

## 高性能軽量コンクリートの性状とそれを用いた PC 橋の試設計

(株)ピー・エス土木技術部 正会員 ○桜田道博  
 同 上 正会員 角田隆洋  
 同 上 正会員 村井伸康  
 (株)宇部三菱セメント研究所 大西利勝

### 1. はじめに

近年、産業廃棄物として排出される石炭灰(フライアッシュ)を主原料とする独立空隙型の人工軽量骨材(以降、石炭灰系高性能軽量骨材と呼ぶ)が開発されている。本骨材の絶乾密度は1.3kg/l程度、吸水率は1.0%程度であり、本骨材は従来の軽量骨材と同程度の軽さと天然普通骨材と同程度の低い吸水率を有している。そのためこの骨材を使用したコンクリート(以降、高性能軽量コンクリートと呼ぶ)は、単位容積質量が普通コンクリートに比べ20%程度軽減し、耐久性および施工性が従来の軽量コンクリートに比べ大幅に改善される。これをPC橋に適用すれば、産業廃棄物のリサイクルのみでなく、PC上部構造の軽量化、軽量化に伴う耐震性の向上、およびコストの低減、等が可能になると思われる。しかしながら、軽量コンクリートは一般に、ヤング係数、引張強度、等が普通コンクリートに比べ小さいとされており、高性能軽量コンクリートの設計用値も定まっていないのが現状である。そこで、高性能軽量コンクリートの力学的性状をまとめ、設計用値を提案するとともに、その設計用値を用いてPC橋の試設計を行った。

### 2. 石炭灰系高性能軽量骨材の性状

石炭灰系高性能軽量骨材(以降、UL)の性状およびその写真を表-1 および写真-1 に示す。ULの絶乾密度は従来の軽量骨材と同程度であるが、吸水率は天然普通骨材(以降、N)と同程度である。吸水率が小さいため、ULを用いたコンクリートは凍結融解抵抗性およびポンプ圧送性が従来の軽量コンクリートに比べ大幅に改善される。

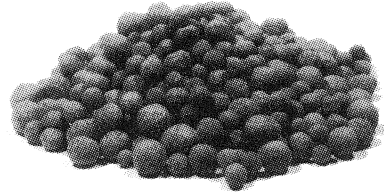


写真-1 石炭灰系高性能軽量骨材

表-1 石炭灰系高性能軽量骨材の性状

		石炭灰系 高性能軽量骨材 (UL)	従来の軽量骨材 (LA)	天然普通骨材 (N)
絶乾密度	g/cm <sup>3</sup>	1.30	1.29	2.63
吸水率	%	0.81	9.41	0.72
コンクリートの 単位容積質量*	kg/l	1.85 (0.79)	1.85 (0.79)	2.35 (1.00)
空隙構造	—	独立空隙型	連続空隙型	—
主原料	—	石炭灰	膨張頁岩	川砂利

\* ( )は普通骨材に対する比

### 3. 高性能軽量コンクリートの性状

#### 3.1 試験方法

高性能軽量コンクリートの設計用値を検討するためコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、引張強度、クリープ係数および乾燥収縮ひずみの試験を行った。使用材料、コンクリートの配合および試験方法をそれぞれ、表-2、表-3 および表-4 に示す<sup>1)</sup>。高性能軽量コンクリートは、細骨材を天然普通骨材とする軽量1種コンクリートとした。コンクリートの単位容積質量は高性能軽量コンクリートで1.85kg/l程度、普通コンクリートで2.35kg/l程度であった。

表-2 使用材料

材料名	種類	性状
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm <sup>3</sup>
細骨材	①酒匂川産川砂	表乾密度 2.61 kg/l、吸水率 3.0%
	②福岡県産海砂	表乾密度 2.62kg/l、吸水率 1.51%
粗骨材	①高性能軽量骨材	絶乾密度 1.32 kg/l、吸水率 0.9% 実積率 62.6%、G <sub>max</sub> 15mm
	②玄倉川産川砂利	表乾密度 2.80 kg/l、吸水率 0.7% 実積率 63.0%、G <sub>max</sub> 20mm
	③山口県産硬質砂岩砕石	表乾密度 2.72kg/l、吸水率 0.51% 実積率 57.9%、G <sub>max</sub> 20mm

