

高含水比の粘性土を用いた道路盛土の土工

いな 田 ます 穂*

1. ま え が き

高湿多雨のわが国では、高含水比の粘性土を用いて土工を行なうことがきわめて多い。道路盛土の場合、土工の終了後交通に開放して十分な期間を経過した後、舗装を施工する工程の工事では、高含水比の粘性土も比較的障害とはなりにくい。しかし、大規模な道路工事を機械化施工によって急速に進め、かつ、土工の終了と同時に舗装を施工して交通に供する場合には、工事中における粘性土のトラフィカビリティー、交通開始後の路面に及ぼす粘性土のデフレクションの影響、高い盛土における不同沈下とノリ面の破壊など多くの問題に遭遇する。

ここではこれらの問題点について多少の考察を加えるとともに、対策の一端にふれてみたいと思う。

2. 道路盛土各部の機能と粘性土の使用

2.1 道路盛土各部の機能

道路を構成する各部分は路面を将来まで最良の状態に維持し続ける任務をもっている。この意味でまず土工の対象となる盛土を図-1に示したように区分し、各部の機能を考えてみる。

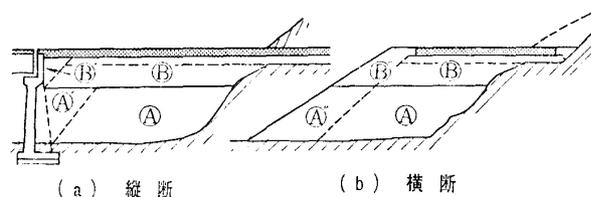


図-1 道路の断面構成

(1) 路体部……A, A', A''

盛土部において道路の基礎を形成する部分である。したがって切土部の地盤といちじるしく相違しない程度に路床、舗装および交通荷重を十分に支持できることが必要である。とくに路体部では長期にわたって舗装に有害な不同沈下を与えることのないような材料の使用と仕上げを考慮しておかなければならない。

橋など構造物取付け部の路体 A' にはとくに構造物裏込め土として、容積変化の少ない材料を用いて車両の走行に有害な不同沈下を防止することが多い。

また盛土ノリ面部の路体 A'' は路体の心部 A を拘束して保護するため、盛土高に応じて必要なノリ面安定の確保できる材料で仕上げる必要がある。とくに降雨によ

って侵食されるか、盛土の施工中あるいは施工後に浸透水の影響によって膨潤弱化する性質のいちじるしい材料をこの部分に用いることは適当でない。

(2) 路床部……B, B', B''

路床は舗装の直下において交通荷重の影響を受ける土の部分である。良質な土で盛土する場合には盛土の上部がそのまま路床となるが、盛土材料が不良な土であればとくに良質な土を盛土上部に搬入して上部路床とすることも多い。路床は舗装を介して受ける交通荷重によって起こる応力に十分耐え、さらに下部の路体に広く荷重を分散させる役目をもっている。このため交通荷重に耐える十分な支持力をもち、舗装にたいして有害な塑性変形や、容積変化の起こることを最小限に止めるとともに、舗装に対し不均一な反力を与えることのないように良質な材料を十分に締固めて仕上げる必要がある。

また路床は舗装の工事前、あるいは工事中に路床上を走行する車両の輪荷重によって受けるセン断応力に対して、十分耐え得るだけのトラフィカビリティーを有していなければならない。したがって交通繰返し荷重によって将来とも変形の継続する材料や、浸透水その他によって変質し、膨潤弱化するような材料を路床部に用いることは、きわめて危険である。

なお、橋など構造物に接する路床 B' に使用する材料はとくに変形の少ないものを用いて、十分に仕上げ、舗装に悪影響を与える局所的な不同沈下を防止しなければならない。

また路側の路床 B'' の部分は水の浸透が少なく、かつ雨水その他によって侵食されることの少ない材料で仕上げることが大切である。

2.2 高含水比粘性土とその使用

粘性土という言葉は、日常よく使われているにもかかわらず、その定義はきわめてあいまいである。高含水比の粘性土となるとなおさらで、まず高含水比粘性土の意味について考えてみる必要がある。

統一分類法 (A.C 法) によれば、No. 200 フルイ (74 μフルイ) を通過する細粒分の重量百分率が全体の 50% を越す土の中で、液性限界 LL が 50% 以上である場合には盛土材料として好ましくない土であるとしている。また自然含水比 W_n が塑性限界 PL を越す土を用いた土工作業は困難であり、突固め試験によって得られる最大乾燥密度が小さい土ほど盛土材料として不適なもの

