

# 地山の風化により切土のり面工に作用する土圧の実験的評価

太田 直之\*      高柳 剛\*  
杉山 友康\*\*      輿水 聡\*\*\*

## Experimental Evaluation of Earth Pressure of Weathering Layer Act on Protection Work for Cutting Slope

Naoyuki OTA      Tsuyoshi TAKAYANAGI  
Tomoyasu SUGIYAMA      Satoru KOSHIMIZU

In this report, we clarified the characteristics of earth pressure of the weathering layer behind of slope protection work through the laboratory test based on the result of investigation about the cutting slope. We found a number of cases in which the ground weathered along the slope protection work as a result of having investigated on fifty slopes along the railway. We experimented with models based on the conditions of the weathering layer clarified by the above investigation. It was apparent that it was possible to reproduce the earth pressure of the weathering layer as obtained from the experiments by considering the friction of the back surface of slope protection work.

キーワード：切土、のり面工、風化、土圧、模型実験

### 1. はじめに

切土のり面には、のり面表層の侵食や風化防止を目的として、張コンクリートなどののり面工が施工される場合がある。このような切土のり面のうち、施工後数十年が経過したものの中には、のり面工背面の地山の風化が進行している場合がある<sup>1)</sup>。地山深部まで風化が進行した場合、風化層による土圧にのり面工が耐えられなくなり、やがて崩壊に至ることが懸念される。一方、現状の切土のり面工の健全度評価には、表面に現れた亀裂などの変状を基にした定性的な評価方法が用いられており、のり面工背面の地山の風化度を基にした定量的な評価方法は用いられてこなかった。そこで筆者らは、地山の風化の進行程度からのり面工の健全度を評価する手法を作成することを目的として研究を進めてきた<sup>2) 3)</sup>。

本報告では、調査結果を基に明らかにしたのり面工背面の地山の風化状況の実態について述べるとともに、これを基に作成した模型のり面工を用いた土圧実験から明らかになった地山風化層の土圧特性について述べる。

\* 防災技術研究部（地盤防災）

\*\* 防災技術研究部

\*\*\* 前 防災技術研究部（地盤防災）（現 東日本旅客鉄道株式会社）

### 2. 地山の風化状況の実態

地山が風化して土砂化した部分がのり面工に土圧として作用することを模型実験で明らかにするためには、地山の風化の実態を明らかにし、これを考慮した模型を作成する必要がある。そこで、張コンクリートなどののり面工が施工され、かつ、変状が現れている切土のり面50箇所を抽出し、ボーリングデータ等の現地調査データを基に風化パターンを分類するとともに、風化パターンと変状の種類との関連性などを整理した<sup>2)</sup>。

#### 2.1 のり面工の変状の種類

調査対象としたのり面工の変状は、a) 鉛直または斜め方向の亀裂、b) 水平亀裂、c) コンクリートの欠落、d) 施工目地部分付近の変状、e) 豆板・ジャンカ等の表面の劣化、の概ね5種類に分類できることがわかった。これらの変状の内訳は、図1に示すとおり鉛直または斜め方向の亀裂が全体の29%と最も多く、次いで施工目地の変状と表面劣化が各20%となっている。また、水平亀裂は9%であるが、鉛直および斜め方向の亀裂と合わせると亀裂は全体の4割近くを占めている。

