

最近のダム再開発事業における構造に関する技術的課題

山口嘉一* 坂本博紀**

1. はじめに

近年、公共事業費の縮減や自然環境の保全に対する社会的要請が高まっていること、また良好なダムサイトが減少していることなどを背景に、既設のダム施設を有効活用する再開発事業の重要性が増してきている。

ダム再開発事業は一般に表-1のように区分される。ダム再開発事業はソフト面の施策とハード面の施策に区分され、施策の目的で区分すると既設ダムの容量配分の変更や嵩上げ、放流設備の増強といった既存施設を利用・改良することで、より効率的な施設運用を図るものと、老朽化した施設の改修や貯水池内の堆砂除去による容量回復を行うことで施設の長寿命化を図るものとに分けられる。なお、ここでは表-1の「③ダムの嵩上げ」については広義に、旧堤体を利用して同一ダム軸で嵩上げを行う場合だけでなく、別のダム軸（一般に直下流）に既設ダムより高い新設ダムの建設を行う場合も含む。

ハード面の対応によるダム再開発事業では一般的に既設のダム施設の運用を行いながら再開発工事を実施しなければならないため、新設のダム建設事業にはない検討事項や制約条件が多数存在する。特に、最近のダム再開発の事例をみると、従来に比べて、設計・施工条件が厳しく、より精緻な構造検討を実施している事例が増えてきている。

表-1 ダム再開発事業の区分

区分1	区分2	再開発事例
ハード面の対応	既存施設 長寿命化	①既設ダムの補強・補修
		②堆砂除去 (貯水池内掘削・浚渫)
	既存施設 有効活用	③ダムの嵩上げ
		④放流設備の新設または改築
ソフト面の対応	既存施設 有効活用	⑤容量の再配分・運用変更
		⑥ダム群の貯水容量再編成
		⑦ダム群の連携運用

本稿ではこのような近年のダム再開発事業において検討されたダムの構造に関する技術的課題を、表-2に示す鶴田ダムおよび新桂沢ダムの事例をもとに紹介する。

2. 事例紹介

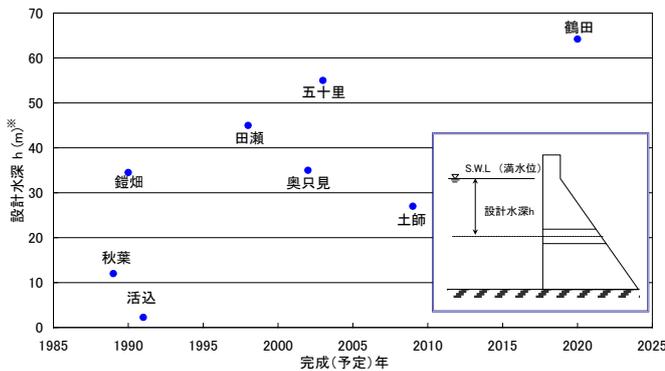
2.1 放流管増設のための重力式コンクリートダムの堤体穴あけの検討事例

既設の重力式コンクリートダムにおける放流設備の増強方法は主として、①「既設堤体に穴あけや切削を行い、放流管やゲート設備を増設する方法」と②「貯水池と下流をつなぐトンネル式放流設備を増設する方法」について各種条件での比較検討を行い決定される。この時、一般的にはコスト面や施工期間等の優位性から①の穴あけによる方法が選択される事例が多い。しかし、堤体への穴あけは構造安定性に大きな影響を及ぼすため、既設ダムの設計時に安定計算を実施した断面に欠損が生じることに対する安定性の検証、開口部周辺の応力状態の検証などを行う必要がある。過去の事例では、前者については断面欠損を考慮した梁理論に基づく手法等により検証する事例が多く、後者については穴あけによって発生する応力、特に引張応力を有孔無限板の理論解やFEM等により検証を行っている²⁾。

ここで重力式コンクリートダムの堤体の穴あけ事例について、完成（予定）年と設計水深 h 、穴あけ幅（径） D を穴あけ堤体のブロック幅 B で除した D/B の関係について図-1,2に示す。開口部周辺の応力集中は D/B および穴あけ標高における上

