

インドネシア国ブンカリス島北部海岸における 泥炭地盤安全率

香川 拓輝¹⁾・山中 直輝²⁾・山本 浩一¹⁾

¹⁾山口大学大学院創成科学研究科

²⁾山口大学工学部社会建設工学科

1. はじめに

泥炭地崩壊は、イングランド北部やアイルランドの北方泥炭地で16世紀以降に多く報告されてきた泥炭地での地すべり現象である¹⁾²⁾。熱帯泥炭地ではあまり報告例⁴⁾がなかったものの、熱帯泥炭地のインドネシアブンカリス島北部海岸で頻発している。ブンカリス島での泥炭地崩壊の被災状況は深刻化しており、地元メディアは、2021年12月30日にはSesai Panjang海岸での被災を取り上げた⁵⁾。

インドネシア国ブンカリス島北部海岸は泥炭地崩壊を伴い海岸侵食が進行している。そして、泥炭地崩壊は海岸線に沿って連続的に発生している。そのため、ブンカリス島北部海岸の崩壊後の地形は傾斜の緩やかな地形になっている。緩やかな地形になっているのにも関わらず、泥炭地崩壊発生箇所では再び泥炭地崩壊が発生している。この泥炭地崩壊発生後の地形で再び泥炭地崩壊が発生することは、潜在的な要因があるのか、もしくは伴って進展している海岸侵食によって形成される崖地形の影響なのか明らかではない。

インドネシア国ブンカリス島北部海岸の泥炭地崩壊の深刻化に伴って、対策と同時にハザードマップの作成が急務である。ブンカリス島北部海岸を対象として、泥炭地崩壊を伴った海岸侵食を考慮した現地の海岸地形の進展に適応したハザードマップの作成に向けて、ブンカリス島北部海岸における現地地形の泥炭地盤安全率への影響を検討することを研究目的とした。

2. 研究方法

2.1. 使用データ

モデル地形別の泥炭地盤断面の地盤高は、インドネシア国家数値標高モデル (DEMNAS) を使用した。DEMNAS のデータはインドネシア国の地理空間情報庁 (Badan Informasi Geospasial) のサイトからダウンロードできる。DEMNAS の空間分解能は 0.27 秒角で、ジオイドモデルの鉛直データをもとに補正されている。DEMNAS は、IFSAR (分解能 5m)、TERRASAR-X (分解能 5m)、ALOS PALSAR (分解能 11.25m) の標高データを統合したものである。プランテーション内部の裸地の DEMNAS と RTK-GNSS (2013 年 8 月 24 日) の同一地点の地盤高の比較を図 1 に示す。

2.2. 海岸の断面地形の抽出方法

地下水位再現計算を行うために、DEMNAS をもとに泥炭地盤断面を抽出した。抽出手順としては、まずブンカリス島北部海岸の海岸線を GIS 上で 100 m 間隔 (± 5 m 誤差) で座標を抽出した。この座標をもとに多項式近似曲線により近似を行った。多項式近似曲線に対して法線を算出することで抽出する泥炭地盤断面の測線 (図 2(c)) とした。測線は、陸域 1 km、海域 1 km の断面が抽出できるようになるように計算した。作成した測線を使用して、GIS 上で DEMNAS の地盤高を抽出した。

