

講 演

第 20 卷 第 12 號 昭和 9 年 12 月

舗装に及ぼす路盤凍結作用の影響に就いて

(昭和 9 年 10 月 28 日土木學會 20 周年記念講演會に於て)

會員 工學士 金子 柁*

On Effect of Freezing of Subgrade Soil upon Pavements

By Masaki Kaneko, C.E., Member.

内 容 梗 概

本文は今冬 8 號國道に起つた路盤凍結に因るコンクリート舗装及び各種の歩道舗装の被害調査の結果を述べ、この種の被害に就いて理論的説明を加へ、これ等に依つて明かにされたこの種の氣象作用の恐るべき點を記し、更にこれが對策に就いて述べたものである。

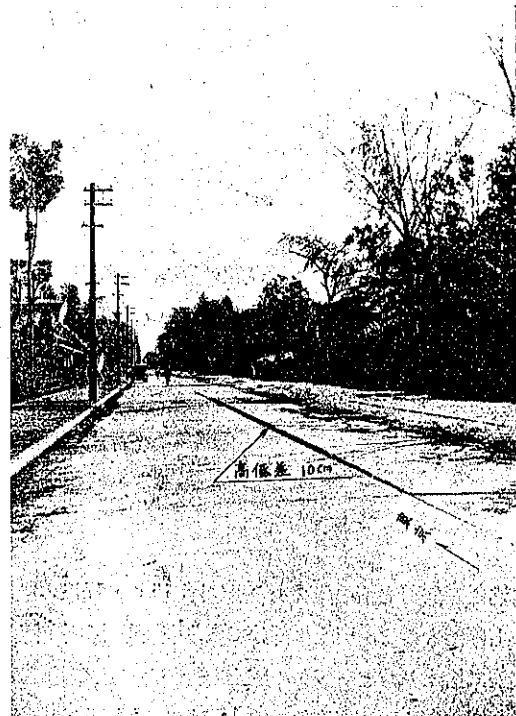
1. 緒 言

8 號國道にコンクリート舗装が施工されてから、既に數年になるが、今日に至る迄東京府下に於て路盤土壤の凍結に因る著しい被害が発見された事は聞いてゐなかつた。然るに本年 1 月 21 日偶々府下北多摩郡谷保村地先で車道コンクリート舗装の目地に著しく高低差の生じてゐるのを発見し、最初は路盤の陥落に因る舗装版の沈下ではないかと疑つたのであるが、沈下の疑のある版には何等移動の跡が見られず、高い方の版には横目地に喰違ひが出来て居り、且其の発見の場所が道路の南側に丈高い樹木が茂つてゐて、日光の直射少く常に濕氣の多い處で、時候も丁度極寒の折であつた等、種々の條件から考へて路盤の凍結に因る舗装版の浮上りの現象と推定し、尙附近の條件の似通つた多數の地點で同様な現象が見られ、其の最初に発見された場所から東京市に至る迄同様な浮上りが斷續して居る事を認めたので、1 月 28 日にこれが調査を行つてみたのである。

2. 舗装浮上りの観測

東京市世田谷區代田から東京府南多摩郡小宮村大和田に至る區間に内務省及び東京府によつて施工された

第 1 圖 谷保村青柳に於けるコンクリート舗装の浮上りの狀況



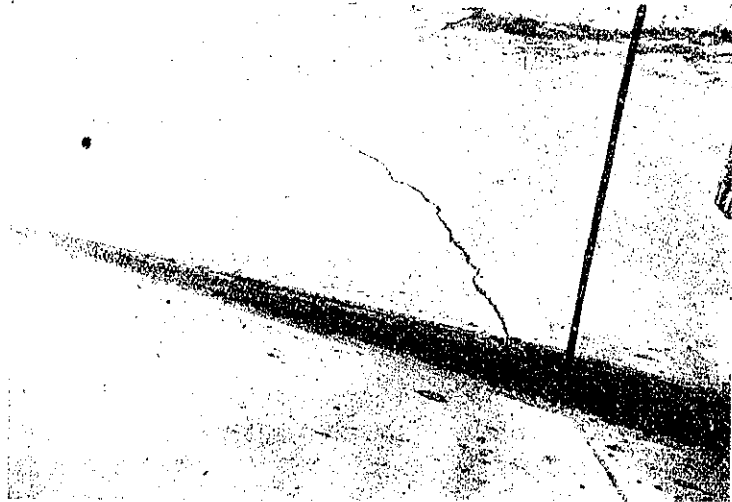
* 内務技師 内務省東京土木出張所勤務

コンクリート舗装の浮上りの状況の観測の結果を主として述べ、歩道に施工せられた2, 3種の舗装に対する同種の被害の状況を加へ、別に山梨縣北都留郡大原村猿橋に施工せられたコンクリート舗装の浮上りの程度に就いて述べることにする。

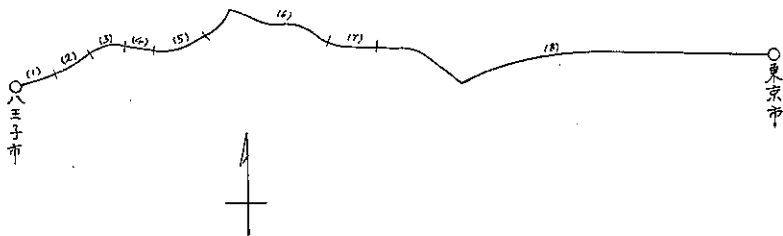
1. コンクリート舗装

第3圖は調査の結果を記述する便宜のために全延長を區分して描いた略圖である。

第2圖 第1圖の箇所が生じた隅角龜裂

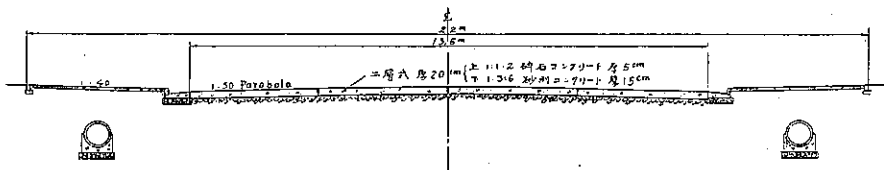


第3圖



(1) 大和田區間 この區間の舗装は昭和8年2月から3月にかけて施工されたもので、第4圖に示す通りの横斷形を有し、舗装版の横目地間隔は10mで縦横兩目地に厚13mmのエラストイトが用ひられてゐる。

第4圖 大和田區間横斷定規圖



路盤は一部切土、一部盛土の上に厚15cm程度の敷砂利を施して其の上を10.5tonのローラーで輾壓を行つて仕上げたもので、切土の部分では、舊砂利道路面を僅かに削り取つた程度で深い切取箇所は無く、盛土の部分は前年度に捨土した上に僅かの盛土を行つたに止る所が多く、一部水田の上に1m前後の盛土をした所はあるが、路盤としては比較的好条件の箇所である。縦斷勾配は比較的緩かで一部1/90の箇所はあるが他は1/400である。

又道路は略東西に向つて走つて居り、其の兩側共人家は稍稠密であるが樹木少く、且幅員も廣い上に兩側に歩道がある等のため車道の舗装面への日射は充分にあるのである。浮上りの模様を調べた所、盛土の箇所では暗渠の附近に延長30mに亘り車道全幅に版の浮上りが認められ、縦横目地共に高低差を生じ、其の大きいものでは中央

縦目地に 23 mm、街渠に接する部分で 18 mm に及ぶものがあり、舗装版数枚に亘つて浮上りが認められたが、版の略中央部に 1 條の横断龜裂のあるもの 1 版の外龜裂は発見されなかつた。舗装版には以上のやうな浮上りが認められたにも関わらず、これと接する街渠には夫と認められるものがなかつた。

