

盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例

3. 堆積軟岩材料の締固め特性

黒島 一郎 (くろしま いちろう)
三井建設(株)技術研究所

中岡 時春 (なかおか ときはる)
大末建設(株)生産企画部

3.1 はじめに

土は締固めることによって、土構造物としての機能を発現することは、土木技術者の常識となっている。そして、基本的なルールを守って施工を行えば、所定の品質の構造物を得られることは周知のことである。

しかし、締固めの方法や程度によっては、圧縮沈下や法面の崩壊等土構造物の品質に大きな障害を与えることがある。そこで、締固めの施工については材料特性、施工条件等に十分留意して行う必要がある。

土の締固めは、強度や変形など土構造物の安定に大きく影響し、静的および動的に荷重を加えて土をより密実にするにより、せん断強さは増加し、圧縮率および透水性は低くなり、均等性が向上する。これらの特性は図-3.1¹⁾に示すように、最大乾燥密度および最適含水比付近で最大の効果を示し、また原粒度を基準に同一方法で調整した試験試料を同一試験条件で締固めると粒径の大きい試験試料の方が、密度は大きくなることは既に知られている。

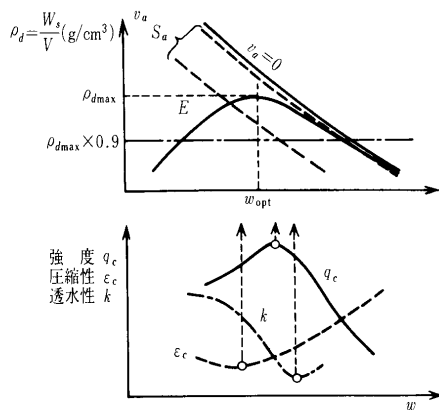


図-3.1 締固めと土の性質

すなわち土は締固めによってより密実な構造になっているほど、外力に対する抵抗が大きく、より高い安定性を保つといわれている。

締固めの利点を具体的に表現すれば、

- ① 盛土面に生じる不同沈下を著しく減少できる。
- ② 盛土内に浸透水を滞留させない。
- ③ 盛土の水平方向に対する補強効果が大きくなる。

ということになる。

盛土材料として用いる堆積軟岩は、一般に地山からリッピング等により掘り起こすため、粒径は大きくなり粗粒材料（以下原粒度という）となる。この場合、原粒度のままでは、粒径が大きすぎ直接試験に供することができないので、試験試料を調整し、その試験結果から原粒

度の締固め特性を推定する必要がある。

また材質的にも脆弱で、締固めに伴う粒子破碎やスレーキングを起こしやすいという特徴を持つため、締固めは十分留意して行う必要がある。

ここでは一般に十分に締固め、かつ飽和状態に保つことが望ましいとされる堆積軟岩の締固めについて述べ、実施工に際しての試験方法の決定や試験結果の解釈、材料選定、および施工方法の決定や施工管理基準の設定等に役立つように考えている。

3.2 室内締固めとその適用

3.2.1 室内締固め試験の目的

盛土工事では、原粒度に人為的な締固めエネルギーを加えて、盛土の密度を高め、力学特性や工学的性質を改善することが行われる。このように盛土の密度を高める場合、材料の物理的性質や最大粒径、粒度分布、さらに締固めエネルギーの種類等、密度を変化させる種々の要素が影響し、密度の高まりに応じて原粒度の工学的特性値も変化するので、施工にあたっては室内の締固め試験によって、締固め特性を確かめることが行われる。

しかし、室内での締固めエネルギーと現場の締固めエネルギーとは締固めメカニズムやエネルギーに違いがあることから、室内締固め試験値と現場の転圧等による締固め効果との間には直接的な関連性がなく、締固め試験結果を単純に現場での施工管理に基準値として適用させるには、問題があることも指摘されている^{2),3)}。

したがって、室内締固め試験の位置づけとしては、原粒度材料が有する最小限の特性を把握することであり、一般にこの特性を用いた設計値を満足すれば、土構造物は安定するという考え方で、施工管理が行われている。

