

斜面の安定性に及ぼす根系の効果について

Consideration on Slope Stability reinforced by Roots Network

矢田部龍一	Ryuichi YATABE	(愛媛大学工学部)
八木則男	Norio YAGI	(愛媛大学工学部)
榎 明潔	Meiketsu ENOKI	(鳥取大学工学部)
小堀慈久	Shigehisa KOBORI	(呉工業高等専門学校)
向谷光彦	Mitsuhiko MUKAITANI	(財)大阪土質試験所

斜面の安定性に関する多くの研究がなされてきたが、植生が斜面崩壊に与える影響を明らかにする必要がある。そこで本論文では、まず、いくつかの地点から不かく乱まさ土を採取し室内実験、現場実験を行い、根系と原地盤の強度特性について検討を加えた。そして、一般的に、根系の補強効果をみかけの粘着力 c の増加として評価できることは、ある程度分かっていたが、地域的に松山、広島近辺のまさ土帯に及ぼす根系の効果を定量的に示した。次に、根系の補強効果を考慮した安定解析法としてFellenius法と一般化された極限平衡法(GLEM)を提案した。根系の補強効果を力学的に妥当な形態での定式化を行い、その解析法と結果の妥当性について検討した。

キーワード：根系，斜面安定，まさ土，テンションクラック，強度定数(IGC：E6)

1. まえがき

降雨時には斜面の崩壊が多発し、多大な被害が出ている。的確な斜面崩壊予測法の確立が望まれるが、そのためには解決しなければならない多くの問題が残されている。植生が斜面崩壊に与える影響の解明もその一つである。植生の影響としては、太陽光線の遮蔽(地盤の湿潤化)、表面侵食の防止、雨水の浸透防止、蒸散作用による土の乾燥促進、風による樹木のゆさぶりに伴う根群域のゆるみの促進、根の伸張に伴う風化の促進、根系による土の補強などである。本論文では根系による土の補強機構について検討する。

根系を含む土の強度特性に関してはいくつかの報告がなされている^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}。これらの報告の多くが、根系による補強効果は粘着力 c の増加として現れること、また、根量の増加に応じて c が増加することなどを指摘している。しかし、これらの研究の多くは、特定の地域、地盤条件下に限定されていることが多く、地域的な力学特性を把握するところまでは至っていないと思われる。本論文では、まず、根系を含む不かく乱まさ土に対して種々のせん断試験を行い、強度定数に及ぼす根系の影響を把握する。次いで、根系とテンションクラックを考慮して極限平衡法を用いたモデル斜面の安定解析を行う。そして、モデル斜面の安定性に及ぼす根系の効果について検討する。

2. 根系を含む不かく乱まさ土のせん断特性

2. 1 根系を含む不かく乱まさ土の強度特性

2. 1. 1 試料, 試験方法

試料としては広島県呉市周辺の広島型花崗岩体の風化したまさ土および愛媛県松山市の花崗閃緑岩の風化した松山型まさ土を用いた。

行った試験は室内一面せん断試験、三軸圧縮試験ならびに大型の現地一面せん断試験である。室内実験に用いた一面せん断試験機は在来型のものを用いた。供試体は直径6cm、高さ2cmで、下部可動型である。大型の現地一面せん断試験機は試作した。概要を図-1に示す。せん断枠は方形で、大きさは縦横とも30cm、高さ12cmであり、せん断枠下面で一面せん断される。垂直荷重はエアシリンダーにより、また、せん断力は油圧ジャッキにより与えられる。試作試験機の実用性を検

