

平成26年度

寒冷気候下での固化材による不良土改良 —反応熱を利用した改良例—

寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○ 佐藤 厚子
山梨 高裕
北見工業大学名誉教授 鈴木 輝之

小さな供試体による室内試験によれば、不良土を固化材で改良したとき、養生温度が強度に与える影響は大きく、養生温度が0℃未満の場合、ほとんど強度は発現しない。しかし、現場では、盛土が大きく、さらに施工方法を工夫することによって、盛土の温度は室内試験ほど低下しないと考えた。そこで、現場試験施工において、固化材により改良した材料で盛土を施工して、凍結状態や強度を調査した。その結果、現場では、盛土はほとんど凍結せず、強度発現したことを確認した。

キーワード：固化材、改良、寒冷、反応熱、盛土

1. はじめに

盛土工事において、土に必要な強度がなく盛土の安定が確保できないような不良土を改良する場合、セメントや生石灰などの固化材により改良して施工する方法がある。これらの方法で改良した材料により、室内で小さな供試体を作製して強度を測定すると、養生温度の影響を受け¹⁾²⁾、0℃未満で養生した場合は、ほとんど強度発現しない³⁾。これは、室内試験の小さな供試体を0℃未満で養生すると、供試体中の水分が凍結し、固化作用が進行しないため、破壊され長期強度の発現が阻害される⁴⁾⁵⁾と考えられる。このため、これまで固化材により改良した材料による盛土は、慣例的に寒冷気候下では施工されていなかった。

一方、土砂とセメント系の固化材を混合すると、土砂の中の水とセメントが反応して水和熱が発生し、寸法が大きいほど発熱量も大きい⁴⁾。盛土は室内試験の供試体よりはるかに大きいので、セメントで改良した材料による盛土を一般的な方法で施工しても、寒冷気候下でも凍結しないで、強度発現する可能性がある。

また、固化材が生石灰の場合、土砂の水分と生石灰が反応して⁶⁾、発熱・膨張する。反応時間は、土の含水比、混合度合い、および気温により一定ではないが、4～12時間⁶⁾とされており、発熱・膨張している間に盛土を施工すると、締め固めた盛土が緩んで密度が小さくなり盛土の品質が低下する。このため、生石灰による改良土を施工するときは、発熱・膨張反応が終了するまで、仮置

き養生しなければならない。この発熱反応中の材料を施工済みの盛土の上で翌日まで仮置き養生することにより、盛土が凍結しないで、強度発現すると考えた。

しかし、これまで、寒冷気候で固化材により改良した材料による盛土を施工して、盛土内の温度や強度を計測した事例はほとんど報告されていない。

そこで、0℃未満の気温の中で、固化材により不良土を改良して実物大の試験盛土を施工し、盛土内の温度と強度を調べた。また、実際の施工現場において、不良土を生石灰系固化材により改良して盛土を施工する現場があったので、ここでも盛土内の温度と強度を調べた。

2. 調査内容

2.1 施工方法

寒地土木研究所苫小牧施工試験フィールドで、0℃未満の低温条件で、高炉B種セメントと生石灰の2種類の固化材により改良した材料および比較のため改良しない材料（原土）により試験盛土を施工した。セメントを固化材とした改良土、および原土では、一般的な方法により冬期に盛土を施工した。生石灰を固化材とした場合は、発熱・膨張反応が終了するまでの間仮置き養生するが、これを固化材との混合後から翌日まで、施工済みの盛土の上で行うことにより盛土を保温した。

試験施工では、表-1に示す原土1に固化材を混合し、図-1に示す形状で盛土した。固化材と原土1とは、汎用

表-1 盛土材料の基本物性値

盛土		試験施工	実施工
		原土1	原土2
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.732	-
自然含水比 w_n (%)		68.59	27.0
粒度特性	2mm以上(%)	1.5	-
	75 μ m~2mm(%)	70.1	-
	75 μ m以下(%)	28.4	-
コンシステンシー限界		N.P.	N.P.
地盤材料の分類記号		(SF)	(GS-F)
搬入時の土砂の温度(°C)		3.6~8.4	-
コーン指数 qc (kN/m ²)		649.1	207

