

テラロサの安定処理について

樋 渡 正 美・上 田 満

On the Soil Stabilization of Terra Rossa

Masami HIWATASHI and Mitsuru UEDA

Abstract

The soil stabilization of highway subgrade and base course is able to classify the following methods by the kinds of additives :

- (1) Mechanical soil stabilization,
- (2) Soil stabilization with cement,
- (3) Soil stabilization with bitumen,
- (4) Soil stabilization with chemicals.

Three kinds of soil stabilization with cement, bitumen and chemicals are adopted in our experiments. The soil sample is terra rossa, which is so widely distributed to Carust terrace at Mine and Akiyoshi districts.

The percentage of clay in this soil is 43, liquid limit is 74.6 and plastic index is 42.5. It is generally said that the soil in which the percentage of clay is more than 30, liquid limit is more than 40 and plastic index is more than 18, is difficult to be stabilized economically. In this point of view, Terra rossa is a very interesting soil.

There are various methods testing the effect of soil stabilization, but unconfined compression test, Marshal test and modified CBR test are tried in our experiments. The results of these experiments are mentioned in this paper.

1. 緒 言

一般に石灰岩が炭酸ガスを含む水に遭遇すると、 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ なる化学変化を起こして重炭酸石灰を生ずるが、これは水に溶解して流出し、あとにK, Mg, Fe, およびAlなどに富む赤褐色の粘土が残留する。この土をテラロサ（バラ色の土）と称しているが、腐蝕質と磷酸分を欠ぎ、またラテライト化作用で珪酸分に乏しいといわれている。山口県では美祢、秋吉地方のカルスト台地に広く分布しており、降雨の際に泥濘となつて道路交通に支障をきたしている。また修正CBRが3程度であるので、路盤を築造するとき施工機械の乗り入れに困難を生ずることもあり、安定処理の必要が痛感される。筆者らは日本石灰工業所の好意により、美祢市伊佐町の同所付近から試料土を採取して安定処理に関する種々の実験を行なつたのでその結果をここに報告しようと思う。

Fig. 1は試料土の粒径加積曲線を示しているが、

これによると粘土分43%、シルト分24%、砂分33%となり三角座標では粘土の分類にはいる。つぎにこの土に対しJISに規定する比重、液塑性および突固め試験を行なつた結果がTable 1に示されている。これを見ると、試料土は液塑性や流動指数が非常に大きく、強い粘着力をもっていることがわかる。一般に粘土含有量が30%以上、液性限界40以上、塑性指数18以上の土は、経済的に安定処理することがむずかしいといわれている。試料土はまさにこれに相当するので、その改善策として消石灰3%および五酸化磷1%を添加してみた。Table 1にその結果があわせ示されており、液性限界、塑性指数および流動指数が著しく減少していることは注目すべき現象であろう。

さて土を安定処理する場合現実にどのような手段をとるかが問題となる。道路の基層もしくは路盤を安定処理する方法は添加剤の種類によりつぎの4つに分類されている。a) 粒度調整による安定処理。b) 石灰セメントなどによる安定処理。c) 歴青材による安定処理。d) その他の薬品類による安定処理。これらの

