

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14765

研究課題名（和文）CLTと薄板軽量形鋼のハイブリッドパネルを用いた高減衰型建築構造システムの開発

研究課題名（英文）Development of high damping structural system using hybrid panel of CLT and cold formed steel

研究代表者

脇田 健裕（Wakita, Takehiro）

早稲田大学・理工学術院・客員主任研究員（研究院客員准教授）

研究者番号：10469025

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では壁及び床構造に薄板軽量形鋼とCLTを適用した、ハイブリッド型高減衰構造システムを開発することを目的としている。提案する構造システムは、耐力壁の復元力特性に摩擦力を利用した機構を適用することで、高い靱性と耐力及びエネルギー吸収能力を発揮し、過酷な地震動の入力に対しても変形と加速度の応答を同時に抑制すると共に、余震等の繰り返しの地震入力に対しても建物機能を維持し続けることを明らかにした。また、設計的検討として、提案する構造システムに保有水平耐力計算を適用する場合に必要な構造特性係数について、IDA(Incremental Dynamic Analysis)による評価法の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案する構造システムは、異なる部材が相互の構造的弱点を補うことで、高い性能を発揮するものであり、高い耐震性と機能性を有する建築物を省資源かつローコストで実現することを目指した。提案する構造システムの理論的な検討に留まらず、具体的かつ実用的なデバイスの開発を行い、実大試験体による性能検証を踏まえた解析手法及び、設計法に関する検討までも行った。持続可能な社会の実現において、建築物の省資源化と長寿命化は外すことの出来ない重要なテーマであり、提案する構造システムの実用化が、その実現に大きく寄与するものであると考えている。現在、本研究結果を実構造物に適用するための検討を大規模に進めている。

研究成果の概要（英文）：A structural system for buildings was developed that combined wood-based materials and cold-formed steel framing. This structural system provides strong earthquake protection because the shear walls with built-in friction mechanisms have high energy absorption performance. First, the mechanical properties related to the shear force transmission of the screw joint between the cross laminated timber used for the floorboard and the cold-formed steel framing were tested. The results showed that the strength varies depending on the steel thickness and the screw length, and exhibited lower than that predicted according to design formulas presented in past research. Next, tests were performed to examine the constructability and seismic performance of the structural system using real scale frames. It was found that the proposed structural system can be constructed easily in a short time and has extremely stable dynamic performance even under strong repetitive seismic wave inputs.

研究分野：建築構造

キーワード：薄板軽量形鋼造 CFS建築 摩擦 振動台実験 高減衰 制振 ドリルねじ CLT

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

①研究の学術的背景

CLT(Cross Laminated Timber)パネルを用いた木質構造は、欧米を中心に急速に普及が進んでいる。我が国においても、CLTは間伐材や製材には不向きなB材の有効利用が可能であるため、減少傾向にある国産木材需要拡大の切り札として大きな期待を集めており、平成28年4月にはCLT関連の建築基準法告示が公布・施行され一般利用が開始された。現在我が国において開発が進められているCLT構法は小幅または大幅の壁パネルと床パネルを、金物及び引きボルトにより接合し壁・床を構成するものである。CLTパネルは通常90mm程度以上の厚みを有しており、面内方向のせん断に対する剛性及び強度が非常に高いため、層せん断力が作用した場合の層間変形は、金物ビスの引き抜けや、引きボルトの伸び変形、パネル隅角部のめり込みによる変形が支配的となる。1)で行われた5層実大建物の振動台実験では上層階での応答加速度の増幅が顕著であり、JMA神戸100%(最大加速度約1G)の入力に対して、最大5Gを超える応答加速度が記録されている。また、各層の荷重変形関係は顕著なスリップ形の復元力特性を示しエネルギー吸収能力に劣るため、繰り返しの地震動に対して応答変形が大きく増大する結果となっている。CLTパネルは高い断熱・遮音・耐火性を持つ一方で、現行ではパネルの剛性・強度を十分に活かした接合方法が開発されておらず、応答加速度の過大化や、極大規模の地震動に対する変形能力、余震を含む繰り返しの地震動に対する十分な耐震安全性を有しているとは言い難い。

