

座屈拘束ブレースにおける局部崩壊の制御

Control of Local Failure Mechanisms in Buckling-Restrained Braces

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 山崎翔

Abstract

An experimental study was performed on the premise that the energy dissipation capacity of buckling-restrained braces (BRBs) can be enhanced by preventing localized failure of the buckling-restraining system. A total of nine BRB specimens with different mortar strength, mortar thickness, depth of restraining steel, were subjected to cyclic loading tests. Finite element simulations were performed to further examine the experimentally observed behavior of BRBs.

Keywords: Buckling-restrained brace, Cyclic loading test, Local failure, Restraint performance

1.はじめに

座屈拘束ブレース（以下、BRB）は、軸力を伝達する芯鋼材の外周を座屈拘束材で覆うことで、圧縮側でも安定した履歴特性が得られる制振部材として広く普及している。BRBにおいては、芯鋼材が降伏軸力を超えても座屈しないように、拘束材に十分な剛性と耐力を付与することが求められる¹⁾。こうした目的を達成するための設計要件は、多くの研究によって明らかにされているが、さらに一段階エネルギー吸収性能が高いBRBを実現するためには、繰返し高軸歪載荷で生じる拘束材の局所的な破壊（以下、局部崩壊）を防止する必要がある。拘束材が鋼材とモルタルで構成されたBRBについては、局部崩壊のメカニズムに未解明な点が多い。

そこで、本論では、拘束材がモルタルを充填した溝形鋼で構成され、芯鋼材に平鋼を用いたBRBについて、拘束材のモルタル強度、モルタル厚、

溝形鋼厚をパラメータとした9体の繰返し軸方向載荷実験を行った。さらに、芯鋼材と拘束材の干渉を精査するために、有限要素解析を行い、各設計因子がBRBの力学性能に及ぼす影響を検証した。

2.実験計画

表1に試験体一覧を、図1に試験体4を例として試験体形状を、表2に鋼材とモルタルの素材試験結果を示す。いずれの試験体も、芯鋼材には細長比が270のSN400B平鋼、拘束材にSS400の溝形鋼を用い、モルタルには試験体によって規格強度が27 N/mm²（以下、低強度）、45 N/mm²（中強度）、100 N/mm²（高強度）の3種を用いた。試験体1と7に低強度、試験体2, 4, 5, 6, 8に中

表2 材料特性

(a) 鋼材

	試験体	降伏応力 [N/mm ²]	降伏歪 [%]	引張強度 [N/mm ²]
芯鋼材	12345	304	0.15	440
	6	294	0.15	429
	789	291	0.15	438
溝形鋼	1234	380	0.19	444
	5	321	0.16	412
	6	334	0.17	459
	789	351	0.18	431

(b) モルタル

	低1	低2	中1	中2	中3	高1	高2
強度 [N/mm ²]	14.9	23.8	50.4	74.8	76	109	122
ヤング係数 [×10 ³ N/mm ²]	6.6	11	24.2	30	30.1	34.9	37

表1 試験体一覧

試験体	芯鋼材		拘束材			P _v /P _y
	断面寸法	芯鋼材長 [mm]	モルタル	モルタル厚 [mm]	溝形鋼厚 [mm]	
1	PL-132×12	1785	低1	20.8	3.2	1.5
2			中1			
3			高1			
4			中1	30.8	6	
5			中1			
6			中2			
7	PL-176×16	2351	低2	48.8	3.2	3
8			中3			
9			高2			

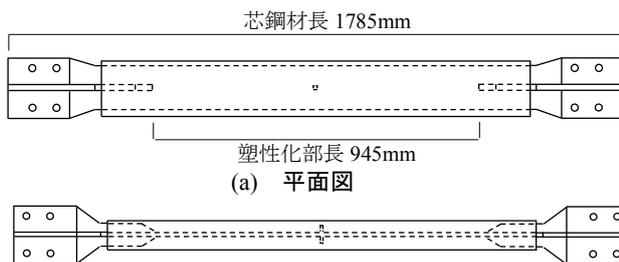
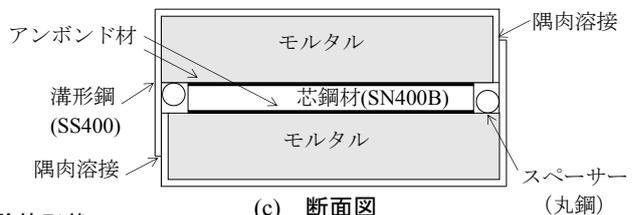


