

道路の路盤用碎石の支持力について

森 満 雄

1 ま え が き

この報告は道路用材料として従来用いられてきた碎石、川砂のCBR試験及び締固め試験を行ったものである。目的とするところは、各種火山レキに関する一連の研究¹⁾²⁾との比較検討の必要性からであるが、碎石自体長年用いられてきた材料であるにもかかわらず、いまだ土質工学、道路工学的に明らかにされていない点が多い³⁾。例えば、締固めエネルギーの変化に伴う締固め密度の変化についても十分明らかにされていない。このことは実際に締固め機械により転圧する場合要求される密度に対する必要十分な効果的転圧回数を求める基礎資料の不足を意味すると考えてよい。その他粒度分布の変化をもたらす破砕現象等も挙げられる。よって、これらの解析を行いつつ碎石、川砂混合材料の締固め試験、CBR試験の結果について検討を加えたものである。

2 締固め密度におよぼす含水比の影響

図-1 は碎石の粒度配合曲線を示し、粒度 No. 1~No. 5 に対してそれぞれ図に示す川砂を混入して試験を行ない、粒度分布の影響を検討したもので、図中の斜線は参考のため上層路盤材料の標準粒度範囲をレキ分について示している。従ってこの場合 No. 2, No. 3 の材料の碎石は標準粒度として満足することになる。標準粒度の基本的意義は、締固めエネルギーが等しい場合に、最っとも密に詰まる粒度分布であるから、従って土質工学的に安定性の高い状態が得られることになる。以下はこのような標準粒度も含

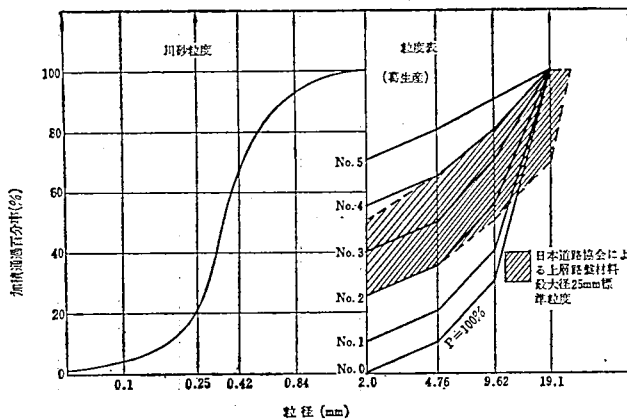


図-1

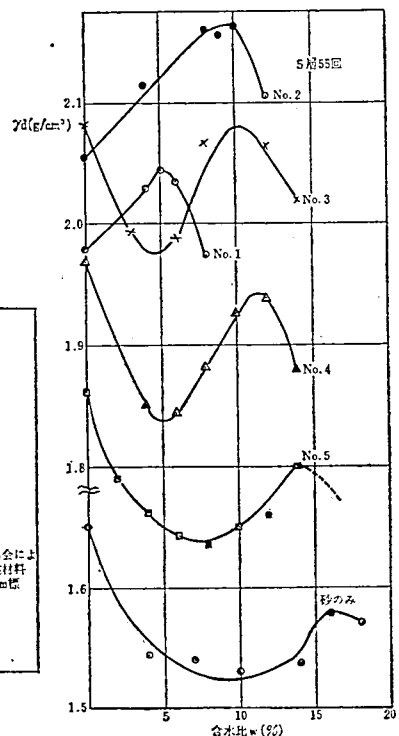


図-2

んで、No. 1~No. 5 まで粒度分布範囲を拡張し、相互の関連性を検討したものである。

図-2 は、2.0mm 以下の砂分の場合と No. 1~No. 5 の配合材料について、含水比を気乾燥状態 ($w=0\%$) から加水し、含水比の増加と乾燥密度の関係を示したものである。締固め回数はいずれも JISA 1211 による 5 層—55 回を与えている。図から明らかのようにいずれも最大乾燥密度、最適含水比が存在するが、砂分の多い材料は気乾含水比と最適含水比の間に乾燥密度の低い下に凸の現象を生じている。いま、この状態の乾燥密度と含水比を仮りに最小乾燥密度 $\gamma_{d\ min}$ 、最小含水比 w_{min} として表わすものとすれば、砂分の少ない No. 1, No. 2 の材料は $\gamma_{d\ min}$, w_{min} が生じないことになる。

