

超弾性合金を用いた橋脚の繰返し載荷実験の再現解析

宇都宮大学 学生員 ○ 藤岡光 正会員 藤倉修一

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、橋梁の崩壊や損傷等の甚大な被害が生じ、また、橋梁の損傷が軽微であるにもかかわらず、橋脚の残留変位が原因で撤去または再構築となった橋梁の事例が数多く報告されている¹⁾。この地震被害を受けて主流となった地震時保有水平耐力法によって耐震設計された橋梁は、2016年の熊本地震において橋梁の崩壊を回避する成果を得たが、残留変位等が原因で復旧に長期を要した橋梁がある²⁾。このように、兵庫県南部地震以降、橋梁の耐震性向上において一定の成果が認められているが、残留変位は現在も課題である。

一方、安価で加工性に優れる Cu-Al-Mn 超弾性合金（以下、SEA : Superelastic Alloy）が近年開発されている³⁾。超弾性合金とは形状記憶合金の一種で、金属が塑性変形後に除荷しても元の形状に復元する性質を有する金属である。この SEA を RC 橋脚の主鉄筋の代わりに用いることで橋脚の残留変位の低減が期待される。

そこで本研究では、著者らが行った橋脚基部に主筋として SEA を用いた橋脚供試体の正負交番載荷実験⁴⁾に対する再現解析を実施した。

2. 繰返し載荷実験および解析概要

(1) 繰返し載荷実験概要⁴⁾

実験における橋脚供試体の配筋図を図-1に示す。橋脚供試体は従来型 RC 橋脚（以下、RC 橋脚）と SEA を主筋の一部として用いた橋脚（以下、SEA 橋脚）で、いずれの供試体も有効高さ 800mm、直径 250mm の円形断面である。主筋には、RC 橋脚では公称直径 12.7mm の D13 を、SEA 橋脚では直径 12.4mm の SEA を使用し、断面に対して円状に等間隔で 8 本配置した。帯鉄筋には D6 を使用し、塑性ヒンジ部で 60mm 間隔、それより上部では 70mm 間隔で配置した。SEA は全長 300mm で、両端の 25mm には高ナットで鉄筋と接合するためにねじ切加工を施している。主鉄筋として用いた D13 は、降伏強度が 367N/mm²、弾性係数が 186kN/mm² であった。橋脚躯体部は早強コンクリートを使用し、圧縮強度は 50.5N/mm²、弾性係数が 35.6kN/mm² であった。

載荷は一定振幅変位漸増方式で行い、各変位振幅はドリフトを基準にして定めた。ここに、ドリフトとは橋脚の有効高さ（800mm）に対する水平変位の比である。各変位振幅についてはドリフト 0.5%（4mm）で載荷をはじめ、その後ドリフト 0.5%（4mm）ずつ変位振幅を増加させた。上載荷重として供試体の柱頭部の上に 23.0kN 分の鋼板の錘を載せることにより一定軸力を与えた。

(2) 解析概要

本解析では、有限要素解析ツール OpenSees⁵⁾（Open System for Earthquake Engineering Simulation）を使用した。橋脚供試体の解析モデルを図-2に示す。フーチングおよび柱頭部は線形要素とし、橋脚躯体部は部材の非線形挙動を確認するためにファイバー要素とした。柱頭部の上に載せた錘による上載荷重は、柱頭部位置に節点集中質量として

