重錘 4.8t

既設落石覆工の衝撃応答解析結果を用いた破壊確率の推定

室蘭工業大学大学院	正会員	\bigcirc	栗橋	祐介
室蘭工業大学大学院	正会員		小室	雅人
室蘭工業大学大学院	学生員		瓦井	智貴

Matrisk GmbH非会員Rocco CusterTBA Graubunden非会員Kristian Schellenberg釧路工業高等専門学校フェロー岸 徳光

1. はじめに

本研究では、落石覆工の衝撃応答解析結果に基づいた破 壊確率の推定法の確立を目的に、落石覆工の耐衝撃挙動に 大きな影響を及ぼすことが予想される不確定要素(材料強 度など)を選定するとともに、その確率分布を設定し、10 ケースの弾塑性衝撃応答解析を実施した.ロックシェッ ドの破壊指標は、頂版部のたわみの弾性復元率(Elastic recovery Ratio: *ER*)が対応するものと仮定し、*ER* と各不 確定要素に関する重回帰式を求めた.最後に、この重回 帰式に関して 100 万ケース以上のモンテカルロ・シミュ レーションを行い、*ER* の累積分布関数を求めた.

2. 数值解析概要

2.1 解析モデル

図1には、対象とした既設落石覆工の解析モデルを示し ている.解析モデルは、コンクリートの要素長を50mm を基本に分割しており、約53万節点および約50万要素 で構成されている.本数値解析には非線形衝撃応答解析 用汎用コードLS-DYNA²⁾を用いた.要素のモデル化に関 しては、鉄筋には2節点の梁要素を用い、その他の要素 には8節点の固体要素を用いている.四隅の柱下端部は 完全固定支持、頂版上面と緩衝材の界面は面と面との接 触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面(摩擦係数:0)を 定義している.なお、重錘質量と衝突速度は、頂版が大き く塑性変形する程度の落石荷重を想定し、事前解析結果 に基いて、それぞれ25m/s および4.8tとした.

2.2 材料構成則と確率分布

図2には、コンクリート、鉄筋および緩衝材の応力-ひずみ関係に関する材料構成則を示している.なお、各構成 則の詳細については、文献 1)を参考にされたい.**表1**に は、各材料特性値の確率分布の一覧を示している.ロッ クシェッドの耐衝撃性に大きな影響を及ぼす不確定要素 としては、コンクリート圧縮強度 f'_c 、鉄筋の降伏強度 f_y 、 緩衝材の弾性係数 E_G と降伏強度 f_G を選定した.

表2には,解析ケースの一覧を示している.解析ケース は,4つの材料特性値(不確定要素)をそれぞれ変化させた 全10ケースである.

3. 数値解析結果

3.1 時刻歴応答波形

数値解析モデル σ (MPa) g r MPa g r MPag r MPa



図2 材料物性モデル

表 1 不確定要素の確率分布

不確定要素	分布形	モーメント	確率分布 パラメータ
コンクリート	対数正規	平均值: 62 MPa	$\lambda = 0.10$
圧縮強度 f'_c	分布	標準偏差: 6.24 MPa	$\zeta = 3.65$
鉄筋降伏	対数正規	平均值: 509 MPa	$\lambda = 0.06$
強度 fy	分布	標準偏差: 36 MPa	$\zeta = 6.23$
緩衝材の 弾性係数 <i>E_G</i>	ベータ 分布	平均值: 45 MPa 標準偏差: 12.6 MPa	$\alpha = 4.44$ $\beta = 3.61$ min. 3.0 MPa
	ベータ 分布	平均值: 5.5 MPa 標準偏差: 0.77 MPa	$\frac{\text{max. } 79.3 \text{ MPa}}{\alpha = 12.33}$ $\beta = 12.96$ min. 1.6 MPa max. 9.6 MPa

表3には,解析結果における各種応答値の一覧を示している.表中の弾性復元率 *ER*は,応答変位波形に関する解析結果から得られる最大変位および残留変位を用いて下式(1)で求めている.本研究では,*ER*をロックシェッドの破壊指標として検討することとしている.

