

高耐震性RC橋脚における接合目地構造の開発

鹿島建設(株)		工修	○金光 嘉久
鹿島建設(株)	正会員	博(工)	山野辺慎一
鹿島建設(株)	正会員	工修	一宮 利通
鹿島建設(株)		工修	河野 哲也

Abstract : The seismic performance of a RC pier structure depends greatly on the plastic hinge region at the bottom of the pier. As means to improve the plastic hinge region of the structure, ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) is proposed to apply to concrete cover at the bottom of the pier. In the structure, the artificial cracks are introduced by means of structural joints in order to control bending crack to occur within the plastic hinge region. Therefore, in this study, structural joints are focused by conducting compression test of UFC–mortar–UFC specimens. The compressive behavior of the precast joint is examined, and based on test data, a method for estimating the compressive strength from the strength of constituent materials is proposed.

Key words : RC Pier, Ultra-high-strength fiber-reinforced concrete, ductility, Joint mortar

1. はじめに

大地震時におけるRC橋脚の構造特性は、橋脚基部などの接合部に形成される塑性ヒンジ部の特性に大きく依存し、橋脚全体の地震時の挙動や耐震性に大きな影響を与える。塑性ヒンジ構造の特性を改善する方法として、橋脚躯体基部の断面外周に超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)からなるプレキャスト(以下、PCa)型枠を適用して変形性能を向上する構造¹⁾が提案されており、すでに施工例²⁾も報告されている。この構造は、断面外周部に配置したUFCが、地震時に生じる大きな曲げ圧縮応力に抵抗することにより、かぶりコンクリートの圧壊と主筋の座屈を抑制できる。また、UFC製のPCa型枠に層状の水平目地を設けることで、地震時の曲げひび割れを分散し、特定の断面への損傷の集中を防ぐことで、安定した大きな変形を可能としている。

地震時の曲げひび割れを誘導する構造における水平目地は、これまではUFCの補強繊維を分断するような金網や鋼板を埋設した構造で検討されていた。また、PCa型枠は、蒸気養生の必要から工場での製作と運搬が必要となるため、その寸法には制約が伴い、今後の大型化への対応から、PCa型枠を分割して製造し、接合する方法の開発が求められていた。本研究は、圧縮に対しUFCの圧縮特性を阻害しないような目地構造やそれに用いる材料について検討したものである。

2. 目地供試体の圧縮試験

2.1 実験概要

PCa部材における接合目地には、エポキシ樹脂やモルタルを用いたものが多いが、部材内部に軸方向鋼材が配置される本構造においては、強度と耐久性だけでなく、弾性係数についても、UFC製橋脚の高い耐震性能を確保するうえで、重要な要因である。また、強度については、目地部を設けることにより、補強繊維が分断されるため、母材UFC³⁾の180 N/mm²よりも低くなると考えられるが、できるだけUFC単体に近い強度が求められる。

目地の材料や厚さが、圧縮強度に及ぼす影響を把握するために、目地を配置した円柱供試体の圧縮

試験を行った。なお、ここでの試験に先立ち、実施工可能な目地の厚さと接合面の施工方法について検討するため、材料として弾性樹脂、高強度モルタル、UFCと同一のW/Cのモルタル等を、また接合面の仕上げ方法としてコテ仕上げ、マッチキャスト、研磨面仕上げ等の種々の組み合わせについて類似の試験を行い、目地の仕様を選定している。

供試体の製作には直径100 mm、高さ200 mmの水平モールドを用い、あらかじめ厚さ約1.0 mmの鋼板を高さを3等分する位置に埋設して打設した。脱型後、3ピースに分離し、目地材料を塗布し、鉛直に積み重ね、20°Cで4週間養生した。目地材料は、実施工での入手の容易さと練混ぜの作業性を基本とし、流動性 (J14漏斗：7秒) に優れる市販の高強度無収縮モルタルを使用した。

