

論文 主筋がシングルに配筋された PVA 繊維補強薄肉断面鉄筋コンクリート梁部材のせん断性状に関する実験的研究

磯 雅人^{*1}・郷 雅紀^{*2}・西川 恭平^{*3}・徳橋 一樹^{*4}

要旨：本論文は、住宅用布基礎の損傷の制御と防止、構造性能の向上、高耐久化を目的にコンクリートの代替としてポリビニルアルコール繊維補強コンクリート（以下、PVA-FRC）を使用した薄肉断面梁部材のせん断実験および PVA-FRC のひび割れ開閉挙動を把握するための一軸引張試験の結果について報告する。さらに、PVA-FRC 薄肉断面梁部材のせん断終局耐力について詳細に分析・検討がなされ、定量的に評価される。実験の結果、PVA 繊維の混入量の増加とともにせん断終局耐力は向上し、ひび割れ幅を抑制する傾向が認められた。また、トラス機構の作用有効幅を導入した修正 A 法式を提案し、本提案式で実験値を概ね評価できることを示した。

キーワード：PVA 繊維補強コンクリート、シングル配筋、せん断終局耐力、ひび割れ

1. はじめに

過去の地震被害では、住宅の布基礎が損傷して上部構造物が傾斜、ずれるなど甚大な被害を生じさせた事例は多数存在する。一方、地下構造物に被害が生じた場合には、修復が困難となるばかりでなく、修復が可能な場合でも高額な修復費用がかかる。そのため地震に対する住宅用の布基礎の損傷制御・防止技術の開発は重要な課題である。さらに、近年では、性能設計の導入や環境問題の観点から、凍害、塩害等を受ける厳しい環境下においてもひび割れや損傷を制御・防止し、さらには、ひび割れを起因とする鉄筋の腐食やコンクリートの剥落を抑制するといった高い耐久性能を保有することも必要である。一方で住宅用の布基礎は、主筋がシングルに配筋されることが多く補強筋も閉鎖型とならない。そのため従来の閉鎖型配筋の性状に比べて、構造性能が低下し、梁上面で割裂破壊するなど、従来の RC 梁の破壊とは異なる性状を示す報告¹⁾があり、その構造性能は不明である。そこで本研究では、住宅用布基礎の損傷制御・防止、高耐久化、構造性能向上を目的として、コンクリート代替として PVA-FRC を使用する。筆者らは、PVA-FRC を使用した閉

鎖型補強筋を使用した通常断面の RC 梁部材については継続的に実験を行っており、PVA-FRC のせん断補強効果ならびに、ひび割れ開口の抑制に効果があることをすでに報告²⁾している。しかし、PVA-FRC を使用した薄肉断面梁部材のせん断性状は不明である。そこで、PVA-FRC を用いた薄肉断面梁部材のせん断実験および PVA-FRC のひび割れ開閉挙動を把握するための角柱供試体による一軸引張試験を実施し、そのせん断性状を明らかにする。また、比較のために PVA 繊維を無混入とした RC 梁も同時に作製し比較・検討する。

2. 実験概要

2.1 一軸引張試験の概要

表-1に一軸引張試験供試体一覧、図-1に供試体形状図および計測図、表-2にベースコンクリートの配合表、表-3に使用材料（鉄筋、コンクリート、繊維）の力学的特性を示す。供試体形状は $b \times D \times L = 100 \times 100 \times 400$ (mm) の角柱供試体である。断面の中央には、引張力を導入するための鉄筋 (D16 (SD345)) が埋め込まれている。供試体中央には、ひび割れを誘発するためのノッチを4面のうち対となる2面のみに設けた。また、

*1 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻 講師 博士（工学）（正会員）

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 修士（工学）（正会員）

*3 清水建設（株） 修士（工学）（正会員）

*4 敦賀セメント（株） 品質保証部技術グループ 博士（工学）（正会員）

-1424-

3. 実験結果

3.1 一軸引張試験の結果

(1) 最終破壊状況

写真－１に一軸引張供試体の最終破壊状況を示す。

破壊経過は、最初に中央ノッチ部にひび割れが生じ、次にノッチ位置での主筋が降伏に至る。その後は、荷重の増加とともにノッチ位置でのひび割れが顕著に開くとともに、ノッチと供試体端部の間にもひび割れが生じる。PVA 繊維の混入量を多く入れた $V_f=0.75, 1.00$ (%) の PVA 供試体は、上記の経過をたどるとともに、ひび割れ本数は RC 供試体および $V_f=0.50$ (%) の PVA 供試体に比較してやや多く発生し、ひび割れが分散する傾向が認められた。

