

二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法

奥山一典¹・藤原身江子²・大西智佳²・八木則男³

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)

簡易で経済的なサンプリングが可能となるサンプラーを用いて精度の良い地盤情報(密度, 物理的性質)を大量に入手し, これを各種力学定数と関係付ければ, 解析・設計の信頼性が向上し, 建設事業費の縮減が期待できる. 本研究では, そのようなサンプラーの一つである二重管式標準貫入試験器による砂の試料採取機構や密度測定精度を明らかにした上で, 試料の密度補正式の誘導, 最大粒径に関する適用範囲の検討を行った. そして, 二重管式標準貫入試験器による実用的な砂地盤の密度測定方法を提案し, 密度を基にした砂のせん断抵抗角 ϕ_d の推定事例を示した.

Key Words : standard penetration test, measurement of density, sand, maximum particle size, particle breakage

1. はじめに

せん断特性や圧密特性などの把握を目的とする地盤調査を行う場合には, 品質の良い不攪乱試料のサンプリングが要求される. しかし, 土の密度や物理的性質の把握を目的とする場合には, 必ずしも不攪乱サンプリングをする必要はないであろう. したがって, 簡易で経済的なサンプリングが可能となるサンプラーを用いて精度の良い地盤情報(密度, 物理的性質)を大量に入手し, これを各種力学定数と関係付ければ, 解析・設計の信頼性が向上し, 建設事業費の縮減が期待できよう¹⁾.

そのようなサンプラーとしてはいくつかの形式が考えられるが, 本研究では, 図-1および写真-1に示す二重管式標準貫入試験器^{2), 3), 4), 5)}を用いることにする. 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(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 値測定と共に現場で簡単に密度を測定することができる. しかしながら, 砂地盤においては, 試料採取時に試料の密度が変化し, 原地盤の密度を正確に把握できないなどの問題がある. そのため, 小松田ら⁵⁾は, 二重管式標準貫入試験器で採取した

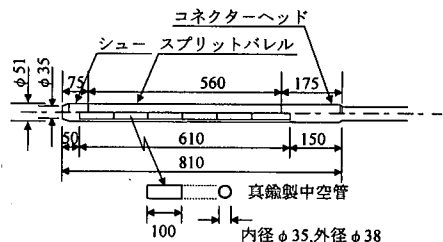


図-1 二重管式標準貫入試験器 (単位: mm)



写真-1 二重管式標準貫入試験器

砂質土の湿潤密度とサンドサンプラーのそれを比較することにより, 二重管式標準貫入試験器で採取された砂質土の湿潤密度の補正式を提案している. しかし, サンドサンプラーで採取された試料の密度は信頼性に疑問があるという指摘⁶⁾や補正式の適用範囲(とくに細粒分含有率 F_c の影響)などを考慮すると, 小松田らが提案した補正式は今一度検討を要すると思われる.

このような背景から, 本論文では, 二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法の実用化を目的とした基礎的研究を行った.

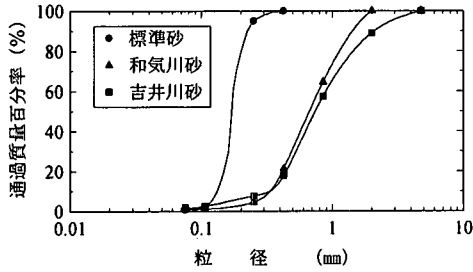


図-2 実験用試料の粒度分布

表-1 実験用試料の物理的性質

試料名	ρ_{s3} (g/cm ³)	D ₅₀ (mm)	U _c	e _{max}	e _{min}
標準砂	2.644	0.17	1.6	0.973	0.612
和気川砂	2.637	0.68	2.5	1.036	0.609
吉井川砂	2.672	0.76	3.0	0.844	0.494

本研究では、まず、土槽実験により試料採取機構や密度測定精度を明らかにし、土槽実験結果を基にした密度補正式を誘導する。つぎに、最大粒径に関する密度測定方法の適用範囲について検討する。そして、これらの検討結果を踏まえ、密度測定方法の提案を行う。最後に、提案した密度測定方法と密度による砂のせん断抵抗角 ϕ_d の推定式を組み合わせ、砂地盤における ϕ_d の推定事例を示す。

なお、本研究で対象とする砂とは、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⁷⁾における砂(S)、礫まじり砂(S-G)および礫質砂(SG)である。

2. 密度測定精度と密度補正式

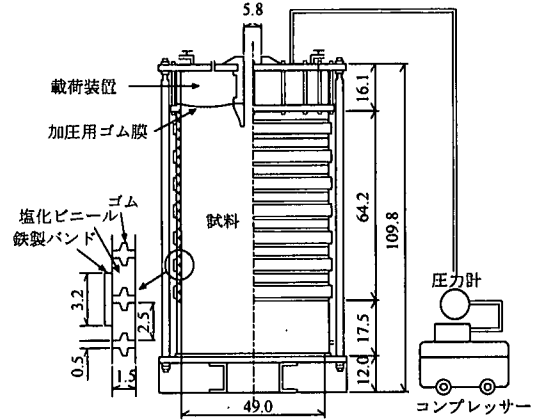
(1) 土槽実験による密度測定精度の把握

a) 実験用試料と実験方法

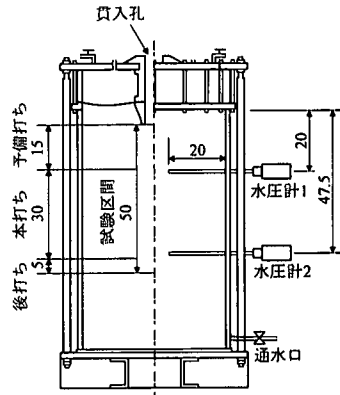
豊浦標準砂、和気川砂(愛媛県産)および吉井川砂(岡山県産)を実験用試料とした。これらの試料の物理的性質を表-1に、粒度分布を図-2に示す。なお、表-1中の最大間隙比 e_{max} および最小間隙比 e_{min} は、奥山ら⁸⁾が提案した砂礫の最大・最小密度試験法によって求めた。

図-3に示す積輪型土槽を用いて二重管式標準貫入試験器の密度測定精度の検証実験を行った。土槽上部の天蓋には載荷装置が取り付けられている。この載荷装置で与えた上載圧 p (=有効土被り圧 σ'_v)は、ほぼ一様に土槽内の試料に分布することが確認されている⁹⁾。

積輪型土槽内に、乾燥試料あるいは十分に水浸した試料を6層に分けて投入し、目標相対密度 D_r^T を



(a) 土槽の構造



(b) 水圧計の設置位置

図-3 積輪型土槽 (cm)

