

土の凍上抑制工法と
火山灰土の凍上特性に関する研究

2001年3月

川端 伸一郎

土の凍上抑制工法と火山灰土の凍上特性に関する研究

2001年3月

学位論文内容の要旨

川端 伸一郎

土の凍上抑制工法特性と火山灰土の凍上特性に関する研究

寒冷地において冬期に地盤が隆起する凍上現象は、道路構造物をはじめ各種の構造物に機能低下や損傷・破壊などの甚大な被害を生じさせる。このような凍上被害に対しては、既に構造物の重要度に応じ、幾つかの凍上対策工法が提案されており、中でも凍上性の土を非凍上性の土に置き換える置換工法は、高い信頼性と適用範囲の広さから多くの構造物に利用されている。しかし、置換工法は近年の建設コストの削減や環境問題から様々な問題点も取り上げられてきている。これは、置換工法が常に置換対象となった土の処分地確保や大量の粗粒材料を必要とするためであり、処分地や土取場周辺的环境保全の面から時代と共に注目され始めたものである。これに伴い、凍上抑制工法に関する研究は、新たな展開を見せはじめ、置換厚さの見直しや天然の粗粒材料に代わる代替材料の開発、置換工法以外の凍上抑制工法の試行が積極的に行なわれるようになってきている。

本論文は、凍上抑制工法に関わる問題として、材料の凍上性評価手法や置換対象土の削減を目的とした石灰による安定処理の凍上抑制効果の検討、ならびに構造物の種類に応じた凍上対策工法の提案などを行い、各種凍上対策工法の効果と道内に多く存在する火山灰土の凍上特性を明らかにすることを目的とした。

本論文は、全7章で構成されている。

第1章では、凍上抑制工法の現状と問題点を述べ、本研究の目的を示した。また、既往の研究と本研究の関連性を示し、本研究が扱う問題を明確にした。

第2章では、凍上発生のメカニズムや現状の凍上対策工法、凍上性の判定方法などについて述べた。さらに、凍上抑制工法として期待される土質安定処理について、主に石灰安定処理を取り上げ、その基本的な反応メカニズムについて解説した。

第3章では、各種火山灰土を対象に凍上特性および凍結融解作用を受けた場合の材料性状の変化について述べ、次のような結果を得た。

- 1)従来型の細粒分含有率と強熱減量による凍上性判定では、規定値外に多くの非凍上性の火山灰土が存在することを示した。
- 2)自然含水比と土粒子の密度による火山灰分類を用いると、自然含水比が低いVs1とVs2に非凍上性材料が分布することを明らかにした。

3)自然含水比 (ω_n) と最適含水比 (ω_{opt}) の関係より非凍上性火山灰土は $\omega_n \doteq \omega_{opt}$, 凍上性は $\omega_n > \omega_{opt}$ の関係になることを明らかにし, 自然含水比と最適含水比の関係を用いることにより凍上性の分類が可能であることを示した。

4)火山灰土の凍上性判定法として, ω_n と ω_n/ω_{opt} の関係による 4 つの分類領域を設定し, 簡易凍上性評価法を提案した。

5)凍結・融解履歴を与えた火山灰土は, Marsal の破砕率および細粒分の増加から微小ではあるが, 全ての火山灰土で粒子破砕が確認された。しかし, 破砕は 1 サイクル目の凍結・融解作用で生じており, サイクル数の増大は破砕性の増加には繋がらないことを示した。

6)Marsal の破砕率は, 自然含水比および土粒子の密度と相関が見られ, 自然含水比が高いほど, また土粒子の密度が小さなものほど破砕が顕著であった。ただし, 両指標を単一で使用するには例外的な火山灰土もあり, Vs 分類のような座標上で破砕性を捕らえることが有効であった。

第 4 章では, 置換工法に代わる凍上抑制工法として石灰安定処理に着目し, 凍上抑制効果に関わる材料性状を取りまとめた。また, 第 5 章では原位置における石灰安定処理の凍上抑制効果を検証し, 以下のような結果を得た。

1)安定処理土の凍上性は強度と相関が高く, CBR を 100 程度まで改良すると凍上率を 5%以下にすることが可能であることを示した。

2)意識的に粒子間結合力を減少させた混合養生が一般的な締固め養生よりも顕著に凍上抑制効果が現れた。このことから, 従来安定処理土の凍上抑制因子の一つと考えられていた固化効果は凍上抑制に直接寄与していないことが確認された。さらに, 安定処理による透水性の減少傾向が短期間に一定値に収束することから, 透水性の変化も固化効果と併せて凍上抑制因子としては関連が薄いことを示した。

3)吸着水量と凍上量は高い相関関係にあり, 吸着水量の減少が凍上抑制に寄与していることを示した。また, これらの関係は養生方法や試料によって異なった関係になっており, 毛管力や透水性の違いを理由として挙げた。

4)原位置でも石灰安定処理に凍上抑制効果があり, 凍上量は添加率 10% で凍上抑制層として砂を用いたタイプと同値程度に抑えられることを確認した。

5)原位置で実測された凍結深さは砂と比較すると現状土を用いたタイプが 20cm 程度浅い位置に存在し, 凍上性の土を石灰安定処理することにより凍上抑制層の層厚を減ずることが可能であることを示した。

第 6 章では, 特殊な凍結環境にある農業用施設に対する凍上対策工法の提案を目的に, 各種農業用施設の原位置観測データから凍結環境と断熱工法の有効性を検証し, 次のような結果を得た。

- 1)畜舎に対して基礎断熱併用スカート断熱工法を施工した結果，凍結深さの抑制に効果があることを確認した。しかし，一般建築物に比べると施設内部からの熱供給条件の違いによって，畜舎の凍結深度が深部まで達することを明らかにした。
- 2)施設区分により内部の凍結環境が異なることを明確にした。また，施設の使用方法によっても凍結環境が大きく異なることを示し，その要因として敷き藁の断熱効果を挙げた。
- 3)規制緩和の対象となる施設区分Ⅰの畜舎に対して，畜舎特有の使用方法などを考慮に入れた独自の凍上対策工法を提案した。

第 7 章では，凍結環境下での材料特性や各種凍上対策工法の効果について総括し，今後さらに多様化すると考えられる凍上対策工法の課題を提起した。

土の凍上抑制工法と火山灰土の凍上特性に関する研究

目次

第 1 章 序論	1
1-1 研究の背景と目的	2
1-2 凍上問題に関する既往の研究	
1-2-1 凍上現象	4
1-2-2 凍上量予測	5
1-2-3 凍上性の評価と凍上対策工法	6
1-3 本論文の構成	9
第 1 章の参考文献	11
第 2 章 凍上現象と凍上対策工法の現状	16
2-1 凍上の発生機構	17
2-2 凍結深さの推定方法	18
2-3 凍上対策工法	22
2-3-1 置換工法	23
2-3-2 断熱工法	24
2-3-3 遮水工法	25
2-3-4 土質安定処理工法	25
2-3-4-1 土質安定処理の種類と適用範囲	26
2-3-4-2 石灰安定処理の基本的原理	27
2-3-4-2a 消化吸水反応	28
2-3-4-2b イオン交換反応	29
2-3-4-2c ポゾラン反応	29
2-3-4-2d 炭酸化反応	29
2-3-4-3 石灰安定処理の強度増加に及ぼす諸要因	30
2-4 凍上性の評価手法	31
2-4-1 土質による凍上性判定手法	31
2-4-2 凍上試験による凍上性判定手法	34
2-4-2a 排水工指針法	34
2-4-2b 日本道路公団法	35
2-4-2c 本研究で用いた凍上試験	36

第2章の参考文献	38
第3章 粗粒火山灰土の地盤材料としての凍上特性	40
3-1 緒言	41
3-2 粗粒火山灰土の凍上性	
3-2-1 はじめに	42
3-2-2 試験試料と実験方法	
3-2-2a 試験試料の概要と試料分類	45
3-2-2b 実験方法	50
3-2-3 試験結果と考察	
3-2-3a 従来型の凍上性簡易判定	50
3-2-3b 火山灰分類と凍上性	51
3-2-3c 締固め特性と凍上性	53
3-2-3d 新しい火山灰土の凍上性簡易判定方法	59
3-2-4 まとめ	60
3-3 凍結融解履歴が粗粒火山灰土の粒子性状に与える影響	
3-3-1 はじめに	62
3-3-2 試験試料と実験方法	62
3-3-3 結果と考察	63
3-3-4 まとめ	69
3-4 結び	69
第3章の参考文献	71
第4章 石灰安定処理土の凍上抑制効果に関わる材料特性	73
4-1 緒言	74
4-2 石灰安定処理土の強度特性と凍上抑制効果	
4-2-1 はじめに	74
4-2-2 試験試料と実験方法	75
4-2-3 安定処理土の一軸圧縮強度	77
4-2-4 凍上抑制効果と強度特性の関係	82
4-2-5 まとめ	86
4-3 水分特性の変化が石灰安定処理土の凍上性に与える影響	
4-3-1 はじめに	87
4-3-2 水分特性と凍上性	87
4-3-3 試験試料と試験方法	88

4-3-4	結果と考察	
4-3-4-1	石灰安定処理の凍上抑制効果	90
4-3-4-2	透水係数の経時変化と凍上量の関係	91
4-3-4-3	p F 特性と凍上性	92
4-3-4-3a	早期段階の反応による p F 特性の変化	92
4-3-4-3b	養生方法の違いによる影響	93
4-3-4-4c	試料の違いによる影響	95
4-3-4-4d	凍上性と水分特性の関連性	95
4-3-5	まとめ	97
4-4	結び	98
	第 4 章の参考文献	99
第 5 章	原位置試験による石灰安定処理の凍上抑制効果の検証	101
5-1	はじめに	102
5-2	試験工区の概要	102
5-3	観測内容と方法	103
5-4	試験年度の気象状況	103
5-5	凍結深さと土中温度	105
5-5-1	凍結深さの推定	107
5-6	凍上抑制効果	108
5-7	まとめ	111
	第 5 章の参考文献	112
第 6 章	農業用施設における凍上抑制工法とその効果	113
6-1	はじめに	114
6-1-1	一般建築物における凍上対策と畜舎建築の現状	114
6-2	施設区分と実験対象施設	115
6-3	観測内容と方法	120
6-4	結果と考察	
6-4-1	各調査地点の気象状況と土質性状	124
6-4-2	基礎断熱併用スカート断熱工法の効果	125
6-4-3	施設区分の違いによる内部の凍結環境と積雪の断熱効果	127
6-4-4	使用目的の違いによる凍結環境	128
6-5	まとめ	133

第 6 章の参考文献	134
第 7 章 結論	135
謝辞	140
研究業績目録	142

第 1 章 序論

第 1 章 序論

1-1 研究の背景と目的

凍上現象を簡易に表現すれば、土の凍結による体積膨張現象である。ただし、土粒子自体が凍結により体積膨張を起こすことは無く、全ては土中の水分に起因した現象である。水分の相変化による体積膨張に関しては、周知のように水は氷に変化する過程で約 9%の体積膨張を起こす。しかし、このような直感的にも理解できる現象で凍上の全てを説明することは困難であり、凍上発生メカニズムの解明には多くの研究者が長い時間を費やしながらも未知の領域が多く残った現象である。

凍上を物理的現象としてそのメカニズムの解明研究が理学の分野で進む一方、工学的なアプローチは、地盤凍結工法に代表される凍土の利用技術と寒冷地における凍上抑制技術の集約である。凍土は低強度のコンクリート並みの強度を有し、かつ遮水性に優れた材料である。この特性を生かし、地盤中に一時的な止水壁や耐力壁を築造し利用する技術がトンネル建設などに広く応用されている。このような地盤凍結工法が建設技術の一端を担い社会基盤整備が進む一方で、寒冷地では冬期間の凍上現象により、構造物の破壊や機能低下などの被害が生じてきた。その代表的な構造物は道路であり、寒冷地の凍上抑制技術の歴史は、道路の凍上対策の歴史といっても過言ではない。

日本で初めて凍上問題が取り上げられたのは、昭和初期の旧満州鉄道の工事に関連して作られた耐寒対策委員会や昭和 14 年旧札幌鉄道局に凍上対策委員会ができてからである¹⁾。この当時は、鉄道を中心とした基盤整備が進んだ時代であったことから、凍上問題も鉄道建設上の問題として扱われてきた。しかし、その後は交通形態の変化による現代までのモータリゼーションの急速な進展が凍上問題を道路を中心としたものに変えていった。

国内で道路の凍上問題が表面化した背景には、戦後に冬期間の交通確保のため精力的に除雪を進めたことにある。北海道では、昭和 20 年の札幌一小樽、札幌一真駒内の 128km の除雪から始まり、僅か 5 年後の昭和 25 年には、冬期交通可能な道路延長が 3,000km にまで達した²⁾。このような除雪は、従来まで数 m の積雪下で地盤凍結を免れていた路床土を著しく凍結させ、その結果、凍上現象がにわかに表面化することとなった。

国内で凍上問題の解決が急務とされた時代より、やや先行した形で 1930 年代には、Taber³⁾や Beskow⁴⁾によって凍上の理論体系が作られていた。したがって、国内の道路凍上問題の解決にも、これらの理論を基にした対策技術への応用として道内各地で凍結深さの実測や被害調査が精力的に行われた⁵⁾。北海道開発局を中心としたこれらの

調査結果により、昭和 30 年代後半までにほぼ現在の凍上対策工法の原型が出来上がり置換工法すなわち、凍上性の土を理論最大凍結深さ程度まで非凍上性の土に置き換える工法が凍上対策の主流となった。この工法が国内で確立されたことにより、凍上の被害数は激減することになる。前述した凍上のメカニズムに関する研究や凍土の利用技術が時代と共に進展する反面、凍上抑制工法に関する研究がこの時代を期に収束したとも言える。現在まで凍上抑制工法の研究に注目が集まらなかった理由には、置換工法の信頼性の高さが挙げられる。置換工法は、凍上の本質的な土質の部分を改善する手法であるため、十分な材料選定と置換厚さを決定すれば、凍上をほぼゼロに抑えることが可能である。このような信頼性の高さから、一時期を境に凍上問題を解決済みの問題と扱う向きもあった。しかし、近年の建設コストの削減や環境問題から置換工法に対する問題点も幾つか挙げられるようになってきた。

瀬在ら⁶⁾は、高速道路で生じた凍上箇所⁷⁾の 9 割が切土に集中しており、盛土で生じた箇所⁸⁾の約半数は 3m 以下の低盛土で被害が集中していることを報告している。このような調査から、現在一律に設計されている置換工法に対して現場条件を加味した置換率の変更へと積極的な研究が成され始めている^{7),8)}。

また、置換工法は大量の掘削土を生じさせることから掘削残土の処分問題や同時に置換土として使用される良質な粗粒土（碎石や砂）の枯渇も懸念されている。上述の置換率の見直しなども掘削土の削減などコスト面からも有効な手法である。さらに近年では、置換材料の代替としてコンクリート廃材^{9),10),11)}や廃タイヤ^{12),13),14)}、廃ビニールペレット^{15),16)}などを利用した研究例も報告されており、凍上対策として新たな展開を見せている。

つぎに、凍上対策が道路を軸として発展してきたことを述べたが、他の構造物にも凍上の被害は広く観察されている。しかし、道路のように一定条件で除雪が行われるような構造物と異なり、特に多雪地域の構造物では除雪環境などによって凍上の被害形態も大きく変化してくる。そのため、一律の対策を施すことが難しく、単純な置換工法の適用などは、状況によって過剰設計に成り得る可能性も強い。基本的に置換工法は、凍上を完全に抑制する手法であり、構造物のニーズや重要度によっては、地盤の凍上性を低減させる程度の補助的な抑制工法が適する場合もある。しかし、現状では、構造物の種類や使用環境に応じた凍上対策工法の提案などはされておらず、今後様々な手法での凍上抑制工法の提案が望まれるところである。

本論文は、凍上抑制工法に関わる問題として、材料の凍上性評価手法や凍上性土の有効利用を目的とした石灰による凍上抑制効果の検討、ならびに構造物の種類に応じた凍上対策工法の提案などを行い、各種凍上対策工法の効果について明らかにすることを目的とした。

1-2 凍上問題に関する既往の研究

1-2-1 凍上現象

自然界における凍上現象は、冬季に地盤内の温度が低下し、間隙水が凍結することに起因して発生する。ただし、水-氷への相変化による体積膨張率は9%程度であり、冬季間に数10cmにも及ぶような地盤隆起を単なる水の相変化から説明することはできない。凍上により隆起した地盤を掘削すると、幾重にも層状に形成された氷晶（アイスレンズ）が確認でき、それら氷の総量は凍結前に存在した水分量を遥かに超える量になっている。すなわち、凍上現象とはアイスレンズを形成する過程で未凍結部分から水分の供給を受けた場合に生じる現象であり、水分供給を受けながら成長したアイスレンズが幾重にも形成されることにより、大きな体積膨張を生じさせる。

地盤の凍結は、冬期間の凍上による地盤隆起や初冬に見られる霜柱など身近な現象として古くから人々に知られていた。しかし、土質工学が18世紀のCoulombの土圧論に始まり、Terzaghi(1925)によって近代土質工学として体系付けられたことを考えると、凍上研究の歴史はそれほど古くはない。初めて凍上を理論的観点から述べられたものは1930年代のTaber³⁾やBeskow⁴⁾の研究からであり、凍上が土中に発生するアイスレンズに起因したのものとして、水分の移動と氷晶生成のメカニズムを論じた。特にTaberは、凍結時に体積収縮を起こすようなベンゼンなど数種の液体で置換した土においても凍上を確認し、凍上が水分の相変化による膨張現象ではないことを示した。また、Beskowは平均粒径と凍上性の関係から凍上を起こしやすい粒径として、0.005～0.002mmの範囲を示した。Casagrande¹⁷⁾は、0.002mm以下の粒子含有量と凍上性の関係に着目し、凍上速度から凍上性の判定方法を提案した。また、Casagrande¹⁷⁾が示した凍上速度の判定を元にKaplur¹⁸⁾は各種の土質と凍上性の関係を取りまとめた。

凍上性と粒径の関係などが明らかにされる一方で、凍上研究の当初から精力的に最大凍上力の研究がされるようになり、この過程でEverettとHaynes¹⁹⁾によって凍上機構の説明に毛管力が使われるようになった。しかし、その後に毛管力理論で得られる凍上力が実際の凍上力よりも著しく小さいことをRaddとOertle²⁰⁾が実験的証明したため、この理論は否定された。他の凍上理論として、Takagi²¹⁾による吸着水膜理論はアイスレンズの成長による吸着水膜の減少を水膜の厚みを保とうとする機構から凍上力や吸水力を説明した。ただし、吸着水膜理論だけで実際の凍上現象を説明することは難しい点も多く、更なる理論の展開が必要とされている。

また、Miller²²⁾はアイスレンズが土中の0℃位置（凍結面）ではなく、やや低温側で成長することを確認し、アイスレンズと凍結面との領域をフローズンフリンジと名付けた。現在では、フローズンフリンジ内の水分挙動が凍上機構の解明の鍵とされており

り，幾つかの仮説が提案されている。Gilpin²³⁾は不凍水膜を通してアイスレンズへの水分供給がされるものとし，温度低下による不凍水膜の圧力変化で水分移動を説明した。Miller²⁴⁾はアイスレンズの成長による部分的な不凍水膜の厚さの変化を水分移動の説明に用いた。また，O'Neill と Miller²⁵⁾は両仮説を複合して水分移動モデルを提案した。現時点では，アイスレンズ直下にある厚さおよそ 10～20nm²⁶⁾とされている不凍水膜を介して水分供給がされることは確かと考えられるが，その水分の移動機構を物理的なモデルとして説明するには至っていない。

1-2-2 凍上量予測

凍上機構が物理的モデルとして完成に至っていないながらも，幾つかの工学的な凍上量予測のアプローチがされている。特に LNG や LPG 等の地下貯蔵によって生じるタンク周辺地盤の凍結に対して，設計に適用できる凍上量の予測が必要であった。LNG 等の地下タンクは，地下水位以下の大深度が対象となるため飽和地盤であることや自然凍結と異なり供給される熱量が想定しやすい条件にはある。しかし，LNG タンクの出現以前は，タンク設計に用いることができる実用的な凍上理論は存在しなかった。世界で最初に実用的な凍上量の定量予測を可能にしたのは高志²⁷⁾であり，土の凍上率を次式で表現した。

$$\xi = \xi_0 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \cdot \dots \cdot \dots \cdot (1-1)$$

ここに， ξ ：凍結膨張率， σ ：凍結面に作用する有効応力， U ：凍結進行速度
 ξ_0 ， σ_0 ， U_0 は室内凍上試験から求められる定数

凍上機構からは，凍上を支配する因子は凍結速度 U ではなく，凍結面の温度勾配であるとの考え方が一般的であり，高志の式は物理現象を厳密に説明するものではないといわれている。しかし，凍結速度は凍結面の温度勾配とも関連しており，実タンクの周辺地盤の凍上現象を精度良く推定できることから，この理論は工学的に高く評価されている。なお，高志の式は LNG タンクの設計や地盤凍結工法における凍上量や凍土圧の予測に広く用いられており，LNG 地下式貯槽指針²⁸⁾にも採用されている。

他の凍上予測理論としては，Konrad と Morgenstern による SP (Segregation Potential) 理論が存在する^{29),30),31)}。Konrad らは，多くの実験から凍上量を予測する式として次式を導いた。

$$V_0 = SP_0 \cdot grad T \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1-2)$$

ここに、 V_0 ：凍結面への吸水速度、 $grad T$ ：フローゼンフリンジ内の温度勾配、 SP_0 ：土の凍上性に依存した比例定数

SP_0 で表現される土の凍上性は、物理的に表現が困難な性質を実験によって工学的に置き換えた指標とされている。 SP_0 は上載荷重や凍結面での間隙水圧、フローゼンフリンジの温度低下速度に依存するため、物理的な定数としては成立しない。 SP は普遍的な物理定数には成り得ないものの、原位置でのこの理論の適用例では観測結果と比較的良好な一致を示すことが確認されている。Nixon³²⁾や福田³³⁾は、野外での精密な凍上試験によって、 SP 理論を検証し実際現象に一致することを示した。さらに福田³⁴⁾らは、自然環境下にある原地盤の温度分布と凍上量を計測し、それらの結果から求めた SP による予測値が実際の凍上量と一致することを示した。また、了戒と伊藤らは SP 理論が凍結速度が非常に小さな場合の飽和土や、さらに不飽和土についても工学的に利用可能であることを示し、吸水速度が有効応力に逆比例することを示した^{35),36)}。しかし、国内外でも SP 理論を用いた実際の解析は、例が少ないことや室内試験で正確なフリンジ内の温度勾配を調べるのが難しいことなど幾つかの問題もある。

凍上量の予測は、一部の人工凍結地盤などでは可能である。しかし、自然凍結地盤では、対象となる層が不飽和土であることや地下水位などの想定が難しいこと、さらに気象条件である凍結条件をどのように設定するかなど、解決しなければならない問題が多く、工学的に利用可能な予測手法の確立までには至っていない。

1-2-3 凍上性の評価と凍上対策工法

凍上性の評価には、粒度組成やコンシステンシーなど土の物性値から判定する手法と凍上試験によって直接的に評価する2種類の方法がある。

Beskow⁴⁾が粒径と凍上性の関係を示したように、Casagrande¹⁷⁾も0.02mm以下の粒子を3%以上含む土が凍上しやすいことを示している。Willis¹⁾はコンシステンシー限界と凍上性の関係をまとめている。現在各国で提案されている土質による凍上性判定の多くが粒度組成もしくは粒度組成とコンシステンシーから行われている。1989年に国際土質工学会のTC8が報告した土質からの凍上性判定もこれらの指標が同様に用いられている³⁷⁾。国内でも道路土工・排水工指針³⁸⁾には凍上を起こしにくい材料として粒度組成からの判定基準が存在する。

凍上試験は、人工的な凍結地盤の解析や研究レベルの特殊な試験を除き、材料の凍上性をグレード分けするための定性的な試験が多い。先に述べたように、土の凍上性は、凍結条件、有効応力、給排水条件などによって変化する。これらを加味した上で、

土の凍上性を固有の物性値として表現することは非常に難しく、凍上判定試験の多くは、ある試験条件下で凍上の可能性の強弱を調べるものである。また、寒冷地などの自然凍結を対象とした工学的な判定は、置換工法に代表されるような凍上対策工の必要性判定のために用いられるものであり、凍上対策の選定や設計法に直接利用されるものではない。国内では、伊福部²⁾が Taber³⁾の試験法を参考にして材料の凍上性判定のための実験を行い、昭和 30 年代活発に行われた火山灰土の凍上性判定のための凍上試験方法を示した。この試験方法は現在も利用されており、道路土工・排水工指針³⁶⁾や北海道開発局、日本道路公団³⁹⁾で仕様書などに記載されている。また、日本道路公団³⁷⁾では、独自の凍上試験法として CBR モールドを用いた凍上試験があり、凍上性と同時に凍上後の CBR も求めることができる試験法を提案している。しかし、近年これら国内に存在する凍上試験に対して、試験精度や試験条件の問題点などが指摘され始め、新しい試験方法の提案なども成されるようになってきている^{40),41)}。材料判定試験として特色があるものには、ASTM に記載されているスプリットタイプのリングモールドを用いる試験法がある⁴²⁾。これは、6 段に分かれたリング型のモールドを積み重ね、凍上時に生じる周面摩擦を低減させる方法である。しかし、このような試験法は稀であり大多数の試験は、アクリル製の円筒モールドに試料を入れるタイプである。

寒冷地における凍上対策の主流は、置換工法である。置換工法の採用には、上述の凍上試験などにより凍上性を判定し、凍結対象深さまでの土質が凍上性を示した場合、凍結深さを推定して非凍上性の土に置き換えがなされる。したがって、置換工法においては、材料判定と凍結深さの推定が最も重要である。地盤の凍結深さの推定には、土の熱伝導率などの熱的性質を把握する必要がある。熱伝導率の推定法としては、有名なものに Kersten や Johansen の実験式がある。Kersten⁴³⁾は 19 種類の土と砕石の実験から含水比と乾燥密度の関数として凍土と未凍土の熱伝導率を求める式を提案した。また Johansen⁴⁴⁾は、飽和度、間隙比、石英含有量などから熱伝導率を求める実験式を導いた。Faraouki⁴⁵⁾によると Johansen の式は、0.1 以上の飽和度で土質や凍結条件に関わらず良い結果を示すとされ、Kersten の式は飽和度が低い細粒土や石英量の異なる粗粒土には適合しないとされている。

凍結深さの推定には、土の熱定数を決定した上で、修正 Berggren 式(Aldrich 式)⁴⁶⁾が用いられる。これは、湖沼の氷層生成について熱伝導論より解析を行った Stefan や Neumann の解法を舗装体のような多層地盤に応用したものである。どの理論も、マイナスの熱を受ける一端（地盤の場合は地表面）が瞬時にあるマイナス温度になった時の凍結厚さを推定するものであり、本来は地表面温度により解析が行なわれるのが理想的である。しかし、実用上は外気温データを解析に用いている。この点については、理論上多少の問題はあるが、伊福部²⁾による道内数十箇所の実測例では最大凍結深さ

と推定値は、良い一致を示し工学的に問題がないことを確認している。また、武市ら⁴⁷⁾は AMeDAS データを用いて道内数ヶ所の実測凍結深さと推定値を比較し、最大凍結深が推定値と良く一致することを示した。さらに、従来の方法では、最大凍結深の推定には適するが、凍結進行過程の予測を過小評価する点について熱比の補正によって推定精度が上がることを示している。置き換え深さの決定は、推定された凍結深さを 100%とした場合の 70~100%の範囲で定められる。70%までの置き換え深さの低減については、伊福部²⁾による砂利道の観測で 80%以深に進行した凍結による地表面の凍上が全凍上量の 1%程度であったとの報告を基にしている。現在、国内のアスファルト舗装要綱⁴⁸⁾には、理論最大凍結深さの 70%の値が置き換え深さとして採用されている。道路の凍上対策のように常時除雪が行なわれる個所の凍結深さの推定は、上述の手法が用いられるが構造物の種類や地域によっては、積雪による凍結深さの減少が考えられる場合がある。福田⁴⁹⁾は、積雪下の凍結深さを測定し 20cm 以上の自然積雪が継続してあった場合、凍結面は地表面近くに停滞し地盤内の凍結が殆ど起こらないとした。また、Takeichi⁵⁰⁾らは、圧雪面が残る軽交通道路に対して、圧雪面下での凍結深さの推定法を提案している。このような、積雪の断熱性を考慮した凍結深さの推定法は、道路以外にも各種の構造物の設計に応用が可能であり、一般建築物などへの適用が期待できる。他の置換率の低減法としては、横田⁷⁾らが地下水位の深さと凍上量の実測の関係を実際の盛土によって観測し、地下水位までの距離が遠くなると凍上量が減少することを報告している。地下水位と凍上性の関係は、Beskow⁴⁾によっても示されており、載荷圧力が小さく無視できれば凍上速度は地下水位までの距離に反比例するとしている。したがって、横田らの研究のように盛土高さによって置換率を変化させるような手法が、現在一律の置換率で設計される手法に比べコスト面からも有効な手段になると考えられる。諸外国における置換工法の設計法としては、米国⁵¹⁾での置換率 80%、やスイス⁵²⁾では凍結深さ 90cm までは 100%とし、それ以上は経済的な理由から次第に置換率を低減させる手法が用いられている。

置換工法以外の凍上対策としては、ジオテキスタイル（不織布）などを用いた遮水工法や断熱工法、薬剤などによる土質の改善などがある。ジオテキスタイルによる遮水工法の効果は、土谷⁵³⁾、Bell⁵⁴⁾、Henry⁵⁵⁾などによって報告されている。舗装内に断熱材を敷設し凍結深さを抑制する断熱工法は、伊福部⁵⁶⁾や Kubo⁵⁷⁾によって凍結深さの減少が確認されている。ただし、断熱工法は人為的作業が多くコスト面からも置換工法よりも割高になることが多いため、道路の凍上対策としてはそれほど多く採用されていない。これに対し、建築物基礎への断熱工法の利用は、藤村⁵⁸⁾らによって積極的な研究が行なわれ、すでに設計マニュアル⁵⁹⁾も作られている。薬剤による土質改善は主としてセメントや石灰による土質安定処理であり、従来強度増加を目的として行

なってきた安定処理の凍上抑制効果を利用したものである。安定処理土の凍上抑制効果に関する研究は、Thompson⁶⁰⁾、Fukuda⁶¹⁾、石田^{62),63),64)}のほか、幾つかの研究報告がされている^{65),66),67),68),69),70),71),72),73)}。その多くは、室内試験によってセメントや石灰による安定処理の凍上抑制効果を確認した内容であり、原位置での研究報告はそれほど多く存在しない。Fukuda⁶¹⁾は、セメント安定処理土について室内および屋外での試験を行い凍上抑制効果を確認した。久保田⁶⁷⁾や松尾⁷⁰⁾、川端⁷³⁾などは実際の舗装構造内に安定処理層を設け凍上抑制効果を検証している。安定処理による凍上抑制は、すべての研究報告においてその効果が確認されているが、実務に積極的に利用されるには至っておらず、長期安定性や経済性、実際の施工方法など幾つかの課題を残している。

1-3 本論文の構成

本論文は、各種凍上対策の効果とそれらに用いる材料特性を明らかにするため、以下に述べる内容で構成されている。

第2章では、凍上発生のメカニズムや現状の凍上対策工法、凍上性の判定方法などについて述べる。さらに、凍上抑制工法として期待される土質安定処理について、主に石灰安定処理を取り上げ、その基本的な反応メカニズムについて解説する。

第3章では、火山灰土を対象に簡易な凍上性判定法および凍結融解作用を受けた場合の材料特性について述べる。火山灰土は北海道内に広く分布しており、様々な土工材料に用いられている。特に、良質な火山灰土は置換材料としても多く使用され、砂や碎石に代わる材料として位置付けられている。しかし、火山灰土の工学的性質を簡易な指標から判定することは難しく、特に凍上性は一般的な粗粒土のような細粒分含有率による判定が困難である。そこで、現在の火山灰土の凍上性簡易判定法の問題点を指摘し、各種土質パラメータと凍上性の関係から新たな凍上性簡易判定方法を提案する。さらに、凍結融解作用が火山灰土の粒子破砕性に与える影響を検討し、凍上性と併せて凍結をキーワードに道内火山灰土の材料特性を取りまとめる。

第4章では、置換工法に代わる凍上抑制工法として石灰安定処理に着目し、抑制効果に関わる材料特性を述べる。この章では、安定処理土の処理効果の確認として一般的な強度特性を取り上げ、一軸圧縮強度や CBR と凍上性の関係から石灰安定処理の凍上抑制効果を検証する。また、これまで明確にされていない安定処理による凍上抑制の機構を解明するため、透水性や p F 試験等からの水分特性の変化から凍上抑制効果に与える影響因子を特定する。これらの検討により、凍上抑制を目的とした安定処理の効果的な処理方法の提案を行なう。

第5章では、原位置における石灰安定処理の凍上抑制効果を検証する。検証は実物

大の舗装体を構築し、石灰添加率を変化させた安定処理工区と従来の置換工法の比較から、抑制効果を確認する。また、得られた結果から実施工における施工上の問題点を考察する。

第6章では、施設内部からの凍結が問題となる農業用施設に対する有効な凍上対策工法の提案を目的とし、各種施設の原位置観測データから凍結環境の調査と断熱工法の有効性を検証する。この検討には、施設の使用環境や構造上の特殊性、積雪の有無などを考慮し、様々な条件下における凍上対策法を提案する。

第7章は、本研究のまとめである。この章では、凍結環境下での材料特性や各種凍上対策工法の効果についてまとめを行い、今後さらに多様化すると考えられる凍上対策工法の課題を提起する。

第 1 章の参考文献

- 1)土質工学会，土質基礎工学ライブラリー23：土の凍結－その制御と応用－，1982.
- 2)伊福部宗夫博士論文集：北海道土木技術会，pp.83～189，1982.
- 3)Taber, S. :Frost Heaving, J. Geol., Vol.37, pp.428-461, 1929.
- 4)Beskow, G. :Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Road and Railroads, Swedish Geological Society, No.375, pp.1-144, 1935.
- 5)土木試験所月報，北海道開発局，第 39 号，pp.14，1956.
- 6)瀬在武，三島信雄，菊池勝三：寒冷地における凍上対策－現行凍上対策の問題点と凍上試験法－，日本道路公団試験所報告，pp.13～33，1985.
- 7)横田聖哉，三島信雄，三浦清一：地下水位を考慮した実用的な凍上量の設定法，土木学会論文集，No.574/VI-36，pp.21～31，1997.
- 8)横田聖哉，三浦清一，三島信雄：道路盛土における現地凍上試験，土と基礎，Vol.45，No.11，pp.27～29，1997.
- 9)渡辺将人，松原拓，樫村眞：コンクリート廃材を路盤材として用いた舗装体の冬期性状について，第 10 回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.132～137，1994.
- 10)佐伯昇，志村和紀，鈴木信貴，今井益隆，長尾博志：コンクリート再生骨材による路盤材への適用，第 10 回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.138～143，1994.
- 11)神谷光彦，橋本昭夫，草刈孝弘，笠原篤：コンクリート廃材の CBR と凍上性，第 27 回土質工学研究発表会講演集，pp.1205～1206，1994.
- 12)久保宏：自動車用古タイヤの用排水路裏込め材への適用，農業土木学会誌，Vol.63，No.5，pp.13～16，1995.
- 13)岸山晶信，伊関寛，北島明，福島伸二，福田正巳：廃タイヤ破砕ゴム混合土の圧縮沈下および凍上特性，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 40 号，pp.37～40，2000.
- 14)金学三，福田正巳：廃タイヤパウダー混合土の熱伝導特性について，北海道の雪氷，No.19，pp.7～9，2000.
- 15)伊藤智明，久保宏，佐渡知典，北野隆春：廃棄ビニールの凍上防止材への活用に関する研究，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 38 号，p.7～12，1998.
- 16)伊藤智明，久保宏：廃棄ビニールの凍上抑制層材への活用に関する研究(2)，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 39 号，p.115～120，1999.
- 17)Casagrande. A.: Discussion on Frost Heaving. Proc., H.R.B., pp.168-177, 1932.
- 18)Kaplur, C. W.:. Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils. CRREL Technical Report, No.250, pp.1-36, 1974.
- 19)Evrett, D. H. & Haynes, J. M.:. Capillary Properties of Some Model Pore Systems with

- Special Reference to Frost Damage., Re-union Internationae des Laboratoires disseis et de Recherches les Mutireaux et les Constructions Bull. New Series 27, pp.31-38, 1965.
- 20)Radd, F. J. & Oertle, D. H.: Experimental Pressure Studies of Frost Heave Mechanics and Growth-fusion Behavior of Ice, Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost, pp.377-384, 1973.
- 21)Takagi, S. :The Adsorption Force Theory. CRREL Report, 1978.
- 22)Miller, R. D. :Freezing and Heaving of Saturated and Unsaturated Soils, H. R. R., 393, pp.1-13, 1972.
- 23)Gilpin, R. R. :A Model for the Prediction of Ice Lensing and Frost Heave in Soil, Water Resources Res., 16, pp.918-930, 1980.
- 24)Miller, R. D.: Frost Heaving in Non-colloidal Soils, Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost, pp.707-713, 1978.
- 25)O'Neill, K., Miller, R. D. :Exploration of a Rigid Ice Model of Frost Heave, Water Resources Res., 21-3, pp.281-296, 1985.
- 26)木下誠一 : 凍土の物理学, 森北出版, 1982.
- 27)高志勤, 益田稔, 山本英夫 : 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究, 雪氷, No.36, pp.1~10, 1974.
- 28)日本ガス協会 : LNG 地下式貯槽指針, 1979.
- 29)Konrad, J. M., Morgenstern, N. :A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fringe-grained Soils., Canadian Geotechnical Journal, No.17, pp.473-486, 1980.
- 30)Konrad, J. M., Morgenstern, N. :The Segregation Potential of a Freezing Soils., Canadian Geotechnical Journal, No.18, pp.482-491, 1981.
- 31)Konrad, J. M., Morgenstern, N. :Prediction of Frost Heave in the Laboratory During Transient Freezing., Canadian Geotechnical Journal, No.19, pp.250-259, 1982.
- 32)Nixon, J. F. :Field Frost Heave Predictions Using the Segregation Potential Concept., Canadian Geotechnical Journal, No.19, pp.526-529, 1982.
- 33)福田正巳, 木下誠一, 了戒公利, 赤川敏 : 原位置凍上試験法について, 低温科学-物理編, 第 45 号, pp.99~107, 1986.
- 34)福田誠, 小川正二, 亀井健史 : Segregation Potential 理論による原位置凍上量予測, 土木学会論文集, No.400/Ⅲ-10, pp.253~259, 1988.
- 35)了戒公利, 若槻良行, 伊藤譲 : SEGREGATION POTENTIAL による凍上解析 (その 1), 土木学会第 44 回年次講演会講演概要集 (第Ⅲ部門), pp.800~801, 1991.
- 36)三嶋信雄, 伊藤譲, 了戒公利 : SEGREGATION POTENTIAL による凍上解析 (その 2), 土木学会第 45 回年次講演会講演概要集 (第Ⅲ部門), pp.316~317, 1992.
- 37)ISMFE Technical Committee on Frost, TC8 :Frost in Geotechnical Engineering, VTT

- Symp., 1989.
- 38)日本道路協会，道路土工-排水工指針-，1987.
- 39)日本道路公団：日本道路公団試験方法-土の凍上試験方法-，1992.
- 40)例えば酒井晃，鈴木輝之，澤田正剛，山下聡，宇野裕教：土の凍上試験法に関する研究，地盤工学会北海道支部技術報告集，第39号，pp.87～92，1999.
- 41)例えば高橋邦行，鈴木輝之，澤田正剛，山下聡：土の凍上試験法に関する研究(2)，地盤工学会北海道支部技術報告集，第40号，pp.11～16，2000.
- 42)ASTM :Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils.(ASTM STANDARD D5918-96), pp.1-12, 1996.
- 43)Kersten, M. S. :Thermal Properties of Frozen Ground., Proc. 1st Int. Conf. on Permafrost, pp.301-325, 1963.
- 44)Johansen, O. :Thermal Conductivity of Soils., Ph. D. Thesis, Trondheim Univ., Norway, 1975.
- 45)O. T. Farouki, :Thermal Properties of Soils, Trans Tech Publication, Series on Rock and Soils Mechanics, Vol.11, 1986.
- 46)Aldrich, H. P. : Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavement, Bulletin 135, H. R. B., 1956.
- 47)武市靖，久保宏：AMeDAS データを用いた凍結深さの経時変化の推定手法，土質工学論文報告集，Vol.31, No.2, pp.217～225，1991.
- 48)日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1991.
- 49)福田正巳：自然積雪下の土の凍結の深さの推定法について，北海道大学低温科学研究所業績，2446号，pp.55～74，1982.
- 50)Takeichi, K., Kubo, H., Kasahara, A. :A Pavement Design for Low-Volume Roads that Considers the Antifrost Effect of Thickly Packed Snow., 4th Inter. Conf. on Low-Volume Roads, TRR1106/Vol.2, pp.236-243, 1987.
- 51)Orlands B. Andersland and Duwayne M. Anderson :Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill Book Co., pp.348-355, 1978.
- 52)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－，1994.
- 53)土谷富士夫，辻修，三島信雄，横田聖哉：ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制，農業土木学会誌，Vol.60, No.12, pp.25～pp.28，1992.
- 54)Bell, J. R., Allen T. and Vison T. S. :Properties of Geotextiles in Cold Regions Applications, 4th Conf. on Permafrost, pp.51-56, 1983.
- 55)Henry K. S. :Laboratory Investigation of the Use of Geotextiles to Mitigate Frost Heave, CERRL Report 90-6, pp.1-28, 1990.

- 56)伊福部宗夫：断熱材による道路の凍上防止試験，北海学園大学工学部研究報告，No.1,1972.
- 57)Kubo, H. and Sakaue, T.:A Preventing Measure Against Frost Action of Airport Shoulder Pavement with Insulation Method, 1st Int. Symposium on Frost Geotechnical Engineering, Vol.2, pp.801-808, 1989.
- 58)藤村成夫，服部勝雄，阿部宏侑：断熱材を用いたベタ基礎の凍上防止の試験，第3回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.288～293，1987.
- 59)北海道建設部建築指導課：スカート断熱工法設計・施工マニュアル，1997.
- 60)Thompson, M. R. :Durability and Frost Resistance of Lime and Cement Stabilized Soils., Proc. of Symposium on Frost Action on Road, Vol.2, pp.201-203, 1973.
- 61)Fukuda, M., Yamamoto, H. and Izuta, H. :The Evaluation of Reducing Method of Total Heave Amounts Using Soil-cement, Proc. of the 6th Int. Symposium on Ground Freezing, pp.417-424, 1991.
- 62)石田宏：生石灰・スラグによる高含水比火山灰質粘性土の凍害防止，土と基礎，Vol.39, No.8, pp.5～pp.10, 1991.
- 63)石田宏：各種火山灰粘性土の生石灰による土質安定処理と凍害防止，土と基礎，Vol.41, No.4,pp.33～38, 1993.
- 64)石田宏：低含水比火山灰質粘性土の石灰およびセメントによる土質安定処理と凍害防止，土と基礎，Vol.43, No.8, pp.15～18, 1995.
- 65)久保田忠郎，東海林更二郎，永田収作：安定処理土の凍上性について，第14回日本道路会議論文集，pp.193～194, 1983.
- 66)生頼孝博，山本英夫，岡本純，伊豆田久雄：セメント混合による凍上及び解凍沈下抑制に関する実験的研究，雪氷，Vol.46, No.4, pp.189～197, 1984.
- 67)久保田忠郎，芳賀勇一，東海林更二郎：安定処理土の室内凍上試験例，第15回日本道路会議論文集，pp.237～238, 1984.
- 68)金沢円太郎，松浦精一，田中武夫：石灰安定処理路床の凍害防止効果について，第16回日本道路会議論文集，pp.253～254, 1985.
- 69)綿引直志，長井英章，森道夫：路床安定処理土の凍上・凍結融解特性，第17回日本道路会議論文集，pp.306～307, 1986.
- 70)松尾隆，望月信広，長屋龍三：寒冷地における凍上対策としての安定処理の活用，第17回日本道路会議論文集，pp.312～313, 1986.
- 71)瓦川善三，奥田和浩，了戒公利，加藤和彦：セメント及び消石灰を添加した細粒土の凍上特性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.1037～1038, 1988.
- 72)川端伸一郎・神谷光彦：石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性，農業土

木学会論文集，192号，pp.105～111，1997.

73)川端伸一郎・神谷光彦・大沢正人：試験盛土における石灰安定処理の凍上抑制効果，
土と基礎，Vol.46，No.4，pp.25～pp.28，1998.

