

超弾性合金を用いた橋脚の地震時実橋解析

宇都宮大学 学生員 ○ 中野緒未 正会員 藤倉修一
学生員 藤岡光

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、阪神高速道路3号神戸線でピルツ橋の倒壊など大規模な被害が生じた。この地震を契機に、耐震設計法は従来の震度法に代わって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は、塑性化を許容する塑性ヒンジ部と、塑性化を許容しないそれ以外の部分に分けることで、地震による橋の予期せぬ破壊モードを回避する設計法である。地震時保有水平耐力法が適用された橋は、2016年に発生した熊本地震において橋の崩壊を免れ、橋の損傷部分も限定的であった¹⁾が、塑性化を許すことは残留変位を生じることを意味する。

その残留変位等が原因で、兵庫県南部地震においては、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²⁾。また、熊本地震においては、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あり、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) が開発されている³⁾。藤岡らは残留変位を低減することを目的として、SEA を塑性ヒンジ部に用いた橋脚供試体に対して、正負交番載荷実験を行い、SEA を有する橋脚の残留変位低減の有効性を確認した⁴⁾。しかし、SEA を用いた橋脚を有する実際の橋が地震力を受けた場合の挙動は明らかになっていない。そこで、本研究では橋脚の塑性ヒンジ部に SEA を用いた際の実橋梁の地震時挙動を解析的に明らかにすることを目的とし、非線形動的解析を行い、特に残留変位に着目して SEA を橋脚に用いる有効性を検討する。

2. 解析概要

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。解析モデルの対象橋梁は、平成29年道路橋示方書⁵⁾に準拠して設計された2径間連続非合成鋼桁橋である。解析モデルにおいて、上部構造は線形はり要素を用い、換算断面積 0.57m^2 、弾性係数 200kN/mm^2 、せん断弾性係数 77kN/mm^2 とした。橋脚は部材の塑性化や破壊を考慮するためファイバー要素を用い、 $2.1\text{m} \times 6.0\text{m}$ の矩形断面を橋軸方向に18分割、橋軸直角方向に50分割し、軸方向筋は計214本配置した。

解析ケースを表-1に示す。Case1の鉄筋コンクリート橋脚の材料モデルとして、鉄筋の応力-ひずみ関係には図-2に示す Giuffre-Menegotto-Pint モデルを用い、鉄筋の降伏強度は 345N/mm^2 、弾性係数は 200kN/mm^2 とした。コンクリートの応力-ひずみ関係には Karsan-Jirsa モデルを与え、かぶりコンクリートの圧縮強度は 24.0N/mm^2 、コアコンクリートの圧縮強度は星限らの提案する帯鉄筋による横拘束効果を考慮して、 26.8N/mm^2 とした⁶⁾。以下、このコンクリートモデルを鉄筋コンクリートモデルと呼ぶ。

Case2は塑性ヒンジ部に SEA を用いた橋脚である。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分割した中の基部から1分割目 (813mm) のみに用いた。図-2に SEA の応力-ひずみ関係を示す。SEA の

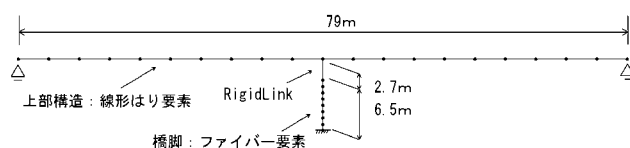


図-1 解析モデル概要図

表-1 解析ケース

	Case1	Case2	Case3
軸方向筋	D32	SEA	SEA
降伏強度 (N/mm^2)	345	200	345
等価剛性 (N/mm)	42154	22169	33574
固有周期 (s)	1.29	1.78	1.45