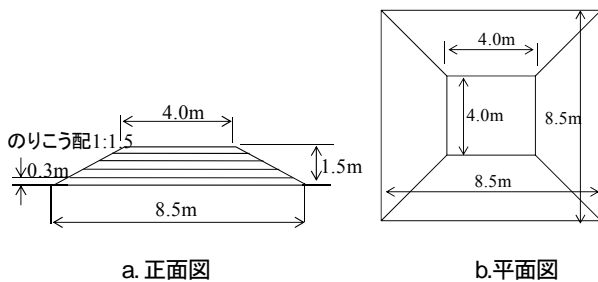


図-1 盛土の形状

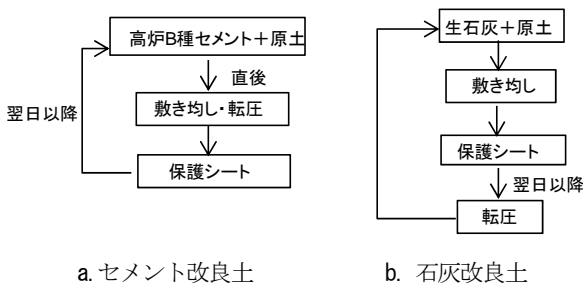


図-2 施工の手順

性のある建設機械であるバックホウのバケットで約 10 分間攪拌混合した。試験施工の手順を図-2 に示す。高炉 B 種セメントと原土 1 との混合土（以降セメント改良土）は、混合後、すみやかに盛土施工箇所ですき均して転圧した。生石灰と原土 1 との混合土（以降生石灰改良土）は、1 層目では、盛土施工箇所ですき均した後養生した。2 層目以降は、転圧済みの盛土の上ですき均し、反応が終了するまで養生し翌日転圧した。それぞれの改良土は、原則として、1 日 1 層ずつ、仕上がり厚さを 30cm として施工した。

北海道では、改良土を施工するとき、汎用性があり、取り扱いが比較的容易なポリエチレン製の保護シート（通称ブルーシート、本文では保護シート）を盛土表面に敷設することが一般的である。本試験施工でも、盛土の施工途中は保護シートで施工箇所を覆った。いずれも盛土完成後の最上層は保護シートを敷設していない。また、保護シートの影響を調べるため、保護シートを敷設

しない置き土による盛土も調べた。これらの結果は、未改良の原土 1 を用いて、保護シートを用いない一般的な方法で施工した盛土と比較した。

2.2 調査方法

試験盛土では、盛土中央部の温度を表面から深さ 10cm ごとに温度センサーを配置して毎正時に自動計測した。また、試験施工では盛土の強度発現傾向を調べるため、盛土表面の衝撃加速度⁷⁾を測定するとともに、施工の翌年 10 月に盛土を開削し盛土内の衝撃加速度を測定した。衝撃加速度は、一軸圧縮強さと相関性が高いことから、室内試験により衝撃加速度と一軸圧縮強さの関係を求めておき、現場で測定した衝撃加速度から一軸圧縮強さを推定した。なお、冬期施工により盛土が凍結した場合は、凍土の強度を測定することとなり、正確な強度を測定できない。このため、衝撃加速度を測定する盛土表面箇所を断熱材で覆った。用いた断熱材は、これまでの実験⁸⁾で凍結を抑制することができた住宅用断熱材である。この材料は厚さ 5cm で、熱伝導率は 0.033×10^6 (W/m \cdot K) である。図-3 に計測位置の概略を示す。

また、表-1 の原土 2 を石灰系固化材により改良（以降石灰系改良土）した実際の道路盛土の工事において、盛土の表面から 10cm ごとに温度センサーを設置し、融雪期の 5 月下旬まで、毎正時に温度を自動計測した。さらに 5 月下旬に盛土の一部を開削し、衝撃加速度を測定した。なお、この盛土施工では保護シートを敷設しなかった。