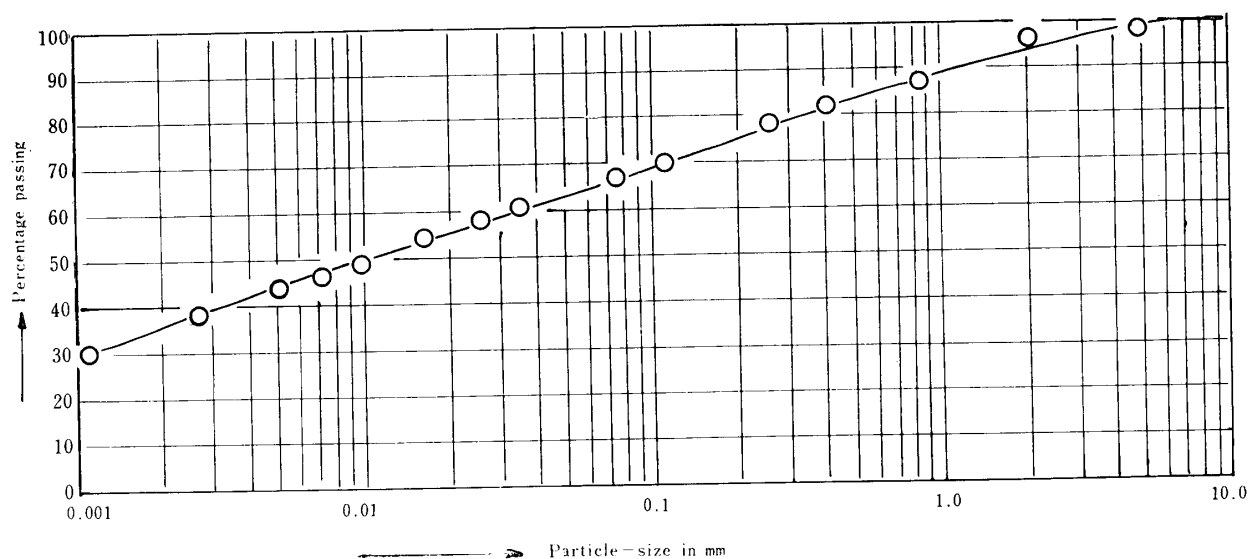


Fig.1 Particle-size accumulation curve of terra rossa

Table 1 Nature of soil sample

Additives	Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index	Flow index	Optimum moisture content	Maximum dry density
None	2.698	74.6	32.1	42.5	31.7	25.4	1.498
Ca(OH) ₂ 3 %	—	54.1	36.9	17.2	5.5	27.1	1.476
P ₂ O ₅ 1 %	—	58.7	29.5	29.2	18.2	26.3	1.497

うち粒度調整による安定処理は現場の土に不足している材料を加えて締固め、道路の基盤として十分耐えうるよう作り変える工法である。したがって不足材料の粒径や粒度および結合力などが処理土の安定性や均一性に重要な役割を演ずる。理論的には最大密度を与える粒度配合となるよう、不足材料を補給することが望ましいとされている。つぎに石灰セメントなどによる安定処理は世界各国で広く行なわれており、わが国でも豊富な経験をもっている。これらは水和作用で土粒子相互を結合する働きがあるので、それを利用して処理土の安定性を増強させるわけであるが、石灰にはとくに土のコンシステンシーを改善する作用もある。しかしながら水和作用による結合はその反応が緩徐であつて養生期間を必要とすることと、細粒土に対してはあまり有効でないことや風化作用に対する抵抗性が十分でないことなどが欠点としてあげられている。現場の近くに適当な砂利や砂がある場合は、細粒土でも粒度調整を行なつてから少量のセメントを添加することにより経済的な安定処理が可能となる。また歴青材による安定処理はその粘着力を利用して処理土の安定性を増すとともに、防水性を付与して水に対する抵抗力

を増大せしめんとするものである。外国においては広く採用されて相当な実績をもっているが、わが国では特殊な土質条件と多雨多湿の気候のためあまり普及していない。しかし AASHTO の道路試験の結果でも明らかのように、その柔軟性において最もすぐれた路盤となりうるということが証明されたので、今後おおいに推奨すべき工法である。つぎにその他の薬品類による安定処理については現在のところ食塩、塩化石灰、水硝子、パルプ廃液およびアクリル酸樹脂などを添加する方法が考えられている。これらの薬品は水に溶解するため効果の持続性に問題があり、また安定性もそれほど大きくないので強度増進のための添加剤の開発が今後の課題であろう。ここでは以上4種の安定処理法のうち、b)、c)、d)の3種について実験を行なつて

2. 実験方法

安定処理の効果を試験する方法には種々ある。セメントを添加材として利用する土質安定処理の設計のための試験には、安定度試験と耐久性試験とがある。耐

久性試験としては凍結融解試験、乾湿くり返し試験などがあり、相当面倒であり、しかも長時間を要するし、その上あまり実際のでもないという意見が相当あり、最近では耐久性試験は一部の人および特別の場合をのぞいては行なわれないのが普通である。安定度の試験には単軸圧縮強度試験が一番多く利用されている。砂質土と砂利の混合したものにセメントを加えた場合は $q_u=17\sim 25\text{kg/cm}^2$ 、粘質土と砂と砂利の混合材にセメントを加えた場合は $q_u=14\sim 22.5\text{kg/cm}^2$ あれば舗装が長期にわたって破壊しなかつたという試験例がある。米軍技術部隊 (Corps of Engineers) の研究によれば、 $q_u=14\sim 21\text{kg/cm}^2$ あれば破壊は起こらないとしており、P.C.A. によれば、 $q_u=21\text{kg/cm}^2$ あればソイルセメントでは常に各種耐久性試験に合格するとしている。カリフォルニア州の規定では、ソイルセメントを基層に使用する場合には 45.5kg/cm^2 、上層路盤に使用する場合は 21kg/cm^2 、コンクリート舗装の場合の路盤としては $14\sim 21\text{kg/cm}^2$ の圧縮強度 (いずれも 7 日養生, 1 日水浸) が必要であるとしている。イギリスの標準では 7 日養生で 17.5kg/cm^2 の圧縮強度をとっており、とくに凍上融解の気象作用を強く受ける地方では $(31.5\pm 3.5)\text{kg/cm}^2$ を必要とするとしている。

