

用排水路の凍上対策における側壁高と積雪を考慮した置換厚さの設計手法の検討

武市 靖*

用排水路の凍上対策において置換工法を用いる場合、裏込め砂利厚の設計手法を明確にする必要がある。本論文では、現場観測データと熱伝導解析モデルにより、用排水路の壁高の違いと積雪の断熱効果により影響される凍結侵入形態を定量的に明らかにした。これらの解析結果に基づき、具体的な裏込め砂利厚の設計手法を検討し、現場適用性の検証を行った。

Key Words : *trough, frost protection, replacement method, snow cover insulation*

1. ま え が き

寒冷地において、地域内の道路や農地等の基盤整備にともなう用排水路の築造・改修が進むにつれ、凍上被害は年々、増加傾向にあり、凍上対策の見直しが必要となってきた。

用排水路が土水路で築造されていた当時は、その法面自体が凍上に対し順応し、緩和する機能を有していた。土水路の法面周辺は植生で被覆されていたり、法面勾配が緩いため着雪しやすく、早期に積雪で断熱されて凍結の侵入が抑えられていた。そのため、少雪寒冷の地域を除いて、用排水路の凍害はほとんど問題にならなかった。

U型・V型コンクリートトラフ等で築造・改修された剛性の用排水路は、地盤の凍上や凍結・融解作用による熱的・力学的作用に対してある程度抵抗できても、凍上力のような大きな力にはほとんど無力である。凍害を受けた用排水路では、背面地盤の押し出しによる側壁のほらみや倒壊等の傾倒破損に集中しているが、天端が不揃いになる波打ち現象も見られる。用排水路背部は、側壁面と地表面から冷却されるため、凍結の侵入形態とそれに伴う凍上力の作用方向は複雑で、一般的な凍上現象に係わる要因の他に、側壁の高さ・勾配、積雪状態、のり面背後の土質・地形等の要因が大きく影響する^{1)~3)}。

用排水路の凍害は、少雪寒冷地域の北海道の中央部・東部や⁴⁾、寒さが北海道ほど厳しくない他県^{5),6)}でも発生し、裏込め砂利厚の増加を検討している。一方、多雪地域では凍害を受けにくいから、裏込め砂利厚を低減あるいは省略したいという要望が出ている。また、従来のコンクリートトラフの凍上対策の指針は、主に側壁高(以下、壁高と略称する)が1m以上の大型トラフを対象としたもので^{7),8)}、小型トラフに対するものは、その準用

や経験値等によるものがほとんどである。その結果、置換工法における裏込め砂利厚が、過小あるいは過大に設定されて実態にそぐわない場合があり、壁高や積雪を考慮した裏込め砂利厚の設計手法を検討する必要がある。

このような凍上対策における問題点を検討するために、十勝地方の池田町に用排水路の観測現場を築造し、1990年11月~1992年4月の冬期間の調査・観測を行った^{9),10)}。さらに、気象条件が異なる北海道内の各地でも用排水路の凍結深観測を実施して検証を行うとともに、気象データにより積雪を考慮した凍結指数、いわゆる確率凍結指数の算出とその利用に当たっての簡便化を図った¹¹⁾。

本論文は、壁高と除雪・非除雪の違いによる凍結の侵入形態を定量的に明らかにし、置換すべき裏込め砂利厚の設計手法について検討を行ったものである。

2. 観測の概要

観測現場では、側壁高が300, 450, 600及び1200mmのV型用排水路(以下、Vトラフと略称する)のそれぞれについて、裏込め砂利厚を4通りに変えたものを築造し、除雪と非除雪の状態で観測を行った。これらの断面は、北海道内での設計指針の見直しをするために、トラフの凍害状況と既存の裏込め砂利厚等を考慮して設定した。

図-1には各トラフの設置現場の平面図と縦断図を示した。各Vトラフの横断方向の凍結深さ、天端の水平変位、積雪深(トラフの天端と底板部)を週2回の間隔で観測し、除雪断面については降雪がありしだい除雪を実施した。詳細な検討対象としたv600タイプの4断面については、地温分布が求められるように、それぞれ片側の側壁背部に30点の熱電対と変位計を設置し、地温、気温及び水平変位を1時間間隔で自動計測した。なお、観測現場における凍結指数は、1990年~1991年の冬は

*正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科
(〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)

