

吹付けのり面における劣化範囲の推定及び 崩壊対策に関する一考察

馬 貴臣^{1*}・安藤 伸¹・宮本 浩二¹・永末 猪年¹・宮島 和紀¹

¹応用地質株式会社 エンジニアリング本部 (〒331-8688さいたま市北区土呂町2-61-5)
*E-mail: ma-gc@oyonet.oyo.co.jp

吹付けのり面の維持管理では、緩み領域を如何に正確に評価し、合理的な対策の設計を実施するかが重要な課題である。一般に、のり面対策工の検討では、のり面を構成する地質・岩盤の状況に基づき、地山の安定勾配を上回る領域が崩壊すると想定する。本稿の事例では、崩壊履歴のある急勾配の吹付けのり面を対象として、高精度屈折法地震探査を実施し、トモグラフィ解析により得られた速度層の分布より、吹付けのり面背面のゆるみ領域の推定を試みた。これを過去の崩壊履歴と比較した結果、低速度帯と崩壊範囲の相関が確認された。また、不連続変形法 (DDA) を用いた崩壊シミュレーションを実施し、崩壊土砂の堆積範囲、堆積勾配、落石軌跡等を求めることにより、対策工の要求性能についての検証を行った。

Key Words :slope collapse,DDA,rockfall simulation, high-precision refraction survey, deterioration

1. はじめに

吹付けのり面の対策設計では、吹付け背面地山の緩み領域の調査手法及び、崩壊岩盤の落下挙動の評価方法が確立されていない。従来、吹付けのり面の対策工は、オーバーハングなどののり面の凹凸形状から推定される崩壊形態やのり面の安定勾配を想定して検討されている。このような設計では、対策工が過大または過小となるリスクが生じる。そこで、本論文では、吹付けのり面の適正な対策設計手法の確立を目指し、緩み領域の効果的な調査手法とシミュレーションによる崩壊土砂落下挙動の評価手法を検討した。

近年、弾性波探査、電磁探査、レーダー探査、熱赤外線撮影などの物理探査手法は、岩盤斜面の緩み領域の調査への適用¹⁾が検討されており、その有効性が示されつつあるが、実用まで至っていない。本論文では、崩壊履歴のある吹付けのり面を含む道路区間に対して、高精度屈折法地震探査を実施し、トモグラフィ解析で得られた弾性波速度分布図と周辺のり面の崩壊履歴との比較を行い、のり面の緩み・崩壊領域を推定した。これらの結果をもとに不連続変形法 (DDA) を用いた崩壊ならびに落石シミュレーションを実施し、崩壊土砂の堆積範囲、堆積勾配、落石速度等を評価することで、対策工の要求性能についての検証を行い、従来方法による対策工設計をより効果的な対策工への見直すことが可能となった。

2. 吹付けのり面の崩壊履歴と従来の対策工設計

写真-1に検討箇所、図-1に検討箇所の平面図を示す。検討箇所の始点側から終点側にかけて切土のり面が連続する。切土の高さは、30m~40mでその上部に自然斜面が続き、斜面全体の高さは50mに達する。のり面の傾斜は、最大85°、見通しで70°前後と急勾配である。のり面には写真-1のように吹付け工が施工され、吹付け表面にはポケット式ロックネットが施工されている(写真-1(b))。のり面には第四紀中期更新統の火山噴出物(写真-1(c))が分布し、その背後の比較的緩やかな自然斜面には湖成堆積物(写真-1(d))が分布する。第四紀火山噴出物と湖成堆積物は、不整合関係にあり、地層境界はほぼ水平とみられる。

第四紀火山噴出物は、安山岩質の塊状溶岩であり、溶岩流の移動に伴い不均質に破碎され、凝灰角礫岩ないし火山礫凝灰岩(フローブレッチャ)の様相を示す。溶岩岩塊の礫径は直径5~50cmが主体で、所々1m以上の巨礫が点在する。基質は新鮮部では硬質であるが、風化部では軟質化している。湖成堆積物が分布する斜面には、古い表層崩壊跡を示す微地形が点在しており、終点側側の谷壁斜面には、明瞭な表層崩壊跡が認められる。

