

二層緩衝構造を設置した実規模落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical Study on Impact Resistant Behavior of Prototype Rock-Keeping Retaining-Wall with Two-Layered Absorbing System

室蘭工業大学

(株)構研エンジニアリング

(独)北海道開発土木研究所

室蘭工業大学

室蘭工業大学

フェロー

正 員

正 員

フェロー

○学生員

岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

川瀬 良司 (Ryoji Kawase)

今野 久志 (Hisashi Konno)

松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

佐藤 由幸 (Yoshiyuki Sato)

1. はじめに

著者らは、小規模落石等に対する道路防護工の一つである落石防護擁壁(以後、擁壁)の耐衝撃性向上を目的として擁壁の落石衝突面に表層材として10~15 cm厚のRC版を、裏層材として25~50 cm厚のEPS材を設置する二層緩衝構造を提案した。また、二層緩衝構造の重錘落下衝撃実験¹⁾および二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁模型の重錘衝突実験²⁾を行うことにより、その緩衝性能および応力分散性能に関する検討を行ってきた。同時にそれらに関する弾塑性衝撃応答解析を試み、本数値解析に関する妥当性の検討を行ってきた。その結果、二層緩衝構造を設置した幅2.0 mの擁壁模型に関する衝撃挙動を本数値解析手法により大略算定可能であることが明らかになった。

本研究では、二層緩衝構造を設置した実規模落石防護擁壁に関する耐衝撃性状を精度良く評価可能な数値解析手法の確立を目的として、RC版厚およびEPS材厚の組み合わせが異なる場合や衝突速度を変化させた場合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数値解析手法の汎用性について検討を行った。本研究における検討項目は重錘衝撃力波形、緩衝構造から擁壁本体への伝達衝撃応力波形、擁壁本体の浮き上がり波形および実験終了後のRC版のひび割れ状況である。なお、本数値解析は衝撃応答解析汎用コードLS-DYNA(ver.960)³⁾を用いている。

2. 実験方法

落石防護擁壁は一般的に良質な支持層に根入れされていることから、本実験では擁壁の転倒および損傷のみに着目することとし、コンクリート基礎上にストッパーを設けて水平移動を拘束している。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって擁壁に衝突させ載荷することとした。重錘は、質量2,000 kg、直径1.0 mの円柱状鋼製重錘である。なお、重錘衝突部は半径80 cm、高さ17.5 cmのテーパを有する球面状となっている。また、重錘衝突位置は、設計上で規定されている最も厳しい高さである擁壁高さの0.9倍とした。実験における測定項目は、鋼製重錘に埋設されているひずみゲージ型加速度計(容量1,000 G、応答周波数特性DC~7 kHz)による重錘加速度、レーザ変位計による擁壁各点の変位波形および擁壁表面に面一になるように埋設された衝撃



図-1 擁壁の形状寸法

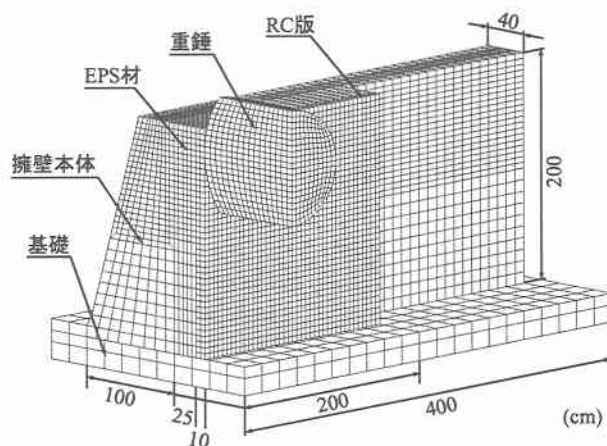


図-2 有限要素モデルの一例

表-1 試験体の一覧

試験体名	EPS材厚 E(cm)	RC版厚 R(cm)	衝突速度 V(m/s)
E25-R10-V5	25	10	5.0
E25-R10-V9	25	10	9.0
E50-R15-V5	50	15	5.0
E50-R15-V9	50	15	9.0
E25-R15-V11	25	15	11.0
E50-R10-V11	50	10	11.0

