

基礎地盤を考慮した実規模落石防護擁壁に関する数値解析的検討

Numerical simulation for impact behavior of prototype rock-fall retaining-wall considering material properties of base ground

室蘭工業大学
(株)構研エンジニアリング
北海道開発土木研究所
室蘭工業大学

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
○学生員 佐藤 由幸 (Yoshiyuki Sato)

1. はじめに

山岳道路沿いには、小規模落石等に対する道路防護工の1つとして落石防護擁壁(以後、擁壁)が設置されている。現在、擁壁は落石対策便覧¹⁾に基づき、擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し、落石の衝突により擁壁に伝達される運動エネルギーが地盤の弾性応答時の変形エネルギーに等しくなるまで水平変位および回転変位を生ずるものとして設計が行われている。

しかしながら、落石防護工の被害実態調査²⁾によると、擁壁本体が欠損する場合が多数確認されるものの、擁壁本体の滑動・転倒等の事例はないことが報告されている。また、著者らの過去の実験的研究³⁾によっても、滑動・転倒等の安定性を失う前に、曲げやせん断ひび割れの発生とともに天端部がブロック化して大きく剥落することが明らかになっている。

著者らは、擁壁の耐衝撃性に着目してC製、RC製および二層緩衝構造(表層:RC版、裏層:EPS材)を設置した擁壁(以後、緩衝構造付擁壁)に関する重錘衝突実験を実施してきた。同時にそれらに関する弾塑性衝撃応答解析を試み、その妥当性の検討も行っている。その結果、本数値解析手法を用いることによって擁壁に関する衝撃挙動を大略評価可能であることが明らかになった。

本研究では、過去の研究⁴⁾と同様に、2m高の擁壁および質量2,000kgの鋼製重錘を用い、基礎地盤をN値10, 20, 50の地盤あるいは岩盤、コンクリート基礎と変化させて数値解析を行い、落石衝突による擁壁の衝撃挙動に関する基礎地盤の影響を考察することとする。本研究における検討項目は、重錘衝撃力、擁壁本体の回転角、水平変位である。なお、本数値解析では衝撃応答解析汎用コードLS-DYNA(ver.960)⁵⁾を用いている。

2. 数値解析の概要

2.1 数値解析ケース

図-1には、一例として緩衝構造付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、全ての解析ケースを擁壁高さ $H=2.0$ m、天端および基部の壁厚をそれぞれ0.4m、1.0mとした。擁壁延長は落石対策便覧で規定している有効幅を考慮し、擁壁高さの4倍である8.0mとした。なお、重錘衝突位置は設計時の最も厳しい条件である基部から $0.9H$ の点に限定した。

