

◆ コンクリート構造物特集 ◆

超貧配合コンクリートの力学特性

永山 功* 渡辺和夫** 西澤賢太郎***

1. はじめに

重力式コンクリートダムは堤体の自重を利用してその安定性を確保する構造物であり、規模の大きなダムを除けば、堤体コンクリートにはそれほど高い強度が要求されない。そこで、重力式コンクリートダムの設計、施工においては、外部コンクリートで保護され、高い耐久性が要求されない内部コンクリートにRCD用コンクリート(Roller Compacted Dam-concrete)のような単位セメント量を減じたコンクリートを使用することによって、温度応力を抑制すると同時に、ダム建設の経済化を図っている。

現在、RCD用コンクリートの単位セメント量は一般に混和材を含めて 120kg/m^3 程度としている。しかし、RCD用コンクリートの単位セメント量をどこまで減じることができるかについては、これまであまり系統的な研究がなされていない。そこで、RCD用コンクリートの単位セメント量をさらに減じることができれば、コンクリートダム建設の経済性をさらに高めることができることになる。また、建設資材の中でも CO_2 の主要な発生源となっているセメントの使用量を抑制していくことは、環境に及ぼす負荷を軽減する上でも極めて効果的であると考えられる。

一方、近年、CSG(Cemented Sand & Gravel)¹⁾と呼ばれるコンクリートとフィル材料の中間的な材料が、土質材料からのアプローチにより開発され、ダム建設工事の仮設構造物として利用され始めている。CSGは非弾性的な挙動を示すといわれており²⁾、単位セメント量の多寡がコンクリートの力学特性に及ぼす影響を把握することは、CSGなどの超貧配合コンクリートを用いた構造物の設計体系を確立する上で極めて重要なことと考えられる。

このような背景から、筆者らは、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートの力学的性質について実験的検討を加えた。

2. 試験内容

2.1 コンクリートの配合の選定

超貧配合コンクリートは単位ペースト量が少ないので超硬練りコンクリートとなることから、その締固め方法はRCD用コンクリートの締固めと同様に振動ローラーによるものと考えられる。そこで、本研究では、RCD用コンクリートの締固め理論を用いてコンクリートの配合を決定した。

試験配合は粗骨材最大寸法が 150mm の代表的なRCD用コンクリートを 40mm でウェットスクリーニングした配合を基準として、単位セメント量を徐々に減じながら 20秒 のVC(Vibrating Compaction)値を確保するように単位水量を調整した。試験に用いた配合を表-1に示す。ここでVC値を 20秒 としたのは、ジャンカが少ない密実なコンクリートを得るためにあり、その結果、最も貧配合である単位セメント量 70kg/m^3 (粗骨材最大寸法 150mm の配合に換算した場合、単位セメント量 50kg/m^3 程度)の配合では、水セメント比は約186%となった。

使用材料としては、セメントには普通ポルトランドセメント、骨材には砂岩の碎石、碎砂を用いた。材料の物性値は表-2に示すとおりである。

2.2 供試体の作製方法

試験に用いた供試体は直径 15cm 、高さ 30cm の標準供試体とし、供試体の作製にはRCD用コンクリートの締固め試験に広く使用されているRCD用コンクリート標準供試体作製装置³⁾を用いた。なお、供試体は3層に分けて締め固め、1層あたりの締固め時間は 40秒 とした。また、供試体は、試験材齢の 91日 まで 20°C の水中標準養生を行った。

2.3 試験項目

試験は一軸圧縮試験、割裂引張試験、三軸圧縮試験の3種類とし、一軸圧縮試験はJIS A 1108、割裂引張試験はJIS A 1113によった。なお、一軸圧縮試験では、供試体表面にひずみゲージを貼り、圧縮時の弾性係数を測定した。また、三軸圧縮試

表-1 コンクリートの配合

配合名	粗骨材 最大寸法 (mm)	目標 VC 値 (秒)	目標 空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				実測値		
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	VC 値 (秒)	空気量 (%)	相対締固め密度 (%) *
C175	40	20±10	2.2±1.4	67.4	44	118	175	938	1,203	18.8	1.5	97.1
C140	40	20±10	2.2±1.4	87.9	44	123	140	945	1,212	18.0	1.0	97.5
C105	40	20±10	2.2±1.4	120.0	44	126	105	955	1,225	21.3	1.2	97.1
C70	40	20±10	2.2±1.4	185.7	44	130	70	963	1,235	18.7	1.6	96.8

