TOPICS ▶ 落石事故

対策の盲点を突いた“一石”

樹木の成長による安定度の経年劣化を実地試験で追証

島根県西南部の中山間地域で昨年5月のゴールデンウイーク中に発生した落石死亡事故。専門家による検討委員会の検証によって見えてきたのは、斜面の落石防止対策で意外と見落とされてきたポイントだ。カギは斜面に生い茂った樹木。県が公表した委員会報告から要点を紹介する。
（下田 健太郎）

鬱蒼と木が茂る斜面から転げ落ちてきた大石が走行中の車を直撃――。2016年5月4日、島根県西南部の中山間地域で、落石防止対策の盲点を突くような死亡事故が発生した。

事故が発生したのは邑南（おおなん）町戸河内の県道（主要地方道）浜田作木線。午後15時55分ごろ、山側から落ちてきた最大長約95cm、重さ510kgの石が、西方向に走行していた軽自動車の助手席側を直撃。助手席の女子大学生が死亡し、運転していた母親も軽傷を負った（写真1、2、図1）。

県は事故直後の現地調査などを踏まえて、有識者を集めた「落石事故

写真1■ 事故発生直後の現場付近。左手の樹林帯斜面から石が落ちてきた。道路の右手（北側）には出羽（いずわ）川。浜田作木線は国道375号と同261号をつなぐ路線で、交通量は道路交通センサスで1日1500台程度。事故2日前の通常パトロール（週2回実施）で異常は確認されていなかった（写真・資料:74ページまで特記以外は島根県）

図1 ■ 位置図

写真2■ 落ちてきた石は長手方向が約95cm、短手方向が約55cmで重さは510kg。調査を通じて、斜面上方にある閃緑岩の岩盤露頭の一部だったと分かった

写真3■ 多数の落石痕が見つかった斜面。路面から高さ約5mの擁壁上にはガードパイプ（作業道の転落防止柵）があり、落石痕の延長上が大きく破損していた

再発防止検討委員会」（委員長：常田（ときだ）賢一・大阪大学大学院教授）を組織。同年5～8月にかけて、落石メカニズムの実証試験を交えて検証を進め、その報告書を同年12月5日付で公開した。

「斜面の落石対策では一般に、樹木の繁茂は安全度の判定上、プラスの評価要因。だが、条件によってはマイナス要因になる。後者はこれまであまり着目されていなかった」。常田教授は事故の検証から見えてきた最大の教訓をこう総括する。

立体模型で落石発生源を特定

現場は幅員7mの道路で、北側の川と南側の山に挟まれた急カーブだ。山側の擁壁（高さ約5m）の上には森林管理などの作業道があり、ガードパイプ（転落防止柵）が設置されている。パイプの一部に落石の衝突とみられる破損が生じ、上方に落石痕が続いていた（写真3、4）。

県は事故直後の5月8日、土木研

写真4■ 破損したガードパイプ。事故直後の当初調査や検討委員会の現地調査では、落石の破片とみられる石も見つかっている

写真5■ 道路から高低差で約18m上方の斜面に見つかった落石発生源。岩盤露頭に近接樹木の根がまとわりついていた。落ちた石はくぼみの箇所にあったものと推定され、その下に樹木の太い根が2本（根A・B）が伸びていた

写真6■ 検討委員会は、落ちてきた石と木の根元にあった発生源とみられるくぼみをそれぞれ三次元レーザースキャナーで計測。そのデータに基づいて三次元プリンターで5分の1サイズの樹脂製模型をつくった

写真7■ 発生源とみられた木の根元付近の模型。くぼみの下にあった根を含めて、一帯の凹凸形状や傾斜角などを正確に再現した。石とともに事故直後の色彩もできるだけ忠実に再現したという

写真8■ 木の根元付近と落ちてきた石それぞれの模型を組み合わせてみると、根元のくぼみにぴたりと合った。石の上部だけ、他の面に繁茂していたコケ類が見られず（石の模型で上部の黄色い面）、落下の際に割れ飛んだ部分とみられた。その一部とみられる破片が下方のガードパイプ付近や事故現場の道路上でいくつか見つかっている

究所や島根大学、地元建設コンサルティング会社などの専門家と現地を調査。落石痕をたどると道路面から高さ約18mの斜面に、落石発生源とみられる箇所を見つけた（写真5）。

