

座屈拘束ブレースにおける芯材局部座屈の拘束条件

LOCAL BUCKLING RESTRAINT CONDITIONS FOR CORE PLATE IN BUCKLING RESTRAINED BRACES

竹内 徹^{*1}, 松井良太^{*2}, ジェロム・ハジャー^{*3}, 西本晃治^{*4}, イアン・アイケン^{*5}
Toru TAKEUCHI, Ryota MATSUI, Jerome F.HAJJAR,
Kohji NISHIMOTO and Ian D.AIKEN

Buckling Restrained Braces (BRBs) are commonly used as ductile bracing elements in seismic lateral resistance systems. A key limit state governing BRB behavior is overall flexural buckling. However, when the wall thickness of the restrainer is relatively small compared to the core plates section, the restraint conditions against local buckling of the core plate about its strong axis can be critical for the stability and strength of the BRB. In this study, cyclically-loaded experiments and numerical analyses were carried out using various tube restrainer configurations, and the local buckling restraint conditions are discussed and proposed using these results.

Keywords : *Buckling Restrained Brace, Local buckling, Cyclic loading, Restraint Performance.*

座屈拘束ブレース, 局部座屈, 繰返し荷重, 拘束性能

1. 序

座屈拘束ブレース(以下, BRB)は, 平板等の芯材をモルタル充填された鋼管等によって軸方向歪に対して離間させながら曲げ座屈を拘束することで, 安定した弾塑性履歴を示す耐震・制振部材として, 現在までに多くの建物に使用されている. BRBが安定した弾塑性履歴特性を示すために必要な条件は概ね以下の5つの項目に分類できる.

- (a) 芯材が軸力により降伏し, 必要な塑性率に至るまで拘束材が全体座屈しないために十分な曲げ剛性及び耐力を有していること.
- (b) 芯材は圧縮されることにより断面が膨張し, これが拘束材内で閉塞した場合には, 拘束材に芯材軸力が伝達され, 全体座屈を生じたり圧縮側の復元力特性が乱れるおそれがあるため, 芯材と拘束材の間に軸力伝達を阻止し得る適切なクリアランスを設けていること.
- (c) 芯材は圧縮されることにより, 拘束材クリアランス内において高次モードの局部座屈を生じる. この芯材の影響により拘束材が局部変形を生じる等によりその機能を失わないこと.

(d) 建物構面内に配置されたBRBが接合部を含む拘束材外部の変形・塑性化により不安定とならない様, 接合部及び拘束材端部が十分な剛性及び耐力を有していること.

(e) 条件(a)において設けられたBRBの設計条件式において, 拘束鋼管の座屈荷重を求める際の有効座屈長は接合部, 座屈拘束部の剛性及び耐力を考慮し, 適切な値を使用すること.

(a)の芯材の座屈を拘束するために必要な拘束材の条件については開発初期に藤本・和田¹⁾により研究されており, 芯材の降伏軸力が拘束鋼管のオイラー座屈荷重を下回ればよいという設計条件式が提示されている. 又, 井上²⁾により初期不整とクリアランスを考慮した条件式が提示されている. (b)の芯材と拘束材間の適切なクリアランス量については, 芯材が平板の場合について藤本・和田¹⁾により, 芯材が中空鋼管の場合について竹内・鈴木³⁾によりそれぞれ論じられている. (c)の芯材の局部座屈については, 藤本・和田¹⁾によりモルタルを弾性バネと置き換えることにより検討され, 通常のプロポーションでは局部座屈拘束に十分な剛性が得られるとしている. (d)のBRB両端の接合部剛

*1 東京工業大学建築学専攻 准教授・博士(工学)

*2 東京工業大学建築学専攻 大学院生・修士(工学)
(日本学術振興会特別研究員 DC1)

*3 イリノイ大学土木環境工学専攻 教授・Ph. D.

*4 新日鉄エンジニアリング(株)建築・鋼構造事業部 修士(工学)

*5 サイズミック・アイソレーション・エンジニアリング
代表・Ph. D., P.E.

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, D. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)

Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., University of Illinois, Ph. D.

Building Construction & Steel Structures Div., Nippon Steel Engineering, M. Eng.

Principal, Seismic Isolation Engineering Inc., Ph. D., P.E.

性に関しては竹内・山田⁹⁾らにより種々の構面外剛性の低い接合部により接合されたBRB 端部回転剛性の確認実験が行われている。接合部の剛性・耐力評価では、(e)のBRB 有効座屈長評価と合わせて拘束材端部にヒンジが生じる場合に対し、井上・聲高^{9),10)}により構面内に配置されたBRBの節点間において接合部剛性の設定を変化させて曲げたわみの式を利用し、検討されている。

一方、条件(c)に関しては芯材の大断面化及び拘束鋼管の相対的な薄肉化が進むにつれ、BRBが文献1),2)で示される設計式を満たしていたとしても芯材断面に対して拘束鋼管が薄く、モルタルのかぶり厚さが薄い場合は、芯材が強軸方向へと変形した際に生じる軸力直交方向分力を拘束することができず、拘束鋼管が凸状に変形する破壊形式(以後、局部座屈破壊と呼称する)が発現し得ることが岩田^{7),8)}により確認されている。拘束材が局部座屈破壊を生じると塑性歪が芯材内で偏し疲労性能の低下を招くのみならず、偏心量の増大により全体座屈を誘発する危険性もある。しかしながら、そのクライテリアに関してはまだ明らかになっていない点が多い。そこで、本研究では種々の幅厚比を持つ角形及び円形薄肉鋼管を拘束材に用いたBRBを製作し、拘束材の局部座屈破壊性状を確認する。また、芯材及び拘束鋼管の数値解析を行うことにより芯材の局部座屈挙動について分析を行い、これらを総合して、座屈拘束ブレース拘束材が局部座屈破壊を生じないための簡易な設計条件式を提案することを目的とする。

