

耐震補強に使用した鋼管添え柱の力学特性

MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL PIPE ATTACHMENT METHOD APPLIED TO SEISMIC STRENGTHENING

森崎 充¹⁾・古田 勝²⁾・阿部和久³⁾

Mitsuru MORISAKI, Masaru FURUTA and Kazuhisa ABE

The steel pipe attachment method has been employed as a seismic strengthening technique for RC columns in cut and cover tunnels. In this method, two concrete-filled tubular steel columns are attached to the RC column from both sides, and they will prevent the tunnel from collapse even if the RC columns undergo shearing failure. In order to appreciate the mechanical properties of the attached column, numerical analyses are accomplished. This paper presents the modeling of the RC and attached columns and then constructs an interaction analysis method. Several discussions are carried out through comparison between the numerical and the experimental results.

Key Words: steel pipe attachment method, seismic strengthening, concrete-filled tubular steel column, RC column, cut and cover tunnel, interaction analysis method

1. はじめに

兵庫県南部地震による地下鉄開削トンネルの被害は、RC中柱のせん断破壊に特徴があった。この被害から、既設地下鉄の開削トンネルRC中柱を対象に、主に鋼板巻き工法による補強が行われているが、工事施工時間の制約や工事費用の縮減の面から、鋼管添え柱工法の採用も多くなっている。この工法の特徴は、写真-1に示すとおり、既設開削トンネルのRC中柱の両側にコンクリート充填円形鋼管柱（以下、CFT鋼管柱という）を添わせて設け、大規模地震時にRC中柱がせん断破壊した場合にも上床を支持し、トンネルの崩壊を防ぐ点である。

鋼管添え柱工法の採用にあたり、補強効果を確認するための実験¹⁾（以下、補強実験という）が行われている。実験結果では、水平変位を与えた場合にはRC中柱とCFT鋼管柱は一体となった挙動を示し、RC中柱のせん断破壊の進行とともに添え柱が軸力を負担することが計測され、実験から耐震補強工法として有効であることが確認されている。

本論文では、RC中柱及びCFT鋼管柱より成る複合構造物の連成解析を行い、上述の補強実験と合わせ、当該工法の有効性や力学特性の検討を行ったものである。



写真-1 CFT鋼管添え柱による耐震補強

- 1) 正会員 (株)クボタ 鋼鋼・ロール営業部
- 2) 正会員 東京都交通局 建設工務部
- 3) 正会員 新潟大学 工学部建設学科

2. CFT鋼管柱の解析

地下鉄開削トンネルの中柱として使用されるCFT鋼管柱は、その上下に支圧板を有しており、支圧板とRC桁とはアンカーボルト6本を用いる程度の軽微な方法で固定されている。そのため、最大荷重時に柱脚基部に破壊ゾーンが形成されて塑性ヒンジとなる挙動²⁾は認められず、支圧板は引張力に抵抗せずRC桁から浮き上がりが生じる。

このような構造のCFT鋼管柱の水平交番載荷実験³⁾を参考に、CFT鋼管柱をファイバーモデルによりモデル化し、解析結果と実験との対比を通して本モデル化の妥当性を確認する。

2. 1 CFT鋼管柱の解析モデル

直径 D 、厚さ t の円形断面の鋼管にコンクリートを充填した長さ ℓ の柱の両端に、直径 D_p 、高さ ℓ_0 の支圧板を取付けたものを考える(図-1)。鋼管柱には変動し得る軸荷重 P_s と水平荷重 Q_s とが作用しているものとする。支圧板は上下端にある梁に接しており、圧縮には抵抗するが、引張力は伝えず、浮き上がりを生じる構造となっている。

CFT鋼管柱は、弾性域ではコンクリートのポアソン比より鋼管のポアソン比の方が大きいいため、鋼管とコンクリートの間に相互作用はない。コンクリートが圧壊し、コンファインド効果が生じてから、鋼管による拘束力 $\alpha\sigma_y$ (α :拘束パラメータ、 σ_y :鋼管の降伏応力)が作用すると考えてよい。

