



海外大規模水力発電事業におけるRCCダムの合理的な設計・施工およびその実証に関する研究

青坂, 優志

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2023-09-25

(Date of Publication)

2024-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8739号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100485923>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

海外大規模水力発電事業における
RCC ダムの合理的な設計・施工および
その実証に関する研究

2023年7月

神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻

青坂 優志

論文要旨

RCC (Roller-compacted Concrete) は、単位結合材量が少ない超硬練りコンクリートであり、1970年代以降、海外ではコンクリートダム of 合理化打設工法として、RCC工法が採用されるようになった。RCC工法の施工は、超硬練りコンクリートをダンプトラックで運搬・荷卸し、ブルドーザで敷均し、振動ローラによって転圧する方法である。その利点としては、従来のブロック工法や拡張レヤ工法と比較して、同一標高で大量打設かつ高速施工が可能であり、大幅な建設工程の短縮と工事費の削減、ならびに工事の安全性を向上させることができることである。

RCCダムの現状においては、RCC工法を適用した一般的な重力式コンクリートダムの設計・施工の手順は示され、RCCダム技術(設計・施工)は改善されてはいるが、依然として解決すべき課題が残っている。例えば、ダム堤体からの長期的な漏水などであり、それらは、RCCの品質(以下、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質を指す)およびRCCダムの性能(以下、ダムの水密性および耐荷性を指す)の低下に影響を及ぼす可能性がある、しかしながら、これらの課題を解決するための具体的な対策が、事業や当該国の諸事情・条件・環境に合わせて示されていないのが現状である。

次に、海外大規模水力IPP (Independent Power Producer) 事業における課題としては、堤高100 m以上の大規模なRCCダム建設を伴う場合に、競争力のある事業コスト(安価な電気料金)をオフテーカー(電力の買手・取引先)に提供すること、そして、費用リスクおよび工事(完工)リスクの発現を回避することである。そのためには、既往研究や事例にとらわれない、RCCダムの合理的な設計・施工手法の開発が求められている。

また、開発途上国でのRCCダム建設における課題は、材料調達リスク、人的リスク、費用リスクおよび工事(完工)リスクの発現を回避し、RCCの品質およびRCCダムの性能を確保することである。そのためには、事業や当該国の諸事情・条件・環境を考慮に入れ、多国籍・多様な作業員にも適応できる設計・施工手法の整備が求められている。

以上を踏まえ、海外の大規模水力IPP事業および開発途上国でのRCCダム建設では、競争力のある事業コスト(安価な電気料金)を提供すること、上記で示した各種リスクの発現を回避しながら、RCCの品質とRCCダムの性能を確保することが課題である。

そこで、本研究では、安価な再生可能エネルギーの供給と競争力に資するために、ラオス人民共和国のナムニアップ1水力発電事業(以下、NNP1と称す)のRCCダ

ム建設を題材とし、上記課題を解決するための RCC ダムの設計・施工の合理化について検討する。そして、費用リスク、材料調達リスク、工事（完工）リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な設計・施工手法を提案することを目的とする。

なお、本研究の対象範囲は、上述の各種リスクの回避が求められる海外の大規模水力 IPP 事業および開発途上国での堤高 100 m 以上の RCC ダム建設とする。また、依然として未解決の課題が残る、ダム工学およびコンクリート工学に関連する RCC ダムの設計・施工を対象とする。

本研究では、顕在する課題を踏まえ、RCC ダムの設計・施工手法の合理化について検討し、初期湛水以降のダムの挙動を分析・評価により、RCC の品質および RCC ダムの性能を検証する。そして、RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証する。

さらに、本設計・施工手法の提案内容については、水力 IPP 事業、公共事業含めた様々な事業の競争力を高めることができると考えられる。また、様々な事業や当該国の諸事情、条件、環境下に合わせて、提案する設計・施工手法を適材適所に適用することで、顕在する様々なリスクを回避させることができると考えられる。

本論文は、第 1 章～8 章で構成する。

第 1 章では、海外大規模水力発電事業における RCC ダムの合理的な設計・施工およびその実証に関する研究の背景と目的、そして本論文の構成と概要について示した。

第 2 章では、RCC ダムの設計・施工に関する既往研究および現状を調査し、現状把握とともに課題および研究目的を示した。具体的には、RCC ダムの設計（材料、配合、堤体・構造物）と施工（施工手順、施工方法、RCC の打設速度など）および RCC の品質と RCC ダムの性能について示した。

第 3 章では、電界放出型電子プローブマイクロアナライザ（FE-EPMA）などの元素・材料分析装置によるフライアッシュ（FA）粒子やコンクリート内部の観察により、Class C-FA などの構成物質が RCC の温度上昇および強度発現に与える影響を分析・評価した。そして、FE-EPMA などの分析装置の有用性を示し、反応メカニズムの妥当性を実証するとともに、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示した。

第 4 章では、超富配合 RCC（SHCRCC）が持つワーカビリティの裕度を確保しつつ、結合材の石粉代替による配合設計を試行し、建設コストを削減する手法について検討した。そして、ワーカビリティの裕度、打継目の強度および水密性などの要求品質を確保した石粉代替による SHCRCC の設計手法を提案するとともに、そのコスト削減および RCC の打設速度の効果について示した。

第 5 章では、重力式コンクリートダムの基礎に連続性のある弱部に対して、ダム

の滑動安全性を確保するために、くさび解析および FEM 解析を用いて、ダム堤体のせん断キーの安定性を分析・評価した。また、ダム堤体への揚圧力を低減または制御するために、有限差分法 (FDM) による浸透流解析を用いて、堤内排水孔とダム堤体への揚圧力の低減率の関係を分析・評価した。そして、経済性に資する合理的なダム堤体のせん断キーおよび堤内排水孔の配孔の設計手法を提案した。

第 6 章では、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するために、RCC ダム施工における施工計画 (施工方法, 施工手順書) の改善および RCC ダムの高速施工を実現するための施工手法について検討した。そして、各種リスクを軽減することができる RCC ダムの合理的な施工手法を提案した。

第 7 章では、NNP1 の RCC ダムの初期湛水以降におけるダムの挙動を通じて、RCC の品質および RCC ダムの性能を検証し、第 3 章から第 6 章で示した RCC ダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を実証した。

第 8 章では、各章で得られた研究成果を結論として要約するとともに、提言を示した。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 RCC ダムの現状.....	1
1.1.2 海外大規模水力 IPP 事業における課題.....	4
1.1.3 開発途上国での RCC ダム建設における課題.....	5
1.2 研究の目的	6
1.3 本論文の構成	7
1.4 本論文の概要	9
第2章 RCC ダムの設計・施工に関する既往研究	11
2.1 はじめに	11
2.2 Class C フライアッシュに関する既往研究	12
2.2.1 フライアッシュ利用の現状	12
2.2.2 フライアッシュを混和材としたコンクリートの特性	14
2.2.3 フライアッシュ, コンクリートなどの元素・材料分析装置	15
2.2.4 まとめ	17
2.3 RCC 配合に関する既往研究	18
2.3.1 RCC 配合の歴史	18
2.3.2 RCC の標準配合	18
2.3.3 超富配合 RCC	19
2.3.4 石粉が RCC に与える影響	23
2.3.5 まとめ	24
2.4 RCC ダムの堤体・構造物に関する既往研究	25
2.4.1 RCC ダムの堤体・構造物	25
2.4.2 ダム基礎の弱層対策	26
2.4.3 くさび解析	27
2.4.4 まとめ	28
2.4.5 堤内排水孔の配孔	29
2.4.6 2次元有限差分法による浸透流解析	31
2.4.7 現場透水試験	32
2.4.8 まとめ	33
2.5 RCC ダム施工に関する現状	34

2.5.1	RCC 工法の概要	34
2.5.2	RCC ダムの施工	35
2.5.3	RCC ダムの施工速度	42
2.5.4	まとめ	44
2.6	RCC の品質と RCC ダムの性能	45
2.6.1	概要	45
2.6.2	まとめ	48
第3章	Class C フライアッシュの RCC ダムへの適用性	53
3.1	NNP1 におけるフライアッシュの効果	53
3.1.1	RCC 配合の使用材料	53
3.1.2	コンクリートの温度上昇	57
3.1.3	コンクリートの強度発現	59
3.1.4	Class C フライアッシュを適用することによるコスト削減効果	61
3.2	コンクリート中でのフライアッシュの反応	61
3.2.1	フライアッシュ粒子の形態と化学組成・元素濃度分布	62
3.2.2	コンクリート中での反応状態	64
3.3	Class C フライアッシュコンクリートの反応メカニズムの実証	66
3.3.1	水和反応とその抑制	66
3.3.2	ポゾラン反応の促進	68
3.4	まとめ	69
第4章	石粉代替による超富配合 RCC の設計	73
4.1	石粉代替による配合設計	73
4.1.1	RCC 配合の使用材料	73
4.1.2	石粉代替のプロセス	76
4.1.3	ペースト・モルタル容積の関係	78
4.1.4	α 値と β 値の関係	79
4.1.5	石粉による強度と水密性への効果	80
4.2	石粉代替による超富配合 RCC の設計手法	83
4.2.1	細骨材に含む石粉率の向上	83
4.2.2	ダムのゾーニング	85
4.2.3	超富配合 RCC 設計の実践フロー	85
4.2.4	石粉代替の超富配合 RCC によるコスト削減効果	87
4.3	まとめ	88

第5章 RCC ダムの合理的な堤体・構造物の設計	91
5.1 ダム堤体のせん断キー設計	91
5.1.1 NNP1 ダムサイトの地質と弱層	91
5.1.2 せん断キーによる対策	94
5.1.3 くさび解析によるせん断キー設計	95
5.1.4 2次元静的弾塑性 FEM 解析	96
5.1.5 2次元 FEM 解析によるせん断キーの効果	98
5.1.6 配置の違いによるせん断キーの効果	105
5.1.7 まとめ	110
5.2 堤内排水孔の配孔設計	110
5.2.1 配孔設計のための平面 2次元 FDM 解析	111
5.2.2 揚圧力低減効果検証のための鉛直 2次元 FDM 解析	112
5.2.3 コンクリートの透水係数の違いによる間隙水圧分布挙動の検討	115
5.2.4 堤内排水孔の配孔	116
5.2.5 堤内排水孔の配孔変更によるコスト削減効果	116
5.2.6 まとめ	117
第6章 RCC ダムの性能確保と高速施工を実現できる RCC 施工	120
6.1 はじめに	120
6.2 RCC ダム施工の施工方法	121
6.2.1 試験施工	121
6.2.2 GE-RCC 施工	125
6.2.3 フェザーエッジ処理	127
6.2.4 GPS 装置による転圧管理	128
6.2.5 散水養生装置	129
6.2.6 堤内排水孔の削孔	130
6.3 RCC ダム施工の施工手順書	131
6.4 RCC ダムの高速施工を実現するための施工手法	136
6.4.1 材料調達	136
6.4.2 仮設備の配置	137
6.4.3 スロープレイヤー工法の最適化	143
6.4.4 化学混和剤の添加量	144
6.4.5 RCC 打設における安全確保	145
6.4.6 ダムのゾーニングにおける施工手順	147
6.4.7 組織体制	147

6.4.8	RCC ダム施工の生産性効率	148
6.5	まとめ	149
第7章	RCC ダムの設計・施工に関する実証	151
7.1	はじめに	151
7.2	RCC ダムの水密性に関する検証	152
7.2.1	ダム堤体の現場透水試験	152
7.2.2	X線 CT 画像解析によるコンクリートコアの観察	155
7.2.3	ダム堤体の漏水量	157
7.3	RCC ダムの耐荷性に関する検証	159
7.3.1	RCC の VB 値, 空気量, 温度	159
7.3.2	RCC の締固め率, 密度	161
7.3.3	ダム堤体から採取したコンクリートコアの観察	162
7.3.4	RCC 供試体とコンクリートコア供試体の強度	164
7.3.5	ダム堤体の RCC 内部温度とひずみ量	166
7.3.6	ダムのノーマル・リバーズプラムラインの挙動	169
7.3.7	X線 CT 画像解析によるダム基礎のボーリングコアの弱層観察	170
7.4	まとめ	172
第8章	まとめ	174
8.1	結論	174
8.2	提言	179
謝辞	183

用語の定義

RCC	Roller-compacted Concrete
GE-RCC	Grout-enriched RCC
HCRCC	High Cementitious RCC : 富配合 RCC
MCRCC	Medium Cementitious RCC : 中間配合 RCC
LCRCC	Low Cementitious RCC : 貧配合 RCC
BOT	Build, Operate, Transfer : 建設・運営・譲渡
IPP	Independent Power Producer : 独立発電事業者
FA	Fly ash : フライアッシュ
NNP1	Nam Ngiep 1 Power Hydropower Project : ナムニアップ1水力発電プロジェクト
SHCRCC	Super High Cementitious RCC : 超富配合 RCC
FE-EPMA	Field Emission-Electron Probe Micro Analyzer : 電界放出型電子プローブマイクロアナライザ
FEM	Finite Element Method : 有限要素法
JOGMEC	Japan Organization for Metals and Energy Security : 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構
IEA	International Energy Agency : 国際エネルギー機関
ICOLD	International Commission on Large Dams : 国際大ダム会議
USACE	US Army Corps of Engineer
SEM	Scanning Electron Microscope : 走査型電子顕微鏡
FE-SEM	Field Emission-SEM : 電界放出型走査型電子顕微鏡
XRF	X-ray Fluorescence : 蛍光 X 線分析法
XRD	X-ray Diffraction : X 線回析法
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : エネルギー分散型 X 線検出器

EPMA	Electron Probe Micro Analyzer ：電子プローブマイクロアナライザ
RCD	Roller Compacted Dam-Concrete
USBR	US Department of the Interior / Bureau of Reclamation
FDM	Finite Difference Method : 有限差分法
OPC	Ordinary Portland Cement : 普通ポルトランドセメント
MMFA	Fly ash at Mae Moh Coal-fired Power Plant
SP	Stone Powder : 石粉
OBE	Operational Basis Earthquake : 運転基準地震
LRCC	Leveling RCC
O&M	Operation and Maintenance : 運転・保守
EAP	Emergency Action Plan : 緊急行動計画
BIM	Building Information Modeling
CIM	Construction Information Modeling/Management

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 RCC ダムの現状^{1~7)}

RCC は、単位結合材量が少ない超硬練りコンクリートである。海外では、古くは1920年代以降、道路や空港の舗装に利用されてきたが、1970年代以降はコンクリートダムの合理化打設工法として、RCC工法が採用されるようになった。

RCC工法の施工は、図1-1に示すように、超硬練りコンクリートをダンプトラックで運搬・荷卸し、ブルドーザで敷均し、振動ローラによって転圧する工法である。一方、従来のブロック工法や拡張レヤ工法は、ダム堤体の縦継目および横継目により複数のブロックに分割し、コンクリートを打設する工法である。



(1) ベルトコンベアによる RCC 運搬・ダンプトラックへの RCC 投下



(2) ダンプトラックによる RCC の運搬・荷卸し



(3) ブルドーザによる RCC の敷均し



(4) 振動ローラによる RCC の転圧

図 1-1 RCC 工法による施工

RCC工法の利点は、従来のブロック工法や拡張レヤ工法と比較して、同一標高で大量打設かつ高速施工が可能であり、大幅な建設工程の短縮と工事費の削減、ならびに工事の安全性を向上させることができることである。

図1-2に、RCC工法を含む一般的な重力式コンクリートダム設計・施工の手順^{2,8)}を示す。まず、主要な設計項目は、図中の1から6に示す基本計画、配合、コンクリートの特性、基礎岩盤の特性、ダム堤体の安定性（静的解析と動的解析含む）、コンクリートの温度管理、そしてダム堤体の構造物である。次に、主要な施工項目は、図中の7に示す施工計画（施工仕様・方法など）および仮設備である。最後に、図中の8に示すRCCの品質管理およびRCCダムの性能評価となる。各項目については既に定式化が進められているが、後述する通り、依然として解決すべき課題が存在していると考えられる。

例えば、図中の下線で示す通り、設計における課題としては、混和材、配合、ダムの堤体の安定性（滑動）および堤内排水孔などの合理化が重要であると考えられる。また、施工における課題としては、施工計画（施工方法など）および仮設備などの合理化が重要であると考えられる。

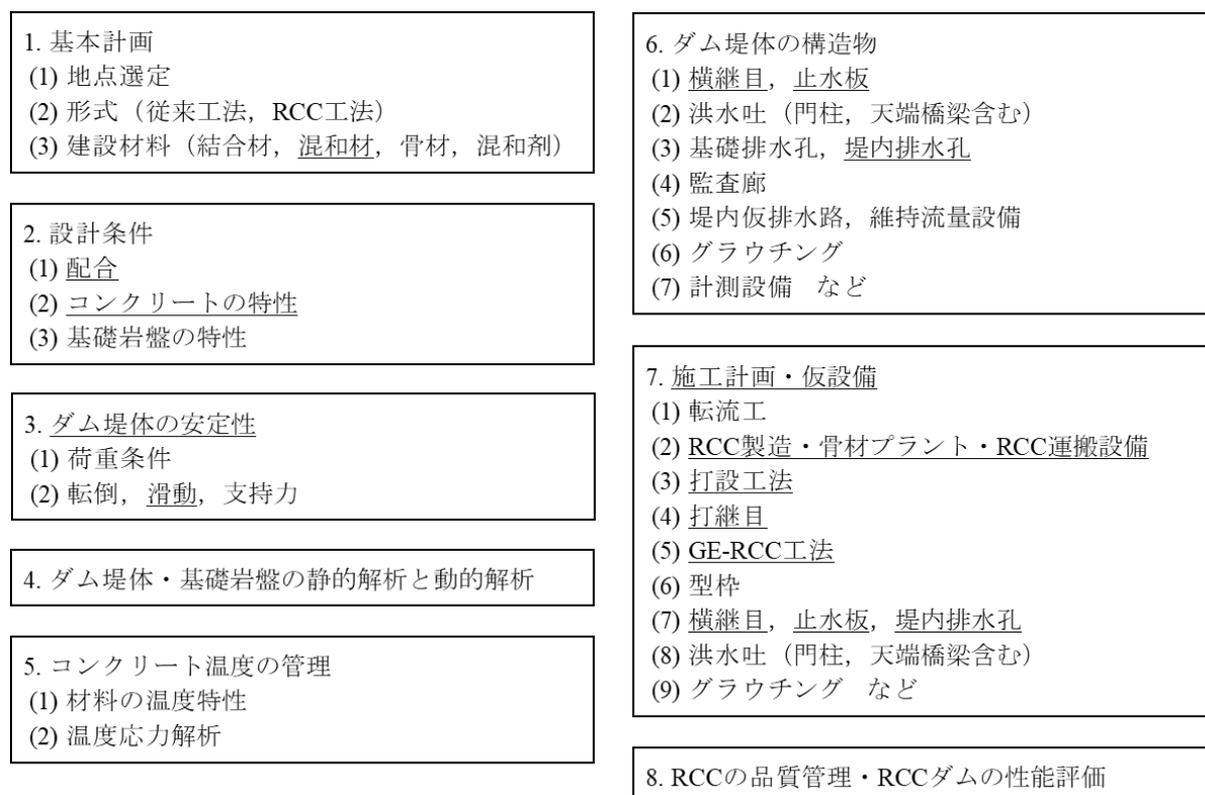


図1-2 一般的な重力式コンクリートダム設計・施工の手順

RCC ダムの堤体・構造物の特徴としては、水密性や耐久性を確保するために外部コンクリートに GE-RCC などを適用することや、ダム堤体内に作用する揚圧力を低減させるために堤内排水孔を設置することである。

RCC 工法の施工の特徴としては、ワーカビリティを確保するために、最大骨材寸法が 50 mm 程度と小さく、層厚が 30 cm 程度と薄いことである。また、RCC 打設の高速施工を可能とするために、打継目のコンクリートの凝結時間は始発時間まで (Hot joint) とし、無処理で連続打設を行うことである。

次に、RCC 配合の特徴としては、ワーカビリティや強度などの要求品質に応じて、富配合 RCC (HCRCC, $C+F=150 \text{ kg/m}^3$ 以上, C:セメント, F:フライアッシュ), 中間配合 RCC (MCRCC, $C+F=150\sim 100 \text{ kg/m}^3$) および貧配合 RCC (LCRCC, $C+F=100 \text{ kg/m}^3$ 未満) に分類されていることである。なお、本論文では、 $C+F=220 \text{ kg/m}^3$ 以上を超富配合 RCC (SHCRCC) と称する。

1970 年代以降、経済性を重視して LCRCC や MCRCC を採用した RCC ダムでは、コンクリートのひび割れやダム堤体からの漏水の発生が報告されている。これらの要因については、横継目を省き RCC の打設速度を優先した結果、内部 (RCC) および外部 (ダム基礎岩盤) 拘束による温度応力によりひび割れが発生したと考えられる。また、ワーカビリティが低下したことにより、打継目の強度および水密性が低下したこと、さらに、RCC の打設速度を優先することで、打継目処理が不十分などの施工不良が生じたことで、ダム堤体からの漏水につながったと考えられる。

これらの対策としては、ダム堤体へのグラウト材の充填やダム上流面へのジオメンブレンの設置が実施されている。しかし、これらは水中または高水圧環境下での作業となるため、止水が困難で、大幅なコスト増額が懸念される。また、長期的な漏水はコンクリートの劣化につながり、特に打継目の強度低下や漏水量の増加、さらには揚圧力がダム堤体内へ作用するなど、RCC の品質 (以下、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質を指す) および RCC ダムの性能 (以下、ダムの水密性および耐荷性を指す) の低下に影響を及ぼす可能性がある。

これらの課題への解決策として、経済性への重視を緩和し、MCRCC や HCRCC への富配合化によるワーカビリティの改善や、横継目の間隔を規制、ダム上流面への GE-RCC の適用や堤内排水孔の設置などによる堤体・構造物の改善が実施されてきた。また、RCC の打込み温度やリフトスケジュールを規制するための温度応力解析による設計や施工の改善が実施されてきた。

しかしながら、欧米や豪州の RCC 専門家たちは、2000 年以降に建設された一部の比較的新しい RCC ダムでも、ダム堤体 (打継目) からの漏水などが依然として発生していると指摘している⁹⁾。これらの課題は、事業や当該国の諸事情・条件・環境に起因する部分も含まれており、その解決策はまだ示されていない。

以上より、RCC ダムの現状としては、RCC 工法を適用した一般的な重力式コンクリートダムの設計・施工の手順は示され、RCC ダム技術（設計・施工）は改善されてはいるが、依然として解決すべき課題が残っている。例えば、ダム堤体（打継目）からの長期的な漏水などであり、それらは、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある、しかしながら、これらの課題を解決するための具体的な対策が、事業や当該国の諸事情・条件・環境に合わせて示されていないのが現状である。

1.1.2 海外大規模水力 IPP 事業における課題

1990 年代以降、特に東南アジア諸国を中心とした豊富な包蔵水力を有する経済的に脆弱な開発途上国では、外貨獲得のために RCC ダムを有する大規模水力 IPP 事業が開発されている。これらの事業は、BOT（建設・運営・譲渡）方式を採用した民間企業による水力 IPP 事業で推進されている。欧米、豪州、中国など多くの IPP 事業者が市場に参入し、厳しい国際競争が繰り広げられている。この競争環境下で、水力 IPP 事業を展開するためには、競争力のある事業コスト（安価な電気料金）をオフテーカー（電力の買手・取引者）に提供する必要がある^{10,11)}。

しかし、海外大規模水力 IPP 事業においては、様々なリスクが存在する。例えば、堤高 100 m 以上を有する大規模な RCC ダムの欠陥による第三者被害は、重大な経済的影響を及ぼす可能性がある。また、水力 IPP 事業は、自然由来の水文・地質リスクの発現の可能性が高く、地質リスクが発現すると、掘削やコンクリート量が増大し、大幅な工程遅延および工事費の増額により事業の経済性が大きく低下する可能性がある^{12,13)}。これらのリスクを回避するためには、RCC ダムの合理的な設計・施工手法の開発が、水力 IPP 事業の推進に資すると考えられる。

以上を踏まえ、海外大規模水力 IPP 事業における課題としては、堤高 100 m 以上の大規模な RCC ダム建設を伴う場合、競争力のある事業コスト（安価な電気料金）をオフテーカー（電力の買手・取引者）に提供すること、そして、費用リスクおよび工事（完工）リスクの発現を回避することである。そのためには、既往研究や事例にとらわれない、RCC ダムの合理的な設計・施工手法の開発が求められている。

1.1.3 開発途上国での RCC ダム建設における課題

海外の大規模水力 IPP 事業は、未開発地点が数多く残る開発途上国での事業が多くなるが、以下に示すリスクが発現する可能性があり、それらのリスク発現を回避する必要がある。

RCC において、結合材をフライアッシュ (FA) に置換えることは、コンクリートの温度応力の低減やアルカリ骨材反応の抑制に寄与する。また、石炭火力発電所から産出される産業廃棄物である FA の有効利用は、エネルギーセキュリティや環境負荷の低減に寄与することになる¹⁴⁾。しかし、開発途上国では、FA の品質と安定供給を確保することが困難な場合があり、材料調達リスクが存在する。そこで、一般的に適用されない低品位石炭から産出される Class C-FA の RCC ダムへの適用性を検討することで、材料選択の自由度を広げ、材料調達リスクを軽減することができると考えられる。

開発途上国での大規模な RCC ダムの建設は、豊富な人材を有することから、2,000～3,000 人以上の多国籍・多様な地域性を持つ作業員を投入する人海戦術で行われている。しかし、これらの作業員の技術力には、大きなばらつきがあり、それが人的リスクとなっている。例えば、打継目処理の施工不良が生じると、打継目の強度および水密性の低下により、ダム堤体からの漏水につながる可能性がある。これらは工程遅延などの工事（完工）リスクや、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下につながる可能性がある。したがって、全作業員の技術力を一定の水準に確保（統一）するため、多国籍・多様な作業員にも適応できる設計・施工手法の整備が求められている。

上記に示す人的リスクおよび工事（完工）リスクを軽減するため、RCC 専門家たちは、Construction friendly（優れた施工性）となる HCRCC を推奨している。しかしながら、費用に余裕がない開発途上国では、結合材を多く混和できない事情もあり、工事費を削減するなどの費用リスクの回避も必要である。そのためには、費用が不足するような条件下でも、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保しつつ、事業を推進するための解決案が求められている。

以上を踏まえ、開発途上国での RCC ダム建設における課題は、材料調達リスク、人的リスク、費用リスクおよび工事（完工）リスクの発現を回避し、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保することである。そのためには、事業や当該国の諸事情・条件・環境を考慮し、多国籍・多様な作業員にも適応できる設計・施工手法の整備が求められている。

1.2 研究の目的

海外の大規模水力 IPP 事業および開発途上国での RCC ダム建設では、競争力のある事業コスト（安価な電気料金）を提供すること、上記で示した各種リスクの発現を回避しながら、RCC の品質と RCC ダムの性能を確保することが課題である。

そこで、本研究では、安価な再生可能エネルギーの供給と競争力に資するために、ラオス人民共和国（Loa People's Democratic Republic, 以下ラオスと称す）のナムニアップ1水力発電事業（以下、NNP1 と称す）の RCC ダム建設を題材とし、上記課題を解決するための RCC ダムの設計・施工の合理化について検討する。そして、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な設計・施工手法を提案することを目的とする。

なお、本研究の対象範囲は、上述の各種リスクの回避が求められる海外の大規模水力 IPP 事業および開発途上国での堤高 100 m 以上の RCC ダム建設とする。また、依然として未解決の課題が残る、ダム工学およびコンクリート工学に関連する RCC ダムの設計・施工を対象とする。

本研究では、図 1-3 に示す手順に従い、顕在する課題を踏まえ、RCC ダムの設計・施工手法の合理化について検討し、初期湛水以降のダムの挙動を分析・評価することで、RCC の品質および RCC ダムの性能を検証する。そして、RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証する。具体的には、以下の通りである。

RCC ダムの材料設計では、Class C-FA の反応メカニズムを解明し、RCC ダムへの適用性を示すことで、主に材料調達リスクを軽減する。また、配合設計では、SHCRCC のワーカビリティの裕度を解明し、経済的な石粉代替の SHCRCC の設計手法を提案することで、主に費用リスクを軽減する。さらに、堤体・構造物設計では、合理的なダム堤体のせん断キーおよび堤内排水孔の配孔の設計を提案することで、主に費用リスクおよび工事（完工）リスクを軽減する。

RCC ダムの施工では、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するための施工計画（施工方法や施工手順書など）の改善および高速施工を実現するための施工手法を提案することで、主に工事（完工）リスクおよび人的リスクを軽減する。

最後に、初期湛水以降、ダムの挙動を分析・評価することで、ダムの水密性および耐荷性について検証し、RCC ダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を実証する。

なお、本設計・施工手法の提案内容については、水力 IPP 事業、公共事業含めた様々な事業の競争力を高めることを目指す。また、様々な事業や当該国の諸事情、条件、環境下に合わせて、提案する設計・施工手法を適材適所に適用することで、顕在する様々なリスクを軽減させることを目指すものとする。

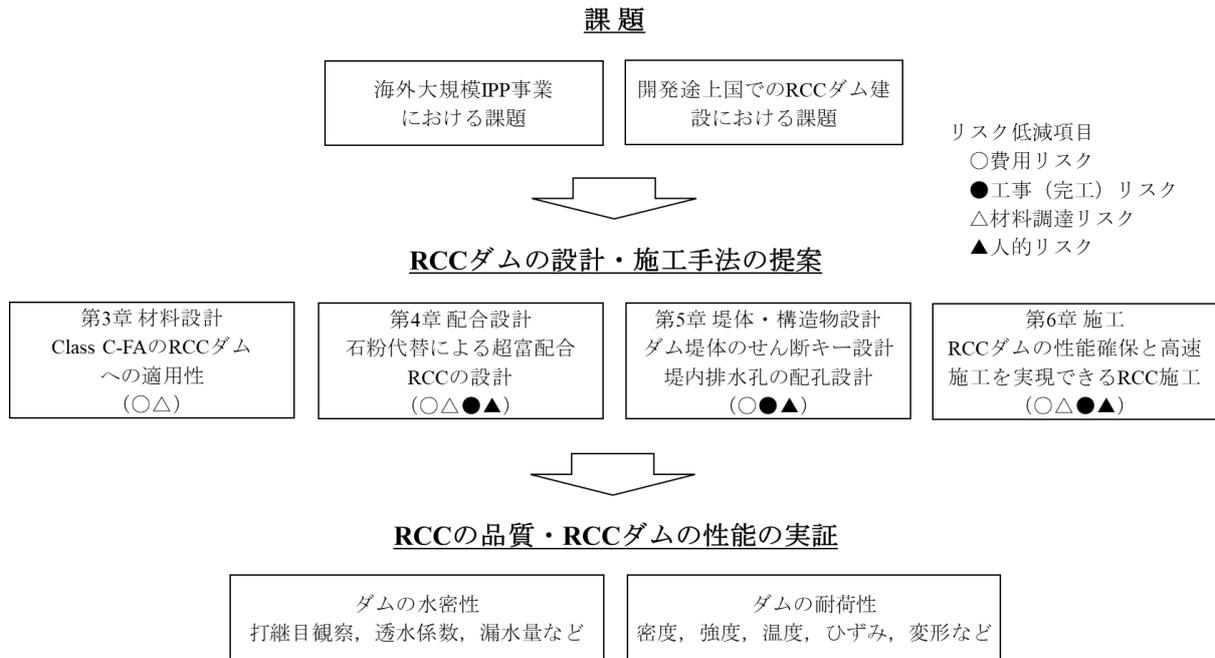


図 1-3 RCC の品質および RCC ダムの性能実証までの手順

1.3 本論文の構成

本論文は，本章を含め図 1-4 に示す 8 つの章で構成されている．また，本研究の対象となる内容を構成図として，図 1-5 に示す．

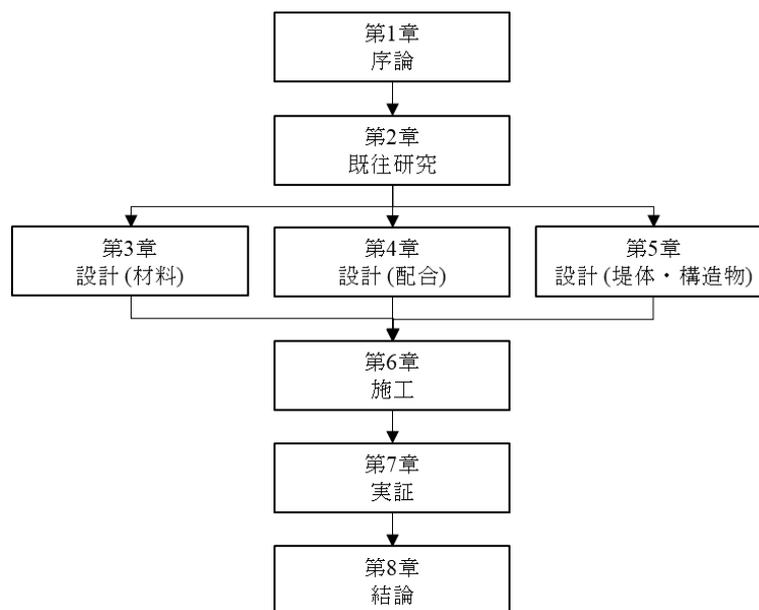


図 1-4 論文の構成

第3章 Class C-FAのRCCダムへの適用性（材料設計）
第4章 石粉代替による超富配合RCCの設計（配合設計）

第5章 堤内排水孔の配孔設計（堤体・構造物設計）



第5章 ダム堤体のせん断キー設計（堤体・構造物設計）
第6章 RCCダムの性能確保と高速施工を実現できるRCC施工（施工）

(1) ダム建設時の主ダム（2016年）



第7章 RCCダムの設計・施工に関する実証
（ダムの水密性・耐荷性）

(2) 初期湛時の主ダム（2019年）

図 1-5 本研究の対象となる構成図

1.4 本論文の概要

各章の概要を以下に示す.

第1章では, 海外大規模水力発電事業における RCC ダムの合理的な設計・施工およびその実証に関する研究の背景と目的, そして本論文の構成と概要について示す.

第2章では, RCC ダムの設計・施工に関する既往研究および現状を調査し, 現状把握とともに, 課題および研究目的を示す. 具体的には, RCC ダムの設計 (材料, 配合, 堤体・構造物) と施工 (施工手順, 施工方法, RCC の打設速度など) および RCC の品質と RCC ダムの性能について示す.

第3章では, FE-EPMA などの元素・材料分析装置による FA 粒子やコンクリート内部の観察により, Class C-FA などの構成物質が RCC の温度上昇および強度発現に与える影響を分析・評価する. そして, FE-EPMA などの分析装置の有用性を示し, 反応メカニズムの妥当性を実証するとともに, Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示す.

第4章では, SHCRCC が持つワーカビリティの裕度を確保しつつ, 結合材の石粉代替による配合設計を試行し, 建設コストを削減する手法について検討する. そして, ワーカビリティの裕度, 打継目の強度および水密性などの要求品質を確保した石粉代替による SHCRCC の設計手法を提案するとともに, そのコスト削減および RCC の打設速度の効果について示す.

第5章では, 重力式コンクリートダムの基礎に連続性のある弱部に対して, ダムの滑動安全性を確保するために, くさび解析および FEM 解析を用いて, ダム堤体のせん断キーの安定性を分析・評価する. また, ダム堤体への揚圧力を低減または制御するために, 有限差分法 (FDM) による浸透流解析を用いて, 堤内排水孔とダム堤体への揚圧力の低減率の関係を分析・評価する. そして, 経済性に資する合理的なダム堤体のせん断キーおよび堤内排水孔の配孔の設計手法を提案する.

第6章では, RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するために, RCC ダム施工における施工計画 (施工方法, 施工手順書) の改善および RCC ダムの高速施工を実現するための施工手法について検討するものとする. そして, 各種リスクを軽減することができる RCC ダムの合理的な施工手法を提案する.

第7章では, NNP1 の RCC ダムの初期湛水以降におけるダムの挙動を通じて, RCC の品質および RCC ダムの性能を検証し, **第3章**から**第6章**で示す RCC ダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を実証する.

第8章では, 各章で得られた研究成果を結論として要約するとともに, 提言を示す.

参考文献

- 1) International Commission on Large Dams: Roller-Compacted Concrete Dam (Bulletin 177), pp.1-143, 2020
- 2) US Army Corps of Engineers: Roller-Compacted Concrete, Engineering and Design, 77pp., 2006
- 3) 坂本忠彦, 松本徳久: 最近の米国の RCC 技術, ダム技術, No.191, pp.37-44, 2002
- 4) 松本徳久: ダム技術一洋の東西, ダム技術, No.211, pp.3-21, 2004
- 5) 舟川勲: 海外における RCC ダムの現状, コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.51-55, 2000
- 6) 荒井治: 「RCC ダムの現状技術水準」とその考察, ダム技術, No.210, pp.8-20, 2004
- 7) 永山功, 自閑茂治: 「第4回 RCC ダムに関する国際シンポジウム」報告, 大ダム, No.187, pp.98-117, 2004
- 8) US Army Corps of Engineers: Gravity Dam Design, Engineering and Design, 88pp., 1995
- 9) RCC 専門家 (Dr. Ole-John Berthelsen, Dr. Marco Conrad, Mr. Forbs BRIAN, Mr. Bassam EGILATN) からの聞取聴取, 2015
- 10) 矢吹信喜: 発展途上国におけるプロジェクトファイナンスによる水力 IPP に関する一考察, 建設マネジメント研究論文集, Vol.820, pp.93-100, 2000
- 11) 筒井勝治, 村上嘉謙, 喜多伸明, 富岡健一: 東南アジアにおける水力 IPP プロジェクトのリスクマネジメント～ラオス国ナムニアップ1プロジェクトにおける水文・地質・移転リスク～, 土木学会論文集, Vol.76, No.1, pp.26-42, 2020
- 12) SEOKA Tadahiko, AOSAKA Yushi, YOSHIZU Yoichi, TABUCHI Takahisa: Evaluation of the Dam Geology and Geological Risk at the Nam Ngiep 1 Hydropower Project, Symposium Knowledge Based Dam Engineering, 26th Congress of International Commission on Large Dams 2018, 21pp., 2018
- 13) 瀬岡正彦, 青坂優志, 吉津洋一, 田渕貴久: ラオス国ナムニアップ1水力発電所建設 (BOT 事業) におけるダム地質評価および地質リスクについて, 日本大ダム会議, 大ダム, No.246, 2019
- 14) ロマン・ジスラー: 東南アジアにおけるエネルギー転換 石炭から自然エネルギーへ, 自然エネルギー財団, 60pp., 2019

第2章 RCC ダムの設計・施工に関する既往研究

2.1 はじめに

本章では、RCC ダムの材料設計（Class C-FA）、配合設計（SHCRCC）、堤体・構造物設計（ダム堤体のせん断キー、堤内排水孔）、施工（施工手順、施工方法、RCC ダムの施工速度など）、RCC の品質および RCC ダムの性能に関する既往研究および現状について示す。

本研究の題材とする NNP1 は、関西電力とタイ電力公社、ラオス国営投資会社の出資により、ラオスのナムニアップ川に2つのダムと発電所（それぞれ主ダム・主発電所と逆調整ダム・逆調整発電所）を建設し、計 29 万 kW の電力をタイ王国（以下タイと称す）とラオス国内に売電する IPP 事業である（図 2-1、図 2-2）。2013 年 8 月にラオス政府と事業許可書を締結、2019 年 9 月に商用運転を開始しており、27 年間の運転後にラオス政府に設備を無償譲渡することになっている。

NNP1 の主ダムは^{1,2)}、総貯水容量が約 22 億 m³となる堤高 167 m、堤頂長 535 m、堤体積 242 万 m³の重力式コンクリートダムで、打設工法は RCC 工法を採用し、236 万 m³の RCC を打設した。また、主ダムに加え、主ダムの上流 2 次仮締切りダム、逆調整ダムの両岸部においても RCC 工法を採用した。



図 2-1 NNP1 の位置図

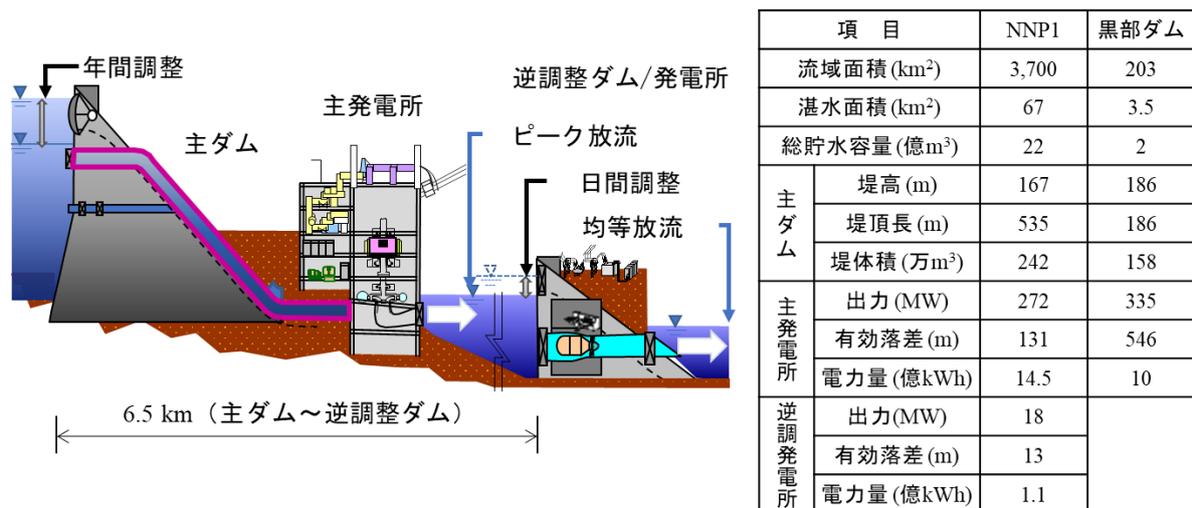


図 2-2 NNP1 の概要

2.2 Class C フライアッシュに関する既往研究

2.2.1 フライアッシュ利用の現状

一般的に海外産の FA は、ASTM C618³⁾によって $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有率により Class F と Class C の 2 種類に分類される。ここで、前者はそれらの含有率が 70%以上、後者は 70%未満 50%以上である。通常、前者は無煙炭または瀝青炭を、後者は瀝青炭、亜瀝青炭または褐炭を石炭火力発電所で燃焼した場合に産出される副産物である。

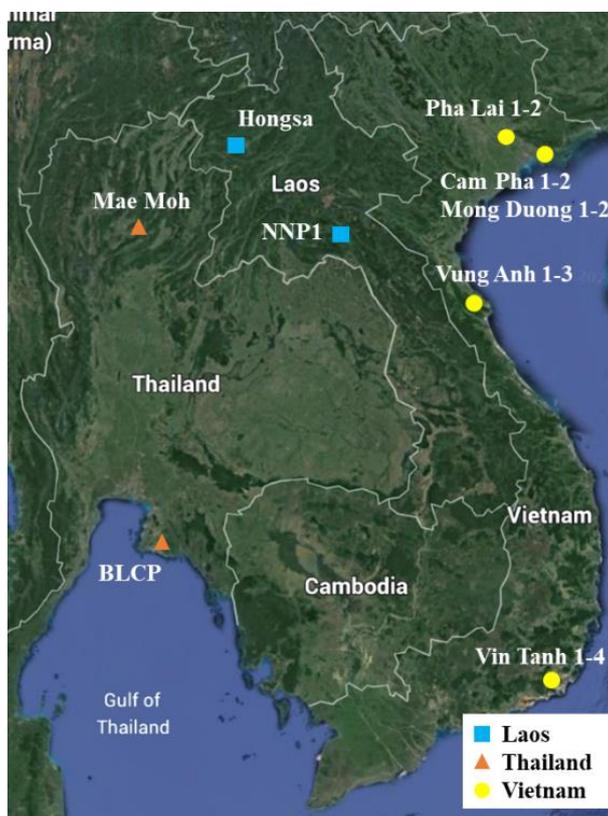
独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) による報告⁴⁾では、2018 年末時点で確認された世界の石炭埋蔵量は 1 兆 ton であり、2010 年以降の世界の生産量は、年間 70~80 億 ton を推移している (国際エネルギー機関 (IEA) より引用)。また、2018 年から 2040 年までの石炭の需要量 (公表政策シナリオ) は、世界的に 3%程度の減少である。一方、地域別でみるとアジア太平洋 (中国、インド、ASEAN など) は、急激な経済成長に伴い 8~9%の増加が見込まれている。

JOGMEC⁵⁾に示されている世界エネルギー統計レビューの報告では、2017 年時点の世界の石炭可採埋蔵量は、無煙炭と瀝青炭が 69%、亜瀝青炭と褐炭が 31%である。また、エネルギー総合工学研究所の報告⁶⁾では、2040 年までの石炭火力発電所の需要は、世界的には 0.4%と微増であるが、インドや東南アジアでは急激な経済成長に伴い 3~5%の増加率が見込まれている。

また、褐炭を始めとする石炭の有効利用は、世界的な脱炭素化への潮流とは逆行することになる点にも留意が必要である。その対策として、石炭火力発電所の高効

率化・低炭素化以外にも褐炭などの低品位石炭を利用した水素製造などの技術導入が検討されている。

ラオスとその周辺のタイとベトナム社会主義共和国（以下ベトナムと称す）の主な大型火力発電所の位置および石炭の産地について、図 2-3 に示す。



(備考)

ラオス : Hongsai (1,878 MW), Brown coal (D)

タイ : Mae Moh (2,200 MW), Brown coal (D), BLCP (1,434 MW), Bituminous coal (I)

ベトナム : Pha Lai 1-2 (1,040 MW), Anthracite (D), Cam Pha 1-2 (1,120 MW), Brown coal (D), Mong Duong 1-2 (2,320 MW), Anthracite (D), Vung Anh 1-3 (4,920 MW), Anthracite (D), Vin Tanh 1-4 (6,225 MW), Anthracite (D)

ここで、D: 国産炭, I: 輸入炭である。

図 2-3 ラオスとその周辺国の火力発電所

JOGMEC の報告⁷⁾によれば、石炭の埋蔵量と年間消費量は、タイで 34 億 ton と 2,583 万 ton, ベトナムで 26 億 ton と 3,832 万 ton である。2018 年時点での石炭火力の発電量は、全体発電構成のうちタイは約 7 地点で約 2 割弱, ベトナムは約 29 地点で約 4 割となる。特にベトナムは、今後の石炭火力の新增設計画が多い。石炭の

種類は、タイでは国産の褐炭または、輸入した無煙炭や瀝青炭の利用が多い。ベトナムでは、国内炭と輸入炭の比率はおよそ半分ずつで、無煙炭、瀝青炭および亜瀝青炭が利用されている。

また、HONGSA Power の報告⁸⁾によれば、ラオスの石炭は、褐炭と無煙炭を合わせて埋蔵量は約 6 億 ton であり、その 9 割が褐炭であるが、生産されるのは Class C-FA と Class F-FA の両方である。石炭の種類によって、FA の種類にばらつきがある。褐炭を主とする Hongsa 地域の埋蔵量は、約 5 億 ton であり、年間 1,400 万 ton が発電のために供給されている。

Dr. Tangtermsirikul⁹⁾によれば、FA は石炭火力発電所で産出される副産物であり、コストの低減、コンクリートの品質の向上、周辺環境との調和を目的として様々な分野で使用されている。例えば、タイの Mae Moh 石炭火力発電所から産出される Class C-FA (MMFA) については、1990 年代初期より利用されるようになり、2004 年時点では年間約 270 万 ton がコンクリート材料として消費されている。特にレディーミクストコンクリートや低発熱コンクリートへの利用が多い。

一方、世界の FA の未使用率は、年々減少しているものの、世界各国で FA の有効利用が大きな課題となっている^{10~14)}。また、東南アジアではエネルギーセキュリティや外貨獲得の手段として、石炭が貴重な資源として活用が期待されているが、その中でも埋蔵量の多い褐炭の石炭火力発電への利用と、そこで産出される Class C-FA の利用の余地が残されている。

2.2.2 フライアッシュを混和材としたコンクリートの特性

ICOLD¹⁵⁾、USACE¹⁶⁾およびフライアッシュ協会の報告¹⁷⁾によると、ダムコンクリートでは、FA を結合材としてある程度置換することにより、コンクリートの水和発熱の抑制、長期強度の改善効果が期待でき、コンクリートの流動性の付与、アルカリシリカ反応の抑制などの効果が発揮される。

Class F-FA と Class C-FA を結合材としたコンクリートおよびモルタルの一般的な特性を既往研究から以下に示す。

コンクリートの温度上昇については、Class C-FA は、Class F-FA より遊離石灰が多く、消化(水和反応)による急激な発熱挙動を示す。USACE¹⁶⁾、中川ら¹⁸⁾、Thomas, M.ら¹⁹⁾、Tsimas, S.ら²⁰⁾によると、Class C-FA は、Class F-FA より遊離石灰が多く、消化(水和反応)による急激な発熱挙動を示す。また、Banchong, N.ら²¹⁾によると、温度上昇量は、CaO 含有量と相関性がある(多いほど高くなる)。

次に、コンクリートの強度については、安藝ら²²⁾、A Wardhono²³⁾によると、Class C-FA は、Class F-FA より遊離石灰および CaO 含有量が多いため、短期強度が大き

くなる。Adhikary, S.ら²⁴⁾によると、Class F-FA は、Class C-FA より Si や Al 含有量が多いため、ポゾラン反応による長期強度が大きくなる。また、山本ら²⁵⁾によると、ポゾラン反応に伴い、FA 粒子周囲の微細な空隙の充填作用と合わせて、反応形成に伴うセメント水和相の密着度が高まり、強度が高まる。

経済性としては、Class F-FA を混和材とした RCC ダムは、温度上昇量を抑制しコンクリートの冷却コストを低減することができる。

以上より、Class F-FA は、ワーカビリティの改善効果が高く、初期材令におけるコンクリートの温度上昇量を抑制でき、コンクリートの長期強度発現が大きくなる利点があるため、RCC ダムやコンクリート構造物の結合材として利用が進んでいると推察される。

また、Dr. Malcolm Dunstan の報告²⁶⁾によると、世界の約 500 地点の RCC ダムで採用されている FA の実績は、そのほとんどが Class F-FA (利用率 67.5%) であり、残りはポゾラン材料が占め、Class C-FA はわずか 0.7%の利用率と極めて限定的である。また、Class C-FA の特性についても、利用を促すために必要な項目が解明されていないのが現状である。

2.2.3 フライアッシュ、コンクリートなどの元素・材料分析装置

一般的に FA やコンクリートの各種試験は、化学・物理材料試験、断熱温度上昇試験および各種強度試験などがある。一方、FA がコンクリート温度上昇や強度発現に与えた因子については、一般的な各種試験では解明できないことがある。

元素・材料の分析装置としては、表面を観察する走査型電子顕微鏡 (SEM) と、より高倍率で観察が可能な電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) がある。また、元素分析に着目している蛍光 X 線分析法 (XRF) や化合物分析に重点を置いた X 線回折法 (XRD) がある。さらに、観察領域における元素分析・元素濃度分布を測定できるエネルギー分散型 X 線検出器 (EDX) , 電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) や電界放出型電子プローブマイクロアナライザ (FE-EPMA) などがある。

本研究で重要となる EPMA および FE-EPMA に関する原理と特徴を以下に示す。

EPMA は、図 2-4 に示すように、電子線を対象物に照射する事により発生する特性 X 線の波長と強度から構成元素を分析する装置である。

例として、EPMA の主な分析能力を以下に示す²⁷⁾。

- 1) 固体試料表面から 1 μm 程度の深さに及ぶ領域での Be~U の元素分析 (定性分析) が可能。検出限界は特定の元素に着目すると、数 10 ppm 程度。
- 2) 50 nm 程度から最大 100 mm 角領域の平均組成分析 (定量分析) が可能。定量精度は数%程度の主成分で、相対誤差 1~2%程度。

- 3) 数 μm 領域から 100 mm 角領域の元素分布分析（面分析）が可能.
- 4) 数 μm から最大 100 mm の線上の元素分布分析（線分析）が可能.

