

島尻層泥岩土の締固め特性と安定処理

Compaction characteristics and stabilization of Shimajiri mudstone

すな 砂 がわ 川 てつ 徹 お 男* うえ 上 はら 原 ほう 方 せい 成**

1. ま え が き

土を材料として構造物をつくる場合、それを締め固めることによって、密度を高め、その強度、圧縮性、透水性などの工学的性質を改善することは、古くから行われている。土を締め固めれば密度が増大することは当然であるが、締め固める目的は、ただ単に密度を増大させることなく、土の工学的性質を築造する構造物に最適ように変えることである。これまでは、盛土材料としては、土構造物の機能や安定性に適合する工学的性質、施工性、経済性などを満足している土を求め、使用してきた。しかしながら、近年の建設工事においては、地域的制約あるいは経済性の面から、現場発生土を利用しなければならない場合が生じたり、または積極的に利用する方向で検討されているものの、盛土等材料としては必ずしも前述の条件を満足しているとはいえないような土もみられる。

本研究に用いられている新生代第三紀の島尻層泥岩は沖縄本島中南部に広く分布し、未風化で地山の状態では固結していて良好な地盤とされる^{1),2)}が、切土、掘削を行うと応力解放や吸水膨張による強度低下、乾湿繰返し作用に伴うのり面の変状と崩壊、圧縮沈下等の問題点がある^{3),4),5)}。また、掘削直後は、粗粒径の泥岩片を含むので締固めにおいて施工管理上の問題が生ずる。島尻層泥岩土（沖縄本島中南部に分布する泥岩の破砕片で粘性土と同様な物理的性質を示す。以下、泥岩土という）はこれらの理由により、これまで盛土材料としてはあまり利用されなかった。しかしながら、近年の建設工事の大型化に伴い、経済性の面から、泥岩土を盛土材料として利用するように迫られている。特に、道路工事、宅地造成、公園敷地造成等においては、その利用事例が顕著になってきている。ところが、泥岩土を盛土材料として利用する場合の材質基準、設計基準、施工管理基準等は皆無の状態であり、およそ経験的感覚に基づき、ケース・バイ・ケースで施工されていて、開発が進むに伴い、工法不良による被害が多発しつつあり、しかも拡大化する傾向にある。このような状況から、これらの基準または仕様の制定が急務とされているが、基礎的、実験的研究としては、泥岩土の締固めに関する新城⁶⁾や筆者ら⁷⁾

の報告があげられる。前者は未風化泥岩土について、非乾燥法・非繰返し法による動的締固めを行い、乾燥密度と含水比の関係を明らかにし、自然含水比状態の泥岩土については、締固めに及ぼす締固め仕事量および塊状粗粒分の径の影響を明示している。後者は室内で空気乾燥させた泥岩土について、非繰返し法および繰返し法による動的締固め、半動的締固めおよび静的締固めを行い、泥岩土の締固め特性を明らかにしている。また、筆者ら⁸⁾は添加材として、高炉セメントと消石灰を用いた場合の泥岩土の締固めについて一部報告している。本研究では非乾燥法および乾燥法によって、繰返し法および非繰返し法での動的締固め試験を行った。乾燥法による泥岩土については、実際施工の現状を想定し、突固めスタート時の含水比（初期含水比 w_0 ）が異なる試料の最適含水比と最大乾燥密度がどのように変化するか、更に、締固め仕事量との関係についても検討した。また、泥岩土の安定処理をも意図して、添加材を用いることにより、泥岩土のコンシステンシーがどのように変化するかを確かめ、添加量、最適含水比および最大乾燥密度の関係についても検討した。

2. 試料および試験方法

2.1 試 料

試料は西原町（試料A）で風化の進みつつある泥岩地山を、南風原町（試料B）においては新鮮な泥岩地山を、土工機械で掘削し、自然含水比の状態で袋詰めにして試験室へ搬入し、空気乾燥させたものである。室内で空気乾燥させた試料は人為的に粉碎し、38.1mmふるいを通させて試験に供した。試料の準備方法は、試料Aについては乾燥法および非乾燥法を、試料Bについては乾燥法のみを採用した。また、乾燥法による試料の初期含水比は無添加の試料については5～10%および15～20%、添加材を混合した試料については15～20%になるように調整した。

