

膨張コンクリートを用いた重力式コンクリートダム縦継目工の合理化

EFFICIENT LONGITUDINAL CONTRACTION JOINT WORK WITH EXPANSIBLE CONCRETE IN CONCRETE GRAVITY DAM

菊地 智*・植本 実**・加嶋 武志***

Satoshi KIKUCHI, Minoru UEMOTO and Takeshi KASHIMA

Concrete cracks due to thermal stress around cavities such as conduits or diversion waterways in dam bodies, caused by cool air intruding into the cavity, are found in some concrete gravity dams built even recently. Longitudinal contraction joint is being focused on as an effective countermeasure against such concrete cracks. This paper introduces the design of longitudinal contraction joint applied in the inclined mattress concrete (L=50m) in Tsuruda Dam Upgrading Project, which resulted in more effective joint treatment. This method uses expansible concrete to maintain contact between the longitudinal contraction joint without grouting. This paper also proposes concrete tests to confirm performance of the expansible concrete applied in various work conditions.

Keywords : *Mattress concrete, Slot joint, Longitudinal contraction joint, Expansible concrete*

1. はじめに

マスコンクリートであるコンクリートダム堤体には、温度ひずみによるクラック発生を防止するため継目が設けられる。ダム軸に直交する継目を横継目、ダム軸に平行するものを縦継目と称する。

島地川ダム（1981 年竣工）で 40 年ほど前から施工されている RCD 工法や ELCM の面状工法では、大量急速施工を行うため、温度クラックに対してセメント量低減などによって、縦継目の省略を行ってきた。しかしながら、近年面状工法で施工された重力式コンクリートダムにおいて、洪水吐きや堤内仮排水路など堤体を貫通する空洞部分が冷却され、温度ひび割れが生じる事例が散見されており、この対応策として縦継目の有効性が再び注目され始めている。

縦継目の施工は、ダム堤体の内部温度が低下し、コンクリートが収縮した後に継目の開きを充填（低圧グラウチング）し、堤体を一体化することが不可欠である。このため、施工は表 1 に示すように、極めてデリケート、かつ煩雑となる。

これらの課題に対し、従来でも主応力と継目の方向の関係から、縦継目を傾斜させ主応力と並行または直交させた傾斜継目の採用によって、ジョイントグラウチングを省略する施工の簡素化に取り組んできたが、この手法は上下流ブロックの打設手順の制約などの課題があった。

最近では造成アバットメントの継目として、コンクリートと後充填

できる間隔をもたせたスロットジョイントが開発されている。スロットジョイントは、ジョイントグラウチングを省略することはできるが、一次コンクリートの冷却後に二次コンクリートを打設するため、後施工に時間を要する。

表 1 縦継目施工の課題

工種	各工種における 施工の難しさ、煩雑さ	堤体打設速度を 低下させる要因
【①冷却】 パイプ クーリング	過剰冷却クラックの発生を防止しつつ、適正な冷却速度維持が必要（冷却水温、流速の昼夜連続管理）	堤体すべてのリフト全面へのクーリングパイプ配管
【②一体化】 ジョイント グラウチング	堤体変位を生ずる危険性を伴う、堤体広範囲への加圧作業である。夜間作業を不可とする、嚴重な変位および漏圧の監視管理が必要	すべてのブロックにおける継目面全域へのグラウト配管、アウトレット配置

本稿では、鶴田ダム再開発事業において国内初となる傾斜型マットコンクリート工（L=50m）に採用した、施工性を大幅に向上させた縦継目工の合理化について報告する。

2. 鶴田ダム再開発事業の概要¹⁾

鶴田ダムは、九州で 2 番目の流路延長を持つ川内川のほぼ中央にあたる、河口から約 51km に位置する洪水調節と発電を目的とした九州最大規模の多目的ダムであり、昭和 41 年の完成以降、川内川の「治水の要の施設」として役割を担っている（図 1 参照）。

* コンサルタント国内事業本部 流域水管理事業部 水工インフラマネジメント部

** コンサルタント国内事業本部 技術管理室

*** コンサルタント国内事業本部 流域水管理事業部 ダム発電部

この平成 18 年 7 月豪雨により鹿児島県北部では、総雨量 1,165mm（西ノ野雨量観測所：7 月 19 ～ 23 日）と記録的な豪雨となった。平成 18 年度豪雨は、鶴田ダムの洪水調節能力を超える洪水であったため、下流域の洪水を完全には防御できず、薩摩川内市、さつま町などで浸水家屋 2,347 戸をはじめとする甚大な被害が発生した。



図-1 鶴田ダムの位置

これを受けて、河川激甚災害対策特別緊急事業（激特事業）が採択され、鶴田ダムについても河川改修と相まって川内川流域の洪水被害を軽減するために、平成 19 年度より洪水調節容量の増加を行う鶴田ダム再開発事業に着手した。鶴田ダム再開発の概要は図-2とおりである。増設放流施設は平成 28 年 3 月に完成し運用を開始、付替発電管は平成 28 年 5 月に完成、既設減勢工改修は平成 30 年 3 月の完成により、鶴田ダム再開発事業は完了した。鶴田ダム再開発事業は、既設ダムの再生の先駆的事业として平成 30 年度土木学会賞を受賞した。

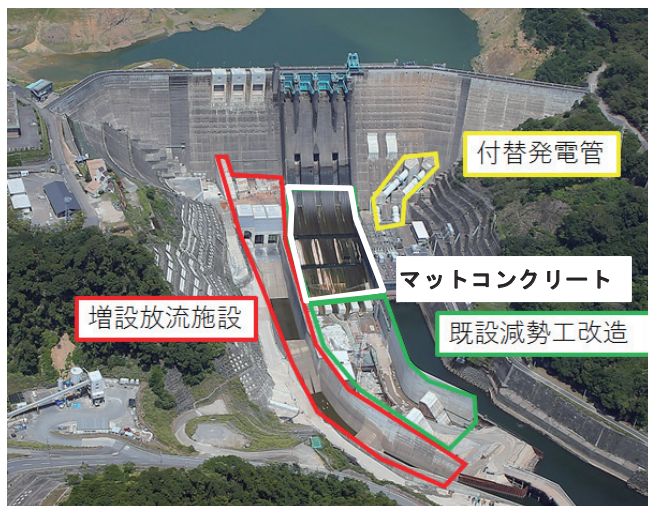


図-2 鶴田ダム再開発の概要

3. マットコンクリート工（堤体補強工）の設計

(1) 既設堤体の安定性検証

鶴田ダムは現行基準である河川管理施設等構造令（昭和

51 年）が制定される以前に設計・建設され、昭和 40 年に完成したダムである。再開発事業の着手にあたり、現行基準に照らし合わせて外部安定性（滑動、転倒、および支持力）を検証した結果、転倒条件は全水位、全ブロックで満足するが、ダム高が高くなる河床部越流断面（BL.13 ～ BL.16）では常時満水位、サーチャージ水位時に滑動の条件（Henny の式によるせん断摩擦安全率 $n \geq 4$ ）を満足しない結果が得られた。

