

モルタル充填鋼管により座屈拘束された圧縮鋼管部材の変形性能

PERFORMANCES OF COMPRESSIVE TUBE MEMBERS WITH BUCKLING RESTRAINER COMPOSED OF MORTAL IN-FILLED STEEL TUBE

竹内 徹*1, 鈴木一弁*2, 丸川智輝*3, 木村祥裕*4
小河利行*5, 杉山 武*6, 加藤史郎*7

Toru TAKEUCHI, Kazuaki SUZUKI, Tomoki MARUKAWA, Yoshihiro KIMURA,
Toshiyuki OGAWA, Takeshi SUGIYAMA and Shiro KATO

The authors have proposed the concept of ductile truss structures replacing critical members to buckling-restrained braces. However, in case of seismic retrofit for existing truss structures, effective buckling restrain method for existing members are required. In this paper, buckling restrain retrofit method using outer-tube and in-filled mortar in-between is proposed, and tested under elasto-plastic compression conditions. Their performances are compared with tubes without restrainer or mortar in-filled tube, and their buckling behaviors are studied by numerical analyses.

Keywords: Steel tube, Seismic retrofit, Compressive members, Local buckling, Buckling restrained members

鋼管部材, 耐震補強, 圧縮部材, 局部座屈, 座屈拘束部材

1. 序

既存構造物に各種の制振部材を付加し、エネルギー吸収性能を向上させることによりその耐震性能を向上させる技術は、通常の重層建築物については様々な手法が開発され、実用に供されている。一方、鉄塔や産業構造物に多用される鋼管トラス構造物について制振部材の付加を試みた例は、現在まであまり見られない。その理由として、これらの構造物の設計において風荷重が地震荷重を上回る場合が多く、地震荷重に対しては十分な強度を保持していると考えられていたことが挙げられる。しかしながら、建屋上に付設された通信鉄塔など、下部構造の増幅効果により地震荷重が風荷重を上回る例も報告され始めていることから、このようなトラス架構に対しても耐震性能を向上させる手法の整備が求められている。

筆者らは、トラス架構の一部を座屈拘束ブレース等の履歴型制振部材に交換することで、履歴減衰による地震応答の低減を図ると共に安定した架構の崩壊メカニズムを形成し、他の部材を座屈させない制振補強工法を提案し、自動ラック、鉄塔等のトラス架構についての適用研究を行ってきた^{1)~3)}。一方で、鉄塔の支柱の様に交換が困難な部材に関しては、既存部材に座屈拘束材を付加し、そのまま履歴ダンパー化する技術が有効と

考えられる(図1)。この手法は軸力抵抗型の鋼管トラス架構全般に有効となる。

既存部材の周囲に座屈拘束材を付加することで履歴ダンパー部材化する研究は、H型鋼ブレースについては金子ら⁴⁾により

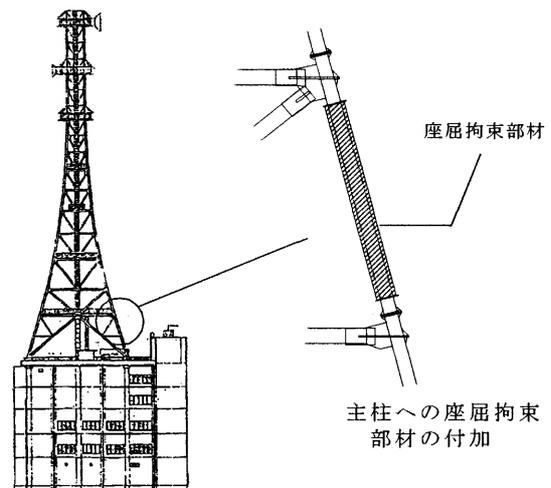


図1 トラス架構の耐震補強例

*1 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)

*2 新日本製鐵(株)建築事業部 工修

*3 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 大学院生

*4 長崎大学工学部構造工学科 助教授・博士(工学)

*5 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 教授・工博

*6 中部電力(株)土木建築部 工博

*7 豊橋技術科学大学建築工学系 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Nippon Steel Corp., Building Const. Div., M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology

Assoc. Prof., Dept. of Structural Eng., Nagasaki University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Chubu Electric Power Co., Inc., Building Const. Div., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.

行われている。鋼管の内側に座屈拘束鋼管を付加し、外管を軸力管とした内管補剛型の座屈拘束ブレースを構成する研究は、多田、今井ら^{9)~11)}により行われているが、既存部材への適用は難しい。又、鋼管の外側に座屈拘束鋼管を付加し、内管を軸力管とした外管補剛型の座屈拘束ブレースを構成する研究は、上村、藤澤ら^{9)~11)}により行われ、細長比 $\lambda=70$ 程度の軸力管に関して最大歪1.5%程度までの履歴特性及び低サイクル疲労特性が確認されている。これらの研究では座屈拘束材は全体座屈を拘束する目的で付加されており、局部座屈発生後の拘束効果については明らかにされていない。一方、短柱において鋼管の局部座屈を外側鋼管で拘束する同様の試みは鈴木、小河ら^{10)~11)}によって行われているが、2%を越える歪レベルにおいて芯鋼管が外側に局部座屈を生じた後、芯鋼管と同程度の厚さの外側鋼管のみでは座屈の成長を完全に拘束することは困難であることが明らかにされている。又、既往の研究においては局部座屈の成長を効率よく抑制できるような内側鋼管と外側鋼管との間隔は明らかになっていない。

本研究ではトラス架構における鋼管部材の補強方法として、最大3%程度までの通常設計より過大な塑性歪範囲に耐え得る鋼管部材の補強方法として、モルタル充填鋼管による座屈拘束手法を提案し、その限界性能を実験的に検証する。又、実験結果と合わせた解析により、本補強構法が有効となる径厚比限界とその条件を探ることを目的とする。外側鋼管の付設は現場溶接を想定し、芯鋼管と外側鋼管の間に空隙を設け、ここにモルタルを充填する。モルタルによって芯鋼管の局部座屈による外側鋼管への応力集中は大幅に緩和され、安定した座屈拘束効果が期待できる。座屈拘束材を既存部材に適用した場合の荷重の増加は長期許容応力度の1~2%程度であり、影響を及ぼさない範囲と考えられる。

実験は実際のトラス架構を想定し細長比35、70程度の2種類について実施し、外側鋼管との間隔を変化させた場合の局部座屈及び全体座屈に対する座屈拘束効果を、補強の無い場合やモルタルを芯鋼管の内側に充填した場合と比較して検証する。併せて、解析による座屈性状の追跡を行い、変形性能を確保する為の条件について明らかにする。尚、本研究では第一段階として、単調圧縮荷下における芯材となる鋼管の変形性能を対象とする。