(2) 小宮村區間 昭和 7 年 9 月起工、8 年 3 月竣功した舗装で第 5 圖の如き横斷形を有し、版の長さは 10 m を標準とし、横目地にだけエラストイトが用ひられてゐる。

第 5 圖 小宮村區間横斷定規圖



路盤は前年度に擴築した後砂利敷のまま交通を許してあつた箇所を約 40 cm 程切下げて、其の上に砂利道上層の砂利混りの土を敷いて 10.5 ton のローラーで充分軋壓を施して仕上げたものである。

道路は略東西に向つて走り、縦斷勾配は 1/100~1/400 で概して平坦であり、道路幅員の狭いのと南側に人家や樹木のある箇所が多く日光の直射の少い點などから、一見條件は不良のやうに見えるが、道路の各所に設けられた盲溝によつて比較的良好的な路盤が形成されてゐるものと考へられる。浮上りの状況を見るのに、南側に人家又は樹木があつて日射の不十分な箇所で、縦目地に 5~15 mm の浮上りを生じたものが數箇所あり、尙詳細に見るときは延長 2500 m の間殆んど全延長に亘つて北側又は南側の版に浮上りが認められたが、其の高は 2~3 mm 程度を超えず、又舗装兩側の砂利敷路面には殆んど異状が認められなかつた。其の中浮上りの比較的大きいものを擧げてみる。

(a) 鐵道八高線附近

浮上り延長	200 m
日射	良好
最大浮上り高	5 mm (縦目地)
浮上り版	北側
龜裂	版の中央部に横断龜裂のあるもの數箇所

(b) 竹林の蔭

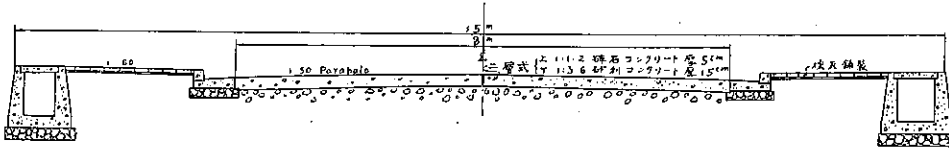
浮上り延長	10 m
日射	不良
最大浮上り高	15 mm (横目地)
龜裂	横断龜裂 1 條

(3) 日野坂路區間 昭和 7 年 1 月から 3 月にかけて施工された縦斷勾配最急 1/30 の坂路の舗装で、有効 11 m の道路幅員の内中央に 7 m 幅の舗装を行ひ、其の中央には縦目地を設け、横目地の間隔は 10 m を標準として目地にはエラストイトが挿入され、前記の膠石舗装と同種のものであるが、滑止めのため其の表面に淺く横溝が付けてある。一部切取をした箇所もあるが概ね在來砂利道路路面を搔均し軋壓を施して路盤を形成したものである。全延長 1000 m に亘り 2 mm 程度の浮上りが南側の版に認められ、南側に山林を負うた日蔭の部分に最大 20 mm の浮上りがあつたが、龜裂は発見されなかつた。

(4) 日野町區間 この區間の舗装は昭和 8 年 2 月から 3 月にかけて施工されたもので、第 6 圖の如き横

斷形を有し、横目地間隔は 10 m で縦横目地共にエラストイトが挿入してある。

第 6 圖 日野町區間横斷定規圖



路盤は舊砂利道を 30~40 cm 程切下げて造つた箇所が大部分で、別に砂利は敷かず、唯砂利道路面の砂利混りの土砂を表面に敷いて締固めただけである。

道路は東西に向ひ、兩側には人家が揃比してゐるが、舗装面への日射は比較的良好である。

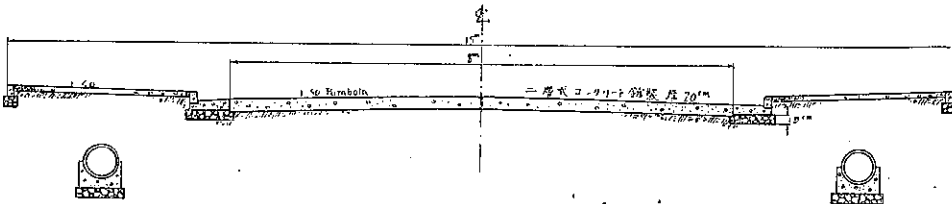
調査の結果、南北兩側共數箇所多少浮上りが認められたが其の高は 2~5 mm 程度で、龜裂も少かつた。

(5) 日野橋附近 昭和 7 年 2 月~3 月の施工に成る膠石舗装で、在來砂利道路面を掘均し輾壓を施して路盤を造つた箇所であるから路盤の状態は極めて良好である上に、道路の兩側は概ね田畑故日射も亦良好で、道路の兩側にはコンクリートの側溝が設けられ路面は附近の土地より相當高く出來上つてゐるので、總ての條件に恵まれてゐるものと云へる。

而してこの區間に於ては浮上りの見るべきもの殆どなく、唯主として南側の版に 2~5 mm の僅かな浮上りが認められたに止まる。

(6) 谷保區間 昭和 7 年 11 月に起工、8 年 3 月に竣功した舗装で、第 7 圖の如き横斷形を有し間隔 10 m 毎に横目地を設け、縦横目地共にエラストイトが用ひられてゐる。

第 7 圖 谷保區間横斷定規圖



幅員 7 m 前後の砂利道を擴築したもので、新道の半幅は砂利道を切下げ、他の半幅は宅地の在來地盤を締固めて路盤を造つた箇所が多く、路盤に砂利の敷かれてゐる箇所は至つて少い。

道路は東西に走り、兩側には人家稠密し樹木多く日蔭の部分の多いのが特に目立つのである。

浮上り箇所の中主なるものを擧げてみる。

(a) 立川町附近

切取深さ 1 m 前後の箇所、路盤には殆ど砂利が敷かれてゐない。

浮上り延長 50 m

日射 不良

最大浮上り高 55 mm (南側側溝に接する部分)

龜裂 無し

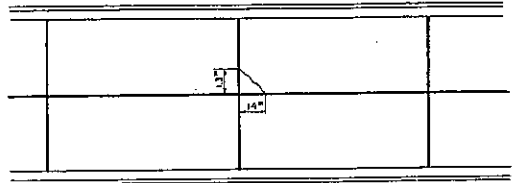
尙横目地には高低差なく、側溝にも異狀が認められなかつた。

(b) 青柳地先

在來砂利道を 50 cm 程切下げた部分で路盤の土質は粘土質である。第 1 圖に見る通り、樹木のために日射極めて悪く、本調査中最大の浮上り高を示してゐる。

浮上り延長 40 m
最大浮上り高 80 mm (寫眞撮影當日
100 mm)

第 8 圖



浮上つた版は南側の日蔭部分のもので、版の隅角(第 8 圖)に第 2 圖の如き龜裂を生じ、其の位置と切斷面の新しい點から、浮上つた版の隅角に交通荷重が作用して生じたものと認められる。

舗装版の浮上りは以上の通り著しいものがあるにも係らず街渠には夫と認むべきものゝなかつた事は注目に値する。

尙 40~50 mm の浮上りのあるものが數箇所あつた。

(7) 府中町區間 この區間の舗装は東京府の施工に成つたもので、幅員 8 m 前後、歩車道の高低分離なく、車道は膠石舗装によつて幅員 6 m が施工せられ、中央に縦目地を設け横目地にだけ目地材が用ひられてゐる。

