

下水汚泥焼却灰やアルミニウム汚泥を用いた 石灰系安定処理土に関する研究

嘉門雅史・顧 歆達*・勝見 武・井 真宏

*京都大学大学院工学研究科

要旨

本文は、廃棄物有効利用の観点から、下水汚泥焼却灰やアルミニウム汚泥を用いた石灰系安定処理土の道路舗装への適用性を室内実験により評価し、電子顕微鏡やX線回折装置を用いて安定処理土の力学的特性の解明を目的とした実験、研究結果を示すものである。本研究の結果から、下水汚泥焼却灰やアルミニウム汚泥を混合した石灰系安定処理土は、アスファルト舗装要綱に示される路床、路盤の品質基準を満たすものであり、道路舗装への適用性は高いと判断される。

キーワード：土質安定処理、一軸圧縮強さ、曲げ強さ、復元変形係数、X線回折分析、電子顕微鏡

1. はじめに

近年、環境問題への関心が高まっている中、廃棄物の有効利用は非常に重要な問題となっており、一般廃棄物や産業廃棄物を建設材料として利用する試みが研究されている。例えば、西ら(1993)は道路路床・路盤材料として高炉スラグの適用性を検討しており、Lee and Fishman(1993)はフライアッシュと細粒材料を混合した材料の路盤材としての適用性について検討している。

一方、道路の交通量や交通荷重の増加とともに、道路路面の亀裂や輻掘れなどの疲労破壊が目立つようになり、道路の耐久性の問題が取り上げられている。路面の亀裂や輻掘れなど疲労破壊を低減させ、道路の耐久性能を高めるためには、路床・路盤材料の強度特性を改善し、交通荷重によって路床・路盤中に発生する変位量を抑止することが重要であると考えられる。Ferrum石灰(産業廃棄物である酸化鉄と消石灰の混合物)は60年代から九州地方を中心に軟弱地盤を改良するために、道路の路床・路盤の安定材料として用い

られており、亀裂や輻掘れなどの疲労破壊の発生が少なく、耐久性が高いことが示されている。

一般的に、安定処理土の力学特性は、載荷形式、安定材の添加率、養生期間、養生方式、養生温度などに影響される。例えばBonifaceら(1972)は、セメント安定処理土の動的載荷条件下の復元及び残留変形特性を研究しており、Sauerら(1978)は、石灰安定処理土において添加率や載荷方式が復元変形係数に及ぼす影響を検討している。また、安定処理土の強度発揮のメカニズムを調べるため、鳥居(1985)や友久(1989)は電子顕微鏡やX線回折装置を使用して、産業廃棄物である水砕スラグやフライアッシュなどを石灰で安定処理する場合の、強度発揮のメカニズムを解明するとともに、路盤材料としての適用性を検討している。

本研究では、廃棄物の有効利用を図るとともに、静的及び動的の載荷条件において、下水汚泥焼却灰やアルミニウム汚泥を混合したFerrum石灰安定処理土の安定処理効果を評価し、舗装材料としての適用性を評価する。さらに、電子顕微鏡やX線回折装置を用いる

ことにより、安定処理土の力学的特性のメカニズムを解明する。

2. 実験概要

2.1 処理材料及びサンプリング

安定処理の対象土は、福岡県築紫郡那珂川町のまざ土を 11.5%に含水比調整して用いた。まざ土の物理特性を Table 1 に示す。

実験で使用した安定処理材は下水汚泥焼却灰あるいはアルミニウム汚泥を混合した Ferrum 石灰である。以後、Fe-Ash 石灰あるいは Fe-Al 石灰と称す。それらの比較対象物として、Ferrum 石灰や消石灰を用いた実験結果も含めて考察を行った。各安定処理材に含まれる消石灰と廃棄物の混合比率を Table 2 に示す。安定処理材の中に含まれる酸化鉄やアルミニウム汚泥の成分組成を Table 3 に示す。

一軸圧縮試験と動的三軸試験用の供試体は JIS A 1210 に基づき、直径 5cm×高さ 10cm のモールドを用いて作製したが、締固めエネルギーは、セメント協会「セメント系固化工材による安定処理土の試験方法 (CAJS L-01-1990)」に基づき締固めを行った。曲げ試験用の供試体は、4cm×4cm×16cm のモールドを用いて一軸圧縮試験用の供試体と同じ湿潤密度となるように、締固めて作製した。実際に実験を行うに当たり、作製した供試体の種類、実験の方法を、Table 4 に示す。

Table 1 Material properties of soil

Particle density (g/cm ³)	2.64
Optimum moisture content (%)	11.85
Maximum dry density (g/cm ³)	1.87
Maximum grain size (mm)	19
D ₅₀ (mm)	0.82
Ignition loss (%)	2.156

Table 2 Composition of the stabilizers

	Hydrated lime	Ferric oxide	Aluminum sludge	Sewage sludge ash
Fe Lime	75%	25%		
Fe-Ash Lime	60%	25%		15%
Fe-Al Lime	65%	20%	15%	

Table 3 Chemical composition of ferric oxide and aluminum sludge

	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Others
Ferric oxide	0.27	94.92	0.48	1.02	0.05	3.26
Aluminum sludge	0.14	44.47	16.42	21.01	2.69	15.27

2.2 静的一軸圧縮試験及び曲げ試験

一軸圧縮試験は JIS A 1216 に準じて行った。また、曲げ試験は JIS A 1106 に準じたが、三点載荷で 1mm/min の変位制御によって載荷した。実験結果は、次式を用いて曲げ強さを計算した。

$$\sigma_b = 2.293 \times 10^{-2} P \quad (1)$$

ここで、 σ_b : 曲げ強さ (MPa)、 P : 最大載荷荷重 (kPa) である。

2.3 動的繰返し三軸圧縮試験

復元変形係数の応力依存性については、既に西ら (1993) により報告されている。本研究においても、西ら (1993) の報告を参考にし、98.1kPa、196.2kPa、294.3kPa の三つの平均主応力を設定した。繰返し載荷における載荷条件を Table 5 に示す。繰返し載荷を行う際は、平均主応力を一定に保持し、軸差応力を段階的に減少させた。

