

論文 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

川瀬 良司*¹・岸 徳光*²・今野 久志*³・池田 憲二*⁴

要旨: 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, 実規模衝撃実験結果に基づいた転倒安定に着目した一設計手法を提案し, 実規模衝撃実験結果や 3 次元弾塑性衝撃応答解析結果と比較することで妥当性の検討を行った。検討の結果, 設計過程に用いられる 1) 最大重錘衝撃力は, 振動便覧式を用いて評価可能であること, 2) 衝撃力の力積は, 振幅を最大重錘衝撃力, 荷重継続時間を 5 ms とする矩形波の場合とほぼ等価であることや, 3) 擁壁の転倒安定評価に用いられる重心浮上量に関する提案式は, 設計的に安全側の評価を与えること, 等が明らかとなった。

キーワード: 落石防護擁壁, 耐衝撃設計法, 重心浮上量, 弾塑性衝撃応答解析

1. はじめに

我が国の山岳道路沿いには, 小規模落石等に対する防災対策の一つとして落石防護擁壁(以下, 擁壁)が設置されている。現在, 擁壁は落石対策便覧¹⁾に基づいて, 擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し, 落石の衝突により擁壁に伝達された運動エネルギーが地盤の弾性応答時の変形エネルギーと等しくなるまで擁壁が水平変位および回転を生ずるものとして設計されている。しかしながら, 本設計法に従えば, 基礎の剛性が大きいほど転倒安定性が劣る結果となり, 実現象に対応していないことが指摘されている。

一方, 擁壁は, 前述のように剛体構造と仮定して設計されていることから, 通常重力式の無筋コンクリート構造(以下, C 製)が採用されている。著者らは, その耐衝撃挙動を明らかにするために実規模衝撃実験や数値解析を実施している²⁾。その結果, 重錘衝突位置が擁壁高さの 9 割程度の場合には, 衝突位置近傍の損傷の他, 載荷点を中心として高さ方向および幅方向に曲げひび割れが発生し, 必ずしも耐衝撃性が保障されたものとなっていないことが明らか

となっている。また, その擁壁の耐衝撃性を簡易に向上させる方法として, 鉄筋コンクリート構造(以下, RC 製)を提案し, 実規模衝撃実験や数値解析を実施して, C 製の場合と比較することで耐衝撃向上効果を明らかにしている³⁾。その結果, 1) RC 製の場合は, C 製の擁壁と同様に曲げひび割れが発生するものの, 異形鉄筋の効果によって大幅に耐衝撃性を向上可能であること, 2) 簡易な材料構成則を用いた弾塑性衝撃応答解析を実施することにより, C 製および RC 製擁壁の耐衝撃性評価は十分可能であること, などが明らかになっている。しかしながら, 擁壁の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには, 擁壁本体の耐衝撃評価と共に転倒安定性も適切に評価することが肝要である。

本研究では, C 製および RC 製擁壁の耐衝撃設計法の確立のために重要な転倒安定性に着目し, 実規模実験に基づいたより合理的な一設計手法を提案し, 妥当性を実規模衝撃実験結果や 3 次元弾塑性衝撃応答解析結果と比較することにより検証した。なお, 弾塑性衝撃応答解析は, 非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA⁴⁾を用いて実施している。

*1 (株)構研エンジニアリング 部長 防災施設部 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 北海道開発土木研究所 主任研究員 構造研究室 博(工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

2. 実験概要

2.1 実験方法

擁壁は、一般的に良質な支持層に根入れされていることから、本実験では擁壁の転倒および損傷のみに着目することとし、コンクリート基礎にストッパーを設けて水平移動を拘束することとした。実験に使用した重錘は、直径が1.0 m、先端部が半球状で質量が2,000 kgの鋼製重錘である。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、着脱装置による振り子運動によって作用させることとした。繰返し载荷の場合には、第1回目衝突時衝突速度および増分速度を1 m/sとして擁壁が転倒するかひび割れが貫通するまで実験を繰返し実施した。また、単一载荷実験は、繰返し载荷実験から得られた終局時の衝突速度を把握し、その衝突速度と同一の速度で1回だけ実験を行った。測定項目は、ひずみゲージ式加速度計(容量1,000 G、応答周波数DC~1 kHz)による重錘加速度および、レーザ式変位計(容量200 mm、応答周波数DC~915 Hz)による擁壁各点の変位波形である。写真-1には実験風景を示している。

