# 論文 超高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮と寸法効果 の評価について

三谷 昂大\*1·大賀 琢麻\*2·佐藤 良一\*3

要旨:超高耐久化と合理的な構造設計を目指し,水結合材比(W/B)0.15の自己収縮を低減しない超高強度コン クリート(HSF)と,粗骨材全容積の20%を廃瓦粗骨材で置換した超高強度コンクリート(G20-EX-R)を用いて, 有効高さ250,500,1000mmの3種類のせん断補強筋及び圧縮鉄筋を有さないRCはりのせん断実験を行い, 斜めひび割れ発生強度の検討を行った。その結果,等価引張鉄筋比,割裂引張強度,特性長さ,有効高さを 考慮することにより,収縮の大きさに拘わらず,斜めひび割れ発生強度とその寸法効果(有効高さの-2/5 乗) を統一的に評価できることがわかった。

キーワード:超高強度コンクリート、内部養生、自己収縮、斜めひび割れ発生強度

# 1. はじめに

高性能化の一環として、近年、自己収縮応力が構造性 能に及ぼす影響が検討されている。曲げ性能については、 自己収縮により曲げ変形、曲げひび割れ幅が増大するこ とが明らかにされている<sup>1)</sup>。せん断性能については、斜 めひび割れ発生強度が低下し、自己収縮の影響を取り入 れた斜めひび割れ発生強度算定式が提案されている<sup>2)</sup>。 一方、W/B=0.15 の超高強度コンクリート(UHSC)の内部 養生材として粗骨材の一部を置換した廃瓦は、膨張材、 収縮低減剤と併用することにより、高い収縮低減効果を 発揮することが明らかにされた<sup>3)</sup>が、構造部材の性能は 検討されていない。そこで本研究では、粗骨材全容積を 廃瓦粗骨材で20%置換し、さらに膨張材、収縮低減剤を 併用したコンクリート(G20-EX-R)を用いた RC はり の斜めひび割れ発生強度を、対応する収縮低減を図らな いコンクリート(HSF)を用いた RC はりのそれと比較し て明らかにするとともにその評価方法を検討する。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 材料, 配合, 供試体の作製

本研究で用いた使用材料を表-1に、コンクリートの配 合を表-2に示す。表-2に示すように、自己収縮の大き いHSFと、収縮低減した G20-E.X-Rの2種類のコンクリ ートを製造した。膨張材の使用量は内部養生しているの で標準使用量 20kg/m<sup>3</sup>の半分とした。

RC はりは、これら 2 種類のコンクリートを用い、有 効高さ d=250、500、1000mm それぞれ各 1 体、計 6 体作 製した。以後、有効高さ d=250mm の供試体を HSF-25、 G20-EX-R-25 と表記し、他も同様に表記する。供試体の 形状、寸法、配筋状態の一例として、d=1000mm の RC はりを図-1 に示す。また、自由収縮ひずみ測定用の RC はりと同断面の供試体もそれぞれ 1 体作製した。さらに、

	材料名	記号	種類 / 特性							
	セメント	Н	早強セメント / 密度:3.14g/cm <sup>3</sup>							
		SFLC	シリカヒュームプレミックスセメント / 密度:3.08g/cm <sup>3</sup>							
	細骨材	S	砕砂 / 表乾密度:2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.13%							
	粗骨材	G	砕岩 / 表乾密度:2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.73%, 破砕値11%							
		G(廃瓦)	廃瓦 / 表乾密度:2.27g/cm <sup>3</sup> , 吸水率8.66%, 破砕値21.38%							
	混和材	SF	シリカヒューム / 密度:2.24g/cm <sup>3</sup>							
	混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)							
	膨張材	EX	石灰エトリンガイト複合系 / 密度:3.05g/cm <sup>3</sup>							
	収縮低減剤	R	低級アルコール系							

表-1 使用材料

#### 表-2 コンクリート配合

問わる	セメント		単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
	の種類	VV/B	w	С	S	G	G(廃瓦)	SF	EX	R		
HSF	н	0.15	155	930	407	849	0	103	0	0		
G20-EX-R	SFLC	0.15	149	1023	425	679	148	0	10	6		

\*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

\*2 広島大学大学院 工学研究科 工修 (非会員)

\*3 広島大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)



図-1 RC はり供試体と載荷試験の概要



写真-1 RC はり載荷試験状況

寸法 100mm×100mm×400mm の破壊エネルギー測定用 の供試体も 10 体合わせて作製した。これらの全ての供 試体は材齢7日まで封緘養生し,その後乾燥暴露した。 2.2 RC はりの計測および載荷試験方法

RC の支間中央たわみ,曲げせん断域のせん断変位お よび鉄筋ひずみを,高感度変位計,ワイヤストレインゲ ージにより測定した。自己収縮ひずみは,無拘束供試体 の高さ中央位置に埋め込んだ低弾性埋込み型ひずみ計 により計測した。

