

三層緩衝構造を設置したトンネル坑口部の 衝撃挙動に関する実規模実験と数値解析的検討

A full-scale falling-weight impact test and numerical study on impact behavior of arch-type RC tunnel portal with three-layered absorbing system

川瀬 良司*, 岡田 慎哉**, 鈴木 健太郎***, 岸 徳光****

Ryoji Kawase, Shin-ya Okada, Kentaro Suzuki and Norimitsu Kishi

*博(工)(株)構研エンジニアリング 取締役(〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

**修(工)室蘭工業大学大学院 博士後期課程 建設工学専攻(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***修(工)(株)構研エンジニアリング 防災施設部(〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

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

In order to confirm dynamic response characteristic of full-scale arch-type RC structure with three-layered absorbing system, falling-weight impact tests were conducted at real tunnel portal and three-dimensional elasto-plastic impact response analysis was also performed applying an equivalent tensile fracture energy concept. From this study the following results were obtained. 1) Applying three-layered absorbing system, punching shear failure may not be occurred and impact resistant performance can be remarkably improved. 2) Impact resistant performance of the tunnel portal with the absorbing system can be improved more than 13 times in input energy than that without absorbing system, and the real structure has possessed more than three times ultimate impact resistant capacity in input energy at design. 3) Three-dimensional elasto-plastic impact response analysis applying an equivalent tensile fracture energy concept for arch-type RC structure can be applicable by the level of maximum input energy at design.

Key Words : *three-layered absorbing system, arch-shape RC rock-shelter, absorbing-effects, falling-weight impact test, impact response analysis*

キーワード : 三層緩衝構造, トンネル坑口部, 緩衝効果, 重錘落下衝撃実験, 衝撃応答解析

1. はじめに

我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈している。そのため、道路は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って建設されている箇所が多く、トンネルも多く建設されている。そのトンネル坑口部は一般的に斜面を背負っているため、耐衝撃性に関する検討は勿論のこと、落石対策が施されていない箇所も多いのが現状である。従って、落石から人命を守りかつ道路交通網を確保するためには、RC 製アーチ型トンネル坑口部における耐衝撃性の確認と、耐衝撃性が十分でない場合には適切な耐衝撃性向上のための対策を講ずることが必要不可欠であるものと判断される。実際に施されているトンネル坑口部の例を写真-1 に示す。

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に三層緩衝構造¹⁾が開発されている。



写真-1 トンネル坑口部の例

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。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。

著者らは、先に、落石覆工に用いられている三層緩衝構造をトンネル坑口部の落石対策の緩衝工として用いた場合の数値解析²⁾を実施し、RC 製アーチ構造の衝撃応答特性や緩衝効果について検討を行っている。その結果、応答性状は箱型の落石覆工と大きく異なるが、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等を明らかにしている。また、RC 製アーチ構造の衝撃挙動を把握するために、小型 RC 製アーチ構造模型の衝撃実験³⁾を実施している。その結果、版形状に近い構造の場合には、静載荷実験および衝撃載荷実験結果ともに押抜きせん断型の脆性的な破壊性状等を示すことを明らかにしている。さらに、小型 RC 製アーチ構造模型の衝撃実験に関する三次元弾塑性衝撃応答解析を実施して、アーチ構造の衝撃挙動⁴⁾も明らかにしている。

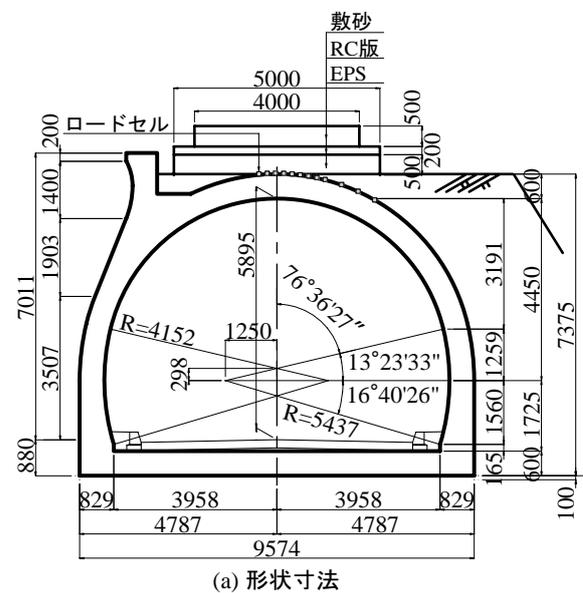
一方、我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、現在、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下、耐衝撃設計に関しても性能照査型設計法に移行すべく、土木学会構造工学委員会では小委員会を設置し検討に着手している。その中で、著者らは、重錘落下実験を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析^{5),6)}を試み、その適用性に関する検討を行っている。また、小型 RC 梁に関する解析手法を踏襲した場合の実規模 RC 桁への適用性⁷⁾に関する検討も行っている。さらに、三次元弾塑性衝撃応答解析法に基づいた実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、曲げ破壊型 RC 桁を対象にコンクリート要素の軸方向要素が基準の要素長よりも大きい場合に対して破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を評価する手法を提案⁸⁾している。

本研究では、三層緩衝構造を設置した実規模 RC 製アーチ構造の落石に対する耐衝撃挙動を把握することを目的に、実物トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施して実構造の挙動を把握することとした。実規模 RC 製アーチ構造の衝撃挙動に関する検討は、トンネル坑口部に緩衝工を設置しない場合と三層緩衝構造を設置した場合の重錘落下衝撃実験結果を比較することにより実施した。さらに、三層緩衝構造を設置した場合には、破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析も実施して、三層緩衝構造を用いた実規模 RC 製アーチ構

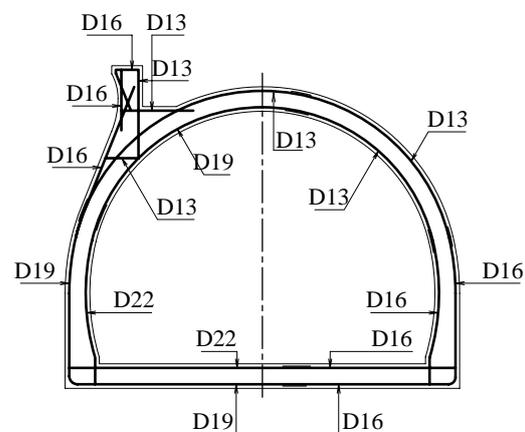
造への適用性についても検討を行っている。また、破壊エネルギー等価の概念を導入した三次元弾塑性衝撃応答解析法の三層緩衝構造を用いた場合の実規模 RC 製アーチ構造への適用性については、重錘落下衝撃実験結果と比較することにより検討を行った。検討項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、アーチ部の変位、RC 製アーチ構造本体や三層緩衝構造の RC 版のひび割れ分布である。

