座屈拘束された筋かいをもつ壁 構面の耐震性能

SEISMIC PERFORMANCE OF WOODEN BUCKLING RESTRAINED BRACES

齋藤拓歩 ——— * 1 松田昌洋 ——— * 2
五十田 博 ——— * 3

Takuho SAITO ——— * 1 Masahiro MATSUDA — * 2
Hiroshi ISODA ——— * 3

キーワード：
筋かい, 耐力壁, 座屈, 木造住宅, セッコウボード

Keywords:
Bracing, Shear wall, Buckling, Wooden house, Gypsum board

Bracing is one of popular shear walls for newly constructed and existing wooden houses in Japan. In our past study, it was clear that the shear performance without sheathing cover board is less than the design value of Building Standard Law. In this study, static loading tests for the bracing with sheathing cover board were conducted to evaluate the design value and shaking table tests for them were also conducted to confirm the design value. As the result of these tests, the design value of bracing with sheathing cover board is sufficient value of BSL.

1. はじめに

筋かいは一般的な耐力壁として、多くの木造住宅等で用いられており、筋かい耐力壁を対象とした実験や研究はこれまでに多数報告されている。一方で筋かい耐力壁の実際の性能は、建築基準法施行令（以下、施行令）で定められている性能より低いという指摘¹⁾がある。また、2つ割りと3つ割りの筋かい耐力壁を試験体とした振動台実験の結果から、2つ割り、3つ割り筋かいともに壁倍率を満たしていないとの報告²⁾もある。その要因として、いずれの研究でも面材のない場合の圧縮筋かいの曲げ座屈による荷重低下が指摘されている。そして、面材による座屈拘束については大方予想されることではあるが、実験によって定量的に実証されているわけではない。

以上より、本研究は2つ割り筋かいおよびセッコウボードや構造用合板を併用した耐力壁を対象として、大壁面材による筋かいの座屈拘束効果を明らかにすることを目的とした。検証にあたって、大壁面材の有無をパラメータとした2つ割り片筋かい耐力壁を試験体とし、静加力実験および振動台実験を実施した。なお、座屈拘束のない筋かい耐力壁については、その性能が壁倍率相当には得られないことをすでに前述の振動台実験で報告²⁾しており、本稿では拘束した結果を中心に述べる。

2. 静加力実験による筋かいの座屈拘束効果の検証

2.1 実験概要

図1に示す2P(1820mm)の軸組に対して、2つ割り片筋かい及びセッコウボードを用いた耐力壁を試験体として、タイロッド式の静加力実験を実施した。筋かいは45×90mmの2つ割り片筋かいとし、端部の接合はBoxビスタイプの2倍用金物を用いた。座屈拘束効果の確認を目的とした試験体は、2つ割り片筋かいに加えてセッコウボード(12.5mm)をRP-28ビスによって150mmピッチで留め付け、準耐力壁仕様の両面張りとした。また、前述のセッコウボ

図1 静加力実験 試験体図

(左:筋かい、中:セッコウボード、右:筋かい+セッコウボード)

図2 荷重-変形関係

ドの性能を確認するためのセッコウボード片面張りの試験体を含めて、試験体は合計3仕様(各3体)である。

加力はアクチュエータによる変位制御の正負交番3回繰り返し載荷とし、目標変形角は見かけのせん断変形角で1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/37.5radとし、最大荷重の80%に低下するか、1/15radまで変形した時点で試験終了とした。

2.2 実験結果

図2に実験から得られた荷重-変形関係とバイリニアモデル³⁾を示

¹⁾ 信州大学大学院 修士課程
(〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1)

²⁾ 信州大学工学部 助教・博士(工学)

³⁾ 京大大学生存圏研究所 教授・博士(工学)

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Shinshu Univ.

²⁾ Assistant Prof., Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof., Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto Univ., Dr. Eng.

