

ソイルビチューメンに関する基礎的研究 (第1報)

樋渡正美* 水摩嘉孝**

The Fundamental Study of Soil Bitumen (First Report)

Masami HIWATASHI and Yoshitaka MIZUMA

Abstract

There are reported some results of nonconfined compression test and Marshall test for the compacted samples of soil bitumen, in which three kinds of soil are mixed with anion bituminous emulsion ME-3 and cation one CME-3 using slaked lime and cement respectively as an additive, and which are soaked in water for 24 hours after various period of curing.

1. 緒 言

セメントによる土の安定処理すなわちソイルセメントに関しては、これまでに多くの研究が行なわれてある程度の成果をあげているが、乳剤による土の安定処理についてはまだ余り研究されておらず、わが国では筆者らの知る限りその施工例も十指に満たない状態である。ところでセメントの添加は砂のような粗粒の土にはよく効くけれど、粘土のような細粒の土や有機物を含む土には余り有効でないことが一般に知られている。このような場合には全部の土を入れ換えるか、またはいわゆるセレクト材を加えて粒度調整を行なってからセメントで処理するのが普通である。しかしながら土質安定処理の本来の目的からすれば、どのような土でもこれを捨てたり入れ換えたりしないでそのまま利用できるような方法が望ましいわけで、ここに新しい混和剤の開発が切望されることになる。

瀝青乳剤は別に新しい混和剤ではないけれど、細粒の土に比較的好く効くともいわれているので、どの程度効果があるかを明らかにするためこの研究に着手した。一般に乳剤による安定処理の方法にはサンドビチューメンとソイルビチューメンの2種がある。そして

前者は砂のような粗粒の土かまたは細粗粒が適当に混合した粒度配合のよい土に、主として結合力を与えるために行なわれるものであり、後者は粘着性の土に主として防水性時にはある程度の結合力を与えるために行なわれるものとされている。さきにあげた乳剤による土質安定処理の実施例はほとんど全部サンドビチューメンに相当するもので、ソイルビチューメンの例はわが国では皆無であるように思う。ところが道路などの建設現場で安定処理を実際に必要とするのは粗粒の土よりもむしろ粘着性の細粒土の場合が多いので、ここではとくにソイルビチューメンを研究の対象に選んだわけである。

2. 材料の性質

2.1 試料土

この研究に使用した土は宇部市内の3ヶ所すなわち琴崎八幡宮裏山、上宇部開付近および工学部構内から採取したものでそれぞれ No. 1, No. 2 および No. 3 と名づける。これら試料土の外観および JIS に規定する比重および液塑性試験を行なった結果は Table 1 に示される。又 JIS A1204 に規定する粒度試験を行なった結果は Fig. 1 に示すとおりであった。

Table 1. Nature of Soil Samples.

Soil Sample	Colour	S.G. (15°C)	L. L.	P. L.	P. I.	F. I.
No. 1	Blue Gray	2.743	65.3	27.8	37.5	16.5
No. 2	Brown Red	2.719	63.3	35.3	28.0	18.9
No. 3	Brown Yellow	2.739	71.3	24.8	46.5	19.2

* 土木工学教室

** 山口県土木建築部河川課

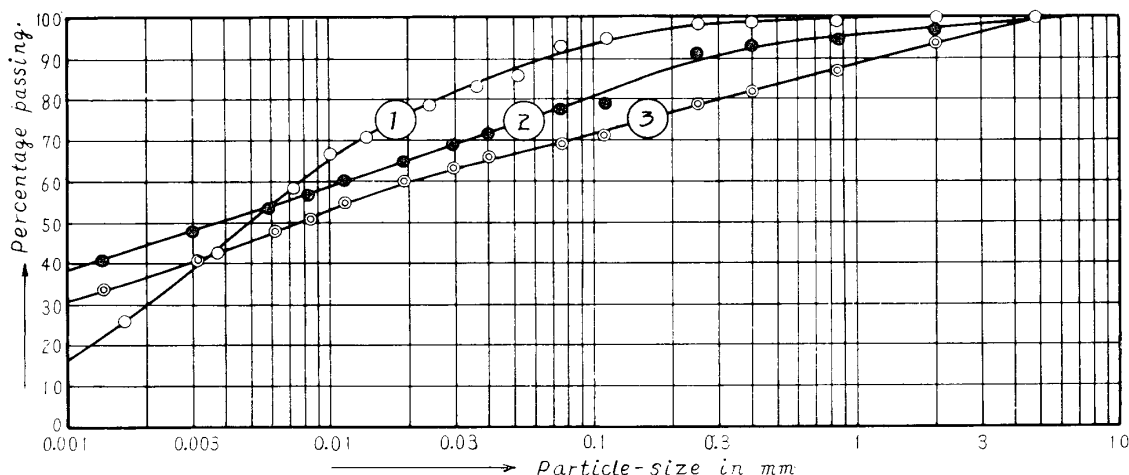


Fig. 1. Particle-size accumulation curves of Soil Samples.