表-3 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材かさ容積
18±2.5	4.5±1.5	36	160	444	0.58
21±1.5	5.0±1.5	30	150	500	0.58
15±2.5		35	150	429	0.58
		40	150	375	0.58
		45	165	367	0.61
		50	165	330	0.61
	55	165	300	0.61	

### 3.2 高性能軽量コンクリートの性状

#### (1) 圧縮強度

高性能軽量コンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係を図-1に示す。高性能軽量コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートに比べ2割程度小さく、同じ圧縮強度を得るための水セメント比は普通コンクリートより小さくなることわかる。また、セメント水比が1.8~3.3の間ではセメント水比と圧縮強度との関係は直線であり、従来の軽量コンクリートのような強度の頭打ち現象は認められない。高性能軽量コンクリートの圧縮強度は最大で70MPa程度まで可能であり、設計基準強度としては60MPa程度までは可能と思われる。

#### (2) ヤング係数

圧縮強度とヤング係数との関係を図-2に示す。ヤング係数の推定値は以下のNewRC式により算出した。

$$E_c = 33.5 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot (\gamma/24)^2 \cdot (\sigma_c'/60)^{1/3} \quad \dots (1)$$

$E_c$ : ヤング係数(GPa)

$k_1$ : 粗骨材の種類により定まる修正係数

$k_2$ : 混和材の種類により定まる修正係数(=1.0)

$\sigma_c'$ : コンクリート強度(MPa)

$\gamma$ : コンクリートの気乾単位容積質量(kN/m<sup>3</sup>)

高性能軽量コンクリートおよび普通コンクリートのヤング係数はともに、NewRC式でほぼ推定できることがわかる。骨材の種類に関する係数 $k_1$ は、高性能軽量コンクリートで1.3、普通コンクリートで1.1である。普通コンクリートで $k_1$ を1.1とした推定値はコンクリート標準示方書設計編のヤング係数(図中コン示)とほぼ一致しており試験結果がほぼ妥当なものであることがわかる。ヤング係数の推定値の比較を表-5に示す。高性能軽量コンクリートのヤング係数は普通コンクリートの70%程度であることがわかる。

表-5 ヤング係数の推定値の比較

	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	比
UL	40	20.8	0.73
(NewRC式, $k_1=1.3$ )	70	23.4	0.73
N	40	28.4	1.00
(NewRC式, $k_1=1.1$ )	70	32.0	1.00

表-4 試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠
ヤング係数	ASTM C 469 に準拠
引張強度	JIS A 1113 に準拠
クリープ係数	養生:24時間で脱型→標準水中養生、20℃、RH60%の恒温室中で保管、 載荷:材齢28日で載荷開始、載荷応力は強度の1/3 供試体:10×10×40cm
乾燥収縮	養生:クリープ試験と同様 供試体:クリープ試験と同様

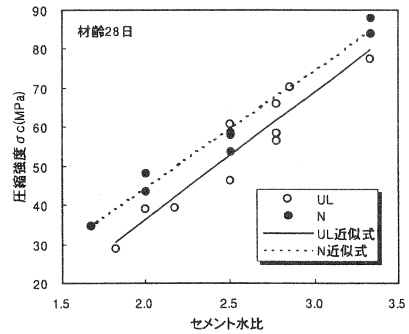


図-1 セメント水比と圧縮強度との関係

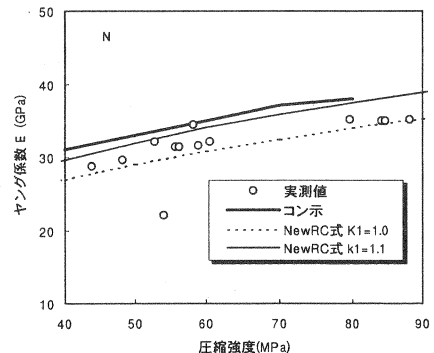
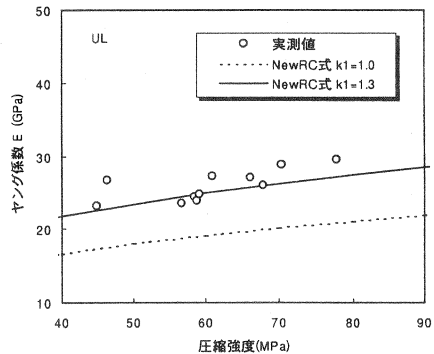


