

落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する コンクリート構成則を変化させた衝撃応答解析手法の適用性検討

Applicability on impact response analysis method for impact resistant behavior
of rockfall protection retaining wall varying concrete constitutive law

室蘭工業大学大学院	○ 学生員	名須川 駿 (Shun Nasukawa)
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)
(国研)寒地土木研究所	正 員	山澤 文雄 (Fumio Yamasawa)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、道路防災施設の一つとして、比較的小規模な落石を対象とした落石防護擁壁が数多く設置されている。一般的に、落石防護擁壁は無筋コンクリート製であり、擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し、落石衝突による擁壁の運動エネルギーと基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となる水平変位および回転が生じるものとして設計されている¹⁾。

しかしながら、現行設計法に関しては、1) 地盤が固く変形しにくい場合には、擁壁の規模を大きくする必要があり、あるいは2) 落石衝突時における擁壁の有効抵抗長を、擁壁高さの4倍と仮定し設計しているが、この根拠が明確ではない、などの問題点が指摘されている。

これらの状況を鑑みて、著者らは、既設落石防護擁壁に関する耐衝撃保有性能を把握し、合理的な設計手法の確立を最終目的として、種々の実規模実証実験²⁾を実施してきた。また、擁壁の耐衝撃挙動をより詳細に検討するために、その現象を忠実に再現可能な数値解析手法についても検討を行ってきた。しかしながら、擁壁の回転移動量、浮上量あるいは損傷状況などを、落石防護擁壁の規模や入力エネルギーによらず、いずれの条件下においても実験結果を忠実に再現可能な数値解析手法の確立には至っていないのが現状である。

以上より、本研究では、落石防護擁壁の合理的な設計法の確立を最終目的とした研究の一環として、要素長およびコンクリート構成則を変化させた無筋コンクリート製落石防護擁壁の衝撃応答解析を実施した。ここでは、衝撃応答解析において国内外で広く用いられている4種類のコンクリート構成則に着目し、解析結果と別途実施した実験結果を比較することにより、構成則モデルや解析手法の妥当性を検討した。なお、本数値解析には汎用構造解析用コードLS-DYNAを用いている。

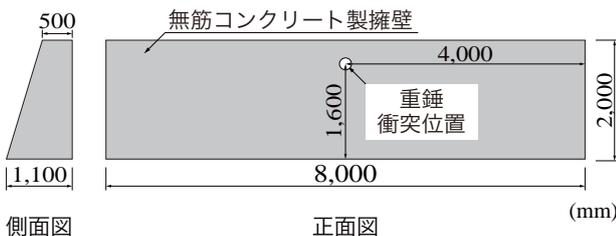


図-1 落石防護擁壁の形状寸法

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた落石防護擁壁の形状寸法を示している。擁壁の形状寸法(高さ×天端×基部の壁厚×擁壁幅)は、2.0 m×0.5 m×1.1 m×8.0 mであり、擁壁背面(重錘衝突面)を鉛直、擁壁前面を1:0.3の勾配としている。なお、擁壁はボルトや治具などを用いて連結していない一体構造となっており、実験前日に実施した材料試験よりコンクリートの圧縮強度は28.7 MPaであった。

図-2には本実験で使用した鋼製重錘の寸法を示している。重錘はφ=500 mmであり、胴体部長さが620 mm、先端部長さは70 mmとなっている。また、質量は890 kgである。図-1に示すように、重錘は擁壁中央部に底部から1.6 mの位置に衝突させることとし、落下高さは既往の研究を参考にH=7.5 mとした。

2.2 実験方法および測定項目

写真-1には実験状況を示している。衝撃荷重は、複数のトラッククレーンにより吊り下げられた重錘を所定の高さまで吊り上げ、脱着装置による振り子運動によって一度だけ水平衝突させることにより作用させている。なお、擁壁はコンクリート基礎上に設置しており、かつ一般的に擁壁は良質な支持層に根入れされており水平移動