実際問題としては実験室内での試験の結果と、現場施工の場合の品質のバラツキとの間にどんな関係があるかが問題になる。すなわち実験室内での配合設計がいかによくできて、現場施工の場合に品質のバラツキが相当あり、実験室で規定した圧縮強度より現場で施工したものが、ずっと弱い部分が相当あるというのでは困ったことになる。またソイルセメントの場合は力学的な効果としてある程度版としての強度をたしかに期待してはいるが、経験によれば強度が強すぎれば生ずるヒビ割れの幅が大きいため版としての強度はあまり強すぎるとはいけないとしている。そこで現場で施工したものが程度以上弱いところがあつても、またある程度以上強すぎてもいけないわけである。

したがって施工管理が重要な問題になつてくるわけであるが、わが国の実状として実験室での規定強度が現場でどのくらいの範囲までまもられているかという問題については、目下土木研究所の研究室で建設省の直轄工事事務所と協同して研究中で、まだ結論はでないが、十分注意して機械化施工しているところでは大体実験室できめた規定強度の $\pm 20\%$ の範囲内には落ちつくようである。機械力にたよれない現場では、相当注意しても $\pm 40\%$ くらいのバラツキはあるであろう。

歴青材による安定についての室内試験においては、安定すべき土の性質を知るための試験と、歴青材を加えた場合の性質、すなわち突固め、安定度、防水性などの性質を知るための試験とを行なう必要がある。

対象となる土に対してその性質を知るためには、粒度、液性限界、塑性限界等の試験を行なう。突固め試験は JISA 1210 の突固め試験と同じ要領で行なえばよい。ただし、試料はあらかじめ $2\sim 2.5\text{kg}$ あて分けておいて、いろいろ異なる量の水を加えて 24 時間密封して放置しておき、水分を行きわたらせる。後に歴青材を加えて適当な方法で混合する。混合は実験室用のミキサーを使うのが望ましく、ミキサーを使う場合には混合時間は通常 2 分間程度とする。このようにしてえた混合物に対して突固め試験を行なう。乾燥密度は歴青材と水とを除いたものを考え、この乾燥密度と含水比との関係を図示し、これから最適含水比と最大乾燥密度とを求める。歴青材の量を変えて同じように突固め試験を行なえば、いろいろな歴青材の量のときの最適含水比あるいは最大乾燥密度が求まる。土と歴青材との混合物の安定度を試験する方法としては、つぎのようないろいろなものが考えられる。

Hubbard 現場安定度試験 (Hubbard-field test),
 フロリダ支持力値試験 (Florida bearing value test),

円スイ貫入試験 (Cone penetrometer test),

単軸圧縮試験,

三軸圧縮試験,

CBR 試験,

円柱貫入比試験,

マーシャル試験,

ビームのスタビロメーター試験

などである。歴青材とセメントと土との混合物に対しては、通常単軸圧縮試験を行なう。方法はソイルセメントの場合に準ずればよいが、場合によつては供試体をそのまま水中に漬けてその半数を 1 日後、残り半数を 7 日後において試験することもある。水に漬けた供試体に対して必要な圧縮強度は、車道に対して 10.5kg/cm^2 、歩道、自転車道に対しては 7.0kg/cm^2 ぐらいである。実際には乳剤量 $1\sim 5\%$ 、セメント量 $3\sim 15\%$ ぐらいがよく用いられているようである。本論文で取り上げたものは、一軸圧縮試験、CBR 試験、マーシャル試験の 3 つである。

3. 単軸圧縮試験

アスファルト舗装要綱 (p.26) によれば、単軸圧縮

試験においてソイルセメントの場合最適含水比で締固めて供試体を作り、温度 $21^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 湿度90%以上の恒温恒湿槽で6日養生した後、24時間水浸させてから歪速度を毎分高さの1/100として試験を行なうことになっている。緒言で述べた安定処理の方法のうちセメントによる安定処理は経済性を考慮し添加量を5%とした。

歴青材による安定処理についてはアニオン乳剤とカチオン乳剤を使用し、さらにアニオン乳剤には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を3%, カチオン乳剤には P_2O_5 1%を添加してみた。なお乳剤の量は5%から25%まで5%おきに変えて実験を行なった。また化学的安定処理については薬液注入工法でよく使われるケミゼクト法、ハイドロック法、およびミルズの発明した珪酸ソーダに塩化カルシウムを添加する方法、さらにクロームリゲニン法などの実験を行なった。そしてそれら全部について添加量を5%から25%まで5%おきに変えている。

さらにその他の化学的処理として $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaCl}_2$ 1%, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ 1%, および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ について実験を行なった。

それらの試験結果がFig. 2, およびFig. 3に示してある。図中の記号は●印が6日養生1日水浸の供試体に対する測定値を表わし、○印が27日養生1日水浸の供試体に対する測定値を表わしている。また●印が歴青乳剤に添加剤を加えた場合の6日養生1日水浸のも

