

土工の締固め作業の当面する二、三の問題について

河 上 房 義*

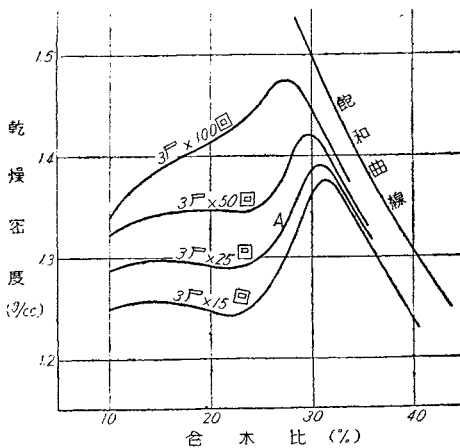
要旨 わが国において比較的大規模な土工を行う場合の締固め作業の特性について述べ、さらに近來導入せられつつある二、三の表面締固め機械とその締固め効果について紹介し、これら締固め作業の管理の方法について若干の考察を行った。

1. ま え が き

近來わが国でも、大規模な非コンクリート造ダムの築造や、道路・飛行場の路床の建設などにもなつて、土工の締固め作業の問題がとり上げられている。土の締固めに関する一般原則はすでに周知されているように、締固めた土の密度、いいかえれば土の締固まりの程度は、主として土質・土の含水比・土に加えられる締固め仕事の種類と量によつて定まる。図-1 はあるシルト質粘土ロームについて実施した JIS A 1210 の突固め試験の結果(曲線A)と、これに準じて突固め仕事量を変えて行った試験の結果を併示したものである。図の曲線が示すように、それぞれの締固め仕事量に応じて、締固めの最適含水比が存在する。この最適含水比およびこれに対応する最大密度の値は、一定の締固め方法については、土質、ことに土粒子の大きさと形状によつて変る。一般に粗粒の土では、最大密度が高く、最適含水比は低く、細粒の土では反対の傾向を示す。

このような関係があるので、簡単に土工の締固め作業

図-1 締固め密度—含水比



* 正員 工博 東北大学教授, 工学部土木工学教室

の効果が密度によつて表わされると仮定すれば、土の現場含水比が図-1の曲線の頂点に相当するように調節して施工することによつて、最大の締固め効果が得られる。現に外国の土工の仕様書の中には、土の現場含水比を最適含水比に近い一定の範囲内に入るように調節すべきことを規定している。しかしながらわが国では、気候条件や土の成因などから、このような含水量の調節は困難であり、また必ずしも締固め仕事量が大きければ有効な締固めができるとはかぎらない。わが国の気候条件や土質に応じて、最も有効な土質の締固めを行うには、適当な機械を選択し、これを合理的な仕様にもとづいて用いるばかりでなく、その方法によつて締固めうる効果の限界を明らかにし、さらにあらかじめ土構造物の設計に際して、その力学的あるいは水理的な特性、たとえばせん断抵抗・圧密性・支持力・透水性などが、上の限界を超えないように考慮しなければならない。

2. 締固める材料の特性

上述のように、力学的にも水理的にも安全な構造物を築造するために、高度の締固めを行うには、土質・含水量・締固め方法などを、適当に選択しなければならないが、それらのうちわが国では含水比の調節が最もむづかしい。すなわちわが国の多雨・多湿の気候のために、アースダムなどの土取り場で得られる多量の土は、きわめて高い含水比を有する。表-1はあるアースダムの土取り場における現場含水比の平均を示したものであるが、

表-1 土の平均現場含水比の例

試料	土質	平均現場含水比(%)	最適含水比(%)	液性限界(%)
A	砂	25	14	—
B	砂質ローム	28	20	60
C	砂質粘土ローム	40	25	50
D	"	45	32	56
E	"	54	35	68

一般に現場含水比は締固めの最適含水比よりはるかに高く、なかには液性限界に近いものもある。もちろん、現場含水比は、日々の天候・土質・土取り場の位置および地形・土取りの方法などによつて、ある程度は変動するが、その含水比が高いことはわが国の地方や土質のいかんにかかわらず見られる共通の傾向であり、このような土を現場で乾燥し、その含水比を最適含水比に近づけることは至難である。