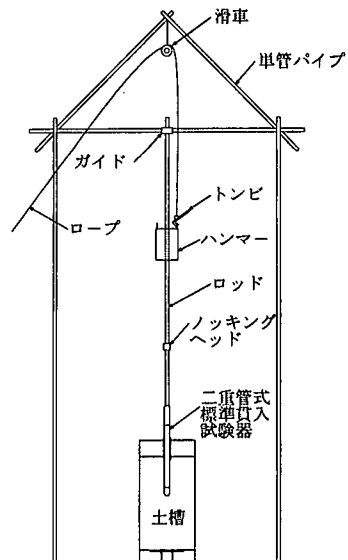


図-4 標準貫入試験状況

表-2 実験ケースと標準貫入試験結果

(a) 乾燥

試料名	D_r^T (%)	ケース 番号	D_{r0} (%)	ρ_{d0} (g/cm^3)	上載圧 σ_v (kPa)	D_{rf} (%)	ρ_{df} (g/cm^3)	N値 (回)	採取 本数 (本)
標準砂	100	1	107	1.665	0	107	1.665	9.0	2
		2	105	1.658	49	105	1.660	26.0	2
		3	109	1.675	98	110	1.678	31.0	2
		4	106	1.662	147	107	1.667	33.0	1
	80	5	77	1.560	0	77	1.560	3.0	2
		6	82	1.577	49	83	1.579	12.5	2
		7	81	1.574	98	83	1.579	15.0	2
		8	81	1.573	147	83	1.579	12.0	2
	50	9	48	1.468	0	48	1.468	1.0	2
		10	44	1.458	49	45	1.460	4.0	1
		11	48	1.468	98	49	1.473	9.5	2
		12	45	1.459	147	47	1.465	9.0	1

(b) 水浸

試料名	D_r^T (%)	ケース 番号	D_{r0} (%)	ρ_{d0} (g/cm^3)	上載圧 σ_v (kPa)	D_{rf} (%)	ρ_{df} (g/cm^3)	N値 (回)	採取 本数 (本)
標準砂	80	13	79	1.567	98	81	1.573	16.0	2
	65	14	65	1.521	98	68	1.531	10.5	2
	50	15	58	1.500	0	58	1.500	1.5	3
		16	65	1.521	49	67	1.526	4.5	2
		17	50	1.476	98	54	1.487	5.0	2
		18	63	1.513	147	67	1.527	8.5	3
和気川砂	100	19	100	1.640	98	102	1.647	15.0	3
	85	20	90	1.597	0	90	1.597	3.0	2
		21	91	1.599	49	92	1.605	7.5	3
		22	86	1.581	98	88	1.589	9.0	3
		23	88	1.587	147	91	1.599	11.5	3
	65	24	67	1.508	98	71	1.520	5.0	3
吉井川砂	100	25	103	1.803	0	103	1.803	9.5	3
		26	113	1.843	49	114	1.849	17.0	3
		27	88	1.739	98	90	1.747	15.5	3
		28	113	1.844	147	115	1.853	23.5	3
	80	29	96	1.770	0	96	1.770	3.0	3
		30	92	1.756	49	94	1.762	5.5	3
		31	69	1.666	98	71	1.674	4.0	2
		32	87	1.735	147	90	1.748	15.0	2
	50	33	54	1.613	98	57	1.623	3.0	3

目安に試料をバイブレーターで締固めて実験用地盤を作成した。なお、実験用地盤の密度は1層当たりの試料の投入量と各層の累計層厚で規定した。各層を仕上げる毎に土槽内の5箇所の地盤高を測定することで累計層厚を確認した。

貫入試験時に二重管式標準貫入試験器の周辺で発生する過剰間隙水圧を測定するため、水圧計を図-3(b)に示すよう設置した。水圧計は、実験用地盤を作成した後、土槽側方に設けた孔よりパイプ(外径4mm, 内径3mm)を挿入し、その端に取り付けた。

表-2に示すケースの標準貫入試験(JIS A 1219)を以下のように行った。まず、所要の p を実験用地盤に載荷した後、載荷装置の貫入孔内に侵入している試料を予備打ち開始深度まで丁寧に取り除く。つぎに、二重管式標準貫入試験器をロッドに取り付け、図-4のように土槽に設置する。そして、図-3(b)に示す位置で予備打ち15cm, 本打ち30cm, 後打ち

5cmの貫入試験をトンビ法で行い、本打ち区間でN値を測定した。

さて、所要の p を載荷した場合、実験用地盤は圧縮し、実験用地盤作成時の初期相対密度 D_{r0} (あるいは初期乾燥密度 ρ_{d0})は、 σ_v 下の相対密度 D_{rf} (あるいは σ_v 下の乾燥密度 ρ_{df})に変化する。そこで、実験ケース毎の圧密試験結果から、 D_{rf} を以下のようにして求めた。まず、試料を圧密容器に ρ_{d0} となるように詰めた後、水浸させる。ただし、表-2(a)の乾燥のケースでは水浸させない。つぎに、 σ_v 相当の圧密圧力を試料に載荷する。そして、圧密終了時の乾燥密度を σ_v 下における実験用地盤の ρ_{df} とし、最大・最小密度から D_{rf} を求める。

b) 実験結果と考察

表-2に標準貫入試験結果を示す。表中の採取本数は、試料採取できた中空管の本数のことである。以下に、本実験結果の考察を述べる。

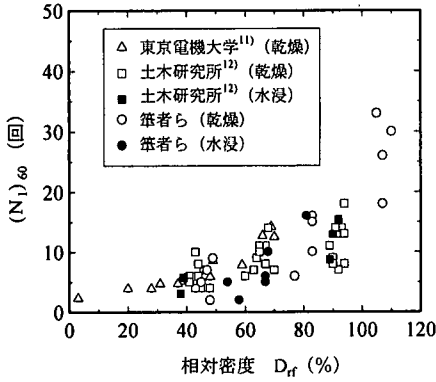


図-5 $(N_1)_{60} \sim D_{rf}$ 関係 (標準砂)

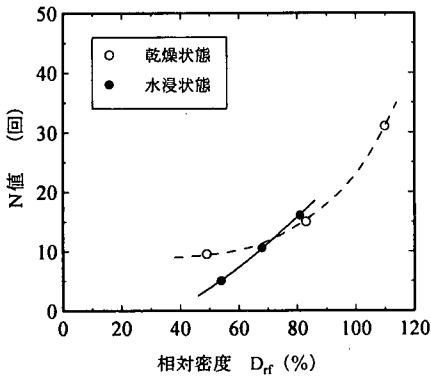


図-6 $N \sim D_{rf}$ 関係 (標準砂, $\sigma'_v = 98\text{kPa}$)

① N 値と D_{rf}

図-5 に標準砂の乾燥地盤と水浸地盤を対象として行った標準貫入試験から得られた $(N_1)_{60}$ と相対密度 D_{rf} の関係を示す。 $(N_1)_{60}$ は, Skempton¹⁰⁾ が次式で定義したもので, $\sigma'_v = 98\text{kPa}$, ロッドエネルギー比 $ER_r = 60\%$ に相当する換算 N 値である。

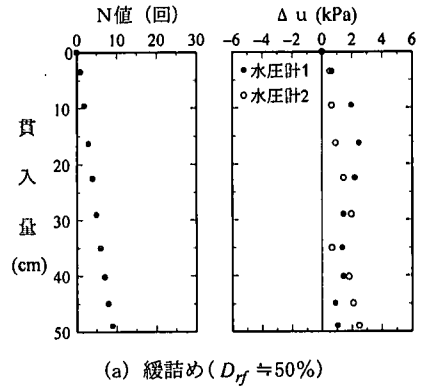
$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (1. a)$$

$$N_{60} = N \times (ER_r / 60) \quad (1. b)$$

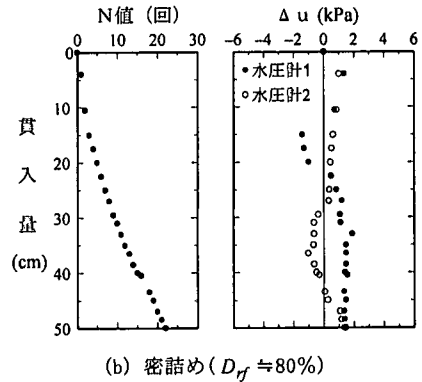
ここに, ER_r : ロッドエネルギー比 (コーンブリー法で65%, トンビ法で78%), N : 実測 N 値 (回), N_{60} : $ER_r = 60\%$ 相当に規準化された N 値, N_1 : $\sigma'_v = 98\text{kPa}$ 相当に規準化された N 値, C_N : 拘束圧に関する補正係数で $C_N = 2 / (1 + 0.0102 \sigma'_v)$ である。

