

台形 CSG ダムの地震時挙動に対する地震動強さ及び堤高の影響

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○中田 哲二、金銅 将史、榎村 康史、小堀 俊秀

1. はじめに

ダム事業において、経済性や環境配慮の面からダムサイト近傍で得られる河床砂礫などの礫質材料を簡易な設備を用いてセメント・水と混合して製造するCSG¹⁾(Cemented Sand and Gravel)を主な堤体材料とする新形式のダムである台形CSGダムの建設・計画事例が増えつつある。筆者らは、台形CSGダムの耐震性能照査手法を確立するため、大規模地震時における同型式ダムの損傷形態を含む動的挙動について地震応答解析による検討を行ってきた²⁾。本報では、今後、既往施工事例(堤高50m規模)よりも大規模な台形CSGダムが建設される場合も想定し、線形動的解析及び堤体材料の引張軟化を考慮した非線形動的解析により通常考えられる以上の極めて強い地震動を考慮した場合も含めて地震動強さやダム規模(堤高)の違いによる台形CSGダムの地震時挙動への影響について検討した。

2. 解析条件

解析モデルとして、堤高50m及び同100mの一般的な断面形状の台形CSGダム堤体、基礎岩盤及び貯水池をモデル化した。なお、台形CSGダムでは堤体の大部分を占めるCSGより強度が高い止水・構造コンクリートや保護コンクリートが上流側及び表面に配置され(図-1)、断面設計の応力解析は相対的に強度が低いCSGの物性値で代表させて行われるのが通常であるが、大規模地震時の動的挙動を精度よく推定することを目的とする本検討では、図-1に示す堤体内部構造(内部及び富配合CSGと止水・構造用コンクリート及び保護コンクリート)を考慮した解析モデルを用いた。

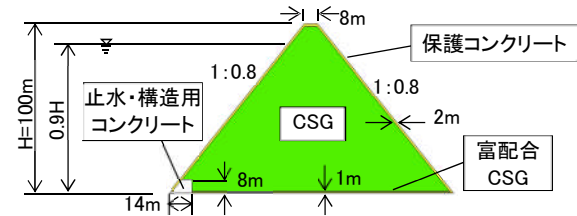


図-1 解析モデル形状の例(堤体部、堤高100m)

解析での物性値は、表-1に示す値とした。このうち、内部CSGの弾性係数と弾性領域強度(圧縮強度試験で得られる応力-ひずみ関係における弾性領域の最大応

力)は、堤高50mでは既往施工事例、堤高100mでは計画中の検討事例を参考に設定した。富配合CSGは、内部CSGの圧縮強度(ピーク強度)に対する富配合CSGの同強度の比を、既往施工事例や両配合を想定した供試体試験結果³⁾を参考に設定した。コンクリートは圧縮強度を24N/mm²とし、引張強度はその1/10とした。

表-1 物性値一覧

	堤高50m		堤高100m		両モデル共通	
	内部CSG	富配合CSG	内部CSG	富配合CSG	コンクリート	岩盤
弾性領域強度 (N/mm ²)	3.5	—	6.0	—	—	—
圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	5.0	7.0	9.0	12.0	24.0	—
引張強度 f_t (N/mm ²)	0.5	0.7	0.9	1.2	2.4	—
弾性係数 (N/mm ²)	2,000	3,000	5,000	7,000	25,000	2,000
単位体積重量 (kN/m ³)	22.54	22.54	22.54	22.54	22.54	22.54
ポアソン比	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.30
破壊エネルギー G_F (N/m)	70	90	100	130	200	—

非線形動的解析で引張軟化による損傷過程の再現に必要な破壊エネルギー G_F は、コンクリート及びCSGについては、堀井ら⁴⁾によるダムコンクリートについての実験式である式(1)の関係をを用い、表-1の圧縮強度 f'_c 及び粗骨材最大粒径 $d_{max}=40\text{mm}$ として設定した。

$$G_F = (0.79d_{max} + 80) \times (f'_c/10)^{0.7} \cdots (1)^4$$

なお、CSGの破壊エネルギーは、筆者ら³⁾の実験では式(1)で得られる値よりやや大きな値が得られている。また、同実験では標準供試体(粗骨材最大寸法40mm)での結果しか得られていないため $d_{max}=40\text{mm}$ としたが、既往施工事例では $d_{max}=80\text{mm}$ が一般的である。よって、本検討での設定値はやや安全側の値と考えられるが、引張軟化を伴う損傷形態をより明確に把握する上でも上記設定とした。また、堤体材料の引張軟化特性は、CSGは筆者ら³⁾の実験から推定した引張軟化曲線に基づく図-2のモデル、コンクリートは、コンクリート標準示方書⁴⁾の2直線モデルを用いた。

入力地震動は、解析モデルの堤体底面で、大規模地震に対するダムの耐震性能照査で考慮される照査用下限加速度応答スペクトル⁶⁾となるよう調整した加速度波形(最大水平加速度341gal、同鉛直加速度213gal)及びその振幅を2倍及び3倍に引伸した波形とし、各々の波形が堤体底面で再現され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。