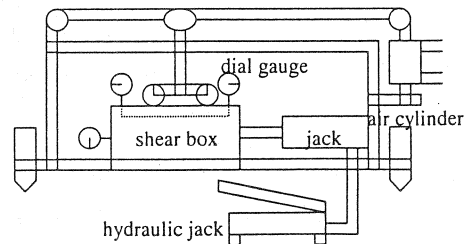


図-1 現地一面せん断試験機の概要

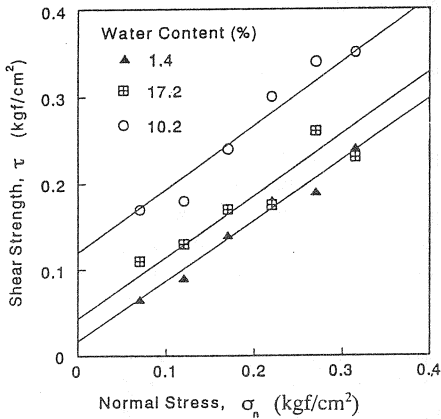


図-2 突き固め地盤における現地一面せん断試験機による試験結果

討するためにまき土を締め固めた地盤でせん断試験を行った。得られた試験結果を図-2に示す。地盤の含水比を3種類 ($w=1.4, 10.2, 17.2\%$) 変えているが、含水比の変化による見かけの粘着力の変化をよく表している。また、せん断抵抗角 ϕ_d は飽和度に関係なく $37^\circ \sim 38^\circ$ である。別に行った三軸試験では $39^\circ \sim 40^\circ$ と若干試作一面せん断試験機の方が小さなせん断抵抗角を与えたが、実用的には問題はないと思われる⁷⁾。

室内試験に用いた不かく乱供試体の作成手順は次のようである。まず、現地でブロックサンプリングした試料を冷凍庫で凍結させる。次いで、削り粉を出すためのらせん溝を有するコアビットで円柱状に成形した後、ディスクカッターで端面を成形して供試体とした⁸⁾。現地試験に用いた供試体はせん断枠の大きさにブロックを掘り出すことにより行った。試験は、このブロックにせん断枠ならびにせん断試験機をセットした後、供試体部分を水浸させて行った。

試験は全て圧密排水条件である。変位速度は室内一面せん断試験で 0.33mm/min 、三軸圧縮試験で 0.067mm/min である。また、現地の大型一面せん断試験では室内試験のそれとほぼ同じ速度で行った。試料は水浸状態で行っている。なお、含根率の測定は試験終了後、供試体を水洗いして根を取り出して行った。

2. 1. 2 試験結果と考察

図-3にせん断抵抗角 ϕ_d と体積含根率の関係を示す。図中には室内三軸圧縮試験と室内一面せん断試験それと現場一面せん断試験の結果を併せて示してある。どの試験とも不かく乱試料を用いているので供試体の間

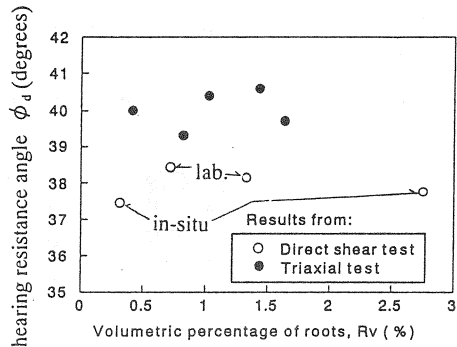


図-3 せん断抵抗角と体積含根率の関係

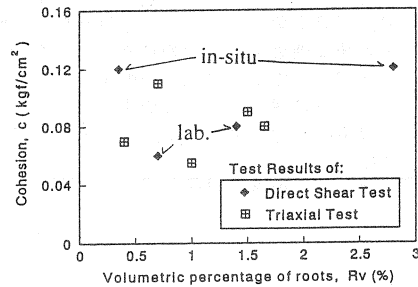


図-4 見かけの粘着力と体積含根率の関係

隙比に若干のばらつきがあり、試験結果にもばらつきがみられる。特に、大きな供試体の必要な現場一面せん断試験ではかなりのばらつきがある。しかし、室内の三軸圧縮試験と一面せん断試験結果をみる限りでは、せん断抵抗角は根系の含有量の影響を受けず、ほぼ一定と扱ってもよいと思われる。