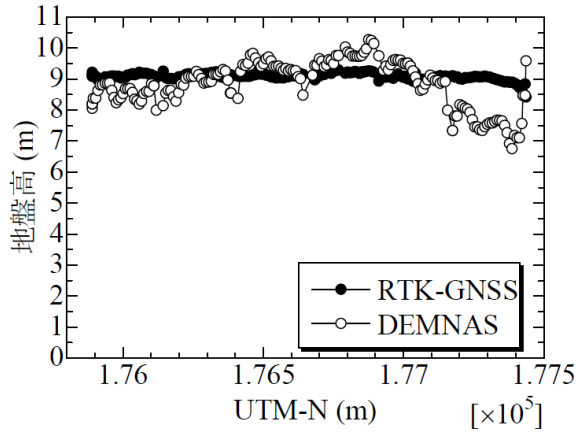


図1 DEMNAS と RTK-GNSS の地盤高の比較

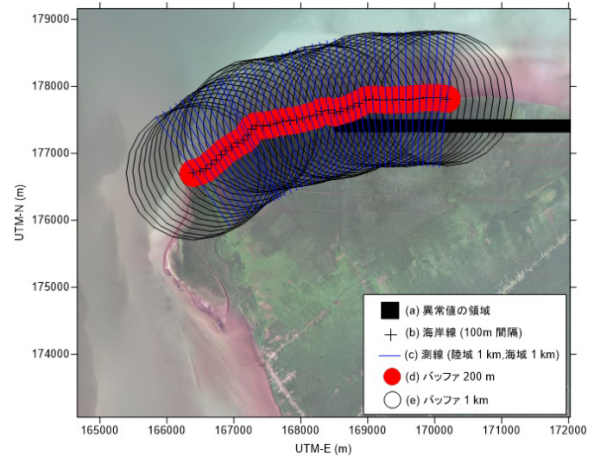


図2 地盤高に含まれる植生の樹高除去手順

2.3. 地盤高の植生除去方法

DEMNAS は一部数値表層モデルとなっているため樹高が含まれている可能性がある。そこで DEMNAS の地盤高データから植生を含まない高さを表すデータに変換する処理を行った。図2に、DEMNAS から植生を除去する方法を示した。1) Landsat5 画像 (2010年2月2日) を用いて、機械学習で裸地とそれ以外の土地被覆に分類した。2) 裸地ラスタを1とし、DEMNAS の地盤高の乗算することで裸地の標高データを作成した。このとき、泥炭湿地林と道路の境界の標高異常値はマスク処理した (図2(a))。3) 海岸線を100m間隔で分割した点 (図2(b)) において岸沖方向に測線を作成した (図2(c))。4) 海岸線から半径200m (図2(d)) から半径1km (図2(e)) に存在する裸地の標高の中央値を海岸線に付与し、線形補完した。

2.4. 鉛直二次元の断面地形を用いた地下水再現計算

地下水流動計算ソフト (HYDRUS3D) を用いて、地下水位再現計算を行った。地下水位の再現を行う鉛直二次元の断面地形は、2.2. で抽出した代表地形断面を10m間隔の節点ができるように加工して使用した。代表地形に水路 (幅2.5m) を法肩から100mに設置した。また、水路なしの地形についても地下水再現計算を行った。地形に使用した地形断面の一例を図3に示す。解析に用いたパラメータ、初期条件・境界条件は表1に示す。サクシオン-体積含水率の関係は、van Genuchten 式を用い、現地の泥炭を用いて n , α を求めた。van Genuchten 式を式(1)に示す。ここで、 S_e は規準化した体積含水率 (有効飽和度)、 h はサクシオン、 α , m , n はフィッティングパラメータである。透水係数は、2015年8月に現地で行った透水試験の結果 $0.5184 \text{ (cm day}^{-1}\text{)}$ を用いて行った。水路には、圧力水頭0mを与えた。地下水再現計算に用いた基礎方程式を式(2)に示す。ここで、 T は、帯水層の透水量係数 $[\text{L T}^{-1}]$ 、 h は、水頭 $[\text{L}]$ 、 S_s は、比貯留係数 $[\text{L}^{-1}]$ 、 Q は、単位体積当たりの部分的な注水あるいは吸い込み $[\text{T}^{-1}]$ 、 x , z は、空間座標 $[\text{L}]$ 、 t は、時間 $[\text{T}]$ である。この式をガラーキン有限要素法によって解いた。

$$S_e = \left(1 + |\alpha h|^n\right)^{-m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q - S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

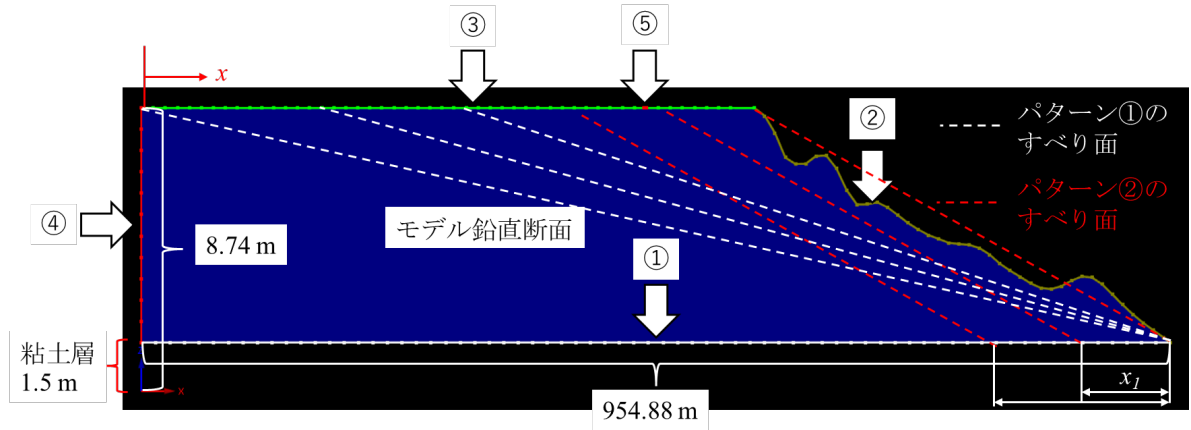


図3 モデル地形（崩壊後地形・水路あり）

表1 解析に用いたパラメータ，初期条件，境界条件

	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	l (-)
地盤高1.5 mより表層	0.555	0.819	0.00458	4.7	0.5184	0.5
初期条件	Bottom Pressure Head 700 cm;Equil					
	境界条件					
○①底面	No Flux (不透水)					
●②地表面沿岸部	Seepage Face (湿潤面)					
●③地表面内陸部	Atmospheric Boundary (大気圏境界)					
●④内陸背面	Constant Head;700 cm;Equil (定水位)					
●⑤水路	Constant Head;0 cm;Equil (定水位)					

