

論文 鉄筋の付着を制御した RC 構造物の地震被害軽減に関する研究

谷野 良輔*¹・睦好 宏史*²・牧 剛史*³・Govinda Raj Pandey*⁴

要旨：本研究は鉄筋とコンクリートの付着性状が、RC 柱の耐震性状に及ぼす影響を正負交番載荷実験、仮動的実験により、明らかにしたものである。正負交番載荷実験から軸方向鉄筋の付着を制御した供試体はせん断破壊に対する抵抗性が格段に上昇することが明らかとなった。また、地震波を入力した仮動的実験においても同様な結果を得た。これらの実験結果から、付着性状をパラメータとした復元力モデルを提案し、これを用いて地震応答解析を行った結果、実験結果と良い一致を示した。

キーワード：付着，せん断破壊，正負交番載荷実験，仮動的実験，復元力モデル

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート構造物の耐震に関する研究が精力的に行われ、耐震設計法の改訂が行われてきた。その結果、設計震度（地震荷重）が大幅に引き上げられ、また地震後に要求される RC 構造物の耐震性能に基づいて耐震設計を行うことが明記されるようになった¹⁾。これにより、RC 部材の脆性的な破壊であるせん断破壊を防止し、さらに大きな靱性能が要求されるようになり、大量の鉄筋、特にせん断耐力、靱性能の向上のため、せん断補強筋（帯鉄筋）が配筋されることになった。その結果、経済性、鉄筋の施工性およびコンクリートの充填性が新たに問題となっている。これは単に帯鉄筋の量を増やし RC 部材の耐震性能を向上させることに限界があることを示唆している。

池田ら²⁾や内堀ら³⁾は、付着の有無が、RC 梁のせん断破壊性状に及ぼす影響、付着の有無とせん断耐力との関係、そして付着の有無と残存アーチ機構との関係等を実験および解析により求めている。池田らはその中で、鉄筋コンクリート梁において、引張鉄筋の付着が無く、かつ

両端で十分に定着されているならば、せん断破壊に至らないことを指摘している。しかし、付着の有無が RC 柱の耐震性状に及ぼす影響については十分明らかにされていない。

本研究は、軸方向鉄筋の付着を制御した RC 柱の実験供試体を作製し、正負交番載荷実験、仮動的実験を行い、軸方向鉄筋の付着を制御した RC 柱の耐震性状を明らかにし、また、付着を制御した RC 柱の復元力モデルの提案を行った。

2. RC 柱の正負交番載荷実験

2.1 実験概要

軸方向鉄筋の付着の有無が RC 柱の耐震性状にどのような影響を及ぼすかについて、実験的に明らかにするために RC 柱の正負交番載荷実験を行った。実験供試体は付着を持つもの (A-1)、完全に付着を切ったもの (A-2) の 2 体を作製した。A-1, A-2 どちらの供試体も同一の配筋であり、せん断耐力と曲げ耐力の比は 0.8 としており、せん断破壊先行の設計としている。供試体の形状寸法を図-1 に示す。軸方向鉄筋には D16 を 12 本、せん断スパン内の帯鉄筋は D6 を供試体基

*1 東日本旅客鉄道株式会社 [元埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻] (正会員)

*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 工学部 建設工学科 助手 工博 (正会員)

*4 埼玉大学 研究員 工博 (正会員)

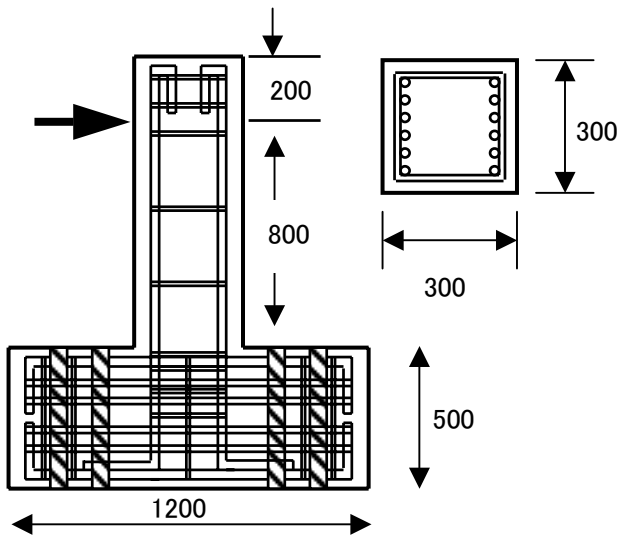


図-1 供試体の形状寸法

部から耐力比が 0.8 となるよう 250mm 間隔で配筋している。付着を制御した区間は、供試体基部から荷重点までの区間とし、フーチング内、荷重点の外側で十分に定着を取るようにした。

