

粗粒土の統一土質分類に関する考察

ON THE UNIFIED SOIL CLASSIFICATION OF COARSE-GRAINED SOILS

植下 協*・野々垣一正**・浅井武彦***

By Kano Ueshita, Kazumasa Nonogaki and Takehiko Asai

1. ま え が き

統一土質分類は 1942 年にアメリカにおいて、Casa-grande¹⁾ によりその原形が作られ、その後、アメリカの開拓局と陸軍技術部で統一した形で採用することになってから、統一土質分類 (Unified Soil Classification System) という名前で広く紹介され²⁾、1969 年に ASTM の正式規格³⁾として採用されるにいたっているものである。

今日では、この統一土質分類は、アメリカ国内のみならず、世界各国でも広く利用されつつあり、世界的な工学的分類法となりつつある。

わが国では、JIS または学会基準として、国内で統一した土質分類法のとり決めがなく、数種の分類法 (アメリカ道路局型三角座標、ミシシッピ河管理委員会型三角座標、大阪地盤図型三角座標、アメリカ統一土質分類法、改訂 PR 分類法など) が各方面、各機関で用いられており、土質に関する意思疎通が阻害される状態にあった。このような土質分類ならびにその図式記号を国内的に整理する役割をもって、土質工学会の中に、昭和 41 年より、土の判別分類法委員会が活動をはじめ、各方面の土質分類の利用状況、各種土質分類法の利害得失を検討した結果、わが国で、今後、統一して用いるべき分類法としては、統一土質分類の線に沿ったものが適当であろうとの結論に達した⁴⁾。

しかし、統一土質分類をわが国で採用するためには、基準化に先だち、わが国の土質との対応を調べ、必要があれば、わが国に適した修正を考慮しておかなければならない。

このような意味で、土の判別分類法委員会がアメリカ

の統一土質分類をわが国の土と対応させて検討した結果、塑性図上で CH と MH の存在する領域を修正し、火山灰質土に対する VH, VL の分類名を加える必要がわかり、それらを含めた日本統一土質分類の提案がなされた⁵⁾。

ところが、その後、統一土質分類の礫と砂の粒径区分 4.76 mm の可否に関する議論が高まり、この区分点を 2.00 mm とした統一土質分類を考えるべきかいなかにて検討しておかなければならない状況となった。

この点についての議論は、アメリカ⁶⁾、イギリス⁷⁾でも行なわれており、ドイツ⁸⁾、フランス、スイスなどでは 2.00 mm、イギリス⁹⁾では 2.40 mm を砂・礫の粒径区分とした統一土質分類を考えている。

わが国では、土の判別分類法委員会が日本統一土質分類法の提案を行ない、土質分類に関するシンポジウムを開催³⁾して解散した後、昭和 45 年 7 月より土質工学会に土の判別分類法基準化委員会が設けられ、土質分類基準化の具体的作業を進めることとなった。しかし、その作業において、さらに解決しなければならないいくつかの問題と遭遇し、それらの解決にとり組んでいる¹⁰⁾。

著者の一人 (植下) は、昭和 42 年度以降、上記の土質工学会土の判別分類法委員会ならびに土の判別分類法基準化委員会に協力してきた。これらの委員会では、その目標を達するための審議を行なうためには判断のよりどころとなる多くの資料が必要である。そのような資料は、現時点ではきわめて不足しており、研究的意図をもって積極的に収集し、不明な点は実験で確かめてゆかねばならない現状であり、委員会内の作業のみに期待することはできない。

著者らは、さきに、東海地方の土質資料のうち塑性図分類の行ないうる土 (細粒土ならびに砂質土) の統一土質分類を検討し、三角座標との対応、自然土としての土の性質 (強さ、圧縮性など) との対応を調査検討した¹¹⁾。細粒土 (74 μ 以下の粒径部分が半分以上を占める土) は

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 名古屋大学助手 同
*** 正会員 工修 日本道路公団高速道路仙台建設局建設部技術第 1 課

不透水性材料として利用される以外は土構造物の材料としては、土工中、土工後における性質が劣り、土工材料として利用されることは少ない。むしろ、建設計画において避けることのできない場所に細粒土が存在する場合の支持力や圧密沈下の性質がどのようであるかに注意が向けられる。

これに対し、今回は、東名高速道路愛知県内資料（日本道路公団試験所蔵資料）、名古屋大学土木工学科所蔵の各種資料（資料名は文末の「付記」参照）ならびに著者らの実験資料に基づいて、粗粒土（74 μ 以上の粒径部分が半分以上を占める土）の統一土質分類に関する検討を行なってみた。

粗粒土を主として考える場合には、自然地盤における性質よりも、土木材料としての工学的性質により多くの関心が集まる。最近、建設工事の盛んな、道路、鉄道、フィルダムなどの工事材料として多量の粗粒土が用いられ、その場合の締固め特性、強度特性、透水性がどのようであるかが注目される。そこで、締固め特性については、JIS A 1210 の試験方法 2.5-b（従来の CBR 突固め、アメリカの改訂 AASHO 突固めに相当）の最大乾燥密度とその最適含水比、強度特性については、最大乾燥密度の 95% 密度における修正 CBR（4 日水浸）を調べた。一方、透水性については、JIS A 1210 の試験方法 1.1-b（従来の標準突固め、標準 AASHO 突固めに相当）の最大乾燥密度における透水係数を実験的に求めるとともに、各方面で求められた実験値を調べた。

以上の収集ならびに実験資料によって検討したことは、統一土質分類と土の工学的性質との対応、砂・礫粒径区分における 4.76 mm と 2.00 mm の意義、細粒分含有率による土の工学的性質の変化、細粒分含有率による土質区分の意義、砂・礫の粒度の良否についてである。

なお、アメリカの道路・滑走路用土質分類では、細粒分（74 μ 以下）が 12~50% の場合、G または S に、Md, Mu, または C の記号がつくことになり、この報文中でもこの分類を利用した。この Md, Mu, C の区分は、420 μ より小さい粒径部分の液性限界、

