

論文 RC ロックシェッドの衝撃応答解析に基づく破壊確率の検討

栗橋 祐介^{*1}・Rocco Custer^{*2}・小室 雅人^{*3}・Kristian Schellenberg^{*4}

要旨:本研究では、RC ロックシェッドの衝撃応答解析結果に基づいて、その破壊確率を検討することを目的に、耐衝撃挙動に大きな影響を及ぼすことが想定される材料特性値（不確定要素）を選定するとともに、それらの確率分布を設定し三次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、頂版部の変位に関する弾性復元率 ER が RC ロックシェッドの損傷度の評価指標の 1 つになるものと考え、解析結果に基づいて弾性復元率 ER と各不確定要素に関する重回帰式を求め、モンテカルロ・シミュレーションにより ER の累積分布関数を得た。これらの結果より、衝撃応答解析に基づく破壊確率の推定手法を提案した。

キーワード: RC ロックシェッド、衝撃応答解析、弾性復元率、破壊確率

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の合理的な耐衝撃設計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^{1),2)}。また、これらの実験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、衝撃力や変位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^{3),4)}。

従って、ロックシェッドの破壊基準を適切に設定し、上記の数値解析手法を用いて種々の材料特性値のばらつき（不確定要素）を考慮した衝撃応答解析を行うことにより、その破壊確率 P_f を推定できるものと考えられる。ただし、ロックシェッドの損傷度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 P_f の推定法を提案することを目的に、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を選定するとともに、その確率分布を設定し、10 ケース程度のロックシェッドの三次元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-DYNA⁵⁾ を用いた。ここでは、ロックシェッドの損傷度には、頂版部の変位の弾性復元率 (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 万ケース程度のモンテカルロ・シミュレーションを行い、 ER の累積分布関数を求めた。



(a) 外観



(b) 頂版表面と柱部の状況

写真-1 検討対象のロックシェッド

2. 数値解析概要

2.1 解析モデル

写真-1には、検討対象であるロックシェッドを示している。本ロックシェッドは、スイスグリソン州の山岳部において1981年から供用されているリアイナトーベル覆道であり、1987年には落石災害が発生して軽微な損傷を受けている。そのため、現在は岩盤の経過観察を行うとともに各再現期間における落石規模を想定し、補強設計の検討が進められている。

図-1には、設計図書に基づき、かつ既往の研究成果⁴⁾を参考にし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50 mm とすることを

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*2 Matrisk GmbH Dr. sc.

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

*4 Tiefbauamt Graubunden Dr. sc.

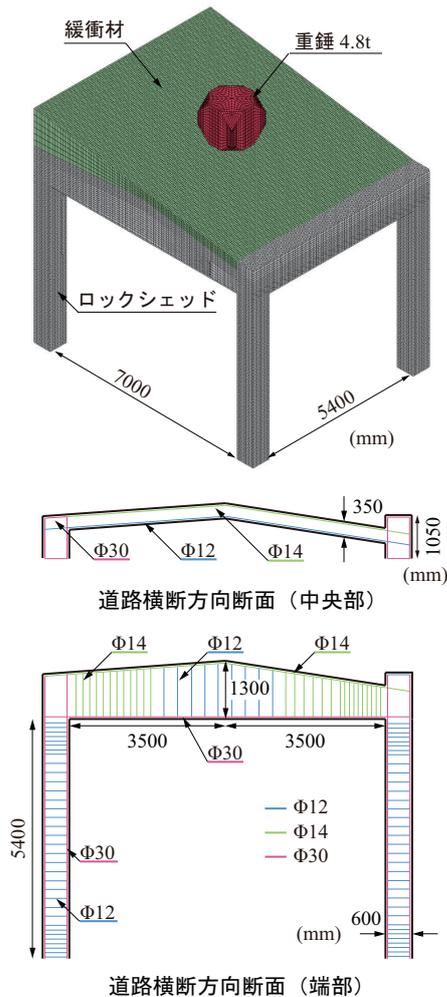


図-1 数値解析モデル

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。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を定義している。

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。これらの材料構成則は、既往の研究成果⁴⁾を参考にして設定した。

コンクリートの材料構成則は、図-2(a)に示すように、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。

