

寄書

米国における道路凍上被害の現状と 対策研究の展望

正員 工学博士 板倉 忠三*

梗概 米国において冬季凍上による道路の被害は少なくとも40州に見られ、そのうち22州ではこれが道路破損の主な原因に数え上げられており、その被害面積は我が国全面積の約13倍に当る。Highway Research Board においては1947年以来特にこの問題に関する研究委員会を設置して活潑な研究を行っている。本稿は筆者が滯米中調査したその研究の動向、研究者数及び組織、研究設備並びに各州で実施中の対策の概要を述べたものであつて、異なつた専門分野の権威を網羅して強力に研究を推進していることは注目に値する。

1. 概説

米国における道路網の発展は走行車輛の数、重量並びに走行速度の向上、並びに航空路の発達とともに、かねて紹介されているところであるが、そのすばらしい道路も広大な航空港も仔細に見れば至るところに破損の痕が見られ、維持修繕に意外な努力を払っている。しかも広大な地域にわたり気候、地質の変化した地帯を縦横断しているので、交通量に関する対策にのみ没頭してきたかに見える道路技術も、ようやく凍上と春季融解による破壊に向けられ、Highway Research Board にはこの種研究委員会の設置を見、組織的な調査研究を開始した。現在の委員長 K. B. Woods 教授は Purdue University に設けられている Joint Highway Research Project の Associate Director で、筆者は親しくその研究室を訪れてその研究動態に接することができ、その後もしばしば連絡を取っている。

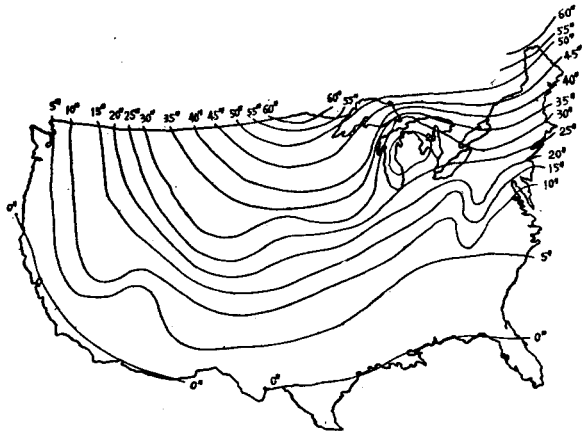
いまこの凍上被害の現状及び研究並びに対策の動向を大観することにする。

2. 凍上被害

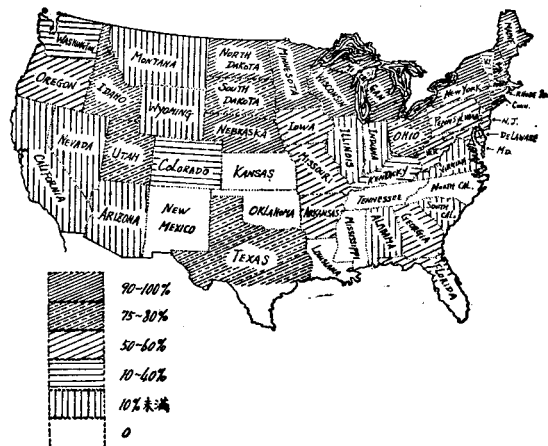
米国においては凍上被害を冬季の凍結と春季の破壊と呼んで区別しているかにみえ、後者を大きく取扱っているものが多い。調査によれば全米48州中凍上による被害のないのがわづかに5州、他の40州は、年によつて被害があつたり無かつたりするものから、毎年100%と云うものまで、大なり小なり道路の凍上、融解に悩まされ、そのうち22州はこれが道路破損の主要な原因となつてい

る。これは、北部並びに大西洋海岸は寒冷であるから至極当然であるが、南部あるいは太平洋岸の暑い、あるいは気候温和な地帯でも、標高の高い所はこの被害を受けるからである。これを面積にすれば Base Course, Subbase 等、路盤より上の部分に被害のあるものが約2,958,000 km²、路盤内に起るもの約2,537,000 km²と推算され、前者は水面の面積を控除した米国全面積の38.4%、後者は33.0%となり我が国全面積の約13倍に当る。参考のため、全米の平均凍結深さの等深線及び凍上融解の被害面積の程度並びに米国の32°F以下の積算温度の分布を示せば図一、二及び三のとおりである。

