三層緩衝構造を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの三次元動的骨組解析

3D dynamic frame analysis of a full-scale RC rock-shed with three-layer absorbing system

寒地土木研究所	OE	員	今里	予久志	(Hisashi	Konno)
寒地土木研究所	Æ	員	西	弘明	(Hiroaki	Nishi)
寒地土木研究所	Æ	員	山口	1 悟	(Satoru	Yamaguchi)
構研エンジニアリング(株)	正	員	牛渡	「裕二	(Yuji Us	shiwatari)
室蘭工業大学大学院	Æ	員	栗橋	喬祐介	(Yusuke	Kurihashi)
釧路工業高等専門学校	フェ	- D —	岸	徳光	(Norimi	tsu Kishi)

1. はじめに

筆者らは、鉄筋コンクリート(RC)製ロックシェッドに 対する性能照査型耐衝撃設計法の確立を最終目的に、こ れまで部材単位での実験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 製ロックシェッド 模型を製作して重錘落下衝撃実験 ¹⁾ や数値解析 ²⁾ を実 施してきている。しかしながら、実ロックシェッドを対 象とする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何よりも肝要なこ とである。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 製ロックシェッド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 3。実験に使用したロックシェ ッド上の緩衝材は、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 に使用されている砕石の3種類である。この中で、 TLAS は筆者らが開発した荷重の分散効果や衝撃力の緩 衝効果に優れる高機能の緩衝構造である。TLAS の開発 に当たっては、伝達衝撃応力測定用のロードセルを面的 に配置した剛基礎上に 4m 四方の TLAS を設置し、入力 エネルギーや各構成材料の厚さをパラメータとした数多 くの重錘落下衝撃実験を実施して重錘衝撃力や伝達衝撃 力および伝達衝撃応力の分布性状等を詳細に計測し、設 計手法を確立している。一方、本研究における TLAS の 実験は、TLAS の設置範囲を実構造物上での現場施工と 同様に頂版上の全面積に対して設置した状態で実施して おり、TLAS を設置した実規模 RC 製ロックシェッドと 同様の条件下での耐衝撃挙動データが得られている。そ こで本論文では、数値解析による性能照査手法の一つと して三次元動的骨組解析に着目し、実務設計への適用性 を検討するために TLAS を使用した場合の数値解析を実 施し実験結果との比較検討を行ったので報告する。

2. 試験体および TLAS 概要

実験に使用した実規模ロックシェッドは、落石条件 W=2ton、H=5m(=100kJ)を基に落石対策便覧に示さ



写真-1 実規模 RC 製ロックシェッド

れている衝撃力算定式により算定した設計落石衝撃力 Pmax=1,466(kN)を基本として行っている。すなわち、試 験体の道路軸方向延長 12m に対して柱間隔である 4m を有効幅とする二次元静的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。 写真-1 には、試験体の外観を示している。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 構造であり、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ドと同程度としている。な お、試験体の配筋状況や使用材料の物性値等については 参考文献3)を参照のこと。

緩衝材として使用した TLAS は、表層より敷砂、芯材 RC スラブ、裏層発泡スチロール(以後、EPS ブロック) より構成される。TLAS の設計については、道路防災工 調査設計要領(案)落石対策編 4 を参考に実施している。 実験における最大載荷可能エネルギーが 3,000kJ の条件 により、重錘質量 10ton(直径 1.25m)、落下高さ 30m に 対して設計を行った。芯材 RC スラブに作用する落石衝 撃力は、Pa=7,218kN、伝達衝撃力は Pt=2,134kN であり、 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 ブロック厚が 100cm である。芯材 RC スラブは、SD345-D22 を 125mm 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。

3. 数值解析概要

3.1 三次元動的骨組解析

本研究で使用した三次元動的骨組解析は、既往研究5)



より、敷砂緩衝材を設置した 1/2 縮尺ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験に対して、最大応答値までの実験結果を概ね再現可能であることが確認されている。本研究では、緩衝材として TLAS を使用した場合について本解析手法の適用性を検討する。解析結果の比較対象となる実験ケースは、入力エネルギーが 3,000kJ の 2 ケース(中央部載荷および端部載荷) である。