当該区間では、過去に切土施工から約40年後の平成14年と平成15年に相次いで2回の道路被害を伴う崩壊が発生している。いずれも吹付け面背後からの崩壊で、

崩壊土量は150~200m³程度であった。



写真-1 検討箇所の写真

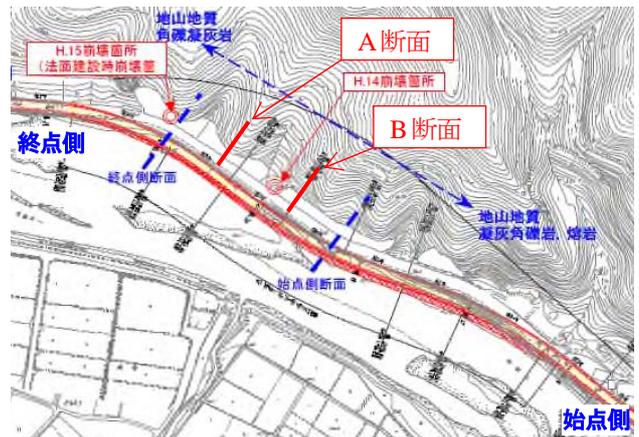


図-1 検討箇所の平面図

AとB断面：シミュレーション断面

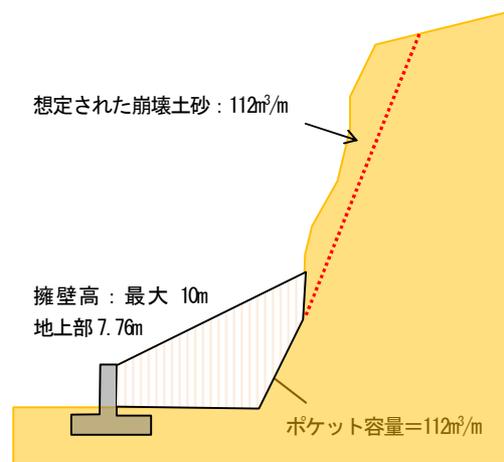


図-2 従来方法による待ち受け擁壁（終点側断面）

同じ地質状況と繰り返し発生するのり面の崩壊履歴から、崩壊箇所と同時期に施工された隣接のり面は、のり面表層部の劣化が進行することで今後ものり面崩壊のリスクがあると判断される。そのため、崩壊対策設計が従来方法によって検討されていた。

従来方法による対策工設計では、のり面の崩壊形態が剥離崩壊と推定され、崩壊土砂量は地山の安定勾配が1:0.3~1:0.5となるように想定されていた。この土砂量を捕捉するために、待ち受け擁壁が設計された。図-1に平面配置を示す。擁壁はL型擁壁で、高さは最大10m（地上部7.76m、図-2）に達する。

従来方法による対策工設計の妥当性を検討するため、地上レーザー計測、高精度屈折法地震探査及び崩壊シミュレーションを実施した。地上レーザー計測は、のり面形状を正確に把握するため実施したもので、のり面の形状を3次元で把握した。以降に高精度屈折法地震探査と崩壊シミュレーションの実施方法及び実施結果を述べる。

3. 高精度屈折法地震探査

高精度屈折法地震探査は、吹付のり面背後の岩盤を対象として岩盤の緩み領域を把握する目的で実施した。

(1) 探査測線

岩盤の緩みを知るためには、吹付工を削孔し、地震計を岩盤に固定する必要がある。しかし、当該区間の吹付のり面には、表面にポケット式ロックネットがほぼ全面に施工されていた。車両を通しながらの調査になることから、ポケット式ロックネットを外すことなく、探査を実施することが求められた。そこで、平成14年および15年に発生したのり面崩壊箇所の中に位置する唯一ポケット式ロックネットが無い、幅5m程度の箇所を探査測線に設定した（写真-2）。

(2) 探査方法

のり面の上部からクライマーがのり面に取り付き、吹付部分に2m間隔にドリルで削孔し、吹付工背面の岩盤に28Hzの地震計を固定した。ドリルで削孔した際にファイバースコープで吹付背面の空洞の有無、空洞の厚さを確認した。起震点をのり面上部、のり尻およびのり面内の2箇所とし、約10m間隔で起震した。

