

報告 フィルダム監査廊への鋼繊維補強コンクリートの適用

森本 英樹^{*1}, 原 夏生^{*2}, 赤坂 雄司^{*3}, 安中 正実^{*4}

要旨: フィルダムの監査廊は、狭隘な空間で施工され、監査廊を施工した後でなければ堤体の盛立てに着手出来ないため、工程上クリティカルとなる場合が多い。本報告は、施工工期の短縮、工種の削減による安全性の向上、トータルコストの縮減を目指して、フィルダム監査廊に従来の鉄筋コンクリート構造に変えて鋼繊維補強コンクリートとプレキャスト型枠を適用することを検討したものである。現状の設計・施工法の調査を行い、変形性能に優れた鋼繊維の優位性を生かした合理的な設計法の提案と、その妥当性をモデル試験および解析で検証した。

キーワード: フィルダム監査廊, 鋼繊維補強コンクリート, 限界状態設計, 寸法効果, 引張軟化

1. はじめに

フィルダムの遮水ゾーンの下部に、堤体および基礎の安全管理、ダム基礎の維持やカーテングラウチングのために設置される監査廊は、図-1に示すように基礎岩盤を掘り込んで設置されるのが通常である。このため、監査廊を施工した後でなければ堤体の盛立てに着手出来ず、工程上クリティカルとなる場合が多い。

施工は大型のスライド型枠を使用し、通常インバート部とアーチ部に分けて施工するが、10~15日/ブロックの施工サイクルとなる。配筋ピッチが密でラップする鉄筋が多く、作業空間は大変狭隘である。また、斜面部では40°~45°の傾斜地での作業もあり、天候に

左右され易いにも関わらず、盛立てなどの主要工種とは異なり、あまり研究開発の対象になってこなかった。

本報告は、施工工期の短縮、安全性の向上、トータルコストの縮減を目指して、フィルダム監査廊に従来の鉄筋コンクリート構造に変えて鋼繊維補強コンクリート（以下SFRCと称す）とプレキャスト（以下PCaと称す）型枠を適用することを検討したものである。

2. フィルダム監査廊の現行設計法

フィルダム監査廊の断面（例）を図-2に示す。一般に監査廊の設計は、岩盤を含んだ2次元モデルを考え、FEM弾性解析により応

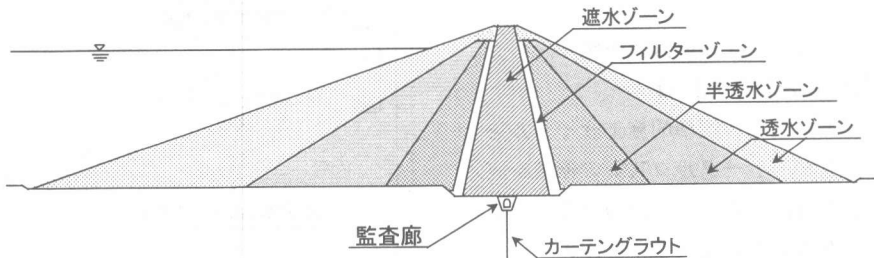


図-1 フィルダム監査廊の断面図（例）

*1 前田建設工業（株）技術本部技術研究所研究員 工修（正会員）

*2 前田建設工業（株）技術本部技術研究所主任 工修（正会員）

*3 前田建設工業（株）技術本部技術研究所課長代理（正会員）

*4 農林水産省農業工学研究所 造構部構造研究室室長 農博

力を求め、それをもとに配筋する方法が定着している。鉄筋量は、要素応力から単位長さあたりの圧縮または引張合力を求め、鉄筋の許容応力度で除して求める場合や、図-3 に示すように要素応力から曲げモーメント、軸力等の断面力を求め、RC 梁部材を仮定して求める方法などがある¹⁾。