3.2 解析モデルおよび解析条件

図-1には、三次元動的骨組解析モデルを示す。要素 分割は、1 要素長を各部材の有効厚程度とし、最小でも 有効高の 0.5 倍程度に設定している。また、隅角部には、 道路橋示方書に準拠し剛域を設定している。骨組モデル にはファイバー要素を使用し、各部材の断面寸法を設定 した。ファイバー要素のセル分割については、図-2 に 示すように、セル要素の中心近傍に部材軸方向鉄筋が配 置されるように設定した。境界条件については、モデル 底面にはロックシェッド試験体がコンクリート基礎上に 設置されていることより道路橋示方書 IV 下部構造編に 準拠したバネ定数を設定した。 頂版上の TLAS の質量は、 要素に付加することで考慮した。減衰定数は質量比例分 のみを考慮し、事前に本解析モデルを用いた固有振動解 析を行い、載荷点において卓越する鉛直方向曲げ振動モ ードに対応した固有振動数に対して、既往研究と同様に h=2.5%に設定した。また、解析に用いた各材料物性モ デルは図-3 に示すように道路橋示方書に則して設定し ている。なお、骨組モデルの総節点数は 1,327、総要素 数は 2,553 である。また、本数値解析には Engineer's Studio⁶⁾(Ver.1.07.00)を使用している。

3.3 衝撃力入力モデル

TLAS の設計手法は、前述のように 4m 四方の剛基礎 上における実験結果を基に定式化されており、設計では 安全側の評価となるように伝達衝撃力の載荷面積を 3m ×3m の範囲としている。また、TLAS を用いた場合の 衝撃応答解析における衝撃力入力モデルは、上記と同様



図 4 金融力入力エデルの一例(中中如料志)

100

。 時間 (ms)

(b) Pa = 3,600 kN, t = 85 ms

150

200

-2000 L

図-4 衝撃力入力モデルの一例(中央部載荷)

表-1 解析ケース一覧								
解析ケース名	載荷 位置	載荷範囲	対象	衝撃力	継続時間			
			荷重	(kN)	(ms)			
CB-A3-Pt-t70	中央部	3m×3m	伝達	2,200	70			
CB-A3-Pt-t100		3m×3m	伝達	2,200	100			
CB-A3-Pt-t110		3m×3m	伝達	2,200	110			
CB-A3-Pa-t85		3m×3m	重錘	3,600	85			
CB-A4-Pt-t110		4m×4m	伝達	2,200	110			
CB-A5-Pt-t110		5m×5m	伝達	2,200	110			
CC-A3-Pt-t70	端部	3m×3m	伝達	2,200	70			
CC-A3-Pt-t100		3m×3m	伝達	2,200	100			
CC-A3-Pt-t110		3m×3m	伝達	2,200	110			
CC-A3-Pt-t120		3m×3m	伝達	2,200	120			
CC-A3-Pa-t105		3m×3m	重錘	3,200	105			
CC-A4-Pt-t120		4m×4m	伝達	2,200	120			
CC-A5-Pt-t120		5m×5m	伝達	2,200	120			

に剛基礎上における実験結果の伝達衝撃力波形を参考に 継続時間が t=70ms の台形状に簡略化したものが用いら れている。このことから、数値解析では上記条件を基本 ケースとしたが、実験において計測された重錘衝撃力波 形の継続時間は剛基礎上での実験結果とは異なっており、 頂版の応答を含むためか t=100~120ms 程度となってい る。以上を踏まえて、本数値解析においても衝撃力入力 モデルの継続時間をパラメータとして解析を行った。た だし、衝撃力入力モデルの立ち上がり時間と最大値から 零荷重時までの減少時間はいずれの場合も 20 ms として いる。図-4 には、中央部載荷における三次元動的骨組 解析に用いた衝撃力入力モデルの一例を示している。最 大衝撃力値は TLAS の設計計算により算定された伝達衝 撃力を丸め Pt = 2,200kN としているが、本数値解析では