同図には, 他の研究機関^{11), 12)} のデータも合わせて示すが, 乾燥・水浸地盤ともに, 本実験結果と同様の値を示している。

八木ら¹³⁾ は, 小型土槽を用いて砂地盤の動的貫入抵抗に関する研究を行い, 「動的貫入抵抗は, ゆるい地盤では飽和非排水状態で最も小さく, 飽和排水,



(a) 緩詰め ($D_{rf} \approx 50\%$)



(b) 密詰め ($D_{rf} \approx 80\%$)

図-7 貫入時の過剰間隙水圧 (標準砂, $\sigma'_v = 98\text{kPa}$)

乾燥状態の順に大きくなる。密な地盤では乾燥状態で最も小さく, 飽和非排水, 飽和排水状態の順に大きい。この貫入抵抗の差異は, 打撃直後に発生する動的水圧と地盤内の残留水圧に起因する。」という結論を得ている。図-6 に標準砂を用いて $\sigma'_v = 98\text{kPa}$ で行った標準貫入試験から得られた $N \sim D_{rf}$ 関係を示す。 D_{rf} が 70% より大きくなると水浸状態の N 値は乾燥状態のそれよりも大きくなる傾向を示しており, 先の八木らの結論とよく一致している。

② 貫入時の過剰間隙水圧

図-7 に標準砂からなる水浸地盤 ($\sigma'_v = 98\text{kPa}$) における貫入時の過剰間隙水圧 Δu を示す。図中の Δu は一回の打撃で発生した測定値のうち絶対値の大きい方を表示している。同図では, 緩詰め ($D_{rf} \approx 50\%$) では正の Δu が卓越して発生している。また, 密詰め ($D_{rf} \approx 80\%$) では二重管式標準貫入試験器の先端付近で負の Δu が発生している。この現象は, 砂のダイレイタンス特性を反映したもので, つぎのように説明できよう。緩詰めでは, 二重管式標準貫入試験器の貫入によって試験器先端付近の地盤がせん断変形を受け, 負のダイレイタンスによる正の Δu が発生する。一方, 密詰めでは, 同様に正のダイレイタンスによる負の Δu が発生する。

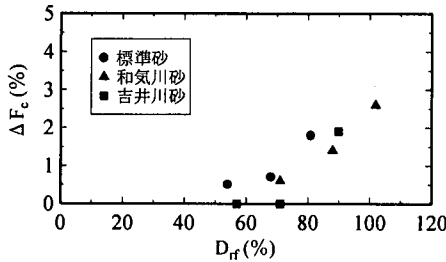


図-8 $\Delta F_c \sim D_{rf}$ 関係 (水浸, $\sigma'_v = 98\text{kPa}$)

③ 試料の採取率

表-2(b)に示す全21ケースの実験では、サンプラーの先端から4番目の中空管の途中まで試料が侵入して1~3番目の中空管で試料採取できたのは14ケースである。残りの7ケースでは、3番目の中空管の途中までしか試料が侵入しておらず、試料採取できたのは1~2番目の中空管であった。サンプラー内への試料の侵入長の違いは、「ゆるい低拘束圧の地盤では、サンプラー先端における砂の側方移動が起こりやすいため浸入砂長が短くなり、密で高拘束圧の地盤では、サンプラー先端における砂の側方移動が拘束されるため浸入砂長が増加する」という砂のサンプラー内への浸入機構¹⁴⁾や試料の摩擦などの違いに起因すると思われる。いずれにせよ、水浸試料の場合、確実に試料採取できるのは、サンプラーの先端から1番目と2番目の中空管である。

④ 採取試料の粒子破碎

図-8は、表-2(b)の $\sigma'_v = 98\text{kPa}$ における実験用地盤の D_{rf} と採取試料の増加細粒分含有率 ΔF_c との関係である。 ΔF_c は、つぎのようにして求めた。サンプラーの先端から1番目と2番目の中空管に採取された試料を合わせて粒度試験を行い、採取後試料の細粒分含有率 F_{cs} と採取前試料の細粒分含有率 F_{cf} との差を $\Delta F_c (= F_{cs} - F_{cf})$ とする。同図をみると、 D_{rf} が70%を超えると ΔF_c が増加し始め、 ΔF_c は最大3%近くに達している。

本実験前には、採取できた1番目と2番目の中空管の平均密度から原地盤密度を推定することを考えていたため²⁾、今回は1番目と2番目の中空管に採取された試料の粒子破碎の違いを明らかにできなかった。しかし、山肩ら¹⁴⁾は、標準貫入試験器内に侵入する砂の性状について調査・検討し、「貫入の初期においては、サンプラー内浸入砂長は短く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、サンプラー内には低拘束圧状態でせん断された砂が浸入する。したがって、その砂は粒子破碎も少なくあまり締め固まっていない。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

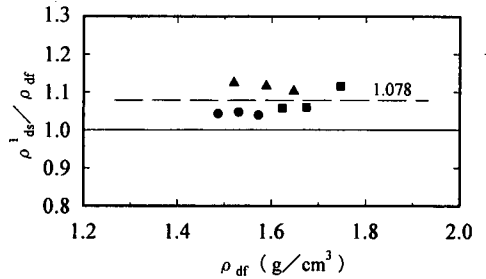
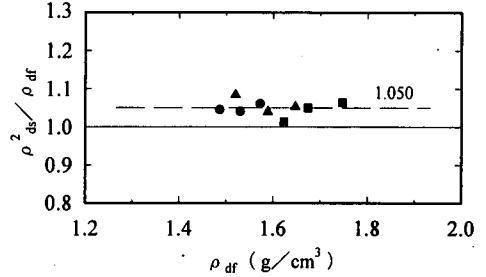
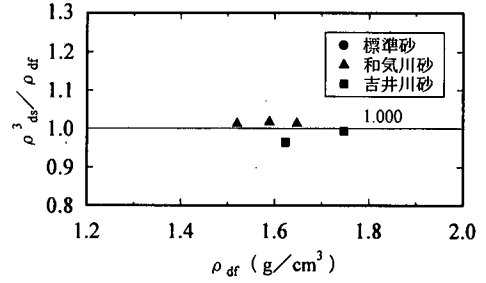


図-9 $\rho'_{ds} \sim (\rho'_{ds} / \rho_{df})$ 関係 (水浸)

