論文　瓦廃材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究

飛田　浩孝[*1]・上原　匠[*2]・梅原　秀哲[*3]・友竹　博一[*4]

要旨：瓦廃材を二次製品用コンクリート骨材として有効利用するため，養生条件および骨材との置換率が，硬化コンクリートの諸性状に及ぼす影響ついて検討するとともに，細骨材を瓦廃材で50%および80%容積置換したRCボックスカルバートの試験体を用いて外圧試験を実施した。その結果，瓦廃材を粗骨材と置換した場合でも，圧縮強度は通常のコンクリートと同程度であることや，同試験体での外圧強さ性能は，瓦廃材置換率が増加しても天然骨材を用いた通常の製品と同等であることが明らかとなった。

キーワード：瓦廃材，リサイクル，廃瓦骨材，圧縮強度，静弾性係数，RC構造体実験

1. はじめに

瓦廃材は，陶器瓦の規格外品である粘土焼成品を原料とするため，多孔質構造を有する。このため，天然骨材に比べ密度は若干小さく，高い吸水率を有する特異な物性を示す。既往の研究成果から，細骨材を粒径 5~0mm の瓦廃材で80%まで容積置換したコンクリートのフレッシュ性状が混和剤量の調整により制御可能であることや，硬化後の力学特性では，置換率の増加に伴い静弾性係数は若干低下するが，圧縮強度は置換率 0%の場合と同等もしくは若干増加することが明らかとなっている[1)]。現在では，透水性や吸音性を有する環境に優しい材料としての特性を活かし，舗装やポーラスコンクリート用骨材等への利用も検討され始めている。

そこで本研究では，瓦廃材を二次製品用コンクリートへ有効利用するうえでの適用性を検証するため，室内試験（シリーズ A）にて，養生条件および骨材との瓦廃材置換率の違いがコンクリートの諸性状に及ぼす影響について検討するとともに，実用性を確認するために細骨材の一部を瓦廃材で置換した RC ボックスカルバート試験体での外圧試験[2)]（シリーズ B，以下，RC 構造体実験）を実施した。

2. 廃瓦骨材の物性

本研究では，粒径 5~0mm の瓦廃材を廃瓦細骨材，土木学会が定める粒径 20~5mm 粗骨材の標準粒度の中央値を取るように粒度調整を行った瓦廃材を廃瓦粗骨材と称して用いた。**表－１**に廃瓦骨材の物性値を示す。廃瓦細・粗骨材は，原料が同一であり密度に大きな違いはない。しかし，吸水率の相違については，廃瓦粗骨材の粒径が大きく，破砕面の表面積が廃瓦細骨材に比べ小さく，かつ一部骨材表面の釉薬付着等により，約 2.5%小さな値を示すと推察される。ところで，廃瓦細骨材の実積率が天然骨材に比べ大きな値を示すが，その要因としては，微粒分を多く含み密実に詰ること等が挙げられる。なお，粒形判定実積率では，砕石（55%以上）および砕砂（53%以上）の JIS 基準を上回る値を示しており，良好な粒形を有すると判断できる。破砕値は，BS812 に準拠し，標準粒径 15~10mm の瓦廃材で試験を行った。その結果，瓦廃材の破砕値は，砕石の約 3 倍を示すことが明らかとなった。

3. 実験概要

3.1 使用材料

表－２に，シリーズ A および B での使用材料を

*1 名古屋工業大学　大学院工学研究科　都市循環システム工学専攻　（正会員）
*2 名古屋工業大学　大学院工学研究科　社会工学専攻助教授　工博　（正会員）
*3 名古屋工業大学　大学院工学研究科　都市循環システム工学専攻教授　Ph.D.　（正会員）
*4 ㈱ホクコン　技術統括部　研究開発室長　博（工）（正会員）

表－１　瓦廃材の物性値

		粒径	表乾密度	絶乾密度	吸水率	粗粒率	微粒分量	単位容積質量	実積率	粒形判定実積率	破砕値
		(mm)	(g/cm^3)	(g/cm^3)	(%)	F.M.	(%)	(kg/ℓ)	(%)	(%)	(%)
瓦廃材	廃瓦細骨材	5～0	2.25	2.03	10.40	3.19	11.22	1.47	72.2	58.7	23.11
	廃瓦粗骨材	20～5	2.24	2.07	7.86	6.68	0.00	1.24	59.6	62.0	

