

I-68

二層緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的研究

北海道開発局	正員	池田 憲二
北海道開発局	正員	今野 久志
(株)構研エンジニアリング	○正員	川瀬 良司
室蘭工業大学	正員	岸 徳光

1. はじめに

著者らは、これまで落石防護擁壁に関する合理的かつ汎用性のある衝撃応答解析手法の確立を目的として、比較的単純な構成則を用いた落石防護擁壁の三次元弾塑性衝撃応答解析を行い、実験結果と比較することにより本解析手法の適用性に関して検討を行ってきた。その結果、緩衝構造を有しない落石防護擁壁に関する衝撃挙動は本解析手法により十分評価可能であることが明らかとなっている¹⁾。一方、落石防護擁壁の耐衝撃性を向上させるために、著者等は落石防護擁壁の背面に設定する緩衝構造として三層緩衝構造を基本として表層敷砂層を除いた二層緩衝構造を考えた。すなわち、裏層材料として発泡スチロール (Expanded Polystyrol, 以後 EPS), 表層材として RC 版から構成されるものである。

本研究では、二層緩衝構造を設置した場合の落石防護擁壁に関する数値解析的検討の前段階として、本二層緩衝構造の重錘落下衝撃実験に関する弾塑性衝撃応答解析を行い、実験結果と比較することにより本解析手法の妥当性について検討を行った。また、妥当性検討の後、実験結果を補足する形で二層緩衝構造の緩衝性能および分散効果についての数値解析的な検討も行っている。検討項目は RC 版に作用する重錘衝撃力およびコンクリート基礎部に設置したロードセルによる伝達衝撃応力である。また、本数値解析では単純な構成則を用いることを前提としているため、コンクリートや鉄筋の歪速度効果は無視することとした。なお、本数値解析は LS-DYNA (ver.940) を用いて行っている。

2. 実験概要

2.1 実験方法

図-1 には、厚さ 250 mm の EPS 材を用いた場合における実験状況図を示している。実験は円柱状の鋼製重錘 (直径: 230 mm, 質量 400 kg) を用い、高さ 2 m の落石防護擁壁に対する規定と同様に端部から 200 mm の位置に所定の高さより重錘を自由落下させることにより行っている。重錘底部は片当たりを防止するため、2 mm のテーパを有する球底としている。なお、緩衝構造はコンクリート基礎上に横置きとしている。緩衝構造のリバウンドによる跳ね上がりを防止するために擁壁基部に相当する部分を $\phi = 32$ mm の鋼棒 (3 本) を用いて固定している。計測項目は、重錘に内蔵した衝撃荷重測定用ロードセルによる重錘衝撃力、コンクリート基礎内に予め組み込まれたロードセルによる伝達衝撃応力である。

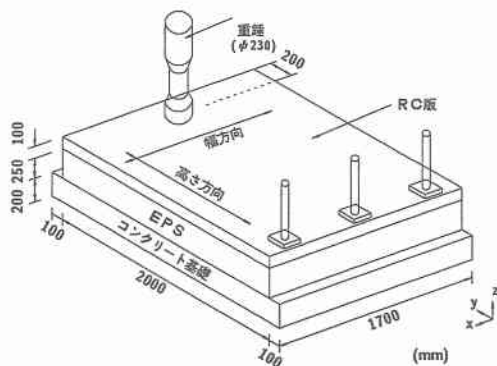
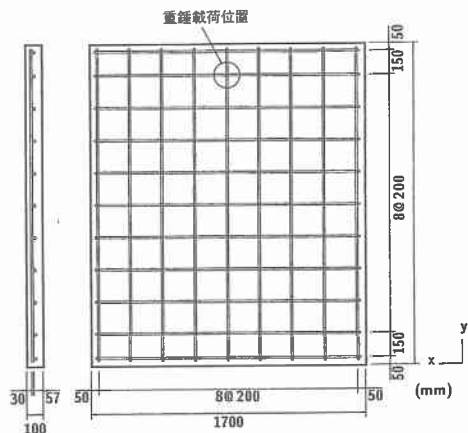
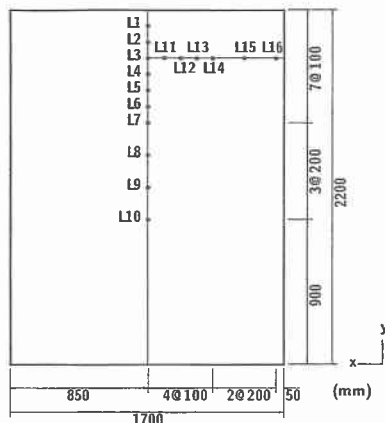