一方で、薄板軽量形鋼を建築構造体として用いた構法は薄板軽量形鋼造(通称:スチールハウス)と呼ばれ、2001年に告示が制定され一般構法としての建築が可能となった。薄板軽量形鋼造は各部の仕様が簡素かつ省資源であり、設計・生産・施工が簡易で、高い経済性・耐久性を発揮する等の特徴を持つが、わが国では未だ一般的な認知度は低く普及には至っていない。壁式構造である薄板軽量形鋼造建築物の耐震性能は耐力壁のせん断性能に依存し、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。こ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によって急激に耐力を失うため靱性に乏しい。また、ドリルねじ接合部は面材へのめり込みにより、履歴ループに強いスリップ性状を有しているため、紡錘型の復元力特性を持つ鉄骨ラーメン構造等に比べると、薄板軽量形鋼造耐力壁のエネルギー吸収能力は低く、繰り返し振幅による耐力低下も顕著である。

2012年の国土交通省告示第1641号の改定により、薄板軽量形鋼造は4階建て迄の建築が可能となった。しかし、現行の耐力壁(合板+石膏面材)を用いて、4階建て建築物の試設計を行うと、低層階には相当量の壁数が必要となるため、建築計画の自由度は大きく阻害されることが分かる。また、従来のような剛性・強度型の耐力壁を用いて4階建て建物の耐震性能を確保しようとすると、加速度応答が過大となるだけでなく、耐力壁を支えるたて枠や金物、基礎に作用する応力が非常に大きくなるため、これに対応するための各部仕様が大型・複雑化することとなる。その結果、生産性・施工性の大幅な低下とコストの増大が避けられないものとなり、スチールハウスの省資源かつ簡素な仕様という長所を大きく減ずる結果となることが懸念される。

2. 研究の目的

本研究では、前述の現行CLT構法及び薄板軽量形鋼造で指摘される弱点を克服した新しい建築構法を開発することを目的とした。まず壁構造については摩擦機構を内蔵する薄板軽量形鋼造耐力壁(以下、摩擦機構内蔵耐力壁)を主としたCLT耐力壁によって構成される構造システムとした。これにより各層の耐震性能を高靱性・高減衰・高耐力な摩擦機構内蔵耐力壁の性能によって決定することが可能である。

次に床構造についてはCLTと薄板軽量形鋼による複合パネルを用いる。これにより、床の曲げ荷重に対して、圧縮応力度が作用する上面側をCLT、引張応力度が作用する下面側を薄板軽量形鋼とすることで、薄板形鋼の曲げ座屈耐力が向上し大スパンへの適用が可能となる。木質材料であるCLTは乾燥収縮及び経年によってクリープ変形の発生が懸念されるが、薄板軽量形鋼と一体化することで効果的に抑制することが期待できる。床パネル同士の接合は形鋼部分のドリルねじ接合によって行う仕様とすることが出来るため余分な金物が発生しない。CLTを面材とする床パネルは高いせん断剛性を発揮することが期待されるため、枠組み壁工法の 2×4 やスチールハウスでは実現が困難な、壁線区画が 100m^2 を超える大空間への適用が可能となる。薄板軽量形鋼造床パネルの大きな弱点である上下階の遮音性が大幅に向上する。薄板軽量形鋼造の床パネルはパネル厚み方向への剛性が低く、上下に耐力壁が配置され大きな圧縮力が生じる部分には金物等による補強が必要となるが、提案する構造システムではCLTの上下に直接耐力壁が配置される仕様となるため形鋼に対する補強が必要ない。といった複合パネルを用いることによる様々なメリットを生かした設計が可能となる。

3. 研究の方法

提案する構造システムでは床板に使用するCLTとフレーム材に使用するcold-formed steel間のせん断力の伝達を木ねじによる接合によって行う。そこでまず、木ねじ接合部の力学的特性を単体実験によって検討した。図1に試験体名称のルールを示す。試験パラメータは、Loading

schedule, Screw length, Steel thickness, Fiber direction の4つについて各1体ずつ行った。試験システムを図2に示す。試験部分は CLT(cedar, Mx60A-3-3, t=90mm)と薄板軽量形鋼(SGC400, t=1.0mm or 1.6mm)を、図3に示す木用ねじ(STS-C45 or 65)で留め付けた。