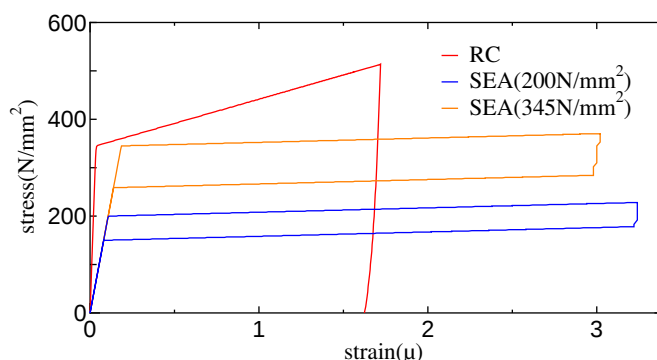


図-2 応力-ひずみ関係

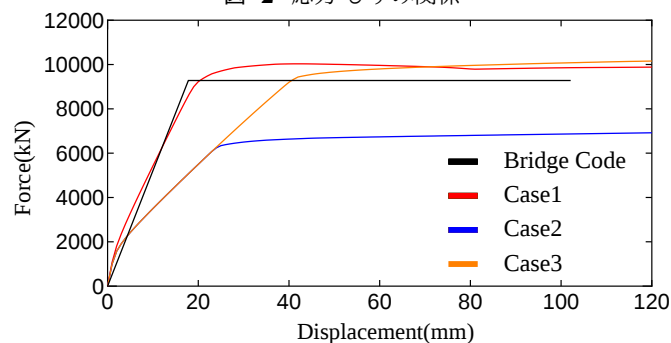


図-3 Pushover 解析結果

応力-ひずみ関係には、フラック型を用いて、実際に行われた SEA の引張試験結果をもとに、降伏強度は 200N/mm^2 、弾性係数は通常の鉄筋 200kN/mm^2 の $1/5$ 程度、二次勾配は 180N/mm^2 、除荷時は降伏強度の 2.5% 一次剛性で低下した後、二次剛性で低下し、初期剛性の関係に戻るよう定めた。SEA の応力-ひずみ関係はフラック型であるため、材料の変態から逆変態を表現し、応力がゼロのときに変形が完全に元に戻る形となっている。コンクリートの応力-ひずみ関係は藤岡らの実験⁴⁾をもとに決め、実験では、SEA を塑性ヒンジ部に用いた際には、従来の RC 橋脚に比べてかぶりコンクリート、コアコンクリートともに損傷が少なかった。そのため、本解析では、Case1 で用いた鉄筋コンクリートモデルにおいて、かぶりコンクリートは終局ひずみを 6000×10^{-6}

Key Words: 超弾性合金, 動的解析, 残留変位, 塑性ヒンジ

〒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

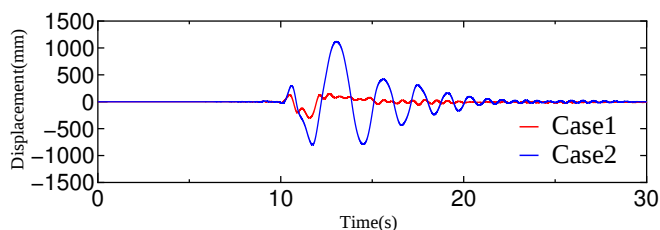


図-4 時刻歴応答変位 (Case1, Case2)

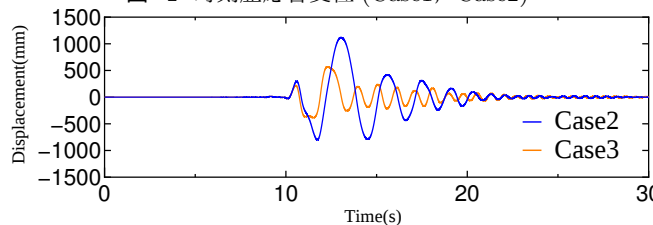


図-5 時刻歴応答変位 (Case2, Case3)

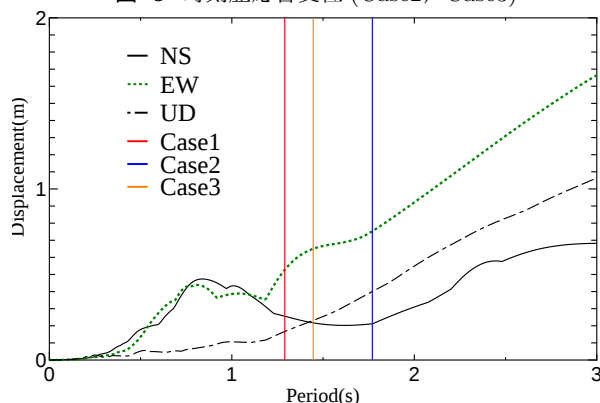


図-6 変位応答スペクトル

から 60000×10^{-6} へ変更し、コアコンクリートは応力が最大応力に達した後、応力が低下せず最大応力を維持するように設定した。以下、このコンクリートモデルを SEA 用コンクリートモデルと呼ぶ。Case3 は、Case2 における SEA の降伏強度を鉄筋と同じ 345 N/mm^2 とし、他は Case2 と同じ条件である。