鶴田ダムはすでに完成後 45 年が経過し、その間に発生した鹿児島県北西部地震（H.9.3.26 最大震度 5 強 M6.6 ダム基礎底部 155gal）や、大規模出水も経験しているが、ダム堤体の観測データからは安定した状態であると判断されている。しかしながら、今回『鶴田ダム再開発事業』を契機に、現行基準で要求される所要の滑動安全率を確保するため、既設堤体下流にマットコンクリート工を設けることにした。なお、マットコンクリート工は既設洪水吐き下流に配置されるため、放流水を適正に減勢工へと流下させるための水理的機能も必要とされるものである（図-3 参照）。

マットコンクリート長さは、図-3 に示すとおり、既設堤体＋マットコンクリートにより、せん断摩擦安全率が 4 以上となる長さとして 50m とした。

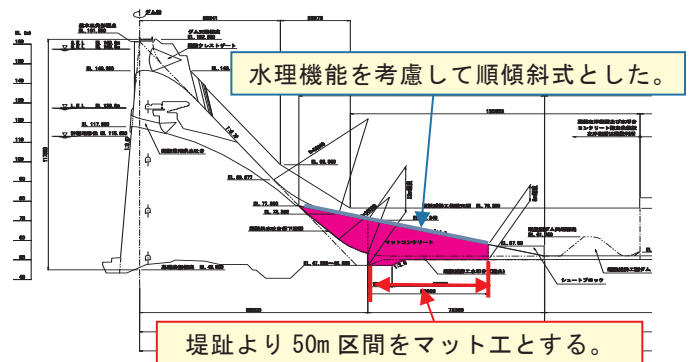


図-3 マットコンクリート工断面図

(2) マットコンクリート工のブロック割（図-4 参照）

マットコンクリート工における継目のうち、横継目は既設堤体の横継目と一致させた。一方で、縦継目はマットコンクリート上下流長が 50m と長くなることから、傾斜継目を併用したスロットジョイント方式により対応することとした。

1) マットコンクリート工

マットコンクリートは、堤体に作用する荷重を基礎岩盤に確実に伝達するために既設堤体およびマットコンクリートの一体性が確保されていることが不可欠である。一方で、マットコンクリートはマスコンクリートになること、および上下流方向の長さが長くなることから、温度ひび割れリスクが懸念されたため、マットコンクリートを上下流方向で 2 分割（BL.b、BL.c）した。加えて、傾斜水路を形成するために既設堤体の下流面に腹付けブロック（BL.a）を設けた。

2) マットコンクリート工の先端部

マットコンクリート工の下流ブロック（BL.d）は、減勢効果・

水理機能維持のため、傾斜水路先端部に設けたシュートブロックである。そのため、滑動抵抗長としての機能は期待しておらず、必ずしも一体化の必要はないので、スロットジョイントは設けていない。ただし、マットコンクリート工の応力を基礎岩盤に滑らかに伝達する重要な効果が FEM 解析により認められることが判明したため、マットコンクリート工内部に発生する主応力に対してほぼ直交する傾斜継目 (J.c) を設けてマットコンクリート工と先端部分を接続するものとした。

3) スロットジョイント方式+傾斜ジョイントの採用

ブロック分割するジョイントは、当初スロットジョイント単独であったが、マットコンクリート工の施工の合理化の観点から提案された、工事請負者からの契約後 VE により RCD 工法を採用時点で、さらなる施工性とスロットジョイント充填工期の短縮を図るため、スロットジョイント方式+傾斜ジョイントに設計を変更した。また、既設堤体の下流面に腹付けブロック (BL.a) の EL60.5m 以下の継目 (J.a) については、先行して 1 年前倒して打設し十分にコンクリートが冷却され温度変化による継目の開きが生じにくいこと、引張応力が集中する部分であるので、あえて開かせる構造とし、スロット底部には半割管および補強鉄筋を配置した (図-9 参照)。

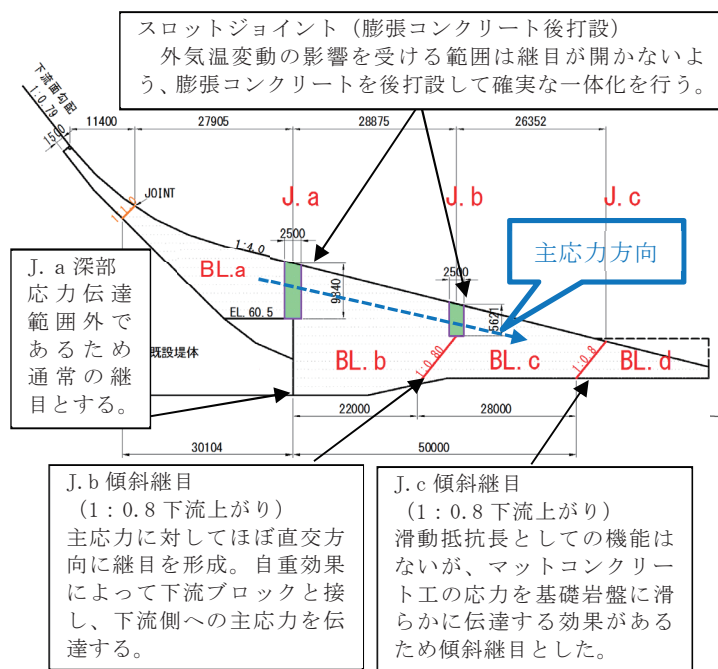


図-4 マットコンクリート工の縦継目

(3) スロットジョイントの施工

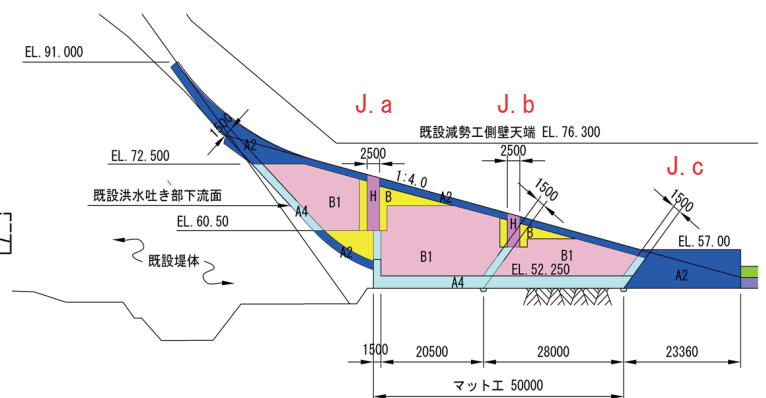
マットコンクリートの配合区分図を図-5 に示す。

スロットジョイントの施工は、傾斜継目の直上に溝 (幅 2.5 m) を設け、ブロック割を行って各ブロックに一次コンクリートを打設し、その後、スロットの中に二次コンクリートを打設する。二次コンクリートは、一次コンクリートの温度低下・収縮を待ってから打設し、二次コンクリートには膨張コンクリートを使用した。膨張コンクリートは、コンクリート温度降下による収縮変形