(3) トモグラフィ解析

解析結果を図-3に示す。0.6~0.9km/sの速度層の岩盤は、既往文献²⁾からD級岩盤に相当することから、風化による緩みが進行しているものと推測される。隣接のり面の崩壊層厚（奥行）は最大で2mであり、この層厚は探査結果における地表面から0.8km/s線（図-3、赤破線）までの最大距離に相当する。

図-3では、0.8や0.9km/s線から地表面までの距離（緩み厚さ）は「A」点付近から上部が急に厚くなった。一方、写真-2に示すように、隣接のり面での崩壊箇所の下端部を結んだ線（赤点線）は地層境界線のように見られ、この線より上部は比較的風化が進んでおり、2回の崩壊が発生した。図-3の「A」点は写真-2に示す赤点線と一致する。これにより、探査結果から推定される緩みエリアは隣接のり面の崩壊箇所と整合する。

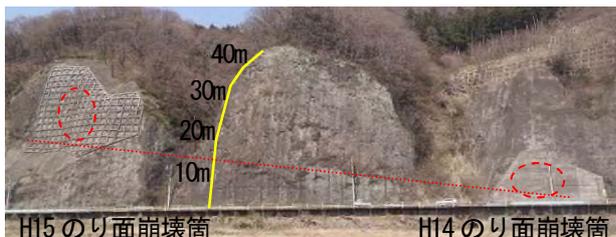


写真-2 弾性波探査実施箇所

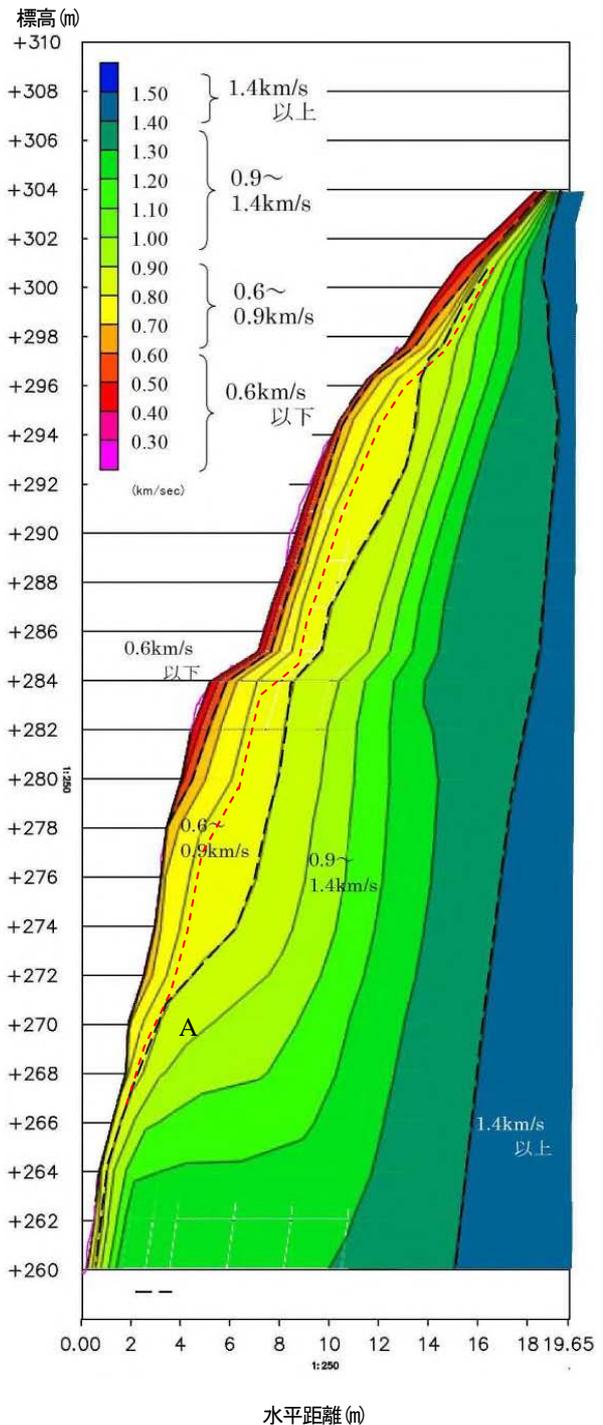


図-3 弾性波探査解析結果

4. 崩壊シミュレーション

崩壊履歴及び探査結果から見ると、当地区では今後も斜面崩壊や落石のリスクが高いと推察できる。のり面と道路の位置関係、崩壊土砂量、到達位置などを勘案して道路の安全を保持するには発生源対策や待ち受け対策が要求される。また、のり面上部には未固結の砂礫からなる湖沼堆積物が分布する自然斜面も続いており、重力変形や風化の進行などにより、のり面そのものの不安定化

に加えて、上部自然斜面の表層崩壊も考えられる。そのため、アンカー工等ののり面の発生源対策では、斜面全体の長期的な崩壊や落石のリスクを絶つことは難しい。従って、道路の長期的な安全通行を維持するため、待ち受け対策の構築が望まれる。

待ち受け対策を検討する上では、崩壊土砂の到達位置や落石の跳躍高さ、運動エネルギーを正確に評価することが必要となる。ここでは、岩盤の安定性検討や落石シミュレーションで多くの事例がある不連続変形法（DDA）を用いた検討を行う。

(1) シミュレーション手法

吹付けのり面の崩壊形態は主に剥離型表層崩壊であり、崩壊土砂は集合体として落下する。落下土砂のうち、個別の岩塊は落石挙動を示す。そのため、吹付けのり面の対策検討では、集合体として土砂の落下挙動及び落石挙動を別々に評価する。

