

アンボンド 芯材入り RC 構造の解析モデルと芯材パラメータの影響

Analytical model for Unbonded Bar Reinforced Concrete structure and influence of bar parameters on the structural characteristics

高橋 良和*・家村 浩和**・曾我部 直樹***

Yoshikazu Takahashi, Hirokazu Iemura and Naoki Sogabe

*工博, 京都大学助手, 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

**工博, 京都大学教授, 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

***工修, 京都大学大学院, 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

Unbonded Bar Reinforced Concrete (UBRC) structure has been developed as a new RC structure with stable seismic response. Installing unbonded high strength bars into a RC pier, the post-yield stiffness can be easily increased and controlled. This structure can reduce not only maximum displacement response but also the residual displacement by the combination of the elastic bar's action. The characteristics of UBRC structures are changed due to the bar parameters, which are a bar ratio, a bar location in a section, a bar length and a gap at an anchor. Developing the analytical model for UBRC structure, parametric studies were conducted. As the result, it is found that the various kind of the load-displacement hysteresis can be realized, changing these parameters.

Key Words : UBRC structure, unbonded bar, numerical model, parametric study

キーワード : UBRC 構造, アンボンド 芯材, 解析モデル, 芯材パラメータ

1. はじめに

兵庫県南部地震では, 強烈な地震動により数多くの橋梁に甚大な被害が生じた. この復旧作業の中で, 大きく損傷した橋脚はもちろん撤去・再構築の対象となったが, 橋脚天端の残留変形が大きいために, 損傷程度は大きくないものの撤去・再構築となった橋脚も数多く存在した¹⁾.

都市内高速道路は震災後の復旧・救援活動において重要なライフラインとなる. 阪神大震災での教訓を受け, 改めて高性能橋脚として求められる性能を考えると, 従来の高い耐力, 変形性能という静的性能に加え, 安定した地震応答性能が重要であると考えられる. この安定した地震応答というのは, 大きく塑性域に入ったとしても片流れせずに振動し, 地震後の残留変形が小さいことを意味している. RC 橋脚は大きく変形すると鉄筋の降伏やコンクリートの圧壊などが生じ, 正の剛性を発揮できる要因は小さくなる. 結果降伏後ほぼ二次剛性のない骨格曲線となり, 地震応答時に大きく片流れしやすい性質を持っている. このような RC 構造に対し, アンボンド高強度芯材を導入することでその性質を改善する新たな構造 (UBRC 構造) を筆者らが提案している^{2)~6)}. UBRC 構造は RC 構造の骨格曲線における二次剛性を安定して発揮させることができる構造である. 本論文では, UBRC 構造の解析モデルを用いて二次剛性発現メカニズムを明らかにするとともに

に, 構造特性に及ぼす影響が大きいと考えられる芯材パラメータを抽出して, 目標とする骨格曲線を有する構造を設計するための基礎資料を得ることを目的としている.

2. アンボンド 芯材入り RC 構造

本研究で提案する RC 構造の基本的構成は, 通常の RC 構造の断面内に高強度のアンボンド芯材を配置するものである (図-1). 芯材の両端は RC 構造内に定着する. ただし図-2において後述するが, 片側には間隙を有する定着としてもよく, 間隙量によって芯材が作用する変形領域を調節することができる. 本構造は主鉄筋だけではなくアンボンド芯材によっても補強していることから, Unbonded Bar Reinforced Concrete (UBRC) 構造と呼ぶこととする.

UBRC 構造の特性を, 荷重-変位骨格曲線の観点から説明する (図-2). RC 構造は一般に完全弾塑性型にモデル化されるが⁷⁾, 弾性部材を付与すれば, 二次剛性を有する構造を得ることができる. この大変形領域でも安定した正の二次剛性を有する骨格構造が, UBRC 構造の目指すところである.

原理的には図-2に示した通りであるが, 現実には安定した二次剛性を得るために, 大変形時においても芯材が弾性挙動することを保証する必要がある. そこで本構造では, 芯材の材料として高強度のものを使うだ

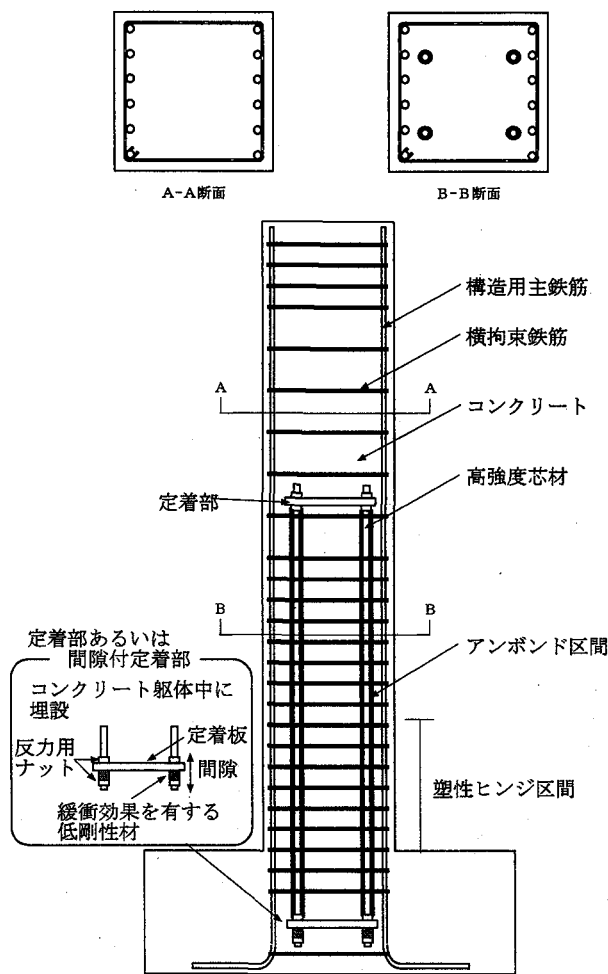


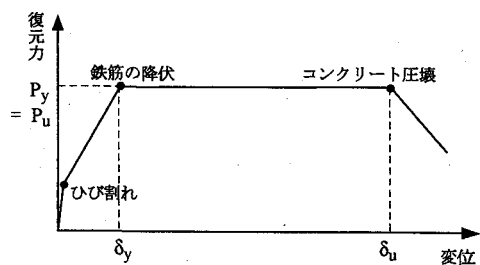
図-1 提案する UBRC 構造の概念図

けでなく、アンボンド化して導入した。また芯材は必ずしも橋脚断面内に配置する必要はないが、大変形時にも座屈せず安定した挙動を発揮させるため、ここでは断面内に配置している。断面内部は最外縁主鉄筋位置よりもひずみが小さいため、主鉄筋が降伏している大変形領域においても芯材が降伏しにくい効果も期待できる。