発生源と推定したのは閃緑岩の岩盤露頭で、落石の岩質とも一致。そこには幹径45cm、樹高15mの樹木が立ち、太い根が露頭に絡み付くように伸びていた。根元には比較的新しいくぼみがあり、その下部にも2本の太い根が見えていた。

検討委員会は落石源を確定するために、このくぼみと落ちてきた石それぞれの形状を三次元レーザースキャナーで計測。そのデータから三次元プリンターで精密な立体模型を製作した。くぼみと石の模型を組み合わせると、それぞれの凹凸形状が対応することを確認し、落石源と断定した。2本の太い根（写真5の根A・B）が石を抱えるような格好だったことが分かった（写真6、7、8）。

さらに問題の石の重量や大きさ、斜面地盤の性状などをパラメーターにして、落石源から自由落下させた場合に計算上求められる軌跡と、実際の落石痕と車両の被災位置から推定した落下の軌跡とを比較。両者がほぼ一致することも確認し、落石時の状況を再現した（図2、写真9）。

県の当初調査に同行し、後の検討委員会でも委員を務めた藤井基礎設計事務所（松江市）の藤井俊逸社長は、次のように話す。

「太い根が露頭の亀裂に何本も入り込んでいた。根は主に表層部を水平方向に発達し、岩塊を抱え込んだり、浮き石化させたりしていた。落下した石もそうした状態にあったとみている」。

原因は強風による木の揺れか？

不安定な石に“最後の一押し”を与えた直接的な原因は？――。

事故発生の直前、現場付近では、落石を誘引する規模の降雨や地震は観測されていない。だが、強い風が吹いていた。

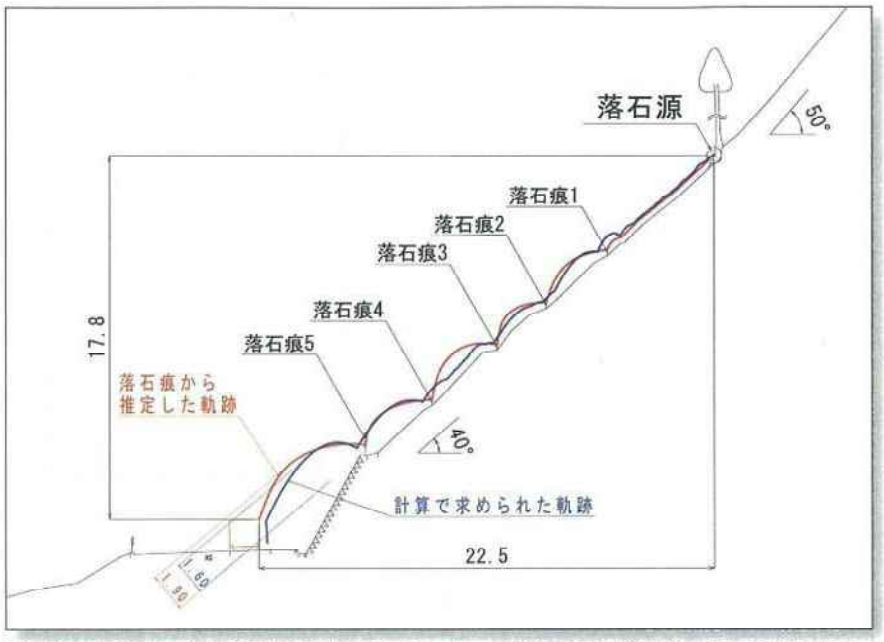
現場から直線距離で約5km離れた松江地方気象台瑞穂観測所では当時、最大瞬間風速24.2m/秒を観測。現場付近の住民からも「滅多にない強い風だった」といった複数の証言があった。県の当初調査時点でも、専門家から強風による木の揺れの影響を指摘する声が上がっていた。

検討委員会はこの点も検証。発生源で石の下にあった根が木の揺れに伴って動くか、実地で木の引張試験を行った（図3、写真10）。

引張試験は、谷側にアンカーで固定した鋼製ワイヤを問題の木にかけて、中間にセットしたウインチで引っ張り、幹や根の変位を計測する内容だ。山から谷方向に吹く風を受ける木の水平断面積を、三次元レーザースキャナーの計測データから算出。風速24.2m/秒の場合に木に作用する風圧力を3.2kN、さらにこの風圧力に相当するワイヤの張力を21.9kNと試算し、試験を行った。

