

粒度調整による安定処理について

樋 渡 正 美*・上 田 満**

On the Granular Soil Stabilization

Masami HIWATASHI and Mitsuru UEDA

Abstract

Though there are various sorts of soil stabilization, it is generally adopted as a practical procedure for a fine graded and high plastic soil to improve its grading by means of adding some select materials to the soil. In this case, many suggestions of the most suitable grading are made due to the experiences in the past.

Writers have especially marked Talbot's formula $P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100$ being said to give the maximum density, and performed the compaction, uniaxial compression, Marshal and CBR test for the soil samples whose exponential "n" varied according to mix sand and dust. Those results are reported here.

1. 緒 言

土を安定処理する方法には物理的、化学的、熱的および電気的手段を用いるものの4種がある。これらのうち粒度調整は物理的安定処理の有力な手段として古くから採用されているが、その簡便さと経済性が広く実用に供される主な理由である。粒度調整の目的は通常不足する材料を補給して理想的な粒度とすることにより、土の性質、すなわち安定性、圧縮性および透

水性などを改善することであるが、ときには他の安定処理の効果を高めるための補助手段として利用されることもある。例えば Table 1 に示す通りセメントで経済的に処理しうる土の性質には限度があるから、現場の土がこの範囲を超えている場合は表示の数値を満足するよう粒度調整を行なった後、なるべく少量のセメントを混合して優れた安定効果を挙げる事が実行されている。

Table 1 The suitable nature of soil for cement stabilization

4.8mm passing	0.42mm passing	0.074mm passing	Liquid limit	Plastic index
>50%	>15%	<50%	<40%	<18%

さて粒度調整による安定処理で最も重要なのは理想的な粒度がなんであるかということである。この問題は長い間研究されてきたが未だ十分明らかになっていない。一般に土の性質はきわめて複雑であるから、例えば安定性の改良に処理の重点を置く場合と透水性を重視する場合とでは当然理想粒度も異なるであろうし、また土粒子の形状や表面組織によっても異なることが知られている。しかし土構造物が使用目的に適合するための粒度範囲については過去の経験に基づく幾多の提案がなされており、それらのうちの一つを目標

として粒度調整を行なっているのが現状である。筆者等は密度が最大になる粒度といわれる Talbot の式に

$$P = (d/D)^n \times 100 \quad \text{ただし } D: \text{最大粒径 (mm),}$$

$$P: d \text{ mm ぶるい通過量 (\%)}$$

着目し、三種の試料土に砂および石粉を混合して n の値を変え、締固め、一軸圧縮および CBR 試験を行なった。さらに二種の試料土については、添加剤による安定処理の補助手段として行なわれる粒度調整の効果を検討するため、砂を種々の割合で混合した供試体を作り一定の養生を行なった後一軸圧縮およびマーシャル試験を実施したので、それらの結果をここに報告

* 土木工学教室

** 山口大学工業短期大学部土木工学科

する。

2. 一 軸 圧 縮 試 験

この実験に用いた試料土 (No.1) は工学部構内か

ら採取した蛇紋岩風化土であって、その粒度がFig. 1にまた指數的性質が Table 2 に示されている。これらの図および表から試料土は粘土分を43%も含む高塑性の細粒土であることがわかるので、通常粒度調整の必要があり山口県秋穂町産の川砂を混合することにし