モデル化においては、周方向応力の変動部分は無視し、初期段階から $\alpha\sigma_y$ の周方向応力が作用しているものとして扱い、軸方向応力と周方向応力とは分離して考え、等価な一軸応力-ひずみ曲線に基づき、解析モデルを構成する。

図-2に示す実験³⁾に用いた試験体について、対称性を考慮して柱中央から下方をファイバーモデルを用いてモデル化する。図-3に示すとおり軸方向に n 分割し、各要素長を ℓ_i ($i=1, \dots, n$)とし、各要素断面は平面保持の仮定に従うものとする。また、断面は図-4に示すとおり、断面の図心から y の位置にコンクリートの微小面積 dA_c 、鋼管の微小面積 dA_s を定義する。

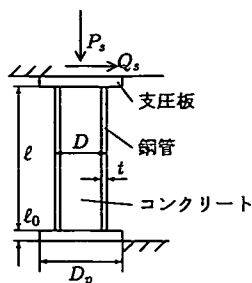


図-1 解析モデルの概念図

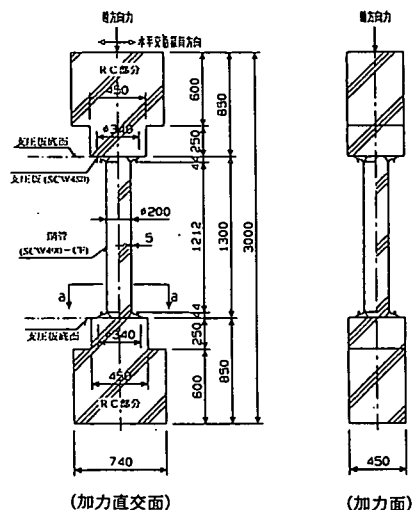


図-2 試験体

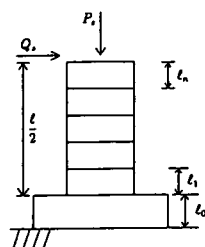


図-3 軸方向の分割

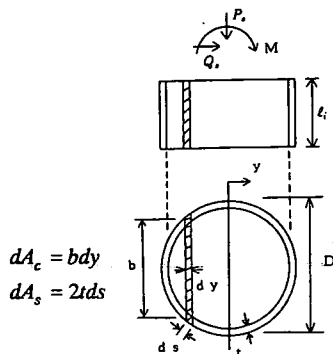


図-4 断面の定義

鋼管柱のモデル化においては図-5に示すとおり、要素 i の両端面の相対回転角を θ_0 とし、 i から上端までの距離を L_i 、 H_i と定義し、軸力の増分 dP_i 、及び曲げモーメントの増分 dM_i を考え、関係式を導くと次式を得る。

$$\begin{aligned} \alpha_i dP_i + L_i dQ_i + \beta_{ij} d\theta_j + P_i L_i d\theta_0 &= 0 \\ (i=1, \dots, n), \\ \alpha_i &= H_i + L_i \theta_0 - \frac{s_{2i}}{s_{1i}}, \\ \beta_{ij} &= P_i \hat{H}_{ij} - \delta_{ij} \left\{ \frac{1}{\ell_i} (s_{3i} - \frac{s_{2i}^2}{s_{1i}}) \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

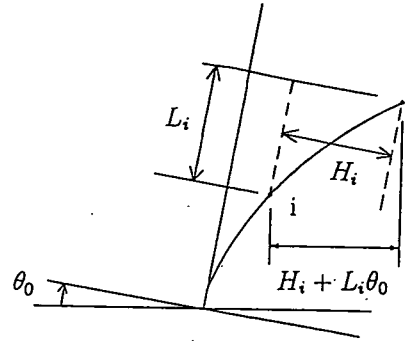


図-5 L_i 、 H_i の定義

また、軸力及び曲げモーメントの増分と同様に支圧板の応力増分 $d\sigma_p$ を考えると、式(1)と同様な式を得ることができる。

次に、鋼管柱の上下端の相対水平変位増分を $d\bar{u}$ とすると、水平変位の適合条件より最終的には次式を得る。

$$\hat{H}_{1j} d\theta_j + (L_1 + \ell_0) d\theta_0 = \frac{d\bar{u}}{2} \quad (2)$$

