



Title	国頭マージ締固め土の透水係数の異方性について(生産環境学科)
Author(s)	宮城, 調勝; 前原, 光博
Citation	琉球大学農学部学術報告 = The Science Bulletin of the Faculty of Agriculture. University of the Ryukyus(38): 195-201
Issue Date	1991-12-04
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3837
Rights	

国頭マーヅ締固め土の透水係数の異方性について

宮城調勝*前原光博**

Norikatsu MIYAGI and Mitsuhiro MAEHARA : On the anisotropy of permeability of compacted Kunigami Maaji soil

Summary

Generally, there is a difference between vertical and horizontal coefficient of permeability in compacted soils. The several reasons of its anisotropy of permeability had been reported in the past. In this paper, transmission of compaction energy for depth of compacted soil is considered by the method which investigate dry density with cutting soil to 1cm thickness piece at right angles to the direction of the mold.

The results are as follows;

- 1) The dry density of slice soil changed in the range of 0.92-1.08 as compared with average dry density in mold. It seems that this difference of dry density bring on anisotropy of permeability
- 2) In the relation between coefficient of permeability and void ratio, measured values agree with values based on consolidation test in remould soils. But in the soil conditions of optimum moisture content and air dried, measured values become larger than values based on consolidation test with the increase of void ratio.

緒 論

国頭マーヅの土性は一般には砂質土から粘性土のものまで広い範囲にまたがるが、土質材料としては一般盛土材料はもちろんのこと、フィルダムの土質材料も含めて幅広い用途がある。特に近年建設が盛んに行われているフィルダムの遮水材料は、ほとんどがこの国頭マーヅ土である。

国頭マーヅを築堤材料として使用する場合、その力学性の相違は、堤体の設計段階で対応すればよいが、遮水性にはそれぞれ土の持つ限界値があり、それぞれの施工条件下でその管理値を満たすことが要求される。この遮水性は一般には透水係数で論じられるが、JISに定める試験方法と構造物における実際の水の流れとは方向が異なることから、土の透水係数の異方性が問題となってくる。土構造物の設計数値としての透水係数の異方性については、過去の経験から便宜上、軸方向（縦）に対してその直角方

*琉球大学農学部

**鹿児島県枕崎市役所

(横)の透水係数を10倍とみることで、安全率も含めて対処しているのが現状である¹⁾。

土の透水係数に異方性が生ずる理由は、締固めた土の土粒子の配向、空隙分布および空隙形状の変化、あるいは締固めによる土の層状形成も考えられるが、それ以外に、転圧時の土のまき出し厚さの範囲内での、締固めエネルギーの伝播によって起こる土の乾燥密度の不均一さに起因することも考えられる。

この研究では、国頭マージ土を使用して、与えられた一定の締固めエネルギーのもとで、締固めた土の乾燥密度が深さ方向に変化する状態を細かく調べることと、実際に締固めた土を異方的に切抜き、透水試験を行うことでその異方性を実測し、土構造物の設計値に寄与することを目的としている。

試料および実験

1. 試料土

試料土は地質的に中生代白亜紀に属する名護層群黒色千枚岩²⁾の風化土を使用した。この種の土は国頭マージの中でも代表的な土である。採取地は読谷村長浜で、地表から1 m程度の深さの有機質が混入していない部分の土の2 mmフルイ通過部分を使用した。この土の基本的物理性はTable 1に示す。

2. 試験方法

1) 締固めエネルギーによる深さ方向の乾燥密度の変化
標準締固め試験方法(旧JIS A 1210)に基づいて締固め試験を行った試料を、モールドから押し出す際に、ほぼ10 mm程度づつの長さ分割して土を切り出し、質量を計量した。またその体積は押し出した試料長さの4点測定の平均値をもって算出した。

締固め三層の境界は、締固めの際に層間に挿入したマークによって切り出し時に確認している。

2) 透水係数の異方性

締固め土の透水係数の異方性は、締固め軸方向とその直角方向に透水係数を測定しているが、軸方向の透水係数

(K_v)の供試土は、 $\phi = 5$ cm、 $h = 5.1$ cmの円筒に試料を直接締固めている。その締固めは、密度の不均一を防ぐために5 cm高さの試料を3層に分けて締固めている。

