

三層緩衝構造で補強したトンネル坑口部の 落石衝撃挙動に関する数値解析的検討

A NUMERICAL CONSIDERATION FOR ROCKFALL IMPACT BEHAVIOR OF PITHEAD OF TUNNLE WITH THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEM

川瀬 良司*, 岸 徳光**, 牛渡 祐二***, 鈴木 健太郎****

Ryoji KAWASE, Norimitsu KISHI, Yuji Ushiwatari and Kentaro SUZUKI

*博(工) (株) 構研エンジニアリング (〒060-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

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

*** (株) 構研エンジニアリング (〒060-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

****修(工) (株) 構研エンジニアリング (〒060-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

キーワード: トンネル坑口部, 三層緩衝構造, 衝撃挙動, 弾塑性解析

(pithead of tunnel, three-layered absorbing system, impact behavior, elasto-plastic analysis)

1. はじめに

我が国の道路は、海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って敷設されている箇所が多く、大規模な岩盤崩落や落石などの災害要因を抱えている。このことから、道路の安全性を向上させるため防災事業が盛んに実施されている。それらの防災事業では、トンネルにより大規模な岩盤崩落を回避したり、落石覆道や落石防護擁壁などを設け落石などから道路を防護する方法などが取られている。しかしながら、既存のトンネル坑口部は斜面を背負っており、斜面からの落石に対して対策が施されていない箇所も多く残され、落石によるトンネル坑口部への被災が懸念される。このことから、トンネル坑口部への落石に対する安全性を向上することが緊急な課題となっている。一方、落石による衝撃力を効率的に吸収・分散させる工法として三層緩衝構造¹⁾が開発されており、北海道開発局ではこの構造をトンネル坑口部の上部に設置することを提案している。

本研究では、トンネル坑口上部に三層緩衝構造を設置した場合の緩衝性能を把握することを目的に、三層緩衝構造を用いてトンネル坑口部を補強した場合の三次元弾塑性衝撃応答解析を行ない、トンネル坑口部の落石衝撃挙動や落石作用位置の坑口部の衝撃挙動への影響に関する検討を行った。すなわち、

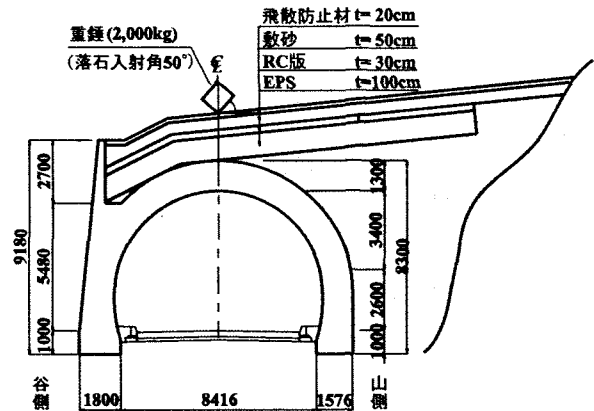


図-1 トンネル坑口部の断面図

トンネル坑口部の1ブロックに着目して道路縦断方向の天端中央点と端部に落石衝撃荷重を作用させ、数値解析を行なうこととした。図-1には、三層緩衝構造を設置した場合のトンネル坑口部の断面形状を示している。ここで、三層緩衝構造とは、表層材に敷砂、芯材にRC版、裏層材にEPS材を用いた異なる材料の波動伝播特性を組合わせて全体としての緩衝性能を高めようとするシステムである。なお、本数値解析は衝撃解析用汎用コードLS-DYNA²⁾を用いて実施した。