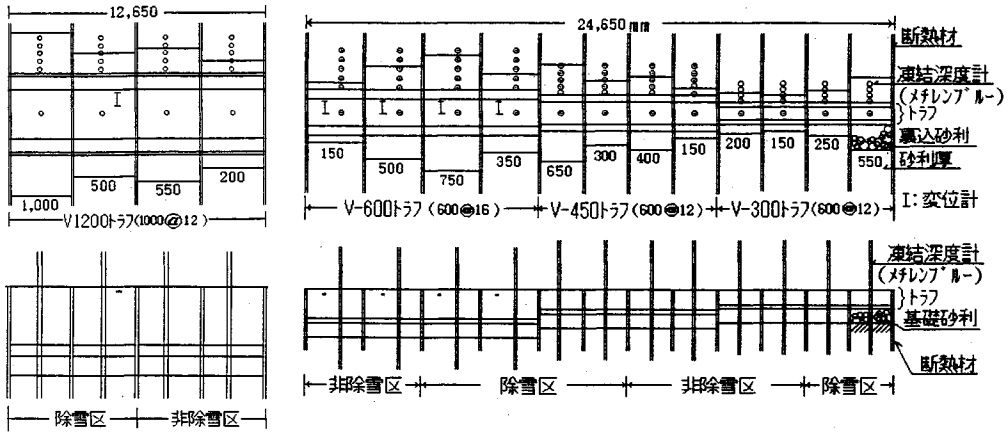


図-1 観測現場の平面（上段）と縦断（下段）

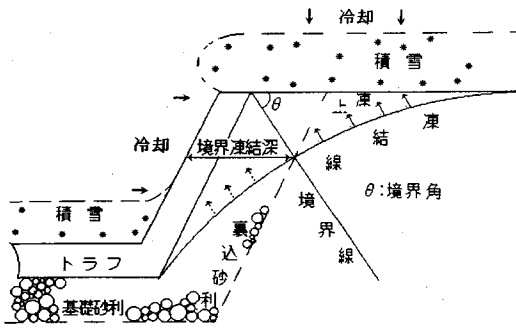


図-2 凍結の侵入形態の模式図

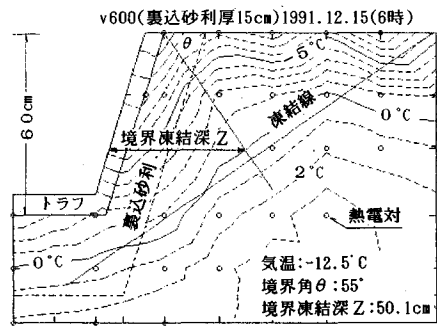


図-3 トラフ側壁背部の地温分布

465°C·days, 1991年～1992年の冬は675°C·daysであった。

3. 凍結の侵入形態

(1) 側壁背部の凍結の侵入形態

図-2は、置換工法を用いたトラフ側壁背部における凍結の侵入形態を模式図で示したものである。この図に示すように、積雪がない場合、側壁背部は地表と側壁の2面が冷却面となり、側壁天端周辺が最も冷却されて凍結は一般にクサビ状に侵入し、側壁から離れるにともない地表面に平行ないし漸近する形態を示す。側壁背部の土砂が凍上性の土質であれば、氷晶は凍結線に平行に生成し、凍上は凍結線の接線に直角方向に発生する。凍結層の上部では、凍上は地表に向かって起こるので側壁への影響は小さい。一方、凍結層の中部から下部では直接側壁に向かって凍上が起こるので、側壁への影響は大きい。ここでは、図-2のモデル化をし、境界線より下での凍上が側壁に影響すると仮定し、境界線と凍結線との交点から側壁までの水平距離を境界凍結深、境界線と地表面となす角を境界角と呼ぶことにする⁸⁾。

置換工法では、境界凍結深に相当する幅が裏込め砂利による置換厚さの目安となり、経時変化する境界凍結深

を求めるには境界角を決定する必要がある。一方、地表面が積雪により断熱されている場合には、側壁面からの冷却が主となる。凍結線は地表面付近で温度が0°Cの地点に漸近あるいは交差し、凍結している断面はほぼクサビ状になり、境界凍結深は積雪のない場合と同様に求められる。トラフ全体が積雪で被覆されたり、開口部にスノブリッジが形成されると凍結の侵入がほぼ停止するので、この時点での境界凍結深が置換厚さの目安となる。

(2) 解析プログラムによる地温分布

図-3は、凍結初期の12月15日におけるv600トラフ（非除雪区）側壁背部の凍結の状況を等地温線で示したもので、凍結はクサビ状に侵入し、図-2の模式図と良く近似していることが分かる。等地温線は、30点の地温計測データと土質の熱的性状等を入力条件として、定常熱伝導解析結果をプロットしたものである。解析プログラムでは^{12),13)}、定常熱伝導解析と同時に任意の範囲における凍結線の直線近似、トラフ天端から凍結線への法線の設定、境界角、境界凍結深の算出を自動的にできるようにした。

(3) 境界角と境界凍結深

解析プログラムによりv600トラフの日平均の境界凍

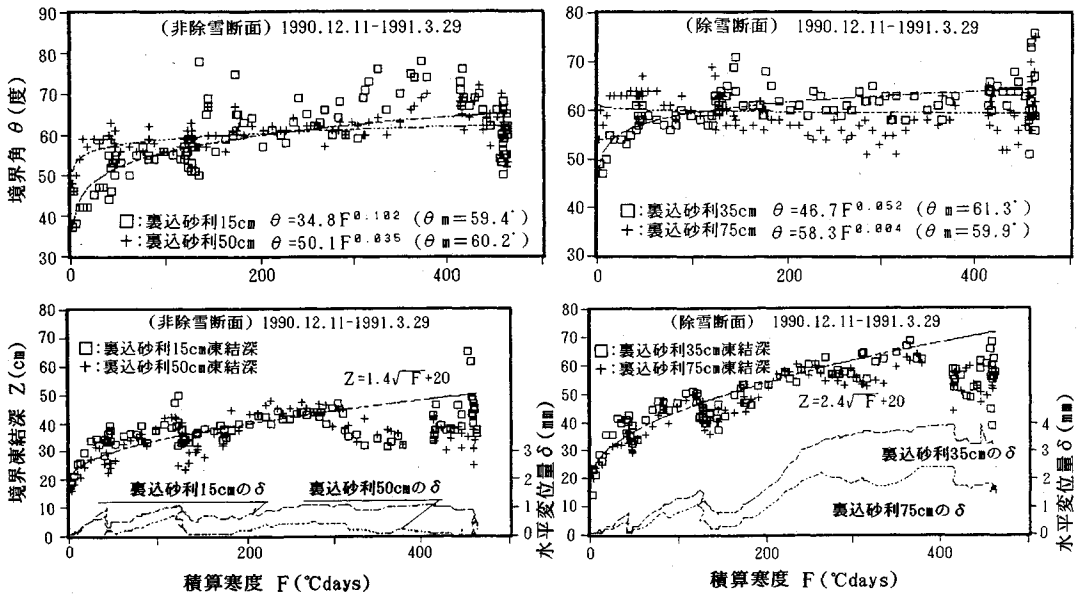


図-4 非除雪・除雪断面における積算寒度と境界角，境界凍結深との関係（v 600 断面）

結深と境界角を算出し、1990年12月～1991年3月の冬について、図-4に除雪・非除雪断面別に示した。翌年度の冬については、積算寒度や積雪状態の違いによる多少の変動は見られるが、ほぼ同様の結果を示している¹⁴⁾。

a) 境界角 θ

両断面とも初冬期では、図-4に示すように、裏込め砂利厚の小さい箇所の境界角は小さく、凍結線は側壁に沿った状態になる侵入形態を示しており、側壁の押し出しに直接作用する凍上が起きやすいと考えられる。その後、積算寒度の増加とともに、境界角はやや変動するが、冬期間を通じた境界角の平均値 θ_m は両断面とも 60° 前後である。側壁が垂直なUトラフの境界角は、 40° 程度であるが⁸⁾、Vトラフでは垂直面に対し約 17° (1:0.3) 傾斜しているため、傾斜分がほぼ加算された境界角となっている。

b) 境界凍結深 Z

境界凍結深 Z、側壁天端の水平変位量 δ と積算寒度 F との関係を図-4に示した。除雪・非除雪断面とも裏込め砂利厚による境界凍結深の違いは小さいので、境界凍結深と積算寒度との関係を1つの式で近似した。

