# UFCセグメントを用いた橋脚の耐震性

市川 翔太<sup>1</sup>・張 鋭<sup>2</sup>・佐々木智大<sup>3</sup>・川島 一彦<sup>4</sup>・Mohamed ElGawady<sup>5</sup> ・松崎 裕<sup>6</sup>・山野辺慎一<sup>7</sup>

1東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail:ichikawa.s.aa@m.titech.ac.jp (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) 2東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 E-mail:zhang.r.ab@m.titech.ac.jp 3独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫県耐震工学研究センター (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21) E-mail:tomo s@bosai.go.jp 4東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail:kawashima.k.ae@m.titech.ac.jp 5前東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻客員准教授 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail:melgawady@wsu.edu 6東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助教 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail:matsuzaki.h.aa@m.titech.ac.jp (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1) 7 鹿島建設株式会社 技術研究所 E-mail:yamanobe@kajima.com

ー般にRC橋脚に設計地震力を超えるような大きな地震力が作用すると、軸方向鉄筋の局部座屈や破断 及びかぶりコンクリートの剥落が生じる結果,RC橋脚の耐力は低下する.被災後も継続使用でき,その 後の補修も少なくて済むようなダメージフリー橋脚を実現させるためには、塑性ヒンジ部の損傷を防ぐこ とが重要である.本研究は、塑性ヒンジ部の損傷の軽減や変形性能の向上を目的として,超高強度繊維補 強コンクリート(UFC)製プレキャストセグメントを用いると同時に鉄筋をアンボンド化し、セグメント 内をRC構造とした橋脚とUFCセグメント内を空洞としてPC縦締めを行った橋脚の2種類の構造を提案し, これらの耐震性能を検討したものである.

Key Words:, Seismic Design, Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, Damage Free Columns

# 1. はじめに

一般に RC 橋脚に設計地震力を超えるような大き な地震力が作用すると、軸方向鉄筋の局部座屈や破 断、かぶりコンクリートの剥落が生じる結果、RC 橋脚の耐力が低下する. 被災後も継続使用でき、そ の後の補修も少なく済むようなダメージフリー橋脚 を実現させるためには、塑性ヒンジ部の損傷を防ぐ ことが重要である.

塑性ヒンジ部の損傷を防ぐ方法の一つとして,超 高強度繊維補強コンクリート(UFC)製セグメント<sup>1)</sup> を利用すると同時にアンボンド鉄筋<sup>2)</sup>を用いて変形 性能を向上させる方法が考えられる.山野辺らは UFC製プレキャスト型枠を用いた橋脚に対する2方 向載荷実験を行い,耐震性の向上が認められること を明らかにしている<sup>3)</sup>.

本研究では、UFC を用いた橋脚の損傷の軽減及び 変形性能の向上を目的として、UFC セグメントにア ンボンド鉄筋を配置し、型枠内を RC 構造とした模 型橋脚と UFC セグメント内を空洞として PC 縦締め を行った模型橋脚を提案し、これらの耐震性能を検 討する.

## 2. UFCセグメントの活用策

UFCは180MPa~200MPaという高い圧縮強度を持ち,ひび割れが生じてもひび割れ間を鋼繊維が架橋するため,曲げ引張強度は普通コンクリートに比べ大きい.また,引っ張りにも抵抗できる.本研究で

はUFCを用いて強度と変形性能に富むダメージフリ ー橋脚を実現させることを目的に,以下の方針で UFCの適用を図る.

1)曲げ圧縮側では UFC セグメントが圧縮力を負 担し圧壊を防ぐとともに、引張側では UFC セグメ ント間が開くことにより橋脚に変形性能を与える. このために、UFC セグメント間をドライジョイント とする. UFC セグメント区間の高さは UFC セグメ ント上部の RC 構造部が損傷しないように定める.

