

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***

(平成 20 年 10 月 31 日受理)

Collaborative Seismic Performance Evaluation of Steel Structure with Shear Panel Damper

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI and Motohide TADA

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

In the previous paper, we improved a substructure online system for investigating the restoring force characteristics of exposed column-base. This substructure online system and interface of CSA (Collaborative structural analysis) forms a collaborative seismic performance evaluation system. This system enables collaboration among researchers by linking their programs and experimental systems through the Internet. As participants can share data such as interactions between structural members, distribution of seismic loading and overall failure mode of building structures, it makes it very easy to investigate the seismic performance evaluation using the sophisticated knowledge of participants. Hence, we call it a collaborative seismic performance evaluation (CSPE). Also, the hysteretic damper is used to use the building frame in seismic area. In this paper, we evaluate the seismic performance of building frame with a shear panel dampers using this CSPE system. Evaluation results show validity and possibility of the presented CSPE system.

Keywords: collaborative seismic performance evaluation, shear panel damper, Internet

1. はじめに

著者の1人は、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, 異種言語を用いても、容易に接続でき、建物全体の挙動を解析できる『統合化解析手法』を提案した¹⁾。また、これらの状況を背景に、この実大部分構造加力装置を用いて、部分構造法によるオンライン実地震応答シミュレータを構築し、インターネットを介して異種構造解析プログラム/異

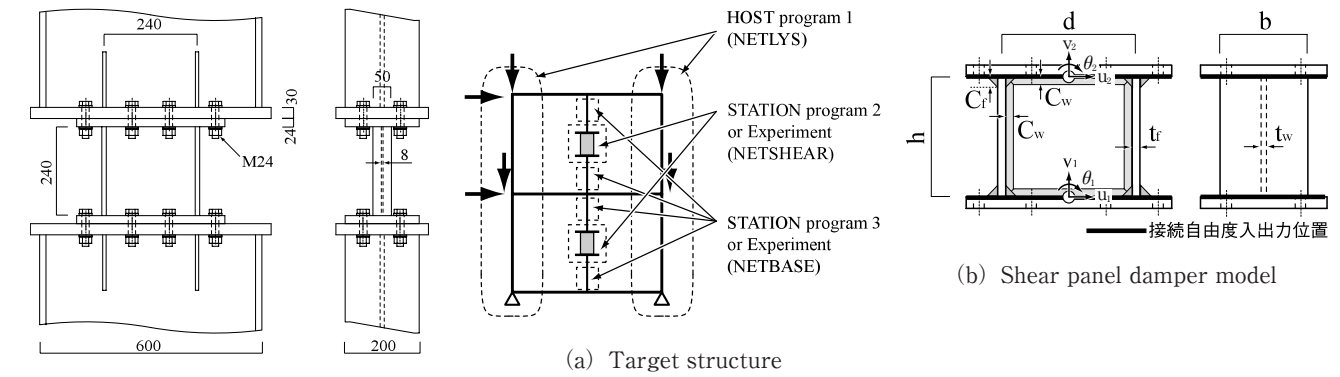
種構造実験システムを容易に接続できる分散型解析・実験の接続法(インターフェイス)を開発している²⁾。

インターネットによる接続法を解析プログラムに実装すれば、国内外の研究者と分散型解析・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、遠隔地にいる国内外の研究者が協力・協調して、対象とする建物の部分構造の解析や実験を相互作用を考慮して行い、個々の部分構造の

