

強度のばらつきを考慮した台形 CSG ダムの構造安定性についての一考察

独立行政法人土木研究所 正会員 ○切無沢 徹, 岩下 友也, 山口 嘉一

1. 目的

近年、コスト縮減や材料の有効利用の観点から台形 CSG ダムの計画や施工が増加している。台形 CSG ダムは河川管理施設等構造令(昭和 51 年政令第 199 号)で、特殊な構造の河川管理施設等に位置づけられている。そのため、台形 CSG ダムの設計では、既往のダムの設計法と同等以上の効力のある方法であることを前提に、有限要素法により常時、地震時の構造安定性を確認する方法を採用している。また、CSG はコンクリートに比べて品質のばらつきが大きいことから、母材採取地で得られる CSG 材の中で最粗粒、最細粒及び平均的な粒度分布を選定して強度試験を行い、施工時の管理方法から想定される単位水量の範囲での強度分布を規定した「ひし形」¹⁾を作成し、得られる最小の強度を「CSG 強度」として発生応力に対する構造安定性の評価に用いる。この際、現行設計における有限要素法による応力解析では、堤体の物性値は一定とし、品質のばらつきは考慮していない。本稿ではモンテカルロ法により CSG の強度及び弾性係数のばらつきを想定した有限要素法による応力解析を行い、台形 CSG ダムの構造安定性について検討した。

2. 検討方法及び解析条件

ダム堤体の強度及び弾性係数のばらつきを考慮するため、モンテカルロ法による応力解析を行った。解析モデル概要を図-1 に、主要諸元を表-1 に示す。堤体の要素は 1.5m×1.5m の四角形要素を基本とし、堤体物性のばらつきが堤体局所応力に与える影響に着目した(堤体要素数は 1110)。堤体の各要素には想定したばらつきの分布から強度を割付け、弾性係数は図-2 に示す計画中の CSG ダムの CSG の強度と弾性係数の関係から設定した。ばらつきを想定したケースでは、強度の割付けから応力解析までの手順を 1 ケース当たり 100 回繰返した。解析は現行の台形 CSG ダムの設計手法と同様に初期応力解析では基礎岩盤を考慮し、地震力を与えた動的解析では堤体のみのモデルを用いた。入力地震波形は兵庫県南部地震時に一庫ダムで観測した地震波を照査用下限加速度応答スペクトル²⁾に適合するように調整した波形を用い、最大加速度は「フィルダムの耐震設計指針(案)」³⁾に示される中震帯の地盤設計震度を想定して 156.8gal に振幅を調整した。なお、本解析には有限要素法汎用構造解析コード「ISCEF」を用いた。

3. 想定する CSG の強度のばらつき

解析に用いる CSG の強度のばらつきは、堤高 50m 程度の実際のダムにおけるひし形を参考とし、CSG の強度範囲は 1.5～5.5N/mm²、平均強度は 3.5N/mm²と想定した上で、正規分布でばらつきを設定した。解析ケースを表-2 に示す。ケース 1 は現行設計手法を想定し、安定性評価に用いる CSG の強度はひし形の最小値(CSG 強度)とし、弾性係数については実ダムの設計で安全側の解析を行う観点で最大値程度を採用していることから、想定する強度範囲での最大強度にあたる 5.5N/mm²に相当する弾性係数 1989N/mm²とした。ケース 2～7 は平均強度が 3.5N/mm²の正規分布で、変動係数を 0～30%に変化させてばらつきを設定した。なお、ばらつきをもつことを想定するケースについて

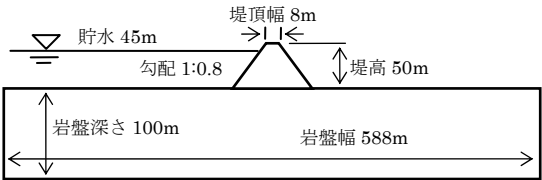


図-1 解析モデル概要(岩盤底面及び側方固定)