写真-1に RC はりの載荷状況を示す。載荷は単調増加し,所定の荷重で計測を行った。

### 2.3 破壊エネルギー試験概要

# (1) 試験方法

試験は、日本コンクリート工学協会の試験方法<sup>4)</sup>に準 じて行い、試験体中央に幅 4mm,深さ 50mm の切欠きを 設けた。試験体の概要を図-2 に示す。

載荷は、荷重の降下域の変形を測定するため、容量 100kNの変位制御型試験機を用いて行った。試験体のス パンは 300mm とし、両支点はローラを配置して水平方 向に可動な構造とした。計測項目は、荷重、ひび割れ開 口変位(CMOD)、載荷点の鉛直変位である。CMOD は試 験体底面の切欠き部中央で、鉛直変位は試験体底面の切 欠きを挟んだ2点で、クリップゲージ(感度:1/1000mm) により計測した。写真-2に試験状況を示す。



図-2 破壊エネルギー試験体概要



写真-2 破壊エネルギー試験状況

#### (2) 破壊エネルギー評価方法

コンクリートの破壊エネルギーは,以下の算定式(1) から求めた<sup>4)</sup>。また,特性長さ l<sub>ch</sub>は式(2)より求めた<sup>5)</sup>。



表-3 破壊エネルギー試験結果一覧

		破壊エネルギー	引張強度	ヤング係数	特性長さ			破壊エネルギー	引張強度	ヤング係数	特性長さ
配合		Gf	ft	Ec	lch	配	合	Gf	ft	Ec	lch
		N/mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	mm			N/mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	mm
	1	0.289		48.9	529	0 0 3 0 5 5 5 6 6 6 2 7 4	1	0.149	5.10	45.6	262
	2	0.202			370		2	0.128			224
	3	0.186			341		3	0.131			230
	4	0.198			363		4	0.170			298
	5	0.196	196 5.17   183 192   173 155		359		5	0.113			198
HSF	6	0.183			335		6	0.173			303
	$\overline{O}$	0.192			352		$\overline{\mathcal{I}}$	0.170			299
	8	0.173			317		8	0.116			203
	9	0.155			284		9	0.162			285
	10	0.187			342		10	0.148			259
	平均	0.186	5.17	48.9	340		平均	0.146	5.10	45.6	256

なお、ヤング係数および引張強度の測定は RC はり載 荷時(HSF:材齢 103 日, G20-EX-R:材齢 98 日)に、破壊 エネルギー試験は HSF:材齢 130 日, G20-EX-R:材齢 103 日に実施した。

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}}$$
(1)

ここで、W<sub>0</sub>: 試験体が破断するまでの荷重-CMOD 曲 線下の面積[N・mm], W<sub>1</sub>: 試験体の自重及び載荷治具が なす仕事[N・mm], A<sub>lig</sub>: リガメントの面積[mm<sup>2</sup>]

$$l_{ch} = \frac{E_c G_f}{f_t^2} \tag{2}$$

ここで、E<sub>c</sub>:ヤング係数[N/mm<sup>2</sup>],f<sub>t</sub>:引張強度[N/mm<sup>2</sup>]

#### 3. 実験結果

#### 3.1 自己収縮ひずみの経時変化

図-3, 図-4 に自由収縮ひずみおよびスパン中央の鉄筋 ひずみの経時変化測定値を示す。載荷時における自由収 縮ひずみは, HSF で-1069×10<sup>-6</sup>~-1270×10<sup>-6</sup>, G20-EX-R で-50×10<sup>-6</sup>~-100×10<sup>-6</sup> であった。収縮の増加傾向はある ものの内部養生による高い収縮低減効果が認められる。 3.2 破壊エネルギー特性

図-5, 図-6 に HSF および G20-EX-R の荷重-CMOD 曲 線を示す。また, 試験結果一覧を表-3 に示す。なお, HSF ①の試験結果は誤差が大きいため除外した。

