

## 軟岩ずりの締固め特性に及ぼす粗粒分の影響

The influence of coarse-grain component on compaction properties of soft rock muck

ご 藤 茂\* 宮 本 武 司\*  
 たま おき かつ ゆき\*\*  
 玉 置 克 之\*\*

表—1 試料の物理的性質

		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 ン性 シシ 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** $\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	1.60~1.68	1.65
	乾燥密度** $\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup>	8.8~17.6	13.7

\*JIS の方法による測定値

\*\*泥岩のかたまりについての測定値

## 1. ま え が き

軟岩ずりはフィルダム、道路盛土など多くの土木構造物に使用されているが、軟岩ずりの粒径は岩塊のような大粒径のものから細粒土に相当するものまで広範囲のものから成り立っており、しかも粒子はもろく破碎しやすい。

粗粒土の締固め密度については、従来、礫と細粒土を混合した試料に関して試験が行われており<sup>1)</sup>、Walker-Holtz (ウォーカー・ホルツ)の礫分による締固め密度の補正法なども提案されている。また、粒子破碎を伴う場合の締固めについては、最大粒径が4.7 mm 以下の小粒径のまき土に関する研究例があり、粒子破碎によって締固め特性曲線が大きく変化することが報告されている<sup>2)</sup>。これらの研究によれば、軟岩ずりのように広範囲の粒径から成り、しかも破碎しやすい材料の締固め特性は複雑なものになると思われるが、密度の適切な推定方法は提案されていない。

そこで軟岩ずりの締固め密度に及ぼす岩塊のような大きな粒子の影響を明らかにするために、粒度をパラメータとし、大型突固め試験装置を用いて最大粒径76.2 mm までの試料の室内締固め試験を行った。更に、締固め密度は粗粒分の関数として数式的に表現できることを明らかにした。

## 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ずりを用いた。泥岩ずり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 に示す。

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/cm<sup>3</sup>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/cm<sup>2</sup>の範囲である。

かたまり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 に装置の仕様を示す。この試験機は粗粒材の試験を行うために、モールド内径30 cm、容量31.9×10<sup>3</sup> cm<sup>3</sup>と大型になっており、CBR モール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。ランマーは付けかえることによって重量が変えられ、また落下高は30 cm、40 cm、50 cm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った。表—3 に試験条件の一覧表を示す。

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5.6×10<sup>4</sup> m・kgf/m<sup>3</sup>の他に2.5×10<sup>4</sup> m・kgf/m<sup>3</sup>と1.1×10<sup>4</sup> m・kgf/m<sup>3</sup>を行った。試料には図—1に示す5通りに粒度調整した泥岩ずりを用いた。粒度分布の調整は泥岩ずりの粒径を4.76 mm 以下、4.76~19.1 mm、19.1~

\*清水建設株式会社 技術研究所

\*\*清水建設株式会社 技術研究所 主任研究員

表-2 大型突固め試験装置の仕様

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

表-3 試験条件一覧表

ランマー	質量 (kg)	落下高 (m)	締固め仕事量 ( $\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$ )		
			$5.6 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	$1.1 \times 10^4$
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	

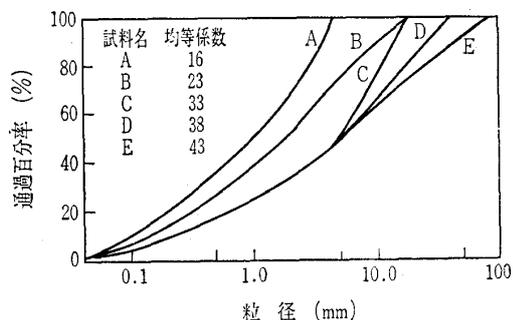


図-1 試料の粒度分布

38.1 mm, 38.1~76.2 mm の4段階にふるいわけたのち、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った。なお、試料は繰り返して用いないこととした。供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のちに、供試体とモールドおよび底板の全部をひょう量 150 kg, 感度 100 g の手動ばかりで計量して締固め密度を算出した(口絵写真-5)。なお、供試体の含水比は供試体の上部、