試験施工および実際の施工条件の概略を表-2 に示す。なお、原土 1 に対する固化材の混合量は、不良土を固化材により改良する場合としては比較的多いが、この試験施工では、発熱の効果を確認するため、多めに設定した。

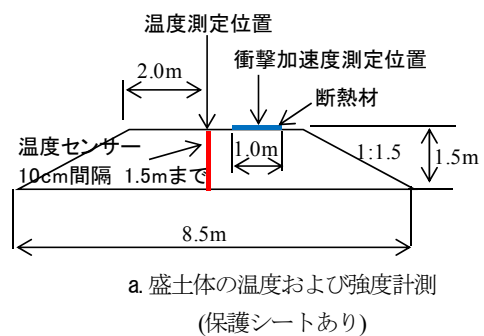


図-3 a. 盛土体の温度および強度計測 (保護シートあり)

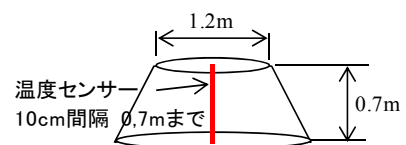


図-3 b. 置き土（敷き均し前の改良土）の温度計測 (保護シートなし)

図-3 計測位置の概略

表-2 試験施工および実際の施工条件の概略

盛土		試験施工				実際の道路工事		
固化材		高炉 B 種セメント	生石灰	無	無	石灰系固化材		
混合量		10% (原土の湿潤重量に対して)			0	12	22	17.5
						kg/m ³		
盛土高(m)		1.5	0.7	1.5	0.7	1.5	3.0	
施工時期		1/15-1/23	1/26	1/15-1/23	1/16	1/15-1/23	11/13	12/17
保護シート		有	無	有	無	無	無	無
バケットの種類		一般的				-	ふるい状	
施工時の 気象条件	気温 (°C)	最高	3.4				0.5	-0.2
		最低	-19.2				-6.3	-1.1
	最大積雪深(cm)	31 ⁹⁾				81 ¹⁰⁾		

3. 調査結果

3.1 固化材混合による改良土の温度変化

原土 1 に固化材を混合したときの改良土の温度変化を求めた。固化材と原土 1 の混合は、気温-13°Cのもとで行い、締めをしないで置土し、表面から深さ 10cm の位置の温度を測定した。混合前と混合から約 3 時間後の温度を表-3 に示す。セメント改良土では、改良前 6.7°C であった原土 1 がセメント混合 3 時間後に 11.1°C まで上昇した。石灰改良土では 7.7°C であった原土 1 が生石灰混合 3 時間後に 43.1°C まで上昇した。セメント改良土、石灰改良土のいずれも固化材混合による発熱で温度が上昇した。特に、石灰改良土で温度上昇が大きい。

表-3 固化材混合による温度変化

固化材	セメント	生石灰
時間	温度	
10:00(混合前)	6.7	7.7
13:00(混合 3 時間後)	11.1	43.1

3.2 原土による盛土施工中の凍結状態

原土 1 による盛土について、施工開始から盛土開削までの盛土内の 10cm ごとに計測した温度から凍結深さを推定した。図-4 に施工中の盛土の凍結状態を示す。

原土の敷き均し、転圧中には盛土は凍結しなかった。施工中はマイナス気温であり、1 層目から 5 層目のすべてで、時間の経過とともに盛土表面から凍結が進んでいった。1 層目では、転圧から次の日の施工までに約 10cm 凍結した。2 層目の盛土材の敷き均し、転圧作業により、凍結した箇所が一旦融解した。その後 5 日間盛土作業を休止したことから盛土の表面が寒気にさらされ、凍結深さが大きくなっていった。3 層目、4 層目、5 層目の施工でも、原土の保有熱により、敷き均し、転圧作業後、凍結表面が若干融解した。しかし、2 層目以降は、ほぼ 1 日で盛土の 1 層目が凍結した。原土 1 のような材料により、一般的な盛土施工を行うと、夜間の休止作業により、