2. 弾塑性バネにより拘束された芯材の局部座屈条件

芯材幅が広くモルタルのかぶり厚さが薄い場合、薄肉の拘束材を用いた座屈拘束ブレースは、図1に見るように芯材強軸側のモルタルがほとんど機能せず局部座屈破壊すると考えられる。この状態を図2に示すように芯材が上下2枚の鋼板により拘束された状態に置き換える。拘束鋼管の側面端部はモルタルにより拘束されているため、拘束鋼管を図3に見るように両端固定により支持された梁とみなし、芯材が軸と直交方向にのみ変形すると仮定した際の拘束鋼管の単位長さ当たりのバネ剛性 β_r を図3中の式(1)により算出し、得られた連続支承バネにより支持された芯材が局部座屈する荷重を式(2)により算出する。この条件は、藤本・和田¹⁾が示した拘束材を剛体とみなし、モルタルの弾性剛性をバネ支承とした条件よりは低い座屈荷重を示すものの、弾性範囲では芯材降伏軸力よりはるかに高い値を示す。ただし、芯材が塑性化すると芯材の接線係数 E_{tc} が低下し、同時に拘束鋼管のバネ剛性 β_r が芯材の局部座屈により面外方向に塑性化し低下するに従い、局部座屈軸力 P_{cr1} も大幅に低下し、 P_{cr1} が芯材降伏軸力 P_{cy} を下回った際に芯材の局部座屈を拘束できずに拘束鋼管が局部座屈破壊する現象が発生し得る。一例として図4で表わされる引張試験の材料特性に基づく拘束鋼管の接線剛性により、得られた拘束鋼管のバネ剛性 β_r 及び芯材の接線係数 E_{tc} を用い、拘束鋼管幅 $B_r=150\text{mm}$ 、拘束鋼管厚さ $t_r=2.3, 20\text{mm}$ とした場合の芯材局部座屈軸力と芯材降伏軸力との関係を図5に示す。図4(a)に示す芯材接線係数を仮定した時、拘束鋼管板厚2.3mmでは拘束鋼管のバネ剛性が弾性剛性 β_{r0} の0.1倍程度まで低下した場合に局部座屈破壊を発生する可能性が生ずることが分かる。

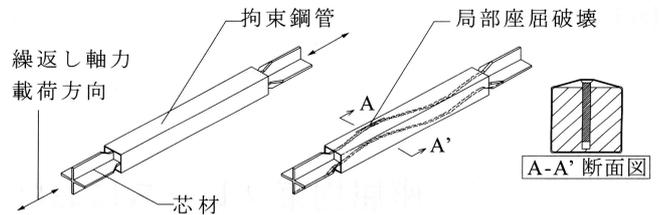


図1 座屈拘束ブレース拘束鋼管の局部座屈破壊

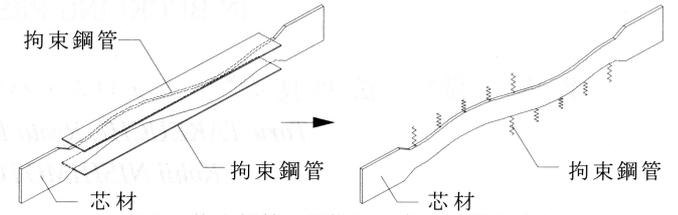


図2 拘束鋼管の弾塑性バネへの置き換え

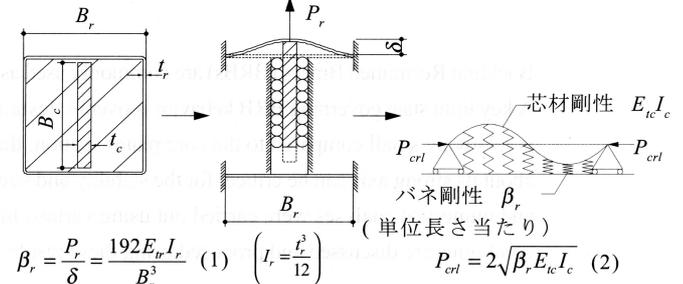


図3 拘束鋼管の面外剛性と連続バネ支承モデル

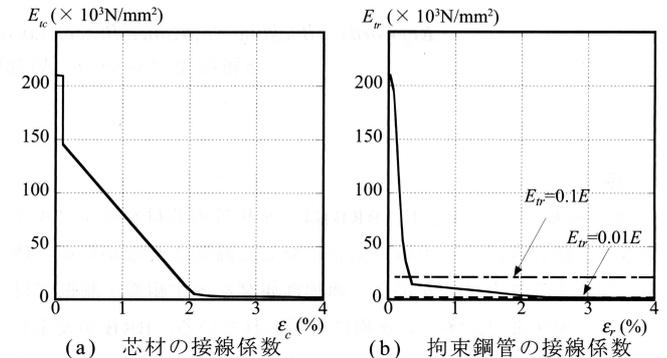


図4 塑性化に伴う構成材の接線係数低下

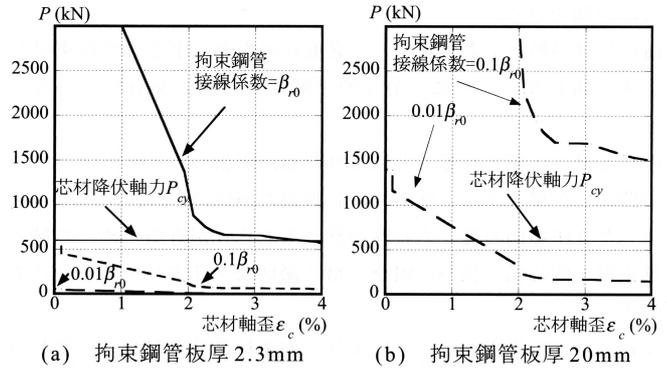


図5 芯材局部座屈軸力と降伏軸力の比較

RC-65

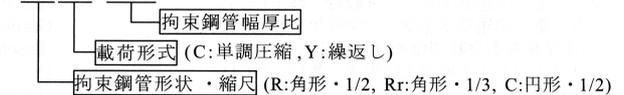


図6 試験体記号の説明

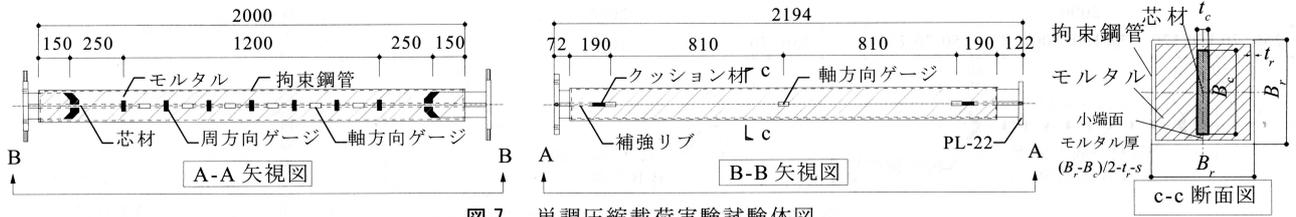


図7 単調圧縮荷重実験試験体図

表1 単調圧縮荷重実験試験体

試験体	B_r (mm)	t_r (mm)	拘束鋼管 材質	σ_{ry} (N/mm ²)	E_{tr} (N/mm ²)	B_c (mm)	t_c (mm)	小端面の モルタル厚 (mm)	σ_{cy} (N/mm ²)	E_{tc} (N/mm ²)	P_{cr1} (kN) 式(2)	P_{cy} (kN)	P_{cr1}/P_{cy}	s (mm)	局部座屈 破壊
RC25	150	6.0	STKR400	436	2.05×10^5	130	16	4	258 (SS400)	2.02×10^5	2.73×10^5	539	507	1.0	発生せず
RC65		2.3	SS400	301	2.05×10^5	94	22	7.7			6.49×10^4	535	121		
RC65M				SS400				25.7			4.72×10^4	539	120		
CC83	165.2	2.0	SPHC-P	280	2.01×10^5	130	16	15.6				539	88		