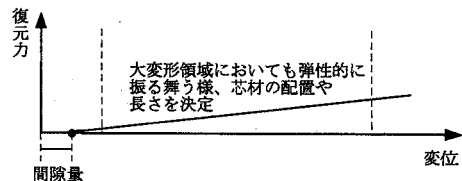
アンボンド化した場合のひずみ分布概念図を図-3に示す。一般に鉄筋のひずみは、小さな荷重下ではモーメント分布と同じ三角形分布を示す。荷重が大きくなると、モーメントが小さな載荷点付近ではそれほど変化しないが、大きなモーメント領域では鉄筋が降伏して大きなひずみを示し、塑性ヒンジ部を形成する。一方芯材は、アンボンド化によって、芯材の長さ方法に一樣なひずみ分布を示す。つまり芯材全体として変形の伸びに抵抗することから、ひずみとしては小さなレベルとなり、降伏しにくくなる。このことにより、大変形時にも弾性挙動が期待できる部材を配置でき、本構造は安定した二次剛性を発揮できることになる。

芯材の材料は高強度であるほど降伏しにくく、UBRC 構造にとって有利なものとなり、鋼材に限らず、連続

モデル化された通常の RC 構造の変位-復元力の静的関係



弾性部材 (アンボンド高強度芯材) の変位-復元力関係



提案する UBRC 構造の変位-復元力関係 = RC 構造 + 芯材

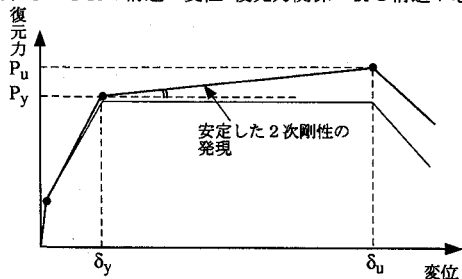


図-2 弾性部材挿入の効果

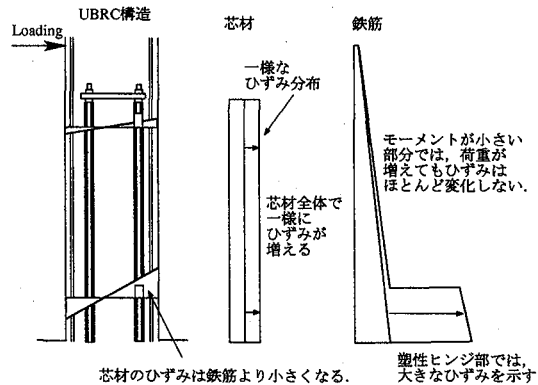


図-3 芯材のアンボンド化の効果

繊維補強材も効果的に用いることができる。ただし現段階では、コストの観点からこれら超高強度材料を採用することが困難となる場合も考えられる。UBRC 構造の特徴で最も重要なことは、大変形領域での二次剛性の確保であるので、多少新たな機構が必要となるが、定着部に間隙を設け、芯材が効き出す範囲をその間隙量によりコントロールできるようにすることで、高強度材料を用いずとも、本構造を実現可能であるようにしている (図-1、図-2)

動的応答の観点から見ると、従来の RC 構造は二次剛性がほぼゼロであるため、地震時における最大応答

変位も大きなものとなる。しかも多くの鉄筋が塑性化しているため、地震後残留塑性変形も大きなものとなってしまう。一方 UBRC 構造は、有意な二次剛性を有し、全体的に線形性を有するため、変形が大きくなると復元力も大きくなり、最大応答変位の低減が期待できる。また芯材は降伏していないため、有効に弾性復元力を発揮でき、残留変形の低減効果も期待できる。ハイブリッド地震応答実験による検討^{8),2)}により、UBRC 構造では、「最大応答変位の低減+弾性部材の確保」の2つの組合せにより、効果的に残留塑性変形を低減することができることを確認している。また、部材の多くが降伏や劣化しているなかで、弾性部材が存在していることは、地震応答を安定化させる役割も期待できる。

UBRC 構造は、基本的には RC 構造としてエネルギー吸収する（主鉄筋の塑性化）ようにし、二次剛性を付与するために弾性挙動をする芯材を配置する、という機能分離型の設計概念を有していると考えてよい。

UBRC 構造は二次剛性を容易に変化させることができるため、兵庫県南部地震以降提唱されている二段階耐震設計法^{9),10)}の考え方を合理的に適用できる。すなわちレベル 1 地震動に対して RC 断面を設計し、それにアンボンド芯材を付加することでレベル 2 地震動に対応しようとする設計法である。これにより二段階耐震設計法のもとで断面積あるいは主鉄筋量を合理的に低減できる構造を実現でき、鉄道ラーメン構造物に対して試設計した結果、主鉄筋を低減したにも関わらず終局変位においては RC 構造よりも大きな耐力を示すことを明らかにし、その効果を確認している¹¹⁾。

3. UBRC 構造の解析モデル

UBRC 構造はアンボンド処理のため芯材が RC 部と独立して挙動するため、従来の平面保持の仮定を用いた手法によりモデル化することができない。そこで UBRC 解析モデルとしては RC 部とアンボンド芯材部に分け、これら 2 つのモデルの組み合わせとして表現することとする（図-4）。RC 部はファイバーモデルとしてモデル化する。アンボンド芯材部は、RC 部の変形に応じて変形し、両端のアンカー部において RC 部と力のやり取りをするため、アンカー部に挟まれた領域における RC 要素と変形の適合条件を一致させるよう芯材の伸びを算出する必要がある。

通常、解析モデルにおいては、アンボンド芯材のアンカー部に挟まれる RC 部は複数の RC ファイバー要素として分割される。ここで図-5を用いて芯材ひずみの算出法を示す。各 RC 要素において、断面中心から芯材配置位置までの距離を y 、そこでのひずみ増分を $\Delta\epsilon_{ub}$ とすると、芯材全体におけるひずみ増分 $\Delta\epsilon_{bar}$ は

