

泥岩塊の締固め特性に及ぼす粗粒分の影響

後 藤 茂
(技術研究所)宮 本 武 司
(技術研究所)玉 置 克 之
(技術研究所)

§ 1. はじめに

フィルダムや山間部の大型造成の増加、および軟岩層への原子力発電所の立地などにより、軟岩や硬岩の掘削によって発生する岩塊を締固めて用いる機会が増加している。これらの構造物は社会的に重要であり、高い安全性が要求される。このため、設計時には動的な解析も含めた高度な解析が行なわれる。解析に用いる材料定数の精度は、解析方法自体の精度とバランスを保つ必要があり、このような高度の解析を行なう場合には材料の力学定数のばらつきに対する配慮がより一層重要になる。前述のような盛土などの人工地盤においては、力学定数は乾燥密度に強く影響されることが知られており、岩塊の締固め密度を正しく管理することが力学定数のばらつきを把握するうえでまず必要になる。

本論文では、軟岩の一種である泥岩塊を用いた一連の締固め試験および試験結果の解析により、締固め密度に影響を及ぼす要因を定量的に把握することを試みた。泥岩塊は粒径が広範囲にわたって変化し、しかも粒子が破碎しやすいという性質がある。他の土質材料における従来の研究では、このような性質は締固め密度に強く影響することが報告されており¹⁾²⁾、泥岩塊の締固め特性は複雑なものになることが予想される。

大型突固め試験機を用いた泥岩塊の室内締固め試験の結果、締固め密度は試料の粒度に強く影響されることが確認された。さらに、統計的手法などを用いて試験結果を解析することにより、締固め密度に対する粒度の影響を表わすパラメータとしては粗粒分含有率が適当であること、締固め特性曲線は粒度の影響も含めて数式的に表現できることなどを明らかにした。

§ 2. 試料

試験には、第三紀の泥岩層を掘削した際に発生した泥

岩塊を用いた。泥岩塊は掘削後あまり風化を受けていない状態のものであり、その物理的性質を表—1示す。

パラフィン法により測定した泥岩の乾燥密度は0.98～1.21 g/cm³の範囲であり、飽和度は96～99%であった。また、一軸圧縮強さは8.8～17.6 kgf/cm²の範囲である。

塊を十分ときほぐした状態における粒度組成は砂礫分が22～27%であり、細粒土に分類される。コンシステンシーは液性限界が52～64%、塑性指数が23～31%の範囲であり、日本統一土質分類ではCH(塑性の高い粘土)に分類される。土粒子比重は2.53～2.63の範囲であり、粘土の比重としては低い値である。

§ 3. 突固め試験装置および試験方法

3.1 試験装置

締固め試験には大型突固め試験機を用いた。表—2に

			範 囲	平均
* 粒度特性	礫 分	(2000 μm 以上)%	0～0.2	0.1
	砂 分	(74～2000 μm)%	22～27	25
	シルト分	(55～74 μm)%	57～60	58
	粘 土 分	(5 μm 以下)%	15～18	17
コテ特性 シス	液性限界	w %	52～64	58
	塑性限界	w_p %	28～33	30
	塑性指数	I_p %	23～31	28
分類	日本統一土質分類		CH	CH
	三角座標表示法		F	F
土粒子の比重 G_s			2.53～2.63	2.60
自然 状態	含 水 比	w %	47～64	54
	湿潤密度**	ρ_t g/cm ³	1.60～1.68	1.65
	乾燥密度**	ρ_d g/cm ³	0.98～1.21	1.10
	間 隙 比	e	1.32～1.67	1.45
	飽 和 度**	S_r %	96～99	98
	一軸圧縮強さ**	q_u kgf/cm ²	8.8 ～17.6	13.7

*JIS の方法による測定値

**泥岩塊についての測定値

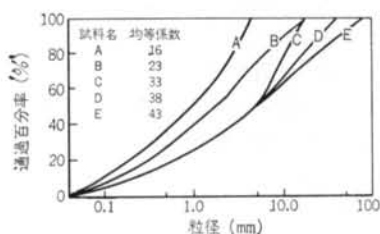
表—1 試料の物理的性質

モールド寸法	内径30cm, 高さ45cm, 容量 $31.91 \times 10^3 \text{cm}^3$
ランマー質量	7.5kg, 15kg
ランマー直径	10cm
ランマー落下高	30cm, 45cm, 60cm
材 質	軽合金 (モールド), スチール (底板, ランマー)

表—2 大型突固め試験装置の仕様

		締固め仕事量 ($\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$)		
		5.6×10^4	2.5×10^4	1.1×10^4
ランマ	質 量 (kg)	15	7.5	7.5
	落 下 高 (m)	0.45	0.45	0.45
各層当たり突固め回数		53	48	21
突固め層数		5	5	5
供試体	含 水 比 (%)	34~55	33~62	34~60
	試 料 名	A, B, E	A, B, C, D, E	A, E