地盤凍結における F と Z の関係は、 $Z=C\sqrt{F}$ の経験式で表されるが、2面冷却を受けるトラフの凍結では、両断面とも $Z=C\sqrt{F}+AZ$ の式がより近似している。3月に入ると積算寒度が増加しても日射等の影響により境界凍結深が低減して回帰曲線からはずれる傾向を示すが、気象の年変動を考慮した設計上の観点からは許容できると考えられる。これは、図-6についても同様である。

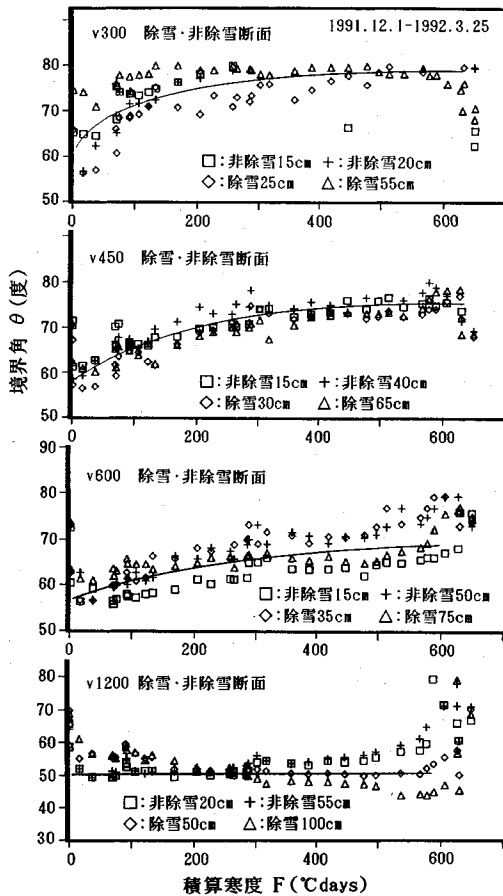
池田町のような少雪寒冷地では初冬期において、側壁

裏面近辺まで一気に凍結が侵入してしまい、日平均気温により積算した積算寒度がわずかでもトラフの側壁背部では凍結が侵入している。すなわち、この凍結状態を修正するのが ΔZ で、このような傾向は、図-6に示すように各トラフ観測断面でも見られた。 ΔZ の値は、図-4の熱伝導解析と図-6に示した手動観測データの解析の結果から、 $\Delta Z=20\text{ cm}$ に設定した。しかし、7章で述べるように、多雪地域では $Z=0$ とした方が良い近似を与えるので、 ΔZ は初冬期の寒さの到来や積雪の状況を考慮する必要がある。側壁水平変位量については、裏込め砂利厚との関係が明確に現れている。除雪・非除雪断面とも裏込め砂利厚の小さい箇所の変位量は、大きい箇所の2倍程度になっている。

4. 壁高と境界凍結深，境界角との関係

トラフ壁高の違いによる積算寒度と境界角，境界凍結深との関係を調べるために、v 300, v 450, v 600, v 1 200 それぞれの除雪・非除雪断面において週2回の凍結深の観測を行った。境界角と境界凍結深は、各断面の片側横断方向に設置した5～6本の凍結深度計の読みから、図上にプロットして求めた。

図-5は、各トラフにおける積算寒度と境界角との関係を示したもので、除雪断面と非除雪断面との明確な違いは見られず、壁高が小さいトラフほど、初冬期における境界角の増加傾向が見られ、冬期間を通じた境界角も大きくなる。これは、壁高が小さいトラフでは、初冬期を過ぎて凍結が深く入るに従い、凍結線が水平に近くなるからである。図-6は、同様に、積算寒度と境界凍結深との関係を示したもので、除雪断面と非除雪断面の両



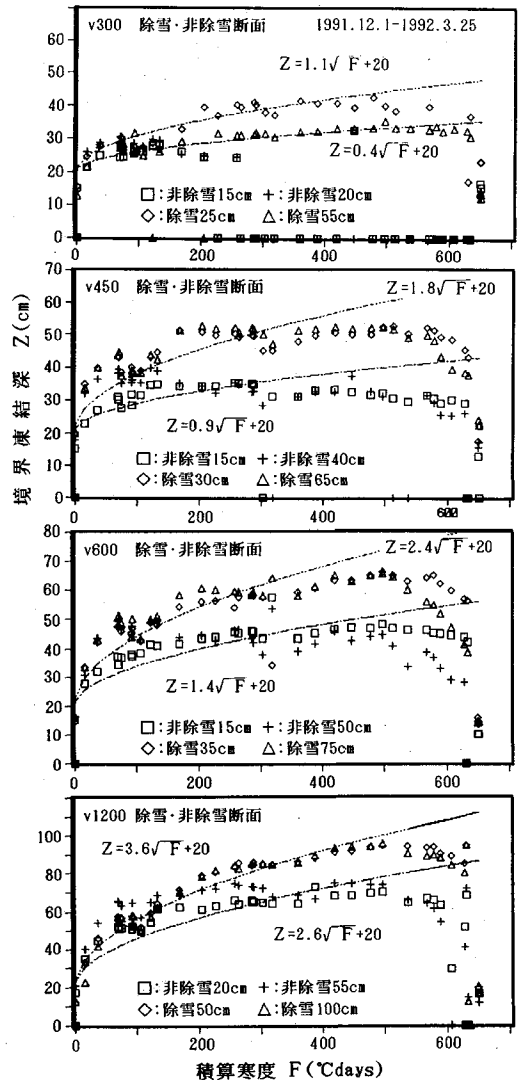
図—5 各トラフの積算寒度と境界角との関係

者の関係を $Z=C\sqrt{F}+\Delta Z$ の近似式で示した。境界角とは逆に壁高が大きくなれば境界凍結深は大きくなる。図—7は、図—5と図—6の解析結果に基づき、壁高に対する境界角、境界凍結深を与える近似式の係数 C (以下、壁高係数と呼ぶ) との関係をもとめたものである。この関係を知ることにより、任意の側壁高のトラフ背部の凍結深さの観測値が与えられれば境界凍結深が推定でき、特に壁高係数は7章で述べる算出式(2)の基礎を構成する。

