



## 第二話 風化に関する現場データの蓄積と活用

## 2.1 切土のり面の風化

地質構造が複雑な日本列島は斜面の地質・地形特性も多様で、切土のり面の安定の検討には風化に関する現場計測データが極めて重要な意味を持つ。高速道路の切土のり面に関して、日本道路公団時代から現NEXCO時代まで継続して長期間に亘り現場計測が継続されて、ほぼ半世紀に及ぶ長期の風化に関する現場計測データが蓄積されている。切土のり面の風化に伴うのり面の劣化に関して日本が持つ貴重なデータである。高速道路関係者は現場計測データに基づく研究論文を継続的に発表してきた。初期の論文(1991)から最近の論文(2024)まで6つの発表論文<sup>15), 28)~32)</sup>を読んで知見を整理してみたい。

第一に気づくのは高速道路関係者が描く風化の概念は長期間大きく変化はしていないことである。図-15、16に示すように、1991年の論文と2024年の論文で描かれた風化概念図を比較すると基本的には同一と言ってよい。1991年論文の記述に従うと、地山は、切土以前から地質学的年代を経てすでに風化作用を受けている(①)。斜面を掘削すると施工時の機械的乱れと掘削による応力除荷に伴う吸水膨張によって強度が低下する(物理的風化②)。これは比較的早期に収束する。そして乾湿繰返しや凍結融解(物理的風化)と、物質移動と化学的反応を伴う化学的風化が継続する③。論文では①を一次風化、②を初期緩み、③を二次風化と呼んでいる。

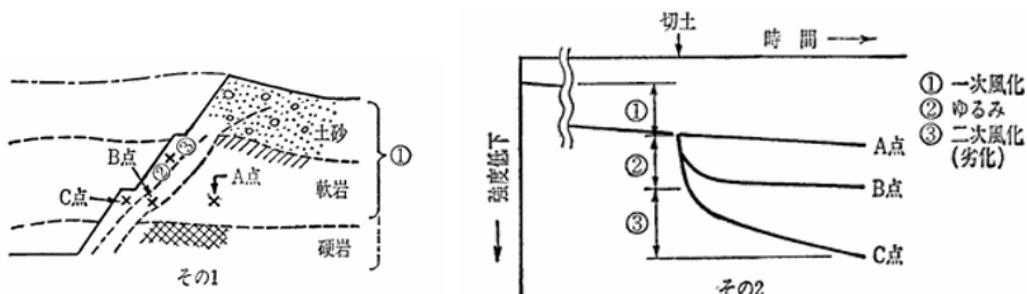
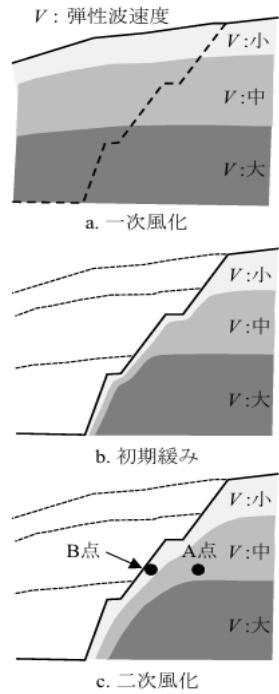
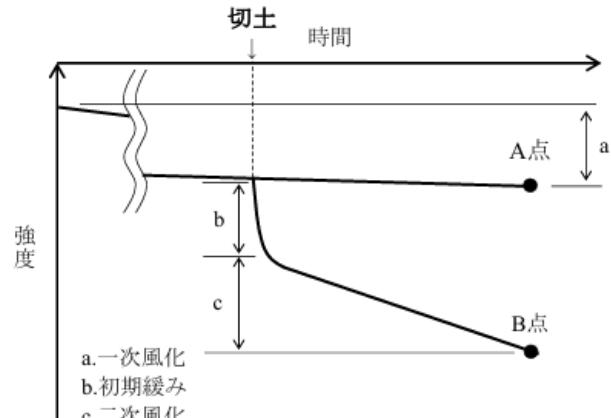


図-15 風化、緩み劣化の概念図。

出典：多賀ら (1991)<sup>15)</sup>



i) 切土掘削前後の風化のイメージ



※切土とともに初期緩みや二次風化が始まると想定

ii) 強度低下の進行イメージ

図-16 切土法面の風化の概念図.

