初期不整を有する鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BUCKLING RESTRAINED BRACES USING STEEL MORTAR PLANKS WITH INITIAL IMPERFECTIONS

吉田文久 — * 1 岡本勇紀 — * 2
田所敦志 — * 3 村井正敏 — * 4
岩田 衛 — * 5

Fumihisa YOSHIDA — * 1 Yuuki OKAMOTO — * 2
Atsushi TADOKORO — * 3 Masatoshi MURAI — * 4
Mamoru IWATA — * 5

キーワード：
座屈拘束ブレース, 鋼モルタル板, 初期不整, 製作, 実験

Keywords:
Buckling restrained brace, Steel mortar plank, Initial imperfection, Fabrication, Experiment

This paper describes static cyclic loading tests of buckling restrained braces using steel mortar planks with initial imperfections. Experimental parameters are initial deflection of core plates due to uneven of mortar face and direction of core plates. Tests are conducted by applying increasing loads alternately in positive and negative directions. As results, the energy absorption capacity of specimens with initial imperfection is lower than that without initial imperfection; however, the absorption capacity is larger than that of required value.

1. はじめに

座屈拘束ブレースは、軸力を伝達するブレース（以下、芯材と呼ぶ）が座屈しないように拘束材で補剛したものである。近年では、その安定した復元力特性を利用して、地震応答を抑制して建物の損傷を低減する制振ダンパーとして広く用いられており、その形式も多様化している。

本報告で対象とする座屈拘束ブレースの構成および製作方法を図1に示す。鋼板で構成された芯材を、モルタルの充填された2つの溝形鋼（以下、鋼モルタル板と呼ぶ）で両側からサンドイッチ状に挟み込んで溶接により固定し、芯材の座屈を拘束する。この製作方法は、モルタルの充填状況を目視で確認することができ、品質管理を容易に行うことができる。また、接合部は面外剛性を高めるためにリブを設けて十字形断面としているが、その形状は座屈拘束材の形状による制限を受けないため、比較的自由的な接合部ディテールとすることができる。

溝形鋼にモルタルを充填している状況を写真1に示す。この座屈拘束ブレース製作および品質管理においては、モルタル面の平滑度が重要な管理ポイントとなる。座屈拘束ブレースにおける芯材の初期不整については、座屈拘束材の必要性能に大きく影響することが指摘されているが¹⁾、本報告で対象とする座屈拘束ブレースに関しては、モルタル面に不陸がある場合は芯材に元撓みを生じさせることになり、座屈拘束ブレースのエネルギー吸収性能に影響を及ぼすことが考えられる。

本報告では、鋼モルタル板のモルタル面に故意に不陸をつけて初期不整を与えた試験体を製作し、鋼モルタル板の初期不整が座屈拘束ブレースのエネルギー吸収性能に及ぼす影響について考察する。また、既往の実験^{2)~4)}では、芯材の面をフレームの構面に対して垂直に設置して載荷を行っているが、本実験では芯材を90度回転させて、構面に対して平

行に設置した実験についても実施し、芯材の向きが座屈拘束ブレースのエネルギー吸収性能に及ぼす影響についても考察する。

図1 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース

写真1 モルタルの充填

*1 大和ハウス工業㈱総合技術研究所 研究員・博士(工学)
(〒631-0801 奈良市左京6-6-2)

*2 大和ハウス工業㈱総合技術研究所

*3 神奈川大学工学部建築学科 大学院生

*4 神奈川大学工学部建築学科 主任技術員

*5 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*1 Daiwa House Industry, Central Research Laboratory, Dr. Eng.