2. 圧縮部材実験による変形性能の検証

2.1 試験体の設計

本論で補強の対象とする部材は、通信鉄塔支柱を想定した径厚比 $D/t=24$ 、細長比 $\lambda=35$ 及び70、降伏点 $300\text{N/mm}^2 < \sigma_y < 400\text{N/mm}^2$ の鋼管である。以下、本研究では圧縮材の曲げ座屈を全体座屈と呼ぶ。全体座屈モードに関して、実験式のJohnson-Euler式を適用すると、 $\sigma_y=325\text{N/mm}^2$ に対し限界細長比は $A=103$ となり、 $\lambda=35$ 及び70の両シリーズともに弾塑性座屈領域に位置する。この時、全体座屈応力はJohnson式に基づき、 $\lambda=35$ の部材では $\sigma_{cr}=330\text{N/mm}^2$ 、 $\lambda=70$ の部材では $\sigma_{cr}=278\text{N/mm}^2$ となる。一方、加藤、秋山ら¹²⁾は残留応力を含む鋼管の局部座屈応力に関して、塑性化が十分に進行した後に局部座屈すること、及び初

期不整などを考慮して、以下のような実験式を提案している。

$$\sigma = \sigma_y \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{n}}{\varepsilon_y} \cdot \frac{2t}{D} \right)^n \quad (1)$$

$\sigma_y=0.2\%$ offset 法より得られる降伏応力度

$$\varepsilon_y = 0.002 + \sigma_y/E$$

n = 降伏後の応力-歪関係を一直線で近似した時の係数

$n=0.11$ 、 $\sigma_y=325\text{N/mm}^2$ と仮定すると、局部座屈応力は 1652N/mm^2 に達する。

以上を総合すると対象となる部材は、圧縮荷下においては弾塑性全体座屈が先行し、全体座屈が拘束された場合においてのみ弾塑性局部座屈が生じる形状となっている。

実験ではこのような位置付けの部材に対し、モルタル充填鋼管の付加による座屈補強を施すことを想定し、実在するトラス架構の基部支柱の縮尺1/3の試験体を設定する。

モルタル充填鋼管の設計は、藤本、和田ら^{13)~14)}の提案したモルタル充填角型鋼管による座屈拘束ブレースの設計式より得られる下式(2)に基づき、外側鋼管の断面2次モーメントが芯鋼管の断面2次モーメントに対して2.3倍程度のものを用いる。

$$I \geq \alpha \frac{P_y L_k^2}{\pi^2 E} \quad (2)$$

I : 外側鋼管の断面2次モーメント P_y : 芯鋼管の降伏荷重

L_k : 外側鋼管の座屈長さ E : 外側鋼管のヤング係数

α : 座屈に対する安全率 ($\alpha=1.5$)

加えて座屈拘束効果の比較のために、モルタルを鋼管内側に充填した試験体も設定する。図2に圧縮実験装置の概要、図3に設定した試験体断面を示す。

2.2 実験概要

実験では上記の試験体に対して、材の細長比($\lambda=35$ 、70の2シリーズ)と、芯鋼管とモルタルの間のクリアランス(アンボンド材厚=0、1、3mmの3タイプ)をパラメータにとり、無補強鋼管、内側にモルタルを充填した鋼管と比較しながら変形性能を明らかにする。芯鋼管の上下端部においては、芯鋼管の圧縮軸変形による縮みを考慮し、座屈拘束鋼管と芯鋼管端部固定プレートとの間に20mmの隙間を設ける。これにより座屈拘束鋼管には芯鋼管の上下端部に座屈拘束されない剥き出しの部分ができる。本実験ではこの部分が起点となって座屈することを避けるために、芯鋼管の上下端部に4.5mmの鋼板をR加工し円周方向にそって覆うように端部補強プレートを溶接する。また、端部補強プレートの影響を比較するために補強プレートが無い試験体でも実験を行う。表1に試験体名の説明、図4に芯鋼管端部詳細(端部補強有り)を示す。

鋼管材の引張試験は、芯鋼管、外側鋼管の製管後の鋼管から切り出したJIS12B号試験片に対して各2体づつ行った。試験結果を表2に示す。応力-歪関係は、明確な降伏点のないRound-House型の応力-歪関係を示し、0.2%オフセット法により求めた応力度を引張降伏応力 σ_{yt} とする。

部材圧縮実験はアムスラー圧縮試験機を用い、各試験体で単純圧縮加力を行う。芯鋼管の軸変形は、試験体上部、下部ペー

スプレートの対角線上の2点における軸方向変形の平均より算出し、試験体の座屈時のたわみは、材長中央部の対角線上の2点における面外変形の平均より算出する。又、芯鋼管の挙動と耐力の関係把握のために、芯鋼管とモルタル充填鋼管の間にクリアランスのある、PA-35-3、PA-35-1、PA-70-3、PA-70-1、の4タイプにおいてのみ芯鋼管の外側に歪ゲージを貼付し、各部の軸歪を測定する。付設位置は芯鋼管上部及び下部の局部座屈の発生が予測される箇所と芯鋼管材長中央部とする。

2.3 部材圧縮実験結果

表3に実験結果一覧を示す。尚、表3中の降伏荷重はGeneral-Yield法¹⁵⁾によって求めた。

図5(a)にλ=35シリーズの各試験体の荷重-軸変形関係、写真1(a)~(c)にPAシリーズの端部終局状態(座屈拘束材撤去後)を示す。又、図5(a)中に荷重指標として、 iP_{cr} : 芯鋼管座屈荷重、 iP_y : 芯鋼管降伏荷重を併せて示す。

無補強鋼管のPO-35は iP_{cr} を越えた付近より全体座屈が進行し、その後10mm程度の軸変形後、耐力低下に至った。モルタルを内側に充填したPC-35においてはPO-35に比べ、耐力・剛性共に増加したが、PO-35より小さい変形で全体座屈を生じ耐力低下に至った。モルタル充填鋼管により外側拘束したPA-35-