本実験で用いた三層緩衝構造の仕様は、設計要領⁹⁾に規定されている衝突エネルギー $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ までを対象として設計した値に基づいて決定している。なお、実験では最大衝突エネルギーを $E_k = 3,000 \text{ kJ}$ まで増加させている。

本研究の弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver.970)¹⁰⁾を用いている。また、本実物実験を実施したトンネル坑口は、別線ルートの完成に伴い平成



(a) 形状寸法



(b) 配筋状況

図-1 実験に供した実トンネル坑口部の形状寸法および配筋状況

表－1 実験および解析ケース一覧

実験ケース	三層緩衝工の有無	重錘質量 (kg)	荷重方法	落下高さ (m)	コンクリート強度 (MPa)	解析実施ケース
N-H5	無	3,000	単一	5	34.1	無
N-H7.5				7.5	32.9	
N-H10				10	27.8	
T-H10	有	10,000		10	36.1	有
T-H20				20		
T-H30				30		

14年度から廃道となっている259m区間を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体

図－1(a)には、衝撃実験や数値解析に用いた実トンネル坑口部の形状寸法、(b)図にはその配筋状況を示している。トンネル坑口部の断面形状において、覆工部材厚は600mm、上半内空半径は4,152mm、側壁部高さは1,725mm、道路軸方向の1ブロック延長は6,000mmである。覆工主鉄筋としてD13～D22、配筋筋としてD13をそれぞれ250mm間隔で配筋しており、かぶりは100mmとなっている。なお、鉄筋の材質は全てSD295Aである。三層緩衝構造は、最小構成である衝突エネルギー $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ までを対象とした、敷砂厚500mm、RC版厚200mm、EPS材厚500mmとしている。

表－1には、本実験および解析ケースの一覧を示している。実験ケースは、緩衝工を設置しない場合には3,000kg重錘を用い、荷重ブロックを変えて落下高さ5m、7.5m、10mの単一荷重実験を3ケース実施している。三層緩衝構造を設置する場合には10,000kg重錘を用いることとした。また、三層緩衝構造は、十分な緩衝効果が期待できることより、同一荷重ブロックで緩衝構造のみを未使用材と取り替え、落下高さ10m、20m、30mの単一荷重実験を3ケース実施した。数値解析については、三層緩衝構造を設置した場合の実験ケースを対象に3ケースについて実施している。表中のケース名の内、第一項目は三層緩衝構造の有無を示しており、NおよびTはそれぞれ無しおよび有りを意味している。第二項目はHの後に重錘の落下高さ(m)を付している。表中には試験体のトンネル坑口部の側壁部から採取した供試体の一軸圧縮強度も併せて示している。

2.2 実験方法

写真－2には実験状況を示している。実験は、質量3,000kgもしくは10,000kgの鋼製重錘をクローラク

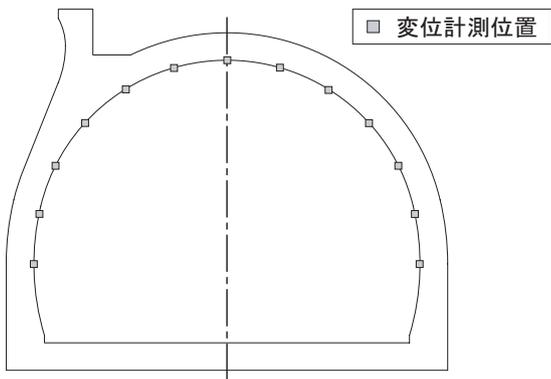


写真－2 実験状況

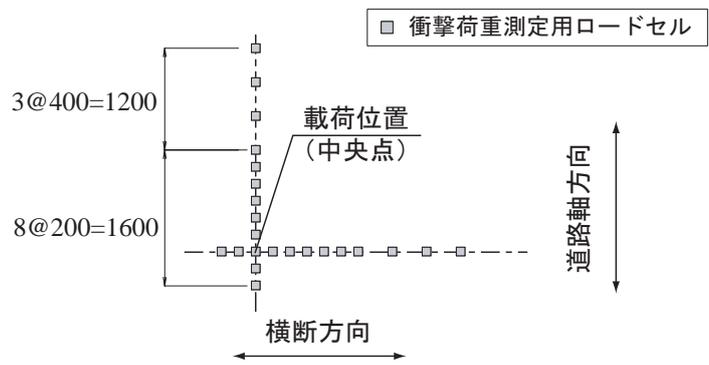
レーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、アーチ部中央点に自由落下させることにより行っている。三層緩衝構造に用いられる敷砂材の平均湿潤密度および平均含水比は、 $1,610 \text{ kg/m}^3$ 、13.8%である。また、芯材に用いたRC版は、形状寸法が $5.0 \times 5.0 \times 0.2 \text{ m}$ 、圧縮強度 $f'_c = 27 \text{ MPa}$ であり、設計要領⁹⁾に準拠して鉄筋比1%以上の複鉄筋配筋となるようにD22(材質SD345)を250mm間隔に配筋した。裏層材には密度 20 kg/m^3 のEPS材ブロックを用いている。重錘は、3,000kg重錘の場合には直径1,000mm、高さ970mmで、底部が半径800mm、高さ300mmの半球状のものを、また、10,000kgの場合には直径1,250mm、高さ950mmで、底部が半径1,000mm、高さ300mmの半球状のものをを用いることとした。なお、クレーン能力の限界が30mであることより、落下高さは30mまでとしている。

2.3 計測方法

図－2(a)、(b)には、それぞれ変位計測位置、伝達衝撃応力測定のためのロードセル設置位置図を示している。本実験の測定項目は、(1)重錘頂部表面に設置したひずみゲージ式加速度計(容量500G、応答周波数DC～5kHz)による重錘衝撃力、(2)非接触式レーザ変位計(容量500mm、応答周波数約1kHz)によるトンネル内面の変位、(3)覆工表面に凹凸が生じないように埋設された伝達衝撃応力測定用ロードセル(受圧径32mm、容量9.8MPa、応答周波数DC～1kHz)に



(a) 変位計測位置図



(b) 伝達衝撃応力測定平面位置図

図-2 計測位置

よる伝達衝撃応力(図-2(b)参照)である。なお、非接触式レーザ変位計は、トンネル内舗装上に組み立てた架台に設置し、着目点の水平および鉛直方向変位を計測している。実験時の各種応答波形は、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルレコーダにて一括収録を行っている。