ここで、表面劣化および欠落の要因は、そのほとんどがのり面工自体の劣化であると予想される。一方、のり

特集：防災技術

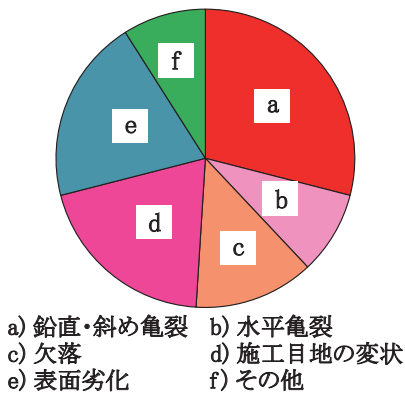


図1 変状パターンの割合

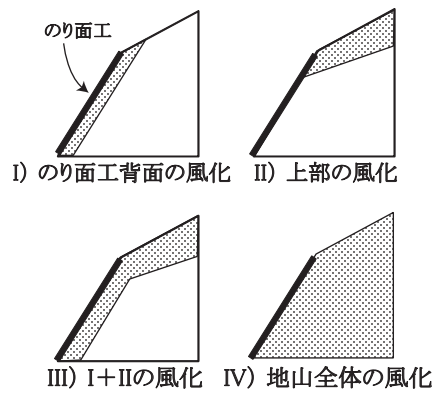
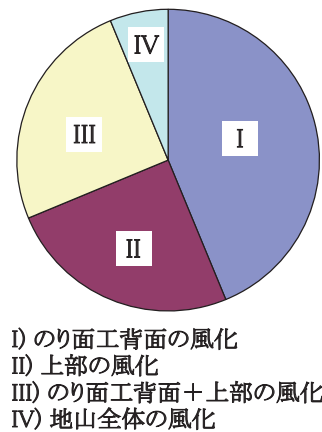


図2 風化パターン



I) のり面工背面の風化  
II) 上部の風化  
III) のり面工背面+上部の風化  
IV) 地山全体の風化

図3 風化パターンの割合

表1 風化パターン別の変状の内訳

	背面風化	上部風化	背面+上部風化	全体風化	風化なし	その他
鉛直・斜め亀裂	8	2	3	1	2	1
水平亀裂	4	0	2	0	0	0
欠落	3	0	2	0	1	1
施工目地の変状	9	2	1	0	2	3
表面劣化	6	6	3	0	5	0
その他	0	1	1	1	0	1

面工の亀裂および施工目地の変状については、地山の状態に起因している場合があり、全体の半数以上が地山に起因した変状である可能性が考えられる。

2.2 地山の風化パターン

地質調査の専門家がボーリングデータを基に作成した地質断面図をもとに、地山の風化パターンを分類した。風化形態は、I) のり面工背面の風化、II) 上部の風化、III) のり面工背面および上部の風化、IV) 全体的風化の4種類に概ね分類される(図2)。各パターンの割合は図3のとおりである。パターンIの背面風化が全体の約半分を占めていることが分かる。ついでパターンIIののり面上部が風化しているもの、パターンIIIの背面と上部が両方風化しているものがそれぞれ全体のほぼ1/4ずつの割合で存在していた。一方、パターンIVのように切土のり面が全体的に風化している箇所は少なく、全体の1割に満たなかった。

2.3 地山の風化状況と変状との関係

地山の風化状態とのり面工表面に現れた変状との関係を調べた結果を表1に示す。表1では1箇所ののり面に複数の種類の変状が見られる場合は、各変状に箇所数を計上している。表から、調査対象の約7割ののり面工で背面の地山が風化していることがわかるが、地山が風化していないものの、のり面工に変状が見られる場合があること、そのような変状の半分は表面劣化であることがわかる。すなわち表1は、のり面工に表面劣化以外の変状が現れている場合には、背面の地山が風化している可能性が高いことを示唆している。