(2) PVA-FRC の応力度とひび割れ開口幅

図－３にノッチ部断面の応力度 ($\sigma_{RC,FRC}$)－ひび割れ開口幅 (W_{cr}) 関係を示す。応力度は、式(1)より算出した。

$$\sigma_{RC,FRC} = (P - \sigma_s \cdot A_s) / A_c \quad (1)$$

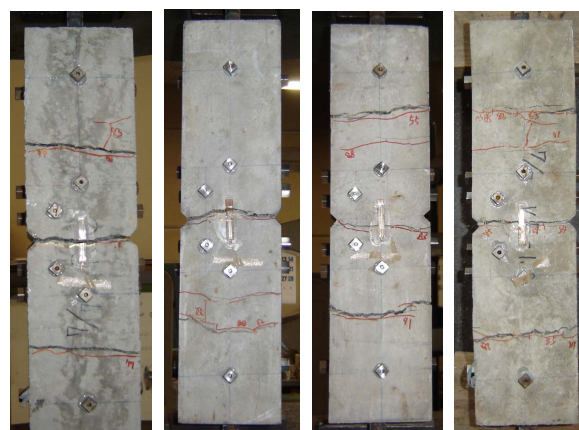
P : 端部鉄筋に生じている引張力

σ_s : ノッチ位置の鉄筋に貼付されたひずみゲージにより算出された鉄筋の応力度

A_s : 鉄筋の公称断面積 (198.6mm^2)

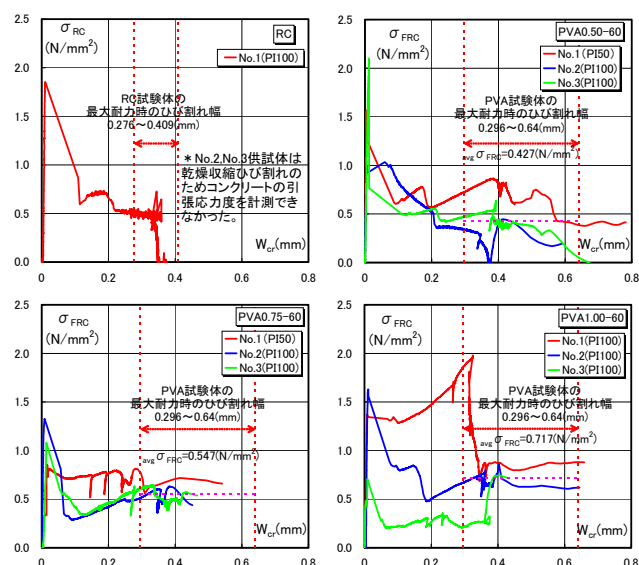
A_c : ノッチ位置でのコンクリート断面積 (8055mm^2)

RC 供試体はノッチ部にひび割れが生じたと同時に応力度を一気に低下させる。その後は、ひび割れ幅の増加とともに応力度を低下させ、ひび割れが完全に貫通すると、コンクリートの負担応力度は 0 になる。一方、PVA 供試体は RC 供試体と同様にノッチ部にひび割れが生じると一旦、応力度を低下させるが、その後は繊維が架橋するために、ひび割れ開口変位の増加とともに応力度が上昇する。しかし、開口幅が 0.4mm 付近を過ぎると徐々に応力度を低下させる性状を示した。また、ひび割れ後の PVA-FRC の応力度は、 V_f の増加とともに高くなる傾向が認められた。繊維量による性状のばらつきは、 $V_f=0.50, 1.00$ (%) の供試体が大いだが、 $V_f=0.75$ (%) の性状が比較的安定した性状を示した。



RC-1 PVA0.50-2 PVA0.75-1 PVA1.00-1

写真－１ 最終破壊状況



図－３ ノッチ部断面の応力度 ($\sigma_{RC, FRC}$)

