
招待論文

Invited Paper

招待論文

初期の路床研究の再評価

REVALUATION OF THE EARLY STAGE STUDY ON SUBGRADE

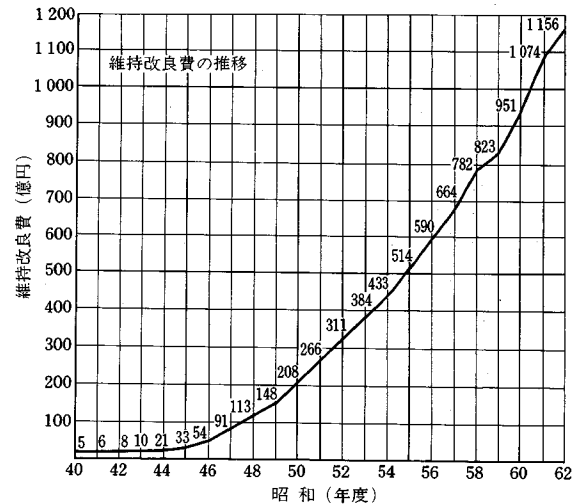
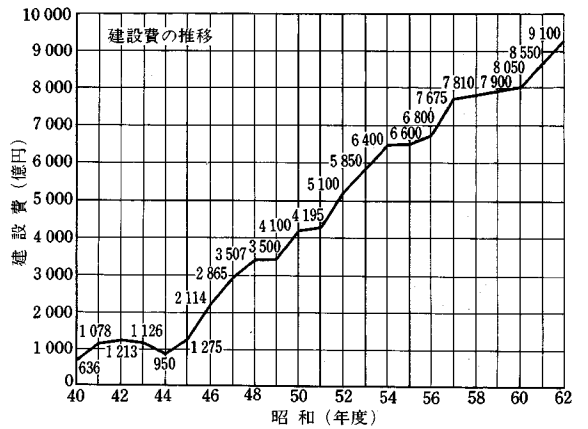
渡邊 隆*

By Takashi WATANABE

1. はじめに

現在わが国はアメリカに次いで世界第2位の約5千万台の自動車を保有し、しかもその増加速度がきわめて高いので、種々の問題が生じていることは周知のとおりである。大都会では毎日のように交通渋滞に悩まされ、能率的な活動も行えないような状況となり、道路整備の必要性は痛感されてはいても、なかなか整備がはかどらぬ現状である。現在の道路整備における障害は、技術的側面よりもむしろ社会的側面から解決すべき問題が多いので、われわれとしては技術の領域を拡大してこの種の社会的問題にも対応できるように努力すべきものと考えられる。しかし舗装等の技術的問題も着実な積み重ねの成果の上に、さらに合理化をはかる必要性も忘れてはならないであろう。

現在わが国の高速道路の供用延長は4千kmを超えているが、日本道路公団の維持改良費が現在建設費の1割以上を占め、今後供用延長の増加につれて、ますますその比率が増大してゆくことが予想されている(図-1参照)。この維持的経費のうちかなりの部分が舗装に関係しており、維持管理を合理化すること、および耐久性ある構造を建設する必要性はきわめて大きい。この種の問題解決には理論的な取扱いが困難な問題も多いのであり、この種の工学的問題解決の一例として路床土研究の歴史を見直すことも意義のあるものと考えて取り上げた次第である。



(注) 40~61年度は最終予算, 62年度は当初予算を示す。

図-1 建設費, 維持改良費の推移 (日本道路公団)

* 正会員 工博 東京工業大学名誉教授・武蔵工業大学教授 (〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

Keywords: flexible pavement design, subgrade soils, historical review

2. 路床土研究のきっかけ（初期のアメリカでの研究）

（1）第1次大戦とアメリカの道路被害

20世紀初めにアメリカでT型フォードの大量生産が開始され、品質の向上、価格の低下（半額に）があったため、1910年頃から急速に自動車が普及していった。当時アメリカでも鉄道の全盛期であり、自動車で遠出するには荒廃していた昔の駅馬車の道を通らざるを得なかった。せいぜい重量が3t程度の駅馬車が、時速6~7 km/hでのろのろ走っていた道を、トラックなど総重量が10t程度の自動車が時速30~40 km/hで走るようになったのであるから、当然路面構造上も幾何構造上も種々の問題が生じたことが理解できる。道路技術の近代化は進まぬうちに、道路の自動車交通量は1907年よりの10年間で30%から90%へと急増していったという。