応力測定用ロードセル(受圧径32 mm、容量9.8 MPa、応答周波数DC~1 kHz)による伝達衝撃応力である。

表－２ 数値解析に用いた物性値一覧

(a) コンクリート			
材料物性	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν	圧縮強度 $f'_c(\text{MPa})$
擁壁本体	14.9	0.20	22.3
RC 版	16.7	0.20	25.0
基礎	24.0	0.20	-

(b) 鋼材			
材料物性	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν	降伏強度 $\sigma_y(\text{MPa})$
鉄筋	206	0.30	450
重錘	206	0.30	-

(c) EPS		
材料物性	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν
EPS	2.2×10^{-3}	0.00

3. 数値解析の概要

3.1 数値解析ケース

図－１には、擁壁の形状寸法を示している。擁壁の形状は、実構造で多用されている標準断面を基に、全ての試験体を擁壁高さ $H = 2.0 \text{ m}$ 、天端および基部の壁厚をそれぞれ 0.4 m 、 1.0 m とした。延長は落石対策便覧⁴⁾の有効幅を考慮し、擁壁高さの４倍である 8.0 m とした。解析に用いた試験体は表－１に示す計６体である。表中の試験体名の第一項目には裏層 EPS 材の厚さ $E(\text{cm})$ 、第二項目には表層 RC 版の厚さ $R(\text{cm})$ 、第三項目には衝突速度 $V(\text{m/s})$ を示している。

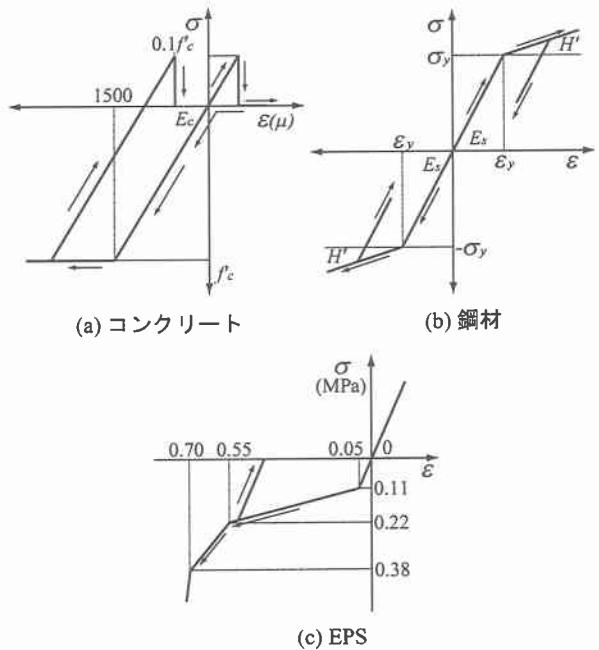
3.2 解析モデル

図－２には、有限要素モデルの一例として E25R10 試験体に関するモデルを示している。ここでは図に示すように構造物全体の対称性を考慮して 1/2 にモデル化した。解析モデルの総要素数および総節点数は、解析対象により異なるがそれぞれ約 25,000～35,000、約 30,000～40,000 となっている。

数値解析モデルは、基本的には 8 節点の 3 次元固体要素でモデル化しているが、RC 版天端部の鋼製チャンネル材および二層緩衝構造固定プレートはシェル要素でモデル化し、RC 版中の鉄筋、二層緩衝構造固定ボルトは梁要素でモデル化した。要素積分点は梁要素では 2×2 Gauss 積分、シェル要素では 2 点 Gauss 積分とした。3 次元固体要素に関しては解析精度を考慮し EPS ブロックには 8 点積分を用い、その他の 3 次元固体要素には 1 点積分を用いている。また、重錘と RC 版間、RC 版と EPS 材間、EPS 材と擁壁本体間およびそれらとコンクリート基礎間には浮き上がりやリバウンドを正しく評価するために面と面の接触・剥離を伴うすべりを考慮した接触面を定義している。数値解析は、重錘を衝突部の RC 版上に配置し、重錘の全節点に初速度を設定して RC 版に衝突させることにより行っている。なお、本数値解析で検討した解析時間は重錘衝突時より 300 ms とした。

