

# 凍結－融解作用이 흙의 強度特性에 미치는 影響(IV)

－斷熱材를 挿入한 凍結盛土의 斷熱舉動－

## Effects of the Freeze-thaw Process on the Strength Characteristics of Soils (IV)

－Insulation Performance beneath the Freezed Tested Banking by Inclusion of Insulation Material－

柳 能 桓\* · 朴 承 範\*\* · 柳 瑩 善\*\*\*  
Ryu, Neung Hwan · Park, Seung Bum · Ryu, Young Sun

### Summary

This paper was analyzed the thermal conductivity of Polystyrene (TENSAR-GEOGRID) embedding into the subbase through frost penetration depth, frost heave, change of bearing capacity, and soil moisture movement due to freezing, thawing and icing actions, and their results were as follows :

1. The change of temperature into the sub-base was much increased by the Tensar-Geogrid insertion, and the frost penetration and frost heave were decreased as the thinner of the insulation thickness but the thawing velocity of melting period was appeared to be faster in case of non-insulated.
2. The frost heave had a close relationship with the thickness of insulations which was reasonably included anti-frost effects.
3. The moisture content during the freezing period of upper layer of the insulation insertion was increased by 15 per cent but it was returned to initial state of the thawing period, and at the down layer temporarily increased by 10 per cent and returned to the original state at once.
4. The insulation was acted as a function of distribution of surcharge, and the settlement

\* 江原大學校 農科大學  
\*\* 忠南大學校 工科大學  
\*\*\* 忠北大學校 大學院

키워드 : 蜂巢構造, 融解係數, 凍結指數, 熱傳導率,  
凍結指示器, Tensar-Geogrid, 斷熱材, 凍上,  
着氷現象, 熱常數

of the sub-base was about 1.5 mm under 15 tonnage of load and which was included within the allowable limits.

5. The sliding resistance due to the icing which was induced by the insulation insertion into the subbase was appeared as more 40 per cent than noninsulation area, so that the insulations should be restricted on the place such as mountains, curved and cross area which were required the braking power under the traffics.

## I. 緒 論

氣溫이 零下로 내려가면, 一般道路나 擁壁, 터널, 各種水路構造物이나 土質構造物은 地盤의 凍結 및 凍結-融解作用에 의하여 中대한 影響을 받게된다.

永晶이 凍結前線으로 成長하여 漸次的으로 移動될때, 發生되는 凍上作用은, 地層에 龜裂을 誘發시키고 支持力을 減少시키기 때문에 過去 20餘年동안 冬季中 흙의 凍上作用을 減少시키기 위한 研究가 꾸준히 遂行되어왔다. 凍上에 따른 흙의 膨脹과 龜裂, 그리고 解氷軟化에 따른 支持力의 減少에 對한 對策을 講究하기 위해서는, 凍上和 解氷軟化에 따른 흙의 物理的, 力學的 性質이 理解되어야 한다. 報告된바에 의하면 偉度和 地形에 따라서 약간의 차이는 있으나, 氣溫은 標高100 m當約0.6°C씩 增減되고 凍結深은 -1°C低下될때마다, 5~8cm 程度 增加된다고 한다.<sup>3, 12)</sup>

또 過度한 凍上은 地中에 蜂巢龜裂(honey comb)을 誘發하고, 凍結-融解의 反復作用은 垂直斷面상에 直線形龜裂을 發生하여, 地下深層部까지 龜裂이 波及되며, 道路斷面에 Bending을 일으켜 큰張力을 誘發시킨다. 이와같은 凍上 및 凍結-融解對策으로써는, 一般的으로 모래자갈층을 設置하여 凍上防止層을 두는 方法을 취하고있다. 한편 凍結의 정도는 그 地域에서의 凍結指數와 關係가 있으며,<sup>3, 12)</sup> 뿐만아니라, 施工上의 問題나 經濟的與件 및 自然環境의 保存的次元에서, 모래자갈의 供給量의 制

