

# デボンド異形鉄筋を用いた間柱型 RC 造制振ダンパーの研究

# EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCED CONCRETE STUD COLUMN DAMPERS USING DE-BONDED DEFORMED BARS

二宮誠司 — \*1 島崎和司 — \*2

Seiji NINOMIYA — \*1 Kazushi SHIMAZAKI — \*2

キーワード：  
 鉄筋コンクリート構造、デボンド、X型配筋間柱、耐震設計

Recent years, the demands of building owners have been changed to be able to use the buildings again with small repair cost after an earthquake. The building system with dampers is one structural type which meets these performance requirements. The dampers need good performance and applicability. The RC stud column damper using diagonal de-bonded rebars is one solution. This experimental study shows basic data of the RC stud column damper for design.

Keywords:  
 Reinforced concrete structure, De-bond, Diagonally reinforced stud, Earthquake resistance design

## 1. はじめに

近年、制振設計や制振補強に関する研究が進められ、種々の制振デバイスが開発されている。さらには、構造物の多様化に伴い、既存建物への適用性や廉価性などを要望するオーナーが増えている。この背景から、エネルギー吸収能力に優れ、リユース性のある修復性の良好な制振ダンパーの必要性が求められる。制振ダンパーの種類も多様であり、代表的なものとして履歴型ダンパーや粘弾性ダンパー、摩擦ダンパーなどが挙げられる。履歴型ダンパーの一つとして、鋼材などの弾塑性材の軸方向伸縮変形に伴って振動エネルギーを消費する軸降伏型履歴ダンパーが存在する。軸降伏型履歴ダンパーはエネルギー吸収材となる芯材としてダンパー用の鋼材が使用されることが多いが、圧縮変形時に起こりうる座屈等への対処が求められる<sup>2)</sup>。

著者等はアンボンドX型配筋 RC 梁の開発<sup>3)</sup>において、デボンドした異形鉄筋が圧縮時においても降伏してエネルギー吸収を行う可能性を示した。

本報はこの成果を基に、RC 部材を用いることで全体座屈や軸回りの振れを抑制し、さらに圧縮降伏を積極的に促すことによって変形の偏りをなくし、安定したエネルギー吸収能力を保持できる補修性の良い RC 間柱型ダンパーの開発を目的とした実験的研究である。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図1に間柱型ダンパー試験体の形状寸法と詳細を示す。試験体は実寸大とし、柱断面 200mm×400mm、内法高さ 800mm の2体である。コンクリート設計基準強度は 36N/mm<sup>2</sup> とし、間柱部分の上下端

部に、水平変形時の幾何学的な軸伸びを吸収するために、断面積と同面積で厚さ 10mm のゴムを入れた。ゴムは緩衝用に使われる汎用の天然ゴム板を使用した。梁と異なり、間柱には長期のモーメントが作用しないため、スタブと間柱部分をつなぐコンクリートがなくとも部材として成り立つ。これにより加力時に間柱部分のコンクリ

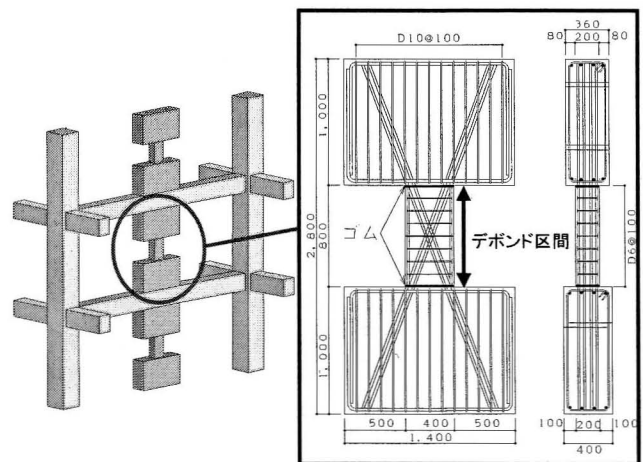


図1 間柱型ダンパー試験体

表1 材料の機械的性質

	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )	40	2.83 × 10 <sup>4</sup>
モルタル強度(N/mm <sup>2</sup> )	35	—
鉄筋	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )
D6(SD345)	359	519
D10(SD345)	392	593
D19(SD345)	393	574

<sup>1)</sup> 神奈川大学工学研究科建築学専攻 大学院生  
 (〒221-8686 横浜市中区神奈川区六角橋 3-27-1)

<sup>2)</sup> 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Kanagawa Univ.