2.2 添加剤

土に乳剤を加えてこれを安定化するとき、土の性質によってその効果が著しく異なるであろうことは容易に想像することができる。理論的に考えても大粒の土ほど表面積が小さいから少量の乳剤でその全表面をおおうことができるし、また粘着性の少ない土ほど混合されやすいので効果的な安定処理が期待できるわけである。これに対して土粒子が小さくなるほど、また粘

着性が大きくなるほど、一定の防水性や強度をうるためには当然乳剤混入量を増加しなければならないことがわかる。したがって瀝青乳剤で経済的に安定処理する土の性質にはその中間にある限界がおのずから存在することになる。Table 2 にアメリカの道路研究所 (HRB)¹⁾ と国際道路連盟 (IRF)²⁾ が推奨しているその限界をかかげるとともに、試料土の数値を併記してこれらを比較検討してみることにする。

Table 2. Nature of Soil Samples.

Item	Passing 4.8mm (%)	Passing 0.59mm (%)	Passing 0.42mm (%)	Passing 0.15mm (%)	Passing 0.075mm (%)	L. L.	P. I.
HRB	More Than 50	—	30~100	—	10~50	Less Than 40	Less Than 18
IRF	50~100	25~100	—	10~65	5~25	—	Less Than 6
No. 1	100.0	98.9	98.7	95.7	93.1	65.3	37.5
No. 2	99.6	93.5	93.1	82.3	77.2	63.3	28.0
No. 3	99.6	84.0	82.1	73.2	69.0	71.3	46.5

この表をみると試料土はいずれも 0.42 mm 以上の粗粒部分において HRB や IRF の限界値を満足しているけれど、0.15 mm 以下の細粒部分がこれらの制限値よりも著しく多いことがわかる。また液塑性においてもこれらの値をかなり超過しているから、試料土はこのままでは経済的な安定処理がむずかしいのではないかと想像される。このような場合の対策としては一般に、セレクト材を加えて試料土の粒度を HRB や IRF が示す範囲内におさまるよう調整するか、または少量の添加剤を加えて土の性質を改善する whichever の方法がとられている。セレクト材が安価にしか

も豊富に入手できるような場合にはもちろん前者が経済的であるけれど、ここではすでに述べたように現場の土をできるだけそのまま利用する方策を見出すことに研究の主眼をおいているので後者の方法を採用することにする。

さて添加剤としてなにを使用すべきかということになるが、文献³⁾によるとある種の脂肪アミン、樹脂材料、クォータナリーおよびリン酸などが有効といわれ、また Na, K, Ca および Al など原子価の高い置換性イオンも安定処理を容易にする点で効果があるという。ここでは従来の実績や経済の面などを考えて、アニ

オン乳剤 ME-3 には消石灰 3% をまたカチオン乳剤 CME-3 にはセメント 3% を添加剤として使用するこ

とにした。これらの添加剤を試料土に加えたときの液塑性は Table 3 に示される。

Table 3. Nature of Soil Samples with Additives.

Soil Sample	Additive	L.L.	P.L.	P. I.	F. I.
No. 1	Slaked Lime 3%	52.4	39.0	13.4	13.5
	Cement 3%	57.0	25.1	31.9	19.1
No. 2	Slaked Lime 3%	53.7	37.2	16.5	13.3
	Cement 3%	68.2	25.6	42.6	16.4
No. 3	Slaked Lime 3%	69.3	29.1	40.2	12.8
	Cement 3%	68.1	23.2	44.9	15.8

Table 1 と 3 を比較してみると添加剤により試料土の液塑性は大部分（とくに消石灰の場合）好ましい方向に変わってはいるが、一部を除いて HRB や IRF の範囲からまだかなりはずれていることがわかる。

2.3 乳 剤

この研究に使用した瀝青乳剤は土壌混合用アニオン乳剤 ME-3 と、同じく土壌混合用カチオン乳剤 CME-3 の 2 種であって、いずれも日瀝化学工業株式会社より提供されたものである。同社のパンフレットによると従来のアニオン乳剤はアスファルト粒子がすべて負の電荷をもっているのに対し、同社が最近開発したカチオン乳剤は強力な正の電荷をもつ点が特色とされ、その他の性質は従来の乳剤と全く同じであるという。一般に土粒子は負に帯電しているものが多いといわれて

いるからこの種の土にカチオン乳剤を混入すると、正の電荷をもったアスファルト粒子は負の電荷をもった土粒子の表面に電気的な作用で強く吸引されて析出し、剥離しがたい密な被膜を短時間に形成することができるはずである。すなわちアニオン乳剤が水分の蒸発（乾燥）によってその強度を発揮するのに対し、カチオン乳剤は湿気に左右されることなく分解結合が確実に水浸による再乳化のおそれもほとんどないから、安定した混合物がえられるわけで土壌安定剤としては理論的にすぐれているといえる。これらの乳剤を試験した結果が Table 4 に示されているが、これをみると乳剤中に含有されるアスファルトの性質は CME-3 よりも ME-3 の方がすぐれているように思われる。

Table 4. Nature of bituminous Emulsion.

