

線形解析に基づく重力式コンクリートダムの地震時損傷のみなし評価に関する考察

電力中央研究所 正会員 西内 達雄

1. はじめに

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」(国土交通省、2005年3月)が公表され、レベル2地震動に対するダムの安全性検討が必要とされている。この指針(案)において、重力式コンクリートダム堤体(重力式ダムと称す)は、貯水機能の維持を要件として、動的解析(地震応答解析)により損傷の発生と進展に伴う貫通等の評価が必要とされている。通常、線形地震応答解析(線形解析と称す)により堤体への損傷が懸念された場合、非線形地震応答解析(非線形解析と称す)により損傷の進展を評価することとなる。ここで、軽微な損傷の場合に、非線形解析を実施せず、線形解析の結果を用いて“みなし”による貫通の評価が実施できれば効率的に耐震性能照査を進めることができると考えられる。このような観点から、線形および非線形解析を用いて重力式ダムの動的応答や損傷状況等を把握¹⁾し、これら結果に基づき、線形解析結果を用いて非線形解析結果から得られる損傷を推測し、損傷の貫通をみなしで評価する方法を考案した。

2. 地震時損傷と評価の考え方

2.1 地震時損傷

重力式ダムの地震による被災事例は数少ないが、インドのKoynaダムは1967年の地震により堤体頂部の断面形状が急変する箇所ではひび割れが発生している。資源エネルギー庁が実施した重力式ダムの非線形解析でも、地震時に堤体頂部近傍と断面形状が急変する上流面フィレット上部、堤体と基礎岩盤との境界近傍(岩着部)で損傷が生じやすいと報告されている²⁾。さらに、海外でのダム損壊は基礎岩盤に起因する事例が多い知見を加えると、堤体と岩着部、基礎岩盤内部が弱部になりやすいと考えられる。

2.2 損傷評価の考え方

損傷の貫通に対する評価の概念を図-1に示す。評価の手順として、まず、線形解析を実施して、要素応力と破壊強度との比較から損傷長を推定する。そして、その損傷長に安全係数(後述参照)を乗じて照査用の損傷長を算出する。次に、損傷を生じていない健全な領域長を算出する。これは、損傷長(安全係数を乗じる前の値)を算出した時点で自動的に求められる。すなわち、損傷長の先端から健全部の終端までの最短長が該当する。貫通に対する照査用の限界値は、損傷長(安全係数を乗じる前の値)と健全な領域長とを加算したものである。損傷の貫通に対する照査において、照査用の応答値

(損傷長)を照査用の限界値で除して、その値が1.0以下であれば貫通しないものとして要件は満足されることとなる。照査用の損傷長を算出する際に用いる安全係数は、図-2に示した線形解析と非線形解析との損傷率の比率の最大値4.5とした。これは、同一条件での2次元解析モデルと入力地震動を扱った堤高100mダムの地震応答解析結果で、線形解析と非線形解析での損傷率を比較した結果である。データが少なく損傷箇所の

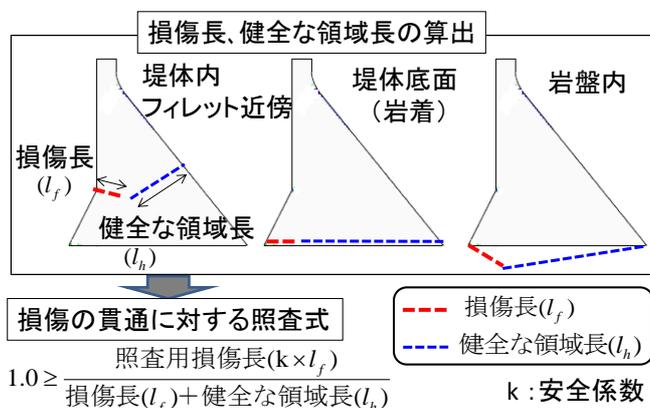


図-1 損傷の貫通に対する評価の概念

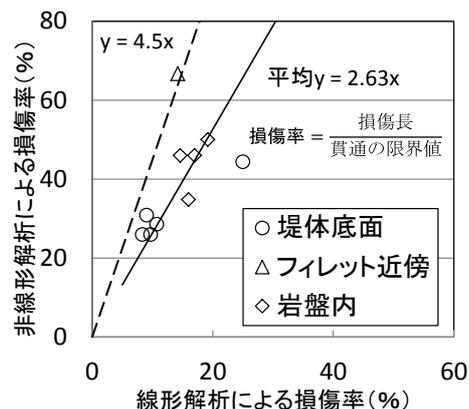


図-2 線形地震応答解析と非線形地震応答解析での損傷率の関係

キーワード 重力式コンクリートダム、耐震性能、損傷、地震応答解析

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電話 04-7182-1181、FAX 04-7183-2962