表-4 大型突固め試験による泥岩ずりの最適含水比と最大乾燥密度

締固めエネルギー $E_c (\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3)$	試験条件				試料名	試験結果	
	粒度分布 (%)					最適含水比 $w_{opt} (\%)$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax} (\text{g}/\text{cm}^3)$
	76~38mm	33~19mm	19~4.76mm	4.76mm以下			
$5.6 \times 10^4$				100	A	39.9	1.184
			25	75	B	43.3	1.150
	13	13	24	50	E	47.3	1.107
				100	A	46.2	1.085
$2.5 \times 10^4$				100	A	46.2	1.085
			25	75	B	50.4	1.064
			50	50	C	42.0	1.021
		17	33	50	D	51.6	1.054
	13	13	24	50	E	53.1	1.048
$1.1 \times 10^4$				100	A	58.6	1.031
	13	13	24	50	E	47.4	0.987

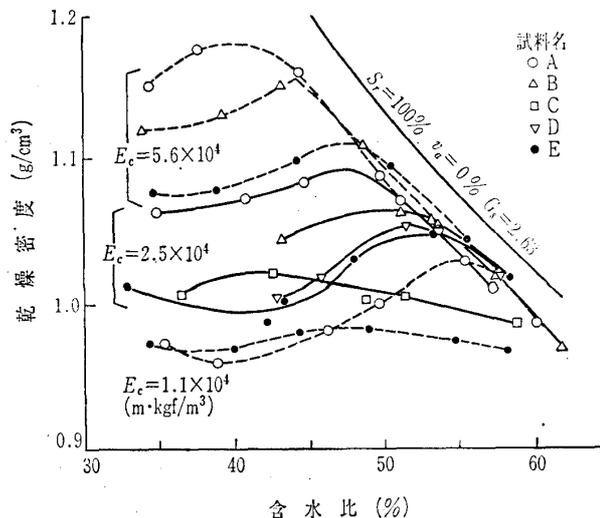


図-2 大型突固め試験による泥岩塊の締固め特性曲線

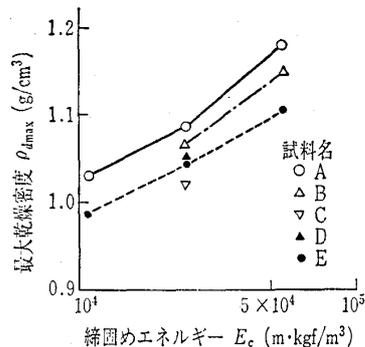


図-3 最大乾燥密度と締固めエネルギーの関係

中部および下部の3箇所からそれぞれ2 kg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ずり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  $\rho_{dmax}$  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

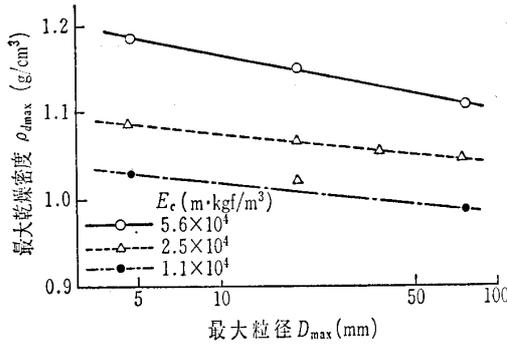


図-4 最大乾燥密度と試料の最大粒径の関係

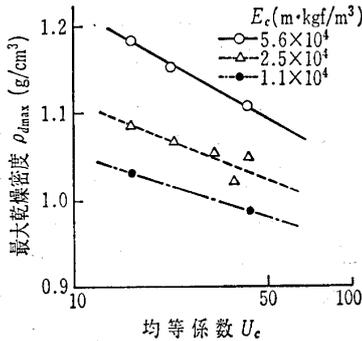


図-5 最大乾燥密度と試料の均等係数の関係

表-5 相関マトリックス

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

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  $\rho_{dmax}$  と締固めエネルギー  $E_c$  の関係を示す。従来から言われているように  $E_c$  が大きくなるに伴い  $\rho_{dmax}$  が増加する傾向がある。図-4および5に最大粒径  $D_{max}$  および均等係数  $U_c$  と  $\rho_{dmax}$  との関係を示す。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  $\rho_{dmax}$  が増加すると言われているが<sup>4)</sup>、図-4および5では  $D_{max}$  および  $U_c$  が大きくなると  $\rho_{dmax}$  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、 $D_{max}$  または  $U_c$  の影響を個別に論じるのは妥当性を欠くおそれがある。しかし、 $D_{max}$  と  $U_c$  の影響が双方とも従来の試験結果と逆の傾向が出ていることは泥岩ずり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

泥岩ずり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あげられる。通常の礫の密度は2以上あるのに対し、図-6に乾燥密度分布を示すように、今回使用した泥岩の乾燥密度は平均値  $m$  が  $1.105 \text{ g/cm}^3$  (標準偏差  $\sigma$  は

