

寒冷地における多数アンカー式補強土壁の凍上対策

宇野裕教¹・鈴木輝之²・澤田正剛³・安達謙二⁴

¹学生会員 工修 北見工業大学大学院 システム工学専攻

²フェロー会員 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

³北見工業大学講師 土木開発工学科

⁴岡三リビック (株) (〒108-0023 東京都港区芝浦 4 丁目 16 番 23 号 AQUACITY 芝浦 8F)

本研究は置換工法による多数アンカー式補強土壁の凍上対策を検討するものである。本報告では土中温度分布を求める 2 次元のコンピュータシミュレーションによって、擁壁裏込め土中の凍結面の位置及び形状を推定し、様々な擁壁形状に対応できる置換え範囲の設定方法を示した。このシミュレーションを行うには気象情報の他に土の熱物性値などの数値設定が必要である。中でも設定の困難な熱伝導率については過去の実測データをとりまとめ、一般的に得られる土質情報である乾燥密度と含水比との関係で表した。これらの検討の成果に基づいて、土質情報と気象情報から凍上対策としての置換え範囲を決める設計手法を提案した。

Key Words : multi-anchored retaining wall, computer simulation, thermo-physical properties, freezing front, frost-heave prevention

1. まえがき

近年、補強材を用いた土留め構造物が開発、実用化されている。寒冷地においては土留め壁の裏込め土が凍結するとき凍上が発生する場合があります。この凍上力により補強部材の応力が許容値を越え破壊にいたることもある。

現在のところ、構造物に加わる凍上力を定量的に推定することは出来ないが、一般的には凍上力に耐え得るような強度の構造物とすることは困難もしくは著しく不経済になるのが普通である。構造物の凍上対策の基本は、構造物と接する土中に凍上が発生しないようにすることである。

土構造物の凍上対策工法として土に凍結が入らないようにする断熱工法、水分の移動供給を遮断する遮水工法、および非凍上性の土に置き換える置換工法がある。これら三つの工法はそれぞれ効果が確認されているが、実際には確実な効果の期待できる工法として置換工法が多く採用されている。置換工法を基準化した例として道路の凍上対策の設計がある。原則的には修正 Berggren の式により理論最大凍結深さを算出し、理論最大凍結深さの 70 % で置き換

える方法がとられている¹⁾。しかし、その他の構造物の凍上被害と対策に関しては研究が少なく、設計方法の基準化はあまり進んでいないのが現状である。

筆者らは、北見工業大学構内に試験設置された多数アンカー式補強土壁において 4 年間にわたる冬季間の挙動観測を行い、以下のような結果を得た²⁾。

- 1) 背面盛土中の凍結面形状が実測され、凍結面に対して垂直方向に作用する凍結膨張圧が壁面ブロックへの凍結土圧をもたらしていることが確認された。
- 2) 凍結面の深さや形状は、壁体の表面形状や壁体材料の熱物性値を反映していることが分かった。
- 3) 2 種類の凍上対策 (置換工法, 断熱工法) の有効性が確認された。

本報告では、凍結シミュレーション手法を用いて、上記の屋外実験の結果を一般化し、汎用性のある置換え範囲の決定方法を示している。壁面に作用する凍結土圧は、凍結面形状によって決まってくる。したがって、凍結面の形状や位置を推定する手法が見出されれば、壁面に凍結土圧発生をもたらすような凍結面の部分を非凍上性材料で置換するという考え方で、凍上対策が決められる。

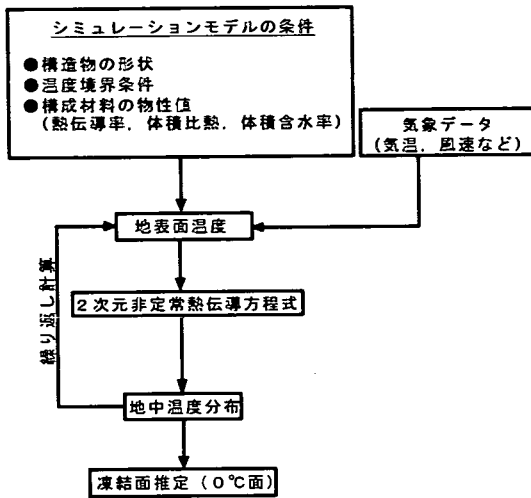


図-1 凍結シミュレーションの流れ図

2. 凍結シミュレーション

土中温度分布を求める凍結シミュレーションは、月館らが開発したプログラム³⁴⁾を基にして行った。図-1に使用したシミュレーションプログラムの流れ図を示す。壁体の断面形状、構成材料の熱物性値（熱伝導率、体積比熱、体積含水率）、及び気象データ（気温、風速など）を入力条件としている。基本式は凍結・融解潜熱（ q_L ）を考慮した2次元非定常熱伝導方程式（式（1））であり、この式を差分法で展開しコンピュータで繰り返し計算した。

$$C\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + q_L \quad (1)$$

ここに θ : 温度 (°C)

C : 比熱 (kJ/m³·K)

ρ : 密度 (kN/m³)

λ : 熱伝導率 (W/m·K)

q_L : 凍結・融解潜熱 (MJ/m³·K)

