

廃瓦を用いたコンクリートの物理的特性に関する考察

PHYSICAL PROPERTY OF CONCRETE USING WASTED ROOF TILES AS CORESE AGGREGATE

麓 隆行*・岡田裕平**・藤原三晃***

by Takayuki FUMOTO, Yuhei OKADA and Mitsuaki FUJIWARA

1. はじめに

建築物の建替え時に、年間90万トンほどの廃瓦が発生する。現在、廃瓦の利用用途は、舗装ブロックや土壌への混合などである¹⁾。さらに有効活用するため、自己養生を期待して、骨材としてコンクリートに利用することが考えられている²⁾。しかし、瓦が扁平であることから、一般の粗骨材と比べて、廃瓦の粒子形状が扁平であり、その吸水率も高い。すなわち、廃瓦をコンクリートに使用すると、再生骨材と同様に³⁾、実積率や吸水量の影響を受ける可能性がある。そこで本研究では、コンクリートのフレッシュ性状や硬化後の性状に影響を及ぼす廃瓦の物性を明らかにすることを目的とした。特に、廃瓦の吸水量が及ぼす影響に着目した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

普通セメント(密度 3.16 g/cm^3)、水道水、AE減水剤およびAE剤を使用した。また、粗砂と細砂を質量比7:3で混合した細骨材を、粒径10-20 mmの砕石と粒径5-15 mmの砕石を質量比65:35で混合した骨材を粗骨材として用いた。以下では、この混合した粗骨材を砕石と呼ぶこととする。また、建築物解体で発生した瓦を一次破碎し、5-20mmにふるい分けて、廃瓦を用意した。

表1に細・粗骨材の種類とJIS試験法で求めた物性を示す。また、写真1に廃瓦の外観を示す。同程度の粒度でも、砕石に比べて、廃瓦の表乾密度は 0.63 g/cm^3 小さく、吸水率は13%ほど高い。しかし、廃瓦の実積率は、砕石に比べて10%ほど高い。破碎前の瓦が板状であることも要因と考えられるが、明確ではない。一方、吸水率が高い原因を調べるため、廃瓦と砕石の細孔径分布を水銀圧入法により測定した。図1のように、ほとんど空隙のない砕石に比べ、廃瓦では種類に関わらずコンクリートでの遷移帯と同等の粗雑な細孔($0.05\text{-}2 \mu\text{m}$)が多い。ペーストだけでなく、廃瓦内部でも物質移動が起こる可能性があると考えられる。

* 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1) , ** 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系専攻, *** 松村産業株式会社生コン部試験室

2.2 練混ぜと試験の概要

本研究では、基本的な配合条件を単位水量 184 kg/m^3 ,

表1 使用した細・粗骨材の物性

使用材料	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	すりへり 減量(%)
粗砂	2.56	2.19	2.87	66.6	—
細砂	2.56	1.87	1.90	60.8	—
砕石 2010	2.78	0.64	7.06	57.0	11.3
砕石 1505	2.79	0.91	6.18	56.7	15.1
砕石	2.78	0.73	6.75	61.5	—
廃瓦 2005	2.16	14.6	6.67	66.0	43.4

