

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560687

研究課題名(和文) 高強度鋼組立架構とせん断パネルダンパーによる無損傷制振建物の統合化耐震性能評価

研究課題名(英文) Collaborative Substructure Analysis on Building with Shear Panel Dampers and High-strength steel weld-free built-up member

研究代表者

玉井 宏章 (TAMAI, Hiroyuki)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80207224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

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整備している。せん断パネルダンパーを建物内に設置した地震時無損傷制振建物の設計を行うため、せん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角と累積損傷度を整理した。せん断パネルダンパーの加力装置を製作し、塑性変形性能を実験的に明らかにし、その設計式について整備を行った。また、地震時無損傷制振建物の高強度鋼組立架構に必要な充填ボルト接合法を提案しその力学特性を検討した。

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 high strength weld-free steel building frame, in which the building yields no damage under severe earthquake. To design such building, design formulas for shear panel damper was arranged by use of the equivalent shear buckling angle and the damage factor. Also, loading test system was equipped to verify the validity and effectiveness of the design formula. Test results showed the plastic deformation capacity of the shear panel damper under severe earthquake. Then, Half-Moon shaped bolt connection was proposed for vibration controlled building made of high-strength weld-free steel frame. Fundamental mechanical properties of the bolt were shown from the collaborative structural analyses.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 分散型解析 統合化評価法 せん断パネル 柱脚 自己充填ボルト

1. 研究開始当初の背景

実大規模の建物や構造物の弾塑性振動実験と大型振動台実験と比較して安価に実施する方法として分散型システムを用いた「統合化評価法」を申請者らは提案している。一方、府省連携プロジェクトとして震度7でも弾性挙動して無損傷となりうる高強度鋼乾式組立て柱梁材が多くの研究者により提案・開発されている。

本研究は、この「統合化評価法」を適用する対象として高強度鋼組立架構とせん断パネルダンパー、充填ボルト接合、ノンスリップ柱脚という、申請者らが開発した新構造システムを用いた制振建物を提案して地震時無損傷制振建物設計の可能性を探ることを目的とした。

2. 研究の目的

上述の地震時無損傷制振建物を可能とするには、(1) 地震入力エネルギーを活発に吸収するせん断パネルダンパーを設計すること、また、(2) 大地震時の大きな水平変形時でも鉛直力を支持しうる高強度鋼架構が効率よくボルト接合して組み立てられることが重要であると判明した。そこで、せん断パネルダンパーが塑性変形性能を地震時に維持し続けられるように設計しうる式(等価せん断座屈変形角)を整備する。また、高強度鋼組立用の複半月充填ボルト接合法を提案し接合部継手の解析を分散型解析手法を用いて解析を行い、本接合法の有効性を示す。

3. 研究の方法

(1) 等価せん断座屈変形角の設計式構築
せん断パネルダンパーを図1に示す。
せん断パネルダンパーの使用限界としてせん断座屈発生による耐力減少時点を取り上げ、せん断座屈はパネル幅厚比、辺長比と繰返し載荷時におけるせん断力が0の時点から最大変形までの変形角(等価せん断座屈変形角)で決定されると仮定した(図2)。

地震応答は正負振幅が同程度となることからせん断パネルの応答塑性率 γ_a/γ_y が次式を満足すればパネルはせん断座屈しないことになる。

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_y} \leq \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} + 1 \right) \quad (1)$$