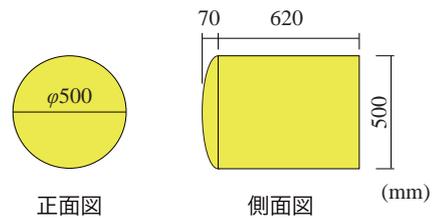


図-2 鋼製重錘の寸法(M=890 kg)

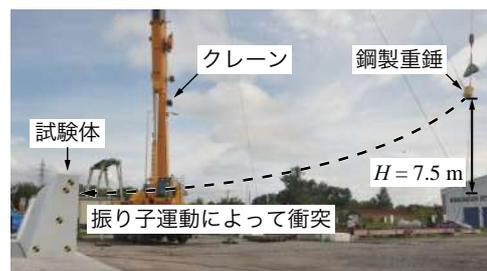


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

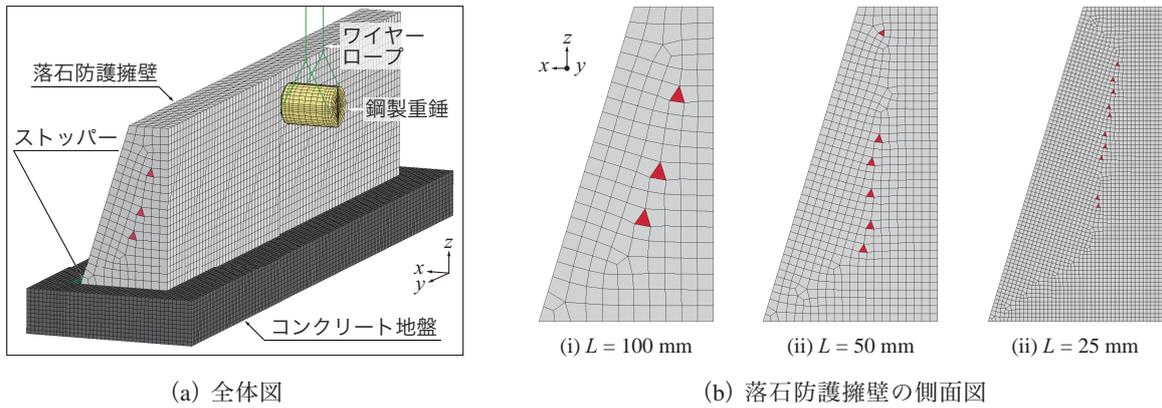


図-3 有限要素モデル

が少ないと考えられることから、回転挙動のみに着目するために、擁壁つま先部近傍にストッパーを設けて擁壁の水平移動を拘束することとした。

測定項目は、1) 重錘の底部表面に設置したひずみゲージ式加速度計による重錘衝撃力、2) 高速カメラによる重錘衝突速度、擁壁天端の移動量および側面の回転角である。また、実験終了後には衝突面・上面・非衝突面の3面についてひび割れ分布も記録している。なお、回転角に関しては、擁壁側面における2点のターゲットマーカーの移動量から評価している。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-3には、本研究で使用した落石防護擁壁に関する数値解析モデルを示している。図-3(a)より、本解析では落石防護擁壁から鋼製重錘およびコンクリート地盤に至るまで可能な限り実験の全体状況をモデル化している。落石防護擁壁は8節点あるいは6節点個体要素(後述)、地盤および重錘は8節点固体要素、ストッパーは4節点シェル要素、ワイヤロープは2節点梁要素を適用した。なお、計算時間の都合上、要素の積分点数は1点積分を基本としている。

図-3(b)には、本解析で使用した擁壁モデルの要素分割状況を示している。本研究では、コンクリート構成則の要素寸法依存性を確認するため、要素長 $L = 100, 50, 25$ mm と三種類に変化させた解析を実施した、また、ここでは可能な限り一要素を立方体に近い形で分割することとし、固体要素のいずれの辺においてもその要素長 L と同程度となっている。なお、擁壁は台形状であることより、全て8節点固体要素を用いて均一に分割することは現実的ではないことより、6節点固体要素(図中、赤色要素)も併用している。