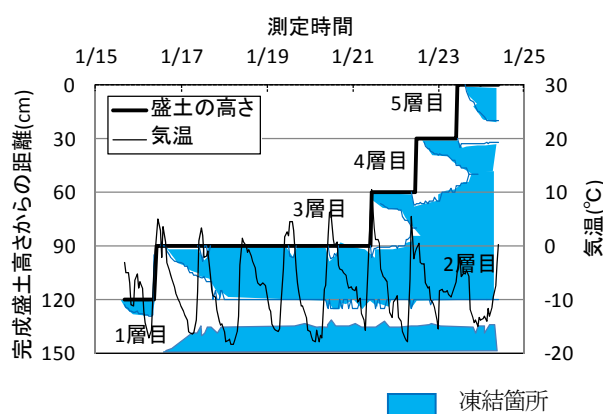


図-4 施工中の盛土の凍結状態(原土)

盛土全体がほぼ凍結する場合があるといえる。

3.3 改良土による盛土施工中の凍結状態

施工期間中は、夜間にマイナス 19.2°C まで低下する場合もあり、寒冷下における施工であった。

セメント改良土について、保護シートを敷設したときの盛土施工中の凍結状態を図-5 に示す。転圧から翌日の施工前までの時間で、凍結深さは 1 層目と 4 層目で 0cm、3 層目と 5 層目で 2cm であった。2 層目は盛土作業休止の 5 日間で、気温の変動にともない、凍結融解を繰り返した。1 層目から 4 層目までの凍結箇所は、その上に次の盛土を施工 (敷き均し・転圧) したとき、盛土材

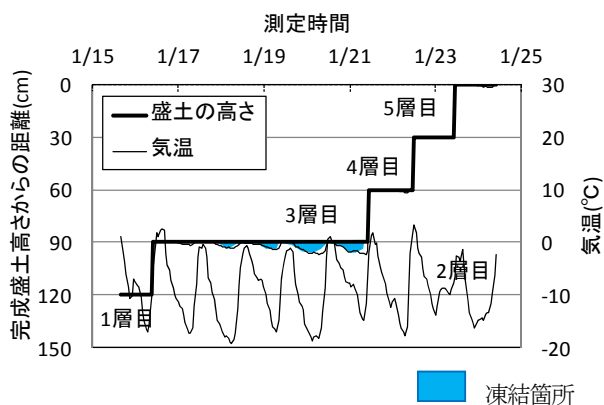


図-5 施工中の盛土の凍結状態(セメント改良土)