試料の物理的性質は表—1に示すとおりで、いずれの試料も類似した性質を示し、日本統一土質分類法によると三角座標では細粒土Fに分類され、塑性図ではCHに分類される。なお、試料の物理試験は原則としてJISに基づいているが、粒度試験の分散剤は分散効果をよくするためヘキサメタリン酸ナトリウムを使用している。

添加材としてはセメント系A、セメント系Bおよび消石

*沖縄建設技研 代表取締役

**琉球大学教授 工学部土木工学科

表一 物理的性質

試料	採取場所	自然含水比 (%)	土粒子比重	粒度組成 (%)			液性限界 (%)	塑性限界 (%)
				砂分	シルト分	粘土分		
A	西原町	28.2	2.748	2.0	35.0	63.0	68.6	26.9
B	南風原町	23.9	2.734	1.6	34.4	64.0	77.2	23.2

表二 締固め試験条件

試料	試料の準備方法	試料の使用 方法	突固め 層数	各層当たり 突固め回数	許容最大 粒径(mm)	添加材
A	非乾燥法	繰返し法	3	92	38.1	無
		非繰返し法	3	92	38.1	無
	乾燥法	繰返し法	3	92	38.1	無
		非繰返し法	3	92	38.1	無
B	乾燥法	非繰返し法	3	25 55 92	38.1	無
		非繰返し法	5	25 55 92	38.1	無
		非繰返し法	3	92	38.1	有

灰の3種類を用いており、いずれも市販品である。セメント系Aは軟弱地盤用として改良されたものであり、主な成分はCaO 61.6%, SiO₂ 19.8%, SO₃ 7.6%, Al₂O₃ 5.0%およびFe₂O₃ 3.1%となっている。また、セメント系Bは高炉セメントである。

2.2 試験方法

コンシステンシー限界は原則としてJIS A 1205および1206に基づいているが、添加材を混合して注水した後の練合せ時間は約10分とした。

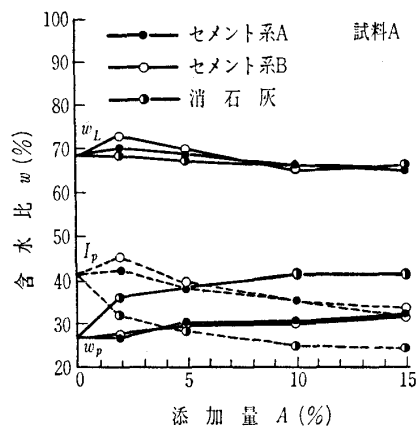
締固め試験は原則としてJIS A 1210に基づき、内径15 cm モールドと質量4.5 kgのランマーを用い、ランマーの落下高さは45 cmとし、試験の条件は表二に示すとおりである。非乾燥法による繰返し法はJISにはないが、特に非繰返し法と比較するために行った。非乾燥法による試料については乾燥過程で突固めを行っているが、乾燥法による試料については調整された含水比に達すると注水後よくかき混ぜて突固めを行った。また、添加材を混合する場合は、添加材が試料中に一様になるまで混合し、注水してよくかき混ぜた後で突固めを行った。

添加量は3種類の添加材についてそれぞれ2, 5, 10および15%とし、土の乾燥重量に対する重量百分率で示してある。

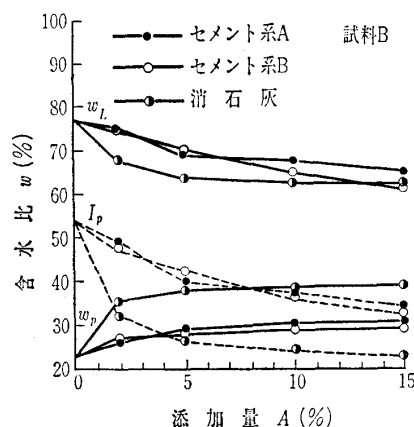
3. 試験結果および考察

3.1 添加材によるコンシステンシーの変化

試料Aについて、添加量とコンシステンシーの関係を示したものが図一である。液性限界(w_L)は添加量が2%のセメント系を除き、添加量の増加に伴い減少する傾向を示しているが、その減少量は極めて小さい。塑性限界(w_p)はいずれの添加材を用いても、添加量の増加に伴い増加する傾向を示しているが、セメント系Aとセメント系Bは類似した傾向を示し、消石灰がいずれのセメント系添加材よりもその効果は大きくなっている。したがって、塑性指数