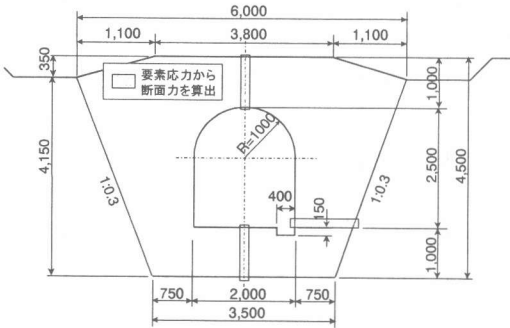


図-2 フィルダム監査廊の断面 (例)

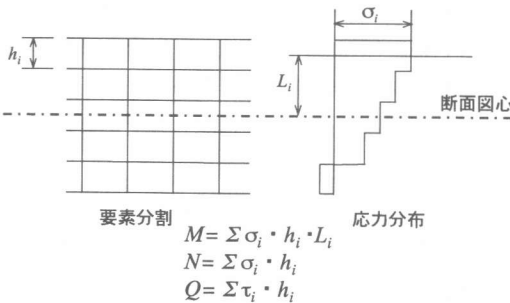


図-3 断面力算出方法

3. SFRC によるフィルダム監査廊

3.1 開発経緯と構造の特徴

フィルダム監査廊の標準的の施工サイクルを表-1 に示すが、トータルコストの削減を実現する工法を考えた場合、型枠の設置・解体と鉄筋作業が監査廊の施工サイクルの 6~7 割を占める。このことから筆者らは、他の構造物でも本体利用されてその一体性が確認されている脱型不要の PCa 型枠²⁾と鉄筋作業の不要な SFRC を用いる構築工法³⁾に着目した。

表-1 監査廊の施工サイクル工程 (例)

工法・種	日数	5		10	
		移動	妻部 蓋部	移動	妻部 蓋部
従来工法 11日 ノサイクル	型枠				
	鉄筋				
新工法 7日ノサイクル	型枠	PCa妻部 蓋部		PCa妻部 蓋部	
	Con打設		Con打 養生		Con打
備考		インバート部を除いた傾斜部 在来工法はスライドセントル使用			

3.2 設計方法の提案

フィルダムの監査廊に SFRC を使用する場合、優れた曲げ強度および曲げタフネスをより合理的に反映することが必要である。そこで、SFRC の特性を生かすために限界状態設計法を用いることとした。フィルダムの監査廊は、通廊としての役割だけでなく、堤体および基礎の安全管理という役割も担っており、監査廊の重要度、機能、使用期間を考慮する

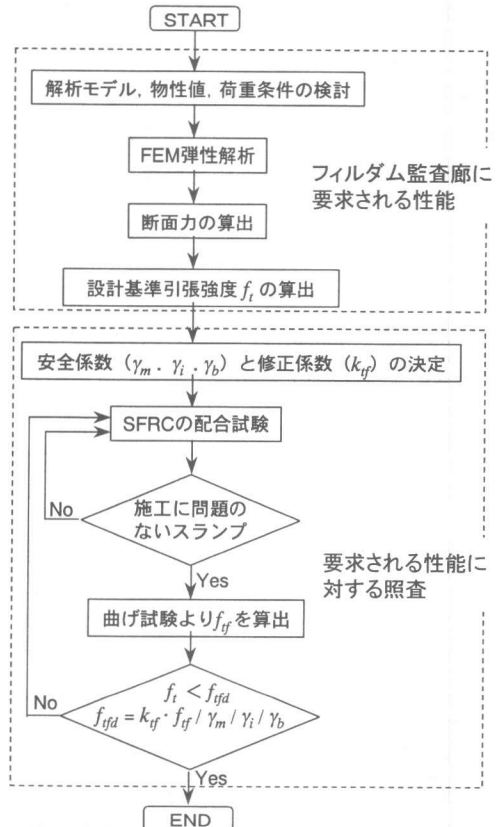


図-4 限界状態設計フロー図

と、長期的にわたる耐久性を確保する必要がある。このことから、使用限界状態について検討することとした。照査性能としては、限界ひび割れ幅を設定した。限界ひび割れ幅は、トンネルの覆工コンクリートの限界状態設計法⁴⁾を参考にし、0.25mmとした。

