

廃瓦を活用したコンクリート（KCクリート）の開発

極東工業（株） 正会員 ○戸川邦彦
 極東工業（株） 工修 谷口義則

1. はじめに

島根県西部に位置する石見地方は古くから「石州瓦」の名で知られる国内有数の屋根瓦の産地である。その生産工場ではブランドを守るため厳しい品質管理が行われており、品質規格に合致しないものは破砕処分されている。こうして破砕されたものの一部は再び瓦の原料として使用されているが、その使用量は排出される量に比べて微量であるため、多くは野積みになされているのが現状である。

著者らはこの廃瓦の新たな用途として、コンクリート骨材への活用を考え、これまでに基礎物性などの研究を重ねてきた¹⁾。こうした研究を踏まえて骨材を100%廃瓦に置き換えた「KCクリート」を実用化するに至り、これまでに橋梁の地覆などに採用された。

「KCクリート」は廃瓦だけでなく、ワーカビリティを確保するためにPFBC灰（火力発電所から排出される石炭灰）などの産業副産物を混和材として使用している。

本稿は特に厳しい品質が要求されるPC桁を「KCクリート」で製作することに主眼をおいて、これまでの研究の成果を報告するものである。

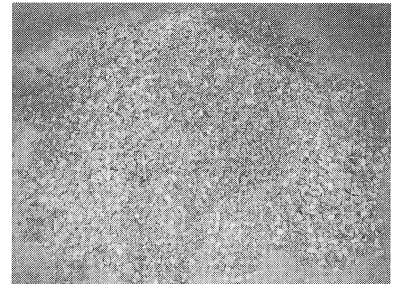


写真-1 廃瓦骨材

2. 瓦骨材の物性

KCクリートに使用される骨材は島根県江津市にて生産される石州瓦を30mm以下に破砕処理されたものを用いている(写真-1)。この廃瓦は瓦工場での生産工程においてひび割れや反りなど外観上の理由により規格外とされたものであり、瓦の原料や生産方法（瓦の焼成温度など）が一樣の廃瓦を骨材として使用することができる。今回、PC桁に使用するコンクリートはこの廃瓦をさらに粗骨材（20～5mm）、細骨材（5mm以下）に分級したものを入荷・使用している。

表-1に廃瓦骨材の表乾密度、吸水率と粗粒率を示す。

廃瓦骨材は通常の骨材（砕石）と比較すると表乾密度は10～20%軽量であり、吸水率は7%程度と大きいことが主な特徴として挙げられる。廃瓦骨材は密度や吸水率から捉えると通常の骨材と軽量骨材との中間的な性質を有していることが推察される²⁾。

表-1 廃瓦骨材の物性

		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
廃瓦骨材	細骨材	2.35	7.13	2.76
	粗骨材	2.24	7.57	6.72
通常骨材 (当社実績)	細骨材	2.60	1.12	2.70
	粗骨材	2.68	0.58	6.71

3. KCクリートの強度特性

図-1は単位水量を一定として結合材量（セメント+混和材（配合比7:3））を変化させたときの圧縮強度の発現特性を示している。表-2に結合材量ごとの配合例を示す。なお、試験体は打込み完了後に蒸気養生（50℃、3時間）を行っている。

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (B×%)
			水	早強 セメント	PFBC灰	粗骨材 (廃瓦)	細骨材 (廃瓦)	
K450	35.6	50.0	160	315	135	739	739	0.80
K500	32.0		160	350	150	720	720	0.80
K550	29.1		160	385	165	700	700	0.90

図-1によれば、材齢28日強度はK450で56.3N/mm²、K500で66.7N/mm²、K550で79.1N/mm²に達している。JIS製品であるプレテンション方式PC橋げたはコンクリートの設計基準強度を50N/mm²(JIS A 5373 道路橋用橋げた)と70N/mm²(JIS A 5373 軽荷重用橋げた)としていることから³⁾、それぞれK500とK550で対応できることが確認できた。

さらに、KCクリートと普通コンクリート(設計基準強度50N/mm²)の圧縮強度、ヤング係数の強度発現を図-2、3に示す。このときのコンクリートの配合を表-3に示す。