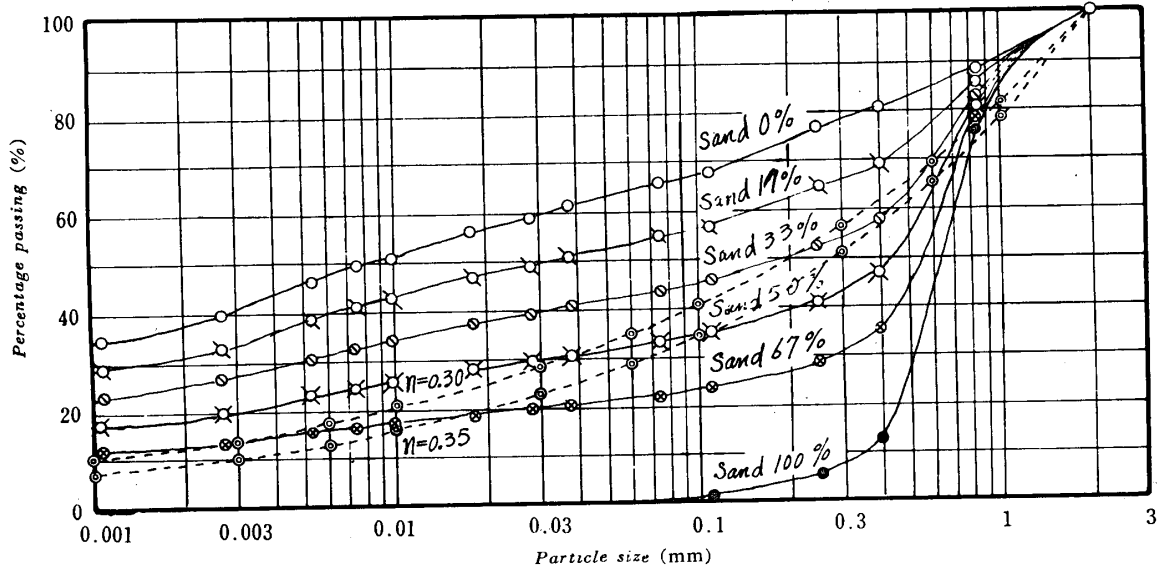


Fig.1 Particle size accumulation curves

Table 2 Characteristics of soil and sand

Soil	Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index	Flow index	Toughness index	Sand	Specific gravity
	2.666	61.4	24.3	37.1	22.0	1.69		2.630

たが、その粒度と性質も同じ図表に示してある。すでに述べた通り粒度調整の目的は土の性質を改善することであるから、原土と処理土の試験結果を比較することによりその効果が判定される。ところで土構造物ではまず第一にその安定性を問題にするから、これと関係の深い密度と強度を調査することにした。すなわち試料土に砂を一定の割合で混合し、含水比を変えて直径5cm高さ10cmのモールドに詰め、突固め試験用のランマーで表と裏をそれぞれ25回づつ突固めて供試体を作り、乾燥密度と一軸圧縮強度を測定したが、その結果は Fig. 2 に示されている。

この図には供試体3個に対する平均値が画かれており、つぎのことがいえると思う。a) 砂の混合量が増すにつれて次

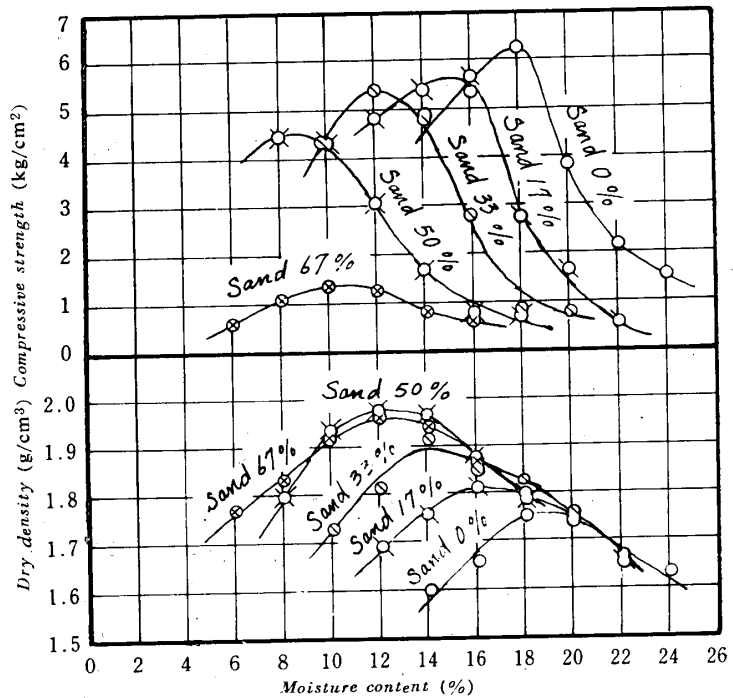


Fig.2 Results of compaction and uniaxial compression test

に最適含水比は減少し、密度は増大する。しかしそれには限度があってこの場合土50%砂50%のとき密度は最大となるが、これを Fig. 1 でみると点線で示した Talbot の式の $n=0.3$ にほぼ相当する。b) 圧縮強度が最大となる含水比は最適含水比よりも 1~2 % 小さい。これは普通の土に対し周知の事実であって、粒度調整の場合もそのまま当てはまることがわかる。c) 圧縮強度の最大値は密度の増大にもかかわらず砂の混合量が増すにつれて減少する。この事実は一見奇異に感ぜられるが密度の最大は必ずしも強度の最大を意味しないという重要な問題を示唆しており、Coulomb の式からその理由を推定することができる。

