

報告

[1154] CER(Cement Enriched Rockfill)の土木材料への適用について

正会員 ○福島英晃(電源開発 総合技術試験所)

中西啓二(電源開発 総合技術試験所)

1. まえがき

ロックフィルダムは、コンクリートダムに比べあまり地形・地質の影響を受けず大量施工ができ、経済性を追求できる利点があるが、本質的にはバラバラの粒状材料をただ積重ねたものであり、越流に対しては非常に弱いものである。そこで、粒状材料に少量のセメントを混入することによりコンクリートと粒状材料の中間的性状を有する材料を開発し、コンクリートダムとロックフィルダムの長所を合せ持つダムの建設の可能性が考えられる。この種の材料は、英国で上層路盤として用いられている Lean Concrete [1], [2], あるいはダム堤体材料としては J. M. Raphael 氏の "The Optimum Gravity Dam" [3] 等に、その萌芽を見る事ができる。更に、我が国においてもフィルセメントの研究が昭和50年頃建設省においてなされている[4], [5]。

本研究は、これらの研究結果をもとに、主としてダム堤体材料への適用を目的に検討した分級や水洗いを行わない河床砂れきあるいは掘削ずりに少量のセメントを混入した Cement Enriched Rockfill (以下「CER」と略記)に関する配合設計の考え方、室内試験、現場試験および経済性の評価について報告するものである。

2. 配合設計

2.1 配合設計の考え方

CERに要求される品質としては、ワーカビリティ・強度・水密性・単位容積重量等があり、配合設計の目的は、これらの品質を満足させることと経済性のバランスを図ることである。CERとRCC・RCDとの比較を表-1に示す。従来の堤体コンクリートは、所要の品質を有する範囲内で単位水量を少なくすように定められているが、CERは、

- a. 資源の有効活用・省力化を目的とし、骨材の洗浄・粒度調整を行わない
- b. ローラ等の転圧機による締固めが可能
- c. 超貧配合であるので、強度・水密性等の品質が水セメント比ではなく締固め度による影響が大

表-1 CERとRCC・RCDとの比較

項目	種別	CER	RCC	RCD
単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )		60	62~104	120
骨材の最大寸法 (mm)		80	40~80	80~150
骨材分級の有無		無	必ず実施	必ず実施
骨材洗浄の有無		無	無しの例が多い	必ず実施

であるので、含水比は、締固め度を最大になるように選定され、この含水比において所要の強度・水密性が得られるように単位セメント量を求めることになる。

2.2 配合選定の手順及び方法

配合選定のフローを図-1に示す。CERの転圧による締固め度および転圧後の強度・水密性などは、主材料である掘削ずり・河床砂れきの粒度の影響を大きく受ける。CERと同様に締め固めるソイルセメント系コンクリートの粒度を規定するものとして、米国のASTM, H. R. B. (Highway Research Board), 英国のR. R. L. (Road Research Laboratory), 日本道路協会「アスファルト舗装要綱」等がある。細粒分の多い方が転圧性や水密性に富むことが多いので、これらは、経験

上から0.074 mm以下の細粒分を増して修正しているものである。筆者らは、これらの事を踏まえ、粒度・単位セメント量等がCERの品質に及ぼす影響を検討するため、室内実験を行った。

### 2.3 室内実験

#### 2.3.1 使用材料

- ・骨材：阿賀野川水系から採取した河床砂れき
- ・骨材の粒度：骨材の品質を表-2に示す。粒度は、上記骨材を細骨材と粗骨材の混合比率をかえて、図-2に示す3粒度とした。

表-2 骨材の品質

項目	骨材	細骨材	粗骨材
表乾比重		2.47	2.59
吸水率(%)		2.75	2.95

- ・セメント

：普通ポルトランドセメント

- ・単位セメント量

：60, 80, 100kg/m<sup>3</sup> の3種・配合：表-3に示す。・供試体の作製方法：締固めには、小型タンプ・加振機を用い、約197kg・cm/cm<sup>2</sup>の締固めエネルギーで供試体を作製した。

