第Ⅲ部門

国道沿いの落石危険斜面におけるAI 画像解析及び変位計モニタリング手法の検討

佐々木　亮一[1]・窪田　安打[2]

[1]近畿地方整備局　姫路河川国道事務所　道路管理第二課　（〒670-0947姫路市北条1-250）

[2]応用地質株式会社　関西支社　神戸営業所　（〒651-0083神戸市中央区浜辺通5-1-14 401号）.

国道 29 号の落石危険箇所では，防災対策工事の完了まで長期間を要するため，道路利用者の安全確保に向けた監視手法が課題である．本報告では，落石の変位形態に応じて AI 画像解析を用いた画像カメラ，伸縮計，傾斜計を選定し，現地での適用性を検討した．赤外線撮影と反射ターゲットにより昼夜・気象条件下でも概ね安定した画像計測が可能で，AI 解析の誤差は数 mm 程度に抑えられた．また変位計も長期計測で安定性を確認した．モニタリング併用により事業費・期間の縮減や通行規制緩和が期待される．

キーワード　落石危険箇所，モニタリング，画像カメラ，AI画像解析，変位計

1. はじめに

姫路河川国道事務所が管理する国道29号について，北部の山間地を抜ける区間は自然斜面からの落石危険箇所が多数分布しており，1996年に道路防災総点検により危険箇所の抽出を行い，その後定期点検を継続している．特に要対策のランクに設定されている箇所に対して，順次防災対策工事を実施しているが，落石危険箇所数が膨大であることや急峻な地形であることにより，対策工事完了までに相当な期間と，膨大な工事費が必要となる．このため，長期間にわたり道路への被災リスクが高い状態が継続し，落石は突発的に変状が進行する可能性があることに対して，点検頻度は年1～2回に限られていることなどが問題点として挙げられる．また，目視による点検は，多大な労力がかかる上，急峻な斜面上で点検作業を行うため，安全性の確保が必要となる．また，この区間には異常気象時の事前通行規制区間が指定されており，要因である要対策箇所の対策が未完了である．基準雨量が160mmと低く，通行止めの頻度が高いため社会的影響が大きいことが問題点として挙げられる．これらの問題点を解決することを目的として，落石危険箇所をAI画像解析技術による画像カメラや変位計を用いたモニタリング監視の手法を検討したので，以下に報告する．



図-1　国道29号周辺の路線図



図-2 検討箇所の位置図

2. 現地概要

図-1 に示す国道 29 号は姫路市と鳥取市を結ぶ重要路線である．このうち，表-1 に示す通り，宍粟市波賀町引原～戸倉峠の鳥取県境にかけて，異常気象時の事前通行規制区間が指定されている．この路線に並行する鳥取自動車道の基準雨量値は更に低い 150mm が設定されており，豪雨時には国道 29 号への迂回が予想されることから，幹線道路としての役割は重要である．

国道 29 号沿いの自然斜面や渓流に対して，落石崩壊

や土石流等のリスクに対する道路防災点検箇所が設定されている．このうち，図-2 に示す引原・戸倉区間は国道 29 号の管理範囲内にある道路防災点検箇所のうち約 5 割が集中しており，特に落石危険箇所の約 6 割がこの区間に集中する．この道路防災点検箇所については，防災カルテ点検による継続監視と要対策に区分された箇所を対象とした防災対策工事が実施されているが，防災対策の完了による規制区間の緩和・解除までに相当な期間と膨大な工事費が必要であることが見込まれている．

表-1　事前通行規制区間における対策箇所数

区間名	延長(km)	基準雨量(連続雨量mm)	防災点検箇所数	要対策
引原	10.9	160	39 (33)	14 (10)
戸倉	3.2	200	15 (7)	5 (3)

※（ ）内は落石危険箇所数

この引原・戸倉区間は，地形的には渓谷状の谷地形の中腹～谷底に国道が位置している．国道から尾根までに比高差200～350mの自然斜面が位置しており，急峻な斜面には浮石転石が多数分布しているため，落石崩壊が主要な危険リスクとなっている．特に引原区間における過去の道路被災は，図-3に示すように2002年～2025年にかけて75回の道路被災や変状が記録されているが，このうち，落石は64%を占めており，最も発生頻度の高いリスクとなっている．

