

# 植生工が軟岩切土法面の風化を抑制する機構の解析的研究

Analytical study of the mechanism in which a vegetation method controls weathering  
of soft-rock cut slopes

太田英将  
Hidemasa OHTA

里 優  
Masaru SATO

萱原敏史  
Toshifumi KAYAHARA



## ■植生工が軟岩切土法面の風化を抑制する機構の解析的研究

Analytical study of the mechanism in which a vegetation method controls weathering of soft-rock cut slopes

(有)太田ジオリサーチ/太田英将  
Ohta Geo-Research Co., Ltd./Hidemasa OHTAスカイマップ(株)/萱原敏史  
Skymap Co., Ltd./Toshifumi KAYAHARA(株)地層科学研究所/里 優  
Geoscience Research Laboratory Co., Ltd./Masaru SATO

キーワード：植生, 植生工, 風化, 熱応力, 数値解析

Key words : planting, vegetation method, weathering, thermal stress, numerical analysis

## 1. はじめに

軟岩切土のり面は、施工後表層部からの温度変化を受けることによって風化が促進され、ついには表層崩壊に至ることはよく知られている。この風化を抑制する目的で植生工がのり面表層部に施工されることが多いが、植生工の効果に関する定量的解析手法の研究は少ない。このため、植生工はいまだに定性的な「侵食防止工」の位置付けにとどまっている。

本報告では、植生工をのり面の風化抑制工として定量的に評価できる調査・解析手法を提案する。

解析の方法としては、①切土のり面内地盤の熱伝導解析を行い、②熱膨張ひずみにより発生する応力を数値解析(FEM)に組み込んでのり面の安定度評価を行うものである。調査の方法は、切土のり面に作用する日射の影響をヘリコプターから熱映像撮影により定量的に把握するものである。

この評価手法が確立されれば、植生工を従来の「定性的なり面保護工」から、「定量的なり面対策工」として設計することができるようになる。

## 2. のり面対策工法としての植生工の再認識

植生工は、のり面の表層剥離・侵食防止、ごく表層部の崩落防止などを対策対象としており、抑制工としてののり面保護工と位置づけられている。本工法の機能として、単独では抑止力を期待できないため、崩壊の恐れがある場合には別途抑止工を併用しなければならない、というのが現状での利用形態である。

抑止工は、斜面が崩壊しようとする力を直接的に押さえ込むため効果が確実に期待できる優れた面をもっている。しかし、現在用いられている抑止工の耐用年数についてはあまり議論されていない。グラウンドアンカー工がのり面の恒久対策工として登場し普及したのは、土質工学会(当時)が平成2年に作成した指針<sup>1)</sup>以降であり、恒久対策工としてのロックボルト工にいたっては公的な設計基準<sup>2)</sup>が公表されたのが平成10年である。いずれの

基準でも腐食に対する長期的耐久性が設計上考慮されているが、その限界については言及されていない。

一方、植生工には、風化が早い岩盤・地盤に対して、表層を被覆し地盤内の温度変化を抑えると同時に、乾湿繰り返しが発生しにくいようにする効果がある。ここで、「著しく風化したときに崩壊が発生する」という地盤を仮定すると、風化防止を目的とした対策工の耐用年数は風化速度によりある程度定量的に設計することが可能となるのではないか、というのが本報告の視点である。

例えば、無対策の場合10年で表層部の風化が進み崩壊が発生する地盤に対して、植生工で風化防止を図った結果その風化速度が1/20となったとすれば、耐用年数は200年と評価することができるわけである。

今後は、社会資本の耐用年数という時間の尺度を入れた視点で対策工を設計する必要があるものと考えられる。その視点に立つと、例えば鋼材を使用した工法が時間と共に劣化する一方であるのに対して、植生工のような生物を用いた対策工は再生可能という利点がある。また、耐用年数に到達した瞬間の状態に着目すると、鋼材を用いた対策工は「破壊」により突然その終わりを告げ、新たな災害要因になる可能性もある。

## 3. 軟岩のり面の風化と既存の対策工法

自然状態の地山を切土しりのり面を形成する場合、3段階の風化区分があると考えられている<sup>3)</sup>。

第1段階は、切土前の自然状態における風化・ゆるみである。第2段階は、切土直後の応力解放に伴うゆるみである。第3段階は、のり面完成後に時間の経過と共に進行する風化であり「二次風化」と呼ばれるものである。

切土時に不安定化するのり面の場合、対策工としては抑止力が付加できる工法である必要があり、グラウンドアンカー工やロックボルト工を用いざるを得ない。

それに対して、切土直後に安定を保っているのり面には、二次風化対策としてののり面保護工が用いられる場合が多い。植生工のみで保護がなされるのり面は主にこの

タイプである。ただし、スレーキングなど二次風化の速度が大きいことがあらかじめ調査段階から判明しているのり面に対しては、近い将来の強度劣化を予測して抑止工を用いる場合もある。

### 3.1 物理的風化の原因と回避方法

物理的風化作用は、大きな岩石が小さく分割される過程である。岩石は温度変化による膨張および収縮により弱面に沿って分割破砕される。また、節理面へ植物の根が侵入し物理的風化が促進される場合もある。