0は載荷終了時まで全体座屈が生じず、剛性・耐力共に上昇した後、20mmの軸変形で耐力低下に至った。耐力低下はクリアランスがないために、芯鋼管が径方向に広がると共にモルタル部の内壁に圧着し、座屈拘束材が軸力を負担して耐力が急激に上昇し、最終的に芯鋼管端部が局部座屈に至ったためと考えられる。一方、クリアランス1mmを確保したPA-35-1は安定した荷重-軸変形関係を示し、POと比較し剛性・耐力が同程度で変形性能のみが上昇している。PA-35-1-NもPA-35-1と同様の性状を示し、35mmの軸変形においても最終的な耐力低下に至らなかった。端部補強付のPA-35-1の方が変形性能が低かった要因として、この試験体では端部補強プレートの付設により端部で板厚方向の偏心及び溶接による熱影響が加わったためと考えられる。一方、クリアランスを3mmとしたPA-35-3は、3段階にわたり小さな耐力低下を生じた後に25mmの軸変形で最終的な耐力低下を生じ、変形性能はPA-35-1よりも低下した。実験終了後拘束材を取り除いたところ、両端部には内外方向に大きな局部座屈波面が見られ、段階的な耐力低下は芯鋼管の局部座屈に起因すると考えられる。以上の結果は、クリアランスが小さすぎても、大きすぎても安定した変形性能を確保できず、適正なクリアランスの範囲が存在することを示している。

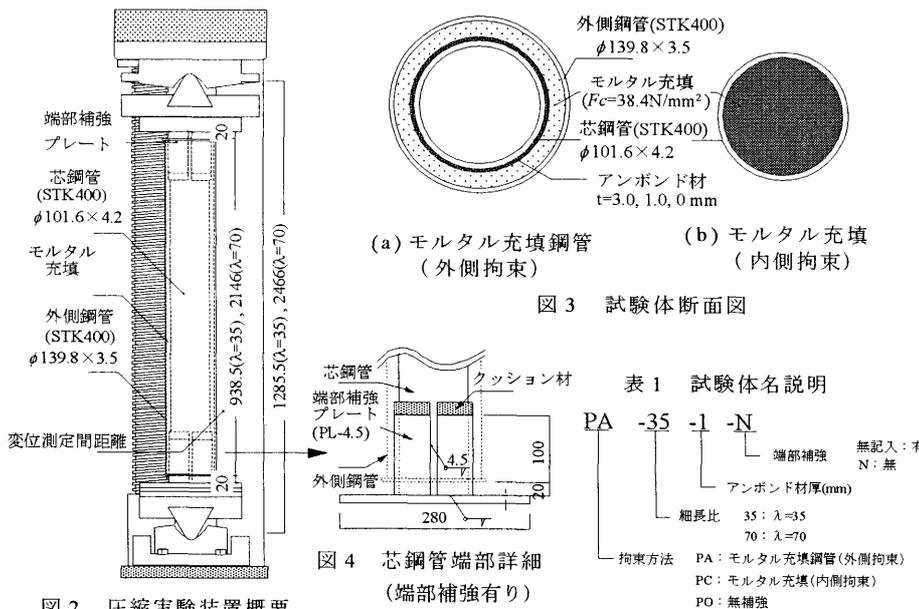


表2 材料引張試験結果

Test Piece	σ_r [N/mm ²] 降伏点	σ_u [N/mm ²] 引張強さ	E [KN/mm ²] ヤング係数	ϵ_{long} [%] 破断伸び
101.6×4.2	365	448	210	41.8
139.8×3.5	374	419	214	41.8

表3 実験結果一覧

試験体名	K (KN/mm)	P_y (KN)	P_u (KN)
	初期剛性	降伏荷重	最大耐力
PA-35-3	292.9	407.5	601.0
PA-35-1	266.5	419.6	701.7
PA-35-1-N	227.9	376.4	701.7
PA-35-0	474.6	554.3	878.1
PC-35	362.7	518.7	613.0
PO-35	290.1	396.0	503.2
PA-70-3	119.4	387.1	616.4
PA-70-1	116.0	390.7	643.9
PA-70-1-N	114.1	390.5	646.8
PA-70-0	242.7	626.1	861.4
PC-70	165.5	582.8	571.8
PO-70	128.1	385.1	401.3

表1 試験体名説明

PA -35 -1 -N
 端部補強 無記入:有 N:無
 アンボンド材厚(mm)
 拘束方法 PA:モルタル充填鋼管(外側拘束)
 PC:モルタル充填(内側拘束)
 PO:無補強

図2 圧縮実験装置概要

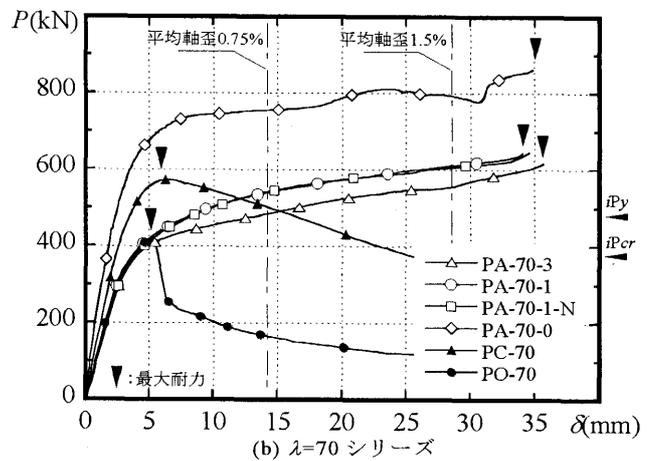
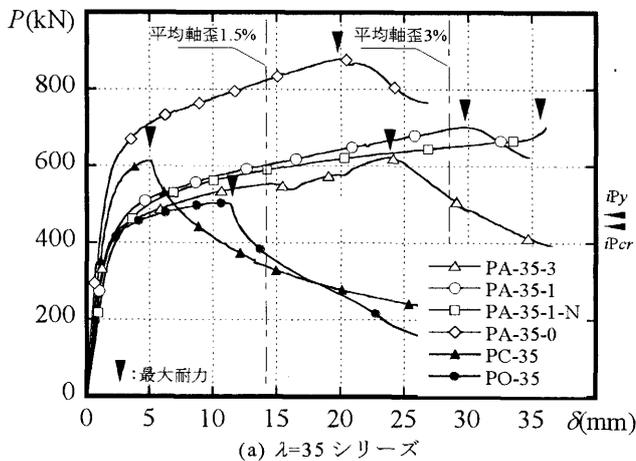
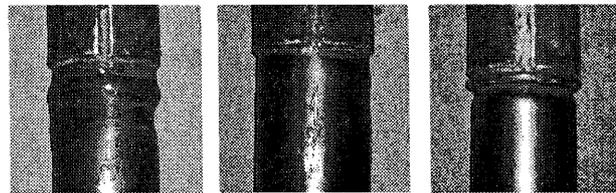