Item	Bituminous Emulsion			Bituminous Residual			
	Specific Gravity (25°C)	Specific Viscosity (Engler)	Bituminous material (%)	Penetration (25°C)	Softening Point (°C)	Flash Point (°C)	Ductility (10°C)
ME-3	1.0150	2.95	57.7	117	44.1	238	100cm +
CME-3	1.0143	2.93	57.8	139	40.9	260	39.0cm

3. 供試体の製作

3.1 実験の方法

乳剤で処理された土の安定性を試験する方法にはいろいろあるがこれらを大体 3 種に分類することができる。第 1 の方法は圧縮試験とよばれるものであって供試体を圧縮してその強度を測定すればよく、単軸圧

縮および 3 軸圧縮試験がこれに属する。第 2 の方法は貫入試験とよばれ、一定寸法の貫入棒をある荷重で供試体に貫入させ、荷重と貫入量との関係からその安定性を比較検討するものであって円錐貫入、フロリダ支持力値および CBR 試験などがこれに属する。第 3 の方法は安定度試験といわれるものであって供試体のせん断強度を直接に測定することを主眼としており、ハ

バード、マーシャルおよびビームスタビロメーター試験などがこれに属する。

このように試験の方法は沢山あるけれどもどの試験法が一番適当であるかということについては現在のところまだ定説はない。しかしながら土の安定性とは形の崩れに対して抵抗する性質を意味しており、しかもその崩れは通常せん断によって惹起されることを考えると、せん断強度を直接測定できるような方法が望ましいであろう。ところでせん断強度はクーロンの公式としてよく知られているように粘着力と摩擦力の和で表わされるから、この2つを測定できる方法すなわち3軸圧縮試験とビーム安定度試験がこの意味では最も良い方法といえる。しかし現在のところではソイルセメントの場合、もっぱら単軸圧縮試験が行なわれており、またアスファルト混合物に対しては通常マーシャル試験が行なわれているから、ここでは添加剤としてセメントを使用することも考えてこれら2つの試験法を採用することにした。

3.2 乳剤の混入量

土質安定において混入すべき乳剤の量をいかにしたらよいかという問題は、強度の上からもまた経済的な見地からもきわめて重要である。一般に経済的な観点からは乳剤量を必要な最小限度に止めたいし、一方余り沢山加え過ぎてもかえって安定性は低下することが知られている。すなわち土の性質によって安定性が最大となるような乳剤の分量があるわけで、それを検討することがこの研究の目的の一つでもある。ところでこのような場合の配合理論として従来最小空げき説と表面積説との2つがあり、一般には後者が合理的であるとされている。表面積説によれば乳剤の混入量

は土粒子の表面積の大小により増減しなければならないことになるが、一方土粒子の表面積はその粒径によって推定されているのが現状だから、結局土の粒度分布に応じて混入量がきまってくることになる。

C. L. Mckesson¹⁾ は表面積説の立場から乳剤の混入量 E に関してつぎのような式を提案しているが、Table 5 にこの式で計算した数値が示されている。

$$E = 0.05A + 0.10B + 0.35C$$

ただし A = 0.075 ~ 0.005mm の土の量 (%)

B = 0.005 ~ 0.001mm の土の量 (%)

C = 0.001mm 以下の土の量 (%)

Table 5. Admixing Quantity of bituminous Emulsion (Mckesson)

Soil Sample	A (%)	B (%)	C (%)	E (%)
No. 1	44.5	28.0	20.6	12.2
No. 2	25.8	12.3	39.1	16.2
No. 3	23.8	13.6	31.6	13.6

また国際道路連盟⁵⁾ も同じ観点からソイルアスファルト混合物に対するアスファルトの混入量 P について次式を与えている。

$$P = 0.015A + 0.02B + 0.03C + 0.09D$$

ただし A = 2mm 以上の土の量 (%)

B = 2 ~ 0.42mm の土の量 (%)

C = 0.42 ~ 0.074mm の土の量 (%)

D = 0.074mm 以下の土の量 (%)

この式で計算したアスファルト量 P と瀝青含有量を 57.7% とした場合の乳剤混入量 E の値を Table 6 に示す。

Table 6. Admixing Quantity of bituminous Emulsion (IRF)

Soil Sample	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	P (%)	E (%)
No. 1	0.4	0.9	5.9	92.8	8.55	14.8
No. 2	3.2	3.7	16.0	77.1	7.54	13.1
No. 3	6.1	11.8	13.2	68.9	6.92	12.0

Table 5 および 6 から乳剤の混入量を与える両式はこの場合ほとんど同じような数値となり、乳剤の適当な混入量は 12% から 16% の範囲内にあることがわかる。これらの式の適否や優劣を検討することも大事なことはあるが、いまはソイルビチューメンそのものの性質を調べるの方が先決問題であるので、式の検討はつぎの機会に譲らざるをえない。したがってここでは一応これらの値を信用しまた添加剤を加えること

も考慮して、それよりいくぶん少なめの 10% という数字を試料土の乾燥重量に対する乳剤の混入量として採用することにする。

3.3 混合物の締め固め

文献⁶⁾によると土と乳剤を混合して締め固める方法に 2 種あって、いずれが適当かは土質によって異なることとされている。たとえばローム質土の場合は最適含水比に調整した土に所定量の乳剤を加える方法がよいと

