構造工学論文集Vol.55A (2009年3月)　　土木学会

巨礫の衝突を受ける砂防ソイルセメントえん堤の衝撃挙動に関する基礎的考察

A fundamental study on the impact behavior of Sabo soil-cement dam subjected to impact of huge rock

別府万寿博*，中村徹**，牛窪光昭***，石川信隆****
Masuhiro Beppu, Toru Nakamura, Mitsuaki Ushikubo and Nobutaka Ishikawa

*博（工），防衛大学校准教授，システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
**共生機構（株）（〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-23-1）
***共生機構（株），技術サービス室（〒160-0022　東京都新宿区新宿 1-23-1）
****工博，砂防鋼構造物研究会　研究顧問（〒102-0093　東京都千代田区平河町 2-7-5）

Recently the debris flow disaster has been increased by global warming and localized torrential rain. This study presents the impact behavior of Sabo soil-cement dam which is proposed as a new type Sabo dam from both viewpoints of cheep construction cost and the effective utilization of field sediment. First, in order to compare with the characteristics of Sabo soil-cement dam, the impact behaviors of the concrete Sabo dam sleeve and the steel pipe Sabo dam member are investigated by impact response analysis using the computer code LS-DYNA. Then, the impact behavior of Sabo soil-cement dam sleeve is examined by changing the parameter of soil-cement and steel plate thickness. Finally, an impact design concept of Sabo soil-cement dam is proposed from the impact behavior results.

Key Words: impact by huge rock, Sabo soil-cement dam, impact response analysis
キーワード : 巨礫衝突，砂防ソイルセメント，衝撃応答解析

1. はじめに

近年，異常気象による影響を受けて，集中豪雨や台風による土石流災害が増加している．地形や土石流が含有している土砂・礫の構成によっては，サージと呼ばれる衝撃的な段波を生じることがわかっている [1]．特に，巨礫を多く含む石礫型土石流が発生すると，逆グレーディング現象 [2]によって巨礫が土石流先頭部へ集まり，巨礫が土石流捕捉工（以下，砂防えん堤と呼ぶ）へ直接衝突して損傷・破壊が生じる．砂防えん堤には，透過型と不透過型があり，現行の設計指針 [3]では，転倒，滑動，支持力の安定計算に加えて，礫や流木の衝撃力に土石流流体力を加えた静的な設計荷重を用いて安全性を検討することを義務付けている．現在，構造物の設計は性能照査型設計 [4]へ移行しつつあり，今後は，規定された性能を照査できる実験や理論・解析技術を確立する必要がある．しかし，現存する多くの重力式コンクリートえん堤（以下，コンクリートえん堤と呼ぶ）袖部や透過型砂防えん堤の鋼管部材においても，礫衝突を対象とした構造実験や理論・解析的な検討例は比較的少ない．

これまでに礫衝突を受ける砂防えん堤の衝撃挙動を数値解析により検討した例としては次のような研究がある．星川ら [5]は，剛体バネモデルを用いて礫衝突を受ける格子型砂防えん堤の 3 次元衝撃応答解析を行っている．下田ら [6]は，コンクリートえん堤袖部の引張破壊を，個別要素法により再現している．伊藤ら [7]は，礫中詰め型砂防えん堤の衝撃応答を個別要素法によってシミュレーションしている．園田ら [8]は，鋼製枠砂防えん堤の衝撃応答を個別要素法で解析している．このように，数値シミュレーション技術の発達にともない各種解析コードの精度が検証されつつあり，今後は有力な性能照査ツールになる可能性がある．

ところで，最近では砂防ソイルセメントえん堤 [9]（以下，INSEM えん堤と呼ぶ）と呼ばれる新形式の砂防えん堤が提案され，増加している傾向にある．INSEM えん堤は，現地発生土砂とセメントを現地で混合し，型枠を兼ねた鋼製壁面材の内部へ打設して施工される．この工法は，搬出土砂が減少するとともに，現地土砂の活用によるコスト縮減，また環境負荷が小さい利点がある．INSEM えん堤袖部についても，土石流を受けた場合の安全性や限界状態を明らかにする必要があるが，このような検討はほとんどなされていない．また，INSEM 材は現地土砂を利用するため性質のばらつきが大きく，さらに壁面材との組合せを考慮すると，INSEM えん堤袖部の構

(a) 重力式コンクリートえん堤

(b) 透過型えん堤

写真-1　砂防えん堤の袖部および部材

造特性はかなり広い範囲にばらつくことが予想される．そこで，著者ら[10]は，INSEM えん堤の静的な挙動を数値シミュレーションによって検討し，INSEM 材のヤング率，強度と鋼製壁面材板厚の組合せによってはコンクリートえん堤と同等以上の性能を示すことを明らかにした．

本研究は，砂防ソイルセメント（INSEM）えん堤の性能照査法の基礎的資料を得るため，巨礫の衝突を受ける INSEM えん堤の衝撃挙動を数値シミュレーションによって検討したものである．まず，礫の衝突を受けるコンクリートえん堤袖部のモデルおよび透過型えん堤の主要部材である鋼管柱モデルに対する解析を行い，これらの構造部材の衝撃応答特性を明らかにするとともに，現行の設計法との対応を考察した．次に，INSEM えん堤袖部の衝撃応答の特徴および安全性照査に用いる適切な指標（エネルギー，応力，ひずみ）を調べるため，現地土砂のばらつきを圧縮強度に反映させた INSEM えん堤に対する衝撃応答解析を行った．最後に，INSEM えん堤の衝撃応答とコンクリートえん堤，鋼管部材の衝撃応答を比較し，礫衝突を受ける INSEM えん堤の設計法の考え方を提示した．

2. コンクリートえん堤袖部および鋼管部材に対する衝突シミュレーション

本章では，**写真-1** に示す不透過型のコンクリートえん堤の袖部および透過型えん堤の柱部材をモデル化した構造部材に対して礫を衝突させ，局部および全体の衝撃応答を調べる．解析は，衝撃解析コード LS-DYNA を用いて 3 次元モデルで行った．

