

土 の 締 固 め

久 野 悟 郎*

1. 締固めについての意識の変遷

筆者は約 25 年間、主として道路についてであったが、多少とも土の締固めと関係をもって過してきた。この間をふりかえてみると、社会一般の土の締固めについての考え方が、ときとともに微妙に変化してきていることに気づく。そして、それが土質工学の一部門として、知識の蓄積に基づく学問的進歩をとげてきたというより、人間のより打算的ともいべき要求に支配されて、ゆり動かされてきたと見えるのは興味ぶかいことである。

土の締固めの設計・施工上の問題点を述べるにあたって、まず問題提起の意味をかねて、これら意識の移り変わりを具体的に述べてみることにする。

道路の盛土において締固めが重点的に取りあげられるようになったのは、名神高速道路の建設に際してからといえると思う。たしかに当時、ようやく活発になってきていた道路整備において、建設当初から重交通を支えるための高級舗装を舗設するには、道路の盛土は、路床、路盤と同じようによく締め固めて、供用後の変形を少なくしておくべきであるという気運が高まり、各地で試験工事も熱心に行われていた。そして、その成果と気運が凝縮したのが名神高速道路においてであった。

名神高速道路の仕様書には盛土の締固めに関する品質規定が明確に指示され、仕上がり 20 cm 厚のほぼ水平な層に転圧する(薄層転圧)ことが定められた。施主側の品質管理試験に対する意欲も旺盛で、現場の監督員がその盛土の目標とする密度、含水比をそらんじていたほどであった。名神と併行して東海道新幹線の工事が進んでいた。保線によって軌道面高を修正しうる余地を残していた鉄道盛土は、締固めについての規準はかなり低かったもので、盛土幅のせまいことも手伝って、盛土工事の進捗が名神と比べて、めざましく速かったことを記憶している。

名神以後、自動車交通の爆発的な伸びに伴って、道路建設がますます盛んになり、昭和 42 年には道路土工指針(初版昭和 31 年)が全面的に改訂され、道路盛土は“よく締め固める”とともに、締固めの程度を仕上がっ

た“品質で規定する”という名神における思想が盛り込まれることになった。しかし、そういった全国的規模での確認にもかかわらず、名神以後、道路盛土に対する締固めの意識は急速に低下の一途をたどった事實は、注目すべきことであった。

最近の高速道路の現場で聞いた極端な話であるが、盛土の現場にローラーがきているかどうかがまず問題で、ローラーがおいてある現場は、まあよい方だとみるべきであるという。まさに、名神当時の意気込みは、施主側にも施工者側にも見あたらなくなってしまったのが現状のようである。この急激な変化について、次の 3 つの理由が思いあたる。

(1) 道路の盛土に名神で行ったほどのたんねんな薄層転圧が、本当に必要なのだろうかという疑念が潜在していること

盛土の締固めにあたって転圧機械を用いて締め固めるということは、フィルダムの場合はいざしらず、金を捨てるようなものだという観念は、土工の歴史に照して、根強いものであったようだ。ローラーが世にでたのは、1860 年代にさかのぼるが、1900 年の初期までに用いられていたものの、ほとんどはロードローラーであり、道路といっても、いわゆる路床、路盤、舗装の転圧用に使われたものであって、盛土(路体)のためのものではなかったらしい。シープスフートローラーなどの盛土(土工)用の転圧機がフィルダムに利用されるようになったのは 1920 年以降のようで、それまではフィルダムでさえ水締め工法が主流として採用されていたし、締固めには羊の群などの獣力が利用されていたにすぎない。平坦な地形が多く、横断構造物の数も少ない欧米の道路においては、盛土自体があまり高くなかったこともあって、高い支持力を必要とする舗装部分と路床をよく締め固めておけば、それらによって分散された応力しか受けない盛土路体は、さほど、よく締めておかなくとも十分役に立ったのであろう。欧米とは逆に、高い盛土高で、多くの剛性に富んだ横断構造物を抱き込んだ日本の高速道路の盛土において、上記の欧米の考え方を適用すると著しい不等沈下を生ずることになるのを恐れたのが、名神的な転圧の発想点のひとつであったのだが。

