

◆ 特集：新しい時代に向けたダム技術 ◆

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

佐々木 隆* 金縄健一** 山口嘉一***

1. はじめに

現在、日本のダムの設計は河川管理施設等構造令に基づいて行われ、その中において耐震設計は簡便な震度法を用いることとしている。震度法により設計されたダムは、過去の大地震によって重大な被害を受けていないことから、その耐震性は十分に高いものと判断されている。しかし、図-1に示すように震度法で仮定している堤体の高さ方向に一様な震度分布は、実際のダムの実測結果とは大きく異なっているなど、設計の合理性に欠けるところがある。

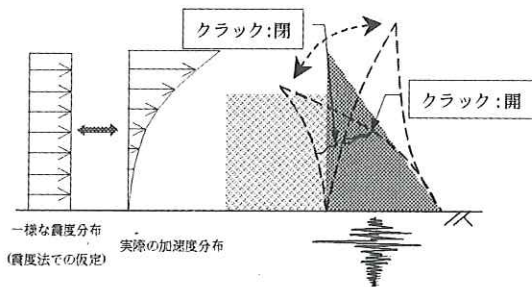


図-1 大規模地震時の重力式コンクリートダムの挙動

コンピュータの性能や数値解析技術の飛躍的な進歩に伴い、近年では動的解析によって地震時のダムの挙動を再現し安全性を評価することが可能になってきている。一方、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。よって、できる限り実際のダムの挙動を精度良く再現したうえで、

合理的にダムの地震時の安全性を照査することが重要になってきている。

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る。本報では、大規模地震を想定した時の重力式コンクリートダムのクラック進展に関して、数値解析手法により検討した結果について報告する。

2. コンクリートのクラック進展を考慮する数値解析手法および検討項目

数値解析法により、コンクリートダム堤体内の引張破壊を考慮する方法の主なものとして、図-2に示すように、離散型クラックモデルと分布型クラックモデルがある¹⁾。離散型クラックモデルは、引張破壊により発生したクラックの開きを変位として考慮できる要素（例：ジョイント要素）を用いるもので、通常クラックが入る可能性がある位置に予めクラックを表現する要素を導入して解析を行うことが一般的である。動的解析中にクラックが入る場所を特定しながらクラックを表現する要素を導入していく方法もあるが、計算途中段階で

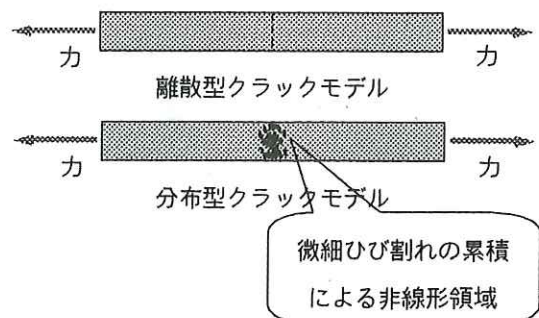


図-2 離散型クラックモデルと分布型クラックモデル

要素分割形状を修正することが必要になる場合には多大な計算時間を必要とするため、コンピュータ技術が進歩した現在でも動的解析においては実用的な方法には至っていない。

一方、分布型クラックモデルは、要素自体にクラック発生前後の特性を付与する方法で、予めクラックが入る場所を設定する必要がない。また、クラック発生後もコンクリートを連続体として扱い、クラックを要素の材料特性の変化としてモデル化するので、初期に設定した幾何学的条件を変更することなくクラックの進展を追跡できる。しかし、この分布型クラックモデルは、クラック発生が構造物の応力状態、巨視的な変形状態に与える影響を表現することは可能であるが、クラックの開きをひずみに置き換えて評価する手法であるため、クラックそのものの開きを評価することには適していない。ダム堤体内の引張破壊を考慮する方法には、これ以外にも種々の手法があるが、各々に一長一短がある。

大規模地震時における重力式コンクリートダム堤体のクラック発生箇所および進展方向を予め推定・予測することは困難であることから、重力式コンクリートダムのクラック進展解析では分布型クラックモデルを用いることとした²⁾。コンクリート材料の破壊進行は、引張軟化開始応力、破壊エネルギー、軟化曲線形状などのコンクリート材料の引張軟化特性により決定づけられる。本報では、地震時における重力式コンクリートダム堤体内のクラック発生位置を把握するとともに、コンクリートの引張軟化特性(引張軟化開始応力、破壊エネルギー)がダムへのクラックの発生、進展に与える影響に関して検討を行った結果を報告する。