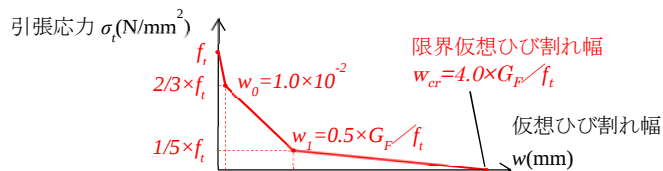


図-2 解析に用いた CSG の引張軟化特性

3. 解析結果

線形動的解析で得られた大規模地震時の主応力分布(発生応力のピーク値の分布)及び非線形動的解析で得られた引張軟化領域を図-3に示す。同図の主応力分布から、堤体上下流端部や保護コンクリート部の応力が大きいことがわかる。また、堤体内 CSG の止水・構造用コンクリートとの境界部においても局部的に応力が大きくなっている。各部での発生応力の値は引張応力(最大主応力 σ_1)、圧縮応力(最小主応力 σ_3)とも全般に堤高 50m よりも堤高 100m の方が大きくなっていることがわかる。引張軟化領域は、加速度 1 倍の場合、堤高 50m では引張軟化は生じておらず、堤高 100m でも軟化領域は上流端付近の一部である。加速度 2 倍の場合、堤高 50m では上下流端部や保護コンクリート部に、堤高 100m ではさらに堤体内 CSG の止水・構造用コンクリートとの境界部周辺にも軟化領域が生じている。加速度 3 倍の場合、堤高 50m でも堤体内 CSG の止水・構造用コンクリートとの境界部周辺で軟化領域が生じ、下流端付近の軟化領域も広がっている。堤高 100m では上下流端からの堤体底面沿いに軟化領域が広がり、下流面の中標高付近では堤体内 CSG にも軟化領域が広がっている。なお、引張応力がゼロとなる開口ひび割れ

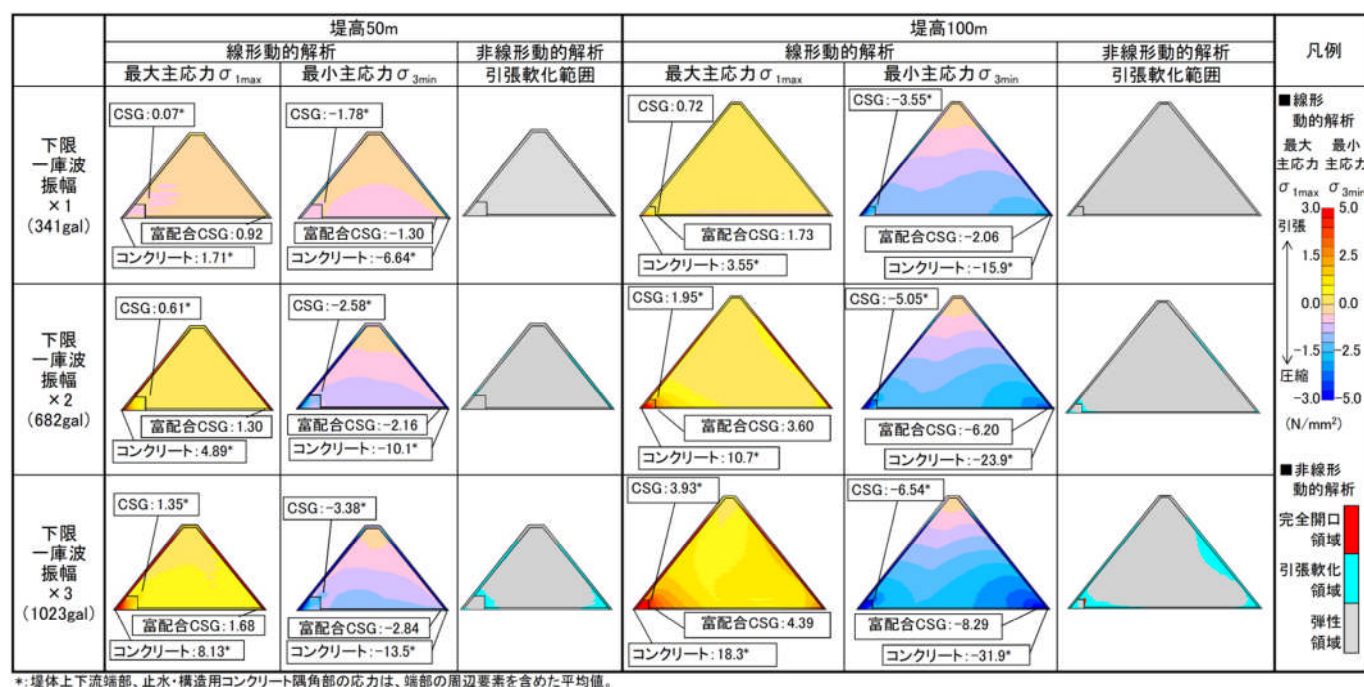
は堤高 100m の加速度 3 倍の場合のみ生じており、その箇所は堤体内 CSG の止水・構造用コンクリートとの境界(隅角部)付近である。

4. まとめ

- ・ 台形 CSG ダムでの大規模地震時の堤体内発生応力は、堤高が高くなると全般的に大きくなる。
- ・ 大規模地震時の引張軟化領域も堤高が高くなると広くなり、地震動強さが極めて大きくなると堤体上下流端部や保護コンクリート部のほか堤体内 CSG の止水・構造用コンクリートとの境界付近からも軟化領域が生じる。

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) 榎村康史、金銅将史ら: 大規模地震時における台形 CSG ダムの動的挙動の推定に関する解析的検討、土木研究所資料、第 4324 号、2016.3.
- 3) 榎村康史、金銅将史ら: CSG の動的引張強度・破壊特性等に関する実験的検討、土木研究所資料、第 4320 号、2016.3.
- 4) 堀井秀之ら: コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討、電力土木、286、pp.113-119、2000.3.
- 5) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、pp.37-43、2013.
- 6) 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.



*: 堤体上下流端部、止水・構造用コンクリート隅角部の応力は、端部の周辺要素を含めた平均値。

図-3 大規模地震時の発生応力及び引張軟化範囲