

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：53901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20451

研究課題名（和文）地盤凍上と地震の複合外力を受けた補強土壁の耐震性評価に関する研究

研究課題名（英文）Study on Seismic Evaluation of Reinforced Soil Wall Subjected to Combined External Forces of Frost heave and Earthquake

研究代表者

小笠原 明信 (Ogasawara, Akinobu)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・助教

研究者番号：30962972

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：積雪寒冷地に構築された補強土壁では、地盤の凍上に起因して補強材が破損し、壁面パネルが落下する等の性能低下を招く事例が報告されているが、凍結・融解を繰返し受けた補強土壁の耐震性能については不明な点が多い。そこで本研究では、凍結・融解履歴を受けた補強土壁の地震時被災メカニズムの解明および、補強土壁の耐震性変化に与える凍結・融解の影響を調べるために、一連の遠心模型実験を実施した。その結果、1サイクルの凍結・融解履歴によって初期変状が生じている場合においては、地震動による変形量が大きくない結果となり、凍結・融解作用による初期変位が必ずしも補強土壁の耐震性能を低下させるわけではないことが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪寒冷環境にある補強土壁の地震時被災メカニズムの解明および、凍上・融解履歴が補強土壁の耐震性に与える影響の評価とその対策の立案は喫緊の課題と言える。しかし、凍上を受けた場合の補強土壁の全体的な変形挙動や補強材への作用力などの基本的なことすら不明な点が多く、凍結・融解履歴の有無による補強土壁の耐震性能に関する検討は手つかずの状態である。そのため、積雪寒冷環境にある補強土壁の凍上・融解作用によって変化した耐震性能を把握することは、経済的な対策工の決定に資する貴重な基礎データとなる。

研究成果の概要（英文）：There have been reports of reinforced soil walls constructed in snowy and cold regions where the reinforcing materials have failed and wall panels have fallen due to freezing of the ground. However, the seismic performance of reinforced soil walls subjected to repeated freezing and thawing is still unknown.

The purpose of this study is to elucidate the seismic failure mechanism of reinforced soil walls that have been subjected to freeze-thaw cycles. A series of centrifuge model experiments were conducted to investigate the effects of freezing and thawing on the seismic performance of reinforced soil walls. The results showed that the initial deformation caused by one cycle of freezing and thawing history did not result in large deformation due to earthquake motion. It was confirmed that the initial displacement caused by the freeze-thaw action does not necessarily reduce the seismic performance of reinforced soil walls.

研究分野：地盤工学

キーワード：補強土壁 凍上 地震 複合外力 耐震性能 遠心模型実験

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

補強土壁は、地形条件などで一般盛土の施工が困難な場合には、建設コストなどで擁壁工法に比べ有利な場合が多いため、今後も施工数の増加が見込まれる。しかし、積雪寒冷地では壁面パネルが落下するなどといった、補強土壁の性能を著しく低下させる深刻な事態が発生している事例もある。これは積雪寒冷地特有の地盤の凍上現象によって盛土材料が膨張し、壁面パネルに凍上圧が作用することで補強材に過度な引張力が作用し、壁面パネルと補強材の連結部が破断したことが原因であると考えられている。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震では、凍上によってわずかに変状していた補強土壁の耐震性能が低下していたことで、地震後に大規模崩壊を起こしたと予想される事例も報告されている。しかし、凍上を受けた場合の補強土壁の全体的な変形挙動や補強材への作用力などの基本的なことすら不明な点が多く、凍上の有無による補強土壁の耐震性に関する検討が手つかずの状態である。そのため、積雪寒冷環境にある補強土壁の地震時被災メカニズムの解明および、凍上・融解履歴が補強土壁の耐震性に与える影響の評価とその対策の立案は喫緊の課題と言える。

2. 研究の目的

本研究課題では、凍上・融解履歴を受けた補強土壁の地震時被災メカニズムの解明および、補強土壁の耐震性変化に与える凍上・融解履歴の影響の明示化に取り組むことを目的とする。そのために、補強土壁模型に凍上・融解履歴を与えて遠心力場加振実験を行い、加振後の変形挙動に着目して、複合外力条件下における補強土壁の耐震性について検討を行う。本研究から変状・崩壊要因を明らかにできた際には、積雪寒冷環境にある補強土壁の凍上・融解作用によって変化する耐震性能を明示化できる。また、この結果は経済的な対策工の決定に資する貴重な基礎データとなる。