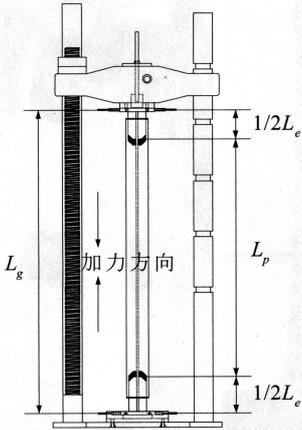


図8 単調圧縮荷重実験
セットアップ

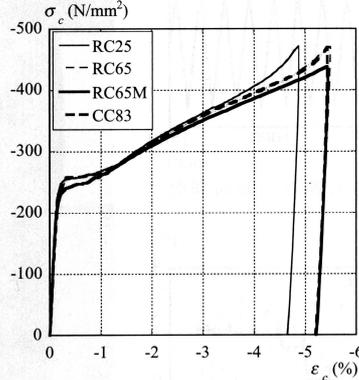


図9 単調圧縮荷重実験
RC65 応力 - 歪関係

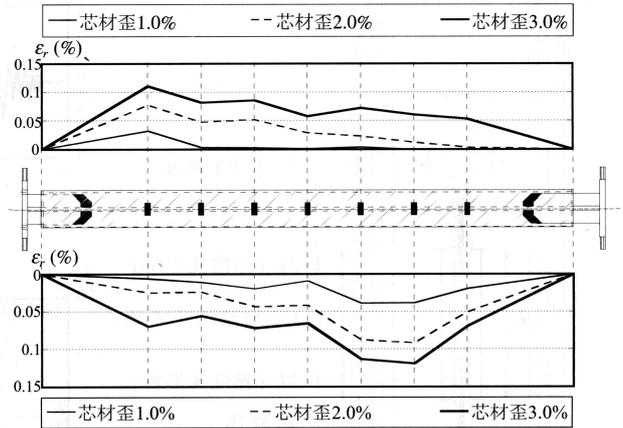
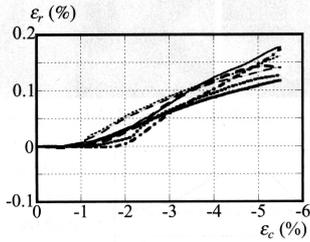
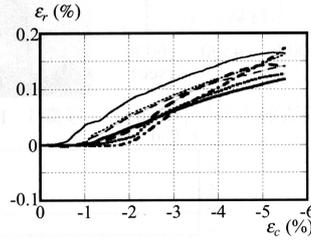


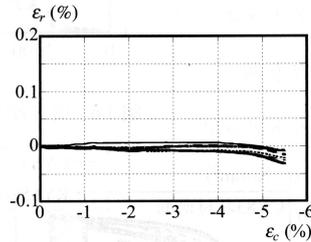
図10 RC65 拘束鋼管歪分布



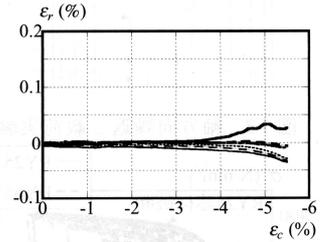
(a) 南面周方向ゲージ



(b) 北面周方向ゲージ



(c) 南面軸方向ゲージ



(d) 北面軸方向ゲージ

図11 RC65 試験体芯材歪 - 拘束鋼管歪関係

3. 単調圧縮荷重実験

3.1 荷重条件

上記の仮定を確認するために、BRB 試験体を拘束鋼管の形状、芯材の形状を変化させて製作し、単調圧縮荷重実験を実施する。以降、図6に示すように試験体記号をそれぞれ拘束鋼管形状、荷重形式及び拘束鋼管の幅厚比を用いて示す。試験体は図7に示すような実大の1/2モデルを想定し、表1に示すように拘束鋼管を円形及び角形の2種類、角形鋼管では25、65、円形鋼管では83と幅厚比を変化させる。これは通常用いられる幅厚比制限値(角形鋼管で55以下、円形鋼管で67以下)⁹⁾を一部超えている。ここで、 s は芯材とモルタル間のクリアランスである。芯材はPL-16×130及びPL-22×94とし、芯材小端面強軸方向のモルタル厚さを変化させることにより拘束鋼管の局部座屈破壊挙動に与える差を合わせて確認する。なお、表中に示す σ_{ry} は拘束鋼管降伏応力、 σ_{cy} は芯材降伏応力、 P_{cr1} は式(2)による拘束鋼管

管弾性時の局部座屈軸力、座屈安全率は局部座屈軸力 P_{cr1} を芯材降伏軸力 P_{cy} で除した値とする。試験体は図8に示すように両端固定条件により軸方向に単調圧縮荷重する。拘束鋼管表面上には歪ゲージを芯材軸方向と拘束鋼管周方向にそれぞれ交互となるように貼付する。一方、図8に示される加力するRAMに付設されているロードセルにより芯材の軸力を測定し、変位計を試験体両端エンドプレートに取り付けた高ナットに設置することにより芯材軸方向変形を測定する。ここで、芯材塑性化領域の軸変形 δ_c は変位計設置間距離 L_g 間の芯材軸変形 δ_g 、芯材軸力 P_c 、弾性領域断面積 A_e 、芯材初期接線係数 E 、及び変位計設置間の弾性領域長 L_e を用いて式(3)のように算出する。

$$\delta_c = \delta_g - \frac{P_c}{A_e E} L_e \quad (3)$$

芯材塑性化領域の等価軸歪 ϵ_c は式(4)により算出する。

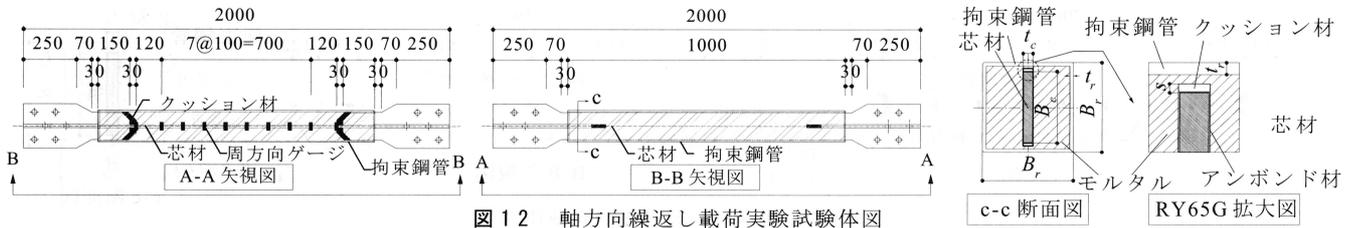


図 12 軸方向繰返し載荷実験試験体図

表 2 軸方向繰返し載荷実験試験体

試験体	B_r (mm)	t_r (mm)	拘束鋼管 材質	σ_{ry} (N/mm ²)	E_{tr} (N/mm ²)	B_c (mm)	t_c (mm)	小端面の モルタル厚 (mm)	σ_{cy} (N/mm ²)	E_{tc} (N/mm ²)	P_{cr1} (kN) 式(2)	P_{cy} (kN)	P_{cr1}/P_{cy}	s (mm)	局部座屈 破壊
RY25	150	6.0	STKR400	350	1.92×10^5	130	16	4	261 (SS400)	2.05×10^5	2.66×10^5	542.9	491	1.0	発生せず
RY65		2.3	SPHC-P	351	2.05×10^5			7.7			6.53×10^4		120	1.0	発生
RY65G		2.0		231	2.01×10^5			15.6			4.76×10^4		88	1.0	発生せず

