

論文 廃瓦骨材を活用した RC はりのせん断強度

Mwangi M. MACHARIA*1・小川 由布子*2・山口 克己*3・佐藤 良一*4

要旨：水セメント比 (W/C)，廃瓦骨材 (PCA) 置換率および PCA の粗骨材 (PCCA)，細骨材 (PCFA) の相違を検討要因とし、PCA の内部養生が高炉 B 種 RC はりのせん断特性に及ぼす影響の検討を行った。W/C は 0.5, 0.35 であり、PCA の容積置換率は W/C=0.5 の場合、粗骨材で 0%, 10%, 20%, 細骨材で 12%, W/C=0.35 の場合は粗骨材で 0%, 20%, 30% である。RC はりは有効高さ 250mm, 鉄筋比 1.03% である。実験の結果、RC はりのせん断強度は W/C=0.5 の場合、PCCA 置換率 10% で 30%, PCFA12% で 40% 増加し、PCFA の効果が高かった。W/C=0.35 の場合は置換率によらず約 15% 低下した。

キーワード：高炉 B 種コンクリート，廃瓦骨材，内部養生，鉄筋コンクリート，せん断強度

1. はじめに

環境負荷低減を目的に、建設リサイクル法やグリーン購入法が制定され、産業副産物である高炉スラグ微粉末を含む高炉セメント B 種が実構造物に広く使用されている (セメント協会によれば 2012 年の生産量が全体の 2 割)。高炉セメント B 種を用いたコンクリート (BBC) は普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリート (NC) よりセメントの水和反応が遅く、強度発現は、特に若材齢時の養生の影響を強く受ける¹⁾。初期に乾燥を受けると、その後湿潤状態を保っても、強度発現が悪くなる²⁾とともに、耐久性の低下および乾燥収縮が増大することもある¹⁾。このため BBC の湿潤養生期間は NC の場合よりも長くする必要がある²⁾が、実構造物においては、養生が十分に行われない場合もある。

屋根瓦の製造時に発生する約 10,000t/年の JIS 規格外品石州瓦は、一部が路盤材として再利用されているが、大部分は産業廃棄物として埋め立て処分されており、廃瓦の有効活用が望まれている。

これらに対応するために、重松ら³⁾、佐藤ら⁴⁾はセメントの水和反応に伴って水分を供給する内部養生材として適度な吸水率と比較的高い強度を持つ廃瓦に着目し、廃瓦粗骨材 (PCCA) を BBC に適用した結果、収縮低減および強度増進などの効果があることを報告した。

廃瓦骨材 (PCA) を構造用コンクリートに適用する場合、無筋コンクリートの力学特性、耐久性に関わる諸特性と共に鉄筋コンクリート (RC) 部材の力学特性を把握する必要がある。中でもせん断強度の把握は、せん断破壊が急激に生じ壊滅的な破壊をもたらすため、特に重要である。

PCCA の破砕値は、BS812 の試験法によれば、内部養生材として実績のある人工軽量骨材の半分程度であるが、天然砕石の倍程度と大きい。ちなみに破砕値が大きいと

破砕しやすいことを意味する。軽量骨材は、破砕値が大きい⁵⁾ためそれを粗骨材全量置換すれば、RC はりのせん断強度の低下をもたらすことが知られている⁵⁾・⁶⁾。また、超高強度コンクリートを用いた RC はりの場合は、PCCA20% 置換であっても、せん断強度が低下することが報告されている⁷⁾。

以上のことを踏まえて本研究では、PCA の構造物への実用化を目指して高炉 B 種 RC はりに適用し、その内部養生効果が RC はりのせん断特性に及ぼす影響の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究において使用した材料を表-1 に示す。セメントには高炉スラグ微粉末 40~45% 置換の高炉セメント B 種を使用した。

粗骨材は黒瀬町産石英斑岩砕石および江津産廃瓦、細骨材は黒瀬町産石英斑岩砕砂を用いた。廃瓦粗骨材は 7 日間吸水させたものを表乾状態に調整し使用した。水セメント比は 0.5 および 0.35 とした。

