

海底地すべりの起因となる水膜現象と堆積層境界の引張強度に関する検討

Examination of water film phenomenon causing submarine landslides and tensile strength at sediment interface

○川北章悟¹, 朝比奈大輔², 竹村貴人³, 北嶋圭二⁴

*Shogo Kawakita¹, Daisuke Asahina², Takato Takemura³, Keiji Kitajima⁴

Abstract: In this study, we focused on water film formation as one of the possible causes of submarine landslides and conducted experiments of water film formation considering the tensile strength at the interface between sedimentary layers. We investigated the effect of the solidification of the sedimentary layers on the water film formation and the conditions under which the water film phenomenon occurs at the interface of the sedimentary layers.

1. はじめに

近年、海底地すべりの発生が様々な海域で報告されている^[1]。海底地すべりが発生すると、津波を引き起こす可能性があり、大規模災害の要因になり得る。海底堆積物が不安定になるメカニズムとして、堆積層の境界における過剰間隙水圧の存在があげられる。Kokusho(2000)^[2]は海底地すべりの1つの発生要因として、液状化による水膜現象を提唱した。水膜現象とは地盤内に存在する低透水層の下部に過剰間隙水圧領域(水膜)が形成される現象である。実際の海底地盤は続成作用により地盤が半固結している可能性があるため、海底地盤の固結の影響を考慮することが重要である。

そこで本研究では、堆積物の固結により発生する堆積層境界の引張強度が水膜形成に及ぼす影響を把握することを目的として、堆積層境界の引張強度を変化させた人工試料を用いた水膜形成実験を行い、海底地盤の固結を考慮した水膜形成の条件を考察する。

2. 堆積層境界の引張試験

2.1 実験概要と試料概要

本実験では堆積層境界の引張強度と水膜形成の関係

を明らかにするため、ベントナイトと豊浦標準砂を使用した2層から成る試料を用いて浸透流実験を行った。

Fig.1 に実験装置概要を示す。装置は、水圧制御部、水圧及び変位計測部、アクリルセルに詰められた試料から構成されている。水圧は空気圧によって制御され、試料の底部から段階的に増加させた。Table 1 に人工試料の配合条件を、Fig.2 にアクリルセル内の2層の試料を示す。堆積層境界の引張強度を変化させるために、ベントナイトと豊浦砂にそれぞれポルトランドセメントを既定の量だけ配合した。セメント配合量は砂とセメント混合物の量に対するセメント量率(以下、CC率)を0, 10, 20, 30, 40%とした。セメントを配合したベントナイトと豊浦砂に水を混ぜた後、各材料をアクリルセルに入れ、3日間養生した。また、ベントナイト層と豊浦砂層の厚さはそれぞれ45mm, 40mmとした。

2.2 実験結果

Fig.3 に実験結果の代表例としてCC率10%の水膜形成後の写真を、Fig.4, 5にCC率10, 40%における計測結果をそれぞれ示す。CC率10%(Fig.4)では、豊浦砂層の透水性が高いため、底部の水圧(水圧計1)を増加

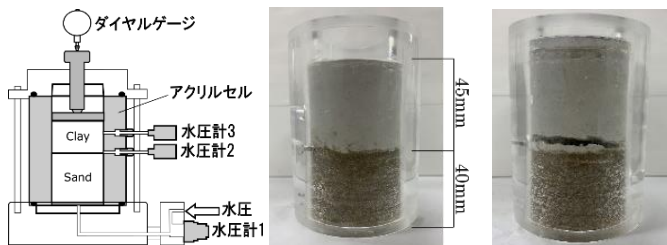


Fig.1 Experimental configuration

Fig.2 A specimen (CC ratio 10%)

Fig.3 After the experiment (CC ratio 10%)

Table 1 Mixture proportions of Toyoura sand and bentonite layers

CC率 (%)	豊浦砂層			ベントナイト層		
	砂量(g)	セメント量(g)	水量(g)	ベントナイト量(g)	セメント量(g)	水量(g)
0	60.0	0.0	0.0	20.0	0.0	60.0
10	60.0	6.7	13.3	18.0	2.0	60.0
20	60.0	15.0	15.0	16.0	4.0	60.0
30	60.0	25.8	17.2	14.0	6.0	60.0
40	60.0	40.0	20.0	12.0	8.0	60.0

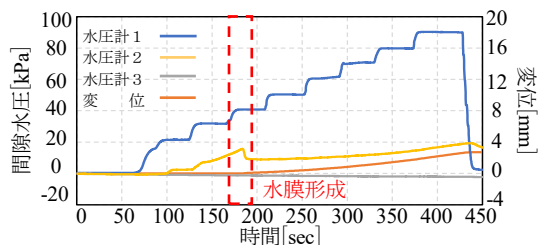


Fig.4 Experimental result (CC ratio 10%)

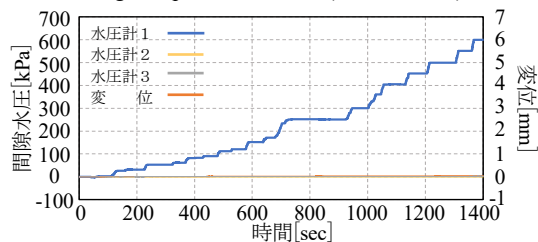


Fig.5 Experimental result (CC ratio 40%)