温度変化による物理的風化として最大のものは、凍結破砕作用であるが、これは季節的あるいは一日の中で凍結・融解のサイクルが存在する地域でのみ起こり得るものである。

凍結・融解が発生しない地域でも物理的風化が起り、のり面は崩壊する。一般に物理的風化の結果として発生する表層崩壊の深度は0.5~1m程度のものが多いことが経験的にわかっている。日照による一日の間に地温変化が発生する深度は通常1m以内<sup>9)</sup>であるので、地中の温度変化と物理的風化との間には関連があると考えられる。

本報告では、地盤内の温度の違いが熱膨張の違いとなり、それが地盤内にひずみと応力を発生させていると考え、その現象を数値解析的に説明する方法を検討する。のり面に熱エネルギーが伝達されるとき、その程度はのり面の方角・傾斜・地盤の熱伝導率・含水状態等に影響を受けると考えられる。

地盤内の熱膨張ひずみは、その量が小さい間は弾性的な挙動となるが、ある量を超えると岩盤組織が破壊され不可逆的に風化が進行するようになると考えられる。そして、このようなしきい値は、地盤の種類や状態により異なるものと考えられる。もし表層部に熱伝導しにくい被覆層(植生工)を設置することにより、地盤内の熱膨張ひずみをそのしきい値内にとどめることができるとすれば、地盤内の風化速度をコントロールすることが可能になるのではないかというのが、本報告の提案である。

### 3.2 安定したのり面の概念

「安定したのり面」に関する概念は、非常に曖昧なものである。「施工後十分長い時間崩れずに存在する」ことが安定したのり面ということであるが、この十分長い時間というのが指し示す量について議論されることはあまりない。

中村ほか(1991)によれば、「のり面は切土前の自然斜面の安定度と同程度かそれ以上に安定にするのが原則であるので、メンテナンスフリーののり面をつくるのであれば、自然斜面勾配以下にする必要がある(自然斜面も崩壊することを考えると、それでも完全にメンテナンスフリーとはならないであろうが)」<sup>10)</sup>ということになる。

道路に切土のり面をつくる場合には、自然勾配よりも急勾配となるのが普通であるため、メンテナンスフリーの安定したのり面をつくりあげることは本来不可能であ

る。このため、維持管理・更新方法について今後十分に検討していく必要がある。

## 4. 解析

### 4.1 理論的背景

斜面の表面では、太陽の輻射熱や大気からの熱伝達によって熱の流入出が発生し、地盤の温度が変化する。地盤内では熱伝導によって温度分布が変化するが、この現象は熱伝導方程式として次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $K_{ij}$ 、 $C$ 、 $\rho$ はそれぞれ地盤の熱伝導率、密度、比熱である。また、添え字は直交座標系を表し総和規則に従う。

地盤の温度変化は、同時に地盤の熱膨張を誘起する。熱膨張量は次式で与えられる。

$$d\epsilon_i = 3\alpha dT \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\epsilon_i$ は熱膨張ひずみ、 $\alpha$ は地盤の線膨張係数である。なお、地盤が凍結するような場合には地下水の凍結膨張量を考慮する必要がある。同時に、凍結時に発生する潜熱も熱伝導方程式の中で考慮しなければならない。

この熱膨張ひずみは、地盤内の応力分布にも影響を及ぼす。熱応力を考慮した弾性地盤の応力-ひずみ関係は、次式のとおりである。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijm} \left( d\epsilon_m - \frac{1}{3} \delta_{ij} d\epsilon_i \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $D$ は地盤の弾性定数マトリクス、 $\delta$ はクロネッカーのデルタである。

仮に、水平成層地盤のように地盤が自由に変形できるような場合には、熱膨張ひずみと同量のひずみが発生するために、地盤の応力に変化はない。逆に地盤の変形が抑制される場合には、(3)式にしたがって、いわゆる熱応力が発生する。

地盤内で生じている温度変化や熱膨張ひずみ、熱応力の発生は、(1)~(3)式と平衡方程式を組み合わせた支配方程式により記述することができる。これを有限要素法により離散化し、所定の境界条件や初期条件の下で解くことにより、地盤内の温度分布や応力分布を推定することができる。

気温の変化などで斜面表面の温度が変化するような場合には、熱膨張ひずみが発生し表面の地盤が変形する。この変形は、温度の日変動、季節変動により繰り返し発生し、地盤のいわゆる疲労破壊などの原因となる。また、変形が抑制される法尻部などでは、熱応力が発生し、場合によってはせん断破壊を引き起こす。これらの現象が、具体的にどのようなもので、どのような範囲に発生するのかなどを、以下の解析例に基づいて検討する。

## 4.2 モデル斜面での計算例

### 4.2.1 解析フロー

2次元FEM非定常熱伝導・熱応力解析ソフトウェア(G-HEAT/2D, 2D-σ: ㈱地層科学研究所)を用いて、温度変化がモデル斜面の変形などに及ぼす影響を検討した。解析のフローを図-1に示す。斜面の有限要素モデルを作成した後、地盤の物性値を定め、自重解析により初期応力分布を求めた。次に、同じ解析モデルを用いて熱伝導解析を行い、気温変化による地盤の温度分布の変化を計算した。この計算は、地盤温度の年変化が前年と差異が無くなり、周期的に生ずることを確認するため5年間行った。その後、熱伝導解析を1年間行い、地盤の温度変化を求め、この温度変化を用いて熱応力解析を行った。