2.2 実験および解析ケース

試験体は、実規模の擁壁を用いて行うこととした。そのために、擁壁の断面形状は、C製、RC製共に実構造で多用される標準断面⁵⁾を参考に、擁壁高さを $H=2.0$ m、天端および基部の壁厚をそれぞれ0.4 m、1.0 mとし、擁壁延長を実設計を考慮して擁壁高さの4倍の $L=8.0$ mとした。図-1には実験で用いた試験体形状およびレーザ式変位計配置状況を示している。RC製については、鉄筋量の違いによる耐衝撃性の評価手法も検討するために、鉄筋量は断面に対して0.2,0.4,0.6,0.8%程度の場合を設定し、それぞれD16, D22, D29, D32を幅および高さ方向に300 mmピッチで配置している。ただし、鉄筋は全てSD345である。

表-1には実験および解析ケースの一覧を示している。表中、ケースは構造形式(RC:RC製, C:C製),RC製については鉄筋量(%), 載

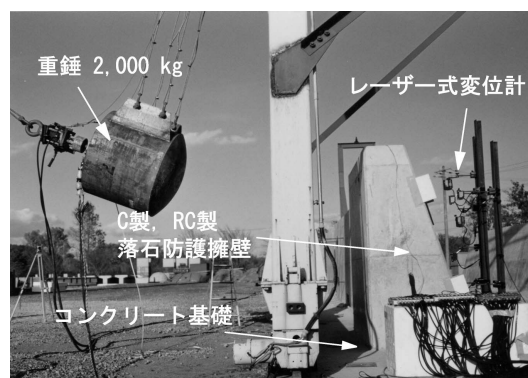


写真-1 実験風景

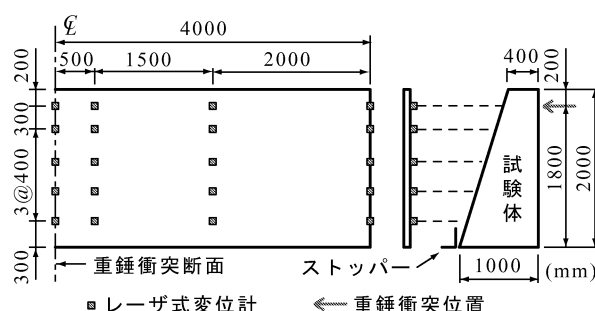


図-1 試験体形状および変位計配置図

表-1 実験および解析ケース一覧

ケース	構造形式	鉄筋量 (%)	载荷方法	衝突速度 (m/s)	実験	解析
C-C-V2~4	C	—	C	2~4	○	-
RC-0.2-C-V1~7	RC	0.2	C	1~7	○	-
RC-0.4-C-V1~7	RC	0.4	C	1~7	○	-
C-S-V4	C	—	S	4	○	○
RC-0.2-S-V6	RC	0.2	S	6	○	○
RC-0.4-S-V6	RC	0.4	S	6	○	○
RC-0.6-S-V6	RC	0.6	S	6	-	○
RC-0.8-S-V6	RC	0.8	S	6	-	○

○は実施ケース

荷方法(C:繰返し载荷, S:単一载荷), 衝突速度 V (m/s)をハイフンで結び表わしている。重錘衝突位置は, H を擁壁高さとして、設計時の最も厳しい条件である基部から $0.9H$ (1.8 m)の点に限定した。

