

## 地震応答解析における超弾性合金のモデル化に関する一検討

宇都宮大学 学生員 ○金澤悠太 正会員 藤倉修一  
 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、地震時保有水平耐力法が主流となった。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設計方法であり、塑性変形によって地震時の構造物の長周期化による橋の揺れの低減、エネルギー吸収による橋の変位応答の減少という優位性が得られる。加えて、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でき、予期した損傷モードに収めることが出来る。しかし、塑性変形を許すことは残留変位が生じることを意味する。それによって兵庫県南部地震では、橋の損傷は軽微であるにも関わらず、橋全体を撤去または再構築せざるを得なかった<sup>1)</sup>。また2016年に発生した熊本地震においては、地震時保有水平耐力法に基づいて設計された橋は、橋の崩壊を免れ、橋の損傷は限定的である<sup>2)</sup>など一定の成果は示されたが、残留変位によって地震後の速やかな橋の機能回復を妨げ、大規模な復旧を要するケースもあった。

一方で、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)が近年開発された。<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(以下、SEA橋脚と呼ぶ)を作製し、正負交番載荷実験を行い<sup>4)</sup>、SEA橋脚の残留変位低減の有効性が確認された。しかし、SEA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橋脚の非線形動的解析を行った。しかし、TDAPIIIという3次元非線形時刻歴応答解析プログラムには、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、作製する必要がある。作成したSEA型モデルを用いて、非線形履歴面積が異なる2つのモデルを用いて履歴減衰について検討した。また、作成したSEA型モデルの妥当性についても検討した。

## 2. 解析概要

## (1) SEA型モデル

図-1に本研究で構築した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セルフセンタリングする履歴挙動となり、エネルギー吸収量が小さいという特徴を有する。入力するパラメータは、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、エネルギー吸収量を変化させるパラメータとして、応力低下率 $\alpha_t$ (引張側)、 $\alpha_c$ (圧縮側)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としたのは、平成29年道路橋示方書<sup>5)</sup>に準拠して設計された2径間連続非合成鋼桁橋の橋脚部分である。橋脚天端部の節点に橋脚一基が負担する上部構造の重量を節点集中質量として与えた。橋脚は作用曲げモーメントが大きい基部の塑性

表-1 解析ケース

	Case1	Case2
応力低下率	0.2	0.8

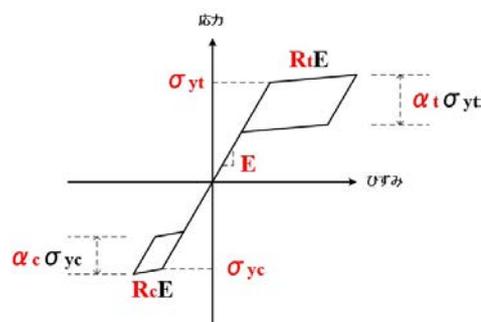


図-1 SEAの材料構成則

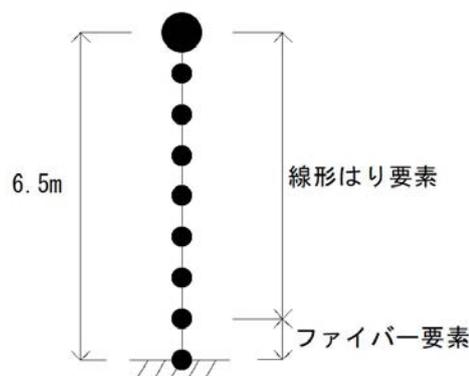


図-2 解析モデル概要図

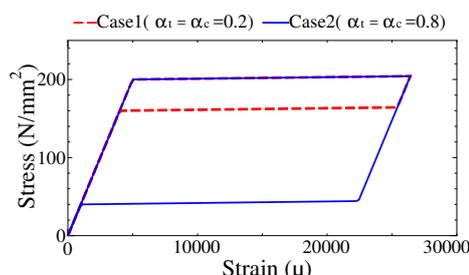


図-3 応力-ひずみ関係

変形のみを考慮し、基部以外は線形はり要素を用いた。橋脚基部には、コンクリート、SEAの応力-ひずみ履歴を適切に評価できるようにファイバー要素を用いた。なお、SEAは道路橋示方書に従って塑性ヒンジ長657mmを考慮し、橋脚を8分割した要素のうち基部から1分割目(813mm)に用いた。橋脚断面は6000mm×2100mmの矩形断面であり、天端部の質量は1723tとした。解析ケースを表-1に示す。Case1, Case2は共にSEAを塑性ヒンジ部に用いた橋脚であり、それぞれ応力低下率 $\alpha_t$ ,  $\alpha_c$ を0.2, 0.8としてエネルギー吸収量を変化させた解析ケースである。

図-3は、本解析で用いたSEAの応力-ひずみ関係を示している。コンクリートの応力-ひずみ関係には、星隈らの提

**Key Words:** 超弾性合金, 超弾性特性, 塑性ヒンジ, 非線形動的解析, 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

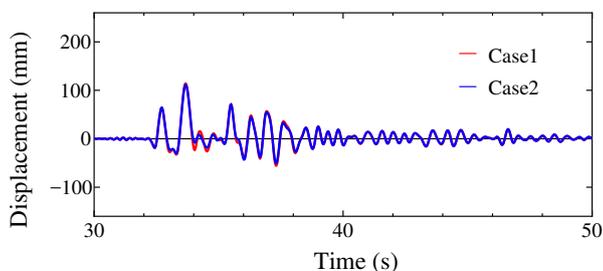


図-4-a 時刻歴応答変位 (Case1, Case2)

