

(118) コンクリート・フェイシング型ロックフィルダムの耐震性について(その2)

(株)青木建設 ○狩谷典男 元山泰史
(財)大阪土質試験所 岩崎好規 田居優

1.はじめに・近年、コンクリートフェイシング型のロックフィルダムは、締固め工法の発達及び表面コンクリートスラブの設計法の改良などによって、堤体変形にともなうスラブのクラックを原因とする漏水などの問題が減少し、世界的に見直されている。一方、わが国において近代的なコンクリートフェイシングダム設計法、施工法の導入が遅れているのは、その大地震時の安全性に疑問があるためである。

コンクリートフェイシングダムの耐震性の検討要素としては、a)堤体の動的すべり安定性(一般に法面勾配が急であるため)、b)表面スラブの地震時の挙動があげられる。a)については、渡辺ら¹(1981)によって提案されている方法を基本とした動的応答解析にもとづき、その動的すべり安定性を検討した(狩谷ら²(1983))。本報告は、とくにb)について、表面スラブのはく離、滑動現象を含む地震時挙動を、ジョイント要素を導入した多点異入力非線型地震応答プログラム(プログラム7S-IV³を改良)により解析し、その結果から地震時安定性に検討を加えたものである。まず、実在のコンクリートフェイシング型ロックフィルダムの表面スラブの地震時挙動及び安全性について照査し、次に、入力加速度、表面スラブの剛性及び厚み、上流法面勾配をパラメトリックに変化させ、表面スラブの地震時挙動に与える影響を検討した。

2.Fダムの表面スラブの地震時安定性・Fダムは、高さ104m、上流勾配1:1.3、下流勾配1:1.4のコンクリートフェイシング型ロックフィルダムであり、表面スラブの厚さは30~60cmで水深にともなって厚くなっている。鉄筋量は上下、水平方向共に0.5%で中央に配筋されている。標準断面図を図-1に示した。入力地震波形としてはエル・セントロ(1940)のNS成分を用い、最大加速度を0.2gとした。

(1) 解析手順・表面スラブの地震時挙動の予備解析として、複素応答動的解析プログラム(FLUSH)により、堤体全体の地震時応答計算を行なった。この結果得られた上流法面での各節点加速度時刻歴を強制外力として、表面スラブを、ビーム・ジョイント系にモデル化したものに、多点入力を行って、その地震時挙動を検討した。FLUSH及び今回の7S-IVでの解析条件、有限要素図をまとめて、表-1及び図-2に示した。本解析において仮定したジョイント要素の構成関係を図-3に示す。垂直方向に関しては相対変位 ε_0 が正(はく離)の場合には力の伝達は行われず $\varepsilon_0 < 0$ (圧縮)の場合にはバネ定数knを介して線形関係にあるとする。またせん断方向に関しては発生しているせん断応力の絶対値 $|\tau|$ がせん断強度 $|\tau_f|$ に達すると滑動を生じ、それ以下ではバネ定数ksを介して線形関係であるとする。はく離が生じた場合には、せん断力も伝達されない。せん断強度 τ_f はモール・クーロンの降伏条件にしたがうものとして次式で与える。

$$\begin{aligned} \tau_f &= C_j - \sigma_n \tan \phi_j & \sigma_n &\leq 0 \text{ (圧縮)} \\ \tau_f &= 0 & \sigma_n &> 0 \text{ (はく離)} \end{aligned}$$

ここに、 C_j 、 ϕ_j はジョイント要素の粘着力、まさつ角であり、 σ_n は垂直応力である。本解析ではジョイント要素の強度定数として、 $C_j = 0.0tf/m^2$ 、 ϕ_j については 30° 、 10° 、 5° の3種類を想定した。

(2) 解析結果とその検討・表面スラブの地震時応答解析結果については、ジョイント要素でののはく離、滑動の時刻歴、はく離、滑動した累積時間及び表面スラブに発生するひずみ分布の形で記述した。図-4は、HWLでの、ジョイントのまさつ角 $\phi_j = 30^\circ$ としたときの各要素のはく離、滑動の時刻歴を示したものであり、図中→での表示は、滑動及び、その方向をあらわしている。 $\phi_j = 5^\circ \sim 30^\circ$ の3ケースの解析結果では、いずれの場合も、はく離現象は生じておらず、ロックフィル法面の振動モードにコンクリートスラブが追随した結果となった。また滑動の累計時間を各ジョイント要素に対して示したものが、図-5であるが、すべての要素が同時間にかつ同方向に滑動するようなスライドは生じていない。

