

平成26年度

積雪寒冷地における補強土壁の健全性 に関する研究 —補強土壁の冬期施工について—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム

○橋本 聖
山梨 高裕
林 宏親

本稿は、北海道開発局で施工した既設補強土壁の変状状態や施工履歴等を把握するために実態調査を実施するとともに、調査結果を踏まえ、施工時期の異なる既設テールアルメ補強土壁を対象に現場引抜き試験を行い、壁の健全性を確認した結果を述べる。さらに、施工時期の温度条件の違いがストリップの引抜き抵抗に及ぼす影響を把握するために室内引抜き試験を実施した。これらの調査、試験の結果を総括して、冬期施工が補強土壁の安定性に及ぼす影響について考察した。

キーワード：補強土壁、テールアルメ工法、冬期施工、引抜き試験

1. はじめに

北海道の冬期において、土工事は低温や降雪等の影響を受ける環境にある。冬期土工設計施工要領¹⁾によれば、1年のうち冬期施工に位置づけられる期間は11月～3月の5ヶ月間に及ぶ。冬期間の土工事は決して好ましいものではないが、事業の促進や通年施工などの観点から冬期施工が行われる場合もある。

補強土壁も例外ではないが、木幡²⁾は北海道建設部で構築した既設補強土壁の変状事例を検証した結果、基礎形式の変化による相対沈下、笠コンクリートの変形のほか、冬期施工による盛土への凍結土の混入によって施工不良となり融雪期に融解した盛土が沈下して、壁面のはらみ出しの誘因となると指摘している。

そこで筆者らは、①北海道開発局が施工した既設補強土壁を対象に施工時期、使用した盛土材料、施工後に生じた補強土壁の壁面変位量などの実態調査、②施工時期の違い（夏期、冬期）がストリップの引抜き抵抗に及ぼす影響を把握するための現場引抜き試験、③施工時期の異なる温度条件（夏、春秋、冬）によるストリップの引抜き抵抗を定量的に把握するために、室内にて温度条件を変化させたストリップの引抜き試験をそれぞれ実施した。

本稿ではこれらの調査、試験の結果を総括して、冬期施工が補強土壁の安定性（健全性）に及ぼす影響について考察した。

2. 一般国道における既設補強土壁の実態調査

実態調査は平成16～22年の7年間に北海道開発局で施工した既設補強土壁28箇所、道路土工（擁壁工）指針に記載されているテールアルメ補強土壁、多数アンカー式補強土壁、ジオテキスタイル補強土壁を対象とした（図-1）。調査は①設計条件（内的安定、外的安定）、②施工条件（土質区分、細粒分含有率、締固め度、含水比、気象条件）、③現況調査（壁面変位量、擁壁周辺条件）の3項目を実施したが、紙面の都合上、テールアルメ工法と多数アンカー式補強土壁工法の「壁高と壁面変位量」と「細粒分含有率と壁面勾配」を報告する。その他の調査結果に関しては文献³⁾を参照されたい。



図-1 調査箇所

工事記録から各現場の施工時期（夏期、冬期）を整理した。冬期土工設計施工要領¹⁾では、土の凍結、雪の混入などによって品質の低下を防止する配慮の必要がある土工期間を11～3月としている。これに従い11～3月の期間を「冬期施工」と定義して、この期間以外を夏期施工として整理した。施工比率は約7:3と「冬期施工」が多いことがわかった。次に、施工時期に応じた壁の傾き具合を把握するために、壁高（全壁高を高さ0.5m間隔で計測）と壁面変位量の関係を整理した（図-2）。図より、壁面変位量が大きくなる傾向は夏期施工より冬期施工がやや多いといえる。ただし、木幡²⁾が指摘する盛土内の雪や凍結土の融解が主要因とされる、壁面が局所的にはらみ出す変形モードは確認されなかった。

