

機関番号：35403

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560541

研究課題名 (和文) せん断パネルダンパー付鉄骨建物の統合化耐震性能評価に関する研究

研究課題名 (英文) Collaborative Substructure Dynamic Analysis on Building
with Shear Panel Dampers

研究代表者

玉井 宏章 (TAMAI HIROYUKI)

研究者番号：80207224

研究成果の概要 (和文)：

分散型システムとインターネットを用いて解析・実験装置を複数統合化した耐震性能評価法を確立した。統合化解析用の NETSHEAR というせん断パネルダンパーの複合非線形詳細解析プログラムを新規に作成した。せん断パネルダンパーを建物内に設置した制振建物全体の地震時挙動を調べて耐震性能評価を行った。また、せん断パネルダンパーの 2 方向加力時の性能を実験的に明らかにし、その設計式についても整備を行った。

研究成果の概要 (英文)：

The collaborative structural analysis system is capable of performing sophisticated structural analyses utilizing the existing individual structural analysis programs and experiment systems. This research deals with the shear panel damper installed in a steel building frame. NETSHEAR, that is geometrically and material non-linear FEM analysis program, is used for analyzing shear panel damper. Whole steel frame building installed the shear panel dampers is analyzed the system. Then seismic performances of the buildings are carried out. Also, plastic deformation capacity of the damper under bi-axial loading is clarified by loading tests. And design formula for a shear panel damper is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造，材料

キーワード： 建築構造・材料，分散型実験，統合化評価法，修正 OS 法，せん断ダンパー

1. 研究開始当初の背景

建物を倒壊させるためには、振動台の性能として、巨大な入力エネルギーとストローク

が要求させるため、実大でも、比較的小型サイズのものしか検討できないケースが多い。一方、振動方程式、特に慣性力の効果や建築

構造物中でも、数値モデルで良好に表現できる部分は数値シミュレーションを、一方、モデル化が困難ないしは破壊が危惧される部分については、実験を行って、それらを組み合わせて建物全体の実地震応答挙動を検討する、仮動的実験が提案されている。この方法によれば振動台実験方法と比べ、大型の構造物も比較的容易に取り扱うことが可能となる。また、申請者と多田、桑原らは、解析・実験手法において、画期的な方法を提唱した。世界各地に点在する、ある構造部分については詳細かつ精密な解析プログラムを、異種 OS、異種言語を用いていても、容易に接続でき、建物全体の挙動を解析・実験できる「統合化評価手法」を提案している。

2. 研究の目的

「部分構造法によるオンライン実地震応答シミュレータ」と「インターネットを用いた分散型解析」の接続法を融合した「統合化評価法」によれば、国内外の研究者と分散型実験が可能となり、それらの研究者とは建築構造学の知見、特に、部材相互の関連や作用の影響に関する知見が共有できるので、複雑な構造挙動の解明が容易になる。

この「分散型実験システムを用いた統合化評価法」によれば、実大規模の建物や構造物の弾塑性振動実験が、世界中に点在する実験設備を効果的に利用することにより可能となり、また、大型振動台実験と比較して、安価に実施することができる。せん断ダンパー間柱、ノンスリップ露出柱脚ともに新たな機能を有する制振建物の構造要素であるが、それらの耐震性能の向上度を、本研究課題で提案する「分散型実験システムを用いた統合化評価法」で明らかにしようとするのが、研究主題である。

3. 研究の方法

3.1 統合化評価システムの概要

システム構成

統合化評価システムを利用した Pushover 解析を考える。Fig. 1(a)の例題を解析対象にする。この構造物を、仮想的にフレームと間柱及びせん断パネルダンパーの3つの部分に分割する。梁、柱の特性を詳細に解析できる Program 1、せん断パネルダンパーを詳細に解析できる Program 2、更に、ダンパーと間柱との半剛接特性を追跡しうる Program 3 を遠隔地に存在する研究者が所有しているとする。

