

## 収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートの 材料特性ならびにRCはりのせん断特性

太平洋セメント(株) 正会員 博(工) ○河野 克哉  
 太平洋セメント(株) 修(工) 川口 哲生  
 太平洋セメント(株) 修(工) 森 香奈子  
 太平洋セメント(株) 博(工) 田中 敏嗣

Abstract : Recently, ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) with high-strength, high-flowability and high-ductility have been developed. With application of this UFC, structural concrete member with lightweight and high-durability can be produced. However, the autogenous shrinkage of this UFC increases due to the decrease in water-binder ratio and due to the increase in curing temperature. Hence, the authors performed the loading tests of RC beams using UFC with shrinkage reducing agents, and clarified the effects on improvement of the shear carrying capacity. The improvement in shear property can be related to the increase in fracture energy and the decreases in shrinkage of UFC containing shrinkage reducing agents.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) , Shrinkage reducing agent , Fracture energy , Shear carryig capacity

### 1. はじめに

圧縮強度 $200\text{N/mm}^2$ 以上を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)は、従来のコンクリートにくらべて引張特性、流動性、耐久性が飛躍的に向上できるため、最近ではこれらの特長が発揮されるような実構造物への適用が広がっている。しかしながら、UFCは水結合材比がきわめて低いことや $90^\circ\text{C}$ の高温養生が必要であることなどから、自己収縮が増加しやすいといった問題点がある。このため、土木学会のUFCの設計・施工指針(案)では、UFCの収縮が異形鋼材によって拘束され、ひび割れが発生することを懸念し、原則としてUFCの内部に異形鋼材を使用しないことになっている<sup>1)</sup>。例えば、UFCの収縮を効果的に低減することで内部拘束ひび割れを抑制できるとすれば、構造部材に対するUFCの適用範囲が広がるとともに、新しい設計・施工を可能にできると考えられる。

本研究では、市販の収縮低減剤ならびに新しく開発された収縮低減剤の2種類をそれぞれ添加したUFCの強度特性、破壊エネルギー、収縮特性を収縮低減剤を添加していない場合と比較する形で検討し、さらにこれらの収縮低減剤を添加したUFCをRCはりに適用した場合のせん断特性について評価した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料ならびに配合

表-1に示すようにUFCの設計・施工指針(案)に準拠した標準配合粉体(粉体中の結合材は以下B、骨材は以下Sと記す)、鋼繊維(以下、Fと記す)および高性能減水剤(以下、SPと記す)に加えて、SRAとして市販の低級アルコール系(以下、SRA1と記す)ならびに新しく開発された高級アルコール系<sup>2)</sup>(以下、SRA2と記す)の2種類を用いた。またSRAの添加による連行空気量の増加を抑制する目的で消泡剤(以下、DFAと記す)を使用し、SRA1にはポリエーテル系(以下、DFA1と記す)を、SRA2にはシリコン系(以下、DFA2と記す)をそれぞれ組み合わせる形で添加した。

表-1 使用材料

種類		略号	成分ならびに物性
標準配合粉体	結合材	B	市販のプレミックス粉体
	骨材	S	市販のプレミックス粉体
補強用繊維	鋼繊維	F	市販の専用品, 長さ15mm, 直径0.2mm, 密度7.85g/cm <sup>3</sup>
混和剤	高性能減水剤	SP	市販の専用品
	収縮低減剤	SRA1	低級アルコールアルキレンオキシド <sup>†</sup> 付加物, 易溶性, 密度1.02g/cm <sup>3</sup>
		SRA2	高級アルコールアルキレンオキシド <sup>†</sup> 付加物, 易溶性, 密度0.98g/cm <sup>3</sup>
	消泡剤	DFA1	ポリエーテル系(ポリアルキレングリコール誘導体)
DFA2		シリコーン系	

表-2 UFCの配合

No.	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	W	SRA1 *1	SRA2 *2	B	S	F	SP	DFA1 *1	DFA2 *1
1	180	15	—	1322	932	157	23.5	B×0.02%	—
2		—	15					—	SRA2×5%
3		—	—					—	—

