

ポリプロピレン繊維補強セメントを用いた高じん性橋脚 における帯鉄筋量の影響に関する検討

張 文進¹・川島 一彦²・松崎 裕³

¹東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (同上)

³正会員 博(工) 東京工業大学助教 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (現、東北大学助教
大学院工学研究科 土木工学専攻) (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

1. はじめに

ポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料 (以下、PFRC) 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¹⁾²⁾。

短繊維コンクリートが橋脚の耐震性向上へ与える効果を検討するため、Kawashima, Zafra らは通常の RC 橋脚の他、PFRC 橋脚、SFRC 橋脚に対して繰り返し載荷実験を行い、PFRC や SFRC を用いることにより短繊維コンクリートの架橋効果のため、かぶりコンクリートの損傷を低減することができ、結果として、軸方向鉄筋の座屈と破断を遅らせる点にも効果があることによって、特に PFRC 橋脚ではこの効果が大きいことを示した³⁾。

この結果を受けて、Kawashima, Zafra らは E-Defense を用いた実大 PFRC 橋脚 (C1-6 橋脚) に対する震動実験を実施し、実大橋脚においてもかぶりコンクリートの損傷が抑えられる結果、軸方向鉄筋の座屈が制御されることを示した⁴⁾。

また、佐々木らは C1-6 橋脚の縮小模型に対する円形オービットを仮定した 2 方向繰り返し載荷実験と応答載荷実験によって、変形性能に及ぼす載荷履歴の影響を検討し、応答載荷では円形繰り返し載荷に比較してはるかに損傷が小さいことを明らかにした⁵⁾。

以上のように、PFRC 橋脚では PFRC の効果によりコンクリート部の損傷を抑えつつ、変形性能を高めることができるが、このことは同一の変形性能を確保するためであれば、通常の RC 橋脚に比較して帯鉄筋量を減らせる可能性があることを示唆している。現在、RC 橋脚では過密配筋が問題となっているが、帯鉄筋量を減らすことができれば、施工の合理化も期待される。

このため、本研究では、佐々木らが用いた PFRC 橋脚と同一の特性を有する PFRC 橋脚と帯鉄筋量を 1/2 にした PFRC 橋脚の 2 体模型を制作し、ハイブリッド載荷実験によって、PFRC 橋脚の耐震性能に与える帯鉄筋の影響について検討した。

2. 縮小模型および載荷方法

2008 年に実施された C1-6 供試体を 6/35 に縮小した佐々木らが用いた橋脚を基本に、帯鉄筋量及び中間帯鉄筋量を以下のように 2 種類に変化させた。

PFRC-1 供試体は、佐々木らが用いた供試体と同じであり、図-1(a)に示すように、載荷点までの高さは 1.37m であり、4 隅を $R=65\text{mm}$ 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 380MPa および 369MPa である。