－ひび割れ開口幅 (W_{cr}) 関係

表－５ 実験結果および計算結果一覧 (せん断実験)

No.	試験体名	実験結果		計算値(実験値/計算値)		
		eQ_{max} (kN)	最終破壊	$AQ_{su}^{(3)}$ (kN)	$cQ_{btu}^{(4)}$ (kN)	MAQ_{su} (kN)
1	RC-0.24-S	107	せん断引張破壊 (上面割裂ひび割れ)	143 (0.75)	152 (0.71)	114 (0.94)
2	RC-0.47-S	144	せん断引張破壊 (上面割裂ひび割れ)	199 (0.72)	167 (0.86)	142 (1.01)
3	PVA0.50-0.24-S	128	せん断引張破壊 (上面割裂ひび割れ)	143 (0.90)	152 (0.84)	130 (0.99)
4	PVA0.75-0.24-S	139	せん断引張破壊	143 (0.97)	152 (0.91)	132 (1.05)
5	PVA1.00-0.24-S	142	せん断引張破壊	143 (0.99)	152 (0.94)	135 (1.05)

■記号の説明■
 eQ_{max} : 最大耐力実験値 AQ_{su} : A法式(非靱性)
 cQ_{btu} : 松崎・武藤による提案式 MAQ_{su} : 修正A法式(提案式 式(3))

3.2 せん断実験の結果

表－５に実験結果および計算結果一覧を示す。

(1) 破壊性状

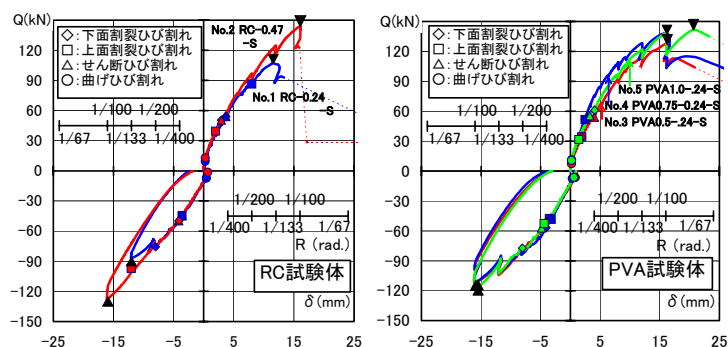
写真－２に+1/100 (rad.) 時の表面のひび割れ状況を示す。なお、表面・裏面のひび割れ状況はほぼ同一であり、試験体には捩りは生じていない。pw=0.24

(%) , No.1, 3, 4, 5 試験体の 1/200(rad.)時の最大ひび割れ幅は、それぞれ 0.324(mm), 0.161(mm), 0.360(mm), 0.170(mm)となり、No.4 試験体のひび割れ幅の値が若干、大きい。これは RC 試験体において、ひび割れ幅が顕著に開いている部分が測定箇所から外れており、RC 試験体の値が小さめにでているためである。全体の傾向は、RC 試験体に比較して PVA 試験体の損傷は軽微である。なお、ひび割れ幅の測定は、PI ゲージにより行い、鉛直方向のひび割れ幅を測定した。また、シングル配筋の特徴である上面割裂ひび割れは、PVA 繊維補強を施すことにより抑制（写真－3 参照）され、 V_f を増加させることにより、その傾向は顕著であった。

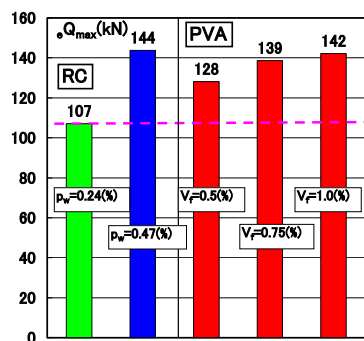
No.1, 2 の RC 試験体および No.3 の PVA 試験体の最終破壊状況は、上面割裂ひび割れを伴うせん断引張破壊の様相を示した。No.4, 5 の PVA 試験体は、シングル配筋の破壊の特徴である上面割裂破壊は抑制され、せん断補強筋が引張降伏に至り終局となるせん断引張破壊の様相を示した。

