

論文 単位セメント量が貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響

西澤賢太郎*1・永山 功*2・渡辺和夫*3

要旨:本研究では、通常のコンクリートよりも単位セメント量を減じた超貧配合コンクリートの利用方法を検討するため、単位セメント量を広範囲に変化させたコンクリートの力学特性について検討した。この際、施工性（コンシステンシー）を重視した配合とセメントペーストの性状（水セメント比）を重視した配合の2種類の配合を設定し、試験を行った。その結果、単位セメント量を減じる場合、セメントペーストの結合力を維持するため、単位水量を抑え、結果的に供試体内に空隙を許すよりも、施工性を重視して単位水量を増し、密実なコンクリートとした方が高い強度、弾性係数が得られることがわかった。
キーワード:単位セメント量、超貧配合コンクリート、水セメント比、締固めエネルギー

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保つ構造物であり、大規模なダムを除けば、堤体コンクリートの強度に対する要求はそれほど大きくない。このため、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は、RCD用コンクリートのように単位セメント量を減じたコンクリートを用い、経済性を追求している。

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 程度に設定されているが、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、より経済的な施工を行うことが可能と考えられる。また、一方では、CSG (Cemented Sand & Gravel)¹⁾のようにコンクリートとフィル材料の中間的な位置づけを持つ材料も開発され、施工の経済性が追求されている。

このような背景のもと、著者らは通常の使用範囲よりも単位セメント量を減じた超貧配合コンクリートをダム堤体材料として利用するための研究を行っている^{2,3)}。本論文では、超貧配合コンクリートの強度特性を明らかにするため、

骨材同士を結合するセメントペーストの性状を重視して、水セメント比を一定に保ちながら単位セメント量を減じていった場合と、コンクリートの締固め性（施工性）を重視して、コンシステンシー（VC値）を一定に保ちながら単位セメント量を減じていった場合の2種類の方法でコンクリートの配合を設定して、両者の力学特性について検討し、その結果をとりまとめた。

2. 試験概要

2.1 配合の選定

単位セメント量を減じた超貧配合コンクリートは一般に超硬練りコンクリートとなることから、その締固めは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、本試験では、RCD用コンクリートの締固め方法を採用した。

試験にあたっては、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場合の単位セメント量 (175kg/m^3) を基準として、単位セメント量を 35kg/m^3 ずつ減じ、 175 、 140 、 105 、 70 、 35kg/m^3 の5種類の単位セメント量を設定した。

*1 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室研究員 工修（正会員）

*2 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室室長（正会員）

*3 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室主任研究員

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)				フレッシュコンクリート			
						水 W	セメント C	細骨 材 S	粗骨 材 G	VC 値 (秒)	空気 量 (%)	単位 容積 質量 (ν_m)	相対 締固め 密度 (%)
C175-50	40			50	44	88	175	969	1248	177.5	8.9	2.42	95.9
C175-62	40	20±5	2.2±1.4	62	44	108	175	946	1218	24.3	2.5	2.38	95.8
C175-79	40			79	44	139	175	910	1172	2.7	2.7	2.42	99.3
C175-111	40			111	44	193	175	846	1090	0.4	1.3	2.49	106.4
C140-50	40			50	44	70	140	1003	1291	>360	6.2	2.24	88.0
C140-62	40			62	44	86	140	983	1266	>360	10.5	2.37	93.9
C140-79	40	20±5	2.2±1.4	79	44	111	140	955	1230	20.5	3.1	2.41	97.0
C140-111	40			111	44	155	140	904	1164	2.0	2.2	2.40	99.8
C140-173	40			173	44	242	140	803	1034	0.3	0.8	2.52	111.6
C105-50	40			50	44	53	105	1036	1334	>360	>15	2.18	84.6
C105-62	40			62	44	65	105	1021	1315	>360	13.0	2.20	86.2
C105-79	40			79	44	83	105	1000	1288	>360	9.1	2.37	93.7
C105-111	40	20±5	2.2±1.4	111	44	116	105	962	1239	20.2	2.2	2.38	96.5
C105-173	40			173	44	182	105	886	1141	0.7	1.6	2.45	103.7
C105-380	40			380	44	399	105	633	816	-	0.4	-	-
C70-50	40			50	44	35	70	1069	1376	>360	>15	2.16	82.7
C70-62	40			62	44	43	70	1059	1364	>360	>15	2.18	84.1
C70-79	40			79	44	56	70	1045	1346	>360	7.4	2.19	85.1
C70-111	40			111	44	77	70	1020	1313	>360	11.0	2.25	88.7
C70-173	40	20±5	2.2±1.4	173	44	121	70	969	1248	23.9	2.0	2.39	97.1
C70-380	40			380	44	266	70	801	1031	-	0.9	-	-
C35-50	40			50	44	18	35	1102	1419	>360	>15	2.12	80.3
C35-62	40			62	44	22	35	1097	1413	>360	>15	2.15	81.5
C35-79	40			79	44	28	35	1090	1404	>360	>15	2.19	83.6
C35-111	40			111	44	39	35	1077	1387	>360	>15	2.16	82.9
C35-173	40			173	44	61	35	1052	1355	>360	14.0	2.16	84.0
C35-380	40	20±5	2.2±1.4	380	44	133	35	968	1246	22.5	3.1	2.37	96.9
C35-500	40			500	44	175	35	919	1184	3.1	2.5	2.37	99.9

