J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 143, p.17 ～ 23 (2019)

寒冷地・凍土特集
論　文
Original Paper

帯鋼補強土壁の交換への地盤凍結工法の適用

長田友里恵[1]・相馬 啓[1]・青木信哉[2]・渡辺晋生[3]

The application of the ground freezing method for replacing the wall surface of a strip-shaped steel reinforced earth wall

Yurie OSADA[1], Hiroshi SOMA[1], Shinya AOKI[2] and Kunio WATANABE[3]

Abstract: Strip-shaped steel (Strip) reinforced earth walls have been in use for more than 45 years. As a measure against aging or disaster, maintenances of reinforced earth walls will be required in the near future. Conventional chemical grouting has been used for stabilizing soil behind a wall when replacing the wall surface during maintenance. However, the injected chemical grout may affect the permeability of the drainage layer behind the wall surface. Therefore, the ground freezing method, which enables the reinforcement of the ground without grout materials, has gained attention. However, the ground freezing method is ordinarily applied to saturated soil. Therefore, the applicability of this method to unsaturated soil such as Strip reinforced soil was examined. CO_2 was used as a refrigerant for the cooling system, and the working space was reduced. In the full-scale experiment, 6 freezing pipes with 60.5 mm in diameter were installed at 0.6 m intervals behind the wall in a 10.8 m × 2.4 m artificial fill. After 4 days freezing, the surface of the reinforced earth wall was replaced successfully without the soil collapsing. From the results of the laboratory experiment and comparisons to a model for saturated soil, it was found that, when the saturated soil water content is 0.4 m^3 m^{-3}, the unsaturated water content ranged from 0.2 to 0.3 m^3 m^{-3} is required in order that the freezing rate of the unsaturated soil should be equivalent to the one of the saturated soil. Further investigation, such as the influence of water content and water flow on freezing expansion and construction technique at the time of wall surface replacement, will be needed to establish this technique.

Key Words : ground freezing method, reinforcement earth wall, unsaturated soil, frost heave

1. はじめに

帯状の鋼製補強材（ストリップ）を層状に敷設し，土とストリップの摩擦によって補強盛土を構築する帯鋼補強土壁（Fig. 1）は日本で採用されてから 45 年以上が経過した（川井ら, 1998）．経年劣化や災害などによる破損が予想され，今後は維持補修技術が求められる．帯鋼補強土壁は道路脇などの擁壁として用いられており，構造物を維持した状態で壁面材の交換を行う場合，これまでは背面の盛土がこぼれ出さないように水ガラス系の固化材注入が行われてきた（熊田ら, 1998）．しかし，注入した固化材が施工後の帯鋼補強土壁背面の排水層の透水性に影響を及ぼす恐れがある．そこで固化材を使用せずに地盤の補強を可能とする地盤凍結工法が注目されている．

地盤凍結工法とは，土中の間隙水を凍結させることで土の物理性を改良し，補強・止水を行う工法であり，解凍後は土の物理性が施工前の状態に戻る環境に優しい工法である．一般的に地盤凍結工法は地下水位以下の飽和土を対象とした工法であり，シールドトンネルなどの地下工事で用いられる．これまでにも多くの施工実績があり，ノウハウの蓄積や関連する課題の検討がなされてきた．一方，帯鋼補強土壁背面は不飽和土である．建物直下の耐震改修工事（町田ら, 2016）の



Fig. 1　帯鋼補強土壁の例.
Application example of the strip-shaped steel reinforced earth wall.

[1]Chemical grouting Co., Ltd. Kyodo News Bldg., 2-2-5, Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001, Japan. Corresponding author: 長田友里恵, ケミカルグラウト株式会社.
[2]JFE Shoji Terre One Corporation, 7-1 Otemachi 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan.
[3]Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu 514-8507, Japan.
2018 年 9 月 20 日受稿　2019 年 5 月 7 日受理