また、鋼管柱の上下端の相対軸方向変位増分 $d\bar{v}$ とすると、軸方向変位の適合条件より次式を得る。

$$\left(\frac{1}{s_{10}} + \sum \frac{\ell_j}{s_{1j}} \right) dP_s - \frac{s_{20}}{s_{10}} d\theta_0 - \sum \frac{s_{2i}}{s_{1i}} d\theta_i = -\frac{d\bar{v}}{2} \quad (3)$$

鋼管柱の求解に必要な方程式は、式(1)、(2)、(3)及び支圧板の応力増分に関する式より与えられる。

2. 2 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線

鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみの関係式は、参考文献4)から、次式で与えられる。

$$Y = \frac{AX + (d-1)X^2}{1 + (A-2)X + dX^2} \quad (4)$$

ここで、

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}}, \quad Y = \frac{\sigma_c}{c\sigma_{cb}}, \quad A = \frac{\bar{E}_c \varepsilon_{c0}}{c\sigma_{cb}}$$

なお、 ε_c 、 σ_c はコンクリートのひずみと応力、 ε_{c0} 、 $c\sigma_{cb}$ は拘束されたコンクリートの強度時のひずみと応力、 $\bar{E}_c$ は始源剛性である。

繰返し時の応力-ひずみ関係は、図-6に示すとおりとする。

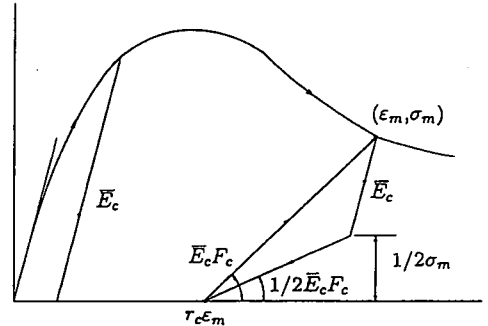


図-6 コンファインドコンクリートの繰返し時の応力-ひずみ曲線

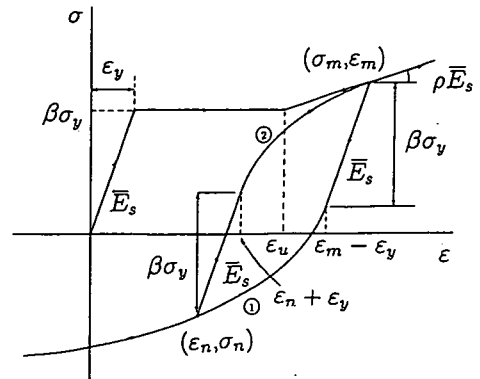


図-7 鋼管の繰返し載荷時の応力-ひずみ曲線

2. 3 鋼管の応力-ひずみ曲線

鋼管の応力-ひずみは、Von Mises の降伏条件に従うものとし、繰返し載荷時の応力-ひずみ曲線を図-7に示すとおりとする⁵⁾。図中の①、②の曲線は、

式(5)により与える。

$$\textcircled{1} \quad \sigma = \sigma_m - \beta \sigma_y + \frac{\bar{E}_s(\varepsilon - \varepsilon_m + \varepsilon_y)}{1 - \left(\frac{1}{\varepsilon_y} - \frac{1}{\varepsilon_m}\right)(\varepsilon - \varepsilon_m + \varepsilon_y)}, \quad (5)$$

$$\textcircled{2} \quad \sigma = \sigma_n + \beta \sigma_y + \frac{\bar{E}_s(\varepsilon - \varepsilon_n - \varepsilon_y)}{1 - \mu(\varepsilon - \varepsilon_n - \varepsilon_y)}$$

ここで、

$$\mu = \frac{\bar{E}_s}{\sigma_n + \beta \sigma_y - \sigma_m} + \frac{1}{\varepsilon_m - \varepsilon_n - \varepsilon_y}$$