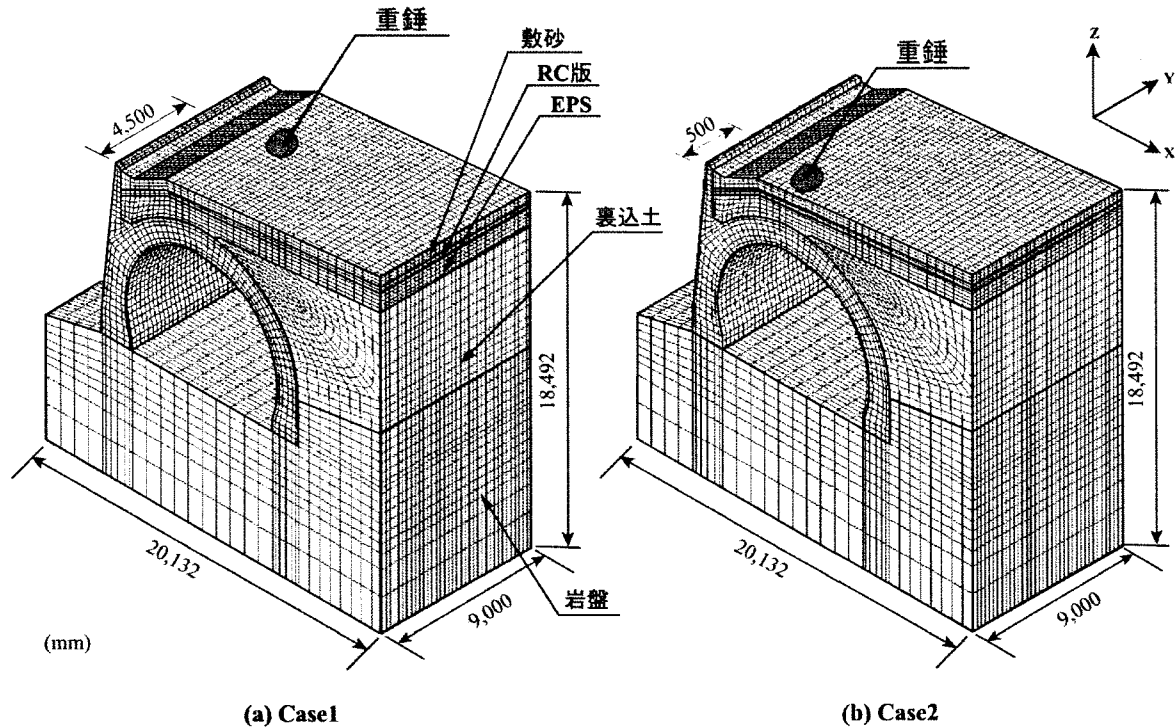


図-2 要素分割図

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	道路軸方向 载荷位置	荷重条件
Case1	中央部	質量 2,000 kg 重錘 200m 落下相当エネルギー
Case2	端部	落石入射角 50°

表-2 解析に用いた物性値一覧

材料	密度 ρ (kg/m ³)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
RC*	2,500	25.0	0.20
三層 緩衝 構造	敷砂	1,600	10.0**
	RC版	3,000	30.0
	EPS	20	2.2
裏込め土	2,000	0.042	0.45
重錘	3,054	206	0.30
岩盤	2,150	0.46	0.35

*RCの密度および弾性係数は設計時の値

**除荷時の弾性係数

2. 解析仮定

2.1 解析モデル

数値解析に用いたトンネル坑口部のモデルは、国道に設置されているトンネル実構造に基づき、その1ブロックの延長9mをモデル化した。図-2には本研究で用いた解析モデルの要素分割状況を示している。

図に示す通り、座標軸は幅員方向をX軸、道路軸方向をY軸、鉛直方向をZ軸とした。本解析では全て三次元固体要素を用いており、境界条件は底面および、山側と谷側の面を完全拘束するとともに、側面には無反射境界条件を定義して応力波が反射しないようにしている。また、トンネル断面に関しては、