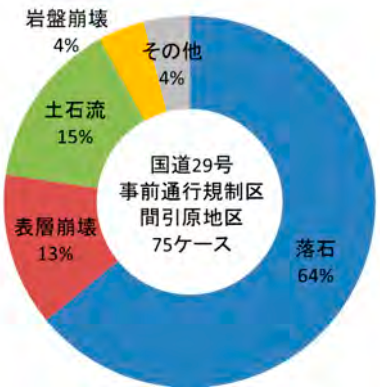


図-3　被災・変状形態の割合（2002～2025）

また，図-4に示すように，発生時期別でみると，3～6月が多いことから雪解けの春先から梅雨時期にかけて落石が発生しているが，その後の台風シーズンには落石が少ない傾向となる．また，過去の被災報告から，風による樹木の揺さぶりにより落石が生じたケースも報告されている．

過去の落石による道路被災の殆どは，待受けの落石防護網や柵を石が越えて道路に石が落下したものである．このため，比較的規模の小さい石が急峻な地形の箇所で発生したものが道路被災に至っている．これらの事象はネットの嵩上げ等で順次対応されているため，近年では落石による被災数は減少傾向である．

この道路被災が発生した落石の原因に関して，降雨との関係を発生件数でみると，図-5 に示すように主に無降雨～連続雨量 20mm 以下の少雨において落石による道路被災が発生している．これに対して，連続雨量 180mm 以上において，表層崩壊や土石流が発生している．これらの記録から，当区間における落石と降雨の関連性は低いものが多いことを示している．

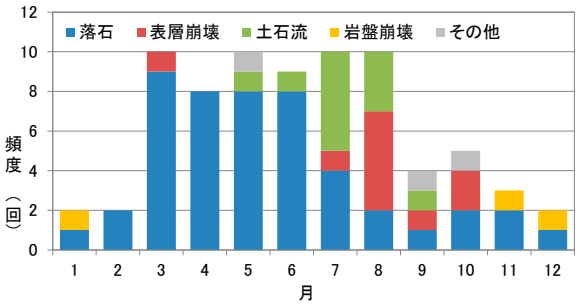


図-4　発生種別と発生月の関係（2002～2025）

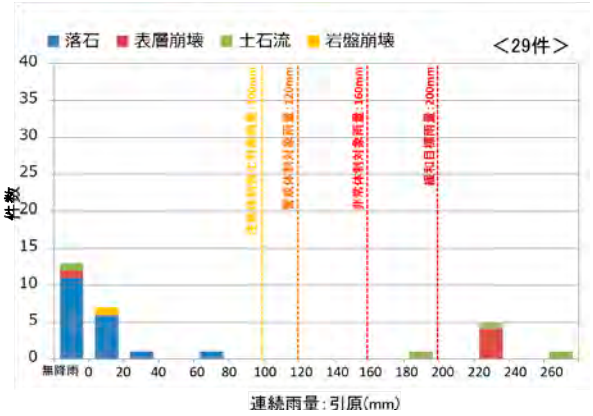


図-5　発生種別と連続雨量の関係（道路被災 2002～2025）

3 現状分析とモニタリングの課題

この問題点に対して，防災対策・規制区間検討会議（兵庫ブロック）（姫路河川国道事務所管内）では，学識経験者を含めた委員による提言により，規制区間の緩和解除に向けた方針が示されている．降雨と関連がある表層崩壊や土石流に対しては，これまで通り防災対策工事を進める必要があるが，図-6 に示すように，落石危険箇所については降雨との関連性や道路被災の規模に応じて，対策優先度を付けて，優先度の高い箇所から対策工事を進めること，優先度が相対的に低い箇所はモニタリングで対応することが示されている．

対象斜面では，現地計測に当たり，現地踏査を行い，

計測方法の検討や課題を整理した結果，落石に対するモニタリングにおいては，表-2 に示す課題が挙げられた．監視する不安定な石は多様な形状をしており，剥落や脱落など落石のメカニズムが多様である．このため，これらの動きを的確に計測できる手法を選択する必要がある．