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

ここに s : 土のせん断強度, c : 粘着力, σ : 垂直圧力, ϕ : 内部摩擦角。

すなわち砂を混合すると内部摩擦角 ϕ は増加するが粘着力 c は減少するため、それらの和として表わされるせん断強度 s が減少するものと考えられる。

さて Coulomb の式による上述の推定が正しいかどうかを検討するためつぎのような実験を行なった。すなわち粒度を調整した試料土の粘着力を増してやれば強度は当然増加するはずであるから、粉末リグニン、

消石灰およびセメントなどを添加して最適含水比に調節し同じ方法で供試体を作った。これを温度 21°C 湿度 90% 以上の恒温恒湿槽で 6 日間養生した後 24 時間水浸してから、毎分 1mm のひずみ速度で圧縮し破壊させた。その結果は Fig. 3 に示されており、つぎのようなことがいえると思う。a) 水浸後の乾燥密度は砂の混合量が 50% 以上になってもなお増加するものがある。前述の結果と必ずしも一致しない。これは最大密度となる土の粒度が粒子の形状や組織だけでなく、添加剤の量や性質などによっても影響されることを示している。b) 圧縮強度は添加剤の結合力が強い程大きい。これは上記の Coulomb の式による説明が妥当なものであることを示唆している。一般に消石灰よりセメントの方が結合力は大きく、添加量を増す程大きくなる。またリグニンは有機物であるから消石灰やセメントの水和作用を妨害して、結合力を低下させる。c) 砂の混合量が一定値を超過すると、密度の増大にもかかわらず圧縮強度は減少する。しかも添加剤の結合力が弱い程圧縮強度の最大点、すなわち最適砂量は少ない。これは密度が大きくなる限り粘着力を強化してゆけば、どこまでも強度は増加するであろうという前述の推定から当然な帰結であるが、安定処理の効果を上げる補助手段としての粒度調整に有力な示唆を与えている。例えば消石灰による安定処理の場合最も効率のよい砂の混合率は、添加量 5% で約 40% また 10% のとき約 50% であることがわかる。

3. マーシャル試験

この実験は乳剤処理土すなわちソイルビチューメンに砂を混合してゆくとき、その性質がどのように変わるかを明らかにするため行なわれた。試料土は前述の蛇紋岩風化土 (No. 1) と美祿市から採取した石灰岩風化土 (No. 2) の二種を使用したが、後者の粒度や性質については次節の Fig. 8 および Table 4 で述べられる。また乳剤は日産化学製の土壌混合用アニオン乳剤 (MA-3) と同じくカチオン乳剤 (MK-3) を用いることにしたが、それらを試験した結果は Table 3 の通りであった。なお試料土は二種とも高塑性の細粒土であるから乳剤処理の効率を高めるため、過去の実績に基づいて MA-3 には日本石灰製の肥料用消石灰をまた MK-3 には五酸化りんをそれぞれ添加している。まず試料土に所定量の砂と添加剤を加えて石川式攪拌濯潰機で混合した後、予備実験で求められた最適含水比となるよう予め水で稀釈された乳剤を投入して、さらに約 5 分間かきまぜ均質な混合物を作っ

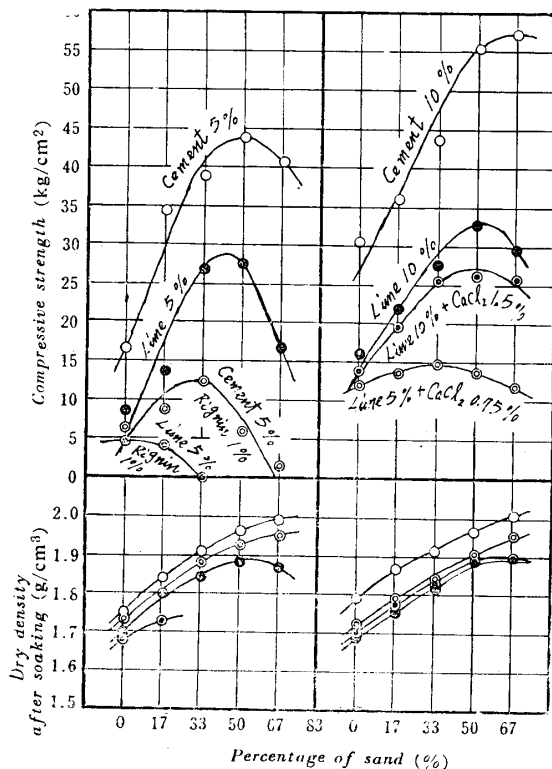


Fig. 3 Relations between compressive strength and percentage of sand

Table 3 Characteristics of bituminous emulsions

Item	Bituminous emulsion			Bituminous residual				
	Specific gravity (25°C)	Specific viscosity (Engler)	Bituminous residual (%)	Specific gravity (25°C)	Penetration (25°C)	Softening point (°C)	Flash point (°C)	Ductility (15°C)
MA-3	1.017	4.29	65.5	1.028	124	37.5	285	>100
MK-3	1.010	4.54	56.6	1.021	129	38.5	270	>100