図一 米国の平均等凍結深度線（深度吋）

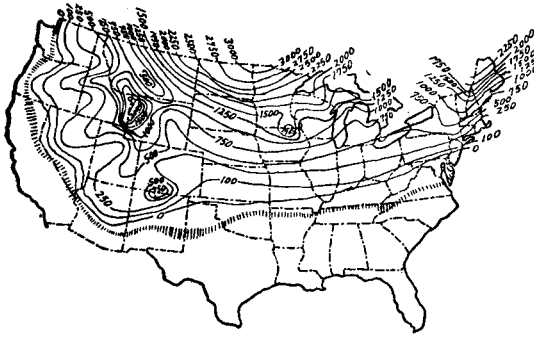


図二 各州別凍結被害面積と全面積の比率



* 北海道大学教授，工学部土木工学教室

図-3 米国の平均凍結指数 (日 °F)



一年の平均 舗装基層を通過して最小12吋凍結する南限

道路の種類は土砂道、中級及び高級舗装全般にわたり、被害の程度は高級舗装の剥離、亀裂等の比較的軽易なものから、融解期の噴泥、地耐力の減少、交通制限、さては輪掘、ふくれ上りに至るまで、東北、北海道地方において毎年繰り返している被害のあらゆるものを包含しているが、荷重及び速度が大なのでその被害もまたいちじるしい。被害の最も大きいのは春季であつて安定処理道のうちには毎年この時期2~4週間、交通制限を例としているところもある。全路線の約45%余が舗装を有しないからこれによる不便も察せられる。その原因は寒気、水分及び路盤あるいは基層等の材料の不適切が挙げられていることも我が国と同様であるが、土性については粒子、地質学的種類並びに液性限界、塑性指数の面から検討され、除雪形式、融雪水の滲透、排水溝の積雪あるいは凍結による閉塞等も挙げられているが、特に秋季の降水量もまた大きく取り上げられている。

このような凍上被害あるいは凍上現象に関心をもつて、何等かの調査あるいは研究を進め、あるいはこれを進めようとしている人々は学界、技術者間に160名を超え、そのうちには凍結のあまり激しくない地方にも60名を数えている。この問題が目下大きく注目を浴びていることを知ることができよう。しかして、上述の約160名の大学の研究者、政府機関技術者並びに各州の道路技術者の数の比率はそれぞれ27.0:40.5:32.5となつており、そのほかに若干の民間人もいる。

3. 凍上研究

凍上に関する研究は、米国においては対策から始められ1943年までは特別の組織を持たず思い思いに現場あるいは研究室で実施されてきたが、1944年4月塩化カルシウムによる凍上防止研究をまづ取上げて Highway Research Board に小委員会が設けられて以来、組織的な研究が開始された。この小委員会は、F.C. Lang氏が委員長となつて、Columbus, Chicago

及び Washington 等において開催され、委員には A.G. Cochran, J.E. Lawrence, A.E. Mathews, Frank O. Olmstead, K.B. Woods 氏等が活躍していた。1945年 F.C. Lang氏が急逝して K.B. Woods 教授が委員長として活動を続けてきたが、1947年 Swampscott, Mass. の会議以来委員会は機構を変え、その範囲は土壤の凍結作用、気象、温度、湿分等の基本研究及び一般的の対策を含むこととなり、本格的に組織的、総合的な凍上研究委員会に発展充実し、委員も委員長を含んで米国、カナダの学者、技術者中から20名となつたのである。

この委員会は毎年会議を行い報告しているが、そのほか H.R.B. の年次大会にもその成果の報告を行つている。1948年には内外の関係文献の蒐集整理を決定し、Part Time ではあるが、そのための専任技術者を定めてまづ1890~1948年の関係文献283編の一覧と梗概を、(1) Frost Action in Soils として発刊し、続いて1950年には(2) Review of Literature, Frost Action in Roads and Airfields, 1951年には(3) A Frost Action in Soils, Symposium を発刊した。(2)は1765~1951年の論文813編を掲げて List にし、その上各項目別に各論文の内容を紹介している異常な努力の結晶である。