2) UFC セグメントの目開きが一部にだけ集中し, その部分だけにコアコンクリートの損傷が生じたり 軸方向鉄筋ひずみが増加することを防止する必要が ある.そこで,UFC セグメント内の軸方向鉄筋をア ンボンド化することにより,アンボンド区間での軸 方向鉄筋のひずみを均一化させ,UFC セグメントの 目開きが一部にだけ集中することを防ぐ.

3) 橋脚に作用するせん断力にドライジョイントの UFC セグメントで抵抗するためには、UFC セグメ ントのジョイント部を嚙み合わせ継ぎ手にすること も考えられるが、このようにすると UFC セグメン トが肉厚になると同時に構造も複雑になり、かつ、 噛み合わせが抜け出したりしてこの部分が損傷する 可能性がある.このため、橋脚にせん断分担機構を 持たせるため、UFC セグメント区間の構造として、 以下の2種類を考える.

(1) 内側 RC 構造: UFC セグメントの内側に低鉄 筋の RC 構造を設け、これによりせん断に抵抗する. UFC セグメントの内法面に窪みを設けて内側 RC 構 造の外周面間とボンドを確保する.

(2) PC 縦締め構造:橋脚上部とフーチング間に PC を導入して,UFC セグメント間の摩擦力を増大 させることにより,せん断に抵抗させる.

#### 3. 模型製作

上記の設計コンセプトに基づいて試算を行った上で、2種類の模型橋脚を製作した.図-1及び図-2は それぞれ内側 RC 構造及び PC 縦締め構造の橋脚模 型である.いずれの模型においても、橋脚基部から 水平力作用点までの高さは 1370mm とし、断面は 300mm×300mmの正方形で、2方向地震力作用下に おけるコーナー部の損傷を軽減するためコーナー部 に半径 65mmの丸みを持たせた.写真-1 に示すよ うに、フーチング上面から高さ 600mm までの橋脚 躯体には高さ 50mmの UFC セグメントを 12 段配置 した.UFC セグメントの断面は 300 mm×300 mm, 厚さは 45mm とし、UFC のせん断強度を確保するた めに周面から 15mmの深さに帯鉄筋として各セグメ ントに対して 1 本の D6 (SD345)を埋め込んだ. UFC セグメントには軸方向鉄筋 D6 (SD345) 36本 をアンボンド状態で設置するための穴を設けた.フ ーチング下面から橋脚上端まで配置した軸方向鉄筋 のうち,フーチング下 100mm からフーチング上 600mm の範囲では軸方向鉄筋はアンボンドにした.

図-1 に示すように,内側 RC 構造の模型橋脚では 橋脚躯体の UFC セグメント内に普通コンクリート を用いて RC 構造を設け,軸方向鉄筋として D6 を 16 本,帯鉄筋として D4 (SD295)を高さ方向に 50mm 間隔で配置した.帯鉄筋は 135 度曲がりフッ クでコアコンクリートに定着した.

一方,図-2 に示すように,PC 縦締め構造の模型 橋脚では UFC セグメント区間では,内部を中空の ままとし,フーチング底面から橋脚上端まで PC 鋼 より線(¢28.5)1 本を中央部に配置し,これに 50kN の緊張力を導入した.PC 鋼より線の緊張力を 計測するため,ロードセルをフーチング底面部に設 置した.

UFC の圧縮強度は 191MPa, 普通コンクリートの 圧縮強度は 31MPa, D6 筋のヤング率は 194 kN/mm<sup>2</sup>で降伏強度は 391MPa, D4 筋のヤング率は 163 kN/mm<sup>2</sup>で降伏強度は 318MPa, PC 鋼より線の ヤング率は 187 kN/mm<sup>2</sup>で降伏強度は 1777MPa であ る.

## 4. 載荷実験

東京工業大学の耐震実験施設を用いて載荷実験を 行った.上部構造によって橋脚基部に作用する圧縮 応力を1MPaと見込み,動的アクチュエータによっ て86kNの一定軸力を橋脚天端に荷重制御で作用させ た.図-3に示すように、ドリフト0.5%を基準変位と し、変位制御により円形オービットで時計回りに各 ステップごとに毎回3回ずつ,基準変位の整数倍ず つ増加させて載荷した.