約때문에, 새로운 施工法의 開發이 要求되어, 1870年頃 sweden에서는 所謂 斷熱工法과 關聯하여, 雜木을 Mat로 짚서 使用했다는 報告가 있었고, 1920年代에 와서는 Beskow<sup>5)</sup>는 凍上對策의 심각성을 인식하고, 凍結深에 對한 理論式을 發表한바 있으며, 1960年初에 leonards<sup>6)</sup> 등은 高分子化合物인 plastic材를 使用한 斷熱施工法을 試圖한바 있다. 또 最近에는, 이웃 日本과, 北美州에서, 道路 및 飛行場滑走路工事에 壓出型-plastic材를 斷熱材로 使用하여 좋은 結果를 얻었다.<sup>8, 19)</sup>

地層의 熱의特性을 評價하기 위해서, 凍結狀態를 測定하는 方法에는, 凍結地盤을 掘鑿하여 直接測定하는 方法과, 電氣抵抗裝置를 插入하여 測定하는 方法, Methylene blue indication<sup>3)</sup>를 使用하여 測定하는 方法등이 있고, 理論式으로는 Stefan<sup>22)</sup>, corps of engineer<sup>1)</sup> 및 Berggren<sup>7)</sup>의 方法 등이 있다.

今回研究에서는, 不等凍上對策工法의 하나로 polyethylene材를 路盤에 埋設하여 本材料의 凍上抵抗能力을 究明하고, 또 凍上의 分布 및 過載荷重分布狀態를 測定하기 爲하여, 2.5, 3.8, 5.0 mm의 3種類의 斷熱材를 使用하고, 各種計測裝置를 設置해서 熱的舉動을 測定하였다.

## II. 材料 및 方法

本試驗에 使用된 材料의 熱的性質은 Table-1과 같고, 주변 氣象台의 Data를 取하여 Fig. 1과 같이 10월부터 다음해 4월까지 平均値를 求하

Table-1. Thermal constants of construction materials.

material	Constants dimenaion	Thermal conductivity cal/cm · sec °C	Heat capacity cal/cm <sup>3</sup> · °C	latent heat cal/cm <sup>3</sup>
Sandy gravel		0.00520	0.466	19.80
Clay		0.00343	0.627	46.00
Insulation		0.000026	0.06	0.00

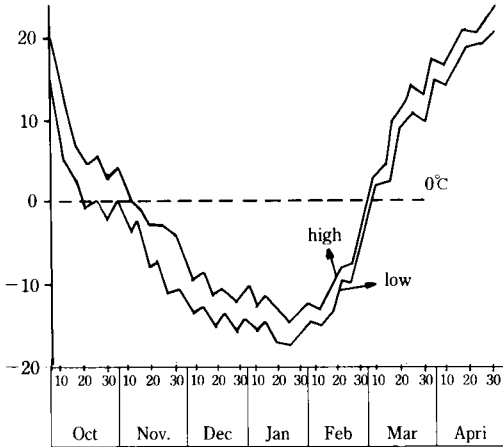


Fig. 1. Daily max-min air temperature for recently 3 years.

였다. 이때 試驗凍結期間은 11월부터 다음해 2  
 月末까지 3個月間으로하고, 2월부터 4월까지  
 解氷期로되고, 最低氣溫은 1月の -18°C이었다.  
 鋪裝構造의 凍結深을 測定하는 Berggren의 修  
 正方程式을 利用하여 全層의 熱의 特性을 求하  
 고, thermocouple 및 frost indicator를 埋設하여  
 地中溫度를 測定하였으며, 平板載荷試驗을 實  
 施하여 支持力分布를 測定하고 icing 現象은 翹  
 대용 미끄럼抵抗測定器를 使用하였다.

### III. 結果 考察

#### 1. 凍結深

凍結深은 흙의 種類, 地下水位, 太陽輻射熱  
 및 積雪量等에 따라서 크게 左右되기 때문에,

正確히 推定하기는 어려우며 今回에는 Bergg-  
 ren의<sup>7)</sup> 修正方程式을 利用하여 求하고 實測値와  
 比較하였다. 다층토의 凍結深을 求하기 爲해서  
 道路鋪裝에 對한 Aldrich<sup>1)</sup>의 修正 Berggren의  
 式은 다음과 같다.