* VC 試験容器内の実測密度を配合上の 0 空隙密度で除したものである。

表-2 材料の物性値

材料	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 : 3.16、比表面積 : 3,320cm ² /g
細骨材	砂岩碎砂 比重 : 2.65、吸水率 : 1.0%、粗粒率 : 3.04
粗骨材	砂岩碎石 比重 : 2.67、吸水率 : 0.45%、粗粒率 : 7.26

験では、拘束圧を 0.5、1.0、1.5、2.0N/mm²の 4種類に設定し、軸ひずみ速度を 0.05%/min とした変位制御方式によって載荷を行った。なお、拘束圧はゴムスリーブ(厚さ 1mm)を介して水圧によって作用させた。また、軸ひずみは軸載荷用油圧シリンダーに取り付けた変位計で測定した。

3. 試験結果

3.1 VC 値が 20 秒となるコンクリートの配合特性

図-1 は単位セメント量と VC 値が 20 秒となるコンクリートの容積配合の関係を示したものである。図によれば、単位セメント量が減少するほど、単位ペースト容積が減じ、コンクリート中の骨材の

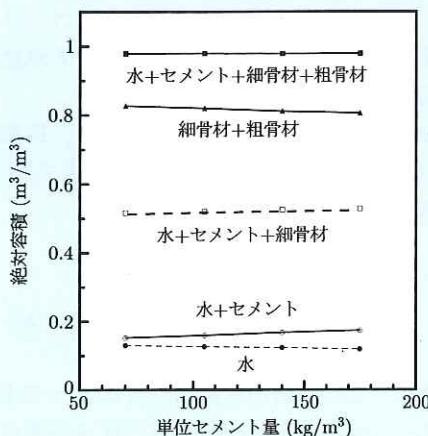


図-1 VC 値が 20 秒となるコンクリートの配合

絶対容積が増加していることがわかる。これは、水セメント比が大きくなると、セメントペーストの粘性が減じ、骨材間の摩擦抵抗が小さくなるため、実積率が増加するものと考えられる。図によれば、コンクリート中の各材料(セメント、水、細骨材、粗骨材)の単位容積は単位セメント量と概ね線形の関係をもって変化している。

なお、各配合のコンクリートに対する VC 値、空気量の測定結果は、表-1 の右列に示すとおり、目標値を満足している。

3.2 一軸圧縮試験および割裂引張試験

図-2 はセメント水比と一軸圧縮強度の関係を示したものである。図によれば、単位セメント量を 70kg/m³まで落とした超貧配合コンクリートにおいても、セメント水比と一軸圧縮強度の間には線形の関係があり、セメント水比の法則に従って一軸圧縮強度が定まることがわかる。なお、図-2 から一軸圧縮強度が 0 となるセメント水比を求めるとき約 35% となり、この時の単位セメント量を試験結果から外挿すると、およそ 50kg/m³となる。したがって、粗骨材最大寸法を 40mm とした場合、結合材としての効果が期待できる最小の単位セメント量は 50kg/m³程度と推定される。