た。これをマーシャル供試体用のモールドに詰め所定の方法で表と裏をそれぞれ50回づつ突固めてから脱型した。これらの供試体は7日前後室内に放置して乾燥させ、蒸発率が40%および50%となったとき24時間水浸してからマーシャル試験を行なった。したがって供試体は6個を1バッチとして製作し3個1組で試験している。

Fig.4 および5はそれぞれ試料土 No.1 およびNo.2 に対する乾燥収縮と吸水膨張の測定結果を示したものであって、図中の記号は○印蒸発率40%添加剤なし、◎印蒸発率40%添加剤あり、●印蒸発率50%添加剤なし、●印蒸発率50%添加剤ありの場合を表わしている。なおこの実験では乳剤の混合量を土の乾燥重量に対して一率に10%とし、添加剤は消石灰が3%五酸化りんが1%とした。これらの図からつぎのようなこ

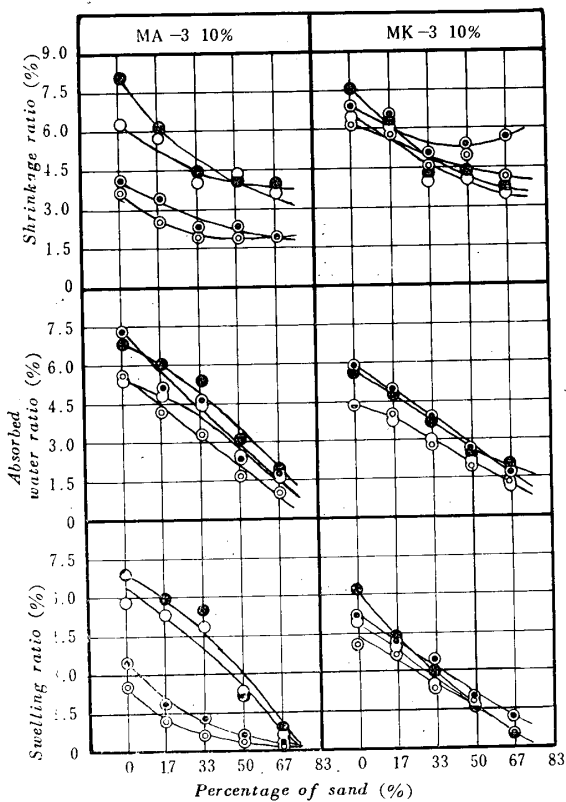


Fig.4 Characteristics of soil bitumen mixed with sand (soil No.1)

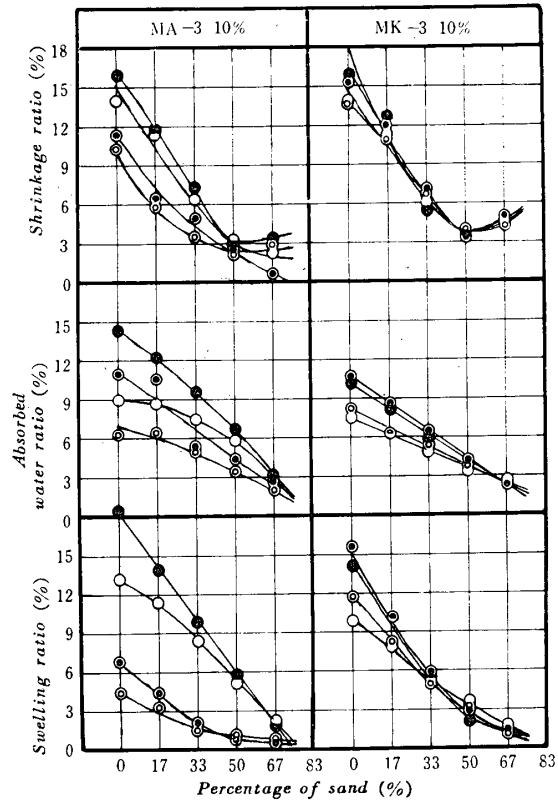


Fig.5 Characteristics of soil bitumen mixed with sand (soil No.2)

