

三層緩衝構造を設置した実 RC 製ロックシェットの重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact loading tests of a full-scale RC rock-shed with three-layer absorbing system

寒地土木研究所	○正員	今野久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
寒地土木研究所	正員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院	正員	栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の国土、特に北海道は急峻な地形を呈しており、山岳部や海岸線の道路には落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。そのなかの一つとして落石覆道（以後、ロックシェット）が挙げられる。現在、ロックシェットは、落石対策便覧などにに基づき許容応力度法によって設計が行われている。一方、様々な構造物の設計手法が、性能照査型設計法へ移行しておりロックシェット等の構造物に関しても性能照査型設計法への移行は急務であるものと考えられる。

以上の背景により、筆者らは鉄筋コンクリート(RC)製ロックシェットに関する性能照査型耐衝撃設計法の確立を目的に、RC 梁や RC スラブなどの部材単位での実験¹⁾や数値解析から研究を開始し、さらには 2/5 および 1/2 スケール RC 製ロックシェット模型を製作して重錘落下衝撃実験²⁾や数値解析³⁾を実施している。しかしながら、実ロックシェットを対象とする場合には、重錘（落石）規模に対するロックシェット模型の寸法効果や衝撃荷重継続時間とロックシェット模型の最低次固有振動との関係等が、ロックシェットの弾性挙動や塑性挙動に複雑に影響するものと推察される。従って、性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けて実挙動の把握や上記解析手法の適用性を検証するためには、実現象を再現する実験を実施することが必要である。

このような観点から、本研究では、実構造物の各種耐衝撃挙動データを取得することを目的に、実規模 RC 製ロックシェットを製作し重錘落下衝撃実験を実施した。本プロジェクトでは、緩衝材や重錘落下位置、入力エネルギーを変化させた数多くの実証実験を実施している。本論文では、その中の一つとして筆者らが開発した三層緩衝構造（以後、TLAS）を用いた場合を対象に、実験結果を整理し考察を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

写真-1 には、実験に使用した RC 製ロックシェットの外観を、図-1 には試験体の配筋状況を示している。

試験体は、道路軸方向長さが 12m、外幅 9.4m、壁高さ 6.4m の箱型構造である。柱の道路軸方向長さは 1.5m、部材厚さは、頂版、底盤、柱および壁共に 0.7m である。鉄筋比については一般的なロックシェットと同程度としており、鉄筋の材質はいずれも SD345 である。また、

コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 であり、実験時の底盤、柱/壁、頂版コンクリートの圧縮強度はそれぞれ、 30.68N/mm^2 、 30.19N/mm^2 、 37.87N/mm^2 であった。

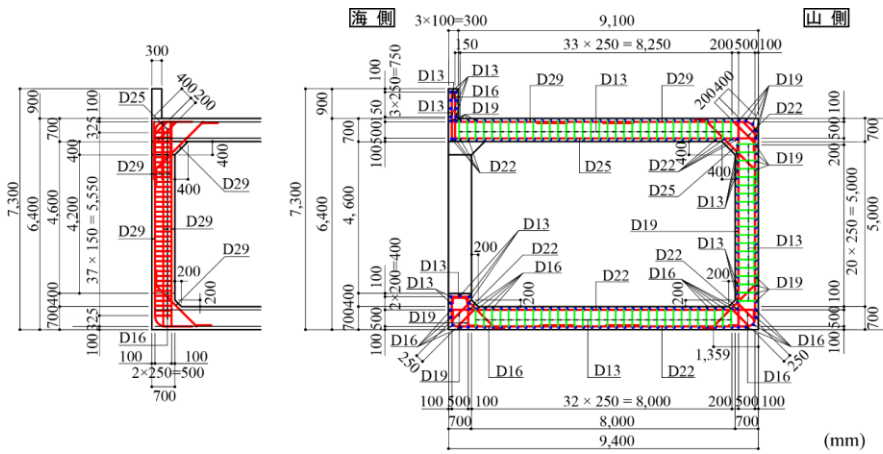
実験に使用したロックシェットの設計は、落石対策便覧を基本として行っている。すなわち、二次元骨組解析により作用断面力を算出し、許容応力度法にて断面設計を行うものである。設計落石衝撃力については以下のようにして決定した。1)既往の研究等より許容応力度法で求めた耐荷力は、実際の限界耐力に対して 20~30 倍の安全率を有していること、2)実験の制約（トラックレーンを使用するため最大で重錘質量 10ton、落下高さ 30m）より最大載荷可能エネルギーは 3,000kJ であること、3)実験において終局限界状態を確認したいこと、より試験体の設計落石エネルギーは、 $3,000\text{kJ}/30$ （安全率） $=100\text{kJ}$ とした。実験では、質量 2ton の重錘を使用することから設計落石エネルギーに相当する落下高さは 5m となる。設計落石条件 2ton、5m を基に落石対策便覧に示されている衝撃力算定式により設計落石衝撃力を算定し設計を行った。

