

液体窒素によるダムコンクリートのプレクーリングについて （その1：温度応力解析によるひび割れ発生の危険性算定および実証実験）

戸田建設株式会社本社ダム営業室	正会員	○野々目 洋
岩谷産業株式会社ガス技術部		橋本 正明
戸田建設株式会社広島支店	正会員	祖父江修一
戸田建設株式会社広島支店	正会員	西田 哲哉

1. はじめに

山田川ダムは、広島県に建設中の堤高32.1m、堤体積43,600^mの重力式コンクリートダムであるが、比較的小規模なダムであるため、市中の生コン工場で製造したコンクリートをトラックミキサにより現場まで運搬し使用する計画であった。このためダム施工で一般的な夏期夜間打設の実施は困難で、工程上暑中におけるコンクリート打設も避けることが出来ないため、炎天下で生コン工場より運搬されたコンクリートを打設する状況の下で温度ひび割れの発生を防止する厳しい条件となった。このような条件の下で温度ひび割れを発生させることなく堤体コンクリートを打設するため種々の検討を行った結果、山田川ダムにおいては液体窒素による生コンクリートプレクーリング工法を採用するに至った。

本稿ではプレクーリング実施に先立ち実施した温度応力解析および実証実験結果についてその概要を述べる。

2. 温度応力解析

2.1 解析モデル

解析モデルは図-1に示す平成15年1月に打設が始まる中央部7ブロックの1～37リフト(EL383.50～EL420.10)とし、今回は26リフトまでの解析を行った。

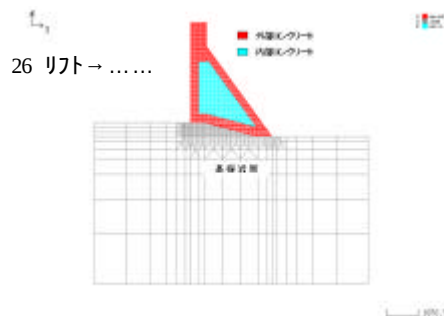


図-1 解析モデル

2.2 コンクリートの配合

配合の詳細は省略するが、中庸熱フライアッシュセメントを外部コンクリートで154kg/m³、内部コンクリートで112kg/m³用いたGmax=60mm、Sl=4±1cmのダムコンクリートである。

2.3 コンクリートの断熱温度上昇量

試験により外部コンクリートの $Q_{\infty}=22.81$ 、 $r=0.43$ 、内部コンクリートの $Q_{\infty}=20.0$ 、 $r=0.43$ と定めた。

2.4 リフトスケジュール、外気温、打設時コンクリート温度等

リフトスケジュール、外気温、打設時コンクリート温度、コンクリートおよび岩盤の物性値等は施工時の状態を反映出来るように施工計画、現場気象データ、周辺の生コンクリート工場データ等により定めた。

2.5 解析ケース

解析ケースはコンクリートのクーリングを行わない場合とクーリングを行い打設時コンクリート温度を30～25まで6水準に変更した場合の7ケースである。

3. 解析結果

温度応力解析により求められた各ケース、各リフトのひび割れ指数を図-2に示す。図-2より、対策未実施の場合、6月24日に打設される19リフトからひび割れ指数が小さくなり、特に8月22日打設の23リフトでは1.60、9月6日打設の25リフトでは1.40とひび割れ発生が懸念される。これに対し、打設時コンクリート温度を低下させた場合は、一部リフトで対策未実施の場合より温度設定が高くなった打設時コンクリート温度30および29の場合を除き、ひび割れ指数が大きくなりひび割れ発生の低減効果が認められる。フルリフト打設の25リフトのひび割れ指数は打設時コンクリート温度を29に制御した場合の1.39から打設時コンクリート温度25に制御した場合の1.81までで、打設時コンクリート温度が高い場合は十分低い値ではないが25リフト以外では対策を行った場合、打設時コンクリート温度

キーワード：コンクリートダム、温度ひび割れ、プレクーリング、液体窒素、生コンクリート

連絡先：戸田建設(株)本社ダム営業室 〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1

PHONE：03-3535-6342、FAX 03-3564-0730、e-mail：hiroshi.nonome@toda.co.jp

が 29 ～ 25 の場合は、ひび割れ指数は全て 1.75 以上になり、温度応力によるひび割れ発生の危険性は少ないと考えられる。一方、打設時コンクリート温度を 30 にした場合は 23 リフトでひび割れ指数が 1.69 となり、温度ひび割れが発生する危険性がやや大きくなった。

以上よりフルリフト打設の25リフト以外のハーフリフト打設箇所においては打設時コンクリート温度を 29 以下にする暑中コンクリート温度規制が適切であると考えた。

4．クーリング工法の選定

主なコンクリートプレクーリング工法には 液体窒素による生コンクリートプレクーリング 液体窒素による練混ぜ水、骨材のプレクーリング 冷凍機による冷水製造 粗骨材への散水 骨材の真空冷却 がある。これらのうち冷凍機による冷水製造や粗骨材への散水では、所要の打設時コンクリート温度低下値を得ることは困難であることがわかった。また、パッチャープラントの改造は困難で、クーリング予定期間が約 3 ヶ月間という短期間であるため多額の設備投資が行えないことを考慮し、山田川ダムでは液体窒素による生コンクリートプレクーリング工法（以下「LN₂直接冷却工法」と称する。）を採用することを決定し、実現に向けた技術的検討、予備実験、実証実験等を進めた。