(2) 変形状

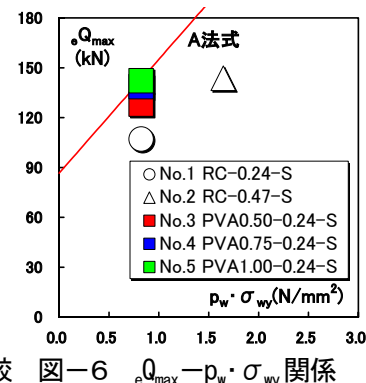
図－4にRC 試験体およびPVA 試験体のせん断力 (Q)－相対変位 (δ) 包絡線関係を示す。 $p_w=0.24\%$



図－4 せん断力(Q)－相対変位 (δ) 包絡線関係の比較

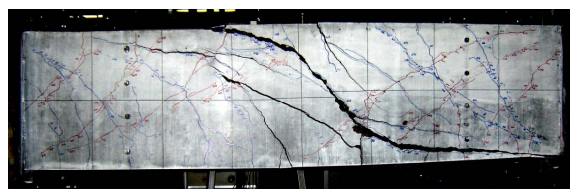


図－5 最大耐力 (Q_{max}) の比較



図－6 Q_{max} － $p_w \cdot \sigma_{wy}$ 関係

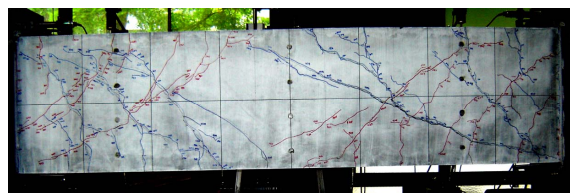
の試験体で比較した場合、PVA 試験体のひび割れ後の剛性は、RC 試験体に比べて高い。最大耐力後の性状は、いずれの試験体も急激に耐力を低下させる脆性的な性状を示した。また、エネルギー吸収能力は、せん断補強量および繊維体積混入率の増加とともに大きくなる傾向が認められた。



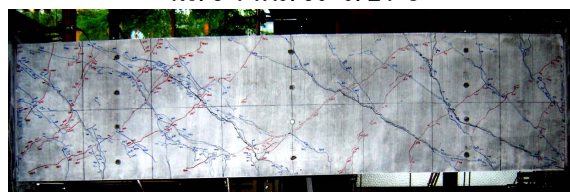
No. 1 RC-0.24-S



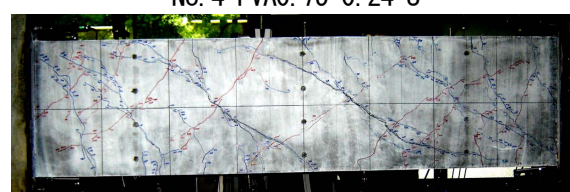
No. 2 RC-0.47-S



No. 3 PVA0.50-0.24-S



No. 4 PVA0.75-0.24-S



No. 5 PVA1.00-0.24-S

写真－2 +1/100 (rad.) 時のひび割れ状況



No. 1 RC-0.24-S
上面割裂ひび割れ



No. 5 PVA1.00-0.24-S
上面割裂ひび割れなし

写真－3 上面のひび割れ状況（最終破壊状況）

(3) 耐力

図-5に各試験体の最大耐力の比較を示す。 $p_w=0.24\%$ の試験体と比較した場合、 V_f の増加とともに最大耐力は増加し、構造性能が大きく改善されることがわかった。また、 $V_f=1.00(\%)$ を混入することにより、 $p_w=0.47(\%)$ のRC試験体とほぼ同等の耐力を示した。図-6に最大耐力の実験値(eQ_{max})とせん断補強量($p_w \cdot \sigma_{wy}$)との関係を示す。比較のため、A 法式(非弾性)による計算

値を示しておく。RC試験体の比較値(=実験値/計算値)は、 $0.72 \sim 0.75$ で危険側に評価され、その適合性は十分とはいえない。主筋がシングルに配筋された場合、A 法式が想定している抵抗機構が十分に形成されていない可能性が考えられる。PVA試験体の比較値は、 $0.90 \sim 0.99$ で同様に危険側に評価される。また、PVA-FRCのせん断補強効果が配慮されていないために計算値は、 V_f の違いによらず同等である。しかし、実験値は V_f の増加とともに上昇する傾向を示し、繊維の補強効果を配慮する必要がある。

