

## 緩衝材として三層緩衝構造を設置した 実規模 RC 製ロックシェットの耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of a full-scale RC rock-shed with three-layer absorbing system

今野久志\*, 西 弘明\*\*, 山口 悟\*\*\*, 栗橋祐介\*\*\*\*, 岸 徳光\*\*\*\*\*  
Hisashi Konno, Hiroaki Nishi, Satoru Yamaguchi, Yusuke Kurihashi, and Norimitsu Kishi

\*博(工), 寒地土木研究所総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

\*\*博(工), 寒地土木研究所上席研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

\*\*\*寒地土木研究所研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

\*\*\*\*博(工), 室蘭工業大学大学院講師, 暮らし環境系領域, 社会基盤ユニット(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

\*\*\*\*\*工博, 釧路工業高等専門学校校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西2丁目32番1号)

*Key Words: RC rock-shed, falling-weight impact test, three-layer absorbing system, impact resistant behavior*

キーワード: RC 製ロックシェット, 重錘落下衝撃実験, 三層緩衝構造, 耐衝撃挙動

### 1. はじめに

我が国の国土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。その中の一つとして比較的規模の大きな落石エネルギーに対応可能な落石覆道(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<sup>1)</sup>等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, 構造物の設計手法は, 現在, 仕様規定型から性能規定型の設計法に移行する方向にある。このような状況下において, 許容応力度法に基づいて設計されているロックシェットは, 過去の被災事例<sup>2)</sup>やこれまでの研究成果から, 終局限界耐力に対して大きな安全率を有していることが明らかとなっている。このことから, 衝撃荷重を受けるこの種の構造物に対しても性能照査型設計法への移行が望まれている。

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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>や数値解析<sup>5)</sup>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。本研究は, スイス連邦工科大学チューリッヒ校との共同研究プロジェクトとして実施したものであり, 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。実験に使用した緩衝材は, 我が国で一般的に使用されている敷砂と三層緩衝構造(以後, TLAS), スイス連邦で一般的に使用されている碎石の3種類である。TLASは筆者らが開発した荷重の分散効果や衝撃力の緩衝効果に優れた高機能の緩衝構造である。本論文では TLAS を用いた場合を対象に, 重錘落下衝撃実験による実規模 RC 製ロックシェットの耐衝撃挙動を整理し考察を行ったので報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

実験に使用した実規模 RC 製ロックシェットは, 落石対策便覧に則して設計を行っている。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。設計落石衝撃力は, 以下のようにして決定した。すなわち, 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