5．LN₂直接冷却工法のシステム

LN₂直接冷却工法のシステムは、-196 の液体窒素をノズルにより直接トラックミキサのドラムに吹込み、ドラム内でコンクリートを所要温度まで冷却するものである。既存プラントの改造が不要で急速冷却ができ、冷却量に限界がないため、プレクーリングが難しい条件下でもコンクリートの冷却が可能となる。本システムによりコンクリート 1m³ の温度を 1 下げるのに必要な窒素ガス量（F_{N₂}）は、液体窒素の潜熱（ゲージ圧力 0.2MPa での飽和状態で 44kcal/kg）のみがコンクリートの冷却に寄与すると仮定すると、コンクリートの比熱 578kcal/m³・より以下のように求められる。

$$F_{N_2} = 578 \text{kcal/m}^3 \cdot \div 44 \text{kcal/kg} = 13.1 \text{kg/m}^3 \cdot$$

6．実証実験結果

LN直接冷却工法によって実際に用いるダムコンクリートを冷却する実証実験を行った。実験によって求められた液体窒素供給圧力別の液体窒素供給量と温度降下幅の関係を図 - 3 に、液体窒素供給圧力別の液体窒素供給能力を表す液体窒素供給量と時間の関係を図 - 4 に示す。

図 - 3 より液体窒素供給量と温度降下幅の関係をみると、バッチ回数が少ないことによるばらつきや、コンクリートのクーリング以外にもドラムの冷却等に窒素ガスの冷熱が使われることなどから直線関係は得られなかった。しかしながら、最も冷却効率の高い供給圧力 0.3MPa の場合、基準とした 5 の温度降下を得るために消費される液体窒素量はおよそ 200kg であることから、1 m³ のコンクリートを 1 下げるのに消費される実液体窒素量は 8.8kg/m³・となる。これは潜熱のみを用いて計算される理論窒素量 11.4kg/m³・と比較すると大幅に小さく、気化したガス窒素の顕熱も冷却に寄与しているものと推察される。

図 - 4 より液体窒素供給圧力が 0.3MPa の場合、約 1.4kg/sec の供給能力を有し、コンクリートを 5 温度降下させるために必要となる液体窒素量 200kg を供給するための所要時間は約 2 分 30 秒であり、0.5MPa の場合は約 1 分 40 秒である。よって、0.3MPa、0.5MPa の供給圧力の場合はコンクリートのサイクルタイム内で冷却できるのに対し、液体窒素供給圧力が 0.1MPa の場合は 200kg の液体窒素を供給するのに 7 分程度の時間を要し供給時間が長く、サイクルタイム内での冷却が不可能で工程に悪影響を与えるため 0.1MPa のような低圧での供給は不適と考えた。

7．結論

山田川ダムにおいては温度ひび割れを防止するために暑中施工にコンクリートのクーリングが必要であることがわかり、LN直接冷却工法を用いればサイクルタイム内に所要の 5 の温度低下が達成できることが実証実験で確認された。

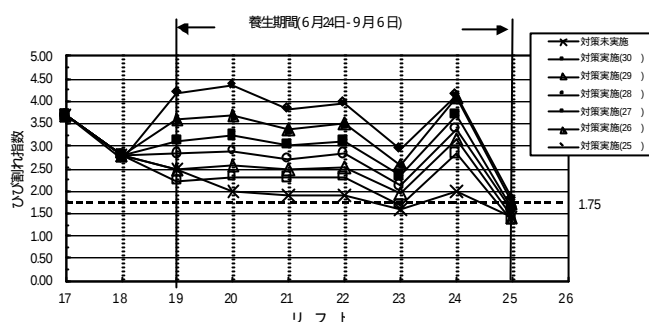


図 - 2 各リフトひび割れ指数

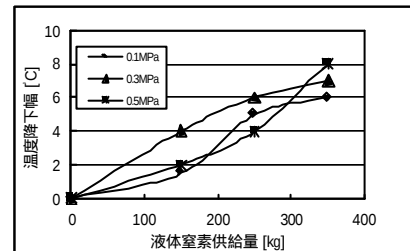


図 - 3 液体窒素供給量と温度降下幅の関係

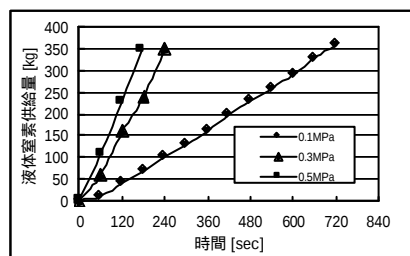


図 - 4 液体窒素供給量と時間の関係