

ファイバーコンクリートを用いた 高じん性橋脚の開発に関する研究

東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 教授 川島一彦

概要：

現在の技術基準で設計された橋脚は、1995年兵庫県南部地震による断層近傍地震動に対しては耐震性を確保できるが、地震動強度をこれよりも1.5倍に大きくしたり、継続時間を長くするため加震を繰返すと、コアコンクリートが圧壊し、破砕したコアコンクリートが鉄筋かごから抜け出し、水平耐力が低下することが、震動台実験施設E-ディフェンスを用いて実施された実大RC橋脚の加震実験結果から明らかとなっている。本研究では、兵庫県南部地震よりもさらに強度が高く、継続時間が長い地震動の作用下でも耐震性を確保できるダメージフリー橋脚を開発すること目的とし、ファイバーコンクリートを用いた高じん性橋脚を開発しようとするものである。このため、平成22年度には、1軸繰返し載荷実験に基づいて、引張と圧縮間に相互作用を考慮したファイバーコンクリートの応力～ひずみの構成則を開発すると同時に、ファイバーコンクリートを基部に用いた橋脚模型に対する繰返し載荷実験から、ファイバーコンクリートを用いることにより橋脚の変形性能を向上させることができることを明らかにした。また、平成23年度には、ファイバーコンクリートが塑性ヒンジ部の損傷を減少させる特性に着目し、塑性ヒンジ部の帯鉄筋を現在の技術基準から減少させた場合に橋脚の変形性能がどの程度低下するかを、ファイバーコンクリートを基部に用いた橋脚模型に対する繰返し載荷実験に基づいて検討した。

キーワード：耐震設計, RC橋脚, 変形性能, ファイバーコンクリート, 応力～ひずみ履歴

1. はじめに

橋梁の耐震設計では、どの程度の地震動を耐震設計に考慮するかが重要である。道路橋示方書では、長く震度法に基づく耐震設計が行われてきたが、平成2年以降には、地震時保有水平耐力法が採用され、1923年関東地震の際に東京で生じたであろう程度の地震動（タイプI地震動）を、また、平成7年以降はこれに加えて平成7年兵庫県南部地震の際に神戸で生じた地震動（タイプII地震動）を考慮するように変化してきた。

耐震設計で重要なことは、どの程度の地震動が最も強いかがまだ明らかにされていないことである。このため、将来、より強い地震動が生じることが明らかになった際に、橋梁の耐震性が直ちに損なわれることのないように、地震時保有耐力法では橋脚の塑性領域における変形性能を期待したじん性設計が採用されている。このため、現在までも多数の橋脚模型に対する載荷実験が実施され、橋脚の変形性能に及ぼす各種の影響が明らかにされてきている。しかしながら、建築

物の柱に比較するとはるかに大断面である橋脚の宿命から、実験施設の制約により、従来、実施されてきた多くの実験は小型模型に対する擬静的載荷実験であり、実大規模の地震動載荷実験は実施できないままになってきた。

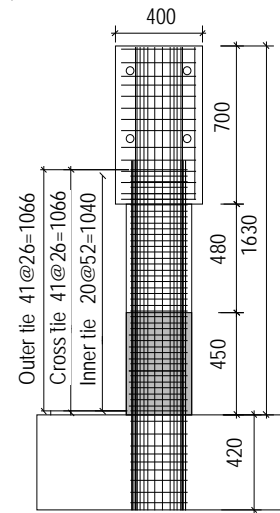
この弱点を克服すべく、2008年に、世界最大最強の震動台E-ディフェンス（(独)防災科学技術研究所）を用いた実大RC橋脚に対する加震実験が実施され、実大RC橋脚の破壊メカニズムに関する多くの貴重な結果が得られた¹⁾。この一つとして実施された、現在の基準で設計された橋脚(C1-5橋脚)に対する加震実験からは、C1-5橋脚は、兵庫県南部地震による断層近傍地震動には耐えることができるが、入力強度を1.5倍にしたり、より継続時間の長い地震動作用の影響を表現するため、この地震動で繰返し載荷すると、コアコンクリートが圧壊し、破砕したコアコンクリートがあたかも爆裂するかのように鉄筋かごから抜け出し、水平耐力の低下が発生する等、大きく損傷することが明らかとなっている。

本研究は、このようなRC橋脚の弱点を克服し、より変形性能が高く、強震動の作用下でもほぼ橋としての機能を満足できるダメージフリー橋脚を開発することを目標とし、近年著しく技術開発の進んだ新材料を用いて、鉄筋かごから圧壊したコアコンクリートの抜け出しを防止し、変形性能の高い、高じん性橋脚を開発しようとするものである。

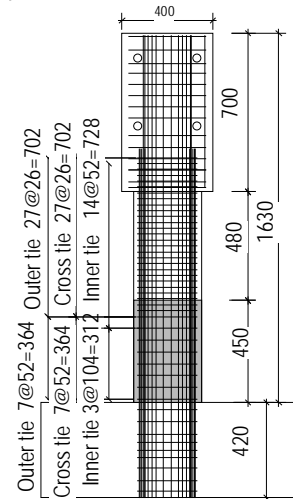
近年、新たに金属あるいは有機の各種繊維材料とセメントを組み合わせた複合セメント系材料の開発が進んでいる。これは、セメントに繊維を混入することにより、セメントにひび割れが発生したとしても、補強繊維がひび割れ面間をつなぎとめることによって、引張力を維持することを可能にした材料である。繊維の種類は多岐に渡っているが、中でも、ポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料²⁾（以下、PFRCC）は、施工時の安全性、経済性から、新材料として有力視されており、橋梁をはじめとする、高い耐震性能が要求される構造物への適用が期待されている。現在までに実施されたPFRCCを用いた橋脚は鋼ファイバーを用いた橋脚よりも変形性能が高いことが明らかにされている^{3) 4)}。

以上の点から、本研究では平成22年度においてはPFRCCを対象に1軸圧縮及び引張実験に基づき、部分的な除荷、再載荷を含む引張から圧縮、圧縮から引張に繰返し荷重を与えた場合の応力～ひずみ履歴特性を明らかにし、PFRCCの構成則の定式化を行った⁵⁾。また、PFRCCを用いた2体の模型模型に対する載荷実験を行い、PFRCC橋脚の変形性能及び破壊メカニズムを明らかにすると同時に、本研究で開発したPFRCCの構成則を用いて模型橋脚の載荷実験結果を解析し、開発モデルの適用性について検討を行った⁶⁾。

