

フライアッシュ混合ポリウレタンを充填した鋼管柱の弾塑性力学特性に関する数値シミュレーション

劉 貴位¹・大塚 久哲²・宇山 友理³・清水 敦夫⁴

¹九州大学 工学府建設システム工学専攻博士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail:g-liu@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院教授 工学研究院建設システム部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学 工学府建設システム工学専攻修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail:uyama@doc.kyushu-u.ac.jp

⁴株式会社 イノアック特材 (〒446-0026 愛知県安城市安城町荒下3番4号)

E-mail:a-shimizsu@inoak-tokuzai.co.jp

近年、鋼製橋脚の耐震補強には軽量の充填材が望ましいことから、フライアッシュを主成分とした軽量かつ高強度な充填材 (PUFA, ポリウレタン混合フライアッシュ) の適用性に関する研究が行なわれるようになった。本研究ではまず、PUFA充填鋼管柱の正負交番繰返し載荷試験を行った。次に、密度 $\gamma=1.4\text{t/m}^3$ のPUFA充填鋼管柱を解析対象とし、各材料の非線形特性およびPUFAと鋼管柱との接触面の結合条件を考慮した有限要素解析を実施した。有限要素解析で算定した荷重-変位履歴曲線や鋼管柱基部に生じている局部座屈の進展状況などは正負交番載荷試験で得られた実験値をよく再現しており、本研究で提案した有限要素解析法の妥当性を確認した。さらに、実務耐震補強設計の観点から、PUFAの密度がこの種の複合構造物の弾塑性応答特性に及ぼす影響を数値シミュレーションによって明らかにし、密度 $\gamma=0.6\text{t/m}^3$ 程度まで軽減したPUFAを鋼管柱内部に充填しても十分な耐震補強効果があることを確認した。

Key Words : *Steel pipe column filled by PUFA(Poly Urethan mixed Fly Ash) , Seismic retrofit Methods, cyclic loading test, None-linear response Characteristics.*

1. はじめに

コンクリート充填による鋼製部材の耐震性の向上に関する研究^{1),2),3),4)}は数多く報告されているが、鋼製橋脚の耐震補強には軽量かつ適正な強度とじん性をもつ充填材が望ましいと考えている。そこで、産業廃棄物の有効利用も視野にいれて、低品位のフライアッシュを主成分とした超軽量かつ高強度な充填材であるフライアッシュ混合硬質ポリウレタン (以下 PUFA と称する) を開発した。これまで、従来のコンクリート充填鋼管柱に比べ、PUFA 充填鋼管柱の弾塑性応答特性の力学的優位性に関する基礎的研究^{5),6),7)}を行ってきた。すなわち、様々な材料試験により PUFA の圧縮強度、曲げ引張強度および応力-ひずみ曲線と材料密度の相関関係を定式化し、簡単な試設計や正負交番繰返し載荷試験により PUFA 充填鋼管柱の弾塑性力学特性の優位性、施工可能性を示した。

しかしながら、PUFA の密度、鋼管柱の径厚比や細長比などの組み合わせは多様である。載荷試験によりそれらの構造物の弾塑性力学特性を逐一把握するのは、膨大な労力と経費が必要となる。そこで、材料試験で得られた鋼材及び PUFA 材の応力-ひずみ関係を用いた PUFA 充填鋼管柱の数値シミュレーションによって正負交番載荷試験結果をどの程度再現できるかを把握する必要がある。

そこで、本研究では、まず正負交番繰返し載荷試験で用いた密度 $\gamma=1.4\text{t/m}^3$ のPUFA充填鋼管柱を解析モデルとし、各材料の非線形応答特性、PUFAのひび割れ現象、本研究で提案したPUFA充填材と鋼管柱との接触面の結合条件、などを考慮した有限要素解析を実施した。次に、荷重-変位履歴曲線や鋼管柱基部に生じている局部座屈の進展状況などに着目して、解析値と実験値とを比較して、本研究で提案したPUFA充填鋼管柱の数値解析法の妥当性を検証した。

さらに、文献5)によるとPUFAの密度がその力学特性に及ぼす影響は大きい。また、鋼構造物の耐震補強設計から密度の大きい充填材よりも軽量なPUFAを使用することは有利である。そこで、充填材の密度がこの種の複合構造物の弾塑性応答特性に及ぼす影響を数値解析により明らかにし、密度 $\gamma=0.6\text{t/m}^3$ のPUFAを鋼管柱に充填する場合の耐震補強効果を確認した。

2. 載荷実験の概要

PUFA充填鋼管柱の弾塑性応答特性の力学合理性、鋼管柱基部付近に生じる提灯座屈の発生性状並びにこの種の複合構造物の耐震設計に関する知見などを明らかにする目的として、正負交番繰返し載荷実験(図-1に示す)を実施した。載荷試験の概要は以下の通りである。

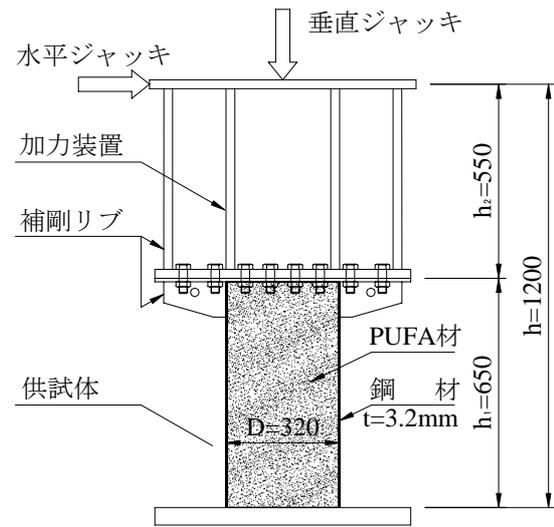


図-1 正負交番繰返し載荷試験の概要(単位mm)