これに対して、PFRC-2 供試体は、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。

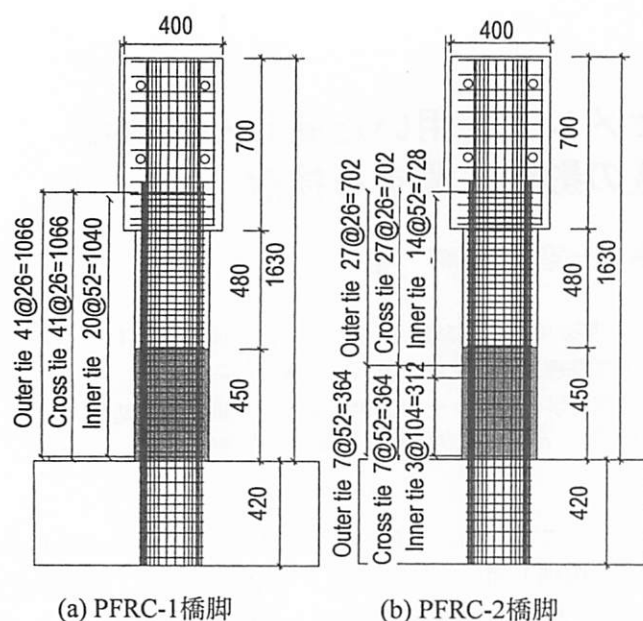


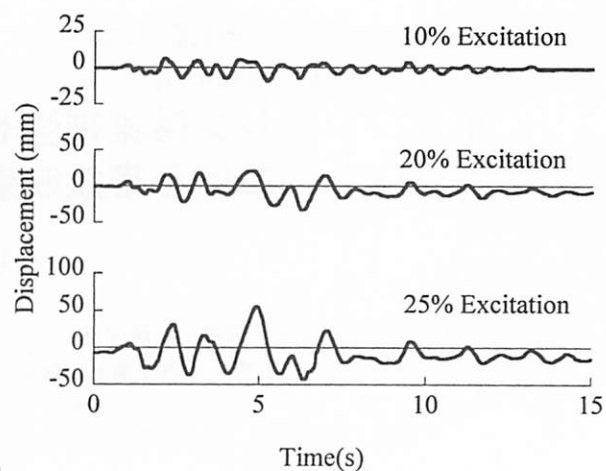
図-1 模型橋脚 (単位mm)

3. 載荷方法

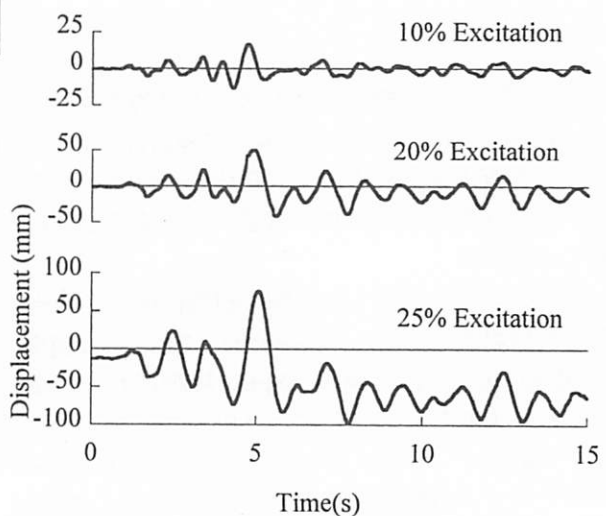
以上の2体の橋脚模型に対して、1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測された強震記録(以下、JR鷹取駅記録と呼ぶ)を入力とした一定軸力作用下の水平2方向ハイブリッド載荷実験を行った。一定軸力としては、橋脚基部の軸応力度を1MPaと想定し、86.4kNを作用させた。また、JR鷹取駅記録のNS及びEW方向成分を橋脚模型のそれぞれEW方向及びNS方向に作用させた。

また、ハイブリッド載荷実験では、橋梁の固有周期 T を定めなければならない。このため、降伏剛性 k_y 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 m を62.1tと設定した。

$$m = \frac{k_y T^2}{4\pi^2} \quad (1)$$



(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)

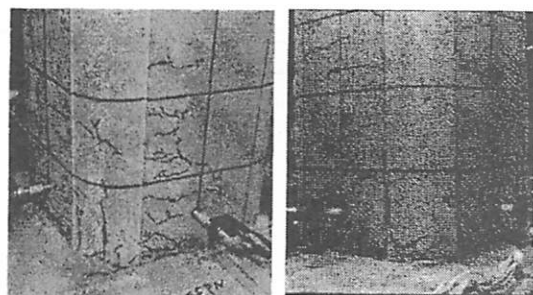
また、ハイブリッド実験を実施する際の橋全体系の減衰定数は0.05と仮定した。

ハイブリッド載荷実験では、橋脚模型が1回目の加震では線形範囲に止まり、2回目の加震では塑性化し、3回目の加震ではさらに大きく塑性化するように入力地震動強度を定めることとした。そのため、まず、JR鷹取駅記録の最大加速度を2.5%とした小振幅での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JR鷹取駅記録の10%、20%、25%と順次増大させて加震した。以下、これをそれぞれ10%加震、20%加震、25%加震と呼ぶ。

