

平成 17 年 4 月 27 日

衝撃荷重を受ける土木構造物の設計用衝撃荷重の設定方法の指針
(案 Ver.2)

土木学会構造工学委員会
構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会

荷重と限界状態WG

目 次

1 . 一般	.....	-Im-1
2 . 衝撃作用の変動性	.....	-Im-1
3 . 構造物の要求性能区分法	.....	-Im-2
4 . 限界状態	.....	-Im-3
5 . 要求性能の性能規定化	.....	-Im-4

備考： 本包括設計コードの各規定は，次の3種類に分類される．分類（REQ,REC,あるいはPOS）は各規定の行頭に示される．

REQ(要求)： このコードが規定している事項．「・・・でなければならない．」

REC(推薦)： いくつかの代替的な方法の中で，もっとも推薦される事項を規定する．「・・・であることが望ましい．」．

POS(可能)： いくつかの可能な代替的な方法や事項の一つを示す．「・・・としてもよい．」

1. 一般

- (1) **[REQ]** 本指針は、衝撃的な作用を主作用として、もしくは従作用として受ける土木構造物の設計法を作成する場合に、設計用の作用（荷重）を指定する方法、およびこれに伴う必要な安全係数を求める方法について述べる
- (2) **[REQ]** 本指針は、性能設計体系に基づいて制定される日本国内の土木構造物の設計法、および性能設計体系における照査アプローチ A に基づく設計を行う設計について適用される。
- (3) **[REQ]** 本指針を適用するにあたって、包括設計コード（性能設計概念に基づいた構造設計コード作成のための原則・指針と用語：code PLATFORM ver 1.0, 2003.3, 土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会）等、関連する性能設計法に基づくガイドラインの意図することに適切に整合させねばならない。

【解説】

- (1) 本指針の目的を定めた。
- (2) 本指針の適用範囲を示した。
性能設計体系に基づいた設計法では、性能の照査方法がマニュアル的に示され、その示すところに従って照査をすると自動的に、その上位にある包括設計コードの要求性能を満足する自由度の少ない照査アプローチ B と、設計者が自由に照査方法を選択する照査アプローチ A がある。本指針は、照査アプローチ B の基準を作成する者と、自由設計を行う者に適用される。
- (3) 本指針は、性能設計のコード体系に従うものであり、性能設計の概念および体系については、土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会の提案した包括設計コードに従うものとしている。
ちなみに、この体系（用語の定義）に従って、適用範囲も記述されている。

2. 衝撃作用の変動性

- (1) **[REQ]** 設計者は、当該構造物の目的および要求性能を分析し、衝撃作用を「変動作用」もしくは、「偶発作用」のいずれとして取り扱うかを明示する。
- (2) **[REC]** 変動作用として取り扱う場合には、不確定性を含めて、前提とする確率特性を記述することが望ましい。
- (3) **[REC]** 事前に確率特性を指定できない場合には、必要な特性値を求めるための調査方法等を指定することもできる。

【解説】

- (1) 設計者とは、照査アプローチ B による設計法の策定者および照査アプローチ A による設計者をいう。
- (2) 一般の土木構造物では、衝撃荷重は他の作用に比して作用頻度が極めて小さく、そのばらつき

特性が不明確であるため、偶発荷重として取り扱われるが、特定の防災構造物や防護構造物のように衝撃荷重を受けることを主目的とする構造物がある。この場合には、衝撃荷重を偶発荷重とすることは、構造物の設置目的との矛盾することになるので、その場合には作用頻度と作用荷重との関係に、主観的であっても何らかの確率評価が行えるものとする。

- (3) 偶発作用と変動作用のどちらにするかについては、作用組み合わせの考え方や要求性能の指定を多段階性に影響を与える。すなわち、偶発作用として取り扱う場合には、自重などの永続作用とのみ組み合わせして衝撃作用を与えることになり、変動作用として取り扱う場合には、他の変動作用を従作用として、相当な確率値と組み合わせるようになる。
- (4) 一般に、衝撃作用の発生頻度特性を定量化するための基礎データを集めることは難しい。しかし、推定の不確定性を主観的な確率量として与えることは可能である。
- (5) 落石荷重や土石流中の巨礫など、地域依存性の強い作用因子については、広域な範囲での標準化を行うことは困難である。このため、例えば95%非超過確率値に対応する値の調査方法などを指定することが望ましい。

3. 構造物の要求性能区分法

- (1) **[REC]** 設計者は、衝撃荷重を受ける場合の当該構造物の要求性能について、限界状態に対応させて作用の大きさを組み合わせて、要求性能を記述する。
- (2) **[REC]** 変動作用として取り扱う場合には、一般に複数の限界状態に対して、それぞれに対応する作用の大きさを示す。
- (3) **[REC]** 偶発作用として取り扱う場合には、一つの限界状態に対して、対応する作用の大きさを示す。

