

ダムコンクリートの動的引張強度の 定量的評価に関する実験的研究

有賀義明¹ ・ 渡邊啓行²

¹電源開発株式会社技術開発センター茅ヶ崎研究所上席研究員
(〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

E-mail : yoshiaki_ariga@jpower.co.jp

²埼玉大学工学部建設工学科教授 (〒338-0825 埼玉県さいたま市下大久保255)

E-mail : hiroyuki@post.saitama-u.ac.jp

ダムコンクリートの動的引張強度は、静的載荷試験によって評価された圧縮強度に基づいて設定する考え方が一般に良く用いられている。動的強度に関する既往の研究では、載荷スピードを速く設定した静的載荷試験によって評価した強度を「動的強度」として取り扱っている場合が多く、時々刻々変動する地震動に対する、本来の意味の動的強度を評価する研究事例は非常に少ない。本研究では、地震動に対するダムコンクリートの動的引張強度を定量的に評価する新しい方法として、破壊振動実験と三次元動的再現解析を組合せた評価法を考案した。

Key Words : shaking table test, dam concrete, dynamic tensile strength, fracture, 3D dynamic analysis

1. はじめに

ダムコンクリートの動的引張強度は、静的載荷試験によって評価された圧縮強度の1割の地震時3割増、すなわち静的圧縮強度の0.13倍という考え方が一般に良く適用されている。動的強度に関する研究については、これまでに研究事例が報告されているが^{1), 2)}、静的載荷試験の載荷スピードを速く設定した試験によって評価した強度を「動的強度」として取り扱っている研究が多い。静的なアプローチによって評価した強度を便宜的に「動的強度」として定義している場合が多く、時々刻々変動する地震動に対する、本来の意味の動的強度を定量的に評価する研究事例は殆どない。

本研究では、地震動に対するダムコンクリートの本来の意味の動的強度を定量的に評価するために、コンクリート供試体を用いた破壊振動実験と三次元動的解析による再現解析とを組み合わせることにより、ダムコンクリートの動的強度を定量的に評価する新しい方法を考案した。

2. 動的強度の定量的評価法の考案

考案した動的強度の定量的評価法の基本フローを図-1に示す。図-1に示したように、まず、ダムコンクリートを想定したコンクリート供試体を用いてクラックが発生するまで破壊振動実験を行い、クラックが発生した際の加振条件（加振周波数および

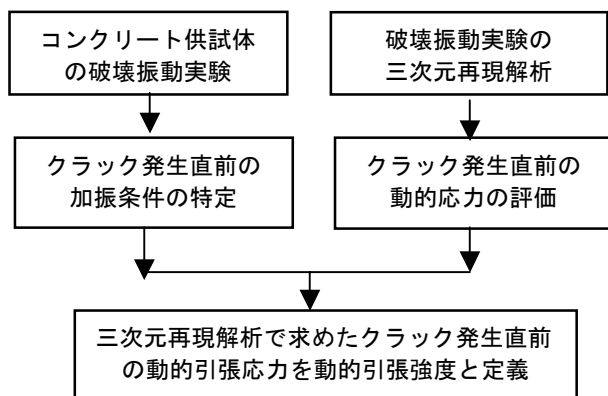
最大加速度）を特定する。つぎに、三次元動的解析によりコンクリート供試体にクラックが発生した際の再現解析を行い、コンクリート供試体の応力・ひずみ状態を解析する。そして、三次元再現解析によって算出した、クラック発生時のコンクリート供試体の最大引張応力を動的引張強度として定義する。

この方法を考案した背景としては、振動実験および現地計測では、加速度や変位を計測することは容易であるが、応力を精度良く計測することは難しいこと、一方、数値解析では、変形を精度良く評価することは難しいが、応力を評価することは容易であることを挙げることができる。本研究で提案している手法は、破壊振動実験と数値解析のそれぞれの長所を選択的に活用することによって、これまでは評価できなかった動的引張強度を定量的に評価することを可能にしている。

