

1. はじめに

コンクリートダム本体の耐震性能照査は、線形動的解析を行い、ダム本体に発生する応力と材料強度から、所要の耐震性能が確保されるかどうかを判断する。

ここで、ダム本体に損傷が生じるおそれがあると判断された場合は、さらに損傷過程等を考慮した地震応答解析を行い、生じる損傷が限定的な範囲にとどまるかどうかを確認する。損傷過程を考慮するひび割れ進展解析には2つの代表的な方法があり、一つは、離散ひび割れモデル (discrete crack)、もう一つは、分布ひび割れモデル (smeared crack) である。離散ひび割れモデルは、ひび割れ経路が既知でない限り、ひび割れ進展に伴い要素の再分割が必要となる。これに対し、分布ひび割れモデルは、ひび割れ後もコンクリートを連続体として扱い、要素の材料特性の変化としてモデル化するため、初期の要素分割を変更することなく、ひび割れ進展を追跡できる。

本資料は、上記記載に示した損傷過程を分布ひび割れモデルの解析例を示すものである。解析は既往の試験³⁾を基にシミュレーション解析を実施し、試験結果との比較により、解析の妥当性を確認した。

2. 解析モデル

解析モデルは、重力式コンクリートダムを模擬した無筋コンクリート構造物の試験体とし、高さ 3.4m、下流側の勾配 0.7、厚さ 0.25mの形状で、試験体頂部には固有周期を低減させるために重量 2700kg の付加マスが設置されている。また、クラック位置を限定させるため、ノッチ (切り欠き) が設定されている。図-1 に試験体、表-1 に試験体の諸元を示す。

解析モデルは平面応力要素とし、メッシュ分割は、応力-ひずみ関係が引張強度を超えた後のスナップバック現象^{注)}の防止のため、要素寸法 L を(1)式を満足するように設定した⁴⁾。図-2 にメッシュ図を示す。

$$L < (E \cdot G_f / f_t^2) \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot (1)$$

ここに、

L : 要素寸法

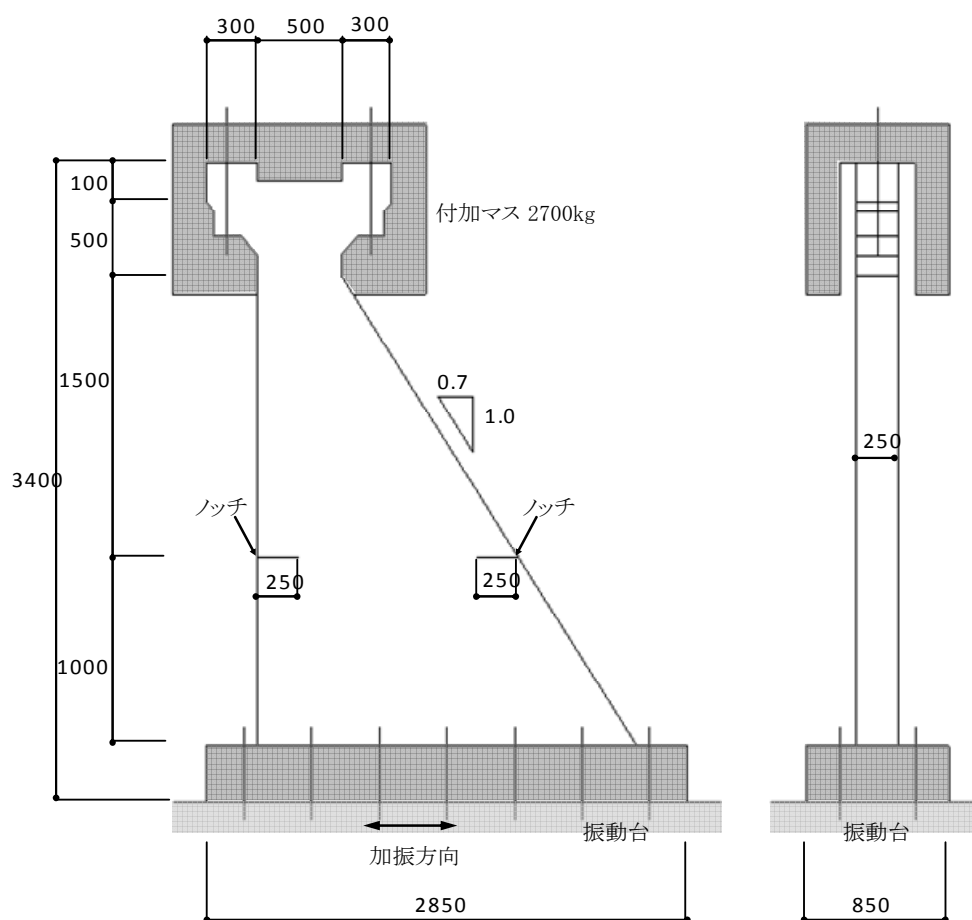
E : ヤング係数

G_f : 破壊エネルギー

f_t : 引張強度

注) スナップバック現象

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し、計算が不安定となる。



(単位 : mm)

図-1 試験体

表-1 試験体の諸元

項目	定数
圧縮強度 f_c (MPa)	14.8
引張強度 f_t (MPa)	3.7
ヤング係数 E (GPa)	18.5
ポアソン比 ν	0.19
密度 ρ (kg/m^3)	2400
破壊エネルギー G_f (N/m)	105