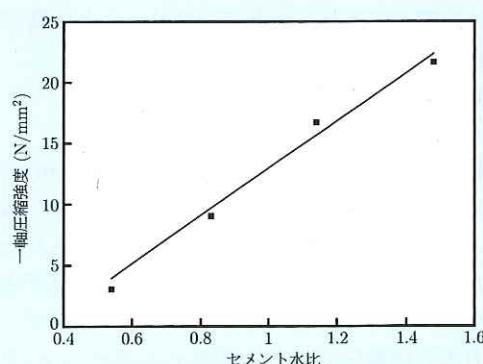


図-2 セメント水比と一軸圧縮強度の関係

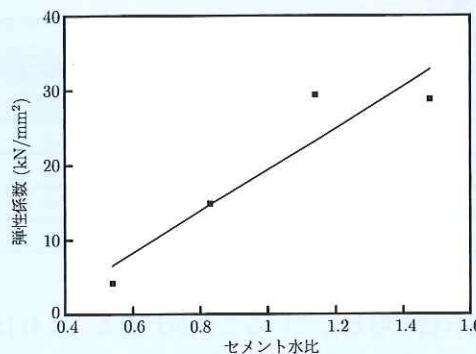


図-3 セメント水比と弾性係数の関係

次に、図-3は、一軸圧縮試験時に供試体に貼付けたひずみゲージから求めた弾性係数をセメント水比との関係で示したものである。なお、弾性係数は次式より求めた。

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (1)$$

ここに、

E : 弾性係数

σ_1 : 一軸圧縮強度の1/3の応力

σ_0 : 50μ のひずみ時の応力

ε_1 : σ_1 時のひずみ

ε_0 : 50μ のひずみ

である。図によれば、弾性係数もセメント水比と概ね線形の関係にあることがわかる。

さらに、図-4は一軸圧縮強度と割裂引張強度の関係を示したものである。両者は線形の関係にあり、その比は概ね10:1となっている。

これより、単位セメント量を極端に減らした超貧配合コンクリートにおいても、VC値を20秒程度に設定して十分な締固めを行えば、その圧縮強度、引張強度、弾性係数の値は従来コンクリートの延長線上にあり、従来コンクリートと同様に取り扱うことができるがわかる。

3.3 三軸圧縮試験

(1) 試験結果

単位セメント量が175、140、105、70kg/m³の各配合に対して、拘束圧を0.5、1.0、1.5、2.0N/mm²の4種類に設定した三軸圧縮試験より得られた軸ひずみ・主応力差曲線、軸ひずみ・体積ひずみ曲線を図-5にとりまとめて示す。なお、ここで、主応力差とは軸応力 σ_1 と拘束圧 σ_3 の差 $\sigma_1 - \sigma_3$ を表している。図によれば、いずれの配合とも応力・

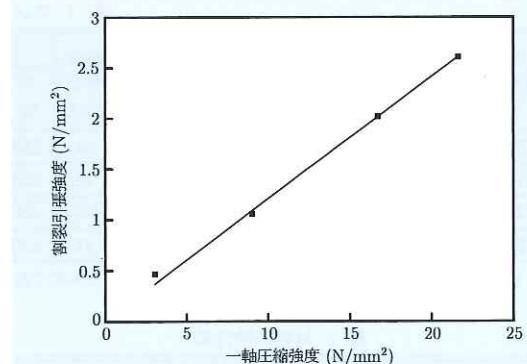


図-4 一軸圧縮強度と割裂引張強度の関係

ひずみ関係は塑性的であり、CSGのような超貧配合コンクリートだけでなく、RCD用コンクリートにおいても三軸圧縮条件下では塑性的な性質を示すことがわかる。なお、この点の詳細については後の項で考察する。

(2) 強度特性

次に、単位セメント量が175、140、105、70kg/m³の各配合について、拘束圧 σ_3 と最大主応力差 $f_T - \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_3$ の最大値。拘束圧下における圧縮強度を表す)の関係を求めるとき図-6のようになる。なお、図には一軸圧縮試験の結果($\sigma_3 = 0$ の状態)も含めてある。図によれば、いずれの配合とも、拘束圧の増加とともに最大主応力差が増加し、両者は線形の関係にあることがわかる。

一方、図-7は拘束圧をパラメータとしてセメント水比C/Wと最大主応力差 $f_T - \sigma_3$ の関係を示したものである。図によれば、いずれの拘束圧下においても、セメント水比の増加とともに最大主応力差が増加し、両者は線形の関係にあることがわかる。すなわち、拘束圧下においてもコンクリートの圧縮強度(最大主応力差)はセメント水比の法則に従って変化していることがわかる。

なお、図-6、7の結果を総合すると、拘束圧下におけるコンクリートの圧縮強度(最大主応力差)は次式で表されることになる。

$$\begin{aligned} f_T - \sigma_3 &= (a\sigma_3 + b)(cC/W + d) \\ &= ac\sigma_3 C/W + ad\sigma_3 + bcC/W + bd \end{aligned} \quad (2)$$

