

材料物性のばらつきを考慮した台形 CSG ダムの大規模地震時応答解析

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○土田 将己, 金銅 将史, 榎村 康史

1. はじめに

ダム建設に対して一層の合理化が求められるなか、経済性や環境に配慮した新型式のダムである台形CSGダムの採用事例が増加している。台形CSGダムは、現地得手近に得られる砂礫などにセメントと水を混合したCSG(Cemented Sand and Gravel)を堤体材料とし、断面形状を台形としたダムで、その設計手法の特徴として、以下のことが挙げられる。

- ①材料 (CSG) の物性 (強度) のばらつきを一定の粒度や単位水量の幅の中で許容すること
- ②堤体断面形状や CSG の配合 (単位セメント量, 単位水量の許容範囲) は、地震応答解析を含む FEM 解析で得られる CSG の必要強度をもとに決定されること

一方、大規模地震に対する構造物の耐震性への社会的関心の高まりから、ダムにおいても各サイトで考えられる最大級の地震動を考慮した耐震性能照査²⁾が試みられている。しかし、照査解析において、①の特徴を合理的に考慮する方法は十分検討されていない。そこで、本報では、CSG の物性のばらつきが大規模地震時の台形CSGダムの応答に及ぼす影響をモンテカルロ法による地震応答解析によって定量的に考察した。

2. 解析方法

2.1 解析条件

本検討の解析モデル (堤体横断面形状を基礎岩盤とともに 2 次元有限要素でモデル化し、ダム本体の内部構造を考慮したモデル) 形状を図-1に示す。

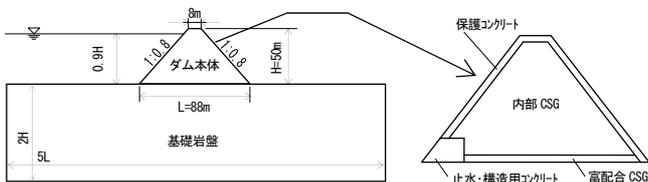


図-1 解析モデル形状

物性のばらつきを考慮する対象は、堤体の大部分を占める内部 CSG とした。なお、CSG の圧縮強度と弾性係数には線形関係がある³⁾ことを用いて、解析上は内部 CSG の弾性係数にばらつき (正規分布を仮定) を与えることとした。

ばらつきの大きさは、実ダムでの品質管理試験結果を

キーワード 台形 CSG ダム, 耐震性能照査, モンテカルロ法

連絡先

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人土木研究所 水工構造物チーム TEL029-879-6781

参考に、圧縮強度の変動係数が 10% 及び 20% となるケースを考えることとした。すなわち、実ダムの設計・施工例⁴⁾を参考に弾性係数の平均値を $2,000\text{N/mm}^2$ とし、既往の実験結果³⁾による(1)式の関係性を考慮し、圧縮強度の変動係数が上述の値となるよう、弾性係数の変動係数を 6.4% 及び 12.8% に設定した。

$$E_c = \{0.18 + (f'_c - 4.0) / 37\} \times 10000 \quad (1)$$

ここに、 E_c : CSG の弾性係数 $[\text{N/mm}^2]$

f'_c : CSG の圧縮強度 (t° - q 強度) $[\text{N/mm}^2]$ ($3 \leq f'_c \leq 6$)

なお、比較のため、ばらつきを考慮しないケースも設定した。以上の解析ケースを表-1に示す。その他の物性値は各ケースとも表-2に示すとおりとした。

表-1 解析ケース

| 弾性係数 (内部 CSG) | ケース0 | ケース1 | ケース2 |
|------------------|-----------------------|-------|------|
| | 平均値 (N/mm^2) | 2,000 | |
| 変動係数 (%) | 0 | 6.4 | 12.8 |

表-2 解析物性値 (各ケース共通)

| モデル | 単位体積重量 (N/m^3) | 弾性係数 E_c (N/mm^2) | ポアソン比 |
|------|-------------------------|------------------------------|-------|
| 堤体 | 内部 CSG | (表-1) | 0.25 |
| | 富配合 CSG | 22,540 | 0.25 |
| | コンクリート | 22,540 | 0.20 |
| 基礎岩盤 | 22,540 | 2,000 | 0.30 |

2.2 解析手順

解析手順を図-2に示す。解析モデルへの物性値の割当ては、表-1の条件で図-3に示す正規分布に従うよう、ランダムにばらつきを与えた弾性係数を内部 CSG 各 FEM 要素に割り当てることで行った。

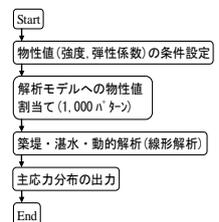


図-2 解析手順

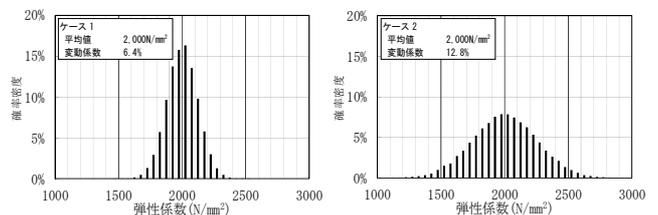


図-3 弾性係数の頻度分布

地震動は、解析モデルの堤体底面で図-4に示す波形となるよう引き戻した加速度波形を解析モデル底面から入力した。その周波数特性は、大規模地震に対するダムの耐震性能照査で規定される下限加速度応答スペクトル²⁾を3倍に引伸ばしたものに相当する。