図-2 圧縮強度とヤング係数との関係

(3) 引張強度

圧縮強度と引張強度との関係を図-3 に示す。引張強度の推定値は、以下のコンクリート標準示方書設計編の引張強度推定式により算出した。

$$f_t = 0.23 \cdot f_c^{2/3} \quad \dots (2)$$

$f_t$  : コンクリートの引張強度

$f_c$  : コンクリートの圧縮強度

高性能軽量コンクリートの引張強度は、式(2)により求めた値より大きい傾向にあるが、普通コンクリートの引張強度より小さい。実測値を直線回帰して求めた引張強度の計算値の比較を表-6 に示す。圧縮強度が40~70MPaの範囲では、高性能軽量コンクリートの引張強度は、普通コンクリートに比べ1割程度小さいことがわかる。

(4) クリープ係数および乾燥収縮ひずみ

クリープ係数の経時変化を図-4 および表-7 に示す。高性能軽量コンクリートのクリープ係数は普通コンクリートの70%程度であることがわかる。これは所定の圧縮強度を得るための水セメント比が普通コンクリートより小さくなり、クリープ変形するマトリックス(モルタル)が強固になるためと思われる。コンクリート標準示方書設計編では、軽量コンクリートのクリープ係数を普通コンクリートの75%としてよいとされており、高性能軽量コンクリートにこの規定を適用しても問題ないと思われる。乾燥収縮ひずみの経時変化を図-5 に示す。乾燥収縮ひずみも高性能軽量コンクリートのほうが普通コンクリートよりも小さい傾向にある。

(5) 設計用値案

以上の試験結果から、高性能軽量コンクリート(石炭灰系高性能軽量骨材を使用した軽量1種コンクリート)の設計用値案を表-8 に示す。高性能軽量コンクリートのせん断耐力はプレストレスを導入した場合、普通コンクリートと同等との報告<sup>2)</sup>もあるが、今回はコンクリート標準示方書設計編の規定通り、普通コンクリートの70%とした。乾燥収縮ひずみは、先述の通り普通コンクリートより小さい傾向にあったが、コンクリート標準示方書設計編に準じ、普通コンクリートと同値とした。

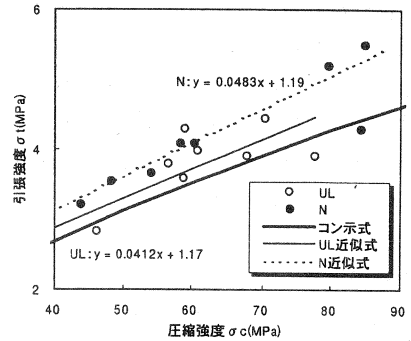


図-3 圧縮強度と引張強度との関係

表-6 引張強度の計算値の比較

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	比
UL (y=0.0412x + 1.17)	40	2.82	0.90
	70	4.05	0.89
N (y=0.0483x + 1.19)	40	3.12	1.00
	70	4.57	1.00

表-7 クリープ係数の比較

載荷材齢 (日)	クリープ係数		比
	UL	N	
7	0.45	0.65	0.69
28	0.72	1.03	0.70
56	0.82	1.18	0.69
91	0.91	1.36	0.67
133	1.00	1.47	0.68