$0.06 \text{ g/cm}^3$ ) 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まじること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  $\rho_{dmax}$  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(1)式を用いて粗粒を含む試料の値を求めるものである。

$$\rho_a = \frac{\rho_{a1} \cdot \rho_{a2}}{PG \cdot \rho_{a1} + (1 - PG) \cdot \rho_{a2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$w = w_1(1 - PG) + w_2 PG$$

ここで、 $\rho_a$  と  $w$  は試料全体、 $\rho_{a1}$  と  $w_1$  は細粒土のみを締め固めた場合、 $\rho_{a2}$  と  $w_2$  は粗粒自体のそれぞれ乾燥密度と含水比であり、 $PG$  は粗粒分含有率 (試料全体に対する粗粒分の重量比) である。

今回は粒径  $4.76 \text{ mm}$  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  $\rho_{a1}$  とした。実測の  $\rho_{dmax}$  とW&H法を用いて推定した  $\rho_{dmax}$  の対比を図-7に示す。図中には  $\rho_{a2}$  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として、また、 $m \pm (1 \sim 3)\sigma$  の

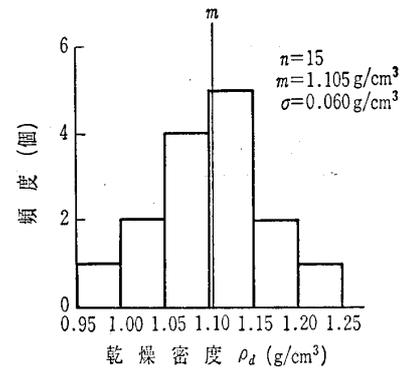


図-6 泥岩の乾燥密度分布

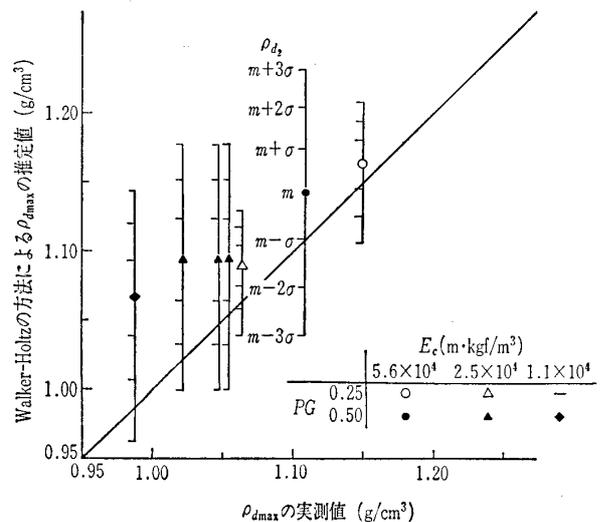


図-7 Walker-Holtz の補正方法で算出した  $\rho_{dmax}$  の推定値と粗粒分を含む試料の試験で求めた  $\rho_{dmax}$  の対比

表—6  $\rho_{dmax}$  の重回帰分析の  $F$  値と寄与率

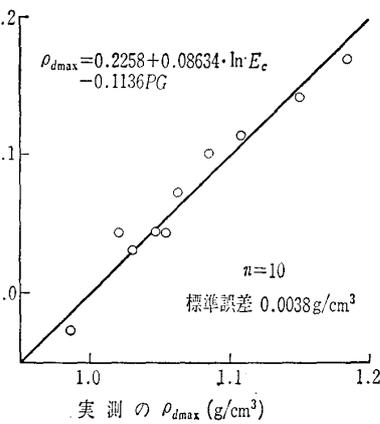
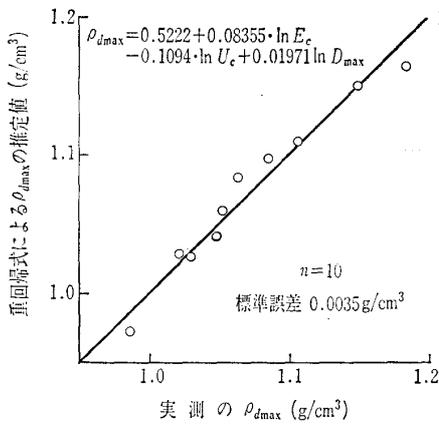
log $E_c$	$w$	粒 度 分 布				log $U_c$	log $D_{max}$	回 帰 式	
		76~38mm	38~19mm	19~4.7mm	4.7mm 以下			寄 与 率	標 準 誤 差
26.3	3.1	0.8	1.0	1.4	2.2	2.3	1.3	—	—
○	0.0	1.7	2.2	24.8	29.6	24.1	9.4	0.767	0.0087
○	0.1	0.5	3.4	2.2	○	0.0	2.0	0.955	0.0038
○	0.0	4.0	2.3	5.3	1.0	○	2.2	0.948	0.0041
○	0.4	1.1	0.8	10.1	11.9	9.7	○	0.900	0.0057
○	0.3	2.0	0.7	2.8	1.4	○	○	0.962	0.0035

