

ダムコンクリートについて

材料研究室

Q : コンクリートダムの合理化施工法にはどんなものがありますか？

A 1 : 日本のコンクリートダム建設の歴史は1900年頃にさかのぼりますが、1936年に完成したアメリカのHooverダムで応力解析や温度応力解析手法などの設計技術、および温度規制方法や柱状ブロック工法などの近代的な施工技術が開発されたことに伴い、1950年代以降次々と大ダムが建設されました。とりわけ重力式コンクリートダムは明確な設計理論のため、大ダムの一般的な形式として数多く採用されてきました。その後、構造解析技術の進歩により、堤体積の低減が可能なアーチ式コンクリートダムや中空重力式コンクリートダムも次第に採用されるようになりました。これらの形式は、相対的に人件費が安く、セメントなどの材料費が高い時代には経済性を追求する上で適切な方法と考えられていました。しかし、高度成長期を経て安定成長の時代への移行に伴い、人件費の高騰、良好なダムサイトの減少などにより、堤体積の低減よりも機械化施工による大量施工によって経済性を追求できるフィルダムの建設が指向されましたが、洪水吐きの設置の問題や本質的に越流に対して脆弱であること、さ

らに地形が急峻な日本のダムサイトでは必ずしも経済的とはならないことも多くありました。このため、機械化施工による経済性の追求を目指したコンクリートダムの新しい施工方法の開発が強く望まれるようになりました。現在では、スランプゼロの超硬練りのコンクリートをレヤー状にブルドーザで敷きならし、振動ローラで締固めて築造するRCD工法(Roller Compacted Dam Concrete Method)や有スランプコンクリートをリフト差を設けずに打ち上げて、内部振動機を用いて締固めて築造する拡張レヤー工法(ELCM:Extended Layer Construction Method)などの合理化施工法が開発されています。これらの工法は、一回のコンクリート打設範囲の拡大を可能にし、ダンプトラックなどの汎用性に富む機械の使用による、省力化、工期の短縮などの合理化を可能にしました。RCD工法は大量のコンクリートを効率的に打設できる施工法であるのに対し、ELCMは小規模ダムや堤内構造物が多い中規模ダムなど内部コンクリートの打設面積が狭い場合に有利な工法です。

Q : 配合設計の手順とポイントを教えてください

A 2 : コンクリートの配合は、一般的なコンクリートの要求性能に加えて、重力式コンクリートダムの場合は、発熱の原因となる単位セメント量を減らし、さらにダム建設の経済性を確保するため、図-1に示すように配合区分を設けて各部で必要とされる品質を考慮し決定します。一方、アーチ式コンクリートダムでは、断面が薄く、高い強度が要求されることから特に配合区分を行わず、堤体全体に品質の高いコンクリートを用いることが多くなっています。ダムコンクリートの一般的な配合設計の手順を図-2¹⁾に示します。以下に、各配合区分について詳述します。

