

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：50102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820194

研究課題名(和文) 表層地盤凍結状態における地震時の斜面崩壊メカニズムの解明とその危険度評価

研究課題名(英文) Study on mechanism of failure of slope with frozen surface layer due to earthquake and its estimation

研究代表者

所 哲也(Tetsuya, Tokoro)

苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：40610457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、寒冷地において表層が凍結している時期に生じる地震による地盤災害を対象として、凍土・未凍土の2層が存在する地盤の地震時挙動を明らかにするために、表層を凍結させた模型地盤に対して振動台実験を実施した。さらに、凍土・未凍土境界面での力学特性を明らかにするために温度制御した一面せん断試験を実施した。これらの試験結果より、表層に凍土が存在することで非排水状態となり、さらに、凍土・未凍土境界面での強度は、未凍土のみの場合よりも高くなることで、表層が凍結している状態では液化が生じにくくなることを示した。

研究成果の概要(英文)：This research intends to clarify the mechanism of the geotechnical disaster induced by earthquakes in the situation that surface is frozen in cold regions. we conducted a series of shaking table tests for the model that has frozen surface layer. We also conducted temperature-controlled direct shear test to estimate the mechanical characteristics at the frozen/unfrozen soil interface. According to the results obtained, the behavior of the excess pore water pressure under frozen surface is different from that of an unfrozen model because the frozen surface layer obstructs the drainage of water. Furthermore, compared with that for the unfrozen condition, the shear strength under frozen-surface is higher, and the internal friction angle is also larger. Therefore, we conclude that the undrained situation due to frozen surface layer and the increase in shear strength at the interface strengthen the resistance against liquefaction.

研究分野：地盤工学

キーワード：液化化 表層凍結 振動台実験

1. 研究開始当初の背景

寒冷地域に属する北海道・東北・信越地方は、冬季に凍結作用を受ける厳しい自然環境下にある。また、これらの地方はいずれも地震の多発地域であり、これまで地震による被害を多数受けてきた経緯がある。特に、2011年東北地方太平洋沖地震発生後は、国内の広い範囲で地震が発生しており、上記地域でも頻繁に強い地震動が観測されている。例えば、東北地方太平洋沖地震の翌日には長野県北部で震度6強の地震が発生し、凍結斜面の崩壊や崩落土により土砂ダムが形成されるなどの土砂災害が生じた。凍結期に発生する地震による地盤災害については、1993年1月に発生した釧路沖地震に関連して、国内では初めて学術的な視点から地盤表層が凍結している状況での地盤災害の特殊性について、以下のような特徴が指摘された。

- (1) 地盤表層が凍結している場合、液状化などの被害が最小限に抑えられる可能性がある。
- (2) 地盤表層が凍結している場合、斜面崩壊箇所ではその規模が未凍結時と比較して大きくなる。

2011年以降の地震活動期に入ったと言える日本列島において、災害の特殊性を指摘されている地域における地震災害メカニズムを解明することが今後の防災、減災対策手法の構築に必要であると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

これまで凍土・未凍土の二層地盤を対象とした研究は限られており、特に、二層地盤の動的挙動は明らかにされていない。本研究では、遮水性の高い凍土が表層に存在している状態での地震時挙動を明らかにすることを目的とする。凍土・未凍土の二層系地盤が地震動を受けた場合、凍土と未凍土の剛性の違いにより地震時の両者の振動特性は異なると考えられる。また、凍結した表層下の未凍土層が液状化する規模の地震動を受けた場合、凍土が遮水層となるため未凍土のみの場合と挙動が異なることが予想される。この場合、地震動によるせん断応力が凍土・未凍土境界におけるせん断強度を上回ったり、または液状化に伴って未凍土層が沈下・側方流動すると、凍土と未凍土が剥離すると考えられる。

