

鉄骨筋かい付骨組の原点復帰機能に関するオンライン応答実験

Pseudo-Dynamic Tests on Self-Returning Capability of Steel Braced Frame to the Original Position

大 井 謙 一*・嶋 脇 與 助*・大 塚 日出夫*・伊 藤 拓 海*・片 野 史 大*

Kenichi OHI, Yosuke SHIMAWAKI, Hideo OTSUKA, Takumi ITO and Fumihiko KATANO

1. は じ め に

Ti-Ni 系合金などに代表される形状記憶合金 (Shape Memory Alloy) は、通常の鋼材料の弾性変形歪を遙かに上回る 5 ~ 10 % にも及ぶ擬弾性変形を併せ持ち、大歪が回復して元の形状に戻る特性がある。形状記憶合金の構造システムへの応用として、柱梁の半剛接合部におけるボルトに同合金を適用し (以下 SMA ボルトと略する)、超弾性接合部を有する架構の実現を試み、その地震時挙動を実証的に調べる。また超弾性接合されたラーメンと軸組ブレースの混合構造に、El Centro NS 1940 地震波ならびに加速度 Impulse を入力して、オンライン地震応答実験を行い、梁端 SMA ボルト接合部の挙動を簡単な復元力特性モデルで近似した数値応答解析結果と比較する。

2. 実 験 方 法

2.1 試験体と想定骨組

ここでは有力な解析手段として、数学モデルの確立していない SMA ボルト接合部を載荷実験部分とし、それ以外の部分については計算機内でシミュレートするサブストラクチャ・オンライン応答実験を実行した。SMA ボルトは、形状記憶合金 (Ni: 54.66 %, Co: 1.48 %, Ti: 残り) の素材からなる 17 mm 径の棒材を、図 1 に示すような両端にネジ部を有する形状に加工した。平行軸部 (13 mm 径) の長さは 5 cm である。(材料のマartenサイト相 (M) とオーステナイト相 (A) 遷移温度は Ms: 23.3°C, Mf: 1.5°C, As': 11.6°C, Af': 30.9°C) 同合金の応力歪曲線を図 2 に示す。

SMA ボルトの温度管理は、湯せん (50°C, 30 分後 40°C, 60 分後 35°C) 後、室内に放置し、同一温度 (10°C) になったことを確認し、試験体にセットした。

SMA ボルト試験体はセット時に張力を軸歪で 700 μ 程度 (軸部応力度で 50 MPa 程度) 導入してある。

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

比較対照のため、普通ボルト (強度区分 4.8 相当, 16 mm 径, 全ねじ) を使用した試験体についても実験を行った。

図 3 に示すように梁 H-250 \times 125 \times 6 \times 9 を梁端に溶接されたフラッシュ形エンドプレート (板厚 16 mm) を介して SMA ボルトまたは普通ボルト 4 本で試験台に固定された柱ピースに接合している。柱面より 1700 mm の位置に片持梁形式で変位制御荷重を行う。

変位計測は荷重位置の X1, SMA ボルトの浮き上がりを計測する X2, X3 を計測している。ひずみの測定は梁端より 425 mm の位置に G1, G2, 2 本の SMA ボルトにそれぞれ 2 箇所, G3, G4, G5, G6 の計測がなされている。

オンライン応答実験では、柱脚ピンの仮想剛柱ならびに上記の梁-接合部試験体から成る門形ラーメンに仮想軸組引張ブレース (スリップモデル) を組込んだ骨組を想定している (図 4)。

仮想慣性質量 $M=48,800$ kg, 仮想粘性減衰 2.0 %, 仮想ブレースの初期弾性剛性 18,500 kN/m, 骨組全体の弾性 1

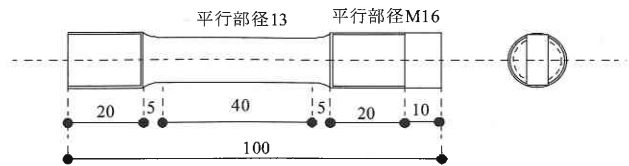


図 1 試験体形状 (単位: mm)

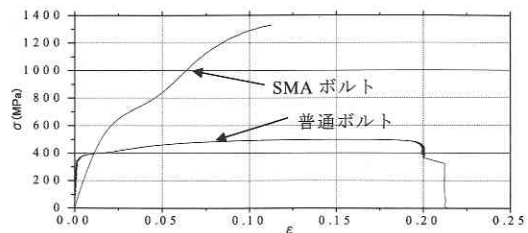


図 2 SMA 材料の応力歪関係

次周期は 0.30 秒，ブレース塑性化時のベースシア係数で 0.23 の骨組である (表 1)。また図 5 にラーメン，仮想ブレース，全体系の $Q-\delta$ 関係を示す。

