

# 粗粒材を含む盛土材料の締固め密度の推定

中岡時春\*・望月秋利\*\*・阪口 理\*\*\*

本論文は、粗粒材料の締固め密度および含水比を室内試験の結果から外挿する方法を検討したもので、まず外挿に必要な条件を整理した後、各種の調整試料で実施した締固め試験の結果をもとに、密度および含水比の粒径に対する相関関係を利用して、原粒度材料の締固め密度と含水比を外挿する式を提案した。さらにこの外挿法を現場の施工管理基準密度に適用し、施工機種および施工方法の選定を行った。

**Key Words**: coarse materials, compaction test, extrapolation equation for in-situ density, in-situ density

## 1. ま え が き

最近の造成工事では、岩砕や中・粗礫等の粗粒土を含む材料を盛土材料として用いるケースが増えてきている。このような材料の締固め特性は直接試験して求めるのが最良の方法であろうが、実際には粒径が大きい原粒度材料をそのまま室内試験に供することはできないので、合理的な施工管理を実施するための密度をいかに設定するかが現場において重要な問題となっている。現在では、一般に①せん頭粒度試料（せん頭試料と略す）を用いて得た締固め密度を礫の混入割合に応じて補正する「Walker-Holtzの補正法<sup>1)</sup> (W & H法と略す)」による方法か、②相似粒度試料（相似試料と略す）で得た締固め密度をそのまま原粒度材料の締固め密度として採用する方法が採られることが多い。しかしW & H法は、礫分の含有率が30~40%以上の試料に対しては適用性が良くないことが指摘されている<sup>2)~5)</sup>。また相似試料を用いる場合は試料の調整が大変なことや、調整試料の細粒分の割合が多いと原粒度材料の性質とかけ離れてくるという問題<sup>6)</sup>もあり、いずれも一般的な方法になり得ていないのが現状である。これらの問題は、例えば大型締固めモールドを用いたところで、実施工において30 cm、あるいはそれ以上の粒径の粗粒材料を用いるようになってきている現状を考えれば、限界があることは明らかである。

礫材の締固め特性に関する研究では、木下<sup>7)</sup>らがせん頭試料を、赤司<sup>8)</sup>が相似試料を用いた締固め試験を行い、密度が最大粒径 ( $D_{max}$ ) の対数に比例するという結果を報告している。また松本<sup>9)</sup>は、ロック材の種類にか

かわらず間隙比 ( $e_0$ : 絶乾比重による  $e$ ) と均等係数 ( $U_c$ ) の対数との間に直接的な関係があることを見出し、均等係数が密度に対して重要な因子であることを示した。これは試料粒径に関するある因子、例えば  $D_{max}$  や  $U_c$  に対して、締固め特性がある一定の傾向を持つことを示しており、この特性を利用すれば室内試験結果をもとに原粒度材料の締固め特性を外挿できる可能性を示すもの、と考えることができる。

本研究はこの視点にたち、原粒度材料の締固め特性について、原粒度のままでは粒径が大きすぎて試験ができず直接的に求めることができないことや、調整試料の試験結果を補正するW & H法にも適用限界があること等の問題に対して、試料の定性として「原粒度材料に対して調整した一連の試験試料の特性は、試料の粒径が原粒度に近づくにしたがい、原粒度材料の特性に近づく」という考え方を基軸に、JISに定められた試験方法で求める試験試料の締固め特性を用いて、原粒度材料の締固め特性を推定する手法を検討したものである。

検討に際しては、室内試験結果から原粒度材料の締固め特性を外挿するための必要条件（試料条件、試験条件、相関条件）を整理した後、原粒度材料に対して最大粒径を数種類に変えて調整した「せん頭試料」と「礫粒度補正試料<sup>10),11)</sup>」と名付けた2種類の調整試料を準備し、JIS A 1210 T法で締固めた試験結果をもとに、模型実験で用いる“modeling in models”の手法で外挿法の検証を行い、その結果に基づいて原粒度材料の締固め特性を外挿し、現場盛土の評価を行った。

その結果、締固め特性を  $\log(f_{min}) \sim \log(D_a)$  関係および  $\log(w_{opt}) \sim \log(D_a)$  関係で整理したとき外挿条件を満たし、その相関関係から提案した外挿式で求めた原粒度材料の締固め特性を現場の施工管理基準値に採用し、適切な評価ができたことから、原粒度材料の締固め特性を外挿する考え方の妥当性を示せた。

\* 正会員 大末建設(株) 土木本部生産管理部技術課課長  
(〒553 大阪市福島区福島 6-8-10)

\*\* 正会員 工博 大阪市立大学工学部 助教授

\*\*\* 正会員 理博 近畿大学理工学部 教授

表一 試料の種類と主な物理的性質

試料		呼び名	最大粒径 (mm)	置換粒径*1 (mm)	$\rho_s$ *2	$U_c$	礫分*3 (%)
原粒度	栗東試料	原 <sub>R</sub>	100	—	2.659	13	82
	伊賀試料	原 <sub>I</sub>	76.2	—	2.654	170	30
栗東 調整 試料	礫補正試料	① R <sub>1.2/5</sub>	1.2	1.2~0.25	2.664	2	0
		② R <sub>9.5/5</sub>	9.52	9.52~2.00	2.662	4	82
		③ R <sub>19.5</sub>	19.1	19.1~4.76	2.660	8	82
	せん頭試料	④ S <sub>1.2/8</sub>	1.2	1.2~0.15	2.664	3	0
		⑤ S <sub>4.8/8</sub>	4.76	4.76~0.60	2.663	3	53
		⑥ S <sub>9.5/8</sub>	9.52	9.52~1.20	2.662	4	73
		⑦ S <sub>19.8</sub>	19.1	19.1~2.40	2.660	6	82
せん頭 試料	⑧ S <sub>1.2</sub>	1.2	—	2.664	5	0	
	⑨ S <sub>4.8</sub>	4.76	—	2.663	5	47	
	⑩ S <sub>9.5</sub>	9.52	—	2.662	6	64	
	⑪ S <sub>19</sub>	19.1	—	2.661	8	74	
伊賀 調整 試料	礫補正試料	⑫ R <sub>1.2/5</sub>	1.2	1.2~0.25	2.644	80	0
		⑬ R <sub>19.5</sub>	19.1	19.1~4.76	2.650	170	30
	せん頭試料	⑭ S <sub>1.2</sub>	1.2	—	2.644	190	0
		⑮ S <sub>19</sub>	19.1	—	2.648	157	20