### 4.2.2 解析モデル

図-2に解析に用いた有限要素法の基本モデルを示す。斜面の勾配はほぼ1:1とし、直高は5mとした。次に図-2のモデルを次の3ケースに分けて解析を行った。図-3(a)は斜面に何も施さない裸地の場合のモデルであり、図-3(b)は植生工として、地盤と熱伝導率が異なる

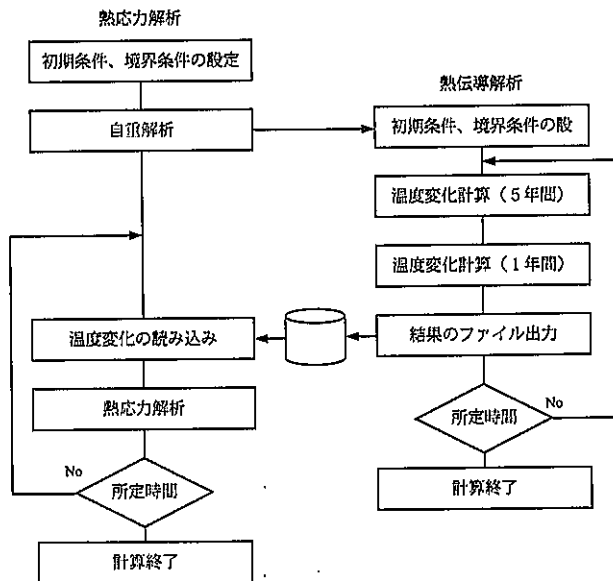


図-1 熱伝導・熱応力解析フロー

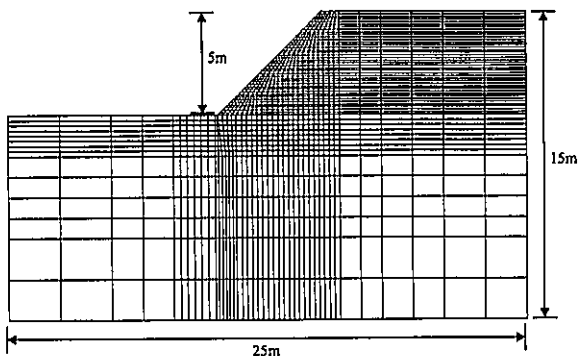


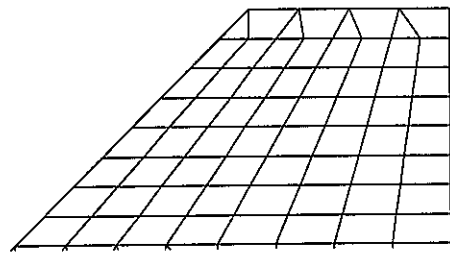
図-2 有限要素メッシュ (領域全体図)

材料を厚さ3cm設けた場合、図-3(c)は植生工を厚さ10cmとした場合のモデルである。

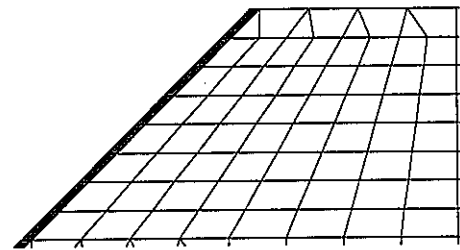
### 4.2.3 解析ステップおよび解析条件

#### (a) 熱伝導解析

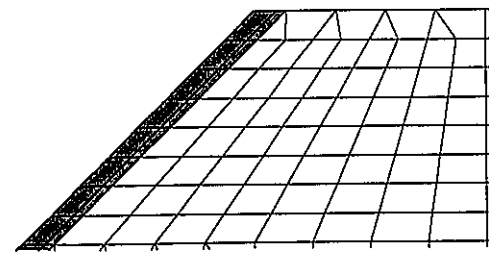
熱伝導解析の手順を、表-1に示す。最初に、モデル地表面および底面の温度を固定し、定常解析を行うことで仮想的な初期温度分布を設定した。次に、地表面に熱伝達境界を設定し、地表面温度として気温の年変化を6回繰り返して入力した(5回目までの繰り返しによって、地盤内の温度の年変化に前年との差異が無くなることを確認したためである)。



(a) 裸地



(b) 植生工 3cm



(c) 植生工 10cm

図-3 有限要素メッシュ (法肩部拡大 暗色領域は植生工)

表-1 熱伝導解析の解析手順および境界条件

解析条件	境界条件
初期定常解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表面: 規定温度境界 (4°C)</li> <li>底面: 規定温度境界 (12°C)</li> <li>側面: 断熱境界</li> </ul>
非定常解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表面: 熱伝達境界 (熱伝達率: 10W/m<sup>2</sup>K) (外界温度経時変化: 図-4 参照)</li> <li>底面: 規定温度境界 (12°C)</li> <li>側面: 断熱境界</li> </ul>

解析に用いた物性値を、表-2に示す<sup>9)</sup>。植生工には、太陽の輻射熱をさえぎる効果や熱伝達・熱伝導を妨げる効果などがあると考えられるが、本研究では、植生工の熱伝導率を通常の地盤に比べて一桁低く設定した。これにより、植生工の効果を評価するものとした（発泡スチロールなどの熱伝導率は地盤に比べて二桁低い）。なお、地盤の温度は0度以下にはならなかったため、潜熱は考慮していない。また植物の生育状態による影響も現時点では評価できないため考慮していない。

