

超高強度繊維補強コンクリート製型枠を適用した RC橋脚の正負交番載荷実験

曾我部 直樹¹・山野辺 慎一²・家村 浩和³・高橋 良和⁴

¹正会員 博（工） 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

³正会員 博（工） 京都大学助教授 防災研究所地震災害研究分野（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

地震時に上部構造の慣性力がRC橋脚に大きく作用すると、橋脚基部や部材の接合部などに塑性ヒンジが形成される。そして、橋脚全体の変形の大部分が塑性ヒンジ部における曲げ変形に依存するようになる。そのため、大地震時におけるRC橋脚の構造特性は、塑性ヒンジ部の特性に大きく依存し、橋脚全体の地震時の挙動や耐震性に大きな影響を与える。したがって、RC橋脚において塑性ヒンジ部の特性を改善することができれば、橋脚全体の耐震性能を向上できる可能性がある。

塑性ヒンジ部の特性を改善する方法としては、ゴムなどの弾性材料を圧縮材として適用し変形性能を向上させる方法¹⁾や、軸方向鉄筋の一部をアンボンド化しその損傷を低減する方法²⁾、さらに、橋脚にプレストレスを導入することにより残留変位を低減する方法³⁾などが報告されているが、それ以外にも、近年、開発が進められている超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFCと称する）を適用することが考えられる。UFCとは、 180N/mm^2 相当の高い圧縮強度と鋼繊維による高い曲げじん性を有するコンクリートであり構造部材への適用が進められている材料である^{4) 5)}。UFCは、普通コンクリートに比べ高い性能を有する反面、高価な材料であり、その使用量は可能な限り少ない方が望ましい。すなわち、UFCによりRC橋脚の耐震性を向上させる場合には、最少の使用量で大きな効果を実現できるような適用を行う必要がある。

そこで、本研究では、UFCによるプレキャスト型枠を橋脚基部に限定的に適用する方法として、塑性

ヒンジ区間のかぶり部分のみをUFCで構築したRC橋脚を提案した。ここでは、まず、UFC製プレキャスト型枠とそれを適用したRC橋脚について整理した。そして、UFC製プレキャスト型枠を適用したRC橋脚の基本的な構造特性を把握することを目的として、道路橋橋脚を想定した模型試験体に対する正負交番載荷実験を実施し、考察した。

2. UFC製プレキャスト型枠を用いたRC橋脚

(1) 超高強度繊維補強コンクリート（UFC）

本研究で対象とする超高強度繊維補強コンクリートは、エトリンサイト生成系のコンクリート材料であり、 $180\sim 200\text{N/mm}^2$ 級の圧縮強度が得られるものである。また、公称長さが 20mm と 15mm の鋼繊維を混合したものを体積比で 1.75% 混入することにより、 15N/mm^2 相当の引張強度を得ることができる。養生方法は、 20°C の気中養生を24時間実施し（以下、1次養生と称する）、その後、 85°C の蒸気養生を24時間行う（以下、2次養生と称する）ことを基本とする。表-1に、UFCの配合例を示す。また、写真-1に、UFCのフロー試験の様子と曲げ試験後の試験体におけるひび割れを示す。

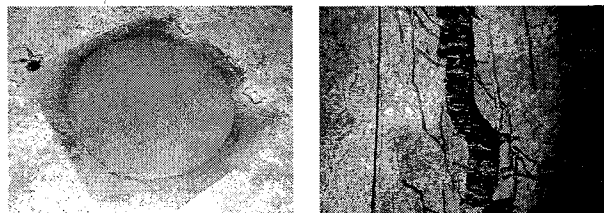
(2) UFC製プレキャスト型枠

RC橋脚に軸力および曲げモーメントが作用すると、中立軸を境として引張応力は鉄筋等の鋼材が負担し、逆に圧縮応力はコンクリートが負担する。破壊モードが鉄筋降伏先行型の曲げ破壊であるRC橋脚では、引張側の鉄筋が降伏することにより曲げ剛性が低下し、圧縮側のコンクリートが圧壊するか、