図一 添加量と含水比の関係



図二 添加量と含水比の関係

(I_P)は添加量が2%のセメント系を除き、添加量の増加に伴い減少し、泥岩土の塑性指数を低下させる効果は消石灰がセメント系よりすぐれていることが明らかである。

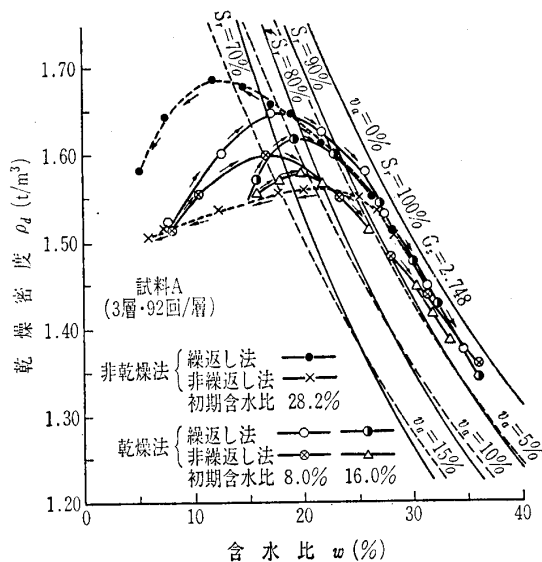
図二は試料Bについて、添加量とコンシステンシーの関係を示したものである。液性限界は添加量の増加に伴い減少する傾向を示しているが、試料Aに比較して添加量5%までの影響は大きい。塑性限界はいずれの添加材を用いても、添加量の増加に伴い増加する傾向を示している。したがって、塑性指数は添加量の増加に伴い減少し、泥岩土の塑性指数を低下させる効果は消石灰がセメント系より大きく、試料Aと類似した傾向を示している。

試料AとBを比較した場合、液性限界の減少効果は添加量5%まで試料BがAより大きくなっているが、その差異は泥岩土の風化の度合、無添加泥岩土の分布地域によるコンシステンシー限界の違い²⁾等が考えられ、今後各地点の泥岩土について比較実験を行い検討する必要がある。

これらの結果から、いずれの添加材を用いても、泥岩土の塑性指数は減少する傾向にある。したがって、これらの添加材を用いることにより、現場における泥岩土の安定化と同時に高含水比泥岩土のトラフィカビリティーの確保が期待できよう。

3.2 未処理土の締固め特性

(1) 試料A



図—3 締固め曲線

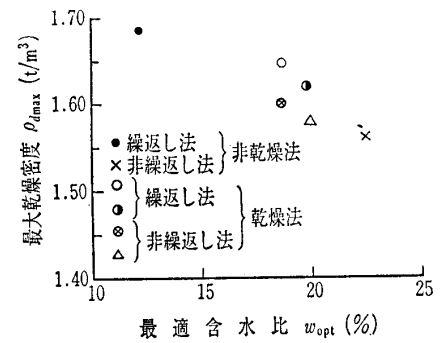
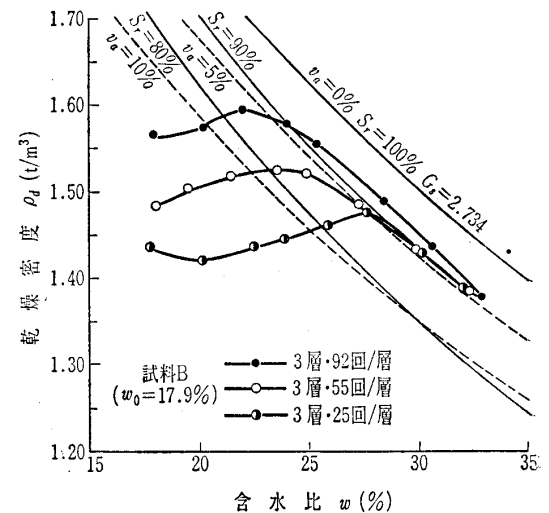
図—3は試料Aについて、非乾燥法および乾燥法で試料を準備し、突固め試験を行った結果である。乾燥法による試料については初期含水比を変化させ、その締固め特性を比較している。