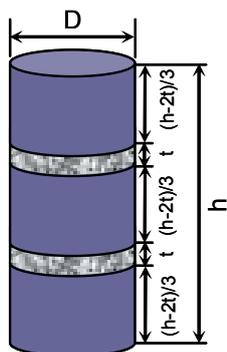
試験ケースNo.1～No.4では、モルタル強度を約70 N/mm²とし、一層あたりの目標の目地厚さを2.4 mm、5.0 mm、8.0 mm、12.0 mmの4種類とした。試験ケースNo.5～No.8では、モルタル強度を約110 N/mm²とし、目地厚さは、モルタル強度約70 N/mm²の場合と同じく4種類とした。さらに、比較用として、モルタル強度を約90 N/mm²、一層あたりの目地厚さを1.2 mmとしたもの (試験ケースNo.9) と、接合面にモルタルを用いずにドライジョイントとしたもの (試験ケースNo.10) を用意した。ただし、試験ケースNo.9においては、使用したモルタルに含まれる細骨材の最大寸法が、2.4 mm程度であり、目地厚さをこれ以上薄くすることは不可能であるため、練混ぜ前の材料の1.2 mmのふるいを通した材料を用いて供試体の製作を行った。なお、目地厚さの相違による圧縮傾向を把握することを目的としたため、厳密な目地厚さ管理はしなかった。そのため、大きいもので、±1 mm程度の目地厚さのばらつきが生じた。

計測は、荷重と縦方向のひずみを測定した。縦方向のひずみは、二つの目地を含む標点距離100 mmのコンプレッソメータにより求めた。表-1に供試体の一覧を、図-1に供試体の形状を、写真-1にその製作状況を示す。また、写真-2に圧縮試験の様子を示す。

表-1 供試体一覧

試験ケース No.	UFC強度 f_{ufc} (N/mm ²)	UFC弾性係数 E_{ufc} (kN/mm ²)	モルタル強度 f_m (N/mm ²)	モルタル弾性係数 E_m (kN/mm ²)	1層あたりの目標目地厚さ t (mm)	直径 D (mm)	試験体高さ h (mm)		
1	191.9	45.7	69.3	22.9	2.4	100	200.92		
2					5.0	100	207.92		
3					8.0	100	214.03		
4					12.0	100	222.95		
5			108.5	35.9	108.5	35.9	2.4	100	201.41
6							5.0	100	208.15
7							8.0	100	214.28
8							12.0	100	219.42
9	91.8	25.3	—	—	1.2	100	199.57		
10	—	—	—	—	—	100	197.37		

※各試験ケースの供試体数は3本である。ただし、試験ケースNo.1については、計測器の不具合により、供試体数は2本とした。



(a) UFC 打設状況 (b) ペースト打設状況

図-1 供試体形状

写真-1 供試体の製作状況



写真-2 圧縮試験の様子

2.2 実験結果

図-2に、圧縮試験に使用したUFCと目地材料の材料試験結果、ならびに試験ケースNo.9とNo.10の結果を、図-3に、試験ケースNo.1~No.4の目地供試体の応力-ひずみ曲線を、図-4に、試験ケースNo.5~No.8の応力-ひずみ曲線を示す。また、表-2に、圧縮強度試験の結果一覧を示す。

表-2に示すように、UFC単体の圧縮強度が 191.9 N/mm^2 であるのに対し、目地試験体である試験ケースNo.9で 192.4 N/mm^2 、試験ケースNo.10で 185.4 N/mm^2 であり、ほぼ同等の強度が得られた。ただし、図-2に示すように、No.9の弾性係数はUFC単体に対し、若干低下し、ピークひずみはUFCの $4,700 \times 10^{-6}$ に対し、 $6,000 \times 10^{-6}$ 程度であった。また、No.10は、研磨面どうしの接合であったため、 10 N/mm^2 以下の低応力度において目地の密着に伴う変形があったが、その後の挙動は、目地材料のあるものと同程度であった。

図-3~図-4に示すように、UFC単体に比べ、モルタル目地を有する供試体では、最大圧縮応力時のひずみが大きくなることがわかった。また、この傾向は、モルタル強度が小さくなるほど顕著に現れた。さらに、同一モルタル強度で比較した場合、目地厚さが厚くなるに従い、最大圧縮応力時のひずみが大きくなることがわかった。

図-4中に、試験ケースNo.9の結果を示す。No.9は、No.5~No.8の試験体に比べ、モルタル強度と弾性係数が、ともに小さいものを使用したか、圧縮強度や弾性係数はこれらの中で最もUFC単体に近いものとなった。このことから、目地厚さを薄く管理することができれば、モルタルの強度をある程