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

(2) 日本にローラーの転圧を受け付けぬ高含水比粘性土が多かったこと

多雨多湿な日本の気象条件に災いされて、わが国の粘性土は自然含水比が一般に高く、そのままの状態、欧米の条件のよい土質に合わせて開発された転圧機を使用すると、少ない転圧で過転圧 (over compaction) 状態となり、締固めの効果があがらないことが多かった。よって、よい締固めの結果が得られるように含水量調節を行おうとすれば、一般的に理解されている散水による含水比の増加ではなく、乾燥による含水比の低下を図らなければならないことになり、不可能に近い手間が必要となった。このような土に遭遇することは、締固めに関する欧米の技術を素直に導入しようとする技術者に水をさしたことになったのはたしかである。この種の土の代表が関東ロームなどの火山灰質粘性土であり、ブルドーザーによって敷ならし、ふみ固めるといった程度の転圧でしか盛土が立ち上がれないという実態が多かった。このような施工でよしとしたのは、重転圧機械の締固めを受けつけない関東ロームについて、このような軽い締固め状態で設計的にがまんしうる配慮のもとにとった手段であって、いかなる土についてもブルドーザー転圧でよいというわけでは決してなかったはずであるが、それぞれの土に応じた転圧機械でよく締固めようとする意欲を著しく殺ぐことになったのは残念なことである。

(3) 転圧が労多くして報いられることの少ない作業であること

道路の盛土において切土の土を流用する場合、 1 m^3 の単価は運搬距離によって変化しようが、数百円といった値段であろう。その中で、転圧にみている金額は、大体であるが、自走式タイヤローラーで 40 円、被けん引式のタイヤローラーで 55 円、被けん引式の振動ローラーで 60 円といった程度であり、前述のブルドーザー転圧が 20 円程度とのことである。これに敷ならし用の金、約 20 円を加えても、転圧に要する費用は土の単価の 1 割程度ということになる。良質な土を客土してくる場合を考えると、それはもっと小さなものになってしまう。こういう実情であれば、土を締め固めなければ良い盛土ができないという考えさえ持たなければ、転圧機械を土質に応じて選択し、最適な転圧を行うことを考えずに、何はともあれ、施工能率のよい機械を用いて仕事を早くし、土量をかせいだ方がはるかに有利なことは目に見える。最近の道路の現場では、土工段階であってもローラーが使われている場合は、ほとんどが自走式タイヤローラーであり、許されればブルドーザー転圧だけですませようという気風が強いのは、この理由によるのでは

ないだろうか (日本の道路盛土の現場がせまいので、小回りのきく上記の機械が、さらに有利なことも手伝っている)。締め固めた後の品質が規定に合格していればそれでよいではないかという理屈も成り立つ。しかし、工事量に比して技術者数が不足している現在において、施工側の品質管理試験に対する態勢は大幅に後退し、施工者側が行った試験結果を報告書において確認するという形式をとることがほとんどとなった。土の密度測定にははらばりが多いこと、また、規定値自体が、厳格な管理基準といえるほどの確証をだれもが持ち得ない現状を考えると、明らかに不利となる結果を意識的に調節してしまった報告書が全くないとはだれも断言できないし、それを検査する手法もないうえ、それによる弊害もすぐには表われてこない。施主も施工者も、少ない技術者で多くの工事量を短期にこなすことを強いられたとき、努力すればよいことはわかっている、真先に手を抜く対象となるのが、締固めであることは無理からぬことである。

以上、多分に筆者の邪推もあるかも知れぬ理由によって、道路盛土における締固めの意識は名神のころと比べて低下してきていることは確かである。しかし、その後も高速道路は着実に延びているし、盛土の仕上がりに面においては輪荷重によるたわみが厳正にチェックされ、舗装工事に引き継がれている。これでよいのであるならば名神当時の考え方は過剰な締固めを求めていたことになる。道路の盛土に対する意識が以上のような経過をたどっているのと対照的なことが、他の盛土に起っている。

鉄道における伝統的な保線作業に依存する考え方が、労働力の不足とともに変化することになった。高速な鉄道の軌道面の平坦性の要求度は、道路のそれよりはるかに高いのは当然であり、そのような平坦度を永く保ちうる軌道を盛土上に設置しようとするれば、その盛土に許される変形量は、極度に小さくならざるを得ない。道床バラストのない路盤上スラブ軌道が採用されるようになれば、それはコンクリート舗装を支持する道路盛土よりもはるかに過酷な対沈下の条件が科せられることになる。したがって、このような鉄道の路盤 (盛土) は、材料的にも精選された土を、きわめて高い密度に締め固めなければならないことになるのは当然である。

