

(20) 鋼製枠砂防堰堤の耐衝撃性能に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on the impact resistance of steel frame dam

加藤 尚*, 園田 佳巨**, 神田 幸弘*, 大隅 久***

Takashi KATO, Yoshimi SONODA, Yukihiko KANDA, Hisashi OHSUMI

*九州大学大学院修士課程, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***砂防鋼構造物研究会 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5 砂防会館 5F)

キーワード: 鋼製枠砂防堰堤, 衝撃応答, 個別要素法
(steel frame dam, impact behavior, distinct element method)

1. 緒言

土石流・地すべり等の土砂災害から人命や財産の損失を防ぐための代表的な防護構造物として, 各種の砂防堰堤が土石流発生危険溪流に提案・施工されている。その砂防堰堤の一つに写真-1 に示すような鋼製枠組の中に現地で採取した小径の礫を中詰材として充填した鋼製枠砂防堰堤¹⁾がある。鋼製枠砂防堰堤は, コンクリート製の砂防堰堤に比べて, 施工期間が短く, 優れた透水性により堆積土砂の地下水位を低下させることができるだけでなく, 周囲地盤の変形にも追随可能などの数多くの利点を有する合理的な構造と考えられていたが, 平成14年7月に三重県藤原町で発生した土石流による被災事故²⁾によって, その安全性について大きな懸念が持たれることになった。

現行の鋼製砂防構造物設計便覧³⁾では, 鋼製枠砂防堰堤の水平荷重に対するせん断抵抗を評価する場合には, 構造全体を鋼製枠組と中詰材とに分け, どちらか一方のせん断抵抗を期待するように設計されている。これは, 中詰材と鋼製枠組で, 変形性能や外力に対する抵抗メカニズムが大きく異なるために, これらを一体とした構造全体の耐荷性能の評価が困難なためであると考えられる。しかし, 実構造においては, 鋼製枠組で拘束された中詰材のせん断抵抗と鋼製枠組とが相互に補剛し合う効果が構造全体の挙動に大きく反映していると考えられる。この点については, 既に香月の研究⁴⁾において, 中詰材の挙動特性とせん断抵抗力に関する実験・解析により詳細な検討がなされ, 中詰材のせん断抵抗力評価式も提案されているが, 中詰材を充填した鋼製枠砂防堰堤の破壊の可能性を想定した検討はなされておらず, その耐衝撃性能についても明確にされていないのが現状である。

そこで, 本研究では3次元個別要素法をベースとして独自の改良を加えた数値解析モデルを用いて, 中詰材と鋼製

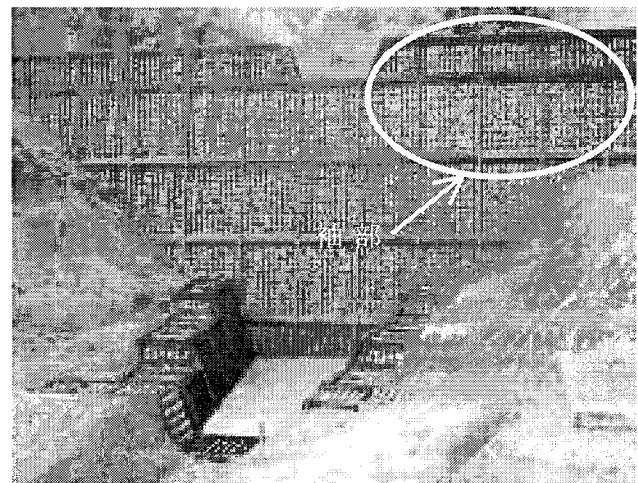


写真-1 鋼製枠砂防堰堤

枠組の相互作用を考慮した構造全体系での3次元衝撃応答解析手法を作成し, 巨礫の衝突に対する鋼製枠砂防堰堤の耐衝撃性能を, シミュレーション解析により評価することを試みた。

