軽量鉄骨下地間仕切壁の面外静的加力実験

ANTI-PLANE STATIC LOADING TESTS ON PARTITION WALLS WITH LIGHT-GAUGE STEEL

田中栄次 — * 1 寺田岳彦 — * 1
櫻庭記彦 — * 1 内本英雄 — * 1
小川雄一郎 — * 1 室田文男 — * 1

Eiji TANAKA — * 1 Takehiko TERADA — * 1
Fumihiko SAKURABA — * 1 Hideo UCHIMOTO — * 1
Yuichiro OGAWA — * 1 Fumio MUROTA — * 1

キーワード：
非構造部材, 間仕切壁, 軽量鉄骨

Keywords:
Nonstructural component, Partition wall, Light-gauge steel

A significant amount of research on Tohoku earthquake in 2011 reported the damages to nonstructural components. However, the survey on structural characteristics and seismic performance of nonstructural partition wall is scarce. In this paper, we carried out anti-plane static loading tests on partition walls with light-gauge steel and confirmed their behaviors and strength. In addition, their dynamic properties were estimated based on the results.

1. 序

2011年の東北地方太平洋沖地震では天井の脱落をはじめ非構造部材の被害が多数報告¹⁾され、非構造部材の耐震性は建物の地震時安全性を確保するために重要であるということが改めて認識された。特に、大型の軽量鉄骨下地間仕切壁（以下 LGS 壁）が脱落した場合の被害は甚大と予想され、上記地震時では写真 1 に示す LGS 壁の破損がみられた。既往の研究²⁾³⁾では LGS 壁の面内構造性能を実験的に検証しているが、面外方向の特性に関する研究事例⁴⁾は極めて少ない。そこで、本報では LGS 壁の面外方向静的加力試験を実施し、破壊性状・耐力等の構造力学特性調査及び耐震性の検討を行う。

2. 試験計画

代表的な試験体を図 1 に、試験体諸元を表 1 に、使用部材を表 2 に各々示す。試験体は施工の現状を鑑みて全長やボード枚数等のパラメータを設定し、実際と同一の部材（JIS 規格品）・工法により試験場所で製作した。通常の施工ではスタッドが壁全長より若干短いため、上側想定ランナー（壁を鉛直に立てた場合上側を想定した方）とスタッドとの取合いにクリアランスを設ける。試験体 L2 では角形鋼管の骨組（以下補強鉄骨）を軽量鉄骨下地に追加した場合の補強効果を検証する。試験体 L4, L5, M1～M3 は北側ランナーが溝形鋼（以下 C 鋼受）を介して試験フレームに接続され、天井等と取合う端部剛性の低い壁を模擬する。試験装置概要を図 2 に示す。試験は実大の試験体を水平に設置し、両端固定のもとジャッキにより面外方向に静的加力するものである。尚、製作時から加力直前まで試験体はサポートで支持され、ほぼ水平な状態を保つ。中央のジャッキ及び加力器具により加力点は試験体のほぼ 1/4 点に設定し、地震時慣性力による等分布荷重での最大曲げモーメントと端部せん断力を近似する。載荷計画を図 3 及び表 3 に示す。中央加力は荷重制御による正負交番の繰り返し載荷とし、1～2 サイクル毎に荷重振幅を増大させて耐力低下まで加力を行う。尚、荷重振幅の原点は 0(G)相当、つまり試験体の自重を中央ジャッキが支持した状態とする。さらに層間変形の影響を確認するため、試験体 L5 では南端部に設置したスライダとジャッキを用い

て強制層間変形を与える。層間変形入力は中央加力 0(G)を維持しつつ行い、その後層間変形を固定した状態で中央を加力するものとし、層間変形角は中央加力の荷重振幅に応じて増大させる。