3. 正弦波振動に対する挙動

3.1 検討条件

分布型クラックモデルを用いて正弦波による重

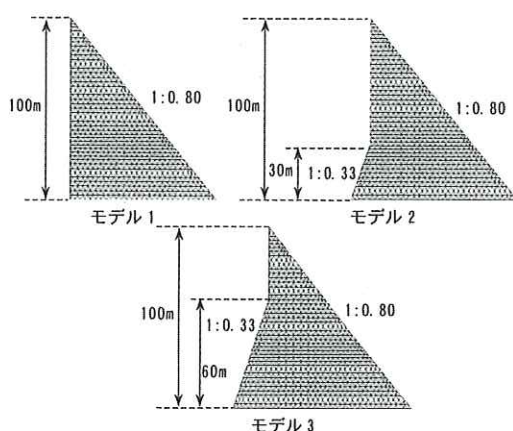


図-3 解析モデル

表-1 コンクリートの材料物性値

構成モデル	線形弾性-単直線近似
弾性係数 E (MPa)	3.00E+04
ポアソン比	0.2
引張軟化開始応力 f_t (MPa)	2.0、2.5、3.0、4.0
破壊エネルギー G_f (N/m)	100、200、300、400、500
圧縮強度 f_c (MPa)	$f_t \times 10$
単位容積質量 (kg/m^3)	2,300
減衰定数 (%)	10 (レーリー減衰1.3次)

力式コンクリートダムのクラック進展解析を実施し、コンクリートの破壊に関する材料特性がダムへのクラックの発生、進展に与える影響について検討を行う。解析モデルは、図-3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。解析に用いた材料物性値を表-1に示す。減衰は、コンクリートの破壊を考慮しない線形モデルに対する1次および3次の固有振動数を用いて、レーリー型減衰として与えた。また、引張軟化曲線は図-4に示す単直線を用

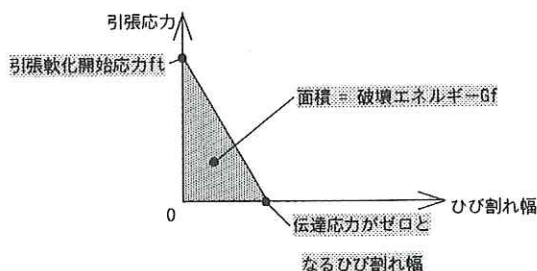


図-4 引張軟化曲線 (単直線近似モデル)

いて、固定ひび割れモデル（ひび割れ発生後、そのひび割れ方向を固定し、主ひずみ方向が変化した場合、ひび割れ面でのせん断伝達を考える分布型クラックモデル）で解析を行った。静的な荷重として自重と静水圧のみを考慮した。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。なお、揚圧力は考慮していない。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。図-5にモデル2の解析に用いた入力波形を、表-2に各形状のダムに用いた入力波形の諸元を示す。解析には汎用有限要素法解析プログラム“DIANA”³⁾を用いている。なお、比較のためコンクリートの破壊を考慮しない線形解析も行っている。

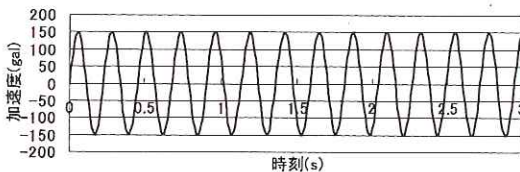


図-5 入力波形（正弦波）

表-2 入力波形の諸元

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

3.2 解析結果

(1) 堤体の応答

図-6に、モデル2についての線形動的解析での天端の応答加速度および応答変位時刻歴を示す。なお、下流側を正としている。図より、天端では2000gal以上に応答していることが分かる。図-6(b)に示すように、天端が下流側に大きく変位した時刻を便宜上、一波、二波と呼ぶことにする。図より、四波あるいは五波程度から堤体の応答は