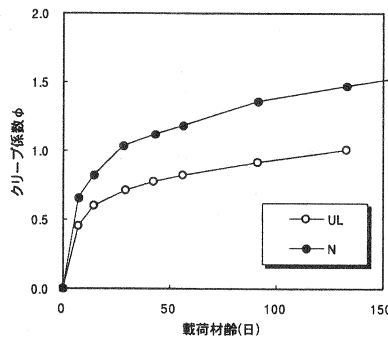


図-4 クリープ係数の経時変化

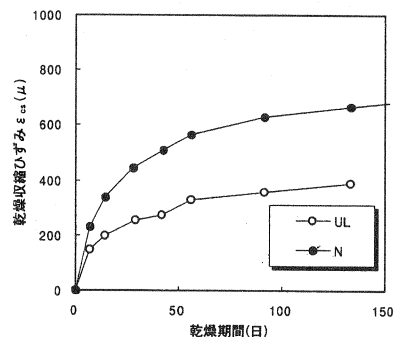


図-5 乾燥収縮ひずみの経時変化

表-8 高性能軽量コンクリートの設計用値案

項目	設計用値
ヤング係数	普通コンクリートの70%
許容引張応力度	普通コンクリートの90%
コンクリートが負担できるせん断応力度	普通コンクリートの70%
クリープ係数	普通コンクリートの75%
乾燥収縮ひずみ	普通コンクリートと同値
コンクリートの単位重量	18.0 kN/m <sup>3</sup>
鉄筋コンクリートの単位重量	19.5 kN/m <sup>3</sup>

#### 4. 高性能軽量コンクリートを用いた PC 橋の試設計

先述の通り高性能軽量コンクリートには同じ圧縮強度の普通コンクリートに比べ、ヤング係数、引張強度およびクリープ係数が小さい性質がある。これらの性状が PC 橋を設計する際、どのように影響するかを検討するため、PC 橋の試設計を行った。試設計した橋梁の一般図を図-6 に示す。設計の対象は、支間 20m、幅員 15.6m のプレテンション方式によるスラブ桁橋とした。比較のため普通コンクリートを用いたスラブ桁橋および T 桁橋の設計も行った。

##### (1) 橋梁緒言

- ①構造形式：プレテンション方式による PC 単純桁橋
- ②桁 長：L= 20.700 m
- ③支 間：l= 20.000 m
- ③幅 員：B= 16.300 m (有効幅員 3.500+8.500+3.500=15.500 m)
- ④斜 角：90° 00'00"
- ⑤荷重条件：B 活荷重+雪荷重 1.0kN/m<sup>2</sup>
- ⑥設計基準強度：50MPa

##### (2) 検討ケース

支間、幅員、荷重、等の条件は上記と同様とし、検討ケースは以下の 3 種類とした。

- ケース 1：高性能軽量コンクリートを使用したスラブ桁橋
- ケース 2：普通コンクリートを使用したスラブ桁橋
- ケース 3：普通コンクリートを使用した T 桁橋

##### (3) 設計条件

- ①ケース 1 では、主桁のみを軽量コンクリートとし、場所打ち部分(間詰めコンクリート、地覆、等)は普通コンクリートとした。
- ②ケース 1 での断面寸法は JIS 桁(BS20)と同様とし、PC 鋼材本数は設計荷重時の応力がケース 2 と同程度となるよう決定した。