道路軸方向に自由境界として定義している。なお、三層緩衝構造を構成する敷砂、RC版、EPSの境界および三層緩衝構造とトンネル覆工、裏込め土とトンネル覆工間には接触剥離を伴う接触面を定義している。解析対象範囲に関しては、地盤方向にはトンネルの高さと同等程度の深さを設定し、山側および谷側方向に関しては両方向共にトンネル幅の1/2程度を考慮することとした。

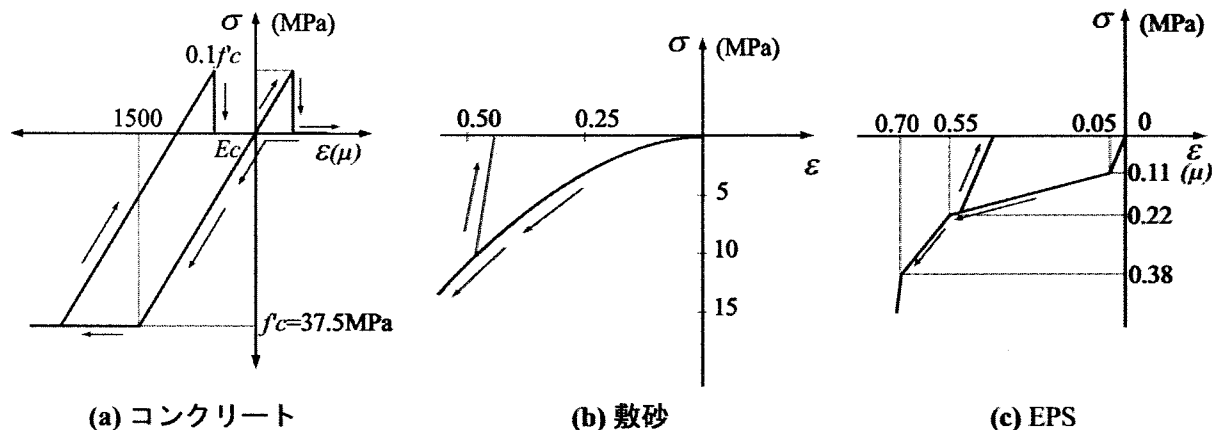


図-3 各材料の応力-ひずみモデル

解析ケースに関しては、落石覆道の落石衝撃挙動において道路縦断方向の端部載荷における頂版の曲げモーメントが中央載荷の場合の2倍程度になることが明らかとなっている¹⁾ことから、本研究においてもトンネル縦断方向中央部載荷と端部載荷の2ケースについて実施することとした。表-1には、本研究で実施した解析ケースを示している。落石条件に関しては、当該箇所を対象となる落石は径が1mを越え、発生位置も比高が200mを越える箇所であることが確認されている。従って、災害要因および地形状況から、荷重条件を落石質量2,000kgで200m落下相当のエネルギーとし、現地条件から落石の入射角を50°で作用させることとした。また、数値解析は解析初期に動的緩和法による自重解析を実施し、その後重錘衝突による衝撃解析を行っている。

2.2 物性モデル

表-2には、解析に用いた物性値の一覧を示す。なお、岩盤については現場試験値を使用している。図-3には、本数値解析に用いた各材料の応力-ひずみモデルを示している。

(a)図には、トンネル本体やRC版のコンクリート要素部に用いた応力-ひずみ関係を示している。このモデルは、要素の負圧力（応力として評価する場合には三方向の直応力成分の平均値で、引張応力を意味する）がカットオフ値に達した段階でいずれの方向へも引張り応力が伝達しないように定義している。圧縮側に対しては材料試験に基づき0.2%ひずみ時の応力を降伏応力とし、0.15%ひずみ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 とし、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。ここでは、RC版を $f'_c = 45.0 \text{ MPa}$ とし、トンネル覆工のRCに関しては $f'_c = 37.5 \text{ MPa}$ を仮定している。但し、トンネル覆工に関しては弾性域内での応答であったことを確認している。

