

礫まじり土の締固め密度の推定に関する研究

森 満雄¹・阿部道雄²・森 麟³

¹正会員 工修 明星大学教授 理工学部土木工学科 (〒191 東京都日野市程久保 2-1-1)

²正会員 工修 明星大学助手 理工学部土木工学科

³名誉会員 工博 早稲田大学名誉教授

本論文は、礫まじり土の締固め密度と、締固めエネルギーゼロ、含水比ゼロの条件で求めた、ゆる詰め密度との関連性に着目し、礫まじり土の締固め密度の推定法を検討したものである。物理的性質の異なる2種の礫と砂質土（山砂）を混合し、大型突固め試験を行った結果、せん頭粒度のゆる詰め密度、突固め密度、最大乾燥密度の間に比例関係が得られた。これらの関係より、ゆる詰め密度から最大乾燥密度・最適含水比の推定が可能であることを提案した。さらに、粒度分布からみた適用限界、実際に得られるであろう最大の締固め密度の限界についても検討した。

Key Words : granular materials, compaction test, maximum dry density, loose density, optimum moisture content.

1. まえがき

現場の締固め施工管理法として乾燥密度による方法がある。土の締固まり方は、土質、含水量、締固め方法などの違いによって異なるので、その基準となるべき密度をJISによる標準の突固め試験から得られた最大乾燥密度とし、施工後の乾燥密度は、最大乾燥密度に対する比率、締固め度で表す。そして、その締固め度は一般に90～95%以上というように規定されている。

しかしながら、原材料が室内実験で用いられるモールドに応じた許容最大粒径以上の礫分を含む場合、許容最大粒径以下の材料で行った室内実験の結果から原材料の締固め密度を推定する必要が生じてくる。この推定法としてWalker-Holtzの理論式による方法¹⁾(W・H法と略す)、Humphresの方法²⁾がある。

W・H法は礫分の含有率が30～40%までが適用範囲と指摘されているが^{3),4)}、赤司ほか⁵⁾は細粒土の少ないロック材料では適用不可、細粒土の多いコア材料でも礫率20%までと指摘している。また、片山ほか⁶⁾は礫の粒形の相違によってはW・H法が礫率の低い場合でも適用できない結果を得ている。

このように、W・H法の適用性に幅のあることは、森・阿部⁷⁾および森^{8),9),10)}が各種の締固め密度の異なる土を用いた礫混合土の突固め試験を行って

指摘した。また、礫分を火山礫のような気泡性の材料とした場合には、W・H法は礫率が低くても適用出来ない結果も報告¹¹⁾した。

Humphresの方法は、特殊な締固め試験機と手法によって得た値を用いて、かなり複雑な作図法により礫率に対する密度の推定曲線を求めるものであるが、一部にW・H法の理論曲線を取り入れており、W・H法より合理的と考えてよい。

Humphresの方法については、実験の手段は異なるが、作図法を利用して、その適用性を森^{9),11),12)}が検討した。その結果、推定値と実験値の差はW・H法より少ないが、破碎性のとくに大きい火山礫などには適用できない¹¹⁾。

礫まじり土の締固め特性について、赤司¹³⁾はロック材料について相似粒度の締固め密度が最大粒径の対数に対して比例すること、さらに、粒子間のみの空隙を表す間隙比(有効間隙比)が相似粒度・せん頭粒度のいずれも最大粒径による影響をほとんど受けないことから、この有効間隙比を用いた密度管理法を提案している。また、中岡ほか¹⁴⁾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」という考え方を基に2種類の調整試料を用い、JISによる標準の突固め試験の結果から、最大乾燥密度・最適含水比の外挿法を試みている。

ところで、実際の礫まじり土は最大粒径が異なっ

表-1 使用材料の物理的性質

礫分	見かけ密度 JIS A 1110 ρ_s (g/cm ³)	すり減量 JIS A 1121 (%)	吸水量 JIS A 1110 (%)	形状	細粒土分 (山砂)
川砂利	2.709	17.4	0.99	丸	$D_{max}=2.0\text{mm}$ $U_c=40.4$
破碎軟岩	2.643	41.6	2.82	角	$U_c=5.4$ $\rho_s=2.661$

ても、粒度分布は連続的であり、以上のような試験を室内実験として行う場合、相似粒度かせん頭粒度かが問題となる。

この両者について比較すると、相似粒度は最大粒径が異なっても、締固め密度に影響を与える因子の一つである均等係数が一定であるが、全体的に粒径が小さくなるので、細粒土含有量がせん頭粒度に比べてかなり多くなる。また、粒度調整において、特に細粒部分の調整に多大の時間を必要とする。

一方、せん頭粒度は、ある粒径で取り除いた材料以外はそのまま用いられるので試料調整も容易であり材料も少なくてもよい。また、せん頭粒度の最大粒径が小さくなるほど細粒土が多くなるが、相似粒度ほどには多くなりませんので、細粒土の締固めに与える影響は少ないと考えられる。

本研究は以上の観点から、せん頭粒度の試料を用いて比較的簡単な操作で実用性のある推定法を提案すべく次のような考え方と順序で実験を進めた。

まず、礫まじり土の締固め密度に影響する因子を含水量・締固めエネルギー・1回当たりの打撃力・粒度分布・礫の形状・礫の硬さ(破碎)・礫率(礫分含有率)とすれば、ある一本の粒度曲線を持つ礫まじり土において、含水比の影響ゼロ($w=0\%$)、締固めエネルギーの影響ゼロとしたゆる詰め状態の密度と、 $w=0\%$ の条件での突固めによる締固め密度は、各段階のせん頭粒度に対応すると考える。これは、各段階のせん頭粒度の最大粒径は連続的に変化し、それに応じて礫分の混合割合も連続的に変化するので、ゆる詰め密度と締固め密度は、せん頭粒度の最大粒径に応じて、各段階で対応するものと仮定したものである。

また、礫の硬さは突固め時の破碎に関連するが、各段階のせん頭粒度での破碎の程度は連続性を持つと考えてよいので、突固め状態の密度も連続的に変化し、ゆる詰め密度と相関すると考える。

以上の検討は、含水比の影響を持たない $w=0\%$ の条件のもとで実施するが、次に、含水比の影響を受ける最大乾燥密度と最適含水比を各段階のせん頭粒度について求め、最大乾燥密度と前述のゆる詰め

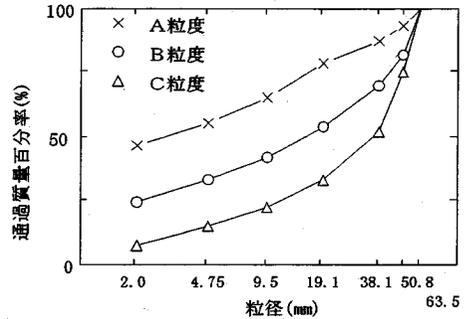


図-1 礫分の設定粒度 ($D_{max}=63.5\text{mm}$)

密度 ρ_{dl} との関連性を検討する。

上記の関係を物理的性質の異なる2種類の礫(2.0~63.5mm)に山砂(2.0mm以下)を混合して大型突固め試験を行って、せん頭粒度のゆる詰め密度から最大乾燥密度の推定可能なことを確かめ、さらに、この最大乾燥密度の値から最適含水比の推定も可能であることを示した。

また、当然のことながら、締固め密度には限界があり、粒度分布の範囲にも適用限界があるので、これらについても明らかにした。

2. 実験に用いた材料と礫分の設定粒度

表-1 に使用材料の物理的性質を示す。礫分は川砂利と破碎軟岩で、川砂利は富士川産、軟岩は奥多摩地区の風化砂岩で、ロサンゼルスすりへり試験によるすりへり減量、吸水量、形状ともに川砂利と著しく異なる。角は角ばっている、丸は丸みを帯びているという意味である。細粒土分として用いた山砂は多摩地区の稲城近辺に産する通称稲城砂と呼ばれる山砂で、土質分類では砂質土{SF}となる。

図-1 に礫分の設定粒度分布を示す。3本の設定粒度を上からA粒度・B粒度・C粒度と呼ぶことにする。B粒度の38.1mmのせん頭粒度は粒度調整工法¹⁵⁾に用いる粒度範囲(M-40)のほぼ中心の粒度でありA粒度は粒度範囲の上限付近である。C粒度は粒度範囲の下限付近の粒度分布となるが、前述の $w=0\%$ のゆる詰め密度と突固め密度の関係の成立する限界を調べるため設定したもので、粒度分布がC粒度付近よりさらに下側になるとゆる詰め密度と突固め密度の関係は成立しなくなる¹⁶⁾。