締固め軸方向に直角方向の透水係数(K_h)は、特性の8×8×15 cm角形両割モールドに締固めた試料を取り外し、締固め方向と直角方向に、 K_v の場合と同じ容器に削りながら押し込んでいる。但しこの試料を締固める際は、 K_v の場合と同様に試料密度の均一化には十分注意している。

これらの試料の透水係数の測定は、変水位透水試験法に従った。

Table 1 Physical properties of sample

Specific gravity	2.77
Clay	35.5%
Silt	36.0%
Sand	22.1%
Gravel(Cut)	6.4%
Liquid limit	57.0%
plastic limit	31.7%
Plastic index	25.3

結果および考案

1. 締固めエネルギーの伝播について

Fig. 1は、試料土の締固め特性を予め把握することを目的として行った繰り返し締固め試験の結果である。この試験の中からFig. 1に示すような試料を6点選定し、これらの試料についてはほぼ1 cmの厚さ毎に乾燥密度の変化を調べた結果がFig. 2、3である。図には3点ずつの結果を示しているが、これは最適含水を中心とその乾燥側および湿潤側の三つのパターンであり、供試体の平均乾燥密度に対する各切片の乾燥密度の比を深さ毎に表している。図でみると、深さに少々ずれがあるが、それぞれ3箇所まで落込みが見られる。これは、モールドの高さを3層にわけて試料を突き固めているためであり、突き固めた層の上部から下部にいたる、わずか3~4 cmの間に密度低下が生じたことを示している。

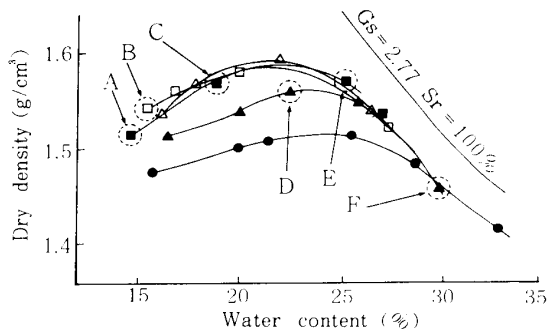


Fig. 1 The place of measuring samples in compaction curve

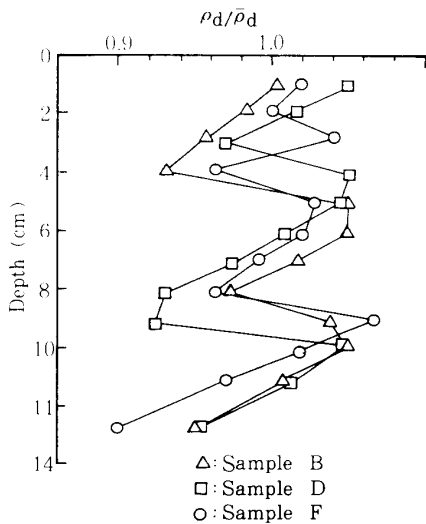


Fig. 3 Distributions of density ratio ($\rho_d/\bar{\rho}_d$) in mold. $\bar{\rho}_d$: Average dry density in mold.

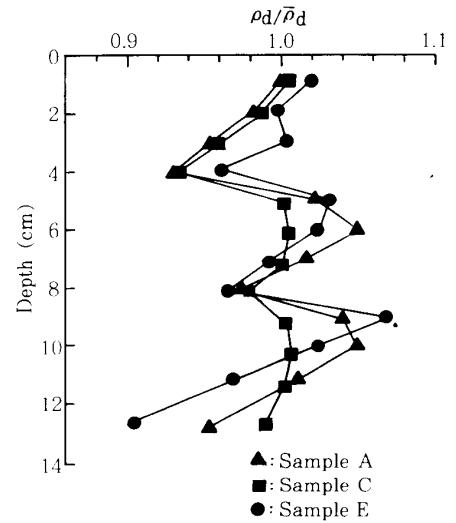


Fig. 2 Distributions of density ratio ($\rho_d/\bar{\rho}_d$) in mold. $\bar{\rho}_d$: Average dry density in mold