車道兩側には稍薄いコンクリートの歩道舗装が施工されて居る。

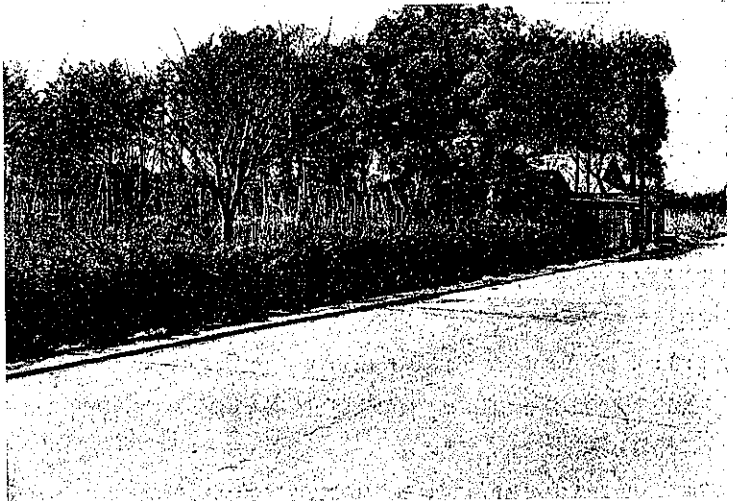
京王電車の踏切箇所から府中町を通つて東京寄りの町端に至る迄、兩側には第 9 圖に見る通り人家櫛比し、處々に樹木が茂り、概して日射は不良である。

全區間に互つて多少の浮上りが認められ、南側の版の浮上り高 30~50 mm に及ぶものが數箇所見出された。

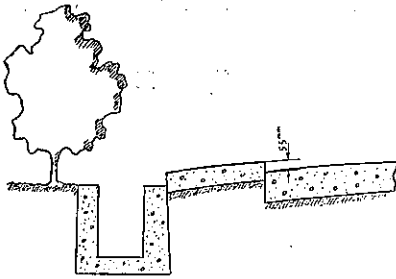
第 9 圖 府中町に於けるコンクリート舗装の浮上りの狀況



第 10 圖 歩道コンクリート版の浮上りの狀況



第 11 圖



又歩道部分の被害の甚しいものは第 10 圖及び第 11 圖に示す如くである。

(8) 府中町世田谷區間 南側日蔭部分に 20 mm 前後の浮上りが各所に見られ、歩道部分の浮上りも亦多かつた。

中央に縦目地の無い部分では日蔭の箇所にて特に縦斷裂が多く見られた。

2. 歩道舗装

(1) 乳劑舗装 東京府北多摩郡谷保村地先に於て第 7 圖の歩道部分に、砂利敷路面を僅かに削つて軽く輾壓を施した上に厚 40 mm の乳劑舗装を施したものであるが、舗装の性質上、目地を缺き、縦斷勾配が比較的急で、且基礎の砂利敷に因つて良好な路盤が得られた爲か、日蔭の部分でも比較的被害は少く、南側に 5~10 m の浮上りが認められたのが數箇所あつたに過ぎない。

(2) 煉瓦舗装 上記舗装に隣接して施工されたもので、歩道幅員 3 m の内、中央約 1 m を舗装し、残部は砂利敷となつてゐる。

排水不良のためか南側歩道に於ては全面的な浮上りがあり、而もそれが不均一なために舗装面に凹凸を生じ、破壊の見られる箇所が多かつた(第 12 圖 参照)。

(3) コンクリート平板舗装 これは煉瓦舗装に其の境を接するもので、幅員は前者と似てゐる。砂褥の上に平板を並べただけであるから、被害の程度も著しく、各の版は箇々自由に移動し、舗装面は亂雑を極めてゐる箇所が多かつた(第 13 圖参照)。

3. 猿橋に於けるコンクリート舗装

新猿橋の取付道路の舗装で、昭和 8 年 3 月~4 月の施工に成り、有效幅員 8 m の内、幅 7 m のコンクリート舗装を施工したもので、中央に縦目地を設け、横目地として 16 m 間隔に伸縮目地を造り、其の中間に 1 箇所づつ収縮目地を置いたものである。舗装は厚 15 cm の 2 層式のもので、上層は配合 1:1.5:3、厚 5 cm、下層は配合 1:3:6、厚 10 cm で、共に砂利コンクリートである。

この舗装の施工箇所は一部在來の砂利道路面を掻き均し、一部は最高 3 m 程の盛土の上を輾壓して路盤とし、其の上に舗装を施工したものである。

道路の兩側には人家が多いが、日射は比較的良好である。

第 12 圖 歩道煉瓦舗装の被害状況



浮上りを調べた處、舗装の南側街渠と接する部分の残雪の在る箇所には極く僅かの區間、10~20 mm 程の浮上りが見出された外は殆んど被害はなく、中央縦目地の高低差は認められなかつた。

唯、南北兩側の街渠又は石積擁壁に接する部分に 1~2 mm の浮上りが見られただけである。

以上の調査の結果、浮上りの著しいのは、道路が東西の方向に走り、其の幅員が比較的狭く、南側に人家、樹木等の日光の直射を遮ぎるものがあり、路盤の築造に當り、在來地盤を切取ること深く、路盤の土質が粘土質で、且其の排水が不完全な箇所であつて、これに反し、日當りの良好な箇所、在來砂利道の路面を路盤として利用した箇所等に於ては浮上りの程度が極めて少いことが分つた。

又山梨縣に於ける舗装では、同地の氣温降下の程度の大きい點、舗装版の薄い點等からみれば、被害も大きくなければならぬ様に考へられるにも拘らず、東京附近と比べて、却つて被害の少かつた事は、街渠の浮上りの殆んどなかつた事と共に注目し値するものと云はねばならない。

3. 舗装版の動き

前述の如く浮上りの最も大きかつたのは、東京府北多摩郡谷保村青柳地先で、第 1 圖に見る通り著しい浮上りを示し、撮影當日其の最高 10 cm に及んでゐた。

前にも述べた通りこの箇所は粘土質の路盤で、砂利敷をなさず、10.5 ton のローラーで締固めを行つたのであるが締める後から浮上つて來て、所謂跳ね返りの現象を呈し、輾壓の効果も充分擧らぬ状態であつた。

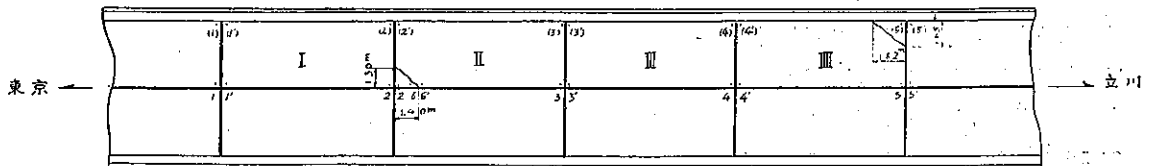
寫眞で見る通り道路の南側に丈高い樹木が茂り、北側は日光の直射のために舗装面では雪が解けて消え去り全く乾燥してゐるが、南側は日蔭であるために積雪が多量に残つてゐる。この箇所の浮上りの延長は 40 m であつて、北側の版と兩側の街渠には浮上りの跡が見られなかつたが、南側の版では中央縦目地に於て最大の浮上りを示し、街渠に接する部分ではそれが極めて少かつた。第 14 圖はこの箇所の平面圖である。

第 13 圖 歩道コンクリート平板舗装の被害状況



第 14 圖

南側



北側

浮上りの高を精密に測定することは版の移動の性質を明かにし、版に生ずる應力を推定する上に極めて必要なこ

とであるが、種々の事情のために水準器を用ひて精密な測定をすることが出来ず、止むなく北側の版と街渠とを基線として、これに対する南側の版の動きを測つたのであるが、其の結果は次表の通りであつて、これに依つて版の動きの性質を略推察することが出来る。

