

スチールハウス耐力壁の減衰性能

—仕上付き壁パネルの動的特性および付加減衰機構の効果—

DAMPING PROPERTIES OF BEARING WALLS FOR STEEL-FRAMED HOUSINGS

—Dynamic behavior of wall panel with finishing and effect of additional dampers—

竹内 徹^{*1}, 丸川 智輝^{*2}

Toru TAKEUCHI and Tomoki MARUKAWA

Seismic performances of steel-framed housings are secured by bearing-wall panels composed of wooden panels or gypsum board with light steel members of 1.0mm thick, fabricated by screw bolts. Their hysteretic characteristics have been tested and modeled for time-history analyses, however, their damping values with finishing against large deformation zones are yet clarified. In this paper, real-size dynamic test of bearing walls are carried out, and their damping performances with finishing and visco-elastic dampers are verified. Their performances are discussed on 3 or 4 story steel-framed housing structures, followed by proposing easy damage evaluation method.

Keywords : Steel-framed housing, Bearing Wall, Damping, Visco-elastic Damper

スチールハウス, 耐力壁, 減衰, 粘弾性ダンパー

1. 序

スチールハウスは枠組壁工法において、枠材を木材から1.0mm前後の亜鉛めっき薄板軽量形鋼に置き換えた住宅構法を呼称したもので、木質系構法から派生した薄板軽量形鋼造建築物の一種である。構造形式は、薄板軽量形鋼で構成される枠組に構造用合板等の面材をドリルねじで接合した耐力壁(以下「スチールハウス耐力壁」と呼称)が水平力に抵抗する壁式構造となっている(図1(a))。本構法は主として3階建て以下の戸建住宅及び集合住宅に使用されてきたが、過密化が進んだ大都市中心部では狭小敷地に2世代住宅を計画する需要が増加し、今後4階～5階に至る架構も検討されることが予想される。このような多層のスチールハウス耐力壁には現在よりも高い耐力とより厳密な動的特性の把握が求められる。又、架構の構成方法は他にも下層に重量鉄骨による剛節架構を用い、上層にはスチールハウスを用いるなどの混合構造化も考えられる。このように高層化あるいは混合化した架構に、従来の住宅の設計に使用されてきた壁率に基づく経験工学的な設計法を適用することには限界があると考えられ、架構及び構成要素の挙動を分析的に把握すると共に、一般の重層架構で使用されている設計法に対応した性能評価が求められている。

スチールハウスに関しては1996年以来、設計法の確立を主題として数多くの解析的・実験的研究が行われ、それらを基に主に3階建て以下の規模を対象とする耐震設計法が提案されている¹⁾²⁾。この

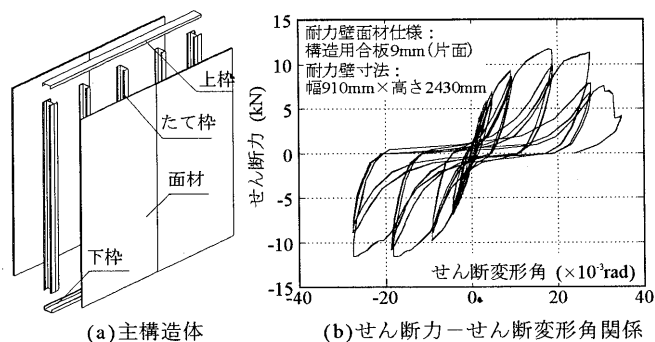


図1 スチールハウス耐力壁

中で、スチールハウス耐力壁の履歴特性は図1(b)に示すように、水平力に対してスリップ型の履歴特性を示し、ある一定の変位を超えると荷重が低下し崩壊に至ることが示されている。これらの実験結果に基づき、河合らは地震応答解析に用いるための耐力壁の履歴モデルを提案し、2階建てスチールハウスの耐震性能を検証している³⁾。又、池田・青木らは更に詳細な耐力壁の履歴モデルを提案し、1～3階建てのスチールハウスに対して地震応答時の入力エネルギー評価を行い、その応答特性を論じている⁴⁾⁵⁾。これら一連の研究では極稀に遭遇する地震に対する応答層間変形角が最大1/30rad程度まで達することが予測され、その場合にはスリップ性状が進行するために構造体の塑性履歴により消費できるエネルギー量に上限値があり、

^{*1} 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

^{*2} 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
大学院生(当時)

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology,
Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology (Previous)

相対的に粘性減衰の設定がエネルギー消費能力に大きな影響を与えることが示唆されている。上記の研究で設定している減衰定数は、実在建物及びスチールハウス耐力壁の常時微動または加振実験⁷⁾に基づき定められているが、これらは微小振幅時の同定結果であり、 $1/50\text{rad}$ に至る大振幅までの減衰特性は明らかになっていない。三宅らは3階建ての住宅用低層鉄骨造建物に対して実大加振実験を行い、層間変形角が $1/40\text{rad}$ 程度に至るまでの外壁や間仕切り壁による減衰性能の調査を行っている⁸⁾が、同研究で行われているALC外壁や非構造材間仕切りを有する鉄骨造建物と、外壁や間仕切り壁を全て構造材として評価するスチールハウスではその減衰特性が大きく異なることが予想される。

本研究では、減衰の主要因を外部摩擦(=仕上げ間の摩擦等)であると仮定し、仕上げの付設に伴う復元力の増大分つまりエネルギー吸収量の増大分を減衰として評価し、その変位及び振動数に対する特性を把握する事を目的とする。具体的には、仕様及び振動条件を変数として設定したスチールハウス耐力壁に対し動的なせん断試験を行い、各試験体の履歴特性を検証すると共に各試験体の試験

結果の比較により、仕上げの付設による耐力壁部分の減衰効果を検討する。又、連続する面材の競り合い部に粘弾性ダンパーを付設した場合の減衰効果についても検討する。実験により得られた減衰の評価を用いて3～5層の中層スチールハウス及び重量鉄骨造との混合構造建築物の地震応答に与える減衰の影響を評価すると共に応答評価手法の検討を行う。

2. 動的せん断試験による耐力壁の履歴性能及び減衰性能

2.1 試験体概要

試験体は高さ 2400mm ×幅 910mm ×2のスチールハウス耐力壁を対象に、表1に示す面材種類、仕上げの有無、粘弾性ダンパーの付設個数、入力波振動数の4つを変数として計9体を設定する。面材種類に関して、スチールハウスでは構造用合板+石膏ボードを用いる場合が最も一般的であるが、中層建物における耐火規定を満足するために、スラグセメントパーライト板+強化石膏ボードの組み合わせについても検討する。仕上げは図2のようなスチールハウスの設計要綱⁹⁾に示される標準的な乾式仕上げを想定し、外装は屋外側の面材に直接断熱材を接着し、外壁用スラグセメントパーライト板 16mm を横張りで枠材に木胴縁を通して接合する。内装は耐力壁の屋内側の面材を接着剤及びステーブルを用いて重ね付けする。入力波振動数に関しては、事前に行った予備解析によると、3～5層の中層スチールハウスの固有周期が架構の塑性化を考慮しても1～3Hz程度の範囲にあることから、 1Hz と 3Hz の2種類を設定した。