盛土材の細粒分含有率と壁面勾配の関係を図-3に示す。壁面勾配とは、直壁の壁頂部および中間部の壁面変位量を壁高で除したものである。図をみると、壁面勾配 i の平均値は土質区分、細粒分含有率や施工時期の違いに関係なく $i = \pm 1\%$ 程度の範囲内に収まっていた。補強土壁の施工管理基準^{例えは⁴⁾}は、壁高の3%、かつ300mm程度の壁面変形であれば安定性を保つ目安とされている。この値自体に工学的な根拠は存在しないが、これらの値を超過する経時的な壁面変位の進行は確認されなかった。

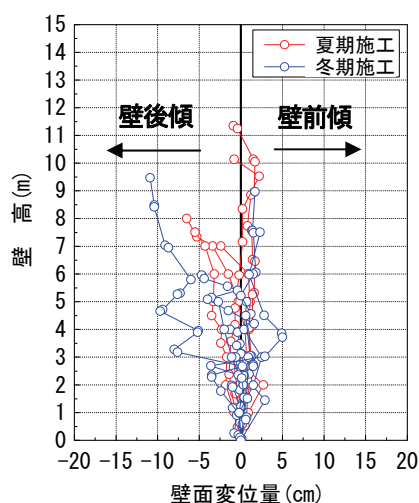


図-2 壁高と壁面変位量

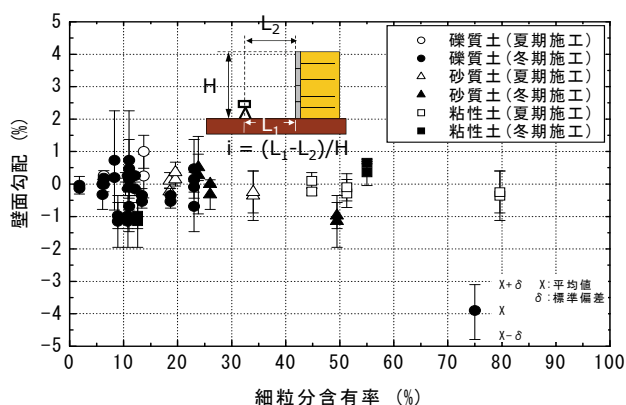


図-3 細粒分含有率と壁面勾配

3. 既設テールアルメ補強土壁の現場引抜き試験

実態調査の結果、冬期施工の実施事例が多いという知見を得たが、施工管理基準に工学的根拠が無い以上、ストリップの引抜き抵抗が設計値を満足するか定かではない。そこで、主に冬期間（11～3月）に施工された壁のうち、壁面の位置を問わず壁前方か壁後方への水平変位が最も大きい箇所（北見_最大変位量：12cm）、施工期間中の積雪量が最も多かった箇所（留萌_積雪量：120cm）を対象に現場引抜き試験を実施し、実測の引抜き抵抗が設計値を満足するか確認した。鹿追は夏期施工であるが、冬期施工との比較という位置づけで選定した。なお、試験の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

3.1 補強土壁の設計諸元および盛土材料

表-1に試験箇所の設計時の諸元を示す。各現場の設計定数は「補強土（テールアルメ）壁工法設計・施工マニュアル⁴⁾（以降、マニュアル）」に従って決定した。

表-2に盛土材料の物性を示す。マニュアルでは $F_c \leq 25\%$ の土は [A] 材料（良質土）に位置付けている。鹿追と北見は粒径幅の広い砂混じり礫（ $F_c = 16.6\%$ 、 22.4% ）、留萌は分級された礫（ $F_c = 8.0\%$ ）といずれも $F_c \leq 25\%$ であり [A] 材料の盛土材が使用されていた。

表-1 補強土壁の設計時諸元

調査箇所		鹿追	北見	留萌
規模	壁面積	227.8m ²	129.3m ²	433.9m ²
	延長	L	27.15m	16.24m
	壁高	H _{max} H _{min}	13.2m 3.0m	13.48m 1.48m
設計条件	盛土材の内部摩擦角	ϕ	30°	30°
	盛土材の単位体積重量	γ	19kN/m ³	19kN/m ³
	ストリップと盛土材の摩擦係数	f'	1.5～0.726	1.5～0.726
ストリップ	リブ付きストリップ	SM490 SS400	幅60mm×厚さ4mm 幅80mm×厚さ4mm	幅60mm×厚さ4mm -
	亜鉛メッキ	350kg/m ² (片面あたり)	350kg/m ² (片面あたり)	350kg/m ² (片面あたり)
	腐食しろ	1mm(両面)	1mm(両面)	1mm(両面)
	引張応力度(降伏点)	SM490 SS400	325N/mm ² 245N/mm ²	325N/mm ² -