中央縦目地に於ける南側版の浮上り測定値 (単位 mm)

測 點 測定月日	(1)	(1')	(2)	(2')	(6)	(6')	(3)	(3')	(4)	(4')	(5)	(5')	摘 要
1-24	0	10	25	55	—	—	50	50	62	32	5	0	残雪あり (小澤技師測定)
2-21	0	0	5	5	15	70	75	75	50	30	0	0	〃
2-22	0	0	4	0	—	65	72	72	45	20	0	0	〃
2-26	0	0	0	2	12	46	56	56	19	10	0	0	〃
3- 2	0	0	0	2	12	31	24	24	10	9	0	0	積雪融解
3- 9	0	0	0	2	10	26	8	9	10	9	0	0	〃
3-22	0	0	0	-3	7	23	3	7	7	10	0	0	〃

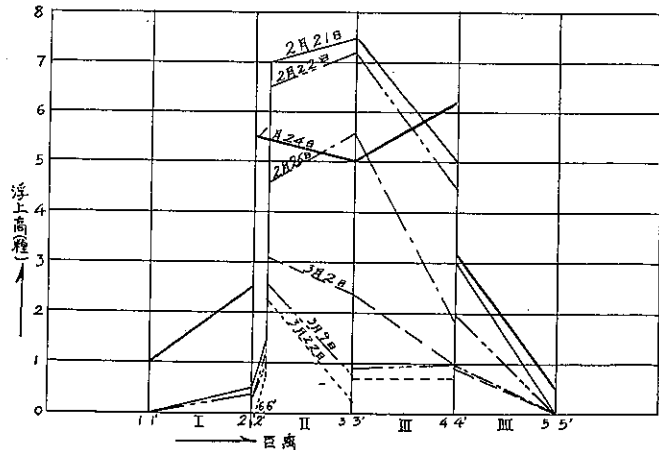
街渠側に於ける南側版の浮上り測定値 (単位 mm)

測 點 測定月日	(1)	(1')	(2)	(2')	(3)	(3')	(4)	(4')	(5)	(5')	摘 要
1-24	0	10	33	0	0	0	0	0	0	0	残雪あり
3-22	0	7	25	0	—	—	0	12	-10	-7	〃
3-26	0	7	15	0	—	—	0	19	-3	-2	〃
3- 2	0	7	14	0	0	0	0	8	0	0	積雪融解
3- 9	0	3	12	0	0	0	0	6	0	0	〃
3-22	0	3	6	0	0	0	2	0	0	0	〃

これ等の観測値を圖表で示せば次の如くである。

各の版の浮上りの模様を見るために、中央縦目地と街渠に接する部分との浮上り高を各観測日に就いて同一圖に畫いてみる。

第 15 圖 中央縦目地に於ける南側版の浮上りの圖



これ等の圖面に依つて明かな通り、版の兩側縁邊の線の平行なものは極めて稀であつて、何れの版も多少の振れを現し、版の各部の移動が均等を缺いてゐることが見られる。第 18 圖は 2 月 22 日の測定によるもので、Ⅲ の版では兩側縁が略平行で振れの作用は考へられないのであるが、其の日から 4 日後の 26 日には第 19 圖に見られる通り、この版には振れが生じてゐることが分る。第 14 圖に於て Ⅲ の版の隅角に龜裂が描かれて

あるが、これが発見されたのは2月26日であつて、この龜裂はは版Ⅲの路盤の凍結の弛むに従つて起る版の移動が均等を缺いたことによつて版に應力を生じたがためであると考へられる。

4. 凍結の理論

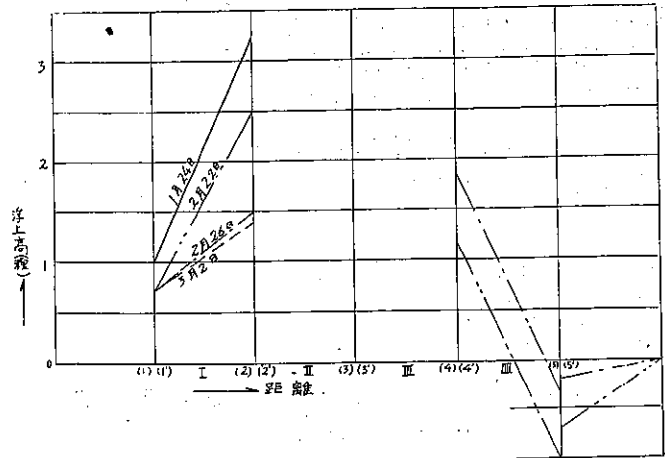
路盤の凍結に因る舗装版の浮上りを考へるに當り、浮上りの大きな版とそれの小さい版とに就いて周囲の條件を比較考究してみる必要がある。

凍結に因る被害は東西の方向の道路に多く起り、同一箇所に於ても南側の版と北側の版との間に其の程度が著しく相違することは前記の調査の結果によつて明かであるが、それは次の如き理由に基くものと考へられる。

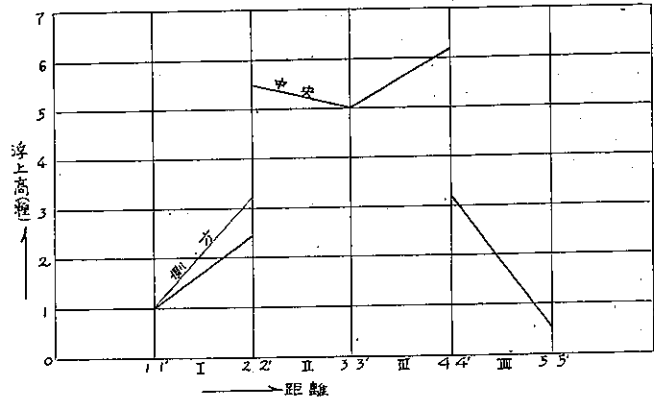
路盤の凍結に因る被害の大きさに最も密接な關係があると考へられるのは地下水位の高度と路盤の土壤の含水量であるが、この關係はしばらく措き、今同1箇所に於ける南北兩側の版に就いて考へるとき舗装面に特別な差異が無い限りは雨水の舗装面を流れる速さは南北兩側共に同一とみてよいから、舗装の目地の間隙から路盤へ流入する雨水の量は大体同一であるとみななければならない。

然るに舗装面に雪の積る場合には霽れた後の日光の直射量の差に依つて、第23圖に見る如く北側の版では積雪の解け方が速かた、舗装の目地の間隙から路盤へ流入する水量は比較的少いが、南側では日光の直射が少いために積雪の融解が極めて徐々に行はれ、且融解して生じた水も積雪の中に貯へられて其の動き方が極めて緩いから、目地の間隙から路盤へ流

