

減衰定数と破壊エネルギーが重力式コンクリートダムクラック進展解析に及ぼす影響

国土技術政策総合研究所 正会員 ○佐藤 弘行、平松 大周、金銅 将史

1. はじめに

大規模地震に対するコンクリートダムの耐震性能照査¹⁾においては、損傷過程を推定するための非線形動的解析としてクラック進展解析が行われる場合がある。解析に必要となる各種パラメータの中には、強震記録からの同定が必要な減衰定数や、ダムコンクリートの破壊特性に係る物性値であるものの試験事例に限られる破壊エネルギーのように、適切に設定するのが容易でないものもある。そこで本論文では、これらパラメータ設定上の留意点の把握を目的として、破壊エネルギーに関する既往研究を最近の事例も含めて調査したうえで、減衰定数と破壊エネルギーが重力式コンクリートダムクラック進展解析結果に及ぼす影響について検討した。

2. 解析方法、解析条件

重力式コンクリートダムを対象に、スミアドクラックモデルにより大規模地震時における堤体コンクリートの引張軟化を考慮した非線形動的解析を行い、ダム堤体の減衰定数と破壊エネルギーが解析結果に及ぼす影響を検討した。解析には図-1に示す2次元堤体-貯水連成モデルを用いた。貯水は流体要素でモデル化した。解析物性値は表-1の値を用い、堤体の減衰定数は5%、10%、15と変化させた。減衰はレーリー減衰を用いた。入力地震動は、ダムの照査用下限加速度応答スペクトル²⁾を2.33倍に引き伸ばした加速度応答スペクトル(最大加速度約700gal)に適合し、2000年鳥取県西部地震時に震源近傍ダムの基礎部で観測された加速度波形(賀祥波)を原種波として位相特性を与えた波形を用いた。引張軟化曲線は最も単純なモデルとして一直線モデルを用いた。なお、解析には汎用有限要素法構造解析コードISCEFを用いた。

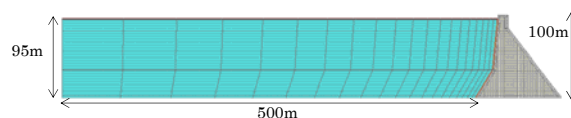


図-1 解析モデル

表-1 解析物性値等

	単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー (N/m)	減衰定数 (%)
堤体(外部コン)	23.94	48000	0.2	3.83	428, 759, 1313	5, 10, 15
堤体(内部コン)	23.77	38000	0.2	2.68		
貯水池	9.8	流体要素 (非圧縮性流体)				

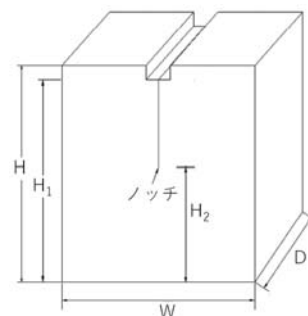


図-2 供試体の模式図

3. 破壊エネルギーの設定

ダムコンクリートの粗骨材最大寸法(80~150mm)と同程度の骨材を使用し、くさび挿入による破壊エネルギー試験について、比較的大きな破壊エネルギーが得られている事例^{2)~7)}の試験条件と試験結果の概要を表-2に、くさび挿入試験の供試体の模式図を図-2にそれぞれ示す。なお、表-2に整理した6文献については、表-2に記載した以外の条件での試験も実施されているが、表-2には、静的試験については粗骨材最大寸法および供試体サイズが最大の試験の概要を、動的試験については載荷速度が最大の試験の概要を示している。表-2に示すように、破壊エネルギーが500N/m以上となる大きな試験値がいくつか得られており、今回調査した文献においては、静的試験時の破壊エネルギーの最大値は759N/m、動的試験時の破壊

