

締固めたクロボク・シラス混合土の工学的性質

三輪晃一・難波直彦・若松千秋

(農地工学研究室)

昭和63年 8月10日 受理

Engineering Properties of Compacted KUROBOKU-SHIRASU Mixtures

Koichi MIWA, Naohiko NANBA and Chiaki WAKAMATSU

(Laboratory of Farm Land Engineering)

緒 言

クロボクは高圧縮性であり、施工性も悪く土工上は問題の多い土である。クロボクおよび類似のローム質火山灰土の処理法として、道路用盛土ではシラスとのサンドイッチ工法が実施されてきた⁵⁾。またこれらの粘性土の施工性の改良にはシラスを混入することがしばしば行われている。

最近、現場ではコア用土にクロボクとシラスを用いた混合土の使用が検討された。この場合はその圧縮指数が設計基準値より大きいことを理由に用土として不適当と判断された。しかしながらシラス地帯ではダム用土の確保が困難になってきている。そこで均質な土質材料としての混合土を再検討するために、ここではシラス混入率と混合土の透水性、圧密諸係数および圧縮強度との関係を整理するとともに、過剰締固め現象についても考察する。

実 験 方 法

混合材料には含水比 107% のクロボクと 10% の

シラスの 2 mm フルイ通過試料を用意した。混合割合は両試料の湿潤質量比で与え、そのシラス混入率は両試料の含水比からそれぞれの乾燥質量を求め、(1) 式で計算した。

$$M = \frac{m_{s2}}{m_{s1} + m_{s2}} \times 100 \quad (\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

M: シラス混入率, m_{s1} : クロボクの乾燥質量, m_{s2} : シラスの乾燥質量

シラス混入率は Table 1 に与えたように 7 段階とした。

透水および圧密試験用の供試体は、直径 10cm、高さ 12.5cm のモールドを用いて 25 回/層 (3 層) で締固めた。この標準締固めエネルギー $E_c = 5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^3$ を基準にして、透水試験用の供試体にはその 0.5 および 1.5 倍の締固めエネルギーも採用した。また圧密試験用の供試体は標準締固め供試体を直径 6 cm、高さ 2 cm に成形した。一軸圧縮試験には、直径 5cm、高さ 12.5 cm のモールドで均質な締固め供試体を得るために、標準エネルギーに等しい 8 回/層 (8 層) を基準とした。過剰締固め状態にある供試体を用意するた

Table 1 Physical properties of mixed soils

Ratio of wet weight KUROBOKU : SHIRASU		Mixing ratio M (%)	Specific gravity G_s	Water content w (%)	Organic matter content h_c (%)
1	: 0	0.0	2.385	107.3	32.2
5	: 1	24.2	2.396	81.9	22.6
2	: 1	44.4	2.401	61.4	15.6
1	: 1	62.5	2.410	43.1	10.4
1	: 2	76.2	2.419	29.9	6.3
1	: 3	82.7	2.428	20.3	2.9
0	: 1	100.0	2.441	10.0	0.5

るためには、一層当りの締固め回数のみを変えて標準締固めの12倍までのエネルギーを加えた。

実験結果と考察

1. 透水性

透水係数は供試体の間隙比や飽和度、試験時の水頭差や水温などの影響を受ける。粒度組成の異なる混合土の透水試験ではまずフィルタの選択が問題になる。供試体の透水係数 k_s とフィルタの透水係数 k_f の間に

$$k_f = m k_s \quad \text{----- (2)}$$

なる関係を用いると、土質試験法¹⁾では $m \geq 10$ と規定している。 $m=10$ は透水係数の温度補正における14℃から16℃の温度変化に相当する²⁾。 Fig. 1 に示す簡単な透水装置を用いて(2)式の m を実験的に求めた。 Fig. 1 の記号を用いると