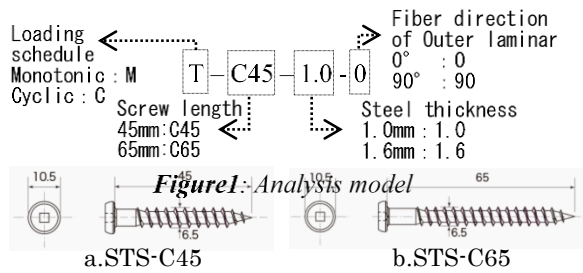


Figure3: Analysis model

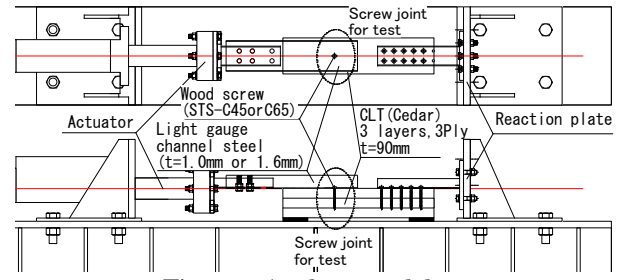


Figure2: Analysis model

図4に単調載荷試験における荷重変形関係を示す。鋼材の板厚が厚く、かつねじの長さが長い試験体の最大耐力が高くなる結果となった。変形能力については、板厚1.6mmの試験体では終局に至るまで徐々に耐力低下するのに対し、板厚1.0mmの試験体の多くは最大耐力発揮後に急激な耐力低下が生じることが分かった。板厚1.6mmの試験体は全て木部のめり込みによる破壊であったのに対し、板厚1.0mmの試験体では鋼板の支圧破壊とねじの曲げせん断破壊が生じたためである。

次に、提案する構造システムの施工性の検証と地震時の動力学特性を検討するため、実大2層小型フレームによる実験を実施した。図5に試験体のイメージ図を示す。本試験体の加振方向の両側の壁には図6で示す摩擦機構内蔵耐力壁を配置した。この耐力壁はせん断力が作用した際に、合板と周辺枠材の間に発生する変形を利用した摩擦による抵抗力が発揮される仕組みとなっている。図7は摩擦機構部の荷重変形関係を示しており、ボルトの締付力を変化させることで摩擦力を任意に制御することが可能である。表1に加振入力した地震動を示す。最大速度レベルの低い地震動から順に入力し試験体が終局変形に至るまでの応答を検討した。

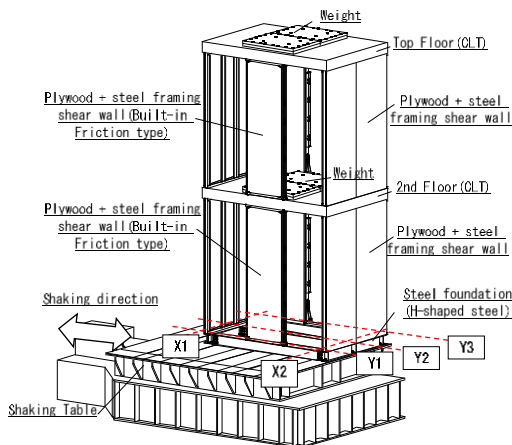


Figure5: Analysis model

Table1: Input waves for shaking table test

Eathquake name.Observation area Phase	Test name	Normalization magnification	PGA (ga)	PGV (kine)
Public announced wave_Random Phase	KokujiLv1	Lv1	402	18
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake haga ew	Haga0.3	0.3	612	22
	Haga0.6	0.6	870	41
The Southern Hyogo Prefecture Earthquake	Kobe1.0	1.0	905	69

