

EPS とケブラーシートを組み合わせた落石緩衝工に関する衝撃挙動解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS ON ABSORBING SYSTEM
COMPOSED OF EPS BLOCK AND KEVLAR SHEET AGAINST FALLING ROCKS

三上 浩*, 岸 徳光**, 池田 憲二***, 小室 雅人****

Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Kenji IKEDA, and Masato KOMURO

* 工博 三井建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*** 北海道開発局開発土木研究所 室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

**** 工修 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード：衝撃解析, 落石緩衝工, ケブラーシート, EPS
(impact response analysis, falling rock absorbing system, Kevlar sheet, EPS block)

1. はじめに

わが国は山岳部が海岸まで迫り, かつ主要市町村も各地に点在していることから, 山岳急峻な地域における交通網の確保のためにロックシェッドやスノーシェッド, トンネル等を建設している. しかしながら, 平成元年の福井県越前海岸で発生した大規模な落石によるロックシェッドの崩壊¹⁾, 平成8年の北海道余市町の豊浜トンネルや平成9年の北海道岩内町の第2白糸トンネルで発生した岩盤崩落事故など, 近年大規模な自然災害が比較的多く発生している. 道路管理者は, これら大規模な自然災害を防ぐべく, 防災点検を行い, 地山の経年変化による落石危険箇所の特定, 落石規模の再評価や風化岩体の除去作業に着手している. 一方, 規模の大きい風化岩体除去時の人為的な落石や自然災害としての落石に対するロックシェッド等の落石防護施設の安全性を確保するためには, 1) 地山斜面に軽量でエネルギー吸収性能に優れた発泡スチロール (EPS) ブロックを積層し, 落石による衝撃力を緩衝し, かつ谷あるいは海中に岩石を落下させる方法, 2) 落石防護構造物の緩衝性能を強化する方法^{2),3)}等が考えられる. 現実にも緊急時には1)の方法が採用され, 施工されている場合もあるようである. しかしながら, この場合には落石のEPSブロックへの衝突によってブロックが飛散することも考えられるため, 衝撃

力が実挙動に比較して過小に評価される可能性を含んでいる.

本研究では, このような場合を想定し, 効率よく落石エネルギーを吸収させる方法として, EPSブロックの積層上をさらに軽量でしなやか, 高強度, 高弾性伸び特性を有しているケブラーシート (アラミド繊維シート) でカバーする工法を提案し, この工法の妥当性を非線形動的解析コード LS-DYNA (Ver.940)⁴⁾を用いた数値解析によって確認することとした. 本研究では, 地山の場合, 地山を盛土で覆った場合, EPSブロックを積層した場合も含め, 各ケースについてトンネル巻き出し工上部に落石がある場合を想定し, 岩石の動的挙動とともにトンネル天端部に発生する変位および応力の応答性状に着目して数値解析を行った.

2. 数値解析条件

2.1. 解析対象範囲

本数値解析で対象とした解析モデルは, トンネル巻き出し工上部のある一地山を対象とした. 数値解析で対象とした範囲は, トンネル軸方向に12m, 高さ方向に30m, 断面方向にはトンネル中心位置より山側に19.6m, 海側に10.4mまでとした. なお, トンネル近傍部の挙動に与える底部境界条件の影響を出来る限り排除するため, トンネル底部から10m

