論文 地盤物性を考慮した落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する 数値解析的検討

川瀬 良司*1・岸 徳光*2・今野 久志*3・池田 憲二*4

要旨:本研究では,無筋コンクリート構造(C製)および鉄筋コンクリート構造(RC製)の 落石防護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,地盤物性の影響を 考慮した落石防護擁壁の耐衝撃挙動や安定性に関する3次元弾塑性衝撃応答解析を実施 し,地盤物性を変化させた場合の各種応答波形や破壊性状を考察すると共に,それらの結 果と剛基礎を仮定して得られた擁壁の安定照査式との比較検討を行った。その結果,地 盤物性によって重錘衝撃力および破壊性状に大きな差異がないこと,転倒安定性に関す る提案式は,設計的に安全側に評価可能であること,等が明らかとなった。

キーワード:落石,防護擁壁,弾塑性解析,衝撃応答解析,転倒安定性

1. はじめに

我が国の山岳道路沿いには,小規模の落石等 に対する道路防災対策の一つとして落石防護擁 壁(以後,擁壁)が設置されている。現在,擁壁 は落石対策便覧¹⁾に基づき,擁壁を弾性地盤に 支持された剛体と仮定し,落石の衝突によって 擁壁に伝達される運動エネルギーと地盤の弾性 応答における変形エネルギーが等価な擁壁の水 平変位および回転が許容されるものとして設計 されている。従って,通常無筋コンクリート製 (以下,C製)の重力式擁壁が用いられている。 このC製落石防護工の被害実態調査²⁾による と,擁壁本体が欠損する事例が多数確認されて いる。

著者らは, 擁壁の耐衝撃性向上に関する研究 の一環として C 製擁壁の重錘衝突実験や数値解 析を実施している。その結果, 滑動・転倒等の 安定性を失う前に, 落石の衝突によって曲げやせ ん断ひび割れが発生すると共に天端部がブロッ ク化して大きく剥落することが明らかとなって いる。また,これらC製擁壁の耐衝撃性を向上 させるために鉄筋コンクリート製(以下,RC製) とする場合に関しても実規模実験や数値解析を 実施し,その耐荷性状を把握している³⁾。その 結果,上述のC製擁壁と同様の曲げやせん断ひ び割れが発生するものの,異形鉄筋の補強効果 によって大幅に耐衝撃性を向上可能であること を明らかにしている。さらに,C製やRC製擁 壁の転倒安定性に着目して,独自に実規模実験 結果に基づいた設計手法を提案し,剛基礎上の 実験結果や数値解析結果と比較することにより, その妥当性も検討している⁴⁾。

しかしながら,上述の転倒安定性に関する設 計手法は,擁壁が剛基礎上に設置されている場 合のみでの検証結果に基づいて提案されたもの である。従って,実状に即したより合理的な設 計手法を確立するためには,地盤物性を考慮し た検討が必要であるものと判断される。

このような観点から、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

*1	(株) 構研エンジニアリン	ノグ 防災施設部	部長 博	事(工) ((正会員)
*2	室蘭工業大学 工学部建	む設システム工学科	教授 コ	【博 (正義	会員)
*3	北海道開発土木研究所	構造部構造研究室	主任研	「究員 博	淳 (工) (正会員)
*4	北海道開発土木研究所	構造部構造研究室	室長	(正会員))

御忙とっ	擁壁 #24114-114	衝突速度	地盤
一件例クース	伸迫形式	V (m/s)	(N 徂)
C-V2		2	
C-V3	C 製	3	N 値 20, N 値 50, 岩盤, コンクリート
C-V4		4	
RC-V2		2	
RC-V3		3	
RC-V4	RC 製	4	N値 20,N値 50,岩盤,コンクリート
RC-V5		5	
RC-V6		6	

表-1 解析ケース一覧

ることを目的として,地盤物性の影響を考慮し た落石防護擁壁の耐衝撃挙動や安定性に関する 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各種応答波 形や破壊性状を考察すると共に,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)⁵⁾を用いている。

2. 数値解析の概要

2.1 数値解析ケース

図-1には、本数値解析に用いた擁壁の形状 寸法を示している。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、擁壁延長は落石対策便覧で規定されて いる有効幅を考慮し、擁壁高さの4倍である8.0 mとした。なお、重錘衝突位置は幅方向に対称 断面、高さ方向には最も厳しい条件である基部 からの高さが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は擁壁の構造形式 (C:C製擁壁, RC:RC製擁壁),第二項目には 衝突速度V(m/s)を示している。なお,後述の 擁壁の最大主応力分布から,終局時の衝突速度 を,C製擁壁ではV=4m/s,RC製擁壁ではV =6m/sとしている。

