

論文 軸方向鉄筋のアンボンド化による RC 橋脚の地震時損傷制御

牧 剛史^{*1}・Govinda Raj PANDEY^{*2}・睦好 宏史^{*3}・福田 雄志^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート橋脚の地震時損傷制御の観点から、軸方向鉄筋をアンボンドとする手法の有効性およびそれに伴う履歴エネルギー吸収能の低下を改善する方策を検討することを目的として、橋脚基部に繊維補強コンクリートを適用したケースと、基部の軸方向鉄筋のみを付着させたケースを含む合計4体の鉄筋コンクリート柱試験体の正負交番載荷実験を実施した。その結果、柱部材にアンボンド化手法のみを適用した場合に懸念される低いエネルギー吸収能および等価粘性減衰が、繊維補強コンクリートを併用することによって、改善される可能性が示唆された。

キーワード：RC 橋脚，軸方向鉄筋，付着，繊維補強コンクリート，履歴エネルギー吸収能

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物のせん断挙動に関する研究は、過去数十年に渡って数多く行われてきたが、依然として脆性的なせん断破壊を回避するための様々な試みが行われている。1995年の兵庫県南部地震をはじめとする近年の大地震においては、RC柱にせん断破壊が生じる例が多く見受けられた^{1),2)}。その後の検討結果を受けて改訂された設計基準では、設計地震力が大幅に引き上げられると共に、要求される耐震性能を構造物が満足していることを保証する性能照査型設計の概念が導入された³⁾。しかし、これらの設計基準によると、せん断破壊を防止して十分な靱性能を保持するために、非常に多量のせん断補強筋を配置することが必要となり、これによって、コンクリート打設や配筋作業などの施工性や経済性の面で新たな問題が生じている。そこで著者らはこれまでに、既往の研究例⁴⁾も参照しながら、従来のようにせん断補強筋のみに頼ることなく、RC柱の耐震性を向上させる手法として、軸方向鉄筋とコンクリートとの付着を制御する手法を既に提案してき

た⁵⁾⁻⁸⁾。軸方向鉄筋をアンボンドとすることによって、柱内部の応力分布が大きく変化し、せん断スパン内にひび割れが生じなくなり、結果的に脆性的な斜め引張破壊を回避することが可能となることを既に明らかにした。

しかしながら、上記のように軸方向鉄筋をアンボンドとしたRC柱の履歴特性は、通常のRC柱とは大きく異なることも併せて指摘されている⁹⁾。すなわち、アンボンドとすることによって曲げひび割れが柱基部に局所化し、これによって履歴曲線が鋭いピンチング挙動を示す。したがって、RC柱としての履歴エネルギー吸収能が小さくなり、通常のRC柱に比べて大きな地震応答を示す可能性が懸念されている。

以上の背景をふまえ、本研究では軸方向鉄筋をアンボンドとしたRC柱を実構造物へ適用することを念頭に置き、柱の履歴エネルギー吸収能を改善させることを目的として、実験的に検討を行った。すなわち、短繊維補強コンクリートの適用、または軸方向鉄筋の部分付着をアンボンド化手法と併用することによって、RC柱のさらなる耐震性状の向上を目指すものである。

*1 埼玉大学 大学院 理工学研究科 助教授 博(工) (正会員)

*2 埼玉大学 大学院 理工学研究科 研究員 Ph.D. (正会員)

*3 埼玉大学 大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

*4 埼玉大学 工学部 建設工学科 学部生

2. RC 柱の正負交番载荷実験の概要

2.1 実験供試体

本実験においては合計4体のRC柱供試体を用いた正負交番载荷実験を行った。実験供試体の形状寸法と配筋図を図-1に示す。全ての試験体は柱部とフーチング部を一体として打設した。柱部の断面寸法は $300 \times 300\text{mm}$ 、柱高さは 1000mm であり、载荷点高さは柱基部から 800mm とした。土木学会コンクリート標準示方書構造性能照査編¹⁰⁾を適用し、通常のRC部材として算定した設計せん断曲げ耐力比は 0.8 となっている。全ての供試体において、軸方向鉄筋はD16を12本、帯鉄筋としてD6を 250mm 間隔で配置した。

Control 供試体は通常のRC柱であり、UB-800は柱基部から载荷点高さまでのせん断スパン全域において、全ての軸方向鉄筋をアンボンドとした供試体である(アンボンド区間 800mm)。UB-730もアンボンド供試体であるが、フーチン