表-3 コンクリートの配合

	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (B×%)
			水	早強セメント	PFBC灰	粗骨材 (廃瓦)	細骨材 (廃瓦)	
KCクリート(K500)	32.0	50.0	160	350	150	720	720	0.80
普通コンクリート	36.0	40.0	151	419	0	697	1076	0.75

養生はKCクリート、普通コンクリートのいずれも50°Cで2時間の蒸気養生を行った。

材齢1日での圧縮強度は普通コンクリートが43.4N/mm²に対して、KCクリートは34.8N/mm²と普通コンクリートと比較してKCクリートの強度発現は遅れる傾向が見られる。道路橋用橋げたのプレストレス導入時の圧縮強度は35N/mm²以上としており、材齢1日でのプレストレス導入にはわずかに圧縮強度が不足していることが分かる。このことからKCクリートにプレストレス導入を行うには配合条件や蒸気養生の条件設定を適切に管理する必要がある。これと同じ傾向が通常の骨材を用いているEA-CRETE(PFBC灰混入コンクリート(NETIS登録技術:CG-060016-A))での試験結果でも確認されており、材齢1日でのプレストレス導入を行うため普通コンクリートよりも結合材量を増加した配合としている⁴⁾。

一方、ヤング係数は普通コンクリートに比べて約60%程度低い数値を示している。これと同じ傾向が軽量コンクリートにも見られ、これは普通コンクリートに比べて使用している骨材のヤング係数が低いことに起因していると言われており²⁾、KCクリートも同様の原因によっていると考えられる。

4. 収縮特性

収縮特性を把握するため、幅150mm×高さ200mm×長さ250mmの供試体(図-4)を用いて、打込み直後から収縮量の計測を行った。

打込み直後からの収縮ひずみを図-5に示す。計算値はコンクリート標準示方書(構造性能照査編)に示されるコンクリートの収縮ひずみの算定式により算出した。

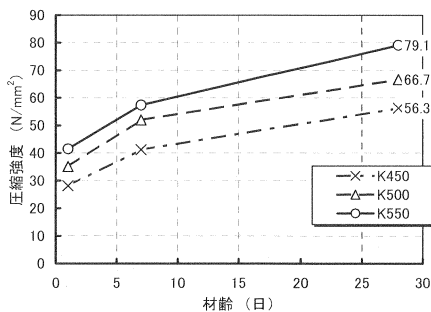


図-1 強度発現特性

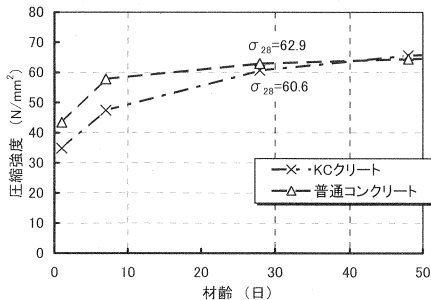


図-2 普通コンクリートとの比較 (圧縮強度)

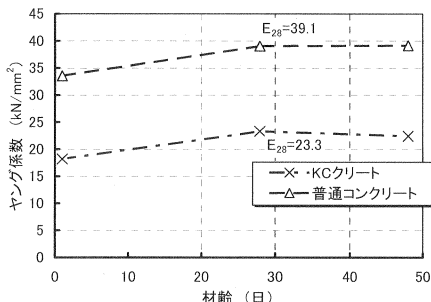


図-3 普通コンクリートとの比較 (ヤング係数)

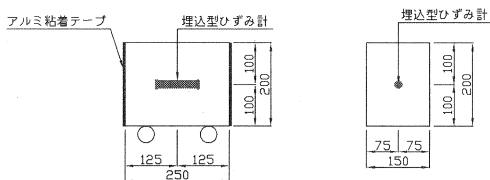


図-4 収縮試験の概要 (単位:mm)

図-5 によると打込み直後から PFBC 灰の影響により 150 μ 程度の膨張が認められている。PFBC 灰は通常のフライアッシュに比べて CaO や SO₃ を多く含んでいるため練り混ぜ水と反応してエトリンガイトなどの膨張性水和物を生成することで初期膨張をすとされている⁴⁾。

