

鋼製枠砂防堰堤の耐衝撃性能の解析的評価方法に関する基礎的研究

Basic study on the analytical evaluation method of impact resistance of steel frame dam

園田 佳巨*, 加藤 尚**, 神田 幸弘**, 大隅 久***

Yoshimi SONODA, Takashi KATO, Yukihiro KANDA, Hisashi OHSUMI

*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)

**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)

***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)

Check dam structures had been constructed in the upriver distinct in order to prevent the disaster by debris flow. Steel frame dam is one of these protective structures, and it is considered as the rational and economic due to its unique structural system. Steel frame dam is composed of the comparatively thin frame members and a number of local small gravels that filled in the frame casing. Although, these gravels and steel frames are expected to reinforce each other against the impact load, their impact behavior and dynamic strength have not been investigated. Thus, this paper presents an analytical approach on the dynamic strength of steel frame dam by one's own improved 3-dimensional distinct element method.

Key Words: steel frame dam, impact behavior, distinct element method

キーワード: 鋼製枠砂防堰堤, 衝撃応答, 個別要素法

1. 緒言

我が国は、国土の4分の3を山地や丘陵地が占めるとともに梅雨や台風時期に集中豪雨が多いことから、毎年のように土石流・地すべり等の土砂災害による被害が各地で生じている。このような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の一つとして、砂防堰堤が土石流発生危険渓流に設置されている。しかし、砂防堰堤の整備状況は、全国に約90,000箇所ある危険渓流の中の20%程度にとどまっており、土石流による被害を低減させるために早期に設置すべき箇所が全国各地に残されているのが現状である。

砂防堰堤には、これまで各種の構造形式が提案・施工されているが、その一つに写真-1に示すような鋼製枠組の中に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。この鋼製枠砂防堰堤は、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従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るが、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。しかし、鋼製枠砂防堰堤の耐衝撃性能や破壊メカニズムについては、必ずしも明確にされているわけではなく、その耐荷性能を定量的



写真-1 鋼製枠砂防堰堤

に把握した上で適切な設計・施工を行えば、鋼製枠砂防堰堤の特長を活かせる地域が数多く存在すると考えられる。

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

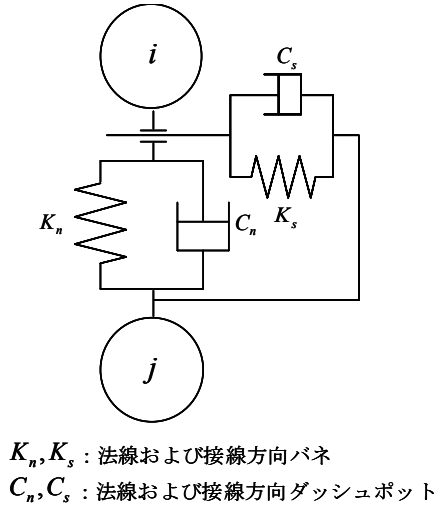


図-1 結合モデル

大きく異なるために、これらを一体とした構造全体系の耐荷性能の評価が困難なためであると考えられる。実構造では、鋼製杵組で拘束された中詰材のせん断抵抗と鋼製杵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^{4,5)}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。しかし、中詰材を充填した鋼製杵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、中詰材と鋼製杵組の相互作用を考慮した構造全体系の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杵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杵砂防堰堤の解析モデル

本研究で対象としている鋼製杵砂防堰堤は、鋼製杵と中詰材の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^{6,7)}をベースに、独自に改良を加えて鋼製杵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に示すような接触点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。

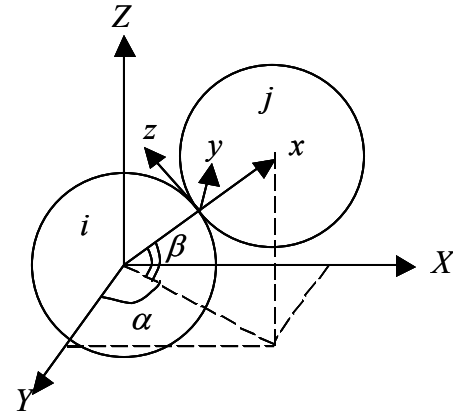


図-2 局所座標と全体座標

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

ここで、 u : 並進変位、 M : 要素質量、 C : 減衰係数、 K : バネ係数、 $f(t)$: 外力ベクトル。なお、ドット($\dot{\cdot}$)は時間に関する微分を表す。

