

Ⅲ-7 コンクリートダムの耐震性評価法の合理化に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐々木隆、金縄健一

【要旨】

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。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。そこで、分布型クラックモデルを用いた重力式コンクリートダムの地震時クラック進展解析に関して研究を進めてきた。

本研究の成果として、クラックの発生を考慮できる分布型クラックモデルを用いたクラック進展解析を行い、その結果として得られたクラック発生状態での地震後常時の安定解析を行うという、大規模地震時における重力式コンクリートダムの耐震性評価手法を提案した。

キーワード：大規模地震、重力式コンクリートダム、分布型クラックモデル、クラック進展解析

1. はじめに

日本のダムの耐震設計は、簡便な震度法を用いて行われている。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。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）を受けた場合でも、致命的な被害を受けないことを照査することが強く求められている。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。本課題では、クラック発生を考慮できる最新の数値解析技術を利用した重力式コンクリートダムの耐震性評価に関する研究を行い、大規模地震に対する重力式コンクリートダムの耐震性評価方法を提案する。

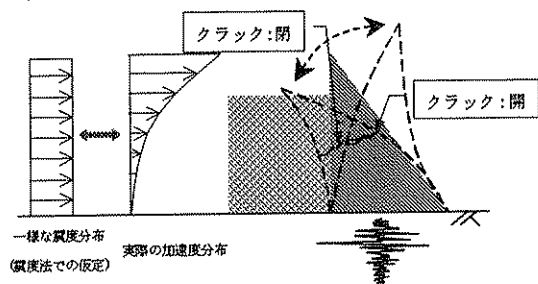


図-1 大規模地震時の重力式コンクリートダムの挙動

2. 解析手法

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。

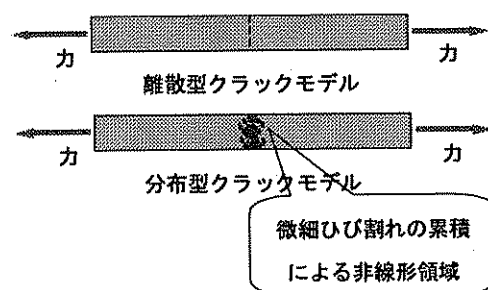


図-2 離散型クラックモデルと分布型クラックモデル

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（例えば、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入れて解析を行う。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、計算途中の要素分割形状の修正により、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。分布型クラックモデルでは、クラック発生による変位がある幅（代表要素長 h ）で均等に分布する非弾性ひずみに置きかえる方法を用いている。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。

大規模地震時の重力式コンクリートダムの安定性評価を行うためには、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、本課題では分布型クラックモデルによりクラック進展を表現する動的解析を用いて重力式コンクリートダムの耐震性評価の研究を進めることとした。

3. 研究方法

3.1 三点曲げ試験を対象とした静的解析による検討

コンクリートの非線形材料物性の一つに破壊エネルギーがあり、それを求めるための試験として図-3に示す三点曲げ試験がある。試験では、荷重と変位量の関係を測定し、その結果から破壊エネルギーを算出する¹⁾。ここでは、分布型クラックモデルを用いて三点曲げ試験を対象とした静的解析を実施し、コンクリートの非線形材料特性が荷重-変位曲線に与える影響について基礎的な検討を行う。

分布型クラックモデルを用いて解析を行う場合、一要素当りの代表要素長 h （要素の大きさ、形状および変位の補間次数から算出されるもので、一般に要素寸法が大きくなれば代表要素長は大きくなる）をコンクリートの特性長さ l_{ch} （弾性係数、引張軟化開始応力、破壊エネルギー、引張軟化曲線近似より算出される）より小さく要素分割を行う必要がある。これは、代表要素長 h がコンクリートの特性長さ l_{ch} を越えると、ひび割れ直交方向の応力-ひずみ関係が引張強度以降、応力の減少とともに変位も減少するスナップバックという現象が発生し、計算が不安定となるためである。しかし、ダムの有限要素法解析を想定した場合、ダムの構造寸法が大きいため必然的に大きい要素を用いることとなり、つまり一要素当りの代表要素長 h が大きく

なる。そのため、引張軟化曲線にコンクリートの特性長さが比較的大きくとれる単直線近似（図-4(b)参照）を用いている例が多い。そこで、一般的なコンクリート材料の引張軟化曲線として用いられることの多い二直線近似（図-4(a)参照）との解析結果に与える影響の比較検討も行う。