【解説】

- (1) 包括設計コードでいうところの「要求性能」は、荷重の大きさ、限界状態および時間（期間）を組み合わせ、言語表現で記述することになっている。
- (2) 同一種類の作用に対して、複数の要求性能を指定する場合には、作用を指定して限界状態を選択する方法と、限界状態を指定して対応する作用を選択する方法があるが、ここでは後者を推薦した。
- (3) 偶発作用では、その作用頻度や大きさについての定量的表現が非常に困難である。このような荷重特性において、複数の作用段階を設定することは非合理的であるので、単一の要求性能を前提とした。
- (4) 変動作用として取り扱う場合には、作用が大きくなるにつれて超過頻度が低くなる性質を前提とすることが可能である。よって、複数の段階について要求性能を指定することが可能である。
- (5) 衝撃作用を対象とする防災構造物は、設置場所の工事難易度や防災対象物の価値や近接度など設計条件の多様性が大きい。このため、土木構造物が公共構造物であることに鑑みて、重要度に応じた設計作用の選定が可能とすることが重要である。

4．限界状態

- (1) **[REQ]** 設計者は、衝撃作用を受ける構造物には使用限界状態、修復限界状態および終局限界状態のいずれか、もしくはそのいくつかについて定義する。
- (2) **[REC]** 変動作用として取り扱う場合には、一般に複数の限界状態を指定する。
- (3) **[REC]** 偶発作用として取り扱う場合には、単一（多くの場合終局限界状態）を指定する。
- (4) **[POS]** 限界状態の物理的事象には、衝撃作用特有のもののみならず、一般の作用によって生ずるものもある。

【解説】

- (1) 限界状態の設定法は、基本的に一般の作用に対応した限界状態の区分原理と同様である。ただし、衝撃作用を主作用とする構造物は稀であるため、多くの場合、偶発荷重として取り扱われ、その場合には、単一の限界状態に対応させることが多いと考えられる。その際の、限界状態は、使用限界状態や修復限界状態である場合がないとは限らないが、衝撃作用の特性上、終局限界状態に対応させる場合が多いものと思われる。
- (2) 構造物が衝撃作用を受けると、裏面剥離や貫通などの局部応答が卓越して起こる場合が多い。よって、衝撃作用に対しては、そのような衝撃作用特有な限界状態を意識しがちであるが、構造物の特性や作用との相互効果によって、一般の動的な作用を受ける構造物と同様な応答が生ずることも多く、その応答の中に、構造物の目的に照らして、限界状態として定義すべきものがある。
- (3) 衝撃荷重を受ける場合の限界状態は、一般に次のものから選択・指定する。
 - 1) 使用性
 - a) 振動
 - b) 水密性
 - c) 気密性等
 - 2) 局所的破壊限界
 - a) 表面破壊
 - b) 貫入
 - c) 裏面剥離
 - d) 貫通等
 - 3) 構造要素破壊限界
 - a) 変形
 - b) 破断等
 - 4) 構造システム破壊限界
 - a) 変形
 - b) 保護空間への進入等
 - 5) その他

飛散物による傷害等

- (4) 本項による限界状態の選択と荷重指定を組み合わせることは、図-1 に示すような性能マトリクスを具体的に指定することに相当する。

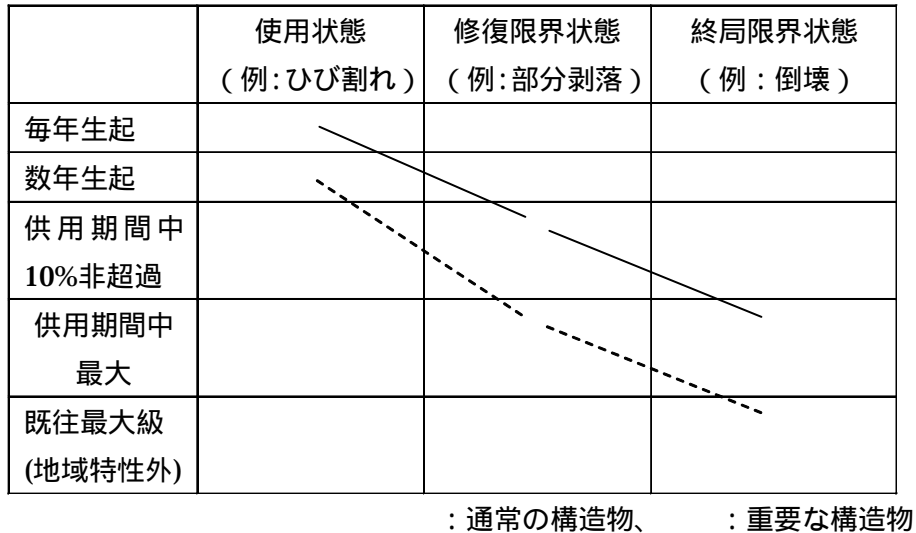


図-1 要求性能に重要度を考慮した荷重指定

5 . 要求性能の性能規定化

- (1) **[REQ]** 設計者は、要求性能を数量化し、性能規定として示す。
- (2) **[REQ]** 照査アプローチAのためには、数値化された荷重と数値化された限界値およびその達成信頼度について示す。
- (3) **[POS]** 数値化に伴って、載荷状態をモデル化して指定することもある。
- (4) **[POS]** 照査アプローチBについては、部分係数法による処理をして示すこともある。

