

VI-5

ダムコンクリートの今後の課題

正員 菊地正敏

1. はじめに

ダムは大規模構造物であり、その安全性は従来より十分な注意を払い、調査、計画、設計、施工及び維持管理が行われてきた。

日本のコンクリートダムの歴史をたどると、明治33年に神戸市の生活用水に建設された布引五本松ダムは現在もお健全を保っている最古のダムである。大正、昭和(戦前)と、戦争による施工中断によるコンクリートダムは、戦後経済の復興によりダムの建設時代に入った。

我が国ではダム数においては、現在世界でも屈指の国と云える。我が国には現在堤高15m以上のダムが1,800もあると報告されている。国民の生命、財産を守り、生活水準の向上と共に増大する水資源の需要に対処するため今後もダムの建設要請は続き、これらの目的や規模、地形、地質条件、ダム周辺の社会環境や自然環境等の保全問題、ダムを取りまく諸条件も多様化する時代になった。

最適なダム技術とは、時代の流れと共に推移しなければならない。その時代の科学技術と社会性と経済との調和をとらなくてはならず、合理化施工法の研究開発、在来工法と新施工法の開発、推進を行い最近の合理化施工法を含めてのダムコンクリートの研究開発を行わなくてはならない。

2. コンクリートダムの施工

コンクリートダムの施工法としては、一般的な工法としてはダムの本体をブロックに分割して、硬練りコンクリートを大型クレーン等で運搬打設して、温度応力のコントロールをクーリングにより温度上昇の規制を行いダムを建設する。

ダムコンクリートは、粗骨材の最大寸法の大きい(150mm以下)貧配合のマスコンクリートで、設計諸条件を十分に満たし、耐久性、水密性、所要強度、比重、均一性なコンクリートが要求される。

ダムコンクリートは大量打設を行うので、水和熱による温度上昇が非常に大きくなり、即ち、温度応力が大きくなるのでひび割れの発生が生じ易く、コンクリートの温度調節、温度規制の配慮を十分に行わなくてはならない。またコンクリートのコストは、ダム工費中に占められる割合も大きく、セメントの使用量(土木学会標準示方書では最低使用量は140kg/㎡としている)は、ダムコンクリートの諸条件を満たす限り、出来るだけ単位水量を減じ、単位セメント量も減らさなくてはならない。ダムコンクリートに用いられる混和剤については使用実績が多いものが良く、合理性と経済性を併せて、十分に施主、施工側にも混和剤の有効利用性についてアプローチを行なわなくてはならない。混和剤の種類も多々あり成分、使用量もやや異なり、それ等の混和剤の持つ優位性を熟知して使用に当らなくてはならない。現在施主側ではJISに適合しておれば可とし、施工者側では安価であれば可とする安易に考えている傾向もみられるので、換言すればコンクリートについての深い知識と経験者が殆ど現場には不在と云っても過言ではないと云える。著者もその悲観論者の一人である。

3. ダムコンクリートの材料

現在用いられている材料は周知の通り、セメント、骨材、混和材料、混和剤等であるが、今後の課題としてはダムコンクリートの合理化施工をより推進させるためには最優先して考えられる重要課題である。

1.) セメント

Problems should be solve in Dam concrete in near future. by Masatosi Kikuchi

現在一般にダムコンクリートに用いられているセメントは、中庸熱セメントが多用されている。混合セメントでは高炉セメントB種、フライアッシュB種、C種が用いられている。ダムコンクリートは多量にセメントが消費されるのでコスト面から考えても混合セメントを用いる方が経済的と云える。混合セメントではフライアッシュセメント、高炉セメントが多用されている。

(1) フライアッシュセメント

一般にはフライアッシュ(以下FAと記す)は20%混合率のセメントが多用されているが、布目ダムでは35%混合のセメントが用いられ、RCD工法の補助ダムでは20%FA混合のセメントが汎用されているが今後場合によってはFA30%位迄用いても経済性を加味して特に問題はないと考えられる。

(2) 高炉セメント

一般的にダムコンクリートに用いられるセメントはスラグの混合率は45-50%の範囲で用いられているのが現況である。札内ダムではスラグ混合率65%の高炉C種セメントを用いて現在コンクリートを打設している。特に寒冷地のダムサイトは日照時間外には比較的低温となり、春先より秋口にかけては非常に温度が低下するので混合セメントを用いる場合には初期強度の発現が非常に遅れ、更に貧配合のためレイタンスの除去作業もグリーンカット量が多くなっている例がある。