室内締固め試験の目的は、通常次のとおりである。

- ① 締固め曲線を求めて、土の含水比 (w) と乾燥密度 (ρ_{dmax}) との関係を知る。
- ② 締固め施工の仕様と施工管理の基準の決定に用いる。
- ③ 実施工の状態を想定して締固めた土の強さや変形等の性質を調べるための供試体の作成方法を定める。

3.2.2 試験方法

室内の締固め試験は種々の方法が実施されている。これらを締固め方式の違いによって分類すると、

- ① 衝撃的荷重による締固め
- ② 静的荷重による締固め
- ③ 半動的荷重による締固め
- ④ 振動による締固め

となるが、JIS法など世界各地の規格は衝撃的荷重によ

講 座

る締固めに属する方法を基本としている。

表一3.1に土構造物ごとに採用されている締固め方法を示した。一般的に施工管理基準値に採用する締固め特性は、衝撃的荷重による締固め方法を採用する 경우가多く、そのほかの締固め方法は、粒子破碎をさせずに原粒度の粒度状態を再現させて、工学的諸特性を求めるための供試体作製用に用いられることが多い。

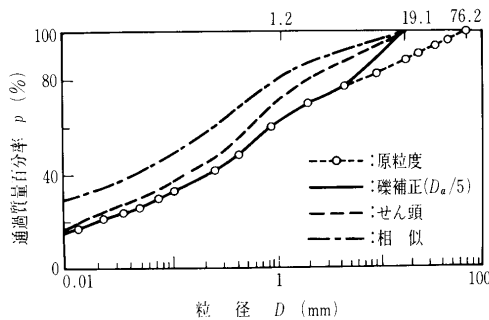
表一3.1 締固め方法と土構造物

締固め方法	土構造物			
	宅地 造成	道 路	鉄 道	フィル ダム
衝撃的荷重による締固め	○	○	▲	△
静的荷重による締固め				▲
半動的荷重による締固め ^{注)}				
振動による締固め				▲

○：JIS法 △：JIS法以外の方法 ▲：供試体作製用 注) 外国で利用されている

3.2.3 試験試料

図一3.2に、試験試料としてよく用いられる調整試料の粒度を示した。原粒度の粒径が大きい場合、そのままの粒径で室内試験に供することはできないので、試験試料を調整して試験を行い、その試験結果を用いて原粒度材料の締固め特性を推定する方法が採られる。



図一3.2 試験試料

この場合の調整試料には、一般にせん頭試料や相似試料、礫補正試料等があるが、これらの試料選定の留意点を以下に述べる。

(1) せん頭試料

室内試験粒度における最大粒径 (D_a) 以上の材料を原粒度から取り除いた粒度で、

- ・均等係数 (U_c) が原粒度と異なり、また試験試料の最大粒径 (D_a) により異なる。
- ・試験試料の最大粒径 (D_a) の設定により、相対的に細粒分が多く含まれることになり、力学特性に影響を与える要因となる可能性がある。

等の問題点がある。

(2) 相似試料

原粒度材料の粒度分布を基準に、粒度曲線図上で相似形となるように人為的に作成した粒度で、

- ・試料の採取状況により、原粒度と粒子破碎が異なる可能性もあり、これが締固め特性にも影響する。
- ・試験試料の最大粒径 (D_a) の設定により、相対的に

細粒分が多く含まれることになり、力学特性に影響を与える要因となる可能性がある。

- ・試料調整に多量の試料が必要で、かつ労力や経費がかかる。
- 等の問題がある。

(3) 礫補正試料

原粒度材料の粒度分布を基準に、室内試験粒度における試験試料の最大粒径 (D_a) 以上の原粒度材料を、「 $D_a \sim D_a/n$ ($n=5 \sim 10$)」粒径で置き換えた試料である。図一3.2では実線がこれにあたり、 $D_a=19\text{ mm}$ 、 $n=5$ としたもので、粒径 $D=4.75\text{ mm}$ ($D_a/5=19/5$) 以下は原粒度と同じ粒度分布であるが、それより大きい粒径分布は図中の実線の粒径分布となるように調整した試料で、

・試料に礫の混入効果を再現する工夫をした調整試料であるが、試料調整に多量の材料が必要である。また、この試料調整法は、試験試料に「礫の混入効果」の再現を考慮しており、原粒度材料のせん断特性を室内せん断試験で推定できる特徴も有している。