これらの湿潤な土は、前掲 図-1 の締固め密度-含水比曲線の頂点よりはるかに右側の部分に相当し、この部分では締固め仕事量の差が締固め密度に大きな影響をおよぼさないことがわかる。このような土を締固めても土の密度は低く、間ゲキ比が高く、従つて透水性も高いばかりでなく、セン断抵抗も小さい。のみならず施工に当つて転圧機械などに粘着して施工困難となり、ひいては年間の施工可能日数が少く、これがわが国において大規模な土構造物の築造が不利とされる一つの理由である。またわが国のアースダムでは実測例がほとんどないが、外国の例ではこのような湿潤した材料を用いて築造したダムの不透水性部分などの内部には、きわめて高い間ゲキ水圧の発生が測定され、このために土のセン断抵抗は減少し、構造物の安定性が低下する。このような現象は、構造物の高さが低く、建設に長年月を費していたときは問題とならなかつたが、最近のように構造物が漸次大規模になり、施工が機械化されて施工速度が高まるにつれて、材料の含水比が高いだけに、外国の例よりはるかに顕著に現われるものと予想される。これは設計基準を定める際に十分考慮しなければならない。

また含水比の高いある種の土を締固める場合、過度転圧という現象もときどき見られる。前掲 図-1 のように、一般には締固め仕事量が大いほど土の密度は高まるが、これは必ずしもよく締固められたということにはならない。わが国に広く分布しているローム質の火山灰

土を締固める場合、転圧力が過大であつたり、転圧回数が過多であると、比較的浅い土の内部に局部的なセン断破壊が起り、平滑なはく離面が生ずる。図-2 はある粘土を突固めた場合、突固め仕事量の増加とともに密度は高まるが、単純圧縮強さは反対に低下し、単純圧縮ひずみが増大することを示している。すなわち密度のみによつて締固めの程度を判定すると、このような締固めにもなる力学的強度の減少や透水性の増加など、構造物の欠陥となるおそれのあることが明かにされない。またローム質の地盤における滑走路の路床の転圧とともに密度は高まるのに対し地盤係数が小さくなることなど、幾多の実例が見られる。この現象を防止する上に最も有効であるのは、含水比を塑性限界くらいまで低下させることであるが、これはわが国の現状では望み得ないので、土質が変えられないときは、締固め仕事量を必要以上に大ならしめないことが必要である。

3. 新しい締固め工法

古くからわが国においては、タンデムローラーやマカダムローラー等の、平滑胴の自走式ローラーが主なる転圧機械として用いられてきたが、これらは転圧面を平坦ならしめることはできても、盛り土内部の締固めの程度を均斉にする上には不利であり、またまき出した土の層の間に平滑なはく離しやすい面ができる等の欠点があつたので、最近は土工用トラクターの普及と相まつて、大規模な土工にはタンピングローラーやゴムタイヤローラーなどの被牽引式ローラーが用いられるようになった。また従来は、いわゆる転圧力のみによつて締固めが行われていたが、近來はこれに振動をともなう形式の締固め機械も導入されている。これらの締固め特性などについてはまだ十分明らかにされていないが、将来はかなり普及すると考えられるので、以下これらの最近導入されつつある二、三のものについて解説を加えよう。また古くから外国で用いられていたフロッグランマーも、最近実用されて効果をあげているが、ランマーそのものは比較的普及しているのでここは説明を加えない。

(1) ゴムタイヤローラー

元來、盛り土の上面や路床の表面の仕上げなどに用いられていたが、外国においてはこの形式のローラーの特に重量の大きいものが大規模な土工の締固めに用いられている。アースダムのような大きな盛り土の締固めに用いられているものは、1車輪当りの荷重が8~10tもあり、タイヤの空気圧は80~100lb/in²のものが用いられている。このローラーの転圧特性は、タイヤの空気圧と接地面積によつて支配され、車輪荷重の大きさは二次的な要素である。このようなゴムタイヤ付車輪が数コ並列して配置され、そのおのおのが地表の不整に応じてべつべつに上下するか、傾斜しうる構造を有するのでほぼ均