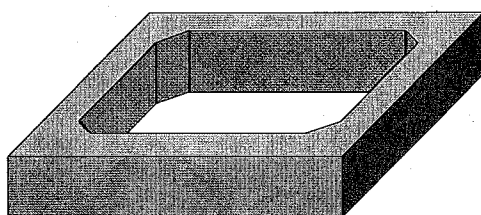
表－ 1 UFC の配合例

空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス 結合材	骨材	混和剤	
2	205	1288	911	51.52	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む



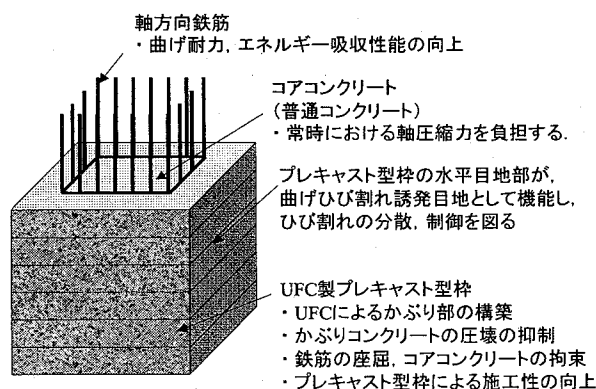
写真－ 1 UFCのスランプフロー試験（右）と曲げ試験後の破壊面（左）



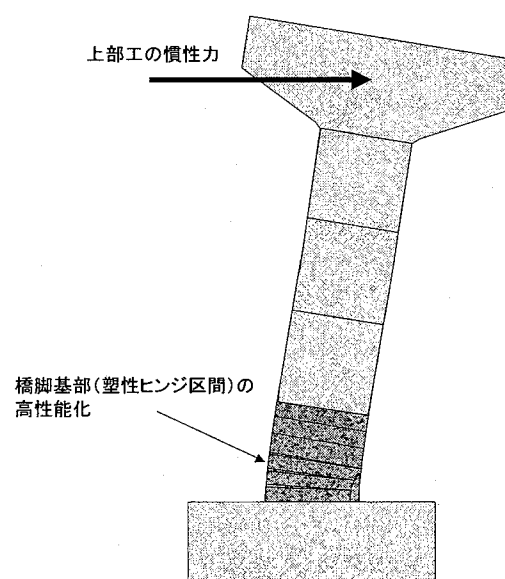
図－ 1 UFC製プレキャスト型枠

もしくは、圧縮側の鉄筋が座屈することによりかぶりコンクリートが剥落し、部材耐力が低下する。つまり、曲げモーメント作用時に最も大きな圧縮応力が作用するかぶりコンクリートの圧壊を抑制できれば、部材の変形性能を向上させることが可能となる。また、かぶり部分が高い曲げじん性を有するコンクリートで構成されれば、座屈した鉄筋のはらみ出しやコアコンクリートに対する拘束効果が大きくなり、変形性能の向上に繋がる。

そこで、本研究では、図－ 1に示すようなUFC製プレキャスト型枠を複数個、積層することにより、塑性ヒンジ部のかぶり部分をUFCで構築する方法を提案した。UFC製部材は前述したように2次養生が必要となることから、一般に2次製品工場で製作されることが想定される。そのため、プレキャスト型枠を分割化し、小型化することは、製作時の型枠工の省力化、製品の運搬と設置が容易となるなどの利点がある。一方、UFCの曲げ引張強度は、ひび割れ間における繊維の架橋効果により普通コンクリートに比べ大きくなることから、型枠を基部などの限られた部分へ適用した場合、軸方向鉄筋の段落し部と同様なメカニズムで、型枠の適用区間外および境界において曲げひび割れの発生が先行し、塑性化する可能性がある。このような場合でも、各型枠の重ね合わせ部がひび割れ誘発目地として機能することに



