

8. 鉄処理による斜面安定工法の実験的研究

土 岐 晃 生
中 山 准 一
村 上 讓 二

要 旨

当斜面安定工法は、斜面に打ち込んだ鋼材に接触して酸化促進剤を配置し、周辺土を強制的に酸化させることで、土の固結強度を高め同時に土を一体化させ斜面を安定化させることを目的とした工法である。本報告は、酸化促進剤として塩化第一鉄を使用し、鋼材にかすがい状鉄筋と鋼管パイプを用いてまき土を中心に行った実験と、前記、酸化促進材に追加としてケイ酸ソーダを組み合わせ砂質土を対象に行った実験を述べるものである。

キーワード

斜面安定工法／酸化鉄／酸化重合体／鉄処理

目 次

(その1)	(その2)	
1. はじめに	1. はじめに	§ あとがき
2. 酸化鉄の浸透観察実験	2. 試料の種類と調整法	
3. 処理土の工学的特性	3. 処理土の工学的特性	
4. 現場実験	4. 固化発現の機構	
5. 実験結果	5. 実験結果	

8. EXPERIMENTAL STUDY OF THE SLOPE STABILIZATION METHOD BY THE ADDITION OF IRON

Teruo Toki
Junichi Nakayama
Joji Murakami

Abstract

This method seeks to stabilize slopes by increasing bonding strength of soil and simultaneously by making the soil monolithic during its oxidation process. Such increase of strength is to be achieved by putting the oxidation accelerating agent in contact with the steel bars and pipes driven into the slope to force the surrounding soil to oxidize.

This report describes the experiments carried out mainly on decomposed granite using ferrous chloride as oxidation accelerating agent and using cramp-shaped steel bars and pipes. It also describes the same experiments, mainly of sand, using an additional material of silic acid soda.

鉄処理による斜面安定工法の実験的研究（その１） １）

1. はじめに

土地造成において斜面を急勾配に仕上げる場合、擁壁やのり枠などの工法が用いられているが、このような構造物は施工上煩雑で工期、工費が多くかかるのが一般的である。また、緑化工法は簡便また安価な工法として従来より多用されている工法であるが、斜面の表面保護の効果しか期待できず、斜面安定工法として補助的な役割をはたしてきたに過ぎない。

したがって、施工性が良く、しかも安価で一定の改良効果の得られる工法が望まれている。

我々は、鉄の酸化過程における土粒子間の結合作用に着目して、主として砂質土よりなる斜面を対象とした斜面安定工法の開発を進めてきた。本報告はその開発にあたっての室内および現場実験の経過と結果を述べるものである。

2. 酸化鉄の浸透観察実験

二価鉄イオン (Fe^{2+}) は酸化して三価鉄イオン (Fe^{3+}) になる過程で酸化重合体を生成する。このとき酸化重合体は土粒子間の接着剤として働くといわれている。²⁾

現場実験に先立ち、地中での酸化鉄の浸透拡散状況をとらえるため、酸化促進剤として塩化第一鉄 (FeCl_2) を用いて、まず室内で砂層中の浸透実験をおこなった。写真－１に示すように排水孔を設けたアクリル水槽 (30cm×25cm×25cm) 内に砂を満し、タテ割りにした直径13mmで長さ10cm、20cmの２種類の異形鉄筋と、酸化促進剤 (FeCl_2) をアクリル板の壁面に接するように配置して鉄の酸化拡散の目視観察を行った。

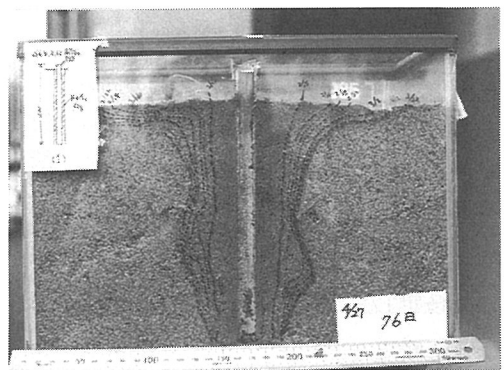
この模型実験では自然環境にできるだけ近づけるよう7日毎に5mm降雨相当量を注水した。