*2 Daiwa House Industry, Central Research Laboratory

*3 Graduate Student, Department of Architecture and Building Engineering, Kanagawa University

*4 Technician, Department of Architecture and Building Engineering, Kanagawa University

*5 Prof., Department of Architecture and Building Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

表1 試験体一覧

試験体	芯材向き	初期不整	芯材				拘束材				外形		P_E/P_y	
			材長 (mm)	幅 (mm)	板厚 (mm)	降伏耐力 P_y (kN)	板厚 (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	I $\times 10^4$ (mm ⁴)	座屈耐力 P_E (kN)	幅 (mm)		高さ (mm)
H-1	横	無	2351	176	16	808.2	3.2	50	203	613	2309	206	118	2.86
H-2	横	有												
V-1	縦	無												
V-2	縦	有												

表2 芯材の機械的性質

鋼種	板厚 mm	降伏応力度 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %
SN400B	16	287	429	66.9	32

a)初期不整なし (H-1, V-1)

b)初期不整あり (H-2, V-2)

図2 試験体図

図3 プレース断面

2. 実験計画

2.1 試験体

表1に試験体一覧、図2に試験体図を示す。試験体は4体で、初期不整の有無と構面に対する芯材の向きをパラメータとしている。試験体の製作方法は、鋼板で構成された芯材を、2つのモルタルの充填された溝形鋼(鋼モルタル板)で両側からサンドイッチ状に挟み、鋼モルタル板同士を溶接により固定して芯材の座屈を拘束する。

初期不整は、芯材がブレースの中央部で3.5mm (=0.0015×材長)の初期撓みが生じるように、故意に鋼モルタル板のモルタル面に不陸を与えて製作した。この初期撓みはJASS6⁵⁾の梁の曲がりに対する限界許容差に相当する。芯材の向きは図3に示すように、構面外方向に対して平行に設置した試験体(＝横向き)と構面外方向に対して垂直に設置した試験体(＝縦向き)を用意した。試験体H-1とH-2は共に芯材の向きが横向きで、初期不整の有無をパラメータとしている。試験体V-1とV-2は共に芯材の向きが縦向きで、同様に初期不整の有無をパラメータとしている。端部の接合部は、リブを設けて十字形断面とし、高力ボルト摩擦接合としている。

表2に芯材の機械的性質を示す。芯材はSN400Bを用いている。拘束材には板厚3.2mmのSS400材を用い、内部にモルタルを充填している。

表1において、 P_E は座屈拘束材の座屈耐力で次式で与える。

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L_B^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 E は鋼材のヤング係数、 I は座屈拘束材(鋼モルタル板)の断面二次モーメントであり、モルタルのヤング係数を鋼材の1/20として、モルタルの寄与分を算入する²⁾。 L_B は座屈拘束ブレースの材長である。芯材の降伏耐力に対する座屈拘束材の座屈耐力の余裕度 P_E/P_y は

図4 荷重装置

表3 荷重パターン

荷重順序	芯材歪ε (%)	層間変形角	荷重回数	δ (mm)
1	$\varepsilon_y/3$	1/1690	1	0.74
2	$2\varepsilon_y/3$	1/850	1	1.47
3	0.25	1/400	1	3.74
4	0.5	1/200	2	6.87
5	0.75	1/133	2	9.99
6	1.0	1/100	5	13.12
7	1.5	1/67	2	19.38
8	2.0	1/50	2	25.63
9	2.5	1/40	2	31.89
10	3.0	1/33	-	38.14

ε_y : 芯材降伏歪

図5 荷重パターン

図6 荷重-変形関係(P/P_y - ϵ)

(a)試験体 H-2

(b)試験体 V-2

写真2 最終破壊状況

表4 実験結果

試験体	耐力低下時の歪(%)	最終状態
H-1	3.0%歪8回目圧縮側	芯材弱軸(構面内)方向局部変形
H-2	3.0%歪6回目圧縮側	芯材弱軸(構面内)方向局部変形
V-1	3.0%歪6回目圧縮側	芯材弱軸(構面外)方向局部変形
V-2	3.0%歪3回目圧縮側	芯材弱軸(構面外)方向局部変形

2.86である。

図4に載荷装置を示す。実験は座屈拘束ブレースの組み込まれた建築物が水平力を受けた場合を想定している。本実験では、既往の実験^{2~4)}と同様に、芯材に生じる塑性歪は、ほぼ層間変形角に等しくなるように設定している。これにより、中地震動(レベル1)に対応して想定されている層間変形角1/200相当の芯材の歪は0.5%となり、大地震動(レベル2)に対応して想定されている層間変形角1/100相当の芯材の歪は1%となる。