図-4に粘着力 c と体積含根率の関係を示す。根系を含まなければ c はほぼゼロであるが、根系を含むと 0.1kgf/cm^2 程度の c を持つようである。含根率の増加に伴って c も増加すると思われるが、今回の実験結果を見る限りでは、ばらつきが大きくそのような傾向は認められない。

根系の補強効果が強度定数に与える影響を検討するために、不かく乱試料を用いている例は非常に少ないが、遠藤ら¹⁾ および岩本ら^{3), 4)} も強度定数へに影響に関して、本実験結果と同様な結論を得ている。

以上のことから、 ϕ_d を求めるためには現地の大型一面せん断試験を行うのが理想的であるが、実際問題としては難しい。したがって、比較的簡単に行うことができる室内のせん断試験結果との比較を行っておくことが必要である。図-5は今回行った各種試験により得られた ϕ_d と間隙比 e の関係である。図には服部らがま

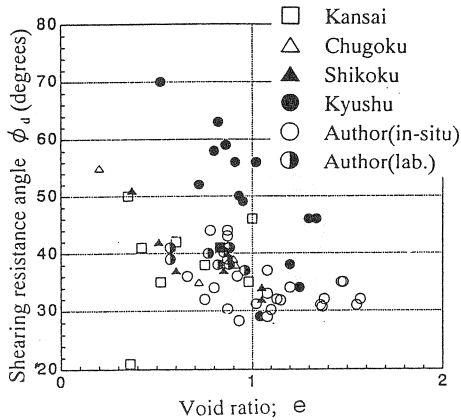


図-5 せん断抵抗角と間隙比の関係

とめた他の研究成果も併せて示している⁹⁾。これを見ると、不かく乱まき土の $\phi_d \sim e$ 関係は、ばらつきが非常に大きい。但し、九州地区のデータを除けば e に対して ϕ_d は 10° 程度の範囲には納まっているようである。何れにしてもばらつきは大きい、これには、せん断試験の方法や間隙比の測定誤差といった人為的な問題も含まれていると思われる。なお、今回の試験値は一応、従来の試験により得られた範囲内にある。

2. 2 根の引っ張り・引き抜き抵抗特性

根系は主に引っ張り補強材として土を補強している。根系を含む土がせん断破壊する時には、根は破断もしくは引き抜けを起こす。したがって、根系による土の補強機構を検討するためには根の引っ張り破断特性および引き抜き抵抗特性を明らかにしておく必要がある。

2. 2. 1 試料, 実験方法

試料には杉(cedar), モミ(fir), 笹(bamboo), 雑木(shrub), 雑草(grass)の根を用いた。

引っ張り破断試験は根の両端を石膏で固定し、 $1.5\text{mm}/\text{min}$ の速度で引っ張ることにより行った。引き抜き試験は根の片方を石膏で、もう一端を 5cm 程度砂で挟み、上載圧をかけた状態で行った。上載圧は $0.1, 0.2, 0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ で、変位速度は $1.5\text{mm}/\text{min}$ である。

2. 2. 2 実験結果と考察

図-6に引っ張り抵抗応力 S_t と伸びひずみ ϵ の関係の一例を示す。これから樹種に関係なく伸びひずみ $30 \sim 40\%$ で破断することがわかる。図-7に引っ張り破断強度(=最大引っ張り抵抗応力) $S_{t,max}$ と根の直径 D の関係の一例を示す。 $3 \sim 4\text{mm}$ 以上の直径を持つ根の引っ張り破断強度は $100\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度であり、今回行った試験に限れば、樹種による差はあまりないようである。

