

マサ土の原位置せん断抵抗角 ϕ_d の推定システム

奥山一典¹・河原敏之²・藤原身江子²・平川 武³・北川隆司⁴・八木則男⁵

¹正会員 工修 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

²正会員 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

³株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

⁴理博 広島大学理学部地球惑星システム学科 (〒739-8526 東広島市鏡山 1-3-1)

⁵フェロー 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3)

マサ土は、風化の影響で著しく不均一であるため、地盤工学的な取り扱いが困難である。本報告では、二重管式標準貫入試験器による密度測定方法をマサ土に適用し、土質定数のバラツキを経済的かつ高精度に把握することを試みた。まず、砂置換法で測定された乾燥密度 ρ_{df} と二重管式標準貫入試験器による乾燥密度 ρ_{ds}^2 を比較したところ、両者には非常に強い相関が認められた。つぎに、不攪乱試料のせん断抵抗角 ϕ_d と乾燥密度 ρ_d の関係と $\rho_{df} \sim \rho_{ds}^2$ 関係を組み合わせ、マサ土の ϕ_d の推定システムを提案した。そして提案システムの検証を行い、提案システムが十分実用に供することを示した。

Key Words : decomposed granite soil, density, angle of shear resistance, split spoon sampler with built-in tube

1. はじめに

マサ土からなる切土斜面において、豪雨時などにしばしば崩壊が生じることは良く知られている。このような斜面崩壊は、地盤工学的には主に浸透とせん断の二つの力学特性に支配される。その崩壊の基本的機構は明らかにされているが^{1), 2)}、的確な地盤情報を得ることが困難であるため、切土斜面の設計では経験的基準によりマサ土の切土勾配を決定しているにすぎない³⁾。また、個々の斜面の崩壊機構の解明あるいは合理的な解析・設計手法の確立を困難にしている最大の原因は、風化に伴うマサ土地盤の不均一性⁴⁾、すなわち土質定数の空間分布の著しいバラツキにあると考えられる。したがって、崩壊機構の詳細な解明を行うには、マサ土地盤の土質定数の空間分布を把握するに足りうる大量の地盤情報の蓄積が必要である。ところが、マサ土は砂質土系であるために、不攪乱試料の採取や試験に莫大な費用を要し、十分な地盤情報が得られていないのが実情である。このような背景から、マサ土地盤に即した経済的な調査法の開発が望まれている⁴⁾。

筆者らは、二重管式標準貫入試験器による密度測定方法⁵⁾を基に、砂地盤における力学定数の推定システムに関する基礎的な研究^{6), 7)}を行ってきた。このシステムは、密度と力学定数を関連付け、原位置の力学定数を経済的かつ高精度に推定するものである。

これをマサ土地盤に適用することができれば、極めて経済的に大量の地盤情報を得ることができよう。ただし、これまでの研究成果では、その適用範囲は、最大粒径 D_{max} が3~5mm程度、細粒分含有率 F_c が5%未満の飽和砂地盤に限られている。

一方、本研究で対象とするマサ土地盤は、不飽和状態の最大粒径が5.0~9.5mmのマサ土からなり、砂地盤における力学定数の推定システムの適用範囲外となる。しかし、本研究では、力学的に不明な部分をブラックボックス入れてしまっても技術に役立てばよいとする立場⁸⁾から、上記と同様の手法で二重管式標準貫入試験器による密度測定方法のマサ土地盤への適用性を検討した。

本報告では、まず、マサ土からなる切土部において二重管式標準貫入試験器による現場密度測定実験を行い、密度や含水比の測定精度を検証する。つぎに、マサ土の不攪乱試料の三軸圧縮試験を行い、密度とせん断抵抗角 ϕ_d の関係を求める。最後に、密度によるマサ土の ϕ_d の推定システムの提案と検証を行う。

2. 現場密度測定実験

(1) 現場概要

今回選定した現場は、岡山県赤磐郡赤坂町山口(以後、岡山と略称する)と広島県東広島市高屋町^{ついでに}每井谷

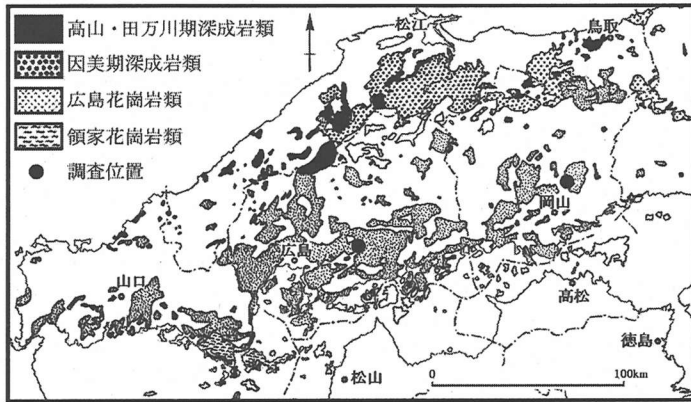
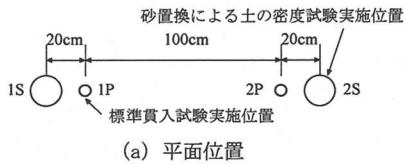
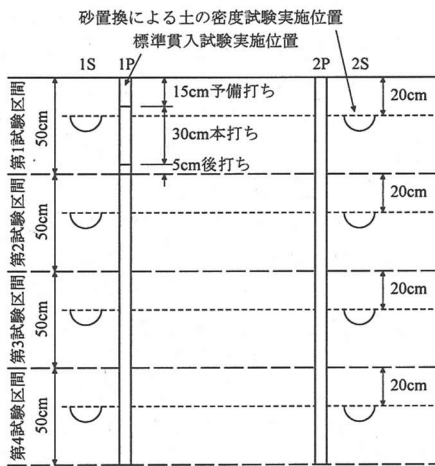


図-1 中国地方における白亜紀～古第三紀深成岩類の分布⁹⁾および調査位置



(a) 平面位置



(b) 断面位置

図-2 現場密度測定位置



写真-1 砂置換法による密度測定状況

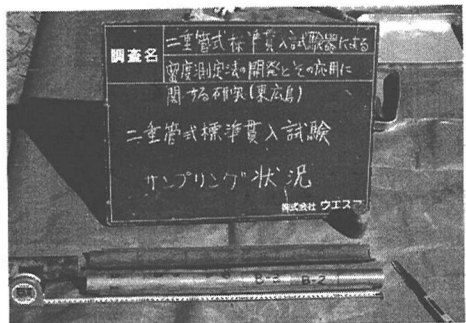


写真-2 中空管に採取された試料

(以後、広島と略称する)の2箇所である。両現場とも、マサ土からなる切土部の不飽和地盤であり、図-1に示す中生代白亜紀の広島花崗岩類が分布している地域に位置している。なお、いずれの現場も深度3mまでは、地下水位は確認されていない。