キーワード:落石覆工,衝撃応答解析,弾性復元率,破壊確率 連絡先:〒050-8585 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX 0143-46-5225



表2 解析ケースの一覧

	コンクリート	鉄筋降伏	緩衝材の	緩衝材の
No.	強度 f'_c	強度 fy	弾性係数	降伏強度
	(MPa)	(MPa)	E_G (MPa)	σ_G (MPa)
1	33.0	480	55	6.5
2	31.0	465	70	6.5
3	35.0	435	55	6.0
4	41.2	290	50	6.0
5	30.0	290	100	6.0
6	41.2	330	100	6.0
7	35.0	290	75	6.5
8	41.2	390	100	6.0
9	41.2	450	100	6.0
10	30.0	360	60	6.5

表3 解析結果による応答値の一覧

	最大落石	落石	頂版の	頂版の	弾性
No.	衝擊力	貫入量	最大変位	残留変位	復元率
	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)	$ER\left(\% ight)$
1	8626	137.8	128.3	73.3	42.9
2	9086	130.1	130.8	76.8	41.3
3	8508	144.0	127.7	79.8	37.5
4	8397	150.0	134.8	109.2	19.0
5	9098	123.1	162.5	130.5	19.7
6	9075	123.9	125.2	98.7	21.2
7	9113	113.4	155.0	123.5	20.3
8	9136	122.4	112.0	76.8	31.4
9	9136	121.4	108.4	67.5	37.7
10	8943	137.0	161.1	112.4	30.2

$$ER = \frac{\delta_{max} - \delta_{res}}{\delta_{max}} \tag{1}$$

図3には、ERが最大値および最小値を示した解析ケース1および4に関する落石衝撃力,落石貫入量および頂版中央部のたわみに関する時刻歴応答波形を示している。 図より,落石衝撃力波形は,最大振幅が8,000~9,000 kN 程度で継続時間が25 ms 程度の正弦半波が卓越する性状 を示している.落石貫入量波形は,落石衝突後10 ms 程 度で急激に増大しその後増加勾配が減少して,50 ms 程度 で最大値を示す性状を示している。

頂版の載荷点変位波形は,継続時間 100 ms 程度で,か つ落石衝突後 50 ms 程度で最大値を示す主波動が励起さ れ,その後変位が残留している.最大変位 δ_{max} や変位復 元後の残留変位 δ_{res} およびこれらの結果から得られる弾



図4 弾性復元率に関する累積分布関数

性復元率 ER は、不確定要素に大きく依存している.

4. 破壊確率の推定

前章で得られた全10ケースの衝撃応答解析結果を用い てロックシェッドの破壊確率を求めるために,重回帰分 析を行った.回帰式は下式(2)の通りである.本回帰式の 決定係数は0.99であり,極めて相関性の高い回帰式が得 られた.

 $ER = -20.2 - 0.07f_c + 0.12f_v - 0.003E_G + 1.53\sigma_G + \varepsilon$ (2)

次に, 表1に示した不確定要素の確率分布と上記の重 回帰式を用いてモンテカルロ・シミュレーションを実施 した.その結果を弾性復元率の累積分布として図4に示 す.図を用いるとロックシェッドの破壊確率を容易に求 めることができる.すなわち,破壊基準を ER < ER_{failure} として ER_{failure}を設定することにより,破壊確率を得る ことができる.

5. まとめ

- 1) 設定したケースに関する衝撃応答解析結果より,弾 性復元率 ER と各不確定要素について相関性の高い回 帰式が得られた.
- 2) 重回帰式を用いたモンテカルロ・シミュレーション により,弾性復元率 ERの累積分布関数を求めた. 破 壊基準を $ER < ER_{failure}$ として $ER_{failure}$ を設定する ことにより,破壊確率を得ることができるものと考 えられる.