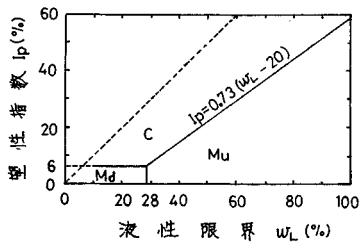


図-1 土質記号における Md, Mu, C を区分するための塑性図

塑性指数を求め、図-1 の塑性図上にプロットして区分したものである。なお、非塑性で試験の求められないような場合は、Md とした。

2. 粗粒土の統一土質分類と工学的性質との対応

従来、統一土質分類に対し、「盛土および基礎用の分類表」、「道路および滑走路用の分類表」、「フィルダム設計上の適性分類表」がアメリカの資料に基づいて作られており¹²⁾、これによって統一土質分類の利用価値が高いと考えられてきた。しかし、今後は、わが国の土質資料に基づく工学的性質との対応表を作成してゆかなければ、わが国の分類法として生きてこない。そこで、著者らは、従来の土質資料（さしあたりは東海地方を主とする）をできるかぎり収集整理して、統一土質分類と最大乾燥密度 γ_{dmax} ならびに最適含水比 w_{opt} (JIS A 1210 試験方法 2.5-b) との対応、ならびに γ_{dmax} の 95% 密度の修正 CBR（4 日水浸）との対応を調べ、図-2（資料総数 547）、図-3（資料総数 478）、図-4（資料総数 387）にヒストグラムの形で示した。図-2 と 図-3

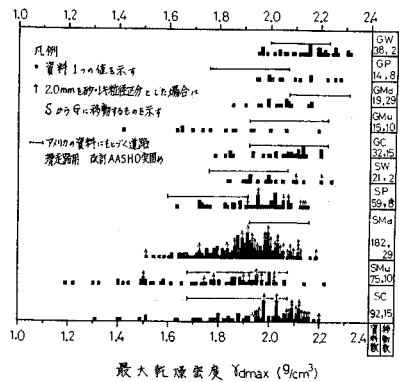


図-2 統一土質分類と最大乾燥密度 (JIS A 1210 試験方法 2.5-b) との関係

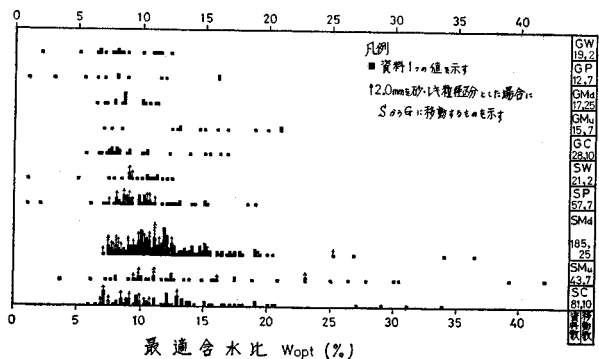


図-3 統一土質分類と最適含水比との関係

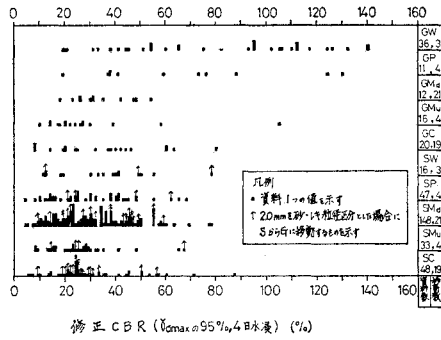


図-4 統一土質分類と修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との関係

の資料総数が一致しないのは、最大乾燥密度の記録がなくて、最適含水比の記録のないものがあつたためである。これらの図には、次節で砂・礫の粒径区分を考察するときの参考とするために、もし 2.00 mm を砂・礫の粒径区分とした場合、S の記号のつく分類名から G の記号のつく分類名に移動する資料の存在位置を示すために↑記号を用いた。各分類を示す記号 (GW など) の下の数字は、左側のものが 4.76 mm 区分の場合の各分類ごとの資料数、右側のものが 2.00 mm 区分の場合に移ってくるもの、または移るものの資料数である。なお、統一土質分類によると、GW, GP, SW, SP と GMd, GMu, GC, SMd, SMu, SC の間に、細粒分が 5~12% の境界分類があるが、これらの図では境界分類を除き、細粒分含有率 5% 以下の GW, GP, SW, SP と細粒分含有率 12~50% の GMd, GMu, GC, SMd, SMu, SC だけを対象とした。

これらの図を見ると、統一土質分類に対応する性質は、土質分類によって、それぞれの存在範囲のずれは認められるが、むしろ分布範囲相互のオーバーラップの大きいことに気づく。このことは、現在、工学的に最も優れているといわれる統一土質分類によっても、土の工学的性質を精度よく推定することはむずかしく、設計のためには土質試験をぜひ行なうことの大切であることが示されている。

図-2 には、アメリカの資料に基づく対応範囲を記入し、著者らの場合と比較してみた。それによると、アメリカの資料では GW と GP, SW と SP の間に注目しうる差が示されているが、著者らの資料では、GW と GP の分布範囲に相違はなく、SW と SP の間にもわずかなずれがあるだけである。

また、GMd, SMd の範囲がアメリカの資料では、他の分類に比べて高い値を示しているが、著者らの資料に

おいてはそのような傾向はみられない。そして、礫土、砂質土のように細粒分を多く含有する土質に対しては、著者らの資料は、アメリカの資料に比べて低い値に分布するものが多くみられる。

図-3, 図-4 の場合に対しては、図-2 のように直接比較しうるアメリカの資料はない。

図-2, 図-3, 図-4 に基づく土質分類・性質対応表を作り、従来の関連ある数値と比較して示せば、表-1, 表-2, 表-3 のようになる。表-3 については、道路土工指針¹³⁾の現場 CBR 値も参考までに記入した。なお、図から数値を読みとる場合、かけ離れて存在すると思われる数値は除外した。

表-3 における修正 CBR 値は、従来の現場 CBR の対応値に比べて、さらに対応範囲が広く、土質分類相互のオーバーラップがきわめて大きいことに気づく。このことから、土質分類によって土の力学的性質を推定することはきわめてむずかしいといわざるを得ない。