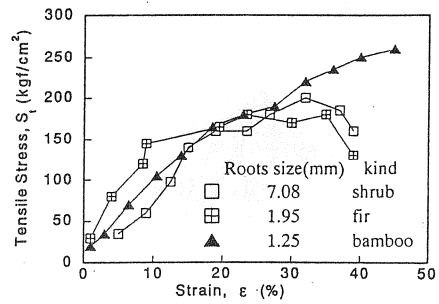


図-6 引っ張り抵抗応力と伸びひずみの関係

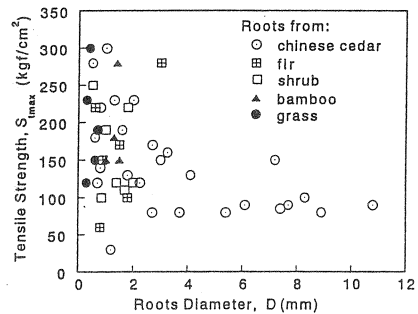


図-7 引っ張り破断強度と根系の直径の関係

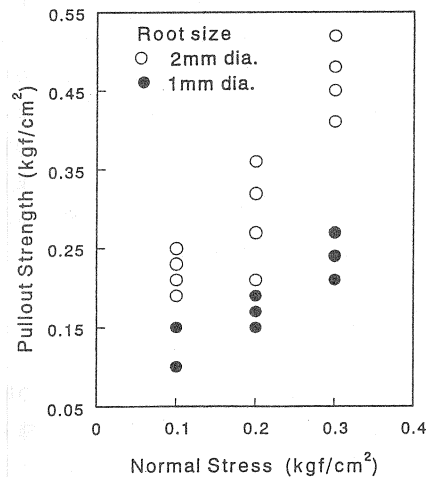


図-8 根系の引き抜き試験結果の一例

$3 \sim 4\text{mm}$ より小さい直径の根は単位面積当たりの強度が大きい、これは根の断面積に占める表面の繊維の強い部分の割合が大きいためである。なお、中根ら¹⁰⁾および陶山ら¹¹⁾も同様な引っ張り試験を行っている。中根らは本実験結果と同様の引っ張り破断強度を得ているが、陶山らは樹種によってはかなり大きい値を得

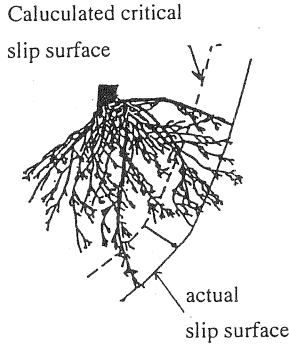


図-9 根系による補強効果の概要

ている。

図-8に直径1mm程度と2mm程度の松の根の引き抜き試験結果の一例を示す。当然の事ながら引き抜き抵抗は周面摩擦抵抗に比例するので上載荷重の増加とともに周面摩擦抵抗は大きくなっている。ばらつきはあるが、この結果から周面摩擦角を求めると砂の内部摩擦角を越える大きな値となる。これは根が若干曲っており、根の実際の面積より大きな面積で砂がせん断されるためであると思われる。なお、直径2mmの根の破断力は、3~6kgf程度であるので、上載荷重が0.3 kgf/cm²であれば10~20cm程度の根の進入長さがあれば、引き抜き抵抗は4~7kgfとなり、せん断により引き抜けではなく破断が生じ始める。実際の根系は、先端部ほど複雑に分岐しながら細くなっていくので、引っ張り力が作用すれば破断と引き抜きが同時に発生する。また、周面摩擦抵抗は樹種、土の種類や間隙比それと飽和度などにより異なる上、根系の土中への進入状態も複雑であるので実際の引き抜き抵抗を定量的に把握するためには、多くの室内および現地実験を必要とする。

3. 根系によって補強された斜面の安定解析

3.1 根系による土の補強機構

根系によって補強された斜面のすべり層付近の概念図を図-9に示す。根系によって補強された土の機構は複雑で、そのモデル化は困難である。そこで、ある構成式による有限要素解析を用いることが考えられる。しかしながら、土中の自然の根系の応力とひずみの関係を明らかにすることは困難である。例えば、根系の波打ったような形状の影響がある。著者らは、単純化した繊維と補強土のメカニズムを提案してきた⁷⁾。ただし、本論文では、根系の引き抜きは生じないこととした。