せん断パネルダンパーは、周辺架構からの影響で、間柱の反曲点位置がダンパー部中央からずれて、要素実験でよく行われる純せん断応力状態とは異なる曲げせん断応力状態となる。また、間柱とダンパーとをエンドプレートを通じて、ボルト接合した場合、半剛

接状態となり、その固定度は柔らかくなる。従って、それぞれの構造部材の特性を追跡しうる Program 1, 2 及び半剛接状態を表現できる Program 3 がそれぞれの接続情報を共有しあえば、フレーム、間柱、及び、せん断パネルダンパーの相互作用の効果を考慮して、架構全体の挙動を調べることができる。

本研究の対象は、インターネットを介して、これらを接続し、解析・実験を行う方法である。

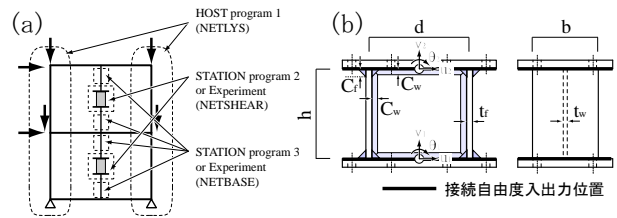


Fig. 1 統合化評価法の概念

3.2 接続通信法について

本システムでは、遠隔地にある異種構造解析プログラムと接続・通信する仕組みが必要となる。特に、長時間の接続で通信障害が生じないプロトコルを採用し、ファイヤーウォール等で保護された研究機関とも、通信・接続を可能にする工夫が必要である。

更には、異種構造解析プログラムとも接続できるように、接続条件をなるべく緩和しておく必要もある。本研究では、この問題点を解決するため Fig. 2 に示すような直接ソケット通信を行うこととし、各研究機関のファイヤーウォール対策には、代理サーバー (Proxy サーバー) を利用する。すなわち、研究機関の外から内への通信は拒否されるが、内から外への通信は通過できるというファイヤーウォールの性質を利用し、各通信の要求を待ち受け、接続後は2つの通信を結びつける Proxy サーバーを、ファイヤーウォールの外に設置する。これにより、インターネットを利用した比較的高速度な通信が、ファイヤーウォールの有無に拘わらず実行できる。

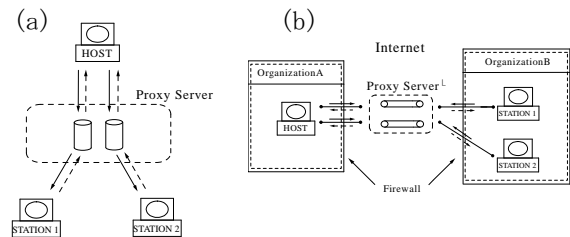


Fig. 2 (a), (b) Proxy サーバ通信法

4. 研究成果

4. 1 せん断パネルダンパーの有限要素解析 (NETSHEAR)

本節では、せん断パネルダンパーの解析手法、解析モデルの概要と解析精度について示す。

○解析モデル

解析対象は、せん断抵抗材であり、解析対象全領域が平面応力状態であると仮定して 2 次元問題として取り扱う。Fig. 1 (b) に示すように、上下エンドプレートを除くせん断パネル全領域を解析対象とし、加力は、間柱要素との接続を考慮して上下ベースプレート内側表面中央に、強制変位パラメータ；水平・上下・回転成分 (u_1, v_1, θ_1)、(u_2, v_2, θ_2) を設定し、Fig. 1(b) の太線上の並進自由度を、これら変位パラメータと適合させて行っている。解析に用いた要素モデルは、Lagrange 型の形状関数を仮定した、9 節点 Iso-parametric 要素であり、数値積分法は、(3x3) の標本点を有する Gauss-Legendre の求積法を採用した。尚、溶着金属部の変断面部分の板厚は、エネルギー積分時に正確に評価している。