グ面上 70mm の高さから载荷点までの区間をアンボンドとした(アンボンド区間 730mm)。UB-FRCはUB-800と同様にせん断スパン全域をアンボンドとし、かつフーチング上部 70mm 区間およびフーチング面から高さ 250mm までの区間に鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)を打設した供試体となっている。

軸方向鉄筋をアンボンドとするためにスパイラルシースを用いた。すなわち、コンクリート打設前に、アンボンドとする軸方向鉄筋の所定の区間をスパイラルシースに挿入し、シース両端の隙間をシリコンジェルで塞ぐことによって、液体の流入を防止した。さらに、鉄筋の定着部で破壊することを避けるために、アンボンド区間の両側には十分な定着長を確保した。

2.2 材料特性

コンクリート打設には、スランプ 15cm の普通レディーミクストコンクリートを用いた。表-1に载荷試験当日のコンクリート圧縮強度と各

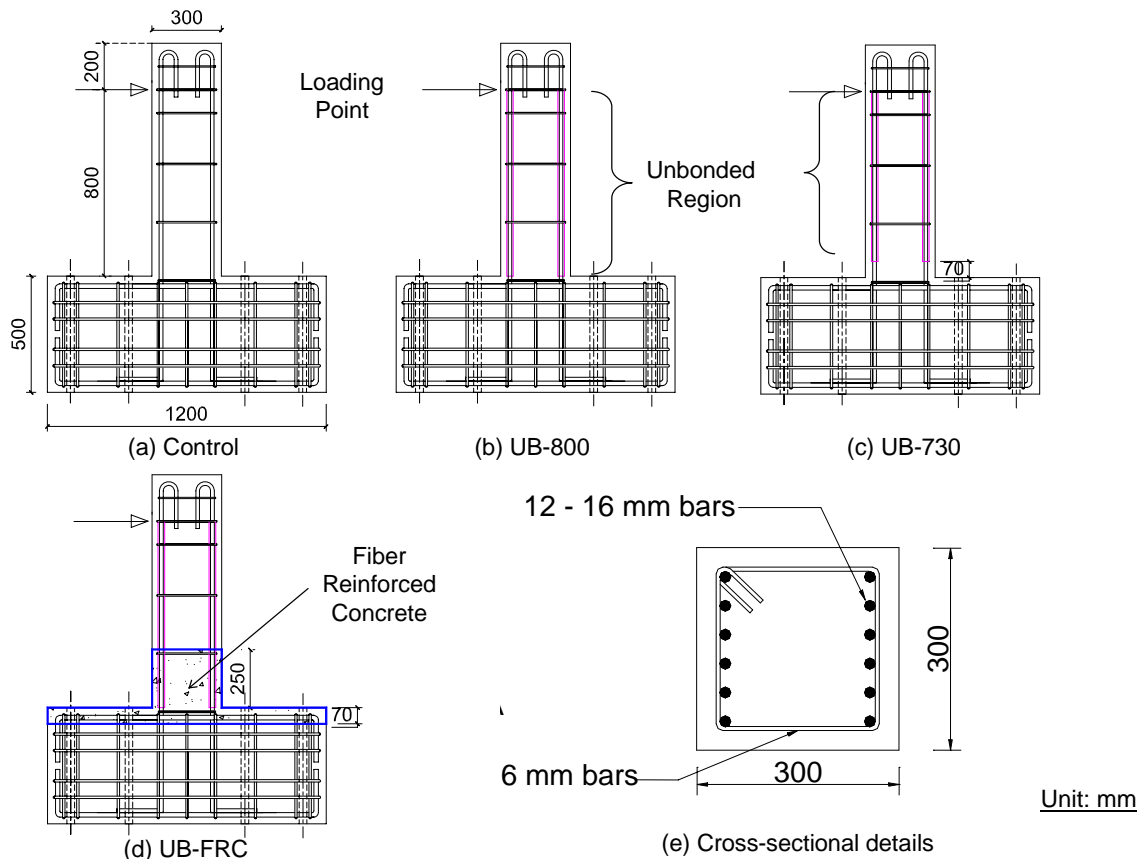


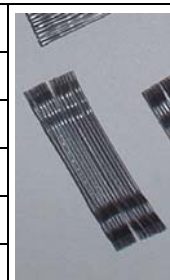
図-1 実験供試体の形状寸法と配筋

表－1 供試体の材料特性

供試体 タイプ	コンクリート 圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	軸方向鉄筋 降伏強度 f_y (N/mm ²)	帯鉄筋 降伏強度 f_{wy} (N/mm ²)
Control	32.54	380.18	396.60
UB-800	27.15	380.18	396.60
UB-750	27.63	380.18	396.60
UB-FRC	53.24	380.18	396.60