非乾燥法による試料の最適含水比は、非繰返し法で突き固めた場合が、繰返し法で突き固めた場合より大きく、最大乾燥密度は、繰返し法で突き固めた場合が、非繰返し法で突き固めた場合より大きな値を示している。繰返し法による最大乾燥密度が非繰返し法によるそれより大きいのは、乾燥過程において、試料を室内で乾燥させることによって固化するものの、解きほぐして繰返し使用するため、粒子破碎によって粒度分布が良好になり、締固め効果が大きくなることによるものであろう。

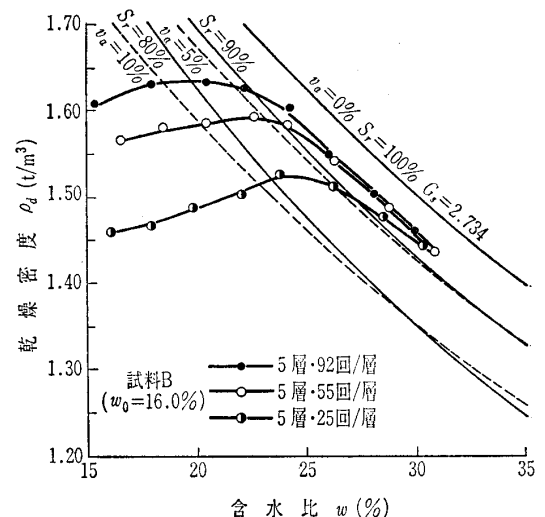
乾燥法による試料の最適含水比は繰返し法および非繰返し法のいずれでも初期含水比が大きいほど大きな値を示しているが、最大乾燥密度は初期含水比が大きいほど小さな値を示している。また、繰返し法と非繰返し法を比較した場合、初期含水比が同一であれば、最大乾燥密度は繰返し法が非繰返し法より大きな値を示しているが、最適含水比に関しては大きな差異はみられない。繰返し法による最大乾燥密度が非繰返し法によるそれより大きいのは、室内乾燥によりかなり固化した泥岩片を繰返し使用するため、粒子破碎によって粒度分布がより良好な状態になり、締固め効果が大きくなることに起因しているものと考えられる。

図—4は試料Aについて、最適含水比と最大乾燥密度の関係を示したものである。乾燥法で繰返し法および非繰返し法のいずれの方法によっても、最適含水比と最大乾燥密度は非乾燥法の繰返し法と非繰返し法の間にあることを示している。

これらの結果から、最適含水比と最大乾燥密度は、試料の調整方法あるいは初期含水比によってそれぞれ異なった


図—4 w_{opt} と ρ_{dmax} の関係


図—5 締固め曲線



図—6 締固め曲線

値を示すことが明らかである。したがって、現場における施工管理基準のための締固め試験方法は、試料の調整方法あるいは初期含水比を現場の泥岩土と対応させて決定する必要がある。

(2) 試料B

図—5と図—6は試料Bについて、乾燥法で初期含水比が15~20%になるように調整し、非繰返し法で突固めを行ったときの締固め曲線を示している。従来知られているように、最適含水比は突固め回数の増加に伴い減少し、最大