【解説】

- (1) 要求性能は、技術情報化される以前の合意を示すものであるのに対し、性能規定は技術者間の解釈のばらつきを制御する目的の情報である。よって、技術情報としての定量化が行われていなければならない。
- (2) 性能規定は、見なし規定を用いない照査アプローチAによる設計について評価を行う場合の基準値でもある。よって、適切な自由度を有しつつ、曖昧な解釈を避けるような定義が必要である。
- (3) 照査アプローチAで行われる作用効果の推定は、実績のある手法であるが古典的なものや、新しく精緻な計算が可能であるが実績のないもの、大量な実験結果であるが構造要素のみであったり縮小モデルであったりするもの、もしくは実物実験であるが数少ない荷重ケースでありものなど、長所欠点の混在するものであることが多い。これらを公平にかつ科学的に評価するためには、性能規定が達成される信頼性を審査する尺度が必要である。

- (4) ただし、この信頼性をどのように判定するかについては、いまのところ確立した方法が有るわけではない。このため、照査アプローチBで行われる部分係数法の安全率がどのように決定されているかについて理解と判断尺度を参考とする必要がある。

(6) 付 録

- (1) 部分係数法と設計荷重
- (2) 落石荷重のばらつき
- (3) 落石シミュレーション

付録

(3) 落石シミュレーション

落石は、ほとんどの場合偶発的に発生する。落石に関わる問題は表-1 に示すように大きく4つに分類され、この中で、落石発生の具体的な予知に関しては有用な資料が十分得られていないため、現状では困難な場合がほとんどである。ただ、落石がどのような箇所にどのような頻度で発生するかについてはデータの蓄積がある現場ではかなり明らかである。落石衝撃に関する対策を検討する場合、落石荷重設定のため、一般に落石の質量、衝突速度が必要とされる。

表-1 落石問題の分類

番号	問題の分類	内容説明
1	落石発生	落石の発生の時期、箇所そしてその規模を予知・推定する。
2	斜面上の落石運動	発生した落石の斜面上の動的挙動を推定し、危険度を決定する。
3	落石衝突による発生衝撃力	衝突落石による運動エネルギー、発生衝撃力を算定する。
4	落石防護構造物の挙動	落石衝突による防護構造物の動的挙動を算定する。

1. 落石運動の予測

落石運動、すなわち、落石が斜面上をどのように落下するのかを予測することは、落石対策上重要な課題である。この予測については経験的な方法および数値シミュレーションによる方法がある。前者は既往の現場観察から導かれたもので、比較的単純で限られた斜面・落石条件に対して適用されるものである。そのような条件から大きくはずれる場合や、防護工の設計等のためにより詳細に運動の予測が必要とされる場合に、後者の方法が適用される。ここでは、経験則による方法と数値解析による落石運動シミュレーションを紹介する^{1,2)}。

(1) 経験則による方法

斜面上を落下する落石の跳躍量、速度等は、既往の現場落石実験の結果等にもとづき、ある程度経験的に予測することができる。ここでは、斜面上の落石運動を経験則により求める方法について述べる。

1) 跳躍高さ

図-1 は、現場落石実験³⁾による落石の落下高さ⁴⁾と落石の跳躍量の関係を落石の形状と最大径で分類し示したものである。この実験結果では、80%程度以上は2m以下の跳躍量となっている^{4,5)}。しかしながら、斜面に凹凸が存在する場合で落下高さの大きい場合には、跳躍量は2mを超えることもあることも予想される。

