

論文

[2110] 連続繊維補強筋を横拘束筋に用いたコンクリート部材の圧縮特性

正会員○細井良二 (埼玉大学大学院)
 正会員 睦好宏史 (埼玉大学建設工学科)
 正会員 谷口裕史 (間組技術研究所)
 正会員 喜多達夫 (間組技術研究所)

1. はじめに

連続繊維補強材 (以下FRP) は高強度であるが、塑性ひずみがない脆性材料である。これを主筋に用いた梁の曲げ破壊性状は同様にして脆性的であることが知られており、鋼材を用いた場合と同じような靱性的な性状に改善するための研究がいくつか行われている[1]。その中で曲げ圧縮破壊する部材に対して変形能を確保するために、コンクリートを拘束することが効果的であることが知られており[2]、筆者らも緊張材にFRPを使用したPC曲げ部材に、横拘束筋鋼材を配することにより変形性状が改善できることを報告した[3]。

本研究では、FRPを横拘束筋として用いたコンクリート供試体の中心軸圧縮試験を実施し、FRPにより拘束されたコンクリートの圧縮応力-ひずみ性状を実験的に明らかにした。さらにFRPを横拘束筋および緊張材に用いたPC梁部材の載荷試験を実施し、FRPの拘束効果により、梁の変形性状を大きく改善できることを明らかにした。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状および実験要因

供試体は、図-1に示すように、断面が15×15cm、高さが30cmの角柱と、直径が15cmで高さが30cmの円柱の2種類である。さらにかぶりの影響をなくすために、同一高さで、かぶりコンクリートを除いた供試体を作製した。使用したFRPは炭素繊維で、7本より線型のストランドタイプとシングルタイプの2種類で、比較のために高張力鋼で作製した拘束筋も使用した。拘束筋の形状は、11×11cmの矩形、7.8×7.8cmの矩形、直径11cmの円形の3種類とし、直径5mmのシングルタイプのFRPを軸方向に配筋した。これらの力学的特性を表-1に、実験要因を表-2に、コンクリートの配合を表-3に示す。

2.2 実験方法

図-2は実験の概要を示したものである。載荷は、200ton万能試験機を用い、上面をピン支持とした単純一軸圧縮試験とした。供試体の変形量を測定するために、以下に示す3種類の方法を用いた。

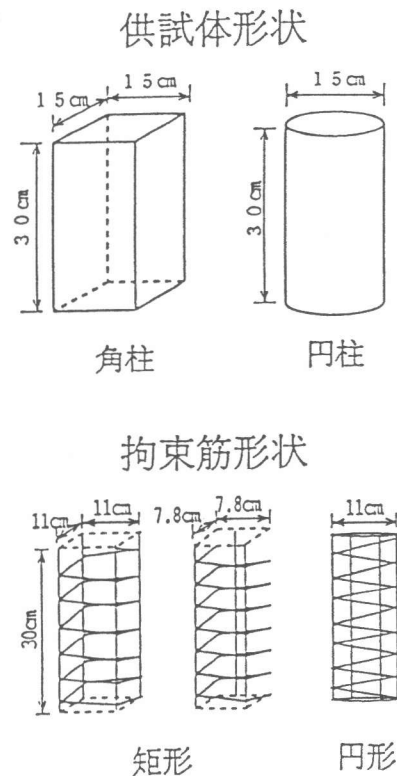


図-1 供試体形状寸法

表-1(a) 拘束筋の力学的特性

拘束筋	外径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び (%)
ストランド	5.0	10.1	188	14000	1.5
シングル	5.3	15.2	216	14200	1.5
高張力鋼	5.4	31.0	148	20000	11.0

表-1 (b) コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
円柱	331	2.4×10 ²
	656	3.5×10 ²
角柱	277	2.8×10 ²
	554	3.4×10 ²

1) 供試体をはさむ上下載荷板に取り付けた変位計から測定される全変形量。2) コンプレッソメーターによる供試体の変形量。3) 供試体の相対する2面に貼付したひずみゲージによる変形量。さらに、いくつかの供試体については、中央部にモールドゲージを配置し、水平方向のひずみを測定した。