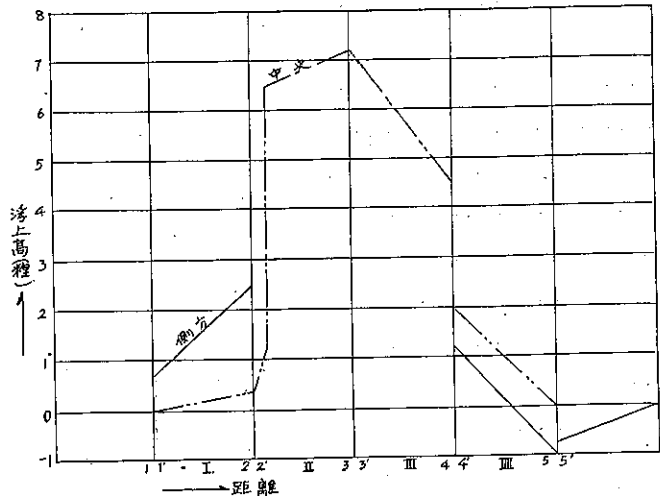
第16圖 街渠側に於ける南側版の浮上りの圖



第17圖 1月24日に於ける浮上りの圖



第18圖 2月22日に於ける浮上りの圖



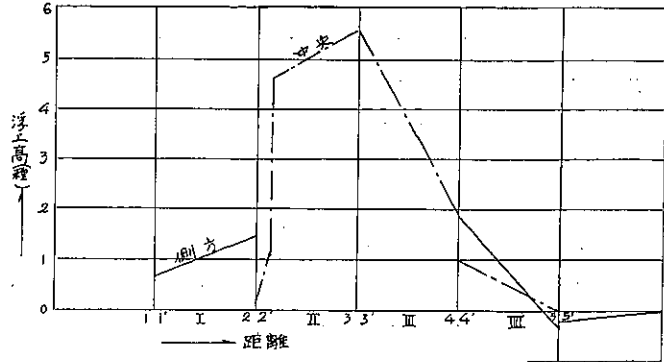
入する水量が多くなるのである。

本年は1月、2月に各月共数回に亘つて多少の降雪があり、例年より降雪の回数も量も共に多大であつたが、これが舗装の浮上りをして、今年特に著しからしめた重大な原因の一つであると考へられる。

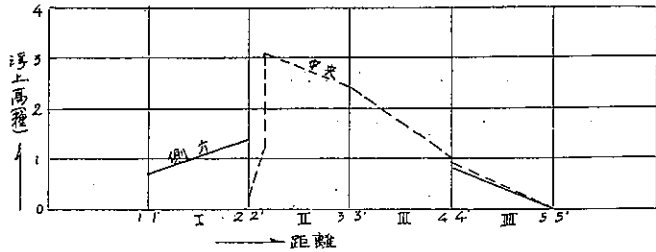
日光の直射の影響はこれのみに止らず、舗装版並に路盤の温度の變化と極めて密接な關係がある事は藤井博士の實驗に依つて既に明かにされてゐるが、夫れに依れば冬季は夏季に比すれば日光直射の影響は弱けれども猶且相當の作用を及ぼすものであつて、北側の舗装版並に路盤の温度が南側のそれより常に高く、前述の含水量の差と相俟つて南北の版の被害の程度に差異を生ぜしめてゐる事は明かである。

又銜渠は其の基礎に厚 15 cm 程度に砂利、玉石の類が敷かれてゐて、これが盲溝の作用をなすために銜渠に近い部分では路盤の含む水の一部がこの盲溝に排除されて其の部分の路盤の土壤の含水量を減じ、中央縦目地附近では前記の温度の關係と、目地の僅かの間隙を通して出入する外氣や雨水の持つ熱の影響、並に其の間隙を通して行はれる蒸發があり、これは銜渠寄りの目地及び横目地に於ても同様で、これ等の原因によつて版の南側に於ては凍結に因る路盤の膨脹は比較的少く、版の中央附近に於て最も大きくなるものと考へねばならない。其の結果は第 23 圖に見る通り、道路の中心に於て持ち上がることもあれば、又銜渠側に於て特に高く浮上ることもあり、

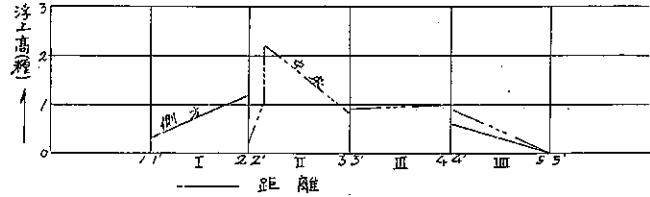
第 19 圖 2月26日に於ける浮上りの圖



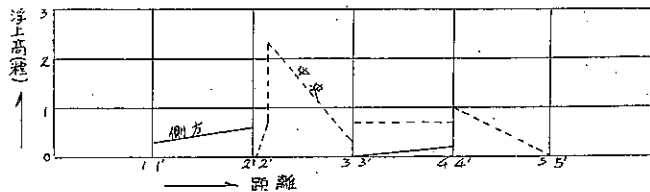
第 20 圖 3月2日に於ける浮上りの圖



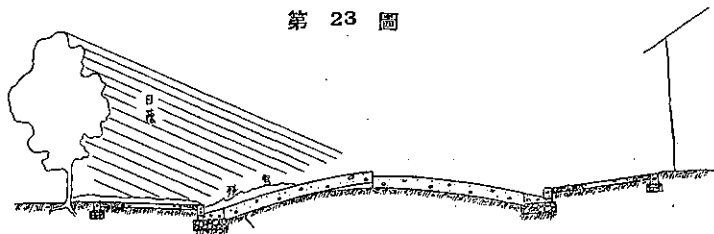
第 21 圖 3月9日に於ける浮上りの圖



第 22 圖 3月22日に於ける浮上りの圖



第 23 圖



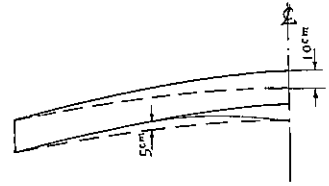
又横目地に於て高低差を生ずることもあるが、何れの場合に於ても版の縁邊に於て路盤の支持を全く離れた部分を生ずるのであつて、極端な場合を考へるならば、版は球面によつて支持されることもあり得ることとなる。而して第 14 圖 II の版に生じた隅角龜裂は以上の推察を立證するもので、この龜裂が次第に成長して遂に隅角の部分が抜け落ちた際に檢べてみた處、版の下には數種の空隙が生じてみたのである。

斯の如く路盤の浮上りが均等を缺き、版の一部が路盤の支持を離れることは舗装版にとつて致命的な危険であつて、この種の被害の如何に恐るべきものであるか分るのである。

次に舗装版の斯の如き浮上りの原因を成す路盤土壤の凍結作用に就いて考へてみる。

今假に路盤の土壤の空隙を 30% と見て、この空隙の全部が水によつて占められてゐるものとし、この水が其の儘凍つたものと考へる。0°C に於て水が凍るときは容積に於て約 9% の膨脹を起すが、路盤の水が凍る場合には上下の方向にのみ膨脹が許されるとみてよいか、土の壓縮を無視すればこの場合の舗装の浮上り高は水の深さの 9% となる。

第 24 圖



1 月 28 日寫眞撮影の際の浮上りの最大観測値 10 cm を採り、第 24 圖

の如く中央縦目地に於て 10 cm、街渠側に於ては浮上りがないものと假定し、上述の理由に因り、版の中央部に於ける路盤の最大浮上り高を 5 cm とすれば、路盤の凍結の最大の深さは 1.85 m でなければならぬ。

然るに昭和 8 年に滿鐵に依つて行はれた調査によれば、北滿地方の如き極寒の地に於ても土壤の凍結の深さは普通 2 m 前後であつて、3 m といふのは稀であることに依つてみるも、この計算による凍結の深さは實驗とは甚しく遠いものであると言はねばならない。而もこの浮上りの高は文獻に依れば米國に於ける道路で 2 ft に及ぶものがあつたと報ぜられてゐるが、斯の如き浮上りが單に土壤の空隙中の水の凍結に依る膨脹だけで起り得るものでないことは明白である。