実験を行うに際し、供試体に対してサクションをかけることによって供試体を飽和させ実験を開始した。本実験においては、載荷応力が静的な破壊強度に対して小さいため、発生するひずみが微小となる。よって端面の影響が大きいと考えられるため、樹脂石膏を用いて端面成形を行った。また、発生する弾性ひずみ量を、安定状態において測定するため、30,000 回の繰返し載荷を実施した。

2.4 電子顕微鏡観察と X 線回折

曲げ試験を実施した供試体を用いて、電子顕微鏡観察用のサンプルを、各々の処理土に対し二つ採取した。本研究で用いた電子顕微鏡は、JEOL JSM-840S である。また、粉末 X 線回折に用いる試料を得るため、供試体を破碎し、75 μ m のふるいを通過したものを、試料として採取した。本研究で用いた装置は、RAD-2B 型 X 線回折装置である。

Table 4 Laboratory test cases

Case	Stabilizer	Content	Aging	Tests
1	Fe-Ash Lime	4%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
2	Fe-Ash Lime	4%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test
3	Fe-Ash Lime	7%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
4	Fe-Ash Lime	7%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test
5	Fe-Ash Lime	10%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
6	Fe-Ash Lime	10%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test
7	Fe-Al Lime	4%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
8	Fe-Al Lime	4%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test
9	Fe-Al Lime	7%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
10	Fe-Al Lime	7%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test
11	Fe-Al Lime	10%	7	Unconfined compressive test, Flexural test
12	Fe-Al Lime	10%	28	Unconfined compressive test, Flexural test, Dynamic triaxial test

3. 結果と考察

3.1 静的一軸圧縮と曲げ特性

3.1.1 静的一軸圧縮特性

Fig. 1 は、安定処理材の添加率と処理土の養生期間が、一軸圧縮強さに及ぼす影響を示したものである。養生期間の増加に伴い、各処理土とも一軸圧縮強さの増加がみられる。安定材の添加率が 4% の場合、各処理材の添加率の増加に伴って、養生期間が 7, 28 日養生の場合は、Fe-Al 石灰処理土が Fe-Ash 石灰処理土より高い一軸圧縮強さを示しており、添加率が増加するとともに、両者の差も増加する傾向が見られる。しかし、90 日養生の実験結果を見てみると、各処理土ともほぼ同様の一軸圧縮強さを示していることが分かる。

Fig. 2 に一軸圧縮強さと養生期間の関係を示す。Fig. 1 の結果と同様、28 日養生の時点では、Fe-Al 石灰処理土が高い一軸圧縮強さを示しているが、養生期間が 90 日と長くなると、Fe 石灰処理土の強度が Fe-Al 石灰処理土のそれを上回り、Fe-Ash 石灰処理土は Fe-Al 石灰処理土と同様の一軸圧縮強さを示す結果となる。これは、処理対象土と添加材に含まれる各成分との反応性の違いを示していると考えられる。これらの結果から、アルミニウム汚泥を混合することによって、早期的な強度発揮を期待できる。

Fig. 3 は、Fe-Al 石灰および Fe-Ash 石灰処理土と、ベースとなる消石灰および Fe 石灰処理土を比較した結果である。28 日養生において、各処理土の一軸圧縮強さと添加率の関係を示している。28 日養生の時点で見ると、添加率 4% において、Fe-Al 石灰処理土の一軸圧縮強さは他の処理土と比べて、それほど大きくないが、添加率の増加に伴う一軸圧縮強さの増加が著しい。

Table 5 Loading conditions of cyclic triaxial test

Loading wave	Sin wave
Number of loading cycles	30,000
Loading condition (s)	0.1(s) loading, 0.9(s) rest
Deviator stress (kPa)	58.9 ~ 618.0
Mean principal stress (kPa)	98.1, 196.2, 294.3

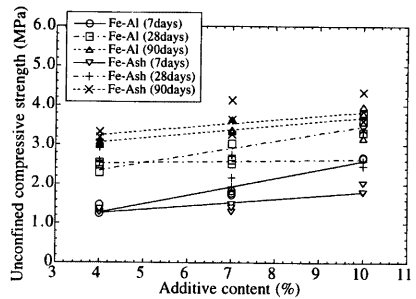


Fig. 1 Unconfined compressive strength versus additive content

他の処理土の場合、添加率を 10% まで増加しても、一軸圧縮強さに大きな増加が見られない。この結果からも、アルミニウム汚泥を混合することによって、安定処理材の反応速度を速め、処理土の圧縮強さを早期的に発揮させることが可能となるといえる。

Fig. 4 は、各処理土の E_{50} と一軸圧縮強さの関係を示したものである。これによると、処理土の違いに関

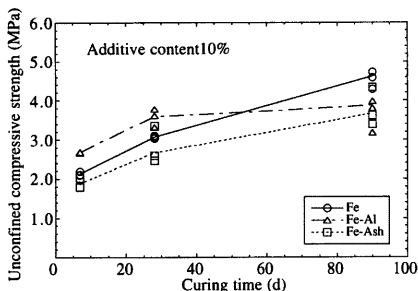


Fig. 2 Unconfined compressive strength versus curing time

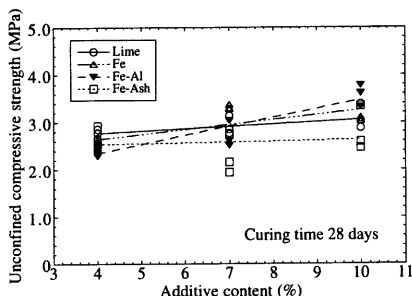


Fig. 3 Unconfined compressive strength versus additive content

わらず、 E_{50} と一軸圧縮強さの間には、線形関係が見られる。したがって、この石灰系安定処理土の E_{50} と一軸圧縮強さの関係には、次のような式が成り立つ。

$$E_{50} = 207.486 q_u \quad (2)$$

3.1.2 静的曲げ特性

安定処理土を路盤材料として利用する場合、処理土の圧縮強さだけでなく曲げに対する耐久性能も重視しなければならない。Fig. 5は、Fe-Al石灰とFe-Ash石灰処理土の添加率と曲げ強さの関係を示すものである。Fe-Ash石灰処理土の場合、いずれの養生期間においても、安定処理材の添加率が曲げ強さに及ぼす影響は小さい。一方、Fe-Al石灰処理土においては添加率の影響が大きく、添加率の増加に伴う曲げ強さの増加が顕著である。添加率4%の場合を除いて、Fe-Al石灰処理土はFe-Ash石灰より大きな曲げ強さを発揮し、添加率が大きくなるほど、その差もより顕著になる。これは、添加率が低い場合、Fe-Al石灰処理土に含有するアルミニウム成分が少ないため、その強度発現特性は処理土中に含有する消石灰量に依存すると考

