

コンクリートダムにおけるプレキャスト通廊の 現場挙動計測結果と通廊周辺部の配筋

白 根 勇 二^{*1} 赤 坂 雄 司
原 夏 生 上 馬 場 靖^{*2}

要 旨

宇奈月ダムでは、作業の効率化・省人化を目指して、ダム堤体内に設けられるすべての通廊をプレキャスト工法で施工した。プレキャスト工法の開発にあたり、プレキャスト部材と堤体コンクリートの一体性の確認、および今後のダム通廊の合理的な設計手法確立に向けたデータを蓄積するために、長期にわたる現場挙動計測を実施した。また、試験湛水期間中の挙動を検討するため、F E M解析を実施した。

計測および解析結果から、プレキャスト部材と堤体コンクリートは一体となって挙動していることを確認できた。また、発生するひずみは温度の影響を大きく受け、上載のコンクリート重量や貯水位荷重の影響は小さく、頂版部に若干の圧縮、底版部に若干の引張を示したに過ぎなかった。このことから、現状のコンクリートダム通廊の配筋は、安全側に評価しており、鉄筋量を削減できることがわかった。

キーワード コンクリートダム / 通廊 / プレキャスト化施工 / 配筋 / F E M解析 / 無限有孔版

目 次

- | | |
|--------------|------------------|
| 1 . はじめに | 4 . 試験湛水期間中の計測結果 |
| 2 . 計測概要 | および解析結果 |
| 3 . 長期挙動計測結果 | 5 . 通廊周辺の配筋について |
| | 6 . まとめ |

FIELD MEASUREMENT AND STUDY OF REINFORCING BAR ARRANGEMENT OF PRE-CAST GALLERIES IN CONCRETE DAM

Yuji SHIRANE
Natsuo HARA

Yuji AKASAKA
Yasushi KAMIBABA

Synopsis:

We have constructed the galleries of Unazuki dam with applying pre-cast segment method in order to efficient construction work with less labor. When we developed the application of the pre-cast segment method, we had to confirm the structural integrity of the pre-cast segments and dam body, and accumulate data for the rational design of galleries. For that purpose we had carried out the long-term measurement of pre-cast galleries.

As a result of measuring and analysis by FEM, it was cleared that the pre-cast galleries and dam body were the structural integrity. It was found out that the temperature gave the strain of the galleries a big influence, but upper concrete weight and water weight of reservoir didn't give it. From the result, it was clear that it was excessively evaluated on the safety side in the present design. It is possible for design of concrete dam galleries to cut down necessary reinforcing bar.

*1 北陸支店 水谷トンネル作業所

*2 東北支店 木戸ダム作業所

1. はじめに

コンクリートダムの施工では、ＲＣＤ工法（コンクリートをダンプトラックで運搬し、振動ローラで締固めを行う施工方法）に代表される機械化施工法の開発が積極的に行われ、合理化施工が進められてきた。しかし、ダム堤体内部に構築される通廊やゲート操作室といった堤体内構造物の施工方法は、従来どおりの型枠・支保工によるものであり、工程的にクリティカルパスとなるため、合理化施工の懸案となっていた。

宇奈月ダムでは、ダム堤体内に設けられるすべての通廊をプレキャスト工法で施工することにより、従来の施工において必要であった配筋作業、型枠や支保工の組立および解体作業の効率化や省人化を進めてきた。この結果、通廊のプレキャスト施工は、作業環境や安全性を著しく改善し、コスト縮減を図ることができることが明らかとなった。

宇奈月ダムは、富山県東部宇奈月温泉の上流約1kmの黒部川に、国土交通省北陸地方整備局が建設した堤高97m、堤頂長190m、堤体積51万m³の重力式コンクリートダムである(写真-1)。平成5年8月にコンクリートを初打設し、平成6年7月に定礎、そして平成10年9月に打設を完了。その後、平成12年2月末から試験湛水を開始し、同年4月にはサーチャージ水位に達した。

この間、通廊のプレキャスト施工は、平成6年8月から平成10年7月までの約4年間にわたり、その施工延長は水平部307m、階段部246.6m、交差部30カ所、総部材数は617基であった。

本文では、プレキャスト部材と堤体コンクリートの一体性の確認、および今後のダム通廊の合理的な設計手法の確立に向けたデータを蓄積するために実施した、約6年間の現場挙動計測の結果について報告するとともに、



写真-1 完成したの宇奈月ダム

試験湛水期間における通廊周辺の挙動についてFEM解析を実施し、検証した結果について報告する。また、これらの計測結果をもとに検討した通廊周辺部の配筋について述べるものである。

2. 計測概要

ダムの通廊全線にプレキャスト部材を適用したのは、宇奈月ダムが国内では初めてであり、また、従来の施工方法においても通廊周辺の挙動をコンクリート打設から試験湛水まで長期に渡って計測した実績は少ない。