宅地造成の盛土も、従来はあまり高度の締固めを要求していなかった。すなわち、盛土部に鉄筋コンクリートの建物を建てる場合、中層住宅であっても盛土を貫いた杭基礎を設けて支持させることが常識となっており、盛土自体に高い支持力を期待する必要度が低かったためである。しかし最近、宅地造成が丘陵の深部から山地部へと広がるとともに、切土部から掘削される盛土用材料に多量の岩塊が含まれるようになった。このように大きな岩塊を多量に含んだ盛土を貫いて杭基礎を設けることは

非常に困難となってきた。一方、これらの材料は盛土用の土としては良質材であるわけであるから、十分な締め固めを行えば中層住宅程度の荷重に対しては、直接基礎の支持地盤としての耐力は得られる可能性ははっきりしている。したがって、このような条件においては、宅造の盛土でも締め固めが注目されることになった。

土の締め固めに対する考え方の変遷は、以上のようにめまぐるしいものがあつた。この変化を種々の情勢に照らして論評することはできるが、理論的に完全に整理し切れないのは、土の締め固めという操作によって土が改良されるということが概念的にわかっていても、この土を、どのような方法で、どのくらいの含水比で、どの程度締め固めたならば、どのような力学的性質をもつ土になる

か、という定量的な評価がまだ完備されていないという致命的な欠陥によるものと思われる。

2. 何を目的に土を締め固めるのか

なぜ土を締め固めるのかという問に対し、簡単に土を密にするためだという答がよく返ってくる。土を密にすることがなぜ必要なのかと反問すると、はじめてその盛土のどのような性質を改良するのだという目的がはじめて述べられる。われわれは、土を締め固めるにあたって最初に何を目的にして土を締め固めようとしているかを明らかにしたうえで、次にそのためにはどのように土を締め固めるかを探求するのが本来の手順といえよう。