表－2 鋼繊維の材料特性

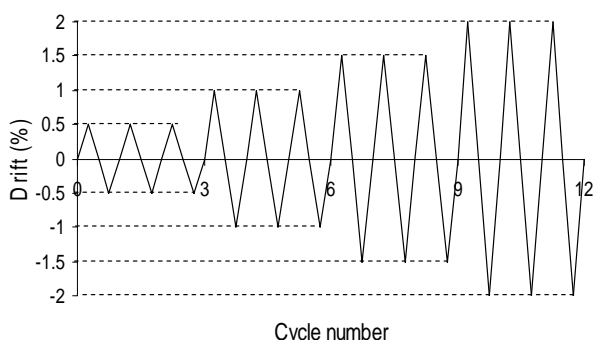
特性	値
密度 (g/cm ³)	7.85
繊維長 (mm)	30
繊維径 (mm)	0.6
引張強度 (N/mm ²)	1100
弾性係数 (N/mm ²)	205000



表－3 鋼繊維補強コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	Vf (%)	単体量 (kg/m ³)					SP (%)
			W	C	S	G	SF	
45	44.6	1.5	195	434	752	955	117	0.15

※ Vf：鋼繊維の体積混入率，SF：鋼繊維，
SP：高性能減水剤（vs C %）

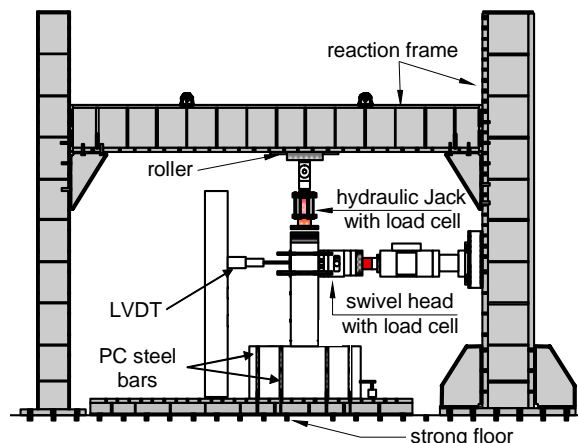


図－3 荷重パターン

異形鉄筋の降伏強度を示す。また、UB-FRC の SFRC に混入した鋼繊維の特性値を表－2に、SFRCの配合を表－3にそれぞれ示す。なお、表－1中、UB-FRCの圧縮強度はSFRC部分の強度であり、柱上部およびフーチング部の圧縮強度は47.0 N/mm²であった。その他の3体については各々一体打設したため、柱部・フーチング部の圧縮強度は同一である。

2.3 荷重試験装置

荷重試験装置全体の概要を図－2に示す。供試体はPC鋼棒を用いて床に固定し、油圧式アクチュエータを用いて荷重点に水平正負交番荷重を変位制御で行った。その際、柱部の軸応力が1.0N/mm²となるように、柱上端に90kNの一定軸力を載荷している。



図－2 荷重試験装置セットアップ

実験では、柱部の水平変位、柱基部のひび割れ幅、供試体の水平・回転変位を変位計によって計測し、数箇所の軸方向鉄筋および帯鉄筋のひずみを、鉄筋表面に貼り付けたひずみゲージによって計測した。