表-1には、解析ケースの一覧を示している。解析ケース名の第一項目には擁壁の構造形式(C:無筋コンクリ

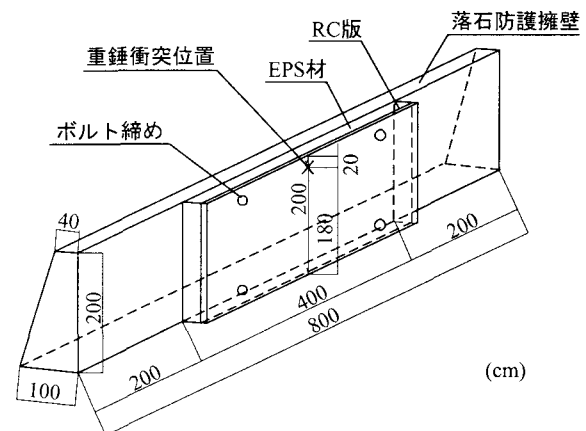


図-1 緩衝構造付擁壁の形状寸法

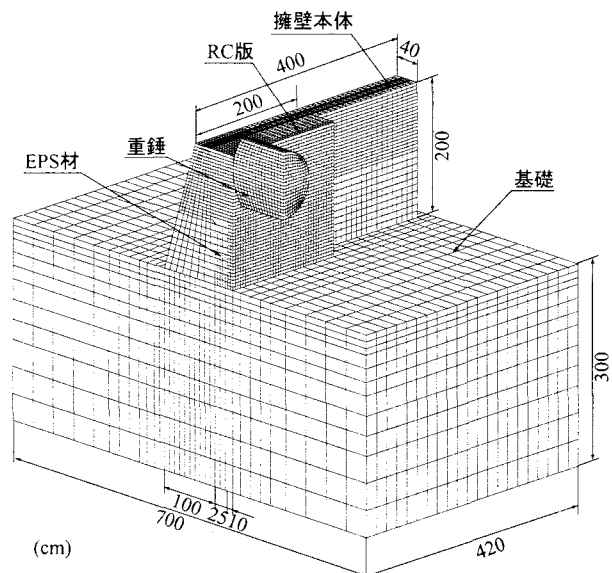


図-2 有限要素モデルの一例

ト製擁壁, RC:鉄筋コンクリート製擁壁, E25R10:EPS材厚25cm, RC版厚10cmの緩衝構造付擁壁), 第二項目には衝突速度 V (m/s), 第三項目には基礎地盤の種類(N10, 20, 50:N値10, 20, 50の地盤, R:岩盤, C:コンクリート基礎)を示している。なお、過去の実験におけるひび割れ図および解析結果の応力コンター図と比較確認し、終局時の衝突速度を、C製においては $V=4$ m/s, RC製においては $V=6$ m/sとした。

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	構造形式	二層緩衝構造		衝突速度 V(m/s)	基礎地盤(N値)
		EPS材厚 E(cm)	RC版厚 R(cm)		
C-V4-N10	C製擁壁	-	-	4	10
C-V4-N20					20
C-V4-N50					50
C-V4-R					岩盤
C-V4-C					コンクリート
RC-V6-N10	RC製擁壁	-	-	6	10
RC-V6-N20					20
RC-V6-N50					50
RC-V6-R					岩盤
RC-V6-C					コンクリート
E25R10-V7-N10	緩衝構造付擁壁	25	10	7	10
E25R10-V7-N20					20
E25R10-V7-N50					50
E25R10-V7-R					岩盤
E25R10-V7-C					コンクリート

2.2 解析モデル

図-2には、有限要素モデルの一例としてE25R10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、C製ではそれぞれ30,233、25,850、RC製ではそれぞれ30,234、28,046、緩衝構造付擁壁ではそれぞれ40,865、34,463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製擁壁中の鉄筋、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、全ての接触面には浮き上がりやり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、擁壁と基礎間には摩擦係数μをN値が10、20、50の地盤には0.6、岩盤、コンクリート基礎には0.7を与えている。数値解析における載荷方法は、重錘の全節点に初速度を付加して衝突させることにより行っている。なお、本数値解析では、重錘衝突時よりC製、RC製擁壁で200ms、緩衝構造付擁壁で300ms間について解析を行った。

2.3 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。基礎地盤に関しては、N値10、20、50に対する地盤の変形係数E₀は「道路橋示方書・下部構造編」⁶⁾の式、E₀=2.8N(MPa)を、一軸圧縮強度q_uに関してはTerzaghi and Peckの式、q_u=N/80(MPa)を用いてそれぞれ算出した。N値10、20、50に関しては完全弾塑性体で定義し、岩盤、コンクリート基礎に関しては、予備解析において塑性域に至らないことを確認後、弾性体として定義した。また、重錘に関しては、過去の研究と同様、衝突後に著しい変形が見込まれないことより弾性体と仮定した。

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(GPa)	ポアソン比 ν	圧縮強度 f' _c (MPa)
擁壁(C製)	12.5	0.167	18.7
擁壁(RC製)	17.6	0.167	26.4
擁壁(緩衝構造付)	14.9	0.167	22.3
RC版	16.7	0.167	25.0