図1 試験体形状



強度、試験体3と9に高強度モルタルを用いた。拘束材の断面寸法は、座屈拘束の指標として一般に用いられる P_E/P_y (P_E : 拘束材のオイラー座屈荷重, P_y : 芯鋼材の降伏軸力) が試験体1, 2, 3で1.5, 試験体4, 5, 7, 8, 9で3, 試験体6で6となるようにモルタル厚と溝形鋼厚を決定した。芯鋼材の表裏に厚さ1 mmのブチルゴムを貼付することで、芯鋼材両側で計2 mmのクリアランスを確保した。芯鋼材の中央には、拘束材が相対的にずれないように、ずれ止めを溶接し、拘束材のモルタルにはずれ止めとかみ合わせる穴を設けた。

図2に荷重装置を示す。表3に基づき、平均軸歪 ϵ を制御して正負交番漸増繰返し荷重した。 ϵ は、材端接合部の最も内よりのボルト間 (AB間) の相対変位から塑性化部以外の弾性変形を差し引いた変位を塑性化部長さで除した歪で、芯鋼材に引張力を導入する方向を正とした。振幅3.0%は、試験体の耐力が測定最大値の80%に低下するまで繰り返した。

3. 実験結果と考察

3.1 履歴特性と最終状態

図3に、各試験体について得た軸方向耐力 P と平均軸歪 ϵ の関係を示す。図中に、実験終了時の軸歪振幅を記す。試験体8と9は、振幅3%でも安定した履歴を示したが、材端が構面外変形したために、荷重装置への影響を考慮して途中で中止した。それ以外の試験体は、拘束材に局部崩壊を観察し、耐力が低下したところで実験を終了した。試験体1, 2, 3, あるいは7, 8, 9は、モルタル強度だけが異なる試験体の組であった。モルタル強度が高い試験体ほど、終了までに要した荷重回数が多く平均軸歪が大きかったため、モルタル強度が高いほど、局部崩壊が抑制される傾向が確認できた。しかし、モルタル強度が高い試験体ほどモルタルが脆性的に破壊し、その局所的な破壊が試験体の急激な破壊に繋がる傾向があった。試験体4と5は、モルタル厚と溝形鋼厚だけが異なる試験体の組であった。両者の終了までに要した荷重回数の比較から、モルタルを厚くするよりも、溝形鋼を厚くするほうが局部崩壊の抑制に有効なことがわかる。

図4に、圧縮側の軸方向耐力 P_c を芯鋼材の降伏軸力 P_y で除した圧縮降伏耐力比 P_c/P_y と軸歪振幅 ϵ_a の関係を示す。いずれの軸歪振幅においても各試験体の P_c/P_y はほぼ等しく、モルタルの強度と

厚さや溝形鋼厚が P_c/P_y に及ぼす影響はほとんどみられなかった。

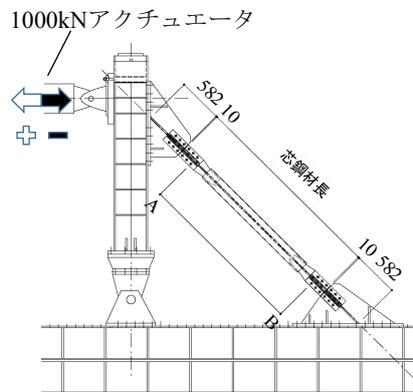


図2 荷重装置

表3 荷重則

振幅 [%]	荷重回数
$\epsilon_y/3$	1
$2\epsilon_y/3$	1
0.25	1
0.5	2
0.75	2
1.0	5
1.5	2
2.0	2
2.5	2
3.0	-