* 日本道路公団高速道路試験所

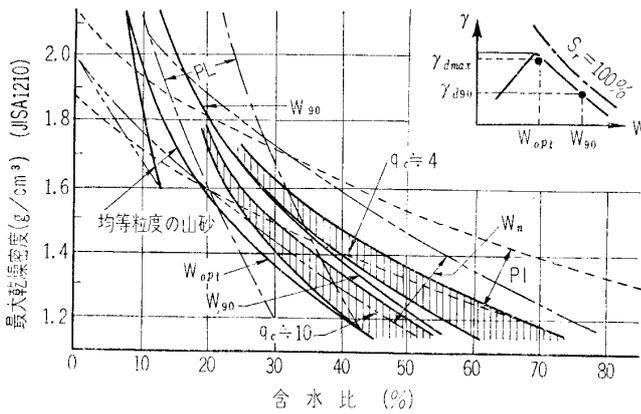


図-2 名神高速道路沿いの土の性質

あるといわれる。われわれが道路の土工に際して、粘性土あるいは高含水比の粘性土と呼んでいる材料は、一般的にいった以上のような盛土材料として好ましくない土を総称しているものと考えられる。

図-2 は名神高速道路の土工に用いた多くの土の性質を一つにとりまとめたものである。この図によると JIS A 1210 の方法にしたがって行なった突固め試験で得られた最大乾燥密度 γ_{dmax} が約 1.7 g/cm^3 である土の性質はほぼつぎのとおりである。

- LL : 約 50% W_n : 約 25%
- PL : 約 25% W_{90} : 約 25%
- PI : 約 25% W_{opt} : 約 15%
- No. 200 (74 μ) 通過分の重量百分率 : 約 60%

したがって γ_{dmax} が約 1.7 g/cm^3 以下の土の場合は自然含水比 W_n がほぼ塑性限界 PL を越すようになり、液性限界 LL もほぼ 50% 以上となる。またこのような土では、最大乾燥密度の 90% の密度 γ_{d90} 以上の密度が得られる限界含水比 W_{90} より W_n が大きくなり、かつ、自然含水比で突固めた土のコーン指数 q_c が約 10 以下となる機会が多くなる。

図-3 は名神高速道路の数箇所での盛土で測定した間ゲキ水圧から、盛土荷重によって間ゲキ水圧の発生する割合 (間ゲキ水圧発生率 = 発生間ゲキ水圧 / 盛土荷重) を求め、その盛土を構成する土の最適含水比 W_{opt} に対してプロットしたものである。図によると盛土材料の最適含水比 W_{opt} が約 15% 程度の土の場合に間ゲキ水圧発生率が最大となり、約 60% に達している。ところが最適含水比がより高い洪積粘土の場合には、高い先行圧を受けて

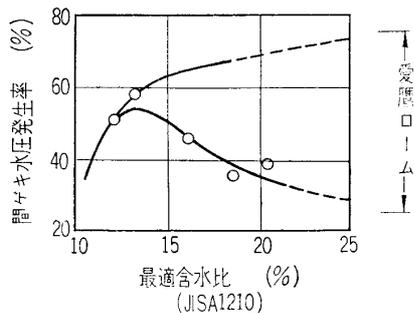


図-3 最適含水比と間ゲキ水圧発生率の関係 (名神高速道路および沼津試験盛土)

よく土が固まっております、締固めた後もはち(蜂)巣状の孔ゲキを残しているの間ゲキ水圧はあまり高くなりません。これと比較する意味で東名高速道路の沼津試験盛土において求めた愛鷹ロームを用いた盛土の間ゲキ水圧発生率の範囲を図-3に併記しておいた。これによると含水比が高くても柔らかい粘

性土を使用した盛土中には、きわめて高い間ゲキ水圧の発生することが知られ、これから洪積粘土であっても十分に水が浸透した場合には間ゲキ水圧の影響を受けてはなはだ好ましくない土に変化することが予想される。

この間ゲキ水圧の影響を、より明らかにする目的で示したのが図-4である。

図-4 は W_n が 180% と 163% の 2 種の愛鷹ロームを用い、エネルギーを変えて順次乾燥する過程で突固めた試料を用い圧密非排水三軸圧縮試験を行なって、間ゲキ水圧係数 $A \cdot B$ 、せん断抵抗角 ϕ_{cu} 、および粘着力 c_{cu} を求めたものである。この図によれば土を乾燥させることによって間ゲキ水圧の発生率はかなり減少し、かつ、土のせん断強さはいちじるしく増加することがわかる。