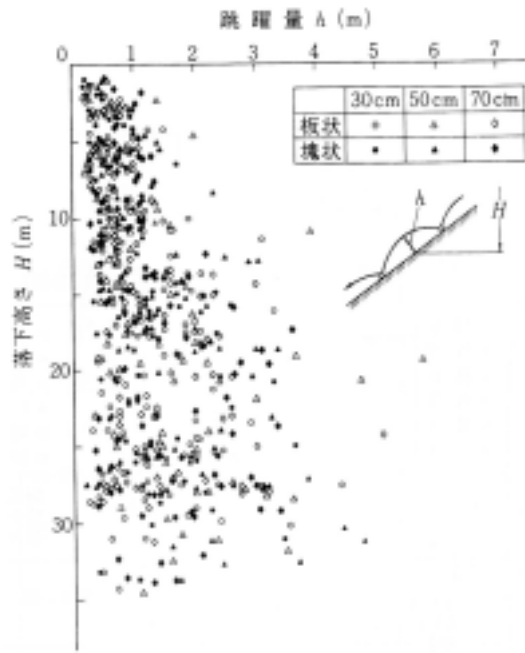


図-1 落石の落下高さ と跳躍量 の関係

2)速度

斜面上の落石の速度は、残存係数 α と自由落下速度を用いて、経験的に次式のように表す場合が多い。

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \tag{1}$$

ここに、 V : 落石速度、 g : 重力加速度、 H : 落下高さである。残存係数の値は斜面の土質、岩質、凹凸、勾配、ならびに落石の形状によって異なる。

斜面の等価摩擦係数を μ とすると残存係数 α は次式で表される。

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \tag{2}$$

ここに、 θ : 斜面勾配であり、落石速度は等価摩擦係数 μ を用いると次式で表される。

$$V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) H} \tag{3}$$

図-2 は等価摩擦係数を求める仮定を示したものである。実際にはある斜面を複雑に落下してくる落石の最終速度を摩擦のある勾配 θ の直線斜面を滑りおりと仮定し摩擦係数を定める方法である。等価摩擦係数の値について既往の実験から得られた値を整理したものが、表-2である⁴⁾。これより斜面を落下する落石の速度を経験的に求めることができる。

3)落石のエネルギー

落石の全運動エネルギー E は、線速度エネルギー E_v と回転エネルギー E_r との和で表される。すなわち、

$$E = E_v + E_r \quad (4)$$

等価摩擦係数を用いて表すと、落石の全運動エネルギー E は次式によって求めることができる。

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) m \cdot g \cdot H \quad (5)$$

ここに、 β は回転エネルギー係数である。

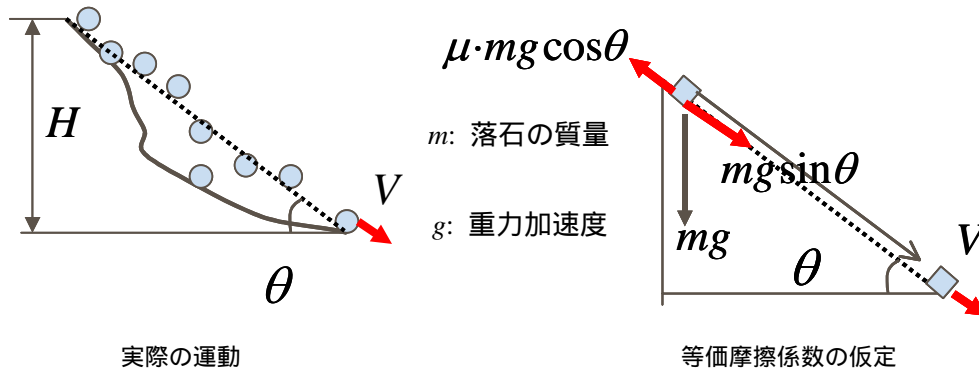


図-2 落石運動と斜面の等価摩擦係数 μ

表-2 等価摩擦係数の値

区分	落石特性	斜面特性	摩擦係数 μ の値(設計用)
A	硬岩, 丸状	凹凸小, 立木無し	0 ~ 0.1 (0.05)
B	軟岩, 丸状 ~ 角状	凹凸中 ~ 大, 立木無し	0.11 ~ 0.2 (0.15)
C	土砂・崖錐, 丸状 ~ 角状	凹凸小 ~ 中, 立木無し	0.21 ~ 0.3 (0.25)
D	崖錐・巨礫まじり崖錐, 角状	凹凸中 ~ 大, 立木無し ~ 有り	0.21 ~ 0.3 (0.25)

回転エネルギー E_r は、既往の実験結果によれば、線速度エネルギー E_v の10%程度である⁴⁾。

ここでは経験則による落石の跳躍量、速度、運動エネルギーの予測法の概略を述べたが、これらは全て限られた現場落石実験の結果等をもとに設定されているものである。したがって、これらの関係は斜面状況により大きく変わることが考えられる。

(2) シミュレーションによる方法

経験的な方法では落石の跳躍量、速度、運動エネルギーの設定が困難な場合に数値シミュレーションを用いて設定に役立てる場合が増えてきている。このシミュレーションによる方法は、落石のモデル化の違いにより質点系シミュレーション手法と非質点系シミュレーション手法の2つの手法に大別される。

1) 質点系シミュレーション手法の概要

質点系シミュレーション手法は、基本的には落石を大きさのない質量を持った質点、または、形状の簡単な円柱や球形の剛体と仮定し、斜面を線状あるいは面状の剛壁と仮定した斜面などからの作用力を考慮して落石の飛行、衝突、すべり・回転等の運動を初等力学により定式化し、数値的に解く手法である²⁾。

a) シミュレーション手法の歴史的経緯

Ritchie⁶⁾他の現場斜面での落石運動の観察から、落石の運動形態は図-3 に示すように飛行、線運動(斜面に沿うところがりあるいはすべり)、衝突の3つに分類されることが多い。

わが国では1968年の飛騨川バス転落事故⁷⁾を契機に、道路に沿う土砂災害に対する防護施設の整備が進められるようになり、その一分野として落石の痕跡から軌跡の逆解析を行うなど⁷⁾の落石運動機構に関する研究等が開始された。1974年には落石に関する既往の成果が高速道路調査会によりとりまとめられた⁵⁾。その報告書の中で上述したような落石の基本的な運動形態の分類や定式化、落石の最大跳躍高、落下速度、運動エネルギーの参考値等が示されている。その後、1980年代に入り計算機の発達に伴い落石運動のシミュレーションに関する研究が行われるようになってきた⁸⁾⁹⁾。これらの研究に先立つ初期の研究では落石を質点とモデル化しており回転運動は無視されていたが、次第に落石を剛体にモデル化することにより回転を考慮することの重要性も認識されるようになってきた。