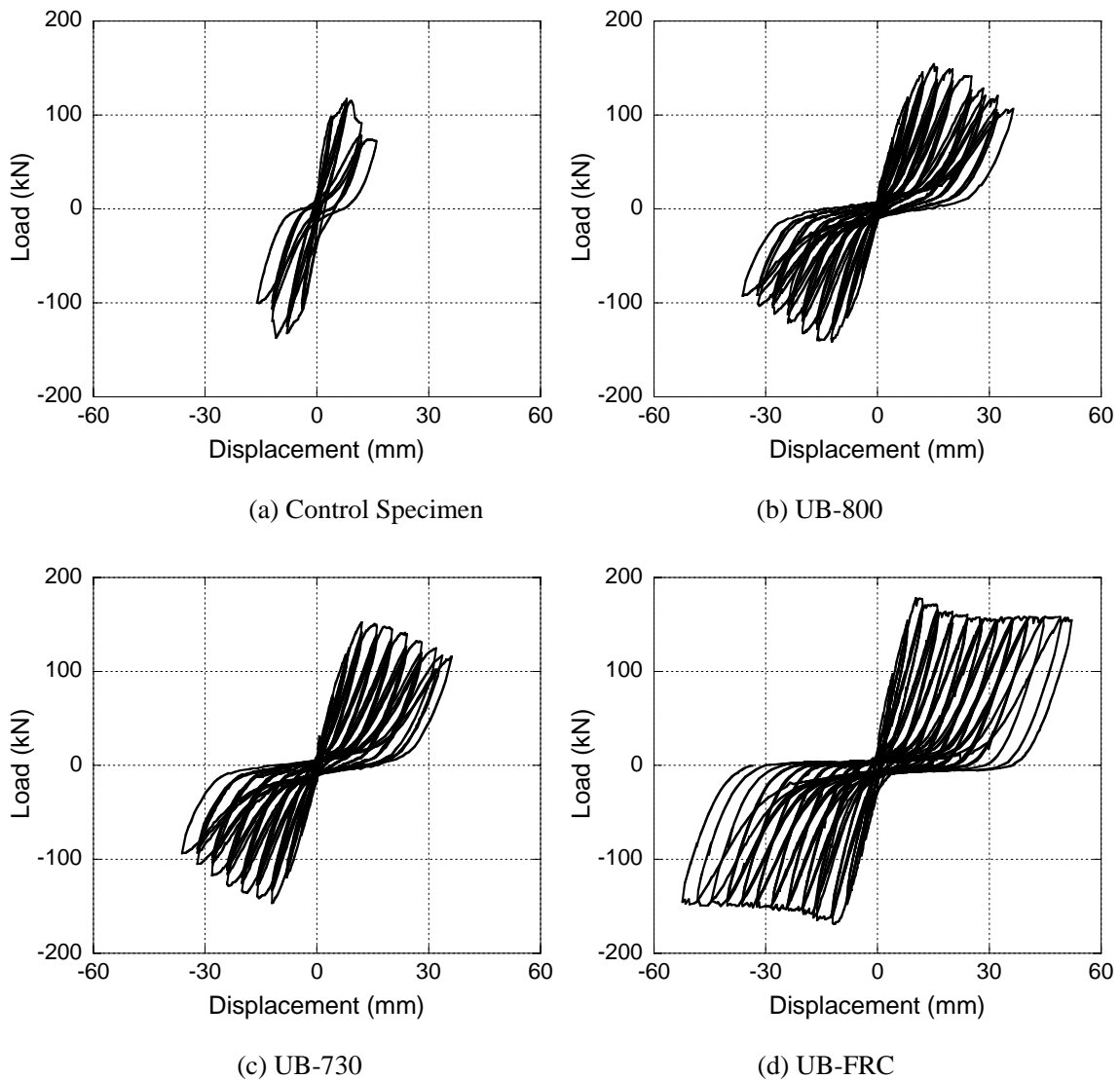
2.4 荷重計画

全ての供試体に静的正負交番荷重を行った。荷重パターンを図－3に示す。変位振幅増分は柱部の回転角1/200（＝0.5%）とし、各変位振幅を3回ずつの繰り返し荷重とした。最大荷重経験後、水平荷重が最大荷重の80%以下まで低下した時点で荷重を終了した。

3. 正負交番荷重実験結果

3.1 荷重－変位関係

全供試体の荷重－変位関係を図－4に示す。Control供試体は軸方向鉄筋降伏前にせん断破壊が生じたが、軸方向鉄筋をアンボンドとした他の3体の供試体はいずれも、破壊モードが曲げ破壊となり、耐荷力が増大した。アンボンド区



図－４ 荷重－変位関係

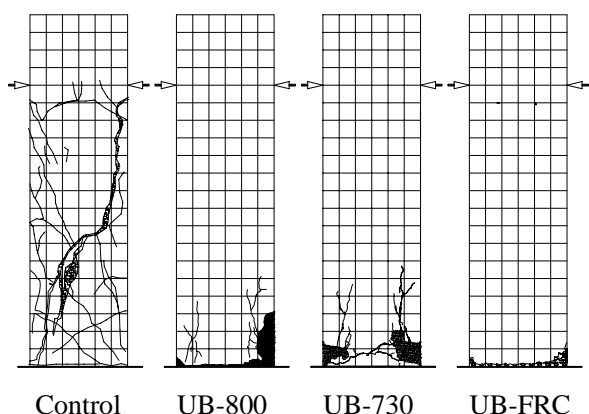
間をせん断スパン全域とした UB-800 では、軸方向鉄筋が降伏する前に、柱基部の圧縮側コンクリートが圧壊して破壊した。アンボンド区間を 730mm とした UB-730 においてもほぼ同様の破壊性状を示した。靱性能の観点からは、UB-800 と UB-730 は殆ど差異がなく、柱基部の 70mm 区間を部分的に付着させる手法は効果が殆ど見られなかった。

