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三次元弾塑性衝撃応答解析

Elasto-plastic impact response analysis on 1/2 scale model of RC rock-shed with various loading points

寒地土木研究所 ○正 員 今野 久志 (Hisashi Konno) 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi) 寒地土木研究所 正員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi) 室蘭工業大学大学院 Æ 員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari) 室蘭工業大学大学院 学正員 武田 雅弘 (Masahiro Takeda)

1. はじめに

現在,落石防護工の一つである RC 製ロックシェッド は,落石対策便覧等の要領に基づき許容応力度法によって 断面設計が行われている.近年,さまざまな構造物の設 計法が許容応力度法から性能照査型に移行してきており, ロックシェッドにおいても,同様に性能照査型設計法の確 立が求められている.落石防護構造物の場合には,耐衝 撃応答特性を考慮し,かつ比較的簡易な設計法が必要と なることから,三次元弾塑性衝撃応答解析を基礎として, 最終的に二次元解析への移行を図ることが望ましい.こ こで,二次元解析によって簡易に耐衝撃性を評価するため には,基礎となる三次元弾塑性衝撃応答解析の精度向上 が課題となる.このような背景の下,著者らは,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,2/5 お よび1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型に対し,重錘落下 衝撃実験を実施し,その耐衝撃挙動を把握している^{1)~3}.

本研究では、1/2 縮尺模型に対する三次元弾塑性衝撃応 答解析を実施し、実験結果との比較検討によりその妥当 性を検証すると共に、載荷位置を変化させた場合の耐衝 撃挙動について数値解析的に検討を行った.なお、本数 値解析には有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析用 汎用コード LS-DYNA(Ver. 971)を用いている.



図-1 要素分割状況

2. 実験概要

衝撃実験を実施したロックシェッドの断面形状は,実 構造物の 1/2 縮尺模型であり, 頂版部材厚, 側壁および 柱部材厚が 500 mm, 内空幅 4,500 mm × 高さ 2,500 mm と なっており, 道路軸方向の 1 ブロック延長は 6,000 mm で ある. 頂版下面および上面の軸方向鉄筋には D22 を 125 mm 間隔で配置し, 配力筋は軸方向鉄筋の 50 % を目安に 上面, 下面ともに D13 を 125 mm 間隔で配置している.

実験法は、繰り返し載荷で行うこととし、重錘質量 10,000 kgの鋼製重錘を、落下高さ H=1m, 2.5m, 5m, 10m, 15 m, 20m と漸増させて実験を行った.載荷点位置はロッ クシェッド模型の軸方向および幅員方向中心位置(後述 の C-CL)に限定している.実験における計測項目は、重 錘衝撃力および試験体各部の変位である.また、各実験 終了後には、試験体のひび割れ状況をスケッチしている.

表-1 解析ケース一覧

解析	落下高さ	入力エネルギー	載荷軸	載荷
ケース	H(m)	E(kJ)	単以11月1年1日	位置
C-P-H10	10	980	ブロック	柱側 (P)
C-CL-H1~20	1,5,10,15,20	98~1,960	中央部	中心 (CL)
C-S-H10	10	980	(C)	壁側 (S)
E-P-H10	10	980	ブロック	柱側 (P)
E-CL-H1~20	1,5,10,15,20	98~1,960	端部	中心 (CL)
E-S-H10	10	980	(E)	壁側 (S)



図-2 荷重載荷位置図

平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号

表-2 物性値一覧

料构	密度	強度	弾性係数	ポアソ
1/3 作号	$\rho~(t/m^3)$	(MPa)	E (GPa)	ン比 v
コンクリート	2.35	28.3	20	0.167
D22, D19	7.85	391, 402	206	0.3
D16, D13	7.85	389, 389	200	0.5
敷砂	1.531	-	10 (除荷時)	0.06
基礎コンクリート	2.5	-	30	0.2



図-3 各材料の応力-ひずみ関係

3. 数值解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

図-1には、本数値解析で用いたロックシェッド模型 の要素分割状況を示す。境界条件として、各接触面には 面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した。また、コ ンクリート-鉄筋要素間は完全付着を仮定し、数値解析 モデルの基礎底面は完全固定、試験体底面-基礎コンク リート間は連続と仮定している。用いた要素は、鉄筋に は2節点の梁要素を、その他の要素には8節点の固体要 素を用いている。減衰定数は考慮していない。

表-1,表-2には,解析ケースおよび物性値の一覧を 示している.また,図-2には荷重載荷位置図を示してい る.実験では繰り返し載荷を行っているが,数値解析で は要素数が多く解析に多大な時間が必要となること,入 力エネルギーが過度に大きくない場合には敷砂によって 入力エネルギーが十分に吸収され,損傷が顕在化しない ことより,鉄筋のひずみ硬化やひび割れの影響が大きく ないものと判断し,繰り返し載荷による損傷の蓄積を考 慮せずに,各実験ケースに対して単一載荷の条件下で解 析を行い,解析手法の妥当性を検討することとした.

3.2 材料物性モデル

図-3には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋お よび敷砂の応力-ひずみ関係を示している.