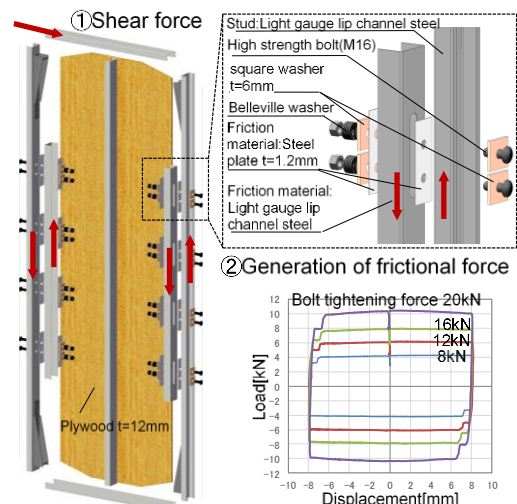


Figure6: Shear wall with built-in friction mechanism

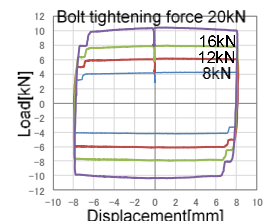


Figure7: Load-deflection relation of friction device

図8は各地震動入力時の各階の最大加速度応答を示している。全ての地震波において上階の応答は入力を下回っている。図9に各地震動入力時の各層の荷重変形関係を示す。各層とも繰り返

返しの地震入力に対し、大変形に至るまで極めて安定したバイリニア型の荷重変形関係を示すことが明らかとなった。

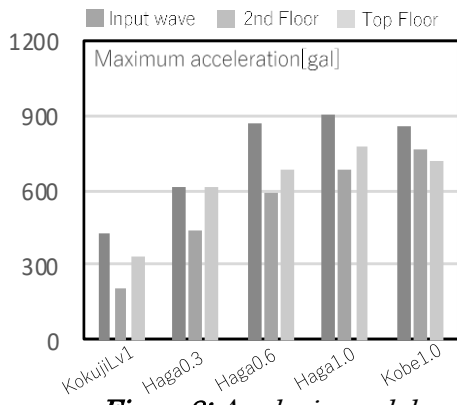


Figure 8: Analysis model

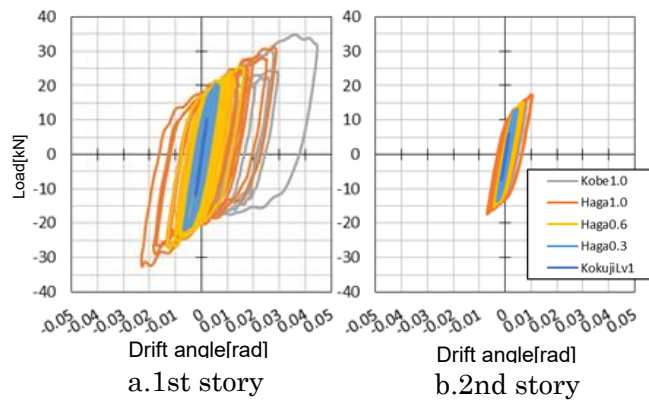


Figure 9: Analysis model

次に、提案する構造システムに保有水平耐力計算を適用する場合に必要な構造特性係数について、IDA (Incremental Dynamic Analysis) による評価法の提案を行った。一般的に利用される構造特性係数 D_s の評価方法はいずれも静的加力試験結果の荷重変形関係の包絡線及び履歴ループ面積を用いてその評価を行うものである。実際の地震時応答が繰り返しの振幅を伴うものであることと、従来の薄板軽量形鋼造耐力壁が消費できるエネルギー量に上限がある進行スリップ型の復元力特性であることを考慮すると、現行の評価方法によって得られる D_s 値がその地震時応答性状と照らし合わせて適切であるかどうかは不明である。そこで、一般的な薄板軽量形鋼造耐力壁である合板耐力壁及びせっこう耐力壁と、本研究で提案する摩擦機構内蔵耐力壁の構造特性係数について、現行の評価方法によって得られる値と、地震応答解析の結果から得られる相当値とを比較することで、現行評価値の耐震安全性を検討した。

まず、式(3.1)により各耐力壁の基準化質点質量 m_{max} を算出する(表 2)。次に、基準化質点質量 m_{max} の値に 0.3~1.0 まで 0.1 刻みの質量低減係数 α を乗じた 8 パターンを質点質量パラメータとする。この質量低減係数 α の逆数を入力地震動の基準化係数 n_r (式(3.2))として入力地震動に乗じる。基準化した入力地震動にさらに増幅係数 a_r (初期値=1.0)を乗じて時刻歴応答解析を行う。この解析結果の最大応答層間変形が実験結果の終局変形以下だった場合は、増幅係数 a_r を 0.02 ずつ割り増した上で再度解析を行い、応答が終局変形以上になるまでこれを繰り返し、終局変形到達時の増幅係数 a_r を得る。この a_r の逆数として靱性低減係数 $1/a_r$ を算出する。この値を各解析ケースに対する構造特性係数 D_s に相当するものとする。入力地震波は国内外で観測された代表的な地震動 51 波を最大速度 50kine に基準化して用いた。減衰定数 h は 6%(瞬間剛性比例型)で、解析の時間刻みは 0.002 秒とし、Newmark- β 法($\beta=1/4$)によって行った。解析フローを図 10 に示す。