表—3 試験条件一覧表



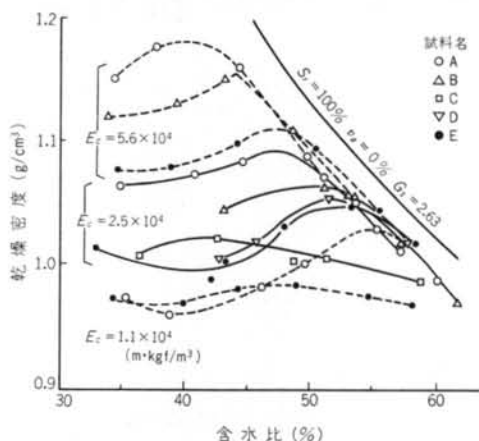
図—1 試料の粒度分布

装置の仕様を示す。この試験機は、粗粒材の試験を行なうためにモールド内径30cm, 容量 $31.9 \times 10^3 \text{cm}^3$ と大型になっており, CBR モードに比較して内径で2倍, 容量で14倍の大きさである。この装置では突固めは自動的に行なわれ, ランマーはモールド内縁にそって9回落下した後に中心部へ落下するようになっている。ランマーは付け替えることによって重量が変えられ, また落下高は30cm, 40cm, 50cmの3段階に切り替えることができる。

3.2 試験方法

試験は, 締固めエネルギーと試料の粒度分布および供試体の含水比を変化させて行なった。表—3に試験条件の一覧を示す。

締固めエネルギーは, JIS A 1210 の第1方法と同等の値である $5.6 \times 10^4 \text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ の他に $2.5 \times 10^4 \text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ と $1.1 \times 10^4 \text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ を行なった。試料には, 図—1に示す5通りに粒度調整した泥岩塊を用いた。粒度分布の調整は泥岩塊の粒径を4.76mm以下, 4.76~19.1mm, 19.1~38.1mm, 38.1~76.2mmの4段階にふるいわけた後, それぞれの試料を所定の割合で混合することによって行なった。なお, 試料は繰り返して用いないこととした。供



図—2 大型突固め試験による泥岩塊の締固め特性曲線

試体の含水比の調整は, 粒径によって分けた試料ごとに非乾燥法によって行ない, 供試体内に含水比の不均衡が生じないようにした。

締固め試験後の供試体は, 余分な土を取り除いた後に供試体とモールドおよび底板の全部をひょう量150kg, 感度100gの手動ばかりで計量して締固め密度を算出した。なお, 供試体の含水比は供試体の上部, 中部および下部の3箇所からそれぞれ2kg以上の試料を採取して測定した。

§ 4. 試験結果

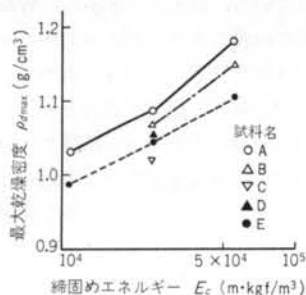
大型突固め試験によって得られた泥岩塊の締固め特性曲線を図—2に示す。また, 特性曲線から求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の値を表—4に示す。

粒度分布と締固めエネルギーによって締固め特性曲線は大きく異なる。粗粒分が多いほど, または締固めエネルギーが小さいほど締固め特性曲線はゼロ空隙曲線に沿って右下に移動する。すなわち, 最大乾燥密度は低下し, 最適含水比は増加する傾向がある。

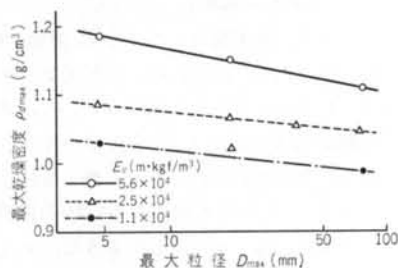
図—3に, 最大乾燥密度 ρ_{dmax} と締固めエネルギー E_c の関係を示す。従来からいわれているように, E_c が大きくなるに伴い ρ_{dmax} が増加する傾向がある。図—4および図—5に最大粒径 D_{max} および均等係数 U_c と ρ_{dmax} の関係を示す。礫まじり材料の締固め特性では, D_{max} が大きくなるほど, または U_c が大きくなるほど ρ_{dmax} が増加するといわれているが⁴⁾, 図—4および図—5では D_{max} および U_c が大きくなると ρ_{dmax} は減少している。各試験条件は, 表—5の相関マトリックスに示すように D_{max} と U_c が強い相関を持つ組合せになっており, D_{max}

試 験 条 件					試 験 結 果		
締固め エネルギー $E_c(\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3)$	粒 度 分 布 (%)				試料名	最適含水比 $w_{\text{opt}}(\%)$	最大乾燥密度 $\rho_{d\text{max}}(\text{g}/\text{cm}^3)$
	76~38 mm	38~19 mm	19~4.76 mm	4.76mm 以下			
5.6×10^4	13	13		100	A	39.9	1.184
			25	75	B	43.3	1.150
			24	50	E	47.3	1.107
2.5×10^4	13	13		100	A	46.2	1.085
			25	75	B	50.4	1.064
			50	50	C	42.0	1.021
			17	50	D	51.6	1.054
			13	24	50	E	53.1
1.1×10^4	13	13		100	A	58.6	1.031
			24	50	E	47.4	0.987