表面スラブに発生する軸ひずみ分布を各時間で示したものが図-6の一連の図であり、 $\phi_j = 30^\circ$ 、HWL

の解析結果を示した。図中滑動した部分に矢印を示している。t=2.3sec付近で圧縮ひずみの最大値がほぼ中央の位置に生じ、t=2.75sec程度で引張ひずみの最大値がほぼ同じ位置で生じている。これらの時刻では図中にも示しているように上部9要素が同時に同じ方向で滑動が生じている。したがって、上部の表面スラブが、ずり落ちるまたはずり上がる力を下部のコンクリートスラブが受けもった結果に対応している。つぎに表面スラブの最大軸ひずみの分布を示したものが、図-7である。図中には強制加速度として入力したときのロックフィル堤体法面の法面方向ひずみの最大値の分布を合せて示している。

ジョイント部の ϕ_j が大きい程、大きな軸ひずみが発生している。これは表面スラブとロックフィル法面の間のまさつ抵抗が十分大きいとき、表面スラブはロックフィル法面の運動に拘束され、ロックフィル法面と同じひずみを受けることになり、一方まさつ抵抗が小さい場合には滑動現象にともない、表面スラブに伝達される軸ひずみが急激に減少していることを示している。そこで、 ϕ_j に対して、発生する最大軸ひずみを示したものが図-8である。圧縮側で 6.0×10^{-4} 、引張側で 4.5×10^{-4} の結果となっている。表面スラブが受ける軸ひずみは以上の振動成分とともに、湛水時にうけるであろうひずみも評価する必要がある。そこで、実測値の側からみると、Pダムとほぼ同一のダムでの湛水時表面スラブの軸ひずみは圧縮側で $1.0 \sim 2.5 \times 10^{-4}$ 程度のものが、ほぼ中央部で実測されている。そこで、ジョイント要素を用いた静解析を実施した。そして湛水時の軸ひずみを加えた合ひずみとして示したものが図-8の破線であり、圧縮側で最大($\phi_j = 30^\circ$) 5.0×10^{-4} 、引張側で最大($\phi_j = 30^\circ$) 2.0×10^{-4} となり、コンクリートの破壊ひずみを引張側で 2.0×10^{-4} 、圧縮側で 2.0×10^{-3} と考えれば、 $\phi_j = 30^\circ$ で引張側で安全率1.0、圧縮側で十分安全な結果となろう。また、ジョイント部の残留強度の低下を考慮することより安全側の結果となる。次に、曲げモーメントについては、HWL、 $\phi_j = 30^\circ$ の場合で、最大曲げモーメント 0.37 tf/m^2 で、きわめて小さな値が得られている。計算すると曲げひずみは軸ひずみに比較して無視しうる値となっている。LWLの場合についても同様の検討を行なっている。同様にいずれのケースもはく離は生じておらず、またすべてのジョイント要素が同時にかつ同方向に滑動するようなスライドは生じていない。発生しうる表面スラブの軸ひずみは圧縮側で 2.8×10^{-4} 、引張側で 2.0×10^{-4} 、 $\phi_j = 30^\circ$ となり、水位面下 $1/2 \sim 1/3$ の位置に生じている。