$$h = 2 h_f + h_s, \quad L_f = n L_s \quad \text{----- (3)}$$

また連続の式から

$$k_f \frac{h_f}{L_f} = k_s \frac{h_s}{L_s} \quad \text{----- (4)}$$

(2)、(3) および (4) 式から m の値は

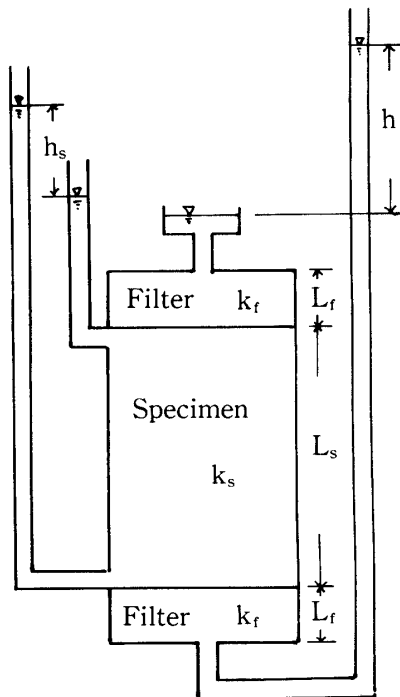


Fig. 1 Apparatus for determining coefficient, $m = k_f/k_s$.

$$m = \frac{2nh_s}{h - h_s} \quad \text{----- (5)}$$

フィルタと供試体の厚さを測って n を求め、また試験時の水頭差 $h=1$ m のときの h_s を実測して(5)式から求めた m の値は Fig. 2 に示した。 Fig. 2 よりポーラスストーン (#50) の場合はクロボク供試体のみ $m > 10$ であるが、粒径が4.76mmと2 mmの間にある礫をフィルタとした場合は混入率の全範囲で $m > 10$ が得られた。 供試体の間隙比は3.04~1.23の範囲にあり、 Table. 2 から締固め供試体の間隙比の方が小さい。 この試験結果から透水条件は h を1 m 以下、フィルタ材には礫 (粒径4.76~2.0 mm) を用いることにした。

Table 2 によると標準締固めの供試体の透水係数は混入率62%までほぼ一定であり、 5×10^{-6} cm/sec のオーダーである。 また混入率が62%以上になると透水係数は 10^{-5} cm/sec から 10^{-4} cm/sec に増加する。 この傾向は1.5倍のエネルギーで締固めても変わらない。 しかし締固めエネルギーを0.5倍に低下させると透水性の漸増傾向が強くなり、透水係数は混入率の増加とともに 5×10^{-5} cm/sec から 10^{-4} cm/sec に変化する。

団粒に起因するクロボクのもつ高い間隙比のために、混合土は間隙比が小さいほど透水係数は大きくなっている。このような混合土の透水性は Fig. 3 に示すように粒度組成の影響を受ける。 Fig. 3 は標準

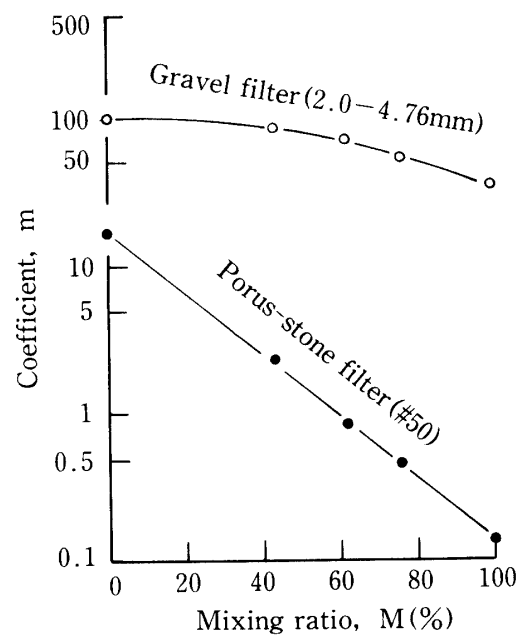


Fig. 2 Relations between coefficient, m and mixing ratio.