図-2は、最も深く凍結が入った時点での凍結面について、実測結果³⁾とシミュレーション結果との比較を示している。表-1は、図-2のシミュレーションで用いた壁体材料の物性値を示す。また、気温は試験場所で計測した値を用いている。モデルの左右端面ではそこを通る水平方向の熱の動きはないと仮定している。一方、大気と接する表面部分（裏込め土上部、壁面ブロック表面及び、壁面ブロック前方の地表面）は大気との間で熱の出入がある。この熱収支を求めるために必要な熱伝達率は、風速の関数で

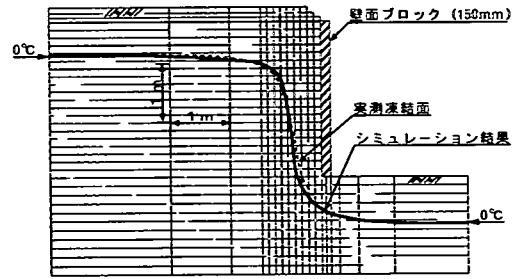


図-2 実測結果とシミュレーションの比較

表-1 図-2で用いた物性値

	未凍結時の熱伝導率 (W/m·K)	凍結時の熱伝導率 (W/m·K)	体積比熱 (J/m ³ ·K)	体積含水率 (%)
土 ³⁾	1.67	2.79	2640	58
エンガート ⁷⁾	2.55	2.55	2510	0

あるユルゲスの式⁹⁾を用いて求めている。試験壁をこの場所から300m程離れた位置に設置されている気象庁の自動気象観測システム（AMeDAS）のデータを用いた。

シミュレーションで得られた凍結面形状は実測結果と良く一致しており、シミュレーション手法の妥当性を示している。表-1で示す土の物性値は実測したものでなく仮定した値であるが⁹⁾、適切な土の熱物性値を与えることにより気温と風速だけを用いて、実用的には十分な精度での凍結シミュレーションが可能である。以後において、凍結シミュレーションで用い得る実用的な土の熱物性値の決定方法を示していく。

3. 凍結シミュレーションに用いる土質材料の熱物性値

本研究のシミュレーションで入力する土の熱物性値は、未凍土の体積比熱と、未凍土及び凍土の熱伝導率の3つである。以下に、3つの熱物性値の算定方法について述べる。

(1) 未凍土の体積比熱

Woodside⁹⁾は土を構成する各相（土粒子、水分、空気）の密度、比熱、重量比より近似的に体積比熱が算定できることを報告し、式（2）を示している。

$$C = C_s m_s + C_w m_w + C_a m_a \quad (2)$$

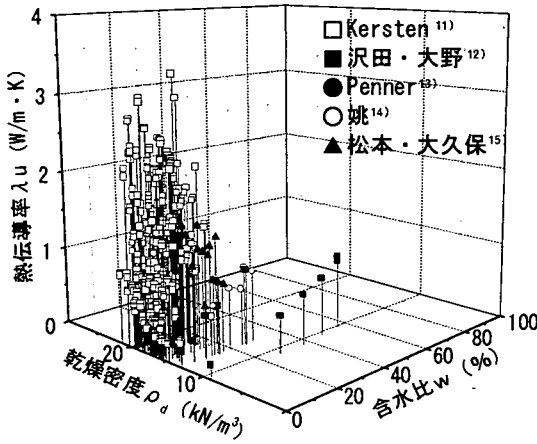


図-3 未凍土の熱伝導率

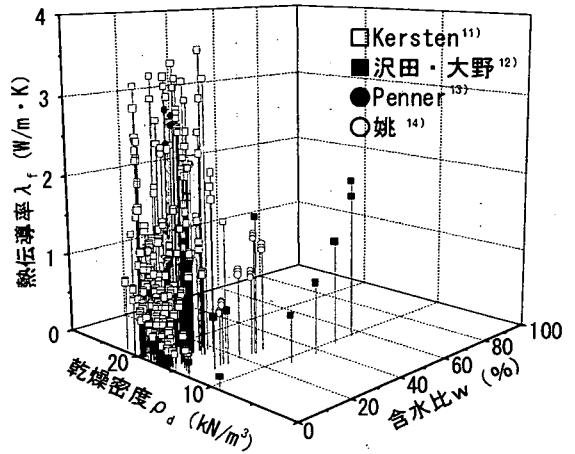


図-4 凍土の熱伝導率

C_s , C_w , C_a はそれぞれ土粒子, 水, 空気の比熱であり, m_s , m_w , m_a は質量比を表す. 空気の熱容量は, 他に比較して小さいので無視すると, 式 (2) は土質試験から得られる値 (ρ_d : 乾燥密度, w : 含水比) を用いて式 (3) に変形できる.

$$C = \rho_d(C_s + C_w w) \quad (3)$$

式 (3) の計算値と実測値は, 良く一致することが, 確認されている⁹⁾. ここで土粒子の比熱 C_s と水の比熱 C_w を一定値と見なすと, 体積比熱は乾燥密度 ρ_d と含水比 w によって表わされることになる.