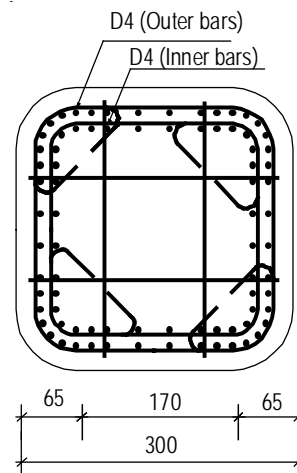
以上の成果を受けて、平成23年度には、塑性ヒンジ部において帯鉄筋量を減少させた場合に、PFRCC橋脚の変形性能がどの程度影響を受けるかに関して2体の模型模型に対する載荷実験に基づいて検討した。橋脚の塑性ヒンジ部の帯鉄筋量はコアコンクリートの横拘束のため平成2年度道路橋示方書から増加されはじめ、平成8年度道路橋示方書からは大幅に増加されることとなった。塑性ヒンジ部では鉄筋の輻輳のため帯鉄筋量の減少は施工性の向上に繋がることから、PFRCCの採用によって橋脚の変形性能をそれほど減少させることなく、帯鉄筋量を減少させることができれば、PFRCC橋脚の大きなメリットとなる。



(a) PRFCC-1 橋脚



(b) PRFCC-2 橋脚



(c) 塑性ヒンジ部の断面

図1 模型橋脚

PFRCの応力～ひずみ関係は本研究の一環として平成22年度に開発しているが、コアコンクリートに対するファイバーの横拘束効果と帯鉄筋の横拘束効果の連成効果については非常に複雑でまだ未解明であることから、解析的な検討は困難である。このため、本検討の第一歩として模型載荷実験によって検討することとしたものである。

2. 縮小模型および載荷方法

橋脚塑性ヒンジ部の帯鉄筋量の影響を検討するために、C1-6 供試体を基本にこの縮小模型を2体製作した。縮小模型は基本的に平成22年度の検討に用いた縮小模型と同じ特性を有しているが、帯鉄筋量及び載荷方法を以下のように変化させている。

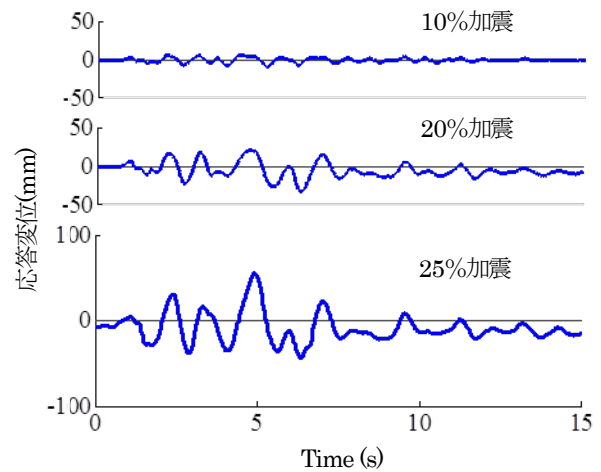
1) 帯鉄筋量

帯鉄筋量を以下のように2種類に変化させた。

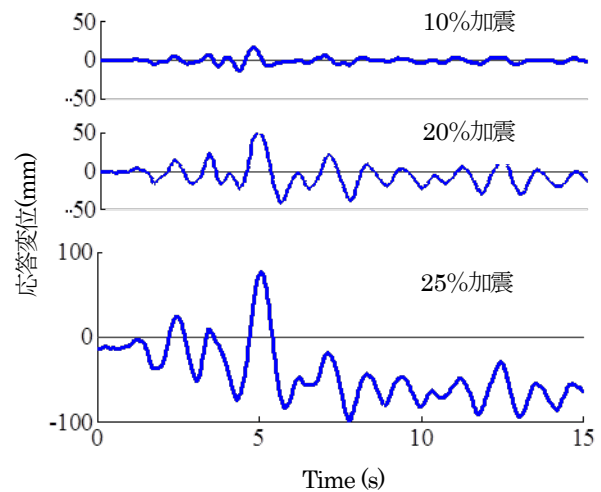
図-1(a)に示すように、平成22年度の縮小模型と同一特性を持つ供試体である。載荷点までの高さは1.37mであり、4隅をR=65mmで面取りした幅300mmの正方形断面を有している。軸方向鉄筋としてはD6SD345を80本配置した。また、帯鉄筋としては、D4SD295を外側には26mm間隔で、また内側には52mm間隔でそれぞれ配筋した。中間帯鉄筋は外側軸方向鉄筋に対しては26mm間隔で、また内側軸方向鉄筋に対しては52mm間隔でそれぞれ設置することとした。中間帯鉄筋は橋脚基部から450mm以内の範囲では1断面につき4本、それ以上の高さにおいては1断面につき2本配筋している。引張試験に基づく軸方向鉄筋および帯鉄筋の降伏強度はそれぞれ387MPaおよび396MPaである。

図-1(b)に示すように、塑性ヒンジ部の帯鉄筋及び中間帯鉄筋の間隔をPFRC-1橋脚の2倍とした橋脚である。すなわち、基部から高さ450mmの範囲では、帯鉄筋として、D4SD295を外側には52mm間隔で、内側には104mm間隔で配筋した。中間帯鉄筋も52mm間隔で設置されている。ただし、橋脚基部から450mm高さまでは1断面につき4本、それ以上の高さでは1断面につき2本配筋している点は上記のPFRC-1橋脚と同じである。

以上の2体の橋脚模型に対して、1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測された強震記録(以下、JR鷹取駅記録と呼ぶ)を入力とした一定荷重作用下の水平2方向ハイブリッド載荷実験を行った。一定軸力としては、橋脚基部の軸応力度を1MPaと想定し、86.4kNを作用させた。また、JR鷹取駅記録のNS及びEW方向成分を橋脚模型のそれぞれNS方向及びEW方向に作用させた。