2.2 粘弾性ダンパーを付設した耐力壁

粘弾性ダンパーは耐力壁に付加減衰効果を与えるために提案するものであり、図3及び写真1に示すように 3mm 厚の粘弾性体と鋼板

表1 試験体一覧

試験体名	面材種類		ダンパー 付設個数	仕上げ	入力波 振動数(Hz)
	屋外側	屋内側			
PG-N-N1	合板 9mm	石膏 12.5mm	0	無	1
PG-N-N3					3
PG-N-F1					1
PG-N-F3			5	有	3
PG-V5-F1					1
PG-V5-F3					3
PG-V3-F1	セメント板 12mm	強化石膏 15mm	3	有	1
STG-N-F1			0		1
STG-V5-F1			5		

*面材種類 合板：構造用合板(JIS 1類2級) 石膏：石膏ボード(JIS A 6901) セメント板：スラグセメントパーライト板(重量 10kg/m^2) 強化石膏：強化石膏ボード(JIS A 6901)
*仕上げ方法 外装：木胴縁 25mm ×断熱材 25mm ×留付金具+外壁用スラグセメントパーライト板 16mm (横張り, 重量 19kg/m^2) 内装：耐力壁の屋内側面材の重ね付け(ステーブル留付)

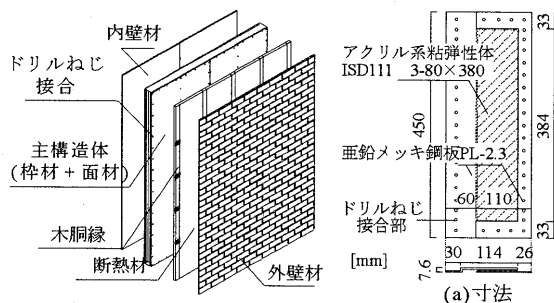


図2 仕上げ方法概要

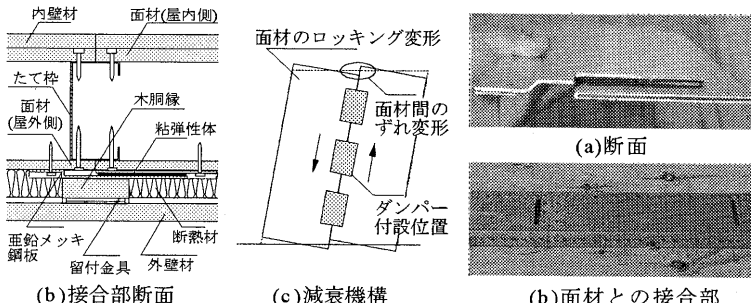


図3 粘弾性ダンパー

写真1 粘弾性ダンパー

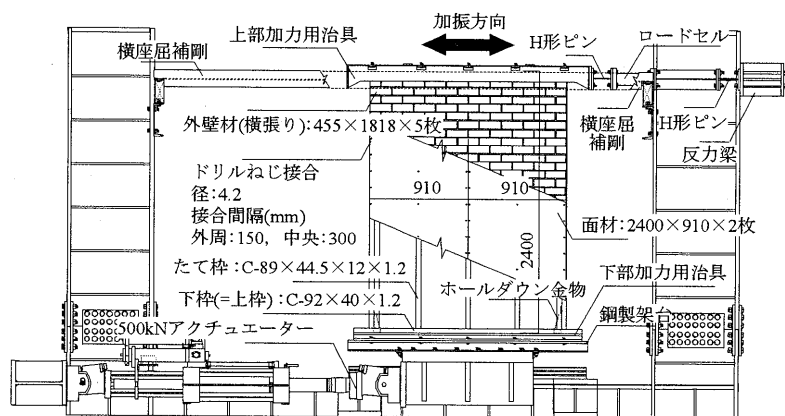


図4 実験セットアップ

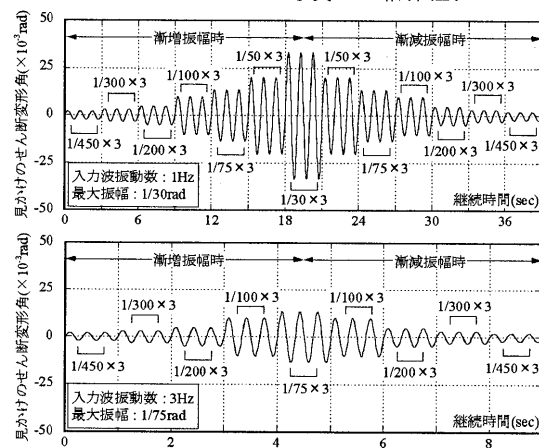


図5 载荷履歴

で構成され、ドリルねじにより現場で簡便に付設することを想定している。減衰機構としては、図3(c)に示すように耐力壁のせん断変形に伴い面材がロッキング変形するために生じる2枚の面材間のずれ変形を利用し、この位置にダンパーを付設することで付加減衰効果を発揮させる。粘弾性ダンパーの付設個数は、粘弾性体を Kelvin-Voigt モデル、耐力壁を弾性ばねモデルでモデル化し、試験体の振動数が1Hzで粘弾性体の温度が25℃の時、せん断変形角が1/150radに達する場合で14.4%、1/150radに達する場合で34.2%の理論上の等価減衰を期待して5個と設定する。併せて、面材のずれ変形の剛性とダンパーの剛性のバランスを勘案してダンパー量を5個から3個へ

表2 基準耐力一覧

試験体名	最大荷重 P_{max} (kN)	1/300時 荷重 P_{300} (kN)	降伏荷重 P_y (kN)	降伏点 変位 R_y' (mm)	せん断 剛性 K_y (kN/mm)	終局 耐力 P_u (kN)	終局 変位 R_u (mm)	塑性 倍率 μ	構造 特性 係数 D_s	短期許容 せん断耐力 P_o (kN)
PG-N-N1	33.88	16.16	20.24	4.84	4.18	-	-	-	-	16.16
PG-N-F1	47.08	19.26	26.03	5.32	4.89	43.12	33.33	3.78	0.39	19.26
PG-V5-F1	52.20	19.39	27.14	5.67	4.79	46.03	30.70	3.19	0.43	19.39
PG-V3-F1	55.03	18.55	28.20	6.43	4.38	48.56	33.33	3.01	0.45	18.55
STG-N-F1	56.95	24.93	32.85	4.99	6.58	52.14	27.01	3.41	0.41	24.93
STG-V5-F1	62.88	25.95	32.31	4.86	6.65	54.87	24.44	2.96	0.45	24.36
PG-N-N3	-	16.91	16.91	3.33	5.07	-	-	-	-	-
PG-N-F3	-	18.89	18.89	3.33	5.67	-	-	-	-	-
PG-V5-F3	-	20.17	20.17	3.33	6.05	-	-	-	-	-