表-2 粗粒土の統一土質分類と最適含水比

統一土質分類	JIS A 1210 試験方法 2-5-b 最適含水比 (%) (東海地方を主とする資料)	標準固め (JIS A 1210 試験方法 1-1-b に相当) 最適含水比 (%) (アメリカの資料にもとづくフィルダム用)
GW	5.0~12.2	<13.3
GP	5.4~11.8	<12.4
GMd	6.4~11.2	<14.5
GMu	7.0~21.0	<14.7
GC	5.6~16.8	13.3±2.5
SW	5.0~12.4	12.4±1.0
SP	6.0~15.2	14.5±0.4
SMd	7.0~20.4	14.7±0.4
SMu	6.0~30.4	14.7±0.4
SC	5.8~20.6	14.7±0.4

表-3 粗粒土の統一土質分類と修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) または現場 CBR

統一土質分類	r_{dmax} の 95% の修正 CBR (%) (東海地方を主とする資料 (4 日水浸))	現場 CBR (%)	
		アメリカの資料にもとづく道路・滑走路用	道路土工指針
GW	19~140	60~80	7~15
GP	19~130	25~60	
GMd	18~54	40~80	
GMu	10~39	20~40	
GC	8~63	20~40	
SW	12~55	20~40	10~30
SP	4~68	10~25	—
SMd	4~78	20~40	3~7 7~15*
SMu	8~67	10~20	
SC	5~71	10~20	* 含水比の低い場合。含水比の変化に相当敏感である。

3. 礫・砂の粒径区分について

まえがきでも述べたように、統一土質分類における砂・礫の粒径区分を 4.76 mm とすべきか、2.00 mm とすべきかで議論がわいている。

図-2、図-3、図-4 は、アメリカの統一土質分類にしたがって、砂・礫の区分を 4.76 mm とした場合であるが、もし、砂・礫の区分を 2.00 mm とし、礫分が砂分より多い場合に G の記号をつけるとすれば、4.76 mm 区分では、S の記号がついているものの一部に、G の記号へと移るものがでてくる。そのような資料の存在を图中的 ↑ 記号で示し、工学的性質との対応を考えた場合、いずれの場合の方が優れているかを検討してみた。図-4 の修正 CBR との対応においては、2.00 mm を粒径区分とした場合の対応では、礫 (GW, GP) および礫土 (GMd, GMu, GC) の対応範囲が、4.76 mm を粒径区分とした対応に比べて低い側 (S 記号の土が主として対応している部分) に移動する傾向がみられることから 4.76 mm を粒径区分とした方が工学的性質との対応はよいと考えられる。単粒度骨材による今井、村尾らの実験的研究も、2.00 mm より 4.76 mm の方がより目立った区分点となることを示している¹⁰⁾。

一方、図-2、図-3 については、4.76 mm、2.00 mm のいずれがより優れているとはいえない。

2.00 mm~4.76 mm 付近の粒径材料は、Pettijohn¹¹⁾ も指摘しているように、自然界における存在が他粒径材料の存在ひん度に比べて少ない。図-2、図-3、図-4 で粒径区分変更をすれば、S 記号から G 記号に変更される資料数はこの場合の資料総数の 11~13% 程度である。

以上に基づき、4.76 mm と 2.00 mm のいずれを砂・礫の粒径区分点とすべきかを考えるとき、4.76 mm の方が力学的粒径区分としてはやや意味があるようだが、世界の動向⁹⁾ ならびに従来のわが国における習慣を考慮すれば、2.00 mm を粒径区分点とした統一土質分類を採用することも許容しうるであろう。わが国の統一土質分類の基準化において、後者の 2.00 mm 区分を採用する場合、ASTM 土質分類基準³⁾ との不一致が問題 (ASTM が変更すれば解消) となるが、アメリカにおける学会間の話し合い⁶⁾、ヨーロッパならびにわが国における 2.00 mm 区分に対する根強い支持を考え、国の内外の混乱をさけるために、4.76 mm は別の意味の区分点として残しつつ、後者に落ち着かざるを得ないであろうことを考えている。

4. 細粒分含有率による土の工学的性質の変化について

統一土質分類では、細粒分含有率 5% 以下のきれいな礫・砂 (GW, GP, SW, SP) と 12~50% の細粒分を含む礫・砂 (GMd, GMu, GC, SMd, SMu, SC)、そして 5~12% の前 2 者の境界分類 (GW-GMd, SW-SMd など) というように分類表示が細粒分含有率により変わる。そこで、細粒分含有率による土の工学的性質の変化を調べるため、細粒分含有率と突固め最大乾燥密度 (JIS A 1210 試験方法 2.5-b) との関係ならびに修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との関係を 図-5 ならびに 図-6 のようにプロットした。図-5、図-6 では、同じ細粒分含有率における最大乾燥密度および修正 CBR の値は幅の広い分布を示し、バラツキも大きい。これらのバラツキの原因として、粗粒分ならびに細

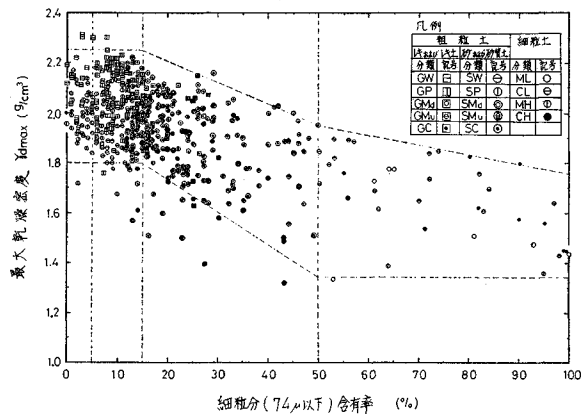


図-5 細粒分含有率と最大乾燥密度 (JIS A 1210 試験方法 2.5-b) との関係

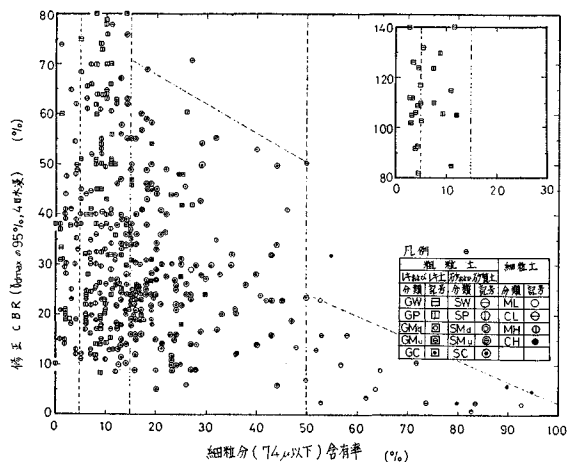


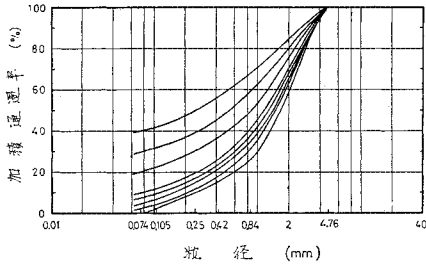
図-6 細粒分含有率と修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との関係