また γ_{dmax} が $1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 程度の砂質土とも考えられる土であっても雨水などの浸透が容易であるため、転圧後盛土の浅部や、ノリ面部の土がいちじるしく弱体化して図-5に示したように高含水比の粘性土に近い強さしかもたなくなる点にはとくに注意すべきであろう。

以上述べたようにわれわれが普通呼んでいる高含水比の粘性土には、柔らかい高含水比の粘性土や浸透水で飽和された粘性土や高い間ゲキ水圧を発生する砂質土など盛土材料として好ましくないすべての土が含まれているものと解釈できる。

このような意味の高含水比粘

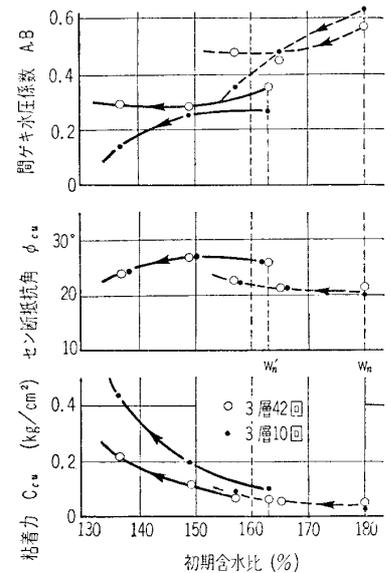


図-4 愛鷹ロームの乾燥過程における強さ特性

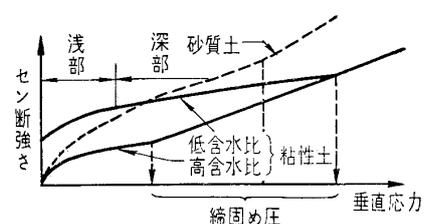


図-5 締固めて得られる土の強さ

性土を盛土材料として使用するか、あるいは捨土するか、ということは盛土の施工にあたって常に問題となる点である。この場合粘性土の使用可否は粘性土の性質と捨土、置換あるいはその他の改良など、採り得る対策の経済性、使用場所の盛土の機能や工事規模、工事工程などを考慮した上で決定すべき問題であろう。

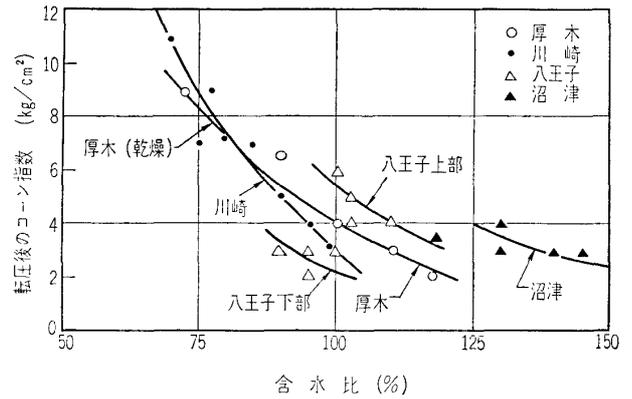
3. 粘性土のトラフィカビリティー

高含水比の粘性土のトラフィカビリティーはいちじるしく悪く土工作業の困難と能率低下の原因となる。トラフィカビリティーという言葉は路面における車両の走行性を示すために使われており、走行性に影響する主要因子として路面の輪荷重に対する支持力と、車両に対するケン(牽)引抵抗とがあげられる。ここでは、トラフィカビリティーとして輪荷重に対する粘性土の支持力のみを考えてみる。

3.1 締固め作業とトラフィカビリティー

道路各部の機能を十分満足させるような盛土を施工するためには薄層に土をまき出して締固め、均一な構造に仕上げることがもっとも大切である。この目的で行なう締固め作業に際して、高含水比の粘性土の場合にはオーバーコンパクションの状態になる直前まで土を締固めておくことに留意しなければならない。このため転圧機種、とくにその接地圧と転圧回数を選択にあたっては、土のトラフィカビリティーを十分に考慮しておく必要がある。