(a) 図には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示 している. 圧縮側に関しては、相当ひずみが-1,500 µ に達 した時点でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾 塑性体のバイリニア型にモデル化した. 引張強度は圧縮強 度の1/10 と仮定している. 降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している.

(b) 図には,鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している.鉄筋要素に用いた物性モデルは,塑性硬化係数 H'を 弾性係数 E_sの1%とするバイリニア型の等方硬化則を適 用している.降伏の判定には von Misesの降伏条件式を採 用している.

(c)図には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひ ずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂の材料構 成則モデルは、筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対 する衝撃載荷実験結果(W=3 ton, H=5~30 m)と数値解









析結果を比較することにより、その妥当性を検証したものである⁴⁾.

4. 数值解析結果

4.1 実験結果と解析結果の比較

本解析手法の妥当性検証を目的とし,ブロック中央部 中心載荷における実験結果と解析結果を比較する.

(1) 各種応答波形

図-4には, C-CL-H10における実験結果および解析結 果の重錘衝撃力,載荷点直下の鉛直変位,柱上部および 側壁上部(いずれもハンチ下端より50mm下方)の水平 変位の各応答波形を示している.

(a)図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果の 重錘衝撃力波形は重錘衝突時から急激に励起して 40 ms 程 度で最大値に至り、その後第1波より振幅が小さく、周期 が同程度の第2波で構成されている。解析結果に着目する と、第1波、第2波ともに最大値、波動継続時間および波 形性状が実験結果を精度良く再現していることが分かる。

(b) 図に示す載荷点直下の鉛直変位波形に着目すると, 実験結果の波形性状は重錘衝突より若干遅れて励起し最 大値に達する第1波と,その後に続く振幅の小さい第2 波で構成されており,1mm 程度の残留変位が発生してい る.解析結果は,実験結果よりも若干遅れて励起してお り,最大値は実験結果よりも20%程度大きいものの,残 平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号



留変位は実験結果と同程度であり,波形性状も概ね再現 している。

(c),(d) 図に示す柱上部および側壁上部における水平変 位波形は,実験結果および解析結果ともに正弦波状の波 形性状を示している.解析結果は,第1波の立ち上がり が実験結果よりも若干遅れているものの,各最大水平変 位および減衰自由振動も概ね再現している.

(2) ひび割れ発生状況

図-5には、C-CL-H10におけるひび割れ発生状況について、実験結果および解析結果を見下げ図として示している。なお、数値解析結果において、赤色で示された要素がひび割れと等価な状態であると判断される要素である。図より、道路軸方向および載荷点を中心に放射状に曲げひび割れが発生しており、解析結果は実験結果を良く再現している。

(3) 各種応答値と入力エネルギーの関係

図-6には、各種応答値と入力エネルギーの関係につい て、C-CLの実験結果および解析結果を合わせて示してい る.なお、図中には E-CLの解析結果も合わせて示してい るが、載荷位置の違いによる解析結果の比較検討は後述 する.

(a)図の重錘衝撃力と入力エネルギーの関係より,解析 結果は実験結果よりも若干小さめの値を示しており,入力 エネルギーの増加と共にその差が大きくなる傾向が示さ れている.しかし,その差は小さく,解析結果は実験結 果を概ね再現している.実験結果では,入力エネルギー が1,470 kJ以降で入力エネルギーに対する重錘衝撃力の 増加割合が大きくなっている.これは,敷砂への重錘貫 入量が限界値に達しているためと推察される.

(b) 図の載荷点最大変位と入力エネルギーの関係より, 載荷点最大変位は入力エネルギーの増加に対応して,ほ ぼ線形に増加しており,解析結果は実験結果を精度よく 再現している.

(c)図の載荷点残留変位と入力エネルギーの関係より, 載荷点残留変位は載荷点最大変位と同様に入力エネルギー の増加に対応して,ほぼ線形に増加している.入力エネ ルギー E = 980 kJ 以降,解析結果が若干大きめの値を示 しているが,その差は2 mm 程度と小さく,解析結果は実 験結果を良く再現している.

(d) 図の重錘貫入量と入力エネルギーの関係より,解析 結果は入力エネルギーE = 980 kJ以降,実験結果よりも 大きな値を示しているものの概ね再現できている. 以上より,本解析手法を用いることにより,ロックシェッ ド模型の耐衝撃挙動を精度良く評価可能であることが示 された.

4.2 載荷位置を変化させた解析結果の比較

前節で示された検討結果より,本解析手法を用いるこ とで載荷位置を変化させた場合の耐衝撃挙動の再現も可 能であるものと判断し,載荷位置の異なる場合の解析結 果について比較検討する.

(1) 重錘衝撃力

図-7には,各載荷位置における重錘衝撃力および載荷 点変位の応答波形を示している.