いわれ、また砂質土の場合は土の含水比はそのままにしておいて、乳剤を加えた場合に最適含水比となるようあらかじめ乳剤に水を加えておく法すなわち最適含水比を採用する方がよいという。この際の最適含水比には条件があって、少なくとも乳剤が均一に混合できる程度以上でなければならぬとされている。筆者らが試料土を用いていると予備実験を行なった結果、後者の方法すなわち気乾状態の土に所定量の水を加えた乳剤を混入して、最適含水比の混合物を作る方法が均一にまざりやすいということがわかったのでこの実験でもその方法を採用することにした。なお添加剤のうち消石灰は最初に土とまぜておく方が電気化学的な考え方から有利と判断されるけれど、セメントは乳剤を分解する性質があるので最後に加えて混合物が塊状となるのをふせいだ。これらの混合はすべて手廻しのロール機を使用して行ない、土と乳剤がなるべく均一にまざるよう数回反復したがまだ完全とはいえなかった。

すでに述べたようにこの研究では単軸圧縮試験とマーシャル試験を行なうよう計画されているので、2

種類の供試体を作ることが必要である。このうちマーシャル試験用の供試体については規格があって、所定のランマーを所定の高さからそれぞれ50回ずつ落して混合物の表および裏をそれぞれ突き固め、直径4'' (10.16cm) 高さ2.5'' (6.35cm) の寸法のものを作ることになっている。しかしながら単軸圧縮試験用については規格がないので、ソイルセメントの場合と同じものすなわち直径5cm 高さ10cmの供試体を作ることにした。なお混合物の締め固めはJIS A1210に規定する突き固め試験用のランマーを用いて行なうこととし、その落下回数はマーシャル試験用供試体の密度とほぼ同じ値がえられることを目標として表および裏それぞれ25回と決定された。つぎに最適含水比であるが、理想をいえば2種の乳剤に対しそれぞれの供試体の密度が最大となるような含水比を実験で求むべきであるけれど、手数が大変面倒なのでここでは試料土に対しJIS A1210に規定する突き固め試験を行なった結果を利用することとし、その値がTable 7に示されている。

Table 7. Result of Compaction Test for Soil Samples.

Item	Optimum Moisture Content (%)			Maximum Dry Density (gr/cm ³)		
	None	Slaked Lime 3%	Cement 3%	None	Slaked Lime 3%	Cement 3%
No. 1	20.1	19.6	21.9	1.549	1.508	1.535
No. 2	28.5	27.7	27.3	1.419	1.389	1.387
No. 3	22.4	22.9	23.0	1.602	1.555	1.551

4. 実験の結果

4.1 単軸圧縮試験

この実験は11月下旬から2月上旬までの寒い期間に行なわれたが、供試体を製作後数日間室内に放置して乾燥させた後15°Cの水中に24時間浸漬してから圧縮試験機にかけた。放置期間をいろいろ変えて水浸したので、よく乾燥した供試体の中には吸水膨張のため水中で破壊したものもあり、また試料土No.1のごときは添加剤を加えないもの全部が崩壊した。水浸直前の含水比を横軸にとり、縦軸に乾燥密度、乾燥による収縮率、水浸による吸水率、吸水による膨張率および圧縮強度をとって実験の結果をまとめたものがFig 2~4である。図中の記号は○ME-3 10%、●CME-3 10%、◎ME-3 10%+消石灰3%、⊙CME-3 10%+セメント3%をそれぞれ加えて製作された供試体に対する値を表わしている。

これらの図からつぎのようなことがいえると思う。

- 圧縮強度は水浸直前の含水比によって左右され一般に最大となる含水比が存在する。
- 圧縮強度が最大となる含水比は土の種類や添加剤の有無によって異なるが、水浸後の乾燥密度が最大となる含水比とかなりよく一致している。
- 添加剤の効果は土の種類によって異なるがこの場合は大変よく効いている。とくに消石灰は吸水率や体積変化を小さくするのに効果的である。
- カチオン乳剤はアニオン乳剤に比しとくにすぐれているとはこの場合思われない。しかし前者は分解が瞬間的に行なわれるためまじりなくくじけであり、混合を完全に行なう方法が開発されたらおそらく異なった結果がでるであろう。
- 乾燥による収縮は無制限に続くものではなく収縮限界とも称すべき含水比が存在する。しかもその値は土の種類や添加剤の有無によってすこし異なる。

