



写真-1 実験状況

造は、最小構成である、敷砂厚 500 mm, RC 版厚 200 mm, EPS 材厚 500 mm としている。

表-1 には、本実験に用いた実験ケースの一覧を示している。実験ケースは、落下高さを変化させた全4ケースである。表中の試験体名のうち、第一項目 T は三層緩衝構造を示している。第二項目は荷重方法を示しており、II および IS はそれぞれ衝撃荷重の漸増繰り返し荷重および単一荷重により実験を行ったことを示している。なお、試験体名の末尾に落下高さ H (m) を付している。試験体である各トンネル坑口部のコンクリートの圧縮強度は、繰り返し荷重の場合で、 $f_c = 36.1$ MPa, 単一荷重で $f_c = 29.7$ MPa であった。

2.2 実験方法

写真-1 には実験状況を示している。実験は、質量 10,000 kg の鋼製重錘をクローラ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。実験時における敷砂材の平均湿潤密度および平均含水比は、繰り返し荷重でそれぞれ $1,610 \text{ kg/m}^3$, 13.8%, 単一荷重でそれぞれ $1,580 \text{ kg/m}^3$, 12.8% である。また、三層緩衝構造の芯材に用いた 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, 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 間隔とし、裏層材には密度 20 kg/m^3 の EPS を用いた。なお、各実験ケースにおいて RC 版, EPS 材は常に未使用材を用いることとした。重錘は、直径 1.25 m, 高さ 95 cm で底部が半径 100 cm の球状となっている。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

本実験の測定項目は、重錘頂部表面に設置したひずみゲージ型加速度計 (容量 500 G, 応答周波数 DC ~ 5 kHz) による重錘衝撃力、図-2 に示す位置の非接触式レーザ変位計 (容量 500 mm, 応答周波数約 1 kHz) による変位およびひずみゲージによるコンクリート表面のひずみである。なお、コンクリート各点のひずみ測定に関しては、コンクリート表面に微細な凹凸やひび割れが発生しているため、ひずみゲージを直接添付することが不可能であることより、燐青銅板 ($50 \times 20 \times 0.3$ mm) を樹脂系接着剤とネジ留めにより固定し、その上にひずみゲージを添付して測定することとした。また、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。