締め固めによって改良を期する土の性質としては

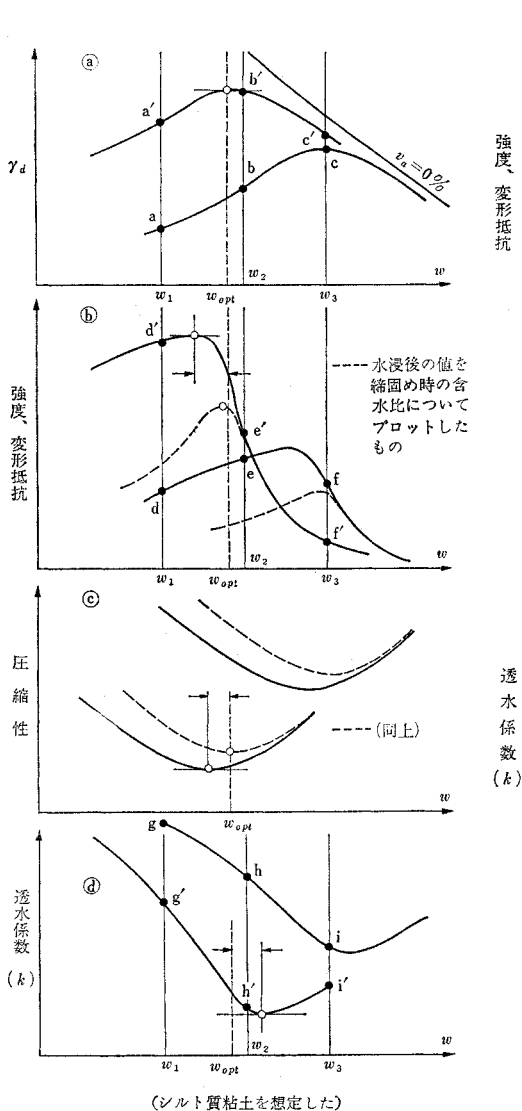


図-1 土の締め固め曲線および締め固め含水比と、土の諸性質との関係の概念図

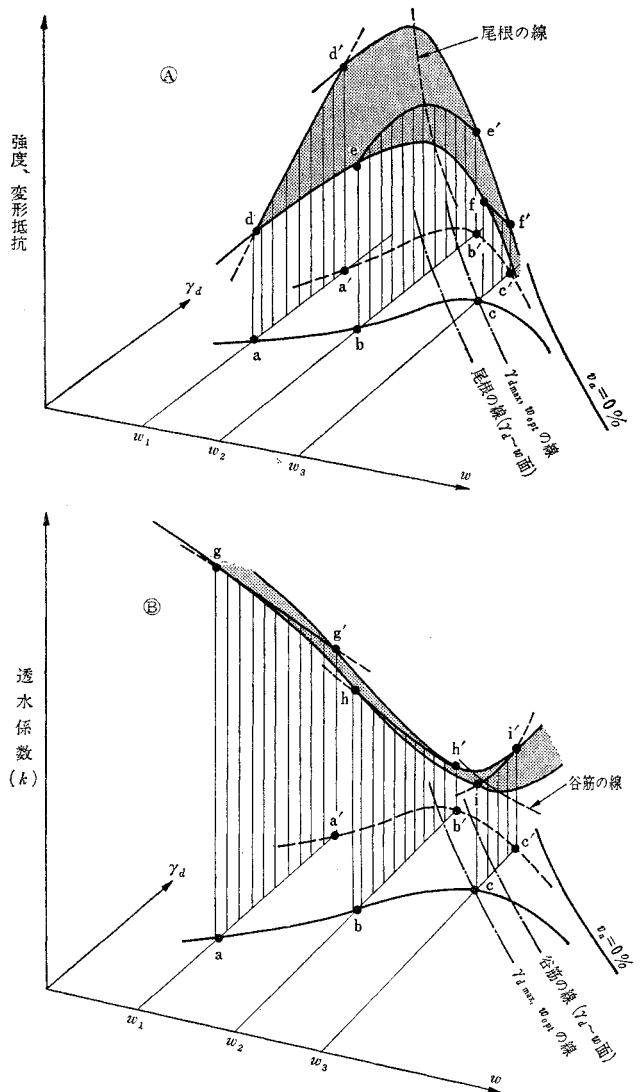


図-2 土の乾燥密度 γ_d と含水比 w に対応する土の性質の変化の表現

表-1 尾根、谷筋の位置の大略想定表

締め固めた土の状態あるいは性質	対応する r_d-w 図上の位置
最大乾燥密度 r_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} の状態 (最適領域)	ゼロ空気間げき率曲線 ($v_a=0\%$) に平行した帯状の領域で; 粗粒土で空気間げき率 $v_a=20\sim 10\%$ 細粒土で空気間げき率 $v_a=10\sim 5\%$ 程度の範囲
強度、変形抵抗についての尾根 (図-2 ㉔ 参照)	r_{dmax}, w_{opt} の領域にほぼ平行した含水比のやや低い (乾燥側) の領域。その領域内で w が低いほど値が高い。水浸した場合の性質については r_{dmax}, w_{opt} の領域とほぼ一致する。
圧縮性についての谷筋	r_{dmax}, w_{opt} の領域にほぼ平行した含水比のやや低い (乾燥側) の領域。その領域内で w が低いほど圧縮性は少ない。水浸した場合の性質については r_{dmax}, w_{opt} の領域とほぼ一致する。
透水係数についての谷筋 (図-2 ㉕ 参照)	r_{dmax}, w_{opt} の領域にほぼ平行した含水比のやや高い (湿潤側) の領域。その領域内で w の低いほど k は小さい。

注：図-2 参照のこと。

- ① 土の変形抵抗の増大 (土の弾性的性質の改善)
 - ② 土のせん断強さの増強 (土の強度特性の改善)
 - ③ 土の圧縮性の低下
 - ④ 土の透水係数の減少 (土のシャ水性の改善)
- などがあげられよう。

① は道路などの路床、路盤のように荷重に対してたわみの量が問題となる場合に、② は盛土斜面の安定、および構造物の基礎地盤としての盛土の極限支持力を求める場合に対象となる。③ は盛土の圧縮沈下を論ずるとき、④ はフィルダムのコアあるいは、河川堤防などの透水性を考える場合に必要な性質である。