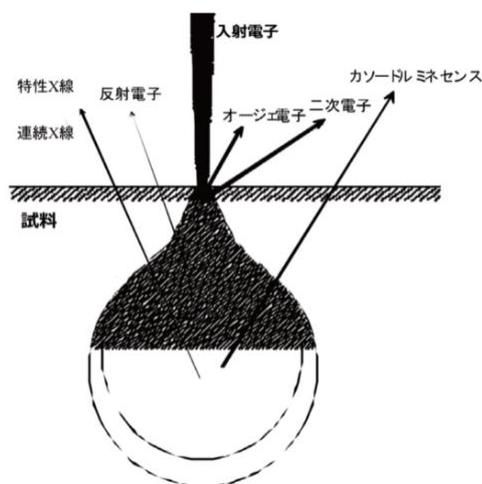


図 2-4 電子線入射で得られる主な情報

これら EPMA を用いたコンクリート分野での既往研究を以下に示す。

小林²⁸⁾、沢木ら²⁹⁾によると、EPMA 分析により構造物または部材内部に起こっている現象をマクロな視点で把握することが可能である。また、特定の微小領域の分析により、劣化のメカニズムの解明や補修材の効果を検証することができる。

佐藤ら³⁰⁾によると、コンクリート構造物の打継ぎの付着性能の向上を検討するために、EPMA による分析により、付着性能を得るために必要となる目荒らし深さなどを定量的に示した。

Dr. Sen, D.ら³¹⁾によると、FA の高置換率モルタルにおける水和反応状態を明らかにするために、EPMA によるマッピングおよび化学分析を利用した。元素濃度分布 (Ca, Si, Al, S) および FA 粒子の化学分析 (元素モル比) の変化量を示すことで、水和反応状態の理解を深めた。

次に、電界放出型の電子銃を搭載した FE-EPMA の分析能力の特徴について、本研究で使用した島津製作所社製の EPMA8050³²⁾について以下に示す。

- 1) 超高分解能マッピングが可能である。
- 2) 卓越した空間分解能を有しており、分析に用いられるビーム電流条件でナンバーワンの二次電子像分解能を誇る。
- 3) 超高感度分析が可能である。SEM, EPMA では、ほかに例を見ない大ビーム電流 (加速電圧 30 kV で最大 $3\mu\text{A}$) が、超微量元素の検出感度を飛躍的に向上させ、元素マッピングでは超微量成分のイメージングが可能となる。

これら FE-EPMA を用いたコンクリート分野での既往研究は少ない。

一方, EPMA や FE-EPMA 以外の材料分析装置においては, 山本ら²⁵⁾の研究では, ポズラン反応の現象について, SEM による可視化によって解明されている。例えば, SEM による形態観察, EDX により構成元素の組成分析などを組み合わせて, 組織緻密化がもたらす強度発現のメカニズムを明らかにされている。しかしながら, SEM および EDX による分析では, 元素の組成を複数の粒子間で比較することは容易ではなく, 化学組成の相違がもたらす反応の進展やその影響に関わる評価において課題が残る。

2.2.4 まとめ

本節のまとめを以下に示す。

- 1) FA 利用の現状としては, 世界各国での FA 未使用率は依然として高く, 有効利用が課題となっている。したがって, FA を有効利用することは, 脱炭素化に反する石炭火力発電所の環境負荷の低減に寄与するものである。また, 東南アジアにおける石炭火力発電所の運転は, 国策やエネルギーセキュリティの観点でも重要な課題となっている。
- 2) 一般的に, Class F-FA は, 初期材令におけるコンクリートの温度上昇量を抑制する効果があるため, RCC ダムを含むコンクリート構造物に広く採用されている。一方, Class C-FA は, 極わずかしか採用されておらず, その特性も Class F-FA に比べて解明されているとは言えない。
- 3) FA がコンクリート温度上昇や強度発現に与える影響因子については, 一般的な化学・物理材料試験, 断熱温度上昇試験および各種強度試験だけでは十分に把握できないことがある。一方, Class F-FA のコンクリート中の反応メカニズムを解明するための分析装置として, XRD, XRF に加えて, 粒子の元素濃度分布や元素の組成を複数の粒子間で比較することができ, 化学組成の相違がもたらす反応の進展やその影響に関わる評価が可能な FE-EPMA がある。
- 4) Class C-FA の RCC ダムへの適用性を検討し, FA の材料選択の自由度 (選択肢) を広げ, 材料調達リスクを軽減することが課題である。

以上より, 本研究では FE-EPMA などの元素・材料分析装置を使用して, FA 粒子の形態と化学組成およびコンクリート中での反応状態を観察し, 上記の特性に与える影響因子を分析・評価する。また, MMFA が一般的な Class C-FA を代表する材料であるかどうかを分析・評価する。そして, Class C-FA の RCC ダムへの適用性を検

討することで、FA の材料選択の自由度（選択肢）を広げ、主に材料調達リスクを軽減することを目的とする。具体的な検討項目を以下に示す。

- 1) NNP1 の RCC で使用した Class C-FA を混和材としたコンクリートの反応メカニズムを明らかにする。
- 2) 反応メカニズムを明らかにする手法として、FE-EPMA などの分析装置の有用性を示す。
- 3) Class C-FA の RCC ダムへの適用性について実証し、利用が低い Class C-FA の有効利用を示すとともに、経済面と環境面での貢献を示す。

2.3 RCC 配合に関する既往研究

2.3.1 RCC 配合の歴史

ICOLD¹⁵⁾、USACE¹⁶⁾によると、RCC は、単位結合材量に応じて、HCRCC、MCRCC および LCRCC に分類される。

1970 年初期以降の RCC ダムは、経済性を重視するあまり、MCRCC および LCRCC が採用されることが多かった。しかし、LCRCC は単位結合材量が少なく、ワーカビリティが悪いため、RCC ダムの打継目からの漏水など、RCC ダムの性能の低下が懸念されたことから、1980 年後半以降は、徐々に MCRCC および HCRCC の採用へ移行してきた^{33,34)}。2000 年以降の堤高 100 m 以上の RCC ダムに注目すると、約 80 地点のうち HCRCC が約 65%、MCRCC が約 20%を占め、HCRCC への移行が進んでいる³⁵⁾。さらに、近年は HCRCC よりも単位結合材量を増した SHCRCC が採用されつつある。

2.3.2 RCC の標準配合

ICOLD¹⁵⁾によって分類される RCC の標準配合と特性を表 2-1 に示す。また、ワーカビリティに影響を与える指標として、単位結合材量、細骨材に含まれる石粉率、ペースト容積、モルタル容積などを併記する。表中には各区分の平均値を表示し、強度などの上下限値を括弧内に示す。

ここで、結合材は、セメント (C) 、混和材はフライアッシュ (FA) である。石粉はペースト材料の一部として取り扱い、ペースト容積 (P) は、C、FA、石粉、水 (W) 、化学混和剤 (Ad) と空気 (Air) を含む容積である。また、モルタル容積 (M) は、ペースト容積に細骨材 (S) を足した容積である。

混和材の平均置換率は、HCRCC が 55%、MCRCC が 32%、LCRCC が 11%である。混和材を増やすことにより、単位結合材量の総量を増やしている¹⁵⁾。また、RCC ダム建設では、一般的に乾式の骨材製造プラントを採用するため、石粉が細骨材に平均 12%、上下限 6~18%と多く混入することになる¹⁶⁾。

なお、日本では湿式の骨材製造プラントを採用することが一般的である。その理由としては、粉塵の発生を低減するなど環境への配慮や、骨材の洗浄による品質管理の容易さにある。ただし、湿式プラントは、多量の水処理が必要となるため、プラント設備や運転コストが増額することになる。

表 2-1 RCC の標準配合と特性

項目	HCRCC	MCRCC	LCRCC
結合材 (kg/m ³)	>150	150>100	>100
セメント (kg/m ³)	87	80	72
混和材 (kg/m ³)	108	37	9
水 (kg/m ³)	111	116	122
水結合材比	0.57	0.99	1.51
石粉率 (%)	12 (6-18)	12 (6-18)	12 (6-18)
VB 値 (秒)	8-15	13-22	18-30
ペースト容積 (L/m ³)	200-240	190-210	190-210
結合材ペースト・モルタル容積比	0.34-0.40	-	-
ペースト・モルタル容積比	>0.42	-	-
圧縮強度 (MPa)	23.5 (11-40)	17 (7.5-30)	12.5 (7.5-16)
直接引張強度 (MPa)	1.5 (0.7-2.9)	0.9 (0.5-2.0)	0.6 (0.3-1.2)

2.3.3 超富配合 RCC

Dr. Malcolm Dunstan の報告²⁶⁾によると、2000 年以降、SHCRCC は、米国、スペイン、トルコ、オーストラリア、ミャンマー、ベトナムなど数多くの国、40 地点以上のダムで採用されている。SHCRCC の平均単位結合材量は、226 kg/m³である。

特に、セメントや FA などの単位結合材量が 220 kg/m³を超える SHCRCC が主流となっている。SHCRCC は、Construction Friendly な（施工性に優れた）RCC として位置づけられており、材料や施工技術、天候などの外的条件のばらつきに影響を受

けることなくワーカビリティを確保することができる。ここでは、許容されるワーカビリティの閾値をワーカビリティの裕度と定義とする。

上記 40 地点のうち配合の特性情報が得られた 6 地点の SHCRCC (表 2-2 の No.13 ~18) のペースト容積は 240~260 L/m³ 程度, モルタル容積は 540~580 L/m³ 程度である^{36~39)}。また, 結合材ペースト・モルタル容積比 (CP/M) は 0.37~0.43 程度, およびペースト・モルタル容積比 (P/M) は 0.44~0.51 程度である。これらの指標を HCRCC と比較すると, 容積, 比率ともに高いことがわかり, 同時にワーカビリティの裕度を高めていることを示すものであると考えられる。

ワーカビリティの裕度を示す指標としては, ①フレッシュコンクリートに関するもの: 材料分離のし難さ, 締固めのし易さ, 転圧後の仕上がり, 天候による制約, ②硬化コンクリートに関するもの: 圧縮強度, 直接引張強度, 打継目の強度と水密性に着目する。

これらの指標を基に, 表 2-3 に SHCRCC と MCRCC が持つワーカビリティの裕度の違い, および仮に裕度が不足する MCRCC に対して, ワーカビリティの裕度の不足を補う方法を示す。

例えば, 材料分離を防ぐためには, 時間をかけた丁寧な作業が必要であり, それには人件費や重機費用が必要となる。または, 技術力を持った, 高賃金の作業員を配置する必要がある。あるいは, 材料分離抵抗性を維持するために, 化学混和剤の増量により配合を変更する必要がある。

以上より, 特にワーカビリティの裕度の指標として, 材料分離のし難さ, 締固めのし易さ, 打継目の強度と水密性に着目する。そして, 結合材の石粉代替により, 高いワーカビリティの裕度を持つ新たな SHCRCC のゾーンを示す単位結合材量とワーカビリティ裕度の関係を図 2-5 に示す。

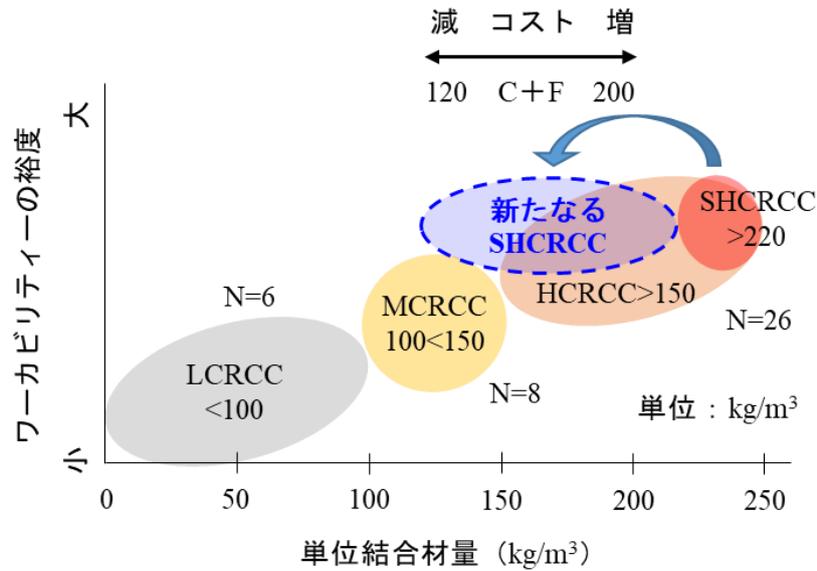
表 2-2 RCC 配合表および配合特性

No	VB 値 秒	G max mm	空気量 %	W/B	FA 置換率 %	S/a %	C	F	G1	G2	G3	S	Ad	SP 率 %	SP 量 kg/m ³	SP 代替率 %	P L/m ³	CP L/m ³	M L/m ³	P/M	CP/M	α	β
1	13.2	50	1.5	0.53	60.0	36.8	80	120	619	414	271	752	0.3	14.0	105	34.5	243	0.45	539	0.45	0.37	1.74	1.93
2	13.1	50	1.5	0.55	65.0	36.8	110	130	758	416	133	735	0.3	14.4	106	34.5	248	0.46	538	0.46	0.38	1.82	1.92
3	13.9	50	1.5	0.58	63.5	37.2	111	122	763	403	132	749	0.3	14.6	110	36.4	248	0.46	543	0.46	0.37	1.78	1.95
4	16.1	50	1.5	0.62	63.2	38.8	117	120	595	399	255	778	0.3	13.3	103	35.3	250	0.45	557	0.45	0.37	1.73	2.08
5	14.5	50	1.5	0.61	62.2	37.7	112	115	761	402	131	757	0.3	13.6	103	35.8	243	0.45	541	0.45	0.37	1.73	1.95
6	16.5	50	1.5	0.66	61.1	39.5	118	110	618	412	218	790	0.3	14.9	118	39.6	253	0.45	564	0.45	0.36	1.72	2.11
7	14.6	50	1.5	0.66	60.0	40.5	116	105	595	399	255	778	0.3	15.2	118	40.3	249	0.45	555	0.45	0.36	1.72	2.07
8	14.0	50	1.5	0.70	62.5	41.0	112	100	589	395	254	837	0.3	15.9	133	45.4	246	0.43	575	0.43	0.33	1.58	2.17
9	12.6	50	1.5	0.76	60.0	41.5	114	90	586	393	253	850	0.3	15.9	135	47.4	244	0.42	579	0.42	0.32	1.54	2.19
10	13.0	50	1.5	0.82	57.1	40.0	115	80	603	405	260	819	0.3	16.0	131	48.3	239	0.43	561	0.43	0.33	1.57	2.06
11	13.2	50	1.5	0.89	53.8	40.0	116	70	606	406	266	826	0.3	16.8	139	51.6	239	0.42	564	0.42	0.32	1.55	2.06
12	12.9	50	1.5	0.96	50.0	41.0	115	60	599	402	264	852	0.3	16.8	143	54.4	235	0.41	571	0.41	0.31	1.48	2.10
13	14.5	50	1.5	0.75	50.0	41.0	150	100	529	441	221	822	0.3	5.0	41	17.0	261	0.45	575	0.45	0.43	-	-
14	10.0	50	1.0	0.47	70.0	35.0	93	140	529	502	385	760	1.3	11.9	90	31.1	210	0.45	467	0.45	0.36	-	-
15	12.0	50	1.0	0.49	55.2	36.0	113	128	-	651	648	704	1.1	13.8	97	29.5	262	0.48	543	0.48	0.42	-	-
16	10.0	50	-	0.50	72.7	38.0	110	160	529	502	385	856	0.8	11.5	98	30.9	245	0.45	544	0.45	0.40	-	-
17	10.0	50	1.0	0.64	63.0	38.4	148	85	145	517	413	351	785	0.5	17.8	140	307	0.51	598	0.51	0.43	-	-
18	10.0	50	1.0	0.55	70.0	38.4	110	140	579	386	319	813	0.5	10.4	85	29.7	240	0.44	549	0.44	0.38	-	-
19	-	50	-	0.55	60.0	35.0	77	84	446	595	446	780	0.8	16.4	128	47.7	193	0.40	487	0.40	0.30	-	-
20	-	50	-	0.50	70.0	33.0	70	98	458	610	458	735	0.9	16.4	121	46.3	184	0.40	462	0.40	0.30	-	-

(備考) VB 値: No.1~12 は実施工での平均値, No.13~18 は管理値の中央値, No.19,20 は VC 値のため参考として併記, FA 置換率: FA/(C+FA), C: OPC, F: FA, B: C+F, G1/G2/G3: 粗骨材 (G1: 50-25 mm, G2: 25-12.5 mm, G3: 12.5-5 mm), S: 細骨材 (5 mm 以下), SP: 石粉, 化学混和剤添加量: (C+F)×0.3%, SP 率 (石粉率): S に含まれる SP 率, SP 量 (石粉量): コンクリートに含まれる石粉量, SP 代替率: SP 量/(C+F+SP 量), (-): 不明

表 2-3 ワーカビリティーの裕度および不足を補う方法

指標	SHCRCC	MCRCC	ワーカビリティーの裕度の不足を補う方法
フレッシュコンクリートについて			
材料分離（打ち込み時）	分離し難い	分離し易い	時間をかけた丁寧な作業が必要となり，人件費や重機費用が必要となる．または技術力を持った作業員の配置や化学混和剤の増量が必要となる．
締固め易さ（VB 値）	締固め易い（8～15 秒）	締固め難い（13～22 秒）	転圧回数を増やす，または大型な重機が必要となり，人件費や重機費用が必要となる．または技術力を持った作業員の配置や化学混和剤の増量が必要となる．
転圧後の仕上がり	ジャンカなし	ジャンカがでやすい	同上
天候	降雨や高温による制約が少ない	降雨や高温による制約が多い	高温になると凝結時間が速くなるため化学混和剤の増量が必要となり，コストが必要となる．
硬化コンクリートについて			
圧縮強度／直接引張強度	必要強度に対して余裕がある	必要強度に対して余裕がない	単位結合材量の増量が必要となり，コストが必要となる．
打継目の強度と水密性	強度と水密性の余裕がある	強度と水密性の余裕がない	材料分離，締固め易さ，天候と同様な対応および各層へグラウト材の塗布などの処理が必要となり，人件費と材料費が必要となる．または単位結合材量の増量が必要となり，コストが必要となる．



(備考) N は 2000 年以降のプロジェクトにおける堤高 100 m 以上のダムの数

図 2-5 新たなる SHCRCC のゾーン

2.3.4 石粉が RCC に与える影響

石粉は、75 μm 以下の骨材の微粒分であり、骨材製造の粉砕過程で得られる副産物である。石粉が RCC のワーカビリティの裕度、強度および水密性に与える影響を既往研究から以下に示す。

(1) ワーカビリティの裕度

藤原ら⁴⁰⁾によると、RCD コンクリートのセメントを FA に 30%程度まで置換すると、真円に近い粒子形状の効果、つまり、ベアリング効果によって、RCD ダムコンクリートの拘束水量は小さくなり、VC 値が下がり締固め易くなる。

島津ら⁴¹⁾、白村ら⁴²⁾によれば、RCD コンクリートに適量の石粉を補填すると、石粉によるペーストがスラリー化し、RCD コンクリートの拘束水量は小さくなり、VC 値が下がり締固め易くなる。

ICOLD¹⁵⁾、USACE¹⁶⁾、ならびに著者らの研究⁴³⁾によると、RCC に石粉を補填すると、ペースト容積が増量し、ワーカビリティが改善されることがわかっている。

(2) 強度

永山ら⁴⁴⁾によると、多量の石粉を含まない RCD コンクリートは、従来のコンクリートと類似した力学的性質、つまり、結合材水比の法則を示す。

島津⁴¹⁾や白村ら⁴²⁾によると、RCD コンクリートに適量の石粉を補填すると強度は増強するが、一方で多量に石粉を補填すると強度が低下する。強度が増強する要因は、石粉がセメント粒子に微粒分として入り込み、セメント粒子周辺で水和物を析出できる空間が増えることにより、水和反応が促進されるため、微粒分効果が強度の増強に寄与すると考えられる。

(3) 水密性

ICOLD¹⁵⁾や栗田ら⁴⁵⁾によると、単位結合材量が増加すると水密性が高まることがわかっている。

2.3.5 まとめ

本節のまとめを以下に示す。

- 1) 近年の RCC ダムでは、要求品質であるワーカビリティが向上し、強度や水密性が確保された RCC 配合が採用されている。特に、セメントや FA などの単位結合材量が 220 kg/m^3 を超える SHCRCC が主流となっている。SHCRCC は、Construction Friendly な（施工性に優れた）RCC として位置づけられており、材料や施工技術、天候などの外的条件のばらつきに影響を受けることなくワーカビリティを確保することができる。ここでは、許容されるワーカビリティの閾値をワーカビリティの裕度と定義とする。ワーカビリティの裕度は RCC 施工における重要な要素の一つであり、SHCRCC はワーカビリティ裕度を有する RCC 施工を実現するための一つの方策である。
- 2) RCD ダムコンクリートや RCC の結合材を FA に置換するか、または石粉を補填することでワーカビリティが改善されることが報告されている。一方、石粉代替率が高い場合にも上記と同様の特性が得られるかは未知であり、課題が残る。また、強度や水密性についても同様の課題が存在する。

以上より、本研究では SHCRCC が持つワーカビリティの裕度を確保しつつ、結合材の石粉代替による配合設計を試行し、建設コストを削減する手法について検討する。また、従来の HCRCC と比較して、石粉を多量に用いた SHCRCC の特性を分

析および評価する。さらに、結合材を石粉で代替する SHCRCC の設計手法を提案し、建設コストの削減および RCC の打設速度の確保により、主に費用リスクおよび工事（完工）リスクを軽減することを目的とする。ならびに、セメント製造に伴う二酸化炭素排出量の削減への貢献について示す。具体的な検討項目を以下に示す。

- 1) 石粉代替による SHCRCC の配合特性とワーカビリティの関係性を明らかにする。
- 2) 石粉代替による SHCRCC の圧縮、直接引張強度、割裂引張強度、打継目の強度などの関係性、力学的性質および水密性の特性を明らかにする。
- 3) 細骨材に含む石粉率を向上させる骨材製造手法を示す。
- 4) 石粉代替による SHCRCC の設計手法を提案する。
- 5) 石粉代替による SHCRCC の経済面、環境面および RCC の打設速度への貢献を示す。

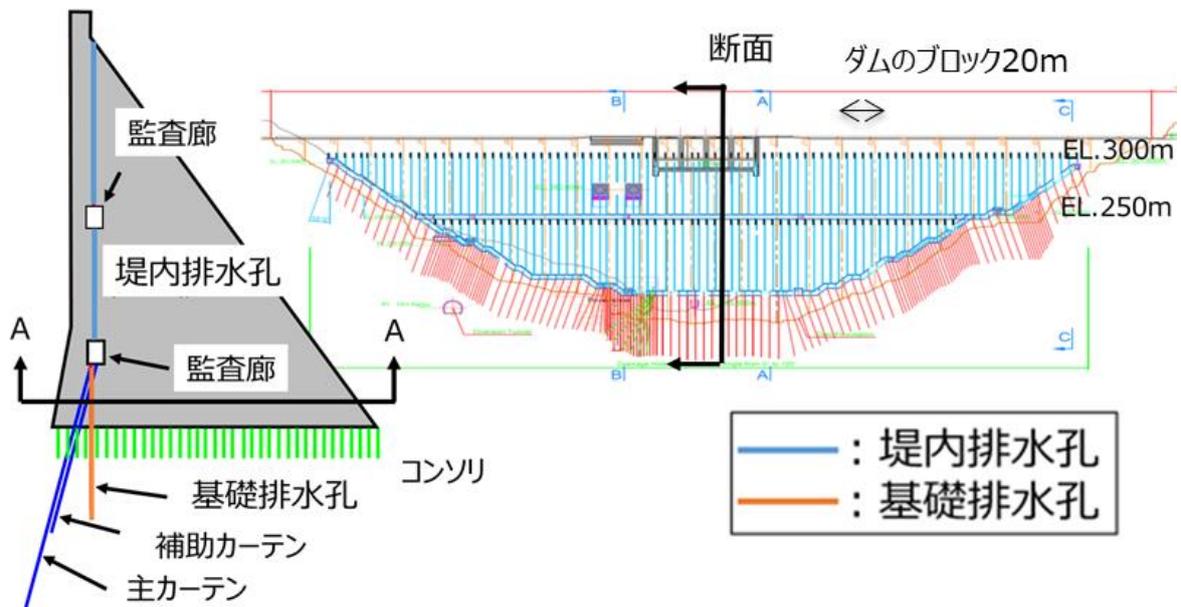
2.4 RCC ダムの堤体・構造物に関する既往研究

2.4.1 RCC ダムの堤体・構造物

NNP1 の RCC ダムの堤体・構造物の概要を表 2-4 および図 2-6 示す。また、表には参考として、一般的な RCD 工法の概要⁴⁶⁾も示す。ダム堤体・構造物としての主な違いは、外部コンクリートに RCC を採用するか、または有スランプコンクリートを採用するか、そして堤内排水孔を設置するか否かである。なお、RCC 工法は、様々な各国の諸事情、条件、環境の違いにより、RCD 工法とは相違がある。

表 2-4 NNP1 の RCC ダムの堤体・構造物の概要

	NNP1 の RCC 工法	一般的な RCD 工法 ⁴⁶⁾
ダム堤体・構造物		
内部コンクリート	超硬練りのコンクリート (RCC と RCD コンクリートの違い)	
外部コンクリート	GE-RCC (配合は内部コンクリートと同じ)	有スランプコンクリート (配合は内部コンクリートと異なる)
堤内排水孔	設置する	設置しない
横継目間隔	15~20 m	15 m



(1) 断面図

(2) 正面図（上流より望む）

図 2-6 NNP1 の RCC ダムの堤体・構造物の概要

2.4.2 ダム基礎の弱層対策

重力式コンクリートダム建設に際し、基礎に断層のような連続性のある弱部（以下、弱層と称す）が存在する場合、特にそれがダム上下流方向に低角度に存在する場合は、ダムの滑動に対する安定性に極めて重大な影響を及ぼし、ダム開発事業そのものの成立性を危うくさせる。このような場合、基礎岩盤のせん断抵抗力を増す方法として、ダム堤体の形状を変化させる方法、上下流面勾配を大きくする方法、上流面にフィレットを設ける方法⁴⁷⁾、ダム堤体底部にマットコンクリートを設ける方法⁴⁸⁾が挙げられる。

さらに、基礎岩盤の弱層部を人工岩盤で置換処理する工法があり、吉田ら⁴⁹⁾は、弱層を取り除き置換処理された人工岩盤の形状・規模がせん断抵抗力の増加に及ぼす効果を模型実験と数値解析により検討している。また、中島ら^{50,51)}は、図 2-7 に示す重力ダムの基礎岩盤の弱層処理工法である置換プラグ処理が基礎岩盤の安定性に及ぼす効果を把握するため、ダム上流、中央、下流部にダム軸方向の弱層およびプラグを考慮した重力式コンクリートダム模型実験と剛体安定性解析を行っている。結果として、プラグ置換することで、堤敷応力分布は弱層がない場合と等価となり、堤敷下流への応力集中を半減させるなどの結果を得ている。

これらの検討結果は、主として、弱層を取り除くまたは部分的なダム軸方向の弱層を条件とした模型実験を中心とするものである。一方、ダム基礎に低角度弱層が

存在し、それに対してせん断キーやマットコンクリートを施工した事例や安定性の検討事例はいくつか報告されている。

例えば、嘉瀬川ダムでは、花崗岩が主体のダムサイトで、左岸中標高部に熱水変質帯が上下流方向に存在することから、ダムの左岸側ブロックはマットコンクリート構造となっている^{52~54)}。

長井ダムでは、低標高部に低角度弱層と呼ばれるせん断抵抗力が低い変質粘土脈および劣化した岩盤が、10度から20度の下流下りの低角度で連続して分布している。したがって、ダムの滑動に対する安定性を確保するため、堤趾部における大規模掘削の代わりにダム上流側をやや下方に彫り込んだキー形状を導入している。キー形状は、低角度弱層沿いの滑動に対する安定検討（FEM解析）を行い決定している⁵⁵⁾。

山口ダムでは、堤敷下の数 m の深さに下流へ緩傾斜する層理面に沿った水平弱層が存在していた。対策としては、水平弱層を取り除くことを基本とし、上流側は底盤長の約7割を取り除いてコンクリートにて置換え、下流部は弱層の上の岩盤が安定していることから残置している。コンクリートによる置換え後を条件としたFEM解析により、滑動に対する点安全率およびすべり面上のせん断抵抗とせん断力の比により、全体の滑動に対する安定性を評価している⁵⁶⁾。

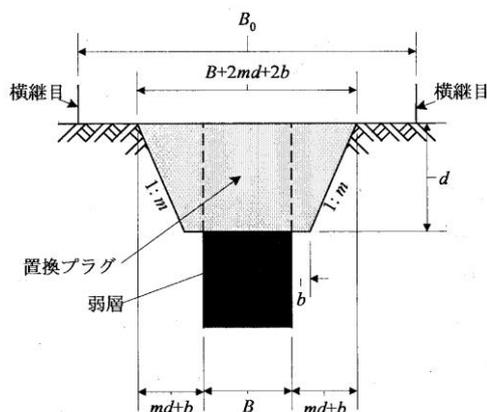


図 2-7 弱層処理工法（置換プラグ処理）

2.4.3 くさび解析

くさび解析は、USACE⁵⁷⁾に準拠し、低角度の弱層に対して複数のすべり面上のブロックに分けて滑動力と抵抗力の検討を行うものである。理論式を以下に、概念図を図 2-8 に示す。くさび解析における外力条件、計算手法および必要安全率などの基準についても、USACE⁵⁷⁾に準拠した。

$$FS = \frac{\{(W_i+V_i) \cos \alpha_i + (H_{Li}-H_{Ri}) \sin \alpha_i + (P_{i-1}-P_i) \sin \alpha_i - U_i\} \tan \phi + C_i L_i}{[(H_{Li}-H_{Ri}) \cos \alpha_i + (P_{i-1}-P_i) \cos \alpha_i - (W_i+V_i) \sin \alpha_i]} \quad (2.1)$$

ここに、FS：安全率，W：鉛直荷重（自重，水重，岩盤など），V：上載荷重，H：水圧，P：水平荷重，U：揚圧力，C：粘着力，L：すべり延長である。

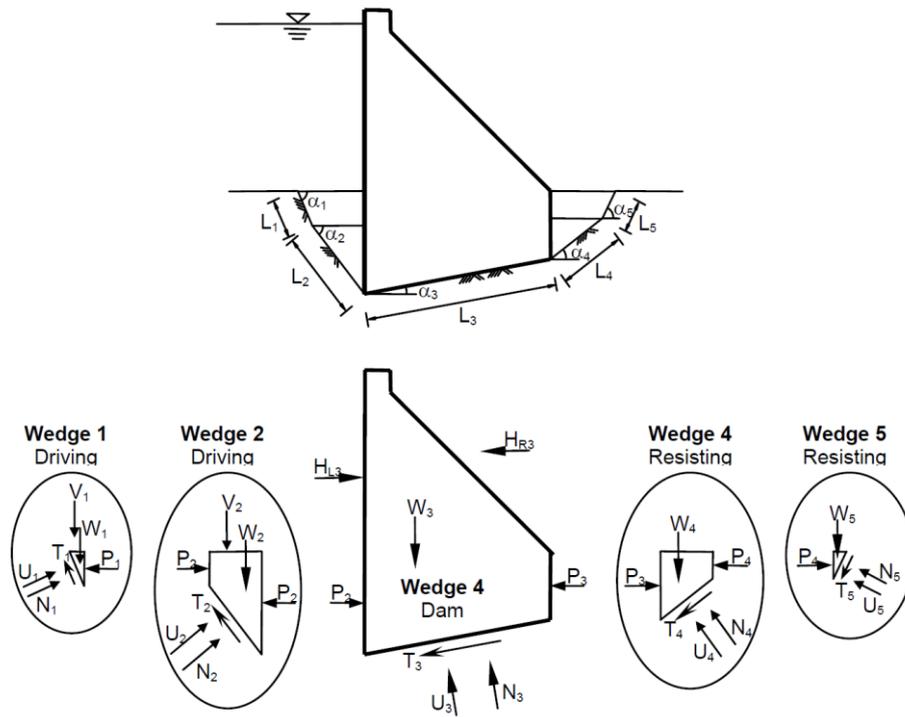


図 2-8 くさび解析のモデル

2.4.4 まとめ

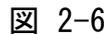
本節（ダム堤体のせん断キー）のまとめを以下に示す。

- 1) 重力式コンクリートダムの基礎岩盤のせん断抵抗を増す方法として，上流面にフィレットを設ける方法，ダム堤体底部にマットコンクリートを設ける方法，弱層部を人工岩盤で置換処理する（置換プラグ）工法が挙げられる．これらの検討は，模型実験を中心に評価されている．
- 2) ダム基礎に低角度弱層が存在する場合，その対策として，せん断キーやマットコンクリートの施工事例や安定性の検討事例は報告されている．これらの検討は，FEM 解析によりダムの滑動に対する安定性を評価している．
- 3) せん断キーの効果を検討し配置した事例は存在するが，一方で実際のダムの挙動計測などによりその効果を裏付ける根拠を示した事例は見当たらない．

以上より、本研究では NNP1 に導入したダム堤体のせん断キーのダムの滑動に対する安定性について、くさび解析および FEM 解析により評価し、合理的なダム堤体のせん断キー設計を提案することを目的とする。また、初期湛水以降のダム計測結果と比較することで、実施工におけるダム堤体のせん断キーの効果（耐荷性）を検証する。具体的な検討項目を以下に示す。

- 1) 2次元 FEM 解析によるダム堤体のせん断キーの効果を示す。
- 2) 合理的なダム堤体のせん断キー設計手法を提案するとともに、コスト削減効果や工程影響を示す。
- 3) NNP1 の RCC ダム堤体の実構造物を用いて、初期湛水時のダムの挙動をリバーズプラムライン、ダム周辺のボーリング調査、および CT 画像解析などによって把握し、計測結果との比較によりダム堤体のせん断キーの効果を検証する。

2.4.5 堤内排水孔の配孔

RCC ダムでは、USBR⁵⁸⁾、USACE¹⁶⁾および ICOLD¹⁵⁾の報告では、2.4.1 に示す GE-RCC や打継目の施工不良に伴って発生する揚圧力の低減を図るため、一定間隔で堤体内に鉛直方向の排水孔を設けるのが一般的な設計である。堤内排水孔は、 2-6 に示すように、RCC 打設後に削孔機によりダムの天端から中間監査廊、中間監査廊から底部監査廊へと削孔し設置する。なお、基礎排水孔は、底部監査廊からダムの基礎岩盤へ削孔し設置する。

また、セメントの水和反応と硬化組織を考えると、 2-9 に示すように、コンクリート内には水和作用の過程で間隙が発生することから、コンクリートは最初から水で飽和しているわけではなく、すぐに水圧が作用するわけでもないと考えられる⁵⁹⁾。しかしながら、例えば、コンクリートの打継目に施工不良が残ることで、間隙水の浸透が徐々に下流面まで進行すると、水圧がこの浸透経路に伝達されることとなり、堤体内に揚圧力が作用することになる。

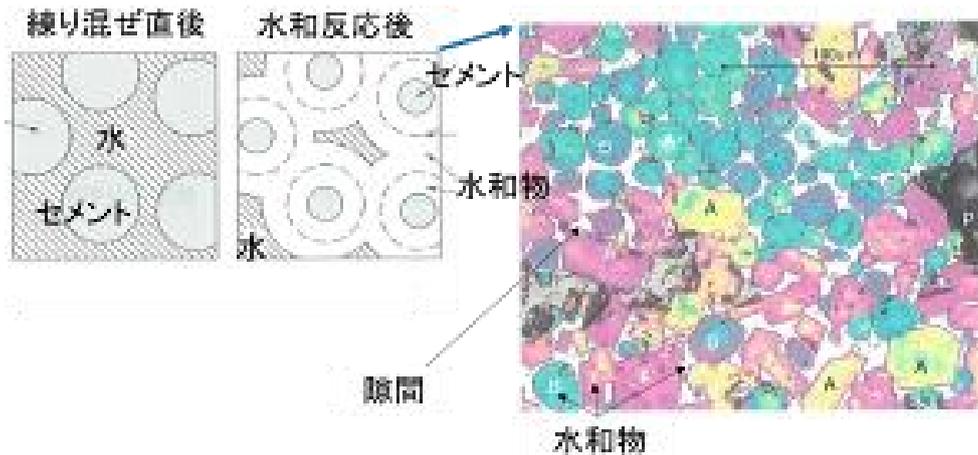


図 2-9 セメントペースト模式図

一方、RCC ダムの堤内排水孔の配孔設計手法については、具体的に文献などで示されていない。その必要性や標準間隔は示されているが、実際の設計は事例や経験に基づいて検討されている。表 2-5 に示す堤内排水孔の設置事例によると、近年の堤高 100 m 以上のダムの配孔間隔は、3 m 程度が多く、削孔径は 75~100 mm 程度ある。また、RCC ダム専門家は、既往文献や経験に基づき、堤内排水孔の間隔は 3 m が最適だと推奨しているものの、定量的な検討が行われているわけではない⁶⁰⁾。

表 2-5 堤内排水孔の設置事例

ダム名	国	完成年	堤高 (m)	間隔 (m)	径 (mm)
Shoshone	米国	1910	106	4.5	—
Mujib	ヨルダン	2004	71	3	75
Khun Dan Pakarncon	タイ	2005	92	5	100
Yeywa	ミャンマー	2010	134	4	76
Al Wehdah	ヨルダン	2011	104	3	75
Son La	ベトナム	2011	148	3	75
Cotter	オーストラリア	2013	80	3	100
Changuinda	パナマ	2014	99.2	3	76
Gibe III	エチオピア	2015	250	1.6, 3.2	150-200

2.4.6 2次元有限差分法による浸透流解析

5.2 で示す堤内排水孔が揚圧力低減効果を評価するために、2次元有限差分法 (FDM) による浸透流解析により再現する。解析ソフトは、ISCEF⁶¹⁾を利用する。理論式を以下に示す。

飽和-不飽和状態の土中を運動する水に対するレンジク式は、質量保存則より導かれた Richard の方程式を求めると、

$$-div\rho\vec{v} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) \quad (2.2)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 v : 流速、 θ : 体積含水率である。

一方、土中の水の運動を規定する運動方程式としては、Darcy の法則があり、これを不飽和領域においても同じ運動方程式が導かれるとすれば、

$$\vec{v} = -k(\theta)\vec{\nabla}h \quad (2.3)$$

ここに、 $k(\theta)$: 透水係数テンソル、 h : 全水頭 (圧力水頭+位置水頭) である。

式(1), (2)より、

$$divpk(\theta)\vec{\nabla}h = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) \quad (2.4)$$

一方、体積含水率 θ は、土の間隙率 n と飽和度 S_r ($0 \leq S_r \leq 1$) の積であり、

$$\theta = nS_r \quad (2.5)$$

式(3), (4)から圧力水頭が1つの独立変数になるほう手式に変換すると、

$$\begin{aligned} divpk(\phi)\vec{\nabla}(\phi + Z) &= \frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta_n S_r) \\ &= \frac{\partial}{\partial \phi}(\rho n S_r) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \left[n S_r \frac{d\rho}{d\phi} + \rho S_r \frac{dn}{d\phi} \cdot \rho n \frac{dS_r}{d\phi} \right] \frac{\partial \phi}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.6)$$

式(5)において圧力水頭変化による水の圧縮性を無視し、不飽和領域において圧力水頭変化による間隙率の変化がないものと仮定すると、

$$\operatorname{div} k(\phi) \vec{\nabla}(\phi + Z) = (C(\phi) + \beta S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.7)$$

ここに、 $C(\phi)$: 比水分容量、 S_s : 比貯留係数、 $\beta=0$: 不飽和領域、 $\beta=1$: 飽和領域である。

2.4.7 現場透水試験

本研究では、現場透水試験による透水係数の推定は、下記に示す3種類の理論式を適用する。

(1) J. F. T. (Johnston Formation Tester) 法⁶²⁾

この理論式は、ボーリング孔内の水圧変化を測定し岩盤の透水特性を評価するものである。

$$K = \frac{d^2 \ln \left[\left(\frac{\lambda L}{D} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{D} \right)^2} \right]}{8L(t_2 - t_1)} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (2.9)$$

ここに、 K : 透水係数 (m/s)、 d : 水位測定管内の断面積と水位測定ケーブルの断面積との差より求める有効内径 (cm)、 D : 試験区間孔の直径 (cm)、 L : 試験区間の長さ (cm)、 K_h : 水平方向の透水係数 (cm/s)、 K_v : 鉛直方向の透水係数 (cm/s) である。

(2) 簡易ピット式変水位法⁶³⁾

この理論式は、ボーリング孔を利用して孔に水を注入し、その浸透量から現場透水係数を推定するものである。

$$K = \frac{r^2}{2(t_1 - t_2)} \left[\left[\sinh^{-1} \left(\frac{h_1}{2r} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{h_2}{2r} \right) \right] + \left[\sinh^{-1} \left(\frac{2r}{h_1} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{2r}{h_2} \right) \right] \right] \quad (2.10)$$

ここに、 K : 透水係数 (m/s)、 r : 試験区間孔の直径 (cm)、 h_1, h_2 : それぞれ時刻 t_1, t_2 における孔内水深 (cm) である。

(3) パッカー法⁶⁴⁾

この理論式は、主としてダム基礎岩盤の透水性を評価するための原位置透水試験で、止水パッカーにより一定の区間長に仕切られたボーリング孔内に多段階の一定有効注入圧力で注水を行い、有効注入圧力 (P) と注入流量 (Q) の関係から透水性を評価するものである。

$$K = \frac{Q}{(2\pi LH)} \sinh^{-1} \left(\frac{L}{2r} \right) = Q(2\pi LH) \ln \left[\frac{L}{2r} + \left(\frac{L}{2r} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

ここに、K : 透水係数 (m/s) , Q : 流量 (m³/s) , H : 落差 (m) , L : 試験長 (m) , r : 径 (m) である。

2.4.8 まとめ

本節 (堤内排水孔) のまとめを以下に示す。

- 1) RCC ダムでは、GE-RCC や打継目の施工不良などによる揚圧力の低減、およびダムの安定性を確保するために、一定間隔で堤内排水孔を設置している。
- 2) セメントの水和反応と硬化組織を考慮すると、打継目に施工不良があると、間隙水の浸透が徐々に進行し、水圧がこの浸透経路に伝達され、堤体内に揚圧力が作用する。
- 3) 堤内排水孔の必要性は、各種文献や標準配孔間隔は示されているが、具体的な配孔間隔の設定理由については示されておらず、経験に基づいた設計が行われている。RCC ダム専門家は、堤内排水孔の配孔間隔として、3 m 程度を推奨している。
- 4) 堤内排水孔の間隔が狭いと、削孔延長が長くなり、コストと時間が増加する。
- 5) 堤内排水孔による揚圧力低減率は、2次元 FDM による浸透流解析で再現することができる。また、ダム堤体の堤内排水孔を利用して、現場透水試験により透水係数を推定することができる。

以上より、本研究では RCC ダムの堤内排水孔設置事例を参考にしながら、2次元 FDM による浸透解析を通じて、ダム堤体の揚圧力の低減率などを分析および評価し、堤内排水孔の設計手法を提案することを目的とする。また、ダムの初期湛水後の計測結果との比較を通じて、RCC ダムの水密性を検証する。具体的な検討項目を以下に示す。

- 1) 堤内排水孔の配置間隔と揚圧力低減率の関係を明らかにする。
- 2) 合理的な堤内排水孔の配孔設計手法を提案するとともに、コスト削減効果や工程影響を示す。
- 3) NNP1 の RCC ダム堤体の実構造物を用いて、現場透水試験や CT 画像解析などによって、ダム堤体の水密性を検証する。

2.5 RCC ダム施工に関する現状

2.5.1 RCC 工法の概要

NNP1 の RCC 工法の概要を表 2-6 に示す。また、表には参考として、一般的な RCD 工法の概要⁴⁶⁾も示す。RCC 工法の特徴は、層厚が 30 cm 程度と薄く、Hot joint の打継目があり、連続打設が可能であることである。なお、RCC 工法は、様々な各国の諸事情、条件、環境の違いにより、RCD 工法とは相違がある。

表 2-6 NNP1 の RCC 工法の概要

	NNP1 の RCC 工法	一般的な RCD 工法 ⁴⁶⁾
施工		
打設工法	水平レイヤー工法 またはスロープレイヤー工法	水平レイヤー工法
転圧(1層)の厚さ	30 cm	75~100 cm
打継目処理	Hot joint : 無処理 Warm joint : 目荒し+グラウト材 Cold joint : グリーンカット+グラウト材	グリーンカット+モルタル
1層/リフトの打継目間隔	基本的に連続打設 3~4時間程度以内	リフトスケジュールで設定 3~5日程度

2.5.2 RCC ダムの施工

(1) RCC ダムの施工手順

RCC ダムの主な施工手順は、基礎岩盤の粗掘削、仕上げ掘削、岩盤清掃、型枠設置脱型、横継目処理、打継目処理、コンクリートの打ち込み、および養生などの手順となる。施工手順の概要写真を図 2-10 に示す。

RCC の施工方法は、ICOLD¹⁵⁾、USACE¹⁶⁾および各種論文により示されているが、日本の RCD 工法施工技術⁴⁶⁾のように確立はされておらず、体系的には整備されていないのが現状である。

具体的には、以下(2)～(6)に示す施工例については、作業員の技術力のばらつきにより、人的リスクが発現し、施工不良による打継目の強度よび水密性の低下など、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性があると考えられる。



(1) ダム基礎岩盤の仕上げ掘削



(2) ダム基礎岩盤の清掃



(3) 打継目処理（グリーンカット）



(4) 打継目清掃

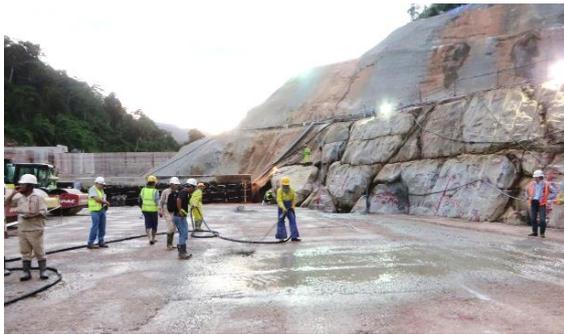
図 2-10 RCC ダムの施工手順



(5) 打継目処理 (清掃後)



(6) 型枠設置・脱型



(7) 打継目処理 (グラウト材塗布)



(8) VB 試験



(9) RCC 荷卸し



(10) RCC 敷均し



(11) RCC 転圧



(12) GE-RCC 締固め

図 2-10 RCC ダムの施工手順 (続き)



(13) 横継目処理 (PVC シート挿入)



(14) 散水養生



(15) 降雨時の養生状況



(16) RCC ダム施工全景

図 2-10 RCC ダムの施工手順 (続き)

(2) GE-RCC 工法

RCD ダムでは、上下流面を内部コンクリートとは別配合の外部コンクリートを打設し、水密性など耐久性を高めるが、RCC ダムでは上下流面と内部コンクリートを別配合とはせず、コンクリートを敷均し後に鋼棒を突き刺し、穿孔にグラウト材(セメントミルク)を注入し、内部振動機で締固めて、水密性(耐久性)を確保する GE-RCC 工法を採用することが多い。GE-RCC の施工状況を図 2-11 に示す。この方法は、コンクリートの供給システムを一つに出来る利点があり、ダムコンクリートの打設効率を高めることができる。

一方、当該方法は、穿孔深さの不足、グラウト材の量管理不足、注入の杜撰さ、締固め不十分などになっていることが見受けられた。



(1) 鋼棒により穿孔



(2) グラウト材を注入



(3) グラウト注入後(注入不足)



(4) GE-RCC 締固め

図 2-11 GE-RCC の施工状況

(3) 横継目の処理

温度応力解析および近年の事例を踏まえて、横継目の基本間隔を 15～20 m に設定した。横継目の処理方法を図 2-12 に示す。PVC 止水板を 2 列配列し、横継目材料として上流部は鋼製板を採用し、下流部には安価な PVC シートを挿入する。止水板および鋼製板横継目の周囲は GE-RCC を適用し、止水板とコンクリートの密着性を確実にする。なお、下流部の PVC シートの挿入には、バックホウの先端に専用治具を付け RCC の縁を切り、その後に PVC シートを挿入する方法とする。

一方、当該方法は、GE-RCC の施工に加え、PVC 止水板と鋼製板の取り付け、縁切りなど、作業行程が複数あることから、各作業が杜撰になっていることが見受けられた。



(1)PVC 止水板と鋼製板



(2)PVC シート

図 2-12 横継目処理の施工状況

(4) 打継目の処理

打継目の主な処理方法は、図 2-13 に示すように、Hot joint, Warm joint, Cold joint の 3 種類とした。



(1)Hot joint



(2)Cold joint



(3)Warm joint

図 2-13 打継目の処理

Hot joint は、先行して打ち込まれたコンクリートの凝結時間が始発となる前に、特別な処理をせずに、次層のコンクリートを打ち込む方法である。

Cold joint は、コンクリートの凝結時間の終結後にグリーンカットを行い、グラウト材を塗布し、次層のコンクリートを打ち込む方法である。

Warm joint は、Hot joint から Cold joint への遷移期間に、目荒しやグラウト材を塗布した後、次層のコンクリートを打ち込む方法である。一方、当該方法は、確立されておらず、その結果、ブリーディングやレイタンスが残り、打継目のコンクリート性状が不均一となる可能性がある。また、打継目の骨材貫入も難しく、打継目の強度および水密性の低下につながる可能性がある。

なお、各打継目の施工仕様の設定には、試験施工による検討が重要となる。

(5) 打設工法

NNP1 ダムの RCC の転圧仕様は、試験施工を踏まえ、15 ton 振動ローラを使用し、層厚 30 cm、転圧回数（無振動 1 往復・振動 3 往復）と設定した。

RCC ダムの打設工法には、水平レイヤー工法とスロープレイヤー工法⁶⁵⁾の 2 種類がある。水平レイヤー工法は、層厚 30 cm を標準とし、RCC を水平に打ち込んでいく。スロープレイヤー工法は、標準リフト高を 3.0 m とし、ダム左岸または右岸から順番に勾配をつけて、層厚 30 cm を標準として RCC を打ち込む（図 2-14）。

スロープレイヤー工法の利点を以下に示す。

- 1) リフト毎に必ず Cold joint が発生するが、反対側（対岸）に到達するまでの 5 から 7 日間に、仕上げ掘削や岩盤清掃、コンソリデーショングラウチング、ダム上下流面の型枠設置・脱型、監査廊の型枠設置、横継目処理および打継目処理など、先行して作業ができることである。また、RCC 運搬用のベルトコンベアの組立てなど仮設備を準備することも可能である。
- 2) スロープレイヤー工法は、RCC 打設が工程上のクリティカルパスとなる。一方、水平レイヤー工法では、上記作業など RCC 打設前の事前準備がクリティカルパスに含まれることから、RCC ダムの施工速度に差異が生じる。
- 3) スロープレイヤー工法は、水平レイヤー工法より打設面積が小さいことから、打継目間隔が短くなり、高価な化学混和剤の添加量を減じることができる。また、東南アジア特有の雨季における突然な豪雨にも打設面積が小さいと、RCC 打設時の降雨処理が容易である。さらに、Hot joint を維持し Warm joint を極力避けることができ、打継目の強度および水密性の確保につなげることができる。

一方、スロープレイヤー工法を適用した場合の課題を以下に示す。

- 1) ダム堤体内で、RCC 打設以外にも仕上げ掘削，横継目や打継目の処理，型枠の設置・脱型など複数の作業が輻輳するため，施工が煩雑となり，人的リスクが存在している。
- 2) リフト高や打設勾配の変更などは煩雑な作業となることから，RCC ダムでは標準リフト高は 3.0 m，打設勾配は 1/10 に設定されている。また，高標高部になると，ダム上下流方向の延長が短くなり，1 層あたりの打設量が減少し，かつ打設面積が狭くなることで打設効率が著しく低下するなど，費用リスクおよび工事（完工）リスクが存在している。
- 3) RCC の各層の先端部（フェザーエッジ）の処理が発生するが，処理作業の技術的な課題が残り，人的リスクが存在している。具体的には，2.5.2(6)に示す。

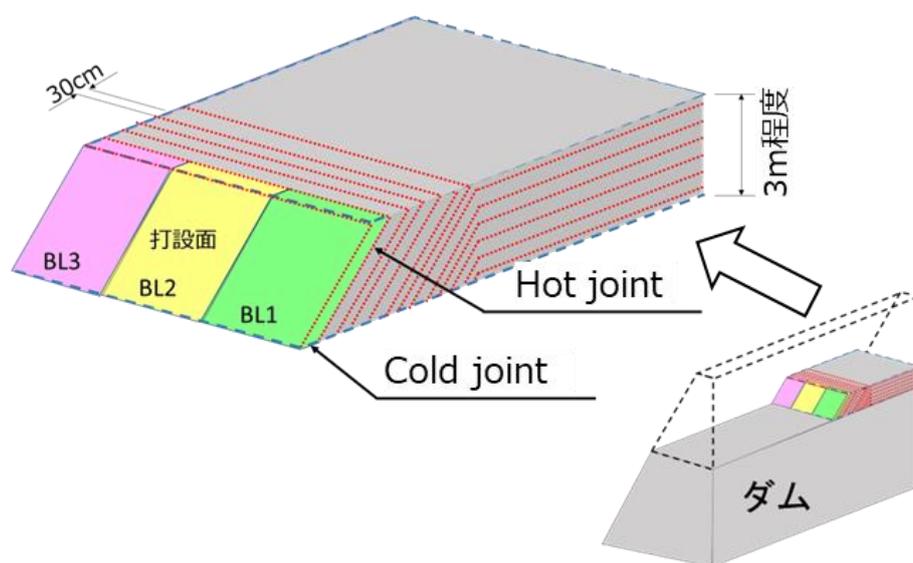


図 2-14 スロープレイヤー工法の概念図

(6) フェザーエッジ処理

スロープレイヤー工法を適用した場合，RCC の各層のフェザーエッジがダム上下流方向に形成されるが，適切な処理を行い，コンクリートを打ち継ぐ必要がある。NNP1 では既往事例⁶⁶⁾を参考に，RCC の転圧後に，フェザーエッジ部の乱れたコンクリートを取り除き，グラウト材を塗布し，コンクリートを打ち継ぐことにした(図 2-15)。

一方，当該方法は，フェザーエッジ部は，層厚が薄くなりダンプトラックなどの車両の通行などにより乱され，これを放置すると，将来的に堤体内の漏水やコンクリートの劣化に影響を及ぼす可能性がある。



(1) フェザーエッジ部の乱れ

(2) コンクリートの除去

図 2-15 フェザーエッジ処理の施工状況

2.5.3 RCC ダムの施工速度

Dr. Malcolm Dunstan の報告³⁶⁾より，約 280 地点の単位結合材量×月間平均打設量×堤体積／堤高×堤頂長の関係を図 2-16 に示す．各配合に対する近似曲線も実線で示す．単位結合材量が多いほど，施工の各プロセスでの調整が不要となり，RCC ダム施工の生産性効率が高まり，高速施工になると考えられる．

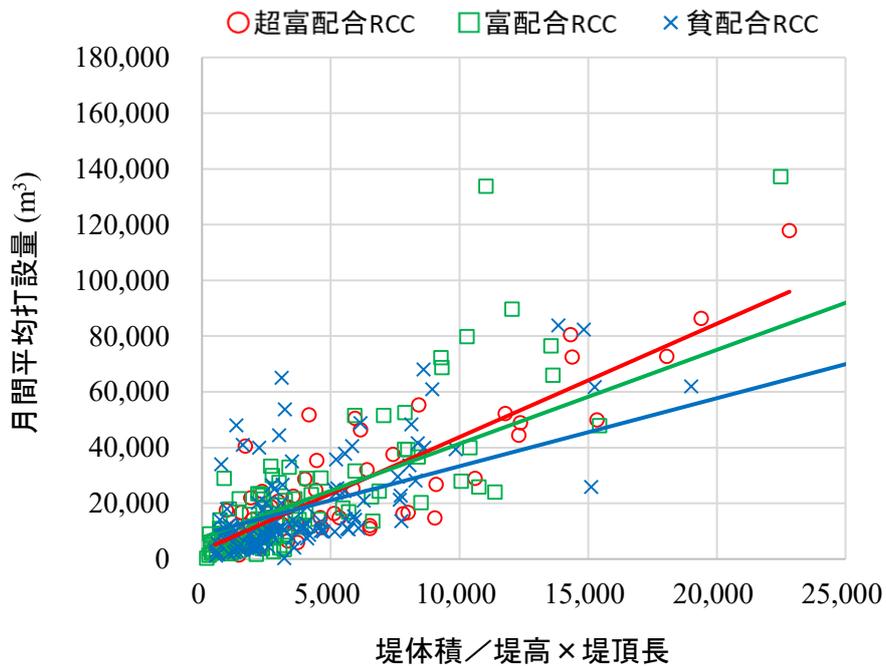


図 2-16 月間平均打設量と堤体積／堤高×堤頂長の関係

ICOLD¹⁵⁾より、約 500 地点の RCC ダム建設における RCC 月間平均打設量と堤体積の関係を図 2-17 に示す。Hard fill 含む RCC ダムのわずか 3%が月間平均打設量の上限 10%に該当している。また、堤体積が 50 万 m³を超える 113 地点のうち、月間平均打設量の上限 10%以内に達成したのはわずか 6 地点（約 5.5%）であり、上限 20%以内に達成したのは 9 地点（約 8%）のみとなっている。つまり、統計的には、これまで建設された RCC ダムの 90%以上では、上位の RCC 打設速度が達成されていないことがわかる。

また、RCC 打設の速度低下は、コンクリートの凝結反応により RCC の品質が低下し、同時にコスト増加につながる可能性がある。よって、打設速度だけではなく RCC の品質、RCC ダムの性能および安全性を確保するためには、経験豊富な人員の配置、RCC ダム施工の施工方法や作業手順書の改善、トレーニングなどが重要となる。特に RCC 打設速度に影響する要因は、材料調達、骨材製造プラント、RCC 製造プラント設備、RCC の運搬設備、作業員の配置、打設工法、仮設備や重機の維持管理および気象条件（降雨量、気温、風）などが挙げられる。これらを適切に計画・実行することで、RCC 工法を最大限に発揮することができる。

加えて、1.1.2、1.1.3 で示すように、RCC ダムの建設には、自然由来のリスク発現による費用リスク、完工（工事）リスクが存在し、これらのリスクを軽減することが大きな課題である。NNP1 では、地質リスクの発現により、ダム基礎掘削量およびダム堤体積が約 2 割増加となり、大幅な工程遅延とコスト増加が課題となった。

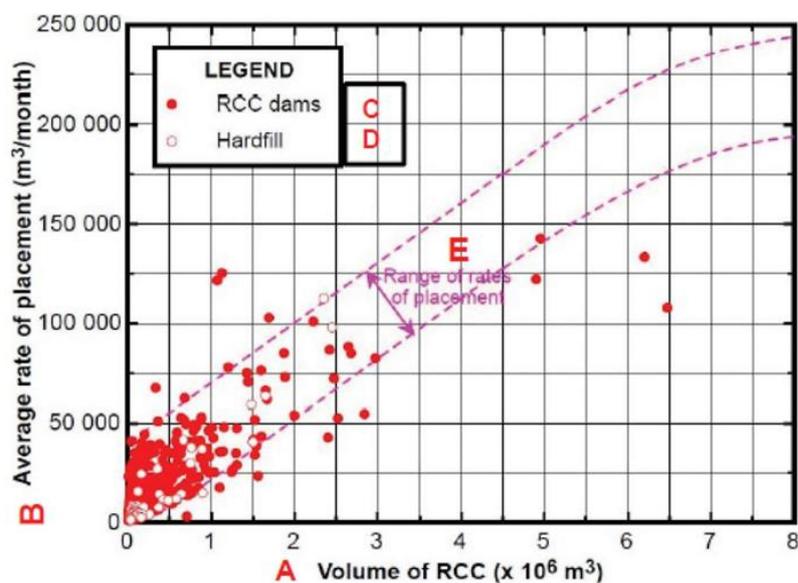


図 2-17 RCC 月間平均打設量と堤体積の関係

2.5.4 まとめ

本節のまとめを以下に示す。

- 1) RCC ダムの主な施工手順は、基礎岩盤の粗掘削、仕上げ掘削、岩盤清掃、型枠設置脱型、横継目処理、打継目処理、コンクリートの打ち込み、および養生などであるが、日本の RCD 工法技術のように体系的に整備がされておらず、施工技術のばらつきが見られる。具体的には、GE-RCC 工法、フェザーエッジ処理などの施工方法および施工手順書の未整備が課題である。つまり、人的リスクが発現することで、施工不良による打継目の強度および水密性の低下など、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある。したがって、全作業員の技術力を確保（統一）するため、技術力にばらつきがある多国籍・多様な作業員にも適応できる設計・施工手法の整備が求められている。
- 2) RCC の品質は、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートにおける各種試験の結果によって評価される。
- 3) 依然として RCC ダムの課題は、ダム堤体からの漏水であり、この漏水が将来的にコンクリートの劣化に影響を及ぼす可能性がある。したがって、RCC ダムの性能としては、水密性および耐荷性が求められる。

RCC 打設速度に関する現状のまとめを以下に示す。

- 1) RCC 打設速度は、単位結合材量が多いほど、施工の各プロセスでの調整が不要となり、RCC ダム施工の生産性効率が高まり、高速施工になると考えられる。
- 2) 統計的には、上位の RCC 打設速度を達成した地点は、建設された RCC ダムの 90%以上では達成されていない。打設速度だけでなく品質と安全を確保するためには、RCC ダム施工の施工計画（施工方法および作業手順書）の改善、トレーニングなどが重要となる。これらを適切に計画・実行することで、RCC 工法を最大限に発揮することができると考えられる。

以上より、本研究では上記リスクを軽減し、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するため、技術的にばらつきのある多国籍・多様な作業員にも適応できる施工手法（施工計画ほか）を提案することを目的とする。同時に、安全を確保しながら RCC 打設の高速施工を実現するための施工手法を提案する。具体的には、以下について検討する。

- 1) RCC ダム施工の施工方法の改善
- 2) RCC ダム施工の施工手順書の改善

- 3) 材料調達
- 4) 仮設備の配置
- 5) スロープレイヤー工法の最適化
- 6) 化学混和剤の添加量
- 7) RCC 打設における安全確保
- 8) ダムのゾーニングにおける施工手順
- 9) 組織体制

2.6 RCCの品質とRCCダムの性能

2.6.1 概要

RCCの品質は、ICOLD¹⁵⁾によると、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートにおける各種品質管理試験の結果に基づいて評価される。表2-7から表2-9に示すように、試験項目、試験基準および頻度が示され、管理値はプロジェクトごとに異なり、各種基準や実例を踏まえ設定される。また、表2-10に示すように、各種試験における変動係数についても示されている。

表2-7 材料の品質管理試験

Material tested	Test procedure	Test Standard ¹	Frequency ²
Cement	Physical and chemical properties	ASTM C150	Manufacturer's certificate or pre-qualification
Supplementary Cementitious Material	Physical and chemical properties	ASTM C618	Manufacturer's certificate or pre-qualification
Admixture		ASTM C494 ASTM C260	Manufacturer's certificate
Aggregates	Relative Density and Absorption	ASTM C127 ASTM C128	One per month or 50 000 m ³
Aggregates	Flat and elongated particles	BS812	Twice per month or 25 000 m ³
Aggregates	Los Angeles Abrasion	ASTM C131	One per month or 50 000 m ³
Aggregates	Gradation	ASTM C117 ASTM C136	One per shift or One per day
Aggregates	Moisture content	ASTM C566 ASTM C70	Before each shift or as required
Aggregates	Compacted Bulk Density	ASTM C29	Twice per month or 25 000 m ³
Aggregates	Sand Equivalent (SE)	ASTM D2419-2	Twice per month or 25 000 m ³
Aggregates	Efflux	EN 933-6	One per month or 50 000 m ³

Notes: 1. Or other appropriate Standard

2. Frequency will be dependent upon the size of project and the degree of control required

表 2-8 フレッシュコンクリートの品質管理試験

Test procedure	Test Standard ¹	Frequency ²
VeBe consistency and density	ASTM C1170	500 m ³ or as required
Gradation	ASTM C117, ASTM C 136	1000 m ³ or as required
In-situ density and moisture content	ASTM C1040	1000 m ³ or as required
Setting times ³	ASTM C403	Three times per shift
Oven-dry - Moisture content	ASTM C566	1000 m ³ or as required
Temperature	ASTM C1064	100 m ³ or as required
Variability of Mixing procedures	ASTM C172, C1078, C1079 or special	Two per month or 25 000 m ³

Notes: 3. It should be recognised that ASTM C403 is an indicator only of setting time in the laboratory and additional in-situ testing is required to develop a correlation between the laboratory setting times and the actual field behaviour under a range of applicable conditions.

表 2-9 硬化コンクリートの品質管理試験

Test procedure	Test Standard ¹	Frequency ²
Compressive strength	ASTM C39 or ASTM C42 (specimen compaction according to ASTM C1176 or with tamper)	Two per day or 1000 m ³
Compressive strength on specimens with accelerated curing	Special	Situational, typically circa 5000 m ³
Tensile strength (direct and/or indirect)	Special (e.g. USBR CRD-C-164) or ASTM C496	One per day or 2000 m ³
Direct tensile strength on jointed cores	Special (e.g. USBR CRD-C-164)	As instructed
Elastic modulus	ASTM C469	One per 10 000 m ³
Permeability	DIN 1048	One per two months, or 100 000 m ³

表 2-10 各種試験における変動係数

Assessed performance (at design age)	Ranges of Coefficients of Variation (%)					
	Excellent	Good	Average	Poor	Very Poor	
<i>Manufactured specimens</i>						
Compressive strength	< 10	10 to 15	15 to 20	20 to 25	> 25	
Indirect tensile strength	< 12.5	12.5 to 17.5	17.5 to 22.5	22.5 to 27.5	> 27.5	
Direct tensile strength	< 15	15 to 20	20 to 25	25 to 30	> 30	
<i>Cores/in-situ specimens</i>						
Compressive strength	< 15	15 to 20	20 to 25	25 to 30	> 30	
Indirect tensile strength	< 17.5	17.5 to 25	25 to 32.5	32.5 to 40	> 40	
Direct tensile strength	Unjointed	<25	25 to 35	35 to 45	45 to 55	>55
	Jointed	< 30	30 to 40	40 to 50	50 to 60	> 60
Shear strength	Unjointed	< 17.5	17.5 to 25	25 to 32.5	32.5 to 40	> 40
	Jointed	< 20	20 to 27.5	27.5 to 35	35 to 42.5	> 42.5
	Unbonded	< 22.5	22.5 to 30	30 to 37.5	37.5 to 45	> 45
Slant shear strength	Unjointed	< 22.5	22.5 to 30	30 to 37.5	37.5 to 42.5	> 42.5
	Jointed	< 25	25 to 32.5	32.5 to 40	40 to 47.5	> 47.5
<i>Density</i>						
Manufactured specimens	< 0.5	0.5 to 1.0	1.0 to 1.5	1.5 to 2.0	> 2.0	
Loaded VeBe	< 0.75	0.75 to 1.25	1.25 to 1.75	1.75 to 2.25	> 2.25	
Nuclear densimeter	< 0.75	0.75 to 1.25	1.25 to 1.75	1.75 to 2.25	> 2.25	
Cores	< 1.0	1.0 to 1.5	1.5 to 2.0	2.0 to 2.5	> 2.5	

RCC ダムの性能については、多目的ダム⁴⁷⁾、USACE¹⁶⁾では、重力式コンクリートダムに求められる構造の原則を以下に示す。

- 1) ダムの堤体及び基礎岩盤は、必要な水密性を有し、及び予想される荷重に対し必要な強度を有するものとする。
- 2) コンクリートダムの堤体は、予想される荷重によって滑動し、又は転倒しない構造とするものとする。

つまり、RCC ダムの性能には、水密性および耐荷性が求められる。また、同時に耐久性、操作性、景観および経済性を総合的に考慮して設計するものとする。

また、ICOLD¹⁵⁾によると、RCC ダムの性能として依然として課題となっているのは、**図 2-18** の写真でも確認できるようにダム堤体からの漏水であり、この漏水が将来的にコンクリートの劣化につながり、RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある。したがって、RCC ダムの性能として、水密性および耐荷性の確保が求められる。これらの主な要因は、直接的には打継目の欠陥や温度応力によるひび割れであるが、その背景には RCC ダムの材料、配合や構造物の設計、施工（施工方法ほか）など、様々な課題が存在している。

例えば、打継目の強度と水密性を確保するためには、RCC ダムの材料・配合設計および施工の検討が重要となる。また、温度応力によるひび割れ発生を抑制するには、横継目間隔の設計、コンクリート温度の管理および打設スケジュールの施工計画など、RCC ダムの設計および施工の検討が重要となる。



(1) ダム堤体下流



(2) 監査廊内部

図 2-18 ダム堤体下流面からの漏水

2.6.2 まとめ

本節のまとめを以下に示す.

- 1) RCC の品質は, 材料, フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートにおける各種試験の結果によって評価される.
- 2) 依然として RCC ダムの課題は, ダム堤体からの漏水であり, この漏水が将来的にコンクリートの劣化につながり, RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある. したがって, RCC ダムの性能としては, 水密性および耐荷性が求められる.