3. 動的強度を評価するための破壊振動実験

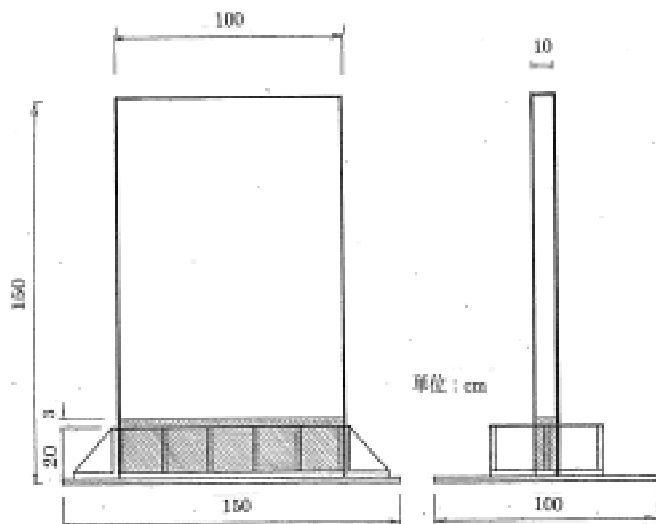
(1) 破壊振動実験の供試体

考案した評価法の実用性を検討するために、最もシンプルな形状として高さ1.50m、厚さ0.1m、幅1.0mの細長い四角柱のコンクリート供試体を作成して破壊振動実験を行った。コンクリート供試体については、使用した振動台の加振性能上の制約から、破壊振動実験の際に必ず破壊が発生するようにするために、コンクリート供試体の圧縮強度(目標値)を5.0N/mm²に設定した。



図－１ 破壊振動実験と三次元再現解析による動的引張強度の定量的評価法のフロー

コンクリート供試体は、鋼製の取付治具を用いて振動台に固定した。振動台に取り付けたコンクリート供試体は、下端固定の片持ち梁となるため、普通の供試体では取付治具の上端部で供試体が破壊するところが想定された。そのため、振動による破壊が取付治具の上端部の境界域ではなく、コンクリート供試体の内部で発生するように、供試体の底面から＋23.0cmの区間に鉄筋を配置し、クラックの発生位置を制御するように工夫した。コンクリート供試体の形状と寸法は図－２に示すとおりである。



図－２ コンクリート供試体の形状と寸法

(2) 振動台

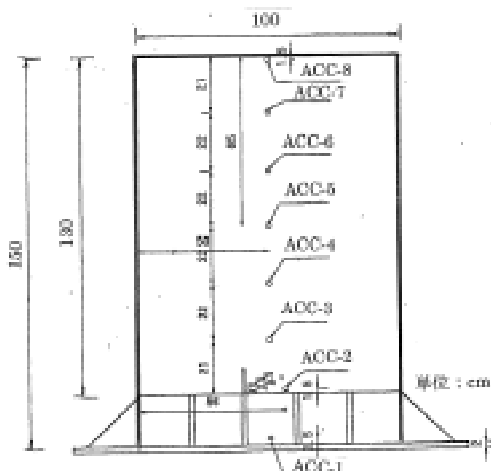
破壊振動実験に使用した振動台の主な性能を表－１に示す。

表－１ 使用した振動台の性能概要

項目	性能概要
加振方式	アンバランスマス方式
振動台寸法	5m×5m (矩形)
最大搭載重量	22 t
最大加振力	56 t G
加振波形	正弦波 (水平, 上下)
周波数範囲	5～50Hz
最大加速度	16G

(3) 計測項目

クラックの発生時刻と発生位置を特定するために、加速度計(圧電型)、変位計(接触型)、ひずみゲージ、クラックゲージを用いて計測した。加速度計の設置位置は図－３に示すとおりである。



図－３ 加速度計の設置位置

(4) 加振方法

入力波には、サイン波を用いた。サイン加振では、加速度を一定にして周波数を高周波から低周波へと変化させてクラック発生させる方法、周波数を一定にして加速度を増大させてクラック発生を発生させる方法などが考えられるが、ここで紹介するケースでは、加速度を 200gal に設定し周波数を 1.0Hz ピッチで 50Hz から 5Hz まで変化させる方法をとった。

(5) 静的载荷試験による静的強度の評価結果

破壊振動実験で使用したコンクリート供試体と同じ材料で３個のテストピース(直径 10cm, 高さ 20cm)を作成し、一軸圧縮試験および圧裂試験により圧縮強度と引張強度を評価した。評価結果は表－２に示すとおりである。

表－２ 静的载荷試験により評価した静的強度

試験法	項目	評価事例
一軸圧縮試験	圧縮強度 (N/mm ²)	4.97
	破壊ひずみ (μ)	1,405
	弾性係数 (kN/mm ²)	14.61
圧裂試験	引張強度 (N/mm ²)	0.66
	破壊ひずみ (μ)	90
	弾性係数 (kN/mm ²)	6.44

(6) 供試体の固有周波数およびせん断波速度

加振加速度を 100gal で実施したスイープ試験から得られたコンクリート供試体の固有周波数は 19Hz であった。また、水平打撃法によって評価したせん断波速度は 2,880m/s であった。