このうちに収められた論文の数は年代順に挙げれば、1765~1900年29編、1901~1910年32編、1911~1920年73編、1921~1930年120編、1931~40年191編、1941~1951年368編、総計813編である。これは米国、カナダのみならず、欧州のものをも包含しさらに他の諸外国のものは訳中であるから、これが集大成されれば膨大なものになるだろう。

この委員会は7つの小委員会に分かれていて、いまその委員長名とともに挙げれば次のとおりである。

(A) 気象及び土性分布 (Kentucky 州道路材料研究所, L.E. Gregg), (B) 土壤温度及び土壤の熱的性質 (カナダ国立研究会議, R.F. Legget), (C) 土壤湿分と湿分の移動 (Minnesota 大学, S. Kersten), (D) 凍結作用に関する基礎資料 (New York 州公共事業局, George W. McAlpin, Jr.), (E) 凍結作用及び春季破壊 (Minnesota 大学, J.H. Swanberg), (F) 対策及び処置 (Virginia 大学, T.E. Shelburne), (G) 凍結作用に対する必要な研究 (B. P. R., F. R. Olmstead)。

1951年1月9~12日の年次大会において、これらの委員会として提出された論文は、(A)2編、(B)5編、(C)7編、(D)8編、(E)7編、(F)6編、(G)2編、その他1編、計39編で、これが前掲の文献(3)

に登載されている。

これをみると研究者の範囲は単に土木技術者あるいは学者のみに限らず、農学、物理学、機械工学の各分野にその先端の知識を求めたもので、国別もカナダ 3、英本国 1、及び Norway 2 を含んでいる。

また、研究者の種別とその研究項目を挙げれば表一 1 に示すとおりである。

表一 1 研究者群及び研究項目

研究項目	研究者	大学	政府	州	軍	会社	H.R.B	計
一般調査		2	2					5
土壌理論		1						1
研究室実験		3	1		1			5
熱計算		4			1			5
野外調査実験		5	2	10	2	2		21
斜議							2	2
合計		15	5	10	5	2	2	39

土壌関係には農学、測定関係には物理、機械、熱計算には機械関係の権威の最新の理論、測定装置、計算方法、あるいはこれらの統計等を網羅していることは、いかにも米国民性のよい面をうかがうことができる。

4. 研究の動向

凍結及び対策問題に関する研究項目の必要度について米国得意の輿論調査を行った。その範囲は研究者、技術者全般にわたり、前述(A)~(F)の小委員会の名称と同じ題目を掲げて必要順位を求めたものである。その結果は(F)対策と処置、(E)凍結作用と春季の破壊、及び(B)土壌湿分及び湿分の移動の順で、これらが最も点数が多く、ついで(D)凍上の基礎資料及び定義で前三者の約70%、最も点数の少ないのが(B)土壌温度、(A)気象及び土性分布で約40%であった。

しかし凍結する地方及び凍結しない地方別に総合した結果では、これら6項目の相対的な必要性に関しては平均の上あまり大きな差が無い。しかし凍結しない地方の人々の基礎的研究上の観点からすれば、(B)、(A)が今後研究を進める必要性を感じており、技術者は(A)についてはあまり必要性を感じていない。これらは恐らくひどい凍上による被害が道路の主要問題でない地域では教育上に有用であると考えているからであろう。

研究方途としては、熱計算には Cold Quantity を 32°F (0°C) 以下の毎日の平均気温の積算で表わし(図一3)、基層及び路盤材料の Heat Storing Capacity を要素に取入れている点、土壌の伝熱係数及び湿分含量の測定には石膏あるいはナイロンの被いを用いた熱伝対法が Michigan 大学で、円筒形熱源を有す