 出典:永田ら (2024) <sup>32)</sup>

## 2.2 弹性波速度の活用

次に注目すべきは、高速道路関係者の計測の視点にも変化がなく弾性波速度（P波速度）の現場計測に重点を置き、データの集積と弾性波速度の経年変化に注目して、切土のり面の風化の進行と斜面の安定性との相関を確立しようとする点にある。第四話で見るよう、日本の法面劣化のモデル化においてこの弾性波速度（P波速度）の経年変化のデータは重要な役割を果たしている。

現在、地盤基礎工学分野では、地層の判別、力学特性の評価に弾性波速度（S波速度）が広く用いられている。現地での弾性波速度計測結果を斜面の風化層厚の推定に用いる考えは、地質学においても以前から採用されていた（渡部・田中、1976）<sup>33)</sup>。

渡部・田中は、秩父盆地で、崩壊が多発している斜面傾斜角が40度から60度の中から、14箇所を選び、崩壊地のへりで弾性波（S波速度）を計測し図-17を得ている。縦軸は斜面高さ、横軸は水平距離である。彼らは、第一速度層（0.2～0.4km/s）、第二速度層（0.4～0.8km/s）、第三速度層（0.8～1.5km/s）に分けて、14の崩壊事例を調べた結果、第一速度層が7例、第二速度層が6例となったこと、大部分の崩壊深さが第一速度層の下底部付近、第二速度層の下底部付近にあることを述べている。これが「酸化フロント」「溶解フロント」と関連があるかの議論はない。

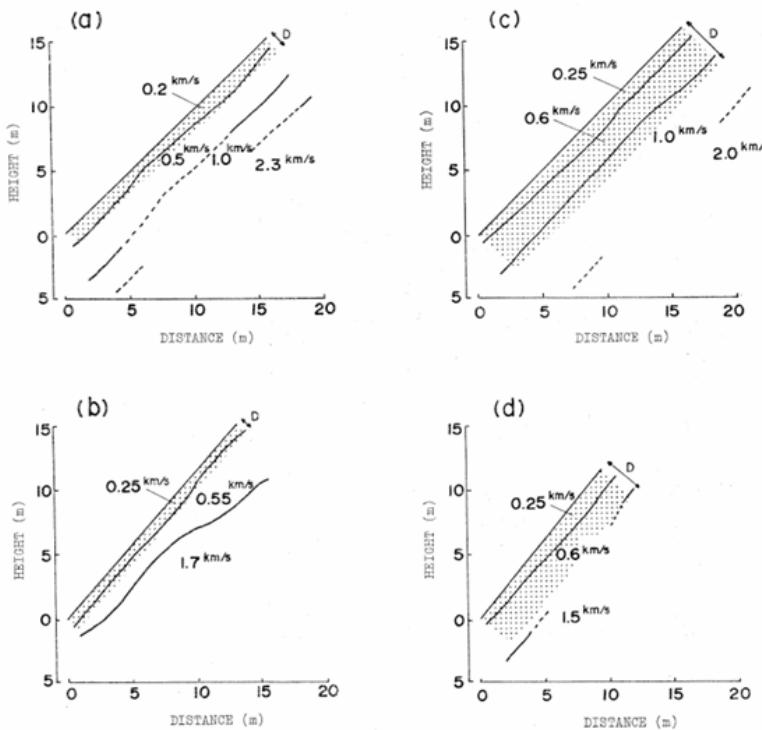


図-17 弾性波 (S 波速度) の計測結果.

 出典：渡部・田中（1976）<sup>33)</sup>

### 2.3 現場データの活用（高速道路関係論文の概観）

高速道路の研究に戻り、時系列に沿って各論文の主要な結論を見ておこう。1991年論文では、その時点でのデータ集積として全国8高速道路の約150箇所の切土のり面の現場計測データが最長20年間実施されていることが記述され、図-15の風化の概念を初めて提示した。計測結果からは、切土掘削直後でも数十cmから数mのオーダーで弾性波速度(P波速度)の低下が観測されている。このことは風化概念図にある②の部分は、かなり短期に発生していることを示唆している。これは、図-2で見たロンドン粘土の掘削後の間隙水圧の初期の急激な回復傾向とも整合している。論文では、風化層を2層に分けて、P波伝播速度と層厚から風化帯走時を求め、斜面を構成する岩石区分、地域区分ごとに風化帯走時の経年変化のデータを示している。図-18はその一例である。