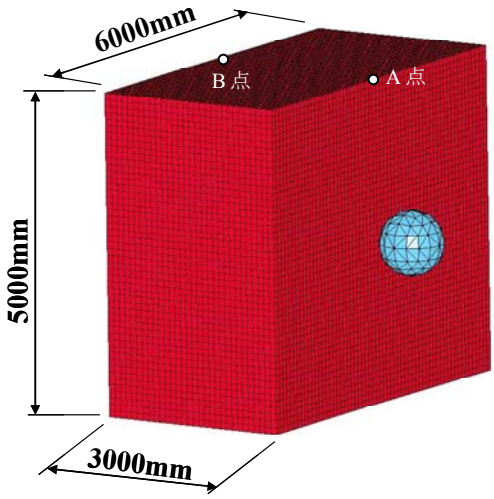


図-1　コンクリートえん堤袖部の解析モデル

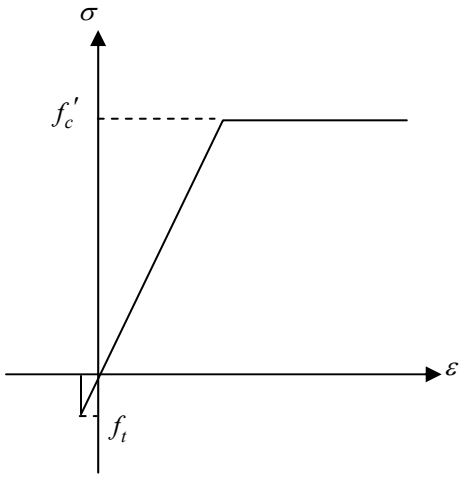


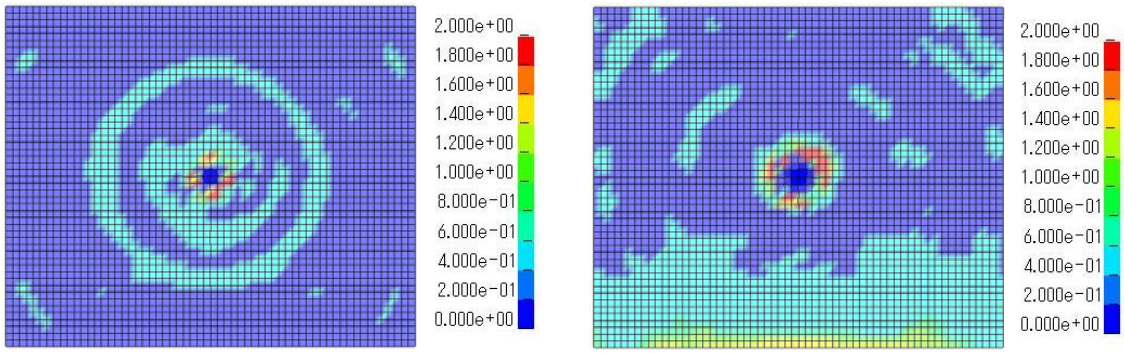
図-2　コンクリートの構成モデル

2.1　コンクリートえん堤袖部の衝撃応答

2.1.1　解析モデル

コンクリートえん堤袖部の解析モデルを**図-1** に示す．コンクリートえん堤袖部については，幅 3000mm，高さ 5000mm のえん堤袖部を 6000mm 取り出してモデル化した．要素はソリッド要素を用いて，応力波の伝播を捕捉できるように 1 要素 100mm の立方体でモデル化した．境界条件としては，えん堤袖部モデルの下端を固定した．なお，本モデルの一次固有周期は 22ms である．コンクリートの構成モデルについては，**図-2** に示すように圧縮側は完全弾塑性材料とし，引張側については引張強度に達した後に強度と剛性を失うモデルを用いた．解析に用いた力学特性値を**表-1** に示す．

巨礫は，密度 2.6g/cm^3，ヤング率 50 k N/mm^2，ポアソン比 0.23 の弾性体とした．寸法は直径 1000mm とし，速度 10m/s で**図-1** に示すように袖部中央に衝突するものと



(a) t=2.5ms　　(b) t=7.5ms

図-3　最大主応力分布（単位：N/mm^2）

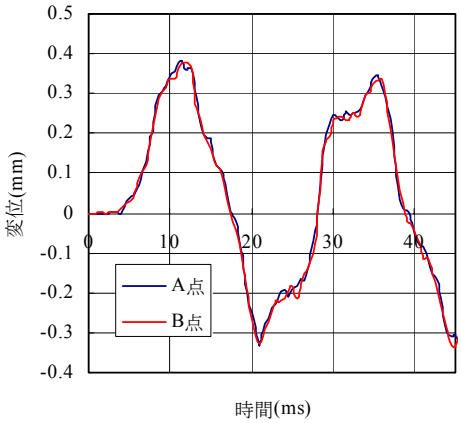


図-4　頂部の変位～時間関係

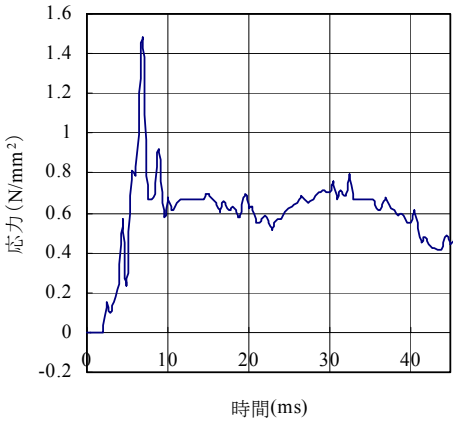


図-5　袖部基部の最大主応力～時間関係

表-1　コンクリートの解析定数

密度	2.5 g/cm^3
ヤング率	20 kN/mm^2
ポアソン比	0.15
一軸圧縮強度	20 N/mm^2
一軸引張強度	2 N/mm^2

した．巨礫とコンクリートえん堤袖部の接触については，ペナルティ法による接触解析を行っている．

2.1.2　損傷の特徴

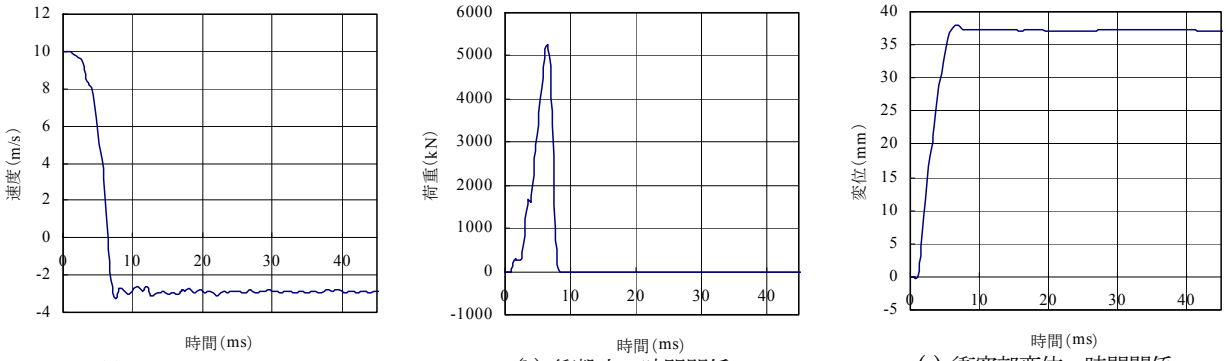
衝突時および衝突後にえん堤袖部の上流側表面に生じた最大主応力分布を**図-3** に示す．これより，礫がえん堤袖部に衝突すると，衝突によって生じた応力波が衝突部から同心円状に外側へ伝播していることがわかる．その後，局部的な応答からえん堤袖部全体の振動モードへ移行し，**図-3**(b)に示すように袖部基部において引張応力が発生している．なお，衝突部において主応力がゼロになっているのは，衝突によってコンクリートが引張破壊したためである．**図-4** に，上流側および下流側頂部のA点およびB点（**図-1** 参照）の変位～時間関係を示す．これより，上流側と下流側ではほぼ同じ変位応答を示しており，0.3～0.4mm の振幅をもつ固有周期 22ms の振動が生じていることがわかる．基部に生じた最大主応力～時間関係を**図-5** に示す．本衝突条件では，応力の最大値は約 1.5N/mm^2 であり，引張強度 2.0N/mm^2 を超えてえん堤基部が引張破壊することはなかった．

2.1.3　礫の速度，衝撃力および衝突部変位

図-6(a)に，礫の速度～時間関係を示す．これより，礫はえん堤に衝突した後急激に速度が低下し，衝突後は約 3.0m/s で跳ね返っていることがわかる．**図-6**(b)は，接触点の接触力を合計して求めた衝撃力～時間関係である．これより，衝撃継続時間は約 8ms 程度で，最大衝撃力は約 5200kNである．**図-6**(c)は，衝突部の変位～時間関係を示している．これより，最大衝撃力が生じる時間において約 38mm の最大変位を示し，その後塑性変形によって約 37mm の残留変位が生じている．**図-4** に示した頂部の変位～時間関係をみると，礫が衝突を終了して跳ね返る時間 t=7ms では，えん堤の頂部はまだ下流側へ振動していることがわかる．