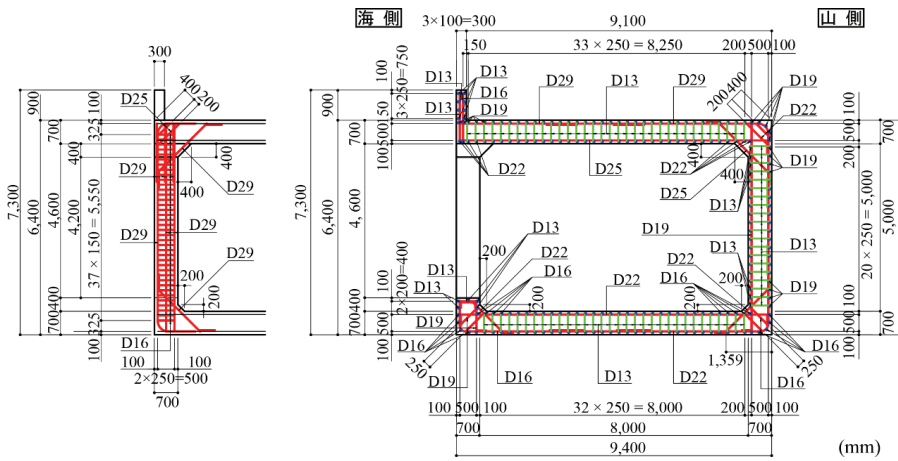


図-1 実規模 RC 製ロックシェッドの配筋状況

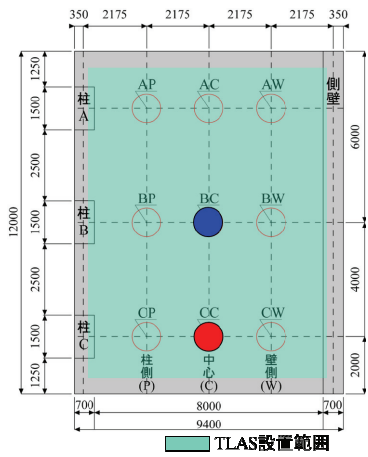


図-2 載荷位置図



写真-1 実規模 RC 製ロックシェッド

こと、等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  $2\text{ton}$  の重錘を使用する場合において設計落石エネルギーに相当する落下高さは  $5\text{m}$  となる。以上より、設計落石条件は落石質量  $2\text{ton}$ 、落下高さ  $5\text{m}$  で、緩衝材として敷砂を  $90\text{cm}$  厚で設置する条件に対して落石対策便覧に示されている衝撃力算定式に基づき設計落石衝撃力を算定し設計を行った。

写真-1には、実験に使用した実規模 RC 製ロックシェッドの外観を、図-1にはその配筋状況を示している。試験体は、道路軸方向長さが  $12\text{m}$ 、外幅  $9.4\text{m}$ 、壁高さ  $6.4\text{m}$  の箱型構造である。内空断面は幅  $8\text{m}$ 、高さ  $5\text{m}$  であり、内空の四隅にはハンチを設けている。柱の道路軸方向長さは  $1.5\text{m}$ 、部材厚さは、頂版、底盤、柱および壁共に  $0.7\text{m}$  である。鉄筋比については一般的なロックシェッドと同程度としており、頂版下面および上面の主鉄筋としてはそれぞれ  $D25$  を  $125\text{mm}$  間隔および  $D29$  を  $250\text{mm}$  間隔 (鉄筋比  $0.68\%$ ) で配置している。表-1に鉄筋の引張試験による力学的特性値一覧を示している。なお、鉄筋の材質は全て  $SD345$  である。また、コンクリートの設計基準強度は  $24\text{MPa}$  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、 $30.7\text{MPa}$ 、 $30.2\text{MPa}$ 、 $37.9\text{MPa}$  であった。

表-1 鉄筋の力学的特性値一覧

材質	呼び径	降伏応力 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)
SD 345	D29	390.9	554.6
	D22	389.6	543.0
	D19	397.1	597.9
	D16	395.9	586.8
	D13	395.5	556.2

表-2 実験ケース一覧

実験 No.	実験ケース名	緩衝材	載荷位置	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	碎石	AW, AC	2	1	20
10~15	G-AP-E40 ~ G-CW-E40	碎石	AP, AC, BC, BW, BP, CW	2	2	40
16	G-CC-E250	碎石	CC	5	5	250
17	T-BC-E3000	TLAS	BC	10	30	3,000
18	T-CC-E3000	TLAS	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	碎石	BC	10	15	1,500
22	G-AC-E1500	碎石	AC	10	15	1,500
23	G-CC-E3000	碎石	CC	10	30	3,000

## 2.2 三層緩衝構造

緩衝材として使用した TLAS の設計は、実験における最大載荷可能エネルギーが  $3,000\text{kJ}$  であることから、重錘質量  $10\text{ton}$  (直径  $1.25\text{m}$ )、落下高さ  $30\text{m}$  の条件に対して芯材 RC スラブ厚および裏層 EPS 厚を決定した<sup>6)</sup>。各層の構成は、表層敷砂厚が  $50\text{cm}$ 、芯材 RC スラブ厚が  $30\text{cm}$ 、裏層 EPS 厚が  $100\text{cm}$  である。芯材 RC スラブは、 $SD345-D22$  を  $125\text{mm}$  ピッチで格子状に上下縁に配置した複鉄筋版としている。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 (道路軸方向  $10.9\text{m}$ 、道路軸直角方向  $8.4\text{m}$ ) に対して一体で製作している。実験時における芯材 RC スラブのコンクリートの圧縮強度は  $36.0\text{MPa}$  であった。また、表層の敷砂は  $25\text{cm}$  厚ごとにバックホウの自重により締め、所定の  $50\text{cm}$  厚さとしている。

