

(152) 石炭灰を原料とした人工骨材を用いた高強度コンクリートのPCへの適用(その1)

(株)日本ピーエス 技術管理部 技術開発課 正会員 原 幹夫
 同 上 検査課 中川 信治
 同 上 技術開発課 正会員 ○濱岡 弘二
 同 上 技術開発課 船野 浩司

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下「PC」と称す)は、コンクリートに作用する応力状態をコントロールし、部材寸法を薄く軽くできる利点から、多くのコンクリート構造物、特に橋梁にPC構造が採用されている。しかし、阪神大震災に端を発した耐震性の改善、建設コスト縮減要求等により、PC構造物のさらなる性能向上が望まれ、現在構造形式上の対策が検討・実施され始めている。

耐震性能の向上、コストの縮減には構造物の軽量化が大きな要素となる。PC構造では、コンクリートの高強度化と軽量化が最も理想的な対策と考えられるが、この2つの条件を同時に満たすのは困難な状況にある。

本報告ではこうした観点から、石炭灰(Coal Ash)を原料とし、比較的比重の小さい人工造粒粗骨材(以下「CA骨材」と称す)を使用した高強度コンクリートの物性試験を行い、PC構造への適用を検討した。

2. CA骨材の特性

CA骨材は、微粉炭燃焼火力発電所から排出される石炭灰の原粉を電気集塵機で捕集し、1300°C程度の高温で焼成したもので、従来の人工軽量骨材に見られる発泡過程を意図的に生じさせないように製造した人工骨材である。形状は球形、比重は1.9程度で、その他の諸性状は「構造用軽量コンクリート骨材規格」(JIS A 5002)のクラスHに適合する。かつ、比重を除いた強度、吸水率、実積率、凍結融解安定性等は「コンクリート用砕石」(JIS A 5005)を満足する性質を持っている。

表-1 CA骨材の物性値

骨材の種類	絶乾比重	表乾比重	吸水率(%)		B S 破砕値		単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	安定性 (%)	すりへり減量 (%)	粗粒率
			24h	5day	40%(t)	10%(t)					
CA骨材	1.86	1.87	0.56	0.72	30.0	16.0	1190	64.0	0.4	21.3	6.70
砕石(当社)	2.84	2.85	0.43	—	12.1	—	1600	58.4	5.2	9.8	6.70
JIS A 5002	L	<1.0	—	—	—	—	—	50<	<20	—	—
	M	1.0~1.5	—	—	—	—	—	50<	<20	—	—
	H	1.5~2.0	—	—	—	—	—	50<	<20	—	—
JIS A 5005	2.5<	—	<3	—	—	—	—	—	<12	<40	—

CA骨材および比較用の砕石の物性値を表-1に示す。表には構造用軽量コンクリート骨材およびコンクリート用砕石の物性規格値(JIS A 5002および5005)も併記した。CA骨材の比重は、砕石より1.0程度小さい。吸水率は幾分大きいが砕石と遜色はなく、約2日間で飽和状態に達する。また、安定性は砕石より極めて良好であり、実積率は砕石より数%大きい。しかしながら、CA骨材の破砕値およびすりへり減量値は数倍大きい。これは骨材自体の強度が相違するためである。

3. 材料および配合の選定

3-1 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメントとし、細骨材は福井県三国産陸砂(細砂)と福井県葉原産砕砂(粗砂)とを4.5:5.5で混合したものを使用した。また、練り混ぜ水はJIS A 5308の水質規格に適合する地下水を、混和剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。

3-2 コンクリートの物性値測定項目

測定項目は、スランプ・フロー試験、ヘッド差、単位容積重量、各強度試験(圧縮強度、曲げ強度、引張強度)、静弾性係数、凍結融解抵抗性、クリープ特性、および乾燥収縮特性とした。

3-3 配合の選定

PC構造物に使用するコンクリートとして、以下の項目に注目して試験練りを行い配合を選定した。

- ①高強度で作業性がよい
- ②単位容積重量が小さい
- ③PCに適用可能な静弾性係数である

上述の選定項目に則って実施した試験練りの配合、フレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの物性値を表-2に示す。