3. 入力加速度振幅、表面スラブ厚および上流法面勾配の影響・・接触面の強度定数を $C_j = 0.0 \text{ tf/m}^2$ 、 $\phi_j = 30^\circ$ 基盤入力加速度を 0.2g から 0.8g まで変化させた。0.6g程度の基盤入力加速度で法面上部 $1/5$ 以上の部分ではく離が生じた。図-9には入力 0.6g に対する表面スラブのはく離、滑動の時刻歴を示した。図中Xの表示は、はく離の生じた時間を示している。また、図-10には、各入力に対する、滑動、はく離の累積時間を示している。入力加速度と表面スラブの最大ひずみの関係を図-11に示しているが、最大軸ひずみは、 0.4g 以上に対しては頭打ち傾向になっている。コンクリートスラブ厚を一定の 30cm 、 60cm 、 100cm の3通りに変化させ地震時に発生する最大軸ひずみをみたものが図-12であるが、通常施工での厚さ 30cm に対して、厚さ 100cm では、約70%程度の軸ひずみ量となっている。上流法面勾配を $1:1.3 \sim 1:1.9$ まで4通り変化させ表面スラブの最大軸ひずみをみたものが、図-13である。 $C_j = 0.0 \text{ tf/m}^2$ 、 $\phi_j = 30^\circ$ とした結果であるが、いずれもはく離が生じておらず、滑動の累計時間もほぼ同様のものとなった。また、法面勾配による最大軸ひずみの変化には、顕著な傾向は見られない。

4. おわりに・・本報告において、はく離と滑動を考慮した非線形地震応答解析により、コンクリートフェイシング型ロックフィルダムの表面スラブの動的挙動を検討したが、これより、得られた結果は次の通りである。

(1) 実在のコンクリートフェイシング型ロックフィルダムの設計仕様にもとづき、表面スラブの地震時挙動を検討したが、 0.4g の加速度に対しても、はく離現象はまったく生じておらず、滑動現象についてもマクロなスライドは生じていない。

(2) 表面スラブに発生するひずみのうち曲げモーメントによるひずみは十分小さく、問題とならない。

(3) 表面スラブの最大軸ひずみは、接触面での摩擦強度に大きく依存しており、静的な湛水時の軸ひずみも評価して、圧縮側で 5.0×10^{-4} 、引張側で 2.0×10^{-4} の軸ひずみが生じた。 $(\phi_j = 30^\circ)$ 、 ϕ_j の残留強度を考慮するために、 $\phi_j = 5^\circ$ とすると、圧縮側で 3.0×10^{-4} 、引張側で 0.5×10^{-4} 程度となる。また発生する最大軸ひずみは、水位の1/2~1/3の位置である。

(4) 入力加速度の強度について、0.2gでの最大軸ひずみに対して、0.4gからは頭打ちの状態となり、約1.6倍のものが計算された。また、0.6gより法面1/5以上の所ではく離現象が生じた。

(5) 表面スラブの厚さについて、通常施工の30cmに対して100cmのモデルでは、最大軸ひずみは70%に減少した。

(6) 上流法面勾配を1:1.3~1:1.9まで変化させて、その結果を比較したが、はく離、滑動および表面スラブの最大軸ひずみなどに顕著な差は生じていない。

5. 謝辞。 本解析プログラム7S-IVの使用及び結果にたいして全般的な指導を戴きました京都大学防災研究所 土岐教授に感謝いたします。

6. 参考文献 渡辺ら(1981),フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察,大ダム, No. 97. 狩谷ら(1983),コンクリートフェイス型ロックフィルダムの耐震性について,第16回地震工学研究発表会 土岐ら(1982),地盤-構造物系の非線形地震応答解析,土木学会論文報告集,第317号

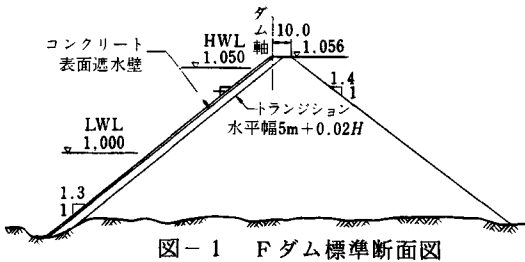
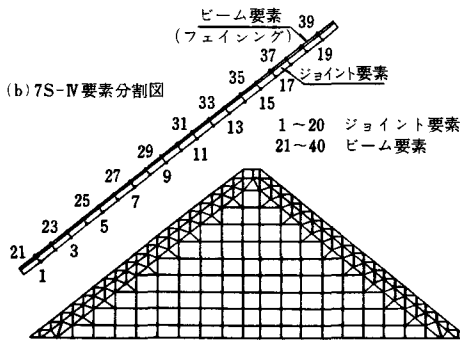


