

# (155) コンクリート表面遮水壁ロックフィルダム地震応答特性

日本大学生産工学部 田村 重四郎  
大連理工大学 孔 憲京  
東京大学生産技術研究所 小長井 一男

## 1・まえがき

1960年代後半から、コンクリート表面遮水壁型式のロックフィルダムの堤体の施工が従来のダンプ、射水による締固めから振動ローラーによる転圧へと変わり、これに伴い完成後の堤体の沈下も従来の1~3%程度から大幅に減少し、0.1%程度にすることが可能になってきた。更に、スライディングフォームを用いて連続的に鉄筋コンクリートを打設する工法も開発され、表面遮水壁の設計方法の改良などが行われて、堤体変形に伴う表面遮水壁のクラックを原因とする漏水を減少させる結果となり、再びこの型式のダムが築造される様になった。しかしながら、今まで、この型式のダムの設計・施工法は経験工学的色彩が強く、特にその耐震性の評価方法はまだ確立されていない様に思われる。地震活動の活発な地域では、その耐震性は中央心壁型ロックフィルダムの場合に較べて、さらに重要である。最近激しい地震動を受けたフィルダムで堤体の沈下が発生しているからである。一方、それ程激しい地震動を受けることが予想されない場合、経済性と施工性に優れた型式であると考えられる。この種類のダムの地震時挙動についての研究は極めて少ない。本論文では、耐震性の解明のため、有限要素法を用いて、コンクリート表面遮水壁がロックフィル堤体の地震応答特性に与える影響について検討したので報告する。

## 2・解析手法

表面遮水壁のロックフィルダムとこれと同形で表面遮水壁を無視したロックフィルダムについて、等価線形を仮定して二次元有限要素法を用いて応答解析を行なった。運動方程式中の質量マトリックスは集中質量とし、湛水の場合には動水圧を附加質量であらわした。レーリー減衰  $C = \alpha (M) + \beta (K)$  とし、積分には Wilson の  $\theta$  法 ( $\theta = 1.4$ ) を採用した。フィル本体の要素の初期せん断剛性は、現地弾性波実験から求めた経験式<sup>[1-2]</sup> (1) を用いて算定した。解析に採用したせん断剛性及び減衰率のせん断ひずみ依存性は、国生ら、Seedら提案した範囲の平均値 (図-1)<sup>[2]</sup> を使用した。

$$\text{湛水前 } V_s = 165 \sigma_v^{0.306} \quad (\text{tf/m}^2)$$

$$\text{湛水後 } V_s = 154 \sigma_v^{0.344} \quad (\text{tf/m}^2) \quad G_0 = \rho V_s^2 \quad (\text{tf/m}^2) \quad (1)$$

ここに、 $\rho$  : 密度、 $\sigma_v$  : 上載圧、 $V_s$  : せん断波の伝播速度である。

コンクリート表面遮水壁の厚さは  $T = 0.3 + 0.003H$  ( $H$  : 堤頂からの鉛直距離 m) とした。また、遮水壁の変形係数は堤体よりはるかに大きいので、弾性ビーム要素で表現し、遮水壁と堤体との不連続面において地震時の相対的滑動及び瞬間剥離の生じる可能性が考えられるため、ジョイント要素を用いた。試験結果<sup>[3]</sup>によれば、コンクリート表面遮水壁と堤体との接触面で、せん断応力と相対変位は次の双曲線モデルで表わすことができる。

$$\frac{K_s}{K_{smax}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{smax}}{\tau_f} U_r} \quad (2)$$