4. 載荷に伴う損傷の進展状況

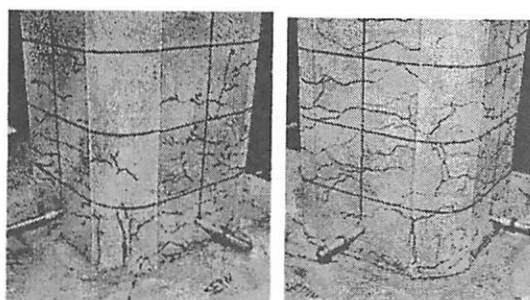
(1) PFRC-1 橋脚

PFRC-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。



(a) NE Corner (b) SW Corner

(1) 20%加震後



(a) NE Corner (b) SW Corner

(2) 25%加震後

写真-1 損傷の進展 (PFRC-1 橋脚)

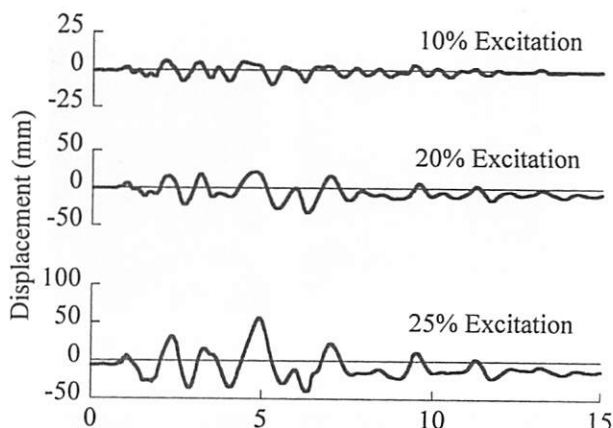
20%加震では、応答変位はEW, NS方向にそれぞれ51.2mm(ドリフト3.7%), 33.2mm(ドリフト2.4%)となり、写真-1に示すように、SW面、NE面を中心に曲げクラックが生じた。また、NE及びSWコーナーには縦ひび割れも生じた。

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PFRC-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、損傷は繰り返し载荷実験によって生じた損傷と比較するとわずかであり、応答载荷実験による損傷と比較しても小さめである。

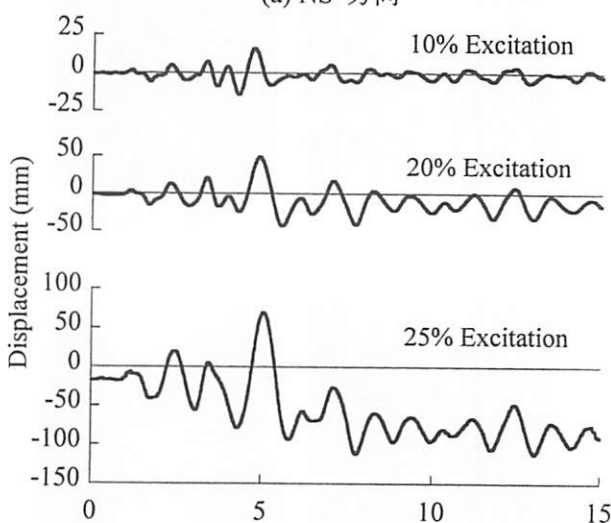
(2) PFRC-2 橋脚

一方、PFRC-2橋脚では、図-3に示すように、10%加震において最大応答変位は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。



Time (s)

(a) NS 方向



Time (s)

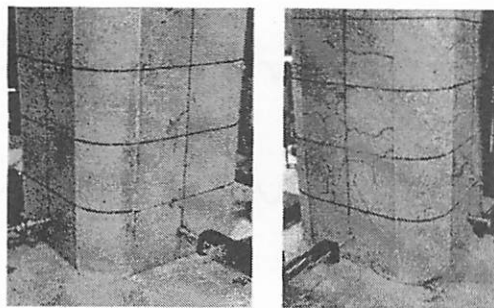
(b) EW 方向

図-3 加震点における応答変位 (PFRC-1橋脚)

