

火成岩系風化砂質土の工学的性質について

ふく だ
福 田まもる
護*

1. ま え が き

ここでいう火成岩系風化砂質土(以後風化砂質土と略す)とは、花コウ岩・セン緑岩および流紋岩系・安山岩系岩石の風化残積土のことである。風化砂質土と題しているように、 74μ 以下の細粒子を20%以上含むものはここでは取り扱わない。なかには、シルト以下の細粒分が20%以上のものもあるが比較的少なく、大部分のものは日本統一分類法によるとシルト混じり砂(S-M)ないしは粘土混じり砂(S-C)に分類される。風化砂質土と一般砂(運積砂)の両者の工学的性質には、分級作用の有無に由来する差異があり、風化砂質土の最も大きな特性は粒度分布と鉱物組成の変化が大きいことで、このことからたとえば、粗粒土であってもある場合には粘性土のような挙動を示す。

これら風化砂質土は、マサ土(花コウ岩風化土)をはじめとして全国的に広く分布し、特に関西・中国地域に多くみられる。道路・宅地造成などの建設工事が丘陵・山岳部へと広がるにつれ、この種の土の問題が種々提起され、基礎的な研究成果の利用による解決策がまたれている。そこで、ここでは主として、この種の土による盛土造成地盤の問題を根底とし、乱された土の基本的性質および力学的性質について述べる。なお、上述の母岩のうち流紋岩系・安山岩系岩石にはその生成環境から、火山灰質の鉱物を含有するものもあるので、本題を火成岩風化砂質土とせず、火成岩系風化砂質土とした。

2. 土の基本的性質

2.1 自然含水比

風化砂質土の地山における自然含水比 w_n は、風化の程度、地形、深さ、植生および水理・気象条件などによって異なろうが、代表的な測定例を表-1に示す。この種の土の w_n の大小は、コンシステンシーに関連があり、通常、後述の流動限界 w_{fl} が小さいほど w_n も小さい。 w_n の測定結果では、マサ土では5~11%、セン緑岩・流紋岩系風化砂質土では12~18%、そして安山岩系風化砂質土では15~25%のことが多い。

2.2 比重, pH および強熱減量

代表的な試験結果を表-1に示す。風化砂質土の場合、特にマサ土および流紋岩系風化砂質土では、一般砂に比較すると、母岩中の比重の異なる鉱物粒子の結合が風化作用

表-1 自然含水比, 鉱物, 比重, pH の試験結果例

風化土名	花コウ岩 風化砂質土	セン緑岩 風化砂質土	流紋岩系 風化砂質土	安山岩系 風化砂質土
試料名	生駒 B	花屋敷 A	市之瀬 A	二上 A
細粒分の 鉱物	石英・長石・ 雲母・カオリ ナイト	長石・カオリ ナイト・イラ イト・ハロイ サイト	石英・長石・ カオリナイト ・ハロイサイ ト・モンモリ ロナイト	カオリナイト ・ハロイサイ ト・モンモリ ロナイト
自然含水比 (%)	9.8	16.8	17.8	24.0
比重 G_s	2.65	2.67	2.65	2.68
pH	5.4	4.4	5.3	5.7
強熱減量	2.98	6.17	5.03	4.12

によってとかれたまま残存しているので、一粒一粒の粒子比重に差異があろう。しかし、大部分の風化砂質土では、粒子群の平均比重が2.60~2.70にあり、例にも示しているように通常の計算には、 $G_s=2.65$ を採用してもほとんど誤差はないものと思われる。また、浸出液のpHは4~6で酸性、そして土質工学会案による強熱減量は7.0%以下でこのうちマサ土が最も低い。

2.3 粒度分布および分類

風化砂質土の生成特性上、単一な土粒子とそれらが団粒化したものとの区別がつけにくいものが多く、さらにそれらは破碎されやすいため、試料の調整方法によって粒度試験の結果が変わってくる。そこで筆者は、気乾試料約500gをビニール袋に入れ、1.5mの高さからコンクリートの床面へ30回落下させた状態の粒度をその基準とした¹⁾。表-2のように各地から採取した各種の土の粒度試験結果を図-1に示す。図のようにこの種の土は、粗粒なものから細粒なものまで広い粒度分布を示し、均等係数 U_e の値は