図－１は、30日経過時までの酸化鉄の浸透拡散状況を示すものであるが、地表部は鉄筋を中心に半径12cmの範囲まで平皿状に酸化領域が進行しており、3cm以深は半径5cmの範囲まで酸化が進行することが確認された。

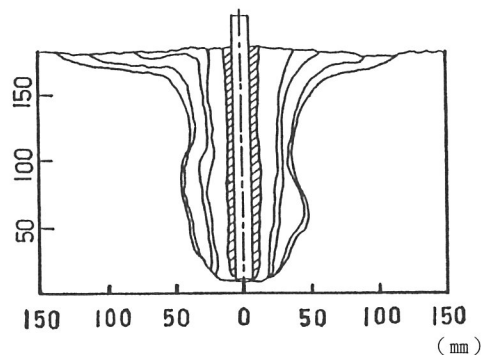
この酸化された面積を測り体積に換算して時間（日数）との関係をみたものが図－２である。

縦軸は深さ10cm当りの酸化拡散領域の容積 ($\text{ml}/10\text{cm}$)

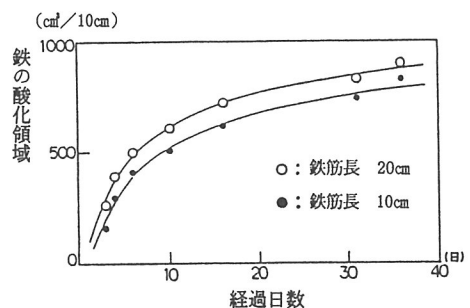
cm) で10日目位までは拡散が急速に進むがそれ以降は漸増しており、鉄筋長の比較では、鉄筋が長いほど有効であることを示している。



写真－１ 砂による酸化鉄の浸透実験



図－１ 酸化鉄の浸透拡散状況



図－２ 鉄の酸化領域の経時変化

3. 処理土の工学的特性

室内試験はまさ土を用いて行った。土木工事に広く用いられているまさ土はわが国の西南部に分布する代表的な土であるが、従来、まさ土地帯では斜面崩壊や地すべりが多いとされており、大規模な造成工事に付随する切盛土工には十分な検討がなされる必要がある。

まさ土は花コウ岩系の風化残積土と分類されており土質工学的に典型的な特性を有している。

図-3に見る通り、まさ土などの破壊包絡線は通常の土の場合と異なり $\sigma - t$ の関係が直線ではなく曲線となり、わずかの拘束力の増加によりせん断強度が著しく増加することが知られている。³⁾

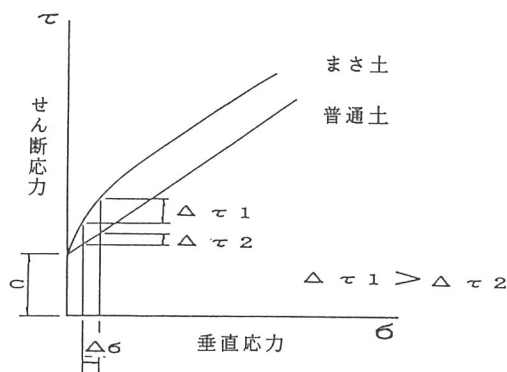


図-3 土の破壊包絡線



写真-2 釘打ち法による不攪乱試料の採取

このような特性を持つ地盤では鉄の酸化過程で生じる土の強度増加による斜面安定の効果が特に高いと考えられ、今回まず実験の対象土に選んだ。

試料のまさ土は交野市私部の生駒山系の切土斜面より採取した。一連の試験は主として不攪乱試料について行い、参考として攪乱試料、標準砂についても行っている。強度試験としては一面せん断試験を行った。

試料の採取方法は写真-2に示すように西田らの提案する方法に従った。³⁾

3.1 試料土の物理的性質

図-4に試料土の物理的性質を示す。現場密度は乾燥密度で 1.35g/cm^3 、コンシステンシーはNPである。

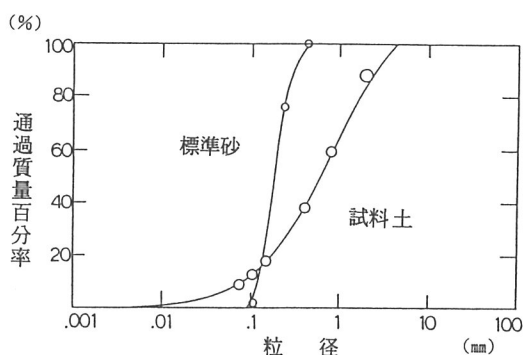


図-4 試料土の粒度分布

3.2 試料土の調整法

攪乱試料に対する鉄の添加量は試料土の乾燥重量に対し実重量換算で2%を目安とした。

塩化第一鉄を使用するとき、 FeCl_2 の分子量は127でこの中のFeの原子量は56であるので、 $0.020 \times 127 / 56 \div 0.045$ より塩化第一鉄は4.5%が必要添加量となる。