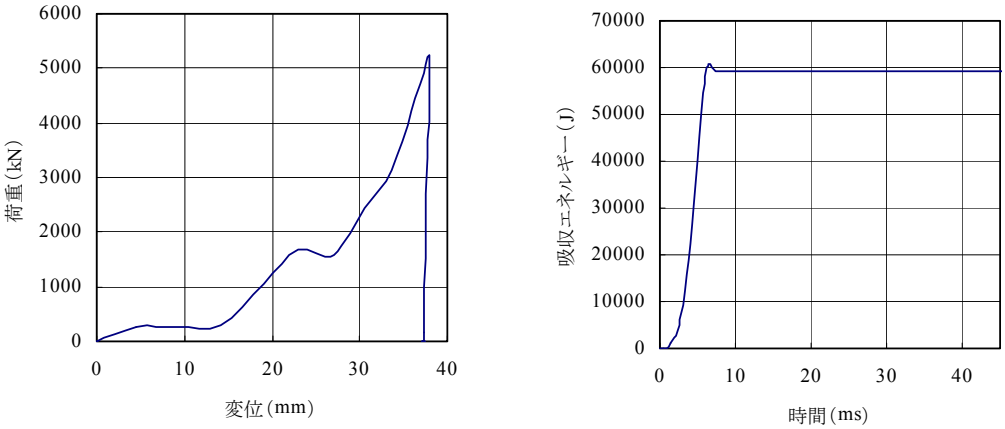
2.1.4　局部吸収エネルギー

図-7 (a)に，衝撃力～衝突部変位関係を示す．これより，変位が大きくなるにしたがって荷重（抵抗力）が次第に大きくなり，変位約 37mm において最大で約 5200kNの値を示すことがわかる．最大荷重を示した後は，ほぼ垂直に除荷して荷重を失っている．この履歴で囲まれた面積は，巨礫がえん堤と衝突することによって失ったエネルギー量の概算値を表しており，これを便宜上局部吸収



(a) 速度～時間関係　(b) 衝撃力～時間関係　(c) 衝突部変位～時間関係

図-6　コンクリートえん堤袖部の局部応答



(a) 衝撃力～変位関係　(b) 局部吸収エネルギー～時間関係

図-7　コンクリートえん堤袖部の局部吸収エネルギー

エネルギーと定義する．なお，衝突部で吸収されたエネルギーを正確に求めるためには，接触した節点ごとに接触力×変位を計算し，接触面積上で合計する必要がある．したがって，ここで定義した局部吸収エネルギーは，衝突によってえん堤が吸収したエネルギーに関する便宜上の指標として理解されるものである．**図-7**(b)は，局部吸収エネルギーの時刻歴応答を示している．これより，衝突後急激に吸収エネルギーが増加し，残留値は約 59.3kJ となった．これは，礫の初期の運動エネルギー63.5kJ の約 93%程度になる．

コンクリートえん堤袖部の場合は，**図-3** のように衝突点に局部的な力が伝達された後，構造全体の振動が誘起される．その結果，**図-5** に示すように袖部基部に引張応力が生じている．すなわち，**図-4** に示す変位振幅自体は小さいが，袖部の基部に生じる応力は引張強度の約 75%に達する大きな値となっている．これは，現行設計法の「袖部の破壊に対する構造計算」[3)]で規定されているように，袖部基部における引張破壊を照査する必要性を示している．よって，コンクリートえん堤袖部への巨礫衝突に対しては，やはり本解析のような動的解析による衝突点の破壊状況や袖部基部の引張破壊を確認することが必要である．

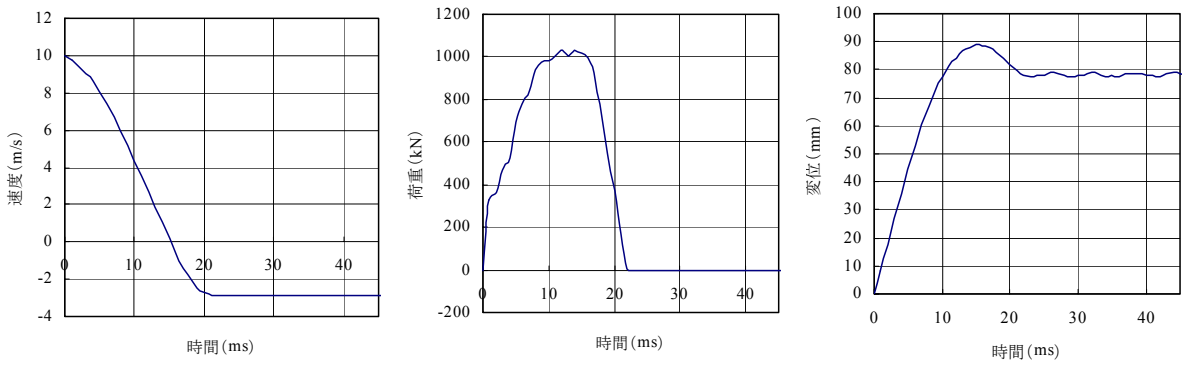
2.2　鋼管部材の衝撃応答

2.2.1　解析モデル

鋼管部材については，一般的な格子型えん堤の部材寸法を参考に，**図-8** に示すように直径 600mm，板厚 20mm，部材長 4000mm のモデルを作成した．鋼管部材はシェル要素を用いてモデル化した．境界条件は，両端固定とした．本解析モデルの一次固有周期は，約 6ms である．鋼材は，完全弾塑性モデルとし，Von-Mises の降伏基準を用いた．解析に用いた力学特性値を**表-2** に示す．礫の寸法形状や衝突速度は，2.1 のコンクリートえん堤袖部の場合と同じである．ただし，衝突位置は**図-8** に示すように鋼管部材の中央である．

2.2.2　損傷の特徴

鋼管部材の場合は，**図-9** に示すように，衝突後に明瞭な残留変形が生じた．また，**図-10** は衝突部の変位（へこみ変形）～時間関係とその真裏（**図-8** の A 点）のはり変位（はり全体変位）を示している．衝突部の最大へこみ変形は約 88mm を示しているが，はり全体変位は衝突後からほとんど変位をせず，はり部材全体の残留変形は



(a) 速度～時間関係　(b) 衝撃力～時間関係　(c) 衝突部変位～時間関係

図-11　鋼管部材の局部応答

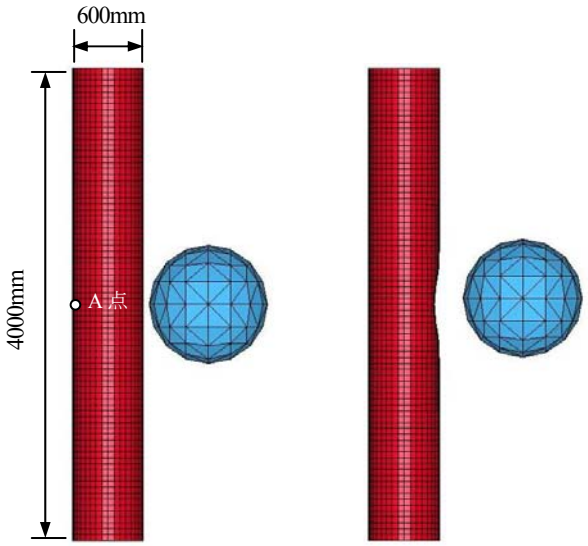


図-8　鋼管部材の解析モデル　**図-9**　残留変形の状況

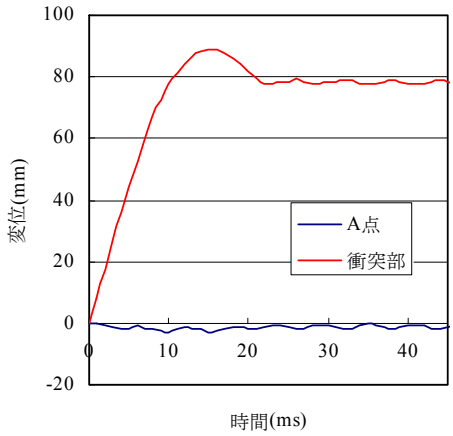


図-10　鋼管部材の変位応答

表-2　鋼材の解析定数

密度	7.8g/cm^3
ヤング率	210 kN/mm^2
ポアソン比	0.3
降伏応力	300 N/mm^2

認められなかった．つまり，礫の衝突エネルギーは，局部の衝突のみで吸収されていることがわかる．

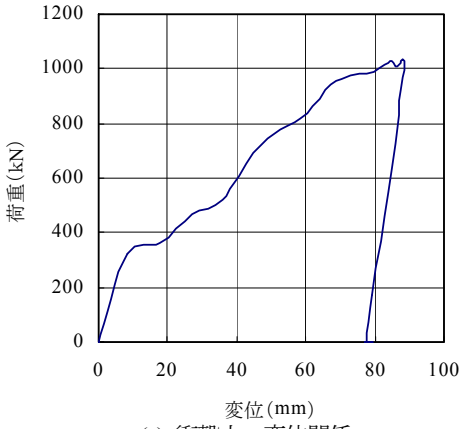
2.2.3　礫の速度，衝撃力および衝突部変位

図-11(a)に，礫の速度～時間関係を示す．これより，礫はえん堤に衝突した後徐々に速度が低下し，衝突後は約2.9m/s で跳ね返っていることがわかる．**図-11**(b)は，衝撃力～時間関係である．これより，最大荷重は約 1033kN とコンクリートえん堤の約 20%に低減したが，衝撃継続時間は約 22ms 程度でコンクリートえん堤の場合の 2 倍以上となった．**図-11**(c)は，衝突部の変位～時間関係を示している．これより，最大荷重が生じる時間 t=16ms において，約 88mm の最大変位が生じた後，塑性変形によって約 78mm の残留変位が生じている．