いまオーバーコンパクション直前における粘性土の一軸圧縮強さ q_u を室内で突固めた供試体を用いて求めれば、土のせん断抵抗角 ϕ を仮定することによって次式



転圧機種 (実績)	厚木	川崎	八王子	沼津
	被牽引式タイヤローラ	被牽引式タイヤローラ		
	D_{50} 湿地ブル	D_{50} 湿地ブル	D_{50} 湿地ブル	
			被牽引式タイヤローラ	
				D_{50} 湿地ブル

図-7 関東ローム盛土のコーン指数と転圧機種

から求めた図-6の関係から転圧に用い得る最大輪荷重(接地圧) P_b の限度をおおよそ予測することができる。

$$P_b = \frac{\beta_c \cdot q_u}{2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}$$

ここに β_c : 粘着力に関する係数

図-7は東名高速道路の沼津、厚木および川崎、中央道高速道路の八王子において実施した試験盛土の施工に際して求めた関東ロームの転圧後のコーン指数と含水比の関係、および転圧機種の種類を比較して示したものである。この図によれば転圧後のコーン指数が約 4 kg/cm^2 以下であるロームの転圧は D_{50} 湿地ブル程度、あるいはそれよりも小さい接地圧をもつ機械でなければ施工できないことがわかる。これにたいして、ロームの転圧後のコーン指数が約 5 kg/cm^2 以上であれば軽い接地圧のケン引式タイヤローラを用いた転圧作業が可能になるようである。

3.2 土運搬とトラフィカビリティー

土運搬のため走行する車両に対する盛土のトラフィカビリティーを調べるため、名神高速道路の茨木地区で行なった盛土試験のうち粘性土の試験結果を述べる。

盛土に用いた粘性土は大阪層群に属する洪積層を掘削した土で粒度は $-74 \mu: 96 \sim 99\%$ 、 $-5 \mu: 25 \sim 35\%$ で $LL: 70 \sim 80\%$ 、 $PL: 25 \sim 28\%$ 、 τ_{dmax} (JIS A 1210): 1.58 g/cm^3 、 $\tau_d(W_n): 1.2 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$ などの性質もっていた。

この粘性土を自然含水比の $42 \sim 45\%$ の状態で 7.5 t タイヤローラ (タイヤ内圧約 3 kg/cm^2 、帯状分布平均荷重約 1.5 kg/cm^2) を用いて $4 \sim 5$ 回締固めて盛土のコーン指数 $q_c = 3 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 、一軸圧縮強さ $q_u = 0.6 \sim 0.8 \text{ kg/cm}^2$ 、乾燥密度 $\tau_d = 1.2 \text{ g/cm}^3$ 、および圧密試験先行圧 $P_0 = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ を得た。また締固めた直後の盛土面