図－ 2 UFC製プレキャスト型枠の適用部



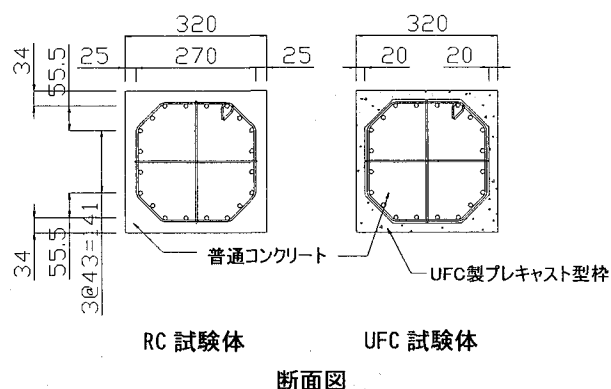
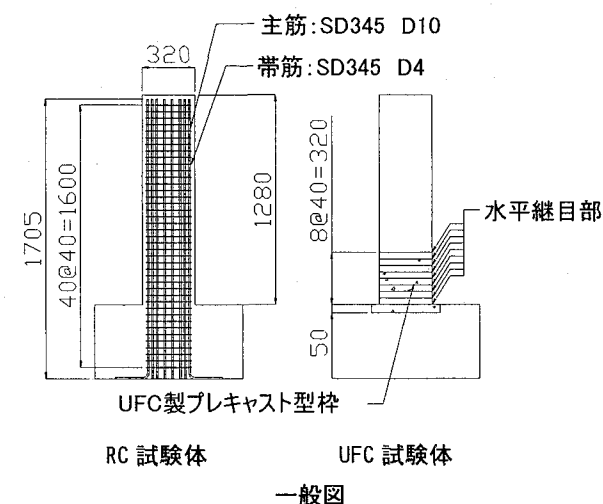
図－ 3 UFC製プレキャスト型枠を適用したRC橋脚

より、確実にUFC製プレキャスト型枠の適用区間にひび割れを発生させ、当該部分を塑性ヒンジ化することができる（図－ 2）。

(3) UFC製プレキャスト型枠を適用したRC橋脚

単柱式RC橋脚では、地震時における上部構造の慣性力が橋脚天端に作用することにより、橋脚基部に作用する曲げモーメントが最も大きくなるような三角形の曲げモーメント分布を示す。そのため、大地震時には橋脚基部が塑性化し、橋脚全体の構造特性、地震時挙動が、塑性ヒンジ部の特性に大きく依存する。つまり、本研究で提案するUFC製プレキャスト型枠により塑性ヒンジ部の変形性能を向上させることができれば、橋脚全体の耐震性を高めることができる（図－ 3）。

塑性ヒンジ部分の高性能化に伴う橋脚全体の耐震性能の向上は、橋梁の安全性を高めると共に2段階耐震設計において要求される性能を満足する橋脚を、従来のRC構造に比べ小規模な断面で実現できる可



図－ 4 正負交番載荷実験用試験体

能性があり、建設コストを縮減できる可能性がある。また、橋脚基部などの塑性ヒンジ部分のみへUFC製プレキャスト型枠を限定的に適用することにより、比較的高価である高性能材料の使用量を抑えながら、大きな耐震性能向上効果を期待することができる。

3. 正負交番載荷実験概要

本研究では、提案したUFC製プレキャスト型枠を適用したRC橋脚の基本的な構造特性について検討するために正負交番載荷実験を実施した。実験の概要については、以下のようなものである。

(1) 模型試験体

試験体は、道路橋を想定して設計されたRC橋脚⁶⁾（断面：2,400×2,400mm、高さ：9,600mm）を相似率7.5で縮小したものであり、320×320mmの正方形断面と1,280mmの試験体高さを有するものである。コンクリートは呼び強度24N/mm²の早強コンクリートを適用し、軸方向鉄筋にはSD345 D10鉄筋を20本、帯鉄筋としてSD345相当のD4鉄筋を用いた。本実験では、橋脚基部におけるUFC製プレキ

表－ 2 鋼材の材料試験結果

鋼材の種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
軸方向鉄筋 SD345, D10	382.1	552.5	189.4
帯鉄筋 SD345, D4	347.7	514.9	210.4

表－ 3 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ引張強度 (N/mm ²)
33.13	3.27	2.43

表－ 4 UFC の材料試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	曲げ引張強度 (N/mm ²)
195.34	47.43	7.70	31.42