Table 2 Results of permeability tests

Mixing ratio M(%)	Ratio of compaction energy E _c (%)	Dry density ρ _d (t/m ³)	Water content w(%)	Void ratio e	Degree of saturation S _r (%)	Coefficient of permeability k(cm/sec)
0.0	50	0.73	93.0	2.27	97	4.8×10 ⁻⁶
	100	0.70	99.1	2.37	99	3.2×10 ⁻⁶
	150	0.64	110.2	2.37	96	3.1×10 ⁻⁶
24.2	50	0.83	74.6	1.88	95	7.2×10 ⁻⁶
	100	0.83	75.4	1.89	94	4.3×10 ⁻⁶
	150	0.79	79.0	2.01	95	4.7×10 ⁻⁶
44.4	50	0.92	66.6	1.60	99	1.2×10 ⁻⁵
	100	0.95	59.3	1.54	93	3.4×10 ⁻⁶
	150	0.95	61.0	1.54	96	3.4×10 ⁻⁶
62.5	50	1.02	52.8	1.36	94	5.6×10 ⁻⁵
	100	1.07	50.8	1.26	97	6.9×10 ⁻⁶
	150	1.09	46.3	1.22	92	6.2×10 ⁻⁶
76.2	50	1.07	50.8	1.26	97	1.8×10 ⁻⁴
	100	1.11	46.4	1.18	95	2.8×10 ⁻⁵
	150	1.18	42.9	1.05	98	2.0×10 ⁻⁵
82.7	50	1.10	47.7	1.20	96	3.4×10 ⁻⁴
	100	1.15	53.6	1.11	99	9.4×10 ⁻⁵
	150	1.19	41.3	1.04	96	5.0×10 ⁻⁵
100.0	50	1.16	42.1	1.11	93	2.6×10 ⁻⁴
	100	1.18	43.6	1.08	98	1.2×10 ⁻⁴
	150	1.26	35.8	0.94	93	1.1×10 ⁻⁴

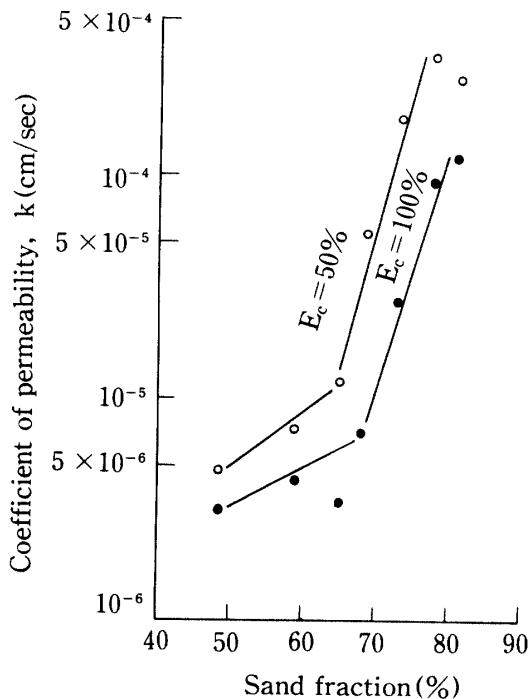


Fig. 3 Changes of coefficient of permeability with increasing sand fraction.

エネルギーとその½で締め固めた供試体の透水係数を砂分の含有量に対して図示した。この結果から砂分65%以下の混合土は10⁻⁶ cm/secの透水係数をもつ難透水性材料であり、砂分が65%以上になると混合土は10⁻⁴ cm/secの透水性材料に変わる。この変曲点は混入率62%にほぼ相当している。

2. 圧密係数

標準圧密試験から得られた混合土の e~logP 曲線が Fig. 4 である。供試体は圧密箱で24時間吸水膨脹させたあと、そのまま載荷した。載荷時間は24時間である。非乾燥状態で締め固めた供試体の吸水膨脹量は混入率76%まで0.32 mmから0.16 mmであった。この膨脹量は風乾状態で締め固めたクロボクの0.72mmに比較して小さい。また混入率が76%以上の供試体の場合はほとんど膨脹を記録していない。

Fig. 4 から求めた圧密降伏応力は圧密圧力0.8 kgf/cm²と1.4 kgf/cm²の間にあり、混入率に関係なく0.9 kgf/cm²と1.4 kgf/cm²の間に集中している。このため圧縮指数 C_c は圧密圧力1.6 kgf/cm²から12.8 kgf/cm²の平均勾配として求め、Fig. 5 に図示した。C_cの値はクロボクで0.9、混入率62%で0.2、

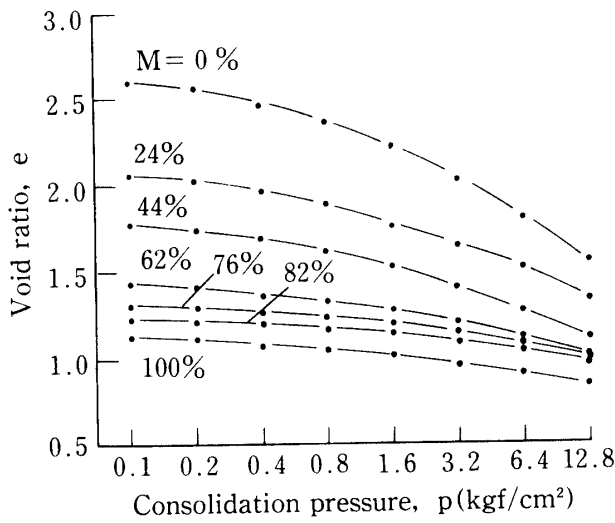


Fig. 4 e - log p curves.