平成26年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第71号



重錘衝撃力波形の第2ピーク値近傍を台形状に簡略化し た入力波形についても比較のために検討対象としている。 表-1 には、解析ケース一覧を示している。解析ケース 名は、第一項目に載荷位置を示す記号(CB:中央部、 CC:端部)、第二項目に衝撃荷重の載荷範囲(A3:3m× 3m、A4:4m×4m、A5:5m×5m)、第三項目に衝撃力 入力モデルの対象(Pt:伝達衝撃力、Pa:重錘衝撃力)、 第四項目には衝撃力入力モデルの継続時間を示す記号 t の後ろに時間(ms)を付け、それぞれをハイフンで繋いで 示している。解析は初めに載荷面積 3m×3m で荷重継 続時間の異なるケースを実施し、その後載荷点直下にお ける変位応答波形について実験結果との整合性が最も良 好と思われる載荷時間について載荷面積を 4m×4m、 5m×5m と広くしたケースに対して計算を実施している。 なお、伝達衝撃力は設定した載荷面積に対して等分布に 分散するものとし、載荷範囲にある節点に面積比を考慮 し分割して与えている。

4. 考察

4.1 載荷点直下における頂版変位の時刻歴応答波形 (1)荷重継続時間の影響

図-5 には、試験体中央部への載荷解析ケースである CB-A3-Pt/Pa-に対する載荷点直下における頂版変位の時 刻的応答波形を実験結果と併せて示している。図より、 重錘衝撃力波形の第2ピーク値近傍の波形を台形状に簡 略化した CB-A3-Pa-t85 では、解析結果の最大変位が実 験結果に比較して大きく、周期も実験結果に比較して短 くなっている。伝達衝撃力を対象とした CB-A3-Ptt70/100/110 を比較すると、いずれの解析ケースにおい



ても実験結果における第1波目の2つのピーク値を有す る波形性状は表現できていないものの継続時間を t= 110ms とした CB-A3-Pt-t110 場合が最大変位および第1 波目の継続時間ともに実験結果との対応が良い。

図-6 には、試験体端部への載荷解析ケースである CC-A3-Pt/Pa-に対する載荷点直下における頂版変位の時 刻的応答波形を実験結果と併せて示している。図より、 伝達衝撃力を対象とした CC-A3-Pt-t70/100/110/120 を比 較すると、荷重継続時間を重錘衝撃力と同程度とした CC-A3-Pt-t120 の場合において最大変位が大きく示され ているものの波形性状や周期等が実験結果と良く対応し ていることが分かる。一方、重錘衝撃力を対象とした CC-A3-Pa-t105 では、中央部載荷に対する結果と同様に 解析結果の最大変位が実験結果に比較して大きく、周期 も実験結果に比較して短くなっている。このことから TLAS を用いた場合には重錘衝撃力波形を基に衝撃力入 カモデルを設定しても頂版変位を適切に評価できないこ とが分かった。これは、TLAS は敷砂、RC スラブ、 EPS ブロックという3種類の材料を組み合わせた構造で あり重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形の波形性状が大き く異なるためと推察される。

(2)載荷面積の影響

図-7には、中央部載荷に関して上述(1)の荷重継続時 間の影響に関する検討において実験結果との対応が比較 的良好であった CB-A3-Pt-t110 に対して、載荷面積を増 加させた CB-A4/A5-Pt-t110 の解析結果を実験結果とと もに示している。図より、ピーク値近傍の波形性状が若 干異なるものの載荷面積が 3m×3m である CB-A3-Ptt110 が最大値および周期ともに実験結果との対応に優れ



図-9 曲げモーメント分布(中央部載荷)