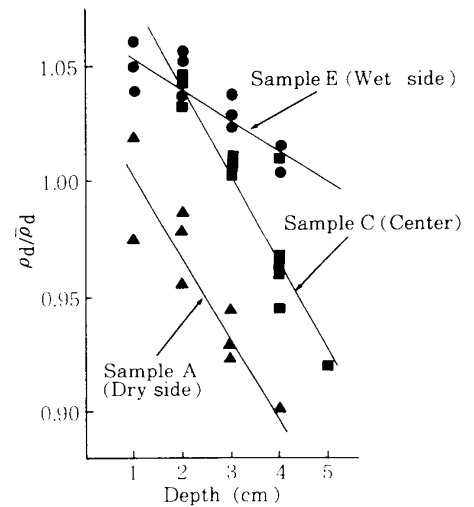


Fig. 4 Distributions of density ratio ($\rho_d/\bar{\rho}_d$) versus depth from compacted soil surface. $\bar{\rho}_d$: Average dry density in mold.

この結果からみると、供試体の中には平均値の90%の乾燥密度しかない部分が生ずることが分かった。この密度のバラツキを締固めにおける三層の面からの距離によって1 cm毎に並べかえると、Fig. 4 のようになり、突き固め面から1 cm離れる毎に密度は大きく低下している。またその低下の割合は含水比によって異なり、乾燥側と最適含水比付近では大きく、湿潤側では小さくなっている。すなわち含水比が高めの場合はエネルギーが深く伝達され、試料の深さ方向に密度が均一になることを表しているが、逆に試料が乾燥している場合には密度差が大きく、現場における巻出し厚は薄くしなければならないこ

とになる。ただし含水比が高い場合は次に述べるように表面が過荷重を受けて破壊し、密度が上がらない現象も起きるので注意が必要である。

Fig. 5 は突き固めエネルギーがどの深さまで伝達されるかを調べるため、深さ27cmモールドを使用して一層締固めを行った結果の深さと乾燥密度の関係を示している。それによると、深さ方向の密度は、突き固めエネルギーが加えられた面から1層目よりも次の層の密度が最も大きく、それ以下は徐々に小さくなって、深さ22cmでは初期密度である 1.16 g/cm^3 までおちている。すなわち、この層まで突き固めエネルギーが届いていないことになる。また一層目の密度の落込みは過荷重 (Overcompaction) による土層の破壊に起因すると思われる。ちなみに Proctor によるこの試験の締固めエネルギーは、 $E_c = 2.23 \text{ cm} \cdot \text{kg/cm}^2$ であり、モールドの内面は壁面摩擦を減じるためにテフロンシートを巻いてある。

締固めエネルギーが深さ方向に以外に伝わっていないのは、テフロンシートを壁面に巻いたとはいえ、モールド径が10cmと小さいめに摩擦の影響を無くすることができなかったことになるが、それにしても Fig. 2、3 の結果とも併せて考えると、下方への締固め効果は急速に減じられることになり、実際のフィルダムなどの築堤時に設計密度を確保するための巻出し厚さの決定および透水係数の異方性に大きな影響を与えることが考えられる。このことについては後で考察する。

2. 圧密試験による透水係数について

土の透水係数を求める方法はいくつかあるが、圧密試験の結果から透水係数を求める方法は、透水係数が非常に小さい粘性土などに適用される。国頭マージ全般の透水係数は一般には 10^{-7} cm/s オーダーにあり³⁾、変水位透水試験法と圧密試験による方法の何れでもよいことになるが、圧密試験による場合は最大粒径の制限を受けるので、変水位透水試験法によることが多い。

また一般に粘性土の間隙比と透水係数は直線関係にあり、圧密試験によって得られる透水係数は、 $\log t$ 法及び \sqrt{t} 法のいずれの処理による値も実測値とよく一致することを過去に報告した⁴⁾。この圧密試験ではこれらのことを考慮にいれて、土の条件が変化した場合の間隙比と透水係数の関係を実測値と併せて明らかにしようとしている。

Fig. 6 は、同一試料の加水による含水比26% (最適含水比) 調整試料、風乾試料 (含水比9%) および練り返し試料の圧密試験から得られた透水係数と、同時に実測した透水係数を、試料の各間隙比に対して表している。