計測箇所は、図-1に示す基礎通廊水平部および階段部、中段通廊水平部の合計3カ所である。本文では、計測位置が最も低く、計測期間が最も長い6ブロック基礎通廊水平部について述べる。6ブロック基礎通廊水平部の計測項目を表-1に示す。また、図-2に6ブロック基礎通廊水平部における横断方向の計測器設置位置を示す。

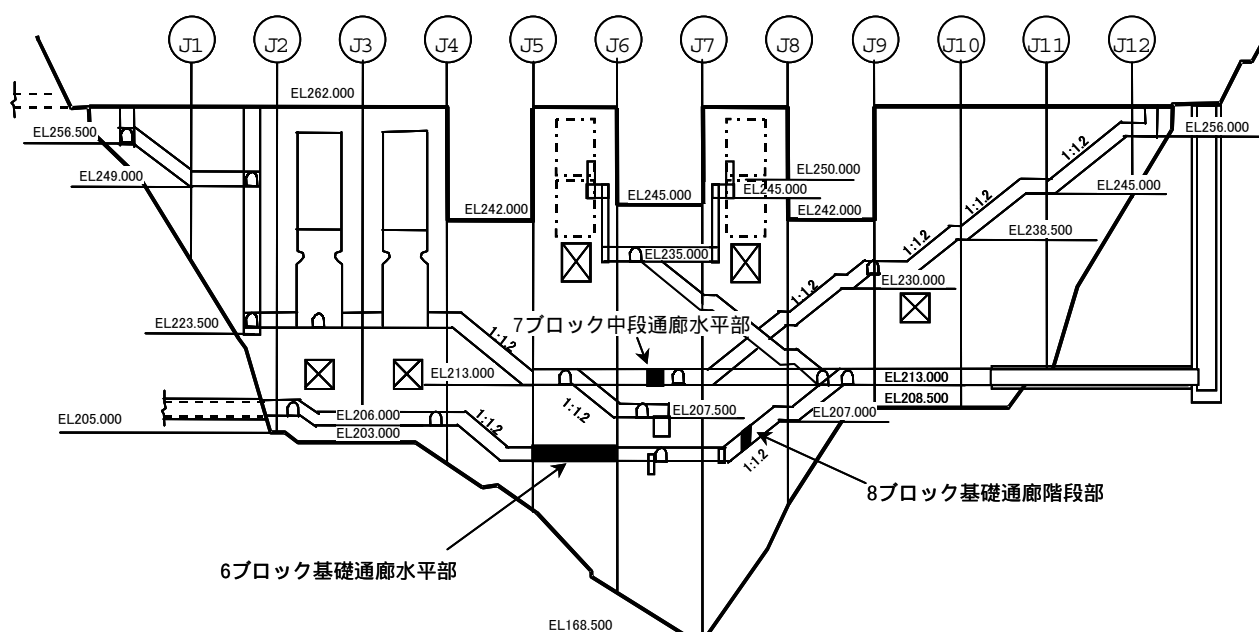


図-1 通廊の配置と計測位置

表-1 計測項目および計測機器
(6ブロック基礎通廊水平部)

	計測項目	計測機器	計測位置
PCa部材	部材内温度	各計器の測温機能	頂版、側壁、底板
	部材内コンクリートひずみ	ひずみ計	頂版、側壁、底板
	内側表面のコンクリートひずみ	表面ひずみ計	頂版、側壁、底板
	部材内鉄筋応力	鉄筋計	頂版、側壁、底板
	部材と堤体コンクリートの目開き	継目計	側壁、底板
	部材間の目地の開き	差動トランス式ひずみ計	側壁
堤体コンクリート	コンクリートのひずみ	ひずみ計	PCa部材に対応する位置
	コンクリートの温度	各計器の測温機能	

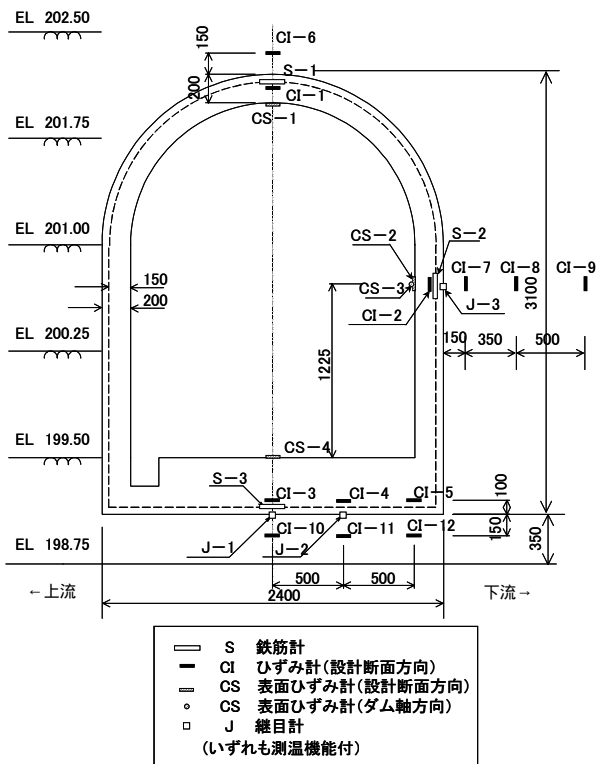


図-2 横断方向計測器設置位置
(6ブロック基礎通廊水平部)