そこで、この係数を重回帰分析によって求めると、 $f_T - \sigma_3$ をN/mm²単位、C/Wを%単位で表示して

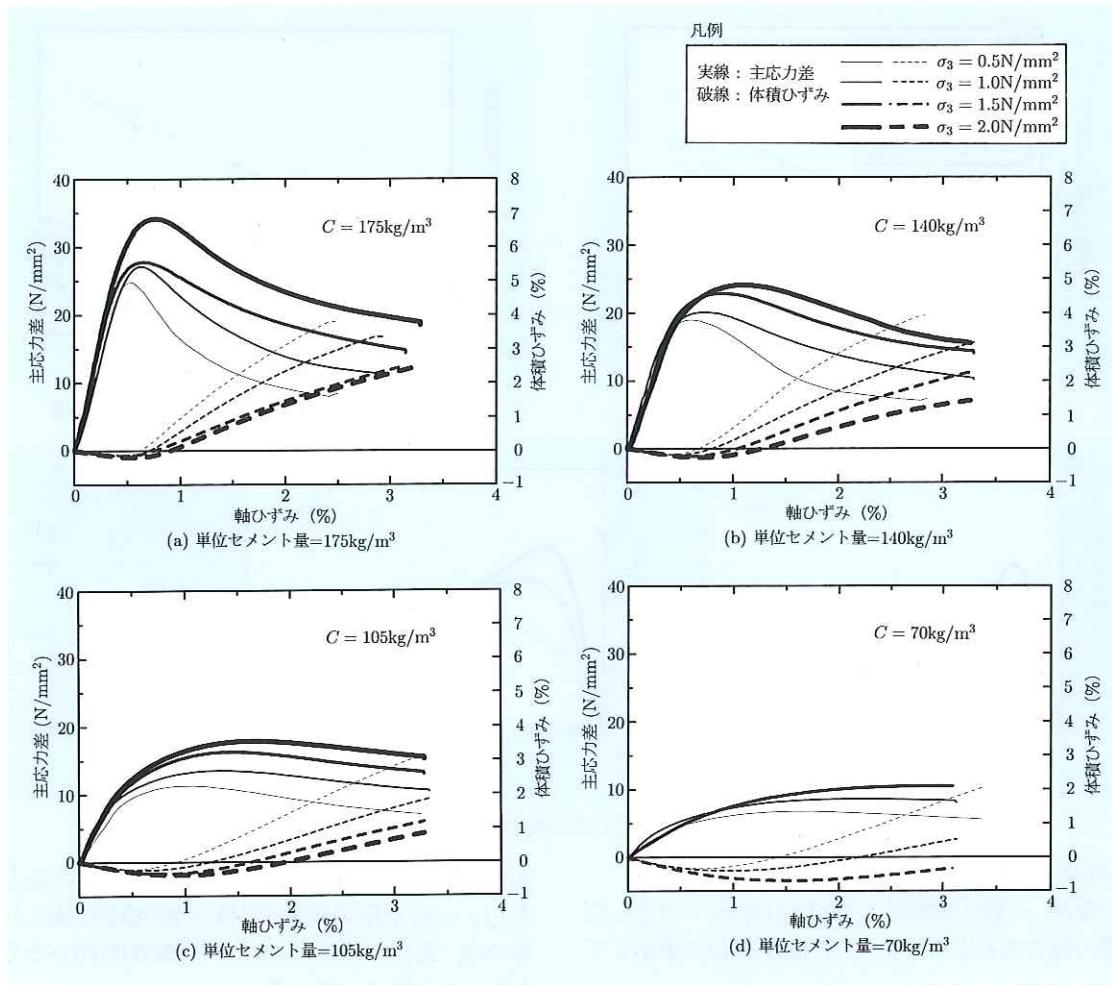


図-5 三軸圧縮試験結果(軸ひずみ、主応力差、体積ひずみの関係)

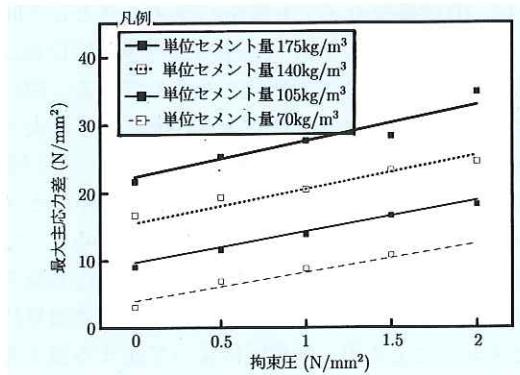


図-6 拘束圧と最大主応力差の関係

$$f_T - \sigma_3 = 0.0112\sigma_3 C/W + 3.64\sigma_3 + 0.195C/W - 6.52 \quad (3)$$