アメリカで道路特に舗装の近代化を迫られたきっかけは、第1次大戦であった。アメリカが1917年に参戦し当時の輸送の主力であった鉄道の能力はほとんど軍需物資で占められることとなった。したがって国民の生活物資は当時すでに生産されていた大型トラックによる道路輸送に切り替えられたのである。荒廃していた昔の駅馬車の道を、トラックが荷物を満載して続々と通ることとなった。1918年の春先に路面の痛みは非常にひどく、車輪がぬかるみにめり込んで車が動けなくなるなどの事故が全国いたるところにみられたという。

（2）アメリカの初期の道路の研究¹⁾

道路の技術的研究は当時一部では行われていたが、全国的にはきわめて低い水準にあったようである。たとえば、1916年に全国の州で材料試験室をもっている州は半分にも達していなかったという。したがって1917年に材料試験の普及や試験法の標準化をはかるための全国的会議も開かれている。この動きが、道路における研究協力体制の必要性を認めさせることとなり、AASHOの調査試験法委員会が発足して活動を始めるきっかけとなった。また情報交換のため1918年に雑誌Public Roadが発刊されている。道路を管理する部局も1916年にBureau of Public Road (BPR) に変わり、規模も拡大された。1918年の大被害の後、1919年にT. H. MacDonaldをIowa州から局長に迎えて、アメリカの道路の研究が本格化していった。彼はHighway Research Board (HRB) の設立にも大変努力したという。

第1次大戦で道路が大被害を受けた翌年の1919年にNational Academy of Scienceの工学部門に、BPRのMacDonald局長の要請で、道路の研究計画立案のための委員会が発足し、国内各方面の研究協力をはかりなが

ら研究を推進することとなった。

この委員会の委員長であったA. Marston (アイオワ州立大学) はこのとき「膨大な予算を使っている道路建設に、基礎的なデータもなく、また正しい設計も施工も行われていないという現状は、橋梁の設計で部材の応力計算もできない1850年以前の状態に相当する」という発言を行っている。またこの研究計画立案の委員会の役割は、研究の重複を避け、しかも必要な分野の研究が欠落しないように、指導性をもちながら研究協力体制を築くことであるといっている。この協力組織がその後Highway Research Boardへと発展していった。

その後1934年にHydon-Cartwright法により、連邦予算の1.5%が計画・調査に使えることとなり、その後研究にも投入できることとなって、道路の計画や調査が組織的に実施され、また材料や舗装等に関する研究も着々と進んだ。このように調査・研究の範囲が拡大するにつれて、H. R. B.の全体的な研究協力体制がますます有効に働くようになったという。すなわち目的とする工学的問題を解決するために必要な研究テーマを選んで適任者に研究を依頼し、これら個々の研究成果を総合して具体的な設計・施工への指針としてまとめる努力が、全国的規模で、多くの組織にまたがって行われたのである。

わが国ではこのような全国的な研究の組織化はあまり行われないうし、一部では研究の自由や自治を損なうとして反対を受けるおそれもある。しかし道路のように総合的で広範な工学技術の発展のためにはこの種の取組み方も大いに参考にすべきものであろう。

3. 路床土の重要性の認識と締固め

（1）アメリカでの路床土研究

前述した第1次大戦での路面被害が、路床土の重要性を認識させるきっかけとなった。すなわち当時の舗装は、路床にはあまり配慮していなかったが、この被害が主として路床土の凍上に起因したものであることが明らかとなって路床土に注目が払われるようになったのである。

初期の路床土の分類にPRA分類(1942年)があるが、土の分類に、粒度、液性限界、塑性指数のほか、収縮限界、現場含水当量、遠心含水当量などが使われている。土の毛管現象の強さに関係した試験結果を多く採用して分類しているところに、凍上性の判定を重視していたことが理解できるのである。この分類はその後AASHO分類(群指数による分類)へと発展して、舗装厚設計に路床土が重要な位置を占めるようになってきたのである。

