

重力式コンクリートダムが地震時のクラック進展に与える影響に関する検討

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

兵庫県南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実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ために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 Smearred Cracking Model を用いての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⁾。本論文では、Smearred Cracking Model を用いた動的解析法による解析を実施し、重力式コンクリートダムの形状が異なる場合のクラックの発生、進展の特性について基礎的な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 に示すように堤高 100m で上流面形状が異なる 3 形状の重力式コンクリートダムである。静的な荷重として自重と静水圧のみを考慮した。解析に用いた材料物性値を表-1 に示す。単直線近似による引張軟化曲線、固定ひび割れモデルを用い、汎用有限要素法解析プログラム“DIANA”で解析を行った。境界条件については、堤体底面は剛結とし、貯水の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、加速度振幅 150gal でダムの一次固有周波数の正弦波を堤体底部より水平方向に入力した。各形状のダムに用いた入力波形の諸元を表-2 に示す。

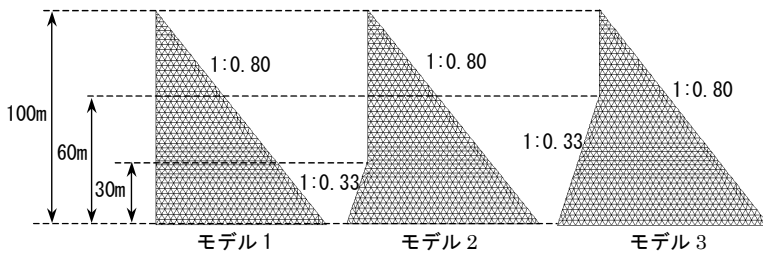


図-1 解析モデル

表-1 材料物性値

構成モデル	線形弾性-直線軟化
弾性係数 E (MPa)	3.00E+04
ポアソン比	0.2
引張軟化開始応力 ft (MPa)	2.0、2.5、3.0、4.0
破壊エネルギー-Gf (N/m)	300
圧縮強度 fc (MPa)	25
単位容積質量 (kg/m ³)	2,300
減衰定数 (%)	10 (レイリー減衰 1,3 次)

表-2 入力波形の諸元

	モデル 1	モデル 2	モデル 3
周波数 (一次固有周期)	4.10	4.41	5.18
周期 (s)	0.24	0.23	0.19
加速度振幅 (gal)	150	150	150

3. 解析結果と考察

3.1. 地震時クラック発生位置

引張軟化開始応力 $f_t=3.0\text{MPa}$ 、破壊エネルギー $G_f=300\text{N/m}$ の条件で、3 モデルに対するクラック進展解析により最終的にクラックの発生した位置（塗潰し要素）を図-2 に示す。図より、モデル 1 では地震時に底部付近に、モデル 2、3 では勾配変化点および底部付近にクラックが発生していることが分かる。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、その部分におけるクラックの進展が目立つ結果となった。本検討では勾配変化点（モデル 1 では勾配変化点を底部とする）のクラックに着目した。図-3 は、モデル 1 に対して同じ入力波形を用いて別途実施した線形動的解析結果よりクラック発生最上流側要素（図-2 の○印）の引張側主応力時刻歴を示したものである。図に示すように、線形解析の結果から f_t を超えるような主応力が発生し、時間が進むにつれ発生最大主応力 σ_{max} と f_t との差が大きくなっていくことが分かる。そこで、本論文では、勾配変化点に発生するクラック長さ L と 2 つの指標（ σ_{max} 、 $\sigma_{max}-f_t$ ）との関係を検討する。

3.2. 引張軟化開始応力によるクラック進展の差異

図-4 はモデル 1 についてクラック長さ L と主応力評価要素での σ_{max} との関係を示し、図-5 はクラック長さ L と $[\sigma_{max}-f_t]$ の関係を示したものである。図-4 より、同じ σ_{max} の場合、 f_t が小さいほどクラックが長くなり、また最終的なクラックも長くなる事が分かる。また、今回の入力波のように加速度

【キーワード】重力式コンクリートダム、ダム形状、クラック進展、Smearred Cracking Model

【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

が同じ振幅の波で連続的に作用する場合でもクラックは進展し続けることはなく、ある一定の長さに収束することが分かる。これより、クラックは一度発生した時点での入力よりレベルの大きい入力がないと進展しにくいといえる。図-5 より、クラック長さと $[\sigma_{max} - ft]$ の関係は ft によらずほぼ同じような傾向にあることが分かる。なお、図示はしていないが、モデル 2 およびモデル 3 についても同様の傾向を示す。

3.3. ダム形状によるクラック進展の差異

図-6 は $ft=2.5\text{MPa}$ 、 $Gf=300\text{N/m}$ の条件での勾配変化点におけるクラック長さと $[\sigma_{max} - ft]$ の関係を、図-7 は勾配変化点での [クラック長さ/勾配変化点標高での堤体幅] と $[\sigma_{max} - ft]$ の関係を、3つのモデルについて示したものである。図-6 より、勾配変化点標高が低いほど発生する $[\sigma_{max} - ft]$ が大きくなりクラック長さも大きくなってはいるが、クラック長さと $[\sigma_{max} - ft]$ の立ち上がり部での関係は堤体の形状によらず、おおよそ同一曲線形状を示す。図-6、7 より、モデル 3 についてクラック長さの絶対量としては小さいものの、堤体幅に対するクラック長さの割合は大きいことが分かる。また、モデル 3 のように勾配変化点標高が高いと下流面側から発生したクラックとつながる可能性が高いことから、安全性という観点からみると余裕度が低いと考えられる。