2.2 三層緩衝構造

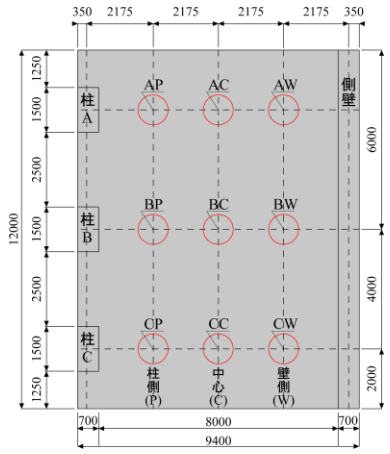
緩衝材として使用した三層緩衝構造は、荷重の分散効果や衝撃力の緩衝効果に優れる高機能の緩衝構造である。設計については、実験における最大載荷可能エネルギーが 3,000kJ であることから、重錘質量 10t（直径 1.25m）、落下高さ 30m の条件に対して芯材 RC スラブ厚および裏層 EPS 材厚を決定した⁴⁾。各層の構成は、表層敷砂厚が 50cm、芯材 RC スラブ厚が 30cm、裏層 EPS 厚が 100cm である。芯材 RC スラブの配筋は、SD345-D22 を 125cm ピッチで格子状に上下縁に配置した複鉄筋版とし



写真-1 実 RC 製ロックシェット試験体



図－1 実 RC 製ロックシェッド試験体の配筋状況



図－2 荷重位置図

ている。なお、芯材 RC スラブは頂版上に設置した裏層 EPS 上に鉄筋を直接配筋してコンクリートを打設し、頂版上のほぼ全面（10.9m×8.4m）に一体で製作している。表層の敷砂は 25cm 厚ごとにバックホウの自重により締め固め所定の厚さとしている。

2.3 実験方法

図－2 には、重錘による荷重位置を、表－1 には本研究における全実験ケースの一覧を示している。実験は、重錘をトラッククレーンにより所定の高さに吊り上げ、着脱装置により所定の位置に自由落下衝突させることにより行っている。本研究では、同一の実ロックシェッド試験体に対して、緩衝材の種類、荷重位置、入力エネルギーを変化させた実験を行い、弾性領域から終局に近い塑性領域までの耐衝撃挙動データを取得している。表－1 の実験ケース名は、第一項目に緩衝材の種類を表す記号（S：敷砂、G：砕石、T：TLAS）、第二項目には道路軸方向の柱断面を表す記号（A：柱 A 断面、B：柱 B 断面、C：柱 C 断面）と道路軸直角方向の荷重位置を表す記号（P：柱側、C：中央、W：壁側）を合わせたものを、第三項目には入力エネルギーを表す記号をハイフンで繋いで示している。本論文で対象とした TLAS の実験は、緩衝材として敷砂および砕石を使用した実験のうち、入力エネルギーが小さい範囲の実験を実施した後に行ったものである。

2.4 計測方法

本実験における計測項目は、1)重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式加速度計（容量 100G, 200G, 500 G, 1,000G, 応答周波数はそれぞれ DC～2 kHz, 3.5kHz, 5kHz および 7kHz）4 個による重錘衝撃力、2)非接触式レーザ変位計（測定範囲±100mm、応答周波数約 1 kHz）31 台による試験体各部の変位、鉄筋に貼付したひずみゲージ 240ch による鉄筋ひずみ、高速度カメラ 2 台による重錘貫入量である。衝撃実験時の各種応答波形については、サンプリングタイム 0.1ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。また、各波形の高周波成分については 1ms の矩形移動平均法により処理を行っている。

表－1 実験ケース一覧

実験 No.	実験ケース名	緩衝材	荷重位置	重錘質量 (t)	落下高 (m)	入力エネルギー(kJ)
1	S-BC-E20	敷砂	BC	2	1	20
2～7	S-BW-E40～ S-AP-E40	敷砂	BW, BP, BC, AC, AW, AP	2	2	40
8,9	G-AW/AC-E20	砕石	AW, AC	2	1	20
10～15	G-AP-E40～ G-CW-E40	砕石	AP, AC, BC, BW, BP, CW	2	2	40
16	G-CC-E250	砕石	CC	5	5	250
17,18	T-BC/CC-E3000	TLAS	BC, CC	10	30	3,000
19	S-AC-E250	敷砂	AC	5	5	250
20	S-BC-E1500	敷砂	BC	10	15	1,500
21	G-BC-E1500	砕石	BC	10	15	1,500
22	G-AC-E1500	砕石	AC	10	15	1,500
23	G-CC-E3000	砕石	CC	10	30	3,000