コンクリートの配合を表-2 に示す。水セメント比が 0.5 の場合、細骨材率 (s/a) を 44.6%, 単位水量を 170kg/m³ の一定とした。廃瓦粗骨材の置換率は、容積比で 0%, 10% および 20% とした。廃瓦細骨材は、廃瓦粗骨材の内部養生水量 (吸水量) と同等となるよう調整し、容積比で 12% 置換した。

水セメント比 0.35 の場合、細骨材率 (s/a) を 40.3%, 単位水量を 170kg/m³ の一定とした。廃瓦粗骨材の置換率を容積比で 0%, 20% および 30% とした。また、引張鉄筋は、曲げ破壊を防ぎ確実にせん断破壊を生じさせるため、高強度の異形 PC 鋼棒 C 種 1 号 (記号：

*1 広島大学 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

*2 広島大学 工学研究院社会環境空間部門 博士 (工学) (正会員)

*3 国土交通省 中国地方整備局 浜田河川国道事務所 (非会員)

*4 広島大学 工学研究院社会環境空間部門 工博 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	記号	物理特性
セメント	高炉セメントB種	BB	密度3.02 g/cm ³ 、比表面積3760cm ² /g
細骨材	石英斑岩砕砂（広島県東広島市黒瀬町産）	S	表乾密度2.58 g/cm ³ 、吸水率1.56%
	石英斑岩乾式砕砂（広島県東広島市黒瀬町産）	DS	表乾密度2.57 g/cm ³ 、吸水率1.71%
	廃瓦細骨材（江津産）	PCFA	表乾密度2.29 g/cm ³ 、吸水率8.1%
粗骨材	石英斑岩砕石（広島県東広島市黒瀬町産）	G	表乾密度2.62 g/cm ³ 、吸水率0.59%
	廃瓦粗骨材（石州瓦）	PCCA	表乾密度2.26 g/cm ³ 、吸水率9.0%

表-2 配合表

配合記号	W/C	目標		s/a	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤	打込み 温度 (°C)	
		スランブ (cm)	空気量 (%)		W	BB	混合砂			混合砕石			
							S	DS	PCFA	G			PCCA
50BBC	0.5	8±2	4.5±1.5	44.6	170	340	503	270	-	977	-	0.90%	14.0
50BBC-G10							880	84	-	880	84		23.0
50BBC-G20							781	170	-	781	170		15.0
50BBC-S12							441	236	85	977	-		24.0
35BBC	0.35	18±2	4.5±1.5	40.3	170	486	423	226	-	977	-	1.20%	16.5
35BBC-G20							781	170	-	781	170		24.0
35BBC-G30							684	253	-	684	253		16.0

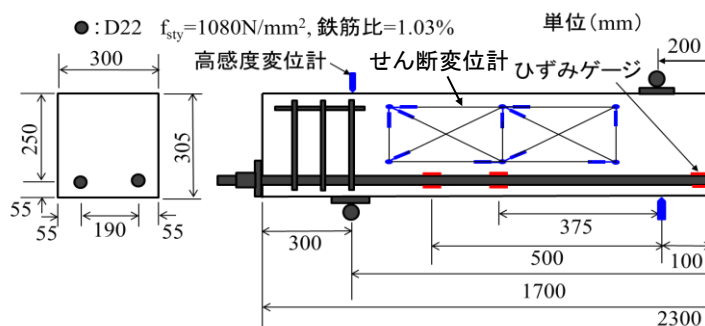


図-1 RC はりの供試体概要

SBPD1080/1230) の D22 を使用した。

RC はり供試体の寸法は、300×305×2300mm、有効高さ d を 250mm とした。引張鉄筋比は 1.03% とした。RC はり供試体の断面と供試体の側面図を図-1 に示す。せん断設計の基本となるせん断引張強度を明らかにするために、せん断補強は行わなかった。RC 供試体は、結果の信頼性を高めるため、各配合で 2 体ずつ作製した。

2.2 養生条件

すべての配合において、養生条件は材齢 7 日まで封緘。その後は屋内気中曝露したものであり、RC はりは、乾燥の影響が長手方向で一様になるよう、両端面にアルミ粘着テープを貼付し、水分の逸散を防止した。養生期間中における平均温度は 16.7°C で、平均相対湿度は 56.4% であった。