堆積軟岩の場合、乾燥させると破碎しやすく、加水すると細粒化するという特性があり、このように人為的に調整すると原粒度の特性とかけ離れることがあることから、試料調整は自然含水比状態で行うことが望ましい。またその場合、細粒分を多量に準備することが困難となるので、前述の試料選定についての留意点を考慮して、せん頭または礫補正で試料を準備するのが適切と思われる。

そのほか、これ以外に用いられる試験試料もあるだろうが、調整試料の目的等を十分に検討して、試料調整法の選択をすることが望ましい。

3.2.4 室内締固め試験結果からの推定

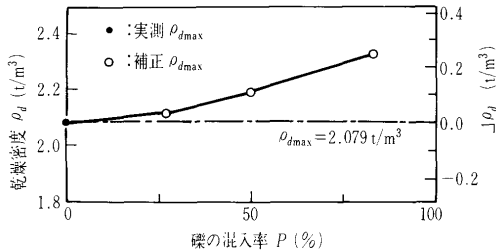
前述したように、土は締固めによってより密実な構造になっているほど、外力に対する抵抗が大きく、より高い安定を保つといわれているので、土を締固め度で評価することが多い。また、原粒度を基準に同一方法で調整した試験試料を同一試験条件で締固めると粒径の大きい試験試料の方が、密度が大きくなるというように、粒径が締固め密度に影響を与えることは既に知られている。

土の締固め特性は、一般に室内で行う締固め試験結果から判断され、締固め度により施工を管理する場合の施工方法の決定や、施工管理基準値に利用される。しかし、施工に用いる盛土材料の粒径が粗粒径の場合、許容最大粒径 (D_a) より大きい粒径の岩片があるためにそのままでは室内試験に供することはできない。そこで、試験試料を調整して、その室内試験結果を用いて、原粒度材料の締固め特性を推定する方法が採られている。

これらの推定方法としては、一般に室内試験から得た締固め密度を用いて外挿する方法や、相似試料で得られた締固め密度をそのまま原粒度材料の締固め密度として採用する方法など数多くあり、その幾つかを以下に紹介する。

(1) Walker-Holtz (ウォーカーとホルツ) の補正法 (以下 W&H 法という)

一般的によく用いられる方法として知られているが、この方法は土と礫を締固めた場合、礫の間隙は土が満たし、間隙中の土はその締固め仕事量で土のみを締固めた場合の密度になっているという仮定のうえに成り立っており、W&H法では土と礫の境界を $D = 4.76\text{mm}$ としているが、一般的には試験最大粒径 (D_a) までを土とし、それ以上の粒径を礫と仮定した密度補正が行われている。



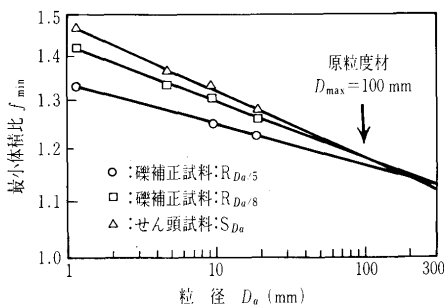
図—3.3 W&H法による補正密度

図—3.3⁵⁾は、原粒度材料を基準に同一の方法で最大粒径 (D_a) の異なる複数の試験試料のうち、 D_a が最大の試験試料の特性を“実物”として、“実物”より小さい D_a の試料の特性をW&H法で密度補正しても“実物”の特性により近い値となるという考え方に基づいた検討結果を示したもので、実際には $D_a = 19\text{mm}$ 試料を基準に各試験試料の D_a 以上の粒径分を礫分として、その混入割合とW&H法による密度補正值の関係を示したものである。このようにW&H法は、礫分の含有率 P が30%以上の試料に対しては、常に補正值が実測値より高く、 P が多くなればなるほど高くなる傾向にあり、適用性がよくないことが指摘されている。したがって、実際の適用にあたっては十分留意する必要がある。