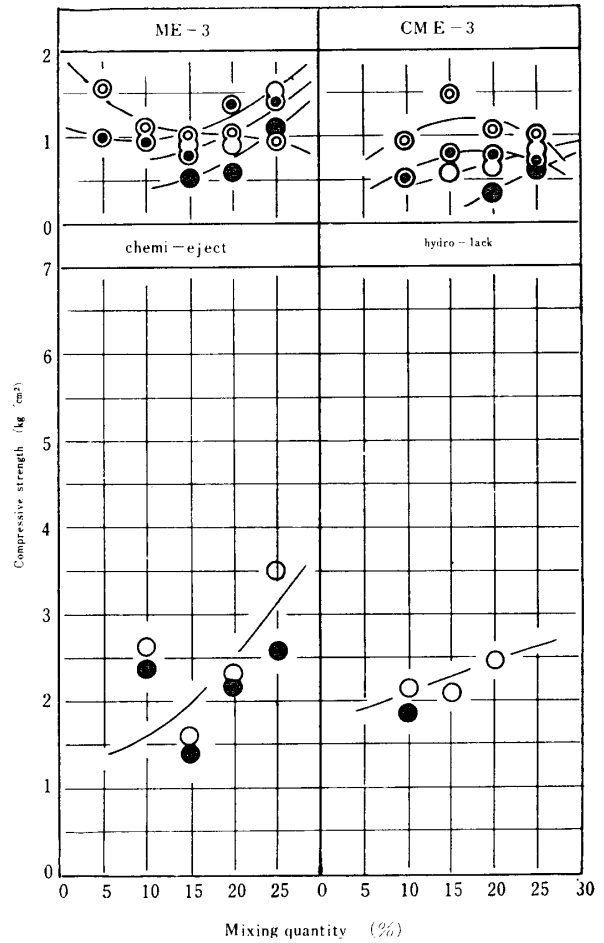


Fig. 2 Results of unconfined compression test

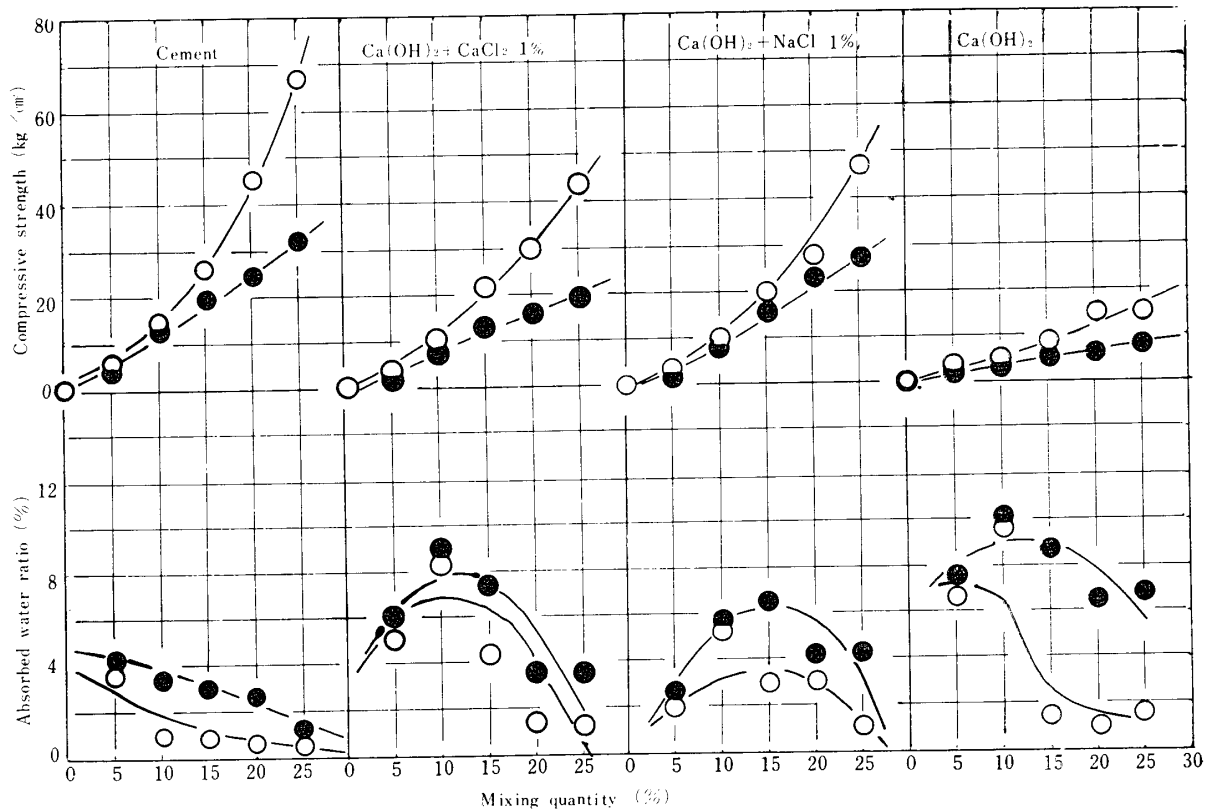


Fig. 3 Results of unconfined compression test

ので、◎印が添加剤を加えた場合の27日養生1日水浸の供試体に対する測定値を示している。添加剤としてはアニオン乳剤の場合消石灰3%を、またカチオン乳剤の場合には五酸化リン1%を加えたものである。Fig. 2とFig. 3をくらべてみると、圧縮強度はFig. 2の場合が大変弱くなっている。とくに乳剤の場合にそれが明確に現われている。ところが乳剤処理土の安定性というものは水浸直前の乾燥状態によつて著しく異なることが明らかにされており、筆者らの行なつた実験の養生方法は供試体を湿度90%以上の恒温恒湿槽で養生させているために乾燥することがなく、供試体を製作した時と同じ含水状態になつているために安定度が弱いものと考えられる。したがつて乳剤処理の場合にはその養生方法に問題があるのではなからうか。なおアスファルト舗装要綱ではソイルセメントの設計規準を交通量により20~30kg/cm²としているが、Fig. 2およびFig. 3でこの範囲にはいるのはセメントおよび食塩または塩化石灰添加の消石灰で処理した3種にすぎない。