DDAは、任意形状の弾性体の変位および変形を動的に解析する手法である。例えば、不連続面によって囲まれた岩盤ブロックの剛体変位、回転およびブロックの変形を解析することができる^{3,4)}。本文においては、斜面および落石を二次元の多角形のブロック、崩壊土砂を二次元の多角形のブロックより構成したブロック集合体としてモデル化する。一般に、落石挙動を評価するためには、落石と斜面の衝突による落石速度の減衰を表す衝突減衰係数、樹木によるエネルギー損失を表す樹木抵抗係数及び、落石と斜面の摩擦によるエネルギー損失を表す摩擦係数を導入する必要があり、その有効性は切土のり面で実施した落石実験⁹⁾への適用により検証されている。また、それぞれの係数の設定方法は落石実験の再現や過去の落石災害の再現解析により検討されている。本文で実施する落石シミュレーションはこれらの成果を引用し、

表層崩壊の崩壊シミュレーションではブロック間の相互作用に関して上記の衝突減衰係数を導入した。

(2) 表層崩壊シミュレーション

シミュレーションは、弾性波探査を行った断面の近傍のA断面と平成14年の崩壊箇所の近傍のB断面の2断面（図-1を参照）を用いた。A断面は当該区間の代表的な傾斜を示し、区間中で最も比高の高いのり面である。以下にA断面を例として解析モデル及び解析結果を示す。

図-4にA断面の崩壊エリア、解析モデル及び解析結果を示す。解析における崩壊エリアは探査結果の0.8km/s線を採用し、地表面までの最大厚さが2.0mとなり、崩壊エリアの断面積は40m²である。ブロックの分割は、現地踏査で得られた割れ目形状、間隔及び転石の大きさ、崩壊履歴における崩壊した岩塊の最大礫径を参照して、ブロックの最大径が1.5m、最大断面積が約2.2m²となるように解析モデルを作成した。崩壊履歴によると、過去の崩壊幅は10mであったことから、本解析で想定される表層崩壊規模は約400m³となり、過去の崩壊規模200m³の約2倍で、対策工設計の上では安全側の設計となる。また、従来方法による待ち受け擁壁の妥当性を検討するため、解析モデルには、従来方法による待ち受け擁壁を加えた。法尻から擁壁までの距離は約11mである。

解析では、ブロック間の衝突減衰係数は既往文献⁶⁾により0.14-0.7の中央値0.3を採用し、摩擦係数は既往文献⁹⁾より、落石及び斜面の摩擦係数の平均値を30.3°を用いた。ここに、衝突減衰係数については、落石実験で得られた落石速度及び跳躍量を再現することによって一様乱数の範囲が選定されたことから、その中央値を採用した。一方、摩擦角に関しては、現場実験で平均値と標準偏差が求められたことから、その平均値を採用することとした。