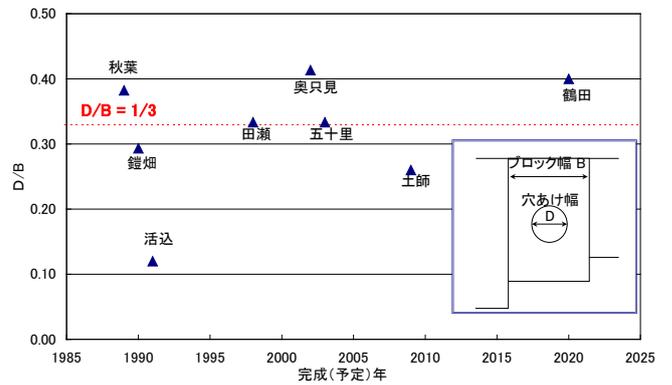
表-2 事例ダム緒元

ダム名	鶴田ダム	新桂沢ダム (既設:桂沢ダム)
再開発の方法	既設堤体への 放流管増設	同一ダム軸 での嵩上げ
堤高 (m)	117.5	75.5 (63.6)
堤頂長 (m)	450.0	422.5 (334.3)
堤体積 (千 m^3)	1,119	606 (350)
既設ダム完成年	1965年	1957年



※ 設計水深h: S.W.L.(発電ダムの場合は満水位)と呑口中心標高の標高差

図-1 設計水深の経年分布



※ D:穴あけ幅(直径) B:穴あけ堤体のブロック幅

図-2 穴あけ幅/ブロック幅の経年分布

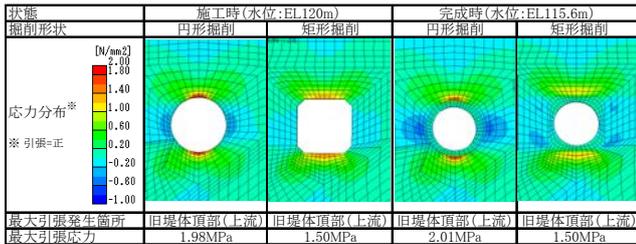


図-3 削孔形状別の応力分布

載荷重(設計水深)が大きくなる²⁾ため、これらが設計・施工条件の厳しさを表す指標であるといえる。なお、D/Bについては開口部周辺の応力集中の影響範囲を考慮して1/3以下に抑えることを原則としている¹⁾。図-1,2よりD/Bには経年的な増加傾向は見られないが、設計水深は明らかに増加傾向にあり、従来より設計・施工条件が厳しくなっていることが分かる。なお、D/Bについては1/3を超えている事例もあるが、既設の再開発事業では現在までに穴あけに伴う大きな問題は発生していない。

現在、国土交通省九州地方整備局が事業実施中の鶴田ダム再開発事業ではD/B=0.40 (D6.0m×H6.0m: Hは穴あけ高)と穴あけ規模およびD/Bが実績の最大値に近く、設計水深は60mを超えて既往最大であるため、より精緻な設計検討を実施している。例えば削孔形状を変化させた場合に開口部周辺の堤体の応力状態を3次元FEMにより検討し、最も条件が厳しい貯水池水位を下げた条件下の上流側断面において、矩形断面が円形断面に対して最大引張応力を約25%軽減できることを確認している(図-3参照)。また、3次元FEM解析はブロック単位モデルを用いているが、ブロック側面の境界条件については自由変形する条件(フリー)として設計上安全側で計算を行っている(図-4参照)。これに対して側方境界が拘束される条件では、自重等による堤体の鉛直方向への圧縮力による側方への変形が拘束されるため、結果的に開口部の頂部および底部に発生する引張