(2) 相関関係からの外挿

原粒度を基準に、調整した複数の試験試料の試験結果を用いて、原粒度材料の締固め特性を推定する方法で、以下にいくつかの推定方法を紹介する。

① $\log(f_{\min}) \sim \log(D_a)$ 法⁵⁾



図—3.4 $f_{\min} - D_a$ 関係：栗東試料

図—3.4⁵⁾は、複数の試験試料の締固め特性を用いて、最小体積比 (f_{\min}) と粒径 (D_a) 相関関係を両対数紙上に示したもので、この相関関係から原粒度の締固め特性を外挿する方法である。

これは、試料の定性として「原粒度に対して調整した一連の試験試料の特性は、試料の粒径が原粒度に近づくに従い、原粒度の特性に近づく」という考え方を軸に

している。この関係を $\rho_{d\max}$ と D_a の関係に書き換えると、

$$\rho_{d1} = (\rho_{s1} / \rho_{s2}) \cdot \rho_{d2} \cdot (D_1 / D_2)^{-B}$$

ここに、 ρ_{d1}, ρ_{d2} ：試料の締固め密度 (t/m^3)

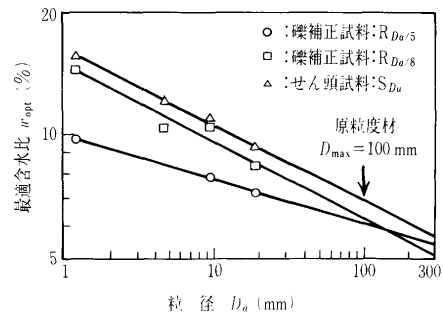
D_1, D_2 ：試料の D_a

ρ_{s1}, ρ_{s2} ：土粒子の密度

B ：回帰定数

$$B = \frac{\log(\rho_{d2} \cdot D_1 / \rho_{d1} \cdot D_2)}{\log(D_1 / D_2)}$$

となり、最大粒径 (D_a) を変えた2種類の室内試験結果を代入して B を求め、その B および室内試験結果のどちらか一方の ρ_d を用いて、原粒度の密度を外挿できる。同様に含水比についても図—3.5に示す関係から、



図—3.5 $w_{\text{opt}} - D_a$ 関係：栗東試料

$$w_1 = w_2 (D_1 / D_2)^F$$

ここに、 w_1, w_2 ：試料の含水比 (%)

D_1, D_2 ：試料の D_a

F ：回帰定数

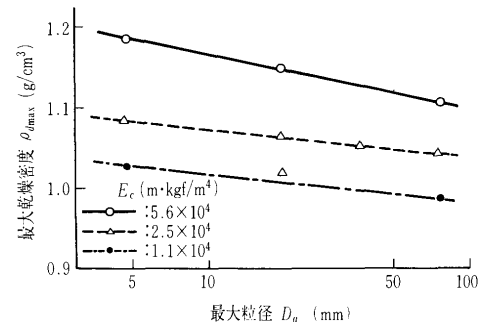
$$F = \frac{\log(w_1 / w_2)}{\log(D_1 / D_2)}$$

となり、最大粒径 (D_a) を変えた2種類の室内試験結果を代入して F を求め、その F および室内試験結果のどちらか一方の w を用いて、原粒度の含水比を外挿できる。この方法は、ほかの方法に比べて簡易に行え、相関性も良いことが確認されている。

② $\rho_{d\max} \sim \log(D_a)$ 法

先に述べたせん頭試料、相似試料等に調整した試験試料を用いて締固め試験を行い、最大乾燥密度 ($\rho_{d\max}$) と粒径 (D_a) の相関関係から原粒度の締固め密度を外挿する方法である。

図—3.6⁶⁾は、複数の試験試料の締固め特性を $\rho_{d\max}$



図—3.6 最大乾燥密度と試料の最大粒径の関係
参考文献6)を一部修正

講 座

$\sim \log(D_a)$ の関係で示したもので、 $\log(f_{min}) \sim \log(D_a)$ 法と同様、簡易的に行える方法である。

③ $\rho_{dmax} \sim \log(U_c)$ 法

$\rho_{dmax} \sim \log(D_a)$ 法と同様の方法で、試験試料の最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と均等係数 (U_c) の関係から、原粒度の締固め密度を外挿する方法である。