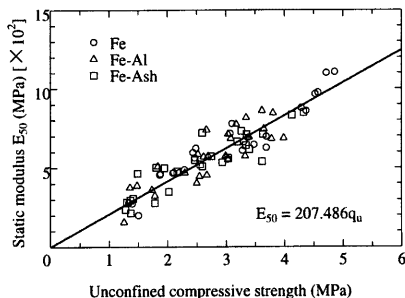


Fig. 4 Unconfined compressive strength versus static modulus E_{50}

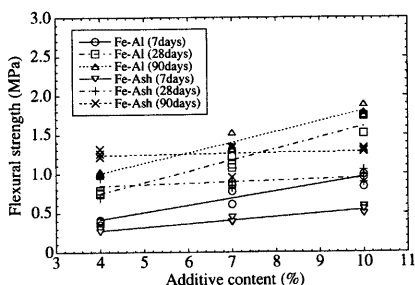


Fig. 5 Flexural strength versus additive content

えられるからである。Fe-Ash石灰は、混合されている下水焼却灰中にも多量の石灰分を含むため、比較的長い期間養生すれば、Fe-Ash石灰処理土の方がFe-Al石灰処理土より大きい曲げ強さを発揮するが、添加率の増加により、Fe-Al石灰処理土中に含有するアルミニウム成分が増加するため、処理土の曲げ強さも大きくなると考えられる。

Fig. 6は、28日養生条件下の各処理土の添加率と曲げ強さの関係である。この結果からも、処理土中のアルミニウム汚泥含有量が増加すれば、処理土の曲げ強さの増加も顕著になることがわかる。一方、消石灰処理土やFe石灰処理土は、多く消石灰を含有しているにもかかわらず、曲げ強さに対する影響が少ない。つまり、消石灰量の増加によって、処理土の曲げに対する耐久能力を高めることは必ずしも有効ではないと考えられる。

Fig. 7とFig. 8に、処理土の曲げ強さと養生期間の関係を示す。添加率が4%の場合、全体的に安定処理材の量が少ないため、含有するアルミニウム汚泥や下水焼却灰が強度発現に及ぼす影響は反映しにくいとい

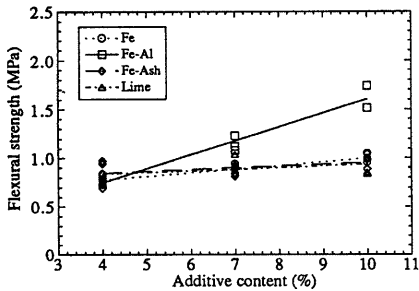


Fig. 6 Flexural strength versus additive content

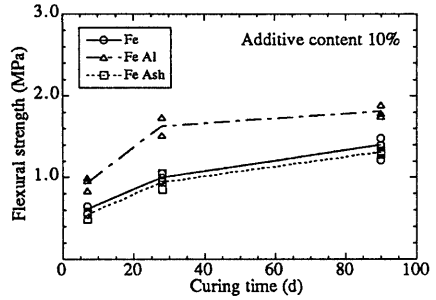


Fig. 8 Flexural strength versus curing time

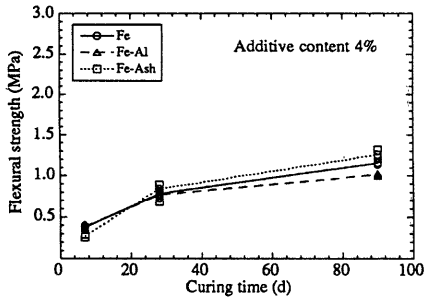


Fig. 7 Flexural strength versus curing time

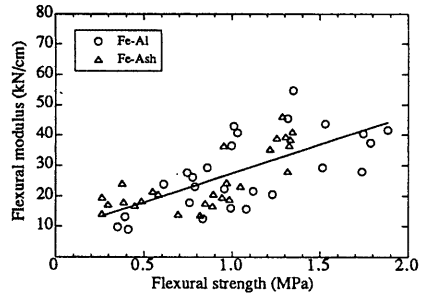


Fig. 9 Flexural strength versus Flexural modulus

える。さらに、処理土の曲げ強さは含有する消石灰量に左右されるため、各処理土の曲げ強さに大きな差が見られない。しかし、添加率が10%に増加すると、Fe-Al 石灰処理土が他の処理土よりも、高い曲げ強さを示している。これは、含有するアルミニウム成分が増加するためであると考えられる。一軸圧縮試験の結果では、アルミニウム汚泥の添加により圧縮強さの早期発揮が期待できたが、長期養生による強度増加がみられなかった。しかし、Fe-Al 石灰処理土の曲げ強さにおいては、長期養生においても、他処理土より高い曲げ強さを発揮しているため、アルミニウム汚泥の添加は、処理土の早期曲げ強さを発揮させるだけでなく、処理土自体の曲げに対する耐久能力も高める効果が期待できる。

曲げ試験を行う際に得られた載荷軸力 p と曲げ変位量 δ の関係を考察すると、供試体破壊までは、ほぼ直線的な関係である。供試体破壊までの載荷軸力 p と曲げ変位量 δ の関係曲線の勾配(単位曲げ変位量に対する載荷軸力)を曲げ変形係数 E_g と定義すると、曲げ強さと曲げ変形係数の関係はFig. 9に示すように、曲げ

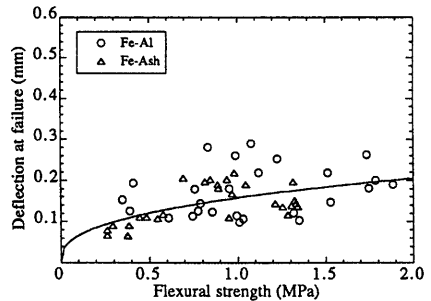


Fig. 10 Deflection at failure versus flexural strength

強さが増加するとともに曲げ変形係数も増加する傾向が見られる。したがって、大きい曲げ強さあるいは曲げ変形係数を持つ処理土は、一定の載荷荷重において発生するたわみ量が小さくなる。よって、アルミニウム汚泥の添加は道路路面に発生するたわみ量を抑制する効果が期待できると考える。