とがいえると思う。a) 吸水率と膨張率は砂の混合率が増すにつれて著しく減少する。これは密度の増大に基づく当然の結果と思われるが、それらの性質は土構造物の耐久性を左右するといわれているから、きわめて重要な意義を持っていることがわかる。また収縮率は砂量50%でほぼその減少が停止する傾向を示すがその理由は明らかでない。b) 蒸発率40%と50%を比較すると当然のことながら収縮率、吸水率および膨張率ともに後者の方が大きい。しかし砂の混合量を増すとその差は縮小するので、過乾燥による失敗を防ぐことができる。c) 添加剤の効果はこの場合消石灰で著しく五酸化りんは余り有効でない。d) 吸水率と膨張率はアニオン乳剤よりカチオン乳剤の方がかなり小さい。これは負の電荷を持った土粒子が正の電荷を持つ

た歴青粒子と電気化学的に結合して、水の浸潤を防止するためと考えられる。なお収縮率についてはほとんど差異は認められない。

つぎにマーシャル試験の結果が Fig.6 および Fig.7 に示されている。記号は前述した通りであって、これらの図からつぎのようなことがいえるであろう。a) 一軸圧縮試験の場合と同じく密度の増加にもかかわらず最大安定値を与える砂の混合率が存在する。その理由は既に *Coulomb* の式で説明したが、土の種類や養生条件および添加剤の有無などによって最適砂量は変化することがわかる。b) 蒸発率40%と50%で安定値を比較すると、砂の混合率が少ないとき前者が大きく多いときは後者が大きい。従って最適砂量は蒸発率を増す程大きくなる。c) 添加剤の効果は安定値に対しても消石灰が顕著であり、五酸化りんはほとんど無効である。また試料土 No.2 が No.1 より砂量の変化に対する安定値の変化が著しいのは、密度の急激な増大に基づくものと思われる。d) 添加剤を用いないときアニオン乳剤よりカチオン乳剤の方が安定値は大きい。この理由はすでに述べたがカチオン乳剤の場合最大安定値は蒸発率が40%のものより50%の方がかなり大きい。

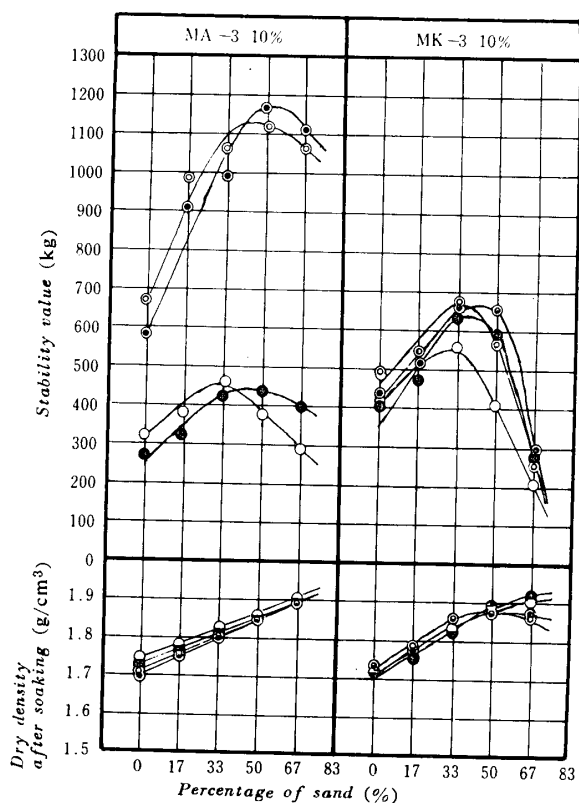


Fig.6 Stability values of soil bitumen mixed with sand (soil No.1)

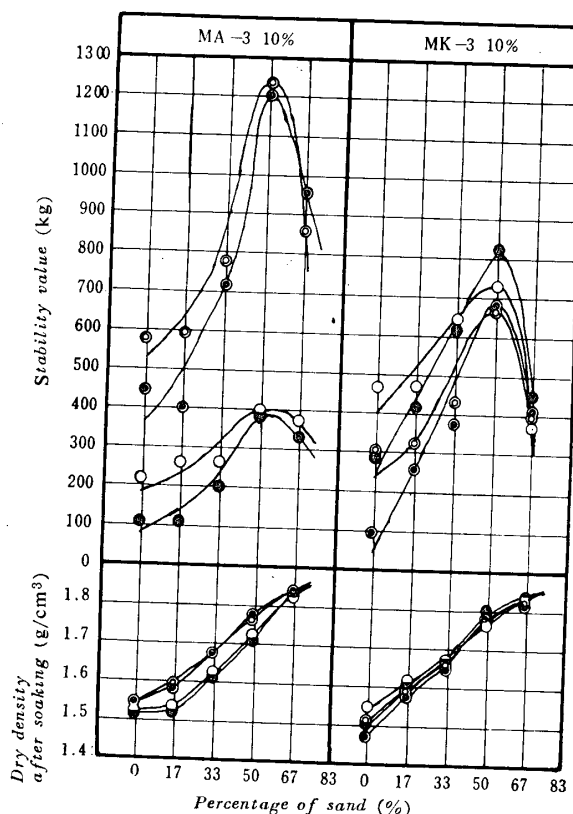


Fig.7 Stability values of soil bitumen mixed with sand (soil No.2)

