高靱性・高減衰薄板軽量形鋼造耐力壁の開発とその基本力学性能

DEVELOPMENT OF HIGH-DUCTILITY HIGH-DAMPING SHEAR WALL
FOR STEEL FRAMED HOUSE AND ITS BASIC MECHANICAL PROPERTIES

曾田 五月也*, 脇田 健裕**

Satsuya SODA and Takehiro WAKITA

We developed a shear wall which exhibits high-ductility and high-damping structural performances when used in steel framed houses. The high ductility can be achieved by fastening plywood with drill screws inside the peripheral steel frames, preventing the plywood from dropping out. The high damping capacity can be achieved by installing the frictional energy-absorbing devices between the stud and inserted plywood panel. We conducted a series of static loading tests and a shaking table test. We also conducted analytical studies on 2-story house models, and confirmed that the wall is quite effective both for reducing the number of walls and suppressing the responses to severe earthquake ground motions.

Keywords : Steel framed house, Cold formed steel, Damping property, Shear Wall, Friction Damper

スチールハウス, 薄板軽量形鋼造, 減衰, 耐力壁, 摩擦ダンパー

1. はじめに

薄板軽量形鋼造(通称: スチールハウス)は、板厚 2.3mm 未満の薄板軽量形鋼に、構造用合板等の面材をドリルねじで留め付けた耐力パネルを用いて、壁及び床を構成する工法である¹⁾。20 年ほど前より我が国への導入が始まり、現在は主に 2 階建て以下の低層建築物向けの工法として用いられている。薄板軽量形鋼造による建築物の耐震性は耐力壁のせん断性能に強く依存し、耐力壁に作用するせん断力は主に面材と枠材のドリルねじ接合部の耐力によって負担される。現在薄板軽量形鋼造の一般的な耐力壁面材として使用されている合板及びせっこうボードのドリルねじ接合部は、耐力壁の変形角がおおよそ 1/30[rad]に達すると、ねじの破断及びパンチング(ねじ頭が面材を貫通する破壊)によって急激に耐力を失うため靱性に乏しい²⁾。また、ドリルねじが面材へめり込むことにより、履歴ループが強いスリップ性状を示すため、紡錘型の復元力特性を持つ鉄骨ラーメン構造等と比べると、薄板軽量形鋼造のエネルギー吸収能力は低く、変形の繰り返しによる耐力低下も顕著である。

一般的な薄板軽量形鋼造の耐震性に関する研究としては、河合らの 2 階建て建物モデルを用いた地震応答解析による検証³⁾や、池田らの 1~3 階建て建物モデルによる地震応答特性に関する研究⁴⁾、菅野らの振動台実験による検討⁵⁾等が行われており、これらの研究では進行スリップ形の復元力特性を有するスチールハウス耐力壁は消費できるエネルギー量に上限があり、極めて稀に発生する地震動に対しては安全限界変形を超える応答が生じる可能性が有ることが示されている。

一般的には、薄板軽量形鋼造の耐震性能を向上させるためには、建物全体の壁数を増やして建物の剛性・強度を増すという方法を用

いるが、この方法では地震時に加速度応答が過大となり、建物内収容物の移動・転倒・落下等に起因する重大な被害が発生する恐れがある。また、個々の耐力壁のせん断耐力が増大すると、耐力壁を支えるたて柱や金物、基礎への負担も大きくなる。近年、建築基準法で想定する範囲を超える強い地震動^{付録 4)}が頻発しているが、そのような過酷な地震動に対応するには構造の剛性強度を上げるよりも、むしろ減衰性能を向上させることが優位と筆者は考えて、高減衰構造の一般化を目指して来ている。

従来、薄板軽量形鋼造は 3 階建て迄の建築物への適用に制限されていたが、2012 年の国土交通省告示 1641 号の改定⁶⁾により、4 階建て迄の建築物への適用が可能となった。薄板軽量形鋼造建築物の中層化を目指す上では上述の問題点はさらに顕著となるはずである。

そこで本報では、薄板軽量形鋼造耐力壁の靱性とエネルギー吸収能力を高めることで、建物の剛性及び強度を大幅にアップせずとも、地震時の変形と加速度の何れをも過大となることを抑制することを可能とする構造システムを開発し、その基本力学特性を評価した結果を記す。なお、本論文は日本建築学会大会学術講演^{7)~11)}において発表した内容に新たな分析結果を加え、作成したものである。

2. 面材内挿型耐力壁による高靱性化

2.1 従来型の薄板軽量形鋼造耐力壁の特徴

Fig.1 に国土交通省告示第 1641 号で示される、薄板軽量形構造用耐力壁の一般的な仕様である構造用合板を面材とする耐力壁の面内せん断加力試験を行った結果の荷重変形関係¹²⁾の代表的な例を示す。耐力壁のせん断変形角が 1/30[rad]となる加力中に、Photo 1 に示すように、ドリルねじ接合部のパンチング破壊が発生し急激な耐

* 早稲田大学創造理工学部建築学科 教授・工博

** 早稲田大学理工学研究所 研究院講師・博士(工学)

Prof. Dept. of Architecture, Waseda University, Dr.Eng.