<sup>2)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Kanagawa Univ., Dr. Eng.

ートへの圧縮力の伝達を防ぎ、鉄筋の圧縮降伏によるエネルギー吸収を図る。X型筋として用いた異形鉄筋 D19 のデボン処理は、節間をワックスで埋めて周りをブチルゴム系のテープで巻く方法で行った。使用材料の機械的性質を表 1 に示す。

## 2.2 補修方法

補修して再利用する可能性の検証のために、実験の終了した試験体に対して補修を行った。補修は、コンクリート充填補修用軽量エポキシ樹脂モルタルを使用した。下地処理として、試験体表面の破損箇所を脆弱部をはつり取り清掃した後、モルタルを混合し、間柱部分の補修の必要な箇所に充填した。写真 1 に補修前と補修後の比較を示す。補修に要する手間は軽微なものであった。充填から一ヶ月経過させた後、補修前の荷重によって生じた間柱部分とスタブ間にある上下のゴム部分の隙間に、シリコン系弾性シーリング材を注入した。実用性を考慮し、弾力性や耐久性に優れ、硬化の早いものを使用した。この作業によって、隙間への異物の進入を防ぎ、試験体とスタブ間の弾性を確保する。

## 2.3 荷重方法

加力は図 2 に示す加力装置を用い、試験体に逆対称モーメントを与え、正負交番繰返し荷重を行った。軸力用反力フレームに取り付けた 2 台の副アクチュエーターにより、軸方向変位の制御をした。No.1 は、試験体の軸方向の伸びを抑える制御を行い、No.2 は、試験体の軸方向の伸びを自由にして左右の変位差を 0 に保つ変位制御を行った。これは実際の構造物へのダンパー使用を想定するにあたり、上下階の梁等による軸伸びの拘束が無い場合と完全な場合の両極端な場合を想定したもので、実際の挙動はこの中間になると考えた。

加力サイクルは、変形角を増加させながら試験体部分の部材角で  $R=1/700$  から  $R=1/40$  サイクルまで、3 回ずつ正負交互に繰返し荷重し、 $R=1/20$  は片側のみ 1 回行った。 $R=1/100$  のサイクルのみ 6 回の繰返しを行った。実構造物における階高を 3000mm と想定し、間柱部分のせいが 800mm で、実際の構造物においてもスタブ部分は変形しないと考えると、試験体部分の部材角  $R=1/100$  は層間変形角で約  $R=1/400$  に相当する。

## 3. 実験結果

### 3.1 実験経過

写真 2 にひび割れ状況を示す。両試験体ともに  $R=1/200$  サイクルまでは、コンクリートとゴム間に隙間が開くのみでひび割れの発生は見られなかった。No.1 試験体は  $R=1/100$  サイクルで端部に微細な亀裂が入り、 $R=1/67$  サイクルで上側端部の表面が剥落した。 $R=1/40$  サイクルで下側端部も剥落したが、せん断ひび割れは発生しなかった。 $R=1/20$  の大変形時に引張側のコンクリートとゴム間の最大の隙間が約 8mm に達し、圧縮側対角を結ぶせん断ひび割れが生じた。No.2 試験体は  $R=1/67$  サイクルまで、端部のコンクリートとゴム間の隙間が最大約 4.5mm 開くのみで、表面のひび割れや剥落は発生しなかった。 $R=1/40$  サイクルでコンクリート表面の一部が剥落した。その後  $R=1/20$  の大変形時に引張側のコンクリートとゴムの最大の隙間が約 17mm に達したが、せん断ひび割れは発生しなかった。