（2）アウトバーンと砂質土の締固め

第1次大戦後ドイツでヒトラーが政権をとり、第2次大戦の準備を始めたようであるが、この準備の1つがア

ウトバーンの建設であった。ヒトラーの命令では、当時のドイツにおける常識的な道路の建設方法すなわち舗装を完成する前に自然輾圧が完了するまでの放置期間を設けるという工期的な余裕がなかったようである。そこで人工的に路床や路盤の締固めを行う必要が生じた。

当時すでにアメリカでの道路の研究が本格化しており、路床の凍上による被害が発生していたことも発表されていた時代であるから、アウトバーンの路床には砂質土を用いたようである。ヒトラーの命令する期間内に完全な舗装を完成させるには、人工的な締固め工法を開発しなければならなかった。そこで砂質土の締固めが実験的に調査研究²⁾された。

当時の締固め機械は2t程度の重錘をスティームクレーンで約1.5m吊り上げて落とすという簡単なものがあるのみであった。人工的な締固めにより道路を建設するには、締固め効果を確認するための密度等締固め程度の測定方法の確立、完全な舗装を築造するに必要な路床、路盤の締固め程度の数字的示様、目的とする締固め程度にするための工法および機械の完成が必要となった。

このため当時砂質土の締固めに有効とされたあらゆる方法を実験的に比較し、実用的な締固め工法をアウトバーン建設に利用することとなった。このとき比較実験に選ばれた締固め工法は、水締め、重錘落下、フログランマ（フリーピストンタイプの0.5t、1tの試作機）、振動締固め機（25tのキャタピラ型機械に装着した、70馬力モーターで偏心荷重を回転させる振動機）、ローラー、その他コンパクションバイル、注水しながらの振動締固めである。

現場実験で効果を比較したが、締固めの判定に相対密度を定義し、間隙比で締固め程度を判定したのである。この結果フログランマと振動締固め機が有効で実用的な工法と判定され、アウトバーンの建設に使われたということである。われわれが何気なく教科書でみかける相対密度も、ドイツの技術者がアウトバーン建設のために考え出したらしいことは興味深い。

また締固めの目標値を設定するために、実在する盛土の調査を行って相対密度を使って判定している。盛土後12年間放置され全然走行荷重が通っていなかったところでは、相対密度が10～20%であり、長期間使われていた鉄道盛土では60%に達していた。100年以上使用された道路は82%であるに対し、自然地盤は大体20～40%であったという。したがってアウトバーンは相対密度50%で満足すべき締固め程度になるとの目標で工事が行われたという。

以上ドイツのアウトバーンでは、人工的締固めが工期短縮のために必要となり、締固め工法および機械の開発

を行い、しかも締固め程度を判定する指標（相対密度）を考え、施工管理目標も決めて実際の工事へと応用していったのである。何も参考になる資料もなく、理論的解決策も見出せない問題も、自らの手で実験も行いながら解決したわけである。