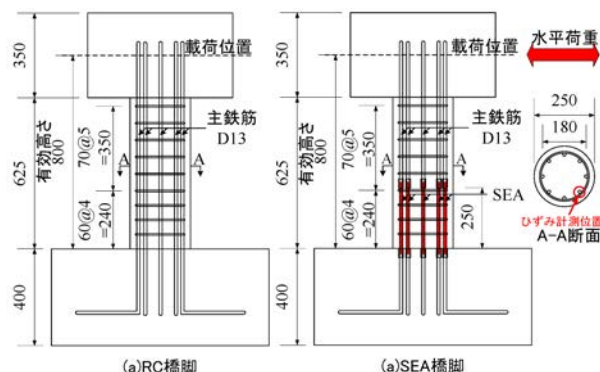


図-1 供試体配筋概要図

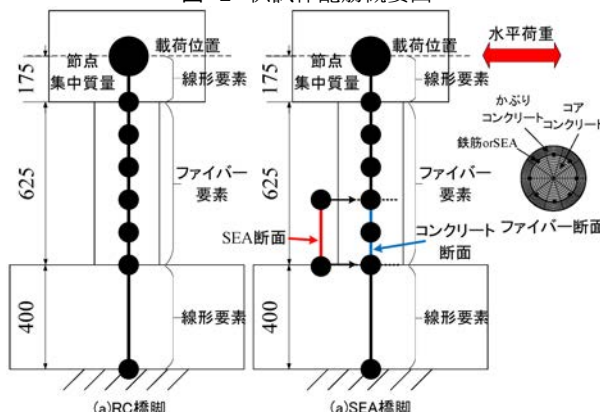


図-2 解析モデル図

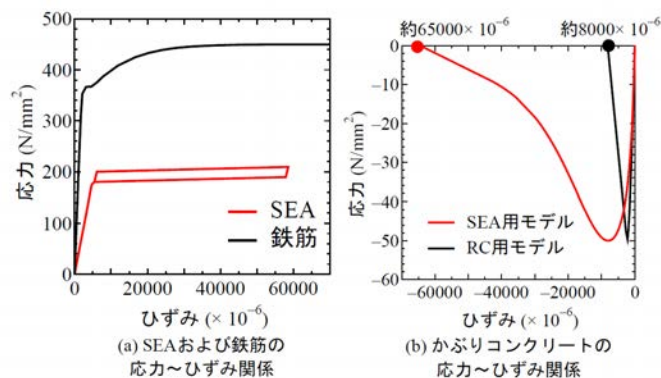


図-3 材料構成則

換算した値を入力した。橋脚底部は固定し、実験と同じ載荷位置に強制変位を与えた。載荷位置で実験による水平変位は実験で得られた主筋の伸び出しによる橋脚の回転変位を差し引いている。

本解析では、図-2に示すように SEA 橋脚においてファイバー断面の梁部材をコンクリート部と SEA 部に分離し、柱の中心位置でそれぞれを重ね合わせている。このようにした理由は、SEA 棒表面に凹凸が無く、コンクリートとの付着効果を期待できないことから、SEA 棒が全長にわたり均等に伸びることを再現するためである。ファイバー断面は図-2のようにモデル化し、コアコンクリートとかぶりコンクリートに分けて断面を分割した。図-3に使用材料の構成則を示す。応力～ひずみ関係として、SEA には図-3(a)に赤線で示すフラッグ型、主鉄筋には図-3(b)に黒線で示す

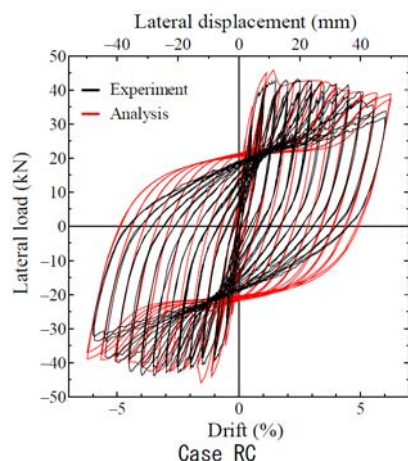


図-4 RC 橋脚の履歴曲線

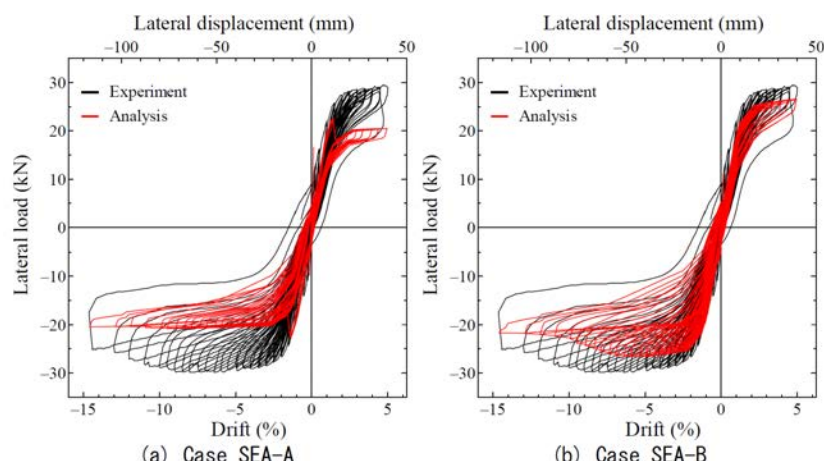


図-5 SEA 橋脚の履歴曲線

Chang and Mander モデル, コンクリートには Chang and Mander モデルを使用し, コアコンクリートでは帯鉄筋による横拘束効果を考慮した. コンクリートおよび主筋の構成則には引張強度試験および圧縮強度試験によって得られた材料特性値を用いた. SEA の構成則には降伏強度 200N/mm^2 , 弾性係数 37.3kN/mm^2 を用いた.