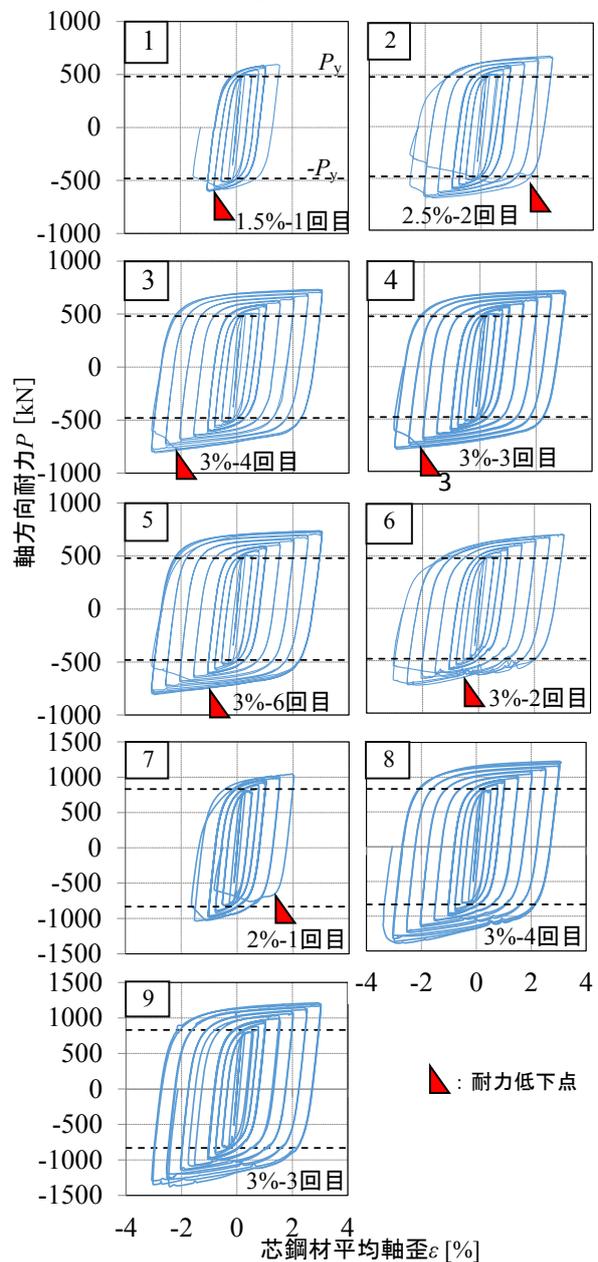


図3 履歴特性

3.2 解体観察

実験後に拘束材を切断して、芯鋼材の変形と拘束材の破壊を観察した。表4に目視で確認した座屈モード数(半波数)を示す。実験終了時の軸歪が同じ試験体4と6、あるいは試験体8と9を比較すると、溝形鋼が厚いほど、モルタル強度が高いほど、座屈モード数が大きくなる傾向があった。それぞれの解体観察から、モルタルが高強度で厚いほどモルタルの損傷が少ない傾向が確認できた。

4. 拘束材局部崩壊耐力式との比較

Linら²⁾は、局部崩壊に対する設計法を提案しており、圧縮荷重を受けて座屈変形した芯鋼材を拘束するための補剛力 P_b が、上界定理に基づく拘束材の局部崩壊耐力 P_s よりも小さければ局部崩壊は生じないとした。

$$P_b = \frac{4P_{max}(2S + v\varepsilon_{max}t_p)}{L_w} \quad (1)$$

$$P_s = \frac{2w_s - w_p}{w_s - w_p} t_s^2 F_{y,s} \quad (2)$$

$$L_w = \sqrt{\frac{4E_r I_p}{P_y}} \quad (3)$$

ここで、 P_{max} は最大圧縮耐力、 S はクリアランス、 v は芯鋼材の塑性化後のポアソン比(= 0.5)、 ε_{max} は引張側の最大軸歪振幅、 t_p は芯鋼材厚、 w_s は拘束材の断面幅、 w_p は芯鋼材の断面幅、 t_s は溝形鋼厚、 $F_{y,s}$ は溝形鋼の降伏応力、 I_p は芯鋼材の弱軸断面二次モーメント、 E_r は換算係数(ヤング係数の0.08倍)である。

図6に P_b/P_s の予測値と実験値を比較する。予測値は $P_{max}/P_y = 1.6$ と仮定して算定し¹⁾、実験値は測定した最大圧縮荷重を用いて算定した。 P_b/P_s が1以下の試験体5と6で、理論上は生じないはずの局部崩壊を生じた。この試験体2体では、溝形鋼とモルタルの厚さの比率が、Linら²⁾の試験体に比べて半分程度であり、モルタルが破壊しやすかったためだと考えられる。試験体6, 8, 9は、 P_b/P_s の予測値と実験値が大きく異なった。これは、3.2節で述べたように、溝形鋼材が厚いほどモルタル強度が高いほど、座屈モード数が大きい(L_w が小さい)傾向と、(1)式が示す P_b と L_w の逆数関係から説明できる。試験体1と2と3と4、あるいは試験体7と8と9を比較すると、 P_b/P_s の予想値は等しいが P_b/P_s の実験値は大きく異なる。この原因は(2)式にモルタルの強度と厚さが