オンライン応答実験では，擬似動的インパルスと EI Centro NS 1940 を入力地震波としている。図 4 の仮想骨組モデルを実測部分と仮想骨組部分とに分けて，サブストラクチャ・オンライン地震応答実験を行うが，以下の 1 自由度系の運動方程式を解く。

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + F(x) = -M \cdot \ddot{y}_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで， C ：仮想粘性減衰係数， $F(x)$ ：ハイブリッド復元力で， $F(x) = F_{SMA} + F_B$ ，ここで F_{SMA} ：アクチュエータのロードセルから測定される荷重の 2 倍， F_B ：仮想ブレースの復元力， \ddot{y}_0 ：地動加速度，である。

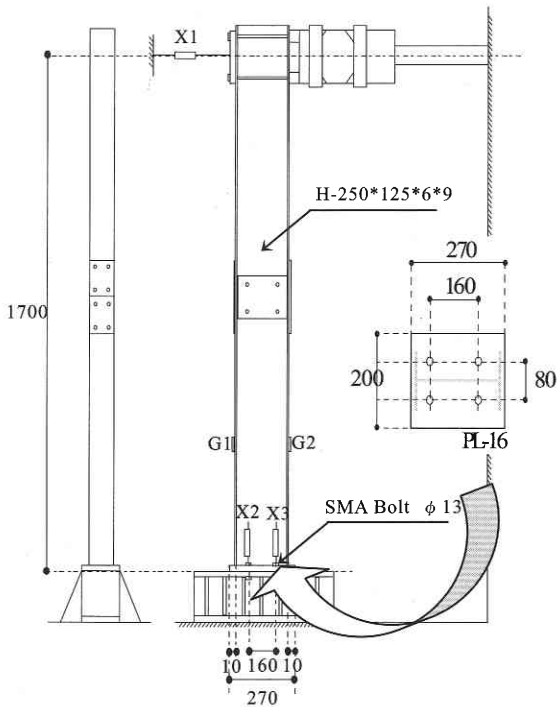


図 3 荷装置

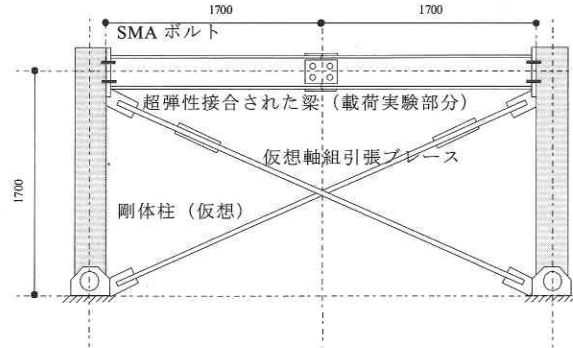


図 4 骨組モデル

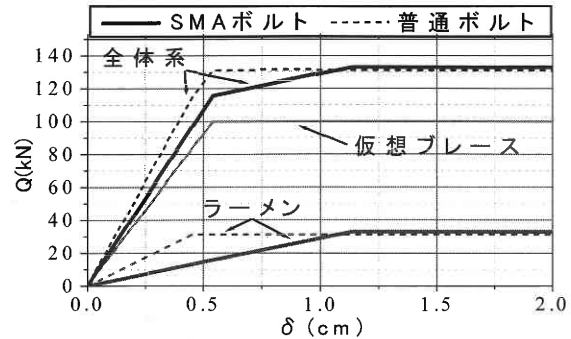


図 5 骨組要素と全体系の $Q-\delta$ 関係

表 1 ハイブリッド解析モデルの諸元

実験ケース	SMA ボルト	普通ボルト
試験体を含むラーメンの性質		
初期弾性剛性	2 × 1,450 kN/m	2 × 3,440 kN/m
降伏/軟化水平耐力	2 × 16.5 kN	2 × 15.6 kN
仮想ブレースの性質	進行スリップモデル・非硬化	
初期弾性剛性	18,500 kN/m	
降伏水平耐力	100 kN	
仮想慣性質量	48,800 kg	
仮想粘性減衰	2.0%	2.0%
全体系のせん断力係数		
塑性化開始時	0.23 (仮想ブレース)	0.24 (ラーメン)
全体降伏耐力	0.28	0.27
弾性一次周期	0.30 秒	0.28 秒