(b) 熱応力解析

熱応力解析では、解析モデルの側面と底面について、それぞれの法線方向の変位を拘束した。温度変化は、図-4に示すように、6年目の1月の平均温度を基準とし、6年目の12ヶ月の変化量を入力した。解析に用いた物性値を、表-3に示す。地盤の破壊は、モール・クーロンの条件にしたがうものとし、破壊条件とモールの応力円の距離より安全率を求めることとした。なお、経時変化を算出した定点の位置を図-5に示す。

4.2.5 解析結果と考察

(a) 温度分布と変形

図-6および図-7に6年目8月と12月の温度分布および変形図を示す。植生工の有無により、地盤内の温度分布が大きく変化している様子がわかる。8月の結果では、裸地の場合に比べ植生工が施された地盤で全体的に温度

が低く、逆に12月では植生工がある方が地盤の温度が高い。

図-8には法肩・法尻付近の定点における温度の経時変化を示した。各温度は、図-5に示す定点の値である。グラフからは、植生工が厚いほど温度の振幅が小さくなっていることがわかる。植生工の存在により夏期で最大約5℃、冬期で最大3℃程度地盤温度の変化を抑制している。このことは、植生工が外界温度が地盤内に与える影響を小さくする役目を果たしている。なお、法肩と法尻部における温度変化総量の違いは、注目点の表面からの距離の違いによるものである。

図-6および図-7の変形図からは、温度の上昇によって地盤が膨張していることがわかる。変形量は8月の方が12月に比べて大きくなっていることは容易に読みとれるが、植生工の有無による差は、モデル全体を見ただけでは違いを読み取るのが困難である。この違いを詳

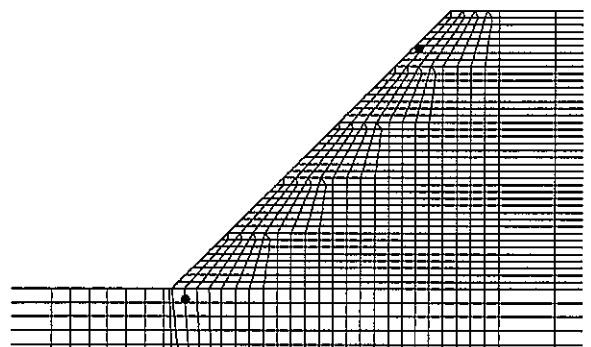


図-5 経時変化グラフを表した箇所 (●印)

表-2 熱伝導解析に用いた物性値

材料	熱伝導率 (W/m・K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (J/kg・K)
植生工	0.1	2000	1000
モデル地盤	1	2000	1000

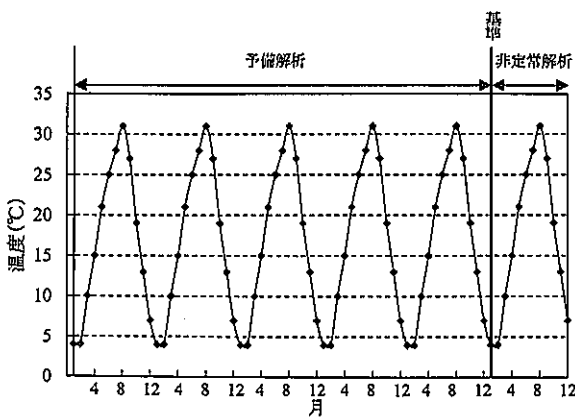


図-4 外界温度経時変化(非定常解析モデル地表面に設定)

表-3 熱応力解析に用いた物性値

材料	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	熱膨張率 (K <sup>-1</sup> )	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (degree)
植生工	1000	0.4	5 × 10 <sup>-6</sup>	0.1	30
モデル地盤	1000	0.4	5 × 10 <sup>-6</sup>	0.1	30

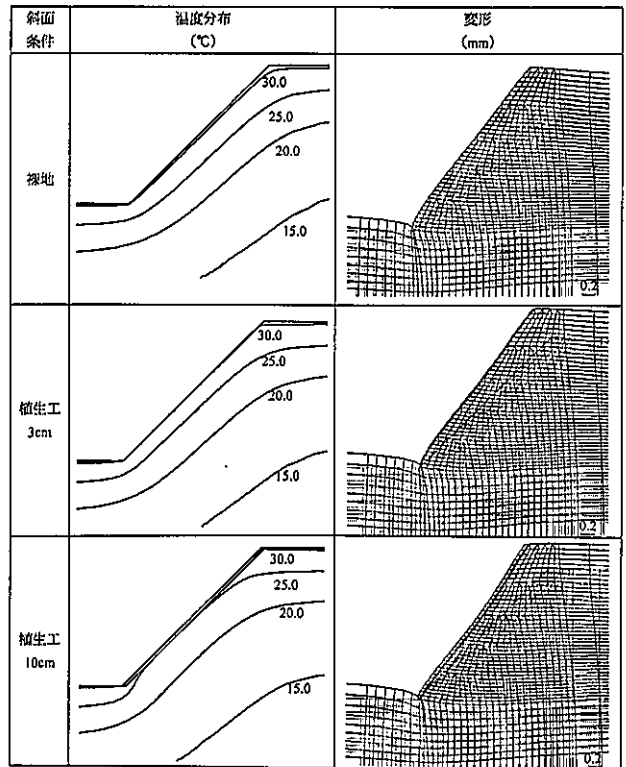


図-6 温度分布図と変形図 (8月)

