

報告 ダム監査廊のプレキャスト化に伴う提体コンクリートとの一体性に関する検討

牛島 栄^{*1}・辻 誠一^{*2}・石田教雄^{*3}・原田和樹^{*4}

要旨:ダムにプレキャスト (PCa) コンクリート製の監査廊を用いる場合、提体コンクリートとの一体性の確保が重要となる。本報では、両引き試験を実施し、両者の一体性を確保するために必要な打継ぎ部の条件について検討した。その結果、PCa コンクリートの表面を目荒らしする程度で、両者の一体性は十分確保できることがわかった。また、PCa 監査廊模擬試験体を用いて一軸載荷試験を実施し、これが外力に対して十分抵抗できること、PCa 部材の接合部の位置がひび割れ追従性に影響を及ぼすことなどを明らかにした。

キーワード:ダム、監査廊、プレキャストコンクリート、一体性、ひび割れ追従性

1. はじめに

一般に、ダム提体内に建設される監査廊は、現場内で鉄筋・型枠などを組み立て、現場打ちコンクリートで施工される。このような従来工法の問題点として、鉄筋工・型枠工などに携わる熟練作業員の不足が挙げられる。さらに、型枠・鉄筋工に多大な工数を必要とすることから、提体コンクリートの打設工程に制約を受ける場合もある。

近年では、これらの問題を解決する手法として、監査廊にプレキャスト (以下、PCa) コンクリートを使用する工法が提案され実用化¹⁾されている。しかし、この工法の場合、PCa コンクリート部と現場打ちコンクリート部との一体性が確保されなければ、監査廊の所期の目的が達成できない結果となる。

本報では、実際のダム現場で計画されている PCa 製監査廊の施工に先立ち、両引き試験体および PCa 製監査廊模擬試験体を作製し、PCa コンクリートと提体コンクリートとの一体性などについて検討した。さらに、事前に実施した FEM 解析の結果と本実験結果とを比較検討した。

2. 両引き試験体による一体性確認実験

2.1 実験概要

(1) 実験方法

図-1 に両引き試験体の形状および寸法を示す。両引き試験体は、あらかじめ作製しておいた PCa コンクリートパネルを型枠として、これに D51 の鉄筋を配置した後、後打ちコンクリートを打ち込んで作製した。次いで、材齢 14 日まで試験体を封緘養生し、後打ちコンクリートが所定の強度に達していることを管理用供試体の圧縮強度試験によって確認した後、ひび割れを導入した。

ひび割れの導入方法は、後打ち (現場打ち) コンクリート中に配置された鉄筋を両側から引張ることによって行った。なお、この場合、PCa パネルと後打ちコンクリートに十分な付着が確保されていなければ、界面での付着切れが生じ、両者のコンクリートの挙動に相違が生じる。そこで、一体性の評価は、後打ちコンクリートに発生したひび割れが PCa パネルへも追従して発生するかどうかを観察することによって行った。

なお、試験体へは加力を 200kN までは約 20kN ビッチ (ステップ) で、その後は 50kN ビッチで

*1 (株) 青木建設 研究所 材料研究室 室長 工博 (正会員)

*2 前 農林水産省 会津農業水利事務所 所長 工修

*3 (株) 青木建設 施工本部 土木設計部 工修 (正会員)

*4 (株) 青木建設 研究所 材料研究室 研究員 工修 (正会員)