表－２　使用材料

材料	記号	シリーズA		シリーズB	
		名称・規格	物性・諸元	名称・規格	物性・諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm^3(a,b)	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm^3
細骨材	CH	三州瓦廃材（廃瓦細骨材5～0mm）	密度：2.25 g/cm^3(a,b)，吸水率：10.40%(a,b)，粗粒率：3.19(a,b)	三州瓦廃材（廃瓦細骨材5～0mm）	密度：2.25 g/cm^3，吸水率：10.40%，粗粒率：3.19
	S	山砂（瀬戸産）	密度：2.55 g/cm^3(a,b)，吸水率：1.30%(a,b)，粗粒率：2.81(a,b)	砕砂（福井県南条産）	細砂（S1）；密度：2.60 g/cm^3，吸水率：1.29%，粗粒率：1.84 粗砂（S2）；密度：2.59 g/cm3，吸水率：1.30%，粗粒率：3.18
粗骨材	B	三州瓦廃材（廃瓦粗骨材20～5mm）	密度：2.24 g/cm^3(a,b)，吸水率：7.86%(a,b)		
	G	砕石2005（瀬戸産）	密度：2.71 g/cm^3(a)，2.72 g/cm^3(b)，吸水率：0.31%(a,b)，粗粒率：6.78(a,b)，破砕値：7.31%(a,b)	砕石（福井県南条産）	15mm（G15）；密度：2.62 g/cm^3，吸水率：1.02%，粗粒率：6.13 20mm（G20）；密度：2.62 g/cm3，吸水率：0.73%，粗粒率：6.98
フライアッシュ	FA	JIS A 6201Ⅱ種（碧南火力発電所産）	密度：2.18 g/cm^3(a)，2.27 g/cm^3(b)	JIS A 6201Ⅱ種（敦賀火力発電所産）	密度：2.21 g/cm^3
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	高性能減水剤	ポリカルボン酸系

示す。本研究では，二次製品用コンクリートを対象とするため，混和剤には高性能減水剤を各配合で適量使用し，また混和材にはJISに準拠したフライアッシュⅡ種を各配合一律に単位セメント量の15%外割置換で混入した。

3.2 配合

表−３にシリーズA，**表−４**にシリーズBでの示方配合を示す。両シリーズにおいて，目標スランプを15cmおよび空気量を2.0%と設定した。シリーズA(a)では，水セメント比（以下，W/C）35%，40%，45%の3水準に対し，細骨材の廃瓦細骨材との容積置換率を0%，50%，80%の3水準設定した計9配合を対象とし，蒸気養生と標準養生での比較を行った。また，シリーズA(b)では，上述の3水準のW/Cに対し，廃瓦骨材置換率0%を基準に廃瓦細骨材置換率100%に対して廃瓦粗骨材置換率0%および100%の3水準を設定し，計9配合を対象に標準養生を施した。

一方，シリーズBでは，RCボックスカルバート試験体を製造するうえで，設計基準強度を満たし，施工性とフレッシュ性状の制御のし易さを考慮して，W/Cを40%とし，細骨材（粗砂）と廃瓦細骨材との容積置換率を0%，50%，80%の3水準を設定した計3配合を対象とした。

3.3 試験方法

シリーズAでは，パン型強制練りミキサ（0.05m^3）を用い，練混ぜ量を0.03m^3，練混ぜ時間を2分間とし，練混ぜ終了後直ちに切り返しを行い，その後10分以内にフレッシュ試験を行った。また，養生条件は標準と蒸気の二通りとした。標準養生は，脱型後20℃での水中養生とし，蒸気養生には，製品同一養生とし，前置き（30℃；0.5h），昇温（15℃/h；2.0h），高温（60℃；2.0h）処理（以降，自然放冷）による方法を用いた。試験項目は，JISによる試験方法に準拠し，スランプ，空気量，単位容積質量試験に加え，各配合につき供試体3本による圧縮強度，静弾性係数，長さ変化（ダイヤルゲージ法）試験とした。なお，静弾性係数および長さ変化試験では，所定の材齢による二次製品用コンクリートの設計基準強度（40N/mm^2）を満足するW/Cが40%での3配合を対象とした。長さ変化試験では，上述の製品同一養生および脱型を行った後，材齢7日まで20℃水中養生した供試体にて基長計