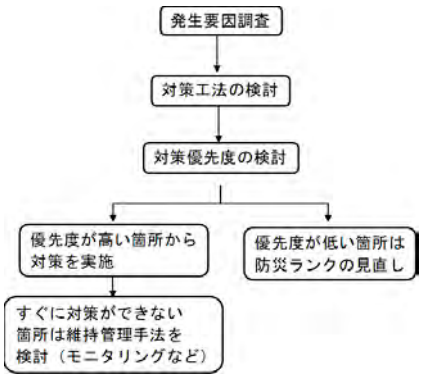


図-6 落石対策に関する対応フロー

また，画像カメラを用いたモニタリング手法については，太陽光の強度変化，雲量や雨，霧等の気象条件により画像の色や明るさが大きく変化する．この場合，画像からの解析が困難となるため，画像の色や明るさが可能な限り一定になる画像を撮影することが課題として挙げられる．また，画像には計測する点が無いため，計測点を現地に設ける必要があることや，画像を自動で読み込んで計測値を得てモニタリングする手法がないため，AI 画像解析技術を利用していく課題が挙げられる．

変位計を用いたモニタリングにおいては，気温変化や接地面の影響により，計測値にノイズや誤差が含まれる可能性がある．この点は現地計測にてノイズや誤差の影響を確認して除外することが課題として挙げられる．

表-2 落石の現象・現地状況に対するモニタリングの課題

現象・現地状況		原因	課題
落石は多様な変位形態がある．		・石の形状が多様である． ・剥離や脱落など異なる．	落石の変位形態ごとに対応できる計器を選定する．
画像カメラ	様々な気象条件，日中，夜間では，得られる画像の色や明るさが異なる．	・太陽光の強さの変化 ・雲量，雨，霧等の気象条件	多様な気象条件や，昼夜を問わずに画像の色や明るさに変化が無いような画像を撮影する．
	画像のみでは計測できない．	多様な形状の石にスケールの設置は困難	計測点を現地に設けることで対応する．
	リアルタイムで計測する技術がない．	画像から自動で数値を読み取る技術がない．	AI画像解析により，自動で計測する手法を検討する．
変位計	自動計測にノイズや誤差が含まれる可能性がある．	気温変化や設置地盤の影響	現地計測によるノイズや誤差の影響を確認して除外する．

4 モニタリング手法の検討

(1) モニタリング計器の選定

特に引原区間における落石は，国道から山側の広範囲の自然斜面に，相当数の落石危険箇所が分布しており，比較的規模が大きな石も含まれている．広い範囲で一体として変位する地すべりとは異なり，落石は個々の安定性の変化に因って落下するものであるため，1) 個別にセンサーを取り付けて計測を行うか，2) 待受け対策工に振動計等を設置して落石を検知する方法のいずれかとなる．引原区間では，待受け対策は隙間なく施工されているが，この施設が対応できる規模を超える石が要対策とされている．このため，これらの石を個別に計測を行う必要がある．

しかし，全てを計測するには相当な箇所数となる．また，落石の落下する形態は回転や滑落などの複数の運動モードがあることから，現地踏査により，落石の変位形態をみて，徐々に回転する変状が生じる石は傾斜計を使用し，ずれ落ちる変位が継続する場合は，伸縮計または画像カメラを使用する．なお，伸縮計は画像カメラよりも高価であるため，カメラが設置困難な箇所のみに使用することとする．回転とずれ落ちが複合するものや，浮石・転石群のように積み重なって脱落するような落石の場合は，画像カメラとする．これらに対して計器費用や維持コストを考慮し，落石危険箇所に対して，現地踏査を行い，対象の石の落下時の変位形態を確認すること，地区ごとの箇所数を確認し，最も計測コストが安くなる方法を選ぶ必要がある．この流れを図-7に示した．選定事例を図-8に示した．