$$P_u = m_{max} \times g \times C_0 \times D_s \dots \text{式(3.1)}$$

P_u : 終局耐力(実験値), m_{max} : 基準化質点質量

$C_0=1.0$ (標準層せん断力係数)

$D_s=1.0$ (構造特性係数)

g : 重力加速度 9807 [mm/s²]

$$n_r = 1/\alpha \dots \text{式(3.2)}$$

α : 質量低減係数(0.3~1.0)

表 2 P_u と m_{max}

	P_u [kN]	m_{max} [t]
合板	12.66	1.29
石膏	3.37	0.34
摩擦	15.50	1.58

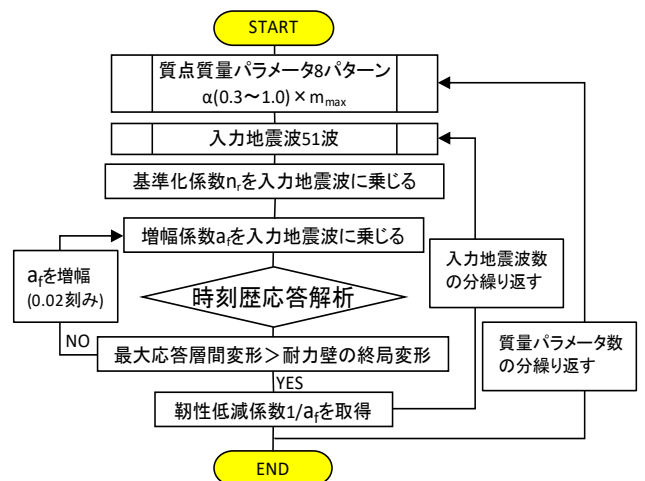


図 10 IDA による解析フロー図

図 11 に解析結果より得られた、靱性低減係数 $1/a_f$ と崩壊率の関係を示す。崩壊率は全 51 パターンの入力地震波に対して終局変形に到達した結果の割合を示している。いずれの耐力壁も質量低減係数 α の値が大きくなるほど、同じ崩壊率に対する靱性低減係数 $1/a_f$ は低い値で推移しており、モデルの長周期化により応答変形が抑制される傾向を示している。また、摩擦機構内蔵耐力壁はいずれの崩壊率に対しても低い靱性低減係数で推移しており、崩壊率が低くなるほどその差は大きくなっていることが分かる。

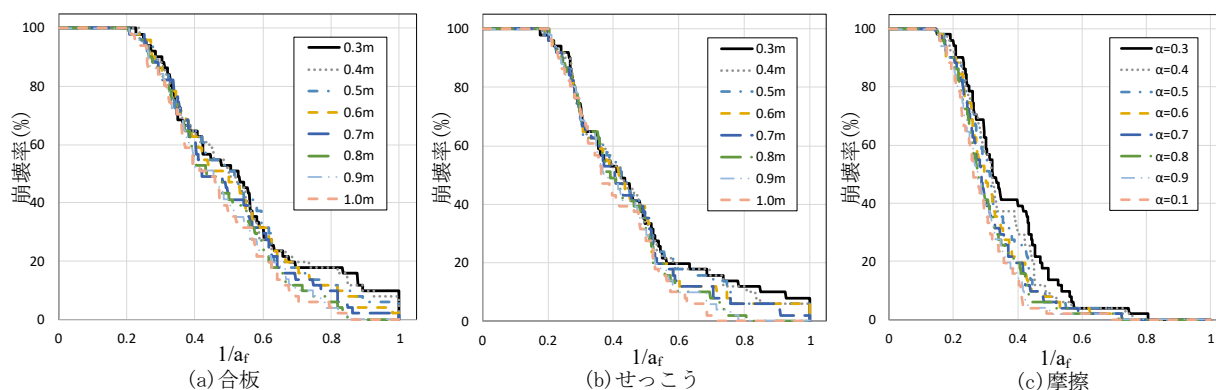


図 11 靱性低減係数 $1/a_f$ と崩壊率の関係(耐力壁毎)