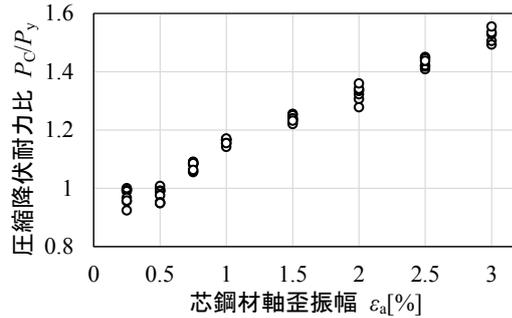


図4 圧縮降伏耐力比-軸歪振幅関係

表4 解体時の座屈モード数

試験体	1	2	3	4	5	6	7	8	9
座屈モード数	6	9	15	13	14	17	3	14	19

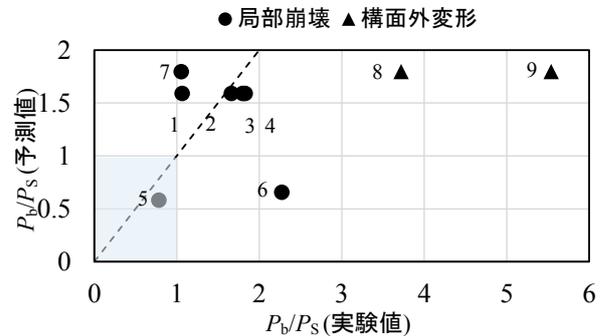


図5 P_b/P_s の予測値と実験値の関係

考慮されていないことだと考えられる。

5. 有限要素解析

5.1 解析モデル

Linら²⁾が提案する設計法は、3章で示した実験結果を説明できない。そこで、拘束材の局部崩壊を防止する設計法をより詳細に検討するために、汎用プログラムADINA³⁾を用いて、有限要素解析を行った。解析パラメータは、モルタル剛性、モルタル厚、鋼とモルタルの摩擦係数 μ (0, 0.1, 0.5)の3種とした。

解析モデルは図6に示すように、対称性を考慮して材長の半分をモデル化し、二次元平面ひずみ、小ひずみ・大変形の定式化を採用した。モデル全体に9節点ソリッド要素を用い、モルタルと溝形鋼は弾性とし、芯鋼材にVon-Misesの降伏条件と混合硬化則を適用した。図7に芯鋼材の繰返し材料則を示す。拘束材の曲げ剛性を表現するために、溝形鋼に図6に示す拘束条件を適用した。芯鋼材とモルタルの間で法線力と摩擦力を伝達する接触解析を行い、その許容誤差をエネルギー誤差5%以内とした。芯鋼材に、1 mmの初中央たわみ(芯鋼材とモルタルの間のクリア

ランスに相当)を与えた。実験と同じ荷履歴を変位制御で与え、3%軸歪振幅の2回目まで解析した。

5.2 解析結果と考察

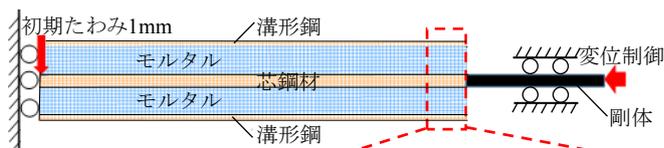
図8に、試験体4の実験と、 $\mu = 0, 0.1, 0.5$ の解析結果を比較する。 $\mu = 0.1$ の解析が、最もよく実験と一致したが、他の試験体についても同様であった。図9に、 $\mu = 0.1$ の解析で算定した、2回目に $\varepsilon = -3\%$ に到達した時点の補剛力 P_b の分布を示す。各モデルにおいて、拘束材の端部から中央に向かうほど P_b が小さい傾向があり、また、モルタルが薄いモデルほど補剛点による P_b の違いが大きい傾向にあった。 P_b の最大値はどのモデルでもほぼ等しいことから、実験においてモルタル強度が高い試験体ほど局部崩壊が生じにくかったのは、モルタル強度の違いによる局部崩壊耐力の違いの影響が大きかったと推測される。解析で得た座屈モード数は、モルタル剛性に関わらずほとんど一定だった。