鉄筋の材料構成則は、図-2(b)に示すように、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

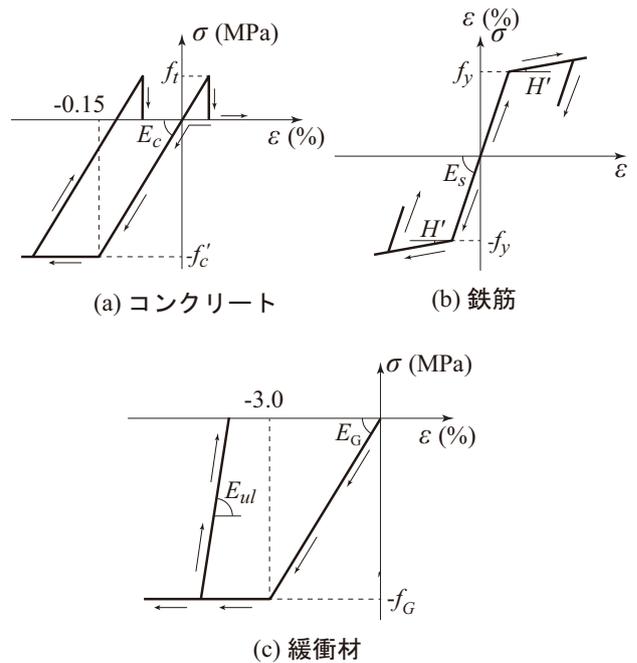


図-2 材料物性モデル

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 $\nu_s = 0.3$ と仮定した。

緩衝材の構成則は、図-2(c)に示すように、圧縮側についてバイリニア型にモデル化した。有限要素法の場合には土質材料の側方流動を再現することが困難であるため、側方流動の開始点を擬似的に降伏点とすることでモデル化している。このモデル化の妥当性については、文献⁶⁾で確認しているが、今後さらに検討する余地があるものと考えている。

なお、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析を実施して鉛直方向最低次固有振動数に対して1%と設定した。また、ひずみ速度効果は考慮していない。重錘は、コンクリート製であるものとしてモデル化した。

表-1には、各材料特性値の確率分布の一覧を示している。ロックシェット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。また、確率密度関数の種類は、既往の文献⁶⁾を参考にして実状を再現したものとなるように設定した。

2.3 解析ケースと損傷度の指標

表-2には、解析ケースの一覧を示している。本研究では、まずシリーズ1として、解析結果の妥当性の検討と解析対象ロックシェットの耐衝撃特性の評価を目的に、前述の4つの材料特性値(不確定要素)を固定し、落石衝突速度を変化させた4ケースについて検討を行った。次に、シリーズ2として、各不確定要素をそれぞれ変化した10ケースについて検討した。表中のケース名の第1

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*
コンクリート圧縮強度 f'_c	対数正規分布	平均値 μ : 62 MPa, 標準偏差 σ : 6.24 MPa	$\lambda = 0.10, \zeta = 3.65$
鉄筋降伏強度 f_y	対数正規分布	平均値 μ : 509 MPa, 標準偏差 σ : 36 MPa	$\lambda = 0.06, \zeta = 6.23$
緩衝材の弾性係数 E_G	ベータ分布	平均値 μ : 45 MPa, 標準偏差 σ : 12.6 MPa	$\alpha = 4.44, \beta = 3.61$ 最小値: 3.0 MPa, 最大値: 79.3 MPa
緩衝材の降伏強度 σ_G	ベータ分布	平均値 μ : 5.5 MPa, 標準偏差 σ : 0.77 MPa	$\alpha = 12.33, \beta = 12.96$ 最小値: 1.6 MPa, 最大値: 9.6 MPa

*: $\lambda = \ln \mu - \frac{\zeta^2}{2}, \zeta^2 = \ln \{ 1 + (\frac{\sigma}{\mu})^2 \}$