Taber 教授の實驗に依れば、土壤の凍結の様式には 2 種類あつて、これを開式と閉式とに區別することが出来る。

閉式と云ふのは凍結の初めから其の終りまで、凍結する土壤の内部で水量に増減のない場合であつて、夫れは恰も不滲透性の容器の中に於ける凍結と同様で、水量に増減がないために、凍つた土壤の容積の増加は土壤に含まれてゐる水が氷となるために起る容積の増加に等しい。

これに反して開式の場合に於ては、凍るべき土壤の内部への水の出入が自由であるために、條件によつては凍結による容積の増加は著しいものとなり、又は全然増加の起らぬ場合もあり得るのである。

従來吾々が土壤の凍結に就いて考へて來たのは閉式の場合であつたのである。

然るに現實に起る現象はこの閉式の考へ方では解決の途を見出すことの出来ぬ場合が極めて多く、問題の舗装版の浮上りも亦同様に閉式の考へ方では説明が出来なかつた譯である。

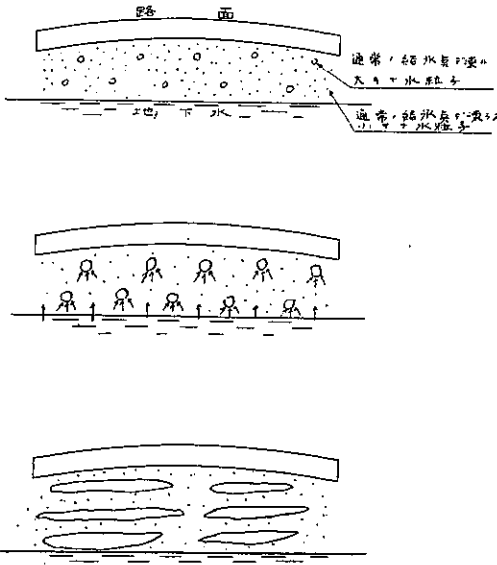
1914 年 Taber 教授は、開式の實驗に依つて、或種の土壤は凍結に當つて容積の著しい増加を起すが、他の種類では夫れが全然起らず、土壤の凍結に伴ふ容積の著しい増加は土壤の凍結に際し水が土から分離して一種の霜柱の塊又は其の層を形成することに因つて起り、容積の増加の伴はぬ場合には夫れが發生しないことを確かめたのであるが、實地に於ても著しい浮上りの生じてゐる所では斯の如き霜柱が發見せられたのである。

土壤の凍結に當つて起る氷の分離作用の力學的研究は其の歴史が極めて淺く、未だ其の目的は充分に達せられてゐるとは云ひ難く、これは將來の研究に俟たねばならぬ問題である。Hogentogler 氏はこの現象を次の如く説明してゐる (Public Roads Vol. 12, No. 4)。

氷層又は氷塊の大きさは、温度の變化の程度、凍結前の土壤の含水量、追加される水の接近程度、毛管作用によつて生ずる水流の模様にも依るものであつて、土壤の中に生ずる分離された氷層の形成は次の如き物理的現象に基くものである。

- (1) 土壤内の大きな毛管空隙中に含まれてゐる水は通常の結氷點又は夫れより僅か低い温度で凍ること。
- (2) 比較的小さな毛管空隙中の水は非常な低温度迄凍結に堪へる性質を有すること。

第 25 圖



- (3) 凍結の過程に於て、凍り易い水粒分子は通常の結氷點で單獨には凍り難い水粒分子を引き付ける性質があること。

既に形成せられた氷の結晶に引きつけられた水粒分子は茲に凍結して氷の結晶の大きさを増すことになる。斯の如き作用を繰返へすことに依つて地下水から毛管を通じて水の供給が續く限り、氷の結晶は其の大きさを増してゆくのである。

第 25 圖は同氏による説明の圖解である。

而して土壤の種類を異にすると共に氷の分離の起るものと起らぬものとがある事實に就いて、同氏は、一般に粘着力を欠き毛管作用の少い土壤では通常の結氷點で殆んど全部の水が凍つて了ふために凍結の影響が餘り現はれないが、毛管作用が盛で粘着力の比較的小さい土壤では凍結による影響が著しいのである、と説明してゐる。

土壤内部の細かい水粒分子の凍結に堪へることに就いては既に實驗の證明する處であつて、土壤が大氣に接してゐる場

合には、土壤の種類によつても異なるが、大體 $-4^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ の気温に對して 3~4 時間に亙つて堪へると云はれてゐるが、粒の粗い土壤の場合と、細かいときによつて其の値を異にする事實は次の實驗値の證明するところである。

土壤の種類	凍結限界温度
砂	$-5 \sim -4.7^{\circ}\text{C}$
粘土	$-6.5 \sim -5.9^{\circ}\text{C}$

土壤の凍結の際に起る氷の分離作用は前記の Hogentogler 氏の説明によつて大體明かになつたが、天然に生ずる所謂霜柱や、實驗室に於て得られるものが綺麗な層を形成することに就いては充分其の理を明かにすることが出来ない。

實驗の結果の分析と其の統一によつて正確な判断を下すことが、問題を解決に導くに最も捷徑であるから、茲に【Taber 教授によつて得られた實驗の結果の中から、重要と認められる事實を若干拾ひ出してゐる。

(a) 土壤の組織

土壤粒子の大きさは氷の分離作用と密接な關係があつて、粒の大きいもの程氷の分離が起り難く、200 番篩通過、最大粒徑 0.07 mm の石英砂では、條件が好い場合に極めて僅かの分離が表面に起り得るに止まるが、粒徑 1 micron 以下のものにあつては分離は容易に起る。

粘土の中に径 0.7 mm の砂を 80% 混合すると分離作用は起らず、これを 50% に減じても尙分離は極めて僅かに止まる。

(b) 膠状物質の影響

粒径の小さいもの程分離が容易に起るのは事實であるが、膠状物質の如き不滲透性の物質を含めば却つて分離作用が妨げられる。

(c) 土壤の成分

有機物を含むことは分離を起させる傾向があるが、実験の結果から見れば大した影響はない。

(d) 冷却の方向

4 方からの冷却は、凍つた土壤の膨脹を 4 方に向つて起させるが、上方からのみの冷却では夫れが上方に限られる。

この場合側壓は起らない。

(e) 土壤の凝固の程度

同一土壤でも凝固の程度の高い程分離作用が弱くなる。

(f) 荷重の影響

最上の條件で辛うじて分離を起し得るやうな土壤では荷重を加へることによつて分離を阻止することが出来る。

(g) 分離の際に生ずる壓力

実験に依つて 11.25 kg/cm^2 の壓力が得られたが、これには容器と土壤との間に働く摩擦力が無視されてゐるから、眞實の値はより大きなものでなければならない。

(h) 冷却の速さ

冷却の速さが早ければ形成される氷層の厚さは薄くなり、徐々に冷却されるときは厚い層が得られる。

定温度の下に行はれた実験によつて得られた土層には第 26 圖に示す如き性質が見られた。

(i) 壓力の方向

分離の際に生ずる壓力の方向は冷却の方向によつて定まる。

(j) 氷の結晶の性質

分離した氷の結晶は、其の成生の際に生ずる水平層と、成長の方向に生ずる絲狀の細い空隙を持つ爲に、縷子様の光澤を有つてゐる。

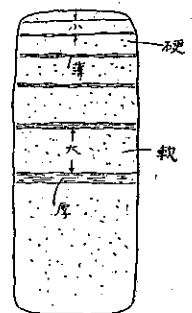
以上の実験に依つて得られた事實から歸納するときは、氷の分離の原因並に其の過程は略推察することが出来る。霜柱の形成に對する主要條件は凡そ下の通りである。