3. 長期挙動計測結果

ここでは、施工開始から試験湛水後までの通廊頂版部・側壁部・底板部のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみの変動について述べる。

3.1 通廊頂版部のひずみ

頂版部の計測結果について、計測開始から試験湛水終了までの約6年間のデータを図-3に示す。図中には、上下流方向の水平方向(設計断面方向)ひずみの値 CI-1、

CI-6(CI-1はプレキャスト部材内の計測値、CI-6は堤体コンクリートの計測値)とその温度を示した。なお、図中のリフト数はプレキャスト部材設置部のコンクリート打設リフト数であり、1リフトは1.5mである。

この図より、プレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみは、その増減の傾向がおおよそ一致しており、季節の温度変化に対応して周期的な変動を繰り返し、温度が上昇すると圧縮方向へ、下降すると引張方向へ移行している。

また、試験湛水期間中の計測結果に着目すると、プレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみの変動は、それ以前の温度変化に起因する変動よりも小さく、45 mの水位の上昇によって、頂版部では約30μの圧縮ひずみが発生している。

3.2 側壁部のひずみ

側壁部の計測結果を図-4に示すが、これは鉛直方向(設計断面方向)のひずみの値である。CI-2はプレキャスト部材内の、またCI-7は堤体コンクリートの計測値である。

この図より、プレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみは、頂版部と同様に、その増減の傾向が両者でほぼ一致して、季節の温度変化に対応して周期的な変動を繰り返していることがわかる。また温度が上昇すると圧縮方向へ、下降すると引張方向へひずみが増減しながら、徐々に圧縮領域に移行していることもわかる。

これは、リフト数の増加(コンクリートの打設の進捗)によって鉛直方向の荷重が増し、圧縮ひずみが増大しているものと考えられるものの、その増加量は40μ程度とわずかであり、上載荷重が全て作用した場合の理論値180μの20%程度で、上載荷重の影響は小さいことがわかる。

3.3 底盤部のひずみ

底盤部の計測結果を図-5に示す。底盤部は上下流方向

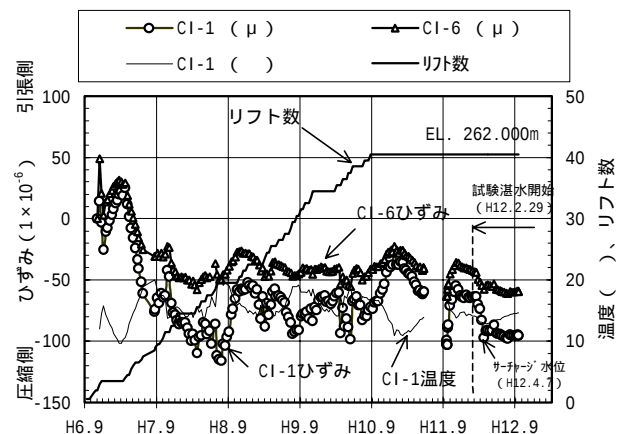


図-3 通廊頂版部のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみ

の水平ひずみの値である。CI-3はプレキャスト部材内の、またCI-10は堤体コンクリートの計測値である。

計測結果より、頂版部と同様、プレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみは、その増減の傾向が両者でほぼ一致しており、季節の温度変化に対応して周期的な変動を繰り返している。

また、試験湛水期間中のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみの変動は、試験湛水実施前の温度変化に起因する変動よりも小さく、45 mの水位の上昇によって底盤部では若干の引張りひずみが発生している。