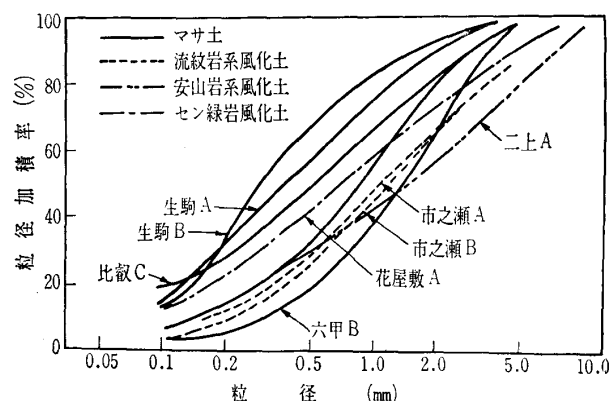


図-1 粒径加積曲線

*大阪工業大学助教授 土木工学教室

表-2 試料採取地一覧表

採取地	試料名	風化土名
大東市竜間	生駒A, B	花コウ岩風化砂質土
神戸市東灘区渦ヶ森	六甲B	同上
大津市田ノ谷峠	比エイA, B, C	同上
三田市市之瀬	市之瀬A, B	流紋岩系風化砂質土
川西市花屋敷	花屋敷A, B	セン緑岩系風化砂質土
奈良県当麻町	二上A	安山岩系風化砂質土

一般砂に比べ大である。風化砂質土を分類すると大部分のものは、日本統一分類法では、S-MないしS-C、三角座標分類法によると砂、そして改訂PR法ではA-1～A-4となる。

2.4 コンシステンシー

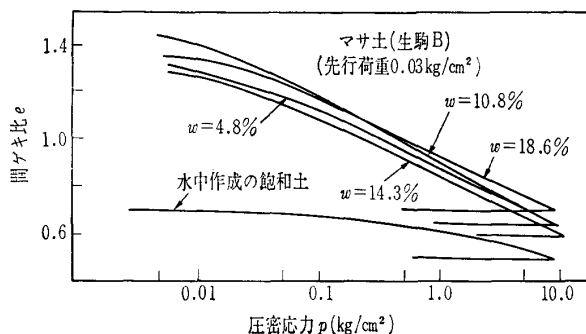
コンシステンシー特性は、風化砂質土の工学的性質に大きく関連しているものと考えられる。しかしこの種の土の場合、従来の JIS A 1205・1206 の試験法による液性限界や塑性限界の測定法では必ずしも適当でなく、また適用できないことが多い。そこで筆者は、コンクリート用スランプ試験器の利用による流動限界 w_{fl} を採用することにした¹⁾。表-3 に代表的な試験結果を示す (w_{fl} (2.0mm以下)は2.0mm以上の粒子を除去したもの)。この種の土の w_{fl} は、鉱物組成、特に二次鉱物の質と量に影響され、一般土のように必ずしも粒度に顕著な影響を受けない。このことは、風化砂質土の特徴ともいえる。

3. 圧縮および締固め特性

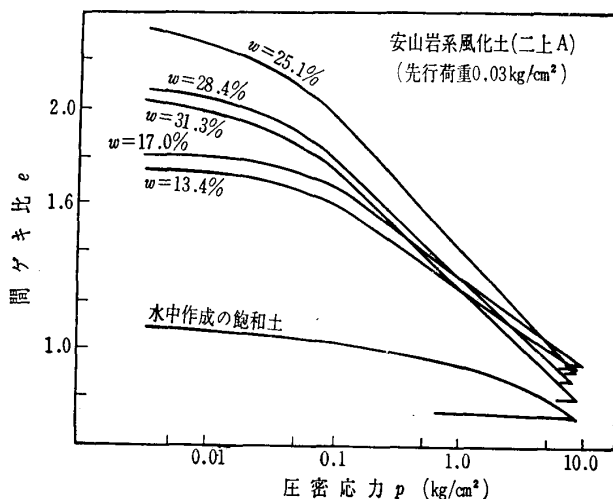
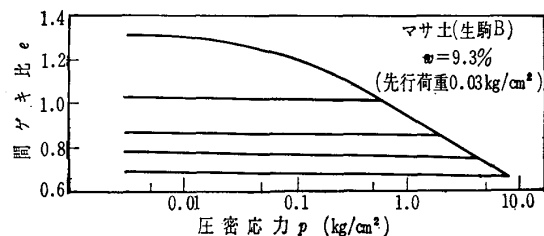
3.1 圧縮特性

風化砂質土は造成地盤の盛土材料として広く利用されているが、载荷による圧縮沈下、あるいは飽水・浸水による自重沈下を生ずることが経験的に知られている。以下、このような沈下に関する基礎的実験の結果について述べる。

実験方法は、落下調整され2.0mm以上の粒子を除いた試料を、直径10cm、高さ4cmのモールドに入れ、加圧板を介して段階的に载荷した。浸水実験の場合には、モールド下部のポーラストンを通じて载荷状態の供試土へ給水