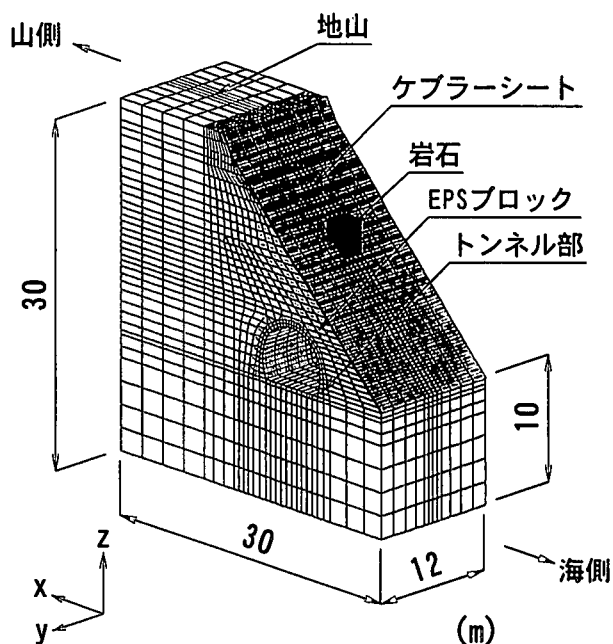
表一 解析ケース一覧

解析ケース	緩衝方法
ケース1	無処理
ケース2	盛土
ケース3	EPS ブロック
ケース4	EPS ブロック + ケブラーシート

の範囲までをモデル化し底部境界とした。また、実際は斜面の奥行き方向には凹凸があり複雑な形状をなしているが、本数値解析では落石緩衝構造の緩衝性能に着目した数値解析であることより、ここではこれらを簡略化して一様な形状と仮定した。

2.2. 数値解析モデル

本数値解析で設定した解析ケースは、各種緩衝材を用いた場合について比較検討を行うため、表一に示すような計4ケースとした。すなわち、1) 無処理でトンネル巻き出し工が一部露出している場合、2) 緩衝材として盛土を行い、自然地山に近い形にした場合、3) 発泡スチロール (EPS) ブロックを積層した場合、4) EPS ブロック積層上にケブラーシートを設置した場合である。図一にはケース4に関する構造全体の有限要素モデルを示している。総節点数および総要素数は各ケースで多少異なるが、それぞれ 9300~13000, 7700~9200 程度である。適用した要素タイプは、いずれも8節点あるいは6節点の3次元固体要素である。落石要素については、その要素体積を 8 m^3 と仮定し、図一に示すような台形断面に換算してモデル化を行った。また、本数値解析で対象としたケブラーシートは繊維厚さが 0.3 mm と非常に薄いものである。ここでは、これらを3次元固体要素でモデル化することとした。なお、実際の厚さを直接3次元要素でモデル化する場合には解析所要時間に大きな影響を与えるため、ここでは軸剛性 EA が等価となるように繊維厚さおよび弾性係数を換算してモデル化している。要素の積分点は、トンネル/地山/盛土/落石の各要素については解析所要時間の短縮を考慮して1点積分とし、ケブラーシートおよびEPSブロックの要素に対しては、大変形時の解析精度を確保するためとワーグラスモードの発生を回避するため8点積分を用いることとした。境界条件は、山側、トンネル軸方向および底部に対してはその面の法線方向成分のみを拘束することとし、海側側面は自由境界とした。



図一 有限要素モデルの一例 (ケース4)

なお、入力した落石荷重は、質量 20 ton の落石要素が高さ 50 m から落下するものと想定し、その落下高さを用いて換算した自由落下速度を落石要素に付加して載荷している。また、岩石要素-ケブラーシート/盛土/EPSブロック/地山, EPSブロック-ケブラーシート/地山の要素間には、ペナルティ法に基づいた接触・剝離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。ただし、落石荷重載荷によるケブラーシートの滑り落ちを防止するため、シートの最上端部は地山に固定することとした。また、EPSブロック要素は、全要素を連続体としてモデル化する場合には実挙動と異なった変形モードになることが予想されるため、高さ方向および奥行き方向に対して適当なブロックに分割し、その個々のブロック間に接触面を定義してモデル化することとした。なお、本数値解析では自重および減衰効果は無視することとした。全数値解析時間は 200 ms までとし、1ケース当りの所要時間は各ケースで異なるがHP9000/C240を用いた場合ケース4では約5時間である。

2.3. 材料物性モデル

本数値解析では、各構成材料に対して全て LS-DYNA に組み込まれている材料物性モデルを用いることとした。表一2に各構成材料における物性値の一覧を示す。トンネル部のコンクリート要素は、各緩衝材を設置した場合の緩衝効果をトンネルに発