\*1  $D_a/n$ のふるい目は、それぞれの値に最も近いものを用いた。  
 \*2 土粒子の密度は、各粒径に対して求めた土粒子の密度の加重平均である。  
 \*3 JIS A 1204 における土質分類のレキ以上の割合を示す。

以下にその研究内容を報告する。

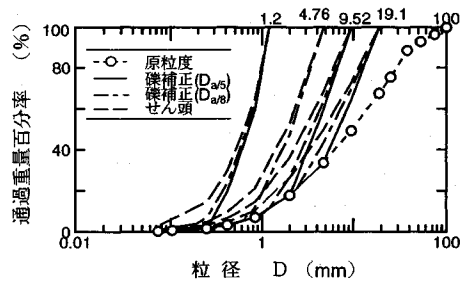
## 2. 試料

原粒度材料は、栗東試料、伊賀試料と呼ぶ2種類を用いた。

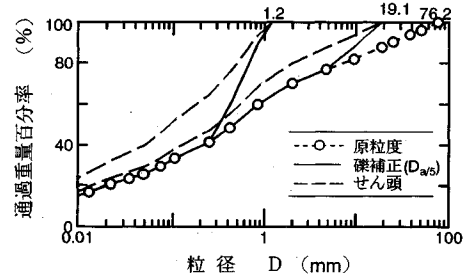
栗東試料：滋賀県栗東町の新設道路の盛土工事に用いる風化の進んだ、粒径が100 mm以下の花崗岩で、日本統一分類法では「粒度のわるい礫 ( $G_p$ )」に分類される。工事は、バックホウで掘削した試料をダンプトラックで運搬し、整地、転圧して、幅員10 m、平均盛土厚さ約8 mの道路盛土を構築する。

伊賀試料：現場は三重県伊賀盆地西部に位置する阿山郡鳥ヶ原における約49 haの造成地で、試料は5~20 mの層厚で堆積している古琵琶湖層群伊賀累層の粒径76 mm以下の礫、砂、粘土を含み、「シルト質砂 (SM)」に分類される。工事はリッピング後、キャリオールスクレーパーで運搬して、整地、転圧し、工事面積約3.2 ha、盛土量95万 $m^3$ 、平均約30 mの盛土造成を行う。

表一は、原粒度材料および調整試料の種類ならびにそれらの主な物理的性質を示したもので、図一(1)、(2)に粒径加積曲線を示す。原粒度材料の最大粒径 ( $D_{max}$ ) は、栗東試料が100 mm、伊賀試料が76.2 mmで、いずれも原粒度のまま室内試験用に用いることはできない。そこで各原粒度材料に対して、試験試料の最大粒径 ( $D_a$ ) が19.1 mm以下の「せん頭試料」と、新た



図一(1) 栗東試料：せん頭粒度と礫補正粒度



図一(2) 伊賀試料：せん頭粒度と礫補正粒度

に「礫粒度補正試料」と名付けた調整試料(礫補正試料と略す)の2種類を準備した。礫補正試料は、試験試料の最大粒径 ( $D_a$ ) 以上の原粒度材料を「 $D_a \sim D_a/n$ , ( $n=5 \sim 10$ )」粒径材料で置き換えたものである。これはせん頭試料や相似試料を用いる場合に起きる、「細粒材料の相対的增加によって試料の特性が原粒度材料の性質と遊離する」という問題を避けるよう工夫したものである。この方法はCBR試験の19 mm法で、19.1 mmふるいに残留する礫分を19.1~4.76 mm材料で置き換える試料の調整方法<sup>12)</sup>や松本<sup>13)</sup>が実施したオーバーサイズ置換粒度調整法と同じ主旨のもので、今回は、 $D_a$ に19.1, 9.52, 4.76, 1.2 mmを選んだ。

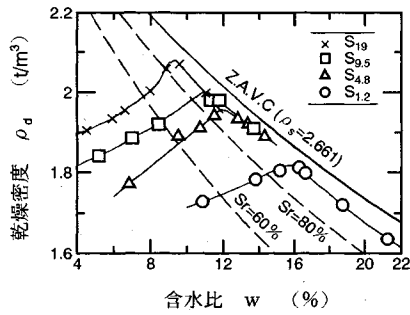
試験試料の呼び名はせん頭試料の場合「 $S_{19}$ 」のように表し、試料の最大粒径をサフィックスで示す。また礫補正試料の場合は「 $R_{19.5}$ 」のように表し、「 $D_a \sim D_a/n$ 」の範囲の試料で置き換えたことを、 $D_a/n$ 部分のサフィックスで表示した(表一参照)。

## 3. 室内締固め試験結果

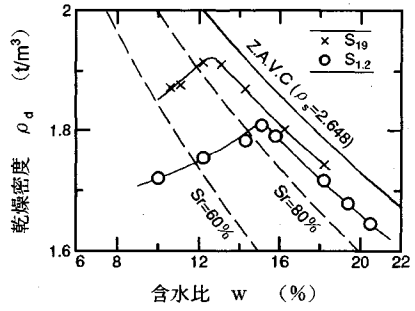
表一に示した合計15試料に対し、JIS A 1210 Tの第1.5および1.6法(土質工学会基準 T 711-1990のB法)に準じた突固めによる締固め試験を実施した。