す。最大荷重を比較すると、筋かい+せっこうボード試験体は3体ともに筋かい試験体の2.5倍以上の値であり、筋かい試験体とせっこうボード試験体の最大耐力の単純和よりも大きくなった。筋かい試験体では1/30rad付近で大きく荷重が低下しているが、筋かい+せっこうボード試験体では1/15rad付近まで最大荷重の80%に低下せず荷重を維持した。破壊性状については後述する。

表1に壁倍率及びその算出に用いる4つの指標を示す。筋かい試験体は施行令で定められた2つ割り片筋かいの壁倍率2.0倍に対して、3体の壁倍率の平均が1.18倍となり、約半分の性能となった。一方、筋かい+せっこうボード試験体は3体の平均が3.78倍となり、せっこうボード試験体の結果から想定される壁倍率3.68倍（2つ割り片筋かい2.0倍+せっこうボード0.84×2倍）と同等の性能となった。座屈拘束要素のない2つ割り筋かいのみの試験体の性能が極端に低く、筋かい+せっこうボード試験体の性能が想定通りに得られたことから、面材によって座屈拘束されることで筋かいが施行令における壁倍率2.0倍の性能を発揮できたと考えられる。

写真1および写真2に破壊性状を示す。筋かい試験体では1/200～1/150rad時に引張筋かいの端部が浮き始め、1/75～1/50rad時に圧縮筋かいが間柱から外れ荷重が低下した。1/37.5rad以降に圧縮筋かいの座屈破壊および引張筋かいの端部破壊が発生し、終局となった。一方、筋かい+せっこうボード試験体では1/37.5rad時に圧縮筋かいの座屈破壊によって、せっこうボードが面外へはずれており、その時点まで急激な荷重低下は発生しておらず面材が筋かいの曲げ座屈を拘束していたことが分かる。以上より、座屈が明確となる1/75rad以前から、圧縮筋かいは面外へ変形しようとしており、1/37.5rad付近まで面材がその挙動を拘束することによって圧縮筋かいが本来の性能を発揮することができたと推察できる。

3. 振動台実験による筋かいの座屈拘束効果の検証

3.1 実験概要

実際に地震を受けた際の性能の確認を目的として、筋かいを座屈拘束した耐力壁を持つ1層試験体に対しての振動台実験を実施した。

試験体は写真3及び図3に示す基本モジュール910mm、平面3640mm×2730mm、階高3185mmの1層構造の躯体である。同じ躯体の中で耐力壁の位置を変更することで、フェーズ1、フェーズ2の2種類の試験体とした。フェーズ1では、2つ割り片筋かい（45×90mm）の側面に構造用合板（9mm）及び準耐力壁仕様のせっこうボード（12.5mm）大壁を持つ耐力壁を外側の2構面に配置した。フェーズ2では、内側の2構面に2つ割り片筋かいと片面にのみ耐力壁仕様のせっこうボード大壁を設けた。筋かい端部は2倍用金物

写真3 試験体概要（中央:フェーズ1、右:フェーズ2）

表1 静加力実験の特性値（荷重の単位：kN/m）

試験体		Py	2/3Pmax	0.2Pu/Ds	P 1/150	壁倍率	施行令壁倍率
筋かい	1体目	5.5	6.2	4.5	6.5	1.26	2.0
	2体目	4.5	5.9	5.7	6.7	1.26	
	3体目	6.1	6.2	3.6	6.9	1.01	
	平均	5.4	6.1	4.6	6.7	1.18	
せっこうボード	1体目	3.0	3.6	5.9	4.9	0.84	-
	2体目	3.0	3.4	4.9	4.7	0.84	
	3体目	3.0	3.2	5.5	4.3	0.84	
	平均	3.0	3.2	5.4	4.6	0.84	
筋かい+せっこうボード	1体目	14.1	17.3	14.4	20.0	3.95	3.68
	2体目	14.3	17.2	12.9	19.3	3.62	
	3体目	13.4	17.1	14.4	19.8	3.76	
	平均	13.9	17.2	13.9	19.7	3.78

引張筋かい浮き：9mm 1/75rad引き時
筋かい金物ズレ：5mm

引張筋かい浮き：11mm 1/50rad引き時
筋かい金物ズレ：8mm

圧縮筋かい折損 1/75rad引き時

金物ビス浮き 試験終了時

写真1 筋かい試験体

せっこうボードずれ 1/37.5rad押し時

せっこうボードはがれ 試験終了時
筋かい座屈

写真2 筋かい+せっこうボード試験体

図3 振動台実験 試験体平面図

で固定し、構造用合板はN50 釘、せっこうボードはGN40 釘を用いて150mm ピッチで留め付けた。使用材料は、筋かいがカラマツ LVL、柱、土台がスギ (105×105mm)、梁がベイマツ (105×180mm) である。

表 2 に加振スケジュールを示す。入力する地震波は日本建築センターが作成した模擬波である BCJ-L2 と 1995 年兵庫県南部地震で観測された JMA 神戸 NS 成分を用いた。フェーズ 1 に対する加振の際、加振番号 3 を実施する前に構造用合板の釘抜きが確認できた部分に釘の打ち直しを実施し、性能を回復させた。なお、各加振前後にステップ波を入力し、試験体の固有振動数を計測した。