表-2 材料物性値一覧

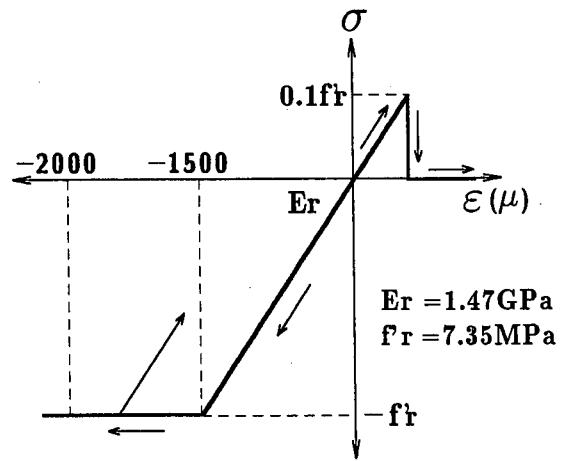
材料	強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	備考
コンクリート	-	29.4	0.2	弾性体
地山, 盛土, 落石	7.35	1.47	0.3	弾塑性体
EPS	図-2 参照	2.2×10^{-3}	0.0	
ケブラーシート	2400	118	0.4	

生ずる引張応力に着目して検討することより、ここでは弾性体でモデル化することとした。一方、地山、盛土および落石の要素には、引張による破壊を考慮した弾塑性体モデルを用いている。このモデルは、図-2 (a) に示されているように圧縮側は降伏後の挙動を完全弾塑性、引張側は圧力が規定値（圧縮強度の 1/10 と仮定）に達すると引張応力を伝達しないように定義されており、降伏判定は Von Mises の降伏条件に従うものとしている。ただし、解析時間の短縮を考慮して地山の一部は弾性体でモデル化することとした。また、EPS ブロック要素には、フォーム材等のモデル化に良く用いられている等方クラッシュモデルを用いている。本数値解析では、図-2 (b) 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 0.38 MPa とするトリリニア型にモデル化した。なお、ケブラーシートには、引張による破壊を考慮した弾塑性体モデルを用いることとした。このモデルは、図-2 (c) に示すように引張側の圧力が破壊圧力に達した場合あるいは相当塑性歪が破壊歪に達した場合のいずれかが満足された時点で、その要素が破壊したものと判断され、それに該当する要素が削除されるように定義されている。

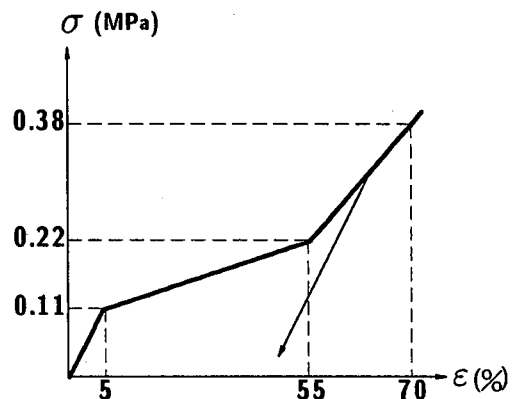
3. 数値解析結果

3.1. トンネルの変位に関する時刻歴応答波形

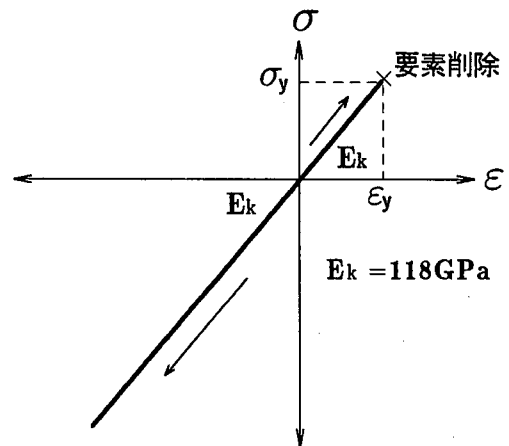
図-3 には、各ケースにおけるトンネル中央部天端の鉛直方向変位(Dz)の時間的な応答性状を比較して示している。図より、ケース1では緩衝材が設置されていないため、最大変位が他のケースと比較して著しく大きく、その発生時間もかなり初期に示されていることがわかる。これに対し、盛土を設置した場合では最大変位は 1/2 程度に低減され、発生時間もケース1の無処理の場合と比較して 5 ms 程度遅くなっていることがわかる。また、EPS ブロックを設置したケース3では、最大変形量はケース