$$Z = \lambda \cdot \sqrt{\frac{172,800 \cdot F}{(L/K)_{\text{eff}}}} \dots\dots\dots (1)$$

$$(L/K)_{\text{eff}} = \frac{2}{X^2} \left\{ L_1 \cdot d_1 \left( \frac{d_1}{2K_1} \right) + L_2 \cdot d_2 \left( \frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{2K_2} \right) \right. \\ \left. + L_3 \cdot d_3 \left( \frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{2K_2} + \frac{d_3}{2K_3} \right) \right. \\ \left. + \dots\dots\dots L_n \cdot d_n \left( \frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \frac{d_n}{2K_n} \right) \right\}$$

X : (d<sub>1</sub> + d<sub>2</sub> + ... + d<sub>n</sub>) 예상동결층(em)

d<sub>n</sub> : 各層의 두께(cm)

d<sub>1</sub> : 最初層의 두께(cm)

K<sub>n</sub> : 各層의 열전도율(cal/cm · sec°C)

L<sub>n</sub> : 各層의 잠열(cal/cm<sup>3</sup>)

λ : 보정계수 f(r,t)

μ : 용해보정계수 Qwt · F/Lwt

Qwt : (θ<sub>1</sub> · X<sub>1</sub> + Q<sub>2</sub> · X<sub>2</sub> · ... · Q<sub>n</sub> · X<sub>n</sub>) 열용량의  
 가중평균치

L<sub>w</sub> = (L<sub>1</sub>d<sub>1</sub> + L<sub>2</sub>d<sub>2</sub> · ... + L<sub>n</sub>d<sub>n</sub>/X) 잠열량의 가중평  
 균치

L<sub>1</sub> : 最初層의 잠열량 cal/cm<sup>3</sup>)

또 單一層에 對하여는

$$Z = \lambda \cdot \sqrt{\frac{172,800 \cdot K \cdot F}{L}} \dots\dots\dots (2)$$

F : 동결지수(°C/days)

K : 열전도율(cal/cm · sec, °C)  
 L : 융해잠열  $= 0.8\omega \cdot \rho_d$ (cal/cm<sup>3</sup>)  
 $\omega$  : 함수비  
 $\rho_d$  : 건조밀도(g/cm<sup>3</sup>)  
 $\lambda$  : f( $\pi, \tau$ )  
 $\pi$  :  $|C_d| \cdot C \cdot \pi_d / L = Q \cdot F / L, t$  : 융해계수  
 t : 총동결기간(days)  
 C = (0.17 + 0.0075 ·  $\omega$ ) : 비열(ac/g · °C)  
 Q : C ·  $\rho_d$  열용량(cal/cm<sup>3</sup> · °C)  
 $\tau$  : C<sub>2</sub> · t / F : 비열

C<sub>2</sub> : 연평균온도

Fig. 2와 Fig. 3은 斷熱材의 두께變化에 따른 凍結深과 溫度 및 凍結期間과의 關係를 나타낸 것으로 凍結深은 斷熱材의 두께가 두꺼울수록 減少되고 또 溫度變化程度도 減少되었고, 不凍結土 部分의 溫度勾配는 斷熱材上에서는 거의 一定하게되었고, 斷熱材以下에서는 減少추세를 보였다. 이와같이 本斷熱材는 熱의 傳達作用을 억제시켜서, 路床의 溫度變化를 크게 減少시키며, 非斷熱의 境遇 0°C 等 溫帶는 140 cm이고 2.5 mm의 경우는 75 cm, 3.8 mm인 때에는 55 cm, 5.0 mm에서는 35 cm를 나타내고 있었으며, 특히 5.0 mm의 경우, 그層以下에서는 理論上으로는 거의 遮斷이 되었으며, 溫度勾配가 작으면 Frost heave도 減少되는 경향을 보였다. 또 斷熱材上部의 溫度는 매우 낮았고, 이와같은 現象은 斷熱材의 두께가 클수록 增加되었으며, 解氷期에는 斷熱材가 地表로부터 熱의 波及效果를 遮斷하므로써, 地盤의 融解 速度는 非斷熱의 境遇보다 遲延되는 現象을 나타냈다.