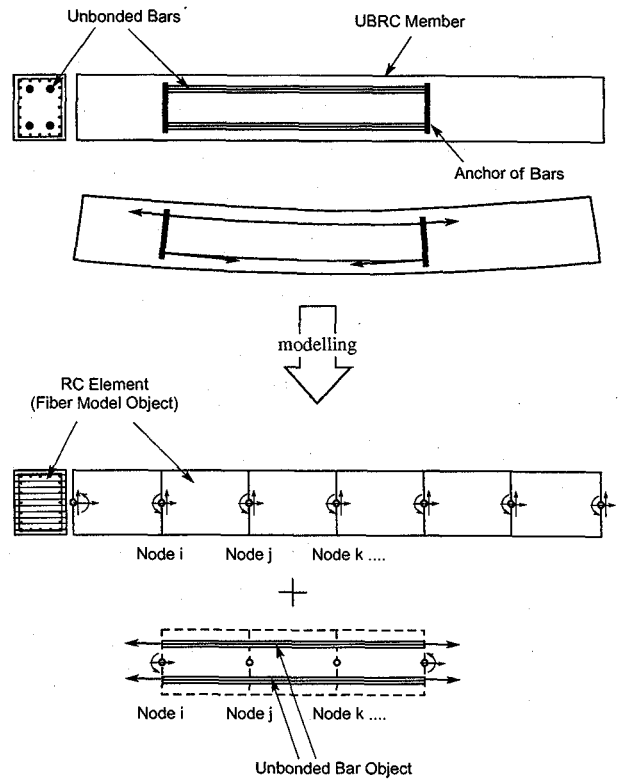


図-4 UBRC 部材解析モデル

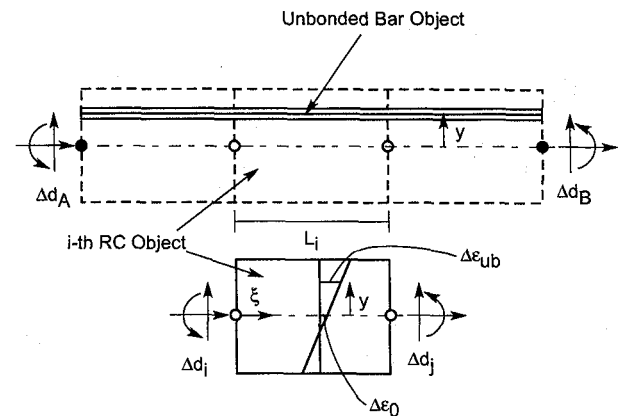


図-5 アンボンド芯材伸びの算出

次式のようになる。

$$\Delta\epsilon_{bar} = \frac{1}{L_{ub}} \sum_i^n \int_0^{L_i} \Delta\epsilon_{ub} dx \quad (1)$$

ここで、 L_i は各 RC 要素長、 L_{ub} は全芯材長、 n は芯材が配置されている RC 要素数である。この RC 要素内のひずみ増分 $\Delta\epsilon_{ub}$ は断面中心におけるひずみ増分 $\Delta\epsilon_0$ および曲率増分 $\Delta\phi$ を用いて得ることができる。

$$\Delta\epsilon_{ub} = \Delta\epsilon_0 + y\Delta\phi = \begin{Bmatrix} 1 & y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_0 \\ \Delta\phi \end{Bmatrix} = Y_i \epsilon \quad (2)$$

また断面中心でのひずみ増分は RC 要素の節点変位増

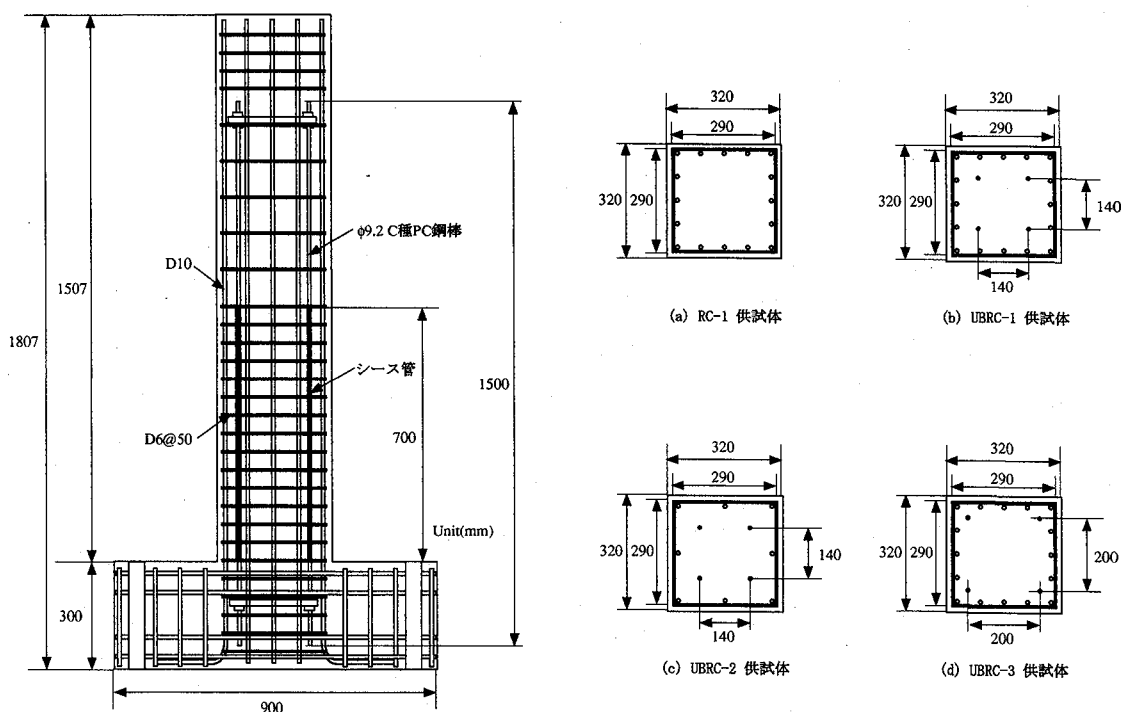


図-6 供試体図

表-1 供試体諸元

供試体名	軸応力度 (MPa)	コンクリート強度 (MPa)	帯筋	芯材	軸方向鉄筋
RC-1	1.46	24.0	D6@50		16×D10
UBRC-1	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 70mm)	16×D10
UBRC-2	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 70mm)	8×D10
UBRC-3	1.46	24.0	D6@50	4×SBPR φ9.2 (中心より 100mm)	16×D10