3つの状態の試料を全体的に比較すると、同じ間隙比に対して風乾試料が最も大きな透水係数を示し、次いで最適含水比試料であり、練り返し試料が最も小さい透水係数を示した。また個々の試料でみると、練り返し土の場合は過去の報告のように圧密係数から算出する値と実測値とはよく一致する。しかし他の試料については両者は一致せず、試料の間隙比が大きいほどその差は大きいが、間隙比の減少と共にその差は小さくなり、すべての試料の値が収束する傾向を示している。ただし間隙比0.6~0.7 (圧密荷重 25.6 kg f/cm^2) でもまだその値には差を残している。

このように同一試料でありながら初期の試料条件の相違によって透水係数は異なった値をとり、また練り返し試料以外は圧密試験による計算値と実測値が一致していない。その理由は、空隙の大きさおよび形状形成の行動単位である団粒の大きさおよび強度と、圧縮応力との関係にあると思われる。すなわ

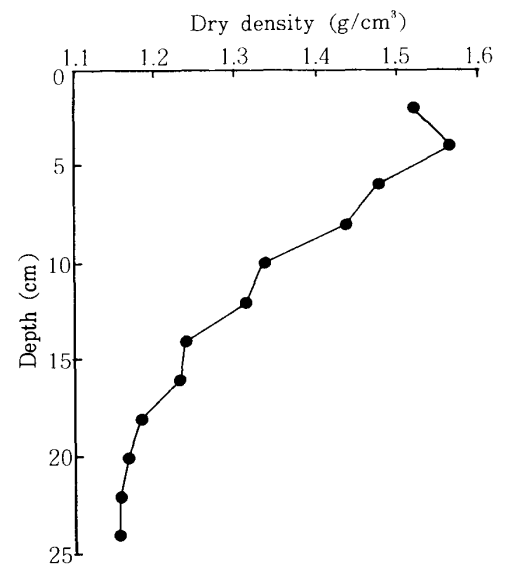


Fig. 5 Distribution of dry density in compacted soil

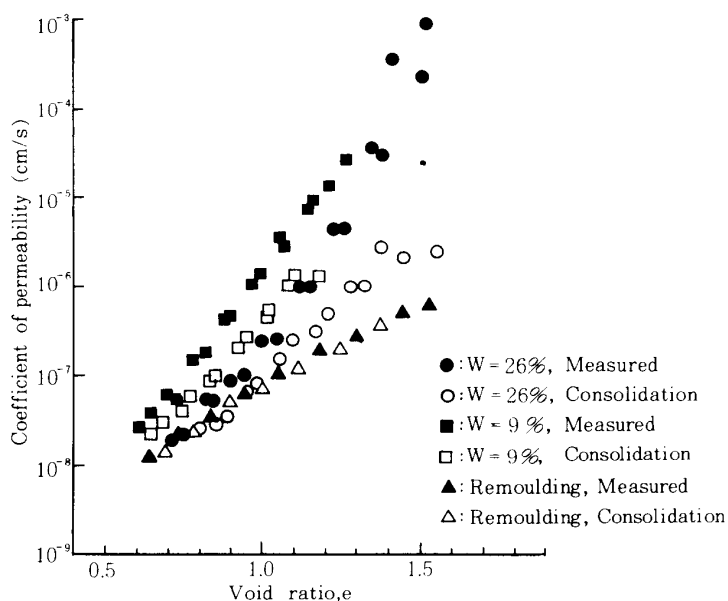


Fig. 6 Coefficient of permeability versus void ratio

ち、どの大きさの圧縮応力で、もとの土構造が破壊されて練り返し土のような単粒構造に近い均質な状態に近づくかということである。この試験結果から、 $W = 26\%$ 調整土は、 $e = 0.8$ 程度 ($p = 12.8 \text{ kg f/cm}^2$)で圧密試験による計算値と実測値がほぼ一致し、また風乾土の場合は $e = 0.6$ ($p = 25.6 \text{ kg f/cm}^2$)でもまだ差を残していて、両者は一致しないことになる。