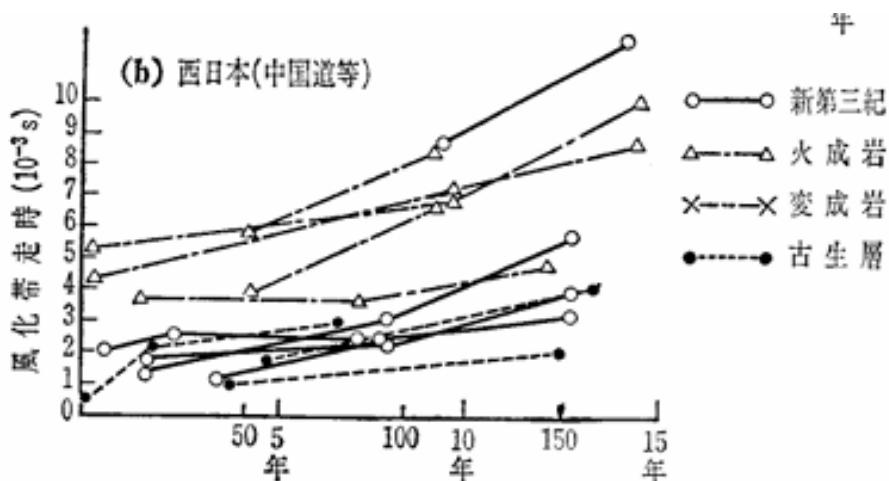


図-18 風化帯走時の経年変化.

出典：多賀ら (1991)<sup>15)</sup>

さらに風化帯走時の年変化率を求めて切土直後の風化帯走時と比較し、安定領域と不安定領域に区分し、弾性波速度が風化帯のせん断強さに比例すると仮定した「のり面安定度」なる量を提案している。

$$F = v / d \sin \theta$$

ここに  $F$  : のり面安定度、  $d$  : 風化層の厚さ (m)、  $\theta$  : のり勾配 (deg)、  $v$  : 風化帯の弾性波速度(m/s) (P波速度)

新たに定義された「のり面安定度  $F$ 」を経年数ごとにプロットしたのが図-19で、データのばらつきは大きいものの、崩壊のり面を表す●に注目して眺めると崩壊のり面、不安定兆候のあるのり面群と健全な法面の計測データ群の間には、のり面安定度  $F$  の値が 0.4m/sec~0.2m/sec 付近に安定から不安定に遷移する境界がありそうであることが読み取れる。この考え方は、2018年以降の論文に踏襲されさらに発展される。



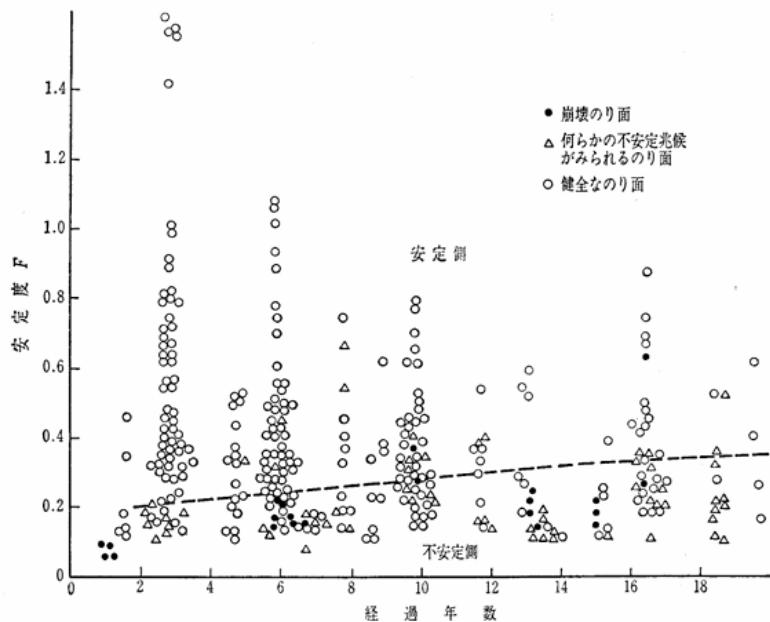


図-19 安定数 F と切土後の経過年数。出典：多賀ら (1991) <sup>28)</sup>

1998年論文では、85箇所のデータを用いて統計処理をして、構成地質、層理面、保護工等ののり面要因を考慮に入れて過去に崩壊を引き起こしたのり面と未崩壊ののり面を区分できるかを検討している。例えば、崩壊履歴別ののり面要因ヒストグラムの例が図-20である。