粒分の性質、粒度分布の良否などの違いが考えられる。そこで、図-5、図-6 では、細粒分の性質の違い、砂と礫の区別または粒度分布の良否の影響もみることができるよう、統一土質分類記号で示してある。なお、細粒分含有率が 5~12% の境界分類の資料については、粒度の良否に意味を持たせて示した。図-5 によれば、細粒分含有率 0~15% ではほとんどの γ_{dmax} の値は、1.80~2.25 g/cm³ の範囲に分布し、細粒分含有率が 15% 以上になると上限ならびに下限の値が下がり、50% 以上になると γ_{dmax} の値は、ほとんどが 1.35~1.90 g/cm³ の幅に分布することとなる。

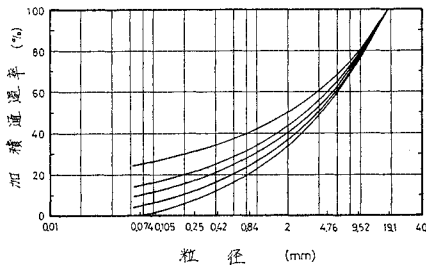
図-6 の修正 CBR との関係においても、ほぼ同様に細粒分含有率が 15%、50% 付近で変化する。

次に、図-5、図-6 において、細粒分含有率が 12% 以下の資料については、礫は砂に比べて最大乾燥密度および修正 CBR の値は高い側に分布するが、礫および砂の粒度の良否による分布の相違は認められない。この粒度の良否に関しては、後節でさらに検討することとする。

細粒分含有率が 12~50% の礫土および砂質土については、図-2、図-4 でもみられたように、含有細粒分の違いによる土質分類相互の間には分布範囲の相違はみられない。図-5、図-6 では、細粒分含有率が 10% 近くの材料は、最大乾燥密度、修正 CBR とともに最大値を示している。Yoder¹⁵⁾ も粒度のよい礫に細粒分含有率 8~10% が加わるとき最大の乾燥密度となり、細粒分含有率 6~8% のときに最大の CBR 値となった実験資料を示している。



(a) 著者らの実験試料



(b) Barber さんの実験試料

図-7 透水試験試料の粒径加積曲線

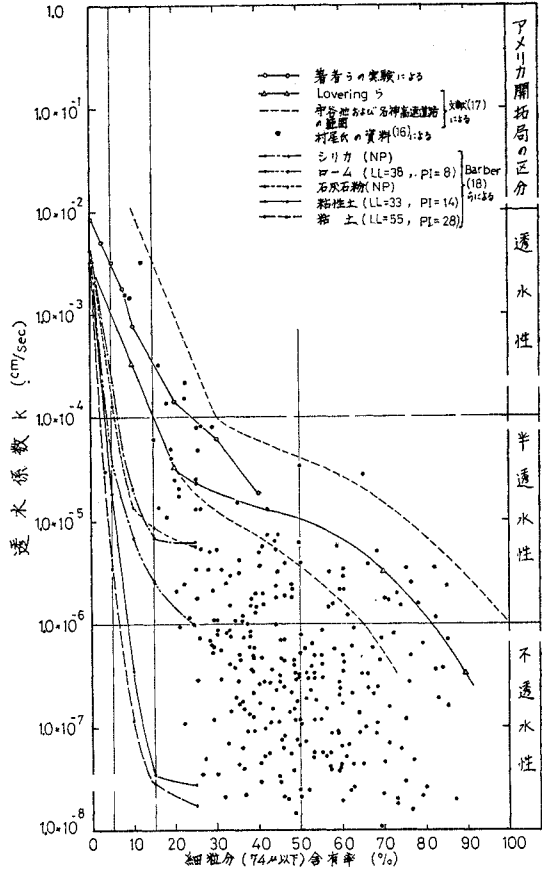


図-8 細粒分含有率と透水係数との関係

次に、細粒分が土質材料の透水性におよぼす影響を調べるために、細粒分含有率を変化させた試料を用いて、透水係数の変化を調べた。用いた試料の粒径加積曲線を図-7 (a) に示す。用いた材料は、4.76 mm から 0.074 mm の間の粒径材料として矢作川上流の砂(黒雲母まじり粗粒石英砂、やや丸味をおびる)を用い、細粒分として石灰石の粉末を用いた。試験は JIS A 1210 試験方法 1.1-b の突固め試験を行ない、各試料の最大乾燥密度供試体を作り、JIS A 1218 の変水位透水試験による透水係数を求めた。その結果の透水係数と細粒分含有率との関係を図示すると 図-8 のようになる。図-8 には、村屋¹⁶⁾、守谷ら、名神高速道路、Lovering らの資料¹⁷⁾、Barber ら¹⁸⁾ の資料もあわせて記入した。Barber らの用いた試料を、著者らの試料と比較するために、その粒径加積曲線を 図-7 (b) に示した。図-8 において、著者らの実験結果と Barber らの実験結果を比較すると、図-7 に示した粒度組成の違い、ならびに細粒分の種類の違いから、透水係数の値にかなりの差が認められる。図-8 を全体的に見れば、細粒分 15% が、平均的に透水性と半透水性の区分点とみなすことができるが、Bar-

ber らの資料によれば、細粒分 5% でも、全体の粒度と細粒分の種類によって半透水性となり、細粒分 10% 前後ですでに不透水性となる場合がある。一方、細粒分が 15% 以上では、締めめられた土は半透水性から不透水性であることがみられる。

5. 細粒分含有率による土質区分の意義

統一土質分類では細粒分含有率で分類表示が変わるが、各国でこの細粒分含有率の区分点が少しずつ異なる。アメリカ³⁾では細粒分含有率が 5%, 12%, 50% のところで分類名が変わり、ドイツ⁹⁾では 5%, 15%, 40%, イギリスの提案⁹⁾では 5%, 20%, 50%, 70% に区分点がある。ただし、アメリカ、イギリスの細粒分が 74 (または 75) μ 以下であるのに対し、ドイツでは 60 μ 以下の粒径部分と定義している。