以上より, 本研究では 2.5.4 に示す通り, 各種リスクを軽減し, RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するために, 合理的な RCC ダムの施工手法を提案することを目的とする.

参考文献

- 1) 田中亮輔, 村上嘉謙, 久保和俊: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電所建設工事の竣工報告, 電力土木, No.405, pp.34-48, 2020
- 2) 山本悠貴, 青坂優志, 松本好弘: ナムニアップ 1 水力発電所の O&M 業務, 電力土木, No.423, pp.26-29, 2023
- 3) ASTM International: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-19), 5pp., 2019
- 4) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 令和元年度海外炭開発支援事業海外炭開発高度化等調査「ASEAN 諸国における気候変動への対応と石炭需要動向調査」, pp.3-26, 2020
- 5) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 平成 30 年度海外炭開発支援事業海外炭開発高度化等調査「世界の石炭事情調査-2018 年度-」, pp.25-114, 2019
- 6) 小野崎正樹: 世界の火力発電の市場動向, 次世代火力発電協議会 (第 5 回会合), エネルギー総合工学研究所, 22pp., 2016
- 7) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 令和元年度海外炭開発支援事業海外炭開発高度化等調査「世界の石炭事情調査-2019 年度-」, pp.1-23, 2020
- 8) HONGSA Power: Hongsapower Company Limited, <<http://www.hongsapower.com/>> (参照: 2021 年 7 月 1 日)

- 9) Tangtermsirikul, S.: Development of Fly Ash Usage in Thailand, Society for Social Management Systems Internet Journal, 11pp., 2005
- 10) Aadil, Y., Shahzada, O, M., Mudasir, Y., Zubair A. M., Khawar, S, K.: Fly Ash: Production and Utilization in India - An Overview, Journal of Materials and Environmental Science, 11 (6), pp.911-921, 2020
- 11) Abhijit, R., Virendra, K. P.: A Critical Review of the Potential for Fly Ash Utilization in Construction-Specific Applications in India, Journal of Environmental Research, Engineering and Management, 76 (2), pp.65-75, 2020
- 12) Basu, M., Pande, P., Bhadoria, P. B. S., Mahapatra, S. C.: Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review, Progress in Natural Science, 19, pp.1173-1186, 2009
- 13) Gorai, S.: Utilization of Fly ash for sustainable environment management, Journal of Materials and Environmental Sciences, 9 (2), pp.385-393, 2018
- 14) Yao, Z,T., Ji, X, S., Sarker, P, K., Tang, J, H., Ge, L, Q., Xia, M, S., Xia, Y, Q.: A comprehensive review on the applications of coal fly ash, Earth-Science Reviews, 141, pp.105-121, 2015
- 15) International Commission on Large Dams: Roller-Compacted Concrete Dam (Bulletin 177), pp.1-143, 2020
- 16) US Army Corps of Engineers : Roller-Compacted Concrete, Engineering and Design, pp.1-35, 2006
- 17) フライアッシュ協会, <<http://www.japan-flyash.com/fquality.html>> (参照 : 2021 年 7 月 1 日)
- 18) 中川裕太, 新大軌, 平尾宇, 坂井悦郎 : 高エーライト系混合セメントの水和に及ぼす遊離石灰および混和材の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol. 69 (1), pp.17-22, 2015
- 19) Thomas, M. : Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association, <https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf> (参照 : 2021 年 7 月 1 日)
- 20) Tsimas, S., Moutsatsou, T, A.: High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, Cement and Concrete Composites, pp.231-237, 2005
- 21) Banchong, N., Saengoy, W., Tangtermsirikul, S.: Study on Mechanical and Durability Properties of Mixtures with Fly Ash from Hongsa Power Plant, ASEAN Engineering Journal, Vol.10, No.1, pp.9-24, 2020

- 22) 安藝朋子, 久我龍一郎, 平尾宙, 坂井悦郎: 基材に用いたセメントの特性がフライアッシュセメントの強度発現性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.32-39, 2017
- 23) Wardhono, A.: Comparison Study of Class F and Class C Fly Ashes as Cement Replacement Material on Strength Development of Non Cement Mortar, IOP Conference: The 2nd Annual Applied Science and Engineering Conference, pp.1-6, 2017
- 24) Adhikary, S., Debnath, B., Chattopadhyay, S.: Sustainable Solution for Construction Industry by Using Fly Ash, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 11 (6), pp.16-21, 2014
- 25) 山本武志, 金津努: フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.52-65, 2007
- 26) Dunstan, M, R.: RCC Dams from Beijing to Kunming via Santander and Zaragosa, 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS, pp.1-20, 2019
- 27) 土門武: 電子線マイクロアナライザー (EPMA) の原理と応用, 日本分析機器工業会, pp.4-6, 2016
- 28) 小林一輔: EPMA のコンクリート構造物への応用, コンクリート工学, Vol. 43, No.7, pp.10-18, 2005
- 29) 沢木大介, 小林久美子, 野口康成, 坂井悦郎: 硬化コンクリートの配合推定に関する一提案—EPMA マッピング分析により実測したセメントの CaO 含有率の適用—Cement Science and Concrete Technology, Vol.64, No.1, pp.238-243, 2010
- 30) 佐藤あゆみ, 石山智, 山田寛次: EPMA 分析に基づくコンクリートの鉛直打継ぎの界面処理に関する考察, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.251-258, 2012
- 31) Sen, D., Xianming, S., Yong, G.: Electron Probe Microanalysis Investigation into High-Volume Fly Ash Mortars, ASCE, 29 (7), 13pp., 2017
- 32) Shimadzu: EPMA-8050G, <<https://www.shimadzu.com/an/products/surface-analysis/electron-probe-microanalyzer/epma-8050g/index.html>> (参照: 2021年7月1日)
- 33) 船川勲: 海外における RCC ダムの現状, コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.51-55, 2000
- 34) 荒井治: 「RCC ダムの現状技術水準」とその考察, ダム技術, No.210, pp.8-20, 2004
- 35) 坂本忠彦, 松本徳久: 最近の米国の RCC 技術, ダム技術, No.191, pp.37-44, 2008

- 36) Dunstan, M, R.: Malcolm Dunstan & Associates, Specialists in Roller Compacted Concrete Dam, < <http://www.rccdams.co.uk/about/>> (参照：2022年1月1日)
- 37) 天明敏行, 菊池保旨, 村上祐治, 大矢通弘：マレーシアのスンガイキンタダムでの実施した RCC ダムの配合設計と試験施工, ダム工学, Vol.15, No.4, pp.307-318, 2005
- 38) Liu. X.: Practical Application of Supper high - Volume Fly ash Roller-compacted Concrete, Technical Progress on Sustainable Hydropower Development and Roller Compacted Concrete Dams, 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, pp.220-229, 2015
- 39) Allende. M., F, Ortega., C. Blas.: Design and Quality Control of the IV – RCC Mix USED at Enciso Dam in Spain” Technical Progress on Sustainable Hydropower Development and Roller Compacted Concrete Dams, 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, pp.136-146, 2015
- 40) 藤原浩巳, 丸岡正知, 下山善秀, 小島明, 国府勝郎：各種混和材を用いた超硬練りコンクリートのワーカビリティに関する研究, 土木学会論文集, No.697, V-54, pp.39-50, 2002
- 41) 島津義郎, 薬師寺公文, 高橋陽一：骨材微粒分を含むコンクリートの性状に関する基礎的研究, ダム工学, No.13, pp.40-49, 1994
- 42) 白村暁, 鈴木徳行：微粒分混入率がRCD用コンクリートの諸特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.484, V-22, pp.77-86, 1994
- 43) Aosaka, Y., Seoka, T., B. Forbes, J. Cockcroft, Y. Murakami, M. Asakawa: Trial mix and full-scale trial embankment for RCC dam at Nam Ngiep 1 hydropower project, Symposium Knowledge Based Dam Engineering, 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams 2017, 11pp., 2017
- 44) 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
- 45) 栗田守郎, 小野定, 奥村忠彦, 嶋田洋, 林亮：RCD コンクリートの締固め性状に関する一研究, 清水建設研究所報, pp.67-80, 1978
- 46) 一般財団法人ダム技術センター：RCD 工法施工技術資料, RCD 工法整理検討会, pp.1-1-7-25, 2019
- 47) 多目的ダムの建設 (平成 17 年版) 第 4 巻, ダム技術センター, pp.17-77, 2005.
- 48) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法, 技報堂出版, pp.175-189, 1992
- 49) 吉田等, 宮内茂行, 平山大輔：置換処理工の形状・規模が軟質岩盤基礎のせん断抵抗に及ぼす影響, ダム工学 Vo.11, No.1, pp.40-47, 2001

- 50) 中島伸一郎, 足立紀尚, 岸田潔, 櫻井洋平, 伊豆好弘: 置換プラグ処理を考慮した重力ダム模型実験と剛体安定解析によるプラグ効果の検討, 土木学会論文集, No.701, III-58, pp.315-330, 2002
- 51) 中島伸一郎, 岸田潔, 足立紀尚, 伊豆好弘: 弱層・プラグ効果を考慮した重力ダム基礎岩盤模型実験による基礎岩盤内応力分布特性, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.378-382, 2000
- 52) 石橋正義, 中島修, 坂元浩二, 遠山修平, 脇坂安彦, 山口嘉一: ダム基礎岩盤における低角度割れ目の調査と安全性の評価, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.205-211, 2008
- 53) 松永和彦, 松本佳之, 市丸祥正: 嘉瀬川ダム本体と施工(前編), ダム日本 823号, pp.11-32, 2013
- 54) 松永和彦, 松本佳之, 市丸祥正: 嘉瀬川ダム本体と施工(後編), ダム日本 824号, pp.11-34, 2013
- 55) 波多野政博, 横山喜代太, 鈴木雄次: キー形状を用いた重力式コンクリートダムの設計, 土木学会東北支部技術研究発表会, pp.694-695, 2000
- 56) 坂川勝, 山本純一: 山口ダムにおける河床下水平断層の処理について, ダム技術 Vol.2-1 現場ノート, pp.100-107, 1984
- 57) US Army Corps of Engineering: Gravity Dam, Engineering and Design, 77pp., 2000
- 58) US Department of the Interior, Bureau of reclamation : Design of Gravity Dams, 553pp., 1976
- 59) 高橋茂: セメントの水和反応と硬化組織, コンクリート工学 Vol.47, No.1, pp.32-35, 2009
- 60) RCC 専門家からの聞取聴取 (Mr. Forbs BRIAN, Mr. Bassam EGILATN)
- 61) Integrated Software for Civil Engineering Fluid-structure interaction system (ISCEF), ISCEF/SPC Input Data User's Manual, pp.32-33, 2019
- 62) 張銘, 高橋学, 遠藤秀典: 原位置浸透流測定法について(その1), 応用地質, 第41巻, 第5号, pp.293-303, 2000
- 63) 千家正照, 足立忠司, 西出勤: 「簡易ピット式変水位法」による現場透水試験の問題点と適用条件, 土壤物理学会, pp.14-20, 1987
- 64) 建設省河川局: ルジオンテスト施工指針(案)同解説, pp.68-70, 1984
- 65) Brian Alistair Forbes: Using sloped layers to improve RCC dam construction, Civil Structures, pp.34-39, 2003
- 66) Brian Alistair Forbes: RCC – New Developments and Innovations, CBC2008, RCC Symposium, pp.1-18, 2008

第3章 Class C フライアッシュの RCC ダムへの適用性

3.1 NNP1 におけるフライアッシュの効果

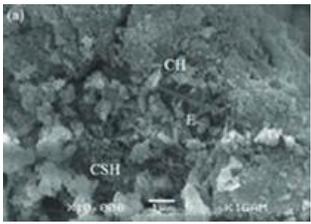
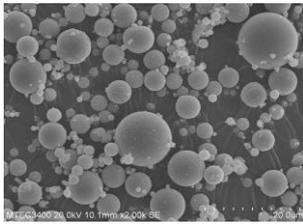
3.1.1 RCC 配合の使用材料

(1) 使用材料

ラオスでは、品質と供給の安定したコンクリート材料の調達が困難であることから、隣国の材料を品質、供給力、価格などを比較評価し、タイ産（TPI セメント）の普通ポルトランドセメント（OPC, ASTM C150¹⁾ Type I）と、タイ Mae Moh 発電所から産出される Class C-FA（MMFA）を調達した。結合材を混和材である FA に置換えることは、コンクリートの温度応力の低減およびアルカリ骨材反応の抑制にも寄与する。また、骨材は、NNP1 ダム地点近傍の原石山から砂岩と礫岩を採取して製造した。化学混和剤は、遅延型減水剤（ASTM C494²⁾, Type B・D）をタイから調達した。

NNP1 では、コスト削減のために、単位結合材量を減らし、その代替として、ワーカビリティを確保するために骨材製造（乾式）の過程で産出される石粉を混和材として利用することを試行した。また、2.3.4 に示す通り、石粉はコンクリートの空隙を充填して、強度や水密性を改善する役割を果たす。各結合材粒子の概要を表 3-1 に示す。粒子の物理的性質は、ASTM International などの規格の標準値に合致し、形状は OPC と石粉はやや角ばり、FA は球状であった。

表 3-1 各結合材粒子の概要

項目	OPC	MMFA	石粉
比重	3.1 g/cm ³	2.3 g/cm ³	2.6 g/cm ³
粒径	0.2~50μm	0.2~200μm	0.5~75μm
比表面積	3,415 cm ² /g	1,922 cm ² /g	2,328 cm ² /g
粒径形状	角ばり	球状	角ばり
SEM 像			—

(2) MMFA の特性

MMFA の概要と化学組成を表 3-2 に示す。MMFA は Class C-FA に分類され、化学組成は ASTM International の規格を満足している。Mae Moh 発電所における石炭の貯蔵量ならびに MMFA の供給量は十分であることが期待された。また、MMFA は材料の品質も安定していた。MMFA はタイにおいて様々な分野で使用されていたものの、NNP1 における RCC 施工に必要な年間約 10 万 ton に対しても十分な資源が確保されていた。

表 3-2 MMFA の概要と化学組成

項目	単位	MMFA
発電出力	MW	2,400
石炭産地	-	国内炭
石炭種類	-	褐炭
運搬距離	km	650
カロリー	kcal/kg	2,600
水分	%	99.53
シリカ (SiO ₂)	%	33.32
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)	%	15.66
酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃)	%	11.73
三酸化硫黄 (SO ₃)	%	2.14
強熱減量 (LOI)	%	0.10
マグネシウム (MgO)	%	2.99
酸化カルシウム (CaO)	%	25.24
遊離石灰 (f. CaO)	%	2.67
粉末度 45μm ふるい残分	%	28.5
活性度指数 材齢 7 日	%	84.6
活性度指数 材齢 28 日	%	93.1
活性度指数 材齢 91 日	%	103

Mae Moh 発電所で燃料として使用される石炭は、現地で産出される石炭で炭素含有量およびカロリーが低く、水分量が多い褐炭である。また、NNP1 の建設期間中に搬入した MMFA の主要な化学成分 (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) の変動係数は 5%以下と、品質は安定していた。MMFA の特性としては、CaO (25.24%) と遊離石灰 (2.67%)

の含有量が多いこと、初期材齢における活性度指数（材齢 7 日，28 日）が高いことが挙げられる。しかし，MMFA は遊離石灰の含有量が多いため，コンクリートの初期材齢の温度上昇量が大きくなる可能性があることが指摘されている³⁾。また，MMFA には CaO と SO₃ が含まれていることから，石こうが存在する可能性がある。石こうは，初期材齢におけるコンクリートの温度上昇を抑制し，強度発現を遅らせる可能性がある。さらに，MMFA の活性度指数は，材齢 91 日で 100% 以上であることから，ポズラン反応による長期強度発現に寄与している可能性がある。

MMFA と米国を中心とした約 20 産地の Class C-FA の化学組成⁴⁾を図 3-1 に示す。これら試料の平均値を Class C-FA の平均値として図中に△として記す。MMFA の主要な化学成分は，Class C-FA の化学組成の分布範囲内に位置することから一般的な Class C-FA として見なせるが，Fe₂O₃，CaO と遊離石灰が平均値よりわずかに多く，SiO₂，LOI と MgO が平均値よりわずかに少ないことがわかる。

次に，水和反応（発熱特性）とポズラン反応に関連する成分（CaO（遊離石灰含む），SiO₂，Al₂O₃）の組成を図 3-2 に示す⁵⁾。この結果，MMFA は標準的な Class C-FA に位置付けられる。

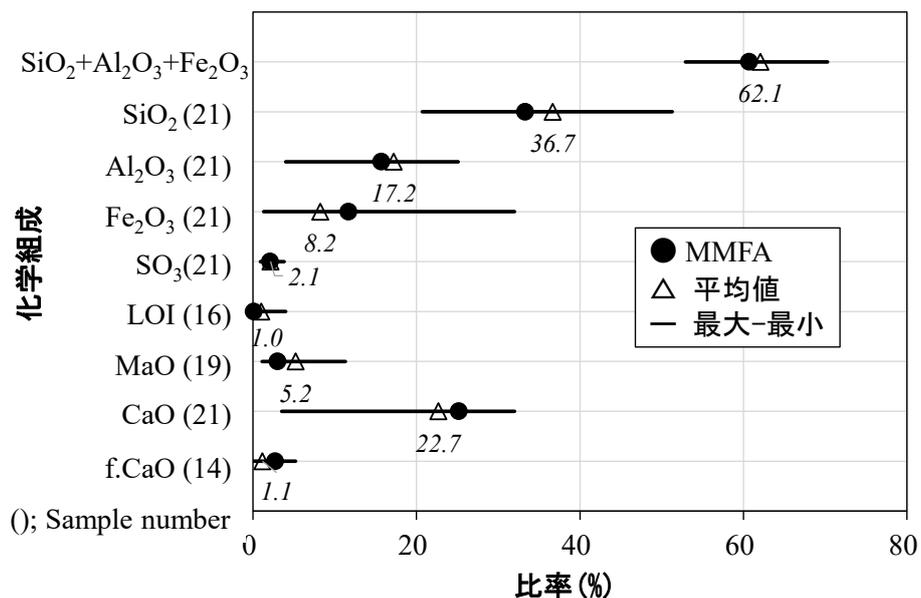


図 3-1 MMFA と約 20 産地の Class C-FA の化学組成

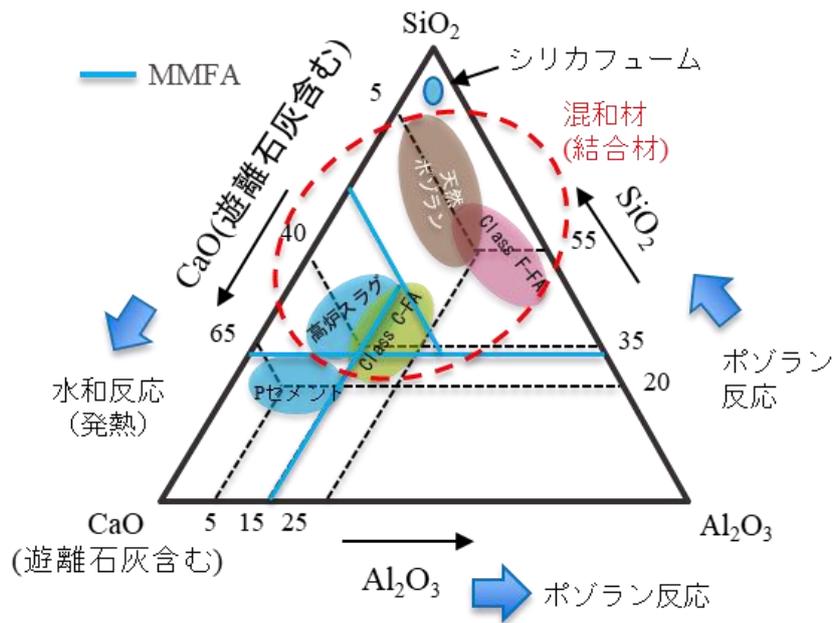


図 3-2 混和材の C-S-A 三角グラフ

(3) RCC 配合

NNP1 では、ダム地点の地震の影響が小さく、ダムコンクリートに求められる設計強度は高くないことから、FA の置換率を高めつつ単位結合材量を減じる配合を試行した。RCC 示方配合の検討結果の一覧を表 3-3 に示す。ダム堤体の内部コンクリートおよび高標高部になるにつれて単位結合材量を減じ、C80F120、C70F130～C70F105、C60F100～C60F60 と複数のゾーニングを図 3-3 に示すように設定した。単位結合材量が少ないことに起因して、コンクリートの打継目の強度や水密性、材料分離への抵抗性およびワーカビリティの低下に影響を及ぼす懸念があったが、

表 3-3 RCC 示方配合表

配合	W/(C+F) (%)	F 置換率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)							
			W	C	F	G1	G2	G3	S	SP
C80MMFA120	53.0	60.0	106	80	120	619	414	271	752	105
C70MMFA105	66.0	60.0	116	70	105	587	394	253	817	125
C60MMFA100	70.0	62.5	112	60	100	589	395	254	837	131
C60MMFA90	76.0	60.0	114	60	90	586	393	253	850	128
C60MMFA60	95.8	50.0	115	60	60	599	402	264	852	139

(備考) 粗骨材の最大寸法：50 mm，VB 値：12～20 秒，空気量：1.5%，化学混和剤添加量：(C+F)*0.3%，W：水，C：OPC，F：FA，G1/G2/G3：粗骨材 (G1: 50-25 mm, G2: 25-12.5 mm, G3: 12.5-5 mm)，S：細骨材 (5 mm 以下)，SP：75 μm 以下の細骨材

その対策として、第4章に示す通り、骨材の粒度分布調整や石粉を代替することで対応した。

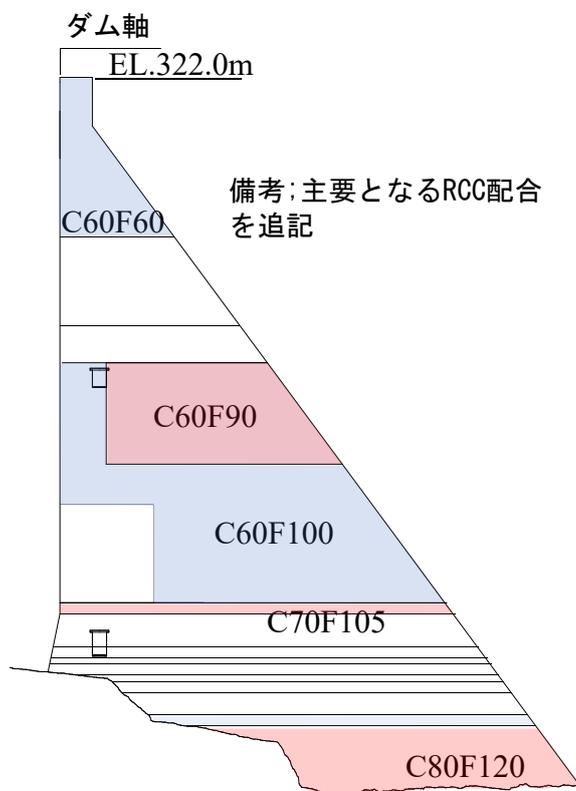


図 3-3 ダムのゾーニング

3.1.2 コンクリートの温度上昇

現場において簡易断熱温度上昇試験機を製作し、表 3-3 に示す配合のコンクリートを対象として、断熱温度上昇試験を実施した。試験結果を図 3-4 に示す。図中に示す曲線は、断熱温度上昇結果を推定式 (3.1) ^{6~8)} により回帰したものである。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rts}) \quad (3.1)$$

ここに、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C) , Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C) , r : 温度上昇速度に関する定数, s : 断熱温度上昇速度に関する係数である。

また、Sivasundaram ら ⁹⁾ や吉岡ら ¹⁰⁾ により、FA 置換率 50~70%の多量 FA コンクリートの断熱温度上昇の推定式が提案されている。吉岡ら ¹⁰⁾ による推定式を式 (3.2) に示す。

$$Q(t) = (0.136C + 4.61)(1 - e^{\gamma N t}) \quad (3.2)$$

ここに、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$)、 C : 単位セメント量 (kg/m^3)、 γN : 温度上昇速度に関する定数 ($\text{OPC} = 0.00038C - 0.036$) である。

Class F-FA は、水和反応に影響しないことから、式 (3.2) の推定式では、FA の効果が含まれていない。そこで、式 (3.2) を用いて単位セメント量からコンクリートの温度上昇量を推定した値を基準値として設定した。実測した各コンクリートの断熱温度上昇量と式 (3.2) から求めた基準値の差異を図 3-5 に示す。

図 3-4 に示すように、各コンクリートの断熱温度上昇の変化は、式 (3.2) の推定値より速く、材齢 3 日から 5 日で終局温度に達した。MMFA に含まれる遊離石灰が消化することで温度上昇速度が高まったと考えられる。一方、FA の置換率を高めるほど、温度上昇の変化が緩慢になる傾向が認められた。

また、図 3-5 に示すように、MMFA を用いたコンクリートの終局温度は基準値よりも $1.1 \sim 4.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度高くなるが、C60MMFA とした配合の水準では FA の置換率が高い (FA が多い) ほど、基準値との差が縮小 (温度上昇量が低下) する傾向が認められた。これらの実験データが示すように、MMFA はコンクリートの温度上昇に影響するものの、温度上昇の抑制と発熱反応時間の遅れは、MMFA に含まれる、例えば石こうなどの成分が水和反応を抑制していると考えられる。

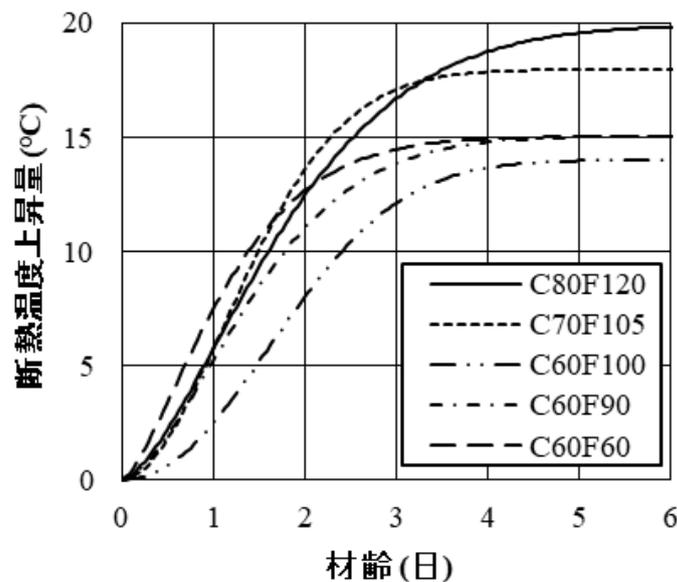


図 3-4 コンクリートの断熱温度上昇量

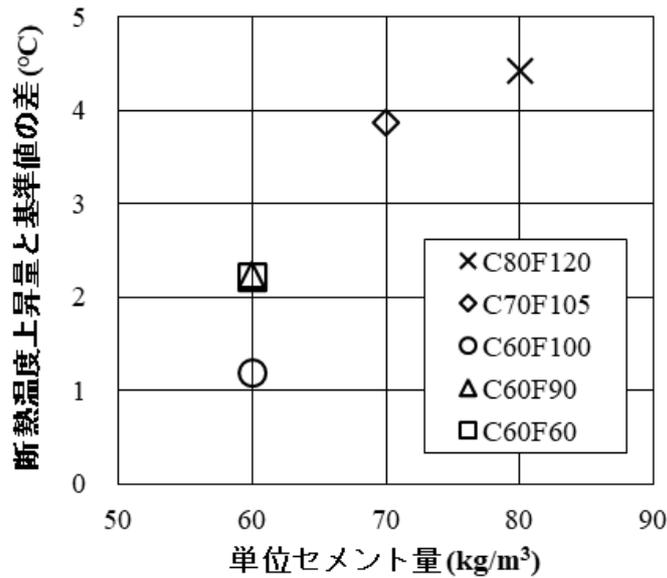


図 3-5 断熱温度上昇量と基準値 (Class F-FA) の差

3.1.3 コンクリートの強度発現

単位結合材量と圧縮強度（材齢 365 日）の関係を図 3-6 に示す．ここでは，FA の OPC への置換率は 50%から 65%であった．また，USACE¹¹⁾ で規定される Class F-FA の置換率を 50%としたコンクリートの圧縮強度の推定値を基準値として実線で図 3-6 中にあわせて示す．MMFA の混和量を変化させたコンクリートの圧縮強度と上記基準値との関係を図 3-7 に示す．参考のため，USACE に従った Class F-FA を用いたコンクリートの圧縮強度の変化もあわせて示す．図 3-6 に示す圧縮強度の各配合の平均変動係数は，6%とばらつきが小さく，コンクリートの品質は安定していた．

図 3-6 より，MMFA を混和したコンクリートは，ポゾラン反応に寄与する $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有量は Class F-FA ほど多くないが，高い活性度指数（材齢 91 日）が示唆するように，長期強度（材齢 365 日）は基準値よりも高くなった．

圧縮強度の発現について，図 3-7 をみると，C60F100 は初期強度（材齢 7 日）の発現は緩慢であるが，長期強度（材齢 365 日）は基準値と同程度であることがわかる．また，C60F60 も初期強度（材齢 7 日）の発現は緩慢であったが，長期強度（材齢 365 日）は基準値を上回った．MMFA を混和したコンクリートの長期強度は，Class F-FA を用いた基準強度と比較しても高いことがわかる．

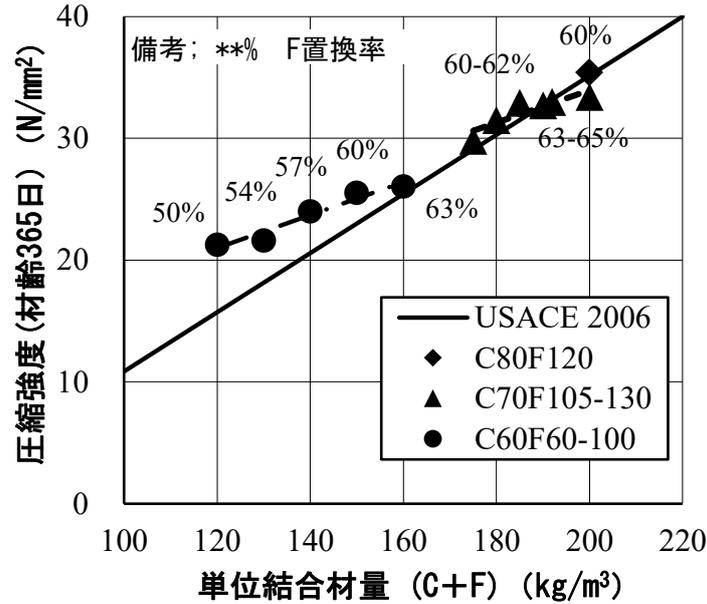


図 3-6 単位結合材量と圧縮強度 (材齢 365 日) の関係

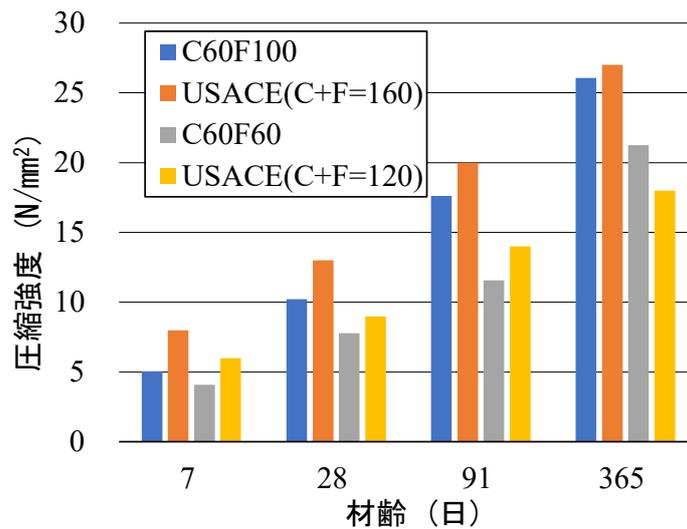


図 3-7 圧縮強度の発現 (材齢変化 : C60MMFA100/60 比較)

短期材齢については、材齢 7 日から 28 日での MMFA を混和したコンクリートの圧縮強度の平均伸び率は約 2 倍となり、基準値の伸び率の 1.6 倍よりはるかに大きく上回った。この強度発現は、FA に含まれる遊離石灰の消化がもたらす効果によるものと考えられる。ただし、その強度発現効果には、ある程度の限界があることも示唆されている。

一方、長期材齢では、MMFA を混和したコンクリートの材齢 28 日から 91 日での圧縮強度の平均伸び率は 1.6 倍であり、基準値の伸び率の 1.5 倍とほぼ同等であった。しかし、材齢 28 日と 365 日間での圧縮強度の平均伸び率は MMFA を混和した

場合は2.6倍となり、基準値の伸び率の2.0倍を大きく上回った。これは、FAによるポズラン反応または何らかの成分の反応が、長期強度の増進に寄与していることが推察される。

3.1.4 Class Cフライアッシュを適用することによるコスト削減効果

MMFAを混和することでコンクリートの温度上昇速度を抑制する効果(3.1.2)と中期強度、長期強度を増進させる効果(3.1.3)を活かして、Class F-FAに変わってNNP1のClass C-FAを用いた場合のコスト削減効果について分析する。

RCCダムの堤体積は、約240万 m^3 になるが、RCC打設時の温度を抑制するために、冷却設備により冷却水や氷片を使用している。RCCの温度を1度下げるには、約0.13 Million USDの冷却設備の電気代が必要となる^{12,13)}。NNP1の場合は、3.1.2よりRCCの温度上昇はClass F-FAを用いたRCCに比べて2~4度程度の差異なので、温度上昇量を抑制するためのコスト影響は、約0.3 Million USDと小さい。

また、コンクリート強度の要求品質を確保しつつ、FA量を減じることができればコスト削減につながる。NNP1の場合、通常のFAより強度発現が大きいことから約10 kg/m^3 のFA量を減じることができる。一般公示単価(OPC:80 USD/ton, FA:30 USD/ton)¹⁴⁾を適用した場合、NNP1では単位結合材量の費用を約3%削減することができ、RCCの総量240万 m^3 で計算すると、0.57 Million USDのコスト削減となる。また、NNP1のようにダム地点周辺でFAを調達することができない場合、FAの調達単価がOPC単価と同程度まで上がるため、単位結合材量の費用を約5%抑えることができ、1.53 Million USDのコスト削減となる。

3.2 コンクリート中でのフライアッシュの反応

NNP1で使用したMMFA試料とダム堤体から採取したコンクリートコア試料(C70F122,材齢1年)をFE-EPMAにより、FA粒子の形態ならびに化学組成・元素濃度分布を観察し、FAの反応メカニズムについて評価した。

FE-EPMAは、島津製作所社製のEPMA8050G¹⁵⁾を使用した。測定条件は、加速電圧15.0 kV、ビーム電流20.0 nA、分析領域は12.0 \times 9.0 μm 、10,000倍とした。FE-EPMAでは、超高解像度かつ超分解能な分析を行うことで異なる種類のFA粒子における密度や構成物質の分布を評価することが可能となり、その結果を用いて各構成物質がコンクリート中での水和反応の挙動や強度発現などの物性に与える影響を分析できる。

3.2.1 フライアッシュ粒子の形態と化学組成・元素濃度分布

直径 10 mm の真ちゅう製の試料台に銀ペーストを適量塗り，その上に FA 試料をふりかけ，固定化し，導電性被覆を薄く施した．

MMFA 粒子の SEM 像と化学組成・元素濃度分布の観察結果を図 3-8 に示す．分析視野の中心に粒径が約 30 μm となる FA 粒子を据え，SEM 像，Si, Al, Mg, Ca, S の濃度分布を観察し，その評価を以下に示す．

(1) SEM 像

画像中央部の約 30 μm の球状粒子表面に粒径 1 μm 以下の微細な球状粒子および幅 1 μm ，長さ 5 μm 程度の棒状粒子が付着している．また，その 30 μm の球状粒子周辺には，粒子径 1 μm 以下の球状粒子も存在する．

(2) Si と Al を主成分とする構成物質

中央部球状粒子の Si と Al 濃度は，それぞれ 25%，10%程度である．FE-EPMA 分析による濃度と XRF 分析による含有量には違いはあるが，表 3-2 に示すように Si と Al は XRF 分析によって検出されている．

(3) Mg を主成分とする構成物質

同図中③の領域に Mg が 5%以上含まれる粒径 1~10 μm の粒子が存在する．これらの粒子は，濃度は低いが，Si, Al, Ca も含まれ，SEM 像では滑らかな表面を形成していることから，電子線の空間分解能（約 1 μm ）を考慮すると厚さ 1 μm 以下の薄い非晶質相に覆われた MgO 粒子であると推察される．

(4) Ca と S を主成分とする構成物質

Ca を高濃度な状態で含む粒子が非常に多く，その形態を以下の 3 種類に区分できる．第一に，中央部の粒径 30 μm の球状粒子表面に付着している 1 μm 程度の微粒子（同図中①）は，Si と Al を含まず，Mg と共存していること，そしてわずかに S も存在することから，ドロマイト ($\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$) がボイラー中で分解し，遊離石灰の類の $\text{Ca}(\text{Mg})\text{O}$ が生成したと推察される．そして，パイライト (FeS_2) から発生する SO_x がわずかにその粒子表面に付着した状態であると考えられる．第二に，Si, Al を含まず，比較的高い濃度の Ca と S で構成される 1~8 μm の粒子（同図中②）は，

カルサイト (CaCO₃) が分解した CaO がパイライト由来の SO_x を取り込み、石こう (CaSO₄) として存在していると推察される。第三に、1~3 μm で Si, Al, Mg と共存する粒子 (同図中④) であり、これらは、非晶質相に Ca と Mg が取り込まれた状態であると推察される。

以上の点から、MMFA は微粒子の状態では遊離石灰類の Ca(Mg)O (同図中①, ③, ④) および石こう (同図中②) を含んでいると推察される。また、SO₃ と CaO の含有量がそれぞれ 2.14%, 25.24% (表 3-2) であり、上記のように CaO の一部が石こうを構成すると考えられる。その場合、SO₃ の含有量を CaSO₄ に換算すると最大で 3.6%程度となることから、2~3%程度の石こうを含有しているものと推察される。

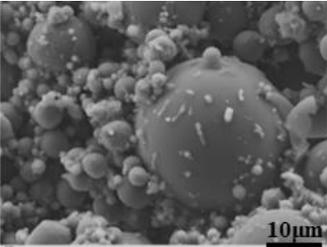
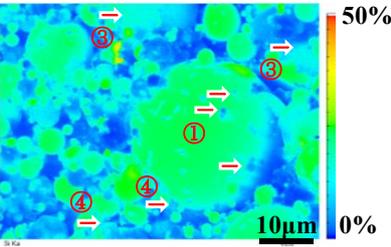
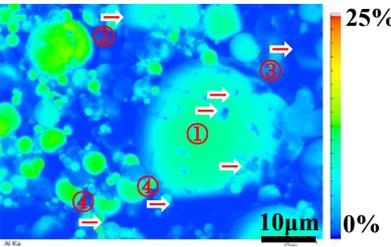
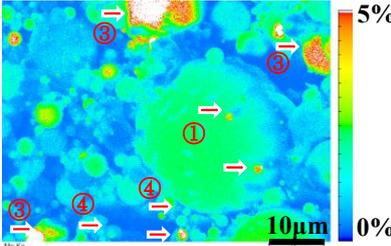
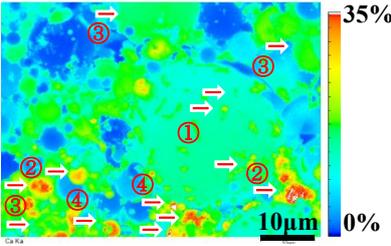
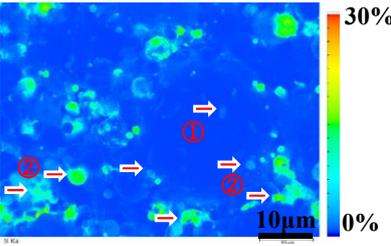
SEM 像	Si	Al
		
約 30 μm の球状粒子表面に微細な球状粒子および棒状粒子が付着。球状粒子周辺には、球状粒子が存在。	①粒径 1 μm 以下、Si を含まない超微粒子が付着、③Si を 15%程度しか含まない粒子、④Si を 10%程度しか含まない粒子	①粒径 1 μm 以下の付着粒子は Al も含まない、③Al を 10%程度しか含まない粒子、④Al を 10%程度しか含まない粒子
Mg	Ca	S
		
①粒径 1 μm 以下の付着粒子は、遊離石灰類の MgO、③1~10 μm、遊離石灰類の高 MgO 粒子が Si-Al-Ca 相に包含(Mg 濃度が高い)、④1~3 μm、微量の Si-Al で覆われた遊離石灰類の Ca(Mg)O 粒子(Mg 濃度は低い)	①粒径 1 μm 以下の付着粒子は、遊離石灰類の CaO、②1~8 μm、Ca を 30%以上含む粒子が共存、③遊離石灰類の CaO が 18%程度含まれる粒子が多い、④1~3 μm、Ca を高濃度に含む粒子	①粒径 1 μm 以下の付着粒子は、遊離石灰類の Ca(Mg)O(S 付着)、②1~8 μm 粒子は、Ca と S で構成される CaSO ₄

図 3-8 MMFA 粒子の SEM 像と化学組成・元素濃度分布 (Si, Al, Mg, Ca, S) の観察結果

3.2.2 コンクリート中での反応状態

コンクリートコア試料 (C70F122) から $20 \times 20 \times 5$ mm 程度の試料片をダイヤモンドカッターで切り出し、樹脂包埋後、ダイヤモンドスラリーを用いて鏡面研磨と導電性被覆処理を施した。SEM 像と化学組成・元素濃度分布および観察結果の概要を図 3-9 に示す。

(1) FA 粒子の断面と反応状態

同図中に示す SEM 像中央部の粒径 $30 \mu\text{m}$ の密実な球状粒子が FA 粒子である。FA 粒子の外周部に $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 幅となる円状の多孔質な領域 (SEM 像: 同図中①) が形成されている。その内側に厚さ $2 \mu\text{m}$ 程度の薄膜状の組織 (SEM 像: 同図中②), そして、FA 粒子中に密実な内部組織が存在している。これらの組織のうち、外周部の多孔質な領域は、セメント水和物相の中で溶解し、周囲にその非晶質成分を拡散、固定化させるポゾラン反応が進展する過程で変質した非晶質相の痕跡である。

(2) FA の反応に伴う相組成の変化

FA 粒子周囲の多孔質な領域 (同図中①) には、Mg が 2.5%程度、Ca が 7%程度、Si および Al は極わずかに含まれている。S は、ほぼ含まれていないことから、この FA 粒子の表層部に石こう粒子が付着していなかったと考えられる。 $5 \times 10 \mu\text{m}$ 程度の矩形断面粒子 (同図中⑤) は、Ca を 20~30%、Mg を 5%程度、Al を 10%程度、含まれている。これはドロマイト ($\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$) 由来の遊離石灰類の物質 ($\text{Ca}(\text{Mg})\text{O}$) が消化した痕跡であると推察される。また、 $5 \times 10 \mu\text{m}$ 程度の矩形断面粒子 (同図中⑥) は、Ca が多く含まれているが Mg を含まないため、遊離石灰類の物質 (CaO) が消化した痕跡であると推察される。これらの粒子 (同図中⑤, ⑥) はコンクリート中で混練水と水和反応し、消化することで $\text{Ca}(\text{Mg})(\text{OH})_2$ に変化したと推察される。また、矩形断面粒子 (同図中⑤, ⑥) 内部の端部 $2 \mu\text{m}$ 程度の領域は、Si 濃度が 5%程度になっており、周辺の反応相から Si が浸透して C-S-H 状の組織を形成したと考えられる。また、厚さ $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の薄膜状の組織 (同図中②) は、未反応の非晶質相であり、材齢 1 年以降も反応が継続すると推察される。

一方、FA 粒子から $10 \mu\text{m}$ 程度離れた反応相 (同図中④) は、Mg, Ca, Si, Al を各々 2%, 20%, 15%, 10%程度含む。このセメント水和物 (同図中④) の主要構成相であるカルシウムシリケート (C-S-H) 相は、主に Ca, Si で構成されるべきである

が、FA の非晶質相（同図中②）に含まれる Mg と Al の含有量が多いことで、同図中④の領域まで拡散し Mg と Al が多くなったと推察される。

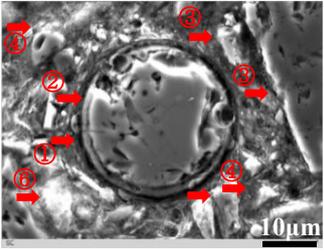
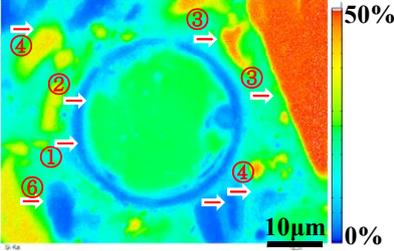
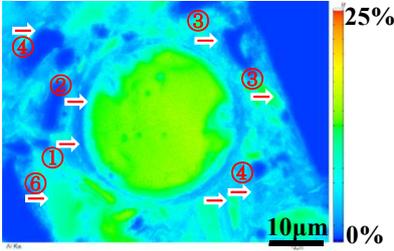
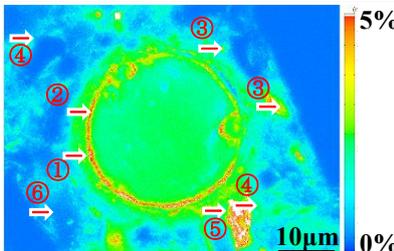
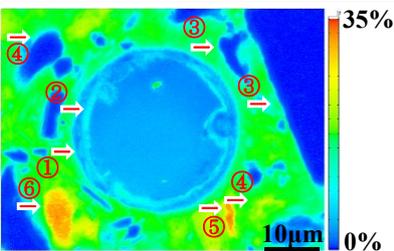
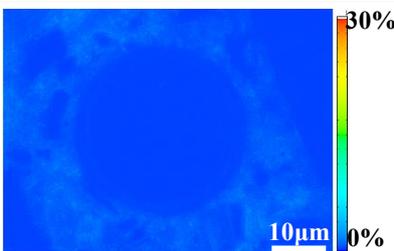
SEM 像	Si	Al
		
<p>①外周 1~2 μm 幅で非晶質相が溶解、粗な領域を形成、②密実な粒子の外周部に 1~2 μm 厚さの外殻が存在、③骨材微粒分、④FA 粒子から 10 μm 程度、骨材粒子に接する領域（FA、石粉を含まないセメント水和物）、⑤5×10 μm 程度の矩形断面粒子、⑥5×10 μm 程度の矩形断面粒子</p>	<p>①粒子表層部の Si が溶解して粗な状態、②密実な粒子の外周部の Si 濃度は 12%程度、③骨材微粒分の Si 濃度は 47%程度、周囲のセメント水和物相に溶解・拡散して Si 濃度を 28%程度まで高めた、④粒子周囲 10 μm の領域の Si 濃度は 15%程度、⑤Si をほとんど含まない、⑥周囲は Si を一部含み、中央部はほとんど含まない</p>	<p>①粒子表層部の Al も溶解して粗な状態、②密実な粒子の外周部の Al 濃度も低い、③骨材(微粒成分)は Al を含まない、④粒子周囲 10 μm の範囲で 10%弱の Al 濃度、⑤10%程度の Al 濃度、⑥Al 濃度は 10%弱</p>
Mg	Ca	S
		
<p>①粒子表層部の溶解領域に Mg が高濃度で存在、②密実な粒子の外周部に Mg も濃縮、③Mg は 2%程度、④粒子周囲 10 μm の範囲で 2%の Mg 量、⑤遊離石灰類の Mg 濃度は 5%程度、⑥遊離石灰類の Mg は 1, 2%程度</p>	<p>①粒子表層部の溶解領域に Ca が存在、②密実な粒子の外周部に Ca が濃縮、③Ca は 15%程度(石粉によるポゾラン反応)、④粒子周囲 10 μm の範囲で 18%程度の Ca 量(FA、石粉などが存在しないセメント水和物)、⑤遊離石灰類の Ca 濃度は 20~30%、⑥遊離石灰類の Ca 濃度は 20~30%(高濃度)</p>	<p>S は局所的に存在していない。全体的に希薄に分布していることから、セメントの水和反応の過程で遅延効果をもたらした可能性がある</p>

図 3-9 コンクリートコア (C70F122) における FA 粒子とその周囲の SEM 像と化学組成・元素濃度分布 (Si, Al, Mg, Ca, S) の観察結果

(3) 石粉の反応に伴う相組成の変化

(同図中③) 領域には、Si 濃度が 47%程度となる鋭角な形状の 10 μm 以上となる粒子が存在する。形状も考慮すると、それらは Si を主要成分とする石粉であると推察される。また、石粉の周囲の Si 濃度は 28%程度であり、FA 粒子から 10 μm 程度離れた領域における水和物の Si 濃度 15%に比べて高いことから、石粉の Si が周囲のセメント水和物に拡散したと推察される。石粉の結晶の状態にもよるが、セメント水和物との間でポゾラン反応が生じたと推察される。

3.3 Class C フライアッシュコンクリートの反応メカニズムの実証

3.3.1 水和反応とその抑制

MMFA を混和材としたコンクリートは、遊離石灰による消化（水和反応）があるにも関わらず、水和発熱反応が抑制されている点が 1 つ目の特徴である。

コンクリートコア試料の FE-EPMA 分析（図 3-9）から、遊離石灰類の物質（Ca(Mg)O）、つまり FA 粒子表面から溶け出したと考えられる Ca および Mg は、セメント水和物（C-S-H 相）に取り込まれ、遊離石灰類の物質（Ca(Mg)O）による水和反応が生じていることがわかった。

一方、遊離石灰による水和反応を抑制する働きを促す成分として、FA 試料の FE-EPMA 分析（図 3-8）から、MMFA にわずかに含まれる石こうが推定された。そこで、MMFA 試料に対して、XRD 分析により化合分析を行った。ここで XRD は、Rigaku 製の SmartLab¹⁶⁾ を使用した。管球種は Cu 管球、X 線発生条件は電圧 45 kV、電流 100 mA、スキャン速度は 2.00 $^{\circ}/\text{min}$ 、ステップ幅は 0.02 $^{\circ}$ とした。XRD 分析の結果を図 3-10 に示す。この XRD 分析から、MMFA に二水石こう（CaSO₄·2H₂O）が比較的多く含まれていることがわかる。

ここで、石こうによる水和反応の効果については、Dale P. Bentz¹⁷⁾ によって述べられている。①OPC (Type I) 単味、②Class C-FA 単味、③は OPC に FA を 40%置換えたペースト、さらに、④は③に石こうを 2%添加したペーストを試料として、カロリーメーターによって各々の発熱挙動を測定している。その結果、②は水と混ぜることで遊離石灰の消化に伴う発熱反応が生じる。一方、③は FA を置換することで発熱開始が遅れ、①OPC 単味と同等な発熱量を比較的長い時間維持している。また、④石こうを 2%添加することで、③の特性（発熱の開始が遅れ、発熱量を比較的長い時間維持）に加えて発熱量が 1 割程度低下している。この挙動は、硫酸塩（SO₄）の消費やセメントのアルミネート相と石こうが反応し、エトリンガイトが生成する

ことでもたらされる。ただし、石こうによる発熱の遅れや発熱量低下の効果は限界があることが示されている。

また、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートが対象ではあるが、國府ら¹⁸⁾によって、石こうの添加量を増やすこと、つまり、高炉スラグ微粉末中のSO₃含有率が増加するほど、温度上昇量の低減や遅延が生じることが示されている。

これらの研究によって、石こうの効果について示されているものの、FA粒子を中心に据えた図3-9に示すFE-EPMA分析では、エトリンガイトの存在は、その結晶の大きさが数μm程度と小さく、その反応を捉えるまでには至っていない。

そこで、XRD分析によりコンクリートコア資料(3.2.2で用いた試料と同様のものから骨材を除去したもの)の構成物質を同定した。図3-11をみると、エトリンガイトに相当するピーク(8°)が顕著に認められたことから、ここで対象としたコンクリートには、比較的多くのエトリンガイトが生成していたことがわかった。この分析結果ならびに上述の既往の研究¹⁷⁾から、MMFAに含まれる石こうがコンクリートの温度上昇の抑制および発熱反応の遅延に大きく寄与したと考えられる。

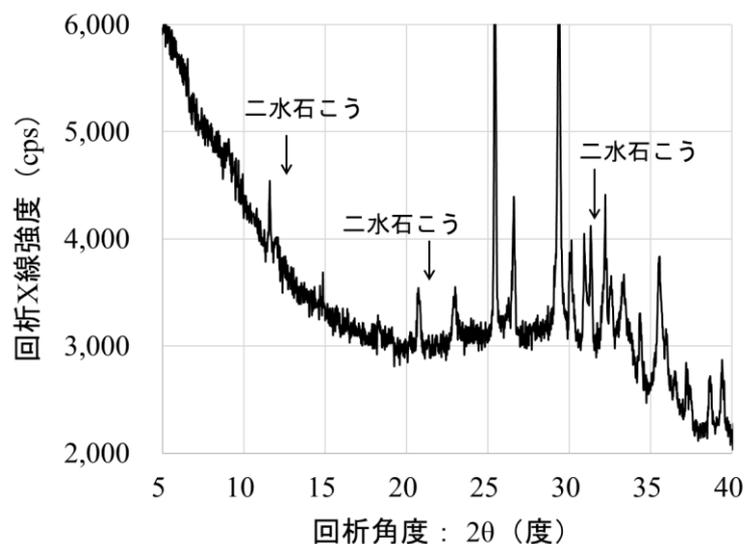


図3-10 FA試料のXRD分析結果

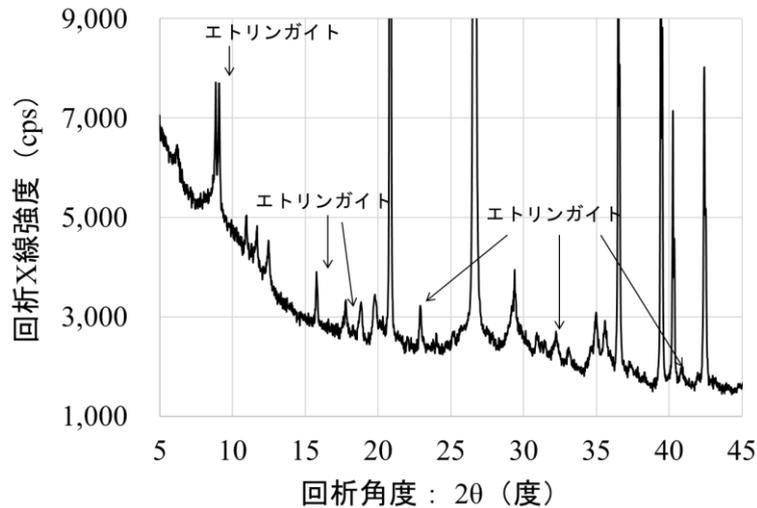


図 3-11 コンクリートコア試料(骨材成分除去)の XRD 分析結果

3.3.2 ポズラン反応の促進

Class C-FA は、Class F-FA より Si や Al が少ないにも関わらず、ポズラン反応が促進されている点が MMFA を混和材としたコンクリートの 2 つ目の特徴である。

コンクリートコア試料の FE-EPMA 分析 (図 3-9) から、FA 粒子周囲で Si, Al 濃度が比較的高くなっており、ポズラン反応が生じているとことがわかる。また、ポズラン反応が生じることで Si, Al, Mg, Fe が FA 粒子近傍のセメント水和物相に拡散し、長期の強度増進に寄与していることがわかる。なお、材齢 1 年のコンクリートコア試料に FA 粒子の非晶質相が残っていることから、それ以降もポズラン反応が継続されていたことがわかる。

次に、コンクリートコア試料の FE-EPMA 分析 (図 3-9) から、石粉とセメント水和物との間でポズラン反応が生じていると推定された。そこで、石粉の母材料となる砂岩および泥質砂岩の試料に対して、XRF および XRD により、元素分析および鉱物種の同定を行った。ここで、XRF には、島津製作所社製の LAB CENTER XRF-1500 (波長分散型)¹⁹⁾ を使用した。管球種は Rh 管球、X 線発生条件は電圧 30 kV, 電流 90 mA とした。XRF 分析の結果を表 3-4, XRD 分析の結果を図 3-12 にそれぞれ示す。

表 3-4 に示す XRF 分析結果から、石粉の主要な化学成分は、シリカとアルミニウムであり、シリカ系石粉であることがわかった。また、図 3-12 に示す XRD 分析から、石粉は石英、雲母などの鉱物を含み、岩石の XRD 分析では、入射角 20~40°の範囲でベースラインが山状になるハローピークを示すことから非晶質相 (ガラス状の物質) を比較的多く含むことがわかった。この石粉に比較的多く含まれる非晶質

相は、コンクリート中でセメント水和物相に囲まれることでポズラン反応をもたらす、FA とともに強度発現に寄与していることが実証された。

表 3-4 石粉（砂岩）の XRF 分析結果

項目	単位	石粉	MMFA
SiO ₂	%	83.56	33.32
Al ₂ O ₃	%	5.87	15.16
Fe ₂ O ₃	%	2.23	11.73
MgO	%	0.87	2.99
CaO	%	0.44	25.24

(備考) MMFA の化学組成は表 3-2 から転記

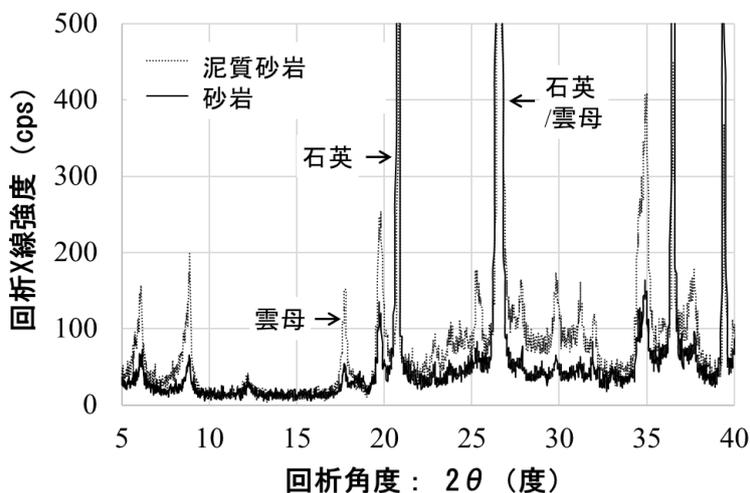


図 3-12 石粉（砂岩と泥質砂岩）の XRD 分析結果

3.4 まとめ

本章では、NNP1 の Class C-FA を混和材とした配合（単位結合材量 120～200 kg/m³，FA 置換率 50～62.5%）の RCC ダムへの適用性について論じた。得られた結論を以下に示す。

- 1) MMFA を用いたコンクリートの反応メカニズムを明らかにした。実験結果から、Class C-FA を混和材としたコンクリートでは、MMFA に含まれる遊離石灰類の物質 (Ca(Mg)O) により温度上昇量は大きくなるが、Class C-FA に含まれる二水石こうが、セメントのアルミネート相と反応してエトリンガイトを生成することによって、FA 置換率が高い場合に温度上昇を抑制し、発熱反応を遅らせるこ

とがわかった。また、MMFA に含まれる遊離石灰類の物質 (Ca(Mg)O) により短期強度が発現するとともに、セメント水和物と MMFA に含まれる Si とのポゾラン反応と、石粉に含まれるシリカ系物質によるポゾラン反応により、長期強度が大きく発現することがわかった。

- 2) コンクリートの断熱温度上昇試験や強度試験の結果に加えて、FA 粒子やコンクリートの内部を観察できる FE-EPMA, SEM, XRF, ならびに XRD などの分析によって、FA 特性やコンクリートの反応メカニズムを明らかにし、コンクリートの水和反応やポゾラン反応の妥当性を実証するために非常に有用な手法であることがわかった。これらの手法が、プロジェクト初期段階の FA 選定や配合設計において、また、施工後の運用段階におけるモニタリングの実証にも活用できると考えられる。
- 3) 本検討によって、従来の Class C-FA の特徴、つまり Class F-FA に比べて発熱や強度の点でコンクリートの要求品質 (低発熱, 高強度など) を満たさないとは一概には言えず、遊離石灰や石こうなどの含有量によっては Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示唆することができた。したがって、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を検討することで、FA の材料選択の自由度 (選択肢) を広げ、材料調達リスクを軽減することができる。
- 4) 本章は、NNP1 における RCC 配合を基にした検証事例であるが、同様の RCC 配合であれば、Class C-FA を混和材としたコンクリートでは、わずかの温度上昇を許容することにより、短期および長期強度が大きくなることから、コンクリートの強度が同程度である場合、Class C-FA を混和材とすることによって結合材量を減じることができ、経済的効果が見込めるとともに、環境負荷の低減に寄与する。なお、単位結合材量を減らすことによるワーカビリティの低下は、第 4 章で対策を示す。

