落石覆道の衝撃応答解析結果に基づく破壊確率の検討

An investigation on failure probability of Rockfall protection gallery based on the results obtained from FE analysis

| 室蘭工業大学大学院○ | 正 | 員 | 栗橋祐介 | (Yusuke | Kurihashi |
|------------|----|---|------|---------|-----------|
| 室蘭工業大学大学院 | 正 | 員 | 小室雅人 | (Masato | Komuro) |
| 室蘭工業大学大学院 | 学生 | 員 | 瓦井智貴 | (Tomoki | Kawarai) |

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC)構造物の耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として,RC梁,RC版 およびRCロックシェッド模型を用いた小型および実大規 模の重錘衝撃落下実験が実施されている.また,これらを 対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析が行われており,実 験結果を再現可能な数値解析手法の確立に向けた検討が行 われている.これまでの検討では,衝撃力やたわみおよび 破壊性状を適切に評価可能な数値解析手法が提案されている¹⁾.

従って、ロックシェッドの破壊指標を設定し、上記の数 値解析手法を用いて種々の不確定要素を考慮した数値シ ミュレーションを行うことにより、その破壊確率を推定で きるものと考えられる.ただし、ロックシェッドの破壊指 標に関する確率密度関数を求めるためには、膨大なケース の数値解析結果が必要であるため、上記の手法は現実的で はない.

そのため、本研究では、ロックシェッドの衝撃応答解析 結果に基づいた破壊確率の推定法の確立を目的に、ロック シェッド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.なお、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.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

写真-1には、検討対象であるリアイナトーベル覆道を示している。本覆道は、スイスグリソン州の山岳部に供用されており、1987年には落石災害が発生している。そのため、現在は落石対策のための補強設計の検討を進めている。

図-1には、設計図書に基いて作成した解析モデルを示している.本解析モデルは、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50万要素で構成している.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

Matrisk GmbH 非会員 Rocco Custer
TBA Graubunden 非会員 Kristian Schellenberg
釧路工業高等専門学校フェロー岸 徳光 (Norimitu Kishi)



(a) 1987 年の落石災害状況



(b) 覆道内部の状況

写真-1 検討対象の覆道





平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号



(a) コンクリート



(c) 緩衝材

図ー2 材料物性モデル

| 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 | $\chi = 0.10$ |
| 圧縮強度 f'_c | 分布 | 標準偏差: 6.24 MPa | $\eta = 3.65$ |
| 鉄筋降伏 | 対数正規 | 平均值: 509 MPa | $\chi = 0.06$ |
| 強度 fy | 分布 | 標準偏差: 36 MPa | $\eta = 6.23$ |
| 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 | <i>a</i> = 4.44 <i>b</i> = 3.61 min. 3.0 MPa max. 79.3 MPa |
| 緩衝材の 降伏強度 σ G | ベータ 分布 | 平均值: 5.5 MPa 標準偏差: 0.77 MPa | a = 12.33 b = 12.96 min. 1.6 MPa max. 9.6 MPa |

表-1 不確定要素の確率分布

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25 m/s および4.8 t とした.

2.2 材料構成則と確率分布

図-2には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋お よび緩衝材の応力-ひずみ関係を示している. 図-2(a) には、コンクリートに関して示している。 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。また、引張側に関しては、 引張強度 (圧縮強 度の 1/10) に達した段階で、応力を完全に解放するものと 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、内部摩擦角を30度と仮定した。

図-2(b)には、鉄筋に関して示している. 材料構成則 には、塑性硬化係数H'を弾性係数の1%とするバイリニ ア型の等方硬化則を適用した.なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している. 各物性値は, 弾性係 数 $E_s = 200$ GPa, ポアソン比 $v_s = 0.3$ と仮定した.

図-2 (c) には、緩衝材に関する相当応力-体積ひずみ 関係を示している。応力-ひずみ関係は、載荷速度に大き く影響を受けるものと推察される。本数値解析では, 既往

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 |



図-3 弾性復元率と塑性率の概要

の研究成果を参考に,弾塑性体モデルを適用した.

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',鉄筋の降伏強 度 f_v ,緩衝材の弾性係数 E_G と降伏強度 f_G を選定した.ま た,確率密度関数の種類は,既往の文献³⁾を参考にして設 定した.

2.3 解析ケースと破壊指標

表-2には、解析ケースの一覧を示している. 解析ケー スは、落石質量 4.8 t および衝突速度 25 m/s の条件下におい て,前述の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.また,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(図-3(a)を参照). 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.