第 2 章 凍上現象と凍上対策工法の現状

第2章 凍上現象と凍上対策工法の現状

2-1 凍上の発生機構

土のような水を含んだ物質が低温下に置かれると、一部の水分が凍結し、その凍結部分にまだ凍っていない部分から水分を吸い寄せる。このような現象が繰り返されると土中に氷の層が成長し、熱流方向に直交した面にレンズ状のアイスレンズが形成される。アイスレンズが成長している面での水分移動のメカニズムは、第1章でも触れたように複数の説があり、定説として説明することは難しい。ここでは、巨視的な見地から凍上の発生機構を説明する。図-2-1はアイスレンズ発生部の微視的モデルである。凍結は、地表面に近いほど進行速度が速く、深部に進むにつれ緩慢になっていく。地表面近くの比較的速い凍結速度の深さでは、冷気の進入によって間隙水が凍り

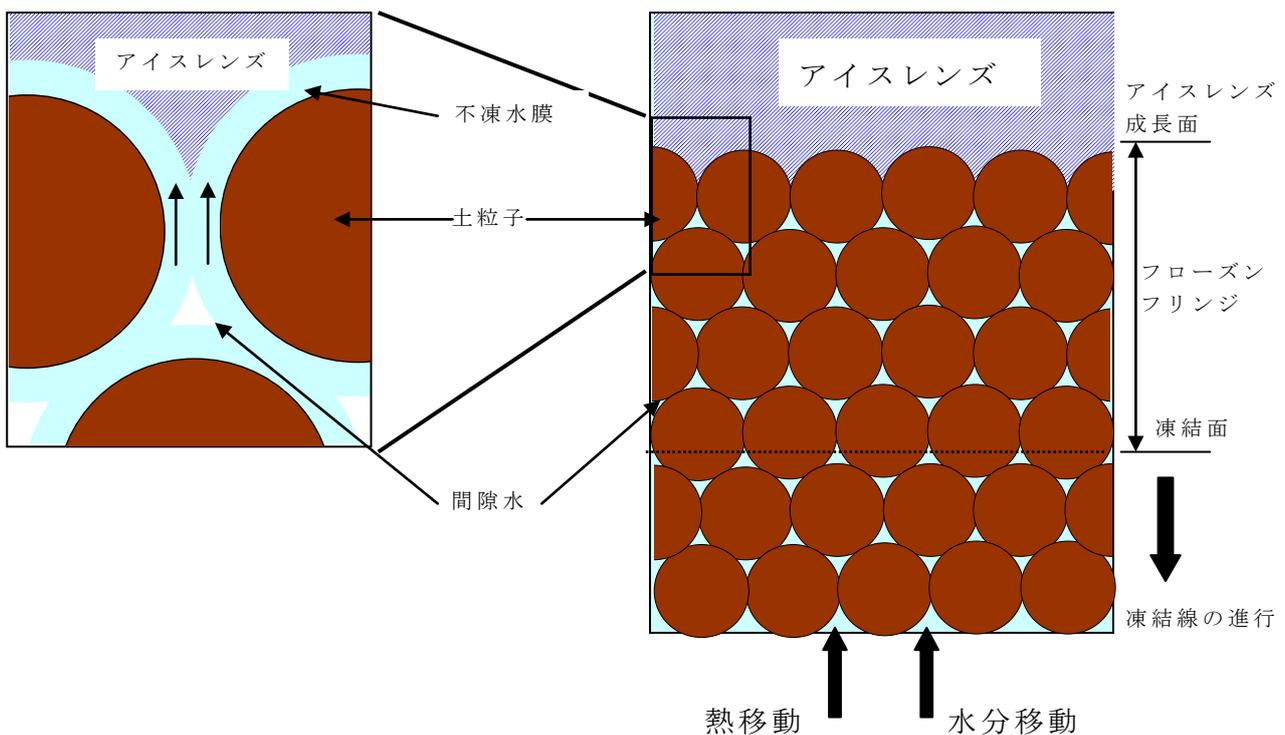


図-2-1 凍土の模式図

凍土を形成していくが、凍結面への水分供給速度よりも凍結速度が速く水分移動を生じない形で凍結が進行していく。ある深さまで凍結が進行すると未凍結部からの熱供給と凍結潜熱によって、上方からの凍結の進行が熱的な平衡状態になる面が現れる。

図に示したように、凍結面（0℃線）はアイスレンズよりやや下方に存在し、アイスレンズの成長面と凍結面の間の領域、すなわちフローズンフリンジ内の水は過冷却状態で存在していることになる。この場合、土粒子の表面に吸着された水分は、粒子表面からの吸着力を受けているため化学ポテンシャルが低下し、0℃では凍らない不凍水膜として存在する。未凍結部から供給される水分は、フローズンフリンジ内を通過過程で過冷却状態になり、不凍水膜を介してアイスレンズに供給される。アイスレンズに供給された過冷却水は、氷に変化しその時に生じる凍結潜熱と上部からの凍結が熱的な平衡状態を保つ間は、その位置でアイスレンズを成長させる。しかし、アイスレンズ成長面での吸水力は、未凍結部分で生じている毛管力よりも大きいいため、いずれ水分供給が追い付かなくなり、熱的なバランスを崩してしまう。この時点で、凍結線は深部に進行し、新たな熱的な平衡状態を保てる位置で同様のアイスレンズを成長させる。このような現象によって、土中には幾重にもなるアイスレンズが形成されていく。

アイスレンズが形成されるには、土粒子表面の不凍水膜が重要な役割を果たす。不凍水膜の厚さは、温度依存性^{1),2)}や応力依存性³⁾がある。すなわち、温度が低下した場合や、有効応力が増加した場合には、不凍水量が減少し透水性も低くなるため凍上量も小さくなる。大きな上載荷重が載った場合に、凍上量が小さくなるのはこの理由である。また、不凍水量は土粒子の比表面積に依存し、比表面積が大きなものほど不凍水量も多くなる。比表面積の大小関係は、概ね粒径に関連するため、粘土>シルト>砂・礫の順で不凍水量を考えることができる。ちなみに、藤の森粘土と豊浦砂の不凍水量の観測例では、豊浦砂に不凍水がほとんど存在しないことが確認されている⁴⁾。

以上のように、凍上現象は土-水-熱の微妙なバランスの上に成り立っている現象である。したがって、凍上を抑制するためには、これらのバランスを意識的に崩すことによって可能となる。

2-2 凍結深さの推定方法

舗装体のような多層地盤の凍結深さ推定には、一般に修正 Berggren 式(Aldrich 式)⁵⁾が用いられる。ここで、土が均質な場合の修正 Berggren 式は次式で表される。

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800\lambda F}{L_w}} \dots \dots \dots (2-1)$$

ここに、 Z : 凍結深さ(m), F : 凍結指数 (°C・days), λ : 凍結時と未凍結時の平均熱伝導率, L_w : 凍結潜熱 (J/m³), λ_c : 融解パラメータと熱比で表される係数

修正 Berggren 式は、Stefan や Neumann の式を基に簡便化された式である。両式は、本来湖沼の氷結現象を熱伝導理論から導いたものであり、同理論における氷を凍土、水を未凍土と考え応用したものである。ただし、Stefan の式では凍結面より下方の温度を一様に 0°C して解析がされるため、比較的温暖な地域や排水性の良い地盤では過

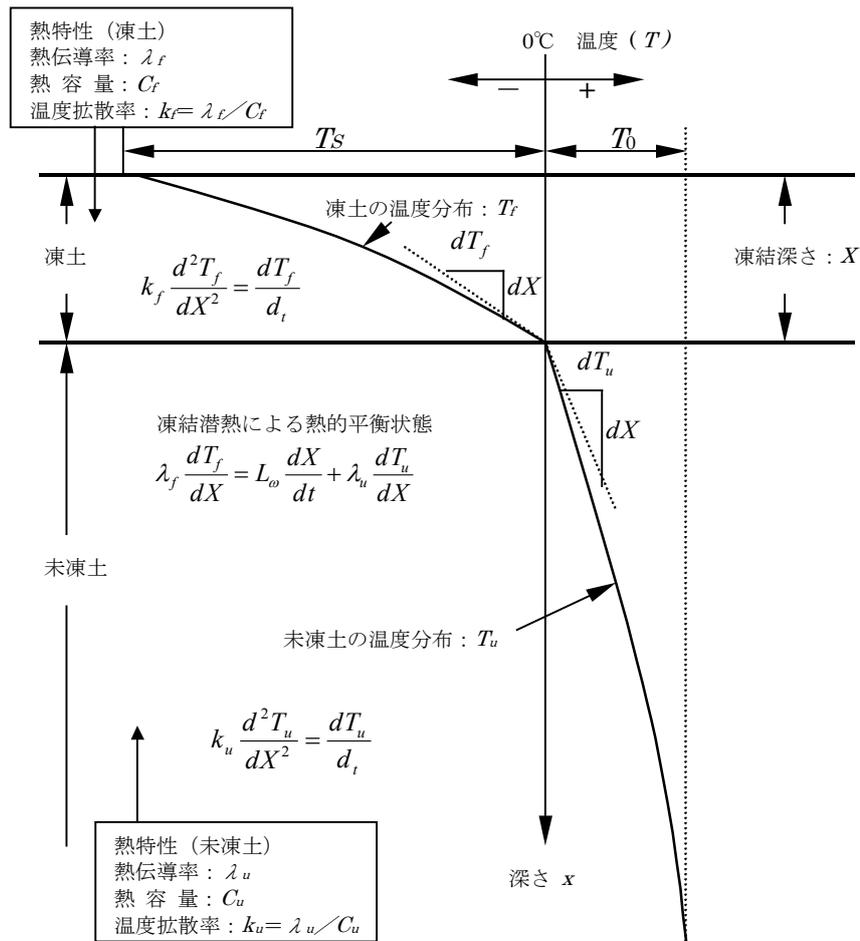


図-2-2 修正 Berggren 式における地中温度の模式図

大な凍結深さを与えてしまう。この点に関して、修正 Berggren 式は未凍土が保有する熱容量を補正係数で修正している。修正 Berggren 式において、地中の温度分布は、図-2-2 のように示される。ここで、修正 Berggren 式には、以下に示す 2 つの仮定がある。

- 1.地盤は半無限等質でその初期温度は一様 T_0 である。
- 2.地表面温度は、初期温度 T_0 から瞬間的に T_s に変化する。

このような仮定からも判るように、凍結深さ推定に用いる温度は地表面温度である。しかし、地表面温度を観測することは難しく、実務上は外気温を代用している。この点については、伊福部⁶⁾が砂利道における実測値と推定値を比較し、良く一致することを示している。また久保⁷⁾は、セメントコンクリート舗装や舗装内に断熱材を敷設した場合にも、適用できることを確認している。

多層系地盤の推定式は、(2-1) 式から

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800F}{(L/\lambda)_{eff}}} \dots \dots \dots (2-2)$$

$$\text{ここで、} (L/\lambda)_{eff} = \frac{2}{X^2} \left\{ L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2\lambda_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{2\lambda_2} \right) + \dots \dots \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots \dots + \frac{d_n}{2\lambda_n} \right) \right\}$$

$X = d_1 + d_2 + \dots \dots d_n$: 予想凍結深さ (cm)

d_n : 各層の層厚 (m)

λ_n : 各層の熱伝導率 (W/m・K)

L_n : 各層の凍結潜熱 (J/m³)

$\lambda_c = f(\mu, \tau)$: 補正係数

$\mu = C_{wt} \cdot F / L_{wt} \cdot t$: 融解パラメータ

$C_{wt} = (C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots \dots + C_n d_n) / X$: 加重平均による熱容量 (J/m³・K)

$L_{wt} = (L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots \dots + L_n d_n) / X$: 加重平均による凍結潜熱 (J/m³)

のようになる。凍結深さ Z は、 Z と予想凍結深さ X が等しくなるように層厚を変化させ繰り返し計算によって求められる。このような推定式は、最大凍結深の予測に優れているが、任意の凍結期間における凍結深さの推定は過小に評価されることが指摘されている。武市⁸⁾らは、熱比の補正によって任意の凍結期間の凍結深さの推定精度が増すことを示し、熱比の補正式として次式を提案した。

$$\tau_i = \frac{C_3 \cdot t_i}{F_i} \dots \dots \dots (2-3)$$

ここに、 τ_i : 任意の凍結期間の熱比、 C_3 : 夏期平均気温

t_i : 任意の凍結期間, F_i : t_i における凍結指数

夏期平均気温を用いる理由は、道内の解析例^{9),10)}で年平均気温を用いると凍結深さを過大評価するとの報告があるためである。これは、年平均気温を用いると未凍結層からの熱補給量が小さく推定されるためとしている。

凍結深さを支配する因子としては、気温以外にも日射、積雪、風速などがある。日射や風の影響については、あまり検討された経緯は無いが、積雪の断熱性を考慮した凍結深さの推定法は幾つか存在する。雪の断熱性は密度によって異なるため、積雪下の凍結深さも自然積雪状態と圧雪状態によって大きく2つの考え方がる。自然積雪状態において、雪の断熱効果は大きく、ある一定以上の積雪下での地盤凍結は生じないとされている。凍結が生じなくなる限界積雪深に関して、東¹¹⁾は15cm、福田¹²⁾は20cmを提唱している。土谷¹³⁾は限界積雪深20cmを採用し、次式で積雪下の凍結深さを実測値と比較した。

$$Z_{snow} = \alpha \sqrt{F_{20}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2-4)$$

ここに、 Z_{snow} : 積雪下の最大凍結深、 F_{20} : 積雪20cmに達するまでの積算寒度

α : 凍結係数

土谷によれば、 α は土の熱的性質によって変化するがその範囲は1~3程度であり、その他の影響因子として積雪の程度を挙げている。この場合、多雪地帯では、1.5、少雪地帯では2.1程度とし、十勝地方の平均値としては、1.8程度であったことを述べ

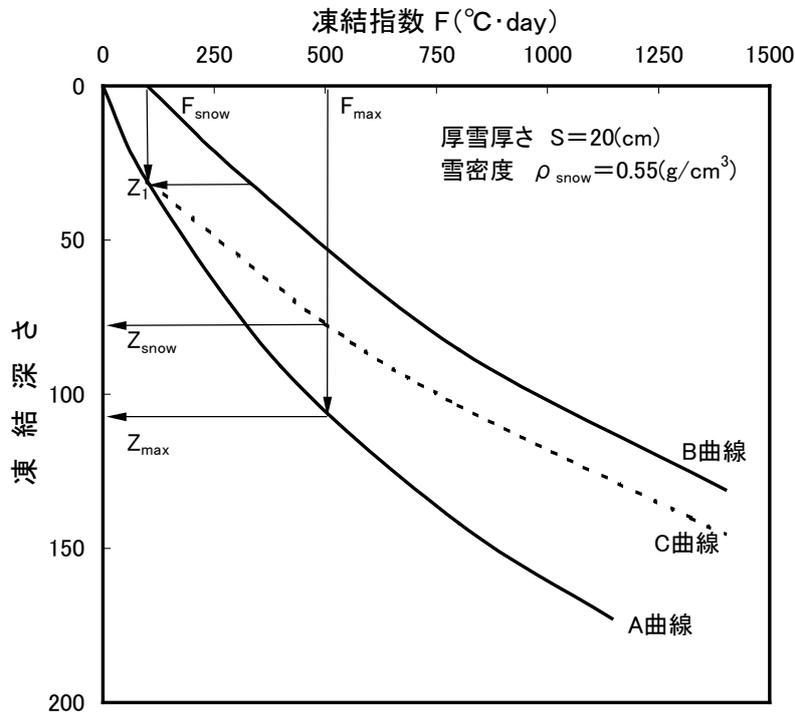
表-2-1 圧雪の熱定数¹⁴⁾

圧雪密度 (g/cm ³)	熱伝導率 λ (W/m·K)	熱伝導率 λ (cal/cm·sec·°C)	熱容量 C (cal/cm ³ ·°C)	凍結潜熱 L (cal/cm ³)
0.50	0.255	0.00138	0.113	39.75
0.55	0.250	0.00170	0.138	43.70

ている。なお、この推定式による、実測値との比較は良い相関関係にある。さらに、福田¹²⁾は F_{20} の扱いとして、20cm積雪までの積算寒度にその後の7日分の積算寒度を加える方法を提案している。

圧雪路面における凍結深さについては、Takeichi¹⁴⁾らによって推定法が提案されている。この方法は、まず圧雪路面の密度を実測から0.5~0.55(g/cm³)に定め、表-2

－1 に示したような圧雪の熱定数を用い，圧雪厚さを変化させた複数の条件で修正



図－2－3 厚雪路面下の凍結深さの推定法

Berggren 式により，積算寒度と凍結深さの関係を求める。この関係から，路面条件に合わせて任意の圧雪条件の曲線と積雪が無い場合の 2 本の曲線を同一図上に抽出する。この例として，図－2－3 に圧雪厚さが 20cm，圧雪密度が $0.55(\text{g}/\text{cm}^3)$ の場合を示した。任意の積算寒度から積雪が継続したとして（図では最も早い段階から積雪がある場合の例である），その時点の積算寒度 F_{snow} に対応する積雪が無い場合の A 曲線の凍結深さ Z_1 から積雪があった場合の B 曲線を合成する。この合成曲線（C 曲線）から，最大の積算寒度（ F_{max} ）の凍結深さ（ Z_{snow} ）が求められる。

2-3 凍上対策工法

「2-1 凍上の発生機構」で述べたように，凍上は，土－水－熱の 3 要素が同時に条件を満たした場合に生じる現象である。換言すれば，これら 3 要素のバランスが崩れれば，凍上は抑制されることになる。凍上対策工法は，このような考えから 3 要素のうち 1 つ以上を改善することを基本に考えられている。現在考えられている凍上対策工法は以下に挙げるような手法がある。

- ①置換工法：凍上性の土を凍結深度まで非凍上性の土に置き換える工法
- ②断熱工法：地中に断熱材を敷設し，地盤の凍結を抑制する工法
- ③遮水工法：地中に碎石などの遮水層やビニールシート，アスファルト層などを設け，地下水からの水分供給を遮断する工法
- ④土質安定処理工法：凍上性の土に石灰やセメントなどの固化材を添加し，凍上を抑制する工法。この工法名に該当するものには，他に土に NaCl や NaCa などの塩類を混合し凍結温度を下げる手法があるが，現在は，石灰やセメントによる工法を指すことが一般的である。

2-3-1 置換工法

凍上対策としては，最も一般的な工法である。現在，道路の凍上対策の大部分は置換工法を採用している。置換工法の概念図を図-2-4に示す。(a)が交通荷重に対応させた基本の舗装構造である。路盤材には非凍上性の碎石が用いられるため，凍上性が問題となるのは，路床土以深である。路床土の凍上性を凍上試験などから評価し，凍上の危険性があるときは，路床土以深を非凍上性の材料に置き換えた場合で，修正

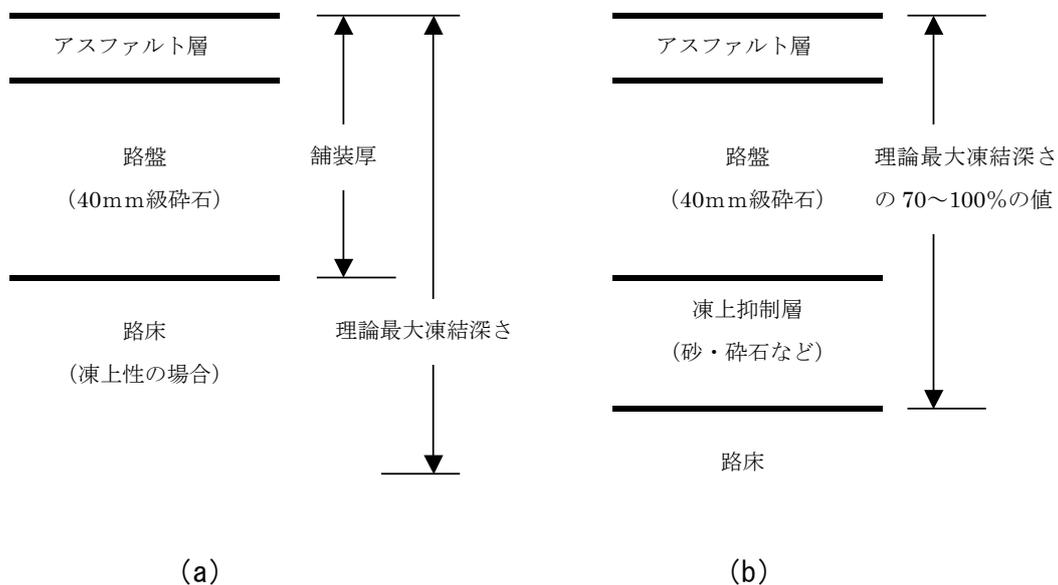


図-2-4 置換工法の概念図

Berggren 式によって凍結深さを推定する。推定される凍結深さが、舗装厚（路盤までの厚さ）を超える場合には、その不足分を凍上抑制層として砂や砕石などの非凍上性材料に置き換える（(b) 図）。一般に凍結深さの推定には、最近 10 ヶ年で最も寒さが厳しい年の凍結指数（積算寒度の最大値）を利用し、求めた理論最大凍結深さが採用される。しかし、設計段階で推定式より凍結深さを予測することは少なく、さらに簡便な手法で凍結深さが決定されることが多い。アスファルト舗装要綱や道路土工－排水工指針－には、各地域の 10 年確立凍結指数や凍結指数と凍結深さの関係が記されており、これらを基に凍結深さを決めることができる。道路の場合は、使用される材料が画一化されるため、土質による熱定数の違いなどを考える必要は実用上あまりない。

実際の置き換え深さは、さらに理論最大凍結深さを 100%とした場合の、70～100%の範囲で決定される。通常は、経済的な理由から 70%の値を用いるが、経験的にそれらが困難な場合には、100%の範囲内で割増が行なわれることがある。

2-3-2 断熱工法

断熱工法は地中に断熱材を敷設し、地盤凍結を完全に抑制もしくは、凍結深さを減じる工法である。この方法は、道路の凍上対策として積極的に用いられることは少ないが、試験的に用いられその効果が確認されている。図-2-5 は道路の断熱工法の概念図である。一般に道路の場合、断熱層は路盤と路床の間に設けられる。凍結抑制の観点からは、断熱層はより地表面に近いほうが効果的であるが、交通荷重を伝達させる舗装構造内に断熱材を入れることは支持力の面から好ましくない。また、道路の改修時に断熱材が問題になることや、状況によっては地中部からのプラス温度も遮断し、

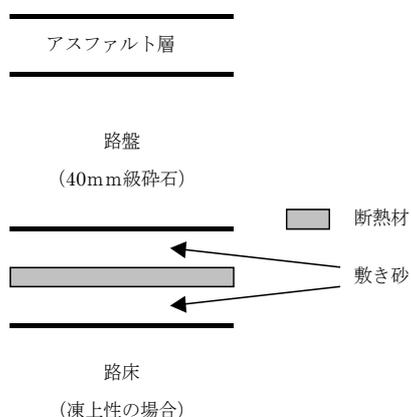


図-2-5 道路における断熱工法の概念図

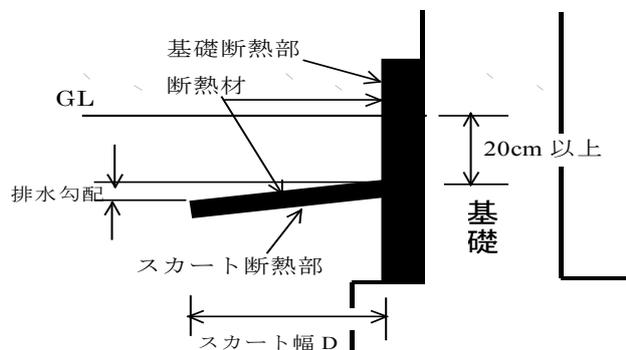


図-2-6 基礎断熱併用スカート断熱工法の適用例

路面凍結を助長する危険性もある。

断熱工法が積極的に利用されている例としては、住宅などの一般建築物における基礎部の凍上抑制である。建築物の基礎周囲は、道路と異なり過度の荷重を受けないことや頻度の高い改修が行なわれない利点がある。この点に着目し、住宅基礎を対象とした凍上対策工法として断熱工法が提案されており、すでに設計・施工マニュアル¹⁵⁾も存在する。図-2-6は、住宅基礎部への断熱工法の適用例である。図に示すように住宅基礎の断熱工法は、基礎背面の凍結抑制のための基礎断熱と基礎底面土の凍結抑制のためのスカート断熱を併用する形で構成されている。これにより、従来まで理論最大凍結深さを以て設定していた基礎の根入れ深さを減じることが可能になった。

2-3-3 遮水工法

遮水工法は、凍上に必要な未凍結部分からの水分を遮断し、凍上を抑制する工法である。水分の供給源は地下水であり、地下水位と凍上対象になる層を分断する形で遮水層が設けられる。遮水層としては、毛管力を持たない粗粒材料やビニール膜、アスファルト層などの不透水材料が用いられる。しかし、不透水材料を用いた場合は、上部からの浸透水も遮断してしまうため、逆に凍上を促進することもある。このような問題から、近年注目されている遮水材としてジオテキスタイル（不織布）を利用した遮水工法がある。不織布の中でも、ポリプロピレン系不織布で、親水性が低い表面性状を持ち、比較的高い透水性を持つものは、浸透水などを通過させ、凍上に必要な毛管水を遮断することが可能である。土谷¹⁶⁾や三嶋¹⁷⁾らによれば、凍上抑制効果は、断面が厚い不織布ほど抑制効果が高く、薄いものでも砂利層などと併用すると分離材として効果が現れるとしている。現時点では、不織布の材料選定や目詰まりなどによる長期安定性の確認など、克服しなければならない点も存在するが、他の凍上抑制工法との併用によって、今後の活用が期待される工法である。

2-3-4 土質安定処理工法

その他の凍上対策工法として、有望なものはセメントや石灰などによる安定処理工法が挙げられる。これは、従来地盤の強度増加を目的に行なってきた安定処理に、強度の増加と同時に凍上抑制効果があることに着目した手法である。

安定処理工法の適用は、従来の置換工法における凍上抑制層部分を安定処理層で代替するものである。安定処理工法による凍上抑制の利点としては、以下のようなことが考えられる。

- ①現状土を利用するため、掘削残土が発生しない。

- ②細粒土を安定処理した場合，凍結深さが浅くなる。
- ③凍上抑制と同時に，地盤強度も増加する。

セメントや石灰による地盤改良技術は，従来までの地盤強度の増加を目的に多くの実績があり，施工方法や品質管理は，ほぼ確立された技術である。凍上抑制の観点から，安定処理工法で懸念もしくは問題とされている点は，

- ①置換工法との比較による経済性。
- ②経年変化による劣化（長期安定性）。
- ③凍上抑制を目的とした施工技術と品質管理技術の確立。

などがある。①については，今後置換材料の枯渇や掘削土の処分地確保が困難になる可能性が強いことから，将来的な問題は少ない。②の長期安定性に関する問題点は，経年変化により凍上量が増すことがあることを報告した例もあり^{16),17)}，十分な検討が必要である。ただし，長期安定性に関する研究例は非常に少ないことから，今後の検討課題である。③については，凍上抑制に効果的な養生方法や混合方法などの検討，さらに安定処理層は透水性が減少するため浸透水などの排水処理なども考える必要がある。

2-3-4-1 土質安定処理の種類と適用範囲

化学的な土質安定処理とは，土に薬剤（固化材）を添加・混合し，せん断強さや耐水性の向上，変形に対する抵抗性などを増加させることを目的としたものである。代表的な固化材にはセメントや石灰があり，一般に土質による使い分けがされることが多い。セメント安定処理は，セメントそのものの水和反応による接着力を利用し，土を固化させるため安定的な反応が期待できる。その反面，対象土の粒度に制約を受けることが多く，細粒な粘性土などには高い処理効果を期待することは難しい。一方，石灰安定処理は石灰と粘土鉱物の化学反応を利用した方法であることから，粘性土地盤の改良などに効果を発揮する。さらに，生石灰を固化材として用いると，土との混合時に生じる発熱作用などによって，含水比の低下などを期待できる。両固化材の適応粒度は，図-2-7の通りであり，砂質土系にはセメント，粘性土系には石灰が効果的である。

本論文では，凍上が問題になり易い粘性土の土質改良として有効な石灰安定処理に着目し，第4章と第5章で石灰安定処理土の材料特性などを述べている。そこで，以降に石灰安定処理の基本的原理についての説明を加える。

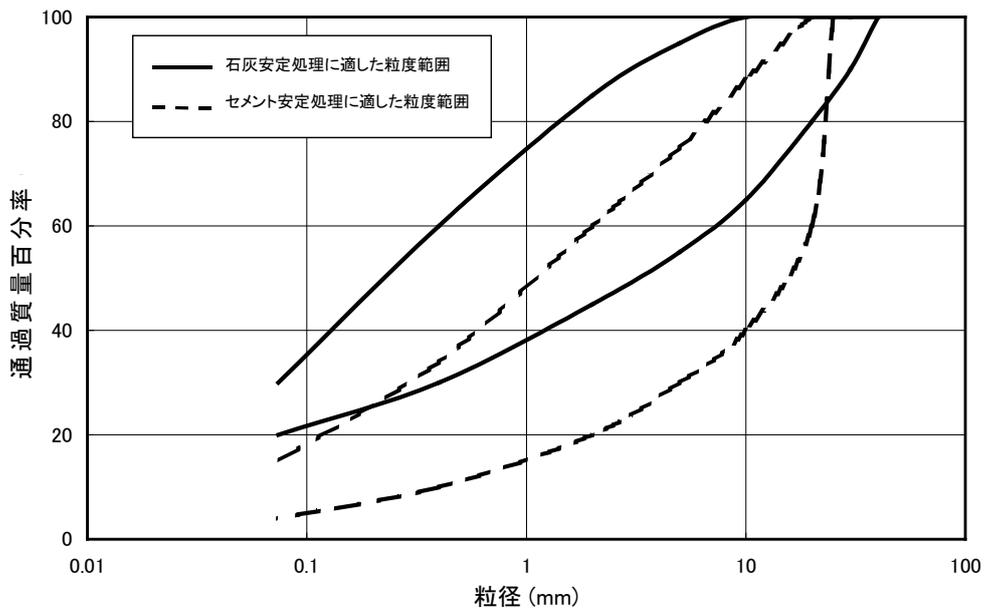


図-2-7 安定処理材の種類による適用粒度^{18),19)}

表-2-2 石灰安定処理の反応と効果

	反応作用	処理効果
短期反応 (即時効果)	消化吸水反応	含水比低下 塑性低下 作業性の向上
	イオン交換反応	土粒子の凝集・団粒化
長期反応	ポゾラン反応 炭酸化反応	せん断強度増加 変形性の低下 剛性の増加

2-3-4-2 石灰安定処理の基本的原理

石灰安定処理は、土中の粘土鉱物と石灰との化学的反応を利用したものであり、化学反応の結果として土の工学的性質が改良される。反応は即時的なものと同期的なものに分けることができ、それぞれの反応と期待される処理効果をまとめると表-2-2のようになる。石灰安定処理に用いられる石灰は、生石灰もしくは消石灰である。生石灰を用いると、土との混合時に土中水分と生石灰が水和反応（消化吸水反応）を起こし、吸水-膨張-発熱作用が短時間のうちに起こる。消化吸水反応後は、生石灰が消石灰に変わるため、その後の反応は両石灰とも同様である。したがって、生石灰は、含水比低下により土質改善が期待できるような高含水比な土質に用いることが多い。

2-3-4-2a 消化吸水反応

生石灰 (CaO) が土中の水分と結合して消石灰 (Ca(OH)₂) を生成する反応である。



上記のような反応は、1kg の生石灰の水和によって 280kcal の発熱があることを示し、同時に体積も 2 倍近くに膨張する。ちなみに、この膨張現象を利用して地盤の圧密を促進させるものが生石灰パイル工法である。また、生石灰は消石灰に変化する過程において重量比で 0.32 倍の水分を必要とする。したがって、固化材に生石灰を用いると消化吸水反応によって消費される水分と発熱によって蒸発する水分の両者によっ

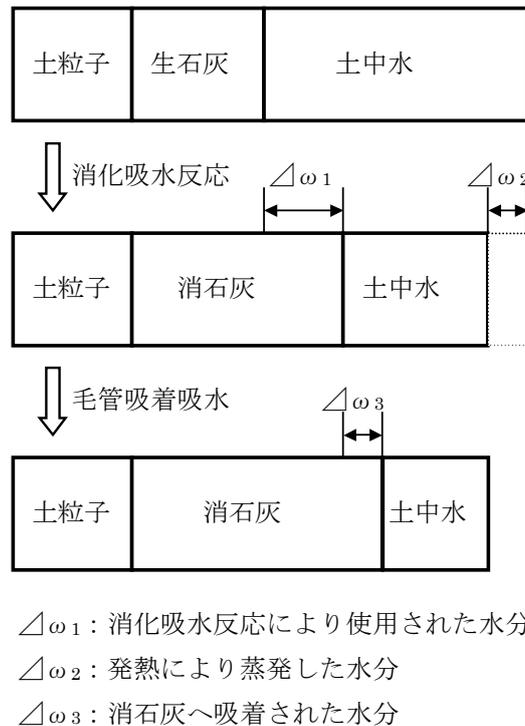


図-2-8 生石灰の吸水作用

て含水比低下が起こる。また、生成された直後の消石灰は絶乾状態にあり、周囲の水分を吸着するため、見かけ上の含水比をさらに低下させる。このような含水比低下を模式的に示せば図-2-8 のようになる。

2-3-4-2b イオン交換反応

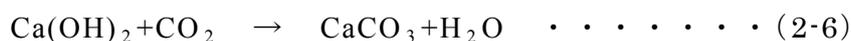
これは、消化吸水反応後の消石灰もしくは消石灰を固化材に用いた場合に最初に生じる反応である。土中に石灰が存在すると、石灰中のカルシウムイオン (Ca^{++}) が粘土粒子の表面イオンと交換して吸着し、土粒子表面の帯電状態が変わる。これにより粘土粒子は凝集して団粒化する。このような凝集作用は、カルシウムイオンの吸着による土粒子表面の電位ポテンシャルの低下が理由であり、電気的な表面反発力が減じられたことによって生じる現象である²⁰⁾。

2-3-4-2c ポゾラン反応

イオン交換ののち、時間が経過すると土粒子からコロイドシリカ (SiO_2) やコロイドアルミナ (Al_2O_3) が溶出し、石灰と反応して複雑な化合物を形成する。反応生成物としては、珪酸カルシウム水和物 ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) やアルミン酸カルシウム水和物 ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$)、珪酸カルシウムアルミネート水和物 ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) などがある。これらの反応生成物は、長期に渡って生成され、これらが結合材となって土を固化させ、時間の経過とともに結合力を増していく。

2-3-4-2d 炭酸化反応

この反応も含めてポゾラン反応と呼ぶ場合もあるが、一部の石灰が空気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウム (CaCO_3) を生成する反応である。



生成された炭酸カルシウムは、処理土の緻密化を促進するとともに、新規反応生成物にも関与する。カルシウムアルミネート類は、炭酸カルシウムと反応してカルシウムアルミネートカーボネートハイドレート ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) を生成する。また、 SiO_2 と Al_2O_3 の双方を持つゲーレンナイト水和物 ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) も生成され、これらの生成物によって固結力が増加される。

ポゾラン物質の生成は、対象となる粘土鉱物によって大きく異なる。表-2-3に主な粘土鉱物の性状と石灰との反応性を示す。ただし、このような粘土鉱物と反応性の関係だけでは、必ずしも強度特性と関連するとは言いきれない。例えば、モンモリロナイトやアロフェンなどは、反応性には富むものの、形状が不定形で比表面積が大きいため強度の発現が小さい。これに比較して、イライトやハロイサイトは結晶度が良く、安定処理効果が高いとされている²⁰⁾。

表-2-3 主な粘土鉱物の性状と石灰との反応性²¹⁾

粘土鉱物	化学式	層構造	結晶系, 形状	イオン交換量	石灰との反応性	反応生成物
アロフェン	$1 \sim 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		非晶質, 球状	20~40	◎	C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3\text{H}_{11}$, CSH
カオリナイト	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	2	三斜, 六角板状	3~15	◎	CSH, C_4AH_{13} , C_2ASH_8
加水ハロイサイト	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2	単斜, 棒状, 球状	40~50 10~40	◎	CSH, C_4AH_{13} , C_2ASH_8
メタハロイサイト	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	2	単斜, 棒状, 球状	5~10	◎	CSH, C_4AH_{13} , C_2ASH_8
ナトリウム・モンモリロナイト	$(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Na}_{0.33}$	3	単斜, 無定形, 薄板状	80~150	◎	CSH, C_4AH_{13}
モンモリロナイト		3	単斜, 無定形, 薄板状	80~150	◎	CSH, C_4AH_{13}
ハーマキユライト	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3	単斜, 板状, 葉片状	100~150	△	Ca 固定
イライト	$\text{K}_{1-0.5}(\text{Al,Fe,Fe,Mg})_2 \cdot (\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	単斜, 板状	20~30	△	CSH
セリサイト	$\text{K}_{1-0.5}(\text{Al,Fe,Fe,Mg})_2 \cdot (\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3	単斜, 六角板状	微小	△	CSH
クロライト		3+1	単斜または斜方, 板状	10~40	×	
ハ+イロフィライト	$\text{Al}_2(\text{Si}_4 \cdot \text{O}_{10})(\text{OH})_2$	3	単斜, 葉片状	0	×	

◎: 反応性大, △: 反応性中, ×: 反応性なし
C: CaO, A: Al₂O₃, S: SiO₂, H: H₂O

2-3-4-3 石灰安定処理の強度増加に及ぼす諸要因

石灰安定処理は、粘土鉱物の種類による反応性などの化学的要因と粒度などの物理的要因によって強度増加が左右される。Tompson²²⁾は石灰安定処理に影響を及ぼす因

表-2-4 石灰安定処理に影響を及ぼす因子²²⁾

	処理効果
物理的因子	粒度 コンシステンシー 自然含水比 最適含水比
化学的因子	pH 粘土鉱物 有機分含有量 全シリカ, アルミナ, 酸化鉄量 アルカリ可溶シリカ, アルミナ量 化学成分比 イオン交換能 塩基飽和度 カルシウム, マグネシウム交換能比 炭酸カルシウム比

子として、表-2-4に示す項目を挙げている。このように、石灰安定処理の強度発現は、土の物理・化学的な要因に影響を受けるため間接的な土質パラメータから強度を推定することは難しい。一般には、配合試験を行い一軸圧縮試験などの結果から石灰安定処理の改良効果の確認がされる。

2-4 凍上性の評価手法

凍上性の評価手法は、土の物性値などから間接的に判定する手法と直接的に凍上試験によって判定する2つの手法に大別できる。現状の凍上性判定は、凍上対策工法の必要性や置換材料などの評価に用いられるものであり、土の凍上性をグレード分けする定性的な判定である。最も期待される自然凍結地盤の凍上量の予測などには、今後の凍上量予測手法の確立と予測に用いるための土質パラメータの決定方法など多くの克服しなければならない課題がある。

この節では、現在用いられている基準や指針などを基に、凍上対策工法に関連した材料の凍上性評価手法について述べる。

2-4-1 土質による凍上性判定手法

凍上研究の初期から、Beskow²³⁾やCasagrande²⁴⁾らによって粒径と凍上性の関係は、

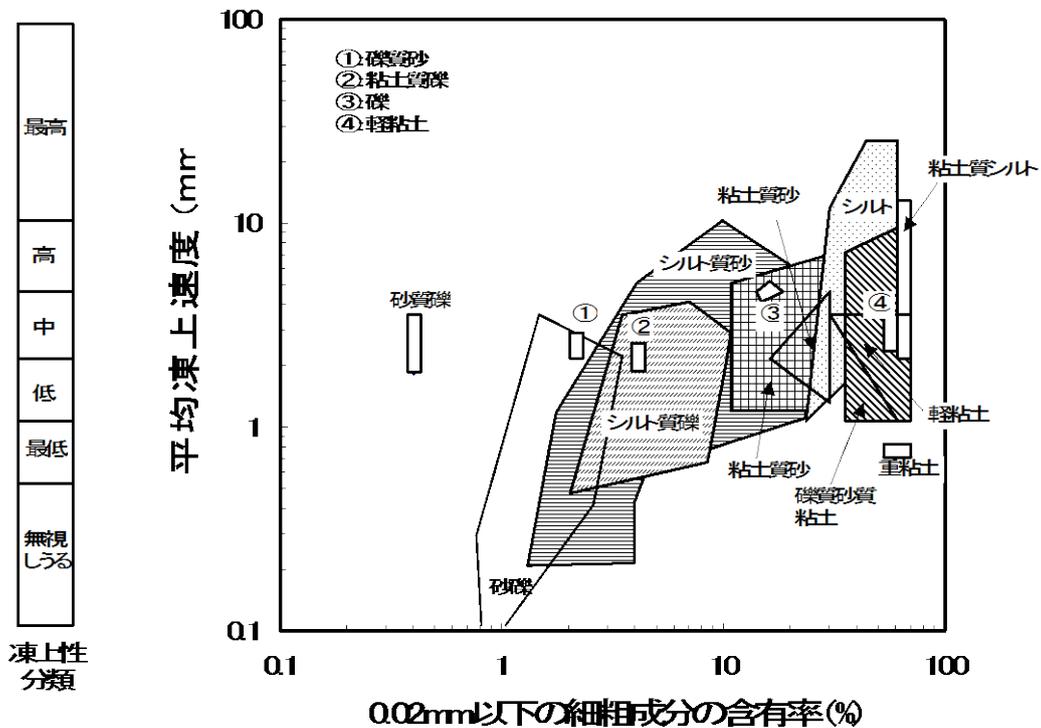


図-2-9 Kaplarによる土質と凍上性の関係²⁵⁾

明らかにされていた。凍上が未凍結部からの水分移動現象であることを考えれば、吸着水量や透水性と深い関連がある粒径と凍上性に一義的な関係を見出すことは可能である。Casagrande²⁴⁾ は、シルト粒径が最も強い凍上性を示す理由に、粒径によって反比例する透水性と凍上有効力（毛管力や吸着力）の関係をを用い、両者が交わる粒径としてシルトを示した。Casagrande の研究を基にして Kaplar²⁵⁾ は各種の土質と凍上性の関係を取りまとめている。図-2-9 は Kaplar²⁵⁾ が示した土質と凍上性の関係である。この他にも粒度やコンシステンシー限界などを利用した凍上性判定手法が、各国に存在するが、基本的な考え方が等しいためそれらに大きな違いはない。国際土質工学会（ISMFE）の TC8²⁶⁾ は、土質からの凍上性判定法として、以下のような方法を提案している。

$$R_f(\text{細粒比}) = \frac{(75\mu m \text{通過率}) \times (75\mu m \text{通過率の内の} 2\mu m \text{通過率})}{75\mu m \text{通過分の液性限界}} \dots \dots \dots (2-7)$$

表-2-6 均質な土の凍上性判定法

凍上性	毛管上昇高さ(m)	液性指数 I _L	
無	< 1	I _L ≤ 0	z > 0.5m 細粒砂 z > 1.0m シルト質砂 z > 1.5m シルト z > 2.5m 粘土質シルト z > 3.0m 粘土
小	1.0~1.5	0 < I _L < 0.25	z < 0.5m 細粒砂 0.5 < z ≤ 1.0m シルト質砂 1.0 < z ≤ 1.5m シルト 1.5 < z ≤ 2.5m 粘土質シルト 2.0 < z ≤ 3.0m 粘土
中	1.5~2.0 z < 1m ; U _c > 20 z < 1.5m ; U _c < 20	0.25 < I _L < 0.50	— 細粒砂 z ≤ 0.5m シルト質砂 0.5 < z ≤ 1.0m シルト 1.0 < z ≤ 1.5m 粘土質シルト 1.5 < z ≤ 2.0m 粘土
大		I _L > 0.50	— 細粒砂 — シルト質砂 z < 0.5m シルト z < 1.0m 粘土質シルト z ≤ 1.5m 粘土

U_c : 均等係数, z : 設計凍結深さから地下水位までの距離

表-2-5 土質による凍上性の判定法

凍上性	土質名	I_p, ω_L	毛管上昇高さ(m)	液性指数	細粒比 R_f
無	GW, GP, SW, SP	$I_p < 1$	< 1	≤ 0	< 2.5
小	CH	$I_p > 7; \omega_L > 35$	1.0~1.5	< 0.25	2.5~5
中	CL (A線以上) OH, MH (A線以下)	$I_p \geq 7; \omega_L = 35 \sim 50$ $I_p \geq 7; \omega_L > 50$	1.5~2.0	0.25~0.50	5~10
大	CL (A線以上) ML (A線以下) OL (A線以下)	$I_p \geq 7; \omega_L < 35$ $I_p \leq 4; \omega_L < 50$ $I_p \geq 7; \omega_L = 35 \sim 50$	> 2.0	> 0.5	> 10

また、フィンランド道路局²⁶⁾では粒径加積曲線からの凍上性判定を提案している(図-2-10)。同図の領域4と3は非凍上性であり、領域2は毛管上昇高さが1m以下であれば非凍上性、領域1は凍上性である。領域1Lは透水係数が小さくなるため凍上性は小さいと判定される。

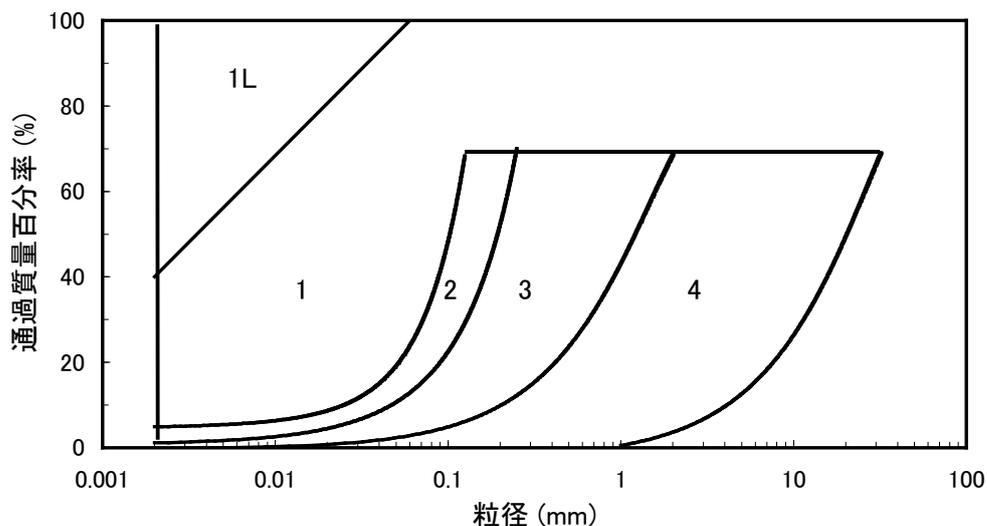


図-2-10 粒度組成による凍上性判定²⁶⁾

国内では、道路土工-排水工指針²⁷⁾に凍上を起こさない材料として以下のような規定がある。

- ①砂：0.075mmふるいを通過するものが全試料の6%以下となるもの。
- ②切込砂利：全試料について0.075mmふるいを通過する量が4.75mmふるいを通

過する量に対して 9%以下となるもの。

③切込碎石：全試料について 0.075mm ふるいを通過する量が 4.75mm ふるいを通過する量に対して 15%以下となるもの。

④火山灰（火山礫を含む）：凍上試験に合格したもの。ただし，凍上試験結果の判定が要注意のものは，0.075mm ふるい通過量が 20%以下で強熱減量が 4%以下のもの。

以上のような土質からの凍上性判定は概略的な判定に用いる手段であり，一部の碎石や砂などを除いては，最終的な判定に凍上試験を用いることが好ましい。

2-4-2 凍上試験による凍上性判定手法

材料判定のための凍上試験は，国内では公的な機関などで幾つかの試験方法が提案されている。代表的なものを以下に列記する。

2-4-2b 排水工指針法（ $\phi 8$ 法）²⁷⁾

日本道路協会の道路土工－排水工指針－に記載された方法であるため，一般に排水工指針法（ $\phi 8$ 法）とも呼ばれている。この方法を歴史的に辿っていくと，伊福部⁶⁾や小山²⁸⁾らによる火山灰土の凍上性に関する研究のために開発された方法であると考えられるが，原型になった試験法は定かではない。現在，この方法は「－排水工指針－」や「北海道開発局の工事仕様書等」ならびに「日本道路公団試験方法（ $\phi 8$ 法）」に記載されている。排水工指針法の試験装置と凍上性判定法を図-2-11と表-2-7，表-2-8に示す。この方法は，凍上試験後の供試体の凍結様式と凍上率から3段階の凍

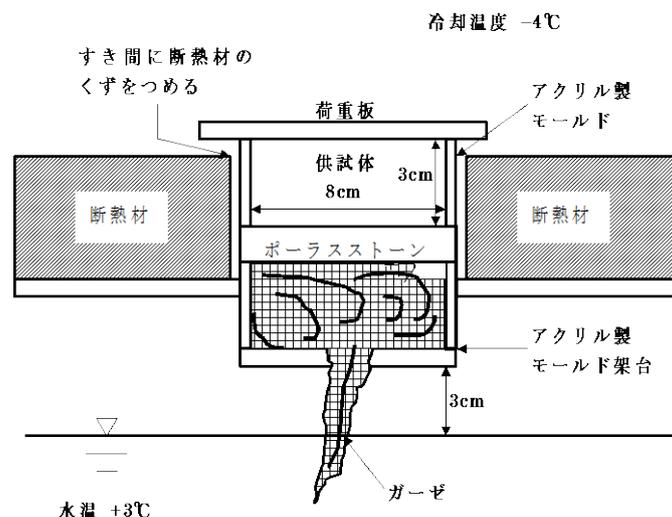


図-2-11 排水工指針法の試験装置

表-2-7 凍上試験後に観察される凍結様式

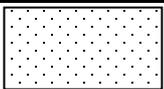
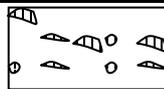
番号	1	2	3	4	5
様式	コンクリート状凍結	微細霜降状を含むコンクリート状凍結	微細霜降状凍結	霜降状凍結	霜柱状凍結
形状					
説明	氷晶がまったく認められない	一部に氷晶がこまかく入っている	氷晶が非常に細かく切れぎれに入っている	1~2mm厚程度の氷晶が入っている	純霜柱の発達したもの

表-2-8 凍上性判定法 (φ8法, φ15法)