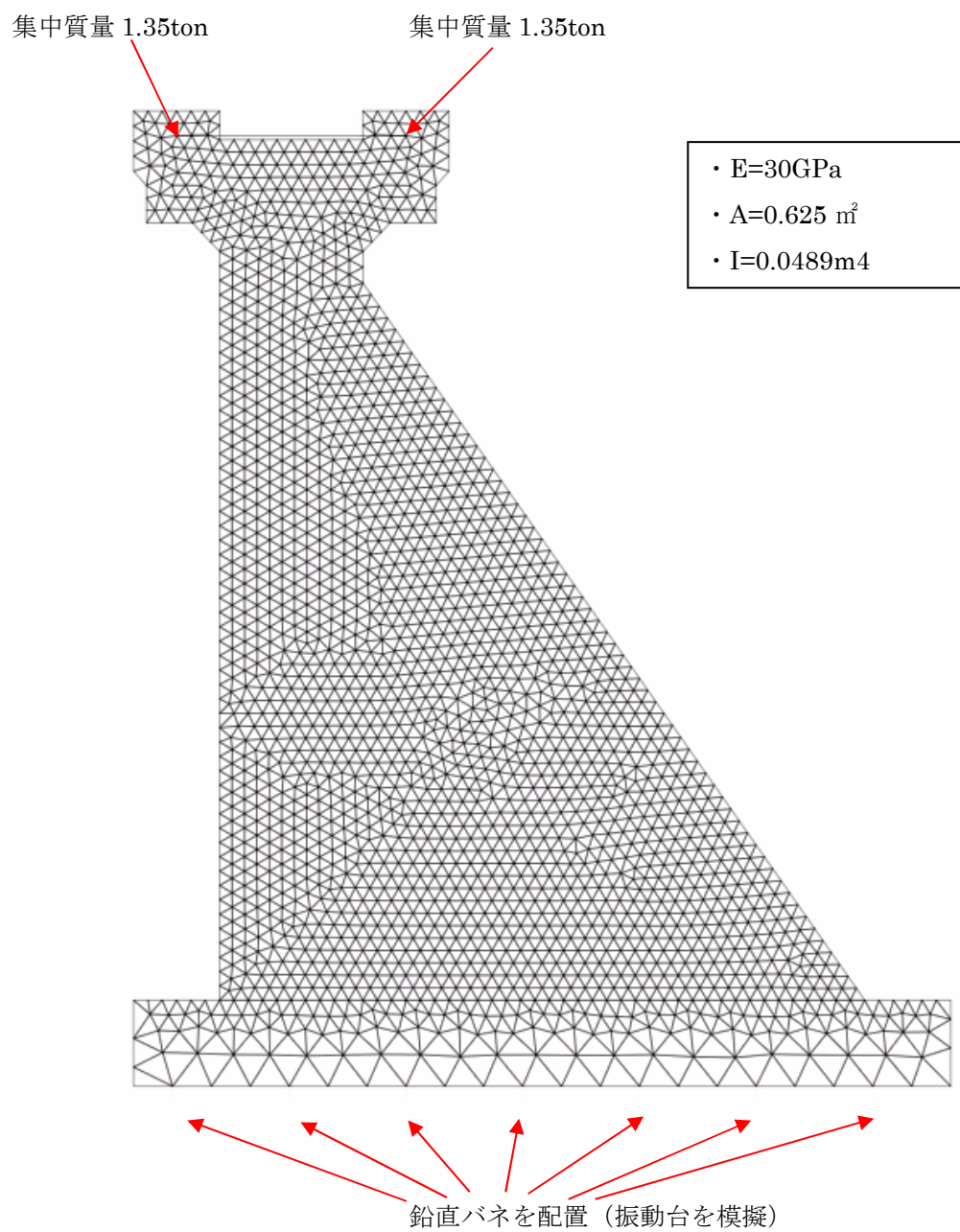


図-2 メッシュ図

3. 入力波

試験体への加振は、三角形パルス波であり、断続的に3回加振が行われている。解析の入力は、振動台で得られた加速度が正弦波に類似していることから、正弦波に置換した波形を入力波とした。なお、断続的に加振されて得られた加速度を解析の入力では、図-3に示すように、1回目と2回目、2回目と3回目間の自由振動がなくなるように間隔を取って、連続的に入力した。

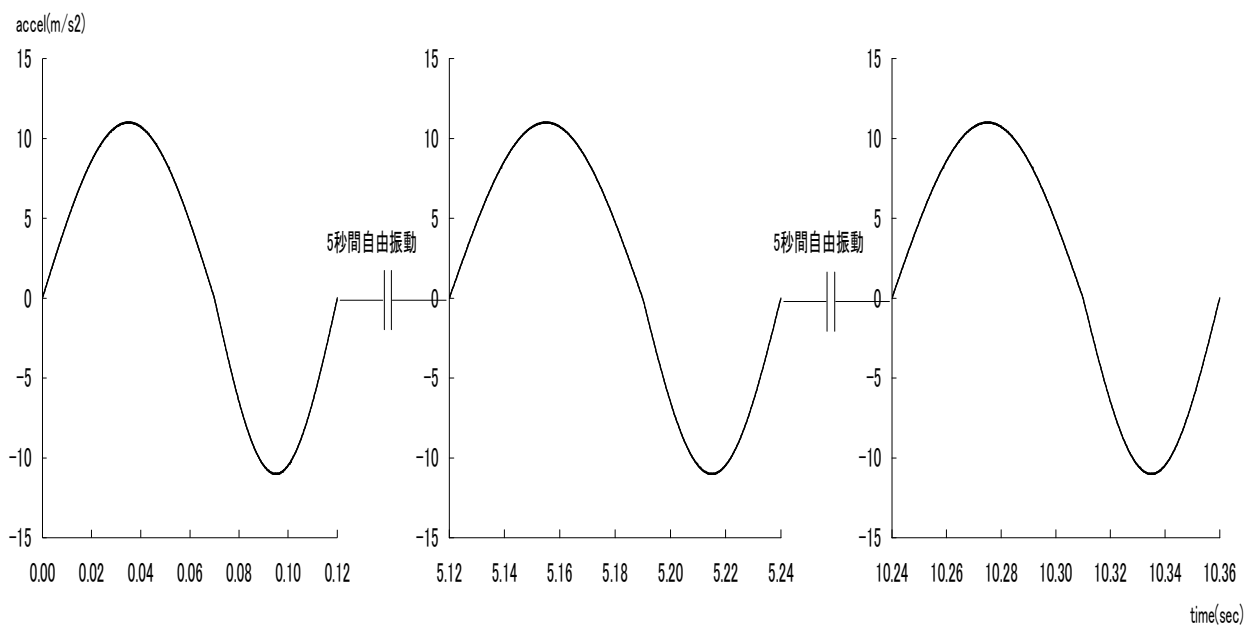


図-3 入力加速度

4. 減衰特性

減衰特性は、試験体の自由振動試験から得られている 0.9%を基に、試験体と振動台の連成一次固有振動数 16.4Hz を 1.1%とし、式(2)より α を決定した。式(3)の減衰係数 C は時々刻々の剛性変化に伴う瞬間剛性比例型減衰とした。図-5 に 1 次、2 次の振動モードを示す。