ところで、わが国の資料に基づく細粒分含有率の区分点については、前章で考察した細粒分含有率による土の工学的性質の変化から、突固め最大乾燥密度、修正 CBR、透水係数などとの対応において、細粒分含有率 5%, 15%, 50% に区分点を考えることができよう。

各国で共通している細粒分含有率 5% の意味については、細粒分がほとんどないきれいな礫、きれいな砂とみなすことができる境界である。図-8 によれば、粒度のよいよく締まった礫の間げきを埋めるように粘性土が混じれば半透水性となるが、一般には透水性と考えるとよい状態である。密度や修正 CBR については、この状態より、細粒分がある程度多い方(細粒分含有率 5~15%)がすぐれた状態となる可能性があるが、図-5、図-6 によれば、密度、修正 CBR にかぎって、細粒分 0~5% と細粒分 5~15% とを便宜上一括して扱ってもよいと思われる。

細粒分 15% 含有の状態は、粗粒土に対し、細粒分の影響が目立ち始める境界である。突固め最大乾燥密度、修正 CBR は細粒分 15% までは、粗粒分の骨組に支配される値を示すが、細粒分が 15% 以上となると、密度や修正 CBR は低下してゆく。透水性については、細粒分が 15% を越えると、透水係数が 10^{-3} cm/sec 以下となり、ほとんどが、半透水性か不透水性となる。

細粒分が 50% を越えると突固め最大乾燥密度、修正 CBR との対応からみて、細粒分の影響が圧倒的な細粒土とみなしうる。透水性についても、細粒分そのものの影響が圧倒的で、ほとんどが 10^{-5} cm/sec 以下の不透水性材料となる。

6. 礫・砂の粒度の良否について

統一土質分類で、礫・砂の粒度が良いか悪いかの判断は、次の定義による均等係数 U_c と曲率係数 U_c' によっている。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (1)$$

$$U_c' = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} はそれぞれ、粒径加積曲線における 10% 径、30% 径、60% 径を示している。粒度がよいというためには、曲率係数 U_c' が 1~3、均等係数 U_c がアメリカ³⁾では礫に対し 4 以上、砂に対し 6 以上、ドイツ⁹⁾では礫・砂とも 6 以上、イギリスにおける提案⁹⁾では礫、砂とも 5 以上となっている。これらの区分点の

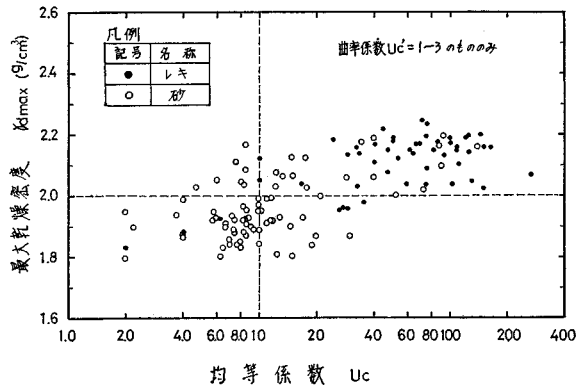


図-9 均等係数と最大乾燥密度 (JIS A 1210 試験方法 2.5-b) との関係

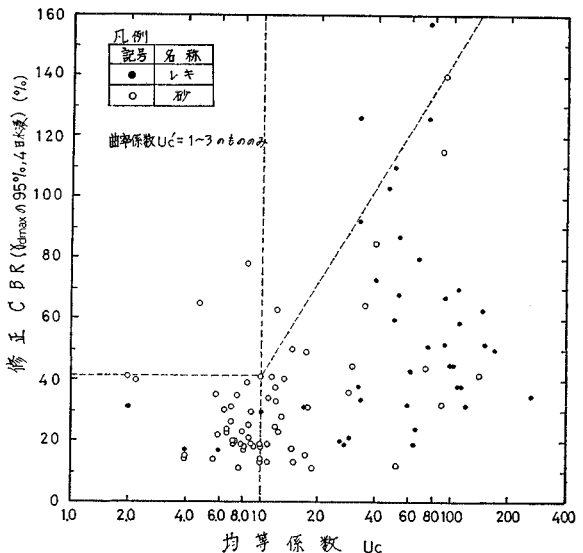


図-10 均等係数と修正 CBR (r_{dmax} の 95%) との関係

工学的性質を調べるため、曲率係数 U_c' が 1~3 の礫・砂の均等係数 U_c と突固め最大乾燥密度との関係、修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との関係それぞれ、図-9, 図-10 にプロットした。道路関係を主とする既存資料では、均等係数の低い場合の資料は少なく、特に礫の場合では存在しなかったため、著者らは、均等係数 U_c が 2, 4, 6, 10 の礫と砂の突固め最大乾燥密度と修正 CBR を求め、図-9, 図-10 の資料として加えた。

図-9 の最大乾燥密度と均等係数との関係から、均等係数が大きくなると最大乾燥密度も高い値となる傾向が示されている。図-9 の資料を均等係数によって分割することはむずかしいが、均等係数が 10 付近で分割されるのではないかと考えられる（礫については、均等係数 4 または 6 の分割を考えることもできる）。図-10 の修正 CBR との関係では、各均等係数に対応する修正 CBR の上限値に着目すれば、やはり、一応、均等係数 10 でわけることができ、それより均等係数が増大すれば、修正 CBR の上限値は均等係数とともに増大している。ただし、下限値については、均等係数による変化はほとんどない。

次に、曲率係数 U_c' の 1~3 という条件が適当なものであるかどうかを検討するために、均等係数 U_c をパラメータとして曲率係数 U_c' と最大乾燥密度との関係を 図-11 に、曲率係数 U_c' と修正 CBR との関係を 図-12 に示した。

図-11 によれば、均等係数 U_c が大きいと最大乾燥密度は高い値を示すが、曲率係数 U_c' が、1 より小、1~3, 3 より大の 3 つの区域で顕著な相違はみられない。