式中、 $U_r$  は接触面の相対変位、 $K_{smax}$ 、 $\tau_f$  は各々最大せん断バネ定数とせん断強度で、次の式で求めている。

$$K_{smax} = 11 \times 10^3 \sigma_n^{0.7} \quad (\text{tf/m}^3) \quad (3)$$

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan \phi \quad (\text{tf/m}^2) \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_n$  は接触面に作用する動的垂直応力、 $\phi$  は接触面での摩擦角である。但し、接触面に鉛直方向の相対変位  $\epsilon_n$  が負値 (剥離) の場合にはせん断力は伝達せず、また接触面に発生しているせん断応力の絶対値  $|\tau|$  がせん断強度  $|\tau_f|$  を達した場合滑動を生じ、残留せん断バネ定数  $K_{s,ur}$  を  $K_{smax} \times 0.02$  にし

た。

### 3. 計算条件

解析に用いたダムモデルは、高さ100m、天端幅10m、上、下流勾配1:1.4、表面遮水壁の厚さは天端の0.3から天端からの深さに伴って直線的に増し、100mで0.6mになっている。計算に用いた材料の諸元は表-1の通りである。

地震動はエル・セントロ(1940)のNS成分で、最大加速度を0.2gに調整し、主要部分8秒間を入力した。入力加速度波形とその応答スペクトルは図-2に示してある。

### 3. 計算結果とその考察

#### 3.1 固有振動特性に及ぼすコンクリート表面遮水壁の影響

図-3はダムの一次固有振動数の入力後の時間的変化を示したものである。ここに、△印が表面遮水壁の剛性と質量を無視した場合であり、○印の線が表面遮水壁がある場合である。この結果より、表面遮水壁が薄いにもかかわらず、ダムの基本振動数を増加させることが分かった。本計算での高さ100mの表面遮水壁ダムの初期固有振動数は表面遮水壁がない場合に比べて3%増え、6秒時点の増加率は約10%である。低次の振動モードは全般的に見て、大体類似している。

#### 3.2 堤体の動的応答に及ぼす表面遮水壁の影響

堤体の最大応答加速度分布が図-4に示してある。この図には、表面遮水壁のある場合とこれを無視した場合の分布をそれぞれ太い実線、細い実線で示してある。その差は断面の位置により異なる。即ち、上流法面では頂部約20%の部分で、表面遮水壁の存在により加速度が減少し、断面中央及び下流面では、頂部約10%の部分で減少するが、頂部より10-60%の部分では逆に増加している。同様に、最大せん断応力 $\tau_{xy}$ 分布は図-5に示してある。この図より、遮水壁により、堤体下部で僅かに増すことが分かった。

#### 3.3 湛水前と湛水後の計算結果の比較

湛水前の基本振動数(□印)と湛水後のその増加率(●印)の入力地震動の時刻に伴う変化を図-6に示す。計算の結果、湛水後の表面遮水壁ダムの固有振動数は湛水前のそれより増加し、初期固有振動数は約5%を増加した。それは、表面遮水壁に作用する水圧荷重により、堤体内特に上流側の応力が増し、それにより、せん断速度 $V_s$ が増えたことによるものと見られる。湛水後の堤体の最大応答加速度は上流法面のみで変わり、堤体内の最大せん断応力 $\tau_{xy}$ は堤体下部ほど大きくなることが分かる。エル・セントロ地震波を入力する場合、堤体の最大変位の時刻が2.3秒と2.6秒であり、その変位分布と主応力分布は図-7に示してある。図より、湛水前後の堤体の変位と主応力の分布は類似しているが、上流法面の変位と主応力の大きさのみがやや違っていることが分かる。図-8は、遮水壁のひずみ分布で、太い線は湛水前、細い線は湛水後を示す。また、○を付けたのはせん断バネ定数を一定値として計算した湛水前のひずみ分布である。図より、湛水により圧縮ひずみがかなり増し、引張りひずみがそれほど増えていないことが分かる。又、せん断バネ定数 $K_s$ 一定で計算しているが、堤体の加速度、変位及びせん断応力などは余り変わらず、表面遮水壁のひずみは大幅に変化している。

### 4. まとめ

本報告においては、遮水壁とロック部との間の不連続面にジョイント要素を設定して、表面遮水壁ダムの非線型地震応答解析を行ない、その振動性状について考察し、次のことが分かった。