○印は説明変数として取り込んだことを意味する

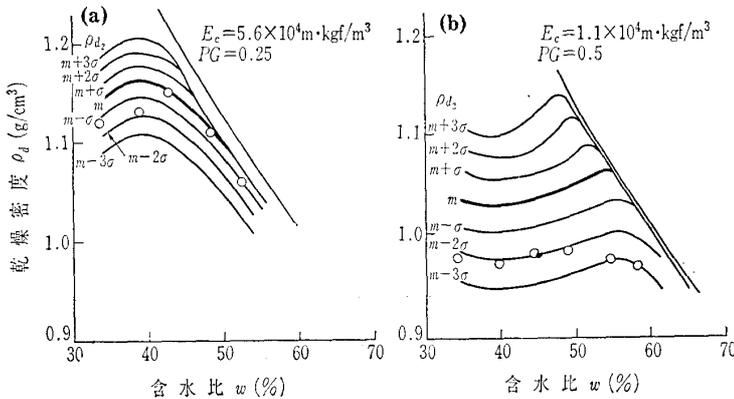
値を使用したときの値が範囲で示してある。 $\rho_{a2}$  に  $m$  から  $m-3\sigma$  までの値を使用した場合の推定値の範囲に実測値は入っているが、両者の関係には強いかたよがりがあり、推定値 ( $\rho_{a2}$  として  $m$  を用いた場合) は常に実測値より大きくなっている。以上の事から W&H 法では  $\rho_{dmax}$  を定量的に説明できないものと考えられる。

次に、重回帰分析を行って  $\rho_{dmax}$  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<sup>5)</sup>。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。

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



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



図—9 Walker-Holtz の補正方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

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回帰係数は  $U_c$  と  $D_{max}$  で符合が異なっている。(2)式から、今回の試験結果は  $\rho_{dmax}$  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  $\rho_{dmax}$  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。

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

図—8 に回帰式による推定値と実測の  $\rho_{dmax}$  の対比を示す。

回帰式として(2)式を用いた場合と(3)式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  $0.0035 \text{ g/cm}^3$  と  $0.0038 \text{ g/cm}^3$  でほぼ同等であった。 $PG$  は  $U_c$  に比較して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  $\rho_{dmax}$  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  $\rho_a$  の実測値の関係を述べる。図—9 は例として  $E_c = 5.6 \times 10^4 \text{ m.kgf/m}^3$  で  $PG = 0.25$  の場合と、 $E_c = 1.1 \times 10^4 \text{ m.kgf/m}^3$  で  $PG = 0.5$  の場合を示したものであり、推定曲線としては  $\rho_{a2}$  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。すべての試料について、 $E_c$  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

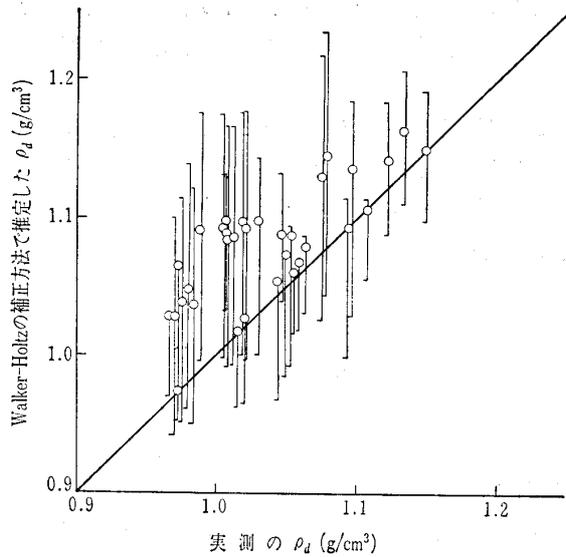


図-10 Walker-Holtzの方法によって推定した乾燥密度と締固め試験結果の対比

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法による推定値との対比を示す。推定値は  $\rho_{d2}$  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。 $\rho_{dmax}$  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、泥岩ずり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って特性曲線を近似することを試みた。 $\rho_{dmax}$  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  $\rho_d$  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って重回帰分析を用いる必要がある。表-7に示すように、52通りのケースについて検討を