その後の傾向を初期膨張分 (150 μ) シフトさせた計算値と比較すると、計算値に沿って収縮する方向へ進行しており、材齢 120 日付近までは通常考えられている収縮過程と同じであることがうかがえる。

しかし、材齢 120 日付近を境にひずみの進行が膨張方向へ変化し始めている。この原因の一つとして試験体の環境が変化したことが考えられる。試験体は材齢 120 日付近で屋内から屋外へ移動させており、雨による水分の供給などがこのような変化をもたらした要因であることが予想される。

5. クリープ特性

クリープ特性を把握するため、幅 150mm×高さ 200mm×長さ 1500 mm の供試体 (図-6) を用いてクリープ試験を行った。圧縮力の導入は材齢 28 日が経過してから行い、導入強度はコンクリート圧縮強度の 20±3%とした。なお、材齢 1 日で脱枠し、その後は空中暴露している。

クリープ係数の結果を図-7 に示す。図に示す計算値はコンクリート標準示方書 (構造性能照査編) に示されるクリープひずみの予測式を基に算出したクリープ係数を示している。

クリープ係数は圧縮力導入直後から計算値に近似して推移しており、材齢 100 日では計算値より約 0.08 低い値で推移していることがわかる。

圧縮力導入から 270 日経過した時点でクリープ係数は計算値が 0.67 に対して 0.62 となっている。

6. PC 桁による曲げ載荷試験

次に KC クリート を PC 桁に適用したときの曲げ耐荷性能を確認するため図-8 のように載荷実験を行った。

載荷試験の状況を写真-3 に示す。

製作した PC 桁は JIS A 5373 推奨仕様に示される断面 (LS09) を採用し、KC クリート (以下、KC) と普通コンクリート (以下、NC) の 2 種類により PC 桁を製作して実験を行った。

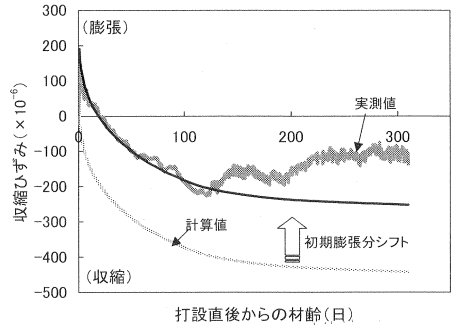


図-5 収縮ひずみの経時変化

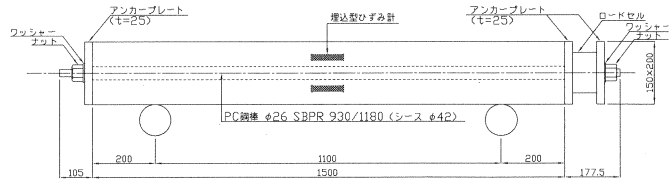


図-6 クリープ試験の概要 (単位:mm)

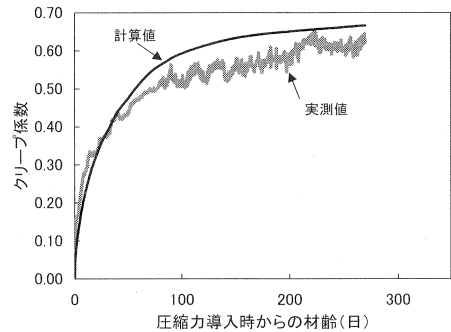


図-7 クリープ係数の経時変化

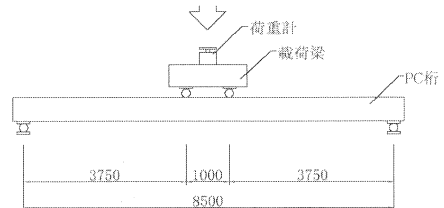


図-8 曲げ載荷試験の概要 (単位:mm)

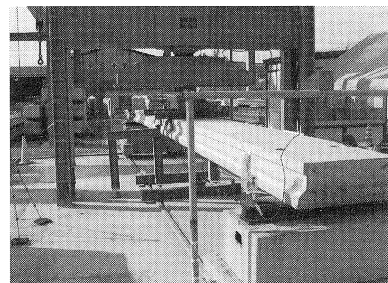


写真-3 試験状況

桁製作に使用したコンクリートは前述の図-2および3に示したコンクリートにより製作している。載荷試験時の圧縮強度は 65.7N/mm^2 (KC), 64.5N/mm^2 (NC), ヤング係数は 22.4kN/mm^2 (KC), 39.1kN/mm^2 (NC) である。