軸方向鉄筋の付着を切る方法はスパイラルシースに異形鉄筋を挿入し、両端をコンクリートが入り込まないようにシリコンジェルで塞いだ。これにより軸方向鉄筋のふしにおける機械的付着を取り除くことができた。表-1 に鉄筋の材料特性、コンクリートの圧縮強度を、表-2 に供試体の設計耐力を示す。なお、設計耐力は土木学会コンクリート標準示方書構造性能照査編⁴⁾に基づいて計算している。

表-1 鉄筋の材料特性、コンクリート圧縮強度

No.	軸方向鉄筋 降伏強度 (MPa)	帯鉄筋 降伏強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
A-1	380.2	396.6	32.5
A-2	380.2	396.6	33.7

表-2 供試体設計耐力

No.	設計曲げ耐力 (kN)	設計せん断耐力 (kN)	耐力比
A-1	136.1	113.3	0.8
A-2			

2.2 荷重方法

供試体の設置、および荷重概要を図-2 に示す。水平荷重はアクチュエーターにより、変位制御で行い、回転角が 1/200 (荷重点変位で 4mm) を基準変位とし、この整数倍の変位を各々

3 サイクル繰り返すことによって行った。また、供試体頭部に軸力をジャッキによって、一定軸応力 1MPa を荷重した。

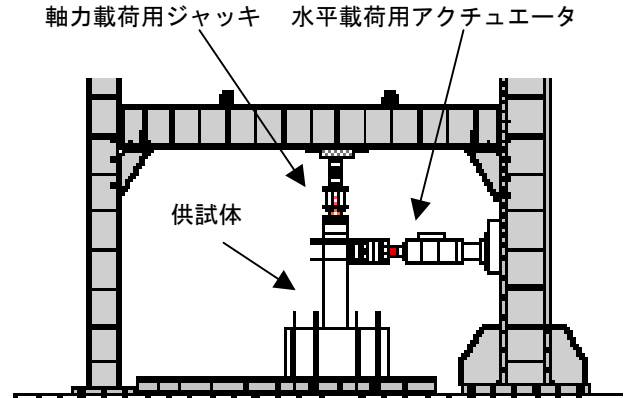


図-2 供試体設置図

2.3 実験結果

図-3 に荷重-変位関係と終局時の荷重荷重方向に平行な面のひび割れ図を示す。付着のある A-1 は軸方向鉄筋の降伏前にせん断破壊となった。荷重当初から曲げひび割れが発生し、荷重が進むにつれ、ひび割れの数が増し、斜めひび割れへと発展した。終局時のひび割れ性状から、斜めひび割れが大きく開いていることが確認できる。付着を切った A-2 はせん断破壊にならず、軸方向鉄筋の降伏後に供試体基部のかぶりコンクリートが圧壊し、剥落することにより終局となった。なお、終局時に軸方向鉄筋は座屈を生じていなかった。ひび割れはコンクリート基部から約 100mm の高さまで生じているのみで、荷重が進んでも斜めひび割れに発展することはなかった。軸方向鉄筋の付着を制御することでせん断破壊を防止でき、靱性に関しても大幅な改善が見られた。

履歴曲線を比較してみると、軸方向鉄筋の付着を切った場合には、柱基部のみにひび割れが入るため、一般の RC 部材の履歴曲線に比べて、スリップ型となり、エネルギー吸収能がやや少ないことがわかる。これは、軸方向鉄筋の付着を切った供試体では、柱基部のみにひび割れが入り、圧縮力を受け持つ場合には、そのひび割

れが閉じ、圧縮力はひび割れが閉じるまで鉄筋だけで受け持つこととなる。この時の剛性は低く変位だけが進行し、荷重は変化しない。さらに荷重が進むと、ひび割れが閉じて、圧縮部のコンクリートも圧縮力を受け持つようになるため剛性が増し、このようなスリップ型の履歴曲線を描くのである。この履歴性状の違いが地震時においてどのように応答性状に影響を及ぼすか検討しておく必要がある。