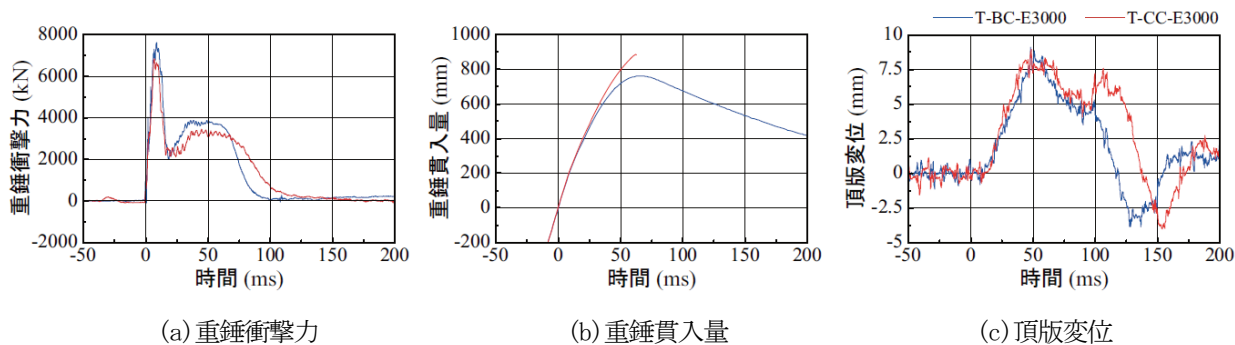


図-3 各種時刻歴応答波形

表-3 最大応答値一覧

実験ケース	最大 重錘衝撃力 (kN)	最大 重錘貫入量 (mm)	最大 頂版変位 (mm)	最大鉄筋ひずみ ( $\mu$ )					
				柱部		頂版		壁部	
				外縁	内縁	上縁	下縁	外縁	内縁
T-BC-E3000	7,612	845	9.1	654	-284	-145	498	372	-175
T-CC-E3000	6,838	1,123	10.9	552	-344	-147	443	665	-140

### 2.3 実験方法

図-2には、重錘による荷重位置を、表-2には本研究プロジェクトにおける全実験ケースの一覧を示している。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), 第二項目には図-2に示す荷重位置を、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。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、同一の実規模 RC 製ロックシェッドに対して、表-2に示す実験番号の順に緩衝材の種類、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。なお、TLASに関する実験(表中太字標記)の直前に実施した G-CC-E250 では、後述の図-9に示すひび割れが発生しているものの、頂版荷重点直下の最大変位は6mm程度、最大鉄筋ひずみは600 $\mu$ 程度であり、残留変位は1mm未満であることから損傷程度は小さいものと判断される。なお、各実験後に発生したひび割れ等の損傷に対しては、一切の補修等の修復は施していない。

本実験における計測項目は、1)加速度計による重錘衝撃力、2)レーザ式非接触型変位計による試験体各部の変位、3)ひずみゲージによる鉄筋ひずみ、4)高速度カメラによる重錘貫入量である。また、各実験終了後にはひび割れ分布状況を記録している。