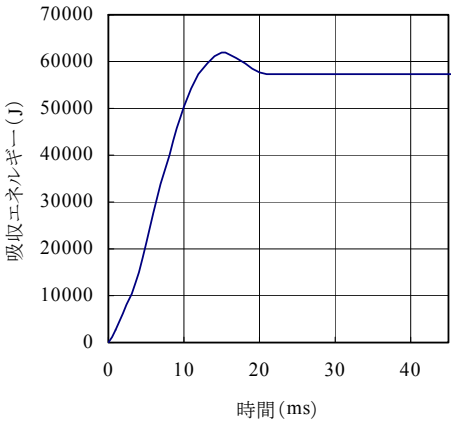
2.2.4　局部吸収エネルギー

図-12(a)に，衝撃力～衝突部変位関係を示す．これより，変位の増加とともに荷重もほぼ比例して大きくなっており，安定したエネルギー吸収性能があることがわかる．これは，礫の衝突によって鋼管部材上流側が安定したへこみ変形を示すためである．**図-12**(b)は，局部吸収エネルギーの時刻歴応答を示している．これより，衝突後急激に吸収エネルギーが増加し，残留値は約 57.3k J となった．これは，礫の初期の運動エネルギー63.5kJ の約 90%程度になる．

鋼管部材の衝撃挙動と現行の設計指針との対応を考察する．鋼管部材の場合では，局部で生じるへこみ変形による局部エネルギー E_d と，部材の塑性変形による吸収エネルギー E_M が礫の運動エネルギーを上回ることを照査することになっており，今回の鋼管部材への衝突挙動から判断して現行のエネルギー設計法で差し支えないと考えられる．ただし，設計の条件に応じて動的解析による安全性照査が必要であると考えている．



(a) 衝撃力～変位関係



(b) 局部吸収エネルギー～時間関係

図-12　鋼管部材の局部吸収エネルギー

写真-2　INSEM えん堤

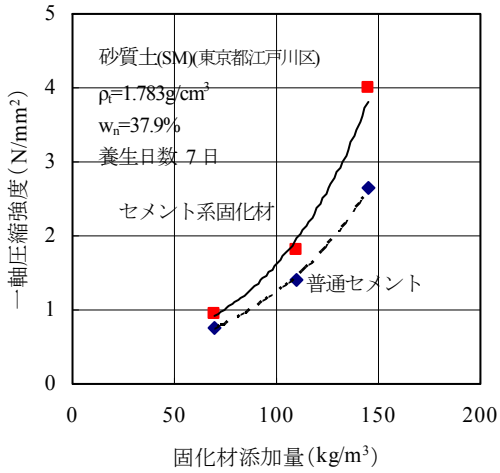


図-13　砂質土の強度～固化材添加量関係 [11)]

3. INSEM えん堤袖部に対する衝突シミュレーション

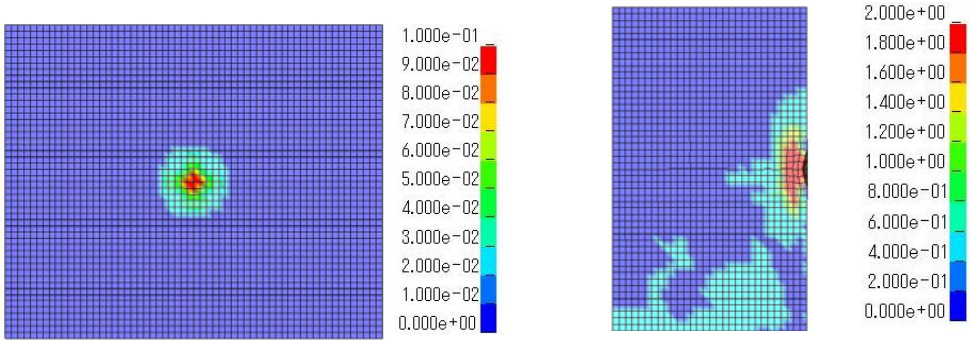
INSEM えん堤は，**写真-2** に示すように型枠を兼ねた鋼製壁面材の内部に，現地で発生した土砂とセメントを混合して締め固めるものである．したがって，内部の INSEM 材は, 土砂とコンクリートの中間的性質を有する．また外部の鋼製壁面材は鋼材の延性が期待できる．一方, 現地土砂に固化材を加えて固めるため，現地の状態によって材料特性のばらつきが生じる．

本章では, INSEM 材のばらつきを圧縮強度に反映させて, INSEM えん堤袖部の衝撃挙動を数値シミュレーションする．その目的は，INSEM えん堤袖部への衝突挙動を考察することにより, 1) INSEM えん堤袖部の損傷および限界状態を調べる，2) 安全性照査の適切な指標（エネルギー，応力，ひずみ）を調べることである．

3.1　解析モデル

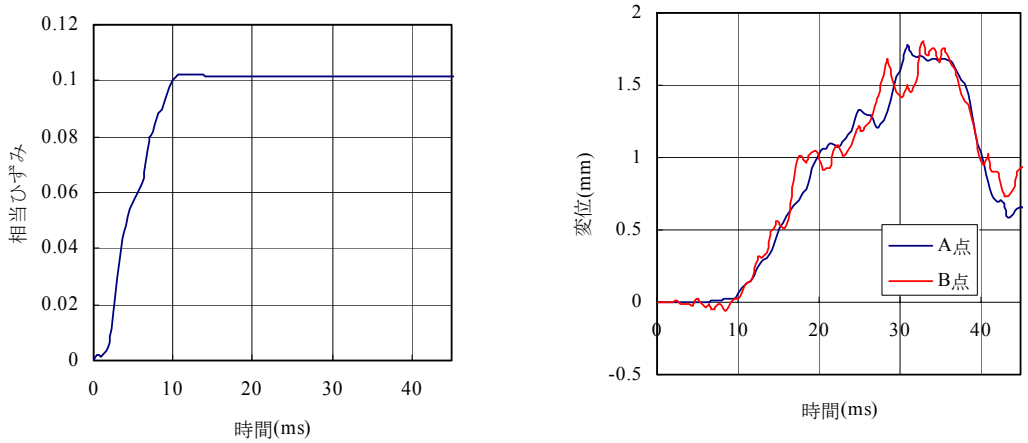
本研究は基礎的な段階なので, INSEM えん堤袖部を単純な形状としてモデル化し, INSEM えん堤袖部の衝撃挙動に与える INSEM 材と鋼材の影響を考察することにした．INSEM えん堤袖部の形状および要素寸法は，コンクリートえん堤袖部と同じ形状・寸法とし，下端を固定した．INSEM 材の構成モデルはコンクリートと同じもの（**図-2**）を用いた．密度は 2.5g/cm^3，ポアソン比は 0.20 である．また，下流側の鋼製壁面材は INSEM 材の拘束に寄与するが，巨礫の衝突に対して直接機能しないため, 上流側（礫の衝突面）にのみ平板として設置し，シェル要素でモデル化した．板厚は一般的に用いられている板厚から腐食代を除いた 2.3mm および 7.0mm とした．INSEM 材と壁面材は節点を共有させており, 接触や剥離などのモデル化は行っていない．したがって，界面に隙間が生じることなく一体となって挙動する．