減らし、面材ファスナーの外周部において、両面材の競り合い部のみ接合間隔を300mmとしたPG-V3-F1も設定する。ダンパーと面材との接合に関しては、上部プレート及び下部プレートと面材をそれぞれ19本以上のドリルねじで接合し、更に補助的に強力両面テープで接着する。

2.3 載荷方法

図4に実験セットアップを示す。載荷は試験体の水平変位を高さで除した見かけのせん断変形角で制御し、図5に示す動的な正負交番繰り返し載荷を行う。最大振幅は入力波振動数が1Hzの場合は1/30rad, 3Hzの場合は1/75radと設定し、1/450rad～最大振幅(漸増振幅), 最大振幅～1/450rad(漸減振幅)の範囲で、正弦波を各振幅で3サイクルずつ入力する。但し、PG-N-N1は漸増振幅時の1/50radで加振を終了した。載荷時温度は25～28℃であった。なお、粘弾性体は温度依存性があることが知られており、本環境温度は通常の設計範囲中、もっとも粘弾性体の減衰効果の少ない条件となっている。

2.4 仕様及び振動条件に伴う基準耐力の変化

静的なせん断試験によるスチールハウス耐力壁の評価法として最も一般的な浜田らの手法を用いて、基準耐力を評価したものを表

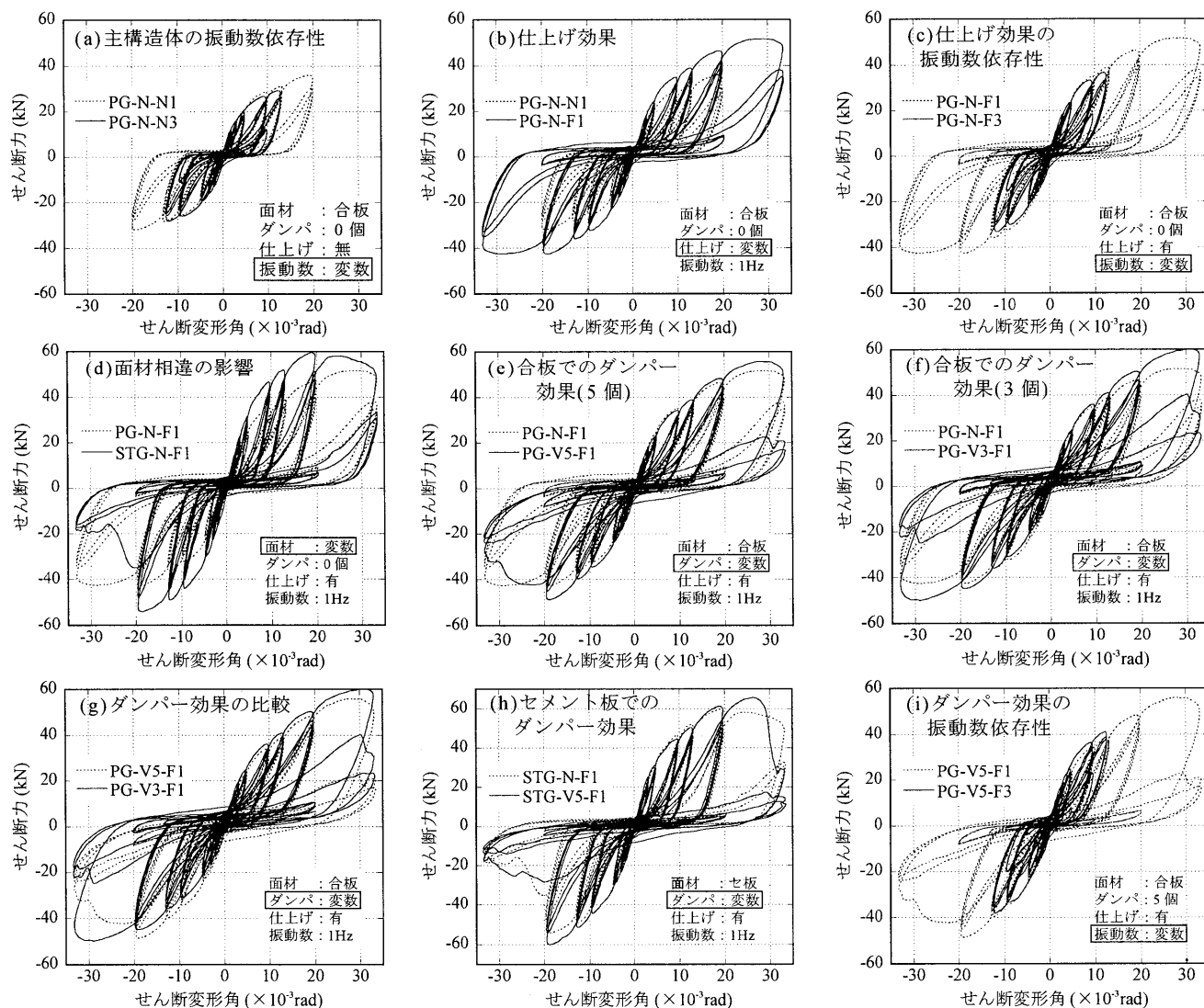


図6 せん断力-せん断変形角関係の比較

2に示す。振動数が3Hzのものは1/300rad時を降伏変位としている。同表より、仕上げの付設、仕上げ+ダンパーの付設、面材の相違及び振動数の増加に伴って、剛性は増大する事がわかる。PG-V3-F1の剛性が特に低いのは、面材ファスナーの外周一部の接合間隔を他の試験体の2倍としたためである。

2.5 仕様及び振動条件に伴う履歴特性の変化

図6に仕様及び振動条件が異なる試験体間の履歴ループの比較を示す。履歴ループはせん断力-見かけのせん断変形角関係で示す。図6(a)によれば、1/100rad程度の範囲では主構造体(枠組+面材)の履歴特性は振動数に依存しない。図6(b)によれば、1/200rad程度から既に仕上げ効果が現れ、1/30radに至る終局状態まで安定したエネルギー吸収性能を示す。図6(c)によれば、仕上げ効果の振動数依存性は微小であると考えられる。これは、仕上げ効果は外装材とその接合部近傍における摩擦により生じ、変位履歴に強く依存するためと考えられる。図6(d)によれば、面材としてスラグセメントパーライト板(以下セメント板)+強化石膏ボードを用いた場合、構造用合板+石膏ボードと比較して耐力は向上するが、一方で脆性的になる傾向が見られる。図6(e)によれば、構造用合板にダンパーを5個付設した場合、1/50radを越えた付近で僅かに負担せん断力は増大しダンパー効果が見られるが、負側の1/30radに至る前に既に耐力低下を生じる。これは粘弾性体の剛性が面材のずれ変形の剛性を大きく上回ったために、面材外周部を枠材と接合していたドリルねじの抜け