番号	凍結様式	凍上率 (φ8法)	凍上率 (φ15法)	判定
1	コンクリート状凍結 (氷粒散在を含む)	20%未満	5%未満	合格
		20%以上	5%以上	要注意
2	部分的な極微細霜降状凍結を含むコンクリート状凍結	20%未満	5%未満	要注意
		20%以上	5%以上	不合格
3	微細霜降, 霜柱氷層等明らかに氷晶分離の傾向のある凍結	凍上率の大きさに関係なく	凍上率の大きさに関係なく	不合格
4				
5				

上性判定を行なうものである。試験装置は、地下水からの水分供給をモデル化し、ガーゼとポーラスストーンを介した形で供試体に水分の供給がされる。しかし、この方法は、給水方法の問題から供試体下面に一樣な水分供給がされないこと、凍上した供試体が乾燥し土粒子が崩落すること、試験間のばらつきが大きいことなど多くの問題点が指摘されている²⁹⁾。水島^{30),31)}らは、排水工指針法の問題点を解消するため改良案として図-2-12のような試験装置を提案した。この試験装置は、ガーゼによる給水を止め、ポーラスストーンによる給水としたこと、さらにモールドを2重にし供試体の乾燥を防ぐ構造になっている。しかし、このような試験法も2重にしたモールドの隙間から冷気が進入することや、アイスレンズの成長面が特定の個所に集中するなどの問題もある³²⁾。

2-4-2a 日本道路公団法 (φ15法)³³⁾

日本道路公団では、土の凍上試験として CBR モールドと同寸法のアクリルモールドを用いた凍上試験を提案している(図-2-13)。この方法は、融解後の CBR を求められることが特徴であり、日本道路公団では融解後の CBR として 10 以上の値を規定

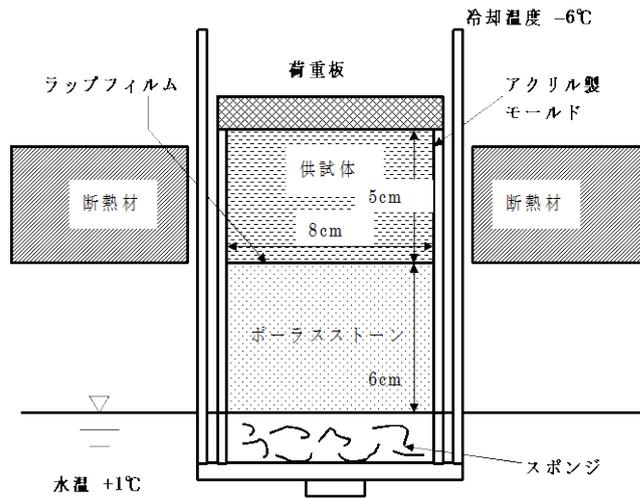


図-2-12 排水工指針法の改良型凍上試験装置

している。なお、この試験法による凍上判定は、表-2-7、表-2-8に示した排水工指針法の判定基準と基本的には同じであり、表-2-8に示したように凍上率にのみ違いがある。

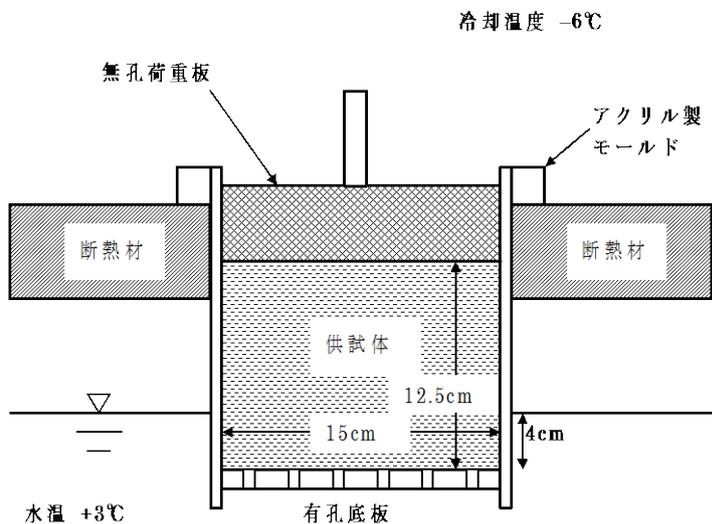


図-2-13 日本道路公団型の凍上試験装置

2-4-2c 本研究で用いた凍上試験

本研究では、凍上試験として日本道路公団法（φ15法）と独自に開発した凍上試験

装置（改φ8法）を用いた。改良型のφ8法は、排水工指針法やその他の改良型試験法の問題点を考慮して開発したものであり、給水方法をφ15法と同様に供試体からの直接吸水にしたことや試験終了時の供試体確認を容易にするため二つ割モールドを採用している。また、モールドと供試体の凍着や周面摩擦を低減させるため、モールドと供試体の間にはテフロンシートを介している。試験装置を図-2-14に示す。

試験は、試験装置を設置後、供試体の飽和のため24時間放置し、その後に冷却を行なった。冷却開始時は冷却温度を一端、 -10°C 程度に設定し供試体にサーマルショック（氷核形成）を与えた。サーマルショックは、凍上量を観察し凍上が確認できた時点で終了とした。その後は、冷却温度を -6°C で一定とし、7日後の凍上量を最終凍上量とした。

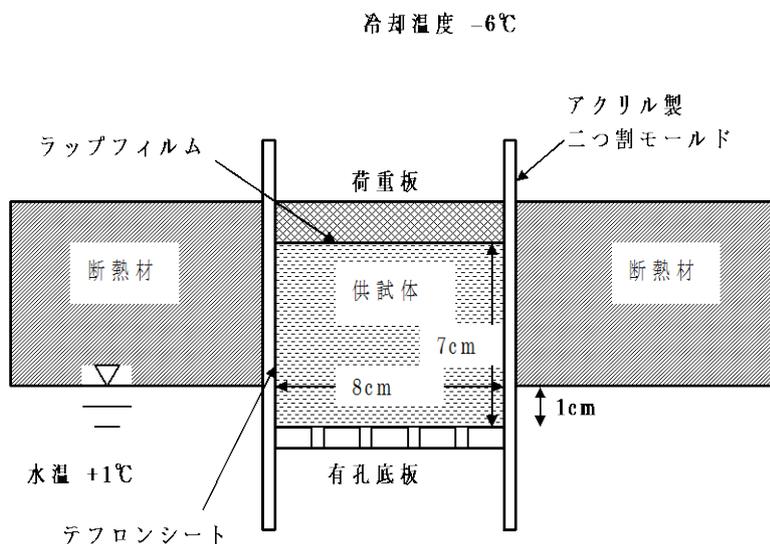


図-2-14 本研究で用いた凍上試験装置

第 2 章の参考文献

- 1) Anderson, D., Tice, A. and McKim, H. : The Unfrozen Water Content and the Apparent Heat Capacity in Frozen Soils, Proc. 2nd Int. Permafrost Conference, pp.289-295, 1973.
- 2) Smith, M., Tice, A., : Measurement of Unfrozen Water Content of Soils, Proc. 5th Int. Permafrost Conference, pp.473-477, 1988.
- 3) 木下誠一 : 凍土の物理学, 森北出版, 1982.
- 4) 伊豆田久雄, 山本英夫, 生頼孝博 : 塩分含有凍土の不凍水量の存在状態について, 日本雪氷学会予講集, pp.40, 1991.
- 5) Aldrich, H. P. : Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavement, Bulletin 135, H. R. B., 1956.
- 6) 伊福部宗夫博士論文集 : 北海道土木技術会, pp.83~189, 1982.
- 7) 久保宏 : 道路舗装の凍上とその対策, 土と基礎, Vol.29, No.2, pp.9~14, 1981.
- 8) 武市靖, 久保宏 : AMeDAS データを用いた凍結深さの経時変化の推定手法, 土質工学論文報告集, Vol.31, No.2, pp.217~225, 1991.
- 9) 有田政博, 久保宏, 熊谷茂樹, 田口史雄 : 舗装体温度の推定について, 第 25 回北海道開発局技術研究発表会資料, pp.9~25, 1982.
- 10) 有田政博 : 凍結指数の特性に関する 2・3 の考察, 土木試験所月報, No.397, pp.42, 1986.
- 11) 東晃 : 北海道の土壤凍結 - 積雪との関係 -, 農業物理研究 第 3., 養賢堂, pp.145~157, 1961.
- 12) 福田正巳 : 自然積雪下の土の凍結の深さの推定法について, 北海道大学低温科学研究所業績, 2446 号, pp.55~74, 1982.
- 13) 土谷富士夫 : 十勝地方における火山灰土壤の凍結, 凍上が農地に及ぼす影響に関する研究, 北海道大学学位論文, pp.100~114, 1986.
- 14) Takeichi, K., Kubo, H., Kasahara, A. : A Pavement Design for Low-Volume Roads that Considers the Antifrost Effect of Thickly Packed Snow., 4th Inter. Conf. on Low-Volume Roads, TRR1106/Vol.2, pp.236-243, 1987.
- 15) 北海道建設部建築指導課 : スカート断熱工法設計・施工マニュアル, 1997.
- 16) 土谷富士夫, 辻修, 三島信雄, 横田聖哉 : ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制, 農業土木学会誌, Vol.60, No.12, pp.25~pp.28, 1992.
- 17) 三島信雄, 横田聖哉 : ジオテキスタイルを用いた凍上対策工法, 舗装, Vol.27, No.4, pp.29~34, 1992.
- 18) 内藤和章 : 土質改良-(5)-セメント安定処理工法, 土木施工, Vol.17, No.4, pp.223,

1976.

- 19)松尾新一郎：セメント・石灰系材料を用いた地盤改良の現状と将来，セメント・コンクリート，No.391，pp.2～10，1979.
- 20)日本石灰協会：石灰による軟弱地盤の石灰安定処理工法，鹿島出版会，1983.
- 21)笠井順一：地盤改良の化学，セメント・コンクリート，No.391，pp.11～17，1979.
- 22)Tompson, M. R. :Lime Reactivity of Illinois Soils., Proc. ASCE, Vol.92, SM-5, 1966.
- 23)Beskow, G. :Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Road and Railroads, Swedish Geological Society, No.375, pp.1-144, 1935.
- 24)Casagrande. A.: Discussion on Frost Heaving. Proc., H.R.B., pp.168-177, 1932.
- 25)Kaplur, C. W.,: Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils. CRREL Technical Report, No.250, pp.1-36, 1974.
- 26)ISMFE Technical Committee on Frost, TC8 :Frost in Geotechnical Engineering, VTT Symp., 1989.
- 27)日本道路協会，道路土工-排水工指針-, 1987.
- 28)小山道義，高橋毅，川井優：火山灰の凍上性について，土と基礎 Vol.13, No.11, pp29～32, 1965.
- 29)常松哲：現行の凍上試験の問題点について，土木学会第42回年次講演会講演概要集（第Ⅲ部門），pp.672～673，1987.
- 30)斎藤敏彦，川村和幸，水島達朗：室内凍上試験の改良について，第34回北海道開発局技術研究発表会論文集，pp.85～90，1992.
- 31)水島達朗，川村和幸，斎藤敏彦，石田樹：室内凍上試験の改良について，第26回土質工学研究発表会講演集，pp.1095～1096，1993.
- 32)川端伸一郎，神谷光彦，多田哲司：土の凍上試験方法と凍上特性について，凍害対策と寒さの利用に関するシンポジウム発表論文集，pp.99～102，1992.
- 33)日本道路公団：日本道路公団試験方法-土の凍上試験方法-, 1992.

第 3 章 粗粒火山灰土の地盤材料としての凍上特性

第3章 粗粒火山灰土の地盤材料としての凍上特性

3-1 緒言

北海道には、グリーンタフ時代から引き続く火山活動による広大な火砕流台地が存在する¹⁾。このような火山活動により、洞爺支笏、大雪十勝、阿寒知床を噴出源とした多くの火山灰土が広域に堆積しており、**図-3-1**に示したように全道面積の約40%を覆っている²⁾。北海道には潜在的に大量の火山灰土が存在するため、土質材料としての入手が容易であり、良質なものは盛土材などに広く用いられている。さらに、粗粒で未風化な火山灰土は耐凍上性に優れているといわれ、寒冷地である北海道では凍上抑制層の材料としても広く用いられてきた。しかし、火山灰土は多岐に利用されている反面、その工学的性状の把握が困難な材料としての印象も強い。これは、北海道に存在する火山灰土が粗粒土に分類されるものが多く、土質分類などで用いられる指標が粒度組成を中心に行われることが一因である。粗粒火山灰土の中には破碎性が強いものや粒子内部に多くの空隙を有するものなどがあり、このような特性を粒度組成のみで評価することには限界がある。地盤工学会北海道支部では、道内火山灰土の工学的性質をまとめた「北海道火山灰土の利用と性質」³⁾を1997年に発刊し、火山灰土の自然含水比と土粒子密度を利用した新たな分類方法を提案している。この分類法により、強度特性や締固め特性などの工学的性質との関係を整理し、従来の土質分類法では表現が困難であった部分を補填する形での成果を挙げている。

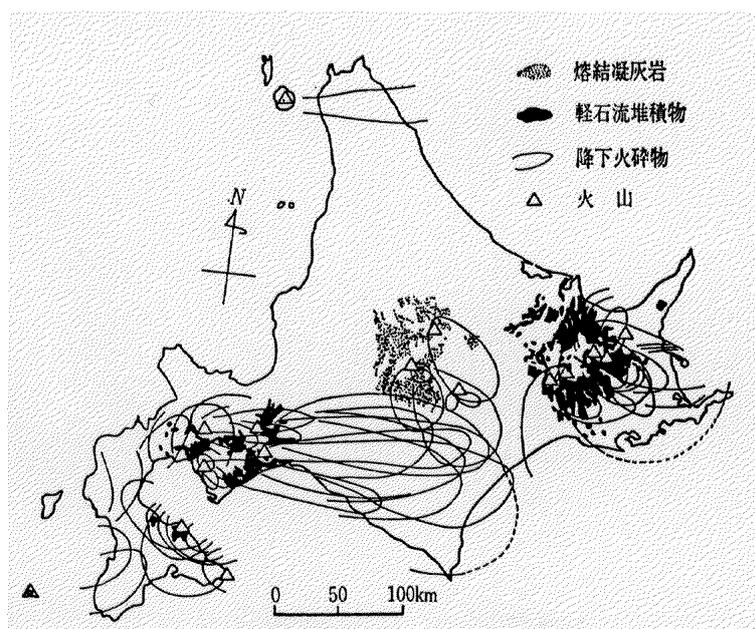


図-3-1 北海道の火砕流堆積物・降下火砕物の分布¹⁾

北海道のような積雪寒冷地では土の凍結問題が身近な現象として生ずる。しかし、現在まで北海道火山灰土を扱った凍結諸問題の研究は比較的少なく、上述の火山灰分類をする上でも重要な位置付けにある。

そこで、本章は道内に存在する各種火山灰土を対象に、凍上性や凍結融解履歴が火山灰土に与える影響を調べ、凍結をキーワードとした火山灰土の材料特性について取りまとめた。

3-2 粗粒火山灰土の凍上特性

3-2-1 はじめに

置換材料としての利用が多い粗粒火山灰土の凍上性分類については、近年まで細粒分含有率と強熱減量での簡易判定を行ってきた。しかし、最新の北海道開発局道路工事仕様書(H.11版)や道路土工・排水工指針・(S.62版)では、凍上試験による判定を主体とするよう変更がなされている。表-3-1は、火山灰土の置換材判定基準の変遷をまとめたものである。このように、現在ある凍上試験の義務化の背景には、細粒分含有率と強熱減量による判定に多くの例外的な火山灰土が存在したことが理由として挙げられる。従来用いられてきた簡易判定法は、小山らの研究に基づいたものであり、強熱減量4%以下で細粒分含有率20%以下の火山灰土が難凍上性を示すとされた⁴⁾。図-3-2は小山らの細粒分含有率と強熱減量の関係である。小山^{4),5)}らは、このような簡易判定基準の扱いとして凍上試験が困難な時代背景からの暫定的な指標であるこ

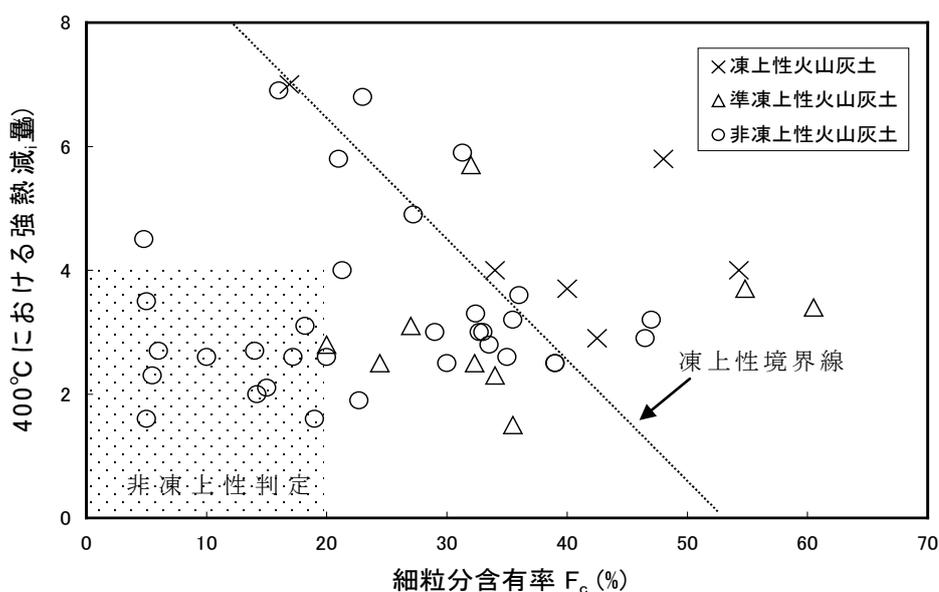


図-3-2 小山らによる細粒分含有率，強熱減量と凍上性の関係⁴⁾

表-3-1 火山灰土の置換材判定基準の変遷

	開発局道路工事仕様書	道路土工・排水工指針
S.31	火山灰（礫を含む）は硬質粗粒で，風化の徴候なく排水性の良好なものとする。 路盤材規定	
S.37	火山灰（礫を含む）は硬質，粗粒で，風化の徴候がなく，排水性が良好で， <u>74ミクロンふるいの通過が20%以下であり，強熱減量が4%以下のものは使用することができる。ただし，凍上試験を行い，非凍上性と認められたものは使用することができる。</u> 路盤材規定	
S.38	火山灰（礫を含む）は硬質，粗粒で，風化の徴候がなく，排水性が良好で， <u>74μふるいの通過が20%以下であり，強熱減量が4%以下でなければならない。</u> ただし，凍上試験を行い，非凍上性と認められたものは使用することができる。路盤材規定	
S.38改訂 S.39	火山灰（礫を含む）は， <u>粗粒で</u> ，風化の徴候がなく，排水性が良好で， <u>74μふるいの通過が20%以下であり，強熱減量が4%以下でなければならない。</u> ただし，凍上試験を行い，非凍上性と認められたものは使用することができる。路盤材規定	
S.48		火山灰，火山礫：粗粒で風化の徴候がなく排水性が良好で <u>74μフルイの通過量が20%以下で強熱減量が4%以下のもの。</u> ただし，この規格にはずれるものであっても凍上試験によって凍上を起こしにくい材料と判定されたものは使用してよい。 <u>凍上抑制層材料規定</u> 初版
S.50 S.54	火山灰（火山礫を含む）は， <u>0.074mmふるいの通過量が20%以下であり，強熱減量が4%以下でなければならない。</u> ただし，凍上試験を行い，難凍上性と認められたものは使用することができる。 <u>凍上抑制層材料規定</u>	火山灰，火山れき：粗粒で風化の徴候なく，排水性が良好で， <u>0.074mmふるいの通過量が20%以下で強熱減量が4%以下のもの。</u> <u>しかも，凍上試験によって凍上を起こしにくい材料と判定されたもの。</u> S54版
S.57 S.63 H.2 H.3 H.5 H.6 現在	火山灰（火山れきを含む）は， <u>凍上試験に合格したものでなければならない。ただし，凍上試験結果の判定が要注意のものは，0.074（0.075）mmふるいの通過量が20%以下であり，強熱減量が4%以下であれば，監督員の承認（承諾）を得て使用することができる。</u>	火山灰（火山礫を含む）： <u>凍上試験に合格したものでなければならない。ただし，凍上試験結果の判定が要注意のものは，0.074mmふるいの通過量が20%以下で強熱減量が4%以下のもの。</u> S62版 最新版

と、また例外的な火山灰土も確認されているため試料数を増やしての検討の必要性や粒度や強熱減量が凍上性と関連する一部の要素に過ぎないことを述べている。しかし、今日まで火山灰土の凍上性の簡易判定法については、他の土質指標による判定法の再考や広域的な火山灰土を扱った報告等は非常に少ない。

そこで、本節では道内火山灰土の凍上性を調べ、各種の土質定数と凍上性の関連性について述べる。

3-2-2 試験試料と実験方法

3-2-2a 試験試料の概要と試料分類

実験に用いた試料は、道内広域から採取した粗粒火山灰土 40 試料である。図-3-3 に試料の採取位置を示す。図中の●は、試料の採取位置であり、同一の採取位置にて複数の火山灰土を採取している。表-3-2 は試験結果の一覧である。第 1 期採取試料（表中の採取地名①の記号）については、火山学的な火山灰名の同定および採取した地山密度は測定していない。第 2 期採取試料については、これらの内容も調べている。火山灰の同定は、図-3-4 に示したように多くの項目を基に行われるが⁶⁾、あくまで噴出原、噴出形態、噴出年代などを示すものであり、火山灰名から工学的性質を判定することは難しい。しかし、噴出形態を示す fa(降下火砕堆積物 Pyroclastic fall deposits 以下、降下火山灰土と称す)および fl(火砕流堆積物 Pyroclastic flow deposits 以下、流下火山灰土と称す)で両者を比べると、降下物である火山灰 (fa 記号が付く Spfa など) の細粒分が少なく粗粒な材料であることが一般的に多い。

また、日本統一土質分類も粗粒火山灰土の場合は、粒径による分類となるため、工学的性質を反映すまでに至らない画一的な分類になる傾向にある。図-3-5 に示したように、道内広域から採取した本試料の土質分類名は中分類で、88% (40 試料中 35 試料) が砂質土であり、このうち 71% (35 試料中 25 試料) が SV (火山灰砂) に分類される。さらに、土質分類名を降下型と流下型の噴出形態で分けると、最も出現頻度が高い SV の全てが流下火山灰土になっている (図-3-6)。降下火山灰土は、広域に分布している反面、その層厚は薄く単層で 1m を超えることは稀である。これに対

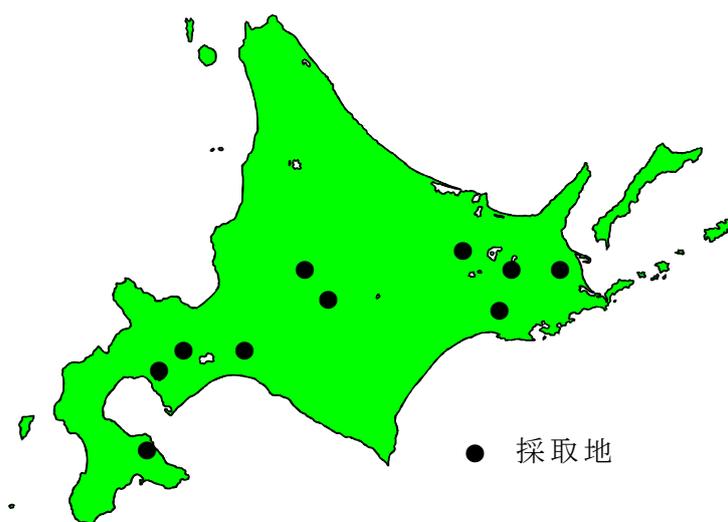


図-3-3 試料の採取箇所

表-3-2 試験結果の一覧

採取地	火山灰名	火山灰分類	日本統一土質分類	自然含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	粒度組成			締固め特性		地山密度 ρ _d (g/cm ³)	耐凍上性
							礫分 (%)	砂分 (%)	細粒分 (%)	ρ _{dmax} (g/cm ³)	ω _{opt} (%)		
恵庭①	----	V _{S1}	SVG	48.4	2.650	3.5	15	68	17	1.114	45.8	----	×
恵庭①	----	V _{S1}	SVG	51.4	2.600	3.3	22	53	25	1.082	48.3	----	×
美々①	----	V _{S1}	S-VG	15.3	2.789	1.6	11	84	5	1.398	27.3	----	○
美々①	----	V _{S3}	SVG	103.8	2.582	11.2	35	37	28	0.778	58.4	----	×
美々①	----	V _{S4}	GPS	123.0	2.521	4.1	70	26	4	0.518	79.9	----	×
美々①	----	V _{S3}	SV-G	76.0	2.686	6.9	7	44	49	0.978	53.8	----	×
美々①	----	V _{S1}	SPG	39.3	2.774	2.4	45	54	1	0.986	61.3	----	×
美々①	----	V _{S2}	SV	54.2	2.504	6.2	4	53	43	1.061	50.7	----	×
美々①	----	V _{S2}	SV-G	45.1	2.402	4.6	13	55	32	0.878	58.9	----	△
美々①	----	V _{S2}	SV-G	39.0	2.293	2.7	8	53	39	0.943	52.3	----	○
美々①	----	V _{S2}	GPS	57.0	1.944	3.0	63	33	4	0.695	68.2	----	○
中標津①	----	V _{S4}	SVG	102.1	2.471	4.7	38	46	16	0.855	43.0	----	×
池田①	----	V _{S2}	S-V	13.8	2.513	3.2	2	86	12	1.145	37.1	----	○
旭山①	----	V _{S2}	SVG	18.0	2.432	2.1	16	60	24	1.330	25.8	----	○
高砂台①	----	V _{S2}	SV-G	19.9	2.430	2.3	6	79	15	1.220	26.6	----	○
森①	----	V _{S1}	SPG	14.3	2.749	1.0	15	81	4	1.455	19.5	----	△
美々1②	Spfl	V _{S2}	SV-G	45.5	2.493	3.7	14	70	16	0.923	53.0	0.731	△
美々2②	Spfl	V _{S1}	SV	59.1	2.753	5.7	1	81	18	1.085	48.0	0.836	×
美々3②	Enfa	V _{S1}	SPG	45.5	2.847	2.3	49	50	1	1.025	42.5	0.873	○
美々4②	Enfa	V _{S3}	SG-V	80	2.780	6.8	20	74	6	0.993	54.0	0.720	×
美々5②	Tafa	V _{S4}	GP-S	156.7	2.535	8.5	86	12	2	0.459	140.0	0.312	△
美々6②	Tafa	V _{S1}	SP-G	18.5	2.782	2.6	10	87	3	1.357	28.5	1.223	△
美々7②	Spfl	V _{S2}	SV-G	35.1	2.370	3.1	7	64	29	0.915	55.5	0.858	○
美々8②	Tafa	V _{S4}	GPS	75.8	2.148	4.2	63	35	2	0.590	83.5	0.553	○
美々9②	Enfa	V _{S2}	GPS	54.4	2.041	3.6	67	31	2	0.532	66.0	0.548	○
洞爺②	Tofl	V _{S2}	SVG	33.9	2.336	2.6	27	53	20	1.151	37.5	1.066	○
洞爺②	Tofl	V _{S1}	SVG	24.9	2.609	4.2	17	61	22	1.212	33.0	1.002	△
洞爺②	Tofl	V _{S1}	SVG	40.7	2.650	5.6	22	61	17	1.442	26.0	0.980	×
駒ヶ岳1②	Kofa	V _{S1}	SPG	38.3	2.551	0.5	45	54	1	1.165	36.5	0.876	○
駒ヶ岳2②	Kofa	V _{S1}	SPG	12.8	2.720	0.5	19	80	1	1.340	26.5	1.340	○
駒ヶ岳3②	Kofa	V _{S1}	SPG	15.4	2.831	0.7	21	70	1	1.415	24.0	1.328	○
喜茂別②	Spfl	V _{S1}	SV-G	17.6	2.766	1.6	11	74	15	1.638	19.5	1.298	△
高砂台②	Tokfl	V _{S2}	S-VG	20.6	2.412	2.6	8	78	14	1.185	34.5	1.141	○
美幌②	Kcfl	V _{S2}	SV-G	29.1	2.424	2.7	11	59	30	1.180	34.0	1.118	○
美幌②	Kcfl	V _{S2}	SV-G	55.3	2.506	6.0	6	56	38	0.980	47.0	0.948	×
鶴居1②	Mafa	V _{S3}	SG-V	68.9	2.578	3.3	42	50	8	0.887	59.0	0.717	△
鶴居2②	Maf1	V _{S2}	SV	32.4	2.419	2.9	3	52	45	1.120	39.0	1.025	△
上富良野②	Tokfl	V _{S2}	SV-G	22.3	2.458	1.9	13	71	16	1.310	29.5	1.307	○
上富良野②	Tokfl	V _{S1}	SV-G	28.5	2.554	3.2	13	70	17	1.301	28.1	1.058	△
美瑛②	Tokfl	V _{S2}	SV-G	19.7	2.354	2.3	12	68	20	1.240	31.0	1.140	○

締固め試験は A-c 法による。 凍上性は凍上率で ○ 5%未満 △ 5%~20%未満 × 20%以上

し、流下火山灰土は分布域こそ噴出源周囲に限られるが、層厚は数 10m に達するものもある²⁾。したがって、集中した箇所に大量に存在するため土質材料としての利用頻度の高い流下火山灰土は、日本統一土質分類において SV のみの判定になるおそれがある。

本来、土質分類は分類名により、締固め特性や強度特性などの工学的性質を反映した形が理想である。しかし、火山灰土は分類名に偏りがある他に、分類上で広範囲に渡る試料についてその工学的性質を調べた例でも、性状把握が困難な材料とされている。神谷ら⁷⁾は、274 試料の道内火山灰土の締固め特性を調べ、一般的な土では相関がみられる細粒分含有率と締固め特性に明確な関係は見られず、自然含水比 50% を境界として性状が異なることを示した。また能登ら⁸⁾は、風化・未風化の程度により火山灰土のコーン支持力が異なることを示し、風化の尺度として自然含水比や強熱減量を指標として用いている。

このようなことから、前述した「北海道火山灰土の利用と性質」³⁾では、従来のような粒度組成に依存しない新たな指標として自然含水比と土粒子密度による分類法の提案がされた。図-3-7 は、同書に示された火山灰分類法に従って本試料を分類した結果である。この分類法は、自然含水比 50~80% と土粒子密度 2.5~2.6g/cm³ を境界としており、同図の軸上に示したような工学的性質と関連付けられている。火山灰分類に自然含水比を用いた例は、Moroto⁹⁾による青森ロームの分類が有名であり、自然含水比と液性指数を指標として用いている。Moroto によれば含水比やコンシステンシー

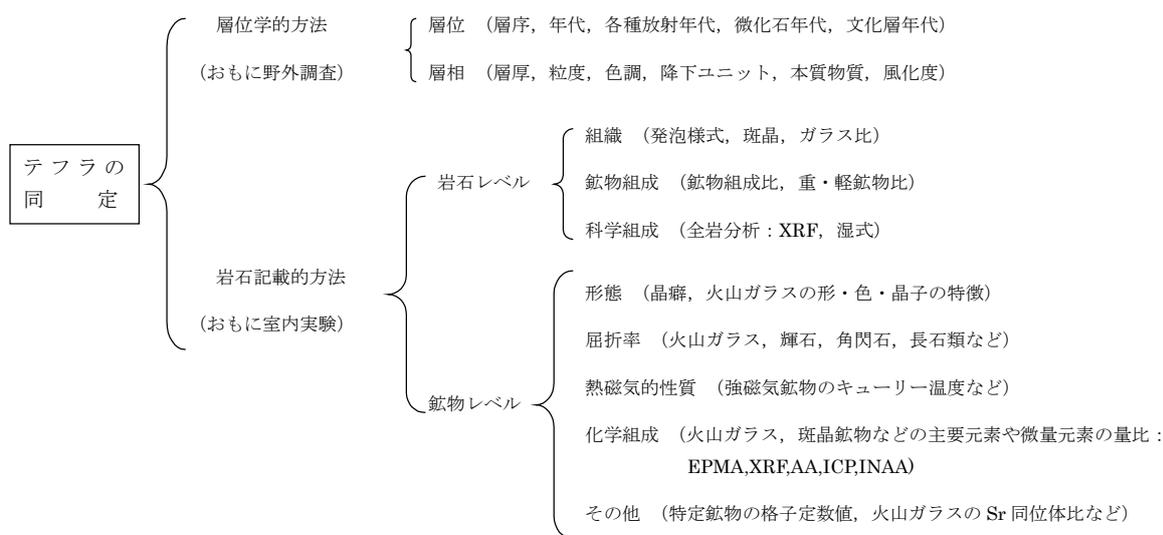


図-3-4 テフラ（火山灰）の同定法⁶⁾

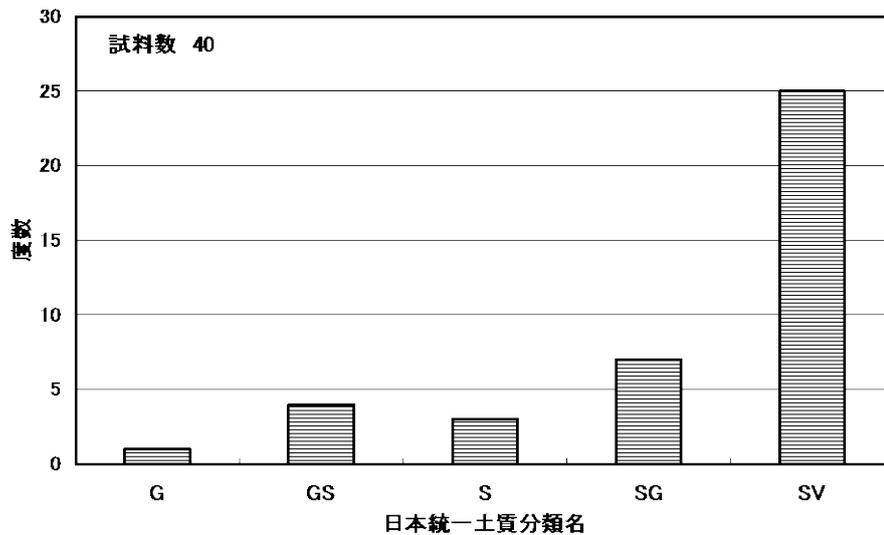


図-3-5 試験試料における土質名称の出現頻度

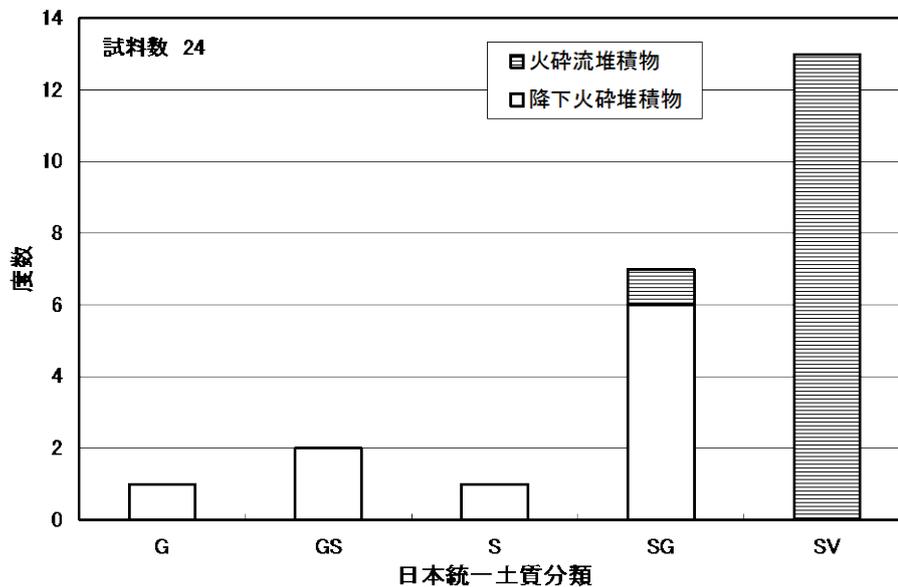


図-3-6 噴出形態の違いによる土質名称の出現頻度

は非晶質物質量と強く関係しており、自然含水比 70%を境界として CBR などの強度特性も異なることを示している。アロフェンに代表されるような非晶質物質は、多量の非自由水を内包しており、関東ロームについても自然含水比とアロフェン量には、以下の関係が成り立つとされている¹⁰⁾。

$$\omega_n = 0.83A_p + 57.3(\%) \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

ここに、 ω_n 自然含水比、 A_p アロフェン含有量

粗粒火山灰土について、自然含水比が持つ工学上の意味を上記のような方法で調べた既存の研究は見られないが、粒子内部に内包された水分量として自然含水比は、粒子性状を示す重要な因子として捉えられると考えられる。

図-3-7の結果から、本試料は自然含水比が50%以下のVs1やVs2に分類される土工上も扱い易い火山灰土が多くを占めている。このような傾向は、文献3)に示された分類例と比較しても同様であり、北海道に分布する粗粒火山灰土の特徴といえる。

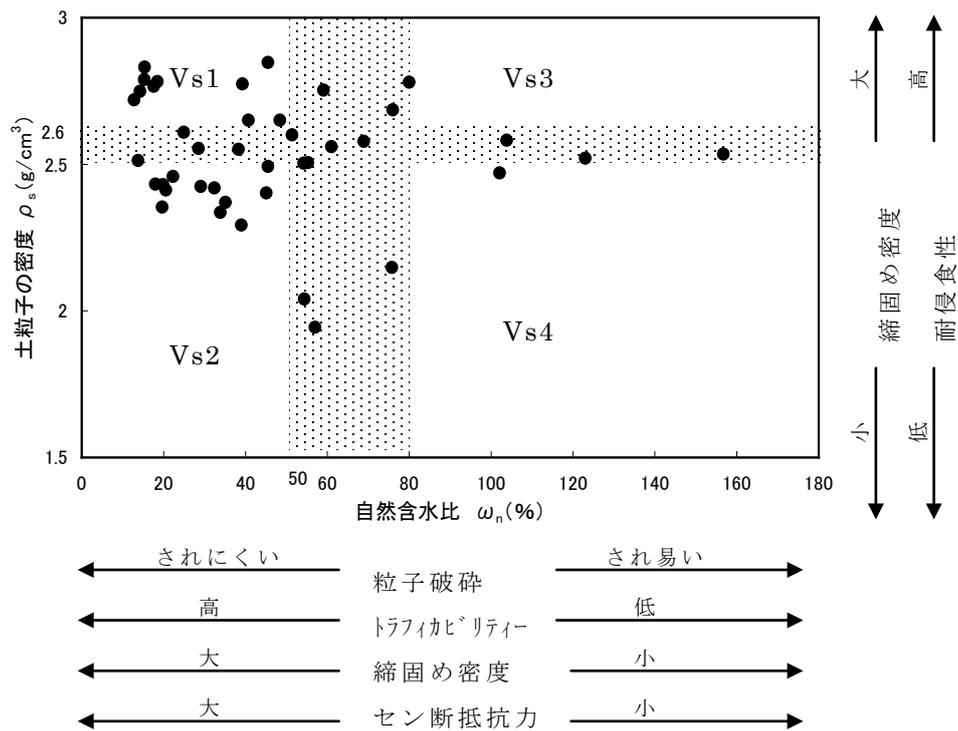


図-3-7 試料の火山灰分類 (Vs 分類)

3-2-2b 実験方法

凍上試験は、第2章 2-4-2c で述べた方法によって行った。供試体は、第1期試料(表-3-2 ①)について締固め曲線上の自然含水比に対応する密度で、第2期試料については最適含水比-最大乾燥密度になるよう両条件共にジャッキにより静的に締固めて作成した。なお、凍上試験は1試料につき3供試体の試験を行い凍上性の判定を行っている。

3-2-3 試験結果と考察

3-2-3a 従来型の凍上性簡易判定

図-3-8は、従来簡易判定法として用いられてきた細粒分含有率、強熱減量と凍上性の関係である。細粒分含有率20%以下、強熱減量4%以下の領域は、比較的凍上性材料(図中の×)が少ないものの、逆に領域外で非凍上性材料(図中の○や△)が多数存在することが判る。簡易判定に用いている両パラメータで凍上性との関係をみると、強熱減量4%以下の火山灰土に非凍上性材料が分布しているように見受けられるが、細粒分含有率に関しては明確な関係はみられない。

一般的に、土の凍上性と最も相関が高いパラメータは細粒分含有率であり、砕石や砂などの置換材料は、非凍上性の材料規定として細粒分含有率を用いている¹¹⁾。これは、凍上の発生メカニズムの観点からも説明することが可能であり、細粒分の混入が微細間隙の割合を増やし毛管力を増加させること、また微細な粒子は、粒子表面の吸着力が大きく大量の吸着水を保有することが理由として挙げられる。このような毛管

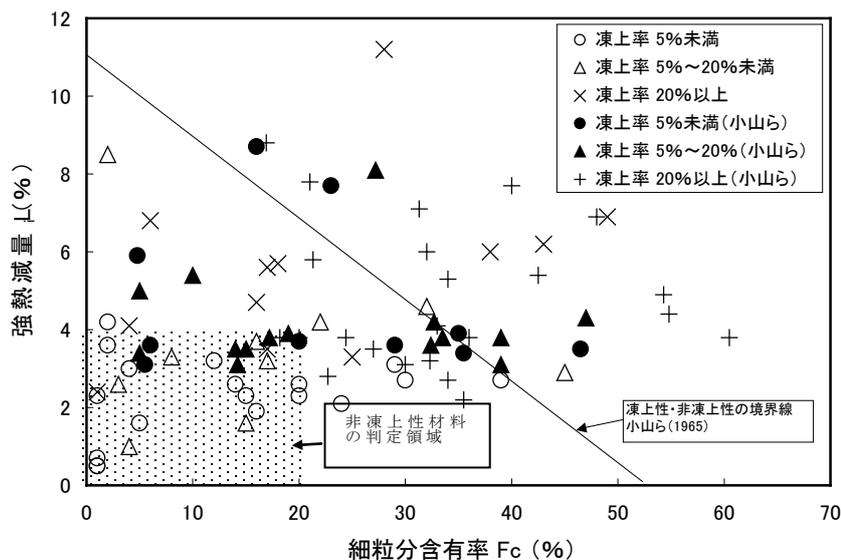


図-3-8 細粒分含有率、強熱減量と凍上性の関係

力や吸着水は、未凍土からの水分供給力や凍結境界面への水分供給ルートとして凍上性と深く関連している。火山灰土の凍上性判定に細粒分含有率が適さない理由は、一つには破碎性が強く、粒度試験のふるい分析時で生じる破碎により正確な細粒分含有率が求め難いこと、また粒子径だけでは、火山灰土特有の粒子性状まで判別が不可能なことである。火山灰土の粒子性状とは、母岩や溶結温度によって異なる粒子内部の微細な孔隙や複雑な粒子表面性状などであり、単なる粒子の外寸法である粒径のみでは、このような性状判定は困難である。鈴木¹²⁾は火山灰土と砂を混合し、意識的に細粒分含有率を変化させた凍上試験を行い、非凍上性（凍上率 20%以下）を示す細粒分含有率の境界が 10%以下になることを示している。また、種々の火山灰土の凍上性を調べ、細粒分含有率で 20%～40%の比較的広い範囲に凍上性と非凍上性が混在することを述べている。

以上のことから、火山灰土の凍上性判定には細粒分含有率のような粒度組成に基づいた評価は前述した火山灰分類と同様に、的確な性状判定には適さない方法である。

3-2-3b 火山灰分類と凍上性

図-3-9は、図-3-7に示した火山灰分類において凍上率毎に記号分けしたものである。この図から、Vs1とVs2に非凍上性材料が多く存在していることが判る。また、Vs1、Vs2で両者を比較すると、土粒子密度が小さいほど非凍上性の火山灰土が多くなる傾向にある。しかし、土粒子の密度が極端に小さなものは($\rho_s < 2.3$ 程度)、非凍上性である反面、 $\rho_s = 2.5$ を超えるような火山灰土は、凍上性・非凍上性が混在し

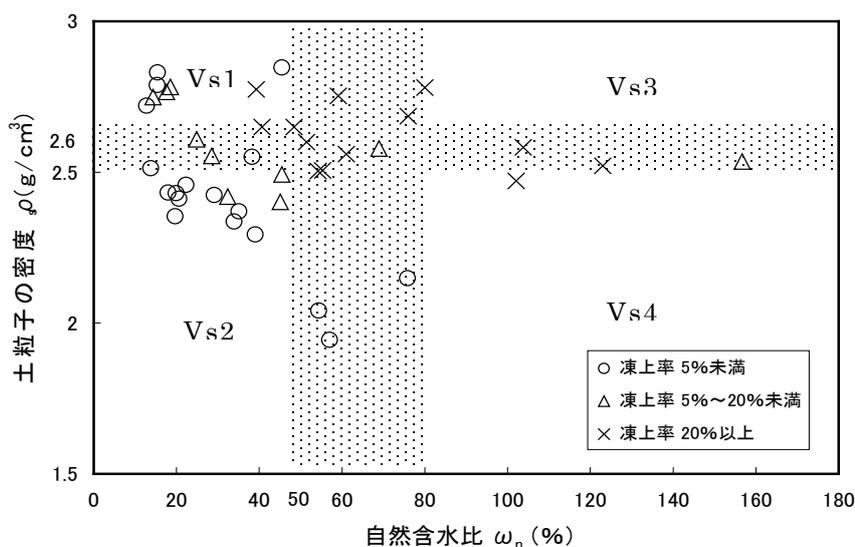


図-3-9 Vs分類上の凍上性

ており，必ずしも土粒子の密度が大きければ凍上性であるとは言えない。つぎに自然含水比に着目すると，土粒子の密度の関係で見られたような凍上性・非凍上性の混在領域が， $\omega_n = 40 \sim 80\%$ の範囲で確認される。しかし，自然含水比での混在領域は土粒子の密度と異なり，中間的な位置であり，混在領域を中心とした対照的な関係として，自然含水比の大小関係が凍上性と非凍上性を明確に分類している。凍上性に関して図-3-9の境界値を整理すると概ね以下のようになる。

- ① $\omega_n < 40\%$ はすべて非凍上性である。(Vs1 および Vs2)
- ② $\omega_n > 80\%$ はすべて凍上性である。(Vs3 および Vs4)
- ③ $\rho_s < 2.5$ は非凍上性である。(Vs2)

両指標ともに，凍上性との関係を示すことが可能であるが，両者を比較するとおよそその凍上性評価としては自然含水比を指標に考えることが簡便である。佐々木らは，道内火山灰土を練り返しによるコーン指数の増減によって，風化火山灰と未風化火山灰に分類し，自然含水比によって両者を簡便に判別する方法を提案している¹³⁾。この分類案において風化・未風化の境界は，土質分類名によって多少異なるものの，概ね自然含水比で50%程度であり，図-3-9に示したような火山灰分類の境界ともほぼ一致する。このように自然含水比を風化の尺度と捉えるならば，風化の度合が火山灰土の凍上性に影響を与えているといえる。さらに，従来の凍上性簡易判定で用いられてきた強熱減量も同様に風化の尺度として用いることが可能であると言われており，