分より算出される.

$$\epsilon = \mathbf{B}_f \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{d}_i \\ \Delta \mathbf{d}_j \end{Bmatrix} = \mathbf{B}_f \mathbf{d}_i^e \quad (3)$$

ここで

$$\mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \quad (4)$$

これより RC 要素の芯材配置位置での変位増分は次式で得られる.

$$\begin{aligned} \Delta L_i &= \int_0^{L_i} \Delta \epsilon_{ub} d\xi = \int_0^{L_i} \mathbf{Y}_i \mathbf{B}_f \mathbf{d}_i^e d\xi \\ &= \mathbf{Y}_i \left(\int_0^{L_i} \mathbf{B}_f d\xi \right) \mathbf{d}_i^e \end{aligned} \quad (5)$$

ここで

$$\int_0^{L_i} \mathbf{B}_f d\xi = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

であるので, 式(6)を式(5)に代入することにより, 次式を得る.

$$\Delta L_i = \begin{Bmatrix} -1 & 0 & -y & 1 & 0 & y \end{Bmatrix} \mathbf{d}_i^e = \mathbf{Y} \mathbf{d}_i^e \quad (7)$$

よって, 芯材のひずみ増分は次式で算出することができる.

$$\Delta \epsilon_{bar} = \frac{1}{L_{ub}} \mathbf{Y} \sum_i^n \mathbf{d}_i^e \quad (8)$$

式(8)を前ステップにおけるひずみ $\epsilon_{bar,n}$ に加えることで現在のひずみを求めることができ, 芯材の構成則および断面積を用いて芯材が発揮する軸力を算出できる. これを芯材のアンカー部に作用させることによって, 芯材による軸力およびモーメントを表現することができ, アンボンド芯材の影響を考慮することができる.

3.1 実験結果再現解析

本解析モデルを筆者らが開発したオブジェクト指向型構造解析システム¹²⁾に組み込み, UBRC 橋脚模型に対する正負交番載荷実験結果³⁾の再現を試みる. 供試体は RC 断面に芯材 (SBPR φ9.2) を 4 本配置したものである. 供試体の配筋および諸元を図-6, 表-1 に示す. 解析においてはコンクリート断面を 36 分割し, コンクリート, 鉄筋の応力-ひずみ履歴モデルとして, 六車モデル, Menegotto-Pinto モデルを改良した Ristić モデル

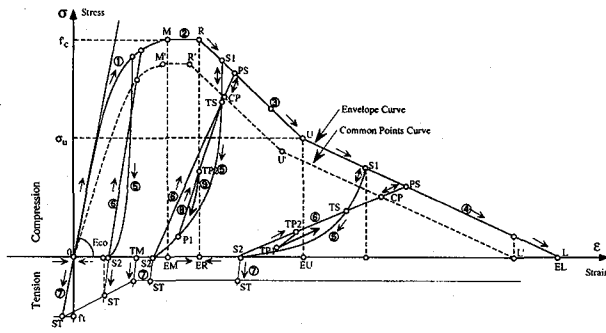


図-7-a コンクリートモデル

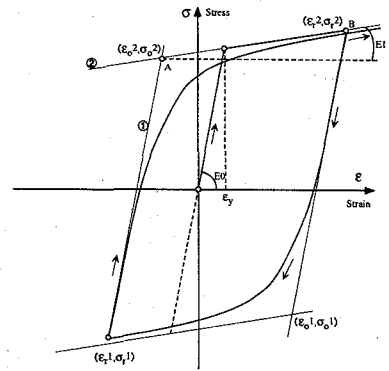


図-7-b 鉄筋モデル

図-7 応力-ひずみモデル

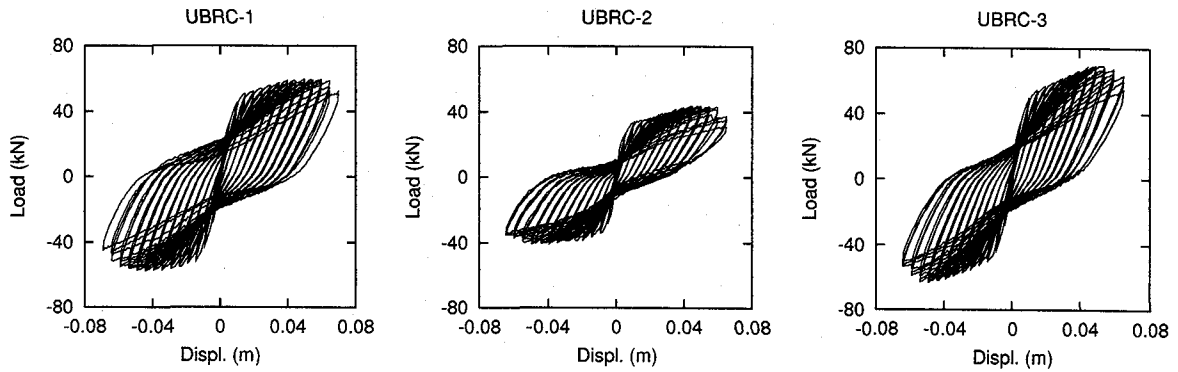


図-8-a Experimental Results

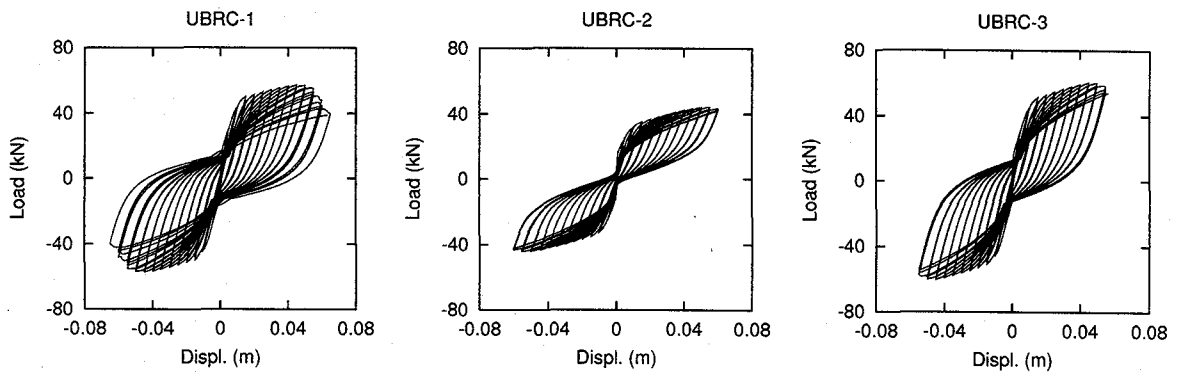


図-8-b Analytical Results

図-8 実験と解析における荷重-変位履歴関係の比較

¹³⁾ (図-7)を用い、材料特性は材料実験値を用いた。これら供試体のうち、UBRC構造に関する荷重-変位履歴関係を図-8に示す。上側が実験結果、下側が解析結果である。これより芯材による二次剛性や履歴形状をよく再現できていることが分かる。