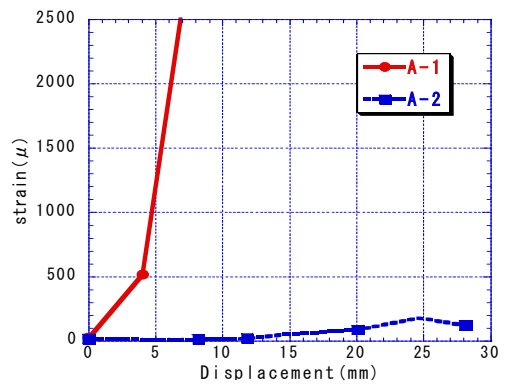


図-4 帯鉄筋ひずみ

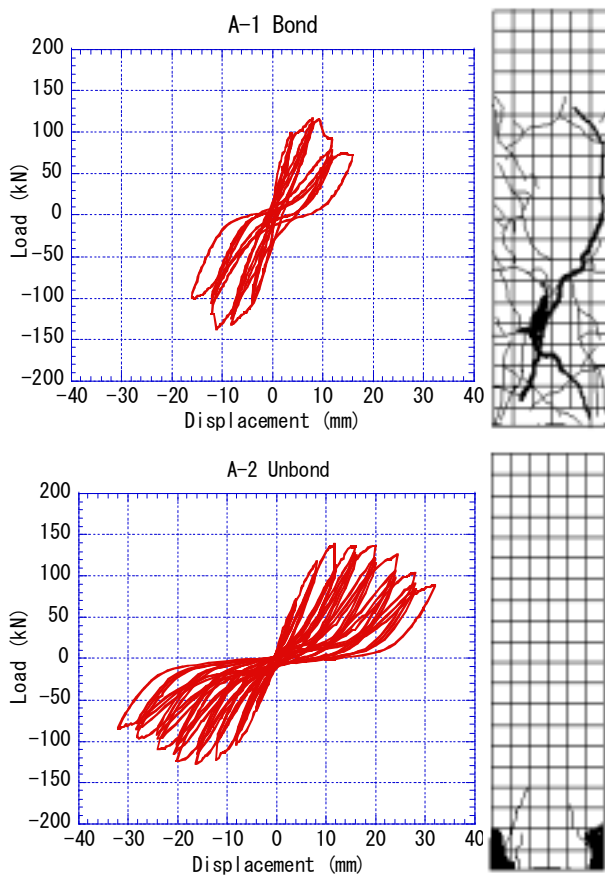


図-3 荷重-変位関係, 終局時のひび割れ性状

図-4に供試体基部から250mmの位置に配筋した帯鉄筋のひずみと変位との関係を示す。図から明らかなように付着のある供試体の帯鉄筋(A-1)は変位が6mmを超えたあたりで降伏しているが、付着を切った供試体(A-2)では、帯鉄筋のひずみはほとんど生じていない。以上のことより、付着を切った供試体ではせん断変形をしていないことが推察される。すなわち、帯鉄筋にせん断力が作用しないため、帯鉄筋量を減らすことができると考えられる。

3. RC柱の仮動的実験

3.1 実験概要

RC柱の正負交番載荷実験より、軸方向鉄筋の付着を制御することでせん断破壊に対する抵抗性が増し、変形性能も大幅に改善されることが確認された。しかしながら、履歴曲線がスリップ型となるため、エネルギー吸収という面に関しては劣っている。そこで、実際の地震時に付着を制御したRC柱がどのような挙動を示すのかを明らかにするために仮動的実験を行った^{5),6)}。

実験供試体は正負交番載荷実験同様、付着を持つもの(B-1)、完全に付着を切ったもの(B-2)の2体を作製した。供試体寸法、使用した鉄筋は正負交番載荷実験に用いたものと同様であるが、せん断スパン内の帯鉄筋の量を変えており、耐力比がB-1で1.5、B-2で0.8となるように、せん断スパン内の帯鉄筋は、B-1が供試体基部から50mm間隔、B-2が250mm間隔で配筋した。表-3に供試体の設計耐力と圧縮強度を示す。

表-3 供試体設計耐力, 圧縮強度

No.	設計 曲げ耐力(kN)	設計 せん断耐力(kN)	耐力比	圧縮強度 (MPa)
B-1	136.1	210.5	1.5	39.4
B-2	136.1	113.3	0.8	38.4

入力した波形は、神戸海洋気象台で観測された兵庫県南部地震の加速度波形のNS成分を用いた。塑性域に至る応答性状を得るために、入力加速度波形の卓越周期は、降伏時周期とほぼ同じとなるように時間軸を約0.14倍に短縮し、加

