

崖内部の応力場と引張亀裂に関する基礎的研究

堀内 浩貴^{1*}・藍檀 オメル²・渡嘉敷 直彦³

¹琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

²琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース (同上)

³琉球大学 島嶼防災研究センター研究開発室 (同上)

*E-mail: k188483@eve.u-ryukyu.ac.jp

崖は、伸びひずみによる亀裂発生が原因で発生する斜面崩壊がしばしばみられる。この問題について、Terzaghiは、土質斜面を対象としたGelatin模型による光弾性実験を行い、斜面・崖上部に発生する引張応力について実験的に検討した。Terzaghiの検討に対して、著者らは、2種類の方法で崖内部の応力状態を検討した。1つ目は、光弾性試験によるGelatinの崖モデル内部の応力場の検討 (Terzaghi1の実験を再現したもの)。2つ目は、有限要素法による崖内部の引張領域の検討である。亀裂と侵食の有無を考慮した模型実験と数値解析を実施することで、法尻付近の侵食の有無によって発生する引張領域が異なることが明らかになった。本研究では、上記の2つの項目の検討結果について得られた知見を説明する。

Key Words : tension crack, tension zone, photoelasticity, erosion, cliff, gelatin, FEM

1. はじめに

沖縄では、海食崖などの法尻付近に侵食を受けた崖の崩壊が数多く存在する。崖の崩壊の発生により、その周辺に存在する歴史的に重要な建造物の安定性が大きな問題となっている。Tokashiki & Aydan¹⁾は、海食崖を対象にした現場調査のデータをもとに、法尻付近の侵食発生に伴う、崖上部に発生する引張応力状態について数値解析による安定性評価の検討を行っている。具体的には、数多くの琉球石灰岩の崖が崩壊した事例分析について片持ち梁理論に基づいて検討している。検討結果より、大半の琉球石灰岩の海食崖は、法尻付近に発生する引張応力値が0.25MPaを超過すると、崖上部に引張亀裂が発生し、崩壊に至る場合が多いことを明らかにしている。

崖の崩壊などを含めた斜面の崩壊については、藍檀 & 川本²⁾、Aydan & Kawamoto³⁾が極限解析手法による理論的な検討を行っている。特に、一様な地層で構成された斜面崩壊の場合について、岩盤の引張強度を超過すると、岩盤内部に引張亀裂が発生する。そのうえ、岩盤内部が、連続体などの一様な地層で構成されている場合に限り、岩盤の引張強度は一定値であるため、発生した亀裂が途中で止まることなく、崩壊に至ると結論付けている。