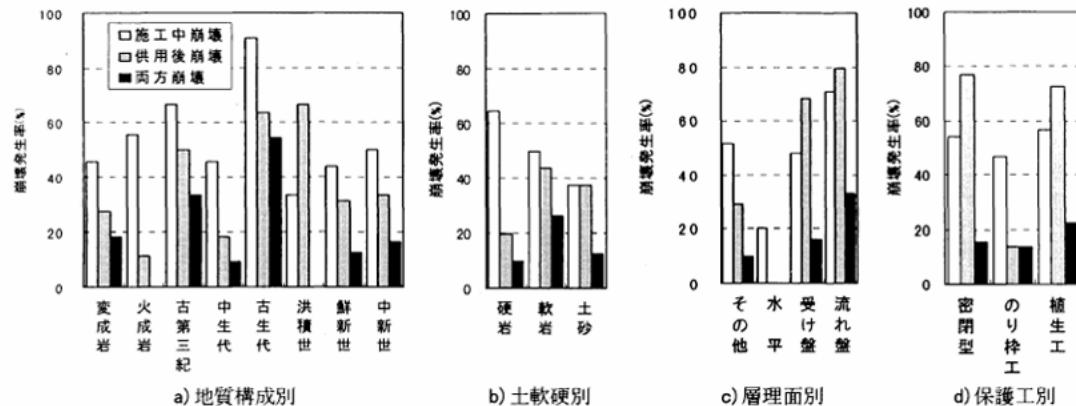


図-20 崩壊履歴別ののり面要因ヒストグラムの代表例、出典：菊池ら (1998) <sup>29)</sup>

1998年論文では、1991年論文で定義された風化帯走時の年変化率の検討から、開放型の切土ののり面の風化は全般的に切土から4年位まで急速に進行し、以後安定し約10年以上経過すると殆ど進行しないと推定している。また、初期走時および風化帯走時の年変化率等の風化要因を考慮した数量化III類の分析では、以外にも風化要因が崩壊・未崩壊の分類に与える影響度は非常に小さい結果となり、崩壊・未崩壊の分類にはのり面要因に加え降雨要因が不可欠であることを指



摘している。

2018年論文は、前回調査から約20年の間をおいて2015年～2018年に実施された調査データが得られた時期の論文で、東北自動車道の16箇所に切土のり面を対象としたのり面勾配や岩種の影響分析を行った結果である。

2020年論文aは、2018年論文と同著者の論文で、東北自動車道、東名自動車道、中国自動車道の20箇所の切土のり面を対象として風化の進行度の実態を明らかにし、のり面の安定評価を検討した論文である。既往論文との違いは、風化帯走時の年変化率の代わりに風化帯層厚の初期値からの増差分を定義して検討したこと、簡易動的コーン貫入試験とベーンコーンせん断試験を実施して、土質定数( $c, \phi$ )を推定し、安定解析結果との対比を行った点にある。検討した切土のり面は14か所で、異なる地質年代、岩種が含まれている。この検討の流れは継続し、検討切土のり面をさらに拡張して2024年論文にまとめられている。

第一話で取り上げた2020年論文bは、東名高速道路の泥岩切土のり面を対象とし、土質試験、X線回折分析を実施し、物理的風化と化学的風化の両面から風化機構と斜面の安定性を検討した論文である。2020年論文bの結論として、切土のり面の表層附近の強度は著しく低下し、掘削から50年後には、泥岩の一軸強度が新鮮な状態の強度の1/4～1/5に低下すると報告し、化学的風化のメカニズムについては千木良の整理を追認し、化学的風化は計測時点でも進行中であるとしている。