加して先端における閉塞効果が発揮されはじめると、大きな拘束圧を受けた状態でせん断された砂が浸入する。その砂は、粒子破碎が著しく、密なものとなる。これらのサンプラー内浸入砂の粒子破碎および密実化は、地盤が密で拘束圧が大きいほど顕著となる。」という結論を得ている。そして、山肩ら¹⁴⁾の実験データ($D_r = 100\%$)をみると、サンプラーの先端から5~15cmの区間(二重管式標準貫入試験器では1番目の中空管に相当)の平均 ΔF_c は4%程度である。また、15~25cmの(二重管式標準貫入試験器では2番目の中空管に相当)の平均 ΔF_c は1%程度である。このことから、1番目の中空管に採取された試料に比べ、2番目の試料の粒子破碎は極めて小さいと考えられる。

⑤ 採取試料の乾燥密度

図-9に各中空管の $\rho'_{ds} \sim (\rho'_{ds} / \rho_{df})$ 関係を示す。ここに、 ρ_{df} は $\sigma'_v = 98\text{kPa}$ における実験用地盤の乾燥密度であり、 ρ'_{ds} (i:二重管式標準貫入試験器内の中空管の位置を表す番号で、先端から近い順に1, 2, 3)

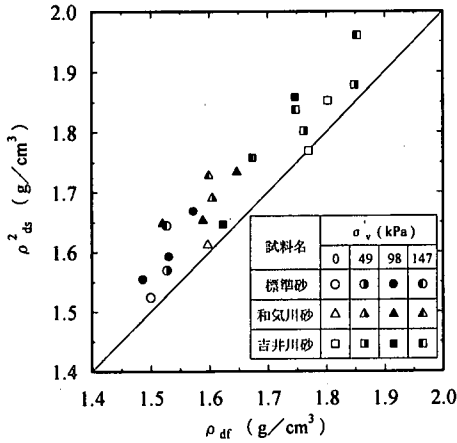


図-10 ρ_{df} ~ ρ_{ds}² 関係 (水浸)

は中空管内に採取された試料の乾燥密度である。同図より、試験器の先端に近い中空管ほど、(ρ_{ds}¹/ρ_{df})が大きく、採取試料がよく締まる傾向にあることが分かる。これは、先に述べた山肩らの実験結果とよく一致している。また、(ρ_{ds}¹/ρ_{df})と(ρ_{ds}²/ρ_{df})を較べると、(ρ_{ds}²/ρ_{df})には試料の違いによる差は極めて小さい。

採取試料の密度の代表値としては、つぎの理由から、ρ_{ds}³が望ましい。試料の物理的特性と各種力学定数を関連付ける際に粒子破碎の影響が少ない方がよい、試料の違いによる(ρ_{ds}¹/ρ_{df})の差が小さい方が以後の密度補正式の誘導に都合がよい。しかし、前述したように3番目の中空管の採取率は低いため、実地盤に適用した場合、深度方向に連続したデータを得られない恐れがある。そこで、採取試料の密度の代表値としては、ρ_{ds}²を採用することにした。

図-10にρ_{df} ~ ρ_{ds}²関係を示す。ρ_{df}とρ_{ds}²は強い相関を示しているが、σ'_vの影響を受けているように伺われる¹⁵⁾。そこで、σ'_v ~ (ρ_{ds}²/ρ_{df})関係を図-11に示す。同図より、σ'_vと(ρ_{ds}²/ρ_{df})は比較的良好な直線関係にあることが分かる。これは、σ'_vが増加すると、せん断強度が増加して貫入抵抗が増すため、打撃回数が増え、中空管内の試料がよく締固められるためであろう。

(2) 密度補正式の誘導

前節の土槽実験結果から、ρ_{ds}²を用いてF_cが5%未満の砂地盤の密度を推定するには、σ'_vを考慮したρ_{ds}²の補正が必要である。

以下にρ_{ds}²の補正式を誘導する。

図-11のσ'_v ~ (ρ_{ds}²/ρ_{df})関係において(ρ_{ds}²/ρ_{df})に関する単回帰分析を行うと、次式を得ることができる。

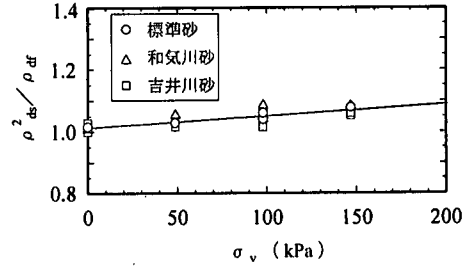


図-11 σ'_v ~ (ρ_{ds}²/ρ_{df}) 関係 (水浸)

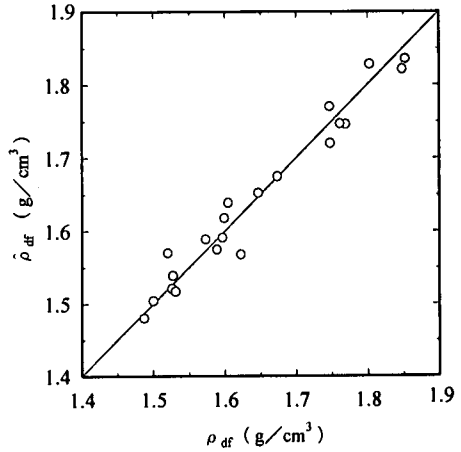


図-12 ρ̂_{df} ~ ρ_{df} 関係 (水浸)

$$\left(\frac{\rho_{ds}^2}{\rho_{df}}\right) = 0.000371 \sigma'_v + 1.013 \quad (r=0.768) \quad (2)$$

上式を展開して得られる次式でρ_{ds}²を補正すれば、ρ_{df}を推定することができる。

$$\hat{\rho}_{df} = \rho_{ds}^2 / (0.000371 \sigma'_v + 1.013) \quad (3)$$

ここに、ρ̂_{df} (g/cm³): 原地盤の乾燥密度の推定値である。

図-10、表-5に示すρ_{ds}²に式(3)を適用して推定したρ̂_{df}と実験用地盤の乾燥密度ρ_{df}の関係を図-12に示す。ρ̂_{df}とρ_{df}の比をとると、(ρ̂_{df}/ρ_{df})の平均値は1.000で、変動係数は0.015である。したがって、式(3)はσ'_vがρ_{ds}²に及ぼす影響を十分補正していると言えよう。ただし、この補正式は、土槽実験に基づく実験式であるから、実用化にあたっては、凍結サンプリングなどによる現場での実証が必要である。

3. 最大粒径に関する適用範囲の検討

図-13は単一粒径に近い相似粒度のガラスビーズの最大密度試験結果¹⁶⁾であるが、ある最大粒径D_{max}

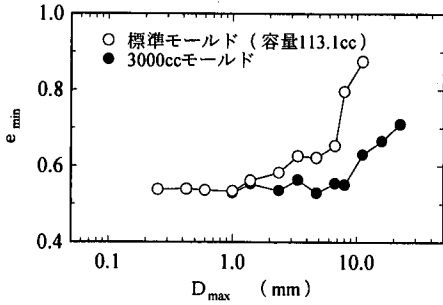


図-13 ガラスビーズの最小間隙比急増現象¹⁶⁾

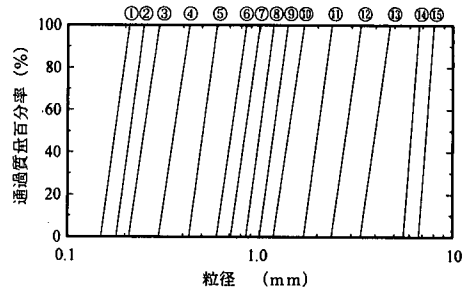


図-14 実験用試料の粒度分布

表-3 実験用試料の物理的性質

試料名	粒径加積曲線番号	U_c	ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)		
GB	②	1.19	2.484	0.250		
	④		2.492	0.425		
	⑤		2.490	0.600		
	⑦		2.485	1.00		
	⑨		2.489	1.40		
	⑪		2.482	2.36		
	⑫		2.510	3.35		
	⑬		2.502	4.75		
	⑭		1.09	2.521	6.7	
	⑮			2.518	8.0	
	碎石 (C-40)	①		1.19	2.645	0.212
		③			2.650	0.300
		④			2.650	0.425
		⑤	2.648		0.600	
		⑥	2.647		0.850	
⑧		2.659	1.18			
⑩		2.657	1.70			
⑪	2.650	2.36				

