

資 料

瓦粉砕物を骨材とした高炉セメントコンクリートの 製造並びに評価試験

阿部 公平**・安藤 邦広**・江角 典広**・原田 達也*・江木 俊雄*

1. 目 的

島根県の石見地方で製造されている石州瓦は1200℃近傍で焼成され、古くから強度、耐久性に優れた瓦として使用されている¹⁾。しかしながら高温で焼成するために変形や切れによる不良品が13,000~16,000t/年生じている。これらは規格外瓦と呼ばれ、その一部は路盤材などへ再利用されているものの半数強は産業廃棄物として処分されている。これら大量の規格外瓦を積極的に循環再利用するシステムを構築することは喫緊の課題である。

これまでに規格外瓦や使用済みの古瓦を循環再利用するために様々な研究開発が行われている。その一つにコンクリート用骨材としての利用に関する取り組み^{2~7)}が挙げられ、瓦粉砕物は物理的性質にバラツキが認められるものの、骨材の一部または全量を瓦粉砕物と置換したコンクリートは総じて従来の普通骨材を使用したコンクリートと同等の強度と耐久性を示すことが報告されている⁷⁾。

我々は平成21年度に規格外瓦粉砕物に対する各種骨材試験、コンクリートの配合設計、圧縮強度試験を行い、規格外瓦の粉砕物が漁礁コンクリートの骨材として利用が可能かを評価・検討した⁸⁾。その結果、普通ポルトランドセメントを使用し、骨材に瓦粉砕物を用いたコンクリートは、普通骨材を使用したコンクリートよりも若干圧縮強度が低いものの目標強度である21N/mm²を十分に満足した。また、瓦粉砕物の置換率の違いによる圧縮強度の顕著な差は認められなかった。よって規格外瓦の粉砕物は漁礁ブロックの骨材として利用できる事が数値的に示された。

漁礁はセメント工場で作製される場合と生コンを使用して港湾の周辺で作製される(以後、現場打ちと表記)2通りの工法があり、セメント工場では主として普通セメントが使用され、現場打ちの場合には高炉セメントが使用される。そこで今年度は高炉セメントを使用し、現場打ちの漁礁コンクリートの骨材として規格外瓦粉砕物が利用できるかを評価した。また比較のために高炉セメントを用いセメント工場で作製される工法での評価を行った。更にコンクリートの骨材を普通砕石から瓦粉砕物に置き換えた場合の

*研究開発グループ, **株式会社イズコン

漁礁ブロックの安定性について計算を行った。それらの結果について報告する。

2. 方 法

2.1 使用材料および配合

本試験で使用した瓦粉砕物は前報⁸⁾と同様に、島根県浜田市にある株式会社石州川上窯業が自社の工場から発生した規格外瓦(石州瓦)をジョークラッシャーで粉砕し5~20mmの粒度に加工したものをを用いた。コスト縮減を図るため、前報⁸⁾と同様に角取りなどの特段な処理は施さなかった。そのため、瓦粉砕物はやや角張った形状で扁平、鋭利な粒形をしており、表面の一部に黒色の釉薬の付着が認められた。この瓦粉砕物に対して、JIS A 5005「コンクリート用碎石及び砕砂」に基づき必要な物性を調べた。更に骨材のアルカリシリカ反応性を化学法により評価するとともに、海水や潮風等の気象条件に対する骨材の安定性を判断するために、JIS A 1122に従い、硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験を行った。

表1に石州瓦の瓦粉砕物を使ったコンクリートの試験体を作製するために使用した材料を示す。練混ぜ水(W)は地下水、セメント(C)は高炉セメント、細骨材は加工砂(S:奥出雲産)を用いた。粗骨材は瓦粉砕物(G2:石州産)および比較の碎石(G1)には古志産を用いた。また、混和剤(AD:マイティ21LV)は高減水性と非遅延性を有する高性能減水剤(I種JIS A 6204)を使用した。