ここに、

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (2.a)$$

$$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \quad (2.b)$$

$\bar{\gamma}_B$ は荷重 0 の点からの繰返し載荷履歴中の最大値までの全振幅である

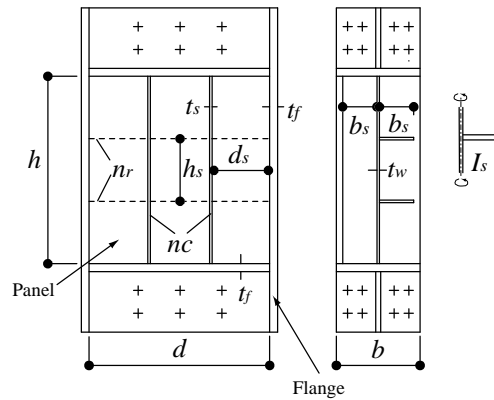


図1 せん断パネルダンパーの代表的形状

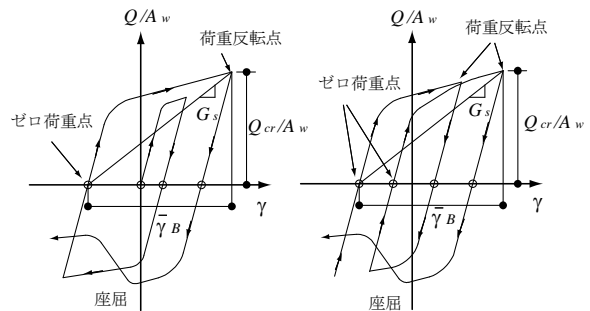


図2 繰返し載荷をうけるウェブパネルの等価せん断変形角と座屈時の割線剛性

ここに、 E, ν は、鋼材のヤング係数、ポアソン比、 h_s, t_w は、パネル高さ、板厚であり、 κ_c は、板座屈係数で、辺長比とパネル境界条件により定義され、パネル全周を固定と仮定すると次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{d_s}{h_s} \geq 1 \text{ のとき, } \kappa_c &= 8.98 + 5.60 / \left(\frac{d_s}{h_s} \right)^2 \\ \frac{d_s}{h_s} < 1 \text{ のとき, } \kappa_c &= 5.60 + 8.98 / \left(\frac{d_s}{h_s} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.a,b)$$

d_s はパネル幅である。

無補剛の場合と普通鋼 SN400 パネルの実験結果が不足しているため、左右フランジプレートの影響を除いたパネル部分のみについて、さまざまな鋼種、辺長比、幅厚比で複合非線形有限要素法解析を行って、予測式の無次元化の妥当性を検討する。また、SN400B 鋼種パネルの無補剛の場合について、漸増振幅載荷試験を行って、データを補充し、併せて検討する。

(2) 充填ボルト接合継手の分散型解析
複半月充填ボルト接合部を図3に示す。

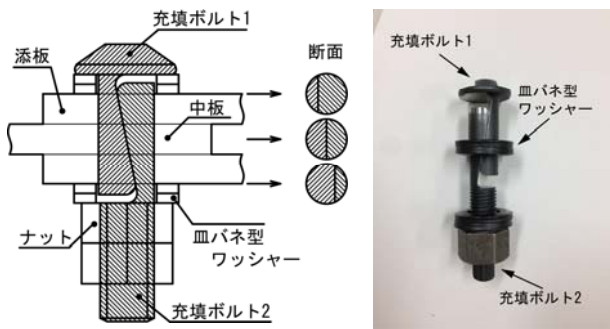


図3 複半月充填ボルト

接合部の降伏荷重は、剛性の低下率から、最大耐力は、ボルトが破損するか中板、添え板が大変形して引きちぎられるかで決められる。

その挙動を究明するためには、

①鋼板のボルト穴が大変形で拡がりつつ耐力が上昇する、複合非線形の効果と支圧破壊性状と、②充填ボルトが接触しながら、せん断破断する特性を検討する必要がある。

これらを解決するために行った複合非線形有限要素法解析のモデル化を示す。これらは、列挙すると、

①大変形大歪問題用の鋼素材応力-歪関係モデル、②アドバンスングフロント法及びテトメッシュ法によるリゾーニング手法、③接触、離間問題の解法、④摩擦のモデル化、⑤体積ロッキング回避のための要素選定となる。

挙動を追跡するためには、解析対象の対称性を考慮して図4の半領域について解かなくてはならない。2つの部分の充填ボルト1組、中板1枚と添板2枚の半領域が対象となる。

2枚の添板は弾性変形のみが生じ、中板と充填ボルトが強塑性状態となる。これらの構成要素の変形と荷重の関係を力が釣り合うように、1度に解くと立体なので多大の計算時間を要することとなる。