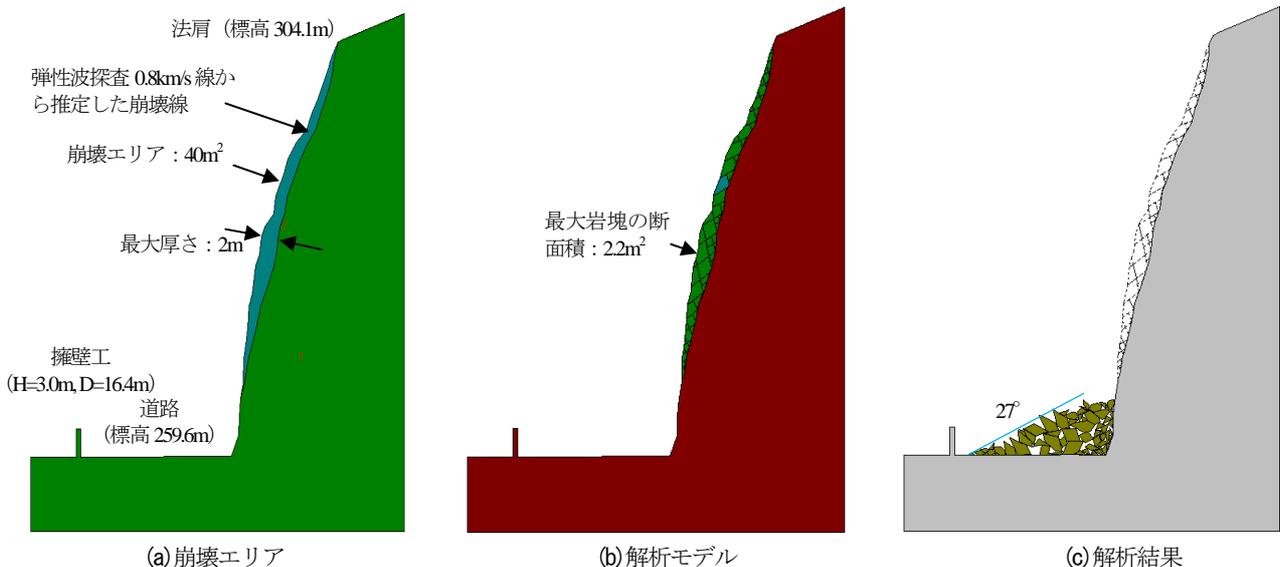


図-4 A断面の崩壊シミュレーション

図-4(c)に崩壊シミュレーションの結果を示す。シミュレーションでの崩壊土砂は、安定勾配のみによって検討された従来方法による対策工に到達せず停止した。この時の崩壊土砂の堆積勾配は 27° で、崩壊履歴の堆積勾配(約 30°)と整合する。これにより、従来方法の設計による擁壁の位置にはかなりの余裕があることが示された。

(3) 落石シミュレーション

シミュレーションは、崩壊シミュレーションに用いたA断面とB断面に対して実施した。落石の長径は、崩壊履歴における最大岩塊の長径1.5mを採用した。落石形状は現地踏査で計測した転石・浮石の(長径/中径)及び(長径/短径)の統計整理により、頻度の高い落石 $1.5m \times 1.5m \times 0.94m$ 、体積 $2.1m^3$ 、単位体積重量 $=2.5t/m^3$ とし、落石重量 $5.29t$ とした。以下にA断面の解析モデルと解析結果を示す。