ただし、内側RC構造の模型橋脚では、最初の0.5% ドリフト載荷を開始する際、アクチュエーターの操 作ミスにより、SE方向にドリフト1.2%相当の変位 を一気に与えてしまった.このため、軸方向鉄筋が NWコーナー及びSWコーナーにおいては引張降伏、 SEコーナーにおいては圧縮降伏した.載荷変位を原 点に戻した上で、当初予定した円形オービットによ る載荷を開始した.

#### 5. 内側RC構造橋脚の耐震性

#### (1)損傷の進展

ドリフト1.0%載荷までは特に損傷は生じない.上述したように載荷ミスによりドリフト1.2%載荷に相当する変位をSE方向に与えたが、この影響は損傷の

進展に対して影響を与えているようには見られない. ドリフト1.5%載荷になると,圧縮側となった基部の UFCセグメントにおいて,セグメントの外側が圧縮 を受けた際に薄く剥離し始めるようになった. ドリフト2.5%載荷になると、圧縮側となる基部の UFCセグメントコーナー部に縦方向の小さい複数の ひび割れが生じるようになった.写真-2はドリフト 3.5%載荷後の損傷である.UFCセグメントの損傷は





写真-1 UFC セグメント



(3) EW 方向 図-3 円形繰り返し載荷の載荷方法

ドリフト2.5%の時からほとんど進展しなかったが, 2段目のセグメントが1段目のセグメントに対して反時計回りにわずかにねじれ始めた.

写真-3に示すように、ドリフト4.0%載荷になると パキパキという音とともにUFCセグメントのコーナ 一部の上下端においてUFCが薄くではあるが広範囲 に剥離した.この段階までにはUFCセグメントの剥 離以外には橋脚本体には全く損傷は生じていない.

ドリフト5.5%載荷になると軸方向鉄筋が1本破断 した. RC構造と異なり,UFCセグメントは破断し たり剥落しないため,破断した軸方向鉄筋本数を直 接視認することはできないが,軸方向鉄筋の破断は 破断音から判断した.ドリフト6.0%載荷に達すると 複数の軸方向鉄筋が破断し,ドリフト6.5%載荷にな ると,軸方向鉄筋の破断がさらに進展したため実験 を終了した.

写真-4 にドリフト 6.5%載荷終了後の模型橋脚を示す.橋脚躯体のねじれは主として1段目と2段目のUFC セグメント間に生じた. E面中央部の目開き



(1) NW コーナ-



(2) SE コーナー 写真-2 ドリフト 3.5%載荷終了後の内側 RC 構 造の塑性ヒンジ区間の損傷



(1) NW コーナー



(2) SE コーナー 写真-3 ドリフト 4.0%載荷終了後の内側 RC 構 造の塑性ヒンジ区間の損傷

に差し金を挿入したところ,内側に 98mm 挿入する ことができた.UFC セグメントの厚さは 45mm であ るため,内側 RC 構造のコンクリート表面から 53mm 程度損傷が進展したことになる.同様に内側 RC 構造表面から内側に向かって,N 面中央部では 10mm,S面中央部では 34mm,それぞれ損傷が進展



(2) SE コーナー **写真-4** 実験終了後の内側 RC 構造の 塑性ヒンジ区間の損傷



図-4 1段目の UFC セグメントに対する 2 段目の UFC セグメントのねじれによる反時計回り の回転量(内側 RC 構造)

した. UFC セグメントが圧壊しない状態で内側 RC の損傷が進展したのは, UFC セグメントの目開きに伴い引張によって損傷したためである.

図-4(1)に各載荷段階終了時における1段目のUFC セグメントに対する2段目のセグメントの反時計回 りのねじれ角を示す.前述したように,橋脚躯体の ねじりはおおよそ3.5%載荷段階から生じ始めていた が,この段階ではまだねじれを計測していなかった ため,ここでは5%載荷以降のねじれ角を示してい る.ドリフト6.5%で載荷を終了した段階では,1段 目UFCセグメントに対して2段目UFCセグメントに は4.6°の残留回転が残った.なお,実際の地震動 作用下では,円形オービット載荷のように一方向へ の単調な回転載荷ではないため,このように大きな ねじれが1方向に生じ続けることはない.