添加方法は、試料が飽和となる水の量を求め添加剤を溶かし静かに供試体に流し込み風乾養生を行った。攪乱試料は現場密度になるようにローラーで敷き均した。添加量、添加法および養生法は不攪乱試料に準じて行った。

3.3 処理土の力学的性質

一面せん断試験は、不攪乱試料については大型一面せん断試験機($\phi 100\text{mm}$)にて、攪乱試料については小型一面せん断試験機($\phi 50\text{mm}$)で行った。

垂直荷重は0.5、1.0、2.0、3.0kgf/cm²の定荷重法で行っている。試験は一点につき2個行い平均した。

3.4 結果と考察

まさ土の1カ月、2カ月養生後の結果を図-5、6に示す。1カ月養生では変化は見られないが2カ月養生で ϕ の増加が見られる。攪乱試料では c の増加も見られている。pHはいずれも1~2の間にあり Fe^{2+} の定量では1カ月養生で重量比平均0.5%、2カ月養生で平均0.2%であった。

標準砂の1カ月、2カ月養生後の結果を図-7に示す。標準砂では ϕ の増加がみられる。

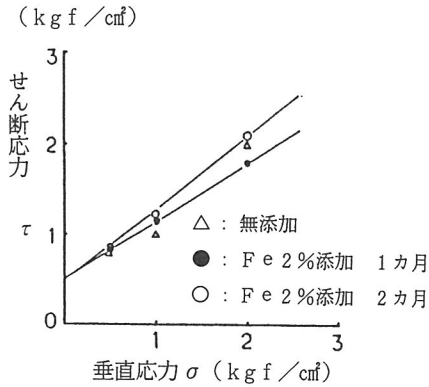


図-5 セン断試験結果（不攪乱）

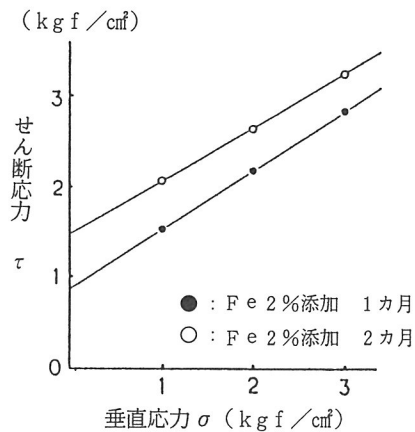


図-6 セン断試験結果（攪乱）

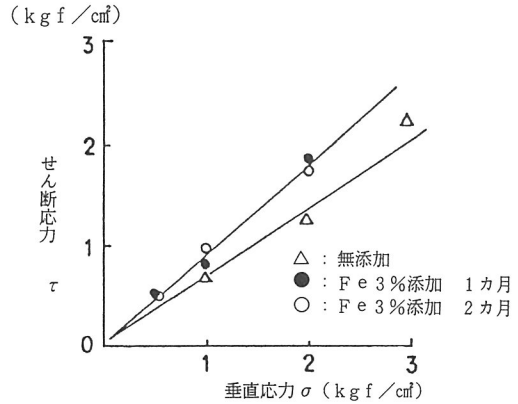


図-7 セン断試験結果（標準砂）

4. 現場実験

実施施工は、自然斜面、盛土斜面、切土斜面の3ケースを設定しそれぞれの現場を選定した。 FeCl_2 はpHが1~2であるが、土中に混入されると土の緩衝力などの作用によりpHが上昇し、この過程で鉄は2価から3価へ酸化することから、ここでは鉄の酸化の進行状況はpHの測定結果を目安とした。⁴⁾