参考文献

- 1) ASTM International: Standard Specification for Portland Cement (ASTM C150-20), 9pp., 2020
- 2) ASTM International: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete (ASTM C494-19), 15pp., 2019
- 3) Tangtermsirikul, S.: Development of Fly Ash Usage in Thailand, Society for Social Management Systems Internet Journal, 11pp., 2005

- 4) Edwin, R, D.: Fly Ash and Fly Ash Concrete, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, REC-ERC-82-1, pp.6-7, 1984
- 5) International Commission on Large Dams: Roller-Compacted Concrete Dam (Bulletin 177), pp.1-143, 2020
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編]， pp.1-17, 2002
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]， pp.302-318, 2012
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]， pp.121-176, 2012
- 9) Sivasundaram, V., Malhotra, V. M.: High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete, Indian Concrete Journal, 78, pp.13-21, 2004
- 10) 吉岡慧， 吉田和隆， 吉武勇， 浜田純夫， 北原敦志：簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定， 日本材料学会， Vol.57, No.5, pp.509-514, 2008
- 11) US Army Corps of Engineers: Gravity Dam Design, Engineering and Design, 88pp., 1995
- 12) Obayashi Corporation: Detailed Works Program and Site Specific Environmental & Social Management & Monitoring Plan for Foundation & Installation of RCC Plant, Ref. NNP1-PCL-01914, pp.1-100, 2016
- 13) JETRO: Business brief. <
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2015/01/54c19d9249bb0.html>> (参照：2021年7月1日)
- 14) Class F Fly Ash: PennState College of Engineering,
 <<https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/materials/Altmaterials/Class%20F%20Fly%20Ash.htm>> (参照：2021年7月1日)
- 15) Shimadzu: EPMA-8050G, <<https://www.shimadzu.com/an/products/surface-analysis/electron-probe-microanalyzer/epma-8050g/index.html>> (参照：2021年7月1日)
- 16) Rigaku: SmartLab, <<https://japan.rigaku.com/ja/products/xrd/smartlab>> (参照：2021年7月1日)
- 17) Dale P. Bentz.: Powder Additions to Mitigate Retardation in High-Volume Fly Ash Mixtures (107-M58), ACI Materials Journal, Technical Paper, pp.508-514, 2010
- 18) 國府勝郎， 村田芳樹， 高橋茂， 安齋浩幸：高炉スラブ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究， 土木学会論文集, No.396, V-9, pp.39-48, 1988

19) Shimadzu: LAB CENTER XRF-1500

<<https://www.an.shimadzu.co.jp/surface/xrf/xrf/index.htm>> (参照 : 2021 年 7 月 1 日)

第 4 章 石粉代替による超富配合 RCC の設計

4.1 石粉代替による配合設計

4.1.1 RCC 配合の使用材料

NNP1 の OPC と FA および石粉の特性については、3.1.1 に示した。また、その他の材料特性については、以下に示す。

骨材の物性値を表 4-1 に示す。骨材の特性は、ASTM International¹⁾、British Standards²⁾などの基準の標準値に合致している。物理的性質は、粗骨材の比重はやや高く、薄片率・扁平率は標準であるが、形状に角ばりを持つため実積率はやや低い。また、細骨材の比重はやや高く、吸収率はやや小さく、粗粒率は小さい。

図 4-1 に、粗骨材と細骨材の粒度曲線を示す。この図には、後述する表 4-2 における配合 No.1 と No.12 の粒度曲線および USACE³⁾に規定されている基準値を併記する。配合 No.1 はダム堤体の低標高部、配合 No.12 は高標高部に適用された配合である。

粗骨材は、基準値を参考に、最適（最大）な容積率になるように G1、G2、G3 の配分を調整した。また、建設期間中の粗骨材の粒度曲線が変化することのないよう、6.4.2(2)に示すように原石山の地質の変化や天候に応じて、採掘場所を選択するなど調整した。細骨材は、前述の基準値内になるように収めた。また、結合材を石粉へ代替するプロセスに応じて、細骨材は細粒化していることがわかる。

表 4-1 骨材の物性値

項目	G1	G2	G3	S
表面乾燥密度 (g/cm ³)	2.65	2.64	2.62	2.68
乾燥密度 (g/cm ³)	2.59	2.58	2.54	2.55
吸収率 (%)	1.34	1.58	1.90	3.02
実積率 (%)	54.4	57.0	56.3	67.8
すり減り量 (%)	35.1	41.4	45.3	-
薄片率 (%)	10.9	4.9	8.1	-
扁平率 (%)	13.3	12.5	10.9	-
粗粒率	-	-	-	2.55

(備考) 粗骨材：G1 (50-25 mm), G2 (25-12.5 mm), G3 (12.5-5 mm), 細骨材：S

(粒径 5 mm 以下)

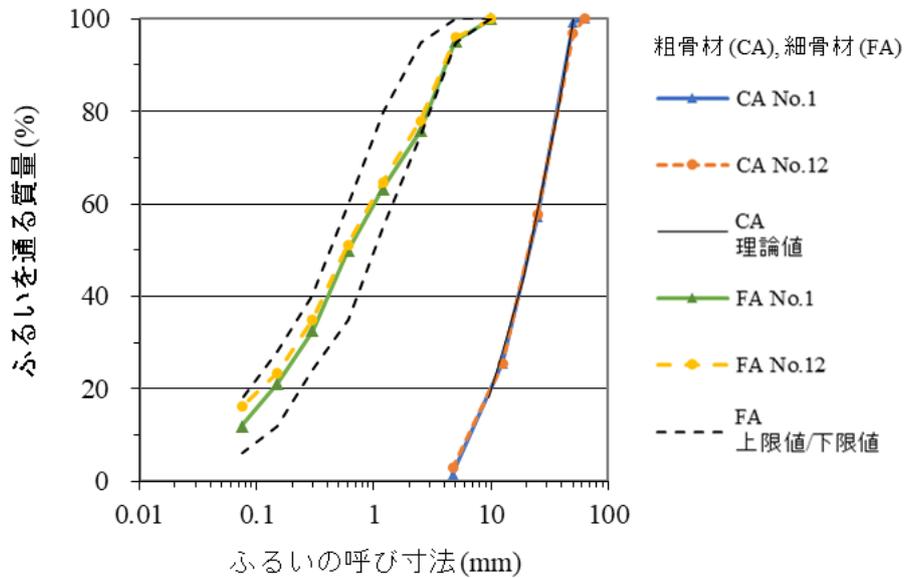


図 4-1 粗骨材と細骨材の粒度曲線（配合 No. 1, No. 12）

次に，NNP1 で実際に施工した RCC ダムと他地点 RCC ダムの配合を表 4-2 に示す．配合は，単位結合材量を 200 kg/m^3 から 120 kg/m^3 に変化させ，FA 置換率を 50～70%とし，そこには $40 \sim 140 \text{ kg/m}^3$ 程度の石粉が含まれている．また，配合 No.13～18 は，他地点 RCC ダムの SHCRCC，配合 No.19, 20 は，MCRCC の事例とする．その配合は，FA 置換率 50～65%， $120 \sim 130 \text{ kg/m}^3$ 程度の石粉量が含まれている．

NNP1 では図 4-2 から図 4-6 に示すように，領域 A, B, C の段階を経て，石粉の代替率を高めた．領域 A は配合 No.1～5，領域 B は配合 No.6, 7，領域 C は配合 No.8～12 とする．

第 1 段階として，領域 A では Construction friendly（優れた施工性）となる単位結合材量 200 kg/m^3 程度を目標とした．第 2 段階として，領域 A から B へは単位結合材量 180 kg/m^3 程度を目標に石粉率を高める工夫をした．さらに，第 3 段階として，領域 B から C は単位セメント量 60 kg/m^3 （単位結合材量 120 kg/m^3 程度）を目指して，ワーカビリティの裕度不足を補うために，骨材製造プラントの改良などによる石粉率を高める工夫を行った．なお，更なるコスト削減を目指して単位セメント量 50 kg/m^3 の配合でも試験練りを実施したが，ワーカビリティの裕度を持つものを得るには至らなかった．

表 4-2 RCC 配合とその特性 (表 2-2 を再掲)

No	VB 値 秒	G max mm	空気量 %	W/B	FA 置換率 %	S/a %	W	C	F	G1	G2	G3	S	Ad	SP 率 %	SP 量 kg/m ³	SP 代替率 %	P L/m ³	CP -	M L/m ³	P/M	CP/M	α	β
1	13.2	50	1.5	0.53	60.0	36.8	106	80	120	619	414	271	752	0.3	14.0	105	34.5	243	0.45	539	0.45	0.37	1.74	1.93
2	13.1	50	1.5	0.55	65.0	36.8	110	70	130	758	416	133	735	0.3	14.4	106	34.5	248	0.46	538	0.46	0.38	1.82	1.92
3	13.9	50	1.5	0.58	63.5	37.2	111	70	122	763	403	132	749	0.3	14.6	110	36.4	248	0.46	543	0.46	0.37	1.78	1.95
4	16.1	50	1.5	0.62	63.2	38.8	117	70	120	595	399	255	778	0.3	13.3	103	35.3	250	0.45	557	0.45	0.37	1.73	2.08
5	14.5	50	1.5	0.61	62.2	37.7	112	70	115	761	402	131	757	0.3	13.6	103	35.8	243	0.45	541	0.45	0.37	1.73	1.95
6	16.5	50	1.5	0.66	61.1	39.5	118	70	110	618	412	218	790	0.3	14.9	118	39.6	253	0.45	564	0.45	0.36	1.72	2.11
7	14.6	50	1.5	0.66	60.0	40.5	116	70	105	595	399	255	778	0.3	15.2	118	40.3	249	0.45	555	0.45	0.36	1.72	2.07
8	14.0	50	1.5	0.70	62.5	41.0	112	60	100	589	395	254	837	0.3	15.9	133	45.4	246	0.43	575	0.43	0.33	1.58	2.17
9	12.6	50	1.5	0.76	60.0	41.5	114	60	90	586	393	253	850	0.3	15.9	135	47.4	244	0.42	579	0.42	0.32	1.54	2.19
10	13.0	50	1.5	0.82	57.1	40.0	115	60	80	603	405	260	819	0.3	16.0	131	48.3	239	0.43	561	0.43	0.33	1.57	2.06
11	13.2	50	1.5	0.89	53.8	40.0	116	60	70	606	406	266	826	0.3	16.8	139	51.6	239	0.42	564	0.42	0.32	1.55	2.06
12	12.9	50	1.5	0.96	50.0	41.0	115	60	60	599	402	264	852	0.3	16.8	143	54.4	235	0.41	571	0.41	0.31	1.48	2.10
13	14.5	50	1.5	0.75	50.0	41.0	150	100	100	529	441	221	822	0.3	5.0	41	17.0	261	0.45	575	0.45	0.43	-	-
14	10.0	50	1.0	0.47	70.0	35.0	93	60	140	529	502	385	760	1.3	11.9	90	31.1	210	0.45	467	0.45	0.36	-	-
15	12.0	50	1.0	0.49	55.2	36.0	113	104	128	-	651	648	704	1.1	13.8	97	29.5	262	0.48	543	0.48	0.42	-	-
16	10.0	50	-	0.50	72.7	38.0	110	60	160	529	502	385	856	0.8	11.5	98	30.9	245	0.45	544	0.45	0.40	-	-
17	10.0	50	1.0	0.64	63.0	38.4	148	85	145	517	413	351	785	0.5	17.8	140	37.8	307	0.51	598	0.51	0.43	-	-
18	10.0	50	1.0	0.55	70.0	38.4	110	60	140	579	386	319	813	0.5	10.4	85	29.7	240	0.44	549	0.44	0.38	-	-
19	-	50	-	0.55	60.0	35.0	77	56	84	446	595	446	780	0.8	16.4	128	47.7	193	0.40	487	0.40	0.30	-	-
20	-	50	-	0.50	70.0	33.0	70	42	98	458	610	458	735	0.9	16.4	121	46.3	184	0.40	462	0.40	0.30	-	-

(備考) VB 値 : No.1~12 は実施工での平均値, No.13~18 は管理値の中央値, No.19, 20 は VC 値のため参考として併記, FA 置換率 : FA/(C+FA), C : OPC, F : FA, B : C + F, G1/G2/G3 : 粗骨材 (G1: 50-25 mm, G2: 25-12.5 mm, G3: 12.5-5 mm), S : 細骨材 (5 mm 以下), SP : 石粉, 化学混和剤添加量 : (C+F)×0.3%, SP 率 (石粉率) : S に含まれる SP 率, SP 量 (石粉量) : コンクリートに含まれる石粉量, SP 代替率 : SP 量/(C+F+SP 量), (-) : 不明

4.1.2 石粉代替のプロセス

(1) VB 値

VB 試験⁴⁾は、振動プレートを用いた RCC のコンシステンシーを評価する試験である。表 4-2 に各配合の VB 値の関係を示す。ただし、配合 No.19, 20 は、VC 値⁵⁾のため除く。

表より、SHCRCC と HCRCC の VB 値は、8~15 秒程度である。NNP1 では、RCC 打設の高速施工を実現するために、40 ton ダンプトラックなどの大型重機の導入および 2.5.2(5)に示すスロープレイヤー工法⁶⁾という打設面に勾配を設ける工法を採用した。傾斜部の重機走行があるため、VB 値が 12~18 秒と少し硬めになるよう調整した。

(2) ペースト容積

表 4-2 より、配合 No.1 は、配合 No.12 に比べて 80 kg/m^3 の単位結合材量 (30 L/m^3 程度) を減じているが、ペースト容積は約 10 L/m^3 程度の減量に留まり 235 L/m^3 以上を確保している。図 4-2 にペースト容積と細骨材に含まれる石粉率の関係、図 4-3 にペースト容積と細骨材率の関係を示す。

図より、領域 A, B, C の変化は、石粉率と細骨材率が高まっているが、領域 A から B は、特に細骨材率を高め、領域 B から C は、特に石粉率を高めて石粉によるペースト容積を確保している。また、配合 No.13~18 (SHCRCC, No.14, 17 を除く) のペースト容積は、NNP1 配合と同様に $240\sim 260 \text{ L/m}^3$ 程度に分布している。

以上より、SHCRCC のワーカビリティーの裕度を確保するには、 $235\sim 260 \text{ L/m}^3$ 程度のペースト容積が必要であると考えられる。

SHCRCC のうち、配合 No.14 はペースト容積が少ないが、混和剤の添加量が多く、細骨材の粒度曲線が良好であるため、ワーカビリティーの裕度が確保されていると考えられる。また、配合 No.17 は、ペースト容積が上記に示す $235\sim 260 \text{ L/m}^3$ 程度を超過しているが、骨材製造の過程で石粉率が 16%以上と高いため、単位水量を増やす配合調整を行ったと考えられる。したがって、SHCRCC の単位結合材量を 220 kg/m^3 とした場合、 100 kg/m^3 程度まで石粉に代替することができる。

配合 No.19, 20 (MCRCC) は、ペースト容積が $180\sim 200 \text{ L/m}^3$ 程度に分布している。表 4-2 に示す MCRCC 同様に、単位結合材量もペースト容積も少ないため、ワーカビリティーの裕度は小さいと考えられる。なお、実験により検証が必要となるが、更なる石粉の代替によりペースト容積が多量になると、石粉ペーストによる粘

性度が高まり^{7,8)}、ワーカビリティの裕度が小さくなると考えられるため、ペースト容積にも上限値が存在すると考えられる。

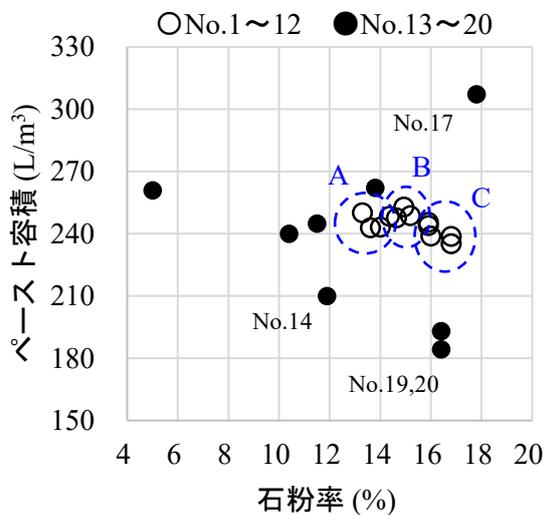


図 4-2 ペースト容積と細骨材に含まれる石粉率の関係

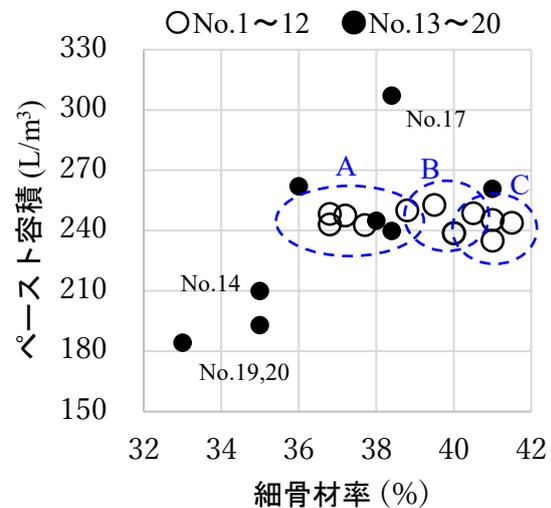


図 4-3 ペースト容積と細骨材率の関係

(3) モルタル容積の関係

図 4-4 に、ペースト容積とモルタル容積の関係を示す。

領域 A から C へと石粉の代替率を高めている配合 No.1~12 では、単位結合材量が最大 80 kg/m^3 およびペースト容積が 30 L/m^3 程度減じられているが、モルタル容積は約 40 L/m^3 程度に増量している。配合 No.1~No.12 を含め配合 No.13~18 (SHCRCC) は、モルタル容積が $540\sim 580 \text{ L/m}^3$ 程度の領域では、ワーカビリティの裕度が確保されている。

上記(2)に示すように、配合 No.14, 17 のモルタル容積は、SHCRCC の領域からは外れている。なお、配合 No.19, 20 (MCRCC) は、モルタル容積は $460\sim 490 \text{ L/m}^3$ 程度とペースト容積と同様に少ない。

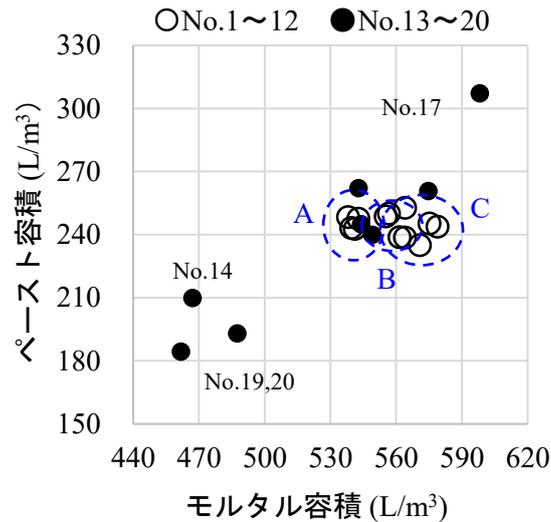


図 4-4 ペースト容積とモルタル容積の関係

4.1.3 ペースト・モルタル容積の関係

図 4-5 に結合材ペースト・モルタル容積比 (CP/M) とペースト・モルタル容積比 (P/M) の関係を示す。当該指標は、ICOLD⁹⁾や USACE³⁾に、推奨値が示されている。

配合 No.13~18 (SHCRCC) は、CP/M と P/M とともに、一定の高い範囲でばらついている。一方、配合 No.1~No.12 の CP/M と P/M は、石粉の代替率を高める領域 A から C のプロセスで線形関係を示している。また、CP/M (=0.31) と P/M (=0.41) 程度が下限値になっていると考えられる。CP/M と P/M の適切な比率および下限値があることは、石粉率を高めるプロセスにおいて、効率的に配合調整ができていることを示唆している。

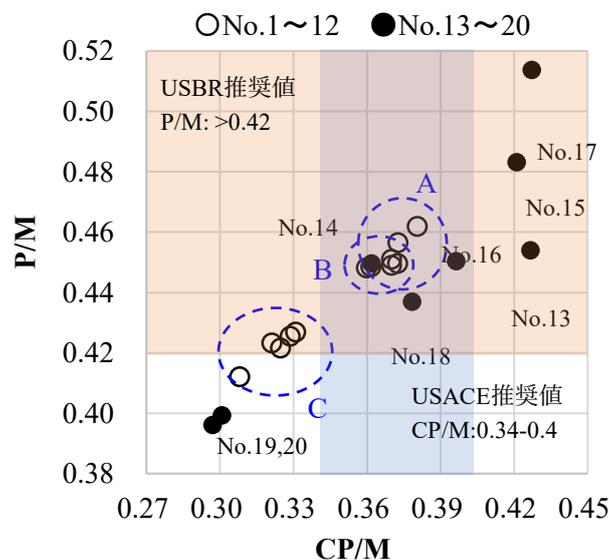


図 4-5 結合材ペースト・モルタル容積比とペースト・モルタル容積比の関係

4.1.4 α 値と β 値の関係

RCD ダムコンクリートの配合分析¹⁰⁾に用いられる α 値と β 値について考察する。ここで、 α 値はペースト容積／細骨材空隙の割合、 β 値はモルタル容積／粗骨材空隙の割合である。 α 値、 β 値ともに 1 より大きい場合は、余剰ペーストやモルタルが存在することになる。この余剰ペーストやモルタルは、全骨材の表面を覆うためにある程度の量が必要である。この余剰量が少ない場合には、材料分離が生じ、ワーカビリティが低下したコンクリートになる。RCD ダムコンクリートの目安は、 α 値が 1.2 程度、 β 値が 1.2～1.5 程度である。なお、RCC とは異なりペースト・モルタル容積には、石粉、化学混和剤量と空気量が含まれていないことから、RCC の数値は RCD ダムコンクリートの目安値より高くなる。

図 4-6 に、SHCRCC のワーカビリティを確保された NNP1 配合 No.1～No.12 の α 値と β 値の関係を示す。

配合 No.1～12 の α 値は 1.5～1.9、 β 値は 1.8～2.2 の領域となる。領域 A から C へと結合材を石粉で代替すると、 α 値は低下し β 値は上昇する。これは石粉量を増加させる過程で、細骨材率が増加し、粗骨材率が低下しているためである。細骨材率の増加に伴いペースト容積率が減少し、ワーカビリティが低下するため、SHCRCC と同等のワーカビリティの裕度を確保するためにも α の限界値があると考えられる。仮に石粉を代替せずに単位結合材量を減じると、 α 値は 1.1～1.5、 β 値は 1.7～2.0 と 2 割程度低下し、ワーカビリティの裕度が確保できなくなる。

以上より、SHCRCC と同等のワーカビリティの裕度を確保するためには、石粉および細骨材によりペースト・モルタル容積を増量させ、骨材の空隙率を 2 割程度の余剰量で充填させることが必要である。

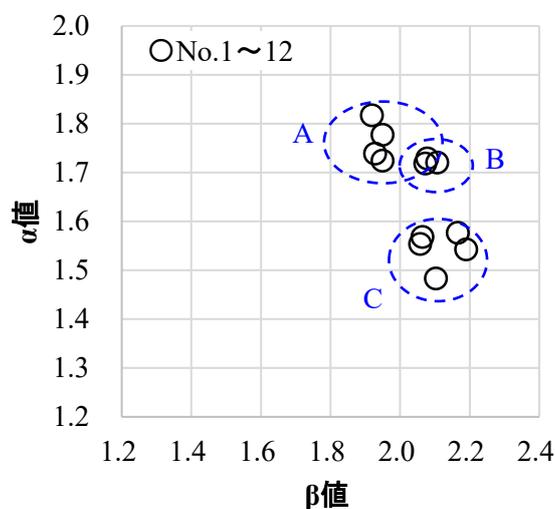


図 4-6 配合 No. 1～No. 12 の α 値と β 値の関係

4.1.5 石粉による強度と水密性への効果

(1) 強度

径 15 cm×高さ 30 cm の円柱供試体を用いて RCC の圧縮試験および直接引張試験を実施した。試験はそれぞれ ASTM C39¹¹⁾, CRD C164¹²⁾に準拠した。NNP1 配合 No.1～No.12 における材齢 365 日の圧縮強度とペースト容積の関係を図 4-7 および直接引張強度とペースト容積の関係を図 4-8 に示す。また、それぞれに ICOLD⁹⁾標準強度（標準値と称す）を緑線で併記する。SHCRCC の標準強度は、HCRCC と LCRCC の強度から外挿した。

標準値は、単位結合材量が増加するにつれて強度が高くなる。石粉代替による強度は、ペースト容積と相関係数 0.7～0.8 と強い相関関係がある。また、石粉代替により圧縮・直接引張強度ともに標準値より若干低下するものの、HCRCC と同程度の十分な強度が発現している。これらは、第 3 章に示す通り、石粉による微粒分効果およびポズラン反応による強度発現と考える。

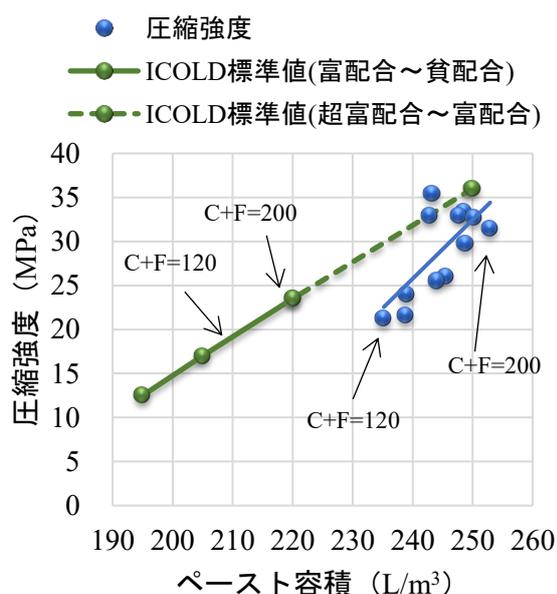


図 4-7 圧縮強度とペースト容積の関係

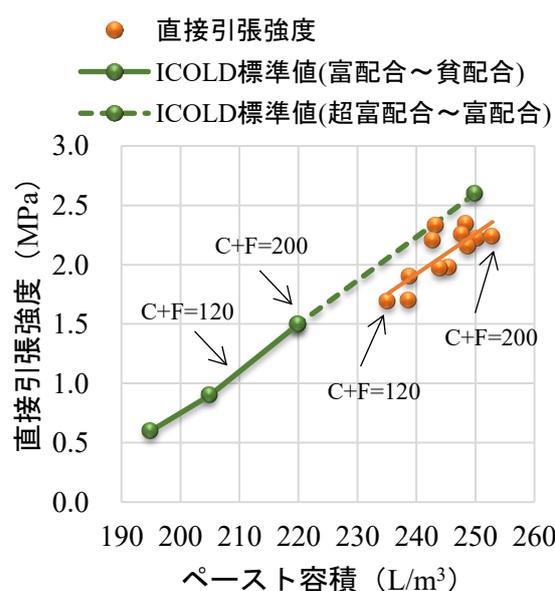


図 4-8 直接引張強度とペースト容積の関係

図 4-9 に直接引張／圧縮強度とペースト容積の関係を示す。

その結果は、配合 No.1～No.12 の直接引張／圧縮強度は 7～8%程度と、標準値と同程度または若干高くなっている。

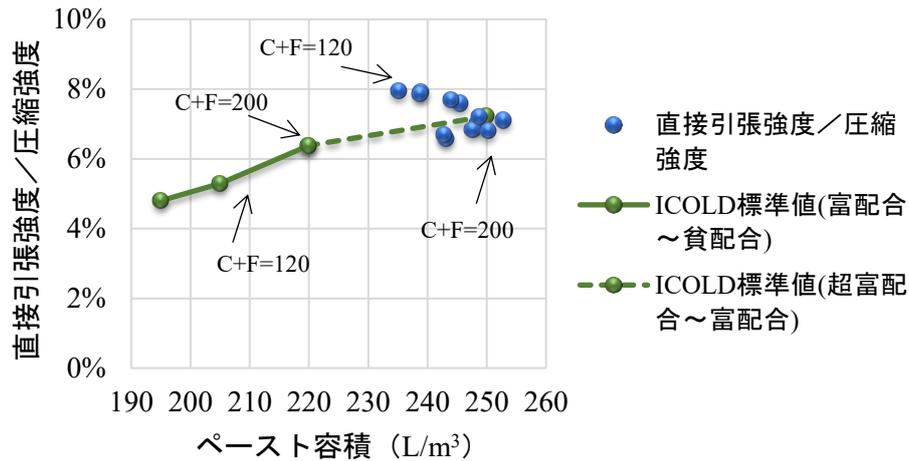


図 4-9 直接引張強度/圧縮強度とペースト容積の関係

次に、配合 No.1～No.12 における材齢 365 日の圧縮強度と結合材水比の関係を図 4-10、直接・割裂引張強度と結合材水比の関係を図 4-11 に示す。

その結果は、結合材水比と強度の R2 乗値は 0.8～0.9 と、正の強い相関性がある。

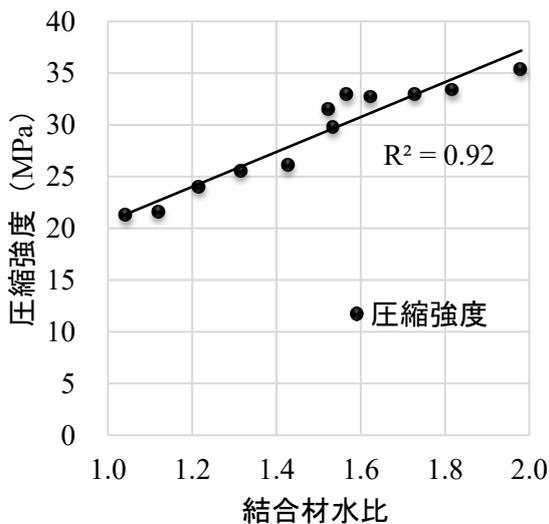


図 4-10 圧縮強度と結合材水比の関係

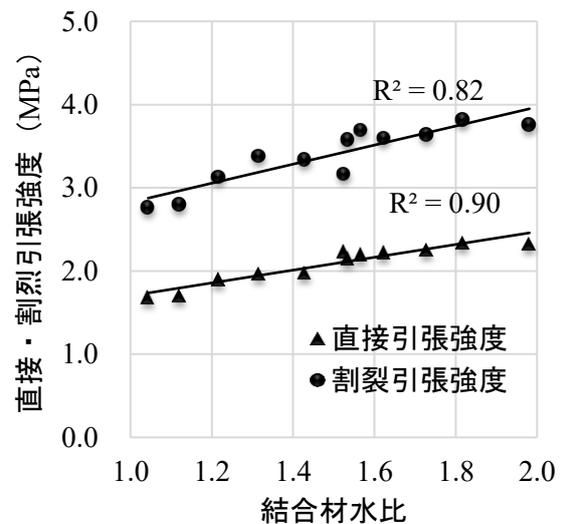


図 4-11 直接・割裂引張強度と結合材水比の関係

材齢 365 日の直接引張強度/圧縮強度と結合材水比の関係を図 4-12、割裂引張強度/圧縮強度と結合材水比の関係を図 4-13 に示す。

その結果は、直接引張強度/圧縮強度は平均 7.3% (R2 乗値 0.83) , 直接引張強度/圧縮強度は 7.5%, 割裂引張強度/圧縮強度は、平均 11.9% (R2 乗値 0.61) と、結合材水比と強度には負の相関性がある。

一方、割裂引張強度／圧縮強度は、圧縮力を加えて割裂した力を引張強度として置き換えていることから、圧縮力に依存し、直接引張強度／圧縮強度と USACE³⁾の上下限値の関係のようにやや高い強度比ではなく、USACE³⁾の平均的な強度比になっていると考えられる。

以上より、配合 No.1～No.12 における石粉代替では、石粉の影響はなく、RCC は従来のコンクリートと類似した一般的な力学的性質を有していることがわかった。

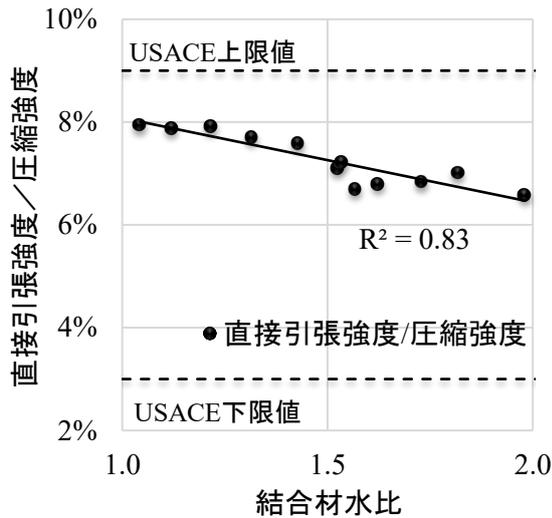


図 4-12 直接引張強度／圧縮強度と結合材水比の関係

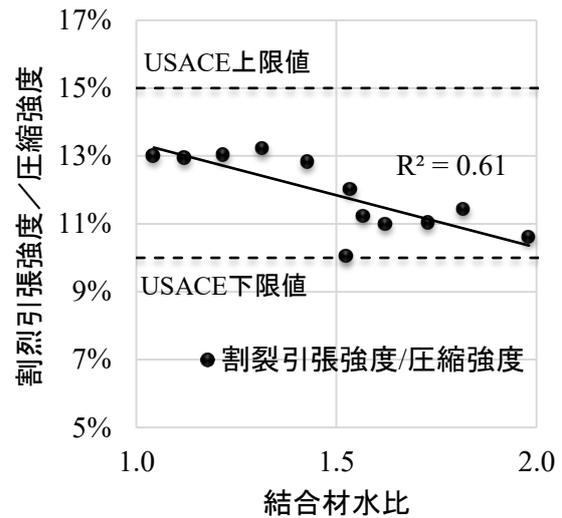


図 4-13 割裂引張強度／圧縮強度と結合材水比の関係

(2) 水密性

水密性については、図 2-6 に示す 3 本の堤内排水孔（径 10 cm）を用いて、配合 No.7, No.8, No.12 の打継目を含む区間（コンクリート材齢は、3 ヶ月～1 年程度）で、2.4.7(3)に示すパッカー法による現場透水試験により検証した。

図 4-14 に透水係数とペースト容積の関係を示す。また、ICOLD⁹⁾の標準透水係数（標準値と称す）を併記する。単位結合材量の増加に伴い透水係数が小さくなっている。単位結合材量が 175 kg/m^3 から 120 kg/m^3 に減量しても、透水係数は、 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ の範囲で標準値の HCRCC（単位結合材量 150 kg/m^3 ）と、大きな差はなく十分な機能を果たしている。

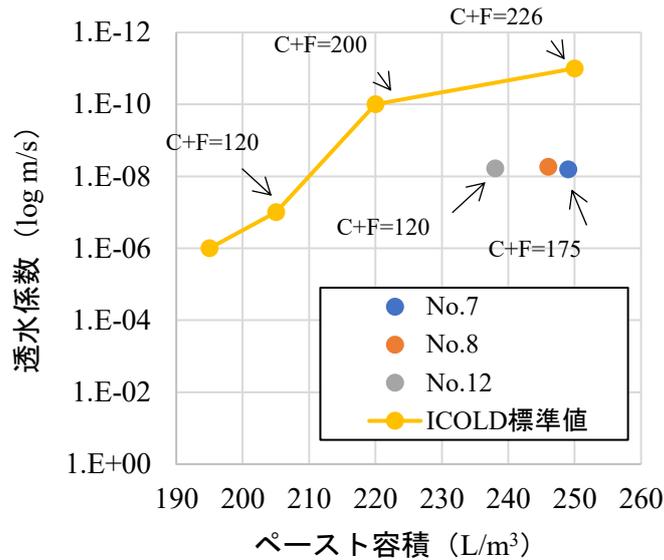


図 4-14 透水係数とペースト容積の関係

4.2 石粉代替による超富配合 RCC の設計手法

4.2.1 細骨材に含む石粉率の向上

4.1 では、結合材を石粉に代替することで、SHCRCC と同等のワーカビリティの裕度を確保できることを示した。また、石粉代替率を高める手法として、細骨材の石粉率を高める、あるいは配合の細骨材率を増加させることを示した。

例えば、NNP1 では、石粉代替率を高めるために、図 4-15 に示す骨材製造過程での改良などにより、石粉率を高めるとともに、細骨材の製造量を増産させた。

まず、プラント改良に伴うコストが小さく、効果が大きい石粉の増産方法を以下に示す。これらの汎用的な方法によって、NNP1 では、建設期間中の安定的な供給とともに、石粉率を 3~5%程度高めることができた。

- a) コーンクラッシャーの破砕（滞留）時間の延長
- b) バーマックの回転速度を高速化させて、細骨材を製造
- c) 振動スクリーンの振動時間を延長させて、粗骨材に付着している石粉を細骨材へ混入
- d) 各粉砕機やベルトコンベアに石粉の飛散防止カバーを設置し、石粉を細骨材へ混入

次に、大幅なコスト増加を伴うプラントの改良方法などを以下に示す。

- e) ボールミルを設置し、石粉を製造

- f) セパレーターを設置し、粗骨材より石粉を分級
- g) コーンクラッシャーで製造された細骨材をバーマックに投入
- h) 石粉や混和材（ポズランなど）を外部から購入。なお、ダム堤体積が大きいと必要量が多くなり、安定的な調達は難しくなるが、選択肢としては考慮。
なお、製造された石粉は石粉専用のサイロに貯蔵される。

また、細骨材の増産方法を以下に示す。i)は軽微な方法、j)は大幅なコスト増加を伴う方法である。

- i) a)に加え、コーンクラッシャーで製造された粗骨材をコーンクラッシャーに繰り返し投入
- j) 製造された粗骨材をバーマックに投入

なお、石粉と細骨材の製造にあたっては、原石の種類や原石山の特性および骨材製造のプロセスなどを勘案して、目標とする RCC 配合を達成するための骨材製造プラントを設計（選択）および改良をすることが望ましい。

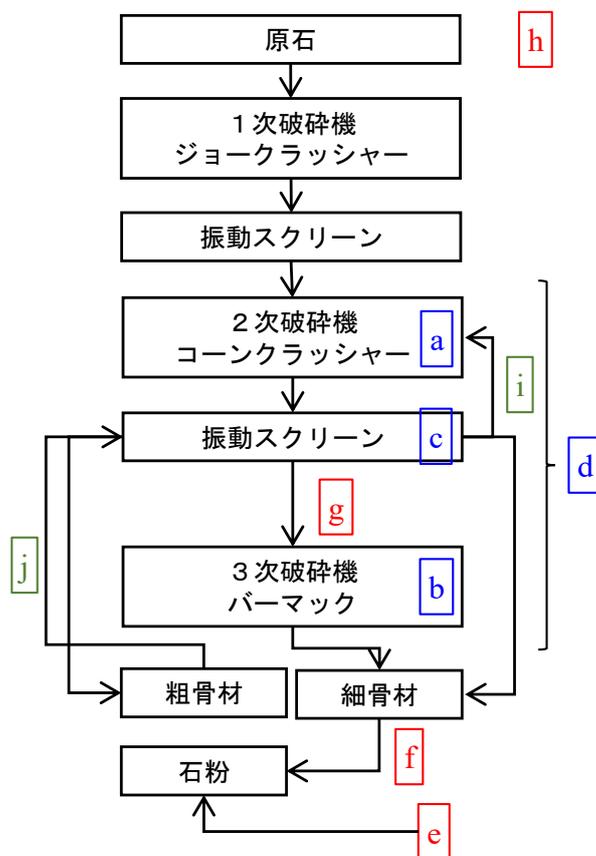


図 4-15 NNP1 の乾式骨材製造過程

4.2.2 ダムのゾーニング

表 4-2 および図 3-3 に示す NNP1 ダムのゾーニングは、経済性に資する石粉代替による SHCRCC を実現するための参考事例となる。

図 4-16 に示す通り、簡易的に堤高 150 m、堤体積 200 万 m^3 の大規模な RCC ダムを想定する。ダムのゾーニングは、低標高部は単位結合材量 220 kg/m^3 (C90F130) とし、標高を上げるにつれて石粉代替率を高めながら結合材を約 25 kg/m^3 ずつ減少させる (計 5 配合)。

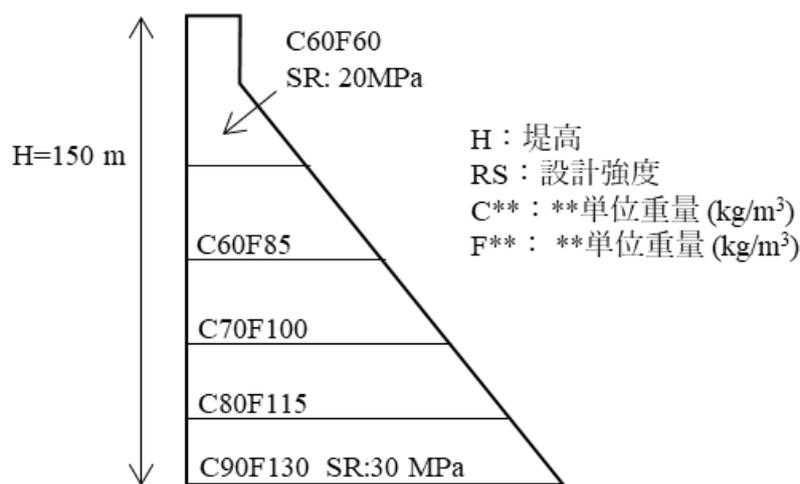


図 4-16 ダムのゾーニング

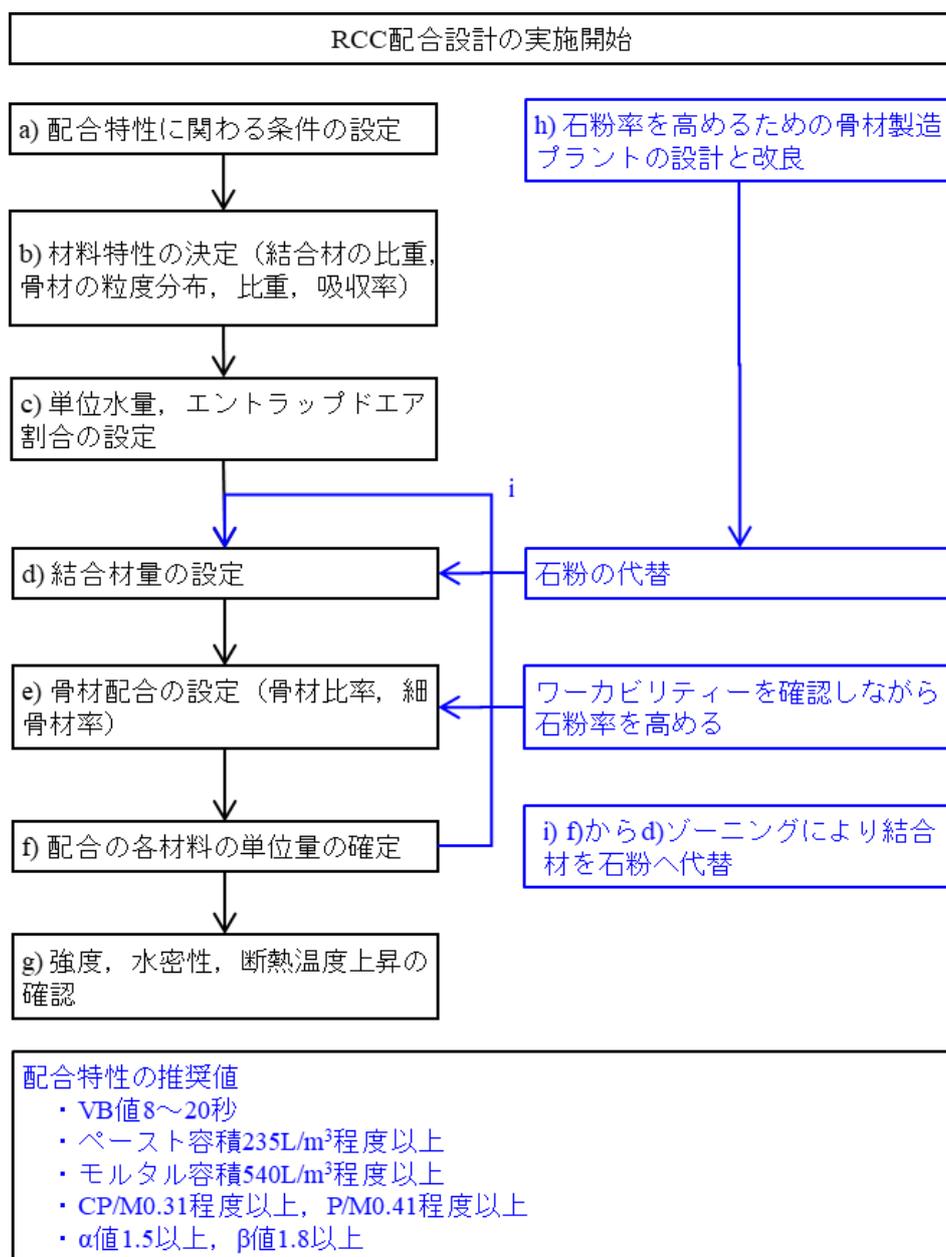
4.2.3 超富配合 RCC 設計の実践フロー

上記で得られた知見を踏まえ、石粉代替による SHCRCC を実現するための実践フローを図 4-17 に示す。これらは、USACE³⁾と ICOLD⁹⁾に示された配合設計フローに修正を加えたものである。なお、図には、SHCRCC と同等のワーカビリティーの裕度を確保するためのペースト・モルタル容積など配合特性の推奨値を示す。

ただし、適用範囲は NNP1 で使用した材料および配合 (単位結合材量 $200 \sim 120 \text{ kg/m}^3$, FA 置換率 $50 \sim 65\%$, 石粉代替率 $35 \sim 55\%$) による範囲とする。各フローの説明を以下に示す。

- 配合特性に関わる条件の設定
- 材料特性の決定 (結合材の比重, 骨材の粒度分布, 比重, 吸収率など)
- 単位水量, エントラップドエア割合の設定
- ダムのゾーニングに応じた単位結合材量とし, 不足分は石粉で代替

- e) 骨材比率と細骨材率を設定し、ワーカビリティを確認しながら石粉率を高める
(石粉の代替率を高める際は、P/MとCP/Mの比率に留意)
- f) 配合の各材料の単位量の設定
- g) コンクリートの強度、水密性、断熱温度上昇量を確認
- h) 石粉率を高めるための骨材製造プラントの設計と改良(外部調達など他の選択も考慮)
- i) f)からd)は、ダムのゾーニングに応じて、石粉代替率を高める



黒字：USACE³⁾とICOLD⁹⁾参照

青字：石粉代替によるSHCRCC配合設計実践フロー

図 4-17 石粉代替による SHCRCC を実現するための実践フロー

4.2.4 石粉代替の超富配合 RCC によるコスト削減効果

(1) 材料コスト

図 4-16 に示すダムのゾーニングを用いて、石粉代替による SHCRCC のコスト削減効果を検証する。一般公示単価 (OPC : 80 USD/ton, FA : 30 USD/ton)¹³⁾、および一般調達単価 (化学混和剤 (遅延減水型) 1.5 USD/kg) を適用した場合、6.6 Million USD のコスト削減となる。これは、材料コスト (結合材, 化学混和剤) の 25~30% 程度に相当する。また、NNP1 のようにプロジェクト地点近傍で FA や化学混和剤の調達が困難な場合、より大きなコスト削減効果となる。なお、結合材を石粉に代替することで、コンクリートの温度上昇量の抑制にも寄与し、冷却設備などのコスト削減にもつながる。さらに、セメント製造に伴う二酸化炭素排出量の削減にも寄与する。

(2) RCC 打設速度

石粉代替による SHCRCC の打設速度を検証する。約 280 地点の SHCRCC, HCRCC および MCRCC を適用したダムの月間平均打設量×堤体積/堤高×堤頂長 (各層の平均打設面積に相当する) の関係¹⁴⁾を図 4-18 に示す。また、各配合の近似曲線を実線で示す。SHCRCC および HCRCC の打設速度は、MCRCC より約 20%程度速いことになる。理由としては、各施工プロセスでの調整が不要となることから、RCC ダム施工の生産性効率が大きく、ワーカビリティの裕度が大きいと推察できる。

次に、NNP1 の実績は、図中のひし形で示す。石粉代替の SHCRCC の打設速度は、ワーカビリティの裕度が大きいことから MCRCC より約 20%程度向上 (SHCRCC と同程度以上) させることができる。

またこれらは、RCC ダム施工の生産性効率の向上は大幅な工程短縮につながり、骨材製造プラントや RCC 製造プラント、RCC 運搬設備などの仮設備の機器損料 (供用日数)、RCC 打設に伴う人件費および重機などの機器損料 (供用日数) を削減することができる、大幅なコスト削減に寄与する。

なお、NNP1 の月間平均打設量は、標準的な SHCRCC よりもさらに RCC の打設量が向上しているが、スロープレイヤー打設工法の適用や作業員のトレーニングによる効果が加味されていると推察される。これらの RCC ダムの施工については、第 6 章で論じる。

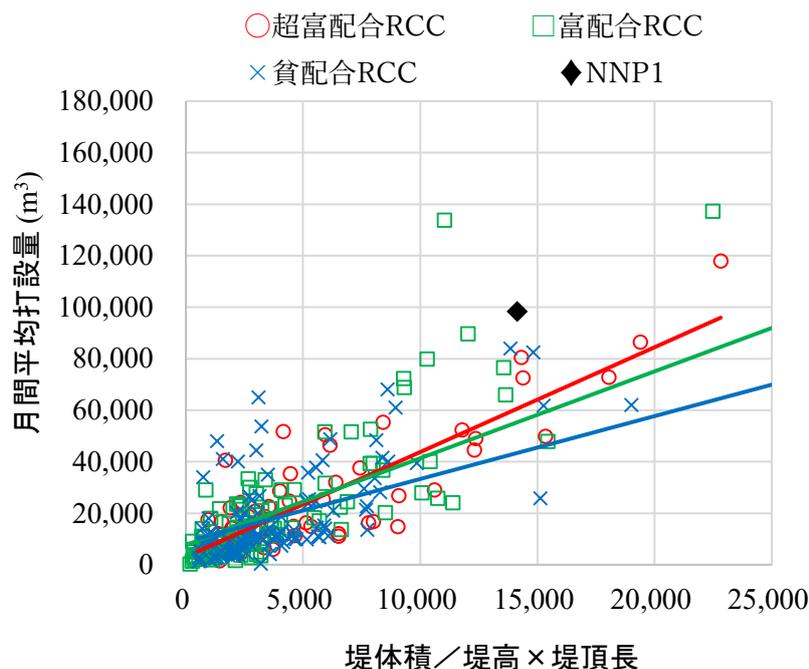


図 4-18 月間平均打設量と堤体積／堤高×堤頂長の関係

4.3 まとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

- 1) 単位結合材量 220 kg/m^3 以上となる SHCRCC は、ペースト容積が $240 \sim 260 \text{ L/m}^3$ と、多い配合であることがわかった。また、経済的な RCC 配合を実現するために、結合材を 100 kg/m^3 程度、石粉に代替することが可能であることがわかった。
- 2) NNP1 の RCC 配合におけるペースト・モルタル容積比 (P/M) と結合材ペースト・モルタル容積比 (CP/M) の関係は、石粉の代替率を増加させる過程で線形関係となることがわかった。また、CP/M は 0.31, P/M は 0.41 と下限値が存在し、石粉の代替率を増加させる過程で、CP/M と P/M の比率を調整することが重要であることがわかった。
- 3) RCC の特性を表す指標として、ペースト容積／細骨材空隙の割合である α 値、モルタル容積／粗骨材空隙の割合である β 値に着目する。ワーカビリティの裕度が確保された SHCRCC の α 値および β 値は、それぞれ 1.5 から 1.9, 1.8 から 2.2 であった。これは、骨材全体を余剰ペーストやモルタルで覆うことで、RCC の材料分離を低減し、転圧し易くしている。また、配合の細骨材率が増加させ、石粉の代替率を増加させることで、ペースト容積が減少するため、ワーカビリティが徐々に低下する。よって、SHCRCC と同等のワーカビリティの裕度を確保するためには、 α 値に限界値があると考えられる。

- 4) 石粉代替の SHCRCC は、圧縮強度、引張強度および水密性は、HCRCC と比較して同程度以上であり、石粉が結合材の代替として十分な役割を果たしていることがわかった。また、単位結合材量を減らすことは、RCC の温度上昇量の抑制にも寄与する。
- 5) 石粉代替の SHCRCC は、従来のコンクリートと類似した一般的な力学的性質を有していることがわかった。
- 6) 石粉や原石山の特徴を配慮し、石粉率を確保するための骨材製造プラントを設計（選択）および改良することが望ましい。
- 7) 石粉代替による新たな SHCRCC を実現するための実践フローを示した。設計手法は、USACE³⁾と ICOLD⁹⁾に示された配合設計フローに基づき、NNP1 の RCC に適用した材料および配合（単位結合材量 200~120 kg/m³、FA 置換率 50~65%、石粉代替率 33~55%）の範囲での修正を行った。また、ペースト・モルタル容積などの推奨値を示した。
- 8) 石粉代替による SHCRCC の効果は、建設コスト削減、RCC ダムの高速施工の確保および環境負荷低減であることを示した。例えば、堤高 150 m、堤体積 200 万 m³、ダムゾーニング（5 配合）を適用した大規模 RCC ダムの場合、結合材と化学混和剤のコストを 25~30%程度削減することができる。また、RCC の打設速度は、ワーカビリティの裕度が大きいことから MCRCC より約 20%程度向上（SCRCC と同程度以上）させることができる。そして、RCC ダムの高速施工による工程短縮に伴い、仮設備の機器損料および人件費を大幅に削減することができる。さらに、セメント製造に伴う二酸化炭素排出量の削減に寄与する。

第 7 章では、各章で示す RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証するために、RCC ダムの水密性と耐荷性について検証した。本章と関連して得られた結論を以下に示す。

- 1) 7.3.3 より、RCC 供試体の強度は、全て設計強度を確保していることを確認した。また、打継目を含むコア供試体の直接引張強度は、RCC 供試体の強度と同等であることがわかった。
- 2) 4.1.5(2)および7.2 より、打継目を含めダム堤体の水密性は大きな欠陥もなく、RCC ダムの水密性が確保されていると評価できる。
- 3) 以上より、4.3(4)および4.3(5)に示す結論については、打継目を含む場合も同様であることがわかった。

参考文献

- 1) ASTM International: Standard Specification for Concrete Aggregate (ASTM C33-19), 15pp., 2019
- 2) British Standards Institution: Testing aggregates. Methods for determination of particle shape - Flakiness index (BS 812-105), 10pp., 1990
- 3) US Army Corps of Engineers: Roller-Compacted Concrete, Engineering and Design, pp.1-35, 2006
- 4) ASTM International: Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table (ASTM C1170-06), 5pp., 2006
- 5) 永山功, 渡辺和夫: RCD用コンクリートに用いるVC試験機の標準化に関する検討, 土木研究所資料, 第3136号, 33pp., 1992
- 6) Brian Alistair Forbes: Using sloped layers to improve RCC dam construction, Civil Structures, pp.34-39, 2003
- 7) 島津義郎, 薬師寺公文, 高橋陽一: 骨材微粒分を含むコンクリートの性状に関する基礎的研究, ダム工学, No.13, pp.40-49, 1994
- 8) 白村暁, 鈴木徳行: 微粒分混入率がRCD用コンクリートの諸特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.484, V-22, pp.77-86, 1994
- 9) International Commission on Large Dams: Roller-Compacted Concrete Dam (Bulletin 177), pp.1-143, 2020
- 10) ダム技術センター: RCD工法施工技術資料, RCD工法整理検討会, II. RCDコンクリート特性に関する研究, pp.1-22, 2016
- 11) ASTM International: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39-19), 10pp., 2019
- 12) US Army Corps of Engineers: Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Cylindrical Concrete or Mortar Specimens (CRD C164-92), 4pp., 1992
- 13) Class F Fly Ash: PennState College of Engineering, <<https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/materials/Altmaterials/Class%20F%20Fly%20Ash.htm>> (参照: 2021年7月1日)
- 14) Dunstan, M, R.: Malcolm Dunstan & Associates, Specialists in Roller Compacted Concrete Dam [online], <<http://www.rccdams.co.uk/about/>> (参照: 2021年7月1日)

第5章 RCC ダムの合理的な堤体・構造物の設計

5.1 ダム堤体のせん断キー設計

5.1.1 NNP1 ダムサイトの地質と弱層

(1) 地質

図5-1に示す通り NNP1 ダムサイトは、砂岩と泥岩の互層からなり、ダム軸付近の左岸から河床部では、下流右岸側に約15度から25度で傾斜している。右岸側には上下流方向の軸を持つ褶曲帯（向斜構造）が分布し、地層は右岸上部に向けて急傾斜となり、さらに高標高部では再度緩傾斜となる。褶曲軸付近では、層面すべりが発達している。層面すべりが発達する砂岩においては、地層面に直交する割れ目と層面すべりが複合してブロック構造がみられる。泥岩においても砂岩と同等の変形が生じたと考えられるが強度が低く塑性変形が生じやすいため割れ目は発達しにくかったものと考えられる。一部の砂岩には層面すべりの方向と調和的な応力方向により生じたと考えられる逆断層センスの明瞭な条線が認められる。圧縮応力が極大に作用した部分で、層面すべりだけでは変位を吸収できずに砂岩の破断が生じたのではないかと考えられる^{1~4)}。

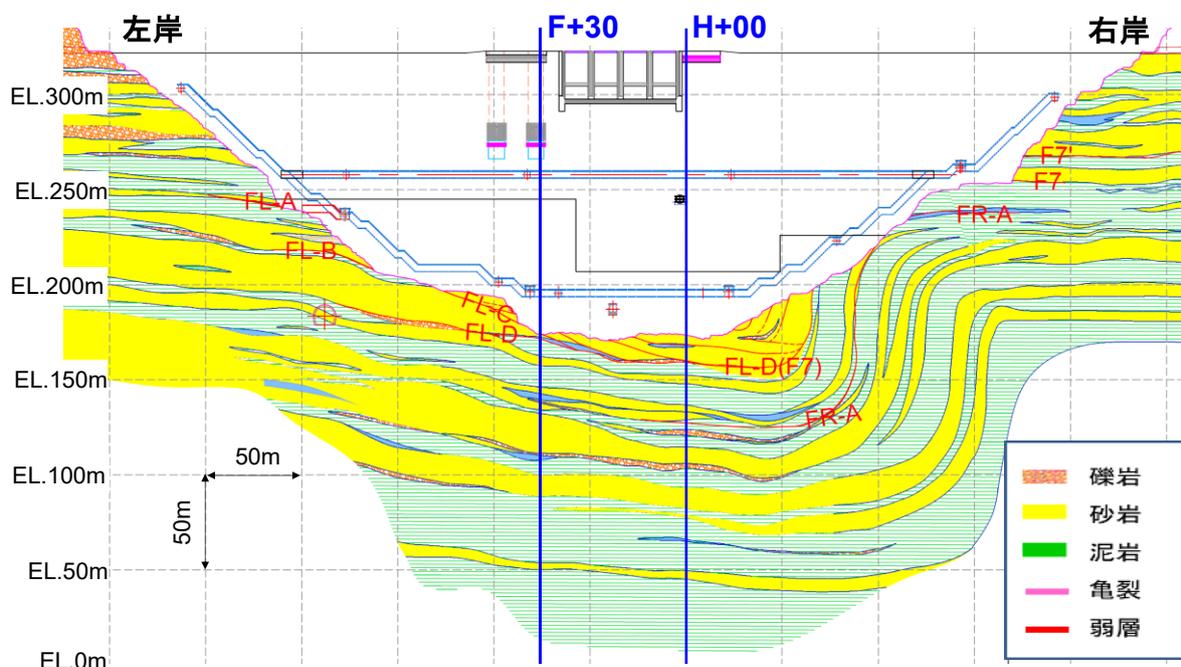
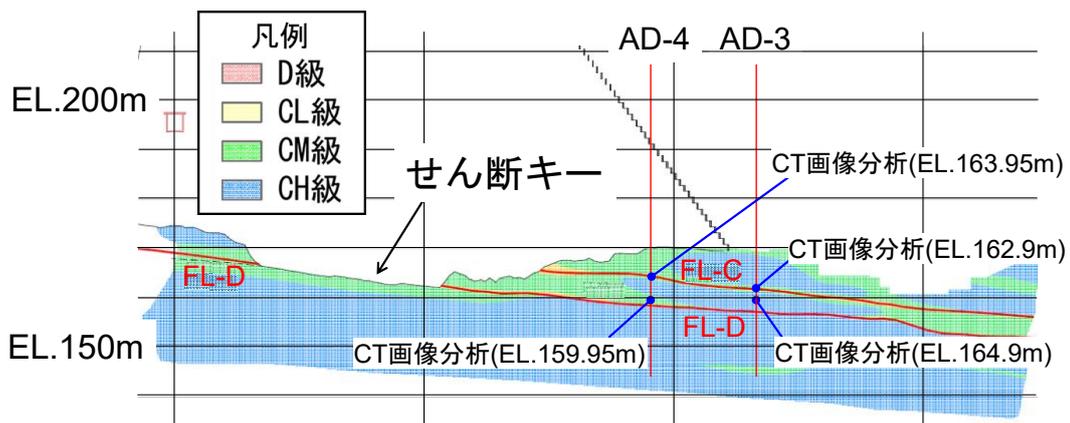