○解析精度の検証

本有限要素解析法の精度を検証するため、Fig. 3 に示す普通鋼せん断抵抗材について解析を行い、荷重実験結果と比較した。

荷重実験に用いたせん断抵抗材は、溶接組み立て時に生じる熱影響に基因する素材特性の不均一性を除去するために完全焼鈍処理（雰囲気温度 780℃で 1 時間保持した後炉冷）を施した。この素材試験結果を基に設定した解析に用いる材料定数パラメータを Table 1 に示す。尚、溶着金属の素材特性は不明のため、ロックウェル硬さがほぼ等しいウェブ部鋼板と同一とした。また、補剛スチフナは水平耐力に影響しないので解析対象から除外した。

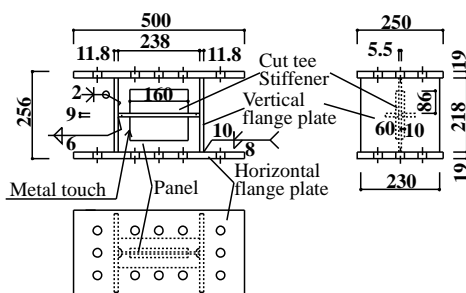


Fig. 3 試験体形状

解析シリーズは、純せん断変形下 ($\theta_1 = \theta_2 = v_1 = v_2 = 0$) とし、せん断方向相対変位振幅： δa ($=u_2 - u_1$) 7.7, 11.0, 15.0, 22.5 (mm) の定変位振幅で 1 サイクル荷重する定常振幅繰り返し荷重解析及び地動最大速度を

75 (kine) に基準化した神戸港工事事務所記録地震波 NS 成分を入力した 15 層制振ブレース架構における第 3 層の応答変位履歴を用いた非定常振幅繰り返し荷重解析の計 5 ケースとした。

純せん断変形下での定変位繰り返し荷重解析、および、非定常振幅繰り返し荷重解析における、せん断方向荷重； Q とせん断方向相対変位； δ との関係を図 4 および Fig. 5 に、それぞれ、示す。

これらの図より、本解析では、繰り返し荷重の大変形時における耐力値を高目に評価する傾向にあるものの、荷重初期や降伏時の初期段階の耐力値は一致すること、また、非定常変位振幅を受けたときの耐力上昇を良好に再現できることが分かる。以上のことから、純せん断変形下でのせん断パネルダンパーのせん断耐力は、本解析により大略予測できることがわかる。

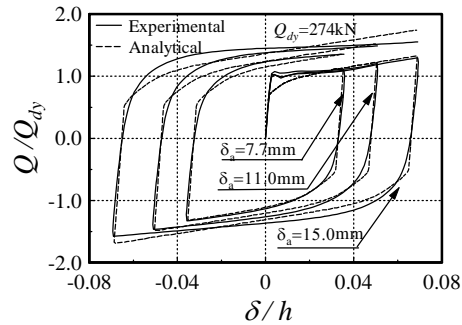


Fig. 4 定常振幅繰り返し荷重試験結果

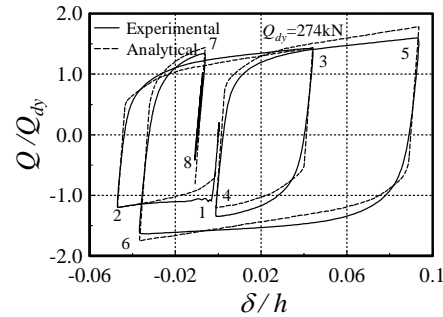


Fig. 5 非定常振幅繰り返し荷重試験結果

Table 1 解析用素材特性

	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_{st} (%)	ϵ_{lt} (%)	H_r (HRB)
Panel	261.7	383.2	2.50	43.6	63.6
Stiffener	286.2	407.7	2.03	41.7	68.6
Flange	259.7	399.8	1.87	54.6	64.7

σ_y : Yield stress σ_u : Tensile strength ϵ_{st} : Strain in initial hardening
 ϵ_{lt} : Elongation H_r : Rockwell hardness (B scale)