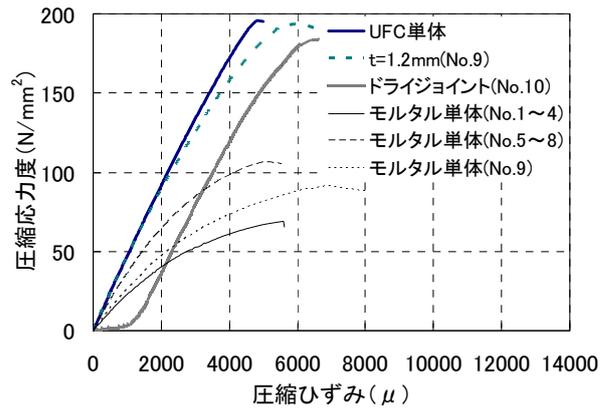


図-2 材料試験結果と No. 9, No. 10 の試験結果

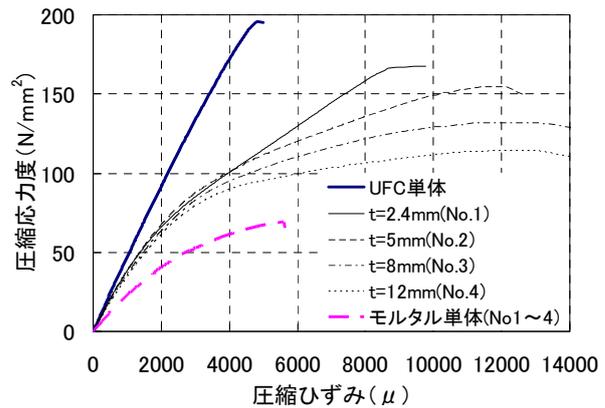


図-3 No. 1~No. 4 の試験結果

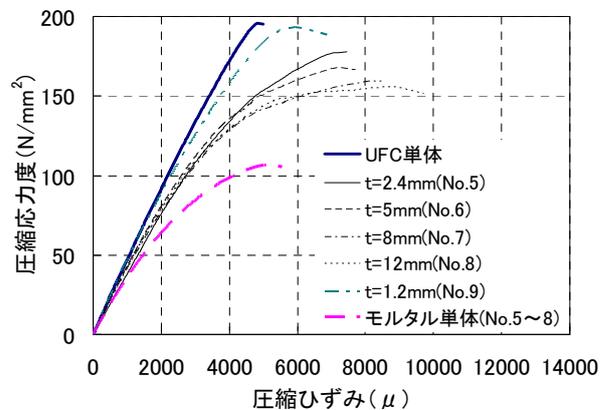


図-4 No. 5~No. 8 の試験結果

表-2 圧縮強度試験結果一覧

試験 ケース No.	目地構造試験 体強度 $f_{um} (\text{N/mm}^2)$	目地構造試験 体弾性係数 $E_{um} (\text{kN/mm}^2)$	f_{um}/f_{ufc}	E_{um}/E_{ufc}	f_{um}/f_m	E_{um}/E_m
1	169.9	33.6	0.89	0.74	2.45	1.47
2	154.5	35.7	0.81	0.78	2.23	1.56
3	131.6	33.7	0.69	0.74	1.90	1.47
4	116.2	33.3	0.61	0.73	1.68	1.45
5	176.9	42.1	0.92	0.92	1.63	1.17
6	166.4	42.2	0.87	0.92	1.53	1.18
7	161.5	40.8	0.84	0.89	1.49	1.14
8	152.7	42.0	0.80	0.92	1.41	1.17
9	192.4	44.9	1.00	0.98	2.10	1.77
10	185.4	(23.3) ※1	0.97	0.51	—	—

※1 荷重初期の不陸の影響を含んでいる。



UFC 単体 No. 5 (t=2.4mm) No. 6 (t=5mm) No. 7 (t=8mm) No. 8 (t=12mm) No. 9 (t=1.2mm) No. 10