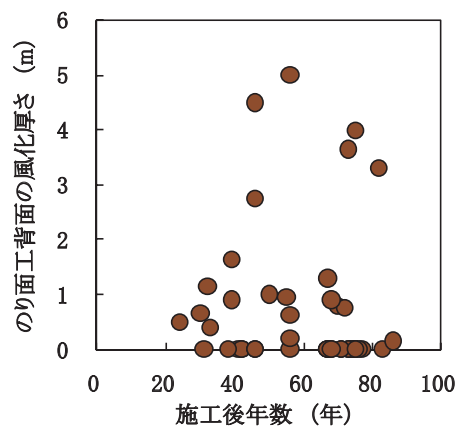


図4 施工後年数ごとの風化厚さ

2.4 風化層の厚さ

のり面工の施工後年数と地山の風化厚さとの関係を図4に示す。ここで、過去の設計指針<sup>4)</sup>では、張コンクリートを施工する場合、地山の緩んだ箇所は十分に取り除くこととされており、のり面工施工当時の地山表面の風化程度は、電研式岩盤分類<sup>5)</sup>のC<sub>M</sub>級相当であったと推定される。そこで、図4の作成にあたっては、風化厚さはD級およびC<sub>L</sub>級岩盤と評価された部分の厚さとした。図4が示すように、施工後年数と風化厚さとの関係に一定の傾向は見られない。施工後年数が長い場合でも地山が良好な状態に保たれている箇所がある一方で、同じ年数でも風化が深部に進行している箇所もある。これらより、のり面工背面の風化厚さは施工後年数以外の要因に大きく影響を受けることが考えられる。

そこで、風化厚さとのり面工の厚さとの関係を図5に示す。のり面工の厚さが大きいほど風化厚さが薄くなる傾向が見られる。これは、良質なコンクリートが用いられ、かつ、十分な厚さを有したのり面工が施工された場合には、のり面工が高い風化防止効果を発揮していることを示していると考えられる。調査対象としたのり面工については、その厚さが概ね60cmを越えると風化厚さは1m以下に抑えられていることが図5からわかる。

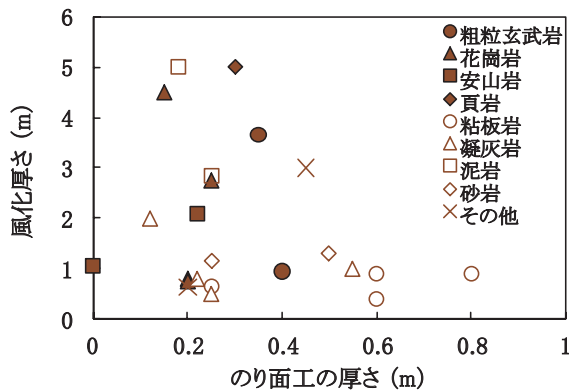


図5 風化厚さと のり面工の厚さとの関係

また、図5では岩種を区別して示しているが、安山岩、花崗岩、凝灰岩粘板岩などの中には、比較的薄いのり面工でも風化の進行が抑制されているものがあり、風化程度には、岩質などをはじめとする個別要因が大きく影響することが考えられる。

### 3. 模型土槽を用いた土圧実験

#### 3.1 検討対象のり面のモデル化

上述のように、のり面工背面の地山の風化パターンは、のり面工沿いの風化、あるいはのり面工背面および上部の風化パターンが多い。

このような実際の風化形態を考慮して、のり面工に平行な風化層を模擬した模型地盤を作成して実験に用いることとした。

#### 3.2 模型土槽

実験では、のり面工と地山新鮮部との間に狭在する土砂化した風化層がのり面工に及ぼす土圧特性を求めることを目的とした。そこで、風化層を模擬した土槽を作成し、土槽内に風化土を模擬した砂質材料を投入したときの側方土圧を測定することとした。実験に用いた土槽の概略図を図6に、また、土槽の外観を図7に示す。

鉛直土槽は、高さ約1.5m、幅0.5m、奥行き1mの鋼製土槽である。のり面工に見立てた前面板は7段に分割し、各段に3個のロードセルを配置した受圧板を設置して側方土圧を測定する構造となっている。また、底板にも3個のロードセルを配置した受圧板が設置してあり、風化層の鉛直土圧を測定する構造となっている。背面板は可動式であり、土槽の奥行きを0.15m、0.3m、0.5m、1mに変えることができ、風化厚さをパラメータとした実験が可能である。実験に用いる風化厚さに合わせて底板の大きさも変えることができ、風化厚さに応じた鉛直土圧を測定できる構造となっている。