表-2 解析ケースの一覧

No.	解析シリーズ	落石質量 (ton)	衝突速度 (m/s)	入力エネルギー (kJ)	緩衝材厚さ (mm)	コンクリート強度 f'_c (MPa)	鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	緩衝材の弾性係数 E_G (MPa)	緩衝材の降伏強度 σ_G (MPa)
1-1	1	4.8	10	470	300	41.2	290	100	6.0
1-2			15	706		41.2	290	100	6.0
1-3			20	941		41.2	290	100	6.0
1-4			25	1,177		41.2	290	100	6.0
2-1	2	4.8	25	1,777	400	33.0	480	55	6.5
2-2						31.0	465	70	6.5
2-3						35.0	435	55	6.0
2-4						41.2	290	50	6.0
2-5						30.0	290	100	6.0
2-6						41.2	330	100	6.0
2-7						35.0	290	75	6.5
2-8						41.2	390	100	6.0
2-9						41.2	450	100	6.0
2-10						30.0	360	60	6.5

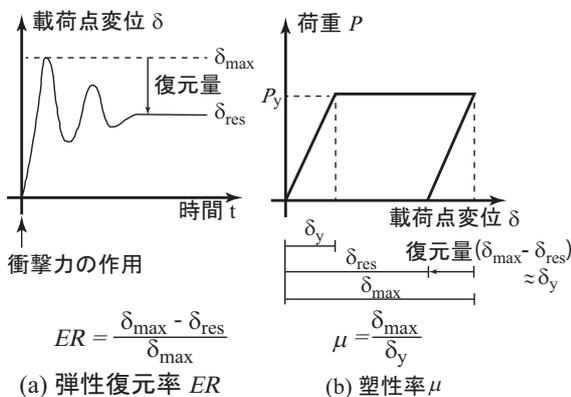


図-3 弾性復元率と塑性率の概要

項は解析シリーズを示し、第2項には各解析シリーズにおける通し番号を示している。

RCロックシェッドの損傷度は、弾性復元率 ER を用いて評価した。ここで、 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)。

$$ER = \frac{\delta_{max} - \delta_{res}}{\delta_{max}} \quad (1)$$

ここで、 δ_{max} : 頂版部中央部の最大変位、 δ_{res} : 頂版部中央部の残留変位、である。なお、図-3(b)に示すように

RC部材の曲げ荷重において、荷重-変位関係を考えると主鉄筋降伏までの荷重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} から残留変位 δ_{res} を差し引いた復元変位 ($\delta_{max} - \delta_{res}$) 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。

$$ER = \frac{\delta_y}{\delta_{max}} = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

ここで、 μ は塑性率⁷⁾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. 数値解析結果

3.1 耐衝撃挙動に及ぼす入力エネルギーの影響(シリーズ1)

(1) 時刻歴応答波形

図-4には、シリーズ1に関する落石衝撃力、落石貫入量および頂版中央部の変位に関する時刻歴応答波形を示している。なお、落石貫入量は緩衝材に対する貫入量であり、頂版の変位量は含まれていない。また、表-3には各応答値の一覧を示している。

図-4より、いずれの応答値も、衝突速度の増加に伴って増大していることが分かる。落石衝撃力は、継続時間が25ms程度の正弦半波が卓越する性状を示している。

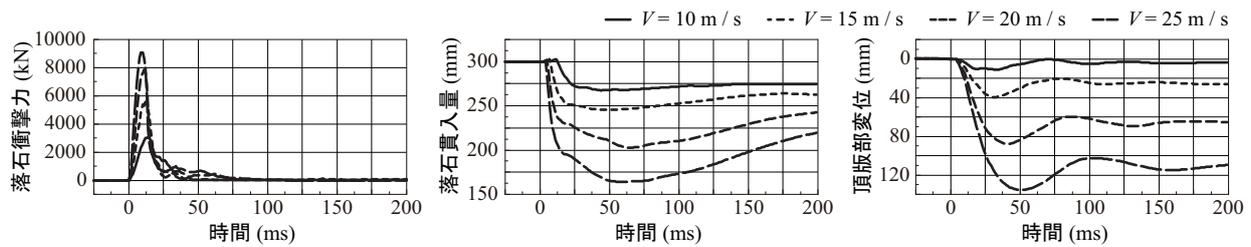


図-4 各衝突速度における時刻応答波形(シリーズ1)

表-3 解析結果による応答値の一覧(シリーズ1)

No.	落石衝撃力(kN)	落石貫入量(mm)	頂版の最大変位(mm)	頂版の残留変位(mm)	弾性復元率ER(%)	塑性率 μ
1-1	3,056	32.5	11.3	3.9	65.0	1.54
1-2	5,567	54.6	39.7	25.4	36.0	2.78
1-3	7,868	97.1	87.9	66.0	24.9	4.02
1-4	9,078	135.8	135.2	110.1	18.6	5.38