図5 実験結果 荷重-軸変形関係

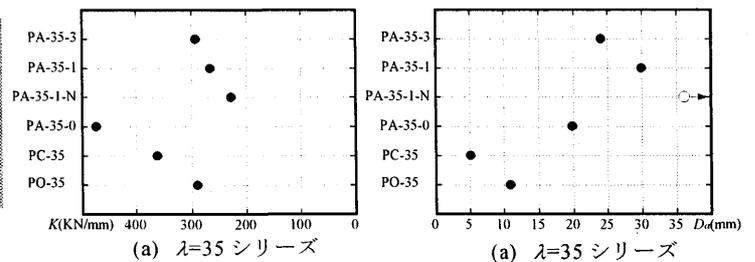


(a)PA-35-3 (b)PA-35-1 (c)PA-35-0

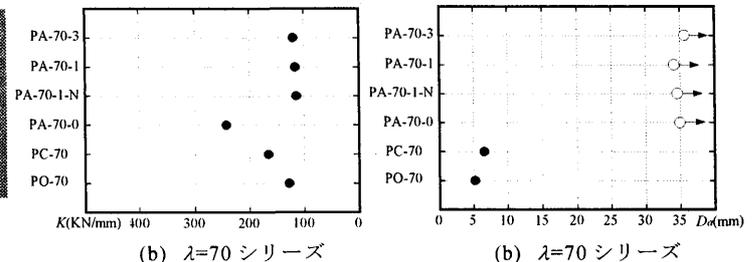


(d)PA-70-3 (e)PA-70-1 (f)PA-70-0

写真1 試験体局部座屈形状



(a) λ=35 シリーズ



(b) λ=70 シリーズ

図6 初期剛性の比較

図7 変形性能の比較

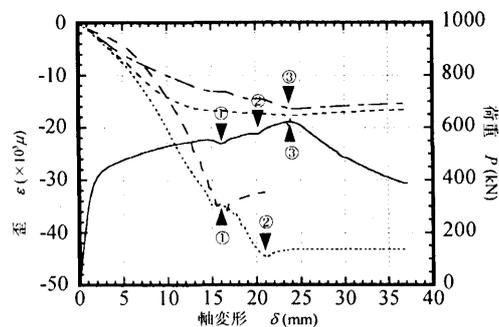
続いて図5(b)にλ=70シリーズの各試験体の荷重-軸変形関係を示す。写真1(d)~(f)にPAシリーズの端部終局状態を示す。

本シリーズではPO、PC-70がλ=35シリーズのものと同様に全体座屈を生じ、耐力低下に至った。λ=70シリーズは軸変形による鋼管の塑性率がλ=35シリーズより小さいために、座屈拘束材を付加したタイプでは局部座屈の成長が小さく最終的な耐力低下に至っていない。PA-70-0ではPA-35-0と同様に、両端部の端部補強プレートのすぐ真下で局部座屈を生じた。又、最終的な座屈モードはPA-35-0と同様であったが、荷重-軸変形関係で不安定な挙動をとった。この試験体のみで外側鋼管がわずかに局部座屈している様子が見られたことから、この現象は芯鋼管上端部の局部座屈波形が成長し、外側鋼管の局部座屈を誘発させたため生じたと考えられる。PA-70-1では図5(b)に示すようにほとんど耐力低下は生じずに、35mmの軸変形まで安定した挙動をした。PA-70-3では、28mmの軸変形付近でわずかに耐力の低下が見られる。同試験体は、実験後の形状で局部座屈が上端部で顕著に出ており、耐力低下はこの局部座屈に起因するものと考えられる。全般的にλ=70シリーズの変形性能の傾向はλ=35シリーズとほとんど同様となり、座屈拘束材を付加した部材では全体座屈の影響はほぼ除去されていると言える。

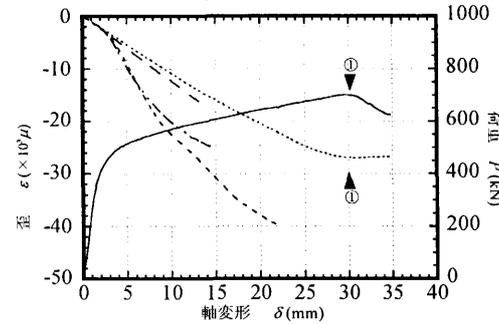
以上の実験結果を総合し、図6に初期剛性の比較、図7に変形性能の比較を示す。図7において、○で示したものはこの変形時で実験を終了したことを示しており、実際の変形性能は更に大きな値を示すものと考えられる。

続いて、計測した歪ゲージの値より、λ=35シリーズのクリアランスが3mm、1mmの各試験体を例にとり局部座屈の発生状況を推測する。図8(a)(b)に代表的な歪値の変化を、荷重-軸変形関係と併せて示す。図9に芯鋼管におけるゲージの付設位置を示す。図中では歪ゲージの付設位置に対して、材長中央から順に番号をつける。斜線で示す箇所は端部補強部分である。

PA-35-3においては、降伏後に図8(a)の①で一度目の耐力低下を生じた。同時に歪-13付近で大きく圧縮歪が減少しており、外側に局部座屈が発生したことを示している。同様に図中②で歪-23付近で外側に局部座屈を生じ、その後図中③で写真1(a)のような内側への局部座屈が発生したことにより、最終的な耐



(a) PA-35-3



(b) PA-35-1

図8 歪, 荷重-軸変形関係

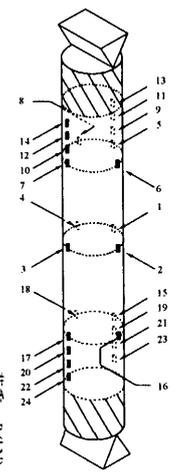


図9 ゲージ付設位置

力低下に至ったものと考えられる。全般的に芯鋼管上下端部の補強部近傍で塑性歪が進展し、端部から中央部へ向かう程歪が小さくなっている。

クリアランスを1mmとしたPA-35-1において、図8(b)を見ると、歪-13、24が歪-5、15と比較して、大きく歪が出ている。これらはPA-35-3と同様に端部に歪が集中している傾向を示している。そして耐力が低下した図中①で、歪-15付近以外の領域で局部座屈が生じたために歪が局部座屈発生点近傍に集中し、歪-15における歪の進行が停止している。

荷重の増減は端部の局部座屈と連動していることが歪ゲージの値からも確認でき、同様の傾向が他の試験体でも見られる。

以上を総合すると、既存鋼管を補強してエネルギー吸収部材とし他の部材に損傷を与えないためには、両シリーズともに無補強鋼管と剛性・耐力が同程度で変形性能が向上し、安定した荷重-軸変形関係、及び芯鋼管の歪-軸変形関係を持つ、クリアランスが1mmタイプのものがもっとも有効であると考えられる。又、PA-35-1とPA-35-1-N、PA-70-1とPA-70-1-Nの実験結果の比較により、材軸方向の端部における無補強部の長さが径の20%程度であれば、両シリーズともに前記した端部補強の必要性は無いと考えられる。