の極めて小さいコンクリートで、スロット両面のマットコンクリートで完全拘束された状態で打設すると、膨張コンクリート内に圧縮ひずみが残存する。このため、スロット両面のコンクリートが外温度の変化等により収縮しても、残留圧縮ひずみによってジョイントの開きは生じない、このメカニズムを利用した。

スロットジョイントを閉塞する (膨張コンクリートを打ち込む) 時期は、マットコンクリート工全体の一体性を確保するうえで、外気温が低下して先行打設したマットコンクリートの表面付近が最も収縮する冬期間 (1~2 月) が有利である。加えて、スロット閉塞後に (マットコンクリート工として一体化されたのちに) おいても温度ひび割れに対するリスクを回避するために、スロット閉塞時点でのマットコンクリート内部温度は可能な限り低下が図られていることが望ましい。

以上を踏まえ、マットコンクリート工の施工は、出水期打設休止期間に入る 6 月 10 日までに完了させ、その後約 7 ヶ月間のコンクリート温度低下期間を経たのちの翌年の冬期 (1~2 月) からスロットジョイントを閉塞する計画とした。なお、当工事は運用中ダム の減勢工内での作業であり洪水に対する作業安全性確保の観点から、6 月 10 日~9 月 20 日までの期間は出水期作業制限期間としてコンクリート打設が休止とされている。



配合区分		0max	スランプ (cm)	空気量 (%)	使用位置	必要強度 (N/mm2)
外部 着岩・接合面 コンクリート	A1	80mm	3±1	3.5±1	増設放流管基礎着岩部	—
	A2	80mm	3±1	3.5±1	マット部 (表面、下流部)	22.0
	A3	80mm	3±1	3.5±1	新設減勢工水叩き 新設減勢工副ダム	—
	A4	40mm	—	1.5±1	マット部(着岩・接合面)	35.0
内部 コンクリート	B	80mm	3±1	3.5±1	マット内部 (フライッシュ置換40%)	10.0
	B1	80mm	—	1.5±1	マット内部 (フライッシュ置換40%)	10.0
スロットジョイ ントコンクリート	H	40mm	10±2.5	4.5±1.5	マット スロットジョイント部	22.0

図-5 マットコンクリートの配合区分

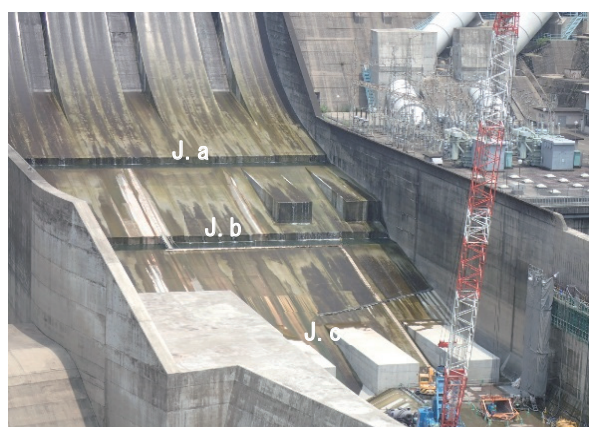
(4) マットコンクリートの温度上昇抑制対策

マットコンクリートの温度上昇を抑制するため、次の温度規制計画を採用した。

- ① フライアッシュ置換率を 40%とした中庸熱フライアッシュセメントの使用
- ② 単位セメント量の低減（一般的な RCD コンクリートの単位結合材量 $C+F=120\text{kg/m}^3$ に対し 105kg/m^3 を使用）
- ③ 流水養生によるセメント水和熱の放熱促進、夏期外気温による温度上昇抑制

ここで、流水養生では、河川水を汲み上げて、コンクリート表面全体に常時万遍なくかけ流すこととした（写真－1 参照）。

また、当初計画のマット工の内部コンクリートは、単位結合材量 160kg/m^3 （フライアッシュ置換率 40%）の有スランブコンクリートで計画していたが、マットコンクリートの温度上昇の抑制によりスロット両面の収縮量を最小にする観点から、工事請負者からの契約後 VE^{2),3)} により、単位結合材量 105kg/m^3 （フライアッシュ置換率 40%）の RCD コンクリート（B1）に見直した。さらに、VE 提案^{2),3)} では急速大量施工による工期短縮のため、着岩部、構造物際、傾斜継目は単位結合材量 220kg/m^3 （フライアッシュ置換率 30%）着岩 RCD コンクリート（A4）に見直した（表－2、写真－2、図－5 参照）。



写真－1 流水養生の状況



写真－2 RCD 施工状況（平成 29 年 4 月 12 日現在）

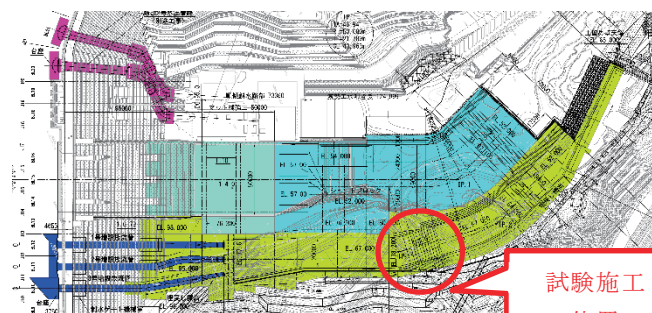
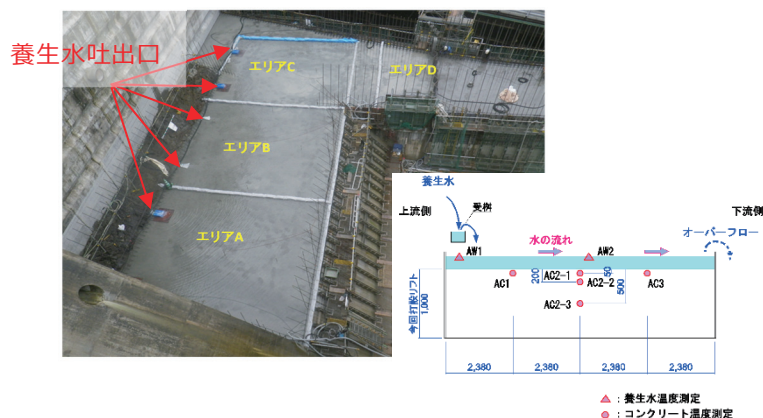
表－2 RCD コンクリートの選定配合
（上段内部コンクリート、下段着岩コンクリート）

	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C+F (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								AE 減水剤	AE 剤
						W	Ce	FA	S	G1 80-40	G2 40-20	G3 20-5			
当初計画 (有スランブ)	80	3.0 ±1.0	3.5 ±1.0	65.6	28.0	105	96	64	585	542	465	542	1.60		0.04
選定配合 (RCD)	80	—	1.5 ±1.0	95.2	33.0	100	63	42	727	522	448	522	1.05		—

