

I - 67

EPS 材と RC 版から成る二層緩衝構造に関する弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
 北海道開発局 正 員 池 田 憲 二
 北海道開発局 正 員 今 野 久 志
 室蘭工業大学 ○学生員 中 山 伸 一

1. はじめに

著者らは、落石防護施設の一つである落石防護擁壁の衝撃挙動を精度良くシミュレーション可能とする信頼性の高い衝撃応答解析手法の確立を目的として、擁壁の高さや幅、重錘衝突位置、重錘重量を変化させた場合の落石防護擁壁に着目し、単純な構成則を用いた場合の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ついて検討を行ってきた。その結果、緩衝材を有しない無筋コンクリート擁壁の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た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置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、その適用性を検討するために室内実験を行った。本緩衝構造は上述のように裏層材料として発泡スチロール (Expanded Poly-Styrol, 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の前段階として、本緩衝構造の緩衝性能や RC 版の損傷程度に関する数値解析を行い、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。実験結果との比較検討は重錘衝撃力波形、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波形および実験終了後のひび割れ状況である。また、本数値解析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。また、コンクリートと鉄筋は付着性状を考慮せず連続体であるものと仮定している。なお、本数値解析には非線形衝撃応答解析用有限要素プログラム LS-DYNA (ver.940) を用いた。

2. 実験概要

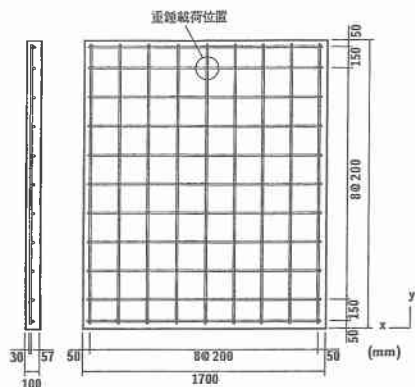
2.1 試験体の概要

解析に用いた試験体は表-1 に示す計 7 体である。表中の試験体名の第 1 項には裏層 EPS 材の厚さ E (mm) を、第 2 項には載荷速度 V (m/s) を示している。表層 RC 版はすべて厚さ 10 cm である。実験は 400 kg の鋼製重錘を用いて行っている。載荷方法は単一載荷とし、表層 RC 版は常に未使用のものを用いている。図-1 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。RC 版は単鉄筋配筋とし、直交方向の補強筋比を等しく 1.0 % としている。図-2 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

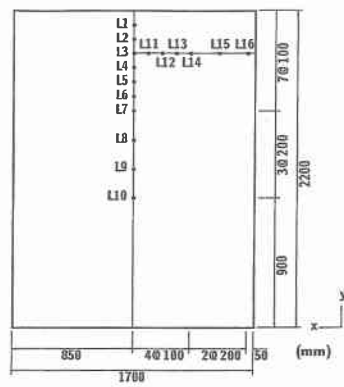
表-1 試験体の一覧

試験体の名称	EPS の厚さ E (mm)	載荷速度 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	

Elasto-plastic impact analysis of two-layered absorbing system composed of EPS block and RC slab
 by Ken-ichi MATSUOKA, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO, and Sin-ichi NAKAYAMA



図－１ 試験体の形状寸法および RC 版の配筋状況



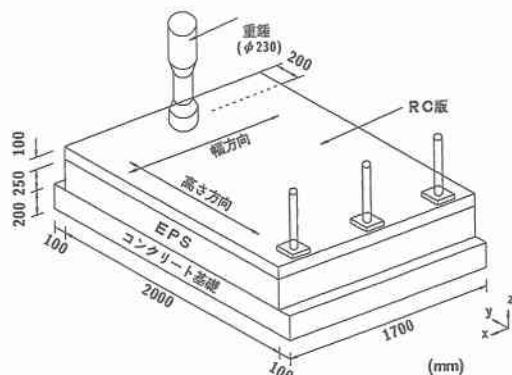
図－２ ロードセルの設置状況

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



図－３ 実験状況図

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。なお、各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。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。

2.2 実験方法

図－３には、EPS 材の厚さが 250 mm の場合における実験状況図を示している。衝撃荷重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から重錘を自由落下させることにより载荷した。試験体は横置きとし、擁壁基部に相当する部分のリバウンドによる跳ね上がりを防止するために、 $\phi = 32$ mm の鋼棒（3 本）を用いて基部を固定している。なお、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。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波形、コンクリート基礎上に設置したロードセルによる伝達衝撃応力波形である。また、実験終了後には試験体のひび割れをスケッチし、ひび割れ性状および破壊性状を検討している。