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

なお、図-3(b)に示すように RC 部材の曲げ載荷におい て,荷重-変位関係を考えると主鉄筋降伏までの載荷勾配 と除荷勾配はほぼ同様であることから、最大変位 δ_{max} から



図-4 応答波形の一例

| | 最大落石 | 落石 | 頂版の | 頂版の | 弾性 | 塑性 |
|-----|------|-------|-------|-------|--------|------|
| No. | 衝擊力 | 貫入量 | 最大変位 | 残留変位 | 復元率 | 率 |
| | (kN) | (mm) | (mm) | (mm) | ER (%) | μ |
| 1 | 8626 | 137.8 | 128.3 | 73.3 | 42.9 | 2.33 |
| 2 | 9086 | 130.1 | 130.8 | 76.8 | 41.3 | 2.42 |
| 3 | 8508 | 144.0 | 127.7 | 79.8 | 37.5 | 2.66 |
| 4 | 8397 | 150.0 | 134.8 | 109.2 | 19.0 | 5.26 |
| 5 | 9098 | 123.1 | 162.5 | 130.5 | 19.7 | 5.08 |
| 6 | 9075 | 123.9 | 125.2 | 98.7 | 21.2 | 4.72 |
| 7 | 9113 | 113.4 | 155.0 | 123.5 | 20.3 | 4.93 |
| 8 | 9136 | 122.4 | 112.0 | 76.8 | 31.4 | 3.18 |
| 9 | 9136 | 121.4 | 108.4 | 67.5 | 37.7 | 2.65 |
| 10 | 8943 | 137.0 | 161.1 | 112.4 | 30.2 | 3.31 |

表-3 解析結果による応答値の一覧

残留変位 δ_{res} を差し引いた復元変位 (δ_{max} - δ_{res}) は,降伏変 位 δ_y と概ね等価である.従って,式(1)は,下式(2)のように変換可能である.

$$ER = \frac{\delta_y}{\delta_{max}} = \frac{1}{\mu} \tag{2}$$

ここで、 μ は塑性率である. 従って、弾性復元率 *ER* は、 塑性率 μ の逆数であることが分かる.

3. 数值解析結果

3.1 時刻歴応答波形

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.また,図-4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-4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.また,このような傾向は,他の解析ケー スでも同様であり,設定した不確定要素の影響は大きくは ないことが分かる.

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.このような性状は,他の解析ケースで も同様であるが,最大値は緩衝材の特性に影響を受ける傾 向にある.

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し,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性復元率 ER は,不確定要素に大きく依存している.特に,鉄筋降 伏強度 f_v の影響が最も大きいようである.

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.回帰式と各不確定要素の共分散行列は下記の通 りである.なお, *ε* は標準偏差 1.02 の標準正規分布誤差項 である.

$$ER = \beta_0 + \beta_1 \cdot f_c + \beta_2 \cdot f_s + \beta_3 \cdot E_G + \beta_4 \cdot \sigma_G + \varepsilon$$
(3)

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20.15 \\ -0.07 \\ 0.116 \\ -0.003 \\ 1.53 \end{bmatrix}$$
(4)

 $COV_{\beta} =$

| 192.07 | -0.86 | 0.0003 | -0.086 | -25.0 | |
|--------|--------------------|--------------------|-------------------|--------|-----|
| -0.86 | 0.0078 | -1.41 <i>e</i> -06 | -0.00015 | 0.094 | |
| 0.0003 | -1.41 <i>e</i> -06 | 1.96e-05 | 1.05 <i>e</i> -05 | -0.001 | (5) |
| -0.086 | -0.00015 | 1.05 <i>e</i> -05 | 0.0003 | 0.01 | |
| -25.0 | 0.094 | -0.001 | 0.01 | 3.43 | |



図-5 弾性復元率に関する累積分布関数

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。

次に、 $\mathbf{表}-1$ 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 $\mathbf{Z}-5$ 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**

本研究では、ロックシェッドの有限要素解析により得ら れた衝撃応答解析結果に基づく破壊確率の推定を目的に、 影響の大きい不確定要素を選定するとともに、その確率分 布設定し、10ケースの三次元弾塑性有限要素解析を実施した。また、解析結果に基づき *ER* と各不確定要素に関する 回帰式を求め、モンテカルロ・シミュレーションにより *ER* の累積分布関数を求めた。本研究により得られた知見は以 下の通りである。

- 1) 頂版の載荷点変位波形から得られる弾性復元率 ER は, 設定した不確定要素に大きく依存している。特に,鉄 筋降伏強度の影響を強く受けている。
- 2) 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)の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.

参考文献

- 平田健朗,小室雅人,山口悟,岸徳光:砕石緩衝材を設置した実規模落石覆道の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション,コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.601-606, 2015.7
- Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- Schubert, M, Faber, M.H., 2009, "Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewoehnlicher Einwirkung bei Kunstbauten. ASTRA Bericht 616.