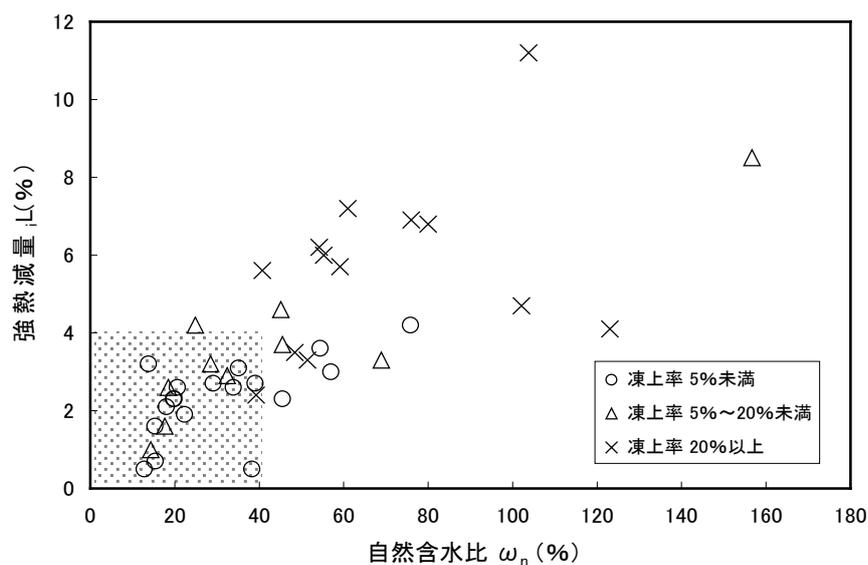


図-3-10 自然含水比，強熱減量と凍上性との関係

自然含水比との関係には、ある程度の相関関係がみられている⁸⁾。図-3-10は本試料の自然含水比と強熱減量の関係である。この結果から、多少のばらつきは見られるものの自然含水比が高いものほど強熱減量も高くなる傾向が見られる。また、自然含水比で凍上性の火山灰土が現れる境界の40%以下では、強熱減量が4%を超える試料が存在しないことが判る。つぎに、非凍上性が出現する可能性がある境界をそれぞれの指標でみると、強熱減量では1試料のみ8%程度のももあるが概ね4%、自然含水比では80%程度である。両指標ともに境界値以内であっても、凍上性・非凍上性が混在する領域があることから、単一での判定指標には用いられないこと、また混在する領域を分類可能な土質パラメータを考える必要がある。

3-2-3c 締固め特性と凍上性

図-3-11に最適含水比と最大乾燥密度の関係を示す。両者の関係は良い相関関係が見られ、凍上性・非凍上性の火山灰に限らず一本の曲線上に分布している。この関係は、火山灰土の締固め特性として捉えることは可能であるが、凍上性に関しては、明確な関係が見られないことになる。したがって、他の土質パラメータと締固め特性との関係において凍上性評価を考える必要がある。図-3-12は自然含水比と最適含水比の関係である。両者の関係は、自然含水比が高いものほど最適含水比が高くなる傾向にあり、凍上性と非凍上性を示す火山灰土の特徴としては、

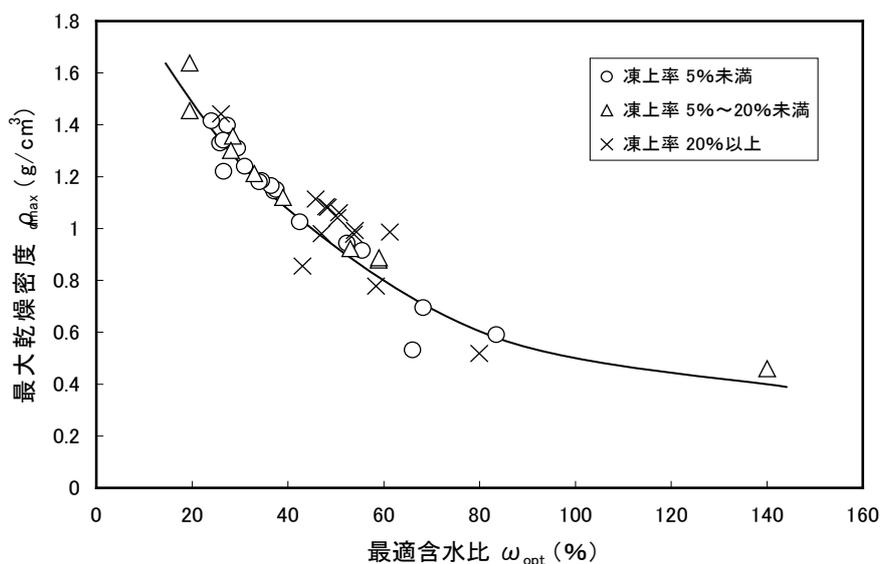


図-3-11 最適含水比，最大乾燥密度と凍上性との関係

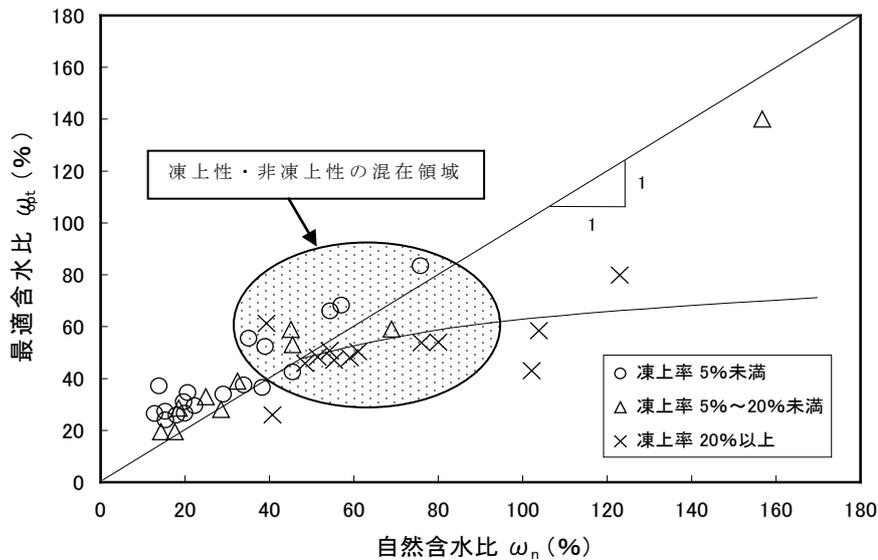


図-3-12 自然含水比，最適含水比と凍上性との関係

$$\omega_n \leq \omega_{opt} \quad \text{非凍上性の火山灰土} \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

$$\omega_n > \omega_{opt} \quad \text{凍上性の火山灰土} \quad \dots \dots \dots (3-3)$$

のような関係がみられる。また，非凍上性の火山灰土は，両含水比で 1：1 に近い相関関係がみられるのに対し，凍上性のものは 1：1 の直線関係から大きく外れ，自然含水比の増加に対しても最適含水比があまり変化しないような関係になっている。このような関係に着目し，凍上性・非凍上性の混在する領域をみると 1：1 の直線を挟むような関係で非凍上性が上方に位置し，凍上性が下方になる傾向が確認される。すなわち，非凍上性の火山灰土は自然含水比状態から加水処理を行うことによって最適含水比状態になるものであり，凍上性の火山灰土は最適含水比状態にするために乾燥処理を必要とするものである。鈴木ら¹⁴⁾は，粗粒火山灰土の粒子孔隙モデルを示し，孔隙の種類と特性について説明している。図-3-13 は軽石粒子の孔隙モデルである。軽石質の粗粒火山灰土は，風化の程度により物理的性質が異なるとした上で，風化によって孔隙構造が相違するとしている。モデルでは，孔隙の種類を粒子表面の凹凸に起因する表面孔隙と粒子内部の内部孔隙に大別し，内部孔隙は，さらに表面と連通した活性孔隙と閉塞孔隙に分類している。このような内部孔隙の違いは，風化による影響とし，未風化な状態では内部孔隙の多くが閉塞孔隙であるとしている。また，表面孔隙についても風化により表面の粗度が異なるため影響を受けるとしている。自然含水比が最適含水比よりも高い状態とは，自然状態の間隙水量が最大の締固め密度を得るために過剰な水分量であることを意味している。活性孔隙が多いような火山灰土では，締固めエネルギーを受けた場合に表面孔隙や粒子に内封された水分が間隙内に析

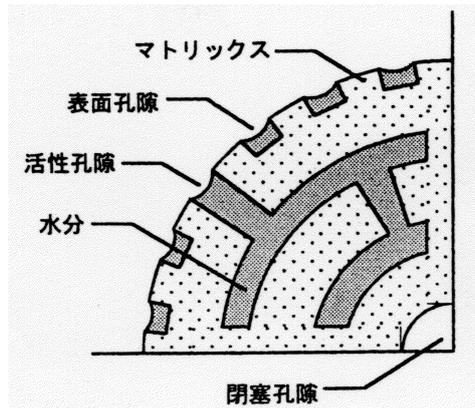


図-3-13 軽石粒子の孔隙モデル¹⁴⁾

出する可能性があり，このような粒子特性が締固め特性に影響を与えている可能性が考えられる。逆に加水処理を行うことによって最大の密度を得るような火山灰土は，未風化で閉塞孔隙に水分を保持するため一般的な粗粒土と比べると自然含水比が高くなるが，内封された水分量は締固めによって析出することは少なく，表面水や若干の間隙水だけでは最大乾燥密度を得るに不足するような状態にあると推察される。また，自然含水比や最適含水比の関係が凍上性と関連したことは，風化・未風化による粒子孔隙の特性として，表面水の多少が密接に係わっているものと考えられる。

つぎに，自然含水比と最大乾燥密度の関係を図-3-14に示す。両者の関係は，自然含水比が高いものほど最大乾燥密度が低くなる傾向にあり，その減少傾向は凍上性

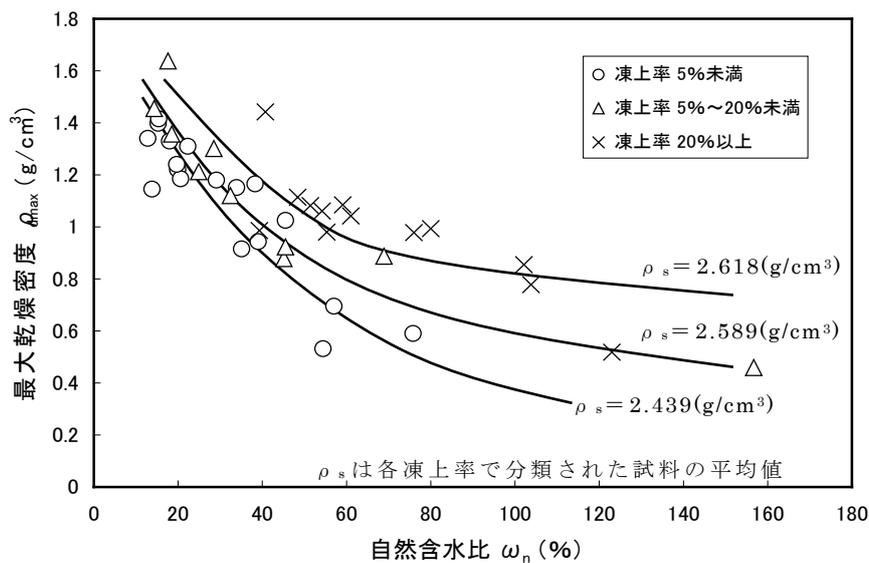


図-3-14 自然含水比，最大乾燥密度と凍上性との関係

の違いによって異なった関係を示している。凍上性と非凍上性の火山灰土を比較すると、同一の自然含水比では凍上性の火山灰土ほど最大乾燥密度が大きくなる傾向にある。最大乾燥密度の関係でこのような傾向がみられることは、土粒子の密度の違いによる影響が考えられ、図中に示した各凍上率での土粒子の密度の平均値は、凍上性が増すほど大きな値を示している。したがって、土粒子の密度の差による影響を考慮した場合、凍上性と非凍上性の火山灰土には締固めにおける密度特性に明確な差が現れない可能性がある。そこで、**図-3-15** は土粒子の密度による影響を考慮し、最大乾燥密度における間隙比を求め自然含水比との関係を示したものである。凍上性によって異なった締固め特性を示した理由が、単に粒子の重量に起因するものであれば、間隙比を用いることにより、**図-3-14** で得られた関係が成立しなくなる。しかし、間隙比との関係においても凍上性を示す火山灰土は、自然含水比との関係で密な間隙状態になっており、凍上性と非凍上性の火山灰土では異なる締固め特性を有していることが確認された。また、同図における凍上性と非凍上性火山灰土の関係は、以下のよう

凍上率 20%未満の火山灰土（非凍上性火山灰土）

$$e_{\rho dmax} = 0.026 \omega_n + 0.480 \dots \dots \dots (3-4)$$

凍上率 20%以上の火山灰土（凍上性火山灰土）

$$e_{\rho dmax} = 0.023 \omega_n + 0.208 \dots \dots \dots (3-5)$$

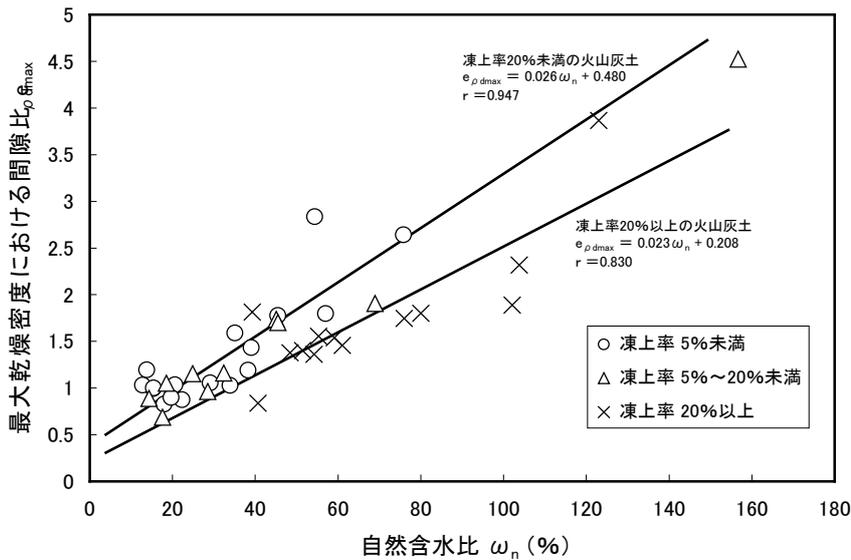


図-3-15 自然含水比， $e_{\rho dmax}$ と凍上性との関係

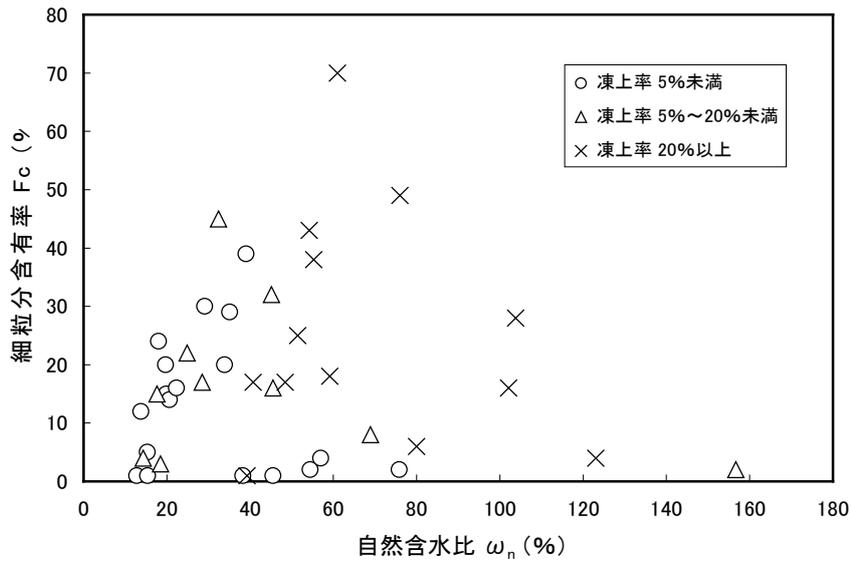


図-3-16 自然含水比，細粒分含有率と凍上性との関係

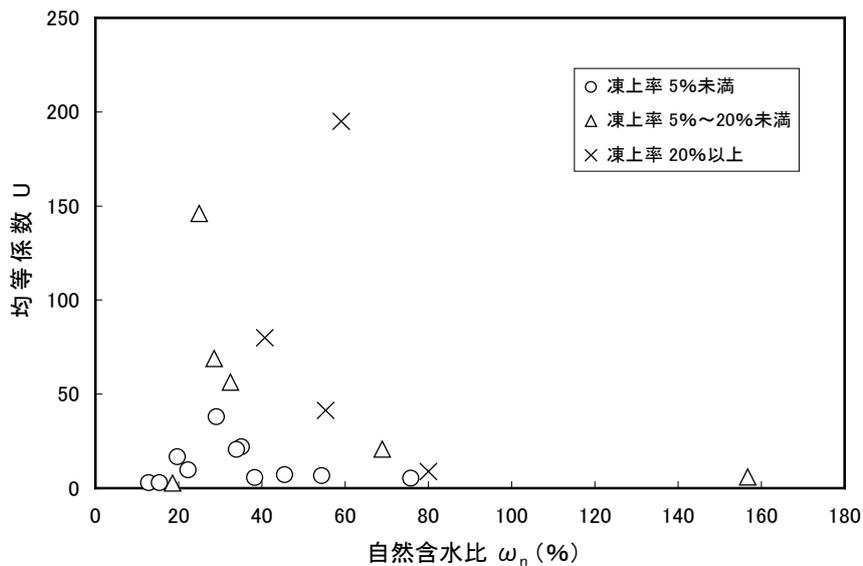


図-3-17 自然含水比，均等係数と凍上性との関係

同一の自然含水比であれば凍上性を示すものほど最適含水比状態では，密な状態に締固められることになる。なお，このような結果は図-3-16，17 に示した自然含水比と細粒分含有率および均等係数の関係に一義的な傾向が見られないことから，粒度組成などに起因するものではない。したがって，火山灰土の締固め特性については，粒度組成だけでは評価が難しい火山灰土の粒子性状が密接に関わっている可能性がある。火山灰土の中には粒子が脆弱で若干の外力を受けただけでも破砕や粒子表面が擦り減るようなものも多く，締固め仕事を受けた場合には，粒子の接触点でそれらが卓

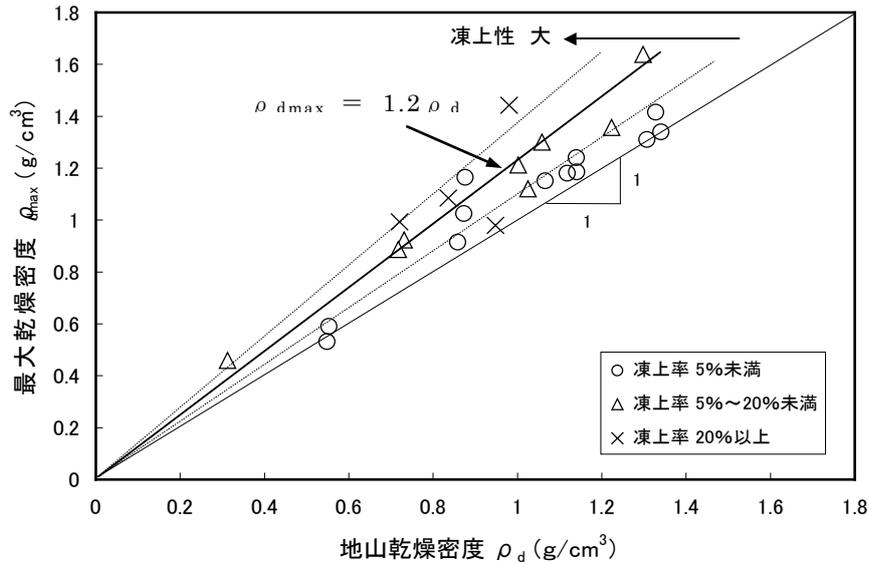


図-3-18 地山乾燥密度, 最大乾燥密度と凍上性との関係

越して生じる可能性がある。仮にこのような現象が締固め時に生ずるのであれば、類似した粒度組成であっても、接触点で破砕などが生じ、土粒子が容易に移動可能になるため、より密な状態の間隙構造になる。このような粒子性状が、粒度組成だけでは判別できない火山灰土の特徴として考えられ、風化の度合や粒子内部の微細孔隙の量などに影響を受けるような強熱減量や自然含水比のような指標が、間接的ではあるものの締固め特性や凍上性と良い相関関係を示すものと考えられる。また、土粒子の密度についても風化の進行により閉塞孔隙が活性孔隙に変化すること、さらに粘土鉱物が生成されれば大きな土粒子密度を示す可能性があり、粘土鉱物の存在なども凍上性に密接に関わるものとして今後検討する必要がある。

つぎに、地山乾燥密度と最大乾燥密度の関係を図-3-18 に示す。データ数が少ないため参考的な結果であるが、火山灰地盤は最大乾燥密度よりやや緩い状態で堆積していることが判り、このような傾向は文献 3) に示された結果と同様である。また、凍上性に関しては凍上性になるほど、最大乾燥密度よりも地山乾燥密度が小さくなっており、凍上性と非凍上性の境界は概略ではあるが、

凍上率 20% 未満の火山灰土（非凍上性火山灰土）

$$\rho_{dmax} < 1.2 \rho_d \dots \dots \dots (3-6)$$

凍上率 20% 以上の火山灰土（凍上性火山灰土）

$$\rho_{dmax} > 1.2 \rho_d \dots \dots \dots (3-7)$$

のような関係になる。

3-2-3d 新しい火山灰土の凍上性簡易判定方法

火山灰土の凍上性を簡易に判定するには、従来用いてきた細粒分含有率のような指標は適切でないことを述べてきた。火山灰土の凍上性判定は、あくまで凍上試験による評価が前提である。しかし、置換材料のように凍上抑制を目的とした材料以外に凍上試験を行うことは稀であり、一般的な砂や碎石のように細粒分含有率から凍上性を予測可能な材料と異なる火山灰土に対しては、新たな形での凍上性簡易判定手法の提案が重要視される。

そこで、これまで述べてきた各種の土質パラメータと凍上性の関係を基にして、新たな形での火山灰土凍上性簡易判定手法として図-3-19を示す。同図は、自然含水比(ω_n)と最適含水比と自然含水比の比(ω_n/ω_{opt})の関係により、凍上性に応じた4つの分類を行っている。分類案は、領域ごとの凍上性と境界値として、

領域Ⅰ：非凍上性火山灰土

$$\omega_n < 40\%$$

領域Ⅱ：非凍上性火山灰土

$$40\% < \omega_n < 80\% \quad \text{かつ} \quad \omega_n / \omega_{opt} < 1$$

領域Ⅲ：凍上性火山灰土

$$40\% < \omega_n < 80\% \quad \text{かつ} \quad \omega_n / \omega_{opt} > 1$$

領域Ⅳ：凍上性火山灰土

$$\omega_n > 80\%$$

のように定められる。このような評価法は、あくまで凍上性予測のための簡易判定法である。ここで用いた含水比などのパラメータは、凍上機構と直接的に関連付けて説明するには困難な点も多く、間接的に凍上性と関連する指標である。前述したが、凍上機構と関連付けるには、粒子性状に基づく不凍水量や吸水ポテンシャルの違いなどを明確にする必要がある。現段階で自然含水比などと凍上性が比較的良い相関関係を示したことは、含水比特性も粒子性状に支配される因子であることが最大の理由と考えられる。今後、自然含水比の持つ工学的意味を詳査する重要性は高いが、凍上試験を主体に考えた凍上性判定では、補助的な簡易判定に高度な土質パラメータを用いることは好ましくなく、簡易に測定可能な指標を考えることが重要である。

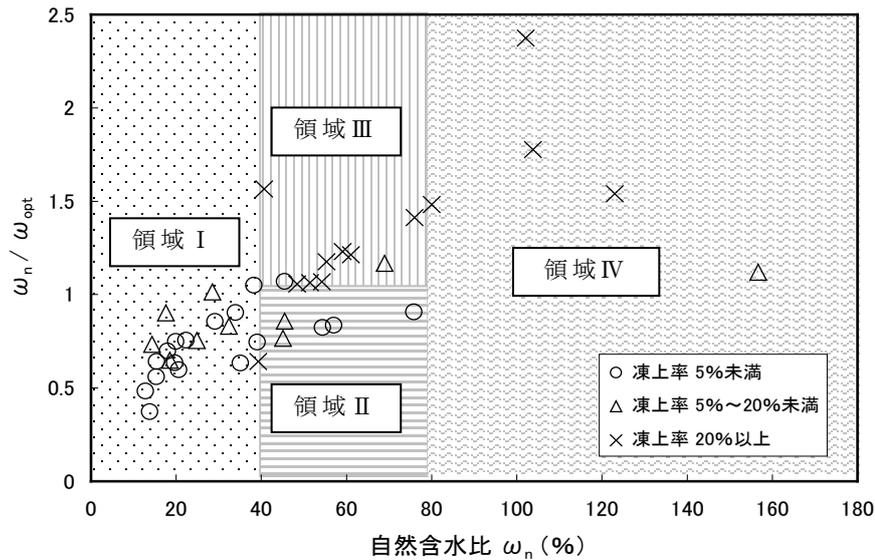


図-3-19 火山灰土の凍上性分類

3-2-4 まとめ

従来型の火山灰土の簡易凍上判定法は、細粒分含有率や強熱減量によって行われてきたが、このような判定法には例外的な火山灰土も多く存在することが指摘されてきた。本節では、従来型の凍上性簡易判定法の適応性や新たな土質パラメータによる凍上性判定法を確立するため、火山灰土の凍上性と各種の土質パラメータとの相関関係を調べ、以下のような結果を得た。

- 1) 従来型の細粒分含有率と強熱減量による凍上性判定では、規定値内に凍上性の火山灰土が出現する頻度は少ないものの、規定値外に多くの非凍上性のものが存在した。
- 2) 細粒分含有率と凍上性の関連は見られず、強熱減量が4%以下の火山灰土は比較的非凍上性のものが多く含まれていた。
- 3) 自然含水比と土粒子の密度による火山灰分類を用いると、自然含水比が低いVs1とVs2に非凍上性材料が分布することが判った。またVs1とVs2で比べると、土粒子の密度が小さいVs2に非凍上性の火山灰土が多くなる傾向が見られた。
- 4) 自然含水比は簡易に凍上性を評価可能であり、自然含水比(ω_n)が40%以下のものには、凍上性の火山灰土は存在しないことが確認された。また、 ω_n が40~80%の範囲には、凍上性と非凍上性が混在していた。
- 5) 自然含水比と最適含水比(ω_{opt})の関係より、両含水比の関係における1:1の線を境界に、非凍上性は $\omega_n \leq \omega_{opt}$ 、凍上性は $\omega_n > \omega_{opt}$ の関係になることが確認された。
- 6) 自然含水比と最大乾燥密度の関係により、凍上性の火山灰土は非凍上性のもの

よりも、大きな最大乾燥密度を示していた。このような関係は、土粒子の密度や粒度組成に関連したものではなく、風化の度合に影響された粒子性状によるものと推察された。

- 7) 新たな火山灰土の凍上性判定法として、 ω_n と ω_n/ω_{opt} の関係により、4つの分類領域を設定し、火山灰土の簡易凍上性評価法を提案した。

3-3 凍結融解履歴が粗粒火山灰土の粒子性状に与える影響

3-3-1 はじめに

道内の粗粒火山灰土には、締固めや圧密・せん断時などに顕著に破砕性を示すものも多く、粒子破砕が土工上の問題や設計・施工に用いる力学定数に与える影響など問題とされる点も多い。谷口¹⁵⁾による樽前系火山灰土の実験例から、締固めによる粒子破砕は密度に与える影響が大きいことが報告されている。また、三浦ら^{16),17),18),19),20)}による道内火山灰を扱った一連の研究によって、粒子破砕による細粒分の増加が力学的特性に影響を与えることが報告されている。さらに道内火山灰土に限らず、同じ火山噴出物である九州地方のしらす²¹⁾や花崗岩風化物であるマサ土^{22),23),24),25)}なども破砕性が顕著であり、粒子破砕が工学的な性質に与える影響は無視できない。主に粒子破砕は、圧密やせん断もしくは締固めなどによる粒子接点での応力増加（有効応力の増加）が原因で生じるが、寒冷地においては凍結・融解作用も粒子破砕を助長する可能性がある。火山灰土の中には、粒子内部に多量の孔隙を有するものも多く、孔隙に内封された水分の凍結膨張圧により、粒子が脆弱化することも想定される。凍結・融解作用が火山灰土の粒子性状に及ぼす影響を調べた例は少なく、それらの影響範囲も明確にされていない。

そこで、本節では数種の火山灰土に凍結融解履歴を与え、凍結・融解作用による粒子破砕量および凍結・融解履歴を与えた火山灰土の締固めによる破砕量を調べ、凍結融解履歴が粗粒火山灰土の粒子性状に与える影響を検討した。

3-3-2 試験試料と実験方法

用いた試料は、表-3-2に示した試料の中で礫粒径の含有率が多い7種類の降下火山灰土である。対象とした火山灰土は、樽前系2種類、恵庭系1種類、駒ヶ岳系3種類、摩周系1種類である。凍結・融解による影響は、試料に凍結・融解履歴を与えたときの粒度組成の変化から調べ、凍結・融解履歴のみ(締固め無)と凍結・融解後に締固めを行った(締固め有)2つのパターンで粒度試験を行った。締固めは、地盤工学会基準のA法(10cmモールド, 3層, 25回)とした。なお、凍結・融解の方法は、最適含水比に調整した試料を水分蒸発が起きないように密封し、-6℃で24時間凍結させ、常温で24時間の融解を1サイクルとし、最大で5サイクルまで行った。また、火山灰土は、ふるいによる粒子破砕が生じ易いためふるい分けの回数を120回¹⁹⁾と規定した。

3-3-3 結果と考察

図-3-20 は、全試験パターンでの粒度組成の変化を Vs 分類毎に示したものである。Vs1 の 3 試料（駒ヶ岳 1, 2, 3）は、締固めや凍結・融解による粒度変化が微小であり、Vs4 の 2 試料（美々 5, 8）が粒度の変化が著しい。粒径加積曲線の変化から、凍結・融解による影響は、全試料で微小であり、締固めによる粒子破碎が卓越している。粒径加積曲線のみから粒子破碎を視覚的に比較するには限界があり、締固めや凍結・融解による影響を明確にするためには粒子破碎量を定量化する必要がある。粒子破碎の指標は、目的に応じた幾つかの手法が存在する。福本²⁶⁾は、過去に提案された粒子破碎量の指標をまとめ、代表的な指標について特徴を紹介している。代表的な粒子破碎量の定義方法として、細粒分（75 μ m 以下）の増加量や 15% 粒径の変化、粒径加積曲線の図上の面積、あるいは、粒子表面積の増加量など様々な手法が紹介されているが、いずれも物理的な意味合いについて明確ではない欠点を指摘している。また、石井²⁷⁾は複数の粒子破碎指標の物理的意義について調べ、独自の手法として Marsal の修正破碎率 B_M^* を提案している。Marsal の修正破碎率は、細粒化した粒子体積と総粒子体積の比率として表され、従来の Marsal の破碎率²⁸⁾が持つ物理的意味の薄弱さを補う指標としている。しかし、いずれの粒子破碎指標もすべての物理現象と対応させて利用できる普遍的な指標にはなり得ず、目的に応じて複数の指標で評価することが有効であると考えられる。本研究では、粗粒火山灰土の破碎性の強弱を幾つかの土質パラメータを基に相対的に比較し、破碎特性の把握を目的としたため一般的な Marsal の破碎率および凍上特性との関連が考えられる細粒分の増加量などを用いることにする。

図-3-21 は、凍結・融解サイクルを与えた場合の Marsal の破碎率である。すべての火山灰土について、凍結・融解による粒子破碎が見られる。しかし、破碎率は初期の凍結・融解（1 サイクル目）による影響が卓越しており、最も破碎率が大きい鶴居 1 についてのみ、サイクル数による破碎率の増加傾向が見られるが、他の試料については 1 サイクル目に生じた破碎がその後に増加する傾向は見られない。つぎに、図-3-22 は、凍結・融解サイクルと細粒分含有率の関係である。この関係でも、細粒分の増加は、最大で 3% 程度であり、Marsal の破碎率と同様に鶴居 1 を除いては、サイクル数の増加が直接的に細粒分含有率に影響を与えていない。以上のように、凍結・融解サイクルのみで生じる粒子破碎は微小であり、一部の粒子の脆弱箇所が初期の凍結・融解作用によって破碎するものの、それらは継続的に進行するものではないことが確認された。

図-3-23 および図-3-24 は、凍結・融解サイクルを与えた試料を締固めた時に生じた破碎を Marsal の破碎率と細粒分含有率で示したものである。両関係ともに、締固

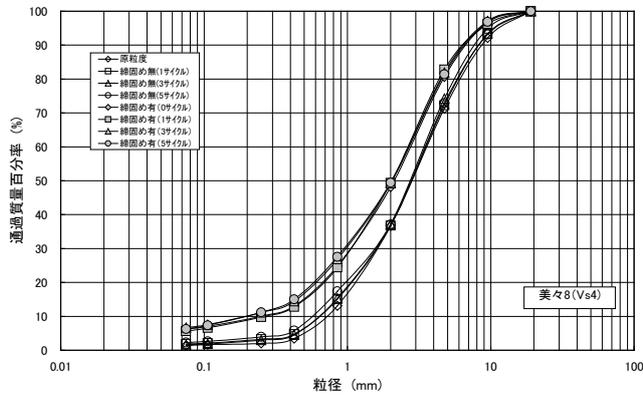
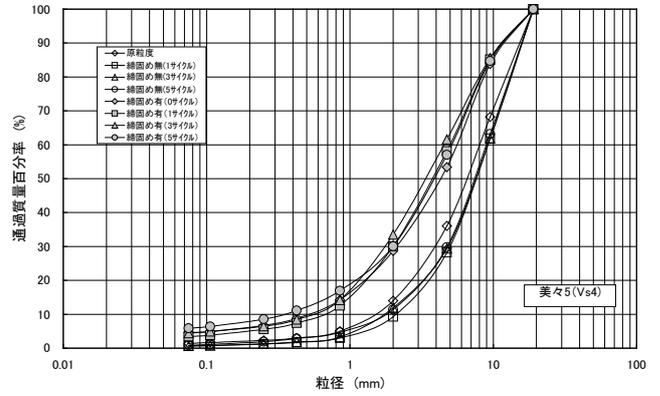
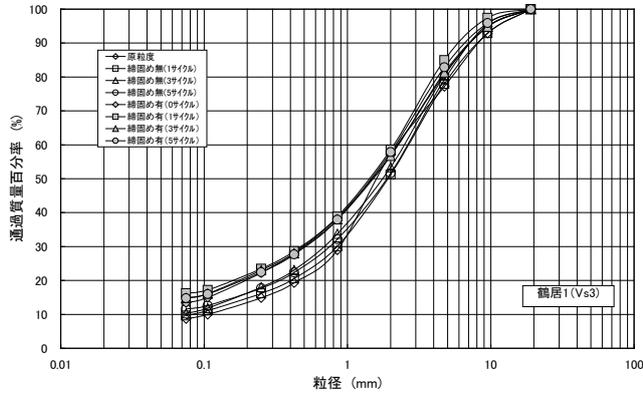
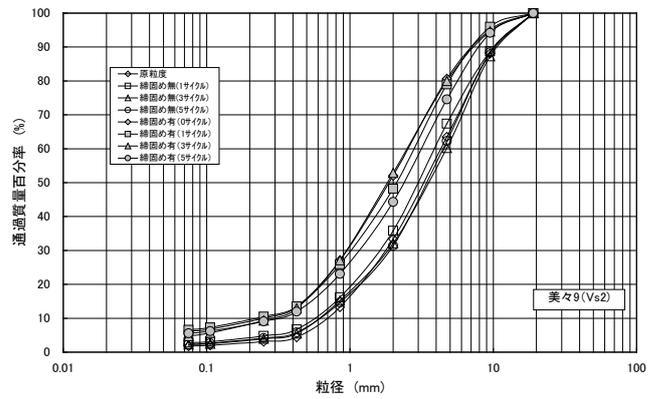
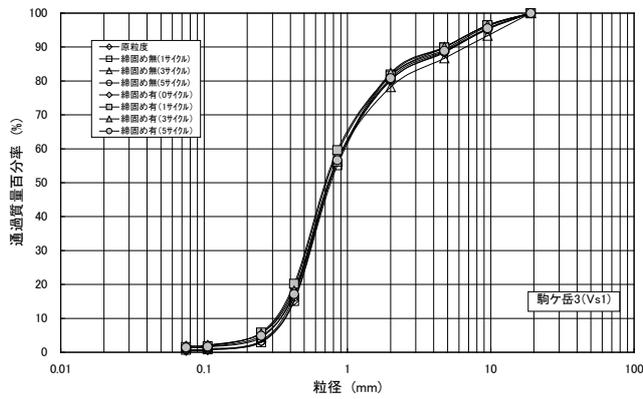
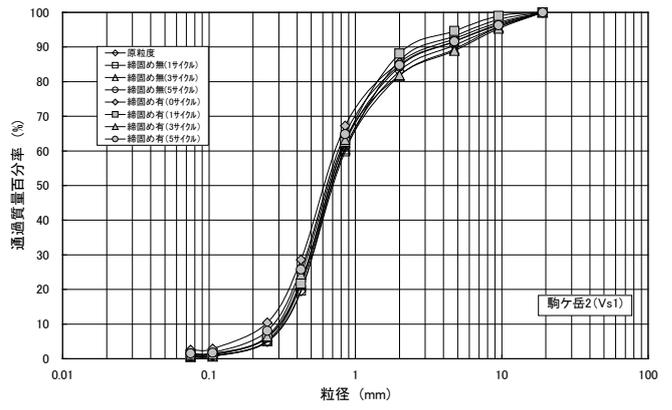
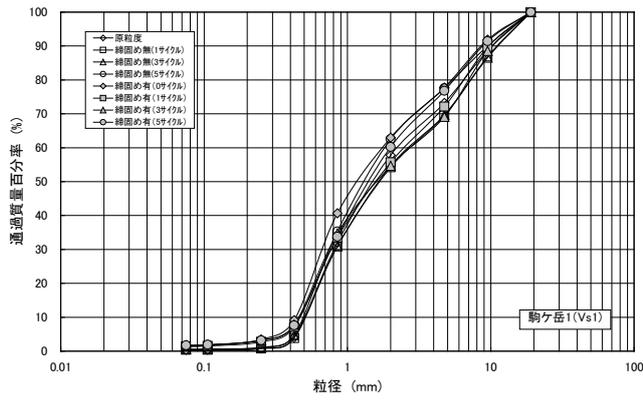


図-3-20 凍結・融解作用による粒度組成の変化

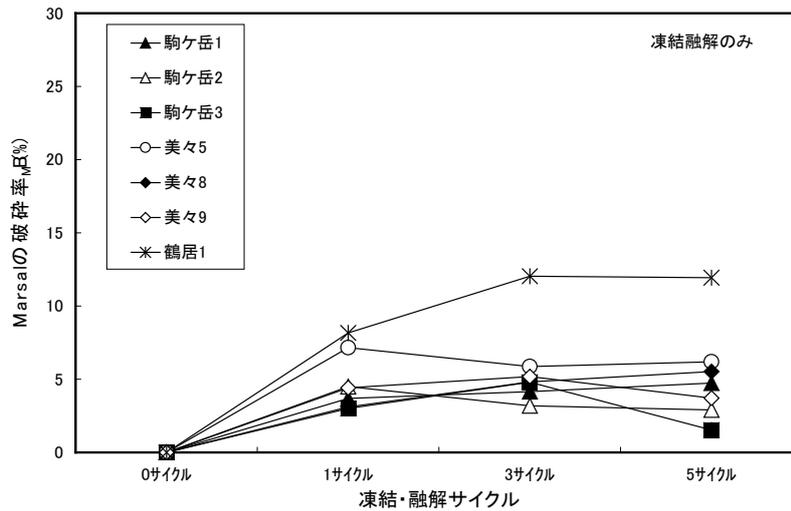


図-3-21 凍結・融解作用による Marsal の破砕率の変化

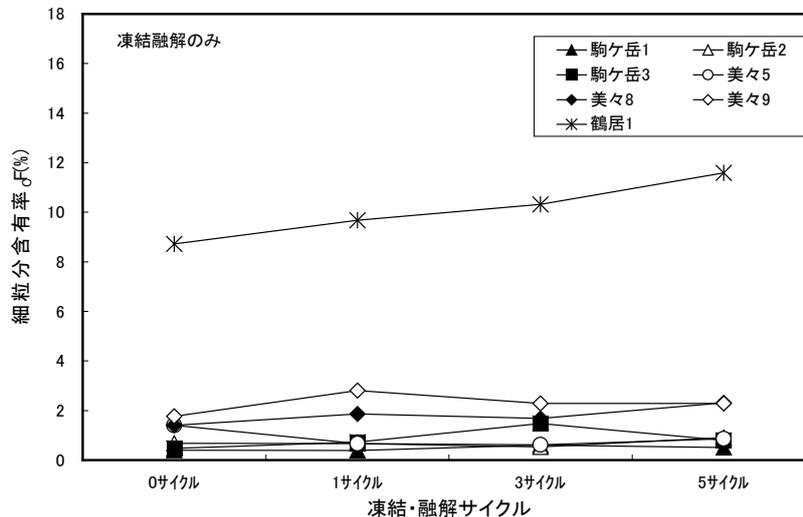


図-3-22 凍結・融解作用による細粒分含有率の変化

めによる破砕が卓越しており（図中 0 サイクル）、その後の凍結・融解サイクルの延長は、破砕性に大きな変化を与えていない。また、凍結・融解のみを与えた結果で見られたような 1 サイクル目の破砕率の増加も見られないことから、凍結・融解作用により破砕するような脆弱な粒子は、締固め仕事を受けることにより、すでに破砕され、それらが凍結融解の影響として現れないものと考えられる。本結果から、凍結・融解作用が粗粒火山灰土を著しく脆弱化させ締固めにより粒子破砕が増加するような現象は生じないことが判った。以上のことから推察するに、粒子に内封された水分の多くは、活性孔隙に存在する水分であり、凍結による内封水分の体積膨張圧は、粒子外部に水分を排出する形で緩和され、直接的には粒子を脆弱化させることが無いものと考え

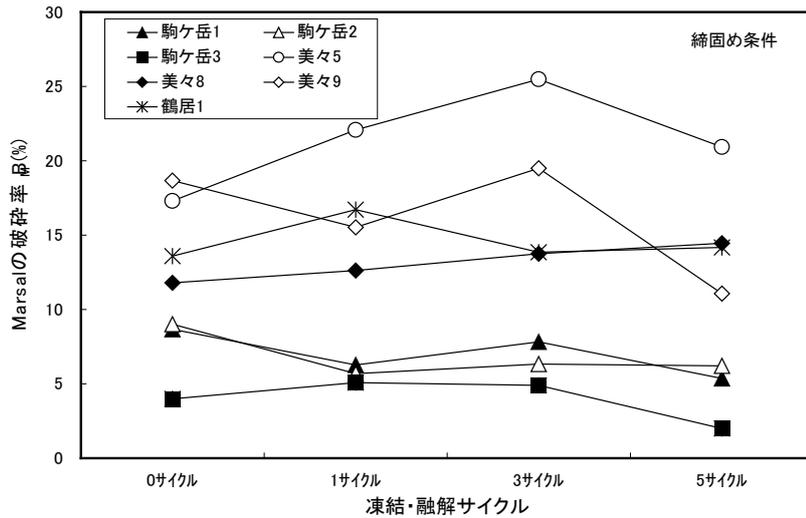


図-3-23 凍結・融解作用による締固め後の Marsal の破碎率の変化

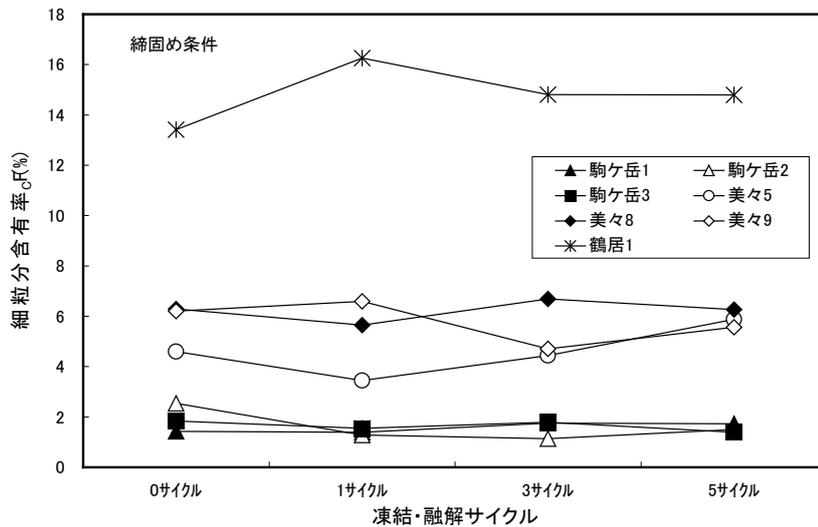


図-3-24 凍結・融解作用による締固め後の細粒分含有率の変化

えられる。

凍結・融解による影響は顕著ではなかったが、締固め仕事のような外力に対する粒子破碎は、一般的な粗粒土と比較すると卓越して生じることが明らかである。粗粒火山灰土の破碎性を概略的に把握する方法は、図-3-7のVs分類でも軸上に記載されており、自然含水比が高く、土粒子の密度が小さなものほど破碎性が強いことが記されている。ただし、これらを裏付けるような実験結果は乏しく、経験的な指標である。そこで、締固めにより生じた Marsal の破碎率（締固め 0 サイクル）を自然含水比と土粒子の密度の関係で整理した（図-3-25）。両者の関係は、自然含水比が高いか、も

しくは土粒子の密度が小さなものほど、破碎性が大きくなっている。両者は、対照的な関係にあり、自然含水比が高いものほど土粒子の密度が小さくなるような関係である。ただし、自然含水比もしくは土粒子の密度を破碎性評価の単一指標として用いてしまうと、美々9や美々5のように他の火山灰土との関係と異なった傾向を示すものも存在してしまう。美々9は自然含水比の関係において、他の火山灰土よりも顕著な破碎性を示しており、この場合については土粒子の密度が著しく小さなことが理由として考えられる。対して美々5は、土粒子の密度との関係で他よりも破碎性が大きく、他の火山灰土に比べ自然含水比が著しく高くなっている。したがって、両指標を単一で用いるのではなく、Vs分類のように両指標の座標上で破碎性の強弱を捉えるのが理想的である。本論文で扱った土粒子の密度は、JIS法（JIS A 1202）に従った結果である。理論上この計測法では、煮沸などにより粒子や間隙内の空気を水と完全に置換した状態を定義しているが、火山灰土のように土粒子の内部孔隙が発達した材料では、十分な水置換がされない場合がある。一般的な土と比べ土粒子の密度が広範囲に分布することは、定義上の問題は残るものの、逆に内部孔隙に依存した指標として考えることもできる。したがって土粒子の密度が小さなものは、内部孔隙が発達し破碎性が顕著であるもの、また内部孔隙に保水される水分量が多く自然含水比が高くなるものと考えられる。内部孔隙の量は、火山灰土の成因（鉱物組成や溶結温度）など一次的な要素に影響を受けやすいと考えられ、風化などの二次的要因を強く受けたものは粒子が脆弱になること、また前述した風化による活性孔隙の増加が結果として自然含水比の増加に繋がっていると考えられる。自然含水比と土粒子の密度が破碎性と関連するものの、一部で特異的な性状を示す火山灰土が存在することは、このような一次的要素と二次的要素が混在しているためである。