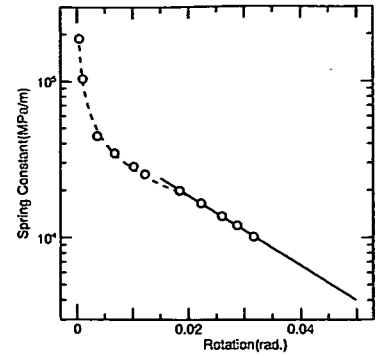


図-8 支圧板回転角とバネ定数

2. 4 支圧板のモデル化

繰り返し荷重に伴う支圧板の浮き上がりは、支圧板及びR C桁の塑性変形、各部の弾性変形などの複雑な力学状態にあり、適切なモデル化は難しい。そこで、実験³⁾におけるモーメント、回転角の關係に着目し、弾性状態と見なして等価なバネ定数 k_p と支圧板の回転角 θ_0 との關係を最小二乗法で求めると次式となる。

$$k_p = 2015 \times \theta_0^{-0.57} \quad (\theta_0 \leq 20 \times 10^{-3} \text{ rad.}) \quad (6)$$

$$= 52200 \times (5.26 \times 10^{-23})^{\theta_0} \quad (\theta_0 > 20 \times 10^{-3} \text{ rad.})$$

図-8に支圧板回転角とバネ定数の關係を示す。図中に実験結果³⁾を丸印で、式(6)の第1式を破線で、第2式を実線で示す。実験結果と式(6)は、よく一致している。

しかし、式(6)のバネ定数は接線剛性であり、一方、繰り返し載荷時の解析では割線剛性が必要であることから、剛性低下率 α_p を θ_0 の関数として与え、 k_p を変化させる方法を検討した。 α_p は実験結果³⁾を参考に、次式とした。

$$\alpha_p = 1 - 0.0034 \theta_0^{-0.71} \quad (7)$$

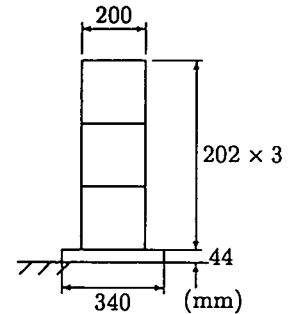


図-9 C F T 鋼管柱のモデル化

2. 5 解析結果と実験結果³⁾との比較

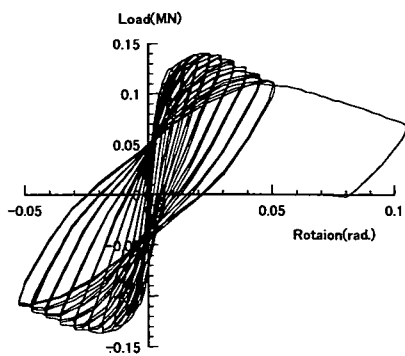
図-2に示した試験体について、解析では対称性を考慮し、図-9に示すとおり、C F T 鋼管柱の中央から下方の650mmを要素3層で等分し、各断面要素を50層に分割してモデル化した。

実験では、鉛直方向に1.058MNの一定軸力を加えた状態で、水平方向に $\pm(3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) \times 10^{-3} \text{ rad.}$ とする正負繰り返し加力を3サイクルずつ加えている。そこで、同一条件での解析を実行した。解析に用いる諸係数を表-1に示す。

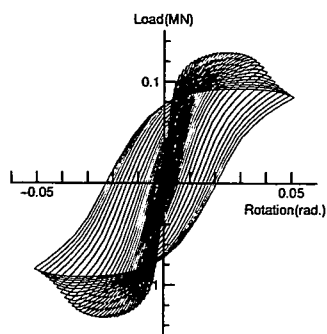
部材軸回転角、支圧板回転角及び軸変位と水平荷重との關係を図-10、11、12に示す。なお、図には実験結果も示してある。各図とも全体的に解析結果は実験結果と対応している。最大水平荷重は、0.13MNであり、実験結果の0.14MNに比較し若干小さな値となっている。また、軸方向変位も最終的には解析では1.8cmであり、実験の2.5cmに比べて小さい値である。