重力式コンクリートダム堤体のクラック発生、進展問題には、減衰特性が大きな影響を及ぼし、初期剛性比例型減衰およびレーリー減衰型では、クラック発生面での引張応力の解放が不十分なことが報告されている²⁾。

- ・瞬間剛性比例型減衰

$$\alpha = h_1 / (\pi f_1) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$C = \alpha K \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

C : 減衰行列

K : 剛性行列 (非線形性を考慮、時々刻々変化)

f_1 : 一次振動数 (16.4Hz)

h_1 : 材料減衰定数 (1.1%)

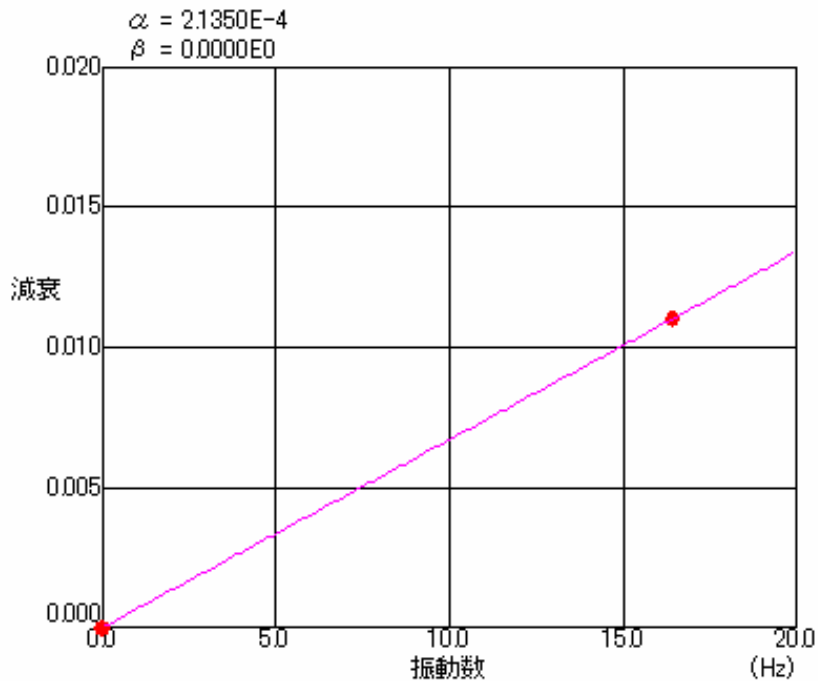
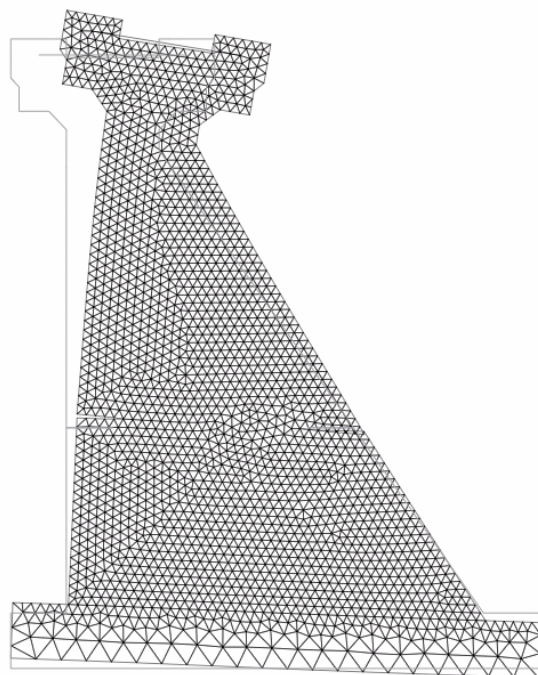
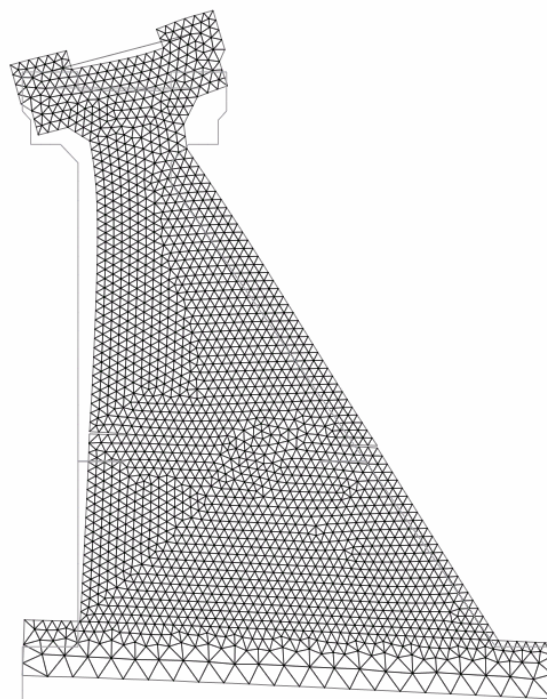


図-4 初期の剛性比例型減衰



1次モード (16.4Hz)



2次モード (57.3Hz)

図-5 振動モード

5. 非線形特性

非線形特性は、コンクリート構造の材料モデルとして、精度の高い構成則の一つとして知られている前川・福浦らによる弾塑性破壊モデルを用いた。材料モデル要素は、分布ひび割れモデルとして取り扱うことから、ひび割れの発生や進展が有限要素内で平均的に考慮される。ひび割れ発生後は、ひび割れ面直交方向、ひび割れ面平行方向のそれぞれに関する一軸の履歴挙動モデル(直応力-ひずみ関係)とひび割れ面に沿ったせん断ずれに関する履歴挙動モデル(せん断応力-ひずみ関係)を適用し、これらを組み合わせることで挙動を表現する。図-6に一軸の履歴挙動モデル、図-7にせん断ずれに関する履歴挙動モデルを示す。また、引張軟化曲線は一般的に2直線で近似し、軟化後の除下時の履歴特性として原点指向型が用いられ場合が多いが、今回は軟化後に原点指向型より履歴減衰効果が大いことから、図-8に示す引張軟化曲線を用いた。