さらに、設定した5種類の単位セメント量について、上述した2つの方法に基づいて種々の配合を選定した。なお、この際、細骨材率は一定に保った。

選定したコンクリートの配合を表-1、図-1

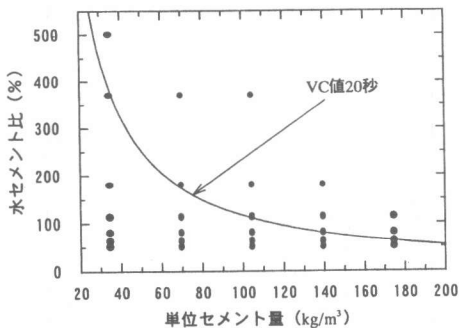


図-1 試験配合の単位セメント量と水セメント比の関係

に示す。ここで、表中の網掛けの配合が VC 値を一定に保った配合(目標 VC 値 20 秒)であり、その配合状態図を図-2 に示す。図によれば、単位セメント量を減じていくと、単位水量が増加するが、単位ペースト容積は減少し、結果として骨材の絶対容積が増加している。単位

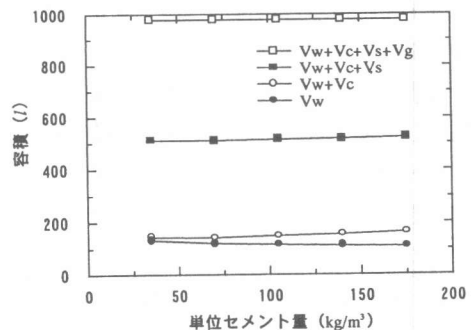


図-2 VC20 秒における配合状態図

表-2 材料の物性値

使用材料	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：3360cm ² /g
細骨材	砂岩 比重：2.64，吸水率：1.1% 粗粒率：2.80，実績率：63.0%
粗骨材	砂岩 比重：2.67，吸水率：0.46% 粗粒率：7.19，実績率：62.8%

セメント量の低下とともに骨材の絶対容積が増加するのは、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と考えられる。

2.2 使用材料

使用材料として、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、砕砂を用いた。表-2 に使用材料の物性値を示す。

2.3 供試体の作製

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 用コンクリート標準供試体作製装置³⁾を用いた。供試体は 3 層に分けて締め固め、1 層あたりの締め固め時間は、RCD 用コンクリートで十分な締め固め効果が得られるとされている 60 秒のほか、30 秒、120 秒、240 秒を加えた 4 種類とし、締め固めエネルギーが供試体の締め固め密度と圧縮強度に及ぼす影響についても検討することとした。なお、供試体は試験材齢の 91 日まで 20℃

の標準養生を行った。

2.4 試験項目

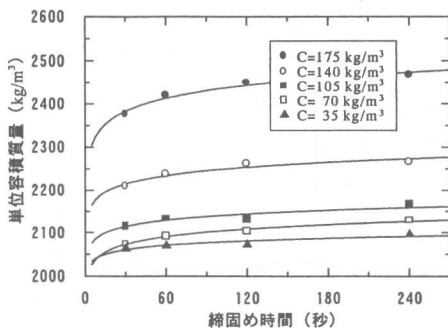
試験項目としては、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートに対しては VC 試験，空気量試験を行い，硬化コンクリートに対しては JIS A 1108 に準じた一軸圧縮強度試験を行った。なお，一軸圧縮強度試験時にはひずみゲージを用いて静弾性係数も測定した (JSCE-G 502-1988)。