Assist. Prof., RISE, Waseda University, Dr.Eng.

力低下に至った。また、耐力壁の履歴性状はねじ接合部におけるめり込みにより、強い進行型のスリップ性状を示しており、エネルギー吸収能力に乏しいことが分かる。

Fig.1 Load-deflection relation of conventional plywood shear wall⁽¹⁾

Photo 1 Punching failure of a drill screw joint

2.2 面材内挿型耐力壁の基本構成

耐力壁のせん断力に対する靱性を向上させるためには、面材のドリルねじ接合部のめり込みとパンチングを抑制することが有効であると考えられる。そこで Fig.2 に示すように、耐力壁面材を補強用形鋼と共に周辺を構成する枠材の内側に挿入し、形鋼がねじ頭側となるように面材をドリルねじで留めつけることとした。これにより、Fig.3 に示すように、耐力壁にせん断力が作用しドリルねじ接合部に応力が生じる際に、ねじ頭側の鋼板が面材に対するめり込みとパンチングを抑制すると共に、面材の脱落による急激な強度の低下を防ぐ仕様とした。また、内挿面材の上下隅角部を切り欠くことで、耐力壁がせん断力を受け変形する際に、内挿面材の隅角部が水平・鉛直枠材の接合部を破壊することを防止する仕様にした。

Fig.2 Image structure of insertion type shear wall

Fig.3 Mechanisms of shear wall to resist shear force

2.3 面材ねじ接合部の単体性能比較

ねじ頭側を鋼板とした場合の面材ねじ接合部の力学的特性を、その単体試験により検討した。試験体は Table 1、Fig5 に示す 2 種類である。P→S と称する試験体は、ねじ頭側に耐力面材が配置される通常の薄板軽量形構造用耐力壁で用いられる仕様であり、S→P と称する試験体が本研究で提案する面材内挿型耐力壁に用いる仕様である。S→P の試験では、Fig.4, Fig5 に示すように、面材の面外方向への移動を拘束するため、面材両側に配置した形鋼からねじの留付けを行った。加力は正負交番繰り返しとし、終局に至るまで徐々に最大変形を大きくしながら加力した。Fig.6 に試験結果を示す。P→S では変形が 10mm を超えた時点から急激に耐力が低下し、パンチングによる急激な破壊を生じたのに対し、S→P では最大耐力値は低いものの、急激な耐力低下はなく高い靱性を有していることが分かる。Photo 2 は S→P の終局時の状況である。ねじ頭側ではねじの抜け出しがみられるものの、周辺部に大きな損傷は見られない。ねじ先側では加力方向に沿った面材の支圧破壊が見られた。

Table 1 Specimen for drill screw joint test

Name of Specimen	Screw head side material	Screw tip side material	Thread diameter(φ)	Screw head shape	Number of screws	Restraint out of plane
P→S	Plywood(9mm)	Light Gauge Steel (1.6mm)	4.2mm	Wafer	2	○
S→P	Light Gauge Steel (1.6mm)	Plywood(9mm)	4.8mm	Low Profile	2	×

Fig.4 Loading system of drill screw joint test

Fig.6 Load-deflection relations of drill screw joint

Photo 2 Failures of a drill screw joint (S→P specimen)

2.4 面材内挿型実大耐力壁の静的加力試験

面材内挿型耐力壁の力学的特性を実大試験体を用いた静的せん断加力試験により検討する。Fig.7 に試験体の詳細図を示す。試験体は幅 910mm 高さ 2730mm の 1P 耐力壁で、内挿パネルの内部に形鋼を配置し補剛した上で(図中(a))、周辺枠材と内挿パネルをドリルねじで留め付けて構成した(図中(b))。上下枠材(ランナー)とたて枠材(スタッド)は各交点をドリルねじ 1 本ずつで接合した。内挿パネ

ルの面材は上下の切り欠き形状を、台形状とした場合と円弧状とした場合の 2 種類について試験を行い(図中(c))、面材の上下はランナー側からドリルねじで片側 7 本ずつ両試験体とも同様に留め付けた。Fig.8 に試験システム全体図を示す。一般的な薄板軽量形鋼造の 2 階建て戸建住宅を想定し、タイロッドを用いて左右の各縦枠材頭に均等に 6.5[kN]、合計 13[kN]の圧縮力を作用させた状態で加力を行った。Table2 に本試験に用いた入力波の振幅を示す。载荷方法は正弦波の漸増振幅正負交番繰り返しとし、変形角 1/450[rad]から 1/15[rad]に相当する振幅で各 3 回ずつ繰り返した。

Fig.7 Detailed drawings of specimens

Fig.8 Loading System

Drift angle[rad]	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
Displacement[mm]	6.1	9.1	13.7	18.2	27.3	36.4	54.6	91	136.5	182
Frequency[Hz]	0.03							0.01		