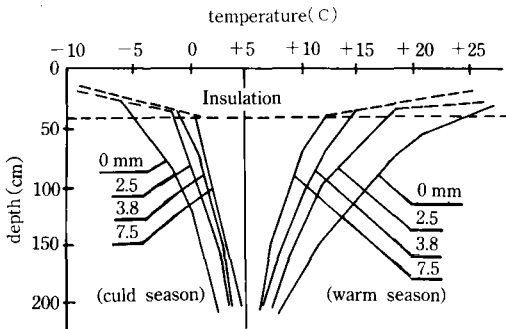


Fig. 2. Vertical temperature distribution in the subgrade where was insulated with geogrid.

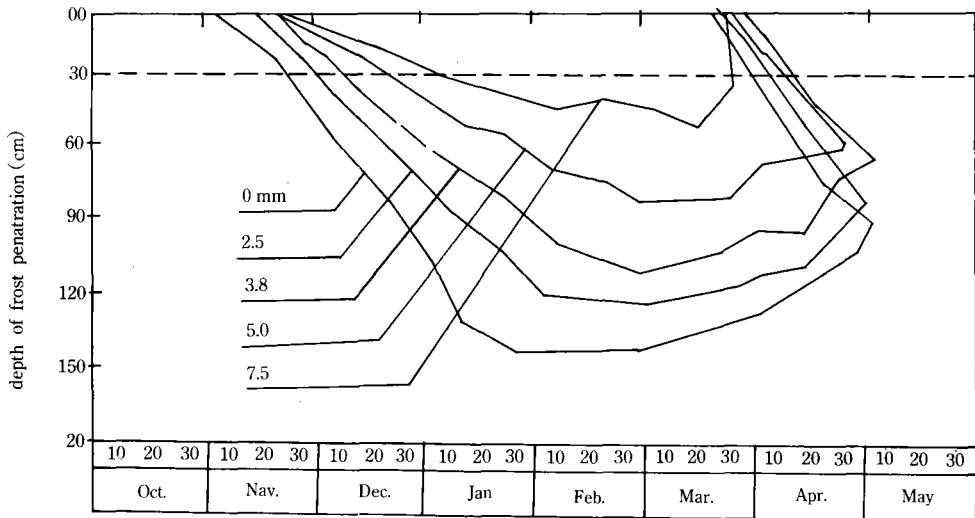


Fig. 3. Comparison of frost penetration as the insulation thickness from October to May.

## 2. Frost heave(凍上)

Fig. 4는 路面橫斷部의 凍上現象으로 中心部가 약간 突出되고, 兩側面으로 갈수록 낮아지고 있다. 이는 交通의 疏通을 爲해서, 積雪量을 側面으로 除去시켜서 除雪에 의한 影響으로 看做된다. 非斷熱地域에서는 大略 25 mm 程度の 凍上現象과 3~5 mm 程度の 垂直龜裂이 發生되었으며, 斷熱地域에서의 凍上은 大略 5 mm 内外로써 約 80% 程度減少現象을 나타냈고, 斷熱材의 두께가 두꺼울수록 凍上量도 減少되었다.

Fig. 5는 路面縱斷方向에 對하여, 斷熱地域과 非斷熱地域의 凍上現象을 測定한 것으로, 이 두 지역의 연결부에서는, 漸進的인 凍上이 發生되

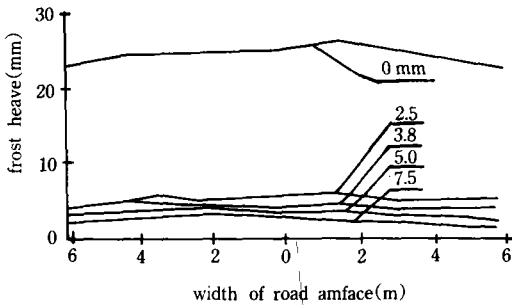


Fig. 4. Typical frost heave in transverse direction of road surface.