写真 1 LGS 壁 破損状況

※ランナーはスタッド及びボードと接合されず、LGS 壁は面内方向変位が自由である。

(a) 試験体 L3

(b) 試験体 L2

(c) 試験体 M3

図 1 試験体

¹⁾ 清水建設
(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

¹⁾ Shimizu Corporation

表1 試験体諸元及び試験結果

試験体	幅 (mm)	全長 l (mm)	重量 W (kg)	スタッド		ボード厚 (mm)			補強鉄骨	C鋼受偏心 (mm)	層間変形	1) クリアランス d (mm)	2) 上側想定	北端 ³⁾ ボード撤去	上貼面	鉛直方向耐力 P_u				破壊性状	
				せい (mm)	間隔 @ (mm)	上貼	下貼	裏貼								上方向 (kN)	下方向 (kN)	上方向 (G)	下方向 (G)	上方向	下方向
L1	1820	6457	481	100	606	21	21	—	—	—	—	10	南	—	上面	2.9	11.3	0.6	2.4	振れ破壊	局部破壊
L2	1820	6457	488	100	455	21	21	—	○	—	—	10	南	—	上面	8.8	23.9	1.8	5.0	振れ破壊	局部破壊
L3	1820	6457	591	100	455	21	21	12.5	—	—	—	10	南	—	上面	9.2	13.9	1.6	2.4	局部破壊	局部破壊
L4	1820	6457	489	100	455	21	21	—	—	300	—	10	北	—	上面	6.3	11.0	1.3	2.3	振れ破壊	局部破壊
L5	2270	6457	722	100	455	21	21	12.5	—	300	○	20	北	裏貼	下面	—	10.7	—	1.5	—	脱落
M1	2270	4857	541	100	455	21	21	12.5	—	300	—	20	北	裏貼	下面	—	9.6	—	1.8	—	脱落
M2	2270	4857	541	100	455	21	21	12.5	—	300	—	10	北	裏貼	下面	17.0	13.9	3.2	2.6	局部破壊	局部破壊
M3	2270	4857	538	100	455	21	21	12.5	—	300	—	20	北	全ボード	下面	—	9.9	—	1.9	—	脱落
S1	2270	4457	187	65	455	9.5	12.5	—	—	—	—	10	南	—	下面	—	6.6	—	3.6	—	振れ破壊
S2	2270	4457	347	65	455	9.5	12.5	—	—	—	—	10	南	—	両面	—	10.7	—	3.1	—	局部破壊

1) スタッドと上側想定ランナーとのクリアランスを示す

2) 壁を鉛直に立てた場合上側を想定した方向を示す

3) 試験体北端部のボードを撤去したものを示す(裏貼は北端から300(mm)、上貼・下貼は50(mm)撤去する)

4) 上貼及び下貼ボードが貼られる面を鉛直上面・鉛直下面・両面で示す

表2 試験体使用部材

部材	規格	寸法 (mm)			使用試験体
		幅	せい	厚さ	
スタッド	WS100	45	100	0.8	S1・S2以外
	WS65	45	65	0.8	S1・S2
ランナー	WR100	40	102	0.8	S1・S2以外
	WR65	40	67	0.8	S1・S2
スパーサー	100型	—	—	0.8	S1・S2以外
	65型	—	—	0.8	S1・S2
振止め	WB25	10	25	1.2	全て
補強鉄骨(角形鋼管)	100	100	2.3	L2

図2 試験装置概要

表3 载荷計画

荷重 (G)	サイクル数	層間変形角	試験体
±0.2	2	0	全て
±0.5	2	±1/200	全て
±0.8	2	—	S1
±1.0	2	±1/100	全て
±1.3	1	—	S1
±1.5	1(L3のみ2)	±1/50	全て
±2.0	1	—	全て
2.5~	1	—	全て

※層間変形入力力は試験体L5のみ実施する

(a) スタッドの局部破壊 (S2)

(b) スタッドの振れ破壊 (L4)

(c) 振れによるボード剥落 (S1)

(d) ランナーからの脱落 (M1)

写真2 試験体 破壊性状

3. 試験結果

各試験体は鉛直上方向加力時と下方向加力時で異なる挙動・耐力を示した。これは、ボードによるスタッドの拘束や、試験体自重による上方向と下方向加力でのモーメント分布の変化が影響していると考えられ、以降では各試験体について上方向加力と下方向加力時の試験結果を個別に扱う。試験体の破壊性状は大別して写真2に示す3種類が観察された。最も多く観察された現象がスタッドの局部破壊であり、曲げにより圧縮を受けるスタッドフランジがボードで拘束される場合に、スタッド圧縮側フランジ・ウェブの局部変形を生じ耐力低下した。破壊位置はモーメントが最大となる加力点付近または両加力点間であり、曲げに依存する破壊性状と考えられる。ボード片面貼りの試

図3 载荷履歴概要

験体でスタッド圧縮側フランジにボードが貼られていない場合、スタッドの振れ変形が進展し横座屈やボードの剥落を生じた。ボードの剥落はスタッドとボードとのビス止め接合部が振れモーメントにより破壊するものである。スタッドの振れは試験体端部から加力点にかけて生じたが、これは加力点で摩擦やてこ反力により振れ拘束されたためであり、実際の地震入力ではLGS壁全長に渡りスタッドが振れ変形し、試験結果と耐力や挙動は異なると推測される。ランナーとスタッドとのクリアランスが大きい試験体ではランナーからの脱落が観察された。この際ランナーは急激に変形し、写真1に示す上部ランナーの破損に類似する状態となった。また、多くの試験体においてボードの割れが耐力低下以前に引張側ボード継目で観察された。局部破壊はこの割れに近い位置で生じることが多く、厳密にはボード継目の局所的な断面性能低下も挙動に影響を与えられとされる。