岡山のマサ土は、細粒分含有率が10%以下と少なく、地盤工学会基準「地盤材料の工学的分類方法」(JGS M 111-1996)の小分類¹⁰⁾における細粒まじり礫質砂(SG-F)に分類されるものである。一方、広島のマサ土は、著しく風化が進行し、細粒分を20~30%

含んでおり、細粒分質砂(SF)あるいは礫まじり細粒分質砂(SF-G)に分類されるものである。

(2) 実験方法

図-2に示すように、砂置換法による密度測定と二重管式標準貫入試験器による密度測定を各現場で2箇所ずつ実施した。密度測定は、深度方向に1区間50cmとして4区間行い、計2mの深度まで行った。標準貫入試験の完了後、標準貫入試験位置から水平方向に20cm離して砂置換法による測定を行った。本来

表-1 現場密度測定結果

現場名	岡山				広島				
	二重管式		砂置換法		二重管式		砂置換法		
密度測定方法	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
地点番号	1P	2P	1S	2S	1P	2P	1S	2S	
試料番号	1P	2P	1S	2S	1P	2P	1S	2S	
第1試験区間	N値(回)	16	13	-	-	5	4	-	-
	乾燥密度(g/cm ³)	1.889	1.838	1.858	1.806	1.374	1.361	1.326	1.312
	間隙比	0.408	0.450	0.438	0.477	0.943	0.961	1.011	1.032
	土粒子の密度(g/cm ³)	2.660	2.666	2.671	2.667	2.669	2.669	2.666	2.666
	含水比(%)	6.6	8.8	7.5	9.2	23.4	24.9	23.5	26.7
	飽和度(%)	43.0	51.8	45.8	51.5	66.4	69.2	62.0	68.9
第2試験区間	N値(回)	21	24	-	-	7	7	-	-
	乾燥密度(g/cm ³)	1.967	1.923	1.984	1.909	1.465	1.499	1.379	1.384
	間隙比	0.354	0.383	0.344	0.391	0.833	0.791	0.938	0.931
	土粒子の密度(g/cm ³)	2.663	2.660	2.666	2.655	2.685	2.685	2.672	2.672
	含水比(%)	5.9	7.2	7.0	8.9	23.5	26.1	25.3	22.2
	飽和度(%)	44.3	50.3	54.4	60.5	75.7	88.5	72.1	63.7
第3試験区間	N値(回)	29	33	-	-	6	5	-	-
	乾燥密度(g/cm ³)	1.944	2.053	1.952	2.055	1.527	1.339	1.406	1.304
	間隙比	0.373	0.300	0.365	0.297	0.752	0.998	0.903	1.052
	土粒子の密度(g/cm ³)	2.669	2.669	2.664	2.666	2.675	2.675	2.676	2.676
	含水比(%)	7.8	7.4	10.1	7.3	23.1	20.1	23.5	21.8
	飽和度(%)	56.0	66.2	73.7	65.6	82.1	54.0	69.6	55.4
第4試験区間	N値(回)	24	32	-	-	5	5	-	-
	乾燥密度(g/cm ³)	1.950	2.082	1.979	2.042	1.383	1.428	1.289	1.332
	間隙比	0.371	0.277	0.342	0.305	0.934	0.873	1.069	1.002
	土粒子の密度(g/cm ³)	2.673	2.659	2.655	2.665	2.675	2.675	2.667	2.667
	含水比(%)	11.1	7.0	10.6	7.9	21.6	20.4	17.9	18.1
	飽和度(%)	80.0	67.1	82.3	69.0	61.9	62.5	44.7	48.2

なら50cm程度離れた方が、砂置換法による密度測定値は標準貫入試験時の打撃などの影響を受けないと考えられる。しかし、後述するように水平方向にわずか1mの違いで原位置の密度は著しく異なるため、この影響を考慮しながらも測定間隔をできるだけ近づけた方がよいと判断した。

本研究では、砂置換法による測定値を原地盤の正しい値とし、二重管式標準貫入試験器の密度測定精度の検証を行う。

以下にそれぞれの密度測定方法について述べる。

a) 砂置換法による密度測定

砂置換法による土の密度試験(JIS A 1214-1995)は、標準貫入試験が全て終了した後、バックホウにより標準貫入試験開始深度から20cm下方まで掘削し、貫入試験位置から水平方向に20cmの位置で1箇所行った。写真-1に示すように砂置換法による密度測定を行い、湿潤密度 ρ_w 、含水比 ω_f 、乾燥密度 ρ_d を求めた。

b) 二重管式標準貫入試験器による密度測定

図-3に示す二重管式標準貫入試験器を用い、岡山と広島現場で、それぞれ、水平方向に1m間隔で2箇所の標準貫入試験を実施した。この試験器は、標準貫入試験器の中に密度測定用の真鍮製の中空管

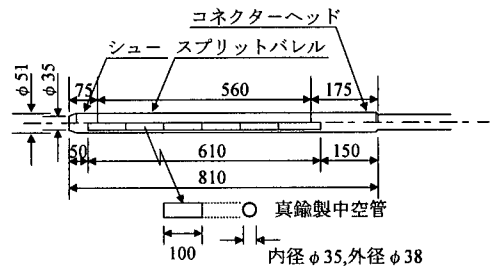


図-3 二重管式標準貫入試験器 (単位: mm)

(長さ10cm、内径35mm、外径38mm)を先端から5個、最後に長さだけが11cmの中空管を並べて装填できるように工夫されたもので、かなり以前から市販されている。本試験器を用いて標準貫入試験を行えば、貫入時に土が中空管内に採取され、N値と共に現場で簡単に密度を測定することができる。なお、N値の測定は、JIS A 1219-1995に従い、トンビ法により、深度方向に50cm間隔で深さ2mまで行った。

標準貫入試験終了後、二重管式標準貫入試験器を引き上げ、スプリットバレル内の中空管を慎重に取り出し(写真-2)、先端から2番目の中空管の両端面をエッジナイフで整形する。2番目の中空管に詰まった試料の湿潤密度 ρ_{ts2} と含水比 ω_{s2} (%)を測定し、

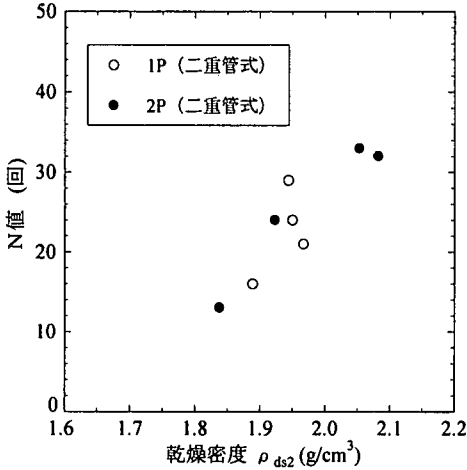


図-4 ρ_{ds2} と N 値の関係 (岡山)