3. 研究の方法

本研究課題では、模型地盤の縮尺は1/50とし、重力加速度の50倍の遠心加速度場で加振実験を行うこととする。したがって、模型地盤寸法は図1に示すように、壁高120mmとして、幅30mm×高さ30mmの壁面パネルを4段積みとした。模型土槽の奥行きが60mmであるため奥行き方向には2列配置している。補強材は、伸び剛性を1/50とするためリン青銅を使用している。また、壁面パネル1枚に対して4本の補強材を配置しており、壁面パネル同士の連結はしていない。裏込め土には豊浦砂や凍上性の高い地盤材料を使用しており、相対密度や締固め度、地盤材料などの条件を変化させて模型地盤を作製している。その際、実験中の模型地盤の変形状況を観察するためにターゲットを設置している。本研究において、補強土壁が地震動を受ける際の初期変状の影響を調べるために、模型地盤に凍結・融解履歴を与えることとする。そこで、凍結させる際には完成した模型地盤を重力場で通水して飽和させ、実大構造物同様に補強土壁前面および天端から凍結が進行していく状況を再現するために、模型土槽を断熱材で覆っている。なお、実現象においては補強土壁全体が凍結することにはならないと

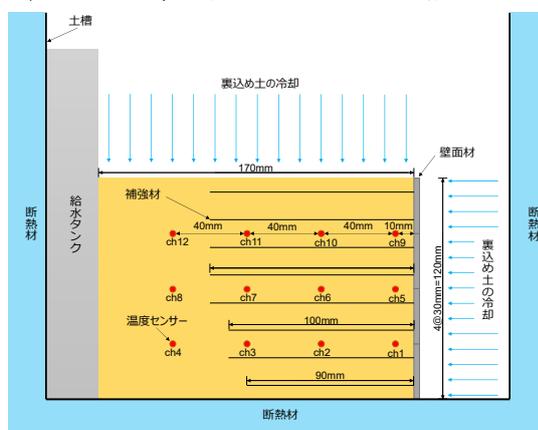


図1 模型地盤の概要

表1 各実験の条件

考えられるが、本研究においては凍結する領域をパラメータとせずに、模型地盤全体を凍結させることとした。

表1は裏込め土に豊浦砂を使用した際の実験条件を示している。完成した模型地盤を遠心模型実験装置に搭載して50Gの遠心加速度を付与したのちに、周波数1Hz、加速度振幅 2m/s^2 の正弦波を20波与える。ベンチマークケースを記号Dの後に相対密度 D_r の数値を記載

実験コード	相対密度 D_r (%)	含水比 w (%)	水位上昇	凍結融解
D40	40	10	無	無
D40S	40	10	有	無
D40SF	40	10	有	有
D80	80	10	無	無
D80S	80	10	有	無
D80SF	80	10	有	有

している。続いて、50Gの遠心加速度場で浸透流を発生させて地下水位が高い状態で加振実験を行うケースは、相対密度を表す数値の後にSを記載している。さらに、凍結・融解履歴を1度与えて、かつ浸透流を発生させて加振するケースは記号Sの後にFを記載している。同一の裏込め地盤密度に対して、これら3種類の実験を実施する。

