

# 粘性土と粗粒土の混合材料の工学的特性について

## II 締固め土の密度と粒度特性の相関性に関する予備的実験

横瀬広司, 溝口昭二, 青柳省吾, 齊藤 実

### I ま え が き

近年、高速道路や新幹線のような大規模で高水準の施工管理が要求される工事が計画され、施工されるにともない、土の締固めの重要性が一層増加している。また、近くで適当な材料が大量に得られがなくなり、適正で均質なものを人工的に混合して用いた方が経済的な場合も生じ、使用例も増加の傾向を示している<sup>(1)~(5)</sup>。混合による利点は、粘性土の掘削、まき出し、転圧の作業過程で生じる強度低下を伴った trafficability, 圧密沈下による変形や盛土の安定性の減少などを軽減し、砂質土の地震、機械振動による粒子骨格の崩壊、再排列に伴う変形、流動などの欠点を補う効果が認められることである。適当な粒度組成土は、粗粒土による強度と高いせん断抵抗角の発生、粘性土による強い水膜形成からの大きな粘着力の発生が期待される。混合はこのような力学的性質、物理的性質の改良のほか、土に最大密度を与えて安定性、耐久性の向上を与える。高含水比の粘性土には、thixotropy と呼ばれる現象で知られる拘束水の作用が認められているが、ここでは、主に粒度の変化が締固め特性に及ぼす影響について考察した。また、Atterberg 限界値と粒度の関係については既に報告した<sup>(6)</sup>。

### II 最も密につめられる粒度組成

最大密度を得るための理想的粒度にはコンクリート骨材の合理的配合を決定するために示された FULLER の最大密度曲線が代表される連続粒度型<sup>(7)</sup>、Féret, FURNAS らの提案した不連続粒度型<sup>(8)</sup>がある。前者は実験的に導かれたもので、現在、コンクリート骨材について大体常識になっている考え方であり、わが国のほか欧米諸国で最も密につめられる粒度の基準として規定されているものである。後者は、ある大きさの粒子によって形成される間ゲキ部分につめられるのに適する粒子群は粗な骨材の骨組みを乱さないで、それをちょうど満たすような粒大と分量のものであり、このような、お互いのつまり方を妨害するような中間の粒径物が欠けたものが、順次、間ゲキ部を満してゆけば最大密度の集合体が得られると考えるものである。しかし、土は不規則な形状の粒子の集合体であり、水分の影響も無視できず、粒度のみで最大密度を規定することは困難で、一概にその優劣は決定できない。混合土の最良の粒度組成を考える場合にも密度を増大させる粒径分布が目標になる。

従来から連続粒度については多くの研究<sup>(9)~(11)</sup>が行なわれているが、不連続粒度については少くないようである。しかし、近年は天然骨材の枯渇から人工骨材、碎石が大きくなり進出するようになり、経済的な面からも不連続粒度が検討されつつある<sup>(12)</sup>。

本文では、土の人工的混合においては不連続のものも多いと考えられることから、混合の機構を明らかにする目的で、粒径差が大きく、それぞれの性質が明らかにされている一般的な材料を用いた予備的実験を行った。

### III 実験の材料と方法

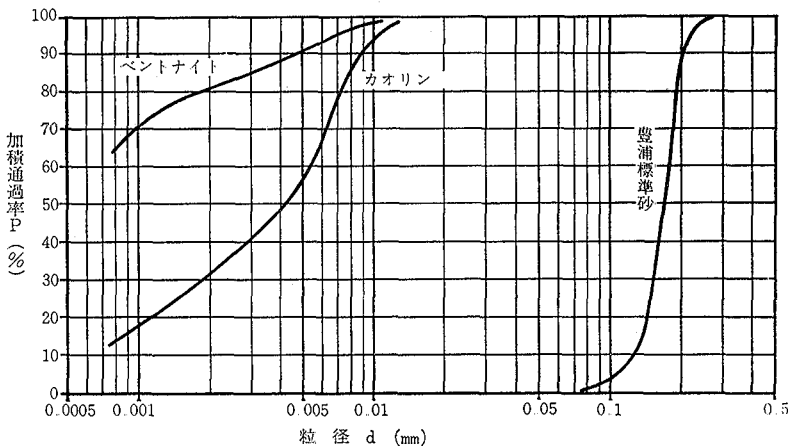
試料は実験目的から、粘土鉱物学的にカオリナイトとしての結晶度が比較的高いとされている関白カオリン（小宗化学薬品K・K製）モンモリロナイトを主成分とするベントナイト（島久薬品KK製）、標準砂（山口県豊浦産）のように、すでに、性質が明確になっている粘性土と粗粒土を採用した。

試料は粒度組成を変化させる目的でカオリン、ベントナイトを、それぞれ、標準砂と全重量に対して 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100%の各割合で混合調整したもの21試料を用意した。

