

メカニカルファスナーにより取付けられた耐震補強ブレースの ハイブリッド地震応答実験

Hybrid Tests on Steel Frames Upgraded by a Bracing System Installed with
Fully Mechanical Fasteners

大 井 謙 一*・李 昇 宰*・嶋 脇 與 助*
Kenichi OHI, Seung-Jae LEE, Yosuke SHIMAWAKI

1. は じ め に

1995 年の阪神・淡路大震災では、鉄骨造建築物の溶接部付近を起点とした破断現象が数多く報告されている¹⁾。これは溶接部近傍に生じる形状的・材質的不連続部の存在が鋼材の破断に大きく影響するためと考えられている²⁾。さらに、近年耐震補強において耐震要素を取設ける場合に現場溶接接合が多用されるが、既存建物への溶接であるため難易度の高い溶接作業となり、溶接継目の形状や溶接熱による鋼材質の不連続部が生じ、ここにひずみが集中して脆性破壊の起点となる可能性がある。そこで本研究では、既存建築物へブレースでの耐震補強を行う際、欠陥の生じやすい現場溶接接合を行わずに、ティ金物を介して柱のウェブに高力ボルト接合する方法を代替案として考え、その有効性を実験的に検証する。

試験体としてはティ金物を介してブレースを柱のウェブ面外方向に取付けた鉄骨架構モデルを製作し、地震応答実験に先立ち準静的・動的載荷実験を実行する。それから部分構造法を用いたハイブリッド地震応答実験手法を適用し、このブレースを用いて 2 層架構の上層部分を耐震補強した場合を想定してオンライン地震応答実験を実行した。本報では、準静的・動的載荷実験結果及び 2 層架構モデルの地震応答実験結果について報告する。

2. 実 験 の 概 要

載荷実験装置を図 1 に示す。試験架構の H 形断面柱はベースブロックにピン支持されている。ティ金物と柱の接合部は図 2 に示すディテールを用いている。ブレースを取付けるティ金物は JIS SS 400 級の形鋼 H-500 × 200 × 10 × 16 より切断して製作した。ブレースは JIS SS 400 級形鋼 L-65 × 65 × 6 のアングル材を 1 丁使いとし、5 本の高力ボルトによってティ金物に取付ける。これは、鋼構造

限界状態設計指針³⁾の最大接合耐力に関する接合部規定をちょうど満足している。梁（溝形鋼 2 丁使い 150 × 75 × 6.5 × 10）とブレースはティ金物を介して柱のウェブに接合されている。ブレースの材軸線は柱梁の材軸線の交点をねらっている。また、柱のウェブには板補剛を行っている。ファスナーとしてはトルシア型高力ボルト（M 20-S 10 T）を用い、ボルト穴とのクリアランスを 2 mm としている。ブレースとティ金物の材料試験結果を表 1 に示す。

上記の試験体は載荷実験及びオンライン地震応答実験の部分構造試験体として使用される。実施した載荷実験とオンライン地震応答実験の詳細を表 2 に示しており、それぞれ 4 ケースと 3 ケースの計 7 ケースである。

部分構造オンライン地震応答実験のモデルを図 3 に示している。ここでは、下層部が RC 壁構造、上層部がブレース付き鉄骨架構の並用構造となる体育館を想定する。上層部の既存ブレースはガセットプレートを用いて軸組と溶接接合されており早期に破断が発生すると仮定する。地震応答実験では、新しく耐震補強ブレースを装着した部分架構のみを試験体として載荷実験を行い、既存ブレースを含む残りの部分はすべて仮想構造としてコンピュータ内でシミュレートするので、地震応答実験のセットアップは図 1 で示している載荷実験の場合と同じである。仮想構造部分である 1 対の既存ブレースの履歴挙動については図 4 のモデルを用いてシミュレートする。引張ブレースの耐力が破断耐力に達すると塑性変形することなく破断し抵抗能力を失い、残りの僅かな圧縮ブレースの座屈後耐力のみで抵抗するモデルとなっている。表 3 に地震応答実験モデルの諸元を示す。上記の地震応答実験モデルは 2 自由度系となるので、物理座標系における地震時の運動方程式は次式で表すことができる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{F\} = -[M]\{1\}\ddot{y} \dots\dots\dots (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