#### (2)曲げ復元力及びひずみ特性

図-5に載荷点高さにおける水平力~水平変位の履 歴曲線を示す.ドリフト2.5%載荷の時に最大復元力 は達し,NS方向には47.7kN,EW方向には53.3kNで ある.これ以降,最大復元力は徐々に低下し,特に 軸方向鉄筋の破断の進展によりドリフト6.5%載荷に おける2サイクル目ではNS方向には19.4kN,EW方 向には16.1kNと,ピーク時の復元力のそれぞれ41% 及び30%へと大きく低下した.

図-6はNEコーナーにおけるUFC内アンボンド鉄 筋のひずみである.ここにはひずみの測定値が信頼 できる区間の結果だけを示している.また,フーチ ング上面から767.5mm位置はアンボンド区間ではな く,RC区間であるが,ここでは参考のために示し ている.フーチング上面から142.5mmにおいては, ドリフト4.5%で50000 µ程度のひずみが生じている. フーチング上面から下に100mmの位置までアンボン ドにしたが,フーチング上面位置ではひずみが 10000 µ程度しか生じていない.UFCセグメントが せん断により水平方向にズレたり,橋脚躯体がねじ れたために,フーチング上面位置では軸方向鉄筋が 完全にアンボンドになっていなかったと考えられる.

図-7はNEコーナーにおけるドリフト3.5%時の最 大軸方向鉄筋ひずみの高さ方向の分布である. 図中



図-6 内側 RC 構造の NE コーナーにおけるアンボン ド軸方向鉄筋のひずみ(フーチング上面から 767.5mmの位置では RC 区間の軸方向鉄筋である)



図-7 ドリフト 3.5%載荷終了後の NE コーナーに おけるアンボンド軸方向鉄筋のひずみ分布

には後述するPC縦締め構造の結果も示している. PC区間(フーチング上面下100mm~600mm)では アンボンド軸方向鉄筋のひずみ分布はほぼ一様とな るべきであるが,ここでは,荒い測定点の結果を直 線で結んでいるだけであるため,このようになって いない.

図-8はUFCセグメント内に埋め込んだ帯鉄筋のひ ずみである.ここでは、フーチング上面から1段目 と4段目のUFCセグメント内に埋め込まれている帯 鉄筋を示している.ドリフト3.5%載荷時では、4段 目のUFCセグメント内の帯鉄筋ではひずみは500 μと 小さいが、最下段のUFCセグメント内の帯鉄筋では 1000 μ程度となっている.いずれの箇所においても まだ弾性範囲内であるが、UFCセグメントの損傷度 に応じて帯鉄筋にひずみが生じている.



#### 6. PC縦締め構造橋脚の耐震性

#### (1)損傷の進展

ドリフト0.5%載荷では特に損傷は生じなかったが, ドリフト1.0%載荷においては1段目セグメントのコ ーナー部の上端部においてUFCが薄く剥離し始めた. また,UFCセグメントどうしがせん断により載荷方 向へずれ始めた.ドリフト3.0%載荷では,UFCセグ メントの内側が損傷し,剥離した破片がフーチング 上に落下する音が聞こえた.ドリフト3.5%載荷にな ると,軸方向鉄筋が1本破断した.この段階でUFC セグメントの特にコーナー部でセグメント外側から 内側にかけて部分的に圧壊し,復元力が急速に低下 したため,ドリフト3.5%載荷終了後に載荷を打ち切 った.