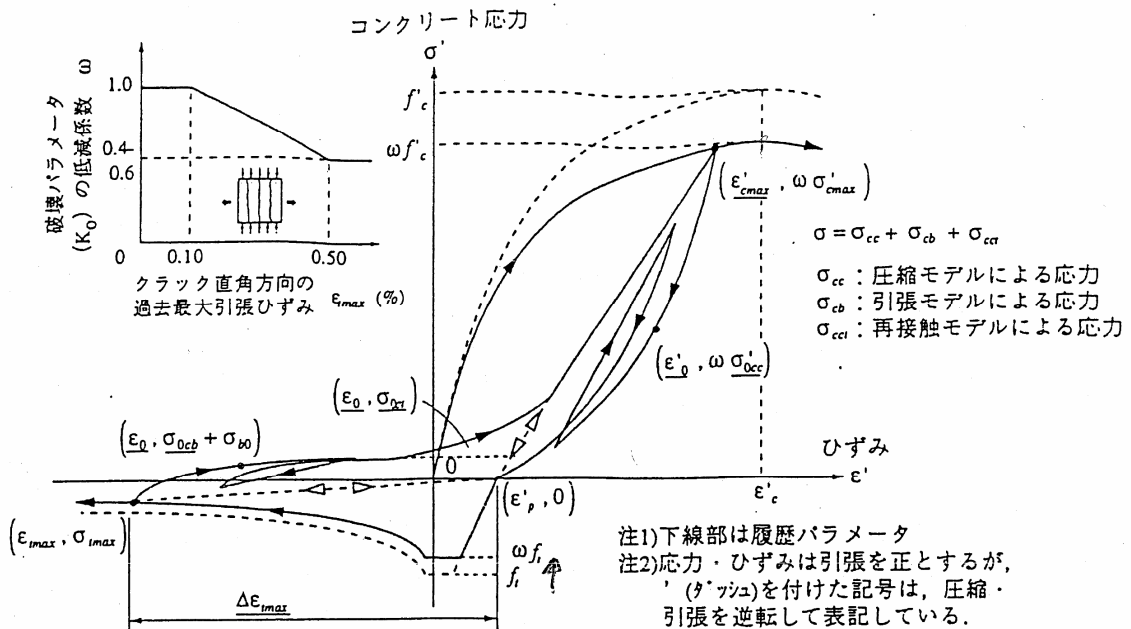


図-6 一軸の履歴挙動モデル

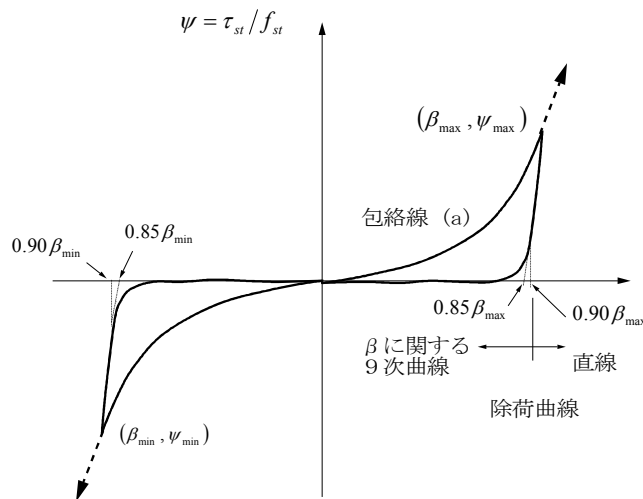


図-7 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

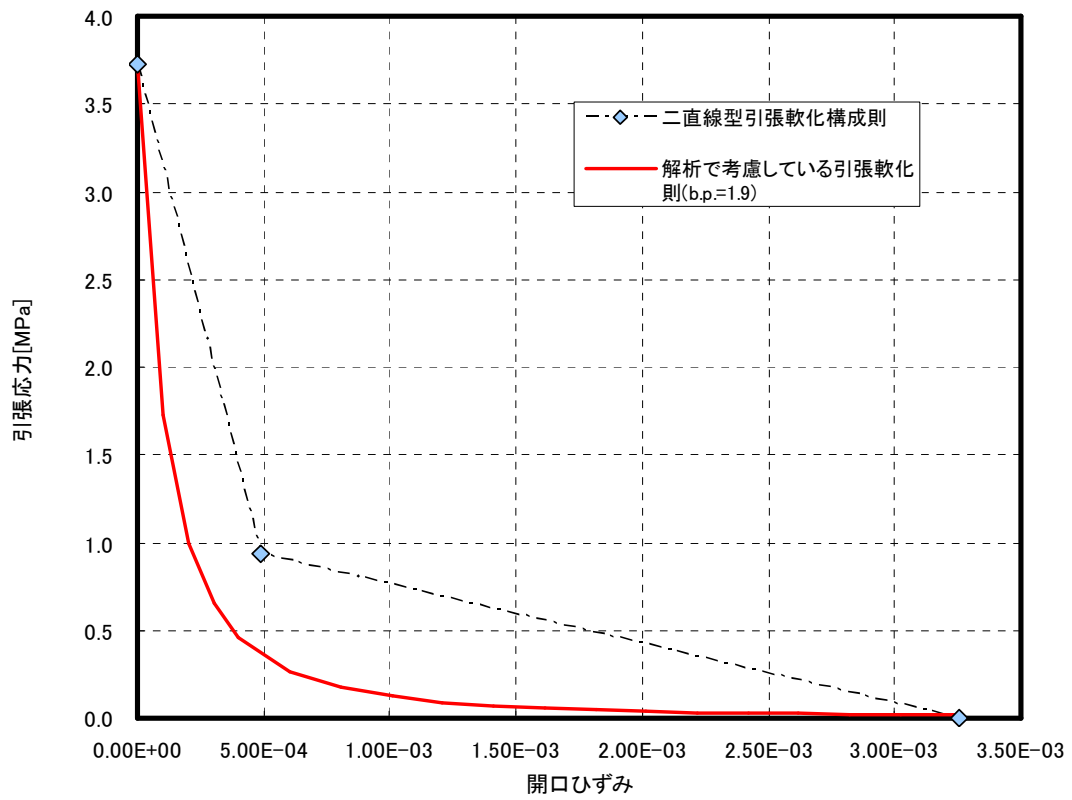


図-8 引張軟化曲線

6. 動的非線形解析

動的非線形解析は、以下の条件による Newmark- β 法の直接積分法で実施した。

- ・ β 値 : 0.25
- ・積分時間間隔 : 0.0001 秒
- ・収束法 : Newton-Raphson法

図-9 に2回目、3回目加振時の試験結果を示す。試験結果は1回目の加振時はひび割れは発生せず、2回目の加振で下流側からひび割れが発生し、3回目の加振時に上流側もひび割れ、上下流方向に貫通した。解析結果は図-10、図-11、図-12に1回目から3回目の各加振時の最大主ひずみ時の主ひずみと主応力のコンター図を示し、図-13に3回目加振時のひびわれ進展を時系列に示したコンター図である。解析結果は1回目、2回目はひび割れは発生せず、3回目に下流側からひび割れが発生し、その後、上流側もひび割れ、上下流方向で貫通した。