3.2 アンボンド効果

芯材をアンボンドとして配置するのは、本構造の概要のところでも触れたように、大変形領域においても

芯材が弾性的に振る舞うようにひずみを平滑化するためである。ここではアンボンドの効果を確認するため、UBRC-1 供試体において芯材が従来の構造のように完全付着する場合 (RC 構造) としない場合 (UBRC 構造) の解析を行い、芯材ひずみ等について検討する。解析は変位振幅漸増 1.625 cm の正負交番解析を実施した。ここでは芯材は線形材料として設定している。

図-9に、完全付着・アンボンドの場合の荷重-変位関係、変位振幅最大時の芯材ひずみの高さ方向の分布を

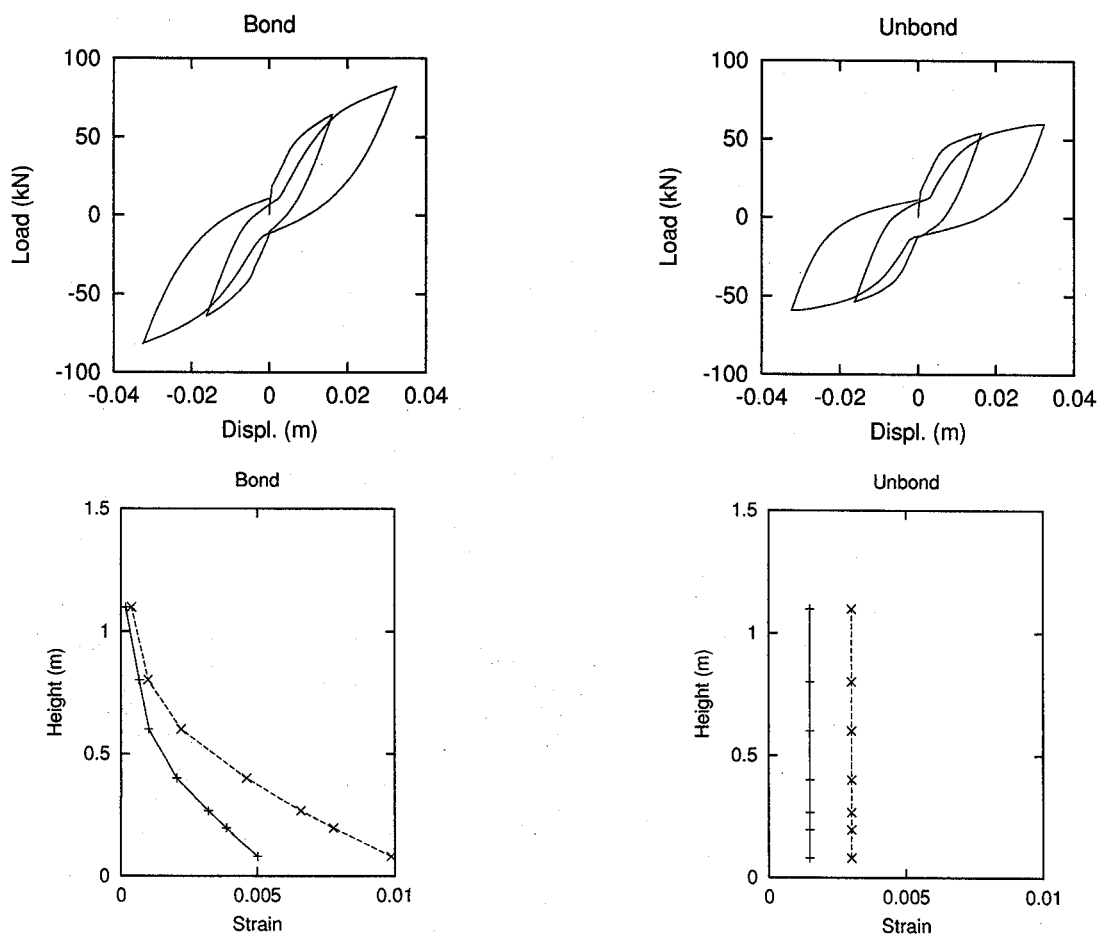


図-9 アンボンドによる効果

示す。これより、完全付着にした場合には芯材を挿入することにより大きな耐力を発揮しているものの、芯材には大きなひずみが生じ、この領域まで線形性を発揮すると考えるのは非現実的となる。また当然ながら芯材も基部でのひずみが大きくなり、効率的に芯材を用いているとは言えない。一方アンボンドとして芯材を挿入することにより、芯材のひずみが定着区間内で均一化され、効果的に芯材が作用していることがわかる。

4. UBRC 構造の二次剛性発現メカニズム

UBRC 構造の二次剛性発現メカニズムを明らかにするため、図-6の RC-1 および UBRC-3 に対してプッシュオーバー解析を行い、変位-復元力特性と各変形時における柱部コンクリートの応力状態を図-10、図-11に示す。応力状態図は底辺がフーチング上面、上辺が載荷点であり、各断面において基準線より下が圧縮、上が引張状態を意味している。この図より、変形に伴う中立軸の移動や応力状態の変化を読みとることができる。RC と UBRC 構造の異なる点としては、Sec.5 および 6 が分かりやすいが、RC-1 は変形が大きい領域でも引張応力が作用しているのに対し、UBRC-3 では変形が増

大しても、中立軸がほとんど移動せず、かつ引張応力が小さくなっていくことである。本解析で用いているコンクリートの応力-ひずみモデル（図-7）によると、引張強度に相当するひずみを越えない限り、必ず引張応力が発生する。引張応力が減少していくファイバーの解析結果を見ると、引張限界ひずみを越えるひずみは発生していない。つまり、引張応力が減少する現象は、変形が大きくなるに伴って RC 内に配置されている芯材が引張られ、より大きな復元力が発生し、この芯材による内力が、RC 構造に対して付加的な軸力のように振舞うことによるものと解釈できる。