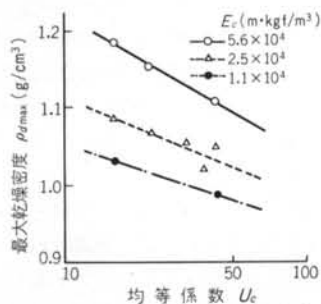
表—4 大型突固め試験による泥岩塊の最適含水比と最大乾燥密度



図—3 最大乾燥密度と締固めエネルギーの関係



図—4 最大乾燥密度と試料の最大粒径の関係

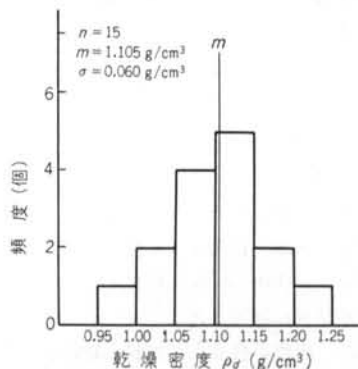


図—5 最大乾燥密度と試料の均等係数の関係

または U_c の影響を個別に論じるのは妥当性を欠く恐れがある。しかし、 D_{max} と U_c の影響が双方とも従来の

	$\rho_{d\text{max}}$	E_c	U_c	D_{max}
$\rho_{d\text{max}}$		0.900	-0.482	-0.355
E_c	0.900		-0.103	-0.047
U_c	-0.482	-0.103		0.903
D_{max}	-0.355	-0.047	0.903	

表—5 相関マトリックス



図—6 泥岩の乾燥密度分布

試験結果と逆の傾向が出ていることは、泥岩塊特有の性質である可能性がある。

§5. 考察

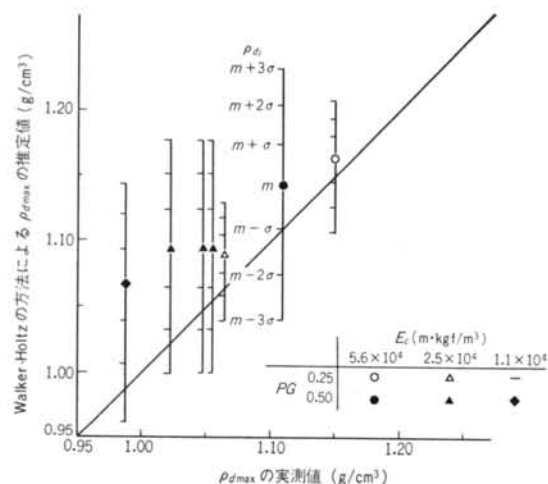
5.1 最大乾燥密度

泥岩塊と一般の礫の相異点としては、泥岩の密度が小さいことが挙げられる。通常の礫の密度は2以上あるのに対し、図—6の乾燥密度分布に示すように、今回使用した泥岩の乾燥密度は平均値 m が $1.105\text{g}/\text{cm}^3$ (標準偏差 σ は $0.06\text{g}/\text{cm}^3$) であった。粗粒の密度が細粒分のみの締固め密度に比較して小さい場合には、粗粒が混じるこ

log E_c	w	粒 度 分 布				log U_c	log D_{max}	回 帰 式	
		76~38 mm	38~19 mm	19~4.76 mm	4.76mm 以下			寄 与 率	標準誤差
26.3	3.1	0.8	1.1	1.4	2.2	2.3	1.3	—	—
○	0.0	1.7	2.0	24.8	29.6	24.1	9.4	0.767	0.0087
○	0.1	0.5	3.4	2.2	○	0.0	2.0	0.955	0.0038
○	0.0	4.0	2.3	5.3	1.0	○	2.2	0.948	0.0041
○	0.4	1.1	0.8	10.1	11.9	9.7	○	0.900	0.0057
○	0.3	2.0	0.7	2.8	1.4	○	○	0.962	0.0035

注) ○印は説明変数として取り込んだことを意味する

表—6 ρ_{dmax} の重回帰分析の F 値と寄与率



図—7 Walker-Holtz の補正方法で算出した ρ_{dmax} の推定値と粗粒分を含む試料の試験で求めた ρ_{dmax} の対比によって締固め密度が低下する場合が考えられる。この粗粒の密度の ρ_{dmax} に対する影響を定量的に把握するために、Walker-Holtz の補正方法（以下、W&H 法と呼ぶ）を試験結果に適用した。

