

論文 各種緩衝材を設置した場合のトンネル坑口部の落石衝撃挙動解析

川瀬 良司*1・今野 久志*2・牛渡 裕二*3・岸 徳光*4

要旨: アーチ形状を有する道路トンネル坑口部の覆工上に落石対策の緩衝工として、敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の三次元衝撃応答解析を実施し、伝達衝撃力や動的応答特性を考慮した断面力について検討を行った。その結果、アーチ形状を有する覆工構造物においても三層緩衝構造が優れた緩衝効果を発揮すること、また、応答性状は矩形断面形状を有する落石覆工とは大きく異なること等が明らかになった。

キーワード: トンネル坑口部, 三層緩衝構造, 伝達衝撃力, 衝撃応答解析

1. はじめに

我が国の道路には、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いことから、道路トンネル(以後、単にトンネル)が多く存在する。トンネル坑口部は一般に斜面を背負っている。しかしながら、斜面からの落石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ている。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させることが緊急な課題となっている。一方、落石に対する緩衝工には、従来の敷砂に比較して衝撃力を効率的に分散・吸収させる工法として、箱型落石覆工を対象として三層緩衝構造¹⁾が開発されている。著者らは、これをトンネル坑口部の覆工上に設置することを提案している。箱型落石覆工の衝撃挙動の特徴¹⁾としては、1) 道路軸方向の端部載荷時には中央載荷時に比べ約2倍の曲げモーメントが発生すること、2) 曲げモーメントおよび軸力の最大応答発生時刻が異なること、等が上げられる。

本研究では、アーチ形状を有するトンネル坑口覆工上に三層緩衝構造を設置した場合(以後、単に三層緩衝構造の場合)の緩衝効果を

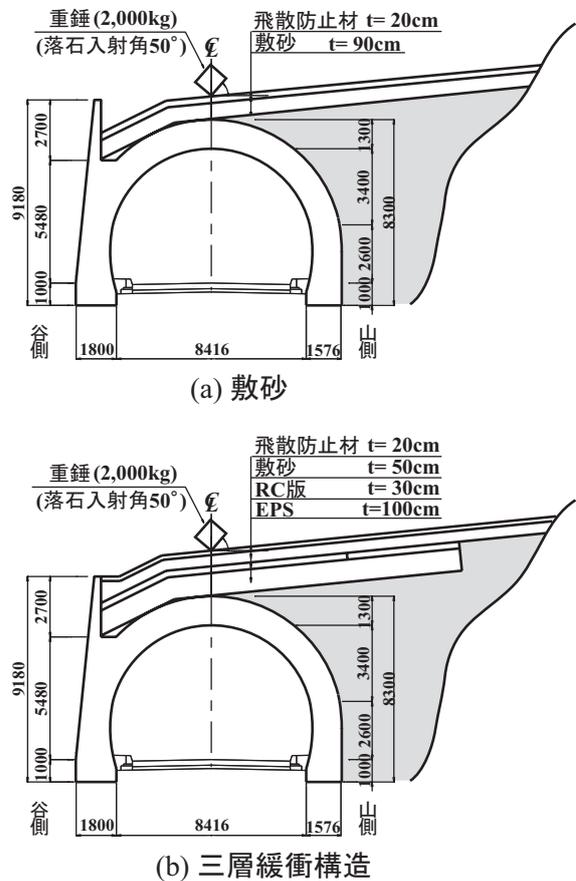


図-1 トンネル坑口部の断面図

把握することを目的に、緩衝工として敷砂および三層緩衝構造を用いる場合の三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、伝達衝撃力や動的

*1 (株)構研エンジニアリング 防災施設部部長 博(工) (正会員)
 *2 北海道開発土木研究所 構造部構造研究室
 *3 (株)構研エンジニアリング 防災施設部次長
 *4 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