出しが先行し、ダンパーを付設した2枚の面材が加振時に一体となってロッキング変形して、ダンパーが有効に機能しなかったためと考えられる。その一方で、図6(f)によればダンパー量を5個から3個にすることで逆に高いダンパー効果が現れる。加振中も外見上はPG-V3-F1のずれ変形が顕著であった。図6(h)によれば、セメント板にダンパーを付設した場合は更に脆性的になり、1/100radに満たない範囲で耐力低下を生じている。図6(i)によれば、粘弾性体の減衰効果の速度依存性により1/200rad程度からダンパー効果が確認できる。

2.6 減衰の影響の評価

試験体に1周期分の振動が入力された場合の履歴消費エネルギー ΔW は履歴ループの1サイクルで囲まれる面積で与えられる。ここでは減衰による消費エネルギーを、主構造体(枠組+面材)の履歴消費エネルギー ΔW_m と仕上げ付設時の履歴消費エネルギー ΔW_f の差分 $\Delta W_f - \Delta W_m$ で定義し、図7に示す等価減衰定数 h_{eq} で評価する。更にダンパーを付加した場合の減衰による消費エネルギーを主構造体の履歴消費エネルギー ΔW_m と仕上げ+ダンパー付設時の履歴消費エネルギー ΔW_d の差分 $\Delta W_d - \Delta W_m$ で定義し、図7に示す等価減衰定数 h_{eq} で評価する。減衰定数を規準化するための剛性としては、図7中の最大点等価剛性に加えて応答解析時に頻繁に用いられる初期剛性を設定する。評価対象は構造用合板と石膏ボードを用いた耐力壁のみとし、漸増振幅時の1/50radまでの範囲で検討する。

初期剛性を用いて規準化した場合の仕上げ及び仕上げ+ダンパー相当の等価減衰定数を図8に示す。変形が増大するにつれて等価減衰定数は減少するために、減衰定数を一定値で評価することは難しい。一方、図9に示す最大点等価剛性で規準化した場合は、変形が増大しても等価減衰定数は増減を繰返しながら僅かに増加する。本研究で検討する3層～5層の中層スチールハウスの固有振動数は架構の塑性化を考慮しても概ね1Hz～3Hzの間に分布する事から、図9に示すように耐力壁単体の減衰としては、最大点等価剛性に対して仕上げ相当の等価減衰定数を概ね $h_{eq}=2\%$ 、仕上げ+ダンパー相当の減衰効果を概ね $h_{eq}=4\%$ と評価する事が出来る。

2.7 粘弾性ダンパーの付設に関する検討

図10に仕上げ及びダンパーを付加しない場合の面材ずれ変形の履歴を各面材が剛体としてロッキング変形すると仮定した理論値と比較して示す。これより、現実の耐力壁における面材ずれ変形は振動数によらず理論値の6割程度になる事がわかる。又、振動数が3Hzの場合は入力速度が大きいために面材と枠組の挙動の間に位相差が生じ、各サイクルの最大振幅後に面材間のずれ変形が残っている。漸増振幅時はある程度損傷が進んだ状態で、一度経験した振幅を再

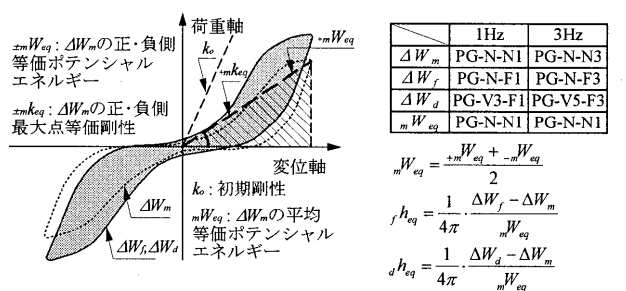


図7 等価減衰定数の算定法

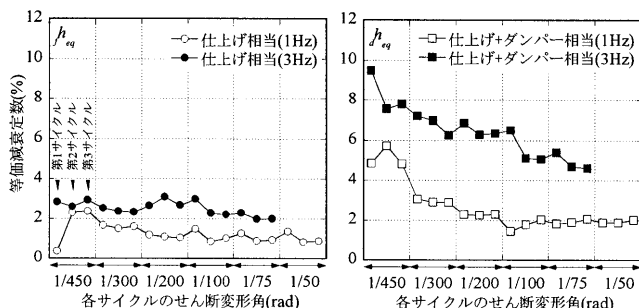


図8 仕上げ及びダンパー相当の減衰効果(初期剛性)

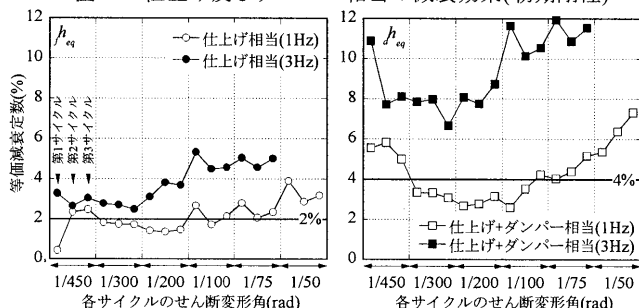


図9 仕上げ及びダンパー相当の減衰効果(最大点等価剛性)

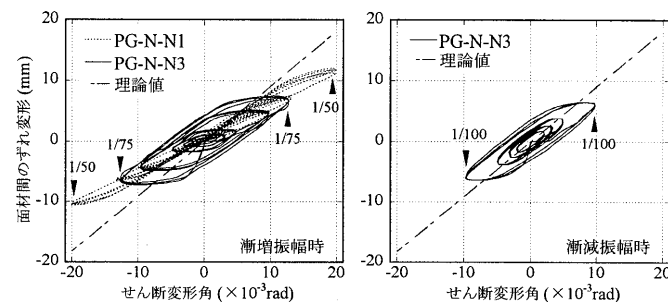


図10 面材間のずれ変形量

度受けるために、接合部強度が低下し、ずれ変形量は漸増振幅時と比較して大きくなる。

粘弾性ダンパーを付加した場合、粘弾性体の剛性により面材ずれは拘束されるため、ダンパーを付加しない場合と比較して更に面材ずれは減少すると考えられる。粘弾性体の剛性が大きい場合はずれ変形を拘束し、逆に剛性が小さければ十分な付加減衰効果を期待できないため、面材のずれ変形モードの剛性・耐力と粘弾性体の剛性・復元力のバランスより最適な粘弾性体量が存在すると考えられる。尚、本研究ではダンパー接合部周辺の面材には特に大きな損傷が見られなかったことから、本研究の範囲内では粘弾性ダンパーと面材の接合部は十分な強度を有する事が確認された。

3. 地震応答解析による耐震性能評価

3.1 解析概要

前章で示した減衰の評価を踏まえ、中層スチールハウス及び重量鉄骨造との混合構造建築物の地震応答に対する減衰の影響を検討する。検討対象は都市部などの過密地域に建設される3層～5層の狭