第1表 土質試験結果

試料	比重	粒度分析			三角座標による分類	コンシステンシー				活性度	締固め試験			一面せん断試験		一軸圧縮試験 qu	
		砂分	シルト分	粘土分		LL	PL	PI	If		Wopt	$\gamma_{dmax}$	emin	C	tan $\phi$		
豊浦標準砂	2.64	99	1	0	砂	—	—	—	—	—	14.0	1,522	0.73	0.88	—	—	
カオリン	2.69	0	43	57	粘土	41.1	27.2	13.9	10.8	0.43	23.8	1,525	0.76	1.02	0.72	3.23	
ベントナイト	2.55	0	9	91	粘土	445.5	36.0	409.5	43.8	5.06	49.2	1,103	1.31	0.91	0.50	3.05	
カオリン十標準砂	1:9	2.65	90	4	6	砂	—	—	—	—	12.5	1,718	0.54	0.07	0.83	0.10	
	2:8	2.66	79	9	12	砂質ローム	16.2	15.0	1.2	3.1	0.19	10.3	1,878	0.41	0.26	0.82	0.44
	3:7	2.66	70	13	17	"	17.8	16.0	1.8	4.4	0.19	10.2	1,960	0.36	0.42	0.89	2.62
	4:6	2.66	59	18	23	"	18.7	17.1	1.6	6.4	0.13	10.8	1,958	0.36	0.73	0.98	3.19
	5:5	2.67	50	22	28	砂質粘土質ローム	19.7	17.3	2.4	4.7	0.15	13.0	1,905	0.40	0.80	0.75	3.48
	6:4	2.67	40	26	34	粘土	25.4	22.2	3.2	5.4	0.17	—	—	—	—	—	—
	7:3	2.68	30	30	40	"	32.5	23.4	9.1	5.7	0.41	—	—	—	—	—	—
	8:2	2.68	20	34	46	"	33.1	24.0	9.1	6.9	0.36	18.9	1,654	0.61	0.89	0.75	—
	9:1	2.68	10	39	51	"	34.8	26.7	8.1	15.3	0.28	21.0	1,583	0.70	0.96	0.75	—
ベントナイト十標準砂	1:9	2.63	90	1	9	砂	44.2	24.0	20.2	6.6	2.53	15.0	1,678	0.57	0.20	0.80	0.91
	2:8	2.62	79	2	19	砂質ローム	72.8	25.3	47.5	11.2	2.97	16.2	1,719	0.53	0.41	1.05	2.06
	3:7	2.61	70	3	27	砂質粘土ローム	115.3	25.6	89.7	13.2	3.74	16.8	1,720	0.52	0.53	0.73	2.20
	4:6	2.61	59	4	37	砂質粘土	114.7	27.8	116.9	18.3	3.65	19.5	1,627	0.60	0.60	0.53	2.37
	5:5	2.60	50	5	45	粘土	183.8	28.0	155.8	28.2	3.90	20.0	1,524	0.70	0.76	0.49	2.52
	6:4	2.59	40	6	54	"	246.3	28.3	218.0	25.9	4.54	26.4	1,431	0.81	0.81	0.53	—
	7:3	2.58	30	6	64	"	294.5	29.3	265.2	30.8	4.73	—	—	—	—	—	—
	8:2	2.57	20	7	73	"	345.3	29.8	315.5	35.6	4.87	—	—	—	—	—	—
	9:1	2.56	10	8	82	"	384.0	33.5	350.5	39.9	4.81	38.5	1,180	1.17	0.89	0.50	—