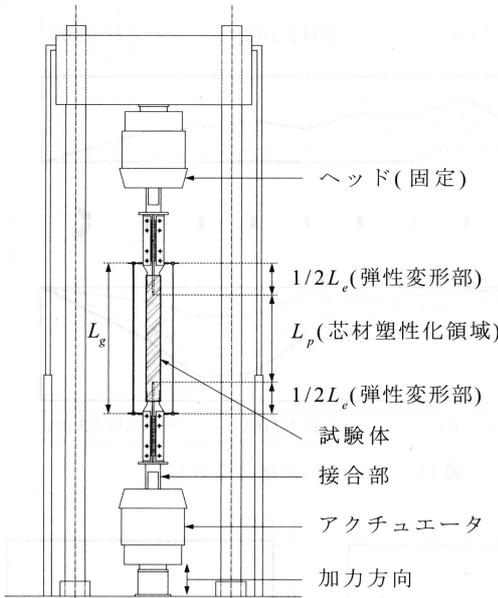


図 13 軸方向繰返し載荷実験セットアップ

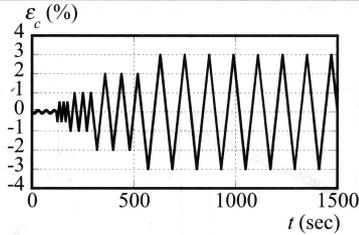


図 14 軸方向繰返し載荷履歴

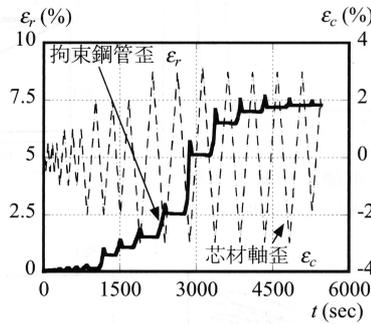


図 16 局部座屈破壊部歪履歴(RY65)

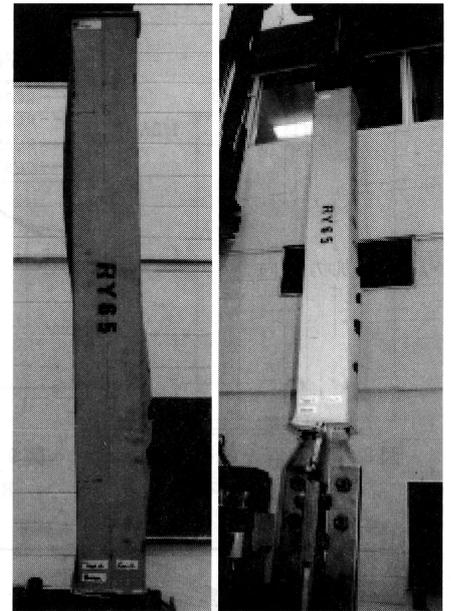


写真 1 RY65 試験体局部座屈破壊の様子

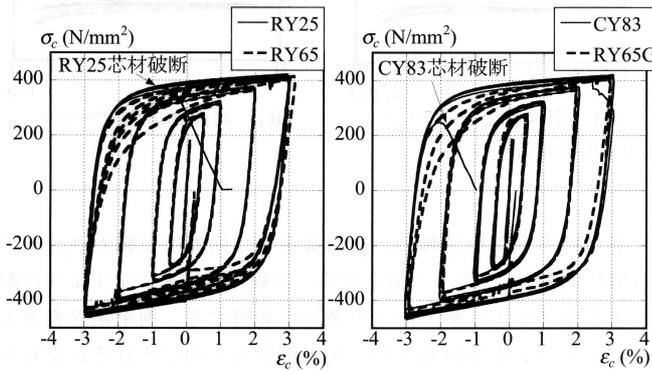


図 15 軸方向繰返し載荷実験応力-歪関係

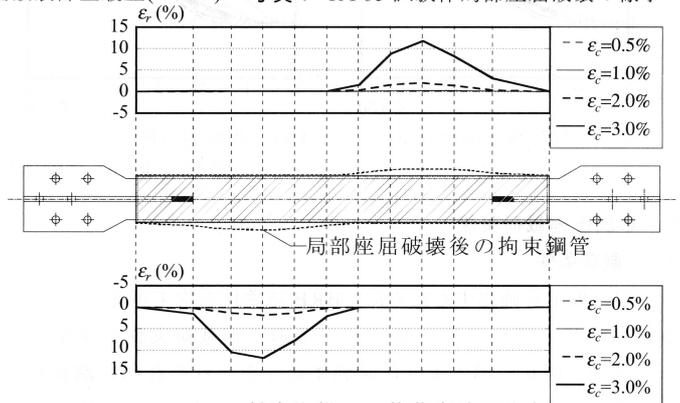


図 17 軸方向繰返し載荷実験歪分布

$$\epsilon_c = \frac{\delta_c}{L_p} \quad (4)$$

3.2 実験結果

図9の芯材の応力-歪関係に見るように、全ての試験体で最大芯材軸歪 $\epsilon_c = 5\%$ となるまで載荷しても耐力低下は確認されなかった。また図10に見るように、薄い拘束材を使用したRY65試験体の拘束鋼管表面の歪も芯材軸歪が3%に至るまで降伏歪の0.1%を概ね下回り、図11に見るように芯材歪が5%に至って

も軸方向及び周方向の拘束鋼管歪は急激に上昇することではなく、拘束鋼管表面の局部座屈破壊も進展しなかった。他のモルタルの厚さ、拘束鋼管の形状及び厚さを変更した他の試験体においてもほぼ同様の挙動となり、本実験ではモルタルのかぶり厚さによる局部座屈破壊挙動への影響は確認できなかった。