外部コンクリートは、厳しい気象作用にさらされる

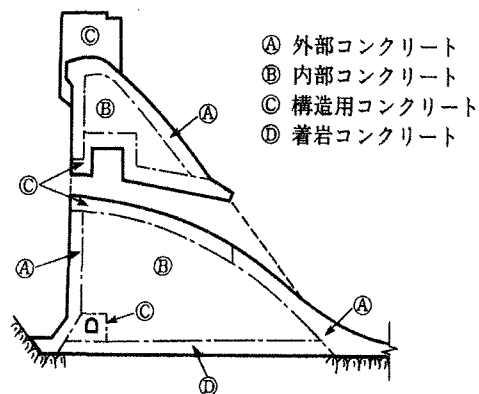
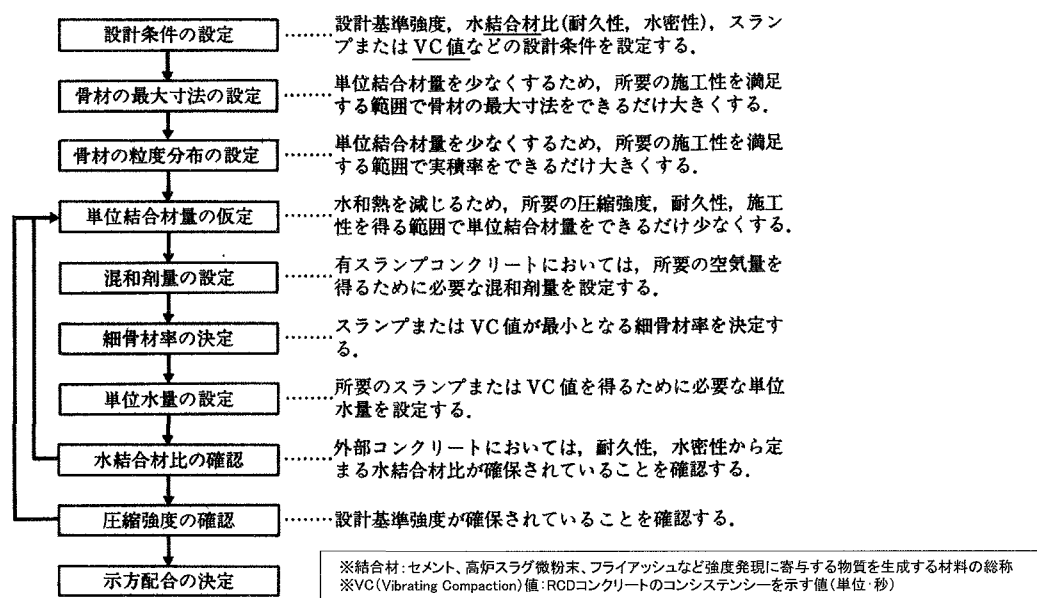


図-1 ダムコンクリートの配合区分

ため耐凍害性など高い耐久性が要求され、品質の高いコンクリートを用いるのが原則です。特に平成11年度に改訂されたコンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾では、ダムなどの重要構造物では、長期的に耐久性を満足するには相対動弾性係数80%以上が必要な場合もあると表記されました。コンクリートの耐久性を確保するには、使用する骨材についても耐凍害性やすり減り抵抗性に関する品質が要求されます。コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす骨材の物性としては、主に吸水率、硫酸ナトリウムによる骨材の安定性損失量、骨材の微粒分量、粘土鉱物の含有量などがあります。吸

水率や安定性は骨材自体の凍結融解抵抗性に直接関与する物性であり、骨材の微粒分は多過ぎると耐凍害性に必要となる空気量の確保を阻害したり、必要なコンシステンシーを確保するために単位水量が多くなるなどにより、コンクリート自体の品質が低下します。また、粘土鉱物については、コンクリートの凝結などに影響するだけでなく、AE剤が吸着し適当な空気量が確保できない場合がありますので、用いる混和剤の種類の検討が必要になります。表－1に骨材の耐凍害性に対する基準を、表－2に有害物含有量の限度値を示します。なお、これらの値に関しては全てクリアする



図－2 一般的な配合設計の手順

表－1 粗骨材の耐凍害性に対する評価基準

ダムコンクリートの設計基準強度	吸水率と安定性損失量の評価基準値
18N/mm ² 未満	吸水率3%以下、安定性損失量40%以下または吸水率5%以下、安定性損失量12%以下
18N/mm ² 未満以上30N/mm ² 未満	吸水率3%以下、安定性損失量12%以下
30N/mm ² 以上	吸水率3%以下、安定性損失量12%以下

表－2 骨材の有害物含有量（質量百分率）

種類	細骨材	粗骨材
粘土塊 ^{※1}	1.0	0.25
軟らかい石片	—	5.0
骨材の微粒分量 ^{※2}	3.0(コンクリート表面がすり減り作用を受ける場合) 5.0(その他の場合)	1.0
比重1.95の液体に浮くもの	0.5	1.0
塩化物(塩化物イオン量)	0.02 ^{※3}	—

※1 試験にはJIS A 1103による骨材の微粒分量試験を行った後にふるいに残存したものを用いる。
※2 砕砂で、微粒分試験で失われるものが砕石粉であり、粘土、シルトを許容量以上含まないときは最大値をそれぞれ5%および7%とする。砕石で、微粒分試験で失われるものが砕石粉の場合、最大値を1.5%とする。
※3 NaCl換算で0.03%に相当する。