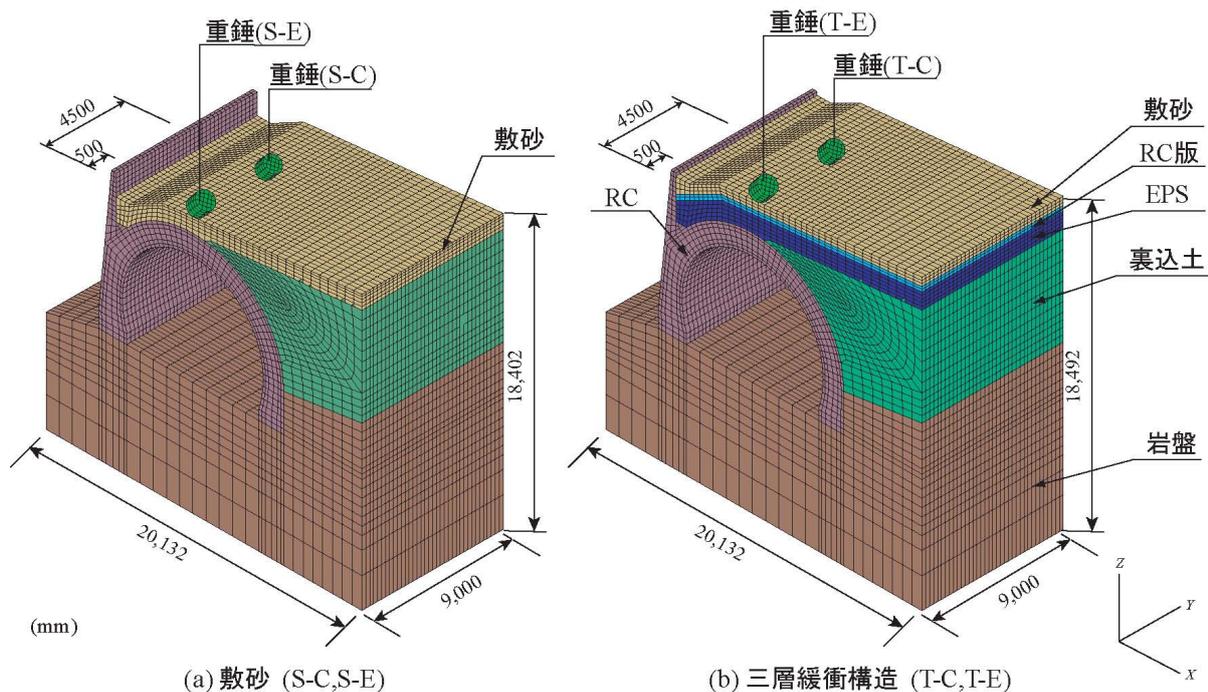


図-2 要素分割図

応答特性を考慮した断面力について比較検討を行うこととした。さらに、落石作用位置によるトンネル坑口部の衝撃挙動への影響についても検討を行っている。図-1には、敷砂と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版を用いて衝撃力を分散し、裏層材にEPS材を用いて衝撃力を吸収する、という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構造システムである。また、緩衝工として敷砂を用いる場合(以後、単に敷砂の場合)の敷砂厚は、設計要領²⁾に即して90cmとしている。なお、本数値解析は衝撃解析用汎用コードLS-DYNA³⁾を用いて実施した。

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実トンネル構造に基づき、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敷砂と三層緩衝構造を設置した場合の解析モデルの要

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	緩衝工	载荷位置
S-C	敷砂	中央部
S-E	敷砂	端部
T-C	三層緩衝構造	中央部
T-E	三層緩衝構造	端部

素分割状況を示している。図に示す通り、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を定義している。なお、敷砂とRC版間、EPS材とトンネル覆工間、裏込土とトンネル覆工間には接触と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、地盤部にはトンネル高さと同程度の深さを考慮し、山側および谷側方向に関しては、側面に無反射境界を定義していることより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。