表-7 回帰式の変数型と寄与率一覧表

目的変数	説明変数			$\rho_d$ に対する回帰式の寄与率	目的変数	説明変数			$\rho_d$ に対する回帰式の寄与率								
	乾燥密度 $\rho_d$	締固めエネルギー $E_c$	含水比 $w$			礫含有率 $PG$	空気間隙率 $v_a$	締固めエネルギー $E_c$		含水比 $w$	礫含有率 $PG$						
$\rho_d$	$E_c$	$w$	$PG$	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)						
	$\log(E_c)$			$(w)^2$		$PG$			0.774	$\log(E_c)$	$(w)^2$	$PG$	0.814(0.930)				
									$1/w$				0.751	$1/w$	0.764(0.910)		
									$\log(w)$				0.751	$\exp(w)$	0.805(0.933)		
									$\exp(w)$				0.751	$\log(w)$	0.795(0.922)		
				$w$		$(PG)^2$			$PG$		0.750	$\log(w)$	$(PG)^2$	$PG$	0.826(0.938)		
											$1/PG$				0.751	$1/PG$	0.822(0.937)
											$\log(PG)$				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)	$v_a$	$E_c$	$w$	$PG$	0.377(0.906)		
										$(E_c)^2$					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)												
$\log(E_c)$		$(w)^2$	$PG$	0.780(0.777)	$\log(E_c)$		$(w)^2$	$PG$		0.328(0.913)							
				$1/w$						0.783(0.756)		$1/w$			0.534(0.917)		
				$\log(w)$						0.774(0.756)		$\log(w)$			0.225(0.867)		
				$\exp(w)$						0.769(0.756)		$\exp(w)$			0.312(0.896)		
		$w$	$(PG)^2$	$PG$			0.780(0.756)	$\log(w)$		$(PG)^2$		$PG$			0.434(0.916)		
							$1/PG$								0.778(0.755)	$1/PG$	0.359(0.911)
							$\log(PG)$								0.782(0.756)	$\log(PG)$	0.267(0.908)
							$\exp(PG)$								0.782(0.756)	$\exp(PG)$	0.259(0.908)
				0.779(0.755)						0.338(0.913)							

寄与率の ( ) 内の値は目的変数に対するもの

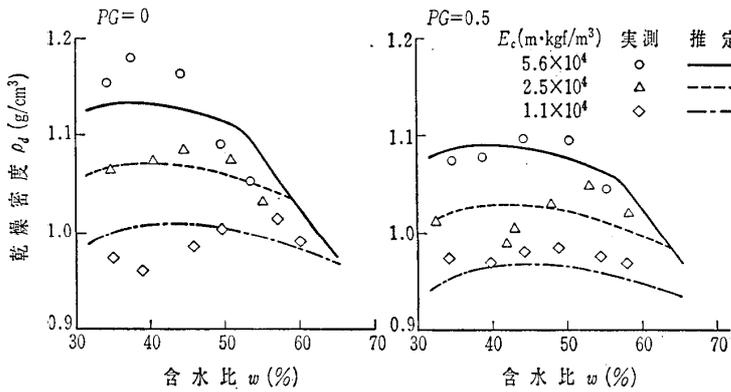


図-11 重回帰分析によって求めた締固め特性の推定曲線と締固め試験結果

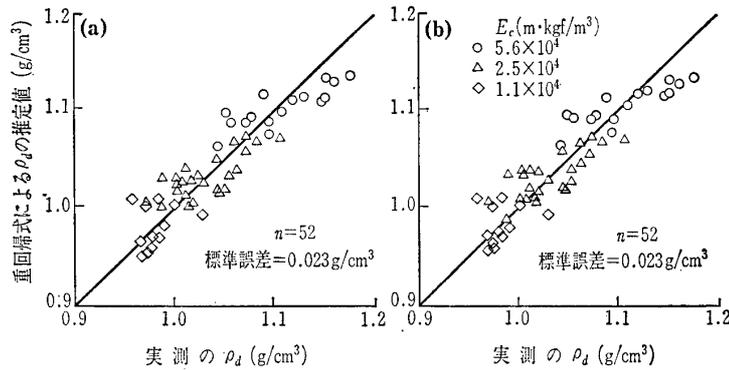


図-12 重回帰式によって推定した乾燥密度と締固め試験結果の対比

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  $\rho_a$  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。

$$v_a = 234.11 - 5.90 \ln E_c - 42.8 \ln w + 6.49 PG$$

$$\rho_a = \frac{100 - v_a}{\frac{100}{G_s} + w} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで  $G_s$  は土粒子比重である。

