# 超弾性合金を用いた橋脚の繰り返し載荷実験

宇都宮大学	学生員	○ 藤岡光	正会員
宇都宮大学	学生員	山口敬也	正会員
HRC 研究所	フェロー会員	中島章典	
オリエンタル白石株式会社	正会員	浦川洋介	正会員

# はじめに 1.

1995年に発生した兵庫県南部地震以来, 耐震設計法は震 度法に代わり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、塑性ヒンジ部で地震エネルギーを 吸収し、損傷を塑性ヒンジ部に限定することによって予期 せぬ破壊モードを回避する耐震設計法である. 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年に発生し た熊本地震で橋梁の崩壊を免れるなど、一定の成果が示さ れた.しかし,橋脚基部が塑性ヒンジ化することによって 生じた残留変位等によって, 地震後速やかに橋梁の機能回 復を行うことができない事例があった<sup>1)</sup>.このため,地震 後に生じる残留変位は依然として課題である.

一方,塑性変形後に荷重を除荷しても元の形状へと復元 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)が近年開発されている.この SEA を RC 橋脚の主鉄筋の一部として用いることで, SEA の超弾 性特性によって橋脚の残留変位の低減が期待できる. そこ で、本研究では橋脚の塑性ヒンジ部に SEA を用いた橋脚供 試体に対して繰り返し載荷実験を行い、橋脚供試体の曲げ 挙動を把握するとともに残留変位低減の有効性を検証した.

#### 繰り返し載荷実験 2.

## (1)供試体

本研究では,SEA を有する橋脚の曲げ挙動を把握するた めに3体の橋脚供試体を作製した.作製した供試体は、従 来型 RC 橋脚(以下, RC 橋脚), 丸鋼のように表面に凹凸 が無い SEA(SEA 丸棒)を用いた橋脚(以下,SEA 丸棒 橋脚),金属表面にねじ切り加工を施した SEA (SEA ねじ 棒)を用いた橋脚(SEA ねじ棒橋脚)の3体である.

橋脚供試体の側面図と断面図を図-1に示す.いずれの供 試体も直径 250mm の円形断面であり, 有効高さ 800mm, せん断スパン比は 3.20 である. 軸方向鉄筋と SEA は断面 に対して円状に等間隔で8本配置した. 塑性ヒンジ部の軸 方向鉄筋の直径について, RC 橋脚では D13 の公称直径は 12.7mm, SEA 丸棒の計測直径は 12.4mm, SEA ねじ棒の有 効直径は 13.0mm であり, 軸方向鉄筋比はそれぞれ 2.06%, 1.97%, 2.16%となる. 塑性ヒンジ長は道路橋示方書<sup>2)</sup>に基 づいてそれぞれ 120mm, 114mm, 119mm と算出された.帯 鉄筋はいずれの供試体も塑性ヒンジ部で 60mm 間隔,それ より上部では 70mm 間隔で配置し, 塑性ヒンジ部の帯鉄筋 比は 1.09% である. SEA の長さは 300mm で, 両端からそ れぞれ 25mm の長さにねじ切加工を施した. 同様に鉄筋に も端部にねじ切加工を施し,鉄筋と SEA を高ナットで接合 した.

また, D13 と SEA 丸棒および SEA ねじ棒の引張強度試 験によって得られた応力~ひずみ関係の一例を図-2に示す. 引張強度試験より D13(SD295)の降伏強度が 367N/mm<sup>2</sup>, SEA 丸棒および SEA ねじ棒の見かけ上の降伏強度がそれ ぞれ 192N/mm<sup>2</sup>, 186N/mm<sup>2</sup> であった. ここで見かけ上の 降伏強度とは、図-2 に示す SEA の応力~ひずみ関係にお いて,一次勾配から二次勾配に変化するときの応力であり,





藤倉修一

Nguyen Minh Hai

ここでは一次勾配と二次勾配を示す直線の交点における応 力とした.弾性係数は D13(SD295), SEA 丸棒, SEA ねじ 棒でそれぞれ 186kN/mm<sup>2</sup>, 37.3kN/mm<sup>2</sup>, 35.0kN/mm<sup>2</sup> で あった. SEA は1本ずつ特性に若干違いがあるので,1本ず つ引張試験を行っており、上記の値はその平均値である.図 -2 より SEA の降伏強度は D13 の半分程度であるが, SEA には塑性後でも除荷するとひずみが変形前の状態に戻る超 弾性特性が確認できる. 橋脚躯体部および柱頭部には早強 コンクリートを打設し, 圧縮強度は 50.5N/mm<sup>2</sup> であった. フーチング部には普通コンクリートを打設し、圧縮強度は 31.0N/mm<sup>2</sup> であった.

## 実験方法 (2)

本実験では、反力壁に固定した油圧ジャッキを用いて橋 脚供試体の柱頭部に水平力を正負交番に与えた.載荷方向 は図-1 に示す NS 方向で,S 面が圧縮を受ける場合を正載 荷,N面が圧縮を受ける場合を負載荷とした.載荷サイク ルを図-3に示す.載荷は一定振幅変位漸増方式とし各変位 振幅はドリフトを基準に定めた. ここにドリフトとは橋脚 の有効高さに対する水平変位の比である.載荷サイクルは ドリフト 0.25%(2mm) 載荷を 1 回, ドリフト 0.5%(4mm) 載荷を3回, その後は各変位振幅をドリフト 0.5%(4mm) ず つ増分させ載荷を行った.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の上載荷重を与え

Key Words: 超弾性合金,橋脚の繰り返し載荷実験,残留変位,塑性ヒンジ

<sup>〒 321-8585</sup> 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



た. このとき橋脚断面に生じる軸応力は 0.47N/mm<sup>2</sup> であ る. 計測項目については,水平荷重をロードセルで,載荷 位置での水平変位を巻込型変位計で、軸方向鉄筋のひずみ をひずみゲージで測定した.