ここで、図2に模型地盤内に設置した温度センサーで計測した土中温度の推移を示す。代表的な結果として、高さ60mm地点のch5~7(図1参照)の結果を示している。なお、模型地盤の凍結方法については、模型土槽に断熱材を設置して冷却装置に搭載することで実施している。模型地盤に凍結・融解履歴を与えてから遠心力場加振実験を行うまでの手順として、模型地盤内に設置した全ての温度センサーの計測結果が0°Cを下回っていることを確認した後に冷却装置から取り出し、模型地盤を融解させて全ての温度センサーが0°Cを上回っていることを確認してから遠心力場加振実験を実施している。この結果から、壁面前方側から後方側へと順番に0°Cを下回っていることが確認できる。また、図3に模型地盤内の凍結線推移状況の代表的な結果を示す。これは、D80SFの実験時における温度計測結果を用いて描いた温度コンター図に、計測結果から推定された0°C線を図示したものである。凍結線の推移状況に着目すると、実大構造物と同様に時間の経過に伴い補強土壁前面および天端側から凍結線が進行している状況を概ね再現できていることが確認できる。一方で、凍結開始から480s後の結果(図3c)に着目すると、補強土壁下部側からも凍結線が進行していることが分かる。これは、模型土槽が金属製材料であることや、模型地盤内に設置した計12個の温度センサー(図1参照)を用いて、模型地盤全体の凍結線を推定している影響が含まれているためであると推測される。そのため、より実現象に近い凍結線の推移状況を再現するためにも、模型土槽下部における断熱材の増設や、温度センサーの設置個数を増加するなどといった対策を検討していくことが必要であると考えられる。

図4は代表的な例として、相対密度 $D_r = 80\%$ の各実験コードにおける加振直後の模型地盤の様子を示している。これらより、裏込め地盤内に浸透流が発生しているケースのはらみ出し変形が大きいことが指摘できる。これは地下水位の上昇に伴い、有効応力の低下に起因する引抜抵抗力の低下と、全土圧が増加することによる引抜力の増加によって壁面パネルが変位した状況下で、地震動を受けたためであると考えられる。

図5は、 $D_r = 40\%$ 、 80% における模型地盤の変位状況を示し、これらの図より読み取った壁面の最大変位量、平均変位量を表2に示している。図より、すべての実験ケースにおいて最下段の壁面パネル変位量が小さいことが指摘できる。これは、壁面材と土槽底面との摩擦によって、壁面パネルの変位が抑制されたためであると考えられる。また、相対密度別にそれぞれの実験ケー

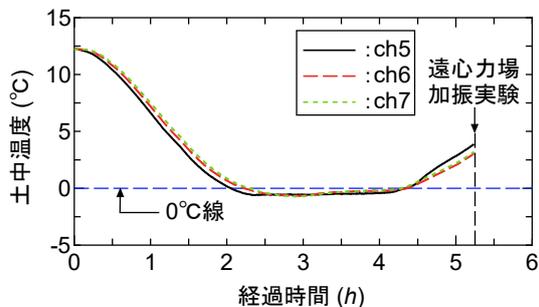


図2 土中温度の推移

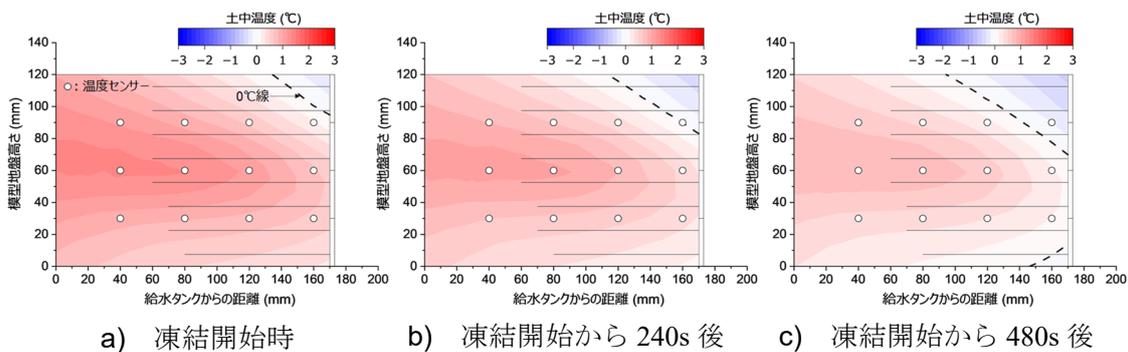


図3 模型地盤における凍結線の推移状況 (D80SF)