表-2 盛土材料の物性

試験箇所		鹿追	北見	留萌
物理一般	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.821	2.711	2.758
	自然含水比 w_n %	13.6	23.4	11.0
粒度特性	礫 分 2～75mm %	69.0	43.2	68.0
	砂 分 0.075～2mm %	14.4	34.4	24.0
	シルト 分 0.005～0.075mm %	9.9	12.6	5.3
	粘土 分 0.005mm未満 %	6.7	9.8	2.7
	最大粒径 mm	53	37.5	19
	均等係数 U_c	1222.35	505.75	47.50
コンシテンシー特性	曲率係数 U_c'	13.56	2.42	2.84
	液性限界 w_L %	47.8	46.6	NP
	塑性限界 w_p %	27.9	24.2	NP
分類	塑性指数 I_p	19.9	22.4	NP
	地盤材料の分類名	粒径幅の広い砂混じり礫	粒径幅の広い砂混じり礫	分級された礫
	分類記号	(GW-S)	(GW-S)	(GP)
三軸圧縮特性	試験条件	CD	CD	CD
	全応力 c kN/m ²	35.6	9.9	27.0
	ϕ °	37.6	30.7	38.0
締固め特性	締固め方法	B-c	B-c	A-c
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm ³	1.993	1.682	2.001
	最適含水比 w_{opt} %	13.0	18.9	11.5

3.2 施工時の気象条件

試験箇所の施工時の気象条件は、施工現場の近傍にある気象庁の地域気象観測システム（AMeDAS）により、気温（日平均、日最高、日最低）、日降水量、日降雪量、積雪深、を整理した（図-4）。

夏期に施工が行われた鹿追では、補強土壁の施工を終える11月30日までに日平均気温が氷点下となる日が見られたが、最高気温は概ねプラスであった。施工期間を通じて、日降水量は20mm/日が数日見受けられたが降雪は確認されなかったため、施工条件としては、低温で時折、降雨の施工であったと思われる。

北見の施工期間は1月17日から2月4日までの19日間であり、この期間における日平均気温は常に氷点下、降雪は5日間、日当りの最大積雪量は4cmであった。これらから、施工期間中の降雪の影響は少なかったものの、非常に低温の中で施工が行われたと推測される。

留萌は最高気温が1月に入っても0℃以上の日が確認され、施工期間を通して凍結・融解を繰り返すような気温であった。降雪は施工開始から11日目の11月19日から始まり、工事が終了する1月23日までの66日間のうち降雪の無い日は11日間、最大積雪量は約120cmであった。留萌での施工は、壁の構築が進むにつれて日中の温度がプラスから氷点下へ移行するとともに、降雨や降雪に晒され、かつ積雪が多い非常に厳しい気象条件であったことが読み取れる。