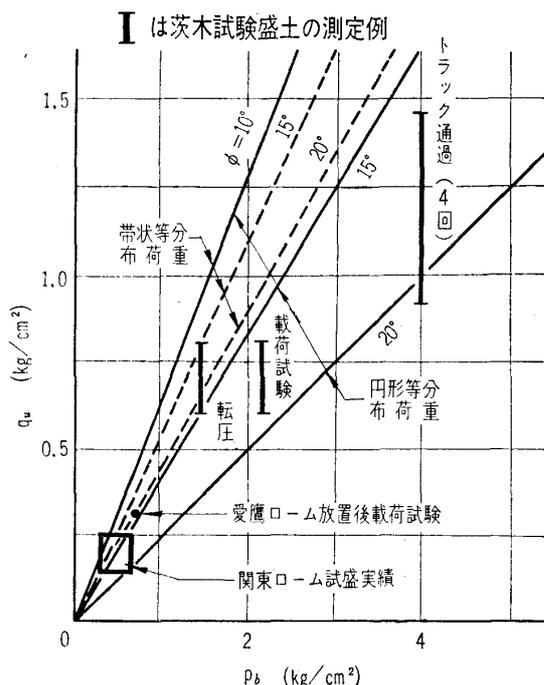


図-6 盛土の q_u と最大輪荷重 P_b の関係

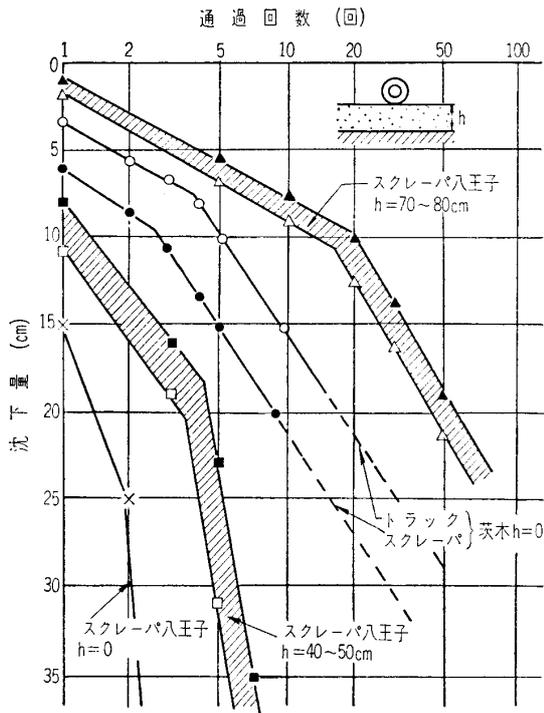


図-8 通過回数と沈下量

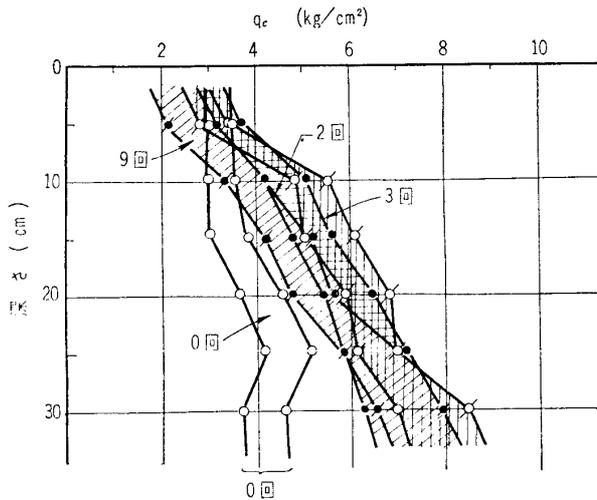


図-9 通過回数とコーン指数の関係

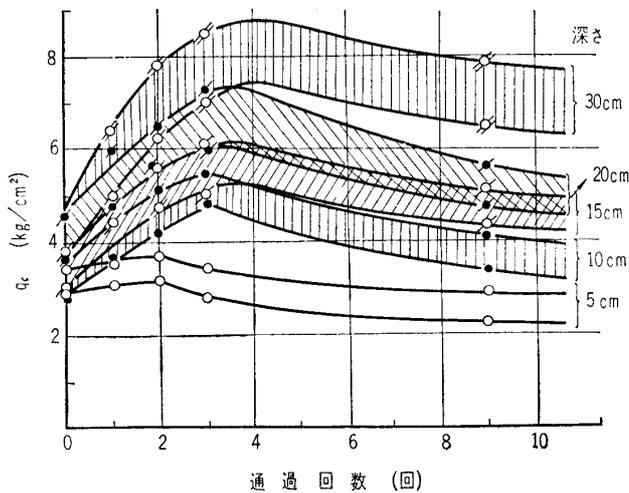


図-10 深さとコーン指数の関係

上で行なった載荷試験 (径 30 cm) によると荷重が約 2.2 kg/cm^2 以上に達すると急激な沈下がはじまった (図-6 参照)。この盛土面上にトラック (平均接地圧約 4 kg/cm^2) およびスクレーパ (平均接地圧約 5 kg/cm^2) を通過させ図-8 に示したようなワダチ (轍) 中央の沈下量と走行回数の関係を得た。またトラックの走行によってワダチ中央下の粘性土に起こったコーン指数の変化状況を 図-9 および 図-10 に示した。図-9 および 図-10 を見るとワダチ中央部の粘性土のコーン指数は車両の走行によってつぎのように変化することがわかる。

(1) 車輪下の盛土は車両の走行によってより締めめられて約 4 回の通過まではコーン指数を増す。この回数は 図-8 の通過回数-沈下量曲線で変曲点の生じる通過回数とほぼ一致している。

(2) 通過回数が約 4 回以上になると盛土はリモールドを起してコーン指数は低下する。この場合盛土面に近い土ほど少ない車両通過回数でリモールドを始める。

このようにして約 4 回のトラック通過によって最大強さに達したワダチ下のコーン指数は表面付近を除けば $5 \sim 8 \text{ kg/cm}^2$ を示している。