衝撃荷重は、重錘要素を擁壁と接する形で配置し、実験時の実測衝突速度 ($V = 10.0$ m/s) を重錘要素の全節点に付加させることで与えた。拘束条件としては、コンクリート地盤底部およびワイヤロープ端部を完全固定とし、地盤側面に関してはそれぞれの法線方向変位成分を固定している。

擁壁-コンクリート地盤間、擁壁-重錘間および擁壁-ストッパー間には滑り・剥離を伴う接触面を定義し、摩擦係数は0.5とした。接触反力の算定にはペナルティ法

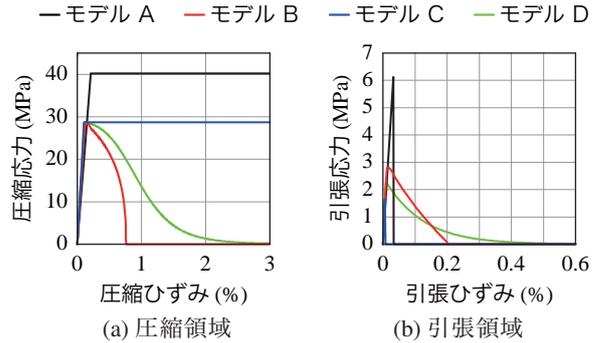


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

表-1 構成則一覧

モデル	圧縮強度 f'_c (MPa)	圧縮強度到達時ひずみ ϵ_c (μ)	引張強度 f_t (MPa)	引張強度到達時ひずみ ϵ_t (μ)
A	40.2	2102	6.1	320
B	28.5	1501	2.8	160
C	28.7	1081	1.6	60
D	28.8	1121	2.3	100

を適用している。また、ストッパーと地盤は完全結合としている。なお、本解析では重力を考慮しているものの、簡略化のため減衰は考慮しないこととした。

3.2 材料構成則

ここでは、コンクリートの力学的特性値として圧縮強度 $f'_c = 28.7$ MPa という1つのパラメータを基に、LS-DYNAに組み込まれている比較的少ないパラメータでコンクリートのモデル化が可能な4つのモデルに対して検討を行うこととした。

図-4には、別途実施した予備解析から得られた4種類のコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。なお、予備解析では一要素 ($25 \times 25 \times 25$ mm) の底部を完全固定し、他端に強制変位を与えることで、強制変位方向の応力-ひずみ関係を計算している。

図より、圧縮領域に関して、モデルA・Cは圧縮強度到達後、ひずみが一定になるバイリニアモデル、モデルB・Dは軟化勾配が異なるが両者とも圧縮軟化を考慮したモデルとなっている。一方、引張領域に関しては、モデルA・Cは引張強度到達後、即時に応力が解放されるカットオフモデル、モデルB・Dは軟化勾配が異なるが両者とも