見かけの粘着力 c を有する斜面の安定性を評価する

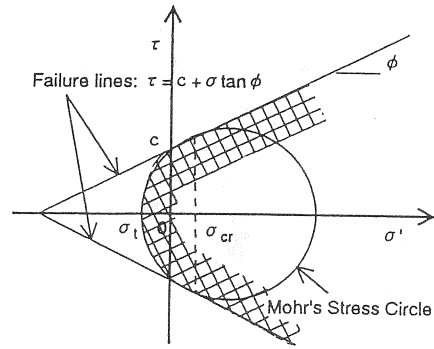


図-10 テンションクラックを考慮した応力状態

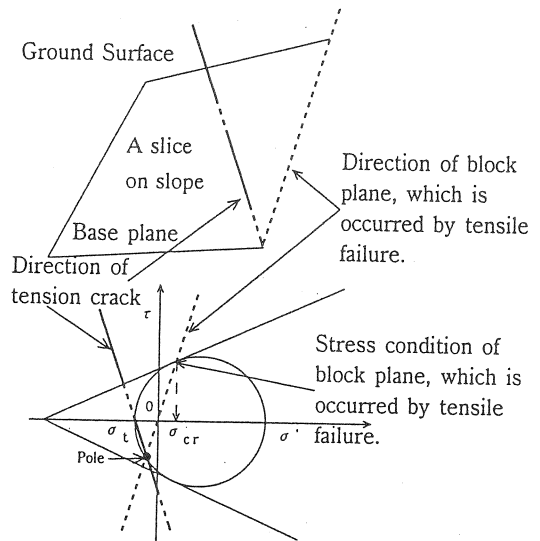


図-11 斜面上のスライスとMohr-Coulombの破壊規準の関係

とき、斜面上部で発生するテンションクラックの効果を無視することは出来ないと考えられる。ここで、テンションクラックを考慮した古典的な安定解析法には、いくつかの問題点がある。その問題点とは、①テンションクラックの深度は斜面高さや斜面角に影響を受けないこと、②テンションクラック発生は斜面に対して鉛直に発生しないこと、③テンションクラックが発生したスライス土塊は、力のつりあいを保証されないことなどである。本章では、テンションクラックの影響を考慮した安定解析法について、検討を加えた。

3.2 テンションクラックを考慮した安定解析

土の破壊は、せん断破壊と引っ張り破壊によって表される。図-10はテンションクラックを考慮した土要素の応力状態とMohr-Coulombの破壊規準を示す。根系に

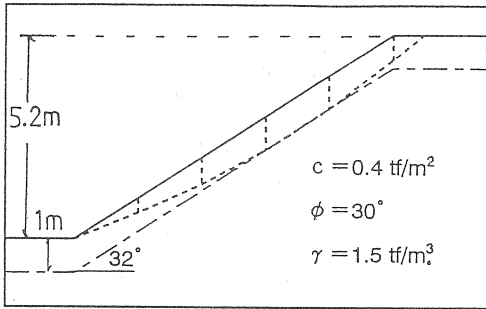


図-12 モデル斜面の概要

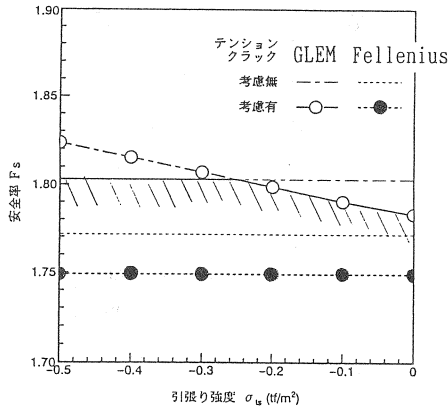


図-13 引っ張り強度と安全率の関係

よって補強された土の要素は、図中のハッチ部の領域の内側に存在することが出来る。ここで、 σ_t : 引っ張り強さ(<0)、 σ_{cr} : すべり面上の垂直応力である。 σ_{cr} は次式によって表される。