(b)図には、三層緩衝構造の表層材に用いた数砂の応力-ひずみ関係を示している。図の応力-ひずみ関係は、数砂材の緩衝特性を評価するために用いたモデル³⁾である。本研究で適用した数砂モデルの応力-ひずみ関係は、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50\epsilon_{sand} \quad (1)$$

ここで、 σ_{sand} は応力(MPa)、 ϵ_{sand} は体積ひずみである。荷重除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ と仮定している。

(c)図にはEPS材の要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。ここでは等方クラッシュャブルモデルを適用し、静的な材料試験より得られた特性値である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0.38 MPaとするトリリニア型にモデル化している。なお、除荷時には載荷時の初期弾性係数である2.2 MPaを定義している。また、引張側はカットオフ値を零応力として弾塑性状態を定義している。

なお、コンクリートの降伏条件はvon Misesの降伏条件に従うものとし、ひずみ速度効果は考慮していない。また、裏込め土、重錘および岩盤は弾性体として仮定している。

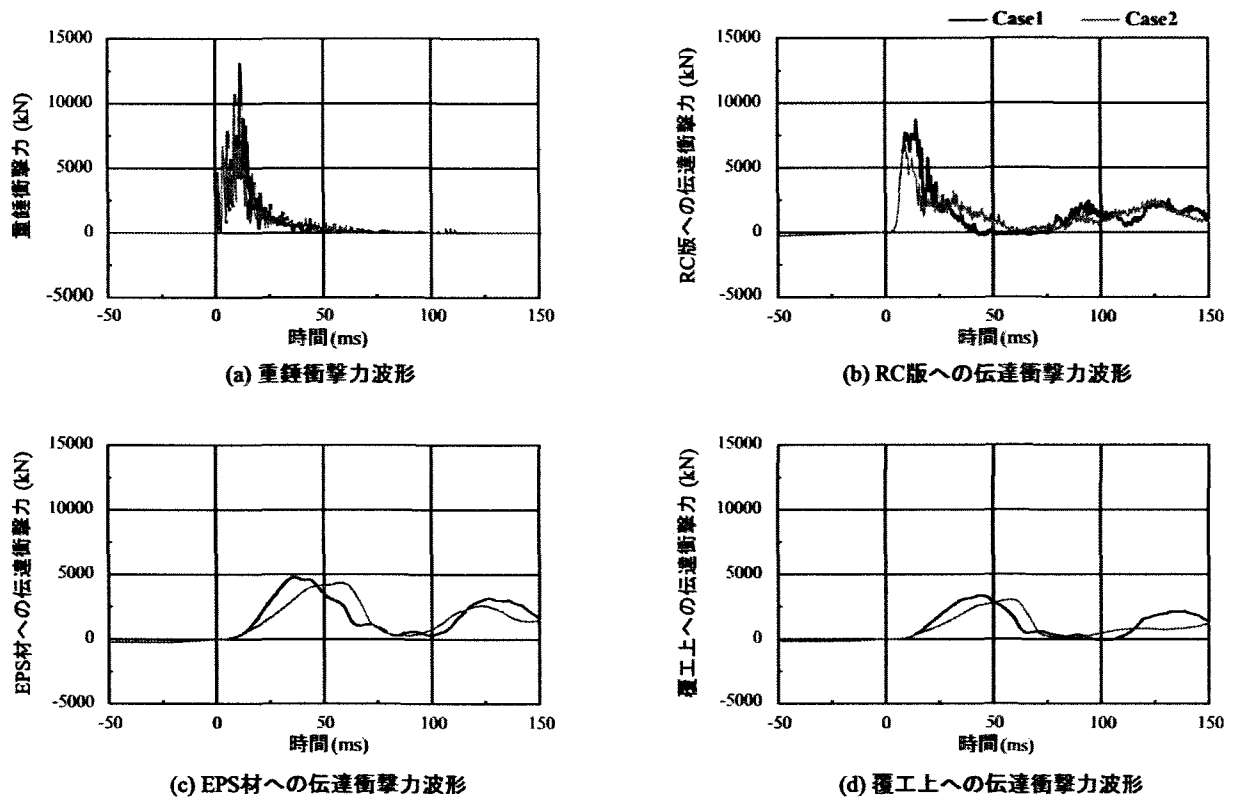


図-4 各衝撃力波形

3. 解析結果

3.1 衝撃力

図-4(a)~(d)には、それぞれ重錘、敷砂からRC版に、RC版からEPS材におよびEPS材からトンネル坑口覆工に伝達される鉛直(Z軸)方向の衝撃力波形を示している。なお、(b)~(d)図の各伝達衝撃力は各接触面に作用する合力を時間毎にプロットしたものである。また、解析結果の応答波形は、重錘衝突時を0msとして整理している。

図より、衝撃力は重錘、RC版上、EPS材上、覆工上の伝達衝撃力の順に小さく示されていることから、三層緩衝構造の緩衝効果や分散効果が三次元弾塑性衝撃応答解析により再現されていることが分かる。