3. 実験結果および考察

3.1 時刻歴応答波形

図－3 には、各種時刻歴応答波形を示している。(a) 図の重錘衝撃力波形は、重錘衝突後に急激に立ち上がり最大値を迎える振幅が大きく継続時間の短い正弦半波状の波形と初期の最大値の 1/2 程度のピーク値を有する台形状の波形が合成された性状を示している。第一波目は、重錘が敷砂緩衝材に衝突し急激に減速することにより発生するものであり、第二波目は重錘が芯材 RC スラブを変形させながら芯材 RC スラブとともに EPS に貫入することにより発生する波形である。中央荷重である T-BC-E3000 に比較して、端部荷重の T-CC-E3000 の場合が、第一、第二ピーク値共に若干小さく、継続時間は前者が 100ms 程度に対して後者は 130ms 程度と長くなっている。これは端部荷重時には芯材 RC スラブの抵抗面積が小さく重錘貫入量が大きくなることに起因しているものと推察される。(b) 図の重錘貫入量波形は、T-BC-E3000 では重錘衝突後から滑らかに貫入量が増加し、勾配が緩やかに変化しながら最大貫入量に達した後リバウンドに移行している。T-CC-E3000 では、重錘衝突時以降、前者と同様の傾向で貫入量が増加し最大貫入量も前者より増加しているものの 60ms 以降は飛散した敷砂緩衝材が重錘のターゲットマーカーを遮ったために高速度カメラによる貫入量の計測ができなかった。次に(c) 図の頂版変位波形について見ると、両ケースとも重錘衝突