のが原則となりますが、ダムの場合、経済性や資源の有効利用、使用量の確保などの観点からダムサイト周辺の骨材をできるだけ利用する必要があるため、骨材使用の適否については慎重に検討する必要があります。特に耐久性に関しては、規格値を満足しない骨材でも、決められた配合と試験条件¹⁾でコンクリートの凍結融

解試験を行い、その試験結果を参考にしたり、さらに実際のダムコンクリートの配合で凍結融解試験を行った結果を参考にするなどして、総合的に骨材としての使用の適否を決める必要があります。

耐久性をもとにしてコンクリートの水結合材比を定める場合は、表－3に示す値以下である必要があります。

表－3 耐久性をもとにして定める水結合材比

気象作用が激しく、凍結融解がしばしば繰返される場合	60%以下
気象作用が激しくなく、氷点下の気温となるのがまれな場合	65%以下

これに対して、内部コンクリートは耐久性も強度もそれほど要求されないため、ダムコンクリートで最も問題となる水和熱の発生をできるだけ抑えるために、セメント量を減らすのが一般的です。そのさいたるものが、RCD用コンクリートです。しかしながら、適当なペースト量やモルタル量が確保されていないと、骨材等の周辺に空隙が残り、適切な締固めが行えません。

このため、RCD用コンクリートでは、モルタルやペースト量が粗骨材および細骨材それぞれの空隙を満たし、さらに適当な膜厚で骨材を覆うことができる量が確保されているかをチェックする必要があります。この特性を示す数値として、ペースト細骨材空隙比（ α 値）とモルタル粗骨材空隙比（ β 値）が一般に用いられ³⁾、式－1および2で算出します。一般に1.1以上が目安となっています。

$$\alpha = (\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3 \text{ 中のペースト容積}) / (\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3 \text{ に用いる細骨材の空隙容積})$$

$$= (W + C / \rho_c) / ((1000 / W_{so} - 1 / \rho_s) \times S) \quad (\text{式－1})$$

$$\beta = (\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3 \text{ 中のモルタル容積}) / (\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3 \text{ に用いる粗骨材の空隙容積})$$

$$= (W + C / \rho_c + S / \rho_s) / ((1000 / W_{go} - 1 / \rho_g) \times G) \quad (\text{式－2})$$

ここに、W、C（結合材）、S、G：各材料の単位量（kg/m³）

ρ_c 、 ρ_s 、 ρ_g ：セメント（結合材）、細骨材、粗骨材の比重

W_{so} 、 W_{go} ：振動台で締固めた表乾状態の細骨材、粗骨材の単位容積質量（kg/m³）

また、最近では低品質骨材の利用やRCD用コンクリートよりもさらにセメント量を減らしたコンクリートの施工⁴⁾も検討されています。

構造用コンクリートは、監査廊まわりや放流孔周辺など配筋が密な箇所に使用されます。このため、粗骨材最大寸法は鉄筋間隔を考慮して一般に80～40mmとなっておりま。また、部分的な引張応力に対応するために強度や耐久性が要求されるため、スランプ8cm程度の富配合コンクリートとなります。最近では、省力化の観点からも締固めが不要な高流動コンクリートが用いられる場合⁵⁾もあります。

岩着コンクリートは、ダムに作用する荷重を岩盤に伝達する上で重要となりますが、配合区分をいたずらに増やさないために、外部コンクリートと同じ配合としているダムが多くなっています。

表－4にこれらの一般的な配合を示します。

各コンクリートのコンシステンシーは、有スランプ

コンクリートの場合は40mmふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートでスランプ試験を行い管理します。スランプの標準は2～5cmとなっています（構造用コンクリートの場合は8cm程度）。一方、RCD用コンクリートの場合はスランプしませんので、コンシステンシーの管理は40mmふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートで小型VC試験を行います。振動ローラの締固めに適したVC値の標準的な値は20秒程度となっています。しかしながら、RCD工法ではコンクリートの練混ぜから締固めまで2～4時間程度かかるのが一般的で、かつ近年では良質な骨材の確保が難しいなどの状況から、VC値の経時変化を考慮して設定する必要があります。