図二(1)~(3)は栗東試料、図三(1)、(2)は伊賀試料の締固め曲線を示したものである。各調整試料とも締固め密度は粒径の大きい材料の方が大きい。

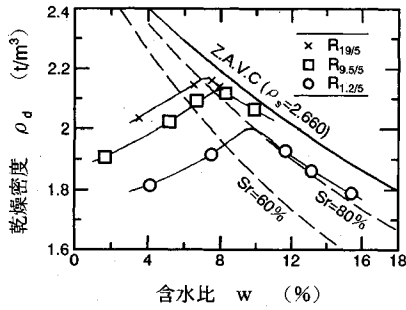
表二に締固め試験結果をまとめ、図四、五に最大乾燥密度 ( $\rho_{dmax}$ ) および最適含水比 ( $w_{opt}$ ) を試料の  $D_a$  に対してプロットした。栗東試料の場合の  $\rho_{dmax}$  は、



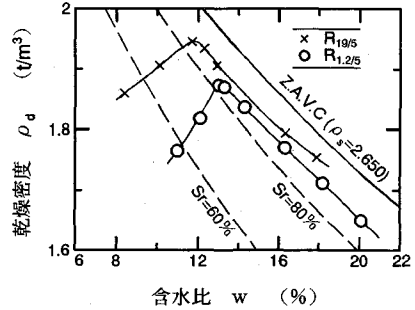
(1) せん頭試料



(1) せん頭試料

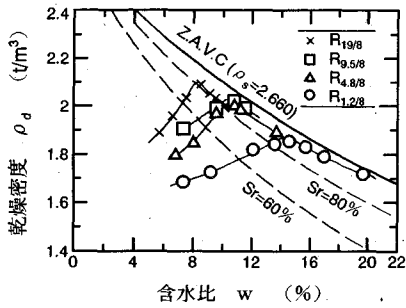


(2) 碟補正試料(Da/5)



(2) 碟補正試料(Da/5)

図-3 突固め曲線：伊賀試料



(3) 碟補正試料(Da/8)

図-2 突固め曲線：栗東試料

$R_{Da/5}$  試料,  $R_{Da/8}$  試料,  $S_{Da}$  試料の順で大きく、また  $D_a$  が大きい程密度は大きくなる。  $w_{opt}$  は  $\rho_{dmax}$  の場合とは逆に、  $S_{Da}$  試料,  $R_{Da/8}$  試料,  $R_{Da/5}$  試料の順に大きく、また  $D_a$  が小さい程大きくなる。伊賀試料の場合も同様な傾向が認められた。

#### 4. 密度、最適含水比の外挿

##### (1) 外挿のための条件

原粒度に対して調整した一連の試料に対して試験を行った場合、「ある注目する特性、例えば  $\rho_{dmax}$  や  $w_{opt}$  は、試料の粒径が原粒度に近づくにしたがい、原粒度材料の特性に近づく」という原理的な性質が外挿法の立脚点で、  $\rho_{dmax}$  や  $w_{opt}$  の外挿を可能とするためには以下の条件が

表-2 締固め試験結果

試料	呼び名	$D_a$ (mm)	$\rho_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	$f_{min}$ ( $e_{min}+1$ )	$w_{opt}$ (%)	
栗東試料	① 碟補正試料	R <sub>1.2/5</sub>	1.2	2.000	1.332	9.7
	②	R <sub>9.5/5</sub>	9.52	2.127	1.252	7.9
	③	R <sub>19/5</sub>	19.1	2.167	1.228	7.2
	④	R <sub>1.2/8</sub>	1.2	1.871	1.424	14.4
	⑤	R <sub>4.8/8</sub>	4.76	2.007	1.327	10.4
	⑥	R <sub>9.5/8</sub>	9.52	2.028	1.313	10.4
	⑦	R <sub>19/8</sub>	19.1	2.100	1.267	8.3
伊賀試料	⑧ せん頭試料	S <sub>1.2</sub>	1.2	1.818	1.465	15.7
	⑨	S <sub>4.8</sub>	4.76	1.956	1.361	12.0
	⑩	S <sub>9.5</sub>	9.52	2.000	1.331	11.0
	⑪	S <sub>19</sub>	19.1	2.079	1.280	9.3
伊賀試料	⑫ 碟補正試料	R <sub>1.2/5</sub>	1.2	1.878	1.408	13.1
	⑬	R <sub>19/5</sub>	19.1	1.946	1.362	11.8
伊賀試料	⑭ せん頭試料	S <sub>1.2</sub>	1.2	1.811	1.460	15.1
	⑮	S <sub>19</sub>	19.1	1.922	1.378	12.6

必要と考えた。

##### 外挿のための必要条件

- ① 試料条件：試料の特性を、例えば  $D_{max}$  あるいは  $U_c$  で示すとすると、その値が原粒度に対して連続的に変化する一連の調整試料を用いる。

