

# ファイバー解析における超弾性合金のモデル化に関する検討

宇都宮大学 学生員 ○金澤悠太 正会員 藤倉修一  
正会員 Thay Visal 学生員 藤岡光

## 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、阪神高速道路3号神戸線のピルツ橋が崩壊に至るなど構造物に甚大な被害が生じた。この地震を契機に耐震設計法は、震度法から地震時保有水平耐力法に移行した。地震時保有水平耐力法とは、構造物の塑性変形を考慮した耐震設計法であり、構造物の塑性化によるエネルギー吸収によって橋の変位応答が減少することが期待されている。また、塑性化を許容する塑性ヒンジ部と、それ以外の部分に分けることで、橋の損傷箇所を限定し、予期せぬ損傷モードを避けることができる。しかし、地震時に構造物の塑性変形を考慮することは、ある程度の残留変位を許容しなければならない。実際に兵庫県南部地震では、残留変位が原因となり、橋の損傷が軽微であるにもかかわらず、橋全体を撤去または再構築せざるを得なかった事例が多くある<sup>1)</sup>。2016年に発生した熊本地震では、地震時保有水平耐力法により設計された橋では、崩壊を免れ、橋の損傷は限定的である<sup>2)</sup>など一定の成果が示されたが、橋脚や支承の残留変位等によって地震後の速やかな橋の機能回復ができず、全面復旧までに長期間を要するケースもあった。このことから地震後の構造物の残留変位は早期復旧を妨げる原因となるため、未だに課題となっている。

これらの課題に対して、近年では、形状記憶合金の一種で、超弾性特性を有する超弾性合金 (Super-Elastic-Alloy 以下、SEAと呼ぶ) が開発され、建設材料として利用可能となっている<sup>3)</sup>。超弾性特性とは、塑性変形後に荷重を除荷しても常温で元の形状へと復元する性質である。藤岡らは、塑性ヒンジ部にSEAを有する橋脚供試体に対して、正負交番載荷実験を行い、残留変位低減効果の有効性を確認している<sup>4)</sup>。しかし、SEAを構造物に適用する研究は少なく、SEAを有する橋脚の地震時挙動は明らかになっていない。そこで本研究では、SEAを有する橋脚の動的挙動を明らかにすることを目的とし、非線形動的解析を行った。市販の解析ソフトには、SEAの応力～ひずみ関係を適切に表現する材料モデルがないため、SEA型モデルを作成するとともに、SEAの材料特性が構造物の応答に与える影響を検証した。

## 2. 解析概要

### (1) SEA型モデル

図-1に本研究で作成したSEA型モデルの応力～ひずみ関係を示す。SEA型モデルは塑性変形後に原点指向型の履歴挙動を示す。モデルに入力するパラメーターは、弾性係数  $E$ 、降伏応力  $\sigma_{yt}$  (引張側)、 $\sigma_{yc}$  (圧縮側)、降伏後の剛性低下率  $R_t$  (引張側)、 $R_c$  (圧縮側) に加えて、除荷時の応力低下を表現するパラメーターとして、引張側および圧縮側において、それぞれ応力低下率  $\alpha_t$ 、 $\alpha_c$  を定めた。

### (2) 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。解析モデルの対象橋梁は、道路橋の耐震設計に関する資料<sup>5)</sup>にあるPC3径間連続ラーメン箱桁橋を参考にした。対象橋梁は全長166.8m、橋脚の高さは31.5m、断面は6.0m×4.0mの矩形断面である。塑性ヒンジは橋脚の上下端部に2.8mずつ設けた。従来型RC橋

