

(9) 三層緩衝構造を設置した実規模 RC アーチ構造の重錘落下衝撃実験

A full-scale falling-weight impact test
on arch-type RC tunnel portal with three-layered absorbing system

川瀬 良司*, 保木 和弘**, 高橋 浩司***, 岡田 慎哉****, 岸 徳光*****
Ryoji Kawase, Kazuhiro Hoki, Koji Takahashi, Sin-ya Okada, 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) (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)
*** (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)
****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)
*****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)

Key Words : three-layered absorbing system, tunnel portal, absorbing-effects, falling-weight impact test
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

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。

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。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。

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

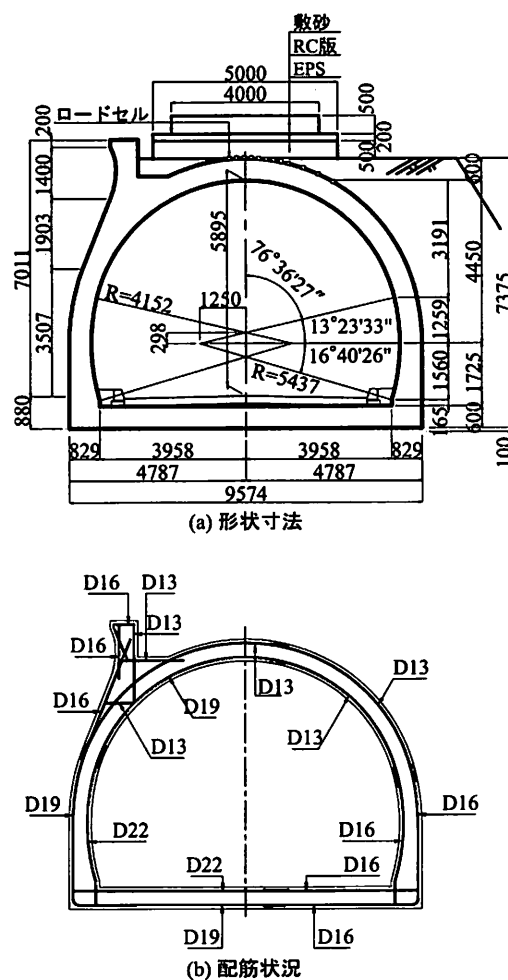
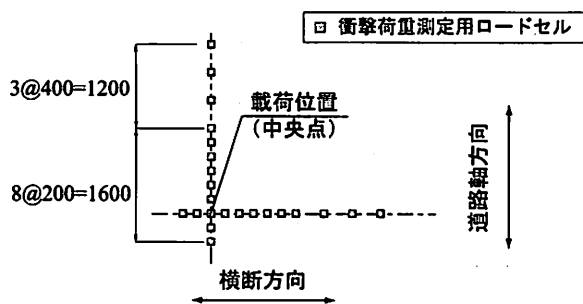


図-1 実験に供した実トンネル坑口部の形状寸法および配筋状況

表一 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)	載荷方法	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		



図一 伝達衝撃応力測定位置

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。検討項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、アーチ構造内縁の載荷点直下の鉛直方向変位、アーチ構造本体の内縁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²⁾に規定されている衝突エネルギー $E_k = 1,000$ 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 $E_k = 3,000$ kJ まで増加させている。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 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

図一 1(a) には、衝撃実験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 600 mm、上半内空半径は 4,152 mm、側壁部高さは 1,725 mm、道路軸方向の 1 ブロック延長は 6,000 mm である。覆工主鉄筋として D13 ~ D22、配力筋として D13 をそれぞれ 250 mm 間隔で配筋しており、かぶりは 100 mm 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 $E_k = 1,000$ kJ までを対象とした、敷砂厚 500 mm、RC 版厚 200 mm、EPS 材厚 500 mm としている。

表一 1 には、本実験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 3,000 kg 重錘を用い、載荷ブロックを変えて落下高さ 5 m、7.5m、10 m の単一載荷実験を 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 10,000 kg 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、同一載荷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 10 m、20 m、30 m の単一載荷実験を 3 ケース実施した。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