4. マーシャル試験

供試体は径10.16cm、高さ6.35cmの円筒形で、高さがこの値と異なる場合には求めた安定度に対して

補正をほどこす。供試体作製に際して締固めは最適含水比でもつて4.536kgのランマーを45.7cmの高さより落下させて行なう。通常一面に対して50回行ない、それが終わつたならば、ひつくり返して他面に対して同じ回数行なう。締固めが終わつた供試体は空中重量と水中重量とを測定した後に室内で乾燥させる。同一種類の供試体を9個製作し、蒸発率が40%になつた時に3個の供試体を水浸し24時間後に室温で安定度測定のための載荷試験を行なう。つぎに蒸発率が50%になつたとき同じく3個、蒸発率が60%になつたとき同じく3個同様の試験を行なう。なお乳剤としてはアニオン乳剤とカチオン乳剤を使用し、さらにアニオン乳剤にはCa(OH)₂を3%、カチオン乳剤にはP₂O₅1%を添加してみた。

乳剤の量は6%から21%まで3%おきに変えて行なつた。マーシャル試験に対する結果がFig. 4, Fig. 5 Fig. 6に示してある。図中の記号は○印がME-3、●印がME-3+Ca(OH)₂3%、◎印がCME-3、および◎印がCME-3+P₂O₅1%をそれぞれ混入した供試体に対する測定値を表わしている。図から蒸発率の小さいときは五酸化リンの添加がよくきくが、大きくなると消石灰の添加が有効になることがわかる。また最大安定度を与える乳剤量は蒸発率が大きいほど多