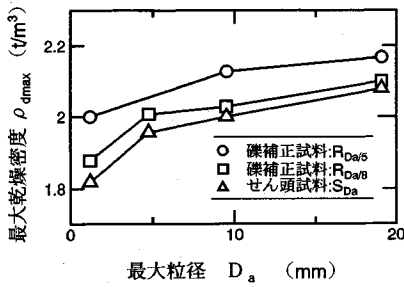


図-4 (1) ρ<sub>dmax</sub>~D<sub>a</sub>の関係: 栗東試料

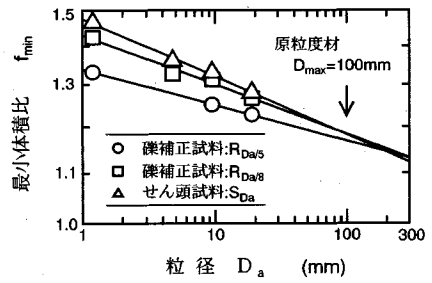


図-6 f<sub>min</sub>~D<sub>a</sub>関係: 栗東試料

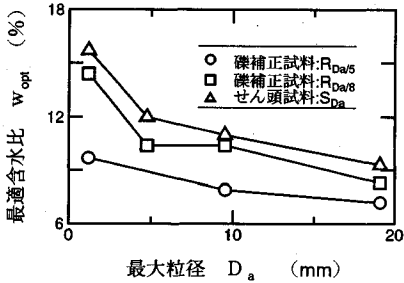


図-4 (2) w<sub>opt</sub>~D<sub>a</sub>の関係: 栗東試料

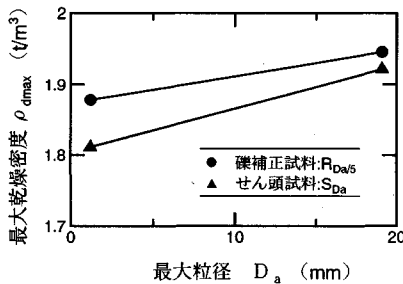


図-5 (1) ρ<sub>dmax</sub>~D<sub>a</sub>の関係: 伊賀試料

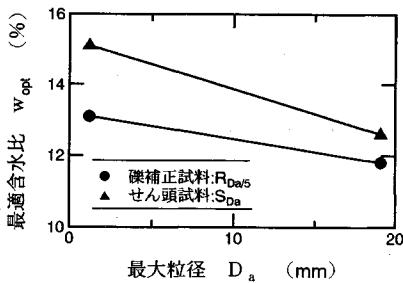


図-5 (2) w<sub>opt</sub>~D<sub>a</sub>の関係: 伊賀試料

- ② 試験条件: 一連の試験を, 同一条件あるいは相似条件のいずれかで実施する。
- ③ 相関条件(1): 締固めた土の特性を, 例えば ρ<sub>dmax</sub> や w<sub>opt</sub> で示すとすると, それらは D<sub>max</sub> あるいは U<sub>c</sub> に対して「強い相関関係」がある。
- ④ 相関条件(2): 原粒度に対して異なる調整方法で準

備しても, 一連の調整試料ごとの特性回帰線は, 原粒度付近で交差する。

この内, 相関条件(1), (2)は「調整方法を変えても一連の試料の特性は, 原粒度に近づくにしたいが, 原粒度材料の特性に近づく」という考え方に基いており, 一方が成立すればもう一方の条件は結果的に成立する, いわゆる従属関係にある。

したがって外挿のためには試料条件, 試験条件の他, 相関条件(1)あるいは(2)が必要条件となる。以下に外挿の考え方の妥当性について, 実験結果に基づく検証と, 原粒度材料に対する締固め特性の外挿方法を検討する。

#### (2) 外挿法の妥当性の検討

原粒度を用いた締固め試験が実施できないため, 原粒度材料の締固め特性は不明である。そこで締固め特性を外挿する方法の妥当性を, まず模型実験で用いる“modeling in models”というサイズ効果の検討手法によって検証する。この方法は実験可能な範囲で行った一連の実験結果の最大あるいは最小の模型を“実物”と見なして, その特性をそれ以外の試験結果をもとに検討し, その間に成り立つ法則(ここでは外挿法則)を見出すという手法である。

この考え方を栗東試料の締固め試験結果に適用する。

試験試料は, 原粒度材料に対して礫補正試料, およびせん頭試料に調整したもので, 同一の方法で突固め試験を実施した。すなわち, 外挿のための試料条件, 試験条件に対応しているので, 以下「相関条件」が成立すれば, 外挿法則が成り立つことになり, これについて検討した。

図-4(既出)は, ρ<sub>dmax</sub>~D<sub>a</sub>関係およびw<sub>opt</sub>~D<sub>a</sub>関係を算術グラフで示したものであるが, これらの関係には強い相関は認められない。

そこで体積比(f<sub>min</sub>)~(D<sub>a</sub>)関係, (w<sub>opt</sub>)~(D<sub>a</sub>)関係の相関性を両対数紙上で整理する方法で検討した。

図-6は栗東試料についての締固め最小体積比(f<sub>min</sub>=e<sub>min</sub>+1)と試料最大粒径(D<sub>a</sub>)の関係を両対数グラフで示したもので, 各調整試料とも両対数グラフ上でf<sub>min</sub>~D<sub>a</sub>間に直線関係が認められ, 外挿のための相関条件(1)を満たしている。

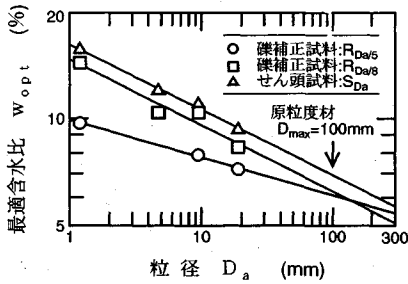


図-7  $w_{opt}-D_a$  関係：栗東試料

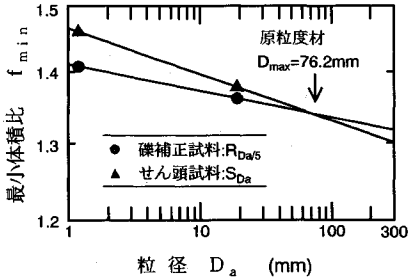


図-8  $f_{min}-D_a$  関係：伊賀試料

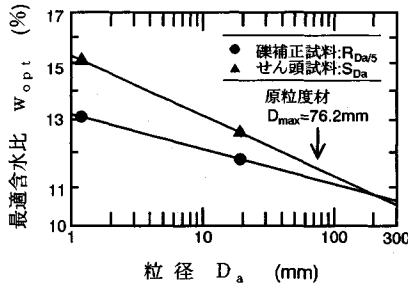


図-9  $w_{opt}-D_a$  関係：伊賀試料

さらに各調整試料の回帰直線は、原粒度付近で交差しており、相関条件(2)も満たしている。

このことから“modeling in models”手法に習うなら、調整試料のうち  $D_a$  が最大である  $R_{19/5}$ ,  $R_{19/8}$ ,  $S_{19}$  試料をそれぞれ“実物”と考え、 $f_{min}$  はそれよりも小さい  $D_a$  の試料 ( $D_a=9.52, 4.76, 1.2$  mm) の試験結果の直線関係を利用して外挿が可能であることを示している。