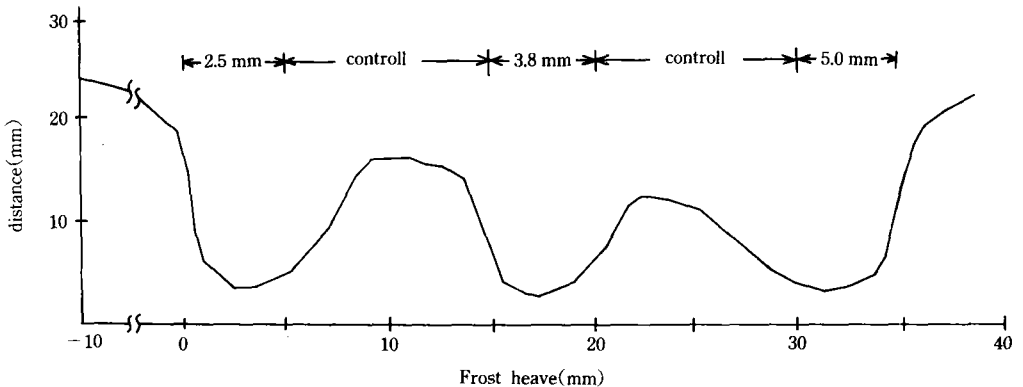


Fig. 5. Longitudinal heaving through the transition area.

므로 큰 문제는 야기되지 않았으며, 가장추웠던 1月중에는 非斷熱地域에서 24 mm 程度の 凍上이 發生되고 斷熱地域에서는 3 mm 内外의 凍上量을 나타냈다.

## 3. 斷熱層内の 水分分布狀態

實際로 斷熱層内の 水分分布 狀態를 調査하기 爲해서, Colman soil moisture cell을 埋設하고, 또 直接確認하기 爲해서 路床中心線에 따라서 core를 채취하여 含水比를 測定하였다. Fig. 6은 含水比와 地面深度와의 關係를 表示한것으로, 斷熱層上部에서는 凍結期間內에 含水比가 15% 程度 增加되었으며, 이로인하여 路面에 ice lense의 發生을 유발하여 減少시킬수 있으리라 생각된다. 또, 融解期에 접어들면서 排水作用이 活潑하게 이어나서 實際로 初期狀態로 복귀되었다.

또 斷熱層아래부분에서는 解氷期에 10% 程度 含水比가 增加되었다가, 4月末頃에 原狀態로 복귀되었다.

## 4. 斷熱材 設置가 地盤의 支持力에 미치는 影響

斷熱地區와 非斷熱地區의 荷重支持力을 相互 比較하기 爲해서 載荷試驗을 實施하고 이들 結

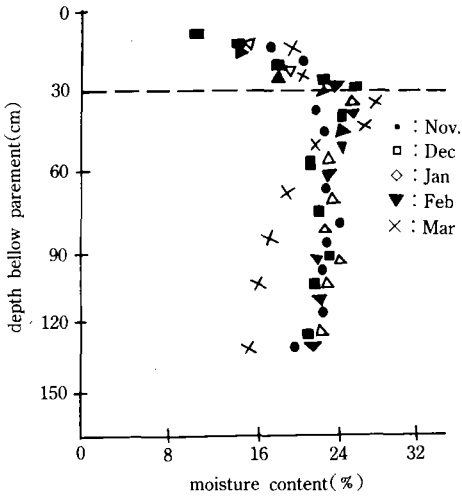


Fig. 6. Relationship between depth below pavement and moisture content.

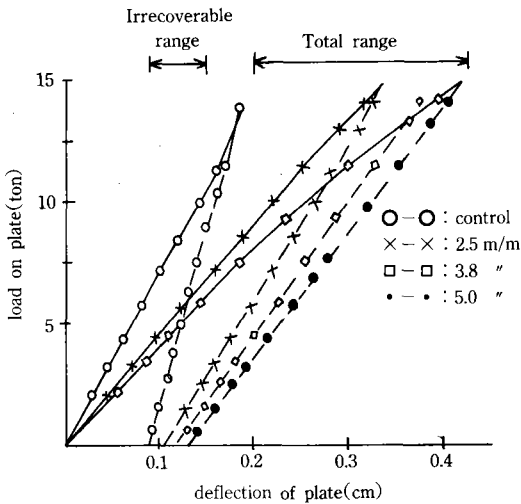


Fig. 7. Plate learing test results on the test section in spring season.

果를 Fig. 7에 表示하였다.