W&H 法は、粗粒を含まない試料の締固め乾燥密度および含水比と粗粒自体の乾燥密度および含水比から、式(1)を用いて粗粒を含む試料の値を求めるものである。

$$\left. \begin{aligned} \rho_d &= \frac{\rho_{d1} \cdot \rho_{d2}}{PG \cdot \rho_{d1} + (1 - PG) \cdot \rho_{d2}} \\ w &= w_1(1 - PG) + w_2 PG \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここで、 ρ_d と w は試料全体、 ρ_{d1} と w_1 は細粒土のみを締固めた場合、 ρ_{d2} と w_2 は粗粒自体のそれぞれ乾燥密度と含水比であり、 PG は粗粒含有率（試料全体に対する粗粒分の重量比）である。

今回は粒径 4.76mm 以上の試料を粗粒として扱い、粗粒を含まない試料 A の試験結果を ρ_{d1} とした。実測の ρ_{dmax} と W&H 法を用いて推定した ρ_{dmax} の対比を図—7 に示す。図中には、 ρ_{d2} の値として泥岩自体の乾燥密度の平均値 m を使用したときの値が点で、また $m \pm (1 \sim 3)\sigma$

の値を使用したときの値が範囲で示してある。 ρ_{d2} に m から $m - 3\sigma$ までの値を使用した場合の推定値の範囲に実測値は入っているが、両者の関係には強い偏りがあり、推定値（ ρ_{d2} として m を用いた場合）は常に実測値より大きくなっている。以上のことから、W&H 法では ρ_{dmax} を定量的に説明できないものと考えられる。

次に、重回帰分析を行なって ρ_{dmax} に対する影響因子の影響力の強さを定量的に把握することを試みた⁹⁾。説明変数としては締固めエネルギー、粒径ごとの試料の割合、最大粒径、均等係数などを用いて検討した。目的変数に対する寄与の強さを示す分散比である説明変数の F 値を表—6 に示した。寄与率が最も高かった回帰式（寄与率 0.962）を以下に示す。

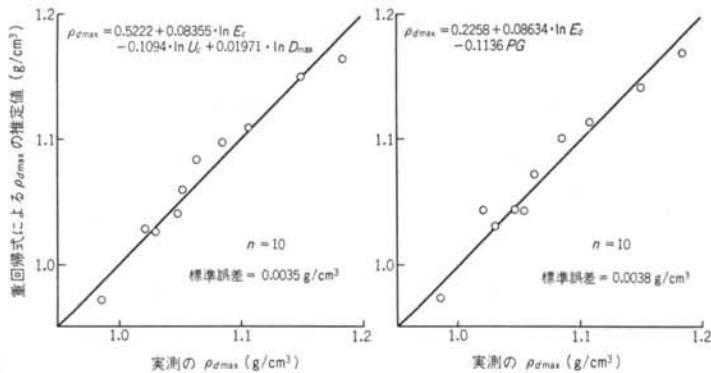
$$\begin{aligned} \rho_{dmax} &= 0.5222 + 0.0836 \cdot \ln E_c - 0.109 \cdot \ln U_c \\ &\quad + 0.0197 \cdot \ln D_{max} \dots\dots(2) \end{aligned}$$

予想されたように、説明変数としては E_c の他に U_c と D_{max} が有意であったが、回帰式中の説明変数である偏重回帰係数は U_c と D_{max} で符合が異なっている。式(2)から、今回の試験結果は ρ_{dmax} と U_c の関係が従来の試験結果と逆の傾向になっていたものであり、表—5 に示したように D_{max} は U_c との相関が強いために U_c の影響を受け ρ_{dmax} との関係が、図—4 に示したように、あたかも従来と逆傾向にあるかのごとく見えたということが分かった。

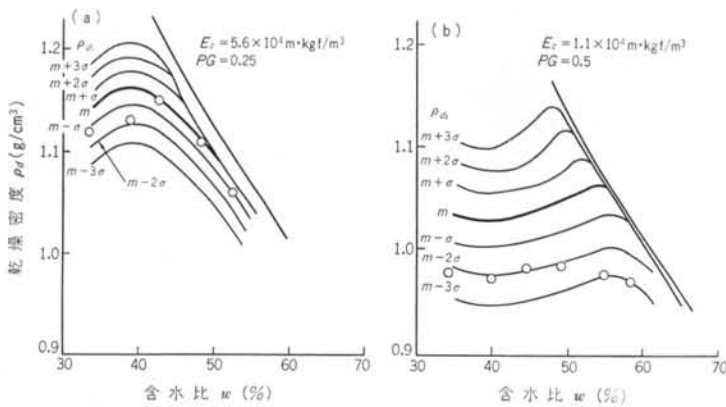
また、この表で注目すべきことは試料の細粒分の割合、いいかえるなら粗粒分含有率 PG を説明変数とした場合に、 U_c と D_{max} の両方を説明変数とした場合と同等の寄与率 (0.955) の回帰式が得られることである。このときの回帰式を以下に示す。

$$\rho_{dmax} = 0.2258 + 0.0863 \cdot \ln E_c - 0.114 \cdot PG \dots\dots(3)$$

図—8 に、回帰式による推定値と実測の ρ_{dmax} の対比を示す。回帰式として式(2)を用いた場合と式(3)を用いた場合とでは推定値と実測値の関係に大きな違いは生じておらず、誤差の標準偏差である標準誤差も 0.0035g/cm³ と 0.0038g/cm³ でほぼ同等であった。 PG は U_c に比較し