3. 実験方法

使用した大型突固め試験機は、モールド直径 $D=30\text{cm}$ 、高さ $H=36\text{cm}$ 、ランマー重量 15kgf ($\approx 147.2\text{N}$)

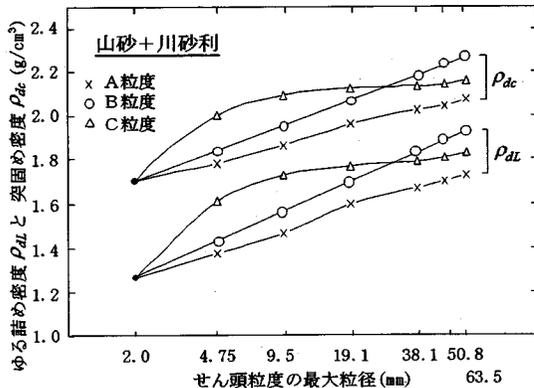


図-2 せん頭粒度の ρ_{DL} と ρ_{DC} (山砂+川砂利)

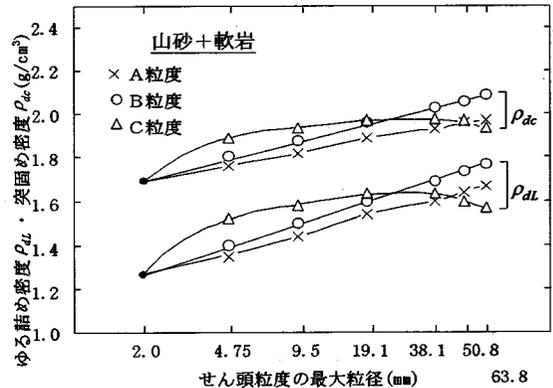


図-3 せん頭粒度の ρ_{DL} と ρ_{DC} (山砂+軟岩)

端面直径15cm, 落下高さ53cm, 3層で各層60回とした〔標準突固め試験 (JSF T 711 A法) の締固めエネルギー $1.0E_c$ と同じ〕。

(1) 乾燥状態のゆる詰め密度 ρ_{DL} の測定

山砂と礫を含水比 $w=0\%$ の絶乾状態とし、せん頭粒度に配合した礫まじり土を、落下高さを与えないように試料に接してハンドスコップで大型モールドに静かに注ぎこむ。その際、あらかじめ予備実験で求めた大略の値に従って、1層分ごとに配合した材料を用いる。これは、モールド内での配合のバラツキを防ぐためである。3層目の表面の整形は圧力を与えないように注意する。この実験を3回くり返し、その平均値を ρ_{DL} とする。山砂のみの場合も大型モールドによる。

(2) 乾燥状態の突固め密度 ρ_{DC} の測定

試料の調整は ρ_{DL} の場合と同じく $w=0\%$ の条件で、予備実験で求めた値に従って1層ごとに配合した材料を用い、3層60回の突固め試験を行う。この実験を3回くり返しその平均値を ρ_{DC} とする。山砂のみの場合や細粒土分の多いせん頭粒度では、突固め時に試料が飛散するが、口紙を2枚載せてその上から突固めると飛散を防ぐことが出来る。

(3) 最大乾燥密度 ρ_{Dmax} と最適含水比 w_{opt} の測定

試料は気乾試料を用い、山砂・礫ともに気乾含水比を測定し、それに基づいて実質の配合割合に換算する。この場合も、全体の質量を想定して、1層分ごとに配合した材料を用いる。

加水は段階的に行うが、礫分の吸水を考慮して一晚水分の蒸発を防ぐ状態で保管したのち試験した。また、礫分が多くなると、水が滲出して、それ以上

の加水が困難となり、締固め曲線の頂点は得られない。この場合、 ρ_{Dmax} と w_{opt} を求めるための試験は不能となる。含水比の測定では、一部分だけでなく全試料を炉乾燥した。

4. 乾燥状態のゆる詰め密度 ρ_{DL} と突固め密度 ρ_{DC} との関係

(1) 山砂と川砂利の場合

山砂に川砂利を配合した各せん頭粒度の ρ_{DL} と ρ_{DC} の関係を図-2に示す。B粒度は、最大粒径が大きくなるに従って、 ρ_{DL} と ρ_{DC} がせん頭粒度の最大粒径の対数に比例して直線的に増加するが、C粒度の場合は19.1mm付近までは他の粒度よりも大きい値を示し、最大粒径が大きくなるとB粒度以下になる。いずれにしても、 ρ_{DL} と ρ_{DC} の曲線の形は近似している。

(2) 山砂と軟岩の場合

図-3に各せん頭粒度の ρ_{DL} と ρ_{DC} の関係を示す。川砂利にくらべて全体的に得られる密度は小さいが、B粒度は川砂利と同じく ρ_{DL} と ρ_{DC} が直線的に増加している。C粒度は川砂利と異なり、最大粒径が大きくなると、 ρ_{DL} と ρ_{DC} ともに密度が低下し、A粒度以下となる。従って、最大粒径が大きくなると密度も大きくなるわけではなく、粒度分布と礫質の影響が考えられる。いずれにしても、 ρ_{DL} と ρ_{DC} の曲線の形は近似している。

(3) ρ_{DL} と ρ_{DC} の関係

図-4、図-5に山砂と川砂利・山砂と軟岩の ρ_{DL} ～ ρ_{DC} の関係を図中にB・C粒度のせん頭粒度の最大粒径を記して示す。A・B・C粒度とも、ほぼ比例関

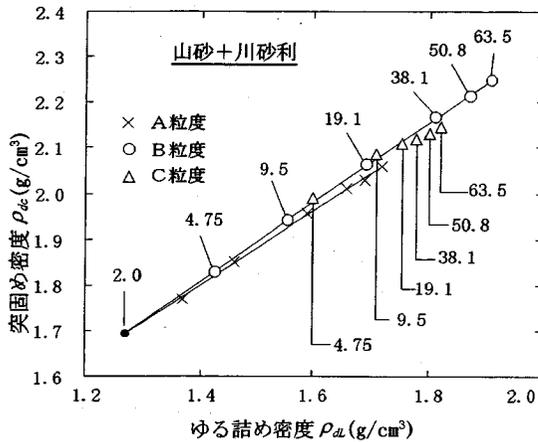


図-4 ρ_{dL} と ρ_{dc} の関係 (山砂+川砂利)

表-2 山砂+川砂利の試験結果

記号	最大粒径 (mm)	区分	ρ_{dL} (g/cm ³)	ρ_{dc} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
•	2.0		1.265	1.690	1.775	14.0
×	4.75	A	1.369	1.774	1.870	11.5
		B	1.425	1.828	1.920	11.4
		C	1.603	1.990	2.075	8.0
●	9.5	A	1.462	1.852	1.945	9.8
		B	1.556	1.940	2.015	9.8
		C	1.711	2.085	2.155	6.9
○	19.1	A	1.588	1.955	2.035	8.7
		B	1.696	2.061	2.100	8.4
		C	1.755	2.110	2.195	6.2
□	38.1	A	1.661	2.009	2.100	7.5
		B	1.812	2.170	2.210	5.7
		C	1.780	2.122	2.200	5.4
△	50.8	A	1.687	2.034	2.120	7.0
		B	1.875	2.216	2.245	4.7
		C	1.800	2.131	—	—
⊗	63.5	A	1.718	2.058	2.140	6.7
		B	1.909	2.250	2.275	4.2
		C	1.821	2.145	—	—

記号は突固め曲線用

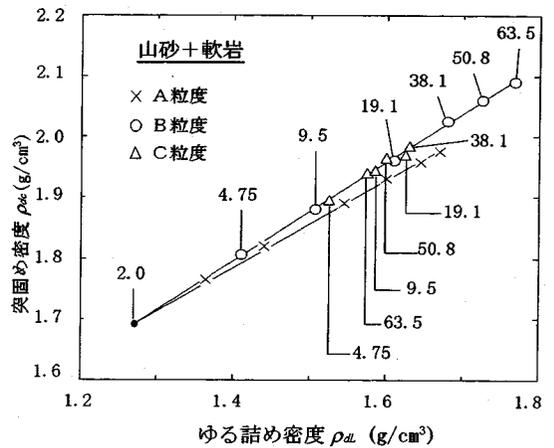


図-5 ρ_{dL} と ρ_{dc} の関係 (山砂+軟岩)