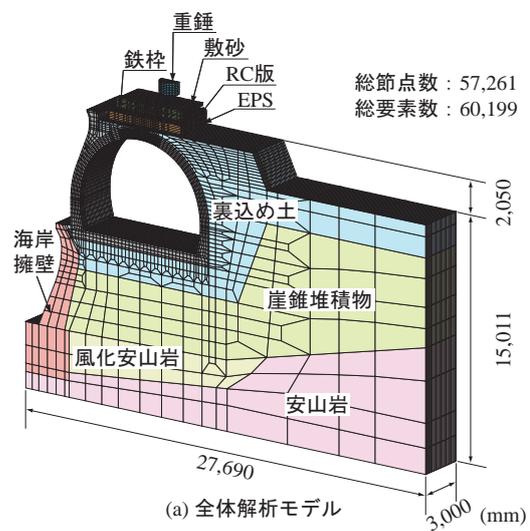
3. 解析仮定

3.1 数値解析モデル

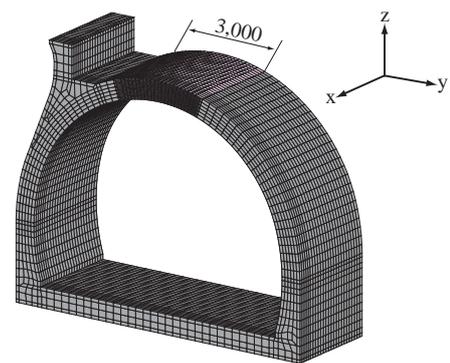
図-3には、数値解析モデルを示している。解析モデルは、要素分割状況が容易に把握できるように、(a)図には解析モデル全体、(b)図にはRCアーチ部の解析モデルを拡大して示している。

解析対象範囲は、山側に対してトンネル幅 10 m 以上の領域を考慮しており、海側に関しては実現場に則して海岸擁壁もモデル化している。また、地層はボーリング調査を実施して評価している。地盤部の解析対象範囲は、トンネルの高さ 8 m 程度以上の深さを考慮することとした。解析モデルは、構造物の対称性を考慮して、道路軸方向に 1/2 モデルとしている。本モデルの総節点数、総要素数は、それぞれ 57,261、60,199 である。

各要素において、鉄筋要素には剛性、断面積、重量を等価とした梁要素を適用して 4 点積分を、それ以外の要素には全て三次元固体要素を適用し、敷砂要素と EPS 要素には 8 点積分を採用し、その他の要素には 1 点積分を採用している。コンクリートの要素長は、断面方向には 250 mm 程度を基本長さとしている。なお、荷重点を中心に 3.0 m の範囲は、ひび割れが他の領域よりも多く発生するものと考えられることから、基本長さの 1/2 の 125 mm 程度とした。なお、全てのコンクリート要素には引張破壊エネルギー等価の概念⁸⁾を適用し、コンクリートの引張強度には要素長に対応した換算値を入力している。また、軸方向要素長は



(a) 全体解析モデル



(b) アーチ部拡大図

図-3 解析モデル

全て 125 mm としている。なお、敷砂と RC 版間、RC 版と EPS 材間、EPS 材とトンネル覆工間、裏込め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。

境界条件は底面および山側と谷側の側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

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*	2,350	25.0	0.167
敷砂	1,600	10.0**	0.060
コンクリート***	2,350	25.0	0.167
鉄筋***	7,850	206.0	0.300
EPS	20	0.0022	0.000
裏込め土(盛土)	2,000	0.68	0.450
崖錐堆積物	2,000	1.40	0.40
風化安山岩	2,000	1.80	0.40
安山岩	2,100	3.10	0.40
重錘	10,080	206.0	0.300

*: 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

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、敷砂の側面の拘束に関しては、実験を忠実に再現するために変形を許容している。コンクリート要素と鉄筋要素間は完全付着としている。減衰定数は、質量に比例する項のみを考慮することとし、最低次固有振動数に対して5.0%を設定した。なお、本研究では、重錘が三層緩衝構造の表層材である敷砂材に衝突した時点をも0msとし、アーチ構造の挙動が定常状態に至るまでの300ms間について数値解析を実施することとした。

3.2 材料物性モデル

表-2には、解析に用いた基準値としての物性値一覧を示している。なお、地盤の物性値については、ボーリング調査や現場試験結果の下に決定している。

図-4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。図-4(a)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¹¹⁾は、次式のように示される。

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

ここで、 σ_{sand} は平均応力(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。

図-4(b)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。コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側に対しては0.15%ひずみ時に圧縮強度で降伏するバイリニア型とし、引張側に対しては応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないカットオフを定義している。本研究では、圧縮試験から得られた圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力

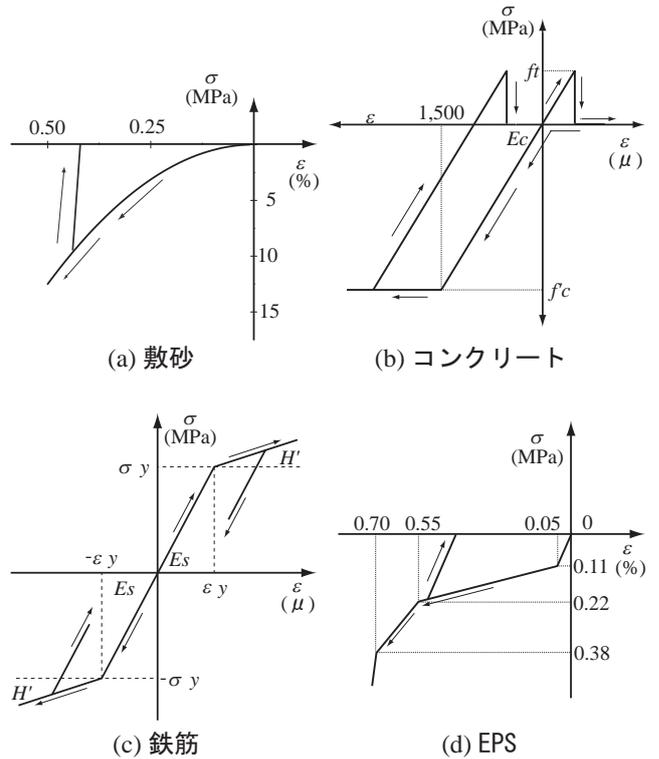


図-4 材料物性モデル

とした。引張側の引張強度 f_t に関しては、1要素の周方向に1個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、周方向要素長が異なる場合においても等しいひずみエネルギーでひび割れが発生するように(引張破壊エネルギー等価の概念)、各コンクリート要素に対して仮定の引張強度を設定することとした。ここでは、断面方向要素長250mm、125mmの仮想引張強度として、文献8)と同様に基準要素長を35mmと設定し、それぞれ $f_{t250} = 0.715$ MPa、 $f_{t125} = 1.011$ MPaと設定した。