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

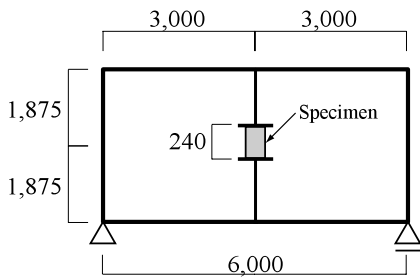
*** 大阪大学大学院地球総合工学専攻



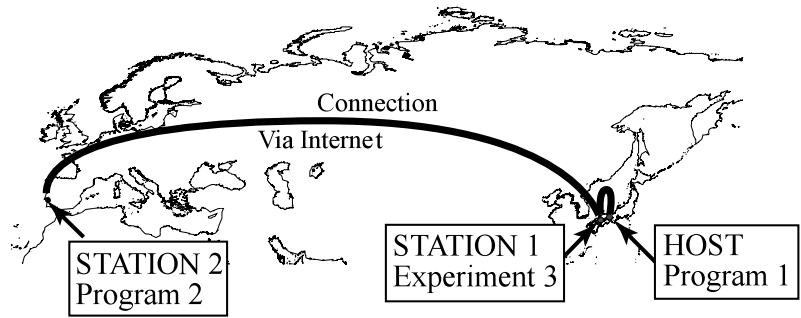
(a) せん断パネルダンパー詳細

(a) Target structure

(b) Shear panel damper model



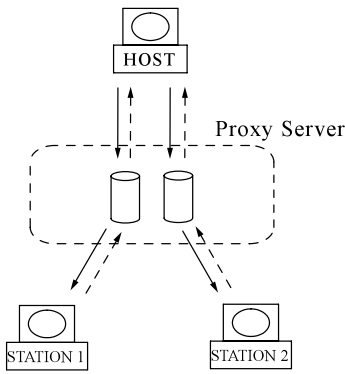
(b) せん断パネルダンパー付架構



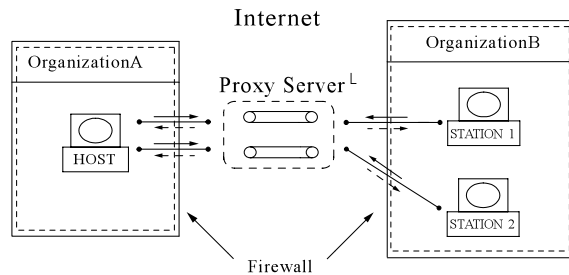
(c) Location of organization

Fig. 1 間柱型せん断パネルダンパー

Fig. 2 統合化評価法の概念



(a) Dataの流れ



(b) Firewall, Proxy server と HOST, STATION の位置

Fig. 3 Proxy サーバーを通ったソケット通信法

挙動から、各研究者の専門知識を駆使して建物全体の耐震性能を明らかにする評価方法を、本研究では、統合化評価法と呼んでいる。

本研究では、せん断パネル間柱ダンパー付鉄骨架構に着目し、この統合化評価法を用いて、耐震性能を検討するシステムを構築することを目的としている。まず、せん断パネルダンパーに着目した構造解析プログラム（ステーション）を新たに作成する。次いで、せん断パネルダンパーの間柱を含む架構からの相互作用による特性の変化を実験的、解析的に明らかにするとともに、せん断パネル間柱ダンパー付鉄骨架構鋼について、統合化解析を行って接続法の検証を行うとともに耐震性能の評価を行った結果を示す。

2. せん断パネルダンパーと統合化評価システムの概要

2.1 せん断パネルダンパー

本研究で取扱う間柱型せん断パネルダンパー付架構の一例を Fig.1 (a), (b) に示す。

せん断パネルダンパーは、Fig.1 (a) に示すように、鋼板パネルの左右辺にフランジプレートを、上下辺にエンドプレートを溶接したものである。このせん断パネルダンパーよりも強度の高い間柱の中央部に、エンドプレートを介してボルト接合して用いる。

地震入力エネルギーを積極的に吸収するダンパーとして、このせん断パネルダンパーの他に、座屈拘束ブレース

Table 1 素材特性

	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_{st} (%)	ϵ_u (%)	H_r (HRB)
Web	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_u : Elongation H_r : Rockwell hardness (B scale)