混合比は重量配合

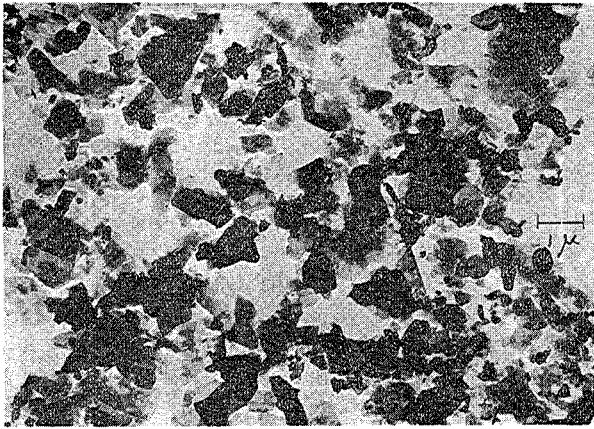


第1図 試料土の粒径加積曲線

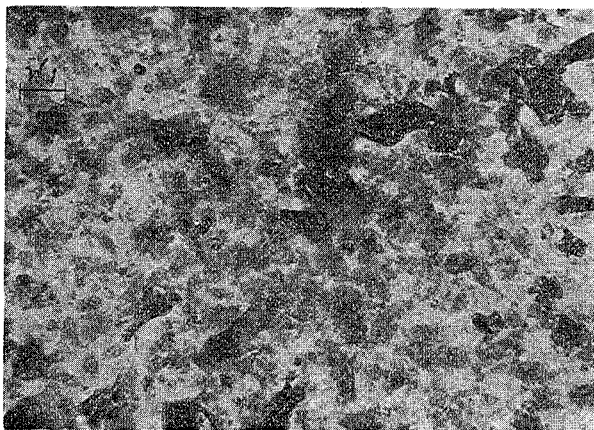
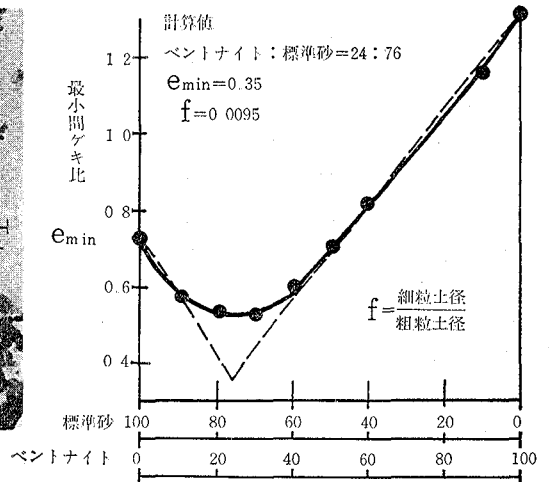
これらの試料の物理的性質ならびに締固め特性値を第1表、粒径加積曲線を第1図に、 $2\mu$ 以下の粘土粒子の電子顕微鏡写真を第2図、第3図に示した。

実験方法は JIS, A, 1210-1969 に従い、モールド(内径10cm)を用い、乾燥法で繰返し法によった(第1-1.1-a方法)。これによって求められた締固め曲線から最大乾燥密度  $\gamma_{dmax}$ 、最適含水比  $W_{opt}$  を読み取り、この条件で力学試験用の試料を作製した。この場合は非繰返し法に相当する試料の取扱い方であるが、再現性は良好で、実験の進行

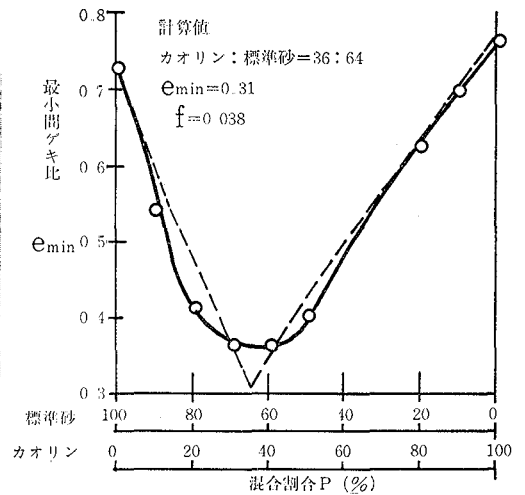
中に粒子の変状はなかったものと考えられる。



第2図 カオリンの電子顕微鏡写真



第3図 ベントナイトの電子顕微鏡写真



第4図 混合割合による最小間ゲキ比の変化

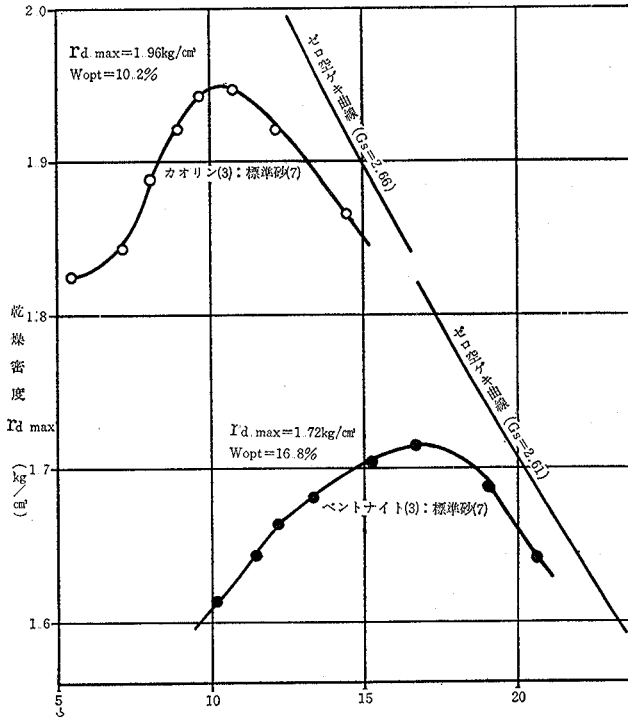
IV 実験の結果と考察

粒体のつまり方の程度は、(1) 構成物自体の性質。(2) 構成粒子の形状、寸法。(3) 異なった粒径群の混合割合(粒度分布)。(4) つめこみ容器の形状、(5) つめこみの方法、程度。(6) ぬれの程度。などが挙げられているが、より支配的な因子は(3)、(6)であると考えられ、本実験のように一定規格のもとでの測定においては、強くこの傾向が示されると推定される。粒度分布から混合物の密度を求める方法については多くの研究<sup>(13)(14)</sup>があるが、ここでは、筆者が提案した乾燥粒体の場合での最良の混合割合と混合物間ゲキ比の推定式<sup>(13)</sup>を用いて、実測値と比較した。