\*1 Wの一部として内割置換。 \*2 Wに対して外割添加。

表-2はSRA1, SRA2をそれぞれ添加した場合ならびにSRAを添加していない場合のUFCの配合を示したものである。一般に分子中に含まれる炭素数が少ないアルコール(低級アルコール)は水によく溶けるものの, 炭素数が多く, 分子中の炭素水素基(疎水基)の占める割合が高いアルコール(高級アルコール)は水に溶けにくくなる。主成分であるアルコールの分子中の炭素数はSRA1の場合に4個で易溶性を示すものの, SRA2の場合には8個となって難溶性を示すようになる。このため流動性と強度発現性の両方を確保する観点から, 易溶性のSRA1は水量(以下, W)の一部に内割置換で, 難溶性のSRA2はWに対して外割添加で, いずれの場合も添加量(以下,  $V_{sra}$ )を15kg/m<sup>3</sup>として用いた。なお, DFAはWの一部として内割置換し, DFA1は添加量B×0.02%で, DFA2は添加量SRA2×5%でそれぞれ使用した。また, 鋼繊維の体積混入率(以下,  $V_f$ )はすべてのUFCに対して内割2%で一定とした。

### 2.3 SRAを添加したUFCの養生

SRA1, SRA2をそれぞれ添加したUFCならびにSRAを添加していないUFCは, いずれも所定の型枠内に打ち込んで標準熱養生に供した。すなわち, 1次養生(封緘養生: 20°C, 48h)の後で脱型し, 2次養生(蒸気養生: 昇温速度15°C/h, 最高温度90°C, 最高温度保持時間48h, 降温速度15°C/h)を行った。

### 2.4 SRAを添加したUFCの材料特性に関する試験方法

#### (1) 圧縮強度ならびにひび割れ発生強度

圧縮強度(以下,  $f_c$ )ならびにひび割れ発生強度(以下,  $f_{cr}$ )の測定は, それぞれ寸法φ5×10cm, φ10×20cmの供試体にて行った。なお,  $f_{cr}$ はUFCの設計・施工指針(案)に記載されている割裂引張試験から求める方法とし<sup>3)</sup>, 供試体端面にポリエステル箔ひずみゲージを貼り付け, このひずみの計測値が不連続になったときの荷重をひび割れ発生とした。

#### (2) 破壊エネルギー

破壊エネルギー(以下,  $G_F$ )の測定は, JCI-S-002-2003に準じて, 図-1に示した切欠きはり供試体の3点曲げ試験から荷重-ひび割れ肩口開口変位(以下,  $CMOD$ )曲線を求め, JCI-S-001-2003に準じて式(1)にて $G_F$ を算出した。切欠きは標準熱養生を行った供試体で曲げ試験に供する前にカッターにて部分的に切断する形で導入した。

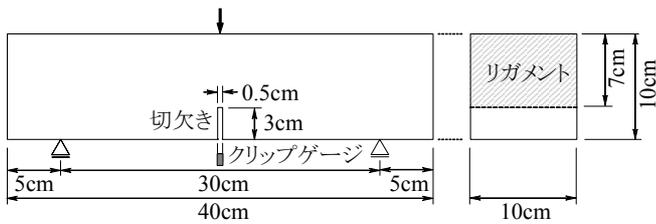


図-1 切欠きはりの3点曲げ試験の方法

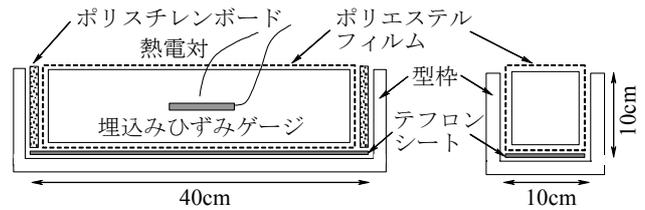


図-2 収縮ひずみの測定方法(材齢48時間以前)