ダム用セメントの今後の課題としては、より水和熱の小さいセメントの開発が望まれる。またコンクリートの打設工程を早めることにより工期が短縮され、コンクリートの初期強度も要求される。故に i) 初期強度が早期に得られ、かつ、最終的に水和熱の小さいセメント、更に欲ばった表現になるが、ii) 施工時にある程度時間が経ってもコールドジョイントの出来にくいセメント、そして iii) ひび割れが生じにくいセメント、iv) コンクリートの表面に汚れが付かないセメント、例えばカビやコケがコンクリートに付着しない、黒いシミや斑点が出ない美観が保てるセメント等々の開発が望まれる。現在セメント協会ではRCD用のセメントの研究開発が行はれ近い将来に実用化されるとのことで大いに期待するものである。

2.) 骨材について

骨材には天然産と人工的に製造される砕石砕砂があり、特にダムコンクリートの約77-84%位を占める重要な材料である。骨材の品質、粒度は土木学会標準示方書にその標準が示されている。故にコンクリートの諸性質に及ぼす影響は非常に大きく、またダムコンクリートのコストに及ぼす影響も大きい。天然骨材と砕石骨材の優劣の判定は難しく、天然骨材が現在入手出来る場合は、天然骨材が砕石骨材より経済的である。

近年、天然骨材資源の枯渇により、原石山より原石を採集、圧砕して砕石骨材を製造するケースが多くなった。また原石*₁の岩質も従来に比べて問題点のある岩質もあり、即ちコンクリートに悪影響を及ぼす骨材中の有害鉱物である。最近比較的問題となっているものでは、例えばローモンタイトやモンモリロナイト、アルカリ反応性骨材を含有する骨材である。岩質の成分についても化学的に不安定な例もあり、施工性、耐久性に及ぼす影響もあるので、事前に岩石の化学分析等の調査試験を行って置く必要がある。

(1) 粗骨材

最近天然骨材資源の枯渇により砕石を用いるケースが多くなり、岩質により細長、薄片等低品質な形状不良な粗骨材も多い。また各分級における粒度分布が不連続で配合試験を行なったり、コンクリートを打設している場合もある。この場合単位水量、単位セメント量、s/aの増となる悪影響もあるので、十分に配慮を行なう必要はない。また化学的に不安定な骨材もあり(既述のローモンタイト、モンモリロナイト、アルカリ反応性骨材等)特に筆者*₂の粘土鉱物を含んだ骨材(モンモリロナイト)を用いた場合、ダムコンクリートの早期凝固の現象がしばしばあり、施工性に及ぼす影響が非常に大となることがある。

また低品質な不良骨材を用いる場合に従来はダムコンクリート(重力)に不適当な骨材を廃棄処分していたが、これは外部コンクリートと内部コンクリートを同一の粗骨材と考えていたが、内部コンクリートは外部コンクリートに比べて、それ程高い品質を要求されないで、低品質の粗骨材の試験を再度行いその結果使用が可能な範囲で骨材の有効利用を行なうべきである。即ち、外部コンクリートには比較的良質な骨材を選

別使用することにより、原石の採集量、不良骨材の廃棄処分及び土捨て場等、ダムコンクリートの経済性も考えられ、ダム現場における今後の課題と云える。

(2) 細骨材

形状については粗骨材と同様に考えて良い。また雲母片 $\ast_3$ が数%含んだだけで、単位水量が10~20kg/m³も増えた例もあり、特に0.15mm以下の微細粒子には注意をしなければならない。粘土鉱物(モンモリロナイト)を含んだ細骨材については既述の通りコンクリートの早期凝固の現象があると考え、多量に含まれた場合には施工が不可能になるので、他の採集地よりモンモリロナイトの含有量の少ないまたは含有されない細骨材を用いざるを得ないのでコンクリートのコストが大幅に増となることが考えられる。細骨材の微細粒子0.15mm以下の形状の良い微細粒子が6~12%位含まれる場合にはコンクリートの施工性、即ちVB値、VC値が良好となる。細骨材の0.15mm以下の微細粒子が上記以上に(20%位)含まれる場合にもダムコンクリートの単位水量は若干増えるが、圧縮強度 $\ast_4$ が増大するので骨材を圧砕製造する際に発生する石粉の有効利用することもダムコンクリートのコストを低減する要因となる。

3.) 混和材料

ダムコンクリートに用いられる混和材料はFA、高炉スラグがある。現在の処FAが主に用いられている。良質なFAを用いることにより、コンクリートにより良いコンシステンシーが得られ、単位水量の減少、長期材令での強度の増加、水和熱による温度上昇の抑制、ひび割れ発生減少等有利な混和材料である。