$$\sigma_{cr} = \sigma_t(1 + \sin \phi) + c \cdot \cos \phi \quad \dots(1)$$

図-10と式(1)より、主応力が σ_t より小さければ斜面崩壊はせん断破壊によって発生するのではなく、引っ張り破壊により発生する。したがって、すべり面の垂直応力は、常に σ_{cr} より大きい。本論文で提案しているFellenius法と一般化された極限平衡法(GLEM)では、根系を有する斜面の安定解析を行えるように改良した。安全率が1.0であるすべり面の応力状態が破壊線に接し、土要素の応力状態がMohr-Coulomb規準によって表現されるとするならば、スライス側面における引っ張り破壊は垂直応力と式(1)により表現される。

3.3 Fellenius法

スライス土塊の幅 b が十分小さければ、 b で除した

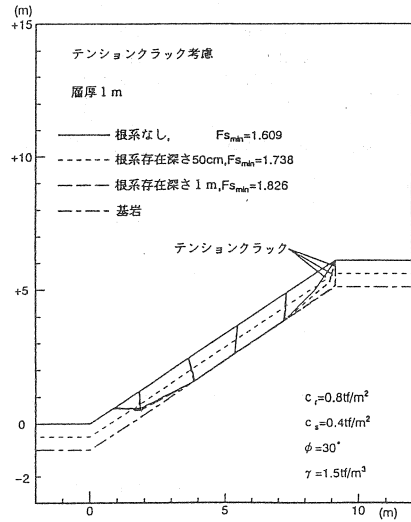


図-14 GLEMによる安定解析結果

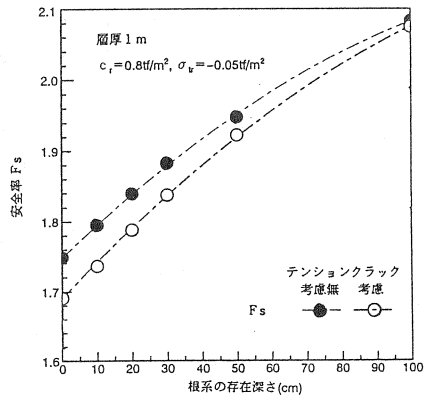


図-15 根系の存在深さと安全率の関係

スライスの自重は γz に等しい。 σ_t がスライス土塊の垂直応力 σ_{cr} より大きければ、引っ張り破壊はスライス側面が発生する。したがって、テニョンクラックの深度 z_c は次式で表される。

$$z_c = \sigma_{cr} / (\gamma \cdot \cos^2 \beta) \quad \dots(2)$$

ここで、 β はスライス底面の角度である。

式(2)より、 z_c は β とともに変化することが分かる。式(2)から z_c を算出することにより、となりあう連続していたスライス側面の力のつりあい関係が分かる。