解析ケースに関しては、箱型落石覆工に関する衝撃挙動の特徴を考慮して、トンネル軸

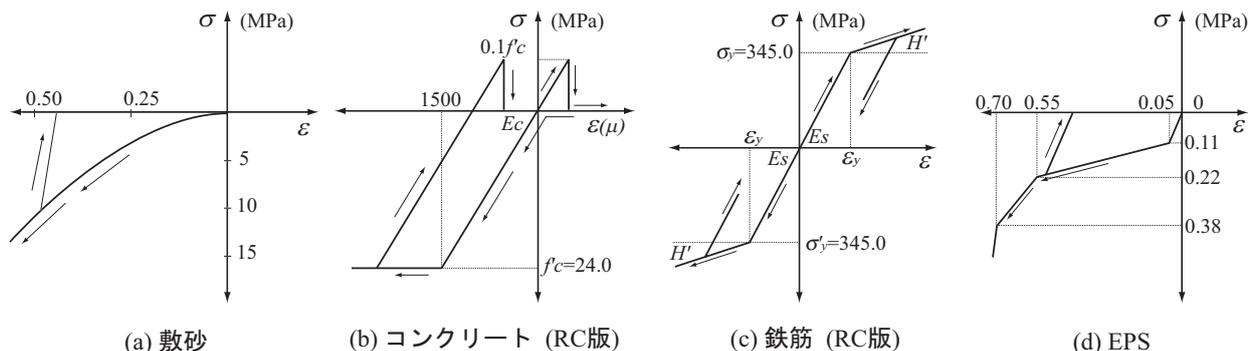


図-3 各材料の応力-ひずみモデル

方向中央部載荷と端部載荷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の一覧を示している。解析ケース名は、緩衝工(S:敷砂, T:三層緩衝構造), 落石載荷位置(C:中央載荷, E:端部載荷)をハイフンで結んで表している。

落石荷重に関しては、災害要因および地形状況から落石質量 2,000 kg で 200 m 落下相当のエネルギーとし、落石の入射角を 50° で作用させることとした。また、数値解析は最初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一覧を示している。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、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、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂モデルの応力-ひずみ関係は、次式のように示される⁴⁾。

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \quad (1)$$

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

(b) 図には、RC版のコンクリート要素に用いた応力-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

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	0.200
敷砂	1,600	10.0**	0.060
コンクリート***	2,350	25.0	0.167
鉄筋***	7,850	210.0	0.300
EPS	20	0.0022	0.000
裏込め土	2,000	0.042	0.450
重錘	3,054	210.0	0.300
岩盤	2,150	0.46	0.350