本解析では、時間積分に陽解法である中央差分法⁸⁾を用いた。陽解法は、次の時刻における運動方程式の成立を条件としない代わりに、安定した数値解を得るために Courant 条件を満たす必要があり、以下の式により与える。

$$\Delta t \leq \Delta l_{\min} / c \quad (2)$$

ここで、 Δt : 時間刻み、 $\Delta l_{\min}$: 最小要素長、 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$:

縦波応力波の伝播速度、 E : 弾性係数、 ρ : 密度。

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。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \quad (\text{接触}) \quad (3a)$$

$$r_i + r_j < R_{ij} \quad (\text{非接触}) \quad (3b)$$

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。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_X \\ \Delta u_Y \\ \Delta u_Z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

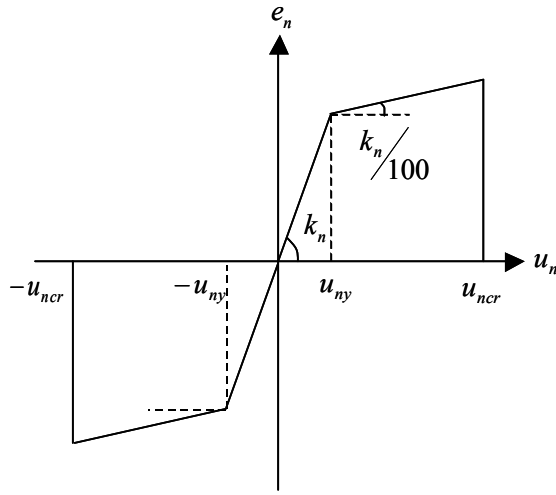


図-3 バネ力ー変位関係

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,

$\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$: 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.

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (5a)$$

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + k_n \Delta u_n \quad (5b)$$

$$[d_n]_t = c_n \Delta \dot{u}_n \quad (5c)$$

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.

$$f_{sy} = f_{sz} = \begin{cases} \mu f_n & (f_n > 0) \\ 0 & (f_n < 0) \end{cases} \quad (6)$$

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.

$$f_{sy} = m \Delta \ddot{u}_{sy} \quad (7a)$$

$$f_{sz} = m \Delta \ddot{u}_{sz} \quad (7b)$$

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, 前述した座標変換マトリクスを用いて全体座標系に変換し, 接触状態にある全要素との間で総和を求め, 式(1)左辺の第 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 (5a) ~ (5c) 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ー変位関係を用いた. 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破壊するものとし, 剛性を 0 とした. ここで, 圧縮側に関しても座屈等による破壊を簡易に考慮するために, 本解析では引張側と同様の終局変位を設定した. 本研究では, 要素間のひずみが 20% に達したときの変位を u_{ncr} に設定した.

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.