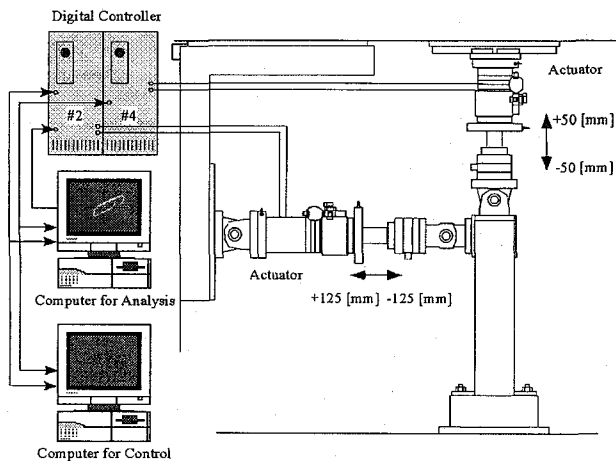
ャスト型枠が構造特性に及ぼす影響を検討するために、その有無を相違とした2体の試験体を製作した（図－ 4）

RC試験体は従来のRC橋脚を想定した試験体である。ただし、後述するような形状を有するUFC製プレキャスト型枠を適用するUFC試験体と軸方向鉄筋の配置（8角形状の配筋）などの条件を等しくしている。

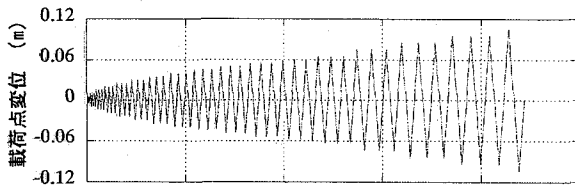
一方、UFC試験体は、その基部から1D区間（320mm）へUFC製プレキャスト型枠を適用したものである。同型枠の厚さについては、予備解析に基づき、1軸曲げ変形時の断面内における曲げ圧縮応力をUFC部のみで負担するために十分な大きさである20mmとした。また、隅角部は、同様に2軸曲げ変形時にUFC部のみで曲げ圧縮応力を負担できるように厚くした結果、UFC製プレキャスト型枠の内部は8角形断面となっている。同型枠の1個当りの高さについては、適用区間320mm範囲内に、8箇所のひび割れ発生誘導目地部（水平目地部）ができるように40mmとした。

(2) 載荷方法

図－ 5に載荷装置を示す。載荷システムの加力装置は、水平力と軸力を同時に載荷する2機のデジタル制御されたアクチュエーターからなる。水平方向のアクチュエーターは、2基のヒンジ構造を介して反力壁に設置されている。また、鉛直方向のアクチュエーターは、ヒンジ構造とスライド支承を介して、上部梁フレームに固定され、試験体の曲げ変形を拘束することなく、一定の軸力の載荷が可能となっている。



図－ 5 荷重装置



図－ 6 荷重波形

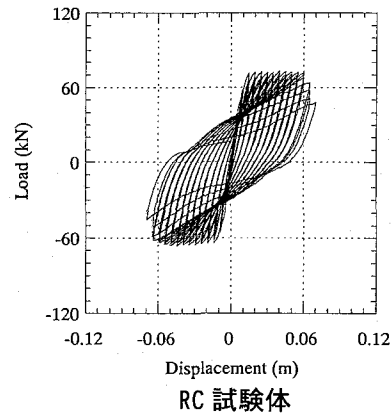
鉛直方向については、試験体断面における圧縮応力度 1.0N/mm^2 に相当する軸力 102.4kN を荷重制御で載荷した。また、水平方向については、載荷点変位 0.005m を基準とする同一振幅における繰返し回数3回の振幅漸増型載荷波形を変位制御で作用させた。なお、UFC試験体については、後述するようにRC試験体が終局を迎えた 0.065m （13サイクル）以降の基準変位を 0.01m に拡大して載荷を行っている（図－ 6）。