表-2 試験練りの配合とフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの物性値

TEST NO	W/C (%)	s/a (%)	フレッシュコンクリート				硬化コンクリート(σ_{28})				
			スランプ ^a (cm)	フロー (cm)	ヘッド差 (cm)	C _T (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	単位容積質量 (t/m ³)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
1	38.2	39.5	21.0	---	---	30	67.4	3.25	2.11	7.2	3.5
2	27.9	42.0	23.0	39.0x38.5	---	31	88.0	3.32	2.12	10.0	3.7
3	25.0	38.0	---	67.5x69.0	---	27	87.4	3.57	2.14	---	---
4	23.0	37.0	22.5	41.0x39.0	---	17	100.9	3.58	2.14	---	---
5	20.0	36.0	---	49.5x49.5	---	18	105.8	3.68	2.15	12.7	3.0
6	20.0	36.0	---	64.0x67.0	3.0	16	107.4	3.88	2.15	11.8	4.5
7	18.0	36.0	---	58.0x61.0	---	16	111.0	3.74	2.16	---	---
8	20.0	36.0	---	73.0x76.5	1.0	26	111.1	3.79	2.13	---	---
9	20.0	36.0	---	65.5x63.5	2.5	30	101.0	3.66	2.15	11.1	3.9

4. 結果および考察

以下の記述の中で、砕石コンクリートとして用いている値は、プレテンション用コンクリート(設計基準強度 $\sigma_{ck}=49.1\text{N/mm}^2$ と 73.6N/mm^2)の実績値を使用している。

4-1 フレッシュコンクリートの性状

(1)同一配合間における砕石およびCA骨材コンクリートのスランプ
コンクリート温度が、29~31°Cである場合の同一配合における両者のスランプ値を比較したものが表-3である。

水セメント比が27.9%のスランプの差は2cmでありあまり差はなかったが、38.2%の場合は6cmであり、CA骨材コンクリートは、ハンドリング性が良く扱い易いことがわかる。

(2)低水セメント比のCA骨材コンクリートのフロー

水セメント比25%以下の配合の場合、高性能減水剤をセメント重量の1.8~3.5%使用したときのフロー値は、コンクリート温度が16~27°Cの範囲で約40~70cmであった。水セメント比が小さくなるにしたがって、高性能減水剤の添加量が増えるが、これはセメント量が増加するのに対してコンシステンシーに影響する単位水量は、逆に減少していくことが大きく影響していると考えられる。今回の試験では、高性能減水剤の適正使用範囲内で添加率を変えながら流動性の良いコンクリートを得られた。

表-3 スランプ比較

TEST NO	コンクリートの種類	W/C (%)	スランプ (cm)
	砕石	38.2	15.0
	コンクリート	27.9	21.0
1	CA骨材	38.2	21.0
2	コンクリート	27.9	23.0

(3) プラントによる実機試験練り (TEST NO,9)

適正配合 (TEST NO,8) を用いて、プラントによる実機試験練りを行った。TEST NO,8と比較して、フロー値で約10cm、ヘッド差で1.5cm小さい結果となったが、ハンドリング性も良く、材料分離も見られず良好なコンクリートが得られた。

4-2 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度と静弾性係数

W/C=38.2%での圧縮強度は、砕石コンクリートで65.0N/mm²、CA骨材コンクリートで67.4N/mm²である。さらに、W/C=27.9%では81.6N/mm²と88.0N/mm²となり、砕石コンクリートとCA骨材コンクリートとの圧縮強度は、これらの配合において大差はなかった。