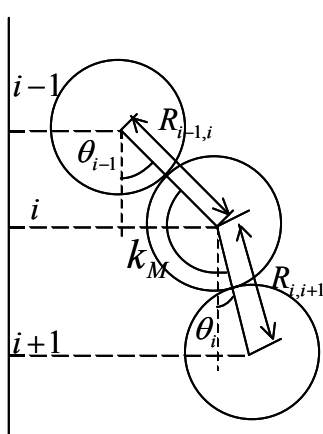


図-4 曲げバネのモデル

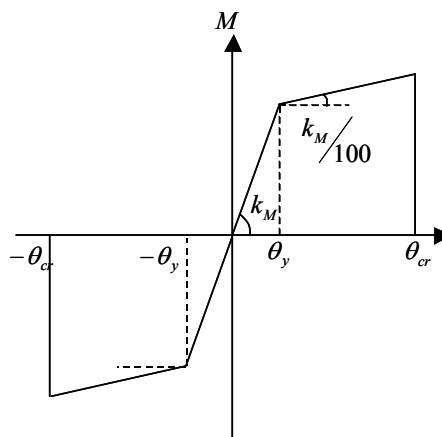


図-5 曲げモーメントー相対回転角

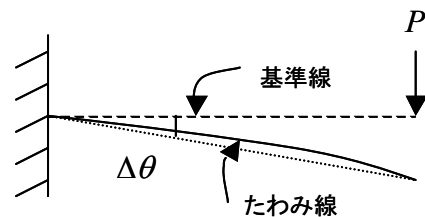


図-6 回転角の算出

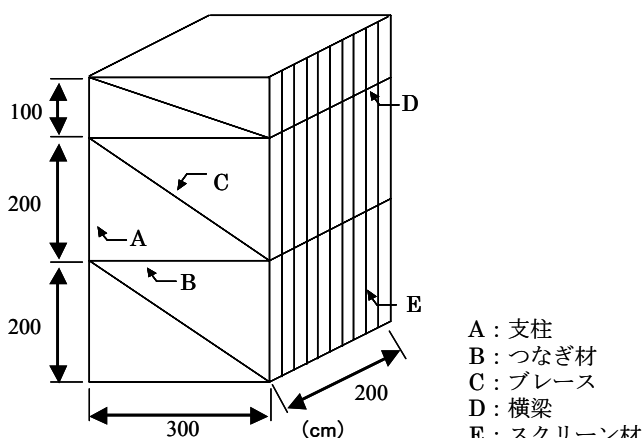


図-7 鋼製枠構造1ユニット図

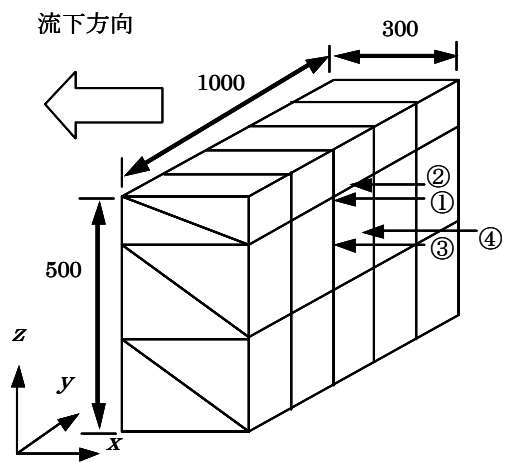


図-8 鋼製枠砂防堰堤袖部モデル

$$M = k_M \Delta\theta \quad (8)$$

ここに、 $k_M = EI/\bar{R}$ 、 E ：弾性係数、 I ：断面2次モーメント、 $\bar{R} = (R_{i-1,i} + R_{i,i+1})/2$ ：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ー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。ここで、降伏回転角、破壊回転角の算出については、図-6のような片持ち梁に静的載荷を行い、固定端における鋼材の応力が降伏強度(235N/mm²)および引張強度(400N/mm²)に達したときの部材全体の平均回転角を求め、その値を降伏回転角、破壊回転角と定義した。

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-7に示すような1ユニットの枠組を、図-8に示すように5つ連結させた鋼製枠砂防堰堤の袖部構造モデルである。なお、横梁とスクリーン材の接合部は、実際の鋼製枠砂防堰堤ではボルト接合されているため、本解析においては法線方向力のみ作用するようにモデル化を行っている。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、中詰材の弾性係数については、一般的な石材の弾性係数を仮定し、中詰材要素間のバネ係数には、弾性係数に該当要素の投影面積を乗じた値を用いた。また、本解析では、底面を全固定とし、時間積分に用いる時間刻みは 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

表-1 材料諸元

	単位体積重量 (kgf/cm ³)	弾性係数 (N/mm ²)	要素径 (cm)	減衰定数	要素数
鋼製枠	0.00785	2.1×10^5	10	0.1	2080
スクリーン	0.00785	2.1×10^5	5	0.1	1890
中詰材	0.00267	4.8×10^4	38	0.1	2275
			19		200
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 $\theta_y(^{\circ})$	破断回転角 $\theta_{cr}(^{\circ})$
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