図-7は栗東試料の  $w_{opt}-D_a$  関係を面対数グラフで示したものである。 $f_{min}-D_a$  関係と同様に図上で直線関係が認められ、かつその回帰直線は原粒度付近で交差しており、外挿の相関条件(1)および(2)を満たしている。

すなわち  $w_{opt}$  においても“実物”の  $D_a$  より小さい  $D_a$  の試験試料の結果をもとに直線外挿が可能であることを示している。

このことは、図-8に示す伊賀試料の  $\log(f_{min}) \sim$

表-3 原粒度材料の外挿密度

試料		A	B	$D_{max}$ (mm)	$f_{min}^{*4}$	$\rho_{dmax}$ ( $t/m^3$ )	$\Delta\rho_d$ ( $t/m^3$ )
栗東 調整 試料	磯補正 $R_{D_a/5}$	0.127	-0.030	100	1.169	2.281	0.020
	磯補正 $R_{D_a/8}$	0.155	-0.041	100	1.184	2.251	-0.010
	せん頭 $S_{D_a}$	0.169	-0.048	100	1.183	2.252	-0.009
平均外挿値					$\rho_{d,mean} = 2.261 t/m^3$		
伊賀 調整 試料	磯補正 $R_{D_a/5}$	0.149	-0.012	76.2	1.338	1.984	0.0
	せん頭 $S_{D_a}$	0.166	-0.021	76.2	1.338	1.984	0.0
	平均外挿値					$\rho_{d,mean} = 1.984 t/m^3$	

\*4 栗東試料： $\rho_s = 2.664$ 、伊賀試料： $\rho_s = 2.654$  で計算。

$\log(D_a)$  関係および図-9に示す伊賀試料の  $\log(w_{opt}) \sim \log(D_a)$  関係でも同様の結果が得られている。

結局これらの結果は、 $D_a$  をパラメータとして  $\rho_{dmax}$  や  $w_{opt}$  の外挿の考え方の妥当性を示しているものと解釈できる。

### (3) 原粒度材料の密度の外挿式

締固め試験結果を  $\log(f_{min}) \sim \log(D_a)$  関係で整理したとき、外挿の法則が成り立つことは、図-6, 8で確認できた。

この  $f_{min} \sim D_a$  (あるいは  $D_{max}$ ) 関係は、式(1), あるいは式(2)で表すことができる。

$$\log(f_{min}) = A + B \cdot \log(D_a) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{または、} f_{min} = 10^A \cdot D_a^B \dots \dots \dots (2)$$

ここに、A, B: 回帰定数

またこの関係を  $\rho_{dmax}$  と  $D_a$  の関係に書換えて、式(3)で表すこともできる。

$$\rho_{d1} = (\rho_{s1}/\rho_{s2}) \cdot \rho_{d2} \cdot (D_1/D_2)^{-B} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\rho_{d1}, \rho_{d2}$ : 試料の締固め密度 ( $t/m^3$ )

$D_1, D_2$ : 試料の  $D_a$

$\rho_{s1}, \rho_{s2}$ : 土粒子の密度

B: 式(1)と同じ

表-3は、原粒度材料の  $D_{max}$  を式(1)の  $D_a$  に代入して得た外挿密度をまとめたものである。表中の  $\Delta\rho_d$  は、

$$\Delta\rho_d = \rho_{dmax} - \rho_{d,mean} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\rho_{d,mean}$ : 平均外挿密度 ( $t/m^3$ )

で表され、 $\rho_{d,mean}$  は栗東試料の場合は3調整試料の外挿密度を、伊賀試料の場合は2調整試料の外挿密度を平均した値である。各調整試料に対して得られた外挿密度は、栗東試料、伊賀試料とも  $\rho_{d,mean}$  に対してほとんど差はなく、いずれの試料調整方法によっても実用上十分な精度で外挿密度が得られている。

### (4) 原粒度材料の含水比の外挿式

原粒度材料の含水比の外挿を、密度の場合と同様な方

表-4 原粒度材料の外挿含水比

試料		C	F	D <sub>max</sub> (mm)	w <sub>opt</sub> (%)	Δw <sub>opt</sub> (%)
栗東	礫補正 R <sub>D<sub>a</sub>/5</sub>	0.996	-0.106	100	6.1	-0.4
	R <sub>D<sub>a</sub>/8</sub>	1.169	-0.816	100	6.3	-0.2
	せん頭試料	1.211	-0.814	100	7.0	0.5
平均外挿値				w <sub>opt.mean</sub> = 6.5 %		
伊賀	礫補 R <sub>D<sub>a</sub>/5</sub>	1.120	-0.038	76.2	11.2	-0.2
	せん頭試料	1.184	-0.065	76.2	11.5	0.1
	平均外挿値				w <sub>opt.mean</sub> = 11.4 %	

法で試みた。図-7, 9 に示す log(w<sub>opt</sub>)~log(D<sub>a</sub>) 関係から、w<sub>opt</sub>~D<sub>a</sub> 関係を式(5)で表わすことができる。

$$\log(w_{opt}) = C + F \cdot \log(D_a) \dots (5)$$

$$\text{または、} w_1 = w_2(D_1/D_2)^F \dots (6)$$

ここに、w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>: 試料の含水比 (%)

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: 試料の D<sub>a</sub>

C, F: 回帰定数

表-4 は、w<sub>opt</sub> 外挿のための回帰定数 C, F と、原粒度材料の外挿最適含水比を示したものである。表中の Δw<sub>opt</sub> は、

$$\Delta w_{opt} = w_{opt} - w_{opt.mean} \dots (7)$$

ここに、w<sub>opt.mean</sub>: 平均外挿最適含水比

である。伊賀試料の場合は、各調整材料の w<sub>opt.mean</sub> に対する差は ±0.2% で、外挿精度はかなり良い。これに対して栗東試料では、図-7 に示したように R<sub>D<sub>a</sub>/5</sub> 試料と R<sub>D<sub>a</sub>/8</sub> 試料の回帰線は原粒度試料の D<sub>max</sub> 付近で交差しているが、せん頭試料の回帰線はそれらとはやや外れ、その結果外挿含水比は他の調整試料の値よりもやや大きくなる。そのため外挿含水比は w<sub>opt.mean</sub> に対して約 ±0.5% の差が生じた。しかしこの程度の含水比の差は施工上あまり問題ではなく、実用上十分な精度で外挿が可能である、といえる結果である。

(5) W & H 法による密度の補正

式(8)は、Walker-Holtz によって提案された礫の含有割合 (P) による密度の補正式である。

$$\rho_d = 1 / \{ (1-P) / \rho_{ds} + P \cdot (1 + w_R \cdot \rho_R) / (\rho_w \cdot \rho_R) \} \dots (8)$$

ここに、P: 礫の混入割合 (小数点表示)

ρ<sub>ds</sub>: 土部分の乾燥密度 (t/m<sup>3</sup>)

ρ<sub>R</sub>: 礫の密度 (t/m<sup>3</sup>)

ρ<sub>w</sub>: 水の密度 (t/m<sup>3</sup>)

w<sub>R</sub>: 礫の含水比 (小数点表示)

この方法は、土と礫の混合物を締固めた場合、礫の間隙は土が満たし、間隙中の土はその締固め仕事量で土のみを締固めた場合の密度になっているという仮定のうえ

表-5 W & H 法による補正密度 (栗東試料)

調整試料	適用試料	P <sup>*5</sup> (%)	ρ <sub>ds</sub> <sup>*6</sup> (t/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>R</sub> <sup>*7</sup>	w <sub>R</sub> <sup>*8</sup> (%)	ρ <sub>dmax</sub> <sup>*9</sup> (t/m <sup>3</sup> )	Δρ <sub>d</sub> <sup>*10</sup> (t/m <sup>3</sup> )
せん頭試料	実物(S <sub>19</sub> )	—	2.079	—	—	—	—
	S <sub>9.5</sub>	27.2	2.000	2.657	2.4	2.115	0.036
	S <sub>4.8</sub>	50.2	1.956	2.658	2.7	2.188	0.109
	S <sub>1.2</sub>	83.7	1.818	2.660	3.0	2.329	0.250

- \*5 S<sub>19</sub> 試料を実物とした時の、各試験試料における礫の混入率。
- \*6 締固め試験による最大乾燥密度 (実測値)。
- \*7 礫の密度は、各粒径に対して求めた土粒子の密度の加重平均。
- \*8 礫の吸水率を採用。
- \*9 締固め試験結果からの補正密度。
- \*10 Δρ<sub>d</sub> = 補正值 - 実測値。

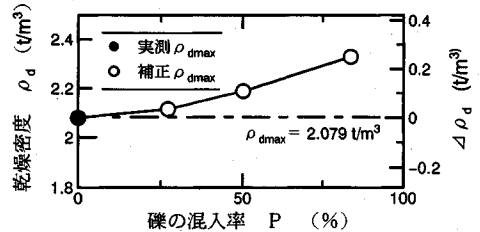
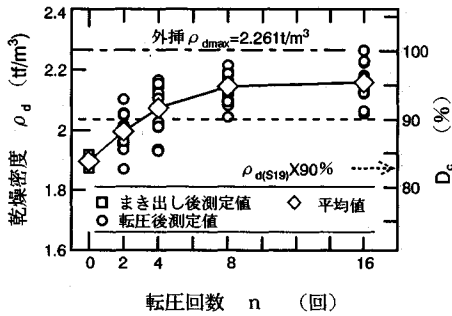


図-10 W & H 法による補正密度

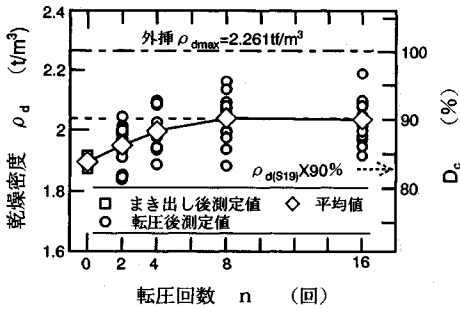
に成り立っており<sup>14)</sup>、W & H 法では土と礫の境界を D<sub>a</sub> = 4.76 mm としているが、一般的には試験最大粒径までを土とし、それ以上の粒径を礫と仮定した密度補正が行われている<sup>15)</sup>。この W & H 法について、“modeling in models” 手法を適用し、その妥当性を検討した。

これは「原粒度材料に対して調整した一連の試験試料の特性は、試験試料の粒径が原粒度に近づくにしたがい、原粒度材料の特性に近づく」という試料の定性を基本に、調整試料に強い相関関係が成り立つなら、調整試料のうち D<sub>a</sub> が最大の試験試料の特性を“実物”とし、“実物”より小さい D<sub>a</sub> の試料の特性を W & H で補正しても、“実物”の特性により近い値になるという考え方に基づいた検討方法で、栗東試料 (せん頭試料) の D<sub>a</sub> = 19.1 mm 試料を“modeling in models” 手法における“実物”と見なして、D<sub>a</sub> = 9.52, 4.76, 1.2 mm の調整試料の締固め結果に W & H 法による密度補正を行い、その妥当性について検討したものである。

表-5 に密度補正結果を、また図-10 に D<sub>a</sub> = 19.1 mm 試料を基準に各試験試料の D<sub>a</sub> 以上の粒径分を礫分として、その混入割合と密度補正值の関係を示した。密度補正值は、“実物”の密度 (実測値) よりも常に大きく、また礫の混入割合が大きくなると実測値と補正值の差は広がる傾向にある。この傾向は「W & H 法の礫の混入割合分 P を礫の密度 ρ<sub>R</sub> で置き換える」という考え方が、密度補正を過大に評価し、その結果 P が増加すると実測値と密度補正值の差が増々大きくなったものである。P = 30% では、密度補正值は実測値に対して約 1.7% (0.036 t/m<sup>3</sup>) 大きく、また P = 50% では約 5.2% (0.109



(1) 振動ローラー転圧



(2) タイヤローラー転圧

図-11 現場盛土試験：栗東試料

$t/m^3$  大きくなっており、土質試験法<sup>2)</sup>や久野<sup>3)</sup>、久柴<sup>4)</sup>、赤司<sup>5)</sup>らの、「W & H法の適用範囲は礫の混入率が約  $P < 30\%$ 」であるという、結論を支持する結果となった。

さらに W & H法では、「礫の含水比  $w_R$ 」には一般に吸水率を用いているが、式(8)の意図とするとところとは異なり、また  $w_R$ の採り方により補正密度が変わるという問題については、筆者らがすでに報告<sup>10)</sup>している。

## 5. 現場盛土試験と施工管理試験結果の評価

### (1) 栗東試料を用いた道路盛土

現場は道路築造のための盛土工事で、ダンプトラックで搬入した材料をブルドーザ(7t級)でまき出して、振動ローラー(重量=3.85t, 起振力=3.5t)あるいはタイヤローラー(重量=8.0t, 満水時=15.0t)による転圧が計画され、機種選定および転圧回数の設定を目的に、現場盛土試験を実施した。この時の基準密度に外挿法により求めた外挿密度を採用し、試験盛土はブルドーザによる10回(片道)以下の走行でまき出し基準厚さ(33cm)に整地した後、振動ローラーあるいはタイヤローラーで2, 4, 8, 16回転圧(片道走行)し、RI法により密度を測定した。

図-11(1), (2)は、乾燥密度と転圧回数(n)の関係を示し、振動ローラー転圧とタイヤローラー転圧について示したもので、実線はそれらの平均値を結んだものである。

また縦軸の副尺には外挿密度を100%とする締固め度

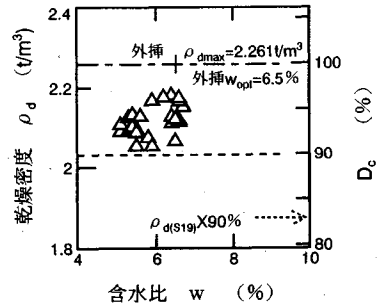


図-12 実施工密度計測結果  
(栗東試料：振動ローラー8回転圧)

( $D_c$ )を示し(一点鎖線)、施工管理基準値( $\rho_{dmax} \times 90\%$ )を破線で示した。

振動ローラーの場合は、転圧回数の増加とともに密度が増加するが、8回を越えると密度増加割合はそれ以前よりも少なくなる。またタイヤローラーの場合、転圧回数が4回以上での密度増加は顕著ではない。振動ローラーでは8回の転圧で計測値がすべて施工管理基準値を越えるが、タイヤローラーの場合、16回転圧でも施工管理基準値を越えたのは約半数である。

この結果に基づき、本工事では振動ローラーによる8回の転圧を採用した。なお図中縦軸には、参考として「せん頭試料(S19)の締固め密度 $\times 90\%$ 」の密度値を矢印で示したが、その値を施工管理基準値として採用すると、ブルドーザ(片道 $< 10$ 回走行)によるまき出し作業によってすでに基準を満足するという結果で、十分締固められていない盛土施工を許すことになり、適切でない。

図-12に施工中に計測した密度と含水比の結果の一例を示す。材料の自然含水比は5~7%にあることが計測されていたので、現場含水比の調整は行わなかったが、施工含水比は最適含水比と大差なく、またほとんどの実測密度は、 $D_c \geq 90\%$ であった。

### (2) 伊賀試料を用いた盛土工事

現場は盛土造成工事で、キャリオールスクレーパーで運土された材料をブルドーザ(42t級)で整地し、振動ローラー(最大起振時=17t)で転圧する施工方法が計画されており、その転圧回数を検討するために現場盛土試験を実施した。運土された材料(含水比未調整)を30~40cmの厚さでまき出してヤードを整地し(ブルドーザ走行：片道6回)、振動ローラーで片道走行3, 5, 8回の転圧を行い、その時の密度を水置換法で測定した。この時の基準密度には、栗東試料と同様に外挿法により求めた外挿密度を採用した。

図-13は、 $\rho_d$ ~転圧回数(n)の関係を示す。縦軸の副尺には外挿密度を100%(一点鎖線表示)として、締固め度を示した。施工管理基準値は $\rho_{dmax} \times 90\%$ (破線表示)に設定していたので、大型ブルドーザによる整地

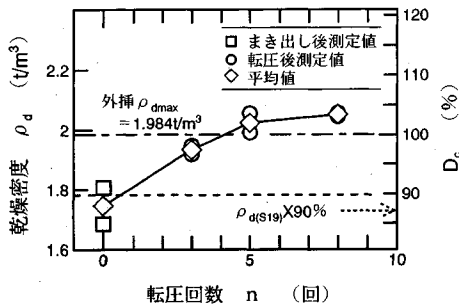


図-13 現場盛土試験  
(伊賀試料: 振動ローラ転圧)

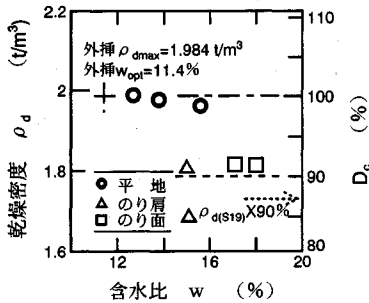


図-14 実施工密度計測結果  
(伊賀試料: 振動ローラ5回転圧)

および振動ローラによる3回の転圧で満足するという結果になったが、本現場では、施工の確実性を期待して5回転圧を作業標準とした。

図-14は施工中に計測した $\rho_d$ と $w$ の結果を示したものである。締固め度は平地では $D_c \approx 100\%$ が得られたが、のり面では $D_c \geq 90\%$ 、のり肩では $D_c \approx 85 \sim 90\%$ であった。のり面に対してはバックホウ等で土羽打ちを急に施工した結果であるが、施工機械が走行できないのり肩では、やや低い密度になった。なお図中縦軸には、参考として「せん頭試料(S<sub>19</sub>)の締固め密度×90%」の密度値を矢印で示したが、その値を施工管理基準値とすると、必ずしも締固めが十分でないのり面でさえ $D_c \approx 95\%$ 、のり肩でも $D_c \approx 88 \sim 94\%$ と、締固め度の値が実感と合わず、試験値をそのまま基準密度に用いるのは適当でない。