2.1 供試体の諸元

表-1に示す鋼管柱の諸元(測定値)は、道路橋示方書・同解説(平成2年4月)に準拠して設計された3径間連続鋼製箱桁橋(橋長 $L=60.0+60.0+60.0=180.0\text{m}$)をもとに、円形断面鋼製橋脚の外形寸法を相似率(α)で割ったものとする。本研究では、載荷装置の能力や市販されている鋼板の最小肉厚などを配慮して相似率(α)を約1/12とした。

表-1に示す h は、オリジナル橋脚梁における橋脚高さ(上部構造の重心(地震時慣性力の作用位置)から橋脚基部までの距離)の1/12であるが、これに本研究で使用する載荷装置に加力装置高 $h_2=550\text{mm}$ を考慮して、供試体の高さ(h_1)を650mmとした(図-1参照)。

また、式(1)により算出した鋼管柱の径厚比パラメータ(R_t)は0.096であり、平成14年版の道路橋示方書・同解説V耐震設計編に記述されている $R_t \leq 0.08$ を満足していない。これは、平成7年に発生した阪神大震災より前の道路橋示方書に準拠して設計された既設鋼製橋脚の耐震安全性、PUFA充填による耐震補強工法の効果などを検証する目的で供試体の製作が行われたからである。

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (1)$$

ここに、 R_t : 座屈パラメータ

R : 半径(板厚中心線から円中心までの距離=158.4mm)

t : 鋼管柱の板厚(=3.2mm)

なお、道路橋示方書・同解説III鋼橋編により、鋼材の降伏基準点(σ_y)、線形弾性係数(E)、ポアソン比(ν)はそれぞれ235N/mm²、 2.0×10^5 N/mm²、0.3の値を用いている。

2.2 実験方法

表-1 供試体諸元の一覧表

| 鋼管 | | | 供試体高 h_1 (mm) | 加力装置高 h_2 (mm) | h (mm) |
|------------------|------------------|----------------|--------------------|---------------------|-------------|
| 外径 D_1 (mm) | 内径 D_2 (mm) | 板厚 t (mm) | | | |
| 320.0 | 313.6 | 3.2 | 650 | 550 | 1200 |

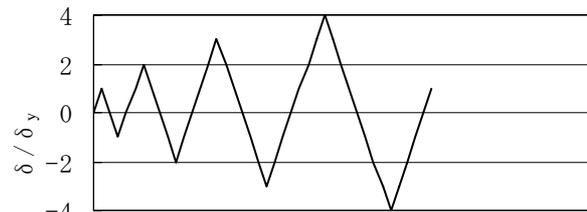


図-2 水平荷重の加力プロセス図

一定の軸圧縮力($N=0.2N_y=0.2\sigma_y \times A_s=1.50 \times 10^2 \text{kN}$)を保ちながら、供試体基部の鋼材に亀裂損傷が発生するまで正負交番繰返し載荷を続けた。また、正負交番繰返し試験で用いた水平荷重の加力プロセスは、図-2に示すように降伏変位 δ_y の整数倍とした。

変位制御の基準値となる降伏変位(δ_y)は、充填材の無い鋼管柱の水平荷重作用位置に初降伏水平耐力 P_y を作用させたときの変位として、軸圧縮力を考慮したベルヌーイ・オイラーの降伏変位とし、式(2)により算出するものである。なお、柱頭部の加力装置は剛体であるため、その曲げ変形は無視した。

$$\delta_y = \frac{P_y h_1^2}{6EI} \{2h_1 + 3h_2\} + \frac{P_y h_1 h_2}{2EI} \{h_1 + 2h_2\} \quad (2)$$

ここに、 δ_y : 降伏変位(mm)

EI : 鋼材の弾性曲げ剛性(Nmm²)

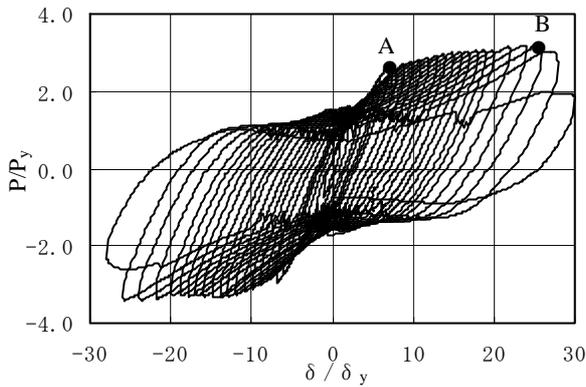


図-3 PUFAを充填した鋼管柱の荷重-変位曲線

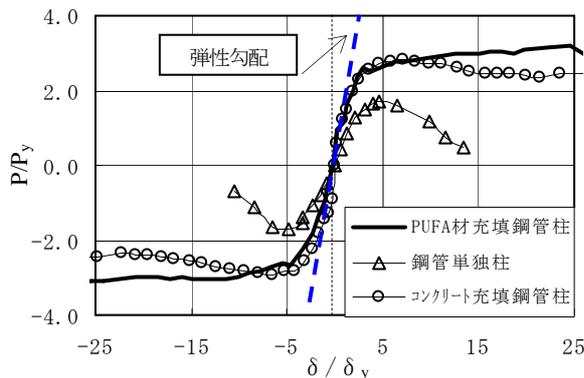


図-4 荷重-変位関係の包絡線

$H_{1,2}$: 供試体と加力装置の高さ(図-1参照)
 P_y : 初降伏耐力(N)で、式(3)より算出する。

$$P_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A_s} \right) \frac{W}{h_1 + h_2} \quad (3)$$

N : 軸圧縮力(N)
 σ_y : 鋼材の降伏応力度(N/mm²)
 A_s : 鋼管の断面積(mm²)
 W : 断面係数(mm³)

式(2), (3)により計算した結果、 $P_y=1.00 \times 10^2 \text{kN}$ 、 $\delta_y=2.5 \text{mm}$ を得た。

2.3 実験結果

密度 $\gamma=1.4 \text{t/mm}^3$ の PUFA を充填した鋼管柱の荷重-変位履歴曲線を図-3 に示す。図中の縦軸と横軸はそれぞれ P_y と δ_y により無次元化している。点 A は PUFA が曲げ引張破壊に達する点である。点 B は鋼板に亀裂が生じる点で、PUFA を充填した鋼管柱の終局点として定義している。