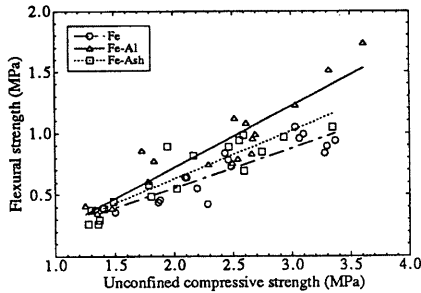


Fig. 11 Flexural strength versus unconfined compressive strength

曲げ試験において、供試体が破断する際の破壊変位量と曲げ強さの関係を Fig. 10 に示す。データのばらつきがあるが、曲げ破壊変位量と曲げ強さの間に非線形的な関係が見られ、曲げ強さは著しく増加しても、曲げ破壊変位量の変化はそれほど大きくない。Fig. 5 および Fig. 6 の結果と併せて考察すれば、Fe-Al 石灰処理土の曲げ強さは、Fe-Ash 石灰処理土に対して大きな値を示しているが、発生する曲げ破壊変位量は大きくない。このことから、曲げ破壊に対して、アルミニウム汚泥を含む Fe-Al 石灰処理土は、Fe-Ash 石灰処理土より高い耐久能力を示していることが証明できる。

3.1.3 一軸圧縮特性と曲げ特性の関連

Fig. 11 は各処理土の一軸圧縮強さと曲げ強さの関係である。同程度の一軸圧縮強さでみた場合、Fe-Al 石灰処理土は、比較的に大きな曲げ強さが発揮する傾向が見られる。このことから、アルミニウム成分の添加は、処理土の圧縮強さの改善よりもむしろ処理土の曲げ強さの改善に効果的である。

Fig. 12 は、各処理土の一軸圧縮試験における破壊ひずみと、曲げ試験における破壊変位量の関係を示したものである。全体的に、曲げ破壊変位量は圧縮破壊ひずみの減少に伴って増加する傾向がある。Fig. 10 の結果に示すように、曲げ破壊変位量が増加すると曲げ強さも大きくなることから、曲げに対する耐久能力が改善されると同時に、圧縮破壊ひずみ量が減少するため、載荷における発生する圧縮ひずみ量を減少させる効果があると考えられる。

3.2 動的復元変形および残留変形特性

3.2.1 復元変形係数の定義

道路のような構造物の載荷条件は、比較的低い荷重レベルで数多く繰返し載荷を受けるのが特徴である。このような場合、構造設計において材料の静的な荷重を受ける際に得られる静的変形係数より、動的な繰返し

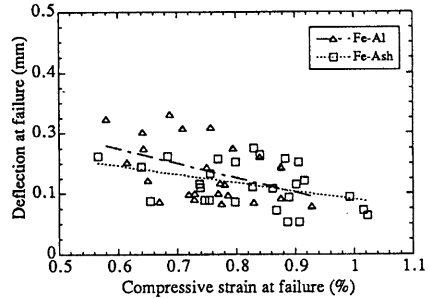


Fig. 12 Deflection at failure versus unconfined compressive strain at failure

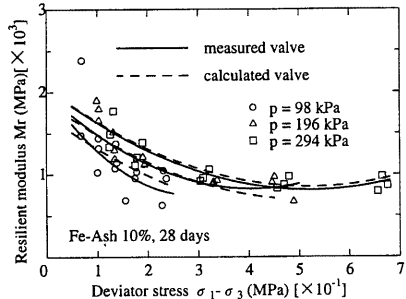


Fig. 13 Resilient modulus versus deviator stress and mean principal stress

し荷重を受ける場合から得られる材料の変形係数を利用することが適当であると考えられる。その場合に考慮すべき変形係数は、材料の動的繰返し載荷を受ける際に発生した弾性ひずみおよび材料の復元変形特性を反映する復元変形係数である。復元変形係数 Mr 試験については、1986年にAASHTOがShookらやRadaらの研究に基づき路床土の Mr 試験法を定めている(順, 1995)。 Mr は、偏差応力と復元軸ひずみから、式(3)を用いて算出される。

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a} \quad (3)$$

ここで、 Mr : 復元変形係数、 σ_d : 偏差応力、 $\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)、 σ_1 : 全軸応力 (最大主応力) (MPa)、 σ_3 : 拘束応力 (最小主応力) (MPa)、 ϵ_a : 復元軸ひずみ。

3.2.2 動的復元変形特性

Fig. 13 は、Fe-Ash 石灰処理土 (添加率 10%, 28 日養生) の軸差応力と復元変形係数の関係を示したものである。ここでは、復元変形係数の平均主応力に対する依存性を調べるために、平均主応力を 98.1kPa、

196.2kPa, 294.3kPaと変化させて実験を行っている。実験結果を考察すると、材料復元変形係数は、平均主応力の増加とともに大きくなり、軸差応力の増加に伴って減少するが、軸差応力がさらに大きくなると、一定になる傾向が見られる。したがって、平均主応力が一定であれば、復元変形係数と载荷軸差応力間の関係は二次元曲線を用いて表すことができる。さらに、Fig. 14に示すように、復元変形係数と平均主応力の間に線形的な関係が見られる。以上の特徴を考慮して、式(4)のような回帰モデルを導いた。式(4)を用いた計算値はFig. 13に示す破線である。全体的に見て、計測値に対して計算値が一致している。よって、本式を用いることにより復元変形係数の予測が可能であると考えられる。

$$Mr = a_0 + a_1 q + a_2 q^2 + a_3 p \quad (4)$$

ここで、 a_0, a_1, a_2, a_3 は実験定数であり、 $a_0=15653.96$, $a_1=4593.32$, $a_2=439.33$, $a_3=16.61$, q : 軸差応力(MPa), p : 平均主応力(MPa)。