ドリフト3.5%載荷終了時における損傷を写真-5 に示す.写真-2に示した内側RC構造に比較して, PC縦締め構造ではUFCセグメントのひび割れ,剥離 及び圧壊がより著しい.内側RC構造と同様に,載 荷に伴い,図-9に示すように反時計回りのねじれが 橋脚躯体に生じた.1段目と2段目間にはすでに1% ドリフトの段階からねじりによるズレが生じ始めて いる.2段目と3段目間,3段目と4段目間,4段目と5 段目間にはそれぞれ1.5%,2%,3.5%ドリフトから と,ねじりによるズレが生じ始めた.ズレは順次下 段のセグメントから上段のセグメントへと伝わって いった.内側RC構造ではとは異なり,PC縦締め構 造では,1段目と2段目間にしかずれが生じなかった のに対して,PC縦締め構造ではすべてのセグメント 間でずれが生じたことが特徴である.

また、1段目と2段目のUFCセグメント間に着目す ると、前述したように内側RC構造の場合にはドリ フト5.0%載荷で1.8°のねじれが生じたのに対し、 PC縦締め構造の場合にはドリフト3.5%載荷終了後 ですでに3.2°のねじれが生じていた.さらに、内





(2) SE コーナー写真 5 ドリフト 3.5%載荷終了時の PC 縦締め構造の 塑性ヒンジ区間の損傷



図-9 基部からi段目 UFC セグメントのi-1段目
UFC セグメント対するねじれによる反時計
回りの回転量(PC 縦締め構造)

側RC構造ではUFCセグメントどうしがせん断によ り載荷方向にずれることは無かったが、PC縦締め構 造ではせん断によりUFCセグメントどうしが載荷方 向(水平方向)にずれた.

以上のようにPC縦締め構造ではUFCセグメント間の目開きは高さ方向に分散して生じたが、ねじりや 載荷方向への水平せん断ずれが生じ、結果的にこれ がUFCセグメントの損傷を早めた.これは内側RC 構造に比較してPC縦締め構造ではUFCセグメントの 内側が空洞であるため、PCを導入してこれに抵抗さ せようとしたが、まだねじれに対する抵抗が十分で はなかったためである.

#### (2)曲げ復元力及びひずみ・PC軸力特性

図-10にPC縦締め構造橋脚の載荷点高さにおける



水平カ〜水平変位の履歴曲線を示す.最大復元力 はNS方向にはドリフト3.0%載荷時で54.5kN,EW方 向にはドリフト3.5%載荷時で57.7Nである.ドリフ ト3.5%載荷になると,復元力は大きく低下していき, 3サイクル目ではNS方向には25.2kN,EW方向には 13.0kNと,ピーク時のそれぞれ46%及び23%にまで 低下した.

図-11はNEコーナーにおけるUFC内にアンボンド された軸方向鉄筋のひずみである.0.5%ドリフトの 段階で軸方向鉄筋はほぼ降伏し,その後,載荷変位 の増加に伴って15000 µ 程度まで増加していく.前 出の図-7には軸方向鉄筋の最大ひずみの高さ方向の 分布を3.5%ドリフトに対して示している.内側RC 構造の場合と同様に,フーチングから767.5mmの位 置ではアンボンド区間ではなくRC区間であるが, ここでは比較のために示している.このため,フー チング上面から242.5mm高さのひずみと767.5mm高 さのひずみを直線で結ぶのは適当ではないことは前 述したとおりである.内側RC構造よりもPC縦締め 構造の方が軸方向鉄筋のひずみが小さくなっている が,これはPC縦締め構造ではPC鋼より線が曲げ引 っ張りを分担するためである.

図-12はUFCセグメント内に埋め込んだ帯鉄筋の ひずみである.最下段と4段目のUFCセグメント内





に埋め込んだ帯鉄筋ひずみを示している.最下段だけでなく4段目のセグメントにおいても、3.5%ドリフトになると降伏している.内側RC構造の場合には、最下段セグメントにおいて3.5%ドリフト載荷の段階では、帯鉄筋ひずみはまだ1000 µ程度であったのに比較して、PC縦締め構造ではより大きな帯鉄筋ひずみが生じた.内側にRC構造が無かったため、UFCセグメントにはより大きなせん断が作用したことを表している.