- (1) 土壤粒子の小さいこと。
- (2) 地下水位の高いこと。
- (3) 冷却の速さの比較的遅いこと。

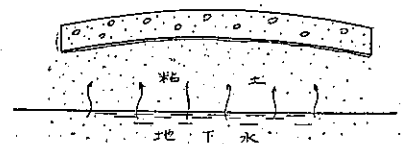
今、第 27 圖の如く、地下水位が高く、毛管作用によつて上昇した水が路盤面に達し、舗装版の底面を沾す結果其處に極めて薄い水膜が出来たものと假定する。

大氣の温度が降下すると共に、舗装版が次第に冷却されて其の底面に於ける温度が水膜の結氷點に達したものとすれば、茲に水膜は凍結

第 26 圖



第 27 圖



を始めるであらうが、前記の通り粘土の細かな空隙の中の水は通常の結氷点では凍り難い性質があるため、水の凍結の深部へ向つての進行は急には起らず、氷の層の近くにある水粒分子は第 2 の水膜を作り、これが再び凍結するときは更に第 3 の水膜を形成し、斯くして下からの水の供給が断たれる迄は霜柱の成長は続けられるであらう。若しも路盤から取去られる熱量と、下から供給される水によつて運ばれて来る熱量及び水が氷に變化する際に發生する熱量との間に平衡が保たれるならば霜柱の成長は水の供給の續く限り永久に續くこととなるであらう。又若しこの平衡が破れて、路盤から取去られる熱量が超過すれば冷却は土壤の深部へ向つて進行することとなる。

然るに後に述べる通り粘土を形成する礦物は水に比べて熱の傳導率が大きく、比熱が小さいために、其の質量の差と相俟つて冷却される速さが水よりも早い故に、土壤の中の或深さを考へるならば、冷却の進むと共に其の點に於ては先づ土粒分子の温度が下つて来るのであつて、土粒分子の温度が水の分子を凍らせるに足るものとなれば粘土の中の水は土粒分子の周圍から凍結し初めることとなり、其の爲に粘土の内部の毛管空隙が狭くなり、水の上昇が妨げられるに至つて遂に或深さ迄の凍土が出来上り、其の上に於て成長しつゝあつた氷の結晶は其の成長を全く停止せしめられることとなる。

而して砂の場合に於てはこの作用が急速に進行するために、霜柱の成長の機會少ないのである。

第 1 の氷層が其の成長を了へ、其の下に或厚さの凍土が出来れば、其の凍土と接する不凍水の上表面が、條件が好ければ第 2 の氷層形成の場所となり、斯の如くにして冷却と水の供給との續く限り霜柱の結成は続けられることとなる。

以上述べた處によつて霜柱の成因並に其の成長の様子が明かになつたが、霜柱の形成の際にコンクリート舗装版の如き大きな荷重を持ち上げる作用が如何にして發生するかの問題が未だ残されてゐるので、前記の如くこの壓力は 11.25 kg/cm^2 にも達し、これを舗装の厚さに換算するときは、大約 50 m と云ふ驚くべき高さとなるもので、丸ビルの如き大建築物をも樂に持上げることが出来るのである。

これに對して Taber 教授は次の如き説明を與へてゐる。

成長しつゝある氷の結晶は他の種々の物體が水と接する部分に生ずる水の吸着層と同様な水の薄膜に接してゐる。

この水膜の中の水粒分子が凍つて氷の結晶に附着すると、これに續いた他の分子が其の補ひに這入つて来るために水膜の存續は保たれる。若しも氷の成生が土粒分子の如き他の物質によつて妨げられるならば、水の薄層はそれを引離すべく壓力を生ずる。斯の如き水の薄層は水の分子の單層から成り立つてゐる様でもあるが、自分はそれよりも幾分が厚いと考へたいのである。其の理由は水の分子には、かなりの運動性があるからである。單分子層は壓力のみによつては追出され得ないが、厚い層では壓力によつて分子の幾らかを追出すことにより其の厚さを減ずることが出来るからである。唯、この場合、強大な引力によつて抵抗されるではあらうが。

得らるべき水が全部使ひ果されて了へば、水膜は凍つて了ふのであるが、この最後の膜は容易には凍らない。水の分子が凍つて、既に出来てゐる結晶に附着する時には其の容積の變化に相應する僅かな反力を伴ふのであるが、これは大して重大な事柄ではないのである。何故なれば、凍結の際に容積を減ずる性質の液體を使つて實驗してみても同様な壓力が生ずるからである。

氷の結晶から離れた所にある水の分子間の引力は水膜内の分子間又は水粒分子と氷との間に働く粘着力よりも小さい。

成長しつゝある氷の結晶と其の障礙物たる土粒分子との間に在る水膜の中に水の分子を推し入れることの出来

る外力がないので、水の分子を引離すまいとする強大な分子引力によつて水が氷の結晶と土との間へ引き入れられるために氷は上へ持ち上げられるのである。

氷の層の成長が續く限り水は土壤の内部の毛管通路を通じて引き上げられるのであるが、この水の上昇運動は毛管作用によるものではない。何故なれば其處には水面も存在しなければ又毛管のメネスカスもないからである。成長しつゝある氷の結晶は開式に於ては、大氣壓の幾倍もの抵抗に打ち勝つことが出来るのであるから、この場合水は強大な引力の下に水膜の中へ引き込まれるのである (The Journal of Geology Vol. 38, No. 4)。

更に又吾々は砂と粘土が其の凍結に當つて著しく異つた性質を示す點に就いて其の理由を究める必要があらうと思ふ。従來はこれを砂と粘土との粒徑の差異、従つて夫れ等の中の空隙の大きいさの差異によつて説明され來つたのであるが、これを單に粒徑の大きいさで簡單に片付けて了ふことには聊か無理が感ぜられるのである。

砂と粘土とを構成する礦物の粒子は、一般に粒徑を異にするのみならず、其の形狀に於ても大きな差異のあることは周知の事實である。土壤の凍結に際して霜柱を生ずる爲には、土壤の内部への冷却の進行が比較的緩慢でなければならぬことは既に度々述べた通りであるが、この作用と粒徑並に形狀との間には次の如き關係があるのである。

今 A を以て熱の傳導に直角な方向に測つた物體の斷面積、 T は溫度、 Q は熱量、 s は熱の傳導の方向に測つた距離、 C は物質の比熱、 ρ は其の密度、 k は熱傳導率を表はすものとすれば、傳導によつて單位時間に運ばれる熱量は次の式で表はすことが出来る。

$$m = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{ds}$$

然るに今單位面積を考へて $A=1$ とすれば、 m なる熱量の増減によつて變化する物體の溫度は $m/C\rho$ となる故、種類を異にする物質の冷却に依つて起る溫度の降下の度は $\omega = k/C\rho$ の値によつて比較することが出来る。路盤の土壤の凍結を取扱ふ場合には空氣、土壤粒子、水並に氷を考へねばならぬ故、夫れ等に就いて熱の傳導に關する諸性質を比較してゐることとするが、これ等の値は溫度の高低と共に多少の變化を示し、且又土壤を形成する礦物と云つても其の種類を異ると共に幾分其値を異にするものがあるから、極めて粗い數字に止めることとする。

物質	k	C	ρ	ω
空氣	0.00006	0.24	0.001	0.250
氷	0.005	0.50	0.92	0.011
礦物	0.003	0.20	2.50	0.006
水	0.002	1.00	1.00	0.003

この表によつて明かな如く、水を含んだ土壤が冷却作用を受けるときは、土粒分子から取去られる熱量はその熱傳導率が大い爲に水から取去られる量よりも大きい上に、 ω の値も亦土粒分子の方が遙かに大きいから溫度の降下は土粒分子に於て著しいのである。又空氣に於ては ω の値が極めて大きい故土壤内の水分が少く空隙中に多量の空氣を含む程土壤内部への凍結の進行が早くなり、従つて水分の少い程霜柱は起り難くなる譯である。

