

やまなみハイウェイの舗装凍害とその調査研究

Frost damages of the pavements of Yamanami Highway and their investigations and studies

やま の うち とよ とし
山 内 豊 聡*

しも あら いそ
下 荒 磯

しげる
滋**

1. はじめに

やまなみハイウェイの愛称で親しまれている有料道路、別府・阿蘇道路（全延長 52 km）は、日本道路公団によって昭和35年から建設され、昭和39年10月に 1 330 m を最高標高として全線開通したが、はやくもその冬に舗装表面の流動やクラックの凍害による損傷を生じ、ついで翌年1月にはかなりの延長にわたって舗装の凍上を起こした。それらはその後の維持補修により、10年間にわたって機能を果たしてきたが、昭和50年4月に発生した大分県中部地震は、復旧工事のため、10か月にわたって全延長の約半分の道路閉鎖が必要であったほどの大きな損害を与え、その際、10年前の舗装凍害の影響を露出した。

やまなみハイウェイは、このように全国でも例の少ない受難の道路であったが、その凍害は、九州で初めての寒冷地における火山灰土上の舗装道路であることへの配慮はあったものの十分でなく、それもほとんど土質工学的原因によって発生したものである。本文はその凍害の原因をそのときどきに行った調査データを使って考察するとともに、それらに関連して行った研究結果を報告するものである。

2. 舗装の設計

昭和20年代の日本の道路の建設は、米国の方法を導入しながら行われてきたが、昭和31年に道路整備特別措置法が公布されたところから、にわかに道路工学の研究がさかんになり、その結果、欧米に少ない火山灰土上では、米国の舗装設計法が適合しないことが分かり、やがて独自の手法が開発されるようになった。やまなみハイウェイの調査・設計は、ちょうどこのような時期に当たっており、他の火山灰土地域におけると同様に、関係技術者にとっては、いわば学習の時代であったといえる。

しかもやまなみハイウェイは、九州とはいえ寒冷地¹⁾に建設されるので、凍上に対しても配慮されたが、結局、十分なものでなかったことが、後述するように、しゅん工後はやくも最初の冬で思い知らされた。あらかじめ想定された凍結深さは 20 cm 程度であったが、凍害発生後、標高

1 300 m 付近で掘削によって調べた実際の凍結深さは約 40 cm であった。

最初の地盤土調査は昭和 32 年夏に行われた(図-1, 写真-1)。九重地帯の原地盤の土の代表的なものは、黒色を呈する黒ぼくと黄褐色を呈する赤ぼくである。ともに、

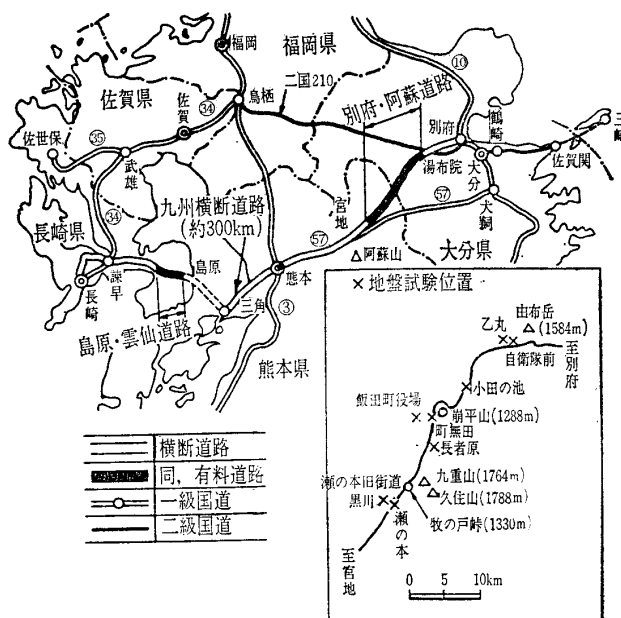


図-1 建設当時のやまなみハイウェイの位置づけと地盤土試験箇所（道路の名称はすべて当時のもの）

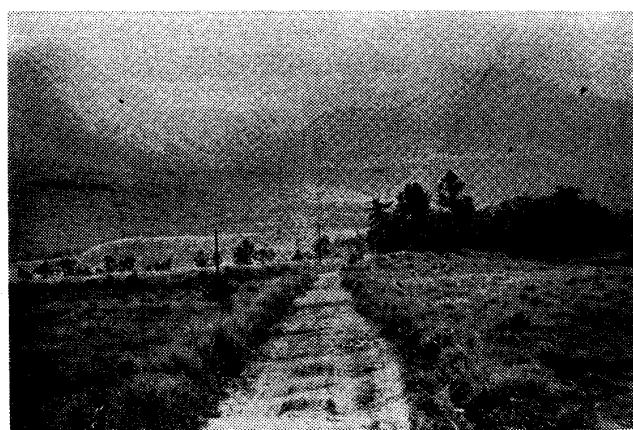
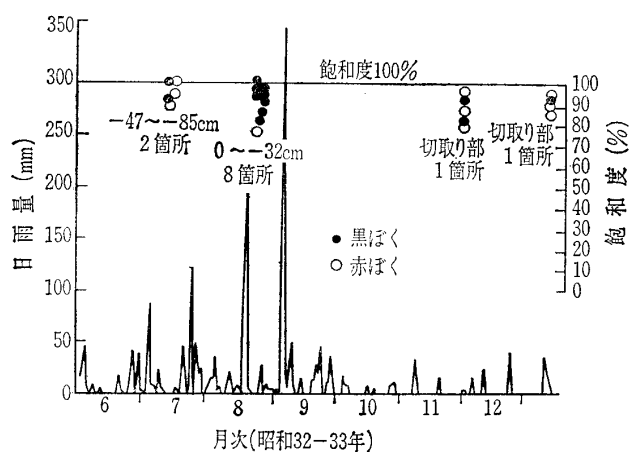