	供試体名	引張鉄筋比	コンクリート材料特性											
配合名			圧縮強度	ヤング 係数	引張強度	自己収縮   引張鉄    ひずみ   ひずみ		<ul><li>斜めひび割れ</li><li>発生時</li></ul>		終局時		破壊モード		
			p <sub>s</sub>	f <sub>c</sub> '	Ec	f <sub>t</sub>	${\cal E}_{sh}$	ε <sub>s,sh or ex</sub>	V <sub>c,mea</sub>	$\tau$ <sub>c,mea</sub>	$V_{u,mea}$	$\mathcal{T}_{u,mea}$		
		%	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm	μ	μ	kN	$N/mm^2$	kN	$N/mm^2$			
	HSF-25	1.55	157.0	48.9	5.17	-1270	-376	115	1.53	115	1.53	斜め引張破壊		
HSF	HSF-50	1.59				-1069	-353	150	1.00	150	1.00	斜め引張破壊		
	HSF-100	1.59				-1262	-297	285	0.95	285	0.95	斜め引張破壊		
	G20-EX-R-25	1.55				-50	-72	112	1.49	166	2.21	せん断圧縮破壊		
G20-EX-R	G20-EX-R-50	1.59	149.0	45.6	5.10	-100	-102	171	1.14	183	1.22	斜め引張破壊		
	G20-EX-R-100	1.59				-99	-86	263	0.88	624	2.08	せん断圧縮破壊		

表-4 載荷時材料特性および載荷試験結果一覧



荷重-CMOD 曲線に囲まれた面積は、ひび割れ進展に 要する"破壊エネルギー"を意味するが、図-5と図-6と の比較で見られるように、G20-EX-Rの面積は若干小さ く、粗骨材全容積を廃瓦粗骨材で20%容積置換すること により、約22%低下した。これは、廃瓦粗骨材の破砕率 がおよそ20%と天然骨材の2倍と大きく、そのために破 壊進行領域の破壊エネルギーが小さく、また粗骨材の架 橋効果の低下をもたらしたためと考えられる。また、破 壊後の試験体破断面の視察においてほとんどの粗骨材 に破断が認められることからも、骨材強度の低下が破壊 エネルギーの低下に大きく影響したものと考えられる。 3.3 RC はりのせん断特性

**表-4**に結果の一覧を示す。HSF はすべて斜め引張破壊 したが, d=1000mm の G20-EX-R はせん断圧縮破壊し, 一部破壊モードに違いが見られた。

図-7 に荷重と支間中央たわみの関係の結果を示す。 G20-EX-R の RC はりの荷重一たわみ関係で見られる面 積は HSF より大きく,収縮の低減効果が認められる。

図-8 にせん断力とせん断変位の関係を示す。斜め引張 破壊する供試体は、斜めひび割れ発生時の荷重低下が明 確であるが、せん断圧縮破壊をする場合は、斜めひび割 れが生じても荷重低下が明確でなく、荷重とたわみの関 係から斜めひび割れ発生強度の判断が困難な場合があ る。そのため、斜めひび割れの発生は、せん断変位も考 慮して決定した。

HSF の斜めひび割れ発生強度は G20-EX-R のそれとほ ぼ等しく,収縮低減効果による斜めひび割れ発生強度の 増大は認められなかった。これは,コンクリートの引張 強度や破壊エネルギー等の物性値の相違による可能性 がある。

# 4. 斜めひび割れ発生強度の検討

佐藤・河金らによって提案された式(3)<sup>2)</sup>をもとに,収 縮および破壊エネルギーの低下が斜めひび割れ発生強 度に及ぼす影響を検討する。

まず、本実験で得られた斜めひび割れ発生強度を、鉄筋の公称断面積を用いた引張鉄筋比およびせん断スパン比の項で正規化した式(4)の斜めひび割れ発生強度 τ<sup>\*</sup>。 と有効高さの関係を図-9 に示す。

$$\tau_{c} = 0.206 \left( E_{c} G_{f} \right)^{2/5} f_{t}^{1/5} \left( 100 p_{s,e} \right)^{1/3} d^{-2/5} \left( 0.75 + 1.4 / (a/d) \right)$$
(3)

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{\{(100p_s)^{1/3}(0.75 + 1.4/(a/d))\}}$$
(4)

図-9に示すようにG20-EX-Rの斜めひび割れ発生強度 τ<sup>\*</sup>。は、収縮が小さいにも拘わらず、いずれも HSF の場 合とほぼ同様である。そこで、G20-EX-R の斜めひび割 れ発生強度が収縮低減により増加しなかった要因を以 下の節で検討する。

# 4.1 収縮が斜めひび割れ発生強度に及ぼす影響

斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響を検討す るため,等価鉄筋比 p<sub>se</sub><sup>2)</sup>の概念を適用して検討を行った。 等価鉄筋比の概念とは,図-10 に示すように,収縮によ る載荷前後の引張鉄筋ひずみ変化量の増大は,機能的に は,引張鉄筋比が小さくなることと等価であるとするも ので,式(5)で示される。

$$p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s \tag{5}$$

ここで、 $\epsilon_s$ :曲げ理論を用いて求めた斜めひび割れ発 生時の引張鉄筋ひずみ、 $\epsilon_{s0,def}$ :コンクリート応力ゼロ 状態時の引張鉄筋ひずみ