が得られる。この式はCSGのような超貧配合コ

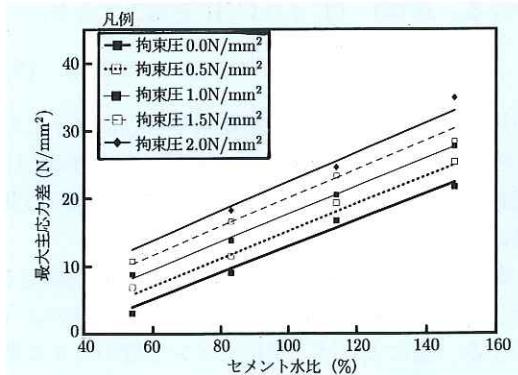


図-7 セメント水比と最大主応力差の関係

ンクリートから従来コンクリートと同様な特性をもつRCD用コンクリートまで共通して適用可能な式であり、また、その式が線形性を有していることから、これらのコンクリートの強度特性には

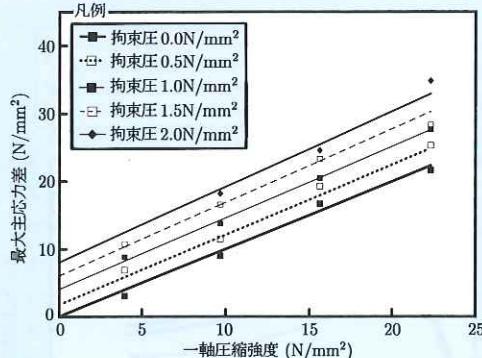


図-8 一軸圧縮強度と最大主応力差の関係

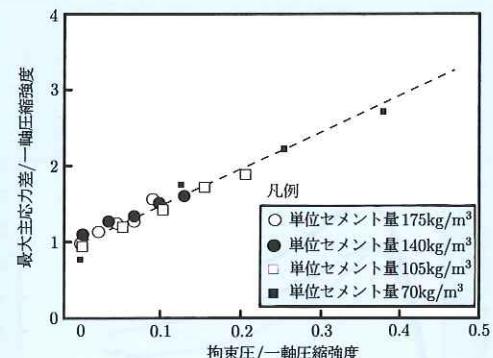


図-9 無次元化した拘束圧と最大主応力差の関係

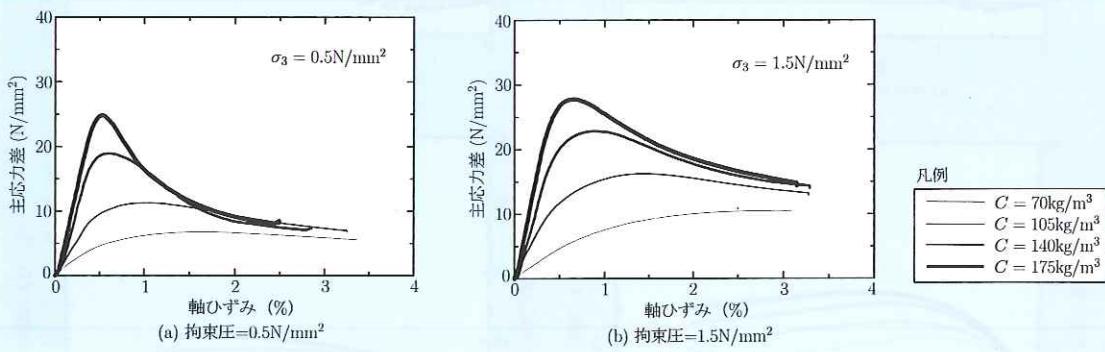


図-10 同一拘束下における軸ひずみ・主応力差曲線

材料的な特性の差がないことができる。

なお、一軸圧縮強度 f_C は式(3)で $\sigma_3 = 0$ とした時の値であるから、 f_C を N/mm^2 単位で表示して

$$f_C = 0.195C/W - 6.52 \quad (4)$$

となる。式(3)、(4)より C/W を消去すると、

$$f_T - \sigma_3 = 0.0573\sigma_3 f_C + f_C + 4.02\sigma_3 \quad (5)$$

が得られる。この式を試験結果とともに図示したものが図-8である。図より、拘束圧下における圧縮強度(最大主応力差)は一軸圧縮強度と線形の関係にあることがわかる。

次に、最大主応力差、拘束圧を一軸圧縮強度で除し、図-6を無次元化して表示すると図-9のようになる。図によれば、単位セメント量の大小に関わらず、無次元化した拘束圧 σ_3/f_C と無次元化した最大主応力差 $(f_T - \sigma_3)/f_C$ の関係はほぼ一本の直線で表されることがわかる。このことは、単位セメント量を大きく減じた超貧配合コンクリートにおいても、その強度特性は従来コンクリートのそれと同等であることを示している。なお、無次