諸外国においても1970年代中頃より1980年代後半にかけて、回転速度も考慮し跳躍ところがりで運動を表現する手法¹⁰⁾、落石の形状を楕円体として表現する手法¹¹⁾、落石を多

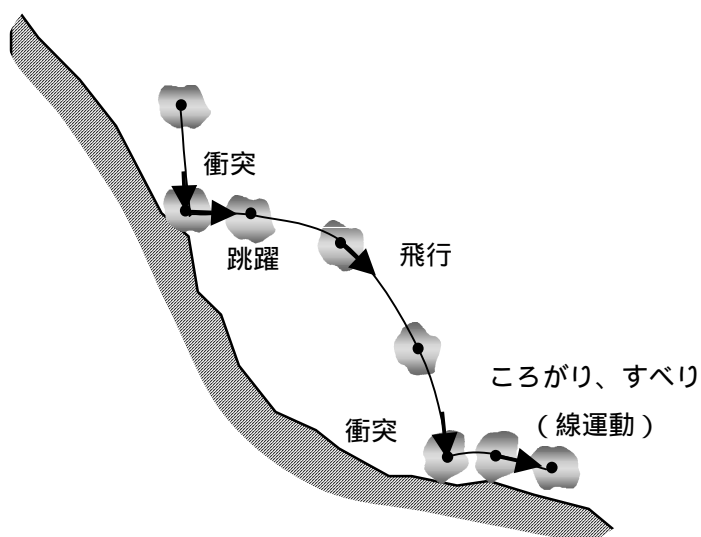


図-3 落石の運動形態

角形モデルとし反発係数などを確率的に取り扱う手法¹²⁾、斜面の凹凸度（一般にラフネスと呼ばれる）を確率変数とする手法^{13,14)}などが提案されている。

b)シミュレーション手法の現状

図-4は落石運動の取り扱いの概念図を示したものである。左は質点の力学の基本であり落石の回転は考慮しない。右に行くに従い多様な運動形態を取り扱うものとなり、回転を考慮し作用力の位置の影響も取り入れたものとなる。質点系手法では、落石運動の形態を判別して運動を定式化しており、このような様々な落石のモデル化のもとで各種の運動形態の遷移を必要に応じ考慮するシミュレーション手法が現在数多く存在する¹³⁻¹⁹⁾。

質点系シミュレーションにおける重要な影響因子として、考慮する運動形態、衝突運動のモデル化、回転運動の考慮、落石運動の不規則性のモデル化等が上げられる。このため、検証データの集積によるパラメータの設定法やシミュレーションにより得られた結果の評価も重要である⁴⁾。