この、下に凸の現象を砂質土の Bulking 効果に原因するものと考えると⁴⁾、締固められた材料中の砂分が Bulking を起し易い含水比の状態においては、材料に加わる締固めエネルギーを減少させる方向に働いた結果といえる。即ち、砂粒子間の吸着水による粒子相互の吸引力は、粒子相互の位置移動による締固め密度の増加を妨げたものと考えてよい。また最適含水比における最大乾燥密度より、気乾含水比 ($w=0\%$) における乾燥密度が大きい状態は、締固めにもなうランマー落下時の振動の影響が現われたもので、振動による締固め効果大きい。すなわち砂分含有率の大きい粒度ほど、その差が大きい。この現象は、砂質土の締固め手段が静荷重、衝撃的荷重を加える場合より振動方式によるものが秀れているという従来の研究成果からみて妥当である。なお、ランマー落下時の振動の影響は、碎石混合の場合と比較して、川砂利の場合には更に大きいものと、その形状の相異から推定される。

以上のように粗粒材料を含んだ砂質土の締固めは一般の粘性土にくらべてかなり複雑である。即ち、粘性土の締固めは、図-2 のような締固め方法の場合、締固め曲線の変化に与える含水比の影響は粒子相互の潤滑作用の影響のみと考えることが出来る。従って、粘性土の締固め曲線は図の No. 1, No. 2 の曲線のようになる。これは気乾含水比より加水量の増加とともに潤滑作用が効果的に働くために乾燥密度が増加すると考えてよく、締固め曲線としては最大乾燥密度、最適含水比を頂点とする上に凸な一本の曲線となって現われてくる。

しかしながら、本実験結果に示された曲線は、砂分の増加とともに変曲点が 2 カ所生じ下に凸、上に凸の現象を示している。従って、気乾含水比から加水し、締固めてゆく過程には、ランマー落下時の打撃面以外への振動、砂分の Bulking 効果と潤滑作用の相反する影響、粗粒分である碎石の形状による粒子相互の移動に対する抵抗性等の各要素が影響してこの締固め曲線が成立しているものといえよう。

図-3 は計算値に従って 2.0mm 以下の砂分の占める乾燥密度を各粒度について示したものである。下に凸の現象を Bulking 効果の影響と考えると、有効締固めエネルギーは (締固めエネルギー - Bulking 効果のエネルギー) として表わすことができる。いま締固めエネルギー零の状態の砂の