UB-FRC においては、柱全体としての挙動に大幅な改善がみられた。水平変位 10mm 付近で最大荷重を示した後は、若干荷重が低下するものの、150kN 程度の高い荷重をその後も維持し続け、結果的に他のアンボンド供試体に比べて約 1.5 倍程度の水平変位まで耐荷力を保持する結果となった。これは、FRC の圧縮特性が、圧縮強

度後も比較的靱性的な挙動を示すことによるものと考えられる。なお、UB-FRC で最大荷重が相対的に高い原因は、柱基部に打設した FRC の強度が普通コンクリートに比べてかなり高くなってしまったことに起因するものと考えられる。

3.2 ひび割れ性状

載荷終了後の全供試体のひび割れ状態を図－5 に示す。通常の異型鉄筋を用いた Control 供試体では、載荷初期から曲げひび割れが発生し始め、載荷の進行とともに曲げひび割れが斜めひび割れへと進展した。最終的には斜めひび割れが大きく開き、帯鉄筋が降伏して、急激に耐荷力を失った。アンボンド供試体の UB-800 では、柱基部で載荷初期に生じた曲げひび割れが、載荷の進行とともに開口し、かつ柱上方へ進展し



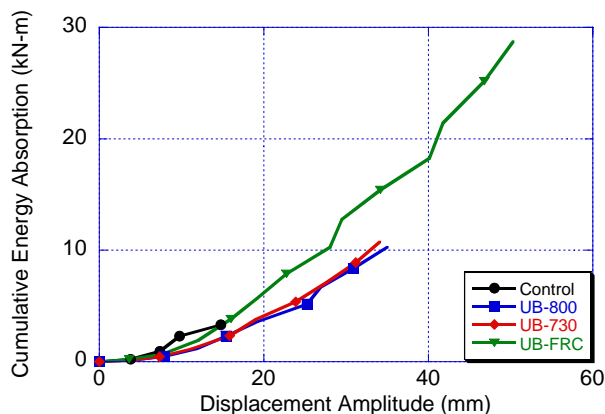
図－5 荷重終了後のひび割れ性状

ていった。最終的には軸方向鉄筋が降伏する前に柱基部のかぶりコンクリートが圧壊した。UB-730では、柱基部70mm区間（付着区間）において複数本の曲げひび割れが荷重初期に生じた。しかし荷重変位の増大とともに、付着区間とアンボンド区間の境界、すなわちフーチング面から高さ70mm位置で曲げひび割れが局所的に拡大する性状を示した。最終的には、軸方向鉄筋降伏前に、上記の境界付近でかぶりコンクリートが圧壊に至った。UB-FRCではUB-800と同様に基部でひび割れが局所的に拡大するが、UB-800で見られたような柱上方へのひび割れ進展は見られなかった。

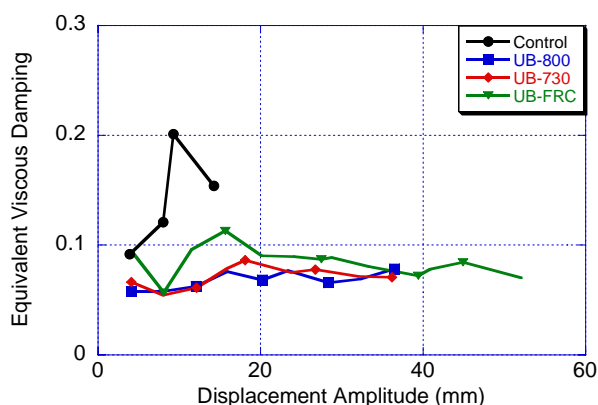
3.3 累積吸収エネルギー

図－4の荷重－変位曲線から、各変位振幅あたりの履歴曲線から履歴吸収エネルギーを算出した。図－6に全供試体について算定された累積吸収エネルギーの推移を示す。柱基部で鉄筋を部分的に付着させたUB-730では、UB-800に比べて累積エネルギー吸収量に殆ど改善が見られなかった。それに対して、柱基部にFRCを適用したUB-FRCでは、エネルギー吸収能に改善がみられた。これは、FRC部分で曲げひび割れが生じたことによって、FRCとしての履歴減衰が反映された結果であると言える。