表 3 に短期許容耐力を壁倍率×壁長さ×1.96 とし、それを地震力算定用重量で除した値である C₀ の算出結果を示す。フェーズ 1 で 0.52 (施行令の 2.6 倍)、フェーズ 2 は 0.30 (施行令の 1.5 倍) となった。

3.2 実験結果

3.2.1 荷重-変形関係と破壊経過

1) フェーズ 1 における力学的挙動

図 4 に実験から得られた荷重-変位関係を示す。荷重は加速度と質量を乗じて算出した。BCJ-L2 波 20%では層せん断力が 16.1kN、最大応答値は 1/740rad 程であることから、筋かい等に損傷はないと判断できる。BCJ-L2 波 100%では層せん断力は 54.1kN と C₀換算で 0.78 であり、短期許容耐力を上回った。最大応答値は 1/60rad 程であり、静加力実験の結果を踏まえると 2 つ割り筋かいに大きな損傷は発生していないと判断できる。観察により確認された損傷は合板の釘抜けのみであり、JMA 神戸波を入力する前にその部分の釘を打ち直し、性能を回復させた。JMA 神戸波による加振では、木造住宅の安全限界とされる 1/30rad を大きく上回る 1/18rad 程まで変形が進んでおり、構造用合板とせっこうボードがはがれ、筋かい端部の金物が損傷した。約 1/33rad で最大層せん断力 85.1kN となり、それ以降は荷重が低下した。静加力実験の結果より、面材による筋かいの座屈拘束効果がなくなるのは 1/40～1/30rad 付近であり、振動台実験の方がやや変形が大きい。これは、面材がせっこうボードよりも耐力壁としての性能が高くなる構造用合板であったことが影響していると考えられる。

写真 4 フェーズ 1 損傷写真

表 2 加振スケジュール

加振番号	入力波	倍率 [%]	最大加速度 [gal]
フェーズ 1	1	BCJ-L2	20
	2	BCJ-L2	100
	構造用合板 釘打ち直し		
フェーズ 2	3	JMA 神戸	100
	4	BCJ-L2	20
	5	BCJ-L2	100
	6	JMA 神戸	70

表 3 試験体の性能値 (荷重の単位 : kN)

試験体	地震力算定用重量	短期許容耐力	C ₀	施行令との性能差
フェーズ 1	68.7	35.7	0.52	2.6
フェーズ 2	68.4	20.7	0.30	1.5

フェーズ 1 (左 : BCJ-L2 波 100%, 右 : JMA 神戸 NS 波 100%)

フェーズ 2 (左 : BCJ-L2 波 100%, 右 : JMA 神戸 NS 波 70%)

図 4 荷重-変形関係

写真 5 フェーズ 2 損傷写真

2) フェーズ2における力学的挙動

BCJ-L2 波 20%ではフェーズ1と同様に大きな損傷はないと判断でき、BCJ-L2 波 100%加振において最大層せん断力 44.9kN に達した後、耐力が低下している。このときの変形角 1/60rad 程であり、筋かいの曲げ座屈によりせっこうボードがはがれ、面材による座屈拘束効果が失われたと考えられる。加振後の損傷観察では、筋かい金物のビスの抜けやせっこうボードが外れていることが確認できており、前述の推定を裏付けることができる。一方で、筋かいの座屈による曲げ破壊は発生していなかった。よって、JMA 神戸波入力前の時点での試験体は、せっこうボード大壁は機能せず、耐力要素は筋かいのみの状態と同等であったと判断できる。JMA 神戸波加振では、最大層せん断力が BCJ-L2 と比較して 33%低下しており、すでに発生していた筋かい端部の損傷とともに、面材による筋かいの座屈拘束効果がないことが主たる要因であると考えられる。最大応答変位は 1/11rad となり、筋かいの座屈破壊及び間柱の折損が発生し、終局となった。

3.2.2 実験結果から得られた耐震性能

1) 壁倍率の算出

それぞれの加振から得られた壁倍率を表 7 に示す。フェーズ 1 の JMA 神戸波の結果から算出した壁倍率は 5.09 倍であり、施行令の壁倍率 4.99 倍（2 つ割り片筋かい 2.0 倍＋構造用合板 2.5 倍＋せっこうボード準耐力壁 0.49 倍）とほぼ同等の値を示した。このことから、構造用合板とせっこうボードによる座屈拘束効果により、2 つ割り片筋かいが十分に性能を発揮したと考えられる。