ここで、PUFA を充填した鋼管柱の耐震補強効果を検討するため、充填材のない鋼単独柱及び圧縮強度が 36N/mm^2 であるコンクリートを充填した鋼管柱に対して、

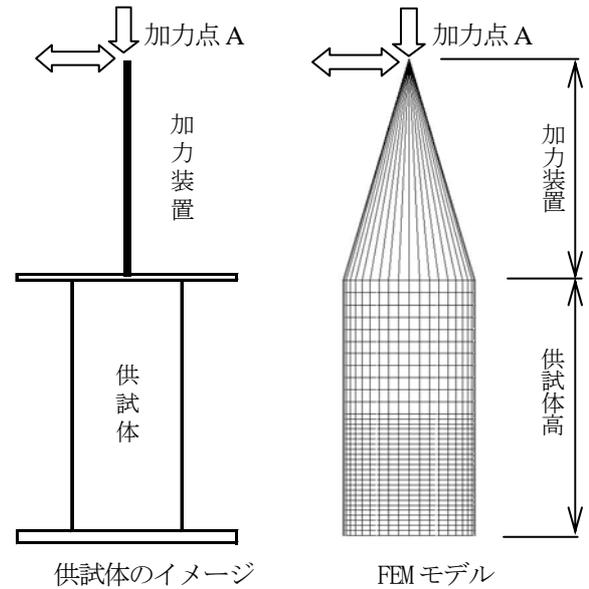


図-5 供試体の概要と FEM モデル

PUFA を充填した鋼管柱と同様な方法にて正負交番繰返し荷重試験を実施し、各供試体の荷重-変位関係の包絡線を比較すると図-4 を得る。なお、図中の横軸と縦軸の定義は図-3 と同じで、青色の実線は PUFA 充填鋼管柱の弾性勾配である。

図-3, 4 から以下のことが言える。

- 1) 充填材のない鋼管柱の耐力とじん性に比べ、PUFA あるいはコンクリートを充填した鋼管柱では、耐力と靱性を確実に向上させることができる。
- 2) PUFA を充填した鋼管柱の終局変位 (δ_u) は約 $25.0 \delta_y$ となり、コンクリート充填鋼管柱と同程度である。
- 3) PUFA を充填した鋼管柱の終局耐力 (P_u) は $3.13P_y$ となり、コンクリート充填鋼管柱の $2.91P_y$ より約 1 割大きい。
- 4) PUFA を充填した鋼管柱の変形性能は、特に変位応答塑性率が 10 以上の領域でコンクリート充填鋼管柱より優れている。

上記のことから、PUFA を充填した鋼管柱は従来の耐震補強技術であるコンクリート充填補強工法と同等以上の耐震補強効果を有していることが立証できたといえよう。

3. 荷重試験における数値シミュレーション

本研究では、汎用解析プログラム (MSC MARC) を用いて PUFA を充填した鋼管柱の正負交番繰返し荷重実験の数値シミュレーションを行った。数値解析の概要は以下の通りである。

3.1 解析モデル

有限要素解析に用いる解析モデルを図-5に示す。メッシュ分割においては要素形状のアスペクト比が1.0となるように、円周方向に40分割、PUFAを充填した鋼管柱の縦(軸)方向に26分割した。鋼管柱基部に発生している座屈の挙動を追跡できるように、鋼管柱下端から鋼管柱の直径までの範囲をさらに2分割した。

3.2 要素タイプ

鋼管柱は4節点のシェル要素、鋼管柱内部に充填しているPUFAは8節点のソリッド要素として設定した。また、加力装置(図-1, 5に参照)の弾性時曲げ剛性は、PUFAを充填した鋼管柱より約50倍も大きいため、供試体の頂面の節点群は水平荷重を作用する点(A)に追従して動くように、剛体リング要素により剛結した。3.4で詳述するように、PUFA充填材と鋼管間はバネ要素を介して連結している。

3.3 境界条件

加力点A(図-5参照)は、水平荷重と上下方向に所定の軸圧縮力を加えられるように自由とした。一方、供試体底面の各節点は6成分の全てを固定とした。

3.4 PUFA充填材と鋼管柱との接触面の結合条件

一般に、鋼管柱内面とPUFA間の結合条件が充填鋼管柱の弾塑性応答特性に及ぼす影響は大きいと考えられる。本研究では鋼管柱内面とPUFA間に3方向バネ要素を設けて力を伝達させることにした。また、以下の理由により両者間の圧縮力は伝達するが、引張力及びせん断力は伝達しないと仮定した。これは、以下の2点を根拠とするものである。

- 1) PUFAと鋼板の粘着力に関して行った引張試験結果によると、鋼管壁内面とPUFA充填材間の粘着力は 0.4N/mm^2 程度と小さい。なお、密度の小さいPUFAでは単位体積に当たりポリウレタンの使用量が少ないため、PUFAと鋼板の粘着力はさらに減少すると考えられる。
- 2) 変位応答塑性率 (δ/δ_y) が7.0となる時点で供試体基部に提灯座屈が見られ、鋼管壁とPUFA間の肌離れが載荷試験より確認された。

3.5 各材料の応力-ひずみ曲線

(1) 密度 $\gamma=1.4\text{t/m}^3$ のPUFA

材料試験で得られたPUFAの応力度-ひずみ曲線を基に、曲げ引張強度と圧縮強度に達してからの評価に着目した様々な比較研究を行なった。比較研究を行なった結果、本論文の有限要素解析に用いたPUFAの応力-ひずみ曲線は下記の通りで提案する。