Tavenasら⁵⁾は、粘土の圧密試験で得られる透水係数と間隙比の関係は直線関係にあることと同時に、一般の土はつぎの関係がよく合うとしている。

$$e - e_0 = C_p \log \frac{K}{K_0}$$

ただし、 e_0 は初期間隙比、 K_0 はその時の透水係数、 C_p は透水性変化指数であり、 $e_0 = 0.3 \sim 3.0$ に対して

$$C_p = 0.5 e_0$$

で与えられるとされている。

この試験の実測値の結果では、練り返し試料が $C_p = 0.6 e_0$ で最も近い値であり、風乾土の場合が $C_p = 0.17 e_0$ 、また最適含水比に調整した試料は $C_p = 0.11 e_0$ で全く異なった値であった。

3. 透水係数の異方性について

締固めた土の透水係数が異方性を持つことについては一般的認識とされているのが現状である。この異方性について近藤は⁶⁾、締固めに伴う層の形成の影響を無視すると、締固め曲線上の乾燥側、湿潤側における土粒子配列の相違にともない、間隙形状、間隙寸法およびその分布など透水に関与する土の要因が変わることから、透水係数の異方性が発現するとしている。しかし、締固めに伴う層の形成、とりわけ締固めエネルギーの下方へ低減によって生ずる、密度の深さ方向への変化は無視できないと思われる。このことは、Fig. 5の深さ方向の密度の変化で明らかにしている。

Fig. 7は、締固めた土の締固め軸方向と、軸に直角方法の透水係数を間隙比の変化に対して表している。測定の結果から、間隙比の変化に対する透水係数は一般に言われるように直線関係にあるが、

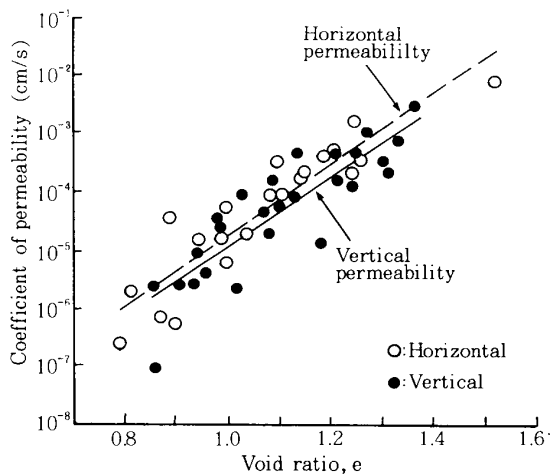


Fig. 7 Anisotropy of permeability of compacted soils.

その値はばらつきが大きい。これは試料の含水比が最適含水比に調整してあるため、団粒構造の発達によって空隙径の分布が一様にならなかったことによると思われる。このバラツキの状態ではあるが、両者を比較してみると、各空隙比に対応する透水係数は K_h の値が K_v に比べてわずかに大きい結果を示している。平均的にその比は $K_h/K_v=1.5-2.0$ 倍であり、この国頭マージについては一般に言われるほどの大きな値は示さなかった。

4. 異方性透水係数の考え方について

透水係数の異方性に関する研究はいろいろあるが、これらと今回の研究との比較してみると、風間⁷⁾は、乱さない沖積粘土の透水係数の異方性は、空隙比の減少に連れて高まり K_h/K_v は3程度におよぶとして、空隙比によってその比が異なることを示している。

また播田⁸⁾は、 K_h/K_v は最適含水比 (W_{opt}) より1%乾燥側に変曲点をもつ曲線であるとし、さらにその値は $W_{opt}+2\sim3\%$ 付近では5以下、 W_{opt} と2%乾燥側の間では10~50倍と最も大きくなると報告している。野口⁹⁾は、 K_h/K_v の値は W_{opt} の乾燥側で大きくなり、湿潤側では小さくなるが、その値は10~20倍であるとしている。

上記の報告に共通することは、締固め曲線に沿った試料であるために各々供試体の乾燥密度が異なること、また1で述べたように締固め土であっても、締固め面から深さ方向に密度が徐々に減少していき、決して一様にはならないが、均一として取り扱っていることである。この研究では、密度を一定としたので含水比だけの影響がでているが、その条件のもとでは K_h/K_v の値は2倍程度であった。既報のように大きな倍率が出るのは締固め曲線の特性からくる密度差が大きく影響したと思われる。