また、土槽側板内面にはテフロンシートを貼り付けており、これによって土槽側壁面の摩擦を低減し、風化層

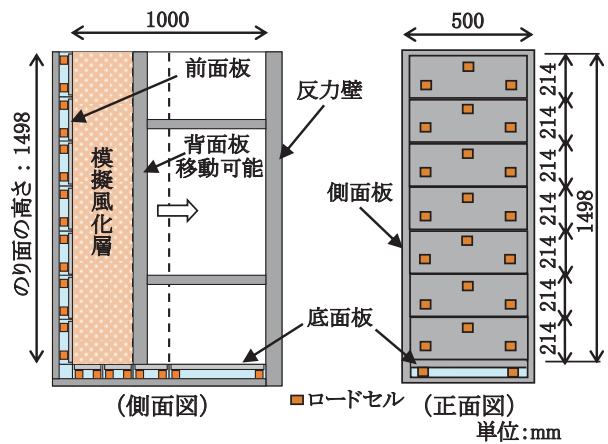


図6 実験土槽の概略図



図7 実験土槽の全景

が側面から受ける影響の除去を図った。

#### 3.3 実験ケース

実験では、風化厚さ、風化度、壁面摩擦角、上載荷重に着目して実験条件を設定した。各実験ケースの条件を表2に示す。

##### (1) 風化厚さ

風化厚さが厚いほど、のり面工および地山新鮮部が風化層の土圧に及ぼす影響が小さくなると考えられる。そこで、風化厚さを0.15m、0.3m、1mとして実験を行い、土圧に対する風化厚さの影響を確認した。

##### (2) 風化度

風化が進行すると風化層の強度が低下して土圧が増加することが考えられる。ここでは、試料の内部摩擦角を風化度を示すパラメータとし実験を行った。

実験で用いた試料は、珪砂および砕石の2種類である。両試料の粒度を図8に示す。実験条件上、砕石は岩盤が風化して粒状材料になった状態と位置づけた。また、砕石が模擬する風化状態からさらに風化が進行して細粒化し、内部摩擦角が低下した状態を模擬する試料として珪砂を用いた。珪砂の内部摩擦角 $\phi$ は $38.1^\circ$ 、砕石の内部摩擦角 $\phi$ は $46.4^\circ$ である。各実験ケースとも試料の種別によらず目標相対密度 $D_r=60\%$ として模擬風化層を作成した。

特集：防災技術

表2 実験ケース

	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7
試料種別	珪砂	珪砂	珪砂	碎石	珪砂	碎石	珪砂
(内部摩擦角 $^{\circ}$ )	38.1	38.1	38.1	46.4	38.1	46.4	38.1
風化厚さ (m)	0.15	0.3	1	0.15	0.15	0.15	0.15
壁面材料	テフロン	テフロン	テフロン	テフロン	摩擦材	摩擦材	テフロン
(摩擦角)	23.3	23.3	23.3	23.3	38.6	38.6	23.3
着目点	基準	風化厚さ	風化厚さ	風化度	壁面摩擦	壁面摩擦	上載荷重