### 3.2 水平力-水平変位関係

図 3 に水平力-水平変位関係を示す。図中には、X 型筋をトラスとみなした時の降伏耐力と降伏変形から求める復元力に、試験体端

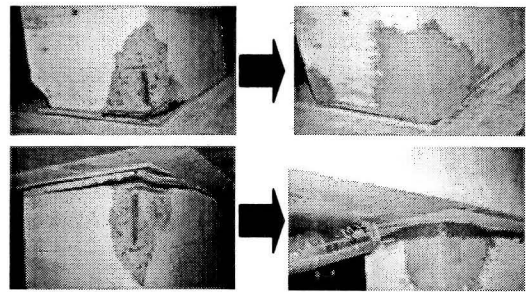


写真1 補修前・補修後の比較

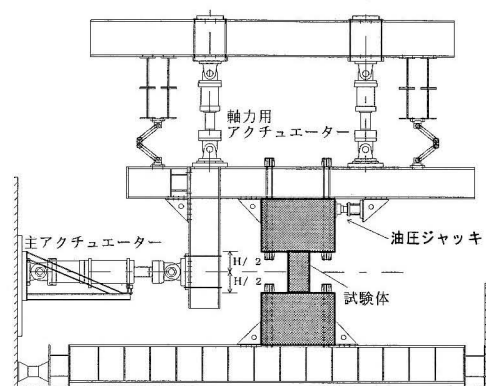
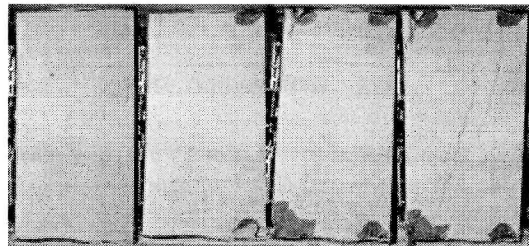


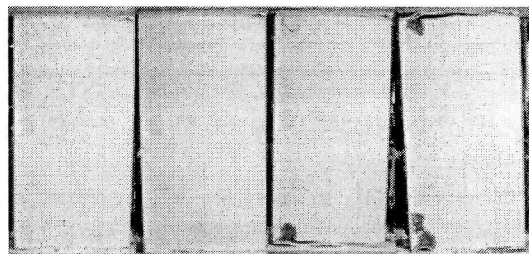
図2 加力装置

No.1試験体(軸伸び拘束)



$R=1/100$   $R=1/67$   $R=1/40$   $R=1/20$

No.2試験体(軸伸び自由)



$R=1/100$   $R=1/67$   $R=1/40$   $R=1/20$

写真2 ひび割れ状況

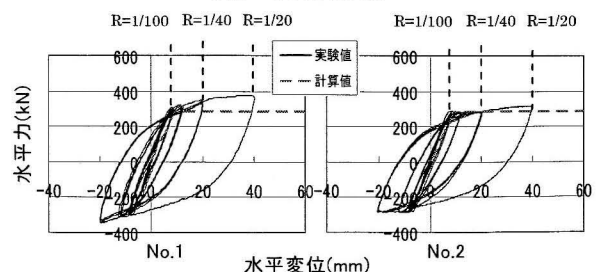


図3 水平力-水平変位関係

**算定式**

$$\Delta S_{y,b} = \left( 0.696 \frac{u_b}{\sigma_B^{2/3}} + 0.463 \right) \cdot \frac{\varepsilon_y \cdot D_c}{2} \quad u_b = \frac{1 + \gamma \sigma_y \cdot d_b}{4 D_c}$$

$\Delta S_{y,b}$  : 主筋降伏時の接合部からの抜け出し量  
 $u_b$  : 最大付着応力度  
 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon_y$  : 主筋の降伏ひずみ  
 $D_c$  : 全せい  
 $\gamma$  : 断面の複筋比で1以下  
 $\sigma_y$  : 主筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $d_b$  : 主筋径