3.FEM解析による芯鋼管の挙動の検証

本章では実験において十分に確認できなかった、芯鋼管全体の座屈挙動をFEM解析により明らかにする。解析には幾何学的非線形性、材料非線形性を考慮した汎用有限要素法プログラムABAQUS.ver.6.3-1¹⁶⁾を用いる。解析対象とする試験体はモルタル充填鋼管の付加により外側拘束されたPAシリーズの試験体とする。

3.1 解析モデル

図10に示すように解析モデルは、芯鋼管、外側鋼管を4節点シェル要素でモデル化し、芯鋼管の周囲に位置するモルタル部分を8節点ソリッド要素でモデル化している。モデル化は対称条件から材軸上の上部方向に1/2の領域で行っている。解析モデル端部については、ピン治具領域を剛体であると仮定し、補強プレート領域はプレートの分の厚さを芯鋼管の厚さに加算した。境界条件は芯鋼管、モルタル充填鋼管の上端部をピン支持とし、下端部をともに固定ローラー支持としている。要素分割はλ=35において、芯鋼管を軸方向に100分割、周方向に64分割し、モルタル部分及び外側鋼管を軸方向に50分割、周方向に32分割している。芯鋼管と拘束材の接触に関しては芯鋼管とモルタル部分の境界面を解析における接触面と定義し、モルタル部分と外側鋼管については一体としてモデル化する。尚、それぞれのモデルに対して、芯鋼管上端部の荷重載荷点に荷重不整として芯鋼管の径の2%の偏心を加え、更に芯鋼管の材長方向に形状初期不整として芯鋼管の厚さの4.8%の不整を入れている。実験においてクリアランスが0mmであったためにモルタル部分と芯鋼管の間に摩擦力が作用したPA-35-0、PA-

70-0のモデルについては、解析上の初期剛性と降伏点が実験値に近似できるように摩擦力を設定した。

材料特性の評価は引張試験結果よりモデル化した応力-歪関係に鋼管の初期応力を考慮して、図11に示すように設定する。尚、図10中の端部治具と端部補強部にあたる区間をAB間とし、芯鋼管の無補強部にあたる区間をBC間としている。

3.2 数値解析結果及び考察

解析は芯鋼管の軸変形を制御することによって行い、30mmの軸変形まで与えた。図12に解析及び実験における荷重-軸変形関係を示す。

解析結果はPA-35-3では途中段階で幾度か耐力低下を生じる等、全般的には実験結果と比較的良好な対応が見られ、実験同様、λ=35、70の両シリーズにおいてアンボンド材が1mmのタイプが最も安定した性能を示した。又、解析終了時の芯鋼管の変形状は、対応する実験結果と非常に近い形状を示した。

図13~15にλ=35シリーズ、図16~18にλ=70シリーズのモデルごとの芯鋼管の軸方向断面変形図を示す。軸方向断面変形図は軸方向変形を初期値で固定して、軸直交方向の変形量のみを5倍程度拡大して表示している。

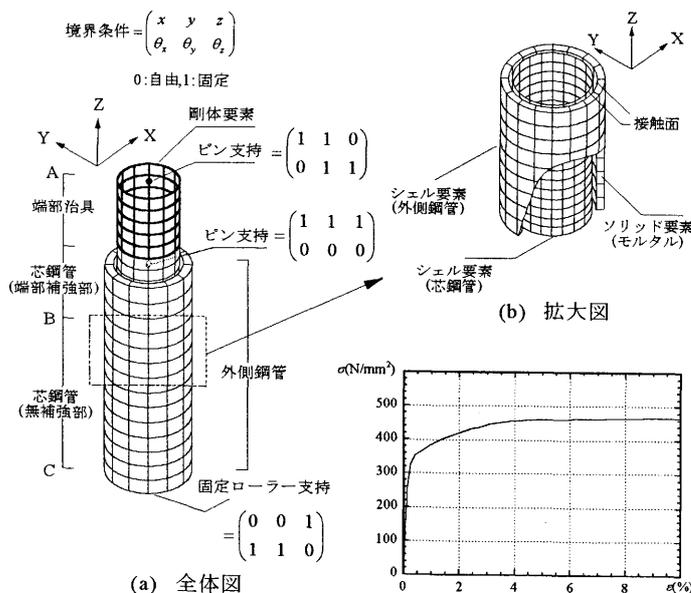
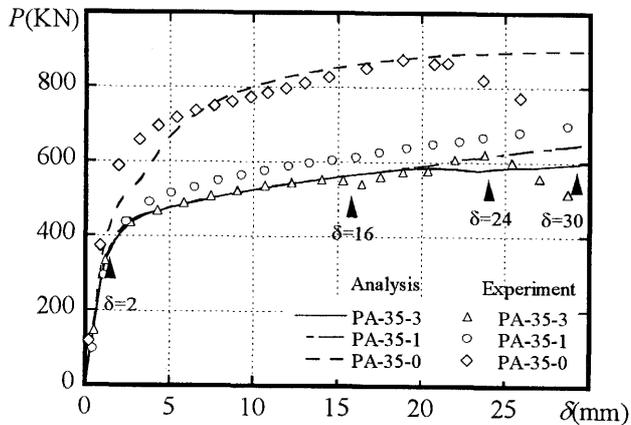
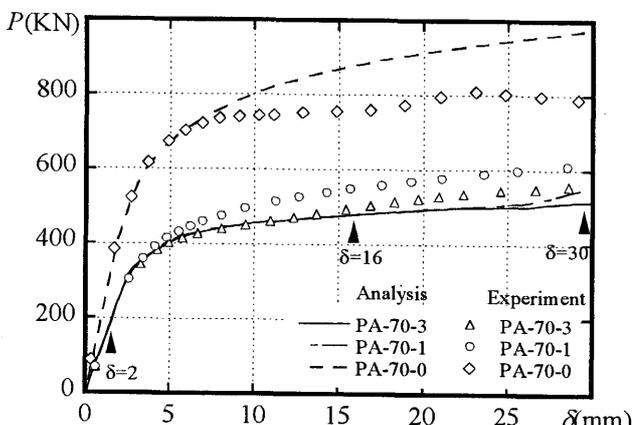