3. 解析仮定

3.1 緩衝構造のモデル化

本数値解析に用いた非線形衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA は、衝突体に衝突時の速度を与えることにより衝突体と被衝突体との一体解析が可能である。本研究では、表-1 に示す EPS 材の厚さあるいは載荷速度の異なる 7 体の緩衝構造を対象として数値解析を行った。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。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。図に示すように、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。コンクリート基礎部は表面より深さ 50 mm の部分のみをモデル化した。重錘は衝突部の RC 版上に配置し、重錘の全節点に初速度を入力することにより RC 版に衝突させている。境界条件に関しては、コンクリート基礎部は基部と側面を完全固定とし、重錘は進行方向に対して直角方向 (x, y 方向) 変位を拘束している。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している。要素積分は鉄筋要素に関しては完全積分、その他の要素に関しては計算時間の短縮を計るために 1 点積分とした。なお、解析時間は 160 msec までとした。1 ケース当たりの解析所要時間は、HP 9000 / C 180 を使用して約 4 時間である。

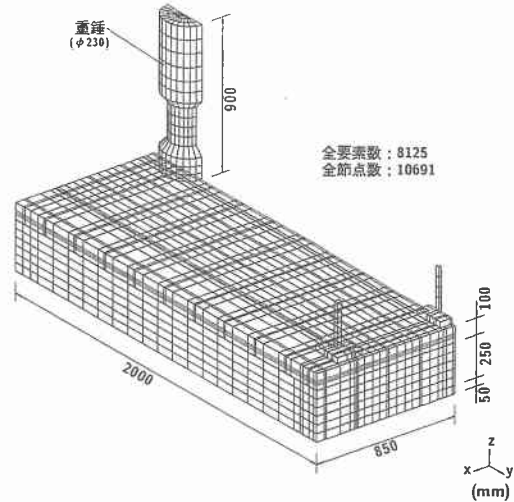


図-4 全体の要素分割図の一例 (試験体 E 250)

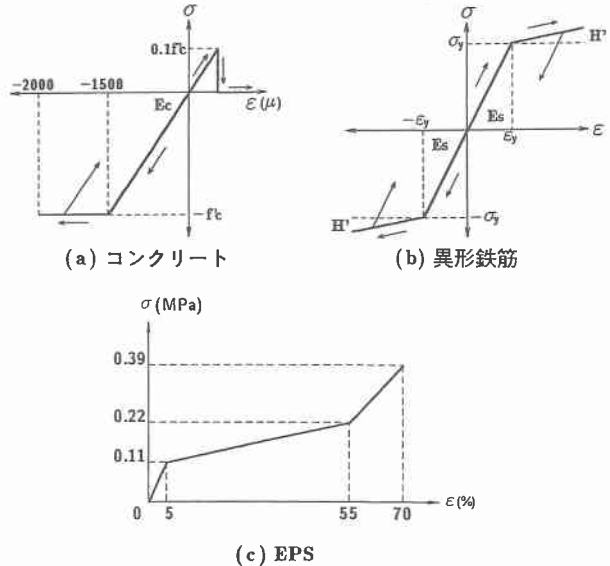
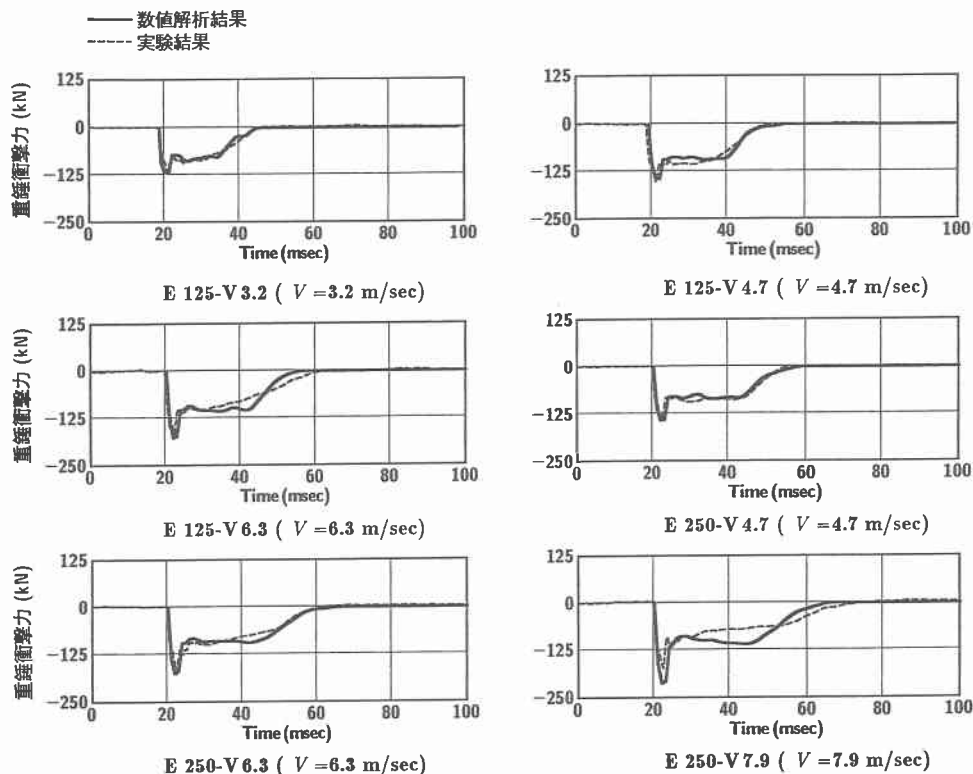