速度振幅を約 1.5 倍に増幅させて実験を行った。

図-5 に入力加速度波形を示す。時刻刻みは 0.008 秒，最大加速度は 1300Gal である。粘性減衰定数は 5%とした。

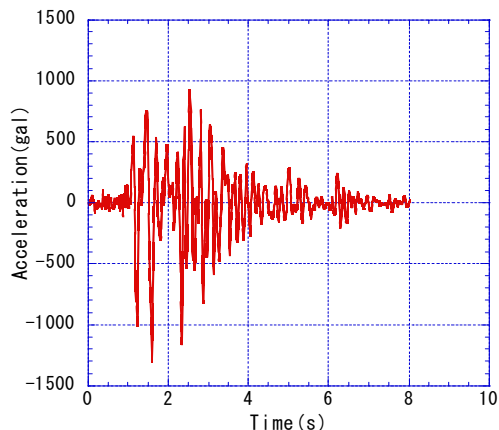


図-5 入力加速度波形

仮動的実験を行うに当たって，数値積分法が重要である。本実験では数値積分法としてオペレータ・スプリッティング(OS)法を用いた。OS法は収束計算が必要なく，線形部分の剛性が非線形部分の剛性を下回らない場合，常に無条件安定となる積分法であり，鉄筋コンクリート部材のように降伏後，繰返しによって剛性が劣化していくような場合には，非常に適した方法である⁷⁾。

3.2 実験結果

図-6 に仮動的実験から得られた復元力の履歴曲線とひび割れ図を，図-7 に応答変位の時刻歴を示す。B-1 は帯鉄筋をせん断スパン内に 50mm ピッチで配筋しているため，せん断破壊には至らず，載荷終了時まで耐力を維持することができた。ひび割れ図から，斜めひび割れが発生しているものの，帯鉄筋が効いていることが確認できる。B-2 は，B-1 と比べて応答変位が大きくなっていることが分かる。これは，軸方向鉄筋の付着を切ると履歴曲線がスリップ型となり，一般の RC 部材と比べてエネルギー吸収能がやや劣っていることが原因であると考えられる。しかし，耐力比が 0.8 にもかわらず，正負交番載荷実験結果と同様にせん断破壊を防止するこ