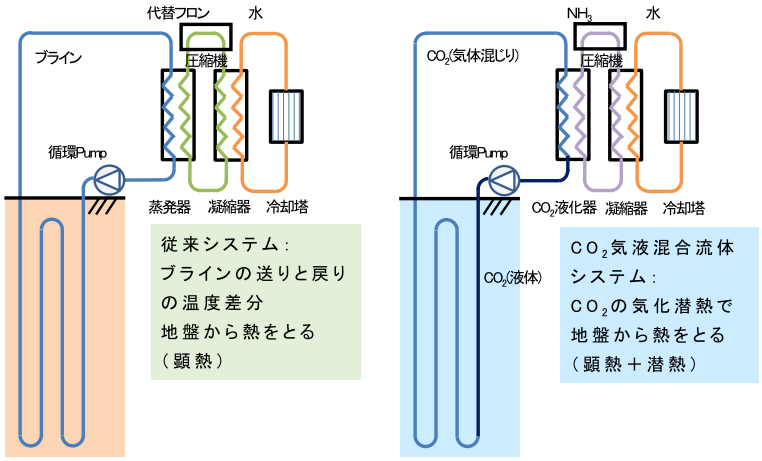


Fig. 2 凍結システムの比較.
Comparison of CO_2 system and conventional system.

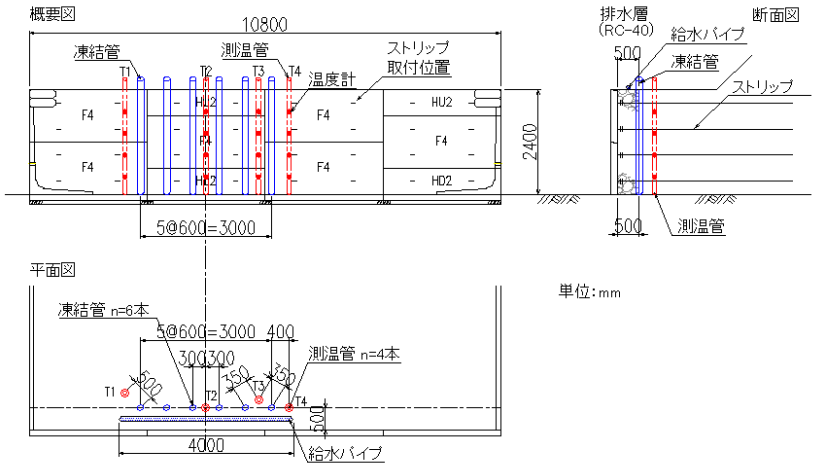


Fig. 3 実大実験概要図.
Schematic of full-scale experiment and layout of freezing pipes.

報告があるものの，地盤凍結工法の不飽和土への適用例は未だ少ない．不飽和土と飽和土では凍結時に発生する潜熱や凍結前後の熱伝導率の変化，凍土の強度や透水性など様々な物性が異なる．地盤凍結工法の不飽和土への今後の活用を進めていくためには，地温変化や凍結膨張量など不飽和土の凍結過程の理解や，飽和土凍結の凍土造成日数や凍上量の予測などの知見をどれくらい不飽和土の凍結に適用可能かの把握が必要である．また，従来の地盤凍結工法では土中に埋設した凍結管にブラインと呼ばれる循環溶液を流して土を凍結する．ブラインの冷却や配送に要する設備は大型化しがちであり，帯鋼補強土壁の補修作業に想定される道路脇などでは，十分なスペースを確保することが困難なケースが想定される．ところで，近年，液体ブラインの代わりに CO_2 気液混合流体を用いた凍結システムが開発された．例えば，シールド到達防護を目的とした石狩湾新港放水路設備工事では，この凍結システムによる省スペース化が工程短縮に寄与した（塩屋, 2018）．そこで，帯鋼補強土壁の壁面材交換における地盤凍結工法の適用性について検討するため，CO_2 気液混合流体を用いた冷却システム（以降，CO_2 気液混合流体システム）を用いた壁面材交換の実証実験を行い，その際の帯鋼補強土壁背面の凍結過程を観察した．また，給水による流水条件下の排水層の凍結を定量的に評価するため，実証試験の凍結過程と飽和土の凍結モデルの比較や不飽和土層の室内凍結実験を試みた．

2. CO_2 気液混合流体システムの適用

冷却システムの概要図を示す（Fig. 2）．従来システムでは冷却したブラインを土中に埋設した凍結管に循環させ，出入りの温度差分の顕熱による冷却を行う．

対して今回採用する凍結システムでは凍結管に液化 CO_2 を循環させ，顕熱による冷却に加えて液化 CO_2 の一部が気化する際の気化潜熱によって地盤を冷却する．このように CO_2 気液混合流体システムでは冷媒の単位重量当たりの熱交換量が従来の方式よりも大きいため，凍結管 1 本当たりの冷媒循環量が少ない量でも従来と同等の凍土を造成することができる．加えて，液化 CO_2 の粘性はブラインの約 1/90 と小さい．そのため今回採用したシステムでは配管径を 15 ～ 20 mm に，ポンプ出力は 0.55 kW まで縮小した（相馬, 2018）．