5. 側壁の天端上幅の伸縮量

各トラフの除雪断面については、凍結深の観測時に天端上幅の伸縮量をノギス測定を行った。図—8は、伸縮量を裏込め砂利厚の小さい断面と大きい断面別に1990年～1991年の冬の測定結果をまとめたものである。測定結果を見ると、裏込め砂利厚の小断面におけるv450の砂利厚 $w=30$ cmの箇所(v450-30)では、最大縮み量 δ は6 mm、同様に、v600-35で8 mmと大きな縮み量となっている。

裏込め砂利厚大断面におけるv600-75では4～5 mm



図—6 各トラフの積算寒度と境界凍結深との関係

で、v600-35箇所の1/2になっており、裏込め砂利の厚さの効果が現れている。v1200-50の縮み量が小さいのはやや傾斜した地盤に築造されているため、側方や上方への移動により、側壁の水平変位が低減したことが考えられる。

図—9は、v300～v1200のトラフ載荷試験結果を荷重 P と変位量 d との関係で示したものである。 $P-d$ 曲線の変曲点付近をクラックが発生する変位量(以下、限界変位量と呼ぶ)とすると、v300, v450, v600, v1200のそれは、それぞれ、1.5 mm, 2 mm, 4 mm, 5 mm前後である。従って、v450-30, v600-35のトラフには1990年～1991年の冬で既に側壁や底板の裏面にクラックが発生しているものと見られる。なお、3章の図—4で示したv600の計測値は側壁片側の値なので、その限界変位量は図—9で示した限界変位量のほぼ半分に対応

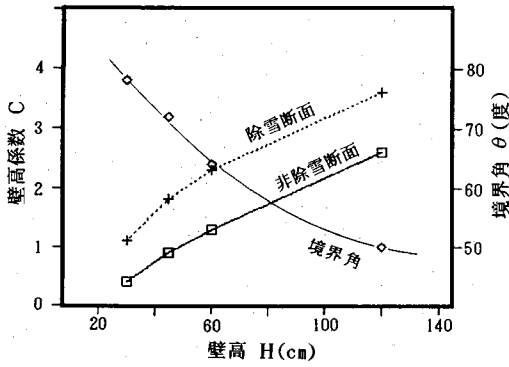


図-7 壁高と境界角, 補正係数との関係

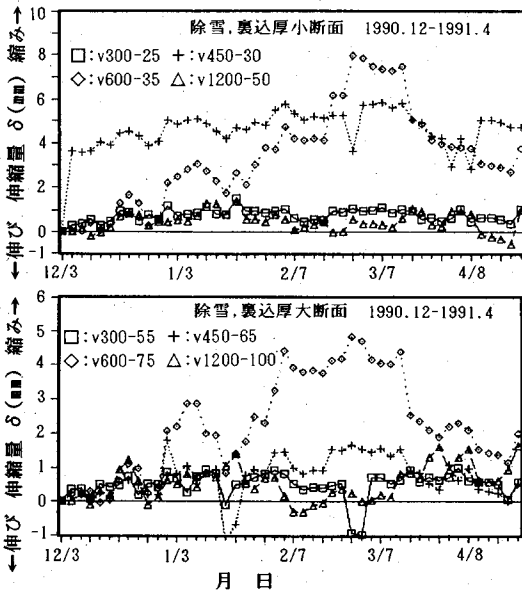


図-8 裏込め砂利厚の小・大断面別のトラフ側壁の伸縮量の変化

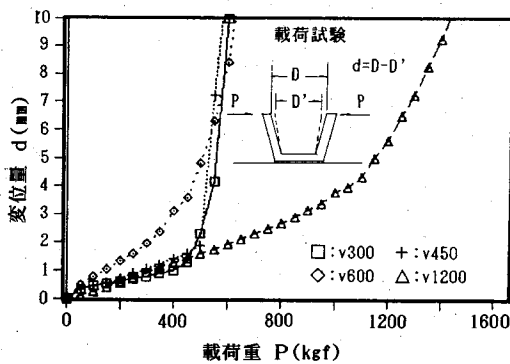


図-9 载荷試験による各トラフ側壁の変位量と载荷重との関係

する。

春と秋の各トラフ断面の目視調査では、供用性において支障が出るようなクラックの発生や側壁の傾倒は見ら

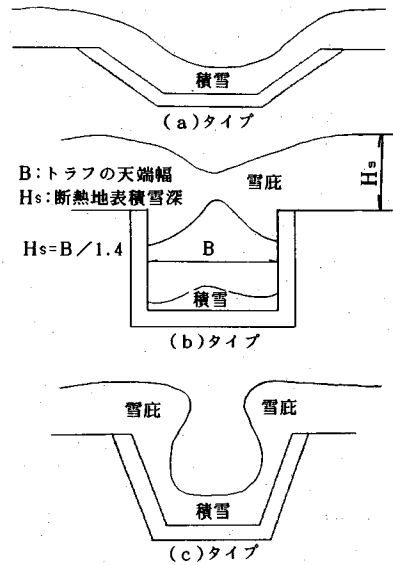


図-10 トラフの着雪パターン

れなかった。しかし、側壁が内側へわずかに傾倒した場合、観察面が圧縮側となるため微小クラックが発生していても確認が難しく、実際にはクラックが発生していると考えられる。また、裏込め砂利厚の小さいトラフ断面では、天端高の不揃い、凍結融解による非置換部分の土壌の泥寧化や流失とそれに伴うトラフの縦・横方向の移動等が観察された。従って、設置する場所によっては、凍上・凍結にともなう副次的な被害の抑制・防止の観点からも、裏込め砂利厚や法面の構造・植生を検討する必要がある。