る熱拡散函による方法が民間航空局でそれぞれ研究され、用いられ、さらに Neutron と γ 光線とによる土壌湿分及び密度の測定が Cornell 大学で、ガイガー計数管による方法が Canada の Saskatchewan 大学で用いられた点等が大きな興味をひく。大規模の靱性舗装下の湿分含量の変化の測定が Mississippi 水路試験所で行われたことも興味あることである。また凍結現象の究明に土壌の熱的解析が機械工学の Staff を集め、土壌材料の粘土鉱物組成と凍結作用の関係の究明に地質学者の電気化学的理論の展開がある。実験室内の凍結函内における凍上実験はところどころで行われているが、New England の軍の研究所が最も活発である。航空写真による永久凍土層地帯の地形学的研究が Purdue 大学で行われている。

凍結及び融解季の道路の破壊は、Minnesota, Michigan, New Hampshire, Connecticut 等、北部諸州のほか、Colorado, Nebraska 等の中南部の諸州においても、標高の高い地方で論ぜられ、基層、路盤の凍上、除雪の影響、路側の積雪等を対象に調査研究して、道路工学における土質の吟味は凍上研究にも大きな成果を挙げている。

一方舗装体の寒冷による凍害も眼につき始めていることは注目に値する。同時に融解季の支持力の測定も行われて数字的に交通制限実施の目安としているところが多い。

路面支持力の測定法は各州独自の方法を用いているが、特に C.B.R. 及び平板載荷試験が多い。

また被害のうちには、溝橋、擁壁等の道路附帯構造物の受けるもの、及び排水管からの凍結の侵入等が挙げられているのは我が国と同様である。

5. 対策及び処置

対策及び処置は凍結研究の最終目標であるが、現在考えられているものは大体我が国と同じく、(a)粒状材料による路盤不良土の置換、(b)地上並びに地下排水の強化等のほか、(c)塩化カルシウムの利用が長年月にわたり研究、試用され、(d)舗装下の土壌の春季の噴出についてその修理工法として、Cement Slurry によるものが用いられ、(e) Tundra による Heat Storing Capacity の増加が Norway 国有鉄道によつて実施されている。(a)、(b)についても寒気と土質とを詳細に分析している点が我が国の現状と多少異なっているものと考えられる。

いまその総合した結果を挙げれば、次のとおりである。

基層及び路盤の型 基層材料には凍上のおそれのない材料を用い、路盤土中に通常危険の原因があると考え

えているものが多く、南方の2州は石灰岩にそのおそれがあり、透水性の基層も危険視されている。多くは細砂とシルトを多く含む土壌層を嫌っている。

路盤 最も危険の多いのはシルト含有量の多いもので、海岸の平地、氷河湖の堆積、風積土、Loess 材料等が挙げられている。また California, Colorado 及び Illinois 各州では凍上の起きやすいのは切取個所であるとしているが、これは盛土の材料撰択及び施工が科学的に行われているからと思われる。Nebraska 州では地表面から 1.80 m 以内にそれ以下の土壌よりも不透水性土壌のあるとき、及び粗砂、砂利以外のものに凍上の危険性があるとしている。

対策としては粒状材料で置換すること、地下水位の高い地方では施工基面を特に昂上することが強調され、いろいろの州でそれぞれ異なつた示方によつて実施している。

すなわち 10 州では基層と路盤の設計の厚さを凍結深度によつて変えている。ある州では凍結深度よりも路盤土の性質の方が支配的要素であるとし、31 州では凍結作用によつて起る舗装の破損と気象条件との間に何等かの相関関係を求めている。また特にこの種の研究を進めつつあるか、あるいはこの研究を企画中のものが 14 州あるが、それ以外の州ではこの研究は終了したと報告している。