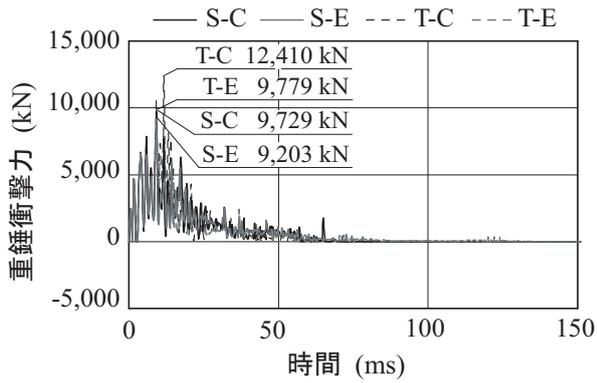
*RCの密度および弾性係数は設計時の値

除荷時の弾性係数 *RC版

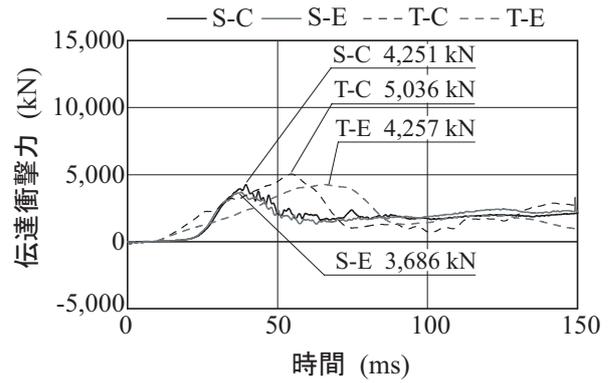
でいずれの方向へも引張応力が伝達しないように定義している。圧縮側に対しては材料試験に基づき 0.2% ひずみ時の応力を降伏応力とし、0.15% ひずみに達した状態で降伏するものと仮定してバイリニア型にモデル化している。本研究では降伏応力として圧縮強度 f'_c を採用し、引張側の破壊圧力(カットオフ値)として降伏応力の 1/10 を仮定している。ここでは、RC版を $f'_c = 24.0$ MPa と仮定している。

(c) 図には、RC版の異形鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。ここで採用したモデルは、降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。ここでは、 $H' = E_s / 100$ と仮定している。

(d) 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。図の応力-ひずみ関係



(a) 重錘衝撃力波形



(b) 伝達衝撃力波形

図-4 各衝撃力波形

は、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、コンクリートおよび異形鉄筋の降伏条件は 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、トンネル本体のRC部、裏込め土、重錘および岩盤は弾性体として仮定している。

3. 数値解析結果

3.1 衝撃力

図-4には、鉛直(z軸)方向の各種衝撃力波形を示している。(a)図には重錘衝撃力波形を、(b)図には覆工への伝達衝撃力波形を示している。伝達衝撃力に関しては、覆工の接触面に作用する合力と定義している。また、解析結果の応答波形は、重錘衝突時を0 msとして整理している。

(a)図の重錘衝撃力波形では、全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75 ms程度の正弦減衰状の分布を示している。また、最大重錘衝撃力の発生時刻は全ケースで10 ms ~ 20 ms程度とほぼ同様である。しかし、最大重錘衝撃力は三層緩衝構造で中央

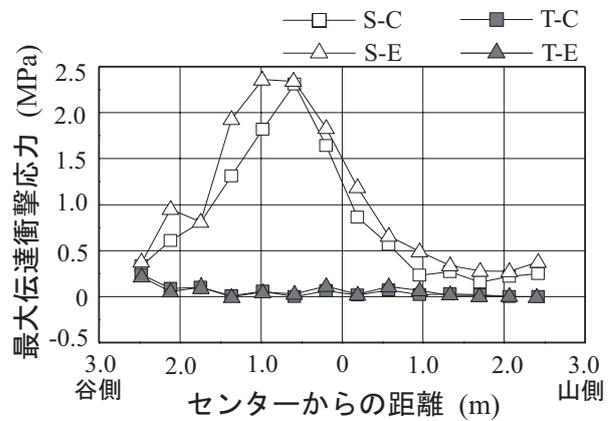


図-5 最大伝達衝撃応力包絡線分布

載荷した場合が、他のケースに比べ30%程度大きく示されている。これは、三層緩衝構造の敷砂厚が薄いことによるものと考えられる。また、三層緩衝構造の端部載荷時が中央載荷時に比較して小さい値を示すのは、荷重載荷位置が端部であるために中央載荷に比較して変形しやすく、たわみ剛性が相対的に小さく評価されるためと考えられる。

(b)図の伝達衝撃力波形より、衝撃初期における波動の立ち上がりは、敷砂の場合で重錘衝突後20 ms程度、三層緩衝構造の場合で10 ms程度経過後に発生している。また、波動の立ち上がり勾配は三層緩衝構造の場合が敷砂の場合より緩やかとなっている。さらに、最大伝達衝撃力に着目すると、発生時刻では敷砂の場合で重錘衝突後40 ms程度、三層緩衝構造の場合で50 ms ~ 70 ms経過後である。その最大応答値は、三層緩衝構造の場合が敷砂