図-2 マサ土の $e-\log p$ 曲線

(注水機にて)し変位を測定した。モールドの周辺抵抗力は、供試土の入ったモールドを固定し、下部に検力計を取

図-3 安山岩系風化土の $e-\log p$ 曲線図-4 マサ土の繰返し $e-\log p$ 線

りつけ上部の载荷重と検力計から得られる力の差から求め、解析にはその修正荷重を用いた。筆者は、乱された不飽和土の圧縮性を考えるに際し、飽和粘土と同じように、応力履歴条件から正規圧密土と過圧密土に分けることにした〔注〕。(本研究の試験範囲では、不飽和供試体からの排水はなく排気のみである)。

3.1.1 圧縮性²⁾

a) 不飽和土：試験結果例として、マサ土および安山岩系風化砂質土の $e-\log p$ 線を図-2, 3に、マサ土の繰返し圧縮試験結果例を図-4に示す。各種の風化砂質土にわたる多数の実験結果から、例示しているように $e-\log p$ 線は正規圧密状態のもとで直線性を呈することがわかり、圧縮指数 C_c が得られうる。初期含水比 w_0 と C_c の関係を図-5にまとめて示す。この図をみると、マサ土の C_c は小さく、 w_0 が変化してもその値はほとんど変わらない。これに対し、他3種の土の C_c は、 w_0 の変化により大きく変わり、 w_0 が大なるほど C_c も大となる。マサ土の上記圧縮特性は、主要含有鉱物が粒子表面のなめらかな石英・長石で、しかも粘土鉱物も活性の低い少量のカオリナイトのため、試料全体として粘性に乏しいことに由来するものと考えられる。一方、他3種の土の上記圧縮特性は、試料中に石英分が乏しいことに加え、比較的活性の高い粘土

〔注〕 この場合、筆者は過去「正規圧縮」「過圧縮」という言葉で表現してきたが、諸賢によれば広い意味から「圧密」の用語も適用できうとの見解があり、以後「正規圧密」「過圧密」と呼ぶことにする。

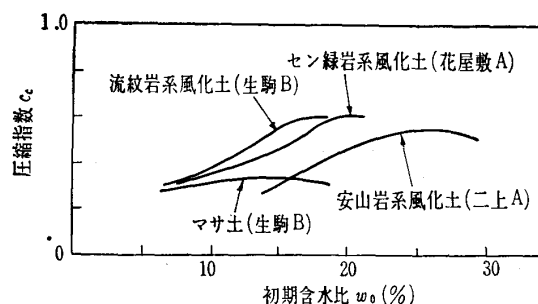
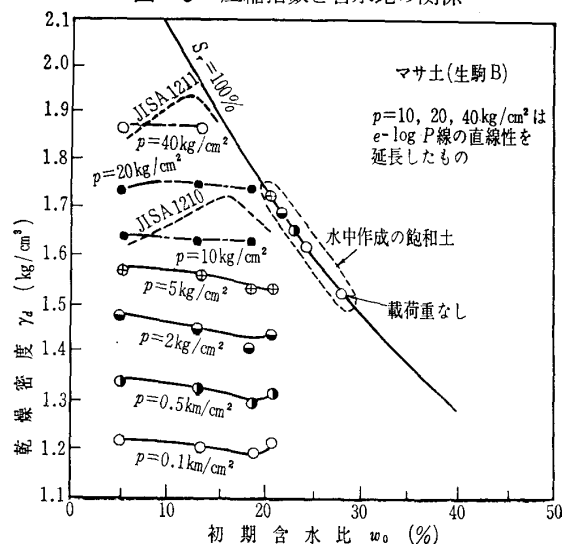


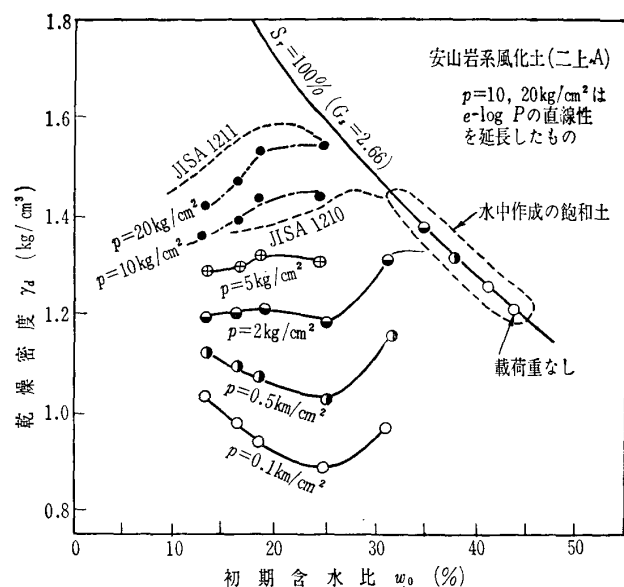
図-5 圧縮指数と含水比の関係

図-6 マサ土の $w_0 \sim \gamma_d$ 曲線 (静的荷重による)