	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C+F (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								AE 減水剤	AE 剤
						W	Ce	FA	S	G1 80-40	G2 40-20	G3 20-5			
当初計画 (有スランブ)	80	3.0 ±1.0	3.5 ±1.0	47.7	26.0	105	132	88	537	539	462	539	2.2		0.035
選定配合 (RCD)	40	—	1.5 ±1.0	50	44.0	110	154	66	913	—	588	588	2.2		—

流水養生の効果は、湛水養生と流水養生の比較試験で確認試験した。確認試験は、本工事に先立ち施工されていた増設減勢工副ダム部の 1 リフトを試験ヤードとして実施した（図－6 参照）。

その結果、流水養生は、湛水養生よりコンクリート表面から水和熱の放熱効果が高いこと、コンクリート表面を養生水が流れている状態であれば、水量の大きさに関係なく、放熱効果が見込まれることが判明した。また、試験を実施した時期は夏季であったが、夏季以外でも、常に水温が低い新鮮な水がコンクリート表面を覆い外気と遮断されることによって、コンクリート温度を低下させることが可能となる点も流水養生の効果として特筆される。実施工では打設後のリフト面および打設完了後のマットコンクリート表面部で流水養生を行った。

試験施工
位置

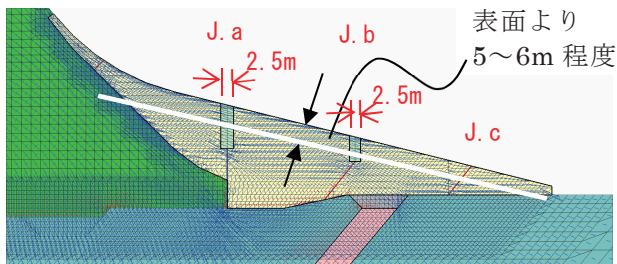
図－6 試験施工位置と流水養生効果確認試験の状況

(5) スロットジョイントおよび傾斜継目の設計

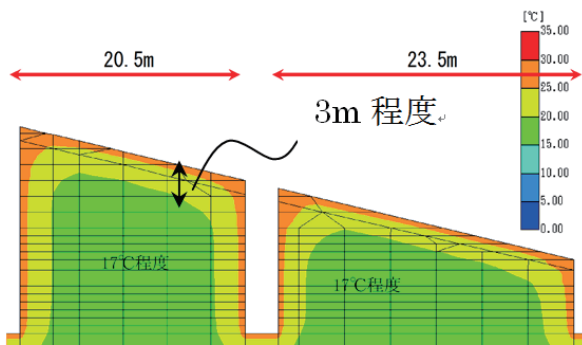
1) 構造概要

スロットジョイントを設ける範囲（深度方向）は、図－7 に示すように堤体の作用荷重により発生する応力の大半がマットコンクリート表面から 5 ～ 6m 程度の深度の範囲内で伝達されること、図－8 に示すように外気温の変動を受ける範囲が表面から概ね 3m 以内の範囲であることを踏まえ設定した。

スロットの幅は、スロットジョイント両側に歯型キーを設けて応力の確実な伝達を図る構造としており、マットコンクリート継目型枠の設置撤去、型枠足場の施工面から最小となる 2.5m とした。

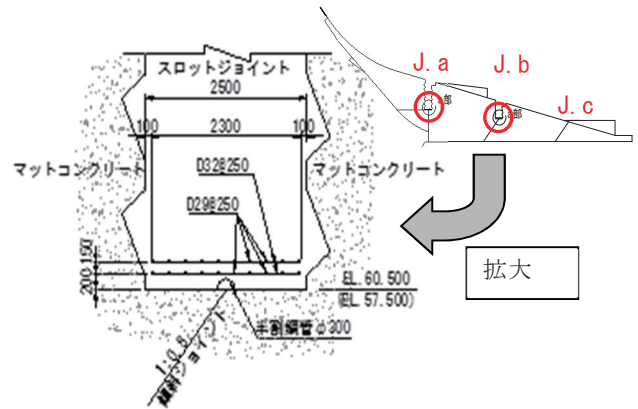


図－7 マットコンクリート内部の応力分布
（完成後常時の主応力ベクトル図）

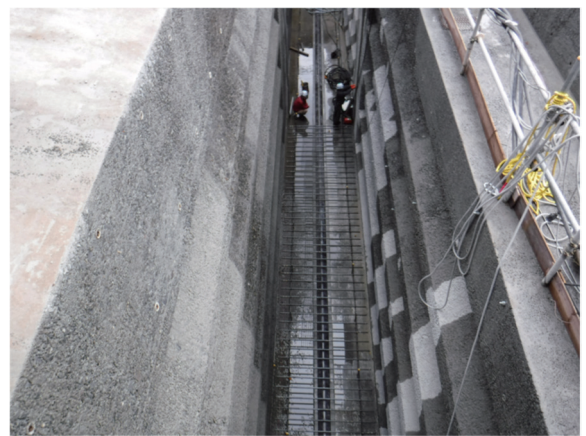


図－8 スロットジョイント打設直前のマットコンクリートの
温度状態の解析結果

これに対して、マットコンクリート内部に発生する応力の伝達にとって大きく関与しないマットコンクリート工深部については、傾斜継目を設けることとした。傾斜継目はマットコンクリート工内部に発生する主応力に対してほぼ直交するように下流上がりに1:0.8とした。これによって上流ブロックは下流ブロックと接し、主応力を確実に下流側のブロックおよび基礎岩盤へ伝達する機能を有することになる。なお、傾斜継目の上端部は、スロット底部に、半割管および補強鉄筋（D32 @ 250）を2段配置し、傾斜ジョイント直上での二次コンクリートへのクラック延伸を防止するよう配慮した（図－9、写真－3 参照）。



図－9 傾斜継目とスロットジョイント
取り合い部詳細図

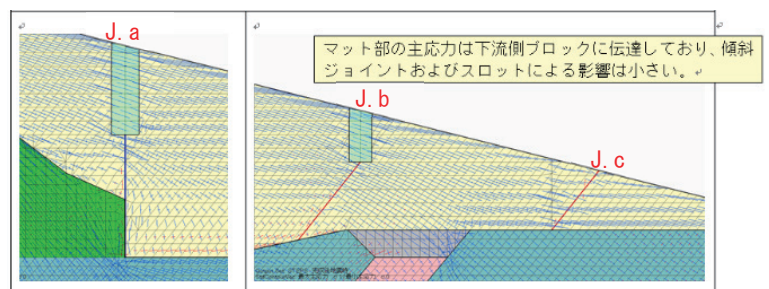


写真－3 傾斜継目のブレイク処理

2) マットコンクリート工内部の応力解析

マットコンクリート工内部の主応力分布について、自重変形、完成後常時、および完成後地震時について FEM 解析を用いて検討した。傾斜継目は引張応力時には引張・せん断を伝達しないジョイント要素とし、スロットジョイントは剛結するジョイント要素でモデル化した。また既設堤体とマットコンクリートの継目は傾斜継目と同様にモデル化した。