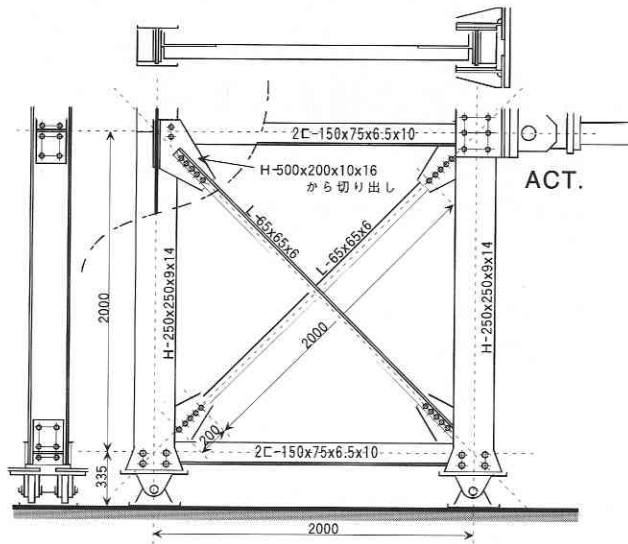


図1 荷重実験装置

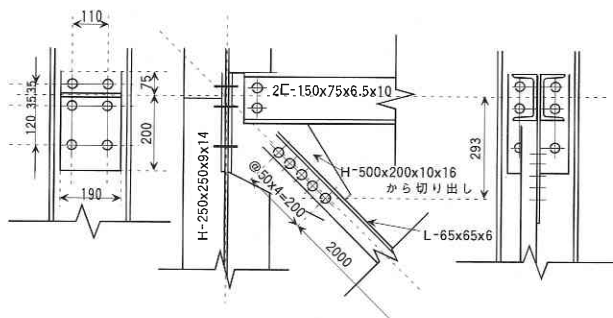


図2 ティ金物と柱接合部のディテール

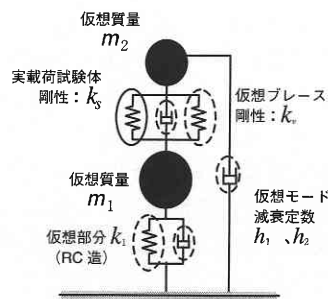


図3 地震応答実験モデル

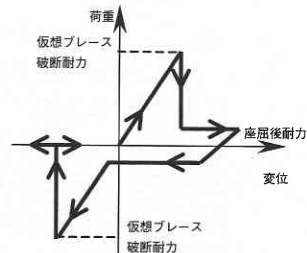


図4 既存ブレースの履歴モデル

表1 ブレースとティ金物の材料試験結果

素材試験片	σ_y	σ_u	破断伸び (%)	σ_y / σ_u (%)
ブレース	3.30	4.73	24.4	69.7
ティ金物 (ウェブ)	3.29	4.69	26.5	70.0
ティ金物 (フランジ)	2.87	4.54	32.1	63.2
柱 (ウェブ)	3.25	4.60	27.8	70.7
高力ボルト	9.10	10.8	14.1	84.3

表2 荷重実験及び地震応答実験の詳細

荷重実験	単調荷重	準静的荷重 (0.1 cm / sec)
		動的荷重 (50 cm / sec)
繰返し荷重	繰返し荷重	準静的荷重 (0.1 cm / sec)
		動的荷重 (50 cm / sec)
オンライン実験	El Centro NS	最大加速度 400 Gal
		単位質量あたりの力積 50 Gal·sec
インパルス波	インパルス波	単位質量あたりの力積 100 Gal·sec