*砕石は、砕石 2010 と砕石 1505 とを混合した骨材



写真1 使用した廃瓦の外観

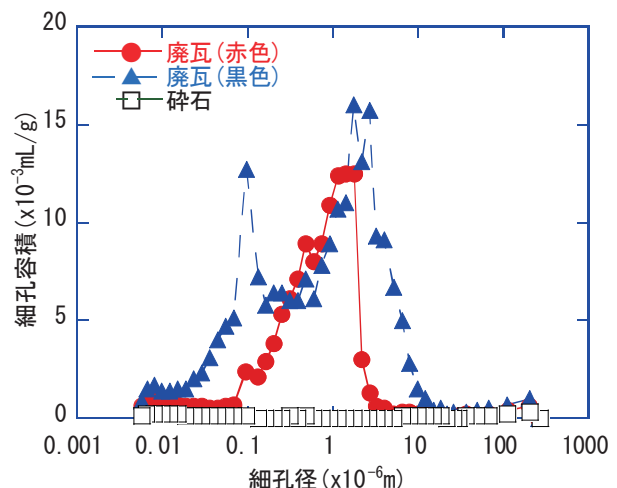


図1 粗骨材粒子の水銀圧入試験結果

W/Cを45-65%，目標空気量 4.5 ± 1.0 %とした。空気量はAE剤の添加量で調整した。廃瓦を用いて、スランプ18 cmとなる表2の配合を決定し、砕石は廃瓦と同体積に置換して作製した。また、W/C=55 %の配合に関して、廃瓦の含水状態の変化による影響を調べるため、廃瓦の含水状態を表乾状態の吸水率から2 %または4 %減らした含水状態とした場合(以降、それぞれ表乾-2%、表乾-4%と呼ぶ)も作製した。含水状態の調整は、表乾状態の廃瓦を室内にて乾燥することで調整した。

強制二軸練りミキサを使用し、セメント、細骨材を10秒攪拌後、水と混和剤を投入し30秒攪拌、さらに粗骨材を投入し60秒攪拌した。

フレッシュ性状として、スランプと空気量をJIS A 1101およびJIS A 1128により計測した。廃瓦を用いた場合の空気量には骨材修正係数を考慮した。

硬化後の性状として、圧縮強度試験、割裂引張強度試験および乾燥収縮試験を行った。圧縮強度試験用に径100×高さ200mmの試験体4体を、割裂引張強度試験用に径100×高さ100mmの試験体3体を打設した。材齢1日で脱型し、20℃の水中で、材齢28日まで養生した。そして、JIS A 1108およびJIS A 1113に準じた载荷速度で圧縮強度と割裂引張強度を求めた。なお圧縮強度試験では、端面にクックパッドを敷き、摩擦を緩和した。また、圧縮強度試験では、側面2カ所に長さ60mmのひずみゲージを十字に貼り付け、応力-ひずみ関係を計測した。割裂引張試験では、打設面の反対側にある試験体底面中央の引張方向に長さ60mmのひずみゲージを貼り付け、応力-ひずみ関係を計測した。真の引張ひずみとは異なるが、傾向を見ることはできると考えた。乾燥収縮試験用に100×100×400mmの試験体を3体用意した。そして、翌日脱型、材齢7日まで水中養生後、温度20℃、相対湿度60%の室内でJIS A 1129 -2コンタクトゲージ方法により乾燥収縮試験を行った。

ここで、载荷による応力の増大とともに収縮していた体積ひずみが膨張に転じる応力を臨界応力と呼び、材料の持続荷重に対する実質的な真の強度と考えられている⁴⁾。本研究では、著者らの既往の研究と同様に臨界応力として求めた⁵⁾。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状について

表2にフレッシュ性状を示す。廃瓦を用いた場合は17-19cmとなった。一方、砕石を用いた場合のスランプが10-12cmとなり、砕石を用いた場合のスランプ値のほうが、廃瓦を用いた場合に比べて小さくなった。余剰ペースト理論^{3),6)}にもとづけば、廃瓦を用いた場合、骨材の実積率が高いことが要因の一つと考えられる。

また、廃瓦を用いた場合、表乾状態から含水率が低下すると、スランプ値が低下した。これは、廃瓦が練混ぜ水を吸水したためと考えられる。含水率の低下によるスランプ値の変化を最小二乗法で近似すると、廃瓦の含水率が1%下がった際のスランプ値の低下は1.2cm程度となった。その結果、廃瓦の含水率が表乾状態から4%程度下がっても、砕石を用いた場合と同程度のスランプ値となった。