細に見るために、法肩および法尻の定点における変位量を、図-9および図-10に示した。このグラフから、季節の温度変化に調和して斜面が変位し、また、植生工が

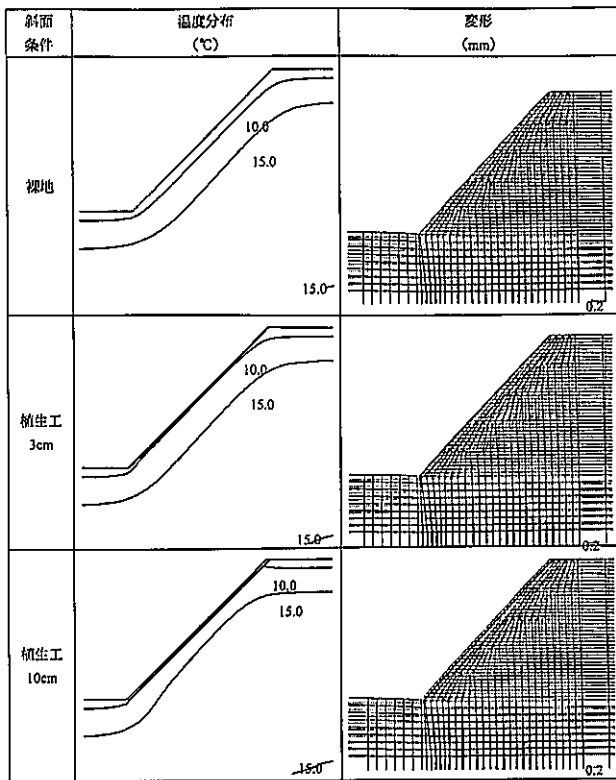
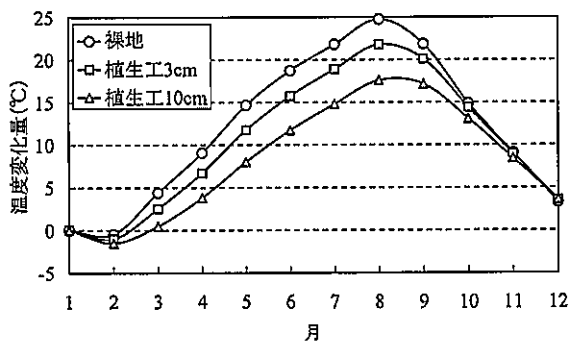
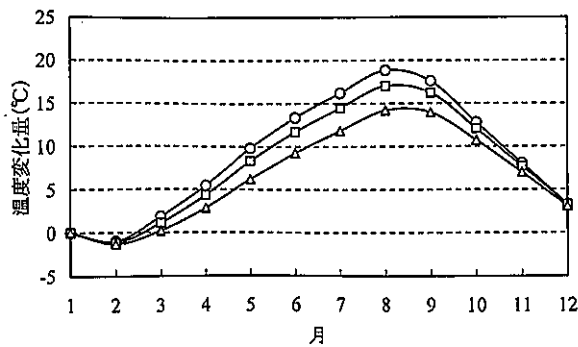


図-7 温度分布図と変形図 (12月)