近年では、主に海食崖を対象に、伸びひずみによる亀裂発生に伴う崩壊が確認されている。この問題について、過去にはTerzaghiが、土質斜面内部における引張応力領域

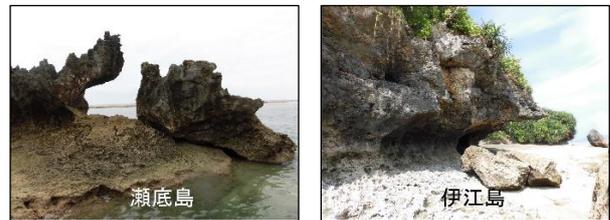


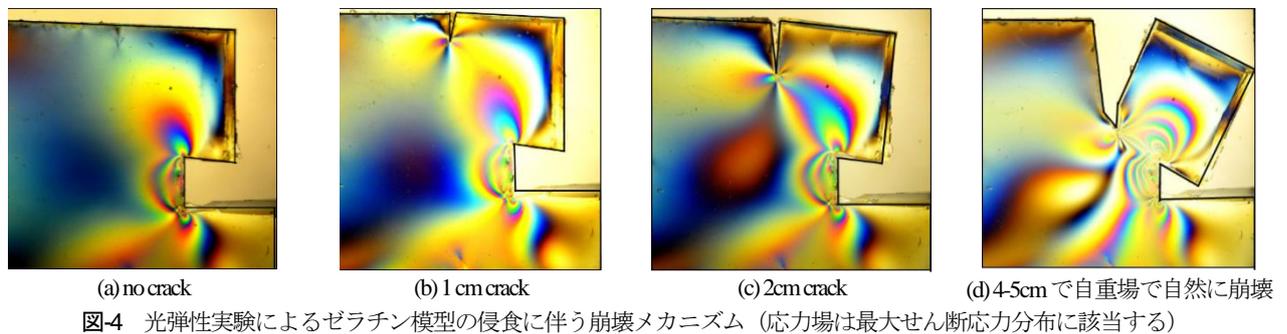
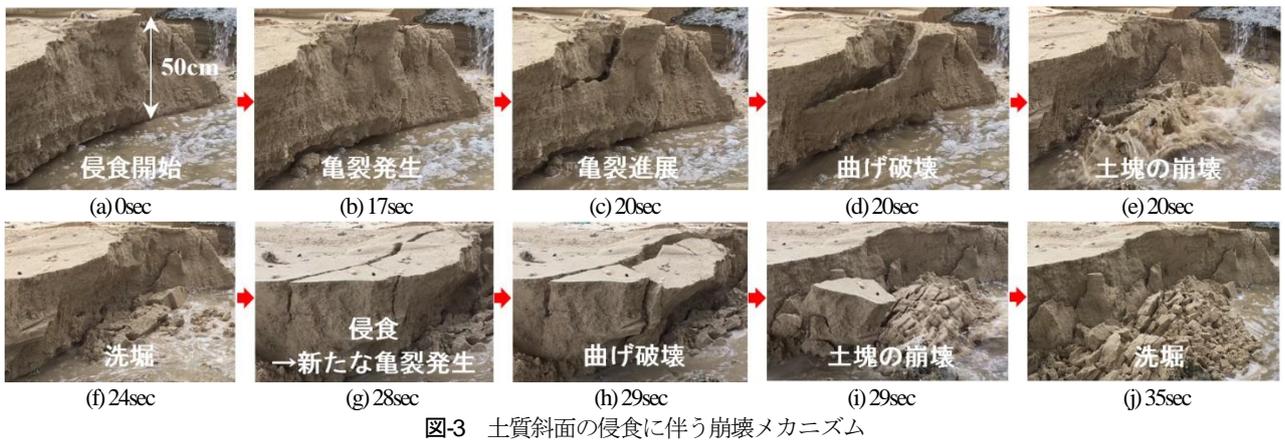
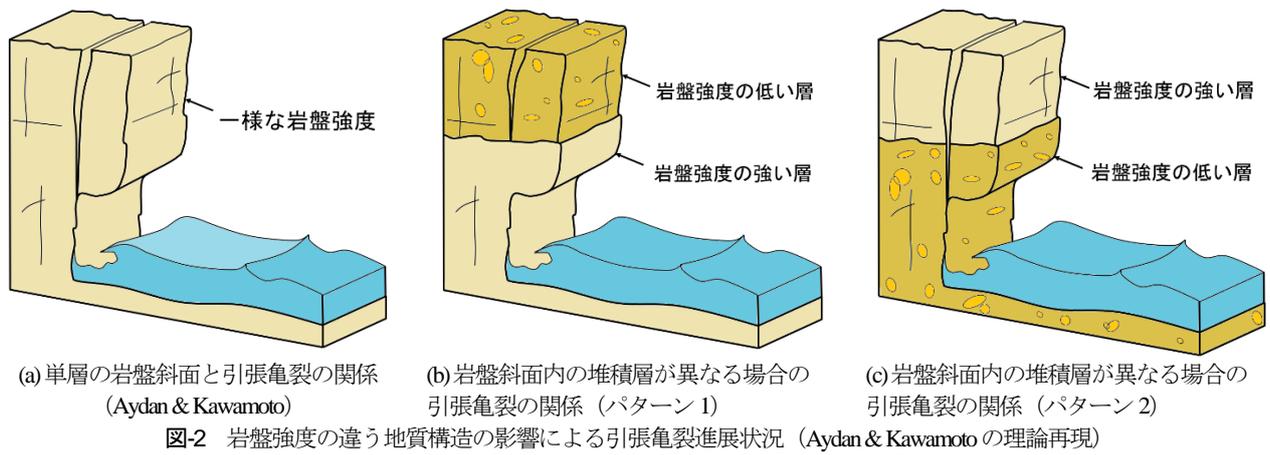
図-1 法尻付近に侵食を受けた崖の崩壊事例