また、図-13の主応力コンター図から、ひび割れ開口周辺要素の引張応力が解放されており、ひび割れ進展が適切に表現されていることが分かる。

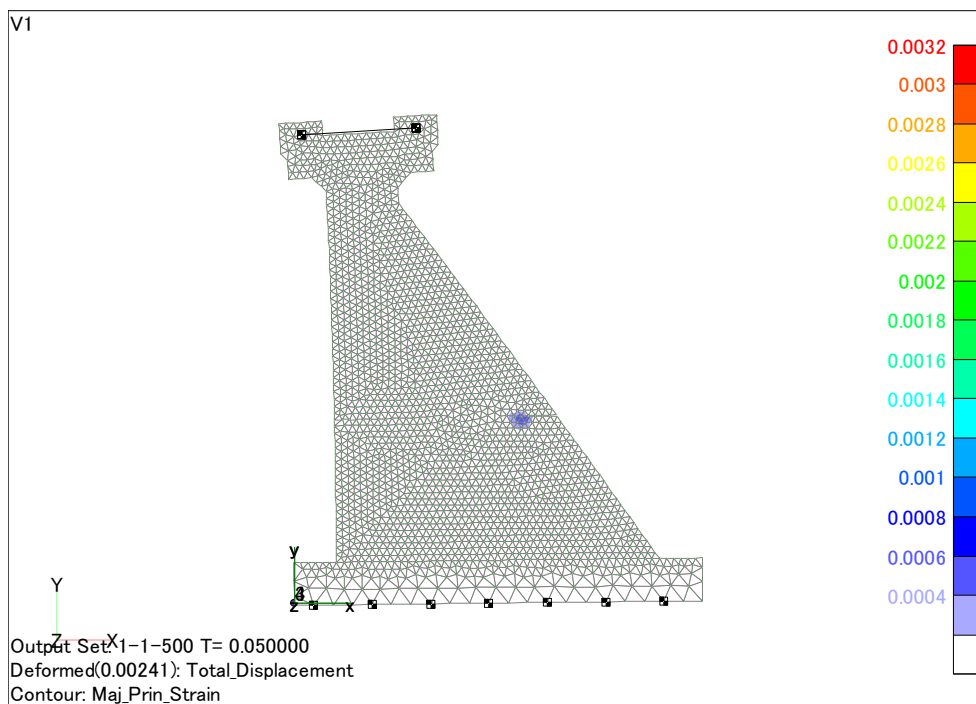


2回目加振時のひび割れ状態

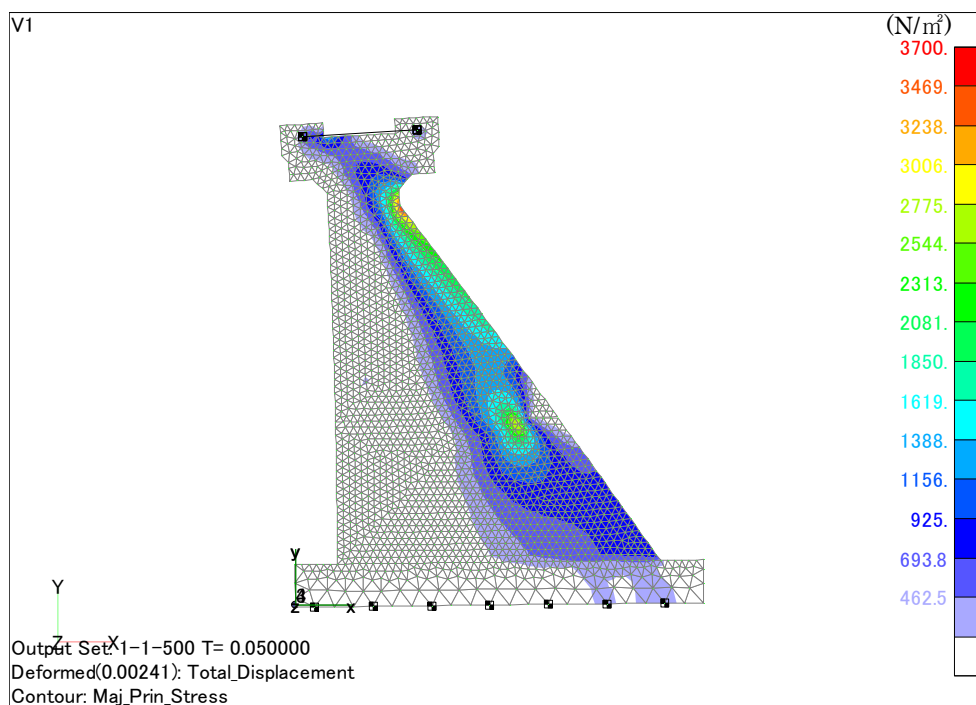


3回目加振時のひび割れ状態

図-9 試験結果

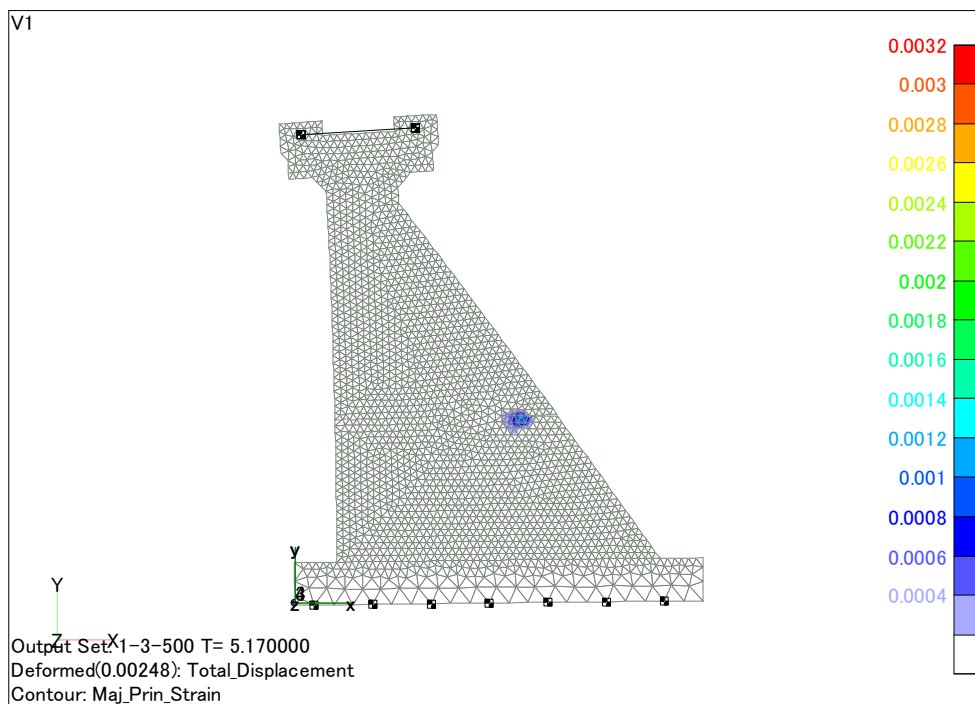


【1回目加振のピーク時の主ひずみコンター図(T=0.05秒)】

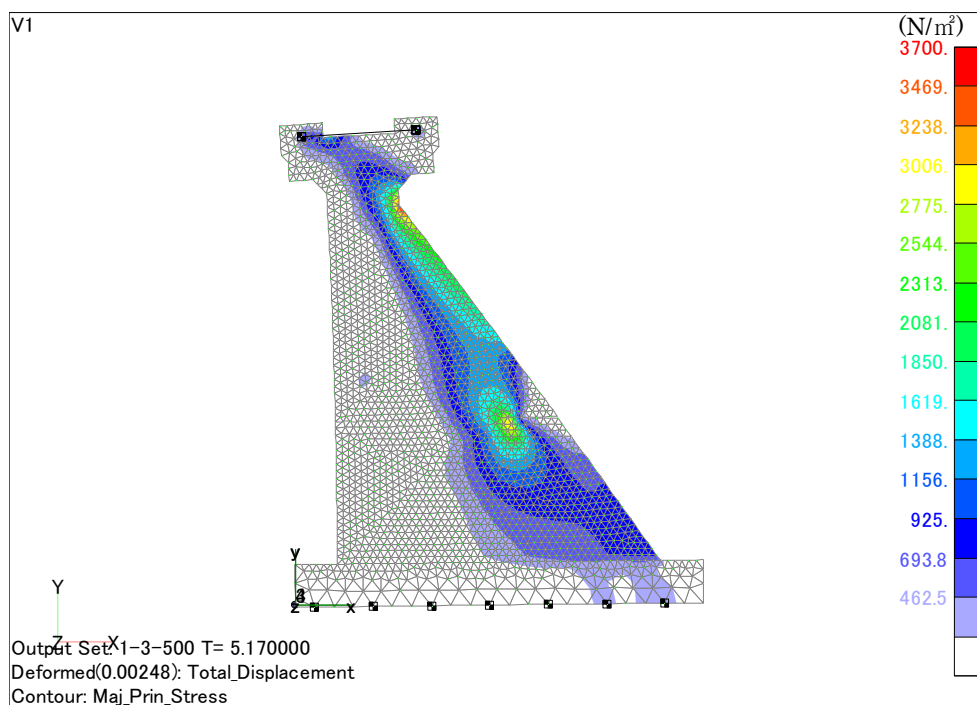


【1回目加振のピーク時の主応力コンター図(T=0.05秒)】

図-10 1回目加振時の解析結果