3.2 強度性状について

図2に硬化後の圧縮強度試験の結果を示す。砕石を

表2 実験で用いた配合

使用粗骨材	含水状態	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G			混和剤 (C×%)	
							粗砂	細砂	廃瓦 2005	砕石 2010	砕石 1505	AE 減水剤	AE 剤
砕石	表乾	45	4.5	42.7	184	409	491	210	0	667	359	1	0.15
砕石	表乾	55	4.5	44.5	184	335	530	227	0	669	360	1	0.2
砕石	表乾	65	4.5	46.2	184	283	564	242	0	665	358	1	0.15
廃瓦	表乾	45	4.5	42.7	184	409	491	210	794	0	0	1	0.05
廃瓦	表乾	55	4.5	44.5	184	335	530	227	797	0	0	1	0.05
廃瓦	表乾	65	4.5	46.2	184	283	564	242	792	0	0	1	0.05
廃瓦	表乾-2%	55	4.5	44.5	184	335	530	227	779	0	0	1	0.025
廃瓦	表乾-4%	55	4.5	44.5	184	335	530	227	764	0	0	1	0.025

表3 コンクリートのフレッシュ性状

使用粗骨材	含水状態	W/C (%)	スランブ値 (cm)	骨材修正係数 (%)	計測空気量 (%)	修正後空気量 (%)	練り上がり温度 (°C)
砕石	表乾	45	10.0	0.0	4.4	4.4	26.4
砕石	表乾	55	11.5	0.0	4.7	4.7	26.3
砕石	表乾	65	12.0	0.0	4.8	4.8	25.8
廃瓦	表乾	45	17.0	1.1	5.7	4.6	24.2
廃瓦	表乾	55	19.0	1.5	6.5	5.0	22.1
廃瓦	表乾	65	18.5	2.0	6.1	4.1	23.8
廃瓦	表乾-2%	55	14.5	1.1	6.4	5.3	22.9
廃瓦	表乾-4%	55	14.0	1.1	6.4	5.3	23.6

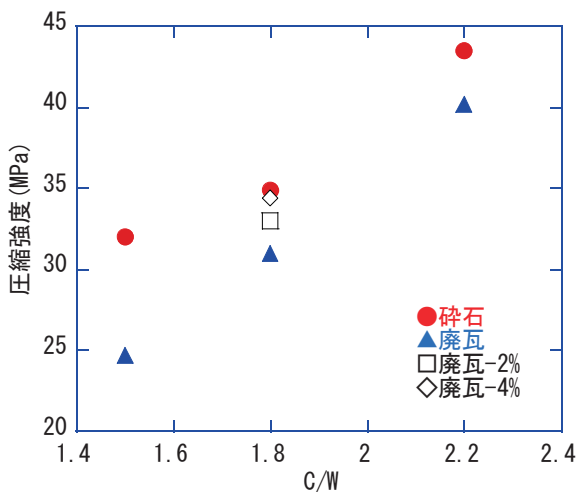


図2 C/Wと圧縮強度との関係

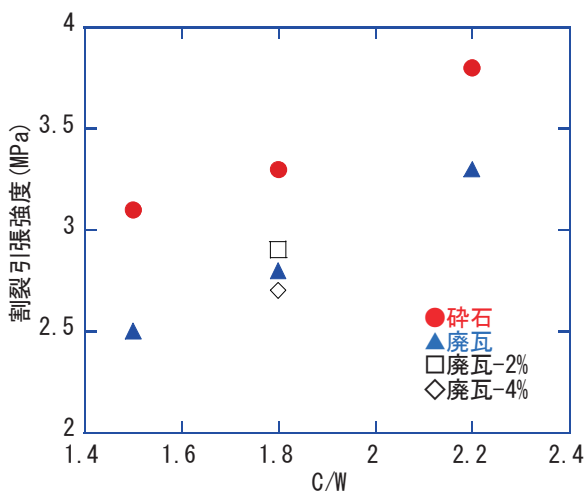


図3 C/Wと割裂引張強度との関係

用いた場合も、廃瓦を用いた場合も、C/Wの増加とともに圧縮強度が直線的に増加した。廃瓦を用いた場合の圧縮強度は、砕石を用いた場合に比べ、W/C = 45, 55%では約3.6N/mm²減少し、W/C = 65%では約7.3 N/mm²減少した。粒子強度の影響であれば、一定強度での頭打ちが見られる。しかし、図2では骨材に拘わらず直線関係が得られており、粒子強度の影響は小さいと考えられる。一方で、廃瓦の含水状態が異なる場合は、含水率が低いものほど圧縮強度が上昇する傾向が見られた。