Fig.9に内挿型の2種の試験体(面材端部を台形状とした試験体(図中 Trapezoidal-end/実線)、面材端部を円弧状とした試験体(図中 Arcuate-end/黒の破線)と合板を面材とする一般的な仕様の耐力壁(以下合板耐力壁、図中 Conventional Plywood/灰色の破線)の荷重変形関係を重ねて示す。なお、実験結果の変形角(図中 Drift angle)は壁の変形角から柱脚の回転角を除いた真の変形角である(以降も同じ)。合板耐力壁は 1/30[rad]加力時に大きく耐力低下するのに対し、内挿型の試験体は終局変形時まで徐々に低下しながらも最大荷重の 80%ほどの耐力を維持し続けている。Table 3 は各試験体の包絡線から設計用特性値を評価した結果である。塑性率 μ^* が向上したことにより、構造特性係数 D_s^* が小さくなっており、高靱性化の効果が反映されている。破壊形状は 2.3 の単体試験結果と同様に面

材ねじ接合部のねじ先側面材の支圧破壊であり、切り欠き形状の違いについては、台形とした方が初期剛性が高く、また端部ドリルねじ接合部の縁端距離の確保によりその損傷も抑制されるため高靱性化に有利である。

Fig.9 Comparison of Load-deflection relations

	Inserted panel type		Conventional Plywood
	Trapezoidal-end	Arcuate-end	
Maximum strength P_{max} (kN)	8.73	6.96	14.07
Yield strength P_y (kN)	4.14	3.88	8.11
Ultimate strength P_u (kN)	7.83	6.37	12.66
Rigidity K (kN/rad)	1059	987	1032
Ductility factor μ^*	5.10	4.28	2.37
Ductility Reduction Factor D_s^*	0.33	0.36	0.52
$P_u \cdot (0.2/D_s)$ (kN)	4.75	3.50	4.90
$2/3P_{max}$ (kN)	5.8	4.6	9.4
Strength at 1/200rad(kN)	4.57	4.32	5.84
Short-term allowable strength P_a (kN)	4.14	3.50	4.90

* 塑性率 μ^* 及び構造特性係数 D_s^* は付録 2)に示す方法により算出

Fig.10(a)は各変形角時の加力ループにおける 1 サイクル間の吸収エネルギーの評価結果である。各試験体とも 1 ループ目と比較して 2 ループ目の値が低下していることが分かる。また、2 ループ目の各試験体の結果を比較すると合板耐力壁の結果が 1/30[rad]を超えて大きく低下するのに対し、内挿型の両試験体では終局まで増加し続ける結果となった。しかしながら Fig.10(b)に示すように各振幅での等価粘性減衰定数 heq (付録 3) (2 ループ目) は一般的な耐力壁と同様に小さいままであり、減衰性能は大きくは改善されていない。

Fig.10 Comparison of damping capacities

3. 摩擦機構内蔵による高減衰化

3.1 摩擦機構内蔵耐力壁の概要

前章では面材を内挿型とすることによる高靱性化手法を示した。本章ではこの面材内挿型の耐力壁内部にエネルギー吸収機構を設置することでさらに高減衰化する手法を提案する。

Fig.11 に提案する耐力壁の概要図を示す。たて枠材と内挿パネル

の間に摩擦機構(図中右上)を内蔵することで、壁の水平変形時(図中①)に発生するたて枠材と内挿パネル間の相対変位(図中②)を利用し摩擦力(図中③)によるエネルギー吸収性能を付与する仕組みとなっている。本摩擦機構には潤滑被膜処理を施した合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)同士を、トルシア形高力ボルトで締め付けることによって摩擦力(摩擦係数約 0.15)を発揮する機構となっている。

Fig.12 に摩擦機構の単体性能評価試験^{付録 1)}の結果を示す。本摩擦機構が安定したバイリニア型の履歴ループを描き、高いエネルギー吸収能力を有していることが分かる。

Fig.13 に耐力壁の構成詳細図を示す。摩擦機構の締付力導入に用いる M16 トルシア形高力ボルトは、ピンテール部の破断溝の直径を旋盤加工により細くすることで、ピンテール破断時の締付トルクを低減し、摩擦機構が発揮する摩擦力を適切に管理して用いた¹⁾。また、ボルト締付軸力の低下抑制と変形時の復元力特性の安定化を目的とし、ボルト軸部の直径と同じ口径を持つ中空鋼棒(外径 32mm, 口径 16.3mm, 長さ 20mm)を緩み止めスペーサーとして用いている。