(7) クラック発生時の特定方法

破壊振動実験における供試体でのクラックの発生時刻の特定方法としては、①加速度応答波形に基づく方法、②変位応答波形に基づく方法、③ひずみゲージ測定データに基づく方法、④クラックゲージ測

定データに基づく方法などが考えられるが、結果的には、加速度応答波形に基づいて評価する方法が最も容易な方法であった。破壊振動実験の際に記録した加速度応答波形の代表例を図-4に示す。図-4から、クラックが発生するとコンクリート供試体の加速度応答が急激に低下することが理解できる。この現象は、実験時の目視からも明白であった。

破壊振動実験の際に供試体に発生したクラックは、目には見えない程度の微細なクラックであり、外見では、構造的には何の変状もないようであった。このように微細なクラックが発生した場合でも、供試体の動的応答が劇的に変化したことは、コンクリート構造体に微細なクラックが発生した場合、動的解析では、初期状態とは異なる解析モデルを作成して解析すべきであると考察された。

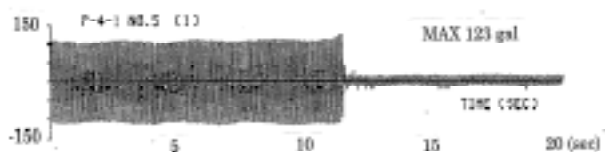


図-4 クラック発生前後の加速度応答波形の例

(8) クラック発生時の特定結果

コンクリート供試体にクラックが発生した際の加振周波数および加速度の特定結果を表-3に示す。

表-3 クラック発生時の特定結果の例

項 目	クラック発生直前の加振周波数	クラック発生直前の供試体基部の加速度
最初のクラック発生	22 Hz	203 gal
2回目のクラック発生	11 Hz	131 gal

4. 動的引張強度を定量的に評価するための三次元再現解析

(1) 再現解析の手順

コンクリート供試体の破壊振動実験に対する三次元再現解析の手順は、つぎに示すとおりである。

- ① 破壊振動実験のクラック発生直前の固有周波数と固有値解析の固有周波数が一致するようにコンクリート供試体の剛性を決定する。
- ② クラック発生直前の破壊振動実験のコンクリート供試体底部における加速度応答波を入力地震動として三次元動的解析を行い、コンクリート供試体天端の加速度応答が再現されるように減衰定数を決定する。
- ③ ①で評価した剛性と②で評価した減衰定数を用いて三次元動的解析を行い、動的応力を算出する。
- ④ クラック発生位置における最大引張応力を動的引張強度と定義する。

(2) 解析モデル

三次元再現解析に用いたFEMモデルを図-5に

示す。FEMメッシュは、8節点ソリッド要素を用いて作成した。クラック発生位置のメッシュ分割を細かくし、解析モデル底面は、固定境界とした。解析は、筆者らこれまでに実用化開発した、ダムジョイントー基礎岩盤一貯水池連成系の三次元動的解析法(プログラム名“UNIVERSE”)により行った^{3),4)}。

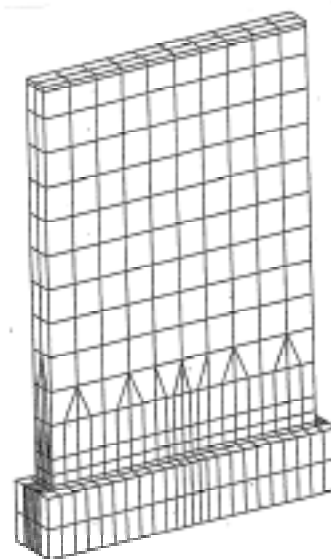


図-5 三次元再現解析モデル

(3) 再現解析による動的変形特性の同定結果

供試体の固有振動数および供試体頂部における加速度応答値に関して、破壊振動実験の結果と三次元再現解析の結果が一致するように動的せん断剛性と減衰定数を同定した結果を表-4に示す。

表-4 再現解析による動的変形特性の同定結果

一次固有振動数	動的せん断剛性	減衰定数
20.5 Hz	2,660 N/mm ²	13.5 %

(4) 動的応力評価に用いた物性値

動的応力を評価する際に用いた動的物性値を表-5に示す。基部鉄筋コンクリート部は、クラックの発生位置を固定治具の上端部より上方になるように制御するために工夫した部分である。固定治具の動的せん断剛性は、剛体としての数値を仮定した。

表-5 応力評価における動的物性値

項 目	コンクリート供試体	基部鉄筋コンクリート部
密度 (t/m ³)	2.26	2.35
せん断剛性 (N/mm ²)	2,660	7,500
ポアソン比	0.2	0.2
減衰定数 (%)	13.5	13.5