解析モデルを、図-5に示す。解析に用いた材料物性値を表-1に示す。図-4に示す二直線近似および単直線近似による引張軟化曲線を用いて、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慮する分布型クラックモデル）で解析を行った。境界条件については、左端から 50mm 最下点を剛結、右端を鉛直ローラーとした（図-5参照）。荷重条件は、右端最上部より下向きに力を与えた。なお、解析には汎用有限要素法解析プログラム“DIANA”²⁾を用いている。

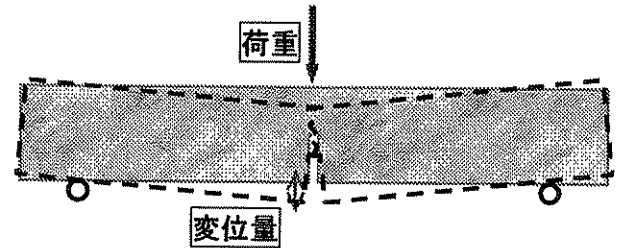
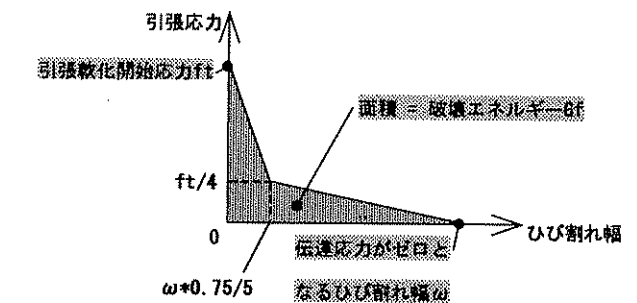
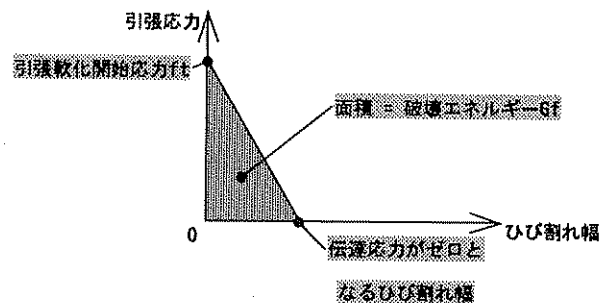


図-3 三点曲げ試験の概要



(a) 二直線近似モデル



(b) 単直線近似モデル

図-4 引張軟化曲線

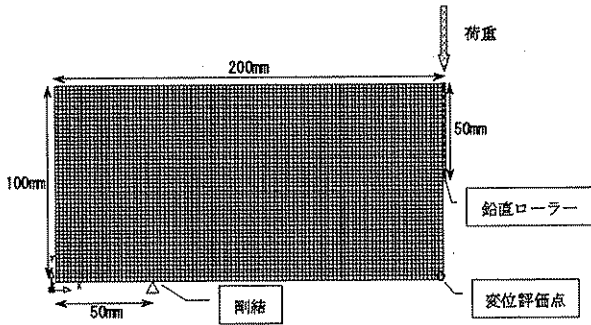


図-5 解析モデル
表-1 材料物性値

項目	物性値
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)	3.0、4.5、6.0、7.0
破壊エネルギー G_f (N/m)	150、300、600
圧縮強度 f_c (MPa)	$f_t \times 10$

3.2 モデルダムを対象とした動的解析による検討

3.2.1 正弦波による検討

分布型クラックモデルを用いて正弦波による重力式コンクリートダムのクラック進展解析を実施し、コンクリートの非線形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-6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-2に示す。減衰は、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、レイリー型減衰として与えた。図-4に示す単直線による引張軟化曲線を用いて、固定ひび割れモデルで解析を行った。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。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で各ダムモデル毎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。表-3に各形状のダムに用いた入力波形の諸元を、図-7にモデル2の解析に用いた入力波形を示す。なお、比較のため線形解析も行った。

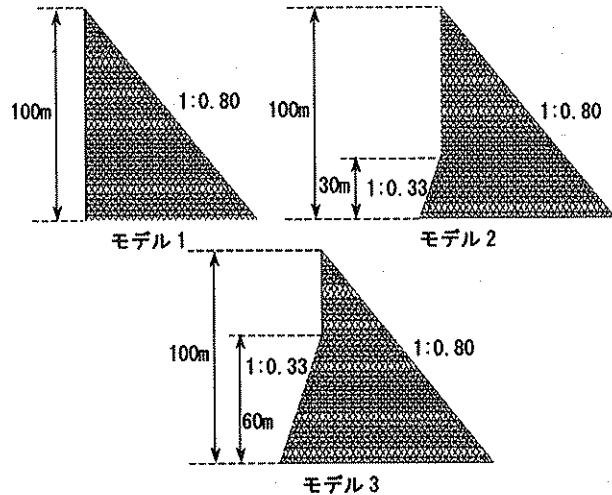


図-6 解析モデル
表-2 材料物性値

構成モデル	線形弾性-単直線軟化
弾性係数 E (MPa)	3.00E+04
ポアソン比	0.2
引張軟化開始応力 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 (レイリー減衰1,3次)