2. 個別要素法を用いた鋼製枠砂防堰堤の解析モデル

本研究で対象としている鋼製枠砂防堰堤は, 鋼製枠と中詰材の2種類で構成されており, その挙動を正確に把握するためには, それぞれの力学的特性を考慮したモデル化を行う必要がある。特に, 中詰材は個々が独立した固体であるため, その挙動を通常の有限要素法を用いて解析することは困難である。そこで, 本研究では中詰材のモデル化に適した個別要素法⁵⁾をベースに, 独自に改良を加えて鋼製枠砂防堰堤のモデル化を行った。

個別要素法は, 解析対象を剛体要素によって離散化し, 各要素が接触状態にある場合, 図-1 に示すような接点

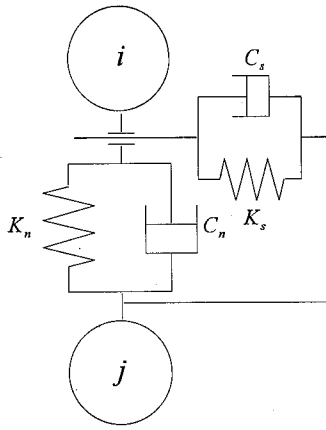


図-1 結合モデル
 K_n, K_s : 法線および接線方向バネ
 C_n, C_s : 法線および接線方向ダッシュポット

図-1 結合モデル

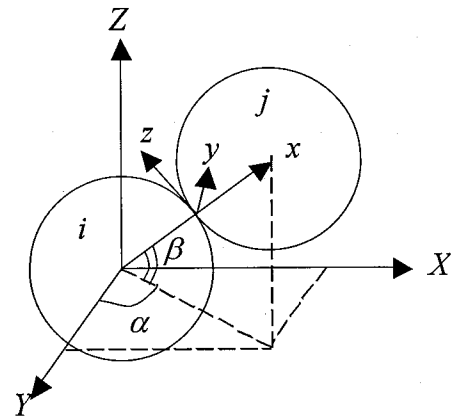


図-2 局所座標と全体座標

に設けた法線方向と接線方向のバネおよびダッシュポットを用いて力の伝達を表現するものであり、それにより得られた力をもとに、以下に示すような運動方程式を立て、時間積分を行うことで各要素の変位を求める。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (1)$$

ここで、 M : 要素質量、 C : 減衰係数、 K : バネ係数、 $f(t)$: 外力ベクトル。

2.1 中詰材のモデル化

各中詰材要素間で以下の接触条件を満足する場合に、力の伝達を求める。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad (\text{接触}) \quad (2a)$$

$$r_i + r_j < R_{ij} \quad (\text{非接触}) \quad (2b)$$

ここで、 $R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$:

i, j 要素中心間距離、 (x_i, y_i, z_i) : i 要素の中心座標、 (x_j, y_j, z_j) : j 要素の中心座標、 r_i, r_j : i, j 要素の半径。

2 要素 i, j が接触している場合には、図-1 に示すようなモデルにより要素間力を求めるため、各要素の全体座標系における変位増分を局所座標系における変位増分へと以下の式を用いて座標変換を行う。なお、全体座標系 (X, Y, Z) と局所座標系 (x, y, z) については、図-2 に示すように定義した。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_X \\ \Delta u_Y \\ \Delta u_Z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$$a_{11} = \cos \alpha \cos \beta, \quad a_{12} = \sin \alpha \cos \beta, \quad a_{13} = \sin \beta,$$

$$a_{21} = -\sin \alpha, \quad a_{22} = \cos \alpha, \quad a_{23} = 0,$$

$$a_{31} = -\cos \alpha \sin \beta, \quad a_{32} = -\sin \alpha \sin \beta, \quad a_{33} = \cos \beta,$$

$\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$: 全体座標系における変位増分、

$\Delta u_n, \Delta u_y, \Delta u_z$: 局所座標系における変位増分、

α : Z 軸まわりの回転角、 β : Y 軸まわりの回転角。

まず、法線方向の力については、上記の局所座標系における変位増分より、接触状態にある 2 要素間の相対変位増分と相対速度を求め、これを用いて以下の式により計算した。なお、中詰材要素の場合には、非接触状態では力の伝達は生じないことから、圧縮力のみ作用するものとする。