写真-1 やまなみハイウェイ建設前の道路状況（長者原，昭和32年）

*九州大学教授 工学部水工土木学教室

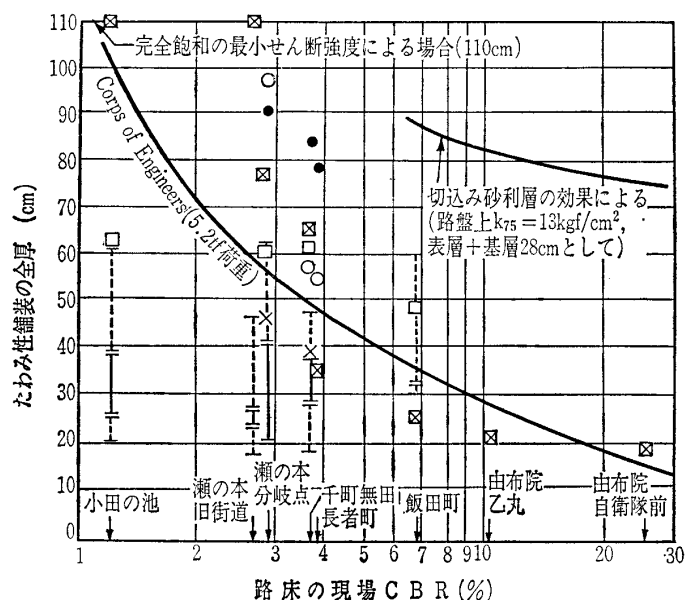
**富士ビー・エス・コンクリート㈱ 常勤顧問



図一2 やまなみハイウェイ地帯の地盤土の飽和度と雨量の関係の例

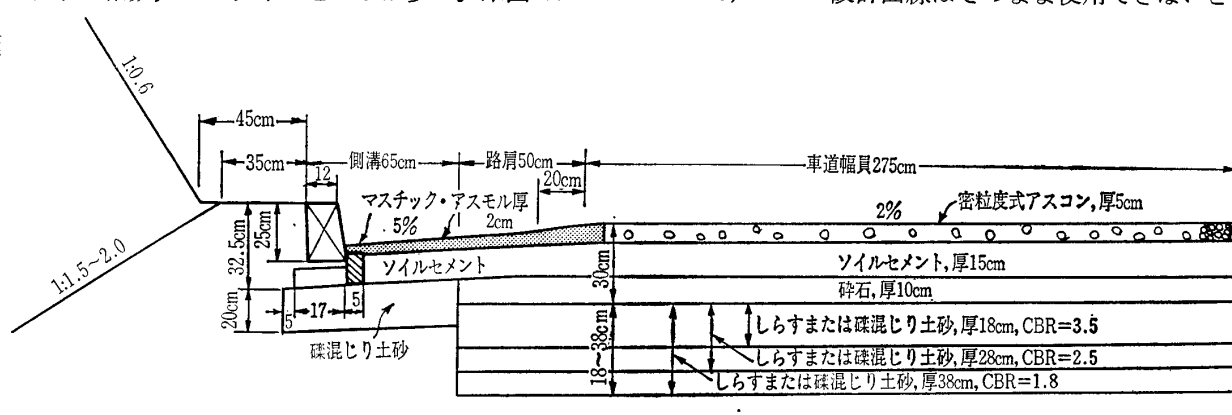
火山灰質粘性土に特有なアロフェンを主要粘土鉱物とし、黒ぼくは腐植を数%ないし20%程度含有していて特異な力学的挙動を示す特殊土の一種であり、また低有機質土の代表的な土とされるようになって、その工学的特異性が究明されたのは、だいぶ後になってからである。

この種の火山灰質粘性土は、図一2³⁾に示すように、年間を通じて降雨量にあまり関係なくほぼ80%以上の飽和度を保持し、また支持力はかなり低く、CBR 値（地盤の支持力を表す一指数）は2以下のところが多い。米国ではこ

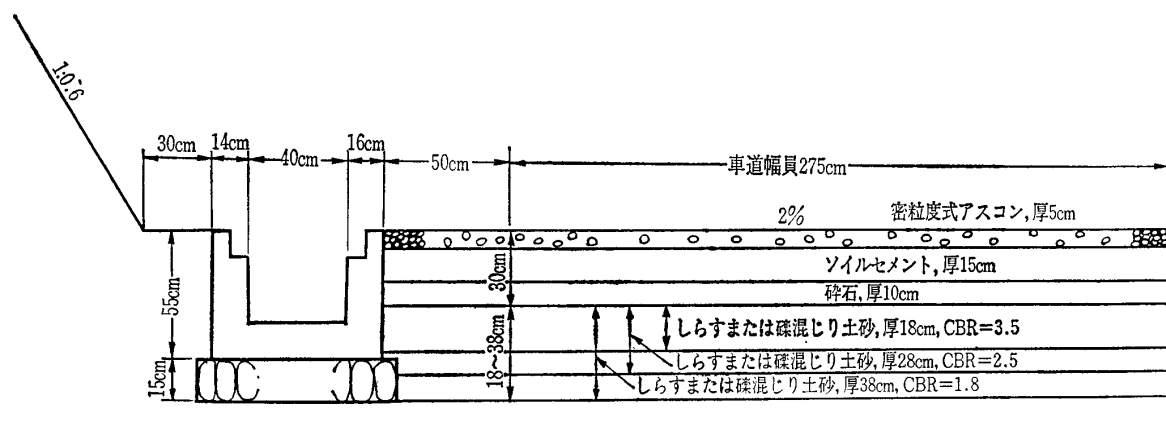


図一3 やまなみハイウェイ地域の各種設計法によるアスファルト舗装全厚

のように低い CBR 値の地盤に直接舗装を設けることがないので、CBR 設計曲線はそのまま使用できないところが



(a) V型側溝の場合



(b) U型側溝の場合

図一4 やまなみハイウェイの舗装の標準断面

ある。かりにその設計曲線をこのような低い CBR に延長して適用するときは、あまりに厚いアスファルト舗装全厚を採用せざるを得ないことになって問題であった。

CBR 設計曲線のみならず、各種の設計法によるアスファルト舗装全厚を路床土の現場 CBR に対して、当時とりまとめたのが図—3³⁾である。このように、設計法によって舗装厚さがまちまちであったことは、火山灰土上に築造する舗装の工学そのものが、まだ揺らん(籃)期であったことを示すものである。

やまなみハイウェイでは、種々検討の結果、黒川温泉の入口付近に堆積しているしらすをセレクトマテリアルとして利用することになった。しらすは極端に侵食されやすいが、材料として種々優れた性質²⁾も備えている。特に、セメントや石灰によって効率よく固め得ることは特長の一つである。

そのしらすを母材としたソイルセメントをもって、上層路盤を造るほか、しらすそのものを下層路盤に利用することになったが、前者は剛性層が持つような版としての支持力効果を、後者は普通の砂の代用として路床からの毛管水上昇を遮断したり、路床土とのなじみを良くすることが目的であった。結局、このような層の重ね合わせによって、48~68 cm の全舗装厚さをもつ図—4 に示すような基準断面が採択された。この厚さは、やはり CBR 設計曲線を参考に行っている。

上述のような舗装のうち、下層路盤材料として、しらすだけでなく、礫混じり土砂の使用をも認めたことは、しゅん工後、路床土からの毛管水の上昇を許す結果を招いた。やはり、当時は凍害に対する認識が甘かったといえる。

3. 施工の実態

やまなみハイウェイの実際の工事は、昭和35年12月に着工の運びとなったが、路線近くに工事用の回路をもたなかったことも、次に述べるように後日の凍害の原因の一つとなった。

道路工事では路床を整えたのちコンクリートの側溝を設けて、初めて各層の舗装材料の搬入と転圧が行われた。原地盤の火山灰土の土工の際に土運搬のダンプトラックが、既に整えられた路床土や既設の下層路盤の上を走行せざるを得ないことになり、その際落ちこぼした火山灰質粘性土を下層路盤に混入させる結果となった。

すなわち、基準断面図上では毛管水の遮断層になるはずのしらす層や礫混じり土砂層にロームがかなり混入して、飽和状態に近い原地盤土(黒ぼくや赤ぼく)からの毛管水上昇を容易に許す結果をもたらしている。

またしらすは、粒度のうえからは砂として分類されるが、その粒度に似合わず、かなり大きなサクシオンを持ち、しかも一度吸収した水分は抜けにくい特性があることが、南九州で一応知られていたものの、当時は、一般にそれほど



写真—2 森林地帯の土工の状況

強く認識されていなかった。

路体の切土・盛土のためのロームの土工は、湿地用ブルドーザーをもってしても困難を極めた。特に昼間日照をよく受けない森林地帯では含水比がいっそう高く、施工業者は土工の際苦労が多かった(写真—2)。もし、日照量の多いところにルートを選定できたとすると凍害は軽微であっただろう。

この工区では、黒ぼくの盛土は最初7 mと計画されたところもあったが、後日の沈下を懸念して3 m高さに設計変更されている。有機質土の沈下は長期にわたって続く性質のものであるが、最近ではその研究⁸⁾も進んでいるほか、フィルター応用と施工管理法の進歩によって、南九州ではかなり高い黒ぼくの盛土もつくられている。

施工中発見されたことであるが、黒ぼくは雨水にさらすとき固くなる性質があったのに対し、赤ぼくはいっそう軟弱となった。有機物量の違いから考えると反対であるようであるが、黒ぼくが雨水を受けると有機物が酸化されて粒子を固結させる結果であると判断された。

下層路盤材料にしらすを用いた瀬の本高原以南では、工事のときに多量の雨が降り、かなりのしらすが流失した。鹿児島県下で経験するような、しらすの侵食やいわゆる浮きしらすの現象である。しかし、砂礫混じり土砂を下層路盤の材料とした工区と違って、後日凍害を受けることが少なかった。もちろん、この工区が台地で比較的乾燥しているほか、昼間よく日照を受ける条件も備えていたからであった。

4. 最初の冬の凍害

昭和36年暮れに発見された舗装の異状は、写真—3 に示すような5 cm 厚さのアスコン表層の流動(車が変速のときに与える水平力が原因の局所的なクリープ)であり、何箇所かに発生した。この原因は、村恵・谷本⁴⁾が、前年度に完成した国道3号線津奈木峠の舗装において発生した同様の流動について、いち早く優れた説明を加えているが、それと全く同じ現象である。流動が起きるまでの段階は、



写真-3 アスコン表層に生じた流動
(写真の手前方向に走行する車線, 昭和39年12月)

図-5のなかに加えた説明のとおりである。アスコン表層厚さが現在のように10cmであれば、この流動は容易には起きなかったであろう。しかし現在は、アスコン表層下面の摩擦抵抗を増大させるような流動を起こさないための工法も進んでいる。

ついで現れた舗装の異常は、ソイルセメント層の収縮クラックに起因する、写真-4に示すような表層のリフレク

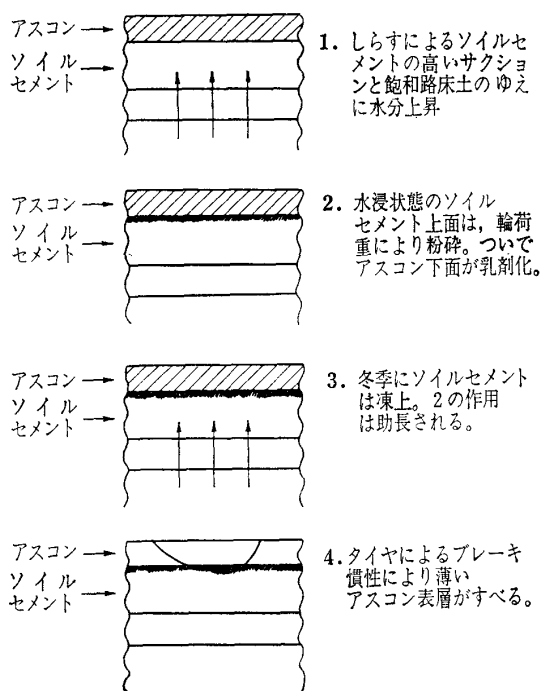


図-5 3号線津奈木太郎峠のアスコン表層の流動に対する村恵・谷本の説明の図化

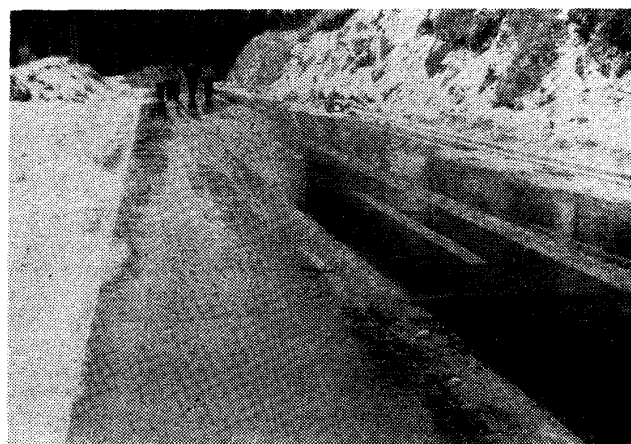


写真-4 ソイルセメント層の収縮クラックによって表層に現れたリフレクションクラック
(熊の墓付近, 昭和40年2月)

ションクラックである。しらすを母材としたものに限らず、セメントの添加量が多くなるに従って、特に寒冷地で起きやすく、ソイルセメントの欠点になっている。この問題は、ソイルセメントが本来の利点として版効果をもつこととの間の一般的なジレンマであるが、この道路でもそれが発生した。

更に昭和39年12月から翌年1月にかけて、いわゆる凍上が、やまなみハイウェイの日照りのよい部分(長者原や瀬の本高原以南)を除いて、かなりの延長にわたって発生した。特に寒の地獄・牧の戸間の崖裾部と熊の墓付近の森林地帯で凍上が顕著であった。これら2箇所を調べたところ、アスコン下表面とソイルセメント上表面の間には、写真-5に示すようにアイスレンズができていることが確かめられた。

このような舗装の凍上が発生した原因をとりまとめると次のとおりである。

① 3. で述べたように、しらすでつくった下層路盤でも土工時に、更に路盤材料にロームが混入して遮断層としての機能を果たさなかった。特に、寒の地獄から牧の戸峠

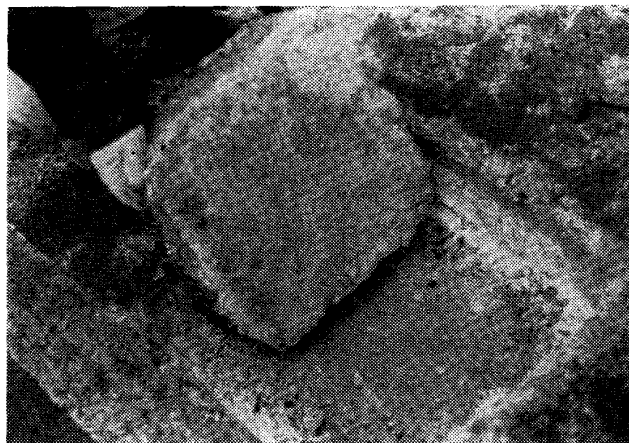
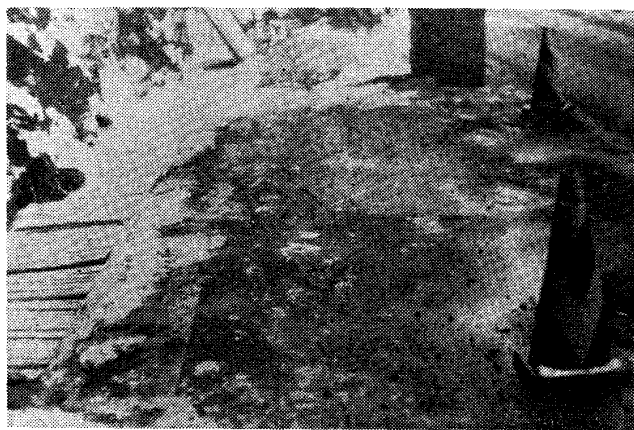


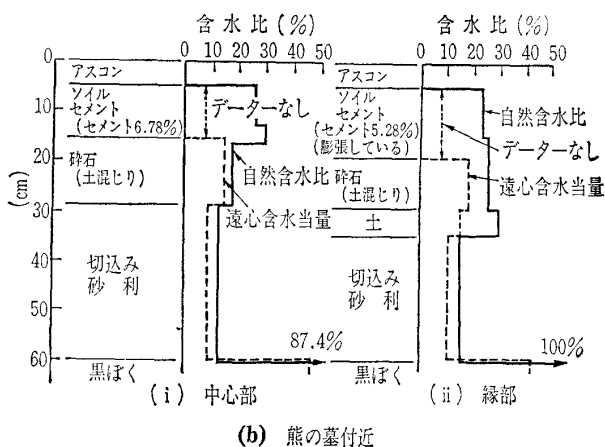
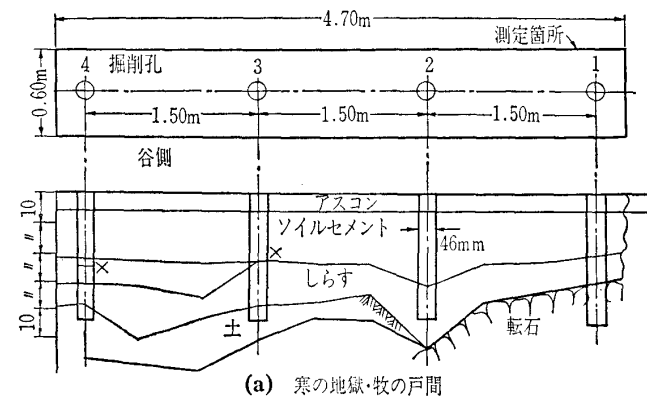
写真-5 凍上部分で調べたアスコン表層とソイルセメント層の状態(熊の墓付近, 昭和40年2月)



写真一六 寒の地獄から牧の戸に上る途中の崖下の舗装の凍上破壊（昭和40年2月）

に至る区間は、写真一六に示すように北向きの崖のすそに沿っており、しかも崖からの泉の水が路床・路盤に絶えず加わって凍上をいっそう起きやすくした。この区間は、県の工事として昭和32年に自衛隊が施工した砂利道であったが、図一六に示すように、実際には遮断層が欠けていた。遠心含水当量は、毛管ポテンシャルに関する一つの指標であり、その値が過大である。良質の砂は0%に近くあるべきである。

② 側溝は大部分がふたを省略しており、路盤の側方からも氷点下の低温が侵透した。ふたの有る無しによる凍上



図一六 実際の舗装断面の状態（昭和40年2月当時）



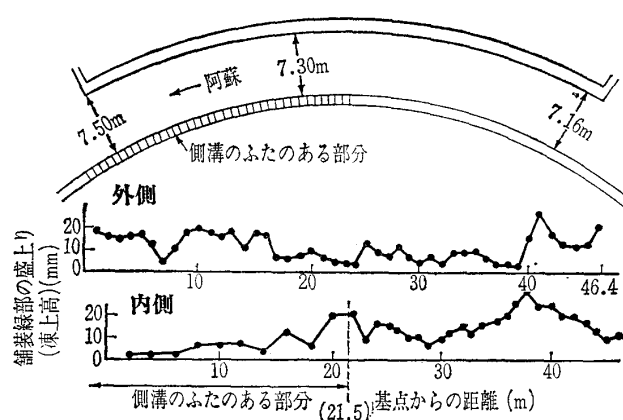
写真一七 舗装縁部の凍上とU型コンクリート側溝の凍害

高の違いは図一七に示すとおりであり、そのことをほぼ実証している。しかも舗装上の降雪を塩化カルシウムを散布して溶かしたため、側溝に流れたその水は氷点以下になっていて、側方からの凍結を促進した。その結果、凍上は横方向にも起きて側溝を押し倒そうとした（写真一七）。

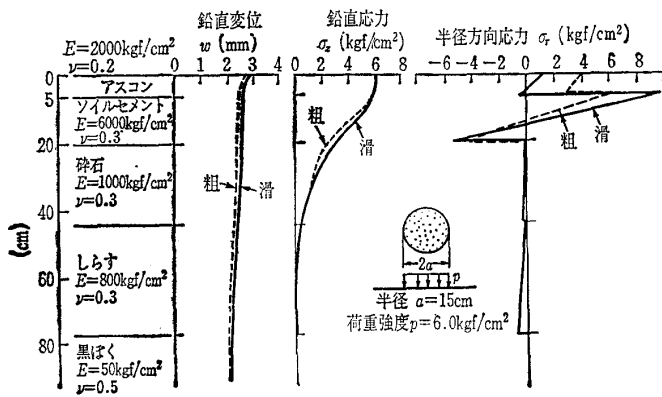
③ しらすおよびしらすを母材とするソイルセメントはもともとサクシオンの高い材料であり、寒冷地の路盤材料としては適当でなかった。

アスコン表層とソイルセメント層の間は、この時点において既に“滑”の状態に変わっており、本来あるべき“粗”の状態に比べて、車両荷重に対する舗装の力学的性状を悪くしたといえる。このことは、最近の弾性解析⁹⁾によって明らかである（図一八）。滑の場合は粗の場合より、変位と応力が大きいことが注意される。ただし、この解析結果は、1回載荷に対するものと考えてよい。

凍害は舗装だけでなく道路斜面にも及んだ。従来からこの地域の切土斜面に起きていたが、やまなみハイウェイでも、口絵写真一三に示すような切土斜面土の崩落が最初の冬に起きている。これは芝付けの活着が十分でない間に凍害のために崩落したものであるが、通常この破損を霜崩れといっている。このように、寒冷地道路の日当りの悪い切土の上の植生は難しいが、小さな穴を掘って肥料混じり土



図一七 側溝のふたの有無による舗装縁部の凍上量の差異（牧の戸の駐車場，昭和40年2月）



図—8 アスコン表層とソイルセメント層の間の粗滑の条件の違いによる輪荷重に対する舗装系の力学的性状の変化

にアメリカ産の草を植え込む穴工法が比較的よいとされるようになった。

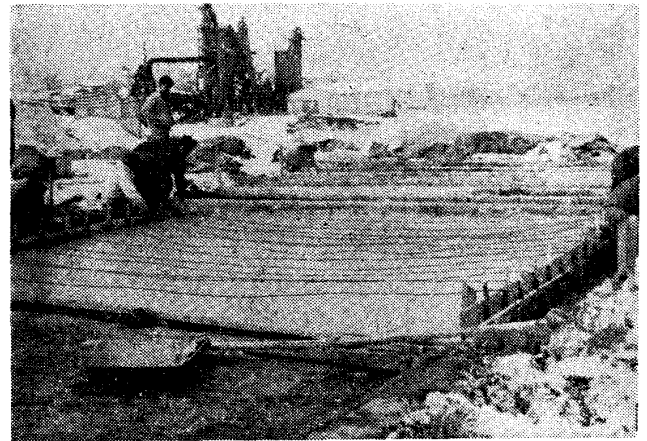
5. 凍上修復のための調査研究

前述のような舗装の凍上は、その冬季間とはともかく、春になってからの融解に伴う舗装の破壊が強く懸念された。このため対策工事のために行った調査研究は、次のようなものであった。

最初に考えた対策は、ソイルセメントの直下のしらす層に生じているアイスレンズを溶解したのち表層から転圧して表層を圧着し、そのうえで破壊している表層のうえに熱伝導率の低い気泡コンクリートをオーバーレイして、更に改めてアスコン表層を施すことであった。実際に、前掲の図—6に示すように径 46 mm のボーリング孔を掘削して、塩化カルシウム溶液を注入したところ、アイスレンズが融解することが確認された。

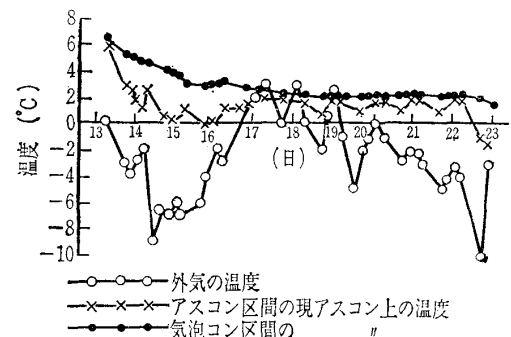
一方、セメントモルタルに発泡剤を混合して多量の独立気泡を与える気泡コンクリートをオーバーレイする方法⁵⁾は、長者原料金徴収所の西側空地で試験施工されたが、試験施工の状態は写真—8に示すとおりである。この方法によるときは、アメリカで当時既に試みられていたような、断熱性の発泡スチロール樹脂板を路床の直上に敷く場合と違って、舗装内でも上の方に設けて、図—9に示すように断熱効果を発揮する点で外国でも例を見ないアイディアであると思われ理論的にも研究⁶⁾されたが、勾配をもつ箇所では、固結まえの流動性のために施工上の難点があった。強さは、ソイルセメントに類似していて適当なものである。

しかし、結局は、この気泡コンクリートのオーバーレイは実例がないことから実際には採用されなかった。既述のとおり、アスコンのオーバーレイが、昭和41年の夏になって施され、その後もこの種の補修を重ねている。

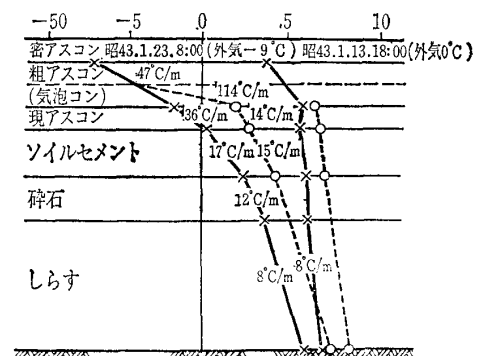


注) 低温のため保温養生の電線を張っているところ

写真—8 試験舗装における気泡コンクリートの打設状況 (長者原の空地, 昭和41年1月)



(a) 試験中の外気温



(b) 舗装中の温度分布(実線は在来舗装, 破線は気泡コンクリート応用の舗装)

図—9 試験舗装の観測温度 (長者原, 昭和43年1月)

6. 1975年大分県中部地震による被害

やまなみハイウェイは、その後10年間にわたって機能を果たしていたが、昭和50年2月になって発生したマグニチュード 6.0 の1975年阿蘇群発地震は、城山展望所付近の道路に少しかりの損害を与えた。この地震では、やまなみハイウェイよりも、むしろその設計法に準じて築造されたという、大観望回りの熊本県営有料道路に比較的大きな損害を与えている。しかし、この道路は比較的平坦な台地

にあるため、大きな斜面破壊はなく、長期の道路閉鎖は避けられた。

同年4月に起きたマグニチュード6.4の1975年大分県中部地震は、やまなみハイウェイの建設当時は全く考慮しなかったほどの大きなもので、小田の池付近から南へ16.8 km にわたって各所に大きな破壊を起こした。

斜面の破壊は数箇所にも及んだ。このうち3箇所は、いわゆる長大斜面である。その破壊は、盛土と切土の境界面をすべり面として起きたものであったが、地震力の大きさに対して、盛土擁壁の支えが不十分であったことと、斜面勾配が急に過ぎたことも斜面破壊を容易にした。しかし、この種の斜面破壊は、やまなみハイウェイに限らず、大地震によって起きる盛土斜面崩壊の普通のタイプのものである。そして、その破壊の実態調査の結果⁷⁾は数多く発表されている。

しかし、既述のような、しゅん工後1年に満たないで生じた凍害が、今回の地震破壊の様相に影響したことは、この地震被害の特徴としてあげられる。それはアスコン表層がソイルセメント層のうえで例のないほど大きく水平に滑った事実である(写真-9)。いうまでもなく、最初の冬に起きたアスコン表層の流動の調査で実証されたように、両層の境界面が結合されていなかった結果であり、それによって舗装破壊を大きくしている。

筆者らは、後日、斜面破壊について解析的研究を行ったが、運輸省別府港工事事務所で記録されたSMAC地震計による地震波を用いるとともに、地盤のN値に基づいてせん断弾性係数を与え、有限要素解析によって斜面を中心とした断面について地震時の地表面応答加速度を調べたが、

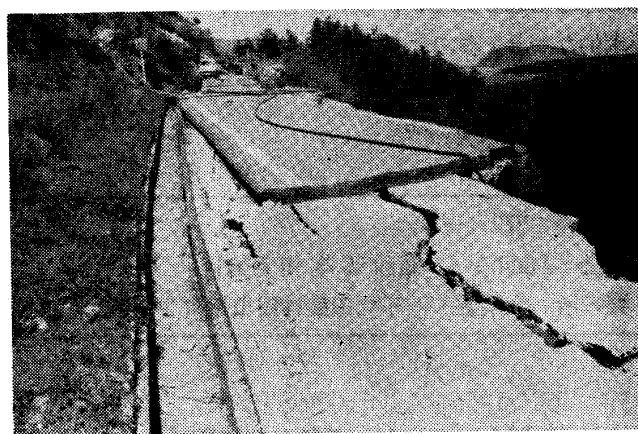
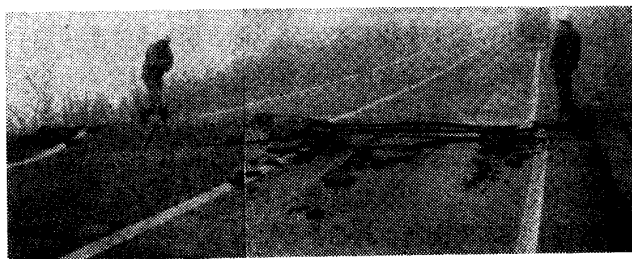
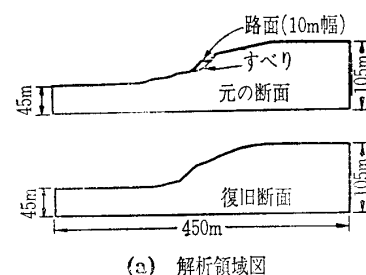
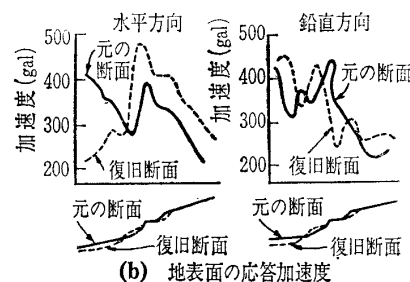


写真-9 1975年大分県中部地震で現れたアスコン表層の大きな水平すべり(昭和50年4月)



(a) 解析領域図



(b) 地表面の応答加速度

図-10 1975年大分県中部地震で破壊した一つの長大斜面の地表面応答加速度

その結果¹⁰⁾は図-10に示すとおりであった。

この解析結果によれば、斜面肩において両加速度は最も大きく、斜面破壊の始まりがこの部分から起き、表層が横方向に大きく滑ったことが理解できる。復旧後の断面について同じ手法と入力をもって解析した結果は図-10に示すとおりであり、斜面肩の水平加速度が増大している。

なおこの地震では、地山の切土斜面の崩壊は3箇所のみであり、しかも局部的であった。この箇所は地中の熱蒸気による風化部分であると判断された。このように全般的には地山部分が破壊しにくかったのは、地山が盛土に比べて、単に堅硬であるからだけでなく、発生した加速度が小さいことによるものであることが、上述の解析結果から理解できる。

7. おわりに

やまなみハイウェイに起きた凍害は、そのまま当時の日本の道路の水準の現れでもあったように思われる。当時は、研究が十分にされていないうちに、寒冷地における火山灰質粘性土上の道路の設計と施工にとりかからざるを得なかったという事情だけでなく、当時の道路建設は延長を延ばすことに懸命であったという事情もあり、凍上についての綿密で周到なルートを選定および設計施工についての配慮が十分でなかったことは否定できないだろう。現地の気象データの把握も十分であったとはいいがたい。また、やまなみハイウェイの建設のための調査段階では、開通後のような大きな交通量は予想されなかった。1 km 当たり3850万円というこの工費は、当時でも有料道路のうちの最低のものであったことは、その予算事情を物語っている。

やまなみハイウェイが被った凍害は、一応、教科書のう

えで知識があったにもかかわらず、南国といわれる九州で実際に起きるとは関係者が予測しなかったのが真実であろう。そして、やまなみハイウェイは一つの実験道路であったという感があり、この経験から得られる教訓は非常に大きい。

本文は過去の教訓として記述したものであるが、最近の道路は、やまなみハイウェイ建設当時の水準では計れないほど進歩している。ことに日本道路公団は、その後、日本の道路工学の水準を世界一流にまで引き上げることに著しく大きな貢献をしたことは周知のとおりである。

なお、本文で述べた見解は、そのときどきに関係者と討議した結果によるものが多い。それらの方々に深甚の謝意を表するものである。また、筆者の一人、下荒磯は凍害発生当時、日本道路公団福岡支社の調査課長であった。

参 考 文 献

- 1) 山内豊聡：九州横断道路における凍結深さについて，九大工学集報，Vol. 32, No. 4, pp. 241-244, 1959. 12.
- 2) 山内豊聡：添加材による火山灰土の安定処理，土と基礎，Vol. 8, No. 6, pp. 25-30, 1960. 12.

- 3) 山内豊聡：九州の軟弱な火山灰土上における舗装の設計施工に関する土質工学的諸問題(1)，(2)，道路，pp. 527-535, 768-774, 1964. 7, 9
- 4) 村恵眞策・谷本誠一：流動破壊の一例とその原因についての一考察，第17回建設省九州地方建設局管内技術研究会論文，p. 72, 1966. 10.
- 5) 山内豊聡・三浦哲彦・久楽勝行：寒冷地舗装における気泡コンクリートの応用について，九大工学集報，Vol. 39, No. 3, pp. 405-409, 1966. 10.
- 6) 山内豊聡・久楽勝行：寒冷地舗装における気泡コンクリートの応用について（第2報），九大工学集報，Vol. 41, No. 3, pp. 411-416, 1968. 7.
- 7) 銚応用地質調査事務所：1975年4月21日大分県中部地震の被害概況，pp. 34-42, 1975. 6. など
- 8) Yamanouchi, T. & K. Yasuhara: Secondary Compression of Organic Soils, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 1, pp. 69-79, March, 1975.
- 9) 山内豊聡・後藤恵之輔・松田滋：1975年大分県中部地震による特異な舗装破壊について，第13回自然災害総合シンポジウム論文集，pp. 41-42, 1976. 10.
- 10) 山内豊聡・後藤恵之輔・兵動正幸：1975年大分県中部地震によるやまなみハイウェイ道路地盤の応答解析，土木学会西部支部昭和51年度研究発表会講演集，pp. 71-72, 1977. 2.

(原稿受理 1980. 7. 1)

新 刊 書 紹 介

「水 文 学」 自然地理学講座（3）

榎根 勇 著

本書は「自然地理学講座」の一つとして出版されたものであるが、対象を既製の学問領域の枠内に限定していない。

それは著者も述べておられるように「水」があらゆる分野とかかわり合いを有し、その実態を把握するためには、特定の分野からでは扱いきれない面が多いからである。

本書は著者のこれまでの国内、外での活躍と多分野にまたがる幅広い知識と体験をもととして書かれているので、従来の類書にみられない特徴を有している。その一端を紹介すると次のようである。

1. 水文学に必要な基本的事項に重点を置いてまとめられているので、読者はこれを起点として、それぞれの関連分野の問題に発展させることができる。

2. 文献リストが豊富なので、読者は必要に応じて原著にあたることができる。

3. 従来の類書にみる固定的な面より最近の新しい知見を重視し、これが豊富にとり入れられている。

主要な目次は次のとおりである。

1. 水文学とは
2. 地球的規模の水循環
3. 地表面における水とエネルギーの分配
4. 土壌水
5. 地下水
6. 地表水

「水」は人間の歴史を通じて常に人間と深いかかわり合いを有してきた。このことは未来永劫に変わりがない。21世紀はまさに「水の時代」だともいわれ、「水」に対する意識の変革がいや応なしに求められるようになるのではないと思われる。このような背景にあって「水」を題材とした啓蒙書も数多く出版されるようになり、それはそれで喜ぶべきことといえるが、教科書として、あるいはいま一つ基本的なことを知りたいという人達にとっては物足りないものがあつた。本書はこれらの要望に対して適確に答えてくれるものと確信する。

(田中)

A 5 判 272ページ

定価 2800円 昭和 55 年 10 月発行

発行所 大明堂 千代田区神田小川町 3-22