(2) 凍土及び未凍土の熱伝導率

一般的に水分を含んだ土は未凍土から凍土に変化した場合, 土の熱伝導率は変化する. 土によって未凍土から凍土になる温度は違うが, 本シミュレーションでは -1°C 以下になったところで, 土の熱伝導率を未凍土から凍土の値に変化させている. 土の熱伝導率については, 多くの研究者が2あるいは3相系の理論式を提案している¹⁰⁾. 一般的に用いられる推定式として, 乾燥密度と含水比から熱伝導率を推定した Kersten¹¹⁾の実験式がある. この式では砂質土と, シルト以下の細粒土に分けて熱伝導率を推定しているが $\pm 25\%$ 程度の誤差があると言われている. また, Johansen¹⁰⁾の式が最も実測値に近いとされているが, 一般的な地盤情報からは得られない不凍水量, 石英含有量などをパラメータとしているため実務的には利用が難しい.

以上のように, 土の種類, 水分状態, 密度及び凍結状態に対応する熱伝導率を, 一つの理論式で表すことは困難なようである. さらに, 設計を行う上では一般的に得られる土の状態量 (乾燥密度, 含水

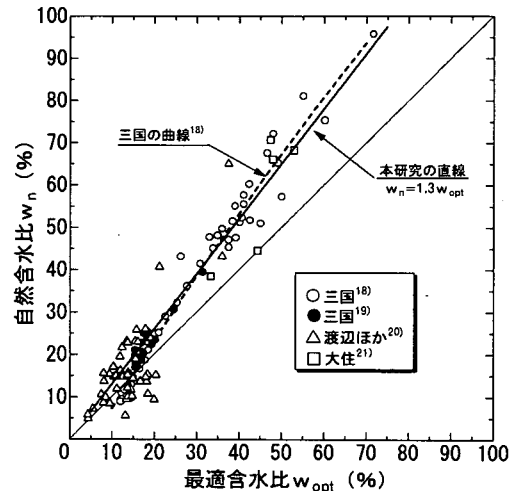


図-5 最適含水比と自然含水比の関係

比) との関係から熱伝導率を決定することも必要である. ここでは, 凍上対策の裏込めとして用いられる粗粒土を対象に, 収集した実測データを基にした熱伝導率の実用的な決定方法を検討する.

図-3, 4は Kersten¹¹⁾, Sakata & Ono¹²⁾, Penner¹³⁾, Arai¹⁴⁾, 松本 & 大久保¹⁵⁾が計測した未凍土と凍土の熱伝導率を乾燥密度と含水比との関係で表した図である. 全体的な傾向として, 熱伝導率は密度が大きくなる程大きく, さらに含水比が高くなる程大きくなる. また, 未凍土と凍土を比較した場合, 凍土の方が熱伝導率が大きい傾向がある. 未凍土から凍土になると空隙内の水分が相変化を起こすため, 熱伝導率は変化するとされている¹⁰⁾.