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + k_n \Delta u_n \quad (4a)$$

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (4b)$$

$$[d_n]_t = c_n \Delta \dot{u}_n \quad (4c)$$

ここで、 f_n : 法線方向力 (圧縮力を正とする)、 e_n : 法線方向バネ力、 d_n : 法線方向減衰力、 $k_n = EA/R_{ij}$: 法線方向

バネ係数、 A : 中詰材の断面積、 $\Delta u_n = \Delta u_{x_i} - \Delta u_{x_j}$: 法

線方向相対変位増分、 $c_n = 2h\sqrt{mk_n}$: 法線方向減衰係数、

h : 減衰定数、 m : 要素質量、 $\Delta \dot{u}_n = \Delta u_n / \Delta t$: 法線方向相対速度。

次に、接線方向の力の伝達については、種々の形状・寸法をもつ現実の中詰材相互のかみ合わせ等を考慮することは困難であり、また必ずしも中詰材要素に接線方向の復元力特性を与える必要もないと考えられる。そこで接線方向の力のやり取りとして、摩擦抵抗のみをモデル化することにした。摩擦力は、前述した法線方向の力を用いて以下の式により与える。ただし、摩擦力の作用方向は相対加速度の向きと逆向きとする。

$$f_{sy} = f_{sz} = \begin{cases} \mu f_n & (f_n > 0) \\ 0 & (f_n < 0) \end{cases} \quad (5)$$

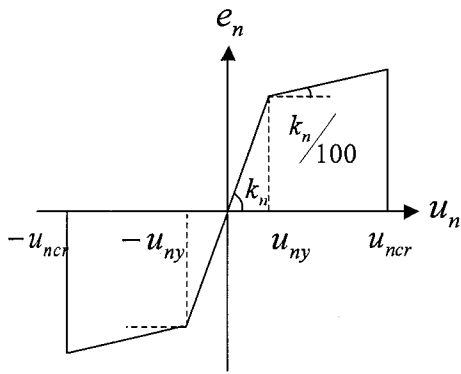


図-3 バネ力-変位関係

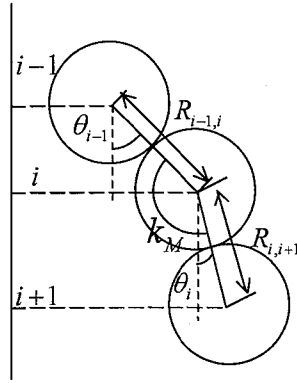


図-4 曲げバネのモデル

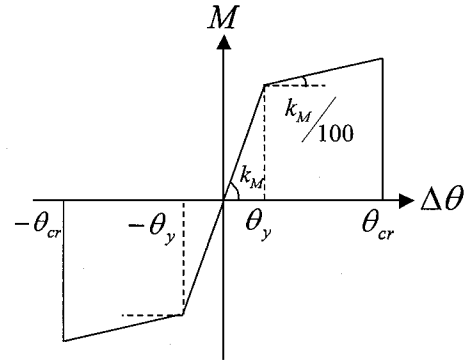


図-5 曲げモーメント-相対回転角

ここに、 f_{sy}, f_{sz} : 接線2方向力、 μ : 摩擦係数 ($\mu = 0.3$)。

なお、摩擦力は2要素間に作用する相対的な外力(2要素間の相対加速度から求めた)を超えて働くことはないことから、摩擦力に比べて外力の方が小さい場合には、以下の式で摩擦力の上限を求め、接線方向に与えることにした。

$$f_{sy} = m\Delta\ddot{u}_{sy} \quad (6a)$$

$$f_{sz} = m\Delta\ddot{u}_{sz} \quad (6b)$$

ここで、 $\Delta\ddot{u}_{sy} = (\Delta u_{y_i} - \Delta u_{y_j})/(\Delta t)^2$,

$\Delta\ddot{u}_{sz} = (\Delta u_{z_i} - \Delta u_{z_j})/(\Delta t)^2$: 接線2方向の相対加速度。