3. 壁面補修実証実験

3.1 実大実験

はじめに 10.8 m × 2.4 m の帯鋼補強土壁を構築した．概要図を Fig. 3 に示す．帯鋼補強土壁は 10 枚の壁面材（F4，HU2，HD2）で構成されており，盛土内に敷設したストリップに結合している．壁面材とストリップは，壁面材にあらかじめ取り付けてあるコネクティブプレートにボルト・ナットで固定する（Fig. 4）．帯鋼補強土壁の背面には層厚 0.5 m の排水層を設けた．盛土材には細粒分含有率 9.6 % の砂質礫（GS-F）を，排水層には再生砕石を用いた．盛土材の締固め度は 106.4 % であった．帯鋼補強土壁構築から 5 か月後に凍結管と測温管を設置した．凍結管は外径 60.5 mm 内に外径 34.0 mm の内管を挿入した二重管構造で，冷凍機から送った液化 CO_2 はヘッダー管で等しく 6 分岐させ，各凍結管の内管から送り，外管から戻した．凍結管を帯鋼補強土壁の背面 0.5 m の位置に 0.6 m 間隔で 6 本設置し，−45 °C の液化 CO_2 を循環した．CO_2 は大気圧下においては気体もしくは固体で存在するが，圧力を 0.7 ～ 0.8 MPa に保持することで −45 °C の気液混合流体となり，気体 – 液体の相変化による冷却を行う．Fig. 3 に示す 4 箇所（平面図，T1 ～ T4）に測温管を設置した．測温管の凍結管からの距離は T1 は 500 mm，T2 は 300 mm（2 本の凍結管の間），T3 は 350 mm，T4 は 400 mm である．各測温管の 0.5，1.0，1.5，2.0 m 深に設置した温度計による測定値によって凍土造成を確認した．土の凍結膨張が帯鋼補強土壁に及ぼす影響は 11 箇所設置した変位計（Fig. 5, 1 ～ 11）によって確認した．壁面材の除去時に土砂の崩落が想定される領域を凍結させるため，凍結運転中は帯鋼補強土壁背面の排水層に，排水層上端に設置した全長 4 m の等間隔に孔を開けた給水パイプから約 2.8 L min^{-1} で給水した．凍結運転開始から 4 日後，壁面材交換を行った．壁面材交換完了後，冷媒の循環を停止し凍土を解凍した．

3.2 室内凍結実験

飽和条件と不飽和条件による凍結過程の違いを把握するために，飽和土と不飽和土について室内凍結実験を行った．実験の概要図を Fig. 6 に示す．内寸 500 mm × 450 mm × 100 mm の容器の一側面は鉄板で，そ



Fig. 4 壁面材のコネクティブプレートとストリップ接続状況．
Connective plate of the wall and connection of a strip.

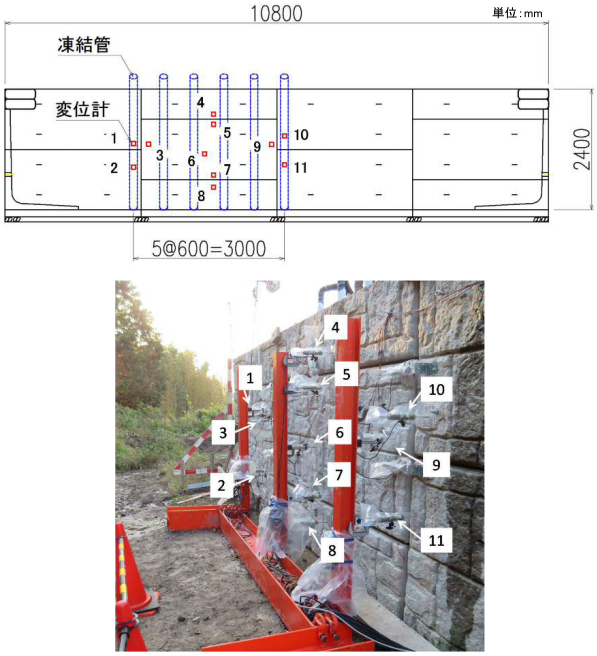


Fig. 5 変位計設置位置と設置状況．
Layout of displacement meter installed on the wall.