(a)図の重錘衝撃力波形は、両ケースとも衝突初期に最大応答値を示し、荷重継続時間が75ms程度の正弦減衰状の分布を示している。一方、最大重錘衝撃力について比較すると、最大衝撃力の発生時刻は両者でほぼ同様であるが、最大衝撃力値はCase1の場合がCase2の場合よりも30%程度大きく示されている。これは、Case2の場合は荷重載荷位置が端部であるためにCase1に比較して、より変形しやす

いことより、たわみ剛性が、相対的に小さく評価されることによるものと考えられる。

(b)図のRC版上への伝達衝撃力波形では、衝撃初期の解析結果は、Case1, 2ともに同様の勾配を示している。また、(a)図の重錘衝撃力波形と同様に、最大衝撃力値はCase1の場合が若干大きな値を示しているが、ピークに達する時間は、10ms程度遅れて示されている。

(c)および(d)図の伝達衝撃力波形性状は、大略類似しており、大きく2つのピークを示している。これは、後述する図-6のトンネル断面中央部の変位波形より、第1波目の正弦半波波形は重錘衝突による衝撃力波形であり、後者はトンネルの上下方向振動成分と落石や表層敷砂層および芯材RC版との相互作用によって生じた応答成分であるものと推察される。ここでは、前者の応答値が大きいことより、主に初期の落石衝撃力の作用に対応した成分に着目して検討を行うこととする。(c)図のEPS材への伝達衝撃力波形では、衝突初期の勾配と最大衝撃力値が両者で若干異なっていることが分かる。また、(b)図のRC版への伝達衝撃力波形とは異なり、最大衝

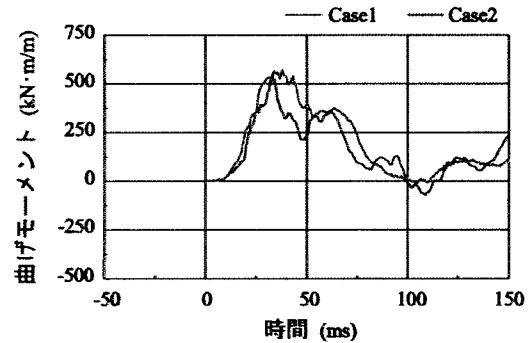
撃力が Case 1 の場合が Case 2 の場合よりも 25 ms 程度早期に発生している。また、(d) 図の覆工上への伝達衝撃力波形の場合には、(c) 図の EPS 材への伝達衝撃力波形と同様に、Case 1 の最大値が Case 2 よりも若干大きくかつその発生時刻が 20ms 程度早期に示されているが、衝撃力の作用継続時間は両者とも 70 ms 程度を示している。これは、図-6 の変位波形からも明らかのように、落石作用位置の違いによるトンネル上下振動の位相差に起因しているものと推察される。また、覆工上への最大伝達衝撃力は 3,000 kN 程度であり、最大重錘衝撃力 (10,000 ~ 13,000 kN) に対して 1/3 ~ 1/4 程度低減していることが分かる。この性状は、落石覆工上に三層緩衝構造を設置する場合と同程度の割合である。