3.3 材料物性モデル

表－２には、数値解析に用いた物性値一覧を示している。コンクリート基礎および重錘に関しては、実験終了



図－３ 各材料における応力－ひずみ曲線

後のひび割れや著しい変形が確認されないことより共に弾性体と仮定した。

図－３(a)には、コンクリートの応力－ひずみ曲線を示している。図示のように圧縮側は 1500μ ひずみ時に圧縮強度で降伏するものとし、降伏後は一定応力を仮定している。また、引張領域に関しては、圧縮強度の 1/10 に達した時点で要素が破壊し、零応力にカットオフされるものと定義している。なお、降伏の判定には、von Mises の降伏条件を採用している。

図－３(b)には、鋼材の応力－ひずみ曲線を示している。ここでは、ひずみ硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用い、 $H' = E_s/100$ と仮定した。なお、 E_s は初期弾性係数である。

図－３(c)には、EPS 材の応力－ひずみ曲線を示している。EPS 材の要素にはフォーム材等のモデル化によく用いられる等方クラッシュャブルフォームモデルを用いることとした。図に示すように 5% ひずみ時の弾性限界応力を 0.11 MPa 、55% ひずみ時の応力を 0.22 MPa 、70% ひずみ時の応力を 0.39 MPa と仮定するテトラリニア型にモデル化している。

また、本研究では衝突速度が 15 m/s 以下であることよりひずみ速度効果は小さいものと判断し、全ての材料に対して無視することとした。なお、質量に比例する減衰定数は予備解析によって 0.0% とした。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

以下では、重錘衝撃力波形、伝達衝撃応力波形、浮き上がり波形および RC 版のひび割れ分布について実験結果と解析結果を比較して示している。なお、計測波形には重錘衝突初期に高周波成分が存在するため、実験結果および解析結果ともに 2.5 ms の矩形移動平均法による数値フィルター処理を施している。