凍結期の凍土・未凍土の二層地盤に地震動が作用した場合の現象を上記のように捉え、具体的には以下の2点を明らかにすることを目的とする。

- (1) 凍土・未凍土の二層系地盤の動的力学特性評価に適した試験方法の確立
- (2) 凍土・未凍土の二層系地盤の地震時における地盤の変状メカニズムの解明

3. 研究の方法

本研究では、凍土・未凍土が存在する二層

地盤の地震時挙動を明らかにするために表層を凍結させた模型地盤に対して振動台実験を行った。さらに凍土・未凍土の二層地盤に一面せん断試験を実施し凍土・未凍土境界面の強度特性を求めることで、地震時の地盤挙動に及ぼす表層凍結状態の影響の検討を行う。さらに、これらの研究成果を総合して研究を総括する。

(1) 振動台実験

試料には豊浦砂($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.18\text{mm}$)を用いた。供試体は、湿潤した砂を土槽内に水を張った状態で5cmの厚さを巻出した後、乾燥密度が 1.55g/cm^3 となるように各層を所定回数突き棒により突き固めることで作製した。

計測器は、図1に示すように深さ0.10m、0.20m、0.35mの位置に入力に対する応答を確認するために加速度計、および液状化の程度を把握するために間隙水圧計を設置した。また、入力加速度を計測するために振動台上にも加速度計を設置した。

未凍結条件では供試体作製後に、直ちに振動台実験を実施した。表層凍結条件では、恒温循環水槽に接続した冷却盤を表層に設置し、供試体温度を0にした後-20の冷媒を循環することで供試体を上面から冷却し、表層8cmを凍結させた。なお、凍結過程では、土槽下部からの給排水を許し、凍結終了後は非排水条件に切り替え、振動台実験を行った。振動台実験は、周波数5Hzで振幅一定の正弦波の水平加速度を与えた。本研究では、入力加速度の大きさを変えることで、供試体に与えるせん断応力を調整した。

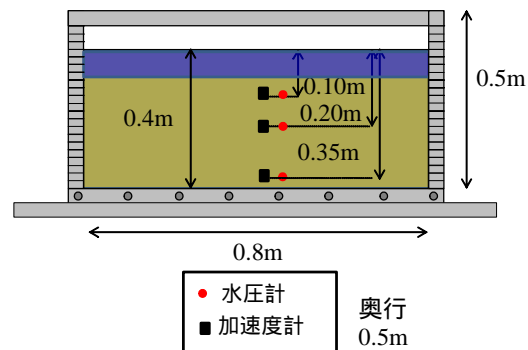


図1 せん断土槽

(2) 温度制御一面せん断試験

供試体は、所定の飽和度($S_r=100\%$)になるよう試料に水を加え十分攪拌し、相対密度85%となるようにせん断箱内で突固めることによって作製した。供試体下部にサーマルショックを与えた後、供試体下部温度を -2°C 、供試体上部 2°C に設定し、せん断面と凍土・未凍土境界面が一致するように凍結させた。その後、ひずみ速度 0.2mm/min で一面せん断試験を実施した。異なる垂直応力条件下(124.6kPa 、 93.45kPa 、 62.3kPa)で定圧一面せん断試験を実施し、せん断変位、せん断応

力関係より各垂直応力条件における最大せん断応力を算出し、垂直応力 最大せん断応力関係を描いた。その後、内部摩擦角 ϕ_0 をクーロンの破壊基準をもとに、垂直応力 最大せん断応力関係の近似曲線の傾きから算出

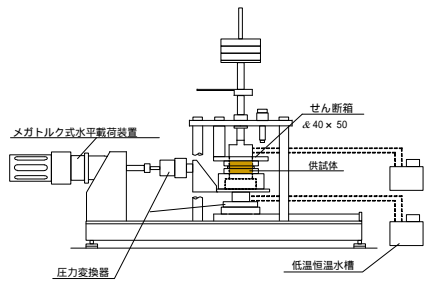


図2 温度制御型一面せん断試験装置

した。

4. 研究成果

(1) 振動台実験結果

最大過剰間隙水圧

表層凍結状態の全ての実験条件における液状化後の同時刻での最大過剰間隙水圧の分布を図3に示す。図中の実線は、乾燥密度より算出した有効応力を示している。未凍結状態では、一般的な振動台実験結果と同様な結果が得られ、最大過剰間隙水圧は深度別に概ね有効応力に等しくなり、液状化が生じていることが確認された。一方、表層凍結状態においては、すべての実験条件で有効応力を大きく上回っている。また、表層凍結状態では、全ての実験条件において、加振終了後に過剰間隙水圧は消散するが0に回帰せず、深さ方向に等しい過剰間隙水圧が残留していることが確認された。