解析の結果、完成後地震時のマットコンクリート工内部の主応力分布より、主応力は下流側ブロックおよび基礎岩盤に確実に伝達されていることを確認した（図－10 参照）。



図－10 マットコンクリート工内部の主応力分布（完成後地震時）

4. 膨張コンクリートの要求性能

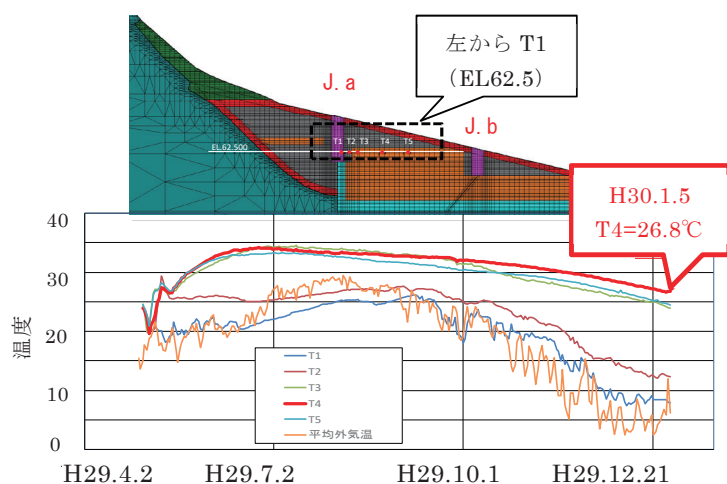
(1) 基本設計方針

スロットジョイントに膨張コンクリートを打設した後、スロット両面のコンクリートは、温度降下により収縮する。このようにスロット両面のコンクリートが外温度の変化等により収縮しても、膨張コンクリートの膨張量がこの収縮量より大きければ継目に開きが生じずに一体化が可能となる。

そこで、スロットジョイントの膨張コンクリート打設後の開きを、温度応力解析によって推定した。

(2) 温度応力解析によるスロットジョイント開きの予測

実施工では、一次コンクリート打設後にマットコンクリートの内部温度の計測を行っている（図－11 参照）。計測結果は、マットコンクリートの内部温度の最高温度が 34℃ 程度となり、当初想定（26.8℃）よりも高いことが明らかとなった。そのため、膨張コンクリート打設前に行った温度応力解析では実測温度と解析値がほぼ一致するように、熱伝達率と外気温の補正を行い、実情と合致するパラメータを設定した。



図－11 マットコンクリート工の実測温度

1) 収縮量の算定

スロットジョイント温度応力解析の結果から、スロットジョイント位置でのマット収縮量を下式より推定した（図－12 参照）。計算は最高温度を示す T4 の標高断面での温度変化による変形が下方のコンクリートによる拘束を受けずに自由に変形するとして概算した。

$$\delta = \sum \alpha \cdot \Delta T \cdot \Delta L / 2$$

δ : 膨張、収縮量

α : 熱膨張係数 ($10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ΔT : 最終安定温度 17℃ との温度差分変化

ΔL : 部材長さ

< 中間ブロックの変位量 >

$$= -0.04\text{mm} + 0.77\text{mm} - 0.22\text{mm} = 0.51\text{mm}$$

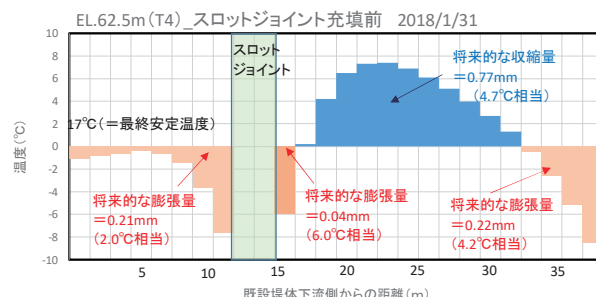
< スロットジョイント下流側での変位量 >

$$= 0.51\text{mm} \div 2 = 0.26\text{mm}$$

< スロットジョイントにおけるひずみ量 >

$$= 0.26\text{mm} \div 2.5\text{m} \text{ (スロット幅)} \times 1,000 = 104 \mu$$

これより、スロットジョイント表面とマットコンクリートの境界面の収縮量は 0.26mm（スロットジョイント部のひずみ量に換算すると 104μ）となり、これを膨張コンクリートの要求性能とした。



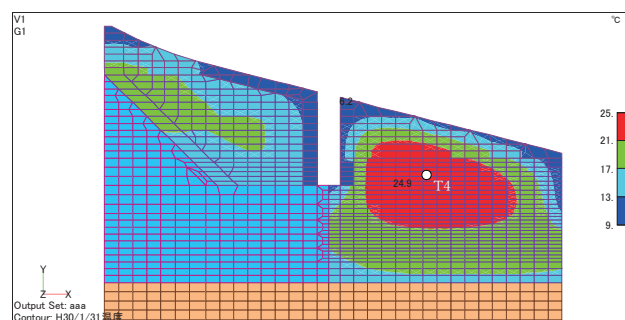
図－12 マットコンクリートの収縮量および膨張量

2) マットコンクリートの温度履歴

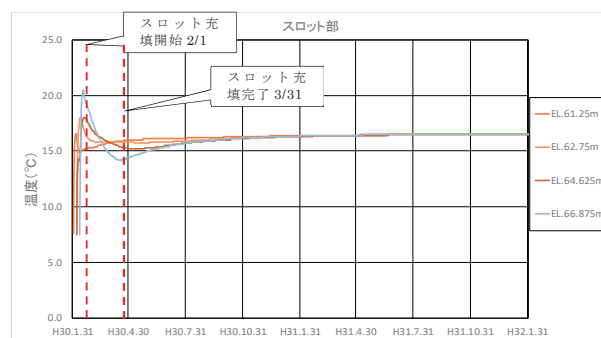
スロットジョイントが膨張コンクリートの性能で密着することができるかを、スロットジョイント打設によるマット温度の変化およびスロット打設後長期の温度履歴を計算した。

解析結果は、以下のとおりである。

- スロットジョイント充填を平成 30 年 2 月 1 日とした場合、マット中央部の温度（T4）は、24.1℃ である（図－13 参照）。
- 充填コンクリートは概ね打設後 1 年程度で最終安定温度 16.6℃ に収束する（図－14 参照）。



図－13 温度コンター（H30/2/1 時点）



図－14 マット中央部の温度履歴解析結果（充填以降）

3) マットコンクリートのひび割れ発生予測

スロットジョイント充填後完全に一体化された状態において、

マットコンクリートが最終安定温度に冷却されたときにクラックが発生しないか検討を行った。検討は、クラック発生を抑制する方向に作用する充填コンクリートの発熱の影響については無視し、100 μ 程度の膨張性能が期待できることを前提として、充填コンクリートの温度を 7℃（＝最終安定温度－10℃（100 μ 相当））を初期条件とし、最終安定温度までの温度低下量をもとにしたひずみに対して、直接ひずみ量を計算した（表－3 参照）。

検討の結果、最大水平ひずみは 51 μ であり、マットコンクリートにクラックが発生する恐れはないと判断した。なお、スロットジョイントと傾斜継目の境界部で局所的に 100 μ を超えているのは、スロット打設前にスロット表面が冷却されたためである。

