

重力式コンクリートダムのクラック進展解析における 減衰特性の影響について

内田善久¹·鶴田 滋²·真保 崇³ 木全宏之⁴·藤田 豊⁵·新美勝之⁶

 ¹東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター グループマネージャー (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3) E-mail:uchita.y@tepco.co.jp
 ²東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター 副長 (同上) E-mail:tsuruta.shigeru@tepco.co.jp
 ³東電設計株式会社 第一土木本部 水力部 主任 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3) E-mail:shimpo@tepsco.co.jp
 ⁴清水建設株式会社 土木事業本部 技術第二部 課長 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館) E-mail:kimata@shimz.co.jp
 ⁵清水建設株式会社 電力エネルギー本部 原子力技術部 グループ長 (同上) E-mail:yutaka.fujita@shimz.co.jp
 ⁶清水建設株式会社 土木事業本部 設計部 主任 (同上) E-mail:nimi@shimz.co.jp

大規模地震動に対する重力式コンクリートダムのクラック進展解析を実施する場合,減衰特性がクラックの発生,進展挙動に大きな影響を及ぼすことが指摘されている.本研究では,1967年の地震で被災した Koyna ダムを対象として,従来の初期剛性比例型のレーリー減衰に対し,クラックの発生,進展に伴って時々刻々変化する瞬間剛性比例型のレーリー減衰を用い,スミアードクラックモデルによるクラック進展解析を実施した.そして,減衰特性がクラックの発生,進展挙動に及ぼす影響について,解析的検討を行った.

Key Words : Concrete Gravity Dam, Seismic Cracking Analysis, Smeared Crack Model, Rayleigh Damping, Time-domain Stiffness Proportional Damping

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以後,種々の土木構造物に ついて大規模地震動に対する耐震安全性評価の重要 性が指摘され,各種耐震設計基準類が改訂されている. 一方,ダムについては,現行の耐震設計法は震度法を 基本としているが¹⁾,震度法で設計された我が国のダム で大きな地震被害を受けた事例はないものの,震度法 では,想定以上の大規模地震動に対し,ダムがどの程 度の耐震安全性を有しているか評価できない.

重力式コンクリートダムの場合,無筋コンクリートであ ることから,大規模地震動に対する耐震安全性評価の 対象となる主な破壊現象は,堤体のクラック発生,進展 による貫通破壊であると予想されている²⁾⁻⁴⁾.重力式コン クリートダム堤体に発生するクラックの進展挙動を精緻 に追跡,評価するための手法として,コンクリートの引張 軟化特性を考慮した動的非線形解析(以後,クラック進 展解析と称する)が用いられているが³⁾⁻¹²,特に減衰特 性がダム堤体のクラックの発生,進展挙動に大きな影響 を及ぼすことが指摘されている^{3),7),8)}.

一般に,クラック進展解析といった時刻歴非線形解 析では,減衰としてレーリー減衰が適用され,レーリー 減衰は初期剛性を用いて設定されている.しかしながら, クラック進展解析において初期剛性比例型のレーリー 減衰を適用した場合,クラックの発生,進展に伴う剛性 低下によって本来クラック近傍領域の応力が開放される べきであるのに対し,減衰による応力が保持されたまま の状態となり,実現象を精緻に追跡,評価できないこと が懸念される.

本研究では,従来の初期剛性比例型のレーリー減衰

に対し,クラックの発生,進展に伴って時々刻々変化す る剛性比例型のレーリー減衰を用いたクラック進展解析 を実施し,減衰特性がクラックの発生,進展挙動に及ぼ す影響について解析的検討を行ったものである.解析 は,1967年の地震で被災したKoynaダムを対象とし,ス ミアードクラックモデルによる二次元FEMを基本に実施 した.また,解析には汎用構造解析コードDIANA¹³⁾を改 良して用いた.

2. 減衰特性の評価

レーリー減衰は,マトリックス表示すると一般に式(1) に示すように,減衰マトリックスが質量マトリックスと初期 剛性マトリックスの線形和として定義される.

$$[C] = a[M] + b[K_0]$$
(1)

ここに, [C]:減衰マトリックス, [M]:質量マトリックス, [K₀]:初期剛性マトリックス, a,b:1 次および 2 次の固有 円振動数とモード減衰定数から決定される定数である.

大規模地震時にダム堤体にクラックが発生,進展した 場合,質量マトリックスは変化しないと考えられるが,剛 性マトリックスについてはその低下によって大きく変化す ると考えられる.このため,実際のクラックの発生,進展 挙動を追跡するためには,式(2)に示すように,時々 刻々変化する剛性(以後、瞬間剛性と称する)マトリックス を用いてレーリー減衰を評価することが合理的である.

$$[C(t)] = a[M] + b[K(t)]$$
(2)

ここに, [C(t)]:減衰マトリックス, [M]:質量マトリックス, [K(t)]:瞬間剛性マトリックス, a,b:1 次および 2 次の固 有円振動数とモード減衰定数から決定される定数であ る.