## 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第1波目の最大値の1/2程度のピーク値

を有する台形状の波形が合成されており、過去に実施した TLAS に関する実験結果<sup>6)</sup>と同様の波形性状を示している。第1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2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。端部荷重の T-CC-E3000 の場合は、中央荷重である T-BC-E3000 の場合に比較して、第1、第2ピーク値共に若干小さく、継続時間は100ms程度に対して130ms程度と長くなっている。これは端部荷重の場合には自由端に近いことにより荷重点におけるロックシェッドの曲げ剛性が中央部に比較して小さいことや、同様の理由により芯材 RC スラブによる荷重分散面積も小さくなるため、衝撃荷重がより集中化すること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  $t=60\text{ms}$  以降は飛散した敷砂緩衝材が重錘に設置した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。

(c)図の荷重点直下の頂版変位波形を見ると、両ケースとも重錘衝突時より若干遅れて変位が励起し、50ms程度で9mm程度の最大変位に達した後、変位が一旦減少傾向を示すが、 $t=100\text{ms}$  以降で再度増加して第2ピークを示した後、減衰自由振動状態に移行している。 $t=100\text{ms}$  以降において両ケースの波形性状が異なっているのは、荷重点の違いによる頂版の卓越する振動モードの影響や衝撃荷重継続時間の違い等の影響が複雑に関係しているものと推察されるが、詳細については今後数値解析的検討を実施して明らかにしていきたい。