4. CBR 試験

この実験は *Talbot* の式を満足するよう粒度調整した場合と、単純に砂を加えた場合との効果の差異を明らかにするため行なわれたが、同時に消石灰5%の添加による安定処理との比較もなされている。試料土は美祿市から採取した石灰岩風化土 (No.2) と、宇部市から採取した花こう岩風化土 (No.3) の二種を使用しており、その粒度が Fig. 8 にまた性質が Table 4 に示されている。これらの図および表から試料土は粘土分を65%以上も含む高塑性の細粒土であることがわかるので、当然粒度調整の必要がある。粒調材として山口県秋穂町産の川砂と美祿市産の石灰岩粉末を使用することにしたが、それらの比重は Table 4 に掲げている。なお比較のため添加された消石灰は前述した日本石灰製の肥料用であって、その比重は 2.624 であった。

さて一般に数種の材料を混合して所定の粒度をうる方法は種々提案されているが³⁾、ここでは試算により Table 5 に示す数量を算出して試料土に加え、0.074mm 以上の粒度がほぼ *Talbot* の式を満足するよう調整した。

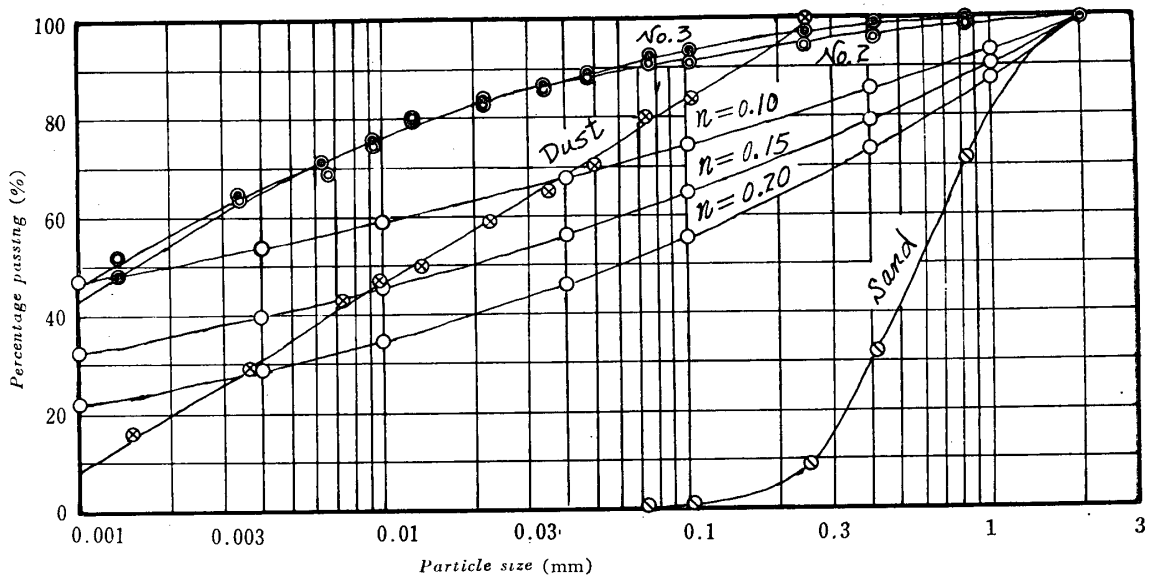


Fig. 8 Particle size accumulation curves

Table 4 Characteristics of soil, dust and sand

Soil	Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index	Flow index	Toughness index	Item	Specific gravity
No. 2	2.725	70.6	34.2	36.4	16.5	2.21	dust	2.646
No. 3	2.842	89.1	45.6	43.5	33.2	1.31	sand	2.631

Table 5 Adding weight in gram to dry soil 1000 grams

Soil	No. 2						No. 3					
	2.0~0.84	0.84~0.42	0.42~0.25	0.25~0.105	0.105~0.074	Total	2.0~0.84	0.84~0.42	0.42~0.25	0.25~0.105	0.105~0.074	Total
n=0.10	87	54	37	51	26	255	105	71	44	44	25	289
n=0.15	163	106	69	99	42	479	183	124	78	93	42	520
n=0.20	261	168	108	150	59	746	283	187	116	146	61	793