図-4(c)には、RC製アーチ構造本体および三層緩衝構造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。なお、 E_s は鉄筋の弾性係数である。

図-4(d)には、EPS材の要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。応力-ひずみ関係は、静的な材料試験より得られた特性値を用い、5%ひずみ時の弾性限界応力を0.11MPa、55%ひずみ時の応力を0.22MPa、70%ひずみ時の応力を0.38MPaとするテトラ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2.2MPa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、海岸擁壁のコンクリー

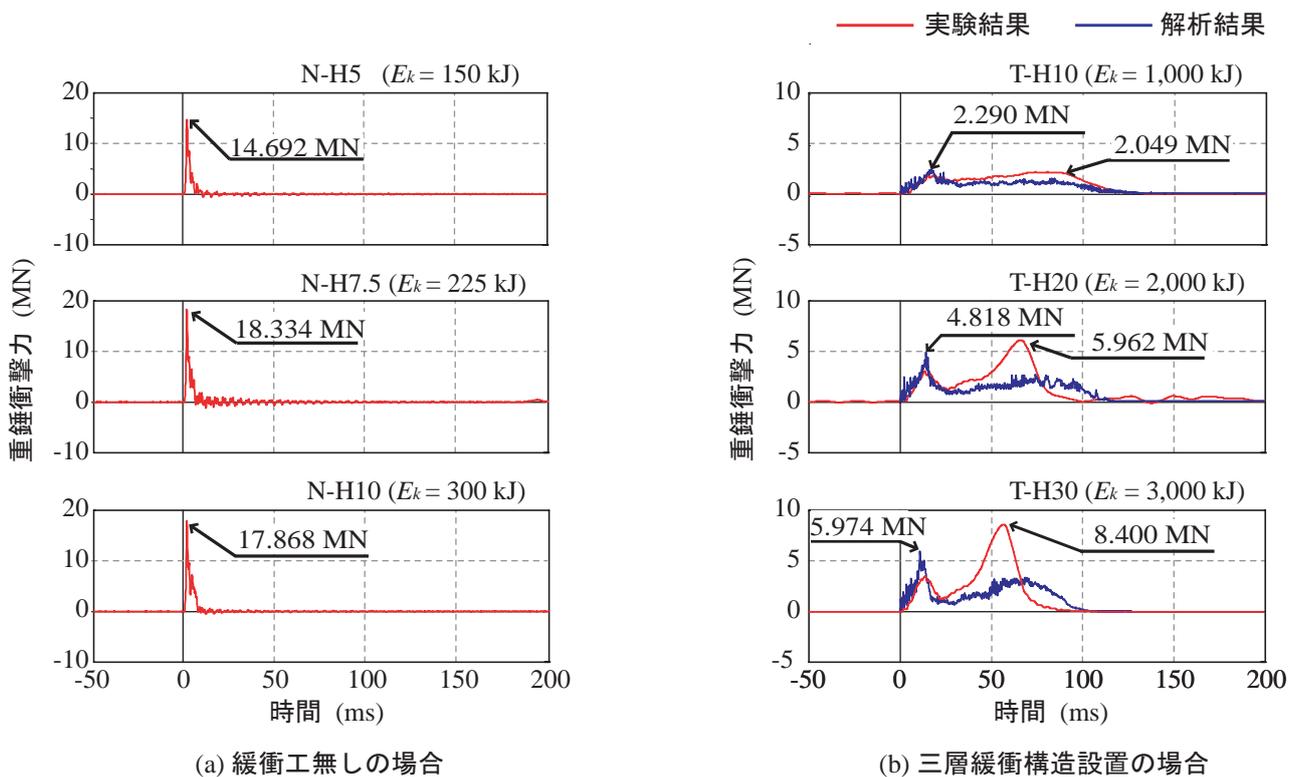


図-5 重錘衝撃力波形

ト、裏込め土、重錘および地盤は弾性体として仮定している。

4. 実験結果と解析結果

4.1 重錘衝撃力波形

図-5には、重錘衝撃力波形を示している。(a)図には緩衝工無しの場合、(b)図には三層緩衝構造を用いた場合の実験結果と解析結果を併せて示している。なお、実験結果の重錘衝撃力は、重錘加速度に重錘質量を乗じて評価している。また、解析結果の重錘衝撃力は、重錘と敷砂の接触面での発生鉛直方向応力を集積して評価している。

図-5(a)より、緩衝工無しの場合の重錘衝撃力の波形性状は、衝突初期に最大応答値を示し、波形継続時間が6 ms程度で急激に零レベルに減衰している。また、最大応答値に着目すると、衝突エネルギーが増加しているにもかかわらずN-H7.5とN-H10とでは、同程度の最大応答値を示している。このことは、載荷点近傍の損傷が著しく、塑性状態に推移していることを暗示している。

図-5(b)より、三層緩衝構造を用いる場合に関する重錘衝撃力の実験結果において、波形性状に着目すると、T-H10の場合を除き、衝突初期に継続時間が30 ms程度の正弦半波状の第1波と継続時間が70～75 ms程度の正弦半波状の第2波が重ね合わされた分布

性状を示している。既往の研究¹⁾より、第1波目は重錘が敷砂貫入時に発生したものであり、第2波目は主に重錘が締め固められた敷砂を介して、剛性の小さいEPSブロック上に設置された芯材RC版に衝突する際に発生したものと推察される。

一方、T-H10の場合には、第1波目と第2波目の振幅が類似し、全体として継続時間が120 ms程度の台形状波形を呈している。これは、入力エネルギーが相対的に小さいため、重錘の敷砂への貫入量が小さく、芯材RC版の衝突衝撃力も小さくなることにより、裏層EPS材の変形によってゆるやかにエネルギーが吸収されるためと推察される。

また、最大応答値に着目すると、第1波目においては、T-H10に比較してT-H20およびT-H30は衝突エネルギーが2～3倍に増加するのに対して、最大応答値は1.6～2.0倍程度の増加に留まっている。しかしながら、第2波目においては、2.9～4.2倍と急激に増加している。さらに、衝突エネルギーの増加に伴い、波動継続時間も若干短くなっている。このことは、本三層緩衝構造が設計要領⁹⁾に規定されている衝突エネルギーT-H10の $E_k = 1,000$ kJまでを対象とする最小構成としているが、衝突エネルギーをT-H30の $E_k = 3,000$ kJと増加させる場合には、重錘のRC版への貫入量が大きく、かつEPS材厚が薄いことにより衝撃エネルギーを十分に吸収できず、比較的大きな衝撃力が覆工に伝達されるためと考えられる。