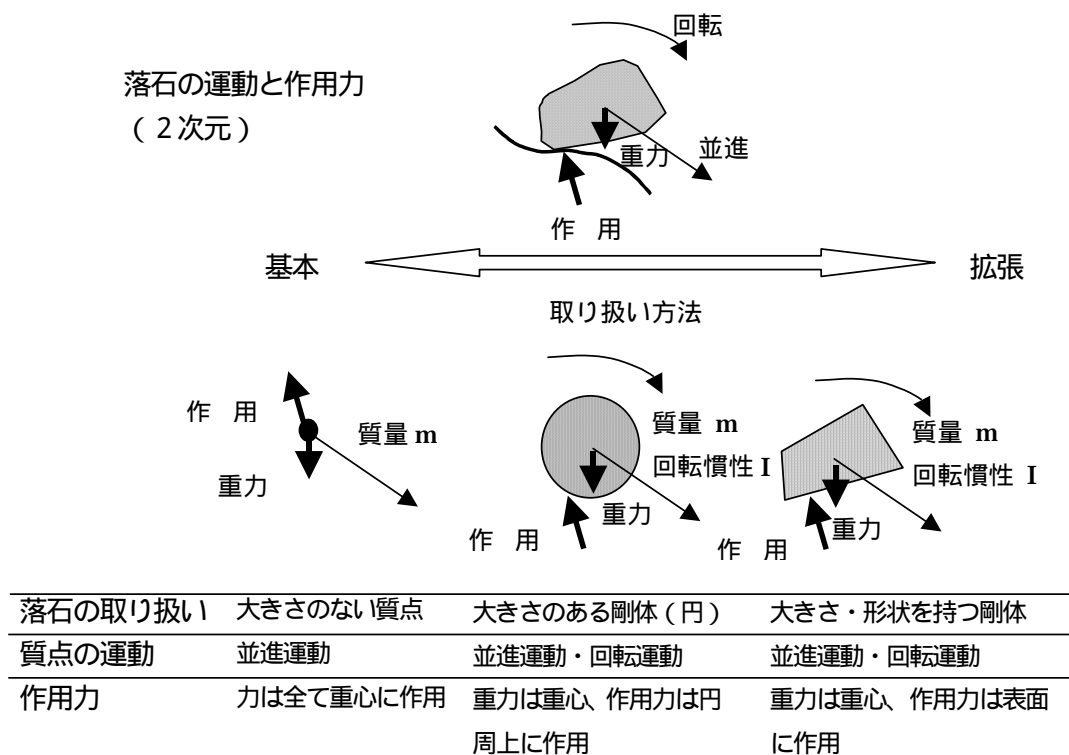


図-4 落石の取り扱い概念図

2)非質点系シミュレーション手法の概要

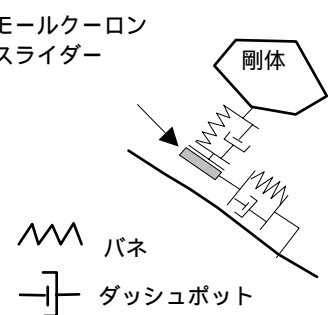
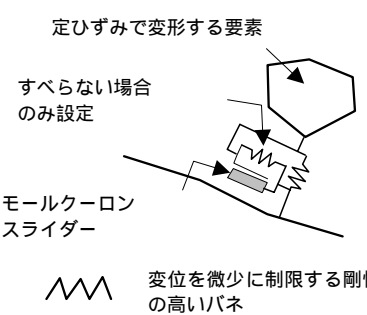
非質点系のシミュレーション手法とは、落石を質点ではなく形状を持ったブロックとして取り扱い、斜面を一つあるいは複数のブロックの集合体として取り扱う方法である。この手法としては、個別要素法 DEM (Distinct Element Method) と不連続変形法 DDA (Discontinuous Deformation Analysis) があり、共に不連続面を有する岩盤などの挙動

解析に用いられている数値解析手法である。最近、動的現象である斜面上の落石運動解析にもこれらが適用されるようになってきた。このような開発経緯の違いを考慮し、質点系と区別して非質点系と呼ばれる場合が多い。

落石シミュレーションを行う場合、個別要素法(DEM)では基本的に解析対象を剛体²⁰⁾、不連続変形法(DDA)では変形可能な多角形要素によって離散化される²¹⁾。運動形態を区別することなく飛行・衝突・すべり・ころがりを包括した運動方程式は小さい時間刻みの逐次計算により解かれる。表-3 に両手法の主な特徴を示すが、時間ステップ毎に接触・非接触を判定し、接触時には接触位置での接触力、すべり、回転モーメント、エネルギー損失などが計算され、非接触時は直前の速度と重力より運動を算定する手法である。なお、DEM及びDDAにおいては、複数の落石が落下するような場合の解析も行なうことができる。

質点系シミュレーション手法と異なり、運動形態(飛行・衝突・すべり・ころがり等)を区別した処理は行われない。また、石の特徴をできるだけ実際の形状に近いモデルとして扱うので、落石の斜面に対する衝突姿勢に依存した反力が算定できる。このため、接触時に接触力が重心を通らない場合に発生する回転モーメントなどが自然に取り込まれるといった特徴がある。しかし、実際の斜面における斜面形状及び落石の凹凸、物性値の変化を詳細にモデル化するのは困難である。このことから、簡易的な方法として、落下開始時の落石の姿勢を変化させるなどの解析を複数回行い、確定的、決定的な計算結果に、実現象におけるばらつきを反映させる検討も行われている²⁾。

表-3 個別要素法 (DEM) と不連続変形法 (DDA)

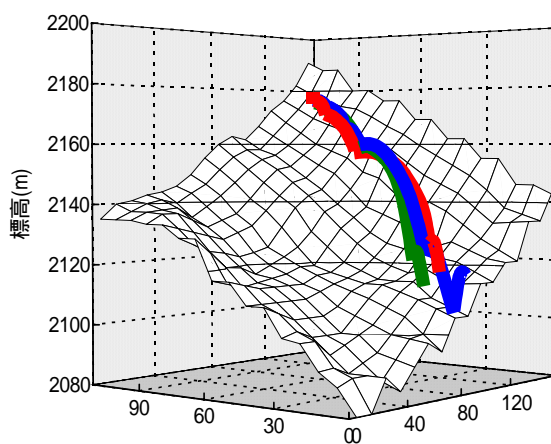
	個別要素法 (DEM)	不連続変形法 (DDA)
解析方法	運動方程式を陽解法で解く。全体剛性、質量、減衰マトリックスを作成しない。	ポテンシャルの最小原理に基づき、運動方程式を陰解法で解く。剛性、質量、減衰マトリックスを作成する。
接触モデル	 <p>モールクーロン スライダー</p> <p>剛体</p> <p>バネ</p> <p>ダッシュポット</p>	 <p>定ひずみで変形する要素</p> <p>すべらない場合のみ設定</p> <p>モールクーロン スライダー</p> <p>変位を微小に制限する剛性の高いバネ</p>