4. 繰返し載荷実験

前項にて示した通り、単調圧縮載荷では薄肉拘束材を用いた

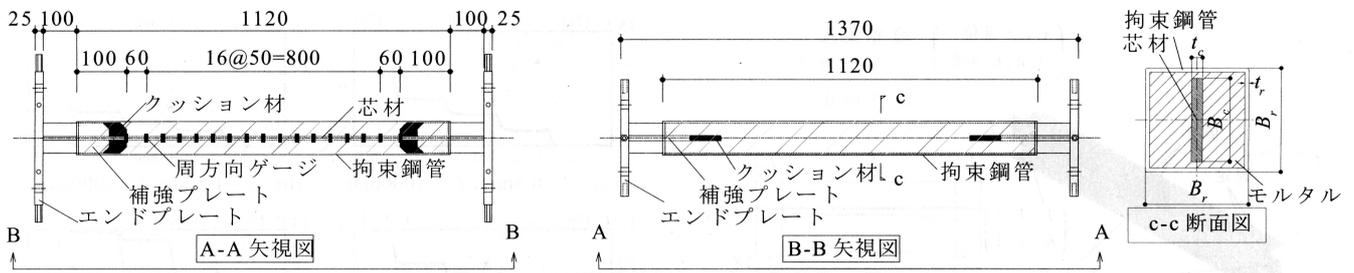


図 18 斜行配置繰返し載荷実験試験体図

表 3 斜行配置繰返し載荷実験試験体

試験体	B_r (mm)	t_r (mm)	拘束鋼管 材質	σ_{ry} (N/mm ²)	E_{tr} (N/mm ²)	B_c (mm)	t_c (mm)	小端面の モルタル厚 (mm)	σ_{cy} (N/mm ²)	E_{tc} (N/mm ²)	P_{cr1} (kN) 式(2)	P_{cy} (kN)	P_{cr1}/P_{cy}	s (mm)	局部座屈 破壊					
RrY125	100	0.8	SPHC-P	288	1.78×10^5	90	12	4.2	276 (SS400)	2.05×10^5	9.32×10^3	297.6	31	1.0	発生					
RrY125M																68	16	3.4	2.83×10^4	95
RrY63																90	12	3.4	2.83×10^4	95

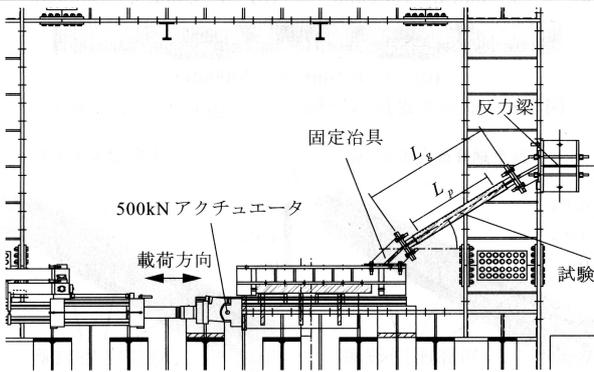


図 19 斜行配置繰返し載荷実験セットアップ

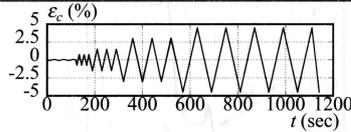


図 20 端部固定繰返し載荷履歴

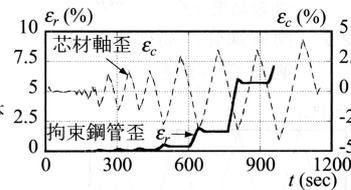


図 21 斜行配置繰返し載荷実験
局部座屈破壊部履歴(RrY63)

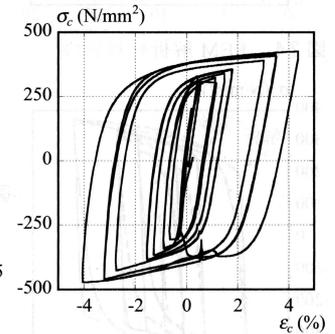


図 22 斜行配置繰返し載荷実験
応力-歪関係(RrY63)

試験体の場合においても拘束材の局部座屈破壊は確認されなかった。次に同等の芯材及び拘束鋼管断面を有する試験体を製作し種々の設置条件のもとでの繰返し載荷実験を行う。

4.1 軸方向繰返し載荷実験

4.1.1 載荷条件

試験体諸元を図 12 及び表 2 に示す。同表に示すように、対象とする座屈拘束ブレースの拘束鋼管は円形及び角形断面の 2 種類とし、拘束鋼管の幅厚比は 25, 65, 83 と変化させる。芯材は PL-16 × 130 とし、図 12 に示すように RY65G では芯材小端面にもクッション材を貼付しクリアランス量 s を増加させることによりクリアランスが芯材の局部座屈破壊挙動に与える差を確認する。座屈拘束ブレース試験体は図 13 に示すように両端回転を拘束し、軸方向に図 14 に示すような正負交番の漸増振幅繰返し載荷を行う。図 13 中に示すように、RAM に付設されているロードセルにより芯材の軸力を測定し、図 13 中の L_g を変位計で測定することにより芯材軸方向の変形を測定する。芯材塑性化領域の等価軸歪は式(3), (4)により算出する。

4.1.2 実験結果

軸方向繰返し載荷実験の結果、拘束鋼管の厚さが比較的薄い RY65 試験体と RY65G 試験体に関しては、単調圧縮載荷実験と異なり、2% 軸歪振幅付近より写真 1 に見るような局部座屈破壊が発現した。図 15 に見るような厚い角形鋼管を拘束鋼管に用いた試験体 RY25 及び円形鋼管を拘束鋼管に用いた試験体 CY83 は芯材破断に至るまで安定した復元力特性を示したが、薄い拘束鋼管を用いた試験体 RY65 及び RY65G は局部座屈破壊の発現後

RY25 や CY83 と比較し剛性が低下していき、最終的に芯材の偏心により接合部の曲げモーメントが増大し不安定となったため載荷を終了した。図 16 にみるように局部座屈破壊を生じた個所の拘束鋼管歪は芯材が繰返して軸力を受けることにより増大している。RY65 試験体に比べ RY65G 試験体の剛性及び耐力低下が早期に生じているのは、芯材小端面のクリアランス量 s が RY65 試験体よりも 4mm 大きく、芯材の局部座屈変形による軸方向変形が大きいためと考えられる。図 17 に見るように拘束鋼管が局部座屈破壊している箇所では拘束鋼管歪 ϵ_r が芯材軸歪 ϵ_c の上昇とともに局所的に増大していることが分かる。載荷終了後、各試験体の拘束鋼管を溶断し内部の芯材の様子を確認したところ、厚い拘束材を用いた座屈拘束ブレース RY25 の芯材では繰返し載荷後も内部芯材が強軸方向に局部座屈することはなく、弱軸方向に高次モードの座屈波形が確認された。一方、薄い拘束材を用いた座屈拘束ブレース芯材は強軸方向に 2 次モードの正弦波のような変形が確認された。座屈半波長は芯材幅の 3.5~5 倍に分布している。

4.2 斜行配置繰返し載荷実験

4.2.1 載荷条件

次に図 19 のように試験体を両端固定条件の下で斜めに設置し、実架構と同様に BRB 端部に強制曲げが生じる際の局部座屈破壊挙動の違いについて 4.1 と比較して検討する。試験体は実大の 1/3 を想定し、図 18, 表 3 に示すように設定する。載荷履歴は図 20 に示す正負交番の漸増繰返し載荷とし、芯材破断又は局部座屈破壊の影響により BRB が不安定となった時点で載荷を終了す