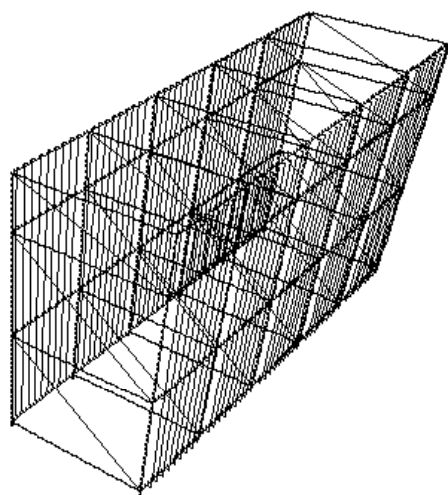


図-9 鋼製枠組モデル

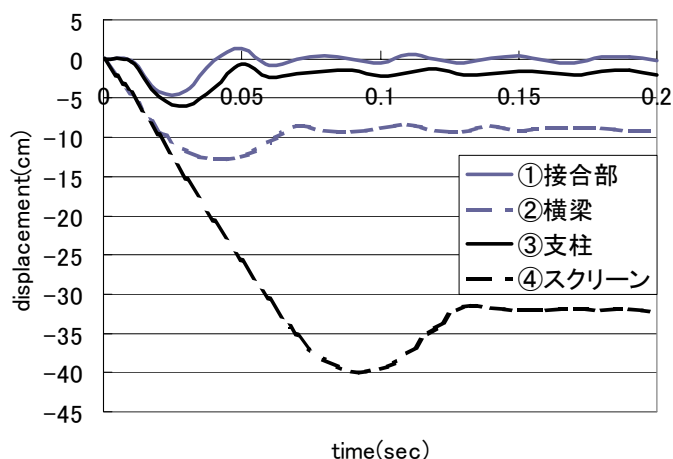


図-10 衝突箇所の流下方向変位比較

検討した。図-9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 600cm/sec とし、図-8 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箇所に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-10 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。これらの結果は、表-2 に示す各部材の断面諸元の値から容易に予想されることであるが、巨礫の衝突箇所によっては部材の破断を想定すべきであることがわかる。

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-8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(破壊)は設けていない。図-11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が、15~20cm程度の種々の形状を有する小径礫を用いた現実の中詰材を忠実にモデル化することは困難であることから、本解析では図-12のように同一径の球要素を規則的に配置した簡易なモデルを用いた。このことは、中詰材要素間を伝達する衝撃力の分散や摩擦抵抗力などの中詰材

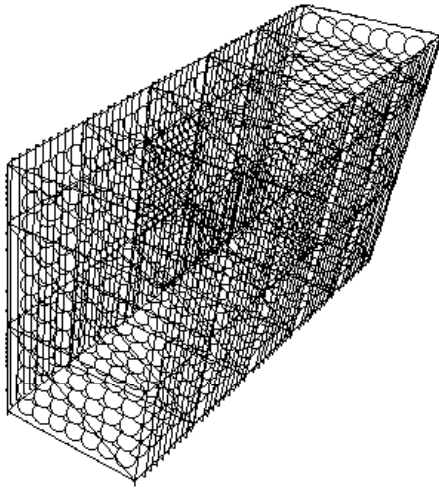


図-11 鋼製砂防堰堤モデル図

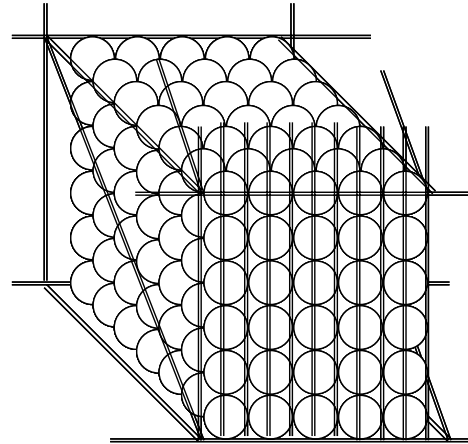


図-12 鋼製砂防堰堤モデル詳細図

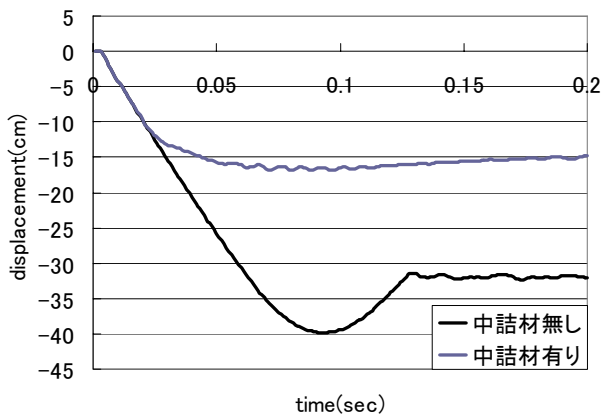


図-13 中詰材の有無による流下方向変位比較

の効果について安全側の仮定を設けたことになると考えられる。また、中詰材を規則的に配置した場合、中詰材とスクリーン間に隙間が生じてしまうことから、本モデルではその隙間を埋めるために中詰材に2種類の要素径を用いてモデル化を行っている。図-13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。

4. 鋼製砂防堰堤袖部の破壊シミュレーション

鋼製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、本研究では以下の3つの可能性を挙げ、これらを対象とした破壊シミュレーションを行った。