表3 解析モデル設計値一覧

質点数	層数	モデル名称	構造形式	層重量 W_i (kN)	初期剛性 K_o (kN/mm)	保有耐力 Q_u (kN)	モデル名称	構造形式	層重量 W_i (kN)	初期剛性 K_o (kN/mm)	保有耐力 Q_u (kN)
3	3	3SH	SH	65	2.6	35.1	1S2SH	SH	65	2.7	36.3
	2		SH	110	5.3	72.5		SH	110	5.5	75.5
	1		SH	110	7.2	98.3		S	150	5.8	249.1
4	4	4SH	SH	65	5.2	37.6	1S3SH	SH	65	3.1	41.6
	3		SH	110	10.6	76.9		SH	110	6.3	85.2
	2		SH	110	14.6	105.9		SH	110	8.7	118.3
5	5	5SH	SH	110	17.4	126.6		S	150	7.6	305.5
	4		SH	65	5.8	42.2	1S4SH	SH	65	5.9	43.2
	3		SH	110	11.8	85.4		SH	110	12.0	87.4
5	3	SSH	SH	110	16.3	118.4		SH	110	16.8	121.7
	2		SH	110	19.8	143.7		SH	110	20.5	148.6
	1		SH	110	22.3	161.9		S	150	7.5	305.6

表4 スチールハウスの復元力特性モデルの設定値

片面、幅910mm	降伏荷重 P_b (kN)	降伏点変位 R_p (mm)	k_{ac}	d_{ac}	U
構造用合板	6.26	3.99	0.2	0.80	1.30
石膏ボード	2.50	1.56	0.1	0.85	2.60
スラグセメントバーライト板	6.02	1.60	0.1	0.90	0.55
強化石膏ボード	2.62	1.33	0.1	0.95	0.90

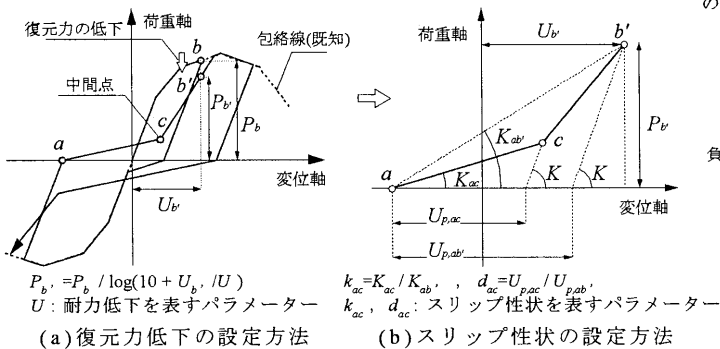


図13 スチールハウスの復元力特性モデル

小住宅として、図11に示す想定建物の平面・立面を基にスチールハウスの設計要綱¹²⁾に準じて設計した解析モデルの設計値一覧を表3に示す。設計した解析モデルは、剛床を仮定し構造物全体の曲げ変形を無視することで、図12に示す質点系せん断ばねモデルとする。スチールハウスの層の復元力特性モデルは図13に示す繰返し履歴による復元力の低下を考慮したモデル³⁾を設定し、重量鉄骨造の層はバイリニアモデルとする。解析では変数として、減衰の評価法(減衰マトリクスの作成法)、減衰定数、及び入力地震波を設定する。減衰の評価法として、スチールハウスの層は初期剛性比例型減衰、瞬間剛性比例型減衰、及び後述する最大点剛性比例型減衰を設定し、混合建築物の解析を行う場合の重量鉄骨造の層は初期剛性比例型減衰で減衰定数 $h=2\%$ として、非比例型の減衰を設定する。減衰定数として、各評価法において2, 4, 6%の3種を設定する。入力地震波は1952年カーンカウンティ地震 Taft 記録EW成分, 1968年十勝沖地震八戸記録EW成分, 1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分の3種の実地震波を設定し、最大速度を50cm/sで規準化する。 P - Δ 効果は考慮しないものとする。数値計算手法は平均化速度法として、時間刻みは0.002(sec)とする。

3.2 減衰マトリクスの作成法

地震応答解析で頻りに用いられる減衰モデルとして、初期剛性比例型減衰及び瞬間剛性比例型減衰がある。初期剛性比例型減衰は、大変形領域における剛性低下が激しいスチールハウスにおいては過度の減衰評価となる可能性が高く、瞬間剛性比例型減衰では大変形