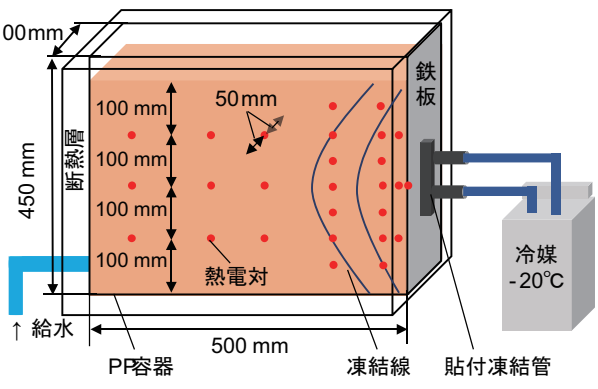


Fig. 6 実験装置の概要図．
Schematic of the laboratory experiment.

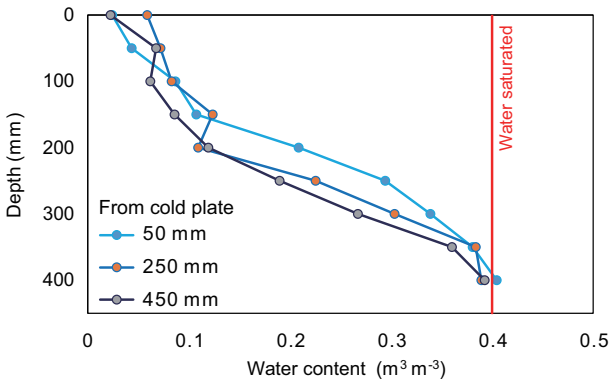


Fig. 7 試料の初期含水率分布.
Initial distribution of the volumetric water content of the soil.

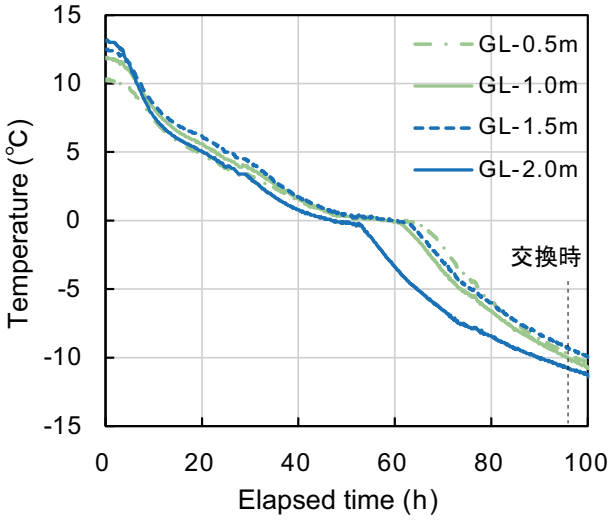


Fig. 8 凍結管間の温度の経時変化.
Temperature at the middle point of freezing pipes (T2) during freezing.

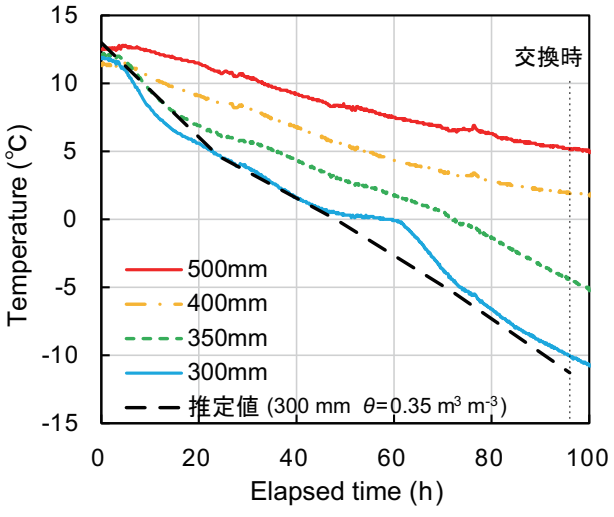


Fig. 9 GL−1.0 m の温度の経時変化.
Temperature at GL−1.0 m during freezing.