(a) 地山・盛土・落石



(b) EPS ブロック



(c) ケブラーシート

図-2 数値解析に用いた応力-歪曲線

2 とほぼ同等ではあるが、その発生時間が約 130 ms 経過時と著しく遅れていることがわかる。これは、落石初期には EPS ブロックの変形によってエネルギーが吸収されるものの、やがて EPS ブロックが飛散傾向を示し、岩石がめり込み地山に直接衝突するためと考えられる。一方、EPS ブロック上にケブラーシートを設置したケース4では、最大変

形量が他のケースと比較して最も小さいことがわかる。これは、ケブラーシートによって EPS ブロックの飛散が防止され、効率よく落石エネルギーが吸収されていることを暗示している。従って、設定した4ケースの中では、EPS ブロックとケブラーシートを用いたケース4の場合の緩衝構造が最も効果的であるものと判断される。

3.2. トンネルの応力に関する時刻歴応答波形

図-4, 5に、各ケースにおけるトンネル中央部天端の X 方向（周方向）および Y 方向（軸方向）応力成分の時間的な応答分布性状を比較して示している。図中、正方向が引張領域、負方向が圧縮領域を示している。図-4より、X 方向成分の応答波形は、いずれのケースともに変位波形と類似した分布性状を示しており、ケース1, 2で、それぞれ9 MPa, 4 MPa とコンクリートにひび割れが生じる程度の引張応力が発生している。しかしながら、ケース3, 4では2 MPa 程度の引張応力に低減されており、変位波形と同様それらの緩衝効果が確認できる。一方、図-5の Y 方向成分の波形に着目すると、ケース1では最大10 MPa 程度の引張応力が発生しており、その後は2 MPa 近傍で定常的な振動を繰り返している。なお、その他のケースの波形分布は X 方向成分波形と同様な応答性状を示しており、ケース4では、1 MPa 程度の引張応力となっていることがわかる。

3.3. 構造全体の変形状況

図-6には、各ケースにおける最終ステップ ($t=200$ ms 経過時) 時における構造全体の変形状況を示している。なお、変形倍率は等倍に設定している。図より、ケース1, 2に着目すると、いずれのケースとも落石要素が地山あるいは盛土と接触し、リバウンド現象により跳ね返りの変形性状を示していることがわかる。さらに、落石要素は特にケース2の場合において複雑な変形性状を呈していることより、実現象においても落石が砕け落ちるような挙動を示すものと推測される。また、ケース3では落石要素が EPS ブロックに対してめり込むような挙動を示し、それによって EPS ブロックが飛散するような変形状態を示しており、実現象をよく再現しているものと推察される。しかしながら、前述(2.2)のように、これら EPS ブロックを一つの連続体としてモデル化する場合には、ブロック間に過度な引張力が作用するように挙動することが予想され、落