1) 主要部材（支柱、つなぎ材、ブレース、横梁）の破断

第一の破壊形態として、鋼製砂防堰堤を形成する主要部材の破断を想定した。本構造の耐衝撃性能は、中詰材のせん断抵抗に依るところが大きいとはいえ、鋼製砂防堰堤自体に破壊が生じると重大な全体崩壊につながる事が予想される。

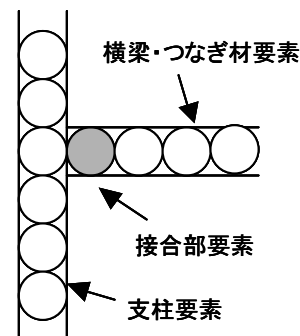


図-14 接合部モデル

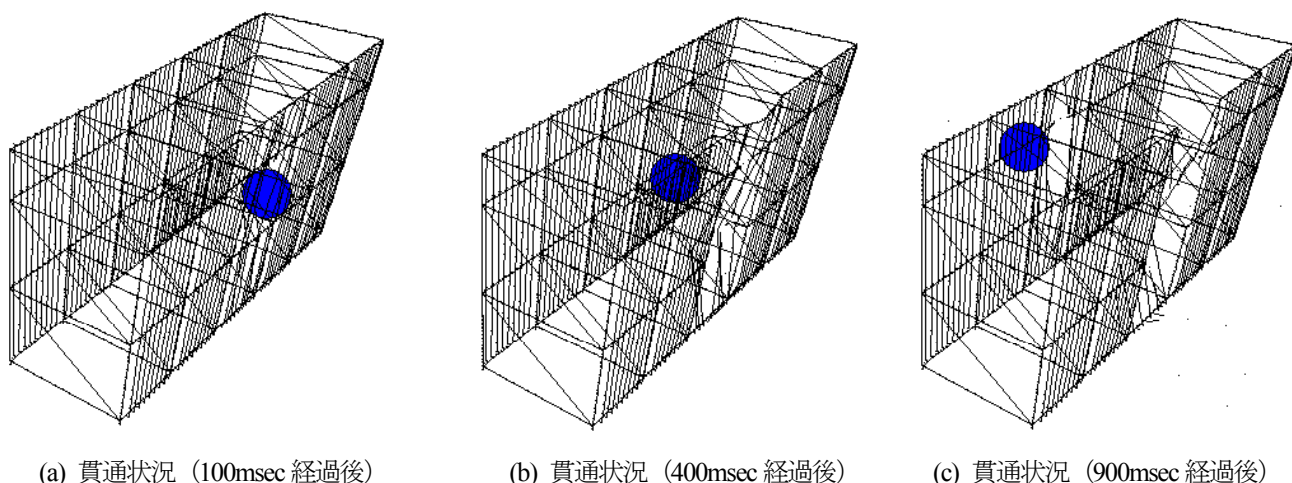
そこで、主要部材要素間で引張破壊（破断ひずみにより照査）もしくは曲げ破壊（破断回転角により照査）の2通りの破壊判定を行った。

2) 下流側スクリーン材の破壊

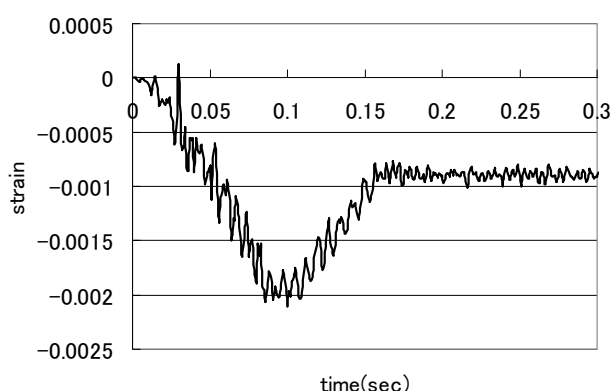
第二の破壊形態として、中詰材の流出を防ぐ役割を担う背面（下流側）スクリーン材の破壊を想定した。鋼製砂防堰堤は、内部に充填されている中詰材が流出すると、中詰材が担っていたせん断抵抗が失われて耐衝撃性能も大きく損なわれると考えられる。巨礫の衝突を直接受ける可能性が高い前面（上流側）スクリーン材の場合には、破壊を起こしても砂の外に流出した中詰材は上流側に堆積することになるが、背面スクリーン材からの中詰材の下流側への流出は致命的な状態を引き起こす恐れがある。したがって、第二の破壊形態に背面スクリーンの破壊を想定することにした。