図10 解析モデル

図11 材料特性モデル



(a) λ=35 シリーズ



(b) λ=70 シリーズ

図12 解析及び実験結果 荷重-軸変形関係

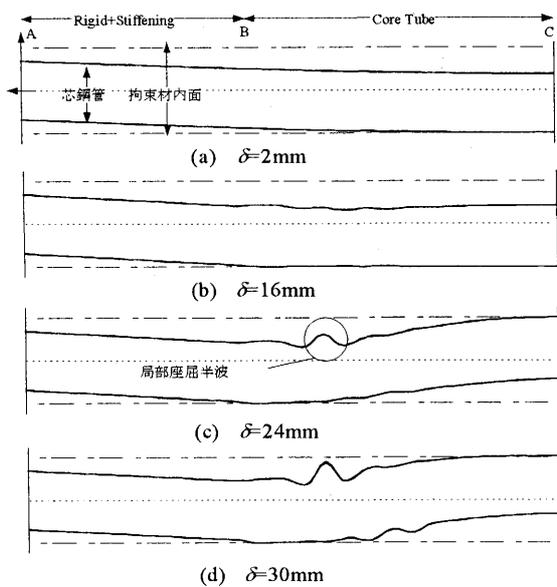


図 13 PA-35-3 芯鋼管軸方向断面変形図

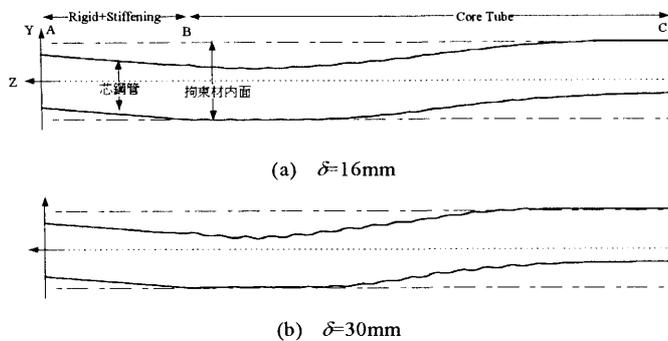


図 16 PA-70-3 芯鋼管軸方向断面変形図

図 13(a) の PA-35-3 において、初期状態 ($\delta=2\text{mm}$) でクリアランスの範囲内で全体座屈を生じているが、それに伴う耐力低下は生じていない。その後、全体座屈が進行すると共に接触面が増大し、接触面内で芯鋼管の任意の点を端点とする新たな全体座屈が生じる。又、この新たな全体座屈の発生とほぼ同時に、限定された範囲内において 6 波程度の局部座屈波形が生じている。これらの局部座屈波形の中で、軸歪が進行すると共に図 13(c) に示した局部座屈半波が大きくなっている。解析上で $\delta=24\text{mm}$ のときの微小な耐力低下は上記の局部座屈の成長に起因すると思われる。その後、図 13(c) に示した局部座屈半波が大きく成長し、外側に変形した局部座屈が拘束材に拘束されると、拘束されたときの反力によって内側に変形した局部座屈が成長し、実験と同様な局部座屈による崩壊系を示すものと思われる。図 14 の PA-35-1 では、PA-35-3 と同様に、初期段階でクリアランス内で微小な全体座屈と局部座屈を生じる。しかし、それらが大きくなる前に拘束され、且つ拘束されたときに生じる拘束材からの反力は、局部座屈を打ち消すような方向に作用するために局部座屈はほとんど成長せず、途中段階での耐力低下も生じていない。この時のクリアランスは 1mm 程度となっており、実験と同様にこのクリアランス量が局部座屈の成長を抑制するのに有効であることがわかる。

図 15 の PA-35-0 は PA-35-1 と同様なメカニズムにより、大き

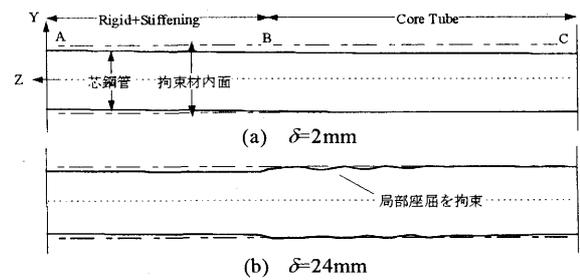


図 14 PA-35-1 芯鋼管軸方向断面変形図

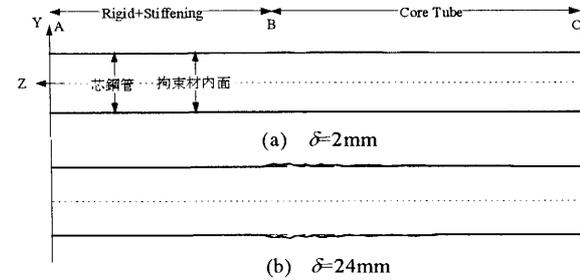


図 15 PA-35-0 芯鋼管軸方向断面変形図

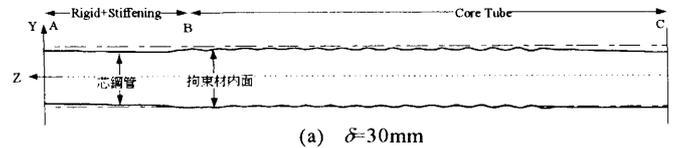


図 17 PA-70-1 芯鋼管軸方向断面変形図

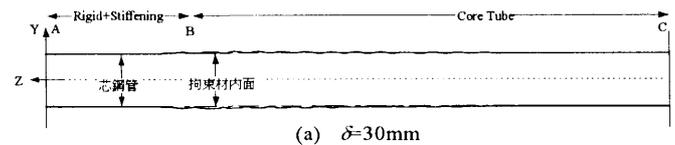


図 18 PA-70-0 芯鋼管軸方向断面変形図

な局部座屈及び全体座屈は生じずに耐力低下も生じていない。しかし、軸変形に伴うポアソン比分の径の増大を吸収し得るクリアランスがないために、拘束材と一体で挙動し過度に耐力が上昇し、補強プレートに近接した領域に歪が集中している。このことは、実験結果とよい対応を示し、ポアソン比を $\nu=0.3$ と仮定すると、想定される軸歪の 30% 程度のクリアランスが必要であるものと考えられる。

図 16 の PA-70-3 において、PA-35-3 において仮定したメカニズムと比較すると、全体座屈がより高次のモードまで発生するものの、局部座屈に関しては同様の傾向が見られる。このことは解析を行った軸歪の範囲においては、細長比の増大に伴う新たな耐力低下は生じないことを示している。同様に、図 16 の PA-70-1 及び図 17 の PA-70-0 の座屈メカニズムはそれぞれ、PA-35-1 及び PA-35-0 と同様のメカニズムで説明できる。

以上を総合すると、今回使用した解析モデルは実験における本補強方法の性状をよく表現し、芯鋼管の局部座屈性状を把握するために有効であると考えられる。

4. 最適クリアランスの条件

4.1 局部座屈波長の評価

実験及び解析を通じ、拘束材と芯鋼管のクリアランスに關し、本検討例では芯鋼管の直径の 3% にあたる、 3mm のクリア

ランスでは局部座屈は抑制できないが、芯鋼管の直径の1%にあたる、1mmのクリアランスでは抑制でき、0mmのクリアランスでは拘束材への軸力伝達を阻止することができないことがわかった。これらの条件により、十分な変形性能を確保するための上限値及び下限値が存在すると推察される。