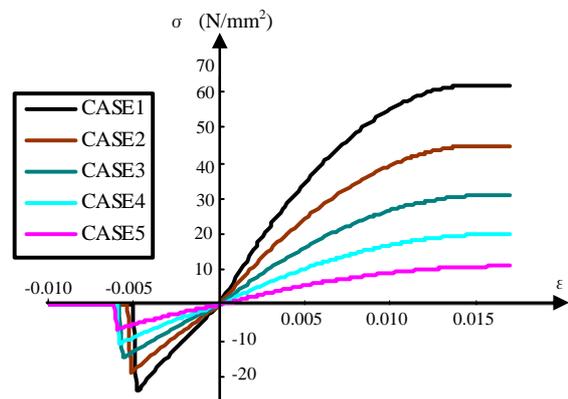


図-6 PUFAの応力-ひずみ曲線

表-2 鋼材の力学性質一覧表(測定値)

| 試験片番号 | 降伏点(N/mm ²) | 引張強度(N/mm ²) | 弾性係数(N/mm ²) |
|-------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| S-1 | 250 | 441 | 1.84×10^5 |
| S-2 | 250 | 441 | 1.97×10^5 |
| S-3 | 250 | 440 | 1.90×10^5 |
| 平均値 | 250 | 441 | 1.90×10^5 |

1) PUFAの圧縮強度及び曲げ引張強度に達するまでの応力度-ひずみ関係は、材料試験で得られたものとし、式(4)により算定する。式中の圧縮応力度及び圧縮ひずみを正、引張応力度及び引張ひずみを負として定義している。

$$\sigma = \sigma_{ck} \frac{\varepsilon}{\beta} \left(\alpha - \frac{\varepsilon}{\beta} \right) \quad (4)$$

ここに、 σ : 応力度(N/mm²)

ε : ひずみ

σ_{ck} : 圧縮強度(N/mm²)

α : 実験定数(圧縮 : 2.0, 引張 : 2.13)

β : 実験定数(圧縮 : 0.015, 引張 : 0.0288)

2) PUFAの曲げ引張ひずみ(ε)が0.0045に達してからの引張応力度(σ)は、引張ひずみに関係なくすべて零とする。

3) PUFAの圧縮ひずみ(ε)が0.0150に達してからの圧縮応力度は、圧縮ひずみの大小に関わらず、常に圧縮強度($\sigma_{ck}=62\text{N/mm}^2$)の値とする。

なお、図-6には密度($\gamma=1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6\text{t/m}^3$)のPUFAの応力-ひずみ曲線を示しているが、本節で密度 $\gamma=1.4\text{t/m}^3$ のPUFAのもののみを使用した。

(2) 鋼材

本研究に用いる鋼材はすべてをSS400である。本研究で使用した鋼板より鋼管柱の軸方向に切り出した試験片を用いて引張試験を行なった。表-2は材料引張試験

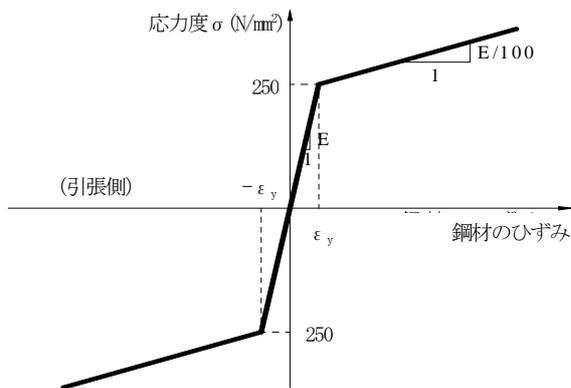


図-7 鋼材の応力度-ひずみ関係

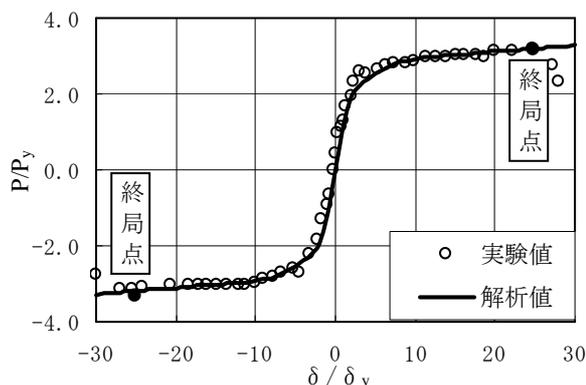


図-9 荷重-変位履歴曲線における包絡線の比較

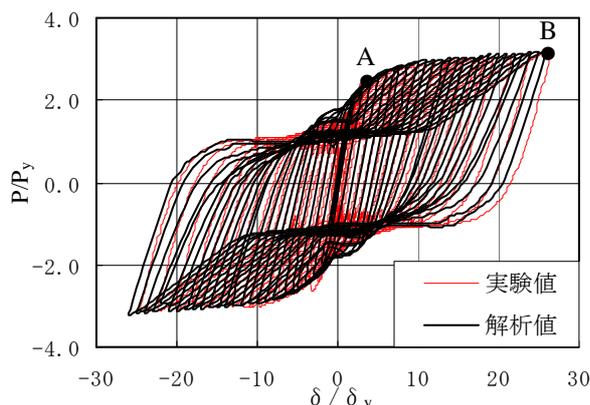


図-8 荷重-変位履歴曲線における包絡線の比較

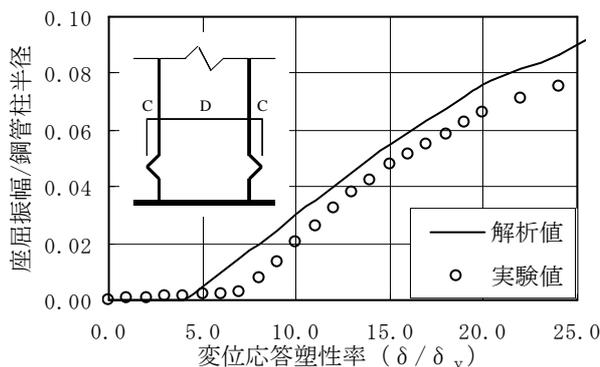


図-10 局部座屈振幅と変位応答塑性率(δ/δ_y)の関係

で得られた鋼材の力学特性を示す。

また、有限要素解析で使用した鋼材の応力度-ひずみ関係は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編の記述により、二次勾配を弾性係数($E=1.9 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)の1/100とするバイリニア型(図-7に示す)として設定した。