張力が21.9kNに達する前に、16kNで根が破断して試験は継続不能に。だが、破断直前の時点で上方の根Aは上方向に2.5mm、谷側方

図2 ■ 落石軌跡の検証



落ちてきた石の重量や大きさ、斜面地盤の性状などをパラメーターに、落石源から自由落下させた場合に計算上求められる軌跡と、実際の落石痕と車両の被災位置から推定した落下の軌跡とを比較。両者はほぼ一致した

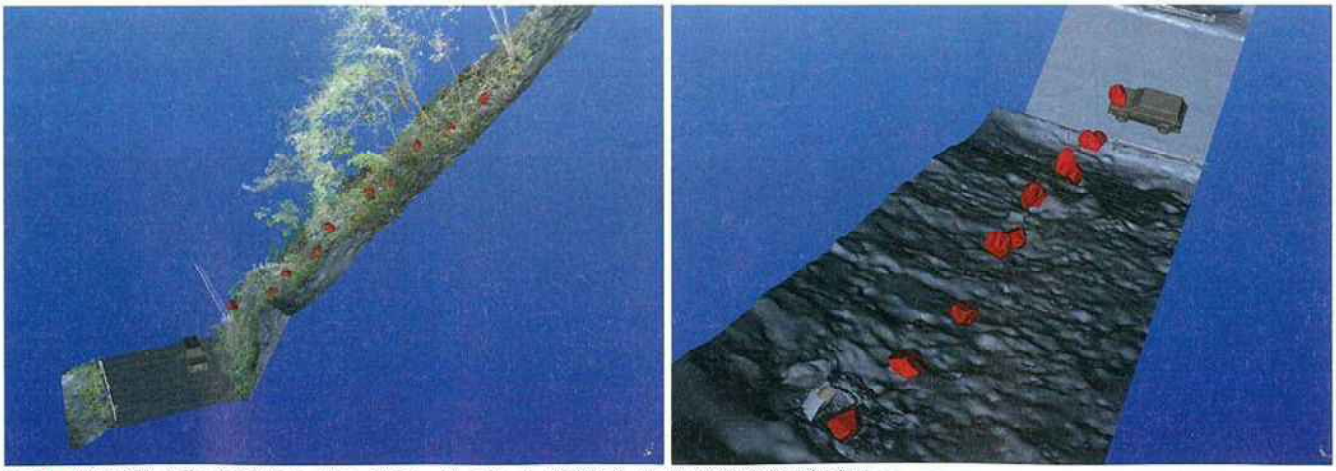
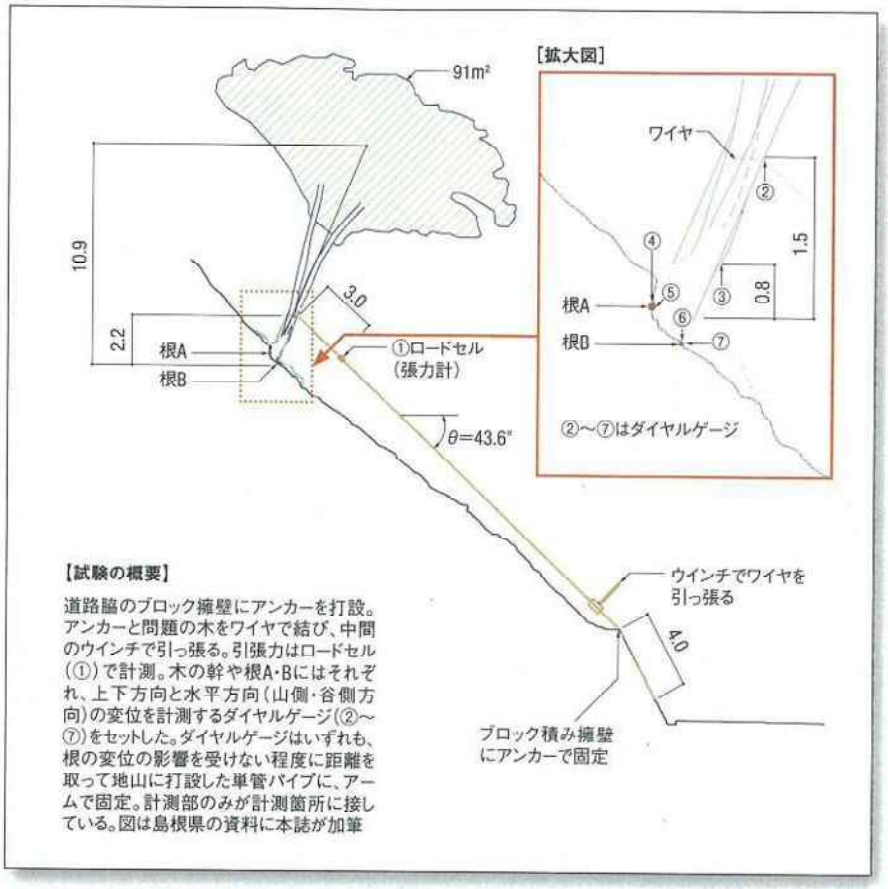
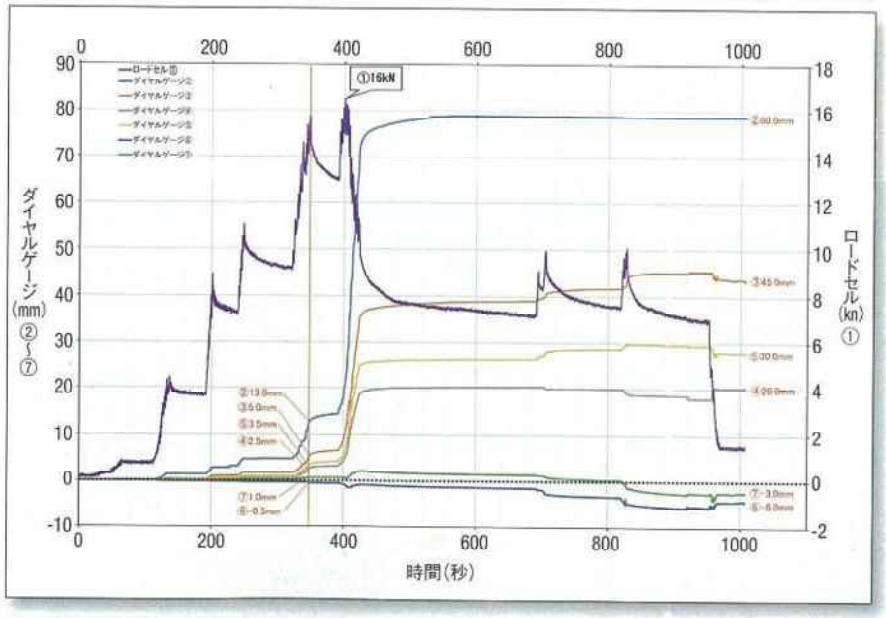