図-13及び図-14に模型橋脚の上端における上下方 向変位とPC鋼より線の緊張力を示す.模型橋脚上端 では、ドリフト3.0%載荷までは上向きに最大で 1.8mm変位するがドリフト3.5%載荷に入ると反対に 最大で4mm以上沈下した.これは、当初は載荷に伴 って軸方向鉄筋の残留ひずみのために橋脚上端が持 ち上がったが、ドリフト3.5%載荷に入るとUFCセグ メントが損傷し躯体が沈下したことを示している. PC鋼より線の緊張力はこれに連動しており、ドリフ ト3.0%載荷までは最大で150kNmで増加したが、ド リフト3.5%載荷に入ると最小で30kNまで減少した. 以上より、ドリフト3.5%載荷において軸方向鉄筋が



1本しか破断していない状態でも曲げ復元力が大き く低下した原因は、UFCセグメントの損傷に伴いPC 鋼より線の緊張力が低下したためであると考えられ る.

## 7. 結論

UFCセグメントを用いて,内側RC構造及びPC縦 締め構造の模型橋脚を製作し,2方向円形オービッ ト載荷実験に基づいて耐震性能を検討した.本研究 より得られた結論は以下の通りである.

1) 内側RC構造では、ドリフト2.5%載荷段階から最 下段のUFCセグメントにおいて縦方向のひずみが生 じ始め、その後損傷は進展したが、最終的に6.5%ド リフト載荷に至るまで、顕著な圧壊は生じなかった. しかし、最下段のUFCセグメントと2段目のUFCセ グ面間で大きな残留目開きとねじりが生じた.ねじ りは円形オービットによる載荷履歴によって生じた もので、実際の地震動載荷では一方向ばかりに残留 ねじりが生じることはないと考えられる.

2) 上記1)から見て,内側RC構造はダメージフリー 橋脚として予期された当初の性能をほぼ発揮したと 考えられる.ただし,今後,もう少し多くのセグメ ントに損傷を分散させる工夫が求められる.

3) PC縦締め構造では、PCの導入に伴いUFCに作用 する圧縮力が増大し、結果的に軸方向鉄筋が1本し か破断していない状況でUFCセグメントの損傷に伴 いドリフト3.5%載荷の段階で終局を迎えた.実大橋 脚では複数本のPC鋼より線を設置することが必要と なること、PCの導入は一般に高価であることを考慮 すると、UFCセグメントの圧壊につながるPC導入の 仕方を再検討する必要がある.

参考文献

- 山野辺 慎一, 曽我部 直樹, 家村 浩和, 高橋 良和:高性能 塑性ヒンジ構造を適用した高耐震性RC橋脚の開発, 土 木学会論文集A, Vol. 64, No. 2, pp. 317-332, 2008.
- 川島一彦,細入圭介,庄司学,堺淳一:塑性ヒンジ区 間で主鉄筋をアンボンドした鉄筋コンクリート橋脚の 履歴特性,土木学会論文集,No. 689/I-57, pp. 45-64, 2001
- 山野辺 慎一, 曽我部 直樹, 河野 哲也: 超高強度繊維補 強コンクリートを用いたRC橋脚の二方向地震動に対 する耐震性能, 土木学会論文集A, Vol. 66, No. 3, pp. 435-450, 2010.

## SEISMIC PERFORMANCE OF COLUMNS USING UFC JACKETS

# Shota ICHIKAWA, Rui ZHANG, Tomohiro SASAKI, Kazuhiko KAWASHIMA, Mohamed ElGawady, Hiroshi MATSUZAKI and Shinichi YAMANOBE

Under an extreme ground motion, the flexural capacity of a RC column deteriorates due to crushing of core concrete and buckling of longitudinal bars. Therefore, it is important to prevent damage of the plastic hinge region for enhancing the seismic performance of RC columns. Two column structures which use UFC segments at the plastic hinge region and unbonded longitudinal bars in UFC segments are proposed, 1) in-core RC type, and 2) PC cable type. The seismic performance of the two column structures were clarified based on cyclic loading experiments. It is shown that the in-core RC type column shows better performance than the PC cable type column.