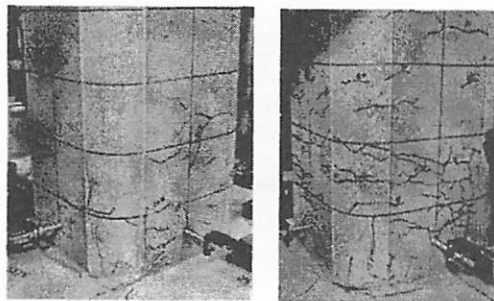
20%加震では、応答変位はEW, NS方向にはそれぞれ48.5mm(ドリフト3.5%), 32.8mm(ドリフト2.4%)となり、SW面を中心に曲げクラックが生じた。また、NE及びSWコーナーでは縦ひび割れも生じた。

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PFRC-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。

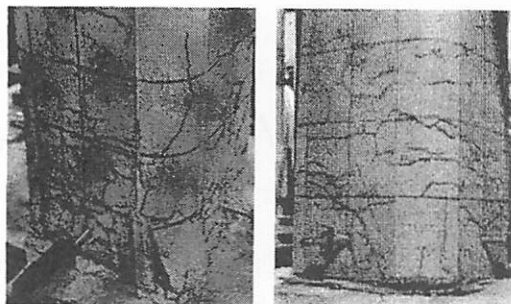
かぶりコンクリートは一般のRC橋脚のように圧壊したかぶりコンクリートがいくつかは砕けて剥落するのではなく、PFRCが大きなひずみまで圧縮に耐えると同時に引張りにも抵抗するため、コーナー部分のかぶりコンクリートがコアコンクリートから剥離してもばらばらにならず、上部のかぶりコンクリ



(a) NE Corner (b) SW Corner
(1) 10%加震後



(a) NE Corner (b) SW Corner
(2) 20%加震後



(a) NE Corner (b) SW Corner
(3) 25%加震後

写真-2 損傷の進展 (PFRC-2 橋脚)

ートに垂れ下がるようになる。

PFRC-1 橋脚ではこのような損傷は生じなかったことから、PFRC-2 橋脚におけるかぶりコンクリートの損傷の進展や残留変位の増加は、帯鉄筋量を 1/2 にした影響と考えられる。なお、PFRC-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 PFRC-1 橋脚及び PFRC-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 NS 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。

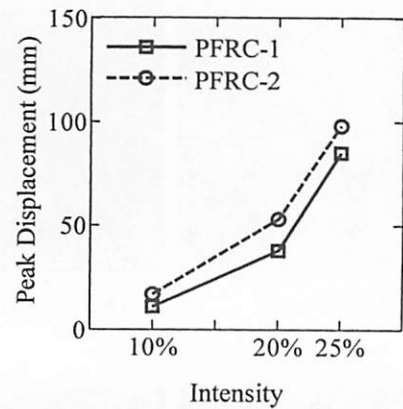


図-4 加震の進展に伴う最大応答変位 (主応答方向)

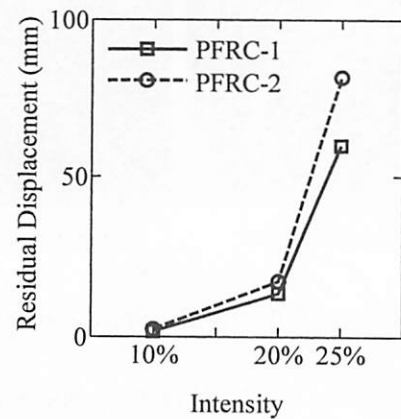
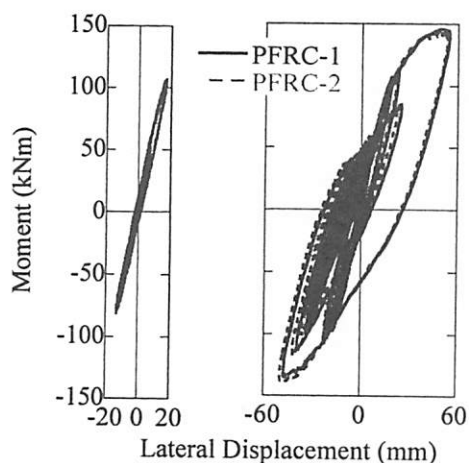