図5-1 ダム地質図（岩質，ダム軸方向）

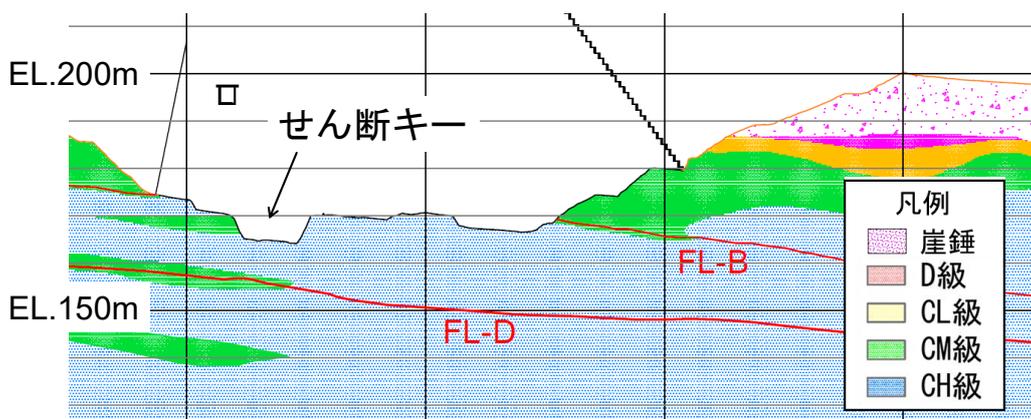
(2) 弱層の概要^{1~4)}

図 5-2 に河床部の上下流方向地質断面図（岩級）を示す。F+30 断面では FL-C と FL-D、H+00 断面では FL-B と FL-D の 2 本の弱層が下流下がりで存在する。

弱層の厚さは 0.3 m から 2 m で、泥岩が角礫状に破碎し一部で薄い粘土状を伴う。弱層および周辺部は、風化によりしばしば軟質化し、黒色から暗褐色を呈する。なお、FL-D より下位標高には、連続する弱層が無いこと、弱層に膨潤性の粘土を含まないことを図 5-2 と図 5-3 に示す AD-3 と AD-4 で採取したボーリングコアの X 線 CT 画像解析や XRD による分析で確認している^{5~7)}。F+30 断面の堤敷下流側では、発電所を建設するために岩盤を深く掘削しており、弱層の上部に位置する岩盤の厚みがほとんどなくなっている。このため、ダム の 滑 動 に 抵 抗 す る 受 動 圧 を 期 待 でき ない 厳 しい 条 件 と な っ て い る。



(1) F+30 断面



(2) H+00 断面

図 5-2 ダム地質図（岩級，上下流方向）

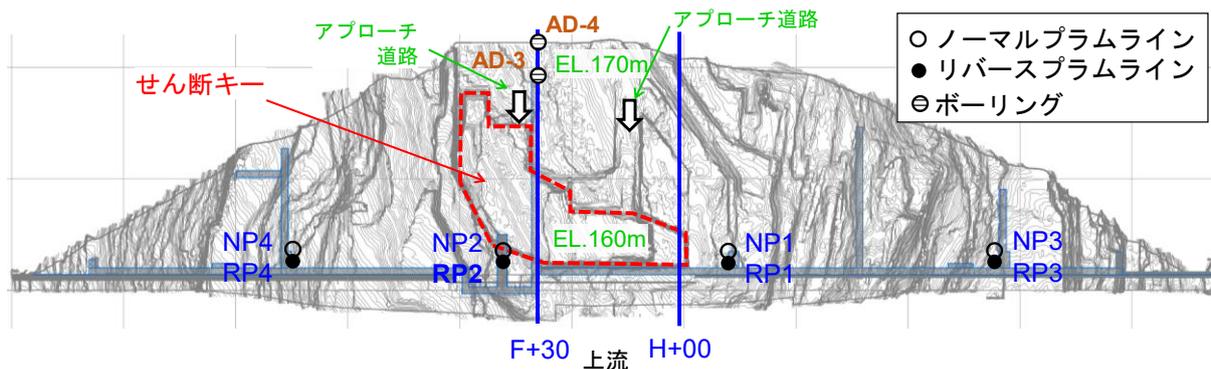


図 5-3 せん断キー施工図

図 5-4 に弱層の代表的なモデル（ボーリングコアと模式図）を示す。Type I は比較的均質な砂岩に挟在する泥岩の破碎，Type II は強く風化した砂岩あるいは礫岩を伴う泥岩の破碎，Type III は方解石が溶脱した空隙を伴う赤色泥岩の破碎である。これらの破碎部周辺の岩相と，風化の程度は互いに関連していると考えられ，各種室内分析結果と併せて 5.1.6 で考察する。また，図 5-5 にせん断キー掘削時の壁面に現れた FL-D の様子を示す。

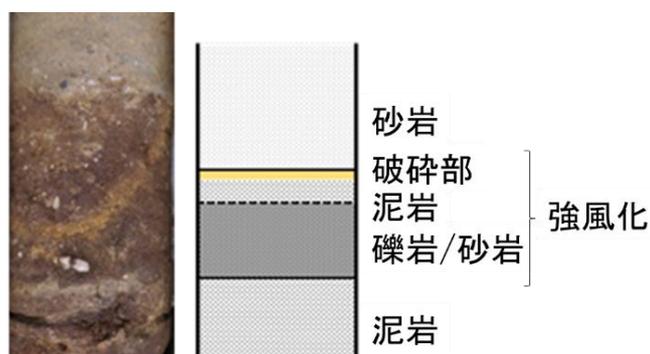


図 5-4 弱層の代表的なモデル（ボーリングコアと模式図）



図 5-5 弱層 (FL-D) の様子

(3) 弱層の性状^{1~5, 7)}

ボーリングコアの弱層部と河床掘削面に露出している弱層から採取した攪乱試料に対して、圧密排水状態の一面せん断試験を実施した。地盤工学会の土の圧密定圧一面せん断試験方法 (JGS 0561)⁸⁾を参考に、完成後のダム荷重を考慮してダム湛水後の圧密された弱層の長期強度を再現するのに十分安全側となるよう、最大拘束圧力を 2 MPa、せん断速度を 0.05 mm/分で実施した。また、試験から得られた残留強度、粘着力 0 MPa、内部摩擦角 23.65 度を、弱層を構成する細粒分 (粘土成分) の物性値とみなした。この値は、粘性土の強度と塑性指数の関係から求まる、粘着力 0 MPa 内部摩擦角 25 度と比べても十分保守的な評価と言える。

5.1.2 せん断キーによる対策

低角度の弱層が河床部に広範囲に分布していることから、ダムの滑動に対する安定性を向上させる対策として、フィレットの拡大やマットコンクリートによる堤敷長の拡大は有利とはならない。そこで、工事費の増加および工程遅延が少なく、最も実用的な対策として、図 5-6 に示すように、弱層の一部を掘削し、コンクリートで置換するダム堤体のせん断キーを採用することとした^{6, 9, 10)}。

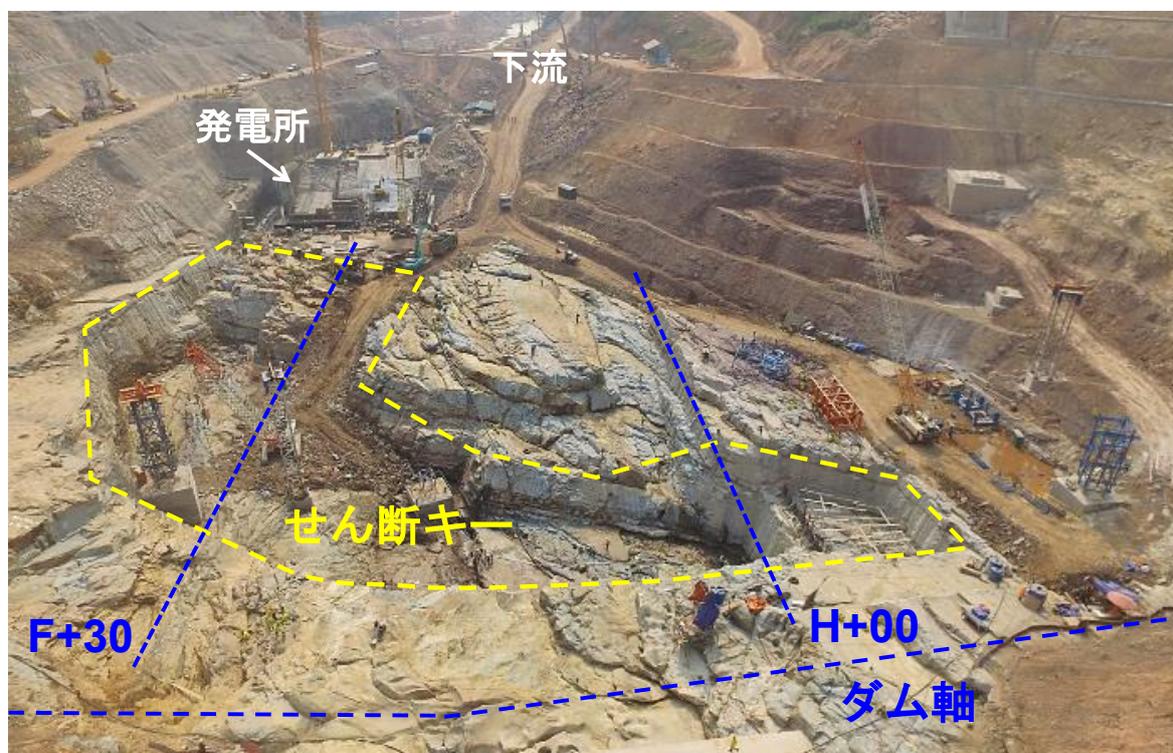


図 5-6 NNP1 のせん断キーの掘削状況 (上流から望む)

当該地点では、ダム基礎岩盤に弱層が存在し、F+30 断面では発電所の掘削により厚みがほとんどないため、せん断キーを設けない場合には、ダムからのスラスト力によりダム堤趾近傍の岩盤の応力、変形が大きくなり、弱層のせん断変形も大きくなることが想定された。よって、弱層を考慮したくさび解析により最も効果的かつ合理的（経済性、施工性、工期など）なせん断キーの配置を決め、2次元静的弾塑性 FEM 解析によりせん断キーの有無によるダムの基礎岩盤の健全性を評価する。

5.1.3 くさび解析によるせん断キー設計

くさび解析¹⁰⁾は、2.4.3 に基づき検討する。計算を行う断面は、図 5-2 に示す F+30 および H+00 断面とする。荷重条件は、常時は自重、満水時（WL.320.0 m）の静水圧（下流含む）および揚圧力とし、地震時は常時に加え、運転基準地震（OBE）による地震力と動水圧とする。なお、ラオスは地震活動が活発でないため、OBE（145 年相当）ではかなり小さくなるので、安全のため水平震度 $K_h=0.1g$ （1,500 年相当）を採用した。コンクリート、岩盤および弱層の密度、粘着力および内部摩擦角を表 5-1 に示す。必要安全率は、常時 2.0、地震時 1.7 とした。

くさび解析による繰返し計算の結果、必要な安全率を確保するためのせん断キーの形状は、図 5-2 に示す通り、F+30 断面では FL-C と FL-D、H+00 断面では FL-B を掘り込み、これらの弱層より下部の岩盤に定着させることとなった。せん断キーの大きさは、F+30 断面で、深さ 10 m、幅 35 m、下流端はダム堤趾からの距離が 50 m である。また、H+00 断面で、深さ 10 m、幅 35 m、下流端はダム堤趾からの距離が 50 m である。

表 5-1 岩盤、弱層とダムコンクリートの物性

項目	記号	単位	CH 級岩盤	CM 級岩盤	弱層	コンクリート
密度	ρ	kN/m ³	25.50	24.40	-	22.54
静弾性係数	E	MPa	12,760	4,000	-	20,000
せん断剛性	G	MPa	-	-	108	-
ポアソン比	ν	-	0.3	0.3	-	0.2
粘着力	C	MPa	2.754	2.009	0.000	-
内部摩擦角	φ	-	47.5	42.5	25.0	-

5.1.4 2次元静的弾塑性FEM解析

せん断キーを配置した際の、ダム堤体、岩盤および弱層の応力・変形状態を確かめるために、2次元静的弾塑性FEM解析（以下、2次元FEM解析と称す）を実施した。考慮した作用荷重は、自重、満水時の静水圧、OBEによる地震力、動水圧であり、解析断面は、F+30およびH+00断面である。以降のFEM解析はすべて、汎用FEM解析プログラムであるISCEF¹¹⁾を用いた。

図5-7にF+30およびH+00断面の解析モデルを示す。2次元FEM解析では、ダム堤体とせん断キーからのスラスト力が作用するダム堤趾近傍やせん断キーの底面から下流側の応力状態や、弱層のせん断変形の把握を目的とするため、解析モデルはダム堤体と、弱層を含むダムの基礎岩盤を連成させたモデルとした。

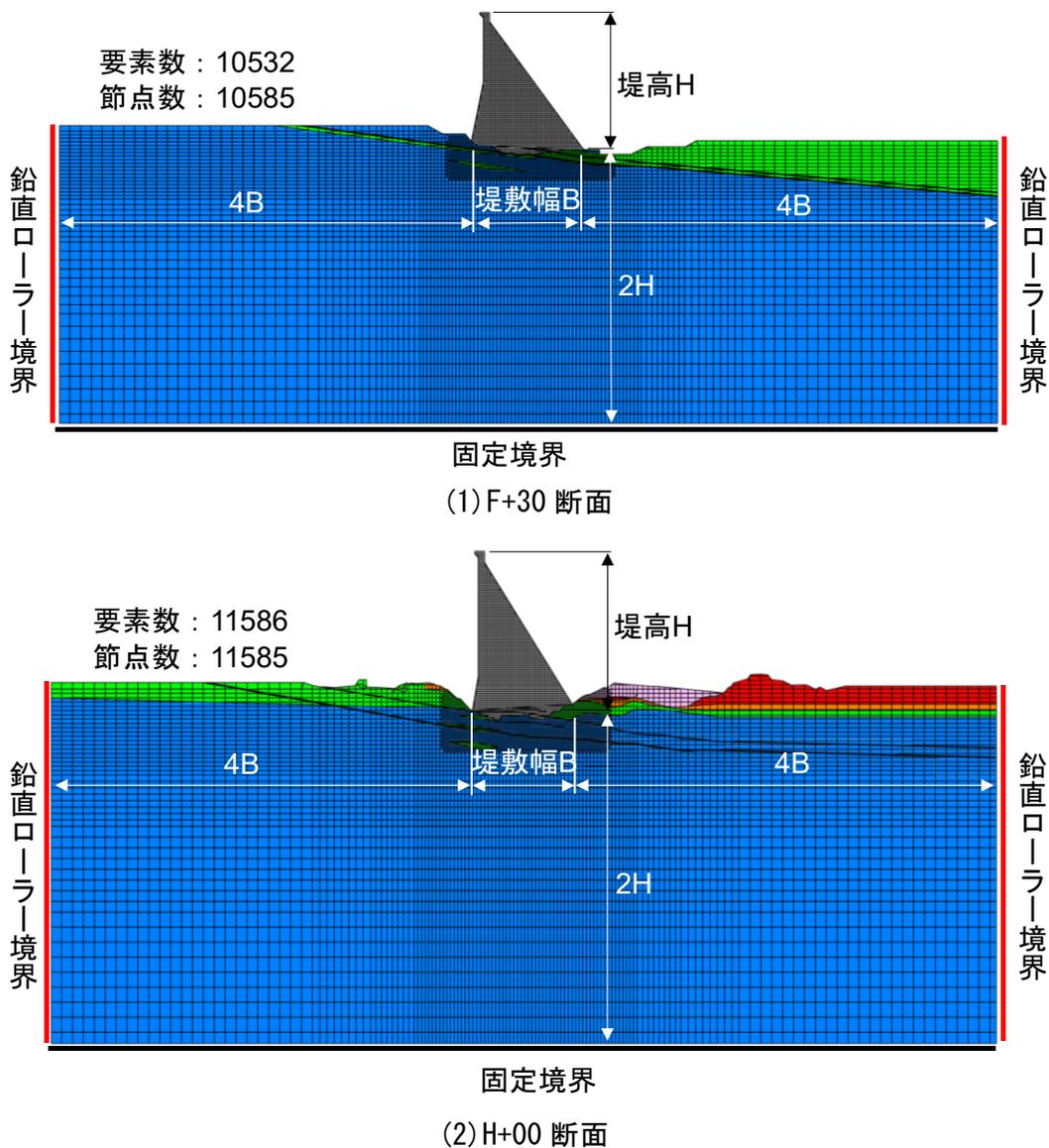


図5-7 2次元FEMモデル（せん断キーあり）

重力式コンクリートダム の 2 次元 FEM 解析では、ダム堤体に作用する水圧や慣性力、上流側の岩盤表面に作用する水圧やダム堤体底面に作用する揚圧力などにより、基礎岩盤に引張応力が発生する場合がある。この引張応力による岩盤の損傷を検討する場合には、岩盤の不連続性を考慮した引張強度の設定が必要となる。一方、本解析では、せん断キーの有無や設置位置の違いによる、せん断キーの底面から下流側やダム堤趾近傍での応力の相対的な比較を主な目的とするため、ダム堤体上流側の岩盤に生じる可能性がある引張応力の影響は考慮せず、線形弾性体としてモデル化した。岩盤の静弾性係数は、CH 級 12,760 MPa、CM 級 4,000 MPa と設定した。また、上流側の岩盤表面や岩盤内に作用する水圧についても、相対的な比較を行う観点から、2 次元 FEM 解析で考慮しないこととした。

要素形状は、ダム堤体、せん断キーおよび基礎岩盤は平面ひずみ要素、岩盤の不連続面となる弱層は、厚さが 0.3 m から 2 m と薄く、せん断挙動が支配的であると考えられることから、ジョイント要素でモデル化した。岩盤のモデル化範囲は、上下流方向にそれぞれ 4B (B : 堤敷幅)、鉛直方向に 2H (H : 堤高) とした。境界条件は、岩盤の底面を固定、側面を鉛直ローラーとした。

物性条件は表 5-1 に示す通りである。岩盤には、モール・クーロンの破壊規準によりせん断破壊に対する安全性の評価に用いるため、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を設定した。弱層は、ジョイント要素のせん断方向の力学的特性に図 5-8 に示すバイリニア型の弾塑性モデルを用い、せん断強さ τ_f まではせん断バネ剛性 K_s 、せん断強度に達した後は剛性を 0 とした。せん断強度 τ_f は、表 5-1 の弱層の c 、 ϕ を用いて、式 (5.1) により要素毎に設定した。せん断バネ剛性 K_s は、せん断剛性 G から、弱層の厚さ t を FL-B、FL-C は 0.5 m、FL-D は 1.0 m として、式 (5.2) により弱層毎に設定した。ジョイント面の直交方向の剛性 K_N は、圧縮方向は十分に剛な値としてジョイント下側の岩盤の静弾性係数の 1,000 倍、引張方向は 0 とした。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (5.1)$$

$$K_s = \frac{G}{t} \quad (5.2)$$

ここに、 τ_f : 弱層のせん断強度 (MPa)、 c : 弱層の粘着力 (MPa)、 ϕ : 弱層の内部摩擦角 (MPa)、 σ : ジョイント面に作用する直応力 (MPa)、 K_s : 弱層のせん断バネ剛性 (MPa)、 G : 弱層のせん断剛性 (MPa)、 t : 各弱層の厚さ (m) である。

解析は、まず岩盤のみの自重解析を行い、続けて、ダム堤体自重を概ね高さ 4 m 毎に 36 ステップ、貯水による静水圧を 11 ステップに分割して作用させた後、上流から下流方向への地震力と動水圧を作用させた。

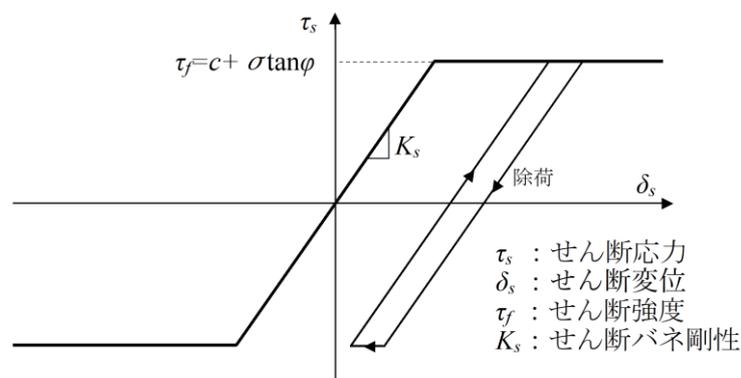
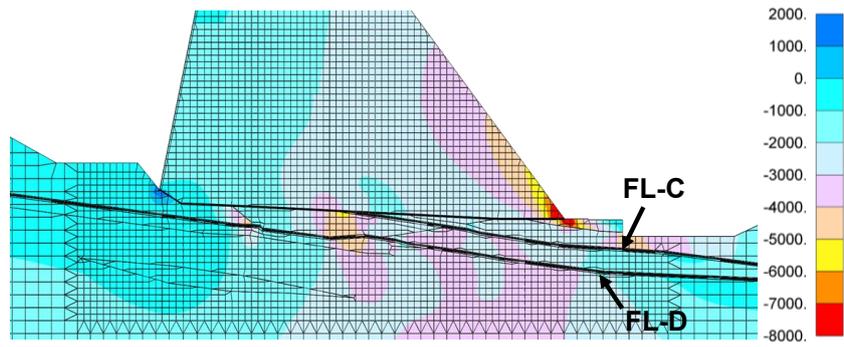


図 5-8 弱層のジョイント要素の弾塑性モデル

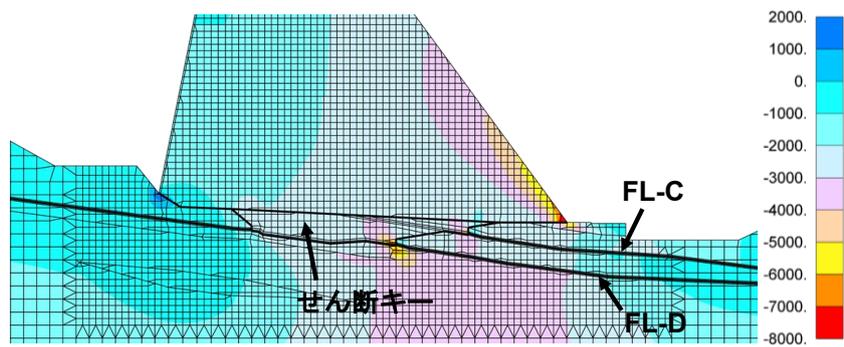
5.1.5 2次元 FEM 解析によるせん断キーの効果

図 5-9 および図 5-10 に、F+30 および H+00 断面でのせん断キーの有無に対する解析で得られた、OBE 時の最小主応力（負符号が圧縮応力）の分布を示す。最小主応力分布より、せん断キーがない場合、ダム堤趾付近の堤体や岩盤に集中する圧縮応力が、せん断キーを配置することで低減していることが確認できる。

また、せん断キーの底面では、図 5-11 に示す F+30 断面での主応力方向からも確認できる通り、せん断キーを設けることで下部の岩盤に応力を伝えやすい鉛直に近い方向に変化し、FL-D や FL-B より下部の良好な岩盤に荷重を伝達できていることがわかる。

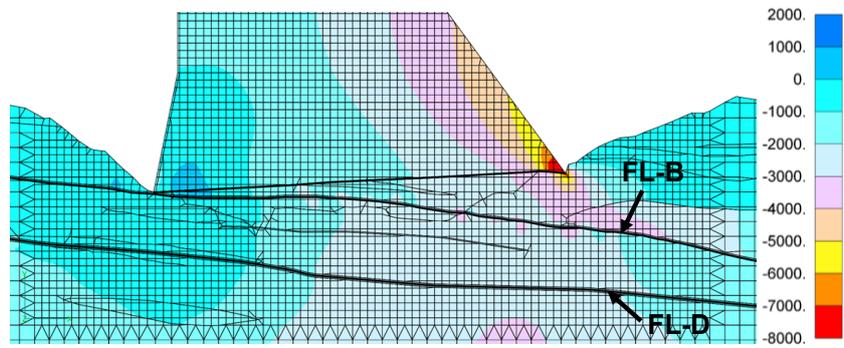


(1) せん断キーなし

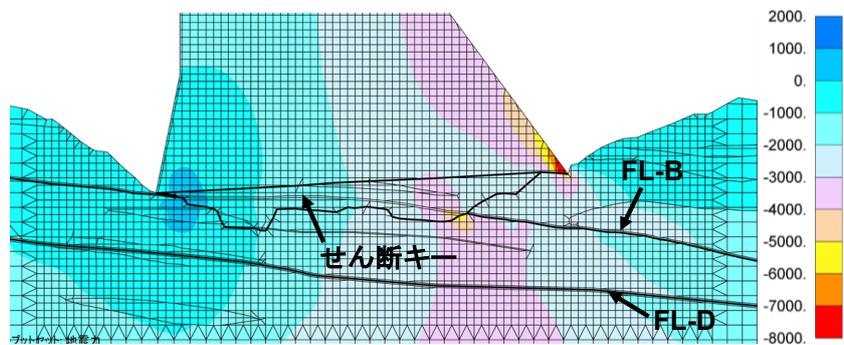


(2) せん断キーあり

図 5-9 OBE 時の最小応力分布 (F+30 断面, 単位: kN/m^2)

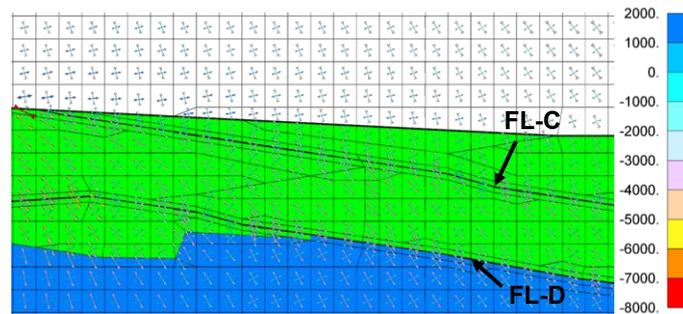


(1) せん断キーなし

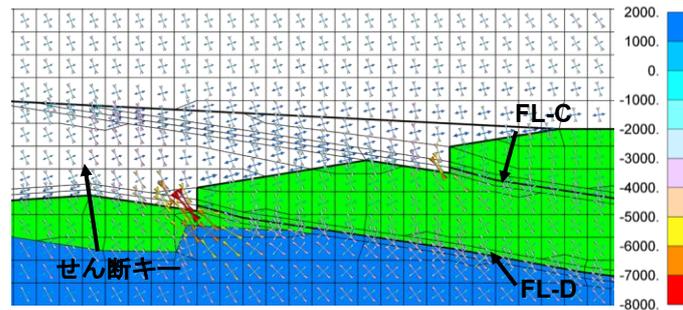


(2) せん断キーあり

図 5-10 OBE 時の最小応力分布 (H+00 断面, 単位: kN/m^2)



(1) せん断キーなし



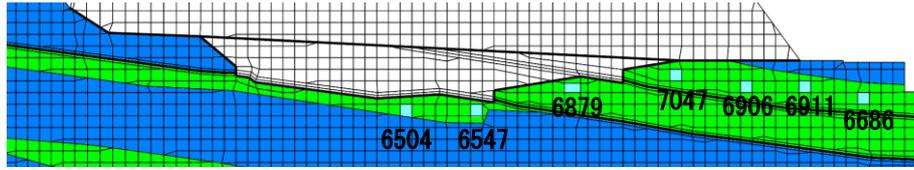
(2) せん断キーあり

図 5-11 OBE 時の主応力方向 (F+30 断面, 単位 : kN/m^2)

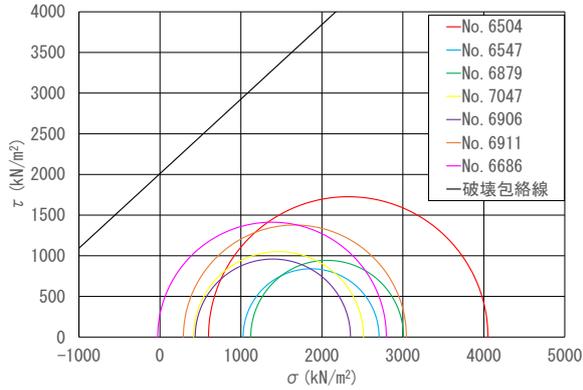
図 5-12 および図 5-13 には, F+30 および H+00 断面の代表要素での主応力の変化を示す. 図中の直線は, 表 5-1 に示した岩盤の強度によるモール・クーロンの破壊規準である.

図 5-12 の F+30 断面では, 要素番号 6911 や 6686 に代表される FL-C よりも上方の薄い岩盤に集中する応力が緩和されることで, これらの位置の岩盤の安全性の向上に寄与している. 一方で, 要素番号 6719 や 6547 に代表される FL-D より下部の岩盤の一部では, せん断キーから伝達されるせん断応力が大きくなり, モール円が大きくなっているものの, 岩盤破壊に対する安全性は確保できている.

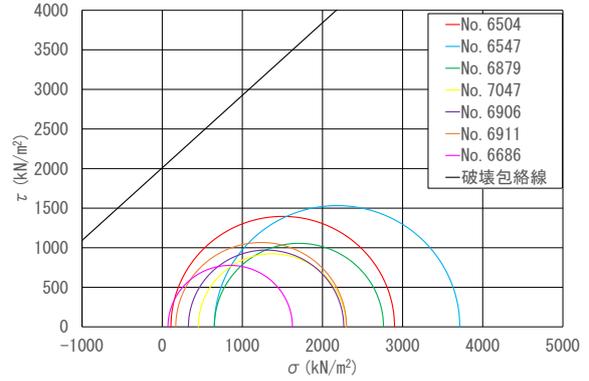
図 5-13 の H+00 断面でも同様に, 要素番号 7843 に代表される堤趾部近傍の岩盤では応力の集中が緩和され, 7027 に代表される FL-B 下部の岩盤では, せん断キーから伝達される圧縮応力とせん断応力を負担している.



(1) 代表要素位置

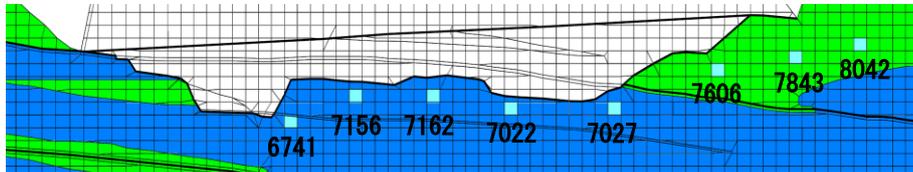


(2) 主応力（せん断キーなし）

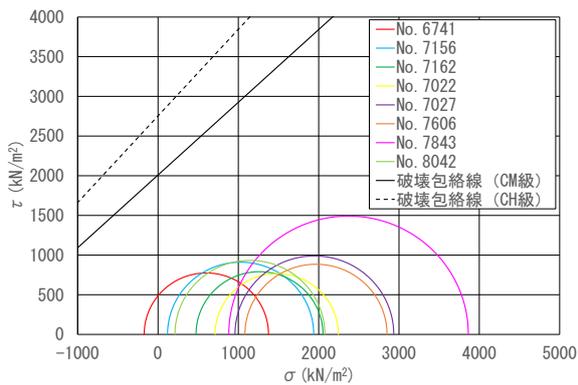


(3) 主応力（せん断キーあり）

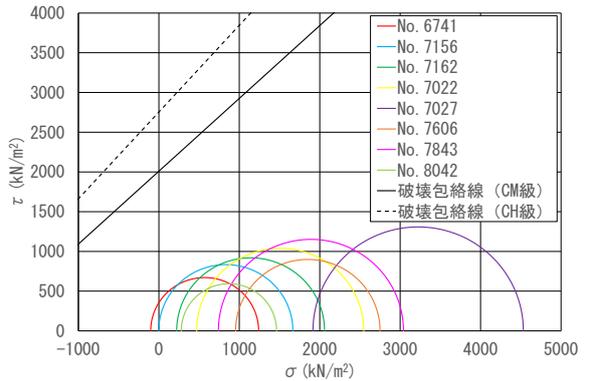
図 5-12 OBE 時の主応力 (F+30 断面)



(1) 代表要素位置



(2) 主応力（せん断キーなし）



(3) 主応力（せん断キーあり）

図 5-13 OBE 時の主応力 (H+00 断面)

図 5-14 には、OBE 時の F+30 断面に対して、せん断キーを設置した場合の岩盤内の局所安全率の変化を示す。局所安全率は式 (5.3) により算出した。堤趾部近傍の FL-D より上部の岩盤では、広い範囲で局所安全率が高くなっている。

$$F_S = \frac{2c \cdot \cos\phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin\phi}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5.3)$$

ここに、 σ_1 ：岩盤の各要素の最大主応力 (MPa) ， σ_3 ：岩盤の各要素の最小主応力 (MPa) ， c ：岩盤の各岩級の粘着力 (MPa) ， ϕ ：岩盤の各岩級の内部摩擦角(°)，である。

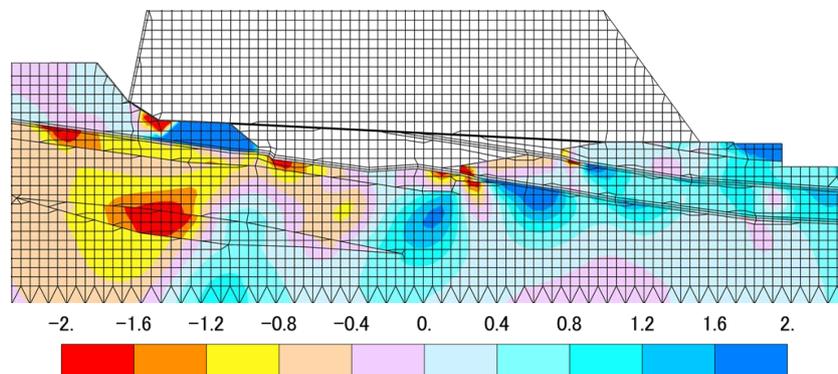
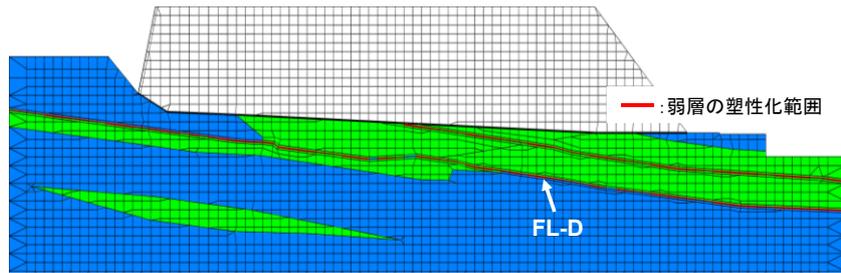


図 5-14 OBE 時の岩盤内局所安全率の変化 (F+30 断面)

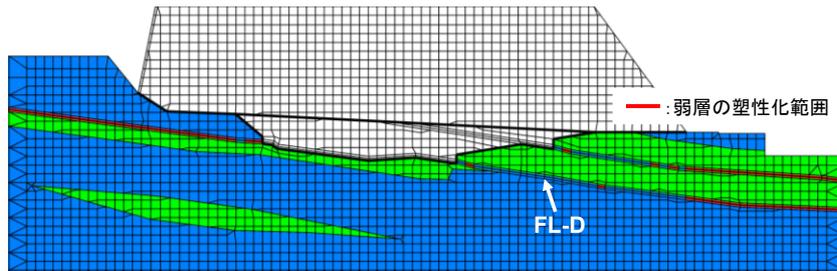
図 5-15 には、F+30 断面での OBE 時の弱層の塑性化範囲を、図 5-16 には弱層の上下の岩盤の相対変位分布を示す。

図 5-15 では、ジョイント要素でモデル化した弱層が、OBE 地震時に塑性化した範囲を赤線で示している。せん断キーがない場合は、FL-C、FL-D とともにダム堤体下部のほぼ全域が塑性化した。せん断キーを配置した場合は、せん断キーの下流側では塑性化していない。

図 5-16 の FL-D 上下の岩盤の相対変位は、せん断キーを配置した場合は堤敷上流端で 12 mm と、せん断キーがない場合の 39 mm に比べて大きく抑制された。



(1) せん断キーなし



(2) せん断キーあり

図 5-15 OBE 時の弱層の塑性化範囲 (F+30 断面)

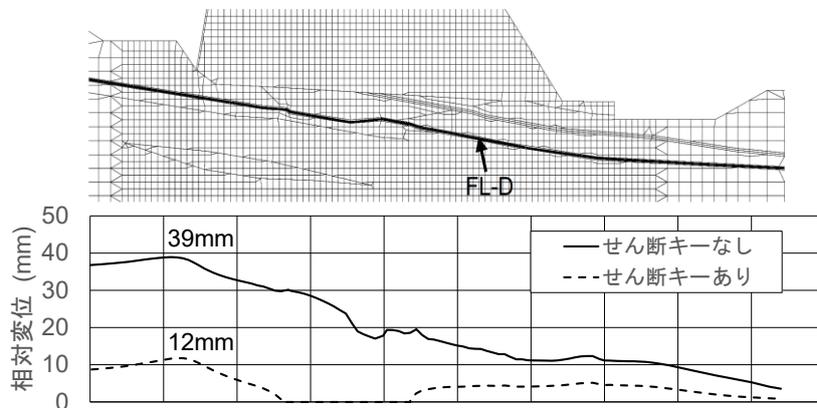


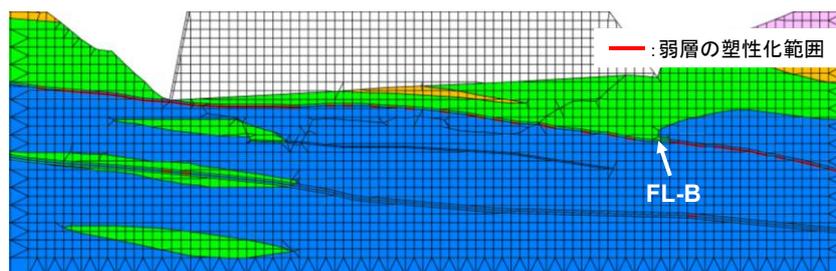
図 5-16 OBE 時の FL-D の上下での相対変位分布 (F+30 断面)

図 5-17 および図 5-18 には、H+00 断面に対して F+30 断面と同じ整理を行った結果を示す。塑性化範囲や弱層 FL-B 上下の岩盤の相対変位は、F+30 断面と同様にせん断キーを設けることで減少した。ただし、ダム堤体下流側にある程度の規模の岩盤を有する H+00 断面では、F+30 断面と比べてせん断キーがない場合の塑性化範囲や弱層上下の岩盤の相対変位が小さく、下流側岩盤による受動圧の効果が大きいと推察する。

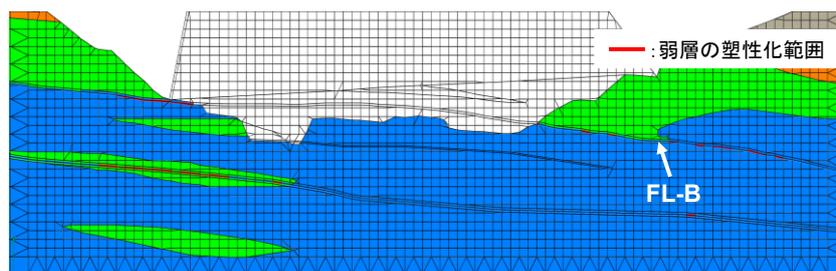
以上より、本設計で計画したせん断キーの配置により、ダム堤趾近傍に集中する圧縮応力をせん断キー下部の良好な岩盤に分配するとともに、弱層の塑性化範囲や

弱層上下の岩盤の相対変位を低減することで、ダム安全性向上に寄与することを確認した。また、その効果は、ダム堤体下流側の岩盤による受動圧が期待できない F+30 断面でより顕著であった。

一方、図 5-19 に示す通り、せん断キー下流側の弱層との境界付近では、局所的に $3,000 \text{ kN/m}^2$ 程度のコンクリートの引張強度を上回る引張応力が確認された。したがって、同箇所には十分な補強鉄筋を配置してせん断キーのひび割れ発生防止を図った。



(1) せん断キーなし



(2) せん断キーあり

図 5-17 OBE 時の弱層の塑性化範囲 (H+00 断面)

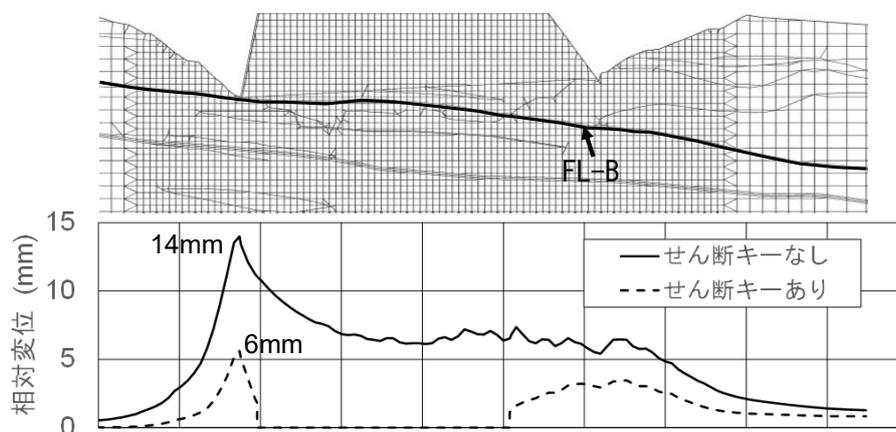


図 5-18 OBE 時の FL-B の上下での相対変位分布 (H+00 断面)

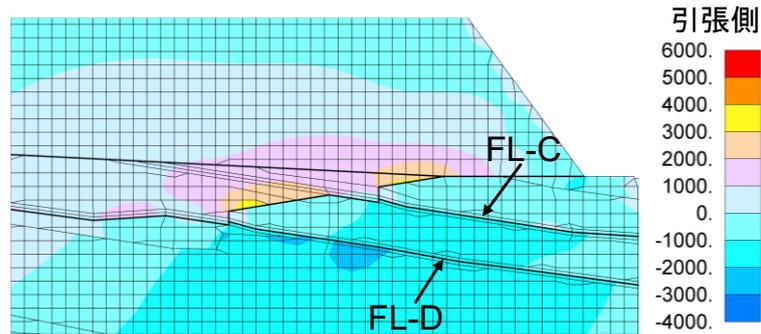


図 5-19 OBE 時の最大主応力分布（ F+30 断面， 単位： kN/m²）

5.1.6 配置の違いによるせん断キーの効果

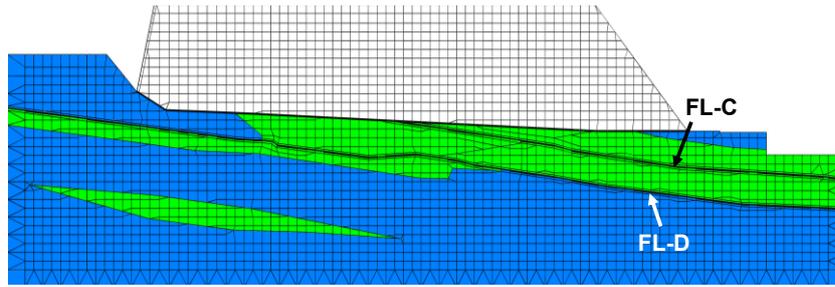
せん断キーの配置は，ダムの安定性を確保することが最優先であるが，掘削ずり運搬のためのアプローチ道路の敷設や上部法面の切り直しへの影響といった施工面の影響も考慮して決定する必要がある．そこで，せん断キーの配置の違いが，弱層の塑性化や相対変位，岩盤内の応力へ及ぼす影響について， F+30 断面での 2 次元 FEM 解析により検討した． F+30 断面は，堤敷下流の岩盤が発電所建設に伴い掘削されており，弱層より上部の岩盤が薄く受動圧が期待し難い断面である．

(1) 解析モデルの設定

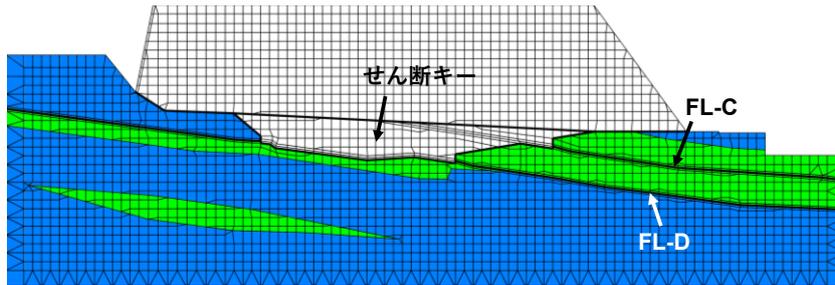
図 5-20 に， F+30 断面での解析モデルを示す． F+30-c0 はせん断キーを配置しない場合， F+30-c1 が堤敷の中央付近にせん断キーを配置した形状であり， F+30-c2， F+30-c3 は，施工上の制約を考慮せずに，せん断キーの掘削量を F+30-c0 とほぼ同じとして上流側あるいは下流側に配置したものである．いずれのケースも，せん断キー下面は FL-D より下側の岩盤に着岩している．

(2) せん断キーによる圧縮応力の低減効果

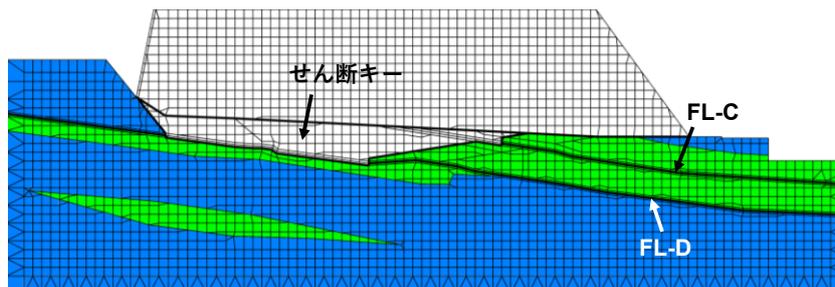
図 5-21 に， OBE 時の最小主応力分布を示す．既述の通り，せん断キーを配置しない F+30-c0 では，発電所建設に伴い掘削されたダム堤体下流の弱層上部の薄い岩盤で圧縮応力が大きくなった．せん断キーを設けた場合は，いずれの位置の場合も圧縮応力の集中が緩和され，せん断キーより下流側の FL-D 下部の岩盤で負担している．これより，ダム堤体下流の岩盤の応力負担を低減させること， FL-D より下部の岩盤に応力を伝達することを目的とした場合， F+30-c1 から F+30-c3 のいずれの位置にせん断キーを配置した場合にも，ほぼ同等の効果が得られることを確認した．



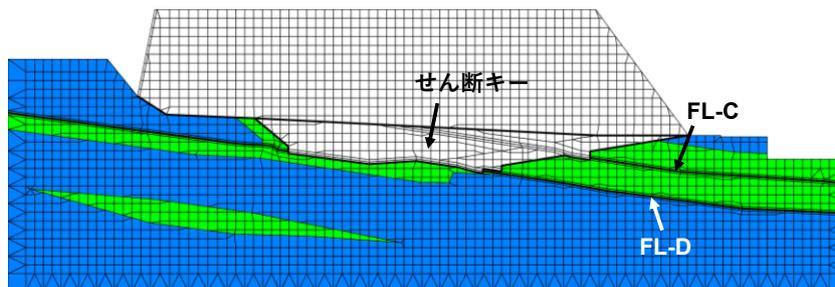
(1) せん断キーなし (F+30-c0)



(2) せん断キー中央 (F+30-c1)

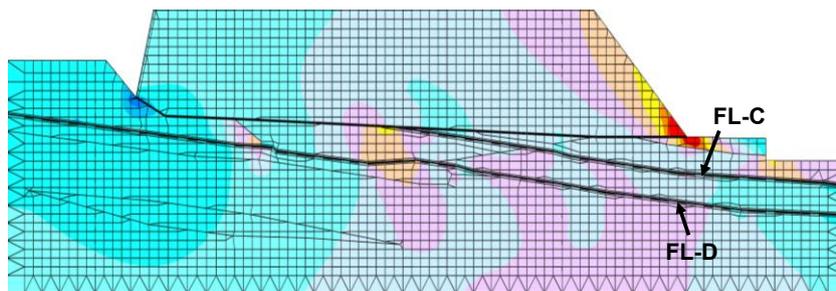


(3) せん断キー上流側 (F+30-c2)

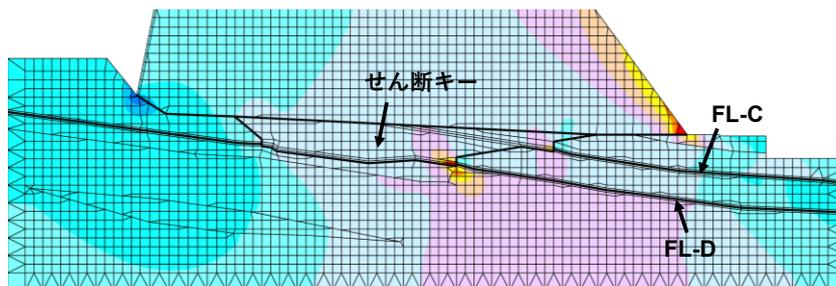


(4) せん断キー下流側 (F+30-c3)

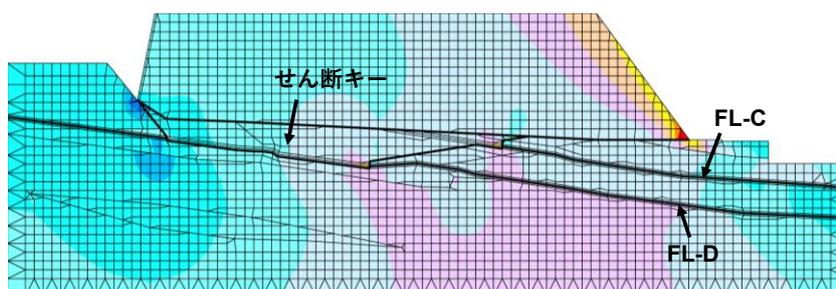
図 5-20 FEM 解析モデル (F+30 断面)



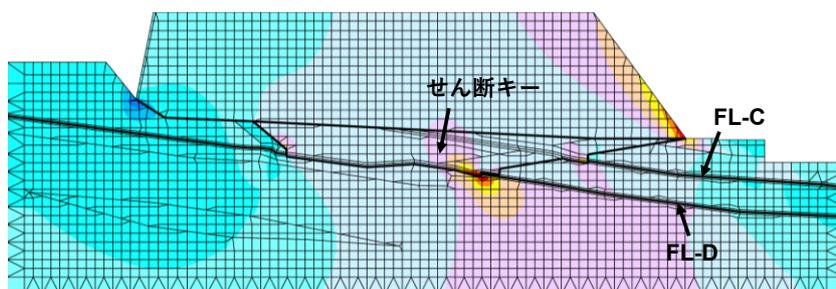
(1) せん断キ一なし (F+30-c0)



(2) せん断キ一中央 (F+30-c1)



(3) せん断キ一上流側 (F+30-c2)



(4) せん断キ一下流側 (F+30-c3)



図 5-21 OBE 時の最小主応力分布 (単位 : kN/m^2)

(3) せん断キーによる岩盤変位の低減効果

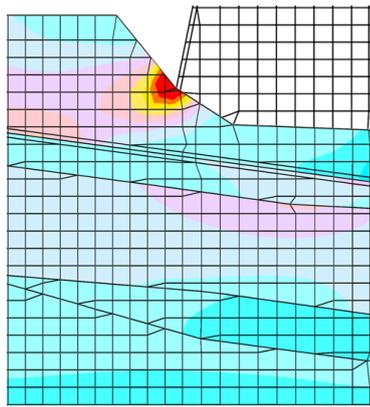
表 5-2 に、OBE 時のダム堤体天端の水平変位量を示す。ここでの水平変位量は、弱層に生じるせん断変形の包括的な確認を目的として、ダム軸位置の FEM モデル下端とダム堤体天端の相対変位量とした。その結果、せん断キーを配置した場合の天端位置での相対変位量は、せん断キーの位置によらずほぼ同じであった。これより、弱層に生じるせん断変形の低減についても、せん断キーの位置によらず、ほぼ同等の効果が得られることを確認した。

表 5-2 ダム堤体天端の水平変位量

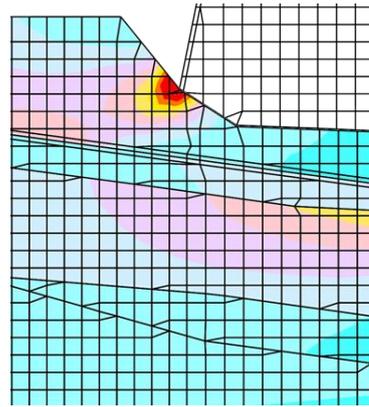
せん断キー位置		天端変位量
なし	F+30-c0	11.8 cm
中央	F+30-c1	9.5 cm
上流側	F+30-c2	9.5 cm
下流側	F+30-c3	9.2 cm

(4) 止水対策への影響

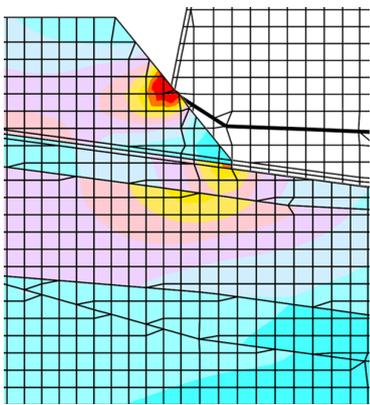
堤敷上流側の岩盤には、止水対策としてのグラウチングが施工されている。これらの岩盤に、湛水時あるいは地震時に引張応力が生じると、止水対策への懸念が生じる。そこで、図 5-22 に、せん断キーの配置により岩盤に生じる最大主応力を整理した。せん断キーのない場合に対し、せん断キーを配置した場合には堤敷上流側岩盤に生じる引張応力が大きくなり、特に、上流側に配置した場合に顕著であった。これより、止水対策への影響面からは、上流側よりも、中央、下流側への配置が有効であると考えられる。



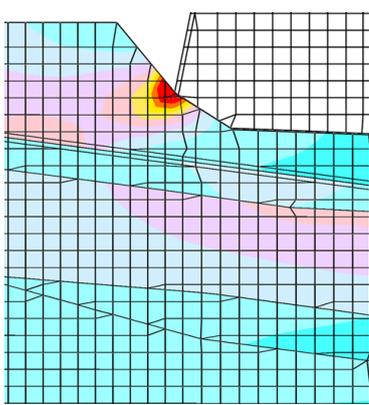
(1) せん断キーなし (F+30-c0)



(2) せん断キー中央 (F+30-c1)



(3) せん断キー上流側 (F+30-c2)



(4) せん断キー下流側 (F+30-c3)

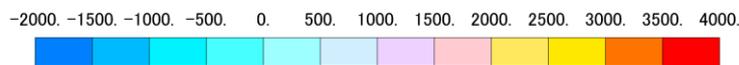


図 5-22 OBE 時の最大主応力分布 (単位 : kN/m^2)

(5) 考察

せん断キーの配置は、必要安全率を確保する大きさをくさび安定解析により決定し、設置箇所は、2次元 FEM 解析によるせん断キーの効果の確認結果も踏まえて、施工性、経済性に優れたダム基礎中央付近とした。

また、受動圧が期待できない F+30 断面の 2次元 FEM 解析では、せん断キーの設置により、堤趾部近傍の岩盤の圧縮応力や弱層の上下の岩盤の相対変位が設置しない場合に比べて低減され、堤趾部近傍の岩盤での局所安全率が高くなることを確認した。せん断キーの位置については、上流側、中央、下流側に同規模のせん断キーを配置した解析結果を比較した。その結果、ダム基礎の中央付近に配置したせん断キーは、岩盤内の応力や弱層のせん断変形の面からは、その他の位置と同等の効果であり、岩盤内に生じる最大主応力の面からは、止水対策への影響が懸念される上流側配置よりも有効であると考えられる。

5.1.7 まとめ

ダム堤体のせん断キーに関して得られた結論を以下に示す.

- 1) 低角度の弱層を有するダムの滑動抵抗性を増す方法として、せん断キー以外にも種々の方法が考えられるが、せん断キーが最も実用的であり、効果が大きい.
- 2) くさび解析および2次元 FEM 解析により、せん断キーの配置の違いによる効果を評価し、経済性に資する合理的なダム堤体のせん断キーの設計手法を示した.
- 3) せん断キーの配置に関しては、低角度の弱層が計画段階以降に見つかった場合は、掘削ずり運搬のためのアプローチ道路の敷設や上部法面の切り直しへの影響も考慮する必要がある. せん断キーの掘削は、掘削量の増加だけでなくダム本体コンクリートの増分コストに直結するため、地形的な制約によっては NNP1 のようにダム基礎中央付近とならざるを得ない.

第7章では、各章で示す RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証するために、RCC ダムの水密性と耐荷性について検証した. 本章と関連して得られた結論を以下に示す.

- 1) リバースプラムラインの計測やボーリングコアの観察を通じて、実際のダムでせん断キーの効果を確認し、弱層の物性評価や設計の妥当性を検証することができる. また、X線 CT 画像解析も解析や計測の妥当性を確保するために重要である.
- 2) 解析や実際のダムの挙動を基に、せん断キーの効果を分析し評価し、ダムの滑動安定性を確保するための実用的な対策として導入できることを示した. 施工中に低角度の弱層に遭遇した場合でも、せん断キーは、工事費の増加や工程遅延を最小限に抑える有効な手段である.

5.2 堤内排水孔の配孔設計

図 5-23 に、NNP1 で採用したダム堤体の堤内排水孔（上流面から 8.5 m の監査廊中央に位置する）、主と補助のカーテングラウチング、および基礎排水孔の配置を示す. 主カーテングラウチングの長さはダム軸沿いの地質調査結果に基づき、ダム高さ×1/2（以降、1/2H のように表現する）とし、補助カーテングラウチングの長さは主カーテンの長さ×1/3 とした. また、基礎排水孔の深さは 30 m とした. これは、USBR¹²⁾ に準拠して、地質も勘案しながらダム高に対して 20~40%、またはカーテングラウチングの延長に対して 35~75%を標準として設定したものである.