表層凍結状態での発生過剰間隙水圧をより詳細に調べるため、最大過剰間隙水圧から加振終了後の残留過剰間隙水圧を差し引いた値を図4に示す。すべての実験条件において、最大過剰間隙水圧から残留水圧を差し引いた値は、有効応力とほぼ等しくなっている。豊浦砂は非凍上性であり、また、凍結過程では土槽下部の排水経路を開放し、水の相変化に伴う9%の体積膨張による有効上載圧の増加を低減させていること、および上記の結果より過剰間隙水圧比が1を大きく上回っているのは、凍結による有効応力の変化によるものではなく、以下に述べる表層の凍土の存在により密閉された空間で生じた水膜によるものと考えられる。本研究で用いたせん断土槽では、内部の沈下を確認することはできないが、未凍土の沈下が生じ、水膜が形成されていると推測される。未凍結状態では沈下によって生じる過剰間隙水圧は、地表面が大気圧となっているため、瞬時に消散する。このため、加振により発生した過剰間隙水圧は、有効応力と等しくなるまで上昇する。一方で、表層が凍結している場合は、沈下によって生じる過剰間隙水圧は、表層の凍結層の影響により非排水状態となっているため、消散する

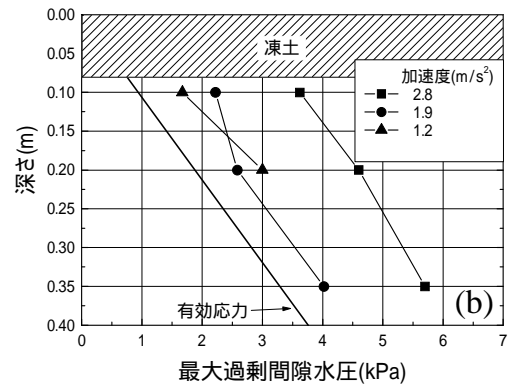


図3 最大過剰間隙水圧

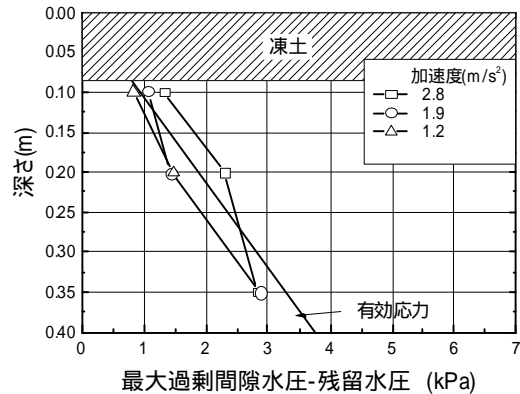


図4 最大過剰間隙水圧 残留水圧

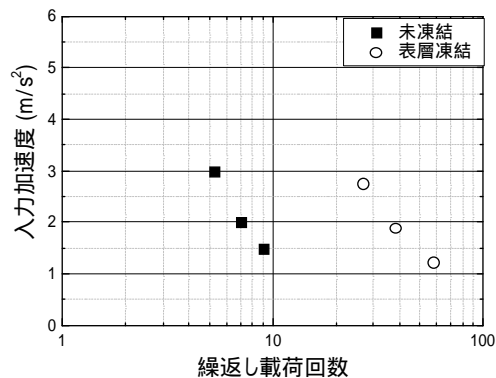


図5 入力加速度と繰返し载荷回数

ことができず、未凍土内に蓄積される。その結果として、密閉された空間で液状化が発生するには、未凍土の沈下により生じた水圧と併せて過剰間隙水圧比が1になるまでの水圧が必要となったと考えられる。