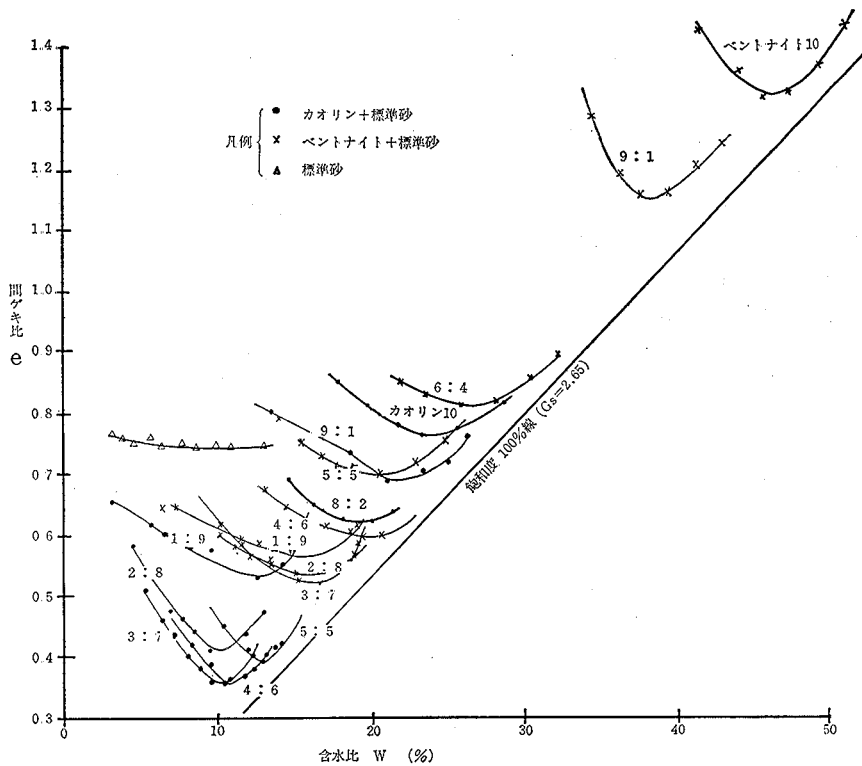
各試料の代表粒径は、粒径加積曲線が微細粒径部分の多いベントナイトで完全に画けていない関係で通過率80%径を採用した。合理的な決定ではないが、標準砂と粘土土の粒径差を比較するためのものであるから、その目的は達したと思われる。

推定式の鎖線と実測値のプロットを第4図に示した。含水状態での実測値であるが、混合割合は大体計算値に近似するようである。最密状態での間ゲキ比(最小間ゲキ比、 $e_{min}$ )の値は若干ばらつきがみられるが、乾燥粒体での推定式でも十分利用できるものと考えられる。締固め結果から求めた含水比~密度から締固め曲線のうち、ベントナイト、カオリンの混合比が30%の場合を第5図に示した。 $\gamma_{dmax}$   $W_{opt}$  値に両者の差が見られるが、曲線の形状にも差が現われているようである。しかし縦軸にとった乾燥密度は土粒子比重の差に影響される値であるから、比重の異な

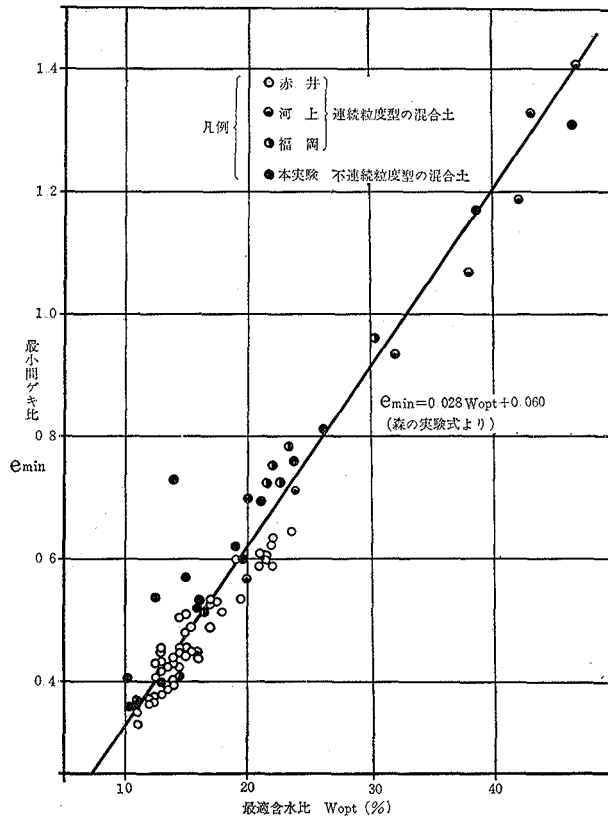
る試料を同一図面上で比較するため間ゲキ比(e)を用いて整理し、第6図に示した。



第5図 混合土の締固め曲線 (粘性土と粗粒土が重量比で3:7の場合)