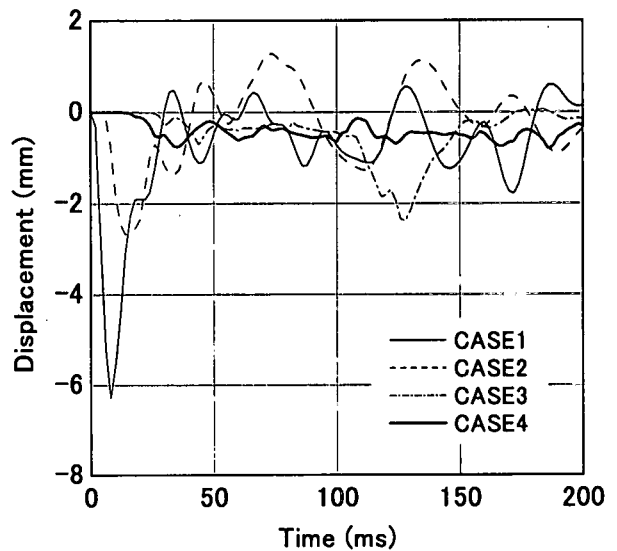


図-3 トンネル中央部における応答変位波形

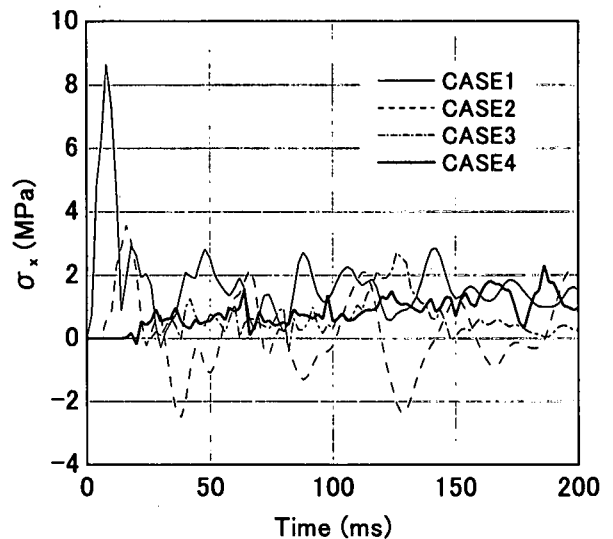


図-4 トンネル中央部における周方向応力 (σ_x) 波形

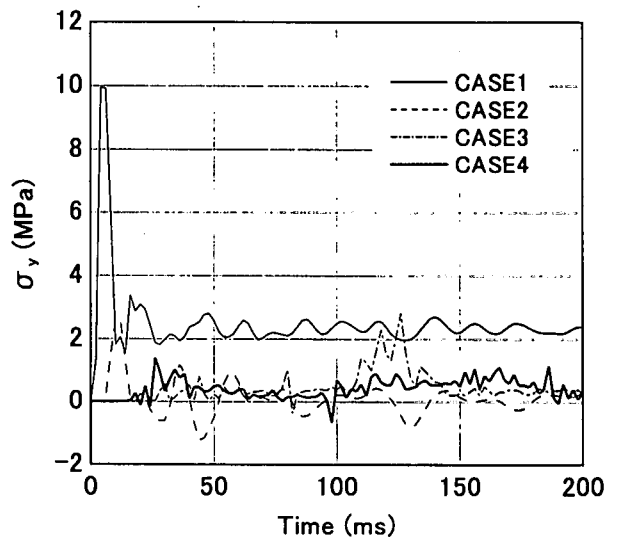
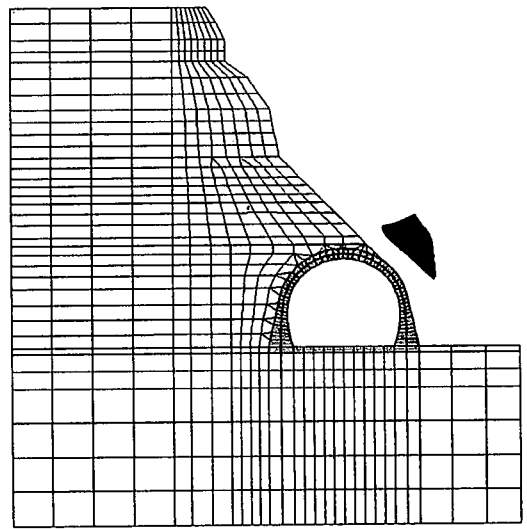
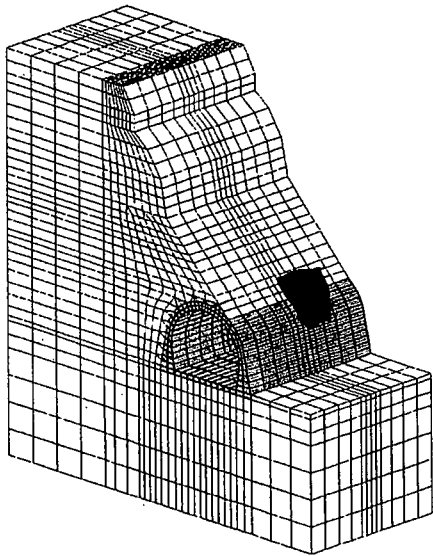
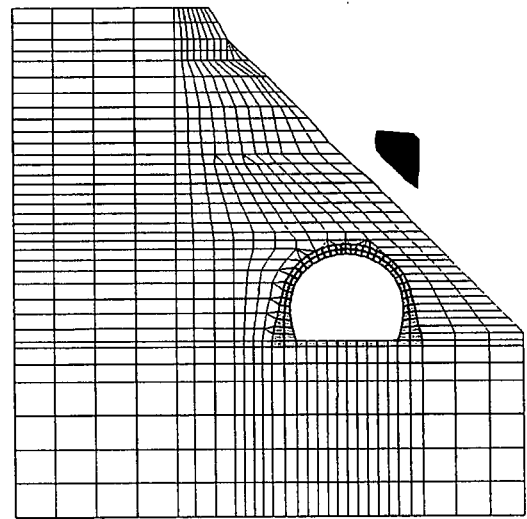
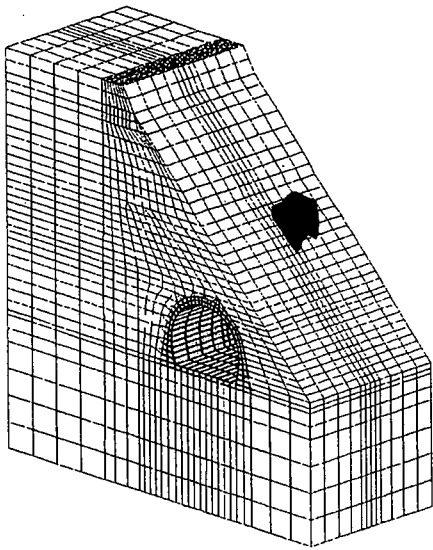