解析では、実験で観察されたモルタルの破壊をモデル化していない。実験では、モルタルが低強度であるほど小さい軸歪でモルタルが損傷し、損傷箇所で芯鋼材とモルタルが機械的にかみ合った結果、芯鋼材の変形集中と拘束材の局所破壊が進行したものと考えられる。今後さらに、モルタルの局所破壊、溝形鋼の降伏と構面外変形を反映した解析モデルによる検討が必要である。

6. まとめ

拘束材のモルタル強度、モルタル厚、溝形鋼厚をパラメータとしたBRB試験体について荷履歴実験と有限要素解析を行い、以下の知見を得た。

- [1] モルタルが高強度の試験体ほど、より大きな軸歪振幅までモルタルが破壊されず、局部崩壊が遅れ荷履歴回数が多かった。
- [2] $P_E/P_y = 3$ の試験体2体の比較では、モルタル厚よりも溝形鋼厚のほうが、局部崩壊を遅らせる効果が高かった(荷履歴回数が3回多かった)。
- [3] Linら²⁾の局部崩壊耐力式は、本実験結果と必ずしも一致しなかった。
- [4] 有限要素解析によって拘束材に作用する補剛力の最大値を検討したところ、モルタル剛性とモルタル厚の影響はほとんどなかった。



拘束条件
 $u_j = u_i + h_{ij}\theta_i$
 $v_j = v_i$

表5 解析パラメータ

モルタル剛性 [$\times 10^3$ N/mm ²]	モルタル厚 [mm]	
	20.8	30.8
6.6	I	IV
24.3	II	V
34.9	III	VI

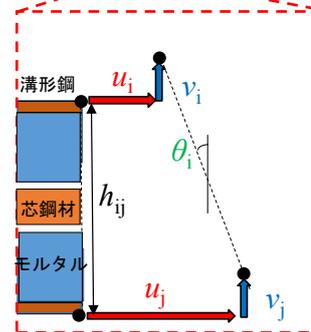


図6 解析モデル

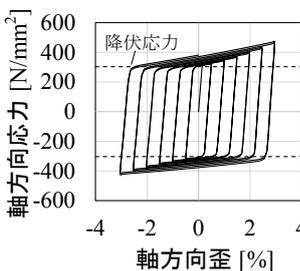


図7 芯鋼材軸応力履歴

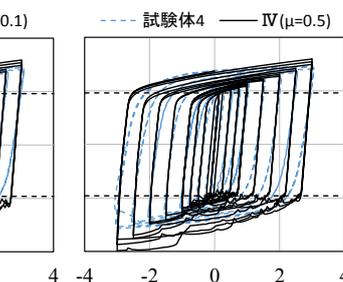
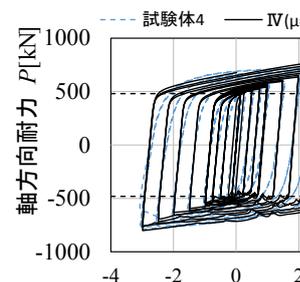
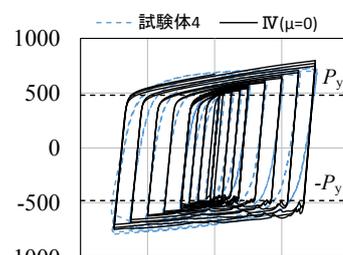


図8 履歴特性

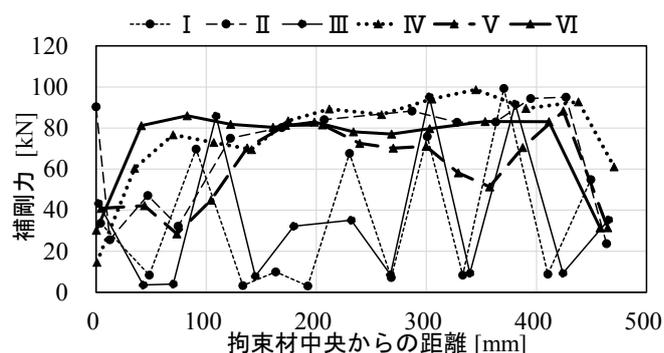


図9 補剛力-拘束材中央からの距離関係

【参考文献】

- 1) 鋼構造制振設計指針, 日本建築学会, 2014.11
- 2) Pao-Chun Lin et al.: Seismic design and testing of buckling-restrained with a thin profile, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.45, pp.339-358, 2015
- 3) ADINA R&D, Inc.: Theory and Modeling Guide: Report ARD12-8, 2012.12