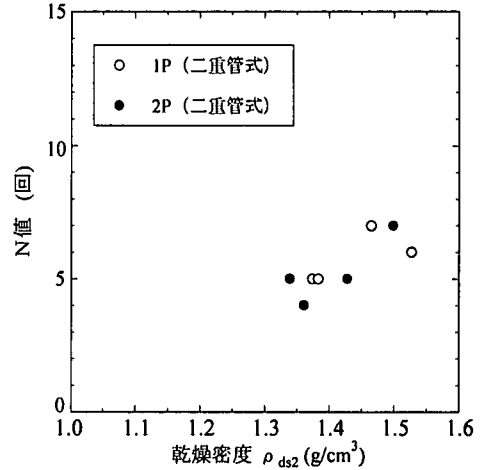


図-5 ρ_{ds2} と N 値の関係 (広島)

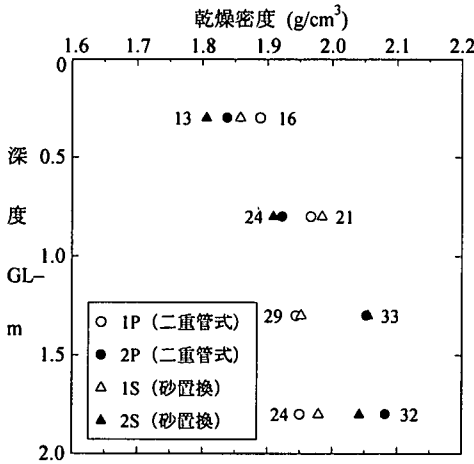


図-6 乾燥密度の深度方向分布 (岡山)

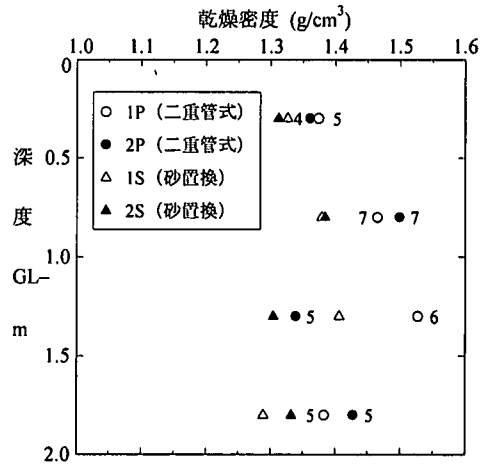


図-7 乾燥密度の深度方向分布 (広島)

これらを次式

$$\rho_{ds2} = \frac{\rho_{is2}}{1 + (\omega_{s2}/100)} \quad (1)$$

に代入して 2 番目の中空管で採取された試料の乾燥密度 ρ_{ds2} を求めた。なお、 ρ_{is2} 、 ω_{s2} および ρ_{ds2} を用いたのは、二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法⁵⁾に準じたからである。

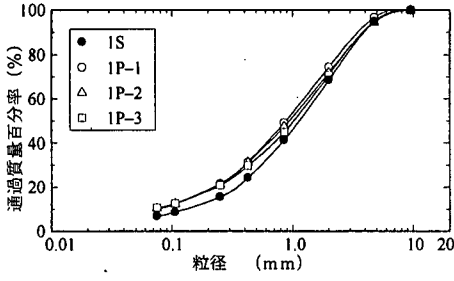
(3) 実験結果と考察

a) 乾燥密度 ρ_{ds2} と N 値

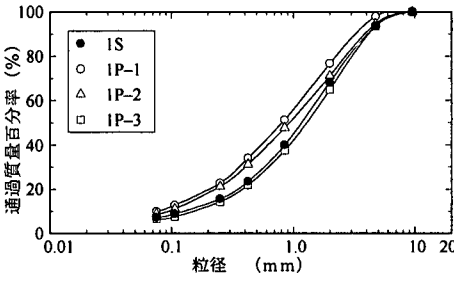
表-1 に岡山と広島における現場密度測定結果を一覧にして示す。また、図-4、図-5 に二重管式標準貫入試験器で測定した乾燥密度 ρ_{ds2} と N 値の関係を示す。いずれの現場も、これらの関係には良い相関があり、乾燥密度が大きくなると N 値は増加している。

図-6、図-7 に乾燥密度の深度方向の分布を示す。図中の記号の添え字は N 値を表している。岡山の各試験位置の乾燥密度と N 値は、深度方向への増加傾向が認められる。乾燥密度は、水平方向に 1m の違いで、二重管式標準貫入試験器で $0.044 \sim 0.132$ (g/cm^3)、砂置換法で $0.052 \sim 0.103$ (g/cm^3) の差があり、測定位置による乾燥密度の差が大きい。同様に N 値についても水平方向に 3~8 回の差がある。これは、花崗岩の場合、節理に沿って風化が進行するので、垂直、水平方向ともに、強度や密度の連続性が乏しいためと考えられる。

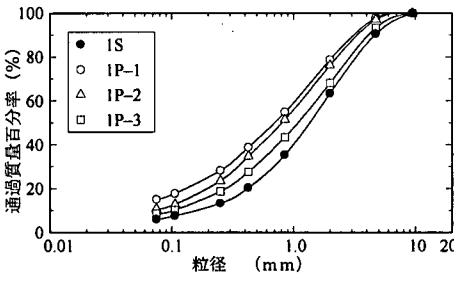
一方、広島では、各試験位置の乾燥密度と N 値の深度方向への明らかな増加傾向はあまり認められない。乾燥密度は、水平方向に 1m の違いで、二重管式標準貫入試験器で $0.013 \sim 0.188$ (g/cm^3)、砂置換法で $0.005 \sim 0.102$ (g/cm^3) の差が生じている。また、 N