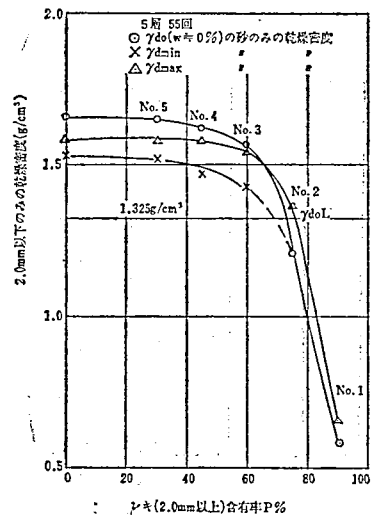


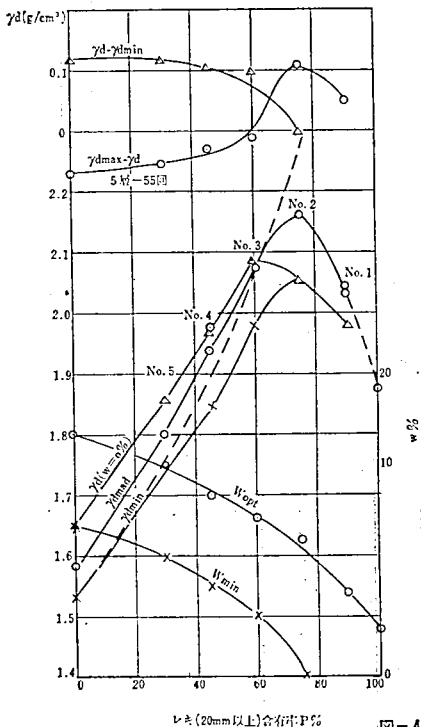
図-3

密度 γ_{dol} (loose density) を測定すると図中の如く 1.325g/cm^3 となる。この γ_{dol} は気乾状態であるが、加水して同様な測定をくり返すと Bulking 効果によって乾燥密度は徐々に減少する。一方、Bulking 効果とは水による体積の膨張力と考えてよい。従って締固めエネルギーが零の場合の loose な砂が加水によって一定体積内で膨張する力は、締固めエネルギーを与えた $\gamma_{do}=1.650\text{g/cm}^3$ の密な砂が一定体積内で膨張しようとする力に比較して微少なものといえる。このことは $\gamma_{do}(\omega=0\%)=1.650\text{g/cm}^3$ の砂が、5層—55回の締固めエネルギーを加えているにもかかわらず、 $\omega=10\%$ で 1.530g/cm^3 となることにより明らかである。従って、締固めエネルギーに Bulking 効果がマイナスの影響を与えるためには砂分の占める乾燥密度が、少なくとも γ_{dol} 以下の値を有していなければならないことになる。ここでは、締固めエネルギーが5層—55回と零の場合について比較検討しているのであるが、締固めエネルギーがこのように大きくない締固め密度が 1.325g/cm^3 に極めて近い値を示す場合には、当然、 γ_{dol} より小さい値で Bulking 効果がマイナスとして働くと考えられる。これらのことから、No. 1, No. 2 の粒度は砂分の Bulking 効果を受けていないことがわかる。なお、図—3中の No. 2 の粒度は、最大乾燥密度 γ_{dmax} と γ_{do} の間に $\gamma_{dol}=1.325\text{g/cm}^3$ が示されているが、

この砂分の密度に対応する混合材料の含水比は図—2の $\omega=6\%$ に相当する。従って曲線上砂分の密度が 1.325g/cm^3 のときには、既に Bulking 効果を仮りに現わすものとしても含水比が多い。このことは、図—4の ω_{min} の6%が No. 4の粒度に相当することから明らかである。

図—4は図—2から最適含水比 W_{opt} 、各乾燥密度等について相互の関係を示したものである。図では、締固めに併うレキ粒子相互のマサツによる締固めエネルギーの損失を考えない場合の理論値を γ_{dmin} について示している。これより図—3の γ_{dmin} が、レキ含有率の増加によってレキ粒子による締固めエネルギー損失の影響も受けていることがわかる。

各粒度のうち最っも密に締固まる粒度は気乾燥で No. 3、最大乾燥密度で No. 2 となり、いずれも図—1の標準粒度範囲内の粒度分布である。このことは締固めにともなう含水比の重要性を意味しているといえよう。



図—4

3 締固め密度に及ぼす締固めエネルギーの影響

材料及び含水比が等しい状態で締固めエネルギーを変化させると、締固め密度も加えたエネルギーに応じて変化する。締固めエネルギーが極めて大きい場合には更に大きなエネルギーを加えても密度はほとんど増加しない。即ち、理論的に材料の真比重以上にはなり

得ないからである。しかしながら、現段階の土質、道路工学で対象としている締固め密度、締固めエネルギーの範囲内においては両者の相関関係は何らかの形で成立つものと考えてよい。

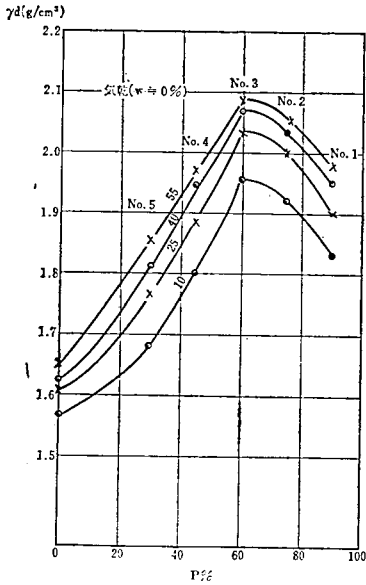


図-5

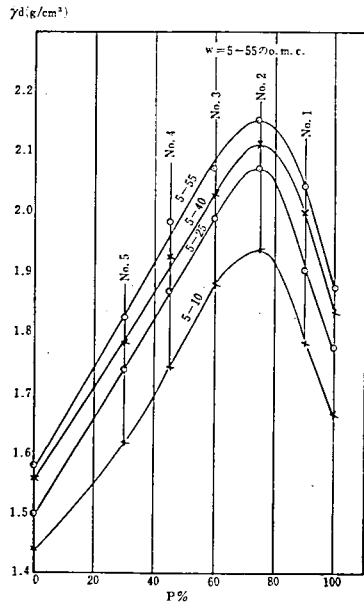


図-6

図-5、図-6は図-2の場合の気乾燥及び最適含水比の場合について、締固め回数のみを変化させ、得られた各粒度と乾燥密度の関係を示している。締固め回数の増加とともに密度も増加し、最も密度の大きくなる粒度はいずれも気乾燥では No. 3、 W_{opt} では No. 2 である。従って、締固め回数が等しければ粒度配合の良い材料は常に密度の値が大きい。