図-1 実験状況図



図－２ 試験体の形状寸法および RC 版の配筋状況



図－３ ロードセルの設置状況

表－１ 試験体の一覧

試験体の 名称	EPS の厚さ E (mm)	载荷速度 V (m/s)	重錘質量 M (kg)
E 125-V 3.2	125	3.2	400
E 125-V 4.7		4.7	
E 125-V 6.3		6.3	
E 250-V 4.7	250	4.7	
E 250-V 6.3		6.3	
E 250-V 7.9		7.9	
E 250-V 9.5		9.5	

表－２ コンクリートの力学的特性

材令 (日)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c	圧縮強度 f'_c (MPa)
21～37	17	0.18	26

表－３ 鉄筋の力学的特性

材質	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	降伏応力 σ_y (MPa)
SD295A	206	0.3	294

2.2 実験ケース

本研究に用いた試験体は表－１に示す計 7 体である。表中、試験体名の第 1 項には EPS 材の厚さ E (mm) を、第 2 項には载荷速度 V (m/s) を示している。载荷方法はすべて単一载荷としている。図－２には試験体の形状寸法および RC 版の配筋状況を示している。試験体は高さ 2 m の落石防護擁壁を想定し、長さ 2 m、幅 1.7 m とした。また、緩衝材の表層 RC 版は全て厚さ 100 mm とし、常に未使用のものを用いることとした。図－３には、コンクリート基礎上に設置したロードセルの設置状況を示している。ロードセルは最小間隔を 100 mm とし、载荷中心点を通る幅方向 (x 方向) および高さ方向 (y 方向) の直線上に合計 16 個設置している。ロードセルは応力集中を避けるために受圧面が基礎面と同一面になるように設置されている。なお、表－２および表－３にはコンクリートと鉄筋の力学的特性を示している。

3. 数値解析仮定

3.1 緩衝構造のモデル化

図－４には、要素分割の一例として試験体 E 250 に関する要素分割図を示している。ここでは、緩衝構造の対称性を考慮して解析断面を 1/2 断面としてモデル化することとした。本数値解析に用いた要素タイプは 8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。コンクリート基礎部は表面から深さ 50 mm までをモデル

化した。重錘は衝突部の RC 版上に配置し、重錘要素には表 1 に示した載荷速度を初速度として入力することにより緩衝構造の一部である RC 版に衝突させている。また、EPS ブロックと RC 版、RC 版と重錘の要素間には、浮き上がりやリバウンドを評価するために面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義することとした。

3.2 物性モデル

本数値解析では RC 版および EPS ブロックに適用するモデルとして LS-DYNA にあらかじめ組み込まれている物性モデルを採用している。図 5 (a) には RC 版のコンクリート要素部に用いた応力-歪関係を示している。ここでは、引張側に対しては要素の圧力がカットオフ値に達した段階で要素が破壊したとみなされいずれの方向へも引張応力を伝達しないように仮定している。また、圧縮側に対しては材料試験に基づき 0.2 % 歪時の応力を降伏応力とし、0.15 % 歪に達した状態で降伏するものと仮定してバイリニア型にモデル化している。本研究では降伏応力として圧縮強度 f'_c を、引張側の破壊圧力（カットオフ値）として降伏応力の 1/10 を仮定している。

一方、図 5 (b) には異形鉄筋要素に用いた応力-歪関係を示している。ここで採用したモデルは、降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。本研究では、既往の研究成果に基づき²⁾、 $H' = E_s/100$ と仮定している。図 5 (c) には

EPS の要素に用いた応力-歪関係を示している。ここでは、静的載荷実験に基づき、5 % 歪時の弾性限界応力を 0.11 MPa、55 % 歪時の応力を 0.22 MPa、70 % 歪時の応力を 0.39 MPa とするトリリニア型にモデル化している。さらに、コンクリート基礎部および重錘要素に関しては、実験終了後の観察によりひび割れや著しい塑性変形が確認されなかったため弾性体と仮定している。なお、粘性減衰係数は既往の研究より最低次固有振動数に対して 2 % となるように設定している³⁾。

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1 重錘衝撃力

図 6 には、試験体 E 125-V3.2 および E 250-V6.3 に関する重錘衝撃力波形を実験結果と比較して示している。図中の実線は解析結果を、点線は実験結果を示している。また、各試験体における重錘の載荷速度 V