写真9■ 図2で検証した落石の軌跡をベースに、三次元レーザースキャナーの計測データに基づく斜面のCG画像と組み合わせて再現した落石の様子

図3 ■ 発生源にあった木の引張試験





山から谷方向の風を受ける木の水平断面積を三次元レーザースキャナーで算出。風速24.2m/秒で幹に作用する風圧力を3.2kN、この風圧力に相当するワイヤの張力を21.9kNと試算し、試験を行った。16kNで根は破断したが、破断直前で上方の根Aは上方向に2.5mm、谷側方向に3.5mmの変位を計測。同時点で下方の根Bは上方向に1mm、山側方向に0.5mm動いた

写真10■ 落石発生源に立っていた木に対する引張試験の様子。問題の木を引っ張り、根などの変位をダイヤルゲージ(下の写真)で調べた

向に3.5mmの変位を計測した。同時点で下方の根Bは上方向に1mm、山側方向に0.5mm動いた。「木の揺れで根が動くこと。上方の根Aの方が下のBより動きが大きく、発生源のくぼみにあった石にはBを支点に、てこの原理のような力が働くこと。この2点が確認できた」(藤井社長)。

落石発生時に実際に木が受けた風圧力や、根A・Bがどの程度変位したかを忠実に再現することは不可能だ。引張試験で静的に力を加える場合と、強い突風などで瞬間的に同等の力が加わる場合とでは、根の変位量に対して石に伝わる運動エネルギーも異なる。引張試験の結果は石を動かしたメカニズムの特定までは至っていないが、仮説の有力な裏付けとなる現象を確認したと言えるだろう(写真11)。