空気量については、北海道のような寒冷地では耐凍害性を考慮して、AEコンクリートにする必要があります。空気量の標準は表－5に示すとおりですが、これらの値は各最大寸法の粗骨材を含んだコンクリート

の空気量の値であり、練混ぜ直後に40mmふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートで測定したときの空気量は $5.0 \pm 1.0\%$ が標準です。なお、耐久性が

あまり必要とされない内部コンクリートについても、施工性が良好となるため一般にAEコンクリートが用いられています。

表－4 一般的な配合

配合区分	単位結合材量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)
RCDコンクリート	120～130	90～100(80mm) 80～900(150mm)	30～34
内部コンクリート (有スランプ)	140～160(柱状工法)	90～115(150mm) 100～125(80～120mm)	23～28
	130～150(拡張レヤー)	95～115	26～30
外部コンクリート	210～230	水結合材比44～55%	23～28
岩着コンクリート	一般に外部コンクリートと同じ		
構造用コンクリート	240～280	水結合材比44～55%	27～30(80mm) 36～40(40mm)

表－5 AEコンクリートの空気量の標準

粗骨材最大寸法 (mm)	運搬、締固めを終了したときの空気量 (%)
150	3.0 ± 1.0
80	3.5 ± 1.0
40	4.0 ± 1.0

Q：ダムコンクリートの養生にはどのような注意が必要ですか

A3： ダムのようなマスコンクリートでは発熱量に対して放熱量が少ないため、コンクリート内部の温度上昇によりコンクリートの内外温度差が増大し、その結果コンクリートの温度降下や内外温度差に起因する温度応力が発生します。その応力がコンクリートの引張り応力を卓越するとひび割れが生じることになります。これを防止するため、外気温の急激な変化や風などによる表面の急冷を防止するために、シート養生や養生マットなどによる養生が行われます。また、さらに積極的な温度制御養生として、パイプクーリングが行われます。パイプクーリングについては後述します。

日平均気温が4℃以下になることが予想されるときは、寒中コンクリートとしての施工を行う必要があり、養生についても初期凍害を防ぐために、コンクリート打設後圧縮強度が5N/mm²以上になるまではコンクリート温度を5℃以上に保ち、さらに2日間は0℃以上に保たなければなりません。北海道のような寒冷地では、

冬期間長期的にコンクリート打設が休止となることがあり、その場合には放置ブロックの凍結や温度ひび割れの発生を防ぐために越冬ブロックの養生が行われます。越冬ブロックの養生方法としては主に、①全面湛水養生、②養生マット+養生シート、③養生マット+湛水に区分されます。

また、RCD工法では、打込み中と打込み後の養生方法について従来工法との違いがあります。打込み中の養生としては、コンクリートの練混ぜから締固め開始まで2～4時間経過するため、コンクリートの品質が変化しないよう打込み中に自走噴霧車などにより表面水を噴霧するなどの対応が必要となります。打込み後の養生としては、施工機械の稼働などの関係から従来のような湛水養生ができないため、スプリンクラーや散水車による散水養生、シートやマットによる湿潤養生が行われます。

Q：温度ひび割れを抑制するための方法を教えてください

A 4：温度ひび割れには、コンクリート内部の温度勾配によって表面部に引張り応力が働き生ずるひび割れ（内部拘束ひび割れ）と、コンクリートが最高温度に達した後に、硬化したコンクリートの温度低下による収縮変形が岩盤など下部に拘束されることにより起こるひび割れ（外部拘束ひび割れ）とがあります。また、

$$f = R E_c \alpha (t_p + t_r - t_f) \quad (\text{式-3})$$

ここに、 f : 引張り応力度 (kgf/cm^2)、 E_c : コンクリートのクリープ変形も考慮した有効弾性係数 (kgf/cm^2)、 α : コンクリートの熱膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)、 t_p : コンクリートの打込み温度 ($^\circ\text{C}$)、 t_r : コンクリートの最高温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)、 t_f : 最終安定温度 ($^\circ\text{C}$)、 R : 基礎の拘束係数