図-3.7⁶⁾は、複数の試験試料の締固め特性を $\rho_{dmax} \sim \log(U_c)$ 関係で示したものである。

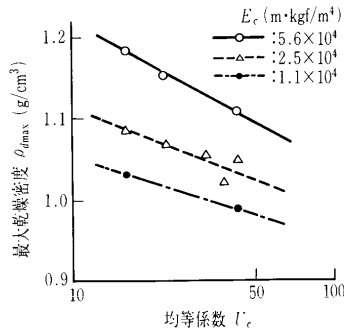


図-3.7 最大乾燥密度と試料の均等係数の関係

この方法は、試験試料の均等係数 (U_c) をパラメーターとしているが、均等係数という比較的小域の要因を尺度に原粒度の密度を外挿する方法で、粒度分析結果のばらつきにより、外挿精度が影響するという課題がある。

④ $e \sim \log(U_c)$ 法

複数の試験試料の試験結果から二次的に求めた間隙比 e (e_b : 絶対乾比重による e) と均等係数 U_c の相関関係から原粒度の e を求め、この e を換算して原粒度の締固め密度を外挿する方法である。

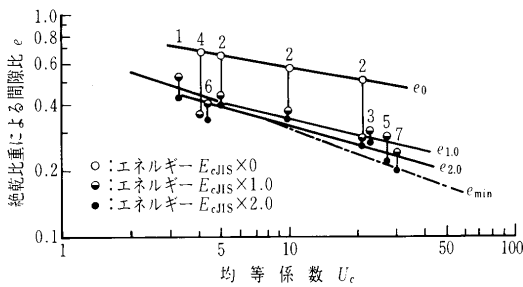


図-3.8 ロック材料の均等係数と間隙比の関係

図-3.8⁷⁾は、試験試料の締固め特性から求めた $e \sim \log(U_c)$ 関係を示している。

この方法は、間隙比 e (e_b : 絶対乾比重による e) および均等係数 U_c とともに、試料特性および締固め試験結果から二次的に換算して求められるものであり、その値のばらつきが外挿値の精度に影響するという課題がある。また堆積軟岩というスレーキングしやすい材料の場合、これら特性が適切に把握できるかも疑問である。

堆積軟岩を盛土材料とし、原粒度の締固め特性を推定する場合の推定方法としては、上記推定法のうち、

① $\log(f_{min}) \sim \log(D_a)$ 法

② $\rho_{dmax} \sim \log(D_a)$ 法

が、適用性、精度等に優れているといえる。

また、これらの推定方法は、締固め特性以外の、例えば力学特性を調べる場合、相似則的に原粒度の特性を室

内試験で反映させるという活用もできる。

3.3 締固めに及ぼす各種要因

堆積軟岩の締固めに及ぼす要因としては、試料の保存状態や締固め試験時の加水養生方法および最大粒径や粒径形状、さらには最大粒径 (D_a) と供試体径 (d) の比や試験試料の粒度分布、ならびに締固めエネルギー (E_c) 等が挙げられる。

3.3.1 試料の保存

原粒度を基準に調整された試験試料には、保存中に試料の含水比が変化 (乾燥や吸水) したとき、粒子の破碎が生じ、試験試料の粒度が原粒度の特性に準じたものなくなる可能性があるため、注意する必要がある。この場合、これらの現象を防ぐ方法としては、長期間放置しないことや、乾燥や吸水を防ぐようにビニール袋で密封する等の対策が必要である。

3.3.2 加水養生

一般に湿潤法、非繰返して締固めが行われているが、自然含水比より湿潤側の特性を調査する場合の加水については、水とのなじみに時間を要し、加水状態が均一になじむまでの期間はおおむね3日程度必要となる。この養生にばらつきがあると、必然的に特性にばらつきが生じることになり、注意する必要がある。

3.3.3 最大粒径

粗粒材料では、原粒度を基準として異なる最大粒径 (D_a) で相似粒度に調整した試料を同じ条件で締固めた場合、最大粒径 (D_a) の大きい試料の方がよく締まることがいくつも報告されている。