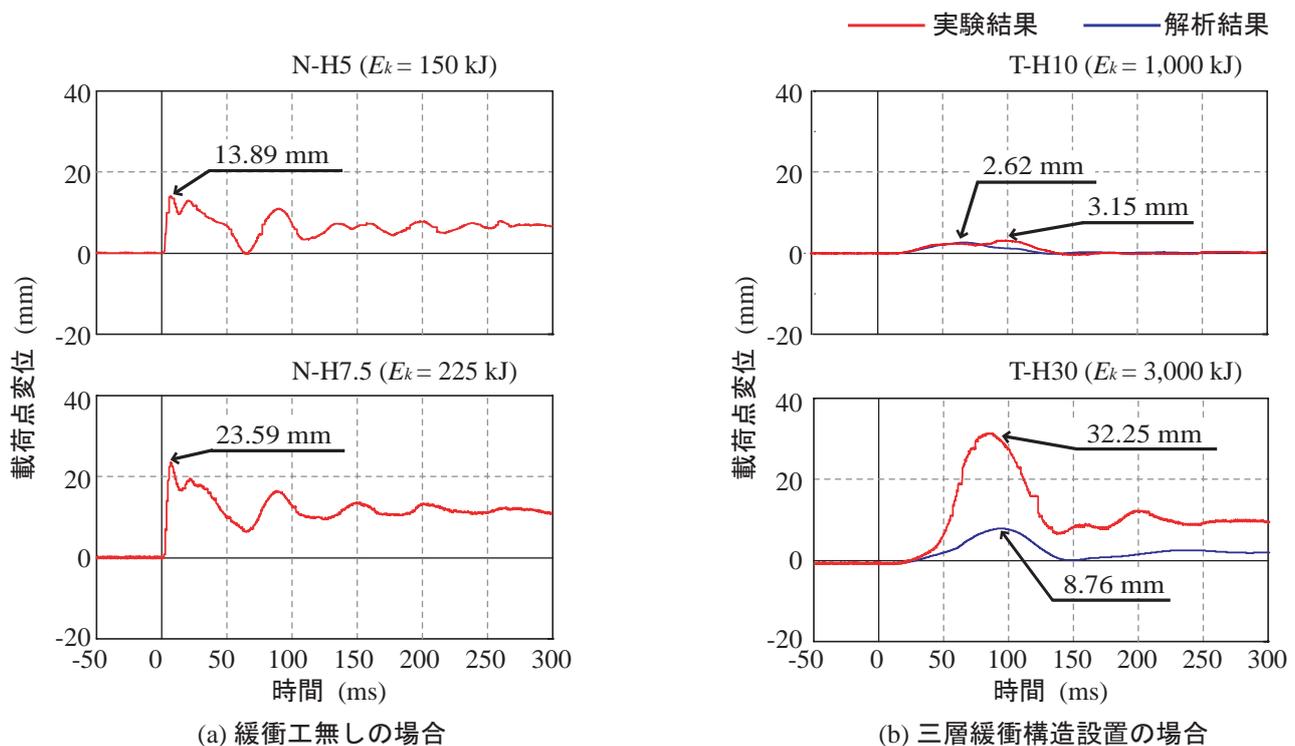


図-6 荷点直下におけるアーチ構造内の変位波形

実験結果と解析結果を比較すると、T-H10では、波形性状および最大応答値が精度良く再現されている。しかしながら、T-H20、T-H30の場合には、波形性状は両者類似の傾向を示すものの、解析結果の波形継続時間は実験結果に比べて2割程度長く、最大応答値においても第1波目が第2波目より大きな応答値を示している。このことは、三層緩衝構造が設計要領⁹⁾に規定されている以上の衝突エネルギーを受ける場合には、提案の数値解析手法は、重錘がRC版へ大きく貫入することによる著しい損傷やEPS材の局所的な大変形を精度良く再現できないことを暗示している。

緩衝工無しの場合と三層緩衝構造を用いた場合の実験値を比較すると、三層緩衝構造を設置する場合には緩衝工無しの場合に比較して、衝突エネルギーが10倍以上であるにもかかわらず重錘衝撃力の最大応答値が1/2程度以下となり、かつその波形継続時間が20倍以上長く示されている。これは、RC製アーチ構造に三層緩衝構造を用いる場合においても、十分に緩衝効果が発揮されることを意味している。

4.2 鉛直変位波形

図-6には、アーチ構造内縁の荷点直下の鉛直方向変位波形を示している。(a)図には緩衝工無しの場合、(b)図には三層緩衝構造を用いた場合を実験結果と比較して示している。なお、N-H10の変位波形は、荷点近傍アーチ内縁かぶりコンクリートが円形状に剥落したため計測されていない。

図-6(a)より、緩衝工無しの場合の変位波形性状は、重錘の衝突直後に早期に立ち上がり、8ms経過後に最大応答値を示した後、減衰自由振動状態に移行している。また、5~10mm程度の残留変位が発生している。これは、RC製アーチ構造に直接重錘を衝突させたことにより、荷点を中心に押抜きせん断破壊面が形成されたことによるものと推察される。

図-6(b)より、三層緩衝構造を用いる場合の変位波形性状は、正弦半波状を呈しており、重錘の衝突直後から20~30ms程度経過後に波形が立ち上がり、60ms程度以降に最大応答値を示している。また、T-H10の場合には残留変位は発生していないが、T-H30の場合には10mm以上の残留変位が発生している。しかしながら、コンクリートの剥落等も発生せず、未だ終局に至っていないことが確認される。

以上のことから、緩衝工無しの場合には、衝突エネルギー $E_k=225$ kJ程度以上において終局に至る傾向を示しているのに対して、本三層緩衝構造の対象エネルギー $E_k=1,000$ kJを用いる場合には、衝撃エネルギー $E_k=3,000$ kJ入力においても未だ終局に至らないことが明らかとなった。これより、本三層緩衝構造を用いることにより、緩衝工無しの場合に比べエネルギー的に13倍以上の耐衝撃力の向上が見込まれるものと判断される。