上式中の ($t_p + t_r - t_f$) は部材の温度変化になりますので、この値をできるだけ小さくすることがひび割れの抑制につながります。しかし t_f の値は人為的に操作が不可能なため、($t_p + t_r$) すなわち部材の最高上昇温度の値をいかに小さくするかが温度ひび割れを抑制するためのカギとなります。

温度ひび割れを抑制するための方法としては、

- ①使用材料および配合の選定
- ②コンクリートを打込む際のリフト厚や打込み時間間隔の規制
- ③収縮継目の設置
- ④コンクリートの冷却
- ⑤コンクリート表面の保温および適切な養生など、気象条件や施工条件などを考慮して、これらの方法を適切に組み合わせて計画する必要があります。⑤については前項でふれたので、以下①～④について詳述します。

①使用材料および配合の選定

使用材料については、中庸熱ポルトランドセメント、高炉B種セメント、フライアッシュB種またはC種セメントなどの低発熱型セメントが用いられ、中庸熱ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末（混入率60%前後）やフライアッシュ（混入率30%程度）を混合したものは水和熱の発生に対して特に効果的です。一例として、中庸熱セメントに高炉スラグ微粉末を混入した場合の断熱温度上昇量⁷⁾を図-4に示します。高炉スラグ微粉末の場合、混入率を60%前後まで高める必要がありますが、この場合断熱温度上昇量を約10℃小さくできます。配合については、所用のワーカビリティおよび強度が得られる範囲内で単位セメント量

外部拘束によるひび割れは、拘束面に対して直角方向に生ずることが多く、コンクリート断面を貫通するひび割れとなります。

外部拘束による応力を算定する方法の一つとして次式⁶⁾があります。

ができるだけ少なくなるように定めます。なお、単位セメント量を低減することによるコンクリートの温度上昇量低減の目安は、用いるセメントの種類によっても異なりますが、単位セメント量 $10\text{kg}/\text{m}^3$ につき約 1°C です。

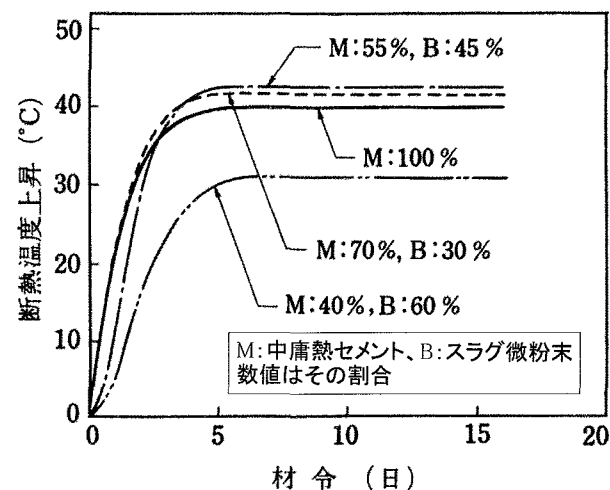


図-4 高炉スラグ微粉末の混入率と断熱温度上昇特性

②コンクリートを打込む際のリフト厚や打込み時間間隔の規制

ダムコンクリートはあらかじめ定められたリフトごとに打ち込まれますが、打ち上げ速度が速すぎたり、1リフトの厚さが厚すぎたりするとリフト表面からの水和熱の放熱が妨げられ、コンクリート内部の温度が上昇し、コンクリートが冷却する過程でひび割れが生じやすくなります。熱対策として特別な措置を講じない場合、打ち上がり速度が $0.3\text{m}/\text{日}$ を大きく上回るとひび割れが生じる可能性が高くなります。また、リフ

トの高さは0.75m以上2.0m以下を目安とし、その1層の厚さは40～50cm程度となるようにします。

また、岩盤上や長期的に打ち止めておいたダムコンクリートの上に新しいコンクリートを打ち込む場合、拘束によるひび割れ発生の可能性が高くなるため、リフト厚を薄くして打ち込むなどの配慮をする必要があります。