これを以下の過程を導入して計算を大幅に縮減する。

- ①添板は十分に耐力があり塑性化しない。
- ②ボルトの接触断面は円形を保ち、その接触面の変形は小さい。
- ③ボルト中心から、中板100mm位置までの相対変位・はボルトせん断と中板のボルト接触位置からの伸びの和として表せる。
- ④中板の端抜け挙動は、板厚の塑性化に伴う盛り上がりの影響を受けない。

構造モデルを2つの領域に分割する。

1つは、勾配1/5のテーパ面を持つ充填ボルト軸部に中板・添板の剛体に摩擦を生じる接触をし、充填ボルトは2面せん断の3次元応

力状態で立体要素を用いる領域とする(図4

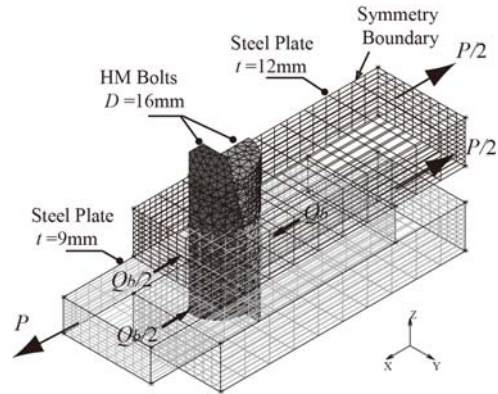


図4 継手の構成要素と充填ボルトの半領域要素分割

参照)。もう1つは、ボルトは剛体とし中板とボルトが摩擦を生じる接触をし、中板自体は平面応力状態の2次元要素を用いる領域とする(写真1(a)(b)参照)。

これら2つの領域は剛体の境界を介して次の力の釣り合い条件と変位の適合条件を満足する。

$$P = Q_p(\delta_p) \quad (4. a)$$

$$P = Q_b(\delta_b) \quad (4. b)$$

$$\delta = \delta_p + \delta_b \quad (4. c)$$

ここに、 P : 継手の荷重、 δ : ボルト中心から中板100mm位置の変位、 Q_b 、 δ_b : ボルトのせん断荷重とせん断変形(剛体中板の反力と変位(図4参照))、 Q_p 、 δ_p : 中板の支圧荷重と支圧変形(剛体ボルトの反力と変位である)。(4. a-c)式から P と δ_b を消去すると、

$$f(x) = Q_p(\delta_p) - Q_b(\delta - \delta_p) = 0 \quad (5)$$

δ を与え、(5)式を満足する δ_p を求めて(4. a)式より P を求めると、継手の荷重 P と変位 δ が求まることになる。

(5)式の解法には、regular-falsi法を適用する。 $Q_b(\delta_b)$ 及び $Q_p(\delta_p)$ の関数は耐力劣化を伴う非線形関数なので、regular-falsi法を適用する際の初期解を良好に選定する必要がある。 Q_b 及び Q_p の最大値の大きい方の関数は0から最大荷重時変位まで解が存在し、その変位までが単調増加関数であれば、その範囲に初期値を取ることにより一意に解が得られる。これにより、大規模な問題を2つの領域に分けて、個別に分散して解き、継手の複合非線形の問題を簡単に解くことができる。

4. 研究成果

(1) 等価せん断座屈変形角の設計式構築

使用した有限要素モデルは、Mindlin板曲げ理論を用いた8/9節点Heterosisシェル要素である。3x3のGauss-Legendre数値積分でひずみエネルギーについて次数低減積分を行った。プログラムは自作した。要素分割は、どの解析シリーズも10x10要素分割とし、横方向に、10層の塑性化判定点を設け

た。境界条件は、周辺固定支持とし、端部1辺に強制せん断変位を加えて、図5のAISC2005規準の振幅履歴を与えた。解析シリーズを表1にまとめて示す。解析シリーズは、パネル辺長比 h/d を 0.25, 0.33, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 と変化させるシリーズ(シリーズA)、パネルの降伏応力 σ_y を 100, 235, 320, 500, 700N/mm² と変化させるシリーズ(シリーズS)、パネル幅厚比 h/t_w を 22, 33, 40, 57, 67, 80, 100 と変化させるシリーズ(シリーズW)の計18体を用意した。