実験時のコンクリートの力学特性は、C製、RC製で平均圧縮強度がそれぞれ $f'_c = 18.7$ MPa, 26.4 MPaである。

3. 解析仮定

本数値解析に用いた非線形衝撃応答解析用汎用コードLS-DYNAは、衝突体に衝突時の速度

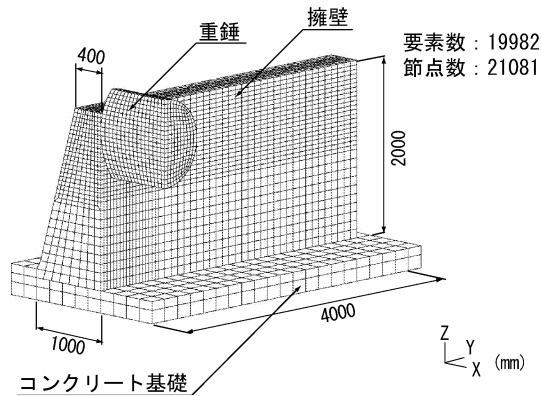


図-2 要素分割図

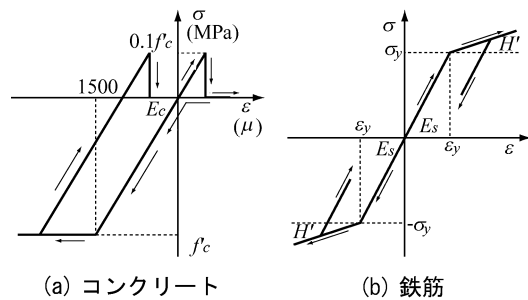


図-3 各材料の応力-ひずみモデル

を与えることにより衝突体と非衝突体の一体解析が可能である。数値解析は、単一载荷のケースのみについて実施している。本数値解析に用いた要素は、鉄筋を梁要素で、他は全て8節点の三次元固体要素を用いている。なお、擁壁部は弾塑性体と仮定しているが、その他の要素は実験終了後に塑性変形やひび割れが発生していないことを確認していることより、計算時間の短縮を考慮して、弾性体と仮定している。また、全ての要素は浮き上がりやリバウンドを評価するために重力を考慮し、かつそれらの要素間には面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面⁴⁾を定義している。解析モデルは、構造物の対称性を考慮して1/2モデルとし、コンクリート基礎に段差を設けて水平移動を拘束している。図-2には要素分割図を示している。なお、全解析時間は300msである。

3.1 物性モデル

数値解析は、過去に実施した著者らの数値解析^{2),3)}と同様に、簡易な構成則を用いて実施することとした。図-3には本数値解析に用いた各材料の応力-ひずみ関係を示している。

表-2 数値解析に用いた力学的特性

材料名	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	ポアソン比 ν	密度 (g/cm ³)
コンクリート (C製)	12.5	18.7	-	0.17	2.35
コンクリート (RC製)	17.6	26.4			
鋼材	206	-	450	0.30	7.85

図-3(a)には擁壁本体のコンクリート要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。このモデルは、要素の負圧力がカットオフ値に達した段階でいずれの方向へも引張応力が伝達しないように定義されている。また、圧縮側に対しては材料試験に基づき0.2%ひずみ時の応力を降伏応力とし、0.15%ひずみに達した状態で降伏するものとしてバイリニア型にモデル化している。本解析では降伏応力として圧縮強度 f'_c を、引張側のカットオフ値として降伏応力の1/10を仮定している。

図-3(b)には異形鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。ここで採用したモデルは、硬化係数 $H' = E_s/100$ と仮定した等方弾塑性体モデルである。

コンクリートおよび異形鉄筋に関する降伏の判定は、von Misesの降伏条件に従うこととしている。表-2には、解析に用いた各材料の力学的特性を示している。なお、これらの材料のひずみ速度硬化やひずみ軟化現象等は考慮していない。また、擁壁の系の振動に伴う粘性減衰定数は実験結果との比較により $h = 0.005$ と設定した。

4. 安定性評価検討に関する基本的考え方

ここでは、重錘衝突時の擁壁の転倒および損傷に着目していることから、擁壁前面下端の水平移動を制御している。従って、擁壁は回転によって重心位置が回転中心より前面に移動した場合に転倒するものと仮定した。このことから、転倒安定性の評価は、回転による擁壁の重

心浮上量について検討を行うこととする。重心浮上量算定式の定式化の流れは、1) 重錘衝撃力を評価する、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を簡易に等価と仮定し、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重心位置の最大浮上量を算定する、である。