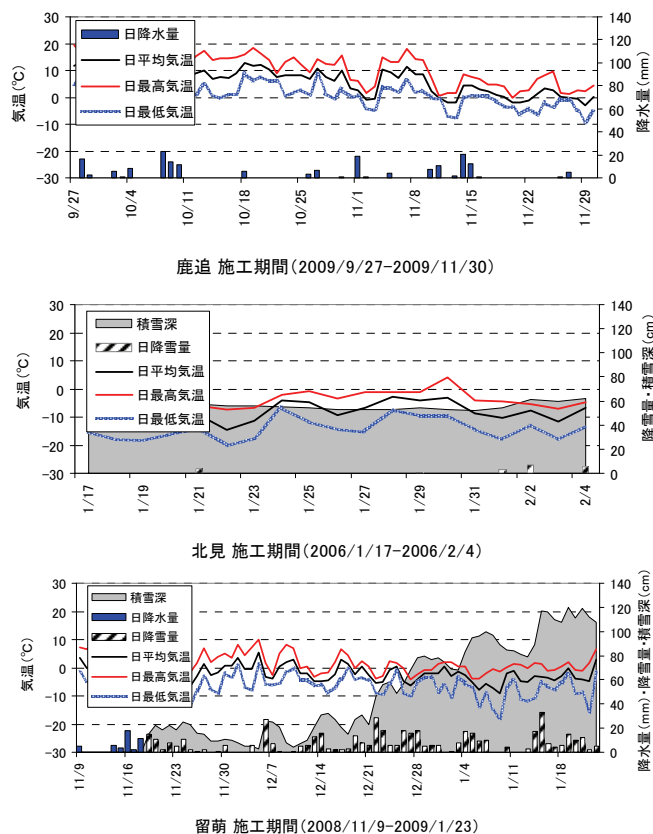


図-4 各現場の施工期間における気象データ

3.3 引抜き試験方法

引抜き試験は試験前にイニシャル値（油圧ポンプ圧力計、ストリップ引抜き量）を確認したあと開始した（図-5）。試験は圧力制御にて30秒で5kNごと段階的に载荷（所定の荷重到達後、5分間荷重保持）し、油圧ポンプ圧力計とストリップ引抜き量を記録した。なお、引抜き試験を終了する目安は、引抜き荷重 P が極限引抜き抵抗 S_f 、あるいは降伏点引張り力 S_p のいずれかに達したあと、3分間荷重を保持して試験を終了とした。



図-5 現場引抜き試験の状況

図-6 にテールアルメ補強土壁の主働領域と抵抗領域の関係を示す。 S_f は盛土内のストリップ上下面に作用するストリップ埋設深さ z における摩擦抵抗抗力で(1)式により、 S_p は降伏点引張り強さの下限値にストリップ断面積を乗じた値（図-7）で(2)式で算出される。

$$S_f = f_0 \cdot \sigma_v \cdot 2b \cdot L_i \quad (1)$$

$$S_p = \sigma_t \cdot t \cdot 2b \quad (2)$$

ここに、 f_0 ：土とストリップの見かけの摩擦係数（マニュアルより算出）、 σ_v ：ストリップ上の鉛直応力、 b ：ストリップ幅、 t ：ストリップ厚さ、 L_i ：ストリップ全長、 σ_t ：ストリップの降伏点引張り強さ

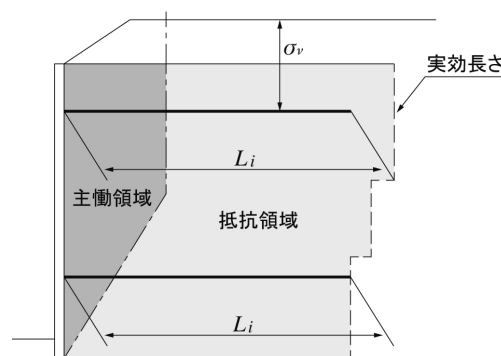


図-6 主働領域と抵抗領域の関係 ④一部、修正

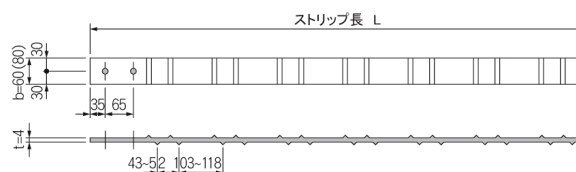


図-7 ストリップの形状寸法 ④

3.4 引抜き試験結果

図-8 に引抜き試験による最大せん断応力 $\tau_{\max}$ ($=P_{\max}/2 \cdot b \cdot L$) とストリップ直上の鉛直応力 σ_v ($=\gamma \cdot z$) から求めた測定摩擦係数 f ($=\tau_{\max}/\sigma_v$) とストリップ埋設深さ z の関係を示す。 γ は単位体積重量 ($=19\text{kN/m}^3$)、 $P_{\max}$ は現場引抜き試験の最大引抜き荷重である。各現場の f は、マニュアルで定められている設計摩擦係数 f^* ($=1.5 \sim 0.726$) をストリップ埋設深さ $z=8\text{m}$ を除き上回っていた。若槻ら⁹⁾ はリブ付きストリップの埋設深さが $z=7\text{m}$ より深くなれば規定値を下回るものが見られたが、壁全体の安定性に問題がなかったと報告している。