以上により求めた法線方向の力および接線2方向の力を接触状態にある全要素との間で総和を求め、式(1)の第2項および第3項とみなして時間積分を行うことで、中詰材要素の変位を逐次求めた。

2.2 鋼製枠のモデル化

鋼部材については、通常の骨組要素でモデル化しても構わないと考えられるが、中詰材との接触判定を容易にするために球状要素の集合体として表し、個別要素法の考えを利用してモデル化を行った。すなわち、法線方向の力については、2.1と同様にバネおよびダッシュポットを用いて(4a)~(4c)の式により与える。

このとき、法線方向の軸力特性には、図-3に示すようなバイリニア型のバネ力-変位関係を用いた。要素間の変位 u_n が降伏変位 u_{ny} を上回るときには、初期のバネ係数 k_n の1/100の剛性を与え、終局変位 u_{ncr} に達したときには鋼材要素間のバネは引張破壊するものとした。

本来、鋼製枠砂防堰堤は各部材が軸力(法線方向力)のみを伝達するトラス構造として設計されているため、接線方向のバネやダッシュポットを設けないモデルも考えられるが、鋼製枠組内に充填された中詰材の側圧や衝撃荷重による影響を正確に評価するには、曲げモーメントを伝達できる構造要素でモデル化した方が望ましいと考えられる。そこで、鋼部材要素間には曲げモーメントを表現できるように、図-4に示すような曲げバネ k_M を設けた。

$$M = k_M \Delta\theta \quad (7)$$

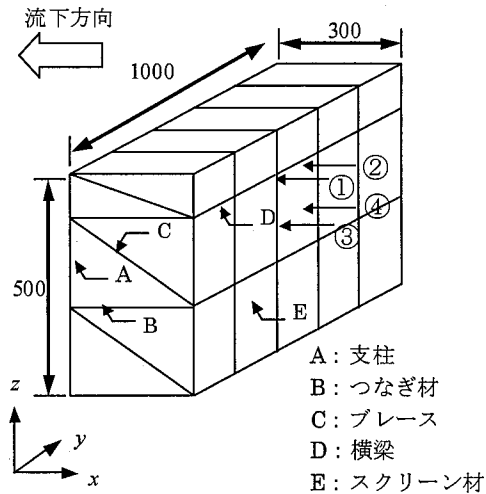


図-6 鋼製枠砂防堰堤袖部モデル

ここに、 $k_M = EI/\bar{R}$ 、 E : 弾性係数、 I : 断面2次モーメント、 $\bar{R} = (R_{i-1,i} + R_{i,j+1})/2$: 隣接要素中心平均距離、 $\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i-1}$: 相対回転角。

鋼材の曲げ剛性として、図-5に示す曲げモーメント-相対回転角関係を用いた。初期の段階では弾性曲げ剛性を用いて曲げバネ係数を k_M とし、要素間の相対回転角 $\Delta\theta$ が降伏回転角 θ_y に達したときに初期のバネ係数の1/100の曲げ剛性となるように設定し、破壊回転角 θ_{cr} に達したときに曲げ破壊が発生するものとした。

以上のモデル化をもとに、2.1と同様に接触状態にある要素間で作用断面力の総和を求め、式(1)を用いて各要素の変位を逐次、時間積分により求めた。

3. 鋼製枠砂防堰堤袖部の衝撃応答解析

鋼製枠砂防堰堤の衝撃応答特性を把握するため、鋼製枠単体挙動と中詰材を充填した構造の2通りに分けて基本構造からモデル化を行いながら、本解析手法の妥当性に関する考察を行った。解析対象は、図-6に示すような鋼製枠砂防堰堤の袖部構造モデルである。本解析に用いた材料諸元を表-1に、鋼製枠を構成する鋼部材の断面諸元および降伏回転角と破壊回転角については表-2に示す。なお、本解析では、底面を全固定とし、時間積分に用いる時間刻