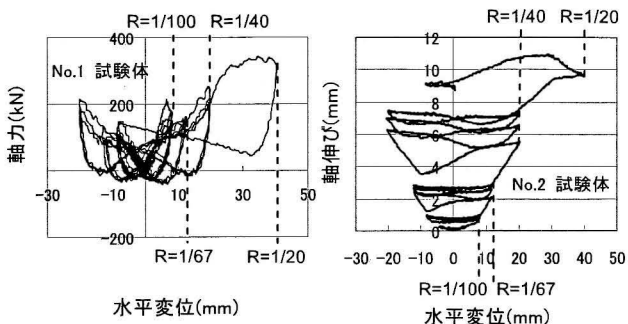


図4 軸力-水平変位関係

図5 軸伸び-水平変位関係

部鉄筋の抜け出し量の算定式<sup>4)</sup>を考慮した計算値を併せて示した。No.1試験体の実験値の耐力は計算値よりも高い値を示し、No.2試験体ではほぼ一致した。両試験体に現れた最大耐力の差は約60kNであり、これは軸伸びに対する制御方法に関係すると考えられる。さらに、ある程度まで部材角が大きくなると、端部のゴムが伸びを吸収しきれなくなり、コンクリートに圧縮力が伝わって端部に剥落が生じたと考えられる。しかし損傷は軽微なものであったため、載荷終了まで両試験体とも耐力低下は起きず、損傷による影響は見られなかった。

### 3.3 軸力、軸伸び-水平変位関係

図4にNo.1試験体の軸力-水平変位関係を、図5にNo.2試験体の軸伸び-水平変位関係を示す。また図6にNo.1試験体の、図7にNo.2試験体のX型筋の歪分布を示す。

No.1では全てのX型筋が降伏したR=1/100(変位8mm)の時点で軸力が増大し、R=1/20の大変形時には約340kNの軸力がかかっている。No.2では、各部材角の最初のサイクルで軸伸びが増加し、繰り返し時には伸びが少ない。各サイクルの最大水平変位時に、鉄筋の最大歪が増大し、繰り返し時にはその歪での繰り返しとなっている。特に、鉄筋の降伏以降の軸伸びが目立つ。最大変形時(R=1/20)での軸伸びは約10mmとなった。

図8にNo.2試験体の各最終サイクル終了時(変形角R=0)の残留軸伸び量の変化を棒グラフで示す。X型筋が降伏するR=1/100からの軸伸びが目立つ。また、同図中にはNo.1の各サイクルの最大軸力を右座標軸で折れ線グラフで示した。鉄筋が降伏するR=1/100まで増大しているが、R=1/67では多少低下し、ゴムの隙間の無くなったR=1/20でまた増大している。梁を剛としてみなせばこの軸力がせん断力として、梁を柔とみなせば軸伸びに対応する強制変形を受ける事になる。