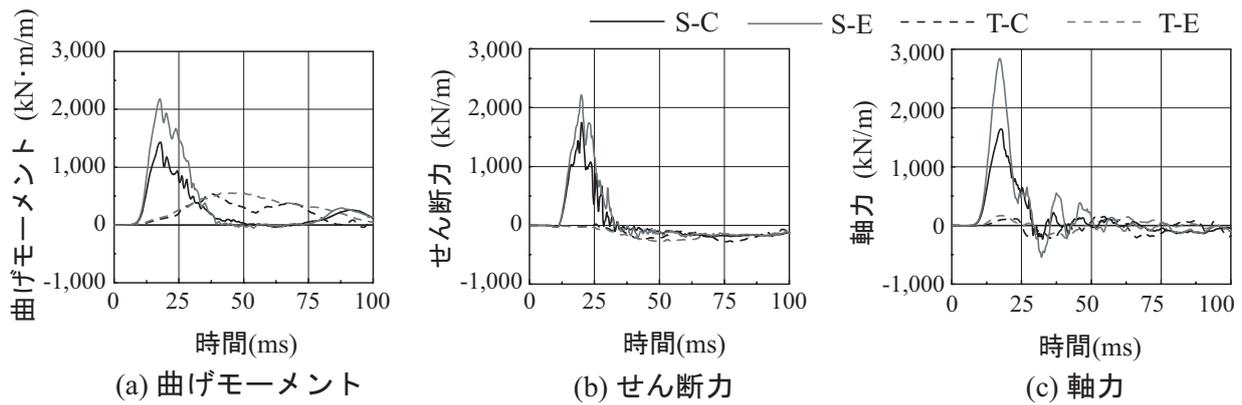


図-6 各断面力応答波形

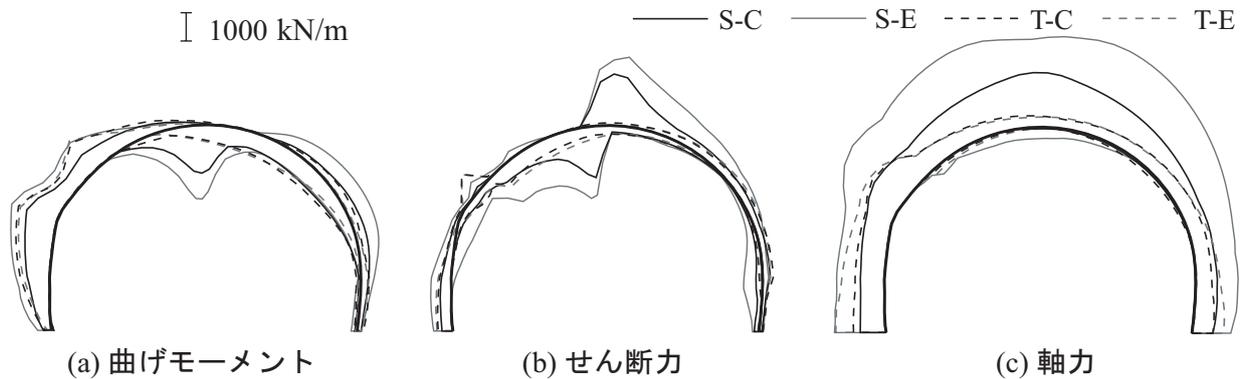


図-7 各最大断面力包絡線分布

の場合に比べ僅かながら大きい。

(a) 図の重錘衝撃力と (b) 図の伝達衝撃力の最大応答値を比較すると、緩衝工に敷砂や三層緩衝構造を用いることにより、伝達衝撃力が重錘衝撃力の 1/2 以下に低減されることが分かる。

図-5 には、トンネル覆工上面の载荷点を中心に幅員方向 6.0m の範囲に発生する各ケースの最大伝達衝撃応力の包絡線分布を示している。敷砂の場合は、最大伝達衝撃応力が中央载荷、端部载荷にかかわらず、0.4 MPa ~ 2.4 MPa 程度の三角形形状の分布性状を示している。また、最大応答発生位置は、覆工中心より谷側に 0.5 m ~ 1.0 m 程度推移している。これは、落石の入射角の影響によるものと推察される。一方、三層緩衝構造の場合における伝達衝撃応力は、中央载荷、端部载荷にかかわらず 0.1 MPa 程度の均等な分布性状を示しており、三層緩衝構造の緩衝効果が十分に発揮されていることが分かる。なお、最大伝