以上述べた茨木地区の洪積粘土と比較するため、八王子試験盛土で関東ロームの盛土上に接地圧約 4 kg/cm^2 のスクレーパを走行させた結果を 図-8 に付記した。八王子試験盛土の関東ロームの含水比は約 100% で締めめを終わった盛土表面付近のコーン指数は $3 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ であった。この盛土上にスクレーパを直接走行させたときは 1~2 回の通過で走行不能となり、ローム上にレキまじり砂質土を敷いてようやく走行が可能になった。茨木地区の洪積粘土の場合は数回の走行まで土のコーン指数が増したが、八王子試験盛土の関東ロームの場合には、走行 2 回目のコーン指数は走行前に比較してかなり低下していた。このように締めめた盛土のコーン指数が、ほぼ同じ値であっても、さらに締めめられて走行の余地がある土と、そうでない土があることは、前に述べた粘性土の間ゲキ水圧発生率とも関連し、はなはだ興味のある問題である。

4. 粘性土のデフレクション

トラフィカビリティーの場合は主として土の上限降伏値以上で起こる急速な破壊を問題にしている。これに対し高含水比の粘性土においては交通荷重による応力を受けて土の上限降伏値以下においても長期間継続するデフレクションが路面に与える影響もあわせて問題になる。

交通荷重によって繰返し生ずる変形量が大きくなって、残留変形量が蓄積されると舗装に重大な悪影響を与えるようになる。アスファルト舗装に与えるデフレクションの有害量についてはたとえば AASHTO Test Road

では $0.0025d \sim 0.0035d$ (d は輪荷重の接地直径) といわれている。

4.1 繰返し荷重とデフレクション

高含水比の粘性土盛土の表面に交通荷重 P による繰返し載荷がなされた場合、回数 N と載荷面の変形量 ϵ との間には長期載荷の場合と同じように P の値によってそれぞれ 図-11 (a) に示したような関係がみられる。図の P_l は下限降伏荷重、 P_u は上限降伏荷重、 P_b は極限の破壊荷重である。3.2 で述べた茨木地区の粘性土上を走行したトラックあるいはキャリオールは図の P_2 に相当する荷重であったと考えられる。図-11 (a) の関係を用いて載荷重に対する変形度を求めると図の (b) に示した曲線 e_1 が得られる。

もし土がさらに締められるかあるいはシキソトロピー効果などで強さを増すと曲線 e_1 はそれぞれ e_2 あるいは e_2' に移行する。このように繰返し載荷重が粘性土の上限降伏荷重以上であれば、繰返し載荷による変形は大きく、かつ、長期にわたって継続した後、やがて破壊にいたることになる。

繰返し荷重による変形量を小さくし、かつ、短期間に変形の進行を終了させるためには、載荷重をできるだけ下限降伏荷重に近づける必要がある。このためたとえば 図-11 (c) に示したように良質土を粘性土上に施工して荷重の分散をはかり、粘性土に作用する荷重を減少させる必要が生ずる。良質土の性質と厚さ、あるいは交通荷重の状態 (繰返しの速度、衝撃効果など) と応力の分布 (全応力や有効応力) などについては、今後さらに十分な研究が必要であろう。

4.2 名神高速道路における変形度の測定例

名神高速道路の瀬田工区 S_1 38 付近の盛土では、かなり良質な山砂の路床上にサブベース (砂利+山砂; 20

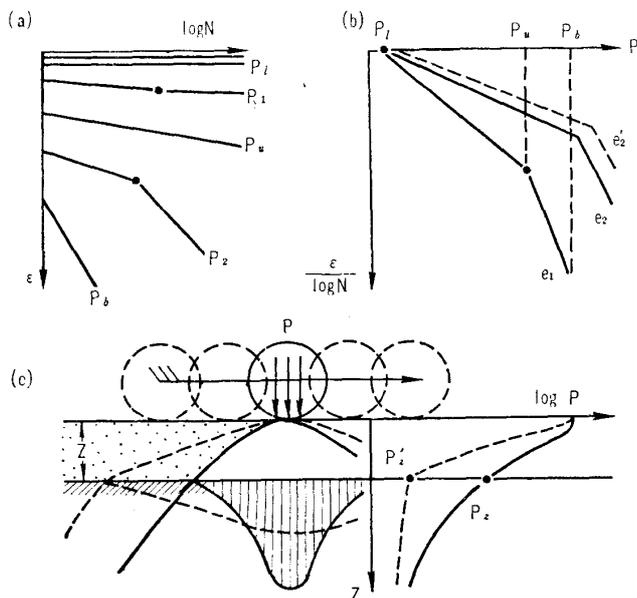


図-11 繰返し荷重とデフレクション

cm)、ベースコース (碎石+山砂; 20 cm) およびバインダー (アスコン; 6 cm) を施工したが、路床の一部に浸透水が集まり、サーフェースの施工にいたるまでの間に、工事用トラックの通過によって施工後約1カ月を経過したとき約3cmの沈下がみられるようになった。