4. せん断終局耐力評価式の提案

前述よりRC試験体は、A 法式によるせん断終局強度に比較して、実験値は危険側に評価される。これは、主筋がシングルに配筋されていることと、補強筋が閉鎖型ではないためにトラス機構によるコンクリート圧縮束応力の作用幅が全梁幅ではなく、狭まっているためと推察される。上記の内容を反映させたせん断抵抗モデルを図-7に、それらを配慮した修正A 法式を式(2)に示す。

■主筋がシングル配筋された

薄肉断面 RC 梁部材のせん断終局強度式■

$$MA Q_{su} = b_e \cdot j_t \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (2)$$

ただし、 $p_{we} \cdot \sigma_{wy} > v \cdot \sigma_B / 2$ の時、
 $p_{we} \cdot \sigma_{wy} = v \cdot \sigma_B / 2$ とする。

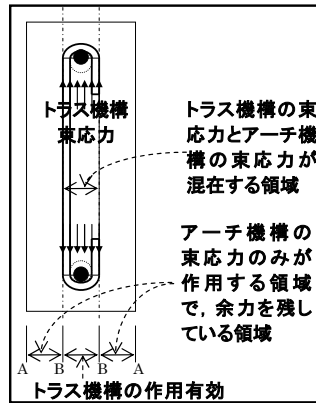


図-7 トラス機構の抵抗モデル

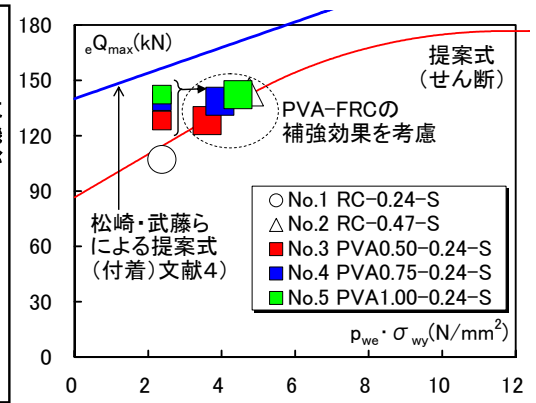


図-8 最大耐力(eQ_{max})と有効せん断補強量関係

ここに、 b_e : トラス機構の作用有効幅 (=52mm)

j_t : 最外縁主筋間距離 (=290mm)

p_{we} : 有効横補強筋比 (= $a_w / (b_e \cdot s)$)

a_w : 横補強筋の断面積 s : 横補強筋の間隔

$\beta = \{(1 + \cot^2 \phi) p_{we} \cdot \sigma_{wy}\} / (v \cdot \sigma_B)$

その他の記号は、文献3)参照

本モデルは、トラス機構の作用有効幅を横補強筋端部のフックの外周寸法(B-B 区間)と仮定したものである。つまり、B-B 区間は、トラス機構とアーチ機構によるコンクリート圧縮束応力が混在する領域となる。ただし、両束応力の加算は、コンクリート有効圧縮強度($v \cdot \sigma_B$)以下とする。一方、トラス機構作用有効幅以外の部分(A-B 区間)は、トラス機構による束応力は作用せず、アーチ機構による束応力のみが作用する領域となる。つまり、余力を残した状態で終局耐力になる領域を意味する。破壊性状においても、主筋を境にしてほぼ2枚割れとなる破壊性状であり、中心部分に破壊が集中している。また、A-B 区間に相当する部分のコンクリートは、ひび割れが若干入るものの、健全な部分が比較的多く存在することから、おおむね本モデルで実現象に近い性状を再現できているものと考えられる。図-8に最大耐力実験値(eQ_{max})と有効せん断補強量($p_{we} \cdot \sigma_{wy}$)との関係を示す。比較のため式(2)による値および松崎・武藤らによる付着による終局強度提案式⁴⁾の値も同図中に示しておく。本提案式は、RC梁の性状を概ね評価できている。しかし、PVA 繊維補強された