3. 試験結果

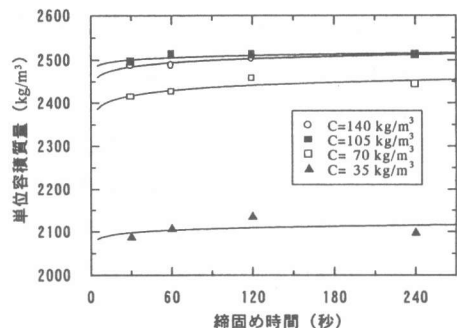
3.1 単位容積質量

VC 試験より求めた各配合の VC 値，単位容積質量および相対締め固め密度（空気量を 0 とした最大理論密度に対する締め固め密度の比率）と，空気量測定試験より求めた各配合の空気量を表-1 の右 4 列に整理して示す。

次に，水セメント比 $W/C=62\%$ ，単位セメント量 $C=175\sim 35\text{ kg/m}^3$ と水セメント比 $W/C=173\%$ ，単位セメント量 $C=140\sim 35\text{ kg/m}^3$ の各配合について，RCD 用コンクリート標準供試体作製装置による締め固め時間とコンクリートの単位容積質量の関係を整理した結果を図-3 に示す。図によれば，締め固め時間の増加とともに（総締め固めエネルギーの増加とともに）単位容積質量は大きくなり，ある値に収束している。なお， $W/C=173\%$ の場合には，締め固め時間 60 秒程度で単位容積質量が一定になるのに対し， $W/C=62\%$ の場合には，締め固め時間 120~240