5. 安定性評価の検討

5.1 最大重錘衝撃力の算定

最大重錘衝撃力 P_a を算定評価するために、ここでは、Hertz の接触理論に基づく振動便覧式の適用を試みる。振動便覧式⁶⁾ (以後、便覧式) は、一般に式 (1) のように示される。

$$P_a = 2.108 W^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

ここで、 P_a : 最大重錘衝撃力 (kN)、 λ : 擁壁本体の剛性特性を考慮した見かけのラーメの定数 (kN/m²)、 H : 落石の落下高さ (m)、 W : 落石等の重量 (kN) である。

図-4 には、最大重錘衝撃力 P_a を実験や数値解析結果と便覧式による結果を衝突エネルギー E_w で整理し比較した結果を示している。実験結果の最大重錘衝撃力 P_a は、最大重錘加速度に重錘質量を乗じて評価している。また、衝突エネルギー E_w は、重錘質量 M 、衝突速度 V を用いて $MV^2/2$ より算定している。図より、繰返し载荷の場合には、衝突エネルギー E_w の増加に対して、最大重錘衝撃力 P_a の増加率が減少する傾向にある。これは、繰返し载荷によってひび割れが進展し、衝撃エネルギーが吸収されるためと考えられる。しかしながら、その傾向は、擁壁の構造形式および鉄筋量によって大差がない。これらのことから、擁壁本体に作用する最大衝撃力は、構造形式、鉄筋量にかかわらず、見かけのラーメの定数を $\lambda = 120 \text{ MN/m}^2$ と仮定することにより、実験や解析結果の最大重錘衝撃力 P_a と大略対応することが分かる。

5.2 力積モーメントの算定

擁壁は並進運動が拘束されていることより、回転運動のみが発生することとなる。従って、擁壁の回転初角速度 ω を算定するためには、重

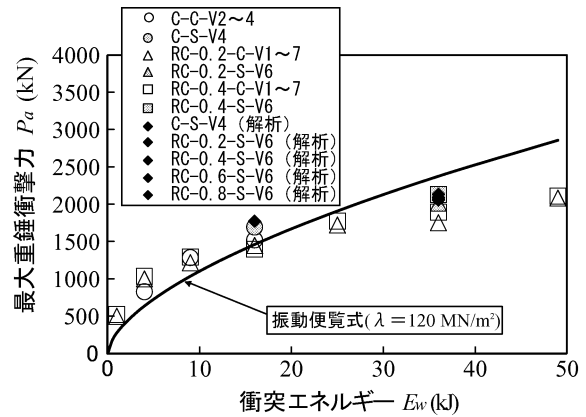


図-4 最大重錘衝撃力と衝突エネルギー

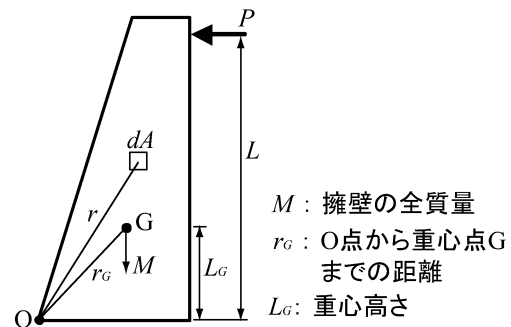


図-5 擁壁回転運動の模式図

錘衝突時の衝撃力 P による力積モーメント M_t を算定しなければならない。いま、図-5 に示すように、回転中心 O 点、重錘が底面から高さ L の点で衝突するものと仮定すると、力積モーメント M_t は、

$$M_t = L \int P dt \quad (2)$$

ここで、上式の積分値は、衝撃力 P による力積 F_t である。いま、

$$F_t = \int P dt \quad (3)$$

とおくと、

$$M_t = LF_t \quad (4)$$

図-6 には、代表的な実験結果と解析結果の重錘衝撃力波形を示している。表-1 で示した全てのケースについての力積 F_t を、式 (1) から評価される最大重錘衝撃力 P_a を横軸に取って整理すると、図-7 のように示される。ただし、重錘衝撃力波形の高周波成分を除去するために 2.5 ms の矩形移動平均処理を施している。