尚、上記以外の解析パラメータは、特に断りがない場合は、パネル辺長比、1.0、パネルの降伏応力は 235N/mm²、パネル幅厚比、 h/t_w を 67 とした。応力-ひずみ関係は、簡単のため、移動硬化則に従う、加工硬化係数がヤング率の1/100のBi-linear型を採用した。これからの解析シリーズについて解析を行い、Bi-linear型のせん断力-せん断変形関係からせん断座屈によって履歴の劣化が生じる直前の片振幅 γ_u から、等価せん断座屈変形角 $\bar{\gamma}_B$ を求めた。その結果を表1に示す。実験に用いたせん断パネル試験体の形状を表2に示す。解析と同様にAISC2005規準の振幅で漸増振幅繰り返し载荷を行った。試験体のパネルは無補剛で鋼種はSN400Bとしている。

表1、表2には、得られたせん断座屈変形角の結果について解析値、実験値をそれぞれ示している。また、実験のうちせん断座屈に起因して破壊した試験体のデータから(2.a)式の定数 A の平均値と標準偏差を求めると、それぞれ、3.65, 0.82 となった。

$A=3.65$ 及び $A=3.65-0.82=2.82$ とした(2.a)式を図6に実線及び破線で示す。図6には、せん断座屈により破壊した試験体の実験値を○で、普通鋼でできた無補剛せん断パネルダンパーの追加試験結果を●で、解析値▲で示している。

以上の結果から次のことがわかる。

- ① 辺長比を変化させた解析値(シリーズA)及び実験値と予測式とが良好に対応することから、基準化幅厚比中の板座屈係数は、周辺固定支持のものを使えばよい。
- ② 降伏応力度を変化させた解析値(シリーズS)と最大変形角評価式とが対応することから、基準化幅厚比中の素材特性の影響係数に、降伏せん断応力をヤング係数で割ったものを採用しておけばよい。
- ③ 数少ない実験結果との比較から得られた知見ではあるが、普通鋼SN400Bを含めた試験体について、パネルせん断座屈で破壊する場合には、等価せん断座屈変形角は、基準化幅厚比が0.145以上0.600以下の範囲、かつサブパネルの辺長比が0.5以上2.0以下の