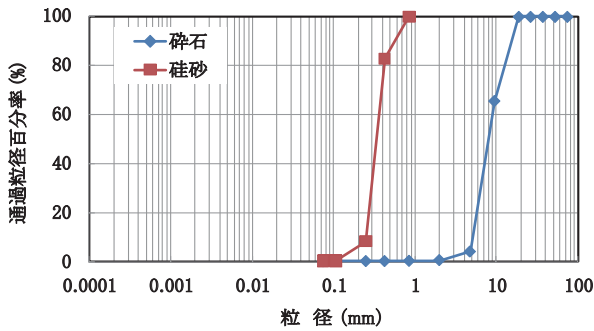


図8 試料の粒度

(3) 壁面摩擦

風化層が薄い場合、のり面工および地山新鮮部から上向きの摩擦力が風化層に作用し、これが土圧に大きく影響を及ぼすと考えられる。そこで壁面摩擦の影響を把握するために、土槽の前面板および背面板表面の摩擦を変化させた実験を行った。前面および背面板にテフロンシートを貼り付けた場合と摩擦材を貼り付けた場合で実験を行った。ここで、摩擦材は樹脂板に珪砂を一樣厚さで接着したものである。別途実施した試験により、テフロンシート～珪砂間の摩擦角は $23.3^{\circ}$ 、摩擦材～珪砂間の摩擦角は $38.6^{\circ}$ が得られた。

(4) 上載荷重

2章で述べたように、実際の切土のり面では、図2のIII)のようなり面工沿いの風化と斜面上部の風化が複合して存在している場合が多い。このようなり面については、斜面上部の風化層による荷重がのり面工沿いの風化層に作用している状態と捉えることとした。これを模擬するために、土槽の上端まで試料を投入した後、試料上端面に死荷重を載せ、上載荷重が載荷された場合の土圧特性を求めることとした。

3.4 測定方法

珪砂および碎石のいずれの試料を用いた実験でも、空中落下法により土槽内に試料を投入し、各位置に配置した受圧板で測定される土圧を記録した。試料毎に目標相対密度が得られる落下高さを予め求めておき、その高さからほぼ一定の速度で試料を投入した。試料が1層10cmの高さに至った時点で投入を中断し、このときの高さと投入量から1層当たりの密度を測定するとともに、この時点の受圧板の出力値から静止土圧を求めた。



図9 上載荷重の載荷状況

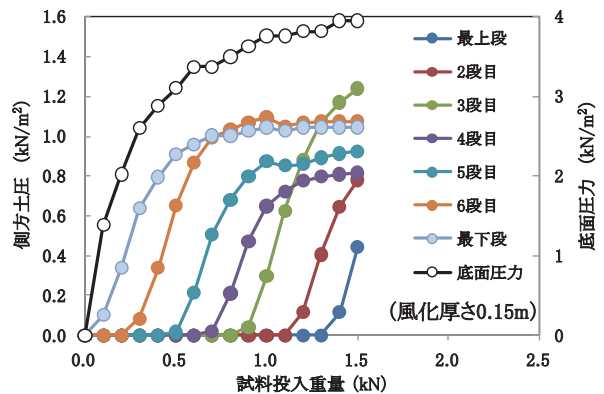


図10 各受圧板の圧力測定結果 (case 1)

また、case7については、土槽上端まで試料を投入した後に上端面を平滑に整形し、その上に複数の重錘板を順次重ねることで死荷重を載荷した (図9)。

4. 実験結果

4.1 試料投入量と土圧との関係

代表的な測定結果としてcase1で測定した各受圧板に作用する圧力と試料投入重量との関係を図10に示す。図から、試料投入にともない各受圧板に作用する圧力は増加するものの、投入量が増加すると、1層あたりの試料投入量に対する荷重の増加量が徐々に減少していることがわかる。また、図10中には底面の受圧板の測定結果も併記したが、土槽の天端まで試料を投入した時点の総投入重量約1.5kNに対して、底面圧力は約4kN/m<sup>2</sup> (底面荷重0.3kN)と測定されている。すなわち、この実験結果では、底面に作用する鉛直荷重は投入重量の約20%と大幅に低減されていることがわかる。

このような荷重の低減傾向は、土槽の高さが低い場合には投入重量に比例した土圧が前面板に作用するが、土槽が高い場合には土槽下方の土圧は一定値に漸近することを示している。すなわち、高いり面に施工されたのり面工背面の地山が一定厚さで風化している場合、ある高さより下方のり面工には一定値以上の土圧は作用しないことを示唆している。