Fig. 15 は、Fe-Al 石灰処理土（添加率 10%，28 日養

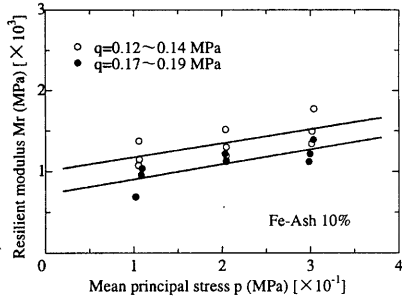


Fig. 14 Resilient modulus versus mean principal stress at fixed deviator stress level

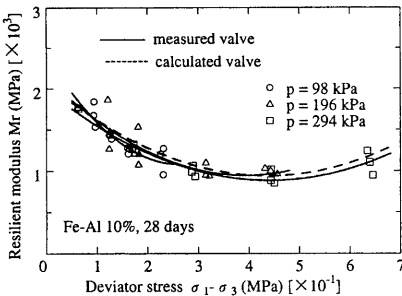


Fig. 15 Resilient modulus versus deviator stress and mean principal stress

生)の軸差応力と復元変形係数の関係を示したものである。Fe-Ash 石灰処理土と比較して、Fe-Al 石灰処理土の場合、平均主応力に対する復元変形係数の依存性が低く、平均主応力が変化しても復元変形係数と軸差応力の関係にあまり変化がない。また、軸差応力が大きくなるにしたがって、復元変形係数は小さくなるが、0.45MPa 以上大きくなると、復元変形係数は逆に大きくなる現象が見られる。さらに、Fig. 14と同じように、復元変形係数と変形主応力の関係を調べると、Fig. 16に示すように、復元変形係数は平均主応力に依存しないことがわかる。図に示す破線は、回帰式(4)を用いて計算した計算値である。実験定数は $a_0=20767.64$, $a_1=5170.77$, $a_2=579.56$, $a_3=-0.307$ である。

静的载荷において、安定処理材の添加率は処理土の強度特性に影響を及ぼす。動的载荷の場合の、安定材の添加率が復元変形係数に与える影響を調べた結果を、Fig. 17とFig. 18に示す。実験結果によれば、安定処理材の違いにかかわらず、処理材の添加率は復元変形係数に及ぼす影響は小さいことがわかる。

添加材料を変えて、処理土の復元変形係数に与える影

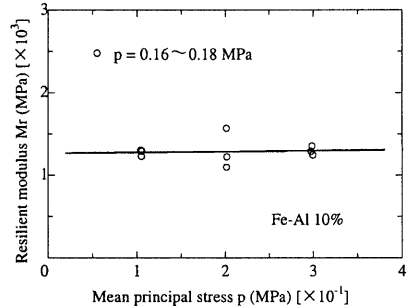


Fig. 16 Resilient modulus versus mean principal stress at fixed deviator stress level

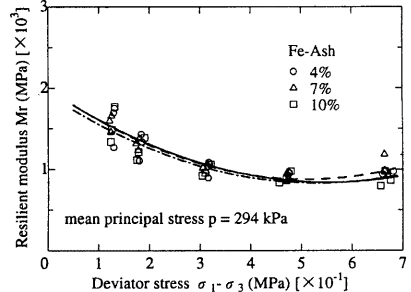


Fig. 17 Resilient modulus versus deviator stress

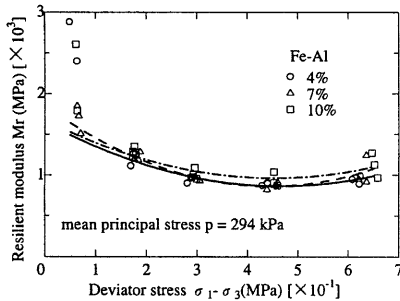


Fig. 18 Resilient modulus versus deviator stress

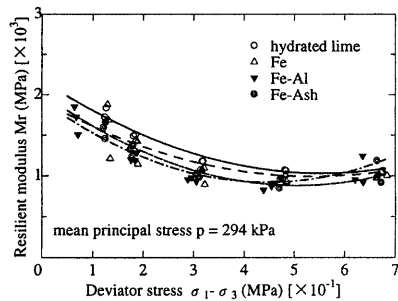


Fig. 20 Comparison of resilient modulus for different stabilized soils

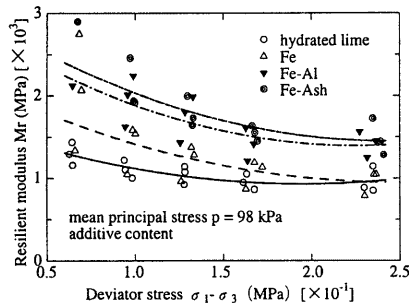


Fig. 19 Comparison of resilient modulus for different stabilized soils

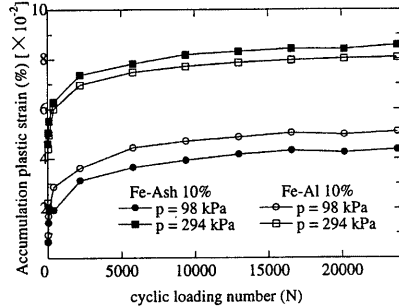


Fig. 21 Accumulated plastic strain versus cyclic loading number

響を調べた結果を Fig. 19 および Fig. 20 に示す。これらの結果より、平均主応力が低い場合、添加材料の違いにより、復元変形係数に差が現れている。さらに、Table 3 を参考にして、安定材料中に含有する消石灰量と併せて考察すれば、添加材料に含有する消石灰量が多いほど、低い復元変形係数を示す現象が見られる。したがって、平均主応力が低い場合、含有する消石灰量が弾性ひずみに影響を与えたと考えられる。しかし、平均主応力が 294.3kPa のように比較的大きい場合、平均主応力が小さい場合と比べて各処理土の復元変形係数の間に大きな差が見られない。したがって、静的強度においては、添加材料の違いが結果に現れるが、平均主応力が大きい場合における、動的変形特性では、添加材料（含有する成分量）の違いよりも拘束圧が弾性ひずみに対して大きく影響する要因であると考えられる。