いま対策の樹立しているものについて、その成果を述べれば次のとおりである。

(1) 凍上被害を及ぼす土壌の諸条件

a) 土壌粒子：200 番篩通過分 10~15% 以上。シルト及び粘土 15~25%。粒径 0.05~0.005 mm のもの 50% 以上。0.02 mm 以下のもの 3~10% 等が挙げられている。このほか、民間航空局では特に 0.02 mm 以下の粒子が Well Graded Soil に対して乾燥重量の 3% 以上、Uniformly Graded Soil に対して 10% 以上含めば凍上被害を及ぼす危険があるとしている。

b) 土壌の性質：粘土、シルトあるいはシルトの混つたロオム。氷河堆積土、沖積土あるいは海底沈積土。B.P.R. の分類で、A-2, A-2-7, A-4, A-5, A-6, A-7, あるいは A-4 が 65% 以上含まれるもの。

c) 液性限界：土壌の液性限界, L.L. は 13~26, 25~35, あるいは 35 以上としているものがある。

d) 塑性限界及び塑性指数：塑性限界, P.L. は大体 12~20, 塑性指数, P.I. は 10 以上, 6~9, あるいは 4 以上としているものがある。

e) 収縮限界：収縮限界, S.L. を 20 以上としているものがあるが、多くの場合、この値には触れてい

ない。

(2) 凍上を防止できる土壌の条件

a) 土壌粒子：200 番篩通過分 5~10% 以下, 12% 以下, 8% 以下あるいは最大 5% とするもの。50 番篩通過分 20% 以下で, 200 番篩通過分 20% 以下としている Ohio 州。Connecticut 州ではきれいな砂利で, 5" 篩通過 100%, 1/2" 篩通過 30~65%, 40 番篩通過 5~30%, 100 番篩通過 0~10% で非塑性のものを基層及び路盤材料に用いることにしている。

b) 土壌性質：B.P.R. の分類で A-2, A-3 が最大公約数的に集約される結果である。

c) 液性限界：液性限界, L.L. は 25 以下。

d) 塑性限界及び塑性指数：塑性指数, P.I. は 5 以下あるいは 3~4 として, 塑性限界 P.L. については述べたものがない。

全面積の 60% の凍結地域を有する Oregon 州では 40 番篩通過分と P. I. との間に表-2 の関係を決めている。

表-2

40番篩通過分(%)	0~3	3~4	4~5	5~10	10~15	15~20	25
P. I.	20以下	15以下	12以下	6以下	4以下	3以下	0

しかして突固めは最適含水比の 95% で行い、凍結深度の約 50% を上の材料で置換えている。

e) 粒状材料あるいは上記の材料で置換える深さ：95% の路盤凍上地域を有する Connecticut 州ではこれまで、凍結深度 71.1, 91.4 及び 121.9 cm に対してそれぞれ 61, 71.1 及び 81.3 cm を置換えることにしていたが、これは 86, 78 及び 67% となつている。さらに運搬盛土には 15 cm の Subbase を用いることにしていたが、最近この州では舗装厚と Subbase までの厚さの和を凍結深度の 2/3 あるいは 3/4, すなわち切取土では 51~81 cm, 岩石切取で 81 cm, 盛土では 35.6 cm としている。

凍上被害区域 90% あるいはそれ以上の Minnesota 州では 1.20~1.50 m の凍結深度の場合には 73 cm, 1.83~2.13 m の凍結深度には 107~122 cm の置換えることにしている。

凍上被害区域 90% の New Hampshire 州では土壌の種類で分け、A-2 土壌には 30 cm, A-2-4 の良質でない土壌には 76 cm の深さまでとしているが、さらに地下水位以上 1.20 m と定めている。

これはすべていわゆる不整凍上を防ぎ得る深さであつて、絶対的に凍上を防ぐ意味ではない。

f) 地下排水の位置：地下水面から舗装面までの厚さ、あるいは地表から地下排水までの深さは 1.20~1.50m を最小とするものが多いが、さらに地下排水は

舗装の端から 60 cm 内側に入れているところもある。
 また Connecticut 州では凍結深度以内の排水管のまわりは粒状材料で埋戻し、かつこれに 5:1 の法を与えている。

(3) 特殊工法

Maine, Minnesota, Massachusetts の各州あるいは Michigan 州等では塩化カルシウムによる土壌あるいは粒状材料の処理が行われており、West Virginia 州では Fly Ash を土壌安定処理用の混合材に加えて凍上防止対策とする方法が計画されているが、前者については“道路”9月号を参照されたい。