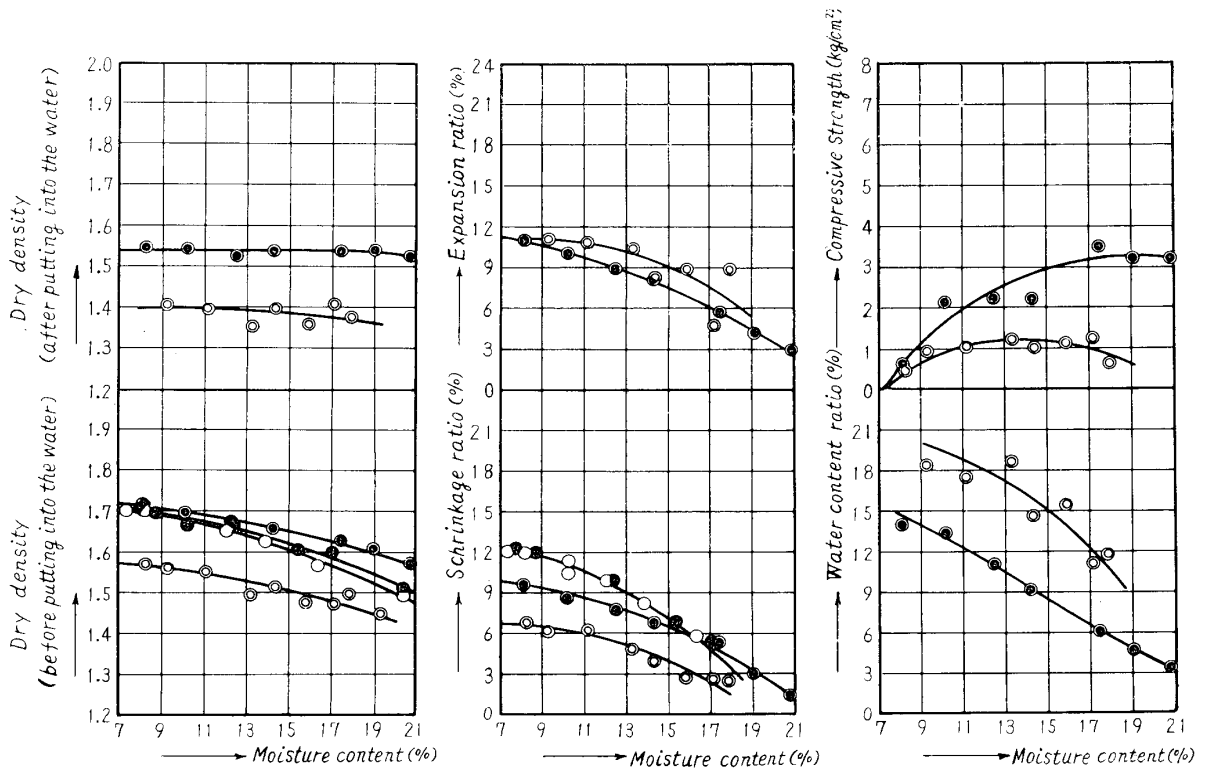


Fig. 2. Soil Sample No. 1.

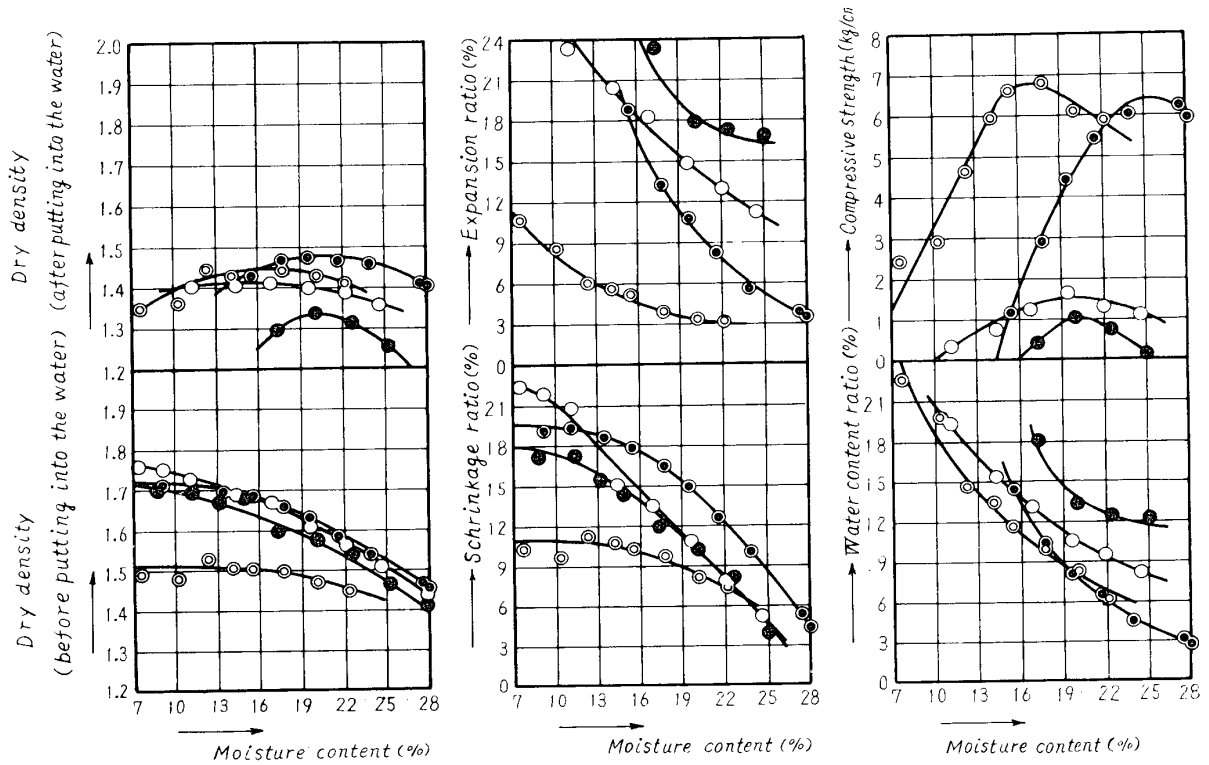


Fig. 3. Soil Sample No. 2.