解析結果と実験結果を比較すると、T-H10の場合には、波形性状と応答値は両者精度良く対応している。一方、T-H30の場合には、波形性状は両者で同様の傾

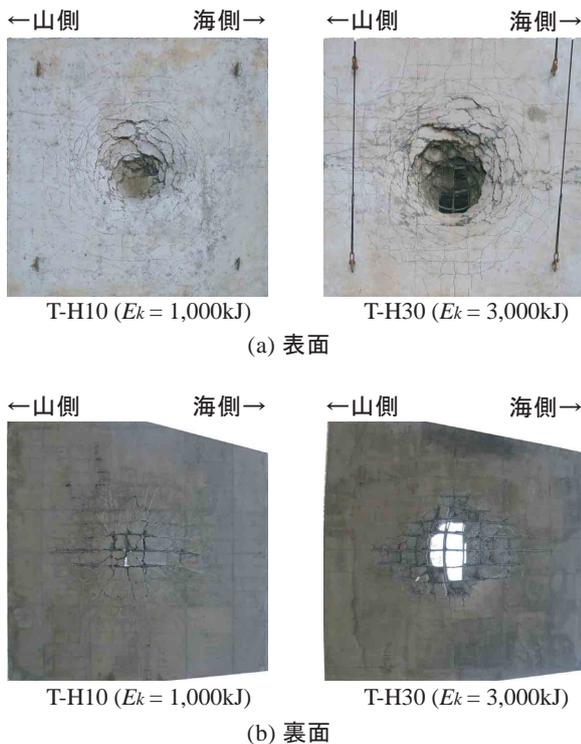


写真-3 芯材 RC 版のひび割れ状況写真

ためと推察される。

緩衝工無しの場合と三層緩衝構造を用いる場合の実験値を比較すると、三層緩衝構造を用いる場合には緩衝工無しの場合に比べ、衝突エネルギーが10倍以上であるにもかかわらず覆工コンクリートの裏面剥離が発生していないこと、後述する広範囲に発生する覆工コンクリートのひび割れ分布などから、三層緩衝構造は設計要領⁹⁾に規定されている3倍の衝突エネルギーに対しても荷重分散効果やエネルギー吸収能が十分に期待できること等が推察される。

4.3 変位分布

図-7には、それぞれN-H7.5、T-H10、T-H30の場合における荷点中心部の断面方向内縁の法線方向変位分布を時系列で表している。なお、図には荷直後から $t = 150$ msまでの分布を変形倍率を100倍にして表示している。

図-7(a)より、N-H7.5の場合は、荷点近傍のみが内側に大きく変形し、 $t = 8$ ms程度で最大値に達し、残留変位も10 mm程度発生している。

図-7(b)より、T-H10の場合は、実験結果と解析結果共に荷点近傍が内方に、側壁上端近傍部では外方に変形する様子が示されている。残留変位は発生していない。

図-7(c)より、T-H30の場合の実験結果は、荷点近傍において $t = 60$ ms経過以降から内方への変位が顕在化している。その後、側壁上端近傍部では外方への変位が増大している。 $t = 130$ ms経過後には変形が

ほぼ落ち着き、最大で10 mm程度の残留変位が発生している。解析結果において、アーチ構造全体の変位に関する挙動は、実験結果と同様な傾向を示すものの、応答値は小さい。このことから、三層緩衝構造を用いる場合には、荷重分散効果が十分に発揮されアーチ構造全体で挙動することによって、耐衝撃性能が向上するものと推察される。また、三層緩衝構造は設計要領⁹⁾に規定されている衝突エネルギー範囲内の場合には、本数値解析手法を用いることによってRC製アーチ構造の全体挙動を精度良く再現可能であることが明らかになった。

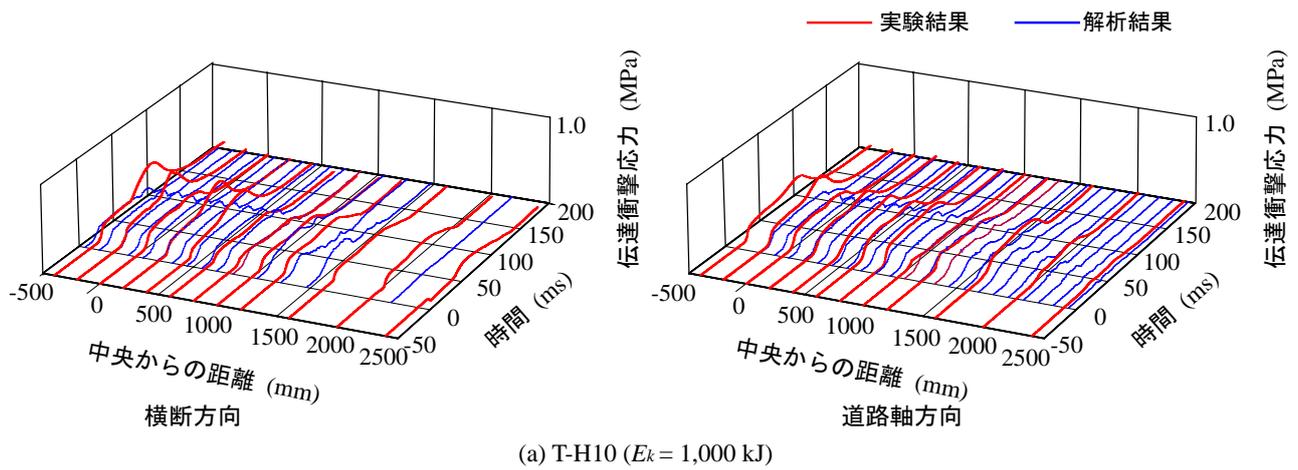
4.4 ひび割れ発生状況

図-8(a)および(b)には、それぞれN-H10とT-H30の場合における実験後のトンネル坑口部内縁ひび割れ状況を、見上げ図の形で示している。

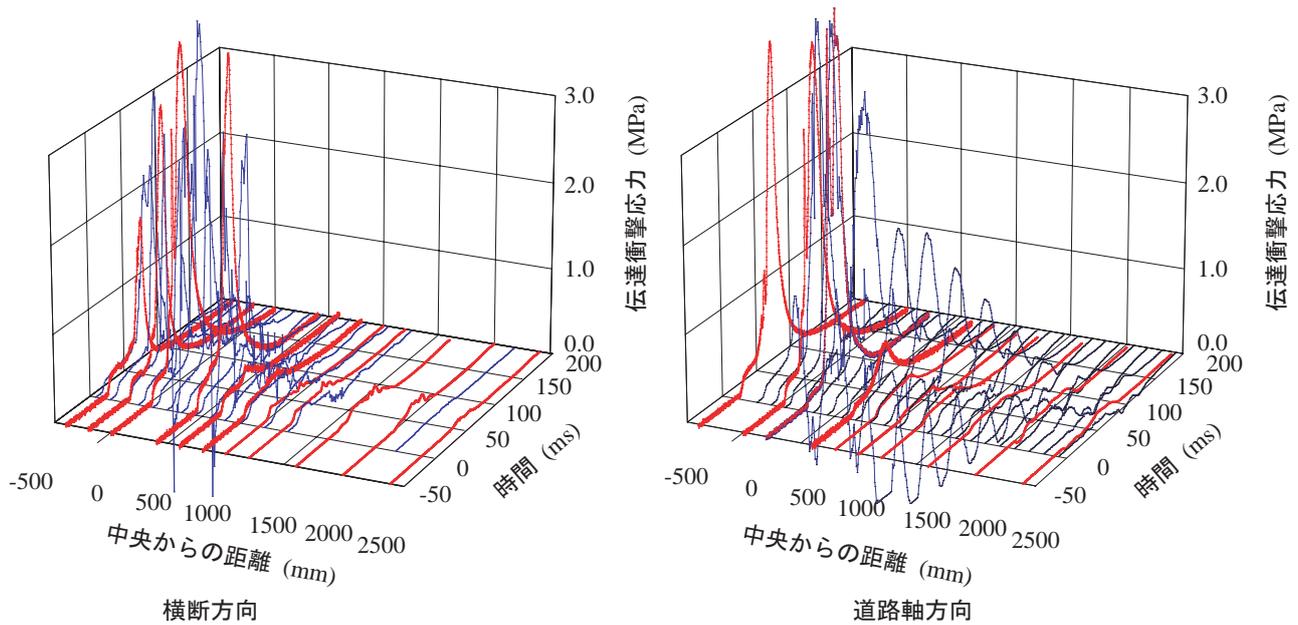
図-8(a)より、N-H10の場合には、荷点を中心として直径約2.0 mのアーチ内縁かぶりコンクリートがだ円形状に剥落しかつ放射状のひび割れが発生している。これは、荷点を中心に押抜きせん断破壊面が形成され、脆性的な破壊が生じたことによるものと推察される。