実験は、質量 3,000 kg もしくは 10,000 kg の鋼製重錘をクローラーク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、 $1,610$ kg/m³、13.8% である。また、芯材に用いた RC 版は、形状寸法が $5.0 \times 5.0 \times 0.2$ m、圧縮強度 $f_c = 27$ MPa であり、設計要領²⁾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 250 mm 間隔に配筋した。裏層材には密度 20 kg/m³ の EPS 材ブロックを用いている。重錘は、3,000 kg の場合には直径 1,000 mm、高さ 970 mm で、底部が半径 800 mm、高さ 300 mm の半球状のものを、また、10,000 kg の場合には直径 1,250 mm、高さ 950 mm で、底部が半径 1,000 mm、高さ 300 mm 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 30 m であることより、落下高さは 30 m までとしている。

2.3 計測方法

図一 2 には、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 500 G, 応答周波数 DC ~ 5 kHz) による重錘衝撃力、(2) 非接触式レーザ変位計 (容量 500 mm, 応答周波数約 1 kHz) によるアーチ構造内縁の載荷点直下の鉛直方向変位、(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 32 mm, 容量 9.8 MPa, 応答周波数 DC ~ 1 kHz) による伝達衝撃応力 (図一 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。

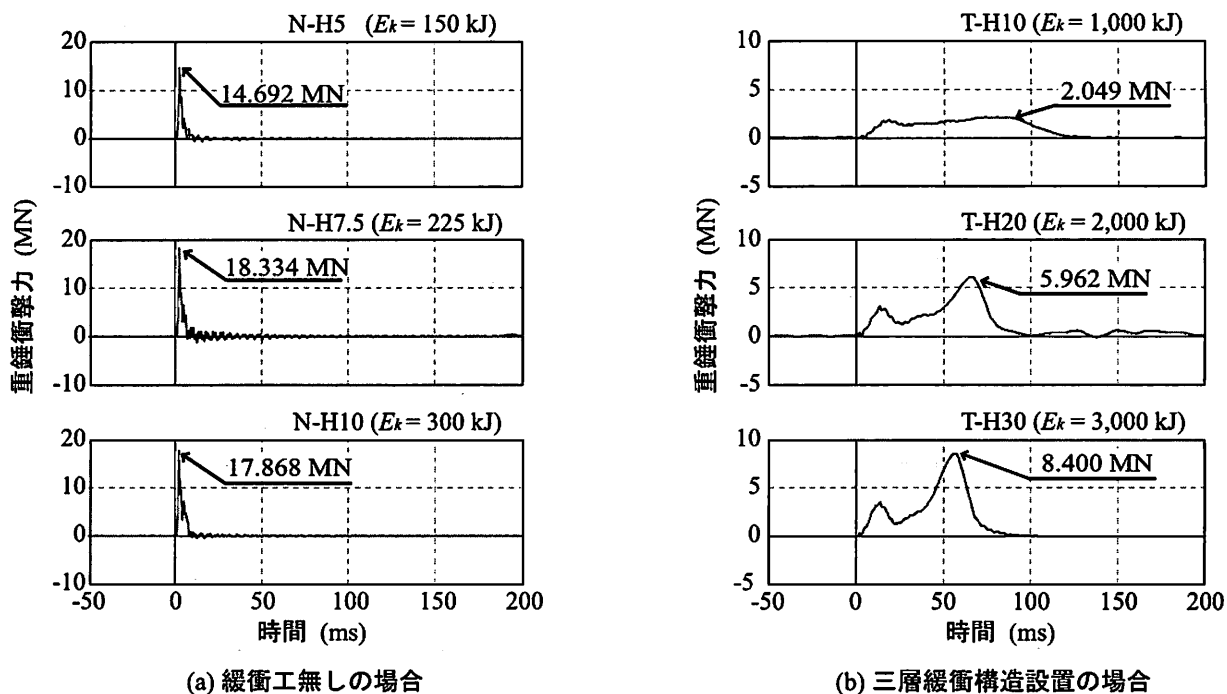


図-3 重錘衝撃力波形

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力波形

図-3(a), (b)には、それぞれ緩衝工無しの場合、三層緩衝構造を用いた場合の重錘衝撃力波形を示している。なお、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。