を検討している。Terzaghiの実施した実験結果より、侵食がない鉛直な斜面は、発生する引張応力領域内で引張亀裂が発生すると結論付けている。また、引張応力による引張亀裂の限界深さは、斜面高さの1/2Hであることを示唆している。Terzaghiの検討結果について、著者らは以下の検討項目で崖の応力状態を検討した。

- ① 侵食前後の土質斜面の崩壊メカニズム。
- ② 光弾性試験によるGelatinを用いた崖モデル内部の応力場の推定。
- ③ 数値解析による崖の引張応力の検討。
- ④ Terzaghiの実験結果に対するGelatin模型実験の再現と数値解析による崖の応力場の比較。

2. 侵食前後の土質斜面の崩壊メカニズム

堀川&砂村⁴⁾が、海波の侵食作用における海食崖の崩



壊形態に関する研究を行っている。堀川&砂村によると、侵食の現象は、「ノッチの形成→崩落→土砂運搬→ノッチの再形成」といった循環過程を示すとしている。しかし、侵食発生から崩壊に至るまでの時間的スケールがなく、いつ崩壊するのか不明である。

本研究では、下部侵食が発生した時の崩壊メカニズムを観察するため、自然環境で堆積し、未固結で緩い砂層地盤を対象に調査を実施した。調査した地盤は、飽和された砂質地盤であったため、地盤の粘着力、引張強度などは、含水量に伴うサクシオンが働いていたと考えられる。また、地盤の力学的な定数について、粘着強度68 KPa、引張強度24 KPa、摩擦角が約30°であった。

土質斜面の崩壊の様子を観察するため、侵食前から侵食後の崩壊に至るまでの一連のプロセスを観察・撮影し、崩壊メカニズムの検討を行った。観察結果より、土質斜

面は、水分を多く含有していたため、崩壊要因の一つとして地下水の影響が想定できるが、侵食前における引張亀裂は発生しなかった。しかし、水流によって斜面の下部侵食が発生し始めると、斜面上部に引張亀裂が発生し、その後、土塊が崩壊に至った。また、斜面上部に引張亀裂が発生してから崩壊に至るまで、約1秒間で一連の現象が発生していたことを確認した(図-3(a)-(j)参照)。一様に堆積した地層で、引張強度を超過して発生した引張亀裂は、短時間で進展し崩壊に至っていることがわかる。

3. 光弾性試験によるGelatinを用いた崖モデル内部の応力場の推定

崩壊直後の崖内部における応力場について調べるため、

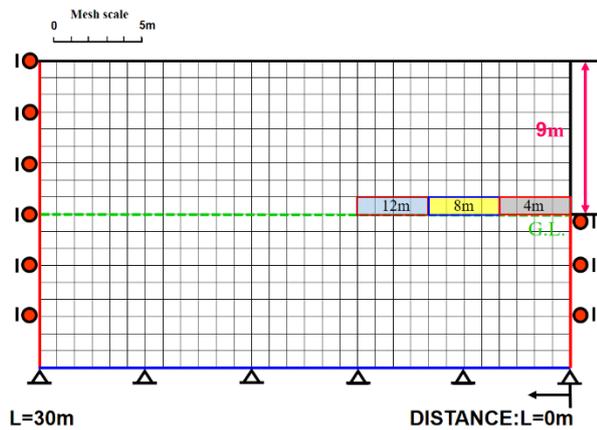


図-5 崖高さ9mにおけるメッシュ図と境界条件
(メッシュ図右下から DISTANCE:L=0-30m)