また、W/C=38.2%での静弾性係数は、砕石コンクリートで3.75×10⁴N/mm²、CA骨材コンクリートで3.25×10⁴N/mm²、W/C=27.9%では4.10×10⁴N/mm²と3.32×10⁴N/mm²となったが、今回使用した砕石は高強度用の比重の大きい良質なものであり、設計基準強度がσ_{ck}=49.1N/mm²~73.6N/mm²の砕石コンクリートの静弾性係数は、3.24~3.68×10⁴N/mm²が一般的とされていることから、CA骨材コンクリートの静弾性係数は砕石コンクリートより若干低い程度と判断される。

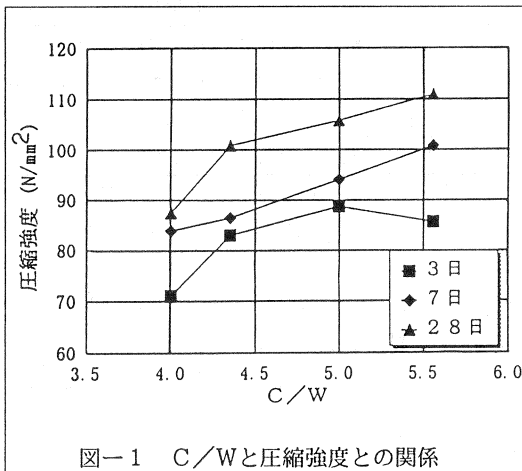


図-1 C/Wと圧縮強度との関係

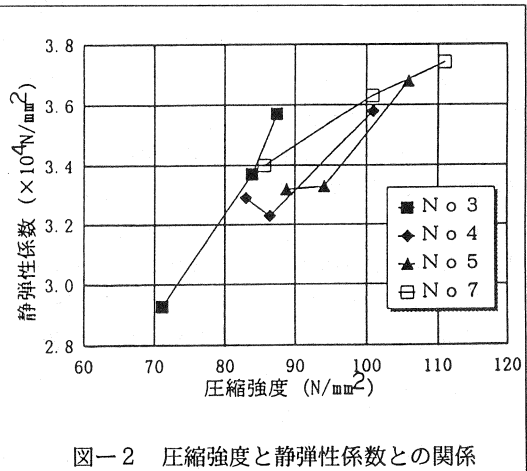


図-2 圧縮強度と静弾性係数との関係

低水セメント比におけるセメント水比と圧縮強度との関係は、図-1に示す通り材齢7日ではほぼ直線的で、材齢7日の圧縮強度は83.9~100.8N/mm²であり、材齢7日から28日までの圧縮強度の伸びは、C/W=4.0を除いてほぼ9.8N/mm²となっている。本試験において、CA骨材を使用することにより、特殊な材料や養生を必要とせず、100N/mm²以上の圧縮強度のコンクリートを得ることができた。

各配合ごとの圧縮強度と静弾性係数との関係は図-2に示す通り、材齢28日では3.57×10⁴N/mm²以上の値となった。

一般に高強度になるほど圧縮強度に対する静弾性係数の伸びは小さい。今回、圧縮強度が100N/mm²以上でも静弾性係数は約3.70×10⁴N/mm²であり、設計基準強度σ_{ck}=73.6N/mm²の砕石コンクリートの90%程度となっているが、PC構造用コンクリートとしては十分な値と考えられる。

(2) 砕石コンクリートとCA骨材コンクリートとの気乾単位重量当たりの圧縮強度比較

水セメント比38.2%および27.9%のコンクリートについて、材齢28日の供試体から求めた気乾単位質量と圧縮強度との関係を表-4に示す。

CA骨材コンクリートの気乾単位質量当たりの圧縮強度比率は、砕石コンクリートの約1.25倍になっている。これより、CA骨材コンクリートは軽量で高強度を必要とする構造物に有利と考えられる。

(3) 曲げ強度と引張強度

水セメント比27.9%における砕石コンクリートとCA骨材コンクリートの材齢7日と28日の圧縮強度と曲げ強度との関係を表-5に、水セメント比38.2%におけるそれぞれの材齢28日圧縮強度と引張強度との関係を表-6に示す。