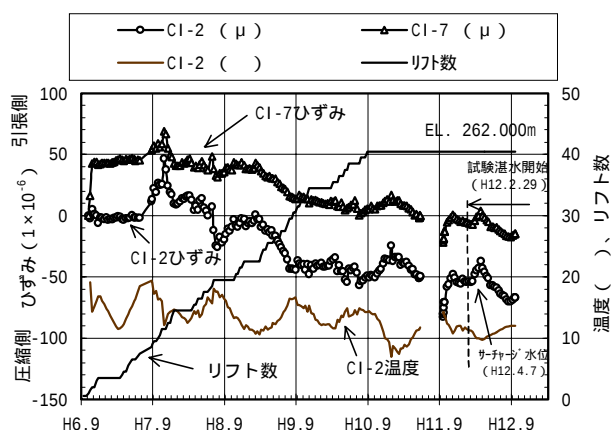


図-4 通廊側壁部のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみ

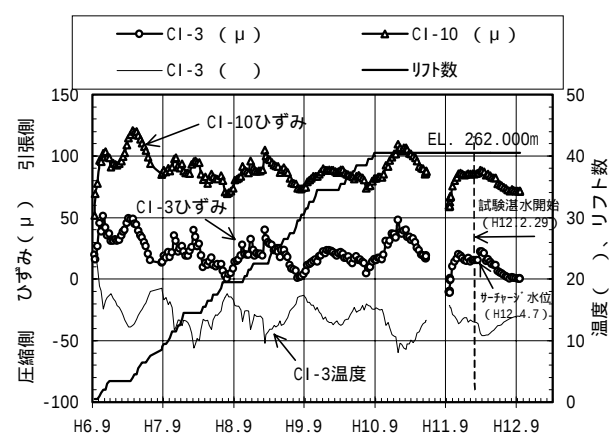


図-5 通廊底版部のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみ

4. 試験湛水期間中の計測結果および解析結果

4.1 検討概要

二次元FEM解析を実施して、試験湛水期間中の通廊周辺の挙動を評価した。重力式コンクリートダム の堤体変形に影響を与える主要因として、季節的 温度変化と貯水位変動による荷重が考えられるため、堤体の変形は、季節的 温度変化と貯水位変動を考慮したそれぞれのモデルを作成した上で解析を実施し、各々の解析結果を加算して求めた。

堤体変形に影響を及ぼす要因の概念図を図-6に示す。

主な影響要因は、

外気温変化による温度荷重

通廊内空温変化による温度荷重

貯水温変化による温度荷重

下流側へ作用する貯水圧

鉛直下向きに作用する水重

鉛直上向きに作用する揚圧力

である。本報告では、 $\sim$ を温度荷重、 $\sim$ を貯水位荷重とする。

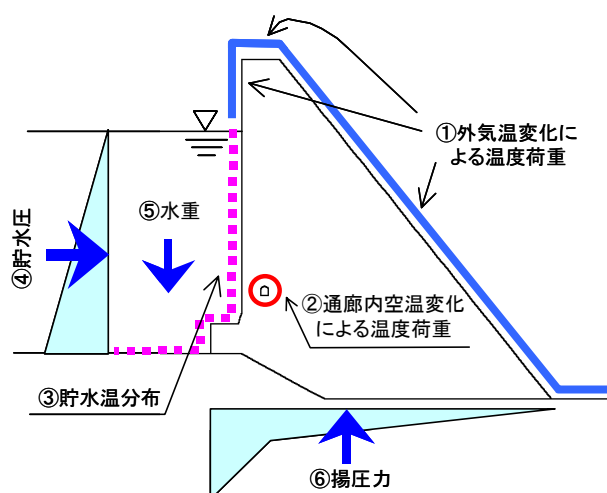


図-6 試験湛水による堤体変形要因

4.2 解析モデル

解析に用いた要素分割図を図-7に示す。解析対象断面はEL.199.5mに位置している6ブロック基礎通廊水平部とし、解析期間は、平成11年10月の試験湛水開始から約1年間とした。

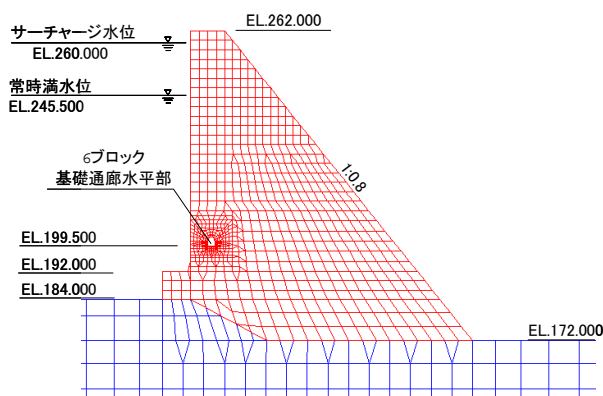


図-7 要素分割図

4.3 解析条件

表-2に解析で用いたコンクリートと岩盤の物性値を示す。物性値は、現場データを基に定めた。なお、コンクリートの発熱はないものとし、熱伝達のみを考慮した。外気温および通廊内空温度のデータは、現場計測の実測値を近似したものをを用い、図-8に示す通りである。また、

堤体上流側の貯水面以下の温度は、通年8一定とした。温度境界条件は、岩盤の底面を年平均気温の12.5で固定温度境界とし、外気温、水に接する面および通廊内空面を対流境界とした。対流境界面の熱伝達係数は、コンクリートおよび岩盤の気中部を 14 W/m^2 、水中部を 47 W/m^2 とした。

貯水位の変動を図-9に示す。貯水位は、試験湛水の実績をもとに定め、平成11年10月15日の時点でEL.215.0mとし、翌年4月上旬にはサーチャージ水位のEL.260.0mまで上昇させた。なお、揚圧力は、最も上流側の位置で水圧と等しくし、通廊下の位置でその1/5とした。

表-2 コンクリート・岩盤の物性値

	コンクリート	岩盤
熱伝導率	2.32 W/m	3.016 W/m
密度	2,300 kg/m ³	2,650 kg/m ³
比熱	0.875 kJ/kg	0.754 kJ/kg
ポアソン比	0.18	0.2
線膨張係数	$10 \times 10^{-6} /$	$8 \times 10^{-6} /$
弾性係数Ec	28,000 N/mm ²	5,000 N/mm ²