ところで、無筋コンクリート構造物を対象にして,式(1) に示す減衰によるクラック発生状態を検討した研究³に よれば,減衰が大きい場合にはクラックが分散し,減衰 が小さいほどクラックは局所化しやすくなることが示され ている.この現象は鉄筋コンクリート構造物と大きく異な る点であり,無筋コンクリートにクラックが発生した場合, 本来クラック面では引張力を負担できないはずであるが, 減衰力があるために見かけ上引張力を負担できることと なる.このため,クラックは主要クラック面付近から分散 していき,分散の度合いは減衰が大きいほど大きくなる ことが示されている.このような問題に対処するため,式 (2)に示す瞬間剛性マトリックスを用いてレーリー減衰を 評価することとした.

本報では,以後式(1),式(2)の両式で示される減衰特 性の違いが重力式コンクリートダムのクラックの発生,進 展挙動に及ぼす影響について解析的検討を行った.た だし,ダム堤体にクラックが発生,進展した場合,堤体 の固有振動数は低下することとなり,レーリー減衰のうち 質量マトリックス項を考慮すると低振動数側で減衰定数 が増大しクラック近傍領域の応力が開放されないことと なる.これより,本報では質量マトリックス項を無視するこ ととし,減衰を初期剛性比例型ならびに瞬間剛性比例 型として扱うこととした.

3. Koyna ダムのクラック進展解析

(1) Koyna ダムの概要

インドにあるKoynaダムは,堤頂長約 850m,堤高約 103mの重力式コンクリートダムである(後述の図-1 参照). 重力式コンクリートダムの既往の地震被害事例は極め て少ないが,当該ダムは 1967 年 12 月 11 日の地震(マ グニチュードMs=6.5,震央距離 =13km)により被災し, ダム堤体頂部の断面変化部にほぼ水平のクラックが発 生した(後述の図-7 参照)¹⁴⁾.種々の方法でクラック調 査が行われたものの詳細は正確には把握できなかった が,クラックは上下流方向に貫通していたとされている. 加速度計が右岸側ダム取付部近傍のギャラリー(標高 約KRL2100ft.)に設置されており,ダム軸および直角方 向の水平 2 方向と鉛直方向の計 3 方向の地震記録が 観測された¹⁵⁾.地震観測記録の最大値は,それぞれ, 6.3m/s²,4.9 m/s²(後述の図-3 参照)および 3.4 m/s²で あった.

- (2) 解析条件
- a) 解析モデル

Koyna ダムを対象として,平面ひずみ状態を仮定した ダム-基礎岩盤-貯水連成系二次元 FEM によるクラック 進展解析を実施した.解析モデルを図-1 に示すが,ダ ム軸直角方向(上下流方向)の非越流部最大断面につ いて解析を実施した.

ダム堤体は、クラック進展解析においてスナップバッ ク防止のため、一辺が2mの正三角形を基本とした三 角形要素によるメッシュ分割とした.基礎岩盤の水平方 向領域はダム底面幅の約6.6倍(470.2m)、鉛直方向領 域はダム堤高の約1.5倍(150m)とした.モデル底面に は半無限境界を模擬したダッシュポットを設け、地震波 動の逸散を考慮できるよう配慮した.また、モデル側面 には自由地盤を設け、自由地盤とのエネルギー伝達を ダッシュポットにより行い、同様に地震波動の逸散を考 慮できるよう配慮した.なお、貯水については、 Westergaard 式から求められる付加質量として考慮した. b)解析定数

Koynaダムの解析定数を表-1 に示すが,既往の研 究^{7)-9,14)}を参考にして設定したものである. ダム堤体コンクリートの引張軟化構成則は,二直線 軟化則(1/4 モデル)¹⁶⁾を採用することとし(図-2 参照), 除荷時には原点指向型の履歴特性を想定した.また, コンクリートの圧縮については線形弾性として表現する とともに,クラック発生後のせん断剛性低減係数 は 0.005 とした³⁾.収束計算はNewton-Raphson法を採用し, 収束判定はエネルギーノルム(収束誤差は 10⁻⁴)により 評価した.一方,基礎岩盤については,線形弾性体と 仮定した.