表-3 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

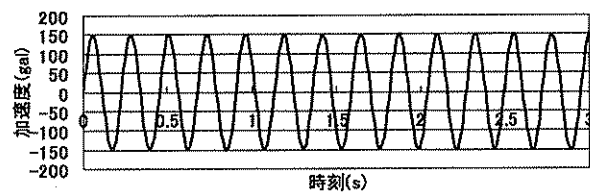


図-7 入力波形(正弦波)

3.2.2 実地震波による検討

ここではダムで観測された実測波形を用いて3.2.1と同様の検討を実施した。解析モデルは図-6のモデル2を用い、解析条件は3.2.1と同様である。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-8に、最大加速度を300galに引き伸ばしたの入力波形を例として示す。

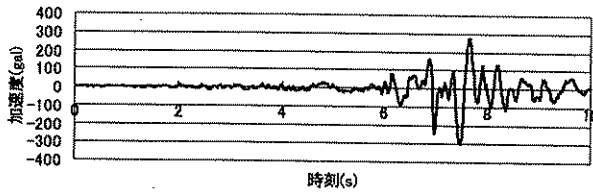


図-8 入力波形（一周期の引き伸ばし波）

3.3 地震後の堤体安定性に関する検討

分布型クラックモデルを用いた動的解析では、大きな地震時には堤体にクラックが発生する可能性が示される。そこで、そのような地震時に延伸した堤体内クラックが地震後の状態における堤体安定性に与える影響について検討する。

地震後の堤体の安定性は、発生したクラック内に上流側貯水池の静水圧に相当する揚圧力を作用させた状態で検討する。なお、堤体内（クラック発生標高）の応力は梁理論により評価し、その標高における滑動に対しては堤体全体としての安定性として検討を行った。なお、安定解析にあたっては、図-9に示すように、上流側のクラック部とその下流側のクラック無部をわけ、クラック部についてはせん断強度、摩擦係数ともに0（ゼロ）と仮定した。揚圧力については、図-10に示すように、クラック内の揚圧力をその標高における上流面の静水圧と同じと仮定し、下流側のクラック無部においては静水圧から0まで直線的に変化するとした。なお、コンクリートのせん断強度は圧縮強度25MPaの1/10の2.5MPa、摩擦係数は1.0と仮定した。

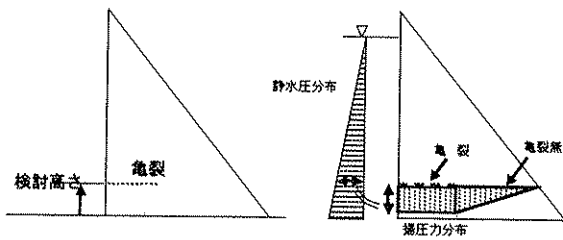


図-9 クラックの設定 図-10 クラックの状態と揚圧力の設定

4. 研究結果

4.1 三点曲げ試験を対象とした静的解析による検討

1) 引張軟化曲線の影響

図-11は、引張軟化曲線を単直線および二直線で近似した場合の荷重と右端最下点（図-5に位置を示す箇所）の変位の関係で、引張軟化応力3.0、4.5MPaについて示したものである。なお、破壊エネルギーは300N/mで一定とした。図より、どのケースにおいても荷重が最大値をとった後、徐々に荷重が減少すると同

時に変位も大きくなり、分布型クラックモデルで荷重-変位曲線をうまく表現できていることが分かる。また、実際の物性をより厳密に表現していると考えられる二直線近似の場合は単直線近似より最大荷重が小さくなり、最大荷重時の変位も小さくなることが分かる。また、図には引張軟化曲線を単直線近似で引張軟化開始応力を3.0MPaより10%下げ破壊エネルギーを300N/mより19%下げたケースも併記している。図より最大荷重が引張軟化開始応力3.0MPaの二直線近似とほぼ同じ値になっているのが分かる。よって、解析上の制約から単直線近似の引張軟化曲線を用いる場合には、破壊エネルギーおよび引張軟化開始応力を適宜割引くことが必要となると考えられる。