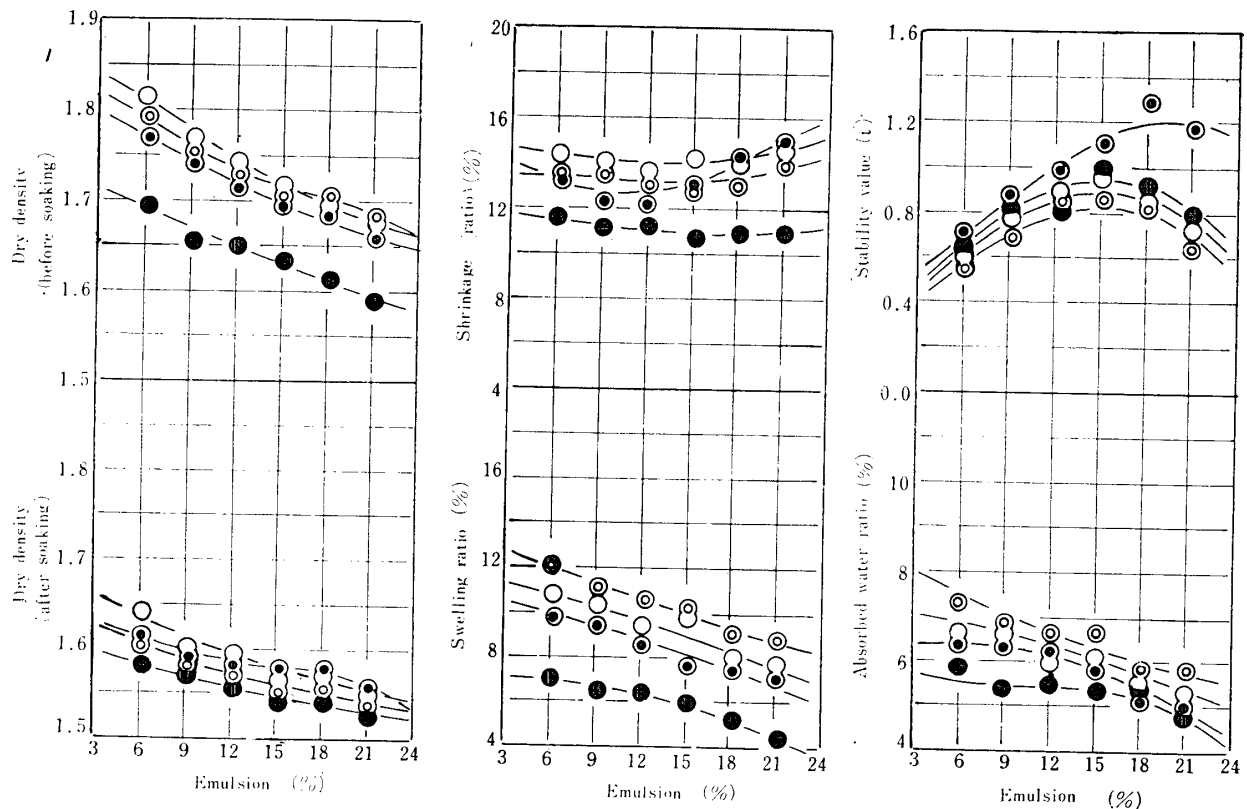


Fig. 4 Results of Marshall test for the soaked soil bitumen (evaporation ratio 40%)

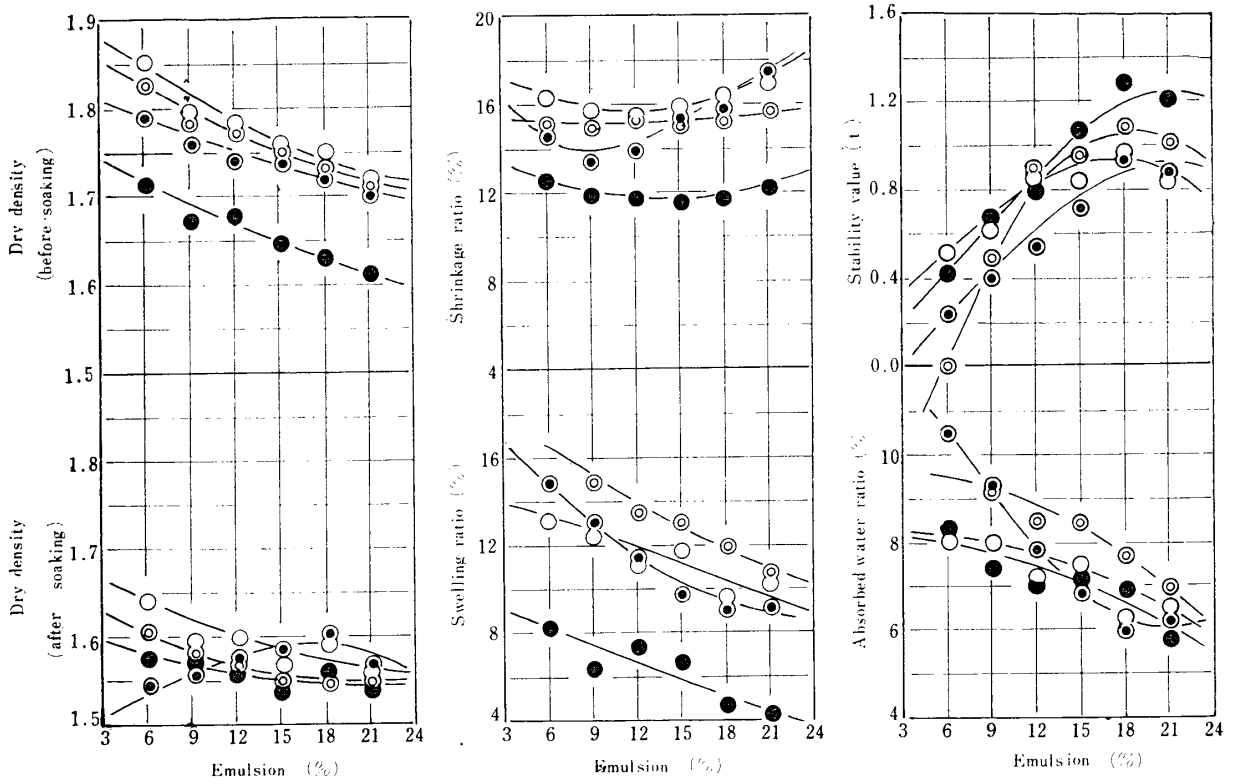


Fig. 5 Results of Marshall test for the soaked soil bitumen (evaporation ratio 50%)