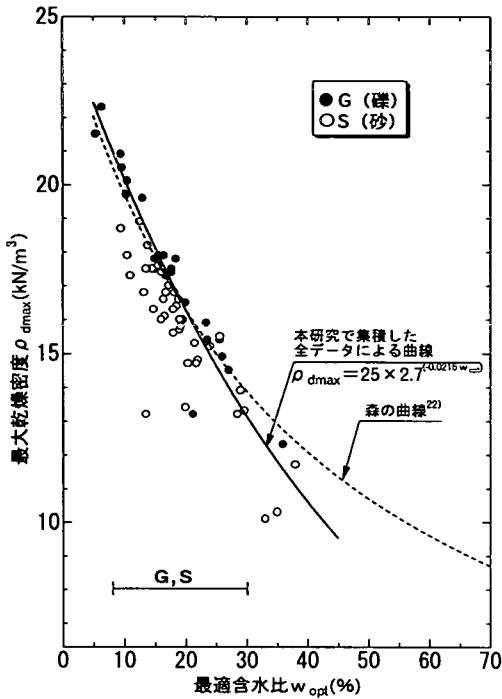


図-6 礫，砂の最適含水比と最大乾燥密度の関係

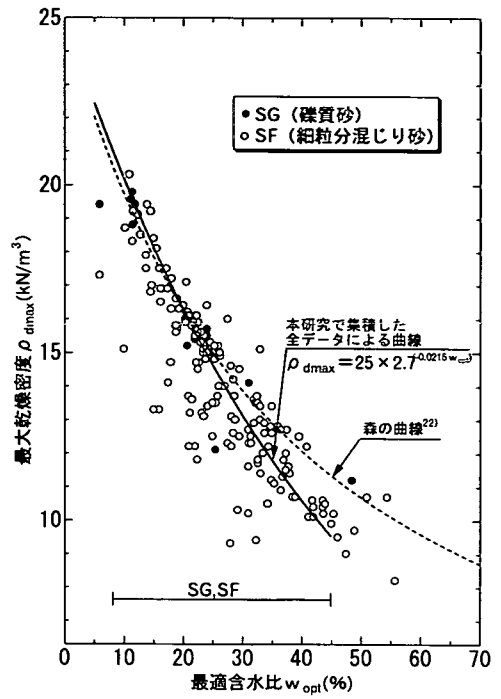


図-8 礫質砂，細粒分まじり砂の最適含水比と最大乾燥密度の関係

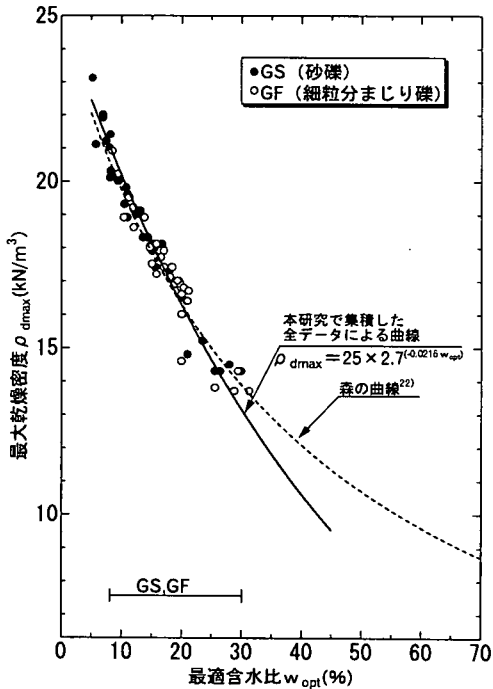


図-7 砂礫，細粒分まじり礫の最適含水比と最大乾燥密度の関係

(3) 粗粒土の乾燥密度と含水比

多数アンカー式補強土壁の盛土材料として使用できる土は、有機質土を含まないすべての粗粒土および細粒土 (ML, CL, VH₁, VH₂) とされている¹⁷⁾。しかし、一般的に凍上対策の置換え土として使われるのは粗粒土なので、ここでは粗粒土だけを検討の対象とする。

前節で述べたように、土の熟物性値は乾燥密度と含水比に強く支配されるので、先ず裏込め土として設置された状態での粗粒土の乾燥密度と含水比の一般的な値を見出す必要がある。

裏込めの施工では、最適含水比付近で最大乾燥密度 ρ_{dmax} の 90% 以上になるように締固めを行うのが一般的である。したがって裏込めとして施工された土の乾燥密度と含水比は、最大乾燥密度と最適含水比と見なしても大過ない。しかし、施工後には時間の経過とともに、雨水等の侵入によって最終的にはある値の含水比に落ち着いていくと考えられる。

図-5は土の最適含水比 w_{opt} と地山における自然含水比 w_n の関係を示す。 w_{opt} と w_n の間には高い相関が認められ、図中に示す関係式が成立する。本研究で扱っている土が粗粒土であることも合わせ考えれ

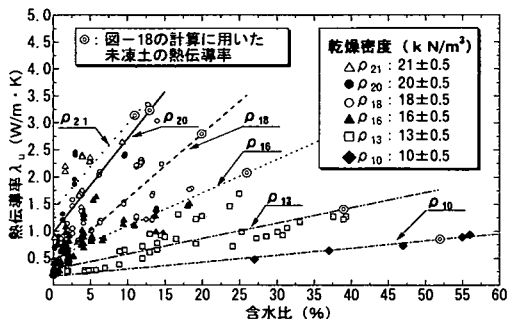


図-9 未凍土の含水比と熱伝導率の関係

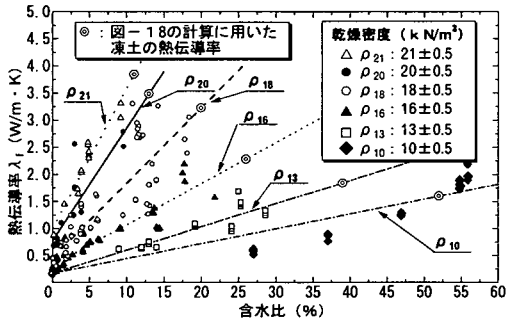


図-10 凍土の含水比と熱伝導率の関係

ばこの自然含水比 w_n と、施工後に落ち着いていく含水比の値はほぼ一致すると想定できる。

図-6~8は、これまで各機関で行われてきた粗粒土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の実験データを集積し土の種類別にプロットしたものである^{21),22),23),24),25),26)}。図中には森²²⁾が380のデータから求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の関係曲線も破線で示している。本研究で収集した全データから求めた近似曲線(図-6~8の実線)と森の曲線を比較すると、含水比の高いところで両者にずれが生じている。これは森の曲線が細粒土のデータも含んでいるためと考えられる。粗粒土だけを検討対象としている本研究では、最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の関係曲線として図-6~8の実線を用いる。

以上のことから図-5~8の乾燥密度と含水比の関係を用いて、次節では凍結シミュレーションに用いる土の熱伝導率を決定していく。

(4) 熱伝導率の決定

図-9, 10は、図-3, 4を書き換えて含水比と熱伝導率の関係として示した図である。前出の図-6~8に示されるように、各中分類でも熱伝導率が実測された土の乾燥密度、含水比はともに広範囲にわたっているため、図では乾燥密度の大きさ毎にグループ