このため沈下した区域の中央A点と沈下のまったくみられなかった近傍のB点とを選んでバインダー、ベースコース、およびサブベースの順にはぎ取って各層の表面で径30cmの載荷板を用いて、それぞれ5回の繰返し載荷試験を行なった。

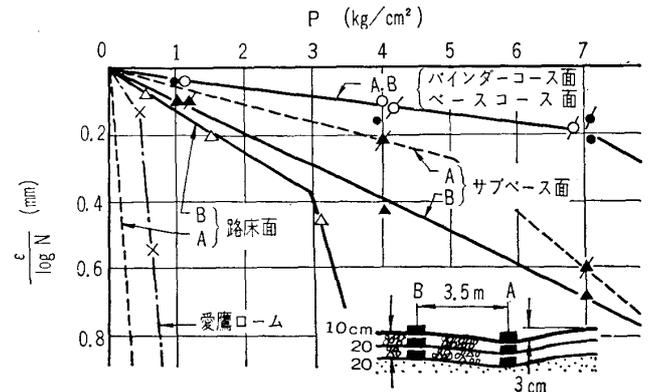


図-12 変形度の測定例

この結果を示した 図-12 によると A 点の路床面における変形度はいちじるしく大きい、サブベース以上の層によって軽減され、載荷 7 kg/cm^2 、繰返し回数5回の範囲では、A点およびB点におけるバインダーコース面における変形度には、ほとんど差異が認められなかった。しかし、工事用トラックの輪荷重の大きさと衝撃の影響や、通過回数を考えると実際に生じたバインダーコース面の変形が路床の弱化にもとづくものであることは明らかであった。

5. 粘性土高盛土の沈下とノリ面の安定

粘性土、とくに高含水比の粘性土を用いた盛土では、大きい締め荷重によって転圧施工して十分な先行荷重を与えることができない。このため転圧を終わった土の圧縮性は、きわめて大きく、強さは低い。高い盛土をこのような状態に施工すると、盛土の自重や交通荷重によって盛土面が沈下したり、強さの不足によって盛土のノリ面が破壊したりする危険性が大きい。

5.1 粘性土盛土の沈下

高含水比の粘性土を使用して盛土を施工すると、仕上がった盛土内部には 図-13 に示した例のような間ゲキ水圧が発生していることが多い。転圧作業中降雨に遭遇した転圧面付近ではとくに高い間ゲキ水圧の発生しているのが普通である。このため構造物や盛土の基礎地盤などでみられる粘土の圧密と同様な現象によって仕上がった盛土面が沈下する。沈下の大部分は盛土の作業中に終わるが、一部は盛土終了後、あるいは舗装を施工した後まで

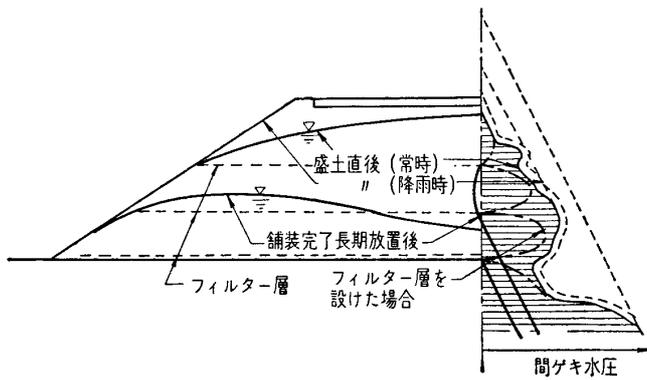


図-13 盛土内の間ゲキ水圧の変化

長期間継続する。このように舗装後まで残留する不同沈下量が大ききときは舗装の維持に悪影響を与えるばかりでなく、自動車の快適な走行にもさしつかえるようになる。高含水比の粘性土の圧密で問題になるのは、脱水速度が遅く、長期間沈下の継続することと、沈下量の大きい点である。このためつぎのような対策を考慮しておく必要がある。