4. 2 せん断パネルダンパーの復元力特性の注意点

本節では、間柱を含む架構からの相互作用によって起こるせん断パネルダンパーの特性変化を解析的・実験的に示す。

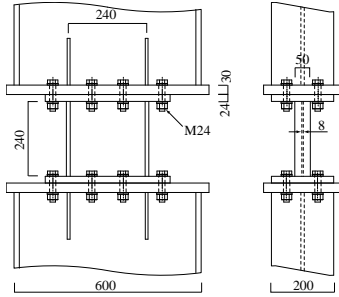


Fig. 6 解析対象のせん断パネルダンパー
Table 2 解析用素材特性と形状

Portion	$\sigma_y^{[1]}$ (MPa)	$H^{[1]}$ (MPa)	$\sigma_y^{[2]}$ (MPa)	$H^{[2]}$ (MPa)	κ
Panel, Flange, Deposited metal	235	2,050	400	0.00	0.50

h mm	d mm	t_w mm	t_f mm	b mm	C_w mm	C_f mm
240	240	8.00	12.0	50	8.00	12.0

○ 解析シリーズ

NETSHEAR 解析プログラム単体を用いて、Fig. 6 に示す、適正形状の普通鋼せん断パネルダンパーの解析を行った。素材特性、形状を Table 2 に示す。

解析シリーズは、曲げせん断変形を受ける場合(解析シリーズ I)と、初期軸変形と純曲げ変形を受ける場合(解析シリーズ II)を用意した。解析シリーズ I では、初期軸変形 $v_0 (=v_1 - v_2)$ は 0 とし、相対回転角 $\theta (= \theta_2 - \theta_1)$ とパネル高さ h の積と相対せん断方向変形 $\delta (=u_2 - u_1)$ との比 $(\theta \cdot h / \delta)$ を 0.00、0.12、0.24、0.48、0.96 と保って、 $\delta=10\text{mm}$ まで単調に荷重する計 5 ケースを、解析シリーズ II では、初期軸変形 $v_0 (=v_1 - v_2)$ と相対せん断方向変形振幅 $\delta a (=10\text{mm})$ との比 $v_0 / \delta a$ を 0.0、0.00625、0.0125、0.0185、0.0250 とし、その後、相対回転角 $\theta (= \theta_2 - \theta_1)$ を 0 とし、相対せん断方向変形 $\delta (=u_2 - u_1)$ を 10mm まで単調に荷重する計 5 ケースを解析した。

○ 解析結果

解析シリーズ I の結果を Fig. 7(a), (b), Fig. 9 に、解析シリーズ II の結果を Fig. 8(a), (b) に示す。

Fig. 7(a), Fig. 8(a) には、せん断力 Q とせん断方向相対変位 δ との関係を示す。Fig. 7(b) には、両端の曲げモーメント反力から求めた下端からの反曲点位置 L_0 とパネル高さ h との比 (L_0/h) と δ の関係を、Fig. 8(b) には、せん断パネルダンパーの全塑性軸力 $N_y (=738.8\text{kN})$ で無次元化した軸反力 N/N_y と δ

の関係を示す。Fig. 9 には $(\theta \cdot h / \delta) = 0.96$ の場合の荷重完了時の相当塑性歪の分布を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。せん断パネルダンパーの耐力は、純せん断変形の時 $(\theta \cdot h / \delta = 0)$ が最も高く、次いで、曲げせん断変形となり、反曲点位置が上部エンドプレート近くなる $(\theta \cdot h / \delta = 0.48)$ と純せん断変形時より 2 割、パネルせいりの 2 倍 $(\theta \cdot h / \delta = 0.96)$ となると 5 割も低下する。この時、曲げ変形により下端部フランジに塑性化が集中して生じる。従って、間柱形式でせん断パネルダンパーを設置する場合は、周辺架構の相互作用を考慮した耐力設定が必要で、反曲点位置を考慮した塑性変形性能を評価すべきであり、安易にせん断バネモデルに置換して、純せん断変形下での繰返し荷重試験のみで塑性変形性能を評価してはならないことがわかる。