これより UBRC 構造の二次剛性発現メカニズムは次のようにまとめられる。芯材は部材断面から偏心して配置しているため、変形とともに芯材が伸び、外力に対して漸増抵抗モーメントとして作用する。これに加え、RC 構造は軸圧縮応力が大きいほど帯筋の拘束効果により大きな耐力を発揮するため、芯材による内力が大きくなる（つまり部材の変形が大きくなる）に従って、RC 部材耐力も大きくなる。これらの和を荷重-変位関係として表してみると二次剛性に見える。つまり図-2に示している弾性部材の変位-復元力関係は実際には弾性部材そのものの特性だけではなく、弾性部材

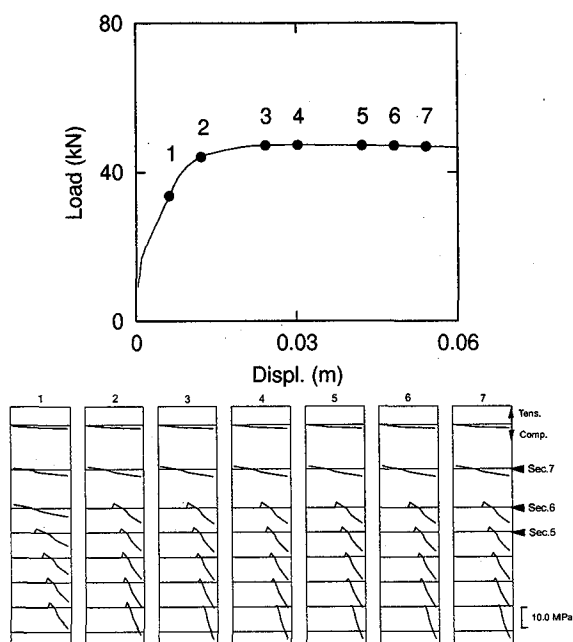


図-10 RC-1 のコンクリート応力状態の推移

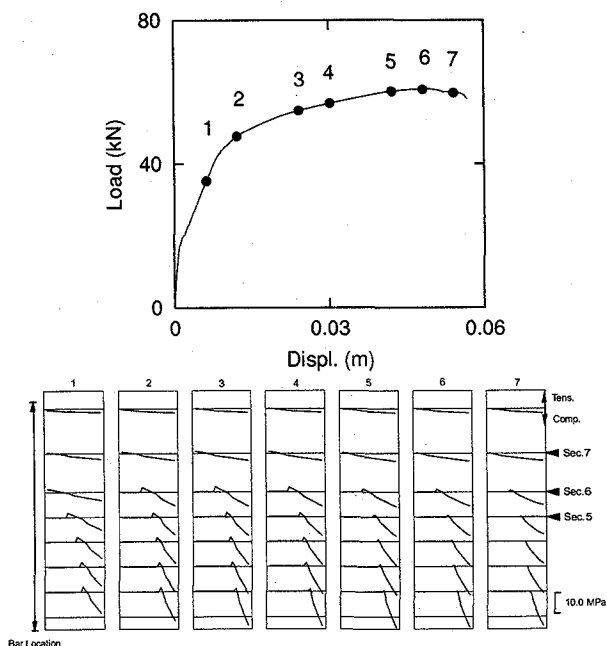


図-11 UBRC-3 のコンクリート応力状態の推移

の漸増内力により RC 構造部の耐力が増加する関係をも示している。これが UBRC 構造の二次剛性発現メカニズムである。

5. 芯材パラメータの影響

UBRC 構造は芯材の配置によってその特性を変化させる。ここでは芯材の断面瀬、断面内配置位置、長さおよび間隙付定着部の間隙量を芯材パラメータとして抽出し、これらが UBRC 構造特性に及ぼす影響につい

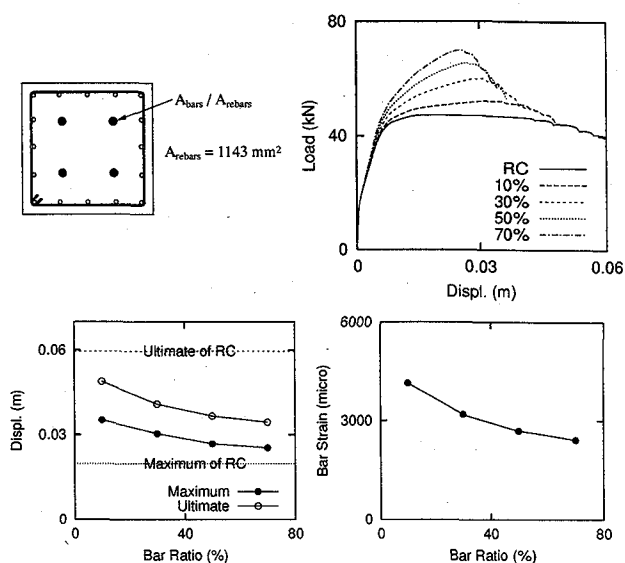


図-12 芯材断面積比の影響

て検討する。ここでは図-6 の RC-1 を基本構造とする。本検討では、荷重-変位関係、最大耐力時の変位、コアコンクリートの応力が 0 となった時（終局状態）の変位および芯材に発生するひずみに着目する。

5.1 芯材断面積比の影響

断面内の主鉄筋断面積に対する芯材断面積の比を芯材断面積比と定義する。図-12 に芯材断面積比を 10 %、30 %、50 %、70 % の 4 ケースについて解析した結果を示す。

骨格曲線を見ると、二次剛性は芯材断面積比が増加するに従って大きくなるのが分かる。また芯材断面積比が大きくなるにつれて、最大変位、終局変位および芯材ひずみは減少していく。また芯材断面積比が大きいほど、最大点以降の部材耐力の減少は急激なものとなっている。それ故 UBRC 構造については、終局点を降伏耐力相当まで耐力が減少した点ではなく、最大耐力の 8 割まで減少した点とし、実際設計に用いる際には最大耐力点までを許容変形として扱うことが望ましいと考えられる。

芯材断面積比を大きくすれば、芯材ひずみは小さくなるため降伏しにくくなり、かつ二次剛性を大きくすることができるので、変位の制約が小さい場合には効果的に二次剛性を増加させることができる。