表1 使用した材料

種別	記号	名称	仕様
練混ぜ水	W	地下水	密度1.00g/cm ³
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.16g/cm ³
細骨材	S	加工砂(奥出雲産)	密度2.57g/cm ³ 吸水率1.37% 粗粒率2.72%
粗骨材	G1	碎石 (古志産5~20mm)	密度2.71g/cm ³ 吸水率1.34% 粗粒率6.78% 損失質量2.56%
	G2	瓦粉砕物 (石州産5~20mm)	密度2.28g/cm ³ 吸水率9.58% 粗粒率6.44%
混和剤	AD	マイティ21LV	密度1.05g/cm ³

表2 コンクリートの示方配合

試験体の名称	容積置換率 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G1	G2	AD*
瓦粉砕物0%	0	55	48	175	319	864	983	-	1.60
瓦粉砕物50%	50	55	49	175	319	882	482	407	1.91
瓦粉砕物100%	100	55	50	175	319	900	-	798	2.23

*) 混和剤 (AD) は、練混ぜ水 (W) に含まれる。

表2に瓦粉砕物を使用したコンクリートの示方配合を示す。前報⁸⁾と同様に瓦粉砕物を粗骨材の内割とし、瓦粉砕物の容積置換率を0%、50%、100%の3水準に設定した。水セメント比 (W/C) はJISの鉄筋コンクリートのフレッシュコンクリートの品質⁹⁾に則り55%とした。細骨材率 (s/a) はコンクリート中の全骨材量に対する細骨材量の絶対容積比を表し、細骨材が圧縮強度に及ぼす影響を最小限にし、かつ瓦粉砕物による圧縮強度変化を明らかにするために、細骨材比がほぼ等しくなるよう碎石と瓦粉砕物の使用量を調整した。単位水量は土木学会コンクリート標準示方書施工編¹⁰⁾で推奨されている単位水量の上限値を参照にして175kg/m³と一定にした。スランプは高性能減水剤 (AD) を対セメント重量で0.5~0.7%の範囲で添加し調整を行った。なお、瓦粉砕物を使用したコンクリートの目標規格値は、漁港・漁場の施設の設計の手引き¹¹⁾の設計基準強度を参考にして圧縮強度は21N/mm² (工場製品用：材齢14days, 現場打ち製品用：材齢28days) とし、スランプは8±2.5cmとした。スランプの許容差は、JISのレディーミクストコンクリート¹²⁾を参考にした。

2.2 試験体の作製方法および試験項目

コンクリートの練り混ぜはパン型強制練りミキサーを用い、1バッチ当たりの練り混ぜ量は0.029m³とした。各使用材料は細骨材、セメント、粗骨材の順にミキサー内へ投入して30秒間空練りした後、練混ぜ水と混和剤を投入し90秒間本練りを行った。練り混ぜ終了後、切り返しを行い直ちにスランプ試験を実施し、所要の状態が得られたことを確認した後に十分な剛性を持った型枠に入れて円柱試験体 (φ10×20cm) を作製した。円柱試験体の成形は前報⁸⁾と同様にテーブル型振動機を使用し、圧縮強度試験に供する当該円柱試験体は成形後12時間静置して円柱試験体の脱型をおこなった。尚、瓦粉砕物は普通骨材である碎石に比して吸水率が9.58%と高いため、練り混ぜ時に瓦粉砕物が練混ぜ水を吸水し流動性が著しく低下 (スランプロス) することが推察された。そこで、軽量骨材を使用する場合と同様に24時間水中に瓦粉砕物を浸漬 (プレウェッティング) をして表面乾燥飽水状態に調整して使用した。

工場で製造されるコンクリート二次製品は、一般的に製品の脱型時期を早めて型枠の利用効率を上げ生産性を向上させるために、蒸気養生などの促進養生が行われる。このことを考慮して、養生方法としては、普通ポルトランドセ

メントによる工場製品に用いられる蒸気養生と高炉セメントによる現場打ち製品に用いられる封緘養生の二種類の方法を行った。蒸気養生は前報⁸⁾と同様に、前置 (2h以上)、昇温 (20℃/h)、最高温度 (65℃) 処理 (以降、自然放冷) で蒸気処理に供し、蒸気処理終了後の円柱試験体 (φ10×20cm) 9本はコンクリート二次製品と同様に材齢14daysまで気中養生に供した。封緘養生は、試験体が乾燥しないように業務用のラップで3重に包装し、円柱試験体 (9本) を室内で材齢28daysまで養生させた。