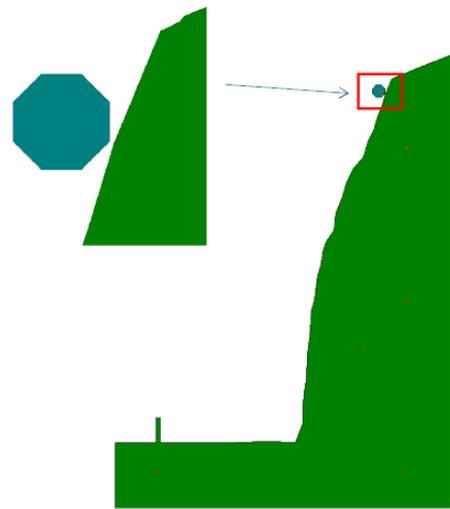
図-5にA断面のシミュレーション結果を示す。図-5(a)に示すように、解析では落石を八角形に設定した。これは、実際の落石形状を観察すると、殆どの場合が多角形となっていることから、図に示すように実際の自然石により類似した形状を想定した。

解析では、落石のエネルギー損失を表すパラメータとして、衝突減衰係数は既往文献⁵⁾により $0.14\sim 0.7$ の一様乱数、摩擦係数は既往文献⁴⁾によって、落石及び斜面の摩擦係数の平均値を 30.3° 、標準偏差を 4.7° とした正規乱数を発生させ、200回の解析を実施した。なお、落石と樹木との衝突によるエネルギー損失は、樹木がないため考慮しなかった。

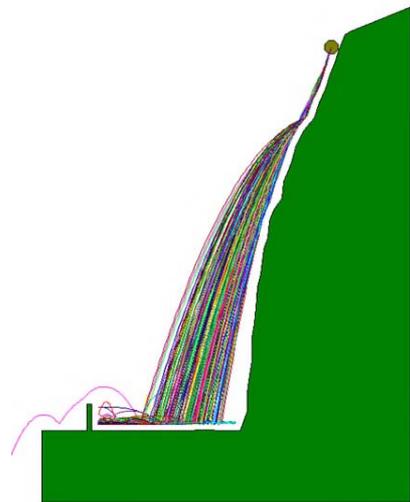
図-5(b)に落石シミュレーション結果を示す。落石が擁壁を直撃するケースは無かった。また、擁壁を飛び越えるケースが1事例あった。擁壁手前の落石挙動を調べるため、擁壁のない解析を実施し、擁壁手前の落石速度と跳躍量を統計整理した(図-6)。図-6では、速度ゼロと跳躍量がゼロの個数は155個で、これは擁壁に到達しなかった落石である。速度 $9m/s$ 以下の落石は200回の95%、跳躍量 $1.5m$ 以下の落石は200回の97%を占める。

(4) 従来方法による対策工の照査

シミュレーション結果を用いて、従来方法で設計された対策工(擁壁)を照査した。従来方法による擁壁の高さに関しては、落石シミュレーションで得られた落石跳躍量及び崩壊シミュレーションで得られた土砂の堆積形状を用いて照査した。擁壁の構造については、落石シミュレーション結果から衝撃力を求め、擁壁の応力度を照査した。



(a) 解析モデル



(b) 解析結果

図-5 A断面の落石シミュレーション

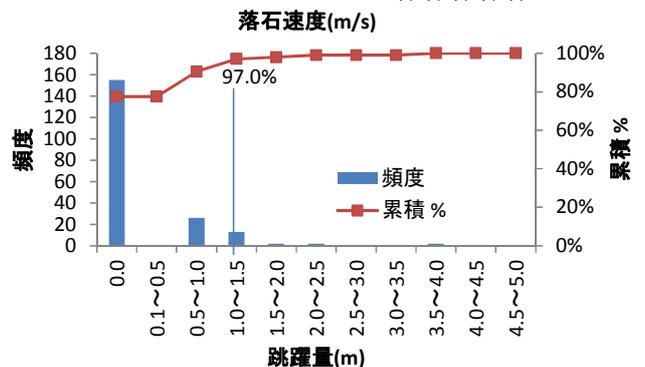
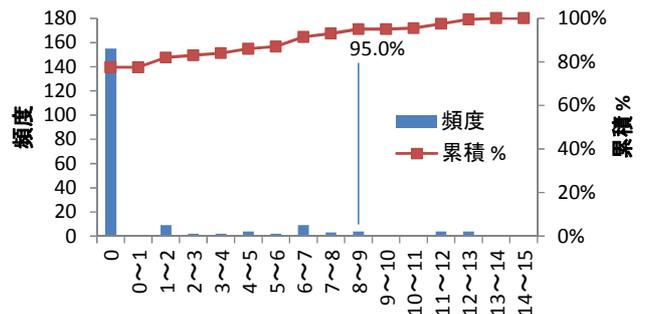