図-1 Fダム標準断面図



(a)FLUSH要素分割図
図-2 有限要素図

表-1 解析条件

F L U S H			
単位体積重量 γ (tf/m ³)	2.0		
動的せん断定数 G (tf/m ²)	$440 \times \frac{2.97 - e^{12}}{1 + e} \times \frac{1.56 \times 10^{-3}}{1.56 \times 10^{-3} + \gamma} \times (\sigma_m)^{0.55}$		
ポアソン比 ν	$0.375 - 0.006 \times Z^{0.58}$		
減衰定数 h	$0.23 \times \frac{\gamma}{\gamma + 1.56 \times 10^{-3}} + 0.05$		
間げき比 e	0.35		
γ : せん断ひずみ σ_m , 平均主応力 Z : 土被り			
7 S - IV			
鉛直バネ定数 k_v (tf/m ³)	1.0 $\times 10^6$	単位体積重量 γ (tf/m ³)	2.35
せん断バネ定数 k_s (tf/m ³)	3.0 $\times 10^5$	ヤング率 E (tf/m ²)	2.55 $\times 10^6$
粘着力 C_s (tf/m ²)	0.0	表面スラブ厚さ (m)	0.3~0.6
まさつ角 ϕ (度)	Case1	5	減衰定数 h
	Case2	10	
	Case3	30	

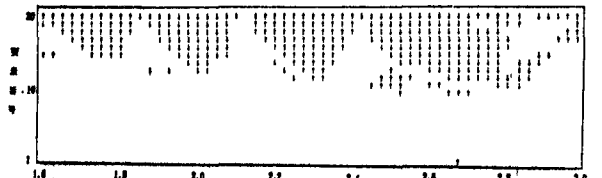


図-4 はく離、滑動の時刻歴 (入力 0.2g)