表－3 マットコンクリート温度、水平ひずみ算定結果

項目	H30/2/1 スロット打設
スロット 打設直後 温度分布	
3 年後 (H33/4/1) 温度分布	
3 年後 (H33/4/1) 水平ひずみ 分布	

5. 膨張コンクリート配合試験

膨張コンクリート配合試験は、a 試験室において膨張コンクリートの要求性能を満足する膨張材添加量を選定した後に、b 現地における実物大試験を行い、表面部のクラック状況の確認を行った。

(1) 配合条件の設定

配合試験は、膨張コンクリートの要求性能として 4 章で設定した 100 μ 程度以上の膨張性能を有すること、設計基準強度

22N/mm²、単位容積重量 2.30t/m³ を有することを配合条件とした。

膨張コンクリートはポンプ打設での施工を考慮してスランブは 10 ± 2.5cm、空気量は耐久性を考慮して 4.5 ± 1.5%、単位結合材料（セメント＋膨張材）は 300kg/m³ とした。

膨張材の添加量は、「2012 年制定 土木学会 コンクリート標準示方書（施工編）」（収縮補償用の石灰系・低添加型の膨張材）の標準添加量、メーカーヒヤリング、配合事例をもとに、拘束状態での膨張特性試験は 4 ケース（無添加量も含む）を実施した（表－4 参照）。

表－4 膨張コンクリートの配合条件

項目	配合条件	備考
設計値	設計基準強度	$\sigma_{91} = 22\text{N/mm}^2$ マット工外部コンクリート
	マット工全体の単位容積重量	2.35t/m ³ 堤体補強工（マット工）の設計値
	膨張コンクリートの単位容積重量	2.30t/m ³ 以上（目標値） マット工全体で 0.35t/m ³ 以上の単位体積重量を確保することを条件として設定した値
使用材料	セメント	中庸熟フライアッシュセメント 実際に使用されている宇部三菱セメント製
	フライアッシュ置換率	30% MF30 プレミックス製品を使用
	膨張材	石灰系・低添加型 使用実績が多い電気化学工業株式会社パワーCSA タイプ R
配合条件	粗骨材最大寸法	40mm
	スランブ	10 ± 2.5cm
	単位粉体量	300 kg/m ³ セメント＋フライアッシュ＋膨張材
	空気量	4.5 ± 1.5% 充填コンクリートの実績配合に基づく
	水結合材比	65%以下 マット工内部コンクリート
	膨張材添加量	ケース 1：無添加 基準とする
		ケース 2：25kg/m ³
		ケース 3：30kg/m ³
		ケース 4：35kg/m ³

(2) 室内試験のフローと方法

1) 試験フロー

配合試験は、次の試験フローの手順で実施した（図－15 参照）。

配合選定は、現地条件に合わせるため、現地試験室で膨張材添加量 4 水準（0、25、30、35kg/m³）の配合選定と圧縮強度試験供試体を作成した。膨張量測定試験は、現地試験室に試験器具がないため、別途試験室で供試体を作成し、測定を行った。

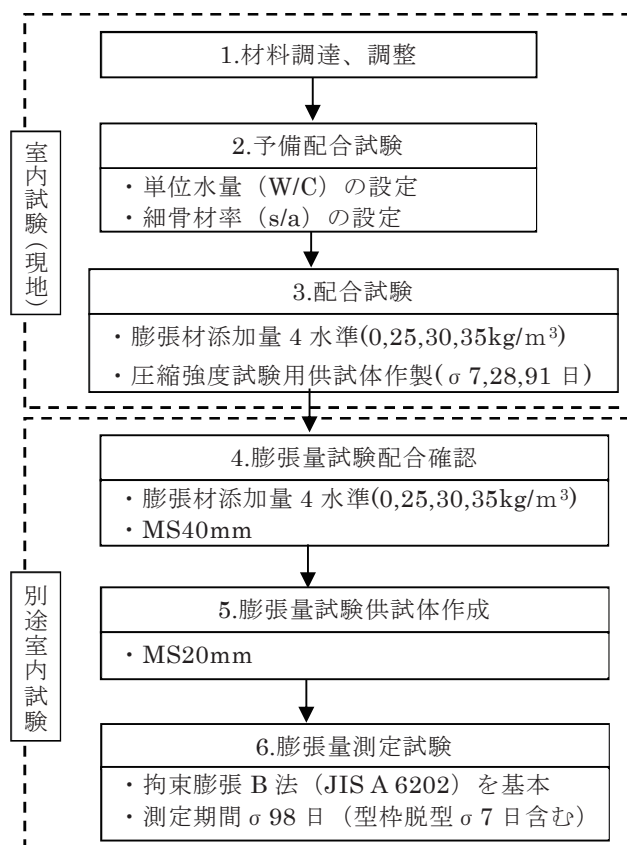


図-15 試験室における配合試験フロー

2) 膨張コンクリートの膨張特性試験方法

膨張特性試験の試験方法は、JIS A 6202:2017「コンクリート膨張材」附属書 B（参考）「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」による【B法：膨張及び収縮を対象とした試験方法】によった（以降、B法と称する）。B法では、供試体の両端を拘束し、PC鋼棒のひずみ量を計測する（図-16 参照）。この際、作成した供試体は、練り混ぜ後 7 日間は水中養生とするが、脱型後の材齢 7 日以降は気中養生となる。気中養生の場合、コンクリートの乾燥収縮が発生するが、同条件で供試体を作成した普通コンクリートと膨張コンクリートの差を求め、これを膨張性能と定義付けている（図-17 参照）。

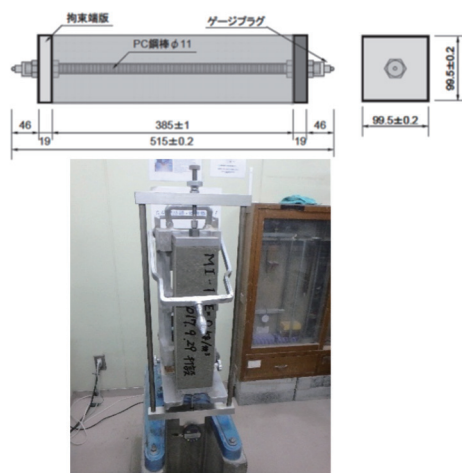
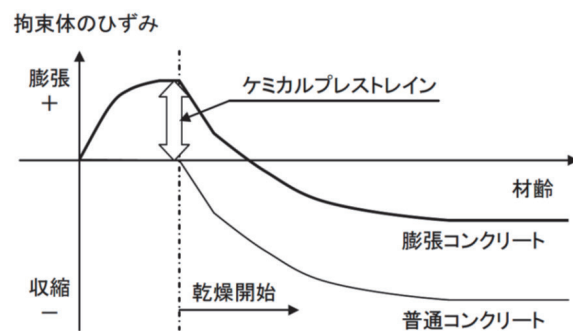
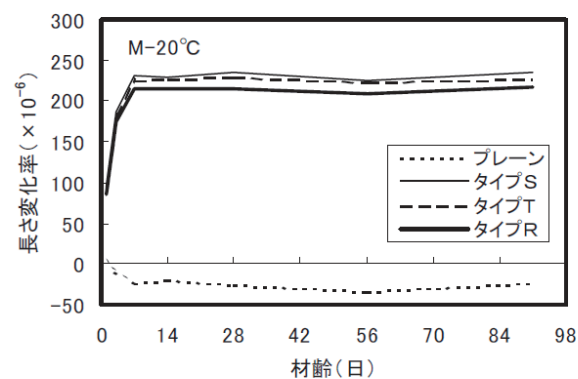