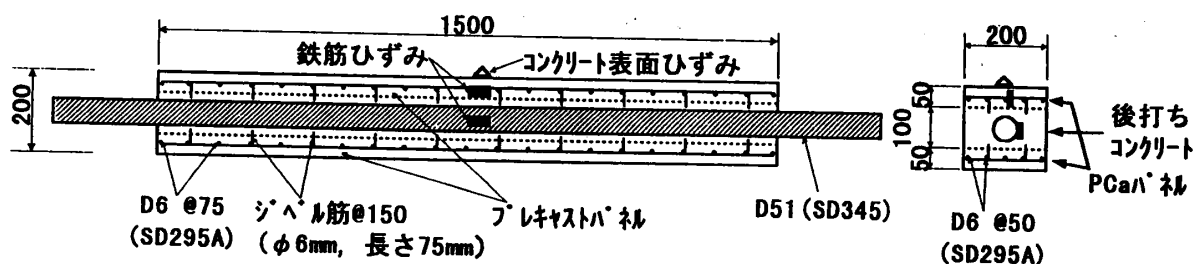


図-1 両引き試験体の形状および寸法

増加させ、各ステップ毎のひび割れ発生状況、鉄筋およびコンクリートひずみを測定した。

(2)実験の水準

打継ぎ部の処理方法が一体性に与える影響について検討することを目的に、打ち継ぎ部の条件を表-1に示す3水準に設定し、実験を行った。なお、表に示されるように、比較用としてPCaパネルを用いずにコンクリートを一体打ちした試験体も用いた。

(3)使用材料およびコンクリートの配合

使用材料は表-2に、コンクリートの配合は表-3に示す通りである。

2.2 実験結果および考察

(1)コンクリートの力学的特性

両引き試験体の荷重日における封緘養生を施した管理用供試体の力学的性質を表-4に示す。PCaコンクリートおよび現場打ちコンクリートともに、圧縮強度は、表-3に示した配合強度を満足していた。なお、PCaコンクリートの試験材齢は28日である。

(2)ひび割れ発生状況

各試験体のひび割れ発生状況を図-2に示す。ひび割れ発生時の荷重は、一体打ちを行った試験体（以下、一体型試験体）の場合が90kNであったのに対し、PCaパネルを用いた試験体（以下、PCa型試験体）の場合は、140kN程度と大きかった。また、天端部のひび割れ発生状況を見ると、一体型試験体は約15cm間隔でひび割れが発生していたのに対し、PCa型試験体の場合は約10cm間隔

表-1 両引き試験における実験の水準

試験体名称	打継ぎ部の処理方法
一体型試験体	打継ぎなし(後打ち(現場打ち)コンクリートのみ)
PCa型試験体(ジベル筋あり)	凝結遅延剤とワイヤブラシを用いた目荒らし+ジベル筋挿入
PCa型試験体(ジベル筋なし)	凝結遅延剤とワイヤブラシを用いた目荒らし

表-2 使用材料

材料名	種類・産地など	記号
セメント	早強ポルトランドセメント(比重3.14)	C
細骨材	霞ヶ浦産陸砂(表乾比重2.57, FM2.60)	S
粗骨材	筑波産碎石(表乾比重2.70)	G
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物)	AE

表-3 両引き試験におけるコンクリートの配合

コンクリートの種類	配合強度(N/mm ²)	Gmax(mm)	スランプ(cm)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE
PCaパネル	39.3	10	8±2.5	46.5	43.5	178	383	738	1007	0.958
後打ち	21.0	20	8±2.5	64.0	44.4	161	252	821	1069	0.252

表-4 コンクリートの力学的性質

コンクリートの種類	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
PCaパネル	46.8	3.0	22.4
後打ち	25.4	1.9	19.9

で発生していた。これは、両者のコンクリートの引張強度(表-4参照)の相違に起因するひび割れ分散性の相違によるものと思われる。

PCa型試験体の打継ぎ部に注目すると、PCaパネル部分と現場打ち部分に発生したひび割れは連続しており、打継ぎ部分でひび割れが停滞したり、あるいは打継ぎ部に沿ってひび割れが進展するようなことはなかった。特に、打継ぎ部に到達したひび割れは、同一の荷重ステップ内でPCaパネルまで進行していることが観察された。これらの観察結果は、PCa型試験体のジベル筋の有無には関係なく、いずれのPCa型試験体においても同じ傾向を示していた。