図-5 加震の進展に伴う残留変位 (主応答方向)

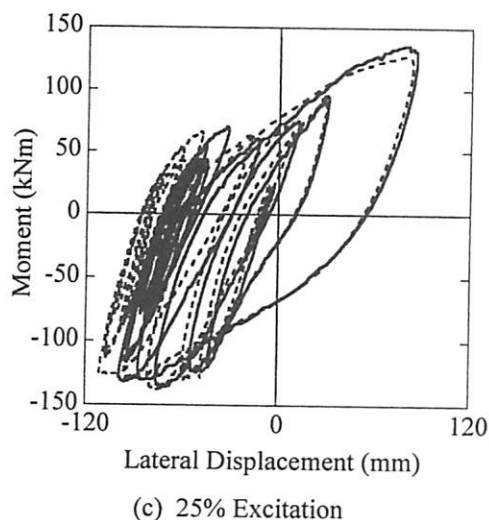
5. 曲げ耐力及び変形性能

PFRC-1 橋脚及び PFRC-2 橋脚の主応答方向における橋脚基部の曲げモーメント～水平変位の履歴曲線を示すと、図-6 のようになる。ここで、主応答とは水平 2 成分の応答変位のリサージュ図において、正負いずれか応答変位の大きい側の最大変位点と原点を結ぶ線に平行方向の応答を主応答方向、主応答方向と EW 軸のなす角度を主応答角度と定義した。表-1 はこの角度 (主応答角度) を示したものである。主応答角度は入力強度により順次大きくなるが、3 回の加震では、10~40 度の範囲にあり、東北東～西南西の方向の応答が卓越している。

PFRC-1 橋脚は 10%加震ではまだ鉄筋は弾性状態にあるが、20%加震で塑性化し、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%加震と応答方向 1.25 倍の入力強度の増加がこのような非線形応答を増大させることは、塑性化を考慮した設計においては、いったん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を示しており、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。



(a) 10% Excitation (b) 20% Excitation



(c) 25% Excitation

図-6 橋脚基部の曲げモーメント～荷点の水平変位履歴（主応答方向）

表-1 主応答方向
(E 軸方向から反時計回りの角度 ϕ_{EV} (°))

供試体	10% 加震	20% 加震	25%加震
PFRC-1	12	21	35
PFRC-2	13	23	38

PFRC-2 橋脚の場合は、全体として PFRC-1 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%加震における負側の応答変位が PFRC-1 橋脚の場合よりも大きくなっている。

図-7 は主応答方向に生じる最大曲げ復元力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。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。PFRC-1 橋脚と PFRC-2 橋脚を比較すると、PFRC-2 橋脚の方が PFRC-1 橋脚よりも 2~3%最大曲げモーメントは小さい程度である。

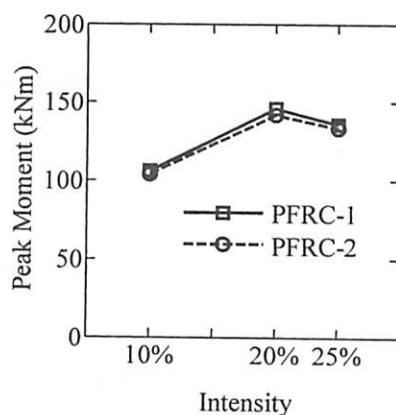
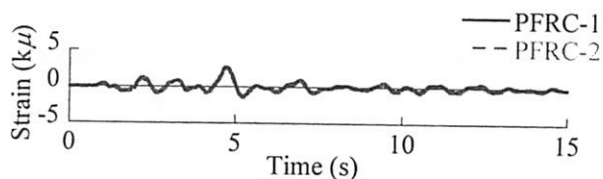
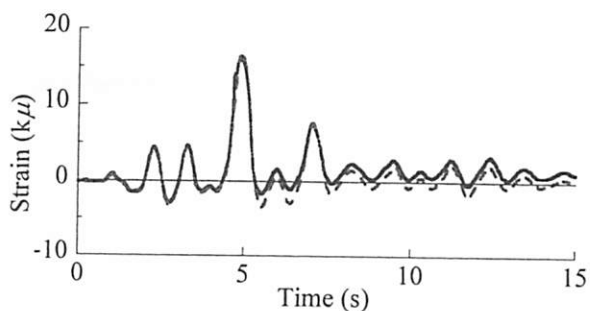