2024年論文は、2020年論文aを引き継ぎ、植生によるのり面保護がされている開放型切土斜面を対象に、弾性波探査による切土のり面の風化評価手法の検証を行ったものである。簡易動的コーン貫入試験を22箇所29側線、120点で実施し、切土のり面表層部の不安定土層厚は2.0m以下の事例が多く、弾性波速度 $V_p$ は0.6m/ms以下の領域に一致することから、 $V_p$ が0.6m/ms以下を不安定土層とするのが妥当であるとしている。一方、1991年論文で提案したのり面安定度Fを、無限斜面の安全率 $F_s$ の間には、 $F_{s1} = KF$ なる比例関係にあるとして検討を進め、Fの閾値以下に含まれる崩壊斜面の割合、および健全斜面の割合を求め、 $F=0.2\sim0.25$ を閾値とするのが妥当とした。 $F=0.2$ とした場合、比例定数Kが5となることから、弾性波速度と風化帯層厚を用いて $F_s$ を算出し、ベーンコーンせん断試験を実施し得られた $c, \phi$ を用いて地中に地下水が存在する場合の斜面安定計算より算出した安全率 $F_{s2}$ と比較している。その結果が図-21で、弾性波探査に基づく $F_s$ は精緻な安全率とはならないものの、管理優先度を見極める指標になりうると結論付けている。

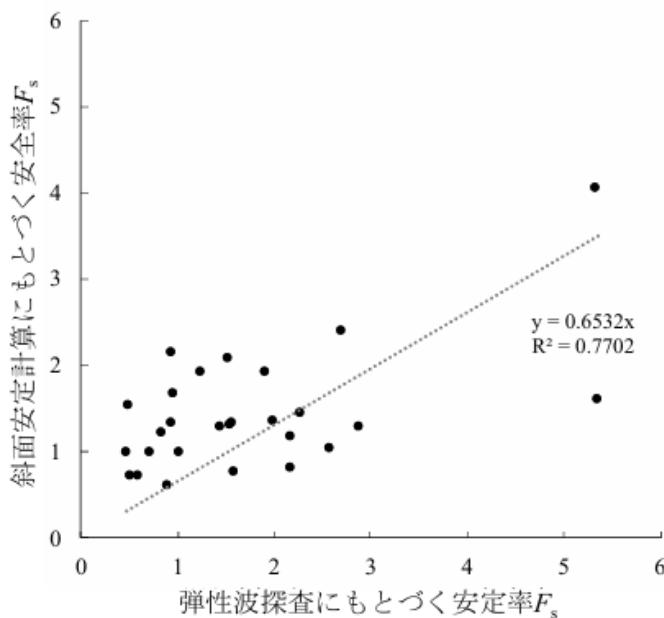


図-21 斜面安定計算による安全率と弾性波探査による安全率との比較.

出典：永田ら(2024)<sup>32)</sup>

ここまで高速道路分野における現場データの蓄積と活用について概観した。現地で計測された弾性波（P 波速度）経年変化のデータは、第五話劣化を考慮した斜面安定の評価でしばしば引用される。次回は、風化に伴う物性の変化についてみることにする。

## 参考文献

- 28) 多賀直太、田山聰、奥園誠之、八木沢孝哉 (1991) : 長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性、土と基礎、Vol.39、No.6, 41-47。
- 29) 菊池英明、古川浩平、河村浩恵、奥園誠之、田山聰 (1998) : 長期追跡データを用いた切土のり面崩壊に与える風化の影響に関する一考察、土木学会論文集 No.533/VI-38, 151-164。
- 30) 藤原優、永田政司、佐藤尚弘、滝口潤 (2018) : 切土のり面の継続的な弾性波探査の計測データに基づく長期安定性の評価、土木学会論文集 C (地盤工学) , Vol.74, No.4, 424-438。
- 31) 藤原優、永田政司、佐藤尚弘、滝口潤 (2020a) : 長期追跡調査による切土法面の風化特性の評価、Journal of the Japan Landslide Society, Vol.57, No.3, 73-83。
- 32) 永田政司、村上豊和、佐藤尚弘、菊本統 (2024) : 風化に対する切土法面の管理優先度の決定方法、地盤工学ジャーナル Vol.19, No.1, 43-56。
- 33) 渡部景隆、田中芳則(1976) : 斜面崩壊の地質学的研究、地学雑誌、85, 3, 1-20



## バックナンバー

### シリーズ2

No.13 2025年12月19日

No.12 2025年12月5日

No.11 2025年11月21日

### シリーズ1

No.10 2025年11月7日

No.9 2025年10月24日

No.8 2025年10月10日

No.7 2025年9月26日

No.6 2025年9月12日

No.5 2025年8月22日

No.4 2025年8月 8日

No.3 2025年7月25日

No.2 2025年7月 4日

No.1 2025年6月20日