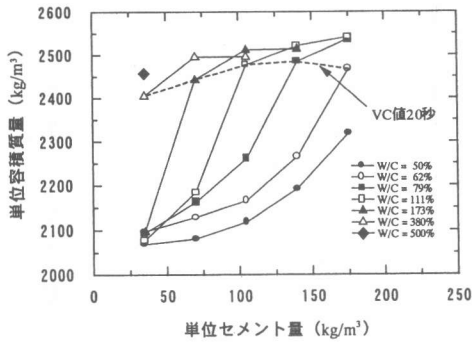


(a) 水セメント比 $W/C=62\%$

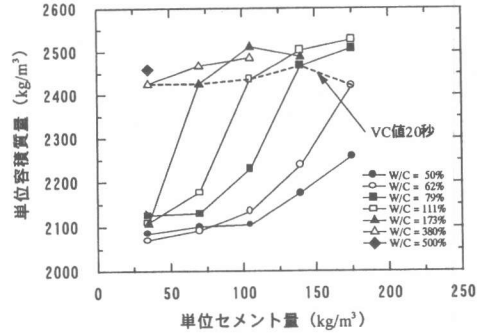


(b) 水セメント比 $W/C=173\%$

図-3 締め固め時間と単位容積質量の関係

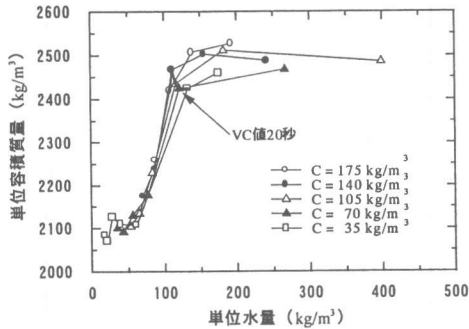


(a) 締固め時間 60 秒

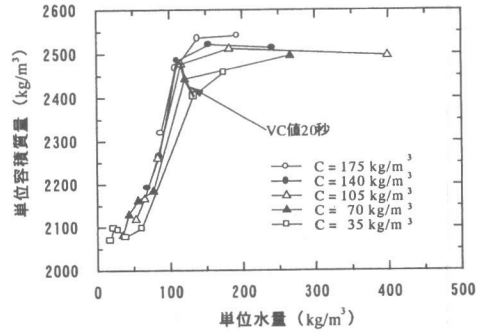


(b) 締固め時間 240 秒

図-4 単位セメント量と単位容積質量の関係



(a) 締固め時間 60 秒



(b) 締固め時間 240 秒

図-5 単位水量と単位容積質量の関係

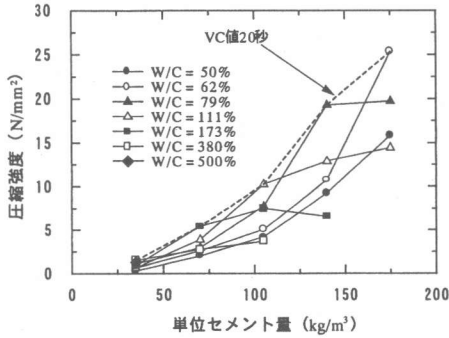
秒でも単位容積質量は増加傾向を示しているが、これは、表-1 に示すとおり、 $W/C=173\%$ の配合は全般に VC 値が小さい (<20 秒) のに対し、 $W/C=62\%$ の配合は全般に VC 値が大きい (>20 秒) ためと考えられる。すなわち、所定の締固めエネルギーで十分な締固め密度を得るためには、適正な VC 値 (コンシステンシー) を確保する必要があることがわかる。

次に、締固め時間が 60 秒と 240 秒の場合について、水セメント比をパラメータとして単位セメント量とコンクリートの単位容積質量の関係を整理した結果を図-4 に示す。図によれば、単位セメント量が大きくなるほど単位容積質量は大きくなるが、VC 値が 20 秒の配合を境に単位容積質量の増加は収束する傾向にある。また、図-5 は、単位セメント量をパラメータと

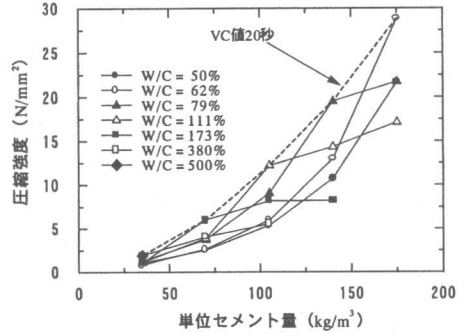
して、単位水量と単位容積質量の関係として整理したものである。図によれば、単位水量が大きくなるほど単位容積質量は大きくなるが、VC 値が 20 秒の配合を境に単位容積質量の増加は収束する傾向にある。以上のことから、貧配合コンクリートにおいて十分な締固め密度を得るためには、いずれの単位セメント量の場合においても、20 秒程度の VC 値を確保することが重要なことがわかる。

3.2 圧縮強度

次に、締固め時間が 60 秒と 240 秒の場合について、水セメント比をパラメータとして、単位セメント量と圧縮強度の関係を整理した結果を図-6 に示す。図によれば、単位セメント量が大きくなるほど圧縮強度は大きくなるが、VC 値が 20 秒の配合を境に圧縮強度の増加は収束