試験項目はJISによる試験方法に準拠して、各配合のコンクリートについてのスランプ試験 (JIS A 1101) および配合毎に蒸気+気中養生-材齢14days, 封緘養生-材齢28daysの円柱試験体 (φ10×20cm) 各3本による圧縮強度試験 (JIS A 1108) とした。圧縮強度試験結果は、前報⁸⁾で行った普通ポルトランドセメントによる試験体の蒸気+気中養生-材齢14days, および標準養生-材齢14daysの値と比較した。

2.3 漁礁ブロックの安定性の計算

漁礁ブロックのコンクリート骨材に碎石と瓦粉砕物100%を使用した場合の漁礁の安定性を計算によって調べた。ここで瓦粉砕物を100%使用した場合は、碎石との絶対密度の違いから漁礁ブロックの重量及び単位体積重量を碎石骨材を使用した場合の10%減とした。計算は漁礁メーカーの(株)太平洋マテリアルの協力により、漁礁を松江市鹿島町恵曇沖の80mの海底に沈めたと仮定して行った。安定性の計算は、漁港・漁場の施設の設計の手引き第2章沈設漁礁2.4安定計算¹³⁾に従い、沈設漁礁に作用する流体力による滑動または転倒について検討した。

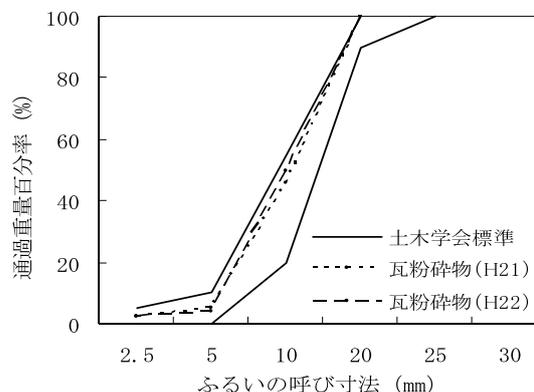


図1 瓦粉砕物の粒度曲線

表3 前報⁸⁾(H21年度)と本報(H22年度)に使用した瓦粉砕物の物性値

試験名	規格	項目	規格値	試験値(H21)	試験値(H22)
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102	粗粒率 (F.M.)		6.47	6.44
骨材の微粒分量試験	JIS A 1103	微粒分損失量 (%)	3.0以下	1.20	2.10
骨材の単位容積質量及び実積率試験	JIS A 1104	単位容積質量 (kg/L)		1.22	1.23
		実積率 (%)		58.5	59.1
粗骨材の密度及び吸水率試験	JIS A 1110	表乾密度 (g/cm ³)	2.45以上	2.24	2.28
		絶乾密度 (g/cm ³)	2.5以上	2.08	2.08
		吸水率 (%)	3.0以下	7.43	9.58
粒形判定実積率試験	JIS A 5005	実積率 (%)	56以上	58.0	58.7
ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験	JIS A 1121	すりへり減量 (%)	40以下	28.0	28.4
骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法)	JIS A 1145	判定		無害ではない	無害ではない
硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験	JIS A 1122	骨材の損出重量 (%)	12%以下	未測定	1.7

3. 結 果

3.1 骨材の物性

試験に使用した規格外瓦粉砕物についてJIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に基づいてコンクリート用骨材として必要な物性を調べた結果を前報⁸⁾の結果と併せて表3に示す。また、瓦粉砕物の粒度曲線を図1に示す。瓦粉砕物の粗粒率は6.44であり一般的な粗骨材の粗粒率である6～8の範囲内にあった。粒度曲線は実線で示す土木学会の標準粒度範囲内に収まっており、粒度の極端な偏りは認められなかった。微粒分損失量は2.1%であり、JISの規格値3.0%以下を満足した。単位容積質量は1.23 (kg/L)であり、標準的な粗骨材の単位容積質量1.55～1.85 (kg/L)よりも小さかった。瓦粉砕物の絶乾密度および吸水率は2.08g/cm³、9.58%であり、JISの規格値である絶乾密度2.5 g/cm³以上、吸水率3.0%以下を満足しないことが分かった。粒形判定実積率については58.7%でJISの規格値である56%以上を満足した。すりへり減量は28.4%でJISの規格値である40%以下を満足した。