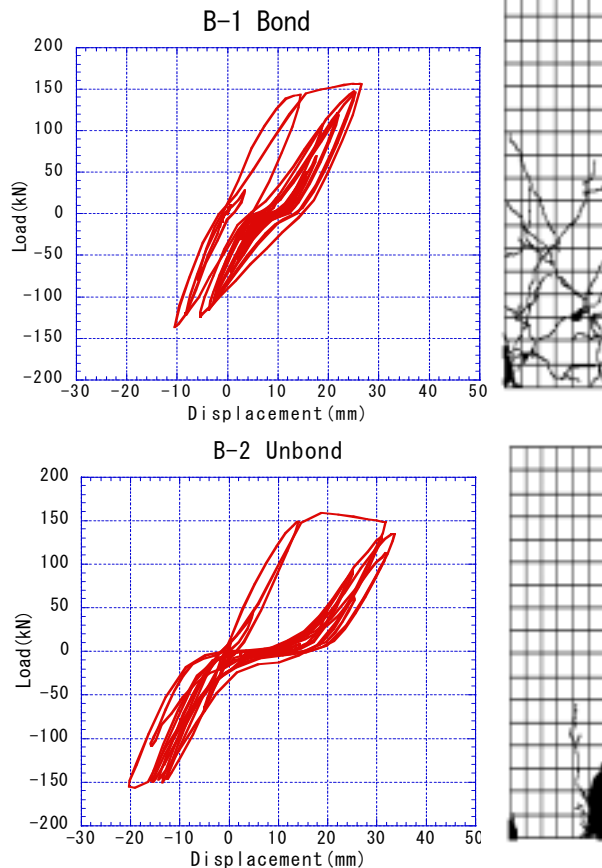


図-6 履歴曲線

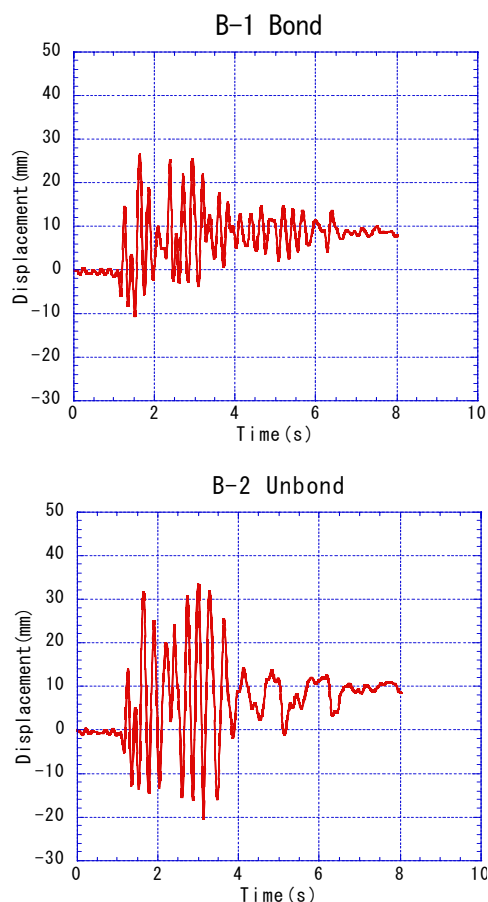


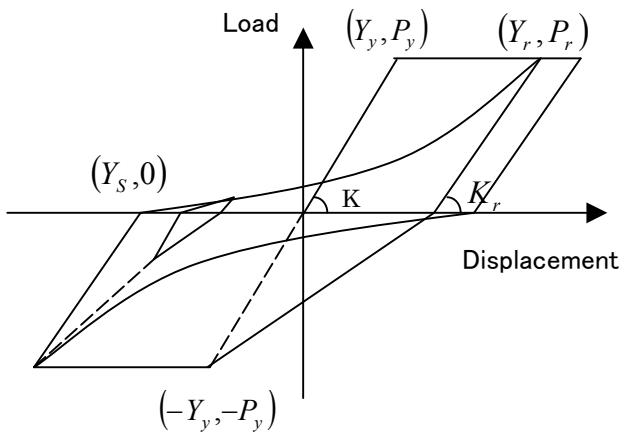
図-7 応答変位の時刻歴

とができた。ひび割れ図から、せん断スパン内に斜めひび割れは発生しておらず、ひび割れは供試体基部に発生したのみである。このことから、地震波に対して、付着を切った供試体の耐力比が 0.8 でせん断破壊先行の設計であっても、帯鉄筋を密に配筋した供試体とほぼ同等の耐震性状を示すということが明らかになった。

3.3 付着を切った RC 部材の復元力モデル

地震応答性状を精度良く求めるためには精度よい復元力-変位関係を求める必要がある。付着を切った RC 部材の復元力モデルは Govinda⁸⁾らによって提案されている。ここでは、上記のモデルをさらに改良したものを新たに提案することにする。

図-8 に提案した復元力モデルの概略図を示す。提案したモデルは通常の RC 部材の剛性劣化型モデルにスリップ部分を取り入れたものである。すなわち、降伏後、変位が反転し、荷重がゼロになった後のスリップ剛性を実験に基づいて Govinda らのモデルの曲線部分の係数を改良した。その曲線部分を式(1)に示す。



ここで、

$$K_r = \frac{K}{(\mu)^{1/4}}, \mu = \frac{Y_r}{Y_y}$$

図-8 復元力モデル

$$P = a(Y - Y_s)^z$$

$$a = P_r / (Y_r - Y_s), z = 0.9 \frac{Y_r - Y_s}{Y_y} \quad (1)$$

ここで、

P : 荷重 Y : 変位

添字 y, s, r は各々降伏点、

荷重ゼロ点、変位反転点を示す

3.4 復元力モデルの精度の検討

図-9 は正負交番荷実験から得られた履歴曲線と、提案した復元力モデルを比較したものである。図から、提案した復元力モデルは柱基部のコンクリートが圧壊し、耐力が低下するまで精度良く表現できていることが分かる。また、図-10 は仮動的実験、および提案した復元力モデルを用いて応答解析から得られた履歴曲線である。なお、降伏荷重、降伏変位は実験値を用

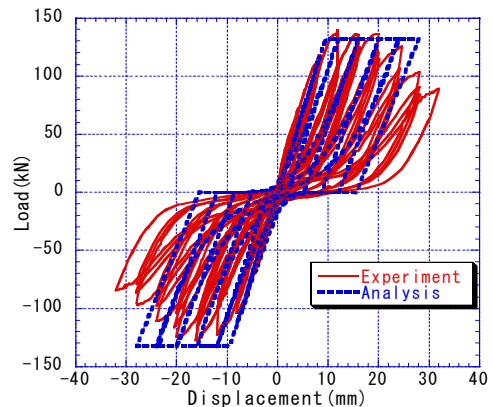


図-9 履歴曲線比較 (正負交番荷実験)