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図-2 加震点における応答変位 (PFRC-1 橋脚)

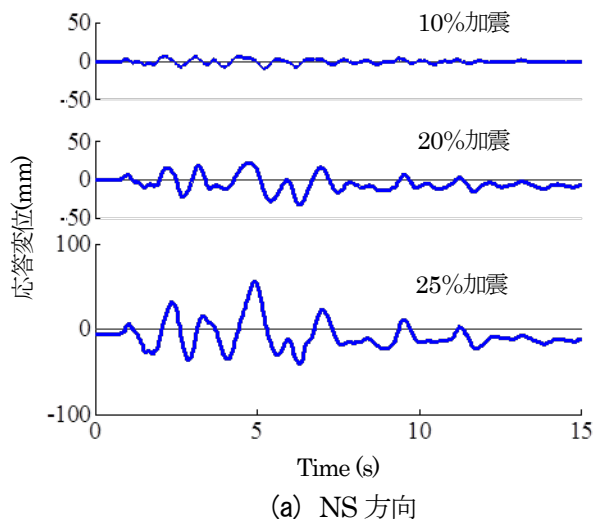
また、ハイブリッド載荷実験では、橋梁の固有周期を定めなければならない。このため、降伏剛性に基づく実験対象橋の固有周期を0.7sと想定し、次式から橋脚頭部に想定する仮想質量を62.1tと図-3 加震点における応答変位 (PFRC-2 橋脚)

設定した。

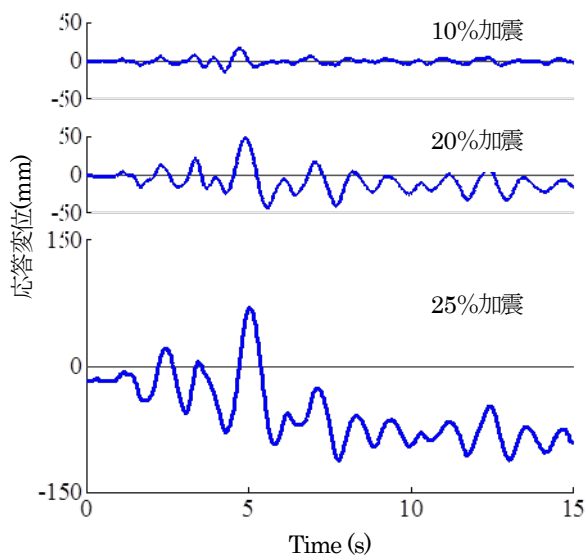
$$M = \frac{KT^2}{4\pi^2} \quad (1)$$

また、ハイブリッド実験を実施する際の橋全体系の減衰定数は0.05と仮定した。

ハイブリッド載荷では、まず、JR鷹取駅記録の最大加速度をE-鷹取駅記録の2.5%とした微小加震実験を行って載荷装置が意図通り動くことを確認後、最大加速度をE-鷹取駅記録の10%、20%、25%と順次増大させ



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図-3 加震点における応答変位 (PFRCC-2 橋脚)

て加震した。以下、これをそれぞれ10%加震、20%加震、25%加震と呼ぶ。

3. 載荷に伴う損傷の進展状況

(1) PFRCC-1 橋脚

PFRCC-1 橋脚では、図-2 に示すように、10%加震においては最大応答変位は EW 方向には 16.7mm(ドリフト 1.2%)、NS 方向には 9.5mm(ドリフト 0.7%) となったが、特に損傷は生じなかった。

20%加震では、応答変位は EW、NS 方向にそれぞれ 51.2mm(ドリフト 3.7%)、33.2mm(ドリフト 2.4%) となり、写真-1 に示すように、SW 面、NE 面を中心に曲げクラックが生じた。また、NE 及び SW コーナーでは

縦ひび割れも生じた。

25%加震になると、応答変位は EW、NS 方向にそれぞれ 98.2mm(ドリフト 7.2%)、55.4mm(ドリフト 4.0%) に達し、残留変位も EW、NS 方向にそれぞれ 63.9mm(ドリフト 4.6%)、15.2mm(ドリフト 1.1%) となったが、損傷はまだかぶりコンクリートの曲げひび割れと一部での剥落程度である。なお、全加震を通して軸方向鉄筋の破断は生じなかった。

以上のように、最終的に PFRCC-1 橋脚には水平 2 方向にドリフト 7.2%及び 4.0%にも達する大きな応答変位を生じたが、損傷は平成 22 年度に実施した繰り返し載荷実験によって生じた損傷と比較するとわずかであり、応答載荷実験による損傷と比較してもやや小さめである。

(2) PFRCC-2 橋脚

一方、PFRCC-2 橋脚では、10%加震において図-3 に示すように、最大応答変位は EW、NS 方向にそれぞれ 16.1mm(ドリフト 1.2%)、9.9mm(ドリフト 0.7%) となった。写真-2 に示すように、橋脚基部とフーチング上面間では SW コーナーと同時に W 面においてひび割れが生じ始めたが、まだ、この段階ではほぼ線形応答の範囲内にある。

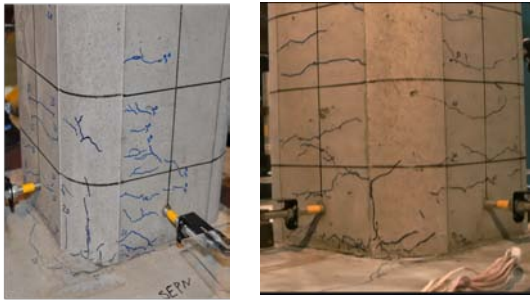
20%加震では、応答変位は EW、NS 方向にはそれぞれ 48.5mm(ドリフト 3.5%)、32.8mm(ドリフト 2.4%) となり、SW 面を中心に曲げクラックが生じた。また、NE 及び SW コーナーでは縦ひび割れも生じた。

25%加震になると、応答変位は EW、NS 方向にそれぞれ 112.1mm(ドリフト 8.2%)、56.1mm(ドリフト 4.1%) に達し、残留変位も EW、NS 方向にそれぞれ 91.1mm(ドリフト 6.6%)、12.3mm(ドリフト 0.8%) となった。塑性ヒンジ部では全体として PFRCC-1 橋脚よりも損傷が進展し、NE 及び SW コーナーにおいてかぶりコンクリートが剥離した。