図-11に重回帰分析によって求めた  $\rho_a$  の推定曲線と締固め試験結果を示す。図-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-12(a)に全試料の  $\rho_a$  の実測値と(4)式による推定値の対比を示したが、データーのばらつきにかたよりはなく、標準誤差も  $0.023 \text{ g/cm}^3$  と小さい。

これらのことから、 $PG$  は  $\rho_{dmax}$  のみでなく締固め特性全体を示す重要なパラメーターであることが明らかになった。

なお、 $PG$  のかわりに  $U_c$  と  $D_{max}$  を説明変数とした重回帰式を以下に示す。

$$v_a = 229.0 - 5.78 \ln E_c - 42.6 \ln w + 0.235 U_c - 0.048 D_{max} \quad \dots\dots\dots(5)$$

図-12(b)に全試料の  $\rho_a$  と(5)式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ー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・久野の提案した(6)式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  $\rho_a$  の変化を表現できるものである<sup>6)</sup>。

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

試料ごとに別個に求まる定数である  $v_{a0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $\alpha$  および  $\beta$  を粗粒分を用いて表現することにより、 $\rho_a$  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、 $\alpha$  と  $\beta$  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  $v_{a0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  の値を示す。 $\beta$  以外の定数は試料の礫分含有率  $PG$  の相異によって変化しており、 $PG$  の一次式で表し、(7)式のように表現した。(8)式は、(7)式を(6)式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。

