

論文 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

今野 久志^{*1}・山口 悟^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、RC製ロックシェット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製ロックシェットを製作し重錘落下衝撃実験を実施した。緩衝材として三層緩衝構造を使用した実験結果より、1)設計落石エネルギーの30倍である3,000 kJの入力エネルギーに対しても、ロックシェットは弾性挙動を示すこと、2)中央載荷時には、三層緩衝構造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、頂版スパン中央断面の道路軸方向変位は全幅に渡って同程度の値となること、3)端部載荷時においても緩衝効果は十分に発揮されること、などが明らかになった。

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。その中で、比較的規模の大きな落石エネルギーに対応可能なものとして落石覆道（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¹⁾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²⁾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関する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³⁾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⁴⁾や数値解析⁵⁾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ので報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

写真-1には、実験に使用した実規模RC製ロックシェットの外観を、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 m、外幅9.4 m、壁高6.4 mの箱型構造である。内空断面は幅8 m、高さ5 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 m、部材厚さは、頂版、底盤、柱および壁共に0.7 m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、頂版下面および上面の主鉄筋としてはそれぞれD25を125 mm間隔およびD29を250 mm間



写真-1 実規模RC製ロックシェット

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工)(正会員)

*2 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工)(正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博(正会員)

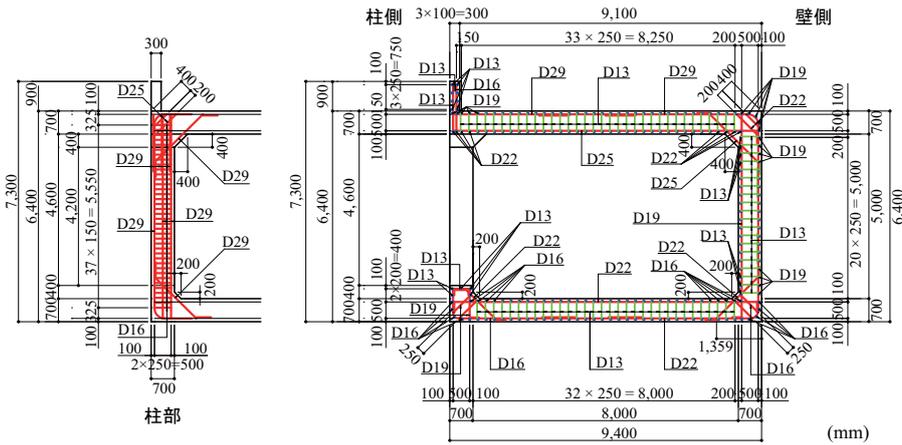


図-1 実規模 RC 製ロックシェットの配筋状況

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	载荷位置	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

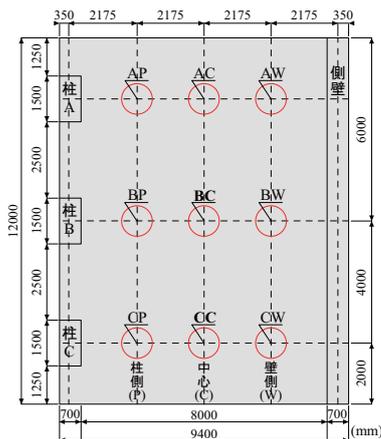


図-2 载荷位置図

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 SD 345 である。また、コンクリートの設計基準強度は 24 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 MPa、30.2 MPa、37.9 MPa であった。

実験に使用したロックシェットは、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 10 ton、落下高さ 30 m）より、最大载荷可能エネルギーは 3,000 kJ 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、等

より試験体の設計落石エネルギーは、3,000 kJ/30（安全率）= 100 kJ とした。実験では、質量 2 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 m となる。設計落石条件 2 ton、5 m を基に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。

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た高機能の緩衝構造である。設計については、実験における最大载荷可能エネルギーが 3,000 kJ であることから、重錘質量 10 ton（直径 1.25 m）、落下高さ 30 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⁶⁾。各層の構成は、表層敷砂厚が 50 cm、芯材 RC スラブ厚が 30 cm、裏層 EPS 厚が 100 cm である。芯材 RC スラブは、SD 345-D 22 を 125 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（10.9 m × 8.4 m）に対して一体で製作している。表層の敷砂は 25 cm 厚ごとにバックホウの自重により締固