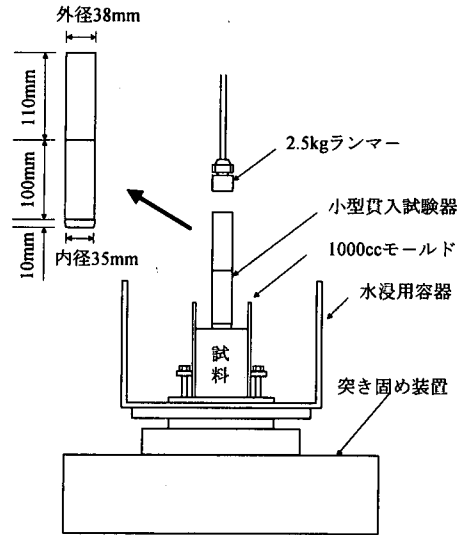


図-15 小型貫入試験器による試料採取

から最小間隙比 e_{min} が急増していることが分かる。このような間隙比急増現象は、試料の余盛り除去や局所充填構造に起因し¹⁷⁾、最小密度試験でも発生する。そのため、砂の最大・最小密度試験では、試料の最大粒径値の制限がなされている訳である。

二重管式標準貫入試験器の中空管に採取された試料についても、充填機構は異なるが、間隙比急増現象が生じる¹⁸⁾。したがって、二重管式標準貫入試験器による密度測定においても採取試料の最大粒径値を制限し、適用範囲を明確にする必要がある。本章では、二重管式標準貫入試験器における間隙比急増現象を簡単な実験で示し、試料の最大粒径値の制限方法を提案する。

(1) 密度測定における間隙比急増現象

a) 実験用試料と実験方法

単一粒径に近く粒度調整した相似粒度の碎石とガラスビーズ GB を実験用試料とした。試料の粒度分布を図-14 に、物理的性質を表-3 に示す。

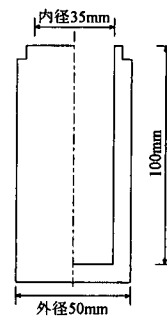


図-16 小型モールド(容量 96.2cc)

まず、絶乾状態の碎石を締め固め試験用の 1000cc モールドに相対密度 60% で充填し、実験用地盤を作成した。つぎに、図-15 に示すように小型貫入試験器をモールドの表面に設置し、2.5kg のランマーを落下させ、所定の深度まで貫入させた。そして、先端の中空管に採取された試料の密度を測定した。なお、小型貫入試験器は、

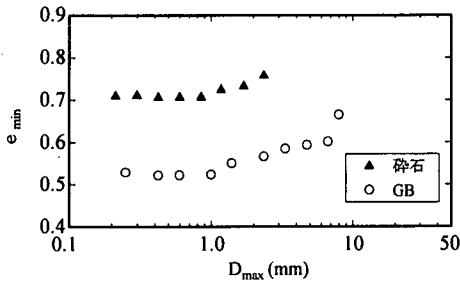


図-17 $D_{max} \sim e_{min}$ 関係 (e_{min} は小型モールドによる)

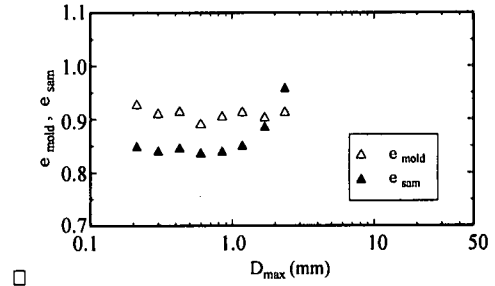


図-18 碎石の $D_{max} \sim e_{sam}, e_{mold}$ 関係(乾燥)

中空管を加工した小型シュートと2個の中空管をビニールテープで固定して形成されている。

また、図-16に示すような中空管と同じ内径と深さの小型モールド(内径 35mm, 深さ 100mm)を用い、現行試験法(JGS T 161-1990)に準じて碎石とGBの最大密度試験を行った。

b) 実験結果と考察

図-17にGBと碎石の最大粒径 D_{max} と最小間隙比 e_{min} との関係を示すが、いずれの試料も $D_{max} = 1$ mm から間隙比増加現象が生じていることが分かる。

図-18に最大粒径 D_{max} と採取試料の間隙比 e_{sam} との関係および D_{max} と実験用地盤の間隙比 e_{mold} との関係を示す。 $D_{max} = 1$ mm までは e_{sam} の方が e_{mold} よりも小さいが、 D_{max} が 1 mm を超えると e_{sam} は増大し始め、図-17と同様の傾向が伺える。このことから、単一粒径に近い試料の場合、二重管式標準貫入試験器の最大粒径の制限値は 1 mm と見なせよう。

また、 $D_{max} = 1$ mm までは、土槽実験結果(図-11)に比べ、 σ'_v がなくても採取試料の密度が著しく増大している。これは、①乾燥試料であること、②モールドが小さいため、小型試験器周辺の試料の流動が拘束され、採取試料に大きな締固めエネルギーが与えられること等に起因すると思われる。

(2) 粒度分布を考慮した最大粒径値の制限方法

前節の実験結果では、二重管式標準貫入試験器においても、試料の充填機構が異なるにも関わらず、砂の最大・最小密度試験と同様の間隙比増加現象が生じている。その原因としては、つぎの二つが考えられる。

① 二重管式標準貫入試験器の中空管内に採取された試料の端面整形時に、容器表面の粒子が取り除かれ、空隙が発生する。

② 中空管内に試料が充填採取される際、中空管の内壁付近の粒子が緩く充填される。

これらは、砂の最大・最小密度試験における間隙比急増現象の発生原因に類似している。したがって、

奥山ら⁸⁾が以下のように提案した砂の最大・最小密度試験における粒度分布を考慮した最大粒径値の制限方法を二重管式標準貫入試験器による密度測定における最大粒径値の制限方法として準用可能と思われる。

まず、試料の粒度分布から、次式によって平均粒径 D_m を求める。

$$D_m = \sum p_i D_i \quad (4)$$

ここに、 D_i : 最小粒径から数えて i 番目のふるい径を通過した粒径、 p_i : 最小粒径から数えて i 番目のふるい径を通過し ($i-1$) 番目のふるい径に留まる試料の質量を試料の全質量で除した値である ($\sum p_i = 1$)。