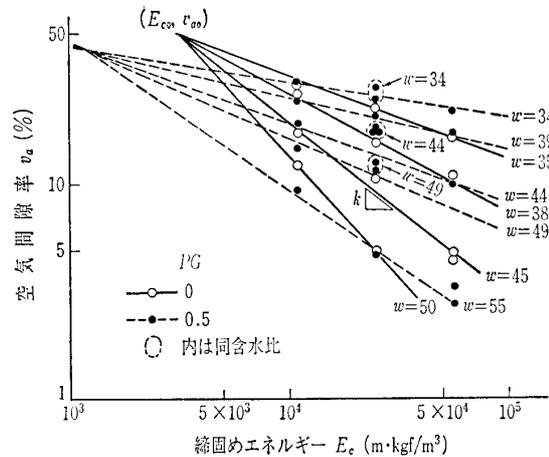


図-13 空気間隙率と締固めエネルギーの関係

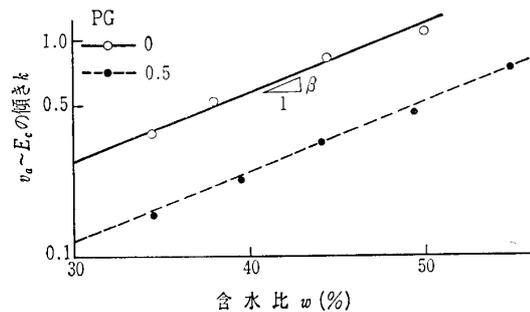


図-14  $v_a \sim E_c$  の傾き  $k$  と含水比の関係

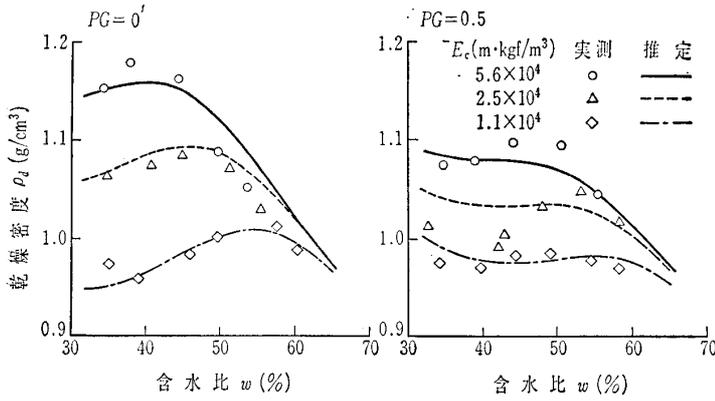


図-15 拡張した渡辺・久野の実験式による締固め特性の推定曲線と締固め試験結果

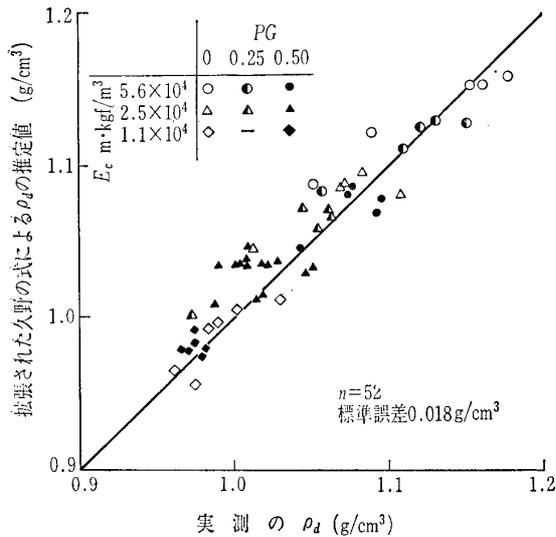


図-16 粗粒分について拡張された渡辺・久野の式による乾燥密度の推定値と締固め試験結果の対比

表-8 粗粒分含有率と渡辺・久野の式の定数

試料名	粗粒分含有率 PG	$v_{a0}$ (%)	$E_{c0}$ (m·kgf/m <sup>3</sup> )	$\alpha$	$\beta$
A	0	49	$0.315 \times 10^4$	0.0323	0.072
B	0.25	—	—	—	—
C, D, E	0.50	42	$0.140 \times 10^4$	0.0137	0.072

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

図-15に(8)式を用いた締固め特性の推定曲線と $\rho_a$ の実測値を示した。例として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 $\rho_a$ の実測値がよい対応をしている。また、図-16は全試料の $\rho_a$ の実測値と(8)式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<sup>3</sup>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かたよ

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(8)式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、(6)式は $w$ 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じるようになり、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30 cm)により泥岩ずり試料の締固め試験を行った。試験には、最大粒径が4.76~76.2 mm、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 $1.1 \times 10^4$ ,  $2.5 \times 10^4$ ,  $5.6 \times 10^4$  m·kgf/m<sup>3</sup>の三種類とした。

一連の試験から、軟岩ずりの特徴と考えられる、①最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ 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、②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、軟岩ずりの締固め密度 $\rho_a$ 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、 $\rho_a$ 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)  $\rho_{dmax}$ は締固めエネルギー $E_c$ のほかに粗粒分含有率PG(試料における粒径4.7 mm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 $\rho_{dmax}$ は減少するが、 $D_{max}$ が増加しても $\rho_{dmax}$ は減少するとはかぎ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って重回帰分析を行うことにより、標準誤差0.023 g/cm<sup>3</sup>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)式によれば標準誤差0.018 g/cm<sup>3</sup>の高い近似精度で軟岩ずり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、補正值は常に実測値を上回り、その差も大きいことから、軟岩ずりへの適応性は低いものと判断された。

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

## 参 考 文 献

- 1) たとえば, 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, pp. 39~45, 1983.
- 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, pp. 93~102, 1976.
- 3) 土質工学会編: 土質試験法, pp. 277~297, 1979.
- 4) 土質工学会編: ロックフィル材料の試験と設計強度, p. 83, p. 159, 1982.
- 5) たとえば, 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正: 多変量解析法, 日科技連, 1981.
- 6) 久野悟郎: 土の締固め, 技報堂, pp. 55~63, 1963.  
(原稿受理 1984.4.9)