［インタビュー］斜面の安定度でマイナス要因として働いた木の成長

落石対策で斜面の安定度を判定する際には一般に、樹木の存在をプラス要因として捉えることが多い。しかし今回の事故検証で改めて実感したのは、条件によっては樹木が落石リスクを高めるマイナス要因として働く場合があるという点だ。落石対策に関する既存の基準類でも、あまり着目されていないと思う。

落石発生源付近で、まず目についたのは石や岩にまとわりつくように根を伸ばす樹木だ。岩塊の下方や亀裂に入り込むように根が育っていた箇所も散見できた。こうした箇所は根の成長に伴って亀裂の拡大・深化が進み、結果として、岩塊の剥落や脱落などによって"落石予備軍"が増える。風による木の揺れの影響を受けやすい状態も生じる。総じて斜面の安定性が低減する。しかし現場ではロックネットを施工済みだった箇所でも、ネットを張る一方で、岩塊に近接して生えている樹木をわざわざネットに穴を空けるなどして温存していた。

言い換えれば、樹木の成長速度に応じて斜面の安定度が"経年劣化"するということになる。成長予測に基づき、必要に応じて伐採や除根といった措置が必要だ。将来的なリスクの判定では、(1)石・岩と近接樹木との距離、(2)樹木の幹径、(3)樹木やその根の被覆・侵入状態、(4)石・岩の亀裂状態が評価項目になる。

樹木の成長速度を織り込んだ時間軸で経過観察が必要だが、こうした考え方も従来の落石対策の"常識"にはない。安定度の変化に早期に気付くうえでは、履歴情報の精緻化も重要な課題だ。例えば落石の位置情報なら、区間ベースではなくできるだけピンポイントで地点情報を把握すべき。道路パトロールも含めて落石防止対策に関わる職員のスキル底上げも大切。島根県の新たな道路防災計画には、検討委員会の提言を踏まえてこうしたメニューも盛り込まれた。(談)

落石事故再発防止検討委員会の委員長を務めた常田賢一・大阪大学大学院教授(写真:本誌)

「木の成長」という対策の盲点

事故現場付近の山側斜面は元々、県が1996～97年度の道路防災点検で抽出した落石・崩壊の「要対策箇所」の一つだった。要対策箇所は約1800カ所あり、2015年度時点で対策済みは4割弱にとどまっている。

事故現場付近の対策箇所は延長550mで、01年度に対策を施していた。転石や浮石が多かった東側500m分にロックネットや法枠を施工。西側端部の50m分は不安定な石が少なく、目立った石を撤去するのみにとどめた。落石発生源はこの50m分に含まれ、ネット施工箇所から数メートルしか離れていない。

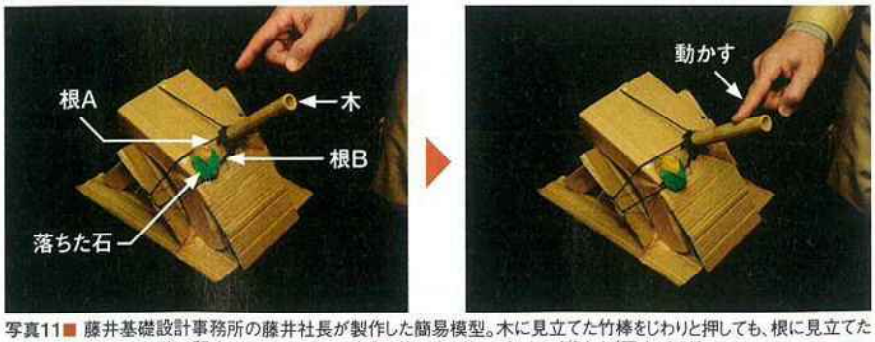


写真11■ 藤井基礎設計事務所の藤井社長が製作した簡易模型。木に見立てた竹棒をじわりと押しても、根に見立てたひもに乗っている石はある程度耐える。軽くはじく(瞬間的に力を加える)と石が落ちた(写真:本誌)

「対策箇所の地形上、落石発生源付近は道路方向への勾配が相対的に緩やかな部分だったこともあり、危険性は低いと判断したようだ」。県土木部道路維持課の山崎泰助課長は、当時の状況をこう説明する。