図-3(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6ms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関わらず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、载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-3(b)より、三層緩衝構造を用いる場合の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30ms程度の正弦半波状の第1波と継続時間が70~75ms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120ms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²⁾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に、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。

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。

3.2 鉛直変位波形

図-4には、アーチ構造内縁の载荷点直下の鉛直方

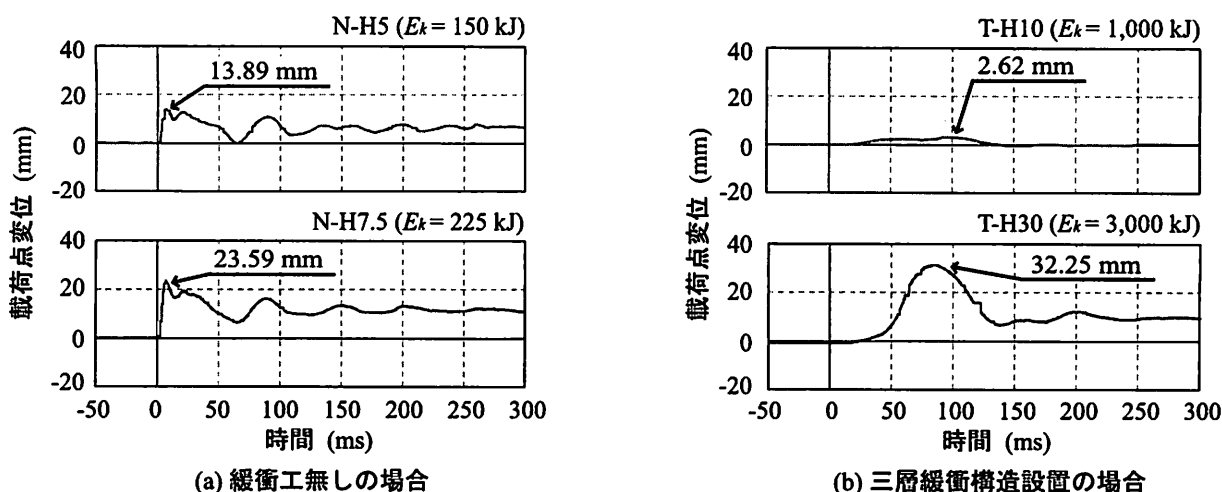


図-4 載荷点直下におけるアーチ構造内の変位波形

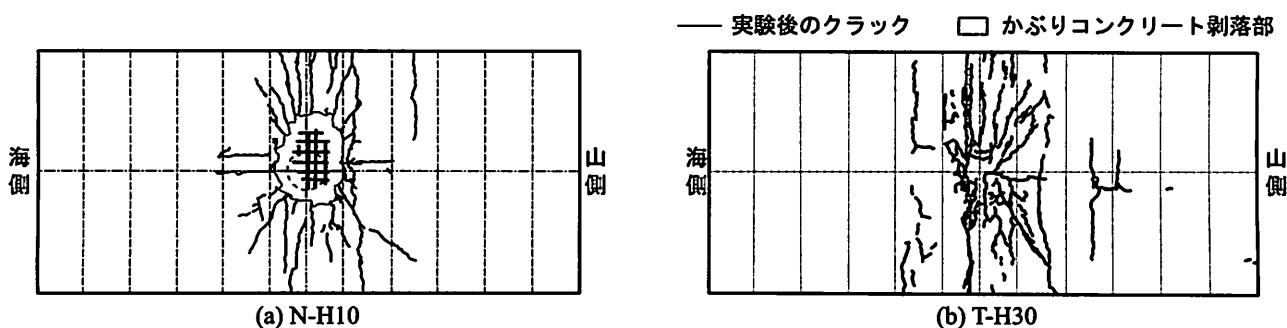


図-5 本体のひび割れ状況

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示している。なお、N-H10の変位波形は、載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-4(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、載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-4(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。