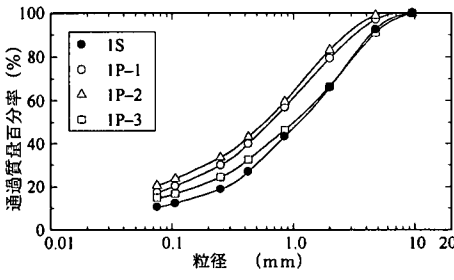
(a) 第1試験区間



(b) 第2試験区間

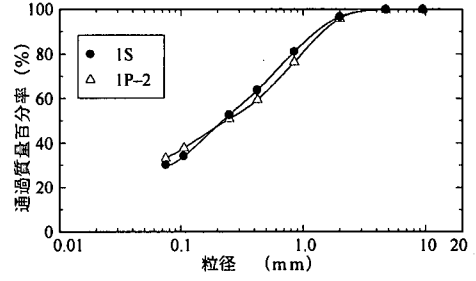


(c) 第3試験区間

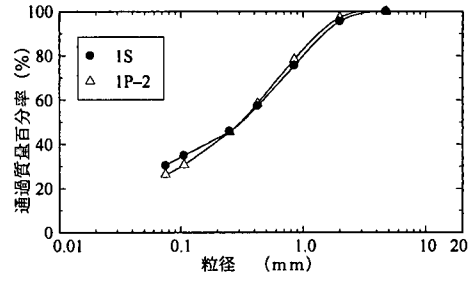


(d) 第4試験区間

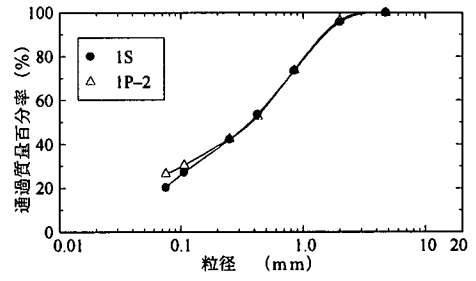
図-8 粒度分布 (岡山)



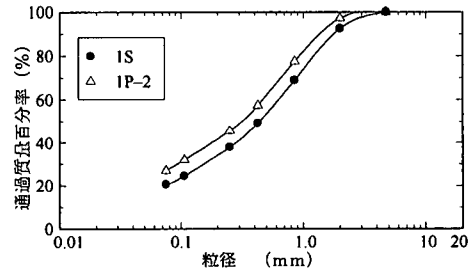
(a) 第1試験区間



(b) 第2試験区間



(c) 第3試験区間



(d) 第4試験区間

図-9 粒度分布 (広島)

値は、水平方向に、1 回程度の差である。

b) 粒子破碎

図-8は、二重管式標準貫入試験器の先端から3本目までの中空管内に採取された岡山のマサ土試料(先端より試料名 1P-1, 1P-2, 1P-3)と砂置換時に採取した岡山のマサ土試料(試料名 1S)の粒度分布である。岡山の場合、砂置換時に採取した試料が原位置の粒度であるから、二重管式標準貫入試験器で採取した試料については明らかに粒子破碎が発生し、

その度合いは先端に近いほうが大きい。これは、中空管に試料が充填される過程で、貫入の初期はサンプラー先端における閉塞効果があまり発揮されないために粒子破碎も少なくあまり締め固まっていなかったが、その後、貫入が進むにつれて、浸入砂長が長くなりかつ摩擦抵抗が増加して先端における閉塞効果が発揮されはじめて粒子破碎が著しくなるためであろう¹¹⁾。また、岡山で採取したマサ土の最大粒径 D_{max} は 9.5mm であり、砂地盤における二重管式標準

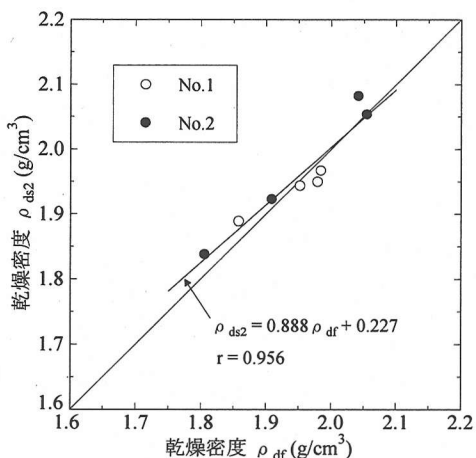


図-10 $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係 (岡山)

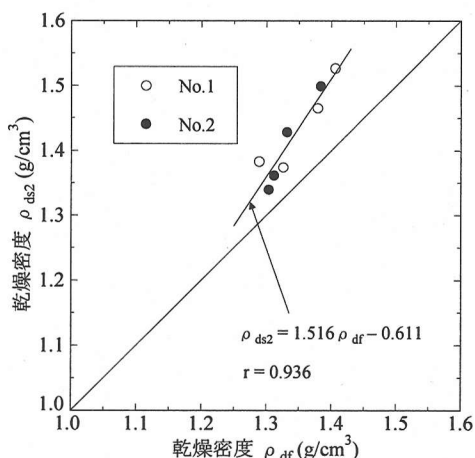


図-11 $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係 (広島)

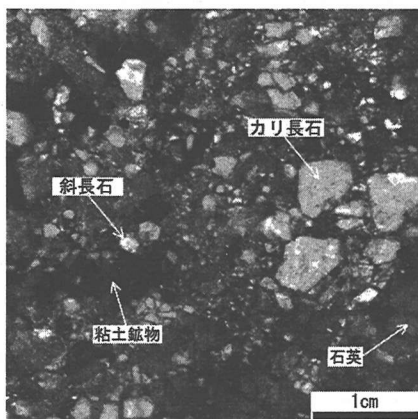


写真-3 不攪乱試料の断面 (岡山)

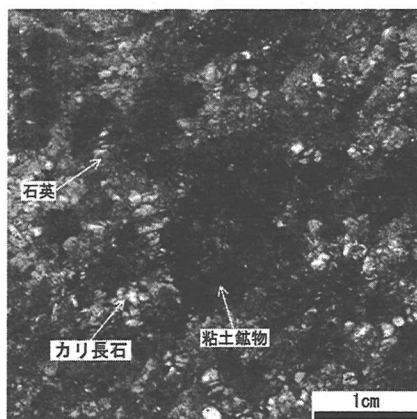


写真-4 不攪乱試料の断面 (広島)

貫入試験器の最大粒径制限 (D_{max} が 3~5mm 程度以下) を超えている。このため、各中空管の試料は、採取時に粒子破碎をかなり生じていると考えられる。

図-9 は、二重管式標準貫入試験器の先端から 2 本目の中空管内に採取された広島のマサ土試料(試料名 1P-2)と砂置換時に採取した広島のマサ土試料(試料名 1S)の粒度分布である。広島のマサ土は、岡山のそれに比べ、粒子破碎による粒度分布の変化は小さく、原地盤の粒度分布に近い。これは、広島のマサ土試料の最大粒径が 4.75mm であることや、 N 値が小さいことから、採取時の粒子破碎が生じ難いためと考えられる。

c) ρ_{df} と ρ_{ds2} の関係

図-10 と図-11 に砂置換法により測定した原位置の乾燥密度 ρ_{df} と二重管式標準貫入試験器を用いて測定した乾燥密度 ρ_{ds2} を示す。同図から、 ρ_{df} と ρ_{ds2} には非常に強い直線的相関があることが分か