表-1 材料諸元

	単位体積重量 (kg/cm ³)	弾性係数 (N/mm ²)	減衰定数	要素数
鋼製枠	0.00785	2.1×10 ⁵	0.1	2080
スクリーン	0.00785	2.1×10 ⁵	0.1	1890
中詰材	0.00267	4.8×10 ⁴	0.1	2475
衝突礫	0.00267	4.8×10 ⁴	0.1	1

表-2 鋼材の断面諸元

部材名	規格	断面2次モーメント (cm ⁴)	降伏回転角 θ_y (°)	破断回転角 θ_{cr} (°)
A: 支柱	H 150×150×7×10	1620.0	0.38	15.48
B: つなぎ材	[125×65×6×8	424.0	0.51	16.62
C: ブレース	[125×65×6×8	424.0	0.51	16.62
D: 横梁	H 125×125×6.5×9	839.0	0.48	16.62
E: スクリーン材	[50×50×6	20.6	1.09	10.89

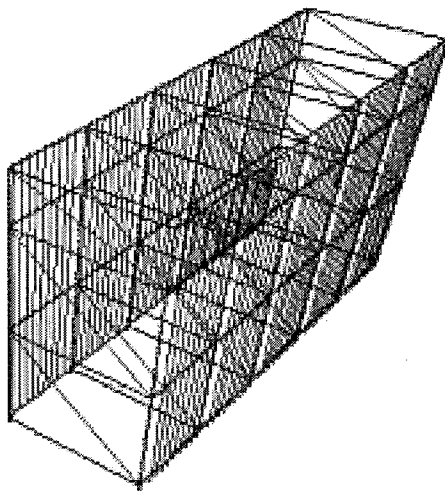


図-7 鋼製枠組モデル

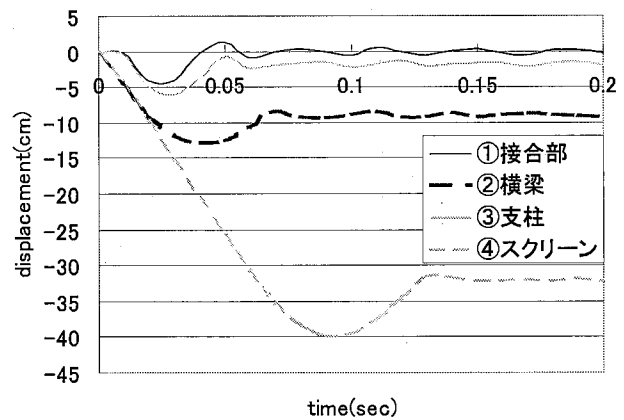


図-8 衝突箇所の流下方向変位比較

みは 1.0×10^{-6} sec に設定した。

3.1 鋼製枠構造単体の解析

まず、巨礫の衝突を受けたときの鋼製枠構造単体のシミュレーションを行い、数値計算による破壊判定の可能性を検討した。図-7は解析モデルを示したものである。

最初に、巨礫の衝突位置が鋼製枠組の衝突箇所の応答変位に与える影響について検討した。衝突条件は礫径 100cm、衝突速度 6.0m/sec とし、図-6に示すように①接合部、②横梁中央、③支柱中央、④スクリーン材中央の4箇所巨礫が衝突した場合の弾塑性衝撃応答解析を行った。また、衝突箇所による弾塑性変位の差をわかりやすくするために、あえて塑性変形量の限界（破断した部位の消去）を設けずに解析結果を比較した。図-8に、衝突箇所の流下方向の時刻歴変位応答を示す。このグラフから、衝突箇所が接合部と支柱の場合は、横梁とスクリーンの場合に比べて最大変位の発生時間が早く、また、最大変位量も約 5cm と小さいことから、部材断面自体が直接衝突に対して十分な剛性を有していると考えられる。一方、衝突箇所がスクリーン