3.6 数値シミュレーションの結果

本研究で提案した境界条件、接触面の結合条件、応力度-ひずみ関係を用いた有限要素解析の妥当性を検証するため、PUFA充填鋼管柱の荷重-変位履歴曲線および鋼管柱基部に発生している局部座屈幅-変位応答塑性率関係などに着目して、解析値と試験値との比較検討を行った。

(1) 荷重-変位履歴曲線

有限要素解析で得られたPUFAを充填した鋼管柱の荷重-変位履歴曲線を図-8に示す。図中縦軸と横軸の定義は図-3と同じである。また、比較のため図-3に示す実験値も図中にプロットしている。

図-8から以下のことが言える。

1) 終局状態(点B)に達するまでの荷重-変位履歴曲線の解析値は実験値と良く一致している。

2) 荷重-変位履歴曲線の内部戻り勾配の解析値は、試験値よりわずかに大きくなっているが、有限要素解析で得られた履歴減衰定数および残留変位は若干安全側の評価となるので、有限要素解析結果を耐震補強設計に反映しても差し支えないと考えられる。

3) 変位応答塑性率($\delta/\delta_y=24, 25$)のとき、PUFA充填鋼管柱における荷重-変位曲線の解析値にぎざぎざとなるところが何箇所見られたが、それは解析精度によるものと判断できる。

(2) 荷重-変位履歴曲線の包絡線

PUFA充填鋼管柱の荷重-変位履歴曲線の包絡線を図-9に示す。図中の実線は解析値、○印は試験値、縦軸と横軸の定義は図-3と同じである。

図-9に見られるように、終局点(点B)に達するまでの変位応答塑性率-耐荷力関係の解析値と実験値は、良く合っている。

(3) 局部座屈の進展状況

有限要素解析で得られたPUFA充填鋼管柱基部の局部座屈振幅(C)の進展状況を図-10に示す。図中の横軸は無次元化変位応答塑性率(δ/δ_y)、横軸は座屈の振幅

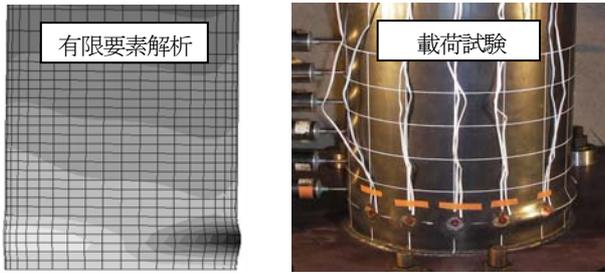


図-11 変位応答塑性率(δ/δ_y)=10.0の時

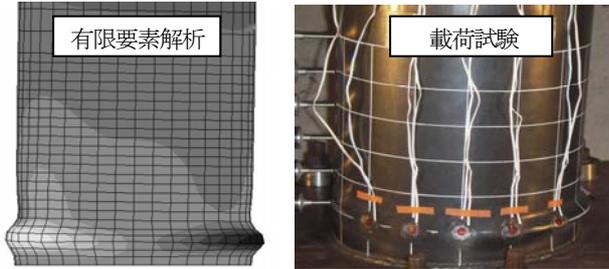


図-12 変位応答塑性率(δ/δ_y)=20.0の時

(C)と鋼管柱の半径($R=D/2$)との比で無次元化している。また、比較をするため、解析値と試験値をそれぞれ実線と○印で区別している。

図-10から以下のことが言える。

1) 有限要素解析で得られた局部座屈は、変位応答塑性率($\delta/\delta_y=4.0$)となる時点で発生し、载荷実験で測定された値 $\delta/\delta_y=7.0$ より小さい。これは、有限要素解析でPUFA充填材と鋼管柱間のPUFA接着強度を無視したことによるものと考えられる。

2) 終局状態($\delta/\delta_y=25.0$)までの局部座屈振幅(C)の解析値は、実験値より15%程度大きい。

なお、数値シミュレーションによりPUFA充填鋼管柱基部に生じる局部座屈現象をどの程度再現出来るかを把握できるため、変位応答塑性率(δ/δ_y)が10.0、20.0となる時の変形図と载荷試験で撮影した写真をそれぞれ図-11、12に示す。

両者の比較からわかるように、数値シミュレーションによりPUFA充填鋼管柱の基部に生じる局部座屈の進展状況をほぼ再現できている。

3.7 本研究で提案した数値解析法の妥当性

本研究で提案している境界条件、PUFAと鋼管柱間の結合条件、応力度-ひずみ関係を用いた有限要素解析結果と载荷試験値との比較結果を総括すると以下の通りである。

1) PUFAを充填した鋼管柱が終局状態に達するまで、有限要素解析で得られた荷重-変位履歴曲線は、実験値と良く一致している。

表-3 検討内容一覧表

| ケース名 | 密度 | 圧縮試験 | | | 曲げ引張試験 | | |
|--------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|
| | | 強度 | 試験定数 | | 強度 | 試験定数 | |
| | γ | f_c | α | β | f_{bt} | α | β |
| | t/m^3 | N/mm^2 | | | N/mm^2 | | |
| CASE-1 | 1.4 | 62 | 2.00 | 0.0150 | 24 | 2.13 | 0.0288 |
| CASE-2 | 1.2 | 45 | 2.00 | 0.0155 | 19 | 1.75 | 0.0242 |
| CASE-3 | 1.0 | 31 | 2.00 | 0.0160 | 15 | 1.45 | 0.0203 |
| CASE-4 | 0.8 | 20 | 2.00 | 0.0165 | 11 | 1.23 | 0.0170 |
| CASE-5 | 0.6 | 11 | 2.00 | 0.0170 | 7 | 1.09 | 0.0144 |