#### 2.3.2 実験内容

##### (1) 粒度分布の影響試験

- ・供試体寸法：φ300 × 600 mm
- ・配合：表-3のNo.1 ~5 及びNo.14~19

- ・単位セメント量 60kg/m<sup>3</sup>
- ・骨材粒度：図-2のA, B, Cの3種

- ・測定項目：表-4に示す。

##### (2) 単位セメント量の影響試験

- ・供試体寸法：φ150 × 300 mm
- ・配合：表-3のNo.1 ~13
- ・測定項目：表-4に示す。

#### 2.3.3 実験結果

CERの締固め度を（実測密度/ゼロ空隙密度）と定義する。

尚、ゼロ空隙密度は、表-3中の使用材料の和である。締固め度と含水比との関係を示した図-3によると含水比が最も高い時には、B, C, A粒度の順によく締め固まっているが、その他

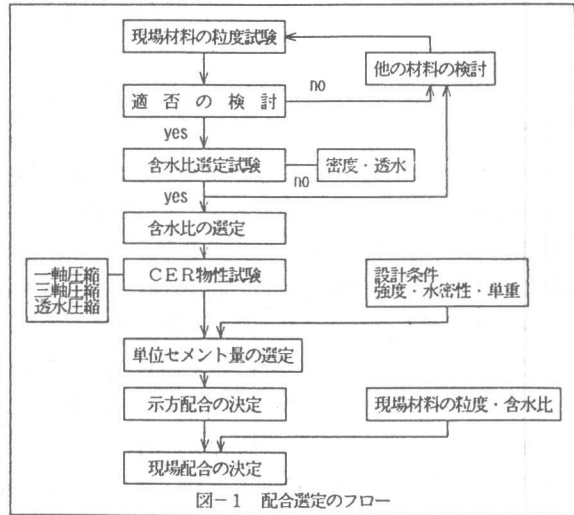


図-1 配合選定のフロー

表-3 コンクリートの配合表

配合No	含水比 (水結合材比) (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				計 (kg/m <sup>3</sup> )	骨材
			セメント	細骨材	粗骨材	水		
1	1.17	46.1	63.8	583.1	1849.9	29.4	2526.2	C
2	2.15	83.5	62.9	569.1	1805.7	52.5	2490.2	C
3	3.14	120.8	61.9	555.6	1762.8	74.8	2455.1	C
4	4.10	156.0	61.6	542.9	1722.9	95.3	2422.2	C
5	5.08	191.5	60.3	530.9	1684.4	115.5	2391.1	C
6	1.17	36.6	80	580.0	1840.3	29.3	2529.6	C
7	2.15	65.6	80	565.7	1795.1	52.5	2493.3	C
8	4.10	119.5	80	539.4	1711.4	95.6	2426.4	C
9	5.08	144.8	80	526.9	1671.8	115.8	2394.5	C
10	1.17	29.3	100	575.7	1826.5	29.3	2531.5	C
11	2.15	52.6	100	561.7	1782.3	52.6	2496.6	C
12	4.10	95.7	100	535.4	1698.7	95.7	2429.8	C
13	5.08	116.0	100	522.9	1659.2	116.0	2397.2	C
14	2.15	87.5	60	472.6	1909.2	52.5	2494.3	A
15	4.10	159.0	60	450.7	1821.0	95.4	2427.1	A
16	5.08	193.0	60	440.4	1779.0	115.8	2415.2	A
17	2.15	86.8	60	490.5	1472.0	52.1	2474.6	B
18	4.10	158.2	60	449.4	1404.3	94.9	2408.6	B
19	5.08	191.5	60	430.2	1372.4	114.9	2377.5	B