3.2.3 残留変形特性

繰返し交通荷重を受ける道路の路床・路盤には、累積残留ひずみが発生する。発生する残留ひずみ量の大きさは路面に発生する輻掘れと関係する。したがって、

処理土の耐久性能を評価する際、繰返し載荷における残留ひずみの検討も必要となる。Fig. 21 は、添加率 10% における、Fe-Ash 石灰処理土と Fe-Al 石灰処理土の残留変位量と載荷回数の関係を示したものである。載荷の初期段階に、残留ひずみは載荷回数の増加に伴って急速に増加するが、載荷回数が 20,000 回を越えると、残留ひずみはほぼ安定な状態になる。一方、Fe-Ash 石灰処理土と Fe-Al 石灰処理土の残留ひずみを比較すると、大きな差が見られない。載荷条件が残留ひずみに及ぼす影響を考察すると、平均主応力 $p=294.3\text{kPa}$ 、軸差応力 $q=0.63\text{MPa}$ の場合に発生する残留ひずみは平均主応力 $p=98.1\text{kPa}$ 、軸差応力 $q=0.21\text{MPa}$ の載荷条件で発生するひずみより明らかに大きい。この結果より、処理土の残留ひずみは拘束圧よりも軸差応力に大きく依存することがわかる。

3.3 静的強度特性と動的変形特性の関連

処理土の静的強度特性と動的変形特性の関連性を考察すると Fig. 22 および Fig. 23 に示すように実験値のばらつきが存在するが、静的変形係数 E_0 は一軸圧

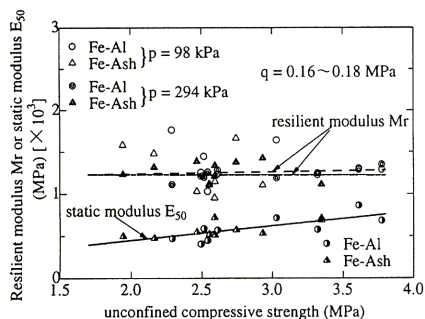


Fig. 22 Resilient modulus and static modulus versus unconfined compressive strength

縮強さの増加に伴って増加する傾向がみられる一方、動的変形特性である復元変形係数は、処理土の一軸圧縮強さが大きくなっても増加する傾向が見られない。さらに、復元変形係数と静的変形係数 E_{s0} の関係を考察すると、同じように、復元変形係数は E_{s0} に依存する傾向が見られない。これは、小さい荷重で繰返し載荷を行う場合の処理土の変形進行状況と静的載荷の場合の単調載荷における処理土の変形進行状況が違いため、処理土の静的強度特性が改善されても、必ずしも処理土の動的変形特性が改善される訳ではないことを意味する。

3.4 反応生成物の同定と微視的構造

3.4.1 安定処理土における微視的観察

安定処理土において、添加材は処理対象土の細粒分から溶出する反応性元素と結合して硬化反応物を生成する。その反応生成物は成長とともに処理土の間隙を充填し、緻密化が進み、粒子間のつながりを強化するため、ことにより、処理土全体の強化が促進される。石灰系安定処理における主な反応生成物は、石灰と粘土鉱物より溶出する可溶性シリカ及びアルミナとの化学反応により生成する、不溶性のケイ酸石灰水和物、アルミン酸石灰水和物などのポズラン反応生成物である。また、ポズラン反応の進行状況は、粘土鉱物より溶出されるシリカおよびアルミナの溶出量に支配される。

微粉酸化鉄やアルミニウム汚泥には Table 2 に示すように多量の Fe_2O_3 および Al_2O_3 が存在し、アルミニウム汚泥中には SiO_2 も多く含有している。これらの材料を添加することによって、処理対象土の細粒分から溶出する反応性元素に頼ることなく、消石灰と廃棄物中に含有する反応性元素が粒子間に存在する水と化学反応し生成した結晶物が粒子周囲の間隙を充填する。よって、このような物質の添加は、強度増進だけ

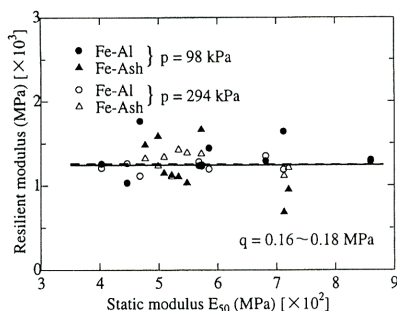


Fig. 23 Resilient modulus versus static modulus E_{s0}

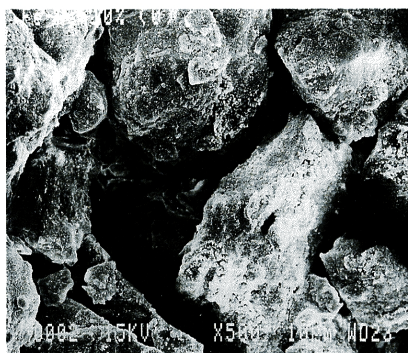


Photo 1 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Ash
Lime after 0 days

でなく、強度の早期発揮効果も期待できる。このような、化学反応と力学的特性のメカニズムを解明するためには、微視的な観察が有用であると考えられる。

安定処理材料である消石灰と廃棄物の混合物中に含まれる主な化学成分は、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 である。処理対象土に含まれる粘土鉱物の化学成分は、 Al_2O_3 、 SiO_2 である。安定処理における反応生成物としては、それらの化学成分の組み合わせにより CSH、CAH および CSAH 系反応生成物が生成する。それらの反応生成物を電子顕微鏡で観察した場合、CSH 反応生成物の結晶形態は一般に繊維状あるいは網目状が多く、CAH 反応生成物は六角形状の板状結晶であることが主な特徴である。また、CSAH 反応生成物も板状結晶物であるが、比較的大きく薄いことが特徴である。

3.4.2 電子顕微鏡を用いた微視的構造の観察

Photo 1, Photo 2 は、Fe-Ash 石灰処理土および Fe-Al 石灰処理土の、添加率 10% における締固め直後の供試体の電子顕微鏡写真である。この時点では反応生成物は存在していないため、土粒子あるいは粒子間の間隙



Photo 2 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Al
Lime after 0 days

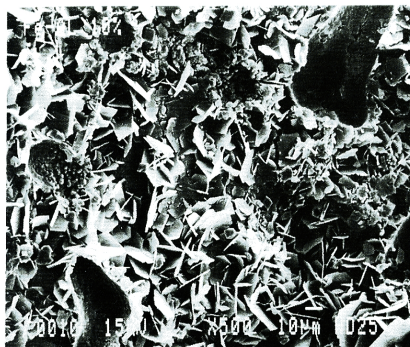


Photo 4 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Al
Lime after 28 days