本試験でも若槻らと同様に $z=8\text{m}$ において f は f^* を下回ったが、経時的な壁面変位は確認されなかった。

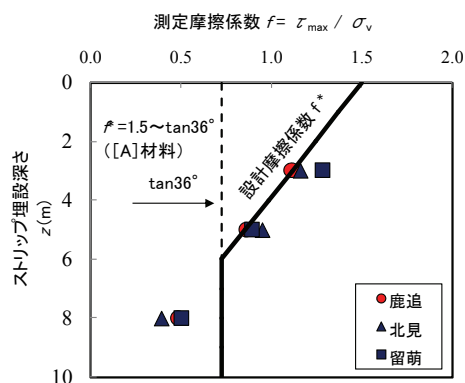


図-8 測定摩擦係数とストリップ埋設深さ

図-9 は小川の報告⁷⁾ に今回得られた f と壁面勾配 i の関係を重ね合わせたものである。 i は壁頂部の壁面変位量を壁高で除したものであり、プラスは壁が前傾、マイナスは壁が後傾することを表している。小川は f と i の間には明瞭な関係を見いだせないとしているが、今回の調査でも小川の調査結果と同様であった。

実態調査の結果、北見の i は最大 $i_{\max} = -1.4\%$ であったが壁全体の健全性は確保されていた³⁾。

テールアルメ補強土壁は多少の壁面変位を伴って壁の安定を図る特長を有すること、測定摩擦係数が設計摩擦係数を満足し、かつ経時的な壁面変位が生じていないことを踏まえると、 f が f^* を満足した上で i が図-9 の範囲であれば、壁の安定性に影響を及ぼさないと考えられる。

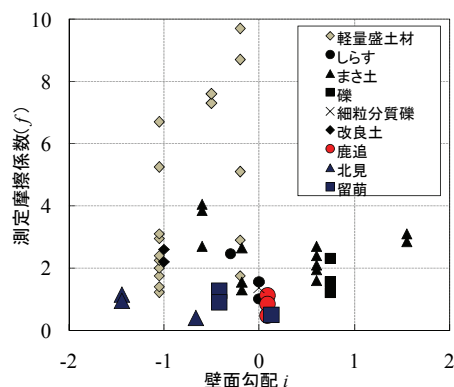


図-9 測定摩擦係数と壁面勾配⁷⁾に加重

4. 温度条件を変化させた室内引抜き試験

冬期にテールアルメ補強土壁を構築する場合、1 日の作業を終えてから翌日の朝までの盛土を実施しない時間帯は外気によって盛土表層部に凍結が生じ、翌朝はこの状態からさらに盛土を構築することが考えられる。ただし、ストリップ周辺の盛土が凍結して春以降にこれらが融解すると、盛土のゆるみ等によってストリップの引抜き抵抗が低下する恐れがある。

そこで、地盤に作用する温度条件を変化させたストリップの引抜き試験を実施し、温度条件の違いによる引抜き抵抗について考察した。なお、室内引抜き試験の詳細は文献 8) を参照されたい。

4.1 土質材料およびストリップ

本試験では[A]材料に位置づけられる砂質土を用いた。表-3 に土質材料の物理特性を示す。マニュアルによると、原則として最大粒径が 75mm 以下の土質材料のうち、細粒分含有率 F_c が 25% 以下の[A]材料（いわゆる、良質材）して適用されている。ストリップは平滑とリブ付の 2 種類に大別されるが、今回試験で使用したのは実現場でも使用頻度の高いリブ付とした。リブ付ストリップの形状および寸法を図-10 に示す。

表-3 土質材料の物理特性

試料		砂質土
土質名称		S-FG
土粒子の密度	ρ_s (g/cm ³)	2.720
自然含水比	W_n (%)	17.1
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.500
細粒分含有率	F_c (%)	16.7
シルト分	(%)	7.3
粘土分	(%)	9.4
液性限界	W_L (%)	NP
塑性限界	W_p (%)	
塑性指数	I_p	
凍上速度	U_h (mm/h)	0.10
凍上性		中