2.3 検討項目

2.3.1 強度試験

強度試験として圧縮強度試験、割裂引張強度試験および静弾性係数試験を行った。各試験は、それぞれ JIS A

1108, JIS A 1113 および JIS A 1113 に準拠した。

2.3.2 破壊エネルギー試験および評価方法

破壊エネルギー試験は日本コンクリート工学会の試験法⁸⁾に準じて行い、切り欠きの深さは 50mm とした。また破壊エネルギーおよびひび割れ発生強度に影響するとされている特性長さは、試験法と同様 JCI の方法により求めた。ここで、特性長さが長くなることは破壊が延性的になることを意味する。

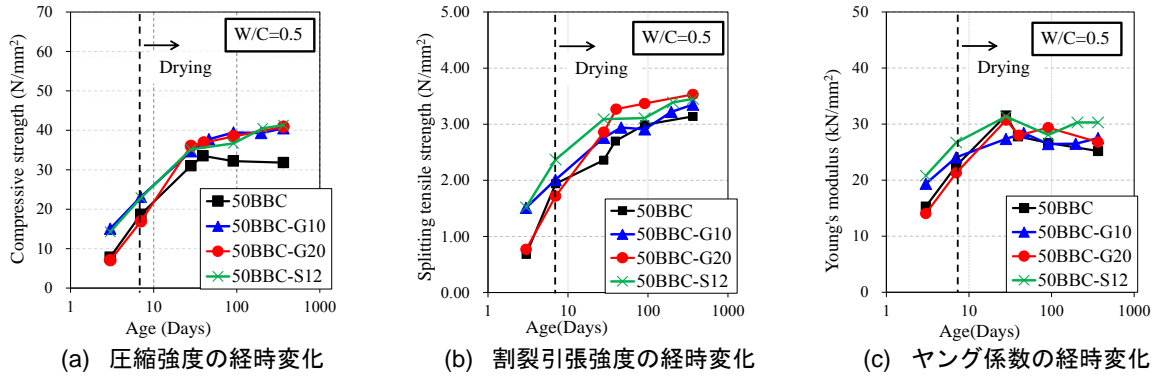
2.3.3 RC はりの計測項目および荷重試験方法

RC はりの挙動を明らかにするために、図-1 に示す位置の鉄筋ひずみの経時変化を打込み直後から測定した。荷重は 2 点集中荷重とし、鉄筋ひずみ、支間中央たわみおよび曲げせん断域のせん断変位を、ワイヤストレーンゲージ (ゲージ長 5mm)、 π 型変位計 (精度: 1/1000mm)、高感度変位計 (精度: 1/1000mm~1/200mm) により測定した。荷重は、単調増加とし所定の荷重で計測を行った。