の含水比では、粒度分布の違いによる締固め度の差異は、明確ではなかった。表-5 の圧縮試験結果によると、最大の圧縮強度を与える含水比は、粒度分布により異なり、圧縮強度を最大にする含水比が存在し、土質材料の最適含水比の理論に酷似している。以下に試験によって得られた配合設計の考え方を述べる。

### 1) 密度と最適含水比

表-3 の骨材Cによる単位セメント量が、60, 80, 100 kg/m<sup>3</sup> の各配合において、含水比を変えて一定のエネルギーで締め固めたときの供試体の密度（湿潤）は、図-4 のようであり、含水比が 4~5 %付近で密度が最大となり、この付近が最適含水比となる。

### 2) 含水比と圧縮強度

上記と同様の配合を一定のエネルギーで締め固めた供試体の圧縮強度は、含水比によって大きな影響を受ける。図-5 は単位セメント量60kg/m<sup>3</sup> の場合であり、いずれの材令においても、含水比 2~3%付近で圧縮強度は最大となる。このときの水セメント比は約84~120 %である。図-6 は単位セメント量60, 80, 100kg/m<sup>3</sup> の材令91日における圧縮強度である。この場合も、単位セメント量に、かわかわらず含水比 2~3%付近で圧縮強度は最大となる。これらより、CERは、原材料の粒度や形状的な性状によって圧縮強度を最大とする含水比が存在する。本実験の材料で

表-5 粒度分布と圧縮強度

材令 (日)	含水比 %	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		A粒度	B粒度	C粒度
7	2.15	32.4	24.3	32.1
	4.10	20.3	27.3	27.6
	5.08	14.5	19.4	19.6
28	2.15	39.8	27.1	48.8
	4.10	27.6	37.6	36.5
	5.08	18.3	27.1	26.5
91	2.15	46.1	41.4	53.3
	4.10	32.5	44.4	46.2
	5.08	23.1	28.4	29.5

3) 含水比と水密性  
含水比と透水係数の関係は表-6 に示

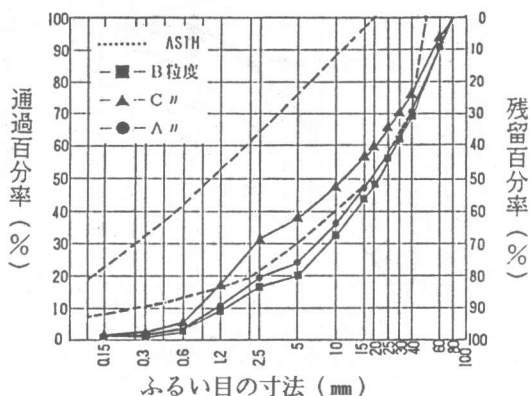


図-2 骨材の粒度分布

表-4 室内試験測定項目

測定項目	測定材令	粒度分布の影響試験	単位セメント量の影響試験
v c 値、空気量 練り上り温度	練り混ぜ時	○	○
供試体壁面観察	脱枠時	○	○
単位容積重量	打設時及び91日	○	○
圧縮強度	7, 28, 91 日	○	○
動弾性係数	7, 28, 91 日	○	○
透水係数	7, 28, 91 日	○	○
せん断強度	28日, 91日	○	