4.1 重錘衝撃力波形

図－４には、重錘衝撃力波形を実験結果と解析結果を

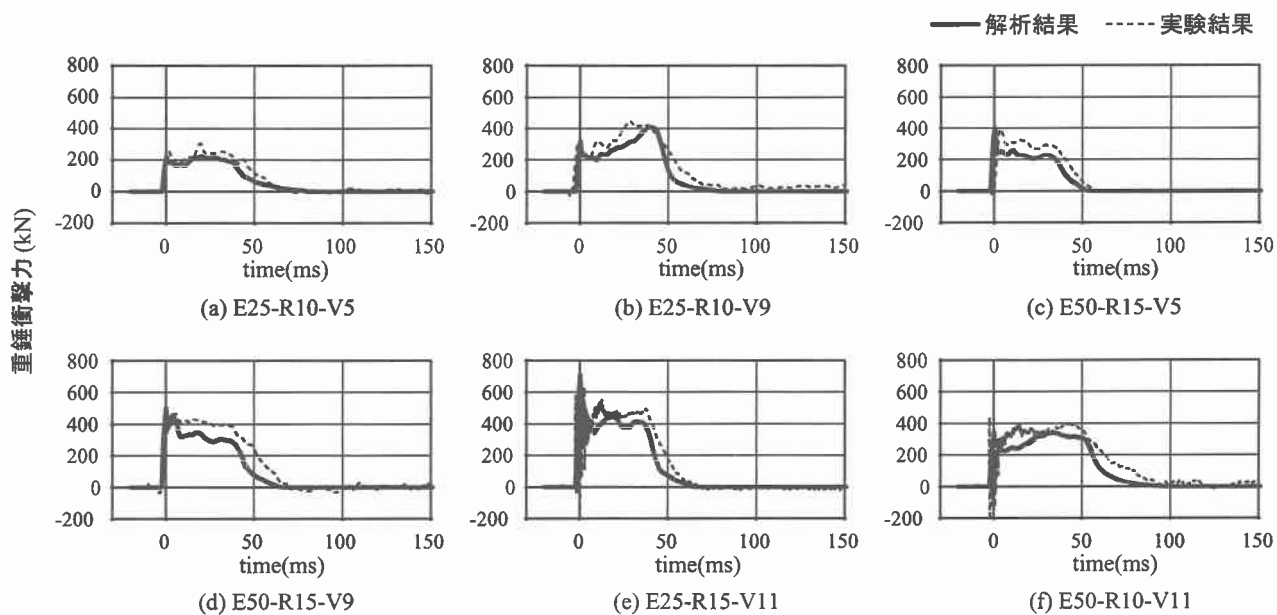


図-4 重錘衝撃力

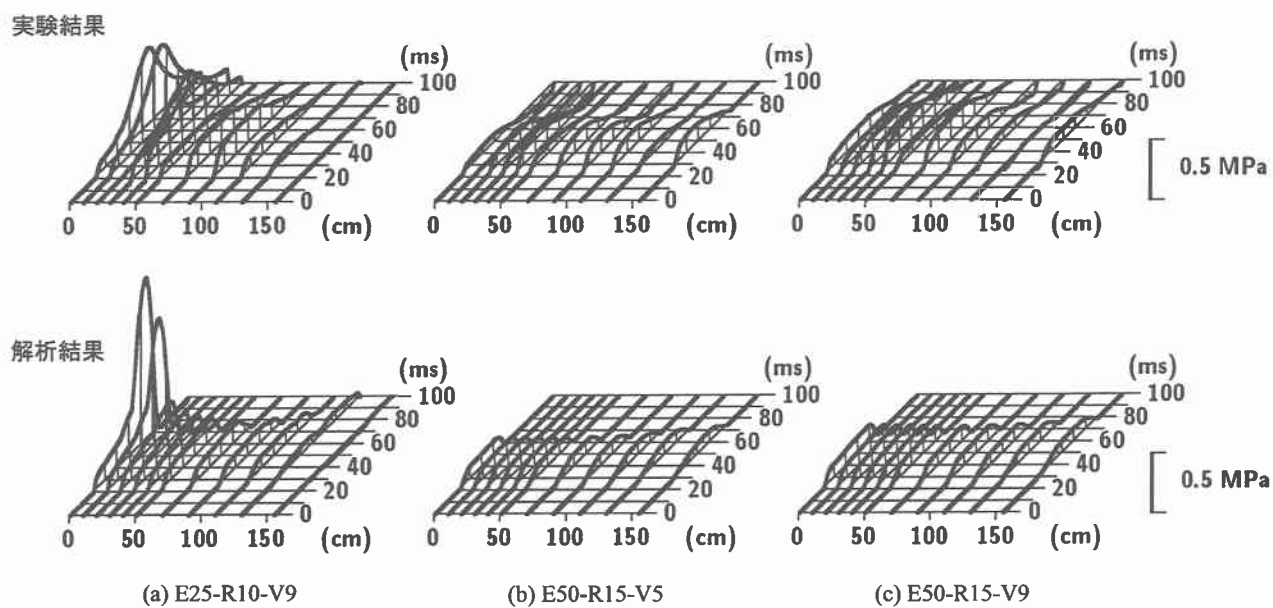