第6図 間ゲキ比と含水比の関係で示した締固め曲線



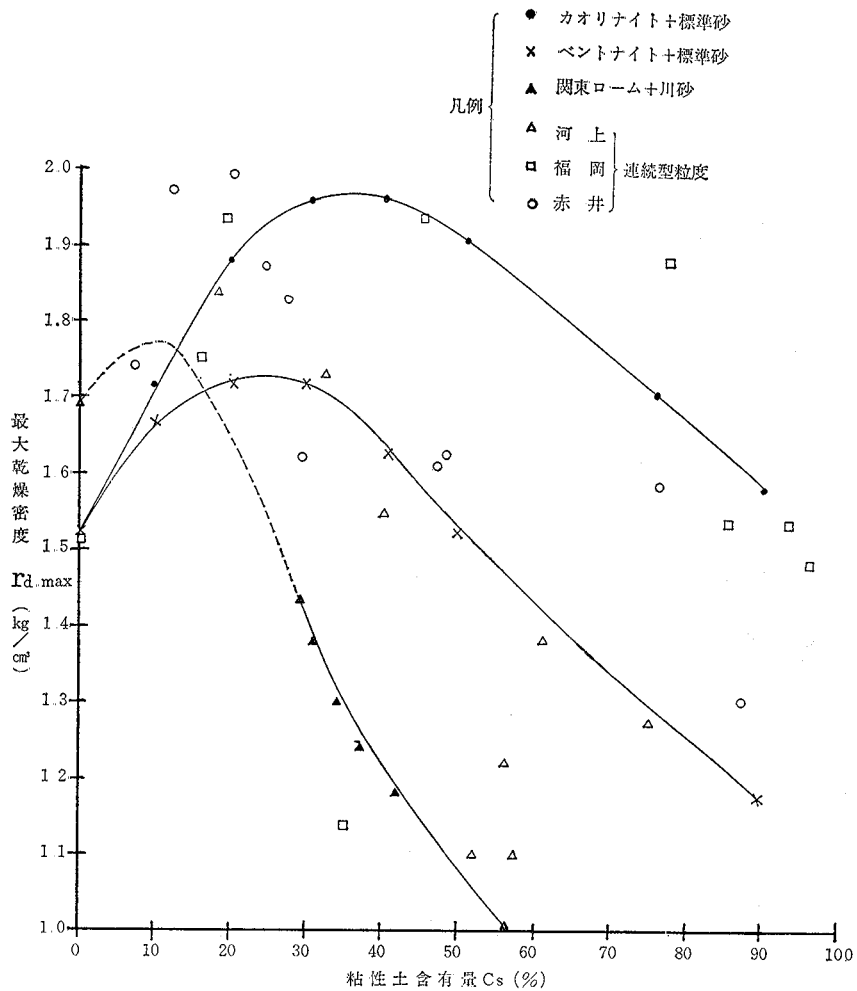
第7図 最適含水比と最小間ゲキ比の関係

粗粒土と粘性土の混合によって、最適含水比  $W_{opt}$  と最小間ゲキ比  $e_{min}$  の位置が移動しており、その傾向は、最良配合に到る区間では  $W_{opt}$ ,  $e_{min}$  値が共に減少しその点を過ぎると逆に増大し、曲線の形状も、最良配合近辺で急峻でそれから遠ざかるにつれて平らになるようである。自然粒度の土においても、大体の傾向として、砂質に富み、細粒分の含有が少く、粒度配合の良い土が良く締固まり  $W_{opt}$  も低く曲線が急に立つこと、粘度やシルト質土では逆の性質を示すことが認められている。

最小間ゲキ比と最適含水比には自然粒度の試料で比例関係が認められているので同様の比較を混合土について示したのが第7図である。ここで、赤井<sup>(10)</sup>、河上<sup>(16)</sup>、福岡<sup>(17)</sup>の値は Talbot 式にもとづいた連続粒度型の混合土の実験結果で、図中の式は森<sup>(15)</sup>が380試料の自然土が求めた  $\gamma_d, max - W_{opt}$  の実験式がら筆者らが換算したものである。不連続型、連続型ともに自然土の場合と同じく、最適含水比の大きな土ほど最小間ゲキ比が大きくなることが認められた。