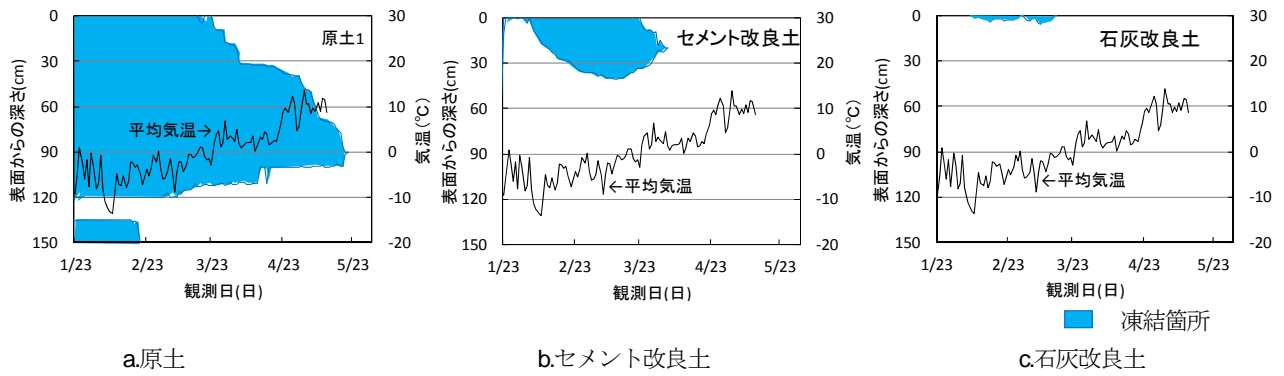


図-6 盛土施工から融解までの盛土内の凍結状態

の保有熱および原土とセメントとの反応熱により、盛土表面が融解した。盛土施工中は、盛土内に凍結箇所は存在しなかった。

石灰改良土を施工済みの盛土の上で仮置き養生して覆土する施工方法では、5日間寒気にさらされた2層目を含めて、どの層においても施工中に盛土が0°C未満になることはなく、盛土の凍結を抑制できた。

保護シートを敷設した固化材改良土は、限定された条件(土砂、固化材量)ではあるが、盛土の施工中は0°C未満の気温であっても1週間程度は盛土がほぼ凍結しないことがわかった。また、改良による熱反応の影響は大きく、特に、生石灰による改良では、発熱量がセメントよりもかなり大きいといえる。

3.4 盛土融解までの盛土内の凍結状態

盛土完成から融解までの盛土内の凍結状態を図-6に示す。また、最大凍結深さ、凍結開始時期、盛土表面からの融解開始時期、凍結消失時期を表-4に示す。施工後の日平均気温は、0°C未満の期間が2か月続いた。最大凍結深さは、原土1のみの盛土では120cmであったが、石灰改良土では6cm、セメント改良土では40cmであり、固化材で改良した盛土は、原土1のみよりもかなり凍結深さが小さかった。

凍結開始時期は、原土1のみでは、施工直後から凍結し始めたのに対し、セメント改良土では施工から11日後、石灰改良土では15日後からであり、盛土完成後も固化材の反応熱により、盛土の凍結を抑制できた。

盛土内の凍結が消失する時期は、最大凍結深さが小さい方が早く、このため、凍結期間も最大凍結深さが小さい方が短かった。特に石灰改良土では、盛土完成後、ほ

表-4 各盛土(施工中シート有り)の凍結、融解時期

	最大凍結深さ	凍結開始	凍結消失	凍結期間
原土1	120cm	1/24	5/21	117
セメント改良土	40cm	2/3	4/4	60
石灰改良土	6cm	2/7	3/16	37

とんど凍結しなかった。セメントや生石灰の固化材の反応熱により、盛土の凍結を抑制できた。

3.5 保護シートによる盛土凍結抑制効果

セメント改良土と石灰改良土による盛土を施工し、保護シートを敷設した場合と敷設しない場合で、凍結深さを測定した。保護シート有り2層目と保護シート無しの場合の盛土について施工からの日数と凍結深さを図-7に示す。セメント改良土の保護シート無しは、施工の工程上固化材の混合日が異なっている。

全体では、保護シート有りの方が無しよりも凍結深さが小さい。石灰改良土では、保護シートが無くてもセメント改良土の保護シート有りよりも凍結深さが小さかった。セメント改良土では、保護シートによる養生で、混合後4日目の凍結深さは保護シート無しの場合の約半分程度であった。また、石灰改良土では、保護シートがなければ盛土はわずかに凍結したが、保護シートがある場合は、盛土が凍結することはなかった。

保護シートの敷設により改良土と保護シートの間に空気層が形成されたこと、さらに風が地表面に直接当たらないことによる放熱量の減少の効果が現れたものと考えられる。このように、保護シートは凍結の抑制に効果があるといえる。