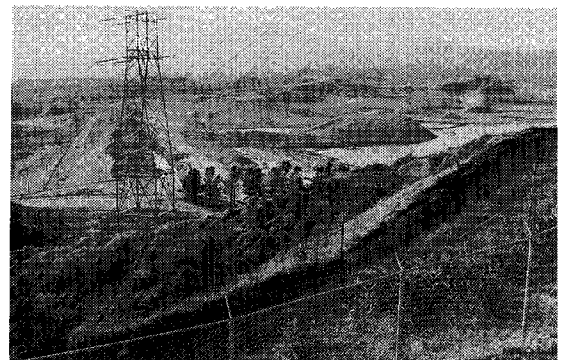
(3) アメリカでの締固めの研究

アメリカの締固めの研究はドイツとは別の必要性から行われたと考えられる。

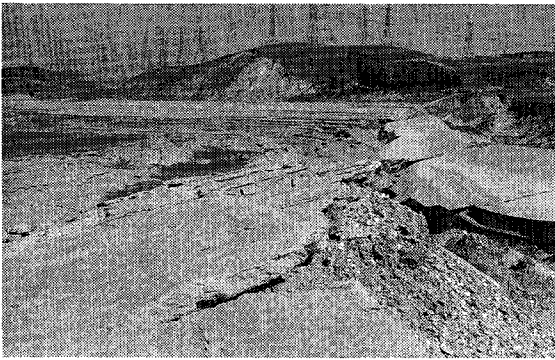
アメリカのダムには、アースダムも数多く建設されているが、多量の土運搬は大変な時間と労力を要する作業であった。1906年に水締めダムの論文が発表³⁾され、土砂の流体輸送（現在の浚渫埋立のような工法）の経済性から、非常に革新技術として急速に普及し、アメリカ全土で数多くの水締めダム（Hydraulic Fill Dam）が建設された。ところが1918年に水締めダムの崩壊事故が発生し、その後続々と事故が続いたという。1918年は道路も大被害を受けた年であるが、アースダムの被害はさらに重大な大事故となったことは想像に難くない。

当然原因の調査、対策の検討などが行われ、締固めの必要性とその合理的な現場への適用方法が問題になったものと思われる。1933年にProctor⁴⁾の論文が発表され現在の突固め試験法が確立したのであるが、Proctorはアースダムの締固めに関連して研究したのである。現在は締固め程度の判定に乾燥密度が使われ、ドイツ流の相対密度はあまり使われないが、いずれにしろ土の締固めの研究はダムの崩壊事故あるいはアウトバーンの急速施工がきっかけとなっていることは興味深い事実である。

水締めダムを輾圧盛土により補強して事故防止をはかる工事が、その後行われたようである。ロスアンゼルス郊外のサンフェルナンドで1971年2月9日に発生した地震で、Van Norman ダムが流動化により崩壊した。しかし溢水して下流の都市に大被害が出る寸前の高さまでの崩壊であったため、溢水による被害は発生していない。このときのすべり破壊はダムの上流側斜面が、貯水池方



写真—1 Van Norman Damのサンフェルナンド地震による被害



写真—2 Van Norman Damの上流側斜面崩壊

向へ崩壊し、一般にダムの崩壊のときにみられるように水圧を受けて下流側にすべっていないことが不思議に思われた。

このダムは1915年に水締めダムとして築造され、その後危険防止のため、下流側に輾圧盛土による腹付け補強が1940年に行われたという。したがって輾圧盛土による下流部分が流動化しないため、水締め盛土の上流側のみが崩壊したのである(写真—1, 2参照)。

(4) わが国の締固め工法

わが国では第2次大戦後の1950年前後に続々と刊行されたTerzaghi-Peck, Taylor, Tschebotarioff等の有名な土質工学の教科書が輸入されてから、土質工学が大いに注目を集めたように思われる。締固め試験や現場での施工管理などが導入され、土工の近代化も進んだ。著者らが旧制大学院の学生として東京の駒場にある当時の東大理工学研究所に行っていたとき、恩師の最上武雄教授から、英文の教科書の突固めモールドと同じものを試作することを命ぜられた。理工研内の工場でアルミ鋳物で突固めモールドを製作したが、昭和23年頃のことで多分日本では最も古いモールドの1つであろう。このモールドができた頃、現在中央大学の久野教授が来られて実験されたが、締固め曲線の実験式⁵⁾を考えて喜んでいた頃は多分昭和24～25年頃であったと思う。

わが国では突固め試験を行うことにより、土を材料として管理しながら合理的に利用することが大いに注目されたのである。当時のわが国は道路の建設までは手が回らず、締固め試験も主としてアースダムの施工管理などで役立っていたようである。機械化施工も導入され、最適含水比による施工管理も行われた。わが国では気候が多雨・多湿のため、最適含水比により施工管理を行うと、施工可能な日数が数か月間でわずかに十数日という極端な事例もあった。含水量を減ずるため粘土を焼成して乾燥粘土を作り、これを混入して最適含水比に近づけるといふ試みも行われた。その後は飽和度による管理も行われるようになり、わが国の条件に合わせるような改善案が

実施されるようになった。著者は1951年にアメリカのアースダムの工事で撒水により最適含水比に近づけているのを見て、土木技術がその地域の条件に強く影響されることを痛感させられたのである。

4. 路床土と舗装

(1) 舗装における路床土

舗装は交通荷重を支持する平坦な耐久性ある路面を、できるだけ経済的に建設しようとするものであり、自然地盤の路床土を最大限に利用することが望まれることとなる。しかし路床土は一般にあまり強固なものではなく、したがって舗装にとっては耐久性を決める大きな要素の1つである。