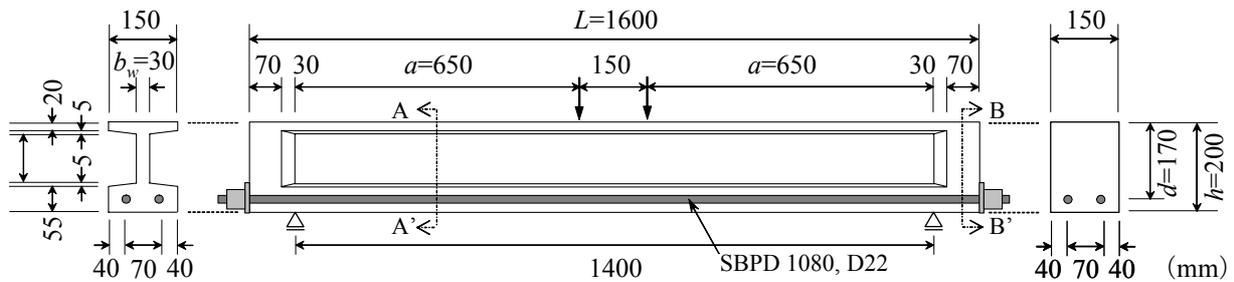


図-3 RCはりの断面諸元

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで、 $W_0$ ：荷重-CMOD曲線下の面積(N・mm)、 $W_1$ ：供試体の自重ならびに載荷治具が成す仕事(N・mm)、 $A_{lig}$ ：リガメントの面積(mm<sup>2</sup>)。

なお、供試体は最終的に破壊しないため、ひび割れ発生後の最大荷重とその下降域が十分に確認できた時点(CMOD=10mm)で曲げ試験を終了し、その時点で破壊したものと仮定して $G_F$ を計算した。

(3) 収縮ひずみ

1次養生(封緘養生、20℃)中の材齢48時間までは、図-2に示すように供試体の自由な変形の拘束(底面にテフロンシートならびに両端面にポリスチレンボードの設置)、および水分の逸散を防止(全面にポリエステルフィルムの設置)した型枠(寸法10×10×40cm)内で凝結の始発に達した時点から供試体中心部に設置した埋込みひずみゲージ(弾性係数39N/mm<sup>2</sup>、標点距離10cm)にて測長した。その後の2次養生(蒸気養生、90℃)では、供試体を脱型(全面に施したポリエステルフィルムを除去)した状態にて同様に埋込みひずみゲージにて測長した。なお、収縮ひずみの算出では、熱電対にて水和熱を実測し、UFCの線膨張係数を $13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して<sup>4)</sup>、長さの補正を行った。

2.4 SRAを添加したUFCはりのせん断特性に関する試験方法

(1) RCはりの作製方法

図-3はRCはりの断面諸元を示したものであり、ウェブ厚 $b_w=30\text{mm}$ 、有効高さ $d=170\text{mm}$ のI型断面を有する全長 $L=1600\text{mm}$ のはり部材とした。引張縁の軸方向には異形PC棒鋼(SBPD 1080, D22)を使用し、両側のせん断スパンにはせん断補強鉄筋を一切使用しない配筋状態とした。RCはりとはUFCの自己充填性を利用して一方向から流込み成形し、標準熱養生を行った後で載荷に供した。なお、表-2に示した3配合にてRCはりを作製し、供試体数は各配合につき1本ずつとした(計3本)。

(2) RCはりの載荷方法

RCはりは図-3に示すように支間1400mm、等モーメント区間150mm、せん断スパン有効高さ比 $a/d=3.67$ となるように支点と載荷点を設置し、耐圧機にて2点集中荷重を静的に作用させた。荷重をロ

表-3 SRAを添加したUFCの流動性、凝結および強度特性

No.	UFCの配合			フレッシュ性状		凝結特性	力学特性		
	SRA種類	$V_{sra}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_f$ (%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)	始発時間 (h-m)	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{cr}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_F$ (N/mm)
1	SRA1	15	2	272	2.5	14-35	233.0	9.51	18.54
2	SRA2	15	2	280	3.5	12-15	207.0	9.98	19.99
3	無し	0	2	272	3.8	10-30	223.5	8.06	16.20