### 3.4 等価粘性減衰定数

図9に等価粘性減衰定数の比較を示す。両試験体とも高い減衰性能を保持し、良好なエネルギー吸収能力を示した。R=1/100の繰り返し

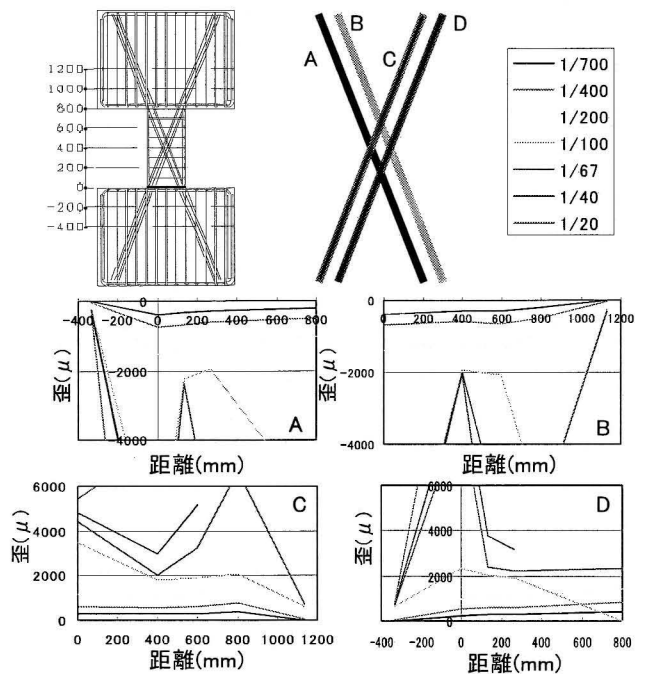


図6 No.1試験体のX型筋の歪分布

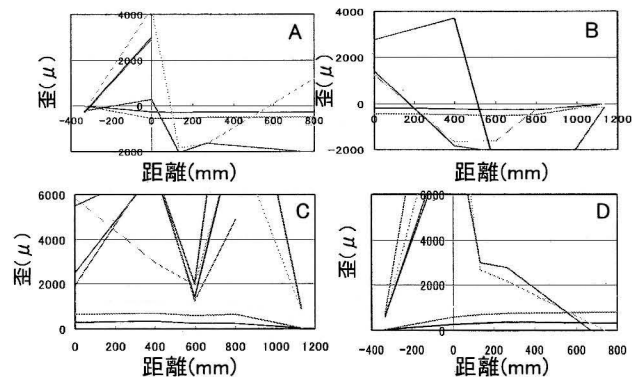


図7 No.2試験体のX型筋の歪分布

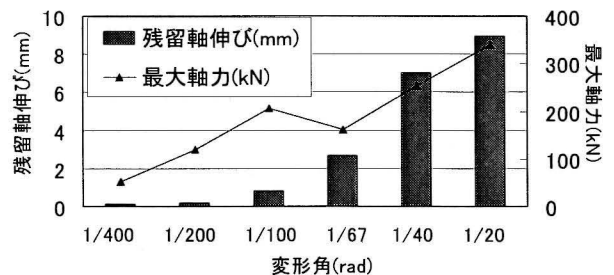


図8 残留軸伸び量と最大軸力

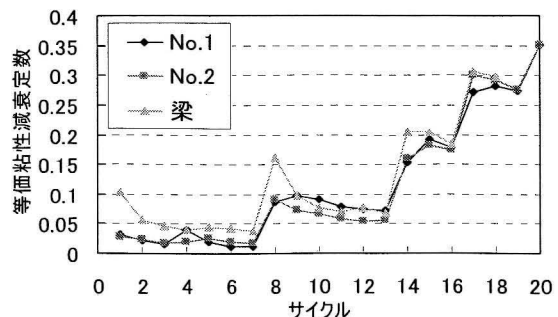


図9 等価粘性減衰定数の比較

返し時においては No.1 のほうがエネルギー吸収能力が高く、軸拘束力の影響が表れていると考えられる。層間変形角で  $R=1/150$  に相当する部材角  $R=1/40$  では、25%以上となり、制振部材として十分な能力があるといえる。

#### 4. 補修後実験

軸方向変形を拘束しなかった No.2 試験体について、補修後、同一の条件で実験を実施した。加力サイクルは、変形角を増加させながら試験体部分の部材角  $R=1/400$  から  $R=1/40$  のサイクルまで、1 回ずつ正負交互に繰返し加力を行った。

##### 4.1 ひび割れ状況

補修前の試験同様  $R=1/67$  時までは端部に隙間ができるだけで、ひび割れやコンクリートの剥落は全く見られなかった。写真 3 に  $R=1/40$  加力を終えた試験体の最終状況を示す。上部の補修モルタル付近とコンクリート部分に軽微な剥落が生じた。これは部材角が大きくなり、間柱部分コンクリートに圧縮力が伝わったためと考えられる。しかし損傷は軽微なもので、耐力への影響はなかった。

##### 4.2 水平力-水平変位関係

図 10 に水平力-水平変位関係を補修前の結果と併せて示す。補修前は、端部のゴムが圧縮側でコンクリートに効いていたと考えられ、計算値よりも高い剛性を示したが、補修後は剛性が計算値より若干低い。 $R=1/40$  時まで耐力の低下は起きず、安定した紡錘形の履歴曲線を示している。

##### 4.3 軸伸び量の比較

図 11 に補修前の残留軸伸び量と、補修後の各サイクルの最大軸伸び量の比較を示す。補修前の実験では  $R=1/20$  まで載荷を行い、加力を終えた後、約 9mm の軸伸びが残留した。補修後はこの値を初期値として、 $R=1/40$  時の軸伸びの最大値が約 1.3mm となり、軸伸び量は低減した。これは、残留軸伸びによって生じた隙間が、補修後の実験での軸伸びを吸収したためと考えられる。

##### 4.4 等価粘性減衰定数の比較

図 12 に等価粘性減衰定数の比較を示す。 $R=1/100$  時まで、補修前の試験体と同等の減衰性能を保持している。 $R=1/67$  以降は若干の低下が見られるが、層間変形角で  $1/100$  に相当する  $R=1/40$  時でも 25% 以上を維持し、補修を施した試験体でも、制振部材としての性能を十分に発揮しているといえる。