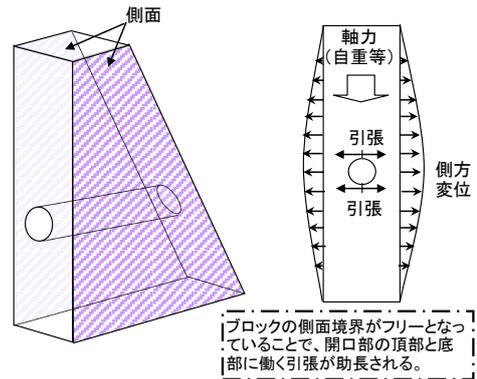


図-4 解析ブロック側面の境界条件のイメージ

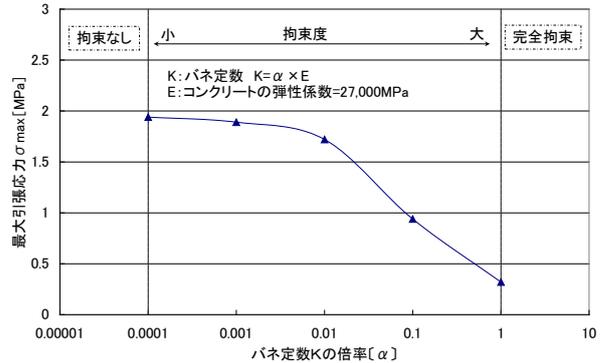


図-5 拘束度による引張応力の変化

応力が小さくなる。鶴田ダムは柱状工法で施工されたダムで、建設時の横継目は歯型形状であるため、隣接ブロックは相互にある程度拘束されている状態にあると仮定して、ブロック境界の面直方向の拘束をバネ定数で考慮することで「拘束なし」から「完全拘束」の5段階に変化させて解析を行い、拘束度が大きいと引張応力が大きく軽減されることを確認している(図-5参照)。しかし、ブロック間の拘束度の大きさを定量的に評価することが困難であることや、穴あけによる側方変位が建設後の堤体の温度収縮による横継目の開口間隔の範囲内に入る可能性もあり、現時点では境界条件をフリーとして安全側で設計計算を行っている。この境界条件を定量的に設定することが出来ればより合理的な設計が可能となるため、今後の重要な検討課題といえる。

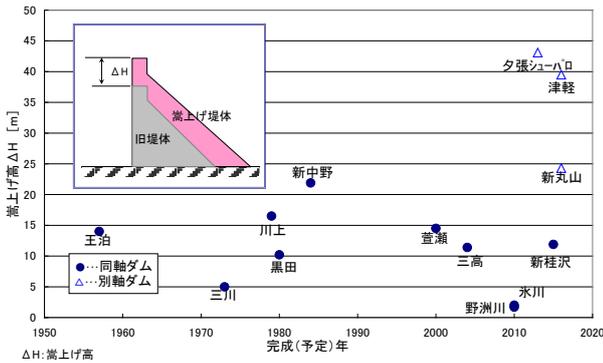


図-6 嵩上げ高さの経年分布

なお、堤体への放流設備増設のための穴あけは従来より重力式コンクリートダムへの適用技術であるが、天ヶ瀬ダム再開発事業ではアーチダムへの適用性について3次元FEMによる検討を実施している。この結果、堤体の開口（D=5m）はアーチダムの主構造には大きな影響は及ぼさないものの、穴あけの採用を決定するには横継目のモデル化方法や、既設堤体温度等についてさらに詳細な検討が必要と考えられることなどから、堤体安定性に対して影響のないトンネル式洪水吐きを採用している³⁾。

2.2 寒冷地における重力式コンクリートダムの嵩上げの検討事例

重力式コンクリートダムの嵩上げによる再開発事業は古くは1950年代の王泊ダムから始まり、1970年代以降、計画・実施事例が増加している。重力式コンクリートダムの嵩上げ事例について、完成（予定）年と嵩上げ高 ΔH 、嵩上げ率（嵩上げ高 ΔH /新堤体の堤高 H_2 ）の関係について図-6,7に示す。図-6,7より、同一ダム軸上での嵩上げダムでは嵩上げ高は25m以内、嵩上げ率は30%以内に分布しており、経年的に大きな変化傾向は見られない。しかし、個別の事業ごとに見ると地形的な制約や嵩上げ予定地の地質、寒冷地における温度応力などの検討条件が従来より厳しい事例が見受けられる。本稿では寒冷地における嵩上げの事例について紹介する。