図—8 重回帰式による ρ_{dmax} の推定値と締固め試験で求めた ρ_{dmax} の対比



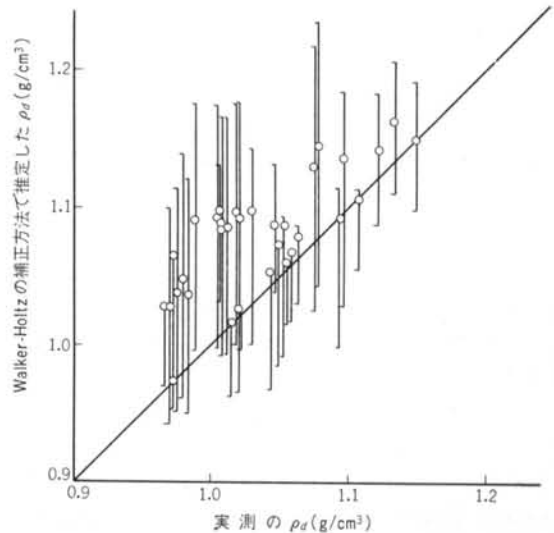
図—9 Walker-Holtz の補正法を用いて推定した粗粒分を含む試料の締固め特性曲線と締固め試験結果ではるかに測定が容易なことから、現場管理などに応用する場合この結果は有用なものである。

5.2 締固め特性曲線

これまで ρ_{dmax} に対する粗粒分の影響を検討してきたが、より広い意味での締固め特性を取り扱うために、締固め特性曲線全体について同様の検討を行なう。

はじめに、W&H 法で推定した締固め特性曲線と試験で求めた ρ_d の実測値の関係を述べる。

図—9 は、例として $E_c = 5.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf/m}^3$ で $PG = 0.25$ の場合と、 $E_c = 1.1 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf/m}^3$ で $PG = 0.5$ の場合を示したものであり、推定曲線としては ρ_{d2} として m , $m \pm \sigma$, $m \pm 2\sigma$, $m \pm 3\sigma$ の値を用いた 7 通りが示してある。前者は推定曲線と実測値の差が比較的小さいのに対し、後者では大きな差が生じている。全ての試料について E_c が小さいほど、または PG が大きいほど推定曲線と実測値の差が大きくなる傾向があった。また、最適含水比より乾燥側と湿潤側を比較すると、湿潤側の方が推定曲線と実測値の差が小さかった。これは最適含水比をこえると含水比の増加に伴い、推定値も実測値も急速



図—10 Walker-Holtz の方法によって推定した乾燥密度と締固め試験結果の対比

にゼロ空隙曲線へ漸近していく傾向があるためである。

図—10に、すべての試験結果について W&H 法によ

目的変数	説 明 変 数			ρ_d に対する回 帰式の寄与率	目的変数	説 明 変 数			ρ_d に対する回 帰式の寄与率		
乾燥密度 ρ_d	締固めエ ネルギー E_c	含 水 比 w	礫分含有率 PG		空気間隙 率 v_a	締固めエ ネルギー E_c	含 水 比 w	礫分含有率 PG			
ρ_d	E_c	w	PG	0.753	v_a	E_c	w	PG	0.788(0.923)		
	$(E_c)^2$			0.701		$(E_c)^2$			0.729(0.906)		
	$1/E_c$			0.723		$1/E_c$			0.758(0.915)		
	$\exp(E_c)$			0.654		$\exp(E_c)$			0.675(0.891)		
	$\log(E_c)$	$(w)^2$		0.774		$\log(E_c)$	$(w)^2$		0.814(0.930)		
				0.751					0.764(0.910)		
				0.751					0.805(0.933)		
				0.751					0.795(0.922)		
		w		0.751			$\log(w)$		0.826(0.938)		
				$(PG)^2$					0.750	$(PG)^2$	0.822(0.937)
				$1/PG$					0.751	$1/PG$	0.826(0.938)
				$\log(PG)$					0.751	$\log(PG)$	0.826(0.938)
	$\exp(PG)$	0.750		$\exp(PG)$		0.823(0.937)					
	$\log(\rho_d)$	E_c		w		PG	0.754(0.735)		$\log(v_a)$	E_c	w
$(E_c)^2$		0.701(0.679)	$(E_c)^2$		0.402(0.894)						
$1/E_c$		0.731(0.706)	$1/E_c$		0.215(0.900)						
$\exp(E_c)$		0.657(0.623)	$\exp(E_c)$		0.381(0.880)						
$\log(E_c)$		$(w)^2$	0.780(0.777)	$\log(E_c)$	$(w)^2$		0.328(0.913)				
			0.786(0.756)				0.534(0.917)				
			0.774(0.756)				0.225(0.867)				
			0.779(0.756)				0.312(0.896)				
		w	0.780(0.756)		$\log(w)$		0.434(0.916)				
			$(PG)^2$				0.778(0.755)	$(PG)^2$		0.359(0.911)	
			$1/PG$				0.782(0.756)	$1/PG$		0.267(0.908)	
			$\log(PG)$				0.782(0.756)	$\log(PG)$		0.259(0.908)	
$\exp(PG)$		0.779(0.755)	$\exp(PG)$	0.338(0.913)							