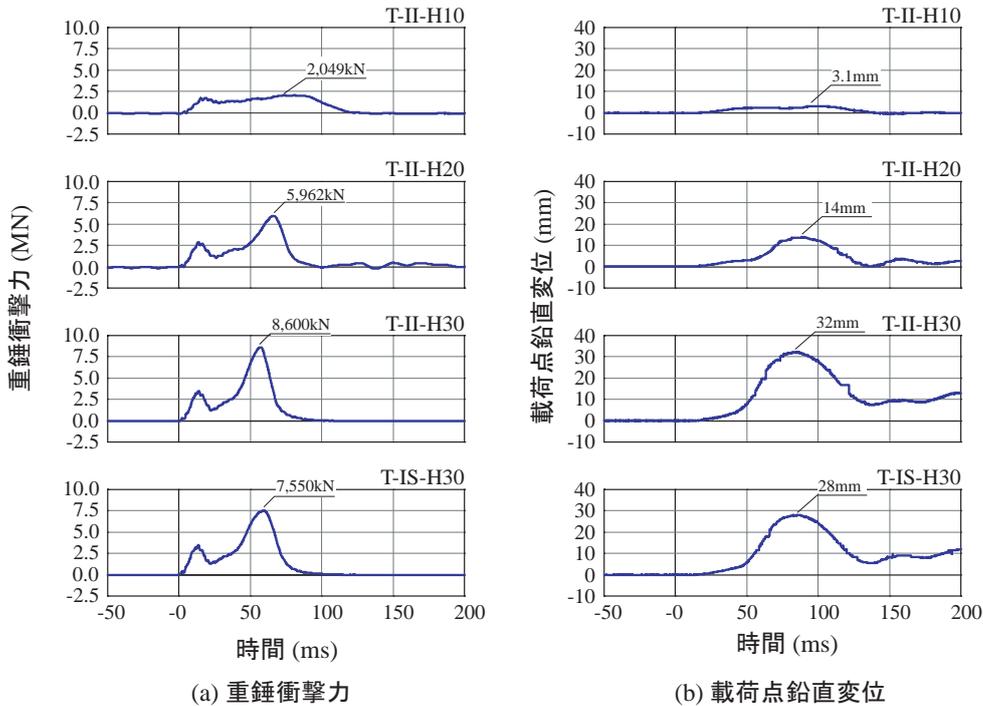


図-3 各種応答波形

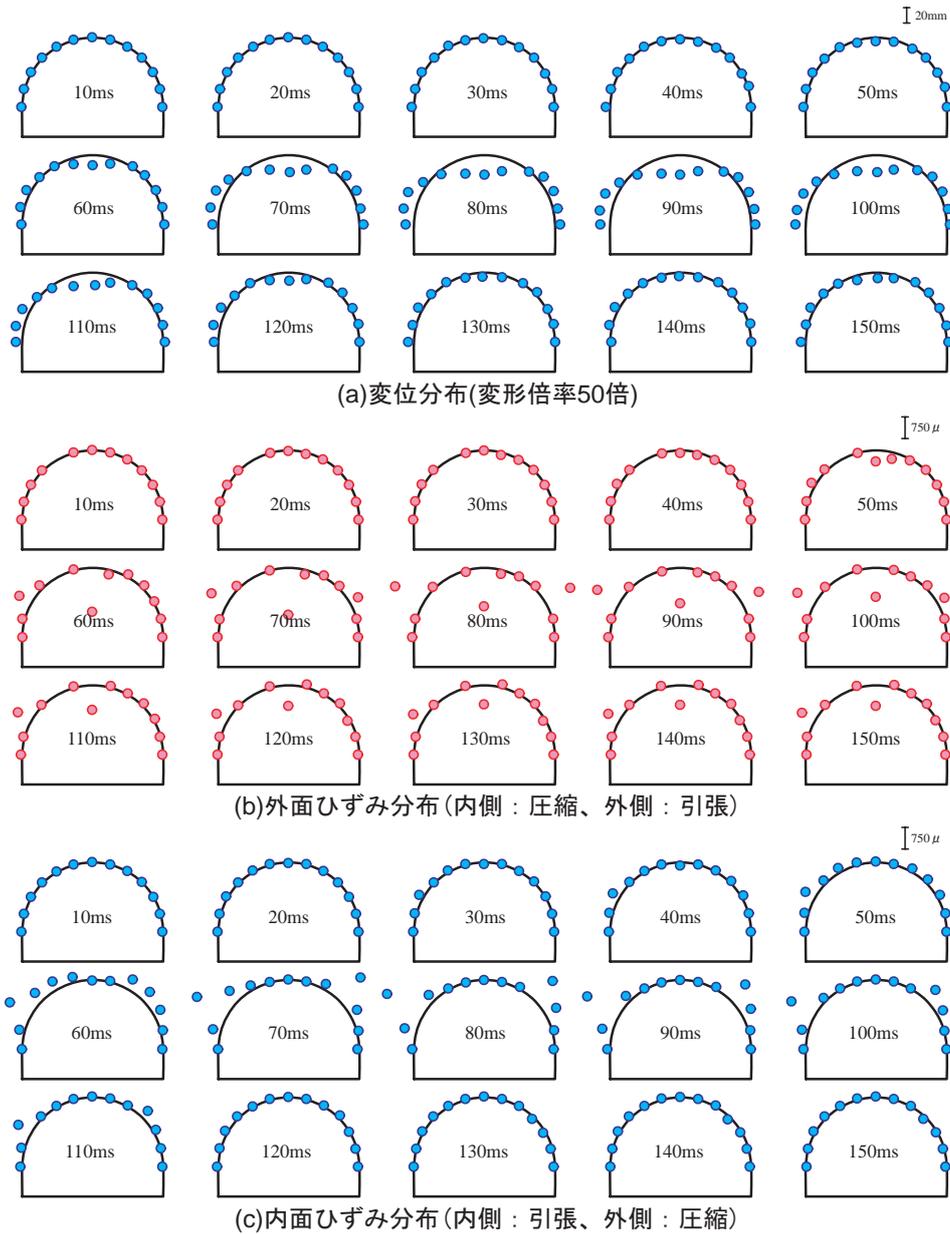


図-4 変位およびひずみ分布図(T-IS-H30)

3. 衝撃実験結果

3.1 各種応答波形

図-3(a)図および(b)図には、それぞれ各実験ケースにおける、重錘衝撃力波形および載荷点における鉛直変位波形を示している。

重錘衝撃力波形に着目すると、衝突エネルギー $E_k = 1,000$ kJ ($H = 10$ m 落下) の場合を除き衝突初期において継続時間が 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³⁾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芯材 RC 版に衝突することにより発生したものと推察される。一方、衝突エネルギー $E_k = 1,000$ kJ 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、従って芯材 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、第 1 波目における重錘衝撃力の最大値は、衝突エネルギーの 2 ~ 3 倍の増加に対して 1.6 ~ 2.0 倍程度の小さな増加を示している。しかしながら、第 2 波目における重錘衝撃力の最大値は 2.9 ~ 4.2 倍と急激に増加している。波動継続時間も衝突エネルギーの増加に従い、やや短くなっている。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 $E_k = 1,000$ kJ までを対象とする最小構成としているが、特に衝突エネルギーを $E_k = 3,000$ kJ ($H = 30$ m 落下) と増加する場合には、裏層 EPS 材厚が薄いことにより EPS 材が芯材 RC 版から伝達された衝撃エネルギーを十分に吸収することが出来ず、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。