#### 5. 結論

間柱型制振ダンパーの軸伸びや補修性能に着目した静的加力実験により以下の結論を得た。

1. デボンド異形鉄筋の安定した引張・圧縮降伏によりエネルギー吸収能力が高く、制振部材として優れた性能を発揮する。
2. スタブと間柱部分のコンクリートを切り離すことで、軸伸びや軸力の吸収が可能となり、部材の損傷低減化につながる。
3. 補修性が非常に良好であり、補修後も補修前と変わらない性能を維持することができる。

本研究により、デボンド異形鉄筋を用いた間柱型 RC 造制振ダンパーの実現の可能性を示した。実用化のためには、梁に作用するせん断力や、端部の隙間と剛性の関係を考慮することが必要である。今後は解析的に評価を行い、検討を進める予定である。

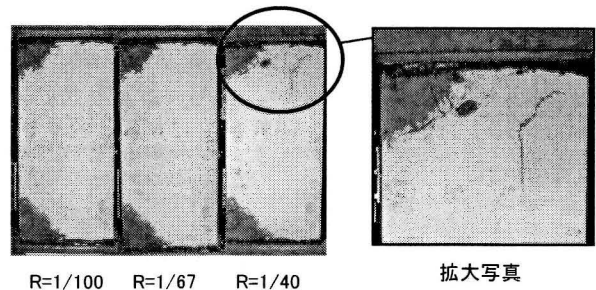


写真3 R=1/40加力後の最終状況

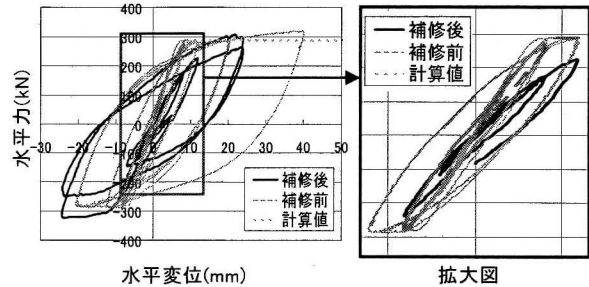


図10 水平力-水平変位関係

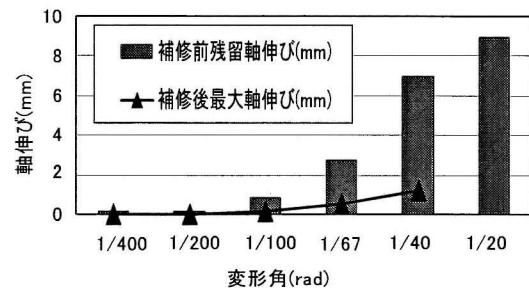


図11 軸伸び量の比較

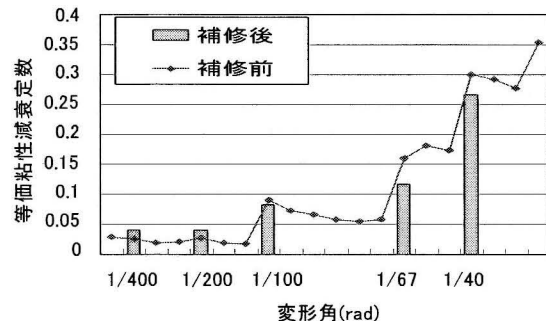


図12 等価粘性減衰定数の比較

#### 謝辞

実験の計画・実施において、神奈川大学・教務技術主任五十嵐泉氏の協力を得ました。

#### 参考文献

- 1) 応答制御構造設計法 付：免震・制振(震)建築の設計例/装置・部材データ集、日本建築構造技術者協会 編 2000
- 2) 岩田衛、村瀬亮、和泉田洋次、村井正敏：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 その3 芯材の座屈挙動、日本建築学会構造系論文集、No.611、pp.133~139、2007.1、他
- 3) 島崎和司：低損傷アンボンド X 型配筋 RC 梁の開発、日本建築学会構造系論文集、No.610、pp.139~144、2006.12
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説、日本建築学会、2004

[2008年10月20日原稿受理 2008年12月25日採用決定]