注) 寄与率の () 内の値は目的変数に対するもの

表一7 回帰式の変数型と寄与率一覧表

る推定値との対比を示す。推定値は ρ_{d2} として $m-3\sigma \sim m+3\sigma$ を用いた場合が範囲で示してある。 ρ_{dmax} に W & H 法を適用した場合と同様に、推定値は常に実測値より大きくなっており、推定誤差も大きい。以上のように、泥岩塊の締固め試験結果を W & H 法で補正するのは妥当でないと思われる。

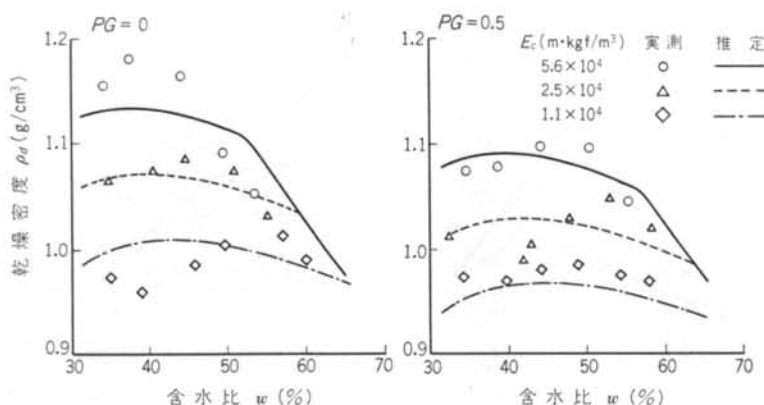
次に、重回帰分析を行なって特性曲線を近似することを試みた。 ρ_{dmax} は各説明変数に対して線型な関係で表現できたのに対し、締固め特性曲線である ρ_d と w の関係は強い非線型である。したがって、精度の高い近似式を得るためには適当な変数変換を行なって重回帰分析を用いる必要がある。表一7に示すように、52通りのケースについて検討を試みた。その結果、目的変数を空気間隙率 v_a に変換し、説明変数として E_c , w , PG を用い

た場合が ρ_d に対する近似精度が最もよくなることが分かった。得られた回帰式を以下に示す。

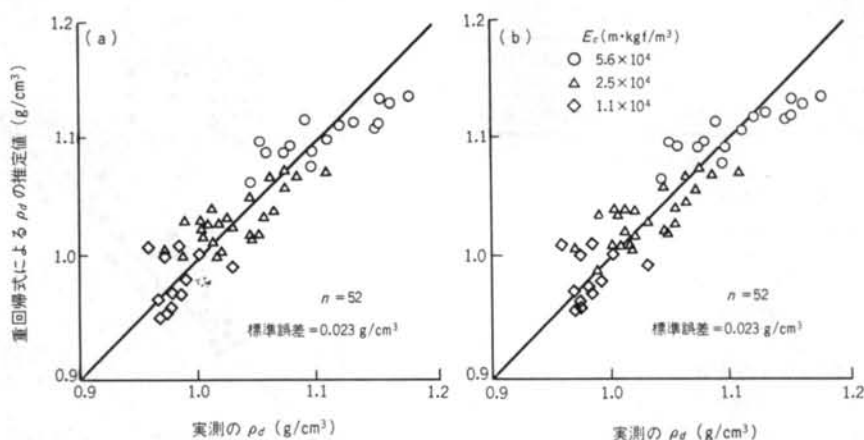
$$\left. \begin{aligned} v_a &= 234.11 - 5.90 \cdot \ln E_c - 42.8 \cdot \ln w \\ &\quad + 6.49 PG \\ \rho_d &= \frac{100 - v_a}{\frac{100}{G_s} + w} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

ここで、 G_s は土粒子比重である。

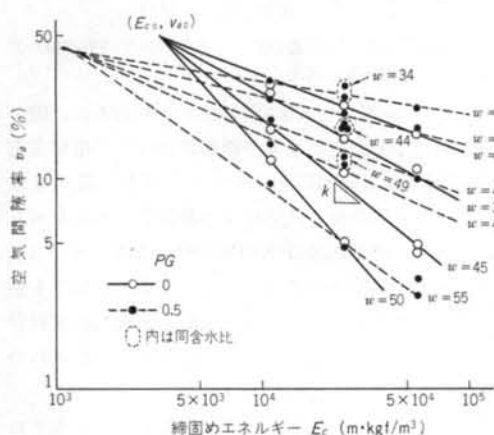
図一11に、重回帰分析によって求めた ρ_d の推定曲線と締固め試験結果を示す。図一10に示した W & H 法の場合に比較して、推定曲線と実測値の差は小さくなっている。図一12(a)に全試料の ρ_d の実測値と式(4)による推定値の対比を示したが、データのばらつきに偏りはなく標準誤差も 0.023 g/cm^3 と小さい。これらのことから、