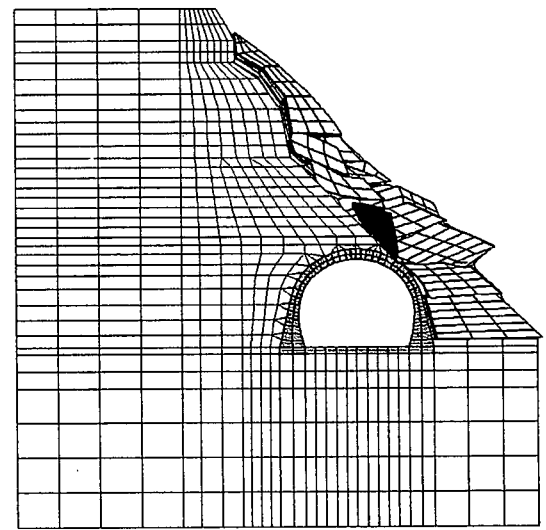
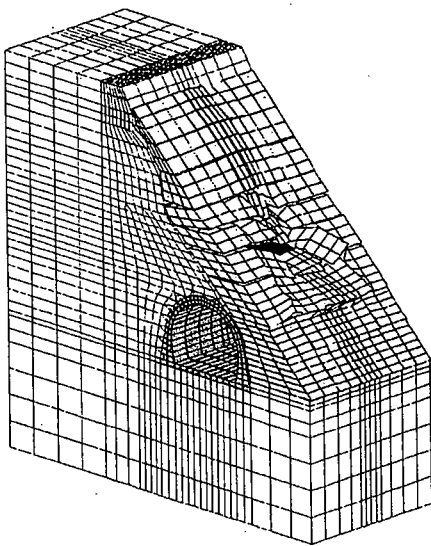
図-5 トンネル中央部における軸応力 (σ_y) 波形