2.2 載荷方法

載荷パターンを図5に示す。載荷は正負交番の漸増繰返し載荷とし、ブレースの軸方向変位で制御する。芯材の降伏歪 ϵ_y の1/3と2/3を各1回、0.25%歪を1回、0.5%、0.75%歪を各2回、1%歪を5回、1.5%、2%、2.5%歪を各2回載荷し、3%歪で荷重が低下するまで繰返し行う。

芯材の軸方向変位 δ は、図4に示すa点とb点の間に変位計を設置して測定し、試験体の手前側と奥側の平均とした。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

図6に荷重-変形関係を示す。縦軸は芯材の軸方向荷重 P を芯材の降伏耐力 P_y で無次元化したもの、横軸は芯材の歪 ϵ である。荷重 P は上側が引張、下側が圧縮である。 ϵ は芯材の軸方向変位 δ を芯材の塑性化領域の長さ(リブ先端間の平板部の長さ=1,251mm)で除した値である。いずれの試験体も、歪振幅±3%の高歪状態まで安定した履歴ループを描いている。表4に各試験体の耐力低下時の歪と最終状態を示す。

初期不整を与えず、芯材を横向きに設置した試験体H-1は、3%歪の圧

(a)試験体 H-2

(b)試験体 V-2

写真3 実験後の芯材

縮側8サイクル目に、座屈拘束部の上端部においてブレース芯材の弱軸方向(構面内方向)に局部変形が発生し、耐力が低下した。

初期不整を与え、芯材を横向きに設置した試験体H-2は、3%歪の圧縮側6回目に、試験体H-1と同様に、座屈拘束部の上端部においてブレース芯材の弱軸方向(構面内方向)に局部変形が発生し、耐力が低下した。写真2(a)に試験体H-2の最終破壊状況を示す。

初期不整を与えず、芯材を縦向きに設置した試験体V-1は、3%歪の圧縮側6回目に、座屈拘束部の中央部においてブレース芯材の弱軸方向(構面外方向)に局部変形が発生し、耐力が低下した。

初期不整を与え、芯材を縦向きに設置した試験体V-2は、3%歪の圧縮

側3回目に、座屈拘束部の上端部においてブレース芯材の弱軸方向(構面外方向)に局部変形が発生し、耐力が低下した。写真2(b)に試験体V-2の最終破壊状況を示す。

故意に初期不整を与えた試験体H-2、V-2は、初期不整を与えなかった試験体H-1、V-1に比べて繰返し回数が低下するものの、歪振幅±3%の高歪状態においても安定した履歴ループを描いている。本座屈拘束ブレースは、鋼モルタル板のモルタル面にJASS6の梁の曲がりに対する限界許容差に相当する初期不整があっても、大きなエネルギー吸収能力を有している。

載荷後に試験体を解体し、芯材の状況を観察した。写真3に実験後の芯材の状況を示す。(a)の試験体H-2では、芯材の平板部分の端部で弱軸方向に大きく局部変形している。芯材の表面にはアンボンド材(プチルゴム)を貼付しているが、およそ200mm間隔で芯材が座屈拘束材に接触し、高次の座屈モードを形成している様子が観察された。(b)の試験体V-2は、試験体H-2と同様におよそ200mm間隔で芯材が座屈拘束材に接触し、高次の座屈モードを形成している様子が観察された。また、縦向きの場合は芯材の強軸方向に曲げが作用するため、芯材がS字状に変形している様子が観察された。

3.2 エネルギー吸収性能の評価

既往の研究⁶⁾に従って、座屈拘束ブレースの耐力が低下するまでに吸収される累積塑性歪エネルギー E_t を、芯材の降伏耐力 P_y と降伏時の変形量 δ_y の積で除した、累積塑性歪エネルギー率 ω を次式のように定義する。

$$\omega = \frac{E_t}{P_y \cdot \delta_y} \quad \dots (2)$$

各試験体の累積塑性歪エネルギー率 ω を表5に示す。初期不整を与えず、芯材を横向きに設置した試験体H-1を基準とすると、初期不整を与えた試験体H-2の ω は7%低下している。また芯材を縦向きとした試験体V-1についても ω は7%低下している。芯材を縦向きとし、初期不整を与えた試験体V-2の ω は35%低下している。