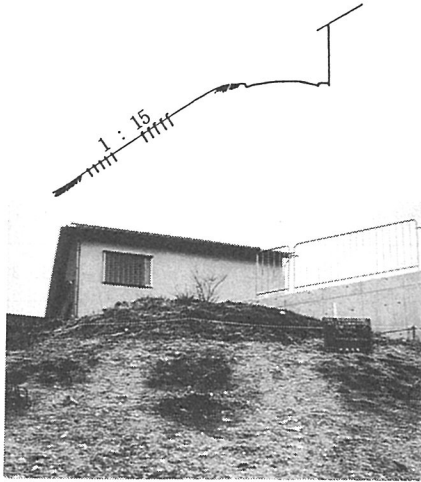
以下に各現場での施工状況を示す。

4.1 有馬層群山田層の風化残積土の自然斜面の場合

現場は神戸市北区青葉台にあり、図-8の粒度分布に示すように土質はシルト質砂である。斜面は約1割5分（1:1.5）の勾配である。

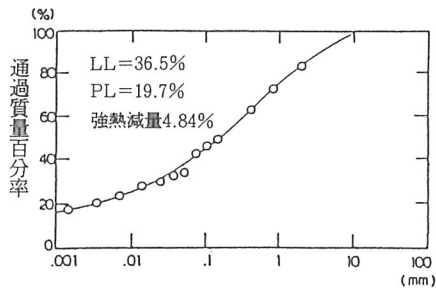
スウェーデン式サウンディング試験値は、 $N_{sw}=50$ 前後であった。写真-3に示すように、実験は地盤に菱形状に20cmピッチで $\phi 3$ cmの削孔を施して、 FeCl_2 を充填した後、直径13mm、長さ20cmの異形鉄筋を挿入した。経過日数と土壌強度およびpHの関係を山中式硬度計、pH試験紙を用いて計測した結果を図-9に示す。

山中式硬度計には貫入量とqu値が記されているので図中に併記した。含水比が一定でないで絶対値の比較はできないが、経過日数とともにpHが上昇し、強度の増加する傾向がみられる。

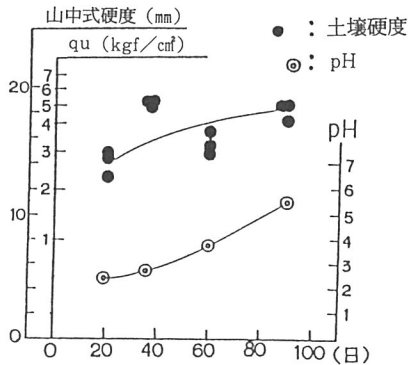


……自然斜面……

写真－3 有馬層群山田層（神戸市北区）



図－8 粒度分布（神戸市北区）

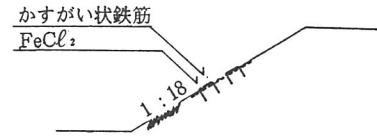


図－9 土壌硬度とpHの経時変化

4.2 大阪層群の盛土斜面の場合

現場は京都府八幡市にあり、図－10の粒度分布に見るように土質は砂質土である。斜面は約8分（1：0.8）の勾配である。簡易貫入試験（土研式）の値はNc=5前後であった。写真－4に示すように、この斜面にかすがい状鉄筋を打ち込んだ後、周囲に酸化剤FeCl₂を散布した。

強度試験は、4.1と同様に山中式硬度計を用いて行った。結果を図－11に示す。やはり、含水比が一定でないので絶対値の比較はできないが、経過日数とともにpHが上昇し強度の増加する傾向がみられる。