表-1 鋼管柱の諸係数

コンクリートのシリング強度	$c\sigma_B$ (MPa)	33.3
拘束係数	k	4.1
コンクリート残留ひずみに関するパラメータ	γ_c	0.16
拘束応力と鋼管の降伏応力との比	α	0.19
鋼管の降伏応力	σ_y (MPa)	387
鋼管の弾性係数	$\bar{E}_s$ (MPa)	2.1×10^5
ひずみ硬化開始時のひずみ	ε_u	1.75×10^{-2}
ε_u 以降の傾きの係数	ρ	0.01

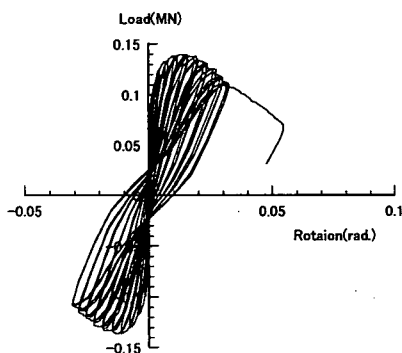


a) 実験結果

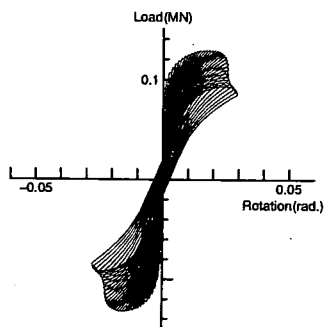


b) 解析結果

図-10 部材回転角と水平荷重

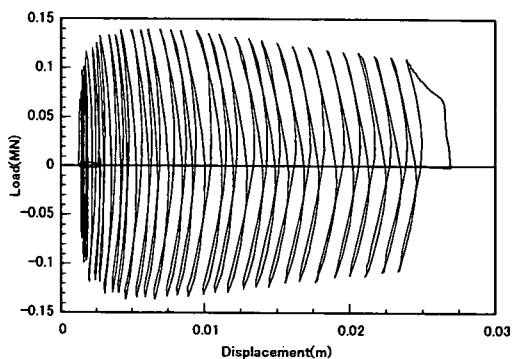


a) 実験結果

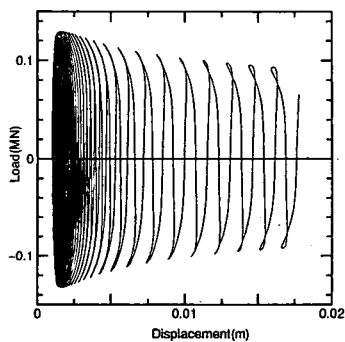


b) 解析結果

図-11 支圧板回転角と水平荷重



a) 実験結果



b) 解析結果

図-12 軸変位と水平荷重

3. RC中柱の解析モデルとCFT鋼管柱との連成解析

一般に地下鉄開削トンネルの駅部分の中柱は、列車進行方向に対して4~5mの間隔に設けられ、柱の上下にRC桁が配置されている。添え柱を設ける位置は、RC桁の鉄筋の配置を考慮すると、図-13に示すとおりRC中柱の両側に設ける構造が適切である。