図-5 伝達衝撃応力

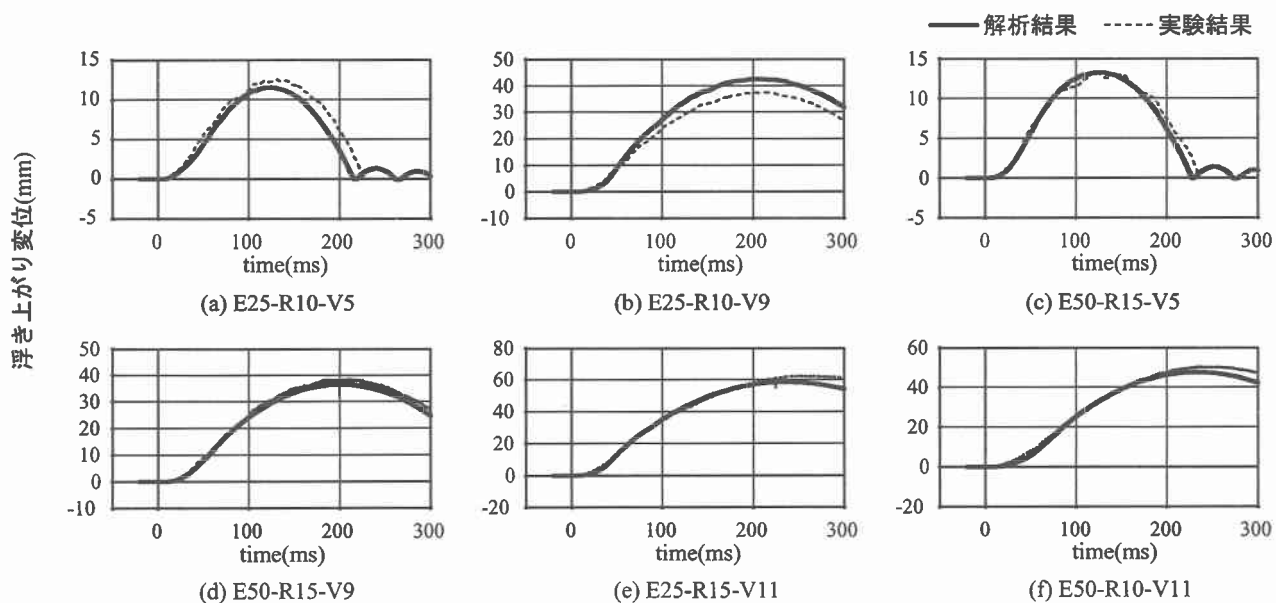
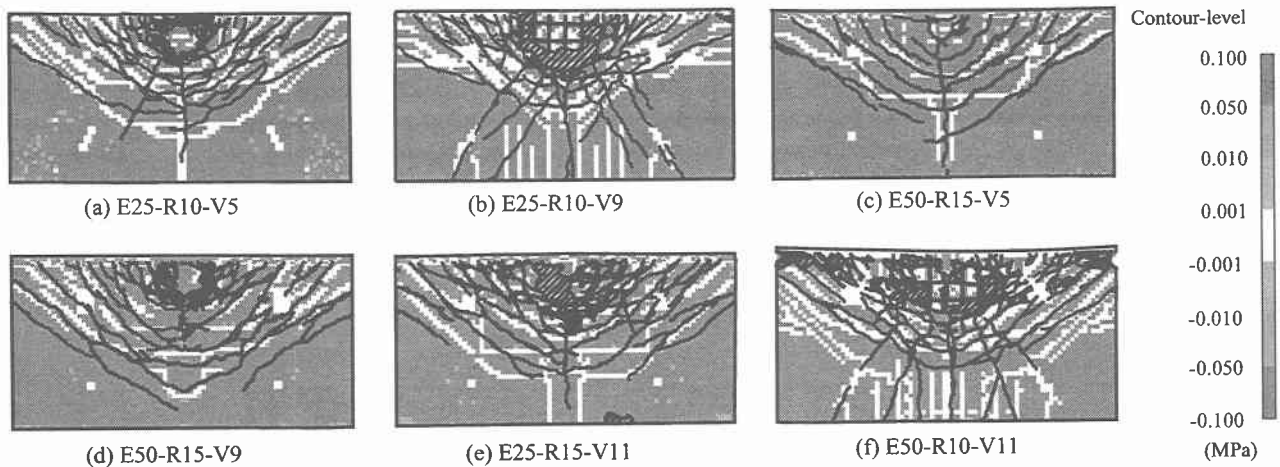