表-4 気乾単位重量と圧縮強度との関係

TEST NO	コンクリートの種類	W/C (%)	圧縮強度 28日(N/mm ²)	気乾単位 質量(t/m ³)	圧縮強度(28日) /気乾質量	比率
/	砕石	38.2	65.0	2.53	25.7	1.00
	コンクリート	27.9	82.1	2.55	32.2	1.00
1	CA骨材	38.2	67.4	2.11	31.9	1.24
2	コンクリート	27.9	88.0	2.12	41.5	1.29

同一配合における砕石コンクリートとCA骨材コンクリートとの曲げ強度および曲げ/圧縮強度比は、材齢7日、28日とも同程度であった。

表-5 圧縮強度と曲げ強度の結果

TEST NO	コンクリートの種類	W/C (%)	圧縮強度(N/mm ²)		曲げ強度(N/mm ²)		曲げ/圧縮	
			7日	28日	7日	28日	7日	28日
/	砕石	27.9	73.9	82.1	10.1	9.9	1/7	1/8
	CA骨材	27.9	76.4	88.0	10.8	10.0	1/7	1/9

また、引張強度および引張/圧縮強度比も材齢28日で同程度であり、CA骨材コンクリートは水セメント比が27.9%および38.2%では、曲げ、引張強度において砕石コンクリートに比べて遜色はないと判断できる。

表-6 圧縮強度と引張強度の結果

TEST NO	コンクリートの種類	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張強度 /圧縮強度
/	砕石	38.2	64.8	3.39	1/19
	CA骨材	38.2	67.4	3.50	1/19

コンクリートの圧縮強度に対する引張および曲げ強度の比は、通常強度のコンクリートの場合、それぞれ1/10~1/13および1/5~1/8といわれているのに対し、高強度コンクリートでは、強度が高くなるほどこの比が小さくなる。一般に、コンクリートの引張および曲げ強度は圧縮強度の関数で示すことができる。

以下に示す日本コンクリート工学協会の提案式に、砕石コンクリート(設計基準強度 $\sigma_{ck}=49.1\text{N/mm}^2$)およびCA骨材コンクリート(TEST NO,6)の実測値を代入したときの結果を表-7に示す。

$$\left. \begin{array}{l} \text{引張強度} \\ \text{曲げ強度} \end{array} \right\} \begin{array}{l} ft = 0.59fc^{1/2} \quad (21\text{N/mm}^2 < fc < 83\text{N/mm}^2) \\ ft = 0.269fc^{2/3} \\ fb = 0.94fc^{1/2} \quad (21\text{N/mm}^2 < fc < 83\text{N/mm}^2) \\ fb = 0.469fc^{2/3} \end{array}$$

ここに、fc: 圧縮強度 ft: 引張強度 fb: 曲げ強度

表-7 引張強度、曲げ強度の実測値および計算値

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)		引張/圧縮		曲げ強度(N/mm ²)		曲げ/圧縮	
		実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
砕石	64.8	3.4	4.7	1/19	1/14	9.9	7.6	1/12	1/9
CA骨材	107.4	4.5	6.1	1/24	1/18	11.8	10.6	1/9	1/10

これらよりCA骨材コンクリートは曲げ強度については計算値とほぼ等しいが、圧縮強度が大きくなっても引張強度は計算値ほど伸びないことがわかる。

(4) 凍結融解抵抗性

図-3に凍結融解抵抗性の試験結果を示す。試験に用いたコンクリートはいずれもAE剤による微細空気泡は連行していないが、図示するように、いずれのコンクリートとも十分な凍結融解抵抗性が付与されている。これは、コンクリートが凍結融解作用の開始時期においてすでに高強度を発現し、このマトリックス部分が緻密であり、空気連行しなくても十分な凍害抵抗性が付与されていたためと判断できる。

(5) 乾燥収縮特性

図-4に乾燥収縮試験結果を示す。図によれば、乾燥に伴う重量減少がCA骨材コンクリートの方が幾分大きい、乾燥収縮率は小さい。これは、CA骨材コンクリートの単位容積質量が砕石コンクリートよりも