ただし、先に述べたように、FRCの圧縮強度が普通コンクリートに比べてかなり高かったため、これらの結果を単純比較することは妥当でない。そこで、次項では柱部材のエネルギー吸



図－6 累積吸収エネルギーの比較



図－7 等価粘性減衰の比較

収能を等価減衰に基づいて比較する。

3.4 等価粘性減衰

図－4の荷重－変位曲線から、以下の式(1)¹¹⁾に基づいて等価粘性減衰を算出した。

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{A_h}{A_e} \quad (1)$$

ここに、

A_h : 1サイクルあたりの履歴吸収エネルギー

A_e : 弾性ひずみエネルギー

全供試体の各変位振幅について等価粘性減衰を算定した結果を図－7に示す。UB-800に比べて、UB-730においては、減衰性状の改善は殆ど見られなかった。しかし、これらの2供試体に比してUB-FRCでは、比較的low振幅レベルにおいて、減衰性状が若干改善されているのが分かる。なお、変位振幅が大きくなり、柱基部の曲

げひび割れ幅が拡大してくると、UB-FRC の等価減衰は他のアンボンド供試体のそれと殆ど変わらなくなる。したがって、柱基部に FRC を適用することは、比較的頻度が高く強度が弱い地震動に対する応答性状の観点からは、効果的となる可能性を有するものと言える。

4. まとめ

地震時損傷を制御するために軸方向鉄筋をアンボンドとした RC 柱の耐震性状について、4 体の RC 柱試験体の静的正負交番載荷実験によって検討した。本実験の範囲内で得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 軸方向鉄筋をアンボンドとすることによって、RC 柱部材の繰返し挙動は大きく変化し、帯鉄筋を殆ど配置しなくても、その破壊モードはせん断破壊ではなく靱性的な曲げ破壊型となる。
- (2) 柱基部を部分的に付着させた RC 柱では、等価減衰性状に若干の改善が見られるものの、全体としては殆ど効果がない。
- (3) 柱基部とフーチング上部に鋼繊維補強コンクリートを適用した RC 柱では、エネルギー吸収能に改善が見られた。また、エネルギー吸収に基づく等価減衰性状は、比較的振幅レベルにおいて若干の改善が見られた。
- (4) 単に軸方向鉄筋をアンボンドとした RC 柱に比べて、基部に鋼繊維補強コンクリートを適用した RC 柱では、最大荷重後も高い耐荷力を維持し、より高い靱性能を有することが確認された。ただし、この結果には繊維補強コンクリートの強度の影響が含まれている可能性がある。

参考文献

- 1) Okamura, H.: Japanese Seismic Design Codes Prior to Hyogoken-Nanbu Earthquake, Cement and Concrete Composites, Vol.19, pp. 185-192, 1997
- 2) Hamada, M.: Seismic Code Development for

Civil Infrastructures after the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, Proceedings of Optimizing Post-Earthquake Lifeline System Reliability, Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, pp.922-924, 1999

- 3) コンクリート標準示方書 (耐震設計編), 土木学会, 1995
- 4) 例えば, 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
- 5) Pandey, G. R. and Mutsuyoshi, H.: Seismic Performance of RC Piers with Bond Controlled Reinforcements, ACI Structural Journal, Vol. 102(2), pp.295-304, 2005
- 6) Pandey, G. R., Mutsuyoshi, H., Sugita, K. and Uchibori, H.: Mitigation of Seismic Damage of RC Structures by Controlling Bond of Reinforcement, Proc. of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.2, pp.1441-1446, 2003
- 7) Pandey, G. R., Mutsuyoshi, H., Maki, T. and Uchibori, H.: Numerical Study on Seismic Behavior of RC Bridge Piers with Bond Controlled Reinforcements, Proc. of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.2, pp.1207-1212, 2004
- 8) 睦好宏史, 牧 剛史, G. R. Pandey, 杉田清隆: 鉄筋の付着を制御することによる RC 柱部材の耐震性状改善に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.155-169, 2005
- 9) Pandey, G. R. and Mutsuyoshi, H.: Seismic Damage Mitigation of Reinforced Concrete Bridge Piers by Unbonding Longitudinal Reinforcement, Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.154, 2004
- 10) コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 土木学会, 2002
- 11) Chopra, A. K.: Dynamics of Structures, Prentice Hall, Inc., pp.103-105, 2001