表－３　配合表（シリーズ A）

配合名		CH 容積置換率	B 容積置換率	W/C	s/a	W	C	S	CH	G	B	FA	SP
		(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)							(g/m^3)
35_Base	(a)	0	0	35	37	175	500	579	0	1046	0	75	4773
35_Base	(b)							579		1053			3450
35_CH50_B0	(a)	50			39			303	268	1014			3853
35_CH80_B0	(a)	80			41			128	452	978			3450
35_CH100_B0	(b)	100			45			0	621	919			2300
35_CH100_B100	(b)	100	100		45			0	621	0	757		2185
40_Base	(a)	0	0	40	40		438	648	0	1035	0	66	4082
40_Base	(b)							650		1039			2772
40_CH50_B0	(a)	50			42			342	302	1000			3276
40_CH80_B0	(a)	80			44			143	504	965			2772
40_CH100_B0	(b)	100			48			0	689	900			2016
40_CH100_B100	(b)	100	100		48			0	689	0	741		1562
45_Base	(a)	0	0	45	43		389	719	0	1014	0	58	3665
45_Base	(b)							719		1017			2906
45_CH50_B0	(a)	50			45			375	331	976			2906
45_CH80_B0	(a)	80			46			153	542	959			2414
45_CH100_B0	(b)	100			50			0	738	892			1475
45_CH100_B100	(b)	100	100		50			0	738	0	735		1296

＊　配合名：水セメント比_廃瓦細骨材置換率_廃瓦粗骨材置換率

表－４　配合表（シリーズ B）

配合名	CH 容積置換率	B 容積置換率	W/C	s/a	W	C	S		CH	G		B	FA	SP
							S1	S2		G15	G20			
	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)									(g/m^3)
40_Base	0	0	40	40	175	438	660		0	1001		0	66	2516
							132	528		451	551			
40_CH50_B0	50			42			347		301	968				2667
							139	208		435	532			
40_CH80_B0	80			44			145		504	934				2667
							145	-		420	514			

測を行った。その後，室温 20℃および湿度 60%の条件下に保存し，26 週までの長さ変化を計測した。

シリーズ B では，強制 2 軸ミキサ（1.5m^3）を用い, 通常の二次製品製造工程に従い RC ボックスカルバート試験体（以下，RC 構造体）を製造した。養生方法は，上述同様の製品同一養生とした。RC 構造体（内空寸法 W:2.5m，h:2.0m，L:1.5m）での外圧試験法は，全国ボックスカルバート協会の方法[3)]に準拠した。試験項目は，頂版上部での破壊に至るまでの変位量および初亀裂発生荷重（ひび割れ幅 0.05mm 発生時）の測定とした。

4. 実験結果および考察

本研究では，先ず各 W/C での配合において，細骨材率と混和剤量の調整により二次製品用コンクリートとしての所定のフレッシュ性状を有するコンクリートを製造した。フレッシュ性状を確認した後，供試体作製と各種試験を実施し，諸条件の違いによる影響を比較検討した。

4.1 シリーズ A

（１） 養生条件と圧縮強度の関係

表－５に，試験結果を示す。また**図－１**に，シリーズ A(a)での養生条件の違いと圧縮強度（蒸気：材齢 14 日，標準：材齢 28 日）の関係を示す。その結果，各配合での圧縮強度は，養生条件の違いに関わらず，置換率 0%と比較する