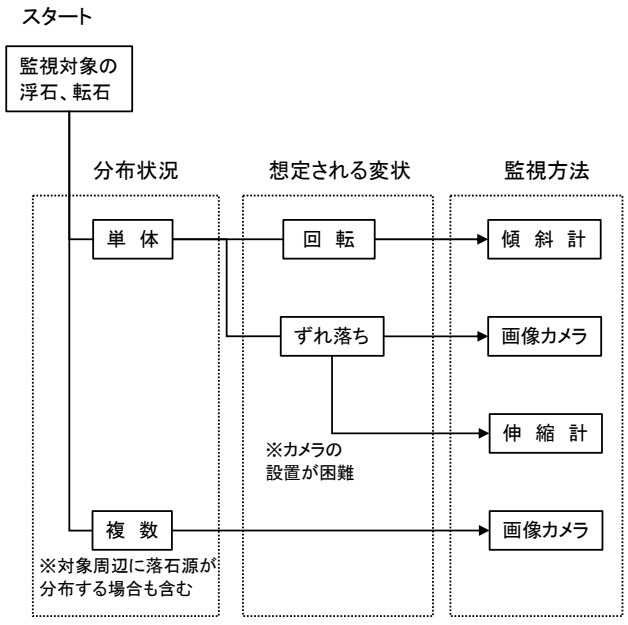


図-7 落石モニタリング手法の検討フロー

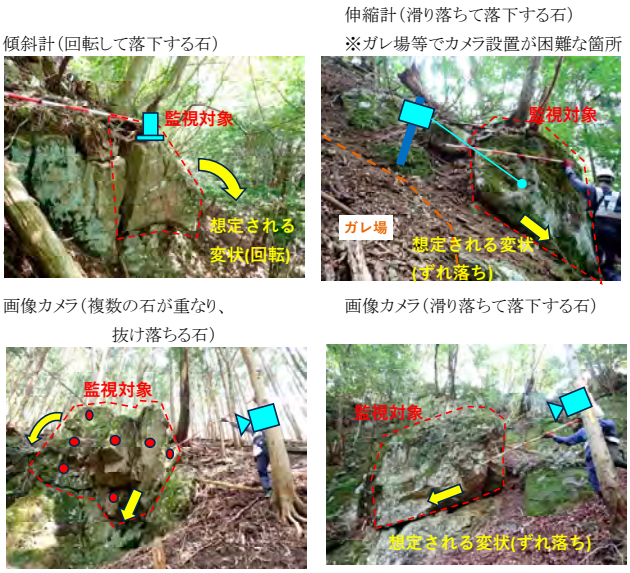


図-8　運動モードの異なる落石のモニタリング手法の選定

(2) AI画像解析を利用した画像カメラのモニタリング

a) 課題に対する検討方針

画像カメラによるモニタリングは，対象物を定期的に撮影した画像から，自動でAI画像解析を行うことで，対象の動きを把握するものであり，近年，実用化に向けた試みが進められている．[1)2)] ここでは，落石の動きに対して応用することを試みた．

多様な気象条件や，昼夜を問わずに画像の色や明るさに変化が無いような画像を撮影する課題については，日中は，可視光モードでは様々な光が入ることで，石の画像認識が低下する恐れがある．このため，日中・夜間ともに赤外線モードで撮影することで，一定の白黒画像を撮影する方針とした．

画像に計測点が無いため，計測点を現地に設けることで対応する課題に対しては，反射材を使用したターゲットを石に設置して計測点を設けることとした．

また，リアルタイムで画像計測する技術として，AI画像解析により，自動で計測する手法を検討する課題については，同箇所で事前に複数の画像を撮影したものを学習したAIエンジンを利用して画像解析する方針とした．

b) 検討結果

図-9に示すように画像カメラを計測対象の石から5m程度以内の箇所に設置し，1時間毎に撮影して画像を通信してクラウド上に保存する方法とした．赤外線モード付のカメラを使用することで，図-10に示すように夜間・日中共に安定した白黒画像を撮影することができた．ただし，濃霧の影響を受けた場合は，カメラと石の距離が7m以上となる場合は，対象物が不明瞭となり，撮影困難となることが判った．また，日差しが対象物に当たる場合は，画像が部分的に白飛びする現象が発生しており，モニタリングが困難な気象現象があることを確認した．