図-5 数値解析に用いた応力-歪折線モデル

3.2 物性モデル

本数値解析ではコンクリートに対する弾塑性体モデルとして 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。RC 版のコンクリート部には引張による破壊を考慮した土質体クラッシュブルモデルを用いている。このモデル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判定され、いずれの方向へも引張応力を伝達しないように定義されている。なお、降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うことにしている。図-5 (a) には本数値解析に用いたコンクリートの応力-歪関係を示している。コンクリート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た。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



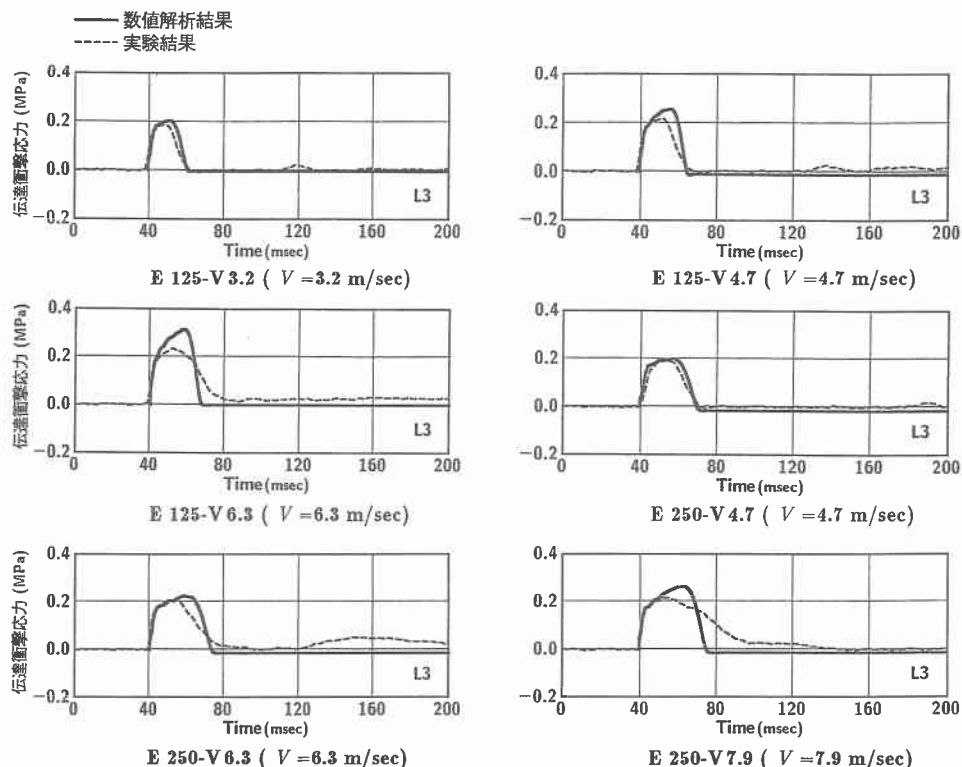
図－6 重錘衝撃力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較

トオフ値)として降伏応力の 1/10 を仮定した。一方、異形鉄筋の要素には図－5 (b) に示しているように降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用いることとした。ここでは、既往の研究成果に基づき²⁾、 $H' = E_s/100$ と仮定している。また、EPS の要素にはフォーム材等のモデル化によく用いられている等方クラッシュブルフォームを用いることとした。EPS ブロックの応力－歪関係は図－5 (c) に示すように 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 とするトリニア型にモデル化している。コンクリート基礎部および重錘に関しては、実験終了後のひび割れや著しい塑性変形が確認されなかったことよりいずれも弾性体と仮定した。なお、質量に比例する粘性減衰係数は既往の研究より最低時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 および E 250-V 4.7、-V 6.3、-V 7.9 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衝突速度 V 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、両波形は波動の立ち上がりから減衰に至るまで非常に良く対応していることがわかる。すなわち、両波形は衝突初期に急激に立ち上がり最大応答値を示した後、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波動が 20～35 msec 程度継続した後、緩やかに減少している。これより、本解析手法を用いることにより、重錘衝撃力を適切に算定評価できることが明らかとなった。