2.2 解析モデル

図-2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



図ー2 有限要素モデル

化した。解析モデルの総節点数および総要素数 は、C 製擁壁ではそれぞれ、30,779、26,382、RC 製擁壁ではそれぞれ、30,780、28,578 となって いる。

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,3 次元固体要素の要素積分点に関しては1点積分 を用い,梁要素は4点積分とした。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た。擁壁と基礎間の 摩擦係数μは,文献6)に基づきN値20,50の地

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	ポアソン比	圧縮強度	
1711-171211-	E(GPa)	ν	$f_c'(MPa)$	
擁壁 (C 製)	12.5	0.167	18.7	
擁壁 (RC 製)	17.6	0.167	26.4	

-		~
		_
(h)	细材	

(U) 如画 小1				
材料物性	弾性係数	ポアソン比	降伏強度	
们们们了	E(GPa)	ν	$\sigma_y(MPa)$	
鉄筋	206	0.30	373	
重錘	206	0.30	-	

(c) 地盤

材彩物性	変形係数	ポアソン比	圧縮強度	
们们们上	E(GPa)	ν	q_u (MPa)	
N 値 20	0.056	0.400	0.250	
N值 50	0.140	0.300	0.625	
岩盤	5.000	0.250	-	
コンクリート	24.00	0.167	-	

盤には 0.6,岩盤,コンクリート基礎には 0.7を 仮定している。境界条件は,対称面に対称境界 の条件を定義し,地盤下面および対称面を除く 側面を完全固定とし,応力波が反射しないよう に無反射境界を定義した。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。また,本解析 では重錘衝突による擁壁の浮き上がりを考慮す ることから,自重解析を行った後に衝撃応答解 析を実施している。なお,本数値解析では,重 錘衝突時より 200 ms 間について解析を行った。

2.3 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 る地盤の変形係数 E_0 は文献7)に示されている 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、実施工に則して解析を行うため、 RC 製擁壁でN値が20および50の地盤の場合 には、擁壁直下にコンクリートの物性を有する 捨てコンクリートのための要素を配置した。ま



図-3 各材料における応力-ひずみ曲線

た,重錘に関しては,過去の研究と同様,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-3には、各材料の構成則を示している。(a) 図には、コンクリートの応力-ひずみ曲線を示 している。図示のように圧縮側は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。

(b) 図には, 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。

3. 解析結果

図-4,5には、基礎の地盤物性を変化させた 場合の C-V4, RC-V6 に関する解析結果の各種応 答波形を比較して示している。なお、波形は重 錘衝突時点を 0 ms として整理している。

3.1 重錘衝撃力波形

図-4には、重錘衝撃力波形を示している。

図より,波形性状を比較すると,C-V4,RC-V6 の場合には,いずれも衝撃初期に最大応答値を 示し,その後急激に除荷される,継続時間がそ れぞれ7ms,10ms程度の三角形状の分布性状 を示している。また,重錘衝撃力の最大応答値, 波形性状は地盤の物性により差異が生じていな いことから,重錘衝撃力は地盤の物性に依存し



ないものと判断される。

3.2 重心浮上量波形

図-5には、擁壁本体の重心浮上量波形を示 している。解析結果の重心浮上量は、擁壁基部 先端点と断面重心位置における鉛直方向変位の 差を取ることによって評価している。なお、重 心浮上量は擁壁の軸方向に一様ではないことよ り、本研究では、それらの平均値を用いて評価 することとした。

図より,N値が20,50の地盤の場合のC-V4, RC-V6における重心浮上量の立ち上がり勾配は, 岩盤やコンクリート基礎の場合に比較して大き いことが分かる。これは,重錘衝突時において 擁壁基部先端近傍の地盤が大きく変形し,それ が擁壁の回転を助長させていることによるもの と推察される。また,C-V4およびRC-V6の場 合を比較すると,N値が小さく剛性が小さい地 盤(N値20)ほど最大値が大きく示されている。 一方,岩盤とコンクリート基礎の場合を比較す ると,C-V4の場合には類似の値を示している が,RC-V6の場合にはコンクリート基礎の場合 における最大値が大きい。これは、両者の剛性 がN値20,50の地盤に比べて十分大きいために 重心浮上量波形の立ち上がり勾配に大きな差異 は生じていないものの、岩盤基礎におけるエネ ルギー吸収がコンクリート基礎のそれよりも大 きいことによるものと推察される。

3.3 重心浮上量算定式と解析結果の比較

ここでは,重心浮上量に関する数値解析結果 と剛基礎上で数値解析的に得られた擁壁の安定 性照査式から求まる値について,比較検討を行 うこととする。

提案の重心浮上量算定式は,擁壁基部先端を 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⁴⁾。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*hG* 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/s²)、 I_O :回転中心に関す る慣性モーメント (kg·m⁴) である。