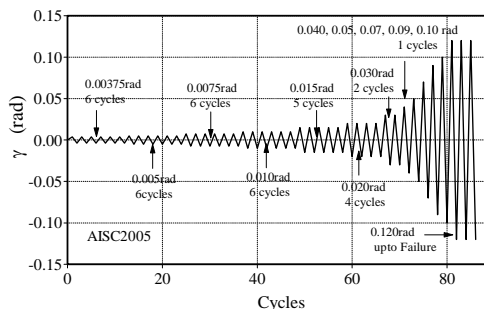


図5 漸増振幅繰り返し試験载荷プログラムの一例

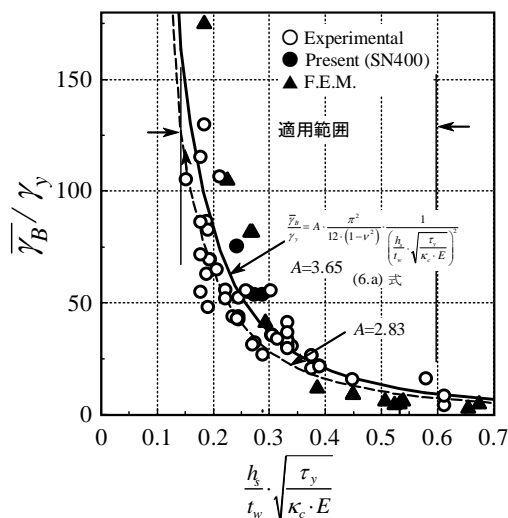


図6 解析値、無補剛を含む実験値と予測式の比較

範囲で予測式と良好に一致する。すなわち、この範囲でオイラー座屈応力と等価せん断座屈変形角とは、ほぼ比例関係にある。

④ 素材特性、辺長比の異なるパネルのせん断座屈による耐力劣化を生じさせない、せん断座屈変形角は、この予測式で大略予測できる。

(2) 充填ボルト接合継手の分散型解析

解析結果、実験結果を図7、写真1,2に示す。図7には、支圧耐力評価値で無次元化した継手の荷重 $P/3dt\sigma_u$ と計測区間で無次元化した継手の変形 δ/L との関係を示す。写真1,2には、充填ボルトが破損したH-SA700中板の端あき距離 e_f が60mmの試験体(HA60試験体)について、中板の最終状況を写真1に、充填ボルトの変形形状を写真2に示す。

表1 有限要素法解析の解析結果

Name	d	h	tw	σ_{wy}	h/d	h/tw	K_c	τ_E	$\frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{\tau_y}{K_c \cdot E}}$	F.E.M.			Calculation		
										γ_u	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B/\gamma_y$	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B/\gamma_y$	FEM./Cal
										rad	rad	-	rad	-	-
A025	200	50	3.000	0.235	0.25	17	9.3	6.223	0.140	0.170	0.340	198.0	0.291	169.7	1.17
A033	200	66	3.0	0.235	0.33	22	9.6	3.671	0.183	0.150	0.300	174.7	0.172	100.1	1.74
A050	200	100	3.0	0.235	0.50	33	10.4	1.731	0.266	0.070	0.140	81.5	0.081	47.2	1.73
A100	200	200	3.0	0.235	1.00	67	14.6	0.608	0.449	0.008	0.015	8.7	0.028	16.6	0.53
A150	200	300	3.0	0.235	1.50	100	25.8	0.478	0.506	0.005	0.010	5.8	0.022	13.0	0.45
A200	200	400	3.0	0.235	2.00	133	41.5	0.433	0.532	0.004	0.008	4.4	0.020	11.8	0.37
S100	200	200	3.0	0.100	1.00	67	14.6	0.608	0.293	0.015	0.030	41.0	0.028	39.0	1.05
S235	200	200	3.0	0.235	1.00	67	14.6	0.608	0.449	0.008	0.015	8.7	0.028	16.6	0.53
S320	200	200	3.0	0.320	1.00	67	14.6	0.608	0.524	0.005	0.010	4.3	0.028	12.2	0.35
S500	200	200	3.0	0.500	1.00	67	14.6	0.608	0.655	0.005	0.010	2.7	0.028	7.8	0.35
S700	200	200	3.0	0.700	1.00	67	14.6	0.608	0.775	0.004	0.008	1.5	0.028	5.6	0.26
W022	200	200	9.0	0.235	1.00	22	14.6	5.470	0.150	0.170	0.340	198.0	0.256	149.2	1.33
W033	200	200	6.0	0.235	1.00	33	14.6	2.431	0.225	0.090	0.180	104.8	0.114	66.3	1.58
W040	200	200	5.0	0.235	1.00	40	14.6	1.688	0.269	0.070	0.140	81.5	0.079	46.0	1.77
W057	200	200	3.5	0.235	1.00	57	14.6	0.827	0.385	0.010	0.020	11.6	0.039	22.6	0.52
W067	200	200	3.0	0.235	1.00	22	9.6	3.671	0.183	0.008	0.015	8.7	0.172	100.1	0.09
W080	200	200	2.5	0.235	1.00	80	14.6	0.422	0.539	0.005	0.010	5.8	0.020	11.5	0.51
W100	200	200	2.0	0.235	1.00	100	14.6	0.270	0.674	0.004	0.008	4.4	0.013	7.4	0.59