6. 積雪の断熱効果と確率凍結指数

積雪の多い地域では、積雪の断熱による凍結深の低減効果が期待できるので、裏込め砂利厚を小さくしたり、省略することができる。経済的な設計を行う上で、トラフ側壁への雪の付き方・断熱効果の評価及び積雪を考慮した凍結指数の考え方を明らかにすることは重要である。

(1) 着雪のパターン

図-10は、着雪の3つの基本パターンを示したものである。(a)は側壁の傾斜が緩い場合に多く見られ、平地部と同様に側壁面に沿って着雪する。(b)は側壁が直壁ないしそれに近い場合に発生し、雪庇が両側から発達して中央部で連結してスノーブリッジが形成される。(c)は前者2つの中間のタイプで、側壁に着雪するが雪庇も形成される。これらの基本パターンは、一般に、ほぼ風がなく静かに降雪した場合であるので、諸条件によりさまざまな形態になる。

既往の研究では⁸⁾、(a)と(b)タイプの着雪によ

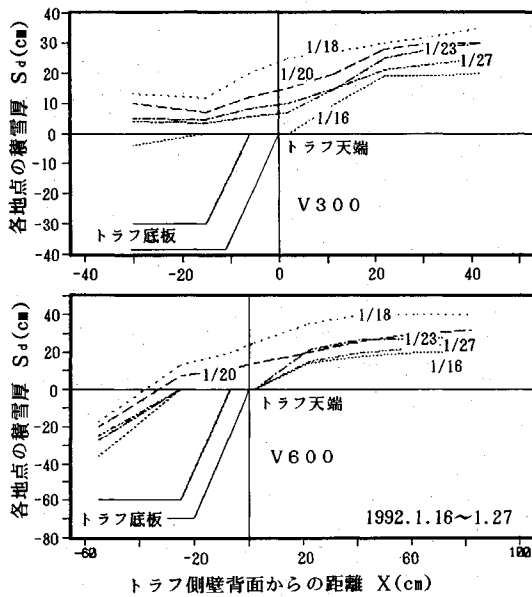


図-11 トラフの着雪状況

るトラフの断熱開始時点として、次のように提案している。

- (a) トラフ側壁に付着した積雪による断熱の場合、積雪深が15 cm以上になった時点とする。
- (b) スノーブリッジによる断熱の場合、その形成時点とする。スノーブリッジの形成時点は図-10に示すように、地表部積雪深が式(1)による H_s に達した時点とする。

$$H_s = B / 1.4 \quad (B: \text{トラフ天端幅}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、(a)の提案は平地部の観測結果に基づいたものであり、また、(b)の提案について、報告書では同じ地域でも気象・地形条件、切土・盛土トラフ等により、トラフ着雪状況は異なり、実態調査が必要であると述べている。

(2) 着雪状況の観測

十勝地方は、積雪の少ない地域であるが、非除雪断面の各トラフ周辺の積雪厚を観測し、トラフ周辺の着雪状況を調べた。図-11は、積雪深が最大の30~40 cmになった1月18日前後のv300とv600トラフの着雪状況を示したものである。トラフ内部の底板面上及び天端周辺の積雪深は、壁高による違いは見られず、全て(a)のタイプであった。スノーブリッジは、どのトラフにおいても形成されておらず、壁高の小さいv300トラフでは、トラフ内部まで堆雪し積雪面が天端より上になる。また、側壁や底板面上の着雪の厚さに大きな違いは見られず、 H_s に達したv300トラフ($H_s=34$ cm)でも、(b)タイプのスノーブリッジの形成は見られなかった。

以上の観測結果から、地形条件や気象条件等によっては(b)、(c)タイプの着雪の可能性もあるが、積雪に

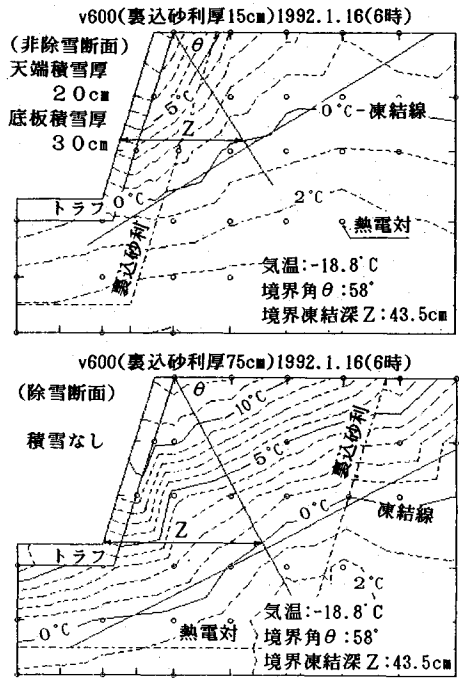


図-12 非除雪・除雪断面の地温分布

よる断熱の観点からは(a)タイプにまとめることができる。

(3) トラフ側壁背部の地温分布

図-12は、1月16日のv600トラフの除雪断面と非除雪断面における地温分布と凍結線の位置を比較したものである。非除雪断面のトラフ周辺は20~30 cmの積雪で覆われている。積雪のない除雪断面の凍結は、底板下部まで深く入っているのに対し、非除雪断面では凍結線は上方に位置し底板部で止まっている。積雪の断熱効果により、深さ方向で25 cm、境界凍結深に換算して13 cm低減している。観測現場は少雪寒冷地域であるが、この観測例に見られるように、積雪の断熱効果を考慮することにより置換厚さを10 cm以上も節約できることが分かる。

(4) 確率凍結指数

北海道の観測例によると、積雪が初冬期に20 cmを越えてその値以上を保つ多雪地域では、土の凍結は地表付近でとどまりわずかしが侵入しない。積雪が1月以降に20 cm以上になる少雪寒冷地域では、その深さが7日間以上続く前の寒さに凍結深さは依存する傾向を示すが、地域により積雪の断熱効果の発現状態が異なる^{14)~16)}。

すなわち、土の凍結の進行を抑制する積雪有効深さは20 cm以上であるという研究結果¹⁶⁾を示しているので、上記(1)の(a)タイプの着雪に関する提案に対し、本文では断熱開始時点の積雪深を20 cmとした。

表一 10年超過確率凍結指数と凍結指数の比
(1961年～1991年)