INSEM 材の圧縮強度は, 現地発生土砂の種類や固化材の添加量によって大きく変化する．砂質土の場合の一軸圧縮強度と固化材添加量の関係 [11)]を**図-13** に示す．一般に用いられる INSEM 材の圧縮強度は 0.5～6.0N/mm^2 の値であることがわかっている [11)]ので，この範囲を包含するように圧縮強度を 0.33，1.67，3.33，6.67N/mm^2 の 4 種類とし，引張強度はそれぞれ圧縮強度の 1/10 とした．次に，ヤング率については，**図-14** に示すようにかなりば



(a) 壁面材の相当塑性ひずみ分布　　(b) INSEM 材断面の相当応力分布（単位：N/mm^2）

図-15　INSEM えん堤袖部の損傷（圧縮強度 3.33N/mm^2，板厚 2.3mm）



(a) 壁面材の相当ひずみ（局部応答）～時間関係　　(b) 頂部の変位（全体応答）～時間関係

図-16　局部ひずみと全体変位の比較

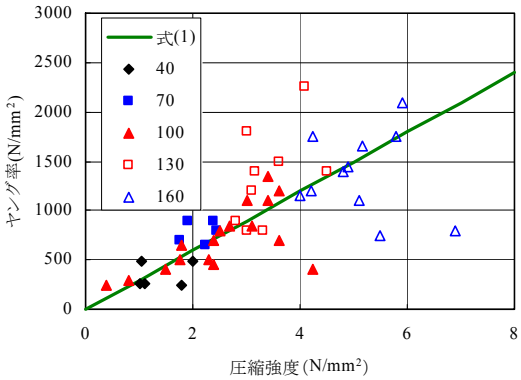


図-14　ヤング率と圧縮強度の関係[9]
（凡例の数字は単位セメント量（kg/m^3））

らつきがあるが，ヤング率 E と圧縮強度 σ_y の平均的関係は次式で表せる[9]ので，この関係を用いて算定した．

$$E = 300\sigma_y \qquad (1)$$

鋼材は Von-Mises の降伏基準を用いて，降伏応力は 300N/mm^2 とした．礫の衝突条件は，2.1 のコンクリートえん堤袖部の場合と同じである．

3.2　損傷の特徴

一例として，圧縮強度 3.33N/mm^2，壁面材厚 2.3mm の結果を**図-15** に示す．**図-15**(a)は，鋼製壁面材の相当塑性ひずみ分布を示しているが，鋼材は衝突部のみに塑性ひずみが集中し，最大約 10%の残留ひずみが生じていた．**図-15**(b)は，衝突部の断面に生じた INSEM 材の相当応力分布を示している．これより，衝突部表面から内部 1m 程度の大きな局部的な応答と，衝突部から下流側にかけて力の流れが確認できる．

図-16 は，衝突部の鋼製壁面材の相当ひずみ～時間関係と，えん堤袖部頂部の変位～時間関係を示している．まず**図-16**(a)より，最大相当ひずみは約 10%を超えているが，鋼材の限界ひずみ（約 30～40%）にはまだ達していないことがわかる．また，**図-16**(b)より，点 A，B（**図-1** 参照）のいずれも，礫の衝突が終了して壁面材に残留ひずみが生じる t=15ms において変位は 0.5mm 程度しか生じていない．つまり，INSEM えん堤袖部の構造全体の応答は，局部的な損傷の後に生じることがわかる．また，点 A および B ともにほぼ同じ変位を示し，最大変位は t=37ms において約 1.75mm であった．

3.3　跳ね返り速度と頂部の最大変位

図-17 に，INSEM 材の圧縮強度の変化に伴う跳ね返り

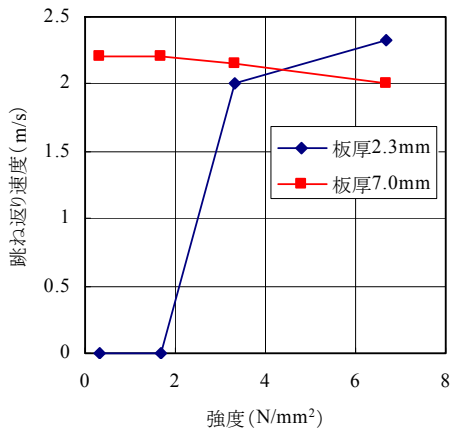


図-17　跳ね返り速度

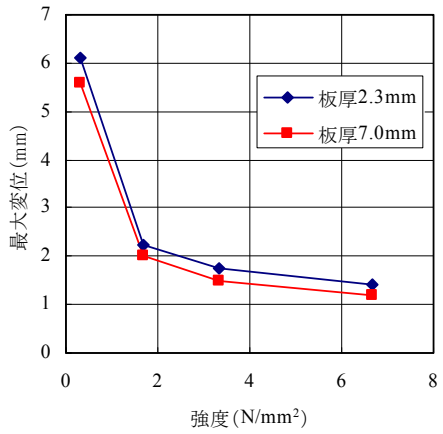
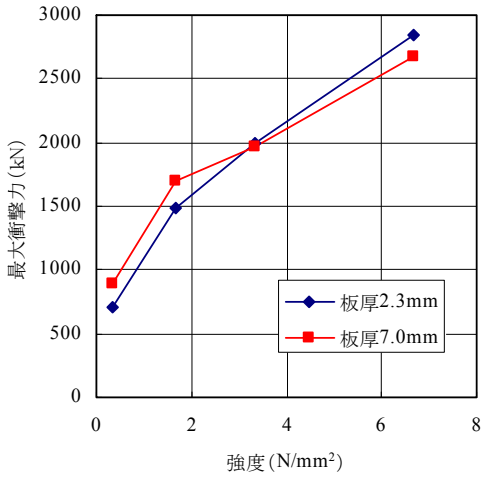
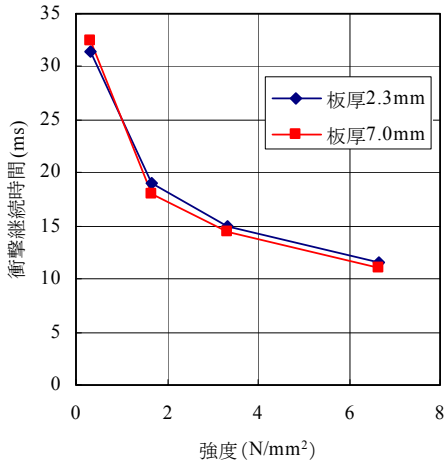


図-18　頂部の最大変位



(a) 最大衝撃力



(b) 衝撃継続時間

図-20　INSEM えん堤袖部の衝撃力特性

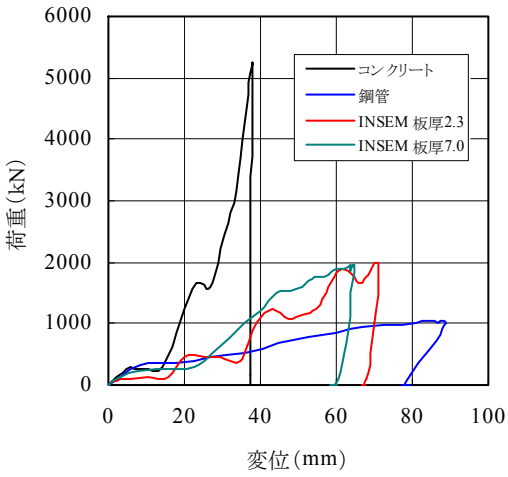


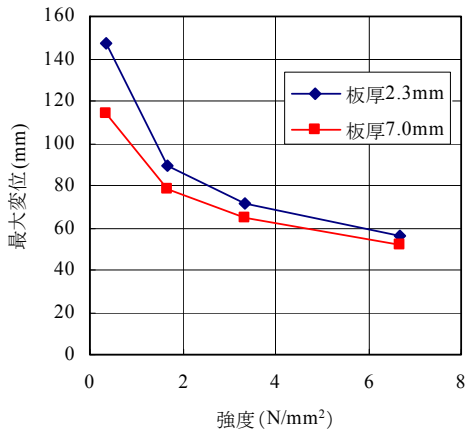
図-19　衝撃力～へこみ変形関係の比較

速度の推移を示す．これより，板厚 2.3mm では，圧縮強度 0.33，1.67N/mm^2 の場合において礫が袖部にほぼ貫入し，跳ね返らなかった．圧縮強度が 3.33，6.67 N/mm^2 になると，それぞれ 2.0，2.35m/s で跳ね返った．一方，板厚 7.0mm の場合は，INSEM 材の圧縮強度によらず 2.0～2.2m/s の速度で跳ね返った．