小さいため見掛け上、重量減少率が增大したことに起因すると推察され、乾燥による水分逸散量は大差ない。すなわち、CA骨材コンクリートの乾燥収縮特性は碎石コンクリートと同等か幾分優れていると言える。

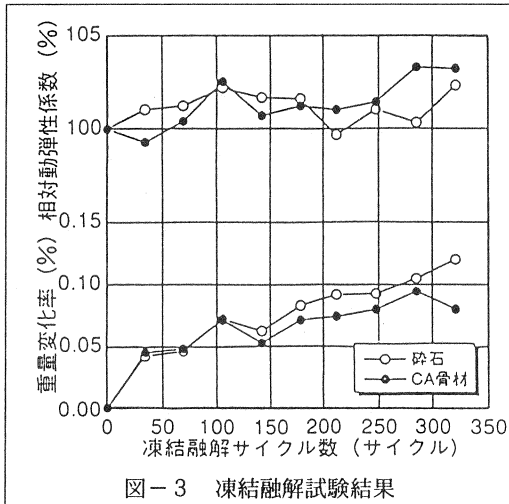


図-3 凍結融解試験結果

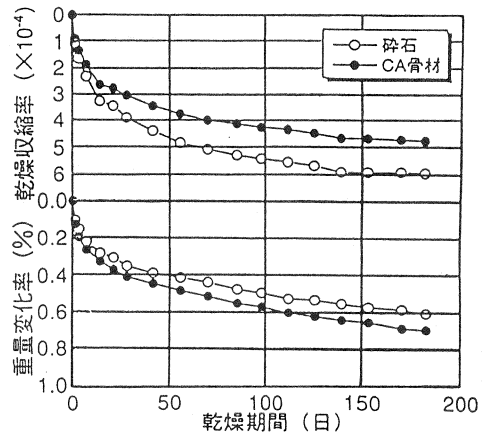


図-4 乾燥収縮試験結果

(6) クリープ特性

クリープ試験は水中養生7日、さらに21日間自然乾燥 (温度20°C・相対湿度60%) 後に開始した。載荷応力はCA骨材コンクリートおよび碎石コンクリートとも17.75N/mm² (同一養生条件コンクリートの破壊応力の約21%) である。単位クリープおよびクリープ係数を図-5に示す。この図より、コンクリートの単位クリープはCA骨材コンクリートの方が碎石コンクリートよりも若干大きい、クリープ係数は、CA骨材コンクリートの方が小さいことがわかる。これは、CA骨材コンクリートの静弾性係数が碎石コンクリートより小さく、一定応力に対する弾性ひずみは大きいいため、クリープ係数が低減したと考えられる。

しかし、その差は小さくCA骨材コンクリートのクリープ特性は、概ね碎石コンクリートと同等と判断される。

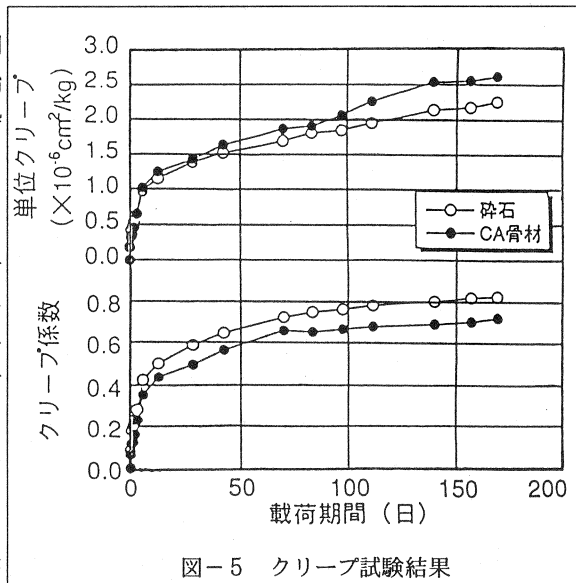


図-5 クリープ試験結果

表-8 応力試算条件

5. CA骨材コンクリートを用いたPC橋の試算

以上の実験結果に基づいて、プレテンション方式PC単純中空床版橋とポストテンション方式PC単純Tけた橋について、CA骨材コンクリートと碎石コンクリートとで応力試算を行った。試算条件を表-8に示す。なお、CA骨材コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=98.1\text{N/mm}^2$ とし、許容値については「高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計指針 (案)」を参考にした。