設計は、前述したように、FEM 弾性解析から各要素の応力を求め、図-3 に示すように断面図心回りの軸力 N、曲げモーメント M、せん断力 Q を求め、引張力を算出する。次にこの引張力作用時に限界ひび割れ幅以下となるような SFRC の配合を施工性も考慮して決定する。図-4 にフィルダム監査廊に SFRC を使用する場合の設計方法のフロー図を示す。

3.3 設計上の課題

(1) SFRC の強度特性

SFRC は、無筋コンクリートと比較して強度特性が優れているのは明らかであるが、鋼繊維（以下 SF と称す）を混入するコンクリートの配合、SF の形状寸法、混入量により力学特性が変動するので、十分な検討が必要である。

(2) SFRC の寸法効果

SFRC を含むプレーンコンクリートの曲げ強度は材料寸法の影響が大きいと指摘⁵⁾されており、フィルダム監査廊設計時に仮定する梁部材は梁高が 1m 程度なので、SFRC 部材の寸法の影響を考慮した引張力を算出する必要がある。寸法効果は、15cm 角曲げ供試体から算出した引張強度に対して試験修正係数 k_{if} を乗じて評価する。

4. SFRC の強度特性

4.1 SF の混入率と強度関係

フィルダム監査廊のコンクリートの粗骨材最大寸法が、 $G_{max}=40\text{mm}$ の場合、SF は、粗骨材最大寸法の $3/2$ 以上、 $\ell=60\text{mm}$ 必要である⁶⁾。そこで、繊維長 $\ell=60\text{mm}$ 、両端フック付結束型の SF の混入率と強度の関係を

求めた。混入率は、0.5~1.0vol% の 5 水準とし、混入後のスランプがそれぞれ 10cm 程度になるように $W/C=60\%$ 、 $s/a=58\%$ とした。表-2 に配合とフレッシュ性状、図-5 に強度特性を示す。なお、ひび割れ幅 0.25mm の時の引張強度は、式(1)で求めた⁴⁾。

$$f_{if} = 0.43 \frac{Pl}{h^2 b} \quad (1)$$

表-2 配合とフレッシュ性状

混入率 vol%	単位量 (kg/m ³)						スランプ ^a cm	空気量 %
	SF	W	C	S	G	Ad		
0.50	40	178	297	1022	754	1.11	13.0	6.2
0.625	50			1020	753		13.5	6.7
0.75	60			1018	752		10.5	6.6
0.875	70			1018	749		12.5	6.8
1.00	80			1015	749		9.5	7.2

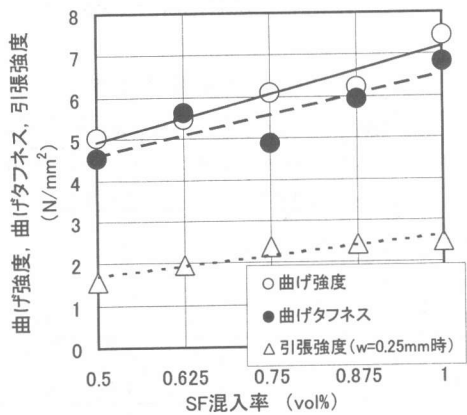


図-5 曲げ強度特性 (SF: $\phi 0.8 \times 60\text{mm}$)

4.2 寸法効果の実験および解析的検討

(1) SFRC 梁の曲げ試験

SFRC の寸法効果算出のために、SF 混入率 0.75vol% で梁高の異なる試験体を用い曲げ強度試験を実施した。梁高は、15cm、50cm、100cm の 3 種類とし、荷重方法は図-6 に示す三等分荷重とした。