鉱物を含み、マサ土に比べ試料全体として粘性に富むことから、わずかな含水量の変化でも土の構造が変わることによるものと考えられる。

つぎに、荷重 p をパラメーターとした $w_0 \sim \gamma_d$ 線を図-6, 7 に例示する。マサ土の乾燥密度 γ_d は、図-6 のようにほとんど w_0 に関係しない。これに対し、他3種の土の γ_d は、 w_0 の変化により変わる。安山岩系風化砂質土の $w_0 \sim \gamma_d$ 線は、図-7 のように約 2 kg/cm^2 以下の荷重では下方に凸状、約 5 kg/cm^2 以上になると逆に上方へ凸状の傾向を示し始める。同様に、セン緑岩・流紋岩系風化砂質土のそれも、約 0.5 kg/cm^2 以下の荷重では下方に凸状、約 2 kg/cm^2 以上になると逆に上方へ凸状の傾向を示した。上述のことから実際の転圧時の問題について考えてみると (もちろん、転圧機による締固めと静的荷重で拘束状態の締固め機構には差異はあるが)、マサ土の場合、 w_0 にそれほど留意する必要もなさそうである。が、他方、セン緑岩・流紋岩系・安山岩系風化砂質土の $w_0 \sim \gamma_d$ 線は、前述のとおり、圧縮荷重の大小によって線形が変わる。特に荷重の小さい場合は、 $w_0 \sim \gamma_d$ 線が下方へ凸状となり、しかも JIS A 1210 による最適含水比 w_{opt} の近傍で最小の γ_d となるものもあるので、転圧荷重には十分な配慮を必要としよう。このことは、動的および静的な締固め機構の問題として、今後さらに検討を要するところである。

b) 水中で作成した飽和土：風化砂質土を埋立材料として利用するような場合を想定して、圧密リング(カラー付)

図-7 安山岩系風化砂質土の $w_0 \sim \gamma_d$ 曲線 (静的荷重による)

に水を満たし試料を静かに投入して供試体を作成した。試験結果例を図-2, 3中に示す。図のように、各風化砂質土とも供試体の作成当初から、不飽和供試体に比べ間デギ比 e は小さい。そのため、荷重を増加しても変位は小さく、上方へ凸状の $e \sim \log p$ 曲線となる。この C_c と荷重の関係を表-4に示す。上述の理由として、粒子間のメニスカスが水中で消失することに加え、粘土鉱物も十分な水の供給を受けているので粘着力も小さく、土の構造が安定化していることによるものと考えられる。このことは、いわゆる土の水締め効果を例証しているものであろう。

3.1.2 浸水による変形性³⁾

正規圧密条件における試験結果例として、マサ土および安山岩系風化砂質土の浸水による圧縮ヒズミ $\varepsilon_{v(sub)}$ を図-8, 9に示す。この $\varepsilon_{v(sub)}$ は w_0 と荷重によって決まる。マサ土の $\varepsilon_{v(sub)}$ は、 $w \div 10\%$ で最も大となり、 $p = 5 \text{ kg/cm}^2$ 以上、また実験結果の解析から乾燥密度が 1.5 g/cm^3 以上では浸水による圧縮ヒズミを生じなかった。一方、安山岩系風化砂質土の $\varepsilon_{v(sub)}$ は、 $w = 22.8\%$ で最も大で、 p が 6 kg/cm^2 以上、 γ_d が、 1.5 g/cm^3 以上でそれを生じなかった。しかし低含水比になると図-9中のように特異なヒズミ性状を示す。同様に、セン緑岩風化砂質

表-3 流動限界の試験結果例

母 岩 名	試 料 名	流 動 限 界	
		w_{fl}	w_{fl} (20mm 以下)
花 コ ウ 岩	生 駒 B	27.8*1	24.7*2
セ ン 緑 岩	花 屋 敷 A	28.7	33.9
流 紋 岩 (系)	市 之 瀬 A	29.3	33.0
安 山 岩 (系)	二 上 A	35.8	37.5

*1 と *2 は採取地に若干のずれがある

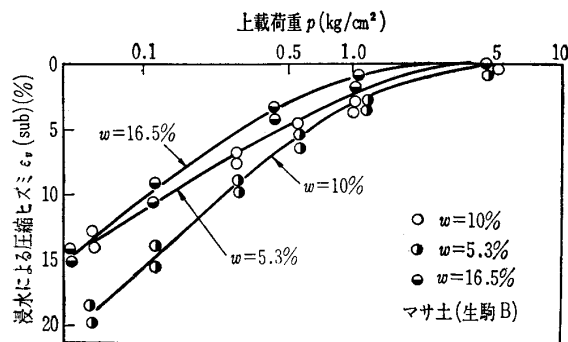


図-8 マサ土の上載荷重と浸水による圧縮ヒズミの関係 (正規圧密状態)