違いによりバラツキも認められるが、包含する最大値とした。解析条件等は関連報告¹⁾を参照されたい。

3. 損傷評価例

3.1 応答値、限界値の算出

上下流方向の最大加速度約 4.0m/sec² の入力地震動に対する堤高 100m の重力式ダムで、2次元線形解析結果を用いた損傷評価例を以下に示す。図-3 上段図は、圧縮および引張応力の最大値が発生した、堤体が下流方向と上流方向へ最大変位した時の主応力分布から、堤体や岩盤等の破壊強度（堤体引張強度 1.92N/mm²、岩盤引張強度 0.98N/mm²、岩着部引張強度 0.34N/mm²）を超過した要素範囲から算出した損傷長である。堤体が下流側へ最大変位した時に、岩着部と岩盤内に損傷が生じる結果となった。貫通に対する限界値は、図-3 上段図で示された損傷長の先端から、損傷が上下流方向に貫通する最短長（図-3 下段図：健全な領域長）を算出して、両方を足し合わせたものである。

3.2 評価結果

前述の算出値を用いた、貫通に対する照査結果を表-1 に示す。岩盤内の損傷については、2次元線形解析では照査の要件が満足されないこととなる。このため、次の検討ステップとしては、より詳細な方法、例えば、2次元非線形解析あるいは3次元線形解析等を選択して実施することが考えられる。ここでは、2次元非線形解析により再度照査を実施する例を示す。2次元非線形解析結果において、地震作用の全時刻を通じて生じた損傷の履歴から損傷長を評価した結果を図-4 に示す。非線形解析の内容については関連報告¹⁾を参照されたい。照査結果を表-2 に示す。照査用損傷長は、それぞれの損傷長に対して安全係数 1.5（土木学会コンクリート標準示方書³⁾を参考）を乗じた値である。いずれの損傷も貫通せず照査の要件を満足している。表-1 と表-2 を比べると、応答値を限界値で除した照査結果の値は、いずれも線形解析の方が大きな値を示している。これより、線形解析の方が安全側の照査を実施していることがわかる。

4. おわりに

線形解析を用いた損傷の貫通に対する評価の考え方を示した。評価に用いた安全係数の元となるデータは少なく、今後データを収集、蓄積して、損傷箇所に応じた安全係数の設定や、安全係数の見直し等が必要と考えている。

参考文献

- 1) 西内達雄：有限要素解析を用いた重力式コンクリートダムの耐震性能照査マニュアル、電力中央研究所報告 N21、2014. 1
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁、電力土木技術協会：ダム耐震設計高度化調査報告書、2001. 3
- 3) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]、土木学会、2013. 3

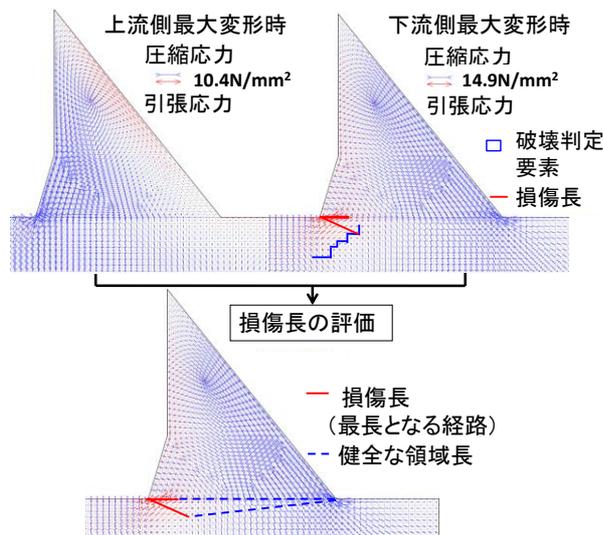


図-3 2次元線形地震応答解析に基づく損傷評価例

表-1 2次元線形地震応答解析に基づく照査結果の例

安全係数 (k = 4.5)	応答値		限界値	照査
	(1) 損傷長	(2) 照査用損傷長	(3) 貫通長	(2)/(3)
岩着	15.6m	70.2m	89.0m	0.79 ≤ 1.0
岩盤	20.4m	91.8m	83.8m	1.10 ≥ 1.0

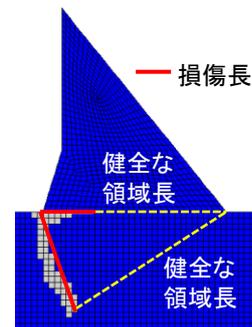


図-4 2次元非線形地震応答解析に基づく損傷評価例

表-2 2次元非線形地震応答解析に基づく照査結果の例

安全係数 (k = 1.5)	応答値		限界値	照査
	(1) 損傷長	(2) 照査用損傷長	(3) 貫通長	(2)/(3)
岩着	17.8m	26.7m	89.0m	0.30 ≤ 1.0
岩盤	47.5m	71.3m	136.4m	0.52 ≤ 1.0