つぎに、次式により、適用の可否を判定する。

$$D^* \geq D_m \text{ ならば 適用可} \quad (5.a)$$

$$D^* < D_m \text{ ならば 適用不可} \quad (5.b)$$

ここに、 D^* は単一粒径の粒状体を用いた最大・最小密度試験における最大粒径の制限値であり、試験に用いるモールドの形状によってその値は異なる。ちなみに、容量 113.1cc のモールド(内径 60mm, 深さ 40mm)を用いる現行の最大・最小密度試験法の場合、 D^* の値は 1 mm である。

(3) 最大粒径値の制限方法の検証

本節では、砂の最大・最小密度試験における粒度分布を考慮した最大粒径値の制限方法が二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限に準用できるかどうかを目的とした検証実験を行う。

a) 実験用試料と実験方法

碎石を JIS の全標準ふるいで図-19のように粒度調整したものを実験用試料とした。図-19中の $U_c = 1.19$ の相似粒度試料の物理的性質を表-4に示す。

なお、 $U_c = 3.33, 5.58, 11.19$ の相似粒度試料は、 $U_c = 1.19$ の相似粒度試料をベースに作製した。

第1節と同じ手順で、相似粒度毎に小型貫入試験

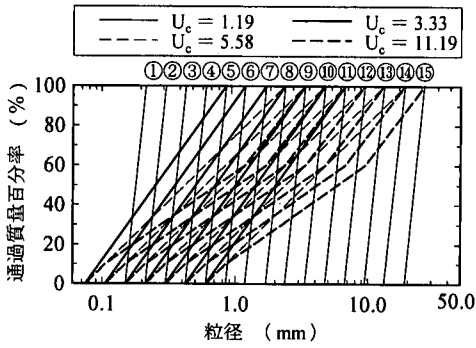


図-19 試料の粒度分布

表-4 相似粒度試料の物理的性質

試料名	粒径加積曲線番号	U_c	ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)
碎石 (C-40)	①	1.19	2.645	0.212
	②		2.650	0.300
	③		2.650	0.425
	④		2.648	0.600
	⑤		2.647	0.850
	⑥		2.659	1.18
	⑦		2.657	1.70
	⑧		2.650	2.36
	⑨		2.657	3.35
	⑩		2.631	4.75
	⑪		2.648	6.7
	⑫		2.611	9.5
	⑬		2.627	13.2
	⑭		2.631	19.0
	⑮		2.643	26.5

間隙比	均等係数 U_c			
	1.19	3.33	5.58	11.19
e_{mold}	○	△	□	▽
e_{sam}	●	▲	■	▼

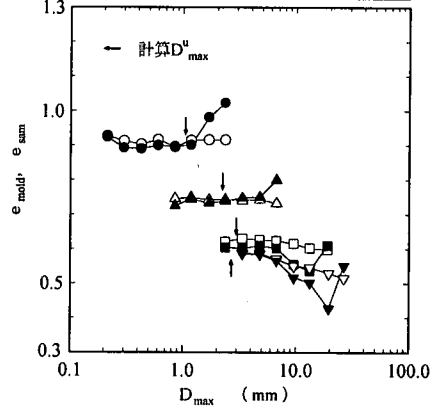


図-20 $D_{max} \sim e_{sam}$ 関係(水浸)

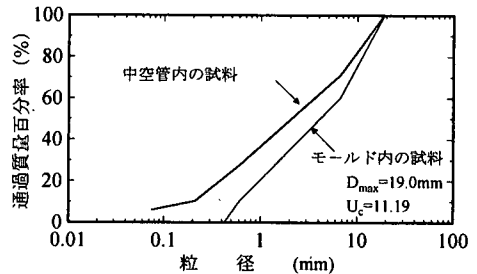


図-21 最大粒径制限値を超えた試料の粒子破碎

器による試料採取実験を行った。ただし、水浸用容器に水を入れ、モールド内を水浸状態にした。水浸状態にしたのは以下の理由による。第1節では最大密度試験の試料の状態に合わせて乾燥試料を用いたが、今回の研究では対象として飽和砂地盤を考えているためである。

b) 実験結果と考察

図-20 に最大粒径 D_{max} と採取試料の間隙比 e_{sam} との関係を示す。図中の矢印は、計算した最大粒径制限値 D_{max}^u を示す。計算 D_{max}^u は以下の手順で求めている。まず、図-19 に示す各相似粒度の粒度分布ごとに式(4)から算出した D_m を D_m^{cal} とする。つぎに、 D_m^{cal} と D_{max} を両対数紙にプロットすると直線関係が得られる。この直線関係において $D_m^{cal} = D^*$ に対応する D_{max} を計算 D_{max}^u とする。なお、図-17、図-18 より、 D^* の値は1mmとする。

図-20 をみると、 $U_c = 1.19, 3.33$ のケースでは、計算 D_{max}^u よりも大きい D_{max} で e_{sam} の急増現象が生じている。また、 $U_c = 5.58, 11.19$ のケースでは、一旦 e_{sam} が減少した後に e_{sam} の急増現象が生じて

いる。これは、試料の著しい粒子破碎によって中空管内の採取試料が締め固まったことによる。図-21 に示す $D_{max} = 19\text{mm}$ 、 $U_c = 11.19$ の試料の採取前後の粒度分布より、粒子破碎の状況がよく伺える。しかし、全てのケースで、試料の D_{max} が計算 D_{max}^u よりも小さければ e_{sam} の急増現象や粒子破碎に起因する e_{sam} の減少は生じていない。したがって、 $D^* \geq D_m$ となる試料には、二重管式標準貫入試験器による密度測定方法の適用が可能と言えよう。すなわち、「砂の最大・最小密度試験における粒度分布を考慮した最大粒径値の制限方法は、二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限方法として準用できる」と結論される。

さて、現行の砂の最大・最小密度試験の D^* と二重管式標準貫入試験器のそれは同じ1mmである。最大粒径制限値は D^* に支配されるため、砂の最大・最小密度試験と二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限値は同じ値になる。砂の最大・最小密度試験の最大粒径制限値は3~5mmと想定されている⁸⁾ので、二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限値も3~5mm程度と考えられる。

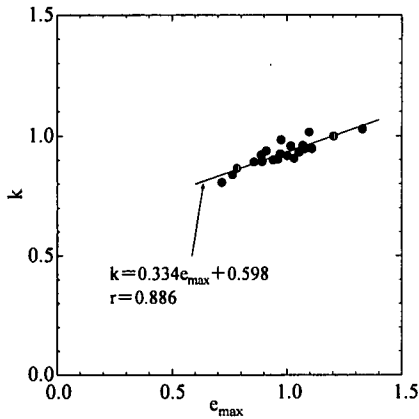


図-22 各種自然砂の $e_{max} \sim k$ 関係²¹⁾

4. 密度測定方法の提案と適用事例

(1) 二重管式標準貫入試験器による密度測定方法

二重管式標準貫入試験器による砂地盤の密度測定方法を以下のように提案する。

a) 測定方法

密度測定は、以下の手順で行う。

- ① ポーリングロッドに二重管式標準貫入試験器を接続し、通常の標準貫入試験を実施する。
- ② 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、シューおよびコネクターヘッドを取り外し、スプリットバレルを二つに割る。
- ③ 先端から2番目の中空管を慎重に取り出し、両端面をエッジナイフで整形する。
- ④ 試料が詰まった中空管の重量を測定する。なお、中空管の重量は予め測定しておく。
- ⑤ 中空管内の試料を容器に密封する。
- ⑥ その他の中空管に採取された試料も別の容器に密封した後、全ての中空管を洗浄する。
- ⑦ 中空管を二重管式標準貫入試験器にセットし、削孔後、①からの作業を繰り返す。
- ⑧ 所要の作業終了後、試料を試験室に持ち帰り、各種物理試験を行い、式(3)から原地盤の乾燥密度を推定する。なお、式(3)中の σ'_v としては標準貫入試験開始深度における有効土被り圧を用いる。

b) 適用範囲

細粒分含有率が5%未満の飽和した砂(S, S-G, SG)を対象とし、最大粒径制限は以下のように行う。

まず、砂の粒度分布に式(4)を用いて平均粒径 D_m を求める。つぎに、 $D^* \geq D_m$ となれば密度測定方法の適用が可能と判定する。なお、 D^* は1mmとする。