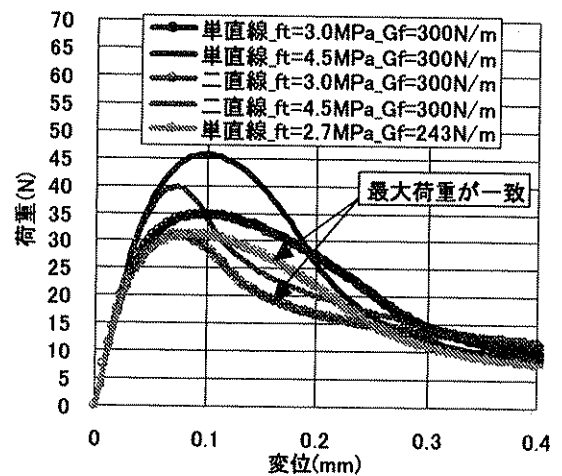


図-11 引張軟化曲線の影響

2) 引張軟化開始応力の影響

図-12は、載荷荷重と右端最下点での鉛直方向変位の関係で、引張軟化開始応力3.0、4.5、6.0、7.0MPaについて示したものである。なお、引張軟化曲線は単直線近似を用い、破壊エネルギーは300N/mで一定とした。図より引張軟化開始応力が大きくなるにつれて最大荷重は大きくなるが、最大荷重時の変位はほとんど変わらないことが分かる。

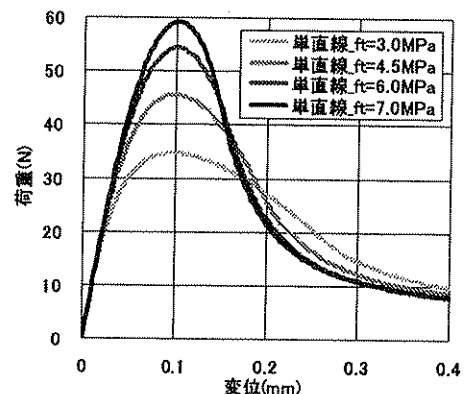


図-12 引張軟化開始応力の影響 (Gf=300N/m)

3) 破壊エネルギーの影響

図-13は、載荷荷重と右端最下点での変位の関係で、破壊エネルギー150、300、600N/mについて示したものである。なお、引張軟化曲線は単直線近似を用い、引張軟化開始応力は3.0MPaで一定とした。図より破壊エネルギーが大きくなるにつれて最大荷重は大きくなり、最大荷重時の変位も大きくなる事が分かる。また、破壊エネルギーが大きいと最大荷重を越えた後もしばらくは引張応力を伝えることができ、破壊エネルギーが小さいと最大荷重を越えた後すぐに引張応力を伝達できなくなる傾向にある。

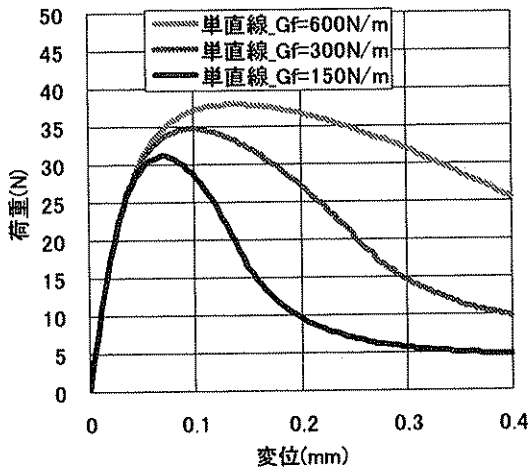


図-13 破壊エネルギーの影響 (ft=3.0MPa)

4) 引張軟化開始応力と破壊エネルギーの影響度合の比較

図-14は、引張軟化開始応力 3.0MPa、破壊エネルギー300N/mでの最大荷重を基準として、最大荷重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。なお、引張軟化曲線は単直線近似を用いた。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最大荷重に与える影響がかなり大きいことが分かる。