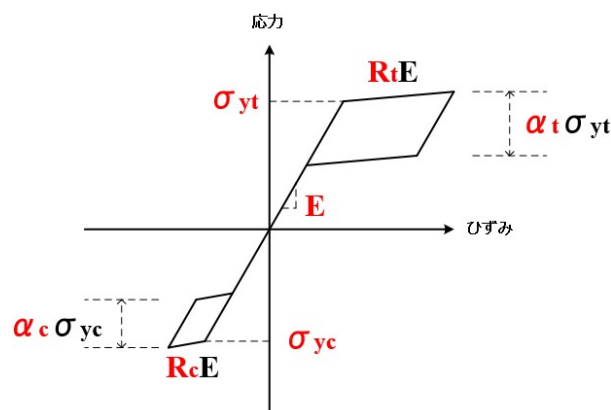


図-1 SEAの材料構成則

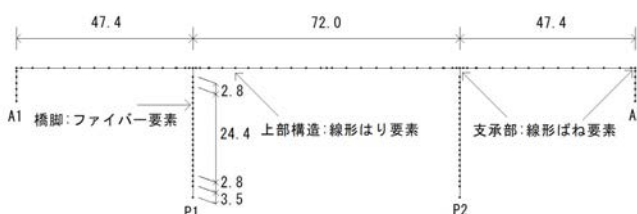


図-2 解析モデル概要図

脚の橋梁をRCモデル、橋脚の塑性ヒンジ部にSEAを有する橋梁をSEAモデルとして比較を行った。

上部構造および橋台には線形はり要素、支承には線形ばね要素を用いた。橋脚にはファイバー要素を用いて、コンクリート、鉄筋およびSEAの材料特性をそれぞれ適用した。ファイバー要素における鉄筋の応力～ひずみ関係には修正 Menegotto-Pinto モデル<sup>6)</sup>を与え、弾性係数は205kN/mm<sup>2</sup>、降伏強度は345N/mm<sup>2</sup>、剛性低下率は1%とした。SEAの応力～ひずみ関係には本研究で作成したSEA型モデル用い、材料特性値にはSEAの引張試験結果を参考にして弾性係数は40kN/mm<sup>2</sup>、降伏強度は345N/mm<sup>2</sup>、剛性低下率は0.5%、応力低下率は0.25とした。また、コンクリートの応力～ひずみ関係にはHoshikumaらの提案する包絡線<sup>7)</sup>に、堺らの提案する除荷・再載荷履歴を組み合わせたモデル<sup>8)</sup>を与えた。かぶりコンクリートの圧縮強度は23.5N/mm<sup>2</sup>、コアコンクリートの圧縮強度は帯鉄筋による横拘束効果を考慮して25.0N/mm<sup>2</sup>とした。

## 3. 静的解析による検証

SEA型モデルを検証するために、PC3径間連続ラーメン箱桁橋の橋脚1基を対象にして正負交番載荷による静的解析を行った。図-3に静的解析による結果を示す。図-3-aに橋脚基部におけるSEAの応力～ひずみ関係、図-3-bに荷重～変位関係を示す。図-3-aよりSEAが塑性変形後に荷重を除荷すると、残留ひずみが生じていないことから、図-3-bに示すように荷重除荷後に残留変位が生じていない。これらの解析結果から、橋脚の塑性ヒンジ部にSEAを用いることによって、橋脚の荷重～変位関係が自己復元型の履歴となり、残留変位が生じないことが確認された。