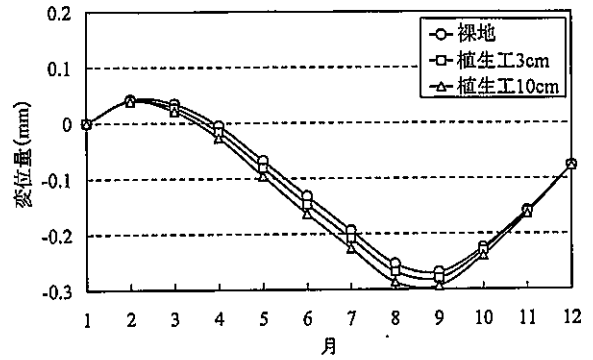


(a) 法肩付近

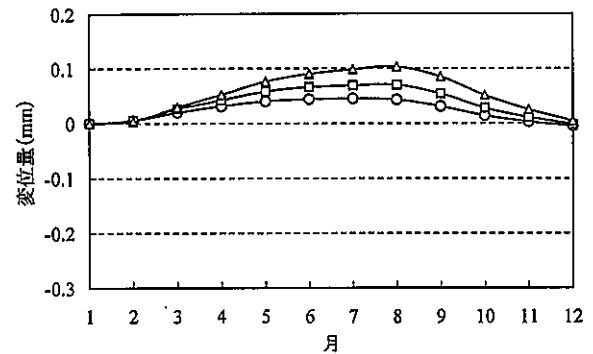


(b) 法尻付近

図-8 温度経時変化

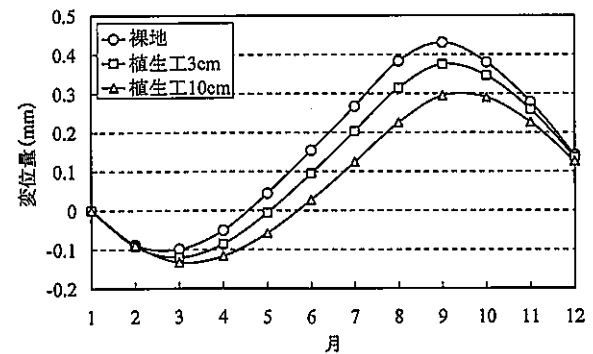


(a) 法肩付近

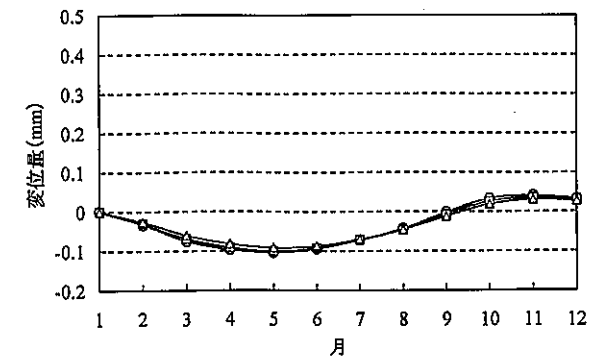


(b) 法尻付近

図-9 水平方向変位の経時変化 (6年目1月からの増分)



(a) 法肩付近



(b) 法尻付近

図-10 鉛直方向変位の経時変化 (6年目1月からの増分)

厚くなるほど振幅が小さくなっていることが読みとれる。このような季節毎の変位が繰り返される場合には、いわゆる疲労破壊が懸念される。

特に法肩付近では、法尻に比べて変位の振幅が大きく、疲労破壊に対する注意が必要であることが示唆されている。また、植生工 ( $t=10\text{cm}$ ) がある場合には、法肩部では裸地と比較して最大30%程度の変形が抑制されており、この部分の安定に寄与していることがわかる。法尻部では、地盤の傾斜が凹状に急変するために変形が拘束され、温度が変化するにもかかわらず変形は小さい。その結果、法尻部で熱応力が発生し、そのためにせん断破壊が生ずることが懸念される。

(b) せん断ひずみについて

図-11および図-12に、8月および12月の最大せん断ひずみと最大せん断応力の分布を示す。自重と熱膨張ひずみによって、法尻部に高いせん断ひずみとせん断応力が発生していることがわかる。法肩部は、法尻部に比べて自由に变形できるために、せん断ひずみなどは小さくなっている。気温の高い8月と気温の低い12月を比較すると、8月の方がより大きなせん断ひずみ、せん断応力が発生していることが明瞭に読みとれる。また、変形の場合とは逆に、法肩に比べ法尻でせん断ひずみの変化が大きくなっており、この部分でせん断破壊が生じ易いことを示唆している。植生工が厚いほどせん断ひずみ、せん断応力が若干小さくなっているが、その差は小さく、この全体図からは読み取るのが困難である。このため、

この違いを詳細に見るため、図-13および図-14には、最大せん断ひずみ、最大せん断応力の定点位置における

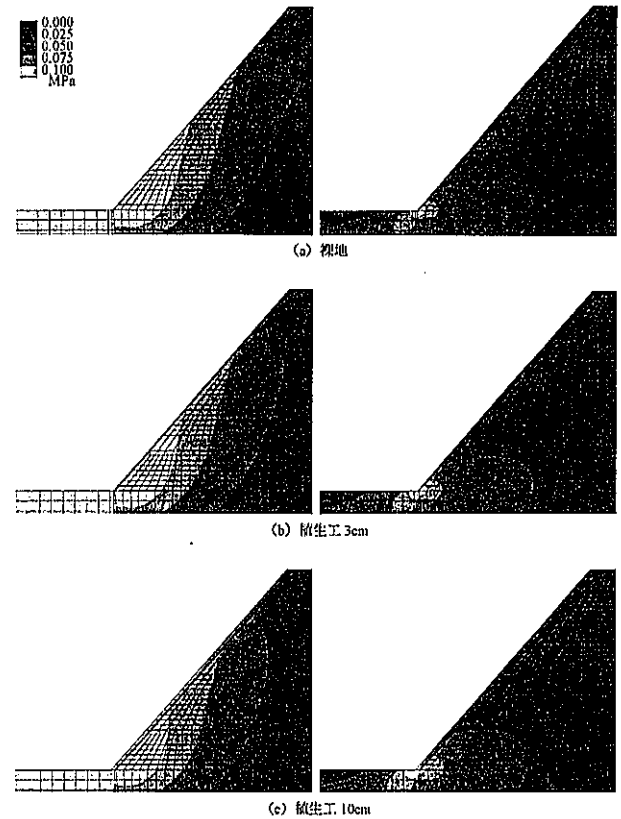


図-12 最大せん断応力図 (左列: 8月 右列: 12月)