なお、施工中に降雨が多く、施工含水比は材料試験から外挿した最適含水比よりも幾分湿潤側に偏った。

## 6. 結 論

栗東および伊賀の盛土現場から採取した2種類の原粒度材料に対して、各々最大粒径を4通りに変えて調整した「せん頭試料」と「礫補正試料」の試験試料(計15試料)に対して室内締固め試験を実施し、その結果を用いて密度および最適含水比を外挿する方法について検討した。さらに外挿した密度および最適含水比を基準値と

する施工管理基準値で、現場盛土試験および実施工の品質を評価した。

以下にこの研究で得られた主な結論をまとめる。

(1) 突固めによる締固め試験結果は、最大粒径( $D_a$ )が同じ場合、礫補正試料の方がせん頭試料よりも最大乾燥密度は大きく、最適含水比は小さい。また同じ方法で調整した試料の場合、 $D_a$ が大きい試料の方が密度は大きく、含水比は小さい。

(2) 密度や最適含水比の外挿のためには、試料条件、試験条件と、相関条件(1)あるいは相関条件(2)のいずれかを満足することが必要であることを示した。また、試験で得られた $f_{min} \sim D_a$ 関係および $w_{opt} \sim D_a$ 関係が両対数グラフ上で直線関係になることを示し、この関係を利用した外挿法の妥当性を示すとともに、 $D_a$ (あるいは現場試料の場合は $D_{max}$ )を与えて原粒度材料の締固め密度および含水比を求める外挿式を示した。

(3) W & H法の妥当性を、 $D_a = 19.1$  mm せん頭試料を“実物”と見なして、実物の密度をそれより小さい $D_a$ の試料で行った試験結果から補正するという方法で検討した。W & H法による密度補正値は常に“実物”よりも大きくなるので、実用性のある適用範囲は概ね $P < 30\%$ という土質試験法<sup>2)</sup>や久野<sup>3)</sup>、久柴<sup>4)</sup>、赤司<sup>5)</sup>らの結論を裏付けた。

(4) 2箇所の現場で現場盛土試験を実施して、施工機種および施工方法の検討を、外挿最大乾燥密度および外挿最適含水比を基準値に設定して行い、振動ローラの施工効果がタイヤローラよりも良いこと、さらに施工に必要な振動ローラの転圧回数の検討を行い、各現場での作業標準を設定し、実施工で必要密度管理値を越えたことを確認した。また「せん頭試料による締固め最大乾燥密度の90%」を管理基準値とする場合、ブルドーザによる整地作業だけで基準値を満足するという実状と合わない結果を示し、粒径の変化に対する締固め密度の補正の必要性を指摘した。

## 参 考 文 献

- Walker, F.C. and Holtz, W.G.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, Dec., Sep. No.180, 1951.
- 土質工学会: 土質試験法 第2回改定版, p.293, 1985.
- 久野悟郎: 土の締固め, 技報堂全書, pp.256~262, 1963.
- 久柴勝行・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.13, No.2, pp.39~45, 1983.
- 赤司六哉・江藤義孝・江藤芳武・相馬 明・山下伸二: 締固められた粗粒土の密度補正に関する一考察, 第20回土質工学研究発表会概要集, pp.1583~1586, 1985.
- 門脇慶太郎・大長昭雄: 喜撰山ロックフィルダムの設計に伴う特殊検討について, 発電水力, No.97, pp.8~27, 1969.



- 
- 7) 木下哲生：礫質盛土の沈下と改良に関する研究，大阪市立大学学位請求論文，pp.19~37, 1986.
- 8) 赤司六哉：ロック材料の密度管理と強度確認試験，土と基礎，Vol.33, No.6, pp.19~24, 1985.
- 9) 松本徳久：粗粒材の設計定数の決定方法とその適用，土と基礎，Vol.33, No.6, pp.7~12, 1985.
- 10) 中岡時春・望月秋利・金田逸朗：中・粗礫を含む材料の締固め密度の補正法，土木学会第42回年次学術講演会概要集，Ⅲ-pp.698~699, 1987.
- 11) 望月秋利・中岡時春：粗粒分を含む締固め土のせん断特性，第24回土質工学研究発表会概要集，pp.547~548, 1989.
- 12) 土質工学会：土質試験法第2回改定版，p.317, 1985.
- 13) 松本徳久・渡辺和夫・岩田充弘・小川 優：ロック材料の室内締固め試験方法の実験的検討，土木技術資料，Vol.27, No.11, pp.33~38, 1985.
- 14) 土質工学会：土質試験法第2回改定版，p.292, 1985.
- 15) 土質工学会：粗粒材料の現場締固め，pp.89~90, 1990. (1993.11.12 受付)
- 

## EVALUATION OF DENSITY FROM COMPACTION TESTS ON COARSE GRAINED SOILS

Tokiharu NAKAOKA, Akitoshi MOCHIZUKI and Osamu SAKAGUCHI

For coarse fill material compaction tests are unsuitable for the determination of maximum density and optimum water content. This paper presents a method for extrapolating values of maximum density and water content from compaction tests performed on materials having smaller grains. In order for the method to be applied correctly some conditions need to be satisfied. The experimental work consisted of a series of fifteen compaction tests on samples having various grain sizes up to a value of 19.1 mm. When plotted in a logarithmic scale the results showed that as the maximum grain size of each sample increased there was a linear increase of the maximum dry density and a linear decrease of the optimum water content. The extrapolation of these results to coarse materials is therefore possible using equations which explain such linear relationships. Finally two case studies are used to illustrate the applicability of the method.

---