(a) 図より、ブロック中央部載荷の C-P/CL/S-H10 は第1 波と第2波で構成されているのに対し、ブロック端部載荷 の E-P/CL/S-H10 は第2波が明瞭には発生していない。こ れは、ブロック中央部載荷の場合には、 頂版の曲げ剛性 が大きいことより、第1波の衝撃荷重作用時における頂 版の変形が小さく, 重錘が敷砂に貫入して第2波が生じ たものと推察される。一方,自由端であるブロック端部 載荷の場合には、頂版の剛性が小さいことから、頂版の 変形が大きく、そのため重錘の敷砂貫入時に発生する第2 波目の振幅も小さくなったものと考えられる. 最大重錘 衝撃力に関しては、ブロック端部載荷の場合にはブロッ ク中央部載荷の場合に比較して 1.2~1.3 倍の値を示して いる。これは、重錘貫入量の違いによる影響と考えられ る. また, 道路軸方向の載荷位置にかかわらず, 中心に 載荷した場合よりも柱側および壁側に載荷した場合の最 大重錘衝撃力が若干大きい. これは, 前者の場合には曲 げ変形が卓越するのに対して,後者の場合には柱や側壁 の拘束が大きく、見かけ上剛性も大きく評価されること によるものと判断される.

(2) 載荷点変位

(b) 図より、いずれも衝突初期に振幅が最大となる正弦 半波状の応答波形を示している。その後、ブロック中央 部載荷の場合には第2波が発生し、残留変位がほとんど 発生していない。一方、ブロック端部載荷の場合には明 瞭な第2波が発生せず、E-P-H10およびE-CL-H10は δ = 10~20 mmの残留変位が生じている。

図-8には、載荷点での最大鉛直変位発生時における道路軸方向変位分布を示している。

(a) 図のブロック中央部載荷時における変位分布より, 載荷点である中央部から端部までの全長に渡って変位が 発生しており,ブロック全体で衝撃荷重を分担している

平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号



図-7 各種応答波形(載荷位置を変化させた場合)

ことがわかる.ブロック端部の変位は柱側,中心,壁側, いずれの載荷位置においても中央部の約50%程度となっ ている.これより,ブロック全体で2次元骨組的な応答 性状を示していることが分かる.

(b) 図のブロック端部載荷時には、ブロック端部を自由 端とする片持ち梁に類似した変位分布性状を示し、分布 範囲はいずれもブロック中央部近傍で収束している.

(3) 各種応答値と入力エネルギーの関係

前述した 図-6 には, C-CL および E-CL において落下 高さを変化させた場合の各種応答値と入力エネルギーの 関係を示している.

(a) 図より, 重錘衝撃力はいずれの載荷位置においても 入力エネルギーの増加に対応して増加する傾向が示され ている.同一入力エネルギーに対する最大重錘衝撃力値 は端部載荷の場合が若干大きな値を示している.これは, (d) 図の重錘貫入量と入力エネルギーの関係において,端 部載荷の場合の重錘貫入量が小さくなることに対応して いるものと推察される.

(b),(c)図には、載荷点最大変位および載荷点残留変位と 入力エネルギーの関係を示している.図より、いずれの 場合も端部載荷が非常に大きな値を示していることが分 かる.これは、図-8(b)に示したようにブロック端部を 自由端とする片持ち梁に類似した変位分布性状を示すた めと推察される.

(d) 図には、敷砂緩衝材への重錘貫入量と入力エネル ギーの関係を示している。図より、重錘貫入量は端部載 荷が中央部載荷よりも20%程度小さな値を示しているこ とが分かる。これは、敷砂緩衝材側方の拘束条件の違い によるものと推察される。

5. まとめ

RC 製ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立 を最終目的に、その基礎的な検討として載荷位置を変化



図-8 変位分布図(載荷位置を変化させた場合)

させた場合の耐衝撃挙動を把握することを目的に 1/2 縮尺 模型に対し,三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した.本 研究で得られた結果をまとめると,以下の通りである.

- 提案の数値解析により、敷砂緩衝材を有する RC 製 ロックシェッド模型の衝撃実験結果を精度よく再現 可能である。
- 2) 重錘衝撃力は、載荷位置に関わらず類似の波形性状 を示すが、最大値はブロック端部が中央部に比較して、1.2~1.3倍程度大きな値を示す。
- 3) 載荷点変位は、載荷位置に関わらずほぼ同様の波形 性状を示すが、最大値に関しては道路軸直角方向で は中央部、柱側、壁側の順に大きく、道路軸方向で は端部載荷の場合が大きい。
- 4) ブロック中央部載荷の場合には、ブロック全体で衝撃 荷重を分担しており、端部の鉛直変位は中央部の50 %程度である.また、端部載荷の場合には軸方向の中 央部近傍を固定端とする片持ち状の応答性状を示す.

参考文献

- 今野久志,岸 徳光,栗橋祐介,山口 悟,西 弘 明:敷砂緩衝材を設置しない RC 製ロックシェッド模 型の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験,構造工 学論文集, Vol.56A, pp.1101-1112, 2010.3
- 山口 悟,岸 徳光,今野久志,西 弘明:敷砂緩衝 材を有する RC 製ロックシェッド模型に関する衝撃 載荷実験,構造工学論文集, Vol.56A, pp.1149-1159, 2010.3
- 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
- 岸 徳光,岡田慎哉,今野久志,池田憲二:敷砂緩衝 材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一 考察,構造工学論文集,Vol.49A, pp.1323-1332, 2003.3