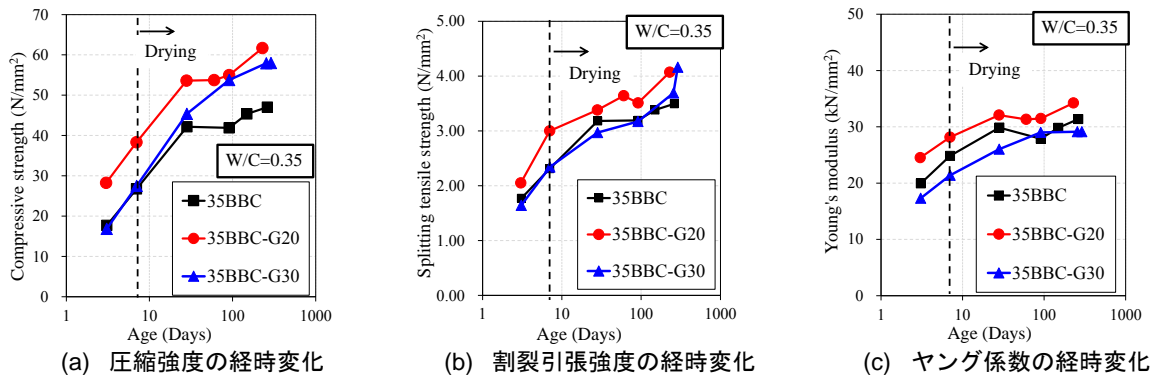
3. 実験結果および考察

3.1 力学特性

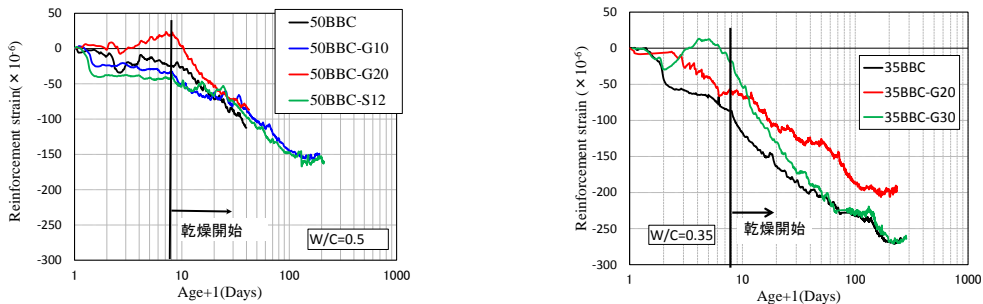
図-2 および図-3 に、W/C=0.5 および 0.35 のコンクリ



(a) 圧縮強度の経時変化 (b) 割裂引張強度の経時変化 (c) ヤング係数の経時変化
 図-2 PCAのW/C=0.5のコンクリート基礎物性に及ぼす影響



(a) 圧縮強度の経時変化 (b) 割裂引張強度の経時変化 (c) ヤング係数の経時変化
 図-3 PCAがW/C=0.35のコンクリート基礎物性に及ぼす影響



(a) W/C=0.5の鉄筋ひずみの経時変化 (b) W/C=0.35の鉄筋ひずみの経時変化
 図-4 鉄筋ひずみに及ぼすPCAの影響

ート基礎物性に及ぼす PCA の内部養生の影響を示す。これらの図によれば、圧縮強度、割裂引張強度は、既往の研究^{3),4)}と同様、いずれの W/C においても内部養生効果が認められ、とりわけ W/C=0.35 の効果が顕著であった。W/C=0.5 の場合には廃瓦粗骨材と細骨材の使用による差異はほとんど見られなかった。ヤング係数については、W/C=0.5 の場合は無置換に比べて同程度であったが、W/C=0.35 の場合は PCA 置換率が 30% のとき小さくなる傾向が見られた。

3.2 収縮による鉄筋ひずみ

図-4 には打込み以降のせん断特性検討に用いた RC はりの鉄筋ひずみの経時変化を示す。W/C=0.5 の場合は、50BBC-G20 に内部養生による自己収縮低減効果が認められるものの、長期的にはいずれの場合も内部養生の効果は認められなかった。一方、W/C=0.35 の場合は、内

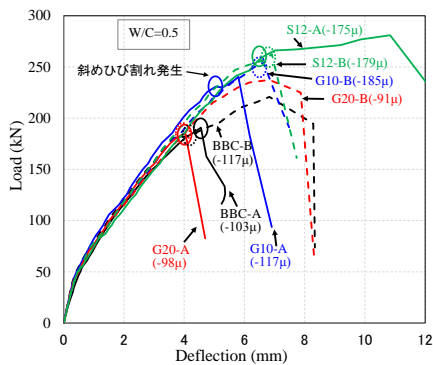
部養生を行った 35BBC-G20 の鉄筋ひずみが小さい。これは自己乾燥および乾燥曝露による細孔中の湿度低下を内部養生水で抑制したことによると考えられる。置換率の大きい 35BBC-G30 の場合は気中曝露前の自己収縮低減があるものの、曝露後は乾燥の影響を大きく受け、材齢 300 日において無置換 (35BBC) と同程度となった。この理由の一つとして、置換率が多く図-3(c)に示されているように、細孔中の負圧と釣り合う骨格のヤング係数が小さいことが考えられる。

3.3 せん断特性に及ぼす PCA の影響

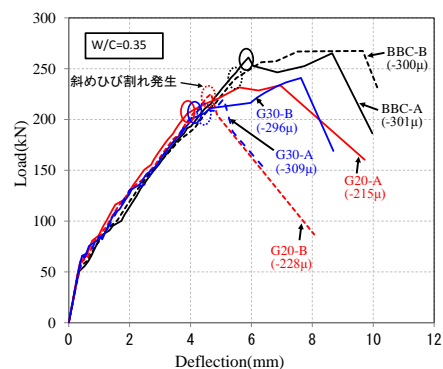
表-3 には RC はりおよびコンクリートの荷重試験時材齢、コンクリートの力学特性、荷重時直前の収縮による鉄筋ひずみと鉄筋位置およびはり下縁のコンクリート応力、鉄筋位置のコンクリート応力=0 の時の鉄筋ひずみを示す。この表によれば、内部養生を行ったコンクリー