図3に割裂引張強度試験の結果を示す。圧縮強度試験と同様に、砕石を用いた場合も、廃瓦を用いた場合もC/Wの増加による割裂引張強度の直線的な増加が見られた。砕石を用いた場合に比べて、廃瓦を用いた場合の割裂引張強度は15-20%ほど低下した。また、表乾-2%とすると、圧縮強度と同様に、割裂引張強度が上昇する傾向が見られた。ただし、表乾-4%とした場合、表乾状態と同程度の割裂引張強度となり、圧縮強度ほど明確な傾向とならなかった。

それぞれの強度に対しても、骨材の吸水量が影響した可能性がある。そこで、骨材の含水量の影響について考えてみる。廃瓦の含水率は大きく、配合上の数値としても廃瓦が吸水している水の量は、単位骨材量 ÷ 骨材表乾密度 × 骨材吸水率で求められ、その量は約100kgとなる。麓ら³⁾や松下ら⁷⁾は、単位総水量を用いて再生骨材が吸水している水のコンクリート性状への影響を考察している。そこで、吸水量の影響を考えるために単位総水量TW (kg/m³)を算出することとした³⁾。単位総水量とは、単位水量に、細・粗骨材が吸収している吸水量を加えたコンクリート中の全水量のことである。単位総水量を式(1)により算出した。