の中央部には貼付面積 140 mm × 22 mm の凍結管を接着した．容器内は風乾した鳥取砂丘砂を均一な乾燥密度 1.67 Mg m^{-3} で充填し，容器周囲は断熱した．容器下端から給水し，一つは試料すべてを水分飽和とし，一つは下端の飽和から上端の体積含水率 0.05 m^3 m^{-3} 程度まで重力水分分布とした．Fig. 7 に不飽和試料の初期体積含水率分布を示す．異なる 3 箇所の体積含水率分布は ±0.05 m^3 m^{-3} の差であったことから，ほとんど均一な含水状態であるとみなした．ここで，凍結管に −20 °C の不凍液を循環し，容器側面の鉄板面から水平方向に試料を冷却した．試料の奥行き 100 mm の中間には熱電対を 27 組設置し温度計測により凍土の成長を確認した．

4. 実験結果

4.1 実大実験

4.1.1 凍土の形成

実大実験で観測した凍結管の間（Fig. 3，平面図 T2）の温度変化を Fig. 8 に示す．土中の温度は冷却開始から速やかに低下した．温度低下は他の測温管においても同様の傾向にあった．凍土成長は二段階の成長に分けて考えられ，第一段階では個々の凍結管の周りから年輪状に凍土が成長し，第二段階では隣接する凍土柱が合体し，板状の凍土壁の厚みが増加する方向に凍土が成長する（生頼, 1997）．実大実験では 60 ～ 70 時間後にはすべての深度で 0 °C 以下まで低下し凍土が閉合した．96 時間後には凍結管間の温度は −10 °C まで低下した．Fig. 9 に GL−1.0 m における温度の経時変化を示す．凍結管からの距離 350 mm の温度は 75 時間後に 0 °C 以下となった．すなわち凍結管から 350 mm 厚の凍土が造成された．350 mm，400 mm 位置の温度より 0 °C 以下の領域を推定すると，壁面材交換時である 96 時間の凍土の厚さは 360 mm 以上であった．

4.1.2 壁面の水平変位

実大実験における凍結運転開始以降の帯鋼補強土壁の水平変位（はらみ出し）の経時変化を Fig. 10 に示す．図は測定した 11 箇所（Fig. 5）のデータのうち，変位が最も大きかった 7 番の計測値を示している．帯鋼補強土壁の変位は凍土造成に伴って，徐々に増加した．変位は最大で 9.7 mm に及んだ．これは，主に給水パイプから与えた帯鋼補強土壁背面の水分が凍ることによって体積膨張する凍結膨張の影響であると考えられる．

4.1.3 壁面材交換

凍土造成ののち，交換部上部の壁面材に落下防止用の治具を取付け，壁面材交換を行った．1.2 m × 2.7 m の交換部の壁面材を中央で切断し，一方は壁面材を破砕することで撤去した．もう一方は頭部にリング状のフックがついたボルトを壁面材前面に取付け，コネクティブプレート周囲を切り離した壁面材をそのままクレーンで吊り上げて取り外した．取り外しはどちら

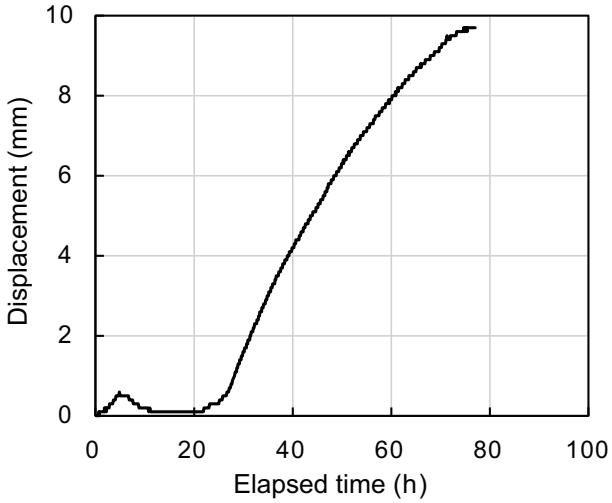


Fig. 10 帯鋼補強土壁の変位の経時変化.
Displacement of the wall during freezing.



Fig. 11 壁面材の取り外し状況.
Soil surface after the wall is removed.



Fig. 12 新しい壁面材の取付け状況.
Installed new wall.