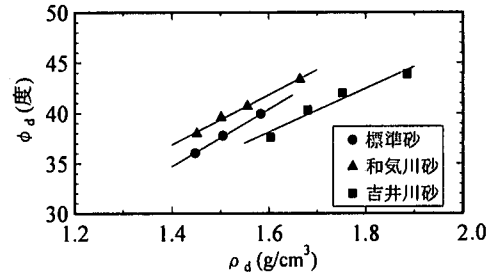


図-23 実験用試料の $\rho_d \sim \phi_d$ 関係

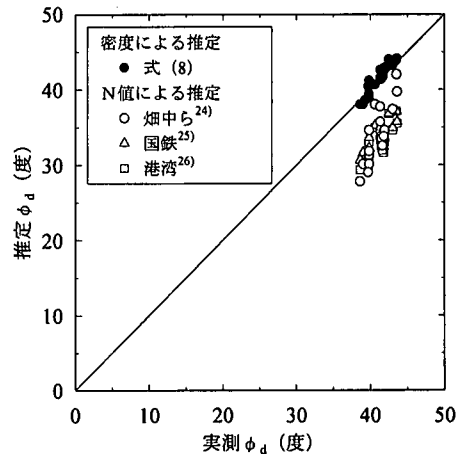


図-24 実測 $\phi_d \sim$ 推定 ϕ_d 関係

(2) 密度による砂地盤の ϕ_d の推定事例

土槽実験や現場実験から砂質地盤の N 値とせん断抵抗角 ϕ_d の関係式が多数提案されている。この関係式は、設計時に N 値を利用して ϕ_d を求める際によく使われている。一方、 N 値は用いず、砂の強度式を利用して密度から ϕ_d を推定する方法がある。この密度による推定方法は、 N 値による推定方法よりも推定精度が高いと考えられるが、いかに経済的に密度を測定するかが問題であった。

本節では、密度による ϕ_d の推定式と本密度測定方法を組み合わせ、砂の ϕ_d を推定した事例を示す。

a) 密度による ϕ_d の推定式

立元¹⁹⁾は、最上の強度式²⁰⁾中の定数 k と最大間隙比 e_{max} に強い相関があることを見出し、この関係を利用して砂の ϕ_d を推定できる可能性を示唆している。そこで、各種の自然砂を試料として最小密度試験と等方圧密排水三軸圧縮試験を行い、次式²⁰⁾から定数 k を得た。

$$\sin \phi_d = \frac{3k}{2(1+e_0)+k} \quad (6)$$

ここに、 e_0 : 初期間隙比、 k : 強度特性を表す定数で

表-5 土槽実験結果

試料名	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	上載圧 σ_v (kPa)	N値 (回)	ρ_{df} (g/cm ³)	ρ_{ds}^2 (g/cm ³)	$\hat{\rho}_{df}$ (g/cm ³)	\hat{e}_{df}	密度 による 推定 ϕ_d (度)	土槽の 実測 ϕ_d (度)
標準砂	2.644	0.973	0	1.5	1.500	1.524	1.504	0.757	38.6	39.3
			49	4.5	1.526	1.569	1.522	0.738	39.0	39.8
			98	5.0	1.487	1.554	1.481	0.785	38.0	39.0
			98	10.5	1.531	1.592	1.517	0.743	38.9	39.8
			98	16.0	1.573	1.668	1.590	0.663	40.7	40.6
			147	8.5	1.527	1.644	1.540	0.717	39.5	39.8
和気川砂	2.637	1.036	0	3.0	1.597	1.612	1.591	0.657	41.7	41.7
			49	7.5	1.605	1.690	1.639	0.609	42.9	41.9
			98	5.0	1.520	1.648	1.570	0.679	41.2	39.8
			98	9.0	1.589	1.653	1.575	0.674	41.3	41.5
			98	15.0	1.647	1.734	1.652	0.596	43.2	43.0
			147	11.5	1.599	1.728	1.619	0.629	42.4	41.8
吉井川砂	2.672	0.844	0	3.0	1.770	1.769	1.746	0.530	42.1	41.8
			0	9.5	1.803	1.852	1.828	0.462	44.0	42.5
			49	5.5	1.762	1.802	1.748	0.529	42.1	41.6
			49	17.0	1.849	1.878	1.821	0.467	43.8	43.5
			98	3.0	1.623	1.646	1.569	0.703	38.0	38.6
			98	4.0	1.674	1.758	1.675	0.595	40.4	39.7
			98	15.5	1.747	1.858	1.771	0.509	42.6	41.3
			147	15.0	1.748	1.837	1.721	0.553	41.5	41.3
			147	23.5	1.853	1.960	1.836	0.455	44.1	43.6

あり、粒子形状、粒子表面の粗滑、均等係数などによって定まるとされている。

図-22の21種類の自然砂の $e_{max} \sim k$ 関係²¹⁾には、良好な直線関係が認められる。kに関する単回帰分析を行うと、

$$k = 0.334e_{max} + 0.598 \quad (r=0.886) \quad (7)$$

となる。 ϕ_d の推定式は、式(6)および式(7)より、次式となる。

$$\sin \phi_d = \frac{3(0.334e_{max} + 0.598)}{2(1+e_0) + (0.334e_{max} + 0.598)} \quad (8)$$

上式に e_0 として原位置の間隙比を、 e_{max} として採取試料の e_{max} を適用すれば、原位置の ϕ_d を簡単に推定することができる。そして、推定された原位置の ϕ_d は、不攪乱採取試料を用いた三軸圧縮試験による ϕ_d と同等になると思われる。なぜなら、 ϕ_d は、密度によって大きく変わるが、粒子構造の乱れの影響を受けないからである^{22), 23)}。

b) 実験用地盤における ϕ_d の推定結果

表-2(b)のケースの実験結果を表-5に示す。表中の \hat{e}_{df} は、実験用地盤の推定間隙比であり、二重管式標準貫入試験器で採取した試料の乾燥密度 ρ_{ds}^2 を式(3)で密度補正したものである。土槽の実測 ϕ_d は、図-23に示す実験用試料の $\rho_{df} \sim \phi_d$ 関係に実験用地盤の ρ_{df} を適用して求めている。図-23の ϕ_d は、試料の密度を適当に変えて作製した供試体の等方圧密排水三軸圧縮試験結果である。

