

重力式ダムの堤高および形状が地震時の安全余裕度に与える影響

独立行政法人土木研究所 正会員 ○金縄健一、正会員 佐々木隆、正会員 山口嘉一

1. はじめに

近年、兵庫県南部地震、鳥取県西部地震のような大地震の発生を契機に、重要構造物であるダムにおいては、今まで設計で考慮していたよりも大きな地震動（レベル2地震動）に対する耐震性を確保することが強く求められている。外国における過去の事例より大規模地震時における重力式コンクリートダムの被害形態の一つとして堤体コンクリートへのクラック発生が考えられ、ダムの耐震性評価を行うにあたり堤体の損傷を考慮した検討が求められる場合も想定される。堤体損傷を考慮したコンクリートダムの耐震性評価方法については、各種解析コードの開発¹⁾やコンクリートの動的物性の設定等、様々な研究が行われており、筆者らも分布型クラックモデルを用いた重力式コンクリートダムのクラック進展解析に関して研究を進めてきている²⁾。本論文では、分布型クラックモデルを用いた動的解析法による解析を実施し、堤高および形状とダムの安全余裕度との関係について検討を行った結果を報告する。

2. 解析モデルと解析条件

解析モデルは、図-1に示すように上流面形状が異なる2種類の重力式コンクリートダムで、それぞれ堤高50、100および150mの3ケースを設定した。解析に用いた材料物性値を表-1に示すが、コンクリートの引張破壊特性については単直線近似による引張軟化曲線を用いた。堤体底面を剛結条件とし、静的な荷重としては自重と静水圧のみを考慮した。貯水の地震時における影響は、非圧縮性流体仮定の付加質量マトリクスで考慮した。入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震時に一庫ダム下段監査廊で観測された上下流方向の加速度波形（最大加速度186gal）をもとに、加速度応答スペクトルが減衰定数15%のときの周期0.1~0.7秒間の応答倍率が1.2で一定である応答スペクトル形状に適合するように調整した波形を用いた。図-2に最大加速度500galの時刻歴波形を、図-3にその加速度応答スペクトルを示し、また各モデルの一次固有周期も併記している。図-2に示す時刻歴波形の振幅の倍率のみを変化させて、最大加速度200galから600galまで100gal刻みの時刻歴波形を設定し、堤体底部より水平方向に入力した。解析コードとして、分布型クラックモデルによる構造解析を実施できる汎用有限要素法解析プログラム（DIANA）を用いた。

なお、今回の検討は、重力式コンクリートダムの被害形態として堤体に発生するクラックのみに着目し、堤高および形状が安全性余裕度に与える影響について数値解析に基づく定性的な検討を行なうことを目的としたものであり、ここでの解析結果のみを以て直接的に重力式コンクリートダムの耐震性能を判断するものではない。

3. 解析結果と考察

図-4は、堤高150mのモデルに対して最大加速度400galの波形を用いてクラック進展解析を実施し、最終的にクラックの発生した位置を示す。これは、解析中に発生したクラックすべての位置を示したものである。図より、地震時には堤体底部付近および上流面勾配変化点からクラックが進展しやすく、下流面側から進展する場合があることがわかる。次に、最大

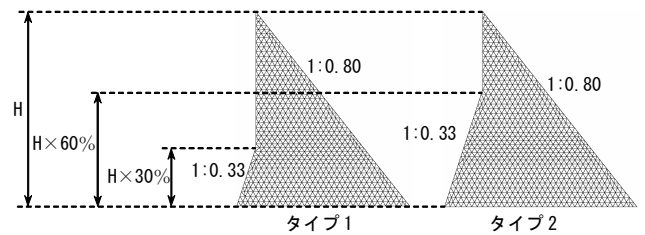


図-1 解析モデル

表-1 材料物性値

| | |
|------------------------------------|-------------------|
| 弾性係数 E (MPa) | 3.00E+04 |
| ポアソン比 ν | 0.2 |
| 引張軟化開始応力 f_t (MPa) | 2.5 |
| 破壊エネルギー Gf (N/m) | 300 |
| 圧縮強度 f_c (MPa) | 25 |
| 単位容積質量 ρ (kg/m ³) | 2,300 |
| 減衰定数 h (%) | 15 (レイリー減衰 1, 3次) |