図—11 重回帰分析によって求めた締固め特性の推定曲線と締固め試験結果



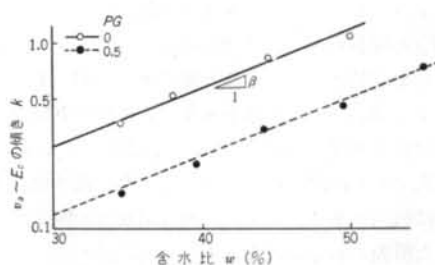
図—12 重回帰式によって推定した乾燥密度と締固め試験結果の対比



図—13 空気間隙率と締固めエネルギーの関係

PG は ρ_{dmax} のみでなく締固め特性全体を示す重要なパラメータであることが明らかになった。

なお、PG の代わりに U_0 と D_{max} を説明変数とした



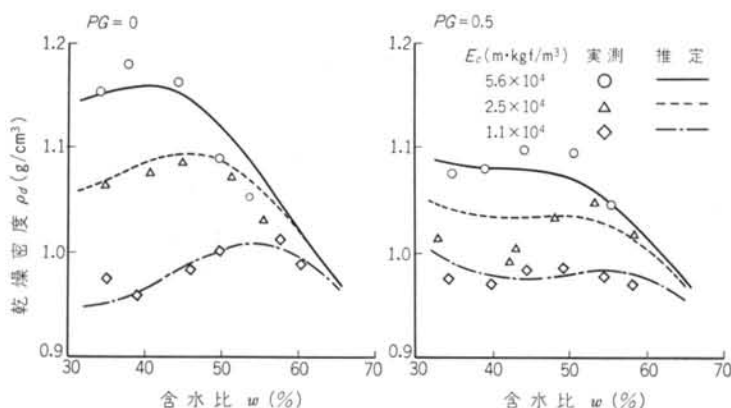
図—14 $v_a \sim E_c$ の傾き k と含水比の関係

重回帰式を以下に示す。

$$v_a = 224.0 - 5.78 \cdot \ln E_c - 42.6 \cdot \ln w + 0.235 U_c - 0.048 D_{max} \quad \dots (5)$$

図—12(b)に全試料の ρ_d と式(5)による推定値の対比を示したが、図—12(a)の場合とほぼ同程度の近似精度になっていることが分かる。

最後に、粗粒分をパラメータとした数式的表現を用いて締固め特性曲線を表すことを検討する。渡辺・久野の



図—15 拡張した渡辺・久野の式による締固め特性の推定曲線と締固め試験結果

試料名	粗粒分含有率 PG	v_{a0} (%)	E_{c0} (m·kgf/m ³)	α	β
A	0	49	0.315×10^4	0.0323	0.072
B	0.25	—	—	—	—
C, D, E	0.50	42	0.140×10^4	0.0137	0.072

表—8 粗粒分含有率と渡辺・久野の式の定数

提案した式(6)は締固めエネルギー E_c や含水比 w の相異による締固め密度 ρ_d の変化を表現できるものである⁶⁾。

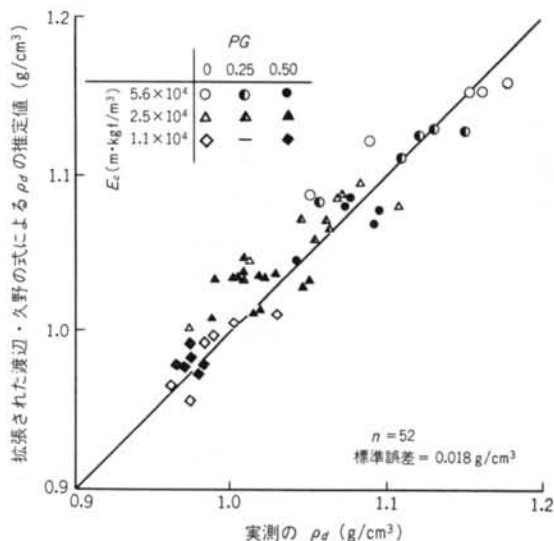
$$\rho_d = \frac{100 - v_{a0} \left(\frac{E_c}{E_{c0}} \right)^{-\alpha \exp(\beta w)}}{\frac{100}{G_s} + w} \quad \dots\dots(6)$$