写真－3 破壊状況

度確保することで、UFC単体の応力-ひずみ関係に近い部材特性を得られる可能性があるといえる。

写真－3に、UFC単体と、試験ケースNo.5～No.10の圧縮試験体の破壊状況を示す。UFC単体のケースでは、供試体中央部に斜め割裂ひび割れが発生していることがわかる。試験ケースNo.5では、UFC部材のモルタルとの接合面に剥離が発生するとともに、大きな割裂ひび割れが発生し、水平目地部のモルタルは、軽く欠損している部分が見られる程度であった。試験ケースNo.6では、No.5と同様にUFC部材のモルタルとの接合面で剥離が確認されるとともに、中間層のUFC部材に大きな割裂ひび割れが発生し、モルタル部はUFC部材の割裂ひび割れ近傍で、軽微な剥落が確認される程度であった。試験ケースNo.7では、UFC部材の割裂ひび割れも確認されたが、試験ケースNo.5やNo.6に比べ、モルタルの欠損範囲や深さが大きくなっていった。試験ケースNo.8では、UFC部材の割裂ひび割れも確認されたが、他の試験ケースに比べ比較的少なく、モルタル部の損傷が目立った。試験ケースNo.9では、No.5と同様の破壊性状で、UFC部材の剥離と割裂ひび割れが目立った損傷であった。また、試験ケースNo.10では、縦方向のひび割れがやや卓越することが伺えた。これは、目地において補強鋼繊維が分断されているために、横方向の拘束が低下したためと思われる。

モルタル目地を有する圧縮試験体では、モルタルの圧壊や層間のずれは外観では観察されず、接合面付近での表面の剥離と、モルタル目地を跨ぐUFC部材の割裂ひび割れが認められた。なお、試験ケースNo.1～No.4の破壊性状については、試験ケースNo.5～No.8とほぼ同様であった。

以上のことから、検討した材料を目地に用い、UFC部材を積層することで、強度および弾性係数が若干低下すること、また、破壊に起因する原因としては、UFC部材の割裂ひび割れが目立つものが多かったが、モルタル目地が厚いものについては、モルタルの圧壊による影響も含まれると考えられる。

3. 目地強度に関する考察

3.1 目地構造供試体の弾性係数

モルタル目地を含む部材の平均的な弾性係数 E_{um} は、UFCの一層とモルタル目地の厚さ h_U 、 h_m と弾性係数 E_{ufc} 、 E_m から、以下のように求められる。

$$E_{um} = \frac{E_{ufc} h_U + E_m h_m}{h_U + h_m}$$

ここで、 E_{ufc} と E_m の差が5%以下となることを目標とし、 E_{ufc} を 46 kN/mm^2 、 E_m に 23 kN/mm^2 程度のものを用いたとすると、目地の厚さとUFC層の厚さの比 h_m/h_U の最大値は、0.11程度となる。実構造物において、ひび割れ分散性の確保のための、一層あたりの h_U の厚さを $150 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$ と設定した場合、 h_m の厚さの最大値は $16.5 \text{ mm} \sim 22.0 \text{ mm}$ であり、モルタルの最大骨材寸法が 2.4 mm に対して十分余裕があるため、施工上の制約はないと考えられる。

3.2 目地構造供試体の圧縮強度

モルタル目地を含む部材の圧縮強度は、ポアソン比がUFCよりも大きく、圧縮強度が低い材料が狭在することにより、理論的には得られないことから、既往の研究を参考に⁴⁾、**図-5**に示すように、目地モルタルの圧縮破壊と、UFCの圧縮割裂破壊の小さい方で決定されると考えた。

(1) 目地材料の圧縮破壊

目地材料は上下のUFCの拘束を受け、強度の上昇がある。円柱供試体の、直径に対する高さの比を0.5とした研究⁵⁾によれば、この強度上昇は次式で表される。

$$f'_m = f_m + 69 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

目地材料が圧縮破壊するときの強度 $Fh1$ は、底角を $\pi/3$ としたモルタルの円錐台形の破壊を考え、拘束を受けて破壊する部分の強度 f'_m と拘束を受けない外周の目地材料の強度 f_m に分けた円柱供試体の幾何学形状から、以下のように表すことができる。

$$Fh1 = (1 - t/\sqrt{3}D)^2 f'_m + \left\{ 1 - (1 - t/\sqrt{3}D)^2 \right\} f_m \quad (2)$$

(2) UFCの圧縮割裂強度

目地材料のポアソン効果や圧縮破壊に伴い、UFCには拘束反力としての割裂応力度が発生する。本試験においては、横方向の引張応力度となる。UFCの3軸応力状態での構成則は得られていないが、普通コンクリートを対象とした既往の研究によれば、その割裂引張強度を f_{ut} とすると、目地部における強度 $Fh2$ は、以下のように導かれている⁶⁾。

$$Fh2 = \frac{f_{ufc}(f_{ut} + \alpha f_m)}{f_{ut} + \alpha f_{ufc}} \quad (3) \quad \text{ここで, } \alpha = \frac{t}{4.1(h-2t)/3}$$

また、 f_{ut} はUFCの引張強度で式(4)により求めた³⁾。

$$f_{ub} = 2.59 f_{ut} + 1.54 \quad (4) \quad \text{ここで, } f_{ub} \text{ は, UFCの曲げ強度である。}$$

(3) 圧縮強度の推定値と実験結果の比較

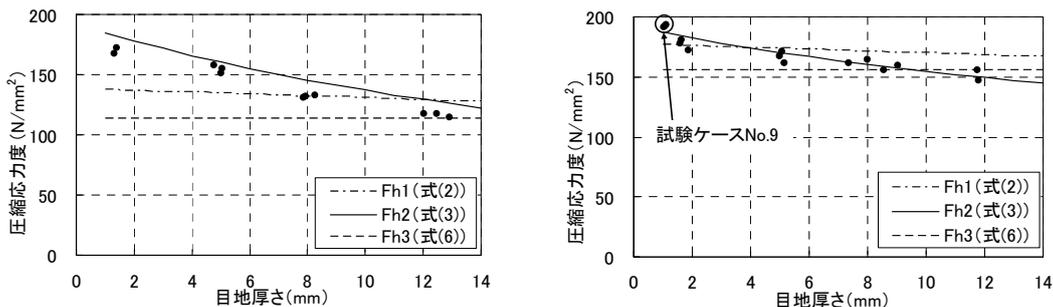
式(2)と式(3)より、モルタル目地を有する圧縮供試体の圧縮強度は、目地厚さを考慮した場合、下記の式で推定することができる。

$$F_{cal} = \min(Fh1, Fh2) \quad (5)$$

なお、目地厚さを考慮しない簡易な式として、下記の式も得られている⁴⁾。

$$Fh3 = f_m (2 - f_m / f_{ufc}) \quad (6)$$

図-6に、式(2)、式(3)、式(6)による強度推定式と、実験結果の全データをプロットしたものを示す。なお、**図-6 (b)**には、試験ケースNo.9のデータもプロットする。



(a) 試験ケース No. 1~No. 4

(b) 試験ケース No. 5~No. 8 と試験ケース No. 9

図-6 強度推定式との比較

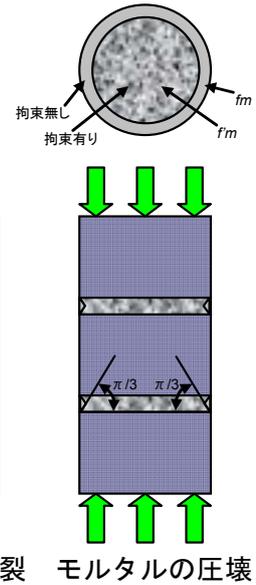


図-5 破壊モード

この結果より、試験ケースNo.1～No.4では、目地厚さが5 mm程度以下では、UFCの割裂強度の推定式(3)の値に比較的近いが、それ以上の目地厚さになった場合、UFCの割裂強度より小さな値を示すとともに、式(5)による推定値も下回る可能性があることがわかった。しかし、目地厚さによる強度低下の傾向は、UFCの割裂強度推定式に近いと思われる。