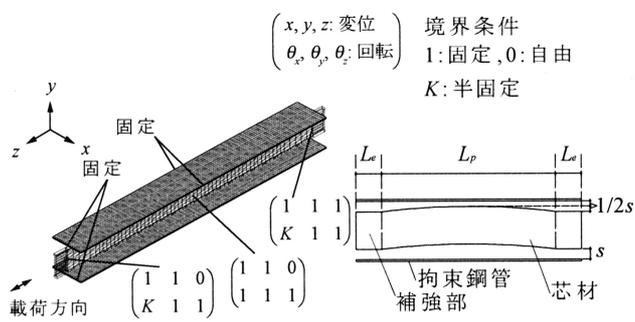


図 23 FEM 解析モデル

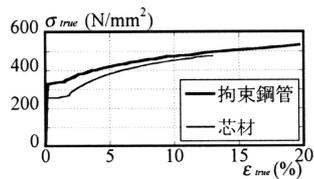


図 24 FEM 解析材料特性

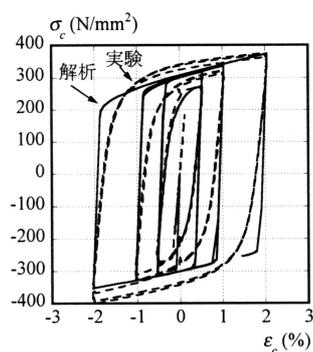


図 25 実験結果と解析結果
応力 - 歪関係

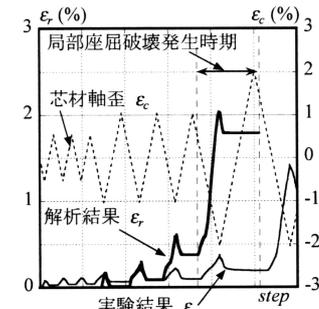


図 26 拘束鋼管の局部座屈破壊部歪の比較

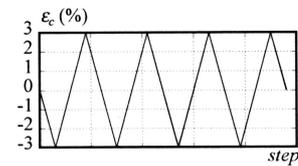


図 27 入力定振幅歪

る。芯材軸歪は3節と同様変位計設置間距離により式(3),(4)を用いて算出する。

4.2.2 実験結果

斜行配置繰返し載荷実験の結果、表3に見るように幅厚比63以上の全試験体において局部座屈破壊が発現した。モルタル厚さが11mm厚いRrY125M試験体が局部座屈破壊を生じた際の芯材軸歪はモルタル厚さの薄いRrY125試験体とほぼ同等であり、両者の差は確認されなかった。またRrY63試験体はRrY125試験体 비해拘束鋼管厚さが2倍程度厚いが、局部座屈破壊を生じた際の芯材軸歪に差はほとんど見られなかった。他の実験と同様、図21に見るように局部座屈破壊を生じた箇所の歪履歴は繰返して圧縮される度に増大していく傾向が見られた。いずれも芯材歪2%程度を超えた辺りから拘束鋼管の局部歪が増大し始め、これは4.1.の軸方向繰返し載荷実験とほぼ同等であることから、端部のモーメントが拘束鋼管の局部変形に与える影響はあまり見られない。図22に見るように、復元力特性は小振幅では安定しているが、拘束鋼管の局部変形が増大することにより偏心量も増大して全体座屈を生じ、RrY125Mにおいては拘束材が曲げ破断に至った。内部芯材は写真1の軸方向繰返し載荷実験と同様2次モードに近い波形で変形しており、座屈半波長は芯材幅の約4倍であった。また、薄い拘束材の強軸方向のモルタルは圧壊し芯材の拘束に寄与していない状況であった。

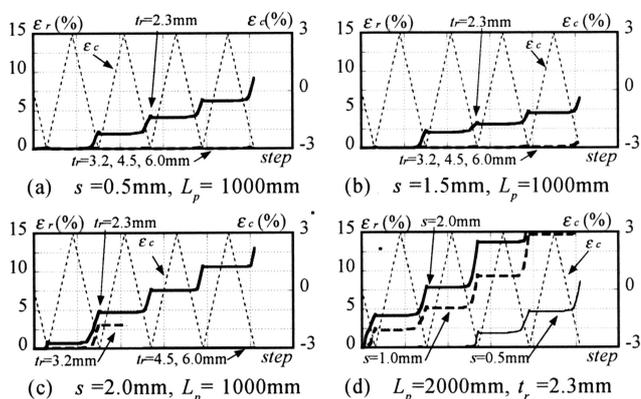


図 28 解析による局部座屈破壊部の歪履歴

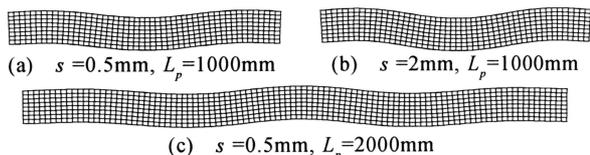


図 29 座屈半波長の比較, $t_r=2.3\text{mm}$ (5回目圧縮時)

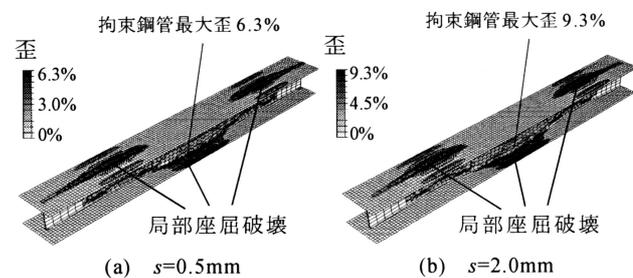


図 30 sの影響, $L_p=1000\text{mm}$, $t_r=2.3\text{mm}$ (5回目圧縮時)

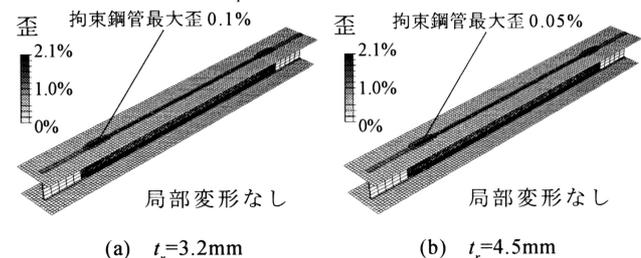


図 31 t_r の影響, $L_p=1000\text{mm}$, $s=0.5\text{mm}$ (5回目圧縮時)