Photo 3 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Ash
Lime after 28 days

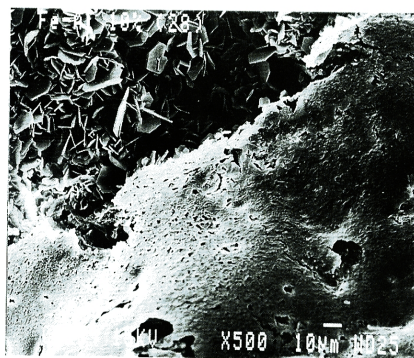


Photo 5 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Ash
Lime after 28 days

が確認でき、土粒子間の接着も弱いといえる。Photo 3は、Fe-Ash 石灰処理土の 10%添加率、28 日養生における電子顕微鏡写真である。この破断面の電子顕微鏡写真を見ると、粒子自体は確認できず、その代わりに粒子表面や粒子の間に存在する反応生成物が見られる。この中には、六角形板状と比較的大きな薄い板状結晶物が確認できる。これらの板状結晶物は CAH あるいは CSAH 系反応生成物と同定できる。その他に、板状反応生成物の周辺にゲル状のものも存在し、スケールが比較的大きく、表面が滑らかな糊状のものもある（処理土中に気泡が存在するため、破断面に滑らかな気泡跡が現れたと考える）。Photo 4は、Fe-Al 石灰処理土の 10%添加率、28 日養生における電子顕微鏡写真である。Fe-Ash 石灰処理土と同様、粒子自体は確認できず、粒子表面や粒子の間に存在する六角形板状や比較的大きく薄い板状の反応生成物が見られる。しかし、Fe-Ash 石灰処理土と比較した場合、Fe-Al 石灰処理土の方がより密に反応生成物が存在する。Photo 5

は滑らかな糊状の反応物をさらに拡大した写真である。これらの結晶物は CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CSH 系反応生成物と考えられる。これらの反応生成物は、板状の結晶物を拘束、あるいは結合する役割を果たす。したがって、土粒子の空隙を充填するだけでなく、結晶物自体にもカードハウス状の構造を形成することにより、安定処理土の強度発揮に貢献している。しかし、全体的に針状、棒状、あるいは繊維状の反応生成物がほとんど見られなかった。つまり、養生期間の関係から、CSH 系反応生成物やエトリンガイトの生成が少ないと判断できる。

3.4.3 X線回折分析による反応生成物の同定

電子顕微鏡写真よりの確定性分析を行うために、X線回折は一つの有効な手段であると考えられる。試料が粘土等と異なり、細粒分が少量であるために、不定方位法（粉末法）により実験を行った。

Fig. 24, 25, 26 は、添加率 10%、28 日養生における処理土の X線回折結果である。これらの結果を考察す

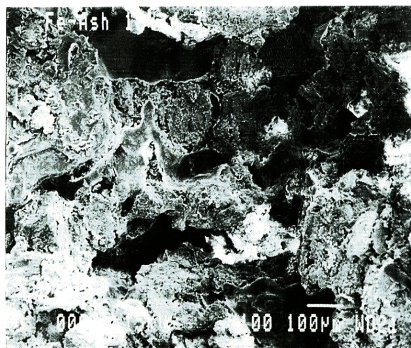


Photo 6 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Ash Lime after 28 days

ると、Fe-Al 石灰処理土中に消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, $d: 2.63, 4.93, 1.93$) はほとんど存在しない。つまり、化学反応がかなり進行しているので、消石灰は処理土中に多く存在する反応が速い物質 Al_2O_3 等と反応して、多くの反応生成物 CAH 系反応生成物が生成したと考えられる。これに対し、Fe-Ash 石灰処理土の中には未反応のままの消石灰が多く見られる。特に Fe 石灰の場合は、Fe-Ash 石灰の場合より顕著である。このことより、圧縮強さと養生期間の関係を考察すれば、短い養生期間では Fe-Al 石灰処理土の強度が早く発揮できるが、28 日以後の強度の増加は少ない。しかし、Fe 石灰、Fe-Ash 石灰は、残留消石灰が多く存在しているため、28 日以後も強度増加を可能としていると考えられる。

3.4.4 反応生成物と力学的特性の関連性

各添加材の電子顕微鏡写真を考察すると、Fe-Al 石灰処理土の破断面の間隙は、Fe-Ash 石灰処理土と比較して少ない (Photo 6, Photo 7)。つまり、アルミニウム汚泥を添加することによって、化学反応の速度が速くなるか、反応生成物が多く生成することにより、土粒子間の間隙の大部分を充填した結果であると考えられる。これに対して、Fe-Ash 処理土の破断面には多くの間隙を確認できる。これは、反応速度が遅いか、反応生成物が少ないためであると考えられる。また、Fe-Al 石灰処理土には、六角形板状の結晶物が多く存在する。よって、アルミニウム汚泥の添加によって、CAH や CSAH 系反応生成物が多く生成したことが分かる。CAH 系反応生成物は、CSH 系反応生成物より反応速度が速いため、早期強度の発揮に有利であるとされる。以上の特徴と処理土の強度特性を関連させて考察すれば、28 日養生の時点では、Fe-Al 石灰処理土は他の処理土より、大きな強度を発揮できる。特に曲げ強さの発揮が顕著である。これは、処理土中の間隙が少ないためであり、CAH 系反応生成物の生成に

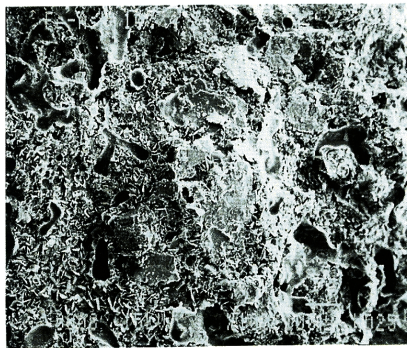


Photo 7 SEM of soil stabilized with 10% of Fe-Al Lime after 28 days

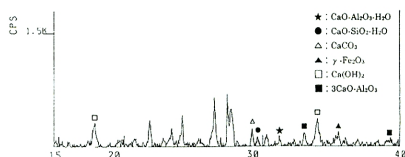


Fig. 24 X-Ray diffraction pattern (Fe Lime 10%, 28days)