Table 2 有限要素解析用素材特性と試験体形状

	$\sigma_y^{[1]}$ (MPa)	$H^{[1]}$ (MPa)	$\sigma_y^{[2]}$ (MPa)	$H^{[2]}$ (MPa)	κ
Web	232.1	1999.2	315.2	1352.4	0.5
Stiffener	262.9	1803.2	332.6	1303.4	0.5
Flange	245.3	1352.4	298.4	1509.2	0.5

$\sigma_y^{[1]}, \sigma_y^{[2]}$: First, Second yield stress $H^{[1]}, H^{[2]}$: First, Second tangent modulus

κ : Isotropic-kinematic hardening ratio

h mm	d mm	t_w mm	t_f mm	b mm	C_w mm	C_f mm
218	238	5.60	12.0	230	5.60	12.6

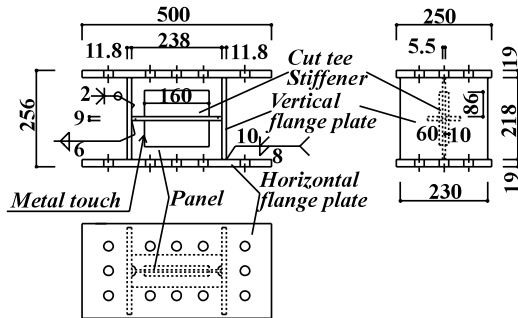


Fig. 4 既往実験の試験体形状

がある。座屈拘束ブレースは、1) 降伏耐力を決めると剛性が決まるので層剛性の調整できないこと、2) ブレースなので、構面を塞いでしまうので、広い間口部が取れないこと、等の欠点を有している。

間柱型せん断パネルダンパーは、1) 降伏耐力はせん断パネルダンパーのパネル形状で用意に設定でき、層剛性は間柱の断面性能を変化させることで容易に調整できること、2) 普通鋼でも製作でき安価であること、などの利点を有している。

これら、履歴ダンパーを利用した建物は、激震時に建物に入力されるエネルギーをダンパー部で集中して吸収するので、主要架構に損傷を与えないため、耐震性能が格段に向上する。そのため、地震国である日本における建築構造では、ダンパー付架構が主流となると考えられる。

2.2 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.2 (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

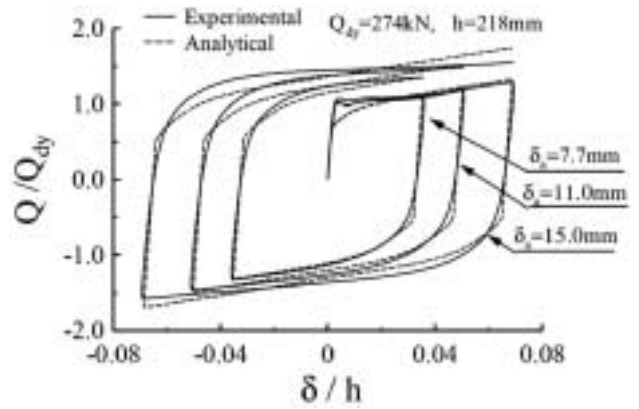


Fig. 5 定常振幅繰返し荷重解析の $Q/Q_{by} - \delta/h$ 関係 (純せん断変形下)

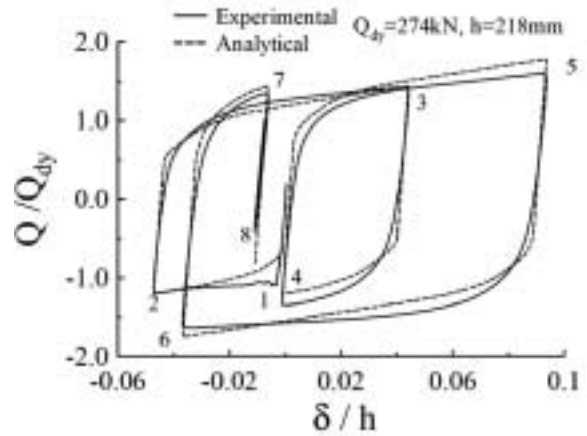


Fig. 6 非定常振幅繰返し荷重解析の $Q/Q_{by} - \delta/h$ 関係 (純せん断変形下)