締め固めに伴う上記の性質の変化を論ずるとき、図-1のように乾燥密度-含水比曲線に対応してこれらの性質の変化を理解しようとすることが多い。たしかに、㉔の乾燥密度 r_d -含水比 w 曲線 (締め固め曲線) は、特定の締め固め方法で含水比を変化させながら供試体を作成した結果を表わしたものであり、㉔、㉕、㉖はその供試体について、それぞれの試験を行い、締め固め時の含水比 w についてプロットしたものであるから、最も直接的な表現法といえよう。しかし、締め固め曲線自体は、ある特定の、例えば JIS の突固め試験方法といったような選ばれた締め固め方法によってのみ与えられたものであって、実際の現場の転圧機械による締め固め曲線と、それとが一致する保証は全くない。そしてまた、それらの関連が明確につけられては決していない。密度と含水比の関係が対応しないのであれば、図-1 ㉔~㉖のような室内試験による知見が、現場の強度その他と定量的に結びつくはずがない。

後述するように、必ずしも完全とはいえないが、図-2に示したような理解の仕方が締め固めた土の性質を解するうえにより有効と考えている。図-2の㉔は締め固め直後の土の強度 (あるいは変形抵抗) について、㉕は透水係数について模式的に示したものである。われわれは締め固め曲線 a, b, c に対応する強度変化 d, e, f や、透水係数 g, h, i の曲線を求めることが必要なのではなく、土の状態 (r_d と w) の変化に伴う強度の変化を表わす d, e, f を含んだ曲面や、透水係数の変化を表わす g, h, i を含む曲面を明確に知ることが必要である。この曲面の形状がはっきりすれば、種々の締め固め含水比において締め固めエネルギーを増していったとき、 r_d の増加に対応して、土の性質がどのように変化していくか (例えば、強度についての $w=w_1$ における d, d' 線) をはっきりと理解することができる。そして、これら曲面の尾根や谷の伸びる位置、斜面の勾配などを土質別に明らかにしておけば、われわれが締め固めによって何を求めるためには、どのような土の状態をねらうべきかを知ることができるはずである。

締め固まった土の諸性質がそれぞれの土質について含水比と乾燥密度が定まれば、それと一対一に対応することがたしかめられれば、図-2に示したような理解の仕方、すなわち締め固め曲線を r_d-w 図上に思いうかべるのではなく、 r_d-w 図上のそれぞれの点に対応して強度や、透水性のコンターラインを想像する方が、締め固めた土の性質をより正しく解釈しようと信じている。

上記の土の締め固めの目的となる性質①~④について、図-2のような表現における尾根や谷筋の位置をほぼ想定してみると表-1のとおりである。これらは、図-1からもわかるように、 r_d-w 図上の種々の締め固め試験における最大乾燥密度 r_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} が分布する帯状の範囲 (線というべきか) と、ほぼ平行した範囲にあるようであり、とくに水浸した場合の強度特性、圧縮性についての尾根、谷筋の位置が、 r_{dmax}, w_{opt} のそれと、ほぼ重なることは——供用中に水が浸入することを考えておかなければならないことの多い土構造物としては——この状態に土を締め固めておくことが必要であることになり、土の締め固めにおける最大乾燥密度、最適含水比のもつ意義を、この点について認めるべきである (この領域を“最適領域”と呼ぶことにする)。また、透水係数の谷筋が、変形特性の尾根よりかなり湿潤側にあることは、フィルダムのコアの転圧において、透水係数を最小にすべく含水量調節を行えば、転圧時の締め固め面のたわみは、かなり大きくなる可能性もあるし、盛立て後の圧縮性においても、必ずしも最低値をねらっていないことにもなることを意味している。

しかし、ここで留意しなければならないことは、締め固め的手段によって、土粒子の破碎の程度や、細粒土にお

表-2 盛土（一般的な道路盛土）の施工管理の目的と対応

目 的	締 固 め 作 業 の 適 正 の 保 証		締固め結果と設計との対比
目 標	施工手順, 方法の妥当性	締固め土の恒久性の確保	盛土の品質の妥当性
手 段	現場の施工状況の制御	締固め土の密度含水比の測定	強度, 変形特性の測定
管 理 事 項	① 転圧機種 ② 薄層敷きならし(層厚) ③ 含水量調節の状況 ④ 締固めの均等性	締固め土が最適領域に移行されたことの確認(密度, 飽和度, 空気間げき率などの規定値との対比)	転圧機械のトラフィカビリティ, ブルーフローリングなどによる検査(材料の適否, 施工含水比の妥当性の検査)