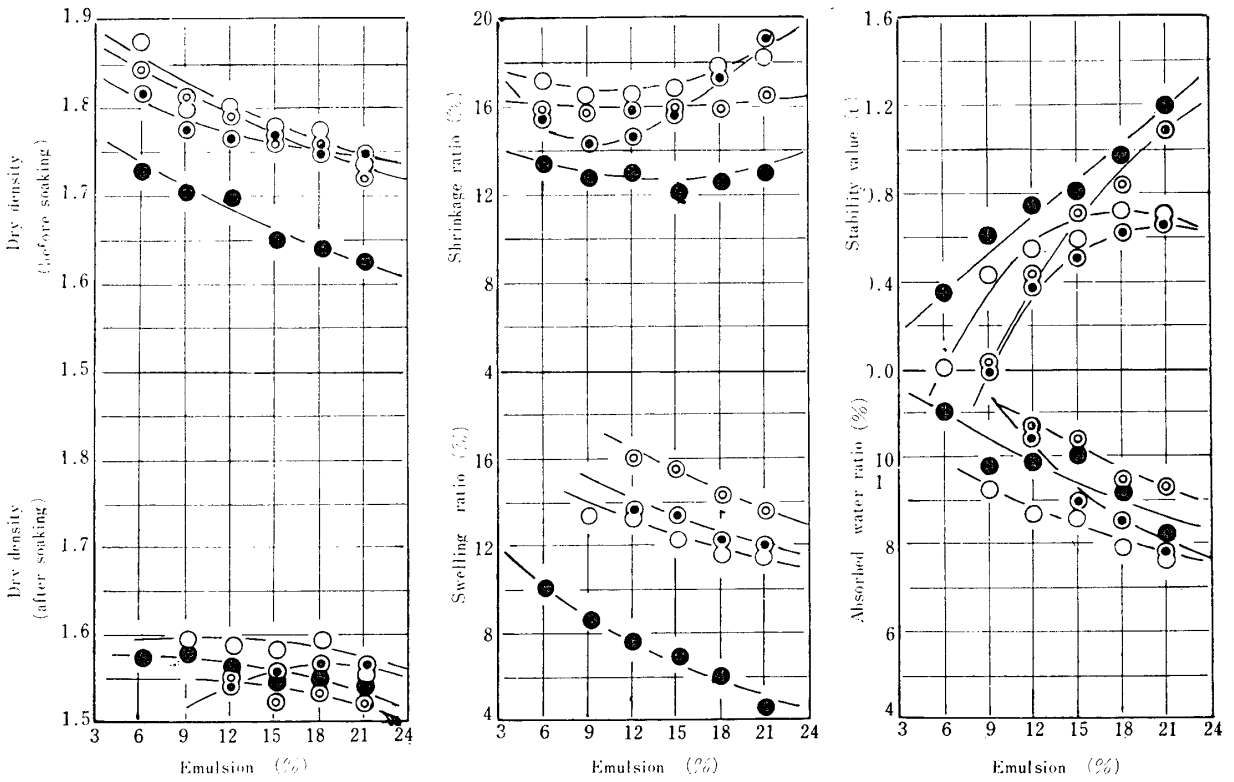


Fig. 6 Results of Marshall test for the soaked soil bitumen (evaporation ratio 60%)

Table 2 Modified CBR test

Item		Compaction test		C B R test						
Ca(OH) ₂ (%)	Additives (%)	Optimum moisture content	Maximum dry density	Moisture content	Number of com- paction	Dry density	Absorbed water ratio	Swelling ratio	CBR	Modified CBR
0	0	21.5	1.620	22.0	10	1.297	20.23	8.07	1.0	3.1
					25	1.474	13.39	7.27	2.3	
					55	1.621	8.46	1.10	4.2	
0	ME-3 10%	21.5	1.589	20.9	10	1.287	18.30	5.78	1.1	3.1
					25	1.451	9.92	4.98	2.3	
					55	1.573	4.51	3.78	4.0	
0	CME-3 10%	21.5	1.573	20.7	10	1.297	18.61	7.71	1.5	2.8
					25	1.466	12.22	6.59	2.4	
					55	1.551	7.31	6.22	3.9	
3.0	ME-3 10%	22.1	1.551	21.1	10	1.300	13.71	2.54	3.0	6.8
					25	1.447	7.94	2.39	5.1	
					55	1.575	3.52	1.82	13.0	
0	CME-3 10 P ₂ O ₅ 1%	20.6	1.588	19.8	10	1.298	18.21	6.85	1.6	3.0
					25	1.421	13.64	6.66	2.3	
					55	1.570	7.73	5.88	3.4	
4.5	Ca Cl ₂ 0.5%	22.0	1.603	21.5	10	1.332	17.10	2.93	2.5	11.0
					25	1.440	12.34	2.82	5.4	
					55	1.597	7.82	2.66	16.2	
4.2	Fe ₂ O ₃ 0.8%	23.1	1.586	22.7	10	1.330	13.20	0.33	8.6	38.0
					25	1.465	7.21	0.18	22.6	
					55	1.617	2.42	0.13	55.3	
0	Cement 5%	22.1	1.608	22.4	10	1.307	14.21	0.18	12.3	97.0
					25	1.445	9.02	0.05	29.6	
					55	1.585	4.04	0.05	146.7	
5	0	22.2	1.558	22.9	10	1.300	13.81	0.15	11.7	29.5
					25	1.472	6.54	0.05	27.4	
					55	1.579	3.62	0.04	54.4	
0	Chemi- eject 10%			22.4	10	1.299	14.91	0.95	6.4	39.0
					25	1.457	8.52	0.69	27.7	
					55	1.588	4.72	0.42	47.4	
0	Hydro- lock 10%			23.3	10	1.301	17.31	4.18	3.9	11.0
					25	1.421	13.02	3.44	5.4	
					55	1.587	6.31	3.18	13.8	
0	Mills 10%			22.1	10	1.334	9.81	1.14	5.8	35.0
					25	1.522	5.34	0.43	32.1	
					55	1.651	1.62	0.12	64.2	
0	Chrome- rignin 10%			21.8	10	1.270	12.50	2.34	2.2	19.0
					25	1.511	4.72	1.54	15.3	
					55	1.648	1.34	0.26	48.9	