研究速報

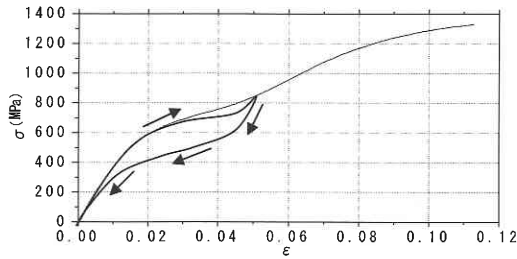


図6 SMA材料の履歴特性

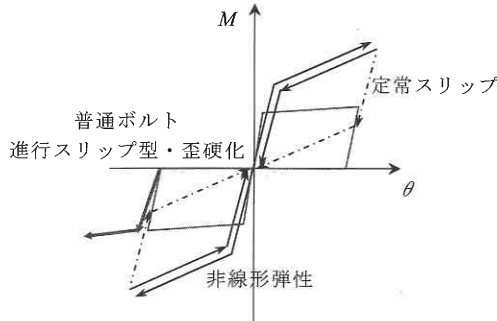
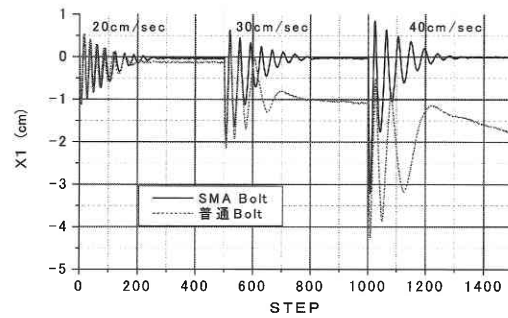
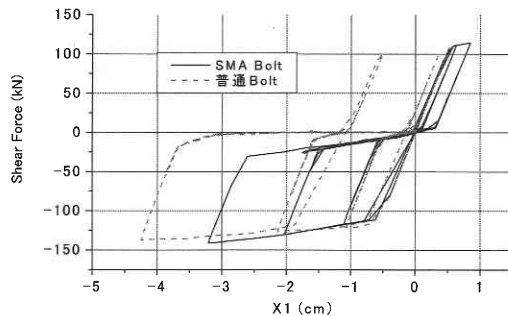


図7 SMAボルト接合部のM-θモデル



(a) 変位応答時刻歴



(b) 層せん断力-層間変位

図8 インパルス応答実験結果

2.2 純粋数値解析

オンライン応答実験では、超弾性接合された柱梁接合部と梁の復元力を物理模型に対する載荷実験から実測して仮想部分の復元力と結合してハイブリッド解析を行ったが、ここではSMAボルトによる梁端接合部の復元力特性に、図7に示す簡単な数学モデルを仮定して純粋数値応答解析を試みる。

初期弾性、軟化、硬化開始に至るまでのSMA材料引張側応力歪関係をSMAボルトの軸力伸び関係に変換し、エンドプレートの変形を無視して接合部のM-θ関係を評価し、最終的にバイリニア型のM-θ関係で近似する。

さらに図6から繰返し挙動については、軟化部分に入ってから履歴部分をモデル化する必要があるが、履歴部分の大きさに関して2種類の極端なモデルを仮定した。

- ①履歴部分を無視した非線形弾性モデル
- ②履歴の幅を過大評価した定常スリップモデル

なお、SS400普通ボルトによる接合部のM-θ関係については、歪硬化の進行スリップモデルを仮定した。また梁は弾性範囲に留まるものと仮定している。

3. 結果と考察

3.1 インパルス地震応答実験結果

柱脚ピンの仮想剛柱ならびに上記の梁-接合部試験体から成る門形ラーメンに仮想軸組引張ブレース(スリップモデル)を組込んだ骨組に対して、擬似動的インパルス応答

実験を行った。床に与える初速度は、0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m/secと順次大きくし、仮想ブレースのみ更新して連続的に応答実験を行った。普通ボルトは2.5mmの残留変形で終了したが、SMAボルトは0.5 m/secの初期段階で破断した。このときの層間変形角θは0.023であり、ボルトの伸びは3.1mmであった。

SMAボルトと普通ボルトの場合の変位応答時刻歴とせん断力-層間変位を比較して図8に示す。

SMAボルトを使用した場合には、その復元力が骨組を強制的に原点復帰させ、残留変形が発生しないことが分かる。一方普通ボルトの場合は塑性化後そのような復元力に期待できず残留変形が認められる。

3.2 オンライン地震応答実験と解析結果の比較

最大地動加速度を2 m/sec²に基準化したEl Centro NS 1940を入力したオンライン実験結果である。なお入力時間は15秒間、応答解析時間間隔Δt=0.02秒である。SMAボルト及び普通ボルトを使用した場合のオンライン応答解析結果を図9, 12に示している。また梁端SMAボルト接合部の挙動を簡単な復元力特性モデルで近似した数値応答解析結果を図10, 11に示し、普通ボルトの数値応答解析結果を図13に示す。実験または解析終了時を図中の丸で示す。