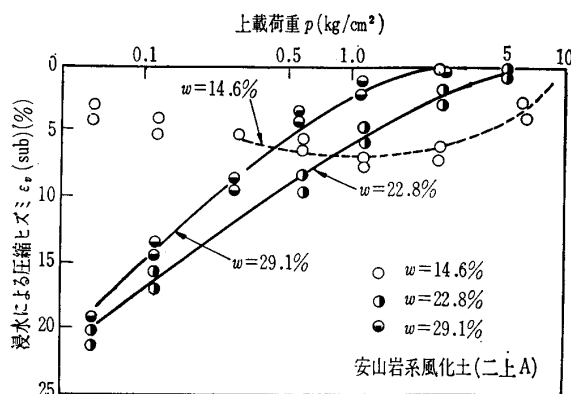


図-9 安山岩系風化砂質土の上載荷重と浸水による圧縮ヒズミの関係 (正規圧密状態)

土も安山岩系風化砂質土に類似のヒズミ性状を示した。つぎに、過圧密条件下におけるマサ土の実験結果例を図-10に示す。図は、縦軸に浸水による圧縮ヒズミ $\varepsilon_v(\text{sub})$ 、横軸に過圧密比 p_0/p (p_0 : 供試体の浸水試験前に受けた先行荷重, p : 浸水試験時の載荷重) をとり同じ大きさの p をパラメーターとしてまとめたものである。図からわかるように、浸水時の載荷重が、同じ大きさであっても、浸水前に受けた p_0 が、大なほど $\varepsilon_v(\text{sub})$ は小となる。多数の実験結果から、ここで、特に指摘されることは、浸水試験時の載荷重 p が同じ大きさであれば、浸水前に受けた応力履歴に関係なく浸水後の e が、ほぼ一定の値を示すことである。このことを利用すると、正規圧密土の試験のみで過圧密土の $\varepsilon_v(\text{sub})$ をも推定できることになる (浸水前の除荷による体積膨張はほとんどなく無視するものとす)。

3.2 締固め特性⁴⁾

各地から採取された風化砂質土を JIS A 1210 によって試験を行なった。試験方法は、第1法でモールドは 10 cm のものを使用し、試料中の 2.0 mm 以上の粒子は除かず、乾燥法、非繰返し法を採用した。図のように、種別に差異が認められる。マサ土の場合、最大乾燥密度 $\gamma_{d \max}$ は $1.70 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 w_{opt} は $11 \sim 15\%$ のものが大部分で、他に比べ密に締め固まり w_{opt} は低い。セン緑岩風化砂質土および流紋岩系風化砂質土の $\gamma_{d \max}$ は、それ