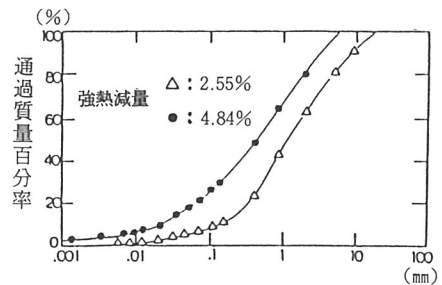


ひし形パターン

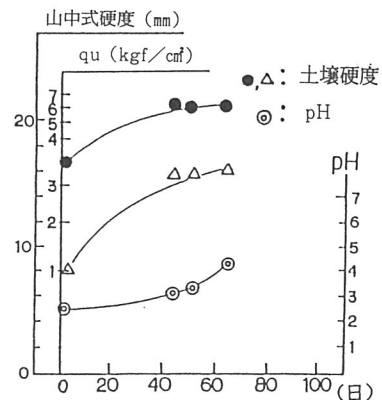


……盛土斜面……

写真－4 大阪層群（京都府八幡市）



図－10 粒度分布（八幡市）



図－11 土壌硬度とpHの経時変化

4.3 まさ土切土斜面の場合

現場は交野市私部にあり、付近は領家花崗岩帯生駒山系に属し土質はまさ土である。図-12に粒度分布を、表-1にその他の土質試験結果を示す。現場密度、強熱減量からみてMuが大部分を占めている。⁵⁾

斜面の勾配は約1割(1:1)である。風化の程度が一様でないので、簡易貫入試験(土研式)を行ってNc=4~6の場所を選び、図-13に示すように風化の進んだ上段(のり肩より下方5.0m以内)について実験を行った。写真-5に正面全景を示す。

鋼材打設部分をA, B, C, Dの4ブロックに分け図中に示すようなかすがい状鉄筋と、酸化促進剤を充填した鋼管パイプを各種組み合わせで打設した。

各ブロックの打設パターンを表-2に示す。

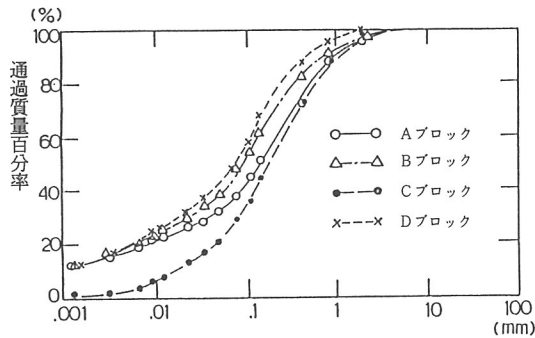


図-12 粒度分布(交野市)

かすがい状鉄筋は、4.2と同じD13の鉄筋を用い、鋼製パイプは外径φ34mm, 内径φ27.6mm(SGP-25A鋼管)にφ6mmの孔を10cmピッチで千鳥状にあけたものを使用した。

表-1 土質試験結果

採取位置	乾燥密度 (g/cm ³)	比重	間隙比	強熱減量 (%)
Aブロック	1.40	2.701	0.93	5.18
Bブロック	1.50	2.633	0.76	4.60
Cブロック	1.47	2.694	0.83	5.32
Dブロック	1.34	2.674	0.99	9.06

表-2 各ブロックの打設パターン

位置	パターン	鋼材の種類	打設密度
Aブロック		かすがい状鉄筋のみ	7.2本/m ²
Bブロック		上部: かすがい状鉄筋 下部: 長さ1.1mの鋼管パイプ	7.2本/m ² 1.0本/m ²
Cブロック		上部: 長さ1.8mの鋼管パイプ 下部: 長さ1.1mの鋼管パイプ	1.0本/m ²
Dブロック		Cブロックに同じ	1.6本/m ²

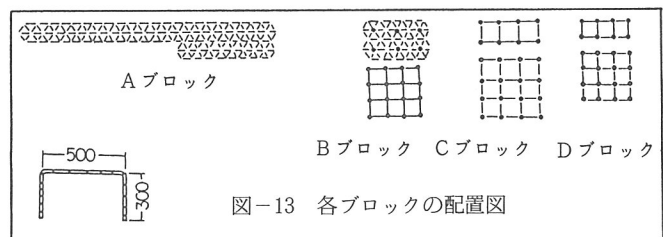
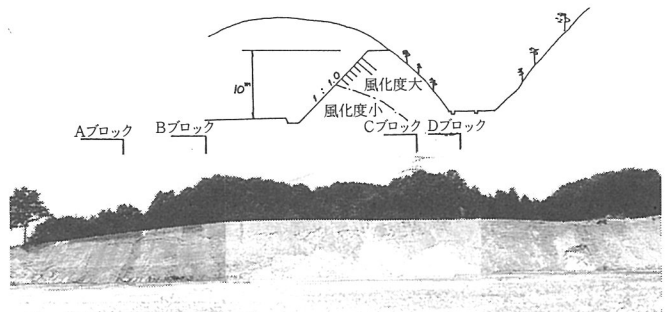