図-8(b)より、T-H30の場合は、荷点を中心幅3.0 m程度の範囲に放射状のひび割れが分布している。また、本三層緩衝構造の対象エネルギー $E_k = 1,000$ kJを大きく超える $E_k = 3,000$ kJの衝突エネルギーを荷したにもかかわらず、コンクリートの剥落はみられない。このことは、三層緩衝構造を用いることにより、設計要領⁹⁾に規定されている3倍の衝突エネルギーに対しても荷重分散効果を有しているため、荷点を中心とした押抜きせん断破壊面が形成されず、脆性的な破壊を制御することが可能であることを意味している。

写真-3(a)および(b)には、T-H10とT-H30の場合における実験後の三層緩衝構造の芯材であるRC版の表面と裏面のひび割れ状況写真を示している。(a)図より、T-H10の場合には、荷点を中心として直径約0.8 mの領域が大きく損傷変形しているが、コンクリートの剥落が発生せず、また重錘径が1.25 mであることから重錘の貫通も生じていない。(b)図より、T-H30の場合には、荷点を中心直径約1.5 mの領域が大きく損傷変形し、コンクリートが重錘径と同程度の領域で剥落しているものの鉄筋の破断は発生していないことから、重錘は貫通していないことが確認できる。このことから、本三層緩衝構造が設計要領⁹⁾に規定されている衝突エネルギー内であれば、RC版の荷重分散効果が十分に発揮されること。また、規定されている3倍の衝突エネルギーまでは、RC版の荷重分散効果がある程度期待できることが明らかになった。



(a) T-H10 ($E_k = 1,000$ kJ)



(b) T-H30 ($E_k = 3,000$ kJ)

図-9 伝達衝撃応力分布波形

4.5 伝達衝撃応力分布

図-9(a)および(b)には、T-H10とT-H30の横断方向および道路軸方向における各実験結果と解析結果の三次元的な伝達衝撃応力分布波形を比較して示している。図の縦軸は応力振幅、奥行方向は時間を表しており、重錘衝突の50 ms前からの波形分布を示している。また、横軸は荷点直下を原点とした道路軸方向のロードセルの位置を示している。

図-9(a)より、T-H10の実験の場合には横断方向の伝達衝撃応力が時間的にほぼ台形状の分布性状を示している。また、0.1 MPa程度以上の応力が構造全体に発生し、アーチ構造の場合においても平坦な剛基礎上¹⁾の場合と同様に荷重分散性に優れていることが分かる。道路軸方向に関しては、荷点中央部において0.4 MPa程度の大きな応力の発生は確認できるものの、荷重分散傾向は横断方向とほぼ同様である。主波動の継続時間に関しては、平坦な剛基礎上の場合¹⁾に

は60～80 ms程度であるのに対して、本実験の場合には120 ms程度となっている。これより、本実験における伝達衝撃応力の継続時間は、平坦な剛基礎上の場合に比較して1.5～2倍程度長くなっていることが分かる。これは、アーチ構造の全体応答が大きく影響していることによるものと推察される。

実験結果と数値解析結果を比較すると、伝達衝撃応力の分布性状や主波動の継続時間は良く対応していることが分かる。また、伝達衝撃応力値も解析結果が実験結果に比較して一部僅かに小さな値を示している箇所が見受けられるものの、全体的には精度良く再現されているものと判断される。

図-9(b)のT-H30に関する実験結果から、荷点中央部において2 MPa以上の伝達衝撃応力が発生していることが分かる。これは、本三層緩衝構造の対象エネルギー $E_k = 1,000$ kJより3倍の衝突エネルギー $E_k = 3,000$ kJが作用したことによるものと推察される。

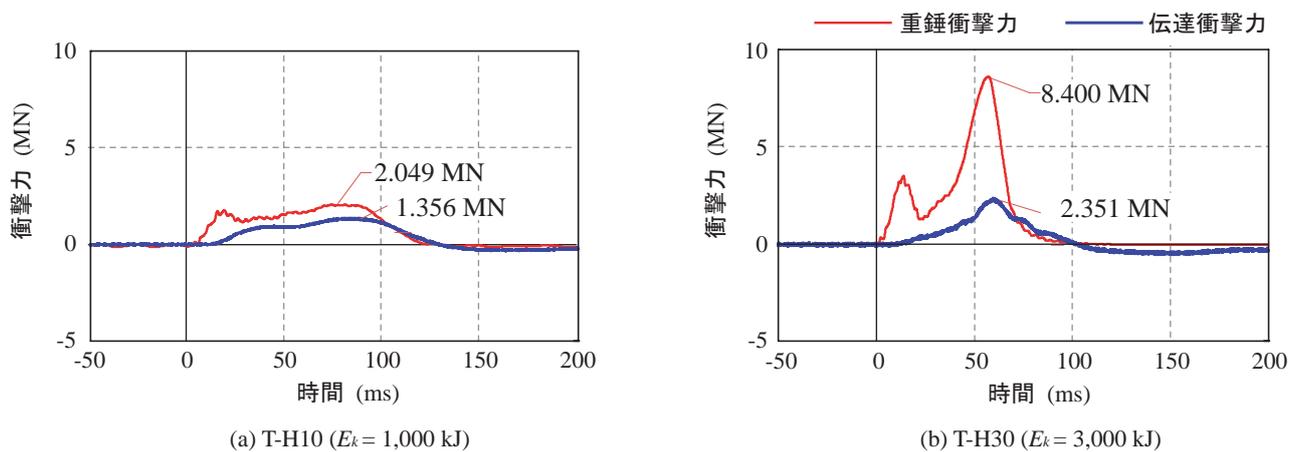


図-10 実験結果の衝撃力波形の比較

しかしながら、0.1 MPa 程度の伝達衝撃応力は T-H10 の場合と同様に横断方向および道路軸方向ともに構造全体に発生している。このことから、本三層緩衝構造の対象エネルギーの3倍程度の衝突エネルギーを入力させる場合においても、アーチ構造全体に衝撃荷重が分散することが明らかになった。