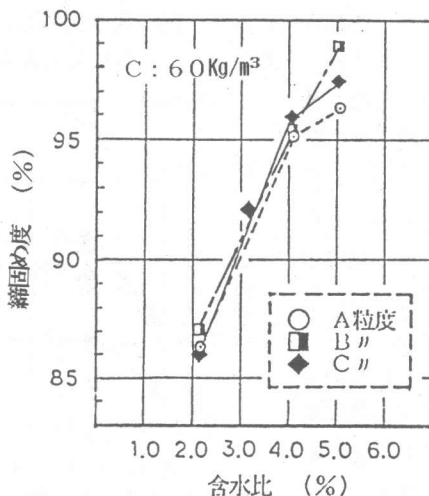


図-3 締固め度と含水比

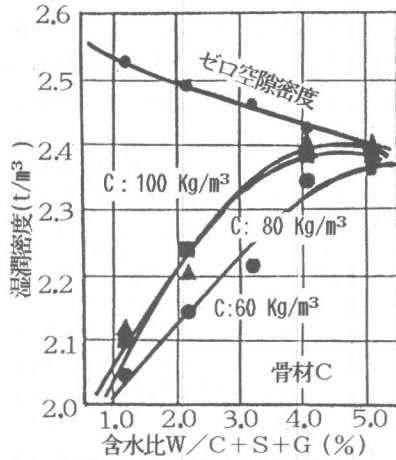


図-4 含水比と密度の関係

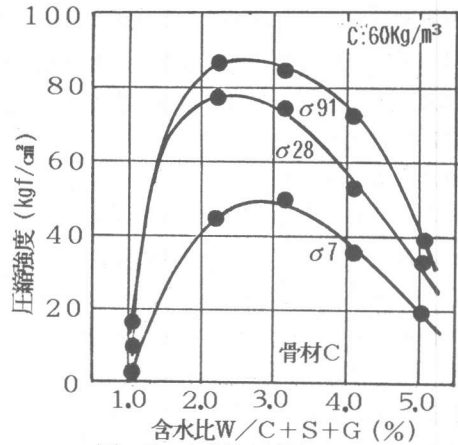


図-5 含水比と圧縮強度の関係

すようであり、本試験範囲においては含水比が4～5%のとき透水係数は $10^{-7}$  cm/sec以下となり、ダム等の堤体として十分な遮水性を有するようになる。含水比が3.14%以下では透水係数は、 $1.0 \times 10^{-4}$  cm/sec以上となり、単なる砂れきと同じような数値となり水密性を有するとはいえない。一方、含水比が大きくなっても水密性が低下することは、土を用いた堤体材料試験によって知られており、水密性が最大となる含水比が存在する。これは含水比によって締固め度が異なることに起因すると考えられている。CERの含水比と締固め度の関係は図-3で示したように、含水比が4%～5%において締固め度は95%以上の値となっている。締固め度と透水係数の関係は図-7のようであり、締固め度が95%以上となると水密性が急激に高まる。すなわち、その材料に適した含水比を選定することにより、CERは密実で水密性の高いものとなる。この実験に用いた材料の場合のその値は4%～5%程度である。一般に、フィルダムのコアが $10^{-6}$  cm/sec以下の透水係数が要求されることから、4%～5%程度の含水比でも十分といえる。

#### 4) 単位セメント量と強度

図-8～9に、CERの単位セメント量と圧縮強度の関係、セメント水比と圧縮強度の関係を示す。これらによると、同一含水比のもとでは、単位セメント量が増え、圧縮強度が増す傾向にあるが、一般コンクリートにみられるセメント水比と圧縮強度の一義的な関係は、みられない。

また、せん断強度に関しては、CERの場合、打ち継目処理を行わないことを原則として、打ち継目がせん断強度の最小と考えられる。この面での純

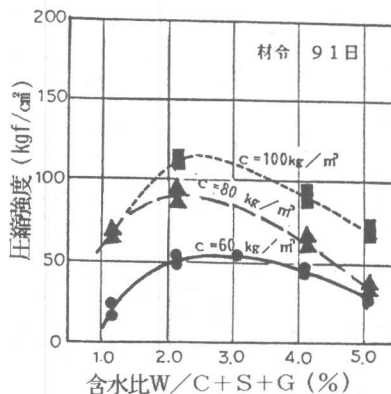


図-6 含水比と圧縮強度の関係

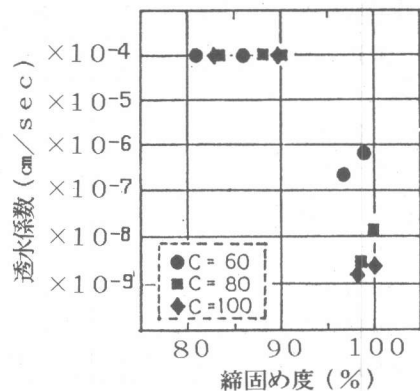


図-7 締固め度と透水係数

せん断強度(粘着力)および内部まさつ角に対する単位セメント量の関係を図-10~11に示す。一般にせん断強度は、 $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$ で求められるが、フィル材料の場合、 $c$ は、小さい値であるため0として、扱われてきた。

