

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560555
 研究課題名（和文） ひずみ硬化型高靱性モルタルによる木造住宅耐震用制振壁部材の開発
 研究課題名（英文） Development of passive control panel of seismic vibration for wooden houses employing strain hardening DFRCC
 研究代表者
 山田 寛次(YAMADA KANJI)
 秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
 研究者番号：50315628

研究成果の概要：

繊維補強セメント材料を用いた木造建物用制振壁の開発を行った。用いた壁材料は市販の FRC ボードで、これに、工夫を凝らしたスリットを導入することにより、トラス機構破壊後、ラーメン機構へ移行する二つの破壊メカニズムを持たせることができた。開発した制振壁部材は、従来の一般的な面材張り壁が壁倍率 2.5 であるのに対し、2.9～3.3 と、十分な差異を有している。また減衰定数は、1/120 ラジアン時に 23% を記録している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	800,000	240,000	1,040,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	2,600,000	450,000	3,050,000

研究分野：建築材料学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：耐震要素，制振構造，繊維補強コンクリート，木質構造，地震

1. 研究開始当初の背景

木造建物の耐震技術では、筋交いや壁で剛性を上げる事が一般的であるが、ややもすれば、土台やホールダウン金物などの特定部材にダメージが集中し、建物が脆性的に破壊する。その対策と耐震技術メニューの拡充の観点から大きな地震による被害を低減させるため制振構造、免震構造などの新しい構造形式の研究が盛んに行われている。

そのうち制振構造は、免震構造に比べ応答変位も抑えられるため、構造的には有利である。最近、木造建物にも制振構造を適用しようとする例が増えてきた。しかし、装置が高価で、ごく限られたメーカーで作られているに過ぎない。

2. 研究の目的

本研究では、制振構造に着目し、木製フレームに損傷を与えず、壁のみに破壊を集中させることで補修が容易にできることを目的とした制振壁部材を開発する。これは FRC ボードにひび割れを導入する事で地震時入力エネルギーを吸収して、骨組みの減衰効果向上を狙うというアイデアを元に構成される。その時、使用する壁の部材は、市販 FRC ボードを用いることとする。

3. 研究の方法

本研究では、まず市販材料の性能を求め、次に小型試験体の載荷試験、実大の大型試験体での載荷試験を行い、有効性を確認した。以下に、成果を記す。

4. 研究成果

(1) 市販材料の性能

本研究で FRC を使用するにあたり、その物性値と特長を把握するため、圧縮試験、引張試験、曲げ試験、破壊靱性試験を行った。尚、本研究の物性値測定にあたり、絶乾、室乾、湿潤、以上 3 つの状態の含水率の違いによる物性値の変化について検討を行った。

破壊靱性試験の実験結果を元に引張軟化解析を行い、得られた引張軟化曲線(TSD)の破壊エネルギー G_f と軟化開始応力 f_i を表 1 に示す。含水率が低いほど、 f_i は大きく、脆性的な破壊となった。一方、湿潤状態の G_f が 7.77N/mm と最も大きくなった。

表 1 TSD から得られた値

養生状態	G_f	f_i
	(N/mm)	(N/mm ²)
絶乾	6.08	17.78
室乾	4.33	14.58
湿潤	7.77	8.9

(2) 縮小モデル実験

① FRC ボード耐力式

FRC ボードの破壊モードは、(1)ボードの引張破壊耐力、(2)ボードのせん断圧縮耐力、(3)ビス周りの耐力に分類され、効率的なエネルギー吸収を目指す場合、ボードが最初に破壊する必要がある。

以下それぞれの耐力の算出方法を示す。

・引張破壊耐力の確認

ボード内に発生する引張力を求めるため、式(1)で示される、鋼材で用いられるウェブパネルの引張張力場理論式を用いた。ここで有効断面割合 α とは、既往の研究結果より得られた実験定数であり、主応力と垂直方向の断面にスリットが入った場合、断面欠損による耐力の低減効果を加味した値である。

$$Q_t = \sigma_t \cdot b \cdot \alpha \cdot t \cdot \sin \theta \cos \theta \quad \dots (1)$$

Q_t :引張破壊耐力(N) σ_t :引張強度(MPa)