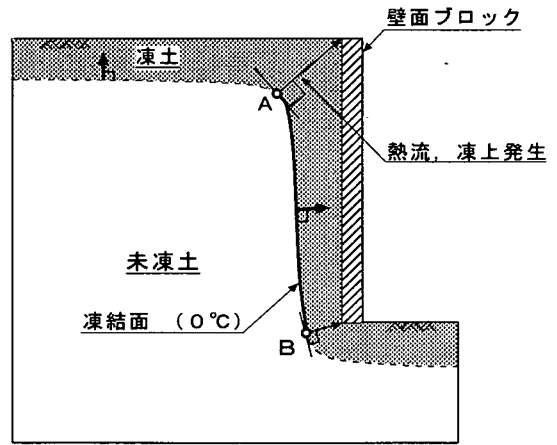


図-11 凍結面の模式図

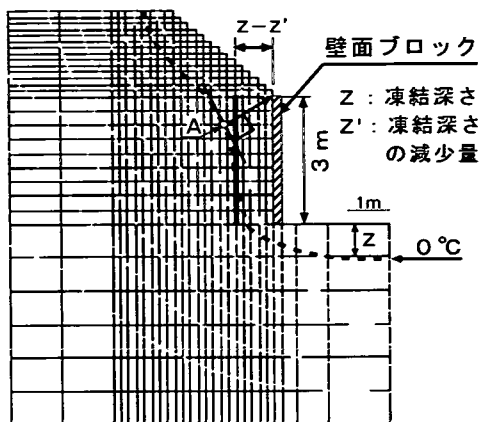
分けして、熱伝導率と含水比の関係として示している。点のバラツキは有るが、乾燥密度のグループ毎に、熱伝導率と含水比の間には直線関係が認められる。熱伝導率の多くの実測値を整理して得られた図-9, 10は熱伝導率-含水比-乾燥密度の関係を示すものであり、図-5~8の関係を併用すれば、実用的な熱伝導率を決定する上で大変便利である。後述の図-18の凍結深さの算定では図-9, 10から求めた熱伝導率を用いている。

4. 置換工法の設計

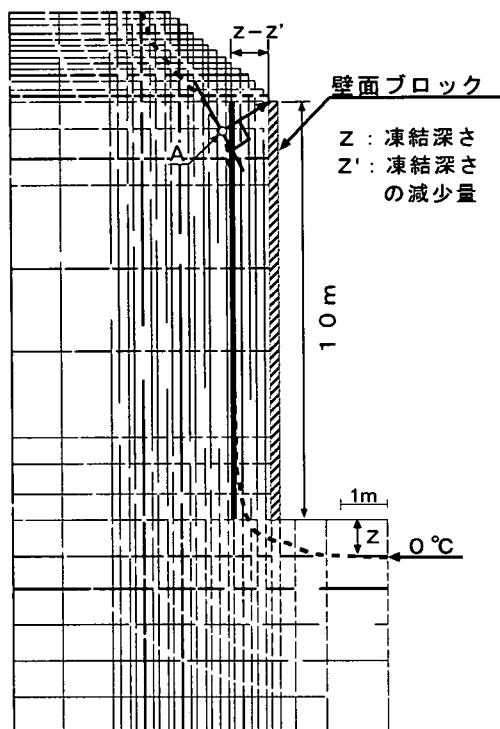
(1) 凍結面形状の検討

凍上変位は凍結面に垂直方向あるいは熱流の方向に発生する。いま、図-11において凍結面に対して垂線を壁面ブロック背面の上端と下端に引き、凍結面と垂線の交点を各々A, Bとする。このとき実線で示される点A-B間の凍結面で発生した凍結膨張力が壁面ブロックに凍結土圧を発生させると仮定する²⁾。そうすると点A, Bは壁面ブロックに凍結土圧の発生をもたらす凍結面の範囲を示すことになり、ここではこれらの点を境界点と呼ぶことにする。このように、凍結土圧は凍結面に垂直方向に発生する凍結膨張力が、凍土層を介して壁面ブロックに伝達されるものであるから、置換工法における良質な材料による置換範囲は、図-11の実線(A-B間)で表される凍結面部分を包含するものであれば良いことになる。

図-12, 13の破線は壁高と法面の小段幅を変化させたときの凍結面のシミュレーション結果を示す。ここでは、壁面ブロックがあることを想定したシミ



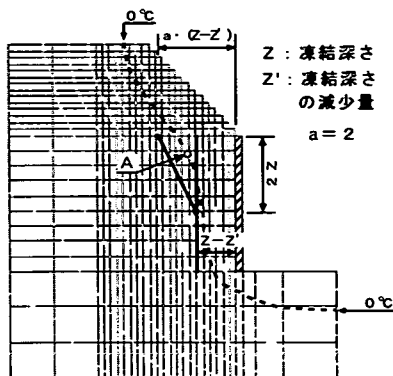
(a) 壁高3mの場合



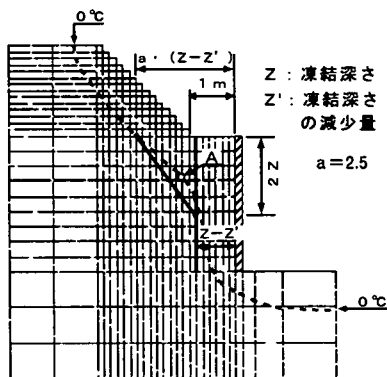
(b) 壁高10mの場合

図-12 壁高を変化させた場合の凍結シミュレーション

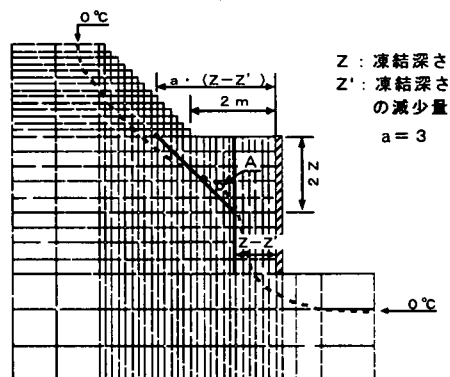
シミュレーションを行っており、熱物性値は前項での検討結果を参考に乾燥密度 $\rho_d=16\text{kN/m}^3$ 、含水比 $w=26\%$ のときの値を用いている。また気温と風速データは図-2のシミュレーションと同じものを使っている。図-12, 13中の太実線は置換範囲を求めるための基準として引いた線であり、 Z は壁面ブロックがないとしたときの凍結深さ、 Z' は壁面ブロックによる凍結深さ Z の減少量である。この場合、水