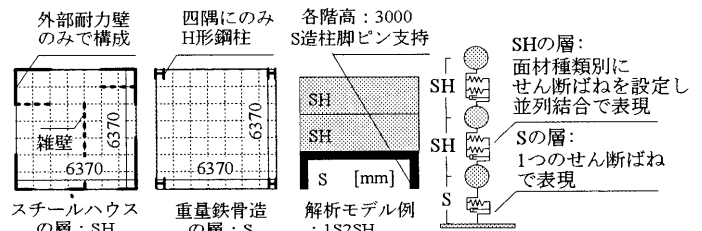


図11 想定建物の平面・断面

図12 解析モデル

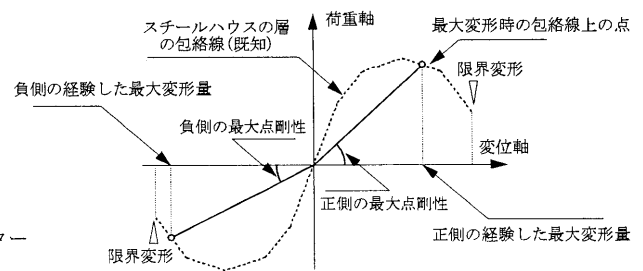


図14 最大点剛性の概要

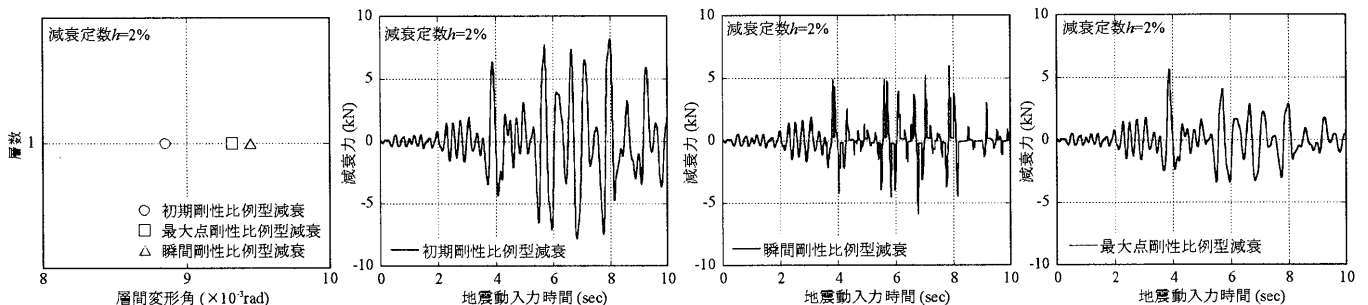


図15 減衰マトリクスの作成法による減衰力の相違

領域において復元力特性モデルの接線剛性が負勾配に至り、減衰力が変形を促進させる方向に作用する可能性がある。

そこで、本研究ではスチールハウスの減衰性能を表現する減衰モデルとして最大点剛性比例型減衰を提案する。最大点剛性比例型減衰は、スチールハウスの履歴特性が復元力特性における包絡線上のそれまでに経験した最大変形点に大きく依存することに注目した上で、減衰が構造体の損傷程度に依存すると考え、更にその損傷程度は上述の最大変形点で表現されると考えたものである。図14に示すように、スチールハウスの復元力特性における包絡線は変位履歴によらず同形状で表現され、同包絡線上のそれまでに経験した最大変形点と原点を結ぶ割線剛性で最大点剛性を定義する。スチールハウスの各層の最大点剛性を求めた後、通常の数値計算で用いる剛性マトリクスとは別に最大点剛性マトリクス $[K_s]$ を作成し、式(1)により減衰マトリクス $[C]$ を作成する。

$$[C] = \frac{2h}{\omega_1} [K_s] \quad (1)$$

ここで、 $[K_s]$ ：最大点剛性マトリクス、 ω_1 ：固有円振動数

最大点剛性は実験における最大点等価剛性に対応しているため、最大点剛性比例型減衰は実験により得られた減衰の評価を最もよく表現できると考えられる。但し、後述する検討でスチールハウス全体の減衰を実験における評価に基づき減衰定数 $h=2\%$ で最大点剛性比例型とした場合でも、その値は仕上げ付耐力壁の振動試験により確認された下限値であり、スチールハウス全体の減衰を安全側に評価した値となっている。なお1次等価固有周期比例型の減衰で

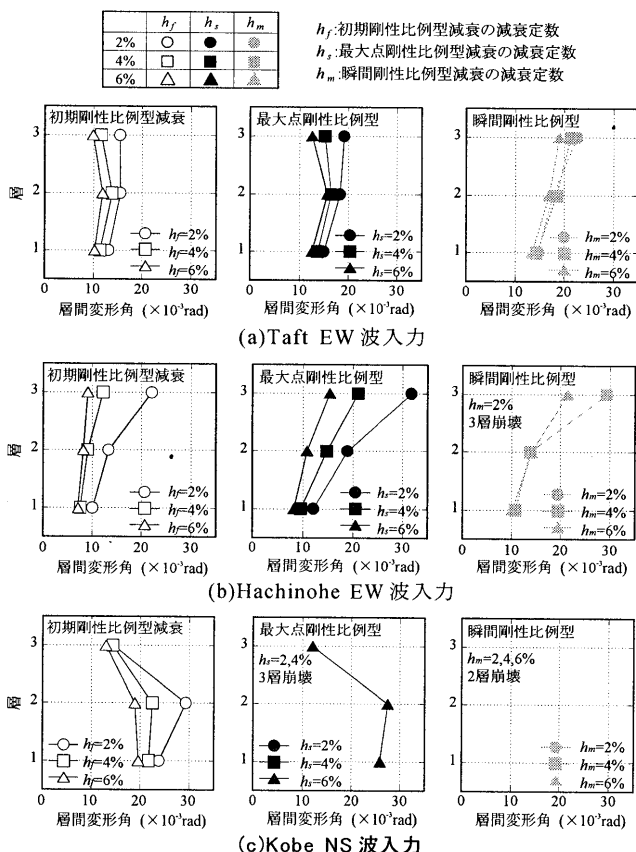


図16 最大応答層間変形角(3層スチールハウス)

あるため、高次モードについては過大な減衰を与える可能性がある点は留意が必要である。

以上の減衰の評価を用いて3層のスチールハウスに対し、減衰定数 $h=2\%$ として減衰マトリクスの作成法による減衰力の相違を検討する。図15に示すように、初期剛性、最大点剛性、瞬間剛性比例型減衰の順に減衰力は大きくなっている。本研究では減衰力を、数値計算において式(2)に示すように累積速度を用いて算定している。

$$\{F_d\} = [C] \cdot \sum \{\Delta \dot{x}\} \quad (2)$$

ここで、 $\{F_d\}$ ：減衰項の累積力、 $\sum \{\Delta \dot{x}\}$ ：累積速度(現在の速度)

瞬間剛性比例型減衰を設定した場合、接線剛性の変化に伴い減衰マトリクスは不連続に変化するため、同様に減衰力も不連続に変化することに対して梁川らは疑問を呈している¹¹⁾。これに対して、最大点剛性比例型減衰では塑性化が進行するにつれて順次、剛性は低下する事から減衰力は連続的な値を示す。

3.3 中層スチールハウスの耐震性能

図16に3層スチールハウスの最大応答層間変形角、図17及び図18に減衰定数 $h=2\%$ の場合の4層及び5層スチールハウスの最大応答層間変形角を示す。図中では層の最大応答変形角が限界変形角 $1/30\text{rad}$ を超えた時点を崩壊として判定している。前章で得られた減衰の評価を設定しKobe NSを入力した場合は、他の地震波入力時よりも総じて応答が大きく、ダンパーを付設した場合でも崩壊に至る可能性が高い。初期剛性比例型では層間変形角が $1/30\text{rad}$ 以下に収まる場合でも、最大点剛性比例型や瞬間剛性比例型の減衰評価では崩壊に至るケースが見られる。又、初期剛性及び最大点剛性比例型減衰の場合は、減衰定数の設定値により最大応答変形角が大きく変化する傾向がある。総じて、今回の検討範囲内では、概ね最大点剛性比例型減衰は瞬間剛性比例型と初期剛性比例型との間の応答値を与えると言える。

次に以上の特性をエネルギーの収支より検討する。秋山は建物に入力されるエネルギーに関して、損傷に寄与するエネルギーを式(3)に示すように定義している¹²⁾。

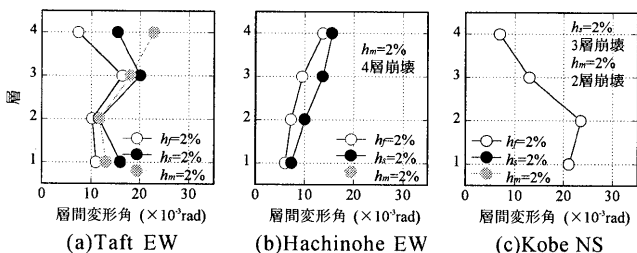


図17 最大応答層間変形角(4層スチールハウス、減衰定数 $h=2\%$)