図-7 加震の進展に伴う最大曲げモーメント（主応答方向）

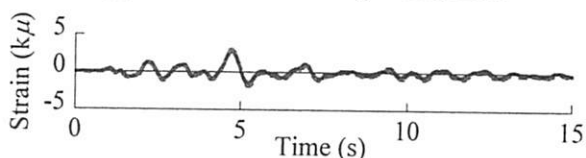


(a) 10% Excitation

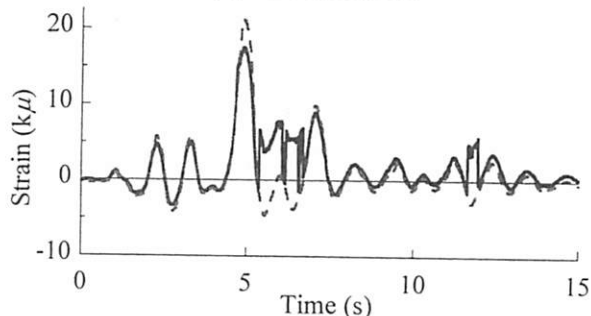


(b) 20% Excitation

(1) Strains of Inner Longitudinal Bars



(a) 10% Excitation



(b) 20% Excitation

(2) Strains of Outer Longitudinal Bars

図-8 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）

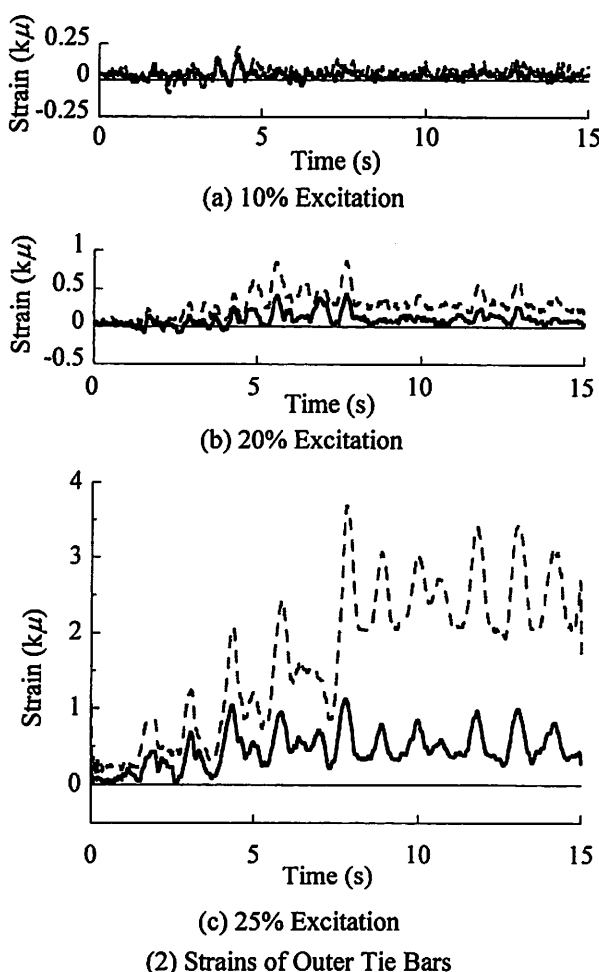
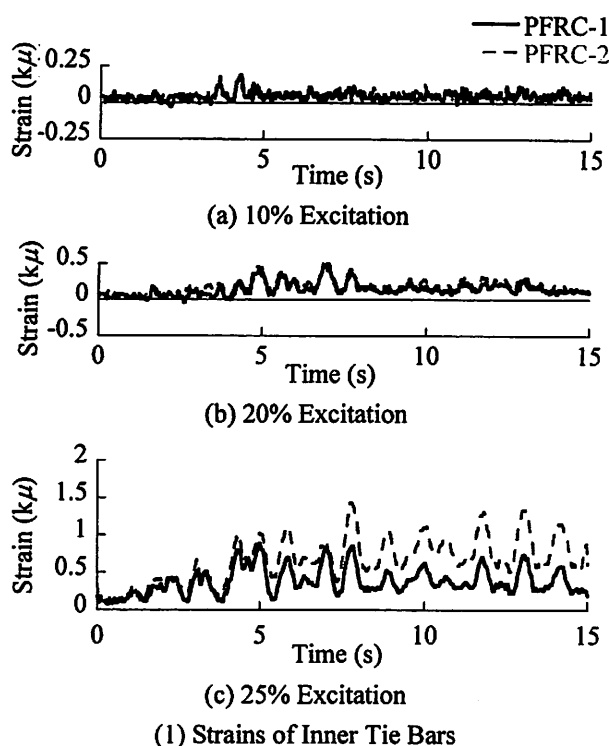


