

第2章 落石被害と既往の研究

2-1. 既存の落石災害概要と対応

落石災害は、山地が大半を占める我が国において日常的な災害であり、近年は特出すべき人的被害が生じた落石被害が少ないものの、多くの山間道路などでは毎年のように交通障害をきたすような落石災害が発生している。このため、施設管理団体等により落石対策は順次進められているが、落石対策未整備の区間や想定落石規模以上の落石が発生するといった対策工の不適区間などで落石の被災が認められる。このような状況で発生した落石災害の例として道路に落下した落石と発生源を撮影したものが写真 2-1～3 である。



写真 2-1. 斜面内の亀裂発達岩壁：右写真（小規模：数 m^3 程度）から落下し、
通行障害発生（左写真）

【被災・現地概要】 道路種別：一般国道， 被災時期：春期， 事前の降雨等：事前の降雨なし，
既設対策工：P 式ネット敷設， 斜面特徴：峡谷に面する斜面



写真 2-2. 斜面全体に露岩が分布する急崖斜面（右写真）から落下し、
通行障害発生（左写真）

【被災・現地概要】 道路種別：一般国道， 被災時期：春期， 事前の降雨等：事前の降雨なし，
既設対策工：P 式ネット敷設， 斜面特徴：比較的大きな河川に面する斜面



写真 2-3. 斜面内の所々に小規模な露岩が点在する斜面より落石し，交通傷害発生

【被災・現地概要】 道路種別：一般国道， 被災時期：春期， 事前の降雨等：事前降雨なし，
既設対策工：P式ネット敷設， 斜面特徴：山地中腹を横切る新設道路斜面，
その他の情報：獣害の可能性

上述のような比較的小規模な落石災害は，人的被害がなく交通障害も数日以下の規制で対応可能な状況にあるため，個々の被災箇所についてのみの対策に主眼がおかれ，路線全体の落石危険性に言及されることが少ない。ただし，道路防災対策の一環として国道，県管理道路などでは，既存の落石災害数などを参考に斜面災害に対して危険性が認められた区間において「雨量規制区間」を設定し，豪雨時の通行を禁止することで落石被害を軽減するような消極的対策が落石区間対策として採用されている地区もある。このように，現実的には，落石被害の大半が小規模な落石災害であり，記録も十分に残されないことが多い。ただし，小規模な落石であっても人，車両等を直撃すれば人的被害は避けられず，落石径によって危険性評価することや緊急対策の優先性を評価するなどの防災対策を区別することには疑問が残る。実際，我が国で高い頻度で発生している落石災害の大半は，上記のような小規模落石被害であるにも関わらず，詳細な調査や要因調査などが行われずに緊急の落石対策を実施して対策を終了していることが多い¹⁾。

一般的に小規模な落石災害箇所で行われる落石被害対応は，発生した落石発生源の把握と今後の落石発生規模を予測し，その対策を検討，施工するような状況である。しかしながら，個々の落石被災箇所での落石発生原因の調査を十分行わなければ，想定外の発生源からの落石や想定以上の落石が発生し，再び被害を受けることもある。この現状は，道路などが検討対象区間での通行規制を伴うような落石発生確率が低く，道路災害について近年行われるようになったリスク管理を行うと，路線全体で対策を講じることが不経済となる考え方を採用しているためと考えられる。

山間道路での落石状況としては，多くの場所で路面に小径の落石が落下した痕跡が認められる。このように日常的に発生している小径の落石（径 100 mm 以下）であっても，人に直撃するようなことがあれば人命に関わる災害となることは誰もが理解できるが，そのような小径の落石については，被災記録が残されていないのが現状であり，将来的に大規模な災害につながる危険性を有する危険箇所といえる。よって，道路のように路線という長さを有する構造物では，路線全体を一つの検討対象として総合的な落石対策を検討する必