達衝撃応力の载荷位置による影響に着目すると、敷砂の場合と三層緩衝構造の場合ともに中央载荷時と端部载荷時で顕著な差異は見られない。

3.2 断面力

図-6 には、重錘衝突地点直下のトンネル覆工頂部における各断面力応答波形を示している。断面力は、曲げモーメント、せん断力および軸力である。(a) 図より、曲げモーメントに関する応答波形は、敷砂の場合には重錘衝突後 10 ms 程度経過後に急激な立ち上がりを示し 20 ms 程度経過後に最大値を示している。一方、三層緩衝構造の場合には、重錘衝突後 10 ms 経過後に緩やかに立ち上がり 50 ms 程度経過後に最大値を示す。最大曲げモーメントに着目すると、三層緩衝構造の場合には敷砂の場合に対して 1/3 ~ 1/4 程度に低減されている。また、三層緩衝構造の場合には、载荷位置による差異が僅かであるが、敷砂の場合には端部载荷時が中央载荷時の約 1.5 倍に増大

している。さらに、曲げモーメントおよび軸力の最大応答値の発生時刻および継続時間がほぼ同様であることから、軸力の作用による主鉄筋量の低減が可能となり、箱型の落石覆工に比べ、アーチ型の優位性が確認できた。

図-7には、トンネル本体の各最大断面力の包絡線分布について全てのケースを比較して示している。曲げモーメントおよびせん断力に関しては、敷砂の場合には三層緩衝構造の場合に比べて、中央載荷で2～3倍、端部載荷で4～5倍程度の大きな値を示している。また、敷砂の場合において、載荷位置間で比較すると、端部載荷時が中央載荷時に比べ1.3～1.5倍程度大きな値を示している。これは、三層緩衝構造に比べ伝達衝撃応力が載荷点近傍に集中的に発生することによるものと考えられる。また、軸力は、敷砂の場合が三層緩衝構造に比べ中央載荷で4倍、端部載荷で9倍程度となっており、曲げモーメントの増加倍率よりも大きい。これは、トンネルのアーチ作用により、伝達衝撃力が効果的に軸力に変換されたことによるものと考えられる。三層緩衝構造の場合における中央載荷と端部載荷を比較すると、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。また、軸力に関しては、側壁脚部で端部載荷時の場合が中央載荷時の場合よりも若干大きな値を示しているものの、両ケースとも類似の分布性状を示している。これより、三層緩衝構造の場合において、アーチ形状覆工の場合には箱型覆工の場合と異なり、載荷位置による断面力の有意な差は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応答値発生時刻および継続時間がほぼ同様であることから、任意点における応力は、お互いの最大断面力包絡線分布を直接用いることにより、容易に照査可能であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、トンネル坑口覆工上に三層緩衝構造を設置した場合の緩衝効果を把握することを目的に、緩衝工として敷砂と三層緩衝構造を用いた場合の三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、伝達衝撃力や動的応答特性を考慮した断面力について比較検討を行った。また、落石作用位置を道路縦断方向の天端中央と端部とした場合のトンネル坑口部の衝撃挙動への影響についても検討を行った。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、敷砂を設置する場合に比べ断面力が載荷点近傍で1/2～1/5程度に低減可能である。
- 2) 三層緩衝構造を用いる場合には、1ブロックの道路軸方向中央載荷時と端部載荷における応答値に有意な差が生じない。
- 3) アーチ形状の覆工の場合には、曲げモーメントと軸力の最大応答がほぼ同時刻に発生することから、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 ロックシェットの耐衝撃設計，1998.11.
- 2) (社)北海道開発技術センター：北海道開発局 道路設計要領 第4集 トンネル，2004.4.
- 3) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.
- 4) 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.