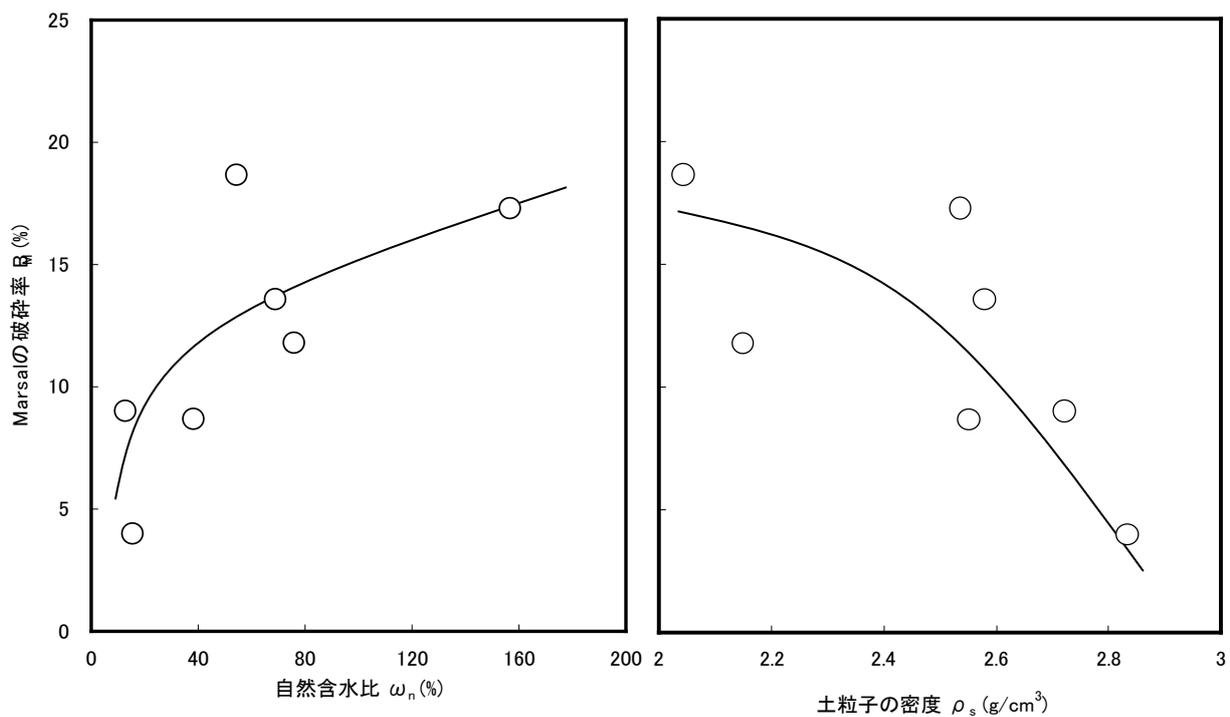


図-3-25 自然含水比，土粒子の密度と締固めによる Marsal の破砕率の関係

本結果を Vs 分類との関係で整理すると，

- Vs1：自然含水比が低く，土粒子の密度が大きい。破砕性 小
- Vs2：自然含水比が低く，土粒子の密度が小さい。破砕性 大もしくは中
- Vs3：自然含水比が高く，土粒子の密度が大きい。破砕性 中もしくは大
- Vs4：自然含水比が高く，土粒子の密度が小さい。破砕性 大

以上のように概略的な関係であるが，粗粒火山灰土の破砕の程度を把握する上では，Vs 分類上の座標位置などを利用することが有効である。

3-3-4 まとめ

降下火山灰土 7 試料を対象に凍結・融解作用が粒子破碎性に与える影響を検討し、以下のような結果を得た。

- 1) Marsal の破碎率および細粒分の増加から微小ではあるが、全ての火山灰土で凍結・融解作用による粒子破碎が確認された。
- 2) 凍結・融解作用による破碎は、1 サイクル目の凍結・融解作用で生じており、サイクル数の増大は破碎性の増加には繋がっていない。このことは、一部の粒子の脆弱箇所が初期の凍結・融解作用で破碎するものの、それらは継続的に進行するものではないことを意味している。
- 3) 締固めによる破碎は、火山灰土の種類によって明確な差として現れていた。しかし、凍結・融解による締固め後の粒子破碎については、凍結・融解サイクルが破碎性を増大させるような傾向は見られなかった。凍結・融解作用による破碎は、微小であり、一部の脆弱な粒子に生じるような凍結・融解による破碎は締固めによって生じる破碎に含まれるものであると考えられた。本結果から、凍結・融解作用が粒子を脆弱化させ、締固めのような外力に対して破碎性を増加させるような現象は生じないことが確認された。
- 4) Marsal の破碎率は、自然含水比および土粒子の密度と相関が見られ、自然含水比が高いほど、また土粒子の密度が小さなものほど破碎が顕著であった。ただし、両指標を単一で使用するには例外的な火山灰土もあり、Vs 分類のような座標上で破碎性を捕らえることが理想的である。
- 5) 粗粒火山灰土の破碎性を Vs 分類で評価すると、Vs1 が最も破碎性が小さく、対照的に Vs4 が最も破碎性が大きくなることが示された。Vs2 および Vs3 は中間的な破碎性を示し、自然含水比が著しく大きいか、土粒子の密度が小さい場合には、破碎性が顕著に現れることがある。

3-4 結び

本章では道内に存在する各種火山灰土を対象に、凍上性や凍結融解履歴が火山灰土に与える影響を調べ、凍結をキーワードとした火山灰土の材料特性について述べてきた。火山灰土は一般的な土と異なり、粒度組成などの簡易的な指標による性状把握が困難な材料である。火山灰土は、通常凍上性の簡易判定に用いられる細粒分含有率との関係において相関がみられず、自然含水比などを利用した凍上性判定が有効であった。また、粒子破碎性についても同様に自然含水比や土粒子の密度によって評価可能であることが示された。今回の結果から、火山灰土の性状把握には、単なる粒子の外寸法としての粒度組成などではなく、粒子特性を反映するような指標が有効であるこ

とが判り，粒子特性に影響を受ける指標として自然含水比や土粒子の密度が凍上性や粒子破碎性と関連したものと考えられる。しかし，自然含水比は粒子性状に大きく影響されるものの，周辺環境による含水比の変動や採取方法によるバラツキなど普遍的な物理量として扱うことには困難な点も多い。また，自然含水比と風化の度合には密接な係わりがあると考えられるが，現状で風化の尺度が明確にされていないことなどから，自然含水比が持つ工学的意味を十分に説明するには至っていない。自然含水比が火山灰土の性状指標として有効であることを踏まえ，今後さらに他の物理指標や風化の程度などと自然含水比の関係を詳査することが必要である。

第 3 章の参考文献

- 1)由良桂一，池田晃一：北海道の土質概要，土と基礎 Vol.37, No.9, pp16～19, 1989.
- 2)若松幹男，近藤務：北海道の火山灰，土と基礎 Vol.37, No.9, pp24～29, 1989.
- 3)火山灰質土の工学的分類委員会：北海道火山灰土の性質と利用，地盤工学会北海道支部，1997.
- 4)小山道義，高橋毅，川井優：火山灰の凍上性について，土と基礎 Vol.13, No.11, pp29～32, 1965.
- 5)小山道義，高橋毅，川井優：火山灰の凍上性について，北海道開発局土木試験所月報，131号，pp.12～17, 1964.
- 6)町田洋，新井房夫：火山灰アトラス，東京大学出版会，1992.
- 7)神谷光彦，池田晃一，佐藤厚子，川端伸一郎：北海道の粗粒火山灰土の締固め特性，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.543～544, 1996.
- 8)能登繁幸，川西是，奥田稔，原田厚子：道内火山灰土の土工上の分類について，土質工学会北海道支部技術報告集，第25号，pp.171～180, 1985.
- 9)Moroto, N.: Basic properties of loam soils in Aomori prefecture, Japan, Soils and Foundations, Vol.33, No.2, pp.35-46, 1993.
- 10)宋永焜：関東ロームのアロフェン含有量がその工学的分類に及ぼす影響，土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集，pp.151～158, 1993.
- 11)日本道路協会：道路土工・排水工指針，pp.169, 1987.
- 12)鈴木輝之：火山灰の凍上性，火山灰に関する研究討論会論文集，土質工学会北海道支部，pp.1～6, 1992.
- 13)佐々木晴美，杉岡博史，奥田稔，工藤節男：土工との関連における火山灰の工学的特性，土質工学会北海道支部技術報告集，第19号，pp.95～102, 1979.
- 14)鈴木伸治，相馬剋之，柏木淳一，池田光良：粗粒火山灰土の熱伝導特性，第45回農業土木学会北海道支部研究発表講演集，pp.56～57, 1996.
- 15)谷口秀男：締固めによる粗粒火山灰の粒子破碎が締固め密度に及ぼす影響，土と基礎，Vol.27, No.6, pp.29～34, 1979.
- 16)S.Miura, K.Yagi, S.Kawamura: Deformation-strength anisotropy and particle crushing of volcanic coarse grained soils, Pre-failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Vol.2, pp.329-334, 1994.
- 17)三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No.547/Ⅲ-36, pp.159～170, 1996.
- 18)三浦清一，八木一善，川村志麻：破碎性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形－強度特

- 性に及ぼす応力履歴の影響，土木学会論文集，No.547/Ⅲ-36，pp.221～229，1996.
- 19)三浦清一，八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，pp.257～269，1997.
- 20)K.Yagi, S.Miura: Effect of stress history on cyclic deformation-strength behaviors of volcanic coarse-grained soils, *Problematic Soils, Balkema*, pp.153-156, 1998.
- 21)岡林巧，兵動正幸，安福規之，村田秀一：乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動，土木学会論文集，No.499/Ⅲ-28，pp.97～106，1994.
- 22)鬼塚克忠，吉武茂樹：破碎性まさ土の低圧条件下におけるせん断特性，土木学会論文集，No.400/Ⅲ-10，pp.141～150，1988.
- 23)松尾新一郎，福本武明：マサ土の破碎性に影響する諸要因，土質工学論文報告集，Vol.16，No.4，pp.85～92，1976.
- 24)松尾新一郎，福本武明：マサ土の締固め特性に及ぼす粒子破碎の影響，土質工学論文報告集，Vol.16，No.4，pp.93～102，1976.
- 25)松尾新一郎，福本武明：マサ土の風化と破碎性の関係，土質工学論文報告集，Vol.17，No.4，pp.99～106，1977.
- 26)福本武明：粒子破碎の程度を示す指標，土と基礎，Vol.29，No.12，pp.64～65，1981.
- 27)石井武美：粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義，土質工学論文報告集，Vol.29，No.4，pp.155～164，1989.
- 28)Marsal, R. J.: Soil properties-shear strength and consolidation, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, Vol.III, pp.310-316, 1965.

第 4 章 石灰安定処理土の凍上抑制効果に 関わる材料特性

第4章 石灰安定処理土の凍上抑制効果に関わる材料特性

4-1 緒言

寒冷地における道路設計において凍上抑制は重要な課題の一つである。舗装構造内に凍上が発生すると舗装表面に亀裂などが生じ、車両の走行性などに障害を与える。また、融雪期には深層部に凍結層が残留することにより融解水や浸透水の排出が困難となり、過飽和状態になる層が現れる。このような状態で過度の交通荷重を受けると舗装表面に亀甲状ひび割れやひび割れから発展したポットホールの発生へと繋がっていく¹⁾。

地盤の凍上を抑制するには熱的環境や水分条件（地下水位など）、土質などの要因のうち一つを改善すれば可能となる。具体的な対策工としては、断熱による凍結深さの抑制²⁾や凍上に必要な水分の遮断³⁾、薬剤などによる土質の改良や凍上性土の置換などが挙げられるが、現状では数種の対策工法のうち置換工法を採用する頻度が最も多い。これは置換工法が凍上を支配する複数の因子のうち本質的な土質の改善であるため、確実な抑制効果が得られるためである。しかし、置換工法は将来的な置換材料の枯渇や置換対象土の残土処理など、幾つかの問題点を抱えている。このようなことから原位置発生土を有効に利用し、且つ信頼性のある凍上抑制工法を確立することが要求されている。

その一つの手法として、従来では置換対象になるような土に石灰やセメントのような固化材を添加する安定処理に凍上抑制効果があることが知られている^{4),5),6),7),8)}。本章では、石灰安定処理土の凍上抑制効果に関わる材料特性について述べる。

4-2 石灰安定処理土の強度特性と凍上抑制効果

4-2-1 はじめに

セメント系や石灰系固化材による土質安定処理の凍上抑制効果については、いくつかの研究報告がなされている。生頼ら⁹⁾は、藤の森青粘土に早強ポルトランドセメントを混合し、凍上および解凍沈下の抑制効果を報告している。これによると藤の森青粘土についてはセメント混合比（乾燥土に対する重量比）10%程度で凍上率が大幅に減少し、解凍沈下も無くなるとしている。また、安定処理土の凍上抑制原理として一般に考えられている透水性の減少は凍上抑制にはあまり寄与せず、セメント混合による吸水能力の低下が影響することを示唆している。石田⁵⁾は、岩手ロームに石灰およびセメントを混合し、凍上量は改良材の種類によらず安定処理土の含水比と相関が高いことを示している。

しかし、現状ではこのような手法は凍上抑制工法として確立されるまでには至っておらず、今後の基礎的データの集積による特性把握が重要な課題である。

本節では、耐凍上性の向上の方法として石灰と微粉末スラグを用いた土質安定処理土に

ついて、①改良材混合による強度増加、②長期養生による強度増加、③改良材の混入による耐凍上性の向上などを検討し、改良材による土質安定の効果調べた。

4-2-2 試験試料と実験方法

試料は凍上性を示す3種類（試料A, B, C）の土であり、その粒径加積曲線を図-4-1に、物理的諸元を表-4-1に示す。

土質改良材は石灰と二次添加剤として微粉末高炉スラグ（以下、スラグと称す）を使用した。改良には石灰とスラグを混合し、その混合割合は石灰：スラグ=100：0（L100と称す）、75：25（L75）、50：50（L50）、25：75（L25）の4種とした。ただし、B試料のL25やC試料の無添加などの供試体が自立しないものについては行っていない。また、C試料は石灰（L100）のみの試験である。改良材の添加率は土の乾燥重量に対して3～7%で、L100については10%の添加率まで行っている。

試験含水比は自然含水比を基本とし、自然含水比が最適含水比とほぼ等しいA試料についてのみ自然含水比の湿潤側への変動を想定して自然含水比+5%（以下、調整含水比（ ω_x ）

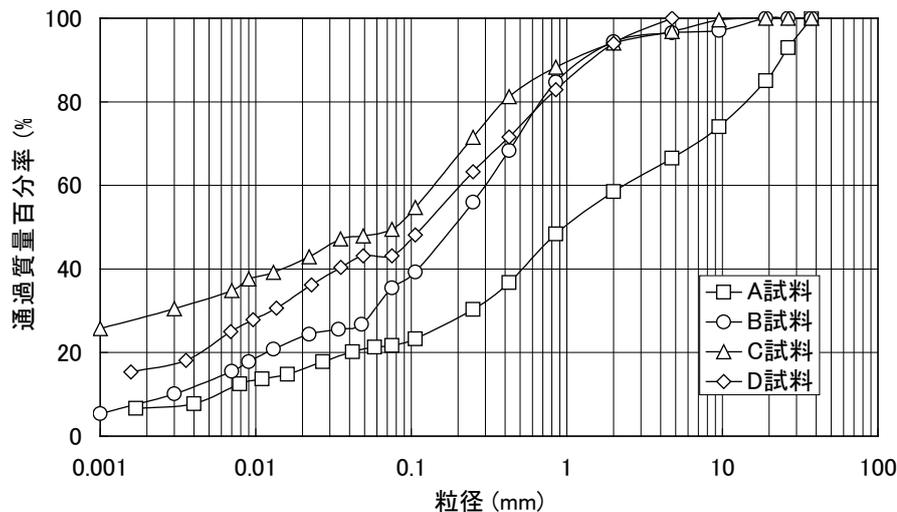


図-4-1 実験試料の粒径加積曲線

表-4-1 実験試料の物理的緒元

	試料 A	試料 B	試料 C	試料 D
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.606	2.710	2.650	2.601
自然含水比 (%)	17.3	26.8	30.0	—
塑性指数	NP	NP	26.0	27.1
最適含水比 (%)	16.3	19.1	15.9	26.8
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.674	1.708	1.814	1.587
細粒分含有率 (%)	19	36	50	43

表-4-2 供試体作製条件と供試体の諸性状

供試体作製条件				
一軸圧縮試験： φ=10cm, h=12.7cm, せん断速度 1%/min 4.5kg ランマー, 落下高 45cm, 3層 42回		CBR・凍上試験： φ=15cm, h=12.5cm 4.5kg ランマー, 落下高 45cm, 3層 92回		
試料名 (設定含水比)	試料 A (自然含水比)	試料 A (調整含水比)	試料 B (自然含水比)	試料 C (自然含水比)
改良材	消石灰 + スラグ	生石灰 + スラグ	生石灰 + スラグ	生石灰
添加率範囲 (%)	0 → 7	0 → 10	0 → 10	3 → 10
供試体含水比 (%)	17 → 15	22 → 16	27 → 20	28 → 22
供試体乾燥密度 (g/cm ³)	1.67 → 1.57	1.58 → 1.66	1.53 → 1.63	1.41 → 1.56

と称す)の2種類で行った。なお、石灰の選定は自然含水比が最適含水比よりも湿潤側にある土については生石灰を使用し、最適含水比付近の試料については消石灰を用いた。試験は一軸圧縮試験、凍上試験およびCBR試験を行った。表-4-2に各試験の供試体作製条件と供試体の諸性状を示す。各試験とも突固めエネルギーは同一であり、表-4-2に示した供試体含水比と乾燥密度は全試験の作製時の改良材添加による変化範囲を示している。試料Aの自然含水比条件では改良材として消石灰を用いているため改良材添加による含水比の低下は少なく、また自然含水比が最適含水比とほぼ等しいため含水比低下により乾燥密度は小さくなっていく。他の試験条件では改良材として生石灰を用いているため添加率の増加に伴って大幅な含水比低下が生じ、設定含水比が最適含水比よりも湿潤側に位置しているため添加率が多く含水比低下が著しいものほど乾燥密度は増大する傾向にある。

一軸圧縮試験は径10cmのモールドを使用し、4.5kgランマー、落下高45cm、3層、各層42回で突固めて供試体を作製した。この締固めエネルギーは、地盤工学会基準(JGF T 711)のC法とほぼ等しい。養生日数は3パターンで、6日、13日、27日間を20℃の恒温室で水分蒸発が生じないように養生を行い、1日水浸の後に試験を実施した。凍上試験は標準化されておらず、わが国においても各機関により様々な凍上試験方法が提案されている¹⁰⁾。本節では凍上試験を日本道路公団¹¹⁾(2章 2-4-2b)の方法に基づいて行い、供試体はJGF T 711のE法(締固めエネルギーはC法と同じ)により突固めて作製した。養生日数は水浸養生4日を含めて7および28日とした。凍上試験は凍結期間を約1週間(開始時の土中水の凍結に要する時間は土の性質に無関係であるため、凍上発生後から1週間目を試験終了時とした)とし、凍上試験終了後にCBR試験を行った。この試験では凍上率が5%未満(凍上量では6.25mm)で、供試体内に氷晶を含まないような凍結様式のもの、非凍上性材料と判定している。

4-2-3 安定処理土の一軸圧縮強度

各試料の養生日数ごとの改良材添加率と一軸圧縮強度の関係および改良材添加率ごとの養生日数と一軸圧縮強度の関係を図-4-2～8に示す。試験は各パターンにつき3体の供試体で行っており、図の点はその平均値で示してある。

初期含水比が最適含水比に近いA試料の自然含水比（消石灰使用，図-4-2，3）をみると、養生日数が7日のように短い場合には添加率と共に、また添加率が3%のように少ない場合には養生日数と共に一軸圧縮強度が大きくなっている。しかし、養生日数や添加率が増大すると一定の傾向は見られない。スラグ混合の効果を見ると、L75やL50のようにスラグを多く含む配合のものが養生日数の増加に伴い一軸圧縮強度も増加している。これは本試験に用いたスラグが、カルシウム分を含んでおり、スラグ自体が水硬性を有し

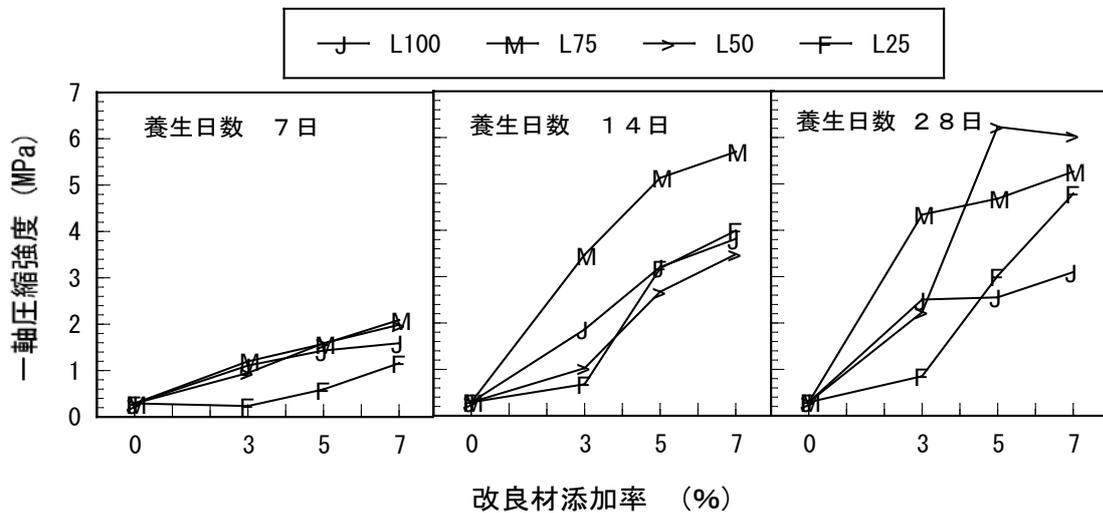


図-4-2 A試料の改良添加率と一軸圧縮強度の関係（自然含水比条件）

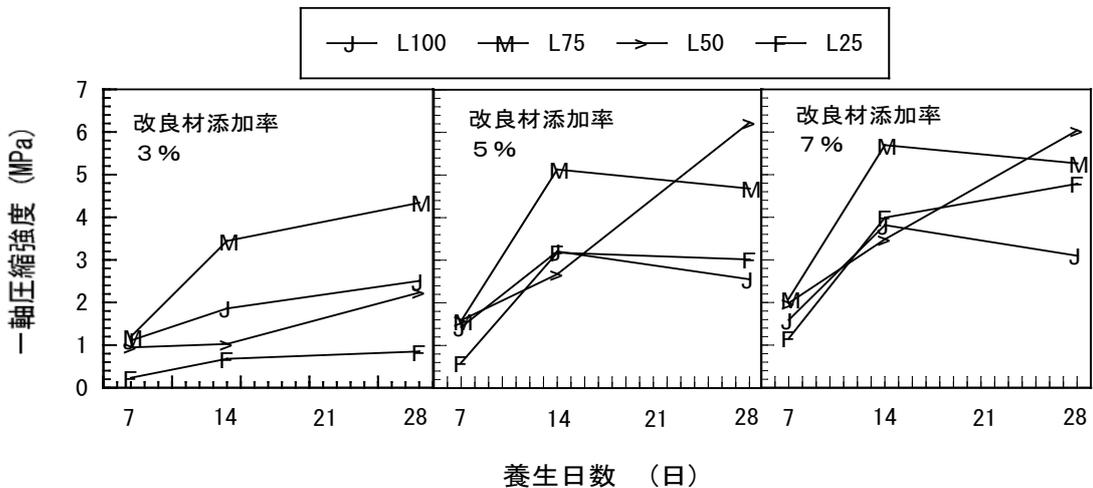


図-4-3 A試料の養生日数と一軸圧縮強度の関係（自然含水比条件）

ているため、養生により強度が増加していくものと考えられる。それゆえ、最適含水比付近の試料ではスラグの混合が強度発現に寄与している。つぎに、調整含水比のA試料やB、C試料のように初期含水比が高い試料では（生石灰使用、図-4-4~8）改良材の添加率が多くなるにつれ、養生日数が延長されるに伴い一軸圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。また、改良材としてはL100やL75のように、石灰を主体とした改良が有効であった。すなわち、含水比が高い試料では改良材添加による含水比の低下が強度に大きな影響を与えるものと予測される。しかし、L100について養生日数7日で石灰添加率を10%まで増加させ試験を行ったが、一軸圧縮強度は増加せず、逆に減少傾向を示した。一般に石灰量と強度の関係は比例関係ではなく、ある量以上に添加率を増加させると強度は一定または減少する場合がある¹²⁾。それゆえ、本試験に用いた試料の短期養生では、最大の強度を与え

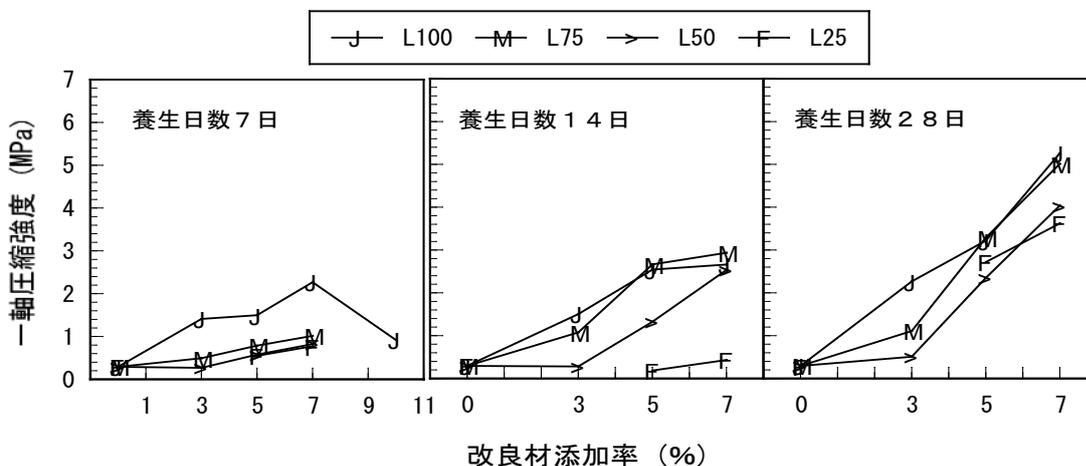


図-4-4 A試料の改良添加率と一軸圧縮強度の関係（調整含水比条件）

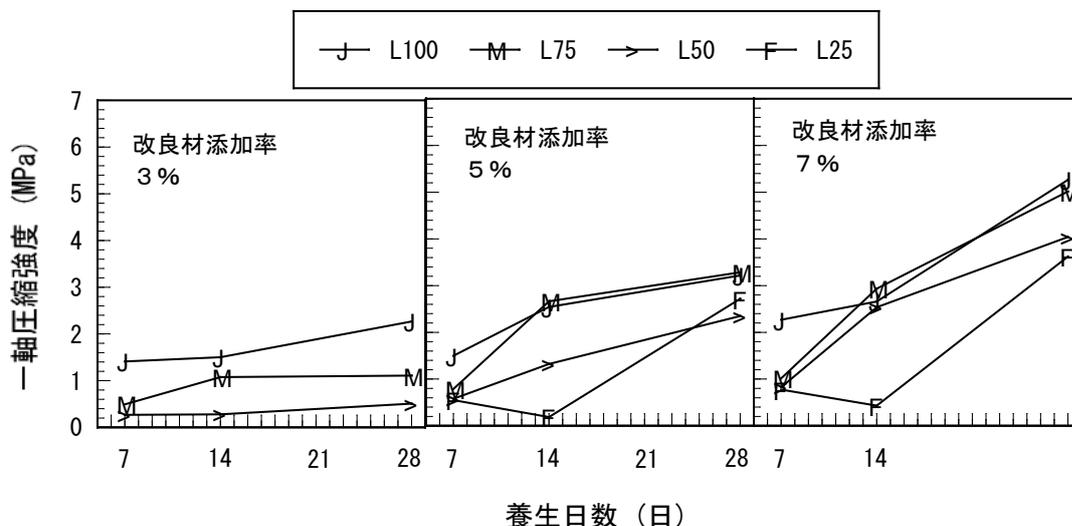


図-4-5 A試料の養生日数と一軸圧縮強度の関係（調整含水比条件）

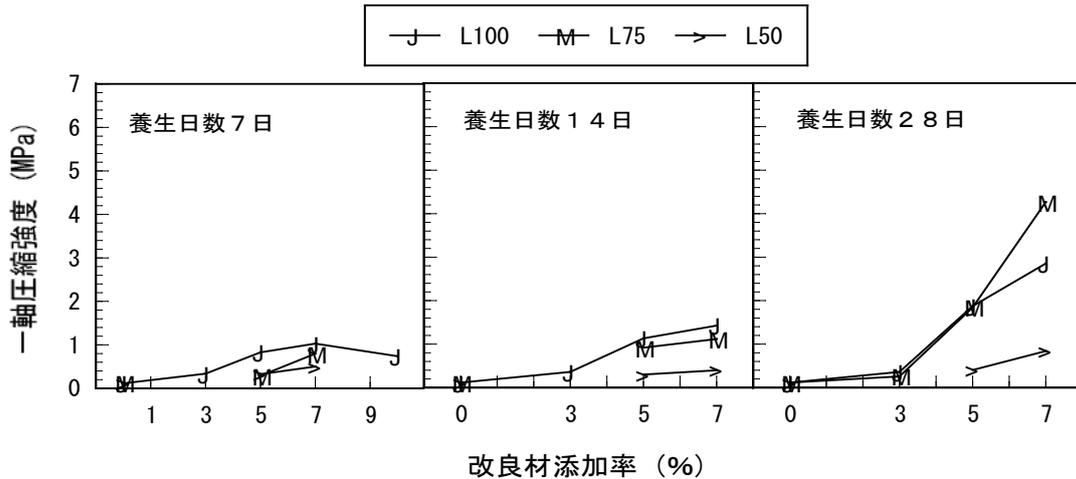


図-4-6 B 試料の改良添加率と一軸圧縮強度の関係（自然含水比条件）

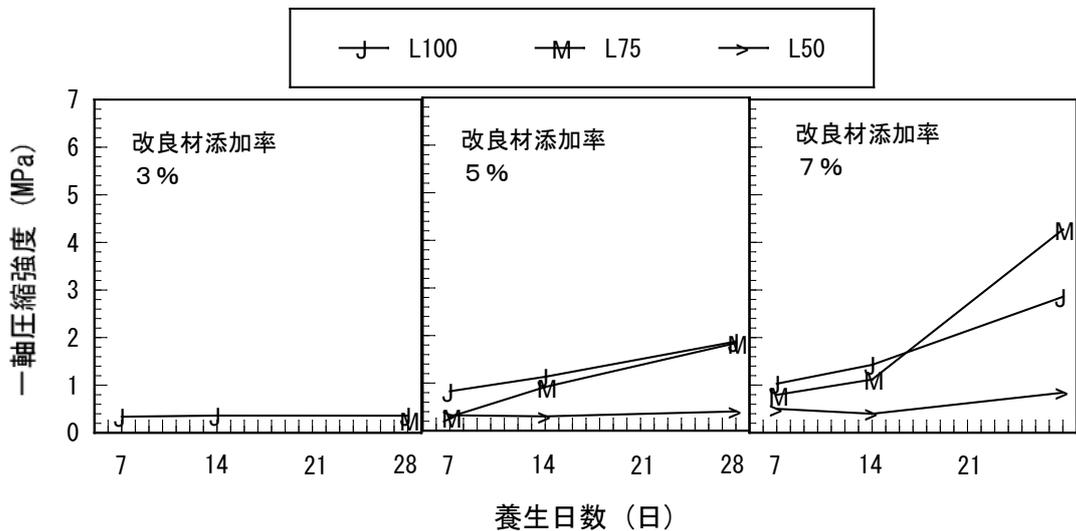


図-4-7 B 試料の養生日数と一軸圧縮強度の関係（自然含水比条件）

る添加率は7%程度であると考えられる。図-4-9は生石灰を用いた試料（調整含水比のA，自然含水比のB，C）について，石灰添加率と添加による含水比低下量の関係を示したものである。両者の関係は，石灰添加率の増加により直線的な含水比の低下が確認される。生石灰は重量比で0.32倍の水を吸水して消石灰になる。この理論消化吸水反応だけでは消石灰は絶乾状態であり，これに吸着力，毛管吸着力が働いて土中水は平衡状態になるまで消石灰側に吸着される¹³⁾。また，図-4-9は石灰量のみに着目したため，スラグを含む供試体が回帰直線の下に位置し，含水比の顕著な低下がみられる。これはスラグによっても吸着による含水比低下が起こるためである。

調整含水比のA試料とB試料の各養生日数における含水比 (ω) と最適含水比 (ω_{opt})

の差と一軸圧縮強度の関係を図-4-10, 図-4-11 に示す。この $\omega - \omega_{opt}$ は、改良材添加後の含水比の最適含水比に対する相対的な位置を示すものであり、プラス側が最適含水比よりも湿潤側にあることを意味し、マイナス側が乾燥側にあることを示している。両試料とも養生日数 14 日までは、最適含水比の 1~3% の湿潤側で強度のピークを持つような曲線で近似でき、改良材の添加率や混合比に関係なく、最適含水比との相対的な位置により短期強度が決定できる。これに対し、養生日数が 28 日になると両者の関係は含水比よりも石灰・スラグの混合比による影響が顕著であり、その増加傾向もほぼ直線的な変化となってくる。すなわち、試料含水比が最適含水比より湿潤側にあるような土では、短期的な強度増加は主として改良材添加時の含水比低下の影響であり、そのため石灰量が多いものが有利となる。しかし、長期強度は含水比による影響よりも、むしろポズラン反応に依存

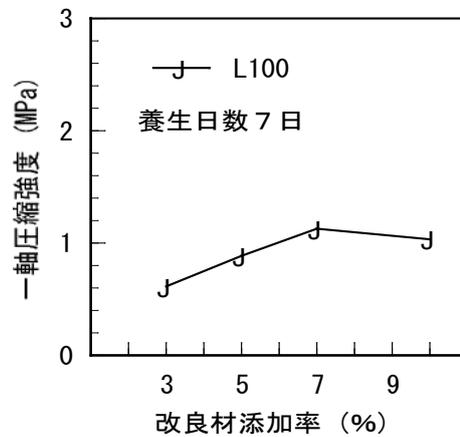


図-4-8 C 試料の改良添加率と一軸圧縮強度の関係 (自然含水比条件)

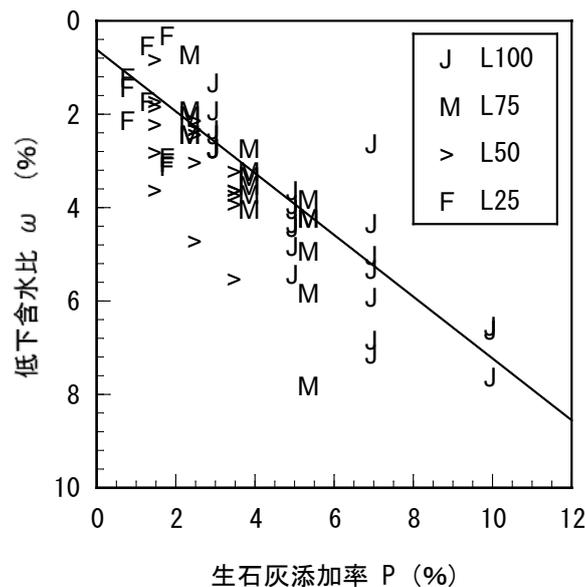


図-4-9 石灰添加率と低下含水比の関係

するため、改良材の性状の違いが現れてくる。従って、スラグの二次添加剤としての利用は、短期的な強度増加にはあまり寄与せず、ポズラン反応に関連する長期強度に影響を与えている。

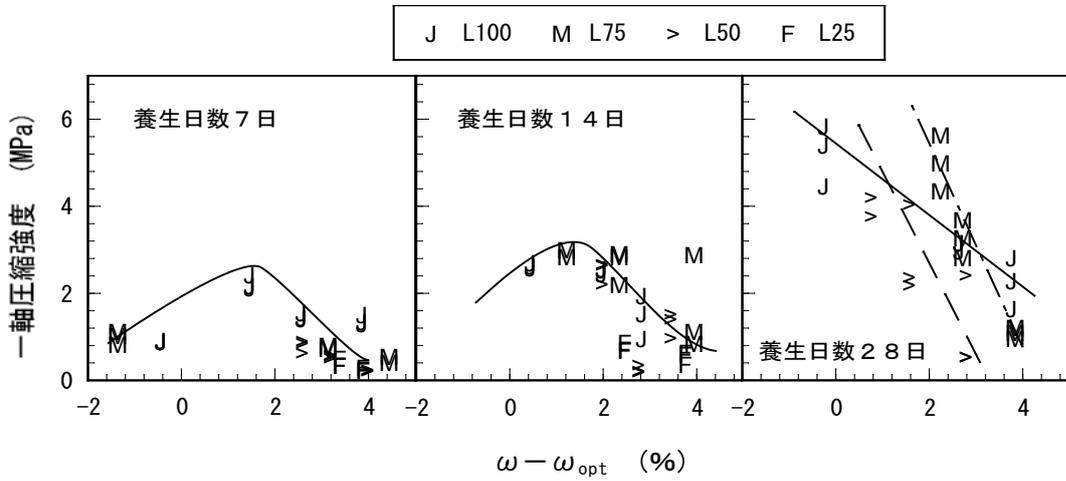


図-4-10 A 試料の含水比と最適含水比の差と一軸圧縮強度の関係

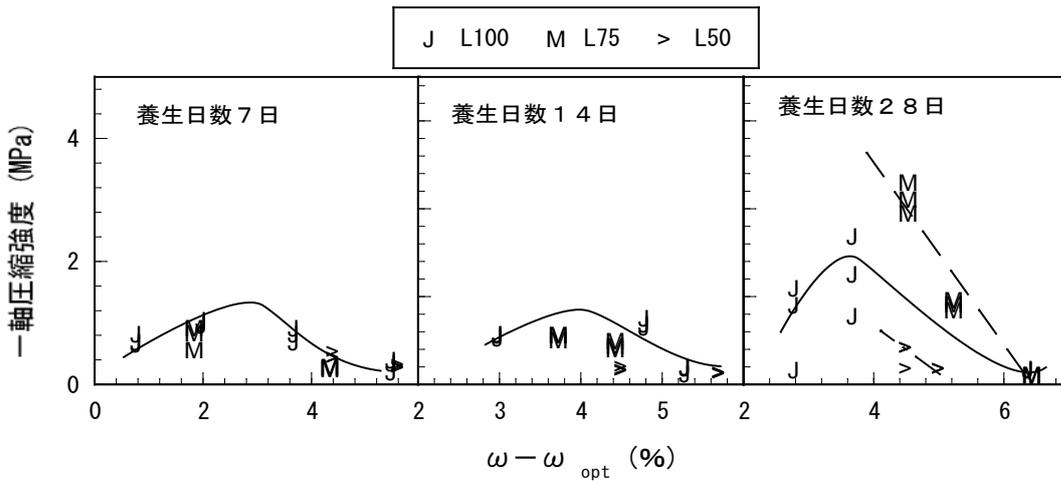


図-4-11 B 試料の含水比と最適含水比の差と一軸圧縮強度の関係

4-2-4 凍上抑制効果と強度特性の関係

A 試料の改良材添加率と凍上量の関係を図-4-12 に示す。凍上量は改良材の添加率に従って減少する傾向にある。また、供試体含水比で比較すると自然含水比と調整含水比では凍上量が異なり、同じ添加率では含水比の高い方が大きな凍上量を示している。つぎに、A 試料の結果を石灰とスラグの改良材混合率で比較すると、石灰を多く含むものほど凍上抑制効果が顕著である。そこで、改良材添加率のうち石灰の添加率と凍上量の関係を示し

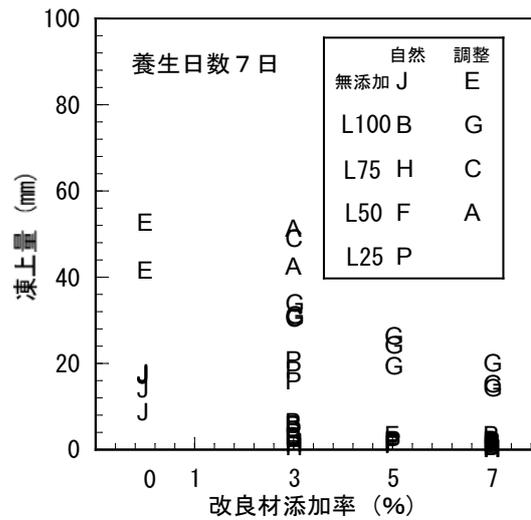


図-4-12 A 試料の改良材添加率と凍上量の関係

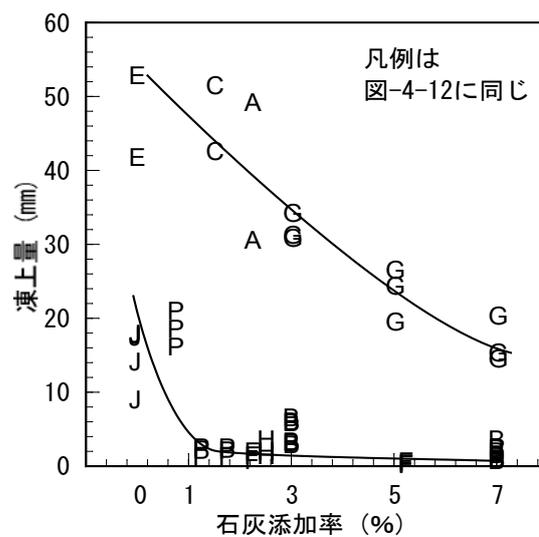


図-4-13 A 試料の石灰添加率と凍上量の関係

たのが図-4-13である。試験含水比により異なる関係となるが、石灰添加率で整理するとほぼ一義的な関係が得られ、凍上の抑制には石灰が効果的とみられる。

同様に、BおよびC試料について石灰添加率と凍上量の関係を図-4-14、図-4-15に示す。凍上量は両試料とも石灰を添加することにより減少傾向を示している。しかし、B

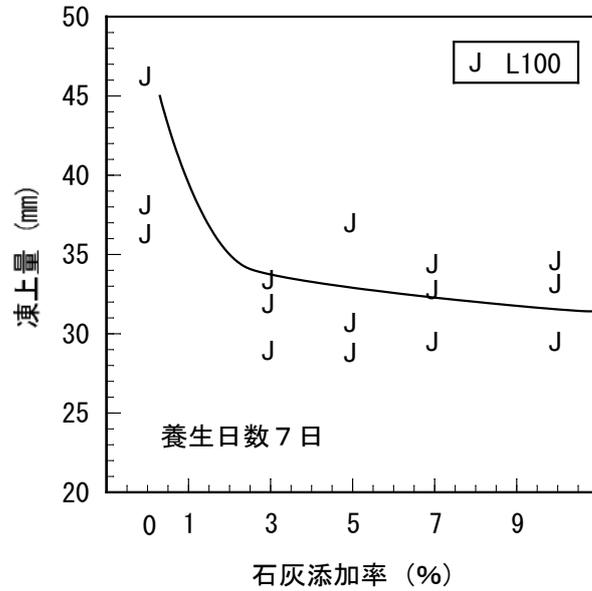


図-4-14 B試料の石灰添加率と凍上量の関係

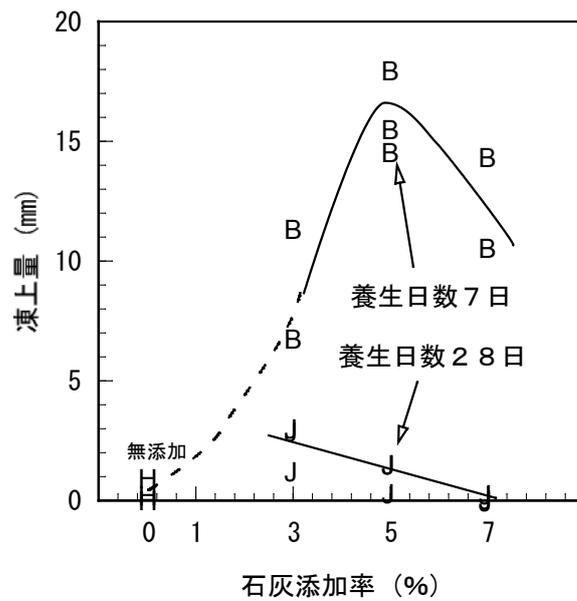


図-4-15 C試料の石灰添加率と凍上量の関係

試料は一軸圧縮強度と同様に、ある添加率で凍上量が一定となり、添加量を増加させても凍上量の減少傾向はみられない。C試料については養生日数が7日では石灰添加量の増加に伴って凍上量が増加し、添加率5%程度をピークに凍上量が減少する傾向を示した。また、本試験では石灰を添加しなかった供試体について凍上が確認されなかった。瓦川ら⁷⁾も、細粒な山砂にセメントおよび石灰を添加して凍上試験を行い、添加量が少ないと逆に凍上量が増す結果を示している。このような原因としてはC試料の自然含水比が30%程度（飽和度約90%）と非常に高いため、供試体密度が小さく間隙径に依存した水分移動に必要なサクションが小さかったことが影響したと考えられる。このような結果は少量の石灰の添加は逆に土中のサクションを大きくし、凍上量を増大させる場合があることを示唆するものである。しかし、養生日数を28日まで延長すると凍上量は添加率の増加に伴い直線的に減少しており、養生日数が凍上量に与える影響が大きいことが確認された。

つぎに、C試料の試験開始6日目までの代表的な時間～凍上量の関係を図-4-16に示す。養生日数7日（石灰添加率5%）の供試体は直線的に凍上量が増加しており、凍結面に十分な水分補給がなされている。また、養生日数を28日まで延長した場合は、全体に凍上量の大幅な減少が見られるが、添加率3%では凍上量の経時変化は直線的であり、一般的な非凍上性材料のような凍上量の収束傾向は見られない。しかし、添加率をさらに増加させると、直線的な凍上量の増加は見られなくなり、特に、下図に示した添加率7%では短時間のうちに一定値に収束している。このことから、安定処理土の凍上性は添加率や養生日数を増加させることにより、凍上速度が減少し、さらには凍結面へ給水が行われな

