

## 地震後の復旧性能の向上を目指したPC橋脚の正負交番载荷試験

宇都宮大学 学生員 ○藤岡光 宇都宮大学 正会員 藤倉修一  
 宇都宮大学 学生員 出町元大 宇都宮大学 正会員 Thay Visal  
 宇都宮大学 学生員 吉川遼 東北大学 正会員 運上茂樹

## 1. はじめに

巨大地震発生後に、橋梁に著しい損傷が生じたり崩壊するなどして、交通システムが寸断されると、避難や救助活動、復旧活動等の支障となる恐れがある。このことから、橋梁では大地震後の崩壊を防ぎ、速やかに損傷部を復旧することが重要である。しかしながら、1995年に発生した兵庫県南部地震では、震度法による弾性設計や、経済性を高めることを目的とした段落とし部が原因となり、数多くの橋梁が損傷被害を受けた。また橋脚の残留変位によって、上部構造に損傷が生じていなくても、橋脚天端150mm以上の変位または橋脚に1度以上の残留傾斜が生じた場合は、橋全体を撤去または再構築することになった<sup>1)</sup>。これらによって橋の長期的な復旧が余儀なくされた。

地震時保有水平耐力法によって耐震設計された橋は2016年の熊本地震において、橋梁の崩壊を防ぐ等、耐震性の大幅な向上が確認されたものの、橋脚の残留変位等<sup>2)</sup>で、復旧に長期間を要した事例もある。このことから、橋梁の地震後の復旧性能にはいまだ課題があり、迅速な復旧を実現する新たな橋脚構造の開発が必要である。そこで本研究では、地震後の復旧性能向上を目的として、残留変位を低減し、塑性ヒンジ部を速やかに補修可能とする新たな橋脚構造を開発する。提案構造に対して正負交番载荷実験を行い基本的な曲げ挙動と復旧性能を検証した。

## 2. 提案するPC橋脚コンセプト

本研究で用いた橋脚供試体を図-1に示す。提案構造は、地震後の復旧性能向上を目的として、大きく二つの特徴を有する。一つ目は、断面中心にプレストレスを導入し、橋脚の残留変位を低減することである。二つ目は既往研究<sup>3)</sup>で提案している、断面コア部に鋼管を配置することによって、コンクリート充填鋼管部と外側の鉄筋コンクリート部の二重構造としていることである。地震時には鋼管外側の鉄筋コンクリートが損傷してエネルギー吸収を行い、充填コンクリート部は鋼管で拘束されているため損傷を受けない。地震後に残留変位が低減できれば、コンクリート充填鋼管部のみで上部構造等の自重を支持し、損傷した鉄筋コンクリート部のみを補修することにより、早期復旧が期待できる。

## 3. 正負交番载荷実験

## (1) 橋脚供試体

図-1に作製した従来型RC橋脚供試体と提案構造であるPC橋脚供試体の配筋図を示す。RC橋脚供試体は道路橋示方書の地震時保有水平耐力法<sup>4)</sup>に基づいて設計した。次に、RC橋脚のコア部に鋼管を配置し、断面中央には緊張材を配置した供試体をPC橋脚供試体とした。PC橋脚供試体については導入する緊張力の大きさを変えた2つの供試体を作製し、緊張力が小さい供試体をPC-S供試体、緊張力が大きい供試体をPC-L供試体とした。PC-S供試体には軸応力にして $0.2\text{N}/\text{mm}^2$ 相当である $24.5\text{kN}$ の緊張力を導入し、PC-L供試体には軸応力にして $3.0\text{N}/\text{mm}^2$ 相当である

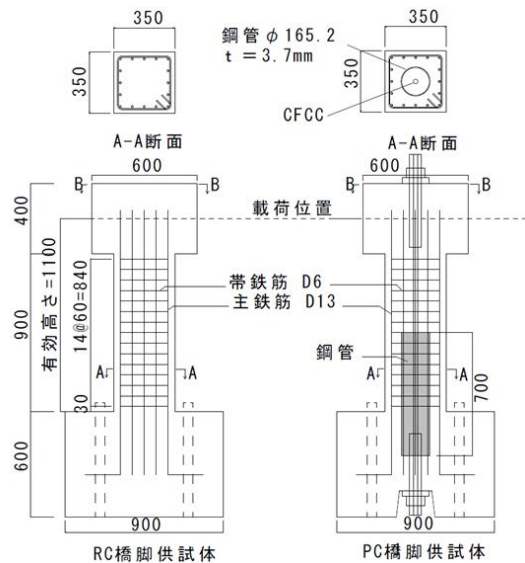


図-1 供試体側面図

$367.5\text{kN}$ の緊張力を導入した。鋼管の直径はコンクリート充填鋼管部のみで想定する上部構造の自重と緊張力による軸力を支持できるように設計した。