図2に瓦粉砕物のアルカリシリカ反応性 (ASR) を化

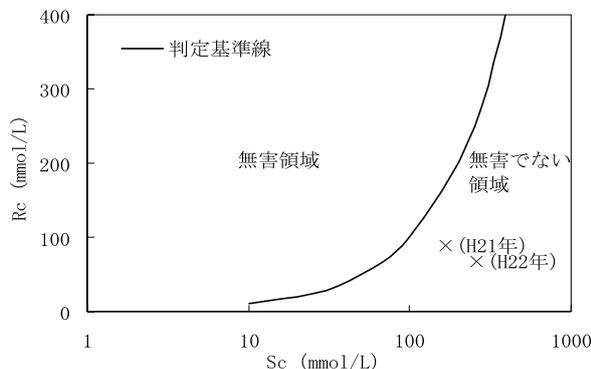


図2 瓦粉砕物のアルカリシリカ反応性 (化学法)

学法で調べた結果を示す。溶解シリカ量 (Sc) が430mmol/L (>10mmol/L) であるのに対してアルカリ濃度減少量 (Rc) は93mmol/L (<700mmol/L) と溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) を上回っている (Sc/Rc=4.62) ことから、使用した瓦粉砕物は「無害でない (有害)」と判定された。そのため、瓦粉砕物中の反応性を持つシリカ (二酸化けい素, SiO₂) と、コンクリートに含まれるアルカリ成分 (Na⁺, K⁺など) とが反応することによって生じる生成物 (アルカリシリカゲル) が吸水膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせる可能性が考えられた。今後、モルタルバー法による試験を行い、アルカリシリカ反応性を確認する予定にしている。

硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験から、瓦粉砕物の損失質量は1.7%であり、JIS A 5005「コンクリート用砕石および砕砂」で規定されている砕石の損失質量の規格値12%以下を満足した。また島根県内の砕石の損失質量は約2.6%で、瓦粉砕物は砕石よりも損失質量が小さい値となった。これらのことから、塩害に強い石州瓦の粉砕物は、海水中においても耐久性が高い骨材であることが判明した。

3.2 アルカリ骨材反応抑制対策

国土交通省は平成14年にアルカリ骨材反応抑制対策として、1)コンクリート中のアルカリ総量を規制する対策、2)抑制効果のある混合セメントなどを使用する対策、3)安全と認められる骨材を使用する対策の三つの抑制対策のうち何れか一つについて確認を行い、土木構造物については1)、2)を優先することと位置付けている。本試験では、2)の混合セメントの一つである高炉セメントB種を使用し、その対策とすることから、1)のコンクリート中のアルカリ総量の計算は行わなかった。

3.3 コンクリートのスランプ

練り上がり直後のフレッシュコンクリートをスランプコーンに詰めて突き棒で所定の回数一様に突いた後、直ちにス

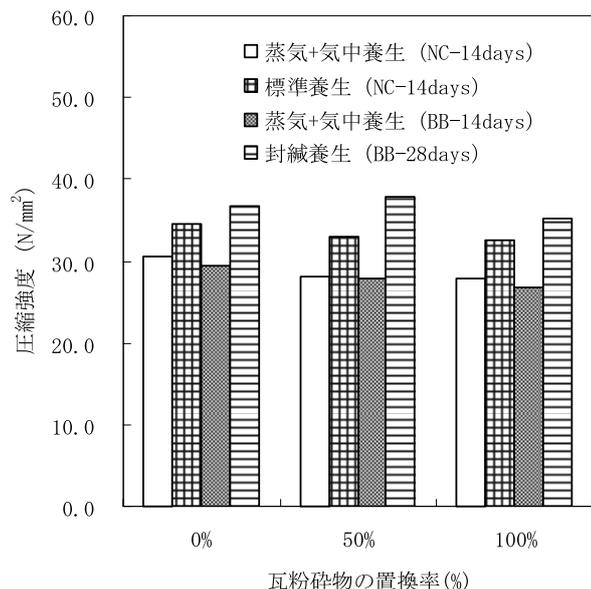


図3 圧縮強度試験結果

(NC：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメントB種)