以上から、打継ぎ部の処理方法として、ジベル筋を用いなくても、コンクリート表面をワイヤブ

ラシなどで目荒らしをする程度で、十分な一体性が確保できることがわかった。

(3) ひずみ分布

図-3 に、各試験体の中心断面（図-1 参照）における D51 鉄筋、D6 鉄筋およびコンクリートの表面ひずみを示す。いずれの図においても、ひび割れ発生以前の 100～150kN 以下の荷重では、ある荷重に対して断面内のひずみは全て同じ値となっている。すなわち、PCa コンクリートと後打ちコンクリートが一体となって挙動していることが示されている。

一方、ひび割れ発生以降の荷重では、ひび割れ発生位置によってひずみ量が大きく変化するため、一体性の有無について明確に言及することはできない。しかし、最終荷重 700kN 付近では、D51 鉄筋のひずみより、D6 鉄筋およびコンクリートの表面ひずみの方が大きな値を示していることから、前項で述べたようにひび割れの停滞や継ぎ目方向への進展はなかったことが、この図からも確認できる。

また、PCa 型試験体のひずみ分布に着目すると、ひび割れ発生荷重の大きさは異なるものの、ひび割れが発生した後の各断面におけるひずみの挙動は、ジベル筋の有無に関わらず、各測定位置ごとにほぼ同様な傾向を示している。このことより、今回の実験の範囲では、ジベル筋の有無が両者のコンクリートの一体性に及ぼす影響は小さいものと予想される。