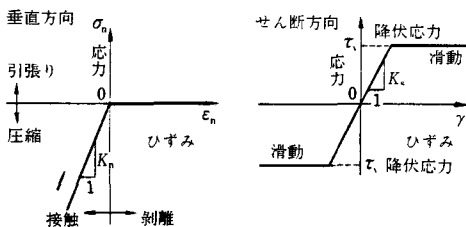


図-3 構成関係

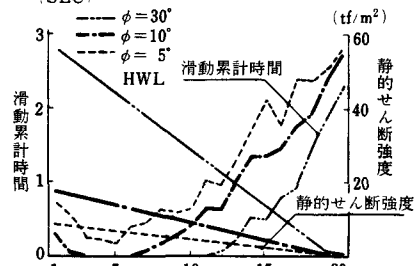


図-5 はく離、滑動の累計時間

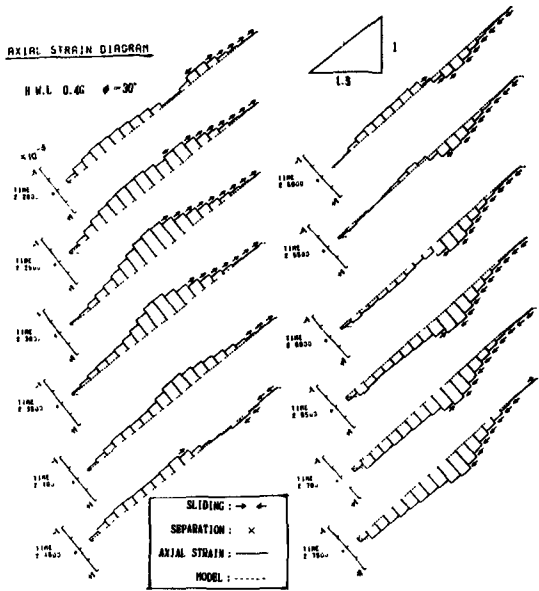


図-6 表面スラブの軸ひずみ分布の時間変化

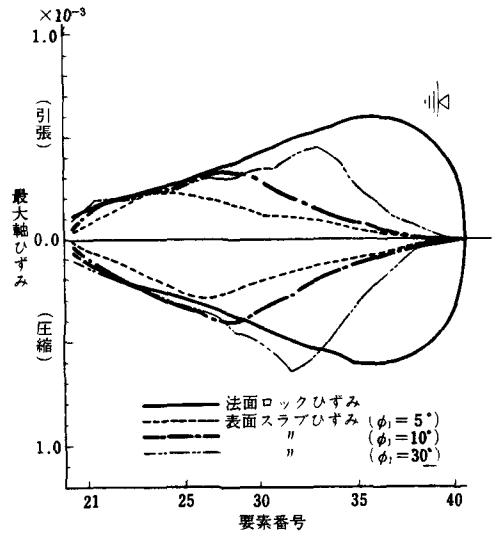


図-7 表面スラブの最大軸ひずみ分布

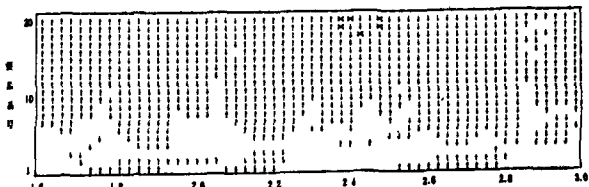


図-9 はく離、滑動の時刻歴 (入力 0.6g)

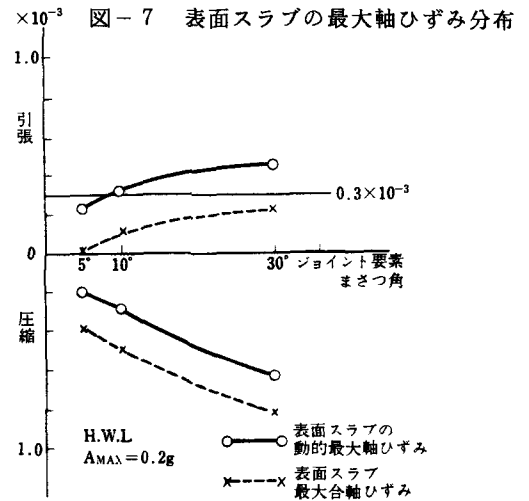


図-8 最大軸ひずみ

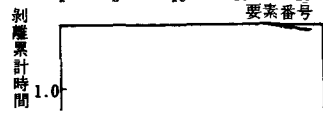
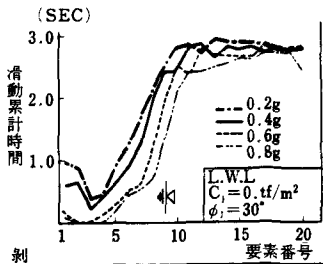


図-10 はく離、滑動の累計時間

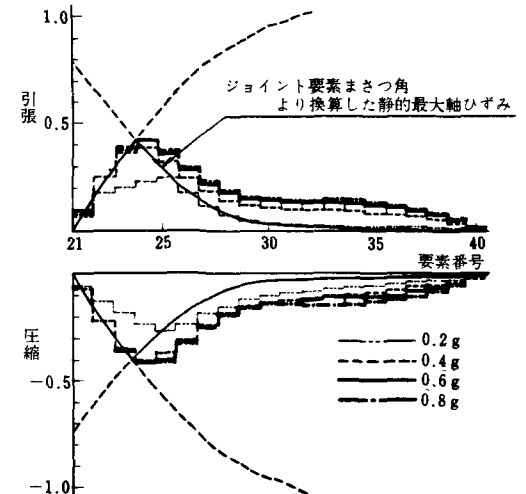


図-11 入力加速度と表面スラブの最大ひずみ

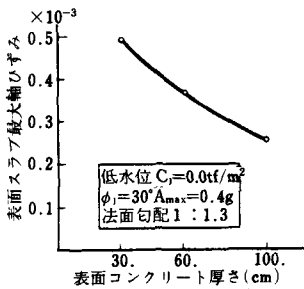


図-12 スラブ厚と表面最大ひずみ

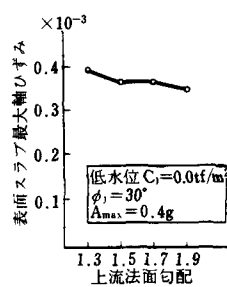


図-13 上流法面勾配と表面最大ひずみ