表-3 RC はりの材料特性および鉄筋ひずみとコンクリート応力

項目	材料試験材齢		RC 載荷材齢		コンクリートの強度					載荷時直前の収縮による鉄筋ひずみとコンクリート応力			
	実材齢	有効材齢	実材齢	有効材齢	圧縮強度	引張強度	ヤング係数	破壊エネルギー	特性長さ	鉄筋ひずみ	鉄筋位置のコンクリート応力=0の時の鉄筋ひずみ	鉄筋位置のコンクリート応力	下縁コンクリート応力
記号	実材齢	有効材齢	実材齢	有効材齢	f_c	f_t	E_c	G_f	l_{ch}	$\epsilon_{s,def}$	$\epsilon_{st,def}$	$\sigma_{c,def}$	$\sigma_{ct,def}$
単位	日	日	日	日	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm	mm	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	N/mm ²	N/mm ²
50BBC-A	39	20	43	22	33.0	2.70	27.8	0.168	638	-91	-103	0.33	0.52
50BBC-B			46	23						-104	-117	0.37	0.59
50BBC-G10-A	196	216	193	214	39.3	3.22	26.5	0.220	564	-147	-167	0.52	0.74
50BBC-G10-B			198	217						-163	-185	0.58	0.82
50BBC-G20-A	40	20	43	22	36.9	3.27	28.0	0.208	546	-87	-98	0.31	0.49
50BBC-G20-B			45	23						-81	-91	0.29	0.46
50BBC-S12-A	205	219	205	219	40.5	3.39	30.3	0.209	551	-156	-175	0.56	0.79
50BBC-S12-B			209	221						-160	-179	0.57	0.81
35BBC-A	262	272	250	263	47.0	3.50	31.4	0.200	513	-270	-301	0.97	1.36
35BBC-B			254	267						-269	-300	0.97	1.35
35BBC-G20-A	229	237	235	240	61.7	4.07	34.2	0.207	428	-194	-215	0.70	0.98
35BBC-G20-B			234	240						-206	-228	0.75	1.04
35BBC-G30-A	290	290	282	286	58.0	4.17	29.1	0.208	350	-275	-309	0.99	1.38
35BBC-G30-B			285	288						-264	-296	0.95	1.33

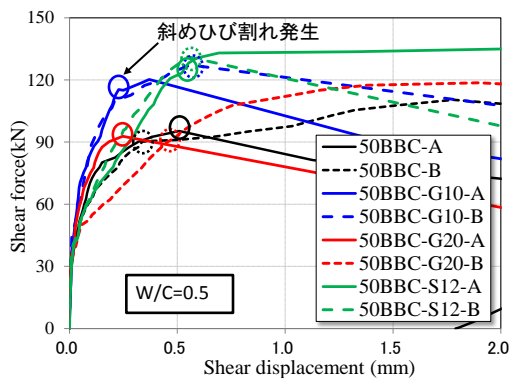


(a) 荷重-たわみ曲線(W/C=0.5)

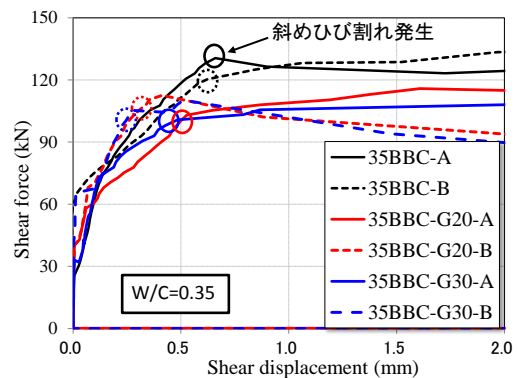


(b) 荷重-たわみ曲線(W/C=0.35)

図-5 荷重-たわみ曲線に及ぼす PCA の影響



(a) せん断強度とせん断変位の関係(W/C=0.5)