各供試体の断面寸法は $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ の正方形断面で、有効高さ $1100\text{mm}$ である。各供試体の軸方向鉄筋にはD13を $68\text{mm}$ 間隔で計16本使用し、帯鉄筋にはD6を $60\text{mm}$ 間隔で配置した。軸方向鉄筋比は1.65%、帯鉄筋比は0.73%である。PC-S、PC-L供試体に用いた鋼管の寸法は外径 $165.2\text{mm}$ 、厚さ $3.7\text{mm}$ である。実験当日におけるコンクリートの圧縮強度は、RC供試体、PC-S供試体、PC-L供試体で、それぞれ $33.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $36.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $39.5\text{N}/\text{mm}^2$ であった。軸方向鉄筋と帯鉄筋の降伏強度はそれぞれ、 $356\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $350\text{N}/\text{mm}^2$ 、鋼管には一般構造用炭素鋼鋼管(STK 400)を使用し、降伏強度は $345\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度は $457\text{N}/\text{mm}^2$ である。緊張材には炭素繊維複合材ケーブル(CFCC)を使用し直径は $26.6\text{mm}$ 、引張強度は $3.23\text{kN}/\text{mm}^2$ 、弾性係数は $164\text{kN}/\text{mm}^2$ である。

## (2) 载荷方法

载荷については一定の鉛直荷重のもと、橋脚供試体柱頭部に油圧ジャッキにて水平力を与え、正負交番载荷を行った。载荷変位については橋脚高さに対する水平変位の比を示すドリフトにより定め、ドリフト0.5% ( $5.5\text{mm}$ )の整数倍の変位振幅を与えた。繰返し回数は、ドリフト0.5%~3.0%は3回、ドリフト3.5%~4.0%は2回、ドリフト4.5%以降は1回とした。载荷高さは橋脚基部から $1100\text{mm}$ の位置である。鉛直荷重は柱頭部に載せた $23.0\text{kN}$ 分の鋼製錘によって与え、橋脚断面に作用する軸応力は $0.19\text{N}/\text{mm}^2$ である。

## 4. 実験結果

## (1) 損傷状況

RC供試体ではドリフト6.0%载荷で塑性ヒンジ部におけるコンクリートが損傷し主鉄筋が座屈したことによって、荷重が大幅に低下し実験を終了した。PC-S、PC-L供試体に

Key Words: プレストレス, 残留変位, 鋼管, 正負交番载荷試験

〒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

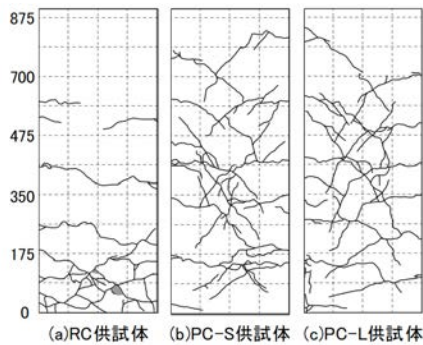


図-2 ひび割れ図 (ドリフト 3.0%)

についてもドリフト 8.0% 載荷で基部に損傷が集中したことで荷重が低下し実験を終了した。なお、それぞれの供試体において主鉄筋の破断は確認されなかった。

発生したひび割れについて、ドリフト 3% 載荷時における載荷方向に対する側面である W 面のひび割れ発生状況を図-2 に示す。損傷図には 87.5mm 間隔のメッシュを記入している。RC 供試体では、橋脚基部にひび割れが集中し、ドリフト 3.5% 載荷時に主鉄筋が座屈し、コンクリートの剥落が高さ約 170mm の範囲で確認され、想定通り塑性ヒンジが形成された。PC-S, PC-L 供試体では、RC 供試体と同様に曲げひび割れが発生すると、ドリフト 1.0% 載荷時には、RC 供試体とは異なり載荷方向に対する側面で鋼管上端の高さ周辺で多数の斜めひび割れが発生した。しかしその後の載荷では、斜めひび割れが進展するものの、橋脚はせん断破壊せず、ドリフト 5.0% 以降になると基部から高さ 330mm 程度の範囲でコンクリートが剥落するとともに主鉄筋が座屈し、最終的には曲げ破壊した。載荷終了後に鋼管外側のコンクリート部分を撤去したところ、鋼管には座屈や破断などの損傷がなく、鋼管部のみで自重を支持できるため、地震後に損傷部を速やかに補修可能である構造であることが示された。