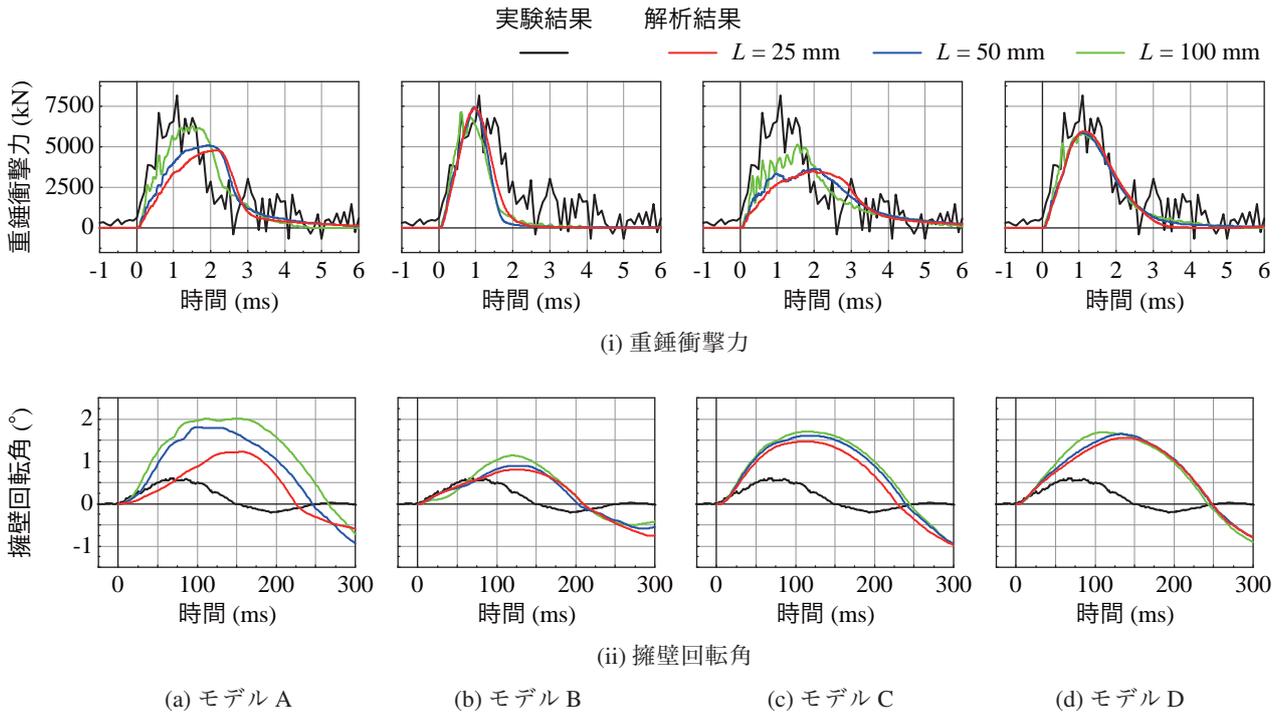


図-5 重錘衝撃力および擁壁回転角波形の比較

引張軟化を考慮したモデルとなっていることが確認できる。また、モデルB・Dの軟化領域は要素体積により変化する点に留意する必要がある。

表-1には各モデルの圧縮強度、引張強度および各強度到達時のひずみを一覧にして示している。また、単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c は、それぞれ $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu_c = 0.167$ とした。なお、圧縮強度や引張強度が各モデルで異なるのは、パラメータの入力方法やプログラム内での計算式が異なることによるものであり、詳細は文献を参照されたい(モデルA:文献3, モデルB:文献4, モデルC:文献5, モデルD:文献6)。

擁壁以外の要素に関しては、全て実験時に塑性変形が確認されていないことより、簡易に弾性体でモデル化しており、弾性係数、密度およびポアソン比は公称値を用いた。なお、重錘要素の密度に関しては重錘質量 890 kg を解析モデルの体積で除した値を入力している。

4. 数値解析結果および考察

4.1 重錘衝撃力および擁壁回転角波形の比較

図-5には、本研究で実施した全解析ケースに関して、重錘衝撃力および擁壁回転角波形を実験結果と比較して示している。図中、黒線が実験結果、その他の線は解析結果を示しており、赤線が要素長 $L = 25 \text{ mm}$ 、青線が $L = 50 \text{ mm}$ 、緑線が $L = 100 \text{ mm}$ の結果である。なお、横軸は重錘がコンクリートに衝突した時刻を原点としている。

図-5 (i) に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果は最大値が7500 kN程度であり継続時間が4 ms程度の主波動に高周波成分が合成した結果となっている。

一方で、数値解析結果に着目すると、モデルA・Cの場合には実験結果と比較して、作用継続時間が大きく、最大衝撃力を小さく評価する傾向にあることが分かる。また、要素長が小さくなるにつれて、最大衝撃力も小さく