2) 有限要素解析で得られた耐荷力-変位応答塑性率曲線は、正負交番繰返し载荷試験で得られたものを概ね再現することができた。

3) 有限要素解析より鋼管柱基部に生じている局部座屈の進展を把握することができた。

以上のことより、本研究で提案している各材料試験で得られた一軸応力度-ひずみ曲線やPUFAと鋼管との接触面の結合条件を考慮した数値解析法の妥当性は、正負交番繰返し载荷試験より検証できたと考えられ、当該有限要素解析方法で求めた結果を耐震補強設計に反映しても差し支えないといえる。

4. PUFAの密度がこの種の複合構造物の弾塑性応答特性に及ぼす影響

文献5)の研究結果によれば、PUFAの圧縮強度-密度関係および曲げ引張強度-密度関係をそれぞれ式(5)、式(6)に示す。

$$f_c = 31.5\gamma^2 + 0.644\gamma - 0.857 \quad (5)$$

$$f_{bt} = 20.8\gamma - 5.67 \quad (6)$$

ここに、 f_c : 圧縮強度 (N/mm^2)

f_{bt} : 曲げ引張強度 (N/mm^2)

γ : 材料密度 (t/m^3)

上式からPUFAの諸強度は材料密度に大きく依存していることが明白である。また、実際の耐震補強設計においては、PUFAの密度を適切に調整することにより、曲げ耐力と靱性との調和がとれた合理的な耐震設計が可能となるとともに、耐震補強工事費のコストダウンも期待できる。

そこで、本研究では、充填材の密度がPUFA充填鋼管柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を把握するため、载荷試験の数値シミュレーションと同様な方法を用いて有限要素解析を実施した。

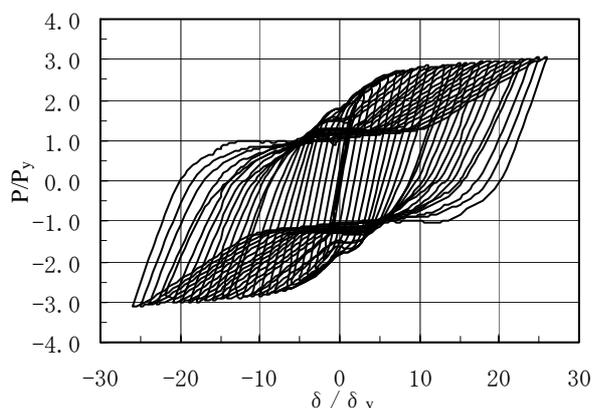


図-13 PUFA 充填材の密度が 1.2 t/m^3 である場合

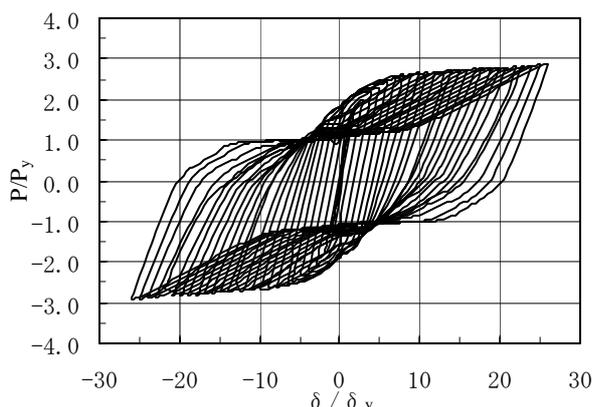


図-14 PUFA 充填材の密度が 1.0 t/m^3 である場合

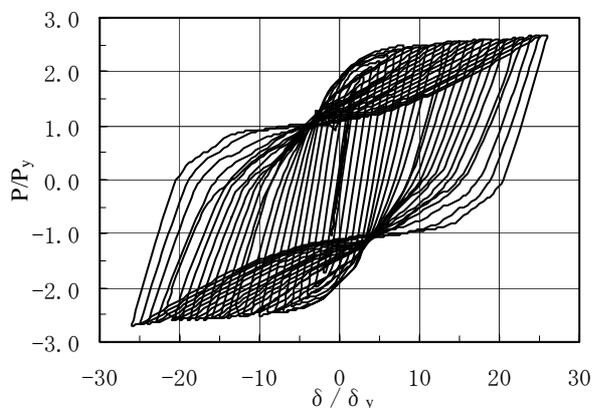


図-15 PUFA 充填材の密度が 0.8 t/m^3 である場合

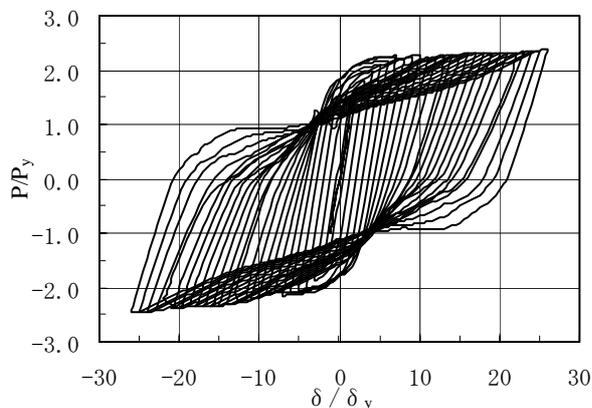


図-16 PUFA 充填材の密度が 0.6 t/m^3 である場合

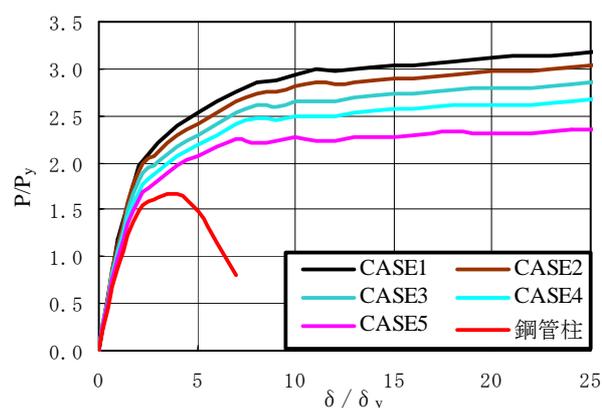


図-17 PUFA 充填材の密度の違いによる包絡線の比較

4.1 検討内容

本研究では PUFA の製造性・施工性および経済性などを念頭に置きながら、鋼管柱供試体内部に充填する PUFA の密度は、今まで検討した $\gamma=1.4 \text{ t/m}^3$ のほかに、文献⁵⁾で確認された $\gamma=1.2, 1.0, 0.8, 0.6 \text{ t/m}^3$ の計 5 種類の PUFA (表-3 に示す) を取り上げ、有限要素解析を行った。