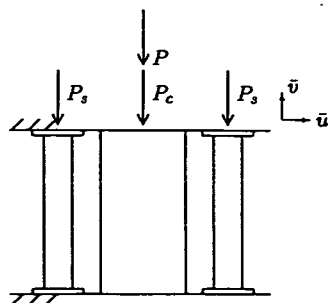


図-13 中柱と鋼管柱との連成解析

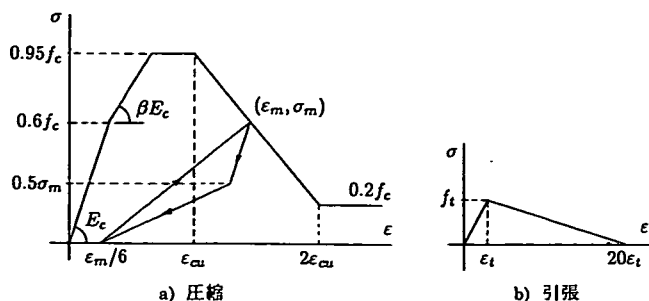


図-14 コンクリートの応力-ひずみ曲線

3. 1 R C 中柱の解析モデル

図-13に示すRC中柱を剛体パネモデル(RBSM)でモデル化する。コンクリートの破壊には、圧壊、引張破壊、せん断すべり破壊を考慮する富田⁸⁾のモデルによることとし、圧縮・引張における応力-ひずみ関係式を図-14に示す。図中の E_c はコンクリートのヤング率、 f_c は圧縮強度であり、解析では $\beta=0.65$ としている。せん断破壊は、Mohr-Coulombの条件を用い、図-15に示す降伏破壊曲面に従うものとした。図中の C は粘着力である。

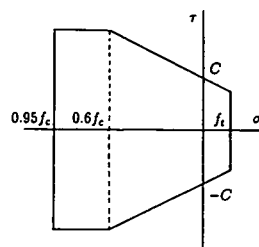


図-15 コンクリートの破壊局面

また、鉄筋のモデル化は、棒要素によりモデル化を行うこととし、鉄筋の応力-ひずみ曲線については文献 5) に概ね従うこととする。図-16 に鉄筋の応力-ひずみ曲線を示す。

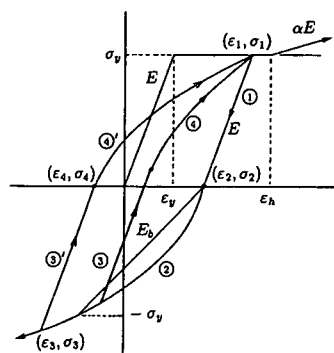
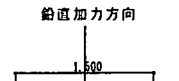


図-16 鉄筋の応力-ひずみ曲線

3. 2 R C中柱とC F T鋼管柱との連成解析

図-13 に示した R C 中柱と鋼管柱に水平方向に同一の強制変位 u を与えるものとする。軸力は、両者にそれぞれ P_c, P_s が作用し、その合計 P は一定とする。また、最初は鋼管に軸力が作用しておらず、中柱の崩壊に伴い次第に P_s の値が増大して行く。R C 中柱と鋼管柱は、上下の梁で拘束されており、両者の鉛直変位は v で同一の値をとるものとする。



これまでに示した鋼管柱に関する式とRC中柱の剛性方程式を連立すると、求解可能となる。

3. 3 解析結果と実験結果との比較

補強実験に用いたRC中柱の1/2モデルの試験体を、図-17に示す。CFT鋼管

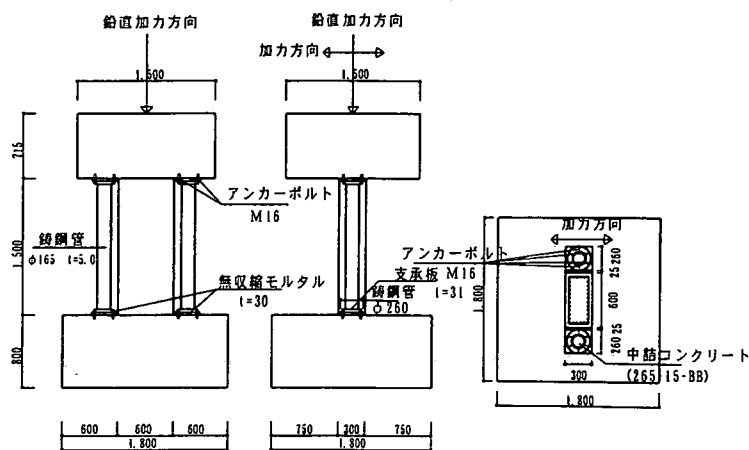


図-17 RC中柱とCFT鋼管添え柱の試験体

柱は、6個のアンカーボルト（M16）によって固定されている。

解析条件を表-2に示す。強制水平変位は、1.88, 3.75, 7.5, 15.0, 22.39mmを順次与えている。ただし、実験では正負3回ずつ繰り返しているが、解析では計算時間の負担を考慮し、それぞれ正負1回のみとしている。