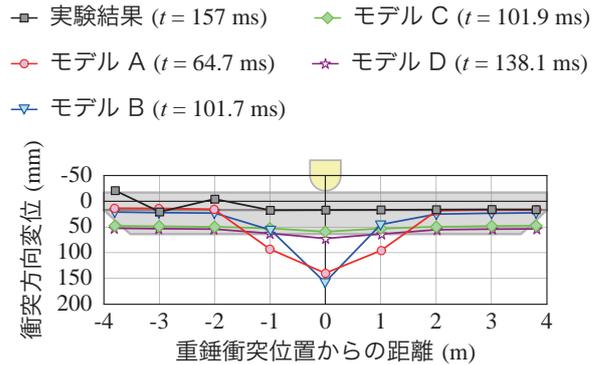


図-6 最大載荷点変位到達時の変位分布 ($L = 25 \text{ mm}$)

なっていることが分かる。また、モデルBに着目すると、要素長によらず最大衝撃力は実験結果と同程度であるものの、作用継続時間が小さい。モデルDでは要素長によらず最大衝撃力や作用継続時間がほぼ実験結果と一致していることが分かる。

図-5 (ii) に示す擁壁回転角波形に着目すると、実験結果は最大値が0.5°程度であり、150 ms以降では回転角が負の値を示していることがわかる。これは、擁壁つま先部を中心として重錘衝突方向に回転した後、元の位置に戻り、逆回転運動していることを表している。

数値解析結果では、いずれのモデルに関しても実験結果よりも、最大回転角を大きく評価する傾向にあり、その差は最大で1.5°程度である。また、最も実験結果との差が小さいモデルBの要素長 $L = 25 \text{ mm}$ に着目すると、その差は0.25°程度となっている。なお、いずれのモデルに関しても要素長 L が小さくなるにつれて、最大値が小さく示され、その傾向はモデルAが最も大きいことが確認できる。

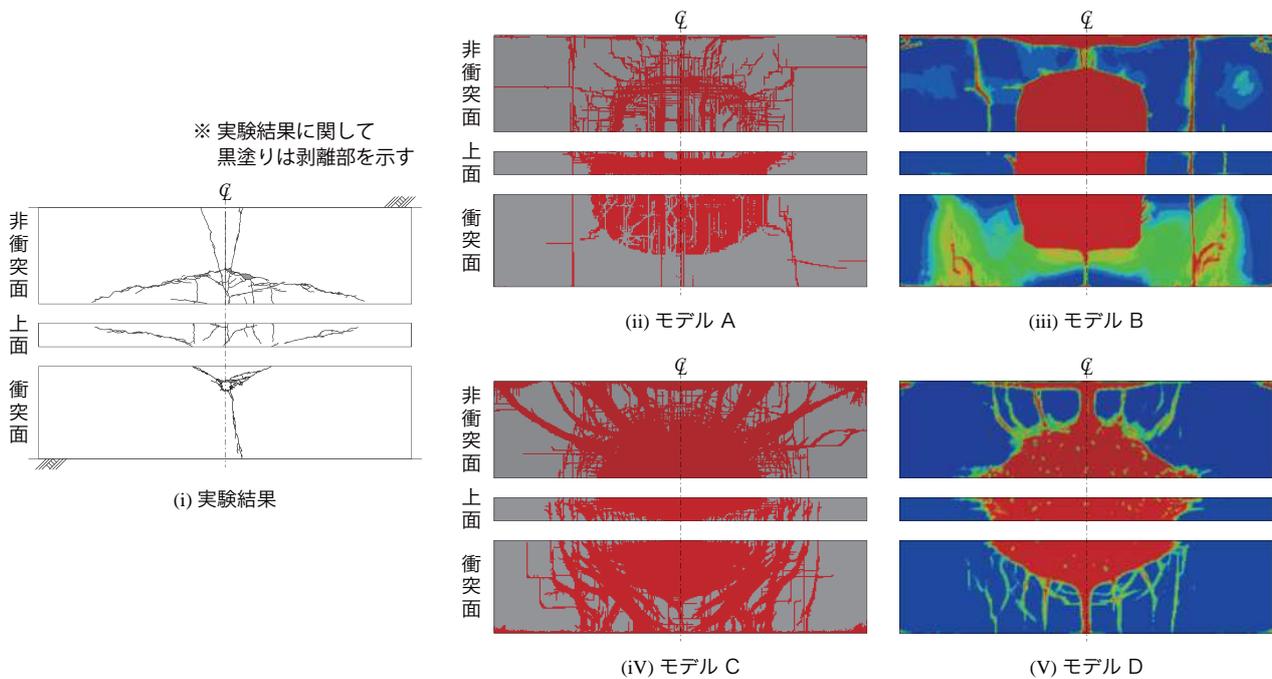


図-7 実験結果および数値解析結果のひび割れ分布比較 ($L = 25 \text{ mm}$)