粘性土の含有量と締固め曲線から得られる最大乾燥密度の関係は第8図となり、自然土においても、バラツキはあるが、粘性土が特定の割合に近づけばよく締固まる傾向が示されたと考えられる。粘性土分含有量の境界として、砂分とシルト分の区分  $0.074mm$  とシルト分と粘土分の区分  $0.005mm$  が考えられるが、シルト分の性格が未解明なこと、粒度分析の精度の問題もあり、実際の設計、現象の解析などから経験的に考えられている砂分とシルト分の区分点を採用した。つまり、自然土の粘性土含有量は砂分とシルト分の合計を採用した。いずれにしても、シルト分の追求が土の工学的性質を明確にするために重要な問題であると考えられる。

締固め試験で求められた最大密度の状態を再現した試料を作製し、一軸圧縮試験と一面セン断試験を行った。一軸試験は JISA 1216 に従い  $\phi = 3.5cm$  の試料を毎分1%のひずみ制御方式で、一面セン断は在来型と呼ばれる下箱移動式のものを用いて圧密急速セン断 (Qc テスト) を同じくひずみ制御方式で行った。在来型とく下箱移動式の試験機は多くの問題点が指摘されているが、本報告の目的が混合割合を変えた混合土の力学的性質を相対的に考えることで



第8図 最大乾燥密度と粘性土含有量の関係

あるし、実験が容易なことおよび改良型試験が本学に備えられていないことがら在来型を用いた。

最適含水比で締固めた最密状態での一軸圧縮強度 ( $qu$ ) と粘性土含有量の関係を第9図に示した。点線で示したのは、一面せん断試験で求められたせん断抵抗角 ( $\phi$ ) と粘着力 ( $c$ ) から次式により  $qu$  を推定した値である。

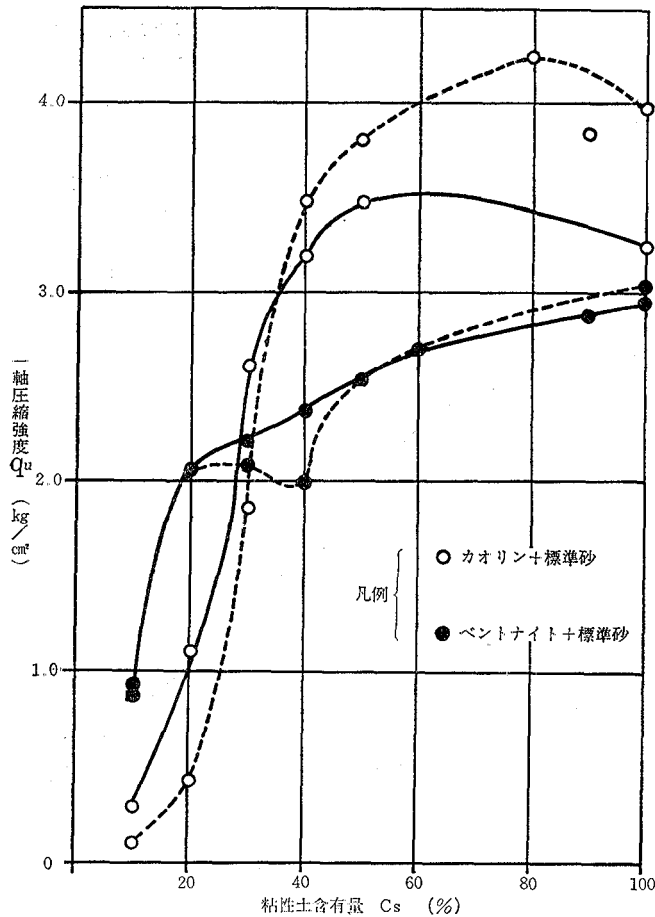
$$qu = 2C \tan(45^\circ + \phi/2) \dots \dots \dots (1)$$

混合土において粘性土の割合が増大するにつれて一軸強度も増すこと、粘性土の割合が増加すると一軸強度は主に粘着力に左右される傾向が見られるようで、その境界、飽和の程度といった水分との関連も注目しなければならないと思われる。

間ゲキ比の変化と粘性土含有量 ( $Cs$ ),  $C$  の関係を第10図に、 $Cs$  と  $\tan\phi$ ,  $C$  の関係を第11図に示した。図中の河上のデータは関東ロームと川砂を混合した試料によるもので文献(17)より引用した。

粘着力は最良配合付近まで粘性土量の増加、間ゲキの減少に伴って急上昇するが、その後は、間ゲキの増大も相まって粘性土の割合が増しても変化が少くないようである。ベントナイトとカオリンで粘性土含有量が増大しても粘着力値が近似している結果が得られたが、これは、締固まり程度の相違も影響していると思われる。

せん断抵抗角は粘性土量がある割合以上になると、ほとんどその数値に差がなくなってくるようである。また、粘性土が少くない個所で変わった傾向が見られた。これは河上のデータと非常に異なるので更に検討しなければならないが、最良配合時はよく締まっている筈であるからせん断抵抗角が大となることは考えられると思われる。