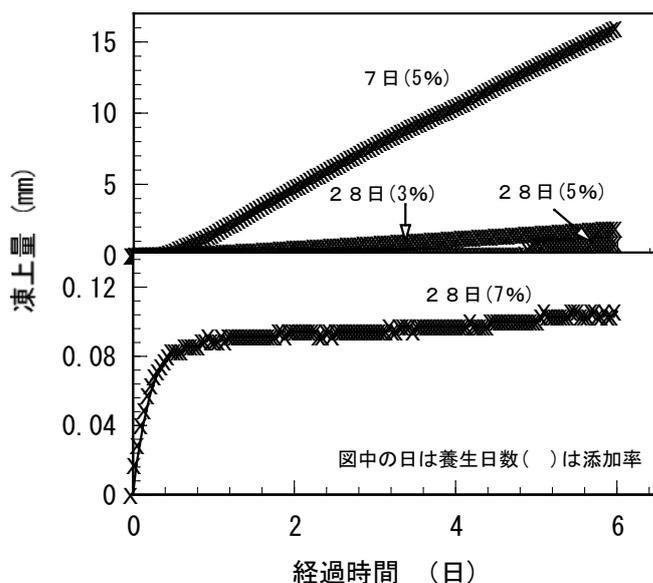


図-4-16 C試料の時間～凍上量曲線

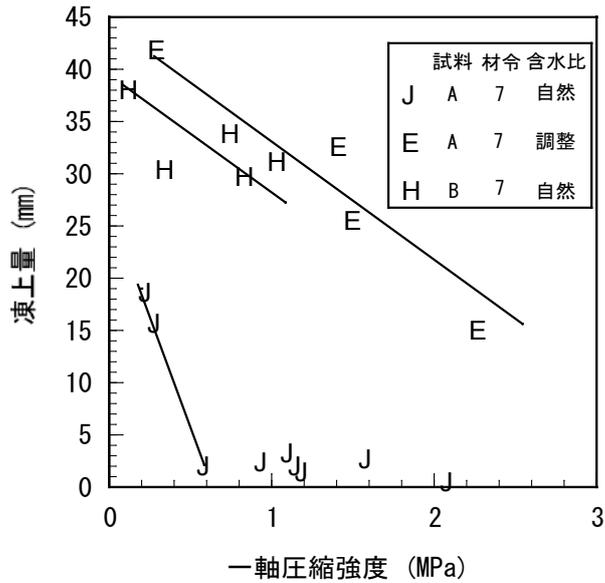


図-4-17 一軸圧縮強度と凍上量の関係

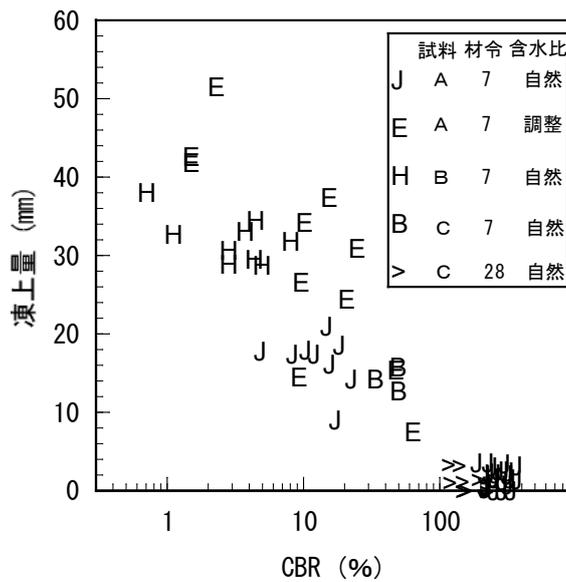


図-4-18 凍上試験後の CBR と凍上量の関係

いような非凍上性材料と同様な時間～凍上量の関係に変化していくものである。

このように安定処理土の凍上特性は改良材の添加率や種類、養生日数の影響を受けるが、石田⁶⁾は安定処理土の凍上性を強度と関連させて整理している。そこで、図-4-17 に一軸圧縮強度と凍上量の間を、図-4-18 に凍上試験後の CBR と凍上量の間を示す。両関係とも強度が増すにつれ凍上量が減少する傾向がある。しかし、一軸圧縮強度との関係は試験条件の違いにより傾向が異なるため一軸圧縮強度のみからの凍上性の判定は困難

である。つぎにC B Rと凍上量の関係は、C B Rが小さい範囲では一軸圧縮強度との関係と同様に土質や試験含水比、養生日数などに影響されている。しかし、C B Rが大きくなるとばらつきはみられなくなり、C B Rが約 100 以上になると改良条件等によらず、非凍上性と判定できる凍上率 5%（凍上量 6.25mm）以下に抑制されている。

4-2-5 まとめ

安定処理土を耐凍上性の材料として使用することを目的として、石灰と微粉末高炉スラグにより安定処理した 3 種類の土を用いて、一軸圧縮試験、凍上試験およびC B R 試験を行った。

安定処理土の強度と凍上特性については、以下のような結果を得た。

- 1) 初期含水比が最適含水比に近い試料では、微粉末高炉スラグを含む改良材に強度増加の効果が顕著にみられた。
- 2) 含水比が高い試料では石灰を主体とした改良材が有効であり、これは改良材添加による含水比の低下が強度増加に大きく寄与するためである。また、短期強度は改良後の含水比と最適含水比との差により決まるが、長期強度はポズラン反応の影響もあって、改良材の性状により異なる。
- 3) 特殊な条件を除き、改良材を添加することにより土の凍上量を減少させることができ、添加量や養生日数の増加によりその効果が増大する。また、添加材としては石灰がより有効であった。
- 4) 土の凍上量はC B Rと関連し、C B Rを 100 程度まで改良することにより、凍上率を 5%以下にすることが可能であった。

4-3 水分特性の変化が石灰安定処理土の凍上性に与える影響

4-3-1 まえがき

これまで、安定処理による凍上抑制原理はポゾラン反応による粒子間力の増大や透水性の低下が主因として説明されてきた¹⁴⁾。しかし、これらを裏付ける結果は乏しく、セメント安定処理土の研究でも、凍上抑制原理として一般に考えられている透水性の減少は凍上抑制にはあまり寄与せず、セメント混合による吸水能力の低下が影響することが示唆されている⁹⁾。

そこで本節では、石灰安定処理土の透水性や pF 特性の変化から凍上抑制効果に与える影響因子を調べ、石灰安定処理の凍上抑制機構について考察する。

4-3-2 水分特性と凍上性

土中水は土粒子表面からの吸着力、粒子間での表面張力（毛管力）、土粒子に吸着されているイオンの影響（浸透圧）等を受けることにより、バルクな水（大気圧下にあり、土粒子への吸着などの拘束を受けていないような純水）に比べ化学ポテンシャルが低下している¹⁵⁾。このため土粒子に吸着された水では、化学ポテンシャルの低下によって 0°C でも凍らない不凍水が存在するようになる。凍土中に温度勾配が存在すると、凍土—未凍土の境界付近では、このような不凍水が勾配に沿って化学ポテンシャルの高い高温側からポテンシャルのより低い低温側に移動し、アイスレンズを成長させる。従って不凍水量の多い土、すなわち粒径が細かく吸着力の大きなものほどアイスレンズの成長が顕著になる。但し、アイスレンズが連続的に成長するためには移動した不凍水が、常に未凍土側から供給される条件になくてはならない。このような条件は毛管力に依存するが、毛管力の大きな土は間隙構造が微細であり、著しく透水性が低くなる。透水性が低くなると、未凍土からのスムーズな水分供給が出来なくなり、結果的には凍上量が少なくなる。従って、最も凍上性を示しやすい土とは吸着水（不凍水）や毛管力が大きく、適度な透水性を有するような土であり、一般的にはシルト質土がそれにあたる。このような凍上メカニズムの観点から、土中水の物理化学的性質を定量的に評価することは凍上特性を理解する上で重要となる。土中水の化学ポテンシャルは、一般に pF で定義されている。 pF とは、ある化学ポテンシャルを持つ水分を取り出すのに必要なエネルギーを圧力水頭の常用対数で示したものであり、次式のように示される。

$$pF = \log (- \Delta \mu) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-1)$$

ここで、 $\Delta \mu$ は間隙水の化学ポテンシャルの低下量であり、圧力水頭 (cmH_2O) で表され

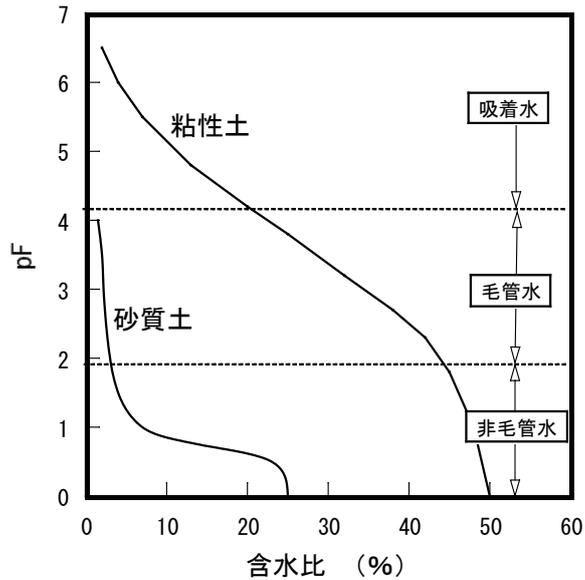


図-4-19 典型的な水分特性曲線

る。

土の pF 特性とは、任意の pF 値に対応するエネルギーを与えたときの含水比と pF 値の関係によって得られる水分特性曲線によって評価される。

図-4-19 は典型的な砂と粘土の水分特性曲線の例である。大部分の砂質土が非凍上性を示すことは、図のように低 pF 域での水分量が多く、高 pF 域での水分量すなわち吸着力で保持されるような水分（不凍水）が少ないことが大きな理由である。

直接的な不凍水量の測定には、NMR 法¹⁶⁾（核磁気磁気共鳴）など幾つかの手法があるが、 pF 特性を利用する利点は、土の間隙構造に影響されるような毛管力なども総合的に評価できることである。また、 pF 値を指標とした簡易分類¹⁷⁾として非毛管水 ($pF=0\sim 1.8$)、毛管水 ($pF=1.8\sim 4.2$)、吸着（不凍）水 ($pF> 4.2$) を利用すると概略的な不凍水量も判定可能となる。

本節では、透水性を未凍結部分からの水分移動に対する動水抵抗、毛管力や吸着力を水分移動力や不凍水量に関連する指標と定義し、土中水に係わるこれら物理化学的な性状の総称として水分特性という用語を用いる。

4-3-3 試験試料と試験方法

用いた試料は表-4-2 に示した試料 D および試料 B の 2 種類である。試料 D は EMS プラント（残土回収プラント）¹⁸⁾ で人工的に粒度配合された試料であり、試料 B は原位置から採取した試料である。表-4-3 に試験条件の一覧を示す。改良材は生石灰を用い、表-4-3 に示した添加率は、土の乾燥重量に対する値である。供試体作製は、石灰混合後、

試料 D で最適含水比，最大乾燥密度の 95% に対応する密度，試料 B では自然含水比，地盤工学会基準の C 法による締固め曲線の自然含水比に対応する密度とした。

本研究では，ポズラン反応等による固化効果（粒子間結合力の増加）が凍上抑制に与える影響を明確にするため 2 種類の養生方法を採用した。図-4-20 は，各養生方法をフローチャートで表したものである。締固め養生と称したものは，一般的な安定処理土であり，石灰混合後（厳密には消化吸水反応の終了を確認した後），直ちに締固めて供試体を作製し養生する方法である。これに対し，混合養生は石灰混合後に締固めを行わず未固結状態で所定の日数を養生し，各試験時に締固めを行う方法である。強度増加を目的とした安定処理では，改良材添加後，短時間に締固めることが重要であり，その後の強度発現に大きく影響する。従って混合養生は強度の面では不利な条件にある。なお透水試験（水中養生）を除いては，両養生方法ともに養生期間内は水分蒸発や吸水がないよう密封し， $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室での気中養生とした。

行った試験は，pF 試験と透水試験および凍上試験である。すべての pF 値を連続的に測定できる pF 試験方法は存在せず，本研究では砂柱法（pF0～pF1.0）と加圧板法（pF1.8～pF4.2）の 2 種類の組み合わせで行った¹⁹⁾。また，pF 試験は土が吸水する過程にあるのか，逆に脱水する過程にあるのかによって，吸水条件と脱水条件で試験をすることができると。両試験結果は同一ではなく，水分特性曲線はヒステリシスを示す²⁰⁾。凍上現象は，吸水条件を設定するのが妥当であるが，吸水試験は吸水が終了した水分平衡状態の確認が難しいこと，さらに，本研究では改良条件による pF 特性の相対的な比較に主眼を置き影響因子の特定を目的としたため，一般的な脱水条件での試験とした。なお，水分平衡状態に達する時間は予備試験によって調べ，試験を簡略化するためすべての pF 条件で試験時間を 24 時間とした。通常の脱水試験は，低 pF 域の試験から始まり段階的に pF 値を上昇させながら同一供試体で計測が行われる。しかし，安定処理土の場合は pF 試験期間中も養

表-4-3 試験条件一覧

試験条件	試料 D： 試験含水比：最適含水比		供試体乾燥密度：1.59 g/cm ³		改良材：生石灰	
試験項目	試験方法	供試体径	締固め方法	添加率(%)	養生日数	養生方法
pF 試験	砂柱法 (pF0～pF1.0) 加圧板法 (pF1.8～pF4.2)	円筒コアサンプラー φ 5cm, H 2.5cm	静的締固め	0,3,5,10	0,7,14,28	締固め養生 混合養生
凍上試験	開式凍上試験	φ 8cm, H 7cm	同上	同上	同上	同上
試験条件	試料 B： 試験含水比：自然含水比		供試体乾燥密度：1.55 g/cm ³		改良材：生石灰	
試験項目	試験方法	供試体径	締固め方法	添加率(%)	養生日数	養生方法
透水試験	変水位法	10cm モールド	2.5kg ランマー	0,3,5,7,10	最大 30 日	締固め養生
pF 試験	砂柱法 (pF0～pF1.0) 加圧板法 (pF1.8～pF4.2)	円筒コアサンプラー φ 5cm, H 2.5cm	静的締固め	0,3,5,7,10	0,5,7,14, 28	締固め養生
凍上試験	開式凍上試験	φ 8cm, H 7cm	静的締固め	0,3,5,7,10 0,3,7,10	0,3,5,28, 42 0,7,14,28	締固め養生 混合養生

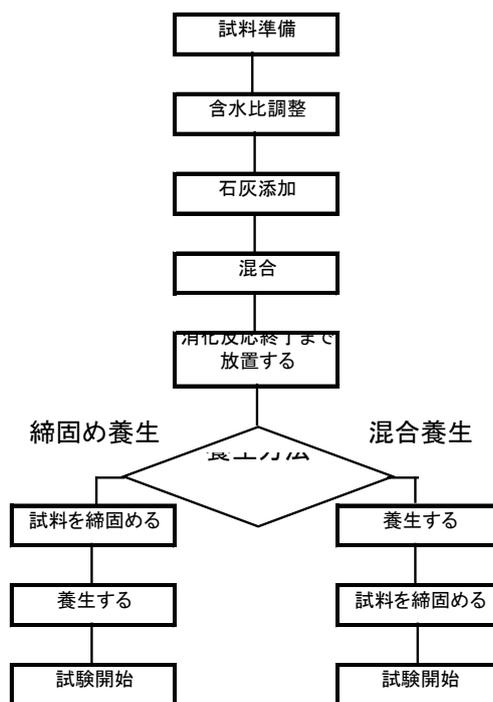


図-4-20 養生方法のフローチャート

生が継続するため、本研究では養生日数の統一を図るために、各 pF 値の試験に対して個別の供試体を作製した。

透水試験は変水位法(JGF T 311)で行い、透水係数の測定は供試体作製直後から 24 時間間隔で最大 30 日まで連続に測定した。凍上試験は第 2 章 2-4-2c に示したような開式凍上試験とした。なお、凍上量は凍上開始後 7 日目の値であり、同一条件で 3 体の供試体の平均値を用いた。

4-3-4 結果と考察

4-3-4-1 石灰安定処理の凍上抑制効果

図-4-21~22 に試料毎の養生日数と凍上量の関係を示す。両試料とも、養生日数の延長及び添加率の増加と共に、凍上量が減少している。また、添加率・養生日数が同一の場合、混合養生が少ない凍上量を示している。本研究では、養生方法の違いによる強度比較は行っていないが、基本的な反応が等しいセメント安定処理土で改良材混合後に締めに移行する放置時間が強度発現に与える影響を調べた例では、放置時間の延長がその後の強度発現に著しい低下を及ぼすことが報告されている²¹⁾。したがって、養生期間が放置時間である混合養生に凍上抑制の有利性が見られたことは、粒子間結合力の増大（ポズラン反応による固化）が凍上抑制に直接的に影響する因子ではないことが判る。

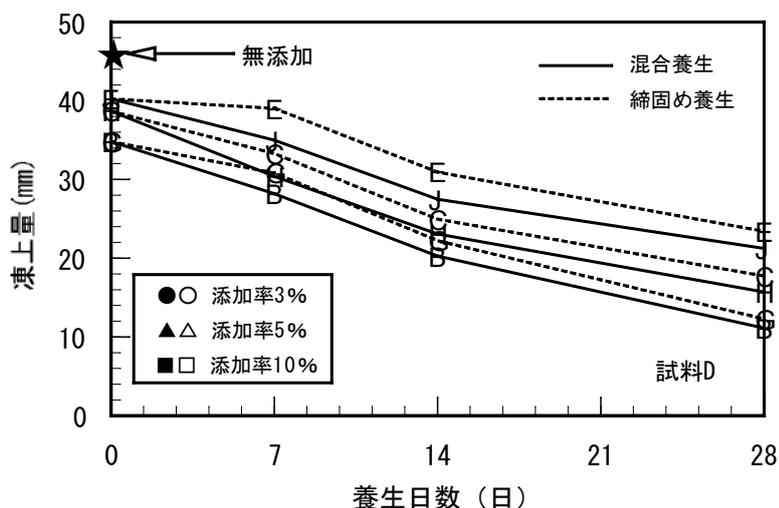


図-4-21 養生日数と凍上量の関係 (試料D)

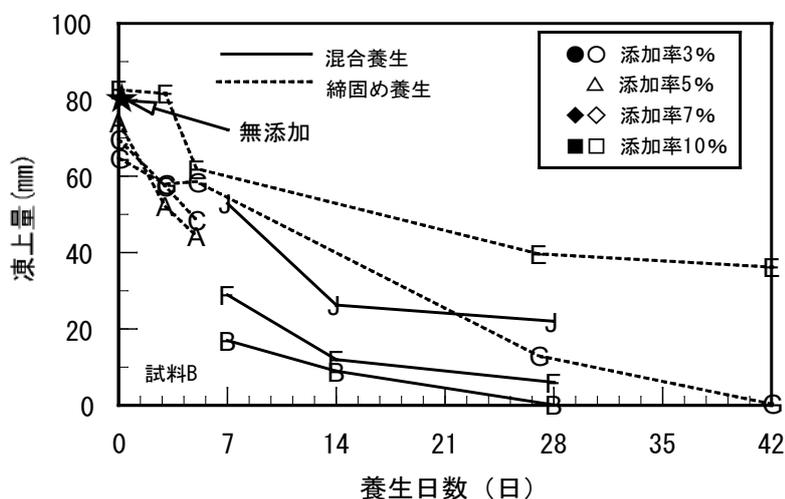


図-4-22 養生日数と凍上量の関係 (試料B)

4-3-4-2 透水係数の経時変化と凍上量の関係

図-4-23は試料Bの締固め供試体による養生日数と透水係数の関係である。一般に安定処理土はポズラン反応による反応生成物が間隙を充填することにより、透水性が減少すると考えられている。しかし、本結果からは透水係数の減少傾向は5日程度でほぼ終了し、30日まで延長した場合でもほとんど変化していない。それゆえ、図-4-22の関係から養生日数が凍上抑制に大きく影響していることから、安定処理土の凍上抑制原理として透水性との関連性は薄いことが判る。

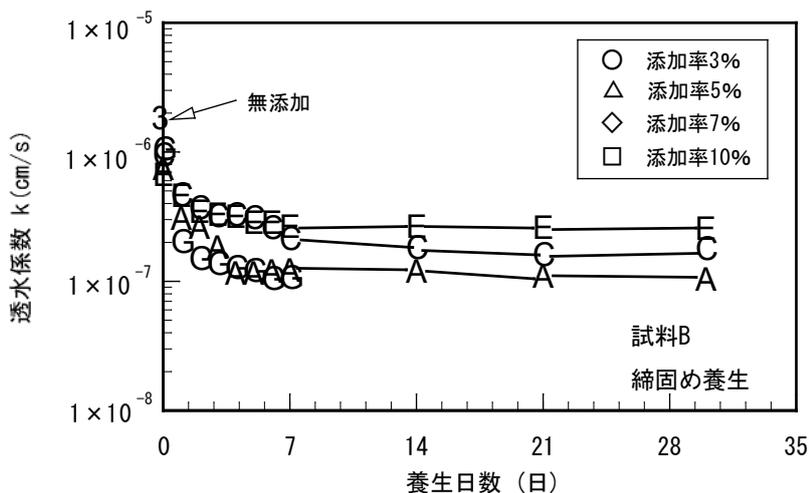


図-4-23 養生日数と透水係数の関係 (試料 B)

4-3-4-3 pF 特性と凍上性

通常、pF 試験の結果は図-4-19 に示したような水分特性曲線で表される。しかし、このような表現方法は特定の pF 値に対する水分量の評価には適するが、各 pF 値における水分の分布状態を連続的に知るためには水分特性曲線を微分して得られる水分分布曲線を用いるのが有用である²²⁾。そこで、改良条件によって変化する毛管水などの量を凍上性との関係で視覚的に比較しやすい水分分布曲線を以下の説明に用いることとする。

4-3-4-3a 早期段階の反応による pF 特性の変化

図-4-24 は、養生期間を設けず石灰混合後直ちに試験を行った試料 D の水分分布曲線である。石灰を添加することによって早期段階で毛管水量 (pF1.8~4.2 の変化率の総和)

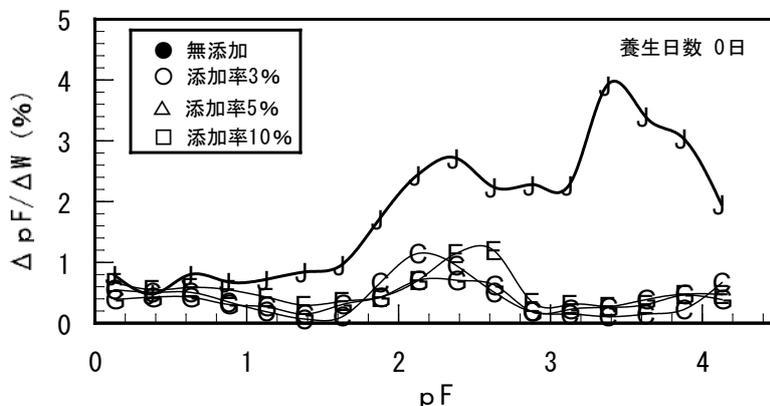


図-4-24 0日養生の水分分布曲線 (試料 D)

が大幅に減少している。早期段階における石灰安定処理の反応としては、土粒子表面へのカルシウムイオンの吸着による団粒化やイオン交換反応などであり、生石灰を用いた場合にはさらに消化吸水反応が加わる。試料 D は供試体作製時の密度を規定しており間隙比は同一であるため、無添加土と安定処理土では、団粒化の効果により締固め後の土の骨格構造に変化を与えたことが、毛管力の減少に繋がったと考えられる。加えて石灰自身にも、多量の吸着水を保持する性質があり、毛管水の一部を拘束したことも一因である。また、団粒化の原因であるカルシウムイオンの吸着は、土粒子表面の電位ポテンシャルを低下させるため、吸着水膜の層厚が減少する効果も併せて生ずる。

凍上量は、養生日数が 0 日でも、若干ではあるがすべての条件で無添加に比べ減少しており、ポズラン反応が期待できない反応の初期段階でも、毛管力や吸着水量の減少によって凍上抑制効果が現れると考えられる。

4-3-4-3b 養生方法の違いによる影響

図-4-25 は養生日数を変化させた締固め養生供試体の水分分布曲線である（試料 D）。図-4-24 の 0 日養生からの変化から、日数の延長により石灰混合時に一旦減少した毛管力が再び増加する傾向がみられる。また、締固め養生では養生日数によって毛管力の分布（曲線のピークに対応する pF 値と変化率）に違いが生じている。毛管力の分布は、7 日養生で pF=3 程度にピークを持ち、日数の延長に伴ってピークの値が低 pF 域に移動しながら、更には減少する傾向を示している。石灰安定処理土が固化体として形成されていく過程においては、ポズラン反応生成物が成長しながら粒子同士を結合していく現象が生じる。従って、このような日数による毛管力の変化は、粒子間を結合していくような反応生成物の成長に伴って間隙構造が変化していくことを示している。

つぎに図-4-26 は、混合養生供試体の水分分布曲線である。曲線形状は締固め養生と異なり、日数の違いによらず、0 日養生と類似した形状を示している。石灰混合によって形成された団粒子は、養生期間の延長に伴うポズラン反応等によって、団粒子としてより安定な状態に変化し、反応生成物の影響によって粒子性状も変化すると考えられる。締固め養生では粒子間を結合させるような反応生成物によって毛管力が変化していたが、混合養生ではこのような変化はみられず、養生日数の影響をあまり受けない単粒子の集合体と考えることができる。

両養生方法で凍上量を比較すると、混合養生がより凍上抑制効果が顕著であり、毛管力に限って考えると毛管力の大小関係が凍上性に影響していると考えられる。

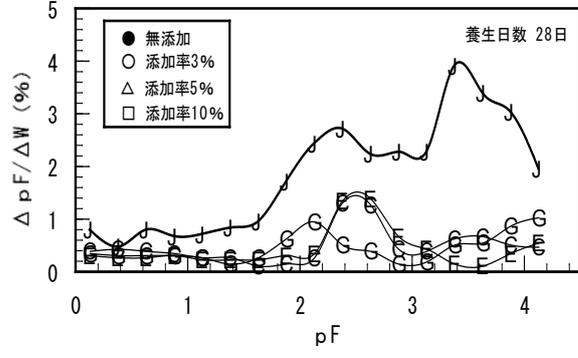
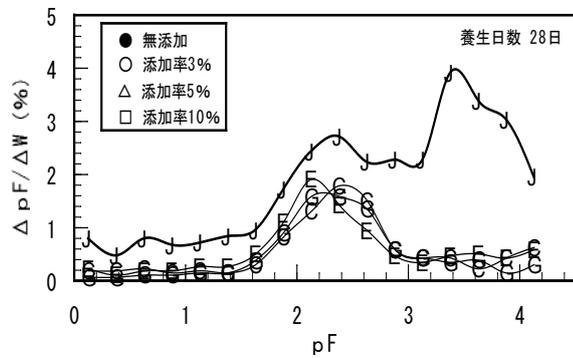
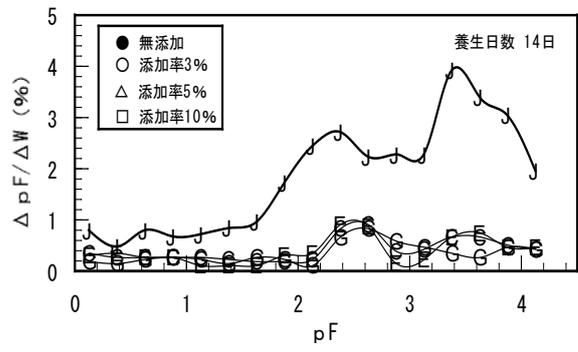
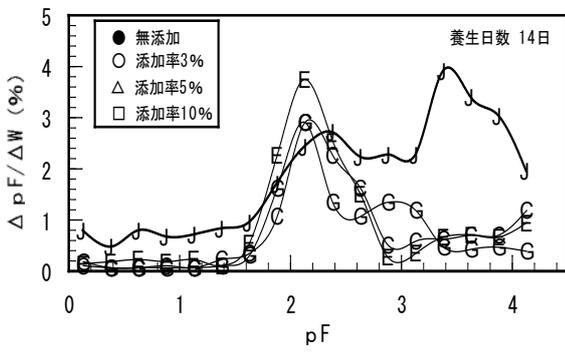
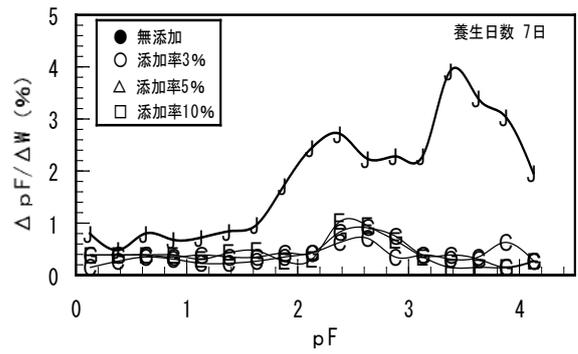
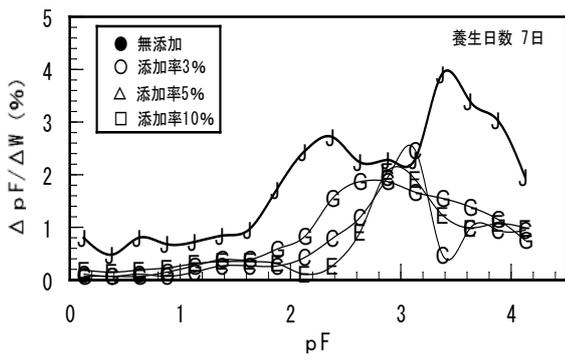


図-4-25 締固め日養生の水分分布曲線 (試料 D)

図-4-26 混合養生の水分分布曲線 (試料 D)

4-3-4-4c 試料の違いによる影響

図-4-27は試料Bの水分分布曲線である（締固め養生）。試料Bについても試料Dと同様に、石灰混合によって毛管力の減少がみられ、養生日数によって曲線の形状が変化している。試料Bは、養生日数による毛管力の変化が少ないが、日数の延長に伴い非毛管水量（ $pF \leq 1.8$ の変化率の総和）が増加する傾向にある。

以上のように $pF=4.2$ までの水分量は、養生方法や試料の違いにより異なった傾向を示すことが確認された。

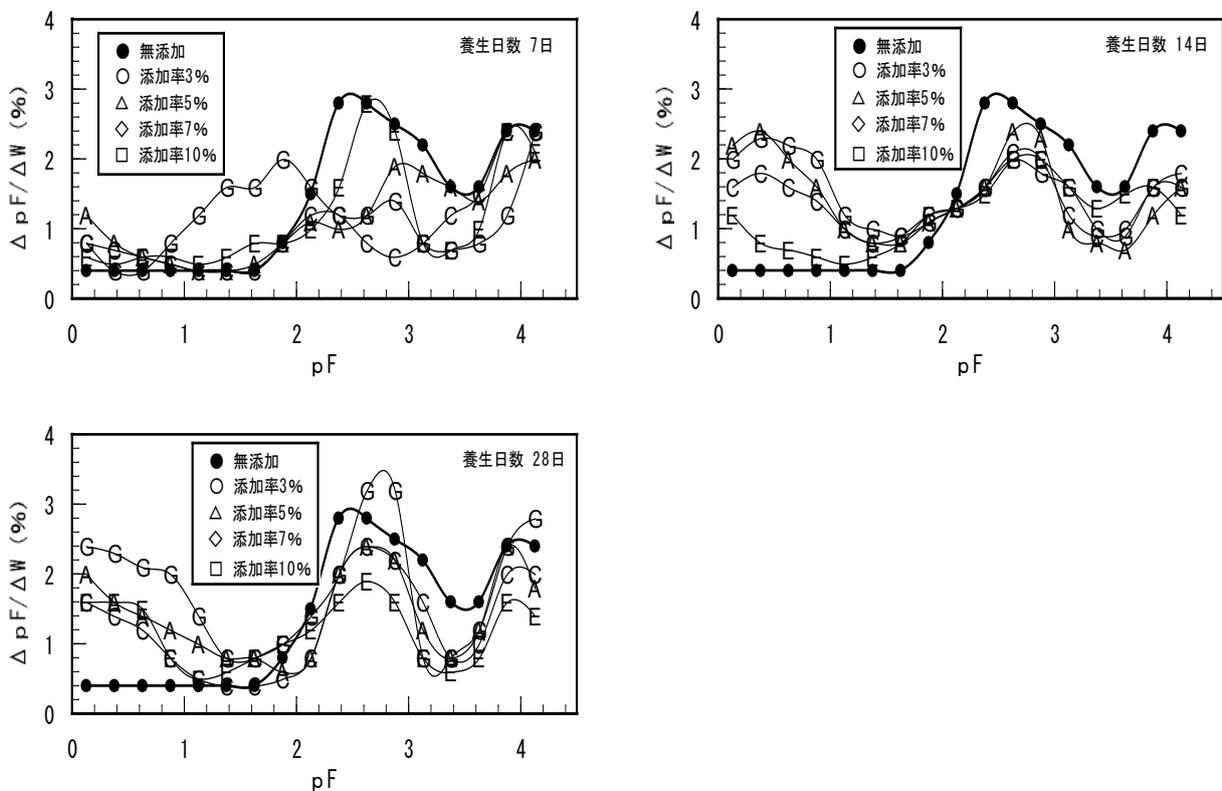


図-4-27 締固め養生の水分分布曲線（試料B）

4-3-4-4d 凍上性と水分特性の関連性

$pF=4.2$ までの水分分布曲線の変化から、毛管水量までの範囲で各条件の水分特性を述べてきたが、これらは複雑に変化しており凍上性と直接的な比較は難しい。そこで、毛管水量（ $pF=1.8$ の含水比 - $pF=4.2$ の含水比）および吸着水量（ $pF=4.2$ の含水比）を定量化し凍上量との関係を求めた。

図-4-28に示した毛管水量と凍上量の関係は、試料や養生方法毎に分布が集中しているが、全体的な傾向は見られない。透水性の変化が短期間で一定値に収束したように、毛

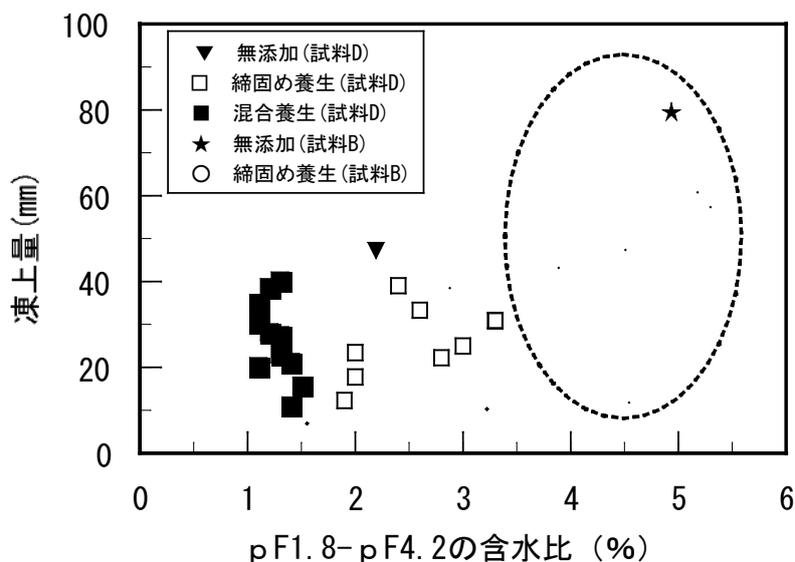


図-4-28 毛管水量と凍上量の関係

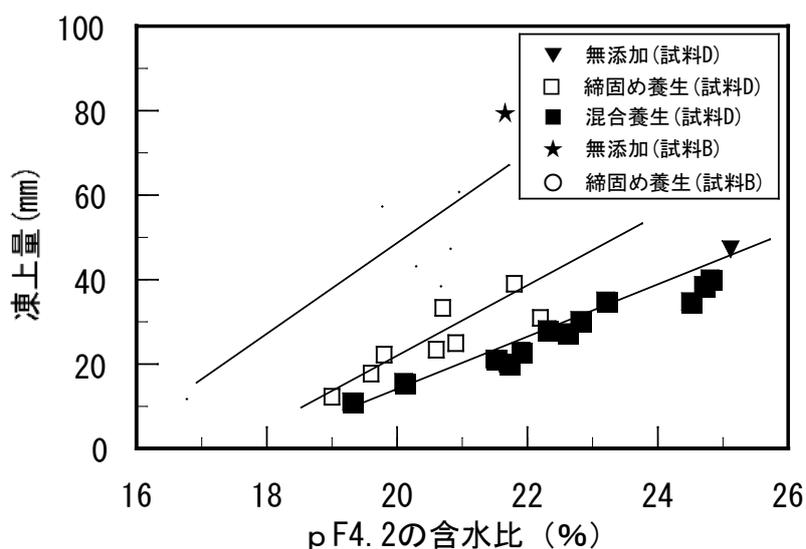


図-4-29 吸着水量と凍上量の関係

管力に大きく影響を与えるような間隙構造の変化は、石灰添加時に生じる団粒化のような即時的な影響であり、反応生成物などによる間隙構造の変化は、凍上性に直接的に影響しないと考えられる。

これに対し、図-4-29の吸着水量と凍上量の関係は、養生方法や試料によって異なった関係になるが、すべての条件で吸着水量の減少に伴って直線的に凍上量が減少している。したがって、安定処理土の凍上抑制機構としては、添加率や養生日数の影響による処理効果の増大が粒子表面の吸着水を減少させることにより生じる現象と考えられる。さらに、

同量の吸着水量であっても、粒度分布や改良方法によって毛管力や透水性が異なるため、その影響が凍上量の違いとして現れているものである。

前述したように、カルシウムイオンの吸着は、吸着水膜の層厚を減少させる。しかし、このような反応は即時的なものであり、長期的な吸着水量の減少メカニズムを証明するには至っていない。一般論として吸着水量は粒子の比表面積に比例するが、石灰安定処理土の比表面積は改良効果の進行によって増大すると報告されており²³⁾、土の構造を単粒子の集合と考えると吸着水量の関係と逆になる。本試験の結果のみからこのような問題点を説明することは困難であるが、反応生成物により土粒子表面の活性の変化などが生じているものと推察される。

4-3-5 まとめ

本節では、透水性や pF 特性など水分特性の変化から、石灰安定処理土の凍上抑制効果に与える影響因子を考察し、以下のような結果を得た。

- 1) 凍上量は、石灰添加率の増加や養生日数の延長に伴い減少し、特に養生日数による影響が卓越していた。
- 2) 試験に用いた 2 試料において、意識的に粒子間結合力を減少させた混合養生が一般的な締固め養生よりも顕著に凍上抑制効果が現れた。このことから、従来安定処理土の凍上抑制因子の一つと考えられていた粒子間結合力の増大（固化）は凍上抑制に直接寄与していないことが判った。
- 3) 凍上量が養生日数の影響を受けていたのに対し、透水係数の減少傾向は 5 日程度で一定値に収束し、30 日まで延長してもほとんど変化していなかった。粒子間結合力と併せて抑制因子と考えられていた透水性の変化も凍上抑制因子としては関連が薄いことが確認された。
- 4) 凍上量は養生日数を設けなくても無添加に比べ減少しており、 pF 試験の結果から石灰の添加によって毛管力が減少することが確認された。毛管力の減少は団粒化による骨格構造の変化と考えられるが、さらに団粒化の原因であるカルシウムイオンの吸着が土粒子表面の電位ポテンシャルを低下させ吸着水膜を減少させる効果があり、両者が複合的に作用したと考えられた。
- 5) 混合養生では、石灰添加時に減少した毛管力があまり変化しないのに対し、締固め養生では日数の延長に伴い、一旦減少した毛管力が再び増加する傾向にあった。相対的に両養生方法を比較すると混合養生の毛管力が小さく、凍上量と同様であった。
- 6) 毛管水量と凍上量の関係は、各試験条件で分布が集中しているが、一義的な関係を見出すことは難しかった。
- 7) 吸着水量と凍上量は高い相関関係にあり、吸着水量の減少が凍上抑制に寄与している

ことが示された。また、これらの関係は養生方法や試料によって異なった関係になっており、毛管力や透水性の違いが理由として考えられた。

4-4 結び

石灰安定処理には、凍上を抑制する効果がある。しかし、その効果は土の物理・化学的性状によって大きく異なってくる。そのため、安定処理土の処理効果の判断基準としては、強度の増加率などが頻繁に用いられている。本研究でも凍上抑制効果と強度増加率には、一義的な関係がみられ、強度が大きくなると凍上抑制効果も顕著に現れてくることが確認された。本研究も含め従来までの研究の多くは、安定処理土の凍上抑制効果を強度増加と結びつけて論じるものが多かった。そのため、十分な凍上抑制には必要以上の強度を望む結果となり、これまでの強度増加を目的とした安定処理工法と同様の施工法や施工管理が念頭に置かれていた。しかし、これらは、凍上現象の本質的な部分から離れ、安定処理を新たな凍上抑制工法と位置付けるための障害となる部分も含まれている。すなわち、強度増加を目的とした安定処理は、石灰混合から締固めへの移行時間が強度発現に影響するため現場での混合が基本になること、さらに混合に専用機械を要することから、小規模施工には向かない点などがあった。今回の結果より石灰混合から締固めへの移行時間は凍上抑制効果に影響しないことが判り、これにより凍上抑制工法としてはプラント混合方式など新たな工法開発の足掛かりになるものと思われる。

第4章の参考文献

- 1)久保宏：道路舗装の凍上とその対策，土と基礎，Vol.29，No.2，pp.9～14，1981.
- 2)伊福部宗夫：断熱材による道路の凍上防止試験，北海学園大学工学部研究報告，No.1,1972.
- 3)土谷富士夫他：ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制，農業土木学会誌，Vol.60，No.12，pp.25～pp.28，1992.
- 4)石田宏：生石灰・スラグによる高含水比火山灰質粘性土の凍害防止，土と基礎，Vol.39，No.8，pp.5～pp.10，1991.
- 5)石田宏：各種火山灰粘性土の生石灰による土質安定処理と凍害防止，土と基礎，Vol.41，No.4,pp.33～38，1993.
- 6)石田宏：低含水比火山灰質粘性土の石灰およびセメントによる土質安定処理と凍害防止，土と基礎，Vol.43，No.8，pp.15～18，1995.
- 7)瓦川善三他：セメント及び消石灰を添加した細粒土の凍上特性，第23回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1037～pp.1038，1988.
- 8)川端伸一郎・神谷光彦：石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性，農業土木学会論文集，192号，pp.105～111，1997.
- 9)生頼孝博・山本英夫他：セメント混合による土の凍上及び解凍沈下抑制に関する実験的研究，雪氷，Vol.48，No.4，pp.189～pp.197，1984.
- 10)川端伸一郎，神谷光彦，多田哲司：土の凍上試験法と凍上特性について，凍害対策と寒さ利用に関するシンポジウム発表論文集，pp.99～102，1992.
- 11)日本道路公団：日本道路公団規格，pp.1・244～1・249，1992.
- 12)日本石灰協会：石灰による軟弱地盤の安定処理工法，鹿島出版会，pp.27～28，1983.
- 13)伊東範雄：生石灰による地盤改良，日刊工業新聞社，pp.34～40，1969.
- 14)土質基礎工学ライブラリー23：土の凍結—その理論と実際—，土質工学会，1994.
- 15)福田正巳：地盤の凍結と凍上メカニズム，土と基礎，Vol.38，No.4，pp.81～pp.88，1990.
- 16)Tice, A.R, Burrous C.M. et.al：Determination of unfrozen water in frozen soil by pulsed nuclear magnetic resonance, Proc. 3rd International Conf. Permafrost, 149-155, 1978.
- 17)土壌物理測定法委員会編：土壌物理測定法，養賢堂，pp.109～110，1980.
- 18)神谷光彦・星昇他：札幌市における道路掘削土の再利用法，土と基礎，Vol.40，No.6，pp.11～15，1992.
- 19)土壌標準分析・測定委員会編：土壌標準分析・測定法，博友社，pp.36～54
- 20)東山勇・石田朋靖：pFの基本的意味（その2），土と基礎，Vol.34，No.12，pp.71～

76, 1986.

- 21)セメント系固化材研究会：セメント系固化材による安定処理土の試験方法（案），セメント・コンクリート，No.511，pp.126～136，1989.
- 22) 多田敦・河野英一他：農業土木技術者のための土壌知識とその応用（その2），農業土木学会誌，Vol.47，No.3，pp208～209,1979.
- 23) 田中弥寿男・高橋悟：比表面積を尺度としたまさ土の風化度と水分特性について，第17回土質工学研究発表会，pp.73～76，1982.