表-3 山砂+軟岩の試験結果

記号	最大粒径 (mm)	区分	ρ_{dL} (g/cm ³)	ρ_{dc} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
•	2.0		1.265	1.690	1.775	14.0
×	4.75	A	1.367	1.767	1.842	13.0
		B	1.410	1.805	1.875	11.7
		C	1.525	1.895	1.965	11.0
●	9.5	A	1.444	1.818	1.890	11.6
		B	1.507	1.880	1.935	11.0
		C	1.585	1.945	2.014	9.6
○	19.1	A	1.546	1.889	1.957	11.0
		B	1.610	1.960	2.016	9.3
		C	1.625	1.970	2.045	9.2
□	38.1	A	1.600	1.928	1.987	10.2
		B	1.681	2.024	2.075	8.0
		C	1.630	1.984	2.055	8.2
△	50.8	A	1.645	1.956	2.015	9.7
		B	1.725	2.060	2.095	7.2
		C	1.599	1.965	—	—
⊗	63.5	A	1.670	1.975	2.035	8.6
		B	1.767	2.090	2.120	7.0
		C	1.573	1.940	—	—

記号は突固め曲線用

係が得られた。ここで注意すべきことは、図-5の軟岩の場合、C粒度(△印)は、せん頭粒度の最大粒径が大きくなると、直線上を折り返す傾向を持つことである。

以上の山砂と川砂利、山砂と軟岩についての ρ_{dL} と ρ_{dc} および次章に示す ρ_{dmax} と w_{opt} の値を一括し、一覧表として表-2、表-3に示す。

5. 湿潤状態の突固め密度 ρ_{dmax} について

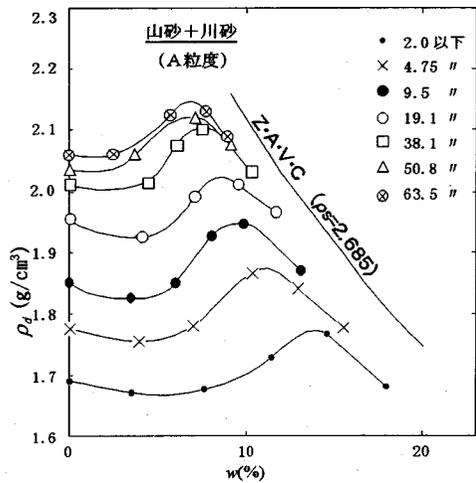
大型突固め試験機による突固め試験を行い、締固め曲線を求めた。実験の手法・材料の含水調整は前

述のとおりである。ゼロ空気間隙曲線 (Z・A・V・C) を求めるための ρ_s は、正確には礫率とともに変化する性質のものであるが、ここでは、表-1の細粒土分と礫分の ρ_s の平均値を用い図中に示した。

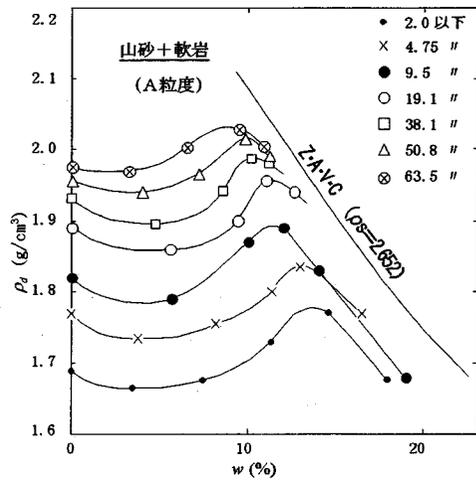
(1) 突固め試験結果

図-6、図-7に最大粒径63.5mmのA・B・C粒度について、各せん頭粒度の突固め試験結果を示す。図中の $w=0\%$ の記号は、各せん頭粒度の ρ_{dc} である。2.0mm以下の山砂のみの曲線は全図について共通である。得られた ρ_{dmax} と w_{opt} は表-2、表-3に示した。

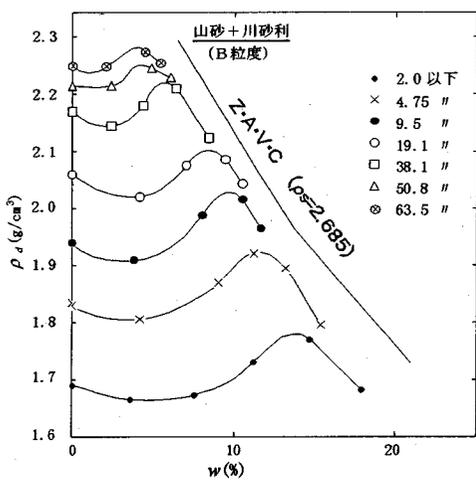
山砂と川砂利、山砂と軟岩いずれもA・B粒度は



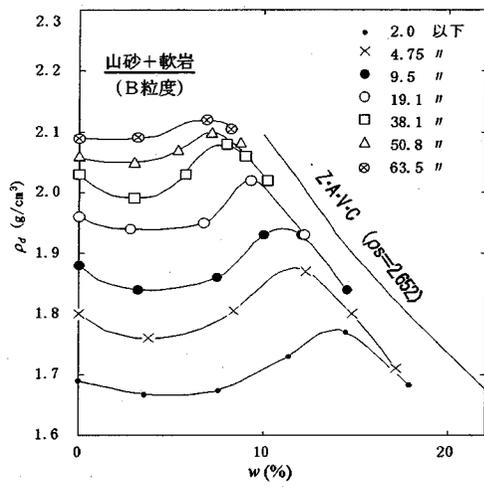
(1) A 粒度



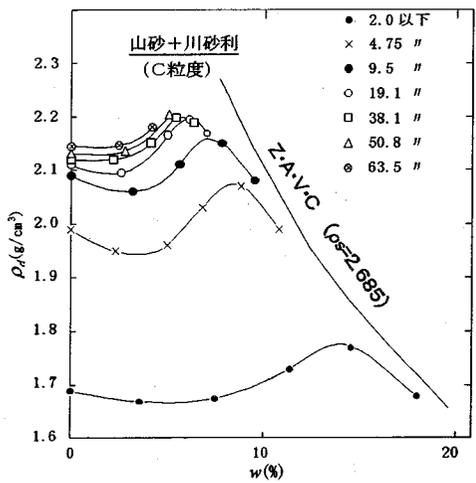
(1) A 粒度



(2) B 粒度

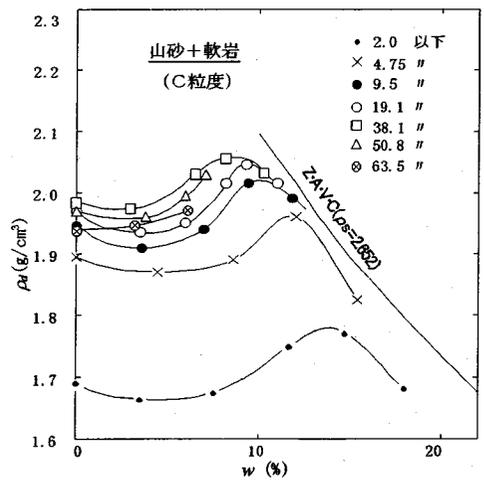


(2) B 粒度



(3) C 粒度

図-6 山砂+川砂利の突固め試験



(3) C 粒度

図-7 山砂+軟岩の突固め試験

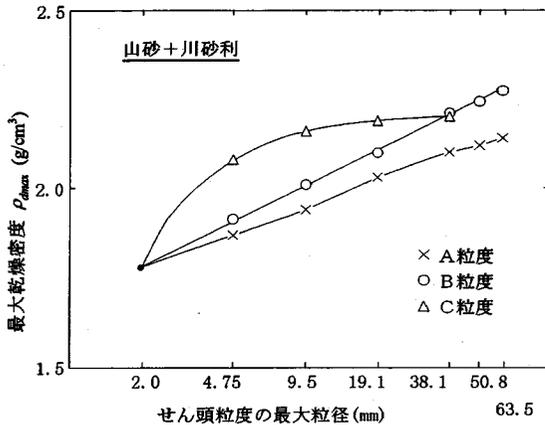


図-8 せん頭粒度の ρ_{dmax} (山砂+川砂利)