表-2 実験要因

供試体NO	かぶり	圧縮強度 ₂ (kgf/cm ²)	供試体形状	拘束筋種	ピッチ	拘束筋形状	供試体数			
1	かぶりあり	300	円柱	ストランド	3 cm	円形	2			
2					5 cm	円形				
3								7 cm	円形	
4				ストランド						3 cm
5					5 cm	円形				
6								5 cm	円形	
7			角柱	ストランド						3 cm
8					5 cm	円形				
9								7 cm	円形	
10				ストランド						5 cm
11					5 cm	円形				
12								7 cm	円形	
13			シングル	5 cm			矩形			
14				5 cm	円形					
15						高張力鋼	5 cm	円形		
16			5 cm				円形			
17	500	角柱		ストランド	5 cm			矩形		
18					円柱	5 cm		円形		
19	かぶりなし	300		シングル			3 cm	円形	1	
20					5 cm					
21						高張力鋼	5 cm			
22							3 cm			矩形
23										

表-3 コンクリート配合表

圧縮強度 (kgf/cm ²)	G _{max} (mm)	スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (cc)
500	12.5	10±2	3.0	40	55	205	525	838	678	5250
300	12.5	10±2	3.0	60	55	192	325	950	768	3250

なお、軸方向の変形の評価は、コンプレッソメーターの値を用いた。

3. FRPにより拘束されたコンクリートの圧縮応力-ひずみ性状

3.1 かぶりのある供試体
供試体の破壊状況は、塑性域に達する前にひびわれが発生し、塑性域に到達した後かぶり部分のコンクリートが大きく剝落すると同時に耐力も

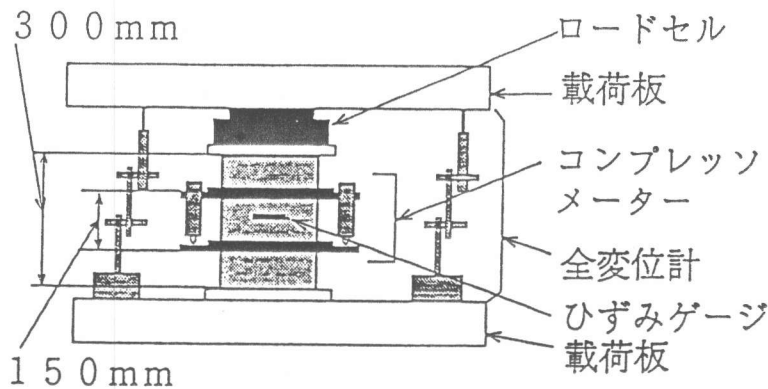


図-2 実験概要

急激に低下し、軸方向の補強筋が順次破断する。さらに、軸ひずみが1%となる付近から耐力の低下が緩やかになり塑性性状を示す。供試体の破壊は拘束筋が破断することによって終局に至った。拘束筋のピッチが変形性状に及ぼす影響を図-3に示す。FRPを拘束筋に用いた場合、一般の鋼材を使用した場合と同様に、拘束筋のピッチが小さくなるに従い塑性域における耐力は大きくなることが確かめられた。拘束筋を3cmピッチに配置した供試体では、軸ひずみが1%あたりから耐力がまた上昇する現象が見られた。コンクリートの圧縮強度が変形性状に及ぼす影響を図-4に示す。図から低強度の供試体の方が耐力の低減率は小さく、見かけ上大きな拘束効果を示している。

拘束筋の形状が変形性状に及ぼす影響を図-5に示す。矩形の拘束筋は円形のそれに比較して、最大耐力以降の耐力の低減率は大きく、早期に破断に至った。これは、矩形の場合、円形と比較して拘束力が均等にかからないこと、さらにFRPは曲げ成形による引張耐力の低下が著しいことが影響していると考えられる。

供試体の形状が変形性状に及ぼす影響を図-6に示す。同一強度のコンクリートを用いたにも拘らず、供試体の形状により最大強度とその時の歪の大きさに違いがみられた。最大強度に達した後は、両者ともかぶり部分のコンクリートが剝落し、耐力は低下するものの、その後は、拘束されたコンクリートが耐力を受け持っている。両者とも良好な靱性的な変形性状