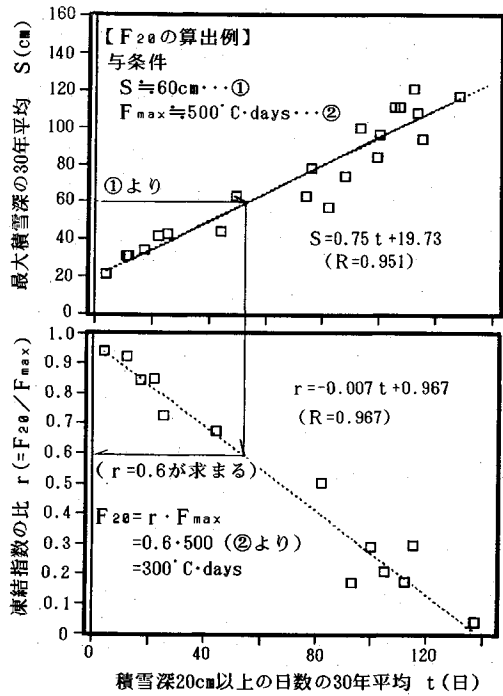
地点	F_{20} °C·days	F_{max} °C·days	F_{20}/F_{max}	最大積 雪深cm	積雪20 cm日数	地域 分類
札幌	124	463	0.27	100	93	A
岩見沢	114	652	0.17	121	112	A
上別	90	1092	0.08	—	—	A
旭川	143	865	0.17	94	115	A
留萌	109	528	0.21	111	105	A
稚内	179	615	0.29	96	100	A
足寄	872	1005	0.87	—	—	B
帯広	672	828	0.81	63	49	B
上札内	468	942	0.50	—	—	B
網走	370	736	0.50	57	82	B
北見	487	1022	0.48	—	—	B
弟子屈	725	995	0.73	—	—	B
標茶	603	975	0.62	—	—	B
釧路	548	645	0.85	42	22	B
中標津	514	931	0.55	—	—	B
根室	461	544	0.85	34	17	B
倶知安	30	703	0.04	204	137	A
江差	145	199	0.73	43	25	C
函館	253	374	0.68	44	44	C
室蘭	262	284	0.92	31	12	C
日高	477	921	0.52	—	—	B
浦河	321	341	0.94	21	4	C
枝幸	92	856	0.11	117	128	A
羽幌	87	628	0.14	108	113	A
小樽	89	423	0.21	111	107	A
寿都	131	327	0.40	78	76	C
雄武	269	937	0.29	84	99	A
紋別	303	813	0.37	74	88	B
広尾	350	608	0.58	63	74	B
苫小牧	481	495	0.97	31	11	B

A:多雪寒冷, B:少雪寒冷, C:少雪温暖

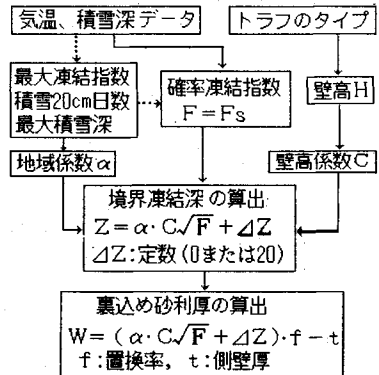
積雪を考慮した置換厚設計の気象条件として、寒さと積雪の両者を同時に確率計算した凍結指数（以下、確率凍結指数と呼ぶ）を適用することにより、気象条件の違いは1つのパラメータで処理が可能である。確率凍結指数は、過去の気温と積雪深の観測データから、積雪深が S_{cm} 以上になる日までの積算寒度の n 年超過確率 F_s として算出でき、ここでは次のような条件で F_s を算出した。

- トラフの着雪パターンを明確に分類することは困難であるので、平地部の積雪深が $S=20\text{ cm}$ 以上になると、トラフ周辺の凍結の進行も停止すると考える。
- 超過確率の年数 n は、トラフの重要度に応じて、5年、10年…等に設定できるが、道路の凍上対策で一般的に用いられている確率年数 $n=10$ 年とする¹⁷⁾。

表一には一例として、1961年～1991年の30年間の北海道内の地上気象観測データとAMeDASデータによる10年超過確率の F_{20} 、 F_{max} 、凍結指数の比 F_{20}/F_{max} の計算結果をまとめた^{18)~20)}。図一13に積雪深20cm以上の日数に対する F_{20}/F_{max} と30年平均の最大積雪深との関係及び F_{20}/F_{max} の比の算出方法を示した。これらの関係から、 F_{20} が与えられなくても、対象とする地域の最大凍結指数 F_{max} とおおよその最大積雪深あるいは積雪深20cm以上の日数が分かれば F_{20} が求められる。