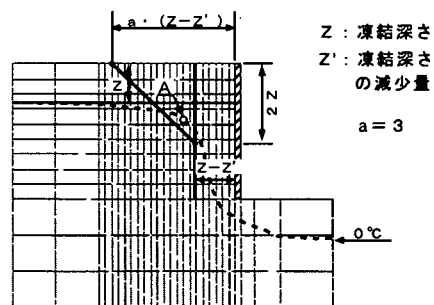
(a) 小段幅0m



(b) 小段幅1m



(c) 小段幅2m



(d) 小段幅 ∞ (法面なし)

図-13 壁面上部の置換範囲の決定方法

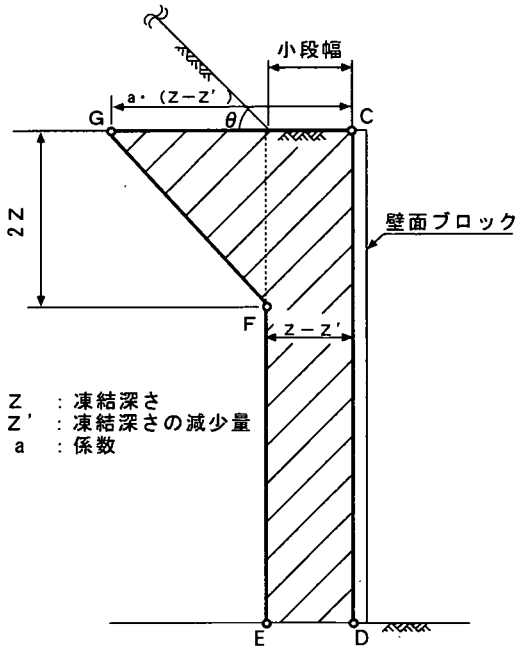


図-14 置換範囲の決定方法

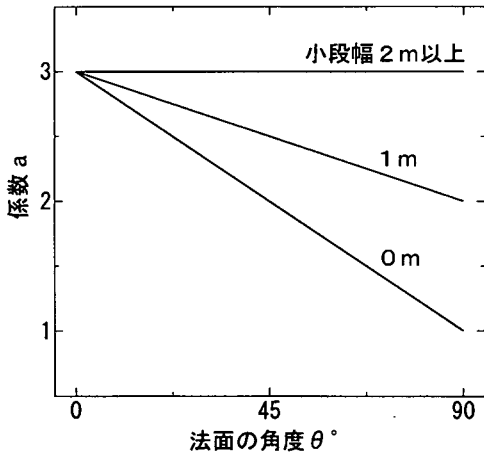


図-15 係数 a の決定

平方向への凍結深さと言うことになるが、本文中での凍結深さは地表面の方向に関係なくそこから垂直方向に測られる凍結面までの距離で定義している。多数アンカー式補強土壁では、壁の高さが2mから17m程度のもので施工されている¹⁷⁾。図-12は壁高を3m及び10mとしたときの凍結面のシミュレーション結果である。図中、A点は上部境界点を表している。壁高が3mと低い場合は、壁面ブロック背後の凍結面は壁面ブロックに平行にはならない。一方、壁高が10mと高い場合の凍結面は、裏込め土の上部では曲面となっているが、中間部の比較的長い範囲

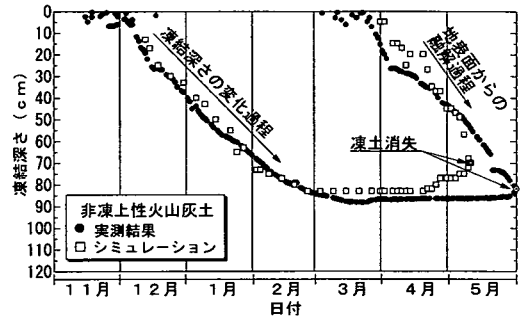


図-16 凍結深さの実測結果とシミュレーションの比較

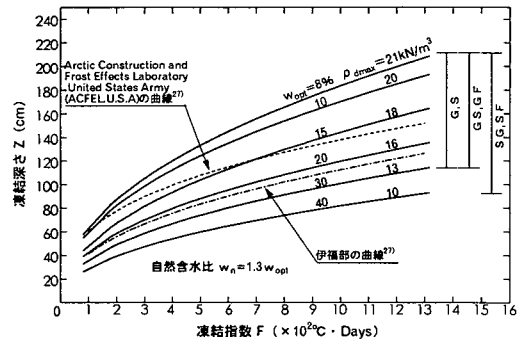


図-17 凍結指数と凍結深さの関係

で壁面ブロックに対してほぼ平行になっている。この場合、壁面ブロックに凍結圧を発生させる凍結面は、Z-Z'の位置に引かれた垂線（太実線）でほとんどカバーされることが分かる。一方、壁面ブロックから凍結深さまでの範囲に入らない凍結面すなわち境界点（A点）付近の凍結面形状は、壁高が3m程度以上であれば、その大きさによってはほとんど変化しないことも認められた。