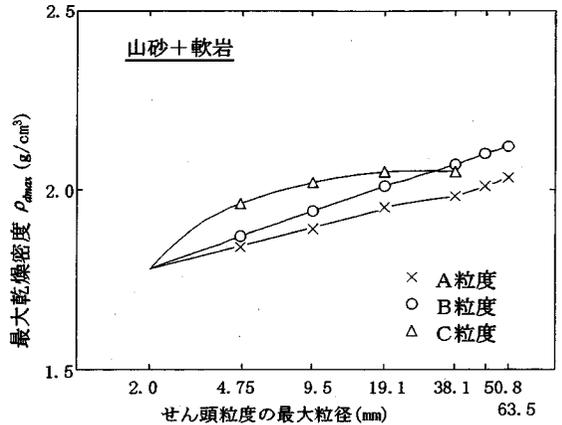


図-9 せん頭粒度の ρ_{dmax} (山砂+軟岩)

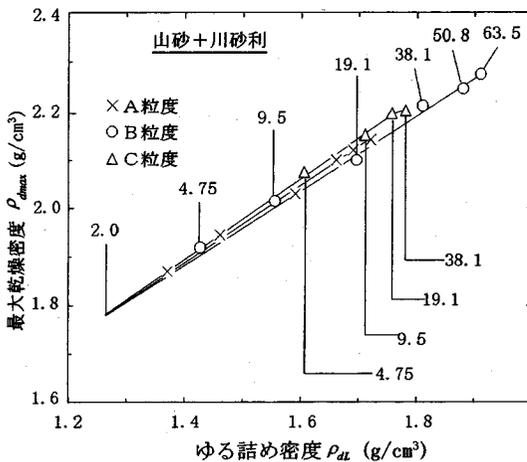


図-10 ρ_{dL} と ρ_{dmax} の関係 (山砂+川砂利)

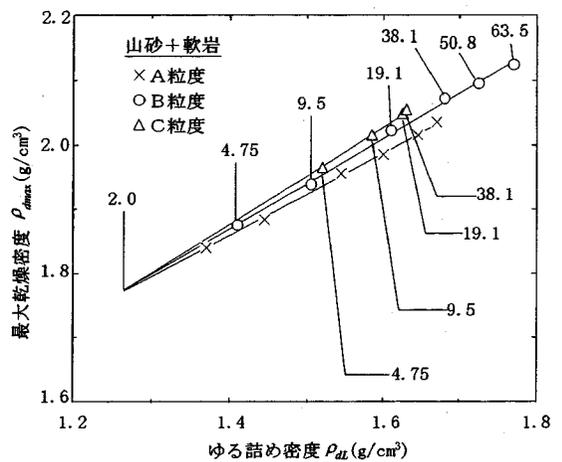


図-11 ρ_{dL} と ρ_{dmax} の関係 (山砂+軟岩)

せん頭粒度の粒径が大きくなるに従って、最大乾燥密度も大きくなるが、礫分の多いC粒度になると、最大粒径が大きい場合、曲線の頂点は現れず加水量に限界がある。

従って、C粒度の最大粒径 50.8mm, 63.5mm の場合は ρ_{dmax} と w_{opt} を求めるための突固め試験が可能な粒度配合といえる。

(2) せん頭粒度の最大粒径と ρ_{dmax} について

突固め試験の結果、得られた締固め曲線から求めた ρ_{dmax} と、せん頭粒度の最大粒径との関係を図-8、図-9 に示す。これらの関係は、図-2、図-3 に示した ρ_{dL} と ρ_{dc} の関係と近似している。すなわち、礫質の著しく異なる礫まじり土の場合においても、締固め密度に影響する因子を締固めエネルギーのみに限定した乾燥状態の ρ_{dL} と ρ_{dc} の関係と、さらに含水比の影響因子を加えて得られた ρ_{dmax} との間には、ある相関関係の存在することが予想される。

(3) ρ_{dmax} と ρ_{dL} の比例関係について

最大乾燥密度 ρ_{dmax} とゆる詰め密度 ρ_{dL} の関係を求めると図-10、図-11 が得られる。図中に、B・C粒度について、せん頭粒度の最大粒径を示した。いずれもA・B・C粒度には比例関係が得られるが、C粒度の最大粒径の大きい場合(50.8mm, 63.5mm)については、 ρ_{dmax} が求まらないので図中に示されていない。

(4) 礫まじり現場用土の ρ_{dmax} の推定についての考え方

本実験では、最大粒径を 63.5mm とし、大型突固め試験機を用いて各段階のせん頭粒度の ρ_{dL} 、 ρ_{dc} 、 ρ_{dmax} の関係を検討した。しかしながら、実際の施工現場においては、最大粒径 15cm, 20cm などの大きな礫の混入した現場用土を盛土材料などに使用する場合がある。従って、このような現場用土を対象とした締固め度の基準となる ρ_{dmax} の推定が必要と

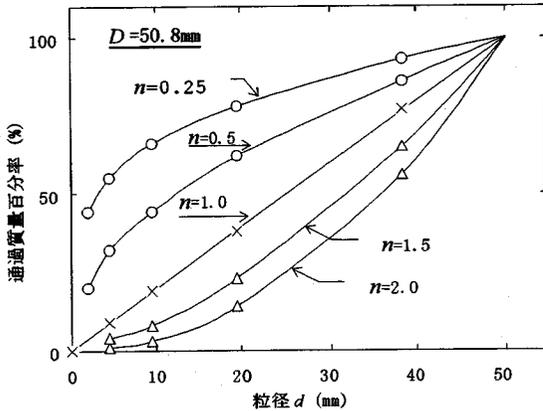


図-12 Talbotの曲線式の性質

なる。

ρ_{dmax} の推定にあたっては、まずその礫まじり現場用土の最大粒径以下の粒度分布が ρ_{dmax} と ρ_{dL} との比例関係を満足する限界内にあるかどうかの粒度試験を行うことになる。この比例関係を満足する粒度分布であれば、CBR モールド (直径 15cm) を用いた標準の突固め試験 (JSF T 711 B 法) で、許容最大粒径までの各せん頭粒度についての ρ_{dmax} と w_{opt} を求める。さらに現場用土の最大粒径に応じた容器を準備し、上記の各せん頭粒度のそれぞれと、全粒度について乾燥状態 ($w=0\%$) の ρ_{dL} を求める。

そして、本実験で得られたような $\rho_{dmax} \sim \rho_{dL}$ の比例関係を求めれば、その直線の延長上に全粒度の ρ_{dL} に対応する ρ_{dmax} が示されることになる。その際、容器の大きさによって ρ_{dL} の値が異なるので、最大粒径の小さいせん頭粒度の場合も、同じ容器を用いる必要がある (本実験の場合、山砂や 4.75mm 以下のせん頭粒度の大型モールドによる ρ_{dL} は、CBR モールドによる ρ_{dL} より大きい)。

本推定法の特徴は、機構上突固め用モールドの大きさには大型試験機といえども制限があるが、 ρ_{dL} の測定のための容器は、現場用土の最大粒径に応じて任意の大きさに製作できるし、又、条件があれば既製の容器を利用することも可能なことである。

6. 粒度分布よりみた $\rho_{dL} \sim \rho_{dmax}$ の比例関係の適用限界

本実験では、礫分の粒度配合を A・B・C 粒度に設定したが、C 粒度は $\rho_{dL} \sim \rho_{dmax}$ の比例関係の成立する限界を検討するため、予備実験の結果¹⁶⁾から設定したものである。