ここで、締固めエネルギーの比較を回数によって行うことにすると、例えば、図-5 で No. 3 の 10 回に相当する No. 4 の粒度の密度は 40 回であり、同様に図-6 の No. 2 の

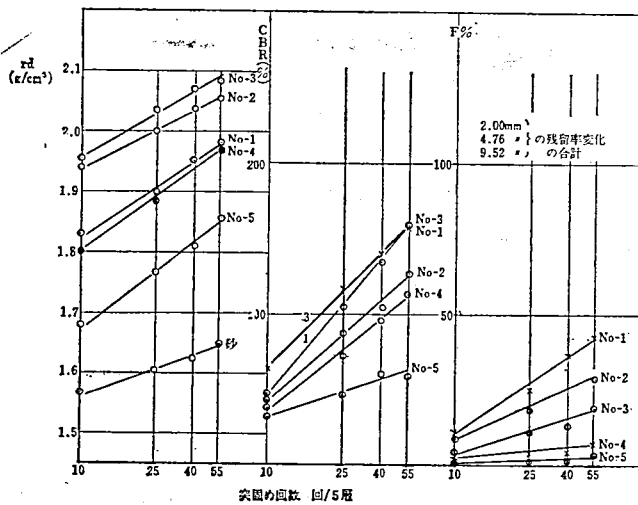


図-7

10回も No. 4 の 40 回に相当する。従って、粒度分布が異なれば、同一締固め密度を得るために要する締固めエネルギーの差は非常に大きくなり、締固めエネルギーの点からも粒度分布の重要性が知られる。

以上の各粒度の締固め回数 (log scale) と乾燥密度の関係は、図-7、図-8 の左端のようにいずれも直線性となって示される。この直線性は、締固めエネルギーの大きさが実用範囲内で、材料が砂質土以上の粗粒材料の場合には一般に認められる現象である⁵⁾⁶⁾⁷⁾。従って、この傾向から、材料の締固め密度の増加率が明らかになっている材料については、締固めエネルギーに対応する密度が推定できることになる。しかしながら、現段階では材料の相異と両図の勾配である増加率の関係については、2, 3 検討されている程度である。

4 締固め密度と CBR 値の関係

締固め密度がいかに大であっても支持力を表わす CBR 値が小さければ土構造物としての機能を果たすことはできない。一般に、締固め密度と CBR 値は Over Compaction の状態を除いて比例関係にあり、同一粒度、同一材料においては密度の大きい状態の CBR 値は密度の小さい場合より常に大きい。図-7、図-8 の CBR 値はそれぞれ乾燥密度 γ_d に締固められた場合の CBR 値を示している。各粒度とも 55 回の場合が密度、CBR 値がもっとも大きい、含水比を変化させて W_{opt} で締固めることにより CBR 値は増加する。全材料のうち最も大きい CBR 値が No. 3, 158% (気乾), No. 2, 245%