要がある。特に、落石調査に関して言えば、落石発生源の位置、岩盤特性などを正確に把握し、調査漏れなどによる落石被災を減ずることが最優先であると要求されている。

2-2. 落石調査の現状

落石危険箇所における落石調査の現状としては、いまだに全ての落石危険箇所が抽出できないことである。この状況は、落石被害が大～小規模のものまで非常に数多いため、一般的な落石被害に対して緊急的な対応をとらざるを得ない社会的な事情もあり、緊急に対策工の設計に必要な条件を求める詳細調査が優先して行われているためである。よって、詳細な落石調査は、落石被害に対する対処的対応を行うために実施されるもので、防災、予防に着目されている調査がなされていない状況といえる。このため、平成9年に岐阜県で発生した豪雨では、数多くの落石が既存落石対策工布設箇所以外で発生し、問題となった。その後も、既存の落石対策が施されているにも関わらず落石が防護柵を飛び越えて、貫いて落下するなどの災害が発生しており、前出写真 2-1～3 はそのような場所である。

一般的実施されている落石調査では、得られる成果と内容によって、いくつかの種類に分類される。落石対策で多用される落石対策便覧²⁾では、以下のような調査を段階的に行うようにしている。

- 概 査：斜面単位で精査・対策の必要性を判断する。既存資料を用いて分析し、簡易踏査など比較的経済的調査を行う。
- 精 査：落石発生源などの不安定度、落石経路、不安定化機構等を明らかにする。対策工の選定、設計施工の基礎資料収集などを行う。
- 維持管理調査：日常点検、定期点検、臨時点検からなり、防災カルテと簡易踏査から既存調査結果と比較することで変状の進行などを把握。
- その他の調査：線全体の総合的な防災計画策定のための調査
：災害発生後の復旧および原因究明のための調査等
(落石対策便覧²⁾を一部加筆)

ここで、我が国での落石危険箇所抽出や危険性を評価する調査はどのようにして実施されているか、全国的に統一された手法で実施されている「道路防災点検」³⁾を例に挙げて説明する。道路防災点検でも上記と同様な調査区分で実施しており、その調査段階として下記のような内容の調査を実施している。

- スクリーニング調査：概査として、地形・地質特性や過去の被災履歴を把握し、落石調査箇所を決定する。
- 本 調 査：スクリーニング調査で落石発生危険箇所と見なされた区間において、点検マニュアルに従って、対象斜面を踏査して危険性なども評価するように調査する。
- 履 歴 調 査：被害発生危険箇所などを記した防災カルテを利用、定期・不定期に履歴調査を実施し、危険性が高まっているかなど現状把握調査を行う。
- そ の 他：災害発生後の復旧および原因究明のための調査等

我が国の道路は、平成8年度の道路防災総点検を実施して大半の道路で落石危険箇所の抽出と危険性が調査された。しかしながら、結果として前述の表1-2で示すように落石危険箇所と判定された箇所以外からの落石被害が約半数近くある。この原因としては、以下のような要因があると考えられる。

- (1) 概査において、調査範囲の山地における地形・地質の特徴を把握するとともに、落石等の災害履歴を精査することで、落石危険箇所の想定区間を見いだす。この概査における現地確認は、被災履歴の箇所と、対象となった斜面を現道付近から地形・地質状況等を観察して落石の危険性を判定している。このため、斜面上方の落石発生源を特定したものではない。
- (2) 概査における落石履歴については、本来、現地での落石状況（崖錐帯の形成状況など）を観察判断するべきであるが、記録として残っている被災箇所についてのみ履歴があると判定している場合がある。このため、現地における落石履歴が存在するのに、把握できないでいる。
- (3) 精査での危険箇所判定は、落石発生源や斜面内の転石などについて指定された項目で評価し、危険性を判定する手法をとっている。ここで、評価すべき落石発生源について、広大な斜面から全てを見つけ出し、全てについて評価判定を行うことは困難であり、点検すべき箇所を見逃していることもある。
- (4) 精査での調査範囲として、道路面から40mとする考え方がある。これは落石対策便覧では、40m以上からの落石エネルギーが一定になるためであると考えられる。しかしながら、40m以上に存在する落石発生源を調査しないと、落石危険箇所の特定ができないため、危険箇所として認識されない区間が存在することとなる。
- (5) 斜面内の落石発生源には、二次的に斜面内に留まった転石なども含まれる。このような落石発生源に対して、前述の表1-1では表土上の転石に対し高い評点が分配されているため、転石が危険性の高い落石発生源となる。結果として、このような転石に応急処置がとられたものの、本来の転石発生源である斜面内岩盤露出箇所などについて見逃された傾向がある。結果として、対象斜面における真の落石発生源である岩盤露出箇所などからの落石が生じたと考えられる。
- (6) 精査での落石履歴について、岩塊と称されるような大径の落石記録がある場合は容易に調査され落石危険箇所に評価された。しかしながら、小径の落石が斜面裾野や斜面内に存在しても落石履歴と評価しない場合が多く。この場合は、実際に現地で落石発生があるにも関わらず落石痕跡箇所とは評価されず落石発生源調査がなされなかった。