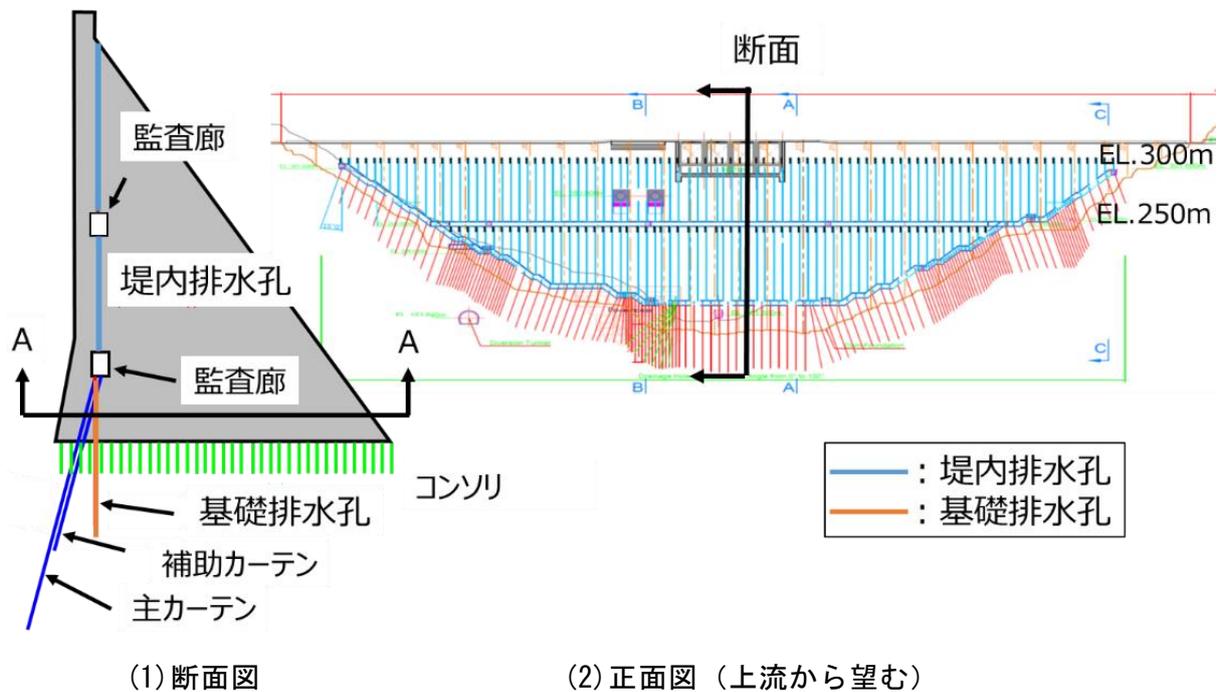


図 5-23 堤内排水孔の配置図 (図 2-6 の再掲)

5.2.1 配孔設計のための平面 2 次元 FDM 解析

堤内排水孔の間隔を決めるために、平面 2 次元 FDM による浸透流解析を実施した。解析ソフトは Excel を使用し、図 5-23 に示す A-A 断面のブロック長 (ダム軸方向) に当たる 15 m、ダム上下流方向 105 m を平面的にモデル化した。ダム堤体の底盤上流端に作用する揚圧力を 100% (126 m の静水圧)、下流端を 0% (大気圧)、ダムコンクリートの透水係数を一様と仮定し、基礎排水孔の位置では揚圧力が 0% (大気圧) になるものとして、隣り合うセルの値の平均値を反復計算することで揚圧力の分布を求めた。なお、解析は定常解析のため、透水係数が一様であればその大きさは結果に影響を及ぼさない。

図 5-24 に、モデル化した範囲のうち上流 50 m 部分の解析結果を示す。図の色は、各セルの揚圧力の低減効果を示している。これによると、上流側の高い揚圧力 (赤～黄) が、堤内排水孔の効果により急激に低減し、堤内排水孔のライン (5 m 間隔で青の点が並んでいるライン) よりも下流側では、一様に 75%以上低減 (緑～青緑) されていることがわかる。

以上の解析結果より、図 5-25 に示す通り排水孔の間隔を 5 m としても、排水孔間の平均の揚圧力の低減率は、USACE¹⁰⁾ に基づいた設計値の 67%に対して 75%を確保できることがわかる。仮に間隔を 6 m に広げたとしても低減率は 71%となり、

さほど低減率が落ちるわけではない。なお、あまり間隔を大きくすると、RCC の局所的な欠陥を補完できなくなるため留意する必要がある。

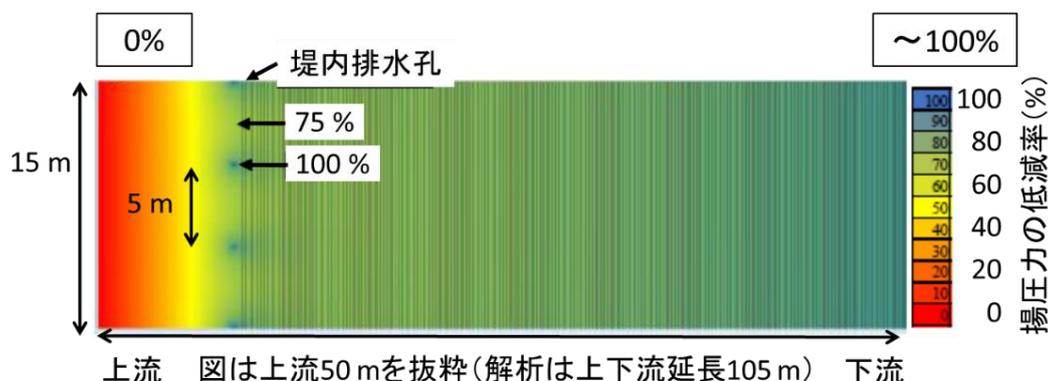


図 5-24 平面 2 次元有限差分法による浸透流解析結果（上流 50m 分）

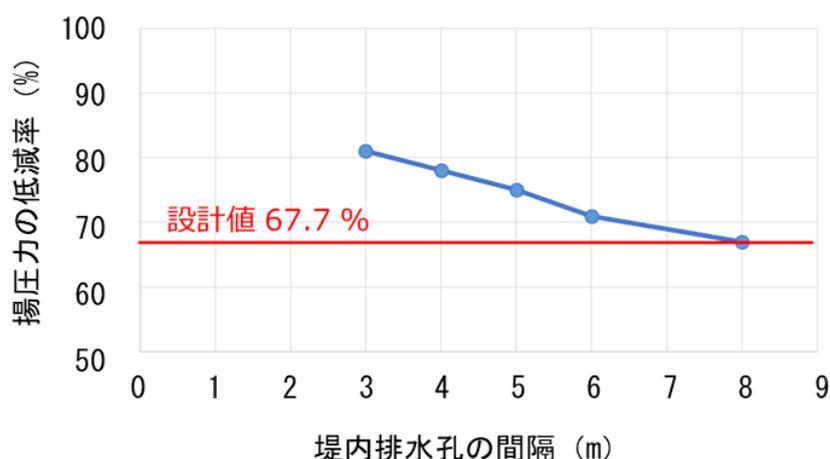


図 5-25 堤内排水孔の間隔と揚圧力の低減率の関係

5.2.2 揚圧力低減効果検証のための鉛直 2 次元 FDM 解析

堤内排水孔が揚圧力低減にどの程度寄与しているかを、図 5-23 に示す断面により、鉛直 2 次元 FDM による浸透流解析で再現した。解析ソフトは FEMAP¹³⁾と ISCEF¹¹⁾を使用し、解析は定常解析を実施した。理論式は、2.4.8 に示す。表 5-3 に解析ケースを示し、図 5-26 に解析モデルを示す。

解析モデルにおけるコンクリートの透水係数については、6.2.1 に示す試験施工での現場透水試験の結果から 1.5×10^{-10} m/s と設定した。また、打継目は、50Lu 相当の 6.7×10^{-6} m/s とした。

次に、ダム堤体の基礎岩盤部の透水係数については、ダム軸方向のルジオン試験の結果に基づいて、簡易に 1/4H 以深については 2Lu 相当の 2.7×10^{-7} m/s、それより浅い部分は 50Lu 相当の 6.7×10^{-6} m/s として設定した。なお、ダム堤体の基礎岩盤部には、下流に緩く傾斜する顕著な水平弱層が 2 層存在するが、これらも一律に 50Lu 相当として設定した。

また、カーテングラウチングの透水係数については、0~1/4H を 2Lu 相当の 2.7×10^{-7} m/s、1/4H より深い部分を 5Lu 以下の 6.7×10^{-7} m/s とした。

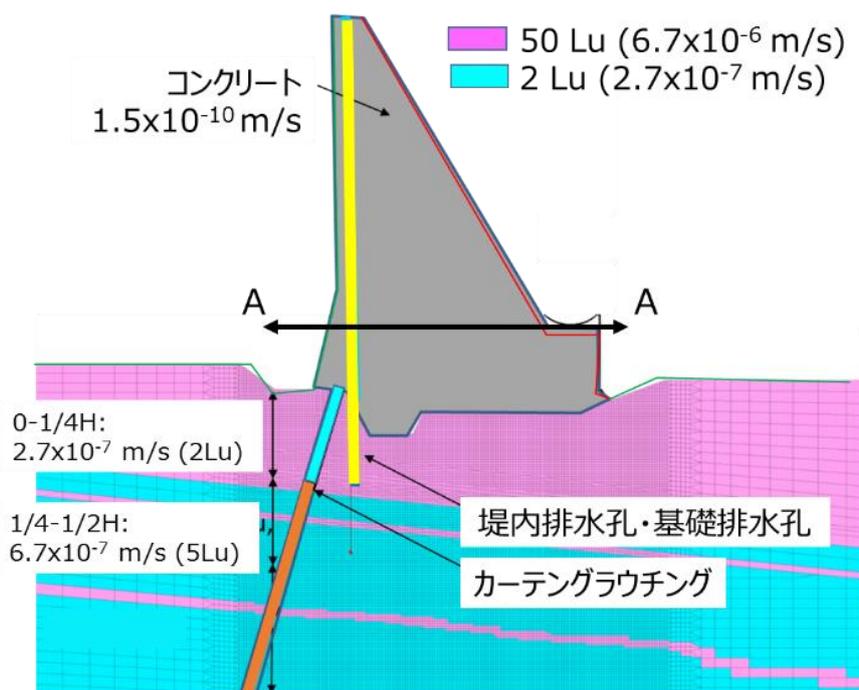


図 5-26 浸透流解析モデル

表 5-3 解析ケース

項目/ケース	1	2	3	4
コンクリートの透水係数 (m/s)	1.5×10^{-10}		1.5×10^{-10} , 6.7×10^{-6} (打継目)	
岩盤の透水係数 (m/s)	6.7×10^{-6} (1/4H 以浅), 2.7×10^{-7} (1/4 以深)			
カーテングラウチングの透水係数 (m/s)	2.7×10^{-7} (1/4H 以浅), 6.7×10^{-7} (1/4 以深)			
基礎排水孔	あり			
打継目の不良箇所	なし		あり	
堤体排水孔	なし	あり	なし	あり

図 5-27 の解析結果を以下の通り示す。

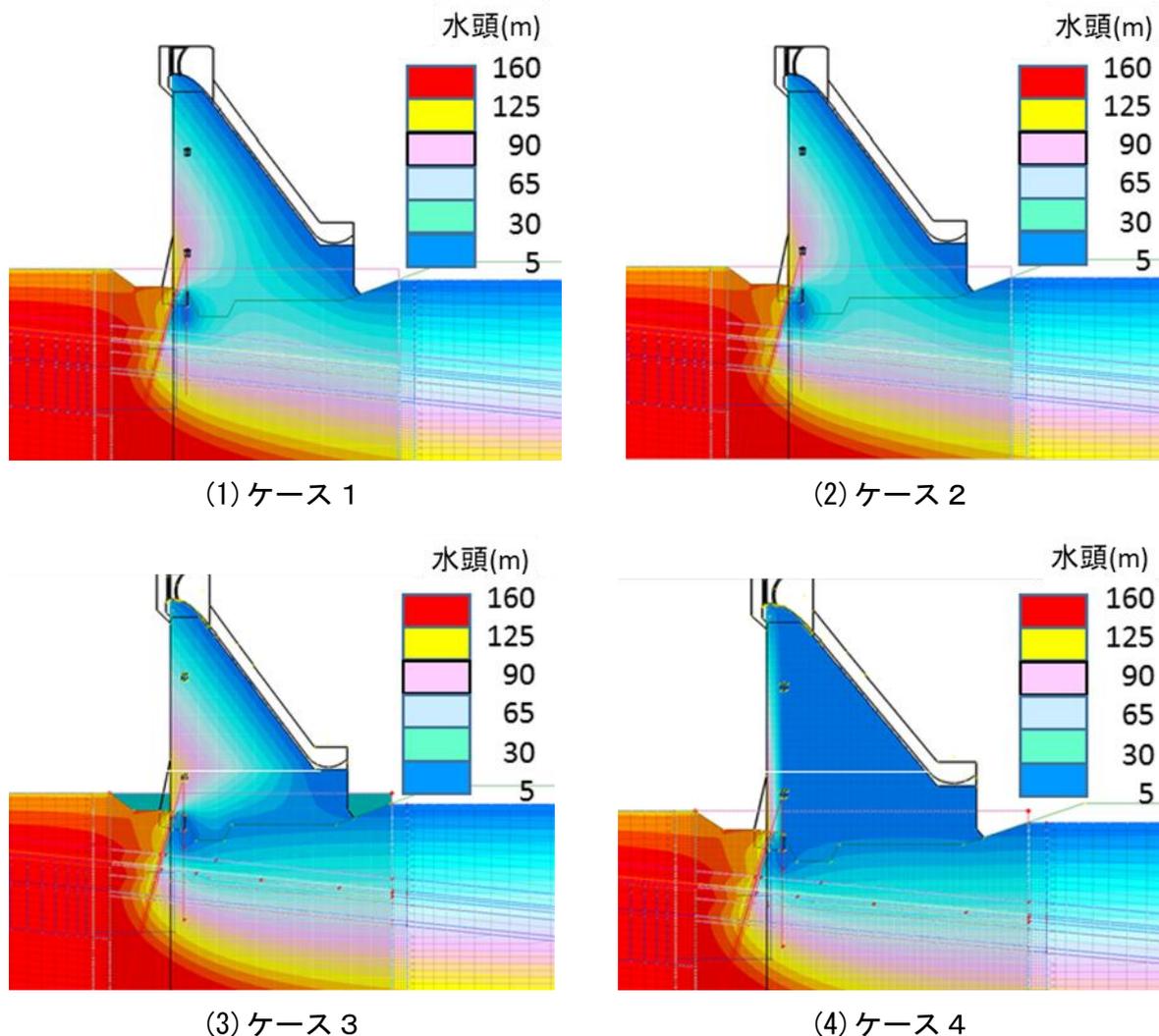


図 5-27 浸透流解析の結果

同図中ケース 1 では、ダム上流面にピンク色の圧力が高い部分があり、ダム下流に向けて水色、青色へと変化し圧力が低くなっている。これは上流から下流に向けて揚圧力が低減していることがわかる。

同図中ケース 2 では、堤内排水孔を入れることにより、ダム堤体内に作用する揚圧力が大きく低減することがわかる。

同図中ケース 3 は、図に示す洪水吐の勾配が緩くなる変局点付近の標高である A-A 断面上の高さ 1 m 相当の要素に、50Lu 以下の $6.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ の透水係数を与え（ダム堤体を上下流方向に貫通する白線部）、打継目の施工不良が原因で水平に上流面から下流面に水みちがつながる事象をモデル化したものである。そうすると、この断面沿いに揚圧力が最も高く発生することがわかる。

同図中ケース 4 では、たとえ上流面から下流面に水みちがつながったとしても、ケース 2 と同じように堤内排水孔を入れるとことによって、過大な揚圧力の発生を防ぐことができることを示している。

5.2.3 コンクリートの透水係数の違いによる間隙水圧分布挙動の検討

湛水開始後に時間の経過とともに、間隙水がじわじわとダムコンクリート内に浸透していくと想定した場合、RCC の透水係数の違いによって間隙水が下流側の表面に達する時間経過を検討した。コンクリートダムでは、一般的に 100 年程度経過してもほとんど強度が低下していないことが知られている。

ここでは、図 5-27 のケース 1 のモデルを用いた非定常解析においてコンクリートの透水係数の感度分析を行い、図 5-28 に示すように、間隙水圧分布の非定常挙動がどのように変化するか求めた。

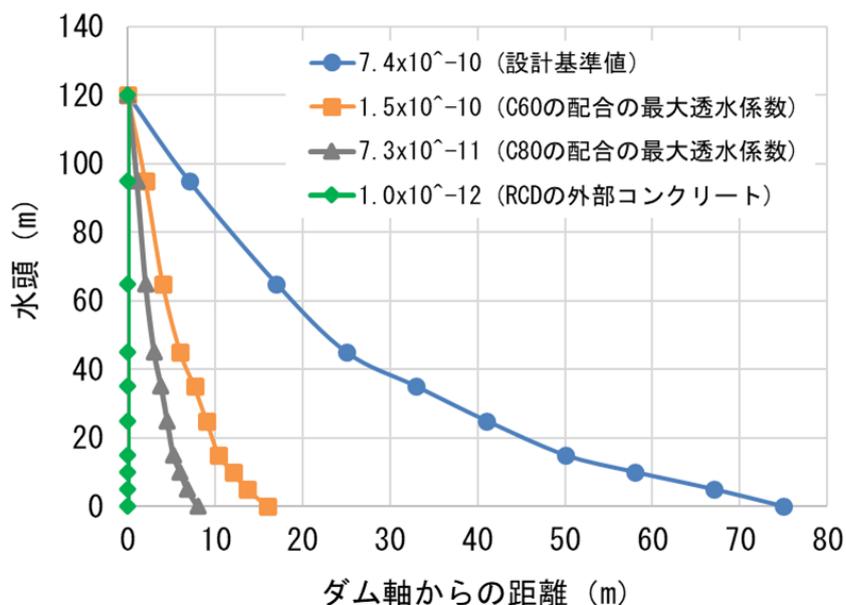


図 5-28 200 年後の A-A 断面沿いの揚圧力の分布

図 5-28 では、図 5-26 で示される A-A 断面上において、仮に 200 年後に透水係数の違いによって揚圧力の分布がどう変わるかを示した。例えばダムコンクリートの透水係数を $7.4 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ とすると（図 5-28 では青線）、200 年後にはダムの下流側面（上流面から 75 m の位置）まで間隙水が到達して水圧が作用する。実際の現場透水試験では、 $1.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ から $7.3 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 程度の値が得られていることから、間隙水が下流方向に進展して水圧が作用するのは、200 年後でもダムの上流から監査

廊までの距離の 2 倍程度といったところまでである（図 5-28 のオレンジと灰色の線）と言える。もし、RCD ダムの外部コンクリート並みの水密性 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ を確保できたとすれば（図 5-28 では緑色の線），間隙水はほとんどダム上流側の表面にとどまることになる。つまり，打継目の不良箇所を通ってくる水を堤内排水孔で捉えることができれば，ダム堤体内にダムの安定上問題となる揚圧力は作用しないと言える。

5.2.4 堤内排水孔の配孔

NNP1 では，5.2.1～5.2.3 の検討結果に加え，コンクリートの温度応力の発生を軽減するために，ダムの横継目間隔（ブロックの長さ）を 15～20 m と設定している。堤内排水孔の間隔は，ブロックの長さの約数とすることが最も効率的である。そのため，堤内排水孔の間隔として，5 m を採用した。局所的な欠陥による漏水を管理できるだけでなく，仮にその欠陥による水みちが発生した場合でも，ブロック全体に作用する揚圧力を設計値以下に十分低減させることが期待できる。なお，堤内排水孔の間隔を 6 m に設定しても，設計上要求される揚圧力の低減率を満足することができるが，ブロックの長さが 20 m の場合は本数が減らない。

また，堤内排水孔の長さが 70 m の場合，仮に後述する削孔機の精度が 1.0%であると仮定すると，隣り合う排水孔の間隔は最大で $5 \text{ m} + 70 \text{ m} \times 0.01 \times 2 = 6.4 \text{ m}$ となるが，この場合でも設計上要求される揚圧力の低減率を満足することができる。

5.2.5 堤内排水孔の配孔変更によるコスト削減効果

NNP1 では，堤内排水孔の間隔を 3 m から 5 m に変更することで，削孔数量を約 10,000 m から約 7,000 m に減らすことができた。例えば，パーカッション工法による削孔の東南アジア諸国の市場単価¹⁴⁾を 90 USD/m を適用すると，堤内排水孔の間隔を変更することで，約 0.3 Million USD のコスト削減が実現できる。堤内排水孔の削孔数量を減じることは，他地点の RCC ダムでも削孔費用を 1/3 程度に低減することができる。また，米国などの先進国の削孔単価は 380 USD/m 程度¹⁵⁾となり，削減効果はより大きい。

5.2.6 まとめ

堤内排水孔に関して得られた結論を以下に示す。

- 1) 平面 2 次元 FDM による浸透流解析により，平面的に堤内排水孔の配置間隔と揚圧力の低減率の関係を求め，ダムの安定性上，最低限必要となる堤内排水孔の配置間隔を示した。
- 2) 鉛直 2 次元 FEM による浸透流解析により，ダム堤体における堤内排水孔による揚圧力低減効果の確認，またコンクリートの透水係数の違いによる間隙水圧分布挙動を確認し，堤内排水孔の必要性を示した。
- 3) 以上より，2 次元 FDM による浸透流解析により，堤内排水孔の配置間隔とダム堤体内の揚圧力低減率の関係を求め，ダムの安全性が確保された経済性に資する合理的な堤内排水孔の設計手法を示した。なお，合理的な堤内排水孔を適用するには，削孔機による削孔精度も重要となることから，第 6 章では，削孔方法および精度について論じる。

第 7 章では，各章で示す RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証するために，RCC ダムの水密性と耐荷性について検証した。本章と関連して得られた結論を以下に示す。

- 1) ダム堤体の水密性を確認するための方法として，現場で簡易にできる現場透水試験の方法を示した。
- 2) 打継目の密着性を確認する方法として，X 線 CT 画像分析の有用性を示した。打継目が Cold joint であっても，適切な処理を行えばコンクリートの連続性は保てなくても，水密性としての観点から打継目の密着性を確保できることを示した。

なお，コンクリート工学ではないが，NNP1 では，RCC ダムの合理的な堤体・構造物の設計の一部として，RCC ダムの式洪水吐について検討し，経済性に資する合理的なスキージャンプ式洪水吐の設計手法を示した^{16~18)}。

参考文献

- 1) Seoka, T., Y. Aosaka, Y. Yoshizu, T. Tabuchi: Evaluation of the Dam Geology and Geological Risk at the Nam Ngiep 1 Hydropower Project, Symposium Knowledge Based Dam Engineering, 26th Congress of International Commission on Large Dams, 21pp., 2018

- 2) 瀬岡正彦, 青坂優志, 吉津洋一, 田渕貴久: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電所建設 (BOT 事業) におけるダム地質評価および地質リスクについて, 日本大ダム会議, 大ダム, No.246, pp.52-63, 2019
- 3) 関西電力株式会社 土木建築室, 水力事業本部: ナムニアップ 1 のダム・発電所の開発 (第 2 回), ダム日本, No.899, pp.49-59, 2019
- 4) 吉津洋一, 清水公二, 上田広和, 中村和男: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電プロジェクトの主ダム堤敷部に出現した低角度弱層の地質工学的評価, 地質学会 (2023 年投稿中)
- 5) 吉津洋一, 井関恭輔, 井関宏崇, 中島伸一郎, 岸田潔: X 線 CT を用いた Modified GIN 工法導入地点でのグラウト浸透状況の可視化, 土木学会論文集, Vol.76, No.4, pp.394-404, 2020
- 6) 田渕貴久, 村上嘉謙: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電所のダムの基礎掘削と安定性の検討, 電力土木, No.387, pp.51-54, 2017
- 7) 大坪祐介, 松本文宏, 佐々木俊法: 医療用ヘリカル X 線 CT スキャナーを用いたボーリングコア観察技術, 電力土木技術協会, pp.81-86, 2017
- 8) 地盤工学会: 土の圧密定圧一面せん断試験方法 (JGS 0561), 10pp., 2020
- 9) 瀬岡正彦, 田渕貴久, 喜多伸明, 村上嘉謙: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電所 低角度弱層を有するダム基礎のせん断キーの効果, 令和 2 年度土木学会全国大会年次学術講演会, III-398, 2pp., 2020
- 10) US Army Corps of Engineers: ENGINEERING AND Design Gravity Dam Design, EM 1110-2-2200, pp.1.1-4.11, 1995
- 11) <https://www.century-techno.co.jp/download/> (参照: 2023 年 1 月 15 日)
- 12) US Department of the Interior, Bureau of reclamation: Design of Gravity Dams, 553pp., 1976
- 13) <https://www.cae-nst.co.jp/products/femap/> (参照: 2023 年 1 月 15 日)
- 14) 東南アジア諸国の複数の専門業者からの聞取聴取
- 15) Centennial Reservoir Project Roller Compacted Concrete Dam Opinion of Probable Construction Cost – Draft (http://www.centennialreservoir.org/wp-content/uploads/2015/10/4-OPCC-Tech-Memo_RCC_R5_compiled.pdf) (参照: 2022 年 1 月 26 日)
- 16) Aosaka. Y., M. Hanamoto, M. Asakawa: Hydraulic Model Test of “Ski Jump Spillway with Multi Flip Buckets” applied to The Nam Ngiep 1 Hydropower Project, Symposium Knowledge Based Dam Engineering, 25th Congress of International Commission on Large Dams, 21pp., 2015

- 17) Takahashi, T., Y. Murakami, M. Asakawa, S. Tsutsui, Y. Aosaka: Experimental study of ski jump spillway at the Nam Ngiep1 Hydropower Project in Laos, Symposium Knowledge Based Dam Engineering, 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, 11pp., 2017
- 18) 村上嘉謙, 高橋拓麻, 青坂優志: ナムニアップ 1 水力プロジェクトにおける重力式ダム洪水吐のスキージャンプ式減勢工の水理模型実験, 電力土木, No. 393, pp.13-20, 2018

第 6 章 RCC ダムの性能確保と高速施工を実現できる

RCC 施工

6.1 はじめに

本研究では、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な設計・施工の手法を提案することを目的とし、第 3 章から第 5 章では、RCC ダムの設計（材料、配合、堤体・構造物）手法の合理化について検討した。

一方、RCC ダムの設計手法が合理化されたとしても、開発途上国での RCC ダム建設では、多国籍・多様な作業員の技術力のばらつきにより、施工不良となる人的リスクが存在する。そのリスクが発現すると、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある。そのような人的リスクを回避するためには、設計手法の合理化だけではなく、多国籍・多様な作業員にも適応できる施工手法を整備し、全作業員の技術力を確保（統一）する必要がある。

また、NNP1 では、主ダムの RCC 打設に先立ち、ダム基礎掘削において、河床部に予期せぬ水平弱層が見つかり、5.1 で示すように、ダム堤体のせん断キーを設置するため、約 3 ヶ月の工程遅延となった。加えて、ダムのアバットメントの地質不良（水平弱層含む）の対策のために、ダム基礎掘削および堤体積は約 2 割増加し、計 11 ヶ月の大幅な工程遅延とコスト増額のリスクが顕在化した。特に、雨季と乾季がはっきりと区別される東南アジアでは、数ヶ月の工程遅延でも、ダムの初期湛水の開始時期によっては、最大 1 年の遅延につながるなど、事業に大きな影響を及ぼす可能性がある。これらのリスクを回避するため、RCC ダム施工の生産性効率を向上させる必要があった。

以上を踏まえ、本章では、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するために、RCC ダム施工における施工計画（施工方法、施工手順書）の改善および RCC ダムの高速施工を実現するための施工手法について検討するものとする。そして、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な施工手法を提案することを目的とする。

参考に、図 6-1 に RCC ダムの施工状況を示す。図はスロープレイヤー工法を適用し、ダムの左岸側から右岸側に向けて、RCC を打設している状況である。



図 6-1 RCC ダムの施工状況（上流から望む）

6.2 RCC ダム施工の施工方法

RCC ダム施工は、RCD 工法の施工技術のように確立されておらず、体系的には整備がされていない。また、RCC ダム施工に従事する多国籍・多様な作業員には、技術力のばらつきがあり、特別な対策を講じなければ、その技術力を一定の水準に確保（統一）することは困難である。

本節では、これらの課題を解決するために、試験施工を通じて、RCC ダム施工の施工仕様・手順について検討する。また、RCC ダム施工の施工方法の改善を検討し、RCC ダムの施工手法の合理化について示す。

6.2.1 試験施工^{1~3)}

(1) 概要

試験施工では、RCC ダム施工の施工仕様・手順の確立および作業員の技術習熟を目的とする。具体的には、室内配合試験練り、現場配合試験練り、第 1 回試験施工および第 2 回試験施工を実施した。なお、LRCC の配合試験練りおよび試験施工も実施した。

(2) 配合試験練り

2008 年から 2015 年にかけて、室内配合試験練りをタイのアジア工科大学およびラジャマンガラ大学で実施した。

RCC の使用材料は、タイ産の OPC, Class C-FA (MMFA), 化学混和剤 (Types B & D), NNP1 の原石山より採取した骨材 (砂岩と礫岩) である。

室内配合試験練りは、基本となる示方配合を設定し、RCC の各材料の適用性および各種試験による RCC の品質 (フレッシュコンクリート, 硬化コンクリート) を確認し、総合的に RCC の NNP1 への適用性を検討した。また、特に長期強度 (材齢 365 日, 圧縮強度, 直接・割裂引張強度, せん断強度) の確認および化学混和剤の種類ごとのコンクリートの凝結時間について検討した。

2015, 2016 年には、現場配合試験練りを NNP1 の試験室で実施した。

RCC の使用材料は、3.1.1 と 4.1.1 に示す通り、NNP1 の実施工で使用する材料とした。なお、骨材は NNP1 の骨材製造プラントで製造される。

現場配合試験練りは、骨材の特性変更に伴う配合修正とともに、各種試験による RCC の品質を確認し、総合的に RCC の NNP1 への適用性を検討した。特に、石粉率の向上による配合特性の変化およびワーカビリティの裕度の改善などについて検討した。また、OPC, FA および化学混和剤については、数種類の材料を比較検討し、緊急時の代替材料を検討した。

(3) 第 1 回試験施工

第 1 回試験施工は、実機の RCC 製造プラントおよび実施工で使用する重機を使用し、配合仕様および施工仕様・手順の確立などを目的として、図 6-2 に示すように、約 15 m×約 35 m×3 m (約 1,500 m³) の試験ブロックを構築し、試験施工を実施した。

検討項目としては、コンシステンシー, ワーカビリティ, 施工仕様, 施工手順, コンクリート強度, 水密性, RCC (GE-RCC 含む) の密着性およびコンクリートの仕上がり状態である。

試験施工の結果概要について、以下の通り示す。

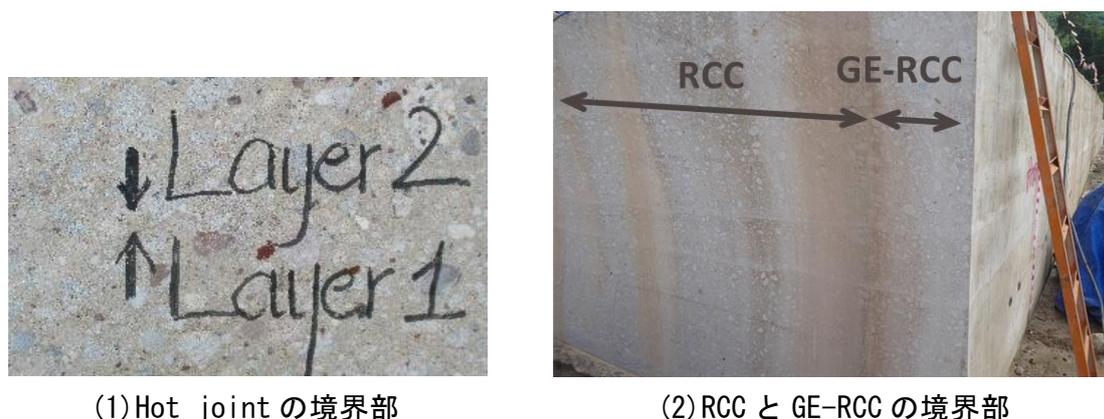
- ・ コンシステンシー, ワーカビリティ, 締固め回数, 単位容積質量, コンクリートの温度, VB 値, 空気量, コンクリートの凝結時間などを検証し、RCC の要求品質を満足することを確認した。
- ・ コンクリートの圧縮強度, 直接引張強度 (打継目を含む, 試験ブロックからコアを採取) を検証し、RCC の要求品質を満足することを確認した。
- ・ 原位置透水試験を行い、透水係数を検証し、RCC の要求品質を満足することを確認した。
- ・ 打継目 (Hot joint, Warm joint, Cold joint) 処理を数種類設定した。RCC (GE-RCC 含む) の密着性およびコンクリートの仕上がり状態を確認するため、ダイヤモンド

ドクターにより試験ブロックを切断し、切断面を観察した。図 6-3 に Hot joint と GE-RCC と RCC 境界の観察面を示す。その結果、Hot joint, Cold joint (グリーンカット+グラウト材塗布) の境界は、分断はなく、確実に密着しており、コンクリートは一体化していることを確認した。また、RCC と GE-RCC の境界も同様の結果となり、RCC の転圧などに関する施工仕様・手順は、実施工に適用可能と判断する。一方、Warm joint, 無処理の Cold joint は、密着が部分的に不十分で、不確実性が残るため、打継目処理の改善が必要である。

- ・ さらに、配合仕様や施工仕様・手順などについて検討し、RCC の品質を検証することで、RCC ダムの実施工に適用できることを確認した。特に RCC の品質を確保するためには、打継目処理、締固め回数、RCC・GE-RCC の施工手順などが重要な因子であると評価した。



図 6-2 第 1 回試験施工の状況



(1) Hot joint の境界部

(2) RCC と GE-RCC の境界部

図 6-3 切断面の観察

(4) 第2回試験施工

NNP1の主ダム施工前に実施した第2回試験施工では、RCCダム施工の施工仕様・手順の確立（再確認）および作業員の技術習熟を目的として、図6-4に示す通り、下流にある逆調整ダム左岸部 12,500 m³ および主ダムの上流2次仮締切り 30,000 m³ のRCCを打設した。

第2回試験施工の結果は、第1回試験施工の再検証により、施工仕様・手順を確立（再確認）するとともに、一連の作業を反復的に行うことで、作業員の技術習熟を図ることができた。



(1) 逆調整ダム左岸部



(2) 上流2次仮締切り

図6-4 第2回試験施工の状況

なお、第1, 2回試験施工では、実施工と比べると少量のRCCを短期間で打設するため、施工不良などの人的リスクが発現する可能性は低いと想定される。一方、主ダムの実施工では、RCCの打設量が200万m³以上で、施工期間も2年以上に及ぶため、人的リスクが存在すると考えられる。

(5) LRCCの配合試験練り、試験施工

RCD工法では、河床部などの不陸整正や狭い場所には、有スランプコンクリートを採用するが、RCCダムでは、LRCC（80～500 m³程度）を採用することが多い。

LRCCの特徴は、RCCと比較すると、単位結合材量が240 kg/m³程度と、富配合である。また、内部振動機により締固めることができるが、RCCと同様にダンプトラックでの運搬およびブルドーザでの敷均しが可能であり、有スランプコンクリートと比較し、大量打設かつ高速施工が可能である。

配合仕様，施工仕様・手順の確立を目的として，LRCC の配合試験練りおよび試験施工を実施した。

図 6-5 に配合試験練りの状況，図 6-6 に試験施工の状況を示す。

配合試験練りおよび試験施工の結果は，コンシステンシー，ワーカビリティなどを評価し，LRCC の示方配合を設計した。また，施工仕様・手順を確立した。



図 6-5 LRCC の配合試験練り状況



図 6-6 LRCC の試験施工の状況

6.2.2 GE-RCC 施工

2.5.2(2)で示す通り，現状の GE-RCC の施工方法では，穿孔深さの不足，グラウト材の注入量管理不足，注入の杜撰さ，締固め不十分など，人的リスクが存在している。そこで，図 6-7 に示すように，RCC の品質と RCC ダムの性能を確保するために GE-RCC の施工方法を以下の通り改善する。これらの改善は，日本での施工においては当然ではあるが，作業員の技術力にばらつきがあり，多国籍・多様な作業

員に適応できる施工手法が整備されていない RCC ダム建設では、これらの改善が必要かつ重要となる。

まず、GE-RCC の施工には監視員を配置し、管理体制を整備する。

穿孔の従来の方法は、鉄筋棒により穿孔していたことから、穿孔長や穿孔間隔にばらつきが生じていた。そこで、穿孔長および穿孔間隔が均一になるように、専用器具を製作する（同図中(1)）。

次に、グラウト材の注入の従来の方法は、複数種類のバケツにグラウト材（セメントミルク）を計測せずに、凡その範囲にグラウト材を注入していたことから、注入量にばらつきが生じていた。そこで、専用バケツを用いて、注入範囲がわかるように、専用フレームを敷均した RCC 上に設置し、グラウト材を孔に注入することで、注入量（2.0 L/0.075 m³）を管理する（同図中(2)）。

最後に GE-RCC 締固めの従来の方法は、作業員 1 人で締固めていたことから、締固め不足が生じていた。そこで、作業員 2 人体制により 2 つの内部振動機を用いて、同じ範囲を締固めることで、作業時間の短縮および確実な施工となるようにする（同図中(3)）。

また、RCC と GE-RCC の境界部の締固めを確実に行うために、先に GE-RCC を内部振動機で締固め、その後、15 ton の振動ローラにより、GE-RCC 側 4~6 cm と RCC 側を同時に転圧することとする（同図中(4)）。



(1) 専用穿孔器具による穿孔長・穿孔間隔管理

図 6-7 GE-RCC 施工の改善



(2) フレーム設置によるグラウト材の
注入量を管理



(3) 2人での GE-RCC の締固め



(4) RCC と GE-RCC の境界部の振動ローラによる転圧

図 6-7 GE-RCC 施工の改善 (続き)

6.2.3 フェザーエッジ処理

2.5.2(6)に示す通り、従来のフェザーエッジ処理では、RCC のフェザーエッジがダム上下流方向に形成されるが、層厚が薄く、ダンプトラックの車両の通行などにより乱されることで、RCC の品質が低下する。また、その部分が将来的に弱点となり、ダム堤体の漏水やコンクリートの劣化など、RCC ダムの性能が低下する可能性があった。そこで、図 6-8 に示すように、RCC の品質と RCC ダムの性能を確保するためにフェザーエッジ処理を以下の通り改善する。

高さ 120 mm の C 型鋼材の型枠をフェザーエッジ上に設置し、端部を構築する(同図中(1))。型枠に沿って、高さ 120 mm の RCC を敷均し、プレート転圧機による転圧後、2.7 ton の転圧ローラにより高さ 70 mm に仕上がるように転圧する(同図(2)～(4))。当該処理は、型枠により縁が切れているため、次層である Cold joint の

打継目の清掃が容易であり，余分な手直しが減ることから，作業の時間短縮にもつなげることができる。

留意点としては，RCC (Hot joint) の性状は，散水養生（保湿）の環境によっては，すぐさま変化するなど敏感であるため，施工中の十分な散水養生が重要となる。また，鋼材の型枠は，安定性を確保するため，アンカーでの固定が必要である。さらに，一般部のブルドーザによる層厚管理はレーザー測量を用いたが，フェザーエッジ部は層厚が薄く測量精度が懸念されたことから，トータルステーションを用いて，層厚管理を行う。



(1) C 型鋼材型枠の設置



(2) RCC の敷均し



(3) プレート転圧機による RCC の転圧



(4) 転圧ローラによる RCC の転圧

図 6-8 フェザーエッジ処理の改善

6.2.4 GPS 装置による転圧管理

従来の管理方法では，転圧ローラの操縦士が転圧範囲と転圧回数を把握していたが，単純な反復作業となるため，転圧不足などによる手直しが生じていた。そこで，図 6-9 に示すように，GPS 装置による転圧管理を導入し，転圧範囲と転圧回数を視

覺的にわかるように改善する。GPS 装置は、モニター上に転圧範囲が示され、色で転圧回数を把握することができる。

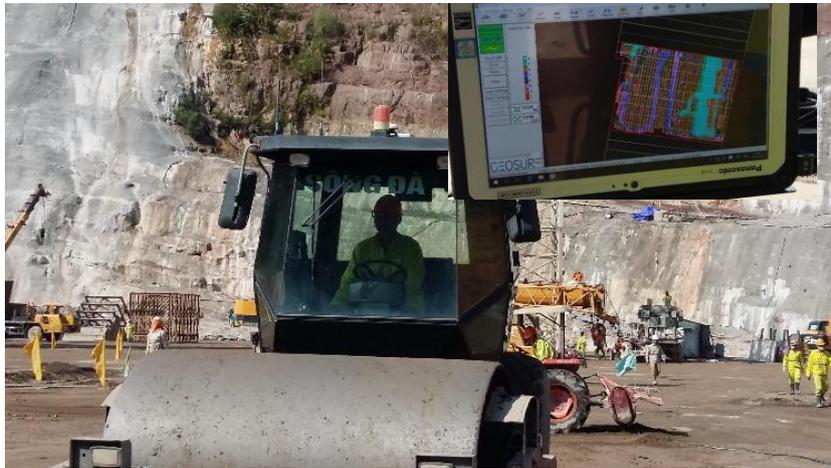


図 6-9 GPS 装置による転圧管理

6.2.5 散水養生装置

従来の打継目（Hot joint）の養生方法は、図 6-10(1)に示すように、ホースを上向きにして水を散水していた。しかし、水の放水量にばらつきがあり、養生の仕上がり範囲や状態にばらつきが生じていた。そこで、同図中(2)に示すように、噴霧散水装置（空気と水を同時に噴射する装置）を導入する。この装置によって、水を噴霧状に噴出させることで、水の放水量のばらつきを改善し、適切な養生を行うことができる。



(1) ホースによる散水養生



(2) 噴霧散水装置による散水養生

図 6-10 散水養生の改善

6.2.6 堤内排水孔の削孔

5.2 では、合理的な堤内排水孔の設計手法を示したが、適用するには削孔延長 70 m 程度で 1.0% 程度の削孔精度が必要となるため、堤内排水孔（径 10 cm）の削孔方法を検討する。

通常、堤内排水孔はダム为天端または水平に配置される監査廊から鉛直方向に削孔する。RCC ダムにおける一般的な監査廊寸法（幅 3 m×高さ 3.6 m）では、高精度の削孔が可能な大型機械を設置することは困難である。したがって、小型の削孔機械を使用することになるが、削孔精度の低下により、削孔延長を短くするために監査廊の本数が追加され、結果として、工事工程が延長されコストが増加する。

削孔方法としては、精度の高いロータリー工法では、削孔時間が長く、コストが高いため、パーカッション工法が望ましい。海外の施工事例⁴⁾では、パーカッション工法の削孔精度は 2.5%、ロータリー工法では 1.0% 程度とされているが、要求精度（1.0%）を収めるためには、以下に示すような改善が必要である。

まず、削孔機械の固定および削孔角度の事前検査である。具体的には、アンカーを 4ヶ所打ち込み、削孔機械を確実に固定する。また、打撃用ハンマーによる振動を抑制するために、打撃ハンマーと天井部分の隙間を単管パイプで固定する（図 6-11）。

これらの改善により、パーカッション工法による削孔精度を確保し、底部と中段の約 70 m 間隔で監査廊を配置することが可能となる。NNP1 の実績としては、パーカッション工法による削孔精度を、ロータリー工法と同等の 1.0% 以内に収めることができ、堤内排水孔の再削孔を不要とすることができた。

工事工程については、ロータリー工法の削孔速度は約 0.8 m/h（8 m/h）、パーカッション工法は約 3 m/h（30 m/h）となり、掘削速度は約 3.8 倍短縮となる。両工法（同規模）の掘削機械の設置・撤去時間は凡そ同じである。NNP1 の堤内排水孔の削孔延長は約 6,700 m となるため、約 20 ヶ月の工程短縮に寄与する。ただし、ロータリー工法による工程短縮は、機械台数と作業員を増やすことで可能ではあるが、その場合は、狭い監査廊内での輻輳作業による効率の低下およびコストが増加する。

削孔コストについては、東南アジア諸国の削孔単価⁵⁾は、ロータリー工法は 180 USD/m 程度、パーカッション工法は 90 USD/m 程度となり、後者を適用することで削孔コストを凡そ半分に削減することが可能である。



図 6-11 改善後の削孔機械の固定方法

6.3 RCC ダム施工の施工手順書

RCC ダム施工に従事する多国籍・多様な作業員には、技術力のばらつきがあり、特別な対策を講じなければ、その技術力を一定の水準に確保（統一）することは困難である。

本節では、この課題を解決するために、表 6-1(1)～(4)に示すように、RCC ダム施工の施工手順書の改善を検討し、RCC ダムの施工手法の合理化について示す。

具体的には、A：仕上げ掘削・岩盤清掃，B：基礎岩盤からの湧水処理，C：RCC の運搬と荷卸し，D：RCC の敷均し，E：RCC の転圧，F：GE-RCC の締固め，G：横継目処理，H：止水板処理，I：打継目処理 (Hot joint)，J：打継目処理 (Cold joint)，K：RCC 打設時の降雨処理，L：養生，M：その他，に関する RCC ダム施工の施工手順書を留意点付きで整備する。

また、同時に指揮命令系統を明確にし、組織的な技術トレーニングマネジメント（施工手順書の改善，検査リスト，レーニングなど）を整備する。さらに、作業員を含む受注者と発注者が RCC 施工の改善について協議を積み重ね、「共に学び考える」というプロセスを導入することで、作業員の技術力を向上させ、人的リスクの軽減につなげる。

なお、これらの改善は、一部を除きスロープレイヤー工法および水平レイヤー工法の両方に適用することができる。

表 6-1 RCC ダム施工の施工手順書 (1)

施工手順		詳細	留意点
A	仕上げ掘削・岩盤清掃	1 緩んだ・風化した岩盤の除去	<ul style="list-style-type: none"> ロックハンマーで基礎岩盤の状態を確認 バックホウとハンマーで緩んだ・風化した岩盤を除去 (必要に応じて地質専門家の判断を仰ぐ)
		2 発破時の穿孔にグラウト材を充填	<ul style="list-style-type: none"> グラウト材 (W/C=0.6) を充填
		3 基礎岩盤の清掃	<ul style="list-style-type: none"> 残っているグラウト材とコケなどを除去 水とエアコンプレッサーで清掃
		4 吹付コンクリートの除去	<ul style="list-style-type: none"> 吹付コンクリートを除去 (法面が不安定時は都度判断)
B	基礎岩盤 (アバットメント含む) からの湧水処理	1 排水管の設置	<ul style="list-style-type: none"> 被圧地下水が無くなる標高以降で、排水管内にCVCを充填、またはG1骨材とグラウト材 (W/C=0.6) を充填
		2 水処理用の堤防 (排水ホース) の設置	<ul style="list-style-type: none"> RCC打設前に打設リフト内の水処理として、モルタルで堤防を設置
C	RCCの運搬と荷卸し	1 ダンプトラックの運搬通路	<ul style="list-style-type: none"> グラウト材の塗布上では、ダンプトラックの通行・旋回は極力避ける グラウト材塗布後に、ダンプトラックが通行した場合は、再度グラウト材を塗布する
		2 ダンプトラック通行後の通路処理	<ul style="list-style-type: none"> 無振動で振動ローラにより処理 グリーンカッター後の緩い骨材を除去 運搬経路は、転圧後のRCC (前層) を乱さないために、極力新鮮なRCC (未転圧のRCC (敷均し後のRCC)) に沿って通行する
	3 材料分離されたG1骨材の処理	<ul style="list-style-type: none"> 作業員によって、材料分離したG1骨材の除去と敷均しの手直し 	
	4 RCCの品質確認	<ul style="list-style-type: none"> RCC温度の管理; 28°C以下 外気温の確認 RCCのVebs値; 12~20秒 (RCC状態に応じて管理値を変更) 	
D	RCCの敷均し	1 敷均し厚さ	<ul style="list-style-type: none"> 敷均し厚さ; 35cm (転圧後30cm) 敷均し上端標高 (基礎岩盤、型枠、排水管、その他) に、カラスプレーでマーキング スローブレイヤーの勾配に応じて敷均し上端標高をレーザー測量で管理 フェザーエッジの上端標高をトータルステーションで管理
		2 敷均しの範囲	<ul style="list-style-type: none"> 打設手順; 水平部から勾配部 1回の打設範囲; 延長12~15m程度 (スローブレイヤー工法の水平部の延長に応じて調整)

表 6-1 RCC ダム施工の施工手順書 (2)

施工手順		詳細	留意点
E	RCC の転圧		
	1	転圧状態の管理	RCC の転圧
	2	転圧後の材料分離部の処理	RCC 転圧後の表面
	3	RCC 各層の上端の重複部 (表層) の転圧	各層の上端の重複部 (表層)
	4	フェザーエッジ処理	スロープレイヤーの端部
F	GE-RCC の締固め		
	1	グラウト材の性状管理	練り混ぜ後のグラウト材
	2	敷均し後の RCC へのグラウト材注入の管理	締固め前の GE-RCC 作業
	3	締固め状態の管理	内部振動機による GE-RCC の締固め時
	4	グラウト材の練り混ぜ管理 (W/C=0.8)	グラウト材の品質と数量
G	横継目処理		
	1	目地切りの管理	目地切り深さ (30 cm)
	2	RCC 表面の処理	横継目の目地切り後の RCC 表面 (各リフトの表層)
			基礎岩盤の狭いオーバーハング打設箇所 (<15 cm)
			目地切り深さ (30 cm)

表 6-1 RCC ダム施工の施工手順書 (3)

施工手順		詳細	留意点
H	止水板処理	1 止水板 (排水管) の設置	<ul style="list-style-type: none"> 止水板と排水管の位置を確認 止水板と排水管を固定 止水板の線形の乱れ・引張の有無、留め具の有無、不要な固定器具の有無を確認 排水管の横継目部の切れ目の有無を確認 横継目の鋼板に型枠オイルを塗布
		2 GE-RCC 締固めの事前準備	<ul style="list-style-type: none"> 止水板の周囲 止水板、排水管、横継目の鋼板の清掃状態を確認 止水板周囲のグラウト材の塗布範囲を確認 止水板を引っ張る (緩みを避ける) 止水板に損傷を与えないように横継目の鋼板の角にはゴム材で保護
I	打継目処理 (Hot joint)	1 散水養生	<ul style="list-style-type: none"> Hot joint 面の乾燥状態を避ける 噴霧散水による養生 (Hot joint 面に直接噴霧散水は禁止)
		2 次層 RCC 打設のための Hot joint の状態確認	<ul style="list-style-type: none"> 目視と感触により、コンクリートの凝結状態を確認 コンクリート凝結時間試験による始発時間の確認 (標準; 2 回/日 (昼・夜))
		3 グラウト材の塗布	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの標準始発時間の 1, 2 時間前後の場合はグラウト材 (W/C = 0.6) を塗布 (Hot joint の判断が難しい場合)
J	打継目処理 (Cold joint)	1 Cold joint 面のグリーンカット	<ul style="list-style-type: none"> グリーンカットを開始する前に RCC の硬化状態を確認 (グリーンカットに適した硬化状態を把握) ブルーマーと高圧洗浄水でグリーンカットを実施 (RCC 打設範囲内に水が流入しないように堤防を設置) 完全にレイタンスなどの不純物を除去
		2 RCC 打設開始前の清掃	<ul style="list-style-type: none"> 高圧洗浄水でグリーンカットを実施 完全にレイタンスなどの不純物を除去 水とエアコンプレッサーで Cold joint 面を清掃 残っている砂、浮いた粗骨材 (コンクリート含む)、コケなどを除去 グラウチング作業で残ったグラウト材を除去 (ハンマーで取れないグラウト材は除去不要) レイタンスの有無 (残っているか否か) をハンマーで確認 (ハンマーで取れないグラウト材は除去不要) 清掃後の RCC 打設前に残っている水を拭き取る
		3 Cold joint 面へのグラウト材の塗布 (厚さ 3 mm)	<ul style="list-style-type: none"> フェザーエッジ部に沿った Cold joint 面を水とエアコンプレッサーで清掃 Cold joint 面にグラウト材を塗布し 15 分以内 (乾燥状態を避ける) に RCC を敷均す (天候に応じて時間を調整) グラウト材の塗布範囲は RCC 敷均し時間を考慮し最小限とする (敷均し範囲に応じて調整)

表 6-1 RCC ダム施工の施工手順書 (4)

施工手順		詳細	留意点
K RCC 打設時の降雨 処理	1	PVC シートで RCC 打設面を覆う	・ 早急に未転圧の RCC を転圧する ・ 締固め後、RCC を PVC シートで覆う
	2	打継目の水処理	・ 降雨後の RCC の打設再開前 ・ ダンプトラットの通路に溜まっている水を除去
	3	降雨後の打継目の水処理	・ 水分が含まれた RCC 表面にグラウト材 (W/C = 0.6) を塗布 (現場の状態に応じて調整) ・ 再転圧と密度の確認
	4	水中ポンプの準備	・ Vebe 値とコンクリート性状を確認。Vebe 値が管理値 (12 秒) 以下の場合、RCC を廃棄 ・ 降雨により湿潤状態となったコンクリート表面にグラウト材 (W/C = 0.6) を塗布 (現場の状態に応じて) ・ グラウト材の除去と清掃 ・ RCC 打設範囲の上部に集水桝と水中ポンプを設置
L 養生	1	散水養生システム	・ 噴霧散水養生でコンクリート表面を湿潤状態に維持 (直接、散水ホースによる養生はしない) ・ 散水ホースによる湿潤養生 ・ 養生シートによる湿潤養生 (CVC 打設後など) ・ 散水ホースによる湿潤養生
	1	照明システム	・ 特にモバイルライトを GE-RCC 施工範囲と上下流面の型枠範囲に設置 (施工性 (品質) と安全性を確保)
	2	足場清掃場	・ RCC 打設面に立ち入る前に長靴を清掃
M その他			

6.4 RCC ダムの高速施工を実現するための施工手法

本節では、費用リスク、材料調達リスク、工事（完工）リスクおよび人的リスクを回避するため、計画をはるかに上回る RCC ダム施工の生産性効率の向上、また同時に、安全性と RCC の品質および RCC ダムの性能を確保できる RCC ダムの施工手法の合理化について、以下の通り検討する。

具体的には、NNP1 の RCC ダム建設を題材に、材料調達、仮設備の配置、スロープレイヤー工法の最適化、化学混和剤の添加量、RCC 打設における安全確保、ダムのゾーニングにおける施工手順、組織体制の検討などを踏まえて、高速施工を実現できる RCC 施工について検討するものとする。

6.4.1 材料調達

(1) 結合材

結合材は、数年間の材料試験（化学・物理）結果より、変動係数が小さい品質が安定している材料を選定する。

開発途上国では、ダム建設地点近郊で安定した品質の結合材を調達することが難しい場合がある。その場合は、1,000 km 以上離れた隣国からローリー車により陸路で調達することがある。NNP1 では、結合材の月間最大使用量が約 30,000 ton となり、積載量 30 ton のローリー車が 1 ヶ月で約 1,000 台（約 33 台/日）必要となる。また、現場には月間最大使用量の 1/3 である約 10,000 ton を貯蔵できるサイロが必要となる。

これらの対策としては、多数の輸送車両を確保するために複数の運搬会社と契約する。また、結合材の中間貯蔵施設を設置して、一度の輸送距離を短縮し、輸送車両の拘束時間を削減する。これにより、運転手の疲労が軽減され、輸送効率が改善される。また、中間貯蔵施設の設定により、輸送距離が短縮され、専用の運搬車両を使用することで、国境での税関手続きなどの事務手続きを効率化することが可能となる。しかし、製造元の事情により、供給量が低下することも頻繁にあるが、中間貯蔵施設の貯蔵量を増やすなど、事前に対応を講じることでリスクを軽減する。

安全性については、1 度の輸送時に 5 台程度の集団を作り、先導車を付けることで、交通災害の防止や緊急時の連絡体制を強化する。また、地元警察の協力のもと、沿道での定期的な交通監視により、さらなる安全性を確保する。

(2) 骨材（原石山）

ダム下流右岸の原石山を選定した。原石山の地質構成は、砂岩および礫岩、そして薄い泥岩層で構成されている。採取した原石の総量は約 600 万 ton であり、月間最大は約 46 万 ton の原石を採取する。地質リスクの発現により、ダムの堤体積が約 2 割増加したことと、また原石山の採掘が進むにつれて予想していたよりも高標高部に風化岩が多いことがわかり、原石量の不足が課題となった。

これらの対策としては、原石山を拡張し、供給不足の軽減を図る。一方、原石山の採掘が進むにつれて、上記課題に加えて、原石山深部に想定していた泥岩層が高標高部に存在することがわかった。このため、深部への掘削が困難になり、早い段階での拡張が、結果的には供給不足の回避につながった。

一方、原石山における材料品質を確保するための課題は、原石山が層状の堆積層であり、特に介在している泥岩を取り除くことである。その対策としては、先行ボーリングにより泥岩層の位置を事前調査し、発破深度を調整することで泥岩の混入を防止する。

6.4.2 仮設備の配置

(1) 仮設備の配置

NNP1 では、図 6-12 に示すように各種仮設備を配置した。雨季を有する東南アジア諸国の現場でも RCC ダムの高速施工を実現するためには、骨材製造プラント、骨材貯蔵設備、骨材運搬用のベルトコンベア、RCC 製造プラント、RCC の冷却設備、RCC 運搬用のベルトコンベアなどの仮設備設計および運転の最適化が重要となる。

また、海外特有の不測の設備故障などによる供給不足が課題となるが、その対策としては、予備品を現場に保管させることで、故障時は速やかに修理を行い、部品待ちによる工程遅延を回避する。



図 6-12 RCC ダム施工に伴う仮設備の配置

(2) 骨材製造プラント

骨材製造プラントを図 6-13 に示すように、原石山の下流側に配置した。骨材製造プラントは、設備故障時の影響を考慮して、各破碎設備およびふるい分け設備などの主要設備は複数台配置する計画とし、設備の一部が故障をしても部分停止とし、全体を停止させることのない設備設計とする。



図 6-13 骨材製造プラント

骨材製造プラントにおいて、RCCが160,000 m³を超えることを考慮すると、骨材の月間生産量は、継続して300,000 tonを確保する必要がある。

破碎設備やふるい分け設備を複数配置し、設備の故障時には残りの機械の稼働時間を増やして生産量を確保する。1日の稼働時間を14時間とし、残りの時間はメンテナンスにあてる。

また、原石投入設備の周囲に原石を仮置きし、ダンプトラック運搬による直接投入とホールローダーによる仮置き材の投入を同時に行えるようにし、RCCの打設量が増加した場合でも、骨材製造のための原石投入量を調整できるようにする。

骨材製造プラントからRCC製造プラントまでの輸送設備であるベルトコンベアの輸送能力が700 ton/hrを維持されているかを定期的に監視し、1日の稼働時間を20時間に限定し、残り4時間をメンテナンスにあてる。

一方、当該設備におけるRCCの品質を確保するための課題は、乾式骨材製造のため、骨材（粗骨材、細骨材）および石粉の粒度分布が岩質や気象状態により大きく変化すること、また雨季には、原石に付着した土砂分が取り切れないことである。

これらの対策としては、以下に示す改善により、安定的な品質を確保する。

- 1) 図6-11に示すように、ずり抜き設備により土砂分を除去する。
- 2) 雨季でのずり抜き効率の低下を防ぐため、図6-12に示すように、乾季は優先的に土砂分の多いエリアの原石を採取し、雨季は土砂分が少ないエリアを中心に原石を採取する。なお、雨季には降雨の影響でRCCの打設量が低下するため、雨季の骨材生産量が低下しても影響はなかった。
- 3) 製造後のG3骨材の洗浄を行い、骨材に付着した土砂分を除去する。
- 4) 雨季と乾季で原石の水分量が変わり、ふるい効率が低下するが、スクリーンのふるい目の寸法を変更することにより、ふるい効率の改善を図る。



図6-14 ずり抜き設備



図 6-15 雨季と乾季の原石山採取の分別状況

(3) 骨材貯蔵設備

RCC ダム建設では、雨季による骨材の生産量低下や、不測の骨材製造プラントの故障が課題として挙げられる。その一般的な対策としては、RCC 打設 3 ヶ月分の骨材量、または堤体積の 1/3 程度の骨材量を貯蔵することが多い⁶⁾。そのためには、広い敷地を必要とするが、NNP1 では骨材製造プラントや RCC 製造プラントの周辺に、敷地を確保することが困難であった。

これらの対策としては、設備の予備品を確保するとともに、日常のメンテナンスを確実に行うことで、致命的な故障を回避する。その結果、骨材貯蔵施設を拡張することもなく、骨材の生産を恒常的に確保することができた。

(4) RCC 製造プラント

図 6-16 に示す RCC 製造プラントには、4 台のミキサ (4.5 m³/台) を設置し、常時 3 台を稼働させ、1 台を予備とし、故障時は予備を稼働させることにする。また、運転については、毎層の RCC 打設量や進捗に合わせ、ミキサ 1 台あたりの練り混ぜ

量 (3.0 から 4.0 m³) , 練り混ぜ時間 (30 から 45 秒) および稼働台数 (2 から 4 台) などを調整する。



図 6-16 骨材貯蔵施設および RCC 製造プラント

一方、当該設備における RCC の品質を確保するための課題は、骨材製造プラントが乾式製造のため、細骨材を含む粗骨材の粒度分布が岩質や気象状態により変化することで、コンシステンシーが変動することである。

これらの対策としては、図 6-16 に示す骨材貯蔵施設にウェットベルトコンベア (図 6-17) を設置することで、粗骨材に付着している土砂分を取り除き、粗骨材の冷却効果と合わせて骨材の表面水率を安定させる。その結果、RCC のコンシステンシーの変動を抑え、安定的な RCC の品質を確保することができる。