次に、図-12 の曲率係数 U_c' と修正 CBR との関係については、曲率係数が 1~3 の修正 CBR の値は、他の曲率係数の場合より高い値を示すものが目立つが、 U_c' が 3 より大きい場合にも、修正 CBR の大きいものがあり、 $U_c'=3$ の境界が $U_c'=1$ ほどに明りょうではない。

ここで、曲率係数の意義をさらに明確なものとするために、曲率係数そのものを再検討すれば次のようになる。

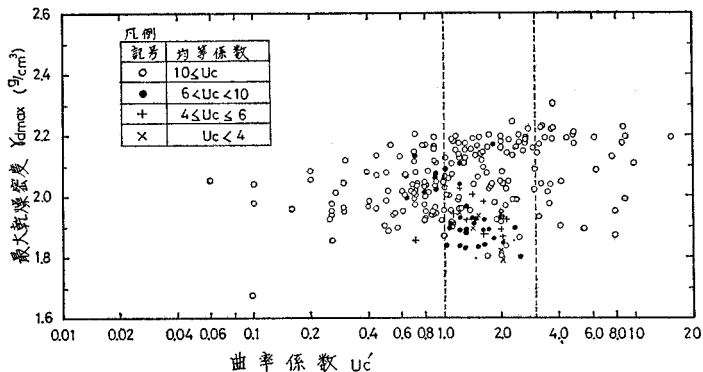


図-11 均等係数をパラメータとした曲率係数と最大乾燥密度 (JIS A 1210 試験方法 2-5-b) との関係

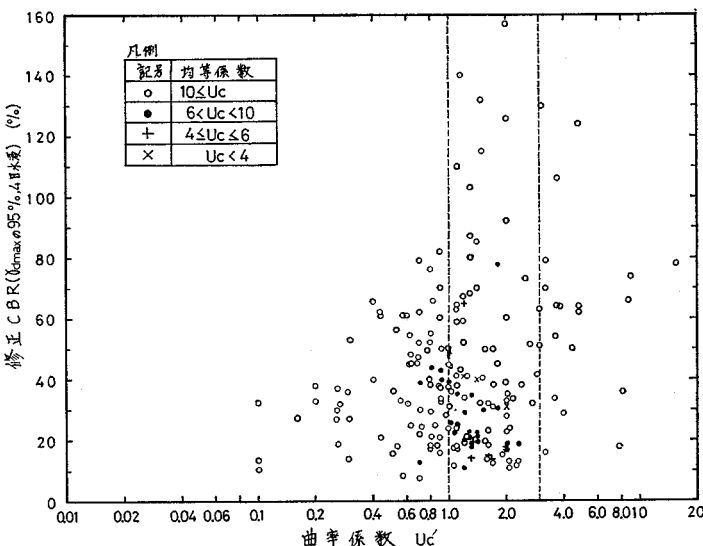


図-12 均等係数をパラメータとした曲率係数と修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との関係

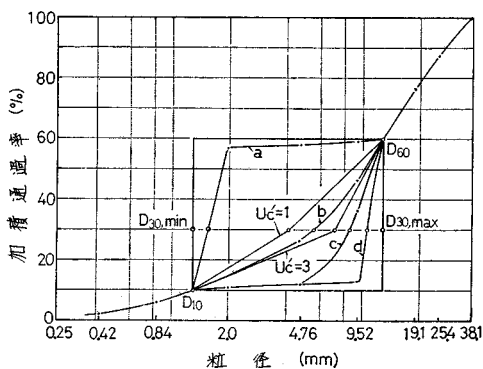


図-13 曲率係数 U_c' の考察ならびに $U_c=10$ の場合の実験試料の粒径加積曲線

まず、曲率係数 U_c' は、図-13 の極端な場合を考えれば、その均等係数 U_c に制約をうけ、次の最小曲率係

数 $U_c',_{min}$ と最大曲率係数 $U_c',_{max}$ の間の値しかとり得ないことがわかる。

$$U_c',_{min} = \frac{(D_{30,min})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(D_{10})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

$$= \frac{D_{10}}{D_{60}} = \frac{1}{U_c} \dots\dots\dots(3)$$

$$U_c',_{max} = \frac{(D_{30,max})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

$$= \frac{D_{60}}{D_{10}} = U_c \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $D_{30,min}$ および $D_{30,max}$ は D_{10} と D_{60} が定められているときにとりうる最小と最大の D_{30} の値である。

図-11, 図-12 には、均等係数が異なるあらゆる資

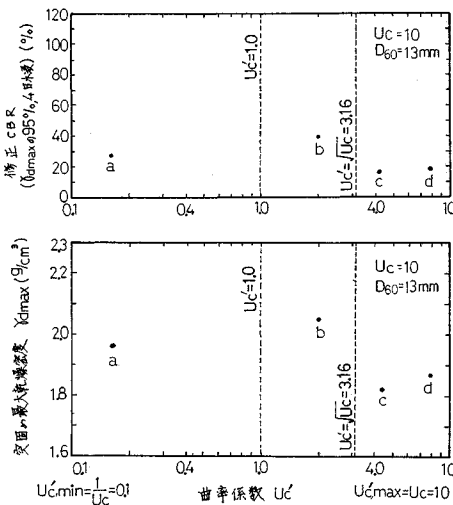


図-14 曲率係数 U_c' と突固め最大乾燥密度 (JIS A 1210 の試験方法 2-5-b), 修正 CBR ($r_{d,max}$ の 95%, 4 日水浸) との関係 ($U_c=10, D_{60}=13 \text{ mm}$ の場合, 図中の a, b, c, d は図-13 の a, b, c, d に対応)

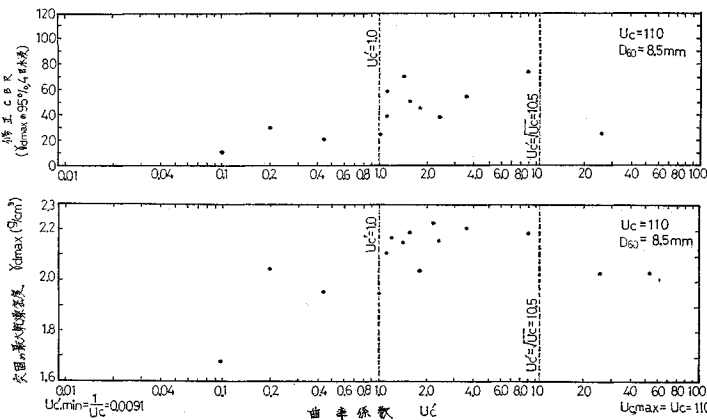


図-15 曲率係数 U_c' と突固め最大乾燥密度 (JIS A 1210 の試験方法 2-5-b), 修正 CBR ($r_{d,max}$ の 95%, 4 日水浸) との関係 ($U_c=110, D_{60}=8.5 \text{ mm}$ の場合)