表3 地震応答実験モデルの振動特性

$\frac{k_1}{(k_s + k_v)}$	$\frac{m_1}{m_2}$	固有 周期	刺激関数 ベクトル	仮想モード 減衰定数
15.65	2	1次：0.3秒	$[1.125 \ 0.0671]^T$,	$h_1=0.02$
		2次：0.1秒	$[-0.125 \ 0.9239]^T$,	$h_2=0.02$
試験体の剛性・降伏耐力			2層部分降伏せん断力係数	
$k_s = 20.0$ (ton/cm)	$Q_s = 16.6$ (ton)		0.4	

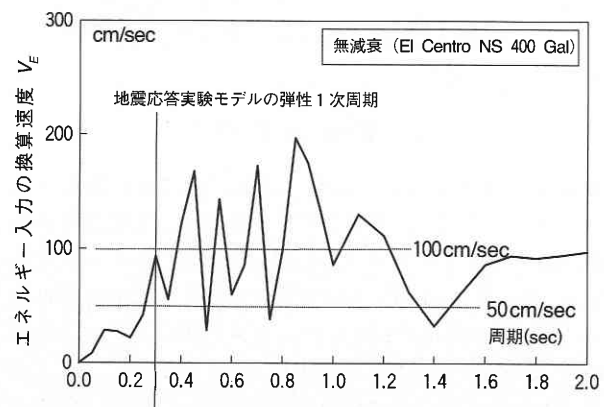


図5 エネルギー入力速度換算スペクトル

ここに、 $[M]$ $[C]$ は 2 自由度系の仮想質量及び仮想減衰マトリクス、 $\{F\}$ はハイブリッド復元力、 \ddot{y} は入力地震動、 $\{x\}$ と $\{x\}$ は地面に対する相対加速度ベクトル及び相対速度ベクトルである。本実験では、古典的規準モードによるモード座標系において運動方程式を記述し、その数値積分を行っている⁴⁾。

1) ある時刻 i ステップでの全自由度系の復元力 $\{F\}^i$ を評価する。

2) 復元力を刺激関数マトリクスの転置 $[\Phi]^T$ によりモード復元力 $\{q\}^i$ に変換する。

$$\{q\}^i = [\Phi]^T \{F\}^i \dots\dots\dots (2)$$

3) 次のステップの n 次モード座標における変位 δ_n^{i+1} は中央差分式を用いて次式で評価する。

$$\begin{aligned} & (1 + h_n \omega_n \Delta t) (\delta_n^{i+1} - \delta_n^i) \\ & = (1 - h_n \omega_n \Delta t) (\delta_n^i - \delta_n^{i-1}) - \Delta t^2 (q_n^i / m_n^* + \ddot{y}) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 h_n , ω_n , m_n^* は n 次モード減衰定数、 n 次固有円振動数、 n 次有効質量である。

4) モード変位 $\{\delta\}^{i+1}$ を変換マトリクスを用いて物理座標の変位 $\{x\}^{i+1}$ に変換する。

$$\{x\}^{i+1} = [\Phi] \{\delta\}^{i+1} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)で求められた物理座標の変位を試験体及びコンピュータ内の解析モデルに強制して手順 1) の弾塑性ハイブリッド復元力を評価することによって弾塑性地震応答解析を行う。

なお、入力地震波としては El Centro NS 1940 の主要動を含む 10 秒間を使用している。入力レベルは 400 Gal、応答解析の時間刻みを 0.005 秒としている。時間軸方向の縮尺は行わず、振動系の 1 次固有周期は 0.3 秒とし、第 2 層降伏せん断力係数は 0.4 と設定されている。図 5 に入力地震波のエネルギー入力の換算速度スペクトルを示す。地震波入力のほかに、上記の入力地震波とほぼ同レベルの運動エネルギーを与えるような加速度インパルス（単位質量あたりの力積で表すと 100 cm/sec）、その半分（50 cm/sec）の加速度インパルスに対する応答実験も行う。