試験体（図－8の小さい□）は安全側の評価となっており、PVA-FRCのせん断補強効果を考慮する必要がある。せん断ひび割れを横切る繊維を局所的に見れば一軸引張状態とほぼ同様の状態と推察される。部材実験で得られたPVA試験体の最大耐力時の開口ひび割れ幅は0.296～0.64（mm）の範囲であった。一軸引張試験より得られた開口ひび割れ幅0.276～0.64（mm）の範囲に生じていたPVA-FRCの平均応力度（ $\text{avg}\sigma_{\text{FRC}}$ ）は、図－3より $V_f=0.50$ （%）供試体では0.427（N/mm²）， $V_f=0.75$ （%）供試体では0.547（N/mm²）， $V_f=1.00$ （%）供試体では0.717（N/mm²）であった。また、繊維は補強筋と同様の役割を果していると仮定して、トラスの項に繊維の補強効果を累加すると式(3)となる。図－8の図中にPVA-FRCによる有効せん断補強量を加算した場合の値を大きい□で示した。これにより繊維量の増加とともに耐力が上昇する傾向を本提案式で再現できていることがわかる。

■主筋がシングル配筋されたPVA 繊維補強

■薄肉断面 RC 梁部材のせん断終局強度式■

$$MAQ_{su} = b_e \cdot j_t (p_{we} \cdot \sigma_{wy} + \text{avg} \sigma_{\text{FRP}} \cdot b/b_e) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (3)$$

ただし、 $p_{we} \cdot \sigma_{wy} + \text{avg} \sigma_{\text{FRC}} \cdot b/b_e > v \cdot \sigma_B / 2$ の時、

$$p_{we} \cdot \sigma_{wy} + \text{avg} \sigma_{\text{FRC}} \cdot b/b_e = v \cdot \sigma_B / 2 \text{ とする。}$$

ここに、 $\text{avg} \sigma_{\text{FRC}}$ ：PVA-FRCの最大耐力時に発揮される平均引張応力度

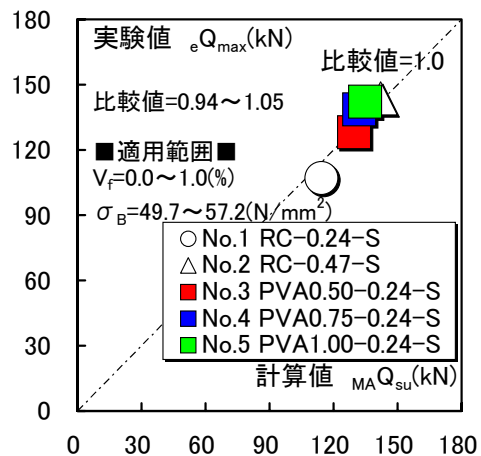
$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) (p_{we} \cdot \sigma_{wy} + \text{avg} \sigma_{\text{FRC}} \cdot b/b_e) \} / (v \cdot \sigma_B)$$

その他の記号は、文献3)および式(2)参照

図－9に最大耐力（ eQ_{max} ）と提案式による計算値（ MAQ_{su} ）との比較を示す。実験値は、比較値=1.0のライン上にあり、本提案式でおおむね実験値を精度良く評価できている。比較値（=実験値/計算値）は0.94～1.05であった。

5. まとめ

- 1) 主筋がシングルに配筋された薄肉断面RC梁部材に、コンクリート代替とするPVA-FRCを使用することにより構造性能が向上し、ひび割れ幅を



図－9 最大耐力（ eQ_{max} ）と提案式による計算値（ MAQ_{su} ）との比較

抑制する効果が確認された。

- 2) 主筋がシングルに配筋された薄肉断面RC梁部材およびPVA繊維補強された薄肉断面RC梁部材のせん断終局強度式を提案し、本提案式で実験値をおおむね評価できることを示した。

謝辞 本実験の遂行にあたっては、福井大学技術部：福田萬氏、安藤誠氏、平成18年福井大学磯研究室卒業研究生：間下幸浩君、玉谷浩昇君、吉中奈樹沙さんに多大な協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（C）課題番号：18560545）の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 松崎育弘ほか：組立鉄筋ユニットを用いたRC造基礎梁の構造性能に関する実験的研究（その1、2），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.281-284，2001.9
- 2) 西川恭平，磯雅人ほか：繊維補強コンクリートを用いた短スパン梁のせん断挙動に関する実験研究（その1、2），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.99-102，2005.9
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- 4) 武藤剛，松崎育弘ほか：主筋がシングルに配筋されたRC梁部材の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.271-276，2006