ていることが分かる。図-8 には、端部載荷に関して上 述(1)の荷重継続時間の影響に関する検討において実験 結果との対応が比較的良好であった CC-A3-Pt-t120 に対 して、載荷面積を増加させた CC-A4/A5-Pt-t120 の解析 結果を実験結果とともに示している。図より、端部載荷 の場合においては載荷面積が 5m×5m である CC-A5-Ptt120 が波形性状や最大値および周期ともに実験結果と 非常に良好に対応している。以上のように試験体中央部 と端部載荷において異なる結果が示されたことに関して、 芯材 RC スラブの損傷状況を基に考察する。中央部載荷 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は比較的狭い。一方、端部載 荷実験終了後のひび割れ状況をみると、載荷位置が端部 で自由端が近いため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し、 載荷点部を中心に広範囲に渡ってひび割れが発生してい る。以上のような芯材 RC スラブの損傷状況の違いが前 述の原因であるものと推察される。

4.2 道路軸直角方向の曲げモーメント分布

図-9 には、中央部載荷の解析ケースである CB-A3-Pt-t110 に関して、載荷点直下の頂版変位が最大値を示 す時刻における道路軸直角方向の曲げモーメント分布を 実験結果とともに示している。図より、解析結果の曲げ モーメントは、実験結果と概ね同様の曲げモーメント分 布性状を示していることが分かる。しかしながら、頂版 部の載荷点直下や柱部および側壁部上端の曲げモーメン ト値を比較するといずれも解析結果が実験結果よりも若 干大きな値を示している。図-10 には、端部載荷の解 析ケースである CC-A5-Pt-t120 に関して、載荷点直下の 頂版変位が最大値を示す時刻における道路軸直角方向の 曲げモーメント分布を実験結果とともに示している。図 より、解析結果と実験結果の曲げモーメントを比較する と、中央部載荷時と同様に分布性状は両者ともほぼ同様 になっているが頂版部の載荷点直下や柱部および側壁部 上端の曲げモーメント値はいずれも解析結果が実験結果 よりも若干大きな値を示していることが分かる。以上よ り、三次元動的骨組解析では変位分布は概ね実験結果を 再現可能であるものの、曲げモーメント分布に関しては 若干安全側の評価を与えることが明らかとなった。この 原因については今後さらに数値解析的検討を行いながら 明らかにしていきたい。



図-10 曲げモーメント分布(端部載荷)

5. まとめ

本研究では、三層緩衝構造(TLAS)を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの衝撃荷重載荷実験結果に着目し、 三次元動的骨組解析の実務設計への適用性を検討するた めに数値解析を実施し実験結果との比較検討を行った。 本研究の範囲で得られた結果をまとめると、以下のとお りである。

- (1) 三次元動的骨組解析に用いる衝撃力入力モデルの 最大値を伝達衝撃力値とする台形状に簡略化し、継続 時間を重錘衝撃力波形と同程度とし、載荷面積を中央 部載荷では TLAS の設計と同様の 3m 四方、端部載荷 では 5m 四方とする場合において比較的精度よく頂版 変位を算定可能である。
- (2) 上記衝撃力入力モデルによる三次元動的骨組解析の曲げモーメント分布は実験結果に対して若干安全側の評価を与える。
- (3) 三次元動的骨組解析は衝撃力入力モデルの継続時間や載荷面積を適切に設定できる条件下において実験結果を比較的精度よく再現可能であることから、ロックシェッドの耐衝撃挙動の推定手法として実務設計に 十分適用可能であるものと判断される。

参考文献

- 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
- 2) 岸 徳光、牛渡裕二、今野久志、山口 悟、川瀬良 司:重錘落下衝撃荷重を受ける 1/2 スケール RC 製 ロックシェッド模型に関する数値解析的検討、構造 工学論文集、Vol.58A、pp.1029-1040、2012.3
- 今野久志、山口 悟、栗橋祐介、岸 徳光:三層緩 衝構造を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの耐 衝撃挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、 No.2、2014.7
- 4) 北海道開発局建設部道路建設課監修:道路防災工調 查設計要領(案)落石対策編、平成13年3月
- 5) 牛渡裕二、小室雅人、今野久志、岸 徳光:衝撃荷 重を受けた RC 製ロックシェッドに関する三次元骨 組動的応答解析の適用性検討、コンクリート工学年 次論文集、Vol.35、No.2、pp.703-708、2014.7
- 6) 3 次元有限要素法(FEM)解析プログラム Engineer's Studio、<u>http://www.forum8.co.jp</u>