減衰定数については,1 次のモード減衰h₁をダム堤 体ならびに基礎岩盤とも 5%と仮定した.固有値解析結 果から,ダム堤体ならびに基礎岩盤の1 次固有振動数 f₁は,それぞれ 3.08Hz(固有円振動数 1は 19.35rad/s), 4.99Hz(固有円振動数 1は 31.35rad/s)となり, 既述の 式(1),式(2)の定数b(=2h₁/ 1)はそれぞれ 5.17×10⁻³, 3.19×10⁻³となる.

c) 入力地震動

Koyna ダムで観測された図-3 に示すダム軸直角方 向(上下流方向)の地震記録を用い,クラック進展解析を 実施した.便宜的に地震記録が本解析モデルのダム堤 体底面レベルで観測されたものと見なし,引き戻しによ り解析モデル底面での地震動を作成し入力地震動とし て用いた.なお,鉛直方向の地震記録も観測されてい るが,本解析では水平方向のみの地震観測記録を入 力地震動として用いることとした.

14.8m



3

(3) 解析結果

最大主応力

クラック進展解析に先立ち,ダム堤体の自重,基礎 岩盤の自重および貯水の静水圧を考慮した初期応 力解析(静的弾性解析)を実施した.得られた初期応 力を用い,クラック進展解析を実施した.なお,初期 応力解析でダム堤体に発生した引張応力は,クラック 発生に至るレベルではなかった.

クラック進展解析結果として,ダム頂部と底部の相 対変位波形および代表的な時刻でのクラック開口ひ ずみ分布と最大主応力分布を図-4,図-5 に示す.ケ ース1 は初期剛性比例型の減衰を用いた解析結果 であり,ケース2 は瞬間剛性比例型の減衰を適用し た解析結果である.

相対変位波形から明らかなように,ケース1に対し, ケース2では4秒付近でクラックが貫通し解析不能と なった.ただし、相対変位波形の振幅や位相特性は、 ケース1とケース2でほとんど変わらず、概ね同様の 時刻歴波形となっている。なお、加速度波形について も両ケース概ね同様であり、ダム堤体頂部の最大加 速度は、ケース1で14.9m/s²、ケース2で12.7 m/s² であった。



図-4 ダム堤体頂部と底部の相対変位波形





⁽b) ケース2:瞬間剛性比例型減衰 図-5 ダム堤体のクラック開口ひずみ分布および最大主応力分布

クラック開口ひずみについて,ケース 1 とケース 2 で 2.5 秒付近まではほとんど差異が認められないが, クラックの進展に伴いケース 2 では頂部断面変化部 で下流側から上流側にかけて局所化したクラックが生 じている.一方,上流側から下流側にかけては頂部断 面変化部でマイクロクラックが分布して発生しているが, この領域もケース 1 に比ベケース 2 の方が狭い範囲 となっている.底部でもクラックの進展が認められ,そ の進展度合いは僅かではあるがケース 2 の方が大き く,局所化したクラックとなっている.最大主応力につ いては、クラックの進展状況に応じてクラック先端位置 で大きな引張応力が発生している。

両ケースについて, 引張軟化構成則の折れ点クラッ ク開口ひずみ、と限界クラック開口ひずみ。よしの 値となったクラック開口ひずみを抽出し表示した結果 を図-6 に示す.マイクロクラックを除き, ダムの耐震安 全性に大きな影響を与えると考えられるクラックのみを 抽出した結果である.特に。よしのクラックに着目 すると,ケース1 では底部に僅かに発生しているのみ であるのに対し,ケース2 では頂部断面変化部で上 下流側から発生し,クラックが貫通に至る様子が認め られる.なお,頂部断面変化部上流側のクラックパス は滑らかでなく蛇行しているのは三角形要素による要 素分割の方向性が原因でメッシュ依存性によるものと 考えられるが, 概ね水平にクラックが進行し途中から 下方に向かって進行している.

ところで,図-7 に示す Koyna ダムの地震被害 状況を概観すると,クラック発生位置は頂部断面 変化部に集中しており,また,正確ではないがク ラックが貫通していたとされており,ケース 2 の解析結果は地震被害状況を概ね模擬していると 考えられる.堤体底部のクラックについては,地 震被害調査報告は見当たらず,解析結果との比較 はできない.

4. まとめ

Koyna ダムを対象にして,クラック進展解析を実施 し,減衰特性がクラックの発生,進展挙動に及ぼす影響について解析的検討を行った.得られた知見を列 挙すると,以下のようになる.

従来の初期剛性比例型のレーリー減衰を用いた 場合,クラックの発生,進展に伴う剛性低下によって 本来クラック近傍領域の応力が開放されるべきである のに減衰による応力が保持されたままの状態となり, クラックは局所化しに〈〈分散する傾向を示す.これに 対し,瞬間剛性比例型のレーリー減衰を適用した場 合は,クラックの進展に伴って近傍領域の応力が開放 され局所化する傾向を示し,クラックの進展度合いも 大きい.

Koyna ダムの地震被害状況から,クラック発生位 置は頂部断面変化部に集中しており,また,正確で はないがクラックが貫通していたとされており,瞬間剛 性比例型のレーリー減衰を用いたクラック進展解析に よって地震被害状況を概ね模擬することができた.