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、緩衝工無しの場合には衝突エネルギー

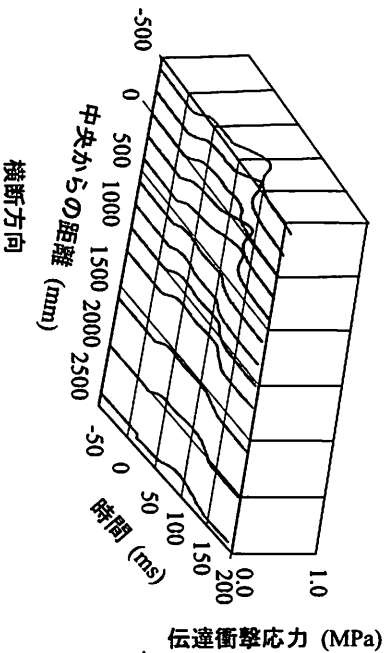
ギー $E_k = 225$ kJ 程度以上において終局に至る傾向を示しているのに対して、対象エネルギー1,000kJまでとなる三層緩衝構造を用いる場合には衝突エネルギー $E_k = 3,000$ kJ においても覆工コンクリートの裏面剥離が発生せず未だ終局に至らないことが明らかとなった。また、後述する広範囲に発生する覆工コンクリートの内縁ひび割れ分布などから、本三層緩衝構造を用いることにより、緩衝工無しの場合に比べエネルギー的に13倍以上の耐衝撃性能の向上が見込まれるものと判断される。

以上のことから、三層緩衝構造は設計要領²⁾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。

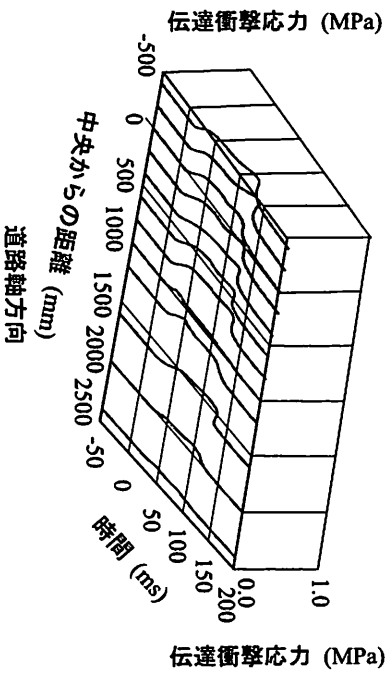
3.3 ひび割れ発生状況

図-5(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。

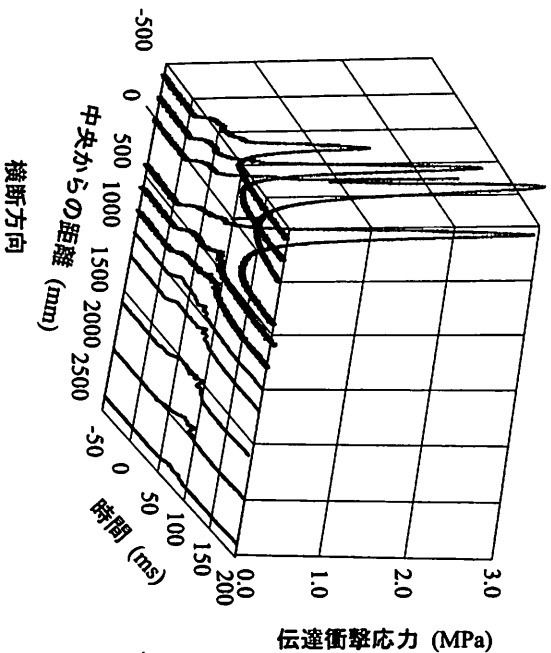
図-5(a)より、N-H10の場合には、載荷点を中心として直径約2.0mのアーチ内縁かぶりコンクリートがだ円形状に剥落しかつ放射状のひび割れが発生して