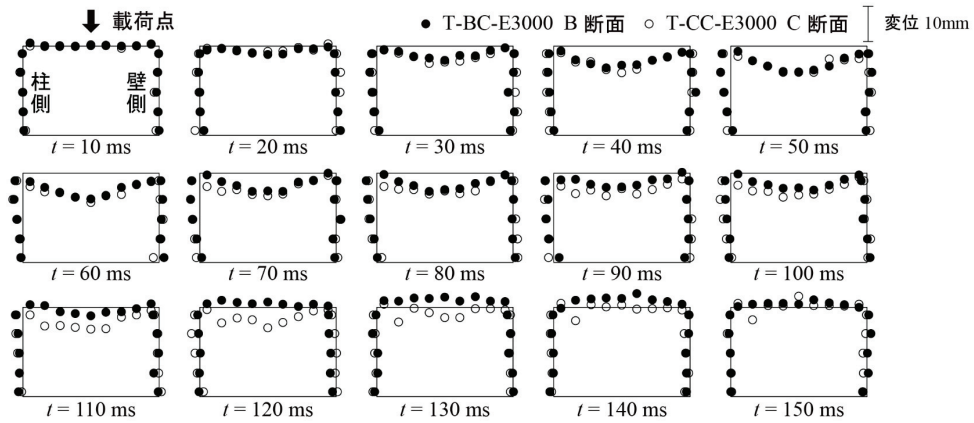


図-4 載荷点を通る内空変位の道路横断方向分布に関する経時変化

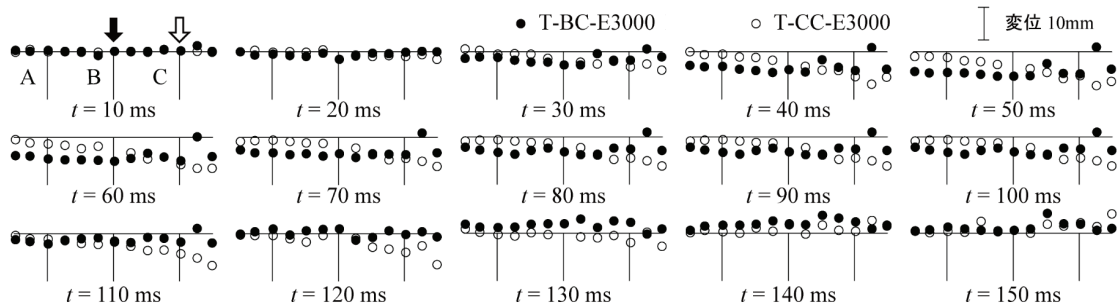


図-5 頂版中央部における変位の道路軸方向分布に関する経時変化

### 3.2 最大応答値

表-3には、T-BC/CC-E3000における最大重錘衝撃力、最大重錘貫入量、最大頂版変位、最大鉄筋ひずみの一覧を示している。最大重錘衝撃力は、中央載荷のT-BC-E3000が7,600kN程度であるのに対して、重錘貫入量が大きく芯材RCスラブの損傷範囲が広範囲に及んだ端部載荷のT-CC-E3000は6,800kN程度と10%程度小さい値を示している。頂版の最大変位は、中央載荷のT-BC-E3000が載荷点直下において9.1mmであるのに対して、端部載荷のT-CC-E3000が載荷点側の自由端近傍（自由端より10cm内側）で10.9mmと20%程度大きい。これは、上述のように端部載荷の場合には自由端に近いことにより曲げ剛性が小さく評価されることによるものと判断される。鉄筋ひずみは、両実験ケースともに柱部外縁または壁部外縁で $650\mu$ 程度、頂版下縁で $500\mu$ 程度であり、残留変位も発生していないことから、弾性領域内の応答性状を示していることが分かる。

### 3.3 変位分布の経時変化

図-4には、載荷点を通る内空変位の道路横断方向分布に関する経時変化を、重錘衝突後 $t=10\text{ms}$ から10ms刻みで $t=150\text{ms}$ まで示している。頂版部に着目すると、中央載荷のT-BC-E3000の場合には、時間の経過とともに載荷点直下を中心として放物線状に増加し、 $t=50\text{ms}$ 程度で最大値に達した後、減衰状態に移行し、 $t=120\text{ms}$ 以降よりリバウンド状態に至っている。一方、端部載荷

のT-CC-E3000では、 $t=80\text{ms}$ 程度までは中央載荷時と同様の挙動を示しているものの、それ以降は再度変位が増加した後、減衰状態に移行している。このように、両ケースで頂版変位の挙動が異なるのは、前述のように載荷位置の違いによる頂版の卓越振動モードの違いや衝撃荷重継続時間の違い等の影響が複雑に関係しているものと判断される。柱部および壁部の変位挙動に関しては、両ケースとも同様の経時変化を示している。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、頂版中央部における変位の道路軸方向分布に関する経時変化を、重錘衝突後 $t=10\text{ms}$ から10ms刻みで $t=150\text{ms}$ まで示している。図中、応答の欠落している箇所は欠測点である。中央載荷であるT-BC-E3000の場合には、載荷点直下より変位が励起し、時間の経過とともに道路軸方向全幅に渡り、ほぼ同様の変位分布を示している。これはTLASの衝撃荷重分散効果により衝撃力が均等にかつ広範囲に分散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-E3000の場合には、載荷位置が端部であることから時間の経過とともに載荷点近傍自由端側の変位が大きく、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。