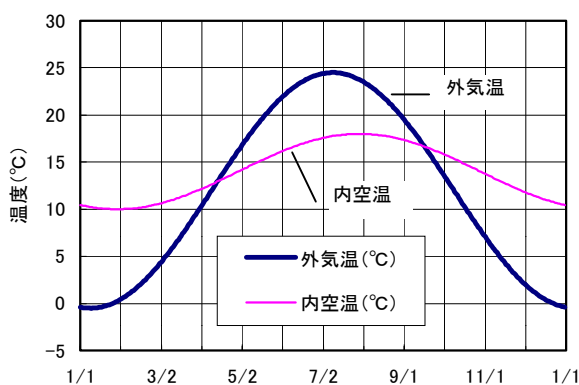


図-8 外気温・内空温データ

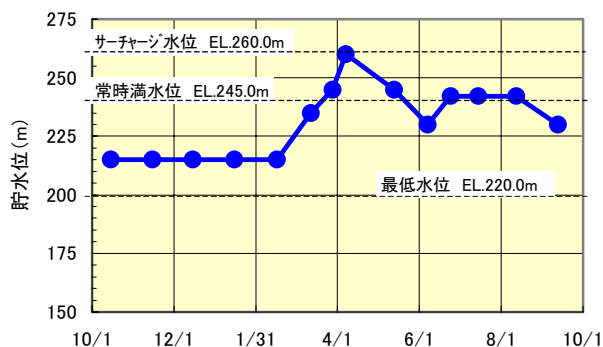


図-9 貯水位の変動

4.4 試験湛水期間中の計測および解析結果

(1) プラムライン

まずダム全体の挙動を確認するため、プラムラインの

変位量の実測値と解析値を比較することとした。

図-10にプラムライン変位量の実測値と解析値を示す。図示した結果は、貯水位荷重のみを作用させたものと温度荷重のみを作用させたもの、さらにそれらを加算したものの、および実測値である。なおプラムラインとは、堤体の変形を観測するために設置される“巨大な下げ振り”のようなもので、堤体が下流側に傾倒すると+方向にシフトし、上流側に傾倒すると、-方向に移行する。

10月の時点を経験点としているが、冬季の気温の低下にともなって、実測値と解析値は若干の差があるものの、両者の増減はほとんど同様の傾向を示している。特に、貯水位変動がない10月から2月の期間は温度変化のみとなるが、プラムラインの変位量は実測値と解析値でほぼ等しいものである。

10月から2月にかけて、プラムライン変位量は+側にシフトしているが、これは温度荷重によってダムの下流面が冷やされ、コンクリートが収縮したために下流側に傾倒したものと考えられる。また、2月から4月にかけては、ダム堤体に貯水位荷重が下流方向へ作用したために、下流側に傾倒している。

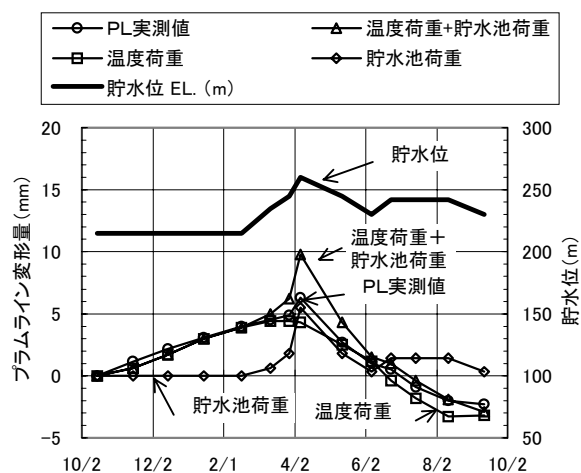


図-10 解析によるプラムライン変位量

(2) 通廊頂版部

図-11および図-12に、試験湛水期間中における、通廊頂版部のプレキャスト部材(CI-1)と堤体コンクリート(CI-6)の上下流方向水平ひずみに関する計測結果と解析結果を示す。+が引張ひずみ、-が圧縮ひずみを示している。

温度荷重の影響を調べた解析では、プレキャスト部材のひずみは、温度降下により引張側へ、上昇により圧縮側へ推移している。これは、温度変化により堤体が収縮、膨張をしているためである。また、貯水位荷重の影響を調べた解析では、貯水位上昇によりプレキャスト部材、堤体コンクリートともに圧縮ひずみが発生しており、上流面側から水圧等の荷重を受けているためと考えられる。

また、温度荷重と貯水位荷重によるひずみを比較すると、温度荷重によるひずみの方が大きく、解析結果からも貯水位荷重による影響は小さいことがわかる。

温度荷重と貯水位荷重の解析結果を加算したものと実測値を比較すると、プレキャスト部材と堤体コンクリートに発生するひずみは、いずれも解析値に比較して実測値の方がやや小さいものの、その傾向はほぼ同様であり、温度荷重と貯水位荷重が要因となって通廊頂版部のひずみが変化しているものと考えられる。

また、図-12 からプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみの実測値は、両者の境界面を完全付着状態の条件で求めた解析値と同様の傾向であることから、貯水位による外力に対して相互に応力の伝達となされ、一体性が確保されているものと推察できる。