本試驗結果에 의하면 斷熱材를 插入한 地區에서는 地盤을 一般의 沈下시키나 下部의 地層構造 system은 荷重을 널리 分布시키는 cushion 役割을 하며, 構造的 機能를 效果的으로 發揮하고 있음을 알 수 있다. 實際로 15 ton의

荷重이 加해졌을때 1.5 mm 程度의 沈下가 發生하였으나 이는 延性鋪裝設計에서는 許容值以內에 속해 있으므로 全体的 鋪裝構造에는 影響을 주지 않음을 알 수 있다.

### 5. 斷熱材의 插入이 路面의 看氷現象에 미치는 影響

本試驗은 Skid-resistance tester에 의하여 斷熱地區와 非斷熱地區에 걸쳐서 마찰력을 測定하여 比較한것으로 눈이 오는 即時 除去하고, 同一狀態를 유지하기 爲해서, 소금이나 염화칼슘제의 使用을 금지하였다. 이들 實施結果를 Fig. 8에 表示하였으며, 非斷熱層은 斷熱層에 比하여, 미끄럼 저항은 40% 程度크게 나타났으며, 斷熱材의 두께가 두꺼운편이 마찰저항이 현저하게 작게 나타났다. 또 本試驗에서 나타난 바에 의하면, 路盤(基原과 路床사이에)에 斷熱材를 插入할때, 表面에 너무 接近하여 設置하면 着氷現象이 크게 나타났으며 熱容量이 높은 材料일 수록 着氷의 觀點에서는 有利하였다. 또 이들 斷熱層은 路盤內의 熱의 移動을 防止한다. 即, 斷熱材設置位置의 아래부분에서 上昇되는 熱의 進路를 遮斷시켜서 外側으로의 熱放出量이 減少되어 表面의 溫度가 低下되므로 着氷現象이 크게 發生되는 것으로 생각된다. 따라서 斷熱材의 使用으로 凍上和 凍結深은 어느程度 減少시킬수 있으나 上記와 같이 附遂的으로 이러나는 看氷現象은 排除할수 없으므로 交通에 莫大한 支障을 招來할 可能性이 있다. 따라서 斷熱材는

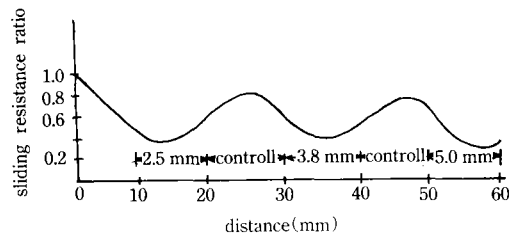


Fig. 8. Test result of icing as a function of insulation thickness.

牽引力이나, 制動力이 集中되는, 山頂, 曲線部, 交叉路, 傾斜路等에서는 그의 使用이 自制되어 야하고, 부득이한 境遇에는 斷熱材 層上部에 自由排水路를 設置해야 한다.

#### IV. 結 論

Tensar-Geogrid를 插入한 地層內的 熱的舉動을 測定하기위하여, 地層의 凍結特性, 支持力의 變化, 水分移動 및 着氷現象을 調査하여 分析한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. Tensar-Geogrid는 地層의 溫度變化를 크게 減少시키고 이들의 두께가 두꺼울 수록 凍結深은 減少되었으며, 凍上量도 減少되었다.

2. 解氷期에는 融解速度가 非斷熱의 地區에서 빠르게 나타났고, 凍上量은 地表狀態 및 斷熱材의 두께와 密接한 關係가 있으며, 斷熱材의 使用으로 凍上防止結果가 크게 나타났다.

3. 斷熱層 윗부분에서는 凍結中 含水比가 15% 程度 增加되었으나, 解氷期에는 初期狀態로 복귀하였으며, 斷熱層下部에서는 일시적으로 10% 程度 增加되었다가 다시 原狀態로 회복되었다.

4. 斷熱材는 上載荷重을 下部에 널리 分布시키는 Cushion 역할을 하며, 15 ton의 荷重을 加했을때 1.5 mm 程度의 沈下를 일으켰다.