式(8)において $e_0 = \hat{e}_{df}$ として推定した ϕ_d すなわ

ち密度による推定 ϕ_d と土槽の実測 ϕ_d との関係を図-24に示す。また、同図には、N値による推定 ϕ_d と実測 ϕ_d の関係を合わせて示す。

図-24をみると、密度による推定 ϕ_d は、実測 ϕ_d と最大 $\pm 2^\circ$ 程度の違いである。この結果は、本密度測定方法を利用して原位置の ϕ_d を精度良く推定できることを示唆している。

一方、N値による推定 ϕ_d は、非常にバラツキが大きく、実測 ϕ_d よりもかなり小さいことがわかる。なお、N値による ϕ_d の推定は以下の式で行った。畑中らの式²⁴⁾

$$\phi_d = (20N_1)^{0.5} + 20, \quad N_1 = N / (0.01\sigma'_v)^{0.5} \quad (9)$$

国鉄の式²⁵⁾

$$\phi_d = 1.85(N / 0.01\sigma'_v + 0.7)^{0.6} + 28 \quad (10)$$

港湾の式²⁶⁾

$$\phi_d = 3.2(N / 0.01\sigma'_v + 0.7)^{0.5} + 25 \quad (11)$$

5. まとめ

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- ① 二重管式標準貫入試験器の先端から2本目の中空管に採取された試料は、乾燥密度のバラツキが最も小さく、粒子破碎の影響も小さいと考えられる。これらのことから、2本目の中空管に採取された試料の乾燥密度 ρ_{ds}^2 を本測定方法における測定値とし

て採用した。

② 有効土被り圧 σ'_v が同じであれば、試料の物理的性質の違いにかかわらず、原地盤の乾燥密度 ρ_{df} と ρ_{ds}^2 には良好な相関性が認められる。しかし、 σ'_v の増加に比例して ρ_{ds}^2 は大きくなり、 σ'_v は ρ_{ds}^2 に著しい影響を及ぼす。

③ ②を勘案して誘導した ρ_{ds}^2 の密度補正式は、 ρ_{df} を精度よく推定できる。ただし、この補正式の適用範囲は、 F_c が5%未満の飽和した砂である。

④ 砂の最大・最小密度試験における粒度分布を考慮した最大粒径値の制限方法は、二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限に準用できる。そして、この制限方法を準用すれば、本密度測定方法は最大粒径が3~5mm程度までの砂に適用可能と想定される。

⑤ 密度による ϕ_d の推定式と本密度測定方法を組み合わせると実験用砂地盤の ϕ_d を推定した事例を示したが、 N 値による ϕ_d の推定方法に比べ、極めて良い ϕ_d の推定精度を得ることができた。このことは、本密度測定方法を実用化することの意義を示唆していると言えよう。

今後は、本密度測定方法の実用化に向け、現場実証実験、 F_c が5%を超える砂地盤における密度補正方法の研究などを行う予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三島秀紀, 奥山一典, 佐藤 勲, 三宅雅生: SPT用サンプラーによる砂の密度測定精度, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 第3部(A), pp. 26~27, 1994.
- 3) 藤原身江子, 八木則男, 篠原 潤, 今泉伸二: SPTサンプラーによる砂礫地盤の密度測定精度(その2), 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 347~348, 1998.
- 4) 高橋昭一, 小松田精吉, 小室篤示: SPTサンプラーによる土の湿潤密度測定, 第22回土質工学研究発表会講演集, pp. 89~90, 1987.
- 5) 小松田精吉, 小室篤示: SPTサンプラーによる土の湿潤密度測定(その2), 第26回土質工学研究発表会講演集, pp. 147~148, 1991.
- 6) 吉見吉明: 砂の乱さない試料の液化抵抗~ N 値~相対密度関係, 土と基礎, Vol. 42, No. 4, pp. 63~67, 1994.
- 7) 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.
- 8) 奥山一典, 藤原身江子, 越智洋秀, 井上真理子: 砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大に関する研究, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 11~27, 1999. 12.
- 9) 越智洋秀, 奥山一典, 田平健二: 積輪型土槽内の土圧分布, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集2分冊の

1, pp. 415~416, 1996.

- 10) Skempton, A. W. : Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 3, pp. 425~447, 1986.
- 11) 西川 修, 安田 進, 小林利雄, 浅香寛之, 内藤福隆: 相対密度と N 値の関係に関する模型実験, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp. 290~291, 1996.
- 12) 古賀泰之, 古関潤一, 島津多賀夫, 三原正哉, 松原勝己: 動的貫入試験結果に及ぼす静止土圧係数(K_0)の影響, 第23回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 107~108, 1988.
- 13) 八木則男, 矢田部龍一: 砂地盤への静的・動的貫入試験に与える間隙水圧および応力状態の影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 3, Spt. pp. 155~164, 1983.
- 14) 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.
- 15) 篠原 潤, 八木則男, 藤原身江子, 今泉伸二: SPTサンプラーによる密度測定に及ぼす上載圧の影響, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 349~350, 1998.
- 16) 井上真理子, 藤原身江子, 奥山一典: 砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限とモールド形状の関係, 第32回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 311~312, 1997.
- 17) 越智洋秀, 津呂 剛, 田平健二, 奥山一典: 最大密度試験におけるモールド内の粒子の充填構造について, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, 第3部(A), pp. 736~737, 1997.
- 18) 伊豫屋紀子, 真田博司, 藤原身江子, 奥山一典: 二重管式標準貫入試験器の最大粒径制限について, 地盤工学会四国支部平成11年度技術講演概要集, pp. 39~40, 1999.
- 19) 立元 勉: 砂質土の粒度粒径などが最大・最小間隙比におよぼす影響について, 砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 71~78, 1981.
- 20) 最上武雄編: 土質力学, 技報堂出版, pp. 1029, 1982.
- 21) 真田博司, 田平健二, 藤原身江子, 奥山一典: 密度による自然砂の ϕ_d の推定方法, 地盤工学会四国支部平成11年度技術講演概要集, pp. 43~44, 1999.
- 22) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. : EFFECTS OF SAMMPLER DISTURBANCE ON DYNAMIC PROPERTIES OF SAND, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol. 26, No. 1, pp. 53~64, Mar. 1986.
- 23) 山崎 勉, 吉見吉昭: 乱さない密な新潟砂の排水せん断特性, 第19回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 263~264, 1984.
- 24) Hatanaka, M. and Uchida, A. : EMPIRICAL CORRELATION BETWEEN PENETRATION RESISTANCE AND INTERNAL FRICTION ANGLE OF SANDY SOILS, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol. 36, No. 4, pp. 1~9, 1996.
- 25) 土木学会: 国鉄建造物設計標準解説, 抗土圧構造物, 基礎構造物, 1986. 3.
- 26) 日本港湾協会: 港湾施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp. 245, 1999. 4.

(1999. 6. 21 受付)

THE MEASURING METHOD OF SAND DENSITY USING THE SPLIT SPOON SAMPLER WITH BUILT-IN TUBE

Kazunori OKUYAMA, Mieko FUJIWARA, Chika OHNISHI and Norio YAGHI

For the improvement of the reliability of ground design method, it is important that a lot of accurate data concerning the density and other physical properties can be obtained economically, and that those data are related to the mechanical constants. In this study, we proposed the practical measuring method of sand density using the split spoon sampler with built-in tube. The derivation of the corrected equation of density, the applicability of the limitation method of maximum particle size and the estimation method of ϕ_d based on the density data have been shown in this paper. The validity of this method was verified by some laboratory experiments.