ける土粒子構造の変化の様子がかなり大幅に相違していることである。このことは、たとえ同じ土を用いて転圧を行うにしても、締固めの方法および程度によって徐々に当初の土が他の土に変化しているようなものである。実験室内の突固め試験と現場のローラー転圧とでは、さらに土の粒度構成は変化しているはずである。土が変わってしまえば、図-2 におけるような密度、含水比と、他の土性との関係も変わってくるはずである。土の締固めの研究において、この問題についての情報はまだ不十分であって何もいえない。この件に関する研究が十分に進まないかぎり、締め固めた土の性質、いいかえれば、不飽和土の土の性質を完全に明らかにすることはできないのではあるまいか。

3. 締固め施工管理の目的と対応

土の締固め施工の管理は、どのような目的でなされるか、その目標とするものは何であるか、そして一般にどのような手段がとられているかを整理してみると表-2 のようになる。

従来、土の締固め施工管理といわれると、施工状況の制御もさることながら、現場における締固め密度、あるいは飽和度、空気間げき率の測定が第一に連想され、その測定に手間がかかるという理由から、ブルーフローリングやコーン指数などの測定に代えて省力化を測ろうといったことに考えが向かいがちであった。しかし、表-2 から明らかのように、施工管理のうち締め固めた土の品質に関することとしては、“締め固めた土の恒久性の検証”と“設計値と対比しての性質の妥当性の確認”という目標が存在することを、思い起こさなければならぬ。2. に述べたように、締固め土の恒久性(すなわち、最悪な水浸状態における土性の安定性)は、 r_d-w 図上における“最適領域”に土が移行されたことを確認すればよいことを意味し、設計値との対比はその施工含水比が最適領域において、要求される土の性質(強度、圧縮性、透水性など)を与えるに適切なものかを検討することによってなしうることになる(原理的には図-2 のような理解から、土性の限界値によって r_d と w の範囲が求められることになる。したがって、 r_d によ

て範囲を定めてもよいが、一般には管理の対象となりやすい含水比が選ばれている)。

以上の理由から、一般の盛土の品質を管理するに際しては、締固め直後の強度や変形抵抗を簡易に測定するだけでは、どうしても盛土の品質を完全に検査したことにはなり得ないことが明らかであろう。もちろん、水浸による強度変化がほとんど見られない粗粒土の締固めにおいては、そのような土においては密度の測定自体が非常に困難であるから、むしろ、転圧に伴う強度や、変形特性を測定して転圧の進行を確認の方が合理的である。

1. に述べたように、現在の道路の盛土工においては、締固め土の品質規定が仕様書に明文化されながらその品質管理がなおざりにされがちである。その対策として管理試験の省力化がさげばれているが、密度、含水比の測定がどうしても避け得ないために、改善の実が上がっていない。この現状を放置するよりは、道路の盛土にもいっては、かえって昔にもどり、転圧工法を規定する方式をとる方が効果的ではないかという考え方がでている。

施工側が工法を規定してしまうことは、施工者側の技術力を低く見ている立場であり、企業的努力を封じるものとして近代的な請負工事にふさわしくないといわれてきた。しかし、ここでいう工法の規定とは、試験施工において、品質が規定どおりになることを両者が確認し合った工法をみつけ、以後、施工側の監督員は、その工法が厳守されて盛土が進行するのを見守ればよいことになり、省力化が期待されることになる。そうであっても、施工中の盛土の密度、含水比の測定は、やはり実態を記録し、観察するために行っておくべきである。この場合、それらの値が管理あるいは検査の対象とならないがゆえに、より正確な実態として維持補修段階における有用な資料として残されることになるであろう。道路盛土の路体部については、規定のまき出し厚さに敷きならした層を、適切な転圧機械が締め固めているという事実が確認されれば、そして、それらの作業が整然と行われている現場の雰囲気のみなられば、多くの場合、所定の品質を満足していることになると思って間違いないという意見があるほどである。

引用資料

- 1) 高速道路調査会：土の締固めに関する調査研究報告書(日本道路公団委託)昭和47年2月。