路床土はまた常に一定の力学的特性を示すものではなく、その特性変動の最大の要因が含水量変化である。舗装は地表面に建設されるから、地表面付近の含水量変化の影響を避けられない宿命がある。アメリカの第1次大戦時の路面の大被害も、路床の凍上が主な原因であったことは前述したとおりであるが、これも路床の含水量変化の一例である。凍上で路面下にアイスレンズが形成され、春先にこれが路床中の水の塊となるのであるから、支持力不足も、周辺の土と混じり合って軟弱化することも当然考えられ、舗装としての機能が失われる状態は容易に想像できる。

一方、道路は全国いたる所に建設されるものであり、地盤条件は非常に異なる場合でも、たとえば非常に軟弱な地盤であっても必要ならば建設しなければならない。わが国では人口が過密であり、古くからの歴史的体験を通じて、人々は洪水にも、地震にも比較的安全な良い地盤のところを選んで住んでいる。したがって人家を避けて道路を建設しようとするれば、軟弱な悪い地盤か、起伏の多い山地を利用せざるを得ないこととなる。路床土の条件の良くないところの利用が非常に多い実情である。

路床土の特性に合わせて、いかに合理的舗装を建設するかが、舗装設計における大きな問題点であった。主としてアスファルト舗装に関連してこの問題の初期の歴史的経緯を振り返ってみたい。

(2) 土の分類による舗装厚設計法

簡単な土質試験結果に基づいて舗装厚を決定しようとする方法である。道路のように全国すべての地域で適用しなければならず、また熟練した技術者がいなくとも間違いがないようにしなければならぬ場合に、この種の対応はきわめて大切な配慮である。この代表的方法としてアメリカの群指数による設計法(Group Index Method)⁶⁾がある。この場合路床土を粒度、液性限界、塑性指数で分類して群指数(0～20の整数)を求める。群指数に応じて路盤厚を決め(群指数が大きいかほど厚い

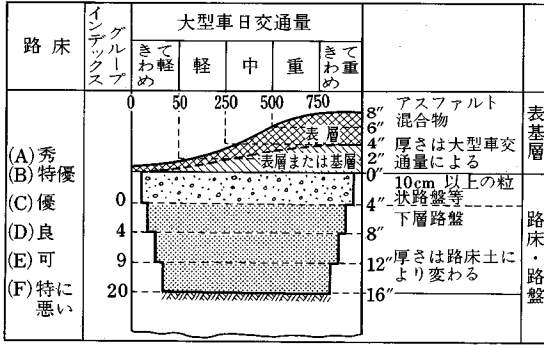


図-2 グループインデックスによる舗装厚設計 (Steele)

路盤を必要とする), 表層・基層の厚さは大型車交通量により決定しようとする方法である (図-2 参照)。

この方法は、路床土の含水比と乾燥密度はそれぞれ排水施設や締固めにより人工的に管理でき、人間が変えられない路床土そのものの性質に応じて舗装を設計しようという考え方である。したがって路床土の締固め程度は標準締固め試験の最大乾燥密度の95%以上、路盤は100%以上が前提となり、含水比に関しても地下水位が路面より3~4ftよりも深い位置にあることが条件となっている。

すなわち人工的に管理できる路床土の状態は、経済的に可能な範囲で、できるだけ最良の状態に近づけ、人工的に管理できない土粒子そのものの性質を、誰でもできる簡単な試験で判断して舗装厚を決めようという考え方である。

(3) 土の力学的特性を考慮する舗装厚設計

舗装面の変形量と破壊に関連性が大きいことが判明したが、舗装内の応力とひずみあるいは変形量の計算が困難であり、また繰返し荷重の影響や路床土等の特性の季節的変動等の複雑な要因を考慮することは不可能に近い。そこで路床土の変形特性を知るための比較的簡単な試験結果と過去の道路における経験とを組み合わせ、舗装厚設計を行う方法が提案された。