3.6 盛土の衝撃加速度の変化

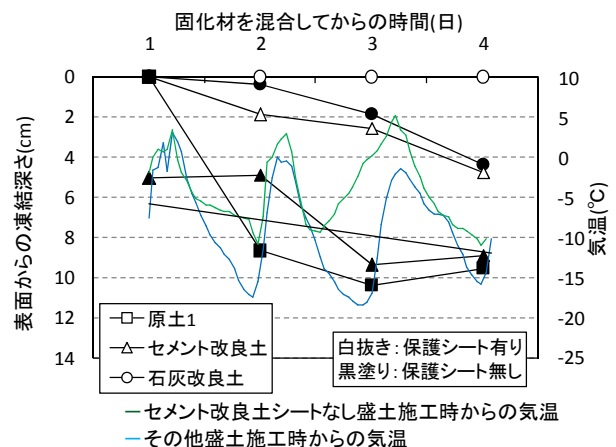


図-7 保護シートが盛土の凍結に与える影響

各材料により施工した盛土の表面の衝撃加速度の変化を図-8に示す。原土のみ（未改良土）およびセメント改良土の一部に凍結が見られ正確な衝撃加速度を測定できなかった。原土のみの測定箇所の盛土表面は、断熱材により断熱したが、盛土完成日が真冬日であり、盛土完成からの時間経過がごくわずかであっても表面は凍結した。石灰改良土は、前述したように、固化材を混合してから発熱しており、盛土表面が凍結しなかった。盛土表面の衝撃加速度は、セメント改良土、石灰改良土ともに施工から1週間程度は時間とともに大きくなった。施工5か月目は施工から1週間とほぼ同じであった。施工から時間が経過しても強度の低下はなかった。また、盛土開削時に測定した盛土内部の衝撃加速度は、セメント改良土、石灰改良土ともに施工時よりも大きくなっており、時間経過による強度発現を確認できた。

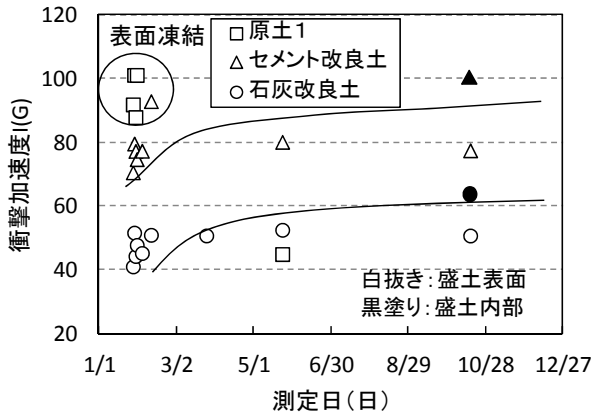


図-8 盛土の衝撃加速度

セメント改良土、石灰改良土の7日養生後の衝撃加速度と一軸圧縮強さを図-9に示す。固化材により改良した盛土の強度の目標値を7日養生後の一軸圧縮強さ 150kN/m^2 ¹¹⁾ とするといずれの固化材改良土の場合でも、この強度となる衝撃加速度は 50G である。試験施工による盛土では、盛土表面および盛土内部の衝撃加速度は、 50G 以上であり、盛土としての安定性を確保できることが確認された。

3.7 実際の道路工事現場での施工

実際の道路工事現場における、固化材による改良工事は富良野市内で実施された。室内試験の結果、対象土の改良として石灰系固化材が最も適した固化材であった。本施工に際して、目標強度を得ることができる固化材量を決定するため、石灰系固化材を混合した改良土（以降石灰系改良土）により試験施工を行った。試験施工における固化材の配合は、対象土に対して 12kg/m^3 、 17kg/m^3 、 22kg/m^3 とし、このうち 12kg/m^3 、 22kg/m^3 の石灰系改良土による盛土の温度を計測した。