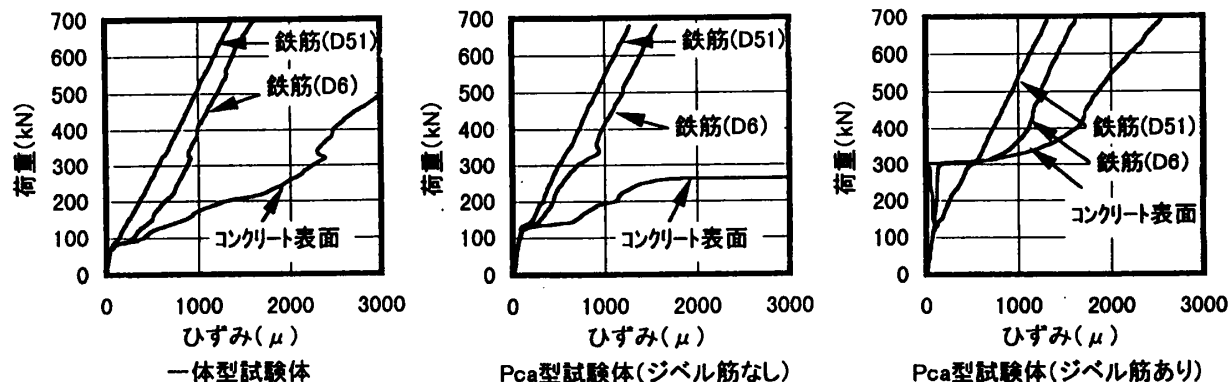


図-3 両引き試験体中心断面におけるひずみ分布

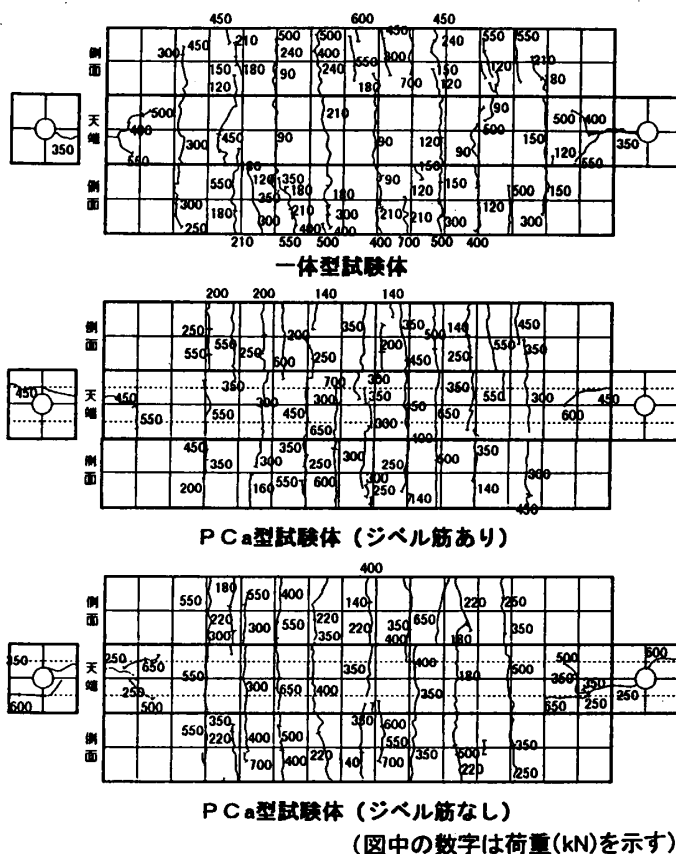


図-2 両引き試験体のひび割れ発生状況

3. 模擬試験体による加力実験

3.1 実験概要

(1) 実験方法

PCa コンクリートの外力に対する抵抗性と、提体コンクリートとの一体性について模擬試験体（図-4 参照）において確認した。

試験体への加力は、試験体の耐力を確認する目的を考慮して、図に示すように試験体天端の3点から加力ビームを介した一軸等分布荷重とした。なお、外力に対する抵抗性、および一体性の確認は、ひび割れ発生状況および試験体や鉄筋のひず

みをなどを測定し、これを後述する一体打ちの試験体と比較検討することによって行った。また、実験に先立ち FEM 解析を実施し、試験体各部のひずみの実験値と解析値とを比較検討した。

(2) 試験体の作製

模擬試験体は、図-4 に示されるように、矩形断面中に監査廊を模擬した内空を有する形状とした。模擬試験体の寸法は、装置の加力能力やクレーンの揚重能力を考慮した上で、実大に最も近い 3/4 スケールモデルとした。なお、試験体は後述する 4 水準で行っているが、図-4 ではその一例として C タイプの試験体を示している。

試験体は、まず PCa 部分のコンクリートを作製し、次いでその周りに提体コンクリートを打設して作製した。ただし、PCa コンクリート底版下へは、実施工時の充填性の確保を目的に高流動コンクリートを使用している。なお、ここでは前章の実験結果から、打ち継ぎ部の処理方法として、PCa コンクリートの表面を目荒らしするのみとした。また、養生方法などは、両引き試験体と同一とした。

試験体の水準は、PCa 部材間の結合方式を変

化させた 3 水準と、比較用として作製した PCa 部材を用いない一体打ち型の計 4 水準（図-5 参照）とした。

(3) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料は、粗骨材最大寸法（表-5 参照）を除き前章の実験と同じである。また、高流動コンクリートには、セルローズ系の増粘剤を使用した。表-5 にコンクリートの配合を示す。

3.2 実験結果および考察

(1) コンクリートの力学的性質

模擬試験体の作製に用いたコンクリートの力

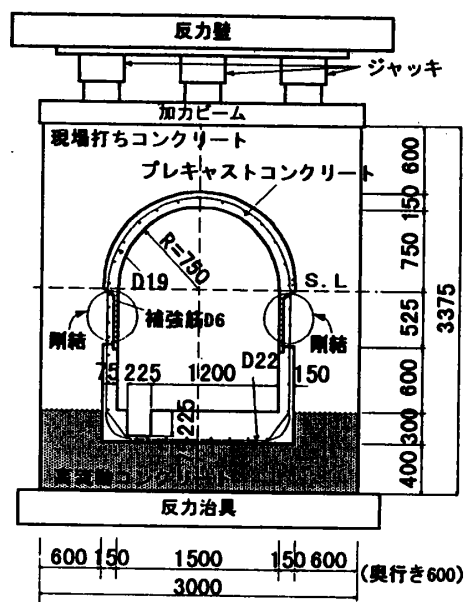


図-4 PCa 製監査廊の模擬試験体
(Cタイプ:PCa 門型2分割)