前述のように C 粒度の礫まじり土は、含水比の影

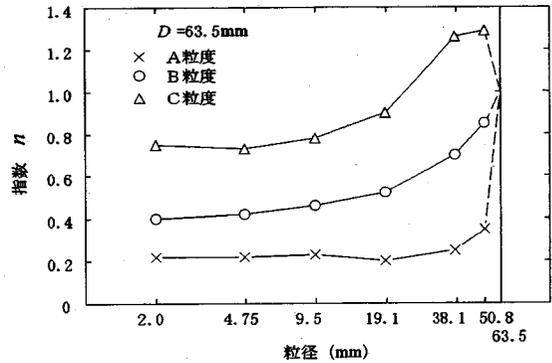


図-13 設定粒度の $P=(d/D)^n$ の指数 n

響を考えない $w=0\%$ の場合の $\rho_{dL} \sim \rho_{dC}$ の比例関係が、図-4、図-5のように得られるが、山砂と川砂利の場合、せん頭粒度の最大粒径が大きくなると、この比例関係から、やや下側にずれ(図-4)、山砂と軟岩では最大粒径 50.8mm, 63.5mm の場合、直線上を折り返している(図-5)。

さらに、 $\rho_{dL} \sim \rho_{dmax}$ の場合を検討すると、図-10、図-11 に示すように、C 粒度の比例関係は最大粒径 38.1mm までで、それ以上になると ρ_{dmax} は求められない。以下、粒度分布よりみた比例関係の限界について検討する。

(1) Talbot の曲線式を利用した検討

連続的な粒度曲線について Talbot の曲線式がありその意味と用法について、2, 3 の文献^{17), 18), 19)}に紹介されている。Talbot の式は次のように表す。

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100(\%) \quad (1)$$

p はある大きさのフルイ目を通す粒子の全体に対する質量比 (通過質量百分率)、 d はそのフルイ目の大きさ、 D は全試料の最大粒径、そして n は指数である。ある材料を人工的に配合すれば、 n を一定として D を変えて配合することの出来る性質の式であるが、一般の材料は D が求められても、曲線中の n は一定とはならずある幅をもつことになる。

この式の性質は、 $n=1.0$ の場合、粒径を等分目盛でとると直線となり、 $n=1.0$ を境界として $n < 1.0$ のとき直線の上側に凸、 $n > 1.0$ のとき直線の下側に凹の曲線となる。すなわち、 D を一定とすれば、 $n = 1.0$ の直線を基準として、上側と下側で曲線の形が反対となる。この関係を図-12に $D=50.8\text{mm}$ の場合について示す。

粒度曲線は、横軸に粒径を対数 $\log d$ として表す

が、一つの理由として、粒径分布の幅が広く、等分目盛では対処できないからであるともいえる。特に、等分目盛では細粒部分が極端に圧縮され、曲線形の判別が困難となる。

しかしながら、図-12に示すTalbotの曲線を見ると、各粒径範囲が均等に配分されている $n=1.0$ の直線を境界として、 n が小さければ粗粒分が急激に減少し n が大きくなれば粗粒分は急激に増加する。

すなわち $n=1.0$ が粒度曲線形からみただる境界線といえる。

(2) 本実験の設定粒度と指数 n よりみた比例関係の適用限界

図-13に本実験で用いた礫分の設定粒度(図-1)とTalbotの式の指数 n の関係について示す。

A・B粒度は n がいずれも1.0以下であるが、C粒度の場合せん頭粒度の最大粒径が大きくなると、 n が1.0以上となる。ここで、C粒度のせん頭粒度の最大粒径38.1mmの n は1.26であるが、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dc}$ (図-4、図-5)、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ (図-10、図-11)の比例関係における限界付近と考えられるので、このC粒度の38.1mmの場合について検討すると次のようになる。

①礫分が川砂利の場合： $\rho_{dl} \sim \rho_{dc}$ 、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ ともに比例関係からずれ始める(図-4、図-10)。

②礫分が軟岩の場合： $\rho_{dl} \sim \rho_{dc}$ は比例関係にあるが、 ρ_{dl} 、 ρ_{dc} ともに最大値を示し、最大粒径がより大きくなると直線上を折り返す(図-5)。また、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ は比例関係にあるが、 ρ_{dl} 、 ρ_{dmax} ともに最大値を示し、最大粒径が50.8mm、63.5mmになると、 ρ_{dmax} が得られない。すなわち、38.1mmが比例関係の限界である(図-11)。

以上の結果、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dc}$ 、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ の比例関係が得られる限界は、川砂利、軟岩によって多少異なるが、B粒度の50.8mmの $n=0.86$ の場合、比例関係を十分満足していることと、Talbotの曲線式の性質からみて、実用的には $n=1.0$ を上限と考えてよいであろう。すなわち、実際に $n=1.0$ は非常に粗い粒度配合を意味しているからである¹⁹⁾。

7. 限界密度よりみた $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ の比例関係の適用限界

含水比の影響を受けない条件でのゆる詰め密度 ρ_{dl} と突固め密度 ρ_{dc} の間に比例関係のあることを検討し、さらに ρ_{dl} と最大乾燥密度 ρ_{dmax} の間にも比例関係のあることを明らかにした。従って、室内実験

で可能な範囲内で、せん頭粒度について ρ_{dmax} を求め最大粒径に応じた容器より求めた ρ_{dl} との比例関係が得られれば粗礫分の入った ρ_{dmax} の推定が可能となる。又、粒度分布よりみた比例関係の適用限界についてもTalbotの式の指数 n を用いて検討した。

しかしながら、締固め密度には当然限界があり、 $\rho_{dl} \sim \rho_{dmax}$ の比例関係の延長線上に過大な ρ_{dmax} が推定されたとした場合、その値を用いることは出来ない。そこで、その限界について検討することにする。

まず、本実験で得られた最大の ρ_{dmax} は、山砂と川砂利の組合せではB粒度の63.5mm以下における2.275(g/cm³)で、軟岩の場合もB粒度の63.5mm以下の2.120(g/cm³)である。通常の締固めにおいては、締固めエネルギーに対応して、礫まじり土の各粒子が最も安定した構造をつくったときに締固めの限界と考えられるが、粒子破砕が生じると、粒度構成も異なってくるため、破砕後の粒度構成による安定した状態が締固めの限界と考えられる。

従って、礫まじり土の粒度構成・粗粒子の性質・締固め方法・締固めエネルギーなどによって得られる極限状態が想定され、これが通常の締固めの限界密度ということになる。

(1) 限界密度の計算

石井²⁰⁾は礫粒子中に閉じこめられた気泡を計算にいれない(この場合の礫の ρ_s は見かけ密度に相当する)場合の空気間隙率が、一般に、多くの場合 v_a が5%程度のとき、最大乾燥密度が得られるとしている。このことは、各種の土の ρ_{dmax} と w_{opt} の点がゼロ空気間隙曲線に沿って分布することから、当然、ある v_a のもとで、これらの点は存在すると考えてよい。そこで、本実験の結果から表-2、表-3について、混合土の ρ_s を礫率に応じた比例計算で求め、 ρ_{dmax} と w_{opt} における v_a を求めた。その結果、(山砂+川砂利)の場合 $v_a=4.2 \sim 8.4\%$ (8.4%は山砂のみの場合)で、多くの場合、5.1~6.4%(平均値 $v_a=6.2\%$)となり、 ρ_s の平均値は2.685 g/cm³となった。また、(山砂+軟岩)については $v_a=3.9 \sim 8.4\%$ の範囲で、多くの場合4.5~5.8%(平均値 $v_a=5.6\%$)、 ρ_s の平均値は2.652 g/cm³となった。これをまとめると、山砂のみの場合も含めて、

- ① 礫分が川砂利の場合： $v_a=6.2\%$ 、 $\rho_s=2.685\text{g/cm}^3$
- ② 礫分が軟岩の場合： $v_a=5.6\%$ 、 $\rho_s=2.652\text{g/cm}^3$ となる。これらの v_a 、 ρ_s 、 w 、 ρ_{dmax} の間には通常用いられている次式が成立する。

$$v_a = \left\{ 1 - \frac{\rho_{dmax}}{\rho_w} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100} \right) \right\} \times 100(\%) \quad (2)$$