図 6-17 ウェットベルトコンベア

(5) RCC 運搬用のベルトコンベア

RCC 製造プラントからダム堤体までの RCC の運搬は、延長 2.0 km、幅 1.0 m、速度 3 m/s の図 6-18 に示すベルトコンベアを採用した。ベルトコンベアの最大運搬能力は 400 m³/時間である。ベルトコンベアは RCC 製造プラントからダム左岸側に設置しているが、ダム堤体の手前 350 m の地点で分岐させ、ダム右岸側にも RCC を運搬できるようにベルトコンベアを設置している。また、分岐点からダム堤体までの中間地点にはホッパーを設けて、ベルトコンベアの故障時は、ダンプトラックの運搬によりホッパーへの RCC 投入を可能とする。

ベルトコンベアの故障は、RCC 打設工程に及ぼす影響が特に大きいことから、十分な実績を有した信頼性の高い設備を導入した。少しの異常に対しても感知し、自動停止するシステムを導入することで、設備故障の未然防止を図る。さらに、設備の予備品を確保するとともに、日常のメンテナンスを確実に行うことで、長期の作業中断を余儀なくされるような致命的な故障を回避する。

一方、当該設備における RCC の品質を確保するための課題は、RCC 製造プラントからダム堤体までの輸送時（約 2.0 km）に気象（特に温度や降雨）の影響を受け、コンシステンシーが変動することである。

これらの対策としては、ベルトコンベア全線に屋根を設置し、直射日光や風雨などの気象の影響を軽減することで、安定的な RCC の品質を確保する。



図 6-18 RCC 運搬用のベルトコンベア

6.4.3 スロープレイヤー工法の最適化

当初，NNP1 では水平レイヤー工法を計画していたが，RCC ダムの高速打設を実現するために，ダム左岸または右岸から順番に勾配をつけて1層（30 cm）ずつ打設するスロープレイヤー工法⁷⁾を導入することにする（図 2-15，図 6-19）。

スロープレイヤー工法の利点および課題は，2.5.2(5)に示した通りである。本項では，その課題に対する対策および改善点を以下に示す。

まず，スロープレイヤー工法に対する課題およびその対策を以下に示す。

- 1) スロープレイヤー工法は，水平レイヤー工法より打設面積が狭く，RCC 打設と下流型枠の設置を同時に施工するなど，施工が輻輳する。そこで，6.3 に示す通り，作業手順書の改善，検査リストを作成・運用およびトレーニングにより，人的リスクを軽減する。
- 2) フェザーエッジの処理が発生し，RCC の品質および RCC ダムの性能の低下につながる可能性がある。そこで，6.2.3 に示す通り，フェザーエッジの処理方法を改善し，人的リスクを軽減する。
- 3) 打設勾配があることから，重機の操縦士の技量や測量技術が必要となる。そこで，6.2.4 に示す通り，GPS 装置による転圧管理により，人的リスクを軽減する。

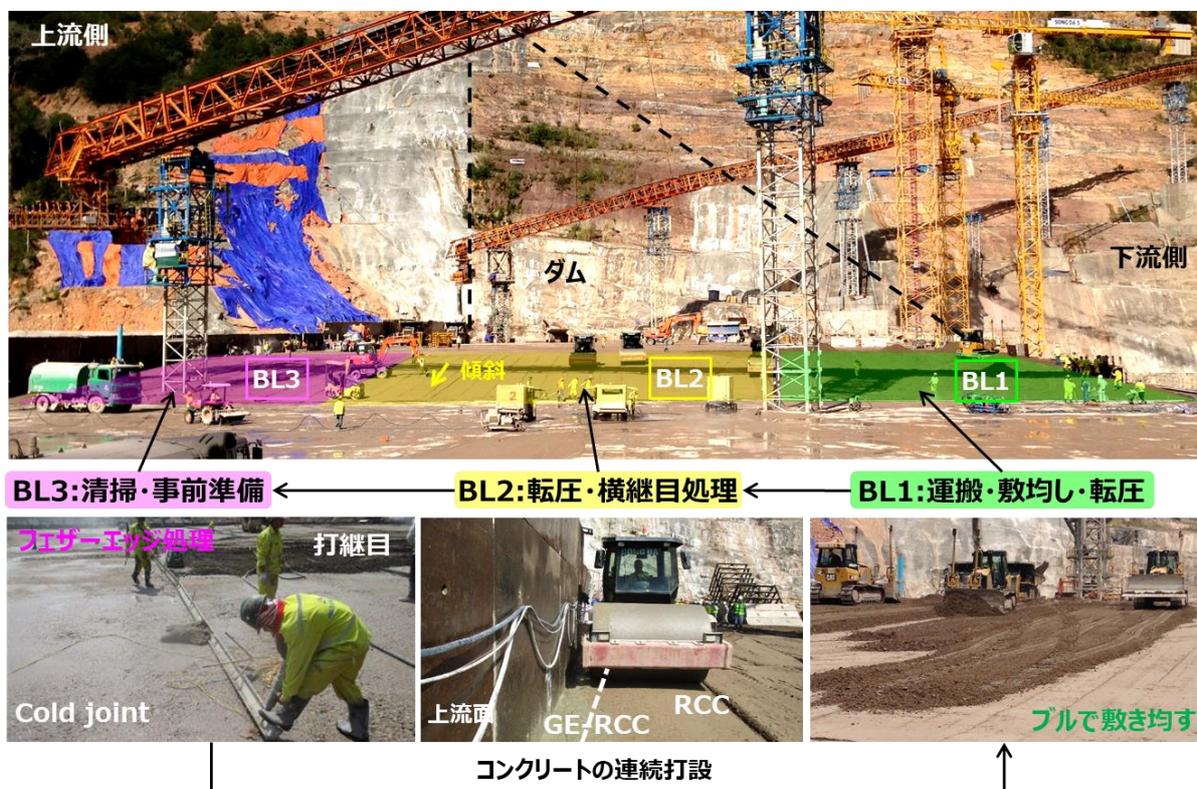


図 6-19 スロープレイヤー工法による打設

次に、RCC ダムの高速施工を実現するための、スロープレイヤー工法の改良について、以下の通り示す。

リフト高およびスロープ勾配を変更することにより、1層あたり、1リフトあたりのRCC打設量を変更することができる。ダムが高標高になるにつれて、打設面は上下流方向に短く、左右岸方向に長くなりRCC打設量が変化するが、その変化にも柔軟に対応することができる。

リフト高については、型枠の高さや打設設備の能力、またRCCの温度応力などの条件を考慮して、1.2m（4層）、2.4m（8層）、3.6m（12層）と複数のリフト高を設定する。リフト高の変更により、対岸への到達時間を調整することが可能となる。

打設勾配については、打設設備の能力や季節（雨量や外気温）を勘案し、試験施工で検証しながら1層の打設時間を3から4時間に設定することが最大の打設速度になることを特定した。NNP1では、最大の打設能力はベルトコンベアの運搬能力400m³/hで決まることから、1層あたりの打設量は1,200から1,600m³となる。これらの打設能力を確保するため、リフト高に応じて打設勾配を1/10～1/30に調整する。このように、打設設備の能力や季節を勘案し、打設勾配を変化させることで、1層あたりの打設量、平均打設面積を調整することで、高いRCCダム施工の生産性効率の確保につなげる。

6.4.4 化学混和剤の添加量

RCC工法の特徴として、連続打設により高速施工が可能であるが、想定外にWarm joint や Cold joint が発生すると、打継目処理の追加により連続打設が中断し、工程遅延につながる。

具体的には、雨季の突然の豪雨によりRCC打設が中断となることがあるが、化学混和剤（遅延型減水剤）の添加量および中断時間によっては、Warm joint や Cold joint が発生する。その結果、打継目処理が必要となりRCC打設が2、3日中断し、工程遅延となる。一般的な対応としては、多量の化学混和剤を添加することでHot joint を維持することができるが、コストの増額につながる。したがって、化学混和剤を最小量にし、可能な限りHot joint を維持しながら連続打設をすることが求められる。

一方、NNP1では、石粉代替とした数種類の配合に加え、雨季乾季の温度変化および日中の温度変化があり、コンクリートの凝結時間（始発・終結時間）は敏感に変化する課題があった。

これらの対策としては、昼夜1回以上のコンクリートの凝結時間試験を行い、コンクリートの凝結時間を把握する。また、各層のRCC打設間隔に加え、天気レーダーを基に降雨を予測し、RCC打設の中断時間（降雨と処理期間）と2時間程度の余

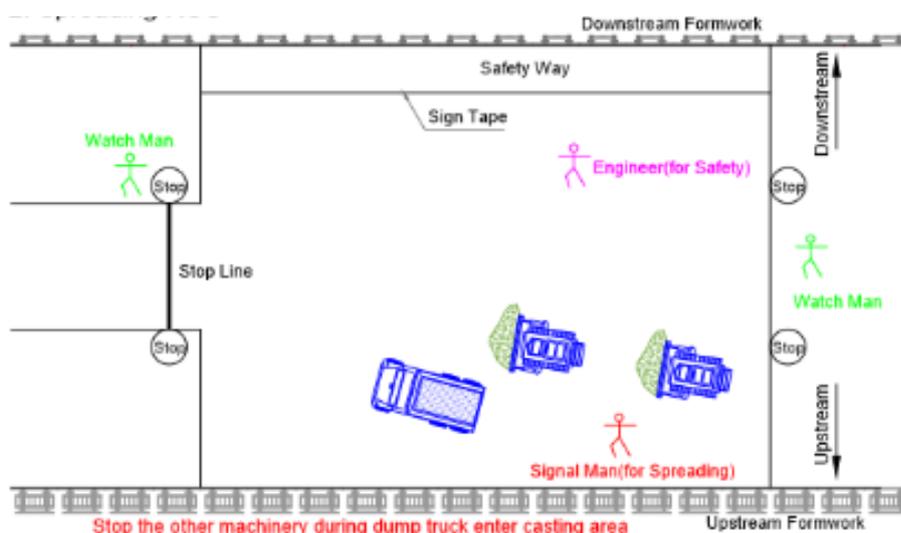
裕を考慮して、毎層で添加量が最小量となるように化学混和剤の添加量を分析し調整する。その結果、Hot joint が 96%、Cold joint が 3.6%で、Warm joint はわずか 0.4%を達成することができ、コスト削減とともに、高速施工につなげることができた。

6.4.5 RCC 打設における安全確保

ダム堤体の中標高部から高標高部にかけて、上下流方向の堤体幅が短くなるため、重機同士や重機と人とが接触する危険性が高くなる。NNP1 では軽微ではあるが、上記事象が発生するようになった。

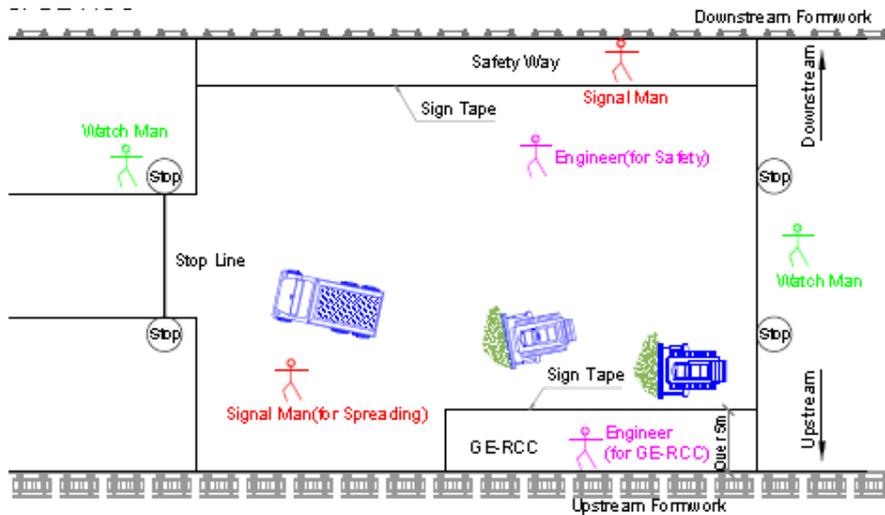
これらの対策としては、RCC の打設速度を確保しつつ安全性を確保する取組みを検討する。具体的には、RCC 敷均し、GE-RCC、転圧などの各作業エリアを完全に区分けし、安全通路を含めカラーコーン、看板、ポール、安全テープなどで各作業エリアを明示する（図 6-20、図 6-21）。また、誘導員および監視員を配置し、各作業エリアの関係者以外の立ち入りを排除する。重機の操縦士と誘導員および監視員へは、無線を配布し、人と重機が近接あるいは第三者が作業エリアに立ち入った際には、直ちに作業を停止する措置とする。また、標高が上がるにつれてさらに上下流方向の堤体幅が短くなるため、標高ごとに使用する重機の規格（大きさ）と台数を変更する。そして、都度、安全な作業であるかを検証し、改善することにより、高い RCC ダム施工の生産性効率の確保につなげる。

その結果、建設期間中を通じて、RCC 施工に関して重大事故の発生を防ぐことができた。

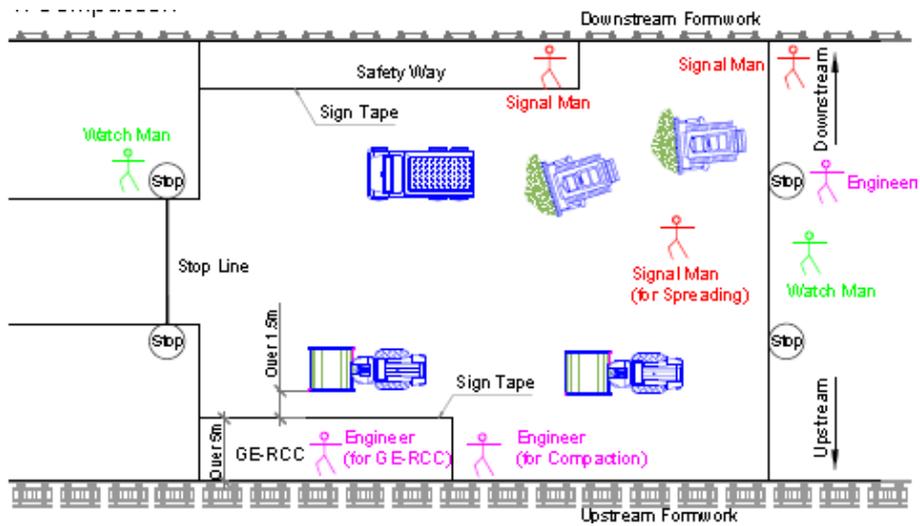


(1) RCC 敷均し時

図 6-20 作業エリア区分け



(2) GE-RCC 施工時



(3) 転圧施工時

図 6-20 作業エリア区分け (続き)



図 6-21 RCC 敷均し時の作業エリア区分け

6.4.6 ダムのゾーニングにおける施工手順

NNP1 では、ダムのゾーニングを適用した場合、同標高で上流側と下流側の 2 種類の配合を適用することになるが、作業エリアが同じであるため、打設配合の誤り、および打設速度の低下につながる可能性があった。

これらの対策としては、施工手順書を改善（全ての関連作業を単純化かつ写真付きで表示）する。また、現場管理体制を強化し、日々、発注者と受注者が好事例と問題点を議論することにより、作業手順書を改善し、作業員へ確実に浸透させることで、人的リスクの軽減につなげる。

6.4.7 組織体制

RCC ダム建設に伴う組織体制の改善について、発注者と受注者（元請け業者）のそれぞれの視点から以下の通り示す。

(1) 発注者

発注者・元請け業者・下請け業者・RCC ダム専門家など、ダム建設に携わる全関係者が団結することが、技術力と品質、安全の向上および工程の確保につながり、様々な難題に挑戦することができる。技術が相互理解できる仕組みになるよう、管理体制と情報共有およびトレーニングを検討し、試行錯誤しながら改善できるような体制を目指す。

具体的には、日々の会議で不具合を抽出し、改善方法を議論する。また、不具合の程度により、会議に参加する関係者を調整する。現場で不具合が生じた場合は、都度施工を中断し、元請け業者や下請け業者、時には直接作業員に聞き取ることにする。そして、関係者の意識向上に努める。

(2) 受注者（元請け業者）

RCC の施工管理体制の整備にあたり、各国（中国、タイ、ベトナム）の RCC 施工実績を有する下請け業者と接触を試み、NNP1 への関心表明を確認する。その後、各社の施工実績、技術者数、保有機械、設備、施工計画、見積もりなど資料を吟味し、数回に亘り各社と討議を重ねて契約を行う。契約後は、組織体系図を提示させ、必要な体制（3 シフト制）を確保し、キーとなる施工経験のある技術者を選定、配置させ、チームリーダー、サブリーダーなどの役割、責任を取り決めるなど、機能

的な組織体系を整備する。また、定期的に複数回に亘るトレーニングを行い、情報共有と不具合の改善、技術力の向上、指示命令系統の確立などに努める（図 6-22）。



図 6-22 作業員へのトレーニング状況

6.4.8 RCC ダム施工の生産性効率

図 6-23 に示すように、NNP1 の RCC 打設は 2016 年 4 月 19 日より開始し、2018 年 4 月 29 日に完了した。第 3 章から第 6 章に示す RCC ダムの設計および施工手法の合理化により、RCC の総打設量 2,360,000 m³ に対し、月間平均打設量 97,500 m³、2017 年 2 月に日最大打設量 9,141 m³、および月間最大打設量 188,110 m³ を記録した。また、スロープレイヤー工法における月間平均打設量は世界第 9 位を記録した。

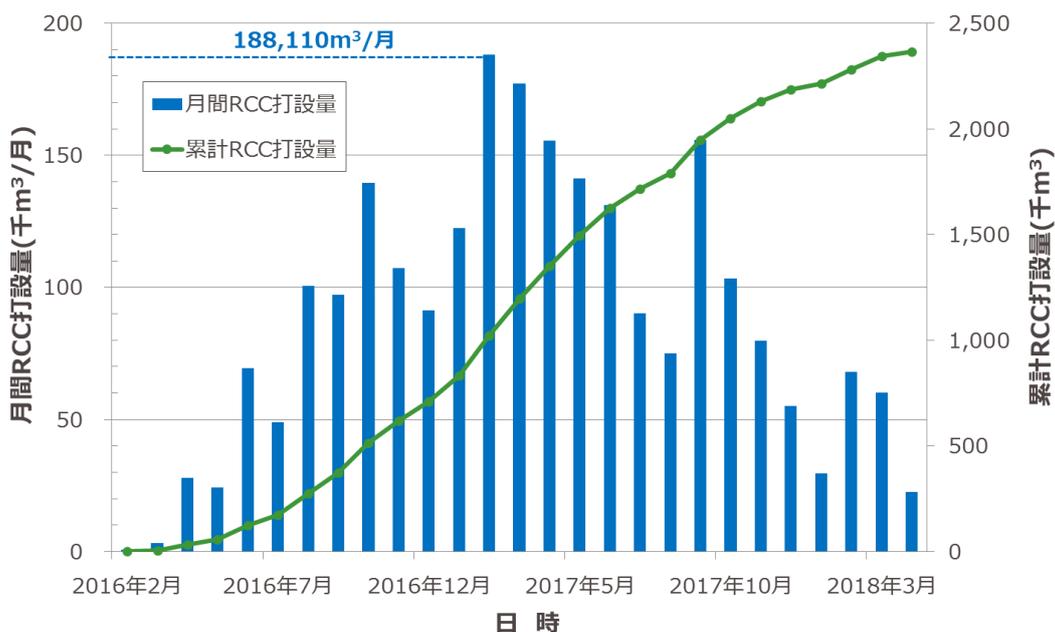


図 6-23 NNP1 の RCC 打設の実績

また、Dr. Malcolm Dunstan の報告⁸⁾によれば、RCC ダム施工の生産性効率は平均打設量と打設能力の比率で評価される。

一般的に、生産性効率が 28%程度で良好と評価されるが、図 6-24 に示すように、NNP1 は 33.8%を達成し、上記同様に世界最高水準の RCC ダム施工の生産性効率を記録することができた。

さらに、当初の計画では、乾季の終盤である 5 月に初期湛水を開始するためには、約 11 ヶ月の工程短縮が必要であったが、RCC ダム施工の生産性効率の向上により、大幅な工程短縮とともにコスト削減を実現することができた。その結果、予定通りに初期湛水を開始することができ、費用リスクおよび工事（完工）リスクを回避することができた。

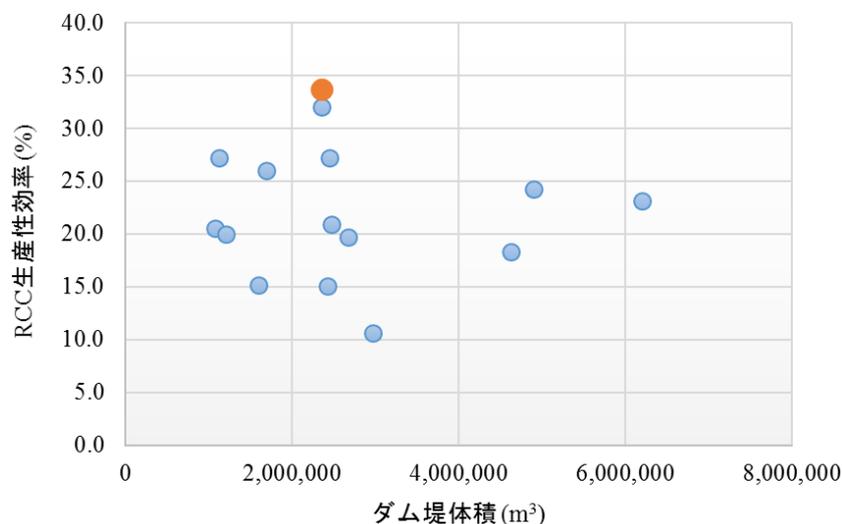


図 6-24 RCC ダム施工の生産性効率

6.5 まとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

- 1) 試験施工により、RCC ダム施工の施工仕様・手順を確立した。そして、GE-RCC 施工、フェザーエッジ処理、GPS 装置による転圧管理、養生装置および堤内排水孔の削孔などの RCC ダム施工の施工計画（施工方法および施工手順書）の改善とともに施工手法の合理化を提案した。これらは、RCC の品質および RCC ダムの性能を確保するとともに、工事工程の短縮およびコストの削減にも寄与する。
- 2) 材料調達、仮設備の配置、スロープレイヤー工法の最適化、化学混和剤の添加量、RCC 打設における安全確保、ダムのゾーニングにおける施工手順および組

織体制について検討し，高速施工を実現するための RCC 施工手法を提案した．これにより，建設期間中の RCC 施工に関する重大事故の発生を防ぎ，生産性効率は世界最高水準の 33.8 %を記録，さらに，スロープレイヤー工法による月間平均打設速度は世界 9 番目を達成した．そして，RCC ダムの合理的な施工手法であることを実証することができた．これらの RCC ダムの高速施工は，大幅な工事工程の短縮およびコストの削減に寄与する．

- 3) 以上より，費用リスク，工事（完工）リスク，材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な施工手法を提案した．

参考文献

- 1) 一般財団法人ダム技術センター：RCD 工法施工技術資料，RCD 工法整理検討会，pp.1-1-7-25, 2019
- 2) Aosaka Yushi, T. Seoka, B. Forbes, J. Cockcroft, Y. Murakami and M. Asakawa: Trial Mix and Full-scale Trial Embankment for RCC Dam at Nam Ngiep 1 hydropower project, ICOLD, 11pp., 2017
- 3) 青坂優志，石井政博，長坂誠司：ラオス国ナムニアップ 1 水力発電プロジェクトにおける RCC (Roller Compacted Concrete) 試験練りおよび試験施工について，電力土木，No.397，pp.31-36, 2018
- 4) RCC 専門家（Dr. Ole-John Berthelsen, Dr. Marco Conrad, Mr. Forbs BRIAN）からの聞取聴取，2015
- 5) 東南アジア諸国の複数の専門業者からの聞取聴取，2015
- 6) RCC 専門家（Dr. Ole-John Berthelsen, Dr. Marco Conrad, Mr. Forbs BRIAN）からの聞取聴取，2015
- 7) Brian Alistair Forbes: Using sloped layers to improve RCC dam construction, Civil Structures, pp.34-39, 2003
- 8) Malcolm Dunstan: How Fast should an RCC be Constructed? Technical progress on substantial hydropower development and Roller Compacted Concrete dams, CHINACOLD Publication, pp.158-169, 2015

第7章 RCC ダムの設計・施工に関する実証

7.1 はじめに

本研究では、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な設計・施工手法を提案することを目的とした。RCC ダムの設計（第3章：材料，第4章：配合，第5章：堤体・構造物）および施工（第6章：施工計画ほか）手法の合理化については、以下の通り検討した。

第3章では、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示し、コンクリートの温度上昇および強度発現の耐荷性について検証した。

第4章では、石粉代替による SHCRCC の設計手法を示し、その強度発現の耐荷性および水密性について検証した。

第5章では、低角度の弱層を有するダム基礎およびダム堤体への揚圧力の作用に対して、ダムの安定性（転倒・滑動）を確保するため、合理的なダム堤体のせん断キーおよび堤内排水孔の配孔の設計手法を示した。

第6章では、RCC ダムの施工における施工計画（施工方法や施工手順書など）の改善および高速施工を実現するための施工手法について示した。

一方、上記に示す RCC ダムの設計・施工における提案手法が不適切あるいは不十分な場合、RCC の品質および RCC ダムの性能の低下に影響を及ぼす可能性がある。

以上より、本章では、NNP1 の RCC ダムを用いて、初期湛水以降の RCC の品質（以下、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質を指す）および RCC ダムの性能（以下、ダムの水密性および耐荷性を指す）を検証することで、各章で示す RCC ダムの設計・施工の提案手法の適用性を実証するものである。

RCC ダムの水密性については、以下に示す検証により適用性を実証する。

- 1) ダム堤体の堤内排水孔を用いての現場透水試験（透水係数）
- 2) ダム堤体から採取したコンクリートコアの打継目観察
- 3) ダム堤体（堤内排水孔，下流面）の漏水量

次に、耐荷性については、以下に示す検証により適用性を実証する。

- 1) RCC の VB 値，空気量，温度
- 2) ダム堤体の RCC 締固め率，密度
- 3) ダム堤体から採取したコンクリートコア観察

- 4) RCC 供試体とダム堤体から採取したコンクリートコア供試体の強度
- 5) ダム堤体内の RCC 内部温度とひずみ量
- 6) ノーマル・リバーシプラムラインによるダム堤体およびダム基礎の挙動
- 7) ダム基礎のボーリングコアによる弱層観察

7.2 RCC ダムの水密性に関する実証

7.2.1 ダム堤体の現場透水試験

ダム堤体の打継目を含む堤内排水孔を用いて、現場透水試験により透水係数を計測し、RCC ダムの水密性について検証した。

現場透水試験は、ダムのゾーニングを踏まえ、図 7-1 に示す計 6 孔（径 10 cm, DL28, DL30, DL45, DL51, 右岸ダム天端孔）で実施した。透水係数の推定は、2.4.7 に示す 3 種類の理論式を適用した。

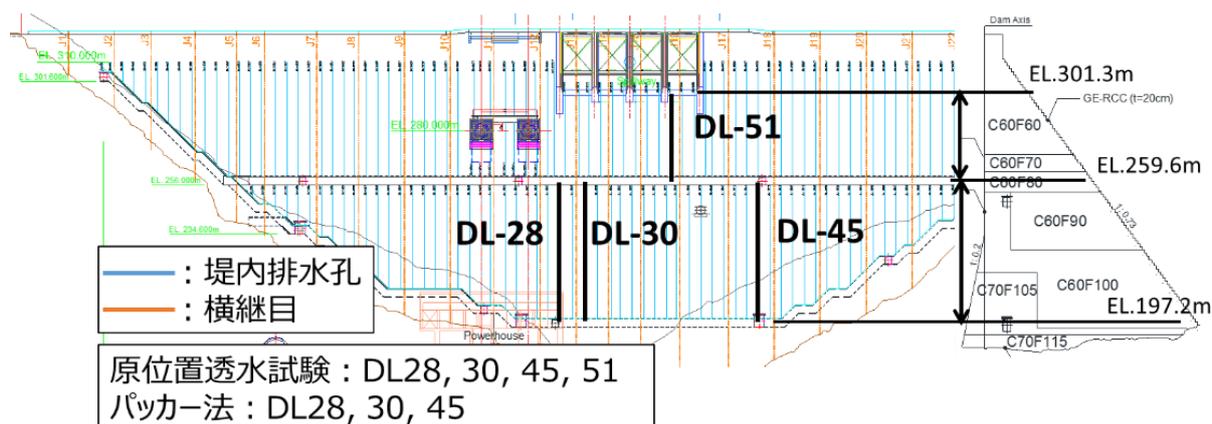


図 7-1 透水試験の実施箇所

図 7-2 に経過時間による孔内水位の変化、図 7-3 に同じく経過時間による孔内水量の変化、図 7-4 に時間経過による透水係数の変化を示す。図 7-2 から図 7-4 には、堤内排水孔を一定の時間湛水させた場合（凡例に 7 日間湛水後、4 日湛水後と示す）と、湛水させていない場合（凡例には孔番号のみ）の結果を示しているが、後者はダムが湛水した状態を模擬していないと考えられ、実際の条件（環境）は前者に近いと考えられる。

図 7-2 では、試験開始から早い時間（約 5 時間）での孔内水位の低下量が大きいですが、時間の経過とともに水位変化量が一定になる。

図 7-3 は、図 7-2 と同じ傾向を示している。図 7-4 では、湛水していない孔(DL28, DL30, DL45)は初めの 10 時間は透水係数が高いが、その後は比較的安定している。一方、7 日または 4 日間湛水後の孔は、初めから透水係数が安定している。

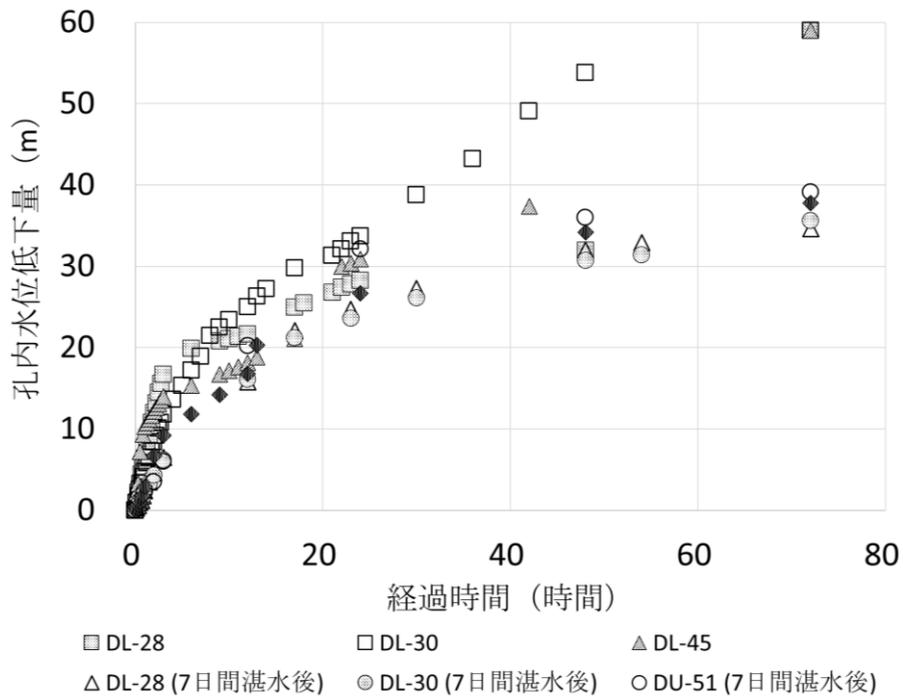


図 7-2 孔内水位の変化

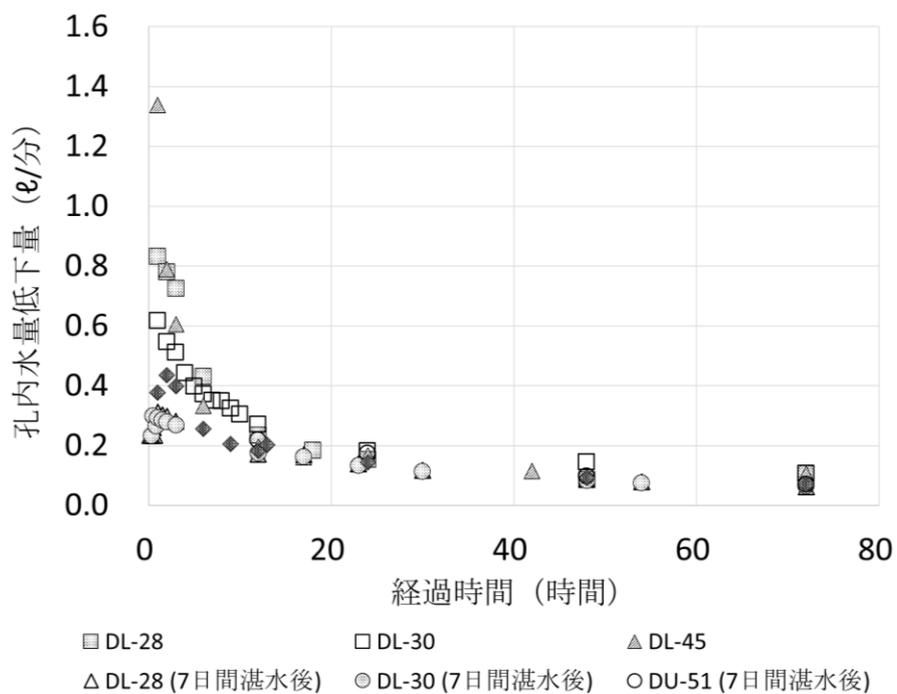


図 7-3 孔内水量の変化

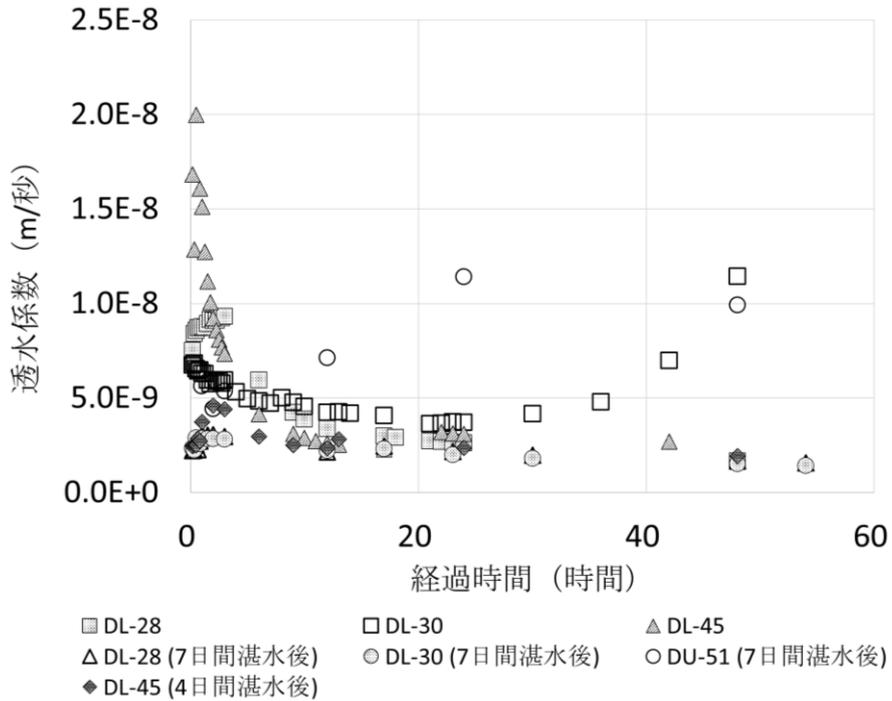


図 7-4 透水係数の変化

以上の結果より，打継目を含むダム堤体の透水係数は，試験開始 10 時間以降の平均値を採用し，表 7-1 にまとめた。

表 7-1 現場透水試験の結果

排水孔	DL30 1st	DL30 2nd	DL28 1st	DL28 2nd	DL45 1st	DL45 2nd
配合	C60F100, C70F105, C70F115					C60F60-80
削孔工法	パーカッション					
透水係数 (m/s) 理論式 (1)	8.7×10^{-10}	3.3×10^{-10}	1.3×10^{-9}	3.3×10^{-9}	1.5×10^{-9}	4.3×10^{-10}
透水係数 (m/s) 理論式 (2)	5.5×10^{-9}	2.3×10^{-9}	6.4×10^{-9}	2.4×10^{-9}	7.8×10^{-9}	2.9×10^{-9}
排水孔	DL45			右岸ダム天端孔		-
削孔工法	パーカッション				ロータリー	
配合	C70F115	C70F105	C60F100	C60F60	C60F60	-
透水係数 (m/s) 理論式 (3)	9.1×10^{-9}	6.5×10^{-9}	5.5×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.5×10^{-9}	-

それぞれの現場透水試験の結果は、式 (2.8) では透水係数が $3.3 \times 10^{-10} \sim 1.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 、式 (2.10) では $2.3 \times 10^{-9} \sim 7.8 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 、また式 (2.11) は $1.5 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ となった。これらは、ICOLD¹⁾に示されている RCC の標準透水係数 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ より小さい数値であり、NNP1 の RCC ダムは、大きな欠陥もなく水密性が十分確保されていると考えられる。なお、当該試験で得られた透水係数は、5.2 に示す浸透流解析で設定した透水係数 ($1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) よりも小さく、解析時の設定値は RCC ダムの水密性を過小評価したことになる。

以上の検証により、打継目を含むダム堤体の水密性は大きな欠陥もなく、RCC ダムの水密性が確保されていると評価できる。また、ダム堤体の水密性を確認するための方法として、現場で簡易に行える現場透水試験の手法を示した。

7.2.2 X線 CT 画像解析によるコンクリートコアの観察

X線 CT 画像解析を用いて、ダム堤体のコンクリートコア（以下コアと称す）の打継目部を観察し、RCC ダムの水密性について検証した。

Hot joint と Cold joint の打継目の状態を比較する。Hot joint コアサンプルは、 7-1 に示す DL45 孔の GL29.7~30.0 m から採取し、Cold joint コアサンプルは同じく DL45 孔の GL29.4~29.7 m から採取した。サンプルの外径は 45 mm である。X線 CT 画像解析は、X線 CT TXS-CT 450/160 (画素サイズ $40 \mu\text{m}/\text{pixel}$)²⁾ を用いた。

コアのサンプルを 7-5 に、Hot joint サンプルの CT 画像を 7-6 に、Cold joint サンプルの CT 画像を 7-7 に示す。CT 画像は、サンプル中心を回転軸とし 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° の断面について示す。また、Hot joint サンプルの CT 画像における WL (Window Level) は 6804、WW (Window Width) は 3615 であり、Cold joint サンプルの CT 画像における WL は 8345、WW は 4926 と示した。

X線 CT 画像解析の評価としては、Hot joint サンプルの CT 画像中央付近には、Hot joint が存在すると想定されるが、CT 画像からは明瞭な打継目は確認されなかった。つまり、Hot joint においては、先行して打ち込まれたコンクリートと次層のコンクリートは、ほぼ一体化していると考えられる。

一方、Cold joint サンプルの CT 画像においては、画像下部付近において、Hot joint サンプルに比べ明瞭な打継目が確認されたものの、サンプルを横断するような空隙とはなっていないことが確認できる。つまり、Cold joint においては、Hot joint に比べると打継目が明瞭になり易いが、グリーンカットやグラウト材の塗布など適切な打継目処理を行うことにより、水密性の観点から打継目の密着性は確保できていると考えられる。

以上の検証により，適切な打継目処理を行うことで，Hot joint，Cold joint ともに打継目の状態は，コンクリートがほぼ一体化しており，7.2.1 に示すダム堤体の現場透水試験の評価も踏まえ，RCC ダムの水密性が確保されていると評価できる．なお，打継目の強度も確保されているかについては，7.3 で検証結果を示す．



図 7-5 Hot/Cold joint コアサンプル

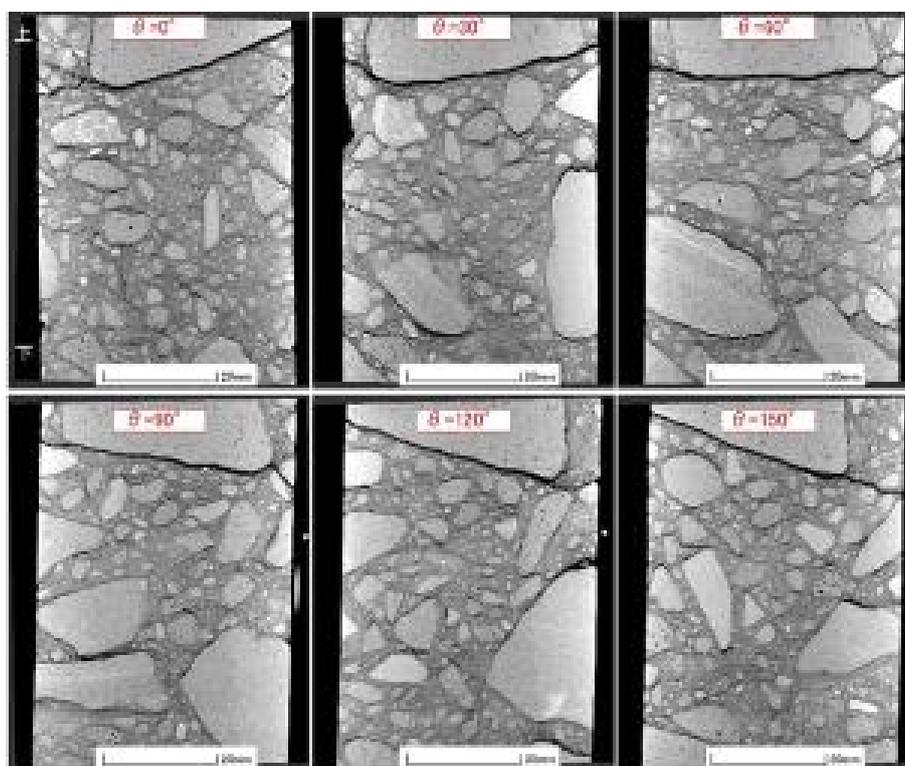


図 7-6 Hot joint の CT 画像

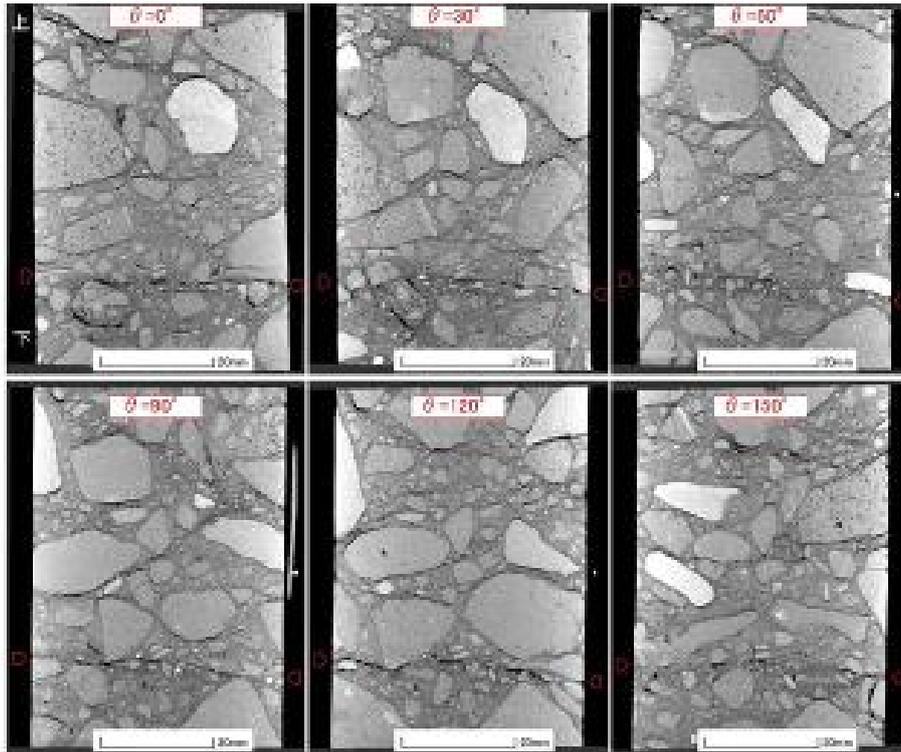


図 7-7 Cold joint の CT 画像

7.2.3 ダム堤体の漏水量

堤内排水孔およびダム堤体の下流面からの漏水量を計測し、ダムの水密性について検証した。

NNP1 は、2018 年 4 月末に RCC 打設を完了し、同 5 月 15 日から初期湛水を開始した。ラオスではこの頃から雨季が始まり、通常 10 月には乾季に移行する。図 7-8 に貯水位の変化を示す。6 月から 7 月にかけては例年に比べて降雨量と流入量が少なかったが、7 月から 8 月末にかけては多い降雨量と流入量が続き、8 月末には貯水位はほぼ満水位に到達している。この期間の貯水池の日最大水位上昇量は 2 m/日に達した。

漏水量については、初期湛水から現在に至るまで、図 7-9 および図 7-10 に示す通り、堤内排水孔やダム堤体の下流面からの漏水はほとんど見られず、ダム堤体のコンクリートの水密性は確保されていると評価できる。

以上の検証により、打継目を含むダム堤体の水密性は大きな欠陥もなく、RCC ダムの水密性が確保されていると評価できる。

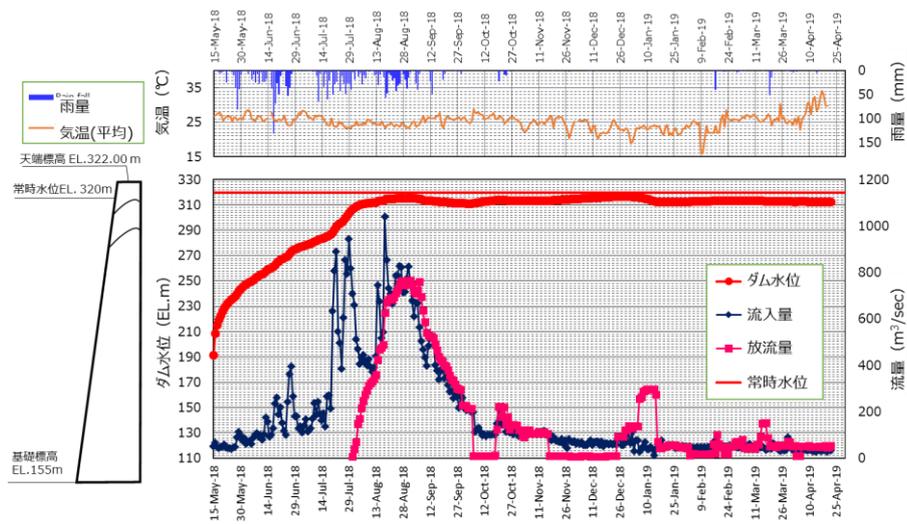


図 7-8 貯水位の変化



図 7-9 堤内排水孔（中間水平監査廊）の漏水状況（2023.3 撮影）



図 7-10 ダム堤体左岸側の下流面の漏水状況（2023.3 撮影）

7.3 RCC ダムの耐荷性に関する実証

7.3.1 RCC の VB 値, 空気量, 温度

7.3.2 以降に示す RCC の締固め率, 密度および強度などの耐荷性に影響することから, RCC の VB 値, 空気量および温度を計測し, RCC ダムの耐荷性について検証した。

VB 試験は, コンシステンシーを評価する試験である。RCC 製造プラントおよび打設エリアの 2 ヶ所で計測し, RCC の運搬に伴う経時変化についても確認した。長い運搬距離かつ季節の影響によって, コンクリート性状は敏感に変化するため, 留意が必要である。

NNP1 での VB 試験の管理値は, 12~20 秒であるが, 配合・施工仕様などに応じて, 12~16 秒および 14~18 秒の 2 種類の管理値を設定した。

VB 値の結果は, 図 7-11 に示すように, RCC 製造プラントでの平均値は 11.8 秒, 打設エリアでの平均値は 13.9 秒となり, 安定した供給とともに要求品質を満足し, 変動係数は約 10%となり, ICOLD¹⁾の指標に基づき優れた RCC の品質と評価できる。

空気量試験は, RCC 製造プラントにて実施した。NNP1 地点の気候を踏まえると, 凍結融解の懸念はなかったことから, AE 剤は不要とした。

空気量の結果は, 図 7-12 に示すように, 空気量の平均値は 1.4%と要求品質 (1.5%程度) を満足し, 変動係数は約 5%と, ICOLD¹⁾の指標に基づき優れた RCC の品質と評価できる。

次に, 打込み時の RCC の温度は, 温度応力解析を踏まえ, ひび割れを抑制するために, 28°C以下になるよう設定した。RCC の温度管理は, ウェットベルト (骨材の冷却) およびアイスフレーク (練り混ぜ水の冷却) により調整した。また, RCC 製造プラントおよび打設エリアの 2 ヶ所で計測し, RCC の運搬に伴う経時変化についても確認した。

打込み温度の結果は, 図 7-13 に示すように, 平均外気温は 27.3°C, RCC 製造プラントでの平均値は 23.5°C, 打設エリアでの平均値は 24.8°Cと, 経時変化は約 1°Cとなり, 安定した供給とともに要求品質 (28°C以下) を満足したと評価できる。

以上の検証により, RCC の VB 値, 空気量および温度とともに, RCC の要求品質を満足している。また, これらの結果は, RCC ダムの耐荷性に影響すると考えられ,

7.3.2 以降の耐荷性について, 検証する必要がある。

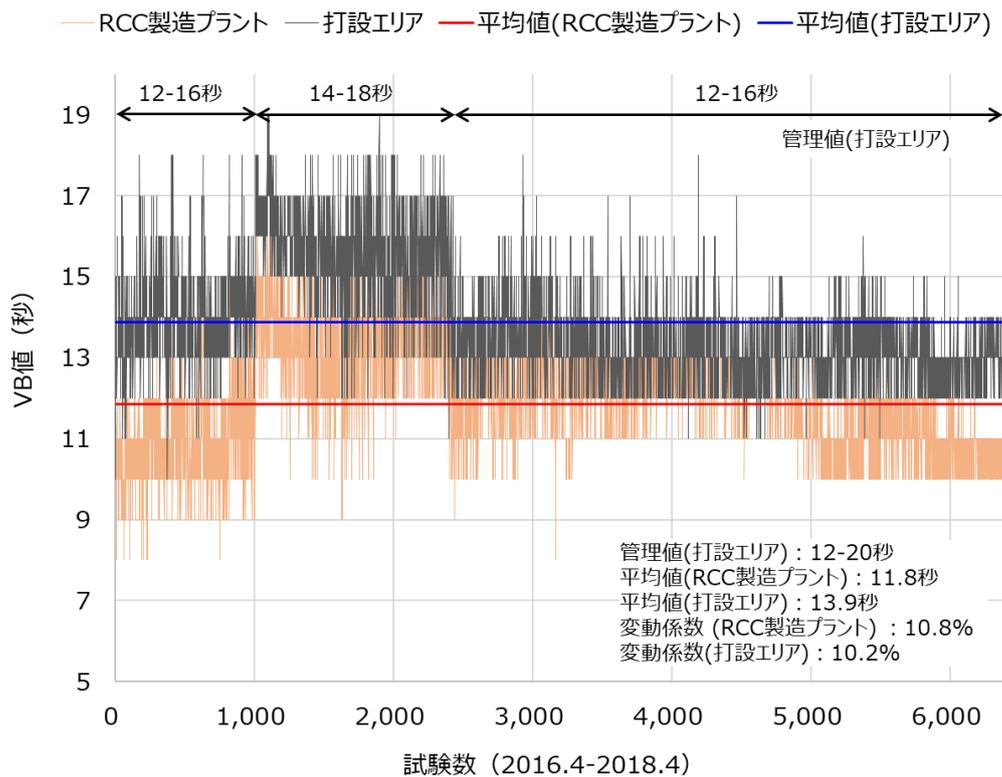


図 7-11 RCC の VB 値 (2016/4~2018/4 の全 RCC 打設期間)

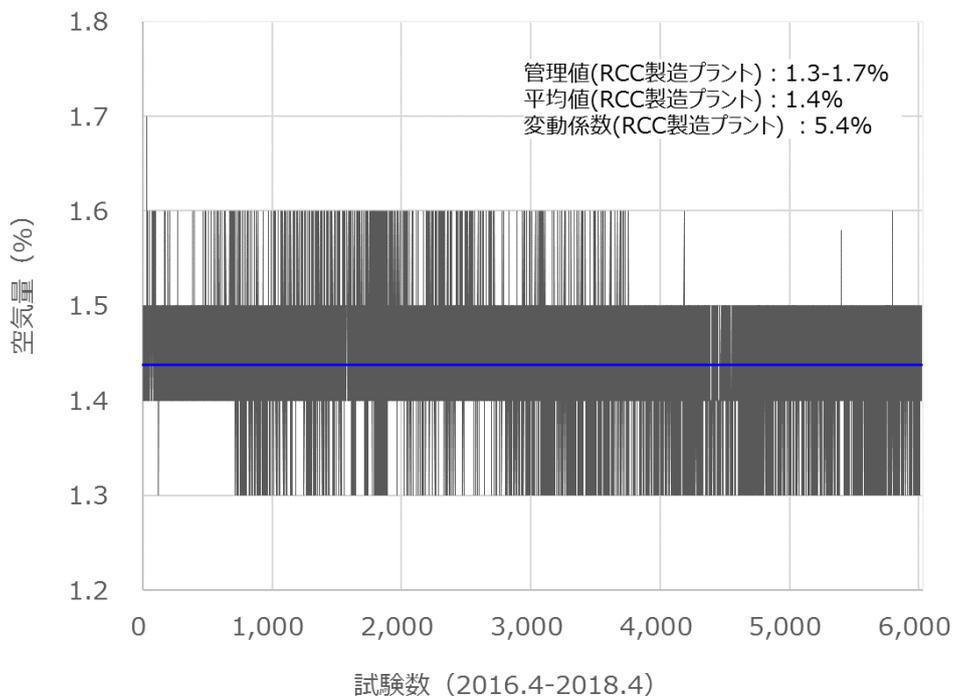


図 7-12 RCC の空気量 (2016/4~2018/4 の全 RCC 打設期間)

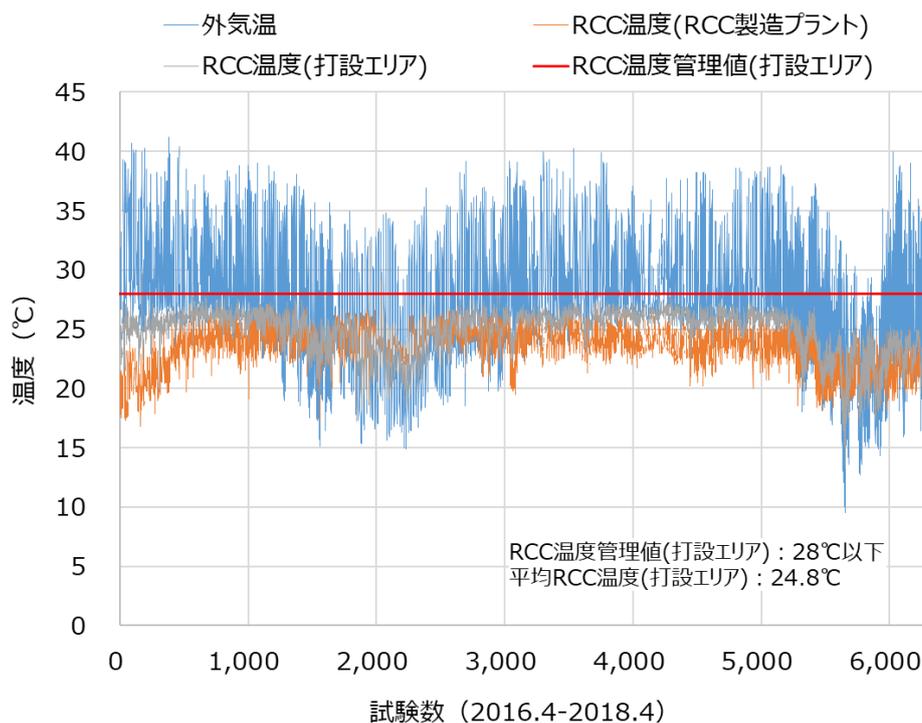


図 7-13 RCC の温度（2016/4～2018/4 の全 RCC 打設期間）

7.3.2 RCC の締固め率，密度

強度などの耐荷性に影響することから，RCC の締固め率と密度を測定し，RCC ダムの耐荷性について検証した。

RCC の締固め仕様は，試験施工の結果を踏まえ，振動ローラ（16 ton）により，無振動 1 往復，振動 3 往復で転圧し，締固め率の平均値が 97%以上になるよう設定した。打設エリアの RCC 密度試験は，1 層（300 mm）あたり 6～8 回程度に設定し，表面より 275 mm の高さで，単位体積質量試験（RI 法）³⁾を実施した。

RCC の締固め率と密度の結果を図 7-14 および図 7-15 に示す。図には変動係数（試験数は約 14,000 回）を併記する。

RCC の締固め率については，平均値が 97.8%と要求品質を満足し，変動係数は約 0.5%となり，ICOLD¹⁾の指標に基づき優れた RCC の品質と評価できる。また，RCC の密度については，平均密度は 2.33 ton/m³と要求品質（2.3 ton/m³以上）を満足し，変動係数は約 0.4%と，ICOLD¹⁾の指標に基づき優れた RCC の品質と評価できる。

以上の検証により，RCC の締固め率と密度とともに，RCC の要求品質を満足し，RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。また，これらの結果は，RCC ダムの耐荷性に影響すると考えられ，7.3.3 以降の耐荷性について，検証する必要がある。

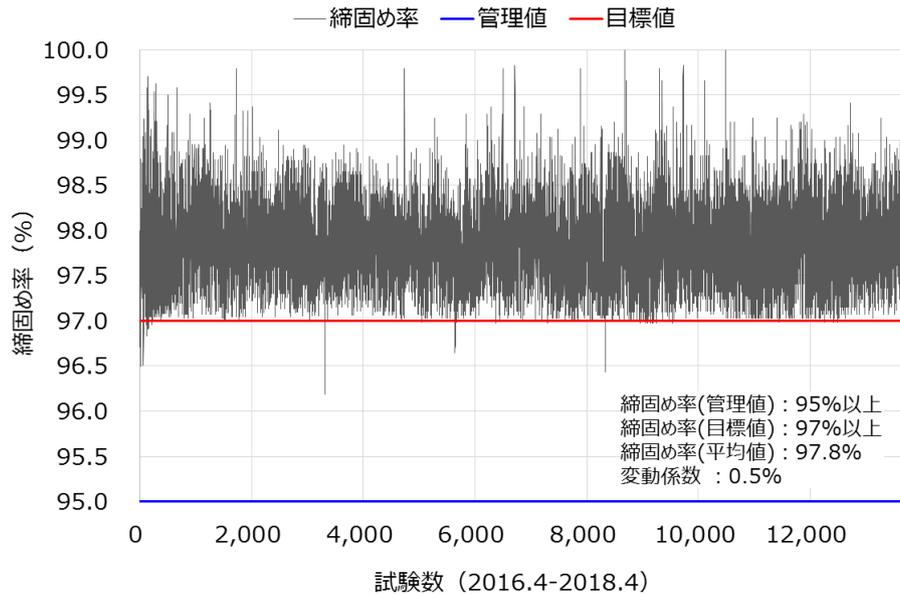


図 7-14 RCC の締固め率 (2016/4～2018/4 の全 RCC 打設期間)

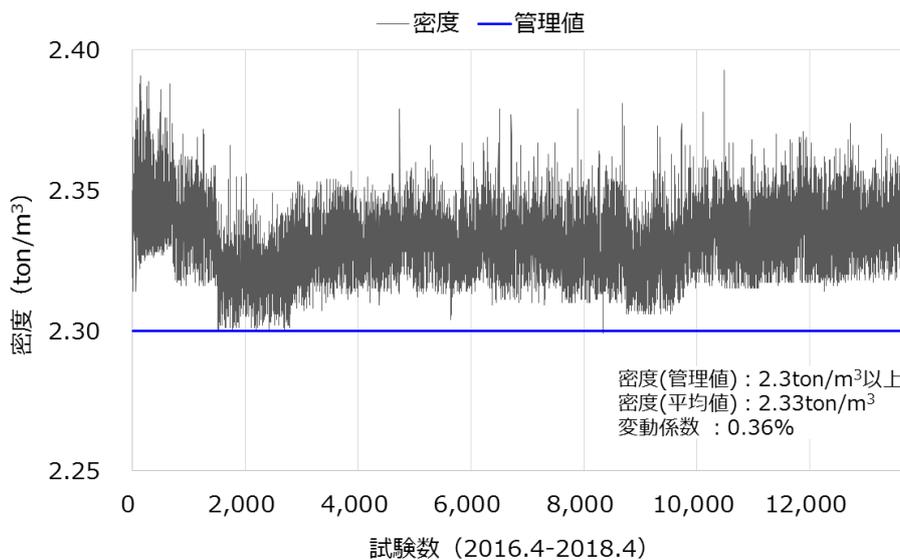


図 7-15 RCC の密度 (2016/4～2018/4 の全 RCC 打設期間)