(3) 通廊側壁部

図-13および図-14に通廊側壁部におけるプレキャスト部材(CI-2)と堤体コンクリート(CI-8)のひずみの解析結果および実測値を示す。

温度荷重の影響を調べた解析では、プレキャスト部材

のひずみは、外気温の低下に伴い引張側にシフトしているが、これは堤体の下流面が熱を放出して収縮し、堤体全体が下流方向に収縮を受けることによるものと考えられる。また、貯水位の上昇によっても堤体は水圧を受けて下流側に押されるため、通廊側壁には引張ひずみが発生しているが、その値は温度荷重による発生ひずみより小さい。

図-14 から、温度荷重と貯水位荷重の解析結果を加算したものと実測値を比較すると、通廊頂版部と同様、プレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみはほぼ同じ傾向で推移していることから、相互に応力の伝達となされ、一体性が確保されていると考えられる。

また、底版部のプレキャスト部材と堤体コンクリートのひずみも頂版部や側壁部と同じように、温度荷重と貯水位荷重が作用してひずみが発生し、相互の応力の伝達もなされていた。

なお、湛水(45 mの水位の上昇)によって通廊各部に発生するひずみは、プレキャスト部材で -15 ~ 30 μ 程度と小さく、構造上問題となるほどのものではないことがわかる。

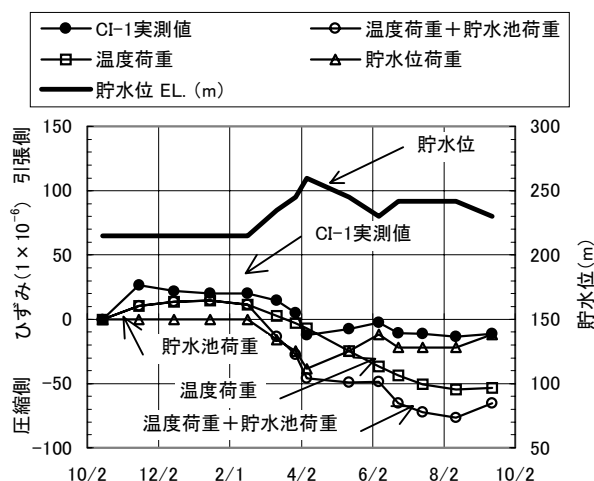


図-11 試験湛水時のひずみ(頂版 CI-1)

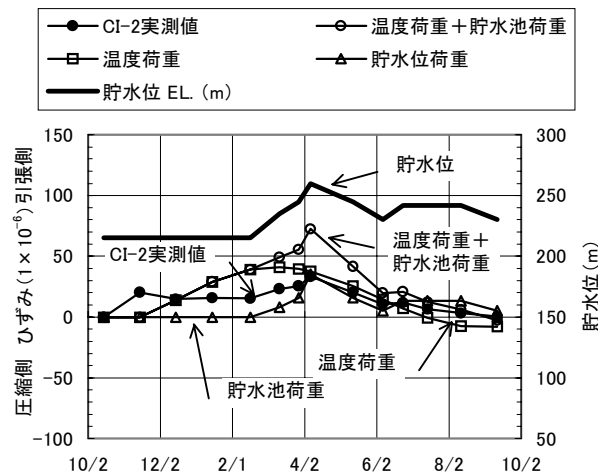


図-13 試験湛水時のひずみ(側壁 CI-2)

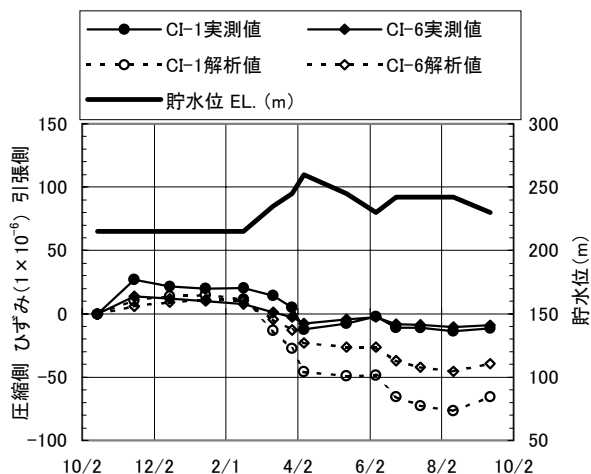


図-12 試験湛水時のひずみ(頂版部)

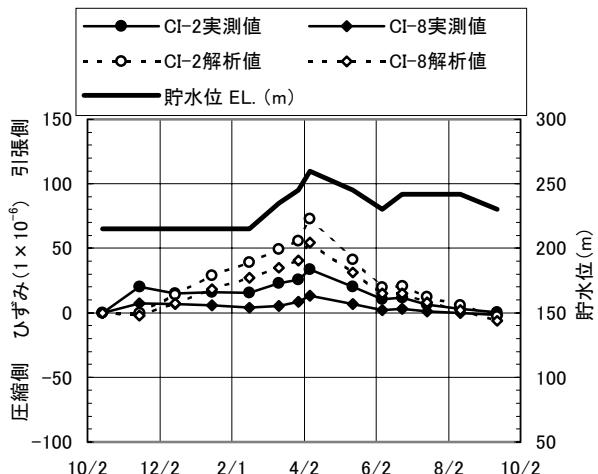


図-14 試験湛水時のひずみ(側壁部)