図-10は、盛土の凍結深さと気温の経時変化を示した

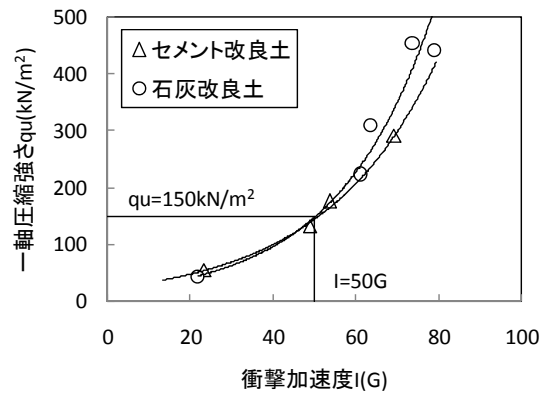
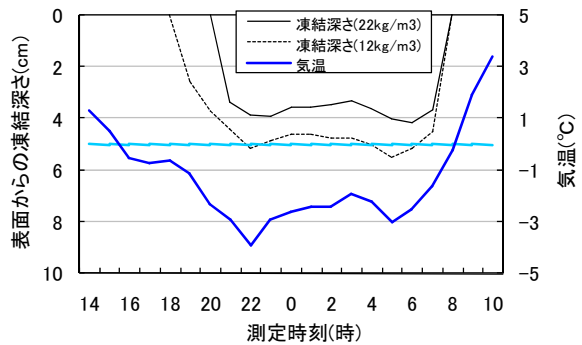


図-9 原土1を材料とする固化土の7日養生後の衝撃加速度と一軸圧縮強さ



ものである。固化材を混合した時刻は、固化材量 12kg/m^3 で11時、固化材量 22kg/m^3 で15時であった。固化材を混合してからの時間経過にともない気温は低下し、16時には 0°C 未満となり、深夜には、 -4°C まで低下した。この間、固化材量 12kg/m^3 の凍結深さは 5.5cm 、固化材量 22kg/m^3 では 4.0cm であった。気温がプラスになると凍結した改良土はすべて融解した。固化材量が多いと発熱量が多く凍結深さが小さい傾向にあった。

図-10 現場施工による盛土の施工時の凍結深さと気温

試験施工の結果、石灰系改良土の配合は、 17.5kg/m^3 であった。この配合で施工した道路盛土内の温度を計測し、図-11に示す。この施工では、石灰系固化材を用いたので、発熱膨張のための養生を転圧済みの盛土の上で行った。盛土を施工してから3月下旬までのこの箇所での平均気温は 0°C 未満であった。石灰系改良土は、盛土完成後、時間の経過とともに凍結深さが大きくなり、盛土表面から 30cm 程度凍結した。気温が 0°C 以上となる頃から凍結した箇所が融解し始めた。

盛土が完全に融解した5月下旬に盛土を開削し、盛土が凍結しなかった箇所(表面から 1m の深さ)で衝撃加速度を測定した。衝撃加速度は 63.8G であった。室内試験によりあらかじめ求めた衝撃加速度と一軸圧縮強さの関

係から、目標一軸圧縮強さに対応する衝撃加速度は 60G であった。これらの結果より、寒冷期における実際の石灰系改良土による道路工事では、盛土の凍結は最大で 30cm 程度であり、凍結しなかった箇所では、盛土に必要な強度が確保されたことを確認できた。なお、同じ材料、同じ配合で冬期に施工した盛土は凍結融解したが、この箇所の衝撃加速度は 58.6G であり、凍結した箇所では目標値を確保できなかった。