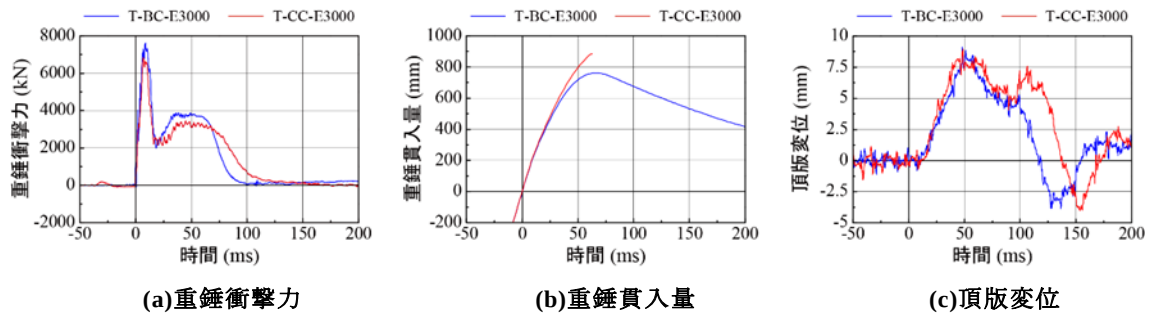


図-3 各種時刻歴応答波形

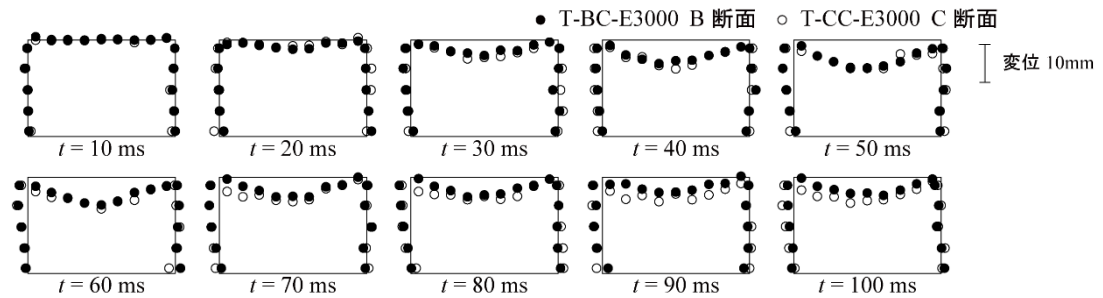


図-4 道路軸直角方向変位の時刻歴分布図

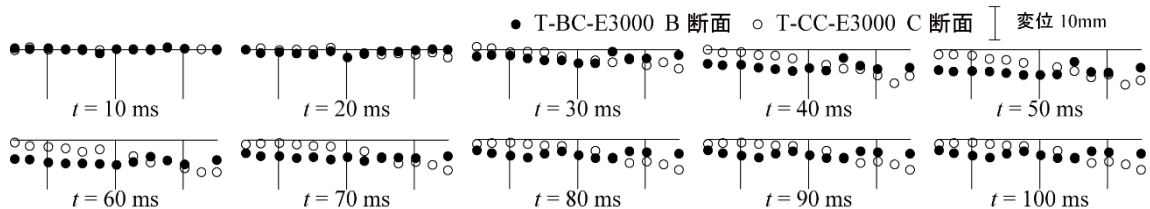


図-5 道路軸方向変位の時刻歴分布図

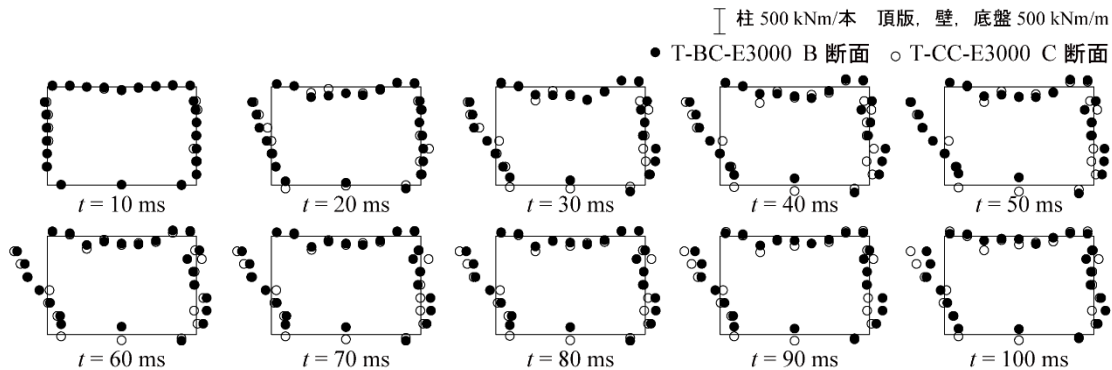


図-6 道路軸直角方向曲げモーメントの時刻歴分布図

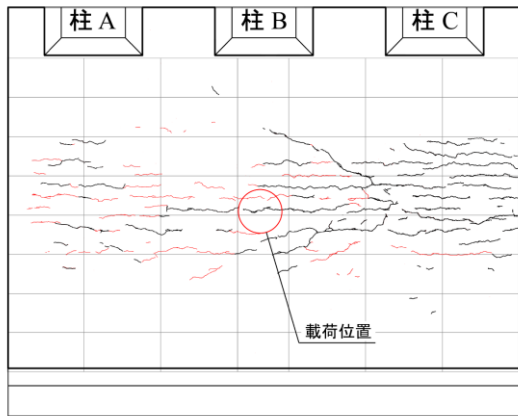
時より若干遅れて変位が励起し、50ms程度で8mm程度の最大変位に達した後、減衰状態に移行し、100ms程度まで同様の性状を示している。100ms以降は荷重載荷時間および載荷位置の違いにより性状が異なっている。最大変位発生時の鉄筋ひずみは、両ケースも0.05%程度であり、残留変位も発生していないことから弾性領域の応答性状を示していることが分かる。

3.2 頂版変位時系列分布

図-4には、載荷断面における道路軸直角方向変位の時刻歴分布図を重錘衝突後10msから10ms刻みで100msまで示している。頂版部に着目すると、いずれのケースにおいても時間の経過とともに載荷点直下を中心として二次放物線状に滑らかに変位が増加し、50ms程

度で最大値に達した後、減衰状態に移行している。柱部は、上端部の変位が大きく頂版の変位と同様の時刻において最大値を示した後、減衰状態に移行している。壁部の変位は時間の経過とともに若干変動しているものの、その値は非常に小さい。

図-5には、載荷点を含む頂版スパン中央の道路軸方向変位の時刻歴分布図を重錘衝突後10msから10ms刻みで100msまで示している。図中、凡例のない箇所は欠測点である。中央載荷であるT-BC-E3000では、道路軸方向全幅にわたり、ほぼ同様の変位が時間の経過とともに発生していることがわかる。これはTLASの効果により衝撃力が均等にかつ広範囲に分散載荷されたことによるものと推察される。一方、端部載荷であるT-CC-