料が一括記入されているので、均等係数別に検討すれば合理的と考えられる。また、最大乾燥密度や修正 CBR との関係においては、均等係数、曲率係数と同時に粒径の大きさも影響があると考えられたので、均等係数 U_c と 60% 粒径 D_{60} を一定とし、曲率係数 U_c' のみを変化させた実験結果を示せば、図-14, 図-15 のようになる。図-14 ならびに 図-15 によれば、

$$1 < U_c' < \sqrt{U_c} \dots\dots\dots(5)$$

であれば、粒度が良いといってよさそうである。この式 (5) の下限値である 1 は、曲率係数変化可能範囲 ($1/U_c, U_c$) の対数尺における中央値であり、上限値の $\sqrt{U_c}$ は 1 と最大曲率係数 $U_c',_{max}=U_c$ との対数尺における中央値、すなわち変化可能範囲の大きい側の 1/4 点 (対数尺上) にあたる。式 (5) の範囲からはずれる粒径曲線はギャップ粒度と考えるものである。したがって、均等係数 U_c が

$$U_c > 10 \dots\dots\dots(6)$$

によって、粒度が広く分布していることを知り、式 (5) によってギャップ粒度でないことを確かめれば、粒度が良いと判断することができる。

なお、均等係数 10 の値は、砂の液状化現象の限界値としても意味のあることが岸田¹⁹⁾によって指摘されている。

なお、粒度の良否と関連して、Fuller・Thompson²⁰⁾の理想的粒度を表わす次式が知られている。

$$p = \left(\frac{D_p}{D_{max}} \right)^n \dots\dots\dots(7)$$

式中、 p は D_p のフルイ目を通過する粒子の全体に対する重量比、 D_{max} は最大粒径、 n は粒度分布曲線の形を決める係数である。

Fuller・Thompson の粒度式は元来コンクリート骨材に対し、 $n=0.5$ として提案されたものであるが、その後、土質材料に対しても応用されるようになり、たとえば Lee²¹⁾ は、 n が 0.25~0.5 の範囲をフィルダム用の粒径が相当大きい礫を選ぶ標準として提案している。これに対し、赤井²²⁾は最大粒径約 1 mm の砂については、 n が 0.7 のときに、密度が最大を示すと述べている。これらの指数 n の代りに均等係数 U_c と曲率係数 U_c' によってこれらの理想粒度を表わせば、Fuller・Thompson の $n=0.5$ は $U_c=36, U_c'=2.25$, Lee の $n=0.25\sim0.5$ は $U_c=1296\sim36, U_c'=5.06\sim2.25$, 赤井の $n=0.7$ は $U_c=13, U_c'=1.78$ となる。

7. む す び

以上、粗粒土の統一土質分類に関し、従来、わが国の土質資料によって検討されていなかった諸点について、著者らの実験ならびに収集資料によって考察したが、その結果をまとめれば次のようになる。

(1) アメリカの統一土質分類にしたがって、わが国の粗粒土資料を分類し、突固め最大乾燥密度、最適含水比、修正 CBR (r_{dmax} の 95%, 4 日水浸) との対応を整理したが、その結果は、アメリカの資料、その他によって示されていた数値と必ずしもよく一致はしない。

(2) 統一土質分類と土の工学的性質との対応は幅が大きく、かつ分類相互間のオーバーラップも大きい。したがって土質分類のみによって、土の工学的性質を推定し、設計に用いることにはかなりの無理があり、設計の目的にかなった試験をその都度行なう必要性が痛感される。

(3) 礫と砂の粒径区分として、4.76 mm と 2.00 mm のいずれがよいかについて、分類結果と工学的性質との対応の良否を検討した結果、修正 CBR との対応では 4.76 mm 区分の方がすぐれているが、突固め試験結果ではいずれともいい難かった。

(4) 礫分と砂分の 4.76 mm 区分を採用すれば、アメリカの統一土質分類と一致するが、従来わが国における習慣、世界的動向を考慮に入れて 2.00 mm 区分による統一土質分類を考えれば、今回の道路土工材料を主とする調査資料の範囲では 1 割程度の分類名変動があった。2.00 mm~4.76 mm 付近の粒径材料は自然界における存在ひん度が他粒径に比し低いので、自然界の全資料中における分類名変動率はずっと少ないと考えてよさる。

わが国の統一土質分類の基準化においては、アメリカにおける学会間の話し合い、ヨーロッパならびにわが国における 2.00 mm 区分に対する根強い支持を考え、国の内外の混乱を避けるために 2.00 mm 区分に落ち着かざるを得ないであろう。

(5) 細粒分含有率による土質区分としては、5%, 15%, 50% の区分点が適当であろうと考えられた。

細粒分 5% 含有の状態は、きれいな礫、きれいな砂とみなしうる境界状態で、この程度までならば透水係数が 10^{-4} cm/sec 以上の透水性のよい場合が多いと考えられる。

細粒分 15% 含有の状態は、粗粒土に対し、細粒分の影響が目立ち始める境界である。突固め最大乾燥密度、修正 CBR は、細粒分 15% までは、粗粒分の骨組に支配される値を示すが、細粒分が 15% 以上となる

と、密度や修正 CBR は低下してゆく。透水性については、細粒分が 15% を越えると、透水係数が 10^{-5} cm/sec 以下となり、ほとんどが、半透水性か不透水性となる。

細粒分が 50% を越えると突固め最大乾燥密度、修正 CBR との対応からみて、細粒分の影響が圧倒的な細粒土とみなしうる。透水性についても、細粒分そのものの影響が圧倒的で、ほとんどが 10^{-5} cm/sec 以下の不透水性材料となる。