表2 無補剛の普通鋼せん断パネルの実験結果

Paper No	Name	Panel Type	d	h	b	tw	if	σ_{wy}	σ_{wu}	σ_{fy}	σ_{fu}	$\frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{\tau}{K_c \cdot E}}$	$\frac{b_w}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_{fu}}{E}}$	$\frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_y \cdot t_w \cdot \frac{h}{2}}$	Experimental			Calculation		
															γ_B	Failure Mode	γ_B	γ_B/γ_y	Cal./Exp.	
J9	SW-A-1	SN400	200	200	50	3.1	5.8	0.187	0.284	0.255	0.401	0.388	0.14	2.3	0.030	22.0	C	0.030	21.9	1.000
J9	SW-B-11	SN400	200	200	50	4.4	8.6	0.230	0.395	0.222	0.345	0.303	0.09	1.5	0.060	35.7	C	0.060	35.9	1.007
J9	SW-B-12	SN400	200	200	50	4.4	8.6	0.230	0.395	0.222	0.345	0.303	0.09	1.5	0.060	35.7	C	0.060	35.9	1.007
J9	SW-C-1	SN400	200	200	75	5.8	11.6	0.253	0.399	0.260	0.397	0.241	0.11	2.6	0.140	75.7	C	0.105	56.8	0.750
-	SW-D-1	SN400	200	300	75	5.8	11.6	0.253	0.399	0.260	0.397	0.272	0.11	1.7	0.100	54.1	C	0.083	44.7	0.826
-	SW-E-1	SN400	200	400	75	5.8	11.6	0.253	0.399	0.260	0.397	0.286	0.11	1.3	0.100	54.1	C	0.075	40.4	0.747

C: Crack at center of Panel, AF: Crack around Panel, FB: Flange Buckling, FW: Crack Flange Weld, B: Panel Buckling, OB: Overall Buckling
E: End Plate Failure, SW: Crack at Stiffener Weld, FWB: Flange Panel Buckling, SWB: Panel Buckling and Crack at Stiffener Weld