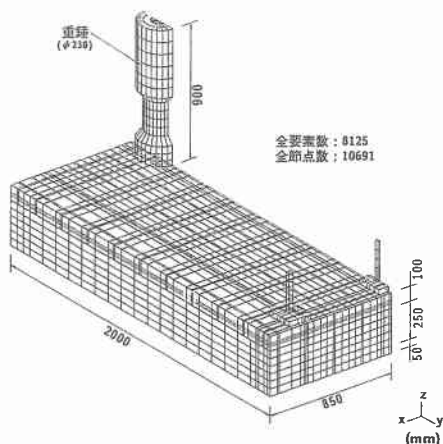
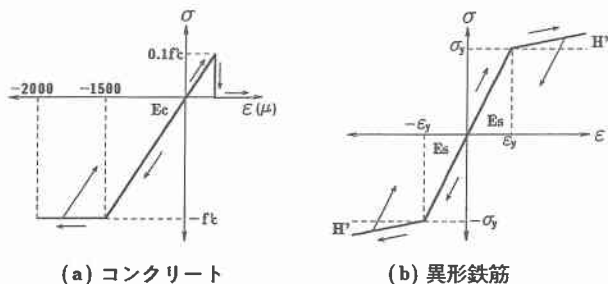
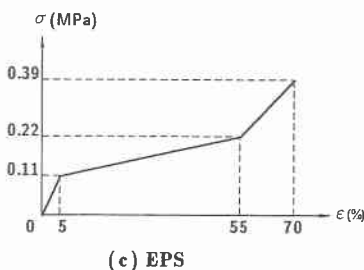