土の変形特性として平板載荷試験がまず考えられるが、さらに簡単な方法として CBR 試験が広く用いられている。この試験は1928年に提案され、その後アメリカでいろいろの修正が行われた。要するに自然土または締め固めた土の中央部にピストンを一定速度 (1/20 in/min) で貫入させ、0.1または0.2inの貫入量のときの抵抗力を求める。この値と標準砕石で同じ方法で測定した抵抗力の比で示すわけで、貫入量一定のときの抵抗力の比であるから、変形係数の無次元表示と考えることもできる。

アメリカ工兵隊の場合、土を4日水浸した後に貫入試験を行い、路床の含水量が増大して最悪の状態のときの

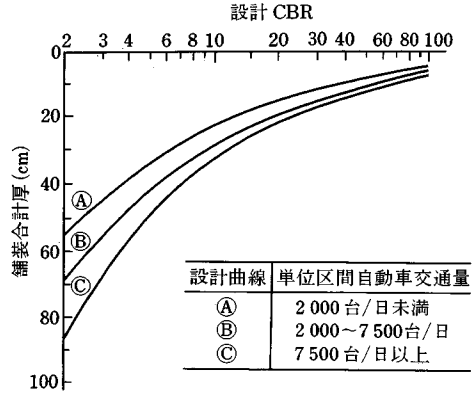


図-3 CBRによるアスファルト舗装厚設計曲線 (旧舗装要綱)

CBR 値を舗装設計に用いるようにした。

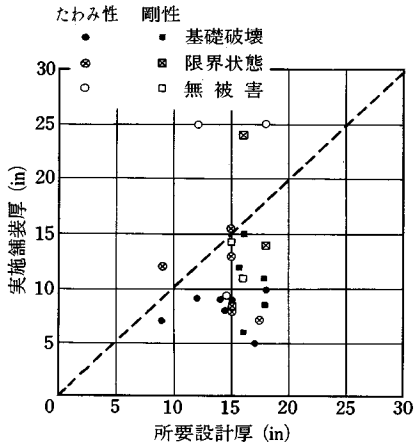
カリフォルニア州の道路局で CBR を路床土、路盤について測定し、路面の破壊との関係を実在道路で調査した。その結果、輪荷重が与えられると、破壊しないために必要な舗装厚さが決定できることが判明した。わが国ではこの CBR 設計法を採用した際に、輪荷重の測定値が少ないことなどを考えて、交通量の大小で輪荷重の大小が決まるとして CBR による設計曲線を与えていた (図-3 参照)。

路床土特性を CBR により判別して舗装厚を決定する方法は、現実の路面の破壊との関係をよく示しているのでも世界的に広く採用された。

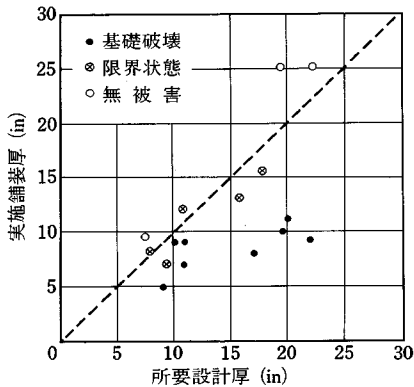
(4) 路床土の特性と舗装の被害

イギリスの Road Research Laboratory で実在道路の舗装破壊調査を行った結果を、群指数設計法および CBR 設計法のそれぞれの所要厚さと比較したものが、図-4、図-5 である。路面が路床、路盤が原因で破壊する場合には、CBR 設計法の方がよく一致を示している。ただし群指数設計法の図-4には、アスファルト舗装のみでなくコンクリート舗装の調査も含まれ、またこの設計法の根拠となっている締固め程度や地下水位の条件から外れている例も含まれている。

この場合に用いられた CBR 値は4日水浸を行わずに現場または乱さない状態での試料について測定した値である。もしこの CBR 値に4日水浸の値を使えば、貫入ピストンへの抵抗に最も影響する試料表面付近が軟弱化するので安全側過ぎる設計になるのではないかと。わが国でも4日水浸の CBR 値が舗装設計の基準値として使われており、また平均値でなく標準偏差程度の安全側の値を採用して舗装設計が行われている。路床土特性のばらつきや、多雨な気象条件等を考えると、必ずしも現在の方法が過大設計であるとはいえないであろうが、検討する必要もある問題であろう。



図—4 群指数設計法とイギリスの実在道路の被害調査 (Road Research Laboratory)