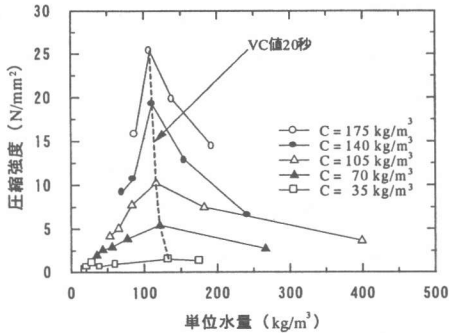


(a) 締め時間 60 秒

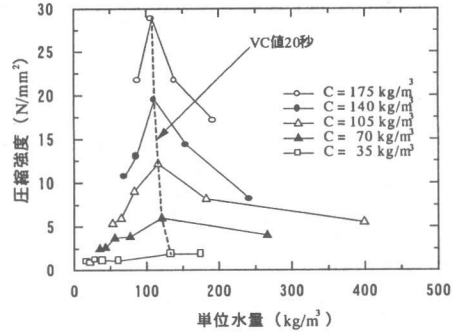


(b) 締め時間 240 秒

図-6 単位セメント量と圧縮強度の関係

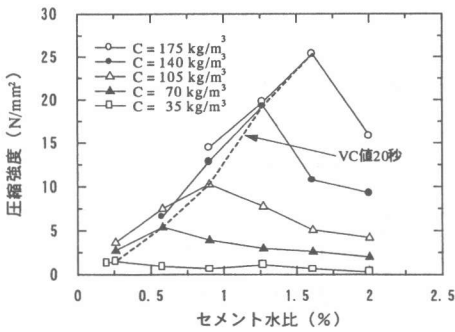


(a) 締め時間 60 秒

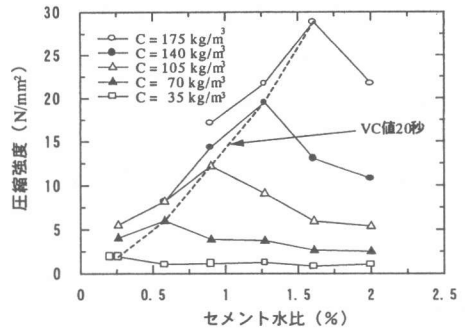


(b) 締め時間 240 秒

図-7 単位水量と圧縮強度の関係



(a) 締め時間 60 秒



(b) 締め時間 240 秒

図-8 セメント水比と圧縮強度の関係

する傾向にある。また、図-7 は、単位セメント量をパラメータとして、単位水量と圧縮強度の関係として整理したものである。図によれば、単位水量が大きくなるほど圧縮強度は大きくな

るが、VC 値が 20 秒の配合を境に圧縮強度の増加は収束する傾向にある。以上のことから、超貧配合コンクリートにおいても十分な圧縮強度を得るためには、20 秒程度の VC 値を得る

ために必要な単位水量を確保することが重要なことがわかる。

一方、図-8は、単位セメント量をパラメータとして、水セメント比と圧縮強度の関係を整理したものである。図によれば、単位セメント量を一定として水セメント比を変化させていった場合、ある水セメント比のときに圧縮強度は最大になることがわかる。この配合は VC 値が概ね 20 秒の場合に相当している。なお、この点より左側の配合は VC 値が 20 秒よりも小さくなる配合であるが、このような領域では、コンクリートの圧縮強度は単位セメント量の大小に関わらずセメント水比の法則に従って一義的に定まっている。一方、圧縮強度が最大となる点より右側の配合は VC 値が 20 秒より大きくなる配合であるが、このような領域では、コンクリートの圧縮強度はコンクリートの締固めの程度によって定まるものと考えられる。

3.3 弾性係数

次に、表-1に示した全配合に対して、締固め時間を 60 秒、240 秒として締め固めた全ての供試体について、その圧縮強度と弾性係数の関係を整理した結果を図-9に示す。図によれば、単位セメント量、VC 値（単位水量）、締固め時間の大小にかかわらず、圧縮強度と弾性係数の間には高い相関性がある。したがって、単位セメント量を極端に減じた配合においても、高い圧縮強度が得られるような配合を選定すれば、すなわち、適切な VC 値を確保すれば、高い弾性係数が得られることがわかる。

4. まとめ

本論文では、単位セメント量を極端に減じたコンクリートの力学特性について検討した。その結果をとりまとめると以下のとおりである。

①空隙を許容しても、結合材の結合力を期待するセメントペーストの性状重視の配合設計よりも、セメントペーストの性状は犠牲にしても、密実なコンクリートを得る施工性重視の配合設計の方が高い圧縮強度が得

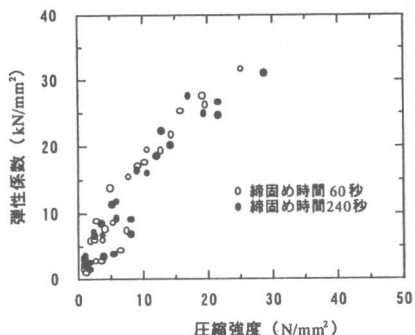


図-9 圧縮強度と弾性係数の関係

られる。

- ②適正な施工性を得るためには、VC 値が 20 秒程度になるように単位水量を決定すればよい。
- ③このようなコンクリートの圧縮強度は、単位セメント量の大きさに関わらず、セメント水比と線形の関係にある。
- ④コンクリートの配合や締固め時間によらず、圧縮強度と弾性係数の間には高い相関性がある。したがって圧縮強度を確保することによって弾性係数を高めることができる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 永山功，渡辺和夫，西澤賢太郎：単位セメント量がコンクリートの強度，変形性に及ぼす影響に関する実験的検討，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，第 V 部，pp.264-265，1997
- 3) 永山功，渡辺和夫，西澤賢太郎：超貧配合コンクリートの力学的性質に関する実験的検討，ダム工学，Vol.7，No.4，pp.210-216，1997
- 4) 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