載荷点における鉛直変位波形に着目すると、波形性状

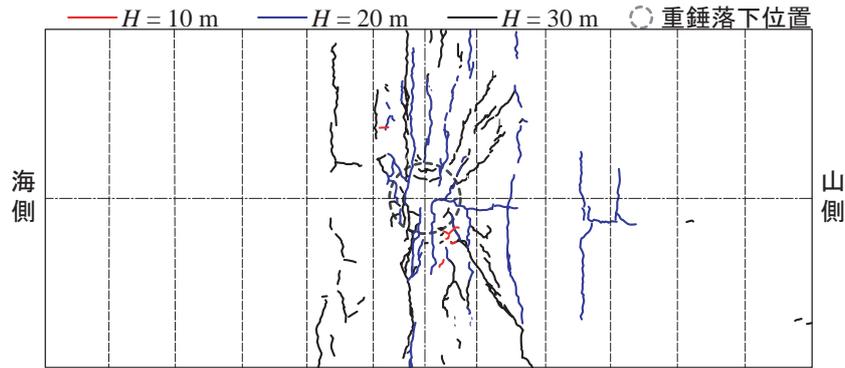


図-5 実験後におけるひび割れ状況 (T-II)

は正弦半波状を呈しており、波形の立ち上がりは重錘衝撃力の場合に比較し 20～30 ms 程度の遅れが生じている。また、 $E_k = 1,000$ kJ ($H = 10$ m) の場合には、残留変位は発生しないが、 $E_k = 3,000$ kJ ($H = 30$ m) では 10 mm 程度以上の残留変位が発生している。このことは、衝突エネルギー $E_k = 1,000$ kJ に対応した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 以上に対して本アーチ構造は塑性化することを示唆している。しかしながら、1) 衝突エネルギーが 2～3 倍に増加してい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、2) 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、三層緩衝構造は規定以上の衝突エネルギーに対しても衝撃エネルギー吸収能や分散効果が期待できるものと考えられる。

3.2 変位分布およびひずみ分布

図-4 には、衝突エネルギー $E_k = 3,000$ kJ ($H = 30$ m) である T-IS-H30 に関する (a) 変位分布図および (b) 外面ひずみ分布、(c) 内面ひずみ分布を示している。なお、図には载荷直後より $t = 150$ ms までの分布を 10 ms 毎に示している。また、(a) 変位分布は変形倍率を 50 倍として表示している。

(a) 図の変位分布に着目すると、変位は $t = 60$ ms 経過以降に顕著に発生していることがわかる。その後、アーチの円中心点より 45° 付近における変位が増大し、载荷点付近の変位が $t = 100$ ms までほぼ一定に推移していることが分かる。変形は $t = 130$ ms でほぼ落ち着き、最大で 10 mm 程度の残留変位が発生している。また、アーチの左右で若干異なる挙動を示している。

(b) 図の外面ひずみ分布は、 $t = 40$ ms から载荷点直下付近の圧縮ひずみが増大し、 $t = 60$ ms 経過後にアーチの円中心点より 45° 付近で引張ひずみが発生している。その後、 $t = 70$ ms でピークに達し、 $t = 110$ ms までに徐々にひずみが減少している。なお、载荷点部とアーチ左側の円中心点より 45° の位置で残留ひずみが発生している。

(c) 図の内面ひずみ分布に関しては、载荷点を中心に幅 3 m 程度の範囲において、ひずみが小さく示されている領域が確認できる。これは、本試験体がアーチ構造であることにより载荷点近傍のアーチ断面内で軸圧縮力が発生し、衝突荷重によって発生するアーチ断面内側の引張力と相殺されることにより、ひずみが小さくなっているものと推察される。

このことより、トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置す

ることによる荷重の分散効果によってアーチ作用が効率よく発揮されることが明らかとなった。

3.3 ひび割れ発生状況

図-5 には、繰り返し载荷後のトンネル坑口部内側ひび割れ状況を見上げ図として示している。図より、重錘落下高さ $H = 10 \sim 30$ m におけるひび割れに着目すると、载荷点を中心に幅 3 m 程度の範囲に放射状のひび割れが分布している。これは、三層緩衝構造の荷重分散幅が大きいため、ひび割れが広範囲にわたり、全体として衝撃力を受け持った結果によるものと考えられる。なお、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载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。

4. まとめ

本研究では、三層緩衝構造を設置した場合の RC 製アーチ構造に関する落石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た。実験は、重錘の落下高さを漸増させる繰り返し载荷法と単一载荷法に基づいて行った。本研究により得られた事項を整理すると、以下のように示される。

- (1) 衝突エネルギーが $E_k = 1,000$ kJ を対象とした三層緩衝構造を用いた場合、本アーチ構造は衝突エネルギー $E_k = 3,000$ kJ 以上に対して塑性化する傾向を示す。
- (2) 三層緩衝構造は規定以上の衝突エネルギーに対しても衝撃エネルギー吸収能や分散効果が十分期待できる。
- (3) トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置することで、衝撃荷重の分散効果によりアーチ作用が効率よく発揮される。

参考文献

- 1) 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, 2003.6
- 2) (社) 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.
- 3) 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.