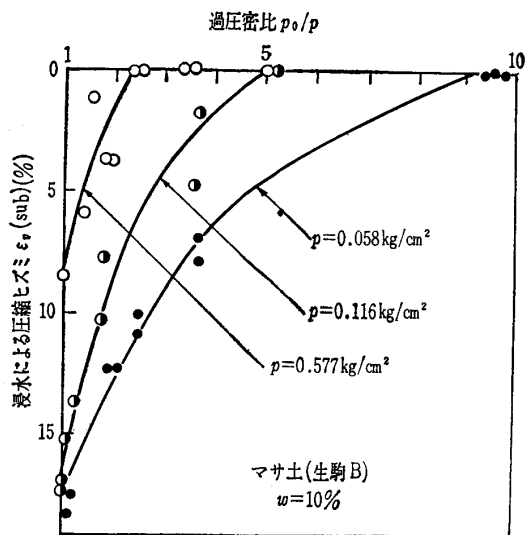


図-10 マサ土の過圧密比と浸水による圧縮ヒズミ

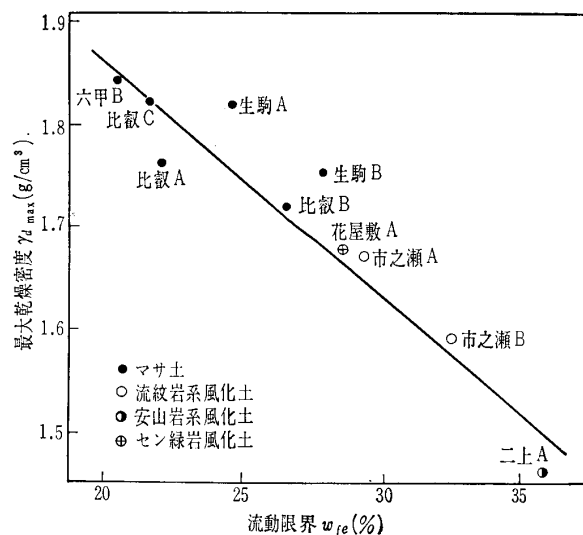


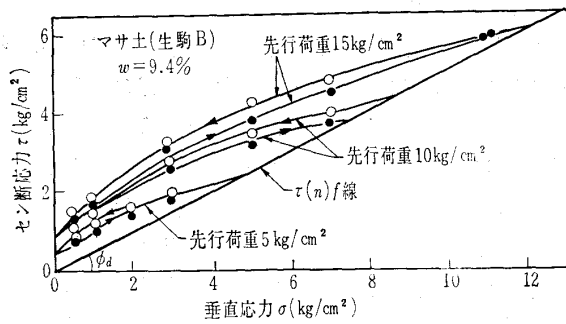
図-11 JIS A 1210 による $\gamma_{d \max}$ と流動限界 w_L の関係

ぞれ $1.59 \sim 1.67 \text{ g/cm}^3$ および $1.50 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$ 、そして w_{opt} はそれぞれ $17 \sim 23\%$ および $17 \sim 21\%$ のものが多く、中位程度に締め固まる土とみなせる。安山岩系風化砂質土の $\gamma_{d \max}$ および w_{opt} は、 1.4 g/cm^3 および 28% で、やや締め固めににくく、 w_{opt} は他に比べ高い。図-11は、 $\gamma_{d \max}$ と w_L の関係を示す。これによると、 w_L が大なほど $\gamma_{d \max}$ は小となり、両者はほぼ直線的な関係を示す。

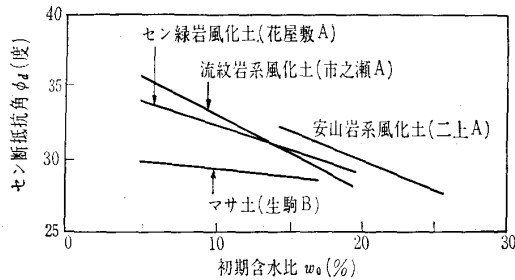
4. 強さ特性

4.1 セン断強さ⁵⁾⁶⁾

風化砂質土を造成地盤の盛土材料として利用するに際し、造成後の土のセン断強さを予測することは重要なことである。従来、砂のセン断強さは含水比と密度のみが重要視されていたが、この種の土の場合、応力履歴をも考慮する必要がある。すなわち、母岩鉱物・風化度合—含水量—応力



図—12 不飽和マサ土の応力履歴とせん断応力の関係



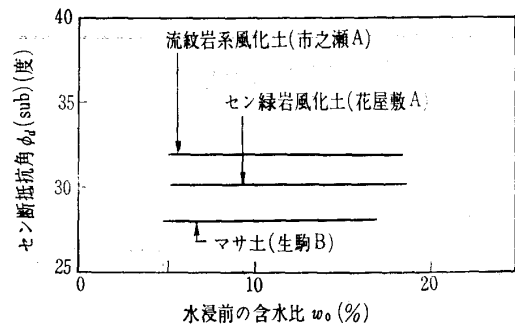
図—13 不飽和土の含水比とせん断抵抗角の関係 (正規圧密状態)

履歴の系によって土の基本的なせん断強さが支配されるものと考えられる。下記のような基礎的な実験を排気・排水の条件で、下部可動式一面せん断試験機(せん断箱: 直径10cm, 高さ4cm)を用いて行なった。

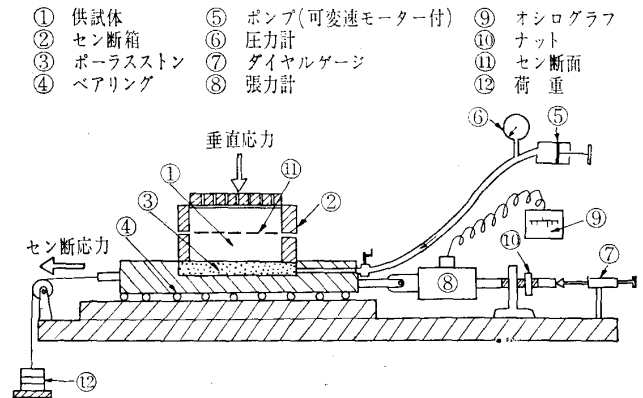
- 1) 不飽和土のせん断試験
- 2) 不飽和土の水浸(注水機使用)後のせん断試験
- 3) 水中作成飽和土のせん断試験
- 4) 一定の垂直応力とせん断応力が作用している不飽和土の水浸せん断試験(注水機使用)