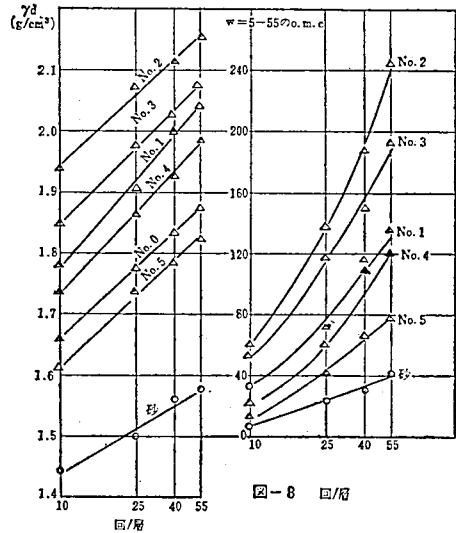


図-8 回/層

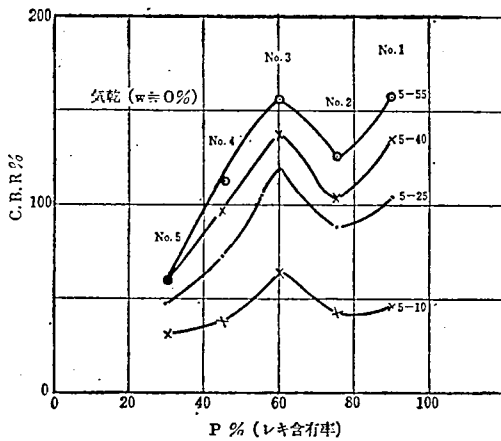


図-9

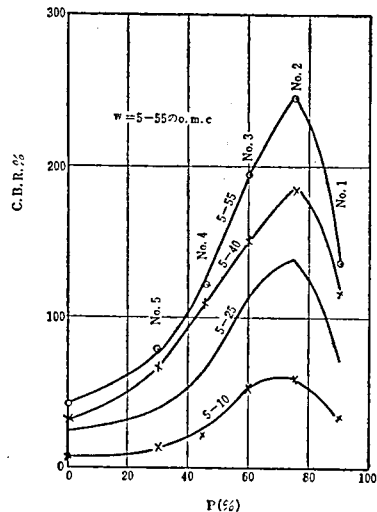


図-10

(W_{opt}) であり乾燥密度 103% ($2.085\text{g/cm}^3 \rightarrow 2.155\text{g/cm}^3$) の増加に対して CBR 値は 155% (158% \rightarrow 245%) と増加する。このことから、土構造物の締固めにともなう密度、含水比の重要性は明らかである。

図-9、図-10 はそれぞれ各粒度の関連性を 2.0mm 以上のレキ含有率 P% で表わし、CBR 値との関係を示している。最適含水比 W_{opt} の場合には、図 2 に示した密度曲線と同形の曲線群を得た。これは、加水による CBR 値の増加とともに、粒度変化による CBR 値の変化の関係を明らかにし、気乾材料に比較して安定性に秀れていることを示している。たとえば、気乾燥の No. 1 の粒度の CBR 値は No. 2 の CBR 値より大きい。これは碎石 90% と全材料のほとんどを角ばった碎石によって占めているため起る現象で、碎石粒子相互間の friction の消滅は図-10 の No. 1 の CBR 値が気乾のそれより低いことより明らかである。

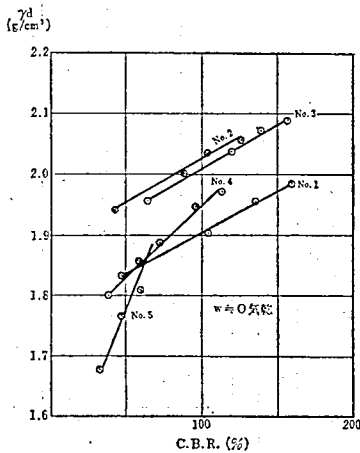


図-11

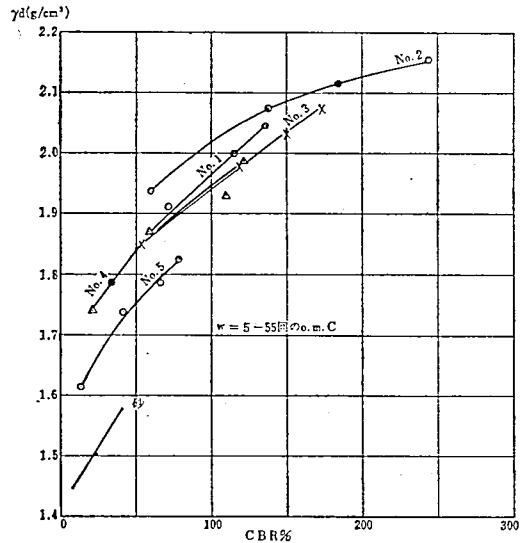


図-12

図-11、図-12 は、締固め回数の変化をパラメーターにとり、密度と CBR 値の関係を求めたものである。気乾燥の場合は乾燥密度の増加とともに CBR 値は直線的に増加する傾向にあるが、 W_{opt} における曲線はやや上に凸の現象を示している。このことは適当な加水量 (W_{opt}) を与えた場合、乾燥密度 γ_d の増加率より CBR 値の増加率の方が大きいことを示し、構造物としてより安定であることを表わしている。

以上のことは、路盤材料の密度と CBR 値に影響する要素が粒度配合はもとより、含水量の効果も極めて大きく影響し、締固めに当って留意すべき点を明らかにしている。

5 締固めにともなう破碎の現象

一般に現場、室内を問わず、すべての締固め機械による締固め方法では、材料の硬さ、粒形、粒度分布に応じて破碎現象を生ずる。この材料の破碎は、細粒材料である粘性土の場合については、一応無視することが出来るが、砂、レキ等の粗粒材料に対しては無視できない。即ち、現段階では、細粒土の土質工学的特性の基準として主にアッターベルグ限界。砂、レキ等の粗粒材料のそれは主に粒度分布となっていることから明らかである。従