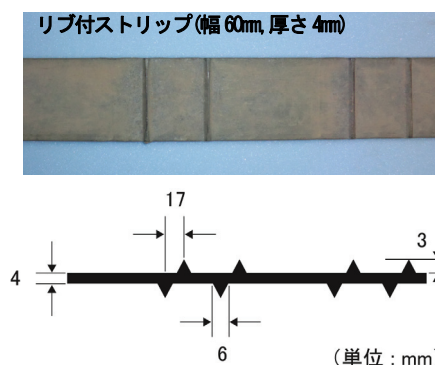


図-10 リブ付きストリップ

室内試験は改造したドライコンテナ（以降、コンテナ）内で実施した（図-11）。コンテナ内の温度調整は $-30 \sim 25^\circ\text{C}$ を自由に設定することが可能である。コンテナ内に引抜き試験装置や土質材料、引抜き試験土槽（以

下、試験土槽)の上蓋を開閉するための治具等を持ち込んで、一連の試験作業を行った。



図-11 改造したドライコンテナ

4.2 引抜き試験装置

図-12 に引抜き試験装置の断面および上面からの試験土槽内を示す。引抜き試験装置は、試験土槽、上蓋、ラバーメンブレン、ロードセル、スクリュージャッキ、変位計およびデータ記録装置で構成されており、空気圧によって $\sigma_v=0\sim160\text{kPa}$ の上載圧を付加でき、試験土槽(長さ 1,200mm、高さ 600mm、幅 600mm)内に投入した試料に対して、設置したストリップを $v=0.12\sim1.20\text{mm/min}$ で引抜くことが可能である。本試験では、実際の冬期施工による盛土を模擬するため、試験土槽内に密度調整した盛土に対して、試験土槽の側面に厚さ 50mm、底面に厚さ 100mm の断熱材を取り付けることで、冷氣、暖気を試験土槽上面から 1 次元方向のみ作用させた。

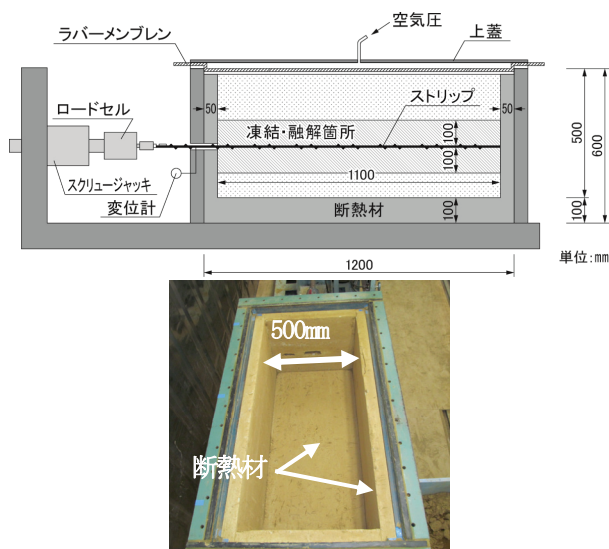


図-12 引抜き試験装置および引抜き試験土槽

4.3 試験手順

引抜き試験を実施する前に表-3 の試料を養生した。コンテナ内で常温条件は 20°C 、低温条件と凍結・融解条件は 2°C で 24h 養生した。その後、試験土槽底面から 150mm の高さまで自然含水比 w_n の試料を締固め度 $D_c=90(95)\%$ で密度調整してストリップを設置した。

常温、低温条件はストリップ設置前と同じ手順にて、試験土槽頂部まで試料を投入し盛土を作成した。盛土作

成時のコンテナ内の温度は常温条件が 20°C 、低温条件では 2°C とした。作成した盛土上に空気圧が確実に作用するようにラバーメンブレンを敷いて上蓋を設置した。