(6) 粗粒土の粒度の良否については次のような判断基準が考えられた。すなわち、

$U_c < 10$ の場合には、粒度範囲がせまく、工学的性質が劣る。

$U_c' < 1$ または $U_c' > \sqrt{U_c}$ であれば、ギャップ粒度で工学的性質が劣る。

したがって、

$U_c > 10$
 $1 < U_c' < \sqrt{U_c}$ } の 2 条件を満たせば、粒度がよい。

以上の調査研究において、貴重な資料を見せて下さった日本道路公団試験所ならびにお世話いただいた同所の松井正弘氏に感謝申し上げます。また意見の交換を通して、著者らにこの調査研究を推進させる力を与えられた土質工学会士の判別分類法基準化委員会の方々（委員の氏名は文献 10) 参照）、作業推進にあたって助言を下さった東京大学三木五三郎助教授、川崎地質（株）山田剛二博士に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Casagrande, A. : Classification and Identification of Soils, Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 901~991, 1948.
- 2) Wagner, A.A. : The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation, Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, pp. 125~134, 1957.
- 3) American Society for Testing and Materials : Standard Method for Classification of Soils for Engineering Purposes, ASTM Designation : D 2487-69, 1970 Book of ASTM Standards, Part 11, pp. 777~782, 1970.
- 4) 山田剛二・植下 協 : 土の分類法の現状と問題点, 第 3 回土質工学研究発表会講演集, pp. 5~10, 1968.
- 5) 土質工学会, 土の判別分類法委員会 : 日本統一土質分類の試案・その他, 土の判別分類に関するシンポジウム論文集, pp. 1~4, 1970.
- 6) Committee on Soil Properties of the Soil Mechanics and Foundations Division : Standardization of Particle-Size Ranges, Proc. ASCE, Vol. 95, No. SM 5, pp. 1247~1252, 1969.
- 7) Archer, A.A. : Standardization of the Size Classification of Naturally Occurring Particles, Géotechnique, Vol. 20, No. 1, pp. 103~107, 1970.
- 8) 三木五三郎 : ドイツの土の工学的分類法の規格, 土と基礎, Vol. 16, No. 11, pp. 38~48, 1968.
- 9) Dumbleton, M.J. : The Classification and Description of Soils for Engineering Purposes : A Suggested Revision of the British System, R.R.L. Report LR

- 182, Road Research Laboratory, Ministry of Transport, 1968.
- 10) 土質工学会, 土の判別分類法基準化委員会: 「土質分類」基準化作業の中間報告, 土と基礎, Vol. 20, No. 2, pp. 21~24, 1971.
- 11) 植下 協・野々垣一正: わが国, 東海地方の細粒土ならびに砂質土の統一土質分類に関する考察, 土木学会論文報告集, 第 184 号, pp. 69~77, Dec. 1970.
- 12) 土質工学会編: 土質試験法 (第 1 回改訂版), pp. 670~675, 1969 年 10 月.
- 13) 日本道路協会: 道路土工指針, p. 55, 1970.
- 14) Pettijohn, F.J.: Sedimentary Rocks, 2nd Edition, Harper and Brothers, New York, 1954.
- 15) Yoder, E.J.: Principles of Pavement Design, John Wiley and Sons, Inc., pp. 284~287, 1959.
- 16) 村尾重信: 細粒分含有率と透水係数との関係, 土質工学会, 土の判別分類法基準化委員会資料, No. 45~68, 1971.
- 17) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, 技報堂, 1965. (p. 651, 図-20.55 を参照)
- 18) Barber, E.S. and Sawyer, C.L.: Highway Subdrainage, Proc. of Highway Research Board, Vol. 31, pp. 643~666, 1952.
- 19) Kishida, H.: Characteristics of Liquefied Sands during Mino-Owari, Tohankai and Fukui Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 9, No. 1, March 1969, pp. 75~92.
- 20) Fuller, W.B. and Thompson, S.E.: The Laws of Proportioning Concrete, Trans. ASCE, Vol. 59, pp. 67~143, 1907.
- 21) Lee, C.H.: Selection of Materials for Rolled-Fill Earth Dams, Trans. ASCE, Vol. 103, pp. 1~18, 1938.
- 22) 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.
- 6 月), 第 2 号 (昭和 32 年 7 月~9 月), 第 3 号 (昭和 32 年 10 月~12 月).
- (2) 防災研究協会: 日本道路公団阪奈道路路床土調査, 0~3 工区 (昭和 33 年 4 月), 4, 5, 7 工区 (昭和 33 年 5 月).
- (3) 建設省近畿地方建設局企画室材料試験係: 材料試験報告, 第 10 卷 (昭和 35 年度).
- (4) 建設省中国地方建設局材料試験所: 材料試験所報告, 第 8 卷, 第 3 号 (昭和 34 年 10 月~12 月), 第 4 号 (昭和 35 年 1 月~3 月), 第 11 卷, 第 1 号 (昭和 37 年 4 月~6 月), 第 2 号 (昭和 37 年 7 月~9 月), 第 13 卷, 第 1 号 (昭和 39 年 4 月~6 月), 第 2 号 (昭和 39 年 7 月~9 月), 第 3 号 (昭和 39 年 10 月~12 月).
- (5) 日本道路公団高速道路大阪建設局大津工事事務所: 名神高速道路逢坂山 大津 工区, 工事報告書 (昭和 38 年 7 月).
- (6) 建設省中部地方建設局企画室材料試験係: 材料試験報告書, 第 14 号 (昭和 38 年度).
- (7) 日本道路公団高速道路試験所: 試験所報告, 名神高速道路篇 (昭和 40 年 3 月).
- (8) 建設省近畿地方建設局大阪技術事務所大阪材料試験出張所: 材料試験報告, 第 15 卷 (昭和 40 年度).
- (9) 建設省中国地方建設局広島技術事務所: 材料試験報告, 第 16 卷 (昭和 42 年度).
- (10) 建設省中部地方建設局名古屋技術事務所: 材料試験報告書, 第 18 号 (昭和 42 年度).
- (11) 日本道路公団試験所: 試験所報告, 昭和 43 年度.
- (12) 日本道路公団: 東名高速道路材料試験一覧表 (土工), 豊川道路維持事務所管内, 昭和 45 年.

(1971.4.6・受付)

付 記

本論文のデータとして使用した試験結果の出典を以下に明記しておく。

(1) 建設省中国四国地方建設局材料試験所: 中国四国材料試験所報告, 第 6 卷, 第 1 号 (昭和 32 年 4 月~