図-16 B法 長さ変化測定状況


図-17 B法の長さ変化の概念⁴⁾

一方、スロットジョイントは、表面を除くとマッドコンクリートにより完全に拘束された状態であり、気中にさらされる部分はほとんどない。材齢 7 日以降も水中養生とした場合の事例を調べたところ、コンクリートの収縮が生じないことが分かった（図-18 参照）。

そこで、本試験では現場条件に適合した条件として、材齢 7 日以降も水中養生（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ）とする試験を実施し、膨張特性の「絶対値」を求めることとした。また、供試体寸法は、 $100 \times 100 \times 385\text{mm}$ であるため、最大骨材寸法を 20mm とし、分級粗骨材 40 ～ 5mm を 20 ～ 5mm に置き換え、単位セメント量、単位水量および単位骨材量も同じとして試験供試体を作成した。



<配合条件>

- ・中庸熱セメント、膨張材添加量 20kg/m^3 、水中養生 20°C

図-18 材齢 7 日以降も水中養生した場合の長さ変化（デンカパワー CSA 技術データ集⁵⁾より引用）

3) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験用供試体は $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体とし、JIS A 1132:2014「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」により作製した。

供試体の養生は、膨張特性試験と同様に $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生とした。脱型は、スロットジョイントにより拘束されている現場条件を踏まえ、圧縮試験直前に行った。

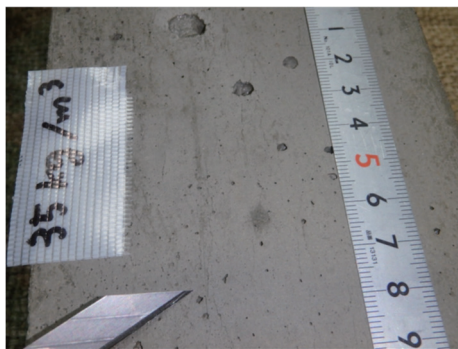
(3) 室内試験結果

配合試験より得られた配合およびフレッシュコンクリート試験

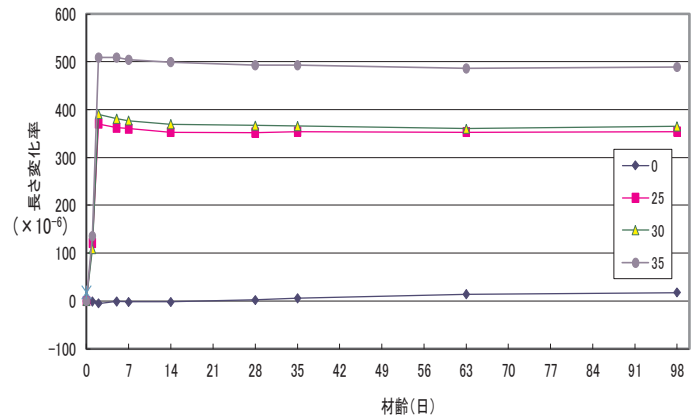
結果を表－5 に示す。また、膨張特性試験は以下のとおりである（図－19 参照）。

- 膨張材添加量 25kg/m^3 でも、 $350\ \mu$ 程度の膨張性能があり、要求性能の 0.26mm （ひずみ量換算 $104\ \mu$ ）を満足することを確認した。
- 膨張材添加量 35kg/m^3 では、供試体にマイクロクラックが認められたが（写真－4 参照）、膨張材添加量 25kg/m^3 、 30kg/m^3 ではマイクロクラックは確認されなかった。膨張材添加量 35kg/m^3 は、過膨張（コンクリートの膨張により発生する引張応力が、コンクリートの引張強度を上回ってクラックが発生する現状）を引き起こしているものと考えられる。
- 材齢 7 日以降の供試体の養生方法を、気中養生から水中養生にしたことにより、乾燥収縮の影響を取り除いた膨張量の測定結果が得られた。
- 材齢 91 日の圧縮強度は、いずれの膨張材添加量も設計基準強度 22N/mm^2 を満足することを確認した（図－20 参照）。

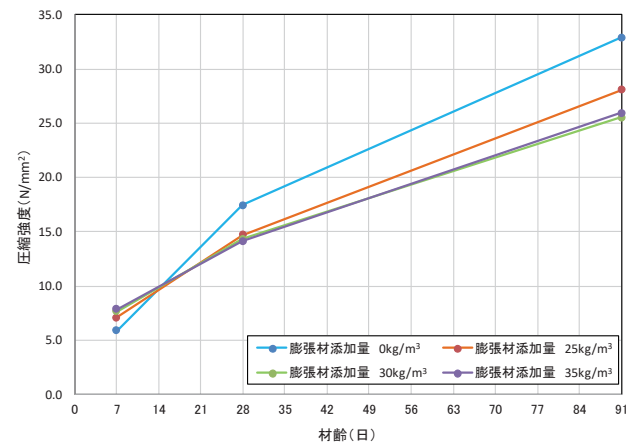
以上から、膨張材添加量は膨張性能が高く、供試体にクラックの発生が認められなかった 30kg/m^3 を選定した。



写真－4 供試体表面部分のマイクロクラック
（膨張材添加量 35kg/m^3 、材齢 14 日）



図－19 膨張特性試験結果



図－20 圧縮強度試験結果

次に、選定した膨張材添加量 30kg/m^3 のコンクリートで無拘束状態での同じ手法で試験を行った。その結果、材齢 2 日で計測限界 $1,000\ \mu$ を超え、供試体全体が膨張し、骨材周辺のモルタルにクラックが発生した（写真－5 参照）。さらに、材齢 35 日には供試体の剥離が認められた（写真－6 参照）。

表－5 配合およびフレッシュコンクリート試験の結果

配合 区分	粗骨材 最大 寸法 (mm)	スラン プの 範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	膨張材 添加量 (kg/m ³)	水 セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 (P×%)	空気量 調整剤 AE-4 *2	スラン プ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	単位容 積質量 (kg/ℓ)		
							水	結合材		細骨材	粗 骨 材 *1								
								セ ン ト	膨 張 材		80～ 40mm							40～ 20mm	20～ 5mm
膨 張 コ ン ク リ ー ト	40	10±2.5	4.5±1.5	0	55.0	41	165	300		727	1066			1.0	17 (0.034)	11.5	5.5	22	2228
								300	0		—	533	533						
				25	60.0	41	165	300		727	1066			1.0	17 (0.034)	11.0	5.8	22	2253
								275	25		—	533	533						
				30	61.1	41	165	300		727	1066			1.0	17 (0.034)	11.0	5.0	22	2252
								270	30		—	533	533						
				35	61.1	41	165	305		727	1066			1.0	17 (0.034)	11.5	4.9	22	2263
								270	35		—	533	533						