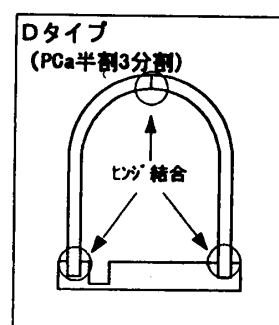
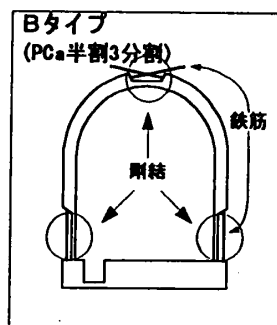
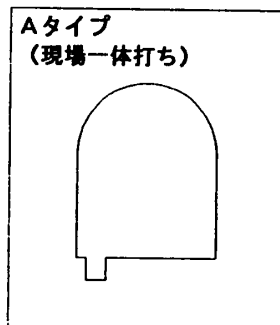


図-5 模擬試験体の水準

表-5 模擬試験体加力実験におけるコンクリートの配合

コンクリートの種類	配合強度 (N/mm ²)	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE
PCaハネル	39.3	20	8±2.5	42.0	41.9	178	498	214	1029	0.498
提体	21.0	40	8±2.5	66.0	42.6	153	232	803	1129	0.232
高流動 ¹⁾	40.0	20	60±5 ²⁾	50.0	51.1	185	370	885	861	7.40 ³⁾

1) 増粘剤 0.4kg/m³使用, 2) スランプフロー, 3) 高性能AE減水剤使用量

学的性質を表-6 に示す。試験は加力試験と同日に実施し、それぞれのコンクリートの試験材齢は同表に示した通りである。

(2) ひび割れ発生状況

各試験体のひび割れ発生状況を図-6 に、また、各部位のひび割れ発生荷重を表-7 に示す。

ひび割れの進展状況はいずれの試験体においても同様な挙動を示した。すなわち、いずれの試験体も荷重 1MN で底版側溝部からひび割れが発生し、その後荷重の増大に伴い、頂部において内側から外側に向かってひび割れの発生・進展が認

表-6 模擬試験体に用いたコンクリートの力学的性質

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	試験 材齢
PCaパネル	46.1	3.0	2.6	28日
掘体	25.3	2.0	2.1	14日
高流動	39.7	2.8	2.0	14日

表-7 各部位におけるひび割れ発生荷重

	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ	Dタイプ
頂部	2.0MN	4.0MN	2.4MN	3.0MN
底部	1.0MN	1.0MN	0.8MN	0.8MN
側部	5.0MN	3.2MN	2.0MN	2.5MN

められた。ただし、頂部のひび割れ発生荷重は、試験体の種類によって異なり（表-7 参照），PCa 部材を用いた試験体は一体型の試験体に比べてその値は大きかった。なお、B および D タイプの試験体の頂部のひび割れ発生荷重が、他の試験体に比べて特に大きかった理由は、この試験体の PCa 部材が頂部で結合された構造となっているため、ひび割れを観察しにくい状況にあったことに起因する。また、これらの試験体では、ひび割れが PCa 部材の背面から発生していることが確認される。

PCa 製監査廊の断面応力状態を解析した既往の文献²⁾を参照すると、通常の共用状態においては、監査廊の頂部付近は引張応力状態にあることが示されており、一体性の確保が特に重要となる部位であると報告している。一般に、実際のダム掘体に作用する荷重は約 2MN 以下であると言われることから³⁾、そのような荷重状態の下では、図に示したような頂部のひび割れが発生する危険性は低いと思われる。しかし、ダムの変状を観察する意味において、PCa 部材頂部には結合部を設けない方が良いと思われる。