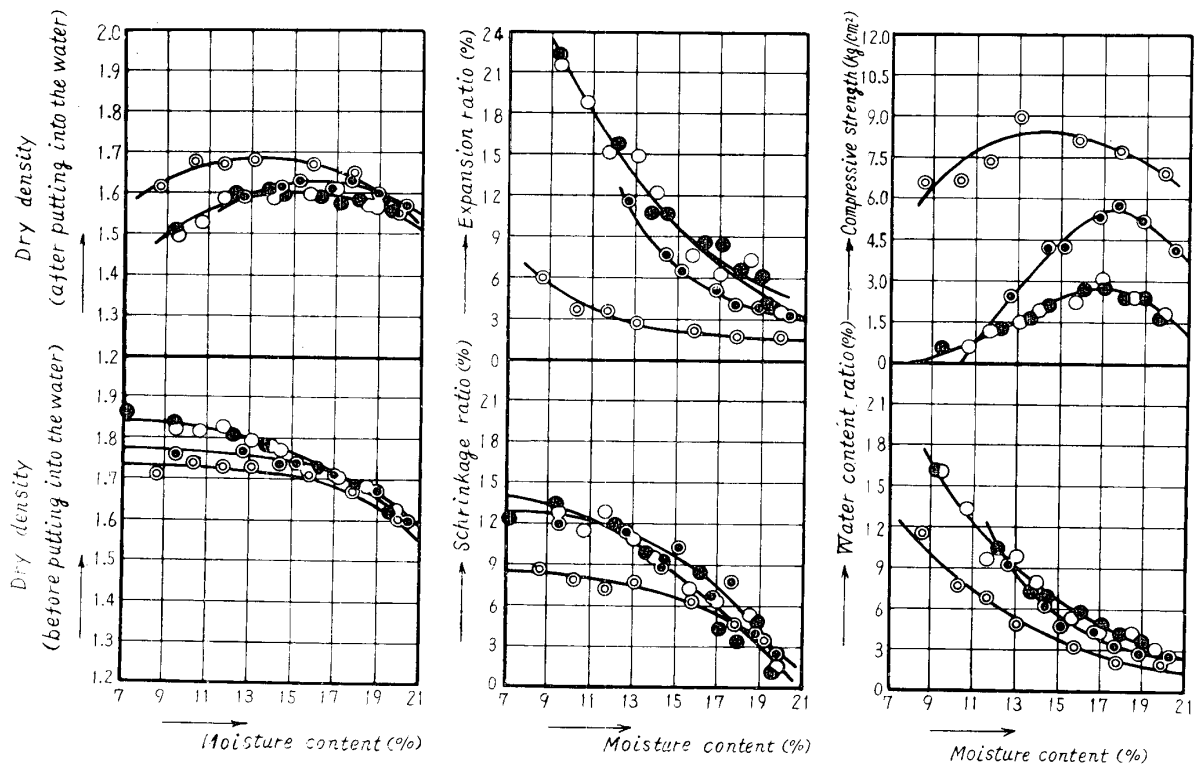


Fig. 4. Soil Sample No. 3.

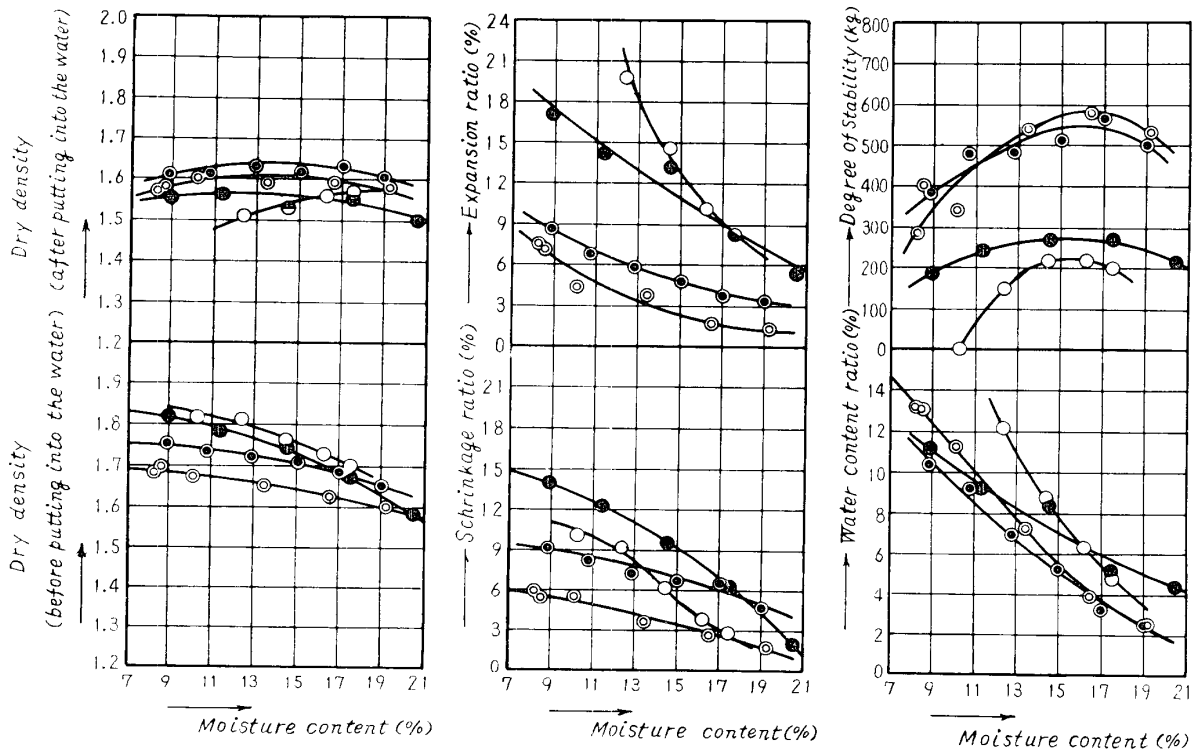


Fig. 5. Soil Sample No. 1.