なお、有限要素解析に用いる各 PUFA の応力度-ひずみ関係は、表-3 に示す実験定数 (α, β) および圧縮強度 (f_c) を式(4)に代入して算出した。なお、その結果をそれぞれ図-6 に示す。

4.2 密度の異なる PUFA を充填した鋼管柱の荷重-変位曲線

密度の異なる PUFA (表-1 に示す) を鋼管柱内部に充填した場合、有限要素解析により求めた荷重-変位履歴曲線をそれぞれ図-13~図-16 に示す。各図中の横軸と縦軸の定義は図-3 と同様である。

また、密度の異なる PUFA を鋼管柱内部に充填させる場合の最大耐力・変形性能をどの程度向上させるか、荷重-変位曲線をどのように変化していくか、という PUFA の密度がこの種の複合構造物の弾塑性力学応答特性に及ぼす影響を明確にするため、PUFA 充填材の密度 $\gamma=0.6 \text{ t/m}^3 \sim 1.4 \text{ t/m}^3$ の荷重-変位履歴曲線の包絡線と鋼管柱の単独構造の実験値を合わせて図-17 に示す。

図-8, 図-13~17 から、以下のことが考察できる。

1) PUFA 充填材の密度の大小にかかわらず、終局状態 ($\delta/\delta_y=25$) まで解析しても顕著な耐力低下が見られず、靱性に富んだ骨格曲線を有することがわかった。その要因は、鋼管柱内部に PUFA を充填することにより、鋼管柱の局部座屈の進展が抑制できたからと考えられる。

2) PUFA 充填材の密度が小さくなるに連れて、PUFA 充填鋼管柱の耐力は低下する傾向にある。これは PUFA 充填材の圧縮強度と曲げ引張強度ともに減少して

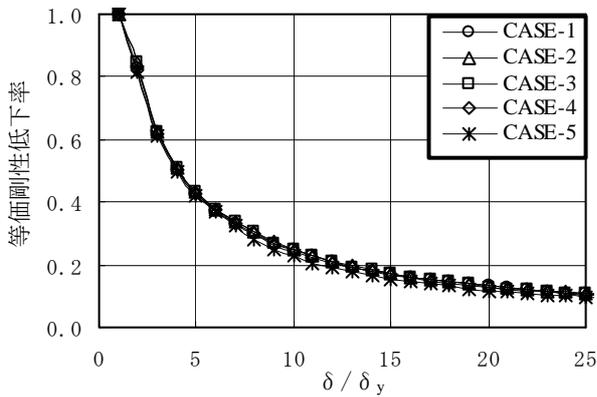


図-18 等価剛性率—変位応答塑性率曲線

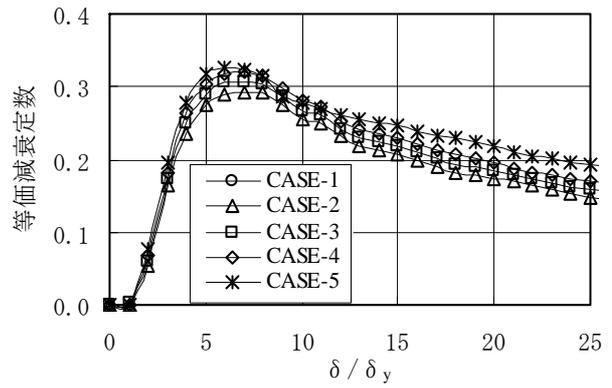


図-19 等価減衰定数—変位応答塑性率曲線

いくことによるものと判断できる。

3) 密度 $\gamma = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 及び 1.4 t/m^3 の PUFA を別々に鋼管柱に充填させる場合の最大耐力はそれぞれ $2.3P_y, 2.7P_y, 2.9P_y, 3.0P_y$ 及び $3.2P_y$ となる。

文献 7)によれば、正負交番繰返し載荷試験で得られたコンクリート充填鋼管柱の最大耐力は $2.9P_y$ であることを踏まえ、普通コンクリート重量の $1/4$ 程度軽減した密度 $\gamma = 0.6 \text{ t/m}^3$ の PUFA を鋼製橋脚に充填すれば、既設鋼製橋脚の耐力とじん性を大幅に向上することが可能であるのみならず、コンクリート充填鋼管柱に比べ最大耐力を約 30% 程度軽減できると地震時慣性力の低減にも期待できるため、既設橋脚基部のアンカーボルト部や基礎工などに対して有利であると考えられる。

4.3 等価剛性低下率—変位応答塑性率

密度の異なる PUFA 充填鋼管柱の等価剛性低下率は、文献⁸⁾の式 (9.3.3) を用いて算出できるので、その結果を図-18に示す。

また、図中の横軸は変位応答塑性率 (δ / δ_y) で、縦軸は等価剛性低下率 (K_{eq}/EI_0) である。

同図から以下のことが言えよう。

- 1) PUFA 充填鋼管柱の等価剛性低下率は変位応答塑性率 (δ / δ_y) と反比例関係を呈している。
- 2) 充填材の密度が PUFA 充填鋼管柱の等価剛性低下率に及ぼす影響がほとんど見られず、ほぼ同じ曲線となっている。

4.4 等価減衰定数—変位応答塑性率

文献⁸⁾の式 (9.3.4) を用いて算出した等価減衰定数と変位応答塑性率の関係を図-19に示す。

同図から以下のことが言える。

- 1) PUFA 充填鋼管柱の等価減衰定数は変位応答塑性率に大きく依存している。変位応答塑性率が $7\delta_y$ 程度に達するまで等価減衰定数は直線的に大きくなるが、ピー

