地盤物性を考慮した落石防護擁壁の転倒安定性に関する数値解析的検討

（株）構研エンジニアリング　正　員　○川瀬　良司　　室蘭工業大学　　フェロー　岸　　徳光
（独）北海道開発土木研究所　正　員　　今野　久志　　東京都　建設局　　正　員　佐藤　由幸

1.　はじめに

本研究では，C 製および RC 製擁壁の合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的として，各種地盤物性の影響を考慮した落石防護擁壁の安定性に関する 3 次元弾塑性衝撃応答解析を実施した．具体的には，地盤物性を変化させた場合の転倒安定性に関連する重心浮上量を剛基礎上に設置した場合の算定結果と比較する形で検討を行っている．なお，本数値解析では衝撃応答解析汎用コード LS-DYNA (ver.960) を用いている．

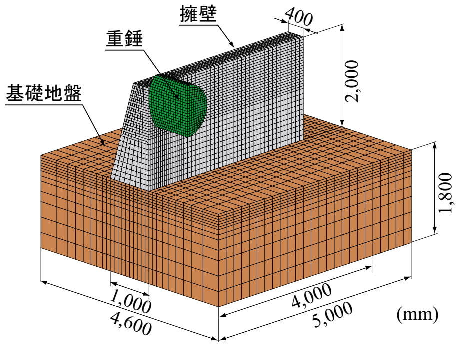
2.　解析ケース

擁壁の形状は，実構造で多用されている標準断面を基に，擁壁高さ $H = 2.0$ m，天端および基部の壁厚をそれぞれ 0.4 m，1.0 m とし，擁壁延長を落石対策便覧で規定されている有効幅を考慮して，擁壁高さの 4 倍である 8.0 m とした．なお，重錘衝突位置は設計時の最も厳しい条件である基部から $0.9H$ の点に限定した．**表−1** には，解析ケースの一覧を示している．解析ケース名の第一項目に擁壁の構造形式 (C：C 製擁壁，RC：RC 製擁壁)，第二項目に衝突速度 V (m/s) を示している．なお，終局時の衝突速度を，予備解析を実施して C 製擁壁では $V = 4$ m/s，RC 製擁壁では $V = 6$ m/s としている．

3.　数値解析仮定

3.1 数値解析モデル

図−1 には，本数値解析に用いた有限要素モデルを示している．ここでは，図に示すように構造物全体の対称性を考慮して 1 / 2 にモデル化した．数値解析モデルは，基本的には 8 節点の 3 次元固体要素を用いて行っているが，RC 製擁壁中の鉄筋は梁要素を用いることとした．また，全ての接触面には浮き上がりやリバウンドを正しく評価するために面と面の接触・剥離を伴うすべりを考慮した接触面を定義している．擁壁と基礎間には摩擦係数 μ を考慮することとし，N 値 20, 50 の地盤には 0.6，岩盤，コンクリート基礎には 0.7 と設定している．数値解析における載荷方法は，重錘の全節点に初速度を付加して衝突させることにより行っている．



図－1　有限要素モデル

表－1　解析ケース一覧

実験ケース	擁壁構造形式	衝突速度 V (m/s)	地盤（N 値）
C-V2	C 製	2	N 値 20, N 値 50, 岩盤 コンクリート
C-V3		3	
C-V4		4	
RC-V2	RC 製	2	N 値 20, N 値 50, 岩盤 コンクリート
RC-V3		3	
RC-V4		4	
RC-V5		5	
RC-V6		6	

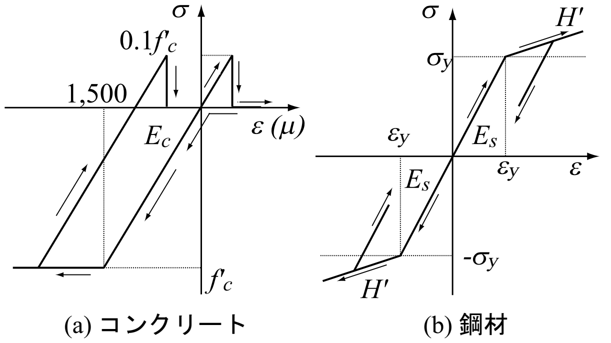
表－2　数値解析に用いた物性値一覧

(a) コンクリート			
材料物性	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	圧縮強度 f'_c(MPa)
擁壁 (C 製)	12.5	0.167	18.7
擁壁 (RC 製)	17.6	0.167	26.4
(b) 鋼材			
材料物性	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	降伏強度 σ_y(MPa)
鉄筋	206	0.30	373
重錘	206	0.30	-
(c) 地盤			
材料物性	変形係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	圧縮強度 q_u(MPa)
N 値 20	0.056	0.400	0.250
N 値 50	0.140	0.300	0.625
岩盤	5.000	0.250	-
コンクリート	24.00	0.167	-