(b) 鋼材			
材料物性	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	降伏強度 σ _y (MPa)
鉄筋	206	0.30	373
重錘	206	0.30	-

(c) EPS		
材料物性	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν
EPS	2.2×10 ⁻³	0.00

(d) 基礎地盤			
材料物性	変形係数 E ₀ (GPa)	ポアソン比 ν	圧縮強度 q _u (MPa)
N値10	0.028	0.400	0.125
N値20	0.056	0.400	0.250
N値50	0.140	0.300	0.625
岩盤	5.000	0.250	-
コンクリート	24.00	0.167	-

図-3には、本数値解析に用いた各材料における応力-ひずみ曲線を示している。

(a)図には、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。

(b)図には、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

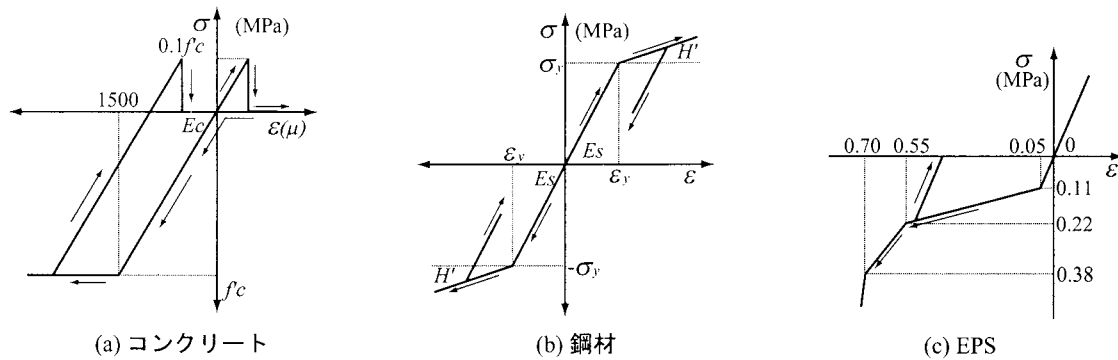


図-3 各材料における応力-ひずみ曲線

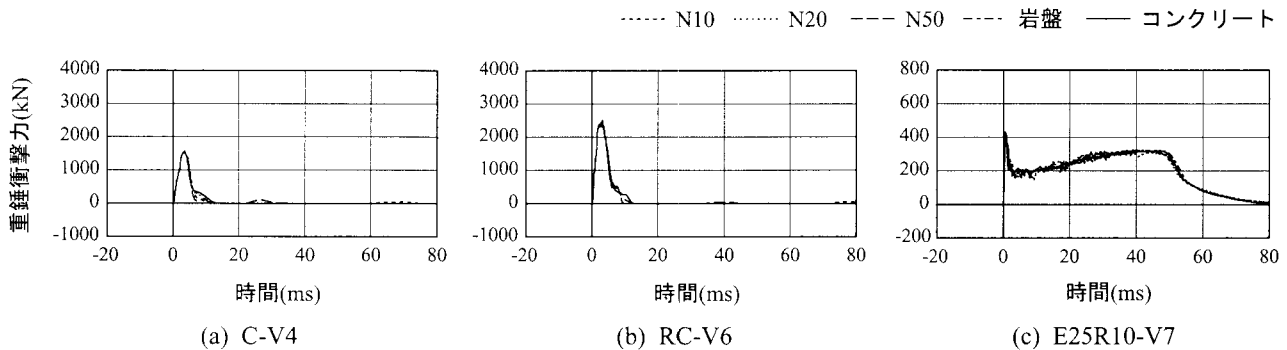


図-4 重錘衝撃力波形

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。

(c)図には、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と仮定するテトラニア型にモデル化している。

3. 解析結果

図-4, 5, 6には、C-V4, RC-V6, E25R10-V7における解析結果の各応答波形を基礎地盤の影響を比較して示している。なお、波形は重錘衝突時点を0 msとして整理している。