かぶりコンクリートは一般の RC 橋脚のように圧壊したかぶりコンクリートがいくつか砕けて剥落するのではなく、PFRCC が大きなひずみまで圧縮に耐えると同時に引張りにも抵抗するため、コーナー部分のかぶりコンクリートがコアコンクリートから剥離してもばらばらにならず、上部のかぶりコンクリートに垂れ下がった形となっている。

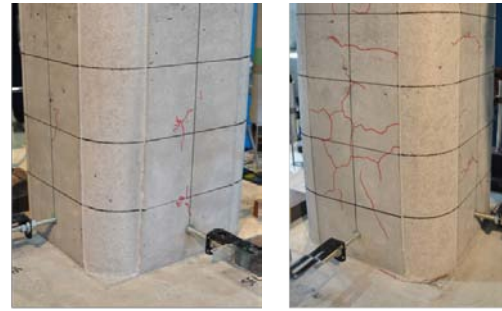
PFRCC-1 橋脚ではこのような損傷は生じなかったことから、PFRCC-1 橋脚におけるかぶりコンクリートの損傷の進展は、帯鉄筋量を 1/2 にした影響と考えられる。

PFRCC-1 橋脚と同様に、SW コーナーにおいては基



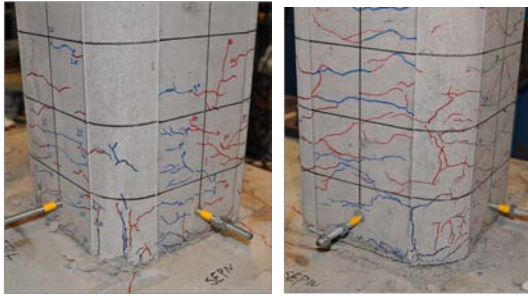
(a) NE コーナー (b) SW コーナー

(1) 20%加震後



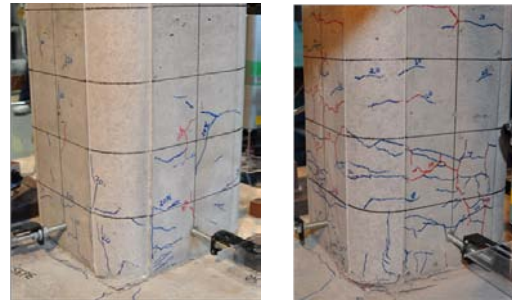
(a) NE コーナー (b) SW コーナー

(1) 10%加震後



(a) NE コーナー (b) SW コーナー

(2) 25%加震後



(a) NE コーナー (b) SW コーナー

(2) 20%加震後

写真-1 損傷の進展 (PFRCC-1 橋脚)

部で軸方向鉄筋がフーチングから抜け上がり、EW方向にドリフト 6.6%の残留変位が生じたのは主としてこの影響と考えられる。なお、PFRCC-1 橋脚と同様に、全加震を通して軸方向鉄筋の破断は生じなかった。

図-4 及び図-5 は PFRCC-1 橋脚及び PFRCC-2 橋脚に生じたそれぞれ最大応答変位と加震後に残った残留変位が加震の進展によりどのように増加したかを示した結果である。最大応答変位はいずれの供試体においても EW 方向の方が SN 方向よりも大きい。これは地震動の特性によるものである。重要な点は、20%加震から 25%加震になるにつれて、最大応答変位が急増する点である。この傾向は特に残留変位において著しい。損傷の蓄積が影響するためである。

4. 曲げ耐力及び変形性能

PFRCC-1 橋脚における荷重作用点における水平力～水平変位の履歴曲線を示すと、図-6 のようになる。10%加震ではまだ橋脚は弾性状態にあるが、20%加震で塑性化に入って状態に、また、25%加震では大きく塑性化した状態になる。20%加震から 25%加震とわずかに 5%の入力強度の増加がこのように非線形応答を増大させることから、塑性化を考慮した設計においては、いったん



(a) NE コーナー (b) SW コーナー

(3) 25%加震後

写真-2 損傷の進展 (PFRCC-2 橋脚)

橋脚が塑性化した後は入力地震動強度の増加によって塑性変形が大きく進展することに注意する必要がある。これは過度に塑性化に期待した設計を行ってはならないことを示している。

これに対して、PFRCC-2 橋脚における荷重作用点における水平力～水平変位の履歴曲線は図-7 のようになる。全体として PFRCC-2 橋脚の場合とよく似た履歴を示しているが、詳細に見ると、25%加震における EW 方向の応答変位が PFRCC-1 橋脚の場合によりも大きくなっている等の違いが認められる。