Fig.11 Shear wall with built-in friction mechanism

Fig.12 Load-deflection relation of friction device

Fig.13 Details of specimen wall

3.2 摩擦機構内蔵耐力壁の実大静的加力試験

摩擦機構内蔵耐力壁の静的な力学的特性を加力試験により検討する。試験システム・方法は 2.4 と同様である。Fig.14 に摩擦機構内蔵耐力壁と従来型の合板耐力壁の荷重変形関係¹²⁾を重ねて示す。摩擦機構内蔵耐力壁が合板耐力壁と比較して、極めて高い靱性とエネルギー吸収能力を発揮していることが分かる。Table 4 に荷重変形関係の包絡線から算出した設計用特性値の一覧を示す。摩擦機構内蔵耐力壁の最大耐力は合板耐力壁の 2 割り増し程度である一方で、短期許容せん断耐力は 2 倍以上、構造特性係数 D_s は半分以下の数値であり、金物等の接合部に過大な応力を発生させることなく壁数を大幅に減少することが可能になる。Fig.15(a)は 1 サイクルエネルギーの評価結果である。1 ループ目の結果を比較すると摩擦機構内蔵耐力壁が合板耐力壁と比較して非常に高い値で推移し終局変形時まで変形量にほぼ比例して増大し続けていることが分かる。また、2 ループ目の結果においても、合板耐力壁が 1 ループ目と比較して大きく低下するのに対し、摩擦機構内蔵耐力壁は 1 ループ目と同等の値で推移している。Fig.15(b)は heq ^{付録 3)}(2 ループ目)の評価結果であり、摩擦機構内蔵耐力壁が合板耐力壁と比較して、小振幅から大振幅に至るまで極めて高い減衰性能を有することが示されている。

Fig.14 Comparison of Load-deflection relations

Table 4 Evaluation result of design characteristic value

	Built-in friction	Conventional Plywood
Maximum strength P_{max} (kN)	17.03	14.07
Yield strength P_y (kN)	11.10	8.11
Ultimate strength P_u (kN)	15.50	12.66
Rigidity K (kN/rad)	2633	1032
Ductility factor μ^*	9.16	2.37
Ductility Reduction Factor D_s^*	0.24	0.52
$P_u \cdot (0.2/D_s)$ (kN)	12.90	4.90
$2/3P_{max}$ (kN)	11.4	9.4
Strength at $1/200rad$ (kN)	11.09	5.84
Short-term allowable strength P_a (kN)	11.10	4.90

* 塑性率 μ^* 及び構造特性係数 D_s^* は付録 2)に示す方法により算出

Fig.15 Comparison of damping capacities

3.3 摩擦機構内蔵耐力壁の振動台実験¹⁰⁾

摩擦機構内蔵耐力壁の動的な力学的特性を振動台実験により検討する。Fig.16に振動台実験の試験システムを示す。試験体下部は治具を介して振動台上の鉄骨架台と、試験体上部は上部鉄骨梁と固定した。試験体周囲の鉄骨フレームは試験体の面外方向への振動と上部梁の回転を抑制し、リニアスライド上に支持された錘の慣性力が試験体の面内せん断力として作用する試験システムとなっている。錘と周辺フレームの質量を合計した慣性力に寄与する質量の合計は2.69[t]となっており、試験体の短期許容せん断耐力に対する層せん断力係数は0.42である。Table 5に加振スケジュールを示す。全ての加振を同じ試験体で連続して実施した。まず加振番号 1～5 の試験では、徐々に入力レベルを大きくすることで、最大応答層間変形の増大と試験体各部の損傷状況の関係について検討した。加振番号 6 の加振にて試験体の最大応答層間変形が 1/30[rad]を超え、一般的な薄板軽量形鋼造耐力壁の安全限界変形を上回った。加振番号 7,8 では安全限界経験後の加振として、試験体が極大地震を経験した後の強い余震を想定した加振を行った。その後入力エネルギーの極めて大きい地震動 3 波を順に入力し、試験体が終局変形に達するまでの特性を検討した。

Fig.16 System for shaking table test of shear wall

Table 5 Input waves for shaking table test

Test No	Earthquake name・Observational component・Phase	Normalization magnification	PGD [mm]	PGV [cm/s]	PGA [cm/s ²]
1	Public announced wave・Random phase	Lv1	145	16	170
2	The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake・Haga_EW	0.2	43	14	376
3		0.4	86	26	708
4		0.6	130	39	769
5		0.8	173	52	829
6		1.0	216	66	923
7	Public announced wave・Random phase	Lv1	145	16	225
8		Lv2	458	80	652
9	The 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake・Takezawa_EW	1.0	313	79	675
10	The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake・Haga_EW	1.0	216	66	868
11	The 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake・Ojiya_EW	1.0	296	124	1067

Fig.17に各地震動入力時の荷重変形関係を示す。層せん断荷重は試験体上部で計測した加速度に、試験体重量（2.68[t]）を乗じることにより算出した。

どの地震動入力に対しても静的加力試験と同様に安定したバイリニア型の復元力特性を示し、高いエネルギー吸収能力を発揮していることが分かる。(b)の結果は安全限界変形を経験する前後の同一地震波に対する応答の比較である。安全限界を経験後の荷重変形関係では若干の剛性及び耐力の低下が生じており、応答変形が増大していることが分かる。摩擦機構部のボルト締付力が低下し摩擦力が低下したことと、ドリルねじ接合部めり込みによる耐力低下が原因であると考えられる。(c)は最終加振時(TestNo.11)の荷重変形関係であり、1/15[rad]を超える応答となっているが、依然として高い耐力と安定したエネルギー吸収能力を発揮しており、摩擦機構内蔵耐力壁が繰り返しの地震動入力に対しても高い靱性と減衰力を維持し続ける性能を有していることを確認することが出来る。

Fig.17 Load-deflection relations by shaking table tests

4. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した 2 層建物モデルの耐震性能の検討
本章では地震応答解析を用いて、摩擦機構内蔵耐力壁を適用して設計した 2 層建物モデルが有する耐震性を、一般的な合板耐力壁を適用した建物モデルと比較し検討する。