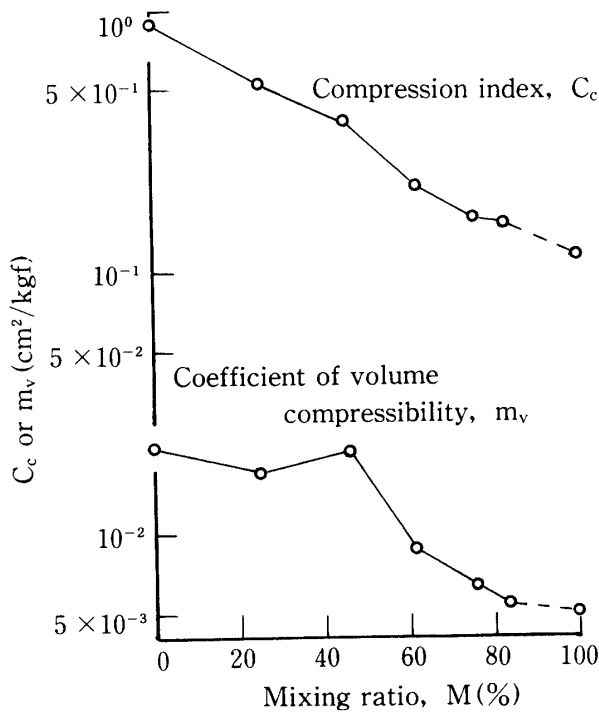


Fig. 5 Changes of C_c and m_v with mixing ratio.

83%で0.1である。設計基準によるとコア用土の C_c は0.2以下であり、この基準値は混入率62%以上で得られることになる。また体積圧縮係数 m_v は混入率44%までほぼ一定で $m_v = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ の値を示し、それ以上の混入率では減少してシラスの $m_v = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ になる。 C_c および m_v から判断すれば、混合土は混入率が62%以上になると圧縮すなわち沈下量が小さくなる。

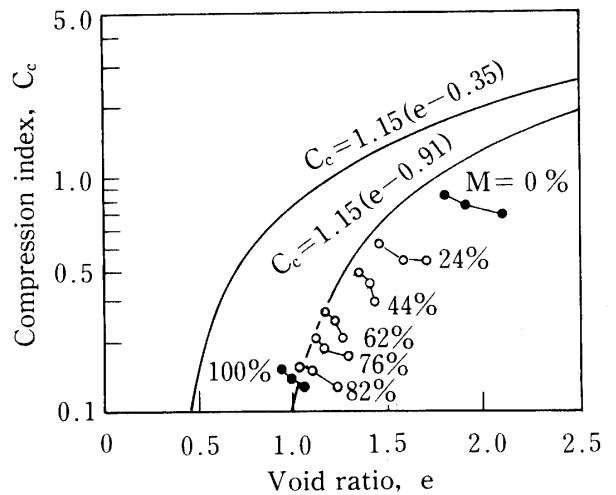


Fig. 6 Relations between compression index and void ratio at each consolidation stage.

透水試験の結果にも反映された混合土の粒度組成が圧密特性にも影響していると思われる。西田³⁾は土粒子の形状を球径と仮定してその堆積様式と C_c の関係の求めている。すなわち混合土の体積減少は間隙の減少によるから、 $e \sim \log P$ 曲線上の任意の点の間隙比を e 、圧力の変化を加える前の間隙比を e_1 とすると

$$C_c = 1.15 (e_1 - e) \dots \dots \dots (6)$$

が得られる。そして六方系充填の場合は $e=0.35$ であり、正方系充填では $e=0.91$ である。(6)式の関係性を圧密圧力の各段階ごとに図示したFig.6によると、圧密圧力が大きくなるにつれて混合土は正方系充填状態に移行する傾向を示している。とくに混入率が62%以上になると圧密圧力12.8 kgf/cm²では正方系充填の線上に位置し、シラスではこの線をわずかに越えた位置にある。この関係から混入率62%以上の混合土における骨格構造がシラスで構成され、その間隙部分はクロボクで占められる構造様式が推定できる。