なお、供試土は圧縮試験の場合と同様、落下調整し2.0mm以上の粒子を除いたものとした。不飽和マサ土の試験結果例を図—12に示す。正規圧密土の破壊包絡線($\tau(n)f$ 線)は原点を通る直線となり、初期含水比 w_0 とせん断抵抗角 ϕ_a の関係をまとめ図—13に示す。マサ土の ϕ_a は w_0 にそれほど影響されないが、他3種の土の ϕ_a は w_0 が大なるほど小となる。つぎに、過圧密土の破壊包絡線($\tau(p)f$ 線)は各風化砂質土とも図—12の例のように上方に凸状の曲線となり、同じ値の垂直応力 σ においてせん断応力 $\tau(p)$ は、先行荷重 σ_0 が大なるほど大となり、過圧密効果を知ることができる。ただしここで留意すべきは、各風化砂質土とも多数の実験結果から約1.7以下の過圧密比でその効果はみられず、 $\tau(n)f \div \tau(p)f$ になることである。

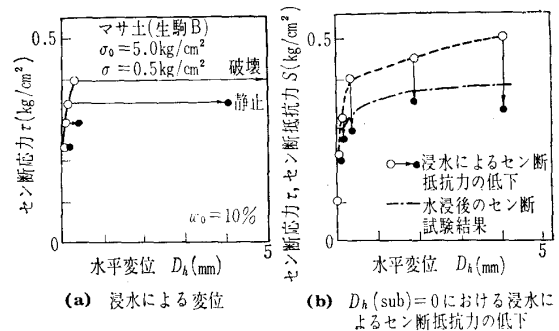
図—14は、不飽和土の水浸後におけるせん断試験結果(正規圧密土)を示す。水浸土のせん断抵抗角 $\phi_{a(sub)}$ は、初期含水比 w_0 に関係なく一定の値を示した。 $\phi_{a(sub)}$ と不飽和土の ϕ_a を相対照してみると、マサ土では $\phi_a > \phi_{a(sub)}$ となり w_0 が大なるほど両者の差は小となる。また、流紋岩、セン緑岩系風化砂質土は、JIS A 1210による w_{opt}



図—14 水浸後のせん断抵抗角と含水比の関係(正規圧密状態)



図—15 浸水によるせん断抵抗力低下測定試験機



図—16 浸水試験結果例

程度の含水状態よりも乾燥側では $\phi_a > \phi_{a(sub)}$ 、湿潤側では ϕ_a が $\phi_{a(sub)}$ よりも小となる傾向を示した。これは、不飽和土における粒子間のメニスカスが含水量の増加に伴って消失するとともに間ゲキ水が増し、水浸土の性状に類似することによるものと考えられる。

水中作成の飽和土(正規圧密状態)のせん断抵抗角 $\phi_{a(seb)}$ は、各風化砂質土とも27~29°の値を示し、そして $\phi_{a(seb)} \div \phi_{a(sub)}$ となる。

つぎに、一定の垂直応力とせん断応力が作用している不飽和土へ浸水すると、どれほど抵抗力が低下するかを測定するため、図—15に示す試験機を試作した。この試験機によれば、供試体に一定の垂直応力と一定のせん断応力が加えられ平衡状態になったのち、底板ポーラス通を通じて注水し、供試体の浸水によって生じる水平変位 $D_{h(sub)}$ をダイヤルゲージで、またナットを適宜調節することによ