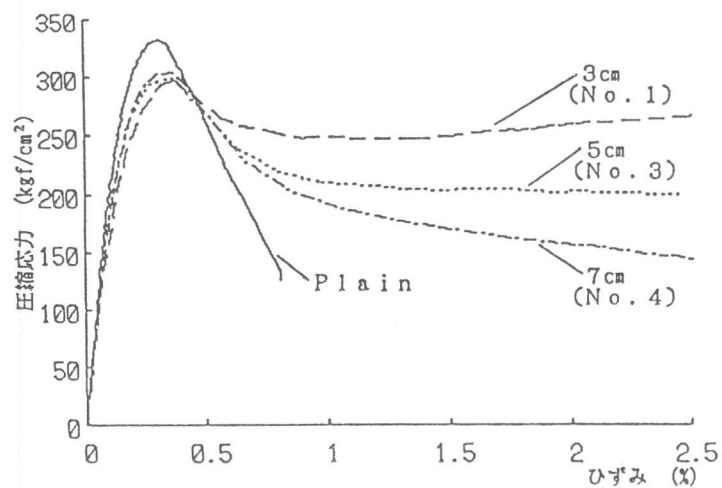


図-3 拘束筋のピッチの影響

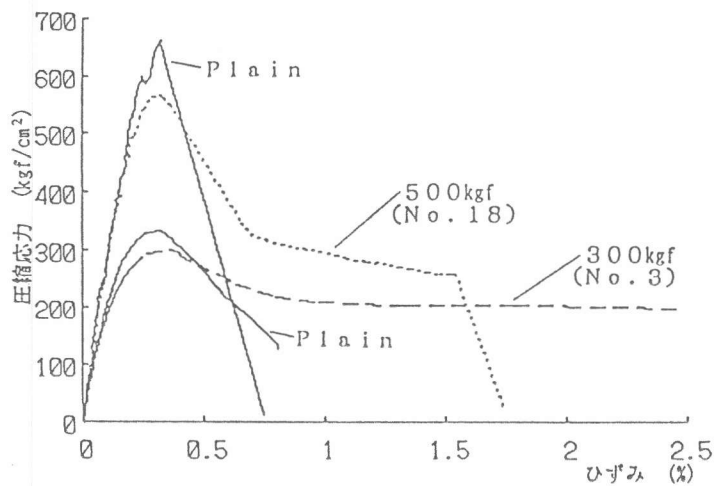


図-4 コンクリートの圧縮強度の影響

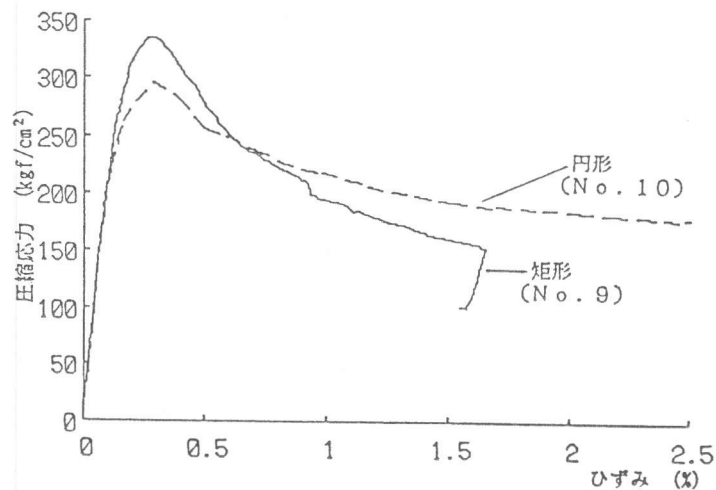


図-5 拘束筋の形状の影響

を示していると言える。

使用したFRPの種類が変形性状に及ぼす影響を図-7に示す。ストランドタイプはシングルタイプのもの比べて断面積が小さく、強度も低いことから拘束効果が劣ると予想されたが、本実験においては、明確な差は見られず、ストランドタイプは拘束筋としてより良い性能を示しているといえる。