(3) 荷重と内空変位の関係

荷重と内空鉛直変位の関係を図-7に示す。内空変位曲線は、PCa 部材を用いたいずれの試験体も、一体型の試験体（タイプ A）とほぼ同じ曲線上を推移しており、PCa 部材の有無が監査廊の内空変位に及ぼす影響はきわめて小さいことがわかった。なお、荷重と内空水平変位の関係においても、これと全く同様な傾向が確認されている。

また、この結果と各試験体のひび割れ発生荷重

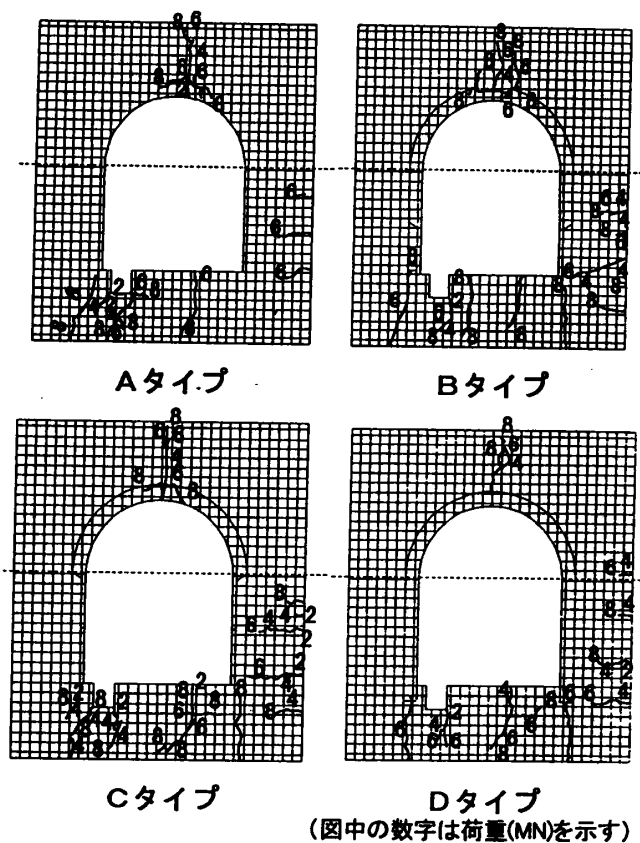


図-6 PCa 監査廊模擬試験体のひび割れ発生状況

に大差がなかったことを考慮すれば、PCa 部材を用いた監査廊の外力に対する抵抗性は、通常の監査廊と同程度であると判断することができる。

(4) 2次元 FEM 解析結果と実験結果との比較

2次元 FEM 解析は、各試験体を表-8 あるいは図-8のようにモデル化して行った。また、実験との整合性を計るために、荷重条件は剛性の高い梁を介した3点載荷とした。境界条件は、試験体底部の鉛直方向の変位を拘束し、水平方向の変位は境界面とのせん断拘束を自由にした。ただし、水平方向へのモデル全体の移動はないように設定

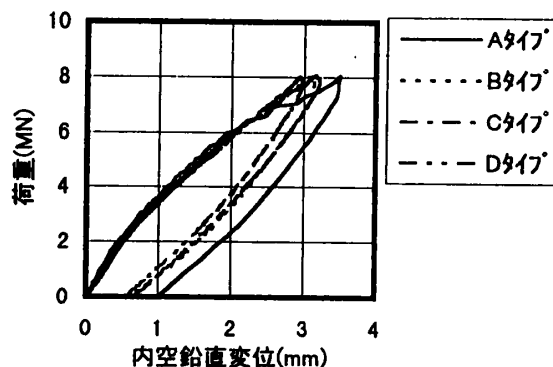


図-7 模擬試験体の荷重と内空鉛直変位の関係

表-8 各試験体の解析モデルの概要

試験体のタイプ	解析モデル
A:現場一体打ち	接合部を全く設けないモデルとした。
B:PCa半割3分割(剛結)	接合部にはジョイント要素を設けて、離散ひび
C:PCa門型2分割(剛結)	割れモデルを適用した。
D:PCa半割3分割(ヒンジ)	ヒンジ部分の要素は、分離させたモデルとした。