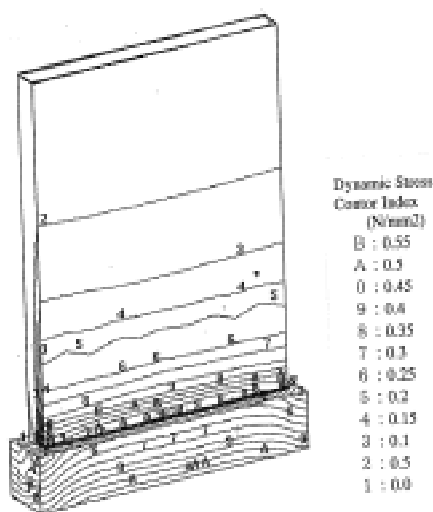
(5) 地震時引張応力の算出結果

三次元動的解析によって算出した供試体の応力分布を図-6に示す。破壊振動実験でクラックが発生した直前の最大動的引張応力の評価結果を表-6に示す。本研究で提案する評価手法によって、静的圧

縮強度 4.94N/mm^2 の供試体に関して、動的引張強度は 0.69N/mm^2 と評価された。

表－6 提案法による動的引張強度の評価結果

評価項目	評価結果	備 考
《従来の方法》		
静的圧縮強度	4.94	一軸圧縮試験
静的引張強度	0.67	圧裂試験
動的引張強度	0.64 (N/mm^2)	一軸圧縮試験 の 0.13 倍
《提案法》		
動的引張強度	0.69 (N/mm^2)	破壊振動実験と 三次元再現解析



図－6 三次元再現解析により評価した供試体の動的引張応力の分布

5. まとめ

○矩形のコンクリート供試体を用いた破壊振動実験と三次元再現解析を有機的に組み合わせることにより、コンクリート供試体の動的引張強度を定量的に評価する新しい評価法を考案した。

○提案した評価法の実用性を検証するために、一軸圧縮強度 4.94N/mm^2 のコンクリート供試体を作成し

て動的引張強度を評価したところ、動的引張強度は 0.69N/mm^2 と評価された。

○本研究で提案した評価手法を適用することにより、実際の地震動に対する、本来の意味の動的引張強度を定量的に評価することが可能である。

○三次元再現解析、破壊振動実験ともに任意形状の構造物を対象に実施することができるので、提案法は、任意形状の供試体に適用することが可能である。
○動的引張強度や地震時破壊ひずみは、地震動の周波数特性に大きな影響を受けるものと考えられ、周波数毎の評価を有機的に複数実施することにより、動的引張強度や地震時破壊ひずみの周波数依存性を定量的に評価することが可能である。

○コンクリートにクラックが発生すると、目で確認できないような微細なクラックであっても、加速度応答は劇的に減少する。コンクリート構造体にクラックが発生した後に対して、動的解析では、健全な状態とは異なる、クラックの非連続的な挙動を考慮した解析⁵⁾を実施すべきである。

参考文献

- 1) 畑野正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文集第 153 号，pp31-39, 1968. 5.
- 2) 永山功，佐々木隆，波多野政博：コンクリートの動的引張強度についての検討，土木技術資料，Vol. 41-1, pp26～31, 1999.
- 3) 渡辺啓行，有賀義明，曹増延：三次元動的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性評価，土木学会論文集 No. 696/ I -58, 99-110, 2002. 1
- 4) 有賀義明，渡辺啓行，曹増延：遠心載荷振動実験および三次元動的解析によるロックフィルダムの地震時安全性に関する研究，土木学会論文集 No. 717/ I -61, 77-89, 2002. 10
- 5) Ariga Y., Cao Z. and Watanabe H.: Seismic stability assessment of an existing arch dam considering the effects of joints, *Proc. of International Congress on Large Dams*, Q83-R.33, pp.553-575, 2003.6.

(2003. 6. 6 受付)

STUDY ON QUANTITATIVE EVALUATION METHOD FOR DYNAMIC TENSILE STRENGTH OF DAM CONCRETE

Yoshiaki ARIGA ・ Hiroyuki WATANABE

We have developed a new method for evaluating a dynamic tensile strength of dam concrete by combining a shaking table test and a 3-D reproduction analysis. In order to examine the efficiency of the proposed method, we made a shaking table test in regard to the fracturing of dam concrete by using the specimen of 1.5m in height, 1.0m in width and 0.1m in thickness. As a result, the dynamic tensile strength of the specimen, whose static compressive strength is 4.94N/mm^2 , was evaluated to be 0.69N/mm^2 . It has become possible to evaluate the dynamic tensile stress of dam concrete by the new method developed in this study.