α :有効断面割合 t :板厚さ(mm) θ :45°

・せん断圧縮耐力の確認

FRC ボードは 5.9mm 厚で幅厚比が大きく、圧縮座屈を生じる可能性がある。そこで、プレートガーターの局部せん断座屈応力式を元に構成した式(2)で示される、FRC ボードにスリットが入った場合のせん断圧縮座屈耐力式を用いた。ここでせん断力の低減効果 β とは既往の研究結果より、スリットが入った場合の座屈耐力の低減効果を表している。また τ_{cr} は式(3)、 k は式(4)より求めた。

$$Q_{cr} = \tau_{cr} \cdot b \cdot \beta \cdot t \quad \dots (2)$$

$$\tau_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{(b/t)^2} \quad \dots (3)$$

$$k = 5.34 + \frac{4.00}{(a/b)^2} \quad \dots (4)$$

Q_{cr} :せん断圧縮座屈耐力(N)

τ_{cr} :局部せん断座屈応力(MPa)

β :せん断力の低減効果

k :板座屈係数

E :ヤング係数(MPa)

ν :ポアソン比

a :板の長辺方向長さ(mm)

b :板の長さ(mm)

・ビス周りの耐力の確認

FRC ボードと木製フレームとの接合部分である、ビス周りの耐力を求めた。要素の実験結果から得た実験式を式(5)に示す。

$$Q_{s9} = 9Q_{s1} / \gamma \quad \dots (5)$$

Q_{s9} :ビス9本の耐力(N) Q_{s1} :ビス1本の耐力(N)

γ :安全率2

②実験及び結果

・実験概要

前節で示された FRC ボード耐力式を元に、縮小試験体による、縮小モデル実験を行った。これは FRC ボード耐力式の確認と、スリット形状による挙動、減衰性能の違いを考察し、実大フレーム実験に備える為のものである。

図 1 に基本フレーム試験体(FR)、表 2 に実験に用いた試験体の概要を示す。図 2 にスリットを分散して配置した分散ボード試験体 HS、図 3 にスリットを配向させた配向ボード試験体 SH を示す。

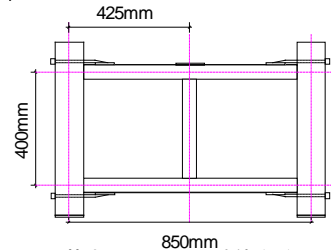


図 1 基本フレーム試験体 (FR)

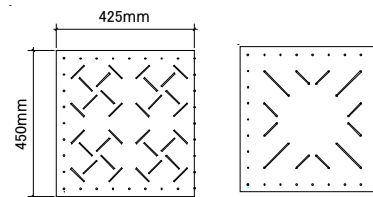


図 2 HS 試験体

図 3 SH 試験体

表 2 試験体概要

名称	概要
FR	壁板を張らないフレームのみ
HR	スリットを設けない FRC 壁
HS	分散スリット入り FRC 壁
SH	トラス機構スリット入り FRC 壁
SF	SH に全面ガラス繊維シート補強
SA	SH に斜め方向ガラス繊維シート補強

・結果と考察

表3に実験結果と減衰性能を示す。分散ボードHSは、せん断引張力による破壊が起こり、FRCボード耐力式で想定した破壊順序と合致したが脆性的な破壊となった。一方HRは曲げによる破壊が生じた。配向ボードSHは最大耐力が49.1kN、塑性率が5.7と大きく、HS,HRと比較して格段に heq が大きくなった。またSHにガラス繊維シートを全面に貼り付けたSF、部分的に貼り付けたSAは、塑性率が9.0、7.2と分散ボードと比較して、大幅に向上した。その結果、配向ボードの中でも、繊維貼り付け面積の最も大きいSFの等価耐力が123kNとなり、制振壁として有効であった。

また汎用構造解析ソフトによるひび割れ解析も同時に行った。解析対象は分散ボードHSであり、図4に示すようにビス周りの局部変形を考慮し、ヤング係数Eを低減することで解析を行った。図4に解析に用いたメッシュを示す。要素の構成則にはTSDの結果を用いた。図5に実験時のひび割れ写真とひび割れ解析結果を重ねた図を示す。黒線で囲まれた箇所はどちらもひび割れていたが、赤線で囲まれた箇所は、解析結果のみひび割れが入り、FEM解析によりある程度のひび割れ箇所の特定が可能となった。