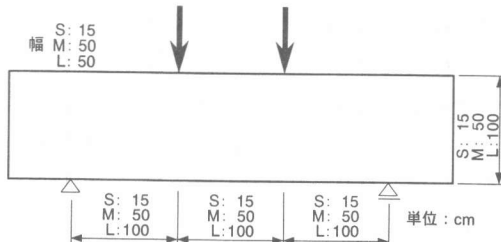


図-6 SFRC 梁の曲げ試験

試験結果を表-3 に示す。表中の値は実施した材齢が異なるため 15cm 角曲げ供試体の強度を基準として式(2)で補正した。各試験体のばらつきが大きいので明言は出来ないが、15cm 角曲げ供試体と梁高 100cm の試験体のひび割れ幅 0.25mm での曲げ強度比は、0.65~0.96 である。

$$\sigma_m = \sigma_{mexp} \times (\sigma'_{ccexp} / 27.5)^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 σ_{mexp} : 試験材齢時の曲げ強度

σ'_{ccexp} : 試験材齢時の圧縮強度

表-3 SFRC 梁の曲げ試験結果

CASE	圧縮強度 σ'_{ccexp} (N/mm ²)	曲げ強度 σ_m (N/mm ²)	*1) 応力比	ひび割れ幅 0.25mm	
				曲げ応力 (N/mm ²)	*1)応力比
S-1	27.5	5.7	1.10	5.1	1.09
S-2	27.5	5.9	1.13	5.7	1.21
S-3	27.5	4.0	0.77	3.5	0.74
平均	27.5	5.2	1.00	4.7	1.00
M-1	23.8	6.5	1.25	4.6	0.98
M-2	24.6	5.2	1.00	4.4	0.94
M-3	24.6	2.9	0.56	2.9	0.62
M-4	25.7	4.5	0.87	4.0	0.85
平均	24.7	4.8	0.92	3.9	0.83
L-1	23.8	5.2	1.00	4.6	0.98
L-2	25.7	3.3	0.63	3.1	0.66
平均	24.7	4.3	0.83	3.8	0.81

*1) 15×15×53cmの平均曲げ強度を基準として換算

(2) SFRC の引張軟化特性を考慮した解析

実施した梁高の異なる試験体の曲げ試験に対して FEM 解析を行った。解析に用いた 15cm 角曲げ供試体のメッシュ図を図-7 に示す。

等曲げ区間にはひび割れ要素 (10mm×10mm) を配置した。全ての要素の応力-ひずみ関係は Kupfer 則⁷⁾を使用し、ひび割れ発生基準はプレーンコンクリートの引張強度 (主応力判定時) とした。ひび割れは梁中央の要素のみに発生するとし、ひび割れ発生後は式(3)~(5)に示すような構成則を用いた。表-4 に解析に用いた SFRC の代表的な諸物性を示す。

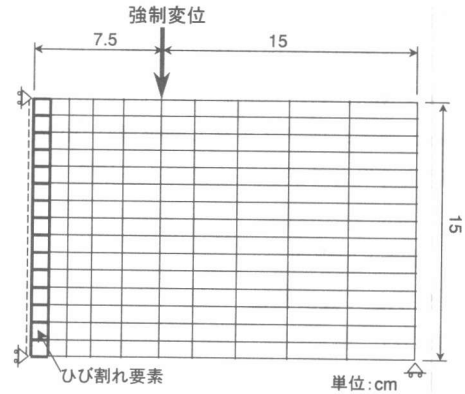


図-7 基準供試体の解析モデル

表-4 解析に用いた SFRC の諸物性

CASE	圧縮強度 σ'_c (N/mm ²)	ヤング率 E_c (kN/mm ²)	引張強度 *1) σ_t (N/mm ²)	基準残留応力 σ_{rt} (N/mm ²)
S	27.5	25.7	2.5	1.32
M	24.7	24.7	2.3	1.32
L	24.7	24.8	2.3	1.32

*1) 引張強度は、次式で求めた。0.269 σ'_c ^{2/3}(N/mm²)