今後の課題として,本解析では水平方向のみの入 力地震動を考慮したが,鉛直方向の入力地震動につ いても併せて考慮する必要がある.また,本解析では 減衰特性がクラックの発生,進展挙動に及ぼす影響 について検討したが,重力式コンクリートダムの耐震 安全性を議論するためには,ダム形状,入力地震動, 構成則等の影響についてより広範な解析的検討を実 施する必要があり,模型振動実験による実証的検討 も併せて実施していく必要があると考えられる.

謝辞:本研究を進めるに当たり、堀井秀之東京大学 教授から多大なる御指導や御助言を賜った。ここに、 記して深謝の意を表する次第である。



図-6 引張軟化構成則の折れ点クラック開口ひずみ 1 分布と限界クラック開口ひずみ _c分布

図-7 Koynaダムの地震被害状況14)に加筆

参考文献

- 建設省河川局,(社)日本河川協会:建設省河川砂防技 術基準(案)同解説,設計編[],平成10年3月.
- 2) (社)土木学会:土木構造物の耐震基準等に関する提言 「第三次提言」,平成12年6月.
- 経済産業省資源エネルギー庁,(社)電力土木技術協会:ダム耐震設計高度化調査報告書,平成12年度電力施設地震対策調査(発電設備耐震信頼性実証試験),平成13年3月.
- 4) 佐々木 隆, 金縄健一:大地震動(レベル 2 地震動)に
 対するコンクリートダムの耐震性評価, 土木技術資料, VOL.45, NO.4, 平成 15 年 4 月.
- 5) BAHAA EL-AIDI AND JOHN F. HALL: NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE OF CONCRETE GRAVITY DAMS, PART 1: MODELLING, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 18, pp.837-851, 1989.
- 6) BAHAA EL-AIDI AND JOHN F. HALL: NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE OF CONCRETE GRAVITY DAMS, PART 2: BEHAVIOUR, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 18, pp.853-865, 1989.
- 7) S.S. BHATTACHARJEE AND P. LEGER: SEISMIC CRACKING AND ENERGY DISSIPATION IN CONCRETE GRAVITY DAMS, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL.22, pp.991- 1007, 1993.
- 8) JEEHO LEE AND GREGORY L. FENVES: A PLASTIC-DAMAGE CONCRETE MODEL FOR EARTHQUAKE ANALYSIS OF DAMS, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 27, pp.937-956,

1998.

- 9) Hongyuan ZHANG and Tatsuo OHMACHI: 2 DIMENSIONAL ANALYSIS OF SEISMIC CRACKING IN CONCRETE GRAVITY DAMS, ダム 工学, Vol.8, No.2, pp.93-101, 1998.
- 10) RENE TINAWI, PIERRE LEGER, MARTIN LECLERC AND GIOVANNI CIPOLLA: SEISMIC SAFETY OF GRAVITY DAMS: FROM SHAKE TABLE EXPERIMENTS TO NUMERICAL ANALYSIS, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp.518-529, 2000.
- 11) Hongyuan ZHANG and Tatsuo OHMACHI: SEISMIC CRACKING AND STRENGTHENING OF CONCRETE GRAVITY DAMS, ダム工学, Vol.10, No.3, pp.232-240, 2000.
- 12)Kashiwayanagi.M,Horii.H,Uchita.Y,Kimata.H,Kakiage.
 H and Yoshida.J: Evaluation on Critical State of Concrete Gravity Dams based on Seismic Cracking Analysis,69th ICOLD Workshop,2001.9.
- 13) http://www.diana.nl/
- 14) ANIL K. CHOPRA AND P. CHAKRABARTI: THE KOYNA EARTHQUAKE AND THE DAMAGE TO KOYNA DAM, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.63, No.2, pp.381- 397, 1973.
- 15)JAI KRISHNA, A. R. CHANDRASEKARAN AND S. S. SAINI: ANALYSIS OF KOYNA ACCEROGRAM OF DECEMBER 11, 1967, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 59, No.4, pp.1719-1731, 1969.
- 16)Rokugo,K.,Iwasa,M.,Suzuki,T. and Koyanagi,W.:Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete,Fracture Toughness and Fracture Energy,Balkema,pp.153-163,1989.

(2003.6.24 受付)

Effect of Damping Characteristics in Seismic Cracking Analysis for Concrete Gravity Dams

Seismic analysis considering crack propagation is very sensitive to damping characteristics. In this paper, Koyna dam is analyzed using the smeared crack model. We applied two damping characteristics for this problem. One is proportional to initial stiffness and the other is also proportional but to time-domain stiffness. The former shows diffused crack pattern and it is not realistic. However, the localized crack pattern appears in the latter case. Consequently, it is better to use proportional damping that is related to time-domain stiffness in the dynamic crack propagation problem of concrete gravity dam.