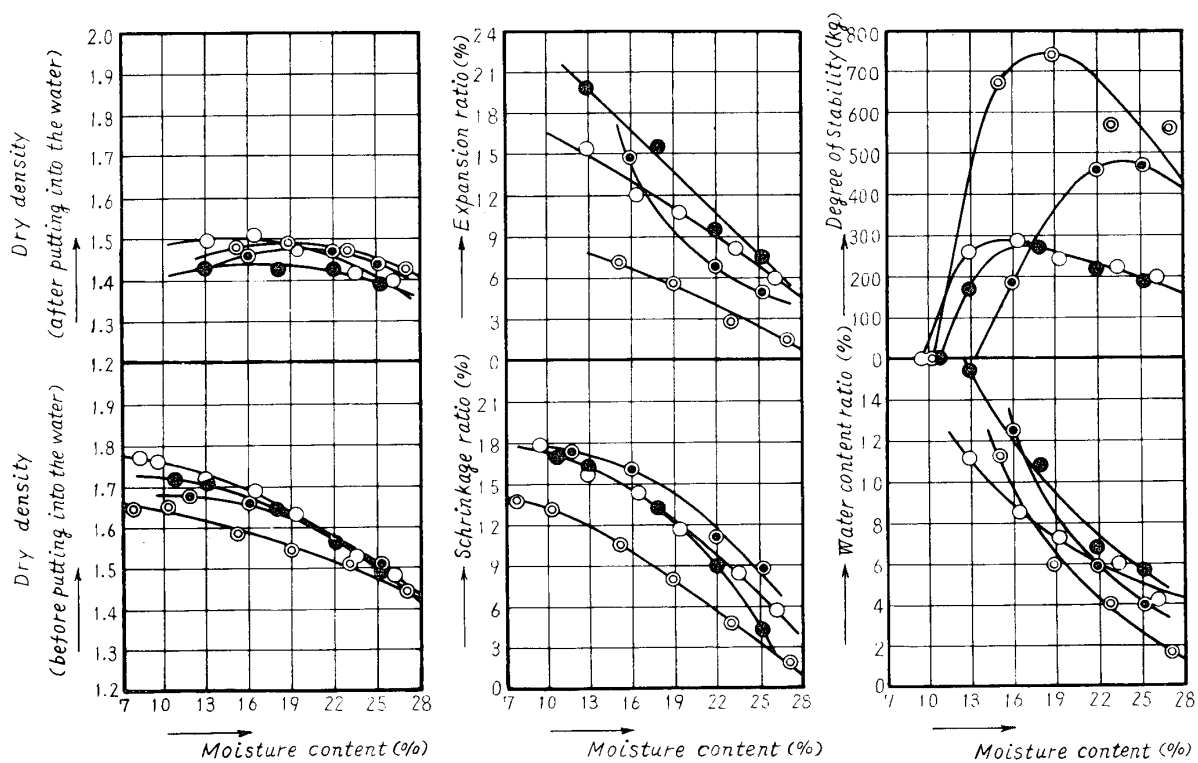


Fig. 6. Soil Sample No. 2.