る。

このことから、二重管式標準貫入試験器により、十分な精度で現場密度を推定できると言えよう。それぞれの現場の ρ_{ds2} に関する一次回帰式を求めると次式となる。

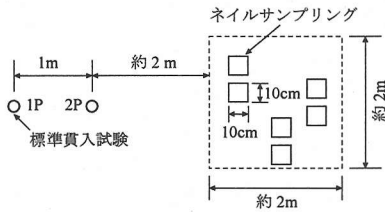
$$\text{岡山: } \rho_{ds2} = 0.888 \rho_{df} + 0.227 \quad (r=0.956) \quad (2)$$

$$\text{広島: } \rho_{ds2} = 1.516 \rho_{df} - 0.611 \quad (r=0.936) \quad (3)$$

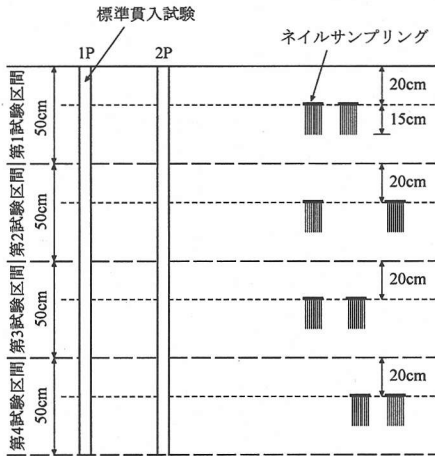
ここに、 r : 相関係数である。

広島の $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係は $\rho_{df} < \rho_{ds2}$ であり、乾燥した自然砂と同様に中空管内の試料は採取過程で締固められている。これは、広島のマサ土は、写真-4 に示すように、著しい風化によって間隙が大きくなり、粒状体として挙動するためであろう。

一方、岡山の $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係は $\rho_{df} = \rho_{ds2}$ に近く、中空管内の試料の密度変化は極めて小さい。この現



(a) 平面位置



(b) 断面位置

図-12 試料採取位置

象は、つぎの理由によると考えられる。写真-3 に示すように、岡山のマサ土は、相対的に変質(粘土化)がやや弱く、石英やカリ長石のほとんどと斜長石の一部の結晶は粘土化が進行しておらず、結晶同士の結合がまだ強い。そのため、採取時の打撃程度では、花崗岩の組織があまり破壊しておらず、中空管内の試料の密度変化が小さいと考えられる。

3. マサ土の密度と ϕ_d の関係

前章の現場実験では、二重管式標準貫入試験器で測定した ρ_{d2} と砂置換法で測定した ρ_{df} には非常に強い相関があることが分かった。本章では、マサ土のせん断抵抗角 ϕ_d と乾燥密度を関係付ける。ただし、岡山のマサ土の細粒分含有率 F_c は 10% 程度、広島の場合は 20 数~30 数% であるため、本章では、設計的に砂として取り扱うことが可能¹³⁾ である岡山マサ土の ϕ_d と現場乾燥密度の関係を求める。

(1) 実験方法

まず、図-12 に示すように、標準貫入試験地点(図-2)から水平方向に約 2m 離して任意の間隔でネイルサンプリング¹²⁾ を実施し、不攪乱試料を採取する。

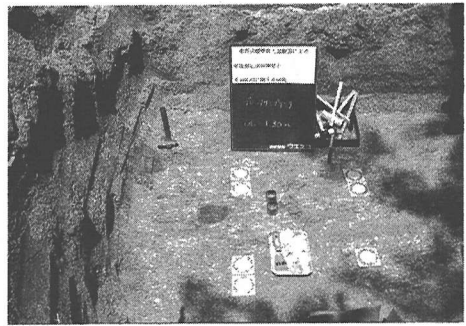


写真-5 ネイルサンプリング状況

表-2 三軸圧縮試験結果(岡山)

試験区間	ρ_s (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	σ_3 (kPa)	ϕ_d (度)
1	2.629	1.558	49	42.0
		1.572	98	38.5
		1.569	196	39.1
		1.543	98	39.2
2	2.643	1.606	49	39.5
		1.660	98	38.4
		1.532	196	37.3
		1.766	49	49.6
3	2.656	1.738	98	44.6
		1.660	196	47.0
		1.763	196	48.5
		1.828	49	51.5
4	2.657	1.815	98	53.9
		1.879	196	49.9
		1.752	98	46.1

つぎに、不攪乱試料の湿潤密度試験(JGS T 191-1990)を行う。最後に、圧密圧力 σ_c を 49, 98, 196kPa で試料の圧密排水(CD)三軸圧縮試験(JGS T524-1990)を実施した。なお、 ϕ_d だけを求める目的で、供試体に土粒子組織を壊さないように水を浸透させ、ほぼ飽和状態(間隙圧係数 B 値で 0.88~0.96)にした。

不攪乱試料の平面的な採取位置の間隔を 50cm~100cm 程度離れたため、採取試料の密度は表-2 に示すようにかなりばらついている。そこで、今回は拘束圧の影響は無視し、供試体 1 個ずつの ϕ_d を求めることにした。 ϕ_d は、粘着力がないものとし、破壊時のモール円に原点から接線を引き、次式より求めた。

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_d \quad (4)$$

ここに、 τ :せん断抵抗、 σ_n :垂直応力である。

(2) 実験結果と考察

表-2 に不攪乱試料の三軸圧縮試験結果を示す。表中の ρ_d は各供試体の乾燥密度、 ρ_s は土粒子の密度である。同表の ϕ_d (度) と ρ_d (g/cm^3) の関係を図-

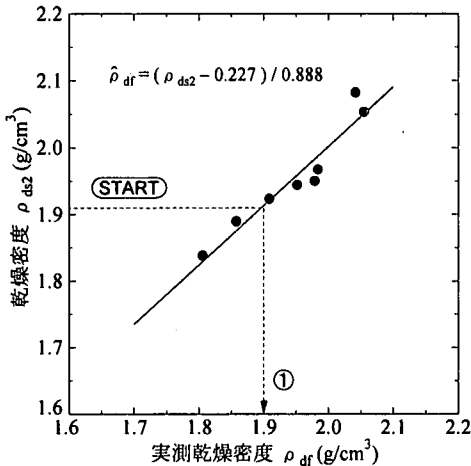


図-13 $\rho_{ds2} \sim \rho_{df}$ 関係 (岡山)