凍結・融解条件はストリップを設置するまでは、低温条件と同じ手順であるが、さらに試料を投入してストリップより 100mm 上まで締固め度 $D_c=90(95)\%$ で密度調整した。盛土作成時の温度は低温条件と同じ 2°C とした。

ストリップ上下 100mm の盛土は「凍上性判定のための土の凍上試験方法(JGS0172)」に従って、凍結速度 $U=1.0\sim2.0\text{mm/h}$ で凍結させた。土中の温度は T 型熱電対を凍結・融解ゾーンに設置し、各実験ケースの凍結速度が上記の範囲内にあるか確認した。ストリップより 100mm 下の温度が 0°C を下回ったことを確認し試験土槽頂部まで試料を投じて再び締固め度 $D_c=90(95)\%$ で密度調整した。その後、コンテナ内の温度を 25°C としストリップ上下 100mm の地盤を融解させ、ストリップより 100mm 下の温度が 0°C を超過したことを確認して上蓋を設置した。

4.4 試験ケース

表-4 に試験ケースを示す。ストリップの変位速度は $v=1\text{mm/min}$ で引抜き試験は常温、低温条件は所定の上載圧を付加した後に実施した。凍結・融解条件は融解後 1、3、14 日後の ± 6 時間以内に実施した。

表-4 試験ケース

ケース	盛土材料	締固め度	温度条件	上載圧 (kPa)
1	砂質土	$\rho_{d\max 90\%}(W_n)$	常温	60
2				140
3			低温	60
4				140
5			凍結・融解	60
6				140
7				60
8				140
9				60
10				140
11				60
12		$\rho_{d\max 95\%}(W_n)$	融解 1 日後	140

4.5 試験結果および考察

(1) 引抜き試験の整理方法

ストリップの単位面積当たりの引抜き力を引抜き抵抗 τ と定義し、引抜き試験で得られた最大引抜き力 $T_{\max}$ に対して、下記(3)式のストリップ引抜け長 ΔL の増加に応じてストリップ表面積の減少分を補正した A から、最大引抜き抵抗 $\tau_{\max}$ を(4)式により算出した。

$$A = \left(\frac{L_0 - \Delta L}{1000} \right) \times \frac{B}{1000} \times 2 \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{A} \quad (4)$$

ここに、 A : ストリップ引抜け長を考慮した表面積 (m^2)、 L_0 : ストリップ敷設長 (mm)、 ΔL : ストリップ引抜け長 (mm)、 B : ストリップ幅 (mm)、 $\tau_{\max}$: 最大引抜き抵抗 (kN/m^2)、 $T_{\max}$: 最大引抜き力 (kN)

(2) 引抜き試験結果

図-13 は引抜き試験の結果を温度条件ごとに σ_v と τ_{max} で整理したものである。小川⁹⁾はストリップと地盤との間に発生する σ_v と τ_{max} にはクーロンの破壊基準式 ($\tau_{max} = s' + \sigma_v \tan \phi$) が成立する、との知見を得ており、 s' と ϕ はストリップと地盤との間に発生する付着力と摩擦角 (土でいう粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ に相当) としている。

凍結・融解条件 ($D_c=90\%$ 、融解 1 日後) の τ_{max} は常温、低温条件のそれと比較して σ_v を問わず約 30%低下したが、凍結・融解条件 ($D_c=90\%$ 、融解 3、14 日後) の τ_{max} は常温、低温条件のそれと概ね同程度に回復した。また、凍結・融解 1 日後でも締固め度 $D_c=95\%$ とした場合は ϕ が大幅に増加した。凍結・融解条件 ($D_c=90\%$ 、融解 1 日後)におけるの最大せん断強度 τ_{max} が他ケースと比較して大幅に ϕ が低下した要因として、土粒子間の間隙水が凍結融解作用によって土粒子配列が乱れたために、一時的にインターロッキング (土とストリップのかみ合わせ) 効果が低下したと推察される。