7.3.3 ダム堤体から採取したコンクリートコアの観察

ダム堤体から採取したコア（各打継目，GE-RCC と RCC の境界部，GE-RCC とダム基礎岩盤の境界部の状態）を観察し，RCC ダムの耐荷性について検証した。

主にダム堤体の上流面および堤内仮排水路から径 15 cm，延長 50～120 cm のコアを採取した。特に材料分離，転圧，打継目および着岩部の状態について観察した。

図 7-16 に Hot joint 部の RCC と GE-RCC の境界部のコア，図 7-17 に Warm joint 部のコア，図 7-18 に Cold joint 部のコアおよび図 7-19 に GE-RCC と岩盤の境界部のコアを示す。

観察の結果は，全体的にあばた，材料分離はなく骨材は均一に分布し，密実に転圧されている。また，Warm joint を含む各打継目，GE-RCC と RCC および GE-RCC と基礎岩盤の境界はなく密着状態は良好であり，品質が確保されていると評価できる。ただし，部分的に，あばた，わずかながらの材料分離が観察されたが，RCC の品質および RCC ダムの性能を低下させるものではないと判断する。

以上の検証により，全てのコア（各打継目，GE-RCC と RCC の境界部，GE-RCC とダム基礎岩盤の境界部）の状態は，RCC の要求品質を満足し，RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。

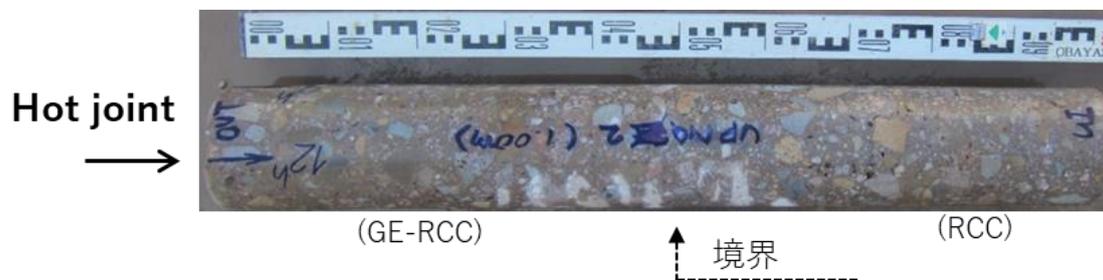


図 7-16 コア（RCC と GE-RCC 境界，Hot joint）の状態

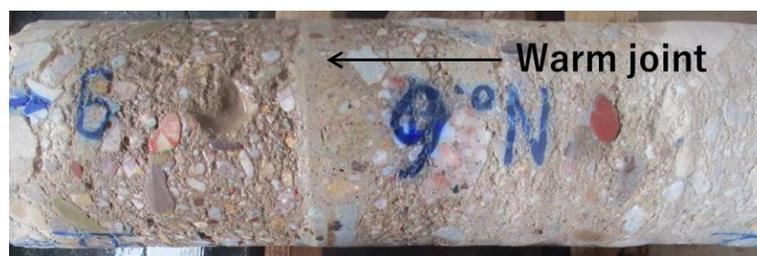


図 7-17 コア（打継目 Warm joint 含む）の状態



図 7-18 コア（打継目 Cold joint 含む）の状態



図 7-19 コア（GE-RCC と岩盤）の状態

7.3.4 RCC 供試体とコンクリートコア供試体の強度

RCC 供試体とダム堤体から採取した打継目を含むコア供試体の強度試験により、RCC ダムの耐荷性について検証した。

RCC 供試体は、RCC 製造プラントから RCC 運搬用ベルトコンベアでダム地点まで運搬された RCC を使用して供試体を作成した。これらの供試体を用いて、材齢 7 日、28 日、91 日、182 日、365 日の圧縮試験、直接引張試験および割裂引張試験を実施した。試験結果を図 7-20 および図 7-21 に示し、ダムの設計上の安全率を含む設計強度を併記する。また、全ての試験供試体数は約 3,800 本であり、各配合の材齢 365 日の圧縮強度の変動係数を図 7-22 に示す。

次に、ダム堤体から採取した打継目を含むコア供試体（径 15 cm）を用いて、圧縮試験および直接引張試験を実施した。これらの試験強度を図 7-20 および図 7-21 に併記する。

RCC 供試体の強度（圧縮強度、直接引張強度、割裂引張強度）は、全て設計強度を確保していることを確認した。また、打継目を含むコア供試体の直接引張強度は、RCC 供試体の強度と同等であることがわかった。7.2 で示した水密性が確保されている評価と併せて、耐荷性についても要求品質を満足し、適切な RCC ダムの設計・施工手法であると評価できる。さらに、圧縮強度の変動係数は平均値が 6%であり、ICOLD¹⁾の指標に基づき優れた品質が確保されていると評価できる。

以上の検証により、RCC の強度（RCC 供試体、打継目を含むコア供試体）は、RCC の要求品質を満足し、RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。

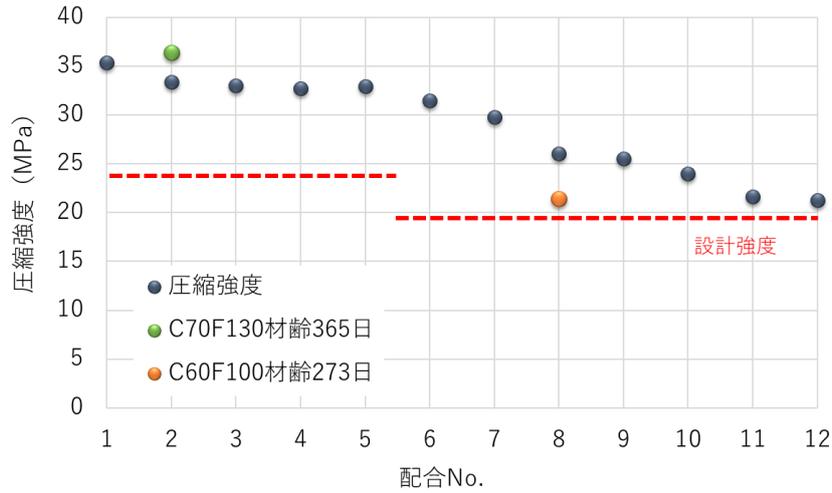


図 7-20 材齢 365 日の圧縮強度と設計強度の関係

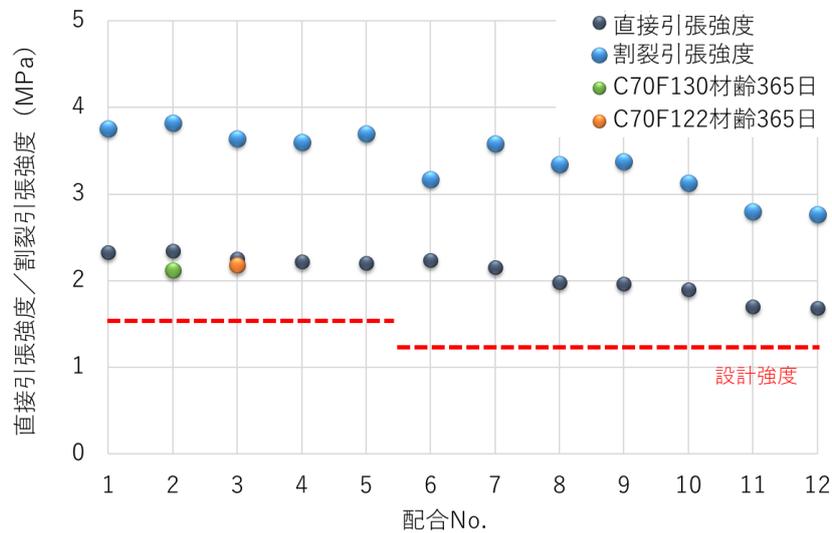


図 7-21 材齢 365 日の直接引張強度／割裂引張強度と設計強度の関係

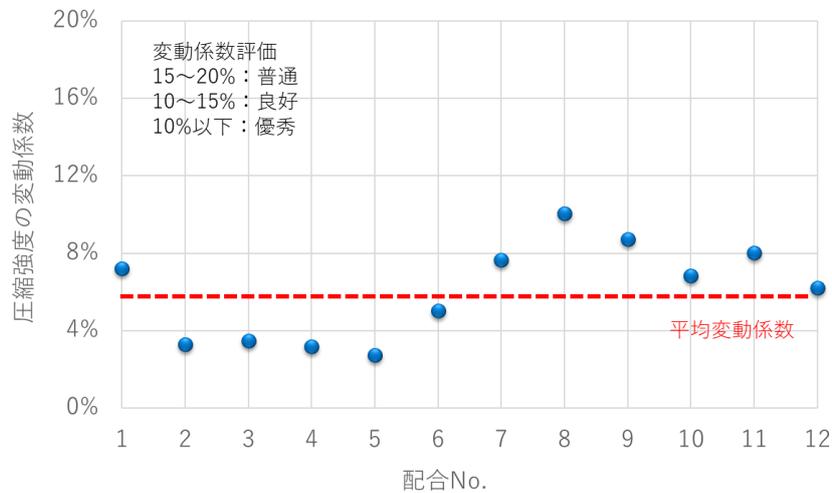


図 7-22 材齢 365 日の圧縮強度の変動係数

7.3.5 ダム堤体のRCC内部温度とひずみ量

ダム堤体内のRCC内部温度とひずみ量を温度応力解析値と比較し、RCCダムの耐荷性について検証した。検証結果を以下に示す。

(1) 温度応力解析

堤高167mのダムを、メッシュ間隔0.6mで7種類のゾーニングとなるよう境界を設定して模擬した。模擬には、図7-23に示す上下流方向のダムの全断面を含む2次元断面モデルを用いた。解析はRCC打設や湛水の進捗に応じて逐次解析を実施した。解析ソフトは、ASTEAMACS Ver.9⁴⁾を用いた。

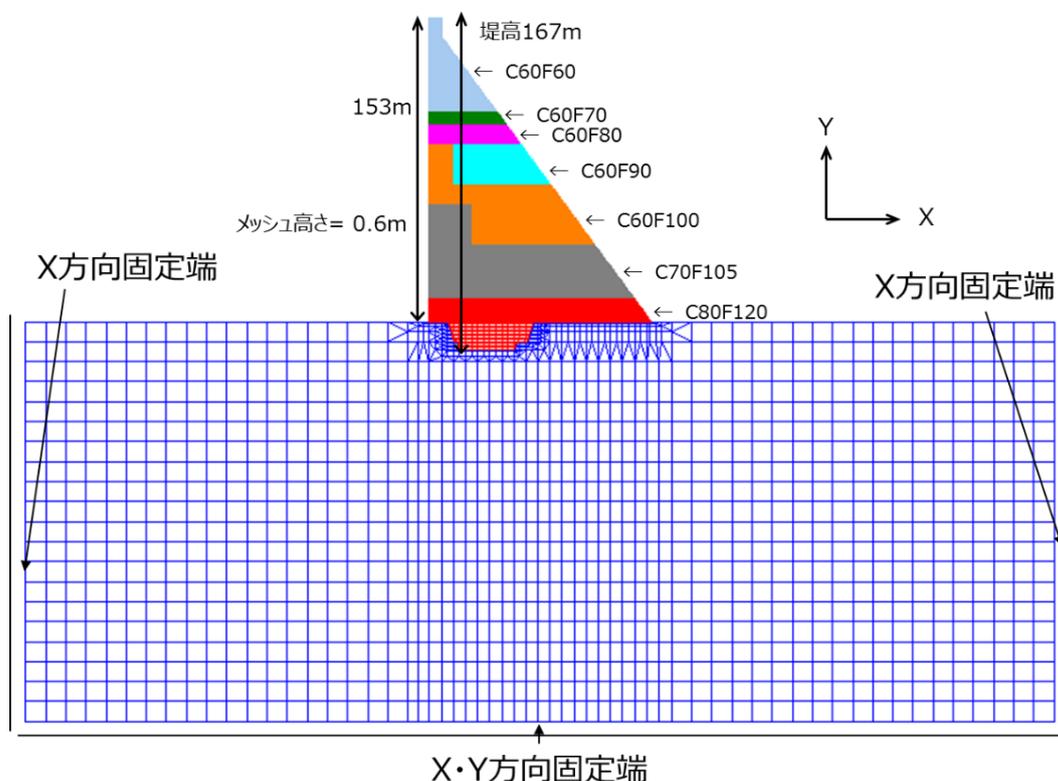


図7-23 解析モデル

解析に適用したコンクリートの物性値を表7-2に示す。

圧縮強度や断熱温度上昇量などは、現地試験で得られた結果を可能な限り適用し、それ以外はコンクリート標準示方書^{5~7)}に示される標準値を適用した。有効ヤング係数については、試験で得られた圧縮強度をコンクリート標準示方書⁶⁾の理論式に適用して算出した。打継目の養生は、散水養生（熱伝達率 $\eta=14\text{W/m}^2\text{C}$ ）として設定し、ダム上流側は水温 25C で2018年5月に湛水を開始し、同年9月に満水位に

表 7-2 コンクリートの物性値

No.	項目	単位	入力値	備考
1	施工条件			
1)	リフト高	m	0.6	打設計画
2	コンクリート物性値			
1)	熱伝導率	W/m°C	2.8	標準示方書
2)	単位体積重量	kg/m ³	2,300	設計値
3)	比熱	KJ/kg°C	1.05	標準示方書
4)	圧縮強度	N/mm ²	f _c =試験結果	試験結果
5)	有効ヤング係数	N/mm ²	$E_e(t) = \varphi(t) * 4700 * f_c^{0.5}$ $0 < t < 3: \varphi(t) = 3$ $3 \leq t < 5: \varphi(t) = 0.135(t-3) + 0.73$ $5 \leq t: \varphi(t) = 1.0$ E _e (t): 材齢 t 日におけるヤング係数 (N/mm ²) φ(t): クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数 f _c (t): 材齢 t 日による有効材齢 t 日の圧縮強度 (N/mm ²)	示方書
6)	断熱温度上昇量	°C	$T = K(1 - \exp(-\alpha t^b))$	試験結果
7)	引張強度	N/mm ²	f _t (t) = 0.12 * f _c (t)	試験結果
8)	ポアソン比		0.2	標準示方書
9)	線膨張係数	/°C	10.0	標準示方書
10)	打込み温度	°C	26	実測値

達し、湛水が完了するような条件を設定した。

ラオスは熱帯モンスーン気候に属し、年間の寒暖差が小さく、特に日本の冬季のような気温の低下が少ない。外気温の入力値は、ダムサイト近傍の A 村の調査期間の 2012 年から 2019 年までの月平均 1 日 3 回、6、12、18 時の外気温の実測値を用いた。月間平均温度は、21.9～28.7°C、温度差 6.8°C となる。

コンクリートの打込み温度は、実測値は 16～28°C とばらつきが見られたが、局所的な温度 27°C 以上を省いた安全側な解析結果となる 26°C を入力値とした。

圧縮強度は、試験値を入力値とした。長期強度（材齢 182 日以上）の結果が得られていない配合については、配合 C80F120 強度の伸び率を適用した。また、引張強度は、圧縮強度の 12～15% という結果が得られたため、安全側な解析結果となる圧縮強度の 12% の強度を引張強度として適用した。

断熱温度上昇量は、現場で簡易な断熱温度上昇試験機を製作し、各配合に対して試験を実施した^{8~12)}。材齢と断熱温度上昇速度の関係には、相関性の高い推定式を適用した⁶⁾。

(2) ダム堤体の RCC 内部温度とひずみ量

図 7-24 は、ダム上流面 (EL.211.6 m, ダム軸から 4 m 下流 (図 7-1)) での RCC の内部温度変化を示す。解析値と実測値は概ね一致する。ただし、2017 年 11 月から実測値が解析値をやや下回っている。これは、この時期がラオスで最も気温が低下する時季であり、平年より外気温が下がったためと考えられる。また、温度応力解析では、RCC 打込み温度の入力値を 26°Cとしているが、実際は 16~28°Cと下方にばらついていたため、その差異が要因と推察される。

次に、図 7-25 は、図 7-24 と同位置での RCC のひずみ量の変化を示す。温度応力解析では湛水による荷重が考慮されていないため、解析値には 2018 年 5 月から 9 月までの湛水による影響は表れていない。しかし、それを除けば温度変化と同様に解析値と実測値は概ね一致している。湛水期間におけるひずみ量の大幅な減少(収縮)は、湛水による静水圧によってダムが圧縮力を受けているためと考えられる。

以上の検証により、ダム堤体内の RCC 内部温度とひずみ量の実測値は、解析値と概ね一致しており、RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。

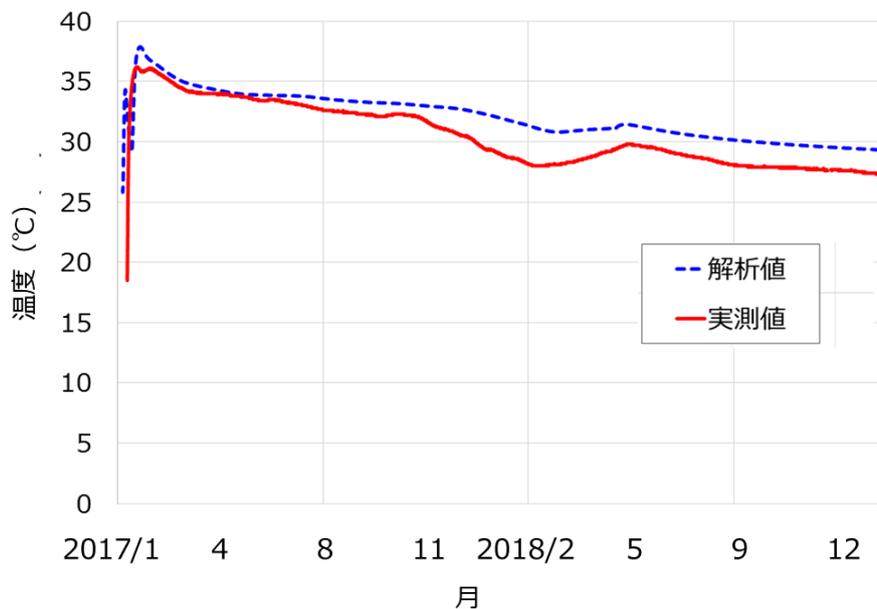


図 7-24 温度応力解析値と RCC の内部温度 (EL. 211.6 m) の実測値

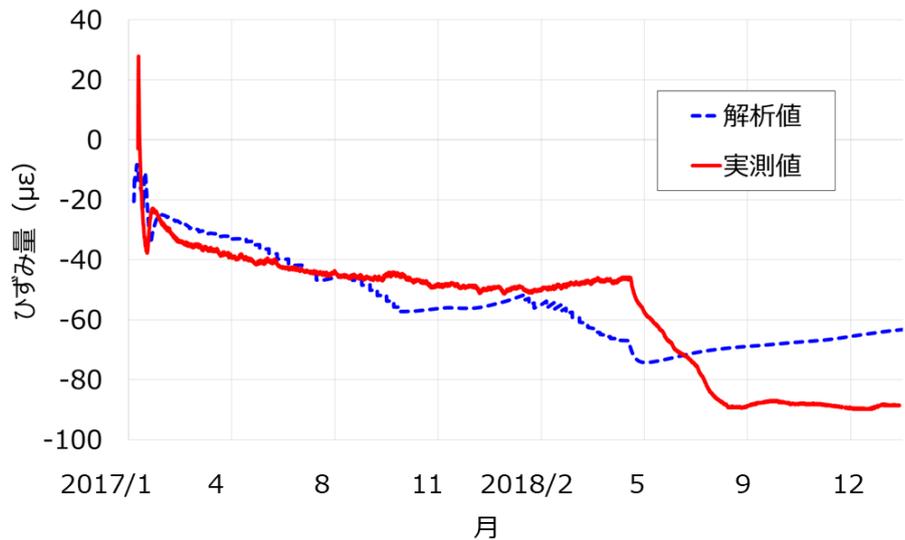


図 7-25 温度応力解析値と RCC のひずみ量 (EL. 211.6 m) の実測値

7.3.6 ダムのノーマル・リバースプラムラインの挙動

ダム堤体のノーマル・リバースプラムラインの計測値と FEM 解析値を比較し、ダム堤体のせん断キーの効果および RCC ダムの耐荷性について検証した。

NNP1 のダム堤体には、図 7-26 に示す通り 4ヶ所にノーマル・リバースプラムラインを設置している¹³⁾。

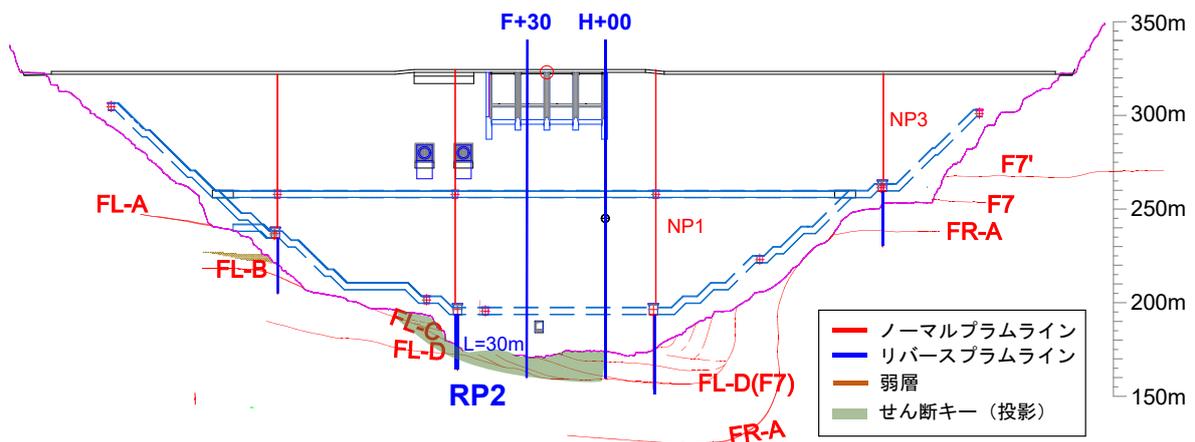


図 7-26 ダム堤体のプラムラインの設置箇所

初期湛水以降のノーマル・リバースプラムラインの挙動を図 7-27 に示す。

ノーマルプラムラインによるダム堤体の変位量は、貯水位の上昇とともに増加しているが、急激な増加などは見られず、安定的な挙動を示している。これは、せん

断キーの効果が得られているとともに、ダムの安定性（転倒，滑動）が確保されていると評価できる。また，図には F+30 断面の FEM 解析でのダム堤体の変位も併記したが，実測値と整合性が良好であることが確認できる。

次に，図に示す FL-D を含む岩盤内の挙動を表すリバースプラムラインにおいて，湛水時の挙動に大きな増加が見られないことから，弱層に破壊やすべりなどの顕著な変化はなく，せん断キーの効果が得られていると評価できる。また，図には，F+30 断面の 5.1 で示す FEM 解析（F+30-c1）での岩盤変位も併記したが，実測値と整合性が良好であることが確認できる。

以上の検証により，ダムのノーマル・リバースプラムラインの挙動は，安定的な挙動を示し，ダム堤体や弱層に破壊やすべりなどの顕著な変化はない。したがって，せん断キーの効果が得られているとともに，ダムの安定性（転倒，滑動）が確保され，RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。

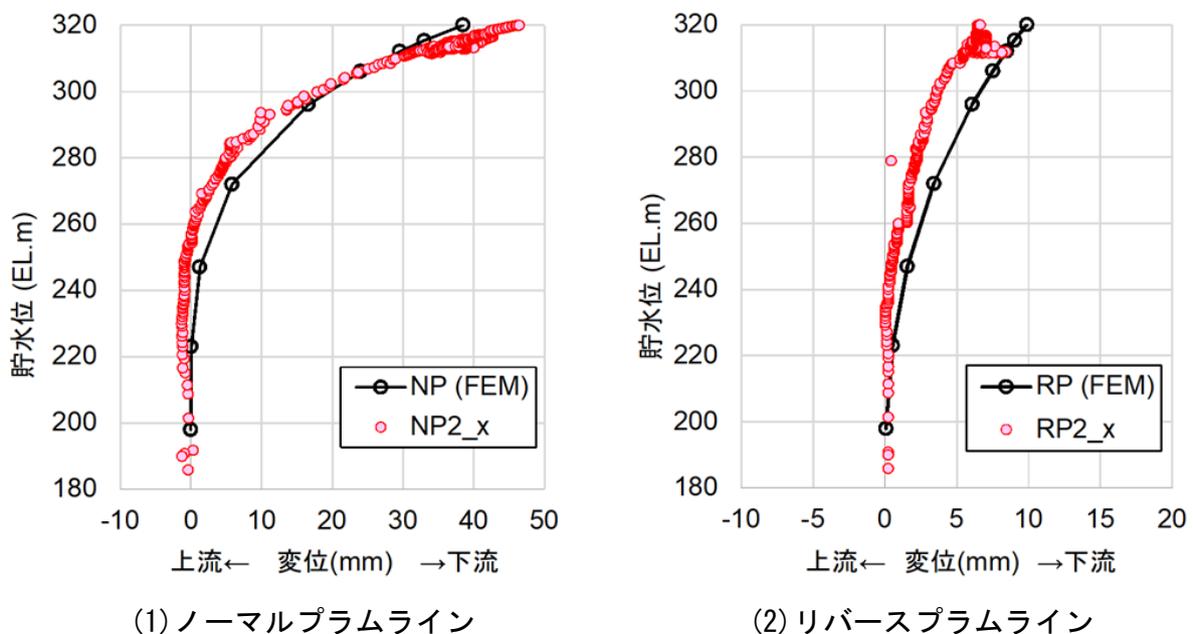


図 7-27 ダムのプラムラインの挙動

7.3.7 X線 CT 画像解析によるダム基礎のボーリングコアの弱層観察

ボーリング調査によりダム基礎の弱層を観察し，RCC ダムの耐荷性について検証した。

図 5-2，図 5-3 に示す AD-3 と AD-4 の位置でボーリング調査を実施した。

図 7-28 にボーリングコアの写真を示す。上段は AD-3 孔の 29 m から 32 m までのコアで，中央付近に FL-C を捉えている。また，下段は AD-4 孔の 32 m から 35 m ま

でのコアで、下端付近に FL-D を捉えている。全てのコアを目視観察した結果、弱層には条線などは見られず、せん断力（ダムのスラスト力）の作用により変形した兆候は認められなかった。ただし、ボーリングコアの表面観察だけでは微細な滑動痕跡の存在を断定することはできないため、弱層の立体的な内部構造を詳細に観察するために、図 7-29 に示す通り、X 線 CT 画像解析をボーリングコアに対して実施した。

ダム堤趾部直下に位置する AD-4 (EL.163.95 m) では、FL-C および FL-D とは無関係の局所的な破砕部付近に、微細なせん断性亀裂やそれに伴う鉛直亀裂が存在していることが確認された。また、初期湛水に伴う鉛直応力の増加により、細粒分が隣接する微細な亀裂の空隙へはらみ出した痕跡は見られたが、弱層自体にはせん断破壊が生じているような変形の痕跡は見られなかった。同様に、AD-4 から 20 m 下流側の AD-3 (EL.162.9 m) でも、弱層とは無関係の局所的な破砕部において、鉛直方向の圧縮に伴う細粒分のはらみ出しの痕跡は見られたが、弱層自体にはせん断破壊が生じているような変形の痕跡は見られなかった。

以上の検証により、ダム基礎の原位置で弱層の状態を詳細に観察することで、せん断キーが弱層のせん断ひずみを抑制する効果を検証することができた。これにより、せん断キーの効果とともに、ダムの安定性（滑動）が確保されていると評価できる。よって、RCC ダムの耐荷性が確保されていると評価できる。

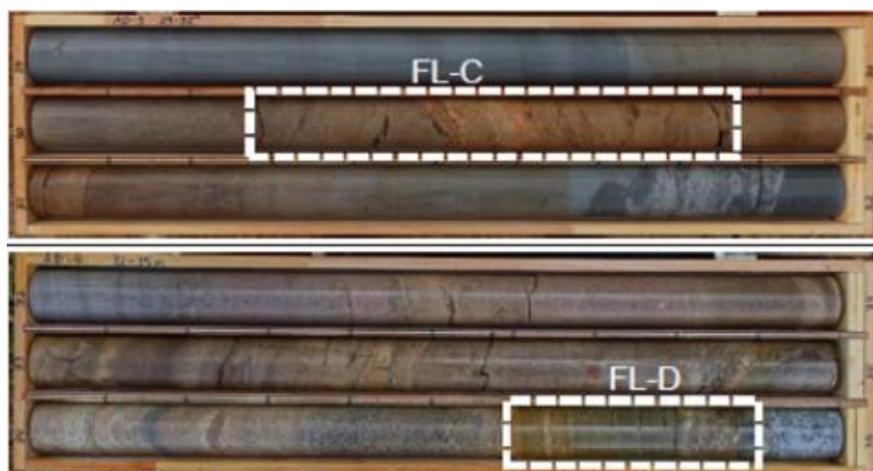


図 7-28 ボーリングコアの写真（上段：AD-3，下段：AD-4）

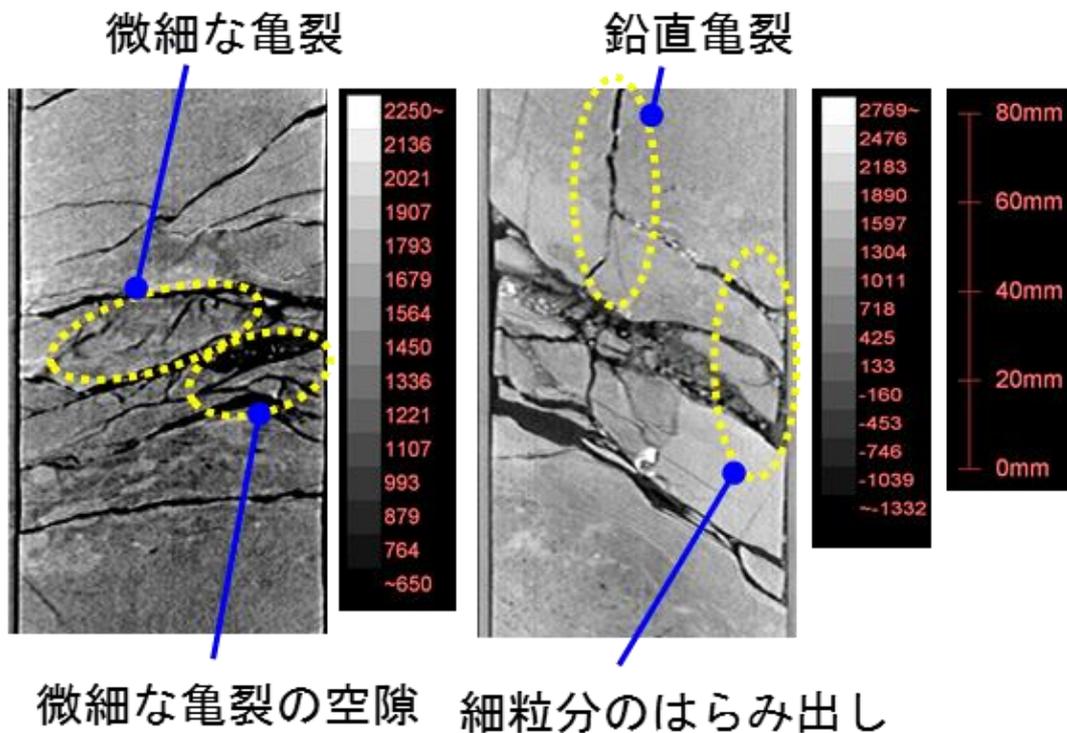


図 7-29 CT 画像解析による基礎岩盤の観察（左：AD-4，右：AD-3）

7.4 まとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

本章では、第 3 章から第 6 章で示した RCC ダムの設計・施工手法の合理化を実証するために、NNP1 の RCC ダムの初期湛水以降のダムの挙動を通じて、RCC の品質および RCC ダムの性能を検証した。そして、RCC ダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を以下に示す通り実証した。

RCC ダムの水密性は、打継目を含むダム堤体の現場透水試験、ダム堤体のコアの観察およびダム堤体の漏水量により検証した。

また、RCC ダムの耐荷性は、RCC の VB 値、空気量、温度、締固め率および密度、ダム堤体のコアの観察、RCC 供試体の強度、ダム堤体の打継目を含むコア供試体の強度、ダム堤体内の RCC 温度とひずみ量、ダムのノーマル・リバーズプラムラインの挙動およびダム基礎のボーリングコアによる弱層観察により検証した。

これらの検証の結果、要求される RCC の品質および RCC ダムの性能（水密性、耐荷性）を満足し、RCC ダムの合理的な設計（材料、配合、堤体・構造物）・施工（施工計画など）の提案手法の適用性を実証することができた。

参考文献

- 1) International Commission on Large Dams: Roller-Compacted Concrete Dam (Bulletin 177), pp.1-143, 2020
- 2) 野原慎太郎, 濱田藍: マイクロフォーカス X 線 CT による地質試料の内部構造評価のための基礎的研究, 電力中央研究所報告, N17011, pp.6-7, 2018
- 3) ASTM International: Standard Test Methods for In-Place Density of Unhardened and Hardened Concrete, Including Roller Compacted Concrete (ASTM C1040), 17pp., 2016
- 4) 株式会社 計算力学研究センター, ASTEA MACS Ver.9, <https://www.rccm.co.jp/macs/index.html> (参照: 2023年4月10日)
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編], pp.1-17, 2013
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.302-318, 2017
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], pp.121-176, 2017
- 8) Kenneth D HANSEN, B. A Forbes: Thermal Induced Cracking Performance of RCC Dams, 6th International Symposium on RCC Dams, 16pp., 2012
- 9) A. D. Galang, C. T. Tam, S. L. Mak and D. W. S. Ho: Determination of Adiabatic Temperature Rise in Concrete Capabilities and Performance of a New System, 28th Conference on our world in concrete & structures, 10pp., 2003
- 10) 株式会社 八洋コンサルタント: コンクリートの断熱温度上昇試験報告書, 35pp., 2010
- 11) 鈴木康範, 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和: コンクリートの断熱温度上昇試験装置に関する性能試験方法について, 土木学会論文集, No.402, V-10, pp.81-86, 1989
- 12) U Aye Sann, U. San, C. Rohrer, M. Brusin: Thermal Study and Implementation of Short Joints at Upper Paunglaung RCC Dam, 7th International Symposium on RCC Dams, pp.275-283, 2015
- 13) 喜多伸明, 村上嘉謙: ラオス国ナムニアップ 1 水力発電所 ダム建設に係る初期湛水中の課題解決アプローチ, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VI-78, 2020

第 8 章 まとめ

8.1 結論

海外大規模水力 IPP 事業および開発途上国での RCC ダム建設での課題は、競争力のある事業コスト（安価な電気料金）をオフテーカー（電力の買手・取引者）に提供すること、また、上述の各種リスクの発現を回避しながら RCC の品質（以下、材料、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質を指す）および RCC ダム（以下、水密性および耐荷性を指す）の性能を確保することである。

本論文では、安価な再生可能エネルギーの提供と競争力に資するために、ナムニアップ 1 水力発電事業（NNP1）の RCC ダム建設を題材とし、上記課題を解決するために RCC ダムの設計・施工の合理化について検討した。また、初期湛水以降のダムの挙動を分析・評価することで、RCC の品質および RCC ダムの性能を検証した。そして、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる RCC ダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を実証した。

なお、本研究の対象範囲は、上述の各種リスクの回避が求められる海外の大規模水力 IPP 事業および開発途上国での堤高 100 m 以上の RCC ダム建設とする。また、依然として未解決の課題が残る、ダム工学およびコンクリート工学に関連する RCC ダムの設計・施工を対象とする。

本研究の結論として、第 2 章から第 7 章までの各章で得られた研究成果を以下に要約する。

第 2 章では、RCC ダムの設計（材料、配合、堤体・構造物）・施工（施工手順、施工方法、RCC ダムの施工速度など）および RCC の品質と RCC ダムの性能に関する既往研究および現状を調査し、現状把握とともに課題および研究目的を示した。

RCC ダムの技術は、設計と施工の双方で進歩している。しかし、海外の大規模水力 IPP 事業および開発途上国での RCC ダム建設においては、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクなどを回避しながら競争力のある事業コストをオフテーカーに提供する必要がある。そのためには、RCC ダムの合理的な設計・施工手法の提案が求められている。

第 3 章では、FA 粒子やコンクリート内部の観察を基に、Class C-FA などの構成物質が RCC の温度上昇および強度発現に与える影響について、分析・評価を行った。

そして、FE-EPMA などの元素・材料分析装置の有用性を示し、反応メカニズムの妥当性を実証するとともに、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示した。得られた結論を以下に示す。

- 1) Mae Moh 石炭火力発電所から産出されるフライアッシュ（MMFA）を使用したコンクリートの反応メカニズムを明らかにした。Class C-FA を混和材とすると、MMFA に含まれる遊離石灰類の物質により温度上昇量は大きくなるが、Class C-FA に含まれる二水石膏がセメントのアルミネート相と反応してエトリングサイトを生成し、FA 置換率が高い場合に温度上昇を抑制し、発熱反応を遅らせることができる。また、MMFA に含まれる遊離石灰類の物質により短期強度が発現し、セメント水和物と MMFA に含まれる Si とのポゾラン反応と、石粉に含まれるシリカ系物質によるポゾラン反応により、長期強度を大きく発現させることができる。
- 2) FE-EPMA, SEM, XRF, XRD などの分析手法により、FA 粒子やコンクリートの内部を観察し、FA の特性や反応メカニズムを明らかにすることができた。これらの手法は、コンクリートの水和反応やポゾラン反応の妥当性を実証するために非常に有用な手法である。
- 3) Class C-FA は、Class F-FA と比較しても、コンクリートの要求品質（低発熱、高強度など）を満たさないと、一概には評価することはできない。特に遊離石灰や石膏などの含有量によっては、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を示唆することができた。したがって、Class C-FA の RCC ダムへの適用性を検討することで、FA の材料選択の自由度（選択肢）を広げ、材料調達リスクを軽減することができる。
- 4) NNP1 における配合条件下では、Class C-FA を混和材としたコンクリートにより、わずかな温度上昇を許容することで、短期および長期強度が大きくなる。また、コンクリートの強度が同程度である場合には、Class C-FA を混和材とすることで単位結合材量を減じることができ、経済面と環境面にも貢献することができる。

第 4 章では、超富配合 RCC (SHCRCC) が持つワーカビリティの裕度を確保しつつ、結合材の石粉代替による配合設計を試行し、建設コストを削減する手法について検討した。そして、ワーカビリティの裕度、打継目の強度および水密性などの要求品質を確保した石粉代替による SHCRCC の設計手法を提案するとともに、そのコスト削減および RCC の打設速度の効果について示した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 富配合 RCC (HCRCC) は、材料や施工技術、天候などの外的条件のばらつきがあってもワーカビリティが確保できるため、Construction friendly な (施工性に優れた) 配合と評価できる。
- 2) 単位結合材量 220 kg/m^3 以上となる SHCRCC は、ペースト容積が $240 \sim 260 \text{ L/m}^3$ と、多い配合であることがわかった。また、経済的な RCC 配合を実現するために、結合材を 100 kg/m^3 程度、石粉に代替することが可能であることがわかった。
- 3) SHCRCC におけるペースト・モルタル容積比 (P/M) と結合材ペースト・モルタル容積比 (CP/M) の関係は、石粉の代替率を増加させる過程で線形関係となり、P/M は 0.41、CP/M は 0.31 と下限値が存在する。石粉の代替率を増加させる際は、これらの比率を調整することが重要である。
- 4) ワーカビリティの裕度が確保された SHCRCC の α 値 (ペースト容積/細骨材空隙の割合) および β 値 (モルタル容積/粗骨材空隙の割合) は、それぞれ 1.5 から 1.9、1.8 から 2.2 である。配合の細骨材率を増加させ、石粉の代替率を増加させることで、ペースト容積が減少するため、ワーカビリティが徐々に低下する。よって、SHCRCC と同等のワーカビリティの裕度を保つためには、 α 値には限界値が存在すると考えられる。
- 5) 石粉代替の SHCRCC は、HCRCC と比較して圧縮強度、引張強度および水密性が同程度以上であり、石粉が結合材の代替として十分な役割を果たしていることがわかった。また、打継目を含む強度および水密性も同様である。なお、単位結合材量を減らすことは、RCC の温度上昇量の抑制にも寄与する。
- 6) 石粉代替による SHCRCC は、従来のコンクリートと類似した一般的な力学的性質を有していることがわかった。また、打継目を含む強度および水密性も同様である。
- 7) 石粉や原石山の特徴を配慮し、石粉生産率を確保するためには、適切な骨材製造プラントの設計 (選択) および改良が重要である。
- 8) 石粉代替による新たな SHCRCC を実現するための実践フロー、およびペースト・モルタル容積などの配合特性の推奨値を示した。
- 9) 石粉代替による SHCRCC は、建設コストの削減、打設速度の確保および環境負荷を低減することができる。例えば、大規模 RCC ダムの場合、結合材と化学混和剤のコストを 25~30%程度削減することができる。RCC の打設速度は、ワーカビリティの裕度が大きいいため、MCRCC に比べて 20%程度向上させることができる。そして、RCC ダムの高速施工による工程短縮に伴い、仮設備の機器損料および人件費を大幅に削減することができる。さらに、結合材から石粉への代替は、セメント製造に伴う二酸化炭素排出量の削減に寄与する。

第5章では、重力式コンクリートダム基礎に連続性のある弱部の存在に対して、ダムの滑動安全性を確保するために、くさび解析およびFEM解析を用いて、ダム堤体のせん断キーの安定性を分析・評価をした。また、ダム堤体への揚圧力を低減または制御するために、有限差分法(FDM)による浸透流解析を用いて、堤内排水孔とダム堤体への揚圧力の低減率の関係を分析・評価をした。そして、経済性に資する合理的なダム堤体のせん断キーおよび堤内排水孔の配孔の設計手法を提案した。得られた結論を以下に示す。

(ダム堤体のせん断キー)

- 1) ダム基礎に低角度の弱層を有するダムの滑動抵抗性を増す方法には、せん断キー以外にも様々な方法が考えられるが、経済性、施工性、工事工程の観点から、せん断キーが最も実用的で効果が大きいと考えられる。
- 2) くさび解析および2次元FEM解析により、せん断キーの配置の違いによる効果を評価し、ダムの安全性および経済性に資する合理的なダム堤体のせん断キーの設計手法を示した。
- 3) リバースプラムラインの計測やボーリングコアの観察を通じて、実際のダムでせん断キーの効果を確認し、弱層の物性評価や設計の妥当性を検証することができる。また、CT画像解析も解析や計測の妥当性を確保するために重要である。
- 4) 解析や実際のダムの挙動を基に、せん断キーの効果を分析・評価し、ダムの滑動安定性を確保するための実用的な対策として導入できることを示した。施工中に低角度の弱層に遭遇した場合、せん断キーは、工事費の増額や工程遅延を最小限に抑える有効な手段である。

(ダム堤体の堤内排水孔)

- 1) 平面2次元FDMによる浸透流解析により、平面的に堤内排水孔の配置間隔と揚圧力の低減率の関係を求め、ダムの安定性上、最低限必要となる堤内排水孔の配置間隔を示した。
- 2) 鉛直2次元FEMによる浸透流解析により、ダム堤体における堤内排水孔による揚圧力低減効果の確認、またコンクリートの透水係数の違いによる間隙水圧分布挙動を確認し、堤内排水孔の必要性を示した。
- 3) 以上より、ダムの安全性および経済性に資する合理的な堤内排水孔の配孔設計手法を示した。

第6章では、RCCの品質およびRCCダムの性能を確保するために、RCCダム施工における施工計画（施工方法および施工手順書）の改善およびRCCダムの高速施工を実現するための施工手法について検討した。そして、各種リスクを回避することができるRCCダムの合理的な施工手法を提案した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 試験施工により、RCCダム施工の施工仕様・手順を確立した。そして、GE-RCC施工、フェザーエッジ処理、GPS装置による転圧管理、養生装置および堤内排水孔の削孔などのRCCダム施工の施工計画（施工方法、施工手順書）の改善とともに、施工手法の合理化を提案した。これらは、RCCの品質およびRCCダムの性能を確保するとともに、工事工程の短縮およびコストの削減にも寄与する。
- 2) 材料調達、仮設備の配置、RCC打設工法（スロープレイヤー工法）、RCC打設における安全確保、ダムのゾーニングに伴う作業手順および組織体制における施工手法の合理化を提案した。これらは、RCC施工に関する重大事故の発生を防ぎ、生産性効率は世界最高水準の33.8%を記録、さらに、スロープレイヤー工法による月間平均打設速度は世界9番目を達成した。これらのRCCダムの高速施工は、大幅な工事工程の短縮およびコストの削減に寄与する。
- 3) 以上より、RCCダムの合理的な施工手法の提案は、RCCダムの性能確保と高速施工を実現するための重要な要素であり、費用リスク、工事（完工）リスク、材料調達リスクおよび人的リスクを回避することができる。

第7章では、NNP1のRCCダムの初期湛水以降におけるダムの挙動を通じて、RCCの品質およびRCCダムの性能を検証し、第3章から第6章で示したRCCダムの合理的な設計・施工の提案手法の適用性を実証した。

具体的には、RCCダムの水密性は、ダム堤体の現場透水試験、ダム堤体のコアの観察およびダム堤体の漏水量により検証した。また、RCCダムの耐荷性は、RCCのVB値、空気量、温度、締固め率および密度、ダム堤体のコア観察、RCC供試体の強度、ダム堤体の打継目を含むコア供試体の強度、ダム堤体内のRCC温度とひずみ量、ダムのノーマル・リバースプラムラインの挙動およびダム基礎のボーリングコアによる弱層観察により検証した。

これらの検証の結果、要求されるRCCの品質およびRCCダムの性能（水密性、耐荷性）を満足し、RCCダムの合理的な設計（材料、配合、堤体・構造物）・施工（施工計画など）の提案手法の適用性を実証することができた。

最後に、本設計・施工手法の提案内容は、水力IPP事業、公共事業含めた様々な事業の競争力を高めることができると考えられる。また、RCCダムの合理的な設計・施工手法について示したが、RCCダムに限らず、様々な事業や当該国の諸事情、条

件、環境下に応じて、これらの設計・施工手法を適材適所に適用することで、顕在する様々なリスクを軽減させることができると考えられる。

8.2 提言

本研究を踏まえ、提言を以下に示す。

(RCC ダムの材料設計について)

- 1) 世界各国では、FA の未使用率が 1/3 程度であり、依然として高い割合である。特に東南アジア諸国では、石炭火力発電所から大量の FA が副産物として産出されており、コンクリート構造物への適用が限定されている Class C-FA の有効利用は、喫緊の課題である。したがって、Class C-FA の特性や反応メカニズムを明らかにし、広くコンクリート構造物への適用性を示すことは、エネルギーセキュリティや外貨獲得の手段としての活用のみならず、経済面および環境面の観点からも重要である。
- 2) 本研究では、Class C-FA に含まれる遊離石灰と石こうの水和反応における役割を示した。Class C-FA に石こうが含まれていない場合、別途石こうを添加することで水和反応、特に温度上昇を制御できると考えられる。これにより、FA の選択の自由度がさらに広がることが期待される。ただし、石こうを添加することで、コンクリートの強度低下や膨張などが生じる可能性があるため、事前の十分な検証が必要である。
- 3) 例えばラオスの Hongsa 石炭火力発電所では、採取される石炭の種類によって Class C-FA と Class F-FA の両方が産出される。今後は、各事業地点で産出される FA の種類、特性およびコンクリートの反応に与える影響因子を把握することで、RCC に限らず、多様なコンクリート配合設計を検討することができると考えられる。これにより、FA の選択の自由度がさらに広がり、FA の調達、工期や経済性が有利となることが期待される。

(RCC ダムの配合設計について)

- 1) 本研究では、NNP1 の RCC に使用した材料および配合特性の範囲で検討した。しかし、その材料や特性の範囲外になると、SHCRCC の性状が変化する可能性があるため、都度、微調整が必要である。特に、骨材の形状、粒度分布および FA 置換率は、性状変化が想定される。これらの材料・配合特性の変化について、石

粉代替による SHCRCC の配合特性（推奨値含む）を検討することは、適用範囲が拡大し、大変有用であると考えられる。

- 2) NNP1 では、ダム堤体の実施工と同時に、石粉代替に伴う配合試験練りおよび試験施工を実施し、ダムのゾーニングを適用しているが、一部は強度など要求品質以上のコンクリートを打設している。今後の事業では、実施工が開始する前に、各標高で要求品質を満たす石粉代替の RCC 配合を準備することで、より経済性が有利になると考えられる。
- 3) 石粉代替による SHCRCC の設計は、NNP1 における配合試験練り、試験施工および実施工を通じて、実験的な手法により検討を実施した。今後は、基礎的な実験や画像分析などの解析的な手法を用いて検討することで、材料、配合およびワーカビリティの関係について、より深い理解が得られることが期待される。

(RCC ダムの堤外・構造物設計について)

- 1) ダム堤体のせん断キー設計は、解析的な手法による分析・評価を行い、プラムラインやボーリングコア観察、CT 画像解析により耐荷性を検証している。今後の事業では、弱層を含む岩盤の変形を計測するために、事前に岩盤内のひずみ計や孔内傾斜計を設置し、ダムの基礎掘削前からダムの挙動を把握することで、ダムの安定性の検討の妥当性を検証し、必要に応じて修正を加えるなどの手法を採用することが大変有用であると考えられる。
- 2) 堤内排水孔の配孔設計は、解析的な手法による検討によりダム堤体内の揚圧力の低減率を求めているが、現時点では NNP1 のダム堤体からの漏水がないため、揚圧力の低減効果は確認できていない。将来的に漏水が発生した場合は、漏水量から逆解析により、揚圧力の低減率を推定することで、ダムの安定性を検証することができる。

(RCC ダムの施工について)

- 1) 開発途上国における RCC ダムの建設は、材料調達リスクや人的リスク、さらには費用リスクおよび工事（完工）リスクが存在している。その上、これらのリスクは事業や当該国の諸事情・条件・環境などによって大きく異なってくる。そのため、このような差異を考慮し、事業ごとに多国籍・多様な作業員に適応できる施工手法（施工方法、施工手順書など）および RCC ダムの高速施工手法の改善や見直しが必要である。具体的には、各事業の作業員の特性（強み、弱点、求めることなど）を把握し、対応策について分析・評価をすることで、より合理的な手法を得られると期待される。

- 2) RCC 工法は、連続打設により高速施工が可能であるが、雨季を有する地域では突然の降雨などにより Warm joint および Cold joint が発生し、その処理のために施工が一時中断することがある。NNP1 では、スロープレイヤー工法の採用により化学混和剤の添加量を調整することで、Warm joint が 0.4%、Cold joint が 3.6% という最小限の割合に抑えられ、RCC ダムの高速施工を実現することができた。今後の事業では、Warm joint および Cold joint をさらに最小限にする検討は、さらなる高速施工の向上につながると考えられる。
- 3) RCC ダムの施工の効率性を向上させるために、合理的な施工手法を検討してきたが、さらなる向上策としては、日本のダム建設で導入されているブルドーザや振動ローラの遠隔操作や自動化運転などの導入が考えられる。将来的には、開発途上国でのダム建設においても、人材不足となる可能性があることから、最新技術と人材の融合による生産性効率が高い施工が期待される。

(RCC ダムの運用について)

- 1) 開発途上国での RCC ダム建設は、先進国に比べると技術者の人件費が安価であることから、RCC の品質管理や湛水以降のダム計測などは、技術者が書面の検査表や記録表により管理をしていたが、近年、各国ともに人件費の高騰や優秀な技術者の確保が課題となりつつある。また、RCC ダムでは、工事期間中の各種品質管理および湛水以降のダムの性能を分析・評価することが重要であるが、データ数は膨大で時間を要することから、さらなる業務の効率化が求められている。今後は、BIM、CIM、自動化計測などを含めたデジタルツールを活用することで、データ分析・評価など、効率化を図るとともに、技術者のリソース確保につなげることが期待される。
- 2) NNP1 では、ダムの安全な運用を確保するため、運転・保守 (O&M) 業務マニュアル、緊急行動計画 (EAP) などが整備されている。例えば、常時はダム計測値と管理値を比較し、ダムの安全性を評価しているが、ダムの水密性や耐荷性が急激に低下した緊急時に備えて、段階的な対応策が示されている。湛水以降は、ダム計測・分析・評価に細心の注意を払いながら、緊急時に備えての訓練を実施することにより、安全なダム運用を継続することが重要である。これらのダムの運用は、地域との連携を強化しながら、地域全体での安全確保を目指して行われるべきである。また、その取り組みの内容を他の事業地点にも共有することで、さらなる安全対策の向上が期待される。

(RCC ダムの技術展開について)

- 1) 大規模な重力式コンクリートダムの施工に関して、海外ではRCC工法が、一方、日本ではRCD工法が主流となっている。これらの工法は、各国の諸事情、条件、環境などを踏まえて独自に開発された施工技術である。今後のRCC工法の技術展開としては、ダムの合理化打設工法として限定するのではなく、各国の施工技術を基本（前提）とし、RCC工法の利点を有効に取入れることが、技術のさらなる進展につながると考えられる。具体的には、既に一部事例はあるが、道路や空港の舗装への適用、また、堤防や河川の仮締切りなどへの適用も考えられる。また、未使用率の高いFAのコンクリート配合への適用、FAの高置換率コンクリート配合への変更、石粉代替のコンクリート配合への変更などが考えられる。さらに、地質リスク発現時のダム堤体のせん断キーの導入、ダム堤体の漏水量増加に伴う堤内排水孔の設置、超硬練りコンクリートの高速打設を実現するスロープレイヤー工法の採用など、RCCダム技術の利点を、他の土木設計・施工分野に技術展開・融合することは、土木技術の全体の発展にとって非常に有益であると考えられる。

謝辞

筆者は、2011年から2019年まで、ラオスのナムニアップ1水力発電事業(NNP1)に関する設計や施工監理、社外対応などの幅広い業務に従事させて頂きました。その後、2020年から2023年まで、本学位論文に取り組みました。この間、多くの方々から貴重なご指導とご助言を賜りました。すべての関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

本学位論文の取りまとめにあたり、神戸大学大学院 三木 朋広 准教授には、主査を快諾いただくとともに、多大なるご指導を賜りました。先生が提唱される「世界の安全・安心を実現する次世代インフラに関する研究」に深い感銘を受け、ご指導を頂きたいと決心しました。学位論文に盛沢山の情報を一つに集約するなど数多くの困難に直面する中でも、終始暖かく、懇切丁寧かつ的確なご指導とご助言を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。

神戸大学大学院 芥川 真一 教授、同 森川 英典 教授には、副査をお引き受けいただくとともに、学術論文の完成に向けて、多角的な視点からの有益なご指導とご助言を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。

関西電力株式会社 再生可能エネルギー事業本部 筒井 勝治 水力部長（現 株式会社ニュージェック 執行役員）、同 瀬岡 正彦 マネジャー（現 株式会社 KANSO テクノス 水力部 部長）には、大学院博士後期課程への入学および学位取得に至る大きな契機をいただきました。筒井 勝治 水力部長には、本論文の主要な成果に関する深いサポートとともに、調査・分析・評価など多岐にわたるご指導とご助言を賜りました。大変辛抱強く督励していただいたことが、今に至ると感じており、心より感謝申し上げます。瀬岡 正彦 マネジャーには、NNP1 を通じて、常日頃の叱咤激励とともに、特に大きなサポート、ご指導とご助言を賜りました。これからも海外への憧れと情熱を持ち、挑戦して参ります。ここに心より感謝申し上げます。

同 再生可能エネルギー事業本部 水力エンジニアリングセンター 海外水力グループ 村上 嘉謙 開発課長（現 土木建築室付 日本原燃株式会社出向）、同 中村 和男 土木課長には、大学院博士後期課程入学以前から終了まで、社内調整、本論文の添削など包括的なサポート、ご指導とご助言を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 山本武志 研究推進マネジャーには、FE-EPMA による FA、コンクリートの観察による分析・評価をはじめ、RCC ダムの材料・配合設計に関して、深いサポートとともに、貴重なご指導とご助言を賜りました。同 西内 達雄 研究参事には、多角的な観点から学術論文としてのまとめ方に関して、貴重なご指導とご助言を賜りました。同 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門 野原 慎太郎 主任研究員には、X 線 CT 画像解析によるコンクリートコアの観察による分析・評価に関して、貴重なご指導とご助言を賜りました。株式会社ニュージェック 技術本部 基盤技術部門 中野 歩 グループマネジャーには、ダム堤体のせん断キーの設計（解析・評価など）に関して、サポートとともに、貴重なご指導とご助言を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。

RCC ダム建設の受注者である株式会社大林組には、茶林 一彦 所長、木村 隆之 所長、長坂 誠司 所長、町田 馨介 所長をはじめ、多くの技術者にご尽力を賜りました。厳しい海外環境下でも、安全、品質、そして工程を厳格に確保しながら、様々な課題に真摯に取り組んでくださいました。ベトナムの建設会社 Song Da 5 など下請け業者からは、3,000 人以上の多国籍の作業員が建設に従事してくださり、従来の経験とは異なる日本の安全基準、品質、そして工程管理について、深い理解を示していただきました。NNP1 の RCC ダム建設に関与したすべての方々のご尽力により、世界に誇れる RCC ダムを完成させることができました。ここに厚く御礼を申し上げます。

関西電力株式会社としては、RCC 工法による重力式コンクリートダムの建設は初めての試みでした。世界で活躍中の RCC 専門家、Brian A. Forbes 氏、O. J. Berthelsen 博士、Marco Conrad 博士、Bassam Egilatn 氏、Ponnosamy Sammy 氏、および日本のコンクリート専門家、株式会社 KANSO テクノス 石井 政博 マネジャー（退職）、及川 理人 マネジャー、ニュージェック株式会社 和田 哲郎 顧問には、RCC ダムの設計から施工まで、多岐にわたる貴重なご指導とご助言をいただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

関西電力株式会社の皆様に、心より感謝申し上げます。

関西電力株式会社 多田 隆司 執行役常務、同 土木建築室 三鼓 晃 土木部長（現株式会社 KANSO テクノス 執行役員）には、大学院博士後期課程への入学を快諾していただき、学位取得への挑戦に対して激励をいただきました。

学位取得にあたり、前職場の再生可能エネルギー事業本部 水力エンジニアリン

グセンター 浅野 誠 副所長 (現 ニュージェック株式会社 技術本部 電力部門 部門長), 同 国内水力グループ 小坂 馨太 土木課長 (現 人財・安全推進室 安全推進グループ チーフマネジャー), 有光 剛 土木課長, 佐藤 智彦 開発副長 (現 再生可能エネルギー事業本部 開発グループ リーダー), 大坪 祐介 技術副長, ならびに同僚の皆様, 現職場の再生可能エネルギー事業本部 山根 雄一 水力部長, 同 開発グループ 加藤 雅広 チーフマネジャー (現 土木建築室附 原子力発電環境整備機構 出向), 西海 宏則 チーフマネジャー, 田中 裕 マネジャー, 吉田 光宏 リーダー (現 水素事業戦略室 技術開発グループ リーダー), ならびに同僚の皆様には, 学位取得への挑戦に対して激励をいただき, サポートとともに, 業務への配慮をしていただきました.

NNP1 の RCC に関する業務では, 上述の皆様以外にも数多くの上司, 先輩, そして同僚の皆様にも, 激励とともに, 様々な面でのご協力, 貴重なご指導やご助言をいただきました. 順不同・現所属とはなりますが, 再生可能エネルギー事業本部 黒部川水力センター 水田 潤一 所長, 同 庄川水力センター 田中 亮輔 所長代理, 同 水力エンジニアリングセンター 海外水力グループ 松本 好弘 開発副長, 同 山本 悠貴 担当, 同 国内水力グループ 川田 達也 開発副長, 同 吉野水力センター 吉田 淳 所長, 経営企画室 運営グループ 喜多 伸明 マネジャー, 再生可能エネルギー事業本部 技術グループ 朝川 誠 チーフマネジャー, 同 事業開発第七グループ 松田 真人 マネジャー, 原子力事業本部 原子力安全・技術部門 土木建築技術グループ 蒲池 孝夫 チーフマネジャー, ナムニアップ1 パワーカンパニー 田渕 貴久 マネジャー (国際事業本部附), 原子力発電環境整備機構 高橋 拓麻 担当 (土木建築室附), 株式会社 KANSO テクノス 阪井 郁夫 マネジャー, といった方々になります. また, 上述の皆様以外にも, 数多くの方々に, ご協力, ご指導やご助言をいただきました.

改めて, 心より感謝申し上げます.

最後に, 常に筆者を応援してくれた両親に, 心からの感謝を表し, 本論文の謝辞とさせていただきます.