3) シミュレーション手法の適用事例

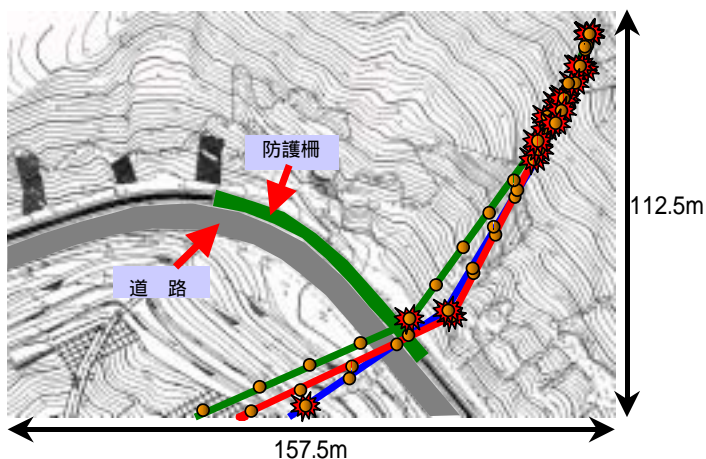
榎谷ら¹⁸⁾と小村ら¹⁹⁾は雪崩対策としてスノーシェッドを計画中の山岳道路において、斜面上方の多数の不安定岩塊に対する落石対策工の必要性の検討および落石到達範囲の推定のために3次元解析を質点系シミュレーション手法を用いて行っている。斜面のモデル化は道路軸方向に157.5m、斜面方向に112.5mの範囲を約5m間隔で座標を設定している。対象落石は標高が最も高く、落石径が最も大きい岩塊とした。パラメータ値である動摩擦係数を変化させシミュレーションを行っている。

図-5に解析結果による落石の3次元軌跡を示す。図-5(b)に示す落石経路は図-5(a)の軌跡を平面上に投影したものであり、落石の到達範囲が把握できる。3次元解析を用いることで、より現実的に落石現象を表現できることがわかる。

倉岡らは非質点系シミュレーション手法である個別要素法 (DEM) を用い、立木のある斜面での防護壁の設置位置の検討を行っている²²⁾。対象とした斜面は傾斜が30~45°であり、防護対象とする家屋から発生源までの比高は約120mである(図-6)。斜面の標高470m~430mには直径0.2~0.4mの杉が10m²に一本程度の割合で林立していた。立木には落石との衝突による擦痕が地表から0.5~1.5mのところ認められ、落石に対する抵抗効果が推定された。



(a) 3次元軌跡図



(b) 平面軌跡図

図-5 小村・榎谷らによる3次元解析事例

そこで、立木の抵抗効果を考慮するために個別要素法 (DEM) により立木及び落石を円形要素で表した平面解析が予め行われた。その結果から立木による速度の低減効果を求め、その低減効果を速度に比例する粘性抵抗力として考慮し縦断面方向の解析に取り入れている。図-7 に解析結果の一例を示す。この結果によれば立木がある場合の終端速度は、立木が無い場合に比べて平均で 2 ~ 3 割程度減少している。

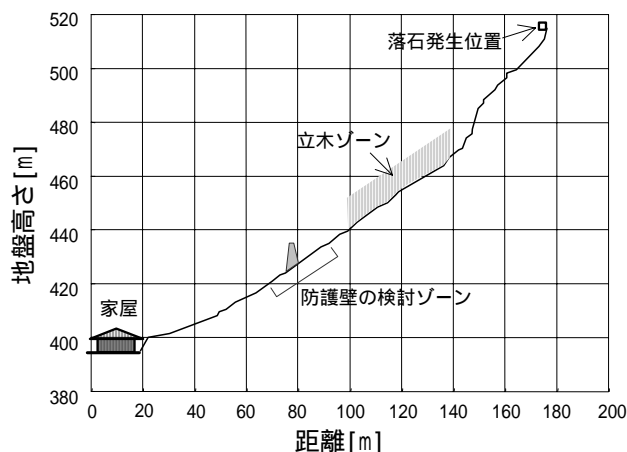
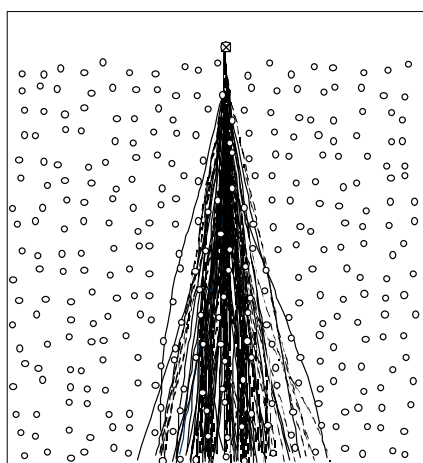
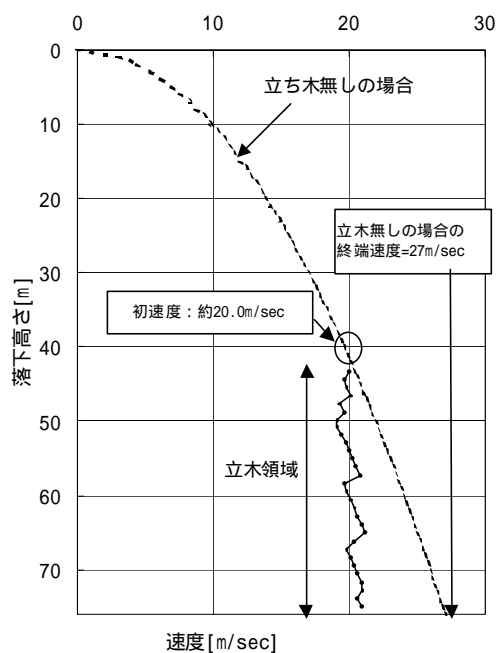