文献⁶⁾では、座屈拘束ブレースの組み込まれた10層3スパンのモデルについて動的解析を行い、必要な累積塑性歪エネルギー率 ω についてのケーススタディーを行っている。そこでは、日本建築センター作成の模擬地震動レベル2に対して必要な ω の値は152.8であることが示されているが、本ブレースの保有している ω の値は、最も値の低かった試験

体V-2についても必要値の4.0倍あり、十分なエネルギー吸収能力を有している。

エネルギー吸収性能評価式として、実験結果の下限を近似した次式が提案されている⁷⁾。

$$\omega = 150 \frac{P_E}{P_y} \quad \dots (3)$$

図8に ω と P_E/P_y の関係を示す。 ω の値はいずれも評価式による推定値を上回っており、安全側に評価できる。

4. まとめ

本実験で、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本実験では、鋼モルタル板のモルタル面に故意にJASS6⁵⁾の梁の曲がりに対する限界許容差に相当する初期不整(=0.0015×材長)を与えた実験を行った。初期不整を与えた場合は、初期不整を与えなかった場合に比べてエネルギー吸収能力はやや低めとなる。しかし、本ブレースは歪振幅±3%の高歪状態まで安定した履歴ループを描いており、またエネルギー吸収能力についてもレベル2地震動に対する必要値を十分に上回っている。本実験で与えた程度の初期不整があっても、本座屈拘束ブレースは十分なエネルギー吸収能力を有していた。
- 2) 芯材の面の向きをパラメータとした実験を行った。芯材の面を構面に対して平行になるように設置した場合(縦向き)は、垂直に設置した場合(横向き)に比べてエネルギー吸収能力はやや低めとなる。しかし、本ブレースは歪振幅±3%の高歪状態まで安定した履歴ループを描いており、またエネルギー吸収能力についてもレベル2地震動に対する必要値を十分に上回っていた。

5. あとがき

本報告では、初期不整を与えた座屈拘束ブレースの実験結果について考察した。今後は、この実験結果を再現できる有限要素解析モデルを用いて、実験では確認するのが困難な座屈拘束ブレース内部の芯材の変形状況や歪分布を解析的に求めると共に、フレームに組み込まれた場合の座屈拘束ブレースの挙動の解析を行い、初期不整および芯材の向きがフレーム全体の挙動に及ぼす影響について検討していく予定である。

最後に、実験の実施およびデータ整理に関して、神奈川大学学生の武下氏に御協力頂いた。ここに記して、心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会，鋼材倶楽部；履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法 3.5節 座屈拘束ブレース，pp. 66-82，1998. 9
- 2) 村井正敏，小林史典，野田隆博，岩田衛；鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第569号，pp. 105-110，2003. 7
- 3) 小林史典，村井正敏，和泉田洋次，岩田衛；鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究—その2 製作簡易化と芯材幅厚比の変化—，日本建築学会構造系論文集，第586号，pp. 187-193，2004. 12
- 4) 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ブ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，第611号，pp. 133-139，2007. 1
- 5) 日本建築学会；建築工事標準仕様書 6 鉄骨工事，2007. 2
- 6) 加藤貴志，岩田衛，和田章；損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価，日本建築学会構造系論文集，第552号，101-108，2002. 2
- 7) 村瀬亮，村井正敏，岩田衛；鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブ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，第620号，pp. 117-124，2007. 10

[2007年10月17日原稿受理 2007年12月4日採用決定]

表5 累積塑性歪エネルギー率

試験体	E_t (kN・m)	ω	ω/ω_{H-1}
H-1	1925	955	1.00
H-2	1782	884	0.93
V-1	1797	892	0.93
V-2	1246	618	0.65

図7 累積塑性歪エネルギー率の定義

図8 ω - P_E/P_y 関係