図-13 各ブロックの配置図



……切土斜面……

写真-5 まさ土(交野市私部)

図-14は山中式硬度計による表面硬度とpH測定結果を示す。付近の降水量も併記してその相関性を調べている。降雨後の一時的な強度低下はあるものの、ほぼ日数の経過とともにpHの回復と土壌硬度の上昇傾向がみられる。

写真-6に鋼管打設状況を、写真-7に試験施工後の状況を示す。



写真-6 鋼管打設状況

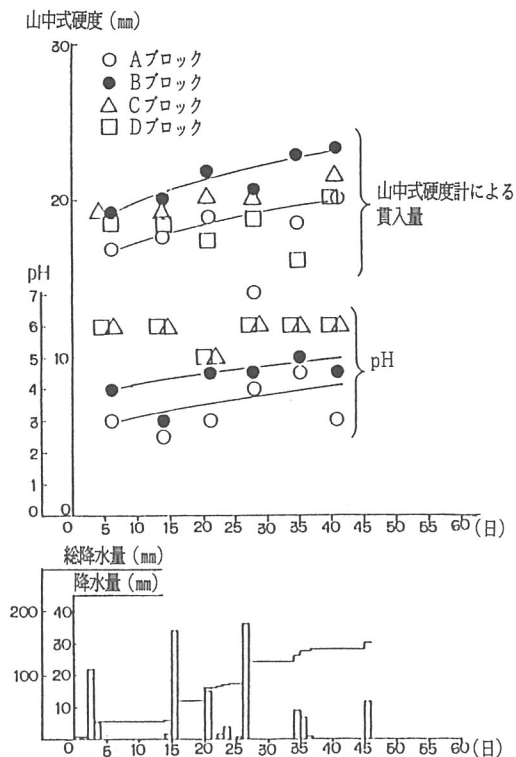


図-14 土壌硬度とpHの経時変化

5. 結果

鉄の酸化過程における土の固結作用を利用した斜面安定工法に関して、基礎的な工学的特性を知るために行ってきた鉄処理による室内実験と、それぞれの条件の異なる斜面に対して施工し観察を行ってきた現場実験の経過を報告した。一連の室内、現場実験を通じ、鉄処理された土は経過日数とともに一定の強度増加の得られることが確認された。

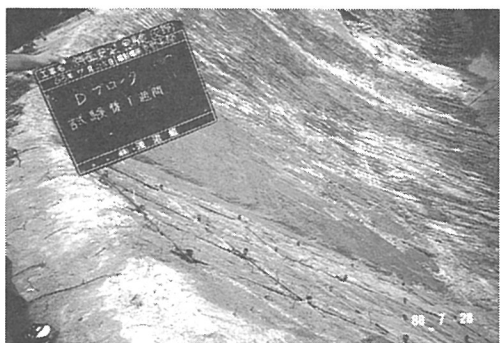


写真-7 試験施工後の状況

鉄処理による斜面安定工法の実験的研究（その2） 6)

1. はじめに

前章では鉄の酸化過程における土の強度増加についてまさ土を中心に行った実験結果を報告した。本章では対象土を砂質土とし、土の固結強度を高めるためにケイ酸ソーダ (Na_2SiO_3) を添加剤に用いて行った実験を報告する。

2. 試料と種類と調整法

処理対象土として川砂、山砂および標準砂の3種類を用いた。各々の試料土の粒度分布を図-1に示す。添加剤は鉄系材料として塩化第一鉄 (FeCl_2) を前回同様に用いた。ケイ酸ソーダ (Na_2SiO_3) との組み合わせは表-1のとおりである。

添加量は試料土の乾燥重量に対し実重量換算で3%を目安とした。塩化第一鉄を使用するとき FeCl_2 の分子量は127でこの中のFeの原子量は56であるので、 $0.030 \times 127/56 \div 0.068$ より塩化第一鉄は、6.8%が必要添加量となる。