フロー値：練上がりから180秒経過後(無振動)，始発：プロクター貫入抵抗値3.5N/mm<sup>2</sup>(F無し)，  
 空気量：質量法， $f_c'$ ：圧縮強度， $f_{cr}$ ：ひび割れ発生荷重， $G_F$ ：破壊エネルギー

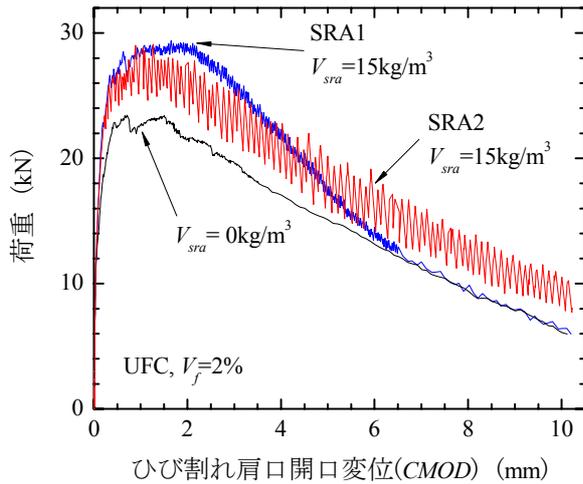


図-4 切欠きはりの荷重-CMOD曲線

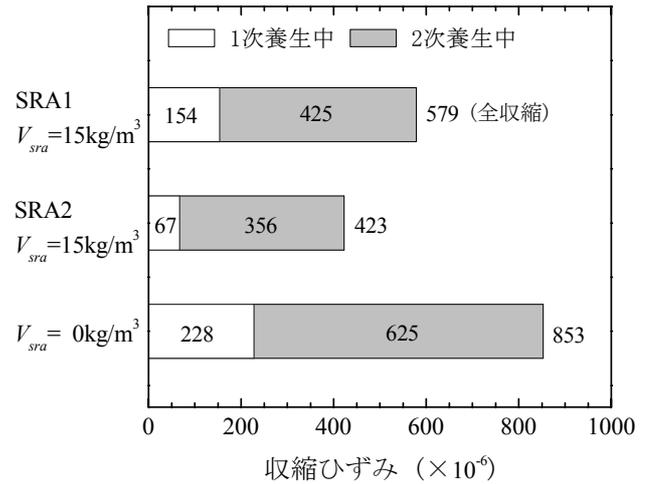


図-5 養生中に生じるUFCの収縮ひずみ

ードセルで検出しながら，はり中央たわみならびに鋼材ひずみを測定した。なお，凝結の始発から載荷直前(1次養生ならびに2次養生終了後)までに生じた収縮に起因する内部鋼材の初期ひずみも測定した。

### 3. 実験結果ならびに考察

#### 3.1 SRAを添加したUFCの材料特性

表-3は，SRA1，SRA2をそれぞれ添加したUFCならびにSRAを添加していないUFCの流動性，凝結および強度特性を示したものである。UFCの $f_c'$ は，SRAを添加していない場合にくらべてWに内割置換したSRA1の場合はほぼ同等，Wに外割添加したSRA2の場合はやや低下したものの，いずれのSRAを添加した場合においても200N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度となった。UFCの $f_{cr}$ は，いずれのSRAを添加した場合にも増大しており，SRA1を用いた場合よりもSRA2を用いた場合の方が $f_{cr}$ が高くなった。凝結の始発時間は，いずれのSRAを添加した場合にも延長される傾向を示すが，Wに外割添加したSRA2の場合はWに内割置換したSRA1の場合よりも始発時間を短縮できることがわかる。

図-4は切欠きはりの荷重-CMOD曲線を示したものである。いずれのSRAを添加した場合にもピーク荷重が増加しており，とくにSRA2を添加した場合にはSRAを添加していない場合にくらべてピーク以降の下降域でも同一のCMODに対して高い荷重を常に維持できることがわかった。このため，表-3に示すようにUFCの $G_F$ は，いずれのSRAを添加した場合でもSRAを添加していない場合にくらべて向上するものの，SRA2を添加した場合にもっとも高い値を示した。なお，SRAを添加すると，荷重-CMOD曲線は荷重低下と増加を細かく繰り返す形で振幅が観察されるようになり，とくにSRA2を添加した場合には顕著となった。これは，SRA2の添加により母材と繊維との界面付着が改善されること