第9図 粘性土含有による一軸圧縮強度の変化

V あとがき

工事の大規模化，施工管理の高水準化，天然材料の不足化などから経済的な人工による混合材料の必要性が増大していると考えられるが，本文では，混合土の工学的特性について知るための予備的な実験として，すでに性状が明確になっている市販の粘性土（カオリン，ベントナイト）を粗粒土（豊浦標準砂）を用いて，その混合比を変化させた試料を調整して，締固め特性および締固め試料の力学的性質について若干考察した。

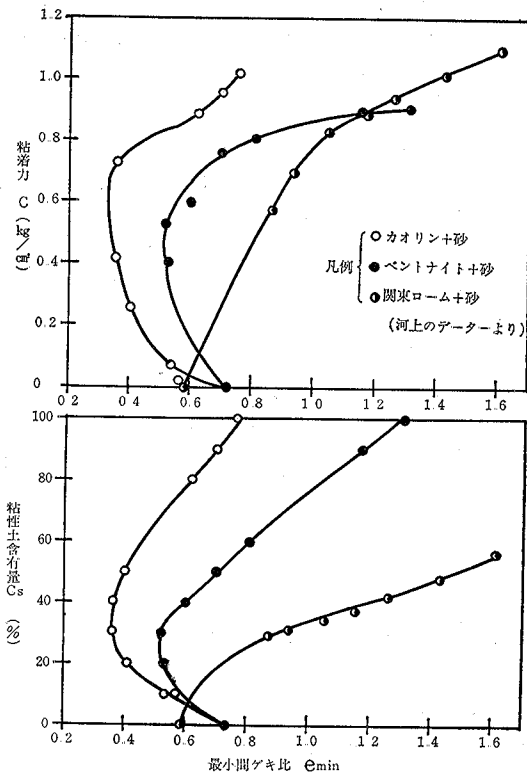
粒径加積曲線から，カオリン・ベントナイトと標準砂の混合物は中間粒径の欠けた不連続型粒度になると思われるので，著者らの提案した推定式により，カオリン+標準砂で  $e_{min}=0.304$ ，混合比  $D_1:D_3=35.9\%:64.1\%$  ベントナイト+標準砂で  $e_{min}=0.351$ ， $D_2:D_3=24.1\%:75.9\%$  を得て実測値と良い相関が認められた ( $D_1$  はカオリン  $D_2$  はベントナイト， $D_3$  は標準砂の重量比)。

含水比と密度の関係を示す締固め曲線を同一図面上で比較するために，含水比と間ゲキ比の関係で示したが，混合比によって最小間ゲキ比  $e_{min}$  と最適含水比  $W_{opt}$  の位置が移動している。その傾向は，最良配合に到る区間では  $W_{opt}$ ， $e_{min}$  が共に減少，その点を超えると逆に増大するようである。曲線の形状は最良配合付近で急峻，遠ざかるに従って平らになる。これらは連続型粒度である自然土の場合と同様の傾向である。

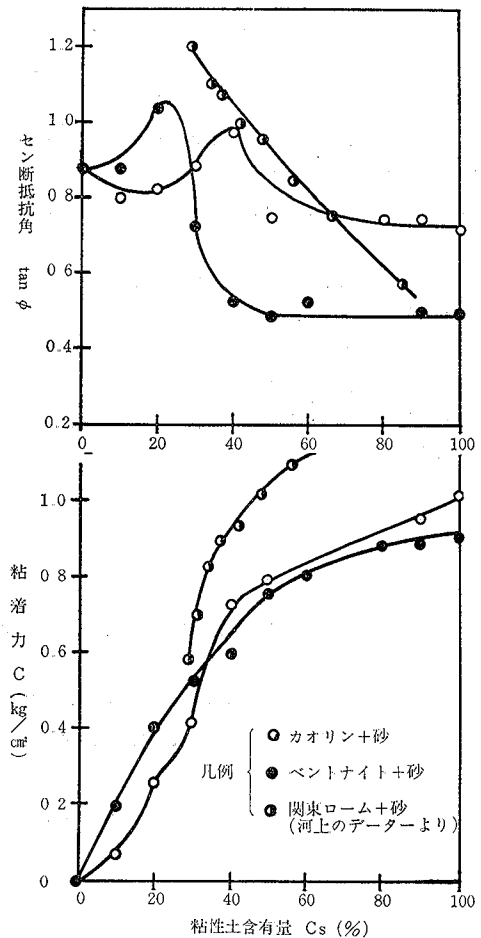
最小間ゲキ比と最適含水比間の自然土で成立する正比例関係は，連続型，不連続型ともに混合土の場合にも成立する。