#### 実験結果 3.

#### 耐力および変形性能 (1)

図-4 に RC 橋脚の水平力載荷位置における水平荷重~水 平変位の履歴曲線を示す.SEA 丸棒橋脚と SEA ねじ棒橋 脚についても同様に履歴曲線をそれぞれ図-5,6に示す.

まず,各供試体の載荷終了時の状況について確認する. RC 橋脚では正載荷側および負載荷側ともにドリフト 10%載荷 時に軸方向鉄筋が破断したため載荷を終了した. SEA 丸棒 橋脚では正載荷側においてドリフト 5%載荷時に SEA が1 本破断したため正載荷を行わないこととし、それ以降は負 載荷側のみで繰返し載荷を行った. 負載荷側では水平変位が 117mm(ドリフト 14.6%)で SEA が破断したため載荷を 終了した. SEA ねじ棒橋脚では正載荷側および負載荷側と もにドリフト3%載荷時にSEAが1本ずつ破断したため載 荷を終了した. SEA 丸棒は金属の粒界における破断, SEA ねじ棒は棒の付着に起因する応力集中による破断と考えら れるが、SEA棒を取り出し、調査する必要がある. 図-4よ り, RC 橋脚の最大荷重は正載荷時で 42.8kN, 負載荷時で 43.6kN であった. ドリフト 4.5% 載荷時に最大荷重付近で 安定していた水平荷重が低下し始めた後に、急激に水平荷 重が低下した.図-5より,SEA 丸棒橋脚の最大荷重は正載 荷時で 29.4kN, 負載荷時で 29.8kN であった. 負載荷側で はドリフト 10%載荷程度まで水平荷重が最大荷重付近で安 定し続け、大幅な水平荷重の低下は確認されなかった.図 -6より, SEA ねじ棒橋脚の最大荷重は正載荷時で 29.1kN, 負載荷時で 29.5kN であった.

図-7は3体の橋脚供試体における履歴曲線の包絡線の比 較である.包絡線とは図-4,5に示した履歴曲線の各変位 振幅の1サイクル目における正載荷側および負載荷側の最 大荷重をプロットした図である.SEA を塑性ヒンジ部に用 いた橋脚は RC 橋脚に比べて,最大荷重が約 30%小さかっ た. これは SEA の見かけ上の降伏強度が D13 鉄筋の降伏 | 強度の半分程度しかないことが原因である.前述のとおり, RC橋脚ではドリフト 4.5%載荷以降に水平荷重の低下が確 認されたのに対して,SEA 丸棒橋脚ではドリフト 10%載 荷程度まで水平荷重が最大荷重付近で安定していたことか ら,SEA 丸棒橋脚は RC 橋脚に比べて最大荷重は小さいも ののじん性が向上している. また, 水平荷重が最大荷重の 80%以下に低下したときを終局荷重と定義すると、そのとき の水平荷重は, RC 橋脚では正載荷側および負載荷側ともに 48mm (ドリフト 6%) である. それに対して SEA 丸棒橋 脚は実験終了まで水平荷重が最大荷重の 80%以下にまで低



下しなかった.なお,負載荷時において水平変位が 115mm のときの水平荷重は最大荷重の85%程度であった.以上か ら, RC橋脚に比べて SEA 丸棒橋脚の変形性能が向上して いる.

# 残留変位 (2)

図-8は残留変位を比較した図であり、各変位振幅に対す る残留変位の関係を示す.残留変位は各変位振幅の1サイク ル目において水平荷重が0のときの載荷位置での変位とし た. 図-8より,同程度の変位振幅を与えた場合の残留変位 は、SEA を用いた橋脚の方が小さい. 例えば、SEA 丸棒橋 脚の SEA が破断する直前の変位振幅で比較する.橋脚の水 平変位が40mm(ドリフト5%)における正載荷側と負載荷 側の残留変位を平均値で比較すると, RC 橋脚では 28.4mm, SEA 丸棒橋脚では 1.4mm となり, SEA 丸棒橋脚の残留変 位は RC 橋脚よりも約 95%小さい.このドリフト 5%時の SEA 丸棒のひずみを確認すると、ひずみが 17000×10<sup>-6</sup> で あるのに対して、荷重を0に除荷したときのひずみが、ド リフト 5%載荷を始めるときのひずみ 1000×10<sup>-6</sup> に復元し ていることから, SEA の超弾性特性によって残留変位が低 減したと考えられる.以上のことから,SEAを塑性ヒンジ 部に用いた橋脚は残留変位の低減に有効的である.

#### 4. 結論

- 1. SEA を塑性ヒンジ部に用いた橋脚は RC 橋脚に比べて 最大荷重が約 30%小さかったが,SEA 丸棒橋脚ではじ ん性および変形性能の向上が確認された.
- 2. 橋脚の塑性ヒンジ部に SEA を用いることで残留変位の 低減に有効的である.ドリフト 5%載荷時の SEA 丸棒 橋脚では RC 橋脚よりも残留変位が約 95%小さかった.

# 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. 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, 2017.11.
- 藤倉修一, 忍田祥太, 臼井祐太, Nguyen Minh Hai, 中島章 3)典, 浦川洋介:レベル 2 地震損傷後に修復可能な RC 橋脚の 提案および実験的検証, 土木学会論文集 A1(構造・地震工 学), Vol.75, No.4, I\_591-I\_601, 2019.