図-6 個別要素法 (DEM) 適用事例の概要



(a) 立木を考慮するための平面解析



(b) 立木の速度低減効果の一例

図-7 DEM の解析事例

(3) あとがき

ここでは、経験的手法に加え、近年有効と考えられようになってきた落石シミュレーション手法の特徴に基づき、シミュレーション手法を質点系と非質点系に大別し、その特徴の概要を示すとともに適用事例を紹介した。今後、落石シミュレーションの斜面防災に果たす役割はますます重要になるものと予想される。現在、解析パラメータの設定に関する基礎的研究が鋭意行われている^{23,24)}。今後、より信頼性の高い衝撃荷重の設定を行うために、斜面途中の植生、転石や防護施設の影響などを考慮できるより合理的な 3 次元シミュ

レーション手法の開発が望まれている。

〔参考文献〕

- 1) 榎谷 浩, 佐々木哲也, 倉岡千郎, 古賀泰之, 三木 茂: 落石対策4 . 落石運動のメカニズムと予測 (その2), 土と基礎, Vol.50, No.4(531), pp.48 - 53, 2002.4.
- 2) 落石シミュレーション手法検討ワーキンググループ (松尾修, 榎谷浩, 他 16 名): 落石対策便覧に関する資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料-, 日本道路協会, 2002.4.
- 3) 佐々木康, 谷口栄一, 舟見清巳, 谷本亘, 堀口正己: 落石の跳躍量に関する実験、第 14 回日本道路会議特定課題論文集、pp.113 ~ 115、1981 .
- 4) 日本道路協会: 落石対策便覧、2000.
- 5) 高速道路調査会: 落石防護施設の設置に関する調査研究報告書、1974.
- 6) Ritchie, M. : Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record No.17, pp.13-28,1963.
- 7) 諏訪浩: 講座 土石流、4.土石流の観測事例、土と基礎、地盤工学会、Vol.48、No.7、Ser.No.510、pp.41-46、2000.7.
- 8) 吉田博、荒田久和: マイコンによる落石の飛跡シミュレーション、第一回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、pp.55-6、1983 .
- 9) 右城猛、村上哲彦: 落石の飛跳躍高の推定、第一回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.48-54、1983 .
- 10) Piteau, D. R. : Communication computer rockfall model, Written report of the Meeting -Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness-, ISMES-Bergamo, pp.127-128,1976.
- 11) Bozzolo, D. : Simulation of rock falls down a valley side, Acta Mechanica ,Vol.63,pp.113-130,1986.
- 12) Paronuzzi, P. : Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.22, pp.175-183,1989.
- 13) Pfeiffer, T. J., J. D. Higgins and A. K. Turner : Computer aided rockfall hazard analysis、Proc.6th IAEG Congress, pp.93-103,1990.
- 14) Stevens, W.D. : RocFall:A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, University of Toronto, Department of Civil Engineering,1998.
- 15) 吉田博、右城猛、榎谷浩、藤井智弘: 斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1603-1615.1991.
- 16) 鷲田修三, 古賀泰之, 伊藤良弘: 落石運動の予測手法について, 第 24 回土質工学研究発表会, pp.1611-1614.1989.

- 17) 右城猛、篠原晶二、谷田幸治、八木則男：落石の斜面衝突運動に関する研究、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、土木学会、pp.91-96 . 2000.
- 18) 榎谷浩、福田尚晃、堤下克彦：斜面上の落石の運動解析手法の開発、構造工学論文集、Vol.43A , pp.1589-1596.1997.
- 19) 小村辰彦、村西隆之、西澤謙二、榎谷 浩：落石シミュレーション解析のパラメータ設定と実斜面の凹凸評価、第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演会論文集、pp.63-68 . 2000.
- 20) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. of Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Vol.1, Nancy France, 11-8,1971.
- 21) Shi, G. and R. E. Goodman : Discontinuous deformation analysis, Proc. Of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp.269-277,1984.
- 22) 倉岡千郎、太田敬一、杉山実：立木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析、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.97-100、2000 .
- 23) Heidenreich, B.: Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes, Ph.D.thesis no3059, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, CH, 2004.
- 24) 上條明洋、音田 奨、榎谷 浩：、落石現象における反発係数と摩擦係数に関する基礎実験、構造工学論文集、Vol.47A, 1605-1612 , 2001.3.