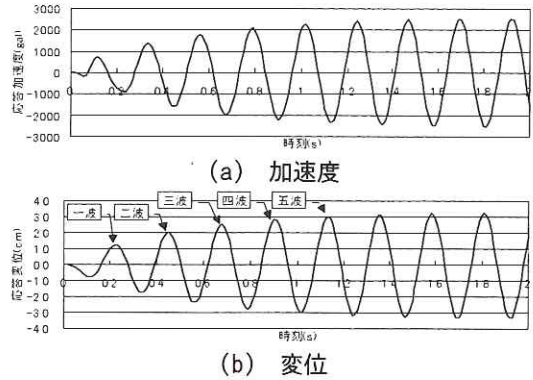


図-6 天端の応答時刻歴

ほぼ定常状態となっていることが分かる。

(2) 地震時クラック発生位置

図-7は、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つのモデルに対するクラック進展解析の結果、最終的にクラックの発生した位置を示したものである。これは、解析中に発生したクラックすべての位置を示したもので、黒塗要素にクラックが発生している。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

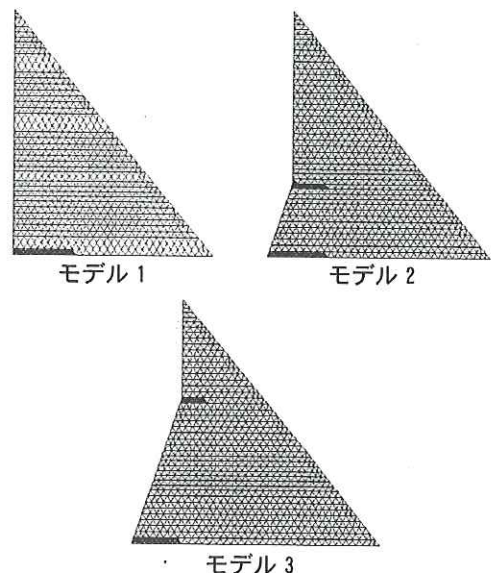


図-7 最終的なクラック発生位置

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ているが、重力式コンクリートダムは地震時には堤体底部と勾配変化点付近にクラックが発生しやすいことが分かる。なお、地震加速度の大きさ、地震波の種類、あるいはコンクリートの引張強度によっては、図-8に示すように、下流面にもクラックが発生する結果となる場合がある。