(3) 計測項目

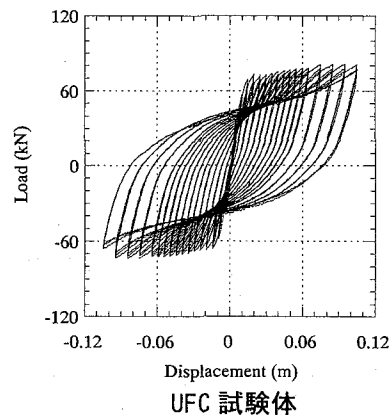
本実験では、載荷実験時における載荷水平荷重、鉛直荷重については、アクチュエーターに内蔵されているロードセルにより計測した。試験体の変形形状、載荷点変位については変位計により、載荷ステップごとにおける計測を行った。また、試験体内部における軸方向鉄筋には、そのひずみ分布を把握するために試験体高さ方向にひずみゲージを設置した。試験体のひび割れ性状については、同一振幅における繰返しの3回目の正側および負側で目視および写真撮影による観察を行った。

4. 正負交番載荷実験結果と考察

図－ 7に両試験体の荷重－変位関係を示す。また、図－ 8, 9には、両試験体の骨格曲線と破壊過程について示す。



RC 試験体



UFC 試験体

図－ 7 荷重－変位関係

(1) 荷重－変位関係と破壊過程

a) RC試験体

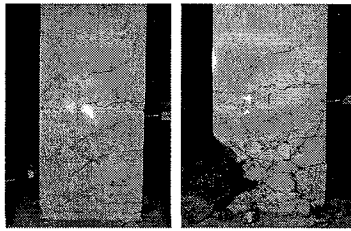
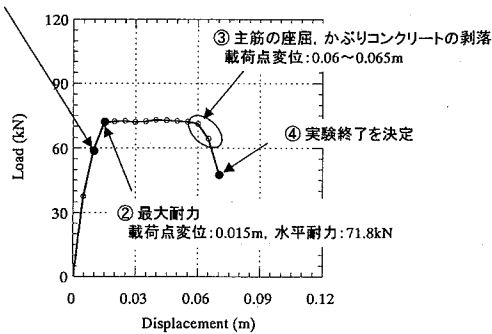
RC試験体の荷重－変位関係では、RC部材特有の紡錘型の履歴曲線が確認できる。破壊過程は、載荷点変位 0.0097m 付近で最外縁の軸方向鉄筋が降伏して剛性が低下し、載荷点変位 0.015m 時に最大耐力 72.0kN を示した後は、載荷点変位 0.06m 付近まで一定の耐力を安定して保持している。ただし、載荷点変位 $0.06\sim 0.065\text{m}$ において、図－ 8に示すように圧縮側のかぶりコンクリートが軸方向鉄筋の座屈に伴うはらみ出しにより剥落し、 0.07m 時において大きく耐力が低下している。

b) UFC試験体

RC試験体の基部から1D区間（ 0.32m ）にUFC製プレキャスト型枠を適用したUFC試験体では、RC試験体において軸方向鉄筋の座屈に伴い大幅に耐力が低下した 0.065m 以降も安定して耐力が保持されている。破壊過程は、RC試験体とほぼ同様の載荷点変位 0.0089m 時に軸方向鉄筋が降伏し、その後は、 0.085m 時に最大耐力 81.6kN を示すまで緩やかに耐力が増加しながら変形が進んでいる。

ひび割れ性状は、図－ 9に示すように、UFC製プ

① 最外縁主筋の降伏
 載荷点変位: 0.0097m, 水平耐力: 59.0kN



主筋の座屈と
 かぶりコンクリートの剥落
 (実験終了時)

最大耐力経験時 0.065m (13 δ y) 時

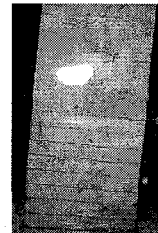
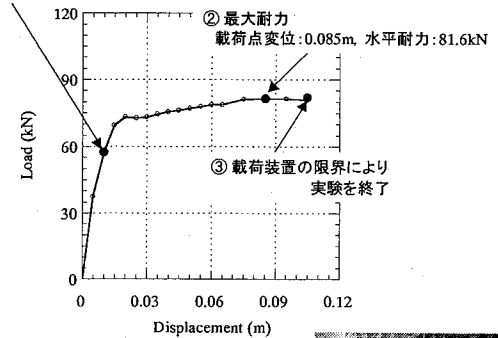
図- 8 RC 試験体の破壊過程