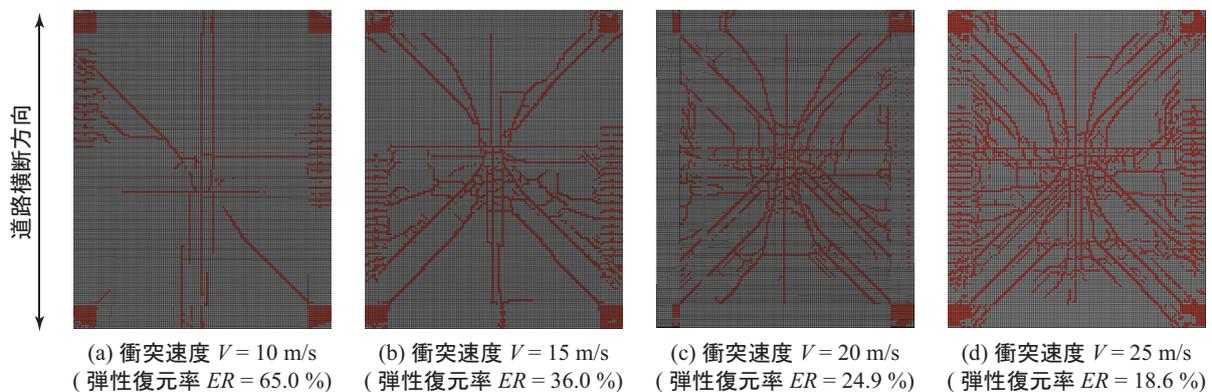


図-5 頂版下面のひび割れ性状(シリーズ1)

落石貫入量は、落石衝突後 10 ms において急激に増加し、その後増加勾配が低下し、40 ms 程度で最大値に到達している。その後、貫入量は低下しており、落石がリバウンドしている様子が窺われる。このような波形性状は、既往の実規模 RC ロックシェッドの重錘落下衝撃実験²⁾においても同様に見受けられる。

また、頂版中央部の変位は、衝突速度 $V = 10$ m/s においては、継続時間が 60 ms 程度の主波動が励起した後、減衰自由振動を呈している。また、残留変位は、3.9 mm 程度である。このことから、ロックシェッドは未だ大きな復元力を有しており、載荷点近傍の主鉄筋は降伏しているものの、損傷は比較的軽微であるものと考えられる。一方、衝突速度 $V = 15, 20$ および 25 m/s の場合には、 V の増加に伴って変位の復元率が減少するとともに、振動が急激に減衰する傾向が強くなっていることが分かる。特に、 $V = 25$ m/s の場合には変位の復元率が小さく、損傷度が大きいことが分かる。

(2) ひび割れ性状

図-5 には、シリーズ1に関する頂版下面のひび割れ分布性状を示している。なお、赤色で示された要素は、引

張応力がコンクリートの引張強度を超過し、解放され零となった要素であり、ひび割れ発生状態であるものと評価できる。図より、 $V = 10$ m/s の場合には、一方方向曲げが卓越したひび割れ性状を示していることが分かる。また、ひび割れによる損傷も軽微であることより、前述の変位波形と対応した性状を示していると言える。衝突速度 $V = 15, 20$ および 25 m/s の場合には、 V の増加に伴って曲げひび割れの他、放射状のひび割れが多数発生する傾向にあることが分かる。

(3) 頂版部の変位と入力エネルギーとの関係

図-6 には、頂版部変位と入力エネルギーとの関係を示している。図より、最大変位および残留変位ともに、入力エネルギーの増大に伴ってほぼ線形に増加していることが分かる。このような傾向は、実規模 RC ロックシェッドの重錘落下衝撃実験²⁾においても同様に見られる傾向である。

これらのことから、本解析モデルは実ロックシェッドの耐衝撃挙動に及ぼす入力エネルギーの影響を適切に評価しているものと考えられる。

3.2 耐衝撃挙動に及ぼす不確定要素の影響(シリーズ2)

表-4 解析結果による応答値の一覧(シリーズ2)