液状化強度

図5に未凍土および表層凍結状態で液状化した試験条件の入力加速度と過剰間隙水圧に到達するまでの繰返し载荷回数を示す。表層凍結状態の方が未凍土よりも液状化に至るまで多くの繰返し载荷回数を要していることがわかる。未凍結状態と表層凍結状態では、地表面の排水条件が異なり、これによって生じた水膜が繰返し载荷回数の違いの原因と考えられる。この水膜によって、表

層凍結状態では、液状化を引き起こすには有効応力に等しい過剰間隙水圧と沈下による水圧分が蓄積される必要があるためと考えられる。以上より、表層が凍結している状態では液状化が発生しにくくなる傾向が確認された。

(2) 温度制御一面せん断試験結果

凍土・未凍土境界面の力学特性を評価するために実施した一面せん断試験より得られた未凍結条件および凍土・未凍土二層条件の最大せん断応力、垂直応力の関係を図6に示す。また、参考までに、それぞれの点と原点を通る直線として算出した内部摩擦角を図中に示している。未凍土の結果と比較すると、凍土・未凍土の境界面でのせん断応力が全ての条件において大きくなっており、内部摩擦角も凍土・未凍土二層条件の方が大きな値となっている。これは、粒子が凍結面に捕捉されたことにより粒子の移動が制限されたことで、粒子のかみ合わせが強くなったためと考えられる。これらの結果より、地震動による凍土・未凍土の剥離は生じにくくなっていると推測される。

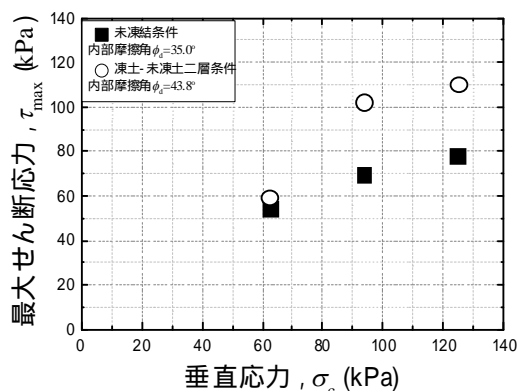


図6 最大せん断応力の比較

(3) 研究の総括

表層を凍結させて実施した振動台実験および温度制御一面せん断試験の結果より、表層が凍結している場合は、過剰間隙水圧の発生挙動が未凍結時と異なること、および凍土・未凍土の境界面でのせん断抵抗が増加することが、液状化に対する抵抗が増加する原因と考えられる。

表層凍結時は、液状化に対する抵抗力は上がる一方で、液状化する規模の地震動が生じ、未凍土が沈下することで凍土・未凍土境界面に剥離が生じた際は、側方流動が生じ、凍土の厚さが十分でない場合は、流動した土の土圧により凍土を破壊し、崩壊規模が大きくなる可能性がある。また、凍土厚さが十分な場合においては、未凍土の沈下や側方流動により空洞が生じ、融雪期に時間遅れを伴った変状が生じる原因になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

所 哲也、Influence of frozen surface layer on ground behavior during earthquake、The 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering、2017年9月18-22日、Seoul (Korea).

所 哲也、せん断土槽を用いた表層凍結地盤の振動台実験、第57回地盤工学会北海道支部技術報告会、2017年2月4日、北見工業大学(北海道・北見市)。

所 哲也、表層凍結状態における地震時の地盤挙動に関する実験的研究、2017年1月31日、鳥羽商船高専(三重県・鳥羽市)。

所 哲也、表層凍結状態における地震時の地盤の挙動に関する実験的研究、第56回地盤工学会北海道支部技術報告会、2016年1月29日、寒地土木研究所(札幌市・北海道)。

Srikrishnan Siva Subramanian、Numerical simulation of shaking table tests under freezing and thawing conditions、2016年1月29日、寒地土木研究所(札幌市・北海道)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

所 哲也 (Tokoro Tetsuya)

研究者番号: 40610457

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授