クを過ぎると等価減衰定数は徐々に減少していく。

2) 充填材の密度が小さくなるにつれて PUFA 充填鋼管柱の等価減衰定数は大きくなる傾向にある。

5. 結論

本研究では、一軸圧縮試験から得られた鋼材と PUFA の応力—ひずみ関係、本研究で提案した PUFA 充填材と鋼管柱との接触面の結合条件等を基に有限要素解析を実施した。PUFA 充填鋼管柱の正負交番繰返し載荷試験に対する数値シミュレーションおよび密度の異なる PUFA に対して行った数値シミュレーションから得られた主な知見をまとめると以下の通りである。

(1) 正負交番繰返し載荷試験の数値シミュレーション

- 1) 終局状態に達するまでの荷重—変位曲線の解析値は試験値と良く一致している。
- 2) 有限要素解析値で得られた耐力—変位応答塑性率関係は、載荷試験で測定したものを概ねつかむことができた。
- 3) 有限要素解析によって、正負交番繰返し水平荷重を受ける PUFA 充填鋼管柱の基部に生じる局部座屈の進展状況を再現することができた。
- 4) 以上のことにより、本研究で提案した有限要素解析法は、正負交番繰返し載荷試験で確認された PUFA 充填鋼管柱の挙動を概ねつかむことができた。すなわち、当該有限要素解析法を用いて算定した結果を耐震補強設計に反映しても差し支えないといえよう。

(2) PUFA の密度がこの種の複合構造物の弾塑性応答特性に及ぼす影響

- 1) PUFA の密度の大小に関わらず、終局状態 ($\delta / \delta_y = 25$) までは顕著な耐力低下が見られず、良好な

荷重骨格曲線を保持することができた。

- 2) PUFA の密度が小さくなるに連れて、PUFA 充填鋼管柱の耐荷力は低下する傾向にある。
- 3) PUFA 充填鋼管柱の等価剛性低下率は、変位応答塑性率 (δ/δ_y) と反比例関係を呈しているが、充填材の密度が等価剛性低下率に及ぼす影響はほとんど見られず、ほぼ同じ曲線となっている。
- 4) PUFA 充填鋼管柱の等価減衰定数は、変位応答塑性率に大きく依存している。変位応答塑性率が $7\delta_y$ 程度に達するまで等価減衰定数は直線的に大きくなるが、ピークを過ぎると等価減衰定数は徐々に減少していく。
- 5) 充填材の密度が小さくなるにつれて PUFA 充填鋼管柱の等価減衰定数は、僅かながら大きくなる傾向にある。

以上のように、普通コンクリートに比べ 1/4 程度の密度しかない超軽量の PUFA を鋼製橋脚内部に充填しても、既設鋼製橋脚の耐荷力とじん性を大幅に向上することが可能であることがわかった。また、普通コンクリートに比べ超軽量の PUFA を鋼製橋脚内部に充填すれば、地震時橋脚柱の慣性力をコンクリート充填の場合より軽減することが期待できるため、アンカーボルト部や基礎工など補強が不要になる可能性があると考えられる。

本論文では、有限要素解析による PUFA を充填した鋼管柱の弾塑性応答特性の数値シミュレーションで得られた知見を記したが、また、鋼製橋脚断面の径厚比、材質および軸力比に関しては一種類しか検討していないため、今後パラメータ解析を行って、さらなる検討を行う必要がある。

さらに、矩形断面を有する鋼製橋脚内部に PUFA を充填する場合の弾塑性応答特性と耐震性能の把握や、本提案工法における経済性に関する検討などの研究の課題が残され、引き続き研究を行う予定である。

謝辞

本研究を実施することに当たり、九州産業大学工学部の水田洋司教授を初め、九州大学建設システム工学専攻の古川愛子助手、山崎智彦技官から多大な御指導と御支援をいただき、ここに記して深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：土木研究所資料 コンクリート充填鋼管の耐荷力（その3），pp. 1-61, 1997.
- 2) 井浦雅司，折野明宏，石澤俊希：コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 696/I-58, pp. 285-298, 2002.
- 3) 田村清満，山田正人，池田学，瀧口将志，渡辺忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価，土木学会論文集，No. 640/I-640, pp. 149-163, 2000.
- 4) 後藤芳頭，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. 780/I-70, pp. 181-198, 2005.
- 5) 劉貴位，大塚久哲，水田洋司，清水敦夫：フライアッシュを用いた超軽量・高強度な材料の開発と静的な力学特性に関する基礎研究，材料学会論文集，Vol. 55 No.8, pp. 738-745, 2006.
- 6) 劉貴位，大塚久哲，水田洋司：PUFA を充填した鋼製柱橋脚の弾塑性応答特性と新しい耐震補強工法の提案，第 12 回日本地震工学会シンポジウム，pp. 1050-1053, 2006
- 7) 劉貴位，大塚久哲，清水敦夫：フライアッシュ混合ポリウレタンを充填した鋼管柱の弾塑性応答特性に関する実験的研究，土木学会論文集に掲載予定，2007，
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp. 738-745, 2004

(2007.04.06 受付)

AN ANALYTICAL STUDY ON THE NON-LINEAR RESDONSE CHARACTERISTICS OF STEEL PIPE COLUMN FILLED BY PUFA

Guiwei LIU, Hisanori OTSUKA, Tomoyoshi UYAMA and Atsuo SHIMITSU

In order to improve the seismic performance of highway's steel piers and to reduce the environmental pollutions, a series of fundamental researches on the mechanical behaviors of PUFA (Poly Urethane mixed Fly Ash) have been performed by authors.

This study presents the analytical results for cyclic loading test conducted for steel columns filled by PUFA, FEM method is based on non-linear characteristics of steel and PUFA and the boundary condition between PUFA and steel column proposed suggested by authors. The propriety of this FEM method was inspected by comparison of analysis values and examination ones, which are P- δ curve, and the progressing of local buckling occurred in the bottom of steel pipe. Lastly, the non-linear characteristics of this kind hybrid structure filled by PUFA with different densities were clarified by numerical analysis.