Fig.7は混合土における骨格構造の変化を示しており、混入率44%まではクロボクの占める割合が多く、62%以上ではシラスが優勢になることが明らかである。混入率62%は団粒とシラス粒子が骨格を形成しており、それ以下の混入率では団粒が骨格を作り、それ以上の混入率で混合土はシラス粒子による骨格構造になる。Fig.7は圧密圧力の作用方向を与える断面(垂直断面)である。

しかしながら \sqrt{t} 法による t_{90} の決定が非常に困

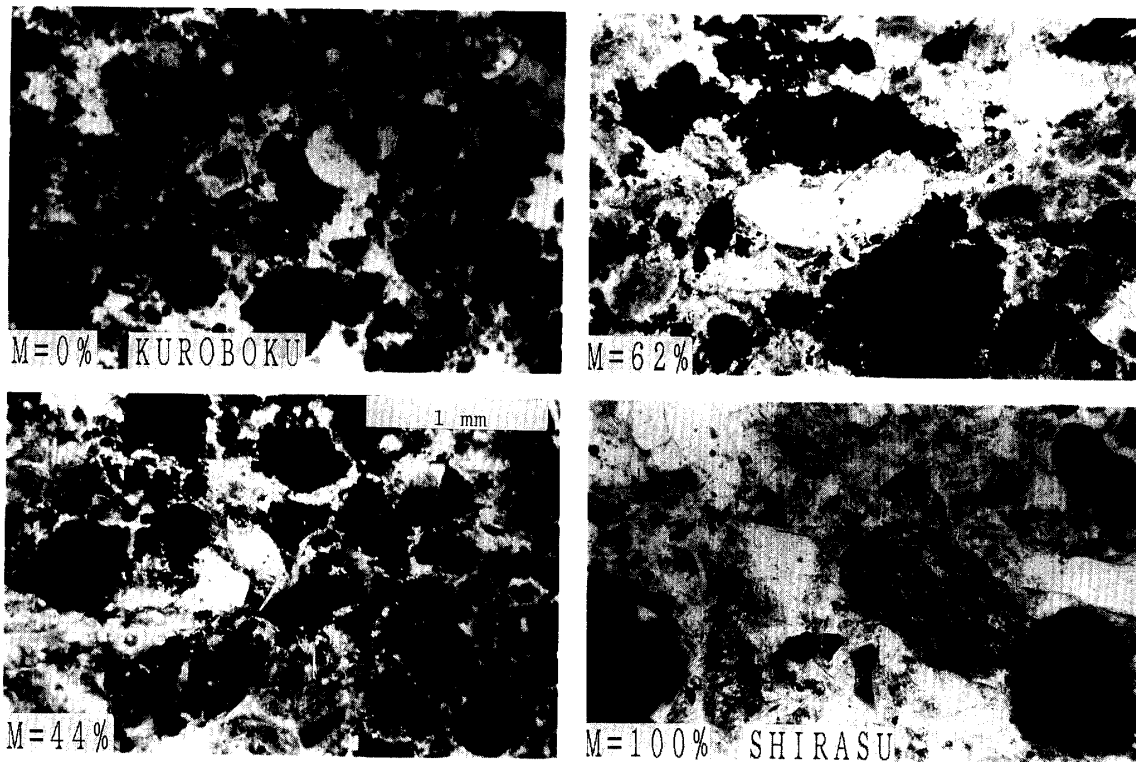


Fig. 7 Changes of soil fabrics with mixing ratio(M).

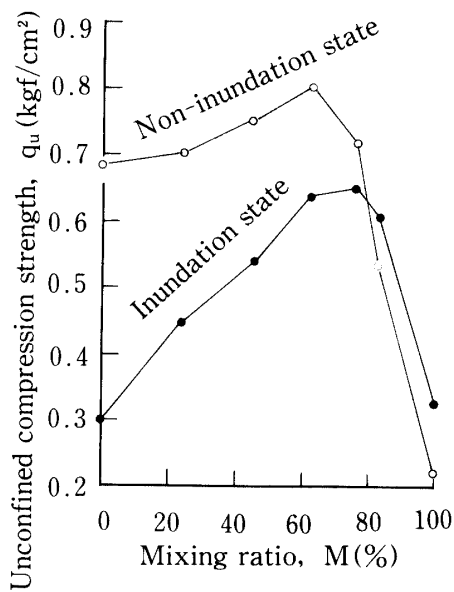


Fig. 8 Variations of unconfined compression strength with mixing ratio.