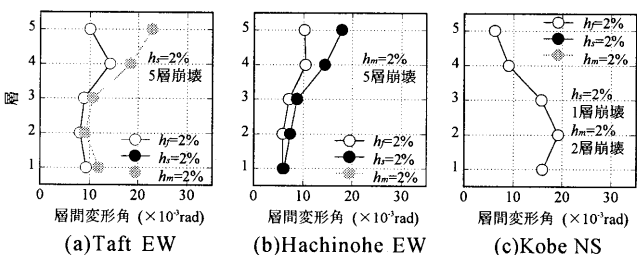


図18 最大応答層間変形角(5層スチールハウス、減衰定数 $h=2\%$)

$$E_D = E - W_h \quad (3)$$

ここで、 E_D ：損傷に寄与するエネルギー、 E ：エネルギー入力(地震動により建物に入力されるエネルギーの総計)、 W_h ：減衰による消費エネルギー

エネルギー入力の速度換算値、崩壊に至る場合の損傷に寄与するエネルギーの速度換算値、及びエネルギー入力に対する損傷に寄与するエネルギーの比率を各モデル別に図19、図20、図21に示す。速度換算値は質量として等価質量(総質量×0.8)を用いて算定する。

崩壊に至る場合は地震波入力時間が短くなり、エネルギー入力速度換算値は減少する傾向が見られるが、概ね減衰の評価によらず入力地震波によって一定の値を示し、上限は180cm/s程度と評価できる。一方、崩壊に至る場合の損傷に寄与するエネルギーを建物で吸収可能なエネルギーの最小値と考えれば、その下限は125cm/s程度で評価できる。又、エネルギー入力に対する損傷に寄与するエネルギーの比率は地震波によらず減衰評価法ごとにほぼ一定の比率で評価できる。よって、中層スチールハウスにおいて、減衰による消費エネルギーを特定できれば、エネルギー入力から減衰による消費エネルギーを減じた値と建物で吸収可能なエネルギー量を比較することで建物の損傷レベルを評価できる。

3.4 混合構造建築物の耐震性能

図22、図23及び図24に減衰定数 $h=2\%$ の場合の3層、4層及び5層の混合構造建築物の最大応答層間変形角を示す。最大応答層間変形角に関して、同じ層数のスチールハウスと混合構造建築物を比較すれば、混合構造の場合が一様に応答値が大きい。スチールハウスの設計要綱¹²⁾に準拠して各層を最低限の耐力で設計した場合、最下

層の重量鉄骨造では層間変形角の規定を満足させるために保有耐力がスチールハウスの層と比較して過度に大きくなり、重量鉄骨造の層では殆ど塑性域に達していない。そのためエネルギー消費は主に

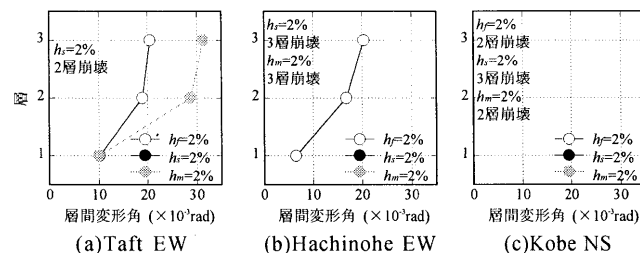


図22 最大応答層間変形角(3層混合構造建築物, 減衰定数 $h=2\%$)

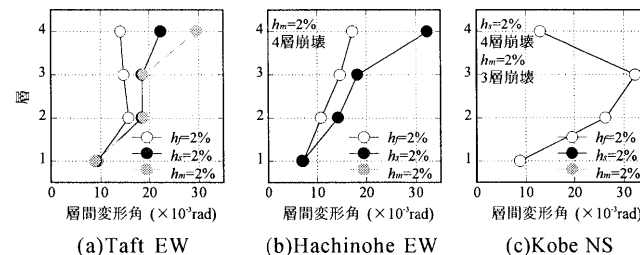


図23 最大応答層間変形角(4層混合構造建築物, 減衰定数 $h=2\%$)

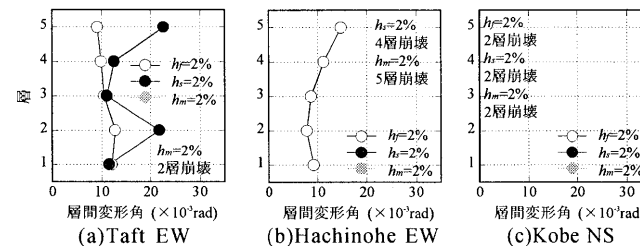


図24 最大応答層間変形角(5層混合構造建築物, 減衰定数 $h=2\%$)

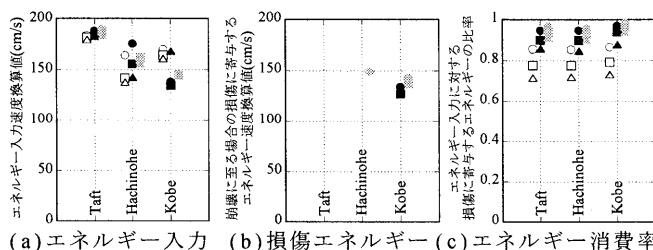


図19 エネルギーに関する応答性状(3層スチールハウス)

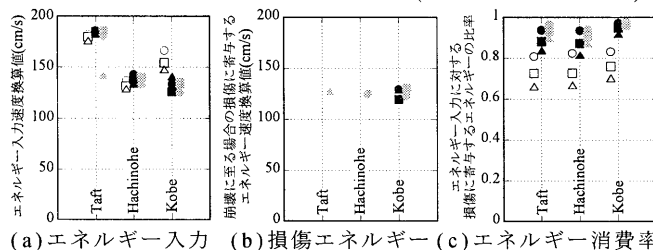


図20 エネルギーに関する応答性状(4層スチールハウス)

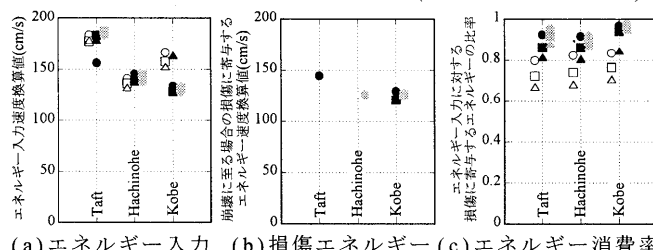


図21 エネルギーに関する応答性状(5層スチールハウス)

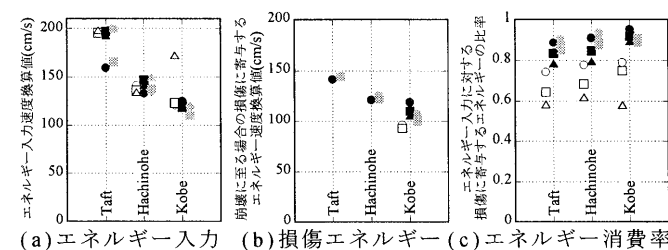


図25 エネルギーに関する応答性状(3層混合構造)