図-13は、法面の小段幅を変化させたときの、凍結面形状の違いを示している。小段幅0mと小段幅∞を比較すると、前者のケースでの境界点が、壁面ブロックからより離れていることが分かる。このように、小段の幅を変化させることで壁体上部の凍結面形状は変化する。以上のような性質を持つ壁体上部の境界点付近の凍結面も含むような、置換え範囲の決め方を次節で検討する。

(2) 置換範囲の決定方法

前節の図-12, 13で示した凍結面の特性を考慮として、凍上対策のための置換え範囲の決め方として図-14を提案する。境界点付近の凍結面を置換え範囲内に包含するための係数 a の取り方を図-15に示す。この図は小段幅と法面角度を変化させた一連のシミュレーション結果によっても確認されている。

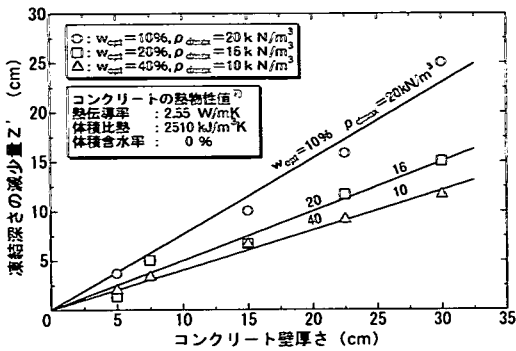


図-18 コンクリート壁による凍結深さの減少

小段幅が2m以上の場合、境界点の位置は法面が無い場合すなわち法面角度 θ が 0° の場合と同じになるため θ にかかわらず $a=3$ となる。一方、小段幅0mの場合の係数 a の値は、法面の角度が大きくなるにつれ小さくなり、法面角 $\theta=90^\circ$ では凍結面全体が壁面に対して平行になる。以上のように図-15から係数 a を求め、さらに後述する凍結深さ Z とその減少量 Z' を決めることによって凍上対策としての置換え範囲は図-14の斜線部(C-D-E-F-G)で決まる。

(3) 凍結深さの決定

図-14で置換え範囲を決定するには、図-15の係数 a の他に、凍結深さ Z とその減少量 Z' を決める必要がある。

図-16は、本研究で用いている凍結シミュレーションを1次元的に適用し、水平地盤における凍結深さの経時変化について、シミュレーション結果と実測結果を比較したものである。この凍結深さは、凍結の進行方向によって変わるものではないので、図-14における凍結深さ Z にもそのまま適用できる。垂直壁では積雪の影響を受けないので、適切な土の熱物性値を用いれば本手法によって凍結深さを精度良くシミュレートできることがわかる。

図-17は2節で述べたシミュレーション手法を用いて、北海道における代表的な22カ所のAMeDASデータと図-9, 10で求めた熱伝導率、及び図-5~8の、最大乾燥密度と自然含水比の関係と式(2)、式(3)から求めた熱物性値を入力条件として、粗粒土の1次元的な凍結深さと凍結指数⁶⁾の関係を求めたものである。ちなみに、凍結指数は 0°C 以下の日平均気温の値を、冬シーズンを通して積算したもので、その冬の寒さを表す数値である。図-9, 10に示す実測された熱伝導率の値は、近似直線からのバラツキが大きい。この値を用いて計算された図-17の凍

結深さの曲線も、相応のバラツキ範囲の平均的な曲線と見るべきである。しかし、凍結指数の決定の精度などとのバランスを考慮すると、図-17は少なくとも実務的には十分に有効なものと考えられる。

同様の関係を北海道の砂利道の凍結深さを実測して求めた例として、伊福部の研究²⁷⁾がある。また伊福部の論文中には排水性粗粒材料で構成された飛行場舗装下の凍結深さを実測した Arctic Construction and Frost Effects Laboratory, United States Army (ACFEL, U.S.A)の結果も紹介されている。これら2つの実測結果を図-17中に併記しているが、ともにバラツキの多い実測値を1本の曲線で代表させたものである。これらの2本の曲線が、本研究の中間的な値をとっていることは、粗粒土の熱物性値の違いを考慮して凍結深さを計算する本手法が妥当なものであることを示唆している。

多数アンカー式補強土壁では、コンクリート製の壁面ブロックを用いるので、この影響で壁前面での凍結深さが減少する。図-18は、コンクリート厚さと凍結深さの減少量 Z' の関係を示す。図-18も図-17と同じシミュレーション手法を用いて計算しており、 Z' はコンクリート壁が無いとしたときの凍結深さからコンクリート壁があるとしたときの凍結深さを引いた値である。コンクリートの熱物性値は、材質の種類により変化するがその範囲は土質材料に比べて小さいので、図-18では一般的なコンクリートにおける値を用いている⁷⁾。

5. まとめ

現在のところ、多数アンカー式補強土壁の凍上対策のための置換え範囲を理論的な根拠に基づいて決める手法は見あたらない。本研究では新しい考え方によって、置換え範囲を決定する方法を示した。主要内容を要約すると、以下のようである。