の場合に最大変位が約 40cm と過大な値を示しているが、これは塑性変形量に上限を設けていないためであり、実際には早い時間でスクリーン部材は破断していると考えられる。

3.2 鋼製枠砂防堰堤袖部構造の解析

中詰材による補剛効果を把握するために、砂防堰堤袖部構造に3.1と同じ衝突条件でスクリーン中央(図-6の衝突箇所④)に礫を衝突させ、中詰材の有無による2通りの条件で衝撃挙動を比較した。なお、本解析においても弾塑性挙動に対する中詰材の充填効果を明確にするため、各部材の塑性変位の上限(破断)は設けていない。図-9は、中詰材を充填した鋼製枠砂防堰堤袖部をモデル化したものである。図-10は、中詰材の有無による衝突箇所の応答変位を比較したもので、このグラフより中詰材の効果により応答変位が約 50%も低減されていることが確認された。

3.3 鋼製枠構造単体の貫通

本解析手法を用いて衝突礫が、最も脆弱な部材であるス

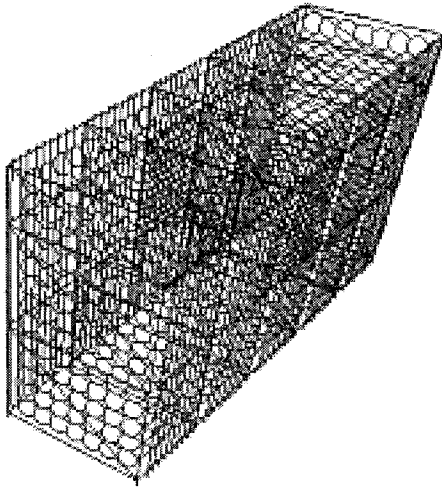


図-9 鋼製枠砂防堰堤モデル図

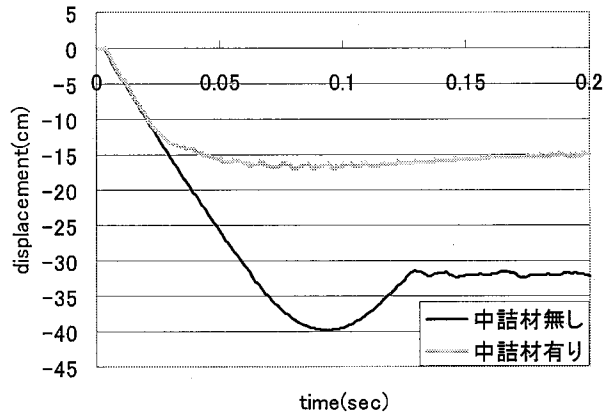
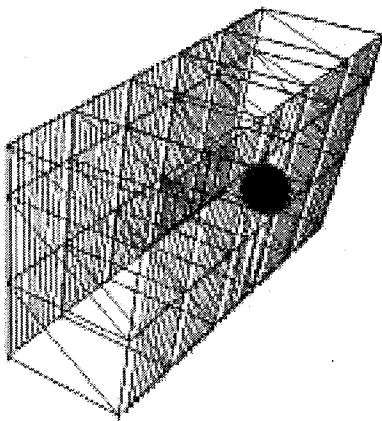
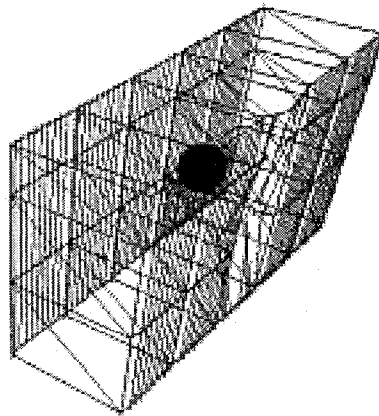