4.1 各耐力壁の復元力特性のモデル化

地震応答解析を行うに当たり一般的な薄板軽量形鋼造耐力壁である合板耐力壁((a)Plywood wall)と、せっこうボード耐力壁

(b)Gypsum wall)の実験結果¹²⁾と、3.2 で示した摩擦機構内蔵耐力壁((C)Built-in friction wall)の実験結果より、その復元力特性を拡張 NCL モデル¹³⁾を用いてモデル化した。Fig.18 に実験結果と作成した解析モデルによる荷重変形関係の比較を示す。各耐力壁ともスケルトンカーブ及び固有ループ共に精度良く模擬していることが分かる。

Fig.18 Comparison of load-deflection relation by test with by analysis

4.2 解析方針

2 階建て建築物を対象に合板耐力壁を適用して設計したモデル(以下、合板モデル)と摩擦機構内蔵耐力壁を適用して設計したモデル(以下、摩擦モデル)の応答を比較し検討する。解析は Fig.19 に示すように 2 質点のせん断質点系モデルにより行い、各階の質量は各階床面積が 70[m²]程度の一般的な戸建て住宅を想定し設定した耐力壁の 1P 当たりの設計値は Table 6 に示す通りで、両モデルとも内装側面材としてせっこうボード耐力壁(片面)を、合板又は摩擦機構内蔵耐力壁と常にも数組み合わせる設計に用いることとした。各層の耐力壁の数量は Ai 分布に基づく設計用せん断力の分布に比例させて配置するものとし、固有周期 T は 0.2 秒(T=0.03H)、地域係数 Z 及び振動特性係数 Rt は共に 1.0 とした。減衰定数 h は 5%(瞬間剛性比例型)とし、時間刻みは 0.002 秒で、Newmark-β 法(β=1/4)によって解析を行った。入力地震波は付録 3)に示す最大速度が 50[cm/s]を超える代表的な観測地震動 32 波とした。初めに、耐震等級 3 相当(C₀=0.3×1.5)となるように設計した両モデルについての解析を行いその応答を比較検討した。次に、建築基準法(ルート 1)を満たすために最低限必要な壁数の 10%を有するモデルについて解析を行い、何れかの層の最大応答層間変形角が各モデルの安全限界変形角(合板モデル:1/30[rad]、摩擦モデル:1/20[rad])を上回る場合にはさらに各層の壁数を 10%増加するという操作を繰り返すことで、各入力地震波に対して何れの層でもその最大応答が安全限界を下回るために必要な壁数を求めた。

Fig.19 2-story lumped-mass model

Table 6 Design characteristic values (Basic unit : 1P(910mm))

Model name	Plywood model		Friction model	
Shear wall	Plywood wall	Gypsum wall	Built-in friction	Gypsum wall
Short-term allowable strength Pa(kN)	4.9	2.05	11.1	2.05

4.3 解析結果

4.3.1 耐震等級 3 モデルの壁数・応答比較

ルート 1 の耐震設計において等級 3 となるように設計した建物モデルについての比較検討を行う。Table 7 に合板モデル(表中 Plywood model)と摩擦モデル(表中 Friction model)において、耐震等級 3 とするために最低限必要な各層の壁の数量を示す。摩擦モデルの壁数は合板モデルの約半分となっており、摩擦機構内蔵耐力壁を用いることで大幅に壁の数量を減らした設計が可能となることを示している。Fig.20 は各地震波入力時の最大層間変形角を比較した結果である。合板モデルでは 32 波中 14 のケースで安全限界変形角を上回るのに対し、摩擦モデルでは 6 ケースに留まっている。Fig.21 は chokubetsu_ew 波入力時の各層の荷重変形関係を重ねて示した結果である。合板モデルでは 2 層の変形が 1 層を大きく上回り安全限界を超えるのに対し、摩擦モデルでは 1 層のバイリニア型の復元力特性が大きくエネルギー吸収をすることで 2 層の応答が抑制されていることが分かる。

Table 7 Number of walls corresponding to seismic grade 3 [×1P(910mm)]

Model name	1F	2F	Total
Plywood model	11.4	5.6	17.0
Friction model	6.0	3.0	9.0

Fig.20 Comparison of the maximum responses of shear drift angle (Seismic grade 3)

Fig.21 Load-deflection relations by analysis[input wave: chokubetsu_ew]

4.3.2 安全限界を下回るのに必要な壁数の検討と応答の比較

Fig.22 は各入力地震波に対して、全ての層の最大応答層間変形角が安全限界変形角を下回るために必要な1層の壁数を比較した結果である。合板モデルの壁数は全ての入力地震波に対して摩擦モデルを上回っており、合板モデルの応答を安全限界変形以下とするためには摩擦モデルの概ね2倍以上の壁数が必要であることが分かる。