図一13 確率凍結指数 (F_s) を算出するノモグラフ



図一14 裏込め砂利厚の設計のフローチャート

7. 裏込め砂利厚の設計手法の検討

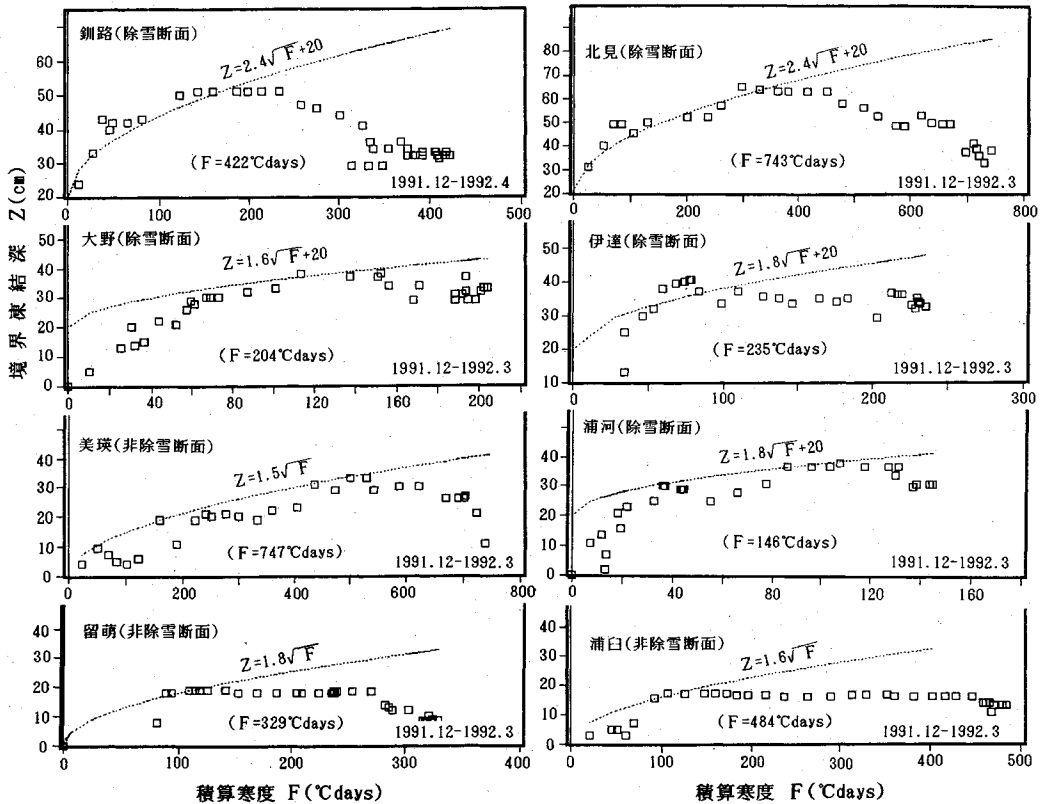
(1) 裏込め砂利厚の算出の考え方

3章～6章における検討結果に基づき、裏込め砂利厚の設計手法についての考え方を図一14のフローチャートで示した。境界凍結深 Z cm の算出式を式 (2)、裏込め砂利厚 W cm を設定する式を式 (3) として示した。

$$Z = \alpha C \sqrt{F_s} + \Delta Z \dots \dots \dots (2)$$

$$W = (\alpha C \sqrt{F_s} + \Delta Z) \cdot f - t \dots \dots \dots (3)$$

式 (2) と式 (3) において、 α は地域係数、 C は壁高補正係数である。 ΔZ は初期凍結に係わる定数で、池田町の観測結果に基づく 20 cm である。池田町は少



図—15 道内各地の積算寒度と境界凍結深との関係
(各観測現場の積算寒度は、最寄りのAMeDAS観測点のデータによる)

雪寒冷地なので、前述したように、初冬期における非除雪断面の凍結の侵入は、除雪断面に類似した傾向を示す。従って、多雪地域で早期積雪が見込まれる地域では、 $\Delta Z=0$ とすればよい。 F_s は積雪を考慮した確率凍結指数で、観測データがない地域は、表—1あるいは図—13からおおよそ推定することができる。 f は境界凍結深の計算値に対する実際に置換する裏込め砂利厚の比で、道路凍上対策の置換厚さの設定における置換率に相当する。 f は0.7~1.0の範囲で考えられるが、施工時の経済性や既存の指針値との調整等を考慮した実際の運用に係わる問題であるので、本文では、境界凍結深そのものを算出する式(2)により各地の観測データで検証を行った。 t はトラフの側壁の厚さである。

地域係数 α は通常1とするが、気象条件、地盤条件、地形条件等による地域特性が凍結の侵入形態に大きく影響する地域では、 α により境界凍結深を補正する必要がある。これは、北海道内におけるトラフの凍害実態調査によると、少雪寒冷地と多雪寒冷地の違いのみならず、同じ管内でも内陸部と海岸部、盛土部と切土部、地盤の土質の違い等によって、凍結の侵入形態が異なり、凍害状況も異なるという点を考慮するものである。

(2) 算出式の検証

1991年11月~1992年4月にかけて、北海道内10箇所でも600トラフの一斉凍結深観測を実施し、上記の算出式の適用性について検証した。図—15は、その適用例を示したもので、積雪の多い地域は非除雪(自然積雪)状態で、少ない地域は除雪状態で観測した。

除雪地点には、600トラフの壁高係数 $C=2.4$ 、地域係数 $\alpha=1$ として、(2)の算出式をそのまま適用した。気象条件が池田町と同様に少雪寒冷地の北見と釧路では、ほぼ妥当な境界凍結深 Z を与えた。今回の観測では凍結期の後半部分で算出式と観測値とのズレが出ているが、少雪寒冷地での凍害状況から、 F_{max} に近い寒さが到来した年では、境界凍結深は凍結期の後半まで増加することが考えられるので、この算出式をそのまま適用した。

海岸部で比較的温暖な浦河と伊達ではやや過大な Z を与えるので、式(2)の αC を1.6~1.8に修正($\alpha=0.7\sim 0.8$, $C=2.4$)した式で、ほぼ近似することができた。従って、少雪寒冷地の地域係数は $\alpha=1$ としてよく、少雪温暖地に対する地域係数は $\alpha=0.7\sim 0.8$ 程度に低減する必要がある。

一方、多雪寒冷地を対象とした留萌、浦臼、美瑛の非

除雪地点については、初冬期から徐々に積雪の断熱効果が見られ、12月半ば以降、凍結の進行はほぼ停止する。従って、積雪の断熱開始時点以降の算出式と観測値とのズレは、 F_{20} を考慮することにより無視できる。但し、寒さの厳しい美瑛については、2月後半から再び凍結が進行しているので気象条件等の調査を要する。3地点の $F-Z$ の関係を調べると、 $Z=\alpha C\sqrt{F}(\Delta Z=0)$ の式による方が近似している。池田町の観測結果では、非除雪断面でも $F-Z$ の関係を式(2)で近似できたのは、少雪寒冷地で初冬期における積雪の断熱効果が小さいため ΔZ が無視できないことによるものである。今回の観測事例に基づく、非除雪断面では $C=1.4$ 、 $\alpha=1.1\sim 1.3$ 、 $\Delta Z=0$ とした近似曲線の方が妥当である。

ここで、地域を少雪寒冷地、多雪寒冷地、少雪温暖地に分類すると、算出式の適用が容易である。北海道の場合、トラフの凍害事例と表-1に示した F_{20}/F_{\max} の比($=r$)と F_{\max} に基づく、多雪寒冷地は $r\leq 0.3$ 、 $F_{\max}\geq 400$ に、少雪寒冷地は $r\geq 0.5$ 、 $F_{\max}\geq 500$ に分布している。比較的温暖な海岸沿いの少雪地域は、 $F_{\max}< 300\sim 400$ 、 $r\geq 0.6$ となっている。この分類から外れる地域は、凍害状況、積雪状況等により上記の何れかの分類に該当させばよい。