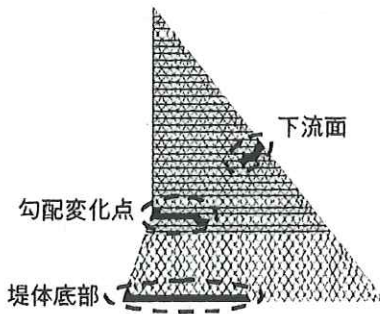


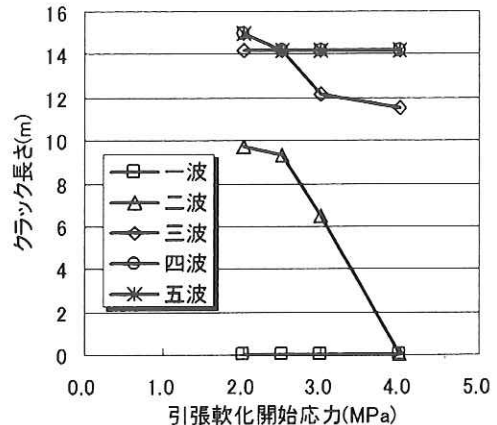
図-8 下流面におけるクラック発生例

(3) クラック長さに対する引張軟化開始応力の影響

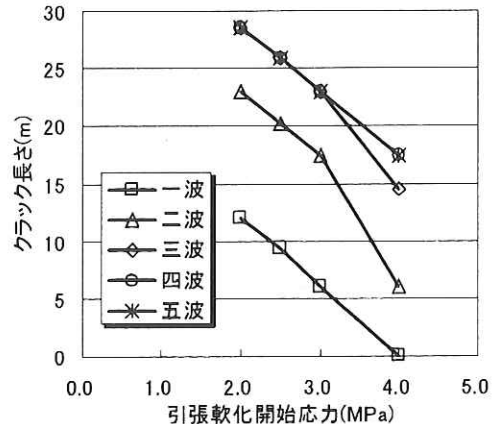
図-9は、破壊エネルギーを300N/mの一定値として、モデル2の引張軟化開始応力とクラック長さ（ダム表面からクラック先端までの最長距離）の関係を、一波から線形解析での応答が定常に達したと見なせる五波までを示したものである。なお、(a)は勾配変化点 (b)は堤体底部である。図より、引張軟化開始応力が小さくなれば、クラック進展長さは大きくなることが分かる。また、今回の入力波のように加速度が同じ振幅の波で連続的に作用する場合でもクラックは進展し続けることはなく、ある一定の長さに収束することが分かる。これより、クラックは一度発生した時点での入力よりレベルの大きい入力がないと進展しにくいと考えられる。

(4) クラック長さに対する破壊エネルギーの影響

図-10は、引張軟化開始応力を2.5MPaの一定値として、モデル2の破壊エネルギーとクラック進展長さの関係を一波から五波までを示したもの



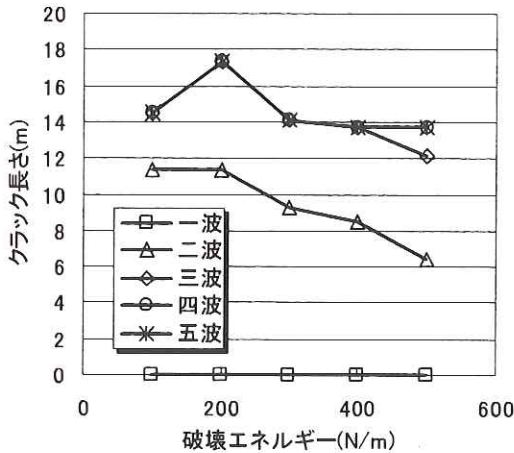
(a) 勾配変化点



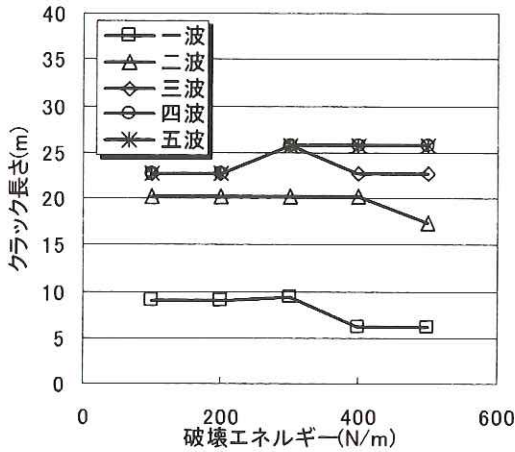
(b) 堤体底部

図-9 引張軟化開始応力とクラック進展長さの関係 (Gf=300N/m)

である。なお、(a)は勾配変化点 (b)は堤体底部である。図より、破壊エネルギーの増加に伴いクラック進展長さは減少し、クラックが進展しにくくなっていることが分かる。しかし、破壊エネルギーの増加に伴いクラック長さが増加するところがある。それは勾配変化点および堤体底部に発生するクラックが各々ダム堤体の応答に影響を及ぼし、その微妙な変化の結果として上記のような現象が生じたものと考えられる。また、引張軟化開始応力の影響の検討と同様、クラックはある一定の長さに収束することから、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考えられる。