3) 鋼部材接合部の破壊

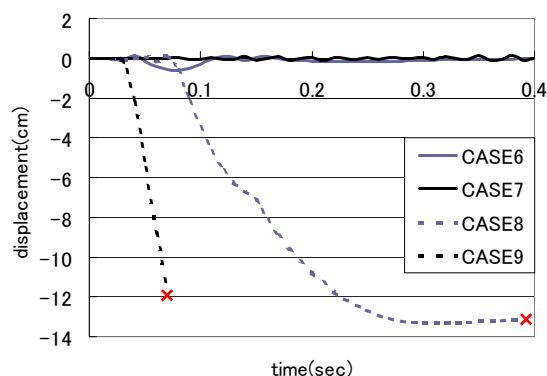
第三の破壊形態として、主要部材間の接合部の破壊を想定した。3.1の考察では、接合部を完全剛結とした解析を行ったが、実際の鋼製砂防堰堤では様々な形式のボルト接合が採用されている。したがって、主要部材間の各接合部を本構造の弱点箇所の1つとみなし、その破壊を想定した。本来、接合部の強度を正確に評価するには、詳細モデルを用いた数値解析か試験体を用いた破壊実験を行わなければならない。本研究では、中詰材と鋼製砂防堰堤を一体とした



図一15 衝撃応答状況



図一16 ひずみ-時間関係



図一17 変位-時間関係（背面スクリーン）

表一3 衝突条件

	礫径(cm)	速度(cm/sec)
CASE1	50	100
CASE2		300
CASE3		600
CASE4	100	100
CASE5		300
CASE6		600
CASE7	200	100
CASE8		300
CASE9		600

構造全体系の耐衝撃性能を概ね把握することを目的としているため、現時点では接合部の強度に関する詳細な検討は行わないが、今後、接合部の破壊を考慮できるように図一14に示すような接合部要素を設け、この要素に作用する応力がある一定の限界値を上回る場合に破壊を表現できるようにした。なお、本来であればボルト結合部の耐荷力を明確にして接合部の破壊判定を行うべきであるが、今回の試算では簡易に接合部断面の全強の75%に応力が達した場合に破壊すると仮定した解析を行うことにした。今後、各種接合部の耐荷力を個別に検討し、破壊判定の精度向上を図

る予定である。

以上の3通り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。

4.1 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、隣接要素間で破壊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（図一8 衝突箇所④）であり、礫径100cm、衝突速度600cm/secを条件として、表一2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。その解析結果を図一15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を

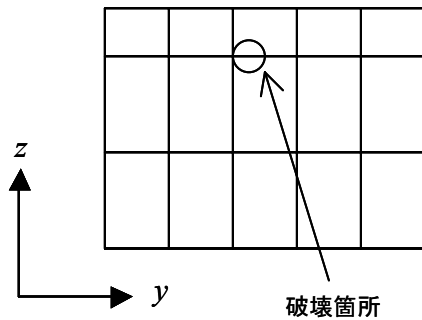


図-18 接合部破壊箇所

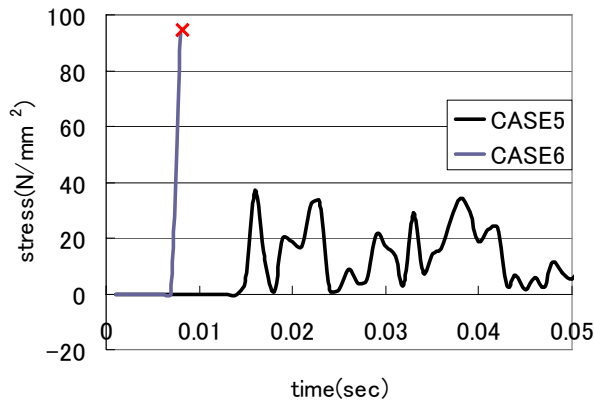


図-19 応力-時間関係 (①接合部)

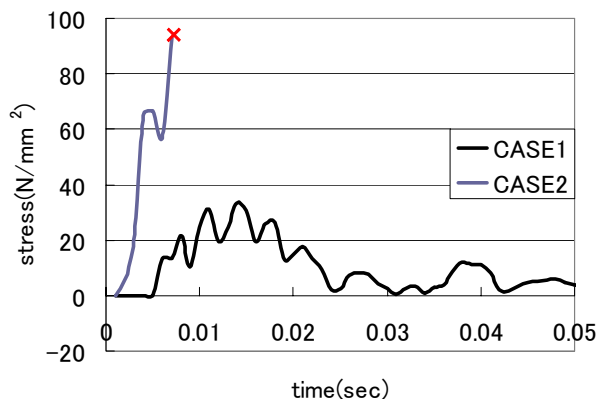


図-20 応力-時間関係 (②横梁)