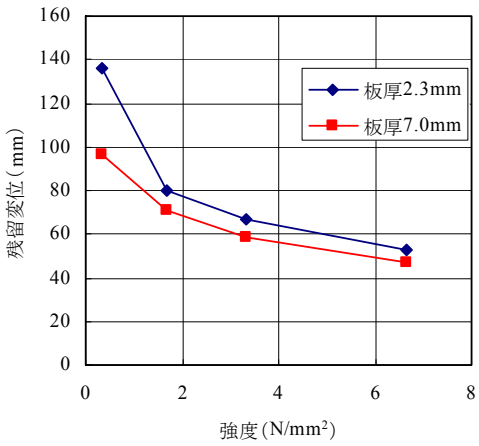
図-18 に，袖部頂部の最大変位を示す．板厚によらず，強度が大きくなるにしたがって，最大変位は小さくなることがわかる．圧縮強度が 0.33 N/mm^2 の場合は，最大変位は 6mm 程度の大きい値を示した．

3.4　最大衝撃力と衝撃継続時間

図-19 は，圧縮強度 3.33N/mm^2 の場合の衝撃力～変位関係を，鋼管部材およびコンクリートえん堤袖部と比較したものである．これより，コンクリートえん堤袖部は荷重が大きく，鋼管部材は変位が大きい特徴があるが，INSEM えん堤袖部はその中間に位置し鋼管部材に近い性質を示すことがわかる．**図-20**(a)に，最大衝撃力を示す．これより，INSEM 材の圧縮強度が大きくなるにしたがって最大衝撃力も大きくなることがわかる．最大衝撃力の大きさは 750～2800kN であり，圧縮強度 0.33 N/mm^2 の場合を除けば鋼管部材（1033kN）とコンクリートえん堤（5200kN）の中間程度である．また，板厚が最大衝撃力に与える影響はあまり大きくない．この理由は，巨礫の衝撃エネルギーが大きい（63.5kJ）ため，最大衝撃



(a) 最大変位



(b) 残留変位

図-21　INSEM えん堤袖部の衝突部の局部変位応答

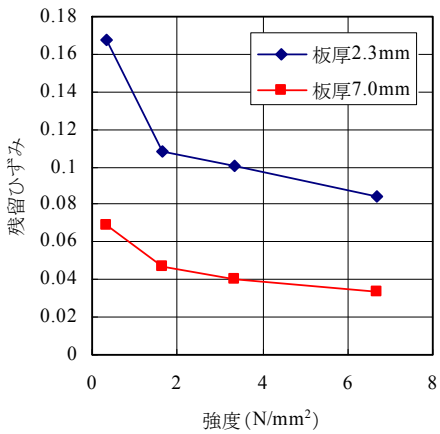


図-22　壁面材の残留ひずみ

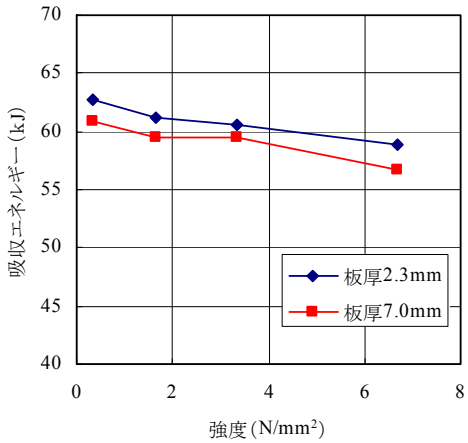


図-23　INSEM えん堤袖部の局部吸収エネルギー

力が INSEM 材の圧縮強度に大きく依存し，板厚の剛性の影響はあまり現れなかったものと考えられる．**図-20**(b)に，衝撃継続時間を示す．衝撃継続時間は，圧縮強度の増加とともに低下する傾向を示している．衝撃継続時間も，鋼管部材（22ms）とコンクリートえん堤（8ms）の中間程度であり，板厚の影響は小さい．

3.5　衝突部の最大変位，残留変位および壁面材の残留ひずみ

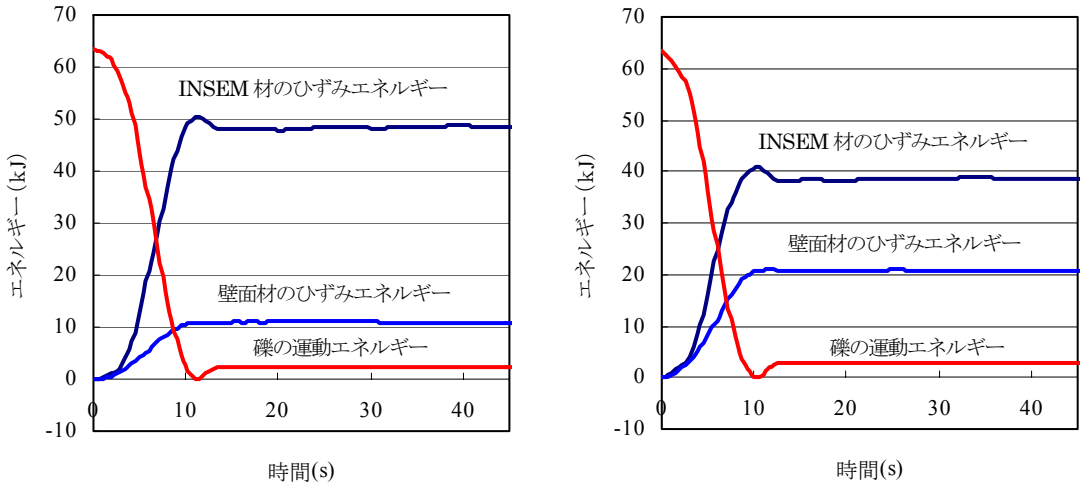
図-21 に，衝突部の最大変位および残留変位を示す．これより，板厚 2.3mm の場合は，最大変位は 58～148mm，残留変位は 52～138mm となり，板厚 7.0mm の場合の最大変位は 52～118mm，残留変位は 48～99mm となった．特に，圧縮強度によって大きく変化することがわかる．最大変位，残留変位ともに，板厚 2.3mm より 7.0mm の方がやや小さな値を示している．圧縮強度 1.67 N/mm^2 の場合における衝突部の変位応答は，鋼管部材とほぼ等しい値となった．

図-22 に，衝突部の壁面材の残留ひずみを示す．これより，板厚 2.3mm の場合では，圧縮強度 0.33N/mm^2 において約 17%もの大きな塑性ひずみを生じている．圧縮強度 6.67 N/mm^2 の場合でも，約 8%のひずみが残留した．一方，板厚 7.0mm の場合は，圧縮強度 0.33N/mm^2 でも約 7%，6.67N/mm^2 では 3.5%程度の小さい残留ひずみとなった．すなわち，板厚が大きいほど壁面材の塑性ひずみは小さく，板厚 7.0mm の場合の残留ひずみは，板厚 2.3mm の場合の半分以下になった．

INSEM えん堤の壁面材が亀裂・破断すると，内部の INSEM 材が流出して機能を喪失する．上記の解析結果より，衝突条件（礫の質量，衝突速度）によっては壁面材の限界ひずみを超える可能性があると考えられるので注意する必要がある．