第 28 圖 (a), (b) に示す如く、同一物質から成り單に其徑のみを異にする球狀の土粒分子が水中に圓の如く配列されてゐるものとする。(a) に於ては (b) に於けるよりも粒徑が大きく従つて其の斷面積も亦大きい

第 28 圖 (a) (b) (c) (d)



ら、前掲の熱傳導の式によつて明かな通り、熱の傳導が良好で、若しも氣温の降下が起れば、(a)の場合には(b)よりもより速かに土粒分子が冷却される。

更に(a)と(b)との土粒分子の徑の異なる結果、同一深さの間に含まれる粒子の数は(b)に於て遙かに多いために粒子間に在る水膜の厚さの總和が大きく、従つて熱の傳導を妨げられる結果、小粒子の土壤に於て凍結の進行が遅くなるのである。

更に又、氷は水と礦物に比して冷却が容易であるから、一度土壤の内部に於て凍結が始まれば其の進行は加速度的に早められることとなるものであつて、これ等の作用が合して、粒子の大小による凍結現象の差異を示すこととなるのである。

然るに、砂と粘土とは單にその粒子の大きさを異にするのみならず、其の形狀に於ても根本的な相違を有し、粘土は主として鱗片狀の粒子によつて組立てられてゐるから、この場合に於ては(c)、(d)の如き兩極端の配列も考へられるが、實際の場合はこれが適當に組合はされたものと考へることが出来る。

而して、(c)の場合には粒子間に挟まれた水膜の多いことに依り、又(d)の場合には其の斷面積の小さいことに依り、共に凍結の進行が遅くなるのであつて、これ等が粘土に於て特に霜柱の發生し易い原因であらう。

5. 被害と其の對策

此處で再び8號國道の問題に立戻る。

今冬は例年に較べて降雪の回数が多かつた。其の爲に路盤に流入する水量も比較的多かつたであらうことは前に述べた通りである。而して、浮上り高の最も大きかつた箇所は路盤の土壤が粘土質で、跳返りの現象を呈し、締固めの効果が充分に擧げ難かつた所である。加ふるに今年の寒氣は例年よりも其の繼續期間が永かつたのであるが、而も元來東京附近に於ては氣温の降下は比較的緩かであるので、斯の如く霜柱の發生に必要な條件の總てが完備せられてゐたと云つても差支へない状態であつたのである。被害の大きかつたことも亦當然と云はねばならない。被害箇所の舗裝版を取除いて、凍結した路盤の土壤を取出してみることは不幸にして出来なかつたが、舗裝の下には必ずや霜柱の層が其の姿をかくしてゐたに違ひない。

路盤の凍結に因つて起る舗裝の被害は眞に恐る可きものであつて、版の浮上りが1~2cm程度ならば交通に與へる障碍も殆ど顧慮するに足りないが、これが數厘に達すれば交通はこの部分を避けて通る傾向を生じ、道路の有効幅員を狭めて交通の混雜を招くに至り、又其の混雜を避けるために、浮上つた版の上を通るときは版を破壊に導くこととなる。版の隅角、縁邊の隆起する結果は、其の部分の磨耗を早め、版の移動のために生ずる目地材の破壊飛散は舗裝の防水力を弱めて目地からの水分の流入を招き益々被害の度を高めることとなる。

又春暖の候ともなり、結氷が融解するに至れば路盤の含水量を増加して其の支持力を激減せしめる結果は舗裝版沈下の危険も生ずることとなり、融解の度が均一を缺くときは版に不測の應力を發生せしめて其の破壊を招くこととなる。

更に吾々が考へねばならぬのは凍結と融解との交互作用である。氷の分離によつて路盤の上面近くに多量の水分が集まるが、氣温の上昇と共にこの氷が解けるときは路盤の土壤は過分の水を含むこととなり、この水が逃げ道を見出さぬ間に再び寒氣が襲來するときは、前よりも更に大きな被害を生ずるのは明かであつて、凍結融解の交互作用の恐るべきは想像に難くない。而も東京附近の如き比較的溫暖な地に於て其の危険が多いのである。

霜柱の發生成長のためには冷却の速さが比較的遅いことが必要條件であることは度々説いた處であるが、東京

附近の被害と山梨縣に於るものと比較するとき、一見被害の大きかるべき後者に於て却つて夫の少かつたことは一部この理に基くものと考へられる。

斯の如く、路盤凍結に因る被害が極寒の地よりも、却つて比較的温暖な地に於て起り易いことは今後の舗装の建設又は維持に當つて特に考慮されねばならぬことである。

吾々は更に、舗装の維持の上から、一度この種の被害を蒙つた路盤に於ける將來の被害の程度を考へてみる必要がある。

前述の如く路盤に霜柱の生ずる結果は舗装版に種々の被害を蒙らしめるが、被害を受けた箇所を其の儘放置するときは、目地材の飛散、龜裂の發生等の原因によつて雨雪の路盤に入る量を増し、結氷と融解との交互作用のために路盤の土壤が其の凝固を弛められる結果、結氷作用に對する危険を増加するに至るであらう。

斯く考へ來れば、被害箇所は年と共に其の被害に對する感度を高めてゆくことが推察出来る。

然らばこの種の被害を如何にして防ぐか。

若しも吾々が經濟上の立場を離れることが出来るならば、凍結の限界の深さ迄舗装の厚さを増せば目的は完全に遂げられるであらうが、特殊の箇所を除いては實行の可能性を缺く。

凍結の被害を防ぐ根本的な方針は、凍結作用を開式から閉式に導くことにあるが其の手段には凡そ次の 3 つが考へられるであらう。

- (1) 路盤の排水設備の改良
- (2) 路盤土壤の組織の改良
- (3) 輾壓の完全な施工

路盤の排水設備の改良は勿論被害を少からしめるために有効ではあらうが、土壤の中の毛管水は單に排水設備の完全な施工のみによつては取り除くことが出来ず、且又急に多量の水分が流入して來るやうな場合には被害の絶無を期し難い。従つて吾々は前掲 3 つの方法を併用しなければなければ防止の目的を遂げるに充分でないことを知るのである。

實驗と理論とによつて明かな通り、砂や砂利の如き粗粒の材料を路盤の土壤に加へ、又は夫れと置き代へることがこの種の被害を防ぐためには最も簡單且最も確實な方法であることは疑ひのないことで、これに充分な輾壓の施工を加へて水の滲透性を減じ、水の上昇に對する抵抗を大ならしめるならば、目的の大部分は遂げられるであらう。唯、被害を充分に防止するためには、凍結作用の到達し得る深さの限度迄路盤土壤の組織を改良しなければならず、場所と場合によつては工費も相當嵩むことを免れない。茲に吾々が考へて置かねばならぬことは、粗粒の材料が霜柱の發生を防ぐに有効であると云ふのは、夫れが絶対に發生しないと云ふ意味ではなく、條件次第で幾らかの發生はあり得るが、其の量が比較的少く、且其の發生の機會も亦少いことである。

舗装の維持に當つては、除雪を速に行ひ、目地や龜裂の修理を完全にして舗装の防水性を高めるならば、夫れは被害の程度を減少せしめるに役立つであらう。

又建設に當つては、地下水と地質に對する調査を充分に行つて、被害に就いて豫め其の對策を講ずることが出来れば幸であり、更に進んでこの種の被害の防止のためには、舗装道路の横斷形狀に對して新しい工夫がなされるべきである。