図-8 は最終クラック長さと ft の関係を、図-9 はクラック長さの変化率、つまり [最終クラック長さ / $ft=3.0\text{MPa}$ での最終クラック長さ] と ft の関係を、3つのモデルについて示したものである。図-8 より、勾配変化点標高が低い方がクラック長さは大きくなっている。図-9 より、モデル 3 は他の 2 モデルに比べて ft の変化率に対するクラック長さの変化率の変化率が大きいことが分かる。

4. まとめ

本検討により、以下のことが分かった。クラックは勾配変化点と堤体底部で発生しやすい。勾配変化点でのクラック長さと $[\sigma_{max} - ft]$ との関係は、 ft およびダム形状に関係なくほぼ同一曲線形状を示す。モデル 3 のように勾配変化点標高が高いと発生するクラック長さの絶対量は短くなるものの、勾配変化点標高での堤体幅に対する割合は大きくなり、安全余裕度が低い。モデル 3 のように勾配変化点標高が高いと ft の変化率に対するクラック長さの変化率の変化率が大きい。

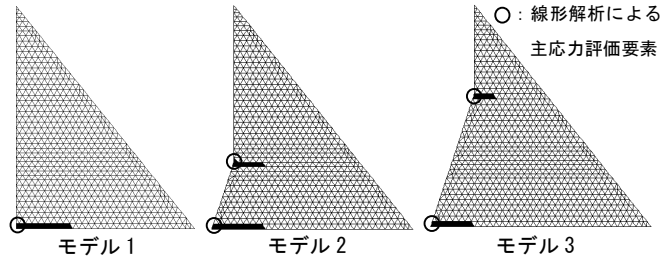


図-2 最終的なクラックの発生箇所

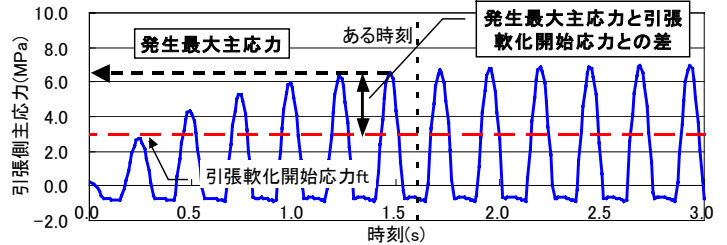


図-3 線形時刻歴解析からの引張側主応力時刻歴

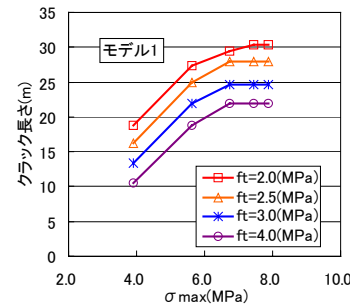


図-4 クラック長さと σ_{max}

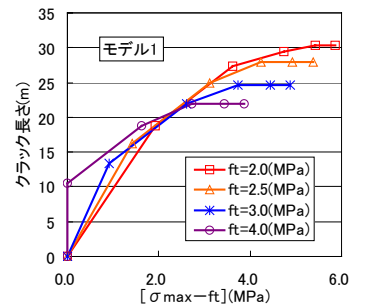


図-5 クラック長さと $[\sigma_{max} - ft]$

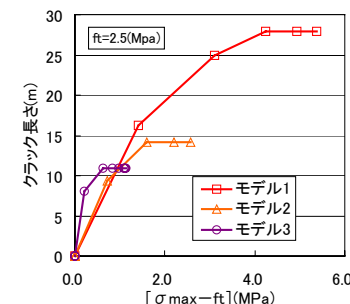


図-6 クラック長さ

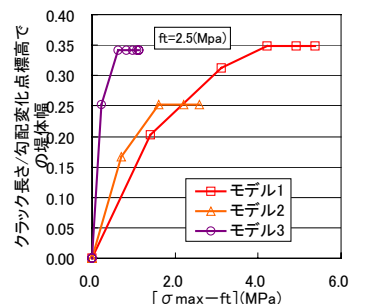


図-7 クラック長さの勾配変化点標高での堤体幅との比

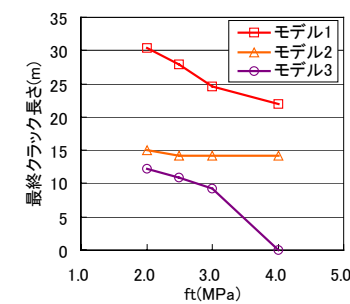


図-8 最終クラック長さと ft

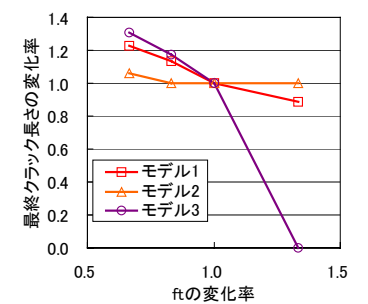


図-9 [最終クラック長さ / $ft=3.0\text{MPa}$ での最終クラック長さ] と ft の変化率

参考文献

1) 金縄健一、山口嘉一、佐々木隆：重力式コンクリートダムの地震時クラック解析における非線形材料特性の影響に関する一考察、第 57 回年次学術講演会講演概要集、I-679、2002