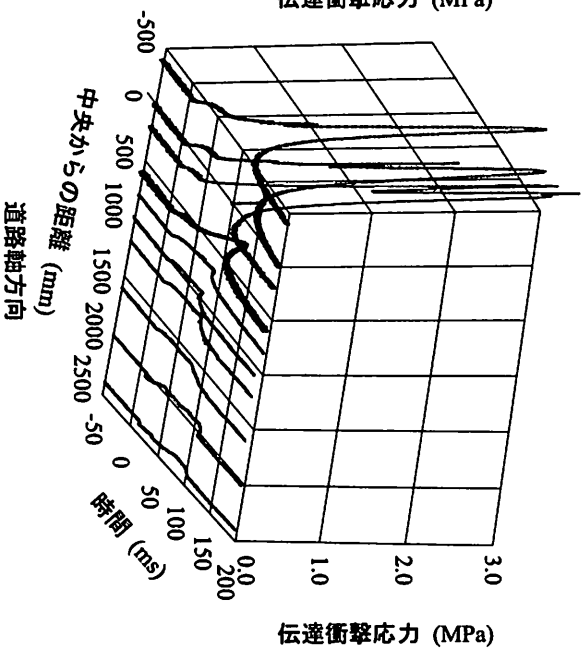
(a) T-H10 ($E_k = 1,000 \text{ kJ}$)



伝達衝撃応力 (MPa)



(b) T-H30 ($E_k = 3,000 \text{ kJ}$)



伝達衝撃応力 (MPa)

図-6 伝達衝撃応力分布波形

いる。これは、載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-5(b)より、T-H30の場合は、載荷点を中心に幅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 $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ を大きく超える $E_k = 3,000 \text{ kJ}$ の衝突エネルギーを載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²⁾に規定されている3倍の衝突エネルギーに対してでも荷重分散効果を有しているため、載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。

このことから、本三層緩衝構造が設計要領²⁾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。

3.4 伝達衝撃応力分布

図-6(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三次元的な伝達衝撃応力分布波形を示している。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、横軸は載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-6(a)より、T-H10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、ラ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、載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。主波の継続時間に関しては、平坦な剛基礎の場合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倍程度長くとなっている。

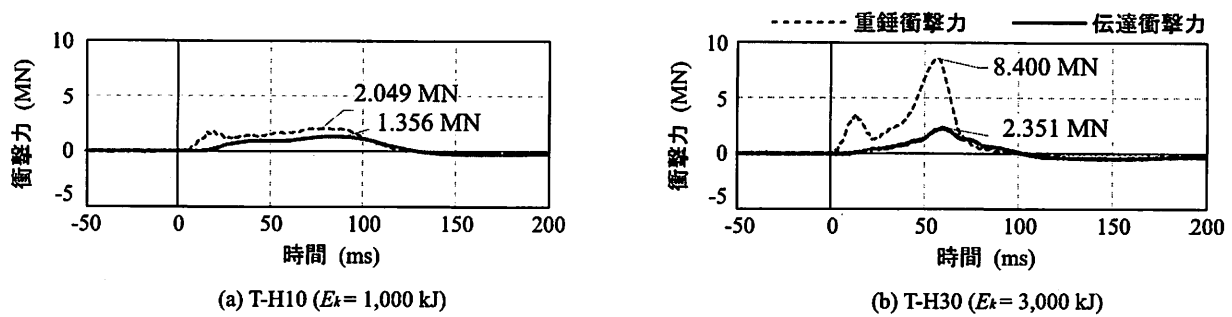


図-7 実験結果の衝撃力波形の比較

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。

図-6(b)の T-H30 の場合には、載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。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。

3.5 衝撃力波形

図-7(a)および(b)には、T-H10、T-H30 に関する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-7(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-7(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示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²⁾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保持していることが分かる。

4. 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。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。

- (1) 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 倍以上の耐衝撃性能の向上が見込まれる。
- (2) 三層緩衝構造は、設計要領に規定されている 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。

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) 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

(2008 年 11 月 7 日受付)