近年エネルギー情勢の変化の中で、我が国でも火力発電が見直されるようになり、石炭火力発電所においても副産されるFAをダムコンクリートに多用される傾向になった。問題点としては、国内炭鉱の閉山により国内炭より輸入炭の使用により、カロリーのアップによるFAの未燃焼カーボンの活性化による処の、メチレンブルー吸着性の比較的高いFAが多くなり、また形状も円形でない低品質なものも比較的多く、単位水量の減少、長期材令での強度の増加、ワーカビリティの改善に余り効果が小さいFAもあり、更に所要の空気量を得るための混和剤の添加量も非常に増加する例もある。またFAの生産量も現在ダムの合理化工法での多用化により需要を満たす限界点迄に来ており、今後低品質のFAも有効利用を考慮すべき重要な課題である。

更に石灰石粉を用いることも今後積極的に考慮しなければならない。この場合粉末度(ブレン値)に産地によりバラツキがあるので十分に配慮して管理を行い使用することにより良質なダムコンクリートを施工することが可能である。

今後高炉スラグ、石灰石粉の利用拡大を上記FAの需給関係が限界点に来ている現況として積極的に利用を図るべきである。

4.) 混和剤

混和剤の有効利用については従来種々行われて来たが、用いられる諸材料、セメント、粗骨材、細骨材等に対応して用いられる必要もある。例えばモンモリロナイトのような粘土鉱物を含んだ骨材に対するコンクリートの早期凝固の抑制策混和剤の割増し使用、 $\ast_5$ また暑中の温度上昇に伴う単位水量の増加の抑制策等は特に骨材等におけ現在迄に現場で混和剤の有効利用が応用された。また $\ast_6$ シリカ鉱物(ASR)の一対応策として考えられた。特に骨材等における問題点に対する解決策としては筆者も過去に記述したが、更にダムコンクリートに対する諸問題点の改善を図ることが可能で、ダムコンクリートでは遅延性、特に初期の水和熱の抑制が要求されるが、コンクリートが硬化後の早期初期強度の発現が得られ、低温時の表面処理にオーバーカッティングのない、PCD工法では圧送性の良い混和剤、コンクリートの分離性のない混和剤が要望される。また新工法に対応する安全かつより効果的な混和剤の研究開発が望まれる。

4. コンクリートダムの継目

マスコンクリートを連続して打設すると、水和熱によるコンクリートの温度上昇による温度応力が生じる。即ち、外部拘束による影響と、内部拘束による影響によりひび割れを生ずることになる。この対策とし

てコンクリートの温度規制を行い、また人工的に収縮継目を設ける。

ダム軸に直角方向の継目を横継目、ダム軸方向のものを縦継目と称し、横継目の間隔は15mが標準とされている。縦継目は出来るだけ避けるためコンクリートの温度規制を行い、クーリングによりコンクリートの冷却を行う。コンクリートの温度上昇を極力抑制し、温度上昇勾配を緩和させることが肝要であり、継目の間隔をなるべく少なくしなければならない。

柱状方式では、縦横とも継目を設けて、コンクリートを打設する方式である。また横継目は設けるが、縦継目は設けずにコンクリートを打設する方法をレーヤ方式と称する。ダムコンクリートの熱膨張率は、骨材によっても変化するが、平均 $1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$ の値を有し、変形を完全に拘束された場合には $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化は 1×10^{-5} の歪をもたらすとされている。

特にRCD工法ではコンクリートのクーリングを行なはないので従来の柱状工法のリフト厚1.5mに対して、RCD工法のそれは0.75mと薄く施工されている。それ故、水平打継目の必要表面処理面積は柱状工法に比し2倍となる。故にRCD工法の問題点としては低温時の表面処理にはオーバーカッティングの問題が発生するので、打継目の処理方法については十分に試験検討を行ななくてはならない。他の合理化工法、拡張レーヤ工法についても同様に考えておく必要がある。

5. コンクリートダムの新施工法

建設省では1974年に「コンクリートダム合理化施工に関する研究委員会」が発足して、以後コンクリートダムの合理化施工に関する研究を推進している。

特に合理化施工とは

- ①設計法と密接にリンク化した合理化
- ②施工法の合理化
- ③材料面からの合理化

の3つの方向からのアプローチが必要であるとしている。迅速な施工でコンクリートの大量打設を行ない、広義での経済性が考慮されている。その結果、RCD工法、PCD工法(コンクリートポンプによる施工法)、BCD工法(ベルトコンベヤーを用いた施工法)、拡張レーヤ工法(ELCM)等で上記諸工法の中現在RCD工法は実用化工法となり、柱状工法に変わり、一般化されている現況にある。