一方、コンクリートでは $c$ が $\sigma \cdot \tan \phi$ より卓越しているため $\sigma \cdot \tan \phi$ は、無視されている。

CERは、これらの中間的性状であるので、せん断強度は、 $c + \sigma \cdot \tan \phi$ として扱うべきである。単位セメントを量 $60\text{kg}/\text{m}^3$ としても、CERのせん断強度は $\tau = 4.1 + 0.67\sigma$ ( $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ )となる。従来のダムコンクリートの純せん断強度 $40\sim 60\text{Kgf}/\text{cm}^2$ に比較すれば小さい値であるが、フィル材料の $0.5\sim 1.0\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 程度と比較すれば、優れた値となっている。

#### 5) 含水比の選択

密度・圧縮強度・水密性の性状は、前述のように含水比によって大きく影響され、本実験で用いた材料に対するこれらの望ましい値は、表-7のようである。CERをダム等の堤体に用いるとすると、水密性が最優先されなければならない。また、圧縮強度は、含水比が小さい方が有利であるので、遮水性が許容される範囲で小さい含水比を選択するのが、合理的である。したがって、本実験の場合、4%程度が適当な含水比といえる。

#### 6) 単位セメント量の選定

CERの単位セメント量の選定法をまとめると、以下のものである。

- ・発熱より; RCDが発熱を考慮し、単位セメント量を $120\text{kg}/\text{m}^3$ 程度あるいはそれ以下としていることから、CERでは、 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度以下のできるだけ小さい値を選定する。

- ・強度より; せん断強度は、 $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$ で求める。つまり、単位セメント量と $c \cdot \phi$ の関係から荷重に対する必要配合強度より単位セメント量を求めることになる。または、単位セメント量をあらかじめ定め、せん断強度を試験により求め、その値を配合強度とする。

- ・遮水性より; 著しく粒度が悪くなければ、単位セメント量 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 以上であれば、十分である。したがって、著しく粒度が悪く、堤体の高さが低い場合には、単位セメント量 $60\text{kg}/\text{m}^3$ でも、十分であるものと思われた。

#### 2. 4 現場実験

室内試験から得られたCERの諸特性の確認および混合方式の検討のため、単位セメント量60

表-6 含水比と透水係数の関係

配合番号	単位セメント量 (kgf/m <sup>3</sup> )	含水比 (%)	透水係数 (cm/sec)	
			材令28日	材令91日
1	60	1.17	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上
2		2.15		
3		3.14		
4		4.10	$1.1 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$
5		5.08	$1.3 \times 10^{-7}$	$8.3 \times 10^{-7}$
6	80	1.17	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上
7		2.15		
8		4.10	$1.1 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-9}$
9		5.08	$6.4 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-8}$
10	100	1.17	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上	$1.0 \times 10^{-4}$ 以上
11		2.15		
12		4.10	$4.0 \times 10^{-9}$	$6.9 \times 10^{-9}$
13		5.08	$1.9 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-9}$