図-9 PFRC-1 橋脚と PFRC-2 橋脚の E 面中央における帯鉄筋ひずみの比較 (橋脚基部から 119mm)

6. 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-8 のようになる。軸方向鉄筋の降伏ひずみは約 2,000 μ であるため、PFRC-1、PFRC-2 橋脚ともに 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 μ 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、PFRC-1 橋脚と PFRC-2 橋脚にはほとんど違いは認められないが、外側軸方向鉄筋では、最大値付近において PFRC-2 橋脚の方が PFRC-1 橋脚よりも 20%大きなひずみが生じている。

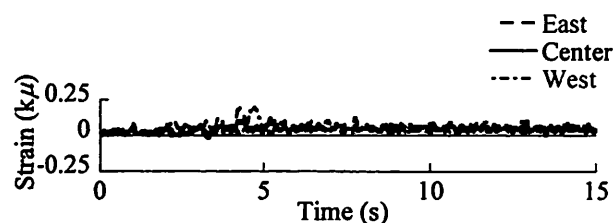
(2) 帯鉄筋

帯鉄筋ひずみとしては、E 面が大きいため、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 PFRC-1 橋脚と PFRC-2 橋脚でどのように異なるかを示した結果が図-9 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。

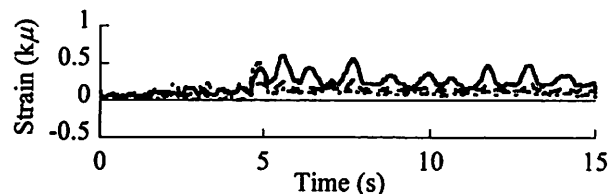
ただし、外側帯鉄筋においても、10%加震や 20%加震の段階ではまだ降伏しておらず、25%加震に至って、時刻 7.8 秒で最大ひずみは PFRC-1 橋脚では 1120 μ 、PFRC-2 橋脚では 3700 μ となる。すなわち、25%加震においても、PFRC-1 橋脚では帯鉄筋はまだ降伏していないのに対して、PFRC-2 橋脚では帯鉄筋は降伏し、横拘束効果が頭打ちになってきている。このことが、上述したように、PFRC-2 橋脚では PFRC-1 橋脚に比較して、橋脚基部の損傷が大きくなったことに寄与していると考えられる。