図 4 全体の要素分割図の一例（試験体 E 250）



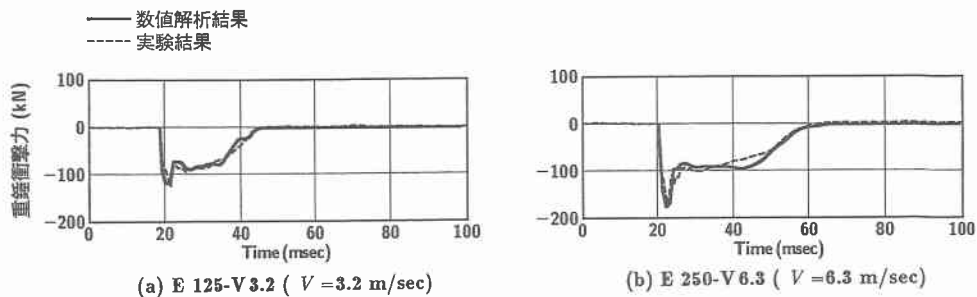
(a) コンクリート

(b) 異形鉄筋

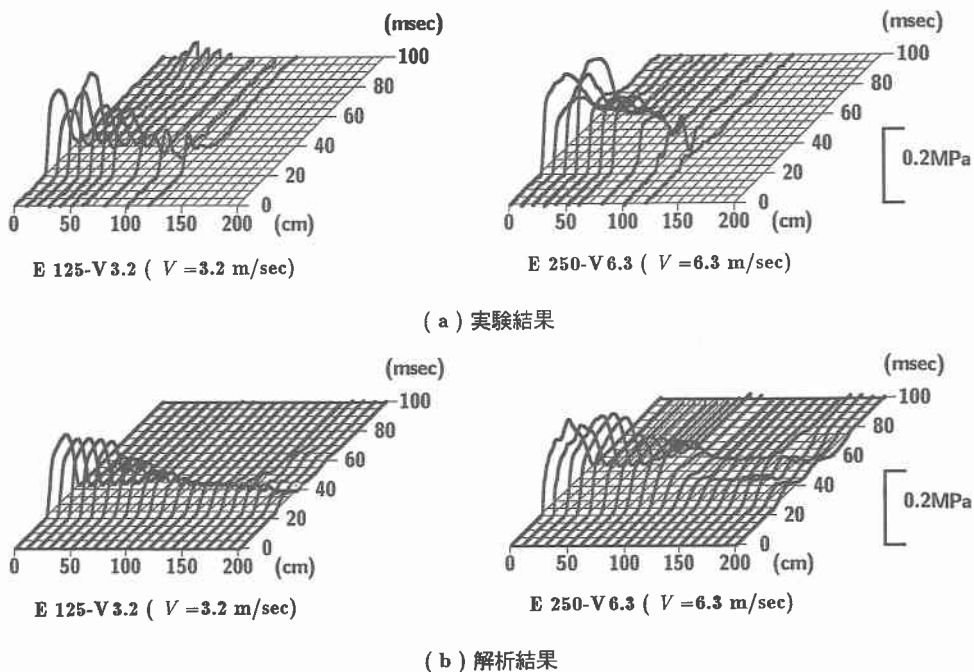


(c) EPS

図 5 数値解析に用いた応力-歪折線モデル



図－6 重錘衝撃力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較

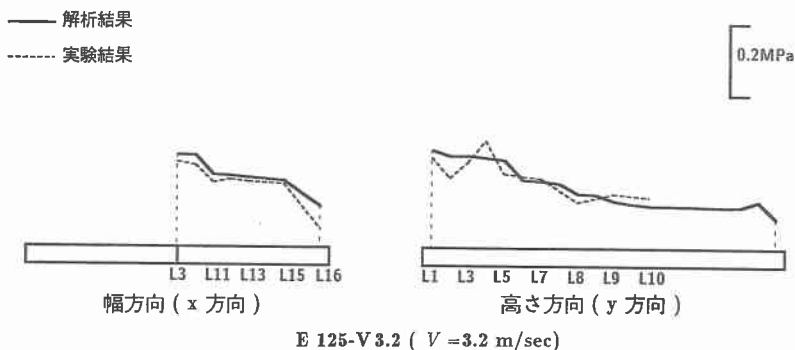


図－7 伝達衝撃応力波形（高さ方向）の比較

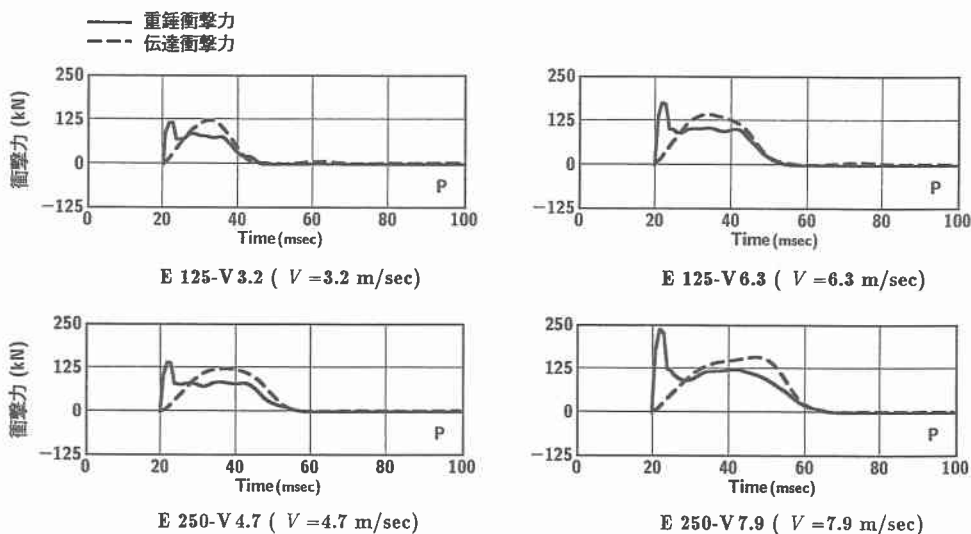
を（ ）内に示している．なお、両波形の衝突初期には高周波成分が卓越するため、実験および解析結果ともに 2.5 msec の矩形移動平均法による数値フィルター処理を行っている．図より、数値解析結果は波動の立ち上がりから減衰に至るまで実験結果を比較的精度良く再現していることがわかる．

4.2 伝達衝撃応力

図－7には、E 125-V 3.2と E 250-V 6.3 における伝達衝撃応力波形に関する実験結果および数値解析結果を比較して示している．ここでは特に y 方向（以後、これを実防護擁壁を想定して高さ方向とする）に配置したロードセル L1～10 から得られた実験波形に着目し、解析結果との比較を試みている．図の横軸には測定点 L1 を原点とした場合の高さ方向距離を示している．また、奥行き方向には時間軸を、縦軸には伝達衝撃応力を取っている．なお、全計測時間は 100 msec としている．図より、実験結果は高さ方向にほぼ均一の伝達衝撃応力分布を示しており、二層緩衝構造の分散効果を確認することができる．実験結果と解析結果を比較すると、いずれのケースにおいても実験結果と数値解析結果は類似の分布を示していることがわかる．すな