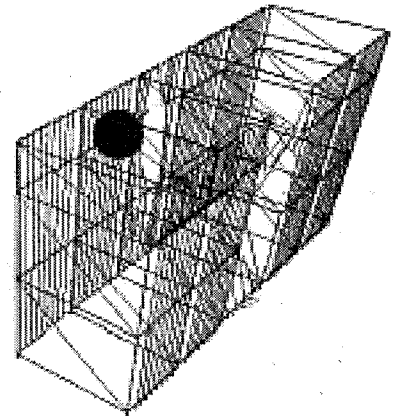
図-10 中詰材の有無による流下方向変位比較



(a) 貫通状況 (100msec 経過後)



(b) 貫通状況 (400msec 経過後)



(c) 貫通状況 (900msec 経過後)

図-11 衝撃応答状況

クリーン材を貫通する現象をシミュレートできることを確認するために、鋼製枠構造単体の衝撃応答解析を行った。貫通現象を表現するための手法として、隣接要素間で破断が生じた箇所は結合を切断し、他との結合が全て失われた要素を消去することで、巨礫の貫通を再現した。巨礫の衝突箇所は、スクリーン中央 (図-6 衝突箇所④) であり、礫径 100cm、衝突速度 6.0m/sec を条件として、表-2 に示す破壊回転角と引張限界ひずみ (20%と仮定) を用いて各部材の破壊判定を行った。その解析結果を図-11 に示す。まず、衝突箇所前面スクリーンの破壊が発生 (100msec 経過後) し、その後、前面スクリーン材と接合している横梁の破壊 (400msec 経過後)、最後に前面スクリーンを貫通した礫が背面スクリーンを貫通 (900msec 経過後) と破壊が進展する結果が得られた。巨礫の運動に着目すると、前面スクリーンに衝突することで初期速度から減速した後は、次の衝突が起こる背面スクリーンまで等速運動をしている。以上のシミュレーションより、本手法を用いて礫の貫通による鋼部材の破壊後に中詰材が流出する現象までを表現可能であることが確認された。

3.4 鋼製枠砂防堰堤袖部の破壊シミュレーション

鋼製枠砂防堰堤に破壊が生じる可能性として、いくつかの原因と破壊形態が考えられるが、本研究では鋼製枠組を形成する主要部材の破断および中詰材の流出を防ぐ役割を担う背面 (下流側) スクリーン材の破断が生じたときに本構造物が破壊するとみなした。これは、鋼製枠組自体に破壊が生じることにより重大な全体崩壊につながる可能性があること、そして鋼製枠組内部に充填されている中詰材の流出により中詰材が担っていたせん断抵抗が失われ、耐衝撃性能が大きく損なわれると考えられるためである。

以上の判定基準を適用した破壊シミュレーションを行い、本構造の耐衝撃性能の評価を試みた。衝突条件は、表-3 に示すように礫径 3 種類 (50cm, 100cm, 200cm)、衝突速度 3 種類 (1.0m/sec, 3.0m/sec, 6.0m/sec) の計 9 ケースである。巨礫の衝突箇所は、鋼製枠組で最も脆弱な部材であるスクリーン中央 (図-6 の衝突箇所④) とした。

その結果、衝突条件 CASE8 および CASE9 の 2 ケースにおいて本構造物の破壊が発生した。破壊箇所は衝突箇所と同じ位置の背面スクリーン材の曲げ破壊であった。図-12 に、破壊したケース (CASE8、CASE9) と巨礫の運動エネルギーが破壊した 2 ケースに比較的近い衝突条件にも関わ