の方法においても可能であった（Fig. 11）．壁面材を取り外した後，背面の盛土材を確認したがこぼれ出しはなかった．新しい壁面材はストリップとの接続部に孔を開けたプレキャストのものをはめ込み，鋼材とボルトの治具を用いてストリップを孔の中心に固定した（Fig. 12）．接続部の孔はモルタルで充填した．新しい壁面材設置の際に，前述の帯鋼補強土壁背面の凍結膨張の影響はなかった．交換した壁面材を固定してから 1 か月後に帯鋼補強土壁と背面盛土の状況を確認したが，帯鋼補強土壁は変位が発生することなく安定し，背面盛土にも空隙やクラックは発生していなかった．

4.2 室内実験

室内実験の不飽和試料と飽和試料の 0 °C 線の進行を Fig. 13 に示す．不飽和試料では 0 °C 線進行のピークが凍結管設置位置である試料中央よりも下に位置し，体積含水率が低い上層よりも飽和に近い 250 mm 以深

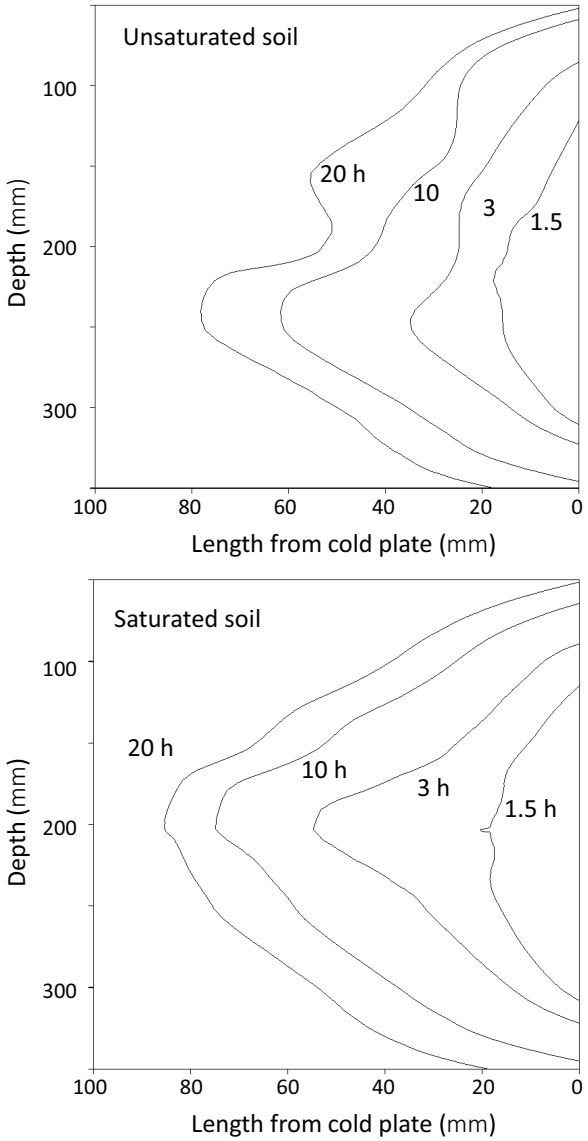


Fig. 13 不飽和土と飽和土における 0 °C 線の経時変化.
Boundary of frozen soil in unsaturated and saturated soil.

の下層の方が早く温度が低下した．一方，飽和土においては 0 °C 線のピークがほぼ中央に位置し，上下層の違いはほとんどなかった．全体として不飽和土よりも飽和土のほうが早く凍土領域が広がった．

5. 考察

室内実験の結果（Fig. 13）より，不飽和土，飽和土において凍土形成は 250 mm 以深で同等であった．不飽和土の 250 mm 深の体積含水率は 0.2 ～ 0.3 $m^3\ m^{-3}$（Fig. 7）であることから，不飽和土における凍土形成を飽和条件と同等にするためには，飽和体積含水率 0.4 $m^3\ m^{-3}$ に対して体積含水率 0.2 ～ 0.3 $m^3\ m^{-3}$ であることが望ましいと考えられる．そこで，飽和土の解析手法を用いて，流水条件下の排水層の体積含水率を推定した．まず，凍土成長の第一段階である単管理論に基づき数値計算を行った．計算は凍結管（熱源）から同心円状に伝熱する相変化を考慮した熱伝導方程式に基づいている．水分量は一定とし水流や水分変化は考慮していない．凍土の熱的性質は水 · 氷 · 土粒子に支配されるため，体積含水率から推定することができる．ここで飽和土の解析に用いられる単管理論で排水層の体積含水率を 0.35 $m^3\ m^{-3}$ と仮定すると，計算値は実測値とほぼ一致した（Fig. 9 中 T2 と推定値）．したがって実大実験では，帯鋼補強土壁背面に 2.8 L min^{-1} で給水したことにより，凍結運転中は凍結管周囲の土がこれに相当する水分を保持していたものと考えられる．但し，水流は凍土の成長を阻害することがある．実大実験での給水量は流速に換算すると約 1.3 m d^{-1} である．これは地下水流が存在する時に隣接する凍土柱が結合できなくなる限界流速 2.0 m d^{-1}（日本建設機械化協会, 1982）以下ではあるものの，水流に伴う熱の移流は無視できないと考えられる．凍土造成を確実に行うためには給水方法 · 給水量についてさらに検討する必要がある．