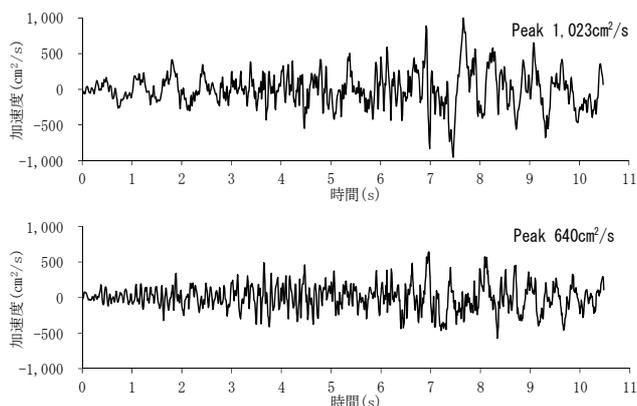


図-4 入力地震動

3. 解析結果

解析で得られた堤体内（内部 CSG）各要素の最大主応力 σ_1 の時刻歴最大値の 1,000 パターン中の最大値 σ_{1max} の分布を各解析ケースについて図-5に示す。図中には、各ケースとも応力が集中する止水・構造用コンクリート隅角部（着目要素①）のほか、比較のため堤体中央部（着目要素②）の σ_{1max} の値を示している。着目要素①、②ともに σ_{1max} はケース2が最大となっており、物性（弾性係数）のばらつきが大きいほど、発生応力が大きくなる可能性があることを示している。

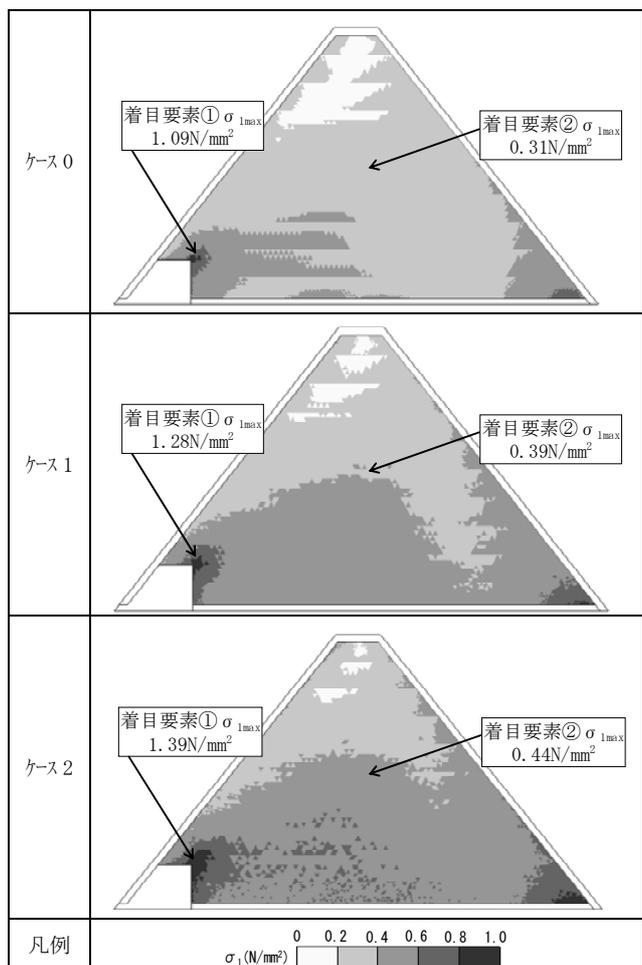


図-5 応力 σ_{1max} の分布（1,000 パターン中最大値）

着目要素①、②での σ_1 の時刻歴最大値（1,000 パターン分）の頻度分布と変動係数を図-6に示す。平均値は応力集中箇所である①の方が②より大きいですが、変動係数は着目要素①（ケース1,2でそれぞれ5.2%と10.3%）より着目要素②（同6.8%と13.5%）の方が大きな値となった。これは、物性値を一定とした止水・構造用コンクリートに隣接している着目要素①より、ばらつきを有するCSGに囲まれた着目要素②の方が、周囲の弾性係数のばらつきによる影響を受けやすいためと考えられる。

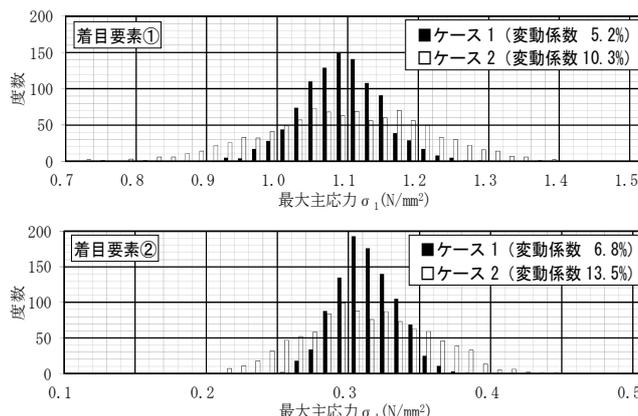


図-6 最大主応力の時刻歴最大値の頻度分布

4. まとめ

- ・ 台形 CSG ダムにおける大規模地震時の堤体発生応力は、CSG の物性のばらつきを考慮した場合、物性値を一定（平均値）とした場合より、ばらつきの大きさに応じては大きくなる可能性がある。
- ・ 物性値のばらつきの条件が同じ場合の大規模地震時の発生応力への影響は、堤体内部構造の影響を受け、物性値のばらつきが小さいコンクリート部周辺より、ばらつきを有する CSG 内部で大きくなる。

参考文献

- 1) 台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料，財団法人ダム技術センター，2012.6
- 2) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005.3
- 3) 金銅将史，佐々木隆，別府万寿博，CSG の引張強度・軟化特性とその載荷速度依存性，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.70, No.2, p.232-251, 2014.6
- 4) 台形 CSG ダム等の設計・施工事例，ダム技術 No. 216, p59, 2004.9