表現可能であることが確認された。

4.2 鋼製砂防堰堤袖部の破壊判定解析

鋼製砂防堰堤の耐衝撃性能を簡易評価するために、部材間接合部の破壊を考慮しないで砂防堰堤袖部構造の破壊判定を試みた。すなわち、ここでは前述の第一、第二の破壊形態のみを想定し、巨礫の衝突速度や礫径をパラメータとして解析を行った。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(100cm/sec, 300cm/sec, 600cm/sec)の計9ケースである。また、衝突箇所には、3.1の結果から支柱は十分な耐力を有していることが明らかなことから、主要部材の中で最も脆弱であった横梁とスクリーン部材の2箇所とした。

まず、巨礫が横梁に衝突した場合では、全ケースにおいて破壊は発生しないことが確認された。図-16は、CASE9の場合の衝突箇所の部材が示したひずみ-時間関係を表したものであるが、この図から横梁はCASE9の衝突条件下で破壊は生じないが、既に明確な塑性応答を示しており、限界に近いことがわかる。

一方、巨礫がスクリーン材に衝突した場合では、CASE8およびCASE9において破壊の発生が確認された。この場合の破壊は前面スクリーン材の衝突箇所と同位置の背面スクリーン材の曲げ破壊であった。図-17に、4ケース(CASE6, CASE7, CASE8, CASE9)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。

4.3 接合部の破壊を想定した照査結果

4.2において主要部材およびスクリーン材の破壊を想定した照査を行った。ここでは第三の破壊形態として、鋼材と鋼材をつなぐ接合部の破壊の可能性を追加して砂防堰堤袖部の耐衝撃性能を検討した。ただし本解析の仮定は、接合部に発生する応答値(応力)が、許容応力を基準とした全強値の75%を上回ると破壊したとみなすもので、衝撃挙動を対象とした照査としてはかなり安全側の評価になる可能性もあることから、定量的な検証は今後の課題である。

巨礫の衝突条件は、4.2と同様に表-3に示す9ケースとし、図-8に示す4箇所に礫を衝突させた場合の破壊判定結果を以下に示す。

①接合部に衝突した場合

接合部を完全剛結と仮定した3.1の計算では、十分な耐力を有するような結果が得られていたが、接合部の破壊を考慮することで、CASE6, CASE8およびCASE9の3ケースにおいて破壊の発生が確認された。破壊箇所は、図-18に示すように構造前面の支柱と横梁の接合部であった。図-19に、CASE5(非破壊)とCASE6(破壊)の2ケースにおける破壊箇所の応力-時間関係を示す。破壊が発生したCASE6の場合、礫が衝突した直後に接合部の応力が強度基準に達しているのに対し、CASE5の場合の接合部応力は、最大値も強度基準(全強の75%)の50%以下にしか達しておらず、破壊に至らない結果が得られた。

②横梁に衝突した場合

今回の解析モデルの場合、接合部の破壊を考慮しない場合には全ケースで破壊は発生しなかったが、接合部の破壊を考慮した場合には、CASE1を除く8ケースにおいて破壊の発生が確認された。これは、横梁背面に中詰材が存在せず、中詰材からの反力が殆ど期待できない場合、接合部に直接的に衝撃的な曲げ応力が作用するためであると考えら

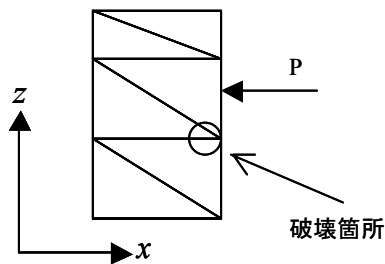


図-21 支柱衝突における破壊箇所

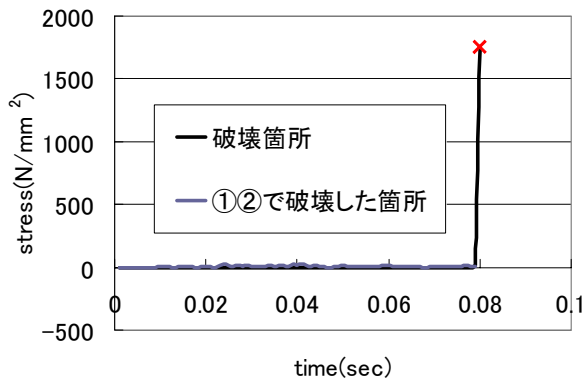


図-22 応力-時間関係 (③支柱)