また、試験ケースNo.5～No.8では、ばらつきもあるが、UFCの割裂強度の推定値と実験結果が、ほぼ等しくなった。これらの原因としては、以下のことがあげられる。

- (i) 目地の厚さが既往のものより小さく、モルタルの圧壊の推定式の適用範囲外であった
- (ii) 目地の破壊において、モルタルの圧壊による横方向の膨張圧とUFCの拘束が生じているが、モルタルの厚さが薄いために膨張圧が小さいこと、UFCの引張強度がひび割れ発生以降も保持されることから、UFCの縦方向強度低下が顕著ならなかった
- (iii) UFCの二軸応力下における構成則は明確ではないものの、補強繊維の効果により圧縮-引張応力領域における強度が一軸圧縮強度に比べさほど低下しなかった

また、全ての供試体の破壊時に、UFC部の割裂が見られたことから、今回製作した目地厚さ程度であれば、UFCの割裂強度が目地構造試験体の圧縮強度に影響している可能性が大きいと考えられる。

また、試験ケースNo.9では、モルタル強度が低いにも関わらず、全ての試験ケースでUFCの割裂強度の推定値を上回るとともに、UFC単体の強度と同等の結果であった。このことから、ある程度のモルタル強度以上であれば、目地厚さをできるだけ薄く管理することが、圧縮強度を向上させる有効な手段であると考えられる。

4. おわりに

UFCを、橋脚基部の断面外周に適用した高耐震性RC橋脚構造に適用するための目地の材料について、円柱供試体を用いて圧縮試験を行った。その結果、本供試体サイズの場合、目地厚さが5 mm程度以下であれば、UFC単体の圧縮強度に対し、一割程度の強度低下とすることができることがわかった。

実構造物では、UFCの上下の接合面をできるだけマッチキャストとなるように製作し、厚さ管理用のスペーサは設けずにモルタルを塗布した後に積み重ねるため、目地厚さは5 mm以下になると考えられる。さらに、目地部の厚さに対するUFC厚さと、平面寸法の割合が、本実験で製作した供試体よりも大きくなるため、実構造物の圧縮特性は母材であるUFCにより近くなるため問題ないといえる。

なお、モルタルによる目地厚さを2 mmとしたUFC型枠を、橋脚基部の断面外周に配置した縮小模型試験体を用い、別途、耐震性能確認実験行っている⁷⁾。この結果、モルタルがUFCの圧縮特性を阻害することは無く、さらに、目地を金網とした同一諸元の試験体に比べ、優れたひび割れ分散性を示し、同等以上の変形性能を有していることを確認している。このことから、一割程度の強度低下は、変形性能には問題ない程度であると考えられる。さらに、弾性係数についても、UFC単体と比較すると若干の低下があるものの、橋脚の変形性能に対しては、特別な影響がない程度であると考えられる。

謝 辞

目地の圧縮試験方法については、法政大学溝淵教授から、貴重なご意見を頂きました。ここに謝意を表します。

本研究は、東京工業大学と鹿島技術研究所の共同研究の一環として行ったものである。高耐震性RC橋脚の開発について貴重なご指導を頂いた川島教授、松崎助教に、紙面を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 山野辺慎一、曾我部直樹、河野哲也：超高強度繊維補強コンクリートを用いたRC橋脚の二方向地震動に対する耐震性能、土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.435-450, 2010年7月。
- 2) 山野辺慎一、河野哲也、齋藤公生、榎本恵太、茂呂拓実、橋岡衛：超高強度繊維補強コンクリート製型枠を用いた高耐震性橋脚の適用—阪神高速大和川線三宮ジャンクション—、橋梁と基礎, Vol.46, No.5, pp.19-24, 2012年5月。
- 3) 土木学会：「超高強度繊維補強コンクリート『サクセム』の技術評価報告書」技術推進ライブラリー3, 2006年11月。
- 4) 今井 和正、是永 健好、服部 敦志、寺島 知宏、甲斐 隆夫：目地モルタルの圧縮実験（その2 強度推定法）、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.65-66, 2007年8月。
- 5) 今井和正、服部敦志、岩室大、稲田博文、是永健好：プレキャスト柱における接合モルタルの圧縮特性、日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.31号, pp.745-750, 2009年10月。
- 6) T.Paulay and M.J.N.Priestley : Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Willy & Sons, Inc. 1992
- 7) 金光嘉久、山野辺慎一、河野哲也、川島一彦、松崎裕、市川翔太：モルタル目地を有するUFC製プレキャスト型枠を用いたRC橋脚の二方向載荷実験と解析、第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集（投稿済）