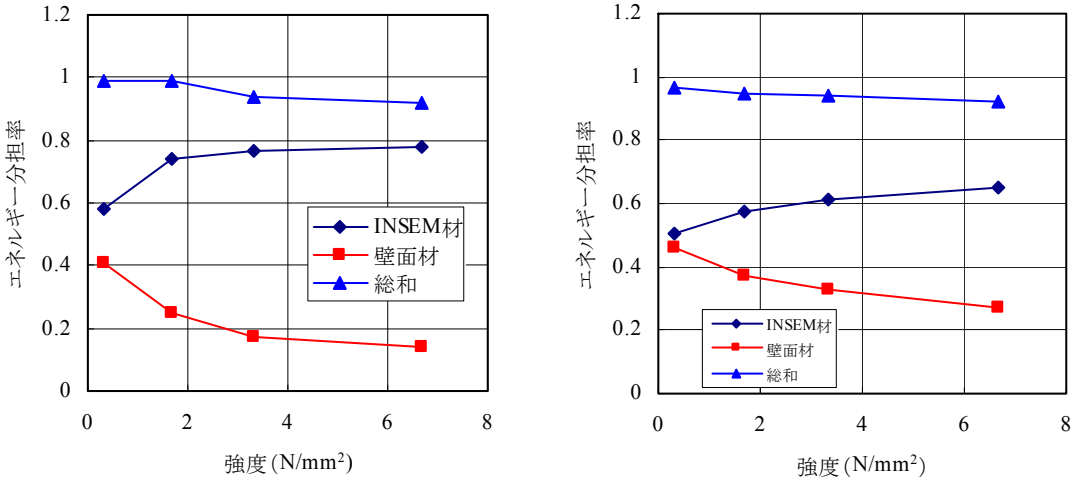
3.6　局部吸収エネルギー

図-23 に，局部吸収エネルギーを示す．これより局部吸収エネルギーの大きさは，板厚 2.3mm で約 59～63 kJ，板厚 7.0mm で約 57～61 kJ となった．すなわち，本研究で想定した INSEM えん堤，コンクリートえん堤袖部および鋼管部材は，ほぼ同等の局部吸収エネルギー（約 57～63 kJ）を示すことがわかる．また，板厚によらず，局



(a) 板厚 2.3mm　　(b) 板厚 7.0mm

図-24　エネルギーの時刻歴応答（圧縮強度 3.33N/mm^2）



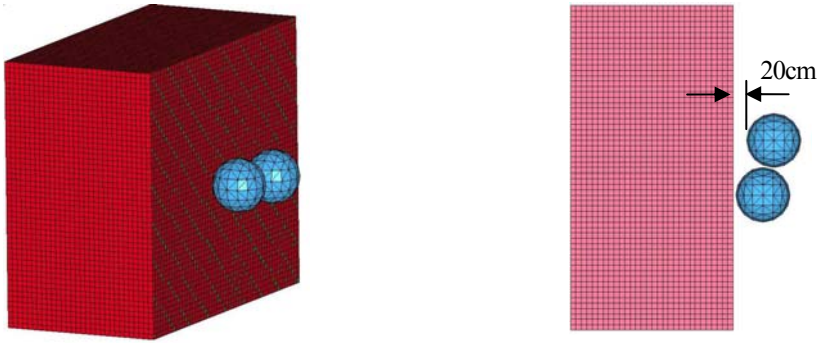
(a) 板厚 2.3mm　　(b) 板厚 7.0mm

図-25　圧縮強度がエネルギー分担率に与える影響

部吸収エネルギーは圧縮強度の増加にともなって減少することがわかる．これは，圧縮強度が大きい場合は，局部変形や残留ひずみが小さくなるため，エネルギー吸収が小さくなったものと考えられる．

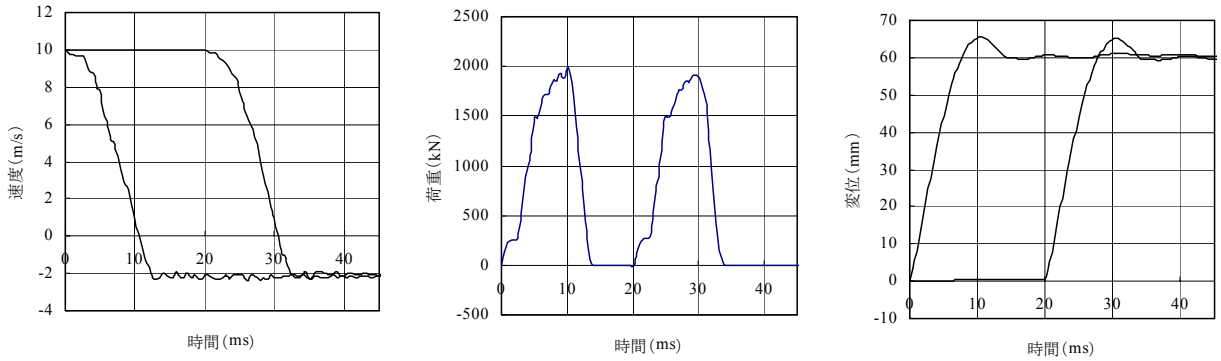
図-24 は，圧縮強度 3.33N/mm^2 の場合における礫の運動エネルギー, INSEM 材の内部ひずみエネルギーおよび鋼製壁面材のひずみエネルギーの時刻歴を示したものである．これより，板厚 2.3mm の場合は，INSEM 材と鋼製壁面材の内部ひずみエネルギーが衝突とともに増加して, 最終的には INSEM 材が 48kJ, 鋼製壁面材が 11kJ のエネルギーを吸収した．これは，初期の礫の運動エネルギー63.5kJ に対して INSEM 材と壁面材が 76.5%および 17.2%程度のエネルギーを分担して吸収していることを示している．一方，板厚 7.0mm の場合には，INSEM 材が 61.0%，鋼製壁面材が 32.9%の分担率となり，同じ圧縮強度でも板厚が大きい方が壁面材のエネルギー分担率が大きくなる．なお，**図-16**(b)に示した頂部の変位～時間関係と比較すると，頂部に最大変位が生じる t=37ms 以降では，エネルギーの変化は小さく，礫の運動エネルギーのほとんどが INSEM えん堤袖部の局部的な応答で吸収されていることを示している．

全てのケースのエネルギー分担率を**図-25** に示す．まず，板厚によらず圧縮強度が小さい方が，INSEM 材と壁面材による吸収エネルギーが大きく，ほぼ 100%に近いエネルギーを吸収していることがわかる．これは，圧縮強度が小さい場合は，へこみ変形が卓越して礫の運動エネルギーを吸収するためである．また，圧縮強度が大きくなるにしたがって, INSEM 材のエネルギー分担率は大きくなり，逆に鋼材のエネルギー分担率は小さくなっている．例えば，板厚 7.0mm の場合，圧縮強度 0.33 N/mm^2 では INSEM 材と壁面材の分担率はほぼ等しく約 50%程度であり，同程度のエネルギー吸収性能を有する．一方，



(a) 鳥瞰図　　(b) 上方から見た図

図-26　礫の連続衝突の解析モデル



(a) 速度～時間関係　　(b) 衝撃力～時間関係　　(c) 変位～時間関係

図-27　礫が連続して衝突した場合の局部応答

圧縮強度が 6.67 N/mm^2 になると，INSEM 材のエネルギー分担率は約 65%，壁面材の分担率は 28%と INSEM 材の半分になる．これは，INSEM 材の圧縮強度が大きくなるにしたがって，INSEM 材の吸収エネルギー性能が向上するためと考えられる．板厚の影響をみると，圧縮強度 0.33 N/mm^2 では板厚 7.0mm の壁面材のエネルギー分担率は 0.46 であり，板厚 2.3mm の分担率 0.41 と比べて約 1.1 倍程度のエネルギー分担率である．しかし，圧縮強度 6.67 N/mm^2 の場合では，板厚 7.0mm の分担率は 0.27，板厚 2.3mm の分担率は 0.14 と約 2 倍に増加している．すなわち，板厚 7.0mm の方が鋼材のエネルギー分担率が大きいと言える．