自然土の場合にも，最適配合に近いものが乾燥密度が高い傾向が見られた。（締固めたとき）ここでシルト分の取扱が宿題として残されている。

一軸圧縮強度は粘性土の増加に伴って大となり，主に粘着力に関係するものと思われる。



第10図 最小間ゲキ比と粘着力・粘性土含有量の関係



第11図 粘性土含有量によるせん断抵抗値の変化

一面せん断試験で求められる粘着力は、最良配合附近まで粘性土量の増加と間ゲキの減少によって増大、その点を超えると間ゲキが増大する関係で、粘性土が増える割合に増加せず横ばいとなる。

せん断抵抗角は粘性土が大量になると低い一定値を示した。また、最小間ゲキ比附近で関東ロームによるデータと傾向を異にした。

以上の市販の材料による実験特性を参考にして、自然に存在する種々の粘土鉱物が混在した粘性土、粒形、粒度巾を異にする粗粒土の混合実験に進み、そこに発生する工学的特性を検討していきたいと考えている。

本文作製にあたってご指導とご配慮を賜った本学名誉教授前川忠夫先生に深く謝意を表します。

参考文献

(1) 谷本喜一ほか：盛土地盤の2, 3の特性, 土と基礎, 9(4), 12-15 (1961).  
 (2) 稲田倍徳, 沖田昭：粘性土と砂の混合盛土材料の特性について, 土と基礎, 9(4), 16-23 (1961).  
 (3) 三国英四郎：フィルタイプダムしゃ水壁材料の性質と締め固めに関する研究, 土と基礎, 10(1), 10(2), 10(3), (1962).  
 (4) 渡辺忠ほか：泥岩を材料としてフィルタイプダムの設計例, 北海道開発局土木試験所月報, 110, 2-17 (1962).  
 (5) 田中常三ほか：名神高速道路吹田工事の土質調査から施工まで, 土と基礎, 10(4), 10(5), 17-26, 23-31 (1962).  
 (6) 横瀬広司, 吉良八郎：粘性土と粗粒土の混合材料の工学的特性について, (1) Atterberg 限界値と粒度との関係, 香川大学農学部学術報告, 17(2), 153-159



- (1966).
- (7) FULLER, W.B. THOMPSON, S. E. : The laws of proportioning concrete 5 : *A. S. C. E Trans LIX* 67—68 (1907).
- (8) FURNAS, C. C. : Grading aggregates I—Mathematical relation for bed of broken solids of maximum density, *Ind. Eng. Chem.* 23(9), 1052—1058 (1931).
- (9) 福岡正己 : 河川堤防体材料の理想的粒度曲線について, 土木研究所報告, 36(2), 1—12 (1953).
- (10) 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, 5(5), 19—22 (1957).
- (11) 倉田進, 藤下利男 : 砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸省, 運輸技術研究所報告, 11(9), 1—43 (1961).
- (12) 吉本彰, 荻野正嗣 : アスファルトコンクリートにおける連続粒度と不連続粒度のマーシャル試験方法による比較, 土木学会論文報告集, 166, 17—25 (196).
- (13) 沢田敏男, 横瀬広司 : 間ゲキを最小にする粒度分布についての一実験的考察—土, 砂, レキのような粒状土木材料の集合特性に関する研究(1)—, 農業土木学会論文集, 22, 45—52 (1967).
- (14) 荒木謙一 : コンクリートの各種性質におよぼす不連続粒度骨材の影響に関する研究, 学位請求論文, 1—226 (1960).
- (15) 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, 10(9), 12—16 (1962).
- (16) 河上房義 : 土質力学, 森北出版, 181—195 (1956).
- (17) 久野悟郎 : 土の締固め——主として道路土工に関連して——, 44—100, 技報堂 (1963).

## On the engineering properties of clay-sand mixtures

### II Preliminary experiments on the relationships between density and grading property of compacted soils

Hiroji YOKOSE, Shoji MIZOBOCHI, Shogo AOYANAGI, and Minoru SAITO

#### Summary

The authors have continued a series of the experimental studies in order to make clear the aggregate characteristics of civil engineering materials such as soil, sand and gravel.

In the previous report, we did a few experiments of consistency on artificially mixed samples, with the aid of these results an analysis is made to determine the relationships between the Atterberg limit and grain size mixed soils.

In the present report, we tried a few experiments for the effect of compaction on artificially mixed clay-sand soil samples.

Materials used in this experiment are Kaolin, Bentonite and Standard-sand on the market.

The main points of these relations are as follows :

- (1) In the case of two component mixture, the grain size distribution at the time of most dense packing, as calculated by our proposed method, gives the weight ratios of 36% : 64% and 24% : 76% for the mixture of Kaolin-Standard sand and Bentonite-Standard sand respectively. Those experimental values agree well with the theoretical results.
- (2) In the mixture soils, moisture content and minimum void ratio values decreases for the content of the coarse grained soils, however, at the point of most dense packing, the tendency to be reverse.
- (3) The cohesions of mixture soil are closely connected with content of cohesive soil.

The authors are looking forward for extending these studies in a more practical direction.

(1971年6月15日 受理)