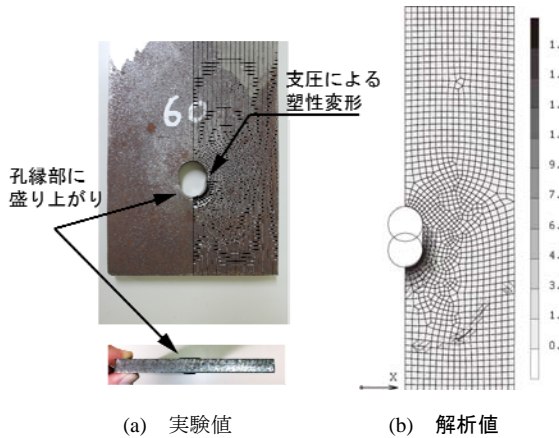


写真1 中板の最終状況

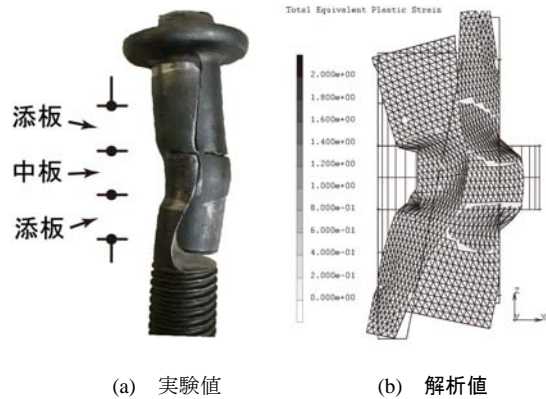


写真2 充填ボルトの破断状況

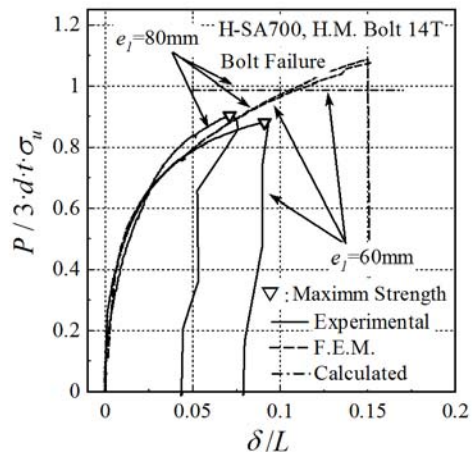
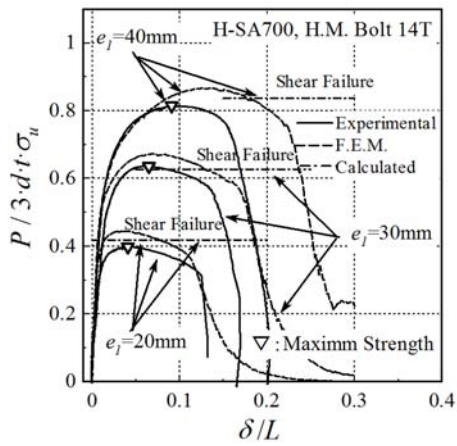


図7 充填ボルトとH-SA700中板の場合の実験値, 解析値及び評価値

提案する複半月充填ボルト接合継手について中板を SM490, H-SA700 として引張試験を行うとともに、接触問題、複合非線形問題として有限要素法解析で行ってその耐荷性状比較、検討して得られた知見は以下のように要約できる。

①分散型解析によりボルトの折損性状最大耐力値については、若干誤差があるものの SM490, H-SA700 中板のせん断力については工学上十分な精度の荷重-変形問題を追跡できる。

②支圧耐力評価値までは、充填ボルト軸部は十分な耐力を有しており、中板の孔に大きな変形が生じボルトに曲げ変形と添板が変形し、すると最小断面部が引張破断する傾向にある。

③継手の添板に大きな変形が生じなければ、H-SA700 中板を充填ボルト接合すれば、支圧耐力評価値までの高い接合耐力を保持しつつ、かつ初期剛性を十分確保することができる。

5. 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 14 件)

- ① 玉井宏章, 桐山尚大, 高松隆夫: 高強度鋼用の複半月テーパ充填ボルト接合梁継手の載荷試験, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 21 号, pp.587-594, 2013.11.
- ② 玉井宏章, 力久陽介, 高松隆夫: アンカーボルトの伸び性能について, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 21 号, pp.645-651, 2013.11.
- ③ 山西央朗, 笠井和彦, 高松隆夫, 玉井宏章: 弾性回転剛性と耐力を広範囲・高精度で調整できる鉄骨柱脚, 性能指定型設計に対応できる柱脚に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 683 号, pp.213-223, 2013.1.
- ④ 玉井宏章, 島津 勝, 尾川勝彦, 高松隆夫: せん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角について, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 20 号, pp.229-236, 2012.11.
- ⑤ 玉井宏章, 島津 勝, 尾川勝彦, 高松隆夫: 飯田康博, せん断パネルダンパーの累積損傷度について, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 20 号, pp.237-244, 2012.11.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 山下祥平, 桐山尚大, 玉井宏章: 高強度鋼用の複半月充填ボルト支圧接合継手の載荷実験 その 1 実験の概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, pp.369-372, 2014.3.2 (佐賀大学, 佐賀県佐賀市)
- ② 桐山尚大, 山下祥平, 玉井宏章: 高強度

鋼用の複半月充填ボルト支圧接合継手の載荷実験 その 2 解析的検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, pp.373-376, 2014.3..2 (佐賀大学, 佐賀県佐賀市)

- ③ 力久陽介, 玉井宏章, 高松隆夫: 露出柱脚用アンカーボルトの伸び性能について, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, pp.385-388, 2014.3.2 (佐賀大学, 佐賀県佐賀市)
- ④ 飯田康博, 玉井宏章: せん断パネルの設計式に関する一考察
- フランジ幅厚比について -, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, pp.417-420, 2014.3.2 (佐賀大学, 佐賀県佐賀市)
- ⑤ 玉井宏章, 尾川勝彦, 高松隆夫, 複半月テーパ充填ボルト接合法に関する基礎的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 35 巻, pp. 337-340, 2012.3.3 (岡山理科大学, 岡山県岡山市)

[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://tmarcl.st.nagasaki-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉井 宏章 (TAMAI HIROYUKI)

長崎大学・大学院工学研究科・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