

# コンクリートの引張亀裂が振動時の一次共振周波数・減衰に及ぼす影響に関する実験的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○金縄健一、佐々木隆、高藤啓、石橋正義、山口嘉一

## 1. はじめに

大規模地震に対する重力式コンクリートダムへの耐震性能に関する照査手法として、コンクリートの引張破壊を考慮した解析が数多く実施されている。筆者らも、スミアドクラックモデルを用いた損傷解析について検討<sup>1)</sup>を行っているが、このような解析手法のダム解析における適用性は、限られた過去のダム堤体への亀裂発生事例の定性的な再現性により確認するとどまっている。しかし、解析手法をダムの耐震性能照査手法において用いるためには、亀裂発生および進展現象を定量的に評価する必要があり、重力式コンクリートダム模型の振動実験を実施した例もみられる<sup>2)</sup>。このような解析の手法を実験的に検証するとともに、堤体コンクリートの非線形材料物性値の設定法を提案するため、大型試験体による振動破壊実験を予定している。本稿は、この大型振動破壊実験に先立って実施した小型試験体による振動破壊実験について、コンクリートの引張破壊の程度と一次共振周波数および減衰定数との関係について報告するものである。

## 2. 振動実験概要

### 2.1. 使用材料

本振動実験において使用した材料は、①振動実験により引張破壊を生じ得る低強度の材料であること、②通常のコンクリートと同様に引張軟化特性を示すことの2点を条件に、配合試験を実施して決定したもので、最大粗骨材寸法 20mm、水セメント比  $W/C=330\%$  を採用し、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を高めるため、石灰石微粉末を混和材として使用した。強度試験から得られた本材料の物性値を表-1 に示す。なお、引張軟化特性を表す破壊エネルギー  $G_f$  はくさび挿入型割裂引張試験（供試体寸法 20cm×20cm×10cm）を実施して求めた。図-1 に、本実験に用いた材料の引張軟化曲線を示す。引張軟化開始応力には割裂引張強度  $f_t$  を、引張軟化式にはコンクリート標準示方書に示された方法<sup>3)</sup>により二直線で近似した。

表-1 材料物性値

| 項目              | 物性値                  |
|-----------------|----------------------|
| 一軸圧縮強度 $f'_c$   | 1.85 MPa             |
| 割裂引張強度 $f_t$    | 0.17 MPa             |
| 静弾性係数 $E$       | 5,260 MPa            |
| 単位容積質量 $\gamma$ | 2.3 t/m <sup>3</sup> |
| ポアソン比 $\nu$     | 0.15                 |
| 破壊エネルギー $G_f$   | 24.7 N/m             |

### 2.2. 試験体諸元

試験体の形状は、①使用する振動台の加振能力の範囲内に試験体の一次共振周波数が入ること、②引張亀裂の生じる位置が特定できることの2点を条件に、図-2 に示す試験体形状に決定した。また、一次共振周波数調整の目的から、試験体頂部に 100kg の重りを付加した。なお、破壊実験前に、最大加速度振幅 10gal 程度のホワイトノイズ波形を用いた加振を実施し、その応答加速度を分析した結果、クラック発生前の一次共振周波数はおよそ 30Hz であった。

### 2.3. 入力波形および計測概要

入力波は正弦波を用い、その振動数については頂部にて 2～3 倍の加速度応答倍率が生じるよう 22Hz とした。また、試験体の応答がほぼ定常となるように加振時間を 2 秒間に設定した。加速度振幅は、引張破壊の発生前から段階的に増加させたが、本稿では 30、150、300、900gal のケースを基に考察を行った。また、データ計測はサンプリング間隔 0.001 秒 (1,000Hz) で実施し、入力加速度、応答加速度、応答変位、亀裂開口幅、ひずみを測定した。このうち、本稿での考察に使用する加速度データおよび引張亀裂始端における開口幅データの計測位置を図-2 に示す。図-3 に、入力加速度の一例として、入力加速度振幅 150gal のケースについて、振動台および頂部で計測した加速度時刻歴波形を示す。