3. 準静的・動的載荷実験

図 6 に載荷実験結果を示している。縦軸はアクチュエータのロードセルより読取った荷重であり、横軸は外付変位計 (X_1) の変位である。繰返し載荷方法は変位制御を用い

て単調載荷実験結果より求めた試験体の弾性限界変位を基準として、その ± 1 倍、 ± 2 倍、 ± 3 倍、 ± 4 倍、 ± 5 倍、 ± 6 倍、 ± 7 倍、 ± 8 倍で各 3 回、 ± 10 倍、 ± 12 倍、 ± 14 倍、 ± 16 倍で各 1 回のランプ波より一定速度の載荷を行った。いずれも試験体下部のブレース取付部の断面欠損部分（第 1 ボルト孔）からの破断もしくは亀裂発生により、載荷を終了した。破断に至るまでの変形能力については、繰返し載荷時に見かけの変形能力が単調載荷に比べて大きくなるという興味深い現象があり、また載荷速度については、動的載荷時には降伏点上昇現象が見られ、準静的載荷時より破断時期が早まっているのが、図 6 より読み取れる。今回の載荷実験では、ブレースが面外に大きく座屈し、外装材への影響が懸念される。ブレースを除く周辺架構の分担復元力を柱の歪データから評価したところ、試験体部分架構の全体復元力の約 95 % をブレースが負担していることが分かった。実験後、柱のウェブの板曲げによる損傷は全く見られず、ブレースの破断に至るまでの十分な接合効果が確認された。

4. ハイブリッド地震応答実験

図 7 に第 2 層の変位応答を示している。第 1 層部分は弾性範囲に留まっている。第 2 層のインパルス変位応答には 1 次モードと 2 次モードの振動成分が混在しており、実験終了時には残留変形（50 cm/sec の場合：残留変形角 1/50）が残っている。

図 8 に第 2 層部分（試験体及び仮想の既存ブレース部分）の層せん断力と層間変位関係を示す。El Centro 地震波入力のケースでは仮想の既存ブレースは 2 本とも破断に至ったが、インパルスの場合は両ケースとも 1 本のみ破断している。El Centro 地震波入力のケースでは全継続時間の間倒壊に至らなかったが、100 cm/sec インパルス入力の場合では、試験体の引張側ブレースが破断した後急激に変位応答が大きくなり実験を中止した。これは、同一エネルギー入力の下では衝撃応答の方が変位応答が大きくなるほか、載荷実験で観察されたように、試験体のブレースの破断に至るまでの見かけの変形能力が繰返し載荷時の方が単調載荷時に比べて大きくなるという効果があらわれたためと考えられる。

5. ま と め

本論文ではまず耐震補強ブレースの接合方法として、溶接を一切使わないメカニカルファスナのみによる接合方法を検討した。その有効性を準静的及び動的載荷実験で調べ、本実験範囲内では十分な接合効果が確認された。しかし、ウェブの曲げ負担が大きくなる柱せいの大きい場合への適

研 究 速 報

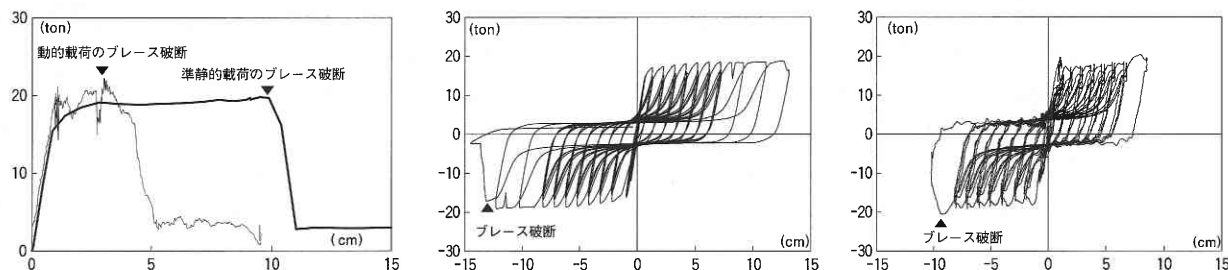


図6 載荷実験結果(単調載荷, 準静的繰返し, 動的繰返し)