3.4 GLEM^{(2), (3)}

GLEMは、スライス側面、底面に作用する全ての力を算定することが出来る。したがって、斜面で引っ張り

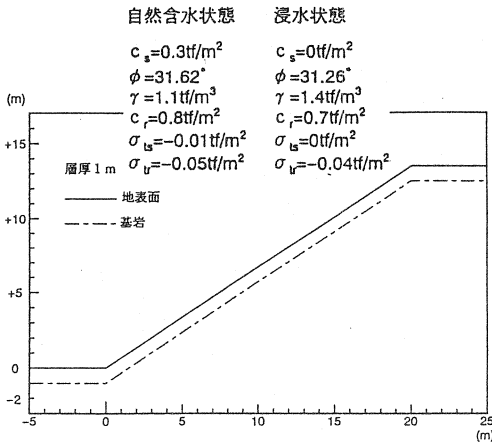


図-16 自然斜面の解析断面

破壊の発生を判定することが可能である。また、引っ張り破壊が発生したスライス側面の引っ張り強度を算出することができる。テンションクラックを考慮した解析法は以下のものである。①テンションクラックを考慮しないすべり面の安全率を算出する。②もし引っ張り破壊が生じれば、スライスは図-11に示す極とその方向から分離される。ここで、せん断強さはゼロになる。③もし、分割後のスライス群を再計算によって同じ安全率が得られるならば、GLEMによって最適な安全率を算出したことになる。

3. 5 テンションクラックを考慮したモデル斜面の安定解析

図-12は、モデル斜面の概要である。図-13は引っ張り強さと安全率の関係を示したものである。これより、Fellenius法とGLEMの両解析法ともに、安全率Fsはテンションクラックにより影響を受けることが分かる。しかし、Fellenius法では引っ張り強さが変化しても安全率は一定の値を示している。これに対して、GLEMでは、引っ張り強さが大きくなると、安全率も徐々に大きくなる傾向が見られる。ここで、テンションクラックを考慮した安全率よりも考慮しない安全率の方が大きいという結果は正しくない。したがって、テンションクラックを考慮した安全率と考慮しない安全率があれば、二つのうち小さい方の値を正解として選択する必要がある。

3. 6 根系を考慮したモデル斜面の安定解析

根系の効果を考慮した斜面安定解析を行うとき、

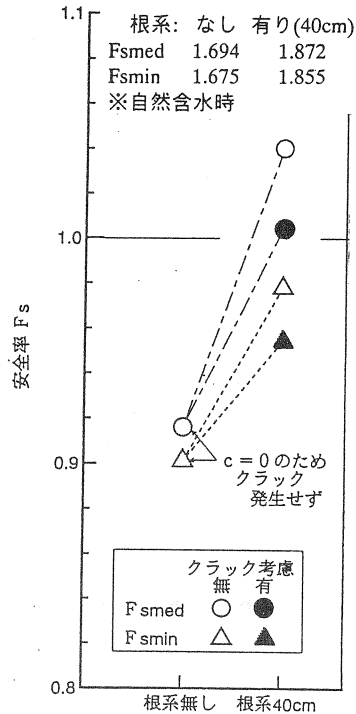


図-17 根系の有無と安全率の関係

二つの重要な事柄がある。一つは、土中に根系が存在するとみかけの粘着力cが増加することである。もう一つは、根系の存在により引っ張り強さが増加することによってテンションクラックの発生を抑制する効果の存在である。したがって、斜面の安定解析では、テンションクラックと根系の存在によるみかけの粘着力cの増加を考慮する必要がある。

図-14は、GLEMによる斜面における根系の効果を示したものである。ここで、テンションクラックの発生は、すべての条件において考慮してある。これより、斜面の根系の存在深さが深くなれば、テンションクラックの角度は鉛直に近づくことが分かる。

図-15は、GLEMによる根系の存在深さと安全率の関係を示したものである。

3. 7 自然斜面の安定解析

図-16は、GLEMによる自然斜面の解析断面図を示す。この安定解析では、地形は現地では測量を行った値を用いており、強度定数はせん断試験により得られたものを用いた。図中で“浸水状態”は、原位置で注水によ

り飽和させたことを示している。地表から基岩までの厚さは、約1mである。

図-17は、根系の有無と安全率の関係である。これより、テンションクラックの有無に関わらず根系の存在により安全率が約0.1程度増加していることが分かる。また、根系の存在を考慮した安全率は、ほぼ1.0程度である。したがって、根系の補強効果が自然含水（不飽和）状態、飽和状態の両条件下において斜面の安定性に寄与していることは明らかである。

