

地震動強度、堤体形状が重力式コンクリートダムのクラック損傷程度に与える影響

独立行政法人土木研究所 正会員 佐々木 隆、正会員 金縄 健一、正会員 山口 嘉一、正会員○千葉 淳哉

1. 目的

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、あるいはそのことを実証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が想定される。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^{1,2)}。本論文では、分布型クラックモデルを用いた数値解析結果より、典型的なダム形状、想定される地震動レベルを考慮して、重力式コンクリートダムに起こりうるクラック損傷の形態および程度についてパラメトリック解析を実施した結果を報告する。

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3種類（フィレット無、フィレット小、フィレット大）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ケースの組合せで9種を設定した。解析に用いた材料物性を表-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¹⁾。堤体底面を剛結とし、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ックスで考慮した。入力地震動としては、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」³⁾における照査用下限加速度応答スペクトルに適合する波形を基本とした。具体には、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

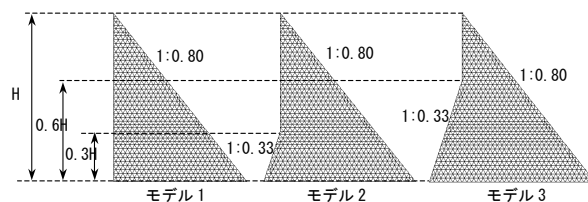


図-1 解析モデル

表-1 材料物性値

弾性係数 $E(\text{MPa})$	2.70E+04
ポアソン比 ν	0.2
引張軟化開始応力 $f_t(\text{MPa})$	2.5
破壊エネルギー $G_f(\text{N/m})$	300
圧縮強度 $f_c(\text{MPa})$	25
単位容積質量 $\rho(\text{kg/m}^3)$	2,300
減衰定数 $h(\%)$	15（レイリー減衰1,3次）

（最大加速度186gal）をもとに、図-3に示す照査用下限加速度応答スペクトル形状に適合するように調整した波形（最大加速度300gal）を用いた。このとき作成された時刻歴波形を図-2に示す。さらに、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100galから堤体にクラックが貫通する直前の加速度レベルまで、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、今回の検討では、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定量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に、堤高150mのモデル2に対して最大加速度500galの波形を用いてクラック進展解析を実施し、最終的にクラックが発生した位置を示す。これは解析中に発生したクラック全てを示したものである。地震時には堤体底部、フィレット取付部にクラックが発生しやすいことがわかっていたが²⁾、加速度レベルが高くなるとさらに、堤体上部に

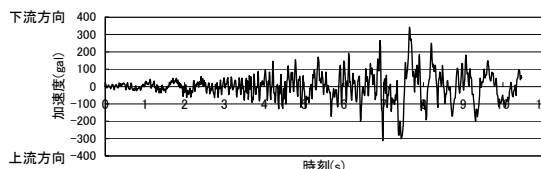


図-2 入力波形

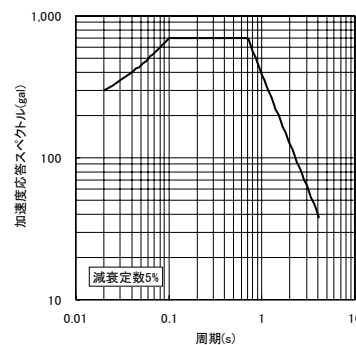


図-3 照査用下限加速度
応答スペクトル³⁾

キーワード 重力式コンクリートダム、安全余裕度、クラック、分布型クラック

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

においても堤体上下流方向に貫く方向にクラックが進展しやすいことがわかった。そこで図-4に示す点線の箇所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おらず、堤体上流方向での応力集中が大きく、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すると大きめに計算される。

図-4 最終的なクラック発生位置
(堤高 150m モデル 2)

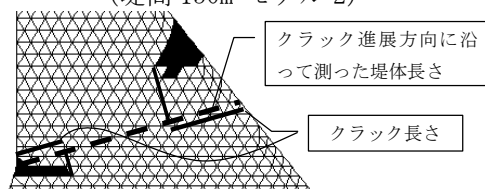


図-5 リガメント残存率の定義

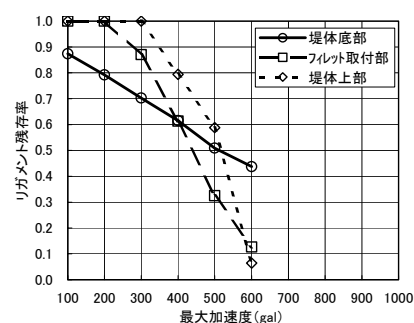


図-6 クラック発生箇所と
リガメント残存率の関係
(堤高 150m モデル 2)

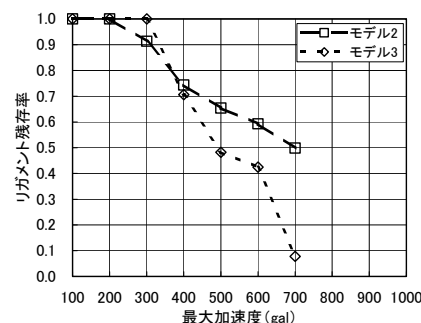


図-7 フィレット取付部クラックと
リガメント残存率の関係
(堤高 100m)

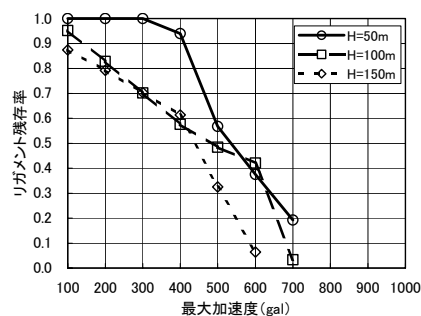


図-8 堤高とリガメント残存率
の関係 (モデル 2)

図-7は、フィレット取付位置の違いによる最大加速度とリガメント残存率の関係を、堤高 100m のモデルについて示したものである。図より、フィレット取付位置が高いモデル 3 は、フィレット取付位置が低いモデル 2 と比較してクラックが進展しやすい傾向が見られる。なお、同様の傾向は、他の堤高のモデルでも見られる。これは、図-6 で見たように勾配変化点が堤体上部にない場合でも、堤体上部のクラックは延伸しやすい傾向があるのに加えて、モデル 3 では堤体上部に勾配変化点があるためである。今回はフィレット勾配を固定し、2 種類のフィレット取付標高を設定した検討しか行っていないが、フィレット取付部のクラックについては、フィレット取付位置の低いダムはフィレット取付位置の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-8は、堤高ごとの最大加速度と、3 箇所のクラック発生箇所（堤体底部、フィレット取付部、堤体上部）に関わらない、クラック発生に伴うリガメント残存率の最小値の関係を、モデル 2 について示したものである。図より堤高が高いモデルほどクラックが進展しやすい傾向が見られる。これより堤高が低いダムは、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。同様の傾向は他形状のモデルにおいても見られる。

4. まとめ

本研究の結果を次に示す。(1) 重力式コンクリートダムのクラックは、堤体底部、フィレット取付部に発生しやすい。(2) 小さい入力加速度では、堤体底部にクラックが発生しやすい。(3) フィレット取付部クラックと堤体上部クラックは、堤体底部クラックと比較して発生し始める加速度レベルは高いものの、最大加速度の影響を敏感に受ける。(4) フィレット取付部クラックについては、フィレット取付位置の低いダムはフィレット取付位置の高いダムと比較して相対的に安全余裕度が高い。(5) 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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 金縄健一、佐々木隆、山口嘉一：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 土木学会第 59 回年次学術講演会、I-279、pp.557-558、2004.9
- 3) 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