図-9　画像カメラによるモニタリング状況

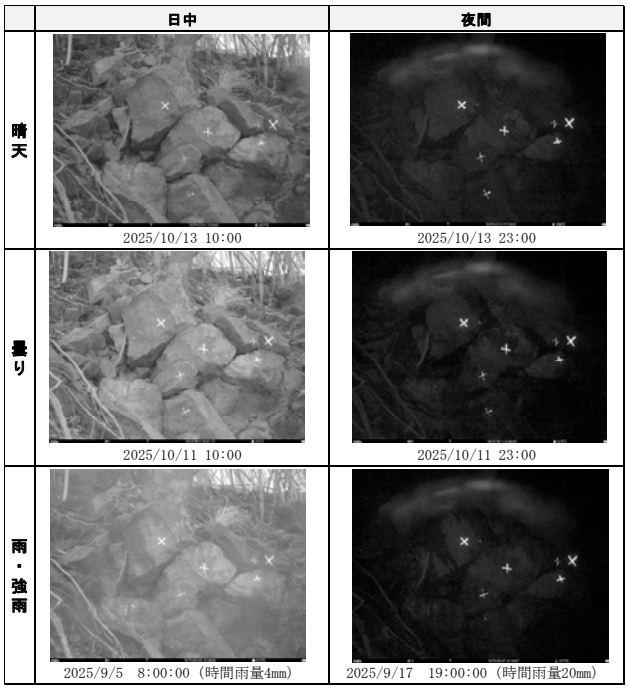
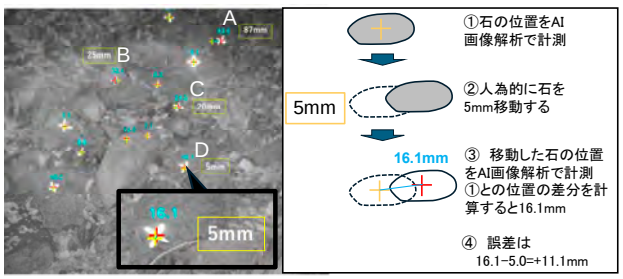


図-10　赤外線撮影による気象条件，日中・夜間の撮影画像



	② 人為的に移動 (mm)	③ AI画像解析の計測 (mm)	④ 誤差 (mm)
A	87.0	93.6	+6.6
B	25.0	32.1	+7.1
C	20.0	24.0	+4.0
D	5.0	16.1	+11.1

図-11　反射ターゲットを利用したAI画像解析の計測精度

更に，撮影した画像を自動で変位を計測するために，反射ターゲットを設置した石の撮影画像を事前に長期間撮影して，気象条件毎にAIに学習させた．このAIエンジンを用いて，ある日時の画像と異なる時間の画像を比較した．ここでは，石が変位した場合の検証を可能とするために，渓流沿いの石が集積した箇所において，石を人為的に移動させて撮影した．その結果，図-11に示すように，人為的に移動した石のA～Dのターゲットを AI画像解析による自動計測した結果，11.1mm以下の誤差に抑えられており，概ね10mm以下の精度があることを確認した．その後の検証の結果，画像カメラに対するターゲットの向きや配置を改善することで，誤差は6mm未満に抑えられることを確認した．なお，この試験位置は道路からの離隔が十分ある地点であり，本試験が道路やその他の安全には影響しない箇所である．

(2) 変位計によるモニタリング

a) 課題に対する検討方針

現地計測によるノイズや誤差の影響を確認にして除外する課題に対して，伸縮計及び傾斜計の変位計を現地の不安定な石に設置して1年間計測を実施することとした．これにより，ノイズや誤差の他，季節変動の有無等を確認する方針とした．

b) 検討結果

径1m程度の不安定な石に対して，図-12に示すように伸縮計及び傾斜計を設置して数か月～年間を通じて計測を実施した．その結果，図-13に示すように，伸縮計は±1mm以下の変化，傾斜計は±0.06°以下の変化であった．いずれもメジャーによる点検により計測期間中は動きが無いことを確認していることから，有意な変化ではなく誤差と考えられる．伸縮計は変動b（緩慢に運動中）の0.1mm/日，2mm/月以下[3]を下回っていること，傾斜計は±0.06/日以下（厳重警戒）[4]の範囲で計測を行うことができている．いずれも地すべり等で利用される閾値であるが，長期間を通じてこの閾値以内の安定した計測値を得られていることから，落石に対する変位計によるモニタリングは可能であると判断した．なお，図-14に示すように，傾斜計の設置後の2～3か月間は，計測誤差が大きいことを確認した．これは接地面の影響を受けていると考えられ，計器設置直後の一定期間は計測値の安定化期間として評価する必要があることを確認した．