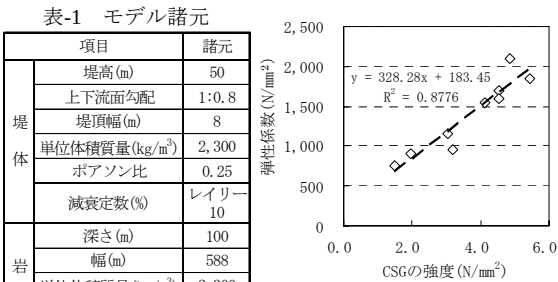


図-2 CSG の強度と弾性係数の関係

ケース		CSGの強度(N/mm ²)				変動係数	ケース1に対する最小強度比
		最小	平均	最大	標準偏差		
1	1.500	1.500	1.500	0	0%	—	—
2	3.500	3.500	3.500	0	0%	2.333	—
3	2.450	2.450	3.500	4.550	0.350	10%	1.633
4	1.925	1.925	3.500	5.075	0.525	15%	1.283
5	1.400	1.400	3.500	5.600	0.700	20%	0.933
6	0.875	0.875	3.500	6.125	0.875	25%	0.583
7	0.350	0.350	3.500	6.650	1.050	30%	0.233
8	1.200	1.200	3.000	4.800	0.600	20%	0.800
9	1.000	1.000	2.500	4.000	0.500		0.667
10	0.800	0.800	2.000	3.200	0.400		0.533
11	0.600	0.600	1.500	2.400	0.300		0.400

表-2 解析ケース

キーワード 台形 CSG ダム, ばらつき, モンテカルロ法, 有限要素法

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 (独)土木研究所 水工研究グループ TEL029-879-6781

て、ばらつきを設定する範囲は平均 $\pm 3\sigma$ (標準偏差)とした。これにより、各ケースで想定するばらつきに対して発生確率 99%以上までを考慮できる。ばらつきの範囲の設定条件から、本検討で想定したひし形の範囲($1.5\text{N/mm}^2 \sim 5.5\text{N/mm}^2$)は平均強度 3.5N/mm^2 で変動係数約 19%の正規分布に相当する。ケース 8~11 はばらつきとして変動係数を 20%で固定し、平均強度を順次 1.5N/mm^2 まで低下させた。

4. 解析結果と考察

応力解析結果から安全性を評価する上で、最大主応力(引張)は極めて小さい値となったため、以下は最小主応力(圧縮)について示す。解析結果の一例としてケース 2 とケース 7 (繰返し 100 回の内の一例)の弾性係数と最小主応力(全時刻)の分布を図-3 に示す。また、各ケースにおける最小主応力と局所安全率(CSG の強度/最小主応力)についての最

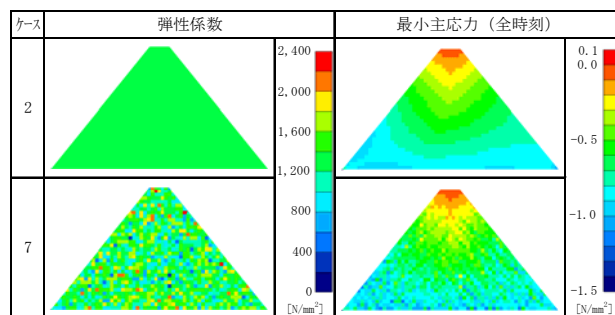


図-3 弾性係数と最小主応力(全時刻)の一例(応力は圧縮が負)

表-3 各ケースの最小主応力と局所安全率

ケース	最小主応力(N/mm ²)			局所安全率			ケース1に対する 最小局所安全率比
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	
1	-1.43	-0.66	-0.03	1.05	3.12	44.99	-
2	-1.10	-0.64	-0.04	3.19	7.34	99.72	3.03
3	-1.21	-0.64	-0.03	2.73	7.32	127.27	2.60
4	-1.25	-0.64	-0.03	2.49	7.30	133.19	2.37
5	-1.33	-0.64	-0.03	1.95	7.28	145.89	1.85
6	-1.35	-0.64	-0.02	1.49	7.25	159.04	1.41
7	-1.47	-0.65	-0.02	0.83	7.22	193.61	0.79
8	-1.24	-0.64	-0.03	1.69	6.27	110.42	1.61
9	-1.22	-0.64	-0.03	1.49	5.23	102.84	1.42
10	-1.24	-0.64	-0.03	1.17	4.15	82.83	1.11
11	-1.25	-0.63	-0.03	0.88	3.12	57.89	0.84