Fig.23 は応答が安全限界変形以下となった各モデルの最大応答加速度を比較した結果である。合板モデルの応答は全て摩擦モデルを上回っており、合板モデルでは最大で4000[Gal]を超える応答加速度が生じるのに対し、摩擦モデルでは全て1000[Gal]以下の応答に抑制される結果となった。なお、本検討はルート1によるものであるが、各耐力壁の短期許容耐力Paの評価において $P_u \cdot (0.2/D_s)$ が含まれているため、ルート3による検討を行った場合においても剛性率・偏心率が極端な値とならない限り同様の結果となる。

Fig.22 Comparison of Number of 1F walls required for the response within the safety limit

Fig.23 Comparison of maximum acceleration

5. まとめ

本報では薄板軽量形鋼造耐力壁の高靱性化及び高減衰化手法を提案すると共に、その基本力学特性を実験的に明らかにした。また、提案する摩擦機構内蔵耐力壁を2層建物モデルに適用した場合の耐震性に関する検討を解析によって行った。

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1)耐力壁面材を周辺フレームである薄板軽量形鋼材の内側に挿入し、ドリルねじ頭側に鋼板が配置されるように留め付けることで、ドリルねじ接合部のパンチング破壊と面材の脱落を抑止することが出来るため耐力壁の高靱性化が可能である。
- 2)面材内挿型の耐力壁のたて枠と内挿パネル間に潤滑被膜処理を施

した合金化溶融亜鉛めっき鋼板同士を高力ボルトで締め付けた摩擦機構を設置することで、壁変形時に当該部分に生じる相対変形を利用しエネルギー吸収能力を大幅に向上できることを明らかにした。

3)摩擦機構を内蔵した実大耐力壁の静的加力試験を実施し、従来の合板耐力壁と比較して極めて高い靱性とエネルギー吸収能力を発揮することを示した。

4)摩擦機構内蔵耐力壁の実大振動台実験を実施し、動的な地震動入力時にも静的試験の結果と同様に高い靱性とエネルギー吸収能力を発揮することが分かった。また極大レベルの地震動入力の繰り返しに対しても、高い靱性と減衰力を維持し続ける性能を有することが明らかとなった。

5)摩擦機構内蔵耐力壁を適用した2層建物モデルの耐震性を地震応答解析により検討した結果、基準法で想定する範囲を超える強い地震動入力に対しても安全性を確保するために必要な壁数は、従来の合板を耐力壁とする建物モデルの半分以下であり、かつその際に発生する最大応答加速度も大幅に抑制可能であることが分かった。

本研究では提案する摩擦機構内蔵耐力壁の力学的な特性につき、概念的な検討結果を中心として報告した。施工性を考慮した詳細設計を反映させての適用性の検討結果は次報にて報告の予定である。

謝辞

本研究は早稲田大学理工学研究所プロジェクト研究「建築物の構造デザイン技術の高度化」の一環で、社団法人日本鉄鋼連盟平成28年度鋼構造研究・教育助成事業(代表 曾田五月也)を受けて行った。また、研究の実施にあたり高橋宏幸君、中原政人君、久保和民君、京田隆寛君、斎藤健寛君(元早稲田大学曾田研究室大学院生)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

付録 1) 摩擦機構の単体性能評価試験

摩擦機構単体の力学的特性を把握するために単体性能試験を実施した。試験体は摩擦機構のボルト2本分の締付部である。Ex.Fig.1に試験システム図を示す。加力は変位制御にてEx.Table 1に示すように耐力壁試験時の摩擦機構部変形に相当する各変形を入力値として、0.2Hzの正弦波3回繰り返しにて行った。実験結果の荷重変形関係を本文中Fig.12に示す。

Ex.Fig.1 Loading system of friction device test

Ex.Table 1 Input deformation of test

Drift angle of shear wall[rad]	1/300	1/200	1/150	1/00	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
Deformation of friction device[mm]	1.4	2.1	2.8	4.2	5.6	8.3	13.9	20.9	27.8

付録 2) 履歴ループ面積を考慮した構造特性係数 Ds の評価法

文献¹⁾¹⁴⁾で示される方法に従い、履歴ループの面積を考慮して低減した塑性率(μ)により Ds を算出する。算出式を式(a)と式(b)に示す。

付録 3) 等価粘性減衰定数 h_{eq} の評価¹⁵⁾

繰り返し加力実験によって得られた履歴ループを用いて各ループごとの減衰性能を等価粘性減衰定数 h_{eq} によって評価した。算出式を式(c)に示す。

付録 4) 解析に用いた入力地震動

本報では国内の代表的な観測地震動記録のうち最大速度が 50[cm/s]を超える地震動を、建築基準法で想定する極めて稀な地震動¹⁶⁾の範囲を超える強い地震動として解析に用いることとした。Ex.table 2 に解析に用いた 32 の地震波の諸元を示す。