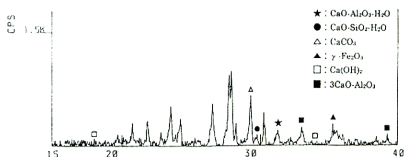


Fig. 25 X-Ray diffraction pattern (Fe-Al Lime 10%, 28days)

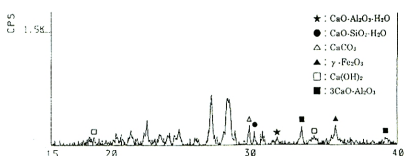


Fig. 26 X-Ray diffraction pattern (Fe-Ash Lime 10%, 28days)

より早期強度が発揮されると考えられる。

4. 結論

- 1) アルミニウム汚泥を石灰系安定処理材料に混合することにより、処理土中のアルミニウム成分を

増加させ、化学反応の反応速度を活性化するため、処理土の圧縮強さを早期的に発揮させることが可能である。また、Fe-Al と Fe-Ash 石灰処理土の一軸圧縮強さは、ともに養生期間 7 日において 0.98MPa を上回っているため、上層、下層路盤に適用する場合の石灰系安定処理の品質基準を満たしている。

- 2) 処理土の圧縮強さが増加すれば、曲げ強さもともに増加する傾向があるが、Fe-Al 石灰処理土を Fe-Ash 石灰処理土や消石灰処理土、Fe 石灰処理土と比較した場合、Fe-Al 石灰処理土は圧縮強さよりも曲げ強さに対する改善が顕著である。さらに、曲げ強さの増加に伴って、曲げ変形係数も大きくなるため、処理土を路盤材として利用する場合、一定の載荷荷重において、発生するたわみ量を抑制するため、Fe-Al 石灰処理土は Fe-Ash 石灰処理土より有利である。
- 3) Fe-Ash 石灰処理土の復元変形係数は繰返し載荷軸差応力と平均主応力に依存しているが、Fe-Al 石灰処理土の復元変形係数は、平均主応力に対する依存性が低い。一定の平均主応力レベルにおいて、処理土の復元変形係数は載荷軸差応力の増加とともに減少するが、載荷軸差応力が一定のレベルを越えると、復元変形係数は一定になるか、あるいは上昇する傾向が見られる。これらの特徴から、処理土の復元変形係数と軸差応力及び平均主応力との関係は、式(4)に示すような二次元曲線族を用いて表すことができる。
- 4) 安定処理土の一軸圧縮強さや曲げ強さなど静的力学特性は、安定処理材の添加率と関係しているが、動的荷重を受ける処理土の復元変形係数は、安定処理材の添加率に対する依存性が低いと考えられる。平均主応力が小さい場合、各々の添加材を比較すると、処理土中に含有する消石灰量が多いほど、低い復元変形係数を示すが、平均主応力あるいは軸差応力が大きい場合、この差が減少する傾向が見られる。したがって、復元変形係数は処理土の強度など要素より軸差応力や拘束圧など載荷応力状態に大きく支配されることが考えられる。
- 5) 処理土の静的変形係数 E_{30} は静的圧縮強さの増加

とともに増加するが、動的載荷条件下における処理土の復元変形係数は処理土の静的一軸圧縮強さや変形係数 E_{30} などに対する依存性が低いと考えられる。

- 6) 微視的な観察結果から、アルミニウム成分の増加によって、Fe-Ash 石灰処理土より多くの結晶物を生成する。これらの結晶物は、より効率的に粒子間の空隙を充填し、処理土自体を一層緻密化する。結果的に、Fe-Al 石灰処理土の曲げ強さは Fe-Ash 石灰処理土に比べて大きな値を示す。

謝辞

本研究を行うにあたりご助力頂いた、京都大学防災研究所三村 衛助教授、清水博樹技官、ならびに Fe 石灰技術研究所関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 顧 歆達 (1995) : Fe 石灰安定処理土の路床・路盤材としての耐久性に関する研究, 京都大学修士論文。
- 友久誠司 (1989) : 特殊土および産業廃棄物の石灰・セメント系安定材による固化処理と強度発現の予測手法に関する研究, 京都大学学位請求論文。
- 鳥居和之 (1985) : 産業副産物の土質安定処理への有効利用に関する基礎的研究, 京都大学学位請求論文。
- 西 勝・吉田信之・畠山昌平・辻本敏治・遠山俊一 (1993) : 円形走行試験におけるアスファルト舗装のわだち掘れ挙動解析, 建設工学研究所報告第 35 号, pp159-177。
- Boniface, C. A. Obi (1972) : Soil-cement bases under thin bituminous surfacing, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. TE2, pp. 167-176。
- Lee, S. W., Fishman, K. L. (1993) : Waste products as highway materials in flexural pavement system, Jour. of Trans. Engng., ASCE, Vol. 119, No. 3, pp.
- Sauer, E. K., Weimer, N. F. (1977) : Deformation of lime modified clay after freeze-thaw, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol. 104, No. TE2, pp. 201-212。

Evaluation of Lime Mixed with Aluminum or sewage Sludge Stabilized Soil for Road Base Material

Masashi KAMON, Takeshi KATSUMI, Huanda GU*, Masahiro I

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Aluminum and sewage sludge are the waste from industry or habit life. The purpose of this paper is to investigate the utility of these waste as road base material. Because the ferrum lime stabilized soil has been used actuality for road base material for long time, by mixing the aluminum or sewage sludge with ferrum lime, the mixture may be used as stabilizer for road base material. It may be hoped to improve pavement as well as make use of waste. In order to demonstrate the benefit of the mixture material toward improvement of pavement performance, a series of laboratory tests had been carried out such as unconfined compressive test, bending test and cyclic dynamic triaxial test, furthermore, the micro structure of stabilized soils had been observed by SEM(scanning electron microscope) and X ray analyses device to make out the mechanism of improving in strength and durability of stabilized soils.

Keywords: Soil stabilization; unconfined compressive strength; flexural strength; resilient modulus; X ray diffraction analyses; electron microscope