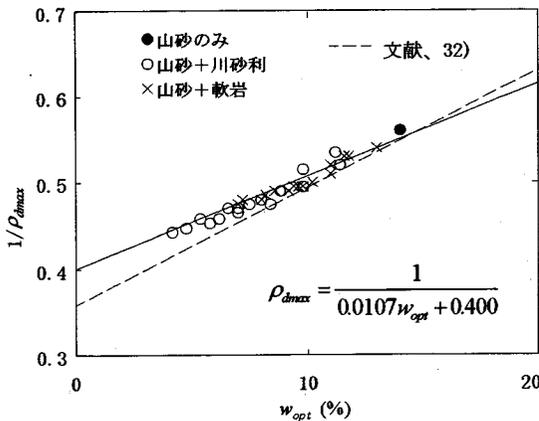


図-14 ρ_{dmax} と w_{opt} の関係

ここで、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が更に大きくなると、最適含水比 w_{opt} は小さくなり極限状態で $w=0\%$ になったとすれば、そのとき上記の v_a のもとで、最も密に詰まった限界密度の状態になったと考えてよい。

式(2)を用いて $w=0\%$ として上記の v_a 、 ρ_s を代入すると限界密度は次のように求まる。

- ① 礫分が川砂利の場合： $\rho_{dmax}=2.519\text{g/cm}^3$
- ② 礫分が軟岩の場合： $\rho_{dmax}=2.503\text{g/cm}^3$

(2) 実際に得られる締固め密度の調査

限界密度の値を計算し 2.5g/cm^3 程度の値を得たが、実際にこのような密度を得ることは経験上困難である。そこで、締固め方法、締固めエネルギーのいかにかわからず、現実にとどの程度の密度まで得ることが出来るのか、各種の礫まじり土についての最大値を調べることにした。

まず、立入ほか²¹⁾は、 $D_{max}=200\text{mm}$ 、 $U_c=8.0$ の硬質砂岩について、室内振動締固め試験を層厚、振動時間を変えて実施し、 $\rho_d=2.30\text{g/cm}^3$ を得ている。

次に、各種のダムについて試験密度と転圧後の現場密度を集計した文献²²⁾を調べた。試験密度とは、相似粒度あるいは、せん頭粒度で突固め試験を行って得られた密度である。その結果、試験密度は、ほぼ $1.5\sim 2.3\text{t/m}^3$ の間にあるが 2.1t/m^3 以上のものは少ない。また、現場密度はほぼ $1.6\sim 2.3\text{t/m}^3$ の間にあるが 2.1t/m^3 付近のものが多く、 2.2t/m^3 以上のものは少ない。しかしながら、試験密度の最大値は $\rho_d=2.21\sim 2.31\text{t/m}^3$ 、現場密度の最大値は $\rho_d=2.28\sim 2.33\text{t/m}^3$ であった。

その他、大型突固め試験関係では、細粒フィルター材 ($D_{max}=101.6\text{mm}$) が締固めエネルギー $1.0E_c$ で、 $\rho_d=2.26\text{t/m}^3$ (天山ダム)²³⁾ の場合や、砂岩の細粒フィルター材 ($D_{max}=63.5\text{mm}$) による $1.0E_c$ のとき ρ_d

$=2.31\text{t/m}^3$ 、 $3.0E_c$ で $\rho_d=2.47\text{t/m}^3$ (稲村ダム) の結果²⁴⁾ もある。また、 $\rho_d=2.30\text{t/m}^3$ ($1.0E_c$)、 $\rho_d=2.35\text{t/m}^3$ ($3.0E_c$) (寒河江ダム)²⁵⁾ の例もある。

現場における盛立て試験においては、振動ローラーの重量や転圧回数を変えても得られる密度は (特例はあるにしても) $\rho_d=2.30\text{t/m}^3$ 付近までが多い²⁶⁾。また、現場における密度管理の測定精度については、粗粒材料の多い場合、種々の問題点を含んでいる²⁷⁾。さらに、軟岩材料を対象とした場合、大型突固め試験によって得られる密度は、 $3.0E_c$ の場合でも、転圧試験の場合でも $\rho_d=1.9\sim 2.0\text{t/m}^3$ 程度である²⁸⁾。

(3) 本研究の推定法における限界密度の決定

これまで、実際に得られる締固め密度の最大値について締固めエネルギーを変えた大型突固め試験の結果や、試験密度・現場密度などに関して調査した。また、本実験では、粒度分布の良い B 粒度の ρ_{dmax} の最大値が 2.275g/cm^3 であった。

以上の結果、密度管理の規準となる JIS による標準の締固めエネルギー ($1.0E_c$) で締固めた場合の実用的な限界密度は $\rho_d \approx 2.30\text{g/cm}^3$ が適当であろうと考えられる。すなわち、本研究の目的である $\rho_d \sim \rho_{dmax}$ の比例関係の直線上に推定される限界密度は $\rho_d \approx 2.30\text{g/cm}^3$ と考えてよい。

8. 礫まじり現場用土の最適含水比の推定方法

(1) ρ_{dmax} と w_{opt} の相関関係

図-6、図-7 に示した締固め曲線から ρ_{dmax} と w_{opt} が求められるが、本実験で得られた締固め曲線は、低含水比の部分で下に凸の曲線をなしている。このような現象は突固め試験において、しばしば経験するところで、高田ほか²⁹⁾も同様な結果を得ている。石井³⁰⁾は礫質土について、その理由を検討しているが、細粒土についてもこのような線形を示す場合が多く、いくつもの研究成果がある³¹⁾。

一般に、各種の土の ρ_{dmax} と w_{opt} の点はゼロ空気間隙曲線 ($Z\cdot A\cdot V\cdot C$) に沿った指数曲線的な傾向で分布する。酒井・佐藤³²⁾は、このことから ρ_{dmax} と w_{opt} の関係を約 70 個の資料を用いて次式が成立するとした。

$$\rho_{dmax} = \frac{1}{0.0132w_{opt} + 0.36} \quad (3)$$

その後、森³³⁾は三角座標分類の判明している約 380 個の資料を集め土質分類と ρ_{dmax} と w_{opt} の関係を検討した際、相関係数 0.96 をもって ρ_{dmax} ($0.672\sim$

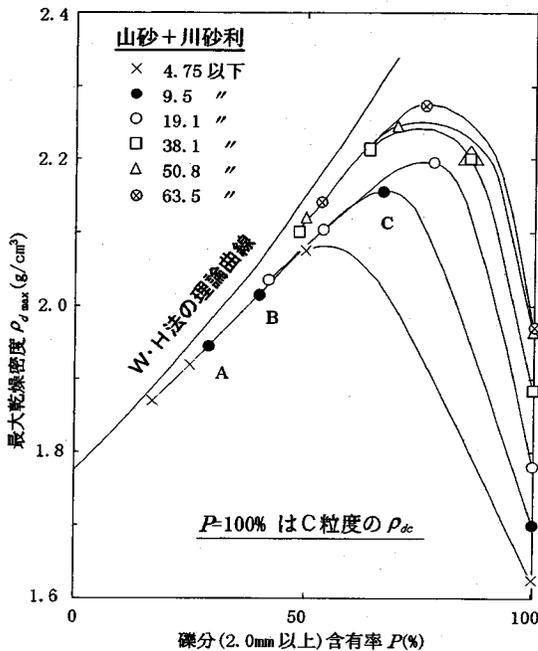


図-15 P と ρ_{dmax} の関係 (山砂+川砂利)

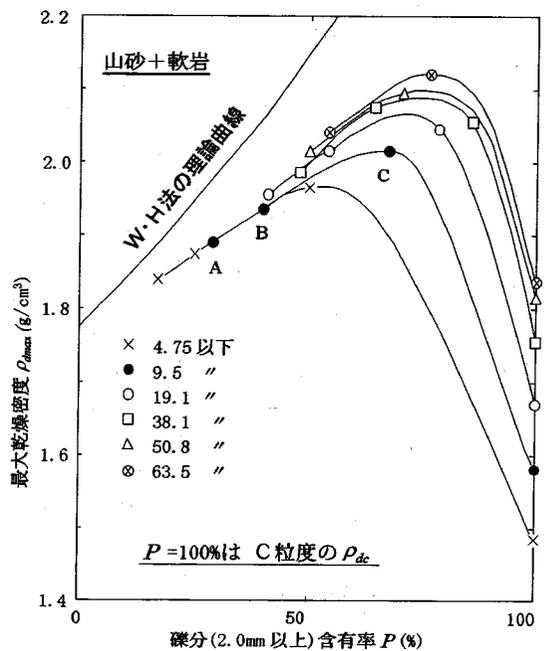


図-16 P と ρ_{dmax} の関係 (山砂+軟岩)

2.070g/cm³), w_{opt} (8.0~99.8%) の間に次式を得た.