このほか、Norway 国有鉄道における Tundra の使用は Heat Storing Capacity の増加によつて凍結の侵入防止策として新しい方途を示して興味深い。

6. 結言

米国の道路凍上研究を展望すると、いわゆる凍上作用の機構に対しては単に Ice Lense, あるいは Ice Crystal の形成と名づけるだけで、霜柱あるいはその成長過程等に関して鋭く追及しているものはきわめて少ない。それよりも、土壌湿分の移動、土壌温度の分布、または熱の伝播に関する理論的究明並びに実験的研究が圧倒的に多く、さらにその対策並びにこれに関する野外研究の盛んなことは測定装置、方法の発達とともに顕著な特性であり、実用主義の実験工学の歩みを如実に示している。

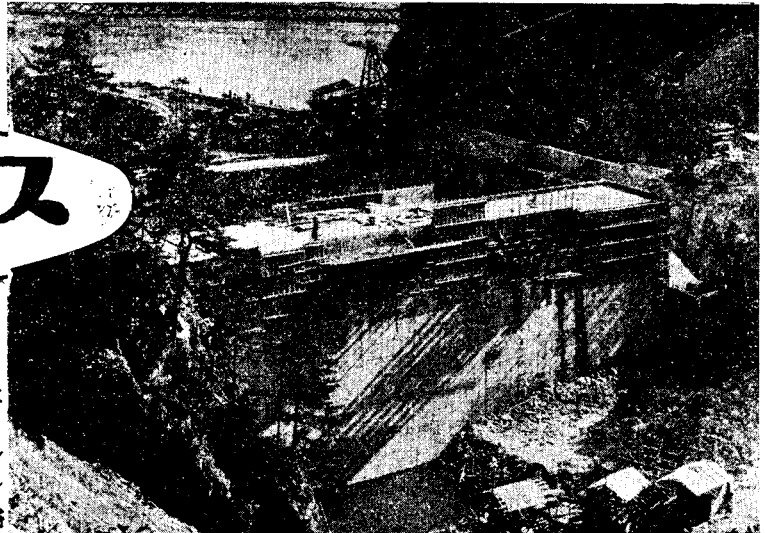
また米国における研究の進め方の中に見逃がせないものは各異なつた専門の分野の研究陣の緊密な提携であつて、これが研究費の多いこと、研究費の上手な支出方法、研究者の教等と一緒になつて成果を挙げしめている事実である。
 (昭.28.10.12)

最も良い最も経済的な
 コンクリートを造る...

ポゾリス
 セメント分散剤

発熱—収縮—龜裂

ダムのようなマスコンでは一番問題になる点です
 ポゾリス・コンクリートは、セメントと水を各々15%減少して普通コンクリートと同じ強度が得られながらも発熱・蒸発が少く、収縮・龜裂の発生が非常に減少します。説明書送呈



本名水力発電所 福島県大沼郡本名村 最大発電力52,000KWH

使用例抜萃 (昭28.11現在)

名 称	企業・設計者	施 工 者
三 面 ダ ム	新潟県	鹿 島 建 設 KK
上 田 水 力 発 電 所	東北電力 KK	前 田 建 設 工 業 KK
本 名 水 力 発 電 所	東北電力 KK	K K 間 組
久 瀬 水 力 発 電 所	中部電力 KK	佐 藤 工 業 KK
松 尾 川 水 力 発 電 所	四国電力 KK	K K 興 村 組
小 田 切 水 力 発 電 所	東京電力 KK	鹿 島 建 設 KK
笹 平 水 力 発 電 所	東京電力 KK	大 成 建 設 KK



製造元

日本曹達株式会社
 東京都港区赤坂表町四丁目
 大阪市東区北浜二丁目

堰堤コンクリート造重力式
 高さ 52m 堤長 195 m
 門扉巾 12m 高さ 12.8m
 ローラーゲイト 5 門

発売元

日曹商事株式会社
 東京都中央区日本橋本町三丁目
 電話 日本橋(24) 7191~5