以上のように落石調査時における落石発生源の位置、特性、現状把握不足などの問題で、道路防災点検における危険箇所漏れが生じている。このため、道路の管理者などは、減災、防災の計画を立案するためにも、全ての落石危険箇所の特定を望んでいる。

現在行われている落石調査の問題点としては、「いつ」、「どの程度の」の想定ではなく、落石災害が「どこで」発生するかを把握できないことである。効果的な防災の観点からすれば「いつ」、「どのようなものが」、「どこに」の要件を調べた落石調査結果が得られれば良いが、定性的な危険性を調査せざるを得ない現在の調査手法では、「いつ」などの条件を判定できない。よって、「どこで」に着目した落石危険箇所の抽出を正確に行い、落石発生源の特徴を把握できる手法を確立することで、落石危険箇所を網羅・判定することが要求されている。

2-3. 落石対策に関わる既往の研究と問題点

落石災害は、「いつ」、「どこから」、「どのように」発生するかなどは重要な問題であるが、現実としての確にそれらを解決することが難しい問題である。ここで、本研究では、発生源である「どこから」に着眼して研究を進めているが、発生源を判定した後に活用できる「どのように」に関わる研究について述べる。これは、落石災害の危険箇所において調査・設計に役立つ研究成果であり、本研究の対象となる山間地域での未確認落石危険箇所・範囲を把握するという目的にも合致する。

2-3-1. 落石落下に関する既存研究と問題点

落石災害での「どのように」に関して、一般的な落石対策のために落石発生源からの落石規模・経路などを調査・判明していれば、落石対策便覧などに示されているシミュレーション手法がかなりの精度で検討可能となってきた。

これらの落石シミュレーション研究については、1970年代から実質的に開始され、多くの研究者が質点系、非質点系に大別できる手法を開発してきた。落石災害に対して最近の研究は、落石被災現場や落石発生源の特定が終了した箇所において、想定される落下危険岩塊と落下経路の想定を行ったうえで、衝突エネルギーなどの解析を行うシミュレーション技術分野が進められている。これらの研究成果である落石シミュレーション技術は、順次二次元的評価から三次元評価に進んでいる。

ここで、落石対策検討に用いられてきた代表的な落石シミュレーション手法についてまとめられ、実際の落石対策の指針ともなっているものが「落石対策便覧に関する参考資料：日本道路協会編」⁴⁾であり、以下に「落石対策便覧に関する参考資料：日本道路協会編」で示される落石シミュレーションの概要をまとめてみる。

<質点系シミュレーション>

- 吉田らの手法（吉田ら，1983）
 - ・落石を球体（剛球体）と仮定し、斜面は直線を組み合わせて表現し、落石の運動を飛行運動，衝突運動，すべり運動，ころがり運動に分けて解析を行う2次元解析手法である。
- 古賀らの手法（古賀ら，1989）
 - ・古賀らの手法は、落石を球体または円柱と仮定し、斜面は直線を組み合わせて表現し、落石の運動を飛行運動，衝突運動，線運動に分けて解析を行う2次元解析手法である。

- 右城らの手法（右城ら，2000）
 - ・右城らの手法は，斜面を有限個の直線の集合，落石を球で近似し，落石の運動（ころがり，飛行，衝突）を2次元問題として微少時間ステップ毎に解析する手法である。