	プレテンション方式 P C単純中空床版橋	ポストテンション方式 P C単純Tけた橋
構造形式	P C単純中空床版橋	P C単純Tけた橋
活荷重	B活荷重	B活荷重
けた長	21.7m	45.9m
支間長	21.0m	45.0m
幅員	9.0m	9.5m
斜角	90°	90°

5-1 応力試算結果

表-9 CA骨材コンクリートと砕石コンクリートとでの試算結果

上述した条件で試算した時の死荷重反力と主けたけた高の比較を表-9に示す。

コンクリートの種類	プレテンション中空床版橋				ポストテンションTけた橋			
	死荷重反力		主けたけた高		死荷重反力		主けたけた高	
	反力(t)	比率	高さ(mm)	比率	反力(t)	比率	高さ(mm)	比率
砕石	201.0	1.00	850	1.00	487.1	1.00	2550	1.00
CA骨材	152.9	0.76	600	0.71	390.5	0.80	1850	0.73

プレテンション方式単純中空床版橋およびポストテンション

方式単純Tけた橋ともに、CA骨材コンクリートを使用の方が砕石コンクリートを使用した場合よりも、死荷重反力で20~24%、主けたけた高で27~29%小さくなっている。CA骨材コンクリートは超高強度ならびに軽量であることから、PCけたへ適用した場合、けた高を低くすることができ、その結果さらにけた自重は軽くなり、下部工への負担が軽減できる。

6. 結論

本試験によって得られた結論を以下に示す。

- (1) CA骨材を使用したフレッシュコンクリートの性状は、ワーカビリティに優れており、単位水量とスランプの相関関係が高い。
- (2) CA骨材を使用することにより、特殊な材料や養生を必要とせず、良好な作業性を維持しながら、圧縮強度100.0N/mm²以上、気乾単位重量が2.15t/m³程度のコンクリートを得ることができる。
CA骨材を使用した場合の曲げ強度および引張強度は、砕石コンクリートと同程度であるが、静弾性係数は若干小さい。
- (3) CA骨材を使用したコンクリートと、同一配合の砕石コンクリートの間に有意差は認められないが、CA骨材コンクリートは単位水量を小さくできるので、単位セメント量を少なくできる。
- (4) CA骨材を使用したコンクリートは、砕石コンクリートと同じく空気を連行しなくとも十分な凍結融解抵抗性を保持している。
- (5) CA骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮特性は、砕石コンクリートと同等かあるいは優れている。
- (6) CA骨材を使用したコンクリートのクリープ特性は、概ね砕石コンクリートと同等である。
- (7) CA骨材コンクリートを使用したPCけたの応力試算によれば、砕石コンクリートに比べてけた高を30%弱、死荷重反力を20%強小さくすることができる。
- (8) CA骨材コンクリートをPC構造物に適用した場合、耐久性、けた高制限、自重軽減、反力減少等の点で有効性が高いと判断される。

今後の課題として、

- (1) CA骨材コンクリートの応力とひずみの関係の把握。
- (2) CA骨材コンクリートを使用した場合の許容値の決定。

参考文献

- 1) 油野、中川、曾根：石炭灰を原料とした人工粗骨材を用いた高強度コンクリートの性状に関する検討
セメント・コンクリート論文集，No.49,1995
- 2) 榮井、友澤、野口、曾根：石炭灰を原料とした新人工軽量骨材を用いたコンクリートの流動性と強度特性、
コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1,1995
- 3) 榮井、友澤、野口、曾根：石炭灰人工軽量骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性・凍結融解抵抗性
日本建築学会大会学術講演梗概集，1995
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧 [第二版]，1996