

高所山岳地域における道路舗装の凍上防止対策工法とその効果

Effectiveness of Frost Heave Prevention Methods in Road Pavements at High Mountainous Areas

ふく だ まこと お がわ しょう じ
福 田 誠* 小 川 正 二**
かめ い たけ し
亀 井 健 史***

1. ま え が き

近年、山岳寒冷地域においては、社会性、経済性の要望や人間環境の変化などにより、高速道路をはじめ各種の工場・宅地、レジャーランドなどが数多く建設または計画されている。しかし、これらの地域においては、設計、施工に必要な気象、地質、土質などの正確な情報が少なく、舗装道路、ボックスカルバート、側溝などが建設後に地盤の凍結によって被害を受ける例が多くなっている^{1),2)}。

これらの被害のうち舗装道路に関するものとしては地盤の凍結隆起による舗装の破壊(写真-1)と融解期の凍結地盤の軟弱化による支持力低下による被害の2つがある。

このような凍害の対策工法としては実験工事の報告は数多くあるが^{3),4),5)}、高含水比火山灰質粘性土地盤を対象とした凍上防止対策工法に関する報告はほとんどみられない。

著者らは標高1000~1500mに位置し、長野県内で大規模に宅地開発をした数箇所の山岳地域において、過去数年にわたって道路の凍害調査を行ってきた⁶⁾。その結果、この地域では、冬期に路床が凍上することによりアスファル

ト舗装道路に多大な被害が生じていることが判明したので、より効果的な対策工法を確立するために各種の対策工法を実施し、数年にわたって追跡調査を続けてきた。本報告は高所山岳地域における切土部の道路に関する凍上防止対策工法の効果について取りまとめたものである。

2. 調査位置の地質・地形条件

調査地点は長野県の新井村、蓼科、軽井沢、山梨県の清里地域であり、いずれも標高1000~1500mで、冬期の気温低下は大きく、凍結深さも大きい。これらの地域において調査対象とした路床土はすべて切土部に位置し、過去に凍結融解作用を受けていない火山灰質粘性土である。それらの物理的特性等は表-1に示すとおりである。各地の地下水位は地表から10m以内にはほとんど認められない。

凍上防止対策工法を施工する前の冬期に、メチレンブルー凍結深度計や掘削によって地盤の凍結状況を調べた(写真-2)。このようにして測定した凍結深さと凍結指数の関係は図-1に示すとおりである。一般に凍結指数と凍結深さの関係として次式が提案されており、ある程度の誤差はあるものの実際の道路に適用できることが示されている^{7),8),9)}。

表-1 路床土の性状

物理定数 土質名と採取位置	w_n (%)	LL (%)	G_s	q_u (kgf/cm ²)	CBR (%)	k (cm/s)	L_i (%)
火山灰質粘性土 G.L. -0.5~1.0m	60~120	70~130	2.52 ~2.78	0.3~1.2	2~4	2.4×10^{-2} ~ 5.6×10^{-4}	7~21



写真-1 道路の被害例

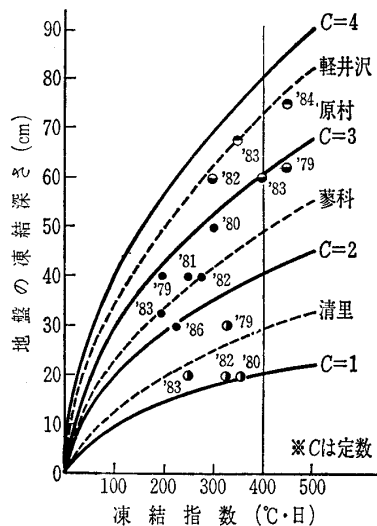


写真-2 凍結深さの調査

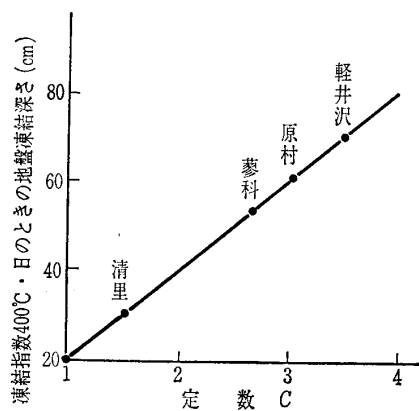
*三井建設機技術研究所 主任研究員

**長岡技術科学大学教授 工学部

***長岡技術科学大学助手 工学部



図一1 各年度ごとの凍結指数と地盤の凍結深さの関係



図二2 各地域の定数と凍結深さの関係

$$Z = C\sqrt{F} \quad \text{.....(1)}$$

ここに、 Z ：凍結深さ (cm)

C ：定数

F ：凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$)

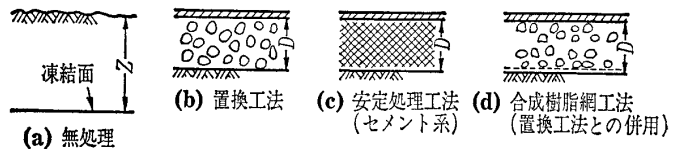
しかし、図一1の測定値をみると、定数 C は同じ火山灰質粘性土地盤でも地域によって、かなり異なっている。図中には定数を $C=1, 2, 3, 4$ としたときの式(1)の関係を示しているが、同じ地域でも凍結深さと凍結指数の間には、式(1)の関係がみられない。しかし、原位置の凍結深さを式(1)によって推定するためには、定数 C が必要となる。いま各地域について平均的な傾向をみると図中の点線のようなので、式(1)によって、 $F=400^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ のときの凍結深さと定数 C の関係を求めると図中の実線のようなになる。この関係を図一1の点線の $F=400^{\circ}\text{C} \cdot \text{日}$ のときの各地域の定数 C を内挿して地盤の凍結深さを求めると、それぞれ図二2に示した位置に相当する。

3. 凍上防止対策工法の効果

調査地点において凍上防止対策工法として用いた置換工法、セメント系安定処理工法、合成樹脂網工法¹⁰⁾の効果を検討した結果について述べる。図一3に各対策工法の概略

表一2 各凍上対策工法に対する検討内容

凍上対策工法	検 討 内 容	判定基準
①置換工法	置換厚さ D と舗装厚さの影響	・凍上量
②セメント系安定処理工法	改良強度 q_u , 改良厚さ D の影響	・クラックの発生状況
③合成樹脂網工法	効果の有無, 置換厚さ D の影響	

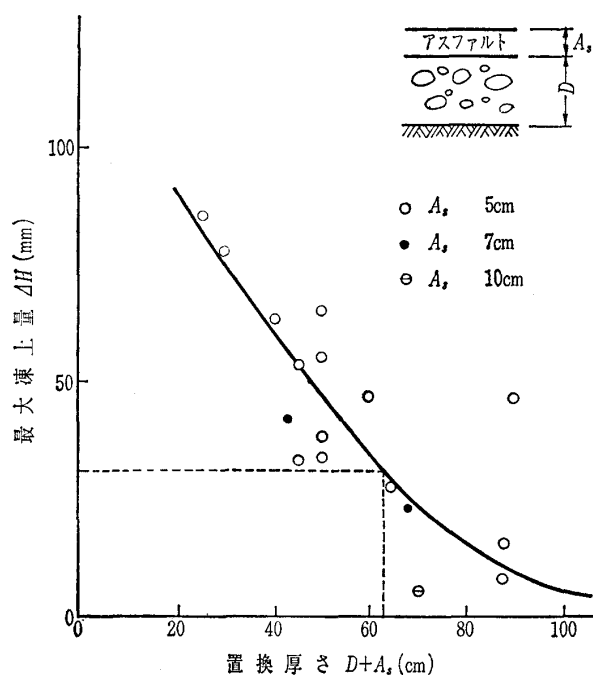


図一3 凍上対策工法 (// はアスファルト舗装の印)

図を示す。凍害の判定としては凍上量、クラックの発生状況を基準にして、各対策工法について表一2の事項についてその効果の検討を行った。

3.1 置換工法

置換工法は、舗装内の路盤や路床部分を砕石や砂利等の凍上を起こしにくい材料で置換する方法である。凍上そのものを防ぐためには凍結の可能性のある路盤・路床をすべて置換すればよいことになるが、一般には、(1)式で示される理論最大凍結深さの70~100%程度を良質材で置換していることが多い⁸⁾。しかしながら、この置換率は道路の重要性および施工コストを勘案して効率よく決めるべきであるものと考えられるので、宅地内のように交通量の少ない、重要度の低い道路では経済的にみて凍上量を効果的に減少させる置換厚さの限界を知ることが必要である。また、その時の路面クラックの状況を把握することも必要である。このようなことを考慮して火山灰質粘性土層の厚い切土部の上に置換工法によって路盤を築造した。置換材としては粒調砕石とクラッシャーランを用い、置換厚さ D を約25~90 cmの間で種々変化させて施工し、昭和56年~昭和59年における最大凍上量およびクラックの発生状況を観測した。なお、この付近における原地盤の凍結深さは気象条件などや火山灰質粘性土層の厚さに応じて45 cm~60 cmである。図一4は昭和59年度に測定した置換厚さ $((D+A_s), A_s$ はアスファルト舗装厚さ)と最大凍上量 $4H$ との関係を示しており、置換厚さが大きくなれば最大凍上量は減少することが認められる。また、原位置観測において凍上量が3 cm以下であれば路面のクラックはほとんどみられなかったの、図一4より凍上量を3 cm以下におさえるための置換深さを求めると約65 cmになる。以上のことから凍上量を路面のクラックが生じないといわれる3 cm以下におさえ¹¹⁾、クラックを生じにくくするためには原地盤凍結深さが45 cm程度の場合には凍結深さの140%、60 cm程度では100%程度以上置換する必要があることが分かる。しかしながら、図一4のAで示されているように置換深さが90 cm程度(路床上の遮断層20 cmを含む)の場合でも凍上量が3 cm以上となることもある。この場合に



図—4 置換工法における置換厚さと最大凍上量の関係

は、路面にクラックが生じているが、これは地山を切土しているため上部斜面より舗装内に地下水の浸透が多くなり、凍上量が大きくなったものと考えられる。しかし、その他の結果は地下水の浸透を防ぐための処置を行ったときのデータである。

なお、アスファルト舗装厚さ (A_s) も 5 cm と薄いときには当然のこととして凍上量が大きく、7 cm, 10 cm と舗装厚さが大きいほど凍上量が小さくなっている。これはアスファルト層が路盤に比較して熱伝導率が低いために路床部、路盤部の凍結深さが浅くなっていることとアスファルト舗装自体の耐力が増加していることによるものと思われる。

3.2 セメント系安定処理工法

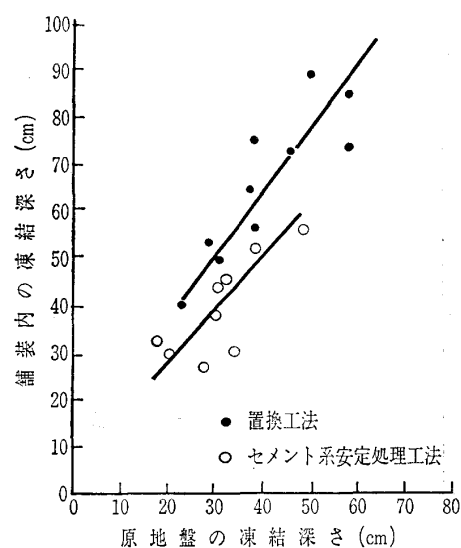
現在では、置換工法は道路の凍上対策として広く用いられているが、良質な置換材料を安価に得ることが次第に困難となり、また、掘削した凍上性の残土処理が難しくなってきたため、新たな対策工法の研究が急務となってきた。そのために、原位置の土を移動させることなくセメント系あるいは石灰系の安定材を加えることにより、舗装の凍上量を小さくさせる方法が行われている¹²⁾。

このような凍上防止対策工法の効果を確認するために図—3(c)に示した舗装構造で、蓼科高原地域においてセメント系安定処理工法を施工した(写真—3)。この場合吉田¹³⁾、藤増¹⁴⁾らの結果を参考として、原位置発生土に碎石を重量比で50～60%加え、さらに土の含水比に応じて、セメント系安定処理材を混合土(発生土+碎石)の乾燥重量に対して2～8%添加し、路上で混合して路盤材としての機能をもたせている^{13), 14)}。

標高1400mの原村付近において測定された原地盤の凍



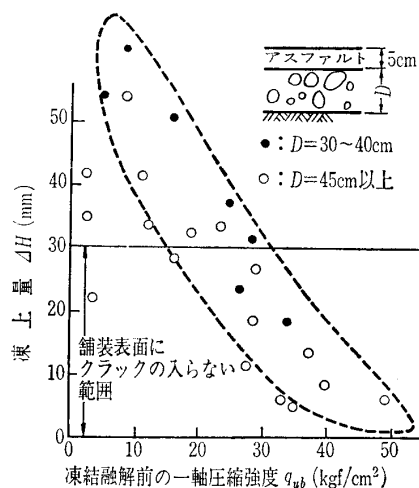
写真—3 セメント系安定処理施工状況



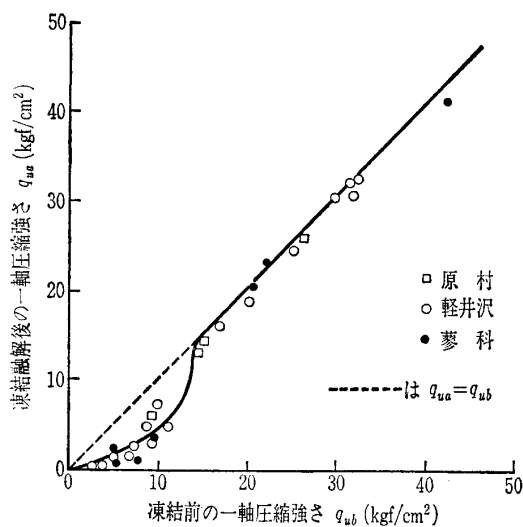
図—5 舗装内と原地盤の凍結深さの比較

結深さと置換工法およびセメント系安定処理工法を行った場合の凍結深さの関係を図—5に示す。この図をみると、置換工法の場合の舗装内の凍結深さは原地盤の凍結深さより大きくなっているが、セメント系安定処理工法の場合には舗装内凍結深さは原地盤の凍結深さとほとんど変わらない。これは、セメント系安定処理工法では原地盤の土を用いているために、安定処理前後において土の熱的性質があまり変化しないためと考えられる。

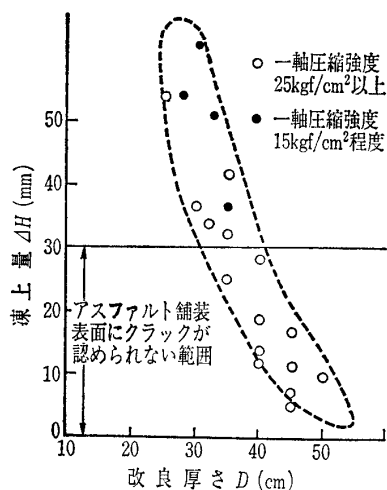
長野県内の宅地造成地においてセメント系安定処理工法を実施した地域より採取した供試体の作用を受ける前の一軸圧縮強さと冬期間の最大凍上量の関係を図—6に示す。この図をみると、処理深さの大きさにもかかわらず、原地盤の凍結前の一軸圧縮強さが大きいほど凍上量は小さいことが分かる。路面にクラックが発生しないといわれる3cm以下の凍上量を考えると、凍結前の路盤の一軸圧縮強さが20kgf/cm²程度で、改良厚さが40cm以上あれば凍上量は小さく、路面にクラックは生じないことが分かる。しかし、図中の黒丸のように一軸圧縮強さが25kgf/cm²以上であっても処理深さが小さければクラックが生じていることが



図—6 セメント系安定処理工法で凍結融解前の一軸圧縮強度と凍上量の関係



図—7 凍結融解前後の一軸圧縮強さの変化



図—8 セメント系安定処理工法における改良厚さと凍上量の関係

分かる。

一般にセメント系安定処理工法の欠点として、凍上防止対策工法は効果の持続時間が短いことが指摘されているので、凍結融解試験により、セメント系安定処理を行った土の強度低下の程度を検討した。

供試体は原村，軽井沢，清里の3箇所より採取した自然含水比状態の土に粒度調整砕石(0-25)とセメント系安定処理材を加え，ソイルミキサーで混合した後，JIS A 1210¹⁵⁾に準じて作成し，一軸圧縮試験により凍結前の一軸圧縮強さ q_{ub} を求めた。比較のため同様に作成した供試体に凍結融解作用を与えた後の一軸圧縮強さ q_{ua} も求めた。ここで凍結融解作用としては日本道路公団の試験方法¹⁰⁾などを参考にし-10℃で1日間凍結し，+20℃で1日間融解する方法を5サイクル与えた。このようにして得られた結果より，凍結融解の有無による一軸圧縮強さの変化を比較すると図—7のようになり，凍結前の一軸圧縮強さが10~15 kgf/cm² を越える供試体では，一軸圧縮強さへの凍結融解の影響は少なく，ほとんど凍結融解による一軸圧縮強さの低下はみられない。このように室内試験でも，一軸圧縮強さが15 kgf/cm² 程度以上の場合に凍結融解の影響をほとんど受けず，図—6に示す原位置のデータと比較的良好一致をみせており，一軸圧縮強さが15 kgf/cm² 以上であるならば，その路盤は凍結融解作用の影響を受けないものといえる。

図—8は，安定処理前の一軸圧縮強さが15 kgf/cm² 程度，および25 kgf/cm² 以上の路盤における凍上量と改良厚さの関係を示しているが，セメント系安定処理工法を行った路盤の凍上量は舗装内改良厚さが大きくなると急激に減少することを示している。すなわち，安定処理工法をほどこすと，改良厚さがわずかに異なっても一軸圧縮強さに関係なく凍上量はかなり変化し，アスファルト路面にクラックの発生しない凍上量3 cm以下にするためには図—6に示されるのと同様に約40 cmの改良厚さが必要であるといえる。しかし，この地域では，原地盤の凍結深さが最大で60 cm程度であることを考えると，置換工法では40~60 cmの改良が必要となるが，セメント系安定処理工法での改良厚さは40~50 cm程度で良いことになる。ただし，この場合でも，表層のアスファルト厚さは最低5 cm以上を必要とする。

3.3 合成樹脂網工法

盛土などにおいて補強土工法として用いられている合成



写真—4 合成樹脂網施工状況

表-3 合成樹脂の物性 (引張り速度 200 mm/min)

銘柄	重量 (gf/m ³)	網 (mm)	引張り強度(kgf/cm)		伸 び(%)	
			縦	横	縦	横
SS-2	320	39.4×27.5	188	328	7	6
AR-1	236	72.0×51.0	254	263	11	10

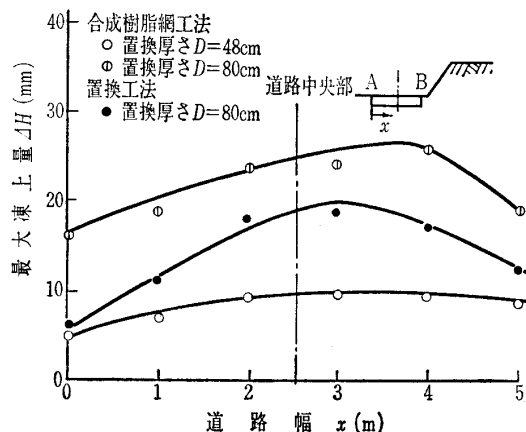


図-9 合成樹脂網工法と置換工法の比較

樹脂網工法を凍上防止対策工法として用い、舗装中央部と端部での凍上量の差によって生じる不等凍上による引張りクラックを防止するため引張り強度の高い合成樹脂網を路床上に布設し、その上に路盤を施工した(写真-4)。この工法は路盤を碎石で置換し、路盤と路床の間に合成樹脂網を布設するものである。使用した網は二軸延伸のポリプロピレン製で、その物性は表-3に示すとおりである。

図-9は置換工法と合成樹脂網工法をほどこした場合の道路横断方向の凍上量の分布を示しているが、遮断層15cmを含めた碎石置換厚さが80cmの置換工法と合成樹脂網工法による凍上量を比較すると、合成樹脂網工法を行ったときの凍上量は置換工法の場合の凍上量より小さくしかも、不等凍上も小さいことが分かる。しかしながら、合成樹脂網工法の置換厚さを48cmにした場合の凍上量は置換厚さ80cmの場合よりかなり大きく、また置換厚さ80cmの置換工法よりも大きい。このように合成樹脂網工法で置換厚さが大きいと凍上量も小さいが、これは置換した合成樹脂網の引張りに対する抵抗力のために凍上が抑制されるためと考えられ、不等凍上防止を考えれば合成樹脂網工法はかなり有効な防止工法と思われる。したがって、凍上を生じやすい場所や凍結深さが大きい場所では、引張り強度が大きく、伸びがほとんどない合成樹脂網を利用することにより路面の凍上が一様になり、舗装表面のクラック発生をある程度防止できるものといえる。

最後に、置換工法、セメント系安定処理工法、合成樹脂網工法を行ったときの舗装厚さと路面最大凍上量を比較すると図-10のようになり、当然のことながら測定凍上量は同じ位置でも年ごとに変化しているものの、各工法とも改良厚さが大きくなるにしたがって凍上量は減少している。

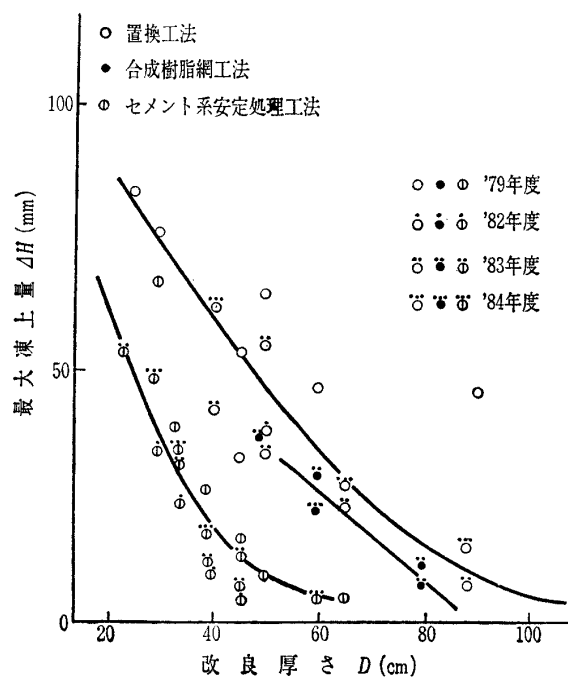


図-10 各種対策工法の比較

また3種類の凍上防止対策工法の中では、セメント系安定処理工法が最も効果のあることが分かる。また、施工後経年とともに凍上量が減少している点については凍結融解により路床上部の含水比は高くなるが、融解時には路床土が路盤の荷重で再圧密され、路床の上層部の土のせん断強さが毎年増加していることが考えられる。しかし、これらのことについては路床土の軟弱化と路盤荷重の関係として今後の研究が必要である。

4. む す び

長野県の高所山岳地域における道路について3種類の凍上対策工法を行い、その効果について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 各調査地点における凍結深さは、同じ凍結指数でも、地形、地質、地下水の挙動などの影響によって異なる。
- ② 置換工法を行う場合、置換厚さが大きくなれば、最大凍上量は減少するが、今回の調査においては、地下水の浸入を断った場合に置換厚さが65cm以上ならば凍上量が3cm以下となり、また路面にもクラックが生じなかった。
- ③ 置換工法を実施する場合は当然なこととして現地盤の凍結の深さの程度によって置換深さの程度を変えなければならない。しかし、そのような対策を行ったとしても、凍上量をさらに少なくするためには地下水の浸入を断たなければならない。
- ④ セメント系安定処理材に現場発生土と碎石を混合し、路盤材としての機能を持たせようとした場合、舗装内の凍結深さは道路周辺地盤の未処理地盤とほとんど変わらない。

- ⑤ 現場調査からセメント系安定処理路盤では一軸圧縮強さが 25 kgf/cm^2 以上で、かつ、改良厚さが 40 cm 以上ならば、路面にクラックが生じるほどの凍上が発生しない。原位置と同様に安定処理を施した土について室内試験を行った結果、一軸圧縮強さが 15 kgf/cm^2 以上の供試体では、凍結融解作用が一軸圧縮強さの変化に与える影響は少ない。
- ⑥ 合成樹脂網工法は置換深さにより凍上量は大きく左右されるが不等凍上を防ぐ効果は優れている。そのため、凍上を生じやすい路盤や、凍上量が大きい路床では置換工法の補助工法として有効と思われる。
- ⑦ 置換工法、セメント系安定処理工法、合成樹脂網工法の凍上防止対策工法としての効果を比較すると、凍上量を低下させるということのみを考えた場合、セメント系安定処理工法が最適である。

謝 辞

本研究を進行するにあたり、三井道路技術研究所主任研究員山本正夫氏には現場実験等に協力していただいた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 古畑和夫・吉沢俊夫：59異常低温による道路の路面災害復旧について、舗装，Vol.20，No.4，pp.28～31，1985。
- 今川史郎・佐藤修治：寒冷地における路床設計の現状と問題点，日本道路公団試験所報告，pp.11～18，1981。
- 久保 宏：積雪寒冷地舗装の凍上対策，土木学会誌，Vol.29，No.2，pp.10～16，1979。
- 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。
- 土質工学会：土の凍結：道路における凍上とその対策工法，pp.111～122，1982。
- 山本正夫・福田 誠・桜田良治：凍害対策試験道路の追跡調査結果，第17回土質工学研究発表会発表講演集，pp.525～528，1982。
- Aldrich, H.P.: Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavements, Highway Res. Board, 135, pp.124～149, 1956。
- 日本道路協会：凍上，道路土工，排水工指針，pp.147～161，1984。
- 長谷川徹・今井 卓：青森県内における理論最大深さと凍結深さ調査結果の検討，舗装，pp.14～18，1984。
- 日本道路公団設計要領第一集（改訂）要旨，凍上及び凍結融解を受ける路盤・路床，pp.78～85，1983。
- 河野文弘：寒冷地における路床・路盤，土と基礎，Vol.20，No.6，pp.19～25，1972。
- 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.193～194，1981。
- 吉田信夫：セメント安定処理路盤の改良，土と基礎，Vol.22，No.5，pp.43～49，1974。
- 藤増肇世：土質改良による仮道路築造の新工法について，第9回土質工学研究発表会発表講演集，pp.882～888，1974。
- 土質工学会：土質試験法，土の力学的性質の試験(1)，締固め試験，pp.289～300，1981。
- 福田 誠・山本正夫・桜田良治：敷網工法を用いた凍害対策試験舗装，第19回土質工学研究発表会発表講演集，pp.773～774，1984。

（原稿受理 1987.12.14）

国際ニュース

国際土質基礎工学会地すべり技術委員会報告

第5回国際地すべりシンポジウムがスイス土質工学会を中心とする実行委員会の運営によって、1988年7月11日から15日の5日間にわたり、レ・マン湖畔のローザンヌで開催された。会議への参加は43か国から469名を数え、日本からは一部行事のみの参加8名を含む19名であった。

この機会を利用して国際土質基礎工学会地すべり技術委員会が開かれ、下記のような議題について検討したので結果を報告する。

- 開催日時 1988年7月12日 17:00～20:30
- 開催場所 PALAIS DE BEAULIEU 317 会議室
- 出席者 P. LaRoche (座長), D. Cruden (事務局長), 藤田寿雄・佐々恭二 (日本)ほかオブザーバー3名を含む19名，計23名 (18か国)

議 事

① 第12回国際土質基礎工学会議地すべり分科会
分科会 No. 21 地すべり対策と計測は座長に P. LaRoche 教授，特別報告「地すべり計測に関するアンケート結果の解析」R.K. Bhandari 教授

② 第6回国際地すべりシンポジウム

開催を希望したニュージーランド，ノルウェーについて投票の結果，ニュージーランドに決定。1992年2月を第一案，場合によっては1992年11～12月開催を予定。

③ 地すべり災害の目録作成に関する共同研究

自然災害防犯年に際して，ユネスコからの提議もあって国際応用地質学会委員会と共同して地すべり災害記録を集成する。調査内容については再検討する。

④ その他の報告・提案

- 国際シンポジウム主催に関するガイドライン
- 重要研究課題に関するワークショップ設置提案
- 地すべりに関する地域委員会の設置
ヨーロッパ，南米
- 国際応用地質学会 (IAEG) との相互関係
- 国際ニュースレター「Landslide News」(日本地すべり学会発行) について協力要請

⑤ 次回委員会 第12回国際土質基礎工学会議開催期間内 1989年8月 リオ・デ・ジャネイロ
(文責：藤田寿雄 日本道路公団技術部)