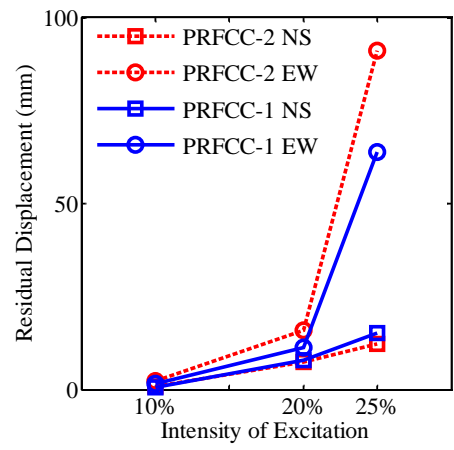
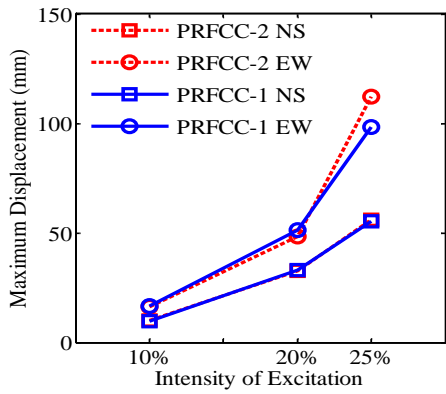
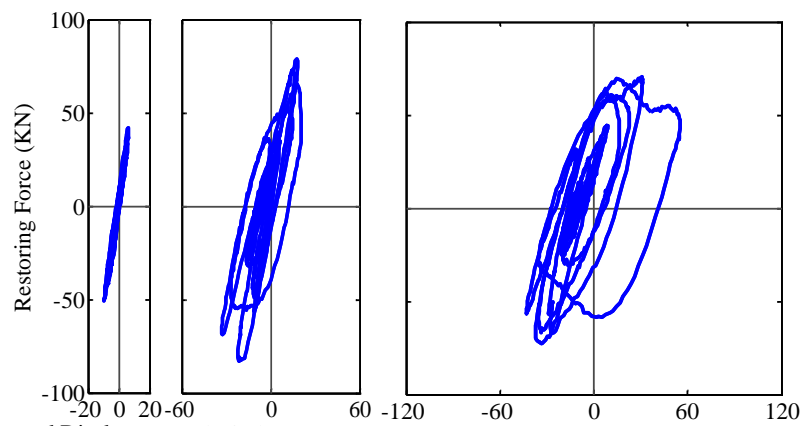
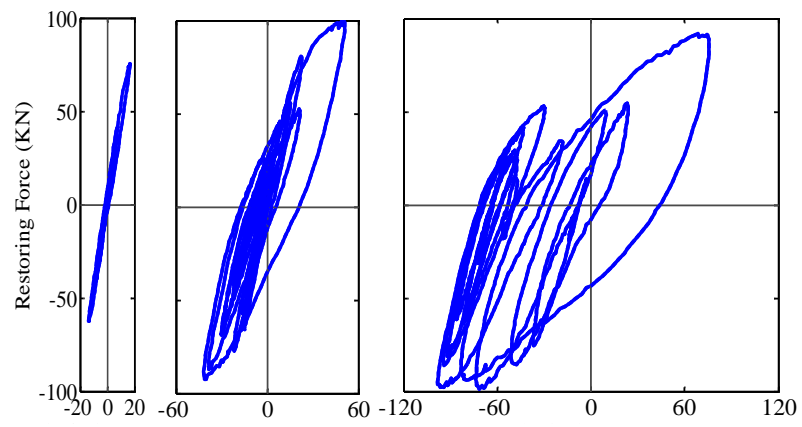


図-4 加震の進展に伴う最大応答変位の比較 図-5 加震の進展に伴う残留変位の比較



(a) 10%加震 (b) 20%加震 (c) 25%加震

(1) NS 方向



(a) 10%加震 (b) 20%加震 (c) 25%加震

(2) EW 方向

図-6 荷重作用点における水平力～水平変位の履歴曲線 (PRFCC-1 橋脚)

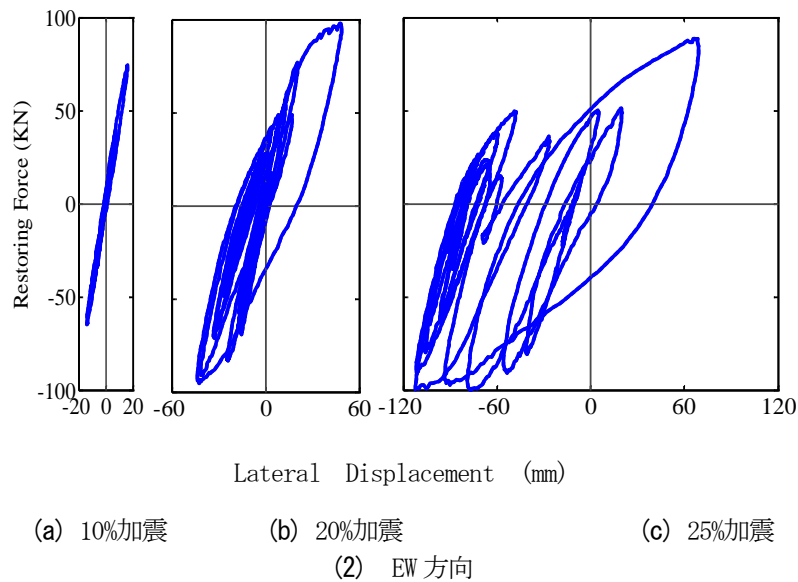
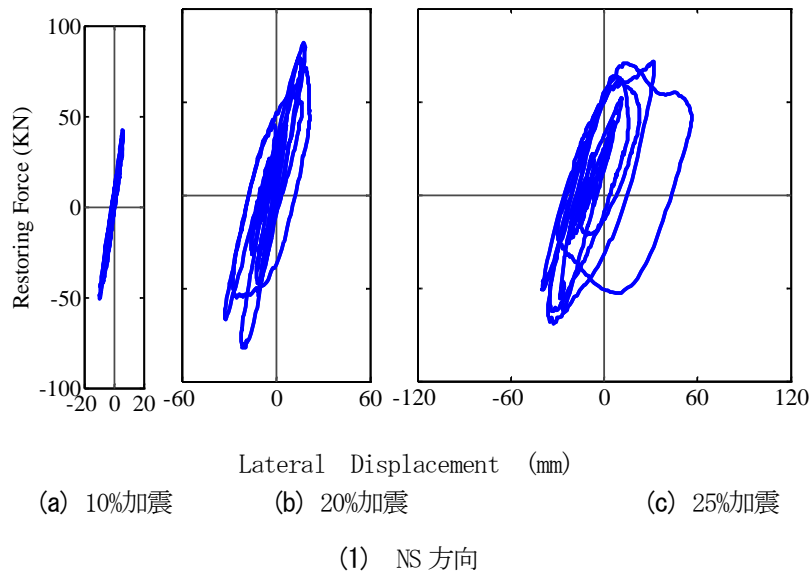


図-7 荷重作用点における水平力～水平変位の履歴曲線 (PFRCC-2 橋脚)