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をそれぞれ Fig.2 (b)のように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紹介して、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。

Table 3 解析対象のせん断パネルダンパーの素材特性と形状

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

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

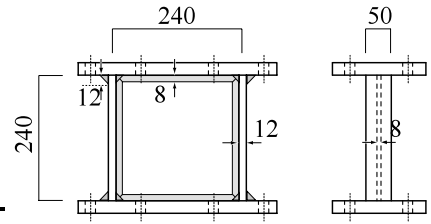
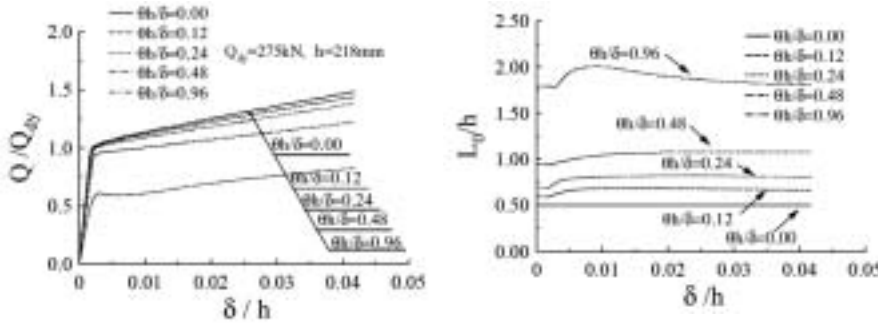


Fig. 7 解析対象のせん断パネルダンパー



(a) $Q/Q_{by} - \delta/h$ 関係 (b) $L_0/h - \delta/h$ 関係

Fig. 8 曲げせん断変形の復元力特性に及ぼす影響

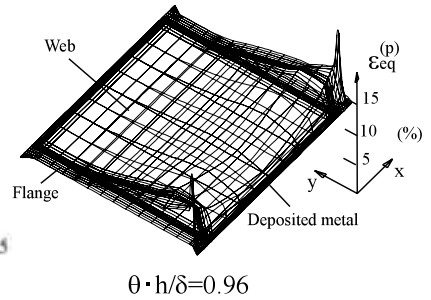
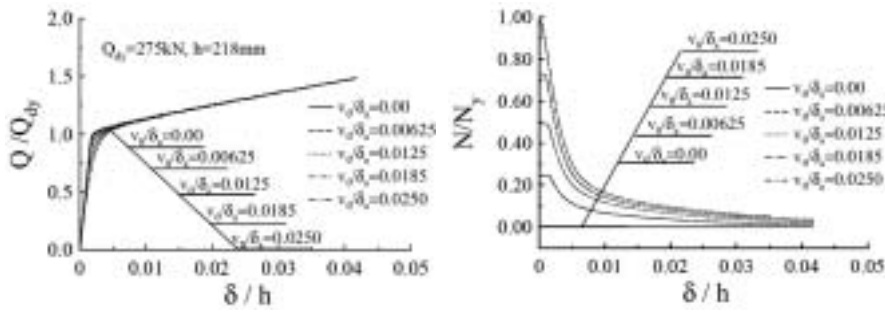


Fig. 10 曲げせん断変形による相当塑性歪の集中特性



(a) $Q/Q_{by} - \delta/h$ 関係 (b) $L_0/h - \delta/h$ 関係

Fig. 9 初期軸変形の復元力特性におよぼす影響

2.3 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.3 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。

3. 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。

3.1 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.2 (c) 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

Table 4 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 ⁸	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, /54	452	-	-	-