- (1) 全沈下量を減少させる：粘性土をできるだけ乾燥して間ゲキ水圧の発生量を少なくするとともに、可能である限り重い転圧機械で締固めて、土に十分な先行荷重を与える。
- (2) 沈下期間を十分にとる：盛土をできるだけ早期に施工して十分な圧密沈下期間をとった後舗装する。
- (3) 沈下を促進する：盛土内にフィルター層を施工して圧密速度を増す。

なお、舗装を施工した後は路面から浸透する雨水の補給が絶たれるため、間ゲキ水圧が急激に低下して、そのため路面の沈下が急速に進行する。このような点についても、盛土内に適当なフィルター層を設けて、盛土深部への降雨の浸透を防ぐことはきわめて有効である。

5.2 盛土ノリ面の崩壊

道路盛土では盛土の高まき施工を禁じて、一層一層転圧しながら盛上げるような施工法をとる限り、盛土の深部を通るスベリ面に沿う大崩壊を起こす可能性は一般にきわめて少ない。しかし、高含水比の柔らかい粘性土で高い盛土を施工した場合には、盛土の内部に高い間ゲキ水圧が発生するため、盛土の深部におよぶ大規模な崩壊を起こすことがある。このための対策として5.1(3)に述べたようなフィルター層を設ける工法を採用すれば間ゲキ水圧の発生量をいちじるしく減少させることができ、きわめて効果的である。

一方、盛土ノリ面に沿う浅いスベリ面に沿う小規模なノリ面崩壊は、ノリ面付近の土が高含水比の粘性土である場合にしばしば発生している。このような崩壊の発生した区間では、図-14(b)に示したように盛土中央部

の転圧施工を先行した後、ノリ面部に土を落として土羽付と同時にノリ面の整形を行なっている場合が多い。このほか、工事用運搬路として残したノリ面部を急速に盛り立てた部分や、構造物と盛土との取付け部付近で透水性の異なる土の間に浸透水が集中するような場所でも崩壊が起きている。また一般に北側ノリ面は、南側ノリ面より湿潤で崩壊のヒン度も高い。

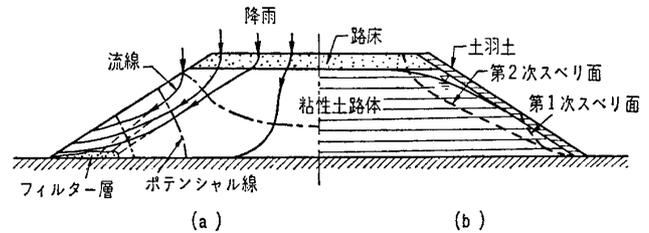


図-14 盛土ノリ面浅部の崩壊

この種の盛土ノリ面の崩壊で共通している点は、およそつぎのような現象である。

盛土のノリ面付近の転圧は不十分なことが多いえ、砂質土や、柔らかい粘性土の場合は締固めた後の、ノリ面付近浅部の土の強さは、図-5に示したようにきわめて弱いのが普通である。盛土内の間ゲキ水圧は一般に高く、盛土に浸透した雨水は図-14(a)に示したように盛土のノリ先部から浸出する。この浸出水によってノリ先部付近の土は膨潤弱体化していちじるしく強さが低下し、滑落しはじめる。その後、降雨による浸透圧の増加その他の原因によってノリ面に第二次の崩壊が起こる(図-14(b)参照)。

このような現象で起こる崩壊を防止するためにはつぎに述べるような方法を採用して、顕著な効果をあげることができた。

- (1) 盛土ノリ面付近に使用する材料をつとめて粘着性に富むレキまじり土とする。
- (2) 必要に応じて図-14に示したようなフィルター排水層を設けてノリ面付近に浸出する地下水の水位を低下させ、ノリ先部の強化をはかる。
- (3) 路肩およびノリ面の地表排水を十分に行なう。
- (4) ノリ面付近の締固め作業を十分に行なうとともに、できるだけ腹付施工のような、異質の盛土を形成して浸透水の集中することを避ける。やむを得ずこのような施工をする場合は、異質の盛土の間(浸透水の集中する層)に排水層を設ける。

6. あとがき

道路盛土に高含水比粘性土を使用する場合に生ずる問題点についてふれてみた。これらの問題については、まだ明らかにされていない点も多く含まれているので、今後の土工作业に際し、できるだけ多くの資料を集収する必要性が痛感される。(原稿受付, 1965. 4. 9)