4. 研究成果

本研究では壁及び床構造に薄板軽量形鋼と CLT を適用した、ハイブリッド型高減衰構造システムを開発することを目的としている。

まず、摩擦機構内蔵耐力壁を構成する各部要素の基本的な力学特性を把握するための検討を行うと共に、薄板軽量形鋼と CLT のねじ接合部に関する実験的検討を行いその性能を明らかとした。次に、摩擦機構内蔵耐力壁の実大試験を実施することで、提案する耐力壁が高い減衰性能を発揮することと容易かつ正確にその性能を変化させることが可能であることが分かった。また、提案する構造システムにより設計を行った実寸 2 層小型フレームによる振動台実験を実施し、繰り返しの地震動入力に対し極めて安定したバイリニア型の荷重変形関係を示すとともに、上階での加速度応答の増大を効果的に抑制する性能を有することを実証した。

設計的検討としては、提案する構造システムに保有水平耐力計算を適用する場合に必要な構造特性係数について、IDA(Incremental Dynamic Analysis)による評価法の提案を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 脇田健裕, 曾田五月也, 渡邊力	4. 巻 Vol.83., No.750
2. 論文標題 摩擦機構を内蔵した薄板軽量形鋼造耐力壁の構造性能と数値解析モデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1183-1191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.1183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 曾田 五月也, 渡井 一樹, 脇田健裕, 宮津 裕次	4. 巻 集84 巻 757 号
2. 論文標題 リンク式流体慣性ダンパによる構造物の地震応答制御 - 実寸2層薄板軽量形鋼造試験体による振動台実験 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 351-360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.84.351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 曾田 五月也, 脇田 健裕	4. 巻 83
2. 論文標題 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的性能	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 201 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 脇田 健裕, 曾田 五月也	4. 巻 第25巻第97号
2. 論文標題 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した薄板軽量形鋼造建築物の構造特性係数に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 39-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takehiro Wakita, Satsuya Soda, Kazuki Watai, Yuji Miyazu
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL SYSTEM FOR BUILDINGS WITH HIGH ENERGY ABSORPTION UTILIZING BOTH WOOD-BASED MATERIALS AND COLD-FORMED STEEL FRAMING
3. 学会等名 2018 World Conference on Timber Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾田五月也、渡井一樹、脇田健裕、宮津裕次
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造試験体の振動台実験 その1. 実験概要
3. 学会等名 2018年日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹、曾田五月也、脇田健裕、宮津裕次、
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造試験体の振動台実験 その2. 油圧式リンク機構を設置した場合
3. 学会等名 2018年日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇田健裕、曾田五月也、大岩奈央、菅原良太
2. 発表標題 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11. 摩擦機構に使用する高力ボルトの締付力に関する検討
3. 学会等名 2018年日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原良太、曾田五月也、脇田健裕
2. 発表標題 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12. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した中層建築物の設計法
3. 学会等名 2018年日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大岩奈央、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本建築学会大会(広島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊力、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央
2. 発表標題 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7. 潤滑皮膜を持つ溶融Zn-Al-Mg合金めっき鋼板を用いた摩擦機構部の単体性能試験
3. 学会等名 日本建築学会大会(広島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 脇田健裕、曾田五月也、斎藤健寛、菅原良太、大岩奈央、渡邊力
2. 発表標題 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8. ボルト締付軸力を変化させた実大耐力壁の静的加力試験と2次元フレームモデルによる解析的検証
3. 学会等名 日本建築学会大会(広島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 斎藤健寛、曾田五月也、脇田健裕、菅原良太、大岩奈央、渡辺力
2. 発表標題 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9. 摩擦機構内蔵耐力壁を有する2層薄板軽量形鋼造の振動台実験
3. 学会等名 日本建築学会大会(広島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅原良太、曾田五月也、脇田健裕、斎藤健寛、大岩奈央
2. 発表標題 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10. 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した3階建て建築物の地震応答解析
3. 学会等名 日本建築学会大会(広島)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 耐力壁パネル	発明者 脇田健裕、曾田五月也、渡辺力	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-125130	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----