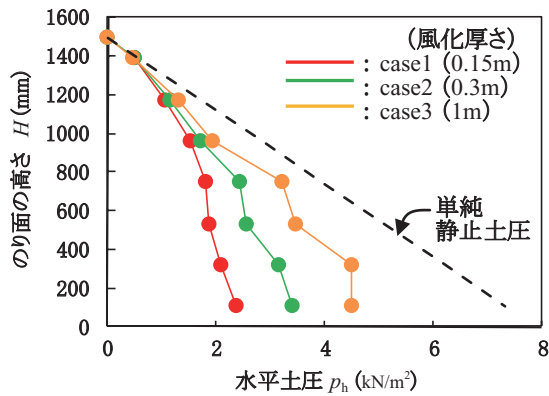


図 11 風化厚さの影響

#### 4.2 風化厚さの影響

土槽天端まで試料を投入した状態の前面板に作用する水平土圧の分布を図 11 に示す。図には、厚さの異なる case1, case2, case3 の実験結果を示した。また、比較のために、風化厚さが無限大と仮定して式 (1) を用いて算定した土圧を単純静止土圧として併記した。

$$p_h = k_0 \cdot \gamma \cdot z \quad (1)$$

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (2)$$

ここで、 $p_h$  は水平土圧、 $k_0$  は静止土圧係数、 $\gamma$  は試料の単位体積重量、 $z$  は土槽天端から土圧算定位置までの深さ、 $\phi$  は試料の内部摩擦角である。

各ケースとも単純静止土圧よりも小さい土圧が測定されており、下方ほど低減割合が大きいことがわかる。また、前面板の下端から 100mm の高さの土圧を比較すると、最も風化厚さの薄い case1 では単純静止土圧の 1/3 程度に、また、風化厚さ 1m を模擬した case3 では単純静止土圧の 1/2 程度に土圧が低減されており、風化厚さが薄いものほど土圧は大きく低減されている。

#### 4.3 壁面摩擦の影響

前面板および背面板にテフロンを貼り付けた case1 と摩擦材を貼り付けた case5 の実験結果を図 12 に示す。また、図中には碎石を用いた case4 および case6 の実験結果も併記した。

摩擦材を用いた場合の土圧はテフロンを用いた場合の 1/2 程度に土圧が低減されている。また、テフロンを用いた場合には、測定値が全体的に緩やかな曲線を描いているのに対して、摩擦材を用いた場合には天端から約 600mm より下方の土圧の低減割合が大きく、より強い低減傾向が見られる。また、図 12 で硅砂と碎石の実験結果を比較すると、同一種類の壁面材を用いた場合、試料の違いによる土圧の差異はほとんどないことがわかる。