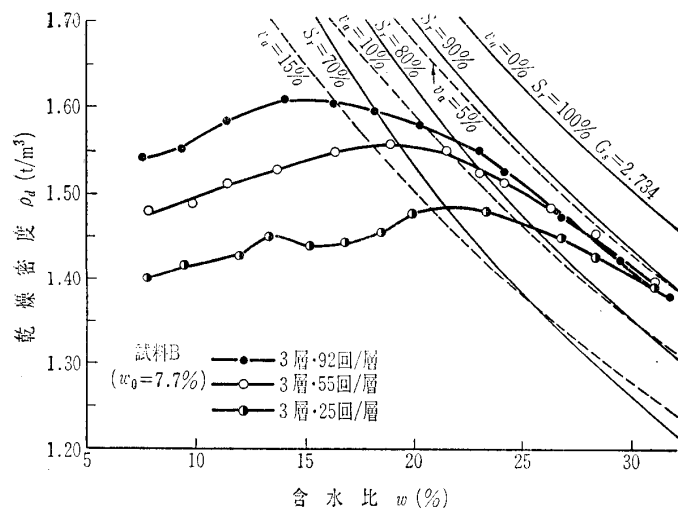


図-7 締固め曲線

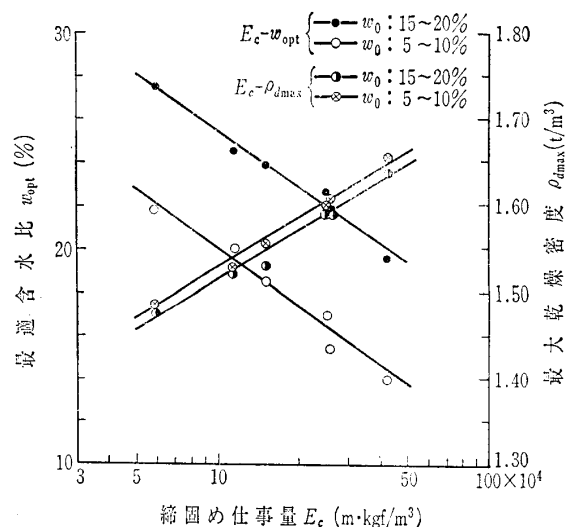
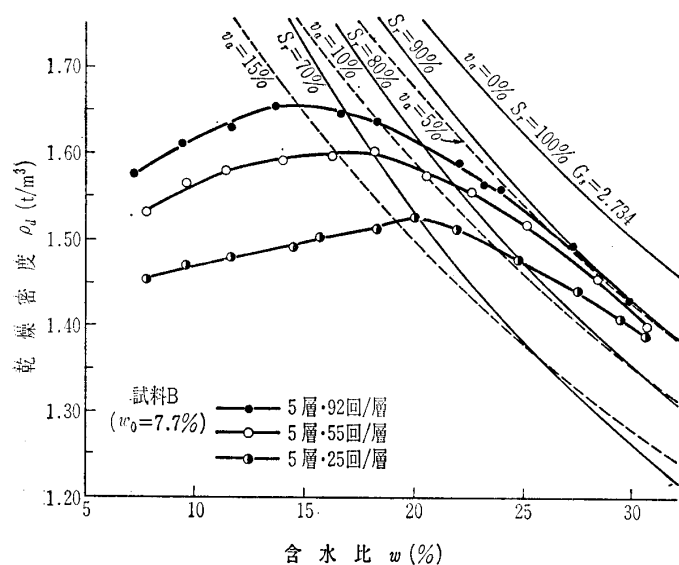
図-9 締固め仕事量と $w_{opt} \cdot \rho_{dmax}$ の関係

図-8 締固め曲線

乾燥密度は突固め回数の増加に伴って増加する傾向を示している。これらの曲線は一つの極大値を持ち、ほとんど類似した曲線を示しているが、3層・25回/層（仕事量小さい場合）の曲線のみが他と異なっている。すなわち、含水比が15~20%でもう一つの極大値があるようにうかがわれる。

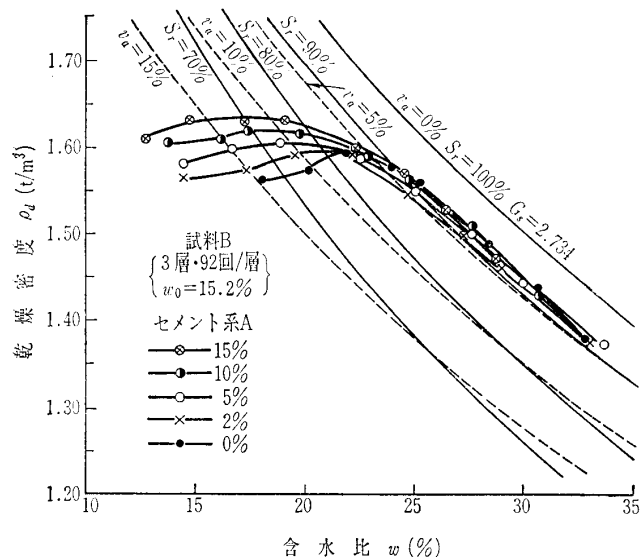
図-7と図-8は試料Bについて、乾燥法で初期含水比が5~10%になるように調整し、非繰返し法で突固めを行ったときの締固め曲線を示している。これらの曲線は図-5および図-6で示した曲線と同様な傾向を示し、最適含水比は突固め回数の増加に伴い減少し、最大乾燥密度は突固め回数の増加に伴い増加する傾向を示している。これらの曲線の中で、3層・25回/層（仕事量小さい場合）の曲線は他の例⁷⁾でも既に知られているように、乾燥側にもう一つの極大値があり、図-5でみられた傾向を更に明確に示している。このように、泥岩土の締固め曲線は締固め仕事量によって異なった特性を示しており、施工管理基準の