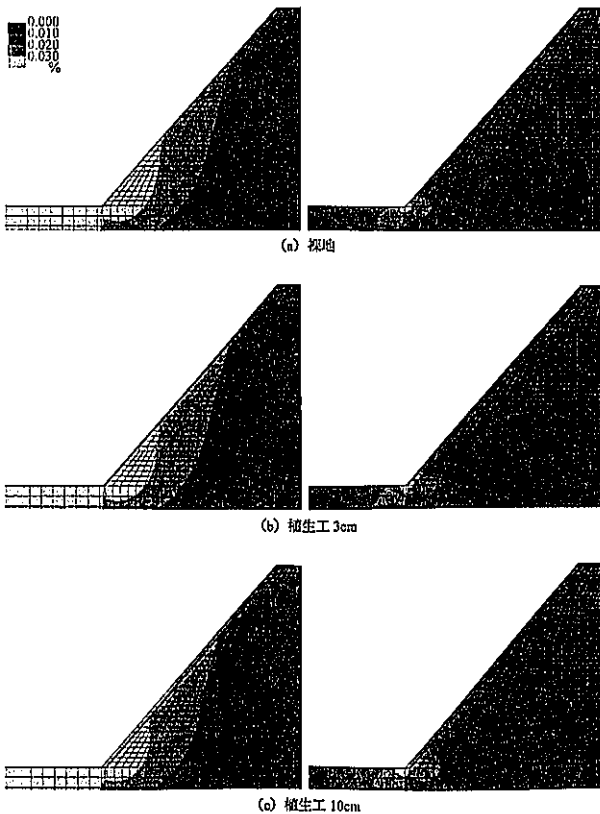
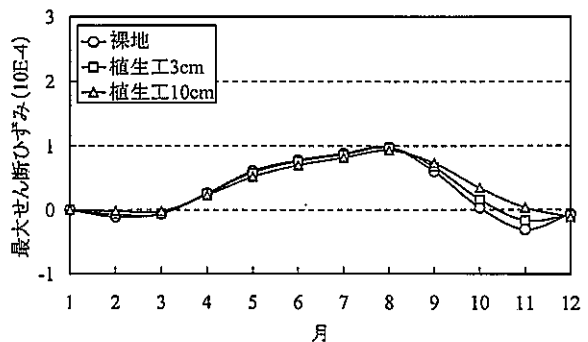
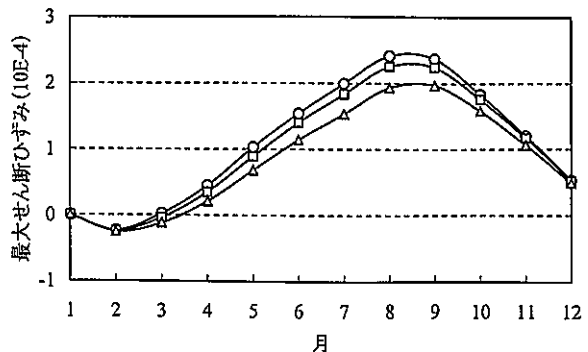


図-11 最大せん断ひずみ図 (左列: 8月 右列: 12月)



(a) 法肩付近



(b) 法尻付近

図-13 最大せん断ひずみ経時変化(6年目1月からの増分)

経時変化を示した。

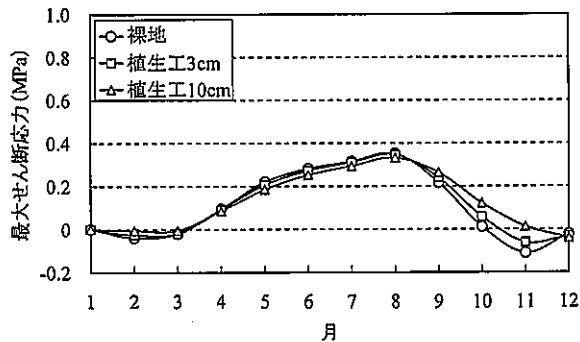
この図を見ると、植生工を施すことによって、法肩付近および法尻付近のせん断応力およびせん断ひずみの値が小さくなるのがわかる。特に、法尻付近においては、その効果が大きいことが読みとれる。

せん断破壊に関してモール・クーロンの応力円への接近度合いを、局所安全率の変化で示したものが図-15である。

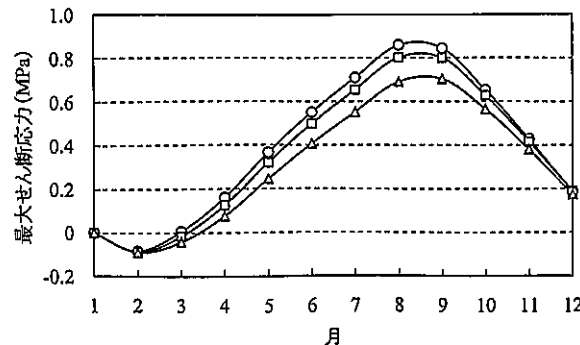
安全率は、地盤温度が上昇し、せん断ひずみが増加する8月(夏期)で小さくなり、12月(冬期)に比べて斜面が不安定化することを示唆している。8月の法尻部では、植生工が厚いほど安全率が小さい範囲が若干狭くなっており、せん断破壊に対しても植生工が安定に寄与していることがわかる。