解析結果を見ると局部座屈が成長するか拘束されるかの境界は、拘束材に局部座屈波が接触する時の波の材軸に対する角度に依存していると考えられる。即ち、局部座屈波長に対しクリアランスが大きい場合には、座屈波が拘束材に接触する際に座屈波形が拘束材に対しより鋭角に変形してしまい、局部座屈波の成長が押さえ込まれず成長・進展しやすい状況にあると言える。そこで、局部座屈の成長を抑制するためのクリアランスの上限値を、局部座屈波長との関係より求めることを考える。

古典理論¹⁷⁾¹⁸⁾において塑性域で局部座屈が生じる時、鋼管の長さに沿って一様な座屈波形が生じ、円周方向と軸方向の材料の力学的性質が同一であることを仮定した場合には、局部座屈半波長は以下の式で表される。

$$l_w = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{D^2 t^2}{48(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

$\nu=0.3, 0.5$ を仮定した時の(3)式による $l_w/D-D/t$ 関係を図19に示す。ここで、実験・解析で用いた鋼管の直径 $D=101.6$ 、管厚 $t=4.2$ 、を用いて(3)式を計算すると、 $l_w=0.25 \sim 0.26D$ となる。又、図19中に実験・解析によって得られた座屈波長を示す。実験後の芯鋼管の局部座屈半波長は座屈発生時より変形が進んでいるために、 $l_w=0.25D$ より短くなっているが、解析における径厚比 $D/t=24$ の時の座屈半波は4要素分の25mm程度で発生し、古典理論式とよい対応を示している。

4.2 最適クリアランス条件式の誘導

拘束材と芯鋼管の最適なクリアランス値を評価するために、3節の解析方法と同様な条件によって、径厚比 $D/t=16 \sim 40$ の範囲で解析を行い、その結果を図20に示す。同図において、●はクリアランスが大きすぎて局部座屈が成長したモデル、○は局部座屈の成長が効果的に抑制されたモデル、□はクリアランスが小さすぎて軸力が拘束材に加わってしまうモデルを示す。この中で、局部座屈の成長を抑制できるクリアランスの領域

は、例えば、下式(4)を上限値、下式(5)を下限值として表現できる。

$$C_{max} = \beta \cdot \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{D^2 t^2}{48(1-\nu^2)}} \quad \text{但し, } \beta=0.07 \quad (4)$$

$$C_{min} = \frac{1}{2} D \cdot \nu \cdot \epsilon_{max} \quad (5)$$

但し、 $\nu=0.3 \sim 0.5$, ϵ_{max} : 軸歪の最大値

式(4)は前項で示した古典理論による局部座屈波長に対し、一定比率のクリアランス以下では局部座屈が成長しないという条件である。又、式(5)は ϵ_{max} の軸歪に対して、ポアソン比による管径のふくらみをクリアランス内で許容できるような条件より導かれている。図20においては、軸変形の限界値を40mm、 $\epsilon_{max}=0.043$ として式(5)の値を算出した。この両式で挟まれた領域では、安定した変形性能が期待できることが解析結果により確認できる。

尚、径厚比 D/t が48及び12のモデルに対しても同様な解析を行ったが、径厚比 $D/t=48$ のモデルの解析では、いずれのクリアランスをとっても、局部座屈の成長を抑制できる条件を確認できなかった。又、径厚比 $D/t=12$ のモデルでは、クリアランスを3mm以上ととっても、最終的な局部座屈には至らなかった。以上より、ここでは式(4)(5)の適用範囲を $16 < D/t < 40$ とする。

5. 結

本研究では、圧縮軸力を受ける鋼管トラス部材の耐震補強構法として、補強対象とする鋼管部材の外周にモルタル充填鋼管を付加して座屈拘束材とし、履歴ダンパーとしての性能を与える構法を提案し、無補強鋼管及びモルタルを鋼管の内側に充填する構法と比較しながら、単調圧縮荷下における変形性能について実験的及び解析的手法を用い検討した。検討のパラメータとしては、部材の細長比及び芯鋼管とモルタル充填鋼管とのクリアランス(アンボンド材厚)を変化させ、この差が芯鋼管の局部座屈性状および変形性能に与える影響を分析した。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 部材圧縮実験の結果、径厚比24、細長比35及び70の鋼管部材において、無補強鋼管及び内側にモルタルを充填した