以上のことから、トンネル本体に作用する伝達衝撃力の載荷時間は、載荷位置にかかわらず落石覆道に三層緩衝構造を設置した場合と同様に 70 ms 程度であり、また最大伝達衝撃力も最大重錘衝撃力の 1/3 ~ 1/4 程度に減少する。よって、トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置して補強した場合も、十分な緩衝効果が期待できることが明らかとなった。

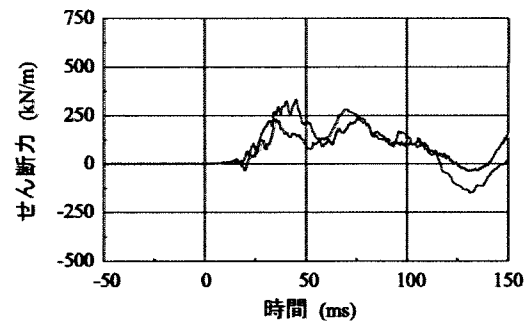
3.2 断面力

図-5 には、重錘衝突地点直下の覆工頂部における各断面力応答波形を解析ケース毎に示している。断面力は、曲げモーメント、せん断力および軸力である。これより、曲げモーメントに関しては、Case 1, 2 ともに最大値、最大値の発生時刻、波形性状や波形継続時間に顕著な相違は見られないことが分かる。軸力に関しては、重錘衝突初期に Case 2 が Case 1 より若干大きな最大値を示しているが、両者の最大値の発生時刻に大きな差異は見られない。また、波形性状は Case 1 の場合が Case 2 の場合に比較して若干高周波成分が卓越する傾向を示しているが、低周波成分は曲げモーメントの波形性状とほぼ同様な傾向を示している。さらに、曲げモーメントと軸力の最大値発生時刻および波形継続時間は、両者でほぼ同様な傾向を示している。せん断力に関しては、重錘衝突初期に Case 2 が Case 1 より若干大きな最大値を示しているが、波形性状や波形継続時間は同様な傾向を示している。

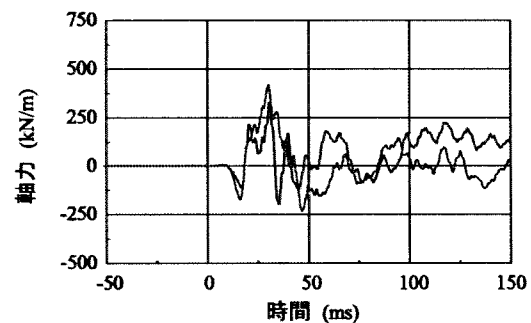
これらの結果より、トンネル坑口部の覆工頂部の曲げモーメント、軸力およびせん断力は、道路縦断方向の落石作用位置による影響が小さいことが明ら