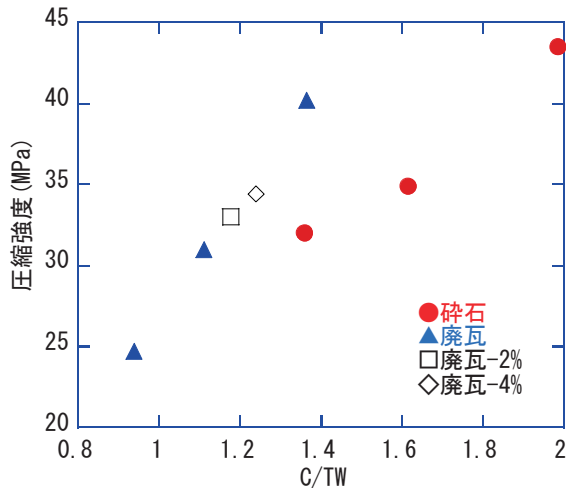


図4 圧縮強度とC/TWの関係

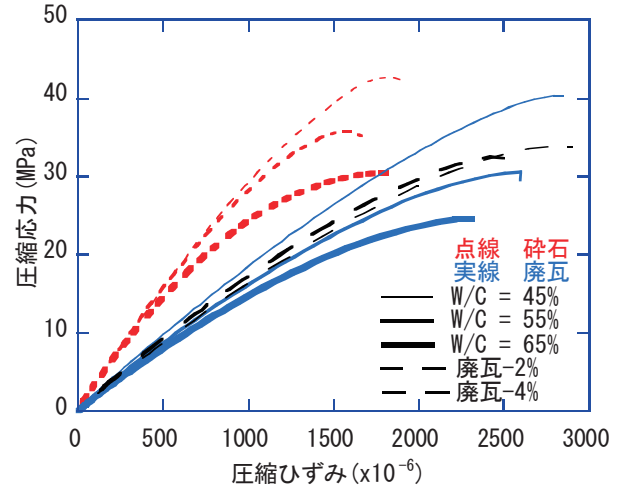


図6 圧縮応力と圧縮ひずみの関係

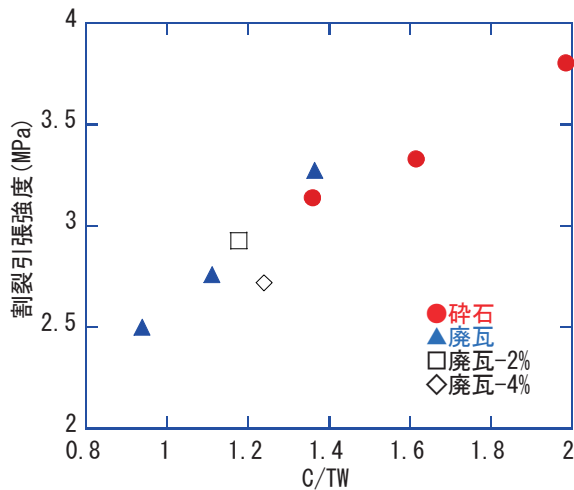


図5 引張強度とC/TWの関係

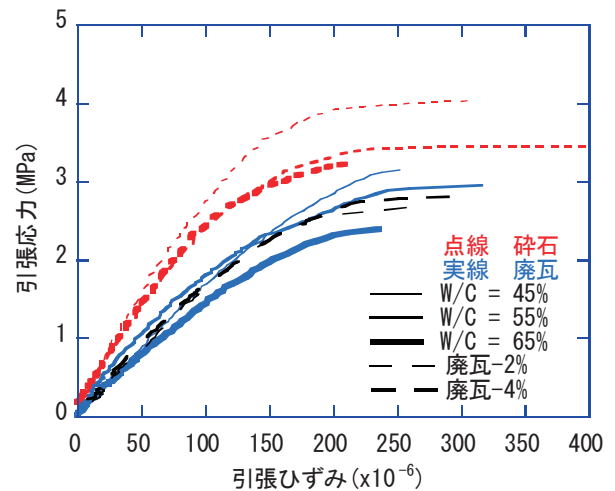


図7 引張応力と引張ひずみの関係

$$TW = W + s \cdot \gamma_{ds} \cdot W_s + g \cdot \gamma_{dg} \cdot W_g \quad (1)$$

ここで、

W : 単位水量 (kg/m^3)

s : 単位細骨材体積 (ℓ / m^3)

γ_{ds} : 細骨材の絶乾密度 (kg/ℓ)

w_s : 細骨材の含水量 (%)

g : 単位粗骨材体積 (ℓ / m^3)

γ_{dg} : 粗骨材の絶乾密度 (kg/ℓ)

w_g : 粗骨材の含水率 (%)

そして、単位セメント量 C (kg/m^3) と単位総水量 TW との比をセメント総水量比とする。

図4に圧縮強度とセメント総水量比 C/TW の関係を示す。それぞれの骨材において、 C/TW の増加とともに圧縮強度は直線的に増加した。しかし、砕石を用いた場合と廃瓦を用いた場合では、その直線の傾きが異なった。一方、図5に割裂引張強度とセメント総水量比 C/TW の関係を示す。差は小さいが、圧縮強度と同じ傾向となった。

以上から、廃瓦の吸水量が圧縮強度や引張強度に影響していると考えられる。ただし、再生骨材の場合³⁾と異なり、廃瓦を用いたことによる影響は、砕石の場合とその影響度合いに差が見られた。この考察のために、それぞれの強度試験での応力-ひずみ関係を検証することとした。

図6に圧縮強度試験から得られた圧縮応力とひずみの関係を示す。廃瓦を用いた場合、砕石を用いた場合に比べて、コンクリートの静弾性係数は小さく、最大応力を向かえた時のひずみは大きくなる傾向が見られた。これは、砕石に比べて、廃瓦の変形が大きいため、コンクリート内部での応力-ひずみ関係が異なると推察される。

次に、図7に割裂引張強度試験から得られた引張応力とひずみの関係を示す。なお、引張ひずみは、試験体底面中央の引張方向の平均ひずみである。廃瓦を用いた場合、砕石を用いた場合に比べて、静弾性係数は小さく、破壊する際のひずみはほとんど変わらなかった。これは、割裂引張強度試験では骨材

表 4 臨界応力の測定結果

骨材	含水状態	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	臨界応力 (N/mm ²)	臨界応力比
砕石	表乾	45	43.5	38.5	0.88
砕石	表乾	55	34.9	30.6	0.88
砕石	表乾	65	32.0	28.8	0.90
廃瓦	表乾	45	40.2	38.8	0.97
廃瓦	表乾	55	31.0	29.3	0.94
廃瓦	表乾	65	24.7	23.6	0.96
廃瓦	表乾-2%	55	33.0	31.7	0.96
廃瓦	表乾-4%	55	34.4	32.3	0.94