また、初期軸変形が、全塑性軸力に達する程大きくても、せん断変形により塑性化が生じると、軸力は消失するため、初期軸変形は、せん断耐力に全く影響を及ぼさないことがわかる。

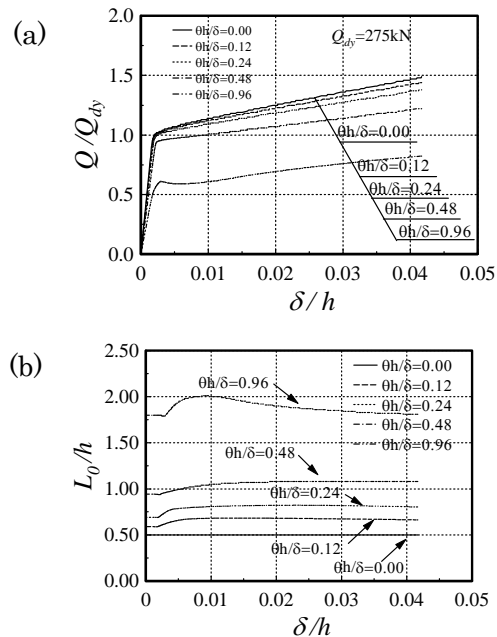
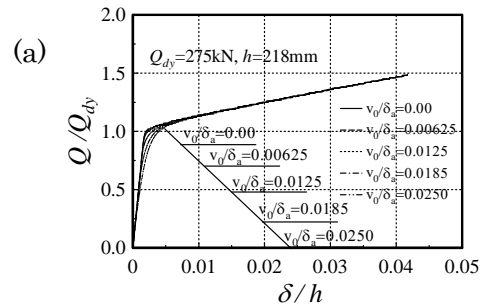


Fig. 7 曲げとせん断変形の復元力に対する影響



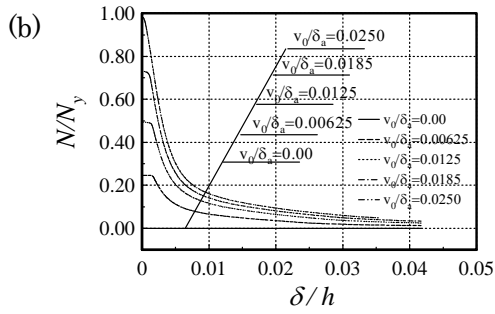


Fig. 8 初期軸変形（軸力）の復元力に対する影響

4. 3 せん断パネルダンパー付架構の統合化解析

統合化解析の有効性を示すため、Fig. 9 に示す、せん断パネル間柱ダンパー付1層1スパン架構について解析を行う。

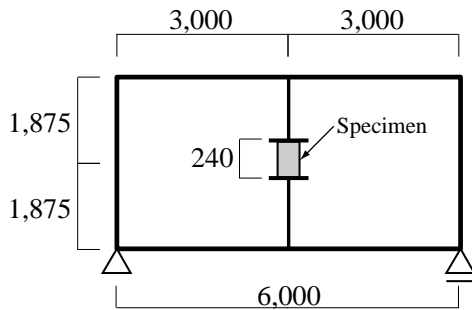


Fig. 9 せん断パネルダンパー付架構（統合化解析対象）

Table 3 各部材の断面性能

Portion	Section mm	A mm ²	I mm ⁴	Z _p mm ³	σ _y MPa
Column	□ - 400x19	27,100	6.28 x 10 ⁷	3.77 x 10 ⁶	235
Beam	H - 600x200x12x19	14,500	8.30 x 10 ⁸	3.20 x 10 ⁶	235
Post column	H - 600x200x11x17	13,200	7.56 x 10 ⁸	2.90 x 10 ⁶	235
Bolt	M24, f54	452	-	-	-