ケース1

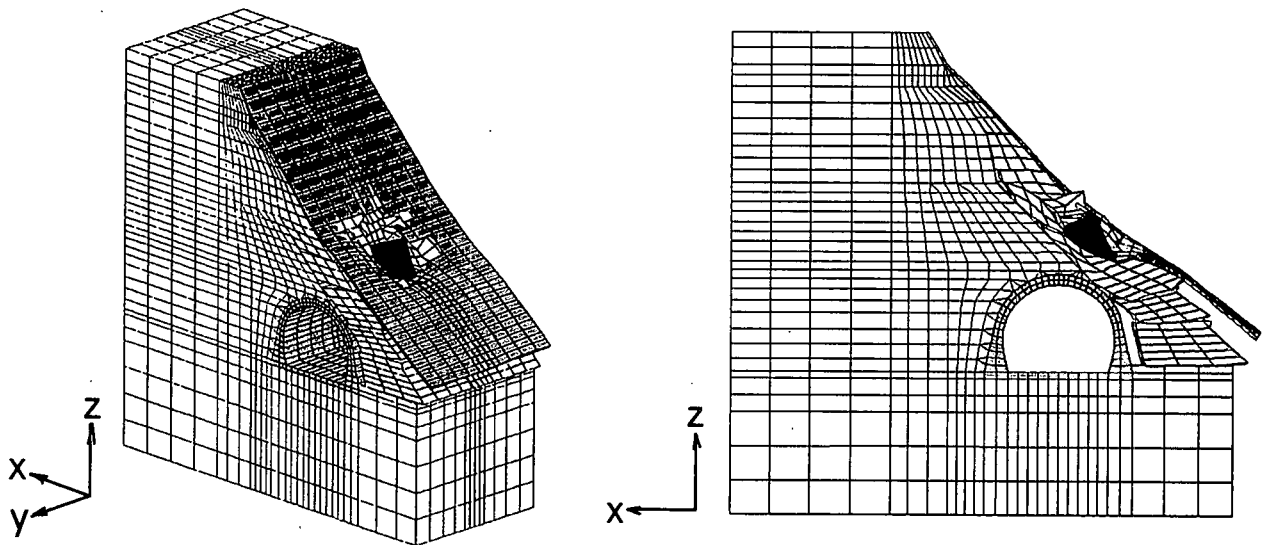


ケース2



ケース3

図-6 最終ステップ時における構造全体の変形状況 ($t = 200 \text{ ms}$)



ケース4

図-6 続き

石緩衝構造としての効果を十分に再現できないものと考えられる。一方、ケース4では、設置したケブラーシート要素に対して、規定値に達した破壊要素を削除する機能を用いているため、落石要素の載荷位置近傍の要素が破壊により削除されているが、ケブラーシートにより、ある程度までのエネルギー吸収がなされ、また分散されることより、シート破断後の落石要素の貫入量が小さくなっていることがわかる。また、ケブラーシートの存在により EPS ブロックの飛散も防止されている。従って、EPS ブロックとケブラーシートを用いたケース4の場合における緩衝効果が他と比較して最も有効であることが変形状況からも確認できる。

4. まとめ

本研究では、落石緩衝構造システムとして EPS ブロックとケブラーシートを組み合わせた緩衝構造を提案し、その緩衝性能を確認するため、無処理の場合、盛土構造とした場合および EPS ブロック積層工法単独で採用した場合についても解析を行い、これらの緩衝構造と比較する形で数値解析的に検討を行った。なお、数値解析には陽的解法による非線形動的解析コード LS-DYNA を適用した。解析モデルにはトンネル巻き出し工上部の地山を対象とし

た数値解析を行うため、実在しているトンネルの実形状寸法を基に、地山および基礎地盤を含めた比較的大規模な解析モデルを作成した。比較検討にあたっては、トンネル巻き出し工の軸方向中央天端部に関する応答変位、発生応力および構造全体の変形性状に着目した。検討結果、著者等の提案する緩衝構造システムは、設定した他の緩衝構造と比較して最も効果的であり、新しい落石緩衝システムとして有効な工法であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェットの耐衝撃性, pp25-28, 1998.11.
- 2) 岸 徳光, 佐藤昌志, 今野久志：敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式 RC 覆道の衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1773-1782, 1998.3.
- 3) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一：三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1347-1356, 1996.3.
- 4) John O. Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1997.9.