R C中柱のRBSMにおける要素分割図を図-18に示す。柱の対称性を考慮して柱の下半分をモデル化した。また、C F T鋼管柱は、図-9に準じモデル化を行っている。

解析結果として、水平変位が15mm作用した時の中柱の破壊状況を図-19に示す。図中の小さい黒丸はコンクリートの引張破壊、白丸はせん断すべり破壊、大きい黒丸は鉄筋の降伏を示している。

中柱の破壊状況について解析と補強実験結果とを比較すると、解析では1.9mmで曲げ破壊、3.9mmでせん断破壊が発生し、6.9mmで圧縮側主鉄筋が降伏している。一方、実験では3.8mmで曲げ破壊、7.5mmでせん断破壊が生じたが、鉄筋の降伏は生じなかった。

解析と実験結果では、中柱の破壊状況は定性的には概ね対応しているが、定量的には変位量が約2倍となっている。定量的な差が生じた原因として、解析に用いた鋼管柱及び中柱の応力-ひずみ曲線と実際との差、モデル化における要素分割の影響などが考えられる。

水平変位と水平荷重の履歴曲線について、

表-2 R C中柱と鋼管添え柱の解析条件

軸力 (MN)	1.2348
鉄筋のヤング率 (MPa)	1.96×10^5
鉄筋の降伏応力 (MPa)	327
中柱コンクリートのヤング率 (MPa)	1.87×10^4
中柱コンクリートの圧縮強度 (MPa)	21.27
鋼管のヤング率 (MPa)	2.06×10^5
鋼管の降伏応力 (MPa)	419
中詰コンクリートのヤング率 (MPa)	1.78×10^4
中詰コンクリートの圧縮強度 (MPa)	23.4
鋼管径 (mm)	0.165
鋼管厚 (mm)	5
鋼管高さ (mm)	1.378
支圧板径 (mm)	0.26
支圧板厚 (mm)	31

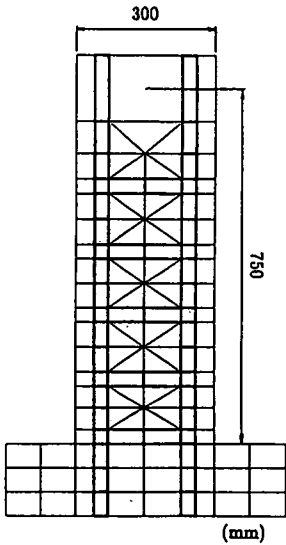


図-18 中柱の要素分割図

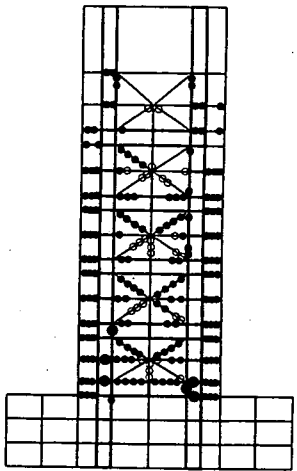
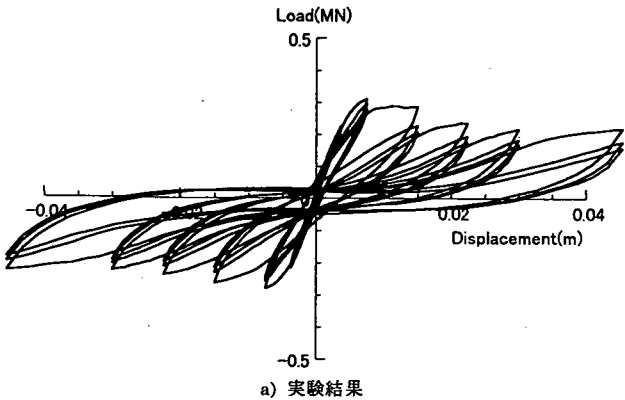
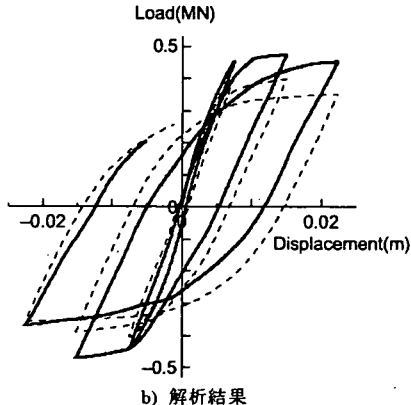