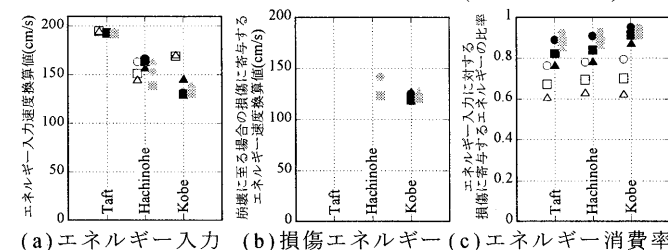


図26 エネルギーに関する応答性状(4層混合構造)

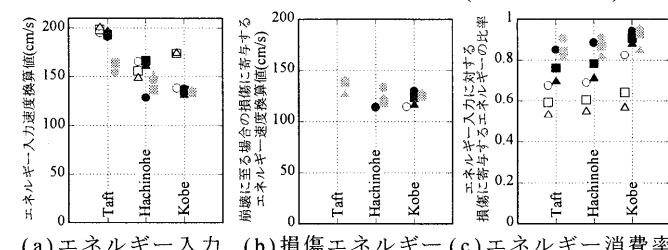


図27 エネルギーに関する応答性状(5層混合構造)

スチールハウスの層で行い、全層でエネルギーを分配する全層スチールハウスのモデルと比較して応答値が増大すると考えられる。

エネルギー入力速度換算値、崩壊に至る場合の損傷に寄与するエネルギーの速度換算値、エネルギー入力に対する損傷に寄与するエネルギーの比率を各モデル別に図25、図26、図27に示す。エネルギー消費は主にスチールハウスの層で行っているため、エネルギーに関する応答性状は全層スチールハウスの場合とほぼ同様な傾向が見られ、エネルギー入力速度換算値の上限は200cm/s、建物で吸収可能なエネルギーの下限は100cm/s程度、エネルギー入力に対する損傷に寄与するエネルギーの比率は地震波によらず減衰評価法ごとにはば一定の比率で評価できる。よって、スチールハウスの設計要綱¹²⁾に準拠して各層が最低限の耐力を満足するように設計した場合の混合構造建築物は、中層スチールハウスと同様な手法により損傷程度を評価できる。

従って、低層部を重量鉄骨造にした場合、この部位に付加減衰機構(ダンパー)を付設することにより、スチールハウス部の損傷を制御することも可能と考えられる。

4. 結

板厚1mm程度の薄板軽量型鋼と構造用合板を組み合わせたスチールハウスの耐力壁について、仕上げや粘弾性ダンパーを設置した状態での実大動的せん断試験を行い、仕上げやダンパーに相当する減衰効果を調査した。又、得られた減衰の評価を用いて3～5階の中層スチールハウスに関するエネルギー収支を含む耐震性能を検討した。同様な手法を用いて、スチールハウスと重量鉄骨造との混合構造の耐震性能に関しても検討した。

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 振動実験において、主構造体である耐力壁に仕上げ及び粘弾性ダンパーを付設した時の履歴消費エネルギーの増加分を等価減衰定数として評価した。その結果、耐力壁単体での等価減衰定数は最大点等価剛性に対し、仕上げのみで2%、仕上げ+ダンパーを付設した場合は4%程度が期待できる。
- 2) 粘弾性ダンパーを5個付設した場合、粘弾性体の剛性・復元力が面材の定着剛性・耐力を上回ったため、連続する2枚の面材が一体としてロッキング変形し有効な減衰効果が得られなかった。粘弾性ダンパーを3個付設した場合、想定していた各面材ごとのロッキング変形が発現し、有効な減衰効果が得られた。
- 3) 振動実験によれば、耐力壁の履歴特性に対応する減衰モデルとして初期剛性比例型とした場合は、損傷による剛性低下後に過大な減衰評価となる。一方、地震応答解析によれば、瞬間剛性比例型では大変形領域で過小な減衰評価となる。以上に対し、実験結果を最もよく表現する減衰モデルとして、応答解析では最大点剛性比例型減衰を提案した。
- 4) 地震応答解析によれば、中層スチールハウスの地震応答は減衰の評価法により大きな影響を受け、最大点剛性比例型減衰は初期剛性比例型減衰と比較して総じて応答が大きい。
- 5) 中層スチールハウスにおいて、建物で吸収可能なエネルギー量はほぼ一定値であり、減衰による消費エネルギー量を適切に評価できれば、エネルギー入力から減衰による消費エネルギーを減ずることで建物の損傷レベルを評価することが出来ると考えられる。

尚、本研究では耐力壁のみを用いてスチールハウス全体の減衰性能を評価したが、現実の建物では天井・階段等仕上げ以外の非構造要素も多く、壁の立体効果も期待できることから、減衰の評価は安全側の評価になっていると考えられる。今後、効率的な粘弾性体の配置の検討とともに、構造物全体の大振幅領域に至るまでの減衰性能の確認が必要となるものとする。また、粘弾性体を付加した耐震壁の実用化に当たっては、今後環境温度を変化させた動の実験も不可欠となる。

謝辞

解析に関しては熊本大学工学部・小川厚治教授が作成されたせん断型多質点系地震応答解析プログラム「shearms.f(ver. 1.32)」に新たな減衰モデルを付加し使用させて頂きました。実験に用いたスチールハウス壁パネルは新日本製鉄株式会社：河合良道氏、岡田忠義博士、菅野良一博士より、また粘弾性体ISD111は住友スリーエム株式会社：大熊潔氏より提供頂きました。ここに深謝致します。

参考文献

- 1) 社団法人 鋼材倶楽部：スチールハウス構造設計指針，2000.5
- 2) 社団法人 日本鉄鋼連盟：薄型軽量型鋼造建築物設計の手引き，技報堂出版，2002.6
- 3) 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，pp.1035～1036，2000.9
- 4) 池田勝利，青木博文，原田幸博：スチールハウス構造体の復元力特性モデルに関する研究 枠組型耐力壁の履歴モデルの提案と地震応答解析，構造工学論文集 Vol.46B, pp.641～649，2000.3
- 5) 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566号，pp.137～144，2003.4
- 6) 菅野良一，宮尾俊明，河合直人，作本好文，二宮淳，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.991～992，1998.9
- 7) 中村仁，高橋広人，西阪理永，福和伸夫，飛田潤，河合良道：自由振動実験に基づくスチールハウスの固有振動特性に関する研究 スチールハウスの諸性能に関する研究 その5，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.987～988，1998.9
- 8) 三宅辰哉，福知保長：低層鉄骨建物における非構造部材の耐震効果に関する研究 その1 非構造部材による水平力分担と減衰性の向上，日本建築学会構造系論文集第462号，pp.151～160，1994.8
- 9) 浜田伸一，宮尾俊明，高木伸之，唐津敏一，河合良道：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－試験方法－ スチールハウスの諸性能に関する研究 その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.979～980，1998.9
- 10) 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.981～982，1998.9
- 11) 梁川幸盛，関口洋平，宇佐美祐人：地震応答解析における瞬間剛性比例型減衰についての考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.1001～1002，2004.8
- 12) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999.11

(2006年9月1日原稿受理，2007年1月15日採用決定)