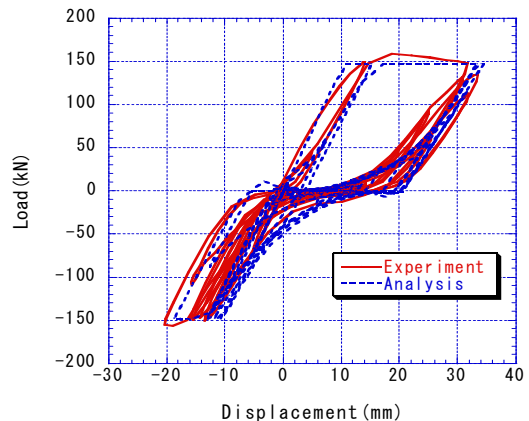


図-10 履歴曲線比較 (仮動的実験)

いている。図-11 は応答変位の時刻歴を示したものである。どちらの図においても、仮動的実験結果と良く一致しており、提案した復元力モデルを用いて付着を切った RC 柱の地震応答性状を精度良く求めることが可能である。

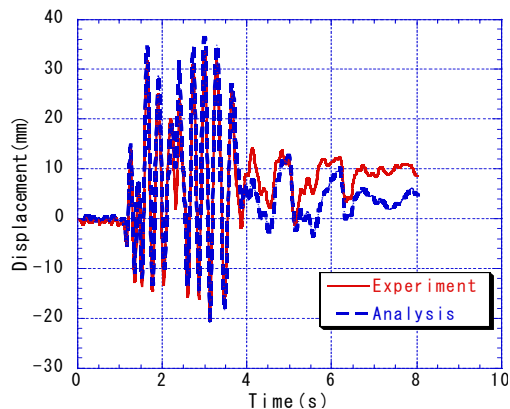


図-11 変位応答の時刻歴

4. まとめ

RC 構造物のせん断破壊を防止し、変形性能を向上させる手法として、軸方向鉄筋の付着を制御する方法を取り上げ、正負交番載荷実験、仮動的実験を行い、付着を制御した RC 部材の耐震性状について明らかにした。本研究から以下のことが言える。

- (1) 正負交番載荷実験結果より、RC 柱における軸方向鉄筋の付着を切ることによって、十分な定着を確保していれば、せん断スパン内に斜めひび割れは発生せず、帯鉄筋量を従来必要とされている量より大幅に少なくしても、せん断破壊に対する抵抗性が格段に増し、さらに変形性能も改善されることが明らかとなった。
- (2) 地震波を入力した仮動的実験結果より、軸方向鉄筋の付着を切ることによって、せん断破壊を防止でき、帯鉄筋を密に配筋した通常の RC 柱と比べてほぼ同等の耐震性状を有することが明らかとなった。
- (3) 軸方向鉄筋の付着を切った RC 柱の復元力モデルを提案し、正負交番載荷実験結果、仮動的実験結果と比較した結果、提案した復元力

モデルは実験結果と良く一致し、地震応答性状を精度良く求めることが可能である。

参考文献

- 1) 丸山久一：耐震基準の変遷：土木コンクリート構造物，コンクリート工学，Vol.41，No.5，pp.4-10，2003.5
- 2) 池田尚治，宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文集報告集，Vol.293，pp.101-109，1980.1
- 3) 内堀洋紀ほか：鉄筋の付着を制御した RC 梁のせん断耐荷挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1027-1032，2004
- 4) コンクリート標準示方書，構造性能照査編，土木学会，2002
- 5) 伯野元彦ほか：ハイブリッド実験の応用マニュアル，平成元年度科学研究費補助金（総合研究（A））研究成果，1990.3
- 6) 横山雅美ほか：仮動的実験手法を用いた RC 部材の弾塑性応答，コンクリート工学年次論文集報告集，Vol.9，No.2，pp.435-400，1987
- 7) 中島正愛ほか：サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.417，pp.107-117，1990.11
- 8) Govinda, R. P. and Hiroshi, M.: Seismic Damage Mitigation of Reinforced Concrete Bridge Piers by Unbonding Longitudinal Reinforcements, Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No.154, Aug.2004