(b) せん断強度とせん断変位の関係(W/C=0.35)

図-6 せん断変位に及ぼす PCA の影響

トの破壊エネルギーは無置換に比べて大きくなるが、引張強度も大きくなるため、コンクリートの破壊の脆性を表す特性長さは小さくなる傾向が見られた。

図-5 にはせん断 RC はりスパン中央のたわみに及ぼす PCA の影響を示す。また、図-6 には曲げせん断域のせん断変位に及ぼす PCA の影響を示す。図中の丸印は図-5 の場合斜めひび割れ発生荷重で図-6 の場合は斜めひび割れ発生時のせん断力を示している。斜めひび割れ発生荷重の決定では荷重とたわみ関係のみならず、曲げせん断域で測定した鉛直方向変位およびせん断変位も考慮して決定した。図-5 より、いずれの W/C においても斜め

ひび割れ発生までの荷重-たわみ関係に対する内部養生の影響はほとんど見られない結果となった。しかし、図-6 にも見られるように、W/C=0.5 の場合には、内部養生により斜めひび割れ発生荷重が増大する場合があります。また最大耐力もいずれも増大して、内部養生した RC はりの斜めひび割れ後のたわみは無置換に比べ小さい。

図-7 にそれぞれの RC はりのせん断強度に及ぼす PCA の内部養生効果を示す。図中に RC 部材のせん断強度の土木学会示方書式の原式である二羽らの式(1)で求めた値および式(2)に示す等価鉄筋比の概念⁹⁾により収縮の影響を考慮した二羽式による計算値も示している。