3.2 かぶりのない供試体

かぶりのない供試体の応力-ひずみ関係を図-8に示す。かぶりのある供試体が塑性域に到達してから、顕著な下降傾向が認められたのに対し、塑性域到達後もひずみの増加とともに応力も増加する傾向が認められた。また、塑性域が始まるひずみ（ここでは、曲線の曲率が最も大きく変化するときのひずみ（P点））の大きさは、プレーンコンクリートと比べて大きくなる傾向がみられた。これらのことから、かぶりがある供試体では、かぶり部分のコンクリートの剝落が最大耐力以降の性状に大きく影響していることを示唆している。

3.3 FRPで拘束されたコンクリートの圧縮応力-ひずみの定式化

かぶりのある供試体において、かぶり部分をプレーンコンクリートと仮定し、 e 関数で近似して、拘束されているコンクリートの応力-ひずみ関係を推定した。このようにして得られた応力-ひずみ関係を図-8に示す。図から、かぶり部分を差し引いた拘束部の応力-ひずみ曲線は、かぶりがない

場合の応力-ひずみ曲線によく一致している。このことから、かぶりのある供試体の応力-ひず

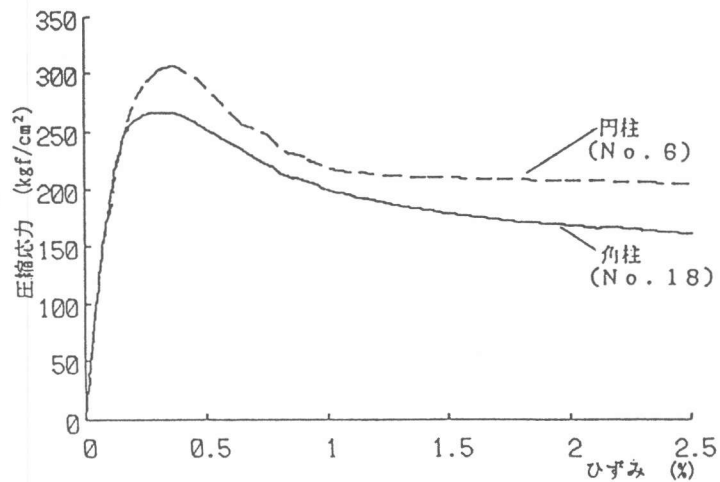


図-6 供試体の形状の影響

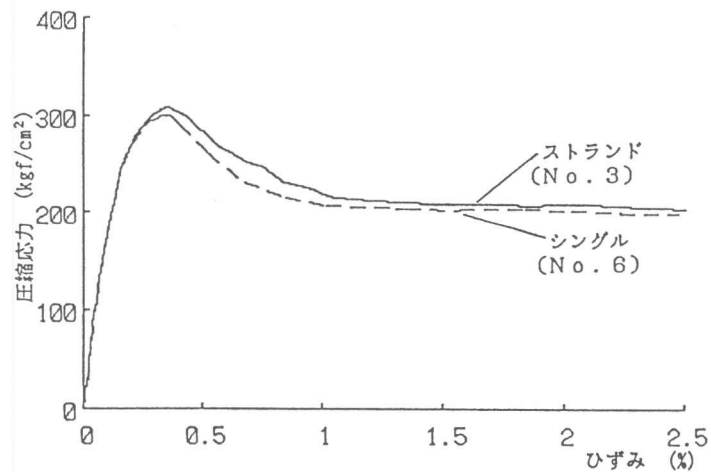


図-7 FRPの種類の影響

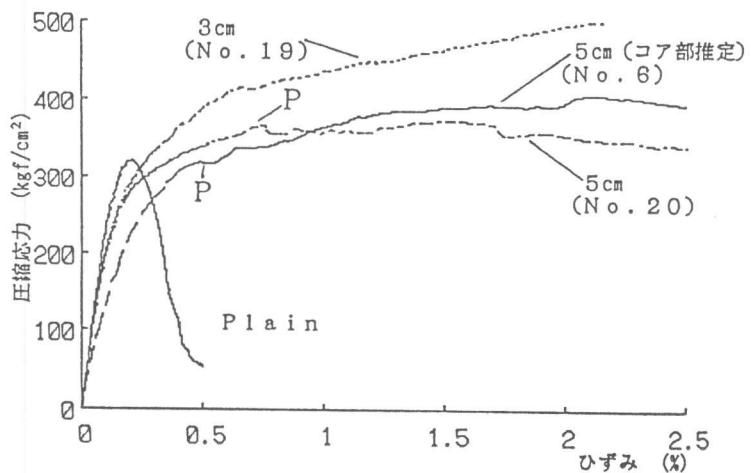


図-8 かぶりのない供試体

み関係は、拘束されたコア部のコンクリートとかぶりコンクリート（プレーンコンクリート）の複合体と考えることができる。そこで、FRPは一般の鋼材と同様な拘束効果があると考えられることから、鋼材で拘束したコンクリートの応力-ひずみ関係式を基にして、FRPで拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係を推定してみた。しかし、FRPは破断に至るまで弾性的な挙動を示すため、拘束筋降伏時、あるいは破断時の強度およびひずみを適用することはできない。

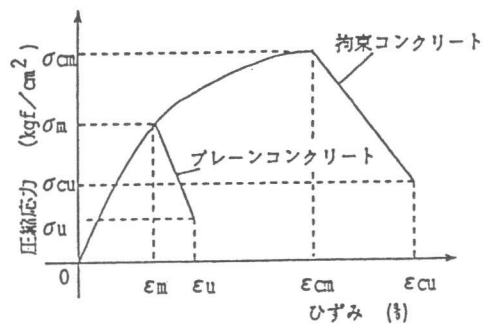