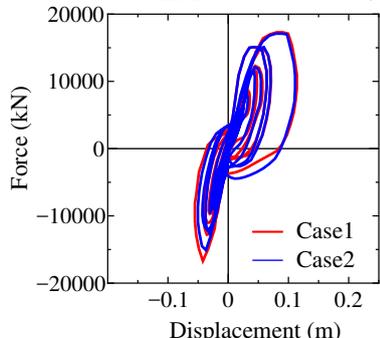


図-4-b 荷重-変位関係 (Case1, Case2)

図-4 初期剛性行列を用いた解析結果

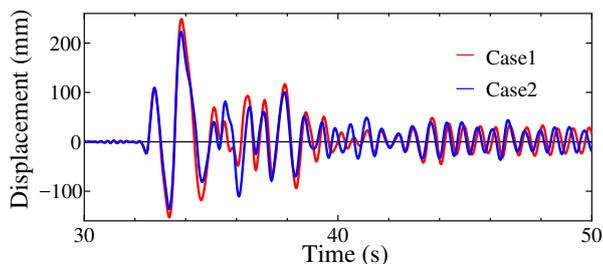


図-5-a 時刻歴応答変位 (Case1, Case2)

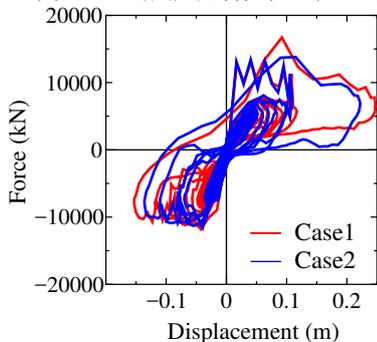


図-5-b 荷重-変位関係 (Case1, Case2)

図-5 瞬間剛性比例行列を用いた解析結果

案する包絡線<sup>6)</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>7)</sup>を与えた。材料強度は、かぶりコンクリートは $24.0\text{N/mm}^2$ 、コアコンクリートの圧縮強度は星隈らの提案する帯鉄筋による横拘束効果を考慮して、 $25.4\text{N/mm}^2$ とした。Case1, 2で用いたSEAの応力-ひずみ関係には、SEAの引張試験結果を参考に、降伏強度 $200\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は $40\text{kN/mm}^2$ とした。

### (3) 動的解析方法及び減衰の設定

本解析で用いた入力地震波は内陸直下型地震の代表的なものとして、1995年兵庫県南部地震よりJMA神戸波を用いて、3方向加振による非線形時刻歴応答解析を行った。数値積分法はNewmark $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用いて、積分時間間隔は0.02秒とした。

減衰設定に関しては、ひずみエネルギー比例減衰を用いて解析を行った。その際に、減衰行列を初期減衰行列のまま変更は行わない方法と剛性行列の変化に比例して減衰行列を変更する方法で地震時挙動の比較を行った。

### 3. 動的解析結果および考察

図-4は初期減衰行列での解析結果を示し、時刻歴応答変位の結果を図-4-a、荷重-変位関係の結果を図-4-bに示す。Case1の最大応答変位は114mm、Case2の最大応答変位は111mmであった。図-4-aより非線形履歴面積の違いによる履歴減衰は反映されておらず、両ケースともほとんど変わらない結果となった。図-4-bより荷重-変位関係においても非線形履歴面積による違いは表れていないという結果になった。次に瞬間剛性比例減衰の解析結果を図-5に示し、時刻歴応答変位の結果を図-5-aに、荷重-変位関係の結果を図-5-bに示す。図-5-aより、Case1の最大応答変位は171mm、Case2の最大応答変位は248mmであった。初期減衰行列での解析と比較すると非線形履歴面積の違いによる減衰は表れているものの有意性はないと考えた。図-5-bより、非線形履歴面積の違いによる履歴の違いは表れているものの、不安定な挙動が目立つ結果となった。

一般的に、瞬間剛性比例減衰を使用する例は2つある。1つ目がJoint等、剥離が起きる要素を使用している場合、2つ目が幾何学的非線形要素を使用している場合である。本解析では、どちらも考慮していないため、初期減衰行列の使用が適切であると考えた。しかし、上述したように初期減衰行列での解析では、SEAの非線形履歴面積の違いによる、時刻歴応答変位や荷重-変位関係の違いは見られなかった。よって、作成したSEA型モデルに原因があると考えた。今後、具体的な原因を検討していく必要があると考えた。

### 4. 結論

本研究では、作成したSEA型モデルを用いた単柱橋脚の非線形動的解析を行い、荷重-変位関係の履歴面積の違いによる変位応答の比較を行った。兵庫県南部地震よりJMA神戸波を用いて解析を行い、以下の知見を得た。

1. 初期減衰行列、瞬間剛性比例減衰のどちらの場合も、非線形履歴面積の違いによる変位応答の違いは見られないという結果が分かった。
2. SEA型モデルが正しく構築できていない可能性があるため、今後検討が必要がある。

### 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痕に基づく要因分析, 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: 道路橋示方書・同解説, 2017.11.
- 6) 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.
- 7) 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.