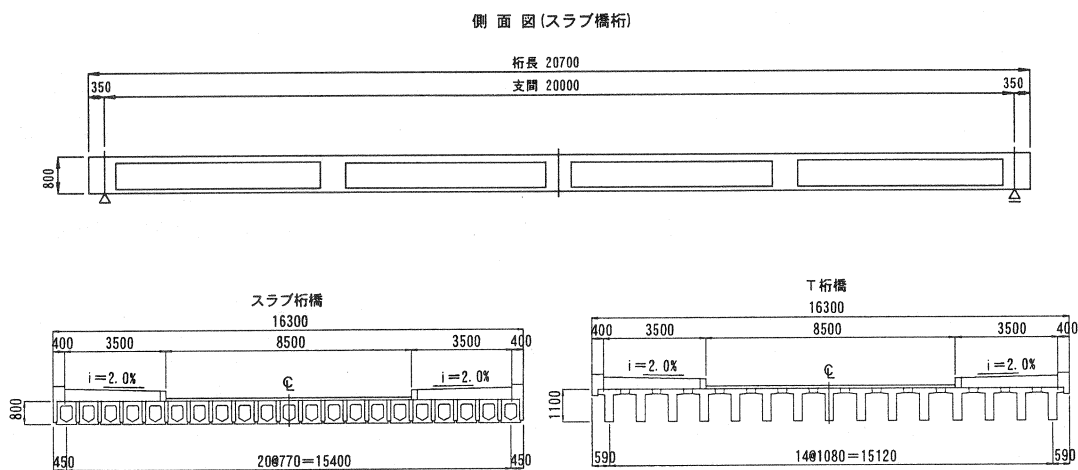


図-6 橋梁一般図

(4) 設計用値

表-8 に基づき決定した設計基準強度 50MPa の高性能軽量コンクリートの設計用値を表-9 に示す。

表-9 軽量コンクリートと普通コンクリートとの設計用値比較

			高性能軽量 コンクリート	普通 コンクリート	備 考
設計基準強度	$f'_{ck}$	MPa	50.0	50.0	
単位重量	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	19.5	24.5	
ヤング係数*	$E_c$	GPa	23.0 (21.0)	33.0 (29.5)	普通コンクリートの 70%
クリープ係数	$\phi$	—	2.25	3.00	普通コンクリートの 75%
乾燥収縮ひずみ	$\epsilon_{cs}$	$\mu$	210	210	普通コンクリートと同値
許容曲げ引張応力度	$\sigma_{ca}$	MPa	1.62	1.80	普通コンクリートの 90%割減
許容斜引張応力度	$\sigma_t$	MPa	1.08	1.20	
コンクリートが負担 できるせん断応力度	$\tau$	MPa	4.6	6.5	普通コンクリートの 70%

\* ( )はプレストレス導入時

(5) 試設計結果

スラブ桁橋の試設計結果を表-10 に示す。桁自重の軽減により高性能軽量コンクリートを用いたスラブ桁は PC 鋼材の本数が 1 割減少した。死荷重と活荷重の比が大きい長スパンの橋梁であれば PC 鋼材量はさらに減少すると思われる。ヤング係数が小さいため導入時のプレストレス力は通常より 3%程度小さくなるが、クリープ係数が小さいためプレストレスの有効係数は通常より若干大きくなる。ヤング係数が 3 割小さくなることによる有効プレストレスの減少量は 2%程度である。

表-10 スラブ桁橋の試設計結果

				ケース 1 (高性能軽量コンクリート)		ケース 2 (普通コンクリート)	
PC 鋼材本数(桁 1 本あたり)				19 本(0.90)		21 本(1.00)	
導入時プレストレス力		Pt	kN/本	159.2 (0.97)		163.5 (1.00)	
有効プレストレス力		Pe	kN/本	125.0 (0.98)		127.5 (1.00)	
プレストレスの有効係数		$\eta$	—	0.785 (1.01)		0.780 (1.00)	
合成応力度*	①プレストレス 導入直後	$\sigma_{ca}$	MPa	3.20	(-1.62 < $\sigma'_{ca}$ < 20)	4.60	(-1.80 < $\sigma'_{ca}$ < 20)
		$\sigma_{cl}$	MPa	14.14	(-1.62 < $\sigma'_{ca}$ < 20)	15.57	(-1.80 < $\sigma'_{ca}$ < 20)
	②死荷重時	$\sigma_{ca}$	MPa	8.50	( 0 < $\sigma'_{ca}$ < 16)	10.20	( 0 < $\sigma'_{ca}$ < 16)
		$\sigma_{cl}$	MPa	4.99	( 0 < $\sigma'_{ca}$ < 16)	5.40	( 0 < $\sigma'_{ca}$ < 16)
	③設計荷重時	$\sigma_{ca}$	MPa	12.71	(-1.62 < $\sigma'_{ca}$ < 16)	14.73	(-1.80 < $\sigma'_{ca}$ < 16)
		$\sigma_{cl}$	MPa	0.32	(-1.62 < $\sigma'_{ca}$ < 16)	0.52	(-1.80 < $\sigma'_{ca}$ < 16)
せん断応力度**	①終局時の平均 せん断応力度	$\tau_m$	MPa	1.82	( $\tau_{max}$ < 4.2)	1.98	( $\tau_{max}$ < 6.0)
	②斜引張応力度	$\sigma_t$	MPa	-0.48	( $\sigma_{ta}$ < 1.08)	-0.47	( $\sigma_{ta}$ < 1.20)