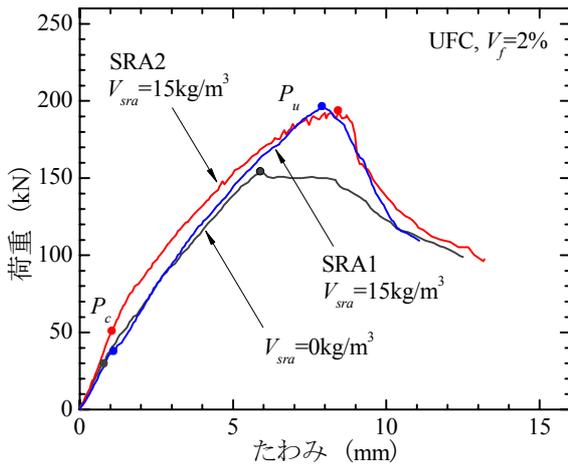


図-6 RCはりの荷重-たわみ曲線

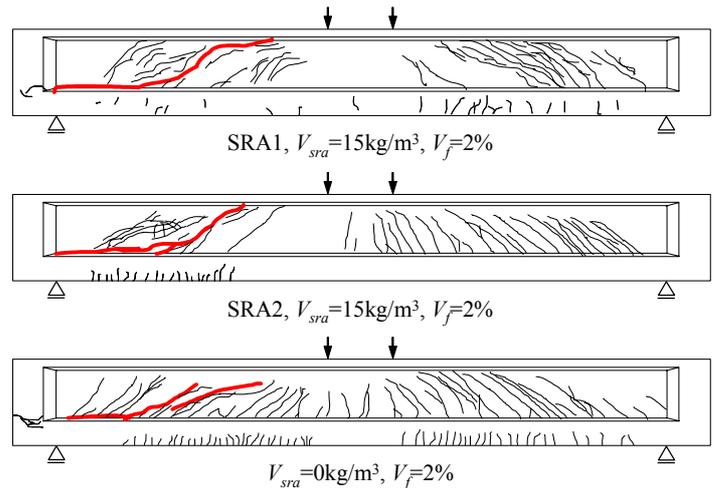


図-7 荷重後におけるRCはりのひび割れ状況

表-4 SRAを添加したUFCはりの力学特性

No.	UFCの配合			載荷前(養生終了後)	RCはりの載荷試験結果			
	SRA種類	$V_{sra}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_f$ (%)	鋼材の初期ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	$P_c$ (kN)	$P_u$ (kN)	$v_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形式
1	SRA1	15	2	604	36.5	196.4	19.3	斜め引張破壊
2	SRA2	15	2	457	49.8	190.8	18.7	斜め引張破壊
3	無し	0	2	945	32.2	150.8	14.8	斜め引張破壊

$P_c$ : 曲げひび割れ発生荷重,  $P_u$ : 終局荷重,  $v_u$ : せん断強度(= $P_u/2/(b_w h)$ )

で、大きな引張力を分担できるようになった繊維が母材との付着切れを起こした際に急激に引き抜けるために生じた現象と考えられる。

図-5は養生中に生じたUFCの収縮ひずみの測定結果を示したものである。1次養生ならびに2次養生を通じた全収縮ひずみは、SRAを添加しない場合に比べて市販のSRA1を添加した場合には32%ほど、SRA2を添加した場合には50%ほど低減できており、新しく開発されたSRA2を用いることでUFCの収縮を大幅に低減できることがわかった。このようにUFCに対するSRA2の収縮低減効果は、普通コンクリートや高強度コンクリートの収縮低減を前提に適用される市販のSRA1で想定されていた効果を大きく上回るものであった。

ここで、SRAを添加した場合にUFCの $f_{cr}$ や $G_F$ が向上した原因には、i) 収縮を鋼繊維が拘束することで母材に生じる引張応力を抑制できること、ii) 母材と鋼繊維の界面に生じる微細収縮ひび割れを抑制することで鋼繊維の架橋効果を向上できること、などが関与したのではないかと考えられる。なお、このような効果は収縮低減剤と短繊維を併用することで高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性が改善された既往の研究例<sup>5)</sup>にきわめて類似している。