ランプコーンを静かに鉛直に引き上げスランプ試験を行った。スランプはコンクリートの中央部における下がり具合を測定し、そのフレッシュコンクリートのスランプとした。その結果、瓦粉砕物0%、瓦粉砕物50%、瓦粉砕物100%のスランプはそれぞれ8cm、9cm、8cmとなり、2.1で述べたスランプの目標許容範囲である 8 ± 2.5 cm内に収まった。

3.4 コンクリートの圧縮強度

高炉セメントによる試験体の圧縮強度試験結果を前報⁸⁾の結果とともに図3に示す。前報⁸⁾の普通ポルトランドセメント (NCと略記) を使用した試験体には、それぞれ蒸気+気中養生 (材齢14days) と標準養生 (材齢14days) を施した。高炉セメントB種 (BBと略記) を使用した試験体に対しては、それぞれ蒸気+気中養生 (材齢14days) と封緘養生 (材齢28days) を施した。この図から、高炉セメントB種を使用して蒸気+気中養生 (BB-14days) を行った瓦粉砕物0%、50%、100%の圧縮強度はそれぞれ29.4、27.9、26.9N/mm²となり、瓦粉砕物の置換率が増加するとともに若干強度が低くなる傾向にあった。普通ポルトランドセメントを使用して蒸気+気中養生 (NC-14days) した瓦粉砕物0%、50%、100%の圧縮強度は、それぞれ30.5、28.2、28.0N/mm²あり、同様の傾向を示した。これは瓦粉砕物自体の強度が碎石と比較して弱い、瓦粉砕物の表面の一部に付着している釉薬がモルタルとの付着力を弱める、プレウェッティングした瓦粉砕物に含まれる水分により供給水分が過剰となりコンクリートの強度が低下した¹⁰⁾、等が影響していると推察される。

また、同一水セメント比の場合、初期強度は普通ポルトランドセメントよりも高炉セメントB種を使用した試験体

のほうが若干強度が低くなるとの報告¹⁵⁾があり、それと同様の結果を示した。他方、高炉セメントB種を使用し封緘養生を施した試験体0%、50%、100%の圧縮強度はそれぞれ36.8、37.8、35.3N/mm²であり、いずれも普通ポルトランドセメントを使用した瓦粉砕物0%よりも高い値を示し、かつ、漁礁用コンクリートに求められる圧縮強度の21N/mm²を満足することが分かった。

3.5 漁礁ブロックの安定性の計算

沈設漁礁に作用する流体力による滑動に対する安定率Fを次式により検討した。

$$\mu W/P = F$$

ここで、

W：浮力を差し引いた沈設漁礁の質量 (kN)

P：沈設漁礁に作用する波・流れによる水平力 (kN)

μ ：漁礁と地盤との摩擦係数。海底が平坦な場合には0.6を用い、その他の場合の摩擦係数は、設置状況に対して適切な値を使用することとなっている。今回は、 $\mu = 0.6$ を用いた。

転倒に対する安全率Fは次式で検討した。

$$(W \cdot Lv) / (P \cdot la) = F$$

ここで、

la：流れに直角な鉛直面への漁礁の正射影面の重心までの高さ (m)

Lv：漁礁重心の底面への射影点から最も近い転倒の中心線までの距離 (m)

漁礁の形状は(株)太平洋マテリアルのエースロック2-B型とし、波と流れが混在した条件での流体力Pと瓦粉砕物を利用した場合の質量等を求めた後、安全率を計算した。その結果、滑動と転倒の安全率はそれぞれ2.03、4.07となり、碎石と比べて10%低い値となったが、安全率の基準値の1.2よりも大きい値を示した。このことから碎石の代わりに密度が低い瓦粉砕物を利用しても漁礁の安定性は大きく損なわれないことが判明した。