図-12　変位計によるモニタリング状況

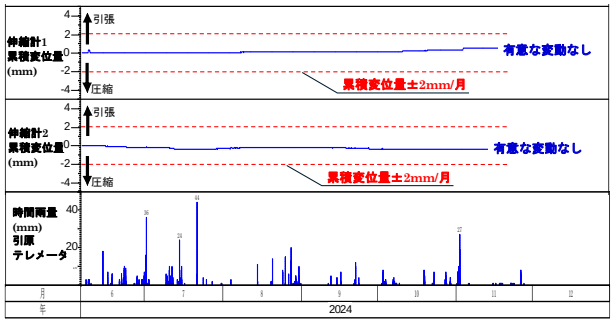


図-13　伸縮計によるモニタリング結果

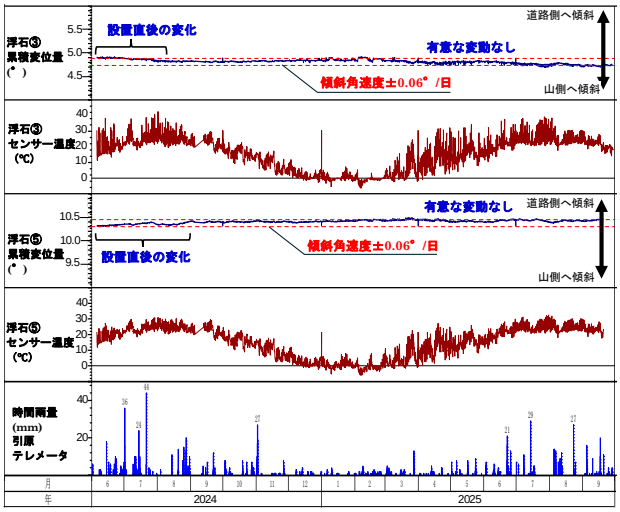


図-14　傾斜計によるモニタリング結果

(3) 閾値について

モニタリングにおいては，計測値に一定の閾値を設けることで，危険度の判断や通行止め等の対応を行うことができる．しかし，落石の動きに関する閾値については，過去の研究や計測事例は殆ど無いことから，新たに設定する必要がある．

落石が発生する前の石の動き，つまり前兆現象が閾値を設定する際の参考となるが，ここでは過去の点検記録を参考に検討することとした．1996年以降，防災カルテ点検が実施されており，不安定な石の動きを把握するために亀裂の開口量や石のズレをメジャーにより計測し

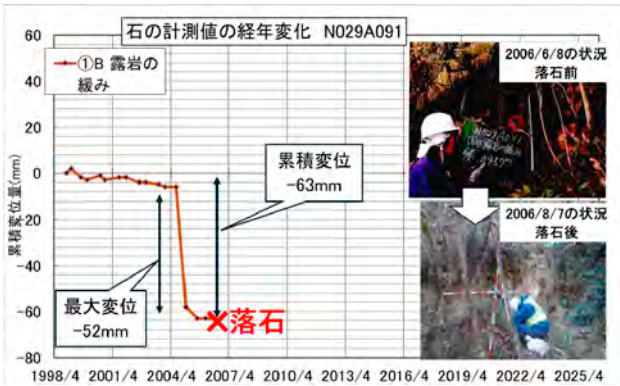


図-15 落石した箇所の点検時の計測結果(1998/11～2006/6)

ている．全箇所の点検記録を時系列にて整理した結果，図-15に示すように，点検期間中に点検対象の石が落下したり，落石の恐れが生じたため緊急対策が実施された石については，落石前に数十mm程度の変位を生じていることが確認された．

以上の落石に対する点検時の計測データを図-16に示した．落下したり，緊急対策で対応された石のうち，点検開始時点で既に変位が顕著なものは，前兆現象の一部しか記録していないと考えられるため参考値とした．その結果，落石前に最大変位量50mm，累積変位量60mm以上の変位を受けているものと考えられる．これは当地区における落石データから得られた落下前の前兆現象と考えらえる変位量であることから，落石発生を事前に判断するために，この値を参考に注意や警戒体制等の閾値を検討することとした．