$$\rho_{dmax} = \frac{1}{0.0107w_{opt} + 0.400} \quad (4)$$

これらの関係式は $(1/\rho_{dmax})$ と w_{opt} が比例関係になるので、本実験で得られた結果を図-14 に示す。この図から見ると式(4)のほうが適用性がよい。従って、 ρ_{dmax} が推定されれば、その値から式(4)によって w_{opt} も推定可能であると考えられる。なお、各種の材料について式(4)の適用性の高いことは100以上のフィルダムの築堤材料について、調査実験した稲葉ほか³⁴⁾や、筋内・風間³⁵⁾による各種の粘性土を対象とした実験結果などに報告されている。

(2) 最適含水比の推定式の検証

ρ_{dmax} の推定において、粒度分布による限界、実用的な密度の限界については、既に検討した。そこで、最適含水比を推定するための式(4)の妥当性について検討する。

限界密度の計算において、通常縮固めエネルギーのもとで、礫まじり土の各粒子が最も密に詰まった状態の限界密度を求めた。その結果、①礫分が川砂利の場合： $\rho_{dmax}=2.519\text{g/cm}^3$ 、②礫分が軟岩の場合： $\rho_{dmax}=2.503\text{g/cm}^3$ となった。それぞれについて $1/\rho_{dmax}$ を求めると次のようになる。

- ①の場合： $1/\rho_{dmax}=0.397$
- ②の場合： $1/\rho_{dmax}=0.400$

この値は、式(4)の $w_{opt}=0\%$ の場合に相当し、礫分が川砂利の場合には殆ど変わらず、軟岩の場合には式(4)と全く同じ値となった。よって、 $\rho_{dmax} \sim w_{opt}$ の関係式である式(4)の妥当性が確認されたことになる。

従って、 ρ_d より推定された ρ_{dmax} に対応する w_{opt} は式(4)により求めることができる。

9. Walker・Holtz の理論式による密度と本推定法による密度について

W・H法¹⁾の適用性については、多くの研究結果があることは既に述べた。しかし、その適用範囲に疑問を持ちながらも利用される場合の多いことは周知のとおりである。この理論式を ρ_{dmax} について示すと次式となる。

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_{d1max} \cdot \rho_s}{P \cdot \rho_{d1max} + (1-P)\rho_s} \quad (5)$$

ここに、

- ρ_{dmax} : 礫まじり土の ρ_{dmax} (g/cm³)
- ρ_{d1max} : 細粒土分 (山砂) のみの ρ_{dmax} (g/cm³)
- ρ_s : 礫分の見かけ密度 (g/cm³)
- P : 礫含有率 (少数表示)

この式は、 $P=0\%$ の ρ_{d1max} から $P=100\%$ の ρ_s まで ρ_{dmax} が増加するとした曲線式である。

図-15、図-16 に表-2、表-3 の ρ_{dmax} を示す。横軸

表-4 せん頭粒度の礫分P(%)

記号	せん頭粒径 (mm)	礫分 (2.0以上) P (%)		
		A粒度	B粒度	C粒度
×	4.75	16.7	25.0	50.0
●	9.5	28.6	40.0	66.7
○	19.1	41.2	53.8	77.8
□	38.1	47.4	64.7	85.7
△	50.8	50.0	70.0	90.0
⊗	63.5	53.7	75.3	92.5

を表-4 に記す各粒度の礫率 P %とし、縦軸に ρ_{dmax} をとると、せん頭粒度の最大粒径が同じでも A・B・C 粒度の順に礫率が異なる。従って A・B・C 粒度は一本の曲線として示される。参考のため、せん頭粒度 9.5mm の ● 印について A・B・C を記す。 $P=100\%$ の礫分のみ ρ_d は、曲線形の概略を求めるため、C 粒度の礫分のみを各せん頭粒度で突固めた ρ_{dc} である。

礫分が川砂利の場合、A 粒度は理論曲線に近いが (図-15)、礫分を軟岩とすると、A 粒度は礫率の小さい部分から離れ最大粒径が大きくなるに従い理論曲線との差も大きくなる (図-16)。これは礫質の相異、特に形状の相異によるものと考えられる。このことについては、同様な傾向のあることを片山ほか⁶⁾も指摘している。また、B・C 粒度はさらに理論曲線から離れる結果となる。

すなわち、礫まじり土の締固め密度推定法の一つである W・H 法の理論に本実験結果の ρ_{dmax} を適用すると、理論値に近い場合も見られるが、厳密には礫率が小さくとも適用不能という結果になる。しかし、本研究の締固め密度推定法の基本となる ρ_{dL} と ρ_{dmax} については、礫分が多く、 ρ_{dmax} の求まらない場合 (C 粒度の最大粒径 50.8mm, 63.5mm) を除いてすべて、比例関係が得られた。

また、Talbot の曲線式より、比例関係の限界を C 粒度の最大粒径 38.1mm の場合について検討したが、図-10 に示す (山砂+川砂利) の C 粒度の 38.1mm ($P=85.7\%$) は ρ_{dmax} が得られていても、 ρ_{dL} と ρ_{dmax} の比例関係からやはずれ始めているので、参考のため図-15 に記号を Δ で囲み示した。

W・H 法の理論は、式(5)に示すように礫率のみを対象とし、礫まじり土の粒度分布には無関係である。従って、礫率 P が同じであっても、その礫分の粒度構成の相異によって ρ_{dmax} が異なり、理論値との差の大きさも異なる。例えば、表-4 より 4.75mm 以下 (×印) の C 粒度と 50.8mm 以下 (Δ 印) の A 粒度はいずれも $P=50\%$ の礫率である。しかし、図-15、図-16 に示されるように理論曲線との差は異なる。

これは、図中の同じ P %上の曲線群との交点の差をみれば明らかである。

このことは、直接求めることの出来ない最大粒径の大きい原粒度の力学試験を室内で行う場合、相似粒度やせん頭粒度と並んで用いられるオーバーサイズ置換粒度について、一つの問題を提起しているといえよう。

10. 礫まじり土の締固め密度の推定法の具体的提案

礫まじり現場用土の ρ_{dmax} と w_{opt} を推定するための方法について、礫質や粒度分布を変えて大型突固め試験を行い、推定方法を検討してきたが、以下に具体的な作業の進め方について提案する。

①まず、礫まじり現場用土の粒度試験を行う。この場合、推定のためだけで、ほかに目的がなければ 2.0mm 以下の粒度試験の必要はない。また当然のことながら、一般的に使用されているフルイ目以上の大きな礫は粒径範囲を任意に決めて粒径を測定し、最大粒径以下の粒度曲線を求める。

②次に、Talbot の曲線式の指数 n を各段階の粒径について計算し、すべて $n < 1.0$ ならば、その現場用土の ρ_{dmax} の推定は可能と考える。

③②の条件を満たした場合、突固め試験を各せん頭粒度について行い、 ρ_{dmax} と w_{opt} を求める。この場合、大型突固め試験の場合のようにモールド直径の大きい程、各せん頭粒度の最大粒径も大きくすることができるが、通常は CBR モールドを使用することになる。CBR モールドを使用する場合、(JSFT 711 B 法) の標準の突固め試験では、許容最大粒径 37.5mm となっているので、せん頭粒度の最大粒径を 6 種類 (2.0, 4.75, 9.5, 19.1, 26.5, 37.5mm) とすることができる。これらのせん頭粒度について、すべて突固め試験をすることが望ましいが、少なくとも 26.5mm までの 5 段階は必要であろう。

④ゆる詰め密度 ρ_{dL} 測定用の容器を準備する。一般に、突固め試験の場合、試料の最大粒径はモールド直径の 1/5 程度までと考えれば、礫まじり現場用土の最大粒径の少なくとも 5 倍以上 (大きい程、表面の整形誤差が少ない) の直径と深さを持つ容器を用意する。これは、一辺の長さや深さが 5 倍以上の正方形の容器でも良いと考えられる。

容器は底なしとし、細粒土分のもれない平坦な場所にビニールシートを拡げて実験を行う。これは、実験後、現場材料を容器から取り出す手間を省くためである。

⑤ゆる詰め密度 ρ_{dL} の測定を行う。④で準備した容器に③で行った各段階のせん頭粒度の乾燥試料 ($w=0\%$) をいれて、それぞれの ρ_{dL} を測定する。さらに、現場材料の ρ_{dL} も測定する。