図-6 A断面の擁壁手前の落石速度と跳躍量

6. まとめ

急崖斜面の吹付けのり面の崩壊対策では、吹付け背面岩盤の緩み領域と崩壊土砂の落下挙動を正確に評価することが重要である。本論文では、急崖斜面の吹付けのり面の緩み領域の特定に高精度屈折法地震探査を適用し、崩壊土砂や落石の落下挙動、到達位置の評価法として不連続変形法 (DDA) を適用した。

高精度屈折法地震探査により、急崖吹付けのり面表面から弾性速度 0.9m/s 以下のエリアが最大約 4.0m まで及び、弾性波速度 0.8m/s 以下のエリアが最大約 2.0m まで分布することを確認できた。0.8m/s 以下のエリアの分布範囲は、隣接するのり面の崩壊履歴から推定した緩み領域と類似した傾向にあった。この結果は、急傾斜のり面における高精度屈折法地震探査が、吹付けのり面の緩み範囲の検討に有効である可能性を示すものである。

次に、崩壊リスクの高いエリアに対して、崩壊シミュレーションと落石シミュレーションを実施し、崩壊土砂の到達位置、堆積形状及び、落石が発生した際の落石速度、跳躍量を評価した。これらの結果に基づいて、従来方法で設計した待ち受け擁壁の高さと構造を照査した。

今後の課題として、今回のシミュレーションの前提条件となる緩み領域と弾性波速度の関係について、ボーリング調査などの異なるアプローチでの検証が必要である。また、本文ではのり面の崩壊機構について言及をしなかったが、斜面上部の湖沼堆積物内からの地下水の供給がのり面崩壊に与える影響や、火山性のフローブレッチャである火山礫凝灰岩中の層構造に沿った崩壊などを含め

た崩壊要因を考慮したのり面の評価が必要である。

今後、上記課題を総合的に調査・検証した上で、弾性波探査と岩盤・落石シミュレーションの組み合わせによる急傾斜のり面对策工検証の有効性を確認していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策, pp.38-55, 1999.
- 2) 土木学会：ダム地質調査, pp.112-113, 1986.
- 3) Shi, G.H.: Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- 4) Goodman, R.E. and Shi, G.H.: The application of block theory to the design of rock bolt support for tunnels, *Felsbau* 5, 1987.
- 5) 馬貴臣, 松山裕幸, 西山哲, 大西有三: 落石シミュレーションのための解析手法の研究, 土木学会論文集, Vol.63 No.3, pp.913-922, 2007.
- 6) G.C. Ma, H. Matsuyama, S. Nishiyama and Y. Ohnishi: Development of probabilistic rockfall simulation technique by the discontinuous deformation analysis (DDA), *The First International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-1)*, Lausanne, 6-8 June, 465-471, 2013.
- 7) 日本道路協会：落石対策便覧, pp.20-21, 2000.
- 8) 日本道路協会：落石対策便覧, pp.197-198, 2000.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, pp.128, 平成 24 年 3 月
- 10) 日本道路協会：落石対策便覧, pp.184, 2000.

ONE STUDY ON ESTIMATION FOR DEGRADATION OF SHOTCRETE SLOPE AND COLLAPSE PREVENTION

Guichen MA, Shin ANDO, Kouji MIYAMOTO, Itoshi NAGASUE
and Kazu MIYAJIMA

In the shotcrete slope maintenance, how to evaluate the slack area of the slope accurately is important. Generally, the countermeasures design for the slope were assumed the loosening and collapse area of the slope based on the state of the geology and rock mass. In the text, we estimated the deterioration layer thickness of the shotcrete slope by the distribution of the velocity obtained by conducted high-precision refraction survey for the steep shotcrete slope. Comparing this to the past collapse history, the relationship between low velocity zone and collapse range was confirmed. Also, based on the simulation by using discontinuous deformation analysis (DDA), we estimated the accumulation areas, accumulation gradient of the collapse and the rockfall tracks, and inspected the required performance of the measures.