\*すべて支間中央部(1-1 断面)の値, \*\*すべて支点付近(4-4 断面)の値

スラブ桁橋および T 桁橋の反力比較を表-11 に示す。桁自重が通常より 20%減少するため高性能軽量コンクリートを用いたスラブ桁橋の上部工反力は 8%減少した。これは桁高が大きい T 桁橋の上部工反力と同程度である。今回の試設計では、全荷重に占める死荷重の割合が小さいため上部工反力の減少は 8%程度であったが、荷重に占める死荷重の割合が大きい長大スパンの橋梁に適用すれば、上部工反力はさらに減少すると思われる。上部工反力が減少すれば、支承および下部工を縮小できるため上・下部工全体でのコスト低減が可能になると思われる。また、部材の軽量化により運搬・架設が合理化できるため高性能軽量コンクリートはプレキャスト製品への適用も有効と思われる。

表-11 スラブ桁橋およびT桁橋の反力比較\*

		スラブ桁橋		T桁橋
		ケース1 (高性能軽量コンクリート)	ケース2 (普通コンクリート)	ケース3 (普通コンクリート)
主桁自重	kN	1489 (0.80)	1871 (1.00)	1581 (0.85)
場所打ち	kN	448 (1.00)	448 (1.00)	357 (0.80)
地覆	kN	153 (1.00)	153 (1.00)	126 (0.82)
高欄	kN	12 (1.00)	12 (1.00)	12 (1.00)
歩道	kN	642 (1.00)	642 (1.00)	642 (1.00)
舗装	kN	198 (1.00)	198 (1.00)	198 (1.00)
死荷重合計	kN	2942 (0.89)	3324 (1.00)	2915 (0.88)
活荷重合計	kN	1352 (1.00)	1352 (1.00)	1352 (1.00)
雪荷重合計	kN	169 (1.00)	169 (1.00)	169 (1.00)
合計	kN	4462 (0.92)	4844 (1.00)	4435 (0.92)

\* ( )はケース2に対する比

## 5. まとめ

本論文では、高性能軽量コンクリート(石炭灰系高性能軽量骨材を用いた軽量1種コンクリート)の性状を整理し、設計用値を提案した。また、その設計用値を使用しPC橋の試設計を行った。高性能軽量コンクリートの性状およびPC橋の試設計結果に関する知見を以下に示す。

### (1) 高性能軽量コンクリートの性状

- ①圧縮強度は最大で70MPa程度であり、設計基準強度は60MPa程度まで可能である。
- ②ヤング係数は普通コンクリートに比べ30%程度小さい。
- ③割裂引張強度は普通コンクリートに比べ10%程度小さい。
- ④クリープ係数は普通コンクリートに比べ30%程度小さい。
- ⑤乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べ小さい傾向にある。

### (2) 高性能軽量コンクリートを使用したPC橋の試設計結果

- ①主桁自重の軽減により、PC鋼材量は1割減少し、上部工反力は8%減少した。死荷重と活荷重の比が大きい長スパンの橋梁へ適用すれば、これらはさらに減少すると思われる。
- ②ヤング係数が小さいことによる有効プレストレスの減少量は2%程度であった。
- ③高性能軽量コンクリートは、死活荷重比が大きい長スパン橋、および部材の軽量化により運搬・架設が合理化できるプレキャスト製品への適用が有効と思われる。

## 参考文献

- 1) 浜里・大高・戸田・大西・岩田・橋村・中水：石炭灰系高性能軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質，宇部三菱セメント研究報告，Vol.2，2001
- 2) 桜田・鈴木・渡辺・村井：石炭灰を主原料とした高性能人工骨材を用いたPC梁の載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，2001.7
- 3) 桜田・渡辺・村井・大浦：石炭灰を主原料とした高性能人工軽量骨材を用いたPC梁の性状，(株)ピー・エス技術資料，Vol.17，2001.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，平成8年度制定，1996
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，1996.12