図－7 頂版下面ひび割れ分布(T-BC-E3000 実験後)

E3000 では、中央部の芯材 RC スラブがすでに損傷しており、また載荷位置が端部であることから載荷断面近傍の変位が大きく、逆側の自由端に向かって変位が減少する分布性状を示している。しかしながら、載荷点直下の最大変位量は中央載荷時とほぼ同程度であることから、TLAS による緩衝効果が発揮されているものと推察される。

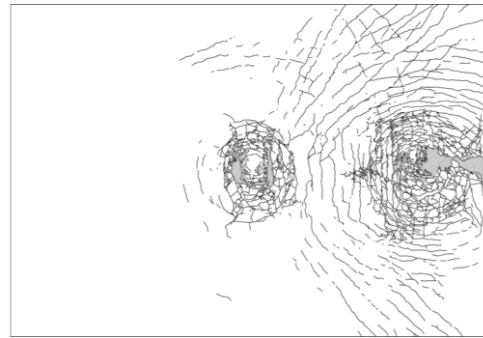
3.3 頂版曲げモーメント時系列分布

図－6 には、載荷断面における道路軸直角方向の曲げモーメントの時系列分布図を重錘衝突後 10ms から 10ms 刻みで 100ms まで示している。なお、曲げモーメントは、鉄筋ひずみを用いて換算しており、頂版と壁については単位幅 1m 当たりの断面力を、柱については柱 1 本分当たりの断面力として整理している。図より、若干値にばらつきはあるものの両ケースとも同様の時刻歴分布を示していることが分かる。頂版部では載荷点直下より曲げモーメントの値が増加し、見かけ上の固定端が両端部方向に移動しながら載荷点部で最大値を示した後、減衰に移行している。柱部は、上端の値が大きく底盤に向かってほぼ線形の分布性状を示しており、下端部において負の曲げモーメントが発生している。壁部では、曲げモーメントの値は小さいものの高さ方向では上下部で曲げモーメントの正負が入れ替わっていることが分かる。

3.4 ひび割れ分布性状

図－7 には、T-BC-E3000 終了後の頂版下面におけるひび割れ分布を示している。図は内空側からの見上げずとして表示している。直前までの実験ケースによって頂版下面にはすでにひび割れが発生していたが（黒線）、本実験ケース後に新たに発生したひび割れは、図中に赤線で示した道路軸方向の曲げひび割れのみであった。これは、前述したように TLAS の効果により衝撃力が均等にかつ広範囲に分散載荷されたことによるものと推察される。なお、T-CC-E3000 終了後には新たなひび割れが発生していないことを確認している。

図－8 には、TLAS に使用した芯材 RC スラブの実験終了後の上面からのひび割れ状況を示している。T-BC-E3000 では、載荷点直下に直径 1.6m、深さ 36cm の重錘形状と同様な陥没が生じているが、損傷の範囲は比較的狭い。一方、T-CC-E3000 終了後のひび割れ状況を見る



図－8 TLAS の芯材 RC スラブひび割れ分布

と、載荷点部を中心に広範囲にわたってひび割れが発生しており載荷点直下は著しくコンクリートが損壊していることが分かる。

4. まとめ

本研究では RC 製ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けて、実構造物の各種耐衝撃挙動データを取得することを目的に、実規模 RC 製ロックシェッドを製作し重錘落下衝撃実験を実施した。緩衝材として TLAS を使用した重錘落下衝撃実験によって以下のことが明らかとなった。

- 1) 実 RC 製ロックシェッド試験体の設計落石エネルギーの 30 倍である 3,000kJ の入力エネルギーに対して、TLAS を設置した場合の実ロックシェッド試験体は弾性挙動を示す。
- 2) 中央載荷時には、TLAS の緩衝効果により衝撃荷重が広範囲に分散載荷されることから頂版中央の道路軸方向変位は道路軸全幅にほぼ均等な値となる。
- 3) 端部載荷時には、TLAS の芯材 RC スラブの損傷範囲が広範囲に及ぶが、緩衝効果は十分に発揮されることから頂版の最大変位は中央載荷時と同程度である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志, 牛渡裕二, 保木和弘: 2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験: 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1181-1193, 2011.3
- 2) 西 弘明, 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 川瀬良司: 敷砂緩衝材を設置した 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1173-1180, 2011.3
- 3) 今野久志, 岸 徳光, 山口 悟, 牛渡裕二: 載荷位置を変化させた 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.2, pp.673-678, 2012.6
- 4) 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, 1998.11.1