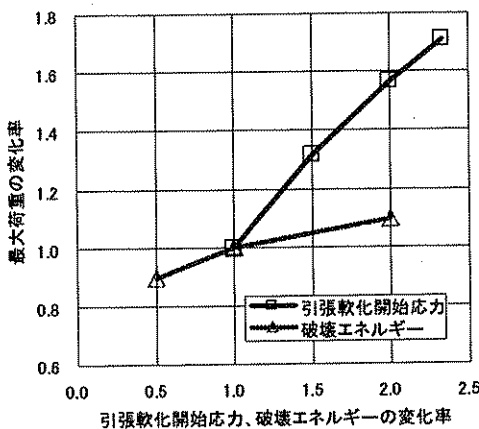


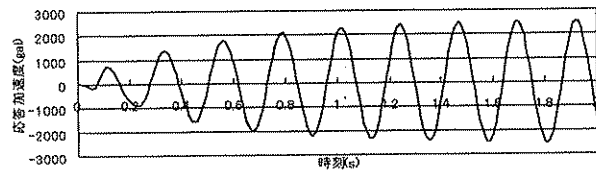
図-14 最大荷重の変化率

4.2 モデルダムを対象とした動的解析による検討

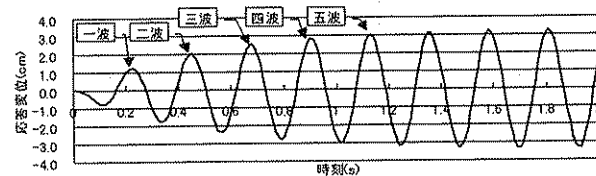
4.2.1 正弦波による検討

1) 堤体の応答

図-15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以上応答していることが分かる。図-15(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…とする。図より、四波あるいは五波程度からほぼ定常状態となっていることがわかる。



(a) 加速度



(b) 変位

図-15 天端の応答時刻歴

2) 地震時クラック発生位置

図-16は、引張軟化開始応力 3.0MPa、破壊エネルギー300N/mの条件で、3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厳しい条件となっており、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、下流面にもクラックが発生する結果となる場合がある。

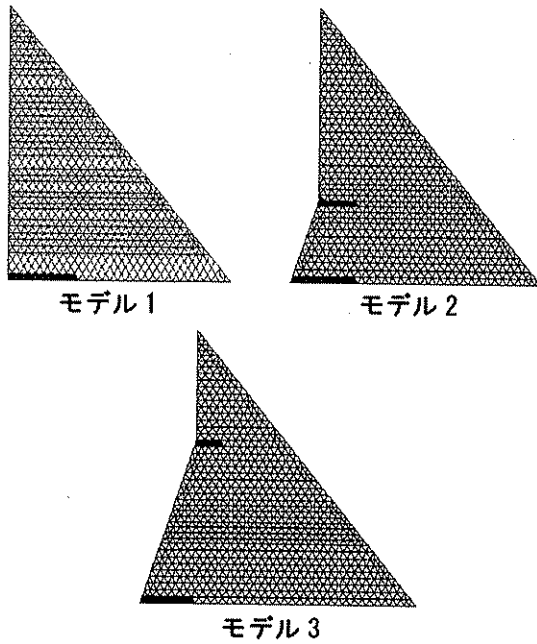


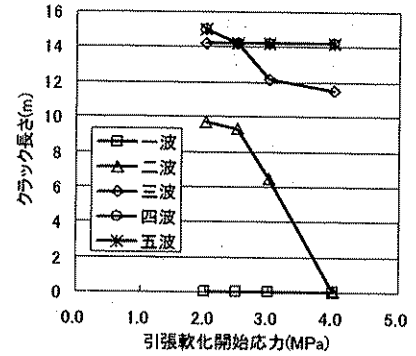
図-16 最終的なクラック発生位置

3) 引張軟化開始応力の影響

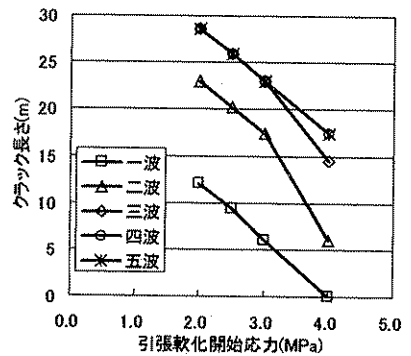
図-17は、モデル 2 の引張軟化開始応力とクラック長さ（ダム表面からクラック先端までの最長距離）の関係で、一波から線形解析での応答が定常に達したと見なせる五波までを示したものである。なお、(a)は勾配変化点 (b)は堤体底部であり、破壊エネルギーは 300N/m である。図より、引張軟化開始応力が小さくなれば、クラック進展長さは大きくなること分かる。また、今回の入力波のように加速度が同じ振幅の波で連続的に作用する場合でもクラックは進展し続けることはなく、ある一定の長さに収束することが分かる。これより、クラックは一度発生した時点での入力よりレベルの大きい入力がないと進展しにくいと考えられる。

4) 破壊エネルギーの影響

図-18は、モデル 2 の破壊エネルギーとクラック進展長さの関係で、引張軟化開始応力の影響の検討と同様、一波から五波までを示したものである。なお、(a)は勾配変化点 (b)は堤体底部であり、引張軟化開始応力は 2.5MPa である。図より、破壊エネルギーの増加にともなう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。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。