5. 局部座屈破壊挙動の有限要素法解析

以下、有限要素法解析を用いて実験結果を再現し、芯材の局部座屈挙動を分析する。プログラムはABAQUS.ver6.5-6を用いる。実験ではモルタルのかぶり厚さが薄く芯材小端面のモルタルが芯材の拘束に殆ど寄与していなかったことから、図23に見るように芯材が直接拘束鋼管に接触し、両端に実験より評価した境界剛性を持つ解析モデルを用いる。弱軸方向のモルタル拘束は芯材の塑性化領域では十分に機能しているとみなして変位及び回転を固定し、芯材の強軸方向の座屈を誘導するために芯材とモルタルの間に設置されたクリアランス分を初期不整値として与える。要素は拘束鋼管及び芯材をシェル要素、載荷治具部を剛体とし、正方形に近い形状で分割する。拘束鋼管と芯材要素は図24に示すような一軸方向引張試験体より得られた材料特性を用い、降伏後は複合硬化則を用いる。図25に局部座屈破壊を生じる直前までの実験結果と解析結果における応力 - 歪関係を比較して示す。この時、図26に示すように拘束鋼管歪が増

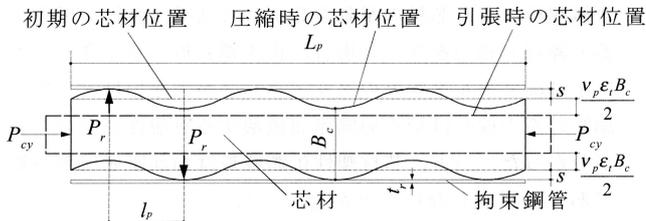


図 32 繰返し軸力下における芯材変形モデル



図 33 局部座屈破壊直前の歪分布(濃黒部分が塑性歪)

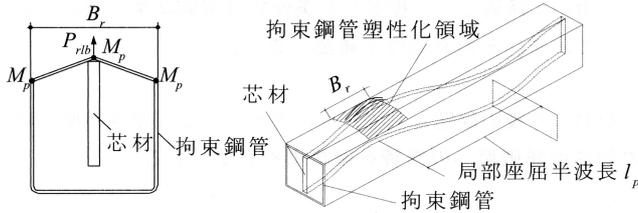


図 34 局部座屈破壊時の拘束鋼管のモデル

大し局部座屈破壊を生じる時期は解析結果と実験結果で概ね一致しており、繰返して軸力を受けることで拘束鋼管歪が増大していく様子が再現できている。以上のモデルを用いて拘束鋼管板厚 t_r 、芯材と拘束材との間のクリアランス s 、芯材塑性領域長 L_p を変化させ、芯材の局部座屈挙動について解析的に分析する。入力する歪は図 27 に示すような定振幅載荷とし、拘束鋼管が局部座屈破壊を生じる条件については拘束鋼管歪が降伏歪の 0.1% を大きく越えたときとみなす。図 28 の各解析モデルにおける拘束鋼管歪の進展状況に見るように、拘束鋼管の局部座屈破壊は拘束鋼管厚さ t_r が薄いほど、芯材拘束材間のクリアランス s が大きいほど早期に生じる傾向がある。一方、芯材塑性領域長 L_p が変化しても局部座屈破壊の生じる時期に変化はあまり見られない。また、内部芯材の局部座屈半波長 l_p は図 29 の比較で分かるように、芯材拘束材間のクリアランス s や芯材塑性領域長に依らずほぼ等しい長さを示すことが確認できる。図 30(a)、図 31(a)、(b) を比較すると拘束鋼管厚さ t_r が厚いほど拘束鋼管の局部座屈破壊は生じにくく拘束鋼管の歪も小さくなること、図 30(a)、(b) を比較すると芯材拘束材間のクリアランス s が大きくなるほど芯材の局部座屈が進展し、局部座屈破壊部の拘束鋼管の歪が大きくなっていることが分かる。

6. 座屈拘束ブレースの局部座屈破壊条件

3, 4 節にて示した実験結果及び 5 節にて示した有限要素法解析より薄肉拘束材を用いた座屈拘束ブレースが局部座屈破壊挙動を生じる時、芯材の局部座屈半波長 l_p は芯材の塑性領域長に関わらず、およそ $l_p = 3.5B_c \sim 5B_c$ 程度となっており、その理由について考察する。まず、図 32 の様に、圧縮力を加えることでより高次モードへ移行していく局部座屈状態において、芯材の接線係数 E_t より導いた Euler 座屈応力が芯材降伏応力と一致した時座屈モードの高次化が止まるとみなし、 E_t を用いた規準化細長比 $\bar{\lambda}$ を式(5)より算出する。ここで、 σ_{cy} は芯材降伏応力である。

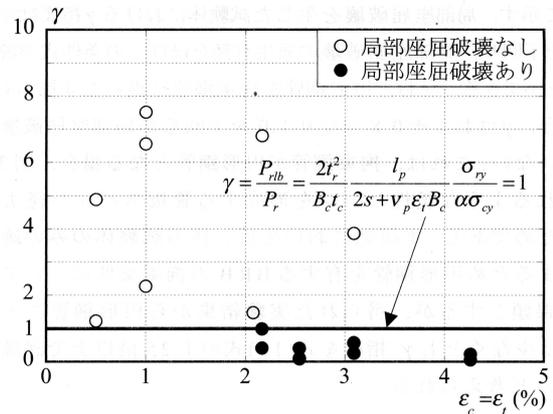


図 35 実験結果の γ 指標の値

$$\sigma_{cy} = \frac{P_{cy}}{A_c} = \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\bar{\lambda}^2} \quad (5)$$

この時、局部座屈半波長 l_p は式(6)のように評価できる

$$l_p = i_c \bar{\lambda} = \frac{\pi B_c}{2} \sqrt{\frac{E_t}{3\sigma_{cy}}} \quad (6)$$

式(6)より局部座屈半波長 l_p は芯材せい B_c と E_t により決定される。図 24 の材料特性の場合、 $E_t/\sigma_{cy} = 832$ 、 $E_t = 0.02E$ とすると、概ね $l_p = 4B_c$ となる。

一方、芯材は繰返し荷重を受けると引張側で $v_p \epsilon_t B_c$ 分断面が縮み (v_p : 塑性ポアソン比)、その分クリアランスが増大するため図 32 の釣り合いから拘束鋼管の鋼管幅に作用する芯材直交分力 P_r を式(7)で評価する。

$$P_r = \frac{2s + v_p \epsilon_t B_c}{l_p} P_{cy} \quad (7)$$

この芯材直交分力 P_r に抵抗する拘束材の範囲は図 33 の FEM 解析結果より局部座屈破壊が生じる直前で B_c 程度であり、局部座屈破壊はこの範囲の拘束鋼管が P_r によって図 34 の塑性ヒンジメカニズムを形成する時生じるものとし、終局分力 P_{rb} を式(8)、(9)より算出する。

$$M_p = \frac{B_r t_r^2}{4} \sigma_{ry} \quad (8)$$

$$P_{rb} = \frac{8M_p}{B_r} = 2t_r^2 \sigma_{ry} \quad (9)$$

ここで、 σ_{ry} は拘束鋼管降伏応力を示す。この時、芯材分力 P_r と拘束鋼管の終局分力 P_{rb} の比 γ は式(10)のようになる。

$$\gamma = \frac{P_{rb}}{P_r} = \frac{2t_r^2}{B_c t_c} \frac{l_p}{2s + v_p \epsilon_t B_c} \frac{\sigma_{ry}}{\alpha \sigma_{cy}} \quad (10)$$