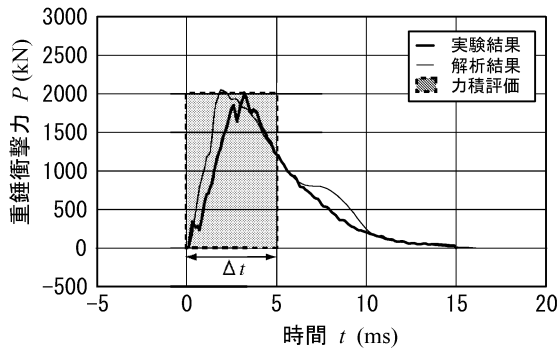


図-6 重錘衝撃力波形 (RC-0.2-S-V6)

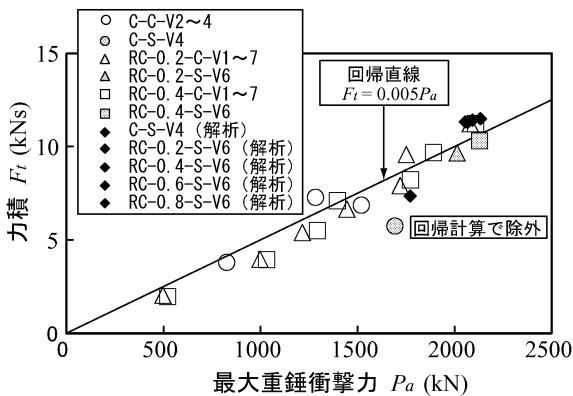


図-7 力積と最大重錘衝撃力

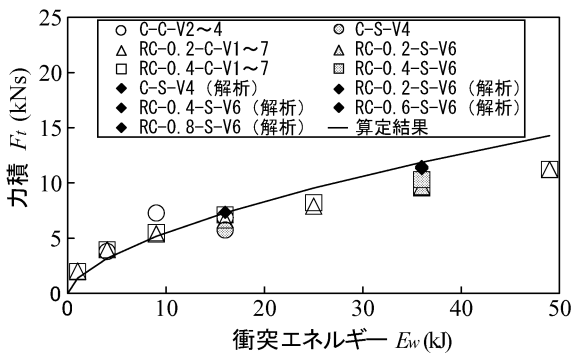


図-8 力積と衝突エネルギー

図より、力積 F_t は最大重錘衝撃力 P_a とほぼ線形の関係にあることが分かる。回帰直線を求めると、次式のように示される。すなわち、

$$F_t = 0.005P_a \quad (5)$$

これより、衝撃力 P の力積 F_t は、振幅が最大重錘衝撃力 P_a 、荷重継続時間を $\Delta t = 5 \text{ ms}$ とする矩形波と等価であることが分かる。図-8には、実験や数値解析結果および算定式から得られる力積 F_t を、衝突エネルギー E_w を横軸に取って整理している。図より、力積評価式は、実験結果とほぼ対応していることが分かる。

5.3 回転初角速度および重心浮上量の算定

衝撃力 P の载荷により、擁壁が O 点を中心に回転を始めるものとする、回転初角速度 ω は次式より求めることができる。すなわち、擁壁の単位体積重量を ρ 、擁壁の設計延長を B とし、図-5に示すように回転中心 O 点から任意の微小要素 dA までの距離 r とすると、擁壁の角運動量 H_O は、

$$H_O = \omega \rho B \int_A r^2 dA \quad (6)$$

として示される。ここで、 O 点に関する擁壁の慣性モーメント I_O は、

$$I_O = \rho B \int_A r^2 dA \quad (7)$$

であることより、式(6)は、

$$H_O = I_O \omega \quad (8)$$

として示される。力積モーメント M_t と角運動量 H_O が等価であることより、初角速度 ω は、

$$\omega = \frac{H_O}{I_O} = \frac{M_t}{I_O} = \frac{L}{I_O} F_t \quad (9)$$

として求めることができる。なお、 O 点に関する慣性モーメント I_O は、図-5より、

$$I_O = I_G + Mr_G^2 \quad (10)$$

となる。ここで I_G は重心点の回転慣性モーメント、 M は擁壁の質量、 r_G は重心点から O 点までの距離である。いま、運動エネルギーが保存されるものと仮定すると、並進運動を伴わないことより、擁壁の初角速度 ω と重心点の浮上量 h_G に関する関係式は、回転エネルギーと位置エネルギーが等価であるとする関係より、以下のようにして求まる。すなわち、