解析対象の各部材の断面性能を Table 3 に示す。せん断パネルダンパーについては、3節で取扱った Fig. 6 のものを用いる。ホストプログラムと、柱、梁と、間柱とせん断パネルダンパーとの接合部には、ステーションプログラム NETBASE を、せん断パネルダンパーについては、新規に作成したステーションプログラム NETSEAR を用いて解析を行う。

解析ケースは、せん断パネルダンパーの初期降伏状態には耐えられるが、加工硬化すると、今回の解析では、上下のダンパー接続用間柱に塑性ヒンジを生じるケース (Case I, 上下間柱の σ_y を 235MPa とした場合)、せん断パネルダンパーのみが塑性化するケース (Case II, 上下間柱のが 325MPa とした場合)、下側の間柱に塑性ヒンジが生じるケース (Case III, 上側の間柱の σ_y が

325MPa、下側の間柱の σ_y が 235MPa とした場合) の3ケースについて、層間変形角振幅 Δ/H を 1/150rad とし、2サイクル繰返す統合化解析を行った。

Fig. 10(a) には、フレームのみの降伏層せん断力で無次元化した層せん断力、Q/Q_{f_y} と層間変形角、Δ/H の関係を、Fig. 11(b) には、Case III についてせん断パネルダンパーの初期降伏耐力で無次元化したせん断力、Q/Q_{d_y} とパネル高さ h で無次元化したせん断方向相対変位、δ/h の関係を、Fig. 11(c) には、両端の曲げモーメント反力から求めた下端からの反曲点位置とパネル高さとの比、L₀/h と Δ/H の関係を示す。

これらの図より、以下のことが分かる。

せん断パネルダンパーの繰返し変形に伴う耐力上昇を把握した上で、十分な耐力を接続用間柱に設定しなければ、ダンパーを十分に機能させることはできない。

载荷中、せん断パネルダンパーの反曲点位置比 L₀/h は、0.5 を中心に変化する。特に、荷重の正負が入れ替わる時点で大きく変化する。

従って、せん断パネルダンパーの耐力は、接続用間柱の構造特性により変化するので、この構造特性を調査するために、提案した統合化解析は有用である。

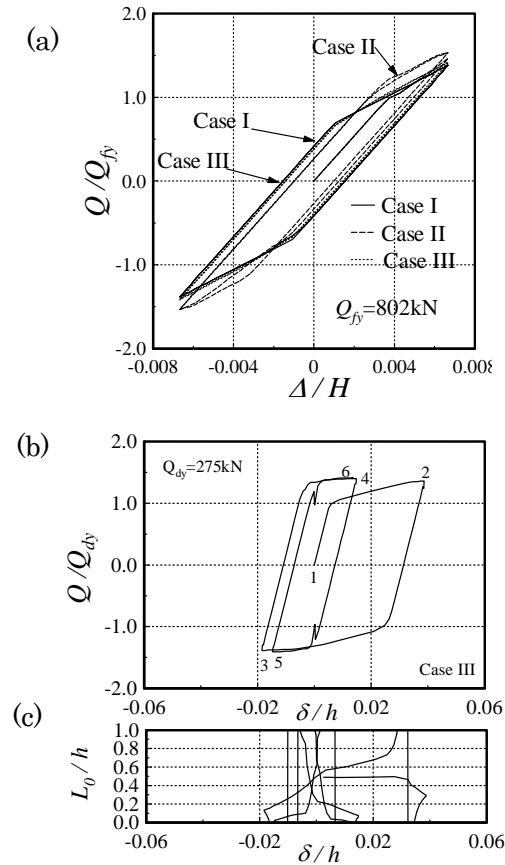


Fig. 10 統合化解析結果

5. まとめ

せん断パネル間柱ダンパー付鉄骨架構の統合化耐震性能評価に向けて、ステーションプログラムとしてのNETSHEARを作製した。これを用いた統合化解析により以下の新たな知見が得られた。