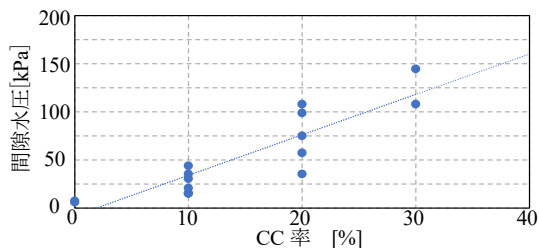


Fig.6 Fluid pressure and tensile strength versus CC ratio

させるとすぐに層の境界の間隙水圧(水圧計 2)が上昇した。さらに、水圧を増加させると層の境界に水膜が発生し、低透水のベントナイト層が上昇していく様子が観察できた(Fig.3)。水膜形成後、層境界の間隙水圧は一時的に減少した。これは、堆積層境界の剥離に伴って空間ができ、水膜の体積が大きくなることに起因している。一方、ベントナイト層の水圧(水圧計 3)は変化しなかった。水膜の形成過程は CC 率によらず概ね同じ傾向を示した。しかし、CC 率が上昇すると、堆積層境界の引張強度が増加するとともに豊浦砂層の透水係数が下がり、水膜が形成するまでに多くの時間を要した。CC 率 40%では、堆積層境界の間隙水圧(水圧計 2)が上昇しづらくなり水膜が形成されなかった(Fig.5)。

Fig.6 に水膜形成時の間隙水圧と CC 率の関係を示す。水膜形成時の間隙水圧と CC 率の関係は多少のばらつきはあるものの正の相関を示した。本結果は、CC 率の増加に伴い堆積層境界の引張強度が上昇し、水膜を形成するためにより大きな間隙水圧を必要としたことを示している。

3. 水膜形成の条件

前章の実験結果を踏まえ、堆積層境界に水膜が形成される条件について整理する。

最初に、堆積層境界に静水圧 P_p と過剰間隙水圧 P_{ex} を生じさせるための水理条件について考える。ここでは、液状化やメタンハイドレートの融解等により下方から水圧が上昇する場合を想定する。堆積層境界に差圧を生じさせる条件として、上層の透水係数 k_{up} と下層の透水係数 k_{low} の関係は以下ようになる。

$$k_{up} < k_{low} \quad \dots (1)$$

次に、過剰間隙水圧が堆積層に空間を形成(またはき裂が進展)するための力学的な条件について、単純なケースとして水平方向と鉛直方向を考える。水膜を形成するためには、Fig.7 に示すような堆積層境界に水平方向に広がる空間が必要である。そのため、堆積物中に作用する水圧は層境界の引張強度 T_{int} と土被り圧である鉛直応力 σ_v の和を上回る必要がある。

$$P_p + P_{ex} > \sigma_v + T_{int} \quad \dots (2)$$

一方、鉛直方向に空間を形成するには以下の式を満足

する必要がある。

$$P_p + P_{ex} > \sigma_h + T_{hup} \quad \dots (3)$$

ここで、 σ_h は水平応力、 T_{hup} は上位層の水平方向引張強度である。間隙水圧の上昇により、鉛直方向に空間が作られると、堆積層境界の水膜は消散してしまう(Fig.8)。従って、水膜ができる条件は、これら二つの力学条件から以下のように示すことができる。

$$\sigma_v + T_{int} < P_p + P_{ex} < \sigma_h + T_{hup} \quad \dots (4)$$

ここで、グリフィス理論^[3]に基づく層境界面の引張強さを考えると層境界面が引張破壊を起こすために必要な基準は以下ようになる。

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) < 4T_{int} \quad \dots (5)$$

ここで、 σ'_1 と σ'_3 はそれぞれ最大有効応力度と最小有効応力度である。静止土圧係数 $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ (水平応力と垂直応力の比)は堆積物では一般的に 0.25~0.67 である。そのため、一般に堆積層に作用する応力は造構運動による水平応力 σ_h よりも土被り圧による鉛直応力 σ_v が大きく、(4)式より水膜は比較的発生しづらい傾向にあることがわかる。しかし、水平応力 σ_h が最大主応力となる可能性のある斜面の端部などの領域では、半固結した堆積物中でも水膜形成による海底地すべりが発生する可能性がある。また、堆積物が半固結している深度においても水膜の形成が可能であることから水膜現象は大規模な海底地すべりをもたらす可能性がある。本考察は、限られた条件下における室内実験に基づいているため、今後はより実際の海底下に近い状態で実験を行い、水膜が形成する条件について検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、海底地盤の固結を考慮した水膜形成実験を行い、水膜形成の条件を整理した。また、限られた条件下ではあるものの、半固結した堆積物中においても水膜現象が発生する可能性を示した。

引用文献

- [1] 川村喜一郎：海底地すべりと災害-これまでの研究成果と現状の問題点，地学雑誌，第 123 巻，第 12 号，999-1014，2017
- [2] Kokusho, T.: Mechanism For Water Film Generation And Lateral Flow In Liquefied Sand Layer, Soils And Foundations, Vol.40, No.5, 99-111, 2000
- [3] Sibson RH: Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes, Journal of Structural Geology, Vol.20, No.5, 655-660, 1998

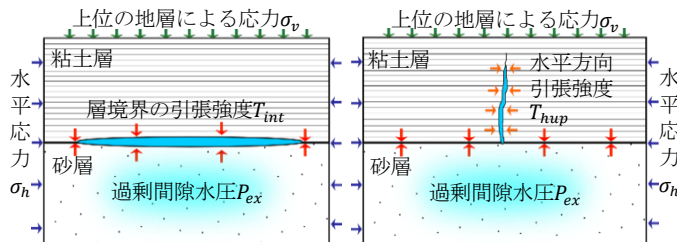


Fig.7 Schematic cross-section of a horizontal crack

Fig.8 Schematic cross-section of a vertical crack