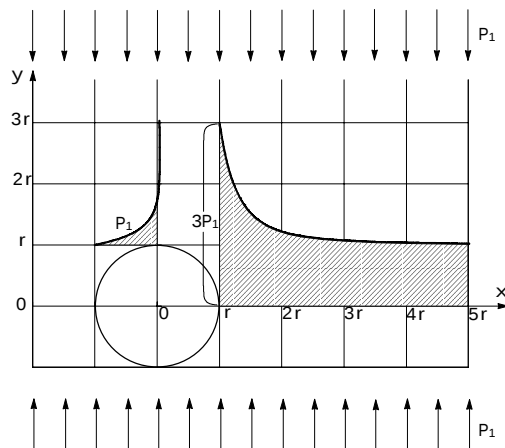
また、解析値と比べて実測のひずみが小さい理由としては、解析が2次元であるのに対し、実際のダム堤体はV字谷に挟まれて3次元的な効果が強く作用していること、ならびに解析ではクリープを考慮していないこと等が考えられる。

5. 通廊周辺の配筋について

5.1 通廊周辺のひずみ

湛水時の貯水位荷重によって通廊周辺のひずみは、頂版部では圧縮ひずみ、側壁部では引張ひずみが発生することが知られており、今回の計測結果からこのことが確認できた。

しかし、現場計測結果から通廊周辺に発生するひずみは、いずれもコンクリートの打設から5年以上経過して圧縮域にある。一方、頂版部には、上載リフトのコンクリートの自重によって引張応力が発生すると想定し、鉄筋で補強されている。今回の計測結果から判断すると、頂版部では引張補強鉄筋はもっと削減することが可能であり、通廊周辺の配筋を見直すことで、合理化できるのではないかと考えられる。



$$\text{圧縮応力 } P_x = 0.5 \cdot P_1 (2 + r^2/x^2 + 3r^4/x^4)$$

$$\text{引張応力 } P_y = 0.5 \cdot P_1 (r^2/y^2 - 3r^4/y^4)$$

ここに、 P_x : x方向の応力(圧縮)

P_1 : 上載荷重($y \times H$)

r : 円空の半径(=1.0 m)

P_y : y方向の応力(引張)

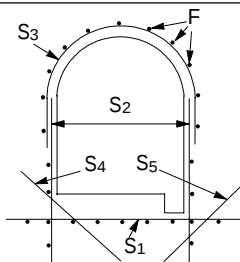
x : 円の中心からの距離

y : 円の中心からの距離

図-15 無限有孔版における応力分

表-3 通廊の標準配筋

堤高 (m)	記号	径 (mm)	長さ (mm)	本数 (本)	単位重量 (kg/m)	1本当り 重量 (kg)	重量 (kg)
40m	S ₁	D 22	4,000	5	3.04	12.160	60.800
	S ₂	D 22	2,600	10	3.04	7.904	79.040
	S ₃	D 22	4,900	5	3.04	14.896	74.480
	S ₄	D 22	2,200	5	3.04	6.688	33.440
	S ₅	D 22	1,700	5	3.04	5.168	25.840
	F	D 16	1,000	26	1.56	1.560	40.560
総重量 314.2kg							
60m	S ₁	D 29	4,000	5	5.04	20.160	100.800
	S ₂	D 25	2,600	10	3.98	10.348	103.480
	S ₃	D 25	4,900	5	3.98	19.502	97.510
	S ₄	D 25	2,200	5	3.98	8.756	43.780
	S ₅	D 25	1,700	5	3.98	6.766	33.830
総重量 634.3kg							
100m	S ₁	D 32	4,000	6.67	6.23	24.920	166.216
	S ₂	D 29	2,800	13.33	5.04	14.112	188.113
	S ₃	D 29	5,300	6.67	5.04	26.712	178.169
	S ₄	D 29	2,700	6.67	5.04	13.608	90.765
	S ₅	D 29	2,200	6.67	5.04	11.088	73.957
	F	D 22	1,000	36	3.04	3.040	109.440
総重量 806.7kg							



5.2 配筋の検討方法

(1) 標準配筋

通廊の配筋はダムの堤高毎に20mずつに区分して、表-3に示す標準的な配筋が決められており、それに従って行われている場合が多い。

(2) 無限有孔版の応力解とFEM解析

通廊の配筋を決めるのによく用いられている方法の一つとして、無限有孔版の応力解がある。この概略図を図-15に示す。これをもとに作用引張力を求め、必要鉄筋量を算定する場合がある。