表-2 ダムコンクリートを対象とした既往の破壊エネルギー試験の試験条件と試験結果の概要

著者	粗骨材の最大寸法	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	くさび挿入試験の供試体寸法(mm)				H ₂ /d _{max}	破壊エネルギー		破壊エネルギー試験の供試体の材齢
	d _{max} (mm)			H ₁	W	D	H ₂		G _F (N/m)		
Heら(1992) ²⁾	76	16.92 ^{*1}	2.00 ^{*1}	1820	1820	230	1366	5.94	静的	152	55日
									動的 ^{*7}	1313	
Trunkら(1998) ³⁾	125	不明	不明	3200	3200	不明	1600	12.8	静的	約600	1年以上
堀井ら(2000) ⁴⁾	150	34.1 ^{*2}	2.53 ^{*2}	1200	1200	450	600	4	静的	317	不明
	20	17.6 ^{*3}	1.84 ^{*3}	200	200	100	100	5	動的 ^{*8}	349	不明
Zhaoら(2008) ⁵⁾	80	51.7 ^{*4}	不明	1000	1000	500	500	6.25	静的	約660	1年
石黒(2014) ⁶⁾	80	26.9 ^{*5}	3.09 ^{*5}	315	350	200	260	3.25	静的	411	91日以降
Guanら(2015) ⁷⁾	150	29.37 ^{*6}	3.04 ^{*6}	2250	2250	450	1350	9	静的	759	180日

*¹ 材齢不明、*² 同約3か月、*³ 同約1ヶ月、*⁴ 同1年、*⁵ 同91日、*⁶ 同180日、*⁷ ピーク荷重(約130kN)まで約2.9秒、*⁸ CMOD速度=12400cm/分

キーワード: 重力式コンクリートダム、耐震性能照査、減衰定数、破壊エネルギー、クラック進展解析

連絡先: 〒305-0804 茨城県つくば市旭1番 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 TEL:029-864-4597

エネルギーの最大値は 1313N/m であった。コンクリートの破壊エネルギー G_F は、粗骨材最大寸法 $d_{\max}$ あるいはそのリガメント長との比 ($H_2/d_{\max}$)、圧縮強度、載荷速度等により影響を受けることが知られている。Guan ら⁷⁾は、 $H_2/d_{\max}$ が 6 以下の条件では破壊エネルギーが $H_2/d_{\max}$ に比例して増加すること、 $H_2/d_{\max}$ が 6 以上の条件では破壊エネルギーが一定となることを指摘している。試験の結果をもとに、破壊エネルギーと粗骨材の最大寸法および圧縮強度の関係について、堀井ら⁴⁾は式(1)、Guan ら⁷⁾は式(2)をそれぞれ提案している。

$$G_F = (0.79d_{\max} + 80) \times (f_{cm}/10)^{0.7} \quad (1), \quad G_F = (0.1616d_{\max} + 1.0263) \times f_{cm} \quad (2)$$

ここで、 G_F は破壊エネルギー (N/m)、 $d_{\max}$ は粗骨材の最大寸法 (mm)、 f_{cm} は圧縮強度 (N/mm²) である。

本論文では、クラック進展解析に用いる入力物性値として、次の 3 種類の破壊エネルギーを選定した。(a) 428N/m (式(1)に $d_{\max}=150\text{mm}$ と $f_{cm}=30\text{N/mm}^2$ を代入した値)、(b) 759N/m (表-2 の Guan ら⁷⁾の静的試験値)、(c) 1313N/m (表-2 の He ら²⁾の動的試験値)。

4. 解析結果

図-3 に解析結果 (引張軟化領域の分布) を示す。なお、各分布図に付した数字は上下流方向の加速度応答倍率 (堤体天端/底面) を示している。

まず、引張軟化領域が比較的大きく比較しやすい減衰定数 5%のケースについて引張軟化領域を見ると、破壊エネルギー G_F が大きくなるとともに完全開口領域は減少している。一方、完全開口領域に対する周辺の軟化領域の相対的な広がりはやや増加している。これは、破壊エネルギーが大きくなることにより完全開口が生じる領域は小さくなるものの、完全開口しないことにより引張応力が隣接要素に伝達されるためと考えられる。次に減衰定数を 10%、15%と大きくしたケースでは、破壊エネルギーが大きいほど完全開口領域が小さくなるのは同様であり、同一の破壊エネルギーでの完全開口領域は減衰定数が 5%のケースに比べ小さくなっている。なお、図-3 中の加速度応答倍率については、減衰定数が大きいほど小さくなっているが、破壊エネルギーの違いによる明確な影響は認められない。