**Key Words:** 超弾性合金, 超弾性特性, 塑性ヒンジ, 残留変位, SEA型モデル

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6227

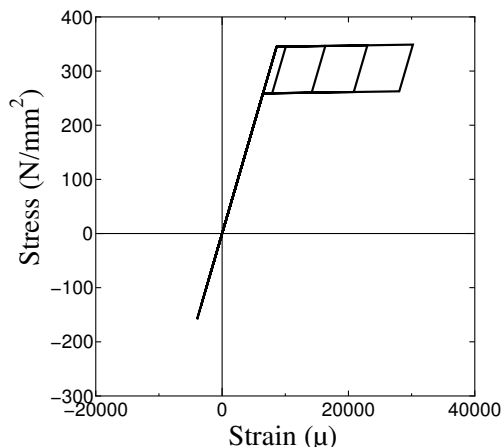


図-3-a SEAの応力～ひずみ関係

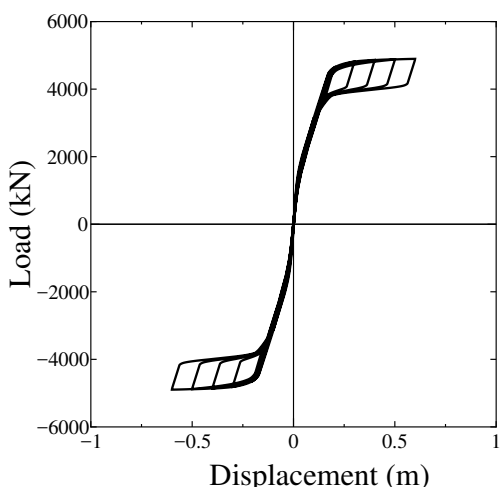


図-3-b 荷重～変位関係

図-3 静的解析による結果

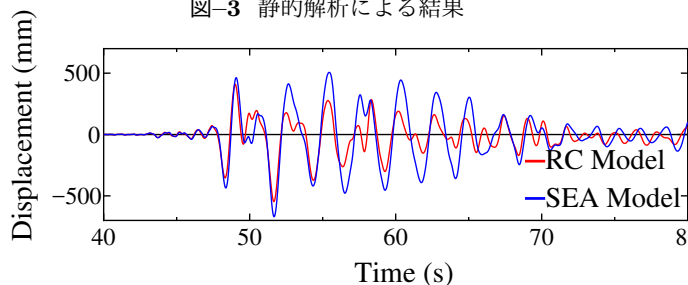


図-4-a 橋軸方向

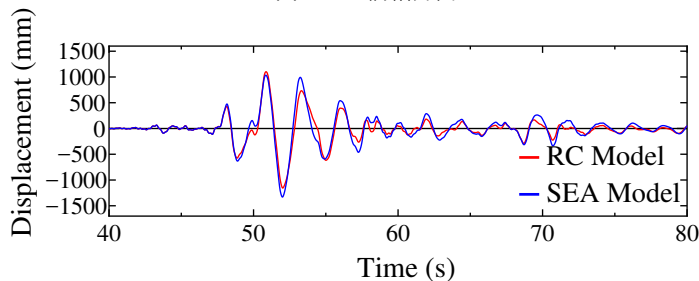


図-4-b 橋軸直角方向

図-4 時刻歴応答変位の比較

#### 4. 動的解析による検証

##### (1) 解析方法

本解析では内陸直下型地震である2018年北海道胆振東部地震より厚真町鹿沼観測波を入力地震動として用い、3方向加振による非線形時刻歴応答解析を行った。数値積分法に

はNewmark $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ )を用いて、積分時間間隔は0.01秒とした。減衰にはRayleigh減衰を用い、基準振動数を1次と3次とした。

##### (2) 解析結果

図-4に対象橋梁の時刻歴応答変位を示す。図-4-aは橋軸方向の時刻歴応答変位、図-4-bは橋軸直角方向の時刻歴応答変位である。図-4-aより、橋軸方向の最大応答変位を比較するとRCモデルは538mm, SEAモデルは670mmとなり、SEAモデルはRCモデルの約1.25倍最大応答変位が大きい。また、図-4-bより橋軸直角方向の最大応答変位を比較するとRCモデルは1155mm, SEAモデルは1332mmとなり、SEAモデルはRCモデルの約1.15倍最大応答変位が大きい結果となった。これは、SEA橋脚がRC橋脚に比べて曲げ剛性が小さく、履歴吸収エネルギーが少ないためであると考えられる。

次に残留変位を確認すると、橋軸方向ではRCモデルは25.6mm, SEAモデルは4.9mmとSEAを用いることで残留変位は約80%低減され、橋軸直角方向においても約90%の低減が確認された。これは、SEAの超弾性特性によるものであり、橋脚の塑性ヒンジ部にSEAを用いることで、SEAが残留変位低減に有効であることが分かった。

#### 5. 結論

本研究ではSEAの応力～ひずみ関係を表現する材料モデルを作成した。さらにSEA橋脚の地震時挙動を明らかにすることを目的として、作成したSEA型モデルを用いて非線形動的解析を実施し、RC橋脚との比較を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 作成したSEA型モデルを用いた橋脚の静的解析から、SEA特有の自己復元型の履歴を確認した。
2. 地震動を用いた非線形動的解析の結果から、曲げ剛性と履歴吸収エネルギーの違いにより、SEA橋脚はRC橋脚に比べて最大応答変位が約1.15倍から1.25倍大きい結果となった。
3. SEAを有する橋脚はRC橋脚に比べて約80%から90%残留変位が低減された。

##### 参考文献

- 1) 田中克典, 林秀侃, 幸左賢二, 安田扶律: 残留変位に着目した地震被災橋脚の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998.
- 2) 大住道生, 星隈順一: 熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷傷に基づく要因分析, 第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.121-128, 2017.
- 3) Omori, T., Kusama, T., Kawata, S., Ohnuma, I., Sutou, Y., Araki, Y., Ishida, K., Kainuma, R.: Abnormal Grain Growth Induced by Cyclic Heat Treatment., Science, 2013.9.
- 4) 藤岡光, 藤倉修一, 山口敬也, Nguyen Minh Hai, 中島章典, 浦川洋介, 渡瀬博: 超弾性合金を用いた橋脚の繰り返し載荷実験, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, I-297, 2020.
- 5) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料-PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例-, 1998.1.
- 6) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.
- 7) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W.: Stress-strain model for coned concrete inbridge piers, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 5, pp.624-633, ASCE, 1997.
- 8) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.7.