5.2 断面内配置位置の影響

図-13 に芯材を断面中心より 40, 80, 120 mm に配置した 3 ケースについて解析した結果を示す。

骨格曲線より、芯材を中心から離すほど大きな二次剛性を得ることが分かる。また芯材断面積比の時に比べ、最大点以降の耐力劣化は小さくなく、最大、終局変位も芯材配置位置にほとんど影響を受けていない。つ

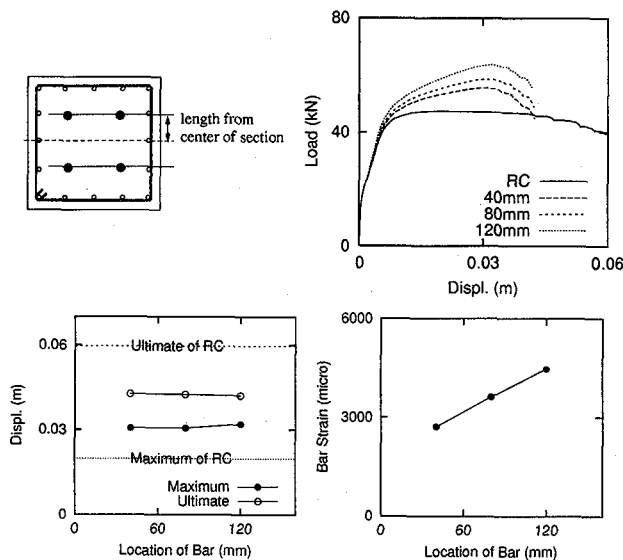


図-13 断面内配置位置の影響

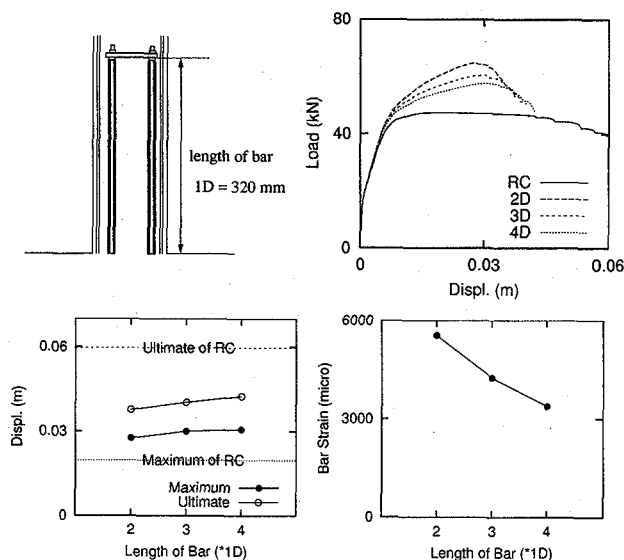


図-14 Influence of Length of Bars

まり本方法では最大、終局変位を大きく変化させることなく二次剛性を大きくすることができる。ただし外側に配置すると芯材ひずみは大きくなるので、大変形時にも弾性応答するよう注意する必要がある。

5.3 芯材長さの影響

図-14に芯材長さを2D, 3Dおよび4D（ここでDは塑性ヒンジ長）として配置した3ケースについて解析した結果を示す。これより芯材長さを短くするほど二次剛性が大きくなるが、終局変位はやや減少し、芯材ひずみも増加していくことが分かる。

芯材による軸力作用を検証するため、芯材長さが2Dと4Dの場合の柱コンクリートの応力分布を図-15に示す。図の左側には芯材配置位置を示している。4Dの場合には、芯材による軸力の影響が柱全長に渡って確認

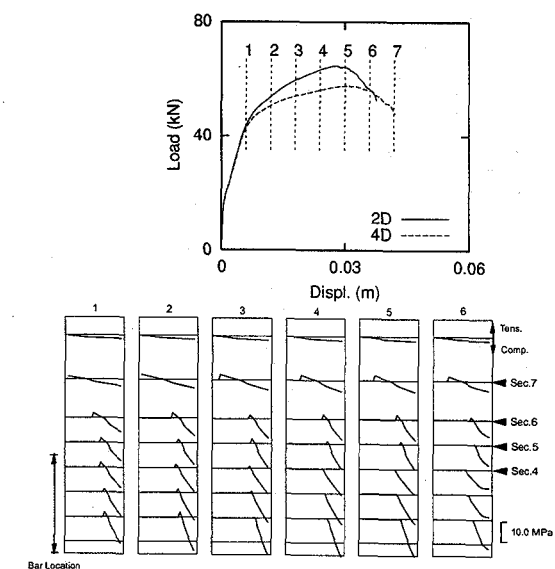


図-15-a 長さ: 2D

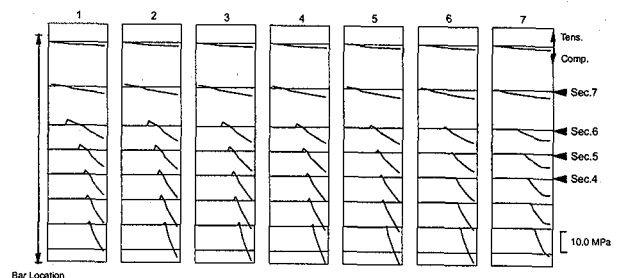


図-15-b 長さ: 4D

図-15 コンクリート応力状態の推移

することができる。一方2Dの場合には、芯材配置外の断面6,7において大変位領域においても中立軸は移動している。ただし断面5も芯材配置外であるものの、中立軸はほとんど移動せず、芯材による付加モーメントにより引張応力は小さくなっている。このようにアンカー部付近には大きなモーメントが作用することから、柱部での損傷を防ぐため充分なせん断補強を施す必要がある。

5.4 定着部間隙量の影響

図-1に示す下部定着部の間隙量を変化させ、その影響を検討する。ここで間隙部は引張側に設け、圧縮方向には芯材はすぐに効くようにしている。解析ではこの間隙量を芯材の非線形材料特性として考慮することとし、その特性を図-16に示す。間隙量を4ケース変化させた解析結果を図-17に示す。