図-2 突固めにもなる密度・圧縮強さ・圧縮ひずみの変化

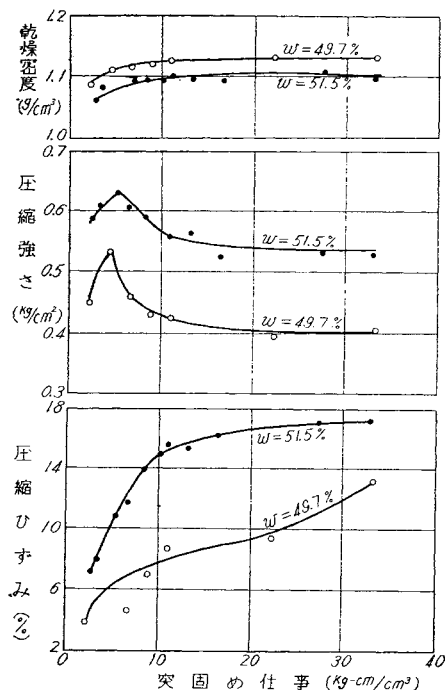
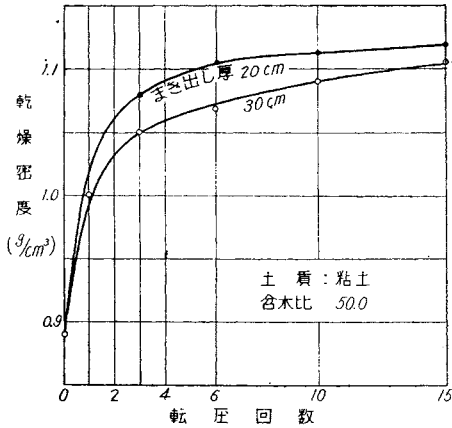


図-3 ゴムタイヤ ローラーによる締固め



等な転圧ができる。図-3 は、やや小形（重量 11.4t, 車輪数 4, タイヤ空気圧 65 lb/in²）のゴムタイヤ ローラーの、粘土に対する転圧効果の一例を示すものであるが、その効果のおよぶ範囲はタンピング ローラーなどにくらべると浅く、このローラーを有効に使用するには、盛り土のまき出しの厚さを 20 cm 以下に薄くしなければならない。このローラーは、タンピング ローラーとともに、かなり粘着性の強いシルト質土の転圧に最も適しており、特にタンピング ローラーの適用が困難であるように含水比の高い粘着性の土に対しても有効である。

(2) 振動式締固め機

静圧または転圧力にあわせて振動を加え、締固め効果を高めようとする種類の締固め機械には二つの形式のものが見られる。その1はバイブレーション コンパクター（写真-1）と称し、皿状の上板の上に荷重と発振装置を備えるものであり、他はバイブレーション ローラー（写真-2）で、平滑胴のローラーまたはゴムタイヤ ローラーに発振装置を添加したものである。現在使用されているものの性能の一例を表-2にかかげる。発振装置は対向に回転する一對の偏心荷重軸を有するもので、バイブレーション コンパクターではこの偏心荷重の遠心力の合力の方向を転圧面に対しいくぶん傾けて、前進または後進させる。