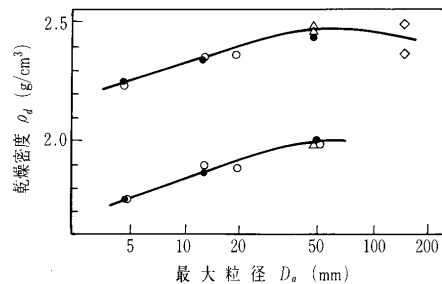


図-3.9 乾燥密度に及ぼす最大粒径の影響
参考文献8)を一部加筆

図-3.9⁸⁾に、その一例として Oroville gravel の結果を示した。このような最大粒径 (D_a) の締固め密度への影響は、粒径が大きくなるほど著しい粒子破碎を伴うことに起因するようである。言い換えると粒子破碎を伴わない締固め方法を採用したり、堅い粒子の粒状材料の締固めの場合などでは、最大粒径 (D_a) の締固め密度に及ぼす影響も小さくなるものと予想される⁸⁾。

しかし、泥岩ずりを用いた大型突固め試験では、図-3.6に示すように最大粒径 (D_a) が大きくなると、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は減少する⁸⁾と報告されている。細粒砂岩を用いた締固め試験では、 D_a の変化による締固め間隙比 (e) の差は少ない⁹⁾との報告もあり、堆積軟岩における D_a による締固め密度への影響は明確でない。これは岩片の破碎が容易に起こるために、破碎によって

生じた粒径の小さい岩片で空隙が埋まるだけでなく、構造的に詰まりにくい粒度分布になったりするためと考えられる。

また締固めにおいては、最大粒径 D_a と供試体寸法 d の比が問題となる。通常用いられる D_a/d は $1/5 \sim 1/6$ 以下とされているが、一般に D_a が d に比して大きい場合、得られる特性にばらつきが大きく、信頼性の高いデータが得られないことから、なるべくその比は小さく抑えることが望ましい。

フィルダムでは、できるだけ大きいモールドを使用し、試料の最大粒径 (D_a) はモールド直径 (d) の $1/10$ 以下を原則としている⁹⁾。

$d=15\text{ cm}$ の場合、最大粒径の上限は上記の点を考慮して、 19 mm とすることをすすめたい。

3.3.4 粒度分布

粒度分布の指標としては均等係数 (U_c) が用いられることが多いので、 U_c による締固め密度への影響について記述する。ロック材料の締固め特性では、図-3.8 に示すように U_c が大きくなるほど空隙比 (e) が小さくなる傾向を示すと言われている¹⁰⁾ が、軟岩ではロック材料と同じ傾向を示すがその差は少ない^{11), 12)} というものと、逆に U_c が大きくなると、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は減少する⁶⁾ ものが報告されており、材料によりその特性は変化する。

また、堆積軟岩などは水による粒子破砕が生じる特性を有しているため、粒度分析の方法にも注意し、材料の特性や実施工を考慮した選択が必要である。言い換えれば、堅い材料と同様の分析方法の水洗い法では粒子破砕により粒径が小さくなる場合があり、採取した自然状態での分析が適切と考えている。

3.3.5 締固めエネルギー

泥岩ずりの締固め試験を行った場合、締固めエネルギー (E_c) が小さいほど最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は低下し、最適含水比 (w_{opt}) は増加する傾向にある⁶⁾ ことは、土の一般的な締固め特性と同様である。

また、同じ締固めエネルギーでも、低締固めエネルギーではモールド径 (d) が小さいとモールドの壁面摩擦の影響により締固め密度が小さくなるようであるが、実用上の範囲では d の影響は小さいようである¹³⁾。

3.4 粒子破砕

軟岩は岩塊自身の強度が低いので、締固めによって容易に破砕し、細粒化する特性を有している。細粒化の程度は締固めの方法やエネルギーあるいは岩質等によって異なる。そして、締固め密度の大きさは材料の細粒化の影響を大きく受けているようである。したがって、この種の材料を扱う場合は材料の細粒化特性をよく理解しておくことが大切である。

山口ら¹²⁾ によればスレーキングで細片化した泥岩の締固め時の破砕状況は締固めエネルギー (E_c) と試料の含水状態のみならず、図-3.10, 11に示すように試料の最大粒径 (D_a) や均等係数 (U_c) に関する初期粒度