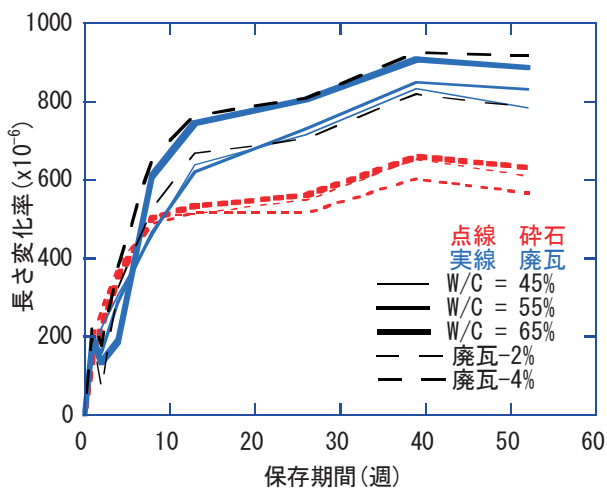


図 8 長さ変化率の測定結果

の変形による影響が小さく、ペースト部分の破壊の影響を強く受けるためと考えられる。

また、表 4 に圧縮強度試験における臨界応力と、臨界応力を圧縮強度で除した臨界応力比を示す。砕石を用いた場合には、臨界応力比が 0.9 程度であったが、廃瓦を用いた場合には、0.95 以上となった。臨界応力比が小さいことは、臨界応力に達してから、荷重の増加に伴うペースト破壊の進行速度が速いことを示している。この理由として、コンクリートが臨界応力に達した際に、砕石を用いた場合に比べて、廃瓦を用いたコンクリートのペーストのひび割れ数が多く、臨界応力後に連続して破壊に至るまでの変化が速かったことが考えられる。そして、ペーストのひび割れ数は、廃瓦の変形抵抗性が小さいことに起因していると考えられる。

以上から、廃瓦を使用した場合、コンクリートの圧縮強度や割裂引張強度に、廃瓦の吸水率と変形抵

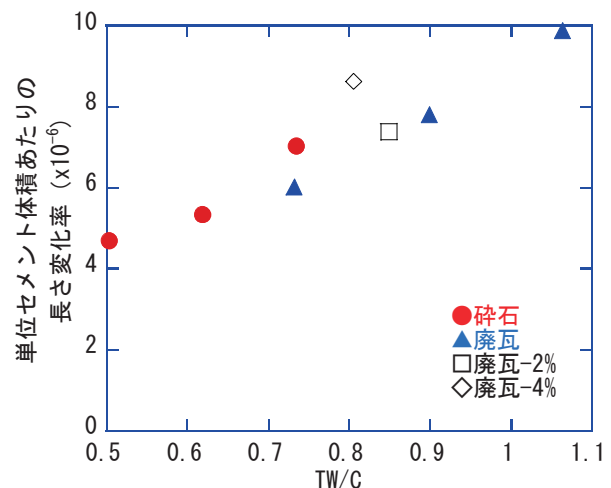


図 9 保存期間 52 週での TW/C と単位セメント体積あたりの長さ変化率との関係

抗性が影響していると考えられる。具体的には、材齢 28 日において、骨材中の吸水量を考慮した TW の影響を受け、廃瓦を用いた場合のペーストの物性は、砕石を用いた場合より低下する。さらに、砕石に比べて廃瓦は柔らかいため、廃瓦を用いたコンクリートの弾性係数は、砕石を用いた場合より明確に低下する。しかし、W/C=45%までであれば、廃瓦の破壊が先行することはない。これらの理由から、廃瓦を用いた場合、同じ荷重を載荷しても、コンクリート中のペーストの内部ひずみは、砕石を用いた場合より大きくなる。したがって、塑性域での微小ひび割れが分散して発生することで臨界応力比が低下したと考えられる。また、砕石の場合とは異なり、ペーストの変形による破壊が主となったことで、コンクリートの破壊ひずみが砕石を用いた場合より大きくなったと考えられる。よって、廃瓦を用いたコンクリ