くなるようである。吸水率および膨脹率については乳剤の混入量が増せば増すほど両者ともに低くなり添加剤を加えたものについても同様のことがいえるので良い結果が得られている。乳剤で処理した土のマーシャル安定度がどれくらいあれば下層として使用できるかはいまのところ明らかでない。しかしながら加熱混合式アスファルト舗装の設計基準値が交通量により250～500kg以上となつているので、室温(約10°C)で試験したことを考慮しても、使用箇所が下層であるからこれくらいの値で十分であろう。したがつてFig. 4～Fig. 6からあまり乾燥させさえしなければ、消石灰などを添加剤として乳剤量6～9%程度の混入で十分に使用に耐えると思われる。

5. CBR 試験

修正CBR試験はまず55回5層で突き固めて最適含水比を求め、その求めた最適含水比で55回5層、25回5層、10回5層のおのおのについて突き固め、それらを4日間水浸した後に貫入試験を行なうことになつていゝ。筆者らは単軸圧縮試験との比較も行なう意味で、CBR用供試体を作つてすぐには水浸せず含水比が変わらないようにビニールの袋をかぶせたまま3日間放置しておき、その後4日間水浸して貫入試験を行なうことにした。添加剤はセメント5%、乳剤については10%、薬液注入工法で知られている一連の安定剤については10%、さらに化学的安定処理のものについてはCa(OH)₂4.5%+CaCl₂0.5%、Ca(OH)₂4.2%+Fe₂O₃0.8%、Ca(OH)₂5%の添加量について実験を行なつた。修正CBR試験結果がTable 2に示してある。

この表から明らかなようになんらかの添加剤を加えることによつて修正CBRの値が大きくなつていゝことがわかる。この表ではセメント5%添加した場合の修正CBRの値が一番大きくなつており、セメント添加は土質安定処理に非常によい結果を与えることがわかる。つぎにケミゼクト法が大きく、以下消石灰4.2%+Fe₂O₃0.8%、ミルズ法、消石灰5%の順になつていゝ。修正CBRについても単軸圧縮試験同様乳剤の添加はほとんどといつていゝくらい効果がないようである。

ある。なおケミゼクト法とはケイ酸ソーダにアルミン酸ソーダを加えたものであり、またハイドロック法とはケイ酸ソーダと重炭酸ソーダにさらにケイフ化ソーダを加えたものを安定剤として使用したものである。

6. 結 語

上述の実験結果より大体つぎのことがいえるであろう。

- (1) 単軸圧縮試験、CBR試験の両者ともによい結果を与える安定剤としてはセメント、消石灰があげられるとともに5%程度の添加量で十分であること。
- (2) 単軸圧縮試験にはあまり効果がなかつたけれど修正CBR試験には効果のあつたものとしてケミゼクト、ハイドロック、ミルズ、クロームリグニン等の薬液注入形式の安定処理工法があげられるであろう。
- (3) 乳剤の添加は単軸、CBR両試験からはよい結果が得られなかつたがマーシャル試験では大変良い結果を得ることができるようである。
- (4) 安定剤を加えるだけでなく砂の混合による粒度調整を併用すれば、一層経済的な安定処理ができるようであるが、これについては別の機会に発表する。

なお歴青乳剤による安定処理においてCBR、単軸両試験でも供試体の含水状態を変える、すなわち、蒸発させてやればある程度の強度は出るといゝられる。つまり供試体の養生方法を変えて実験を行なえば、おそらくこれとは異なつた結果が得られるであろう。実際に路盤を乳剤で安定処理する場合、ある程度水分を蒸発させた上で舗装を行なうはずであるから含水状態を変えて試験をする方が合理的である。この論文は松山市で行なわれた第18回および岡山市で行なわれた第19回の土木学会中国四国支部の学術講演会で発表したものをまとめたものであるが、実験に協力してくれた土橋国安、前川博之の両君に深甚なる謝意を表す。

(昭和43年2月16日受理)