---

 < 講演集・シンポジウムテキスト在庫一覧 >

- |  |       |                |                      |              |        |
|--|-------|----------------|----------------------|--------------|--------|
| ○第10回土質工学研究発表会発表講演集(昭和50年度)            | B 5 判 | 1026頁          | 定価 ¥5,200            | 会員特価 ¥4,000  | 〒 ¥450 |
| ○第11回土質工学研究発表会発表講演集(昭和51年度)            | B 5 判 | 1136頁          | 定価 ¥5,800            | 会員特価 ¥4,500  | 〒 ¥450 |
| ○第16回土質工学研究発表会発表講演集(昭和56年度)            | B 5 判 | 1892頁          | 定価 ¥9,900            | 会員特価 ¥7,600  | 〒 ¥500 |
| ○第17回土質工学研究発表会発表講演集(昭和57年度)            | B 5 判 | 2716頁(2の1+2の2) | (1セット)<br>定価 ¥14,000 | 会員特価 ¥10,800 | 〒 ¥900 |
| ○第18回土質工学研究発表会発表講演集(昭和58年度)            | B 5 判 | 1598頁(2の1+2の2) | (1セット)<br>定価 ¥8,600  | 会員特価 ¥6,600  | 〒 ¥500 |
| ○第19回土質工学研究発表会発表講演集(昭和59年度)            | B 5 判 | 1670頁(2の1+2の2) | (1セット)<br>定価 ¥8,600  | 会員特価 ¥6,600  | 〒 ¥500 |
| ○第24回土質工学シンポジウム(昭和54年度)                | B 5 判 | 204頁           | 定価 ¥3,700            | 会員特価 ¥3,000  | 〒 ¥300 |
| テーマA: 構造物と基礎のケース・ヒストリー(Case History)   |       |                |                      |              |        |
| テーマB: 土質試験の新しい方法及び計測技術                 |       |                |                      |              |        |
| ○第25回土質工学シンポジウム(昭和55年度)                | B 5 判 | 82頁            | 定価 ¥1,700            | 会員特価 ¥1,300  | 〒 ¥300 |
| テーマ: アースアンカー工法                         |       |                |                      |              |        |
| ○第26回土質工学シンポジウム(昭和56年度)                | B 5 判 | 76頁            | 定価 ¥1,700            | 会員特価 ¥1,300  | 〒 ¥300 |
| テーマ: 掘削および盛土時の地盤挙動予測と実測との対比            |       |                |                      |              |        |
| ○第27回土質工学シンポジウム(昭和57年度)                | B 5 判 | 68頁            | 定価 ¥1,600            | 会員特価 ¥1,200  | 〒 ¥300 |
| テーマ: NATM工法の設計と実際                      |       |                |                      |              |        |
| ○第28回土質工学シンポジウム(昭和58年度)                | B 5 判 | 164頁           | 定価 ¥3,500            | 会員特価 ¥2,700  | 〒 ¥300 |
| テーマ: 原位置試験の新しい方法, 計測技術および結果の解釈         |       |                |                      |              |        |
| ○土のサンプリングシンポジウム(昭和47年10月)              | B 5 判 | 70頁            | 定価 ¥ 500             | 会員特価 ¥ 350   | 〒 ¥300 |
| テーマ: 硬質粘土と海底地盤のサンプリング                  |       |                |                      |              |        |
| ○昭和56年度サンプリングシンポジウム(昭和56年11月)          | B 5 判 | 70頁            | 定価 ¥1,700            | 会員特価 ¥1,300  | 〒 ¥300 |
| ○ペーン試験に関するシンポジウム(昭和55年10月)             | B 5 判 | 112頁           | 定価 ¥2,500            | 会員特価 ¥1,900  | 〒 ¥300 |
| ○サウンディングシンポジウム(昭和55年11月)               | B 5 判 | 228頁           | 定価 ¥3,900            | 会員特価 ¥3,000  | 〒 ¥300 |
| ○砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム(昭和56年11月)      | B 5 判 | 116頁           | 定価 ¥2,800            | 会員特価 ¥2,200  | 〒 ¥300 |
| ○低振動・低騒音杭工法の施工法と支持力に関するシンポジウム(昭和57年7月) | B 5 判 | 138頁           | 定価 ¥3,000            | 会員特価 ¥2,300  | 〒 ¥300 |
| ○海洋土質調査に関するシンポジウム(昭和57年9月)             | B 5 判 | 356頁           | 定価 ¥5,900            | 会員特価 ¥4,500  | 〒 ¥350 |
| ○接地圧の評価と設計への適用に関するシンポジウム(昭和57年11月)     | B 5 判 | 110頁           | 定価 ¥3,100            | 会員特価 ¥2,400  | 〒 ¥300 |
| ○地盤と基礎の地震災害に関するシンポジウム(昭和58年5月)         | B 5 判 | 118頁           | 定価 ¥3,100            | 会員特価 ¥2,400  | 〒 ¥300 |
| ○環境保全と地盤工学に関するシンポジウム(昭和58年8月)          | B 5 判 | 88頁            | 定価 ¥2,200            | 会員特価 ¥1,700  | 〒 ¥300 |

問合せ・注文先: 土質工学会販売係 電話 03-251-7661

---