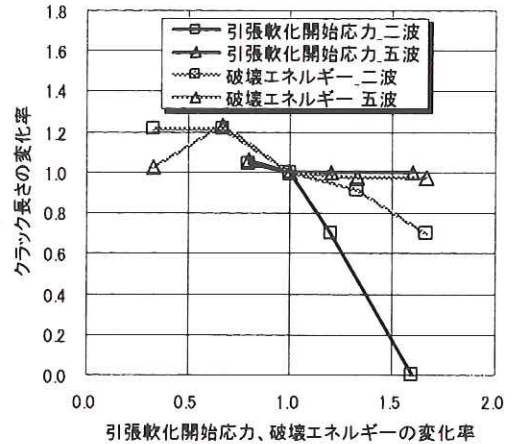


(a) 勾配変化点

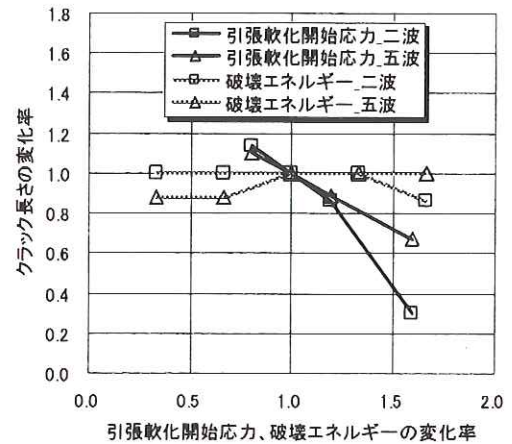


(b) 堤体底部

図-10 破壊エネルギーとクラック進展長さの関係 (ft=2.5MPa)



(a) 勾配変化点



(b) 堤体底部

図-11 クラック長さの変化率

(5) 引張軟化開始応力と破壊エネルギーの影響度の比較

図-11は、モデル2について、引張軟化開始応力2.5MPa、破壊エネルギー300N/mの場合のクラック長さを基準値として、クラック進展長さとして引張軟化開始応力または破壊エネルギーの変化率の関係を示したものである。なお、(a)は勾配変化点、(b)は堤体底部で、図には二波および五波での結果を示している。図より、二波のようにクラックが進展し続け応答がまだ定常に至っていない場合は引張軟化開始応力を変えた場合の方が傾きが急

となり、破壊エネルギーよりクラック進展に与える影響が大きいことが分かる。しかし、五波のように応答が定常となった場合には、引張軟化開始応力および破壊エネルギーを変えた場合のクラック長さの変化率の変化率はともにそれほど大きくなく、その傾向は堤体底部より勾配変化点においてより大きく現れている。

4. 実測地震波に対する挙動

4.1 検討条件

ここではダムで観測された実測波形を用いて3.と同様の検討を実施する。解析モデルは図-3のモ

デル2を用いて、解析条件は3.1と同様とした。入力地震動として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加速度波形（最大加速度183gal）の振幅のみを引き伸ばして用い、下流側を正として堤体底部より水平方向に入力した。図-12に、最大加速度を300galに引き伸ばした入力波形を例として示す。

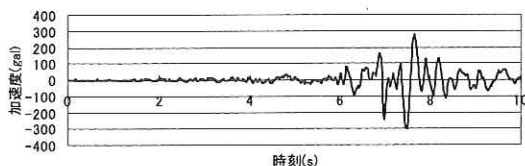


図-12 入力波形（一庫波の引き伸ばし波）

4.2 解析結果

(1) 堤体の応答

図-13に、モデル2についての線形動的解析およびクラック進展解析での天端の応答加速度および

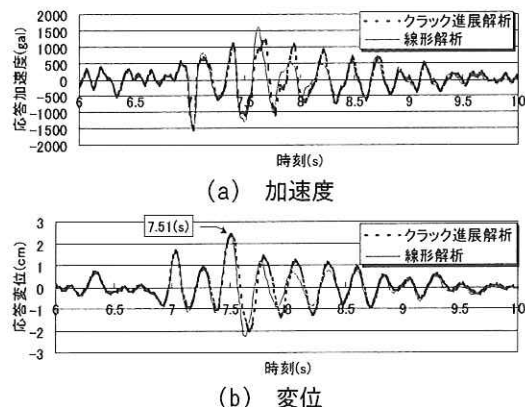


図-13 線形解析による天端の応答時刻歴

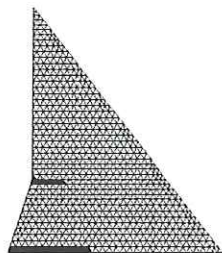


図-14 最終的なクラック位置
(最大加速度300gal, $f_t=2.5\text{MPa}$, $G_f=300\text{N/m}$)

応答変位時刻歴を、図-14にクラック進展解析による最終的なクラック位置を示す。なお、引張軟化開始応力は2.5MPa、破壊エネルギーは300N/mである。クラックは下流側へ最も変位した7.51(秒)に図-14に示すすべてのクラックが発生した。図-13より、その後の堤体の応答は線形弾性体の場合と比較して差が大きくなっているのが分かる。