5. 斷熱層은 地表에 着氷現象을 誘發하여, 미끄럼저항을 40% 程度 減少시키기 때문에 交通에 莫大한 支障을 줄 염려가 있으므로 制動力이 要求되어야 場所에서는 그의 使用이 制限되어야 한다.

本研究는 1987~1990 韓國科學財團의 研究費 支援에 의하여 遂行되었음.

#### 參 考 文 獻

1. Aldlich, H. P., Paynter, H. M., Frost interim report, Analytical studies of freezing and thawing in soils, Arctic construction and frost effects laboratory, New England Division Corps of Engineer, Boston, pp. 93-127, 1953.
2. Aldlich, H. P., Frost heave penetration below highway and airfield pavement, Bul. 135, HBR., pp. 84-109, 1956.
3. Ayama, K., Fukuda, M., Frost damage prevention effect using geogrid, Collection of speeches at JSSI. p. 165, 1985.
4. Beskow, G., Soil freezing and frost heave with special application to roads and railroads, Swedish geotech. society, No. 375, pp. 32-57, 1947.
5. Berg, R. L., Johnson, J. T., Revised procedure for pavement design under seasonal frost conditions, CRREL, special report 83-27, pp. 231-247, 1983.
6. Bjalobzenski, J. G. V., Determination of snow cover thickness in the design snow accumulation at the road embankment Avtomobilnye dorogi, No. 10, pp. 19-27, 1983.
7. Bergren, W. P., Prediction of temperature distribution in frozen soils, Transack, American, Geotechnical, Division, part 111, 1943.
8. Dow chemical, USA, Frost prevention in airfield embankments, Bul. No. 79, pp. 58-95, 1979.
9. Esch, D., Control od permafrost degradation beneath a road way by subgrade insulation, Pro. 2nd, Intl., Cof. on permafrost, NAS, pp. 608-622, 1973.
10. Fukuda, M., Effectiveness of frost heave prevention method in road pavement at high moutaineous area, JSSMFE, Vol. 36, No. 48, pp. 17-18, 1986.

11. Freden's., Stwier Over tjalyftningsmekanisen, SVI, special report 22, 1964.
12. Goodrich, L. E., Field measurement of soil thermal conductivity, Canadian Geotech. J. Vol. 23, pp. 93-102, 1948.
13. Gandahl, R., Plastic foam insulation of roads, VTI, Rapport, 214 a, pp. 17-18, 1979.
14. Gustafson, K., Icing condition on different pavement structure, TRR. 860, pp. 21-28, 1983.
15. Hooper, F. C., The thermal conductivity prove, frost action in soils, HBR, special report No. 2, pp. 57-59, 1962.
16. Isida, H., Prevention of frost damage by mixing calcic, Symposium on ground freezing, JSSMFE, pp. 89-92, 1986.
17. Kubo, H., Sakaue, T., Control of frost penetration in road shoulder with insulation boards, Geotech Engineer, TRR 1089, pp. 28-39, 1986.
18. Kuni, D., Smith, J. M., Heat transfer characteristics of porous rocks, Az. che. E. Jour., Vol. 6, No. 1, pp. 373-381, 1960.
19. Kubo, H., A preventing measure against frost action of airport shoulder pavements with insulation methods, VTI, Sympo. 95, Vol. 2, pp. 801-807, 1981.
20. Kersten, M. S., The thermal conductivity of soil, HBR, Pros., pp. 262-272, 1948.
21. Louie, T. M., The val gagne pavement insulation experiment Pros., paving in cold area, pp. 121-131, 1982.
22. Leonards, G. A., Oosterbaan, M. D., The use of insulating layer to attenuate frost action in highway pavements, TRR, Vol. 1, pp. 11-26, 1965.
23. Macmaster, J. B., Wrong, G. A., The role of extruded expanded polystyrene in Ontario provincial transportation systems, paving in cold area, session 3, Ottawa, pp.93-104, 1987.
24. Phukan, A. P. E., Preventing measures against frokst actions in soils VTT, Symposium 95, Vol. 2, pp. 749-770, 1989.
25. Yanagisawa, E., Experimental studies on insulation effects of expanded polystyrene beads concrete in pavements VTT. Symposium 95, Vol. 2, pp. 845-853, 1989.