これらの実験結果は、風化層の土圧の低減傾向に対しては、風化層そのものの骨格構造の強さを表す内部摩擦角よりも、のり面工や地山新鮮部と風化層との接触面に

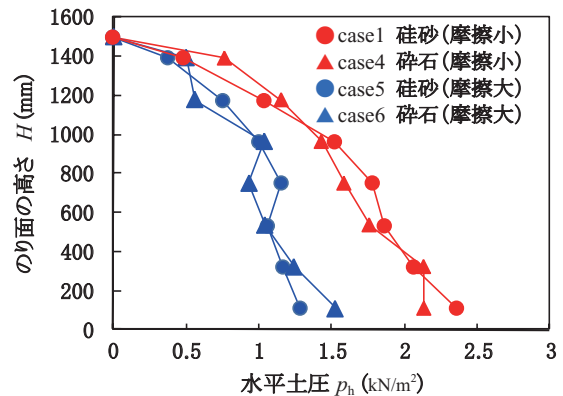


図 12 内部摩擦角および壁面摩擦の影響

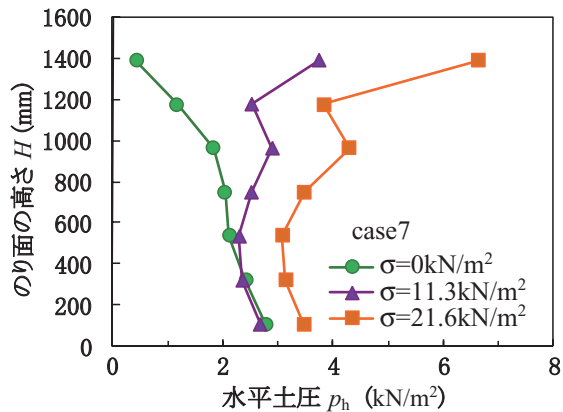


図 13 上載圧力の影響

作用する摩擦の大きさが支配的であることを示している。ただし、式 (1)、(2) のように、摩擦の大きさに直接的に影響を及ぼす壁面に対する垂直応力は、静止土圧係数  $k_0$  に比例し、静止土圧係数は内部摩擦角と密接な関係がある。このため、風化層の土圧については、壁面摩擦および内部摩擦角の両者を考慮する必要があるといえる。

#### 4.4 上載荷重の影響

case7 の実験結果のうち、上載圧力  $\sigma = 0 \text{ kN/m}^2$ ,  $11.3 \text{ kN/m}^2$ ,  $21.6 \text{ kN/m}^2$  の各圧力を載荷したときの土圧分布を図 13 に示す。上載荷重載荷前は、図 11 に示した case1 の結果とほぼ同様に、のり面下方部分の土圧が単純土圧より低減されている様子が見られる。この状態から徐々に上載荷重を載荷すると、のり面上部の土圧が顕著に増加する一方で、のり面下方ほど上載荷重の影響は及ばず、図 13 ように土圧最大値の作用点がのり面下部から上部へと移動している。また、上載荷重の増加にとともにその影響は下部へ伝達され、 $\sigma = 21.6 \text{ kN/m}^2$  では最下端の土圧が載荷前よりも  $1 \text{ kN/m}^2$  程度増加していることがわかる。