骨格曲線より、間隙量に関わらず二次剛性は同じであることが分かる。二次剛性が発現する変形量だけが変化している。その結果、最大および終局変位は間隙

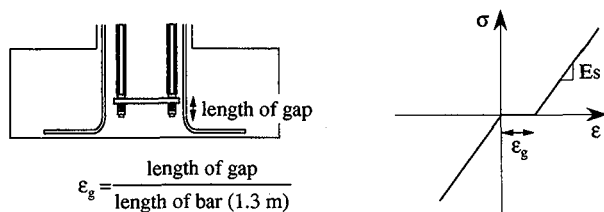


図-16 間隙量を模擬した芯材の材料特性

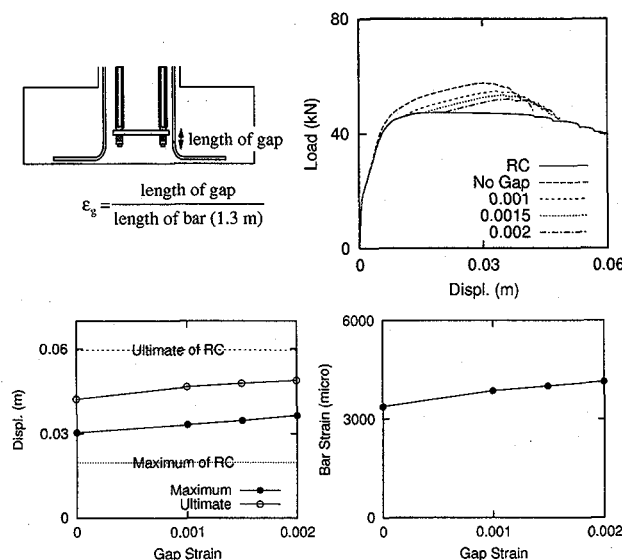


図-17 間隙量の影響

量の増加に伴い大きくなる。ただし本検討では橋脚の終局状態は曲げ変形によるコンクリートの圧壊と定義しているので、最大耐力は小さくなっている。

5.5 パラメータ解析のまとめ

芯材パラメータが UBRC 構造特性に及ぼす影響についてまとめると表-2 のようになる。これより芯材パラメータはそれぞれ異なる性質をもつので、これらを組み合わせることにより、様々な骨格曲線を実現できることが分かる。

以上を踏まえ、UBRC 構造の設計について考える。まず一つの試設計された UBRC 構造を考える。その終局耐力が必要とされる性能よりも小さい場合には、芯材面積比を増加させるのが効果的である。芯材を断面の外側へと配置する方法と併用すると、終局変位の減少を最低限にしながら耐力を増加することができる。もし耐力は満足しているが終局変位が小さい場合には、間隙付定着を用いるとともに芯材断面面積比を多少増加させると、耐力はそのままに終局変位を増加させることができる。もしより大きな二次剛性が必要だが芯材の降伏が問題となるならば、芯材を断面外側に配置する代わりに芯材面積比を増加させるのが効果的となる。

本パラメータ解析では、RC 部の断面積は変化させて

表-2 芯材パラメータの影響

手法	二次剛性	終局変位	芯材ひずみ
芯材断面面積比の増加		減少	減少
断面外側への配置	増加	一定	増加
断面長の短縮		減少	
間隙量の増加	一定	増加	

いない。もし RC 部の特性も変化させるならば、さらに様々な性能をもつ UBRC 構造が実現でき、理想とされる骨格曲線をもつ構造を設計することができる。

6. まとめ

- RC 構造の二次剛性を容易に変化させることのできる UBRC 構造について、その解析モデルを開発した。本モデルを用いて正負交番載荷実験結果を再現し、アンボンド芯材による二次剛性や履歴面積などを精度良く表現できることを明らかにした。
- UBRC 構造の二次剛性発現メカニズムは 2 つの現象の和で表現できる。一つは芯材は部材断面から偏心して配置しているため、変形とともに芯材が伸び、外力に対して漸増抵抗モーメントとして作用することによるものである。これに加え、芯材の漸増内力が RC 構造部の耐力を増加させ、変形とともに大きな耐力を示すようになる。この和が UBRC 構造の二次剛性となる。
- UBRC 構造特性を変化させる芯材パラメータとして、芯材の断面積、断面内配置位置、長さおよび間隙付定着部の間隙量を抽出し、これらが及ぼす影響について検討した。パラメータ解析の結果、これらのパラメータは二次剛性、最大変位そして芯材発生ひずみに対してことなる性質を有し、これらを変化させることにより、様々な骨格曲線を有する構造を実現できることを明らかとした。

参考文献

- 1) 土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(編): 阪神・淡路大震災調査報告土木構造物の応急復旧、補修、補強、丸善、1999。
- 2) 家村浩和、高橋良和、曾我部直樹: アンボンド芯材を活用した高耐震性能 RC 構造の開発、土木学会論文集, Vol. I-60, No. 710, pp. 283-296, 7 2002。
- 3) 家村浩和、高橋良和、曾我部直樹、鵜飼正裕: アンボンド高強度芯材による高耐震性能 RC 橋脚の開発、第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシ

ンポジウム論文集, pp. 157-162, 3 2000. 東京.

- 4) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹, 鶴飼正裕: アンボンド高強度芯材による高耐震性能 RC 高橋脚の開発, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1455-1460, 2002.
- 5) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹, 鶴飼正裕: UBRC 構造を用いた小規模断面橋脚の二段階耐震性能評価, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1465-1470, 2002.
- 6) 高橋良和: *Development of High Seismic Performance RC Piers with Object-Oriented Structural Analysis*, 博士論文, 京都大学, 2002.
- 7) 日本道路協会 (編): 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 1996.
- 8) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹: ハイブリッド地震応答実験による高耐震化芯材を用いた RC 橋脚の性能評価, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 2, pp. 929-932, 8 2001.
- 9) 土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する提言, 土木学会誌, Vol. 80, No. 7, 1995.
- 10) 土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 土木学会誌, Vol. 81, No. 2, 1996.
- 11) 家村浩和, 高橋良和, 岩田秀治, 曾我部直樹: UBRC 部材を用いた鉄道ラーメン高架橋の合理的耐震設計, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 2, pp. 921-924, 8 2001.
- 12) 高橋良和, 五十嵐晃, 家村浩和: オブジェクト指向構造解析システムの分析と設計, 土木学会論文集, Vol. I-57, No. 689, pp. 301-320, 10 2001.
- 13) Ristić, D., Yamada, Y. and Iemura, H.: Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, Technical report, Kyoto University, 1986. KUCE, No.86-ST-01.

(2002年9月13日受付)