ここで ϵ_t は芯材最大引張軸歪、 α は芯材最大圧縮軸歪 ϵ_c に対する芯材の硬化係数で $\epsilon_c = 3 \sim 5\%$ に対し 1.2~1.4 程度の値となる。ただし、単調圧縮荷重の場合は $\epsilon_t = 0$ とする。 γ は安全率であり、式(11)の局部座屈破壊を生じる芯材軸力 P_{rb} と芯材最大軸力 $\alpha \cdot P_{cy}$ との比でもあることから式(12)の様に表現することもできる。

$$P_{rb} = 2t_r^2 \frac{l_p}{2s + v_p \epsilon_t B_c} \sigma_{ry} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{P_{rb}}{\alpha P_{cy}} \quad (12)$$

図 35 に 3, 4 節で得られた角形鋼管の実験結果を γ 指標として比

較して示す。局部座屈破壊を生じた試験体における γ 指標はすべて1.0を下回り、局部座屈破壊の発生有無をほぼこの条件式で説明することができる。なお、円形鋼管を拘束鋼管に扱った4節のCY83の場合、 γ はおよそ0.8となり1.0を下回るが局部座屈破壊を生じていない。これは、拘束鋼管が円形鋼管となる場合、図34に示されるような塑性ヒンジを形成する管板スパンが径より小さいためである。本研究においては一体の試験体のみを確認にとどまるため円形鋼管を有するBRBの拘束条件については今後の課題とするが、得られた実験結果から円形鋼管による場合には少なくとも γ 指標を式(10)式の1.25倍以上で評価できるものと考えられる。

7. 結

本研究では、薄肉拘束材を用いモルタルのかぶり厚さが芯材幅に対して相対的に薄い座屈拘束プレースの局部座屈破壊条件について、実験による挙動確認及び解析結果を分析することにより整理し、以下の知見を得た。

- 1) 薄肉拘束材を有する座屈拘束プレースの拘束鋼管を弾塑性支承バネでモデル化した場合、拘束鋼管が弾性であれば局部座屈破壊は発生しないが、芯材及び拘束鋼管の塑性化が進行した場合、局部座屈破壊を発生する可能性がある。
- 2) 芯材に対し比較的薄い拘束材を用いた座屈拘束プレースに対し単調圧縮荷重を行った結果、芯材最大等価軸歪5%まで載荷した場合においても、芯材の局部座屈破壊は発生せず耐力低下も生じなかった。
- 3) 単調圧縮試験と同様の拘束材を用いた座屈拘束プレースに対し、芯材最大等価軸歪3%に至る正負交番の一方向漸増繰返し載荷実験を行った結果、幅厚比65の角形拘束鋼管に対し、拘束鋼管に局部座屈破壊が発現する現象が確認された。一方、幅厚比25の角形拘束鋼管及び径厚比83の円形拘束鋼管には、同破壊は確認されなかった。局部座屈破壊を生じた拘束鋼管表面の歪は繰返し載荷ごとに増大し、最終的には部材全体が不安定となった。
- 4) 同形式の試験体を、両端固定条件のもと実建物と同様に斜め配置して芯材最大等価軸歪4.5%となる正負交番の繰返し漸増載荷を行った結果、一軸方向繰返し載荷実験とほぼ同等の拘束鋼管の局部座屈破壊性状が発現することが確認された。端部の強制曲げモーメントが拘束鋼管の局部座屈破壊に及ぼす影響は確認されなかった。

- 5) 数値解析により芯材の挙動を分析した結果、芯材が正負交番の繰返し軸力を受けた場合、拘束鋼管板厚が小さく、芯材小端面とモルタルとのクリアランスが大きいほど、拘束鋼管の歪の成長は早く局部座屈破壊する可能性が高いことが分かった。一方、芯材塑性化領域長は局部座屈破壊挙動にあまり影響しないことが分かった。
- 6) 座屈拘束プレースの拘束材クリアランス内における、内部芯材の塑性化時局部座屈半波長は芯材の接線係数から導かれる規準化細長比を用いることで評価できる。これを用いて、薄肉拘束材を用いた座屈拘束プレースの局部座屈破壊発生条件を芯材、拘束鋼管の形状及び芯材の最大引張歪を用いて誘導した。提案した条件式は実験結果と概ね対応しており、その有効性が確認できる。

なお、今後の課題として、モルタルのかぶり厚さが厚い場合の局部座屈破壊への影響を確認する必要がある。

謝辞

軸方向繰返し載荷実験の実施に際し御協力戴きました、イリノイ大学Newmark研究所、Matthew Eatherton、Grzegorz Banas、Tim Prunkardの諸氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 藤本 盛久, 和田 章, 佐伯 英一郎, 渡辺 厚, 人見 泰義: アンボンドプレースの開発, 季刊カラム, No.115, pp.91-96, 1990.1
- 2) 日本鋼構造協会・鋼材倶楽部: 履歴型ダンパー付き骨組みの地震応答性状と耐震設計法[3.5座屈拘束プレース]
- 3) 竹内 徹, 鈴木 一弁, 丸川 智輝, 木村 祥裕, 小河 利行, 杉山 武, 加藤 史郎: 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, 日本建築学会構造系論文集, No.590, pp.71-78, 2005.4
- 4) 竹内 徹, 山田 哲, 北川 まどか, 鈴木 一弁, 和田 章: 構面外剛性の低い接合部により接合された座屈拘束プレースの座屈安定性, 日本建築学会構造系論文集, No.575, pp.121-128, 2004.1
- 5) 天島 秀秋, 聲高 裕治, 井上 一朗: 接合部を含む座屈拘束プレースの構面外座屈荷重, 日本建築学会構造系論文集, No.581, pp.127-134, 2004.7
- 6) 木下 智裕, 聲高 裕治, 井上 一朗, 飯谷 邦祐: 接合部を含む座屈拘束プレースの構面外座屈防止条件, 日本建築学会構造系論文集, No.621, pp.141-148, 2007.11
- 7) 岩田 衛, 村瀬 亮, 和泉田 洋次, 村井 正敏: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束プレースの実験的研究 - その3 芯材の座屈挙動 -, 日本建築学会構造系論文集, No.611, pp.133-139, 2007.1
- 8) 村瀬 亮, 村井 正敏, 岩田 衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束プレースの実験的研究 - その4 芯材幅厚比と拘束力および断面ディテールの影響 -, 日本建築学会構造系論文集, No.620, pp.117-124, 2007.10
- 9) 日本建築センター評定報告書 アンボンドプレース, BCJ評定-ST0125-01, 2006.1

(2008年6月8日原稿受理, 2008年9月11日採用決定)