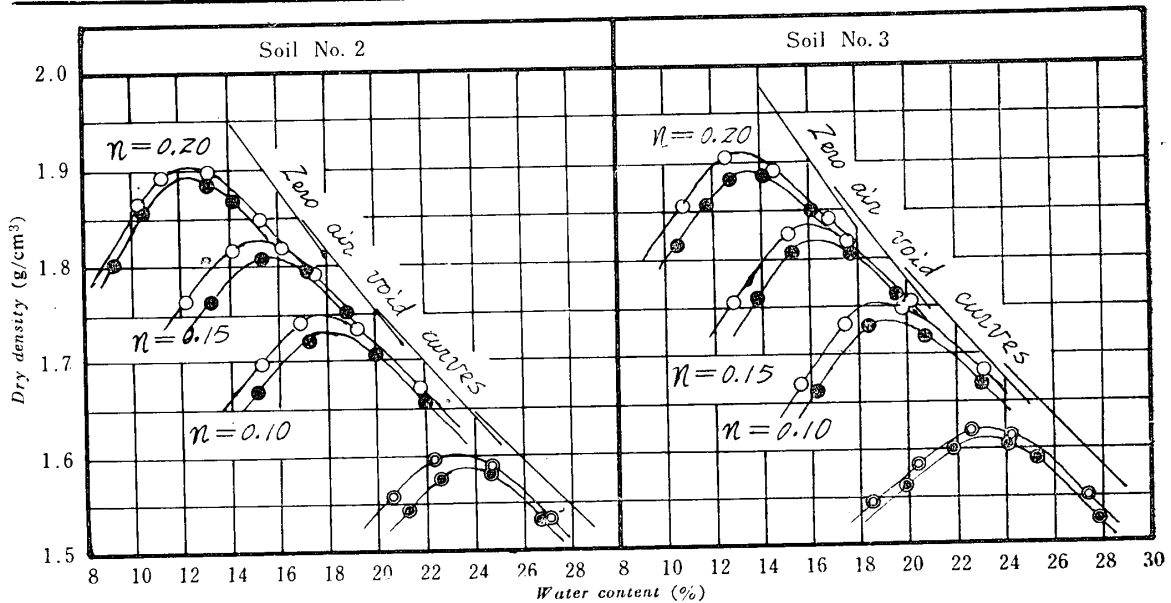


Fig. 9 Results of compaction test

これらの材料に種々の割合で水を加え石川式攪拌搗潰機に投入して均質となるまで混合した後、*CBR* モールドに詰め5層55回の突固め試験を行なった結果が Fig.9 に示されている。図中の記号は○印が正確に粒度調整した場合であり、●印はTable 5 の合計欄と同量の砂を単純に加えた場合を表わしている。また◎印は試料土だけのとき◎印は試料土に消石灰を5%添加したときのものである。図からつぎのようなことがいえるであろう。a) 砂および石粉の混合量を増す程最適含水比は減少し最大乾燥密度は増大する。このことは一軸圧縮試験で既に明らかにされているおり、恐らく $n=0.30$ ぐらいまで継続するものと思われる。b) 粒度を正確に調整することによる密度の増加は僅少である。従って粒調材の粒度を問題にするよりもその混合量を重要視すべきであろう。c) 試料土 No. 2 と

No.3 を比較すると n の値が等しいとき最大密度はほぼ相等しい。これは粒度が等しければ密度も等しくなることを意味するが、恐らく偶然の一致であろう。

つぎに突固め試験でえられた最適含水比となるよう試料土を調整して供試体を作り、4日間水浸後 *CBR* 試験を行なった結果が Table 6 に示されている。これからつぎのようなことがいえると思う。a) 乾燥密度と *CBR* は n の値が大きくなるに従ってともに増大する。この現象は一軸圧縮試験の場合と異なっているが、*CBR* はいわゆる押し貫きせん断強度を表わすので、密度の影響が顕著にきいてくるのであろう。b) 粒度を正確に調整しても強度の増加は僅少である。これは密度の場合と全く同じである。c) 吸水率と膨張率は粒度調整により減少するが、 n の値を増してもまた正確に調整しても僅かしか減少せず、突固め回数を