1.) RCD工法

本工法は「RCD工法技術指針(案)」を基準として、島地川ダム等の経緯を経て、玉川ダムでの施工ではシステムとしての成長期の域に入り、その後RCD工法は国内での施工が大幅に伸び、また海外からも高く評価を受けるに至った。

RCDコンクリートの今後の課題としては山積されているが、(財)ダム技術センター内に「RCD工法新技術研究会」が設置構成され、合理化施工とその対策について検討が行はれている。諸討議の内容については「ダム技術No.70(1992)」で掲載されており周知の通りである。即ち

- (1) 合理化施工に即したダムの設計
- (2) 施工面での合理化
- (3) 施工管理の合理化
- (4) 材料の合理化
- (5) ダム設計基準の見直し

等々であるが、筆者は「RCDコンクリートの配合試験に関する基礎的考察」*₇と題して既往のダムの実績値を参考にした配合試験(小型試験装置を用いた)を記述した。RCDコンクリートの配合試験に関しては非常に労力と時間を要するので試験の迅速化、合理化を述べたものである。今後ダムコンクリート試験の熟練経験者が非常に少なく、試験室要員、作業員の確保も困難となり、また現場試験室においても同様な課題を抱えて

いる。今後RCD工法ダムの増大するにつれて、本件についても深刻度を増すと考えられる。

2.) PCD工法

ポンプ工法は非情に汎用性が大きく、一般のコンクリート工事には殆ど用いられており、作業の合理化、省力化に役立ってきた。ダムコンクリートにおいても、小規模コンクリートダムの本体工事や、水叩部、副ダム、減勢工また、フィルダムの洪水吐の施工等に適応性がある。施工例としては長与ダムを始めとして、三国川ダムでは骨材の最大寸法80mmを用い、 $Sl=6\pm 1\text{cm}$ 、 $Air=4\pm 1\%$ 、 $C+F=220\text{kg/m}^3$ 更に微粉末を用いて吸込式ポンプを用い高さ100m以上を圧送施工されている。

ポンプ工法の今後の課題としては、コンクリートポンプの改良を更に行ない、粗骨材の最大寸法の大きい硬練りコンクリートの圧送可能なポンプの改良が望まれる。また併せて、圧送性に適した細骨材の微細粒子を有するポンパビリティのより良好な細骨材の資源の確保を行なはなくてはならない。更に流動化剤もベースコンクリートにより単位水量の少ない硬練りコンクリートに適応性のある流動化剤の性能の改善、及び使用方法の検討も今後の課題と云える。

3.) BCD工法

ベルトコンベアの特徴としては

- ① 連続輸送装置であるので、製作据付費に比べ時間当り輸送能力が大きいこと
- ② 機械の納入価額は、低廉で償却費用が少ないこと
- ③ 熟練運転士の必要性が少なく、省力化になじむこと

等の大きな利点がある。しかしベルトコンベアをダムコンクリート運搬システムとして利用する場合には

- ① 運搬勾配に限界があるため、地形的な制約を大きく受けること
- ② コンクリートの打設場所の変化に追隨して、コンベアシステムの移設が伴うこと
- ③ 連続輸送システムであるため、打設計画に弾力性が乏しいこと
- ④ ベルトコンベアから打設面に落ちる時、コンクリートの分離が生じ易いこと
- ⑤ ベルトにモルタルが、付着すること

等の欠点がある。BCD工法は既に、七ヶ宿ダムの洪水吐コンクリートに用いられ、流入部には柱状打設工法を考慮し、固定式クライミングスプレッダーを設置、シュート部、減勢部には自走式スプレッダーを設置している。移動方式は、シュート部においてはインクラインで行い、減勢部においては、自走可能なものになっている。また運搬勾配は、一般には 15° 位であるが同ダムでは 23° で施工されており、ベルトコンベアから打設面にコンクリートが落ちる際に分離防止策として、三角シュートでコンクリートを打設、シュートの長さは最大6mで打設している。

七ヶ宿ダムの洪水吐コンクリートのBCD工法での配合は、一般に用いられる配合で、所要の条件を十分に満足し、今後の課題としては、在来の柱状工法のみならず、RCD工法、拡張レーヤ工法への検討も、合理化施工を更に研究推進することが肝要である。またフィルダムの洪水吐コンクリートの合理化施工、小規模ダムの場合には、簡便な機構の設備と云えるので、今後各ダムで現場の条件に適合したシステムを検討研究することが最大の課題と云える。実績としては小平ダム他、また試験施工等を行ったダムもあり、今後RCD工法、大型ダムの浦山ダム、月山ダムにも適用、コンクリートの大量打設施工に採用が準備されている状況である。