3.1 重錘衝撃力波形

図-4には、重錘衝撃力波形を示している。

図より、波形性状を比較すると、C-V4, RC-V6の場合にはいずれも衝撃初期に最大応答値を示し急激に除荷する、継続時間が10 ms程度の三角形の分布性状を示している。

一方、E25R10-V7の場合には、衝撃初期に最大応答値を示し、その後台形状の分布性状を示している。C-V4, RC-V6の場合に比較して、70 ms程度波形継続時間が延長し、かつ最大衝撃力も1/4~1/5に低減しており、衝撃力を効率よく緩和していることが分かる。

図より、いずれの解析ケースにおいても重錘衝撃力の最大応答値、波形性状は基礎地盤の物性により差異が生じていないことから、重錘衝撃力は基礎地盤の物性に依存しないものと判断される。

3.2 回転角波形

図-5には、擁壁本体の回転角波形を示している。なお、回転角とは擁壁基部先端部を回転中心としたものであり、回転角波形は擁壁本体の運動を剛体運動と仮定し、擁壁各点の変位波形から算出し、換算したものである。

図より、C-V4, RC-V6における地盤の場合の回転角の立ち上がり勾配は、岩盤やコンクリート基礎の場合に比較して大きいことが分かる。これは、重錘衝突時において擁壁基部先端部近傍の地盤が大きく変形し、擁壁の回転を助長していることによるものである。そのため、C-V4およびRC-V6の場合には、N値が小さく剛性が小さい地盤ほどピーク値が大きく示されている。一方、岩盤とコンクリート基礎を比較すると、コンクリート基礎の方がピーク値が大きくなっている。これは、岩盤とコンクリート基礎の両者とも剛性が十分に大きく変形が微小であるために回転角波形の立ち上がり勾配に大きな差異は生じないが、剛性が大きいコンクリート基礎の方が擁壁に対する反発力が大きく生じるため、回転角が大きくなったものと推察される。

一方、E25R10-V7の場合には、回転角波形の立ち上がり勾配にはC製、RC製擁壁で見られた程の差異は見られない。これは、二層緩衝構造の緩衝効果によって応力の伝達時間が延長されたことによるものと考えられる。

3.3 水平変位波形

図-6には、擁壁本体の水平変位波形を示している。

図より、C-V4の場合には基礎地盤の物性に関わりなく残留水平変位が約30 mm程度となっている。RC-V6の場合には、岩盤およびコンクリート基礎の場合に比較してN値10, 20の地盤の場合の残留水平変位が小さいことが分かる。これは、地盤とする場合の残留変位が摩擦係