ための締固め試験においては、実際の施工現場で使用する機種および初期含水比との対応も考慮して、締固め仕事量を決定する必要がある。

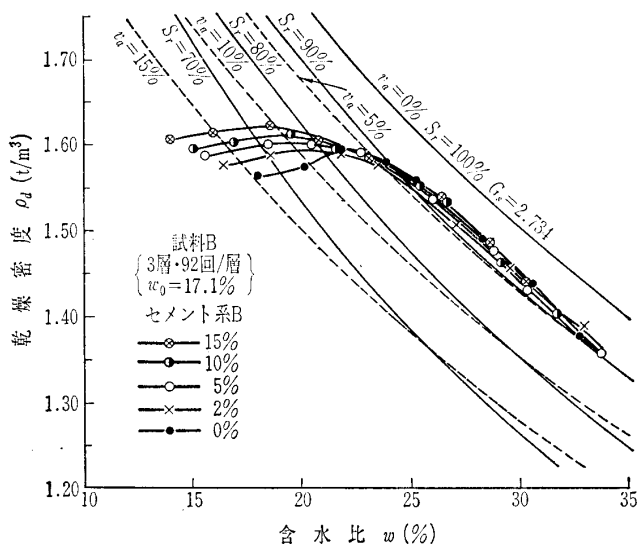
図-5～図-8で示した締固め曲線から、Proctor(プロクター)の突固め試験における締固め仕事量⁹⁾と最適含水比および最大乾燥密度の関係を示したものが図-9である。最適含水比は仕事量の増加に伴い減少し、初期含水比が5~10%と15~20%の場合、両者ともに類似した傾向を示している。しかしながら、同一仕事量における最適含水比は、初期含水比が大きいほど大きくなり、初期含水比が5~10%と15~20%の間では約6%の差異がみられる。一方、最大乾燥密度は仕事量の増加に伴い増加し、初期含水比が5~10%と15~20%の場合、両者ともに類似した傾向を示している。同一仕事量における最大乾燥密度は初期含水比が大きいほど小さくなっているが、初期含水比の違いによる差異は図-3で示した試料Aほどではない。これについては、風化の程度の違いにより物理化学的・鉱物学的性状や自然含水比が異なり、室内乾燥による影響などが考えられる。図からみると最大乾燥密度は仕事量の増加に伴ってほぼ直線的に増加している。ただし、仕事量が大きくなると締固め時含水比によっては過大転圧となり、乾燥密度が減少する領域が考えられるので施工管理等で注意を要することになる。

3.3 処理土の締固め特性

泥岩地山を切土し、盛土材料として使用することを想定して添加材を混合した泥岩土を突き固めた場合の締固め曲線が図-10～図-12である。いずれの添加材を用いても、最初の突固め時の含水比が変化しているが、あらかじめ、15~20%に調整されていた試料の含水比が添加材を混合することによって、添加量の増加に伴い減少することを示している。セメント系Aを添加した場合とBを添加した場合の締固め曲線は類似した傾向を示し、曲線の極大値は添加量の増加に伴いわずかに左上方へ移動し、消石灰を添加し