(3) 実大フレーム実験

①実験概要

縮小モデル実験結果を元に、実大実験を行った。試験体設置図を図6に示す。層間変形角は接触型変位計及び巻取り式変位計を用いて測定し、荷重は100kNロードセルで測定しデータロガーによって記録した。なお試験は寝かせて行った。

②試験体

図7に実大フレーム実験に用いた試験体一覧を示す。用いた試験体は7種類であり、FRCボードはすべて大壁で貼り付けた。(A)、(D)に示されるF2、F3は基本フレーム試験体である。(B)、(C)は分散ボード試験体であり、ビスピッチはHSが50mm、HAが100mmである。(E)は配向ボード試験体HTであり、応力が均等になるように設計した。(F)は2つの破壊メカニズムを持つ双機構ボード試験体であり、室乾状態のHO、湿潤状態HWに分けられる。なおHT、HO、HWは横胴縁と間柱があるF3を基本フレームとする。

表3 実験結果と減衰性能

試験体	最大荷重 kN	最大変位 P_{max}		heq		等価耐力 kN	塑性率 μ
		mm	1/120(rad)	1/30(rad)	%		
FR	23.9	13.3	2.3	8.9	30.2	2.3	
HS	44.0	7.4	5.9	10.2	59.4	2.5	
HR	41.6	5.0	5.8	8.5	51.2	2.8	
SH	49.1	10.1	9.0	18.3	92.8	5.7	
SF	52.9	5.7	7.1	25.0	123.3	9.0	
SA	45.1	8.2	7.0	22.0	96.3	7.2	