図-9 算定式のモデル図

そこで弾性係数を用いている境[4]のモデルを基に検討した。実験データとしては、かぶりがない供試体の応力-ひずみ関係を用い、かぶりのある供試体については、上記の方法により拘束されたコンクリート部分の応力-ひずみ関係を用いた。なお、FRPが破断するとき、または供試体の縦軸ひずみが2.5%に至るときの圧縮応力とひずみを終局の値とした。ここでは円形でシングルタイプの拘束筋を用いた場合について推定した。算定式は以下のである。

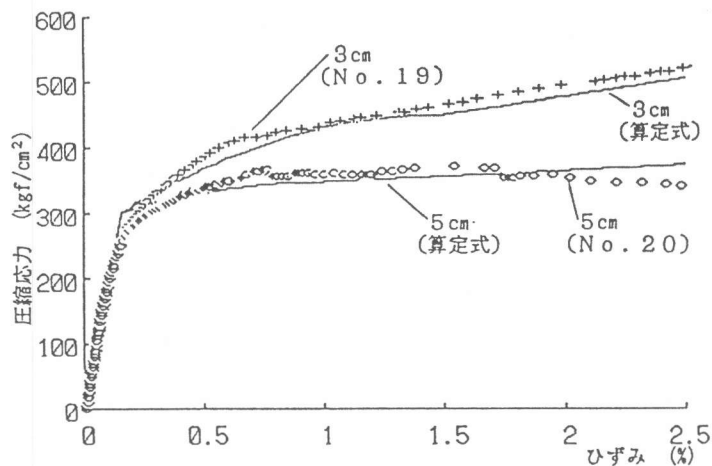


図-10 算定した応力-ひずみ関係

$$\sigma_{om} = (1 + 5.6 \times \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_m})^{0.6} \times \sigma_m \quad \text{式(1)}$$

$$\epsilon_{om} = 0.7 \times p_w + 0.002 \quad \text{式(2)}$$

$$\sigma_{ou} = (1 + 8.5 \times \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_m})^{0.6} \times \sigma_u \quad \text{式(3)}$$

$$\epsilon_{ou} = 0.025 \quad \text{式(4)}$$

ここで、 p_w は横補強筋比、 σ_r は横応力度を表し、上の式は図-9に対応する。実験値と算定式の比較を図-10に示す。算定式はよく実験値を推定しており、これによってFRP部材を拘束筋に用いた場合の一軸圧縮試験における応力-ひずみの関係を推定することが可能となった。

5. FRPを拘束筋および緊張材に用いたPC梁の変形状

これまで述べてきたように、FRPを拘束筋として用いたコンクリートの応力-ひずみ性状は、一般の鋼材を拘束筋に適用した場合と同様に延性的なものに改善できることが明らかとなった。

