値解析により、効果を事前に検討することで決定した。その結果、正方形断面橋脚では、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、座屈高さに中間弱層を挿入した場合(以下「矩形中間弱層1」と)、座屈高さより高いダイヤフラム間隔の半分に当たる高さ162.5mmの位置に中間弱層を挿入した場合(以下「矩形中間弱層2」)に分けて実験を行った。また、スチレンボードによる中間弱層の層厚を3mmと定め、座屈高さ(高さ92mm)に中間弱層を設置した場合(以下「円形中間弱層1」と)、座屈高さより高い位置(高さ116.7mm)に中間弱層を挿入した場合(以下「円形中間弱層2」)に分けて実験を行った。さらに、層厚を厚くした場合として、5mmのスチレンボード2枚を接着して中間弱層の層厚を10mmとした実験(以下「円形中間弱層3」)も行った。実験では、脚柱頂部の水平変位制御による漸増両振り繰り返し载荷を与えた。基準振幅は降伏水平変位 δ_0 とした。用いた供試体諸元を表1および図4に示す。

(2) 数値解析による中間弱層を導入したCFT柱挙動の再現解析

数値解析には非線形汎用解析ソフトABAQUSを用いる。鋼材には三曲面モデルを適用し、単調引張に関するパラメータは材料試験により同定した。充填コンクリートには損傷塑性モデルを適用した。鋼パネルとコンクリートの境界面にはコンタクトペアまたは接触ばね要素、ダイヤフラム、縦リブとコンクリートの境界面には接触ばね要素、コンクリートの仮想ひび割れ面には接触ばね要素およびせん断ばね要素を用いて表現した。また中間弱層は接触ばね要素およびせん断ばね要素を用いて表した。

4. 研究成果

(1) 静的载荷試験による挙動検証

図5に履歴曲線の包絡線、図6に鉛直変位-サイクル関係を示す。まず、矩形断面橋脚について図5(a)より、無充填脚柱のピーク点($-3\delta_0$, $-1.43H_0$)に比べて、CFT脚柱のピーク点は($-7\delta_0$, $-2.11H_0$)であり、変形能が大幅に向上するとともに、耐力も約1.5倍増加した。一方、「中間弱層1」のCFT橋脚では、図5に示すように、 $-4\delta_0$ で最大荷重 $-1.58H_0$ に到達後に荷重は最大荷重の81%まで一旦低下したが、 $\pm 8\delta_0$ で荷重は再び上昇し、ピークは($+10\delta_0$, $-1.48H_0$)に生じた。このように、「矩形中間弱層1」のCFT橋脚は無充填脚柱と比べて変形能が改善されるとともに、最大耐力の上昇は10%程度にとどまっており、中間弱層は耐力上昇を抑制して変形性能を向上させるのに有効であることがわかる。また「矩形中間弱層2」では「矩形中間弱層1」と同様な挙動をしており、挿入高さを座屈高さから離れた場合でも中間弱層の効果が発揮されることがわかる。図6(a)より中間弱層を挿入した場合、発泡スチレン