また、二次元弾性有限要素法により通廊周辺部に発生する応力を求め、頂版部中央、底板部の中央、側壁下部などの通廊周辺の任意断面における圧縮または引張合力から必要鉄筋量を算定する方法もある。

5.3 配筋量の比較

表-3の標準配筋をもとに、堤高60mに位置する通廊の配筋を求めると、頂版部でD25@200、底板部でD29@200となり、このときの奥行き1mあたりの引張耐力は、頂版部で396kN、底板部で503kNとなる。ただし、使用鉄筋はSD295である。

無限有孔版の応力解で、宇奈月ダムの最深部の監査廊に近い、堤高60mに位置する通廊の奥行き1mあたりの引張合力を算出すると、頂版部で266kNとなる。標準配筋の引張耐力と比べると、2/3程度の作用引張力である。

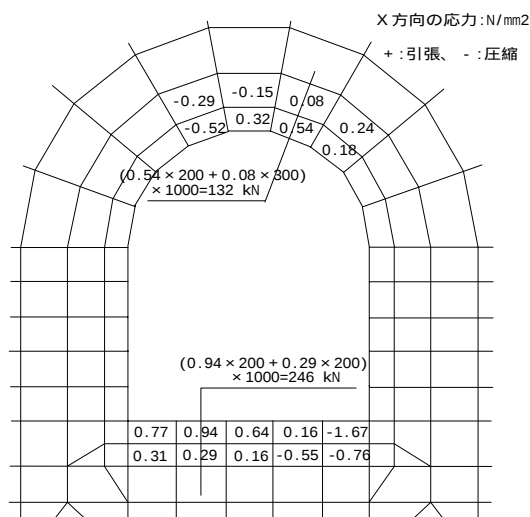


図-16 F E M解析による通廊周辺のの発生

ただし、使用鉄筋はSD295で、許容応力度を 157N/mm^2 とした。

宇奈月ダムの基礎通廊（堤高 62.5m）をモデルとし、通廊周辺部に発生する応力についてF E M解析で計算した結果を図-16 に示す。載荷荷重はコンクリートの自重のみを考慮した。これをもとに、奥行き 1 mあたりの引張合力を求めると、頂版部で 132kN、底版部で 246kN となり、このときの配筋は D22@200 なる。

これは、無限有孔版の応力解より求めた引張合力の 1/2 程度であり、F E M解析によって求めた応力を基にして配筋すれば、表-3 の標準配筋よりも大幅に鉄筋量を減じることができる。

以上より、F E M解析による配筋検討結果は、標準配筋や無限有孔版の応力解と比べ、鉄筋量を減じる結果となった。このような結果となった理由として、F E M解析は堤体と基礎岩盤を含んだモデルであり、空洞の形状、荷重条件、岩盤等の拘束などの条件が異なっている、要素分割も細分化したものではなく、鉄筋のかぶり等を考慮したものである等が考えられるが、標準配筋や無限有孔版の応力解は大幅に安全側の評価をしていることも要因のひとつと思われる。

今回の計測結果において、頂版部では若干の圧縮、底版部では若干の引張を示したにとどまっており、今後、F E M解析の適用事例が増え、検討条件や設定等が明確となれば、F E M解析による設計が主流となり、現状の

鉄筋量を削減することになると考えられる。

6. まとめ

- (1) 通廊周辺の応力は温度変化に敏感に対応し、温度応力が支配的である。
- (2) 通廊位置より上部に打設される上載リフトのコンクリートの荷重は、通廊周辺の応力(ひずみ)にあまり影響を与えない。
- (3) 頂版部、側壁部、底版部ともにプレキャスト部材と堤体コンクリートとの一体性は確保されている。
- (4) 頂版部に発生する応力やひずみは、コンクリート打設から 1 年ほどで圧縮域に移行し、また底版部では若干の引張域にはあるものの、計測された値は小さいものであり、将来的には引張補強のための鉄筋を削減できる可能性がある。
- (5) F E M解析の応力を基にして配筋量を算出すると、標準配筋や無限有孔版の応力解から求めた結果よりも、鉄筋量を減じることができる。

謝辞：長年にわたり通廊のプレキャスト化施工や現場計測について、御指導と貴重な助言をいただいた国土交通省 土木研究所ダム構造研究室の永山元室長、吉田元室長ならびに国土交通省 北陸地方整備局 黒部工事事務所のみなさん、その他多くの関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森本英樹，原夏生，赤坂雄司，上馬場靖：プレキャスト通廊の現場挙動計測について，前田建設技術研究所報，Vol.39，pp.1～8，1998.
- 2) 野中樹夫，木戸研太郎，原稔明：湛水時に観測した重力ダムの挙動とその数値解析，ダム技術 NO.159，1992.12.
- 3) 白根勇二，稲留裕一，市山健二，赤坂雄司：プレキャスト通廊の試験湛水中の挙動，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，第 部門，2001.10.
- 4) 稲留裕一，市山健二，佐藤健一，赤坂雄司：プレキャスト部材を用いて構築したコンクリートダムの通廊に関する現場計測結果および配筋に関する考察，ダム技術，No.176，pp.26～35，2001.5.