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_{crack}} = \exp\{C \times (\epsilon_l - \epsilon_{crack})\} \quad (3)$$

$$C = \ln(R) / \epsilon_f \quad (4)$$

$$R = \sigma_{rt} / \sigma_t \quad (5)$$

ここで、 ϵ_{crack} : ひび割れ発生時のひずみ

ϵ_l : 現時点でのひずみ

ϵ_f : 基準ひずみ

σ_{crack} : ひび割れ発生応力

σ_{rt} : 基準ひずみにおける残留応力

引張軟化特性を定義するために、上式において基準供試体 S の実験結果に合うように ϵ_f

と σ_{ri} のパラメータスタディを行った。 $\varepsilon_f=0.25$ 、 $\sigma_{ri}=1.32\text{N/mm}^2$ とした場合の試験結果と解析結果の比較を図-8に示す。解析結果は、試験結果を若干過大評価しているが、SFRCの曲げ強度、曲げタフネスの傾向を評価している。寸法効果の影響はひび割れ要素の形状・寸法を基準供試体と同様に一辺10mmとし、各梁高の試験ケースに同一のひび割れ要素を配置することで考慮した。

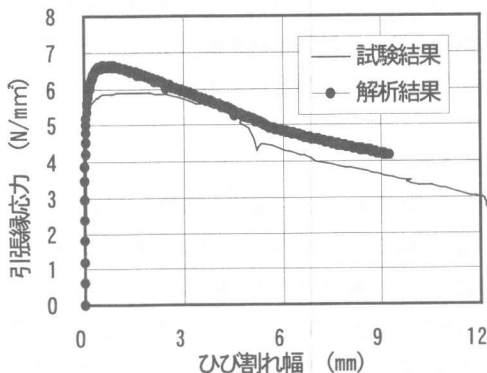


図-8 引張縁応力とひび割れ幅

(3) 試験結果と解析の比較

最大曲げ強度とひび割れ幅 0.25mm 時の試験結果と解析の比較を図-9に示す。試験値も解析値も限界ひび割れ幅時の寸法効果は大きくなっている。本解析は一部、試験結果を過大評価している部分があるが、おおむね寸

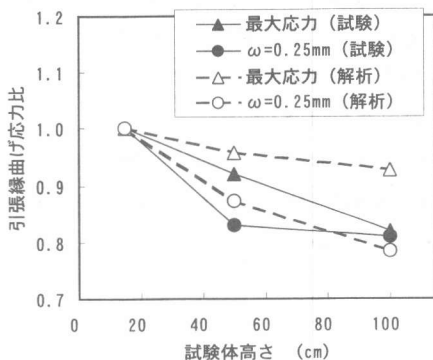


図-9 試験結果と解析値の比較

法効果を評価している考えられる。このことから、ひび割れ要素の寸法を同一とした解析モデルを用いることにより、SFRC梁の高さによる曲げ強度の寸法効果を評価することが可能であることが分かった。

5. 監査廊モデルの載荷試験

図-4に示した提案した設計方法に従い、フィルダムの監査廊の設計を試みた。フィルダムの堤高は100mとし、SFRCの安全係数として、材料係数 $\gamma_m=1.3$ 、部材係数 $\gamma_b=1.2$ 、構造物係数 $\gamma_i=1.1$ とした。寸法効果は梁の載荷試験結果を考慮し、安全側を採用するとして表-3中の曲げ強度比の小さい値0.66の少数点以下第二位を四捨五入した $k_{ef}=0.7$ とした。FEM弾性解析よりアーチ内空部において $f_i=0.8\text{N/mm}^2$ 、 $f_{ef} \geq f_i \cdot \gamma_m \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i / k_{ef} \geq 2.0\text{N/mm}^2$ であり、図-5よりSFの混入率を0.75vol%とした。また、インバート部は、引張り応力が大きく、SFの大量混入では経済性および施工性が悪くなることを考え、SFを用いず鉄筋コンクリート構造とした。検討した監査廊の構造を図-10に示す。

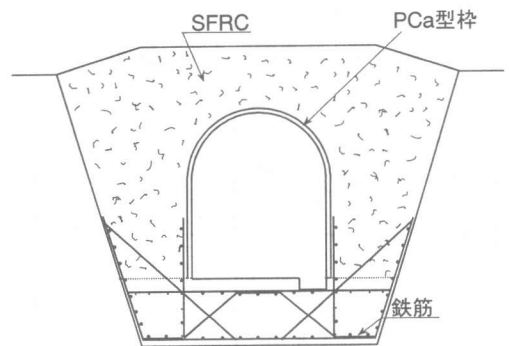


図-10 試設計したフィルダム監査廊

試設計した監査廊を1/2に縮小してモデル化した試験体の載荷試験を行った。載荷試験は、図-11に示すように基礎岩盤に掘り込まれて施工される監査廊の構造を考慮して側方