図-6 浮き上がり波形



図－7 RC版のひび割れ分布と最大主応力分布の比較

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。図より E25-R10 試験体では波形の最大値、波形性状ともに精度良く対応している。その他の試験体では、解析結果は実験結果に比べ、若干小さいものの、零レベルに低減するまでの波動継続時間、波形性状とも大略類似したものとなっている。

4.2 伝達衝撃応力波形

図－5には、E25-R10-V9 試験体、E50-R15-V5 試験体および E50-R15-V9 試験体における伝達衝撃応力分布について、横軸に重錘衝突位置からの距離、縦軸に伝達衝撃応力値、奥行きに時間を取って整理している。なお、図の上側には実験結果を、下側には解析結果を示している。図より E50-R15-V5 試験体および E50-R15-V9 試験体の場合には実験結果と解析結果の伝達衝撃応力の分布範囲、応答性状およびピーク値は大略一致したものとなっている。E25-R10-V9 試験体に関しては、伝達衝撃応力のピーク値に差異が見られる。これは、実験では後述の図－7に見られるように重錘衝突部の RC 版が著しく損傷し、エネルギーが大きく吸収されたことによるものと推察される。

4.3 浮き上がり波形

図－6には、擁壁本体における重心の浮き上がり波形を示している。図中の実線は解析結果を、点線は実験結果を示している。なお、図示の浮き上がり波形は、擁壁本体の運動を剛体回転運動と仮定し、擁壁背面側各点の変位波形から回転角度を算出し換算したものである。図より E25-R10-V9 試験体を除き変位の最大値、波形性状ともに比較的一致したものとなっている。E25-R10-V9 試験体の場合に大きく変位が異なるのは、伝達衝撃応力と同様に重錘衝突部の RC 版が著しく損傷し、エネルギーが大きく吸収されたことによるものと推察される。

4.4 ひび割れ分布

図－7には、実験終了後における二層緩衝構造の一部である RC 版の重錘衝突側に発生したひび割れ分布(図中、黒色実線)と数値解析結果の最大主応力分布を重ねて示している。本数値解析でコンクリート要素に適用した材料構成則モデルの考え方に基づくと、コンクリート要素の最大主応力が零応力(図中、白色分布)を示す場合は、応力レベルが微小な状態であるか、その要素にひび

割れが発生し応力が除荷された状態であることを意味している。図より、数値解析における白色分布は RC 版の損傷が著しい E25-R10-V9 試験体および E50-R10-V11 試験体の場合には実験結果と若干異なるが、その他の試験体に関しては実験におけるひび割れを精度良く再現していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、二層緩衝構造を設置した実規模落石防護擁壁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数値解析手法の妥当性について検討を行った。本研究から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、重錘衝撃力を精度良く評価可能である。
- 2) 伝達衝撃応力および擁壁本体の浮き上がりの挙動に関しては RC 版が著しく損傷する場合を除き、大略評価可能である。
- 3) RC 版のひび割れ分布は、本数値解析手法を用いる場合の最大主応力分布から比較的精度良く予測可能である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 川瀬良司, 今野久志, 池田憲二: 二層緩衝構造の緩衝特性に関する重錘落下実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.1621-1632, 2001.3
- 2) 岸 徳光, 川瀬良司, 今野久志, 岡田慎哉: 二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁模型の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.48A, pp.1567-1578, 2002.3
- 3) John o.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, version 960, Livermore Software Technology Corporation, 2001.12
- 4) (社) 日本道路協会: 平成 12 年度版落石対策便覧, 2000.6