透水係数の異方性の考え方に、締固めた土の層状不均一性の発現を取り入れた近藤⁸⁾、宮川¹⁰⁾の報告がある。宮川らは、土の含水比を変えて締固めると、含水比によって密度の層状不均一性が認められ、この不均一性は最適含水比より乾燥側で顕著に現れる。この層状不均一性の存在が土の異方性の原因であると、近藤と同じ指摘をしている。

自然の堆積層、たとえば河床堆積層などのように水によって運ばれてきた土砂は、粒径の異なる、はっきりとした成層構造を成す場合が一般的であるが、その場合には K_v は堆積層の最も透水係数の小さい細粒子層に支配され、また K_h の方は最も透水係数の大きい粗粒子層に支配されるので K_h の方が大きいことは明白である。しかし、人工的な盛土についての透水係数の異方性の原因には、締固めによる土の空隙形状、空隙分布などの変化も上げられるが、今回の実験の結果から、異方性の最も大きな要因と思われる層状不均一性が存在することがFig. 2、3およびFig. 5ではっきりと現れた。

結 論

締固めた土の透水係数の異方性については、締固め土のミクロな構造論から、層状不均一の発生論までいろいろ論議されている。

この研究では、締固めた試料を深さごとに細かく密度を測定することによって、締固めエネルギーの伝播が深さ方向に急速に低減することを明らかにした。またそのことは透水係数の異方性が、主とし

て成層構造からくる層状不均一性によることを裏付けるものと判断している。

この研究で得られたことをまとめてみると以下ようになる。

1. 土の密度は、旧JISの試験法によるモールドの内部でも大きな不均一を生ずる。不均一性の程度は、最適含水比の乾燥側で大きく、反対に湿潤側では小さく出る傾向にある。

2. 直径10cmのモールドの一層締固めの結果は、壁面摩擦もあるが、締固め荷重の到達は22cm程度の深さにあった。

3. 圧密試験による透水係数は繰り返し試料については、実測値とよく一致するが、風乾土および加水により含水比調整をした試料については大きな差異を生じた。

4. 国頭マージの透水係数の異方性は、 K_v に対して K_h はせいぜい2倍程度であった。しかし成層構造の不均一性を考慮すると、転圧時の巻き出し厚によっては問題になるほど大きくなる可能性がある。

以上の結果を得たが、これらに対して実際に現場で対応できることは、巻き出し厚を薄くすることと、異方性を防ぎ得る施工機械の選定であろうと考える。

最後に、この論文は著者の一人前原光博の琉球大学における修士論文の一部であることを付記しておく。

引用文献

- 1) 農林水産省構造改善局 1981 土地改良計画設計基準 設計ダム
- 2) 吉川博恭 1981 九州・沖縄の地下水 九州大学出版会
- 3) 宮城調勝 1989 国頭マージの締固め特性と土質改良 九州・沖縄のローカルソイルの特性と土質改良 文部省科学研究費報告書
- 4) 近藤 武、宮城調勝 1970 透水係数に関する一考察 三重大農学部 39:103~116
- 5) Tavenas F., Jean P, Leblond P. and Leroueil S. 1983 The permeability of natural soft clays Part II Permeability characteristics Canadian Geotechnical Journal 20:645-660
- 6) 近藤 武 1984 締固め土の透水係数の異方性について 土と基礎 132(11) 55~58
- 7) 風間秀彦 1983 粘土の構造を考慮した透水係数について 土質工学研究発表会講演集 18:185~186
- 8) 播田一雄、柏木 順、吉田亮二 1983 ロックフィルダムのコア材料の透水性の異方性に関する研究 土質工学研究発表会講演集 18:187~188
- 9) 野口俊郎、松井邦人、小林利雄、山本康博 1983 転圧して締固められる土構造物の透水試験について 土質工学研究発表会講演集 18:189~190
- 10) 宮川孝仁、米崎文雄 1983 土の締め固め特性と透水係数の異方性について 土質工学研究発表会講演集 21:1763~1767