No.	落石衝撃力 (kN)	落石貫入量 (mm)	頂版部の最大変位 (mm)	頂版部の残留変位 (mm)	弾性復元率 ER (%)	塑性率 μ
2-1	8,626	137.8	128.3	73.3	42.9	2.33
2-2	9,086	130.1	130.8	76.8	41.3	2.42
2-3	8,508	144.0	127.7	79.8	37.5	2.66
2-4	8,397	150.0	134.8	109.2	19.0	5.26
2-5	9,098	123.1	162.5	130.5	19.7	5.08
2-6	9,075	123.9	125.2	98.7	21.2	4.72
2-7	9,113	113.4	155.0	123.5	20.3	4.93
2-8	9,136	122.4	112.0	76.8	31.4	3.18
2-9	9,136	121.4	108.4	67.5	37.7	2.65
2-10	8,943	137.0	161.1	112.4	30.2	3.31
最大値	8,397	150.0	162.5	130.5	42.9	2.33
最小値	9,136	113.4	108.4	67.5	19.0	5.26

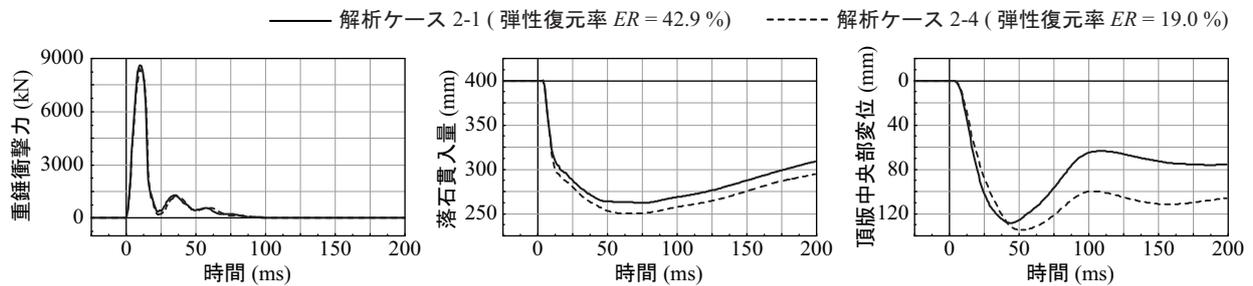


図-7 時刻歴応答波形の一例(シリーズ2)

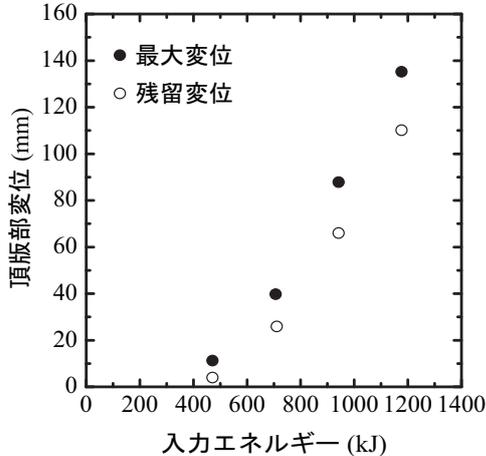


図-6 頂版変位と入力エネルギーの関係(シリーズ1)

表-4には、シリーズ2の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-7には、弾性復元率ERが最大値および最小値を示した解析ケース2-1および2-4に関する落石衝撃力、落石貫入量および頂版中央部の変位に関する時刻歴応答波形を示している。

表-4より、各ケースにおける落石衝撃力の変動は小さいことが分かる。これは、緩衝材の材料特性値が砕石や礫混じりの砂質粘土を想定し、比較的大きな値が設定されているためと推察される。落石貫入量の変動は、落石衝撃力の場合よりも大きいものの、最大値と最小値の

差は30%程度である。

頂版部の最大および残留変位の変動は、落石衝撃力や落石貫入量よりも大きい。これは、鉄筋降伏強度 f_y がRCロックシェッドの変形に大きな影響を与えているためと考えられる。また、残留変位の変動が最大変位の場合よりも大きいのは、残留変位は最大変位と復元量の影響を受けるためである。すなわち、鉄筋降伏強度 f_y は降伏ひずみ ϵ_y と比例関係にあり、降伏ひずみ ϵ_y が変位の復元量に大きく影響するため、残留変位の変動が大きくなるものと推察される。