## (2) 耐力および変形性能

各供試体の荷重-変位関係の履歴曲線および包絡線の比較を図-3 に示す。包絡線は荷重-変位関係の 1 サイクル目における荷重の最大点をプロットした図である。図の横軸は橋脚高さに対する水平変位の比であるドリフトを示している。各供試体の最大荷重を正載荷側と負載荷側の平均値で比較すると、RC, PC-S, PC-L 供試体でそれぞれ 97kN, 182kN, 198kN である。鋼管を有する PC-S 供試体は RC 供試体に比べて約 87% 最大荷重が高いが、これは鋼管が耐力増加に寄与したためである。同じ構造で緊張力の大きさを変えた PC-S, PC-L 供試体を比較すると、PC-L 供試体の方が最大荷重は約 6% 大きい。これは、軸力の増加によって曲げ耐力が増加したためであり、N-M 相関曲線より明らかである。

最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始めた変位を確認すると、RC 供試体ではドリフト 4.0% であるのに対して PC-S 供試体ではドリフト 6.0% と、大きい変位まで水平荷重を保持していることから、PC-S 供試体は鋼管を配置することで、RC 供試体よりじん性を有することがわかる。PC-L 供試体は荷重が低下し始めた載荷がドリフト 4.5% と、同じ構造で緊張力が小さい PC-S 供試体よりも早期に荷重が低下した。これは PC-L 供試体は導入軸力が大きいので、コンクリートの圧壊や主鉄筋の座屈が助長されたからであると考えられる。

## (3) 残留変位

残留変位は各載荷で除荷が完了し荷重が 0 のときの水平変位である。ドリフト 6.0% 載荷時の残留変位を正載荷側と

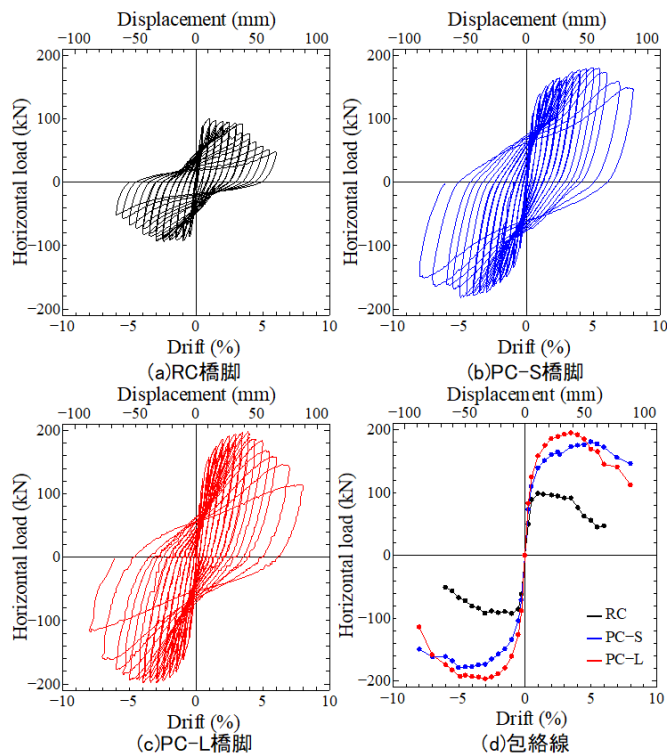


図-3 荷重-変位関係の履歴曲線と包絡線

負載荷側の平均で比較すると、RC 供試体、PC-S 供試体、PC-L 供試体でそれぞれ、54mm, 45mm, 41mm となり、PC-L 供試体の残留変位が最も小さかった。しかしながら従来型 RC 橋脚の 2 割程度しか残留変位が低減されず、復旧性向上が期待できる程の残留変位低減効果は確認されなかった。また導入する緊張力を変えた PC-S, PC-L 供試体間において、残留変位に有意な差はなかった。本研究では断面に鋼管を配置したことで、プレストレスによる残留変位低減効果を阻害した可能性があり、今後検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、地震後の復旧性能向上を目的として、基部に鋼管を有し断面中心に緊張力を導入した PC 橋脚を提案し、正負交番載荷実験を実施した。以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 鋼管を有する PC 橋脚は多数の斜めひび割れが発生したが、鋼管に損傷が確認されず、地震後速やかに損傷部の補修が可能である。
2. 提案する PC 橋脚は従来型 RC 橋脚よりも鋼管を有する分、変形性能が向上しじん性のある構造である。しかし導入する緊張力を大きくすることで、コンクリートの圧壊や主鉄筋の座屈が助長され、早期に荷重が低下する結果となった。
3. PC 橋脚の残留変位は従来型 RC 橋脚の 2 割程度しか低減されず、復旧性が向上する程の残留変位低減効果は確認されなかった。

## 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, pp.973-978, 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) 藤倉修一, 忍田祥太, 白井祐太, 中島章典, 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.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 2017.