盲点を突いたのは、木の成長という条件変化だ。落石発生源の木は、検討委員会などの実地調査で落葉高木の「オニグルミ」と判明した。推定樹齢は30年弱。成長が比較的早い木で、樹種の平均的な成長曲線に照らすと、対策工事前後の幹径は事故発生時の半分以下で、20cm前後だったと推定されている。

周辺の山域では、この落石発生源のように、岩盤露頭のひび割れに近接した木の根が入り込んでいる例が

写真12■ 落石発生源付近には、同様に木の根が成長した結果、岩盤露頭のひび割れ拡大や浮き石化につながる恐れのある箇所が散見された。上の写真2点はそうした例

複数見つかっている。樹木の成長に伴い、割れたり剥落したりして不安定化する石が生じると、斜面の落石危険度も増すことになる（写真12）。

「伐採」も対策メニューに導入

検討委員会は報告書をまとめる過程で、再発防止策に関する提言も県に提示。県は報告書の公表に先立つ16年9月、提言内容を盛り込む形で「落石に係る道路防災計画」をまとめて公表している。

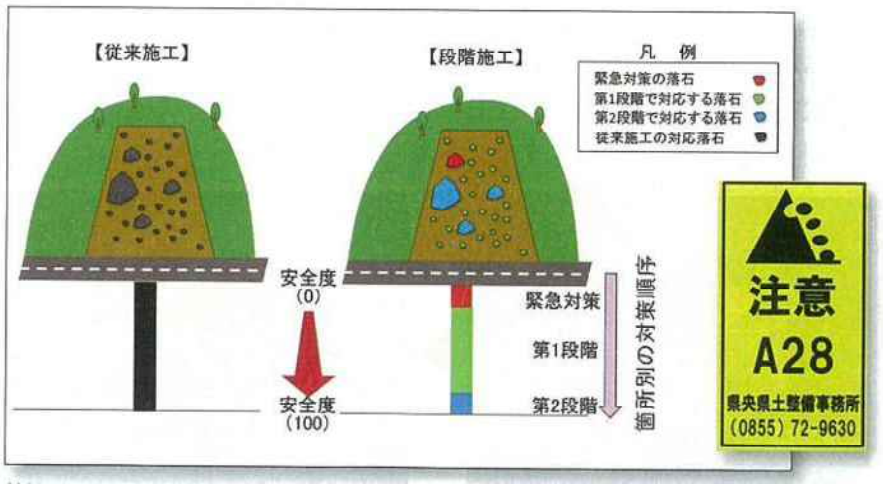
まずは16～19年度の4カ年度で落石の恐れのある斜面を抽出し直して、安定度調査を改めて実施。16年度は約330カ所、17年度以降は年度ごとに各1200カ所前後を調査する。さらに従来の調査では評価項目に含めていなかった近接樹木の存在も、安定度の判定に反映する（1m以内にあれば安定度を1ランク下げるなど）。

並行して取り組む対策手法としては、木の根の成長による石の亀裂拡大や岩盤剥離の進行など、将来的な石の不安定化が見込める場合は、「伐採工事」も取り入れる。従来の対策にはなかったメニューだ。

このほか同計画では、道路パトロールを含めて研修などを通じた点検精度の向上、道路利用者からの通報などによる情報収集を強化するためにスマートフォン向け「落石データ送信アプリ」の無料配信や、要対策箇所などへの「危険箇所番号票」の設置といった具体策も示した。

また対策事業の進め方として、従来のように特定の斜面ごとに予算の都合がつき次第、一気に対策を講じるのではなく、対策範囲の石・岩でまずは緊急対策を要するもの、次にマンパワーやコスト面で対策を講じやすいものといったように、少しずつでも段階的・継続的にリスク軽減を図る「段階施工」と呼ぶ新たな手法も盛り込んでいる（図4）。

図4 ■「段階施工」のイメージと「危険箇所番号標」のサンプル



対象の斜面で「緊急対策を要する石」、コスト面などから「対策が比較的容易な石（径が小さいなど）」と優先順位をつけて着手するのが「段階施工」。危険箇所番号標（右）は、通常パトロールの報告や道路利用者からの通報といった履歴情報（地点情報）の精緻化につなげるため、16年度以降の安定度調査を終えた箇所から順次設置する