③収縮継目の設置

堤体の上流面と下流面は絶えず外部の温度変化の影響を受けるため、堤体内に生じる温度応力はダム軸方向の引張り応力が卓越します。したがって、どのような施工法を用いても横継目を設ける必要があります。一般に、横継目の間隔を15m程度とすることで、ダム軸に直行する方向に生じるひび割れを防止することができます。なお、RCD工法や拡張レヤー工法では、打込み直後に振動目地きり機でダムコンクリートを切り、目地盤を挿入することで横継目を設置します。

一方、縦継目は、柱状工法ではある程度の間隔で設置する必要がありますが、RCD工法や拡張レヤー工法のようにリフト全体が一様に打ちあがっていく施工法では、リフト側面（横継目）や表面が長期間外気にさらされることがないため省略することができます。ただし、大規模なダムの場合は、縦継目を省略する代わりにプレクーリングなど補助的な温度規制が必要になります。

④コンクリートの冷却

コンクリート自体を冷却する方法としては、コンクリート材料の一部または全部を冷却して打込み時のコンクリート温度を下げ、最高上昇温度を抑制するプレクーリングや、堤体内部に設置したパイプに冷却水を通してコンクリートの冷却を行うパイプクーリングなどがあります。

プレクーリングの方法としては、練混ぜ水に冷水を用いる、練混ぜ水の一部を氷で置換する、粗骨材を冷風または冷水で冷却するなどが用いられています。氷を混入する場合には、練混ぜ中に完全に溶けなければならないのでチューブアイスまたはフレーク状の氷を用います。このような氷を用いることにより、従来、氷が溶けにくかったためその混入率は練混ぜ水の50%以下とされていましたが、氷の混入率を高めることが可能となっております。細骨材の冷却は、表面水率をコントロールすることが難しかったため、従来ではほとんど利用されておりましたが、近年、細骨材をかき混ぜながら液化窒素を吹付けて細骨材を急冷する方法、細骨材のビン内の空気を減圧し水の気化熱を利用して細骨材を冷却する方法など、表面水率を管理しながら細骨材を冷却する技術が開発されています。表－6に各コンクリート材料のプレクーリングがコンクリートの練り上がり温度に及ぼす寄与度（プレクーリング効果）[※]を示します。この表から粗骨材の冷却と氷の使用が効果的であることがわかります。

パイプクーリングは、コンクリートを打ち込む際に、あらかじめ打ち継ぎ面表面に鋼管を敷設して、これに冷却水を通水することにより、コンクリート内部の最大温度上昇量を低くし、温度降下速度を緩やかにすることで温度ひび割れの発生を防止するものです。ただし、通水温度が低い場合にはパイプ近傍で温度勾配が大きくなったり、冷却期間が不適切だと温度降下速度が速くなるため、部材内の温度差によりひび割れが発生することになります。したがって、計画段階では、コンクリートの打設時期（外気温）や断熱温度上昇量、冷却管の径や間隔、通水の量や温度、通水期間などの十分な検討が必要となります。

表－6 各コンクリート材料の冷却がコンクリートの練り上がり温度低下に及ぼす寄与度

材料	単位量(kg/m ³)	比熱(Kcal/kg・℃)	材料温度を10℃下げた時のコンクリート温度低下(℃)
セメント	140	0.12	0.3
水	100	1.00	1.8(9.0)※
粗骨材	1800	0.18	5.9
細骨材	600	0.18	2.0
計	2640	0.21	10.0(17.2)※

※（ ）内の数値は、10℃の水100kgを0℃の水50kgとしてプレクーリングした場合のコンクリートの温度低下量

（文責 吉田 行）

参 考 文 献

- 1) 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書
[ダム編]、1996.3
- 2) 土木学会：平成11年版 コンクリート標準示方書
[施工編]－耐久性照査型－、2000.1
- 3) 建設省河川局開発課監修：改訂 RCD工法技術指
針（案）、山海堂、1989.8
- 4) CSGダム研究会：CSG材料を用いたダムの解析と設
計方法の提案、ダム技術 No. 166、pp27-74、
2000.7
- 5) 七澤 馨：滝里ダムの施工について、ダム日本
No. 630、pp17-29
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひ
び割れ制御指針、1996.3
- 7) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート
の設計施工指針（案）、コンクリート・ライブラ
リー第63号、1988.1
- 8) 建設省河川局開発課監修：コンクリートダムの細部
技術、1983.2