試料調整は、まず、試料土に粉末状のケイ酸ソーダを混合したのち、飽和となる量の水で溶かした塩化第一鉄を試料土に流し込み、室内で風乾養生した。

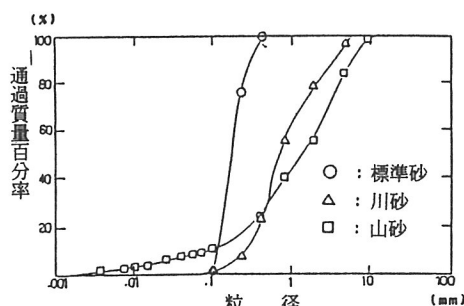


図-1 試料土の粒度分布

表-1 作成試料

試料土	FeCl_2	Na_2SiO_3	養生期間
標準砂	3%	0%	各々 1. 2 カ月
		1%	
		3%	
川砂	3%	0%	
		3%	
山砂	3%	0%	
		3%	

3. 処理土の工学的特性

強度試験として標準一面せん断試験 ($\phi 60\text{mm}$) を行った。試料の成形は養生したものを内径 $\phi 60\text{mm}$ の成形器を用いて不攪乱状態で成形した。

結果を図-2～7に示す。垂直荷重は、0.5、1.0、2.0 kgf/cm^2 の定荷重法で行った。

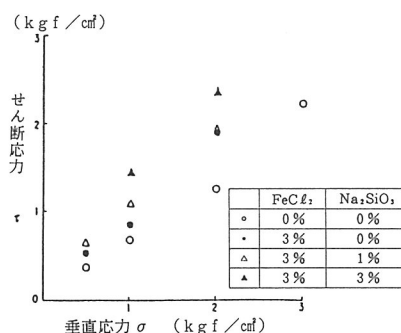


図-2 せん断試験結果
(標準砂 1 カ月養生)

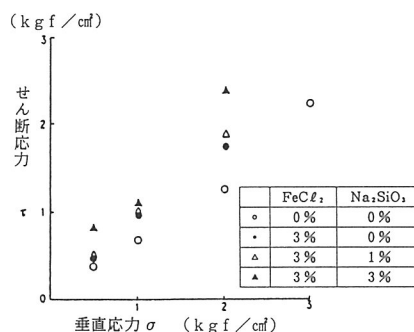


図-3 せん断試験結果
(標準砂 2 カ月養生)

4. 固化発現の機構

鉄の土中での挙動については酸化還元電位 (Eh) と pH の関係によって決まると言われている。⁴⁾

2 カ月養生で pH = 3 以下で、 Fe^{2+} の定量結果では約 70% の二価鉄が酸化していた。X 線回折試験の結果を図-8 に示す。処理土と未処理土を比べるといずれもバックグラウンドが高くなっているが、これは Fe や SiO_2 ゲルが土粒子表面をコーティングしたことによるものとみられる。

処理土には $3.85 \text{ \AA}$, $5.6 \text{ \AA}$ に未処理土にはない特徴的なピークが現れている。これは Fe ゲルによるものとみられる。⁷⁾

5. 実験結果

標準砂は無添加の場合に比べて、鉄処理を行った場合には $\phi = 7 \sim 8^\circ$ の増加、さらにケイ酸ソーダを添加した場合には c の増加傾向がみられる。

一方、川砂、山砂については、鉄処理による強度増加の效果に比べてケイ酸ソーダの添加効果は顕著ではなかった。

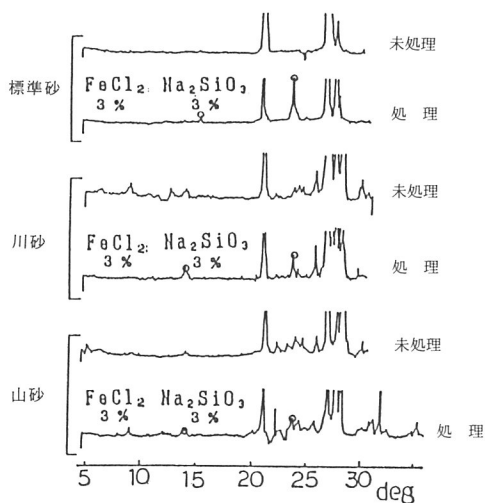


図-8 X線回折試験

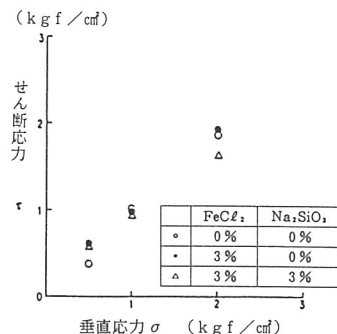


図-4 せん断試験結果 (川砂 1 カ月養生)