(1) . コンクリート表面遮水壁の厚さが薄いにも拘らず、その力学的性質がロックフィル部分と著しく異なっているため、堤体の固有振動数および地震応答(特に上流側)に無視できない影響をあたえる。

(2) . 堤体との不連続面にジョイント要素を用いた場合、せん断バネ定数 $K_s$ の値が表面遮水壁のひずみに影響を与えるから適切な $K_s$ を選ぶ必要がある。

#### 参考文献

- 1) 田村重四郎ら、中国関門山ダムの動特性に関する現地試験, 大ダム, NO. 129, 1989. 9
- 2) 田村重四郎ら、中国関門山ダム築堤に伴う動特性と堤体の物性値の変化について, 大ダム, (投稿中)
- 3) 表村ら、フィルター材とコンクリート接触面のせん断試験研究, 中国河海大学, 1988. 12

表-1 材料の結元

ロックフィル	単位体積重量 $\gamma$ : 2.1 (tf/m <sup>3</sup> ) ポアソン比 $\nu$ : 0.3 初期せん断剛性 $G_0$ : 式(1)による。 ひずみ依存性 : 図-1
コンクリート 表面遮水壁	単位体積重量 $\gamma$ : 2.4 (tf/m <sup>3</sup> ) ポアソン比 $\nu$ : 0.166 ヤング率 $E$ : $3.0 \times 10^4$ (tf/m <sup>2</sup> ) 減衰定数 $h$ : 0.05
表面遮水壁と 堤体の接触面	摩擦角 $\phi$ : 39.0° 粘着力 $c$ : 0 鉛直バネ定数 $K_v$ : $1.0 \times 10^6$ (tf/m <sup>3</sup> ) せん断バネ定数 $K_s$ : 式(2) ~ (4)

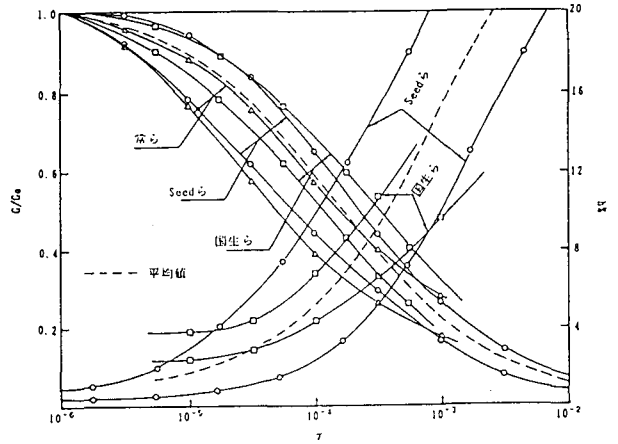


図-1 せん断剛性比、履歴減衰定数とせん断ひずみの関係

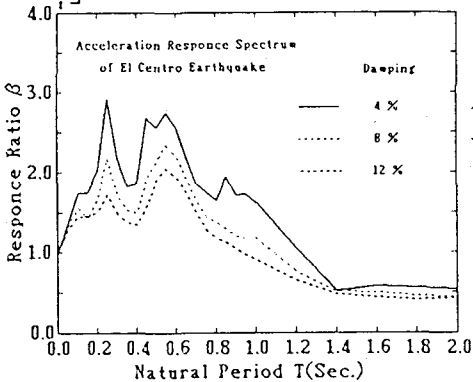
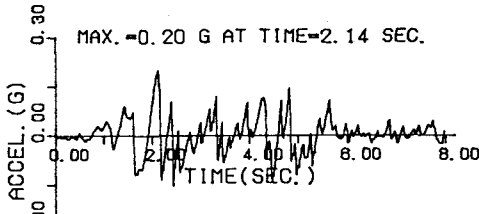