実験結果と解析結果を比較すると、解析結果の波形は大きな振幅を示し、実験結果とは伝達衝撃応力の分布性状や主波動の継続時間において大きく異なる値を示している。

これは、実験結果と数値解析結果において以下のような差が生じたことにより、提案の数値解析手法では伝達衝撃応力分布を精度よく再現できないものと判断される。すなわち、実験結果の場合には、重錘先端下面の EPS 材は実験終了後においてもある程度厚さが確保されている。これに対して、数値解析結果の場合には、重錘先端近傍部の EPS 材要素が要素厚零程度までの圧壊の状態を呈し、応力が過度に集中化している。

以上のことから、三層緩衝構造を用いた実規模 RC 製アーチ構造に対する重錘落下時の耐衝撃挙動は、三層緩衝構造の能力が設計要領⁹⁾に規定されている対象エネルギー範囲内の場合には、提案の引張破壊エネルギー等価の概念を導入した三次元弾塑性衝撃応答解析法を適用することによって、適切に評価可能であることが明らかになった。

4.6 衝撃力波形

図-10(a) および (b) には、T-H10、T-H30 に関する実験結果の重錘衝撃力と伝達衝撃力の波形分布を比較して示している。なお、伝達衝撃力は、伝達衝撃応力が載荷点中央部に関して軸対称に分布するものと仮定し、応力を集積評価している。

図-10(a) より、T-H10 の場合の波形性状は両波形とも台形分布状となっていることが分かる。また、伝

達衝撃力波形は重錘衝撃力波形に対して 15 ms 程度波形の立ち上がりに遅れが生じている。これは、芯材 RC 版の損傷が軽微であることより、重錘、敷砂、芯材 RC 版が EPS ブロック上で一体として挙動していることを暗示している。最大値に着目すると、伝達衝撃力が重錘衝撃力の 3/5 程度の値を示している。

図-10(b) より、T-H30 の場合の波形性状は、T-H10 の波形性状と異なり、重錘衝撃力波形は継続時間が 100 ms 程度の正弦半波波形と周期が 45 ms 程度の 2 波の正弦波が合成された分布を示している。一方、伝達衝撃力波形は、三角形の分布波形を示している。また、重錘衝撃力波形の立ち上がりが急激であるのに対して、伝達衝撃力波形はゆるやかに増加する傾向を示している。これは、T-H30 の場合には入力エネルギーが著しく大きいことにより、重錘が敷砂を介して芯材 RC 版に対しても著しい損傷を与えるため、変動の大きい衝撃力波形分布をしてしているのに対して、伝達衝撃力波形分布は EPS 材ブロックの塑性変形量が大きいことにより、依然としてなめらかな波形分布を示すことによるものと推察される。最大値に着目すると、伝達衝撃力は重錘衝撃力の 1/4 程度の値を示しており、効率的に衝撃力が緩和されていることが分かる。

T-H10 と T-H30 の最大衝撃力を比較すると、T-H30 の場合は衝突エネルギーが3倍となっているのに対して、重錘衝撃力は4倍程度となっているものの、伝達衝撃力は1.7倍程度に低減している。このことから、三層緩衝構造は、設計要領⁹⁾に規定されている3倍の衝突エネルギーに対しても十分な緩衝効果を持っていることが分かる。

5. まとめ

本研究では、三層緩衝構造を設置した実規模 RC 製アーチ構造に関する落石の衝撃挙動を把握することを

目的に、実物トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施して実構造の挙動を把握することとした。実規模 RC 製アーチ構造の耐衝撃挙動に関する検討は、トンネル坑口部に緩衝工を設置しない場合と三層緩衝構造を設置する場合の重錘落下衝撃実験結果を比較することにより実施した。さらに、三層緩衝構造を設置する場合には、破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を評価する三次元弾塑性衝撃応答解析も実施し、三層緩衝構造を用いた実規模 RC 製アーチ構造への適用性についても検討を行っている。本研究より得られた結果を整理すると、以下のように示される。

実験結果より

- (1) 緩衝工を設置しない場合には RC 製アーチ構造体に載荷点を中心とした押抜きせん断破壊面が形成され終局に至るが、三層緩衝構造を設置する場合には荷重分散効果が十分に発揮され載荷点を中心とした押抜きせん断破壊面が形成されず、アーチ構造全体で挙動するため、耐衝撃性能が向上する。
- (2) 三層緩衝構造として対象エネルギー $E_k = 1,000$ kJ の最小構成を用いた場合でも、緩衝工無しの場合に比べ、エネルギー的に 13 倍以上の耐衝撃力性能の向上が見込まれる。
- (3) 三層緩衝構造は、設計要領⁹⁾に規定されている 3 倍程度の衝突エネルギーに対しても十分な緩衝効果を保持していることが明らかになった。

解析結果より

- (4) 三層緩衝構造を用いた実規模 RC 製アーチ構造に関する重錘落下時の耐衝撃性は、三層緩衝構造の能力が設計要領⁹⁾に規定されている入力エネルギーの範囲内において、提案の破壊エネルギー等価の概念を導入した三次元弾塑性衝撃応答解析手法を用いることにより、適切に評価可能である。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室の千葉知子さんに多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表

します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの耐衝撃設計，1998.11
- 2) 川瀬良司，今野久志，牛渡裕二，岸 徳光：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.871-876，2005.6
- 3) 川瀬良司，岸 徳光，今野久志，岡田慎哉，鈴木健太郎：小型 RC アーチ模型の耐衝撃挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1191-1202，2007.4
- 4) 川瀬良司，岸 徳光，今野久志，岡田慎哉：小型 RC アーチ梁模型の衝撃応答特性に関する数値解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.847-852，2006.6
- 5) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.215-233，1999.4
- 6) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004.1
- 7) 岸 徳光，A.Q.Bhatti，今野久志，岡田慎哉：重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1261-1272，2006.3
- 8) 岸 徳光，A.Q.Bhatti，三上 浩，今野久志，岡田慎哉：破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1227-1238，2007.3
- 9) 北海道開発技術センター：道路防災工調査設計要領（案）落石対策編，2001.3
- 10) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation，2006.3
- 11) 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

(2007 年 9 月 18 日受付)