- (1) 擁壁背面土中の凍結面形状や位置は、適切な土の熱物性値が与えられれば、気温情報だけからシミュレーション手法によって実用的には十分な精度で求めることができる。
- (2) この場合の実用的な熱物性値は、乾燥密度と含水比の2つの要素から決定できる。
- (3) 壁高が高くなると、背面土中の凍結面は、全体的に壁面ブロックに対して平行になる。一方、壁体上部の凍結面形状は、背面土の表面形状によって支配される。
- (4) 凍結面形状は主として壁体の断面形状に支配されるが、その位置(深さ)は、気温と背面

土の熱物性から決まる凍結深さによって決められる。この凍結深さは(2)の凍結シミュレーション手法によって推定でき、図-17が有効である。

- (5) 種々の壁体形状に対する凍結面を包含する形で、凍上対策としての合理的な置換範囲を決定する方法を提案した。この置換範囲は壁体形状と凍結深さによって決まる。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路土工—排水工指針—，1987.
- 2) 鈴木輝之，宇野裕教，澤田正剛，安達謙二：多数アンカー式補強土壁背面土の背面凍結と凍結土圧，土木学会論文集，No.645/III-50，pp.281-290，2000.3.
- 3) 月舘司，釜田幹男，富田和彦，岡喜秋，永沢徹，中野清幸，伊藤太郎：伝熱平板を使った温水式ロードヒーティングの期間シミュレーションによる評価，第9回寒地技術シンポジウム，pp.440-446，1993.
- 4) 宇野裕教，鈴木輝之，月舘司，安達謙二，上野邦行：多数アンカー式補強土壁背面土の凍結シミュレーション，土質工学会北海道支部技術報告集 第39号，pp.81-86，1999.
- 5) 建築学体系編集委員会：建築学大系8音・光・熱・空気・色，pp.342-343，1959.
- 6) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー(23)土の凍結—その理論と実際—(第1回改訂版)，1994.
- 7) 林正道，鮎田耕一：コンクリート工学～耐久性・寒中コンクリート詳説，pp.61-64，(樹山海堂，1993.4).
- 8) Woodside, W. and Messer, J.H. : Thermal conductivity of porous media I, *Journal of Applied Physics*, Vol.32, No.9, pp.1688-1699, 1961.
- 9) Kersten, M.S. : Specific heat tests on soils, *Proc. 2nd, I. C. S. M. F. E.*, Vol.3, pp.158-162, 1948.
- 10) Faruoki, O.T. : Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity, US Army Corps of Engineers, *CRREL REPORT* 82-8, 1982.
- 11) Kersten, M. S. : *Thermal Properties of Soils*, University of Minnesota, Institute of Technology, Engineering Experiment Station, Bulletin, No.28, 1949.
- 12) Sawada, S. & Ohno, T. : Laboratory studies on Thermal Conductivity of clay, silt and sand in frozen and unfrozen states, *Fourth International Symposium on Ground Freezing*, pp.53-58, 1985.
- 13) Penner, E., Johnston, G.H. and Goodrich, L.E. : Thermal conductivity laboratory studies of some Mackenzie Highway soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.12, Number 3, pp.271-288, 1975.
- 14) 姚義久：舗装道路の凍結深さの予測に関する基礎的研究，東北大学博士論文，1989.3.
- 15) 松本順一郎，大久保俊治：土の伝熱特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.257，pp.43-50，1977.
- 16) Kersten, M.S. : Thermal properties of soils, *Highway Res. Board*, Spec.Rept.2, 1952.
- 17) (財) 土木研究センター：多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル，第2版，pp.40-41，1998.
- 18) 三国英四郎：フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その1)，土と基礎，Vol.10, No.1, pp.4-12, 1962.
- 19) 三国英四郎：フィルダムしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究(その2)，土と基礎，Vol.10, No. 2, pp.25-34, 1962.
- 20) 渡辺英，西川純一，林宏親：表土処理土の盛土利用の検討，土質工学会北海道支部技術報告集，第39号，pp.203-208，1999.
- 21) (社) 地盤工学会：盛土の調査・設計から施工まで，pp.45-81，1981.5.
- 22) 森満雄：土の乾燥密度と最適含水比について，土と基礎，Vol.10, No.9, pp.12-16, 1962.
- 23) 第22-34回地盤工学会研究発表会発表論文集：締固め，路盤，舗装のセッションの発表論文25件.
- 24) 第35-39回地盤工学会北海道支部技術報告集：発表論文6件.
- 25) 酒井晃：土の凍上性判定試験法に関する研究，平成10年度北見工業大学修士論文，1999.
- 26) 三木五三郎，斉藤孝夫：土の種類による締固め特性の変化，第31回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp.47-48，1976.
- 27) 伊福部宗夫：土木試験所報告，北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究，北海道開発局土木試験所，pp.69-73，1962.3.

(2001.3.2受付)

A COUNTERMEASURE TO FROST HEAVE OF MULTI-ANCHORED RETAINING WALL IN COLD REGION

Hironori UNO, Teruyuki SUZUKI, Seigo SAWADA and Kenji ADACHI

2-D computer simulations for the longterm field experiments were carried out to determine a possible range of ground freezing around a multi-anchored retaining wall. Temperature fields were calculated on several shapes and sizes of walls. Simplification was made for heat transfer calculation on material constants of soil, such as thermal conductivity, heat capacity. The depth and shape of freezing front was determined the required range for soil replacement to protect walls against frost heaving.