- 枅谷・小村らの手法（小村ら，2000）
 - ・増谷・小村らの手法は，落石を球体（剛球体）と仮定し，斜面は三角形を組み合わせた面の集合として表現し，落石の運動を飛行運動，衝突運動，線運動に分けて解析を行う手法であり，3次元解析への拡張を考慮している。

- コロラド州の手法（通称：CRSP）
 - ・Colorado Rockfall Simulation Program（以下，CRSPと略す．Barret，1989）は，落石の形状を球体もしくは円盤状や円柱状と仮定し，斜面の形状をセルと呼ばれる直線の組み合わせで定義する。斜面を構成するそれぞれのセルには，ラフネスと呼ばれる斜面の凹凸の程度を表す尺度を導入して衝突現象の解析を行う。・・・中略・・・また，CRSPでは，落石の運動を飛行運動と衝突運動に分けて解析を行う。すなわち，すべりやころがり運動などの線運動を解析するアルゴリズムは組み込まれていない。

- トロント大学の手法（通称：RocFall）

トロント大学の手法（Stevens，1998）は，以下の仮定による2次元解析手法である。

 - ① 落石は球体としてモデル化する。
 - ② 落石同士の衝突はない。また，落石は割れない。
 - ③ 落石は角速度の計算を行う時以外は大きさを考慮しない。
 - ④ 質量は，エネルギーを算出する時のほか，反発係数を質量の関数とした場合に考慮する。
 - ⑤ 空気の抵抗は無視する。
 - ⑥ 斜面や構造物は直線要素で構成する。
 - ⑦ 本手法における落石の運動形態は，①飛行運動，②衝突運動，③すべり運動に分けられる。

質点系落石シミュレーションの特徴は，落石を大きさのない質点として扱うか，大きさを考慮した円柱または球体として扱うか，さらに形状の影響を有する形態で表すかの違いがある。また，大きさを考慮することにより落石に回転に影響が生じるなどの各手法で特徴がある。全般的に質点系のシミュレーションは，2次元解析を行うことが多いが，近年は3次元化されたものもある。なお，各手法に用いるパラメーターについては，現状として解析対象となる現場観測結果から逆算的に求められるため，現場観測などの正確さが要求される。

<非質点系シミュレーション>

- 個別要素法（DEM：Distinct Element Method:Cundall:1971， 1979）
 - ・DEM では岩盤や粒状態を剛体または変形可能な要素によって離散化する。変形要素とはブロック要素の内部をさらに差分要素で離散かしたものである。落石シミュレーションでは，落石内部の応力分布や斜面の応力分布や変形を詳細に分析することを目的としない。そこで落石および斜面は剛体ブロック要素としてモデル化する。理論的には3次元化可能である。

- 不連続変形法（DDA: Discontinuous Deformation Analysis:1984）

不連続変形法は，亀裂などの不連続に囲まれた任意形状の弾性体多角形ブロック（要素）の集合体における変位・変形を動的，準静的に解析する手法。理論的には3次元解析も可能。以下に DDA の特徴についてまとめる。

 - ① 落石シミュレーションでは，落石の速度などの運動状態を解析する必要があるので，動的解析を行う。
 - ② DDA では，不連続の特性としてモールクーロン則を接触条件として設定できる。落石解析では，落石が斜面をすべる際の摩擦によるエネルギー損失として，斜面（斜面ブロックの辺）にモールクーロン則を設定する。なお，定式化において動摩擦と静摩擦の区別は行っていない。
 - ③ ブロック（要素）間の衝突（接触）時に，速度エネルギー比なるパラメータを用いて斜面に落石が衝突した際のエネルギー損失をモデル化することができる。
 - ④ 斜面を落下する時，落石相互間あるいは斜面と衝突する際，樹木や草本と衝突する際のエネルギー損失として，粘着力（落石の速度と体積（2次元の場合，面積）に比例した抵抗力）の設定ができる。