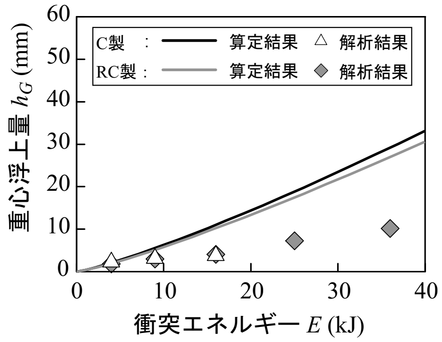
3.2 材料物性モデル

表−2 には，数値解析に用いた物性値一覧を示している．地盤に関しては，N 値 20, 50 に対する地盤の変形係

キーワード：落石防護擁壁，弾塑性衝撃応答解析，転倒安定性
連絡先：〒 065-8510　札幌市東区北 18 東 17（株）構研エンジニアリング TEL　011-780-2813　　FAX　011-785-1501



図－２　各材料の応力－ひずみ曲線



図－３　最大支点反力と衝突速度の関係

数 E_0 は「道路橋示方書・下部構造編」の式，$E_0 = 2.8N$ (MPa) を，一軸圧縮強度 q_u に関しては Terzaghi and Peck の式，$q_u = N/80$ (MPa) を用いてそれぞれ算出した．N 値 20, 50 に関しては完全弾塑性体でモデル化し，岩盤，コンクリート基礎に関しては，予備解析において塑性域に至らないことを確認後，弾性体として定義した．また，重錘に関しては，衝突後に著しい変形が見られないことより弾性体と仮定した．**図－2** には，各材料の応力－ひずみ曲線を示している．コンクリートの応力－ひずみ曲線は，**図－2**(a) のように圧縮側は 1,500 μ ひずみ時に圧縮強度で降伏するものとし，降伏後は一定応力を仮定している．また，引張領域に関しては，圧縮強度の 1/10 に達した時点で要素が破壊し，零応力にカットオフされるものと定義している．なお，降伏の判定には，von Mises の降伏条件を採用している．また，**図－2**(b) には，鋼材の応力－ひずみ曲線を示している．ここでは，ひずみ硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用い，$H' = E_s/100$ と仮定した．なお，E_s は初期弾性係数である．

4.　数値解析結果

本解析で得られた重心浮上量に関する数値解析結果と擁壁を剛体と仮定し，かつそれが剛基礎上に設置されている場合の簡易な安定性照査式から得られる値と比較検討することとする．

簡易な重心浮上量算定式は，擁壁基部先端部を回転中心とする剛体運動の仮定のもとに以下のようにして定式化されるものである．1) 重錘衝撃力を振動便覧式を適用し算定評価する，2) 重錘衝撃力の力積モーメントを算定する，3) 力積モーメントと角運動量モーメントを等価と仮定し，初角速度を算定する，4) エネルギー保存の法則に基づき擁壁の重心浮上量の最大値を算定する．このようにして導かれる重心浮上量 h_G は次の式に示される．

$$h_G = \frac{H_1^2 F_t^2}{2MgI_O}$$

ここで，H_1：重錘衝突位置の高さ (m)，F_t：重錘衝撃力による力積 (N·s)，M：擁壁の質量 (kg)，g：重力加速度，9.8 (m/s^2)，I_O：回転中心に関する慣性モーメント (kg·m^2) である．

図－3 は，重心浮上量 h_G に関する解析結果と提案の算定式による結果を，衝突エネルギー E を横軸にとって整理したものである．なお，ここに示す解析結果は，地盤を N 値 20, 50 の地盤あるいは岩盤，コンクリート基礎と変化させて得られた解析値の中で最も危険側である最大値（N 値 20 時）を採用している．また，簡易算定式では実規模実験結果を基に，重錘衝撃力に関する力積を $F_t = 0.005P$ と仮定している．

図より，算定式から得られる値は衝突エネルギー E の大きい領域で解析結果を 2 倍程度上回る傾向にあることが分かる．これは，簡易算定式では擁壁を剛体回転運動するものと仮定しているのに対して，数値解析結果の場合には衝突エネルギー E の増加に伴って擁壁本体の局部変形や断面損傷あるいは擁壁の水平方向への滑動によるエネルギー損失が増加するため，結果として浮上量が低減する傾向にあるためと推察される．しかしながら，算定式は，工学的に安全側の評価を与えていることが分かる．また，転倒に要する重心浮上量が 206 mm であるのに対して，C-V4，RC-V6 における解析結果の終局時重心浮上量がそれぞれ，3.8 mm，10.1 mm であることより，擁壁の転倒安定性はいずれの場合も耐衝撃性に比べて十分に安全側になることが分かる．

5.　まとめ

本研究では，地盤物性の影響を考慮した落石防護擁壁の転倒安定性に関する 3 次元弾塑性衝撃応答解析を実施し，剛基礎を仮定して得られる簡易な転倒安定照査式に基づく結果との比較検討を行った．その結果，簡易な転倒安定照査式は，詳細な弾塑性解析結果に比較して 2 倍程度の安全率を有していることが明らかになった．