って、粗粒材料では、粒度分布によって工学的な適用性の検討を行なう場合がほとんどで、例えば、Talbot はもっとも密に詰まり易い粒度分布を最大粒径を基準として考えている。その他締固め密度、力学的性質等の研究が粗粒材料を対象として数多くなされて来た。しかしながら、締固めによって生ずる粒度分布変化の原因となる破砕現象に関する研究は極めて少ない。このことは、従来用いられて来た粗粒材料が堅硬であり、締固めにもなう破砕量が実用的には無視できたものと考えてよい。一方筆者が従来行なってきたように、火山レキ等の特殊な粗粒材料を対象とした場合には当然工学的性質を左右する要素となる。これらの破砕と粒度、CBR値等の関係については別の機会に述べ、本項では単に川砂、碎石の場合においても破砕現象を生ずることを示すのみにとどめる。

図-7の $F(\%)$ を本報告では仮りに破砕率と称する。この破砕率とは2.0mm以上の各フルイ分けにおける締固め前の残留率に対する変化の絶対値の合計として示したものである。従って、粒度分布の変化を数値的に表わしたものと考えられよう。図-7では締固め回数が増加すると破砕率も増加し、2.0mm以上の粗粒分を多く含んでいる粒度ほど破砕量が多くなる。乾燥密度と破砕率は締固め回数(log scale)に対していずれも直線性を有する。このことから、締固めを行なう場合、密度の増加に応じた破砕現象の生ずることがわかる。

図-13は破砕におよぼす含水比の影響を示したもので、 f' は2.0mm残留率の変化量を示す。気乾燥では点線の示すように最適含水比の場合より破砕量は多く、このことは、粒子と粒子のfrictionが加水により減少した結果と考えてよい。従って、同一材料においても破砕は含水比の影響を受け、その程度は異なるといえる。

6 む す び

締固められた土構造物の支持力は材料の相異によって異なることは勿論であるが、材料が同じであっても、その締固め的手段、締固め密度、含水比等によって変化する。従って、同一材料または混合材料を用いる場合、その材料の混合比、締固め特性、支持力を示すCBR値等の関連性を知ることが材料を土質工学的に良好な条件で構造物として利用する上から、もっとも重要なことといえる。

この報告で示した結果は、筆者が行なっている路盤材料としての火山レキの締固め特性と支持力に関する研究の一部である。従って、火山レキとの比較検討のための実験であり、火山レキの有する特性との関連性を目的としている。しかしながら、本実験を通じて、従来、広く用いられてきた碎石にも2,3の問題点が提起されたものと考えられる。詳細は本文にゆずるが、締固め時における砂のBulkingの影響、締固め密度の微小増加にもなうCBR値の大きな増加等、締固め時の重要な問題点が本報告によって明らかにされたものといえよう。

終りに本報告も含めた路盤材料の締固め特性と支持力に関する一連の研究に協力された当時都立大学大学院学生、潘作治君に謝意を表するものである。

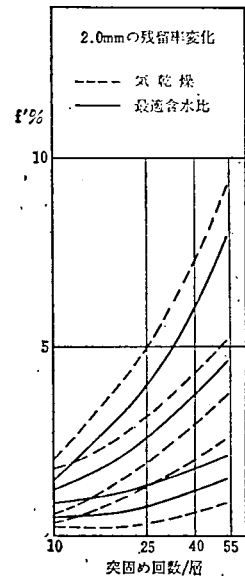


図-13

参考文献

- 1) 森満雄：火山レキの締固め特性と支持力（その1），（その2）土質工学会誌 土と基礎 vol. 13. No. 6, No. 7, 1965.
- 2) 森満雄：浅間火山レキのCBRに関する一考察 明星大学紀要 No. 2. 1966.
- 3) 森満雄：土の締固めにおける問題点について 道路建設 No. 175. 1965.
- 4) 森満雄： } 砂質土の締固めと Bulking 現象について 道路建設 No. 170. 1962.
井上知久
- 5) 森満雄：レキまじり土の締固め特性について 土質工学会誌 土と基礎 No. 77. 1964.
- 6) 久野悟郎：「土の締固め」技報堂
- 7) Mituo Mori: Compaction Characteristics of Coarse Aggregate by laboratory Compaction Tests.
Memo. Fac. Tech. Tokyo Metro. Univ. No. 14. 1964.