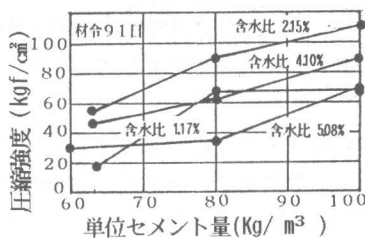


図-8 単位セメント量と圧縮強度の関係

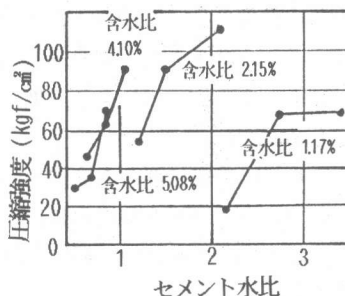


図-9 セメント水比と圧縮強度の関係

kg/m<sup>3</sup>、含水比4.1%の条件で、試験施工を行った。その結果、圧縮強度、せん断強度とも室内試験と同程度あるいは大きな値が得られた。また、遮水性に関しても打ち継ぎの有無に拘らず10<sup>-7</sup>cm/sec以下の透水係数であった。尚、ツイン

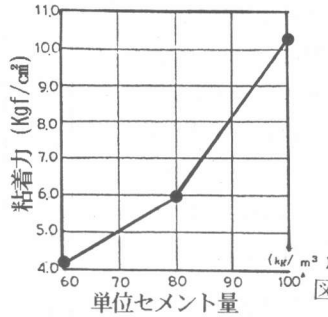


図-10 単位セメント量と粘着力の関係

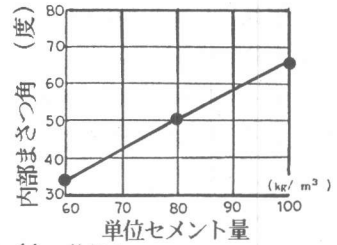


図-11 単位セメント量と内部まざつ角の関係

ヘッドと2軸強制練りミキサーによる混合とでは、単位容積重量、一軸圧縮強度、透水係数とも大差なく、混合時に材料分離を引起し易い材料以外には、ツインヘッドでも十分であると思われる。但し、継目部の一部には、骨材分離・ペースト不足も見られた。

### 3. 概略設計および経済性の評価

設計基準強度および設計せん断基準強度を、試験施工を実施した(単位セメント量60kg/m<sup>3</sup>) CERの圧縮強度・せん断強度のデータから、ばらつきを考慮して、それぞれ32kgf/cm<sup>2</sup>、7.8 kgf/cm<sup>2</sup>(内部まざつ角36度)とし、これらの条件により、ダム高さ13mの重力式ダム(

下流面勾配1:0.75, 上流面直)について内部にCERを用い、外部を富配合コンクリート(底面・上流面0.5 m、頂部・下流面1.0 m)とした場合のCERと富配合コンクリートの弾性係数の違いによる応力集中についてFEM解析により検討した。このとき、せん断強度としては、水平面内(継目)で、接着状態の良の部分と不良部分を半分と考え、3.9 kgf/cm<sup>2</sup>とした。その結果、内部にCERを用いることによる最大主応力の増分は、約4%程度であり、それ程大きいとは、考えられず、局所安全率も4程度であり、この程度のダム高であれば問題ないとの結論を得ている。また、この場合、工期・工費ともに在来型の6割程度となった。

### 4. 結論

CERは、継目部の不安定の問題が解決できれば、ハイダムとしての厳しい法規制を受けない高さ15m以下のダムの堤体材料として有効であると思われ、その他にも河川堤防、水路ライニング、盛土等の土木材料に幅広く利用できるものである。

### 参考文献

- [1] W.P.Andrews :Concrete and soil-cement Roads,Contractors Record Ltd,1960, pp.166~122
- [2] D.R.Sharp :Lean Concrete and Soil-Cement in Road and Airfield Bases,Road Construction, Feb.1960, pp.49 ~52
- [3] J.R.Raphael :The Optimum Gravity Dam,Engineering Foundation Conference in California,1970
- [4] [5] 建設省土木研究所:フィルセメントとダム(1),(2) 土木研究所資料 第1079,1081号
- [6] 鈴木徳行、志水茂明:RCD工法とRCC工法との特性について、土木学会論文報告集、第403号、1989-3

表-7 各品質に対する最適含水比

品質	含水比 (%)			
	2.0	3.0	4.0	5.0
密度			—	
圧縮強度	—			
水密性			—	