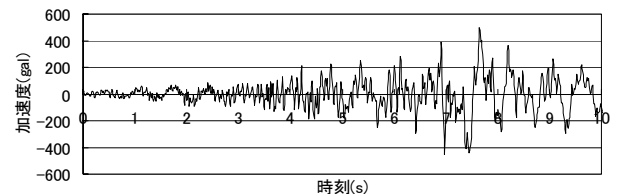


図-2 入力波形

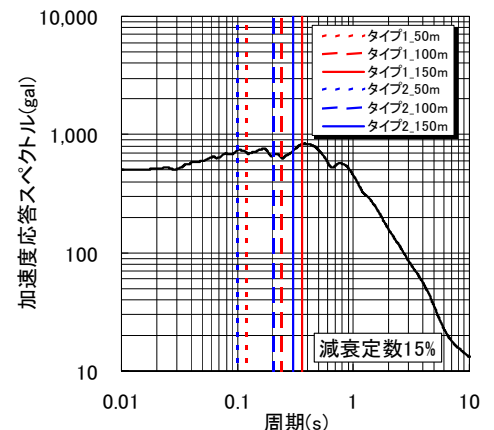


図-3 加速度応答スペクトル

【キーワード】重力式コンクリートダム、安全余裕度、堤体形状、堤高、クラック進展

【連絡先】〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 Tel. 029-879-6781 Fax. 029-879-6737

加速度を大きくしていくと図-4に示す点線の箇所でクラックが進展する傾向があることから、その部分でのリガメント残存率 $[=1.0 - (\text{クラック長さ} / \text{クラック進展方向に沿って測った堤体厚さ})]$ をダム安全余裕度を示す一指標と考えて算出した。リガメント残存率の算出にあたっては、図-5に示すように上流側から進展するクラックおよび下流側から進展するクラックの先端からリガメント部へ垂線をおろし、両方のクラックを考慮してクラック長さを求めた。なお、今回の解析では岩盤をモデル化していないため、堤体底部では応力的に厳しい条件となっており、その部分におけるクラックは岩盤をモデル化した場合と比較して大きめに計算されている。

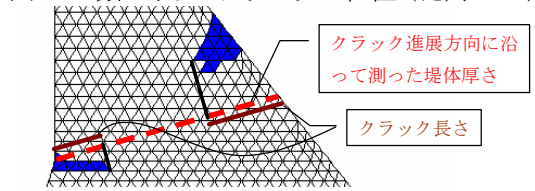
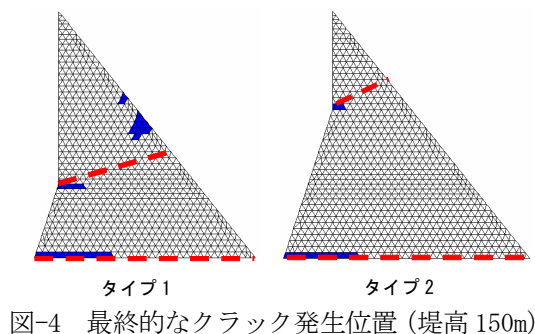


図-6は、タイプ1について最大加速度500galの波形を用いた場合のリガメント残存率と堤高の関係、勾配変化点および堤体底部について示したものである。図より、堤高が高いほど、リガメント残存率は小さくなる傾向が見られ、堤高が低いダムは高いダムと比較して相対的に安全余裕度が高いと考えられる。

図-7は、堤高150mのダムについて勾配変化点および堤体底部におけるリガメント残存率と最大加速度の関係を示したものである。図より、ダムの形状にかかわらず勾配変化点でのクラックが発生しはじめる加速度レベルは高いものの、勾配変化点における曲線が堤体底部での曲線より下降勾配が急となっている。これは、勾配変化点から進展するクラックは堤体底部からのクラックと比較して発生しにくいものの、クラック発生最大加速度以上では最大加速度の影響を敏感に受けやすいことを意味する。これより、堤体を貫通するようなクラックが発生するような被害は堤体表面の勾配変化点を発端としたクラック進展によって生じると想定される。