表1に示す各試験体の耐力を比較すると、脱落したものを除き総体的に全長が短いほど耐力が増大する傾向が確認できる。よって、LGS壁自体の破壊は曲げの影響を大きく受けることが示唆される。一方、脱落した試験体の耐力は全長及びスタッド引張フランジ側ボードの有無に依らず概ね一定であり、ランナーからの脱落は端部せん断力に依存すると推測される。また、振れによる破壊耐力は比較的低く、試験体L1は1.0(G)相当以下である。ボード両面貼りでは振れを生じないが、石膏ボードは比強度・比剛性が低く、試験体S2のようにボード枚数が多いとLGS壁全体の比強度、つまり耐震性も低下し得る。

図4 中央荷重－試験体中央変位関係

中央荷重－試験体中央鉛直変位関係を図4に示す。同図より、各試験体とも共通して非線形復元力特性を有し、スリップ型に近い性状となることが分かる。スタッドの両フランジ歪から算出した曲率分布を図5に示す。曲率分布をモーメント分布として捉えれば、各試験体とも両端部で曲率が概ねゼロに近付いており、LGS壁の面外方向端部境界条件は単純支持に近いことが確認できる。試験体L2は中央補強鉄骨のランナーでも曲率がほぼゼロであるため、補強鉄骨を追加することでLGS壁は全長が分割された応力状態になり、補強鉄骨の耐力や動的特性による応答増幅を無視すれば分割数に応じて耐力は増大

図5 曲率分布

すると推測される。また、試験体L5は層間変形の影響がみられず、単純支持に近い層間変形が応力状態や耐力に影響しないと考えられる。同様に、試験体L4, L5, M1～M3で行った端部剛性の変化もその動的特性による応答増幅を除けば影響はないと思われる。

4. LGS壁の耐力評価

4.1. LGS壁の曲げ挙動及び局部破壊耐力評価

以降は補強鉄骨のない基本的な壁仕様について、実挙動と実験結果が異なる可能性の高い振れによる破壊を除いて検討する。まず、LGS壁の曲げ挙動を複合材料による合成断面の単純支持はりとしてモデル化する。等価曲げ剛性は次式で与えられる。

$$E_{eq}I_{eq} = \sum E_i (I_i + A_i y_i^2) \quad (1)$$

ここで、 E_i : 各材 (スタッド及び各石膏ボード) の圧縮・引張弾性率、 A_i : 各材の断面積、 I_i : 各材の断面二次モーメント、 y_i : 各材の図心から合成断面の中立軸までの距離である。スタッドのヤング率は $205000(\text{N/mm}^2)$ とし、石膏ボードの復元力特性は非線形だが、材料試験を基に表 4 の値を圧縮・引張弾性率として各々定めた。図 4 に示す荷重-変形関係の等価曲げ剛性計算値と実験値とを比較すると、非線形性が顕著な領域では過大評価となるものの、概ね傾向を捉えているといえる。次に、スタッドの局部破壊がスタッド圧縮側フランジの局部座屈に起因すると仮定して耐力評価する。局部座屈強度は圧縮側フランジがボードに拘束されていることを考慮し、3 辺固定支持一辺自由の圧縮板に近似して定める。その終局強度は文献⁵⁾より

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.5) \\ 0.571(R-0.5)^2 - 1.010(R-0.5) + 1.0 & (R > 0.5) \end{cases} \quad (2)$$

$$R = \frac{b_s}{\pi t_s} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}}, \quad k = \frac{4}{\alpha^2} + \frac{40}{3\pi^2} + \frac{15\alpha^2}{\pi^4} - \frac{20\nu}{\pi^2}$$

で与えられる。ここで、 σ_u : 終局強度、 $\sigma_y=341(\text{N/mm}^2)$: スタッド降伏強度材料試験値、 b_s : 板幅、 t_s : 板厚、 $\nu=0.3$: ポアソン比、 $E_s=205000(\text{N/mm}^2)$: ヤング率、 α : 縦横比である。縦横比は座屈係数が最小値 $k=2.31$ となる $\alpha=2.26$ (板の長さ $102(\text{mm})$ 相当) とする。得られた終局強度を用いて試験体の局部破壊耐力は次式で求められる。

$$P_u = \pm \frac{8E_{eq}I_{eq}}{E_s y'_s l} \sigma_u + \left\{ 4 \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) - 1 \right\} W \quad \left(\frac{1}{4} l \leq x \leq \frac{3}{4} l \right) \quad (3)$$