図-2 入力加速度波形とそのスペクトル

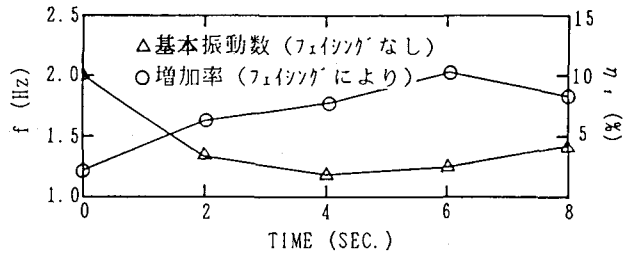


図-3 基本振動数とその増加率の時間的变化

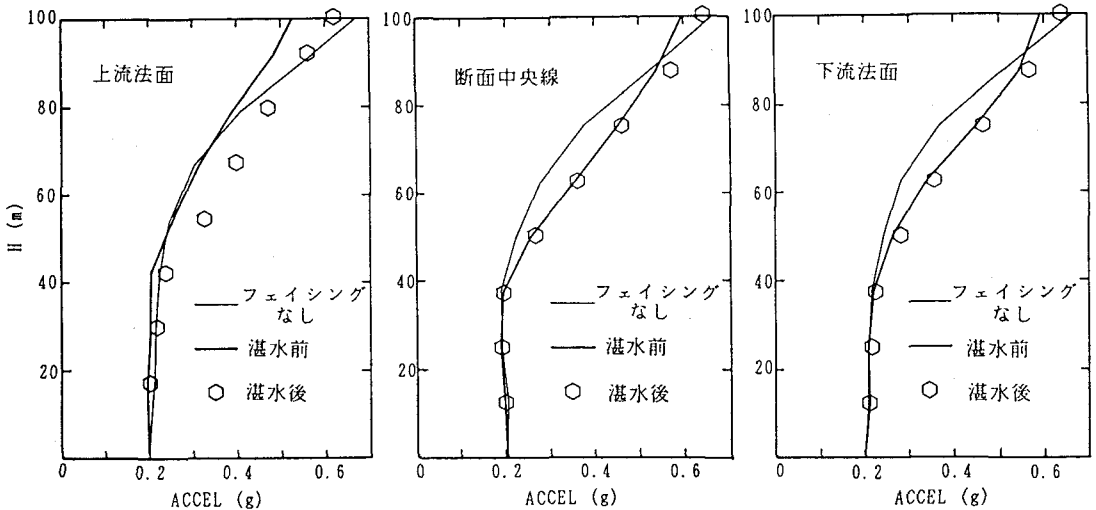


図-4 最大加速度分布

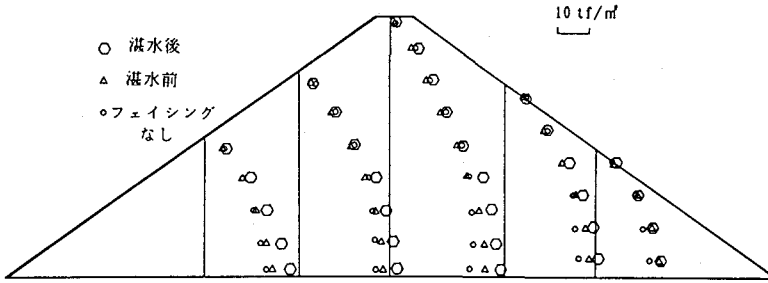


図-5 断面内の最大せん断応力  $\tau_{xy}$  分布