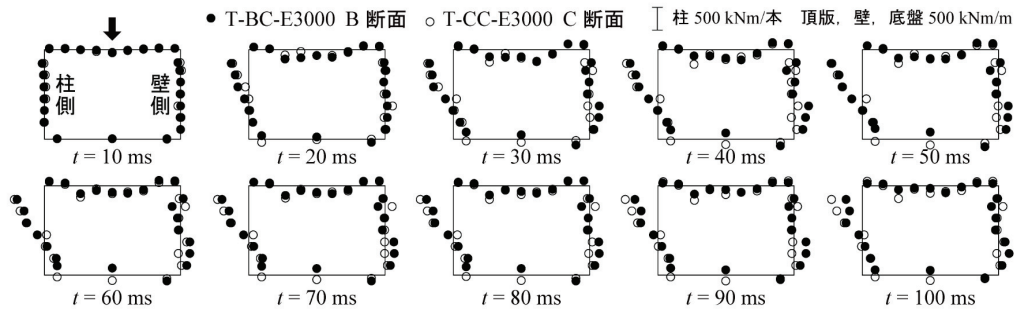


図-6 載荷点を通る道路横断方向曲げモーメントの断面内分布に関する経時変化

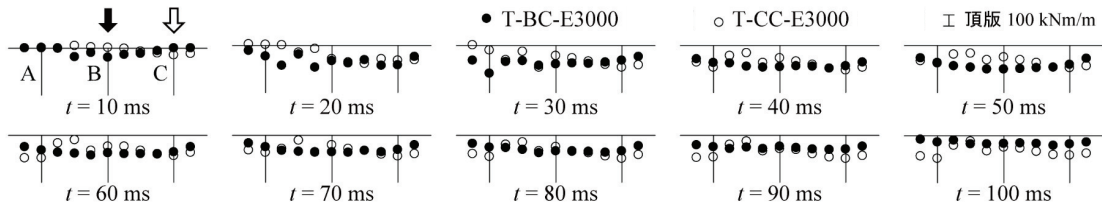


図-7 頂版中央部における道路横断方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化

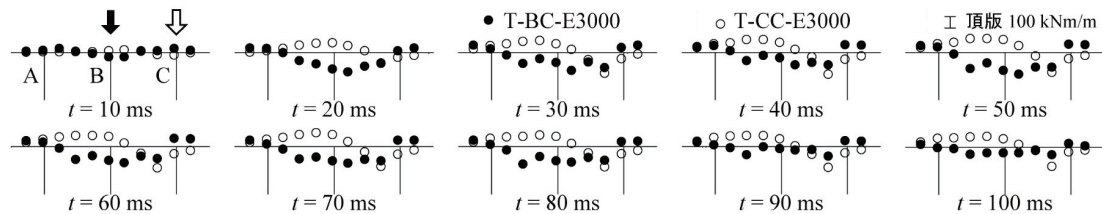


図-8 頂版中央部における道路軸方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化

### 3.4 曲げモーメント分布の経時変化

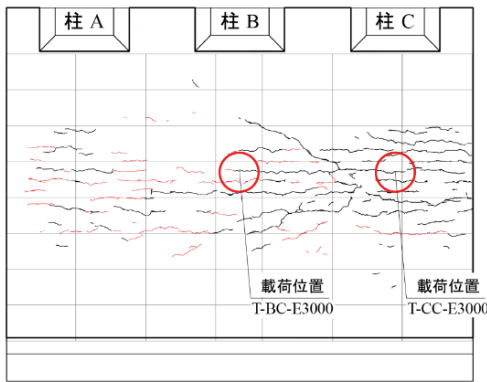
図-6には、載荷点を通る道路横断方向曲げモーメントの断面内分布に関する経時変化を重錘衝突後  $t=10\text{ms}$  から  $10\text{ms}$  刻みで  $t=100\text{ms}$  まで示している。なお、曲げモーメントは鉄筋ひずみを用いて換算しており、頂版と壁については単位幅 (1m) 当たりの断面力を、柱については各柱当たりの断面力として整理している。

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系列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正の曲げモーメントが発生し、時間の経過とともに柱部や壁部さらには底盤で増加していく状況が示されている。載荷点直下における頂版および柱上端の曲げモーメントは重錘衝突後  $t=50\text{ms}$  程度で最大値を示しているが、後者が前者よりも大きな値となっている。これは、版としての剛性が頂版に比較して柱部の方が小さく柱部上端のハンチ下縁で角折れするような変形となるためである。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、下端では正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。

図-7には、頂版中央部における道路横断方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化を重錘衝突後  $t=10\text{ms}$  から  $10\text{ms}$  刻みで  $t=100\text{ms}$  まで示している。図より、中央載荷の T-BC-E3000 の場合には、載荷

点直下より正の曲げモーメントが発生し、時間の経過とともに自由端まで断面力が伝達され、 $t=50\text{ms}$  程度で放物線状の滑らかな分布性状を示した後、減衰状態に移行している。一方、端部載荷である T-CC-E3000 の場合には、重錘衝突後、載荷点直下に正の曲げモーメントが発生し、時間の経過とともに中央部から柱 A 側の自由端へと断面力が伝達される状況が示されている。端部載荷であるにもかかわらず頂版には負の曲げモーメントは発生していない。これは、TLAS の衝撃荷重分散効果によるものと推察される。