表－５　コンクリート試験結果（シリーズ A）

配合名		CH 容積置換率	B 容積置換率	スランプ	空気量	温度	単位容積量	蒸気養生 圧縮強度		蒸気養生 静弾性係数	標準養生 圧縮強度		標準養生 静弾性係数	
								(N/mm^2)		(kN/mm^2)	(N/mm^2)		(kN/mm^2)	
		(%)	(%)	(cm)	(%)	(℃)	(kg/ℓ)	材齢14日	材齢91日	材齢14日	材齢28日	材齢91日	材齢28日	材齢91日
35_Base	(a)	0	0	14.5	1.60	31.0	2.37	57.4	—	—	73.6	88.0	41.4	44.4
35_Base	(b)			16.0	1.65	29.5	2.39	—	—	—	75.1	92.8	43.2	46.5
35_CH50_B0	(a)	50		13.5	2.20	30.5	2.32	56.8	—	—	75.1	92.3	38.9	42.4
35_CH80_B0	(a)	80		14.0	1.90	30.5	2.31	56.9	—	—	75.0	89.4	34.6	39.3
35_CH100_B0	(b)	100		14.5	1.80	30.0	2.29	—	—	—	75.2	94.4	34.5	39.0
35_CH100_B100	(b)	100	100	13.0	1.75	31.0	2.15	—	—	—	73.6	88.4	24.1	26.1
40_Base	(a)	0	0	15.5	1.60	29.5	2.35	48.6	67.9	35.0	67.2	82.7	38.9	43.3
40_Base	(b)			13.0	1.50	29.0	2.38	—	—	—	65.5	81.3	41.5	45.4
40_CH50_B0	(a)	50		15.0	2.00	29.5	2.30	46.7	71.8	34.5	66.7	85.6	36.6	40.0
40_CH80_B0	(a)	80		13.0	1.70	30.0	2.29	46.0	75.9	32.9	69.6	82.2	33.9	37.9
40_CH100_B0	(b)	100		15.0	2.65	28.5	2.26	—	—	—	66.8	85.6	33.9	37.1
40_CH100_B100	(b)	100	100	13.5	2.10	30.0	2.12	—	—	—	63.9	82.1	23.1	25.6
45_Base	(a)	0	0	14.0	1.90	30.0	2.33	39.4	—	—	58.9	74.2	36.1	41.8
45_Base	(b)			17.0	2.00	29.0	2.35	—	—	—	57.4	73.3	38.4	43.1
45_CH50_B0	(a)	50		16.0	2.00	29.0	2.29	42.6	—	—	59.7	75.6	35.1	38.2
45_CH80_B0	(a)	80		16.0	1.95	29.0	2.28	43.8	—	—	59.7	76.3	33.6	36.8
45_CH100_B0	(b)	100		13.0	2.80	30.0	2.23	—	—	—	56.1	72.8	32.6	36.3
45_CH100_B100	(b)	100	100	14.0	2.60	30.0	2.10	—	—	—	55.4	69.4	22.0	23.9

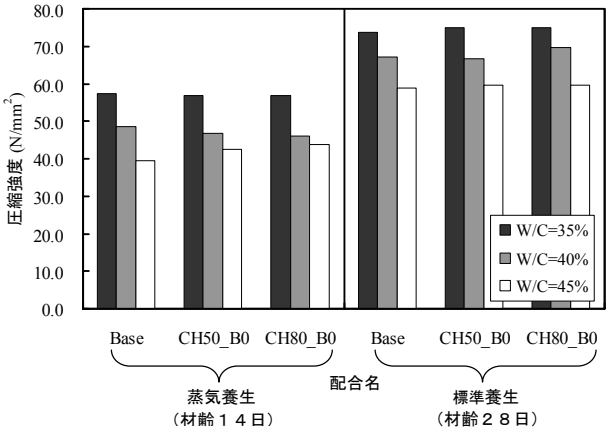
と，若干増減する傾向は見られるが，ほぼ同等の値を示すことが明らかとなった。

（２）　養生条件と静弾性係数の関係

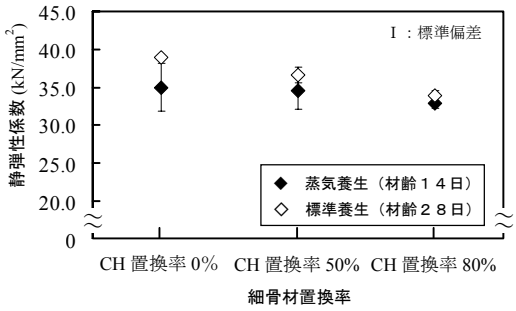
図－２に，シリーズ A(a)での養生条件の違いと静弾性係数の関係を示す。その結果，養生条件の違いに関わらず，平均静弾性係数では廃瓦細骨材の置換率が増加するに従い，相関係数 r^2=0.9 以上の高い負の相関関係が成り立つことが明らかとなった。また，蒸気養生での傾きは，標準養生の場合に比べ小さいが，各供試体での試験値のばらつき（標準偏差：σ）が置換率 0%でσ=3.18，50%でσ=2.34，80%でσ=0.72 と大きく，傾向の違いを判断することは困難であった。

（３）　廃瓦骨材置換率の物性への影響

図－３に，シリーズ A(b)での圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。その結果，各配合とも置換率 0%と廃瓦細骨材置換率 100%に対する廃瓦粗骨材置換率 0%および 100%では，シリーズ A(a)での傾向と同様に，圧縮強度は置換率 0%の場合と比較して，若干の増減は見られるが，ほぼ同等の値を示すことが明らかとなった。この傾向は，廃瓦骨材が一般コンクリート用骨材としての強度を十分に有することを示している。また，破砕処理による表面粗さ等の要因も強度