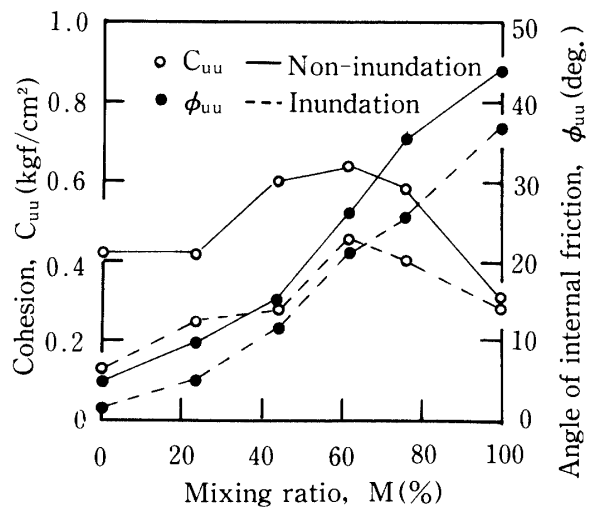


Fig. 9 Relations between C_{uu} , ϕ_{uu} and mixing ratio.

難であった。その理由として混合土の一次圧密が数秒で終了する可能性があること、シラスの混入量が増えると側面摩擦の影響が大きくなることなどが考えられる。このため混合土の圧密速さについては検討

すべき問題が残されている。

3. 圧縮強度と過剰締固め

Fig. 8 は標準締固め供試体の一軸圧縮強度 q_u と混入率の関係である。この場合の供試体の条件は水浸および非水浸であり、その物理的性質を Table 3 に与えた。

Table 3 Physical properties of specimens for unconfined compression test

Mixing ratio M(%)	Inundation specimen			Non-undation specimen		
	Water content w(%)	Dry density ρ_d (t/m ³)	Degree of saturation S _r (%)	Water content w(%)	Dry density ρ_d (t/m ³)	Degree of saturation S _r (%)
0.0	96.78	0.694	95.0	87.96	0.719	90.5
24.2	82.26	0.784	95.9	69.89	0.825	87.7
44.4	60.99	0.966	98.4	58.75	0.915	86.3
62.5	53.55	1.018	92.5	48.06	1.015	83.7
76.2	45.62	1.122	94.0	35.75	1.079	68.9
82.7	37.66	1.192	87.6	30.48	1.096	60.8
100.0	36.05	1.214	86.9	19.06	1.132	40.2

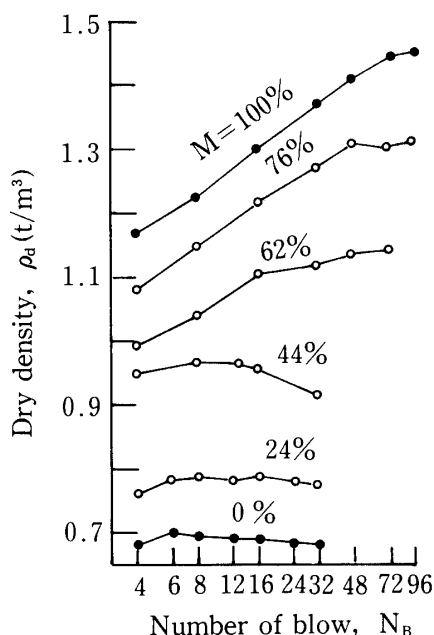
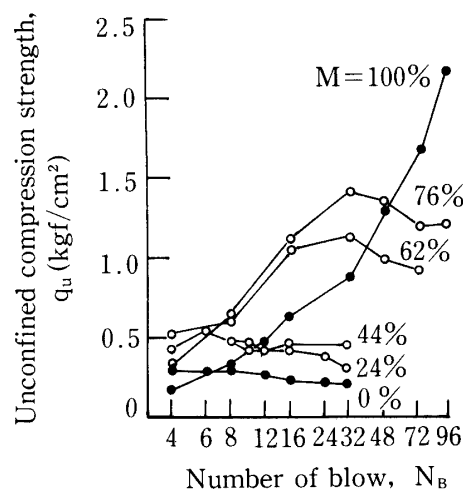


Fig. 10 Variation of dry density with number of blow.