第 5 章 原位置試験による石灰安定処理の 凍上抑制効果の検証

第5章 原位置試験による石灰安定処理の凍上抑制効果の検証

5-1 はじめに

第4章では、石灰安定処理の凍上抑制効果を強度特性や水分特性から検証し、材料特性や効果的な養生方法について述べてきた。これらの結果から、室内試験レベルでは、石灰安定処理が凍上抑制に効果的であることが示されている。これに対し、安定処理を実施工に用いる上で懸念される事項は、施工管理上の問題、長期安定性、経済性などであり、特に、前記の二つについては現場施工例がほとんどないことが一因である。

そこで本章は、凍上性の建設発生土を用いて築造された盛土の一部を石灰により安定処理した事例によって、原位置での安定処理土の凍上抑制効果を検証する。

5-2 試験工区の概要

試験工区は泥炭地盤で、プレロードにより地盤改良して道路盛土を築造している。試験はプレロードの一部を除去せずに、石灰安定処理により凍上抑制層として利用するものである。道路盛土は平成3年度から盛立て、試験施工時の盛土高さは約3mである。盛土材は近隣地域の工事から排出された建設発生土であり、含水比が22～39%、土質分類は粘質土（CL）～粘土質砂（SC）に分類される。また、この地域は10年確率凍結指数で780（℃・day）、積雪は試験年度の実測で最大積雪深78cmを観測している。

試験ヤードは1区画10m×10mとし、改良条件などを変化させて5区画で行った。そのタイプ別の断面構成を図-5-1に示す。本事例は舗装厚を23cm（アスファルトコンクリートによる表層処理は行っていない）、置換え深さを80cmと設定してため必要な凍上抑制層厚としては57cmである。

タイプIは従来の置換工法として凍上抑制層に砂を用いたものであり、タイプIIは凍上抑制層をもうけていない未処理区である。III～Vは凍上抑制層に相当する厚さを

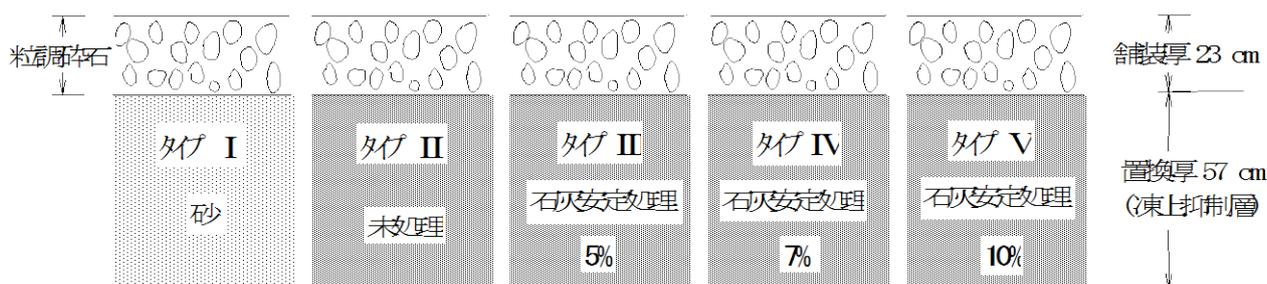


図-5-1 試験工区の構成断面



写真-5-1 試験工区の全景

石灰安定処理したもので、順に石灰を土の乾燥重量比で 5%、7%、10% 添加している。なお、現場での添加率は品質管理の面から石灰添加量に 20% の割増を行っている。安定処理層は仕上がり層厚 57cm を 1 層あたり約 30cm の二段階施工により行った。なお、施工時期は 9 月中旬であり、凍結期までに 3 ヶ月程度の養生期間が見込まれた。

5-3 測定内容と方法

測定期間は平成 6 年 1 月～平成 7 年 3 月であり、以下の内容の測定を行った。

- 1) 白金測温体による外気温および土中温度
- 2) メチレンブルーによる凍結深度
- 3) 沈下板を利用した凍上量測定
- 4) 積雪深

各測定器の埋設状況を図-5-2 と写真-5-2 に示す。外気温および土中温度は 60 分間隔の測定を自動計測で行っており、土中温度は地表面と凍上抑制層内の地表面下 40cm およびその下端の地表面下 80cm で測定した。凍上量は原地盤の沈下と分離するため、埋設深さの異なる 3 つの沈下板を設置し、その相対変位量から求めている。また、温度測定以外は 3 回/週の頻度で測定を行い、試験ヤードは常時除雪をし、地表面が露出した状態を保つようにした。

5-4 試験年度の気象状況

測定期間中の日平均気温と積算寒度（凍結指数）の推移を図-5-3 に示す。日平均

気温は12月4日以降ほぼ連続して氷点下となり、2月3日に最低平均気温 -17.1°C を記録している。また、翌2月4日には瞬間最低気温 -25.8°C を記録した。凍結指数は、測定期間の3月1日までの時点で $548.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ に達している。なお、同図に示したこの地域の過去10年間(AMeDAS)の平均値から試験年度が平均的な気象条件であったことがわかる。

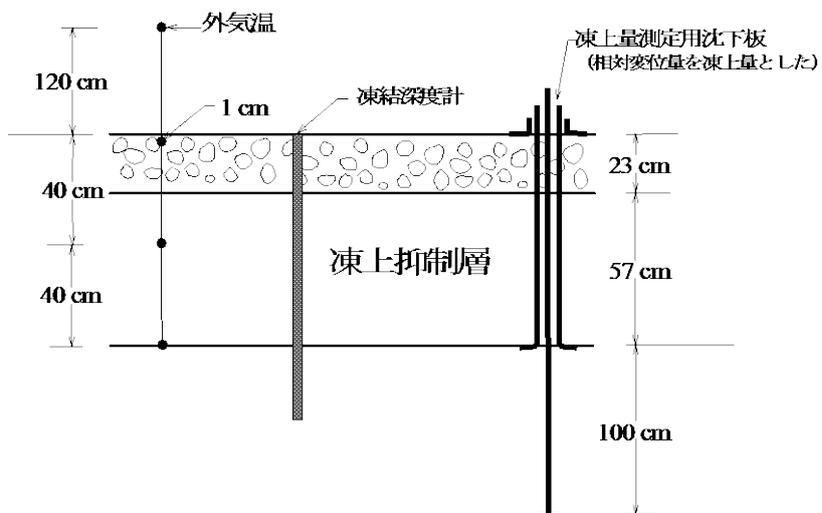


図-5-2 計測器の埋設状況



写真-5-2 観測用計器

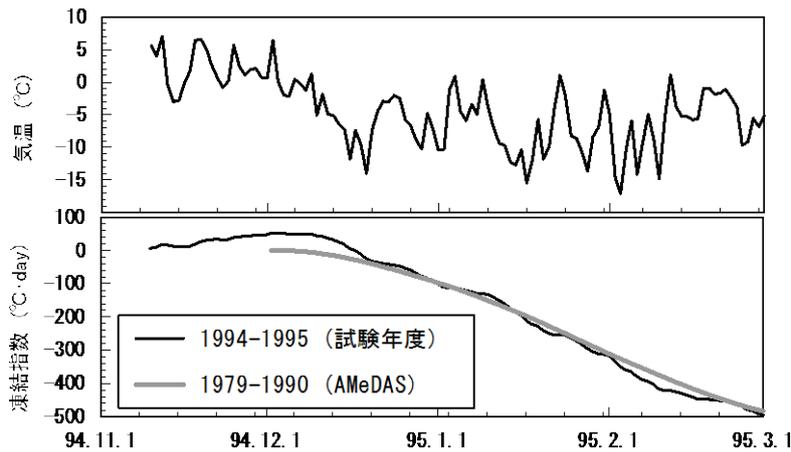


図-5-3 試験工区の気象状況

5-5 凍結深さと土中温度

土の熱伝導率は構成鉱物や含水比、密度などに支配されるが、一般的には粒径が大きいものほど熱伝導率は大きくなる。本試験タイプの中では砂が最も熱伝導率が大きいと予想され、図-5-4に示すように凍結深度の経時変化はその関係を顕著に表している。最大凍結深さはタイプⅠの砂で91cm、未処理土や現状土を改良したその他のタイプでは68cm～70cmとほぼ同じ値を示した。凍結深さの推移からは石灰安定処理による違いはみられず、現状土の熱的性質を継続して維持している。

次に、土中の日平均温度変化を図-5-5に示す。土中温度は砂を用いたタイプⅠが

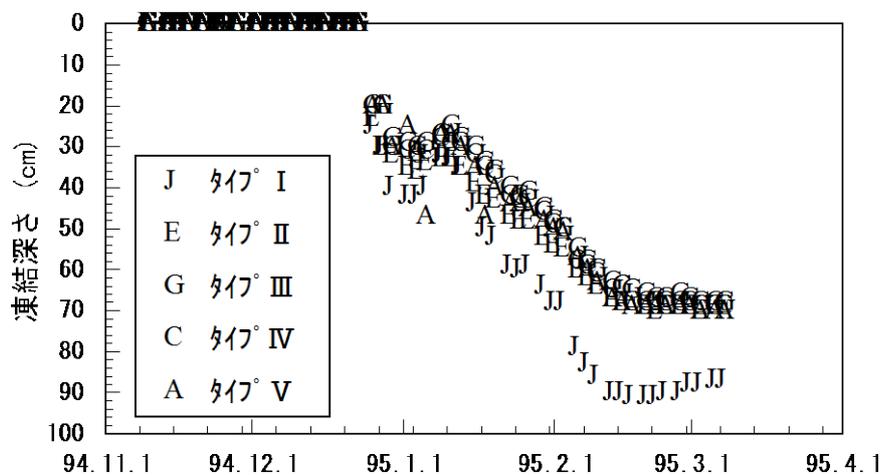


図-5-4 凍結深さの変化

最も低い値を示し，他のタイプと比較すると常に 1～2℃程度低い地温を継続している。また，深度別の関係は凍上抑制層内の地表面下 40cm(GL-40)では未処理土のタイプⅡおよび石灰安定処理土のⅢ～Ⅴは改良条件による違いはあまりみられないのに対し，凍上抑制層の下端の地表面下 80cm(GL-80)では改良条件によって差が生じている。GL-80 で地温，すなわち保温効果が大きかった順は，Ⅳ(7%)>Ⅲ(5%)>Ⅱ(0%)>Ⅴ(10%)>Ⅰ(砂)となっており，未処理土と安定処理土には多少の差がみられ，石灰安定処理が土の熱的性質を変化させているように見える。しかし，石灰安定処理土の熱的性質の変化がポゾラン反応のような化学的作用の影響であれば，地温の順位はその添加率に従うともものと考えられるが，本結果からはそのような明確な関係は見いだせなかった。

前述のように，土の熱伝導率は構成鉱物のような一次的な因子と併せて含水比や密度などの二次的因子に大きく左右され，同一の土質であれば含水比や乾燥密度が大きい

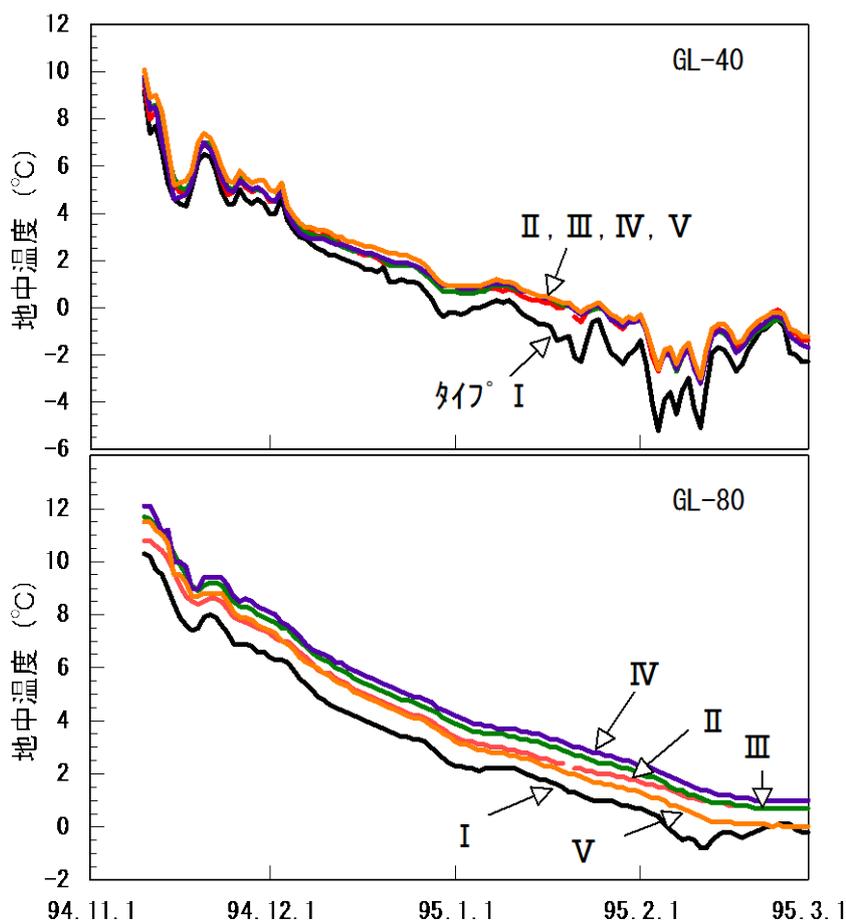


図-5-5 深度別の地中温度の変化

いものほど熱伝導率は大きくなっていく¹⁾。試験工区の現場観察では降雪初期に多くの融雪水が確認されており、アスファルト層を設けていない本事例では雨水や融雪水は直接、路盤や凍上抑制層に浸透する構造になっている。したがって、GL-80のような関係は浸透水の浸入が凍上抑制層の含水比にばらつきを与えたため、深度の増加に伴い、生じたものと考えられる。

5-5-1 凍結深さの推定

本試験施工例は凍上抑制層の種類と比較試験であるため、一般的な置換工法の設計に用いられる非凍上性材料（砂などの粗粒材料）の理論最大凍結深さから求めた置換厚を基準として、全タイプ同じ厚さで施工した。しかし凍結深さは土質により異なり、粗粒から細粒になるにつれ凍結深さは浅くなっていく。今回の凍結深さの実測結果でも、現状土を利用したタイプのもは未処理土や安定処理によらずほぼ同じ値となり、砂と比較して20cm程度浅い位置に凍結線が存在していたことが確認された。そこで、道路構造のように多層からなる場合の凍結深さの推定手法に用いられる修正 Berggren の式²⁾により凍結深さの検討を行った。

なお、凍結深さの推定には表-5-1に示す道路材料の平均的な熱定数を用いた¹⁾。これにより推定された予想凍結深さはタイプIの砂で82.3cm、現状土を用いたタイプ(II~V)で64.1cmであり、いずれも実測値より小さくなっている。これは、積算寒度の計測期間を3月上旬で打ち切ったためと考えられる。すなわち、凍結深さは図-5-4にみられるようにほぼ収束しているのに対し、積算寒度は北海道では3月中旬から下旬にかけてピークを迎える。第2章の2-2でも触れたように、修正 Berggren 式による凍結深さの推定は、最大値に推定には適するが凍結期間中の推定値は過少に評価される。今回のように積算寒度の最終値を把握していない例では、計算による凍結深さがやや小さな値となったものである。そのため、3月中旬程度まで凍結期間を見込むと予想凍結深さはかなり実測値に近づくものと考えられる。また、計算の結果からも砂と現状土では20cm程度の凍結深さの差があり、実測値との整合性も良い。さ

表-5-1 推定に用いた道路材料の熱定数¹⁾

材料	熱伝導率 λ (W/m·K)	熱容量 C (J/m ³ ·K)	凍結潜熱 L (J/m ³)
切込み砂利	1.396	1.863×10 ⁶	46.9×10 ⁶
砂	1.356	1.951×10 ⁶	82.9×10 ⁶
一般土	1.636	2.625×10 ⁶	192.6×10 ⁶

らに，実測の石灰安定処理土の凍結深さは添加率の影響も少なく，未処理土との差もないことより，未処理土の熱的定数を用いて凍結深さの推定が可能と考えられる。

5-6 凍上抑制効果

第4章でも述べたように凍上性の土に石灰を添加すると，凍上量は減少する。石灰による安定処理は，毛管力や吸着水量を変化させ凍上を抑制するものと考えられる³⁾。また，凍上抑制効果の評価については，強度と同様に養生日数の長いものや最適添加量⁴⁾以内の添加量であれば添加率が多いものほど改良効果を期待できる⁵⁾。

図-5-6に試験工区の土を用いた凍上試験(2章2-4-2c)の結果を示す。石灰を添加しなかった供試体については凍上は認められず，養生日数が7日では石灰添加量の増加に伴って凍上量が増加し，添加率5%程度をピークに凍上量が減少する傾向を示した。この試験は自然含水比条件の土に石灰を添加して行ったものであるが，含水比が高いため($\omega_n=30\%$ ， $S_r \approx 90\%$)，未処理土では水分移動に必要なサクションが小さく，凍上を示さなかったと考えられる。したがって，短期養生では少ない添加率の範囲(本試験では添加率5%程度)で生石灰添加による含水比低下がサクションを増大させ，ポズラン反応等による凍上抑制効果よりも顕著に現れたものである。しかし，養生日数を28日まで延長すると凍上量は添加率の増加に伴って直線的に減少しており，凍上抑制には養生日数の影響が大きいことが判る。

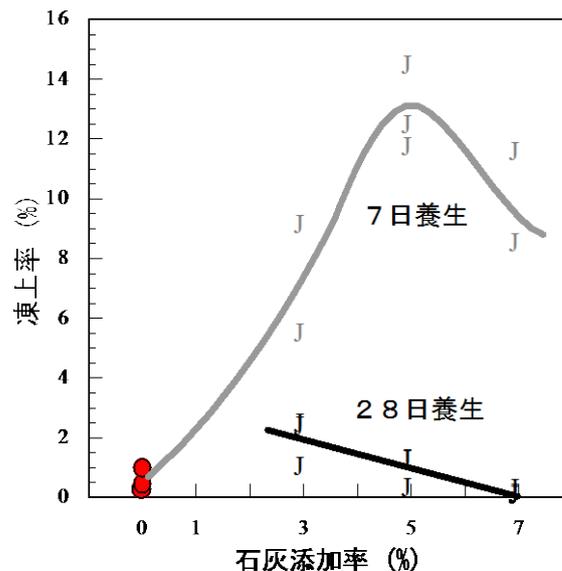


図-5-6 試験施工区の試料サンプルによる石灰添加率と凍上量の関係

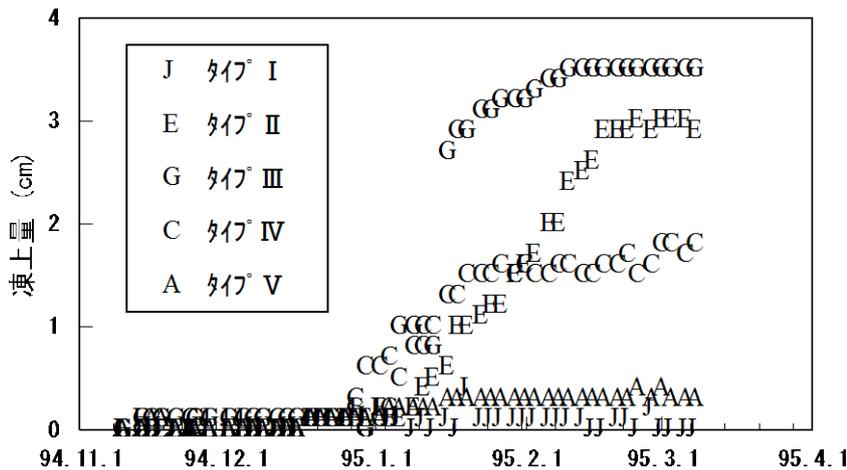


図-5-7 試験工区での凍上量の変化

原位置で計測された凍上量の経時変化を図-5-7に示す。凍上は12月下旬から発生し、すべてのタイプで2月中旬にはほぼ収束傾向を示している。凍上量はⅢ(5%)>Ⅱ(無添加)>Ⅳ(7%)>Ⅴ(10%)>Ⅰ(砂)の順であり、室内試験と同様に添加率5%で最大の凍上量を記録した。しかし、安定処理土については添加量を増加させると凍上量は減少傾向を示しており、タイプⅤの添加率10%では砂とほぼ同じ値の4mm程度の凍上量に抑えられている。さらに、室内試験より養生日数の長いものの凍上抑制効果が大きかったことを考慮すると、施工時期を繰り上げて養生日数を延長することにより、更に凍上量を減少させることが可能である。

つぎに、凍結深さと凍上量の関係を図-5-8に示す。路盤材が非凍上性であるため、凍上は凍結線が凍上抑制層に進入した時点より生じている。未処理土のタイプⅡでは凍結深さと凍上量の関係は直線的であり、凍結線がさらに深く進行すると凍上量が増大する可能性がある。これに対して、安定処理土では凍結線が安定処理層に達した直後より凍上を起こしているが、凍上は安定処理層の上層部のみにとどまり、その後は速やかに凍上が収束する傾向を示している。従って、最大の凍上量を示したタイプⅢの場合でも、さらに凍結深度が増加しても凍上量の増加はわずかであると予想でき、石灰安定処理が凍上の抑制に効果があることが確認された。また、安定処理層の上部10cm程度に凍上が集中した理由として、今回使用した混合機械(スタビライザー)の特性から改良層上部の混合率が低くなる特徴があったことが報告されている。加えて、前述のように浸透水が直接浸透したため、上層部の含水比を著しく増加させ、結果的に凍上に必要な水分の供給源になったものと考えられる。

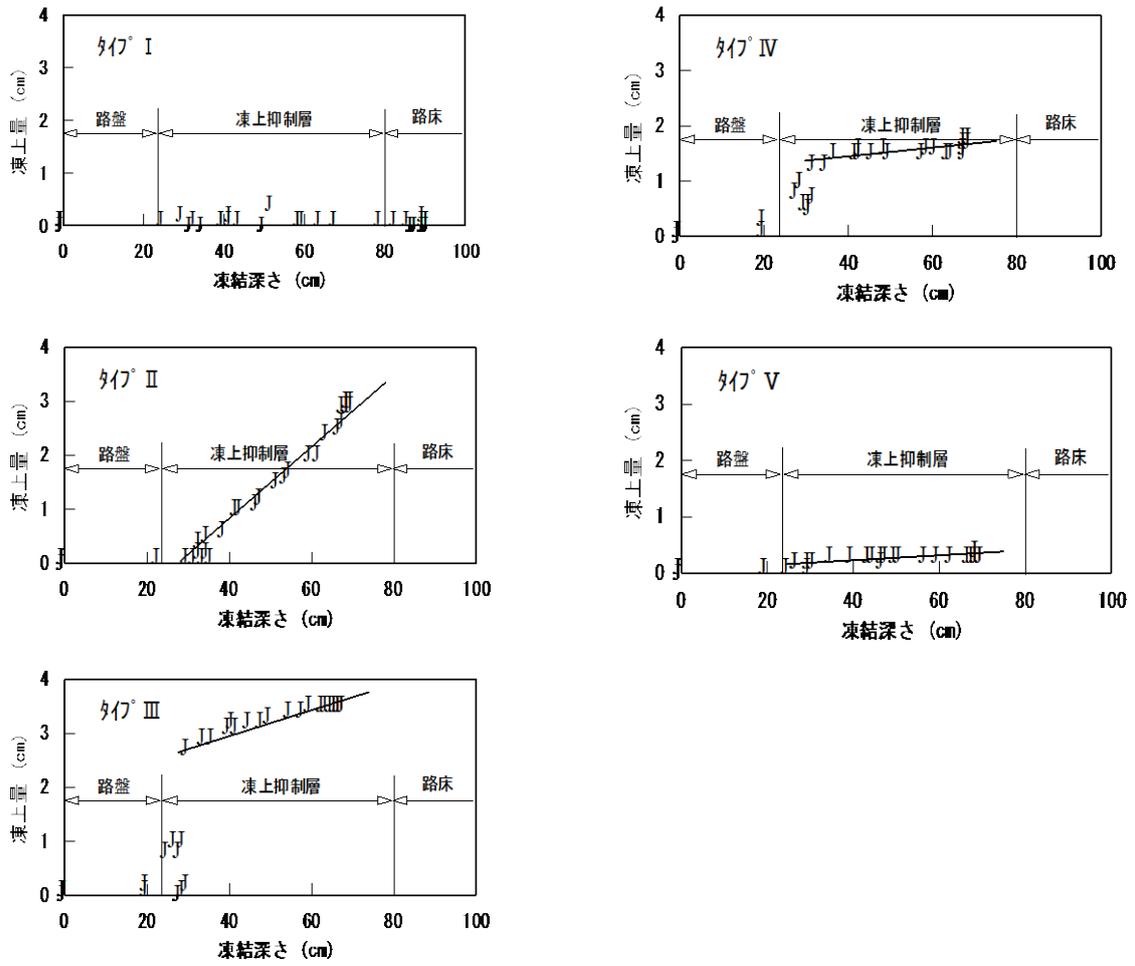


図-5-8 凍結深度と凍上量の関係

5-7 まとめ

原位置における石灰安定処理土の凍上抑制効果を調べるため、凍上性の建設残土に石灰を添加し、冬季動態観測を行った。結果は以下の通りである。

- 1)現状土を利用した未処理土と安定処理土の凍結深さは 68～70cm の範囲にあり、安定処理が凍結深さに与える影響は少ない。
- 2)凍上抑制効果は石灰添加率に従い大きくなり、凍上量は添加率 10%で凍上抑制層として砂を用いたタイプと同値程度の 4mm に抑えられた。
- 3)凍結深さと凍上量の関係から石灰安定処理土の凍上は、改良層上層部に集中している。しかし、比較的大きな凍上量を示すものは凍結線の進行に伴って直線的に凍上量が増加すると考えられ、本報告のように上層部のみに凍上が集中したことは改良材混合の不均一や処理層の透水性の減少によって雨水や融雪水が上層部の含水比を著しく増加させたためであると考えられる。
- 4)実測された凍結深さは砂と比較すると現状土を用いたタイプが 20cm 程度浅い位置に存在し、凍上性の土を石灰安定処理することにより凍上抑制層の置換厚を減ずることが可能である。

最後に石灰安定処理は粘土鉱物との化学的反応を利用しているため土質により反応効果が大きく左右される。しかし、今回の結果から室内試験での凍上抑制効果が原位置でも確認されたことは凍上抑制工法として石灰安定処理を考える上で有益なデータとなった。

第 5 章の参考文献

- 1)土質基礎工学ライブラリー23:土の凍結－その理論と実際－，土質工学会，1994.
- 2)Aldrich, H. P. : Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavement, Bulletin 135, H. R. B., 1956.
- 3)川端伸一郎, 神谷光彦:水分特性の変化が石灰安定処理土の凍上特性に与える影響, 土木学会論文集, No.666/Ⅲ-53, pp.261～268, 2000.
- 4)下田正雄:石灰安定処理工法, 鹿島出版会, pp.79～pp.80, 1984.
- 5) 川端伸一郎・神谷光彦:石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性, 農業土木学会論文集, 192号, pp.105～111, 1997.

第 6 章 農業用施設における凍上抑制工法とその効果

第6章 農業用施設における凍上抑制工法とその効果

6-1 はじめに

前章までは、道路構造物の凍上対策を中心に置換土の材料性状について述べてきた。しかし、凍上現象は道路構造物に限らず地盤凍結が生じる箇所で様々な構造物に被害をもたらす。道路構造物に十分な凍上対策が施されることは、除雪などにより過酷な凍結環境にあること、また凍上による道路表面の変位が直接的な機能低下に繋がるためである。凍上現象をもたらすような季節的な地盤凍結は、北海道で概ね1m程度の深度内が対象となるため、一部の用排水路や小規模な擁壁など凍上による被害を受けやすい構造物もあるが、深層に基礎構造を持つような大規模構造物は、凍上現象を想定する必要性は少ない。これに対し、比較的浅層部に基礎構造を持つ一般建築物などでは、基礎部の凍上対策が重要であり、現在ではほぼ確立された凍上対策工法を持つに至っている。ただし、このような対策工法も個人住宅程度の規模を想定した手法であり、構造物の規模によっては実用が困難な場合も多い。

本章では、道路以外の構造物における凍上対策の現状として、一般建築物を取り上げ、特に特殊な構造を有する畜舎を対象として有効な凍上対策工法について検討した。

6-1-1 一般建築物における凍上対策と畜舎建築の現状

畜舎はこれまで住宅等の一般建築物と同様に、建築基準法に準拠した設計がなされてきた。しかし、近年の農業施設が置かれた効率化や低コスト化の要求に対し、1997年には畜舎施設を対象とした、設計荷重等の規制緩和が実現された¹⁾。この規制緩和は、畜舎施設の立地条件、使用状況、作業者の滞在時間などを考慮した内容であり、一元化することが難しい畜舎関連施設では作業者の滞在強度に応じた3つの施設区分を設けている。この基本概念に基づき、「畜舎設計基準・同解説」²⁾では具体的に積雪荷重や風荷重、防火規制の緩和、構造の簡素化などが盛り込まれた。また、今後は更なる効率化・低コスト化を目指しており、新たな対象項目として基礎構造の見直し等も検討事項としてあげられている。

基礎部が占める建設コストの割合は、地盤の凍上被害が深刻な寒冷地において高くなる。これは、凍上や凍着凍上の対策として布基礎を採用することや基礎の根入れ深さを凍結深度以深にするためであり、寒さの厳しい地域ほどコスト増になる。小林ら³⁾によると、総建設コストは、凍結深度20cm毎に10%程度増加し、この内訳としては土工事や型枠工事のコスト増が著しいことを報告している。凍上現象は、寒冷地特有の問題であるが、国内有数の酪農地帯が北海道や東北などの寒冷地に広く分布していることを考えると、畜舎施設で凍上が問題となる確立は非常に高いといえる。

すでにカナダでは、農用建造物に対する凍上対策設計指針が作成されており、凍上量の予測や断熱材による基礎の凍上対策工法などが提案されている⁴⁾。日本においてもこのような、寒冷地建築物における基礎部のコスト削減手法としては、すでに一般住宅を対象として断熱材による基礎断熱工法が積極的に取り入れられており、これにより基礎の根入れ深さの低減を図っている^{5),6)}。図-6-1は、基礎断熱工法を模式的に表したものである。この工法は、内部からの熱供給がある一般住宅を主体に考えら

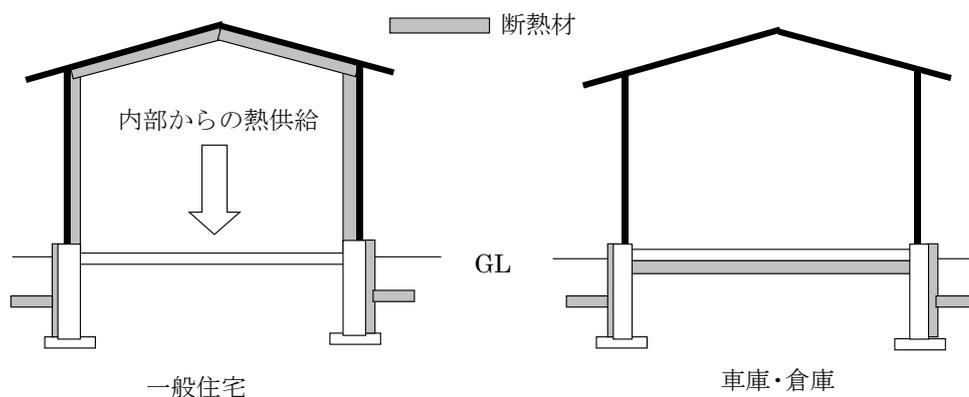


図-6-1 基礎断熱工法の模式図

れており、倉庫や車庫部のように内部に断熱材や熱供給が無いような施設では、施設内部からの凍結防止のため床下の断熱が必要となる。畜舎に対してこのような基礎断熱工法を適用するには車庫部のような床断熱との併用が望ましいが、床面積が広い畜舎施設では、コスト面からも単純な適用は難しい。さらに、畜舎施設は、一般建築物と異なり、換気や家畜への防風雪対策など使用目的により、外壁を有さない構造、もしくは外壁を有しても外気の進入を大幅に許容するものから密閉型の構造まで多岐にわたる。また、使用目的によっては、断熱効果が期待される敷き藁の存在や家畜の放出する熱によって凍結環境が変化することが予想される。

そこで本章では、使用目的の異なる畜舎および畜舎関連施設において地盤凍結環境を調査し、畜舎独自の凍上対策工法の提案を行うことを目的とした。

6-2 施設区分と実験対象施設

表-6-1は畜舎施設を滞在強度によって分類した施設区分である。「畜舎設計基準・同解説」では、施設区分の境界値として滞在強度を基に、IとIIで730[(人・時間)

$/(50\text{m}^2 \cdot \text{年})]$, II と III で $2, 190[(\text{人} \cdot \text{時間})/(50\text{m}^2 \cdot \text{年})]$ を規定している。これらはそれぞれ, $1 \text{人}/50\text{m}^2$ で1日2時間, $2 \text{人}/50\text{m}^2$ で1日3時間の滞在時間に該当する。同基準では, 滞在強度を用いることにより施設の重要度を明確にし, 滞在強度の低い施設区分 I や II の構造や防火規制などの緩和を記している。

表-6-1 畜舎関連施設の施設区分

施設区分	対象畜舎 (代表例)
I	乳牛舎 (搾乳牛舎, 育成牛舎等) 肉牛舎 (繁殖牛舎, 育成牛舎, 肥育牛舎等) 豚舎 (種雌豚舎, 肥育豚舎, 分娩豚舎等) 採卵鶏舎 (育すう舎, 育成舎, 成鶏舎等) 肉用鶏舎, 堆肥舎 これらの施設の付属室 その他これらに類する畜舎内滞在強度 (畜舎内の滞在時間及び密度の程度をいう。以下同じ) が著しく小さい施設
II	搾乳舎, 生乳処理室 畜舎及び生乳処理室に係わる付属室 その他これらに類する畜舎内滞在強度が小さい施設
III	施設区分 I 及び II 以外の畜舎 (選卵及び包装施設, ふ卵舎等)

施設区分 I は, 主として畜舎であり, これらは, 換気などを目的に簡易的で外気の進入を容認するような壁構造のものが多い。したがって, 外気温と室内温の差はあまり無く, 家畜が放出する熱や敷き藁などの有無が内部の凍結環境を支配している。施設区分 II は, 搾乳舎など家畜と作業者が共に滞在する施設であり, 搾乳機械などが配置されていることから周囲を密閉するような壁構造のものが多い。さらに, 作業者が比較的長時間に渡り滞在するため, 簡易的な暖房設備を有する場合もある。施設区分 III は, 作業者のみが滞在する施設であり, 壁の構造や暖房設備などは一般住宅と同程度である。このような施設区分は, 滞在強度を基に定められているが, 同時に内部からの熱供給条件と考えることが可能であり, 凍結条件が厳しいものから順に I ~ III と定義できる。

本研究では, 実験対象として凍結条件が厳しく, 構造的な簡素化が容認される施設区分 I の畜舎を主に取り上げる。なお, 比較のため一部施設区分が II に該当する施設も実験施設として用いている。調査地点は, いずれも北海道十勝管内に位置し, 地点毎に地点 No. を 1~3 と称する。調査地点 1~3 は, 標高や積雪量などが違い, 凍結環境もそれぞれに異なるものである。以下に各調査地点における試験対象施設の概要を述べる。

調査地点 1 畜舎

主たる風向き方向に対して外壁が存在するが、一方向には壁が存在しない面がある。この面は、換気や給餌作業のため開放されており、これにより畜舎内部の温度は外気温とほぼ等しいと考えられる。(写真-6-1)



写真-6-1 調査地点 1 畜舎



写真-6-2 調査地点 2 ミルクパーラー内部

調査地点 2 ミルクパーラー (搾乳舎)

外観は一般建築物同様に外壁で覆われている。内部には作業用部屋もあり、暖房器具も完備されている。(写真-6-2)

調査地点 2 畜舎

外壁は簡易的で二方向のみに存在する。その他の二方向の面は家畜の出入口として開放されている。ただし、その面に対しては風雪対策としてカーテン状の覆いを取り付けられている。なお、この畜舎は、上記のミルクパーラーと一部で結合されている。(写真-6-3)



写真-6-3 調査地点 2 畜舎

この畜舎中央部に直角方向でミルクパーラーが結合されている

調査地点 3 畜舎

主たる風向き方向に対して固定された壁が一方向に存在する。出入口として使用されている二方向の壁は、開閉可能なシャッターが取り付けられているが、大半の時間は開放状態である。残る一面には外壁は存在しない。施設内の全面に 10cm 程度の敷き藁が常時敷かれている。(写真-6-4)

調査地点 3 給飼舎 A

家畜の給餌施設である。上記畜舎と隣接しており、連続的な屋根が架けられている。周囲には一切の外壁が無く、飼料への雨や雪よけのため屋根のみが架けられている。施設全体は外気に曝されている。(写真-6-5)

調査地点 3 給飼舎 B

上記の給飼舎 A と建築構成や使用目的は同様である。ただし、給飼舎 A のように連続的な屋根が架けられていない独立した施設である。給飼舎 A

と比較すると風の侵入が多い。(写真-6-5)

以上の各施設を実験対象施設として用いた。



写真-6-4 調査地点3 畜舎



写真-6-5 調査地点3 給飼舎

本写真の中央は給飼舎B, 左奥に給飼舎Aがみえる

6-3 観測内容と方法

断熱材による基礎断熱工法は、一般住宅などでは既に採用されているものであり、断熱により地盤凍結を抑制し基礎の根入れ深さを低減させる工法である。過去において最も凍上被害が深刻な道路構造物などでも断熱工法による凍上抑制は試みられた⁷⁾。しかし、交通荷重を伝達させる構造体の中に断熱材が位置することや改修時の扱いに苦慮することなどの理由から、現在まで積極的な工法利用には至っていない。逆に、建築物の基礎周囲は過度の荷重を受けることが少ないことや半永久構造物であることから頻度の高い改修が行われないう利点がある。したがって、近年根入れ深さの低減工法として断熱材による基礎断熱工法を利用する例が多くなっている。

住宅基礎における断熱工法は、正式には基礎断熱併用スカート断熱工法と称され、**図-6-2**に示すような基礎断熱部とスカート断熱部の組み合わせによって構成されている。両者の役割は、基礎断熱部が基礎背面土の凍結抑制と基礎部を熱橋とした基礎底面の凍結抑制を目的とし、スカート断熱部が直接的な基礎底面土の凍結抑制を担っている。**図-6-2**に示した断熱工法は、内部からの熱供給がある一般部の適用例である。「スカート断熱工法設計・施工マニュアル」⁸⁾では、ポーチや車庫部のように内部からの熱供給が無い場合は背面部での基礎断熱と床下断熱を義務付けている。

本研究では、各実験施設において基礎断熱工法や床下断熱を施工し、地盤凍結の抑制効果を比較した。基礎断熱併用スカート断熱工法を施工した調査地点は、以下の通りである。

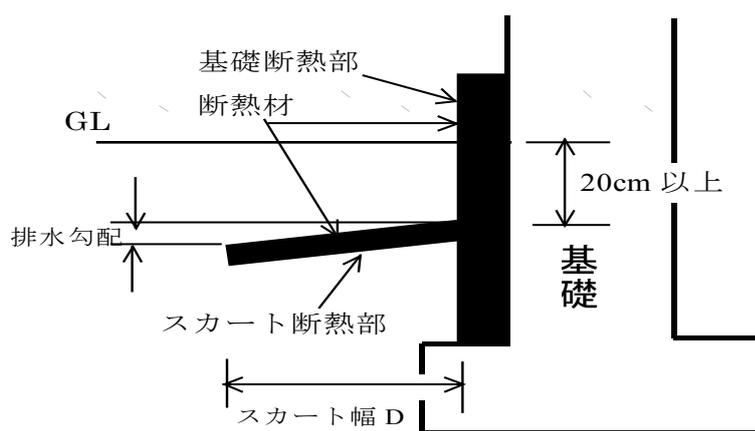


図-6-2 基礎断熱併用スカート断熱工法

①調査地点 1 畜舎（施設区分 I）：観測期間 1997.11～1999.5

上記の施設には、基礎部に図-6-2に示した方法で、屋外部のみに断熱材を敷設した。なお、スカート断熱部の幅は、各地域区分と基礎の深さから定められ、同マニュアルを参考に D=60cm とした。また、本調査地では 97 年度（1997.11～1998.5）は常時除雪をし、基礎部周辺の地表面を露出させ、98 年度（1998.11～1999.5）は自然積雪状態で観測を行った。図-6-3 は、測定計器の埋設状況である。地中温度は、20cm 間隔の最大で地表面下 140cm まで温度センサー（サーミスタ）を設置し、1 時間間隔の計測とした。なお、温度センサーのデータを検証するためメチレンブルー凍結深度計を併せて埋設した。凍上量の測定は、埋設深さの異なる沈下板を利用して、その相対変位から各層の凍上量を計測した。沈下板の埋設深さは、凍上の影響を受けないと仮定した不動点（地表面下 200cm, GL-200 と称する）、基礎の根入れ深さ（GL-150）およびスカート断熱部（GL-20）に対応する値とした。これらの計測を断熱材設置箇所（断熱工区）と未敷設箇所（未処理工区）でそれぞれ計測した。

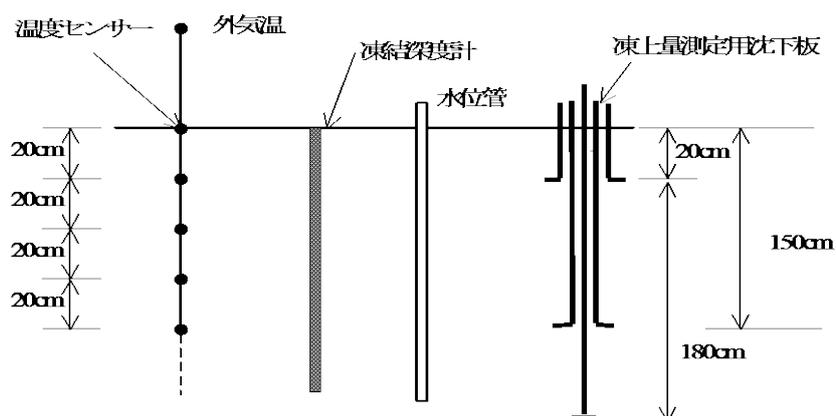


図-6-3 計測計器の埋設状況

つぎに、使用環境や立地条件などが施設内部の凍結環境に与える影響を調べた。

②調査地点 2 畜舎（施設区分 I）：観測期間 1997.11～1998.5

③調査地点 2 ミルクパーラー（施設区分 II）：観測期間 1997.11～1998.5

④調査地点 3 畜舎（施設区分 I）：観測期間 1998.12～1999.5

⑤調査地点 3 給飼舎 A（施設区分 I）：観測期間 1998.12～1999.5

⑥調査地点 3 給飼舎 B（施設区分 I）：観測期間 1998.12～1999.5

調査地点 2 では、畜舎およびミルクパーラーで床スラブ直下の地中温度と室内温を

計測した。図-6-4は調査地点3の見取り図であり、平面図には基礎部および床下で温度を計測した箇所を記している。これらの施設は、壁構造や使用方法、立地条件などが異なるが、基礎構造や床下の断面構造は共通の施設である。図-6-5は床下の断面構造である。調査地点3の各施設に、図-6-6に示すような配置で床スラブ（RC構造）と砕石の間に断熱材を敷設した。また、同図に示したように基礎部に埋設したセンサーは15cm間隔の最大で床表面下75～105cm（FL-750～1050）の範囲で設置した。図-6-7は、床下に埋設した断熱材の設置状況を平面的に示している。断熱材は、幅3.6mで端部まで連続的に敷設し、温度センサーは断熱材敷設中心部で計測している。なお、断熱工区から未敷設工区計測位置までは6mの間隔を設け、断熱材による影響が無いよう考慮した。

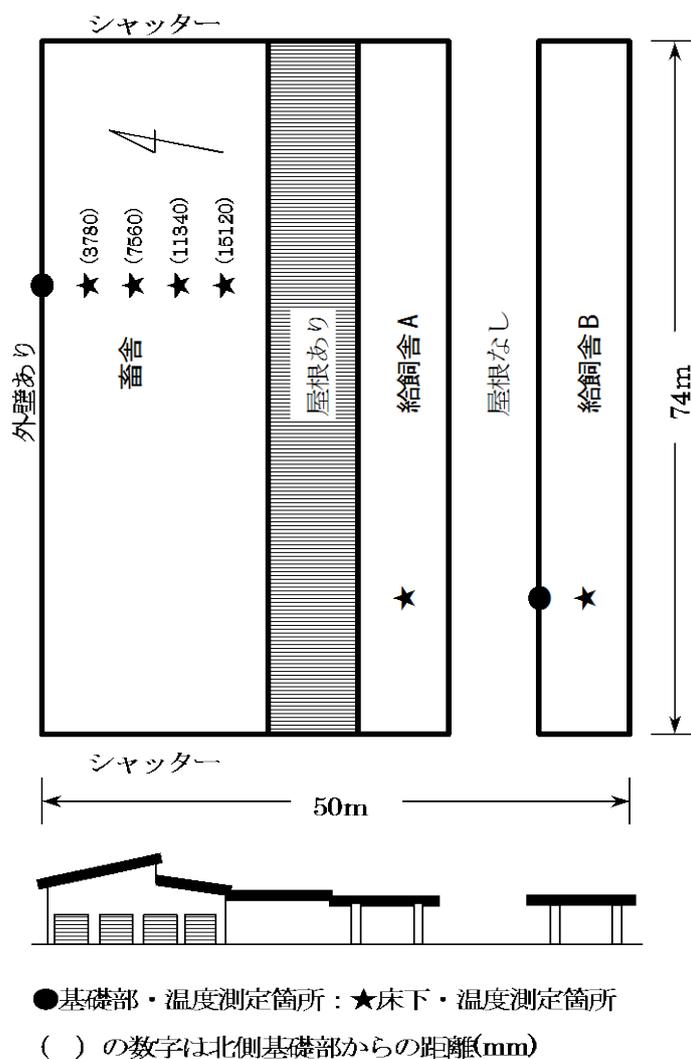


図-6-4 調査施設の見取り図（調査地点3）

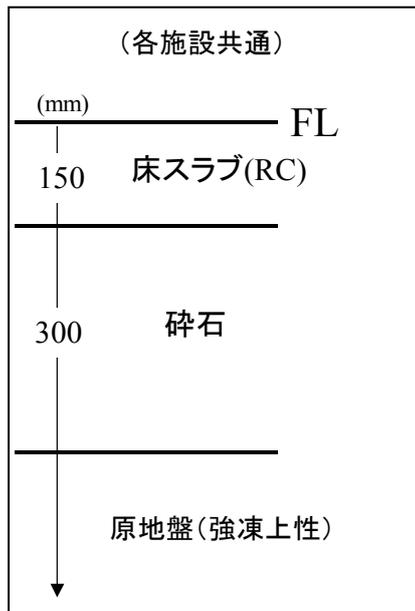


図-6-5 床下の断面構造 (調査地点 3)

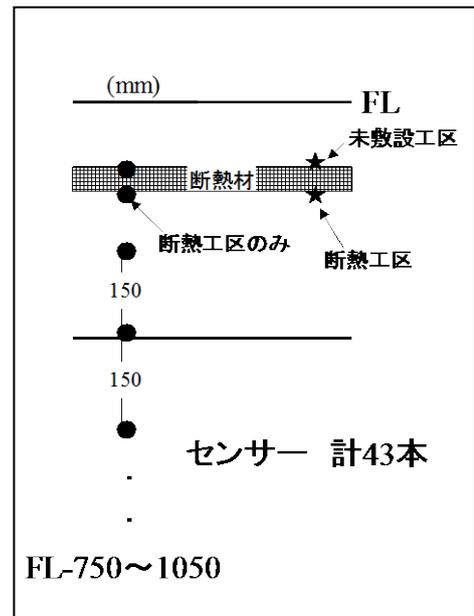


図-6-6 床下に敷設した断熱材の設置位置と温度測定深さ(調査地点 3)

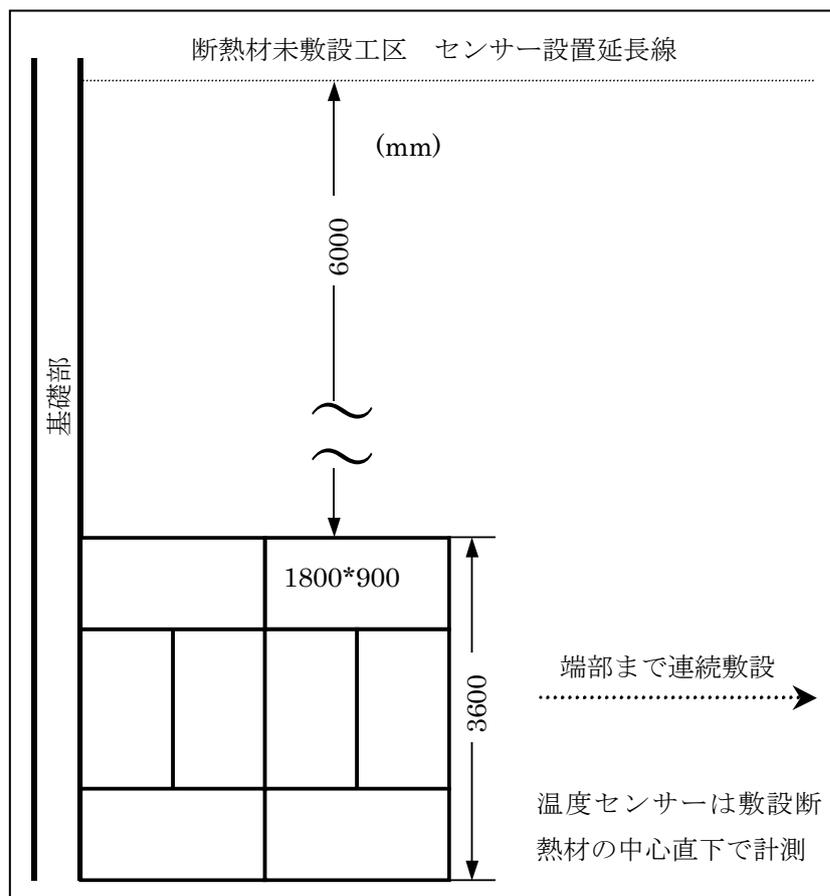


図-6-7 断熱材の設置状況 (調査地点 3)

6-4 結果と考察

6-4-1 各調査地点の気象状況と土質性状

図-6-8～10は各調査地点の積算寒度である。調査地点1は過去10年間のこの地域におけるAMeDASデータと比較するとやや暖冬の傾向にある。他の2地点については、ほぼ平年並みであった。なお、2年間の連続観測を行った調査地点1については、年度による気象条件に大きな違いは見られなかった。

各地点から採取した原地盤の試料で、各種の土質試験を行った。原地盤の土質性状を表-6-2に示す。各地点の土質は同様に細粒分含有率が多く、室内凍上試験(2章2-4-2c)の結果からも凍上性の強い地盤であることが推察された。