図－１　養生条件と圧縮強度の関係



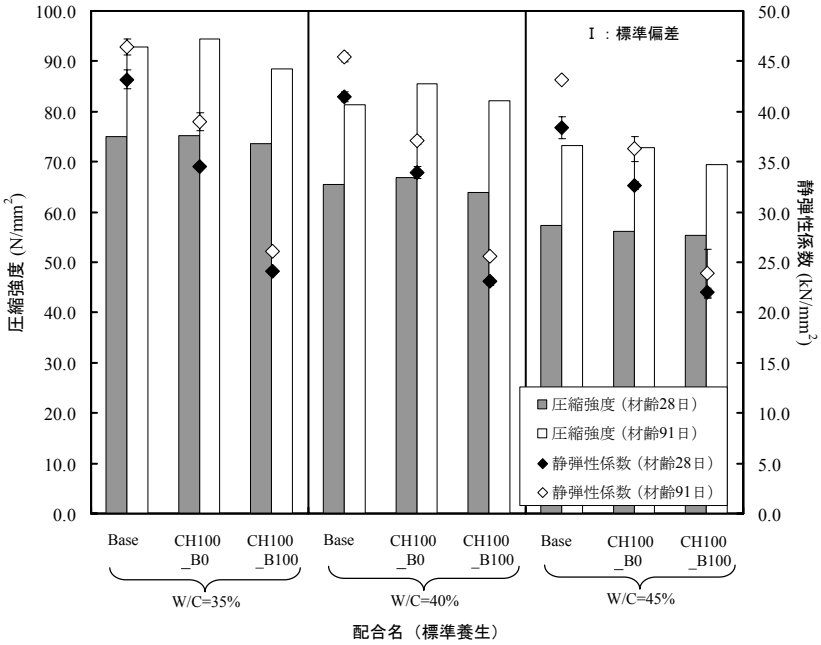
図－２　養生条件と静弾性係数の関係

発現に寄与しているものと推察される。一方，静弾性係数は，置換率 0%に比べ廃瓦細骨材置換率 100%に対する廃瓦粗骨材置換率 0%および 100%では，前者で約 15~20%，後者では約 44%減少する傾向が明らかとなった。したがって，

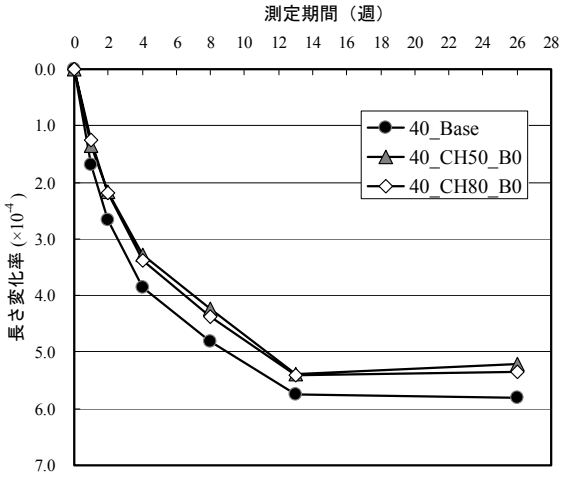
廃瓦骨材の置換率が増加するに従い，静弾性係数は顕著に減少する傾向が明らかとなった。

（４） 廃瓦細骨材置換率と体積変化の関係

図－４に，各配合での長さ変化試験結果を示す。試験結果から，置換率に関わらず 26 週までの長さ変化の全体的な傾向は同様であることが明らかとなった。また，測定週毎の変化率（収縮率）が廃瓦細骨材を置換した場合，若干小さくなる傾向が見られる。これは，廃瓦細骨材の高い吸水性能に起因した保水性が寄与した結果であると推察される。



図－３　廃瓦骨材置換率の物性への影響



図－４　長さ変化試験結果

4.2 シリーズＢ

（１） コンクリート試験結果

表－６にコンクリート試験結果を，**図－５**に圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。フレッシュ試験では，スランプ，空気量ともに室内試験同様，所定の数値内での測定結果を得ることができた。一方，圧縮強度および静弾性係数試験結果では，廃瓦細骨材置換率 0%の場合に比べ，置換率 50%，80%の場合では平均圧縮強度が約 8~13N/mm^2 増加する傾向が見られ，これに従い静弾性係数も増加する傾向が明らかとなった。これは，RC 構造体実験での使用材料，骨材管理および使用設備等が室内試験の場合と異なることに起因した結果であると推察されるが，詳細な要因を特定することはできなかった。