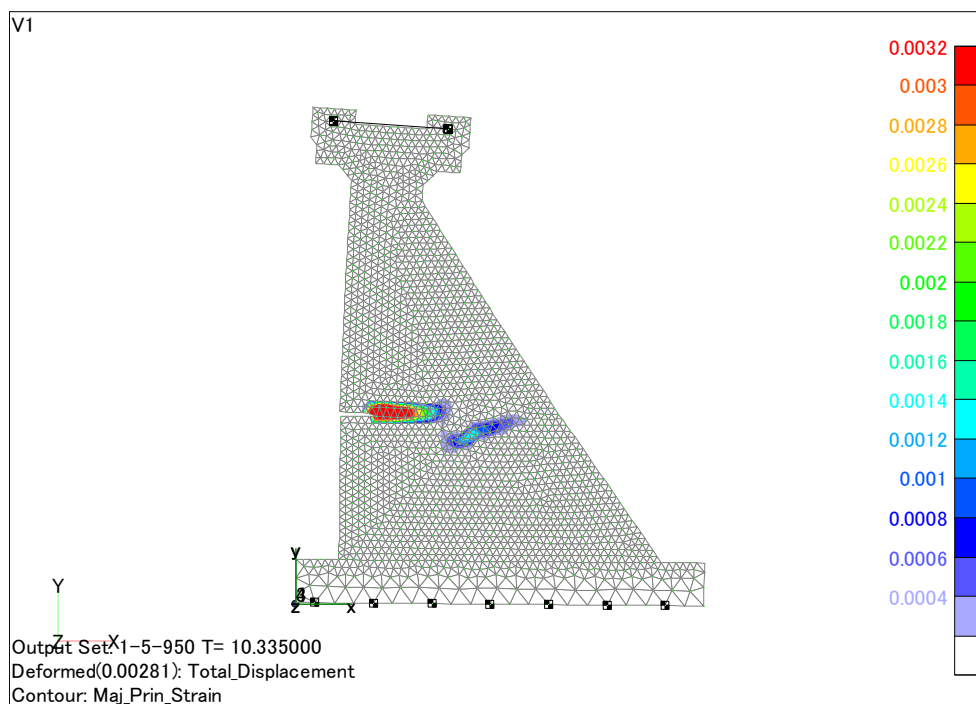


【2回目加振のピーク時の主ひずみコンター図(T=5.17秒)】

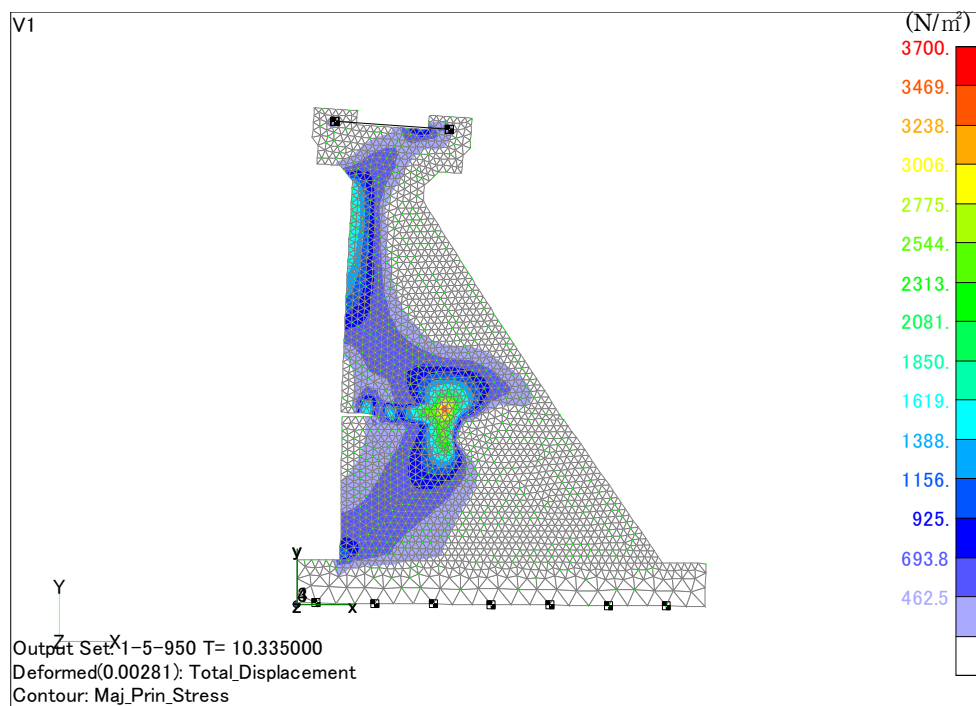


【2回目加振のピーク時の主応力コンター図(T=5.17秒)】

図-11 2回目加振時の解析結果



【3回目加振のピーク時の主ひずみコンター図(T=10.335秒)】



【3回目加振のピーク時の主応力コンター図(T=10.335秒)】

図-12 3回目加振時の解析結果

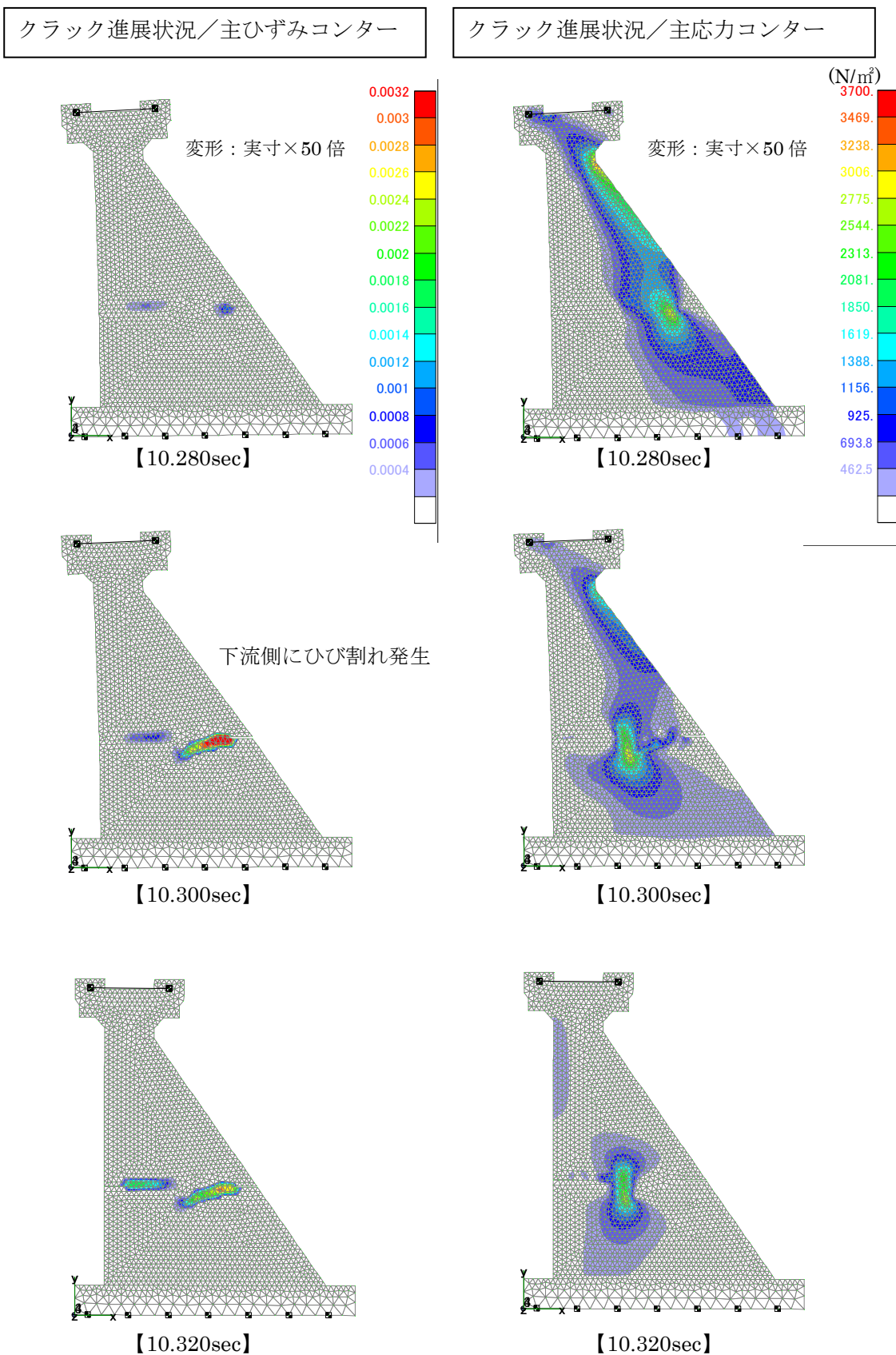


図-13 3回目加振時の時系列(1)

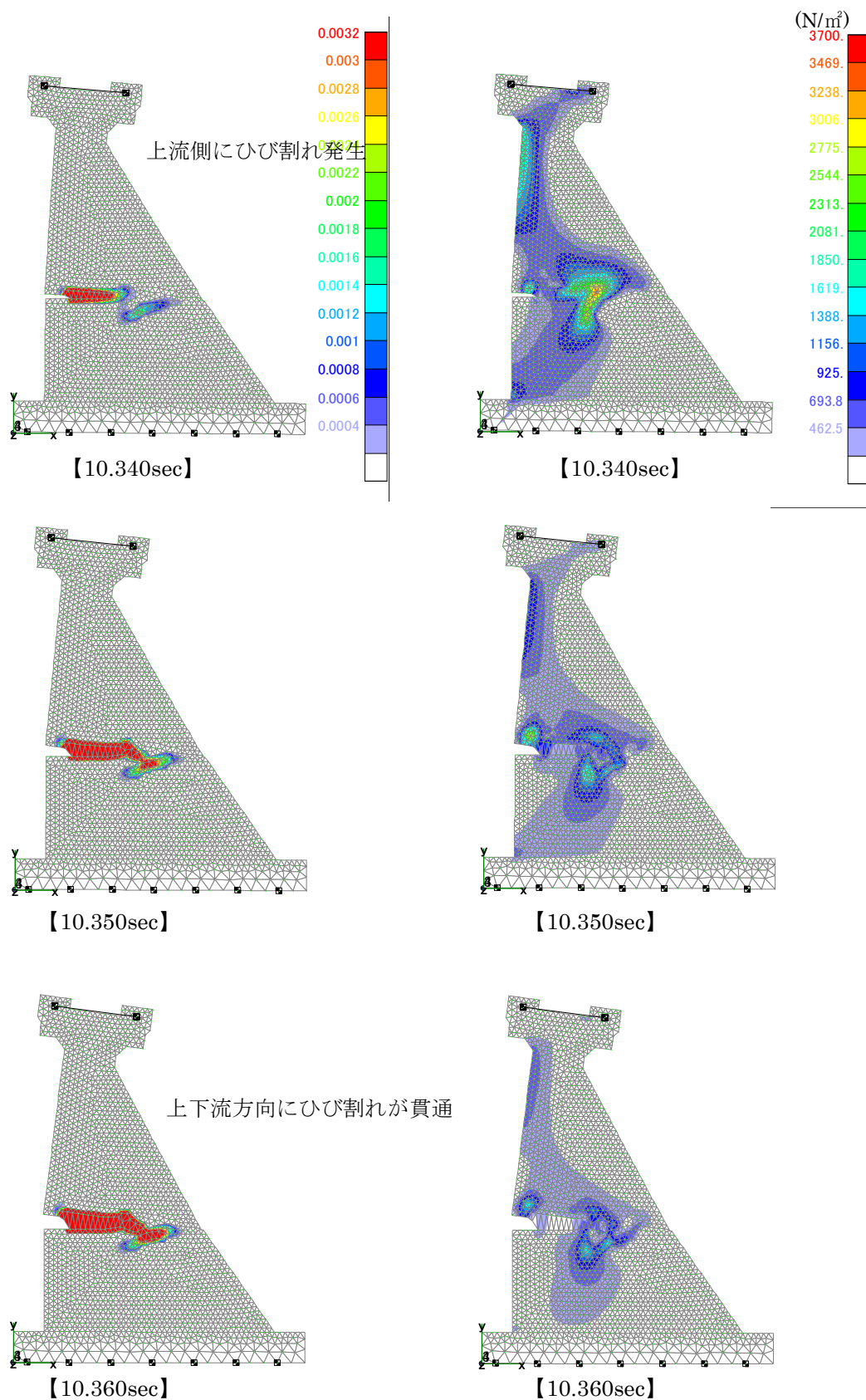


図-13 3回目加振時の時系列(2)

7. まとめ

既往のコンクリートダムのひび割れ試験をシミュレーション解析した結果、試験結果と解析結果のひび割れ進展がほぼ一致した。ただし、試験結果は2回目加振時に下流側からひび割れが発生したのに対し、解析結果は3回目加振時にひび割れが発生した違いがあった。これは、解析の非線形パラメータ(引張軟化曲線)の指定を調整することで再現が可能と考えられる。また、ひび割れ進展に伴う、応力解放が解析結果の主応力コンター図から判断でき、解析の妥当性を確認することができた。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料,平成17年3月
- 2) 木全宏之,藤田 豊,堀井秀之:動的クラック進展解析による重力式コンクリートダムの耐震安全性評価,土木学会論文集, No.787/I-71, 137-145, 2005年4月
- 3) Rene Tinawi, Pierre Leger, Martin Leclerc, and Giovanni Cipolla: Seismic safety of gravity dams:from shake table experiments to numerical analyses, Journal of Structural Engineering, pp.518-529,2000
- 4) 内田裕市,六郷恵哲,小柳 洽:仮想ひびわれモデルを組み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法,土木学会論文集, No.466/V-19,pp.79-88,1993年5月