### 5. 実験結果と理論値との比較

実験で得られた水平土圧の分布形状を、風化層試料の重量と土槽壁面による摩擦抵抗の釣り合い式により近似

特集：防災技術

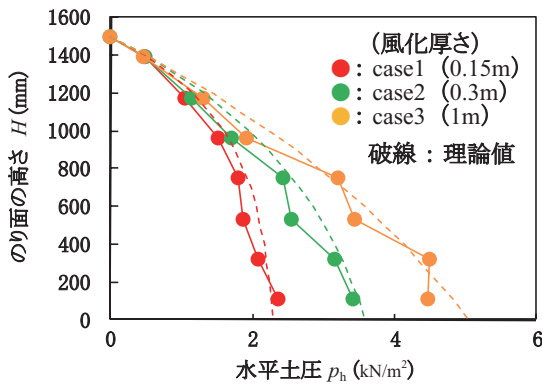


図14 風化厚さの影響

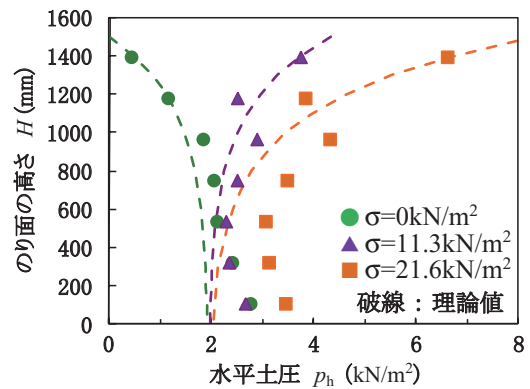


図16 上載圧力の影響

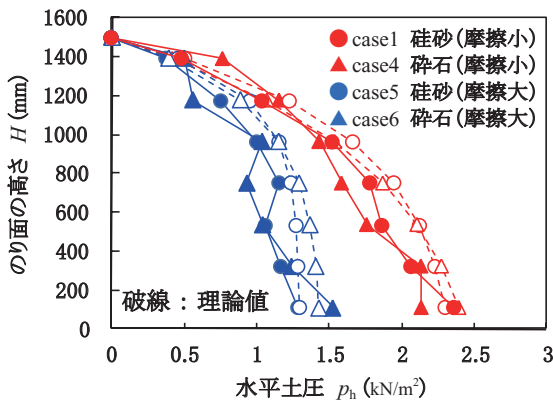


図15 内部摩擦角および壁面摩擦の影響

した。用いた釣り合い式を(3)に示す。

$$\frac{dp_v}{dz} = \gamma - \frac{L}{A_0} \mu k_0 p_v \quad (3)$$

ここで、 $p_v$ は鉛直土圧、 $L$ は土槽の周面長さ、 $A_0$ は土槽の底面積、 $\mu$ は摩擦係数である。

式(3)から、土槽天端から任意の深さ $z$ における側方圧力 $p_v$ は以下のように与えられる。

$$p_v = \frac{\gamma - Ce^{-\omega z}}{\omega} \quad (4)$$

ここで、 $\omega = L\mu k_0 / A_0$ である。

$z=0, p_v=0$ のとき

$$p_v = \frac{\gamma(1 - e^{-\omega z})}{\omega} \quad (5)$$

となり、式(5)と静止土圧係数 $k_0$ を用いて、側方土圧 $p_h$ の土槽深さ方向の分布を求めた。

風化層に作用する摩擦を考慮した理論値と、風化厚さに着目した実験結果との比較を図14に、のり面勾配の影響に着目した実験結果との比較を図15に、上載荷重に着目した実験結果との比較を図16に示す。

図14および図15から、理論値による土圧は下方ほど土圧が低減されており、実験結果と良く一致していることがわかる。図14では、理論値による土圧は風化厚さが厚くなるほど摩擦の影響による低減割合が減少している様子が再現され、実験結果と整合している。また図15の

理論値は、風化層の内部摩擦角よりも壁面摩擦の違いによる影響が大きいことを再現している。

一方、図16では、土槽上部で測定された実験値については理論式で比較的よく再現できているものの、上端から500mmの位置より下方では実験値より理論値の方が小さくなる。このような実験値と理論値との乖離の原因としては、上載荷重の増加による試料密度の部分的な変化や、地盤内応力の伝達範囲の変化の影響などが考えられる。

## 6. おわりに

本報告では、現地調査結果に基づいて切土のり面工背面の地山の風化状況の実態を明らかにし、これを基にした模型のり面を用いて、風化層によりのり面工に作用する土圧の特性を実験的に明らかにした。壁面摩擦を考慮した土圧算定式を用いることによって、実験結果を再現することができることを示した。したがって、上述の土圧算定式を用いることによって、風化厚さなどの条件に応じた土圧を適正に求めることが可能となる。

今後、本報告で述べた風化層による土圧評価方法を基にして、切土のり面の健全度評価方法を整理・提案する予定である。

## 文献

- 1) 佐藤大輔, 小島 貢: 羽越本線小岩川～あつみ温泉間斜面崩壊の応急復旧及び恒久対策工事, 日本鉄道施設協会誌, Vol.45, No.6, pp.23-25, 2007
- 2) 興水 聡, 太田直之, 高柳 剛, 杉山友康, 岡田勝也: 鉄道切土の風化形状に関する検討, 第43回地盤工学研究発表会, pp.2025-2026, 2008
- 3) 高柳 剛, 太田直之, 興水 聡, 杉山友康, 岡田勝也, 山田祐樹, 山本 彰: 切土のり面風化層に発生する静止土圧に着目した基礎的な土圧実験, 第63回土木学会年次学術講演会, III -477, pp.953-954, 2008
- 4) 日本国有鉄道建設局: 土構造物の設計施工指針(案), 1967
- 5) 応用地質学会: 日本の岩盤分類, 応用地質特別号, pp.15-16, 1992