表-3 衝突条件

	礫径	速度
CASE1	50	1.0
CASE2		3.0
CASE3		6.0
CASE4	100	1.0
CASE5		3.0
CASE6		6.0
CASE7	200	1.0
CASE8		3.0
CASE9		6.0

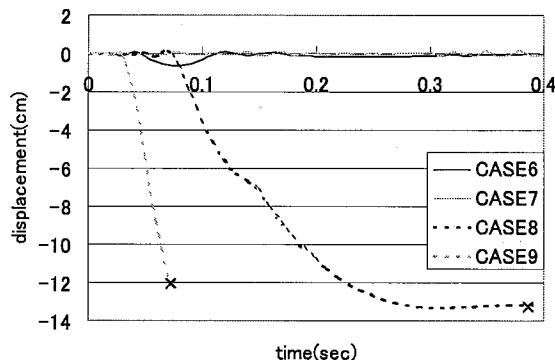


図-12 背面スクリーンの流下方向変位比較

らず破壊しなかった2ケース (CASE6, CASE7) の背面スクリーン材の時刻歴変位応答を示す。CASE6およびCASE7の衝突条件では、ほとんど背面スクリーン材に変位が生じないが、CASE8とCASE9の場合には巨礫の持つ衝撃エネルギーがかなり大きくなることから中詰材を介して伝達する荷重の伝播状況に前記2ケースとは大きな相違が生じたものと考えられ、背面スクリーン材に約12cmの変位が生じた時点で破壊する結果が得られた。また、図-13に衝突条件CASE6で巨礫が衝突し、400msec経過後の衝撃応答状況を示す。同衝突条件で巨礫を鋼製枠構造単体に衝突させた3.3の結果である図-11 (b)と比較すると、構造物全体だけでなく、衝突箇所付近の鋼材の破壊も発生しておらず、中詰材効果によって本構造物の耐衝撃性能が向上していることは明らかである。

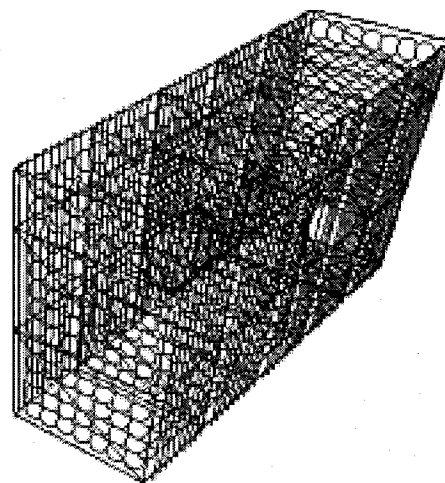


図-13 衝撃応答状況 (400msec 経過後)

4. 結論

本研究では、個別要素法をベースに独自に改良を加えた鋼製枠砂防堰堤の衝撃応答解析手法を開発し、巨礫の衝突を受けた際の耐衝撃性能に関するシミュレーションを行った。ここで得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1)本手法を用いて、鋼製枠構造と中詰材の相互の補剛効果を考慮した衝撃応答解析が可能であることが確認された。
- 2)本手法によると、特に礫がスクリーン材に衝突した場合に中詰材の補剛効果が認められた。
- 3)鋼製枠部材に破壊限界を設けることで、巨礫の貫通や中詰材の流出を解析上で再現できることを確認した。
- 4)鋼製枠砂防堰堤の破壊形態を提案し、破壊判定解析を行うことで、鋼製枠砂防堰堤の破壊の可能性についても予測することができた。

参考文献

- 1)砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物研究会：鋼製砂防構造物に関する研究，1983

- 2)近藤観慈，沼本晋也，林拙郎：2002年7月17日三重県藤原町で発生した土石流，砂防学会誌，Vol.55，No.5，p.31 - 39，2003
- 3)砂防・地すべりセンター鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，平成13年版
- 4)香月智，石川信隆，大平至徳，鈴木宏：鋼製枠砂防構造物における中詰材のせん断抵抗解析に関する一考察，構造工学論文集 Vol.35A，pp.1309～1317，1989
- 5)香月智，石川信隆，大平至徳，鈴木宏：礫中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製枠砂防ダム解析と最適設計に関する一考察，構造工学論文集 Vol.37A，pp.1507～1518，1991
- 6)Cundall, P.A.: A Computer Model for simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129-136, 1971
- 7)木山英郎，藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，pp.137-146, 1983

(2006年9月29日受付)