試料ごとに別個に求まる定数である v_{a0} , E_{c0} , α および β を粗粒分を用いて表現することにより, ρ_d を粗粒分を含んだ関数として表せるようにした。図—13に示すように, v_{a0} と E_{c0} は各含水比ごとの v_a と E_c の関係直線の交点として求まり, α と β は図—14に示すように v_a と E_c の関係直線の傾きである k と含水比 w の直線の切辺および傾きとして求まる値である。表—8に, 各試料の v_{a0} , E_{c0} , α , β の値を示す。 β 以外の定数は試料の粗粒分含有率 PG の相異によって変化しており, PG の1次式で表し, 式(7)のように表現した。式(8)は, 式(7)を式(6)に代入することによって得た粗粒分の関数として表現した締固め密度の式である。

図—15に, 式(8)を用いた締固め特性の推定曲線と ρ_d の実測値を示した。

$$\left. \begin{aligned} v_{a0} &= 50 - 20 PG \\ E_{c0} &= (0.32 - 0.36 PG) \times 10^4 \\ \alpha &= 0.032 - 0.036 PG \\ \beta &= 0.072 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(7)$$

$$\rho_d = \frac{100 - (50 - 20 PG) \left\{ \frac{E_c \cdot 10^{-4}}{(0.32 - 0.36 PG)} \right\}^{-(0.032 - 0.036 PG) \cdot \exp(0.072 \beta)}}{\frac{100}{G_s} + w} \quad \dots\dots(8)$$



図—16 拡張した渡辺・久野の式による乾燥密度の実測値と締固め試験結果の対比

値として PG が0と0.5の場合を示してあるが, 図—9や図—11に示したこれまでの検討に比較して推定曲線と ρ_d の実測値がよい対応をしている。また, 図—16は全試料の ρ_d の実測値と式(8)による推定値の対比を示したものである。標準誤差は 0.018 g/cm^3 とかなり小さく, 粗粒分含有率や締固めエネルギーによる誤差の偏りも生じていない。このように, 渡辺・久野の実験式に粗粒分含有率を導入して拡張した式(8)は, 粗粒分を含む試料の締固め特性を精度よく近似できた。

また, 式(6)は w の増加に伴い v_a がゼロに収束する

ため、高含水比になると推定値と実測値に差が生ずるようになり、久野は最終的な飽和度を仮定して補正する方法を提案している。今回の試験でも最終的な空気間隙率は一定になる傾向がみられ、残留する空気間隙率の性質や物理的意味を明確にすることによって、推定式の精度をより高めることは可能であると思われる。

§ 6. まとめ

室内大型突固め試験装置（モールド直径30cm）により泥岩塊試料の締固め試験を行なった。試験には、最大粒径が4.76~76.2mm、均等係数が16~43の範囲になるように調整した、粒度分布の異なる5種類の試料を用いた。締固めエネルギーは 1.1×10^4 、 2.5×10^4 、 $5.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf/m}^3$ の3種類とした。

一連の試験から、軟岩塊の特徴と考えられる(i)最大乾燥密度 ρ_{dmax} は最大粒径 D_{max} または均等係数 U_c が大きくなると小さくなる、(ii)締固め特性曲線は粗粒分が増加するとゼロ空隙曲線に沿って右下へ移動する、などの傾向が認められた。

上述のように、軟岩塊の締固め密度 ρ_d に試料中の粗粒分が大きな影響を及ぼしていることから、 ρ_d に対する粗粒分の影響に関して定量的表現を試みた結果、以下の結論を得た。

(1) ρ_{dmax} は締固めエネルギー E_c の他に粗粒分含有率 PG （試料における粒径4.7mm以上の粗粒分の重量比）を説明変数とした重回帰式により精度よく（寄与率0.955）回帰できる。また、偏回帰係数の符号などから U_c が増加すると ρ_{dmax} は減少するが、 D_{max} が増加しても ρ_{dmax} は減少するとは限らないことが分かった。

(2) 締固め特性曲線全体も、変数変換を行なって重回帰分析を行なうことにより標準誤差 0.023 g/cm^3 で推定できる。

(3) 渡辺・久野の式に粗粒分含有率 PG を導入して作成した締固め密度の推定式(8)によれば、標準誤差 0.018 g/cm^3 の高い近似精度で軟岩塊の締固め特性曲線を表現できる。

なお、Walker-Holtz の補正方法の適用も試みたが、補正値は常に実測値を上回り、その差も大きいことから軟岩塊への適応性は低いものと判断された。

<参考文献>

- 1) 例えば、久楽勝行・三木博史・関 一雄：“締固めた礫まじり土の工学的性質に関する実験的研究” 土と基礎 Vol. 31, No. 2 (1983年) pp. 39~45
- 2) 松尾新一郎・福本武明：“マサ土の締固め特性に及ぼす粒子破碎の影響” 土質工学会論文報告集 Vol. 16, No. 4 (1976年) pp. 93~102
- 3) 土質工学会編：“土質試験法” (1979年) pp. 277~297
- 4) 土質工学会編：“ロックフィル材料の試験と設計強度” (1982年) p. 83, 159
- 5) 例えば、奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正：“多変量解析法” 日科技連 (1981年)
- 6) 久野悟郎：“土の締固め” 技報堂 (1963年) pp. 55~63