(3) 中間帯鉄筋

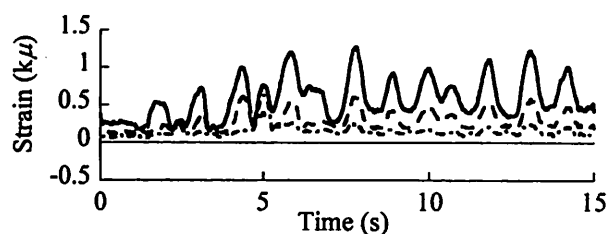
中間帯鉄筋のひずみとして、最も大きいひずみが生じた橋脚基部から 119mm における EW 方向の中間帯鉄筋に着目し、このひずみを図-10 に示す。中間帯鉄筋では両端に 135 度曲がりフックがあるが、その間の直線区間のうち、中央部、E 側、W 側の 3 箇所ではひずみを計測しており、ここではこれらの結果を示している。これによれば、重要な点は E 側や W 側に比較し中央部において中間帯鉄筋ひずみはより大きくなり、25%加震になっても PFRC-1 橋脚、PFRC-2 橋脚ともに中間帯鉄筋はまだ降伏に至って



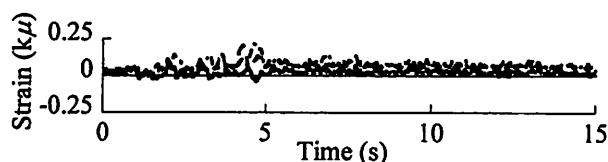
(a) 10% Excitation



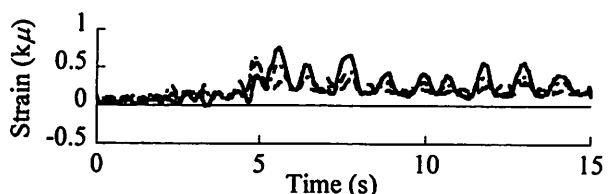
(b) 20% Excitation



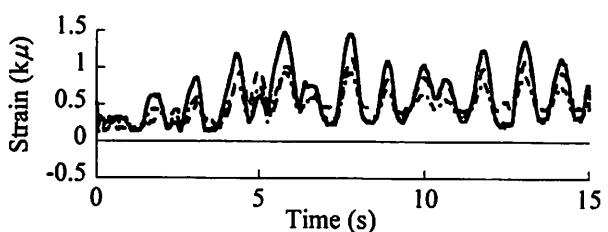
(c) 25% Excitation
(1) PFRC-1 Specimen



(a) 10% Excitation



(b) 20% Excitation



(c) 25% Excitation
(2) PFRC-2 Specimen

図-10 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)

いない点である。

また、さらに重要な点は、中間帯鉄筋のひずみは PFRC-2 橋脚では最大 1500μ と PFRC-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。

PFRC-2 橋脚では PFRC-1 橋脚に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。

7. 結論

本研究は、帯鉄筋量が PFRC 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 6/35 に縮小して製作した PFRC-1 模型に比較し、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 PFRC-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。
- 2) 帯鉄筋に生じるひずみは、25%加震においても、PFRC-1 橋脚では降伏するに至っていないが、PFRC-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 PFRC-1、PFRC-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 PFRC-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 にまで低下させ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抑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ひず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) PFRC 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、PFRC-1 橋脚、PFRC-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、PFRC 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平成 23 年度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ます次第である。また、PFRC 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大学院学生の太田啓介、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頂いた。ここに記して、厚くお礼申し上げます次第である。

参考文献

- 1) Daniel, J. I., Roller, J. J. and Anderson, E. D.: "Fiber reinforcement concrete", Portland Cement Association, Chapter 5, pp. 22-26, 1998.
- 2) Hirata, T., Kawanishi, T., Okano, M. and Watanabe, S.: Study on Material Properties and Structural Performance of High-performance Cement Composites using Polypropylene Fiber, Proc. Japan Concrete Institute, Vol. 31, No. 1, pp. 295-300, 2009.
- 3) Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwar, 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, Vol. 15, pp. 1194-1211, 2011.
- 4) Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwar, 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, Vol. 16, pp. 463-495, 2012.
- 5) 佐々木智大, 川島一彦, Richelle Zafra, 山田真司: ポリプロピレン繊維補強セメント系複合材料を用いた高じん性橋脚の開発に関する研究, 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, pp. 1-8, 2011.