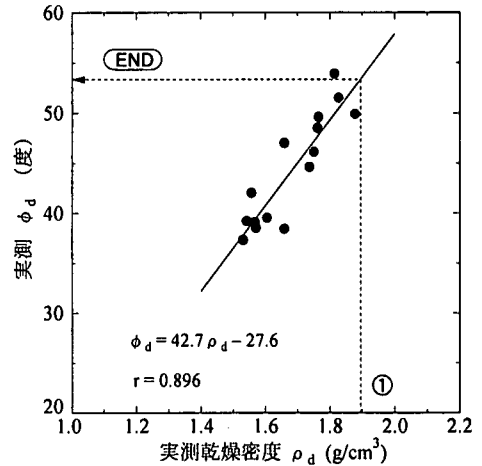


図-14 $\rho_d \sim \phi_d$ 関係 (岡山)

表-3 現場密度測定と最大間隙比(岡山)

試験区間	N値 (回)	ρ_{ds2} (g/cm ³)	ρ_{df} (g/cm ³)	推定 ρ_{df} (g/cm ³)	砂置換試料の e_{max}
1	16	1.889	1.858	1.872	1.182
	13	1.838	1.806	1.814	
2	21	1.967	1.984	1.959	1.065
	24	1.923	1.909	1.910	
3	29	1.944	1.952	1.934	1.259
	33	2.053	2.055	2.056	
4	24	1.950	1.979	1.940	1.303
	32	2.082	2.042	2.089	

14 に示すが、 ϕ_d と ρ_d には強い相関がある。この関係の一次回帰式は以下ようになる。

$$\phi_d = 42.7 \rho_d - 27.6 \quad (r=0.896) \quad (5)$$

ここに、 r : 相関係数である。

$\rho_d \equiv \rho_{df}$ とし、上式と $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係を組み合わせれば、二重管式標準貫入試験器による密度測定により当該現場の ϕ_d を経済的に推定できるであろう。

4. マサ土の ϕ_d の推定システムの提案^{14), 15)}

(1) マサ土の ϕ_d の推定システム

a) 推定システム

① 二重管式標準貫入試験器による密度測定と砂置換法(あるいは RI 法)により、対象現場ごとに $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係の一次回帰式を求める。その一次回帰式より、砂置換法で求めた原位置の乾燥密度の推定値 $\hat{\rho}_{df}$ を算定する。

② ①とほぼ同じ位置でネールサンプリング(あるいはブロックサンプリング)により不攪乱試料を採取し、湿潤密度試験(JGS T 191-1990)および土の圧

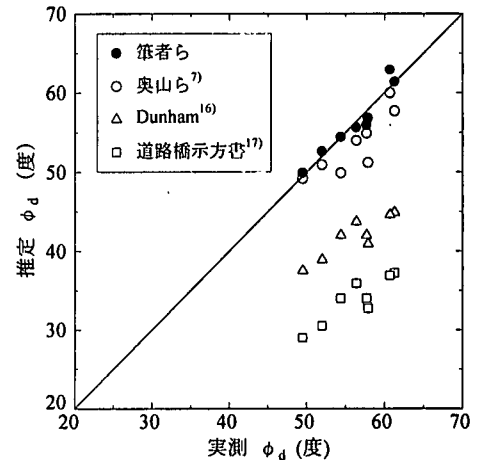


図-15 推定 $\phi_d \sim$ 実測 ϕ_d の関係 (岡山)

密排水(CD)三軸圧縮試験を行い、 $\rho_d \sim \phi_d$ 関係を作成し、その一次回帰式を求める。

③ 例えば、岡山マサ土では、二重管式標準貫入試験器により測定した ρ_{ds2} を図-13 および図-14 中の経路(START→①→END)、すなわち式(2)、式(5)に適用し、 ϕ_d を推定する。

b) 適用範囲

筆者らが提案した自然砂の ϕ_d の推定システム⁷⁾ では、細粒分含有率 F_c が 5%未満で最大粒径が 3~5mm 以下の飽和した砂地盤を対象としている。しかし、マサ土の場合は、このような制限にこだわらず、 $\rho_{ds2} \sim \rho_{df}$ 関係と $\rho_d \sim \phi_d$ 関係の相関が良ければ適用可能とする。ただし、細粒分含有率 F_c は 20%未満、かつ粒度分布がほぼ同じ地盤でなければならない。それは、密度と同様に粒度分布の空間分布の著しいバラツキが考えられるためである。粒度分布が

表-4 乾燥密度 ρ_{df} と湿潤密度 ρ_{jf} の推定

採取位置	ρ_{ds2} (g/cm^3)	ω_{s2} (%)	ρ_{ts2} (g/cm^3)	ρ_{df} (g/cm^3)	ω_f (%)	ρ_{jf} (g/cm^3)	$\hat{\rho}_{df}$ (g/cm^3)	$\hat{\rho}_{jf}$ (g/cm^3)
岡山 No.1	1.889	6.6	2.014	1.858	7.5	1.997	1.872	1.995
	1.967	5.9	2.083	1.984	7.0	2.123	1.959	2.075
	1.944	7.8	2.096	1.952	10.1	2.149	1.934	2.084
	1.950	11.1	2.166	1.979	10.6	2.189	1.940	2.156
岡山 No.2	1.838	8.8	2.000	1.806	9.2	1.972	1.814	1.974
	1.923	7.2	2.061	1.909	8.9	2.079	1.910	2.047
	2.053	7.4	2.205	2.055	7.3	2.205	2.056	2.208
	2.082	7.0	2.228	2.042	7.9	2.203	2.089	2.235
広島 No.1	1.374	23.4	1.696	1.326	23.5	1.638	1.309	1.616
	1.465	23.5	1.809	1.379	25.3	1.728	1.369	1.691
	1.527	23.1	1.880	1.406	23.5	1.736	1.410	1.736
	1.383	21.6	1.682	1.289	17.9	1.520	1.315	1.599
広島 No.2	1.361	24.9	1.700	1.312	26.7	1.662	1.301	1.625
	1.499	26.1	1.890	1.384	22.2	1.691	1.392	1.755
	1.339	20.1	1.608	1.304	21.8	1.588	1.286	1.545
	1.428	20.4	1.719	1.332	18.1	1.573	1.345	1.619

ϕ_d に及ぼす影響を回避するため、採取試料の粒度分布を確認しつつ本システムを適用しなければならない。なお、 F_c を 20%未満としたのは、設計的に砂として取り扱える¹³⁾からである。

(2) 提案システムの検証

a) ϕ_d の推定精度

表-3 に岡山の現場密度測定結果と砂置換試料の最大間隙比 e_{max} を示す。まず、同表の二重管式標準貫入試験器により測定した ρ_{ds2} に提案推定システムを適用して推定 ϕ_d を求めた。つぎに、砂置換法で求めた ρ_{jf} を式(5)に適用して実測 ϕ_d を算定した。図-15 に推定 ϕ_d と実測 ϕ_d の関係を示す。