以上の検証結果から、算出式は気象条件等による修正を要するが、現場への適用が可能であることを明らかにすることができた。しかし、地域係数 α については、おおまかな地域分類でその目安を示したが、更にきめ細かな検討を要する。また、置換率 f に関しては、設計上 $f=1.0$ と考えられるが、凍害状況と費用効果の観点から、現行の裏込め砂利厚と算出式によるものとの比較検討を行い、実際の運用面から設定する必要がある。

現在、凍害が多く裏込め砂利厚の増加が必要な地域、逆にその低減を要望している地域等を対象に、1993年から北海道で現場観測を継続して実施し、本設計手法の適用範囲・条件等を明確にする検討を進めている。

8. 結 論

以上の検討結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) トラフにおける凍結侵入形態を側壁背部の地温測定と定常熱伝導解析による地温分布で明らかにすると同時に、その侵入形態を境界角と境界凍結深を用いて定量的に示すことができた。
- (2) 積算寒度と境界角、境界凍結深との関係を近似式で示し、トラフの壁高の違いによる境界角と境界凍結深を算出するための壁高補正係数を設定した。
- (3) 壁高、裏込め砂利厚が異なる各トラフ断面における境界凍結深と凍上による側壁の変位量との関係をみると、境界凍結深に大きな違いがなくても、裏込め砂利厚の小さい断面では変位量が大きくなる。

(4) トラフにおける積雪の断熱効果を側壁の変位量と地温分布により明らかにした。しかし、積雪・着雪状況の観測結果から断熱に寄与するトラフの着雪タイプを明確に分類することは困難であるので、平地部の断熱積雪深を考慮した確率凍結指数を用いる方が合理的である。

(5) 壁高係数、確率凍結指数、地域係数等を用いて、積雪の断熱効果と壁高の違いを考慮できる境界凍結深と裏込め砂利厚の算出式の検討を行った。気象条件が異なる北海道内10箇所での観測結果に算出式を適用して検証したところ、地域による修正は必要であるがほぼ妥当な結果が得られた。地域係数についても、積雪と寒さによる地域分類により、ある範囲で設定できることが分かった。

今後、各地の観測データによる検証を行い、本設計手法が広く現場に適用できるように、算出式や各係数について検討を加え、それらの適用条件を明確にしたい。

謝 辞

本研究の遂行に際し、北海道農政部、十勝支庁北部耕地出張所及び(財)北海道農業近代化コンサルタントの方々に大変お世話になった。ここに、心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森井 徹・津田進・高橋英樹・長沢徹明：凍結期における水路側壁の挙動，農業土木学会誌，第45巻，第9号，pp.615~619, 1977.
- 2) 高田健治：農業土木における凍害とその対策(その5)―水路の凍害対策―，農業土木学会誌，第51巻，第6号，pp.541~543, 1983.
- 3) 鈴木輝之・山田利之：小型Uトラフの凍上被害に関する屋外実験，土木学会論文集，第418号/Ⅲ-13, pp.163~171, 1990.
- 4) 池田一賢：鉄筋コンクリートトラフの凍上被害について，北海道土木技術研究発表会，pp.120~139, 1985.
- 5) 佐藤祐一：農業用用・排水路の凍上防止に対する一試案，凍害と寒さの利用に関するシンポジウム発表論文集，pp.57~64, 1992.
- 6) 青山清道・福田 誠・杉内祥泰・小野泰彦・池田格：用水路の凍上被害に関する一考察，第22回土質工学研究発表会，pp.889~890, 1987.
- 7) 吉田重一・高田健治：寒冷期における用水路の構造設計，農業土木学会誌，第48巻，第7号，pp.471~477, 1987.
- 8) 北海道開発局土木研究所特殊土壌開発研究室，水路構造物の凍害対策工法検討報告書，1980.
- 9) 武市 靖・久保 宏：用排水路の凍上対策に関する研究(その1)，第26回土質工学研究発表会講演集，1991.
- 10) 武市 靖・久保 宏：用排水路の凍上対策に関する研究(その2)，第27回土質工学研究発表会講演集，1992.
- 11) 武市 靖・馬吾力堤：用排水路の凍上対策に関する研究(その3)，第28回土質工学研究発表会講演集，1993.
- 12) 武市 靖，佐川淳一：舗装体の温度分布に関する研究(そ

- の2), 北海学園大学工学部研究報告, 第14号, pp.169~212, 1986.
- 13) 武市 靖: 路面凍結の予測に関する研究, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.176~178, 1993.
- 14) 土谷富士夫: 十勝地方における火山灰土壌の凍結, 凍上が農地に及ぼす影響に関する研究, pp.109~113, 1986.
- 15) K. Takeichi, H. Kubo and A. Kasahara: A Pavement Design for Low-Volume Roads That Considers the Antifrost Effects of Thickly Packed Snow, 4th Inter. conf. on Low-Volume Roads, TRR 1106/Vol.2 pp.236~243, 1987.
- 16) 福田正巳: 自然積雪下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.
- 17) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, p.31及びpp.283~285, 1992.
- 18) 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, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No2, pp.217~225, 1991.
- 19) 日本気象協会北海道本部: 1991年版北海道の気候, pp.23~45, 1991.
- 20) (財)日本気象協会北海道本部: 用排水農道基準策定調査委託業務(凍結深調査)報告書, 1988. (1993.10.21 受付)

DESIGN PROCEDURES OF THE REPLACEMENT THICKNESS WITH CONSIDERATIONS OF SIDE-WALL HEIGHT AND SNOW COVER FOR A FROST PROTECTION OF TROUGH

Kiyoshi TAKEICHI

For the purpose of a frost protection of trough, design procedures of backfilling layer thickness are required to establish for a replacement method. In this paper, observed data and heat transfer models can be clarified the frost penetrating regime quantitatively in the ground behind troughs depending on the height of trough-sidewall and snow cover insulation. Based on these analyses, practical design procedures are proposed with the verification of in-situ availabilities.