Table 6 Results of modified *CBR* test

Soil		No. 2					No. 3				
Item	Number of compaction	Dry density (g/cm ³)	Absorbed water ratio(%)	Swelling ratio (%)	<i>CBR</i> (%)	Modified <i>CBR</i> (%)	Dry density (g/cm ³)	Absorbed water ratio(%)	Swelling ratio (%)	<i>CBR</i> (%)	Modified <i>CBR</i> (%)
Soil only	10	1.30	16.1	2.7	1.6	4.7	1.34	23.6	9.3	1.8	4.6
	25	1.47	9.4	1.5	3.9		1.47	18.3	8.1	3.7	
	55	1.61	5.2	1.3	6.0		1.63	12.9	6.5	5.7	
Added 5% lime	10	1.30	13.4	0.7	3.1	14.5	1.29	19.7	1.5	3.2	9.1
	25	1.47	3.9	0.3	11.3		1.46	11.7	1.3	6.2	
	55	1.58	0.6	0.2	22.2		1.61	5.8	0.6	12.5	
Adjusted exactly $n=0.10$	10	1.46	11.0	2.2	7.7	16.8	1.51	14.7	7.8	2.5	10.7
	25	1.64	5.8	1.5	14.9		1.68	8.0	5.7	11.3	
	55	1.75	2.1	0.8	22.2		1.74	3.9	5.0	17.8	
Added simply $n=0.10$	10	1.44	9.8	1.4	7.4	15.8	1.44	15.4	7.4	2.5	9.2
	25	1.61	5.3	0.8	13.2		1.60	10.8	6.7	7.8	
	55	1.74	1.2	0.5	22.7		1.73	6.5	5.9	11.8	
Adjusted exactly $n=0.15$	10	1.50	10.5	1.8	5.9	18.4	1.54	11.8	6.5	3.3	13.5
	25	1.72	4.9	1.4	16.8		1.72	6.4	6.2	11.7	
	55	1.82	1.8	0.7	27.1		1.83	3.5	5.1	21.0	
Added simply $n=0.15$	10	1.48	10.7	1.7	5.8	16.6	1.53	12.4	7.5	5.5	12.0
	25	1.66	5.6	0.9	12.4		1.72	7.9	5.6	11.3	
	55	1.80	2.2	0.5	21.2		1.82	5.1	4.7	18.7	
Adjusted exactly $n=0.20$	10	1.54	9.9	1.4	9.6	26.5	1.60	10.3	6.4	7.3	17.5
	25	1.74	4.6	1.3	17.5		1.80	6.2	5.6	14.8	
	55	1.88	1.9	0.6	35.9		1.88	3.4	5.1	29.2	
Added simply $n=0.20$	10	1.54	10.2	1.3	6.4	19.4	1.58	10.9	6.7	6.9	15.8
	25	1.74	5.1	0.9	14.2		1.78	6.9	6.3	14.6	
	55	1.87	2.0	0.6	29.2		1.88	4.3	5.3	20.4	

多くする方が効果的である。その理由は密度増加の大小に起因する。d) 試料土 No. 2 と No. 3 を比較すると粒度も密度もほとんど同じであるのに、処理土の CBR は前者がかなり大きい。これは Table 4 からわかるようにコンシステンシーの差異に基づくものと思われる。e) 消石灰を 5% 混合したときの強度はこの場合 $n=0.10$ すなわち砂を約 25% 加えたものにほぼ匹敵する。

5. 結 言

上に述べた一連の実験からえられた結論はつぎのようなことである。a) 土に砂を加えてゆくと密度は次第に増大するが、一軸圧縮強度は必ずしも増加しない。この現象は *Coulomb* の式で明確に説明することができる。ただし CBR のような密度の影響が顕著である試験法では密度の増加に伴って強度も増加する。b) 土に砂を加えると密度が増大するので、乾燥収縮や吸水膨張などの体積変化が減少する。これは土構造物の耐久性を左右するきわめて重要な効果である。

c) 密度が最大になるという *Talbot* の式の信頼性は証明されたが、厳密に粒度調整を行なってもその効果は僅かである。d) 土に安定剤を添加する場合の補助手段として利用される粒度調整においては、その性質と添加量および粘着力の強弱などに応じて効率のよい最適砂量が存在する。従ってこれまでのように提案された粒度に土を調整してから安定剤を加えるのではなく、安定剤の量に応じた効率的な粒度調整を行なうことが望ましい。終りにこれらの実験は佐藤征二、衛藤尚史両君の協力をえて行なったことを付記し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 三木五三郎・山内豊聡：土質安定の理論と実際，オーム社，(1959) p.90
- 2) 樋渡正美・鈴鹿和央：山口大学工学部研究報告，17, No. 2 (1966)
- 3) 内田一郎：道路舗装の設計法，森北出版，(1966)p.81

(昭和45年9月14日受理)