フェーズ 2 の BCJ-L2 波 100%の結果から得られた壁倍率は 2.97 倍であり、施行令の壁倍率 2.90 倍（2 つ割り片筋かい 2.0 倍＋せっこうボード 0.9 倍）を満たしている。しかし、せっこうボードがはがれた状態で入力した JMA 神戸波における壁倍率は 1.21 倍となっており、2 つ割り片筋かいの施行令壁倍率 2.0 倍を大きく下回る結果となった。静加力実験の筋かいのみの試験体の壁倍率 1.18 倍とほぼ同程度であることから、大壁面材による座屈拘束のない状態が再現されている。そして前述の通り、JMA 神戸波加振後には 2 つ割り筋かいの面外方向への曲げ座屈を確認できたことから、曲げ座屈の発生により 2 つ割り筋かいの性能が十分に発揮されなかったことが分かる。

2) 固有振動数と試験体の性能の推移

地震動入力前後のステップ波より算出した固有振動数の推移を図 5 に示す。フェーズ 1 では BCJ-L2 波入力後に剛性換算で 42%まで性能が低下したものの、構造用合板の釘抜けが確認できた部分の打ち直しにより、JMA 神戸波の加振の前に初期状態の 75%まで回復した。

フェーズ 2 では BCJ-L2 波 100%加振後に初期状態の 23%まで性能が低下した。一方、壁倍率でみると 59%程度の低下であり、耐力はある程度維持しているものの、筋かい端部や軸組接合部のゆるみによる剛性の低下が見て取れる。最終的には筋かいの曲げ破壊により、剛性換算で 5%まで性能が低下した。

4. まとめ

過去の実験結果から筋かいを用いた耐力壁は、座屈拘束要素のない状態では施行令で定められた性能を発揮しないことが明らかとな

表 4 振動台実験の特性値（荷重の単位：kN/m）

試験体	入力波	Py	2/3Pmax	0.2Pu/Ds	P 1/20	壁倍率	施行令壁倍率
フェーズ 1	BCJ-L2	31.2	19.1	36.3	47.1	2.68	4.99
	JMA 神戸	50.1	36.4	56.8	36.5	5.09	
フェーズ 2	BCJ-L2	25.5	21.2	29.9	28.5	2.97	2.90 (2.0)
	JMA 神戸	20.1	8.7	20.1	10.1	1.21	

* () 内は 2 つ割り片筋かいのみでの壁倍率

図 5 固有振動数の推移

っている。性能の低下には筋かいの面外方向への曲げ座屈が影響しているため、本研究では 2 つ割り片筋かいとせっこうボード等の大壁面材を併用した耐力壁を対象として静加力実験と振動台実験を実施し、その座屈拘束効果について検証した。

まず、大壁面材の有無がパラメータとなる試験体に対して静加力実験を実施し、面材による筋かいの座屈拘束効果の有用性を確認した。大壁面材を有する試験体は、施行令の壁倍率を満足する性能が得られた。一方で、筋かいのみの試験体は耐力壁の性能が発揮されず施行令の壁倍率を大きく下回る結果となった。

次に、振動台実験により 2 つ割り筋かいの曲げ座屈を拘束した場合の性能を確認した。大壁面材が存在する場合には、耐力壁は建築施行令の壁倍率を満たす結果が得られた。しかし、大壁面材が機能しない場合は、施行令の壁倍率を大きく下回る結果となった。

以上、静的及び動的の 2 つの実験結果から、筋かいのみの耐力壁の性能が低下する原因が筋かいの曲げ座屈にあり、大壁面材を併用して座屈拘束を実施すれば施行令で定められた壁倍率を満たすことが確認できた。

参考文献

- 1) 福森大造、正野崎昭二：木造連続壁の耐力について、日本建築学会大会学術梗概集、C-1 分冊、pp181-182、2006.9
- 2) 五十田博、峯村廣紀他：2 つ割りと 3 つ割り筋かいを持つ木造住宅の振動台実験 -木造建物の地震時挙動に関する研究 その 5-、日本建築学会構造系論文集、pp969-975、2014.7
- 3) (財) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）、2009.6

謝辞

振動台実験は中村物産有限会社との共同研究の中で実施いたしました。また、静加力実験のデータを日本建築防災協会から提供して頂きました。本論文を執筆するにあたり、ご協力を頂いた皆様にこの場を借りて感謝致します。

[2015 年 2 月 4 日原稿受理 2015 年 4 月 28 日採用決定]