表2 地盤安全率の計算に用いたパラメータ

	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN m ⁻³)	γ_w (kN m ⁻³)	z (m)	β (°)
パターン①	1.4	27.2	9.4	9.8	変動	変動
パターン②	1.4	27.2	9.4	9.8	変動	1.12

2.5. ブンカリス島北部海岸の泥炭地盤安全率の算出方法

地下水位再現計算を行った後に、地盤安全率の計算を行った。粘着力と内部摩擦角については、2015年8月の現地における土質試験で得られた結果を用いた。また、すべり面の設定は2パターン仮定した（図3）。1パターン目は、すべり面の角度 β （°）は、すべり面が陸域の始まる泥炭層0 mから内陸部より $x=0$ m, 100 m, 200 m, 400 m, 700 m 箇所の表層まで貫いているような段階的に β を変化させて算出した。2パターン目は、 β が一定で沿岸部からすべり面と粘土層の交点までの距離 x_l (m)を100 m, 200 m, 300 mと段階的に変化させることによって、深度のみ変化させて算出した。このとき、 β は泥炭層の法肩と法尻の地盤高と距離によって算出した。地盤安全率計算に用いた式を式(3)に示す。ここで、 c' は粘着力（kPa）、 ϕ' は内部摩擦角（°）、 γ は湿潤単位体積重量（kN m⁻³）、 γ_w は水単位体積重量（kN m⁻³）、 h はすべり面からの水位（割合）、 z はすべり面（m）、 β はすべり面角度（°）である。安全率 F_s の計算に用いた各値について表2に示す。地盤安全率は、沿岸部からの累積泥炭土塊の安全率とした。

$$F_s = \sum \frac{c' + (\gamma - h\gamma_w)z \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

表3 すべり面と地表面交点位置での安全率の計算結果

パターン	水路の有無	β (°)	x (m)	x_l (m)	F_S (-)
①	無	0.44	0	0	44.66
①	無	0.47	50	0	43.16
①	無	0.49	100	0	41.68
①	無	0.56	200	0	39.12
①	無	0.77	400	0	39.21
①	無	0.93	700	0	35.80
①	有	0.44	0	0	42.18
①	有	0.47	50	0	40.63
①	有	0.49	100	0	39.03
①	有	0.56	200	0	36.11
①	有	0.77	400	0	32.59
①	有	0.93	700	0	31.11
②	無	1.12	640	300	16.34
②	無	1.12	740	200	16.42
②	無	1.12	840	100	20.99
②	有	1.12	640	300	14.79
②	有	1.12	740	200	14.36
②	有	1.12	840	100	18.90

3. 研究結果と考察

崩壊地形における想定されるすべり面パターンの泥炭地盤安全率を算出した。すべり面と地表面交点位置での安全率を表3に示す。 F_S (-)は、沿岸部からすべり面と地表面の交点位置までの累積安全率である。崩壊後の地形は、設定したパターンに関わらず安定しており、外的要因がない限り、潜在的に再び泥炭地崩壊が発生する可能性は低いことが明らかになった。

4. 結論

インドネシア国ブンカリス島北部海岸において海岸線に沿って連続的に泥炭地崩壊が発生している。また、過去に泥炭地崩壊が発生していた箇所でも再び泥炭地崩壊が発生している。本研究では、泥炭地崩壊後の地形の潜在的要因について検討したが、外的要因がない限り再び泥炭地崩壊が発生されることは考えられにくい。ブンカリス島では、泥炭地崩壊に伴って海岸侵食が進行しており、緩傾斜地形から急峻な崖地形へ遷移している。泥炭地崩壊が再び発生する要因は、崖地形への遷移による影響なのか今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) Bowes, D.R., 1960. A bog-burst in the Isle of Lewis. *Scott. Geogr. J.* 76, 21-23.
- 2) Kirk, K.J., 2001. Instability of Blanket Bog Slopes on Cuilcagh Mountain, N.W. Ireland (Unpublished Ph.D. the-sis). University of Huddersfield, U.K.
- 3) Dykes, A.P., Jennings, P., 2011. Peat slope failures and other mass movements in western Ireland, August 2008. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 44 (1), 5-16.
- 4) A G. E. Wilford: Peat landslide in Sarawak, Malaysia, and its significance in relation to washouts in coal seams, *Journal of sedimentary Research*, 36(1): 244-247, 1966.
- 5) <https://rakyat45.com/2021/12/30/abrasi-menjadi-momok-menakutkan-di-pulau-bengkalis/>