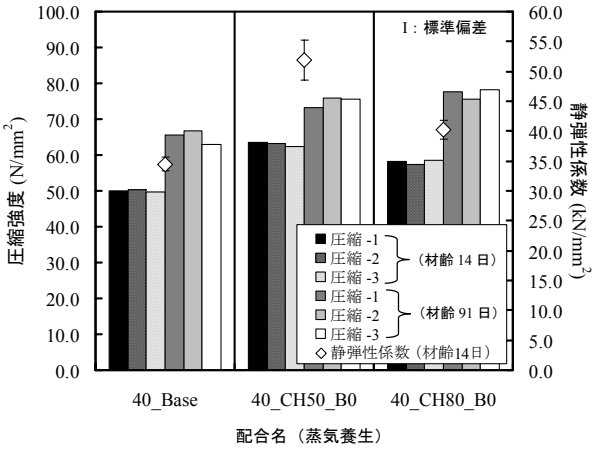
表－６　コンクリート試験結果（シリーズＢ）

配合名	CH 容積置換率	B 容積置換率	スランプ	空気量	温度	蒸気養生 圧縮強度	蒸気養生 静弾性係数
						(N/mm^2)	(kN/mm^2)
	(%)	(%)	(cm)	(%)	(℃)	材齢14日	材齢14日
40_Base	0	0	16.0	2.30	28.0	50.0	34.5
40_CH50_B0	50		14.5	2.70	23.0	63.0	51.9
40_CH80_B0	80		15.5	2.50	25.5	58.0	40.3

（２） RC 構造体の性能試験結果

写真－１に，構造体の概観および変位量の測定位置を示す。規定荷重は，下水道協会が定める規定値（98.1kN/m）に準拠し，148kN とした。

図－６に，規定荷重までの頂版部の変位量測定結果を示す。なお，置換率 80%の試験体においては，破壊までの挙動の把握を，置換率 50%の試験体においては暴露試験への利用を目的としたため，個々の載荷重は異なるが，規定荷重までは何ら問題ないことが明らかとなった。初亀裂発生荷重は，置換率 0%では 176kN，50%では 178kN，80%では 182kN であり，弾性係数の影響は確認できなかった。これらのことから置換率の増加に伴う差は小さいと判断でき，ほぼ同等の亀裂発生荷重を有すると言えよう。



図－５　圧縮強度および静弾性係数試験結果

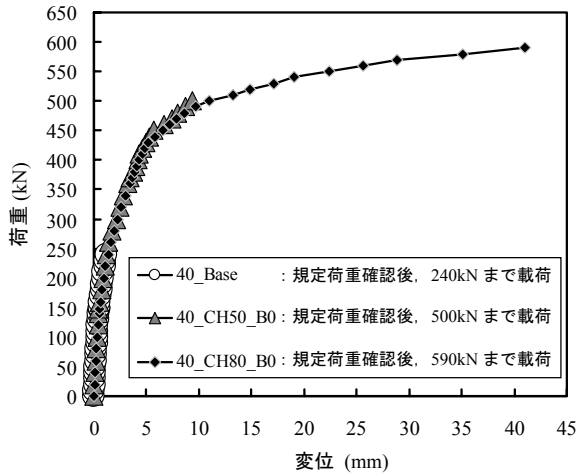
5. まとめ

（１）　養生条件の違いに関わらず，一部もしくは全量骨材として廃瓦骨材を容積置換したコンクリートにおいて，圧縮強度は天然骨材を用いた置換率 0%の場合とほぼ同等の値を示し，静弾性係数では置換率の増加に伴い減少する傾向が明らかとなった。

（２）　蒸気養生の場合での長さ変化率は，高い保水性を有する廃瓦細骨材を置換した場合において，若干小さくなる傾向が明らかとなった。

（３）　RC 構造体実験から，廃瓦細骨材置換率 50%および 80%のコンクリートによる構造物の施工性には問題ないことが明らかとなった。また，置換率 0%と置換率 50%および 80%の場合を比較すると，頂版部での変位量および初亀裂発生荷重は，ほぼ同様の傾向を示すことが明らかとなった。

写真－１　RC 構造体の概観



図－６　変位量測定結果（頂版）

参考文献

１）上原　匠，梅原秀哲，友竹博一，篠田泰宏：瓦廃材を細骨材として用いたコンクリートの物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1405-1410，2005.6

２）友竹博一，松山幸広，梅原秀哲，篠田泰宏：廃瓦再生細骨材を使用したコンクリート製品の性能に関する研究，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, pp.815-816, 2005.9

３）プレキャストボックスカルバート設計・施工マニュアル，全国ボックスカルバート協会編，pp.133-148，2001.3