荷重とたわみの関係を図-9に示す。

弾性域でのたわみの挙動は、いずれも計算値とほぼ一致して推移しており、載荷荷重 50kN 時でのたわみはそれぞれ 11.5mm (NC), 18.8mm (KC) となり、KC は NC に対して 1.6 倍のたわみが生じている。この差はヤング係数の違いによるものであり、KC と NC のヤング係数の比が $1.00 : 1.68$ (KC : NC) であることに符合している。

ひび割れが発生した後は、いずれの試験体においても安定して荷重と変位が増加していることがわかる。NC では最大荷重 210kN で変位が 158mm に到達して圧縮縁のコンクリートが圧壊し、KC は最大荷重 205kN で変位 244mm に至って、同じく圧縮縁のコンクリートが圧壊している。

NC と KC の最大荷重の差は 2% 程度と小さく、いずれの試験体も実測値は計算値の 1.2 倍程度であったことから、KC の耐荷性能は NC とほぼ同等であると思われる。

次に支間中央の上、下縁のコンクリートのひずみを図-10に示す。

コンクリートのひずみはひび割れの発生まで計算値とほぼ一致して推移している。KC は約 80kN, NC は約 116kN でひび割れが確認された後、計算値から乖離していることが確認できる。上縁のコンクリートのひずみはひび割れ発生後も漸増し続け、ひずみの値がそれぞれ -4900μ (KC), -2600μ (NC) に至って、いずれも上縁のコンクリートが圧壊している(写真-4)。

8. まとめ

「KC クリート」を使用した PC 桁の耐荷性能に特に問題は見当たらないが、ヤング係数が低いことによる変形量の増加に注意することが必要である。また、「KC クリート」は普通コンクリートと軽量骨材コンクリートとの中間的な物性を有しており、設計や管理については軽量骨材コンクリートの場合と同様の思想を念頭において行うことで PC 桁に対応することが可能であると言える。

参考文献

- 1) 河金甲 他: 廃かわらを骨材として用いたコンクリートの基礎的性質, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 平成 18 年 9 月
- 2) 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, 昭和 60 年 6 月
- 3) (社)プレストレストコンクリート建設業協会: 道路橋用橋げた設計・製造便覧, 平成 16 年 6 月
- 4) 溝垣道男 他: 加圧流動床石炭灰を混入した PC 桁の実用化実験, 第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 平成 15 年 10 月

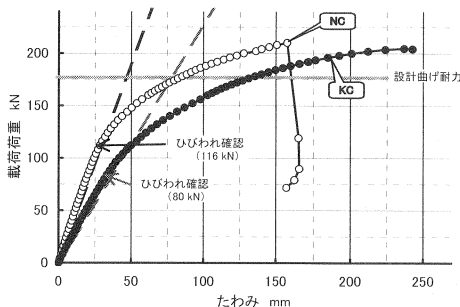


図-9 荷重とたわみの関係

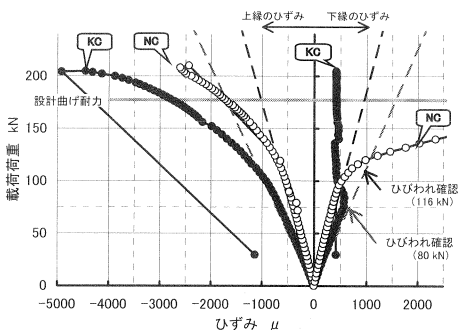


図-10 荷重とひずみの関係

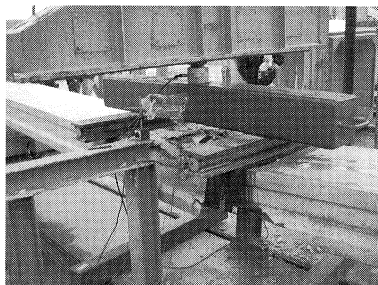


写真-4 破壊状況 (KC)