3.) 拡張レーヤ工法(ELCM)

拡張レーヤ工法とは、従来広く施工されていた柱状工法、レーヤ工法に比べてより広い区画について、全体としてのコンクリート打上がり高さに殆ど差を生じないようコンクリートを打継ぎ、より広い施工面積を可能にする工法で、堤体上をダンプトラックで運搬し、ブルドーザーで敷均し、インナーバイブレーターで締め固める。このような施工法は、従来行なはれてきたレーヤ方式に加えて、ダム軸方向に2ブロック以上に拡張した範囲で、比較のリフト厚(高)を薄く50~75cm同時打設、原則的には同高リフトを打設してから次

の標高リフトを打設する工法で全面レヤー工法とも云いえる。

本工法は現在多用化されているRCD工法と同様であるが、コンクリートの配合も異なり、本工法の配合は即ち0スランブコンクリートと有スランブの相違で、一般のダムの場合と同様な配合試験を行う。＊また締め固めの機械が異なる。即ち外部振動機と従来通りの内部振動機によるコンクリートの施工機械の相違によるものである。RCD工法と同様にダム堤体のクーリングも行はない。

拡張レヤー工法の課題として

- ① 上下流方向のブロック長の増大により発生するコンクリート温度によるひび割れの防止(コンクリートの温度規制、配合設計の検討)
- ② ブロックの長大化に伴うコールドジョイントの防止、およびコンクリートの再振動限界の可能性(打設スケジュールの試験による設定)
- ③ 温度ひび割れ抑制のための単位水量、単位セメント量は諸条件を満足する限り減らす(FAの有効利用)
- ④ コンクリートの分離の防止
- ⑤ インナーパイプレーターの検討

等の検討を行う。またコンクリートの打設量が大量なため、コンクリートの温度規制を行い、管理上高温時においてはプレクーリングや夜間作業を行ない、温度上昇勾配の緩和を図らなくてはならない。

拡張レヤー工法は堤体コンクリートの冷却にパイプクーリングは実施不可能であり、プレクーリング及びリフト表面に所定の水温の湛水を行ないコンクリート表面温度の冷却が検討されている。本工法はまだ実績が少なく、当初は東電今市ダムで採用された外、本格的には布目ダム、栗山ダム、三春ダム等で施工されており、今後本工法を採用されるダムは、施工委員会を中心として十分に研究、検討、試験を行なはれ細部については現場実験等、により解明、大筋については可能性が確認されており、今後拡張レヤー工法にもRCD工法と異なる利点を各ダムを含めて大型ダム等での同工法の採用が期待される。

6. おわりに

ダムコンクリートの現況と今後の課題について略記したが、現在ダムの建設は比較的増大しており、今後とも洪水防除、治水、増大する生活水の需要、エネルギーの開発、水資源の増大等、利水面で多くのダム建設が計画されている。それにはダムコンクリートが抱える諸問題を更に工学的に、合理化され現場におけるダムコンクリートの今後の課題について如何に対応するかによるものである。

参考文献

- *1 土木学会北海道支部論文報告集 「RCDコンクリートの配合に関する骨材物理試験の基礎的考察」 菊地正敏 平成2年度
- *2 土木学会第46回年次学術講演概要 「粘土鉱物を含んだ骨材を用いたダムコンクリートに関する基礎的考察」 菊地正敏 平成3年9月
- *3 土木学会北海道支部論文報告集 「雲母片を含んだ細骨材を用いたダムコンクリートに関する基礎的考察」 菊地正敏 平成3年度
- *4 骨材資源 「砕砂中の石粉がコンクリートの諸性質に及ぼす影響」 森野圭二 通巻No57 1983
- *5 日曹マスタービルダーズ(株)中央研究所報 No.4 「混和剤の使用量増しによるコンクリートの性能向上に関する実験」 村山守et al 1981
- *6 日曹マスタービルダーズ(株)中央研究所報 No.8 「反応性骨材を用いたコンクリートの膨張特性に及ぼす混和剤の影響(その1. 2.)」 清水哲夫 et al 1988
- *7 土木学会第47回年次学術講演会 「RCDコンクリートの配合試験に関する基礎的考察」 菊地正敏 平成4年9月