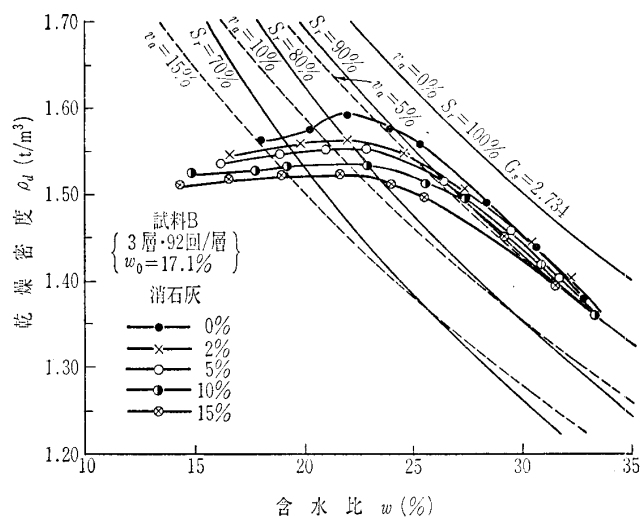
図—10 締固め曲線



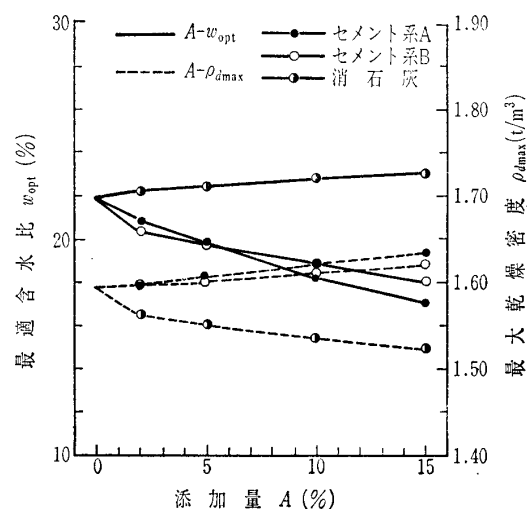
図—11 締固め曲線

た場合の締固め曲線の極大値は添加量の増加に伴いわずかに右下方へ移動していく傾向を示している。

添加材を用いた場合の締固め曲線から添加量と最適含水比および最大乾燥密度の関係を示したものが図—13である。セメント系AとBを添加した場合、添加材として普通ポルトランドセメントを用いた例¹⁰⁾でもみられるように、最適含水比は添加量の増加に伴って減少するが、最大乾燥密度は添加量の増加に伴ってわずかながら増加する傾向を示す。消石灰を添加した場合は、生石灰を用いた例¹⁰⁾に類似し、最適含水比は添加量の増加に伴って増加し、最大乾燥密度は添加量の増加に伴って減少する。これらの性質は他に報告した例⁸⁾とも類似しており、泥岩土の共通した特性と考えることができよう。また、消石灰を添加した場合、最適含水比はセメント系を添加した場合より湿潤側にあるので、風化して自然含水比が高い泥岩土を締め固めるには消石灰を添加の方がセメント系を添加するより施工の面で有利といえよう。しかしながら、密度の増加を期待した場合は



図—12 締固め曲線



図—13 添加量と $w_{opt} \cdot \rho_{dmax}$ の関係

セメント系が消石灰より有利となるので、実際の使用に当たっては、土構造物として要求される強度あるいは圧縮沈下等も検討して添加材を決定する必要がある。

4. あとがき

島尻層泥岩土についてコンシステンシー限界および締固め特性の面から述べてきた。泥岩土の最適含水比および最大乾燥密度が初期含水比や締固め仕事量によって変化するということは、施工管理基準を決定する場合、現場の土質条件を考慮の上、できるだけ現場条件に合致した試験方法を採用すべきことを示唆している。おわりに今回の試験結果を整理すると次のようになる。

- ① 乾燥法により調整した泥岩土の最適含水比は、初期含水比が大きいかほど大きくなる傾向を示し、最大乾燥密度は初期含水比が小さいほど大きく、初期含水比を同一にすれば、繰返し法による場合が非繰返し法による場合より大きな値を示す。
- ② 同一仕事量においては、泥岩土の最適含水比は、初期含水比が大きいかほど大きく、仕事量の増加に伴い減

少する。

③ 同一仕事量においては、泥岩土の最大乾燥密度は、初期含水比が大きいほど小さく、通常の締固め範囲内では仕事量の増加に伴い増加する。

④ セメント系を泥岩土に添加した場合、最適含水比は添加量の増加に伴いわずかに減少し、最大乾燥密度は添加量の増加に伴いわずかに増加する傾向を示す。

⑤ 消石灰を泥岩土に添加した場合、最適含水比は添加量の増加に伴いわずかに増加し、最大乾燥密度は添加量の増加に伴いわずかに減少する傾向を示す。

この報告が泥岩土を盛土等材料として使用するときの施工管理基準の一助となれば幸いである。

末尾ながら、筆者らの研究へいろいろと御助言を賜わる名古屋大学教授植下協博士に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1) 新城俊也：島尻層泥岩のセン断特性，琉球大学農学部学術報