非質点系のシミュレーション手法は，質点系シミュレーション手法より新しい手法である。DEM と DDA の両シミュレーションにおいては，落石の形状を反映することのできるものであるが，詳細な斜面形状のばらつきを詳細にモデル化できないこともある。また，3次元化が可能なシミュレーションである。

以上のような落石シミュレーションが開発され落石対策に用いられている。ここで，落石シミュレーションを利用する際の問題としては，いずれの手法も落石経路が予め把握され，その経路の詳細な地形特性が求められている必要がある。また，各落石シミュレーションの有効性は理解されてきているが，各シミュレーションの結果に差が認められるため，どのシミュレーションが最も有効かは判定されていない。この原因の一つには，落石被災箇所における詳細な落石調査を実施する必要があるのだが，そのような調査は大径の落石が生じた被災箇所だけで行われてきたため，予防的な対策検討の際には詳細調査が実施されず，調査結果の不足でパラメータが推測の域を出ないことである。よって，社会的に重要度の高い路線における，想定される落石径に関わらず小径な落石が確認される箇所について，詳細な落石調査を実施し斜面の特性を把握して各種のシミュレーションを駆使して

対策を検討することで、各種のシミュレーションの有効性が判定できるようになると考えられる。また、質点系の2次元シミュレーションは、落石被害箇所の対策検討において、跳躍量の推定や落石エネルギーの推定に多用されてきている⁵⁾。

2-3-2. 詳細地形図の活用に関する研究と問題点⁶⁾

落石調査において利用されてきた地図資料としては、表 2-1 のようなものがある。一般的に公開されている地形図としては、1/25,000～50,000 の地形図があるが、この縮尺で地質図や土地分類図などにも利用されているため、落石災害の恐れのある地域の地形・地質的概要を把握するには便利である。また、道路管理図や森林基本図などの利用目的に応じた縮尺（1/1,000～5,000）で作成された地形図も詳細な地形変化などを把握するために利用される。ただし、表 2-1 に示される地形図類に関する研究では、近年の測量技術の発展によりより詳細な地形図としてレーザー測量から取得できる数値地図の活用がある⁷⁾。

表 2-1. 落石調査範囲検討に用いる地形地質図関係基礎資料

種 類	資料名等	規 格 等	資料作成先	備 考
地形図類	地形図	1/200,000～25,000	国土地理院	電子データあり
	施設管理図	1/5,000～1,000	施設管理者	都道府縣市町村
	数値地図	10～250mメッシュ (標高)	国土地理院	電子データ
	森林基本図	1/5,000	林野庁・ 県など	
地質図類	地質図	1/200,000～50,000	地質調査所	電子化されたデータあり
	土地分類図	1/50,000	国土交通省	

国土地理院では、近年、都市部において5mメッシュの数値地図を公開し活用できるようになっている。同様に、山間部においては10mメッシュの精度で数値地図（標高）を公開している。これらは、一般的なGISソフトを用いることで、山地内の比較的細かな急峻斜面の位置や分布特性を容易に把握できるようになった。また、数値地図を作成するための航空レーザー測量の精度は日増しに向上しており、最近では1mメッシュデータの取得も可能になった。この結果、各種のGISソフトや各種地形解析ソフトを用いてより詳細な地形解析がなされるようになった⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

しかしながら精密な数値地図データは、限定的な区域での取得に限られており、一般に公開されることは少ない現状である。よって、落石調査に用いられる数値地図は、道路管理者などが保有する専用データも踏まえると、1～10mメッシュの精度であると考えられる。ここで、数値地図の精度（データ密度）の差が落石調査においてどのように重要かを検討してみる。

写真 2-4 は、落石災害が発生した周辺の斜面内に孤立した不安定岩塊であるが、その高さは約2m程度であり、このような小規模な露出岩盤では10mメッシュデータで解析するとメッシュ内に含まれてしまい解析できない危険性がある。同じような落石被災箇所の写

真 2-1～3（前出）は、現実に落石を発生させた岩盤露頭であるが、それらはいずれも高さ 2m 程度の岩盤露頭であり、既存の紙データである森林基本図など 1/5,000 程度の地形図では解析できないため、より精密な電子地図データの取得・活用が望まれる。