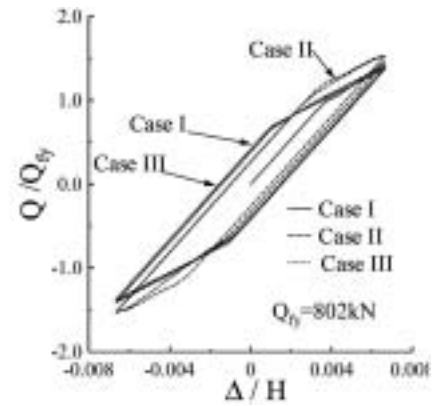


Fig. 11 層せん断力-層間変形角関係

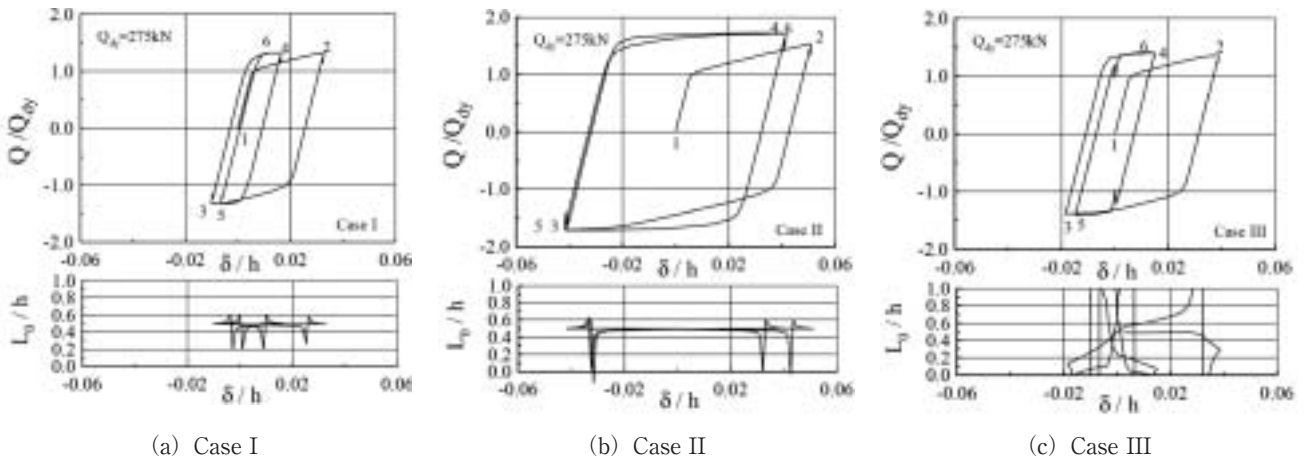


Fig. 12 せん断力-せん断方向相対変位関係と反曲点位置

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.2 (c)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。

3.2 構成方程式と相当塑性ひずみ

大きな塑性変形が生じるせん断抵抗材の繰り返し載荷時も含めた荷重経路下でのひずみ硬化特性を追跡するため，本研究では，文献3を参考に，構成方程式として，単軸状態の応力-ひずみ関係を Tri-linear 直線で近似し，硬化則は等方硬化則と移動硬化則とを併用したものを採用した。降伏条件及び塑性ポテンシャルは，Von-Mises式を用い，ひずみ硬化の寄与を等方硬化成分と移動硬化成分に分け，それらの比は一定とし，移動硬化成分については Ziegler の修正則に従うものとした。構成方程式の定式化の詳細については，文献4を参照されたい。

また，本研究では，多軸応力下での塑性ひずみの集中特性を検討するため，その指標として，次式で定義される相当塑性ひずみ： $\epsilon_{eq}^{(p)}$ を用いる。

$$\epsilon_{eq}^{(p)} = \int d\epsilon_{eq}^{(p)} \dots \dots \dots (1.a)$$

ここに，

$$d\epsilon_{eq}^{(p)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(d\epsilon_x^{(p)2} + d\epsilon_y^{(p)2} + d\epsilon_x^{(p)} \cdot d\epsilon_y^{(p)} + \frac{1}{4} d\gamma_{xy}^{(p)2} \right)^{\frac{1}{2}} \dots (1.b)$$