レキャスト型枠を適用した区間では、目地部が開くことにより、1個当りのUFC製プレキャスト型枠の高さである0.04m間隔で曲げひび割れが発生している。曲げひび割れは、型枠の適用区間より上部にも発生したが、その幅は目地部の開きに比べ小さく、曲げ変形は主に1D区間に集中していた。また、UFC製プレキャスト型枠の適用区間と区間外との境界においても大きな損傷は確認されておらず、塑性化およびその領域の状況についてはRC試験体と同様であった。このことは、RC、UFC試験体の軸方向鉄筋の降伏時のひずみ分布（図- 10）において相違が見られないことから明らかである。一方、圧縮側については、0.105m時においてもUFC部の圧壊、軸方向鉄筋の座屈などは確認されず、健全性を保っていることが分かる。なお、実験は載荷装置の限界により、0.105m時で終了した。

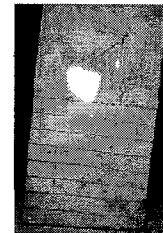
(2) UFC製プレキャスト型枠がRC橋脚の構造特性に及ぼす影響

図- 11に両試験体の骨格曲線の比較を示す。RC試験体では、0.065m時に軸方向鉄筋の座屈、かぶりコンクリートの剥落により耐力が低下し始めている。これに対し、UFC試験体では基部におけるかぶり部をUFCとしたことにより、その圧壊や軸方向鉄筋の座屈が抑制され、載荷を終了した変位0.105m時まで安定した水平耐力を保持している。つまり、今回の実験では、UFC製プレキャスト型枠の適用により、少なくとも60%以上の変形性能の向上効果を確認することができた。

① 最外縁主筋の降伏
 載荷点変位: 0.0089m, 水平耐力: 53.2kN



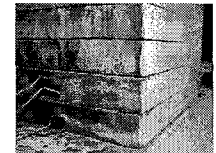
最大耐力経験時



載荷点変位0.105m



圧縮側の様子
 (載荷点変位0.105m)



引張側の様子
 (載荷点変位0.105m)

図- 9 UFC 試験体の破壊過程

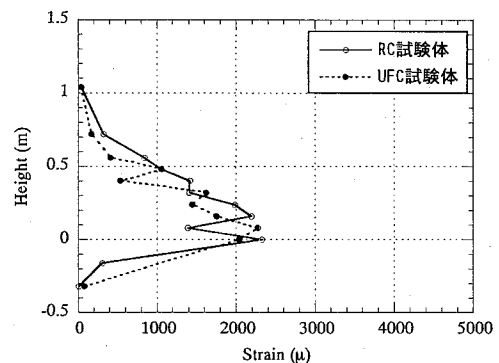


図- 10 軸方向鉄筋降伏時のひずみ分布の比較

図- 12、図- 13に両試験体の各変形状態における残留変位および等価粘性減衰定数の比較を示す。なお、正負交番載荷実験における残留変位とは、各サイクルの最大変位経験直後の水平荷重がゼロになる除荷時の変位である。また、等価粘性減衰定数は、各載荷サイクルの1回目の履歴曲線から算出される履歴吸収エネルギー量 ΔW を $2\pi \times$ ポテンシャルエネルギー W で除することにより算出したものである。

残留変位については、両試験体で同様な傾向を示していることが分かる。これは、残留変位の大きさに影響を及ぼす要因となる、曲げ変形時に降伏する軸方向鉄筋量が両試験体で同様であるためである。すなわち、UFC製プレキャスト型枠の適用が、橋脚