図-8 は最大復元力(曲げモーメント) が加震ごとにどのように変化したかを示した結果である。応答変位が EW 方向よりも NS 方向の方が小さいことを受けて、最大曲げモーメントの EW 方向よりも NS 方向の方が小さい。NS 方向では 20%加震から 25%加震になると、最大曲げモーメントが減少し始めている。ただし、PFRCC-1 橋脚と PFRCC-2 橋脚を比較すると、PFRCC-2 橋脚の方が PFRCC-1 橋脚よりもわずかに最大曲げモーメントは小さいが、20%加震段階に着目すると、PFRCC-1 橋脚が NS 方向には 113.6kNm、EW 方向には 137.0kNm であるのに対して、PFRCC-2 橋脚では NS 方向には 112.3kNm、EW 方向には 133.8kNm と、ともに 2%小さい程度であり、それほどの違いはないと見て良い。

5. 鉄筋ひずみから見た横拘束効果

(1) 軸方向鉄筋

ひずみゲージの損傷のため正しくデータが取得できなかった 25%加震を除く、10%加震及び 20%加震の際の塑性ヒンジ中間部 (基部から 104mm 高さ) の NE コーナーにおける軸方向鉄筋に生じた軸方向ひずみを外側及び内側軸方向鉄筋に分けて示すと、図-9 のようになる。軸方向鉄筋の降伏ひずみは約 $2,000 \mu$ であり、10%加震においてすでに軸方向鉄筋は降伏し、20%加震では $20,000 \mu$ 以上のひずみが生じることがわかる。

上述した橋脚の損傷状況がまだコアコンクリートの

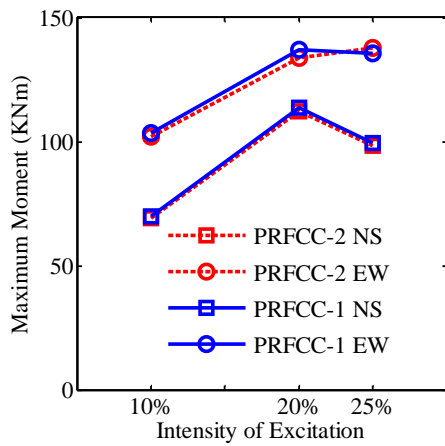


図-8 加震の進展に伴う最大曲げモーメント(復元力)の比較

著しい損傷には至っていないため、軸方向鉄筋の局部座屈もほとんど生じていない状態にあることから推定されるように、PFRCC-1 橋脚と PFRCC-2 橋脚にはほとんど違いは認められない。

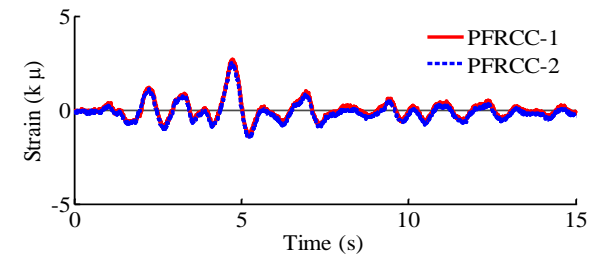
(2) 帯鉄筋

帯鉄筋としては、E 面が大きいので、基部から 119mm における E 面中央の帯鉄筋ひずみに着目し、これが PFRCC-1 橋脚と PFRCC-2 橋脚でどのように異なるかを示した結果が図-10 である。これによれば、帯鉄筋ひずみは外側の方が内側よりも大きく、コアコンクリートの横拘束には外側帯鉄筋の役割が大きいことが注目される。

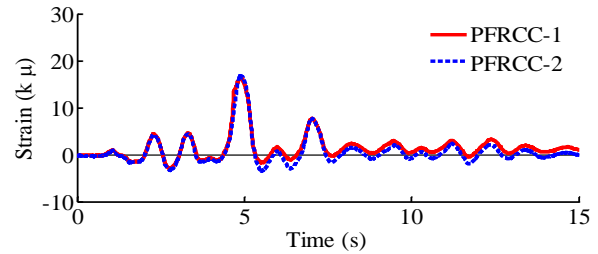
ただし、外側帯鉄筋においても、10%加震や20%加震の段階ではまだ降伏しておらず、25%加震に至って、時刻 7.8 秒で最大ひずみは PFRCC-1 橋脚では 1120μ 、PFRCC-2 橋脚では 3700μ となる。すなわち、PFRCC-1 橋脚ではまだ 25%加震においても帯鉄筋は降伏していないのに対して、PFRCC-2 橋脚では帯鉄筋は降伏し、横拘束効果が頭打ちになってきている。このことが、上述したように、PFRCC-2 橋脚では PFRCC-2 橋脚と比較して、橋脚基部の損傷が大きくなったことに寄与していると考えられる。

(3) 中間帯鉄筋

中間帯鉄筋のひずみとして、最も大きいひずみが生じた橋脚基部から 119mm における EW 方向の中間帯鉄筋に着目し、このひずみを図-11 に示す。中間帯鉄筋では両端に 135 度曲がりフックがあるが、その間の直線区間のうち、中央部、E 側、W 側の 3 箇所を計測しており、ここではこれらの結果を示している。これによれば、重要な点は E 側や W 側に比較し中央部において中間帯鉄筋ひずみはより大きくなり、25%加震になっても PFRCC-1 橋脚、PFRCC-2 橋脚ともに中間帯鉄筋はまだ降伏に至っていない点である。