*1：分級粗骨材の混合割合は、混合粗骨材40～5mmとしたときの40～20mm：20～5mmの割合が土木学会標準示方書ダムコンクリート編に示される標準粒度範囲を満足する値（50%：50%）となるようにした。

*2：上段はAタイプの値、下段はP×%の値を示す。

< 供試体側面 >

< 切断面 >

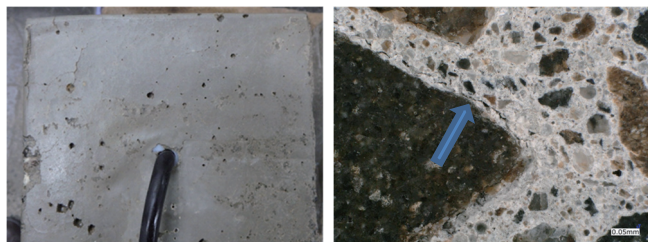


写真-5 無拘束の供試体側面と切断面写真
(膨張材添加量 30kg/m^3 、材齢 91 日)



写真-6 無拘束の供試体の剥離

(4) 現地における実物大試験での確認

室内試験は、供試体寸法 $100 \times 100 \times 385\text{mm}$ であるが、実際のスロットジョイントは、幅 2.5m と広いので、表面部分のクラックの発生が懸念された。

そこで、実施工に先立ち実寸大の模擬供試体を用いた試験を、増設減勢工背面部で行った（写真-7 参照）。膨張コンクリート打設後の状況を観察したところ、クラックの発生はなく良好な状態であることが確認できた。



写真-7 実寸大の模擬供試体試験

(5) 実施工における対応

1) 表面部分の拘束

無拘束状態では、クラックの発生が懸念されたため、実施工においては、スロットジョイント表面部分をメタルフォームによる養生を約 1.0 ヶ月行った（写真-8 参照）。また、脱型後の状況を目視および簡易測量により確認した。その結果、表面部分にクラックは発生していないこと、膨らみはほとんどなく通常のダムの越流部と同等な施工精度であることを確認した（写真-9 参照）。



写真-8 スロットジョイントの養生状況



写真-9 スロットジョイント表面部の状況

2) 傾斜継目の施工

傾斜継目の施工は、先の p.4 “(4) マットコンクリートの温度上昇抑制対策” に加え、工事請負者からの契約後 VE 提案により着岩部、構造物際、傾斜継目は単位結合材量 220kg/m^3 （フライアッシュ置換率 30%）着岩 RCD コンクリートにすることによって、施工機械（締め重機）の入れかロス無くし、作業効率を高めることで、さらに工期短縮が実現できた。

6. おわりに

本稿では、国内で初めての鶴田ダムで行われたダム堤体へ膨張コンクリートを使用した継目構造の合理化についてまとめた。

従来、縦継目の一体化は、ジョイントグラウチングにより実施されてきたが、クーリング、グラウト配管の施工手間に加え、クーリング期間の確保が必要とされる。鶴田ダムでは今回の縦継目の合理化により、約 1 年の工程短縮が可能となり、平成 30 年 3 月の事業完了年度内に施工を完了できたことは、大きな成果であった。

しかし、スロットジョイント打設 1 ヶ月後の状況把握は行っているが、長期的な膨張特性を検証するための埋設計器を、事業工程等の面から、設置できなかったのは反省すべき点である。

なお、今回報告した縦継目工の合理化、ならびにスロットジョイント打設に用いた膨張コンクリートについては、今後次のような箇所への応用なども期待される。

(1) 大口径放流設備や堤内仮排水路のクラック抑制（特に治水専用ダムへの適用）

大口径放流設備や堤内仮排水路の表面部分に内部コンクリートと同時に膨張コンクリート打設し、表面部分を型枠でしっかり養生することで膨張コンクリート内に圧縮ひずみが残存され、クラック抑制の効果が得られると考えられる。机上の簡易計算（FEM 解析）ではその効果は期待できるため、今後は、室内試験で耐久性、現場での実証実験でクラック抑制効果や施工面の確認が必要であると考ええる。

(2) 老朽化ダムの補修対策（クラック補修）

一般的に、クラック補修には無収縮モルタルが用いられている。これに対し、膨張材を添加したモルタル（あるいはセメントミルク）に代用すれば、補修後のクラックが開くことを抑制でき、無収縮モルタルに比べてより確実に一体化ができると考えられる。これは、既に使用実績もあることから、補修後のモニタリングとともに、クラック規模やその適用性、注入の施工性、材料としての強度に着目していきたい。

(3) 巡航 RCD 工法との組み合わせによる、工期短縮とコスト縮減

傾斜継目は、従来の RCD 工法で施工された宮ヶ瀬ダムで用いられており、振動目地切り機で傾斜継目を設けた。近年開発された巡航 RCD 工法では、一面拘束型のプレート型端部法面締固め機（Flat Plate Compactor）の開発により、斜めに打止め可能となっている。

このように、巡航 RCD 工法と組み合わせることにより、傾斜継目形成の作業効率が向上し、工程短縮の効果がある（今回の鶴田ダムで実証済み）。

傾斜継目は、急速施工が要求され、クラック抑制が必要なケースにおいて有効であり、既に玉来ダム（重力式コンクリートダム）で採用されたほか、今後足羽川ダム（重力式コンクリートダム）、成瀬ダム（台形 CSG ダム）で計画されており、その効果に着目したい。

(4) ダム上流面外部コンクリートへの適用（表面クラック発生防止による漏水対策）

上流面の水平クラックは、ダム堤体の揚圧力を増大させ、安定性の観点から重要な問題となる。特に冬期休止などの長期放置を行ったリフト面では、クラック発生リスクが非常に高い。そのため、上流面外部コンクリートを膨張コンクリートで打設すれば、クラック発生の抑制が期待できる。

外部コンクリートの適用にあたっては、圧縮強度、耐久性（凍結融解、中性化）についての確認が重要であることに加え、膨張材はコスト的にも高価であるため、その適用範囲を厳選するといった工夫が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 久保朝雄、遠山玄郎、下村慎一郎：鶴田ダム再開発の概要（その1）、ダム技術2012
- 2) 坂元浩二、高山善光、岩元隆太郎、武井昭、植本実：鶴田ダム再開発事業～既設減勢工改造～マットコンクリート工におけるRCD工法合理化の取組み（その1）、ダム技術2018
- 3) 坂元浩二、高山善光、岩元隆太郎、武井昭、植本実：鶴田ダム再開発事業～既設減勢工改造～マットコンクリート工におけるRCD工法合理化の取組み（その2）、ダム技術2018
- 4) 電気化学工業株式会社：拘束によるコンクリート長さ変化率への影響、実験データ、2009
- 5) 電気化学工業株式会社：パワーCSA技術データ集