## 3. 試験結果

図-4 は、入力加速度振幅 150gal での加振終了後の自由振動状態での頂部（図-2 参照）での応答加速度時刻歴を示したものである。このケースについては、加振終了後 1.0 秒以内に振動がほぼ収まっているのがわかる。また、各ケースについて、自由振動よりみかけの減衰定数および一次共振周波数を算出した。減衰定数については、式(1)により  $n$  を 3 とし、自由振動を開始してから数波より算出した。

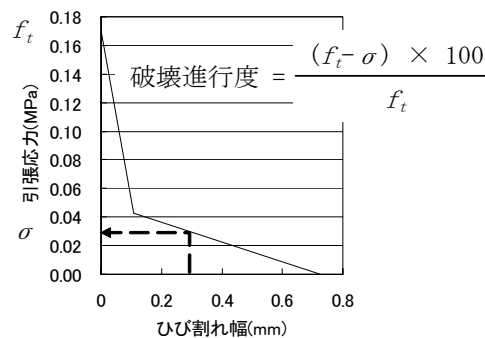


図-1 引張軟化曲線

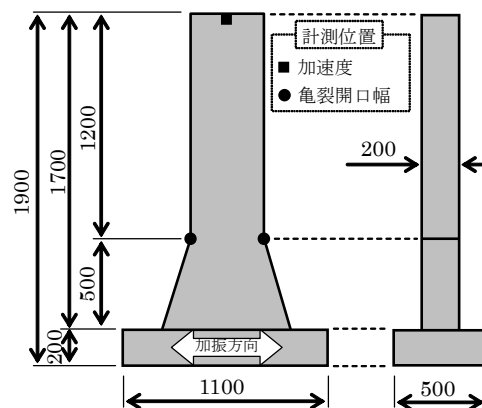
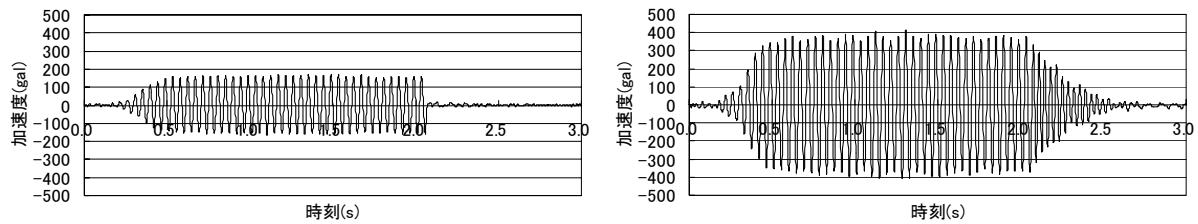


図-2 試験体形状（単位：mm）

【キーワード】 振動実験、コンクリート、減衰定数、一次共振周波数

【連絡先】 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 Tel.029-879-6781 Fax.029-879-6737



(a) 振動台

(b) 試験体頂部

図-3 加速度時刻歴（入力加速度振幅 150gal）

$$|y_m / y_{m+n}| = \left( e^{2\pi h / \sqrt{1-h^2}} \right)^n \cdots (1)$$

ここで、 $y_m$  および  $y_{m+n}$  :  $m$  および  $(m+n)$  番目の片振幅、 $h$  : 減衰定数である。

ひび割れ幅は、図-2 に示す勾配変化点での変位計による加振中の片振幅の平均値より、弾性範囲内の最大変位量 ( $\Delta x = f_t^* l / E = 0.0036 \text{ mm}$ 、 $\Delta x$  : 弾性領域内の最大変位量、 $f_t^*$  : 引張強度、 $E$  : 弾性係数、 $l$  : 変位計による計測長さ(100mm)) を差し引くことで求めた。入力加速度振幅 30gal での加振のケースでは、変位計による変位量が弾性領域内の最大変位量を超えなかったため、ひび割れ幅は 0.0mm とした。次に、算出したひび割れ幅に対応する引張応力  $\sigma$  を図-1 より求め、試験体への亀裂進展度合いを示す一指標として破壊進行度を次式により定義した。破壊進行度 100% となったら、引張軟化状態が終わり、完全に開口した引張亀裂を意味する。

$$[\text{破壊進行度}] = (f_t - \sigma) \times 100 / f_t \cdots (2)$$

表-2 に、各ケースの破壊進行度を示す。入力加速度振幅 30gal での加振ケースでは引張亀裂は発生しておらず、150gal のケースについては、引張強度にほぼ等しい引張応力が発生したと考えられる。