また、同図には、以下に示す各式から求めた推定 ϕ_d と実測 ϕ_d の関係を合わせて示す。奥山らの提案式⁷⁾

$$\sin \phi_d = \frac{3(0.334e_{max} + 0.598)}{2(1 + e_0) + (0.334e_{max} + 0.598)} \quad (6)$$

Dunham の式¹⁶⁾

$$\phi_d = (12N)^{0.5} + 25 \quad (7)$$

道路橋示方書の式¹⁷⁾

$$\phi_d = (15N)^{0.5} + 15 \leq 45^\circ, \quad N > 5 \quad (8)$$

図-15 をみると、提案システムによる推定 ϕ_d は、実測 ϕ_d と最大 $\pm 2^\circ$ 程度の違いである。この結果から、本システムを利用すれば、マサ土地盤の原位置の ϕ_d を経済的に求めることができると言えよう。なお、ここで得られた推定 ϕ_d と実測 ϕ_d の相関は、数m四方程度の狭い範囲での計測データに関するものであり、もっと広い範囲の地盤状態を推定する場合には、誤差が大きくなる可能性があることに留意しな

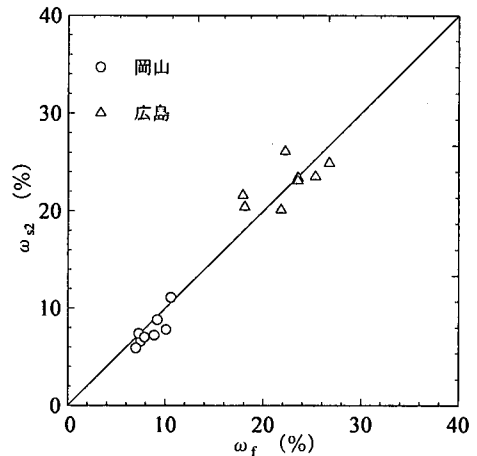


図-16 $\omega_f \sim \omega_{s2}$ 関係

ければならない。

式(6)は自然砂の密度をベースにしたものであるが、その推定 ϕ_d は意外と良い推定値となっている。しかし、式(6)の適用範囲は自然砂に限定されており、その適用には留意する必要がある。また、 N 値をベースとした Dunham の式および道路橋示方書の式による ϕ_d の推定値は、実測 ϕ_d よりもかなり小さい。

b) 湿潤密度 ρ_{jf} の推定精度

原位置の ρ_{jf} および ω_f は重要な情報であり、設計値としても必要である。そこで、本項では、二重管式標準貫入試験器によるマサ土地盤の ρ_{jf} の推定精度を検証する。

第2章の現場密度測定実験では、二重管式標準貫入試験器の先端から2番目の中空管に詰まった試料の湿潤密度 ρ_{ts2} と含水比 ω_{s2} (%) を測定し、これらを式(1)に代入して ρ_{ds2} を求めている。しかしここで、採取試料の測定値 ρ_{ts2} 、 ω_{s2} は、砂置換法で求めた

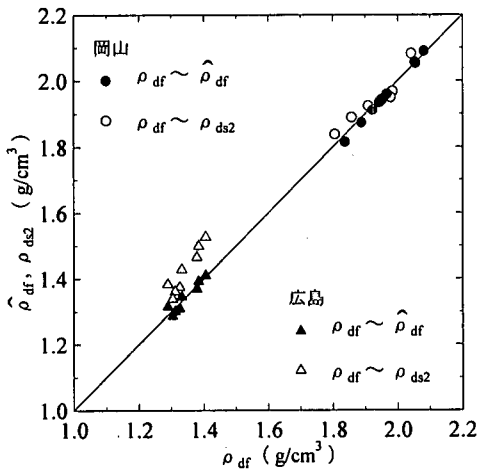


図-17 $\rho_{df} \sim \hat{\rho}_{df}$ 関係

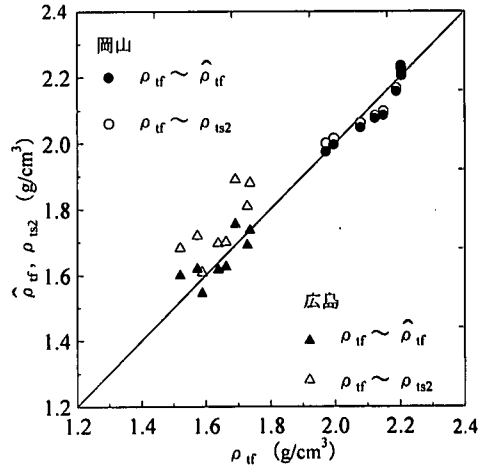


図-18 $\rho_{if} \sim \hat{\rho}_{if}$ 関係

マサ土地盤の砂置換法で求めた湿潤密度 ρ_{if} 、含水比 ω_f とは異なることに注意しなければならない。この差異は、①試料採取過程における脱水、②二重管式標準貫入試験器と砂置換の採取位置の違い、③二重管式標準貫入試験器の打撃貫入の影響による中空管内の試料の密度変化などによって生じる。

図-16 に $\omega_f \sim \omega_{s2}$ 関係を示すが、少々ばらついている。しかし、当現場のような不飽和地盤においては、採取過程における試料からの脱水は極めて少なく、採取位置が同じであれば、 $\omega_f = \omega_{s2}$ である。したがって、同図のバラツキは、二重管式標準貫入試験器と砂置換の採取位置の違いによると考えてよいであろう。

以後の議論は、採取位置の違いはなく、 $\omega_f = \omega_{s2}$ と仮定して進める。

まず、 ρ_{ds2} を式(2)、式(3)に代入し、マサ土地盤の原位置における乾燥密度の推定値 $\hat{\rho}_{df}$ を求める。つぎに、 $\hat{\rho}_{df}$ と ω_{s2} を次式に適用すれば、原位置の湿潤密度 ρ_{if} を推定することができる。

$$\hat{\rho}_{if} = \hat{\rho}_{df} \left\{ 1 + \left(\omega_{s2} / 100 \right) \right\} \quad (9)$$

ここに、 $\hat{\rho}_{if}$: 原位置の湿潤密度 ρ_{if} の推定値である。

表-4 に上記の手順で ρ_{df} と ρ_{if} を推定した結果を示す。また、図-17 および図-18 には、岡山と広島のマサ土地盤の $\rho_{df} \sim \hat{\rho}_{df}$ 関係および $\rho_{if} \sim \hat{\rho}_{if}$ 関係を示す。推定値と実測値は極めて良い相関があり、二重管式標準貫入試験器によって原位置の ρ_{df} 、 ρ_{if} を十分な精度で把握できると言えよう。また、これらの図には、採取試料の測定値である $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係および $\rho_{if} \sim \rho_{is2}$ 関係を合わせて示しているが、先に述べたように、広島現場ではかなりの差異があることがわかる。