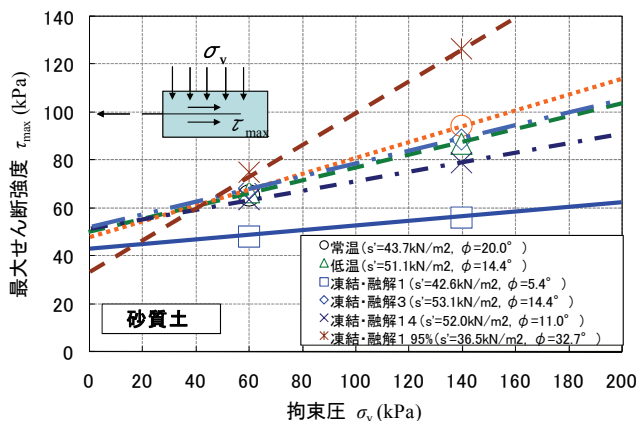


図-13 ストリップに作用する上載圧と最大せん断強度の関係

5. まとめ

2章で述べたとおり、既設補強土壁の実態調査結果では、冬期施工で構築された既設テールアルメ補強土壁の安全性に問題が生じていると判断された箇所は存在しなかった。この理由は下記によるものと考えられる。

- ① 凍結土の混入除去の徹底
- ② 天候 (降雪) に応じた施工管理の徹底
- ③ 良質土の採用

冬期施工を実施した場合、凍結土や雪の混入を100%阻止することは困難と思われる。しかし、実態調査において、冬期施工で使用する盛土材料は土取り場からの購入土がほとんどであったことから、盛土材料へ凍結土や雪の混入しないような施工管理が比較的容易だったと推察される。

現場引抜き試験の結果、施工時期に拘わらずストリッ

プの現場摩擦係数を満足した。さらに、温度条件を変化させた室内における引抜き試験の結果、ストリップを挟む砂質土が凍結・融解しても、融解後3日以上経過すると常温条件、低温条件と同程度の τ_{max} に回復することがわかった。

これらの知見を総括すると、良質の盛土材料を用いて適切な施工管理による施工を行えば、ストリップ間の盛土が凍結して春先にこれらが融解しても、引抜き力の低下は部分的でかつ一時的で、壁全体に致命的な損傷を及ぼすものではなく、冬期施工が直ちに補強土壁の不安定化に直結する可能性は小さいと考えられる。

本報告は、冬期における補強土壁工事を推進するものではない。やむを得ず実施しなければならない場合、本報告が現場施工の一助になれば幸いである。

一連の研究成果は、『補強土 (テールアルメ) 壁工法設計・施工マニュアル第4回改訂版』へ反映されたので参考にして頂きたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、各開発建設部の道路事務所より既設補強土壁に関する業務および工事成果品の提供、既設補強土壁の調査に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 通年施工推進協議会：冬期土工設計施工要領 pp.1-4, 1999.
- 2) 木幡行宏：寒冷地における補強土壁工法の信頼性，基礎工 /2010.2, pp.43-45, 2010.
- 3) 橋本聖、西本聡、林宏親、梶取真一：一般国道における既設補強土壁の実態調査結果，寒地土木研究所月報 No.710, pp.16-22, 2012.
- 4) (財) 土木研究センター：補強土 (テールアルメ) 壁工法設計・施工マニュアル 第3回改訂版, 2003.
- 5) 橋本聖、西本聡、林宏親、梶取真一：積雪寒冷地で施工された帯鋼補強土壁の現場引抜き試験，寒地土木研究所月報 No.725, pp.11-16, 2013.
- 6) 若槻良行、瓦川善三、奥田和浩：補強土 (テールアルメ) 壁工法の現地引抜き試験，日本道路公団試験所報告, vol.26, pp.13-20, 1989.
- 7) 小川憲保：テールアルメ工法における盛土材と壁面変位の関係，土木学会論文集 No.493, pp.119-125, 1994.
- 8) 橋本聖、山梨正裕、林宏親、山木正彦：温度条件の違いが帯鋼補強材の引抜き特性に及ぼす影響について，地盤工学会北海道支部技術報告集第54号, pp.93-100, 2014.
- 9) 小川憲保：現場引抜き試験による帯鋼補強材と盛土材との摩擦特性，土木学会論文集 No.568, pp.221-226, 1997.