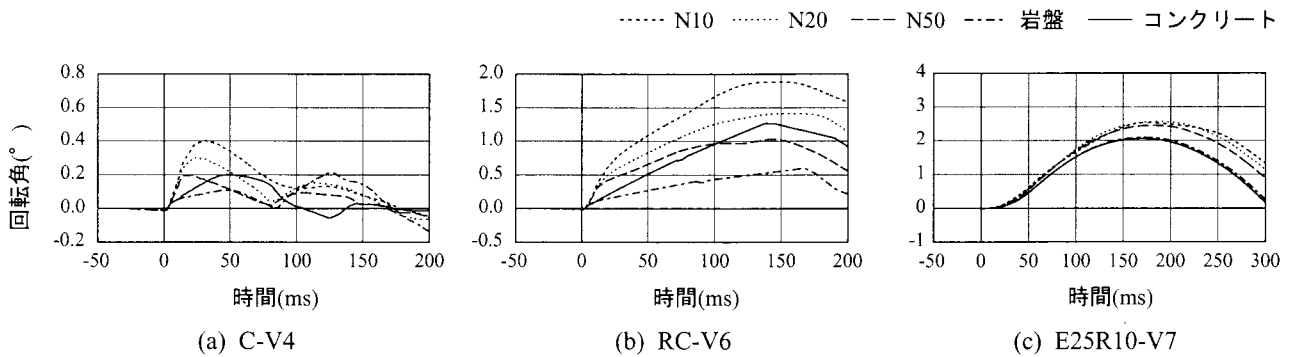


図-5 回転角波形

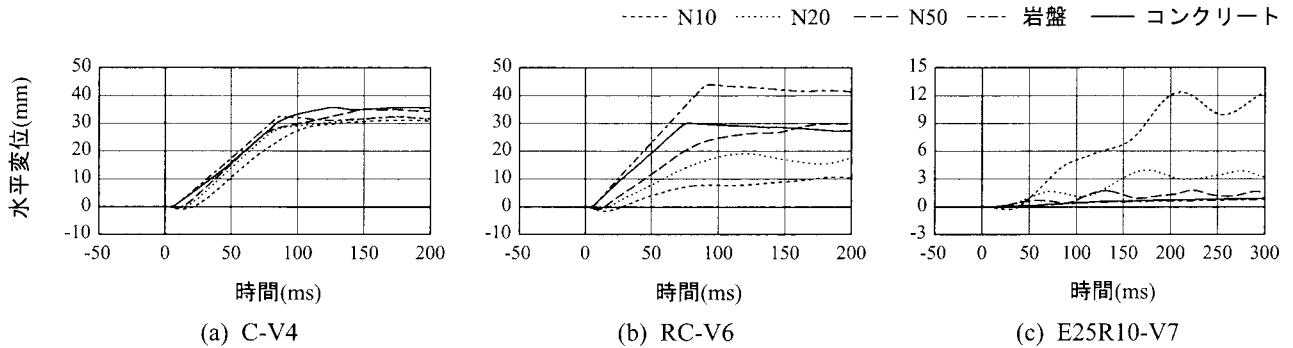


図-6 水平変位波形

数の大きい岩盤，コンクリート基礎に比べて小さく，矛盾しているように思われるが，地盤とする場合には，擁壁基部先端部近傍の地盤の局所変形により水平変位が拘束されたことによるものと考えられる．これより，残留水平変位は摩擦係数や擁壁の自重(鉛直抗力)のみならず，地盤の変形による影響も受けることより評価困難であるものと考えられる．

一方，E25R10-V7の場合には，摩擦係数の大きい岩盤およびコンクリート基礎における水平変位は最大でも1.0 mm程度であり，地盤の場合よりも小さいことが分かる．また，時間軸に注目して見ると，C-V4, RC-V6の場合には，水平への移動時間が約100 ms程度に達しているが，E25R10の場合には，約200 msにまで延長し，約2倍程度になっていることが分かる．これは，前述と同様に二層緩衝構造の緩衝効果によるものと考えられる．

4. まとめ

本研究では，C製，RC製あるい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，基礎地盤の物性が落石衝突時における擁壁の耐衝撃挙動に与える影響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) 重錘衝撃力波形は基礎地盤の物性に依存しない．
- 2) 回転角波形の立ち上がり勾配は剛性の小さい地盤ほど大きくなり，ピーク値も大きくなる．一方，変形が微小である岩盤およびコンクリート基礎の場合には，剛性が大きいほど擁壁に対する反発力が大きくなり，回転角も大きくなる．

- 3) 残留水平変位は摩擦係数や擁壁の自重(鉛直抗力)のみならず，地盤の変形の影響も受ける．C製の場合は基礎の物性に依存しないが，RC製の場合はN値の大きい場合が大きい水平変位を生じる．緩衝構造を設置する場合には水平変位は小さい．

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 松尾 修，佐々木哲也，堤 達也：落石防護工の被害に関する実態調査，第5回 建造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.69-74，2000.6
- 3) 岸 徳光，佐藤昌志，今野久志，松岡健一：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.45A，pp.1677-1688，1999.3
- 4) 岸 徳光，川瀬良司，今野久志，松岡健一，佐藤由幸：二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討，土木学会北海道支部，第58号，pp.268-271，2003.1
- 5) John o.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, version 960, Livermore Software Technology Corporation, 2001.12
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編，1994.2