$$\frac{1}{2} I_O \omega^2 = Mgh_G \quad (11)$$

式(11)に式(9)を代入し整理すると、重心浮上量 h_G は次式のように示される。

$$h_G = \frac{I_O}{2Mg} \cdot \frac{L^2 F_t^2}{I_O^2} = \frac{L^2 F_t^2}{2MgI_O} \quad (12)$$

回転安定の条件は、以下のように示される。

$$h_G < r_G - L_G \quad (13)$$

ここで、 L_G は重心高さである。

5.4 重心浮上量に関する実験結果および数値解析結果と算定値の比較

ここでは、重心浮上量 h_G に関する実験結果および数値解析結果と提案した算定式から得られる値との比較を行い、提案した算定式の妥当性を検証する。図-9は、重心浮上量 h_G を、重錘の衝突エネルギー E_w を横軸に取って整理している。実験結果の重心浮上量 h_G は、算定式が擁壁の剛体回転運動を前提としていることから、レーザ式変位計で得られた擁壁前面での各断面の最大変位から平均傾斜角を算定し評価している。また、数値解析結果も実験結果と同様にレーザ式変位計と同じ位置の最大変位量から算定した。図より、重錘の衝突エネルギー E_w が大きい領域で、算定式から得られる値が実験結果を多少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体と仮定しているのに対して、実構造の場合には衝突エネルギー E_w の増加に伴って擁壁本体の局部変形や断面損傷によるエネルギー損失が増加するため、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、算定式から得られる値は、実験結果や数値解析結果との差が小さく、安全側に評価されている。また、RC製擁壁の場合には、鉄筋量を増加させた場合においても、実験や数値解析結果から得られる値は、ほぼ同程度であることが分かる。これらのことから、本評価方法は工学的に妥当であるものと判断される。

6. まとめ

本研究では、C製およびRC製落石防護擁壁の耐衝撃設計法の確立することを目的に、転倒安定性に着目してその一設計手法を提案し、実

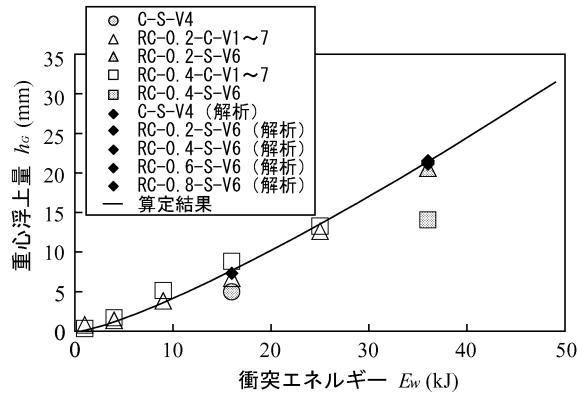


図-9 重心浮上量と衝突エネルギー

験結果や数値解析結果と比較することにより、その妥当性の検討を行った。検討の結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 最大重錘衝撃力は、ラーメの定数を 120 MN/m² とすることで振動便覧式を用いて評価可能である。
- 2) 衝撃力の力積は、振幅を最大重錘衝撃力とし、荷重継続時間を 5 ms とした矩形波の場合とほぼ等価である。
- 3) 擁壁の重心浮上量に関する提案の算定式は、設計的に安全側の評価を与える。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：平成12年度版落石対策便覧，2000.6
- 2) 川瀬良司，今野久志，岸徳光，松岡健一：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値シミュレーション，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.227-232，2000.6
- 3) 川瀬良司，岸徳光，今野久志，池田憲二：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.1357-1362，2001.6
- 4) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation，Jun.2000
- 5) 全日本建設協会：土木構造物標準設計第2巻擁壁類，建設省監修，1987
- 6) 土木学会編：土木技術者のための振動便覧，pp.18-27，1983.7