脆性材料であるFRPを緊張材に用い、FRPにより拘束されたコンクリートを圧縮部に適用する事により、曲げを受ける部材の力学的性状を、通常のRCの引張破壊と同様な変形状に改善できることが考えられる。ここでは、FRPを緊張材及び拘束筋に用いたPC梁の曲げ試験を行い、上記のような力学的性状の改善効果について検討した。図-11に供試体の形状寸法を示

す。供試体は全部で6体であるが、ここでは典型的な1体について述べることにする。なお、導入プレストレスは、保証切断荷重の60%を導入し、コンクリートの強度を300kgf/cm²とした。荷重-たわみ曲線を図-12に示す。供試体は最大耐力に達した後、上端部のかぶりコンクリートが剝離する過程で耐力がいったん落ちた後安定し、圧縮側に配された軸方向の補強筋が破断した後、大きな靱性を有する変形性状が得られた。すなわち、一軸圧縮試験の結果と同様に、曲げ圧縮部のコンクリートの延性は大きく改善されたことにより、拘束筋を用いない供試体と比較して、最大耐力以降の変形性能が大きくなった。

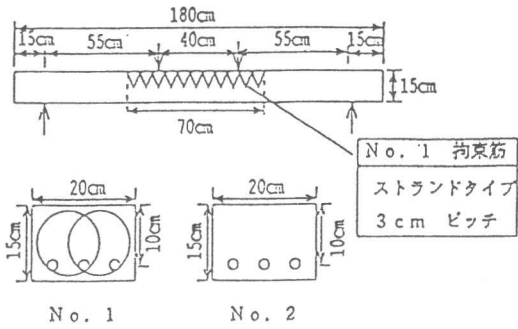


図-11 FRP梁の形状寸法

6. まとめ
本研究の結果をまとめると以下のような①FRPを拘束筋に使用することにより、コンクリートの変形性能を大きく改善できる。

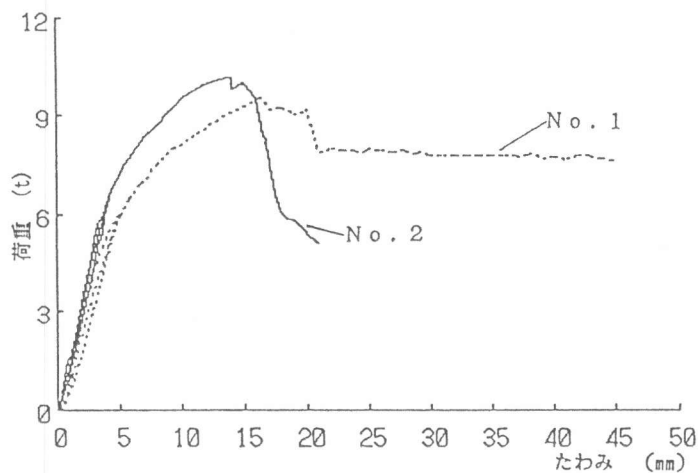


図-12 荷重-たわみ曲線

②かぶりを持ったコンクリートを拘束した場合の挙動は、拘束コンクリートとプレーンコンクリートの複合体と考えられる。

③FRP拘束効果は、拘束筋のピッチ、形状、コンクリート強度に大きく影響される。

④FRPを用いたPC部材の曲げ圧縮部コンクリートを、FRPで横拘束することにより、部材の変形性能が大きく改善できる。

謝辞

本研究は、埼玉大学と間組との共同研究で行われたものである。本実験の遂行および解析に、佐藤昭七郎、佐藤幸作の両元技官、土田一輝君（大学院生）、秋田輝和君（東急建設）、藤森総一君（佐藤工業）の協力に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 秋山、天野、奥村：板状のFRPロッドを用いたコンクリートはりの曲げ性状、第12回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.1099~1104
- [2] 例えば、鈴木、中塚、平松、長田：コンファインドコンクリート（横拘束コンクリート）を曲げ圧縮部に適用したPRC梁の高靱性挙動、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.485~pp.488、1985
- [3] 谷口、睦好、町田、喜多：FRPを用いたPC曲げ部材の破壊性状改善に関する一提案、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部門、pp.244~245
- [4] 境有紀：横拘束された高強度コンクリートの構成則、コンクリート工学年次論文報告集 13-2、pp.43~48