元化した拘束圧 σ_3/f_C と無次元化した最大主応力差 $(f_T - \sigma_3)/f_C$ の関係はほぼ一本の直線で表されるのは、式(5)において $\sigma_3 f_C$ の係数 0.0573 が十分小さいことによっている。

(3) 応力・ひずみ特性

図-10は単位セメント量をパラメータとして同一拘束圧下($0.5N/mm^2$, $1.5N/mm^2$ の場合)における応力・ひずみ曲線を比較したものである。図によれば、単位セメント量が大きい配合ほど最大主応力差(主応力差のピーク値)が大きくなっているが、残留主応力差(主応力差の残留値)は単位セメント量によらずにほぼ一定の値に収束するようである。また、その値は拘束圧によって異なる値を示している。このことから、残留主応力差は単位セメントによらず、拘束圧によって定まる値と考えられる。

また、図より、最大主応力差の生じる軸ひずみは、単位セメント量が大きくなるほど小さくなっている。この点について、最大主応力差は一軸圧縮強度に大きく依存していることから、一軸圧縮強度で除して無次元化した最大主応力差と最大主

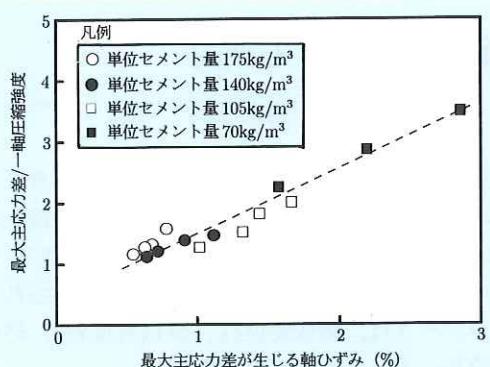


図-11 無次元化した最大主応力差と最大主応力差が生じる軸ひずみの関係

応力差が発生した軸ひずみの関係について整理すると図-11のようになる。この図より単位セメント量の大小に関わらず、無次元化した最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみの関係はほぼ一本の直線で表されることがわかる。

以上より、最大主応力差および残留主応力差によって代表される三軸圧縮試験の応力・ひずみ特性は、単位セメント量によって定まるのではなく、むしろ、一軸圧縮強度と拘束圧の関係から定まるといえる。

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりである。

(1) 単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートにおいても、VC値を20秒程度に設定して十分な締固めを行えば、セメント水比の法則に従って一軸圧縮強度が定まる。なお、本試験では、粗骨材最大寸法を40mmとして単位セメント量70kg/m³の配合までその性質を確認したが、セメントの結合材としての効果が期待できる限界の単位セメント量は50kg/m³程度と推定される。

(2) 上記配合において、弾性係数、引張強度とも一軸圧縮強度と同様にセメント水比と線形の関係を有しており、引張強度と一軸圧縮強度の比は、単位セメント量によらず1/10程度である。

(3) 三軸圧縮試験においても、拘束圧が一定のもとでは、最大主応力差はセメント水比と線形の関係にある。

(4) 拘束圧、最大主応力差を一軸圧縮強度で除して無次元化すれば、単位セメント量に関わらず、無次元化した拘束圧と最大主応力差の関係は一義的に表される。

(5) 三軸圧縮試験における応力・ひずみ特性は、単位セメント量の値によって定まるものではなく、拘束圧と一軸圧縮強度の関係から定まる。

(6) 以上、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートにおいても、VC値20秒程度に設定して十分な締固めを行えば、その力学的性質は従来コンクリートの延長線として取り扱うことができる。

参考文献

- 新村孝行：長島ダムの施工およびCSG工法の概要について、ダム日本, No.611, pp.71-87, 1995.
- 中村昭、豊田光雄、佐藤小次郎：CSGの工学的性質に関する実験的検討、ダム技術, No.96, pp.35-46, 1994.
- 永山功、渡辺和夫、日向正：標準供試体を用いたRCD用コンクリートの配合設計に関する検討、ダム技術, No.80, pp.21-30, 1993.

永山 功*



建設省土木研究所ダム部
ダム構造研究室長
Isao NAGAYAMA

渡辺和夫**



同 ダム構造研究室
主任研究員
Kazuo WATANABE

西澤賢太郎***



同 ダム構造研究室研究員
Kentaro NISHIZAWA