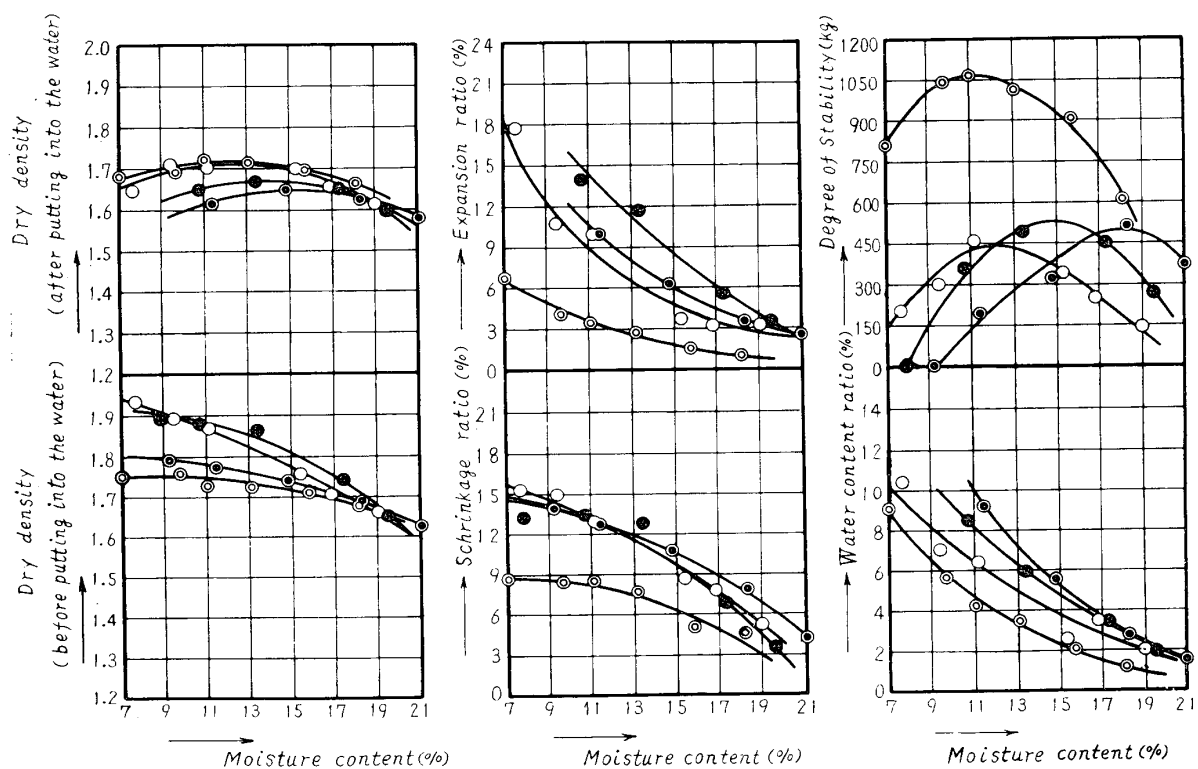


Fig. 7. Soil Sample No. 3.

るが大體10%前後のようである。

- (f) 当然のことながら吸水率と膨張率とは相似の曲線になっており、またよく乾燥したもののほど吸水率と膨張率がともに大きい。

4.2 マーシャル試験

この実験も11月下旬から2月上旬までの寒い期間に実施したが、供試体製作からマーシャル試験機にかけての養生法は単軸圧縮試験の場合と全く同じである。ただ供試体の寸法が大きい関係で乾燥するのにすこし時間がかかることと、水浸中崩壊するものの含水比がいくぶん小さくなった点だけが前者と異なっていた。Fig. 5~7は単軸圧縮試験の場合と同じ記号を用い同じ様式で実験の結果をまとめたものであるが、これらの図からも4.1の(a)~(f)で述べたことが全部そのままいえるようである。

さてここでFig. 2~4とFig. 5~7を比較した場合につきのことがいえるのではないかと思う。

- (a) 強度はほぼ試料土 No. 1, No. 2, No. 3 の順序に大きくなっており、これはTable 6に示したEの値と逆の順序である。すなわち乳剤の混入量が必要量よりも少ないほど強度は小さい道理で、この意味ではIRFの式がMckessonの式よりすぐれているといえないこともない。
- (b) 強度が最大となる含水比は添加剤のある場合ほぼ相対応しているが、ないときは異なる。また強度曲線が相対応しているとは必ずしもいえないようである。
- (c) 吸水率は供試体の大きいマーシャル試験で著しく小さいが、大きさの順序は似たように現われている。
- (d) 膨張率や収縮率の大小は余り明瞭でないが、曲線の位置や形は当然のことながら大體似ている。

5. 結 語

この研究でえられた大きな成果が2つある。第1は水浸直前の含水比によって安定性が相当変化することである。これはソイルビチューメンに関する今後の研究の進め方を示唆するとともに、現場に適用する場合の施工の仕方を暗示しているように思われる。すなわちたとえばソイルビチューメンを舗装の基礎として利

用する場合には、施工後せいぜい1日か2日ほど放置して余り乾燥しないうちに上層の舗装を行なわねばならぬことを示している。第2は添加剤の効果が予想以上に大きいことである。これは添加剤の種類や加え方を研究することによってさらに安定性の高いソイルビチューメンが出現する希望を抱かせるものであって、舗装の基礎として実用される日が1歩近づいた感じである。もちろんその効果の判定には添加剤の種類によって安定性が最大となる含水比はそれぞれ異なることを考慮する必要がある。

つきにこの実験で気がかりになることが2つある。第1はマーシャル試験の安定度が相当高いのに圧縮試験の強度はきわめて小さいことである。しかしこれはおそらく供試体の寸法が異なるためで、直径がマーシャル試験用の半分しかない圧縮試験用のそれが、水浸の影響をフルに受けたからであろう。実際の現場ではソイルビチューメンが相当大きな塊として施工されるから、水浸の影響も圧縮試験ほどには受けないものと思われる。第2は理論的に考えられているほどカチオン乳剤がアニオン乳剤に比してすぐれた安定性を示さないことである。しかしこれはすでに述べたように混合のむずかしさにその原因があるように思われる。今度モーターつきの完全にまざるミキサーを購入したので、この点はこれからの研究ではっきりすると思う。ひき続いて乳剤の適当な混入量についてもさらに研究を進めたいと思っている。終わりにこの研究において実験は主として当時学生であった池田安博、矢口義弘、三住裕泰3君の協力により行なったことを付記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) H.R.B: Current Road Problems, No. 12, Soil-Bituminous Road, (1946)
- 2) 国際道路連盟 1963年度道路セミナー報告, 道路建設 No. 189, (1963)
- 3) 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. 146
- 4) C.L. Mckesson: Recent Developments in the Design and Construction of Soil-Emulsion Road Mixtures, Proc. H.R.B., (1940)
- 5) 国際道路連盟 1963年度道路セミナー報告, 道路建設 No. 189, (1963)
- 6) 増田久仁男・島居敏彦: 砂利道の路面処理について, 第6回日本道路会議論文集, (1961)