にかなり依存し、 D_a が大きく、しかも均一な粒度配合の試料において顕著となる。そして、スレーキングによって細粒化した岩片と新鮮な岩片で構成された両試料間では、締固め特性と締固め時の岩片の破砕状況はかなり異なり、同一エネルギーでは岩片の破砕性に富むスレーキング試料の方が新鮮な岩片試料よりも高い密度が得られる。したがって、岩片の破砕によって生じた粒径の小さな岩片群の形成により大きな乾燥密度が得られたものと考えられる。

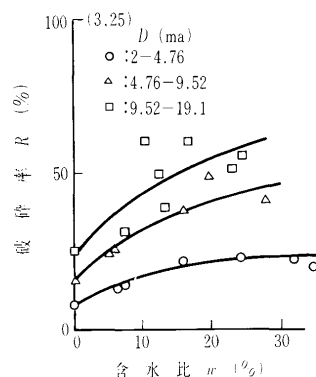


図-3.10 初期粒度の異なる試料間での破砕状況の比較 (湿潤試料)

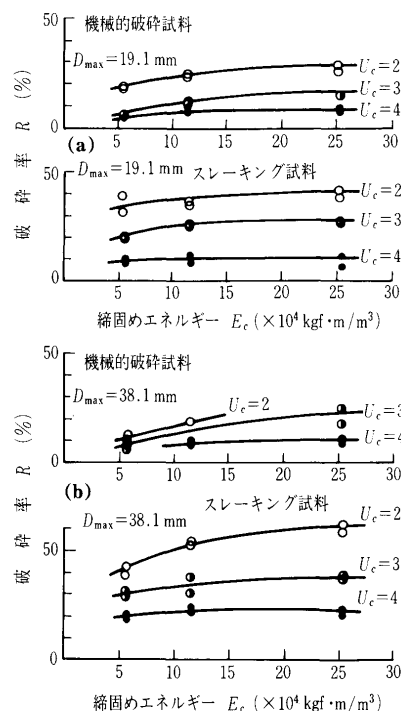
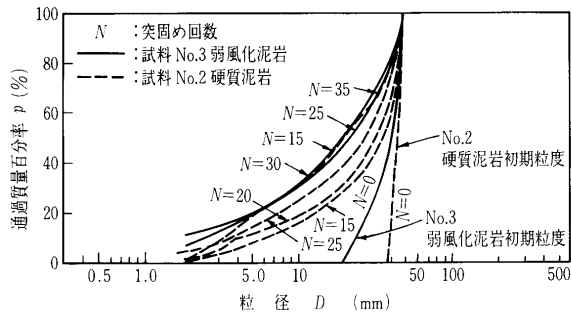


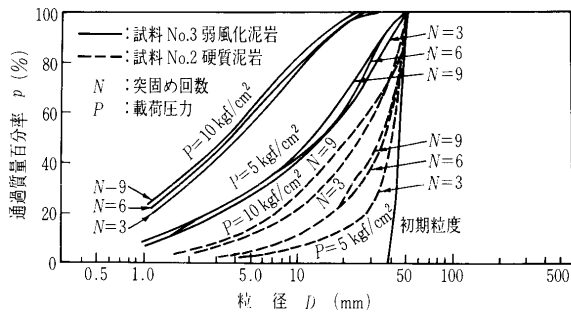
図-3.11 破砕率と締固めエネルギーとの関係 (水浸試料)

山村ダム¹⁴⁾ では、動的なエネルギーを与えたときの締固め特性を求めるために、大型締固め試験を実施している。試験はモールド直径 $d=20\text{ cm}$ 、容積 $v=8\text{ 000 cm}^3$ 、ランマー質量 10 kg を用いた。突固め回数の違いによる粒度分布の変化は、図-3.12 のようである。また、実際の転圧時にはタイヤローラーや振動ローラーで行うことから、静的なエネルギーに近いとして、 $d=20\text{ cm}$ の同じようなモールドを用いた静的な突固め試験を実施

講 座



図—3.12 締固めエネルギーと粒度分布 (動的締固め)
参考文献1)に一部加筆



図—3.13 締固めエネルギーと粒度分布 (静的締固め)
参考文献1)に一部加筆

している。試験は図—3.13に示すように硬質泥岩および弱風化泥岩に対し5 kgf/cm²および10 kgf/cm²の荷重を数回載荷したときの粒度変化を求めている。