これらの振動締固め機は、多くの実験によつて粘着力

写真-1 バイブレーション コンパクター

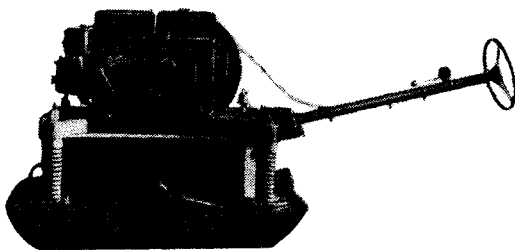


写真-2 バイブレーション ローラー

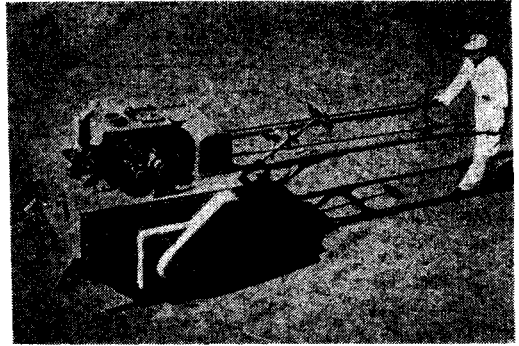


表-2 振動式締固め機の性能の一例

型 式	バイブレーション コンパクター (新和)	バイブレーション ローラー (ダイハツ)
自 重	1.6 t	1.6 t
全 長	1570 mm (ハンドルを除く)	3700 mm
全 高	1445 mm	1370 mm
全 幅	1000 mm	1315 mm
底 板	1000×1000 mm	
ローラー		幅 900 mm, 直径 750 mm
原 動 機	10 HP	7.5 HP
振 動 数	1000 rpm (標準)	1500 rpm
前 進 速 度	10 m/min	15~30 m/min
後 進 速 度	10 m/min	15~30 m/min

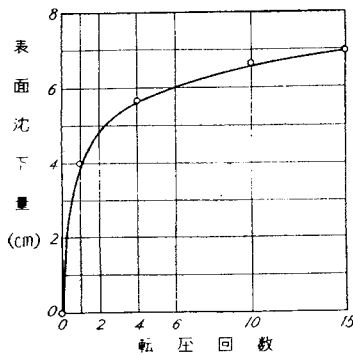
のとほしい土質、特に砂や砂礫等に対して有効であることが明らかにされている。これらの土質では、最上博士:その他の実験によつても、ある程度以上の加速度の振動が加わるとせん断強さが急に低下することが明らかにされており、また静荷重に対して、きわめてわずかの割合（数%以下）の振動があわせて加えられると、貫入抵抗がいちじるしく減少することも知られている。すなわち外部から加わる振動により、粒子間圧力が周期的に変化し、土粒子が相互に位置をかえやすくなるためである。この結果、粘着力の少ない土においては、静荷重や転圧荷重とともに加えられた振動が締固めに有効に働く。

さらに他の研究によれば、粘着力のない土に振動を加える場合、振動締固め機の振動数 f_1 が締固められる土の固有振動数 f_0 に近づくとき共振を起し、締固めが促進される。そして有効な締固めを行うためには、 $f_1 > 0.8f_0$ であることが必要である。土の固有振動数 f_0 は、締固めてない盛り土で約 20 cps (1200 rpm)、細砂で 24 cps (1440 rpm) くらい、粗砂では 26~27 cps (1560~1620 rpm) くらいである。従つて現用の締固め機の振動数はほぼ適当であろう。ある種の振動締固め機では、締固めべき土質に応じて振動数を変化させうるものもある。

図-4 は、国産のバイブレーション コンパクターを砂礫層に適用した例であるが、その振動数 (600~1000 rpm) はやや低すぎるともかわらず、自重において 5~6 倍のローラーと同等の効果を發揮している。またその締固め効果は地表から 30~50 cm くらいまでいぢ

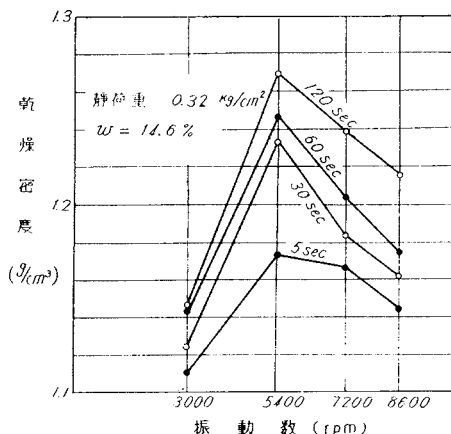
るしい。しかしながらこのような振動機を用いた締固め効果は締固めべき土質が細粒になるに従って減じ、上述の程度の振動数（加速度）の振動では粘土などに対してほとんど効果が無い。これは粘土では、粒子間の粘着力の大きさが外から加えられる粒子間圧力に関係ないため、振動によつて、粒子間圧力の大きさが変動しても、せん断力の減少や粒子の位置の変動が行われなためである。

図-4 バイブレーションコンパクターの締固め (砂礫層)