解析ケースは, RC 橋脚の Case RC, SEA 橋脚ではかぶりコンクリートの構成則が違う Case SEA-A および Case SEA-B とした. Case SEA-A では, 図-3(b) に示す黒線のようにかぶりコンクリートを Chang and Mander モデルで提案されている通常の RC モデルを使用した. Case SEA-B では, 図-3(b) に示す赤線のようにかぶりコンクリートの応力～ひずみ関係において応力が最大圧縮応力に達した後の下降勾配を, ドリフト 12% 載荷時に応力が 0 になるように設定したものを SEA モデルとした. これは実験結果より設定し, 橋脚基部のかぶりコンクリートがドリフト 12% 載荷時に剥落した結果に基づく. このようになったのは, 主筋として用いた SEA が座屈しにくい挙動が影響していると考えられている. かぶりコンクリートの終局ひずみは Case SEA-A で約 8000×10^{-6} , Case SEA-B で約 65000×10^{-6} となった.

3. 解析結果

図-4, 5 はそれぞれの荷重～変位関係の履歴曲線を示し, 赤線の解析結果に加えて, 実験結果を黒線で表している. まず RC 橋脚である Case RC の比較を図-4 より確認すると, 最大荷重は解析と実験でドリフト 5% 程度まで同程度であり, 履歴曲線も概ね一致している. それ以降では, 実験の最大荷重が解析よりも若干小さいが, これは実験では橋脚基部のコアコンクリートの損傷が進展し始めたことによる. 次に SEA 橋脚の解析結果と実験結果を図-5 で確認する. ここで, 実験では SEA がドリフト 5% 時に正載荷側で破断したため, それ以降は負載荷側のみで繰り返し載荷を行っており, 解析における載荷ドリフトも実験に合わせている. RC モデルを用いた Case SEA-A の解析結果を図-5(a) で確認すると, 解析結果では最大荷重がドリフト 1.5% で急激に減少している. このとき, かぶりコンクリートの応力が 0 となっており, かぶりコンクリートが圧縮力を負担していない状況である. 実験ではかぶりコンクリートの圧壊が観察されたのがドリフト 12% 時であったことから, 解析ではかぶりコンクリートの剥落が実際よりも早期に生じている. そこで, かぶりコンクリートの構成則を実験に即して決めた

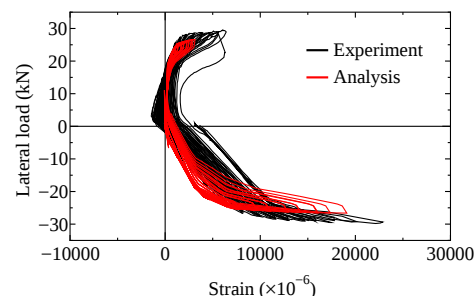


図-6 荷重～ひずみ関係の比較

SEA モデルによる Case SEA-B の解析結果を図-5(B) より確認すると, 解析による最大荷重は実験結果よりも 3kN 程度小さいものの, 両者の最大荷重は Case SEA-A よりも近い値を示した. さらに, 図-6 に Case SEA-B におけるドリフト 6% までの荷重と SEA のひずみの関係を示し, 図中の赤線は解析結果, 黒線は実験結果である. ここで, SEA のひずみは図-1 の断面図に示した位置で基部から高さ 120mm における結果である. 図より解析と実験の荷重～ひずみ関係は同じ傾向を示していることから, 本解析は SEA のひずみ挙動を良く再現している.

4. 結論

1. SEA 橋脚の解析では通常の RC 用のコンクリート構成則を用いた場合は, 実験よりもかぶりコンクリートが早期に剥落するため, 最大荷重の早期の低下が見られた.
2. 実験結果から SEA 橋脚のかぶりコンクリートの損傷は, RC 橋脚に比べて損傷が小さいことから, 実験結果に即したかぶりコンクリートの構成則を用いた解析は, 実験における最大荷重やひずみ挙動を概ね再現できた.

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) University of California, Berkeley: OpenSees, the Open System for Earthquake Engineering Simulation.