図-6は、重錘衝撃力に関する解析結果と振 動便覧式による結果を、衝突エネルギー Eを横 軸にとって整理したものである。図中のシンボ ルは各解析ケースの値を示し、実線は振動便覧 式を用いた場合の分布を示している。ここで、 振動便覧式におけるラーメの定数は文献 4) と同 様に $\lambda = 120 \text{ MN/m}^2$ と仮定している。

図-7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 を採用している。また、算定式では力積を文献 4)に即して $F_t = 0.005P$ 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,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,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,図-1で与えられた擁壁断面に対する 転倒に至る極限の重心浮上量が206 mm である のに対して,C-V4,RC-V6における終局時の重 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であることが分 かる。

3.4 **擁壁の破壊性状**

本研究において適用したコンクリート要素に 関する材料構成則モデルの考え方に基づくと, コンクリート要素の最大主応力が零応力を示す 場合は、応力レベルが微小な状態であるか、そ の要素にひび割れが発生し応力が零レベルに除 荷された状態であることを意味している。この ことは、最大応答時近傍における最大主応力分 布を求めることによって、主なひび割れ分布を 推定可能であることを意味している。ここでは, このような考え方に基づいて擁壁のひび割れ分 布性状を比較検討することとする。図-8には, 数値解析結果における衝突位置から軸方向に 30 cm 離れた断面に関する応力零近傍を拡大した 最大主応力分布を示している。ここでは,誌面 の都合上, C-V4 と RC-V6 の N 値 20 の地盤およ びコンクリート基礎の場合についてのみを示し ている。

図より,いずれの場合にも,衝突面から衝突 背面に向かって斜め下方にせん断ひび割れが発 生しており,コンクリート塊の剥落が生じ終局 に至ることが予想される。C 製と RC 製のひび 割れ分布を詳細に比較すると,C 製の場合には,





ひび割れの本数が1~2本程度と少ないのに対し て,RC製の場合には主ひび割れの他,数本の ひび割れが分散して発生している。これは,鉄 筋の配筋によって応力がより分散されることに よるものと推察される。RC製のN値20とコン クリート基礎の場合を比較すると,コンクリー ト基礎の場合がより分散してひび割れが発生し ている。これは,N値20の場合には,衝突エネ ルギーの一部が地盤の変形によって吸収される のに対して,コンクリート基礎の場合には,全 て擁壁の変形や回転によって消費されるため、 相対的に擁壁の損傷も大きくなるためと考えら れる。ただし,いずれの場合も,損傷は擁壁の 上側半分の領域に限定されている。

4. まとめ

本研究では、C 製および RC 製の落石防護擁 壁の耐衝撃設計法を確立することを目的として、 地盤物性の影響を考慮した落石防護擁壁の耐衝 撃挙動や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、それらの数値解析結果と剛 基礎を仮定して得られた擁壁の転倒安定照査式 に基づく結果との比較検討を行った。本研究に おいて得られた結果を要約すると、

- 1) 重錘衝撃力波形は地盤の物性に依存しない。
- 2)重心浮上量波形の立ち上がり勾配や最大浮 上量は剛性の小さい地盤ほど地盤の変形に 伴って大きくなる傾向がある。一方,岩盤 およびコンクリート基礎の場合には,剛性 が大きいほど基礎のエネルギー吸収が小さ

いため、擁壁の重心浮上量も大きくなる。

- 副基礎を仮定して求められた転倒安定性に 関する提案式は、地盤物性の大小に関わら ず設計的に安全側の値を与える。
- 4)落石衝突時における擁壁の破壊性状はせん 断破壊型を示すが、RC製の場合にはC製 と比較してひび割れが分散して発生する傾 向にある。ただし、ひび割れの高さ方向の 発生範囲は地盤物性に依存しない。

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2000.6
- 2) 松尾 修,佐々木 哲也,堤 達也:落石 防護工の被害に関する実態調査,第5回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論 文集,土木学会,pp.69-74,2000.6
- 3) 川瀬 良司,岸 徳光,今野 久志,松
 岡 健一: RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性
 向上効果,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1357-1362,2001.7
- 4) 川瀬 良司,岸 徳光,今野 久志,岡田 慎哉:C製およびRC製落石防護擁壁の耐衝撃設計法の構築に関する一検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.25,No.2, pp.1129-1134,2003.7
- John o.Hallquist : LS-DYNA User's Mannual, version 960, Livermore Software Technology Corporasion, 2001.12
- 6) 日本道路協会:道路土工 擁壁工指針, 1999.3
- 7)日本道路協会:道路橋示方書・同解説図下 部構造編,1994.2