この二つの試験結果の比較から、次のことがわかる。

- ① 突固め試験および静的締固め試験ともに、締固めエネルギーが大きいかほど試料は細粒化し、風化の程度が進んでいる試料ほどその傾向が顕著である。
- ② 動的な突固めに比較し、静的な締固めの方が細粒化しやすい。

また、粒子破碎の程度を評価する方法としては、①粒子分布の変化に基づくもの、②粒子表面積の変化に基づくもの、に大別される。前者には粒径加積曲線上の1, 2点の移動量、Marsal (マルサル) 破碎率、粒子破碎前後の粒径加積曲線で囲まれる面積などに着目したものが含まれる¹⁵⁾。

3.5 ま と め

堆積軟岩は粘土鉱物などの堆積物が未固結から固結状態への途上にあり、土粒子間の固結力や強度が通常の岩石に比較して低いなどのために、岩塊が乾湿繰返しを受けることによって、岩塊自身が破碎して細片化したり、締固めによって容易に破碎する特性を有している。堆積軟岩が、このような性質を有しているために、一般の岩石から構成された粗粒材料と違って、次に示すような締固め特性を示すので、この点を考慮して締固め試験を行うことが重要である。

- ① 岩塊の含水比が変化することによって細粒化し、

岩塊自身の強度が変化することもあるので、試料の保存状態が試験結果に影響を与える可能性が大きい。

試料の保存は、期間をなるべく短くし、岩塊の含水比が変化しないようにビニール袋などで密封するなどの注意が必要である。

- ② 試料の最大粒径 (D_a) や粒度分布の影響については、堆積軟岩の種類によって違うので、個々の材料について試験で確認し、室内試験から現場の締固め特性を推定するようにする。
- ③ 突固めによる粒子破碎が顕著なので、締固め試験を行う場合には非繰返し法とする。

また、堆積軟岩の締固め特性については、岩種による違いが大きいようなので、今後データの蓄積が必要と考えている。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：盛土の調査・設計から施工まで，p. 14, 1979.
- 2) 河上房義：土の締固め，土と基礎，Vol. 22, No. 4, pp. 1~3, 1974.
- 3) 久野悟郎：第20回土質工学会研究発表会一般報告および総括，土と基礎，Vol. 33, No. 10, p. 123, 1985.
- 4) 望月秋利・中岡時春：粗粒分を含む締固め土のせん断特性，第24回土質工学会研究発表会講演集，pp. 547~548, 1989.
- 5) 中岡時春・望月秋利・阪口 理：粗粒材を含む盛土材料の締固め密度の推定，土木学会論文集，No. 499/III-28, pp. 177~185, 1994.
- 6) 後藤 茂・宮本武司・玉置克之：軟岩ずりの締固め特性に及ぼす粗粒分の影響，土と基礎，Vol. 32, No. 7, pp. 45~57, 1984.
- 7) 松本徳久：粗粒材の設計定数の決定方法とその適用，土と基礎，Vol. 33, No. 6, pp. 7~12, 1985.
- 8) 土質工学会編：ロックフィル材料の試験と設計強度，p. 83, 1982.
- 9) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準設計 グム編，1981.
- 10) 土質工学会編：粗粒材料の現場締固め，pp. 84~85, 1990.
- 11) 広瀬照光・神谷光彦・岸 洋一：軟岩粗粒材料の締固めとせん断強度に粒度組成が及ぼす影響，粗粒材料の変形強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 161~166, 1986.
- 12) 山口晴幸・黒島一郎・福田 誠：スレーキングで破碎した泥岩の締固め特性，土木学会論文集，No. 418/III-13, pp. 75~84, 1990.
- 13) 赤司六哉・相場 明：粗粒材料の締固め特性に影響を及ぼす2, 3の要因について，粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム発表論文集，pp. 1~4, 1990.
- 14) 愛知県企業局：佐布里ダム工事誌，1969.
- 15) 板橋一雄・佐藤 健・森 富雄・和田英孝：軟岩の室内スレーキング試験に伴う細粒化の表現法，土木学会論文集，No. 499/III-29, pp. 181~190, 1994.