図-8には、頂版中央部における道路軸方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化を図-7と同様に示している。図より、中央載荷の T-BC-E3000 の場合には、載荷点直下より正の曲げモーメントが発生し、時間の経過とともに両自由端方向に正の曲げモーメント領域が拡大して行く状況が示されている。しかしながら、柱 A/C 断面より自由端側では負の曲げモーメントに移行している。 $t=40\text{ms}$  以降においてブロック中央部における断面力が数 m の範囲で同程度の値で推移していることから、中央載荷時における TLAS の荷重分散範囲は軸方向曲げモーメントに対して上記の範囲程度であるものと推察される。一方、端部載荷である T-CC-E3000 の場合には、 $t=10\text{ms}$  以降において柱 C 断面より中央側で正の曲げモーメントが発生している。これは柱が存在していることより道路軸直角方向回りの変形が拘束さ



※ 黒線:TLAS実験以前のひび割れ、赤線:T-BC-E3000によるひび割れ

図-9 頂版下面ひび割れ分布

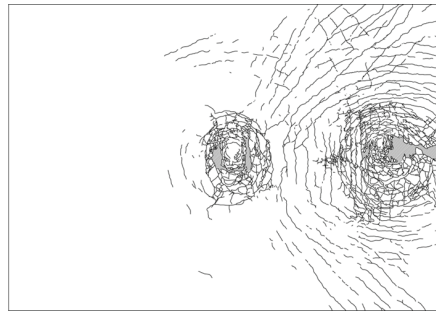


図-10 芯材 RC スラブひび割れ分布



写真-2 ひび割れ状況

れる傾向にあることが要因として挙げられる。一方、柱 B から柱 A 断面側には負の曲げモーメントが発生している。時間の経過とともに正・負の断面力が增大しているが、正の曲げモーメントの分布性状は三角形状、負の曲げモーメントの分布性状は滑らかな放物線状を呈し、両自由端で零となっている。このことから、端部載荷時における TLAS の荷重分散範囲は中央載荷時よりも狭くなっていることが推察される。しかしながら、前述のとおり変位量や鉄筋ひずみが小さく弾性範囲の挙動を示していることから TLAS は端部載荷時においても十分な緩衝効果を発揮していることが分かる。

### 3.5 ひび割れ分布性状

図-9には、実験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図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既にひび割れが発生しているが(黒線)、T-BC-E3000 終了後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 TALS の緩衝効果と荷重分散効果により衝撃荷重が均等にかつ広範囲に分散荷重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-10および写真-2には、TLAS に使用した芯材 RC スラブの T-BC/CC-E3000 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、損傷の範囲は押し抜きせん断破壊が卓越することから比較的狭いことが分かる。一方、T-CC-E3000 終了後のひび割れ状況をみると、載荷点部を中心に広範囲に渡ってひび割れが発生しており、載荷点直下のコンクリートが著しく損壊していることが分かる。これは載荷位置が端部で自由端が近いことにより、曲げ剛性も小さく評価され、押し抜きせん断破壊とともに片持ち版としての曲げ変形挙動が卓越するためと推察される。

## 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、実建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。本論文では、緩衝材として三層緩衝構造 (TLAS) を設置した場合における耐衝撃挙動について検討を行った。本研究によって、以下の事項が明らかになった。

- 1) 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規模ロックシェッドは弾性挙動を示す。
- 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荷重されることから頂版中央の道路軸方向変位は全幅に渡り同程度の値を示す。
- 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ものの、TLAS の緩衝効果が十分に発揮され、実規模ロックシェッドは弾性挙動を示す。

## 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 熊谷守晃：ルランベツ覆道における落石災害に関する報告，第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.286-290，1993.6
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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