図—5 CBR 設計法とイギリスの実在道路の被害調査 (Road Research Laboratory)

現在は CBR 設計法そのものでなく、AASHO 道路試験の成果を取り入れた舗装厚設計が行われているが、ほとんど路床に起因する路面の被害は聞かなくなった。基礎地盤の沈下や盛土路体の不等沈下、あるいは他工事による埋戻し土の締固め不足などによる被害は生じているようであるが、路床自体が問題となることは少なく、維持補修の場合に路床まで手を加える必要のあることは高級舗装ではきわめて少なくなった。これは舗装が本来必ず補修を必要とするものであることを考えたとき、非常に有利な点となるが、一方で不経済な過大設計を行っていないという証拠とはならないと思われるのである。

また最近では弾性論による構造解析も行われるようになってきたが、変形特性が判定の大きな基準となっており、本質的には CBR 設計法と似たような方向にあるものと考えられる。この場合には CBR 設計法が季節的含水量変化の影響や、輪荷重の条件などの複雑な要因を、一応過去の経験により補っているのに対し、弾性論の場

合には舗装を構成する各層の弾性的特性の変動する範囲や、輪荷重の変動などを考慮する必要が生じてくる。したがって実在の道路における数多くの測定データを必要とすることには変わりがなく、工学的に信頼性の高い設計法へと発展させてゆくには、いわゆるドロ臭い多くの努力が今後とも続けられねばならないであろう。

5. 結 語

アスファルト舗装に関連して、路床土に対する考え方の変遷などを、特にその初期の段階について歴史的に述べてみた。一部は路床土以外の締固めにもふれたが、いずれにしろ舗装のように理論的取扱いを行うように単純化することが困難で、しかもきわめて複雑な特性をもつ材料による構造を、必要に迫られて次々と合理的な解決策を見出していった先人の努力に、心から敬意を表す次第である。残念ながらそのほとんどが欧米諸国における調査・研究の成果であり、技術の歴史の重さを痛感したのである。アメリカにおける道路研究が、第1次大戦後の大被害という条件があったとはいえ、挙国的協力体制のもとで着々と積み上げられていったことや、ドイツのアウトバーン建設で常識では不可能と思われた工期内に完全な路面を作るための努力など、われわれも大いに参考としなければならないものと思われる。

最近ではハイテク分野の研究で、わが国の産学官の研究協力によりかなりの成果をあげており、アメリカからもわが国の研究体制に注目が集まっているといった記事も新聞等にみられるようになってきた。大変喜ばしいことであるが、土木の分野特に舗装の分野でもこのように世界の注目を集めるような成果を期待したいものである。工学的問題の解決には、解決すべき問題点を現場に密着した形でよく理解し、その原因を考えて対策を提案し、その対策を実施して効果を客観的に判定する必要がある。そのいずれの場合もかなり広範な分野にまたがり、しかも多くの要因が組み合わさって影響していると思われる。したがって始めはなるべく単純化された条件での検討から始められることになるだろうが、これらを組み合わせることで複雑な現実の問題へと適用してゆくには多くの人々の長期にわたる努力と協力がなければ不可能であろう。われわれの技術が、われわれ自身の手でさらに発展して、世界に貢献することを期待するものである。

参 考 文 献

- 1) Cron, F.W. : Highway Design for Motor Vehicle, Public Roads, Vol. 38, No. 3~Vol. 40, No. 3, Dec. 1974 ~Dec. 1976.
- 2) Loose, W. (DEGEB0) : Comparative studies of the effectiveness of different methods for compacting cohesionless soils, Proc. 1st. Int. Conf. S.M.F.E. p.174,

1936.

- 3) Scott, R. F. 教授 (California Institute of Technology) の談話による。
- 4) Proctor, R. R. : Design and Construction of Rolled Earth Dams, Eng. News Record, Aug. 31, Sept. 7, Sept. 21, Sept. 28, 1933.
- 5) 渡辺 隆・久野悟郎 : 土の突固めに対する特性及び乾燥密度曲線の実験式, 土木学会誌, Vol. 38, No. 5, 昭和28年5月.
- 6) Steele, D. J. : Classification of highway subgrade materials, Proc. H. R. B. p. 25, 1945.

(1988. 7. 5・受付)