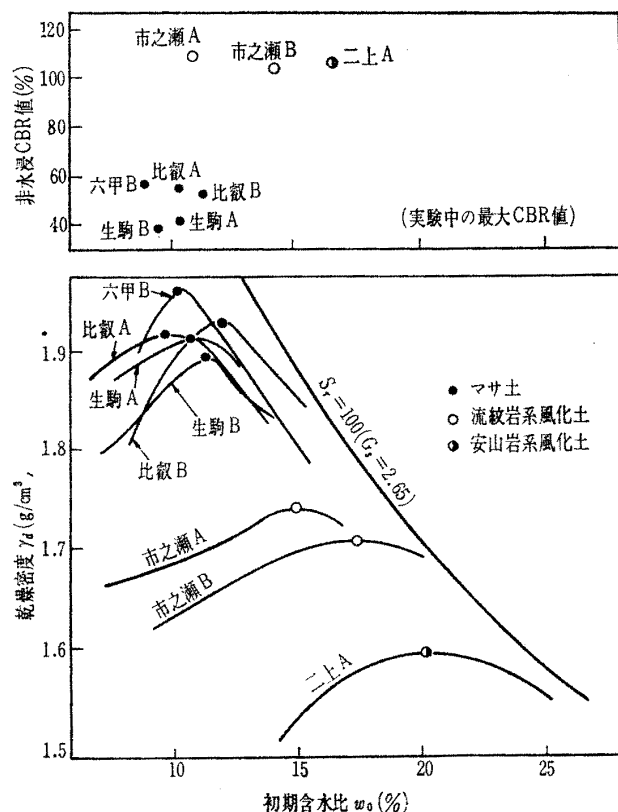


図-17 突固め曲線と排水浸CBR値

て任意の変位点におけるセン断抵抗力の低下値 $\Delta S_{(sub)}$ を張力計で測定することができる。

図-16は、過圧密マサ土($\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma = 0.5 \text{ kg/cm}^2$)の結果例を示す。図-16中、(a)は浸水による変位の状態を、(b)は $D_{h(sub)} = 0$ における浸水による抵抗力の低下状態を示したものである。結果から明らかなように、浸水により著しくセン断抵抗力の低下を生ずる。もっともこの場合も同様、低下量は応力条件およびその履歴によって左右される。

表-4 水中作成の飽和土の圧縮指数

荷重範囲 (kg/cm^2)	花コウ岩 風化砂質土 (生駒B)	セン緑岩 風化砂質土 (花屋敷A)	流紋岩系 風化砂質土 (市之瀬A)	安山岩系 風化砂質土 (二上 A)
0~0.2	0	0.11	0.13	0.11
0.2~2.0	0.06	0.15	0.22	0.21
2.0~5.0	0.07	0.17	0.22	0.24
5.0~10.0	0.17	0.19	0.26	0.25

表-5 修正 CBR 値の例

母岩名 (試料名)	修正 CBR 値 (%)
花コウ岩 (生駒B)	17.0
流紋岩系 (市之瀬A)	28.0
安山岩系 (二上A)	28.0

4.2 CBR特性⁴⁾

風化砂質土は、路盤材としてもよく利用されている。各種土の JIS A 1211 による非水浸および修正 CBR 試験結果を図-17および表-5に示す。結果をみると、マサ土は他の土に比べきわめてよく締め固まるにもかかわらず、両 CBR 値とも低い。これは、マサ土中の空洞化された長石および雲母類が高圧に弱く、いわゆる選択性破砕と呼ばれる現象に起因するものと考えられる。風化砂質土のうち、最も高い CBR 値を示すものは、流紋岩系風化砂質土で、路盤材として良質の土といえよう。安山岩系風化砂質土は比較的高い CBR 値を示しているが、1 試料のみで良質な路盤材と確定化するのは早計のようである。

5. あとがき

以上、マサ土を中心に火成岩系風化砂質土の工学的特性を、基本的性質（自然含水比、比重、pH、強熱減量、粒度分布、分類、コンシステンシー）から述べ、あわせて不飽和状態および水浸（あるいは浸水）状態における力学的性質（圧縮、締固め、セン断、CBR）についてコンシステンシー、初期含水比および応力履歴の観点からとらえ検討してみた。筆者は数年来この種の土の特徴を把握すべく研究を進めてきたが、土粒子が風化途上にあるので不安定で複雑な内容を持ち、取扱いがむずかしく不明な点も多く残されている。そして、従来の試験法では必ずしも適当でないこともあり、試験を行なったとしても結果の解釈に異なった視点を必要とする場合もあるので、今後さらに土の個性に立脚したより合理的な試験法の開発を必要とする。このような風化砂質土が多量に利用されはじめられている今日、その工学的性質の究明はさらに重要性を増してきているものと考ええる。

本研究にあたり種々ご指導・ご示唆いただいた旧マサ土研究会委員長・京都大学松尾新一郎教授、同幹事・関西大学西田一彦教授ならびに同委員会の方々、実験にご協力くださった大阪工業大学の卒業生に深く謝意を表わします。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質試験法，土質工学会，pp. 523~524, 529~532, 1969年
- 2) 松尾新一郎，西田一彦，福田護：火成岩系風化砂質土の圧縮特性について，土木学会第28回年次学術講演会講演集(III)，pp. 290~292, 1973年
- 3) 福田護・国次日出海：火成岩系風化砂質土による土構造物の浸水沈下に関する基礎的研究，土木学会第29回年次学術講演会講演集(III)，pp. 366~368, 1974年
- 4) 西田一彦・福田護：岩石の風化と風化残積土の工学的性質，土質工学会関西支部テキスト，1973年
- 5) 福田護・木村修一：マサ土の応力履歴とセン断強さ，関西支部年次学術講演概要，III-16, 1974年
- 6) 福田護・今西肇：風化砂質土構造物の浸水にとりまう強さ減少に関する基礎的実験，関西支部年次学術講演概要，III-17, 1974年

(原稿受理 1974. 11. 11)