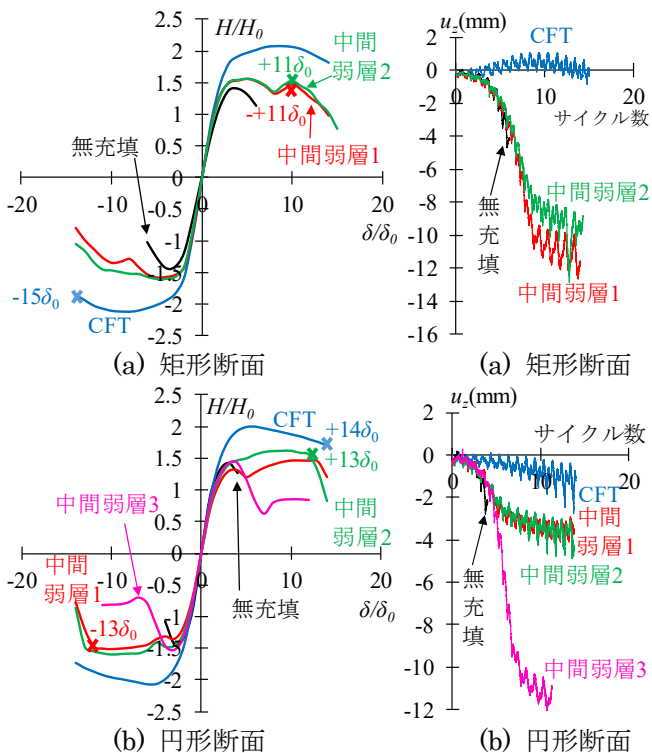


図 5 履歴曲線の包絡線

図 6 鉛直変位の推移

層厚 10mm 近傍に到達すると沈下量の増加は減少した。これは水平荷重の再上昇のサイクル ($\pm 8\delta_0$) とほぼ一致することから、中間弱層圧壊後に上下層のコンクリートが接触したことによると考えられる。

次に、円形断面橋脚について検討する。図 5(b) より、無充填脚柱でのピーク点 ($-3.8\delta_0, -1.47H_0$) に比べて CFT 脚柱でのピーク点は ($-6.0\delta_0, -2.07H_0$) であり、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、「円形中間弱層 1」の供試体では、 $-3.0\delta_0$ で最大荷重 $-1.34H_0$ に到達後に $\pm 5\delta_0$ (=5 サイクル目) で荷重が再び上昇し、無充填脚柱と比べて変形能が改善されている。このとき、最大耐力の上昇は 12% 程度にとどまるとともに、荷重の低下も最大荷重の 97% までに抑えることが出来ており、耐力上昇抑制、変形性能向上の目標がある程度達成された。「円形中間弱層 2」の場合は、さらに荷重の低下が小さいことが分かる。これより、中間弱層挿入高さを座屈高さより高くした場合でも、中間弱層の効果は示せた。一方で、層厚を厚くした「円形中間弱層 3」の場合、耐力が再上昇するまでに大きく耐力が低下した。よって、層厚による影響が大きいことが分かる。図 6(b) より、中間弱層を挿入した場合、発泡スチレンボードの厚さ 3mm 近傍に到達すると沈下量の増加は減少した。これは水平荷重の再上昇のサイクル (5 サイクル目) とほぼ一致することより、中間弱層圧壊後に上下層のコンクリートが接触したためだと考えられる。

以上より、矩形断面脚柱、円形断面脚柱ともに、中間弱層を導入することにより、CFT 化による耐力上昇がほとんどなく変形能のみ向上させることが可能であることを実験的に検証した。

(2) 数値解析による静的荷重試験の再現解析

FE モデルを用いた再現解析結果として、図 7 に水平荷重—水平変位関係を実験結果と比較して示す。これを見ると、ほぼ実験結果は数値解析により再現できている。ただし、「矩形中間弱層 1」の挙動に関しては耐力の再上昇部分においてやや異なっている。これは、数値解析の方が実験に比べて鉛直変位の沈下を過小評価していることおよび 11 サイクルで発生した亀裂が解析で考慮できないことによると考えられる。

以上より、数値解析により概ね中間弱層を導入した脚柱の挙動予測が可能であり、脚柱の耐力上昇がほとんどなく変形能のみ向上させるような CFT 柱を設計することが可能であると考えられる。