Ex.table 2 Specifications of input seismic waves

Year of occurrence	Earthquake name	Observation area_direction	PGV (kine)	PGA (gal)
1995	The Southern Hyogo Prefecture Earthquake 兵庫県南部地震	fukiai_ns	126	810
		kobe_ew	72	619
		kobe_ns	83	821
		takatori_ew	128	666
		takatori_ns	134	642
2003	The Tokachi-oki Earthquake十勝沖地震	chokubetsu_ew	112	785
2004	The Mid Niigata Prefecture Earthquake 新潟県中越地震	kawaguchi_ew	133	1676
		takezawa_ew	89	722
		takezawa_ns	101	538
		nagaokashisho_ew	120	706
		nagaokashisho_ns	111	870
		ojiya_ew	130	1308
		ojiya_ns	96	1147
2007	The Noto Hanto Earthquake 能登半島地震	wajima_ew	77	439
		wajima_ns	98	464
		anamizu_ew	99	782
2007	The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake 新潟県中越沖地震	kashiwazaki_ew	80	514
		kashiwazaki_ns	129	667
2008	The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake 岩手・宮城内陸地震	naruko_ns	79	440

Year of occurrence	Earthquake name	Observation area_direction	PGV (kine)	PGA (gal)
2011	The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake 東北地方太平洋沖地震	haga_ew	78	1197
		sendai_ns	84	1517
		furukawa_ew	88	572
		tukidate_ns	117	2700
2016	The 2016 Kumamoto Earthquake熊本地震(4/14)	mashiki0414_ew	133	729
		mashiki0414_ns	112	632
	The 2016 Kumamoto Earthquake 熊本地震(4/16)	ichinomiya_ew	72	294
		nishiharamura_ew	214	770
		nishiharamura_ns	91	628
		mashiki0416_ew	183	825
		mashiki0416_ns	81	573
		kik-mashiki0416_EW	126	1157
		kikuchi_ns	55	429

参考文献

1)The Japan Iron and Steel Federation: Guidebook on cold-formed steel frame structure design second edition, Gihodo publishing, 2014(in Japanese)
(社)日本鉄鋼連盟: 薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き 第 2 版, 技報堂出版, 2014
2)Karatsu Toshikazu et al.: In-Face Shearing Test of Bearing Walls -Test Results- : Study on Properties of Steel-Framed Houses (Part2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan , C-1, pp.981-982, 1998(in Japanese)
唐津敏一, 宮尾俊明, 高木伸之, 河合良道, 清水秀夫: スチールハウス耐力壁の基準耐力を求める面内せん断試験, -試験結果-スチールハウスの諸性能に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.981-982, 1998
3)Kawai Yoshimichi et al.: Study on Performances of KC-TYPE Steel-Framed Houses : Part 4 Seismic Analysis with Resistance Degrading by Cyclic Loading, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan , C-1, pp.1035-1036, 2000(in Japanese)
河合良道, 菅野良一, 二宮淳, 高木伸之:繰返し荷重による耐力低下を考慮した地震応答解析, KC 型スチールハウスの性能に関する研究 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1035-1036, 2000
4)Ikeda Katsutoshi et al.: STUDY ON SEISMIC ENERGY RESPONSE OF STEEL-FRAMED HOUSINGS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ) , Vol. 68 , No. 566, pp.137-144, 2003.4(in Japanese)
池田勝利, 青木博文: スチールハウス構造体の地震入力エネルギー吸収性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 68 巻, 第 566 巻, pp.137-144, 2003.4
5)Kanno Ryoichi et al.: Shaking Table Test of Steel Framed Walls : Study on Various Performance on Steel Framed Houses Part7, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan , C-1, pp.991-992, 1998(in Japanese)
菅野良一, 作本 好文, 宮尾 俊明, 二宮 淳, 河合 直人, 藤本 効: スチールハウス耐力壁の振動台試験 スチールハウスの諸性能に関する研究 その 7, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.991-992, 1998
6)Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notification No. 1641: To determine technical standards necessary for safety concerning the construction method of the structural parts of buildings or buildings of cold-formed steel frame structure construction etc. 2012.9(in Japanese)
国土交通省告示第 1641 号: 薄板軽量形鋼造建築物の建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件, 2012.9
7)Soda Satsuya et al.: Seismic design of steel house with ductile load-bearing panel : Part one: Cyclic loading test on full-scale panels, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureIII, pp.873-874,2012.8(in Japanese)
曾田五月也, 青野裕太, 中原政人: 薄板軽量形鋼造耐力パネルの高靱性化に関する研究, その 1. 実大耐力パネルの正負交番繰返し載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp 873-874, 2012
8)Soda Satsuya et al.: Study on High Damping Steel House : Part1. Repetitive loading tests on full-scale bearing wall, Summaries of

- Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureⅢ, pp.873-874,2013,8(in Japanese)
- 曾田五月也, 久保和民, 中原政人: 薄板軽量形鋼造の高減衰化に関する研究 : その 1. 実大耐力壁の正負交番繰り返し載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp 873-874, 2013.8
- 9)Soda Satsuya et al.: Development of High-Ductility and High-Damping Bearing Walls for Medium-Rise Steel Houses : Part2. Design of medium-rise steel house and seismic performance estimation of seismic response analysis, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureⅢ, pp.1153-1154, 2015,9(in Japanese)
- 曾田五月也, 久保和民, 齋藤健寛: 高靱性・高減衰耐力壁を用いた薄板軽量形鋼造の中層化に関する研究, その 1. 実大耐力壁の正負交番繰り返し載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.1153-1154, 2015,9
- 10)Oiwa Nao et al.: Development of High-Ductility, High-Damping and High-Strength Steel Houses Part1. Shaking table tests on full-scale bearing wall, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureⅢ, pp.845-846, 2016 (in Japanese)
- 大岩奈央, 曾田五月也, 脇田健裕, 京田隆寛, 齋藤健寛, 高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発, その 1. 実大耐力壁を用いた振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.845-846, 2016
- 11)Oiwa Nao et al.: Development of High-Ductility, High-Damping and High-Strength Steel Houses, Part6. Control Methods for tightening axial force of Torque Shear Type High Power Bolt using for frictional force introduction , Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureⅢ, pp.1117-1118, 2017 (in Japanese)
- 大岩奈央, 曾田五月也, 脇田健裕, 齋藤健寛, 菅原良太: 高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発, その 6. 摩擦力導入に用いるトルシア形高力ボルトの締付軸力管理, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.1117-1118, 2017
- 12)Wakita Takehiro et al.: Experimental Study on High Performance Hybrid Structural System for Steel Frame House : Part1 Comparison of Different Bearing Walls, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, structureⅢ, pp.839-840,2009 (in Japanese)
- 脇田健裕, 安達旭宏, 曾田五月也: 高性能ハイブリッド型スチールハウスの開発に関する実験, その 1 各種スチールハウス用耐力壁の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.839-840, 2009
- 13)Matsunaga Hiroki et al.: A UNIVERSAL MODELING METHOD FOR WOODEN SHEAR/NONSHEAR WALLS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No. 639, pp.889-896, 2009.5(in Japanese)
- 松永裕樹, 宮津裕次, 曾田五月也: 木造軸組耐力壁/非耐力壁の汎用モデル化手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 639 号, pp.889-896,2009.5
- 14)The building center of Japan: Evaluation method of horizontal load capacity of building and allowable stress degree of building, building letter, pp.39~42, 2002.3(in Japanese)
- 日本建築センター:建築物の保有水平耐力及び部材の許容応力度の評価方法,ビルディングレター, pp.39~42, 2002.3
- 15)Shibata Akinori: Dynamic Analysis of Earthquake Resistant Structures, Morikita Publishing CO., LTD,2014 (in Japanese)
- 柴田明徳: 最新耐震構造解析 第 3 版, 森北出版株式会社, 2014
- 16)The building center of Japan:Time history response analysis Building performance evaluation business method manual, 2000 (in Japanese)
- 日本建築センター:時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書, 2000

DEVELOPMENT OF HIGH-DUCTILITY HIGH-DAMPING SHEAR WALL FOR STEEL FRAMED HOUSE AND ITS BASIC MECHANICAL PROPERTIES

Satsuya SODA^{*} and *Takehiro WAKITA*^{**}

^{*} Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr.Eng.

^{**} Assist. Prof., RISE, Waseda University, Dr.Eng.

A steel framed house consists of walls and floors made by panels that plywood boards and light-gauge cold-formed steel frames are fastened with drill screws. Seismic performance of steel framed houses mainly depends on force-deformation relation of shear walls. Most conventional plywood shear walls show poor ductility because they may suddenly lose strength triggered by the break of the screw or punching out of the board when deflection angle becomes around $1/30[\text{rad}]$. Therefore the energy absorbing ability of this wall is very low because of its pinching property in load-deflection relations. Since Japan is an earthquake prone country, the use of steel framed houses has been limited to three story buildings until recent years. But the revision of the design code in 2012 made it possible to apply the structure to a medium-rise building up to four stories. However, when we want to build a four-story house using conventional plywood shear walls, the amount of walls often becomes too much, spoiling the flexibility of the construction. In addition, it is a big problem that response acceleration and stress acting on specific parts of a house will become excessive.

In this paper, we first proposed a method of inserting plywood inside the peripheral frames consist of the light-gauge cold-formed steels and fastening it with drill screws. By using this method, it is possible to prevent the punching failure of drill screw joints and the dropout of the plywood. As a result, it was shown by static loading test that the ductility of this shear wall is improved.

Then, we proposed a method to install friction devices that consist of lubricated coated galvanized steel tightened with high-strength bolts between the studs and the inserted panel. This method is intended to make use of energy absorption by frictional force caused by the relative deflection generated between the studs and inserted panel. We conducted a number of the static loading tests on this built-in friction mechanism shear wall and found that it has very high ductility and damping capacity compared with conventional plywood shear wall. As a result of the shaking table tests, it is also confirmed that the wall can hold a stable energy absorbing capacity even when subject to repetition of large amplitude ground motions.

Finally, we investigated the seismic performance of 2-story house models designed with built-in friction mechanism shear walls by earthquake response analyses. In this analytical study, we used seismic waves recorded in Japan with the maximum speed over $50[\text{cm/sec}]$ as waves exceeding the level required by seismic design regulations. We investigated the quantity of walls that can secure safety against these seismic waves comparing with the models designed by using conventional plywood shear walls. As a result of a number of analytical studies, it was shown that the models using built-in friction mechanism shear walls can suppress the responses to severe earthquake ground motions significantly as well as reduce quantity of walls.

(2017 年 7 月 7 日原稿受理, 2017 年 10 月 12 日採用決定)