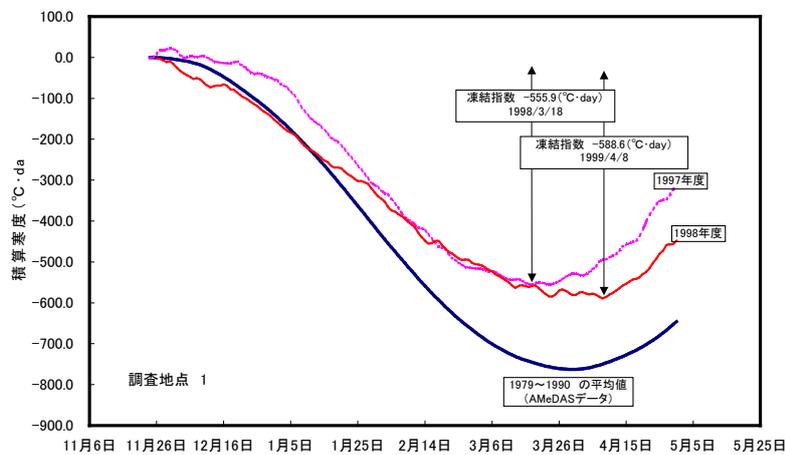


図-6-8 調査地点1の積算寒度

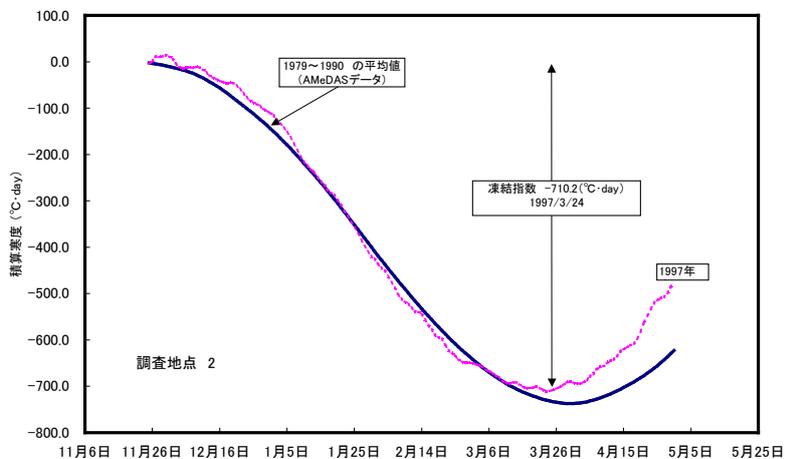


図-6-9 調査地点2の積算寒度

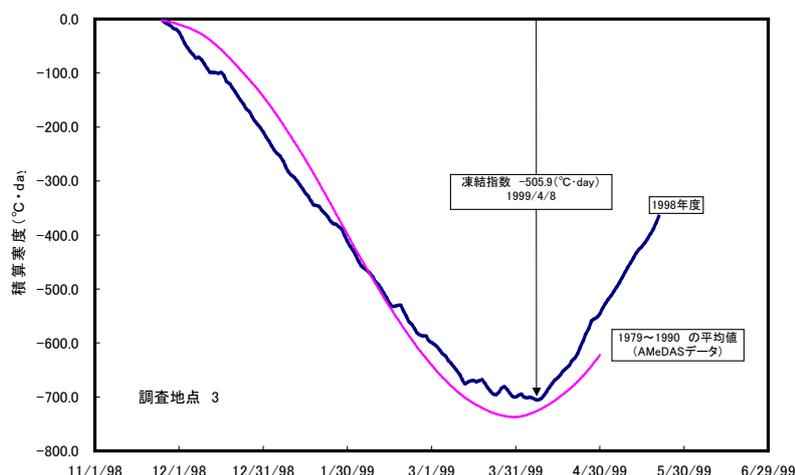


図-6-10 調査地点3の積算寒度

表-6-2 原地盤の土質性状

	調査地点1	調査地点2	調査地点3
自然含水比 w_n (%)	101.6	58.7	46.8
現場乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.682	0.949	1.130
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.423	2.767	2.601
最適含水比 w_{opt} (%)	48.2	39.3	38.2
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.053	1.231	1.232
塑性指数 I_p	45.3	28.6	22.9
細粒分含有率 (%)	63.3	74.4	49.7
凍上率 (%)	40%以上	40%以上	40%以上
日本統一土質分類	VH ₂	CH	MH

6-4-2 基礎断熱併用スカート断熱工法の効果

図-6-11は調査地点1の畜舎における凍結深さ(0℃線の位置)の推移である。同図には、積雪の有無による2年間分の結果が示してある。この節では、断熱工法の効果確認のため意識的に積雪を排除した1997年度の結果について述べる。なお、この凍結深さは深度毎に埋設した温度センサーの値から推定したものであり、実測したメチレンブルー凍結深度計の値ともほぼ一致していた。凍結深さは、断熱材の敷設により未処理工区と比べ減少しており、平均すると25cm程度の抑制効果があった。しかし、断熱工区においても断熱材以深に凍結線が進行しており、凍上性の強い原地盤では凍上が生じる可能性がある。図-6-12は凍上量の推移である。凍結深さが抑制されていたように凍上量も断熱工区が小さな値を示している。しかし、凍結線が原地盤まで到達していることによって断熱工区でも凍上が生じていた。この調査地点での基礎断熱工法は、住宅基礎の一般部(内部からの熱供給がある箇所)と同様な手法で屋

外部のみに対して施工した例である。このような条件では、設計上予想される凍結深さとして 40cm の深さを得るが、今回の結果は断熱工区でその値をやや上回る 50cm 程度の凍結深さであった。従って、畜舎のように内部からの凍結も想定する必要がある箇所では、従来のポーチ部や車庫部の手法を参考にした工法が必要である。しかし、畜舎の床面積は、一般住宅と比較にならないほど大規模な施設が多く、車庫部のような床下の全面断熱はむしろ建設コスト増に繋がってしまう。畜舎施設の規制緩和は、一般住宅とは異なる位置付けを明確にし、要求される機能や耐用年数に応じた経済的な設計を目指したものである。したがって、一般住宅用の断熱工法を用いるには問題点が多く、畜舎独自の工法提案には、後述する畜舎の特殊な使用方法などを考慮した

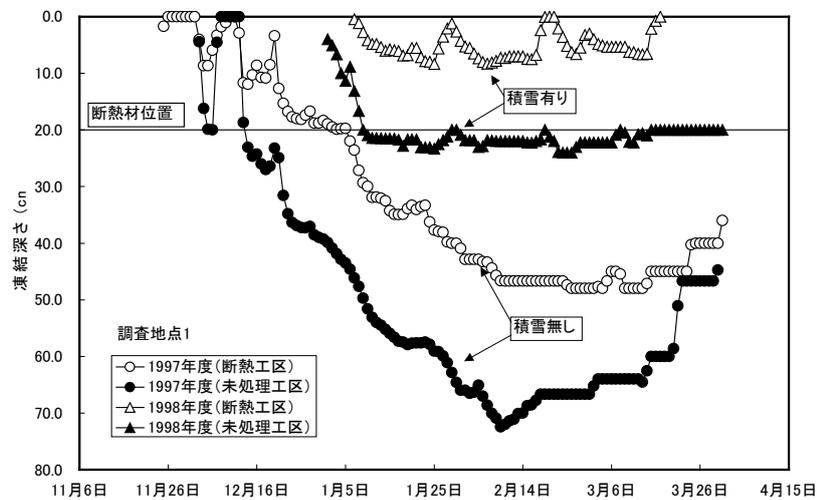


図-6-11 凍結深さの推移 (調査地点1 畜舎)

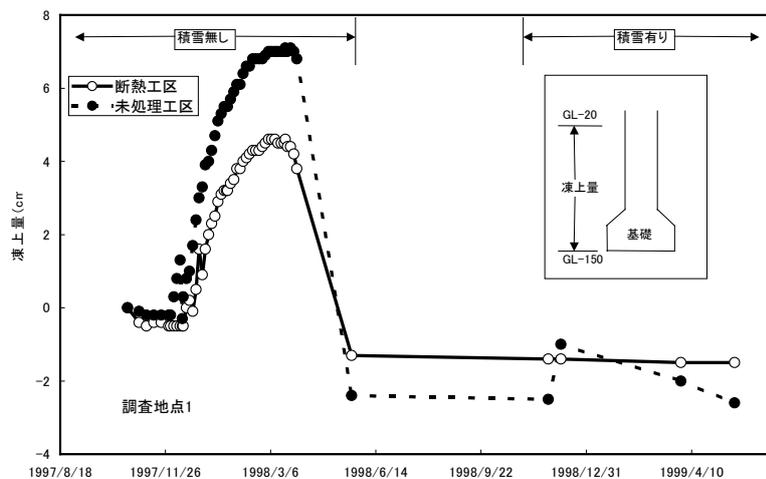


図-6-12 凍上量の推移 (調査地点1 畜舎)

総合的な検討が不可欠である。

6-4-3 施設区分の違いによる内部の凍結環境と積雪の断熱効果

6-4-2では、畜舎基礎に対して住宅の一般部に用いる基礎断熱工法を施工した場合、想定される以上の凍結が進行することを述べた。この理由として考えられた内部の熱供給条件の違いを検証するため、調査地点2に、隣接して築造されている畜舎とミルクパーラーにおいて施設内部の凍結環境を調査した。図-6-13は、外気温度の変化による各施設の床下温度等を示したものである。外気温の変動に対して、最も高い温度を示したのはミルクパーラー内の室温であり、暖房設備を有することから冬期間も常時プラスの温度を示している。同様にミルクパーラー内の床下（RCスラブと敷均し碎石の境界面）温度も室温の影響により、ほぼ0°C以上のプラス温度を継続していた。したがって、ミルクパーラーにおいては、施設内部からの凍結の進行は無いものと考えられる。これに対し、隣接する畜舎の床下温度は外気温とほぼ等しく、最も寒さの厳しい時には日平均温で-10°C以下の値を示していた。また、同畜舎における屋外部での基礎部周辺の地表面温度は、40cm程度の積雪下での測定であるため内部の床下温度よりも5°C程度高く推移していた。20cm以上の積雪が継続的に存在する場合、積雪の断熱効果によって凍結深さが大きく減少することが報告されている⁹⁾。このことから、積雪がある地域では、床面が常時露出した施設内部の方が屋外よりも過酷な凍結環境にあるといえる。

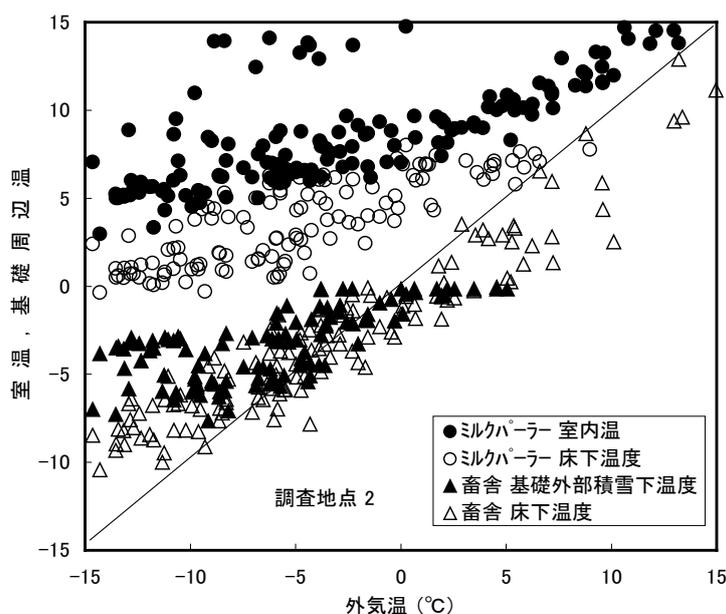


図-6-13 外気温と各施設内の温度の関係

積雪の断熱効果については、基礎部の断熱工法を施工した箇所（調査地点 1）で、積雪の有無によって観測した結果にも現れている。40cm 以上継続して積雪があった調査地点 1 では、積雪によって大幅な凍結深さの抑制が確認されている（図-6-11）。さらに、積雪を有した年度では、凍上量についてもほとんど観測されていない（図-6-12）。積雪が問題となる道路構造物などと違い、畜舎では、周囲の積雪が直接的な施設の機能低下にはならない。出入口など一部の局所的な箇所にのみ凍上抑制工法を適用し、周辺については積雪の断熱効果を考慮に入れることで基礎部の大幅なコスト削減が可能になると考えられる。特に、施主と施設管理者が共通することが多い畜舎施設では、積雪の断熱効果を理解した下で十分に適用が可能であると考えられる。

6-4-4 使用目的の違いによる凍結環境

最も過酷な凍結環境にある施設区分 I の畜舎では、内部の地盤凍結が問題になることを述べてきた。しかし、他の施設区分と比較しても床面積が大きい畜舎等に、床下全面への断熱材敷設はコスト面からも困難である。畜舎は、その使用目的によって敷き藁が存在する場合や家畜の排出する熱を期待できる場合がある。調査地点 3 では、このような使用環境の違いが施設内部の地盤凍結に与える影響を検討した。図-6-14 は、畜舎における床下温度の推移である。同施設は 12/29 に供用が開始された。同時に施設内部全面に 10cm 程度の敷き藁が敷かれ、家畜の居住が始まった（写真-6-6）。供用前は、未敷設工区で床下温度がマイナス温度を記録していたが、供用開始を境にして大幅な温度の上昇がみられた。供用後の畜舎内の床下温度は、冬期間終始 0℃付

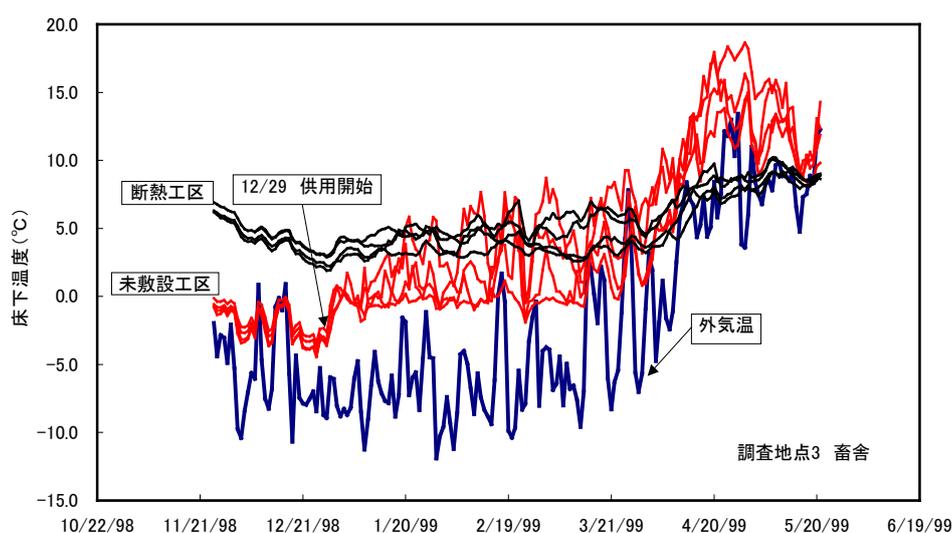


図-6-14 畜舎の床下温度（調査地点 3）



写真-6-6 畜舎内に敷かれた敷き藁の状態（調査地点3 畜舎）

近を推移しており、この施設内部での地盤凍結は生じなかったと推察される。図-6-15は、図-6-14の未敷設工区について供用開始日前後を抽出したものであり、給飼舎AとBの未敷設工区の床下温度も同時に表した。供用開始日以前については、畜舎と給飼舎の床下温度に明確な違いは無いが、供用開始日を境にして畜舎のみに温度上昇が見られている。このような、温度上昇の理由としては敷き藁の存在と家畜の放射熱による室温上昇が考えられる。家畜の放射熱による室温上昇は、干場¹⁰⁾によって道内の数箇所の畜舎で実測した例でも紹介されている。そこで、図-6-16は畜舎の室温と給飼舎の室内温度の比較である。家畜の居住や周囲に壁構造が無い給飼舎AおよびBと比較しても、畜舎の室内温に優位性は無く、家畜の存在が直接的に室内温に影響を与えている傾向はみられない。家畜の放射熱による影響は、周囲をある程度壁で覆われた施設でのみ期待できるものと考えられ、調査地点3の畜舎のように1方向のみの壁では、室内温は外気温とほぼ等しい。したがって、畜舎の床下温度の上昇は、敷き藁の断熱効果によるものと考えられることができる。

つぎに、図-6-17は同一の建築構成で立地条件の異なる給飼舎AとBの床下温度の比較である。畜舎から連続的に屋根が架けられ、畜舎が風除けの役割を果たしている給飼舎Aの床下温度は給飼舎Bと比較するとやや高い温度である。このように立地条件によっても凍結環境が異なることが確認された。

図-6-18は各施設の基礎部で深度毎に計測した地中温度からの凍結深さである。敷き藁が存在する畜舎の断熱工区では凍結線の進行は見られない。また、同施設の未敷設工区でも床面が露出した給飼舎Bの断熱工区と同程度の凍結深さであった。この

ことから、敷き藁の断熱効果は、断熱材と同等の効果を発揮したと考えることができる。さらに、給飼舎の未敷設工区では、凍結線が凍上性の原地盤まで深く進行しており、断熱工区を除いては多くの床面のクラックが観察された。なお、このようなクラックは、畜舎内では確認されていない。

以上の結果を総合すると、施設区分Ⅰに該当する施設では、施設内部の凍結抑制が重要であり、一般建築物とは異なった抑制工法の提案が必要である。予め施設の使用方法を考慮に入れ、敷き藁の有無や積雪条件を判断して設計に盛り込むことが有効で

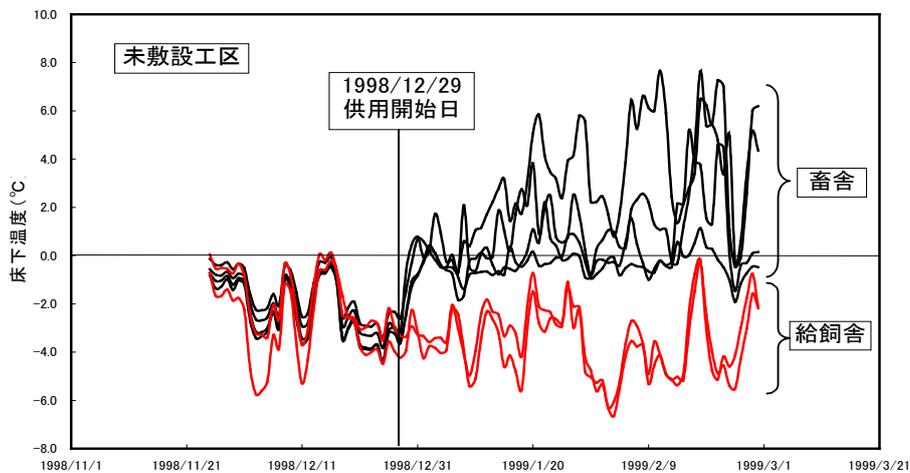


図-6-15 供用開始期の床下温度（調査地点3）

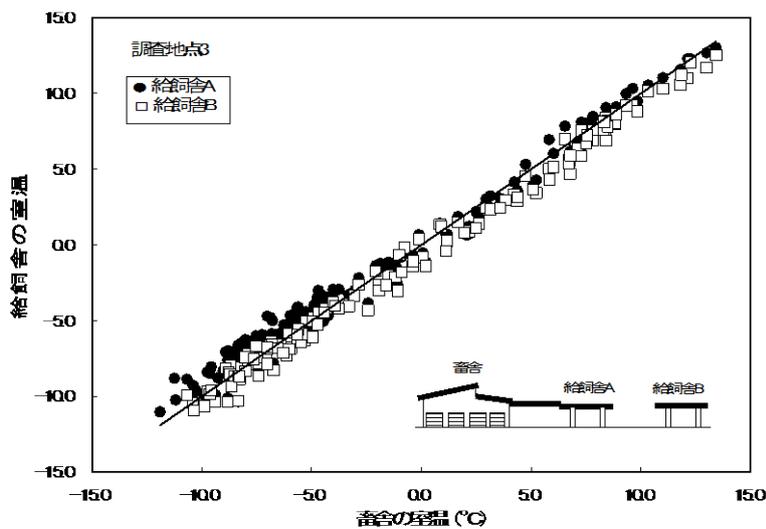


図-6-16 畜舎の室温を基準とした他施設の室温

あり，部分的な断熱工法の導入や施設管理者への意識の徹底が重要である。また，一部の施設に生じる可能性がある床面の凍上被害についても施設の機能性を考慮した上で過度の凍上抑制工法は用いず，ある程度の凍上を許容することも選択肢として考えられる。ただし，このような場合は，床面の凍上による基礎部への悪影響や床面変位の自由度を増すため，従来一般的に用いられている床スラブと基礎部の結合設計を廃

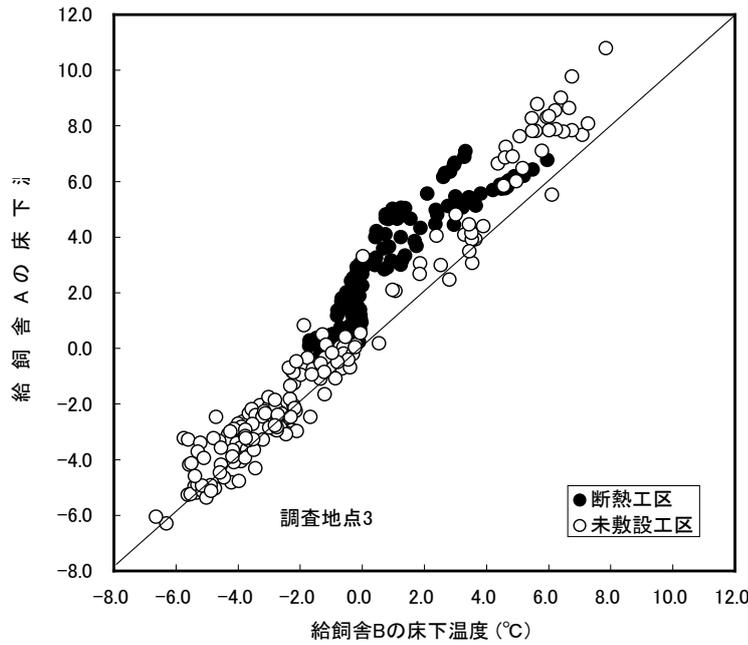


図-6-17 立地条件の違いによる床下温度の比較

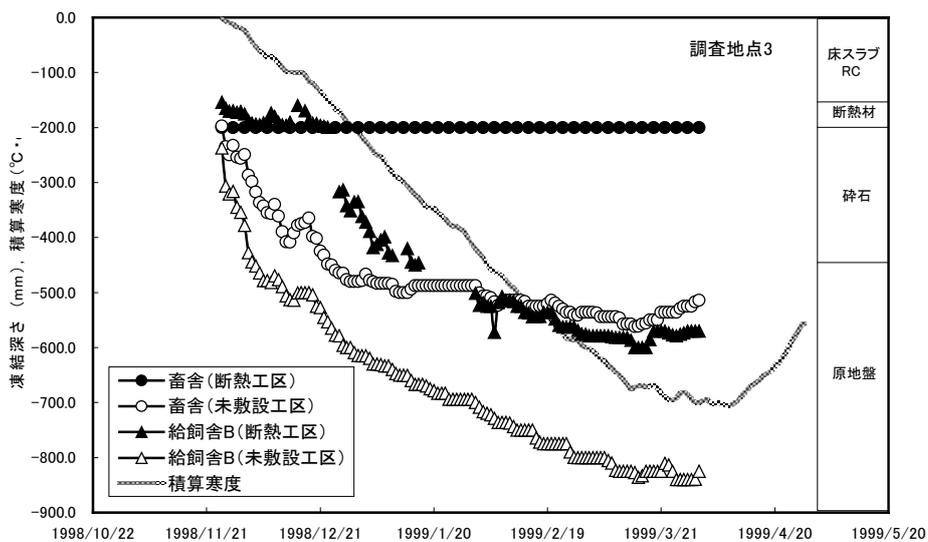


図-6-18 各施設の凍結深さの推移 (調査地点3)

し、独立した床構造にする必要がある。これらの考え方を基にして、畜舎独自の基礎凍上対策として図-6-19に示したような幾つかのパターンを提案する。

最後に、近年敷き藁の材料も多様化し、チップ化した木材廃材などの利用も多くなってきている。今後の検討課題としては、これらの材質や敷厚による影響を明確にする必要がある。

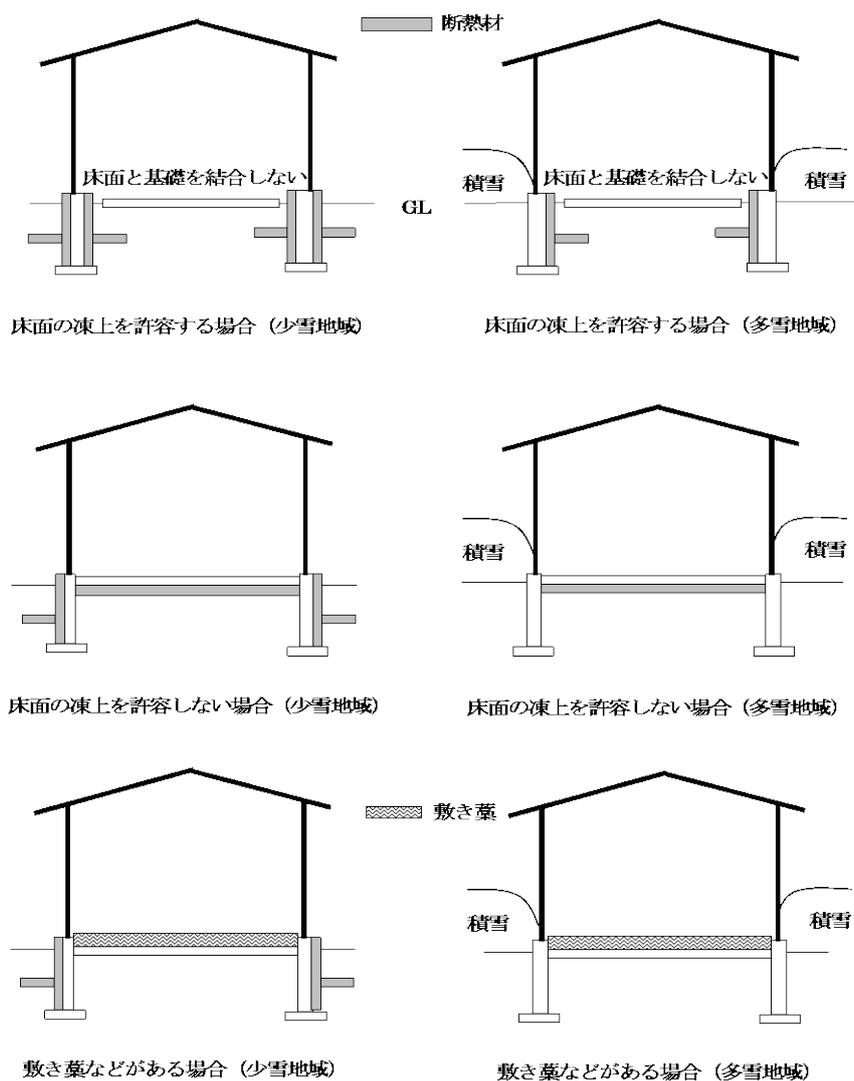


図-6-19 畜舎を対象とした凍上対策の基本案

6-5 まとめ

畜舎関連施設において、施設区分や使用環境が地盤凍結に与える影響を検討した。結果は以下の通りである。

- 1) 畜舎に対して一般建築物に用いられている基礎断熱併用スカート断熱工法を施工した結果、凍結深さの抑制に効果があることが確認された。しかし、一般建築物に比べると施設内部からの熱供給条件の違いによって、畜舎の凍結深度は深部まで達することが確認された。
- 2) 施設区分の違いが、内部の凍結環境に与える影響を検討した。施設内に作業用用の暖房設備を有するミルクパーラーの室温は、冬期間も終始プラス温度で推移しており、これに伴って床下温度もほぼ 0℃以上の値を継続していた。これに対し、隣接する畜舎の床下温度は外気温とほぼ等しく、計測期間中の最低日平均温度は-10℃以下の値を示していた。また、畜舎外部の地表面温度は、積雪の断熱効果により畜舎の床下温度よりも 5℃程度高い値になることが判った。
- 3) 使用方法が異なる同一の区分の施設で、凍結環境を比較した。床面全面に敷き藁が敷かれた畜舎の床下温度は、終始 0℃付近を推移しており、敷き藁の断熱効果がみられた。周囲に壁構造が無く床面が露出した給飼舎の凍結深さは、凍上性の原地盤まで深く進入しており、これにより床面に多くの凍上によるクラックが生じていた。
- 4) 規制緩和の対象となる施設区分 I の畜舎に対して、畜舎特有の使用方法などを考慮に入れた独自の凍上対策工法の提案を行った。

第 6 章の参考文献

- 1) 姫田尚：畜舎建築の低コスト化と規制緩和，第 12 回農業施設研究会資料，pp.41～49，1997.
- 2) 日本畜産施設機械協会：畜舎設計基準・同解説，1997.
- 3) 小林敏道，苫米地 司他：積雪寒冷地における畜舎施設の建設コスト緩和に関する研究，第 16 回日本雪工学会大会論文報告集，pp.17～18，1999.
- 4) 土谷富士夫：カナダにおける農用建造物の凍上対策設計指針，第 37 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集，pp.29～32，1988.
- 5) 藤村成夫，服部勝雄，阿部宏佑：断熱材を用いたベタ基礎の凍上防止の試験，第 3 回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.288～293，1987.
- 6) 藤村成夫：建物の凍上被害と対策，土と基礎，Vol.38，No.6，pp.78～80，1990.
- 7) 伊福部宗夫：断熱材による道路の凍上防止試験，北海学園大学工学部研究報告，No.1，1972.
- 8) 北海道建設部建築指導課：スカート断熱工法設計・施工マニュアル，1997.
- 9) 福田正巳：自然積雪下の土の凍結の深さの推定法について，北海道大学低温科学研究所業績，2446 号，pp.55～74，1982.
- 10) 干場信司：畜舎等農業建築物に対する法規制の考え方について，第 12 回農業施設研究会資料，pp.50～61，1997.

第 7 章 結論

第7章 結論

本研究は、凍上抑制工法に関わる問題として、火山灰土や石灰安定処理土の凍上特性を明らかにし、さらに各種の凍上抑制工法の効果について述べてきた。

本研究によって得られた結論は、以下の通りである。

粗粒火山灰土の地盤凍結に関わる材料特性（第3章）

- 1)従来型の細粒分含有率と強熱減量による凍上性判定では、規定値内に凍上性の火山灰土が出現する頻度は少ないものの、規定値外に多くの非凍上性のものが存在した。
- 2)自然含水比と土粒子の密度による火山灰分類を用いると、自然含水比が低いVs1とVs2に非凍上性材料が分布することが判った。またVs1とVs2で比べると、土粒子の密度が小さいVs2に非凍上性の火山灰土が多くなる傾向が見られた。
- 3)凍上性との関連で両指標を比較すると、自然含水比が簡易に凍上性を評価可能であり、自然含水比(ω_n)が40%以下のものには、凍上性の火山灰土は存在しないことが確認された。しかし、 ω_n が40~80%の範囲には、凍上性と非凍上性が混在していた。この点に関して、自然含水比と最適含水比(ω_{opt})の関係より非凍上性は $\omega_n \approx \omega_{opt}$ 、凍上性は $\omega_n > \omega_{opt}$ の関係になることが確認され、自然含水比と最適含水比の関係を用いることによる凍上性の混在領域が分類可能であることを示した。凍上性と含水比特性が関連したことは、土粒子の密度や粒度組成によるものではなく、風化の度合に影響された粒子性状によるものと推察された。
- 4)本結果から、新たな火山灰土の凍上性判定法として、 ω_n と ω_n/ω_{opt} の関係による4つの分類領域を設定し、火山灰土の簡易凍上性評価法を提案した。
- 5)凍結・融解履歴を与えた火山灰土は、Marsalの破碎率および細粒分の増加から微小ではあるが、全ての火山灰土で粒子破碎が確認された。しかし、凍結・融解作用による破碎は、1サイクル目の凍結・融解作用で生じており、サイクル数の増大は破碎性の増加には繋がらないことが判った。このことは、一部の粒子の脆弱箇所が初期の凍結・融解作用で破碎するものの、それらは継続的に進行するものではないことを意味している。
- 6)締固めによる破碎は、火山灰土の種類によって明確な差として現れていた。しかし、凍結・融解による締固め後の粒子破碎については、凍結・融解サイクルが破碎性を増大させるような傾向は見られなかった。凍結・融解作用による破碎は、微小であり、一部の脆弱な粒子に生じるような凍結・融解による破碎は締固めによって生じる破碎に含まれるものであると考えられた。本結果から、凍結・融解作用が粒子を脆弱化させ、締固めのような外力に対して破碎性を増加させるような現象は生じな

いことが確認された。

7) Marsal の破碎率は、自然含水比および土粒子の密度と相関が見られ、自然含水比が高いほど、また土粒子の密度が小さなものほど破碎が顕著であった。ただし、両指標を単一で使用するには例外的な火山灰土もあり、Vs 分類のような座標上で破碎性を捕らえることが理想的であった。

石灰安定処理土の凍上抑制効果に関わる材料特性（第4章，第5章）

- 1) 含水比が高い試料では石灰を主体とした改良材が有効であり、改良材添加による含水比の低下が強度増加に大きく寄与していた。また、短期強度は改良後の含水比と最適含水比との差により決まるが、長期強度はポズラン反応の影響もあって、改良材の性状により異なった。
- 2) 改良材を添加することにより土の凍上量を減少させることができ、添加量や養生日数の増加によりその効果が増大した。また、改良材としては石灰がより有効であった。
- 3) 土の凍上性は強度と相関が高く、CBR を 100 程度まで改良すると凍上率を 5% 以下にすることが可能であった。
- 4) 凍上抑制効果は、石灰添加率や養生日数によって変化し、特に養生日数による影響が卓越していた。
- 5) 意識的に粒子間結合力を減少させた混合養生が一般的な締固め養生よりも顕著に凍上抑制効果が現れた。このことから、従来安定処理土の凍上抑制因子の一つと考えられていた粒子間結合力の増大（固化）は凍上抑制に直接寄与していないことが判った。
- 6) 凍上抑制効果が養生日数の影響を受けていたのに対し、透水係数の減少傾向は 5 日程度で一定値に収束し、30 日まで延長してもほとんど変化していなかった。粒子間結合力と併せて抑制因子と考えられていた透水性の変化も凍上抑制因子としては関連が薄いことが確認された。
- 7) 凍上量は養生日数を設けなくても無添加に比べ減少しており、pF 試験の結果から石灰の添加によって毛管力が減少することが確認された。毛管力の減少は団粒化による骨格構造の変化と考えられるが、さらに団粒化の原因であるカルシウムイオンの吸着が土粒子表面の電位ポテンシャルを低下させ吸着水膜を減少させる効果があり、両者が複合的に作用したと考えられた。
- 8) 吸着水量と凍上量は、高い相関関係にあり吸着水量の減少が凍上抑制に寄与していることが示された。また、これらの関係は養生方法や試料によって異なった関係になっており、毛管力や透水性の違いが理由として考えられた。これら結果より石灰

混合から締固めへの移行時間は凍上抑制効果に影響しないことが判り、凍上抑制工法としてはプラント混合方式など新たな工法開発の足掛かりになるものと思われる。

- 9)原位置においても、石灰安定処理に凍上抑制効果があることが確認され、凍上量は添加率 10%で凍上抑制層として砂を用いたタイプと同値程度の 4mm に抑えられた。
- 10)原位置で実測された凍結深さは砂と比較すると現状土を用いたタイプが 20cm 程度浅い位置に存在し、凍上性の土を石灰安定処理することにより凍上抑制層の置換厚を減ずることが可能であった。

その他の構造物における凍上抑制工法とその効果（第 6 章）

- 1)畜舎に対して一般建築物に用いられている基礎断熱併用スカート断熱工法を施工した結果、凍結深さの抑制に効果があることが確認された。しかし、一般建築物に比べると施設内部からの熱供給条件の違いによって、畜舎の凍結深度は深部まで達することが確認された。
- 2)施設区分の違いが、内部の凍結環境に与える影響を検討した。施設内に作業用の暖房設備を有するミルクパーラーの室温は、冬期間も終始プラス温度で推移しており、これに伴って床下温度もほぼ 0℃以上の値を継続していた。これに対し、隣接する畜舎の床下温度は外気温とほぼ等しく、計測期間中の最低日平均温度は-10℃以下の値を示していた。また、畜舎外部の地表面温度は、積雪の断熱効果により畜舎の床下温度よりも 5℃程度高い値になることが判った。
- 3)使用方法が異なる同一の区分の施設で、凍結環境を比較した。床面全面に敷き藁が敷かれた畜舎の床下温度は、終始 0℃付近を推移しており、敷き藁の断熱効果がみられた。周囲に壁構造が無く床面が露出した給飼舎の凍結深さは、凍上性の原地盤まで深く進入しており、これにより床面に多くの凍上によるクラックが生じていた。
- 4)規制緩和の対象となる施設区分 I の畜舎に対して、畜舎特有の使用方法などを考慮に入れた独自の凍上対策工法の提案を行った。

最後に、これまで凍上対策工法としては、置換工法が主流として扱われてきた。この方法によって多くの凍上問題が克服されてきたが、近年の環境問題や建設コストの削減に対しては、幾つかの問題点も抱えている。凍上は、土中で生じる現象のため、被害後の対策が困難であり、被害が生じた場合の改修に大きな費用を必要としてしまう。このことが、信頼性の高い置換工法の画一的な利用を促進し、逆に他の凍上対策工法の利用を阻害していると考えられる。道路の凍上対策は、言わば最も過酷な凍結環境下での抑制技術である。他の構造物に道路と同様な凍上対策を施すことは、場合によって過剰な設計条件を与えることになり、建設コストの高騰に繋がってしまう。

今後の課題としては、各種の凍上対策工法を様々な構造物に対応させながら、従来までの凍上を完全に抑制する技術から、構造物の用途に応じた対策工法の開発が促進されることが望まれる。

謝辭

謝辞

本論文をまとめるにあたり、北海道工業大学 神谷光彦 教授には終始御親切な御指導と激励を賜りました。さらに、論文執筆中は先生より格段の御配慮を頂いたこと、ここに厚くお礼申し上げます。

北海道工業大学 土岐祥介 教授および笠原篤 教授、苫米地司 教授には、本論文の御審査を賜り、貴重な御意見や今後の研究に対するアドバイスを頂きました。ここに、記して謝意を表します。また、北海道工業大学大学院建設工学専攻 専攻長 加来照俊 教授には、論文作成のアドバイスや学位申請に際しての様々な御協力と御配慮を賜りましたこと心より感謝いたします。

北海道工業大学 亀山修一 助教授には、舗装工学の面から凍上と道路構造物に関連する貴重な御意見を頂くと共に、暖かい励ましの言葉を頂きました。論文作成に苦勞していた時期に頂いた励ましの御言葉は、生涯忘れることができない貴重な財産になりました。

北海道大学大学院 堀口敬 助教授（元北海道工業大学助教授）には、筆者が大学に勤務してから、公私に渡り多くの御厚情を賜りました。心よりお礼申し上げます。

北海道大学大学院 三浦清一 教授には、火山灰研究に携わる機会を与えて頂き、火山灰土に関する多くの知見を授けて頂きました。ここに、記して謝意を表します。本論文で扱った火山灰土の凍上性は、今後の研究テーマとして、さらに発展させるよう努力していく所存であります。

北海道士質コンサルタント株式会社 池田晃一 氏には、火山灰土に関して地質学的見地からの御指導を賜り、本論文で扱った火山灰土の試料収集および火山灰同定に御協力頂きましたこと深く感謝いたします。

北海道開発局開発土木研究所 小野寺康浩 氏には、筆者が卒業研究で御世話になって以来、今日まで研究面のみならず多方面からの御支援を賜りました。心よりお礼申し上げます。

本論文で取り扱った土の凍上問題に関しては、研究開始当初の筆者の無知に対し、多くの研究者の方々から、御厚志な御指導を賜りました。帯広畜産大学 土谷富士夫 教授には、論文作成の御指導を賜りました。北見工業大学 鈴木輝之 教授および北海学園大学 小野丘 教授、北海道大学大学院 赤川敏 教授には、日頃から暖かい御言葉と凍上に関しての貴重な御意見や御指導を賜りました。ここに、記して謝意を表します。

また、研究面で御世話になりました北海道開発局および日本道路公団などの関係各位に紙面にてお礼申し上げます。

本論文は、筆者が北海道工業大学の助手として採用されて以来、今日までの研究成果を取りまとめたものであり、神谷光彦 教授および土岐祥介 教授の地盤工学研究室において、過去のゼミ学生の努力によって蓄積された成果によるものです。数多くの卒業生に心より感謝すると共に、今後一層の努力を惜しまないことをお約束し、各位に対してのお礼の言葉とさせていただきます。

最後に、本論文の完成を心から喜んでくれた両親と、不平も言わずに協力してくれた妻、そして娘に感謝します。

平成 13 年 3 月

研究業績目録

研究業績目録

●著書

- 1) 雪氷関連用語集 (1999) , 社団法人 雪センター, 分担執筆

●査読論文

[本研究に直接関係するもの]

- 1) 川端伸一郎・神谷光彦・多田哲司(1992. 10) : 土の凍上試験方法と凍上特性について, 凍害対策と寒さの利用に関するシンポジウム発表論文集, pp. 99~102
- 2) 川端伸一郎・神谷光彦(1995. 10) : 含水比を指標とした火山灰土の工学的性質について, 火山灰質土の性質とその設計・施工に関するシンポジウム発表論文集, pp. 211~216
- 3) KAWABATA Sinichiro and KAMIYA Mitsuhiro (1996.6) : Strength and frost heave properties of stabilized soils using lime and slag, Proceedings of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp.427-430
- 4) KAWABATA Sinichiro, KAMIYA Mitsuhiro and OHSAWA Masato (1997.4) : Test Construction of Frost Blanket Using Lime-stabilized Soil, Proceedings of International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, pp.241-246
- 5) 川端伸一郎・神谷光彦(1997. 12) : 石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性, 農業土木学会論文集, Vol. 65, No. 6, pp. 105~pp. 111
- 6) 川端伸一郎・神谷光彦・大沢正人(1998. 4) : 試験盛土における石灰安定処理の凍上抑制効果, 土と基礎, Vol. 46, No. 4, pp. 25~pp. 28
- 7) KAMIYA Mitsuhiro, KAWABATA Sinichiro and IKEDA Koichi, SATO Atsuko(1998.10): Engineering Properties of Volcanic Soils in Hokkaido Japan, Proceedings of the International Symposium on Problematic Soils, pp.207-210
- 8) 川端伸一郎・神谷光彦(2000. 12) : 水分特性の変化が石灰安定処理土の凍上特性に与える影響, 土木学会論文集, No. 666/III-53, pp. 261~pp. 268

[本研究に間接的に関係するもの]

- 1) 神谷光彦・川端伸一郎(1993. 11) : 飽和-不飽和の繰返しによる泥炭の圧縮特性, 高有機質土地盤の諸問題に関するシンポジウム論文集, pp. 155~160

●その他の論文

- 1) 川端伸一郎, 神谷光彦, 柄澤 治(1995. 3) : 石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性, 北海道工業大学研究紀要, No. 23, pp. 201~pp. 210
- 2) 川端伸一郎, 神谷光彦, 中村宏彰(1997. 3) : 石灰安定処理土の凍上性と水分特性, 北海道工業大学研究紀要, No. 25, pp. 203~pp. 210

●その他学術講演等

[本研究に直接関係するもの]

- 1) 神谷光彦・多田哲司・川端伸一郎(1992) : 土の凍上試験方法の改良について, 土質工学会北海道支部技術報告集, No. 32, pp. 57~60

- 2) 柄澤 治・川端伸一郎・神谷光彦・小向利雄(1994. 2) : 石灰と微粉末スラグを用いた安定処理土の強度と凍上性, 土質工学会北海道支部技術報告集, No. 34, pp. 248~251
- 3) 川端伸一郎・神谷光彦(1994. 6) : 北海道の火山灰質土の工学的特性について, 第29回土質工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 249~250
- 4) 川端伸一郎・神谷光彦・柄澤 治(1994. 7) : 石灰系固化材を用いた安定処理土の強度と凍上性, 平成6年度農業土木学会大会講演会要旨集, pp. 88~89
- 5) 川端伸一郎・神谷光彦・柄澤 治(1994. 10) : 石灰による安定処理土の強度・凍上特性, 第43回農業土木学会北海道支部研究発表会要旨集, pp. 92~95
- 6) 川端伸一郎・神谷光彦(1995. 2) : 石灰を用いた安定処理土の凍上特性について(第二報), 土質工学会北海道支部技術報告集, No. 35, pp. 248~251
- 7) 川端伸一郎・神谷光彦(1995. 7) : 粗粒火山灰土の凍上性の判定について, 平成7年度農業土木学会大会講演会要旨集, pp. 88~89
- 8) 川端伸一郎・神谷光彦(1995. 9) : 含水比が石灰安定処理土の凍上特性に与える影響について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp. 1422~1423
- 9) 神谷光彦・川端伸一郎(1995. 10) : 石灰安定処理による凍上抑制, 第21回日本道路会議一般論文集(B), pp. 72~73
- 10) 川端伸一郎・神谷光彦(1996. 2) : 建設残土を用いた試験盛土の石灰安定処理による凍上抑制, 地盤工学会北海道支部技術報告集, No. 36, pp. 25~30
- 11) 神谷光彦・池田晃一・佐藤厚子・川端伸一郎(1996. 2) : 北海道の火山灰質土の締固め特性, 地盤工学会北海道支部技術報告集, No. 36, pp. 99~102
- 12) KAWABATA Sinichiro and KAMIYA Mitsuhiro (1996.5) : Strength and frost heave properties of stabilized soils using lime and slag, Summary papers of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp.143-144
- 13) 神谷光彦・池田晃一・佐藤厚子・川端伸一郎(1996. 7) : 北海道の粗粒火山灰質土の締固め特性, 第31回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 543~544
- 14) 中村宏彰・川端伸一郎・神谷光彦(1996. 9) : 石灰安定処理土の凍上と水分特性について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集3-B, pp. 466~467
- 15) 中村宏彰・川端伸一郎・神谷光彦(1997. 2) : 石灰安定処理土の水分特性が凍上性に与える影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, No. 37, pp. 141~146
- 16) 川端伸一郎・中村宏彰・神谷光彦(1997. 7) : 石灰安定処理土の水分特性が凍上性に与える影響について, 第32回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 1181~1182
- 17) 川端伸一郎・神谷光彦(1998. 2) : 石灰安定処理土の水分特性が凍上性に与える影響(第二報), 地盤工学会北海道支部技術報告集, No. 38, pp. 29~34
- 18) 川端伸一郎・神谷光彦・苫米地司・干場信司(1998. 7) : 断熱工法による畜舎基礎の凍上抑制試験, 1998年度農業施設学会大会講演要旨, pp. 546~547
- 19) 川端伸一郎・神谷光彦・苫米地司・干場信司(1998. 10) : 断熱工法による畜舎基礎の凍上抑制試験, 第47回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集, pp. 68~71
- 20) 川端伸一郎・神谷光彦・中村宏彰(1998. 10) : 石灰安定処理土の水分特性が凍上性に与える影響, 1998年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 55
- 21) 川端伸一郎・神谷光彦(1999. 7) : 石灰安定処理土の凍上性と水分特性の関係について, 第34回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 1, pp. 909~910
- 22) 川端伸一郎・苫米地司・神谷光彦・干場信司(1999. 10) : 畜舎の建築構造が地盤凍結に与える影響, 1999年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 40
- 23) 川端伸一郎・神谷光彦・土岐祥介・池田晃一(2000. 9) : 凍結・融解履歴が粗粒火山灰土の粒子破碎性に与える影響, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ部門B, pp. 357~358
- 24) 川端伸一郎・神谷光彦・土岐祥介(2001. 2) : 火山灰土の凍上性簡易判定法について, 地盤工学会北海道支部技術報告集, No. 41, pp. 1~8

[本研究に間接的に関係するもの]

- 1) 川端伸一郎・神谷光彦(1991)：粗粒材料の剪断強さと吸水率について，平成3年度農業土木学会大会講演会要旨集，pp. 462～463
- 2) 神谷光彦・川端伸一郎(1995. 7)：短周期の繰返し載荷による泥炭の圧縮特性，平成7年度農業土木学会大会講演会要旨集，pp. 98～99
- 3) 神谷光彦・川端伸一郎(1996. 6)：定ひずみ速度圧密試験による泥炭の圧密係数について，平成8年度農業土木学会大会講演会要旨集，pp. 582～583
- 4) 川端伸一郎・神谷光彦・山口秀治(1996. 9)：下水汚泥焼却灰と建設発生土の混合による材料への有効利用，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集7，pp. 244～245
- 5) 神谷光彦・川端伸一郎・井上京(2000. 8)：泥炭地の地盤変動の原位置観測，平成12年度農業土木学会大会講演会要旨集