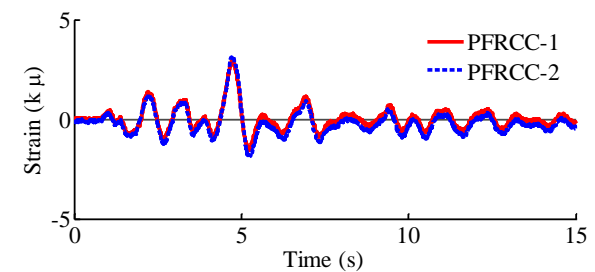


(a) 10%加震

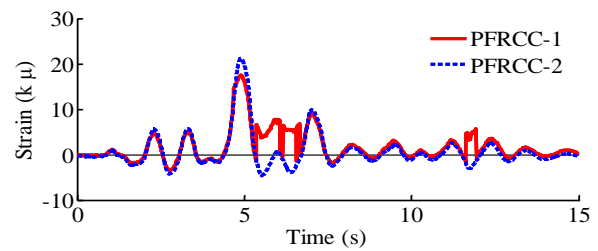


(b) 20%加震

(1) 内側軸方向鉄筋



(a) 10%加震

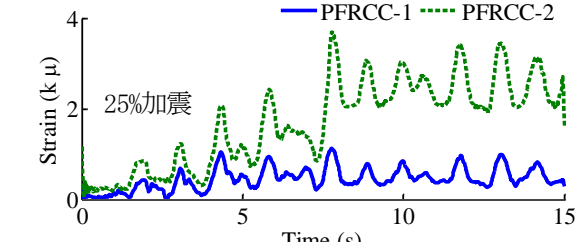
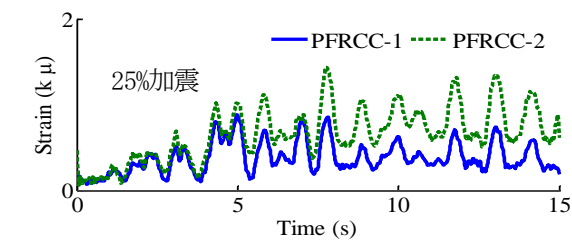
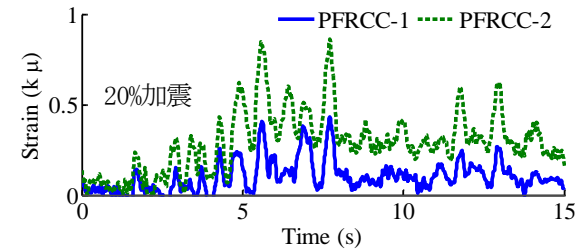
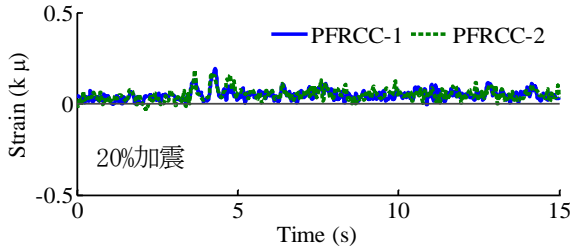
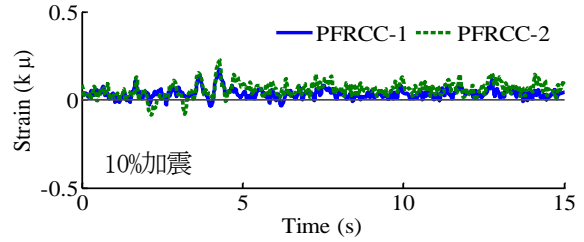
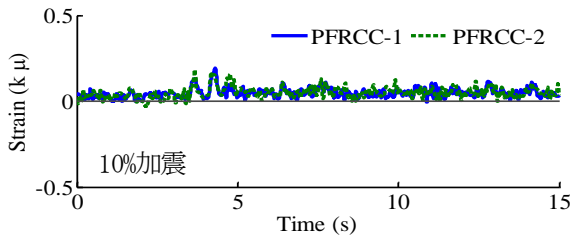


(b) 20%加震

(2) 外側軸方向鉄筋

図-9 軸方向鉄筋ひずみの比較 (橋脚基部から 104mm 高さ、NE コーナー)

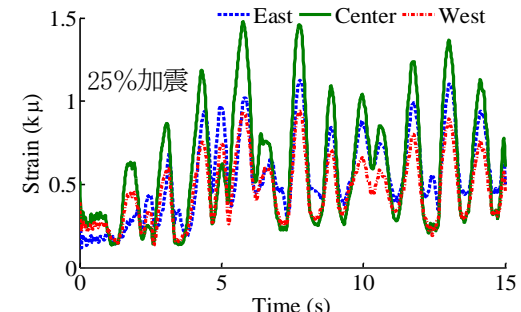
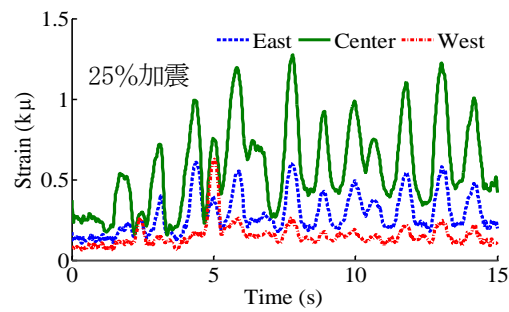
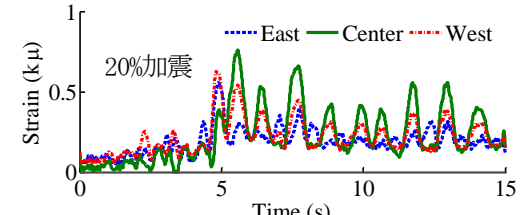
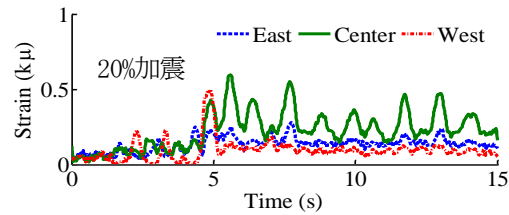
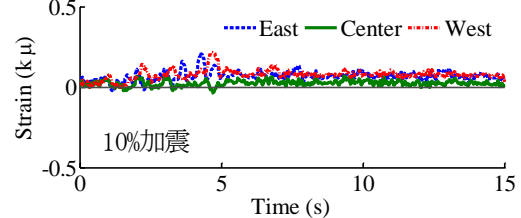
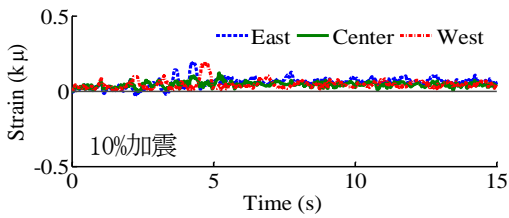
また、さらに重要な点は、中間帯鉄筋のひずみは PFRCC-2 橋脚では最大 1500μ と PFRCC-2 橋脚の最大ひずみ 1300μ より 15% しか増大していない点である。PFRCC-2 橋脚では PFRCC-1 橋脚と比較して帯鉄筋量とともに中間帯鉄筋量も 50% に減少させたが、中間帯鉄筋に生じる歪みの増加が 15% 程度であることは、中間の帯鉄筋の横拘束効果には余裕があることを示している。