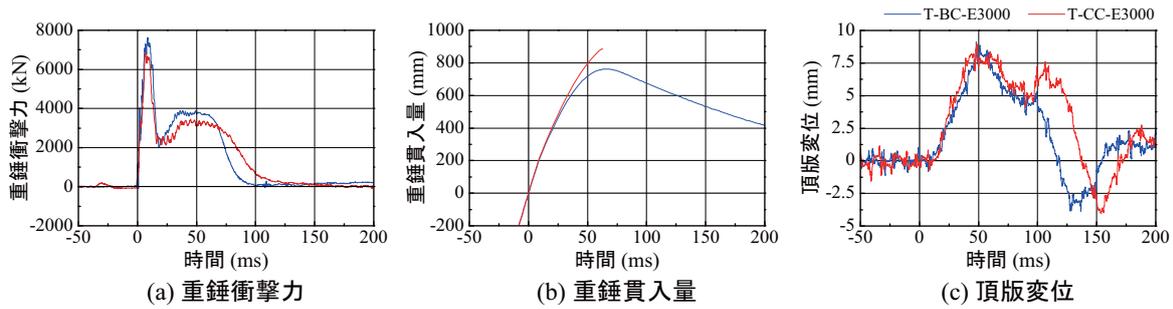


図-3 各種時刻歴応答波形

表-3 最大値応答値一覧

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(μ)					
				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

め、所定の 50 cm 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-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600μ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、各実験終了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⁶⁾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スラブを变形させながら芯材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部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 $t=60$ 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、一旦減少傾向を示すが、 $t=100$ 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。 $t=100$ 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、荷重点位置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。