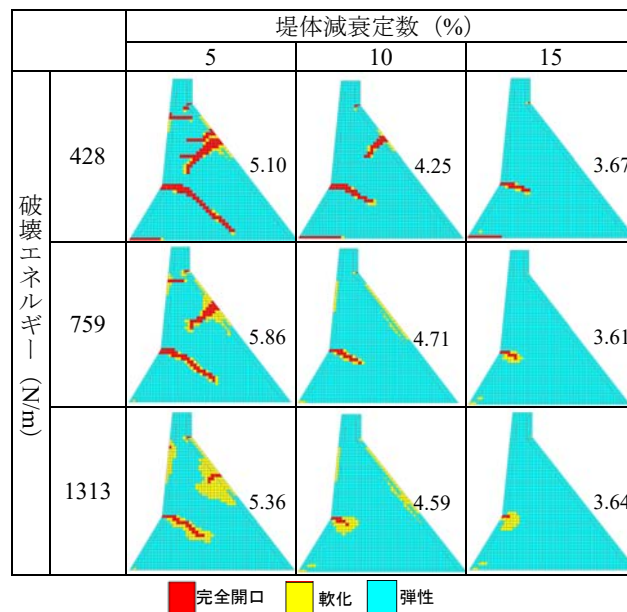


図-3 引張軟化領域の分布図 (数字は加速度応答倍率)

どのように、クラック進展解析により推定される引張軟化領域はダム堤体の減衰定数や破壊エネルギーに大きな影響を受けることがわかる。損傷過程まで考慮する大規模地震時の耐震性能照査を精度よく行うには、これらのパラメータを適切に設定することが重要と考えられる。このうち減衰定数については個々のダムでの強震記録からの同定解析により設定するのが望ましいが、強震記録がない場合には構造等が類似するダムでの観測記録を基に考慮する地震動レベルに応じた加速度応答倍率となるよう設定する方法⁸⁾が考えられる。破壊エネルギーについては、表-2 に示した既往研究を参考とするほか、必要に応じて破壊エネルギー試験を実施することも考えられる。

このように、クラック進展解析により推定される引張軟化領域はダム堤体の減衰定数や破壊エネルギーに大きな影響を受けることがわかる。損傷過程まで考慮する大規模地震時の耐震性能照査を精度よく行うには、これらのパラメータを適切に設定することが重要と考えられる。このうち減衰定数については個々のダムでの強震記録からの同定解析により設定するのが望ましいが、強震記録がない場合には構造等が類似するダムでの観測記録を基に考慮する地震動レベルに応じた加速度応答倍率となるよう設定する方法⁸⁾が考えられる。破壊エネルギーについては、表-2 に示した既往研究を参考とするほか、必要に応じて破壊エネルギー試験を実施することも考えられる。

5. まとめ

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解析結果は、ダム堤体の減衰定数や堤体コンクリートの破壊エネルギーの設定値により大きな影響を受ける。耐震性能照査をより精度よく行うには、これらのパラメータを適切に設定することが重要と考えられる。

【参考文献】1) 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. 2) S. He, et al. : Fracture energy tests of dam concrete with rate and size effects, dam engineering, Vol.III, pp.139-159, 1992. 3) B. Trunk, et al. : Experimental Investigation into the Size Dependence of Fracture Mechanics Parameters, FraMCoS-3 Gifu, pp.1937-1948, 1998. 4) 堀井ら：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. 5) Z. Zhao, et al. : Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy, Cement and Concrete Research, 38, pp.1049-1060, 2008. 6) 石黒：粗骨材寸法の大きいコンクリートの楔挿入割裂試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.352-357, 2014. 7) J. Guan, et al. : Minimum specimen size for fracture parameters of site-casting dam concrete, Construction and Building Materials, 93, pp.973-982, 2015. 8) 平松ら：アーチダムの地震応答における減衰定数の影響, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, pp.1093-1094, 2017.