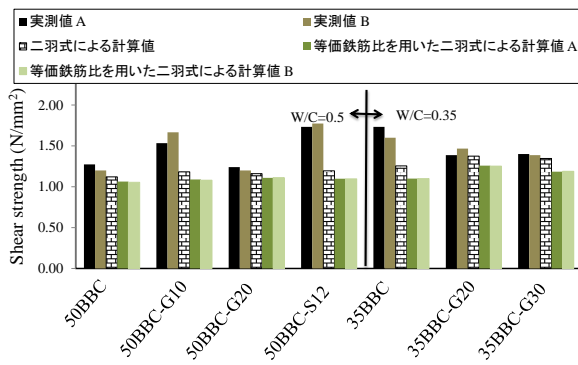


図-7 せん断強度に及ぼす PCA の影響

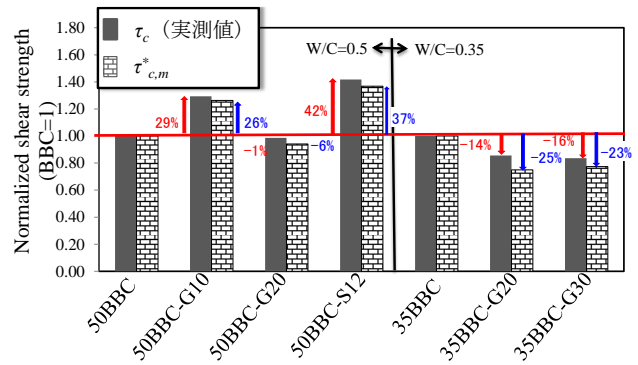


図-8 正規化した実測せん断強度の比較

表-4 斜めひび割れ発生荷重の比較

項目	RC載荷材齢		斜めひび割れ発生荷重・強度								終局耐力		破壊形態	
			実測値		二羽式による計算値		実測値/計算値		等価鉄筋比を用いた二羽式の計算値		実測値/計算値			
			V _{c,m} kN	T _c N/mm ²	比	V _{c,cal} kN	T _{c,cal} N/mm ²	V _{c,m} / V _{c,cal}	T _{c,m} / T _{c,cal}	V _{c,m} / V _{c,cal}	T _{c,m} / T _{c,cal}	V _{c,m} / V _{c,cal}		P _{u,m} / P _{u,cal}
記号	実材齢	有効材齢												
単位	日	日												
50BBC-A	43	22	191	1.27	1.00	168	1.12	1.14	159	1.06	1.20	192	1.01	せん断引張破壊
50BBC-B	46	23	180	1.20				1.07	158	1.05	1.14	220	1.22	せん断ずれ破壊
50BBC-G10-A	193	214	231	1.54	1.21	177	1.18	1.30	163	1.09	1.41	240	1.04	せん断圧縮破壊
50BBC-G10-B	198	217	220	1.47				1.24	162	1.08	1.36	254	1.16	せん断引張破壊
50BBC-G20-A	43	22	186	1.24	0.99	174	1.16	1.07	166	1.11	1.12	186	1.00	せん断引張破壊
50BBC-G20-B	45	23	180	1.20				1.03	167	1.11	1.08	226	1.26	せん断ずれ破壊
50BBC-S12-A	205	219	241	1.61	1.30	179	1.19	1.35	165	1.10	1.46	281	1.16	せん断圧縮破壊
50BBC-S12-B	209	221	242	1.62				1.35	164	1.10	1.47	262	1.08	せん断引張破壊
35BBC-A	250	263	261	1.74	1.00	188	1.26	1.39	165	1.10	1.58	265	1.02	せん断圧縮破壊
35BBC-B	254	267	241	1.61				1.28	165	1.10	1.46	268	1.11	せん断圧縮破壊
35BBC-G20-A	235	240	225	1.50	0.86	206	1.37	1.09	189	1.26	1.19	234	1.04	せん断圧縮破壊
35BBC-G20-B	234	240	206	1.37				1.00	188	1.25	1.10	225	1.09	せん断引張破壊
35BBC-G30-A	282	286	209	1.39	0.84	202	1.35	1.03	178	1.18	1.17	241	1.16	せん断圧縮破壊
35BBC-G30-B	285	288	211	1.41				1.05	178	1.19	1.18	220	1.04	せん断圧縮破壊

$$V_c = 0.2f'_c \left(\frac{d}{1000}\right)^{-1/4} (100p_s)^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d))bd \quad (1)$$

ここで、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 d : 有効高さ、 p_s : 引張鉄筋比、 a : せん断スパン長、 b : 部材幅

$$p_{s,e} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - \epsilon_{s0,def}} p_s \quad (2)$$

ここで、 ϵ_s : せん断スパン中央断面における斜めひび割れ発生直前の曲げ理論による鉄筋ひずみ、 $\epsilon_{s0,def}$: 引張鉄筋に与えるコンクリート応力が0となる鉄筋ひずみ

また、図-8 に無置換 RC はりの実測せん断強度=1 とし内部養生を行った RC はりのせん断強度比をとったものを示す。図中に圧縮強度と等価鉄筋比の相違を除くするために式(3)を用いて実測値を正規化した値も示している。表-4には斜めひび割れ発生荷重の実測値と計算値の比較を示す。

$$\tau_{c,m}^* = \frac{\tau_c}{f_c^{1/3} \times (100p_{s,e})^{1/3}} \quad (3)$$

ここで、 τ_c : 実測せん断強度、 f_c : 圧縮強度、 $p_{s,e}$: 等価鉄筋比

図-7によれば、W/C=0.5の場合、無置換と比較すると、50BBC-G10 および 50BBC-S12 のせん断強度が大きく、

50BBC-G20 は同程度であり、置換率 10%程度の効果が高い。圧縮強度および等価鉄筋比の相違の影響を除いた結果を示す図-8によれば、それらの影響を含んだ結果と大きくは異ならず、50BBC-G10 の場合およそ 25%、50BBC-S12 の場合およそ 35%無置換より大きい。このことは、式(3)のみでは上記の内部養生効果を説明できないことを示しており、破壊力学的アプローチを含めて、今後検討したい。

W/C=0.35の場合、内部養生を行った 35BBC-G20 および 35BBC-G30 のせん断強度は、正規化した場合も含めて、無置換に比べていずれのほりも約 20%低下した。Walraven⁵⁾は、軽量骨材を用いた RC はりでは、ひび割れ面における骨材の噛み合いによるせん断伝達力が低下し、せん断強度が低下すると指摘している。一方、モルタル強度が高くなるとコンクリート中の軽量骨材は破壊しやすいことが報告され¹⁰⁾、また軽量骨材の破砕値が小さいことも報告されている¹¹⁾。これらのことから W/C=0.35 の場合で見られるせん断強度の低下は PCA の大きい破砕値による影響であると考えられる。