シルト質の上のように、粘土より粗粒である程度の粘着力を有する土に対しては、粒子間の粘着力が振動による粒子の位置の変位をさまたげるので、振動は有効でなく、タンピングローラーやゴムタイヤローラーによる締固めよりおとる。図-4のように、砂礫土に対して5~6倍の重量のローラーと匹敵する締固めができたバイブレーションコンパクターも、ある粘土ロームに対しては2倍の重量のローラーと同程度の効果しかあげていない。よく締つた粘土の固有振動数は、ほぼ28 cps (1680 rpm)であるから、振動数の点ではそれほど効果が低下するとは考えられず、これは粒子間の粘着力に打勝つて粒子の配列変えが行われ得ないためである。しかしこのような土に対しても、さらに振動数の高い振動を加え、大きな振動エネルギーによつて粒子相互の粘着をゆるめうるならば、振動による締固めもある程度期待でき

図-5 砂質ロームに対する振動締固め



る。図-5は実験室内である砂質ロームの土に小形の振動機を適用して締固めを行った例であるが、自重の5%程度の振動力を適用した場合、現在実用されている締固め機よりはるかに高い振動数 90~120 cps (5400~7200 rpm)において有効な締固めが行われ、粘土質ロームに対しては一層高い振動数 100~140 cps (6000~8400 rpm)で同様の傾向が見られた。この場合、粘着性の上の振動による締固め効果の増進は、非粘着性の土の場合のように大きくはないが、粘着性の土に対しても振動数の高い振動は有効である傾向が察せられる。

ゴムタイヤローラーに発振装置を取りつけた形式の振動締固め機が最近わが国に導入されている。このローラーの締固め効果は、タイヤの空気圧 (90~100 lb/in²)と発振装置の振動数 (600~1400 rpm)によつて左右されるが、シルト質ないし砂質土に対してもかなり有効な締固めが可能であり、その効果も深さ30 cm以上にまでおよぶ。

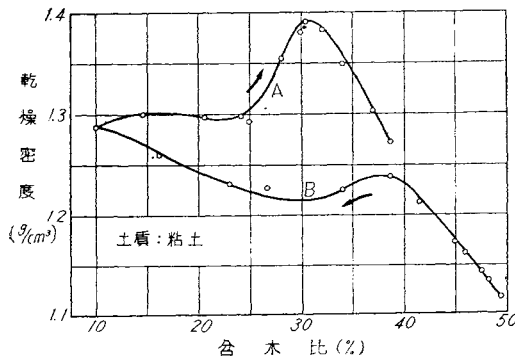
4. 締固め工事の管理方法

実験室内における突固め試験の締固め密度と含水比の関係は図-1に示したが、現場において土の含水比が自由に調節でき、実験室内と現場とにおける締固め仕事率が同一であり、かつ締固め密度が締固めた土の諸性質、例えば透水性・圧密性・浸水時の吸水の可能性・安定度などと直接的関係があると仮定すれば、図-1の締固め密度-含水比曲線を現場の締固め作業の管理の基準として利用することができる。外国の大量の土工の仕様においては、

- (1) 現場における締固め作業の欠陥を補う意味も含めて、締固めた土の密度の最低限を、突固め試験における最大密度の例えば95%と規定し、締固め密度-含水比曲線がこの限界をこえる範囲に入るように、施工時の現場含水比を調節する方法。
- (2) あらかじめ仕事量を変えて、いくつかの締固め密度-含水比の関係を求め、さらに現場で経済的に実施しうる含水比および締固め密度の範囲を定めて、この範囲内にある試料のせん断試験から求めた土のせん断強さが設計条件を満足するように、密度と含水比の変化の上下の限界を規定する方法 (U.S. Corps of Engineers) の方法。
- (3) アースダムのような耐水性の大きな盛り上中に発生する間ゲキ水圧が土構造物の安定を大きく減殺することから、盛り土材料の現場含水比の下限 (乾燥側の限界) を圧密試験の結果にもとづいて、締めた後に飽和しても圧密を生じない限界と、予想される圧密荷重とから定め、また上限 (湿潤側の限界) は同じく圧密試験を実施して、設計上許される限度以下の間ゲキ水圧を生じる程度に制限する方法 (U.S. Bureau of Reclamation の方法)。