水浸供試体の q_u と混入率の関係は飽和度 97% のクロボクの $q_u = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ から混入率が 76% の混合土 (飽和度 94%) の $q_u = 0.66 \text{ kgf/cm}^2$ まで圧縮強度が増大し, そのあと飽和度 87% のシラスの $q_u = 0.33 \text{ kgf/cm}^2$ まで減少する。これに対して非水浸供試体の場合は, 飽和度 90% のクロボクの $q_u = 0.68 \text{ kgf/cm}^2$ から混入率 62% の混合土 (飽和度 84%) の $q_u = 0.81 \text{ kgf/cm}^2$ までほぼ一定の圧縮強度を示し, そのあと飽和度 40% のシラスの $q_u = 0.22 \text{ kgf/cm}^2$ まで急激に減少する。水浸, 非水浸条件による圧縮強度の差はクロボクで最も大きく, シラスの混入量が増加すると強度差は小さくなる。このよ

Fig. 11 Variations of unconfined compression strength (q_u).

うな傾向はクロボクの吸水による膨脹の影響である。非圧密非排水条件で求めた粘着力 C_{uu} , 内部摩擦角 ϕ_{uu} と混入率の関係は, Fig. 9 に示すように C_{uu} は混入率 62% で最大になり, ϕ_{uu} は混入率の増加とともに大きくなる。Fig. 8 と Fig. 9 を比較すると水浸供試体の場合は混入率 44% まで $q_u = C_{uu}/2$ がなりたち, 非水浸供試体では ϕ_{uu} の影響がある。また混入率 76% 以上の混合土の圧縮強度は水浸, 非水浸に関係なく ϕ_{uu} の影響を強く受けることになる。

Fig. 10 と Fig. 11 は, 非水浸供試体の乾燥密度および一軸圧縮強度と一層当りの締固めの回数関係である。混合試料には含水比 103% のクロボクと 20% のシラスを非乾燥状態で用いたので, 供試体の初期飽和度は比較的高い状態にあり, 締固め回数が増えるほど飽和度は高くなる。Fig. 10, 11 によると混入率

44%までの混合土は、締固め回数が増えると乾燥密度および圧縮強度が低下して、いわゆる過剰締固めの現象がみられる。さらにシラスの混入量が増加すると締固め回数の増加によって乾燥密度、圧縮強度の両方とも増大する。しかし過度の締固めでは強度低下を生じ、この状態では飽和度が100%に近づき、乾燥密度も増えなくなる。シラスの場合、この現象は発生していない。このような混合土の性質から過剰締固めは混入率44%までの混合土で発生しやすく、シラスの混入量が増えると起りにくいことがわかる。

要 約

砂分が65~70%になるようにシラスを混入すれば、締固めた混合土は透水係数 5×10^{-6} cm²/sec、一軸圧縮強度0.65 kgf/cm²、粘着力(C_{uu}) 0.4 kgf/cm²、内部摩擦角(ϕ_{uu}) 25°の均質な不透水性材料に

なる。その圧縮指数は0.2以下であり、過剰締固め現象も起りにくい。この場合の混合方法はクロボクとスラスを湿潤質量比1:1で均一に混合する。さらにシラスの混入量を増加すれば所定の透水係数をもつ透水性材料が得られる。

謝辞 本研究には文部省科学研究費(一般研究C)の補助を受けた。また実験の一部は専攻生の卒業論文として実施した。付記して謝意を表す。

文 献

- 1) 土質工学会：土質試験法, p. 339 (1979)
- 2) 河野伊一郎・西垣誠：室内透水試験法に関する2, 3の考察。土質論集, 22, 181--190 (1982)
- 3) Nishida, Y. : A brief note on compression of soil. ASCE, 82 (SM3), 1-14 (1956)
- 4) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準(設計タム)。p. 152, 農業土木学会 (1981)
- 5) 山内豊聡：九州の軟弱な火山灰土における舗装の設計施工に関する土質工学的諸問題(1)。道路, 527-535 (1965)

Summary

In order to determine the mixing ratio most suitable for the impervious material, geotechnical properties of KUROBOKU and SHIRASU mixtures were examined under various ratios. As a result of it, the mixture compacted at the mixing ratio of about 60 percent was decided to be the most suitable one, because of its low compressibility as compared with KUROBOKU.

This material mixed up as homogeneously as possible is composed of the sand fraction of 65 percent, and is to be considered to be the first step at which SHIRASU begins to form the skeleton in the soil structure of compacted mixture.

On the other hand, in the case in which the ratio is greater than 60 percent, the mixture turns out to be a pervious material having properties similar to SHIRASU.