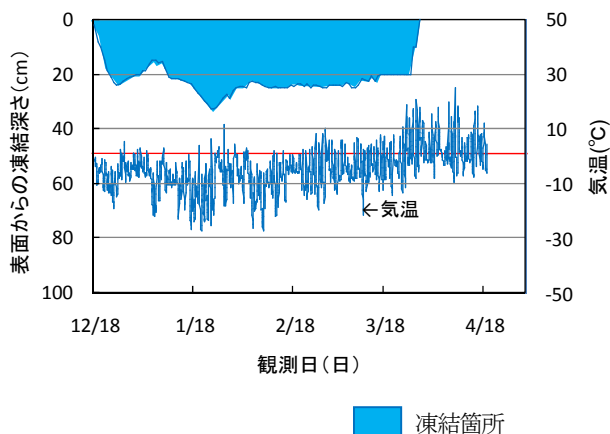


図-11 現場施工による盛土の施工後の凍結深さと気温

5. まとめ

本検討で、セメントや石灰などの固化材による改良を行った。これまで、0°C未満の寒冷気候での固化材による改良は、なるべく行わないようにしてきた。本検討では、固化材量が多かったこと、1シーズンの結果であったことから、混合量や適用できる気温の範囲など施工条件に課題は残っている。しかし、寒冷地域でも一般的な方法およびそれほど手間をかけない方法により、固化材による改良が可能となることがわかった。これらをまとめると次のとおりである。

- ① セメントおよび生石灰などの固化材による改良では、反応熱により改良土の温度が上昇する。特に、生石灰では温度上昇効果が大きい。これにより、盛土内の凍結を抑制できた。
- ② 固化材による改良土では、盛土の施工中に 0°C未満の気温になっても、1週間程度は盛土が凍結しなかった。
- ③ 凍結が抑制された盛土の融解時期の強度は、目標強度を満足していた。
- ④ 汎用のポリエチレン製シート(いわゆるブルーシート)の敷設は、空気層の断熱効果や風当たりによる放熱の減少効果によって、地表面の温度低下を防ぐ効果がある。
- ⑤ 寒冷地域で固化材により不良土を改良する場合、冬期間であっても夏期の施工と同様な方法で施工でき

る。生石灰による改良では、発熱反応終了までの養生を転圧済みの盛土上で行う。さらに、盛土完成までは、保護シートにより盛土表面を養生すると凍結防止の効果が大きい。また、現場では盛土の完成まで1週間程度で施工すると、盛土はほとんど凍結しなかった。

6. おわりに

今回の検討では、固化材の混合量が限られたケースであったが、固化材で改良した材料による盛土施工では、施工上の工夫により、冬期土工の可能性を見いだした。また、セメント改良土による施工では、一般的な方法で施工しても盛土に必要な強度発現があることを確認した。しかし、試験施工は固化材量を多くしており、実際の施工では、固化材や土質によっては十分な強度が得られない場合がある。このため、施工には十分な配慮が必要となるので、寒冷気候下で固化材による改良を施工する場合には、寒地地盤チームまでぜひご相談いただきたい。

謝辞: 最後になりましたが、本報告の作成に当たり、現場を提供いただきました北海道開発局旭川開発建設部の関係者の皆様には、末筆ながら心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋谷健二他：ソイルセメントコラムの原位置温度測定及び養生温度の強度に及ぼす影響, 第20回土質工学研究発表会, pp.1737-1740, 1985.6
- 2) 日本道路公団北海道支社札幌技術事務所：凍上技術テキスト, 2003.3.
- 3) 佐藤厚子、鈴木輝之、西本 聡：セメントおよび石灰改良土の発現強度に及ぼす養生温度の影響、地盤工学ジャーナル Vol.3, No.4, 331-342, 2008.11.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99, p.177, 1999.9
- 5) 日本石灰協会：石灰による路床路盤の安定処理工法, p.34, 1985.8
- 6) 日本石灰協会：石灰安定処理工法 設計・施工の手引, p.27, 1985.12
- 7) 北海道開発局：道路河川工事仕様書、付表 4-39、http://www.hkd.mlit.go.jp/download/h26_kouji/dk26_6.pdf, 2014.4.
- 8) 佐藤厚子、山梨高裕、鈴木輝之、川端伸一郎：冬期土工による盛土の性状、第49回地盤工学研究発表会発表講演集、2014.7
- 9) 気象庁 過去の気象データ検索 胆振地方苫小牧地点
- 10) 気象庁 過去の気象データ検索 上川地方富良野地点
- 11) 土木研究所寒地土木研究所：北海道における不良土対策マニュアル、2013