であり $d\epsilon_x^{(p)}$ ， $d\epsilon_y^{(p)}$ ， $d\gamma_{xy}^{(p)}$ は，各塑性ひずみの増分である。

塑性ひずみは，ひずみエネルギーの数値積分の標本点位置で評価されるので，その位置で相当塑性ひずみを算定している。また，以降の解析例で解析領域全体の分布を示すときには，この算定値を基に，要素モデルの形状関数を重み関数とした平滑化を施して求めた値を採用している。

3.3 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.4に示す既往の研究⁵⁾の普通鋼せん断抵抗材について解析を行い，載荷実験結果と比較した。

載荷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。完全焼鈍処理後の試験体と同質・同厚・同温度履歴の 5 号試験片を用いた素材試験結果を Table 1 に、また、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 2 に、それぞれ、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。

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 ($=u_2 - u_1$) を 7.7, 11.0, 15.0, 22.5 (mm) の定変位振幅で 1 サイクル載荷する定常振幅繰り返し載荷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載荷解析の計 5 ケースとした。

純せん断変形下での定変位繰り返し載荷解析、および、非定常振幅繰り返し載荷解析における、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 5 および Fig.6 に、それぞれ、示す。

これらの図より、本解析では、繰り返し載荷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、載荷初期や際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。

4. 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であろう、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。

4.1 解析シリーズ

3.3 節で示した解析プログラム単体を用いて、Fig.7 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 3 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、 $\delta = 10\text{mm}$ まで単調に載荷する計 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位振幅 $\delta_a (= 10\text{mm})$ との比 v_0 / δ_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 まで単調に載荷する計 5 ケースを解析した。

4.2 解析結果

解析シリーズ I の結果を図 8 (a), (b), Fig.10 に、解析シリーズ II の結果を図 9 (a), (b) に示す。

Fig.8 (a), Fig.9 (a) には、せん断力、 Q とせん断方向相対変位、 δ との関係を、Fig.8 (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 d 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、Fig.9 には $(\theta \cdot h / \delta) = 0.96$ の場合の載荷完了時の相当塑性歪 ϵ_{eq}^p 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たり、純せん断変形下での繰り返し載荷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。

5. せん断パネルダンパー付架構の統合化解析(予定)

統合化解析の有効性を示すため、Fig.1 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。解析対象の各部材の断面性能を Table 4 に示す。せん断パネルダンパーについては、4 節で取扱った Fig.7 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、NETBASE²⁾ を、せん断パネルダンパーについては、3 節で示したステーションプログラム NETSHEAR 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 σ_y が325MPaとした場合), 下側の間柱に塑性ヒンジを生じるケース (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として, 2サイクル繰返す統合化解析を行った。

Fig.11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_b と層間変形角, Δ/H の関係を, Fig.12 (a)~(c)には, Case I~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_b とパネル高さで無次元化したせん断方向相対変位, Δ/H の関係と, 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, L_0/h と Δ/H の関係を示す。

これ等の図より, 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, L_0/h は, 0.5を中心に变化する。特に, 荷重の正負が入れ替わる時点で大きく变化する。したがって, 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变化するので, この構造特性を調査するためには, 提案した統合化解析は有用である。

6. 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を作成した。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, 降伏耐力は变化する。したがって, 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

集中がおきるので, 純せん断のみの繰返し载荷実験で, 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を伴う耐力上昇を見込んだ十分な耐力を, 接続用間柱には設定すべきである。
- 4) 载荷中, せん断パネルダンパーの反曲点位置は变化する。
- 5) 間柱ダンパー付加工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载荷解析, 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みの断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.