(2) クラック長さに対する最大加速度の影響

図-15は、モデル2について、最大加速度とクラック長さの関係を、勾配変化点および堤体底部について示したものである。なお、引張軟化開始応力2.5MPa、破壊エネルギー300N/mである。図より、最大加速度が大きくなればクラック長さも長くなり、最大加速度とクラック長さはほぼ線形の関係にあることが分かる。

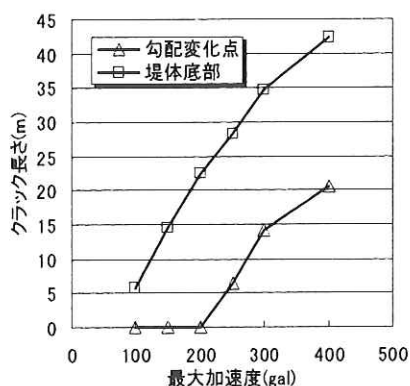


図-15 最大加速度とクラック長さの関係
($f_t=2.5\text{MPa}$, $G_f=300\text{N/m}$)

(3) クラック長さに対する引張軟化開始応力の影響

図-16は、モデル2について、引張軟化開始応力とクラック進展長さの関係を、勾配変化点および堤体底部について示したものである。なお、破壊エネルギーは300N/mで一定である。入力波形の最大加速度は、これ以降300galである。図より引張軟化開始応力が大きくなるにつれてクラック進展長さが小さくなり、引張軟化開始応力とクラック進展長さはほぼ線形の関係にあることが分かる。

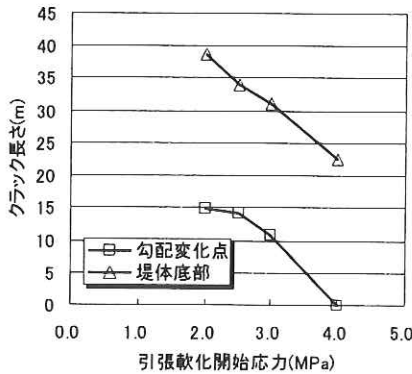


図-16 引張軟化開始応力とクラック進展長さの関係
($G_f=300\text{N/m}$)

(4) クラック長さに対する破壊エネルギーの影響

図-17は、モデル2について、破壊エネルギーとクラック進展長さの関係を、勾配変化点および堤体底部について示したものである。なお、引張軟化開始応力は2.5MPaで一定である。図より破壊

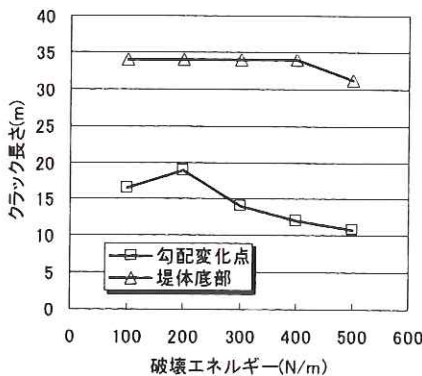
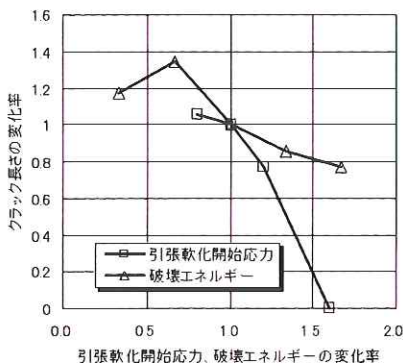
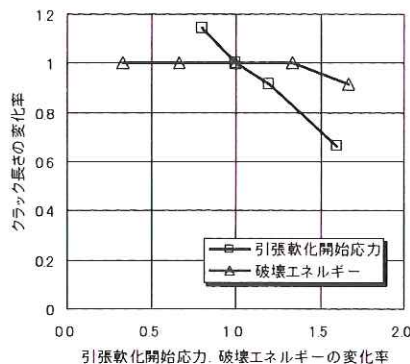


図-17 破壊エネルギーとクラック進展長さの関係
($f_t=2.5\text{MPa}$)