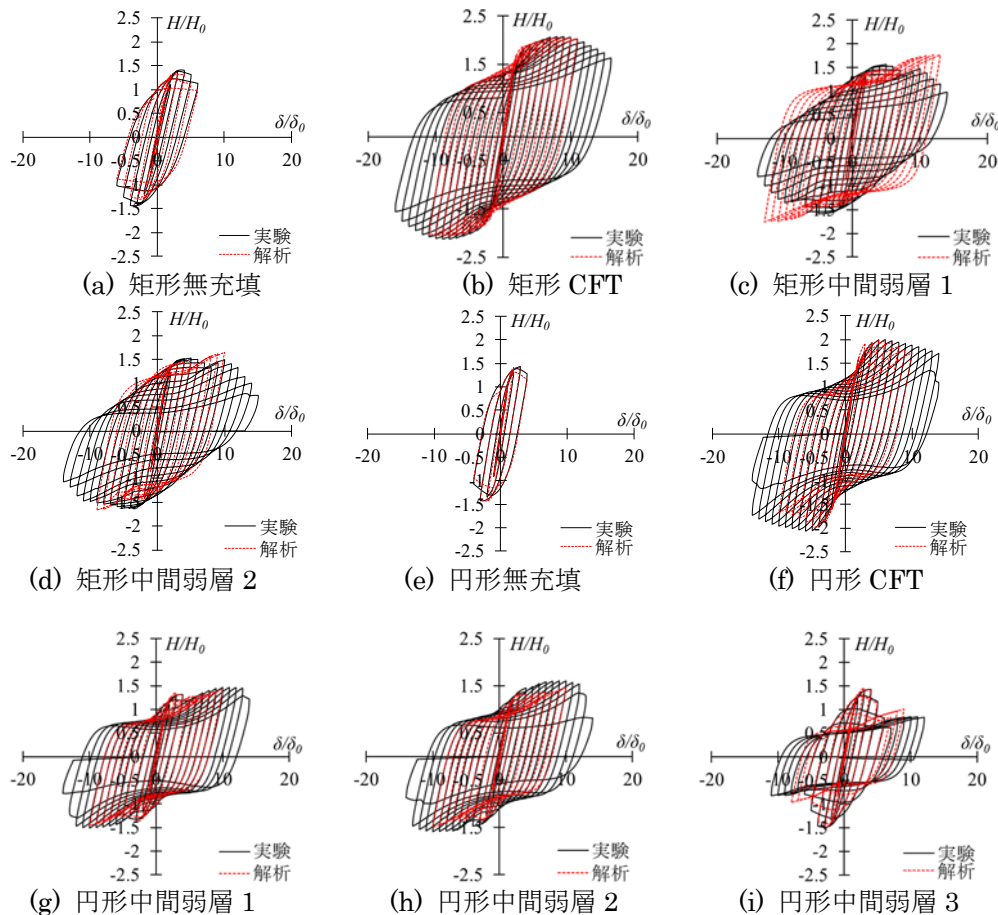


図 7 水平荷重—水平変位関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 GOTO Yoshiaki, EBISAWA Takemasa, SASAKI Katsuhito, KANDA Shinya, MATSUBARA Takuro, TAJIMA Hitoshi	4. 巻 75
2. 論文標題 FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR ULTIMATE CYCLIC BEHAVIOUR OF CONCRETE-FILLED TUBULAR STEEL PIERS WITH GRADE SM570 HIGH STRENGTH STEEL	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 175 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.75.175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 海老澤健正、後藤芳顯、古田高也	4. 巻 22
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 性能に基づく橋梁などの耐震設計に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 371 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川西直樹、後藤芳顯、海老澤健正	4. 巻 22
2. 論文標題 連続高架橋模型の加振実験によるT型と逆L型コンクリート充填鋼製橋脚の崩壊に至る挙動解明と解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 性能に基づく橋梁などの耐震設計に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 187 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 海老澤健正、後藤芳顯、古田高也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第22回性能に基づく橋梁などの耐震設計に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川西直樹、後藤芳顯、海老澤健正
2. 発表標題 連続高架橋模型の加振実験によるT型と逆L型コンクリート充填鋼製橋脚の崩壊に至る挙動解明と解析
3. 学会等名 第22回性能に基づく橋梁などの耐震設計に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野雅之、後藤芳顯、海老澤健正、川西直樹、大門大
2. 発表標題 SM570鋼によるY型橋脚の耐震安全性の3次元照査
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野雅之
2. 発表標題 CFT化したSM570鋼による既設橋脚の塑性履歴挙動と耐力上昇の抑制法
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 海老澤 健正, 後藤 芳顯, 古田 高也
2. 発表標題 正方形断面鋼製橋脚柱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抑制法の検討
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古田 高也, 海老澤 健正, 後藤 芳顯
2. 発表標題 円形断面鋼製橋脚柱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抑制法の検討
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関