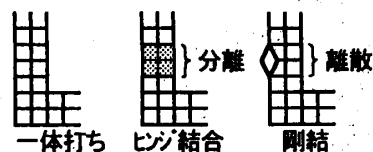


図-8 側壁付近の解析モデルの例

した。なお、解析に用いた材料の物性値は試験によって得られた値(表-6 参照)などを用いた。

荷重 1MN 時および 2MN 時の頂部鉄筋位置でのひずみの解析値と頂部鉄筋ひずみの実測値との関係を表-9 に示す。頂部に結合部を有する試験体(BタイプおよびDタイプ)では、解析値と実測値のひずみ量に大差はない。これに対し、頂部に接合部を持たない試験体については、解析値と実測値に差異が生じている。これは、BおよびDタイプの試験体の頂部の剛性が小さいのに対し、頂部に接合部を持たないAおよびCタイプの試験体は頂部の剛性が加力ビームの剛性に対して無視できない程度に大きく、解析ではその評価が適切に行われなかったことによるとと思われる。

また、解析では底部の変位を拘束したが、実験では底部には反力治具が備え付けられており、これに多少の変位が生じたことが予想される。このため、底版付近のひずみの解析値と実測値に若干の誤差が生じている。なお、側壁部の解析結果は、載荷点からも支持点からも離れており、境界条件の影響を受けにくかったことから、比較的精度の高い解析結果が得られている。

実際のダム提体内部の解析においては、岩盤面から監査廊が離れているため境界条件の影響を受けにくいこと、監査廊に作用する荷重(水圧や自重など)と監査廊の間に介在物がなことから、今回の実験よりもモデル化しやすい状況にあり、高い精度の解析ができるものと予想される。したがって、今回用いた解析手法を、実際の設計にも十分適用できる可能性があると考えられる。

表-9 鉄筋ひずみの実測値と解析値の比較

(μ)

	荷重 (MN)	Aタイプ		Bタイプ		Cタイプ		Dタイプ	
		実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
頂 部	1.0	24	53	41	19	28	31	18	20
	2.0	102	110	84	35	69	62	144	114
スプリング ライン	1.0	-64	-86	-60	-70	-65	-76	-66	-73
	2.0	-140	-128	-142	-162	-140	-146	-141	-124
底 版 中心部	1.0	6	7	17	7	18	7	21	6
	2.0	19	6	39	11	33	14	41	18
底 版 側溝部	1.0	18	13	13	14	10	14	5	20
	2.0	45	23	41	28	30	32	21	24

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 提体コンクリートと PCa コンクリートの打継ぎ部分の処理方法として、ジベル筋などを用いなくても、先打ちコンクリートの表面を目荒らしする程度で、実用上十分な一体性を確保することができる。
- (2) 監査廊に PCa 部材を用いる場合、ダムの変状を正確に観察する意味において、ひび割れ追従性の観点から頂部には結合部を設けない方が良いと思われる。
- (3) PCa コンクリート製監査廊の外力に対する抵抗性は、現場打ちコンクリートで施工される通常の監査廊と同程度であると判断できる。
- (4) 本実験を対象に行った 2 次元 FEM 解析は、実際のダム提体内部の設計にも十分適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 永山 功ほか：宇奈月ダムにおける通廊のプレキャスト化施工，コンクリート工学，Vol.33，No.8，pp.47-53，1995.8
- 2) 鷹取正顕ほか：通廊へのプレキャスト型枠の採用について，ダム技術，No.95，pp.46-56，1994.8
- 3) 駒田憲司ほか：通廊のプレキャスト化に伴う提体コンクリートとの一体性に関する検討，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，第 6 部，pp.338-339，1997.9