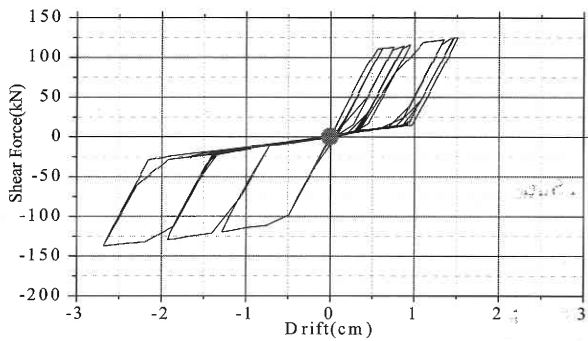


図9 オンライン応答実験結果 (SMA ボルト)
(El Centro 200 gal)

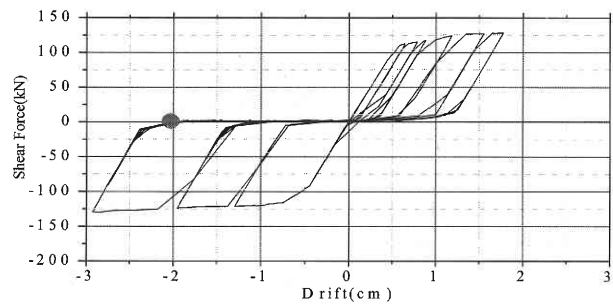


図12 オンライン応答実験結果 (普通ボルト)
(El Centro 200 gal)

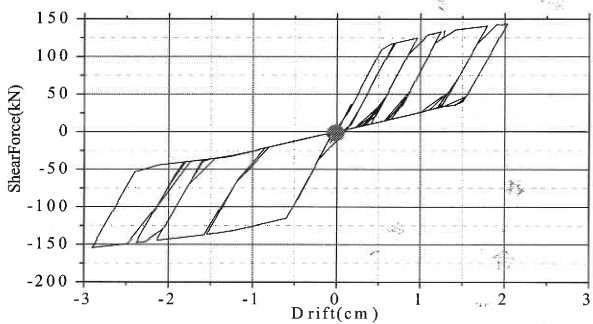


図10 バイリニア非線形弾性 (SMA ボルト)
(El Centro 200 gal)

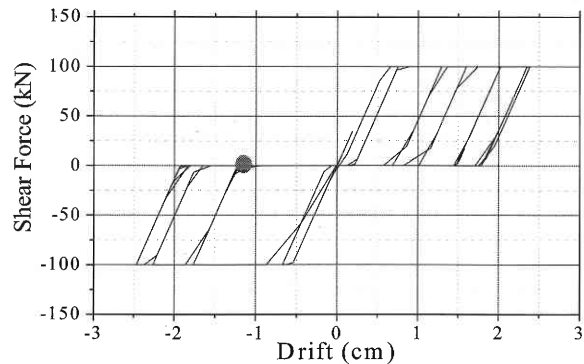


図13 歪硬化進行スリップ (普通ボルト)
(El Centro 200 gal)

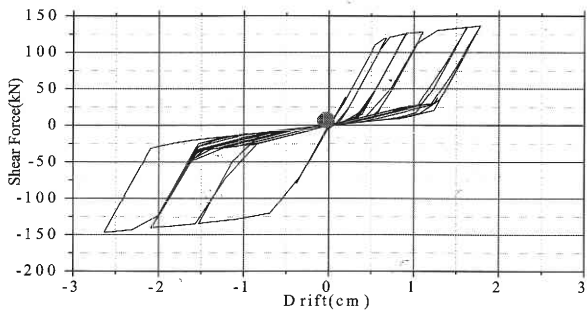


図11 バイリニア定常スリップ (SMA ボルト)
(El Centro 200 gal)

おおむね解析モデルと応答実験結果は一致している。さらに、今回の SMA 材料は軟化部分の履歴が小さいので、解析モデルとしては①の非線形弾性モデルと実験履歴曲線の形状が良い対応を示している。

4. 結 論

SMA ボルトを柱-梁半剛接合部に用いた場合、別の主要な耐震要素が大きな変形・損傷を受けた後も、骨組を原点

復帰させるための復元力ないし剛性が残存し、骨組の残留変位が小さくなるという効果がある。

耐震要素が完全に弛緩する場合、フラッシュ型エンドプレートのような軽微な接合部のファスナーに使用しても、原点復帰効果が期待できることを示した。

この種のファスナーは終局状態近くまで弾性的の性質を示し最終的な破壊は脆性的になりやすく、留意すべきである。

謝 辞

本研究は、日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」(委員長小谷俊介東大教授)のエフェクタ部会(主査藤田隆史東大生研教授)の研究の一環として実施されたものである。試験片材料は株式会社大同特殊鋼から提供を受け、加工は独立行政法人建築研究所の協力を得た。また大学院生伊藤拓海に、社団法人日本鉄鋼連盟(当時・鋼材倶楽部)の平成13年度「建築鋼構造研究奨励金制度」から奨励金が交付された。ここに深甚の謝意を表する。

(2002年9月10日受理)