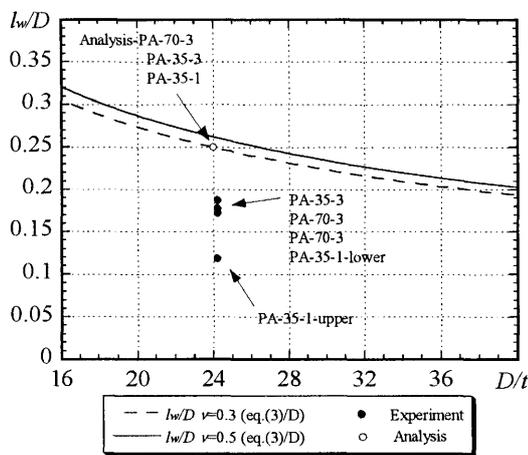


図19 局部座屈波長の評価

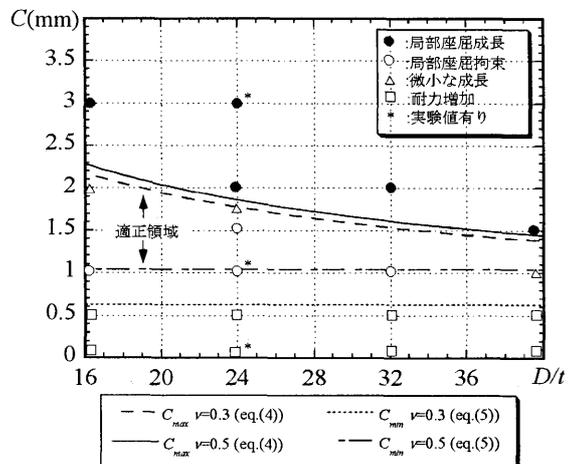


図20 クリアランスの評価

鋼管が全体座屈による耐力低下を生じたのに対し、モルタル充填鋼管で外側から座屈拘束した鋼管ではいずれも芯鋼管の平均軸歪1%以上の安定した変形性能が得られた。

- 2) モルタル充填鋼管により座屈拘束した部材の変形性能は、芯鋼管と座屈拘束材の間のクリアランスに大きく依存し、細長比35の鋼管部材でクリアランスが無いものは、平均軸歪1.5~2%で局部座屈により耐力が低下した。又、クリアランスが芯鋼管直径の3%に当たる試験体では、クリアランス内で芯鋼管が局部座屈を生じ、不安定な荷重-変形関係を示した。これに対して、クリアランスが芯鋼管直径の1%程度の試験体では、平均軸歪3%程度まで局部座屈を生じることなく安定した荷重-変形関係を示した。
- 3) モルタル充填鋼管を用いたタイプを対象にした有限要素法解析結果によると、クリアランスを有する試験体では、拘束材内で芯鋼管の全体座屈が先行し、それが拘束された後、端部付近で局部座屈を生じる現象が生じ、実験結果より得られた各試験体の座屈性状をほぼ再現する結果となった。局部座屈の半波長は理論式による値とほぼ一致しており、実験結果とも整合していることが確認された。
- 4) 実験及び解析を通して、古典理論による局部座屈半波長の7%程度を上限値、ポアソン比による管径のふくらみを下限値とした領域でクリアランスを設定すれば、安定した変形性能が期待できる。ただし、同条件式が有効であると確認できた範囲は $16 < D/t < 40$ である。

謝辞

実験計画及び実行にご協力頂きました、中部電力株式会社土木建築部、松井伸夫氏、大久保浩光氏、大河内靖雄氏に深謝致します。

参考文献

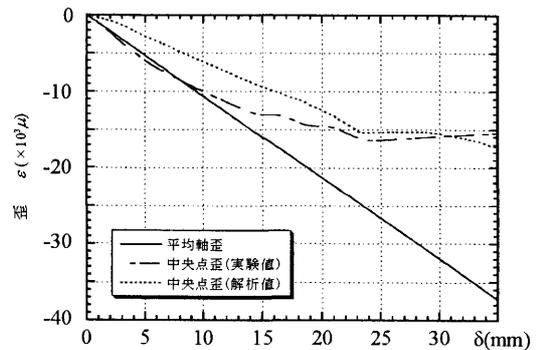
- 1) T. Takeuchi and K. Suzuki: Performance-Based Design for Truss Frame Structures using Hysteretic Damper, STESSA 2003, Naples, 2003.6
- 2) 渡辺秀司, 竹内徹, 鈴木一弁: 履歴型制振部材による高層トラス構造の損傷制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), C-1分冊, pp.685-686, 2003.8
- 3) 内山智晴, 竹内徹, 鈴木一弁, 大河内靖雄, 小河利行, 加藤史郎: 通信鉄塔の耐震補強に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.219-222, 2004
- 4) 金子洋文, 小野喜信, 宇佐美徹: H形鋼座屈補剛制振プレースの疲労特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), C-1分冊, pp.557-558, 2002.8
- 5) 桑原進, 多田元英, 米山隆也, 今井克彦: 二重鋼管の補剛性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第445号, pp.151-158, 1993.3
- 6) 小林智洋, 稲田雅宣, 今井克彦, 木下陵二, 森田時雄, 荻野谷学: 内管補剛型二重管FLD部材の載荷実験(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), C-1分冊, pp.657-658, 2001.9
- 7) 木下陵二, 宮川和明, 阪口暁洋, 今井克彦: 内管補剛型二重管FLD部材の載荷実験(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), C-1分冊, pp.765-766, 2003.9
- 8) 上村健二, 藤沢一善, 清水孝憲, 木下陵二: 二重鋼管座屈補剛プレースの履歴特性に関する研究(その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), C-1分冊, pp.669-674, 2001.9
- 9) 安井信行, 藤澤一善, 中山信雄, 金子洋文, 今井克彦, 清水孝憲, 田淵勝道: 極軟鋼を用いた制振プレースの低サイクル疲労実験その2 二重鋼管プレース, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), C-1分冊, pp.761-762, 1996.9
- 10) 鈴木敏郎, 小河利行, 小笠原朋隆: 外側拘束された円形鋼管の塑性局

部座屈に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第458号, pp.137-143, 1994.4

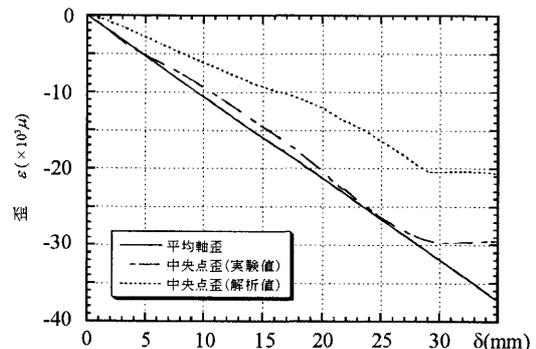
- 11) 鈴木敏郎, 小河利行, 小笠原朋隆: 薄肉鋼管により外側拘束された鋼管の塑性局部座屈に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第479号, pp.93-99, 1996.1
- 12) 加藤勉, 秋山宏, 鈴木弘之: 軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力, 日本建築学会論文報告集, 第204号, pp.9-17, 1973.2
- 13) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 竹内徹, 渡辺厚: アンボンドプレースの開発, 季刊カラム, No.115, pp.91-96, 1990.1
- 14) 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章: 実大アンボンドプレースに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.149-158, 1995.10
- 15) 独立行政法人建築研究所: 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究, 2002.4
- 16) ABAQUS ver.6.3/Standard User's Manual (日本語版), ABAQUS
- 17) S. Timoshenko, J. Gere: Theory of Elastic Stability, McGrawhill, 1963
- 18) 日本機化学会編: シェルの振動と座屈のハンドブック, 技報堂出版, 2003.1

付録1

付図1,2に試験体PA-35-3およびPA-35-1について実験より得られた全体変形と平均軸歪、中央部歪測定値および解析における中央部歪を合わせて示す。これを見ると、PA-35-3では $\delta=10\text{mm}$ 程度までは平均軸歪と中央部歪値はほぼ連動しており、鋼管材全体が平均的に塑性化していることが分かる。その後、端部に局部座屈が発生し、平均軸歪の進行にも関わらず中央部歪値の増加は止まっていることから、 $\delta=20\text{mm}$ 以降の変形は局部座屈により吸収されていることが分かる。一方、PA-35-1では $\delta=28\text{mm}$ 程度まで全体が塑性変形し、その後は局部座屈の発生により軸変形が吸収されている。これより、効果的な拘束条件下では、軸変形3%程度まで局部座屈が発生することなく材全体が平均的に塑性化することが分かる。



付図1 PA-35-3 平均軸歪, 中央点歪 - 軸変形関係



付図2 PA-35-1 平均軸歪, 中央点歪 - 軸変形関係

(2004年9月9日原稿受理, 2005年1月7日採用決定)