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力



(c) 軸力

図-5 各断面力応答波形

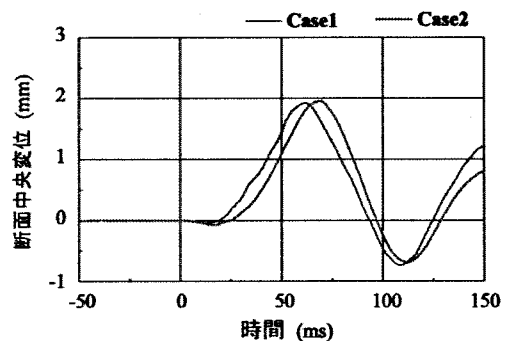


図-6 変位波形

かになった。また、モーメントおよび軸力の最大値発生時刻および継続時間がほぼ同様であることか

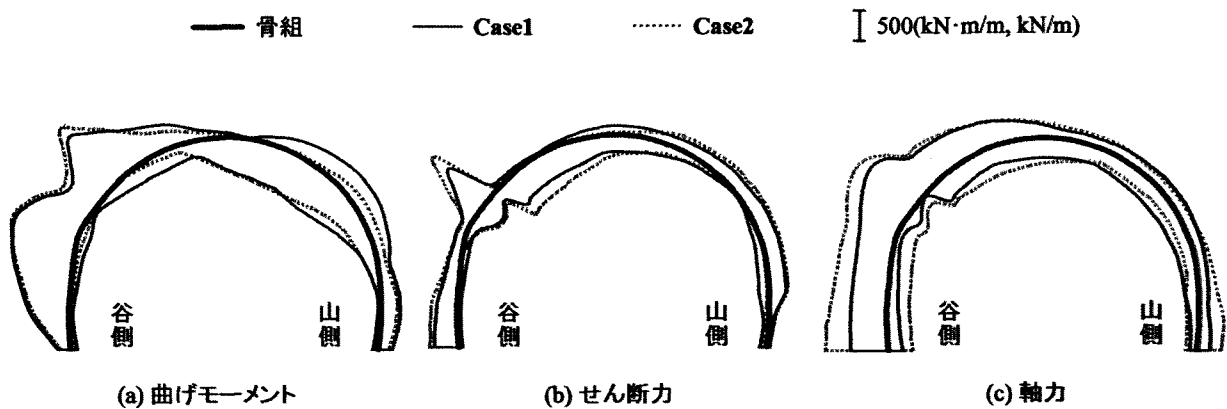


図-7 各最大断面力包絡線分布

ら、箱型の落石覆道に比べ、アーチ型の優位性が確認できた。

図-6には、重錘衝突地点直下の覆工頂部における変位波形を各解析ケースを比較する形で示している。図より、覆工頂部における変位の最大値はほぼ同程度であるのに対し、最大変位発生時刻はCase 2がCase 1に比べ5ms程度遅れて示されている。これは、前述のように落石作用位置の違いによってトンネル上下振動に位相差が発生するためと推察される。

図-7には、各最大断面力の包絡線分布について各解析ケースを比較して示している。(a)~(c)図のいずれの最大断面力包絡線分布も谷側土留め壁周辺において大きく示されていることが分かる。これは、左右非対称断面であることや、荷重入射角の影響によるものと考えられる。また、包絡線分布はトンネル断面に対して正負に発生している。これは、トンネル本体が落石衝撃力を受け正負交番状に応答することによるものである。さらに、Case 1とCase 2を比較すると、曲げモーメントやせん断力に関しては、両ケースとも類似の分布性状を示している。軸力に関しては、Case 2がCase 1よりも全体的に若干大きな値を示している。

これより、トンネル型の場合は箱型の場合と異なり、载荷位置による断面力の優位な差が生じないことが分かる。また、断面力に関する応答解析結果から、曲げモーメントおよび軸力の最大値発生時刻および継続時間がほぼ同様であることから、最大断面力包絡線分布を用いて任意の点における照査が容易に可能であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、三層緩衝構造を設置した場合におけるトンネル坑口部の三次元弾塑性衝撃応答解析を行ない、トンネル坑口部の落石衝撃挙動や道路縦断方向の落石作用位置を変化させた場合の応答性状への影響について検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置する場合には、落石覆道に設置する場合と同様に十分な緩衝効果が期待できる。
- 2) 1ブロックの道路軸方向中央点载荷時と端部载荷における応答値には優位な差がない。特に曲げモーメントと軸力の最大応答は同時刻に発生する。
- 3) このことから、任意点における設計用部材断面力値は最大断面力の包絡線を用いて容易に算定可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェットの対衝撃設計，1998.11.
- 2) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.
- 3) 岸 徳光，岡田慎哉，今野久志，池田憲二：敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A, pp.1323-1332,2003.3