(1) 内側帯鉄筋

(2) 外側帯鉄筋

図-10 PFRCC-1橋脚とPFRCC-2橋脚のE面中央における帯鉄筋ひずみの比較 (橋脚基部から119mm高さ)



(1) PFRCC-1 橋脚

(2) PFRCC-2 橋脚

図-11 中間帯鉄筋のひずみ (橋脚基部から119mm高さにおけるEW方向の中間帯鉄筋)

6. 結論

本研究では、PFRCC を橋脚基部に用いることによって、鉄筋かごから圧壊したコアコンクリートの抜け出しを防止し、変形性能の高い、高じん性橋脚の開発を行うことを目的として、平成 22 年度に引き続いて帯鉄筋量が PFRCC 橋脚の曲げ耐力および変形性能に及ぼす影響を模型橋脚に対するハイブリッド載荷実験に基づいて検討した。本研究により得られた結論は以下の通りである。

1) C1-6 橋脚を縮小率に基づいて縮小して製作した PFRCC-1 模型と比較し、塑性ヒンジ区間における帯鉄筋及び中間帯鉄筋量を 1/2 にした PFRCC-2 橋脚においては、25%加震によって水平 1 方向に 8.2%ドリフト、他方向に 4.1%ドリフトの応答変位が生じるまで、倒壊することなく、コーナー部 2 箇所においてかぶりコンクリートが剥離する程度の損傷で耐えることができた。しかしながら、水平 1 方向の曲げ耐力は 12%程度減少した。ただし、この方向の曲げ耐力の減少は PFRCC-1 橋脚でも同様に生じており、帯鉄筋及び中間帯鉄筋を減少されたことによる直接的な影響とは考えられない。

2) 帯鉄筋に生じるひずみは、25%加震においても、PFRCC-1 橋脚では降伏するに至っていないが、PFRCC-2 橋脚では降伏に至っている。一方、中間帯鉄筋については、25%載荷においても PFRCC-1、PFRCC-2 橋脚ともまだ降伏に至っていない。このような点から考えると、上記 1) の橋脚基部における PFRCC-2 橋脚におけるかぶりコンクリートの剥離は、帯鉄筋および中間帯鉄筋量を 1/2 としたことによるコアコンクリートの横拘束の低下に関連があるのではないかと考えられる。この意味では、帯鉄筋及び中間帯鉄筋量を 1/2 に低下させ、このことがかぶりコンクリートに剥離を生じさせたが、曲げ耐力においては大きな影響を与えるには至っていない状態にあると考えられる。

3) 上記 2) から考えると、ダメージフリー橋脚を目指すためには、帯鉄筋及び中間帯鉄筋量を 1/2 にまで低下することは適切とは言えない。もう少し、帯鉄筋及び中間帯鉄筋量の低下度合いを押さえる必要があると考えられる。

4) 2 段配筋された軸方向鉄筋及び帯鉄筋と中間帯鉄筋から構成される橋脚の塑性ヒンジ部における横拘束筋の変形特性に関し、以下の知見が得られた。

a) 軸方向鉄筋に生じる歪みは外側及び内側において大差は無い。

b) 帯鉄筋については、内側よりも外側の方に大きな変形が生じる。

c) 中間帯鉄筋には、両端の 135 度曲がりフックに挟まれた直線区間において、両端よりも中央部において大きなひずみが生じる。

5) PFRCC を使用することにより、橋脚の変形性能を増大させることができるが、PFRCC-1 橋脚、PFRCC-2 橋脚ともに、20%載荷から 25%載荷へとわずかに 5%の入力地震動強度の増加によって橋脚に生じる応答変位のみならず、特に残留変位が大きく増加する。橋梁のように不静定次数が低く、橋脚のように主要構造部材の応答に構造系全体の耐震性が大きく依存する構造系では、橋脚の塑性変形に過度に依存しない設計体系としておくことが重要である。このためには、PFRCC の特性を橋脚の損傷を減少させる方向に使用し、ダメージフリー橋脚の実現のために活用することが望ましいと考えられる。

謝辞

本研究は(財)国土技術研究センターの開発助成に基づいて実施したものであり、ご関係の方々に厚くお礼申し上げる次第である。また、PFRCC の製作に関しては、(株)大林組技術研究所生産技術研究部平田隆祥氏のご指導を賜った。また、本実験に際しては、東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻川島研究室の松崎裕助教の他、大学院学生の張文進、太田啓介、市川翔太、平井良幸、大矢智之、山田真司、中村香央里の協力を得た。ここに記して、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 川島一彦, 佐々木智大, 右近大道, 梶原浩一, 運上茂樹, 堺淳一, 幸左賢二, 高橋良和, 矢部正明, 松崎裕: 現在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する実大震動台実験及びその解析, 土木学会論文集 A, No. 66, Vol. 1, pp. 324-343, 2010.
- 2) Hirata, T., Kawanishi, T., Okano, M. and Watanabe, S. [2009] "Study on Material Properties and Structural Performance of High-performance Cement Composites using Polypropylene Fiber," *Proc. Japan Concrete Institute* **31**(1), 295-300.
- 3) Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwara, K. and Nakayama, M.: Effect of Polypropylene Fiber Reinforced Cement Composite and Steel Fiber Reinforced Concrete for Enhancing the Seismic Performance of Bridge Columns, *Journal of Earthquake Engineering*, 15-8, 1194-1211, 2011.
- 4) Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwara, K., Nakayama, M., Unjoh, H., Sakai, J., Kosa, K., Takahashi, Y. and Yabe, M.: Seismic Performance of a Full-Size Polypropylene Fiber Reinforced Cement Composite Bridge Column Based on E-Defense Shake Table Experiments, *Journal of Earthquake Engineering*, 2012 (in

print).

Engineering, Portugal, 2012.

- 5) 山田真司, Richelle Zafra, 佐々木智大, 川島一彦: 耐震解析に用いるポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料の応力-ひずみ関係の定式化, 第14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, 315-322, 2011.
- 6) Sasaki, T., Zafra, R., and Kawashima, K.: Effect of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete for Enhancing the Seismic Performance of Bridge Columns, Proc. 15th World Conference on Earthquake