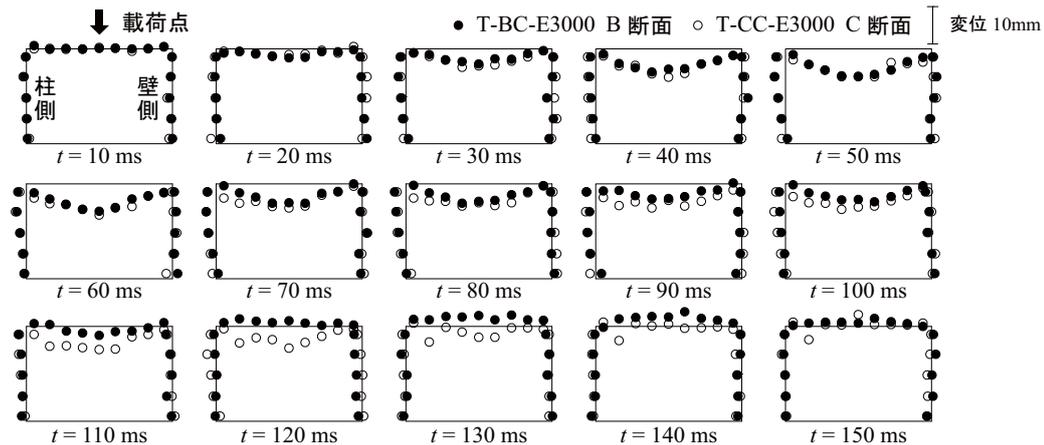


図-4 载荷中心を通る内空変位の道路横断方向分布に関する経時変化

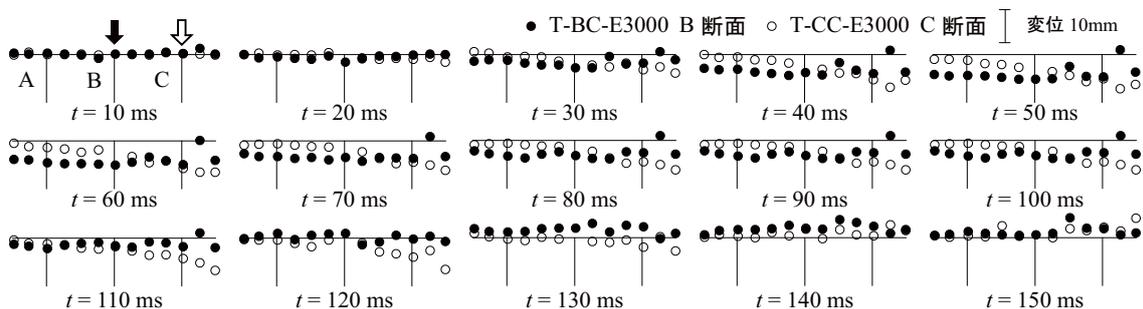


図-5 頂版中央部における変位の道路軸方向分布に関する経時変化

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、中央载荷のT-BC-E3000が7,600 kN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载荷のT-CC-E3000は6,800 kN程度と10%程度小さい値を示している。頂版の最大変位は、中央载荷のT-BC-E3000が载荷点直下において9.1 mmであるのに対して、端部载荷のT-CC-E3000が载荷点側の自由端近傍（自由端より10 cm内側）で10.9 mmと20%程度大きい。これは、上述のように端部载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、両ケースともに柱部外縁または壁部外縁で 650μ 程度、頂版下縁で 500μ 程度であり、残留変位も発生していないことから、弾性範囲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、载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 $t = 10$ msから10 ms刻みで $t = 150$ msまで示している。頂版部に着目すると、中央载荷のT-BC-E3000の場合には、時間の経過とともに载荷点直下を中心として放物線状に増加し、 $t = 50$ ms程度で最大値に達した後、減衰状態に移行し、 $t = 120$ ms以降よりリバウンド状態に至っている。一方、端部载荷の

T-CC-E3000では、 $t = 80$ ms程度までは中央载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、前述のように载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 $t = 10$ msから10 ms刻みで $t = 150$ 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。中央载荷であるT-BC-E3000の場合には、载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の衝撃力分散効果により衝撃力が均等にかつ広範囲に分散载荷されたことによるものと推察される。一方、端部载荷であるT-CC-E3000の場合には、载荷位置が端部であることから時間の経過とともに载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。