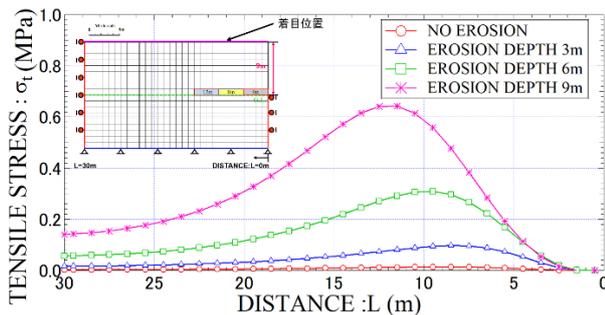


図-6 侵食前後と侵食深さの違いによる引張応力の特性
(崖高さ：9mを例として)

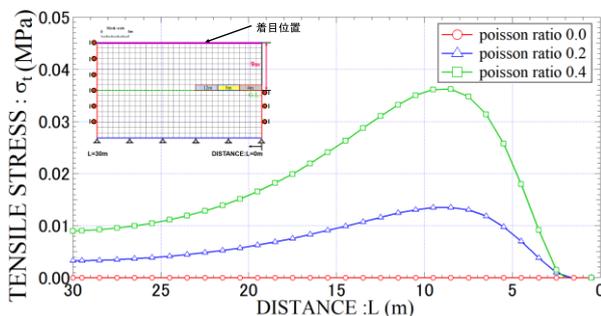


図-7 ポアソン比の違いによる引張応力の特性
(崖高さ：9mを例として)

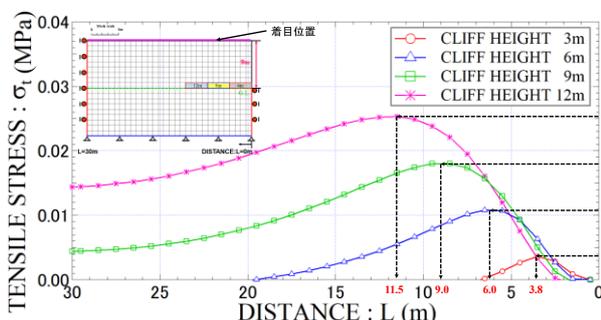


図-8 侵食前の崖高さの違いによる引張応力の特性

表-1 ケース1で用いた物性値

単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
25	10	0.20

ゼラチンを用いた崖の模型を作成し、光弾性試験 (Photoelasticity) を行った。

光弾性試験とは、偏光の性質を利用し、等方等質の透明な模型 (例えばゼラチン模型等) を用いて、任意の形状から応力状態を調べる実験法である⁹⁾。使用した実験材料は、プラスチック製の型枠、粉末のゼラチン、水である。ゼラチンの濃度は、予備実験の結果より、水100%に対して、ゼラチンの濃度が10%になるようにゼラチンの質量を定めた。粉末のゼラチンと水を混合させたものに熱を与え、溶解させたのちに型枠に投入した。また、乾燥度合いの違いによって生じる残留応力をなくすため、型枠の表面をラップで覆い被せて、常温になるまでゆっくり冷ましてから冷蔵庫で約24h冷やした。実際の実験では、型枠から外したのちに、3cmの侵食深さで模型の一部をえぐり、法尻付近から高さ7cmの上端に亀裂を徐々に入れていった。実験の結果、亀裂を上部に入れ、ある一定以上の亀裂深さからゼラチン模型が自らの自重で崩壊していく様子が確認できた (図-4(a)-(d))。また、崩壊の際の亀裂の進展については、途中で止まることなく、完全な崩壊に至るまで続いた。これより、一様な地層において、斜面上端に発生した亀裂は、途中で亀裂が止まることなく、短時間で崩壊に至ることが明らかになった。これは、Aydan & Kawamoto³⁾の岩盤に対する引張亀裂の理論的結論と一致する。

以上より、斜面全体の地層および強度が一樣であれば、土質斜面や岩盤斜面に問わず、亀裂が発生した場合、途中で止まることなく崩壊に至ると思われる。

4. 数値解析による崖の引張応力の検討

本章では、斜面の侵食に伴う崩壊現象について、侵食前後における崖の上部に発生する応力の推定と、侵食前の崖の上部に発生する引張応力を、斜面を構成する材料の弾性挙動に基づいて有限要素法から数値解析を実施した。

(1) 侵食前後における崖の引張応力の比較

本節では、侵食する前と後で崖の上端における引張応力について解析的に検討を行った。侵食前は、崖の高さ3m, 6m, 9m, 12mの4種類に設定し、侵食後は、崖の高さを9m一定として、侵食深さを4m, 8m, 12mの3種類とした。ここで解析モデルと境界条件を図-5、解析モデル (以降ケース1と呼ぶ) の物性値を表-1に示す。なお、図-7の検討は、ポアソン比に着目して崖上部の引張応力の値を検討することが目的であったため、ポアソン比を $\nu=0.0-0.4$ と変更して数値解析を実施した。しかし、図-6と図-8は、崖の高さ、侵食深さ、侵食の有無等の条

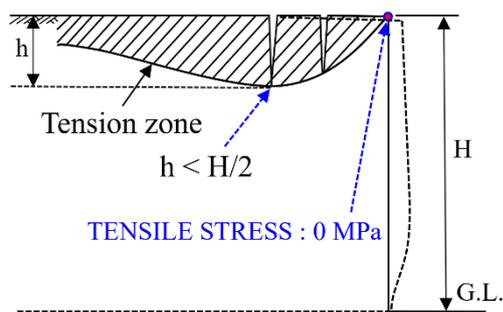


図-9 引張亀裂がある場合の斜面内部の引張領域モデル (Terzaghi²⁹⁾より)

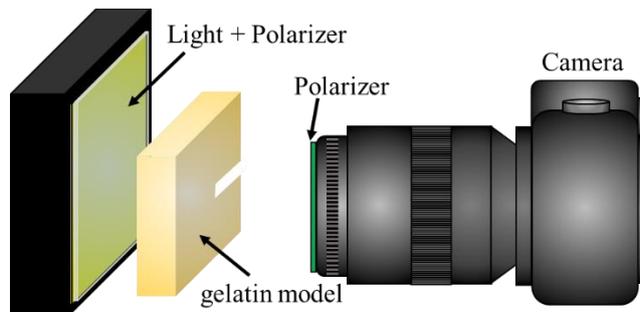


図-10 光弾性試験法に基づく gelatin 再現実験の方法

件に着目し、ポアソン比の値を一定にした状態で、数値解析を実施した。よって、図-6と図-8については、表-1の物性値を用いた。

侵食前後の崖の引張応力の比較結果を図-6に示す。侵食のない場合の結果に着目してみると、崖内部に発生する引張応力は、引張亀裂で崩壊に至るレベルの引張応力よりかなり小さい値を示している。

一方で、侵食深さに関する検討では、侵食深さが深くなるにつれて、引張応力値が増加し、海食崖が崩壊し得る引張強度に達していくことが確認できる(例えば、琉球石灰岩岩盤の引張強度：0.25MPa)。

以上の結果より、侵食前における引張亀裂による岩盤の崖の崩壊はほとんど考えにくい。

(2) 侵食前における斜面内部の引張応力に関する検討

本節では、崖についての崩壊特性を把握することと鉛直な土質斜面との崩壊特性の違いを明確化することを目的に、侵食の有無、ポアソン比の変更、崖の高さの変更等の解析条件を変更して、解析結果から算出される引張応力に着目して、解析的に評価した。Terzaghi⁴⁾による既往の研究結果では、土質斜面の特性として、自重によって発生した引張応力により引張亀裂が発生することを示している。

図-6は、侵食前後の引張応力の違いと、侵食後の侵食深さを変更した時の引張応力の変化について検討した結果をまとめたものである。有限要素解析による解析の結果より、侵食前の引張応力は、岩盤(例えば、琉球石灰岩)の引張強度で比較した場合、崖の崩壊はほとんど発生しないと考えられる。

図-7は、崖の高さを一定とした場合について、ポアソン比($\nu=0.0$: 変形がない剛体, $\nu=0.2$: 岩盤, $\nu=0.4$: 土質やゼラチンなど)の違いによる引張応力の大きさを比較した結果を示す。同図より、ポアソン比が大きいほど、引張応力が大きいことが確認された。しかし、引張応力の値を確認してみると、非常に小さい値での変化であることが確認できる。法尻付近に侵食が確認されない場合でも、引張亀裂が斜面上部に発生する可能性がある

というTerzaghiの意見について、著者らが考える理由として、土質材料の引張強度が、微小な値であることが原因であると考えている。

図-8は、侵食前の崖についてポアソン比および崖の高さを3m-12mに変化させた場合の引張応力の検証についてまとめたものである。図より、崖の高さが高くなるにつれて、引張応力が増加する傾向が確認され、発生した最大引張応力は、斜面高さと同斜面前方からの比が約1:1になることがわかった。しかし、崖の高さが変化しても、岩盤の崖の引張応力値が、従来の岩盤の引張強度を超えるものではないことが明らかになった。

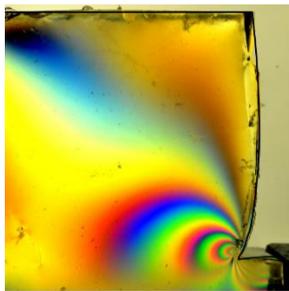
以上から、鉛直な土質斜面で、斜面高さが高い場合、対象とする土質斜面の特性によっては、引張破壊による斜面崩壊が発生する可能性が考えられる。しかし、岩盤斜面は、法尻付近の侵食が発生しない限り、引張破壊による崖崩壊は、問題になり得ないと思われる。

5. Terzaghiの実験結果に対するGelatin模型実験の再現と数値解析による崖の応力場の比較

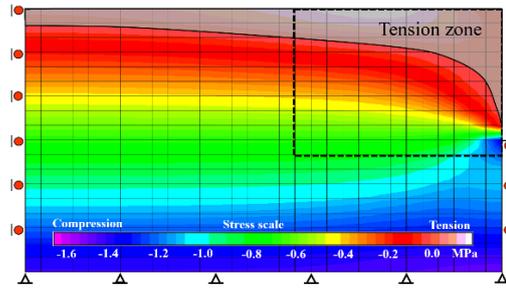
Terzaghiは、Gelatin材料を用いて光弾性試験を行い、斜面・崖上部に発生する引張応力を実験的に検討している。図-9は、Terzaghiの実験結果から得られた引張亀裂が生じた際の引張領域を示したものである。この研究成果をもとに、引張亀裂の存在を考慮した様々な解析手法が提案されている。しかし、当時は、数値解析による解析技術はなく、実験と解析による比較が困難であったと推定できる。また、Terzaghiに関する文献にGelatin材料を用いた模型実験に関する詳細な説明が記載された箇所がなく、引張亀裂やその影響によって発生する引張領域に関する不明点が多い。

本研究では、様々な解析条件下における崖内部の応力分布形状を確認するため、2種類の方法で引張領域を確認した。

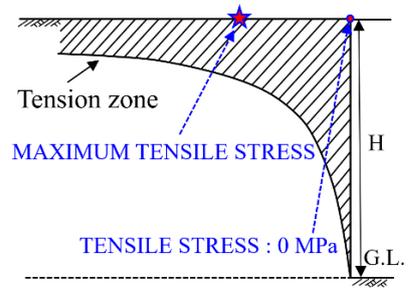
① Terzaghiの模型実験を再現し、従来の実験結果について有限要素解析による数値解析的観点から再検



(a)最大せん断応力分布

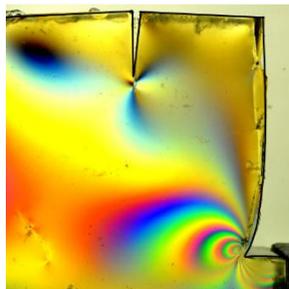


(b)主応力分布における引張領域

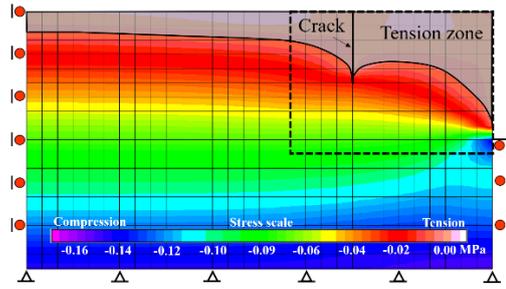


(c)亀裂が存在しない時の引張応力分布

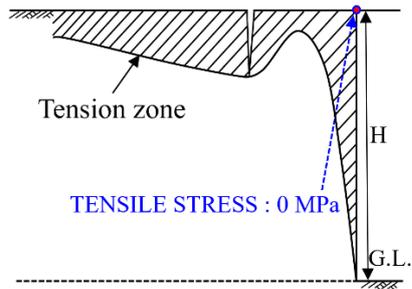
図-11 gelatin実験とその比較：斜面モデル（上端に亀裂なし）



(a)最大せん断応力分布

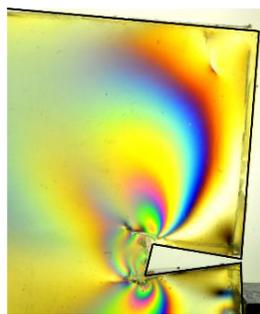


(b)主応力分布における引張領域

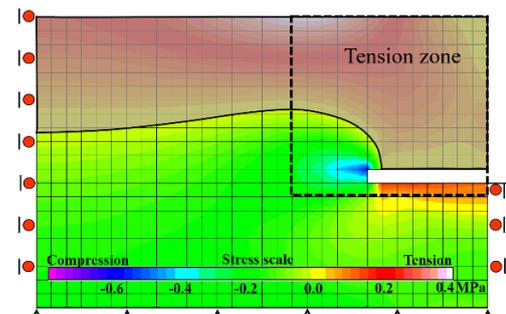


(c)亀裂が存在しない時の引張応力分布

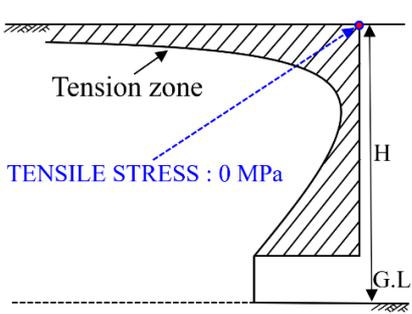
図-12 Terzaghiのgelatin実験の再現とその比較：斜面モデル（上端に亀裂あり）



(a)最大せん断応力分布



(b)主応力分布における引張領域



(c)亀裂が存在しない時の引張応力分布

図-13 gelatin実験とその比較：海食崖モデル

討する（図-10）。

- ② 有限要素解析による最大主応力分布図（ゼラチン模型の縞模様の存在しないエリア）・最大せん断応力分布図（ゼラチン模型の縞模様の存在するエリア）とTerzaghiの実験結果を比較する。

これらの実験条件の下で行った実験と数値解析の結果から、以下に得られた知見を示す。

- 1) 図-11 (a)と(b)より、斜面上端に亀裂が存在しない場合の引張応力の領域は、斜面上端から側面にかけて分布することが確認できた。実験と解析の両方の結果を考慮して推定される引張領域を図-11 (c)に簡易モデルとして提案する（図-11(b)の点線内部は、同図(a)の実験結果の目安位置である）。
- 2) 図-12 (a)と(b)より、崖に亀裂が入った場合における引張応力分布を確認することができた。亀裂の影響で、亀裂の存在している箇所の周辺は、応力分布に変化が認められた。そのため、Terzaghiの実験結果で得られた引張領域とは異なる領域となった

（図-12(b)の点線内部は、同図(a)の実験結果の目安位置である）。

- 3) 図-13 (a)と(b)より、海食崖を想定したモデル実験の場合、法尻付近に応力が集中し、その影響を受けた形で引張応力が生じていることがわかった。これより実験と解析の結果を合わせて、推定される引張領域を図-13 (c)に簡易モデルとして提案する（図-13(b)の点線内部は、同図(a)の実験結果の目安位置である）。