を拘束して行った。拘束力は、設計荷重が作用したときに、アーチ内空部の応力が、設計時に発生する応力とほぼ同じになるように設定した。図-12に鉛直荷重とひび割れ幅の関係を示す。なお、拘束は設計荷重 216tf までは、鉛直荷重の 0.3 倍、設計荷重以降は、 $216 \times 0.3 = 64.8\text{tf}$ で一定とした。図よりひび割れ幅が限界状態ひび割れ幅 0.25mm まで達するには、設計荷重の 3 倍程度の荷重が作用した時であった。このことから有限要素のモデル化や岩盤とコンクリートの境界条件、断面力の算出方法等について検討の余地があるものと考えられる。

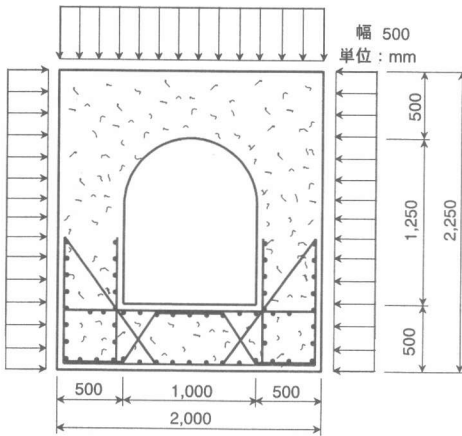


図-11 監査廊モデル試験体

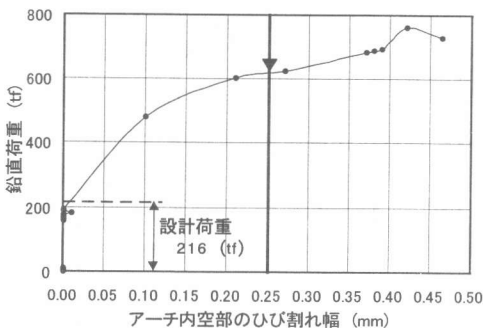


図-12 荷重とひび割れ幅の関係

6. まとめ

- 1) フィルダム監査廊の合理化施工を目的として検討されている SFRC の適用につい

て、設計手法の基本的な流れを提案した。

- 2) 引張軟化特性を適切に設定した、ひび割れ要素を用いた解析モデルにより、SFRC の曲げ特性および寸法効果を評価することが可能である。
- 3) 実構造物の載荷試験より、提案した設計フローにもとづいて設計した場合、十分に安全側の設計をすることが可能である。

尚、本報告の内容は、農林水産省と民間7社（前田建設、熊谷組、銭高組、飛鳥建設、日本国土開発、フジミ工研、前田製作所）とで進めている官民連携新技術研究開発事業の中の共同研究課題として実施したものである。

参考文献

- 1)ダム技術センター編纂：多目的ダムの建設設計編 I，(財)全国建設研修センター
- 2)例えば、永山功，真下和彦，稲留裕一，佐藤健一，赤坂雄司：宇奈月ダムにおける通廊のプレキャスト施工，コンクリート工学，vol.33，No.8，pp47-54，1995.8
- 3)横沢和夫，浅野勇，安中正実：フィルダム監査廊の合理化施工法に関する研究－フィルダム監査廊の設計・施工法について－，平成 10 年度農業土木学会講演会講演要旨集，pp388-389，1997.7
- 4)（社）鋼材倶楽部，SFRC 構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計・施工マニュアル（トンネル編），技報堂出版
- 5)（社）日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，1993.10
- 6)土木学会，鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983.3
- 7)H.B.Kupfer and K.H.Gerstle：Behavior of concrete under biaxial stress，Proc.of ASCE，EM4，pp853-866，1973