図－8 最大伝達衝撃応力に関する数値解析結果と実験結果との比較



図－9 重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布に関する数値解析結果

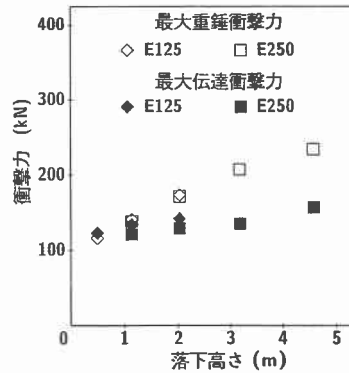
わち、試験体 E 125-V 3.2 では実験結果および解析結果ともに継続時間は約 20 msec 程度と短く、最大伝達衝撃力は 0.2 MPa 程度の値を示している。また、試験体 E 250-V 6.3 では両結果とも、継続時間が試験体 E 125-V 3.2 に比べて 2 倍程度長く、また最大伝達衝撃応力は試験体 E 125-V 3.2 とほぼ同等の約 0.2 MPa を示している。

図－8 には、試験体 E 125-V 3.2 における最大伝達衝撃応力分布に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。最大伝達衝撃応力分布は時間にかかわらず各測定点で発生する最大応力を用いて示したものである。図より、幅方向 (x 方向) および高さ方向 (y 方向) においても数値解析結果と実験結果は比較的良く対応していることがわかる。これより、本解析手法により二層緩衝構造を用いる場合の最大伝達衝撃応力を大略算定評価できることが明らかになった。

4.3 重錘衝撃力と伝達衝撃力の関係

図－9 には重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布に関する数値解析結果を示している。伝達衝撃力は緩衝材全面に発生する伝達衝撃応力分布を各時間ごとに集積することにより評価している。図より、重錘衝

撃力波形は衝突初期に最大応答値を示した後に一旦減少している．その後最大応答値の 2/3 程度の振幅を有する振動が 20～30 msec 程度継続した後、緩やかに減少している．伝達撃力波形は重錘撃力波形に比較して波動の立ち上がり勾配が緩く約 35 msec 時に最大応答値を示している．その後、ほぼ波動の立ち上がり勾配と同様な勾配で減少している．最大重錘撃力と最大伝達撃力を比較すると試験体 E125 では大差が無くその比は 0.82～1.06 となっている．一方、試験体 E250 では衝突速度の増大とともに最大重錘撃力と最大伝達撃力の差は大きくなり、その比は 0.65～0.87 となっている．



図－10 落下高さと最大撃力の関係

図－10には落下高さと最大重錘撃力および最大伝達撃力の関係を示している．図より、落下高さと最大重錘撃力を比較すると、最大重錘撃力は落下高さに比例してほぼ線形に増大していることがわかる．また、最大重錘撃力は EPS 材の厚さの違いによって大差がない．また、最大重錘撃力と最大伝達撃力を比較すると、EPS 材の厚さが 125 mm の場合には厚さが 250 mm の場合に比べて若干緩衝効果が小さい（若干大きな撃力が発生している）．これは、EPS 材の厚さが十分でないために EPS 材の変形量が大きくなり、その結果、比較的大きな撃力が基盤に伝達されるためと考えられる．一方、EPS 材の厚さが 250 mm の場合には、最大伝達撃力は落下高さが増加してもそれほど増大していない．これは、EPS 材の厚さが十分であるために重錘落下エネルギーの増大に対しても応力レベルの低い状態で効率よく衝撃エネルギーを吸収できることを意味している．

5. まとめ

本研究では、二層緩衝構造の重錘落下衝撃実験に関する弾塑性衝撃応答解析を行い、実験結果と比較することによって本解析手法の適用性について検討を行った．さらに妥当性検討の後、実験結果を補足する形で二層緩衝構造の緩衝性能、分散効果について数値解析により検討している．本論文で得られた結果を要約すると、

- 1) 本解析手法を用いることにより、単一載荷時の二層緩衝構造の一部である RC 版に作用する重錘撃力波形、コンクリート基礎上への伝達撃力波形を大略算定評価することが可能である．
- 2) 本解析手法を用いることにより、数値解析的に二層緩衝構造の緩衝性能、撃力分散効果を精度良く評価できる．従って、二層緩衝構造を設置する場合の落石防護擁壁構造に関する数値解析に関しても十分適用可能であるものと判断される．

参考文献

- 1) 岸 徳光, 佐藤 昌志, 今野 久志, 松岡健一：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1677-1688, 1999.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 小室 雅人, 松岡健一：弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1579-1588, 1997.
- 3) 松岡 健一, 三上 浩, 安藤 智啓, 中山 伸一：横方向撃力を受ける RC 橋脚模型の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会北海道支部 論文報告集 第 55 号 (A)
- 4) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1997.9.