寒冷地における嵩上げの事例として、国土交通省北海道開発局が現在施工中の新桂沢ダムの事例を示す。重力式コンクリートダムの建設において温度応力の抑制は重要な検討課題であるが、新桂沢ダムでは新設ダム建設時における温度応力に関する一般的な検討事項に加え、図-8に示す課題がある。①「新旧堤体の接合部（以後「接合部」という）に発生する応力集中」は、越冬リフト表面の内部拘束が接合部の隅角部に集中するという短

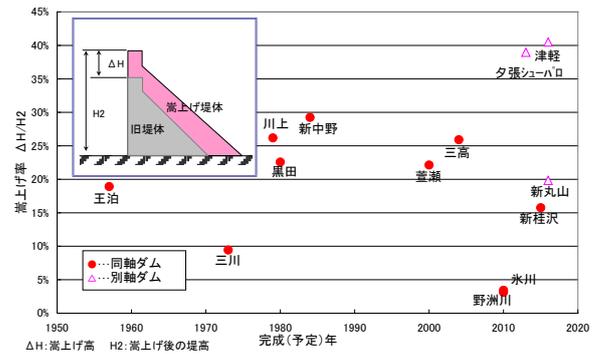
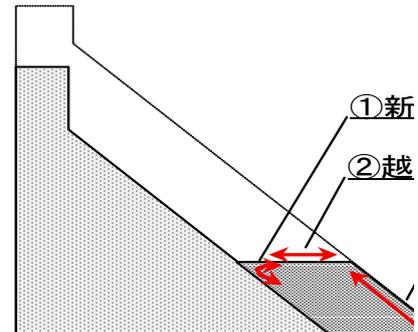


図-7 嵩上げ率の経年分布



- ①新旧堤体の接合部に発生する応力集中
【重力式コンクリートダムの嵩上げ特有の課題・寒冷地の課題】
- ②越冬リフト表面に発生する温度応力
【寒冷地の課題・施工方法に関する課題】
- ③温度降下により堤体下流面に発生する温度応力
【寒冷地の課題】

図-8 寒冷地の重力式コンクリートダムの嵩上げにおける温度応力

期の温度応力問題で、②「越冬リフト表面に発生する温度応力」との複合的な問題である。この箇所にはひび割れが発生すると接合面に沿ってひび割れが伸展し、新旧堤体の一体化を阻害するという問題を引き起こす。そこで北海道開発局では、原因となっている越冬リフトの温度降下の緩和についての検討を実施している。まず、下記のケースについて温度応力解析を実施し、各対策の有効性を確認した。

- <検討ケース>
- Case1：無対策
 - Case2：断熱養生
 - Case3：断熱養生+プレクーリング
 - Case4：断熱養生+パイプクーリング

その結果、以下のような知見を得ている。プレクーリングやパイプクーリングによりコンクリート温度を低下させるのは夏期打設部であり、越冬面から離れている。そのため、越冬面付近での温度勾配の緩和効果がほとんど見られず、越冬面の内部拘束および接合部の外部拘束によるひび割れは低減出来ないことが確認された。一方、断熱養生については外気温による越冬面の温度低下を妨

げるため、温度応力の緩和に対して一定の効果が認められた。しかし、断熱養生のみでは引張応力によるひび割れを抑制するほどの効果は見込めなかったため、越冬コンクリートの表面を加温する方法についての検討を実施した。

越冬コンクリートの加温方法は「越冬面付近を富配合の外部コンクリート配合とする方法」と「コンクリート内に配管し温水を通水する方法」(以下「ウォーミング」という)とし、通水温度を20℃～40℃に、外部コンクリート打設リフトおよび通水リフトを表層から1～3リフトに変化させた検討を行った。その結果、通水温度は40℃とし、外部コンクリート打設リフトおよび通水リフトは表層から1リフト目のみとした場合が最も効果的であることを確認した。さらに、越冬前の最終リフトをハーフリフト(通常の半分のリフト厚とする)で打設し、通水箇所を表層に近付けることで、ウォーミングの効果が高めた場合、通水温度を30℃に下げても上記よりもひび割れの抑制効果が大きいことを確認した。以上のような検討結果を踏まえ、新旧堤体部の接合部の温度応力対策については表-3、図-9のとおりとしている。なお、堤体下流面の温度応力対策についても、同様に養生マットとウォーミングを行うこととしている。図-10に温度応力解析による対策の有無による温度応力の発生状況の違いを示す。図-10より対策を施すことで下流面での引張ひずみを約1/2に、接合部付近の越冬面での引張ひずみを約1/3に抑えることが可能となる。