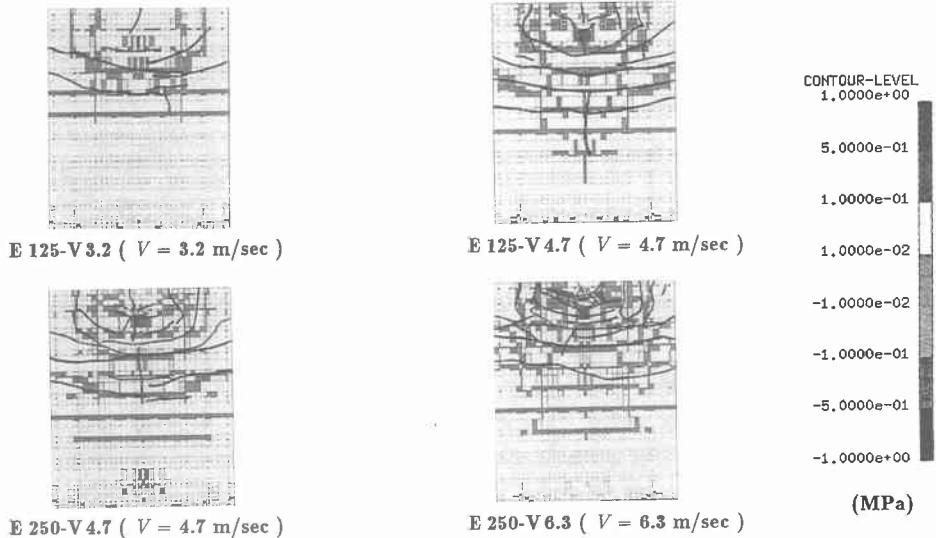
図－7 伝達衝撃応力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較

4.2 伝達衝撃応力

図－7には、重錘落下点直下（測定点 L3）における伝達衝撃応力波形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。図中の実線は解析結果を、破線は実験結果を示している。また、各試験体における重錘衝突速度 V を（ ）内に示している。ここでも、実験および数値解析結果の両波形とも 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、E 125-V 6.3、E 250-V 7.9 に関しては、数値解析結果が実験結果に比べて継続時間が短く、実験結果と若干異なる波形性状を示している。これは、実験では重錘が RC 版の中に貫入した状態を示しているのに対して、数値解析では重錘が RC 版中に貫入しない結果となっていることに起因しているものと推察される。しかしながら、その他のケースに関しては波動の立ち上がり勾配や最大応答値、継続時間に至るまで数値解析結果と実験結果は良く対応していることがわかる。

4.3 ひび割れ分布と最大主応力分布の関係

図－8には実験終了時に RC 版に発生したひび割れ分布と数値解析結果の最大応答時の第一主応力の等色応力分布を比較して示している。図には、E 125-V 3.2、-V 4.7、E 250-V 4.7、-V 6.3 の数値解析結果を示している。また、本数値解析ではコンクリート要素には破壊を考慮した物性モデルを用いているため、引張圧力がカットオフ値に達した段階で要素が破壊され零応力となる。本研究ではこのような状態において要素にひび割れが発生しているものと評価し、実験結果のひび割れ分布と比較することとした。最大主応力の等色応力分布図は解析された 1/2 断面の結果を RC 版の中心軸に関して左右に展開している。図中、最大主応力分布の応力が零の要素は緑色で示されている。図より、数値解析結果ではいずれの試験体においても衝突部を中心に同心円状に緑色分布が形成されている様子がわかる。また、これは実験終了後のひび割れ分布に比較



図－8 実験終了時のひびわれ分布と最大応答時の第一主応力分布の比較

的類似した性状を示している．これより，本数値解析によって得られる最大応答時の第一主応力分布図を用いることにより，EPS ブロック上に設置された RC 版の衝撃荷重載荷時のひび割れ箇所およびひび割れ性状を推定することが十分可能であることが明らかとなった．

5. まとめ

本研究では，二層緩衝構造に関する緩衝性能や RC 版の損傷程度を推定するために単純な構成則を用いた弾塑性衝撃応答解析を可能にすることを目的として，汎用プログラム LS-DYNA (ver.940) を用いて数値解析を行った．本研究では落下高さあるいは EPS 材の厚さを変化させた場合を対象とし，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．本研究で得られた結果を要約すると，

- 1) 本数値解析手法を用いることにより，単一載荷時の RC 版に作用する重錘衝撃力波形，コンクリート基礎上への伝達衝撃力波形を大略算定評価することが可能である．
- 2) 最大応答時の第一主応力の等色応力分布図を用いることにより，実験結果のひび割れ性状を大略評価可能であることが明らかとなった．
- 3) 以上より，本解析手法は二層緩衝構造を設置した場合の落石防護擁壁の衝撃挙動解析に十分適用可能であることが明らかとなった．

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：横方向衝撃力を受ける 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.