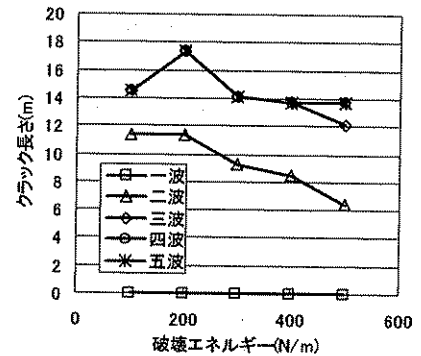


(a) 勾配変化点

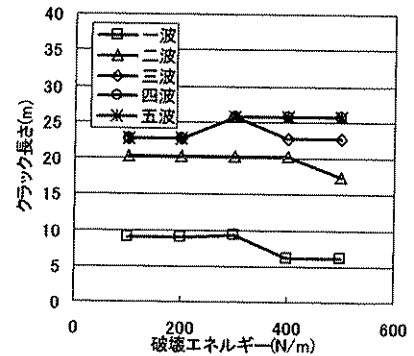


(b) 堤体底部

図-17 引張軟化開始応力とクラック進展長さの関係 (Gf=300N/m)



(a) 勾配変化点

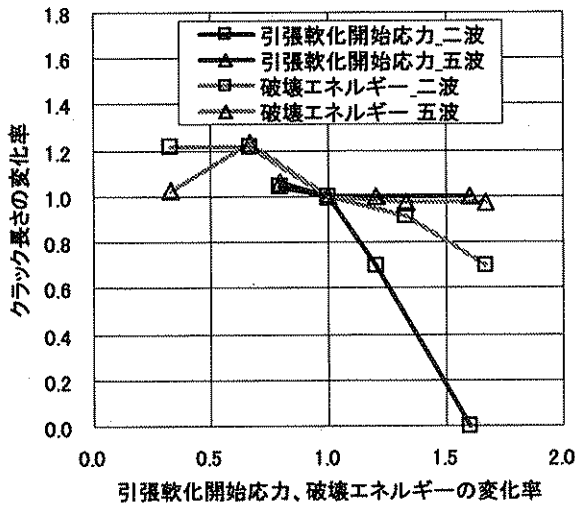


(b) 堤体底部

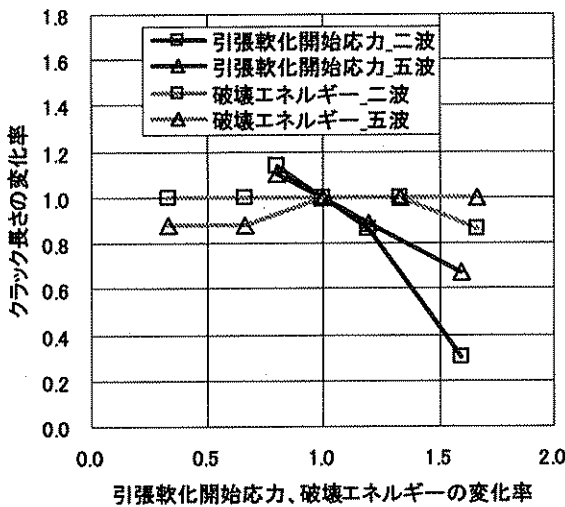
図-18 破壊エネルギーとクラック進展長さの関係 (ft=2.5MPa)

5) 引張軟化開始応力と破壊エネルギーの影響度合の比較

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 でのクラック長さを基準として、クラック進展長さや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。なお、図には二波および五波での結果を示している。図より、二波のように応答が定常に達するまでの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かなり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割合はともにそれほど小さくなく、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。



(a) 勾配変化点



(b) 堤体底部

図-19 クラック長さの変化率

4.2.2 実地震波による検討

1) 最大加速度の影響

図-20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で示したものである。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。

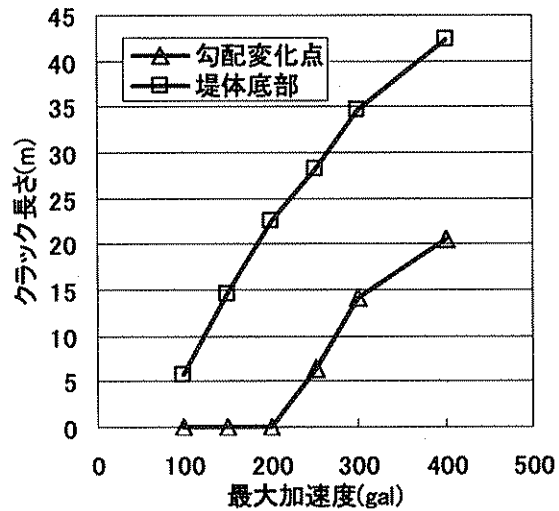


図-20 最大加速度とクラック長さの関係 (ft=2.5MPa, Gf=300N/m)