4. あとがき

斜面の安定性に及ぼす根系の効果について検討等を行った。得られた結果は次のようである。

- 1) 不かく乱まさ土に対する種々のせん断試験から根系の補強効果は見かけの粘着力の増加として現れ、せん断抵抗角には殆ど影響しないことが確認された。
- 2) せん断抵抗角 ϕ_a は体積含根率の影響をほとんど受けない。
- 3) 一般化された極限平衡法(GLEM)は、テンションクラックと引っ張り強度を正しく評価できる解析法である。
- 4) 根系による見かけの粘着力 c が増加すると、テンションクラックの発生が抑制されることが、定量的に評価された。
- 5) 実際の自然斜面の安定解析を行い、根系による見かけの粘着力 c の増加とテンションクラックを考慮した結果、安全率は1.0付近の値を示す。したがって、自然斜面の安定解析では、根系の補強効果を考慮する必要があることが明らかになった。

謝辞 本研究を行うに際して試験機の製作で愛媛大学工学部技官二神治氏並びに工学部機械実習工場諸氏に、また、現地および室内せん断試験では愛媛大学工学部環境建設工学科の卒業生および呉高専土木工学科の多くの卒業生にお世話になった。また、現地実験に際しては愛媛大学農学部附属演習林他を使用した。関係諸氏、諸機関に感謝致します。

参考文献

- 1) 遠藤泰造, 鶴田武雄: 樹木の根が土のせん断強さに与える作用(第1報), 林業試験場北海道支場年報, pp.167~182, 1968.
- 2) 高橋敏男: 森林の山崩れ防止機能に関する研究, 静岡大学農学部研究報告, No.18, pp.85~101, 1968.
- 3) 小橋澄治: 斜面安定に及ぼす根系の影響についての最近の知見, 緑化工技術, 10(1), pp.14~19, 1983.
- 4) 岩本賢, 阿部和時: 大型現地一面せん断試験による樹木根系を含む土層のせん断特性(I), 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.175~176, 1985.
- 5) 岩本賢, 阿部和時: 大型現地一面せん断試験による樹木根系を含む土層のせん断特性(II), 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.607~608, 1986.
- 6) 小堀慈久, 有田哲也, 古田賢司, 中島英司: 現場一面せん断強さと根系の関係について, 土木学会中国四国支部平成4年度研究発表会講演概要集, pp.320~321, 1992.
- 7) 八木則男, 榎明潔, 矢田部龍一, 岡山孝: 根系を含むまさ土のせん断特性, 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1515~1516, 1987.
- 8) 八木則男, 矢田部龍一: 不かく乱まさ土のせん断特性と微視的考察, 土木学会論文集, 第364号, pp.131~141, 1985.
- 9) 服部隆行, 日下部治, 低引洋隆: まさ土の工学的性質に関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, pp.924~925, 1993.
- 10) 中根周歩, 中川勝範, 高橋史樹: アカマツ根の山火枯死・腐朽に伴う引張強度の低下, 日本林業学会誌, 第65巻, 第5号, pp.155~165, 1983.
- 11) 陶山正憲, 原敏男: 樹木根系の工学的評価に関する実験的研究(I)-木質根系の引張強度特性について-, 昭和61年度砂防学会研究発表会概要集, pp.246~249, 1986.
- 12) Gray, D.H. and Leiser, A.T.: Biotechnical Slope Protection and Erosion Control, Van Nostrand Reinhold Co., New York, N.Y. 1982.
- 13) Gray, D.H. and H. Ohashi: Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand, Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.109, No.3, pp.335-353, 1983.
- 14) Enoki, M., Yagi, N., Yatabe, R. and Ichimoto, E.: Generalized limit equilibrium method and its relation with slip line method, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 2, pp.1-13, 1991.
- 15) Enoki, M., Yagi, N., Yatabe, R. and Ichimoto, E.: Relation of limit equilibrium method to limit analysis method, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, pp.37-47, 1991.