(a) 勾配変化点



(b) 堤体底部

図-18 クラック長さの変化率

エネルギーが大きくなるにつれてクラック長さが若干小さくなる傾向にあるが、特に堤体底部ではほとんど変化していないことが分かる。

(5) 引張軟化開始応力と破壊エネルギーの影響度の比較

図-18に、モデル2について、引張軟化開始応力2.5MPa、破壊エネルギー300N/mの場合のクラック進展長さを基準として、クラック進展長さの変化率と、引張軟化開始応力および破壊エネルギーの変化率の関係を示したものである。図より引張軟化開始応力を変えた場合の方が傾きが急となり、破壊エネルギーよりクラック進展に与える影響が大きいことが分かる。これは、解析に用いる材料物性を設定する際には引張軟化開始応力の方を破壊エネルギーより適切に設定する必要があることを意味する。

(6) 正弦波との比較

図-19は、モデル2について、引張軟化開始応力2.5MPa、破壊エネルギー300N/mの場合のクラック進展長さを基準として、クラック進展長さと引張軟化開始応力の変化率の関係を、正弦波二波および五波、実測波形（一庫ダム観測）について示したものである。図より、実地震波は今回実施した正弦波を用いた解析の定常状態よりは過渡的な状態に近いことが分かる。これは一庫波において大きな

な加速度を示す状態が長く続いていないためであり、大きな加速度を生じる波数が増大すると、クラックがさらに進展する可能性がある。しかし、波形の種類および最大加速度レベル等にもよるが、正弦波による解析でみた

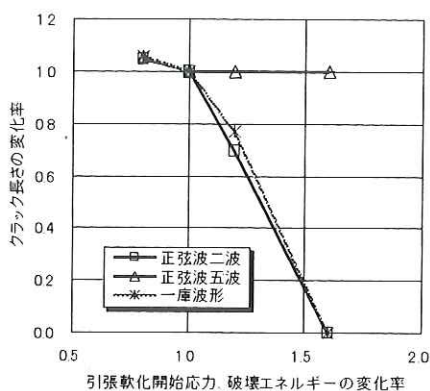


図-19 正弦波と実地震波

おり、クラックの進展長さはある値に収まると考えられる。

5. まとめ

本検討により、以下のことがわかった。

- (1) 単直線近似の引張軟化曲線を採用して分布型クラックモデルを用いたモデルダムに対する解析結果から、重力式コンクリートダムは地震時には堤体底部および勾配変化点付近にクラックが発生しやすい。
- (2) 今回の正弦波に対する解析より、クラック長さが堤体幅に対してそれほど大きくない場合には、大きな加速度が連続的に作用する場合でもクラックはある一定の長さに収束する。
- (3) クラック進展が過渡的な状態では、破壊エネルギーより引張軟化開始応力がクラック長さ

に与える影響がかなり大きい。

- (4) しかし、クラック進展が定常となった状態では、破壊エネルギーおよび引張軟化開始応力がクラック長さに与える影響にそれほど差はない。
- (5) 最大加速度部の波形が連続しない実地震波に対する解析では、今回実施した正弦波を用いた解析の定常状態よりは過渡的な状態に近く、クラック長さは引張軟化開始応力の影響を大きく受けやすい。

今後は、引張軟化曲線の形状を含め破壊に関する材料特性がクラック進展に与える影響に関する検討をさらに進めるとともに、クラック発生後のダムの安定性評価方法について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳裕: 仮想ひび割れモデルを組込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートのひびわれの有限要素解析, 土木学会論文集, No.466, V-19, pp.79-88, 1993.5
- 2) 張宏遠, 大町達夫: 重力式コンクリートダム-貯水系の地震時クラック解析のためのFE-BE手法, ダム工学, Vol.11 No.4, pp.266-274, 2001.12.15
- 3) 土木建築分野向け汎用構造解析ソフトウェア“DIANA”, 広報誌SENAC, Vol.32, No.2, 1999.4

佐々木 隆*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物主任研究員
Takashi SASAKI

金縄健一**



同 水工研究グループダム構造物研究員
Kenichi KANENAWA

山口嘉一***



同 水工研究グループダム構造物上席研究員, 工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI