

樹木根系の貫入による岩盤の不安定化に関する基礎研究

Study on stability reduction of rock mass caused by tree roots intrusion

山口大学大学院創成科学研究科 教授 太田岳洋

(研究計画ないし研究手法の概略)

1) 樹木根系による岩盤の不安定化に関する文献調査

樹木根系による岩盤の不安定化に関する文献を収集し、①研究の現状、②樹木根系による岩盤の風化劣化現象、③樹木根系による岩盤の不安定化メカニズム、を整理する。

2) 岩盤への樹木根系貫入の現状調査

- ① 樹木根系の貫入と地質構造との関係：岩盤斜面中のクラックと地質構造、樹木根系が貫入するクラックの選択性を現地調査により明らかにし、根系貫入に寄与する地質構造を検討する。
- ② クラック幅と樹木根径との関係：樹木根系が貫入するクラックの幅と樹木根径を測定し、樹木根系によるクラック成長の影響を検討する。

3) 樹木根及び岩盤の材料定数の取得

樹木根系の貫入及び岩盤の不安定化をモデル化する際に必要となる物性値を取得する。

- ① 樹木根系の圧縮強さ：針貫入試験器により計測する。モデル化では圧縮強さを根圧に読み替える。
- ② 岩盤の原位置強度：シュミットロックハンマーテストにより計測する。
- ③ 岩盤及び不連続面の引張強さ：intact な試料及び不連続を含む試料を対象として、点載荷試験により計測する。点載荷強度から、岩盤及び不連続面のせん断強度、内部摩擦角などを推定する。

4) 岩盤への樹木根貫入の数値実験

- ① 上記の結果に基づき、樹木根系の根圧により剥離が想定される岩塊の力学的な釣り合い式に基づいた安全率の計算を行い、根圧による岩盤の不安定化の可能性を検討する。
- ② 上記で測定した樹木根系及び岩盤の物性を用いて、クラック内から荷重をかけることで、樹木根系の成長による応力増加を模擬し、樹木根系の成長によるクラック伸張・拡大、それに伴う岩盤の不安定化についてパラメトリックに検討し、不安定化の条件を明らかにする。これらの解析的検討には 2D- σ (地層科学研究所社製) を用いる。

(実験調査によって得られた新しい知見)

樹木根による岩盤の風化劣化への影響と岩盤の安定性への樹木根の力学定な影響に関する基礎的な検討として、現地調査により、岩盤の岩質、不連続面分布などの地質的な特徴、不連続面の状態などと樹木根の貫入の特徴の関係を把握し、樹木根による岩盤斜面の不安定化について、理論計算と数値解析により検討した。具体的には、山口県美祢市内 3ヶ所の道路沿線の切土斜面 (図 1) において、斜面の地質、岩盤の物理特性、樹木根の分布を調査した。その調査結果に基づいて、理論計算と数値実験を行った。調査対象 3ヶ所うち 2ヶ所は三疊紀後期美祢層群平原層の塊状砂岩、残り 1ヶ所は美祢層群桃木層礫岩、砂岩、泥岩の互層からなる。

不連続面および樹木根が貫入した不連続面の分布と地質構造

調査対象の3ヶ所において、切土斜面に分布する不連続面を樹木根の貫入の有無にかかわらずすべて抽出し、その走向傾斜を測定した。その結果、すべての調査箇所では不連続面の走向・傾斜は、層理面の方向とそれと共役関係にある2方向の計3方向に集中することがわかった(図1)。

次に、樹木根が貫入した不連続面の身を抽出し、その走向傾斜の傾向を把握した。その結果、互層岩盤からなる切土斜面では、樹木根が貫入した不連続面の走向・傾斜の分布は全不連続面の走向・傾斜の分布と同様であった(図1)。一方、塊状砂岩の岩盤からなる切土斜面では、3方向の不連続面の走向・傾斜の分布のうちの1方向の不連続面へ樹木根が貫入しており、その不連続面は切土斜面に対して受け盤に相当することがわかった(図1)。

地質構造に規制された樹木根の貫入形態

不連続面への樹木根の貫入の形態について、岩盤の風化程度、不連続面の開口幅と樹木根の長径との関係から、以下の4つのタイプに分類した(図2)。

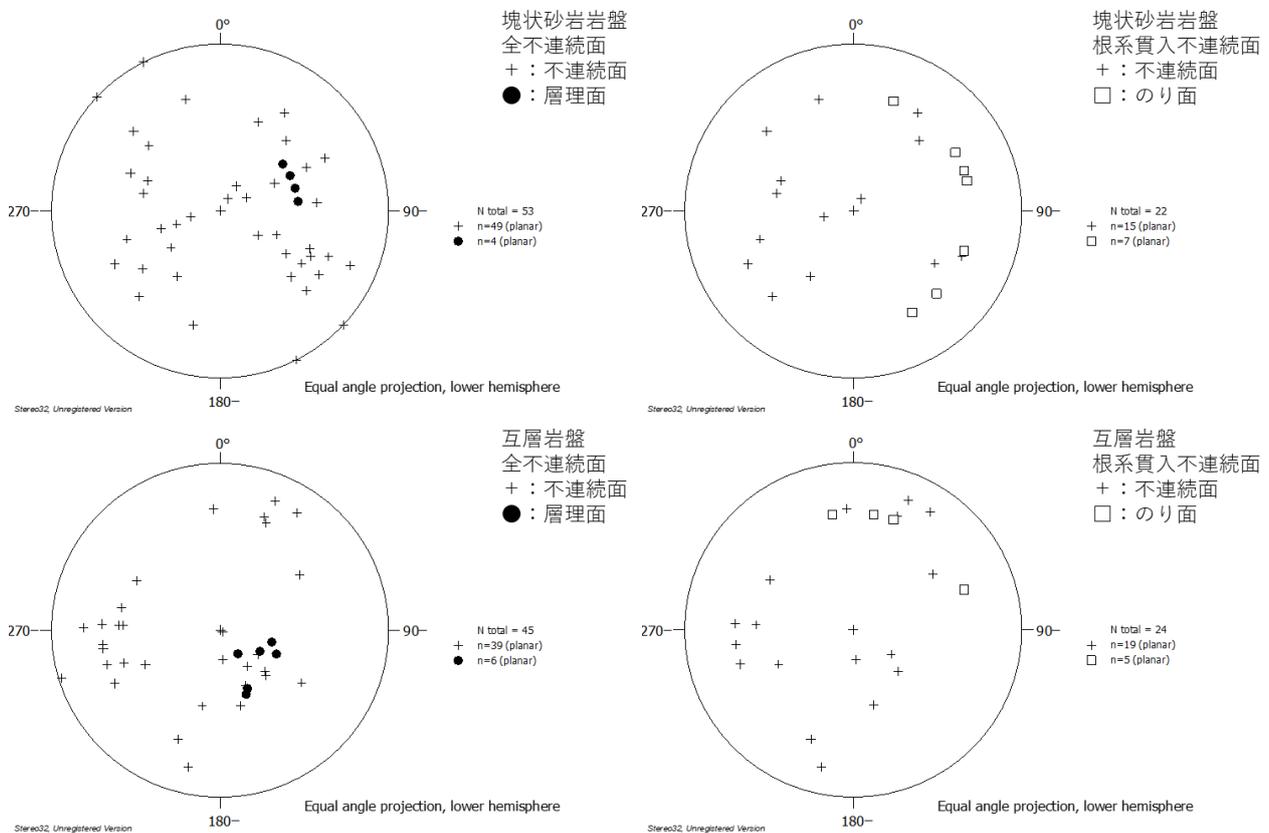


図1 不連続面、層理面、のり面の走向・傾斜

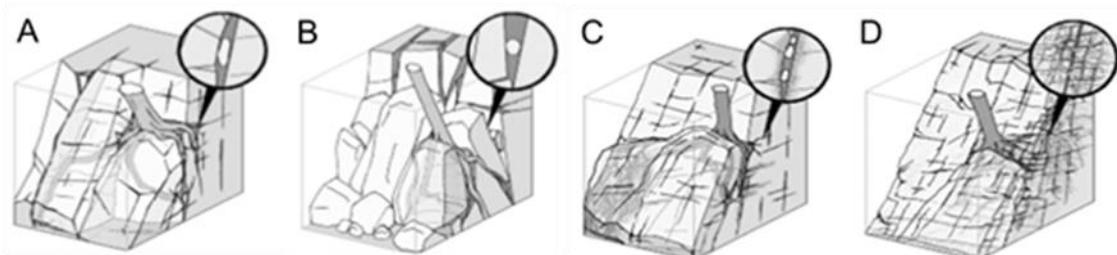


図2 樹木根の岩盤への貫入タイプ区分(五藤他, 2003)

タイプ A：未風化の岩盤中の不連続面に、その開口幅より大きな長径を有する楕円形断面の樹木根が貫入する。

タイプ B：未風化の岩盤中の不連続面に、その開口幅と同等か、それよりも小さな長径を有する円形断面の樹木根が貫入する。

タイプ C：樹木根が貫入する不連続に沿ってのみ風化がみられる。

タイプ D：岩盤が全体的に風化し、広く樹木根の貫入が認められる。

図 3 に塊状砂岩岩盤、互層岩盤それぞれの樹木根の貫入した不連続面における開口幅と樹木根の長径の関係を、貫入形態で記号を分けて示した。互層岩盤では多くの不連続面で開口幅を超える樹木根の長径が確認され、タイプ A の貫入形態が 66% を占めた。一方、塊状砂岩岩盤では、不連続面に貫入する樹木根の長径が不連続面の開口幅と同程度かそれよりも小さいタイプ B の貫入形態が多くみられ、約 50% を占めた。

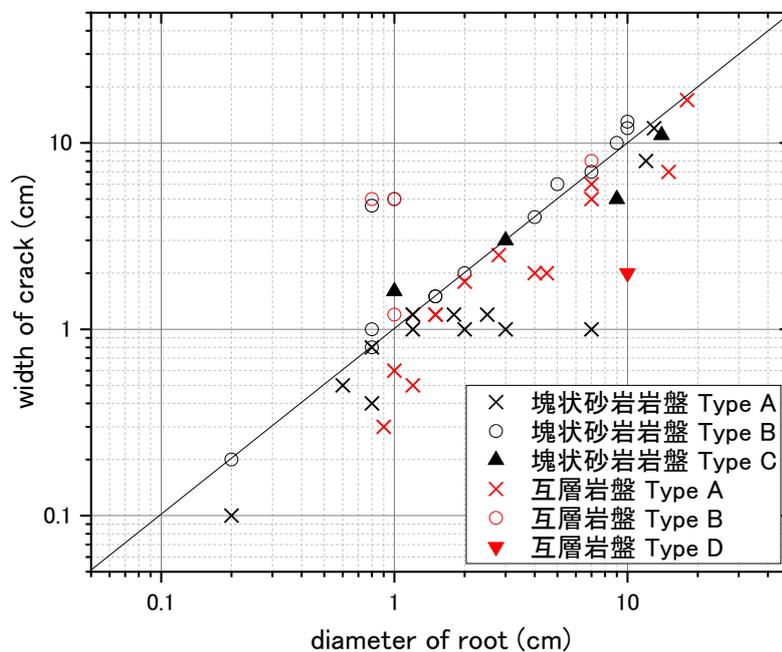


図 3 不連続面の開口幅と不連続面に貫入した樹木根の長径の関係

安全率の計算

樹木根の貫入により斜面側の岩塊が岩盤から剥離し、すべり面に沿って剥落するモデル（五藤，2003）を考える。この時、岩塊の安全率 F_r は式 1 により求められる。また、式 1 に用いる根圧 P_r を式 2 により求めた。

$$F_r = \frac{cA + (W \cdot \cos\beta - P_r \cdot \sin\beta) \cdot \tan\phi}{W \cdot \sin\beta + P_r \cdot \cos\beta} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

$$P_r = k \cdot \sigma_r \cdot b \cdot d \dots\dots\dots \text{式 2}$$

ここで、 F_r は安全率、 P_r は根圧、 c はすべり面の粘着力、 A はすべり面の面積、 W は岩塊の重量、 β はすべり面傾斜、 ϕ は岩盤の内部摩擦角、 σ_r は樹木根の一軸圧縮強さ、 b は樹木根の平均長径、 d は樹木根の侵入長、 k は応力低減係数、である。

安全率 F_r は、1 を下回るとそのモデルの岩塊は理論上剥落し、1 を超えれば剥落には至らない。岩塊の重量 W は砂岩の比重を約 2 と仮定し、岩塊の体積にこの比重を乗じて求めた。樹木根の一軸圧縮強さ σ_r は、樹木根に針貫入試験から求めた貫入強度を一軸圧縮強さ

に変換して求めた。また、砂岩の不連続面の内部摩擦角を 30° と仮定した(土木学会, 2014)。応力低減係数 k は、樹木根が岩盤に対して与える根圧が樹木根の圧縮強さを超えることはないと考え、 $0 \sim 1$ の値をとる。したがって、 k は岩盤を破壊させる時の根圧を求めるためのパラメータとなる。安全率が 1 となる時の k の値を求めることは樹木根が岩盤を破壊する際の根圧を求めることと同等であるため、安全率計算により樹木根による岩盤破壊が現実的に生じ得るかを検証することができる。

樹木根の貫入により剥落しそうになっている箇所および剥落したと推定される箇所の合計 11ヶ所について、安全率を計算した。樹木根が岩盤を破壊した際の根圧を求めるため、安全率 F_r が 1 となる時の根圧 P_r と応力低減係数 k を計算した結果を表 1 に示す。今回はすべり面の粘着力を 1kPa、7 kPa と仮定して計算した。

表 1 安全率 F_r が 1 となる時の根圧 P_r と応力低減係数 k の計算結果

No.	ルート	樹種	剥落の有無	樹木根の貫入 形態タイプ	$c=7\text{kPa}$		$c=1\text{kPa}$	
					根圧 P_r (N)	応力低減係数 k	根圧 P_r (N)	応力低減係数 k
1	1	つる植物	有	A	278.8	2.23	39.7	0.32
2	1	つる植物	有	B	1814.0	1.68	1139.9	1.06
3	1	広葉樹	無	A	1500.5	1.02	792.0	0.23
4	1	ヒノキ	無	B	10145.3	2.90	4504.6	1.30
5	1	不明	無	B	177.6	0.08	129.3	0.06
6	1	広葉樹	有	不明	1764.2	2.76	250.8	0.39
7	1	ヒノキ	有	不明	2609.4	18.12	922.8	6.40
8	1	ヒノキ	無	B	1235.3	1.14	625.8	0.58
9	1	サンゴジュ	有	C	880.2	5.24	-55.9	-0.3
10	2	不明	無	A	4198.6	2.14	597.1	0.30
11	3	不明	有	B	2716.1	1.76	1747.0	1.05

すべり面の粘着力が 7kPa の場合、応力低減係数 k はほとんどの箇所が 1 以上の値を示すため、理論上根圧のみでは破壊が生じることは不可能である。しかし、すべり面の粘着力が 1kPa の場合、No. 7 を除いて全ての箇所が 1 以下の値もしくは 1 に近い値を示す。つまりすべり面がこの強度であれば理論上根圧のみにより破壊が生じる可能性がある。これらの結果より、すべり面の粘着力が十分に低下している場合には、根圧による岩盤破壊が十分に生じ得ると考えることができることがわかった。また、表 1 中に示した安全率を検討した 11ヶ所のうち貫入形態がタイプ A を呈する 3ヶ所は、応力低減係数 k が全てで約 0.3 と低い値を示し、根圧による岩盤破壊(すべり面の破壊)の可能性が高いといえる。

有限要素解析による数値実験

表 1 の No. 3 の岩塊に対して、不連続面からの岩塊の剥離への不連続面の開口や根圧の作用について、有限要素解析による検証を行った。解析に用いたコードは 2D- σ (地層科学研究所社製)である。解析に必要な岩盤及び不連続面の物性値は、以下のように求めた。岩盤のヤング率、ポアソン比、単位体積重量は、同様の地質時代で同様の一軸圧縮強さを示す事例(Lama and Vutukuri, 1978)から推定した。一軸圧縮強さと圧裂引張強さは、intact な岩塊試料の点載荷試験の結果から、Heidari et al. (2012)の換算式から求めた。せん断強さ(粘着力)と内部摩擦角は、一軸圧縮強さと圧裂引張強さからモール円を求めそれらの共通接線の切片と角度として求めた。また、不連続面の物性値は、不連続面を含む試料