3.4 曲げモーメント分布の経時変化

図-6には、载荷点を通る道路横断方向曲げモーメン

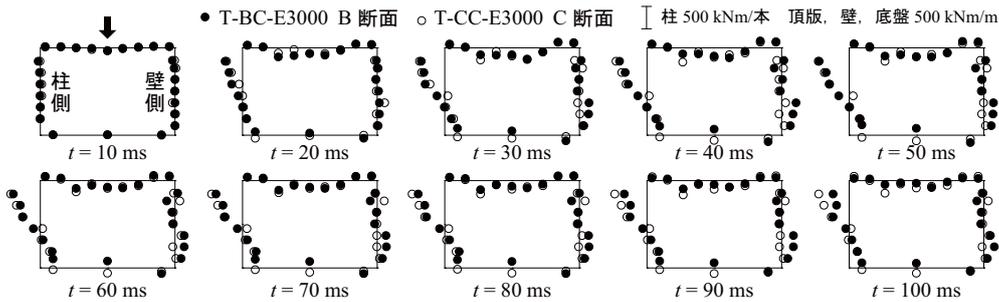


図-6 载荷中心を通る道路横断方向曲げモーメントの断面内分布に関する経時変化

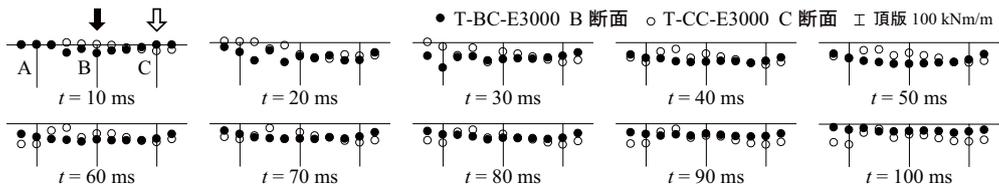


図-7 頂版中央部における道路横断方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化

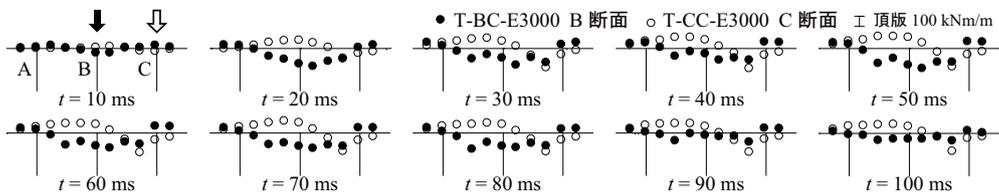


図-8 頂版中央部における道路軸方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化

トの断面内分布に関する経時変化を $t = 10$ ms から 10 ms 刻みで $t = 100$ 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 (1 m) 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。

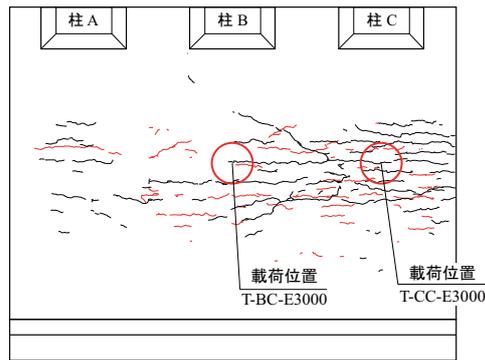
図より、若干値にばらつきはあるものの両ケースとも同様の時系列分布を示していることが分かる。頂版部では载荷点直下より正の曲げモーメントが発生し、時間の経過とともに柱部や壁部さらには底盤で増加していく状況が示されている。载荷点直下における頂版および柱上端の曲げモーメントは重錘衝突後 $t = 50$ ms 程度で最大値を示しているが、後者が前者よりも大きな値となっている。これは、版としての剛性が頂版に比較して柱部の方が小さく柱部上端のハンチ下縁で角折れするような変形となるためである。柱部は、上端の値が大きく底盤に向かってほぼ線形の分布性状を示し、下端では正の曲げモーメントが発生している。壁部では、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 $t = 10$ ms から 10 ms 刻みで $t = 100$ ms まで示している。図より、中央载荷の T-BC-E3000 の場合には、载荷点直下より正の曲げモーメントが増加し、時間の経過とともに自

由端まで断面力が伝達され、 $t = 50$ ms 程度で放物線状の滑らかな分布性状を示した後、減衰振動に移行している。一方、端部载荷である T-CC-E3000 の場合には、重錘衝突後、载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。端部载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 の衝撃力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、中央载荷の T-BC-E3000 の場合には、载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。 $t = 40$ 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、中央载荷時における 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、端部载荷である T-CC-E3000 の場合には、 $t = 10$ 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れる傾向にあることが要因



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

図-9 頂版下面ひび割れ分布

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・負の断面力が増大しているが、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、端部荷重時における TLAS の荷重分散範囲は中央荷重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 は端部荷重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 TLAS 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、荷重点直下に直径 1.6 m、深さ 36 cm 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損傷の範囲は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見ると、荷重点部を中心に広範囲に渡ってひび割れが発生しており、荷重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、荷重位置が端部で自由端が近いことにより、上下方向の拘束効果が期待できないことにより、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。

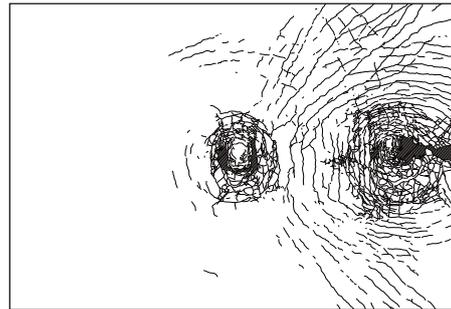


図-10 TLAS の芯材 RC スラブひび割れ分布

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性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 3,000 kJ 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) 中央荷重時には、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) 端部荷重時には、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る。

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：荷重位置を変化させた 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