今回の光弾性実験では、ゼラチン粉末と水を混合させて作成した模型内の応力状態を検討した。一方、Richard, Jr and Mark⁹⁾は、ゼラチンと水にグリセリンを加えて模型内部の応力状態を検討した。ゼラチンと水にグリセリンを加えることで、ゼラチン模型の透明性の上昇やゼラチンに対する細菌からの攻撃を阻害する効果があることを知った。今後は、グリセリンを混ぜて作成した特殊なゼラチンを用いて、斜面内部の応力状態の検討と本研究結果との比較を今後の課題とする。

6. 結論

本研究では、崖の崩壊時の亀裂の進展の仕方や崖内部の応力状態を検討するため、現場調査、数値解析、模型実験を実施した。具体的には、現場調査による侵食崖の崩壊メカニズムの推定、岩盤斜面及び土質斜面と引張亀裂・引張応力の関係、Terzaghiの実験結果に対する再検討及びそれとは異なる条件下における斜面内部の応力領域の検討を行った。これらの検討で得られた知見を列挙する。

- 1) 自然に堆積した高さ50cm程度の土質斜面を対象に行った現地調査結果より、侵食前では引張亀裂は発生せず、崩壊には至らなかった。しかし、斜面の下部侵食が発生し始めると、斜面上端に引張亀裂が発生。約1秒後に崩壊に至った(図-3)。
- 2) 一様な地層で構成された斜面の場合、斜面上部に発生した亀裂は、途中で止まることなく短時間で崩壊に至る。また、この現象は、Aydan & Kawamotoの岩盤斜面に対する引張亀裂の発生と進展に対する理論的結論と一致する。以上までの成果は、土質斜面や岩盤斜面問わず、引張亀裂が発生した場合、途中で止まることなく崩壊に至ることを示唆しているものである(図-2-図-4)。
- 3) 侵食前の岩盤斜面における引張応力の値は、斜面高さを変化させても引張亀裂が原因で起こる崩壊に必要な値を大幅に下回ることが分かった。よって、侵食前における引張亀裂による岩盤の崩壊は、ほとんど起こり得ないと考えられる(図-6)。

- 4) 本研究で行ったGelatinを用いた光弾性試験より、Terzaghiの実験結果で得られた引張領域とは異なる領域となった。具体的には、Terzaghiの実験結果では、崖上端のみにしか引張領域が存在しないのに対して、著者らの実験では崖側面にまで引張領域が及んでいた。

参考文献

- 1) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass. 土木学会論文集 C 部門, Vol.66, No.2, pp.397-406,2010.
- 2) Aydan, Ö, 川本 昶万: 不連続性岩盤斜面のトップリング破壊とその安定化について, 日本鉱業会誌, pp.7-14,1986.
- 3) Aydan, Ö. and Kawamoto, T.: The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization. Rock Mechanics and Rock Engineering,25 (3), pp.143-165,1992.
- 4) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, pp.144-181, John Wiley&Sons,Inc,1943.
- 5) 堀川清司, 砂村継夫: 航空写真による海蝕崖の後退に関する研究, 第 14 回海岸工学講演会論文集, pp.315-324,1967.
- 6) Richard, Jr. R. and Mark, R.: Gelatin Models for Photoelastic Analysis of Gravity Structures, second SEGA International Congress on Experimental Mechanics held in Washington, D. C., pp.30-38, 1966.

AN FUNDAMENTAL STUDY ON STRESS FIELD AND TENSILE CRACK PROPAGATION IN CLIFFS

Kouki HORIUCHI, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

Extension cracks in cliffs are often reported. About this problem, Terzaghi carried out photoelasticity experiment using a gelatin model with an emphasis on soil slope about a century ago. In his experiment, he concluded that tensile stresses develop at the top of the slope. For the experiment of Terzaghi, the authors examined the stress state of the cliff using two approaches. The first approach was to evaluate stress field inside a cliff model through photoelasticity experiments. The second approach was to evaluate stress state inside cliff by using finite element method. Both of approach revealed that the tensile region generated in the cliff depends upon the boundary condition, Poisson's ratio and the existence of erosion.