図-8は、勾配変化点におけるリガメント残存率と最大加速度の関係、タイプ1およびタイプ2の堤高150mのモデルについて示したものである。図より、タイプ2のように勾配変化点標高が高い方がクラックは発生しにくい、曲線の下降勾配が急になっていることからわかるように、安全余裕度は最大加速度の影響を敏感に受けることを意味している。また、最大加速度が500galを超えるほど大きくなると、クラック発生位置（勾配変化点）が高い方が、リガメント残存率が小さくなっている。

4. まとめ

本検討により、クラックは堤体底部および勾配変化点で発生しやすいこと、堤高が低いダムは高いダムと比較して相対的に安全余裕度が高いこと、勾配変化点から進展するクラックは、堤体底部からのクラックと比較して発生し難いが、クラック発生する場合には最大加速度の影響を敏感に受けることがわかった。

【参考文献】

- 1) 張宏遠、大町達夫：重力式コンクリートダム-貯水系の地震時クラック解析のためのFE-BE手法、ダム工学、Vol. 11 No. 4、pp. 266-274、2001. 12.
- 2) 佐々木隆、金縄健一、山口嘉一：大規模地震時における重力式コンクリートダムのクラック進展に関する数値解析的検討、土木技術資料、第45巻、第6号、PP. 60-67、2003. 6.

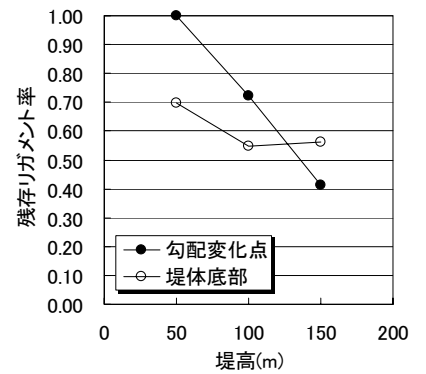
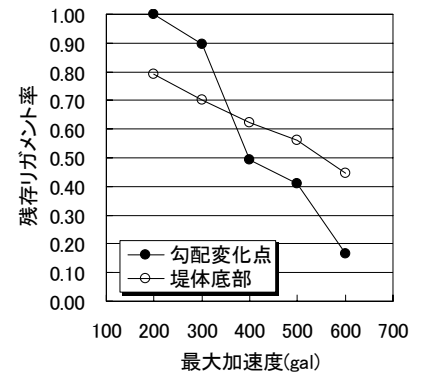
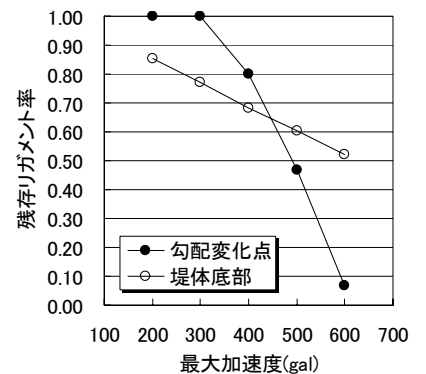


図-6 リガメント残存率と堤高の関係



(a) タイプ1 (堤高150m)



(b) タイプ2 (堤高150m)

図-7 リガメント残存率と最大加速度の関係

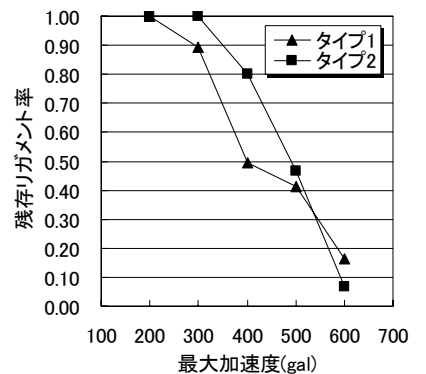


図-8 堤体形状の影響 (堤高150m)