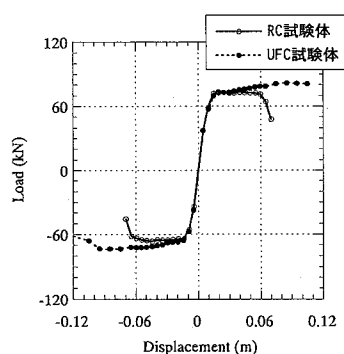


図- 11 骨格曲線の比較

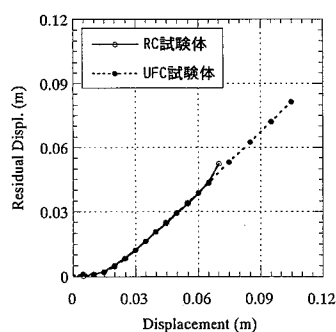


図- 12 残留変位の比較

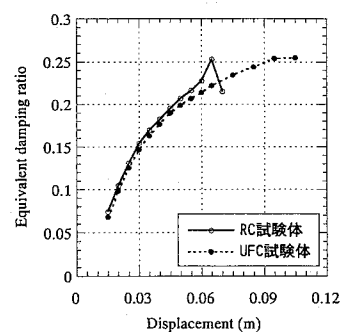


図- 13 等価粘性減衰定数の比較

全体の残留変位に影響を及ぼすことが無いことが分かる。

等価粘性減衰定数についても両者は同様な傾向を示しており、UFC製プレキャスト型枠の適用が、橋脚全体のエネルギー吸収性能に及ぼす影響が小さいことが確認できる。

5. 結論

本研究では、UFC製プレキャスト型枠を基部に適用したRC橋脚を提案した。また、同橋脚を想定した試験体に対する正負交番載荷実験を行い、その基本的な構造特性について検討した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

1. UFC製プレキャスト型枠を橋脚基部に設置することにより、橋脚の曲げ変形時におけるかぶり部分の圧壊や軸方向鉄筋の座屈を抑制することができる。正負交番載荷実験では、UFC製プレキャスト型枠を適用することにより、軸方向鉄筋の座屈により終局を迎えたRC橋脚に比べ60%以上の変形性能の向上効果が確認できた。
2. 型枠の重ね合わせ部が曲げひび割れ誘導目地として機能することにより、適用区間に確実に塑性ヒンジを形成できる。正負交番載荷実験では、型枠の適用区間を1D区間としても、目地間隔ごとに曲げひび割れが発生し、曲げ変形が適用区間に集中するため、適用区間外の塑性ヒンジの発生、曲げ損傷を抑制できることを確認した。
3. UFC製プレキャスト型枠を単柱式RC橋脚の基部に適用することにより、橋脚全体の残留変位、エネルギー吸収性能に影響を与えずに、その復元力特性に高い変形性能を付与することができ

る。大地震時においてもかぶり部分が損傷せず、コアコンクリートへの損傷の伸張が抑制されることは、橋脚の地震直後における使用性を確保する上でも有意であると考えられる。

謝辞：本研究は、(独)防災科学技術研究所が進める「実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)を活用した国内外共同モデル研究」の橋梁耐震実験研究の援助を受けて実施しました。

また、本研究を進めるにあたり京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻構造ダイナミクス分野中野陽介君をはじめとする同研究室の学生諸君の協力が不可欠でありました。

ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 川島 一彦, 永井 政伸: 塑性ヒンジ領域にゴム層を有する鉄筋コンクリート橋脚の開発, 土木学会論文集, 703 巻 I-59, pp.113-128, 2002 年 4 月
- 2) 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, 689 巻 I-57, pp.45-64, 2001 年 10 月
- 3) 堺 淳一, Stephen A. Mahin: Hysteretic Behavior and Dynamic Response of Re-Centering Reinforced Concrete Columns, 第 6 回 地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.51-56, 2003 年
- 4) 本田 智昭, 一宮 利通, 曾我部 直樹, 日紫喜 剛啓: 超高強度繊維補強コンクリートの構造性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 2006 年
- 5) 一宮 利通, 本田 智昭, 曾我部 直樹, 松原 巧明: エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリートの構造性能, プレストレストコンクリート, 48 巻 5 号, pp.66-72, 2006 年
- 6) 星隈 順一, 運上 茂樹, 長屋 和宏: 実大鉄筋コンクリート橋脚に関する正負交番載荷実験, 第 3 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.189-194, 1999 年