なお、弾性復元率ERは19.0%~42.9%に分布し、対応して塑性率 μ は5.26~2.33となっていることから、損傷度が比較的大きいケースも含まれていることが分かる。

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RCロックシェッドの破壊確率 P_f を求めるために、弾性復元率ERと各不確定要素に関する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。

$$ER = \beta_0 + \beta_1 \cdot f'_c + \beta_2 \cdot f_y + \beta_3 \cdot E_G + \beta_4 \cdot \sigma_G + \epsilon \quad (3)$$

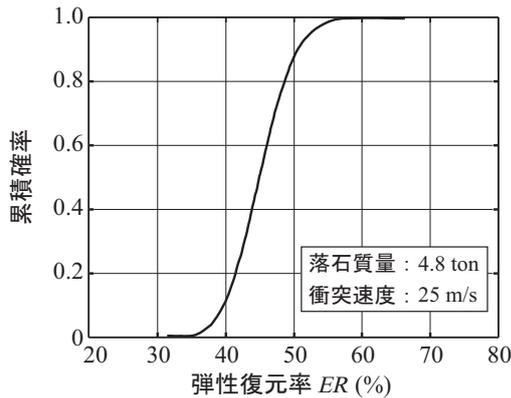


図-8 弾性復元率に関する累積分布関数

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

$COV_{\beta_i} =$

$$\begin{bmatrix} 192.07 & -0.86 & 0.0003 & -0.086 & -25.0 \\ -0.86 & 0.0078 & -1.41e-06 & -0.00015 & 0.094 \\ 0.0003 & -1.41e-06 & 1.96e-05 & 1.05e-05 & -0.001 \\ -0.086 & -0.00015 & 1.05e-05 & 0.0003 & 0.01 \\ -25.0 & 0.094 & -0.001 & 0.01 & 3.43 \end{bmatrix} \quad (5)$$

なお、本重回帰式(3)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、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。すなわち、各不確定要素を確率分布に基いて変化させてERを求める計算を100万ケース程度行った。その結果を弾性復元率ERの累積分布として図-8に示す。RCロックシェットの破壊確率 P_f は、終局弾性復元率 $ER_{failure}$ を適宜設定し、破壊基準を $ER < ER_{failure}$ とすることで評価可能である。すなわち、落石質量および衝突速度がそれぞれ4.8 tonおよび25 m/sの場合において、 $ER_{failure} = 30\%$ ($\mu_{failure} = 3.33$)程度とすると破壊確率 P_f はほぼ零であるが、 $ER_{failure} = 40\%$ ($\mu_{failure} = 2.50$)程度とすると破壊確率 P_f は12%程度となる。

5. まとめ

本研究では、RCロックシェットの衝撃応答解析結果に基づきその破壊確率 P_f を検討することを目的に、耐衝撃挙動に大きな影響を及ぼすことが想定される材料特性値(不確定要素)を選定するとともに、その確率分布設

定し、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。また、解析結果に基づいて弾性復元率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の累積分布関数の算定を試みた。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 入力エネルギーの増加に伴うひび割れ損傷度合いや頂版中央部変位の増加傾向は、既往の実験結果と同様であることから、本解析モデルの妥当性を確認した。
- 2) 各不確定要素を変化させた衝撃応答解析結果より、弾性復元率ERと不確定要素に関する相関性の高い回帰式が得られた。
- 3) 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。RCロックシェットの破壊確率 P_f は、終局弾性復元率 $ER_{failure}$ を適宜設定し、破壊基準を $ER < ER_{failure}$ とすることで、累積分布関数から評価可能である。

謝辞

室蘭工業大学大学院 構造力学研究室の瓦井智貴君には、数値解析からデータ整理に至るまで多大なるご支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中田吉彦, 梶谷浩, 梶川康男, 熊谷貴秀: 重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 46A, pp. 1831-1842, 2000.03
- 2) 佐伯侑亮, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光: 実規模RCロックシェットの耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 613-618, 2015.7
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No. 619/I-47, 1999.4, pp. 215-233
- 4) 平田健朗, 小室雅人, 山口悟, 岸徳光: 碎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
- 5) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R8 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2015.
- 6) Schubert, M, Faber, M.H., 2009, "Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewoehnlicher Einwirkung bei Kunstbauten", AS-TRA Bericht 616.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 2012.4