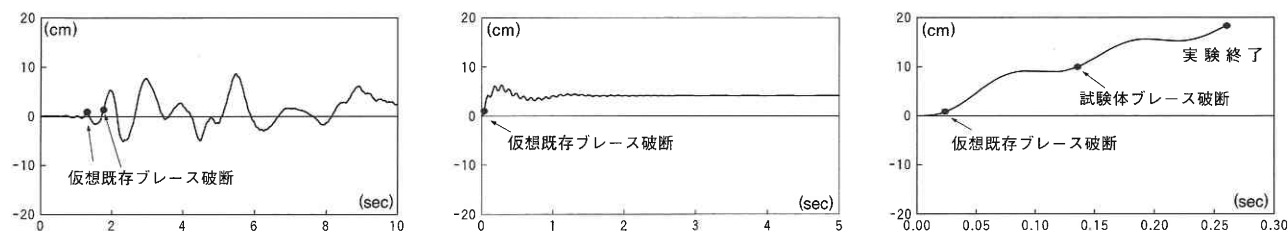


図7 第2層の時刻歴変位応答 (ElCentro 地震波入力, インパルス 50 cm/sec 入力, 100 cm/sec 入力)

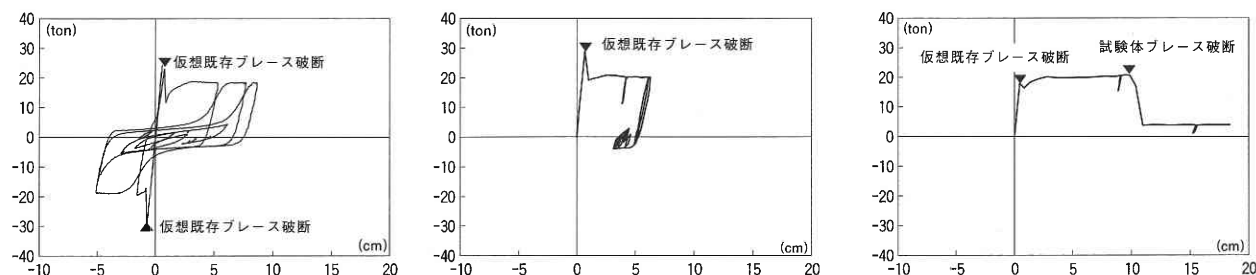


図8 第2層のハイブリッド履歴曲線 (ElCentro 地震波入力, インパルス 50 cm/sec 入力, 100 cm/sec 入力)

用性及び柱ウェブの補剛法を含めた接合部の設計法に対しては検討の余地がある。それから単純化された2層架構モデルに部分構造ハイブリッド地震応答実験システムを適用し、地震入力・衝撃入力に対する弾塑性応答挙動を検討した結果、同一エネルギー入力レベルの下では衝撃入力の方が構造物にとって不利にはたらくことが観察された。

謝 辞

接合法の開発については、高梨晃一千葉大学教授、太田勤氏(堀江建築工学研究所)より多大の御指導ならびに御助力をいただいた。また、本研究の一部には「半剛接鉄骨架構の実用化検討委員会」((社)鋼材倶楽部, 東大生研)の研究経費を使用した。

(1999年8月13日受理)

参 考 文 献

- 1) 「1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書」, 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会, 1995.
- 2) 今津洋也, 大井謙一 他4名: 「溶接金物付高性能鋼の動的繰返し載荷実験」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1998.
- 3) 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 1998.
- 4) 孫 宏, 大井謙一, 陳 以一, 「多自由度弾塑性地震応答解析における部分モード解析法」, 日本建築大会学術講演梗概集, 構造, 1994.