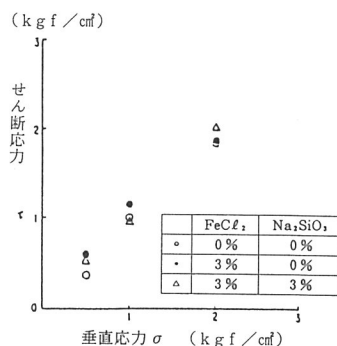


図-5 せん断試験結果 (川砂 2 カ月養生)

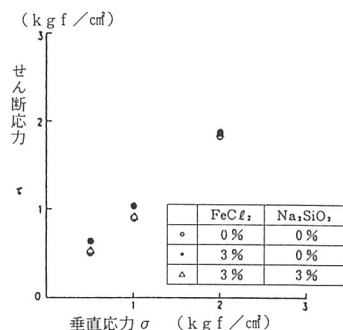


図-6 せん断試験結果 (山砂 1 カ月養生)

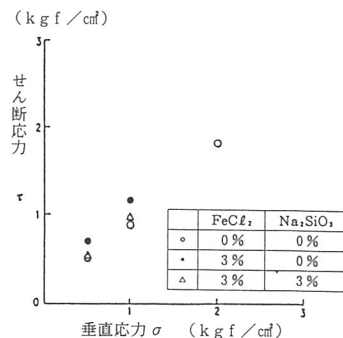


図-7 せん断試験結果 (山砂 2 カ月養生)

§ あとがき

鉄処理による斜面安定工法について、(その1)では我が国の代表的な土であるまさ土を中心に行った実験を、(その2)では鉄処理のための塩化第一鉄に加え酸化促進剤としてケイ酸ソーダを組み合わせ、川砂、山砂を対象に行った実験を報告した。

現場実験では土壌強度の増加のみでなく、すべり面に補強材を挿入することによる引き止め効果やせん断補強効果も期待して、(その1)ではひとつの試みとして酸化剤を封入した鋼管パイプを打設する実験を行った。以降、観察を継続しているが現在まで所定の効果は発揮している模様である。

造成直後の斜面の不安定な一定の期間を、即効的な補強材の引き止め効果と、徐々に効果の現れる鉄処理

による土の固結効果の相乗作用で安定化させることができるようになれば工法的に有望と考えている。

(その2)では鉄の添加量を3%に限定して養生期間は2カ月までしか行っていないので、添加量および長期養生期間と土の強度との関係を引き続き追求したい。

今後、この工法の適用限界がどこにあるのか、また鋼材と安定処理土の複合作用による斜面安定の効果がどのように発現されていくのか、その機構についてさらに研究を進めていきたい。

なお、この研究を行うにあたり御指導をいただいた関西大学工学部の西田一彦教授と、現場実験の実施に多大の御協力をいただいた京阪電鉄㈱、京阪ロースタウン造成現場ならびにその他関係者各位に、心より感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 土岐晃生他 / 風化残積土の鉄処理による斜面安定工法、風化残積土に関するシンポジウム発表論文集、PP. 219~PP.222, 1988.
- 2) Mitchell, B. D., Farmer, V. C., Mchardy, W. J. / Amorphous Inorganic in Soils, Advanced in Agronomy, Vol. 16, 1964.
- 3) 西田一彦他 / 特殊土の試験-まさ土、土質試験法、土質工学会(第2回改訂版)
- 4) Krauskopf, K. B. / Oxidation and Reduction in Sediment, Introduction to Geochemistry, MacGraw Hill, pp236~pp262, 1966.
- 5) 西田一彦 / 風化残積土の工学的性質、鹿島出版会、昭和61年
- 6) 村上譲二他 / 鉄系処理材による砂質土斜面安定工法、土木学会第44回年次学術講演会平成元年10月18日
- 7) Kuron, H. and PreuBe, H. U. / Über Kunstliche Eisenhydroxydgere und deren Alterung Pflanzenern Dung Bodenk, Vol. 100, 12, 1963, pp. 1222