2) 引張軟化開始応力の影響

図-21は、モデル 2 について、引張軟化開始応力とクラック長さの関係で、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、入力波形の最大加速度は 300gal、破壊エネルギーについては 300N/m で一定である。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、ほぼ線形の関係にあることが分かる。

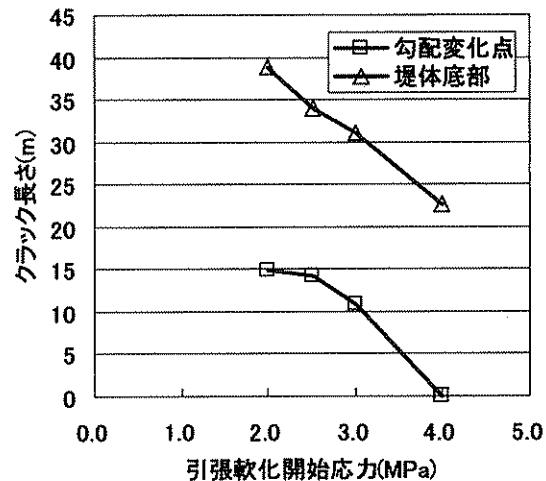


図-21 引張軟化開始応力の影響 (Gf=300N/m)

3) 破壊エネルギーの影響

図-22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で、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、入力波形の最大加速度は 300gal、引張軟化開始応力は 2.5MPa で一定である。図より破壊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があるが、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。

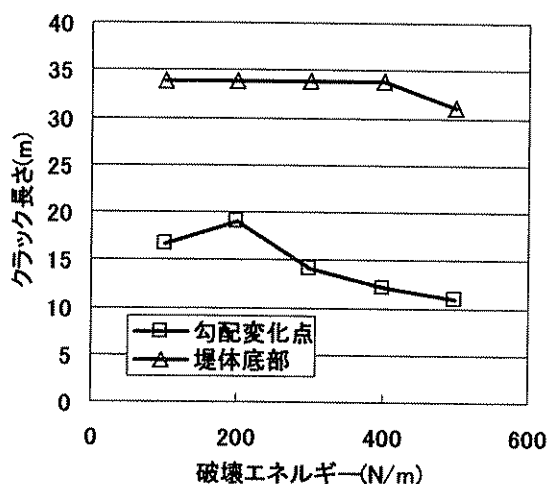
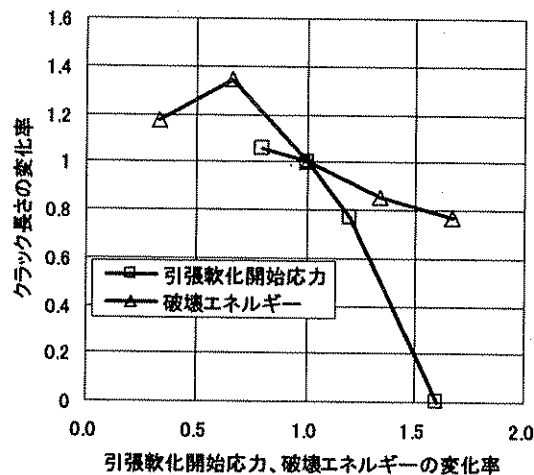


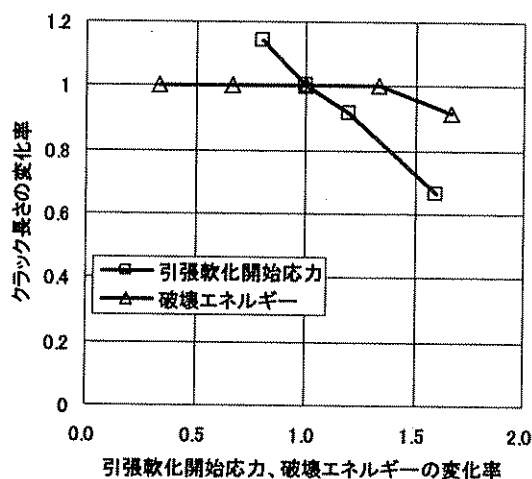
図-22 破壊エネルギーの影響 (ft=2.5MPa)