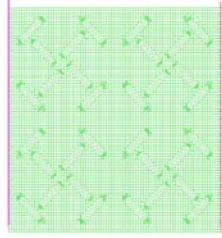


図4 HSメッシュ

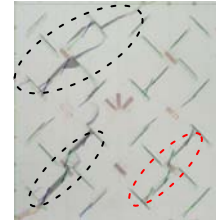


図5 解析結果の比較

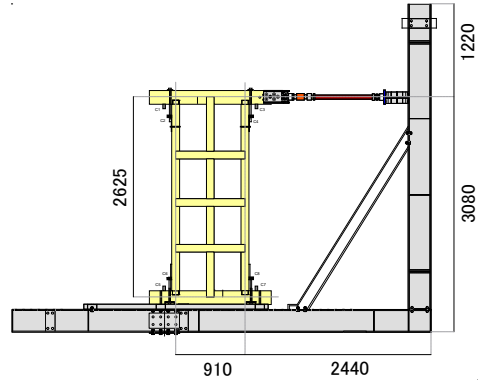


図6 試験体設置

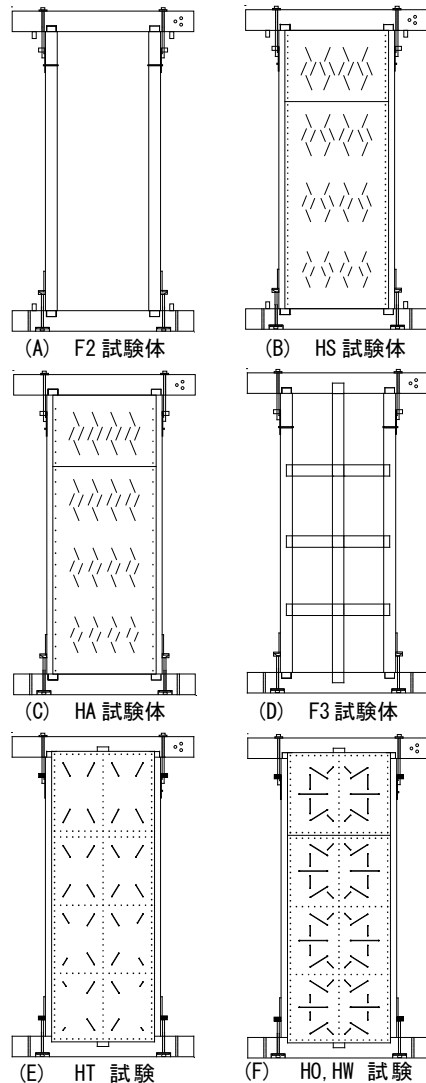


図7 実大フレーム実験に用いた試験体

③実験結果

図 8 に各試験体の荷重履歴を示す。ビスピッチ 50mm の HS は 10kN, 1/90(rad) でせん断圧縮座屈が生じ、ボードが面外に曲がりビス周りが破壊した。ビスピッチ 100mm の HA は、11kN, 1/30(rad) でボード面外曲げでビス抜けが発生した。また配向ボード HT は、ビス周りの破壊は発生しなかったが、1/30(rad) までボードが破壊せず、想定した箇所にはひび割れを導入することが出来なかった。一方破壊箇所を限定したスリット配置を取った双機構ボード HO は、1/60(rad) でひび割れが確認され、実験終了時に他の試験体で見られたホールダウン金物の破壊も見られなかった。湿潤状態で行った HW は全体を通して目立ったひび割れは見られなかった。

図 8 から完全弾塑性モデル、等価粘性減衰定数 (heq)、壁倍率を求め、そこから得られた値を表 5 に示す。最大耐力は分散ボードと比較して HT が 21.3kN, HO が 21.3kN, HW が 18.4kN と配向ボード、双機構ボードが大きくなった。等価粘性減衰定数 heq は、1/120(rad) で HW が 23.2% と大きく、次いで分散ボード HA となった。減衰を加味した等価耐力は、 heq が 1/30(rad) で 39.0% と他の試験体と比較して大きい HW が 59.9kN と最も大きくなった。また HT が 47.0kN, HO が 49.6kN と配向ボード、双機構ボードの減衰性能が優れていることが分かった。塑性率は HO, HA が 4.2 と大きく、次いで HT, HO がそれぞれ 2.5, 2.6 となった。以上の結果より等価耐力、塑性率では、配向ボードと双機構ボードが有効であったが壁倍率を比較すると、スリットのない一般的な 7.5mm 厚の面材張り壁(大壁)の壁倍率が 2.5 であるのに対し、スリットのある 5.9mm 厚の双機構ボードの壁倍率は HO が 2.9, HW が 3.3 と 2 割以上の向上が見られる。また破壊モードは想定した通り、HA, HS がせん断圧縮破壊、HT, HO, HW が引張ひび割れ破壊となった。

④考察

双機構ボード試験体の破壊過程について考察を行った。図 9 に双機構ボードのトラス機構イメージ図を示す。スリットにより、応力が集中する箇所を 173.7mm と限定し、図の灰色で示されるトラス機構を構成した。

表 4 から室乾状態の HO と比較し、湿潤状態の HW の減衰、塑性率が大きくなったことが分かる。また図 10 に HO の破壊過程を示す。±1/60(rad) で初めて FRC ボード部分にひび割れが確認され +1/54(rad) では灰色で示されるトラス機構が破壊された。最終的に -1/30(rad) で紫色で示される FRC の隅角部が生き残り、肌色で示される木製フレームと一体化し、ラーメン機構に移行し、二つの破壊メカニズムを有する。

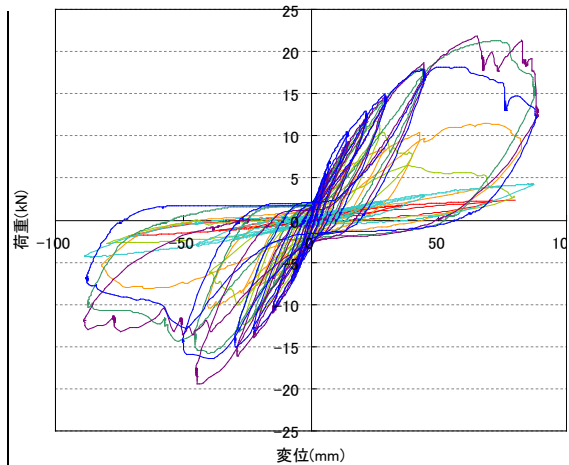


図 8 各試験体の荷重履歴

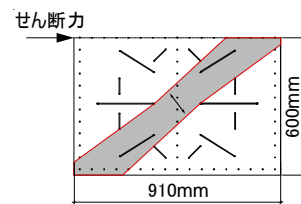


図 9 トラス機構

表 4 実験結果と減衰性能

試験体	最大荷重 P _{max} kN	最大変位 mm	heq		等価耐力 kN	塑性率 μ	壁倍率 —
			1/120(rad)	1/30(rad)			
F2	3.7	2.6	8.7	13.7	3.3	1.8	0.49
F3	4.5	4.5	9.9	13.6	7.0	1.9	0.49
HA	11.6	68.5	13.6	21.7	18.5	4.2	1.36
HS	11.8	29.0	10.0	31.3	7.6	2.0	2.04
HT	21.3	21.3	7.6	23.1	47.0	2.5	2.88
HO	21.9	21.9	7.7	23.9	49.6	2.6	2.99
HW	18.4	18.4	23.2	39.0	59.9	4.2	3.35

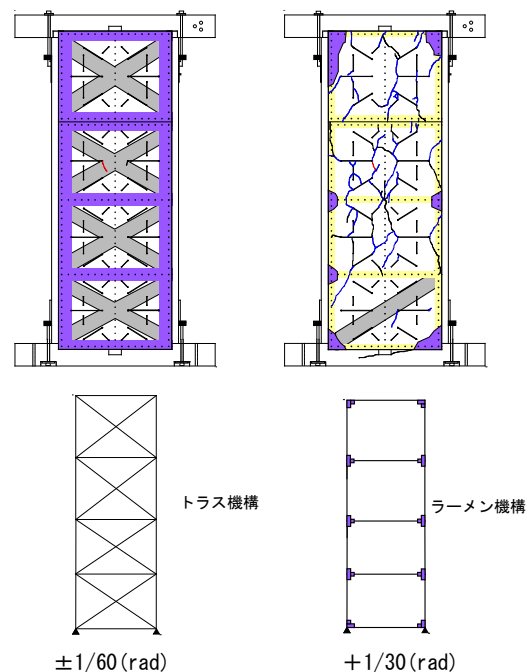


図 10 HO 破壊過程

以上のように、過大な耐力を持たずに壁を破壊させ、耐力のメカニズムがトラス機構からラーメン機構に変化させられることが明らかになった。このことで、木製フレーム、ホールダウン金物の損傷を抑えることができた。

(4) まとめ

繊維補強セメント材料を用いた木造建物用制振壁の開発に関する検討を行い以下の知見を得た。

・破壊の順序が、ボードの破壊>座屈>ビス周りの破壊となる FRC ボード耐力式を確立した。

・トラス機構破壊後、ラーメン機構へ移行する二つの破壊メカニズムを持つ双機構ボードを開発した。

・双機構ボードでは塑性率が大きくなり壁倍率が上がる事が分かった。

・開発した制振壁部材は、従来の一般的な面材張り壁が壁倍率 2.5 であるのに対し、双機構ボード試験体では 2.9~3.3 と、十分な差異を有している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① K. Yamada, I. Sasaki, S. Ishiyama : Performance of passive-vibration-control panel for wooden frame made of DFRCC thin board, Proceedings of the 7th RILEM international symposium, pp. 1001-1006, 2008.9

② 佐々木 維左夫, 石山 智, 山田 寛次 : 繊維補強セメント材料を用いた木造建物用制振壁の開発, 日本建築学会, 東北支部研究報告集(査読無し), No. 71, pp. 85-88, 2008.6

③ 佐々木 維左夫, 石山 智, 山田 寛次 : 繊維補強セメント複合材料の制振壁への適用に関する試み, 日本建築学会, 大会学術講演梗概集(査読無し), Vol. 2007, A-1, pp. 425-426, 2007.8

[学会発表] (計 3 件)

① 山田 寛次 : Performance of passive-vibration-control panel for wooden frame made of DFRCC thin board, RILEM Symposium, 2008, Chennai (India)

② 佐々木 維左夫(代理発表 山田 寛次) : 繊維補強セメント材料を用いた木造建物用制振壁の開発, 日本建築学会, 2008, 弘前市

③ 佐々木 維左夫 : 繊維補強セメント複合材料の制振壁への適用に関する試み, 日本建築学会, 2007, 福岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 寛次 (YAMADA KANJI)

秋田県立大学・建築環境システム学科・教授
研究者番号 : 50315628

(2) 研究分担者

石山 智 (ISHIYAMA SATORU)

秋田県立大学・建築環境システム学科・助教
研究者番号 : 80315647

(3) 連携研究者

なし