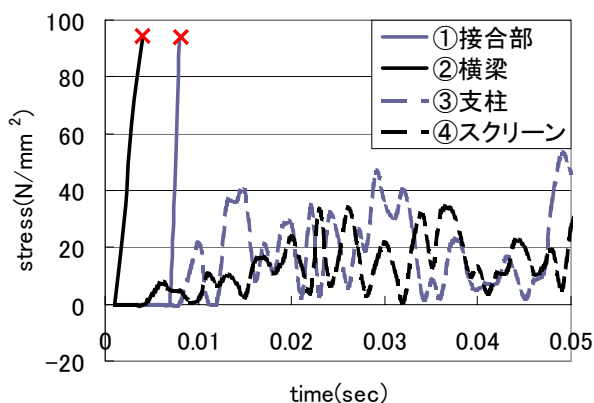


図-23 応力-時間関係 (CASE6)

れる。図-20に、CASE1およびCASE2の2ケースにおける接合部応力-時間関係を示すが、CASE2の場合には衝突後約7msecで接合部が破壊する結果が得られている。この結果は、中詰材が横梁背面にも充填された状態であれば、起こりにくいと考えられることから、中詰材要素の配置に依存しない解析モデルの設定を検討する必要がある。

③支柱に衝突した場合

支柱に礫が衝突した場合には、支柱自体が相当程度の衝撃力を分担するものと考えられ、接合部の破壊を考慮した場合に破壊の発生が確認されたのは、CASE8およびCASE9の2ケースのみであった。

なお、支柱衝突の場合には、接合部や横梁に衝突した場合と破壊箇所が異なり、図-21に示す位置で接合部が破壊する結果が得られた。図-22に、破壊した接合部位置の応力-時間関係を示す。このグラフから、支柱に礫が衝突して約80msec経過した後に応力が急増して破壊することが

わかる。

④スクリーン材に衝突した場合

スクリーン材に礫が衝突した場合には、接合部の破壊を考慮した場合と考慮しない場合で破壊判定結果に相違が見られず、CASE8およびCASE9の2ケースで破壊の発生が確認された。これはスクリーン材が中詰材の流出を防止することを主目的に設けられた脆弱な部材であるため、衝撃力を直接受けた場合には、スクリーン材自身にのみ大きな塑性変形が発生し、他の主要部材にスクリーン材の限界値以上の荷重は伝達されなくなるためであると考えられる。

最後に、4ケースで接合部破壊の可能性を比較するため、CASE6の衝突条件で図-18に示す接合部の応力-時間関係を図-23に示した。このグラフから、支柱衝突の場合には支柱自体の強度が大きいことにより、またスクリーン材衝突の場合には逆にスクリーン材が脆弱で破壊が衝突箇所が発生することが原因で、接合部に生じる応力は小さくなることが確認される。したがって、礫が横梁に衝突した場合には接合部の破壊が発生しやすくなることが推察される。

今回は、接合部強度を全強の75%という現実の接合状態を考慮せず、破壊現象を解析的に評価可能かどうかだけを検討した。今後、定量的に信頼に足る接合部強度を求め、破壊判定を行う必要があると考えられる。

5. 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ようになる。

- 1)本手法を用いて、鋼製砂防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)鋼製砂防部材に破壊限界を設けることで、巨礫の貫通を解析上で再現できることを確認した。
- 4)鋼製砂防堰堤の破壊形態として3種類を提案し、破壊判定解析を行った。その結果、部材間接合部の破壊を想定しない場合と想定した場合で判定結果には大きな相違が見られた。この原因には、接合部強度に関する定量的な検討が不十分であることが挙げられる。
- 5)今後、部材間接合部の強度に関する詳細な検討を行うことで、3つの破壊形態を考慮した鋼製砂防堰堤の安全性照査を実施できることが確認できた。

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：鋼製杵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杵砂防ダムの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
- 8)日本機会学会：計算力学ハンドブック (I 有限要素法 構造編)，丸善，1998.

(2006 年 9 月 11 日受付)