図-19 中柱の破壊状況



a) 実験結果



b) 解析結果

図-20 水平変位-水平荷重の履歴曲線

図-20 に解析と実験結果を示す。解析結果の図中の実線は鋼管添え柱を伴ったもの、破線は無補強時の結果を示している。解析における補強時の最大荷重は0.46MN で、実験結果の0.32MN より大きめの値となっている。図-20 b)解析結果では、補強の有無による最大荷重の差は17%であり、補強の効果が認められる。また、図-21 に解析から得た中柱の変位-荷重履歴曲線を示す。図中の実線は補強を行った場合、破線は無補強の場合を示し、補強により中柱の強度が約10%増加していることが確認される。

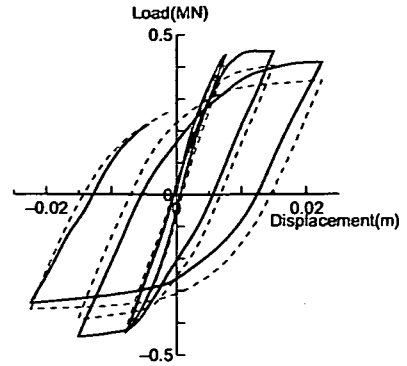


図-21 中柱の変位-荷重履歴曲線（解析結果）

4. おわりに

地下鉄開削トンネルの耐震補強として行われているCFT鋼管柱を用いた添え柱工法について、数値解析のためのモデル化とその解析方法を示した。また、この解析結果と既報告の実験との対比を行い、その力学特性について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) CFT鋼管柱の解析は、ファイバー要素を用い、コンクリートのコンファインド効果と支圧板の浮き上がりを考慮に入れた。この結果、水平交番載荷実験で行ったCFT鋼管柱を単独で試験した結果とほぼ対応した結果を得ることができた。
- (2) CFT鋼管柱の支圧板の浮き上がりを考慮する場合、繰り返し載荷に伴う接触時のバネ定数を一定の比率で低減させる方法により、概ね良好な結果が得られた。
- (3) 既設RC柱にCFT鋼管柱の添え柱を用いた場合の解析は、RC柱を剛体バネモデル(RBSM)、CFT鋼管柱を断面分割法でモデル化を行い、これらを連成解析する方法により行った。解析結果は、実験との定量的な一致までには至らなかったものの、耐震補強実験に対応する傾向が得られ、解析手法の有効性を確認することができた。
- (4) 数値解析の結果から、CFT鋼管柱の補強効果は、RC中柱のせん断破壊の進行に伴い鋼管柱が軸力を負担することにより、RC柱の破壊の進行が軽減され、強度低下が抑えられる効果があることが確認された。

参考文献

- 1) 岡田, 米島, 森崎; 地下鉄トンネル中柱の添え柱による耐震補強実験, 土木学会第52回年次学術講演会, IV-188, 376-377, 1997. 9
- 2) 村田, 山田, 池田ほか; 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-50, 149-163, 2000. 1
- 3) 森崎, 栄藤, 渡辺; 地下構造用合成鋼管柱の水平交番載荷実験, 土木学会第52回年次学術講演会, I-A, 260-261, 1997. 9
- 4) 崎野, 孫; 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 建築学会構造系論文集, 第461号, 95-104, 1994.
- 5) 松本; RC, PCおよびPRC部材のモーメント-曲率の関係とその応用, 土木学会論文集, No. 331, 155-165, 1983.
- 6) 富田, 梶川, 吉田; 軸力と繰り返し曲げを受けるRC部材のRBSMによる挙動解析, 構造工学論文集, Vol. 43A, 347-354, 1997.