表-3 新旧堤体接合部の温度応力対策

対策	仕様	概要
養生マットの設置	1.2W/m ² ℃以下	越冬前までに、越冬面、下流面、および旧堤体の越冬面より2リフト上部まで設置する
越冬面の外部コンクリート使用	単位結合材料 C+F=230kg/m ³ C:セメント F:フライアッシュ	越冬リフト(1.5m)を外部配合とする。
越冬リフトのウォーミング	薄肉電線鋼管φ1.0インチ 配管ピッチ 1.5m 通水量20ℓ/min以上 通水温度30℃以上	越冬リフトをハーフリフトで打設し、ハーフリフト間に配管をおこない、温水を通水する。通水期間は越冬リフト打設から、外気温10℃までを目安とする。

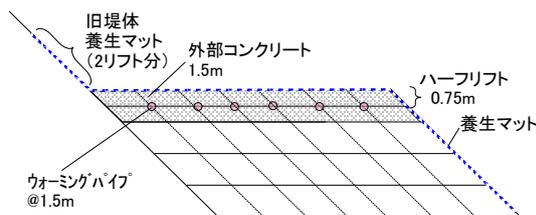


図-9 新旧堤体接合部の温度応力対策の概念

3. おわりに

以上、最近のダムの新規事業におけるダム構

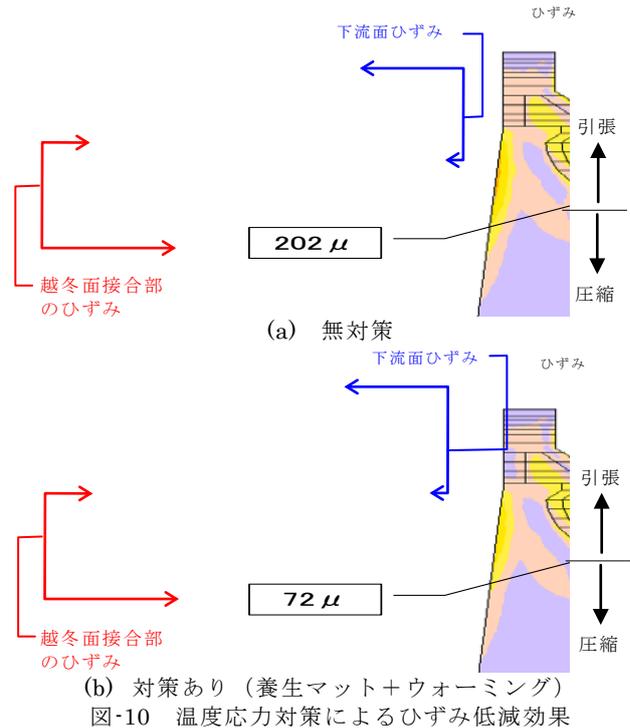


図-10 温度応力対策によるひずみ低減効果

造に関する技術的課題を具体的な事例とともに紹介した。これらの検討成果は再開発事業のみならず新規事業においても活用可能な内容であり、他事業における検討の一助になれば幸いである。

謝 辞

本稿の作成にあたり、国土交通省九州地方整備局および北海道開発局の関係機関より検討資料をお借りした。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) (財)ダム技術センター：多目的ダムの建設 第5巻 第19章コンクリートダムの設計・第28章ダムの再開発、pp.34～35、pp.229～296、2005.6
- 2) 藤沢侃彦、永山功、自閑茂治、小畑伸之：重力ダム放流管埋設ブロックの応力解析、土木研究所資料、第2291号、1985.12
- 3) 津森ジュン、大槻佐伯、柳川雄司：既設アーチダムへの大口径放流管増設検討のための応力解析—天ヶ瀬ダムの例—、ダム技術、No.272、pp.58～67、2009.5

山口嘉一*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム 上席研究員 工博
Dr.Yoshikazu YAMAGUCHI

坂本博紀**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム 研究員
Hiroki SAKAMOTO