### 3.2 SRAを添加したUFCはりのせん断特性

図-6はSRA1, SRA2をそれぞれ添加したUFCならびにSRAを添加していないUFCで作製したRCはりの荷重-たわみ曲線を示したものであり、図-7に示すようにいずれのUFCを用いたRCはりも斜めひび割れによって破壊した(図中では最終的に破壊に至った斜めひび割れを太線で表示した)。下フランジ部分はSRAの添加によって初期に生じる引張応力が低下し、ひび割れ発生が減少しているものの、ウェブ部分についてはSRAの添加の有無によってひび割れ分散性は大きく変化していない。いずれのSRAを添加したUFCはりでも等モーメント区間における曲げひび割れ発生荷重(以下、 $P_c$ )ならびに終局荷重(以下、 $P_u$ )の増大が認められた。UFCはりの $P_u$ はSRAを添加していない場合に比べてSRA1を

添加した場合1.30倍，SRA2を添加した場合1.27倍となっており，ほぼ同様に耐力を向上させることができる。表－3に示すようにいずれのSRAを添加した場合にもUFC自体の $G_F$ が増大した結果を勘案すると，SRAの添加によって，ひび割れたUFC，言い換えると，はりに生じた斜めひび割れの間で架橋した鋼繊維の応力伝達性能が向上し，はり部材のせん断性能を改善できたものと考えられる。

表－4は，SRAを添加したUFCはりの載荷試験結果をまとめたものである。UFCの収縮が低減するほど，載荷直前までに生じる内部鋼材の初期ひずみが小さくなり，はりの $P_c$ も増大している。これは，SRAの添加によって，i) 内部鋼材によるUFCの収縮拘束で生じる下縁引張応力が低減できること(巨視的収縮拘束応力の低減)，ii) 鋼繊維による収縮拘束を低減してUFC自体の $f_{cr}$ が増大すること(微視的収縮拘束応力の低減)，などに起因するものと考えられる。なお，収縮の低減効果がもっとも高いSRA2を添加したUFCはりでは，SRA1を添加した場合よりも $P_c$ の値が大幅に向上しており，図－6に示した荷重－たわみ曲線の結果から，初期剛性の改善にも寄与できることがわかる。

なお，SRAの添加による繊維補強RCはりのせん断強度の改善は，既往の研究<sup>6),7)</sup>にて確認された効果ときわめて類似した機構によるものと考えられる。

#### 4. まとめ

収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートの材料特性ならびにRCはりのせん断特性について，本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 超高強度繊維補強コンクリートに収縮低減剤を添加することで，標準熟養生中に生じる収縮を低減するとともに破壊エネルギーを向上できることがわかった。
- (2) 収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートをRCはりに適用した場合には，ひび割れ発生荷重ならびにせん断強度を増大できることがわかった。
- (3) 新しく開発された高級アルコール系の収縮低減剤は超高強度繊維補強コンクリートの標準熟養生中に生じる収縮を50%低減することが可能であり，RCはりの初期剛性の向上やせん断強度の増加といった力学特性の改善に高い効果が認められた。

#### 5. 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，p.4，2004
- 2) 佐藤正己，田中敏嗣，杉山真悟：収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートの収縮特性，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集第V部門，pp.437-438，2009
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，pp.11-12，2004
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，p.20，2004
- 5) 河野克哉，大滝晶生，二羽淳一郎：混和材料と合成繊維を併用した高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1369-1374，2005
- 6) 河野克哉，二羽淳一郎，大滝晶生，村田裕志：高強度軽量骨材コンクリートはりのせん断特性に及ぼす合成短繊維と収縮低減剤の併用効果，土木学会論文集 第E部門，Vol.63，No.4，pp.575-589，2007
- 7) 河野克哉，二羽淳一郎，大滝晶生：ポリプロピレン短繊維と有機系収縮低減剤を併用した高強度軽量RCはり部材のせん断強度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，pp.1567-1572，2008