(注) 応力は圧縮が負

小/平均/最大の値を表-3 に示す。ケース 2~7 では強度のばらつきが大きいほど発生する圧縮応力も大きくなり、最小局所安全率は小さくなる。ここで、各ケースの最小局所安全率の比は、表-2 に示したケース 1 に対する最小強度比と比べて、大きい値となる。これは強度が小さい要素は弾性係数も小さいことから、弾性係数が大きい強度の強い要素に応力が集中するためである。また、ケース 8~11 では最小主応力の最小/平均/最大の値は同程度であった。平均強度が変化してもばらつき(変動係数)が同じ場合、今回の解析のように強度と弾性係数を線形関係で対応させていると、発生する圧縮応力の変化は小さい。

図-4 に変動係数とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。強度のばらつきが大きくなるほど最小局所安全率は小さくなる。本検討で想定したひし形の範囲のばらつき(変動係数約 19%)では、最小局所安全率はケース 1 の 2 倍程度となることが見込まれる。よって、実施工において強度のばらつき設計時のひし形の想定範囲内であれば、十分な構造安定性を得ることができる。

図-5 に平均強度とケース 1 に対する最小局所安全率の比の関係を示す。ケース 1 の最小局所安全率は、変動係数を 20%とした正規分布では平均強度が半分(1.75N/mm^2)程度まで低下した場合と同程度となり、現行の設計手法は強度低下に対しても安全側となり得る。

5. まとめ

本稿では、堤体の強度のばらつきを考慮した台形 CSG ダムの構造安定性について、モンテカルロ法による応力解析により検討した。本検討条件では、CSG 強度で構造安定性を確認する現行の設計手法は、ひし形の範囲内で強度がばらつく場合に対して十分に安全側であり、また CSG 強度を一部下回るような強度のばらつきに対しても、条件によっては安全側となる。ただし、本解析では個別ダムを参考に強度や弾性係数を設定し、さらに強度のばらつきが正規分布であることを仮定しているため、強度と弾性係数の相関やばらつきの分布形状が異なることで、強度のばらつきによる構造安定性への影響の大小が変化する。CSG は母材採取場所により品質が大きく異なるため、今後、ばらつきを考慮した上での合理的な設計や施工を実現するためには、個別のダムにおける CSG の物性やそのばらつきを把握する必要がある。

参考文献

- 1) 台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料作成検討会：台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料，pp.13-14，2007.9
- 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），2005.3
- 3) 建設省河川局開発課監修：フィルダムの耐震設計指針（案），（財）国土開発技術研究センター，1991.6

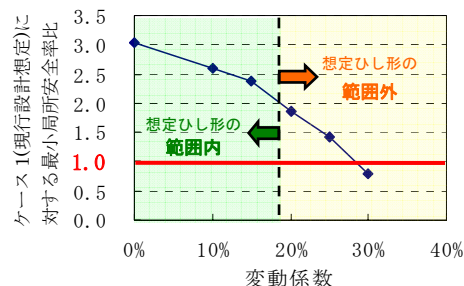


図-4 変動係数と最小局所安全率比
(平均強度一定： 3.5N/mm^2)

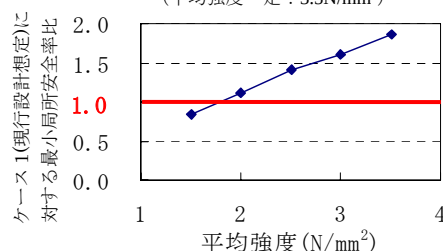


図-5 平均強度と最小局所安全率比
(変動係数一定：20%)