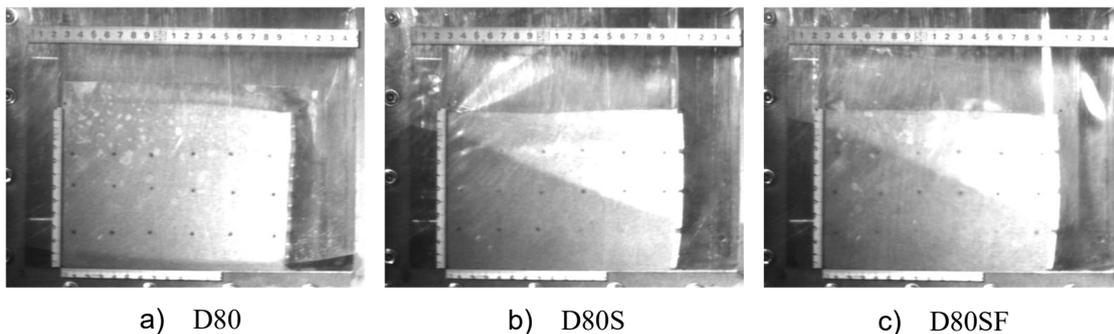


図4 各実験コードにおける加振後の模型地盤 ($D_r=80\%$)