これらの結果から、W/C=0.5では PCA 置換率 10%程度でせん断強度が有意に増大し、W/C=0.35では 20%を

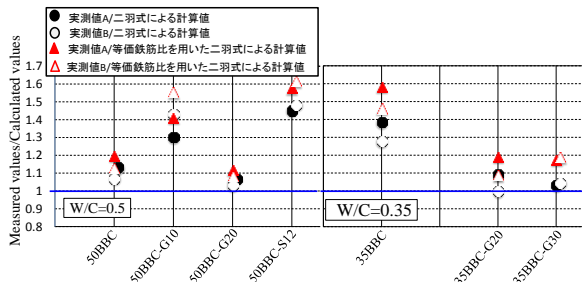


図-9 セン断強度実測値と計算値の比較

超えるとせん断強度が有意に低下する。よって、本研究の範囲では、 $W/C=0.35$ の場合を除けば、置換率 10%がPCAを実構造物に適用するのに最適であるといえる。

図-9 にせん断強度の実測値を二羽式ならびに等価鉄筋比を用いた二羽式で求めた計算値で除した比示している。図-9 によれば、いずれのRCはりにおいても実測値が計算値より大きく、安全側での評価が可能であることがわかる。また、収縮の影響を考慮した等価鉄筋比を用いた二羽式による計算値はより安全側の評価を与える。

4. 結論

本研究の範囲内で明らかになったことを以下に示す。

- (1) 廃瓦骨材の内部養生効果により圧縮強度、割裂引張強度、破壊エネルギーが増大することが確認できた。しかし、大きい破砕値によると考えられる特性長さの低下が見られた。また、ヤング係数は $W/C=0.5$ の場合同程度であったが、 $W/C=0.35$ の場合は置換率が大きいほど低下傾向が見られた。
- (2) 廃瓦骨材を用いたRCはりの鉄筋拘束ひずみは、 $W/C=0.5$ の場合内部養生の影響をあまり受けないが、 $W/C=0.35$ の場合は収縮低減する場合がある。
- (3) 廃瓦骨材を用いたRCはりのたわみは、 W/C によらず、斜めひび割れ発生前では内部養生効果が認められなかった。
- (4) 収縮の影響を無視したせん断強度の計算値は実験値と同等以上であり、安全側での評価が可能であった。また、収縮の影響を考慮した等価鉄筋比を用いた場合は、より安全側での評価であった。
- (5) 置換率 10%の廃瓦骨材を $W/C=0.5$ の高炉B種RCはりに置換した場合、せん断強度は粗骨材置換で 25%、細骨材置換で 35%増加し、10%が最適な置換率であった。しかし、 $W/C=0.35$ の場合の最適置換率は今後の課題である。

なお、本研究の一部は H25 年度 JSPS 特別研究員奨励

費(課題番号:257401)および H25 年度 JSPS 科学研究助成金(挑戦的萌芽, 代表 佐藤良一, 課題番号: 25630187)に基づいて実施したものであり、紙面を借りて謝意を表したい。

参考文献

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, Vol.17, No.5, pp.87-95, 1979.5
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編), pp.123, 2002年
- 3) 重松明, 温品達也, 木村守, 佐藤良一：廃瓦粗骨材の内部養生による高炉B種コンクリートの性能向上について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.205-210, 2009.7
- 4) Sato et al., Improvement of Properties of Portland Blast Furnace Cement Type B Concrete by Internal Curing Using Ceramic Roof Material Waste, JMCE, ASCE, Vol. 23, Issue 6, June 2011, pp.777-782.
- 5) Walraven J.C, Size effects: Their Nature and their Recognition in Building Codes, Size Effect in Concrete Structures, JCI International Workshop, Oct.23-Nov.2, 1993., pp.295-314.
- 6) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, No.56, 1985
- 7) 三谷 昂大, 大賀 琢麻, 佐藤 良一：実大規模超高強度RCはりにおける収縮低減とせん断挙動について, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.667-672, 2010.7
- 8) 日本コンクリート工学会：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
- 9) 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.
- 10) 北村 周郎, 尼崎 省二：人工超軽量骨材コンクリートRCはりに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.247-252, 2000
- 11) 鶴田 浩章, 松下 博通, 陶 佳宏：粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.991-996, 1998