などが行われている。(1)の方法は重要度の低い構造物に対してはさしつかえないが、現場の締固めと実験室における突固め試験の締固めとが同一の効果を与えると仮定すること、ならびに締固め密度が施工および設計上の条件のいかにかわらず単純に締固めた土の特性と関連があると仮定するところに問題がある。(2),(3)の方法はこれにくらべると十分な根拠を有するが、何分にもわが国の大きな土取り場から得られる材料の現場含水比が非常に高く、これを大幅に調節することは経済的に不可能であるから、このようにして、定めた下限はもちろん、上限さえも問題にならないことが多い。いいかえれば締固めの最適含水比がわが国の大土工の現場の施工管理の基準とはなり得ない。さらに注意すべきことは図一6に見られるように、一たん気乾した試料の含水量を増加しつつ行つた突固め試験の結果(A曲線)と、現場含水比から含水量を減じつつ行つた試験の結果(B曲線)とでは大きな開きがあり、図一1の曲線は現場の締固め密度とは全く関連がないので、施工管理の基準とする根拠にとぼしい。

図一6 締固め密度一含水比



わが国においてアースダムのような大規模な土の構造物を築造する場合、まず第一に使用する材料の土質・現場含水量・土質に適した締固め方法を考慮して、その状態で締固めた土の力学的強さや透水性などを実験的に定め、これにもとづいて構造物を設計する。従つて施工(締固め)の管理は現場で締固めた土が、設計に用いた条件にかなりかどうかをたえず点検すればよい。よつて前述の外国の仕様のように、現場含水比の変化の上下の限界を規定することなく、上限(湿潤側の限界)のみが問題になる。この上限の定め方も、現在では間ゲキ水圧の発生を基準にせずに(土質や施工速度いかによつて

は当然考慮すべきであるが単に安定その他の設計条件を満たすかどうかによつて定める。この限界を低く(許容される現場含水比を低く)定めると、年間の施工可能日数が少くなるが、構造物の品質は高まり、断面の縮小が可能で、施工量も減る。反対に許容される現場含水比の限界を高く決めると、年間の施工可能日数は増えるが、締固めた土の強さは減じ、ひいては構造物に大きな断面を与え、工事量が増すのみならず、施工中の含水比の変動が大きいため、構造物内の各部分が不均質となる。実際問題としては、年間施工日数と施工の難易とからこの限界を定め、必要に応じて間ゲキ水圧や過度転圧の問題もあわせて考慮する。

5. 要約

以上わが国の大規模な土工における締固め作業の当面する問題について解説したが、これを要約すると次のごとくである。

(1) わが国の気候条件などの関係から、大規模な土取り場から得られる土の含水比は、最適含水比よりかなり高く、これを現場で大幅に低下させることは経済的に望み得ない。このような湿潤した土を用いて築造した構造物は、力学的および水理的特性がおとるばかりでなく施工上も幾多の不利があり、さらに大きな間ゲキ水圧や過度転圧などの欠陥も生ずる可能性が多い。

(2) 最近、ゴムタイヤローラーや振動を応用した各種の締固め機械がわが国に導入されたが、これらは締固めるべき土質に対する適応性や、締固め効果の波及する範囲などにそれぞれ特徴があり、土質や適用方法が適当でないと効果が非常に小さいので、これらの新しい締固め機を選択するためには、あらかじめ現場の条件について十分な研究を必要とする。

(3) 現場の締固め工法の管理に当つては、常に現場含水比が高いため、セン断強さ、圧密性、間ゲキ水圧の発生などを考慮して、施工時の現場含水比を調節する方法は採り得ない。現段階では、経済上および施工の難易を主として考慮し、許容できる現場含水比の最大限を定めるべきである。この場合生ずる力学的強度の低下や透水性の増大などは構造物の設計に際して十分考慮に入れておく必要がある。

【付記】 本文の引例に用いた図一1, 2, 3 および 6 は電源開発K K 庄川建設所で実施された実験の結果である。引用を許された厚意を謝す。

土—木—工—学—叢—書

平井 敦 著 鋼 橋 (III) 定価 1800 円・11 月末日発行予定

B 5 判 600 ページ・折込付図 27 枚・函入上製豪華本

技—報—堂—刊