4) 引張軟化開始応力と破壊エネルギーの影響度合の比較

図-23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 でのクラック長さを基準として、クラック進展長さ、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。なお、入力波形の最大加速度は 300gal 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、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。



(a) 勾配変化点



(b) 堤体底部

図-23 クラック長さの変化率

5) 正弦波に対する結果との比較

図-24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 でのクラック長さを基準として、クラック進展長さ、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。これより、今回用いた地震動で最大加速度部の波形が連続的に作用するような場合を想定すると、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とおり、クラックの進展長さはある値に収まると考えられる。

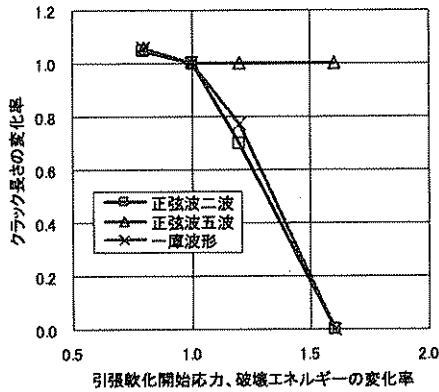
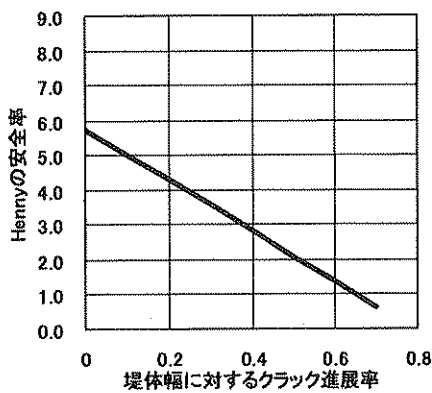


図-24 正弦波と実地震波

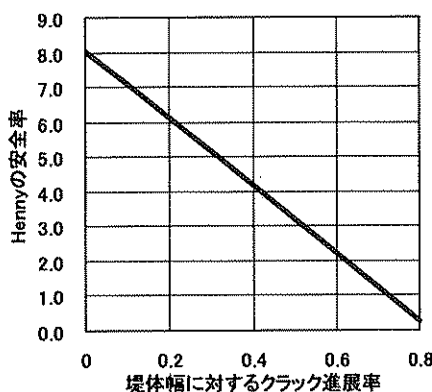
4.3 地震後の安定性評価法

図-25は、堤体幅に対するクラック進展率と地震後常時におけるせん断に対する Henry の安全率との関係を、図-6に示すモデル1における堤体底部およびモデル2における勾配変化点について示したものである。

図より、今回提案した堤体の地震後安定性解析手法によると、モデル1の堤体底部でクラック進展率が65%以上、モデル2の勾配変化点で70%以上でない限りせん断に対する安全率は1.0を下回ることなく、すべりに対して安全性が確保できると判断される。



(a) モデル1の堤体底部



(b) モデル2の勾配変化点

図-25 地震後安定性解析結果

5. まとめ

本研究では、大規模地震時における重力式コンクリートダムの耐震性評価法を提案するための検討を行った。三点曲げ試験を対象とした静的解析による検討、正弦波および実地震波を用いたモデルダムを対象とした動的解析による検討を実施した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 分布型クラックモデルを用いて三点曲げ試験を対象とした静的解析を実施した場合、引張軟化曲線の単直線近似では二直線近似と比較して最大荷重が大きくなる。解析上の制約から単直線近似の引張軟化曲線を用いる場合には、破壊エネルギーおよび引張軟化開始応力を適宜割引くことが必要となる。
- 2) 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ことが分かった。
- 3) 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、今回の正弦波に対する解析より、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ある一定の長さに収束する。
- 4) クラック進展の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。
- 5) 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はそれほど差はない。
- 6) 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。

これらの本研究の成果を受けて、以下の大規模地震時における重力式コンクリートダムの耐震性評価手法を以下のように提案する。

「はじめに、地震動に対する堤体応力を線形動的解析により評価する。その結果、材料強度を超えるような引張応力が発生する場合には、クラックの発生を考慮できる分布型クラックモデルを用いたクラック進展解析を実施し、クラックの進展長について検討する。クラックが上下流に貫通しなかった場合には、クラック内に揚圧力を作用させ剛体としての堤体の地震後安

定性を評価する。」

参考文献

- 1) コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会：繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重-変位曲線の計測方法およびタフネスの評価方法（案）、（社）日本コンクリート工学協会、2001.5.
- 2) 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.