に対する点載荷試験の結果から、岩塊の場合と同様に一軸圧縮強さ、圧裂引張強さを求め、それらからせん断強さと内部摩擦角を求めた。No. 3における根圧は、根に対する針貫入試験の実測値より求めた一軸圧縮強さとした。これを開口した不連続面の法線方向に荷重として作用させた。解析に用いた物性値の一覧を表 2 に示す。解析モデルは、高さ 3m、奥行 5m の岩盤を対象とし、のり面と地表面を無拘束、モデル底面と岩盤深部側の境界を上下左右方向ともに拘束した。No. 3 の現状に合わせ、のり面から奥行方向 0.36m の位置に不連続面が鉛直方向に分布するとモデル化し、樹木根が地表から深さ 0.75m 貫入し、その時の不連続面の開口幅を 0.07m とした。解析ケースは表 3 に示す 5 ケースとした。

解析の結果、ケース 1, 2 では岩盤全体に顕著なひずみや変形が発生しないことがわかった。このことは、不連続面の分布やその一部の開口では、変形が生じないことを示唆している。一方、ケース 3~5 では、いずれも開口部または不連続面分布域の最下部に大きな引張ひずみを伴った大きな変形が生じた (図 4)。このことは、根圧の作用により、のり面側の岩塊が剥離することを示している。

表 2 解析の入力物性値

岩盤		不連続面	
ヤング率(MN/m ²)	3,500	せん断強さ(MN/m ²)	17
ポアソン比	0	内部摩擦角(°)	42
単位体積重量(kN/m ³)	26	残留内部摩擦角(°)	42
せん断強さ(MN/m ²)	43	引張強さ(MN/m ²)	15
内部摩擦角(°)	39	根系	
引張強さ(MN/m ²)	41	一軸圧縮強さ(kN/m ²)	28

表 3 解析ケース

ケースNo.	不連続面分布 深度(m)	開口部分分布 深度(m)	根圧(kN/m ²)
1	3.00	0.00	0.00
2	3.00	0.75	0.00
3	0.75	0.75	0.28
4	1.50	0.75	0.28
5	3.00	0.75	0.28

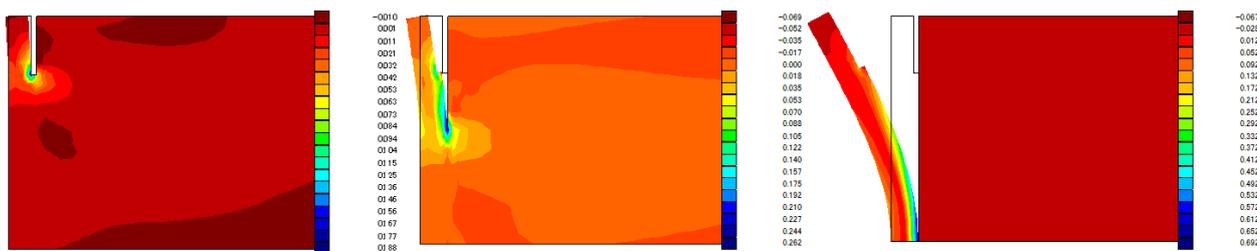


表 4 代々ひずみ分布と変形 (左: ケース 3、中: ケース 4、右: ケース 5)
暖色が圧縮ひずみ、寒色が引張ひずみを表す

(発 表 論 文)

Takehiro Ohta and Takeru Saito: Intrusion behaviour of tree roots to rock mass caused by geologic structure, The 3rd International Conference on Civil, Materials, and Environmental Engineering (ICCME 2021), 4th-5th April 2021 Kuala Lumpur, Malaysia, 2021

太田岳洋・齋藤駿: 地質構造に規制された岩盤への根系の貫入挙動、国際火山噴火史情報研究集会 講演要旨集 2020-2, 4-01, 2021