5. まとめ

本章で得られた主要な結論をまとめると以下のようである。

- ① 岡山のマサ土の最大粒径 D_{max} は 9.5mm であり、砂地盤における二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限 (D_{max} が 3~5mm 程度まで) を超えている。そのため、貫入時に採取試料では粒子破砕がかなり生じている。それにもかかわらず、砂置換法により測定した原位置の乾燥密度 ρ_{df} と二重管式標準貫入試験器を用いて測定した乾燥密度 ρ_{ds2} には非常に強い直線的相関が確認された。また、 $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係は $\rho_{df} = \rho_{ds2}$ に近く、中空管内の試料の密度測定値の変化は極めて小さい。これは、結晶同士の結合がまだ強く、採取時の打撃程度では花崗岩の組織があまり破壊していないことに起因していると思われる。
 - ② 広島のマサ土は、細粒分含有率 F_c は 20 数~30 数%程度であるが、その $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係にも非常に強い直線的相関が確認された。また、 $\rho_{df} < \rho_{ds2}$ であり、乾燥した自然砂と同様に中空管内の試料は採取過程で締固められている。
 - ③ 岡山のマサ土の不攪乱試料の $\phi_d \sim \rho_d$ 関係には強い相関が認められた。そこで、この関係と $\rho_{df} \sim \rho_{ds2}$ 関係を組み合わせ、マサ土の ϕ_d の推定システムを提案した。現場データに本提案システムを適用して ϕ_d を推定した結果、推定値と実測値の良い相関を得ることができた。したがって、降雨による斜面崩壊のようにすべり面深さの大部分が 2m 以下のような場合には、本提案システムの適用は有効である。
- ただし、今回は、深度 2m までのマサ土地盤を対象としたため、上載荷重 σ'_v による中空管内の試料の密度増加現象⁵⁾は考慮していない。したがって、さ

らに深いマサ土地盤に本提案システムを適用する場合は、 σ'_v の影響は無視できないと思われる。

また、今回は、マサ土の不攪乱試料を飽和させ、等方圧密排水三軸圧縮条件下の ϕ_d の推定に限定しているため、飽和度、異方性、有効拘束圧などの影響については別途検討する必要がある。

④ 密度による砂の ϕ_d の推定式⁷⁾を岡山のマサ土に適用した結果、意外に良い推定値になった。しかし、式(6)の適用範囲は自然砂に限定されており、その適用の可否については、今後の研究を待たねばなるまい。

⑤ 本提案システムでは、 ϕ_d 以外に、原位置のマサ土の含水比 ω_f 、湿潤密度 ρ_{df} および乾燥密度 ρ_{df} といった重要な地盤情報を得ることができる。

今回提案したシステムの適用は、岡山のマサ土の一現場のみである。今後は、 F_c が20%未満の他のマサ土地盤に本提案システムを適用し、システムの信頼性の向上に努めたい。また、マサ土の密度と浸透特性の関係などを研究し、斜面崩壊の機構を明らかにしていきたい。

謝辞：本研究には、社団法人 中国建設弘済会の助成が与えられた。末筆ながら、記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩司: 雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文集, No. 330, pp. 107~114, 1983.
- 2) 八木則男, 矢田部龍一, 榎 明潔: 降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量, 土木学会論文集, No. 418, pp. 65~73, 1990.
- 3) 佐々木清一: 乱さないまさ土の土構造と工学的性質, 土と基礎, Vol. 39, No. 6, pp. 29~34, 1991.

- 4) 西田一彦: 風化残積土の特性と工学的問題, 土と基礎, Vol. 39, No. 6, pp. 1~8, 1991.
- 5) 奥山一典, 藤原身江子, 大西智佳, 八木則男: 二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法, 土木学会論文集, No. 652/III-51, pp. 141~153, 2000. 6.
- 6) 奥山一典, 藤原身江子, 田平健二, 八木則男: 砂礫地盤の密度情報に基づく力学定数の推定システム, 第44回地盤工学シンポジウム平成11年度発表論文集, pp. 233~238, 1999. 11.
- 7) 奥山一典, 与那城稔, 藤原身江子, 田平健二, 真田博司: 密度による砂地盤のせん断抵抗角 ϕ_d の推定システム, 土木学会論文集, No. 652/III-51, pp. 155~169, 2000. 6.
- 8) 最上武雄: 1948年型の土質力学と幻の土質力学, 学窓雑筆, 技報堂出版, pp. 75~80, 1980. 8.
- 9) 猪木幸男, 村上允英, 大久保雅弘: 日本の地質7, 共立出版, 中国地方, pp. 64, 1987.
- 10) 地盤工学会: 改正地盤工学会基準・同解説, 地盤材料の工学的分類方法(日本統一分類法)(JGS M 111-1996), 1996. 8.
- 11) 山肩邦男, 伊藤淳志, 下平祐司, 浜田晃之: 標準貫入試験におけるサンプラー内侵入土の性状について, 第23回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 105~106, 1988.
- 12) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, p. 510, 1990.
- 13) 倉田 進, 藤下利男: 砂粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸技術研究所報告, Vol. 11, No. 9, pp. 1~37, 1961.
- 14) 伊豫屋紀子, 藤原身江子, 奥山一典, 大西智佳: SPTサンプラーによるマサ土の現場密度測定, 第35回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 439~440, 2000. 6.
- 15) 真田博司, 大西智佳, 藤原身江子, 奥山一典: 密度によるマサ土の ϕ_d の推定方法について, 土木学会第55回年次学術講演会概要集(CD-ROM), III-A287, 2000. 9.
- 16) Dunham, J. W.: Pile foundations for buildings, Proc. ASCE, Soil Mechanics and Foundations Division, 1957.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, IV下部構造編, 1990. 5.

(2000. 6. 9 受付)

SYSTEM FOR ESTIMATING IN-SITU ANGLE OF SHEAR RESISTANCE ϕ_d OF DECOMPOSED GRANITE SOIL

Kazunori OKUYAMA, Toshiyuki KAWAHARA, Mieko FUJIWARA, Takeshi HIRAKAWA, Ryuji KITAGAWA and Norio YAGHI

In the present study, it was attempted to apply the density-measurement method by using a split-spoon sampler with built-in tube to a decomposed granite soil, and to observe the variations in soil constants economically and accuracy. Dry density ρ_{df} of a decomposed granite soil sample determined by sand replacement method and that ρ_{ds2} determined with the help of a split-spoon sampler with built-in tube were compared to see a close correlation. In the next step, the relationship between angle of shear resistance ϕ_d and dry density ρ_d of an undisturbed sample of decomposed granite soil was combined with that between ρ_{df} and ρ_{ds2} to formulate a system for estimating in-situ ϕ_d for decomposed granite soil. This system was proved with accuracy.