3.7　礫の連続衝突による衝撃応答

これまでの検討は，礫 1 個が衝突した場合のえん堤袖部の衝撃応答を検討してきたが，実際は複数個の礫が同時に衝突する可能性がある．そこで，参考のために，2 個の礫が連続して衝突した場合における INSEM えん堤袖部の衝撃応答を確認した．なお，圧縮強度 3.33N/mm^2，板厚 7.0mm のモデルを用いた．**図-26** に，解析モデルを示す．2 個の礫を 20cm 離して並列に配置し，袖部中央部へ衝突させた．これは最も危険な状態を想定したもので，時間差や距離差が大きい場合には，巨礫 1 個のみが衝突する場合とあまり変わらないと考えたからである．しかし，いくつかのケースも想定されるので，今後検討していく予定である．

図-27 に，礫の跳ね返り速度，衝撃力および衝突部の変位の時刻歴応答を示す．なお，いずれも 2 個の礫の速度，衝撃力および衝突した位置の変位を重ねて示している．これより，礫の跳ね返り速度は，いずれも 1 個のみの衝突と同じ速度（2.2m/s）となった．衝突力および変位応答も，衝突時間の差異はあるが，2 回の衝突ともほぼ同じ最大値となり，1 回の衝突の場合とほぼ等しい値（最大衝撃力 2000kN，最大変位 65mm）を示している．すなわち，INSEM えん堤に 2 個の礫が衝突しても，局部的な応答にはほとんど影響を与えないことを示している．**図-28** は，袖部の頂部の変位～時間関係を示している．一回の衝突における最大変位は約 1.5mm であったが，2 回の衝突では約 1.8mm と多少大きくなった．想定する条件に対して詳細に検討する必要があるが，ここで検討したようなかなり短い間に 2 個の礫が衝突する場合には，全体応答へ与える影響は小さいといえる．

3.8　INSEM えん堤袖部の安全性照査の考え方

これまでに得られた知見を整理して，INSEM えん堤袖部の安全性照査の考え方を検討する．礫の衝突を受ける

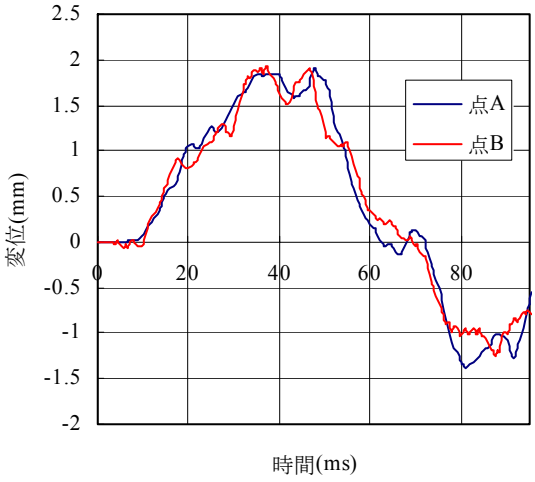


図-28　礫が連続して衝突した場合の袖部頂部の変位～時間関係

INSEM えん堤袖部はコンクリートえん堤袖部, 鋼管部材と同様に，礫の衝突による局部応答が終了した後に，えん堤構造全体の振動が始まった．このときの局部でのエネルギー吸収は，INSEM 材の圧縮強度が 0.33～6.67N/mm^2 の範囲では，コンクリートえん堤袖部や鋼管部材とほぼ同じであった．ただし，板厚 2.3mm で圧縮強度が小さい場合には，礫がえん堤袖部にめり込み，壁面材の残留ひずみが大きくなるので，圧縮強度は 3.33 N/mm^2 以上が好ましいと言える．また，局部における吸収エネルギーの分担率をみると，板厚が大きい方が鋼材の塑性変形によってエネルギーを多く分担していることがわかった．

全体応答としては，衝突後に曲げ振動やせん断変形が生じるが，本解析条件内では全体応答による吸収エネルギーは局部吸収エネルギーに比べて無視できる程度であった．また，INSEM 材は塑性材料であり，鋼製壁面材により拘束されるので，コンクリートえん堤袖部のような脆性的に破壊することはないと考えられる．したがって，本解析条件内における設計の考え方としては，INSEM 材や壁面材の塑性化で吸収する局部エネルギーが，礫の運動エネルギーを超えるような設計基準を設定することが望ましいと考えられる．ただし，局部変形においては，壁面材に生じるひずみによって壁面材が破断しないことを確認する必要がある．なお，袖部の曲げやせん断の全体変形については，今後も検討する必要がある．

4. 結言

本研究は，砂防ソイルセメントえん堤袖部の性能照査法の基礎的資料を得るため, 巨礫の衝突を受ける INSEM 砂防えん堤の衝撃挙動を数値シミュレーションによって検討したものである．本研究の成果を以下に示す．

(1) 礫直径 1m，速度 10m/s の衝突を受けるコンクリートえん堤袖部のモデル, 鋼管部材および INSEM えん堤袖部の解析から，いずれの場合も礫衝突による局部的なエネルギー吸収が大きいことがわかった．

(2) コンクリートえん堤袖部では局部的な応答後に構造全体の振動が生じることがわかった．このとき，袖部の変位振幅はかなり小さいが，コンクリートは脆性材料なのでえん堤袖部の基部における引張破壊につながる可能性がある．一方，INSEM えん堤袖部の場合は，INSEM 材が塑性材料であり壁面材で拘束されるため，えん堤袖部が脆性的に破壊することはないと考えられる．すなわち，設計法としてはエネルギー設計が適用できると考えられる．ただし，袖部の全体応答の限界状態については，今後検討する必要がある．

(3) INSEM 材の強度が増加すると，INSEM 材のエネルギー吸収性能が向上してエネルギー分担率も大きくなることがわかった. また, 板厚の影響については, 大きい板厚の方が壁面材のエネルギー分担率が大きいことがわかった．

(4) INSEM えん堤の場合，壁面材のひずみが限界ひずみを超えて破断する場合を考慮する必要があり，壁面材の板厚はひずみや応力を指標として決定する必要がある．

今後は，解析と実験との比較を行って，数値解析の精度を検証すること，また壁面材の形状や INSEM 材の打ち継ぎ部の影響などを検討することが必要である．

参考文献

1) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，2004.
2) 橋本晴行，椿東一郎：土石流における逆グレイディング機構，土木学会論文報告集，第336号，pp.75-84，1983.
3) 国土交通省砂防部・国土技術政策総合研究所：「砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説」「土石流・流木対策設計技術指針及び同解説」，（社）全国治水砂防協会，平成19年.
4) 土木学会　構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，2007.
5) 星川辰雄，石川信隆，彦坂熙，水山高久，阿部宗平：鋼製透過型砂防構想物の弾塑性衝撃応答解析と耐衝撃設計法，土木学会論文集，549/I-37号，pp.159-173，1996.
6) 下田義文，鈴木真次，石川信隆，古川浩平：個別要素法によるコンクリート製砂防ダムの衝撃破壊シミュレーション解析，土木学会論文集，480/VI-21号，pp.97-106，1993.
7) 伊藤一雄，香月智，石川信隆，阿部宗平：水平衝撃

実験による砂中詰め材の動的変形特性と個別要素法解析，土木学会論文集，591/I-43号，pp.351-364，1998.
8）園田佳巨，加藤尚，神田幸弘，大隈久：鋼製砂防堰堤の耐衝撃性能の解析的評価法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1209-1226，2007.
9) 砂防ソイルセメント活用研究会：砂防ソイルセメント活用ガイドライン，鹿島出版会，平成 14 年.
10) 小野源一郎，中村徹，嶋丈示，別府万寿博：砂防ソイルセメントを用いた鋼製砂防えん堤における鋼材の効果について，平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.226-227，平成 17 年.
11) （社）セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第二版），技報堂出版，1994.

（2008 年 9 月 18 日受付）