写真 2-4. 落石発生源となる小規模岩盤露頭
（亀裂が開口し、積み木状になった落石発生源の斜面内露岩）

落石の危険性を有する斜面には、発生源である大小の岩盤露頭や転石群が存在する。本研究の目的としている落石発生源は、写真 2-4 のような斜面内の小岩盤露頭も含まれ、この小岩盤露頭の多くは斜面内に突出するように分布することが多いため、緩みが発生しており落石の危険性が高い。そこで、本研究では、落石の危険が高いこのような小岩盤露頭を効果的に抽出するために精密な数値地図データを活用する。

2-4. まとめ

本章では、（1）落石被災対応の現状、（2）落石調査の現状、（3）落石対策調査に関わる既存研究について述べたが、その内容を以下にまとめてみる。

（1）落石被災対応

一般的に落石被災箇所では、緊急対策を講じるのであるが、大きな通行障害となる大径の落石については落石調査が実施される。しかしながら小径の落石被害については、落下岩塊の除去と前出表 1-2 の現地調査のみの簡易な調査を行って、対策を講じる場合と講じない場合が混在する。このような現状は、落石被災箇所ですべて落石被害を受けることとなり、落石発生源の特徴を把握することが必要となる。

（2）落石調査の現状

道路では、平成 8 年度道路防災総点検で示された点検手法で落石調査が実施されていることが多い。しかしながら、この調査手法で行った山間部で落石危険箇所の抽出漏れの箇所が目立ち、未調査箇所からの落石被災が発生している。この原因と

しては、広範囲に広がる山地斜面内の落石発生源を探し出すことは、専門技術者であっても困難である。また、落石対策が講じてある箇所についても、想定外の発生源からの落石に対応できず落石被害を受ける箇所も多く見受けられる。

このような落石災害を減ずるためには、山地内の落石発生源を特定し、正確に落石危険箇所を抽出することが望ましい。

(3) 既存研究

落石に関する既存の研究については、「落石シミュレーション」、「精密地図データの地形解析」がある。落石シミュレーションは、近年災害対策に利用されつつあり、実際に利用されることで有効性が認められてきた。次に、精密地図データを利用した地形解析では、斜面内に点在する小規模孤立岩盤露頭（高さ 2m 程度）を解析することができるようになった。この 2 つの技術を用いることで、斜面内の落石発生源から落石落下経路を想定し、落石危険箇所の特定が可能となる。

本章では、既存の落石災害の現状を再認識することで、一般的な落石調査に不足している落石要因としての落石発生源について述べた。

【参考文献】

- 1) 松田篤史，道路斜面对策の優先度評価－斜面の点数化－，近畿地方整備局研究発表会論文集，調査・計画・設計Ⅱ部門，No07，2011
- 2) (社)日本道路協会，落石対策便覧（改訂版），2000
- 3) (社)日本道路協会，平成8年度道路防災総点検要領，1996
- 4) (社)日本道路協会，落石対策便覧に関する参考資料，2002
- 5) たとえば，右城猛・玉井佐一・明坂宣行・山岡幸弘・八木則男，高知県における落石災害と落石の運動特性，土木学会論文集，No581VI-37，pp39-48，1997
- 6) 浅野憲雄・杉井俊夫・山田公夫，道路落石対策に用いる発生源の特定化，構造物の安全性・信頼性，Vol.7, JCROSSAR2011 論文集(A論文)，pp637-642，2011
- 7) 山田・栃本・千田・航空レーザー測量を用いた地質調査事例，全地建「技術フォーラム2011」，2011
- 8) 杉井俊夫・浅野憲雄・三尾康太・松原祥平，広域を対象とした危険斜面抽出法の開発，土木学会中部支部研究発表会講演集,pp283-284，2010
- 9) 沢田和秀・森口周二・田中貴大・浅野憲雄・岩田麻衣子，詳細数値標高モデルとGISを用いた山岳道路盛土の抽出，地盤工学会中部支部，第25回中部地盤工学シンポジウム，73-82，2013