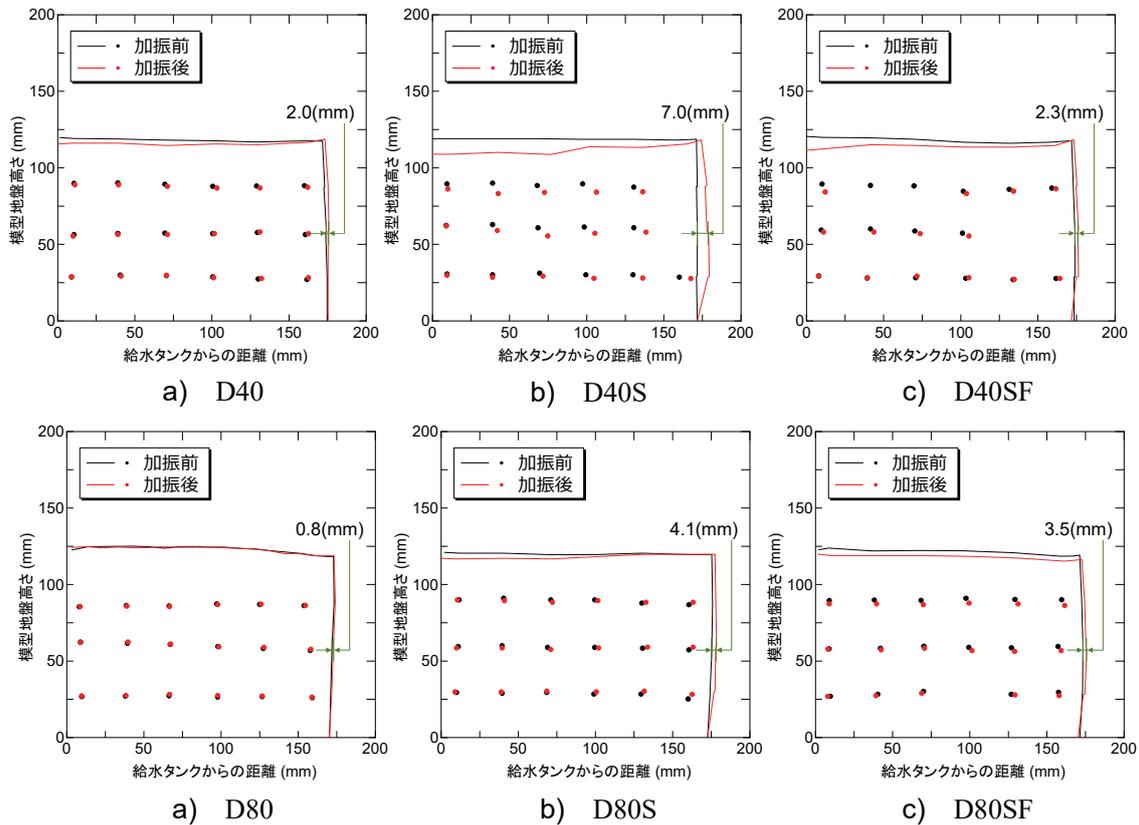


図5 各実験コードにおける模型地盤の変位状況

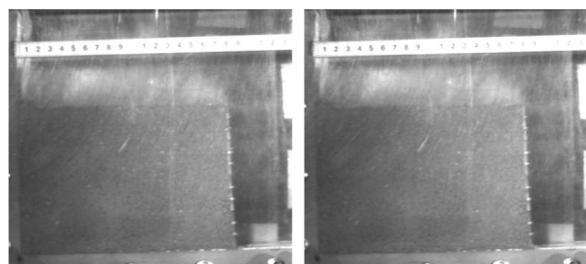
スの変位量を比較すると、浸透流を受けるD40SおよびD80Sの壁面中央部の変位量が最も大きく、表2に示す最大および平均変位量も同様にこれらの実験ケースが最も大きくなっている。これらのことから、補強土壁の耐震性は高く評価されているものの、適切な排水処理がなされていることが前提であるといえよう。一方で、同様に地下水位が高い状態にあっても、凍結・融解履歴によって初期の変位が生じているケースにおいては、地震動による変形量は大きくないことがうかがえる。これは、凍結・融解作用により初期変位が生じることによって、補強材に張力が発生し、補強効果を発揮したためであると考えられる。以上のことから、凍結・融解作用による初期変位が必ずしも補強土壁の耐震性能を必ずしも低下させるわけではないことが確認できた。加えて、摩擦力を抵抗力として扱う補強材は、適切な排水処理を行うことが重要であると言える。

次に、地盤材料を変化させた場合についての遠心力場加振実験結果を報告する。模型地盤の裏込め材には、細粒分質礫質砂(SFG)に分類される凍上性の高い地盤材料の2mmふるい通過試料を使用している。模型地盤は、上述した試料を最適含水比 $w = 18.9\%$ に調整し、補強土壁の施工管理基準値(締固め度 $D_c \geq 95\%$)を満たすよう、乾燥密度 $\rho_d = 1.587 \text{ g/cm}^3$ (締固め度 $D_c = 95\%$)として作製した。

図6は、凍上性の高い地盤材料を使用して、模型地盤に凍結・融解履歴を与えたケースの加振前後の様子を示している。この実験ケースにおいては、模型地盤に対して全ての方向から凍結線が進行する状況下で1サイクルの凍結・融解履歴を与えている。加振前において、50G到達までに裏込め地盤の沈下等も発生しておらず、加振後の様子に着目しても、壁面の変位が発生していないことが確認できる。同様の地盤条件における凍結・融解履歴を与えていないケースについても、加振後には変形が発生していないことを確認している。これらは、実現象とは異なる凍結線

表2 各実験コードの壁面パネル変位量

実験コード	変位量(mm)	
	最大	平均
D40	4.2	1.7
D40S	10.4	5.3
D40SF	9.0	2.6
D80	1.6	0.7
D80S	4.3	2.8
D80SF	3.7	2.4



a) 加振前 b) 加振後

図6 加振前後の模型地盤
(凍上性の高い地盤材料)

の進行状況であったことや、模型地盤を最適含水比で作製して施工管理基準値を満たしていることから、補強土壁の強度が十分に担保されていたために、変形が発生しなかったと考えられる。

4. 研究成果

本研究課題から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 実大構造物と同様に、補強土壁前面および天端側から凍結線が進行している状況を、本実験において概ね再現できていることが確認できた。
- 2) 裏込め土の相対密度が低下することで、補強土壁の耐震性能が低下することが確認できた。
- 3) 補強土壁に凍結・融解作用を与えることにより発生した初期変位によって、耐震性能が必ずしも低下するとは限らないことが確認できた。このことから、補強材の引抜抵抗力を適切に管理する必要があることが示唆された。
- 4) 凍上性の高い地盤材料を使用して、補強土壁の施工管理基準値を満たした条件下で模型地盤を作製した場合において、1サイクルの凍結・融解履歴では変形が発生しないほど耐震性能が高いことが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森剣登, 小笠原明信, 小林睦
2. 発表標題 裏込め土の凍結・融解履歴による初期変位が補強土壁の耐震性能に与える影響
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------