ここで、 y'_s : 合成断面の中立軸から圧縮フランジまでの距離、 x : 破壊位置 (試験体北端を原点とする)、 W : 試験体自重、 l : 全長である。局部破壊耐力の計算値と実験値との比較を図 6 に示す。同図より、両者は概ね整合しており、局部破壊耐力評価として有効と考えられる。

4.2. ランナーからの脱落耐力評価

本試験結果においてスタッド引張フランジ側のボードは耐力に影響しないため、ボードを無視しランナーの曲げ耐力のみで脱落を表現する。図 7 に示すように、スタッドと接触するランナーの板を集中荷重下の片持はりとして見做し、板が全長に渡り全塑性に至る時点を脱落と仮定する。このとき試験体の脱落耐力は次式で与えられる。

$$P_u = 2 \frac{\sigma'_y Z_p}{d} = \frac{\sigma'_y w_r t_r^2}{2d} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma'_y=302(\text{N/mm}^2)$: ランナー降伏強度材料試験値、 d : ランナーとスタッドとのクリアランス、 w_r : ランナー全長、 t_r : 板厚である。 $w_r=2000(\text{mm})$ として上式より脱落耐力を算出すると $9.65(\text{kN})$ となり、実験値 $10(\text{kN})$ 前後と概ね整合するため、今後種々のパラメータによる検討を行うことで脱落現象を模擬し得ると考えられる。

5. 動的特性の推定

LGS 壁の動的特性を前述した合成断面の単純支持はりとしてモデル化する。断面の回転慣性・せん断変形・減衰及び試験結果の履歴特性を無視した振動方程式及び固有振動数は次式で表される。

$$E_{eq} I_{eq} \frac{\partial^4 \delta(x,t)}{\partial x^4} + \frac{W}{l} \frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial t^2} = -\frac{W}{l} \ddot{y}(t) \quad (5)$$

$$f_j = \frac{j^2 \pi}{2} \sqrt{\frac{E_{eq} I_{eq}}{W l^3}} \quad (j=1, 2, \dots)$$

ここで、 j : モード次数、 δ : 変位、 x : 変位位置、 t : 時間、 y : 地動変位である。上式より求めた試験体の 1 次固有振動数を表 5 に示す。同

表 4 石膏ボード設定弾性率

材厚 (mm)	方向	弾性率 (N/mm^2)	
		圧縮	引張
21	平行	490	809
	直交	227	165
12.5	平行	311	809
	直交	194	165
9.5	平行	311	776
	直交	194	769

※方向は母材長辺方向に対して示す

表 5 推定固有振動数

試験体	1次固有振動数 (Hz)	
	上方向	下方向
L1	2.67	2.50
L3	2.65	2.48
L4	2.85	2.67
L5	2.34	2.51
M1	4.14	4.45
M2	4.14	4.45
M3	4.15	4.47
S1	4.16	4.49
S2	3.65	3.65

図 6 局部破壊耐力比較

図 7 ランナーからの脱落モデル化

※試験体 L5 は層間変形入力で履歴に乱れが生じ算定不可のため省略

図 8 等価減衰定数の推移

表より、各試験体の固有振動数は概ね $2 \sim 4.5(\text{Hz})$ であり、一般的な中低層建物において LGS 壁は共振する可能性がある判断できる。各試験体を互いに比較すると、全体として全長に対する依存性が大きく、また石膏ボードは重量に比して剛性が低いため、ボード枚数が多いほど長周期化する傾向がみられる。次に、LGS 壁の減衰推定として

$$h_{eq} = \Delta W / 4\pi W_e \quad (6)$$

で定義される試験体の等価減衰定数⁶⁾を図 8 に示す。ここで、 ΔW : 履歴ループ吸収エネルギー、 W_e : 最大変位点割線剛性の弾性エネルギーである。同図より、LGS 壁の減衰性能は履歴に依存するものの $2 \sim 6(\%)$ 程度期待できると考えられる。

6. 結

LGS 壁の面外方向静的加力試験を実施し、その力学的挙動及び耐力を検証した。さらに LGS 壁の力学特性をモデル化することで耐力評価手法の提案及び動的特性の推定を行った。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, AIJ, 2011
- 2) 田村 他: 軽量鉄骨下地間仕切壁の静的加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.985-986, 2006
- 3) 加登 他: 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証, 日本建築学会構造系論文集, No.614, pp.139-146, 2007.4
- 4) 松岡 他: 軽量鉄骨下地間仕切壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, No.632, pp.1857-1864, 2008.10
- 5) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 丸善, 2005
- 6) L.S. Jacobsen: Damping in Composite Structures, WCEE II, pp.1029-1044, 1960

[2011 年 10 月 20 日原稿受理 2012 年 1 月 10 日採用決定]