ートの圧縮強度や割裂引張強度は、C/TW と良い相関はあるものの、碎石を用いた場合とは異なる直線となったと考えられる。

3.3 乾燥収縮性状について

図8に、長さ変化率の測定結果を示す。保存期間初期にばらつきはあるが、保存期間8週目までは、碎石を用いた場合も、廃瓦を用いた場合も差は見られない。しかし、それ以降で長さ変化率に差が見られるようになった。52週後の長さ変化率は、碎石の場合 600×10^{-6} 程度、廃瓦の場合 $800-900 \times 10^{-6}$ 程度となった。廃瓦の含水率が低下した場合もその差は同様の範囲にとどまった。

ここでも吸水量の影響を考えるため、TWを用いた検討を行う。著者の研究³⁾にもとづき、コンクリートの長さ変化率を単位セメント体積(コンクリート 1m^3 の配合中に占めるセメント体積)で除した値を算出し、TWを用いた指標との関係を調べた。図9にその結果を示す。TW/Cと単位セメント体積あたりの長さ変化率の関係は、いずれの骨材を用いた場合も直線関係になった。しかし、廃瓦を用いた場合と、碎石を用いた場合で少し差が見られた。すなわち、乾燥収縮に関して、骨材の変形抵抗性の影響は小さく、コンクリート中の総水量の影響が大きいことがわかる。

以上から、次のことが考えられる。乾燥初期の長さ変化は、骨材に拘わらず同程度の速度で変化する。保存期間52週での長さ変化率には、骨材の吸水率や変形抵抗性の影響が見られるが、特に吸水率の影響が大きい。

4. まとめ

廃瓦を粗骨材に使用したコンクリートに関する実験的検討から以下のことがわかった。

- 1) 廃瓦の表乾密度が低く、吸水率が高いが、実積率は良好である。ただし、すりへり減量が大きく、 $0.01-10\mu\text{m}$ の細孔が多いことから、摩耗や物質移動などの耐久性に注意が必要である。
- 2) 廃瓦を用いた場合のスランプ値は、同配合の碎石を用いた場合に比べて大きくなる。廃瓦の実積率が大きいことが要因と考えられる。ただし、廃瓦の含水率が1%低下するとスランプ値が1.2cm小さくなる。
- 3) 廃瓦を用いた場合の圧縮強度および割裂引張強

度は、同配合の碎石を用いた場合に比べて10-20%ほど低下する。これは、碎石に比べて、廃瓦の吸水率が高く、変形抵抗性が小さいため、破壊挙動が異なることが要因だと考えられる。なお、廃瓦の含水状態の変化による強度への影響は、単位総水量(TW)を用いることで推定できる。

- 4) 乾燥初期の長さ変化は、骨材に拘わらず同程度の速度で変化する。保存期間52週での長さ変化率には、骨材の吸水率や変形抵抗性の影響が見られるが、特に吸水率の影響が大きい。

参考文献

- 1) 篠原章宏, 米田稔, 片岡利仁, 尾坂高明, 新井貴史, 小島玉雄: 瓦再生骨材としての透水性舗装材および土壌改良材としての性能評価, 日本緑化学会誌, Vol. 36, No. 1, pp. 175-178, 2010
- 2) 天野佑樹, 上原匠, 梅原秀哲, 武長祐樹: 三州瓦廃材のコンクリートへの有効利用, コンクリート工学論文集, No. 21, Vol. 2, pp. 1-11, 2010.
- 3) 麓隆行, 山田優: 再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について, 土木学会論文集, No. 767/V-64, pp. 61-73, 2004.8
- 4) 加藤清志: コンクリートの真の強度に関する研究--主として変形特異点としての比例限度および臨界応力について, 防衛大学校理工学研究報告, Vol. 15, No. 1, pp. 29-57, 1977.3
- 5) 麓隆行, 柏木洗一: 副産物粗骨材の弾性係数がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 145-150, 2009.7
- 6) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝: コンクリートの配合設計への余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 578, pp. 57-70, 1997
- 7) 松下博通, 佐川康貴, 川端雄一郎: 再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 1, pp. 230-242, 2006.1

(2013年1月15日受付 2013年3月1日受理)