等価鉄筋比を用いて正規化した式(6)の斜めひび割れ 発生強度  $\tau^*_{ce}$ と有効高さの関係を図-11 に示す。

$$\tau_{c,e}^* = \frac{\tau_c}{\{(100p_{s,e})^{1/3}(0.75+1.4/(a/d))\}}$$
(6)



図-9 公称鉄筋比で正規化した斜めひび割れ発生強度



図-10 収縮による載荷前後の鉄筋ひずみ変化量の増大



図-11 等価鉄筋比で正規化した斜めひび割れ発生強度

図-11 に示すように等価引張鉄筋比を用いて正規化した斜めひび割れ発生強度によれば、G20-EX-R の強度は HSF に比べ最大で 17%小さい。このことは、破壊エネル ギーおよび割裂引張強度などの材料特性の影響による ものと考えられる。

#### 4.2 材料特性が斜めひび割れ発生強度に及ぼす影響

「3.実験結果(2)破壊エネルギー試験結果」で述べたように、G20-EX-R の破壊エネルギーは HSF に比べて約22%低下している。また、表-4 に示したように、本研究

においてヤング係数および割裂引張強度に大きな差は ない。よって、破壊エネルギーの低下が斜めひび割れ発 生強度の低下をもたらしたと考えられる。図-12 に斜め ひび割れ発生強度に及ぼす破壊エネルギーの影響を示 す。図中の括弧内の数字は、HSF に対する G20-EX-R の 破壊エネルギーおよび斜めひび割れ発生強度 τ<sup>\*</sup><sub>c,e</sub>の比を 示している。破壊エネルギーが22%低下したことにより、 斜めひび割れ発生強度は最大で 17%低下した。

# 5. 寸法効果の検討

佐藤・河金ら<sup>2)</sup>が Gustafsson ら<sup>5)</sup>の手法に基づいて導 出したせん断強度算定式 (式(3))に基づいて、本研究に おける実験値を  $\tau/f_t \propto (d/l_{ch})^{2/5}$ に従って整理すると図-13 のようになる。図中には、河金らの実験データ 12 体<sup>6)</sup> (*d*=250mm,500mm,1000mm, *p<sub>s</sub>*=1.55%~1.59%, 圧縮強 度 *f<sub>c</sub>*'=117N/mm<sup>2</sup>~126N/mm<sup>2</sup>, 割裂引張強度 *f<sub>i</sub>*=6.6N/mm<sup>2</sup> ~ 7.4N/mm<sup>2</sup>, 破壊エネルギー G<sub>f</sub>=0.201N/mm~ 0.231N/mm) も同様に整理して示した。

図-13 に示すように, HSF と G20-EX-R の斜めひび割 れ発生強度とその寸法効果は, 等価引張鉄筋比, 割裂引 張強度, 破壊エネルギー, 有効高さを考慮することによ り, 収縮の大きさに拘わらず, 有効高さの-2/5 乗で精度 良く評価できる。

以上のことから、収縮低減効果による斜めひび割れ発 生強度の増大は認められなかった要因として、G20-EX-R の収縮低減による強度増大効果と、小さい破壊エネルギ ーの強度低下への影響が相殺したものと考えられる。

# 5. まとめ

- (1)廃瓦粗骨材による内部養生,膨張材および収縮 低減剤の併用は,高い収縮低減効果がある。
- (2) 廃瓦粗骨材を 20%容積置換することにより、破 壊エネルギーが 22%低下した。
- (3) 収縮低減効果と破壊エネルギー低下が相殺し, RC はりの斜めひび割れ発生強度はほぼ同等で あった。
- (4)等価引張鉄筋比,割裂引張強度,破壊エネルギ 一,有効高さを考慮することにより,収縮の大 きさに拘わらず,斜めひび割れ発生強度とその 寸法効果を統一的に評価できる。

なお、本研究は国交省中国地方整備局三次河川国道事 務所からの受託により実施した研究(課題:廃瓦粗骨材 による超高強度・高耐久コンクリートを用いた道路橋耐 久性向上技術の研究)であり、関係各位にお礼を申し上 げる。



#### 参考文献

- 谷村充,佐藤良一,平松洋一,兵頭彦次:若材齢時 長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ幅・変 形の一般的評価方法,土木学会論文集,V-63, pp.181-195,2004.
- Sato, R. and Kawakane, H. : A new concept for the early age shrinkage effect on diagonal cracking strength of reinforced HSC beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.6,No. 1, pp. 45-67, 2008. (Invited paper)
- 3) 鈴木雅博ほか:超高強度 RC プリズムの自己応力低 減に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 4) 社団法人 日本コンクリート工学協会:コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書,2001
- Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294,1988.
- 河金甲,佐藤良一:高強度 RC はりの斜めひび割れ 発生強度に及ぼす収縮の影響評価,土木学会論文集, V-65, pp.178-197, 2009.