6. おわりに

地盤凍結工法を用いて帯鋼補強土壁の壁面材交換を行った．帯鋼補強土壁背面の盛土を凍結すると，凍結膨張による帯鋼補強土壁のはらみ出しが確認されたが，問題なく壁面材交換を行えた．室内試験結果から，凍土成長の速さを飽和条件と同等にするためには，飽和体積含水率 0.4 $m^3\ m^{-3}$ に対して体積含水率 0.2 ～ 0.3 $m^3\ m^{-3}$ であることが望ましいことが示唆された．実大実験では数値計算より，排水層が体積含水率 0.35 $m^3\ m^{-3}$ 程度の水分を保持していることが確認できた．但し，凍結膨張や水流の影響の評価や，壁面材交換時の施工技術など，今後の実用化に向けてさらなる検討が必要といえる．また，冷却システムの冷媒として CO_2 を用いることで帯鋼補強土壁の補修に適用可能なまでに凍結設備の設置面積を削減することができた．今後の地盤凍結工法の適用拡大が期待できる．

引用文献

川井洋二, 松澤佳一, 小林和男, 西 剛整 (1998): テールアルメ工法の補修方法. 第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集: 2425–2426.

熊田哲規, 松澤佳一, 川井洋二 (1998): 補強土（テールアルメ）壁における補修 · 補強工事の施工例. 土木学会第 53 回年次学術講演会: 684–685.

町田 勲, 戸羽隆宏, 藤村太史郎, 豊田祥之, 岡沢良昭, 矢島清志, 佐藤貢一, 大舘良吉 (2016): 地盤凍結工法を適用した直接基礎建物の基礎下免震レトロフィット工事に関する事例報告. 日本建築学会大会学術講演梗概集: 851–852.

日本建設機械化協会 (1982)：地盤凍結工法 — 計画 · 設計から施工まで —, pp. 14–17. 技報堂, 東京.

生頼孝博 (1997): 地盤凍結工法とその開発. 雪氷, 59(3): 159–167.

塩屋祐太 (2018): 世界初 CO_2 に気液混合流体を使用した凍結工法 — 石狩湾新港発電所放水設備工事 —. 土木施工, 59(1): 99–102.

相馬 啓 (2018): CO_2 による地盤凍結工法の適用事例. 地盤工学会誌, 66(1): 28–29.

要　　旨

帯鋼補強土壁は日本で採用されてから 45 年以上が経過し，今後は維持管理技術が求められる．壁面材の交換において，従来は水ガラス系固化剤を注入し盛土材の崩落を防止していたが，施工後の排水層の透水性への影響が懸念される．そこで固化材を使用せずに地盤を固結する地盤凍結工法が注目される．しかし地盤凍結工法は従来飽和土を対象とすることが多い．そこでここでは，帯鋼補強土壁の背面盛土のような不飽和土への地盤凍結工法の適用性を検討した．冷却システムには CO_2 を冷媒に用い，補修作業に要するスペースを削減した．実証実験では 10.8 m × 2.4 m の帯鋼補強土壁背面に 60.5 mm の凍結管を 0.6 m 間隔に 6 本設置し凍土造成した．4 日間凍結後，壁面材交換を行ったが，背面盛土のこぼれ出しはなかった．帯鋼補強土壁背面の不飽和土の凍土造成の速さを飽和条件と同等にするためには，飽和土のモデルとの比較や室内実験から，飽和体積含水率 0.4 m^3 m^{-3} に対して 0.2 ～ 0.3 m^3 m^{-3} に体積含水率を保持することが望ましいと示唆された．体積含水率や水流が凍結膨張に及ぼす影響や壁面材交換時の施工技術等，今後さらなる検討が必要である．

キーワード：地盤凍結工法，帯鋼補強土壁，不飽和土，凍結膨張