(c) 解析法の課題

モデル斜面の熱伝導・熱応力解析によって、植生工が地盤内の温度変化をある程度抑制し、この結果斜面の安定性向上に寄与することがわかった。本解析では、植生工を地盤に比べ低い熱伝導率を持つ材料として、植生工の熱遮断効果を表現したが、実際は、これに加えて輻射による温度上昇を抑制する効果や熱伝達の低減、あるいは植物繁茂による熱伝導低減などの効果があると考えられる。また、現実には北向き斜面と南向き斜面では、これらの効果が異なっていると考えられる。これらを、実験結果や実斜面での計測と解析の比較などに基づいて定量的に表現することにより、解析に基づいた植生工の選



(a) 法尻付近



(b) 法尻付近

図-14 最大せん断応力経時変化(6年目1月からの増分)

択への道を拓くことができるものとする。

5. 熱エネルギーの計測方法

のり面の表面にどの程度の日照があり、それがのり面の方位・勾配・植生状態等によりどのような違いがあるのかということ定量的に計測した例はあまりない。

赤外線ビデオカメラを用いて、ヘリコプターから計測する手法を開発し適用した。その結果、図-16に示すように赤外線画像と可視画像を同時に撮影することにより、容易に表面温度状態を把握することができた。

8月に撮影されたこの画像を見ると、植生基盤吹付のみの箇所は表面温度が高く、植生が繁茂すると表面温度が著しく低下しており、植物が熱を遮断する効果は相当大きいものと考えられる。のり面の表面温度から地盤に伝達される熱量を推定する手法はまだ確立されていない

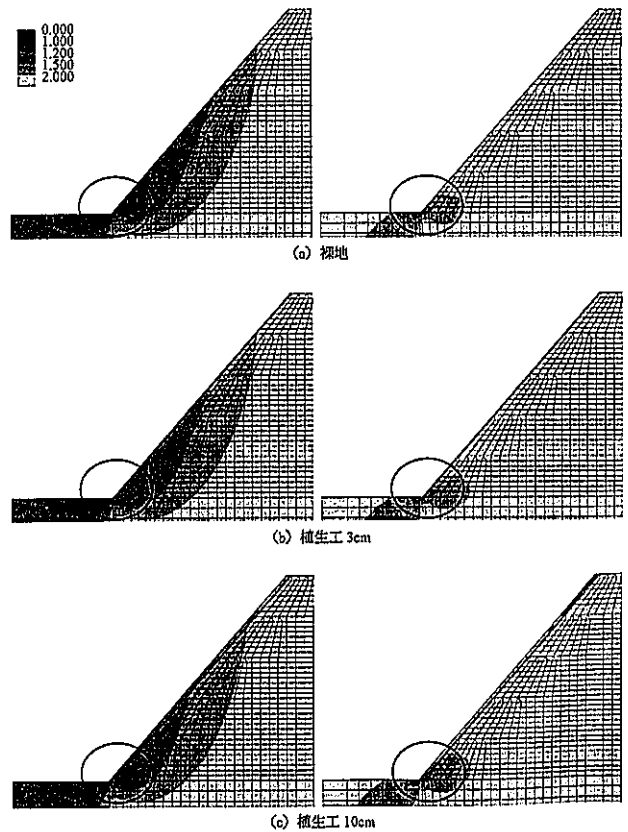


図-15 安全率図(○内が注目点 左列: 8月 右列: 12月)

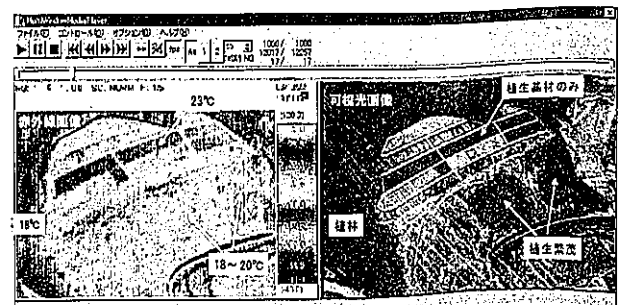


図-16 のり面の表面温度測定例(8月撮影)



が、今後データを収集することにより精度向上を図っていきたいと考えている。

#### 6. まとめと今後の課題

本報告では、地盤への熱伝導が斜面内地盤のひずみや応力状態にどのような影響を与えるのかを数値解析を用いて明らかにする手法について示した。

今回の熱源は外気温であり、直射日光の影響を考慮していない。また植生工は客土を地山よりも一桁小さい熱伝導率として設定し、植物繁茂の効果は考慮していない。このため現実に起こっている熱伝導の影響は今回の解析例よりも大きな幅をもっていることが想定される。

今後は、実際の温度計測などのデータを収集し、より

現実に近い解析手法を確立していきたいと考えており、植生の専門家と共同で研究を進めたいと望んでいる。

#### 引用文献

- 1) 粉土質工学会 (1990): グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説.
- 2) 日本道路公団 (1998): 切土補強土工法設計・施工要領.
- 3) 多賀直大・田山聡・奥園誠之・矢木沢孝哉 (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, 39-6, pp. 41-47.
- 4) 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法, 85p.
- 5) 中村康夫・平野勇・佐々木靖人・阿部昌彦 (1991): 軟岩切土のり面の劣化予測, 土木研究所資料, 第2930号.
- 6) 日本熱物性学会編 (2000): 熱物性ハンドブック, 207p. および289p.

(原稿受付2004年2月2日, 原稿受理2004年5月25日)