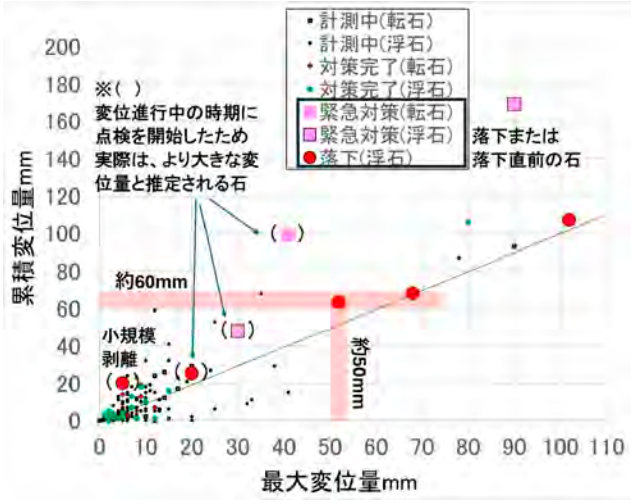


図-16 防災カルテ点検による不安定な石の最大変位量(横軸)と累積変位量(縦軸)の関係

5. モニタリング併用による対策効果

対策が必要な斜面においてモニタリングを利用する案として，図-17に示すように，基本的に道路沿いに高エネルギータイプの待受け柵等を施工して，斜面上の多数の石に対する対策を実施する．そのうえで，待受け対策では対応できない落石エネルギーの大きな石については，対策優先度の高い不安定な石は原位置で抑える対策を実施して，それ以外をモニタリングする方針である．

この方針で引原区間においてモニタリングを併用した事前通行規制区間の対策を行うことによる効果として以下の通り整理される．

対策事業費として全対策案では26.4億円であるが，待受対策＋モニタリング併用案は8.4億円程度に抑えられる．また，対策事業期間に関しても18～20年が，10～13年へ短縮が見込まれる．また，当地区では，自然公園や保安林が広範囲を占めており，対策箇所の削減はこれらの法規制手続きの軽減も期待できる．

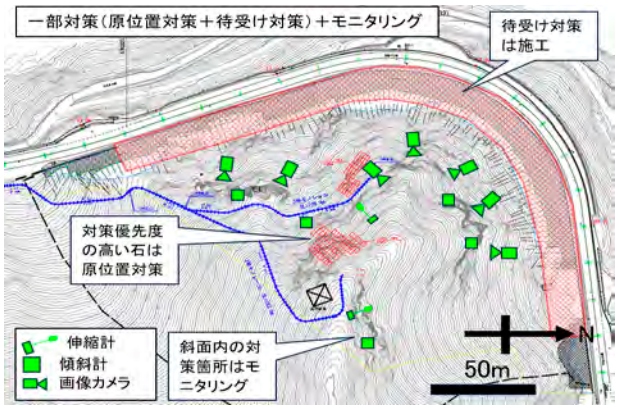


図-17 対策箇所におけるモニタリングを併用した対策案

6. おわりに

落石危険箇所が多数分布する路線では，用地上の問題や対策工事費の規模が大きいことから，防災対策工事の進捗が進みにくい状況は全国的にも共通する問題と考えられる．この点に対する解決方法として本報告で検討している落石のモニタリング手法は，全国的にみても先進的な取り組みと考えられる．モニタリングを行うことで，現状よりも道路利用者の安全性を早期に確保できること，膨大な箇所を人が点検することからの省力化や点検の安全性向上も期待できることから，有効な方法と考えられる．特に落石については，モニタリングすることがこれまで殆どなされていなかったが，近年の計測機器の技術開発により，数多くの点を計測できる機器の登場や，AI技術による画像による監視技術の登場により，多数の落石群を監視することが可能になりつつある．

今後は，AI画像解析によるモニタリングの計測精度の更なる向上と共に，運用可能とするためのシステムや現地作業との整合の検討を進め，実装に向け検討を進める．

謝辞：本発表にあたり，神戸大学の沖村孝名誉教授，大阪公立大学大学院の鍋島康之教授，神戸市立工業高等専門学校の鳥居宣之教授，関西大学の北岡貴文助教授には，ご指導いただいた．深く御礼申し上げる．

参考文献

1)インフラメンテナンス総合委員会新技術適用推進小委員会：モニタリング技術活用のための指針（案），公益社団法人土木学会，2022
2)植前成美：構造物等の変状に対する AI 画像解析によるリアルタイム把握に向けて，2025 年度近畿地方整備局研究発表会，イノベーション部門I：No.04.
3) 日本道路協会：道路土工―切土工・斜面安定工指針（2009年度版），2009
4) 菅原紀明，地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法の提案，応用地質技術年報，No.20，2000