- 1) 反曲点位置により、降伏耐力は変化する。従って、安易なせん断バネモデルの置換は、適切ではない。
- 2) 曲げせん断変形によって、フランジに大きな塑性歪の集中が起きるので、純せん断のみの繰返し載荷実験で、塑性変形、性能を評価すべきではない。
- 3) せん断パネルダンパーの繰返し変形に伴う耐力上昇を見込んだ十分な耐力を、接続用間柱に設定すべきである。
- 4) 載荷中、せん断パネルダンパーの反曲点位置は変化する。
- 5) 間柱ダンパー付き架構の構造特性を調査するためには、本統合化解析法は有用である。

参考文献

- 1) 多田元英、桑原進：インターネットで異種プログラムを統合した構造解析システムの基本考察、日本建築学会構造系論文集、第580号、pp. 113-120, 2004. 6.
- 2) 玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、多田元英、五十嵐秀一、統合化評価法のための分散型仮動的実験システムの構築、日本建築学会中国支部研究報告集、第29巻、pp. 237-240、2006. 3.
- 3) 山田稔、辻文三：鋼材の応力-歪み関係に関する研究、日本建築学会論文報告集、第270号、pp. 17-22, 1978. 8.
- 4) 金澤寛、居田貴史、玉井宏章、近藤一夫、花井正実、藤波健剛：制振ブレースエネルギー吸収部材の弾塑性繰返し載荷解析、日本建築学会中国支部研究報告集、第21巻、pp. 229-232, 1998. 3.
- 5) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実、岩岡信一、龍神弘明、藤波健剛：普通鋼を用いた制振ブレースエネルギー吸収部材のパネル面外補剛効果とエネルギー吸収性能について、構造工学論文集、Vol. 44B, pp. 493-502, 1998. 3.
- 6) 多田元英、玉井宏章、吉村真人：露出柱脚と合成梁部材の解析プログラムを検討した鋼骨組の弾塑性解析コラボレーション、鋼構造論文集、第12巻、第47号、pp. 43-55, 2005. 9.

6. 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5件)

- 1) 2方向載荷を受けるせん断パネルダンパ

一の弾塑性挙動に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、三好行則、山西央朗、鋼構造年次論文報告集、第17巻、pp. 557-564, 2009. 11.

- 2) Collaborative Substructure Pseudo Dynamic Test on Building with New Column-Bases, Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU and Teruaki YAMANISHI, Stessa, USA, pp. 357-362, 2009. 8.
- 3) せん断パネルダンパー付鉄骨架構の統合化耐震性能評価に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、多田元英、広島工業大学紀要、研究編、第43巻別冊、pp. 241-247, 2009. 2.
- 4) 2方向載荷を受けるせん断パネルダンパーの弾塑性挙動に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、三好行則、山西央朗、広島工業大学紀要、研究編、第44巻別冊、pp. 143-149, 2010. 2.
- 5) せん断パネルダンパーの塑性変形性能に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、広島工業大学紀要、研究編、第45巻別冊、pp. 147-155, 2011. 2.

[学会発表] (計3件)

- 1) 普通鋼せん断パネルダンパーの塑性変形性能に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)構造III, pp. 1045-1046, 2010. 9.
- 2) 2方向載荷を受けるせん断パネルダンパーの弾塑性挙動に関する研究、玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、日本建築学会中国支部研究報告集32巻、pp. 1-4, 2009. 3.
- 3) 普通鋼せん断パネルダンパーの塑性変形性能に関する研究、三好行則、玉井宏章、高松隆夫、山西央朗、日本建築学会中国支部研究報告集33巻、pp. 85-88, 2010. 3.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] ホームページ等

<http://beryl.cc.it-hiroshima.ac.jp/>

7. 研究組織

(1) 研究代表者

玉井 宏章 (TAMAI HIROYUKI)

広島工業大学・工学部・建築工学科・準教授
研究者番号：80207224

(2) 研究分担者

高松 隆夫 (TAKAMATSU TAKAO)

広島工業大学・工学部・建築工学科・教授
研究者番号：10125148

(3) 連携研究者

なし