3.6 まとめ

高炉用セメントを用い、規格外の石州瓦粉砕物を骨材として使用したコンクリートの試験体を作製し、その諸性質を普通骨材を使用したコンクリート試験体と比較した。また石州瓦粉砕物の骨材としての安定性、石州瓦粉砕物を骨材として用いた漁礁の安定性を検討した。以下に、本試験で得られた知見を示す。

1) 石州瓦粉砕物の海水中での安定性を判断するために、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験」を行った。瓦粉砕物の損失質量は1.7%であり、JIS A 5005「コンクリート用碎石および砕砂」で規定されている碎石の損失質量の規格値12%以下を満足した。

2) 高炉セメントを用いた瓦粉砕物含有コンクリートは、蒸気+気中養生、封緘養生した試験体ともに漁礁に要求される圧縮強度の21N/mm²を十分に満足した。

3) 碎石よりも密度が約10%小さい瓦粉砕物を骨材として使用すると漁礁の重量が約7%程度軽くなる。しかしながら海底での漁礁の安定性は碎石と比較して7%しか低下せず基準値を十分満足することが分かった。

謝 辞

本報告は、平成22年度資源循環技術基礎研究実施事業による研究成果の一部である。本研究を進めるにあたり、島根大学生物資源科学部の野中資博教授にご指導を賜りました。また(株)太平洋マテリアル社には漁礁の安定性の計算を行って頂きました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 須藤定久. 瓦の話 (4) 島根県の石州瓦と原料粘土. 地質ニュース. 2000, Vol.550, No.1, p.45-52.
- 2) 谷口義則. KCクリートの開発とKCプレキャスト地覆の施工報告～廃瓦を活用したコンクリート～. 平成19年度中国地方建設技術開発交流会 (島根県会場) 発表課題. 極東工業 (株).
- 3) 友竹博一, 清水利康, 坂本一樹, 鳥居和之. 廃瓦再生骨材を使用したコンクリート製品の諸性質. コンクリート工学年次論文集. 2003, Vol.25, No.1, p.1355-1360.
- 4) 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. 2005, Vol.27, No.1, p.1405-1410.
- 5) 飛田浩孝, 上原匠, 梅原秀哲, 友竹博一. 瓦廃材のコンクリ-

- ト用骨材への適用性に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 2006, Vol.28, No.1, p.1577-1582.
- 6) 井上正一, 黒田保, 金子泰治, 吉野公. 廃瓦を細骨材として用いたコンクリートの物性. 日本材料学会誌. 2007, Vol.56, No.8, p.730-735.
- 7) 高田龍一. 「廃瓦リサイクル骨材を活用したコンクリート製品」の開発について. コンクリートテクノ. 2007, Vol.26, No.1, p.17-21.
- 8) 阿部公平, 安藤邦広, 江角典弘, 原田達也, 江木俊雄. 瓦粉砕物を骨材としたコンクリートの製造並びに評価試験. 島根県産業技術センター研究報告. 2011, 47, p.11-15.
- 9) JIS A 5364:2004. プレキャストコンクリート製品 材料及び製造方法の通則.
- 10) 土木学会コンクリート委員会. コンクリート標準示方書 [施工編]. 社団法人土木学会, 2007, p.85-86.
- 11) 水産庁監修 漁港・漁場の施設の設計の手引き [下]. 社団法人全国漁港漁場協会, 2003, p.672.
- 12) JIS A 5308:2009. レディーミクストコンクリート.
- 13) 水産庁監修 漁港・漁場の施設の設計の手引き [下]. 社団法人全国漁港漁場協会, 2003, p.676.
- 14) 温品達也, 清水祥平, 中川信矢, 佐藤良一. 廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混合コンクリートの性能向上に関する実験的検討. コンクリート工学年次論文集. 2009, Vol.31, No.1, p.241-246.
- 15) 村田二郎, 國府勝郎, 辻幸和. わかり易い土木講座10.新訂第六版. コンクリート工学 (I) 施工, 彰国社, 2003, p.30.