告，第23号，pp. 237～254，1976。

2) 砂川徹男・上原方成：島尻層群における与那原層の工学的性質，土と基礎，Vol. 31, No. 4, pp. 27～31, 1983。

3) 新城俊也：沖縄における泥灰岩の工学的特性(I)，琉球大学農学部学術報告，第18号，pp. 127～136, 1971。

4) 新城俊也・小宮康明：乾湿繰返しによる島尻層泥岩の強度低下，琉球大学農学部学術報告，第25号，pp. 307～323, 1978。

5) 新城俊也ほか：島尻層泥岩地帯における切土斜面の設計の現状と問題点，土と基礎，Vol. 31, No. 1, pp. 111～116, 1983。

6) 新城俊也：島尻層泥岩土の締固めに関する2・3の特性，琉球大学農学部学術報告，第24号，pp. 413～425, 1977。

7) 上原方成：土の締固めに関する研究(第1報)，琉球大学理工学部紀要工学篇，第8号，pp. 47～64, 1975。

8) 砂川徹男・中村元次：島尻粘土の安定処理について，昭和56年度土木学会西部支部研究発表会講演集，pp. 233～234，昭和57年2月。

9) 土質工学会編：土質試験法(第2回改訂版)，pp. 285～286，昭和56年。

10) 上原方成：路盤の安定処理工法に関する基礎的研究(Ⅲ)―島尻層泥岩土 その1―，琉球大学理工学部紀要工学篇，第4号，pp. 63～88, 1971。

(原稿受理 1984.3.12)

書 籍 紹 介

「野尻湖の発掘写真集 2」

野尻湖発掘調査団 編著

野尻湖は長野県北端，信濃町にあり，信越本線黒姫駅の北東，バスで10分ほどの山あい静かなたたずまいを見せる小さな湖である。ここに太古の人類のロマンが埋もれているとは少なくとも半世紀前に誰が思い至ったであろうか。

1948年，湖畔の旅館の主人，加藤さんが干上った湖底にナウマンゾウの臼歯を発見。1961年，これに地質家が注目，出土の層準をめぐる議論が，まさに文字どおり「論より証拠」を地で行く，この発掘の契機となったという。1962年，第1回の発掘を始めてから，すでに22年が過ぎ，今年第9回発掘が行われた。そして，この7月には，地元博物館が開館した。

本書は1975年に出版された同名の写真集の2号目であって，主として第7次発掘以来，陸上発掘3回分を含め第8次までの成果をまとめたものである。第1次から第8次まで，延参加人員およそ1万5千名の汗の結晶ともいえよう。1～4ページにカラーで，土地に刻まれた乾裂，昆虫，オオツノシカの掌状角，ナウマンゾウのきば，象牙の加工品(ビーナスか?)，それに地層断面が柱状図とともにのせてある。あとは100ページまでモノクロである。写真の配列は，この発掘の大目標となっている“野尻湖人の生活とそれをめぐる自然の復元”というテーマに沿ってなされている。

石器などの人類遺物を立体視できるようにしてあるので，カラーにおけるなまなましとは別の迫力を感じさせるの

が特徴である。実体鏡に合わせて並べてあるが，裸眼でも容易に見られ，実体視の訓練にもってこいである。カバー(カラー)は発掘地点の遠景であるが，これも実体視できるかも。

17ページに及ぶ解説のほか，野尻湖発掘友の会や専門別グループの所在地・連絡先，発掘の年表がついており，目で楽しみながら学ぶことができる。

本書は写真集ではあるが，発掘の基本姿勢が「層位第一」主義で，現場の精細な観察を最も重要視している。このことは，土質工学会員にとっても常に念頭におくべきであるが，いたずらに数値や理論に走ることなく事実をどのように把握し，それに立脚した理論構成を行うか，きわめて広汎な分野の協同のもとに成り立った本書から学ぶことが多いと考える。

しいて欲をいえば，写真のコントラストが強すぎることに，写真によっては，スケールがついていればよかったのに，と思うものもあった。

前書とあわせて見られることをおすすめしたい。

<内容の概観>

旧人から新人へ——下部野尻湖層Ⅲの時代

キルサイト——中部野尻湖層の時代

大型獣の絶滅——上部野尻湖層Ⅰの時代

氷河時代——上部野尻湖層Ⅱの時代

縄文時代のあけぼの

(工藤 浩)

B 5 判 119ページ 定価 1,600円

発行所 共立出版(株) 電話 03-947-2511