4.2 変位分布比較

図-6には、荷点部擁壁上部における衝突方向変位が最大を示す各時刻において、実験結果と数値解析結果の擁壁上面の変位分布を比較して示している。また、縦軸は衝突方向変位を、横軸には荷点部からの距離を取り整理している。なお、数値解析結果は、いずれも要素長 $L = 25 \text{ mm}$ とした場合の結果となっている。

図より、黒線で示した実験結果に着目すると、荷点部では 20 mm 程度変形しており、擁壁全体としては概ね剛体回転運動のような挙動を示していることが推察される。

一方で、数値解析結果に着目すると、赤・青線で示したモデル A・B は、荷点部近傍では実験結果よりも過大に変形し、局所的な変形となっていることが分かる。また、擁壁端部では概ね実験結果と変位量が一致している。緑・紫線で示したモデル C・D に着目すると、実験結果と同様に局所的な変形が見られず、剛体的な変形をしていることが確認できる。しかしながら、上述の回転角と対応して変位量が多いことが読み取れる。

4.3 ひび割れ分布比較

図-7には、実験終了後のひび割れ分布と解析結果から評価されるひび割れ分布を比較して示している。なお、数値解析結果においては、灰色あるいは青色領域が損傷無し、赤色領域がひび割れを示しており、いずれも要素長 $L = 25 \text{ mm}$ の結果である。

まず、実験結果に着目すると、重錘衝突面においては荷点位置に円形のひび割れが生じており、そこから左右上斜め方向に 30° 程度の角度でひび割れが進展している。また、荷点位置から下方に縦一本のひび割れも生じていることが確認できる。上面を見ると、衝突面から上斜めに進展したひび割れが、その角度を保ったまま非衝突面へと進展しており、押し抜きせん断破壊の傾向が確認できる。非衝突面においては、衝突面よりも広い範囲において、ひび割れが広がっている傾向にある。

一方、数値解析結果に着目すると、衝突面に関しては、いずれのモデルにおいても損傷を過大に評価する傾向にあることが分かる。また、上面に関しては、モデル B を除き、衝突面から非衝突面にかけて斜めにひび割れが進展していく傾向が窺える。非衝突面に関しては、モデル A・C において衝突面よりも損傷範囲が広がっている傾向が確認できる。

5. まとめ

本研究では、落石防護擁壁の耐衝撃挙動を再現可能な数値解析手法の確立を目的として、要素長およびコンクリート構成則を変化させた三次元衝撃応答解析を実施した。また、各手法について実験結果と比較することで、その適用性を検討した。その結果、いずれのモデルにおいても要素長の影響は小さく、かつ実験結果よりも擁壁回転角、変形量および損傷範囲が過大になる傾向が確認された。今後は、これらの検討を基に、落石防護擁壁の耐衝撃挙動や押し抜きせん断破壊現象を忠実に再現可能な数値解析手法を確立していく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) 山澤文雄, 今野久志, 西弘明, 小室雅人, 岸徳光：落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する重錘衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.789-796, 2018.3
- 3) R.D. Krieg: A simple constitutive description for soils and crushable foam, SCDR-72-0883, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1972.
- 4) Malvar L. J., Crawford J. E., Wesevich J. W., Simons D.: A plasticity concrete material model for DYNA3D, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.19, No.19, PP. 847-873, 1997
- 5) L. Schwer: An Introduction to the Winfrith Concrete Model, Schwer Engineering & Consulting Services, California, USA, 2010.
- 6) Murray Y. D.: Users manual for LS-DYNA concrete material model 159, Technical Report, 2007