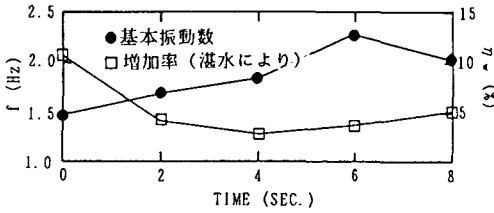
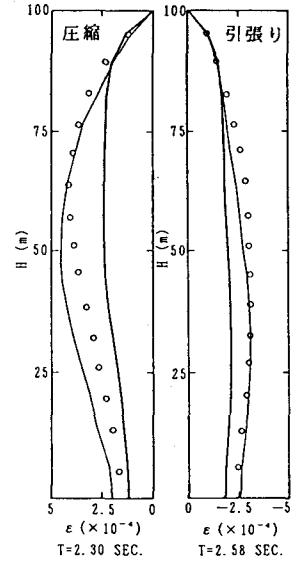
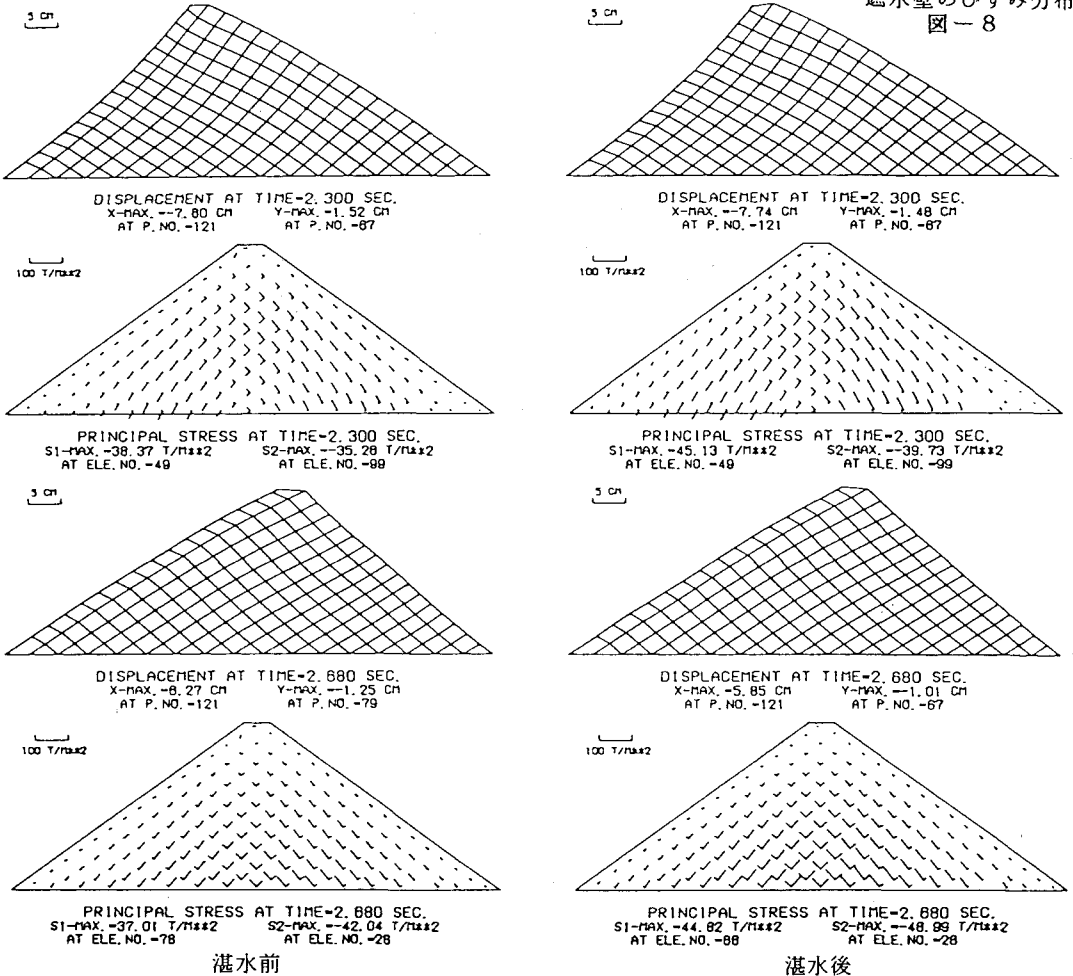


図-6 基本振動数とその増加率の時間的变化



遮水壁のひずみ分布  
図-8



浸水前

浸水後

図-7 堤体変位と主応力の比較