Pushover 解析の結果を図-3 に示す。縦軸は水平荷重、横軸は上部構造の変位である。曲げ剛性は Case1~3 についてそれぞれ、 460 kN/mm 、 260 kN/mm 、 230 kN/mm であり、道路橋示方書に示されているバイリニアモデルと Case1 の結果を比較すると、Case1 の方が若干大きめの関係を示すが、これは鉄筋の 2 次剛性を 1 次剛性の 1% としているからである。Case2, 3 における SEA 橋脚の剛性は RC 橋脚の半分程度であった。

(2) 動的解析方法

本解析で用いた地震波は、レベル 2 地震動である 2016 年熊本地震より西原村で観測されたものを用いた。また、地震波は 3 方向入力し、NS 方向・EW 方向に関しては、加速度が卓越する EW 方向を橋軸方向として入力した。数値積分法は、Newmark β 法を ($\beta = 0.25$) を用いて、積分時間間隔は 0.001 秒とした。

3. 動的解析結果および考察

(1) 最大応答変位

図-4、図-5 に西原村の地震波による上部構造の時刻歴応答変位をそれぞれ Case1 と Case2、Case2 と Case3 の比較を示す。

図-4 より、10~20 秒の間における最大応答変位を確認すると、Case1 では 299mm、Case2 では 1118mm と約 3.7 倍の差がある。これは、軸方向筋の降伏強度が Case1 よりも Case2 の方が小さく、曲げ剛性も小さいためであると考えられる。

また、曲げ剛性を同じとして、SEA の降伏強度の違いによる影響を検討するために、Case2 と Case3 を図-5 で比較する。図-5 より、10~20 秒の間における最大応答変位を確認すると、Case2 では 1118mm、Case3 では 569mm と約 1/2 倍の差がある。これを考察するために、図-6 の変位応答スペクトルを示す。降伏強度を大きくすると、等価剛性も大きくなる。等価剛性が大きくなると構造物は短周期となり、図-6 に示す西原村の EW 方向成分に対する応答変位が小さくなるのがわかる。よって、SEA の高い降伏強度を用いることによる応答変位の減少を確認した。

(2) 残留変位

Case1~3 の残留変位はそれぞれ 10.6mm、0.03mm、0.03mm であった。Case1 の残留変位が Case2, 3 に比べて大きく、Case2, 3 ではほぼゼロに近い。これは、Case2, 3 の地震後における SEA のひずみがほぼゼロであるのに対して、Case1 の残留ひずみは 2296μ であるためと考えられる。このことから、鉄筋に比べ応力を除荷した際の残留ひずみが生じないため、SEA を用いた橋脚は残留変位の低減に有効的である。

4. 結論

本研究では、SEA を用いた橋脚の地震時挙動を明らかにするために、熊本地震時に西原村で観測された地震動を用いて非線形動的解析を行い、以下の知見を得た。

1. 鉄筋の代わりに、橋脚の塑性ヒンジ部に SEA を用いると、地震動による応答変位は大きくなり、降伏強度 200 N/mm^2 の SEA 橋脚を有する橋脚の最大応答変位は、RC 橋脚の約 3.7 倍であった。
2. SEA の降伏強度を大きくすると、地震動による応答変位は小さくなり、SEA の降伏強度を 200 N/mm^2 から 345 N/mm^2 にすると、最大応答変位は約 1/2 倍であった。
3. SEA を塑性ヒンジ部に用いた橋脚の残留変位はほぼゼロとなり、SEA の残留変位低減効果を確認した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力法の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木工学論文集, No.520/V-28, 1-11, 1995.8.