実際には、粒度試験に用いた乾燥試料は各粒径範囲ごとに分類されているので、これと、突固め試験の含水比測定後の試料も利用し、2.0mm 以下から始め、次々に、せん頭粒度の最大粒径にあわせて礫分を加えてゆくことになる。その際、容器内の配合のバラツキを防ぐため、予想される全質量を1/3~1/4に分けて、各々について、せん頭粒度に従った配合をする必要がある。

⑥ ρ_{dL} と ρ_{dmax} の比例関係から現場材料の ρ_{dmax} を推定する。等分目盛で横軸に ρ_{dL} 、縦軸に ρ_{dmax} をとり③で得られた ρ_{dmax} と、⑤で得られた ρ_{dL} の比例関係を求め、直線の延長線上から現場材料の ρ_{dL} に相当する ρ_{dmax} を求める。

⑦最適含水比 w_{opt} の決定。 w_{opt} は式(4)から求めるが、その適用限界を $\rho_{dmax} \leq 2.3g/cm^3$ とする。

11. 結論

含水比と締固めエネルギーの影響を受けないゆる詰め密度 ρ_{dL} と、締固めエネルギーのみの影響を受ける突固め密度 ρ_{dc} の間に関連性のあることに着目し、まず、その関連性を検討した。次に、含水比の影響を考えた最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} を求め、 ρ_{dmax} と ρ_{dL} の間に関連性のあることを明らかにした。さらに、 ρ_{dmax} と w_{opt} の間に合理的な関係のあることも確認した。

これらの関係から、 ρ_{dL} の測定により粗礫まじり土の ρ_{dmax} と w_{opt} の推定が可能であることを提案した。また、この推定法の成立する粒度分布範囲を Talbot の曲線形から検討し、礫まじり土の最も密に詰まった状態の限界密度と、実際に得られる最大密度についても比較検討した。

W・H法の適用性の検討に関連しては、同じ礫率でも礫分の粒度分布によって締固め密度の異なることから、オーバーサイズ置換粒度について問題点のあることも指摘した。

以下に、本研究で得られた主な点をまとめる。

(1) 礫まじり土の ρ_{dL} と ρ_{dmax} の間には比例関係が成立するが、粒度分布からみて成立する限界がある。現場材料の各フルイ目の Talbot の曲線式の指数 n を計算し、全て $n < 1.0$ であれば比例関係が成立すると考えられる。

(2) ρ_{dL} と ρ_{dmax} の比例関係が成立する粒度分

布の材料では、まず室内実験の可能な範囲で各せん頭粒度の ρ_{dmax} を求める。次に現場材料の最大粒径に応じた容器を準備して、 ρ_{dL} を測定し比例関係を求めれば、現場材料の ρ_{dL} の値より ρ_{dmax} の推定は可能であると考えられる。 w_{opt} は式(4)により求めることが出来る。

(3) 推定された ρ_{dmax} には限界があり、締固め度を求める規準となる JIS の突固め試験の $1.0E_c$ のもとでは $\rho_{dmax} \approx 2.30g/cm^3$ と考えられる。

参考文献

- 1) F.C.Walker and W.G.Holtz: *Control of Embankment Material by Laboratory Testing*, Proc. ASCE, No.108, pp.1-25, 1951.
- 2) H.W.Humphres: *A method for Controlling Compaction of Granular Materials*, H.R.B.Bulletin 159, pp.41-57, 1957.
- 3) 土質工学会: *土質試験法*, p.139, 1964.
- 4) 久楽勝行, 三木博史, 関一夫: 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.
- 5) 赤司六哉, 江頭義孝, 江頭芳武, 相場明, 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講演集, pp.1583-1586, 1985.
- 6) 片山正喜, 木越正司, 石井武美: 粗粒土の締固め管理におけるレキ分の密度補正について, 土木学会第29回年次学術講演集(第3部), pp.378-379, 1974.
- 7) 森満雄, 阿部道雄: レキ混合土の締固めと CBR について, 第9回土質工学研究発表講演集, pp.415-418, 1974.
- 8) Mori, M.: *On the correlation between Soil and Gravel in Compaction*, Memo. Fac. Tech., Tokyo Metropolitan Univ. No.12, pp.31-42, 1962.
- 9) 森満雄: 礫まじり土の締固め特性について, 土と基礎, Vol.12, No.7, pp.7-14, 1964.
- 10) 森満雄: 土の締固めにおける Walker-Holtz の理論値の適用限界について, 土木学会第18回年次学術講演集, pp.9-10, 1963.
- 11) 森満雄: 火山レキの締固め特性と支持力(その2), 土と基礎, Vol.13, No.7, pp.3-9, 1965.
- 12) 森満雄: レキ込み土の締固め特性と2,3の補正法の適用性について, 道路建設, No.166, pp.11-20, 1961.
- 13) 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.
- 14) 中岡時春, 望月秋利, 坂口理: 粗粒材を含む盛土材料の締固め密度の推定, 土木学会論文集, No.499/III-28, pp.177-185, 1994.
- 15) 日本道路協会: *アスファルト舗装要綱*, p.57, 1992.
- 16) 森満雄, 阿部道雄: 礫まじり土の締固め密度に関する基礎的検討(II), 第26回土質工学研究発表講演集, pp.1893-1894, 1991.
- 17) 内田一郎: 新編「道路舗装の設計法」, p.39, 森北出版, 1976.
- 18) 土質工学会: *粗粒材料の現場締固め*, p.68, 1990.
- 19) 赤井浩一: 土の粒度配合による締固め特性の変化, 土と基礎, Vol.5, No.5, pp.19-22, 1957.
- 20) 石井武美: 多孔質な岩片や土塊を締固めたときの飽

- 和度，土と基礎，Vol.36，No.12，pp.49-54，1988.
- 21) 立入幹郎，石井武美，藤原東雄：室内および現場における粗粒材の振動締固め試験，土と基礎，Vol.22，No.4，pp.39-44，1974.
 - 22) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，pp.220-242，1982.
 - 23) 土質工学会：粗粒材料の現場締固め，p.86，1990.
 - 24) 土質工学会：粗粒材料の変形と強度，p.329，1986.
 - 25) 文献23)のp.95.
 - 26) 文献23)のpp.126-127，pp.164-165.
 - 27) 文献23)のpp.119-124.
 - 28) 文献24)のpp.362-370.
 - 29) 高田直俊，坂田龍也，木下哲生：大型試験機による粗粒材料の締固め試験，第21回土質工学研究発表講演集，pp.1751-1752，1986.
 - 30) 文献20)のp.53.
 - 31) たとえば，柴田英明：細粒土の突固めにおけるメニスカスの影響について，第24回土質工学研究発表講演集，pp.1769-1770，1989.
 - 32) 酒井佐武郎，佐藤悟：土の最大乾燥密度および最適含水比の簡略決定法に関する一試み，土と基礎，Vol.5，No.2，pp.30-33，1957.
 - 33) 森満雄：土の最大乾燥密度と最適含水比について，土と基礎，Vol.10，No.9，pp.12-16，1962.
 - 34) 稲葉忠雄，西田武三，泉潤一：フィルダム不透水性材料の締固め特性およびその物理的性質との関係について，第11回土質工学研究発表講演集，pp.447-450，1976.
 - 35) 箭内寛治，風間秀彦：土の締固めにおける水分の動きについて，土と基礎，Vol.18，No.5，pp.21-28，1970.

(1995. 9. 29 受付)

A STUDY FOR EVALUATION OF COMPACTED DENSITY OF GRANULAR MATERIALS

Mitsuo MORI, Michio ABE and Akira MORI

This paper examines an estimation method of the compacted density of granular materials by paying attention to how the compacted density of granular materials is concerned with loose density obtained under the condition that both compacted energy and water content are zero. As a result of the large-compaction test conducted by mixing 2 types of gravel whose physical properties are different from each other and sandy soils (mountain sand), a proportionality has been noticed among the loose density of cut-grain-size distribution, compacted density, and maximum dry density. In consideration of the relation, a proposal is made in purport that estimation of the maximum dry density and the optimum moisture content is possible. Furthermore investigation has been made also with the application limitation viewed from grain-size distribution and the limit of the maximum compacted density that would be actually obtained.