図-5 は、各ケースの破壊進行度と自由振動から算出した一次共振周波数の関係を示したものであるが、破壊が進行するに従い、一次共振周波数が小さくなっているのがわかる。今回の条件下では、破壊進行度と一次共振周波数の関係はほぼ線形の関係になった。

図-6 は、各ケースの破壊進行度と自由振動から算出した減衰定数の関係を示したものである。図より、破壊が進行するに従い、減衰定数が大きくなっているのがわかる。これは、亀裂が発生した破壊面において亀裂が開閉することにより、エネルギーが消費され振動が抑制されるためと考えられる。

図-7 は、最終的な亀裂の発生位置を示したものである。図より、左右の勾配変化点から亀裂が発生し、ほぼ水平に亀裂が進展しているのがわかる。

#### 4. まとめ

コンクリート製試験体の振動破壊実験により、以下のことがわかった。

- ①破壊が進行するに従い、一次共振周波数が小さくなる。
- ②破壊が進行するに従い、減衰定数が大きくなる。

今後、今回実施した振動実験を数値解析によりシミュレーションし、より詳細に検討実施する予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 佐々木隆、金縄健一、山口嘉一：大規模地震時における重力式コンクリートダムクラック進展に関する数値解析的検討、土木技術資料、第45巻、第6号、PP.60-67、2003.6
- 2) Leger, P et al.: Seismic Safety of Gravity Dams from Shake Table Experiments to Numerical Analyses, ASCE Journal of Structural Engineering, 2000.4
- 3) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、2002.3

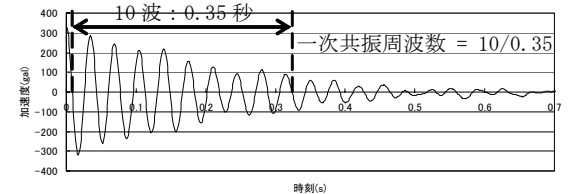


図-4 自由振動時刻歴（入力加速度振幅 150gal）

表-2 破壊進行度

| 加振の加速度振幅 (gal) | 変位計による変位量 (mm) | ひび割れ幅 (mm) | 引張応力 (MPa) | 破壊進行度 (%) |
|----------------|----------------|------------|------------|-----------|
| 30             | 0.0018         | 0.0000     | —          | 0.0       |
| 150            | 0.0075         | 0.0043     | 0.165      | 2.9       |
| 300            | 0.0600         | 0.0568     | 0.104      | 39.1      |
| 900            | 0.1600         | 0.1568     | 0.039      | 76.9      |

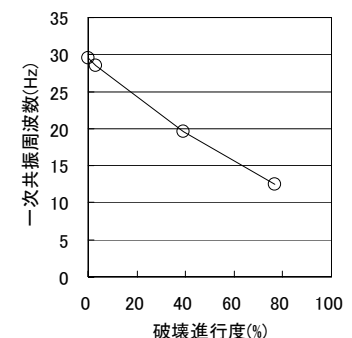


図-5 破壊進行度と一次共振周波数

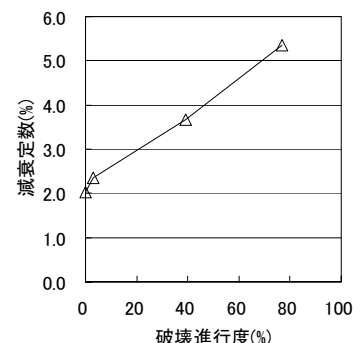


図-6 破壊進行度と減衰定数

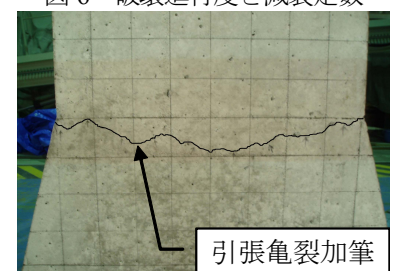


図-7 亀裂発生箇所