■■■ 論文

非流失性人工土壌材の開発*

— 斜面緑化用人工土壌の開発 (第1報) —

細 岡 敏 夫¹ 中 島 巖²
米 田 哲 朗³ 千 葉 幸 司⁴

Development of Non-erosive Soil Materials

— Development of artificial soil for vegetative slope (1st Report) —

by Toshio HOSOOKA¹, Iwao NAKAJIMA², Tetsuro YONEDA² and Kouji CHIBA³

1. The Nippon Clay Mining Co. Ltd., Chuo-ku, Tokyo 103
2. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060
3. Ichinoseki Civil Engineering Office, Iwate Prefectural Government, Ichinoseki 021

In order to realize the vegetative slope in open-cut mining, non-erosive soil materials have been developed in this study.

The non-erosive soil was compounded from the tailings of cyanide leaching at the Kushikino gold mine through the following two processes; (1) a mixture of the tailings, water and portland cement was crushed under 12 mesh after the primary generation of cohesive strength for a specified time, (2) the crushed products were applied to the test of the secondary generation of cohesive strength after charging in a pot and consolidating under various compressive stresses.

The structure of the non-erosive soil is composed of soil particles and voids surrounding the particles. The soil particles and voids are formed as the results of the primary generation of cohesive strength before the crushing and the secondary generation of cohesive strength after the consolidating respectively. The soil properties required to satisfy the vegetative conditions result from such agglomerate structure of the soil particles. From the facts described above it is concluded that the vegetative and the non-erosive conditions of the soil are satisfied simultaneously by controlling the curing and solidifying time from mixing to crushing and the secondary generation of cohesive strength.

KEY WORDS : Non-erosive Soil, Primary Generation of Cohesive Strength, Crushing Cement Mortar, Secondary Generation of Cohesive Strength, Agglomerate Structure of Soil Particle

1. は じ め に

露天掘り鉱山にとって採掘あとの緑化は、環境および景観を保持する上で不可避な課題である。特に、石灰石鉱山や採石場の大規模残壁では、植栽用土壌の流失は避けられず、緑化事業は技術的にも経済的にも困難な問題になっている。この問題を解決するためには、植物が生育する固結土壌、言うなれば非流失性人工土壌の開発が望まれる。

これまで三井串木野鉱山(株)では、製錬廃滓に高炉スラグを加えて硬化しはじめた原料をショベルロードで擾乱し、鉱滓堆積ダムの築堤に適用した結果、非流失性土壌斜面が10年以上も保持されてきた。本研究ではこの施工成功例に着目し、非流失性人工土壌の開発をもくろんだ。すなわち、製錬鉱滓に水、セメントを

混練し、養生硬化、粉碎および充填圧密した土壌試料の強度再発現試験、芝の植生試験および固結土壌の侵食試験を実施した。これらの試験結果、植物の植生限界と土壌の流失限界の間に生育性と非流失性の両方の性質を満たす固結強度範囲があることを確認した。

本報では、まず人工土壌の強度発現試験結果から強度再発現の支配因子について述べる。また、強度再発現過程における水和反応生成物の分析結果から粉碎産物の圧密による強度再発現機構について考察した。なお、強度発現土壌の植生試験と流失試験の結果については次報で述べる。

2. 強度発現試験の方法

2・1 土壌試料の調製

三井串木野鉱山では、青化製錬廃滓の活用の一環として微粒鉱滓に高炉スラグ粉を混合した築堤材を開発し、鉱滓堆積ダム等の工事において非流失性斜面の構築に成功している。図1~3は、これら築堤工事の一例である。まず、図1は鉱滓の充填、圧密による築堤状況である。この築堤材は、全泥青化製錬廃滓をムーアフィルタで含水比30%まで脱水し、高炉スラグ粉を約4%添加した原料からなり、約1週間養生硬化後スクレーパによって擾乱

* 1995年9月29日受付 11月20日受理

1. 正会員 日本粘土鉱業(株)社長

2. 正会員 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科

3. 正会員 工博 北海道大学助手 工学部資源開発工学科

4. 岩手県一関土木事務所

[著者連絡先] FAX 03-3270-1498 (日本粘土鉱業(株))

キーワード: 非流失性土壌, 一次強度発現, セメントモルタルの圧碎, 二次強度発現, 団粒構造

図1 築堤工事(その1), 高炉スラグ粉を混練した鉾津の充填圧密

図2 築堤工事(その2), 充填圧密後の芝張り

図3 築堤工事(その3), 工から13年後の植生状況

した状態で堆積、放置しておいたものである。図2は、築堤材の圧密面に芝生を張り付けた状況である。次いで、図3は、施工から13年後の現況で、芝に代わって域外から侵入したササ、ススキ、クズ等が密生している。なお、施工後の観察結果によれば、30 mm/h 程度の集中豪雨のときでも斜面には洗掘は認められていない。

強度発現試験用土壌試料は、三井串木野鉾山の成功例を参考に調製した。すなわち、原料として同鉾山青化製錬鉾津を用いた。この鉾津に水とセメントを調合し、所定の時間をかけて養生硬化した。次いで、硬化試料を粉碎した。最後に円筒容器に充填した粉碎試料を圧密し、強度発現試験に供した。

表1および図4は、原料鉾津の化学成分分析値と粒度分布線図である。青化製錬鉾津は、串木野鉾山と岩戸鉾山の2系の廃滓で構成されており、いずれの系も主要成分は珪酸塩である。ただし、串木野鉾山系は炭酸塩を約17 wt. % 含有しており、その分珪酸塩の含有率が少なくなっている。また、粒度分布線図の傾きは、細骨材の標準的の分布に比較して小さく、全泥青化製錬鉾津の特性を示している。なお、平均粒径は約100 μm である。土壌試料の調合に当たっては、鉾津試料に水とポルトランド・セメントを添加、混練し、含水比とセメント混合率をそれぞれ22と5%とした。表2は、ポルトランド・セメントの化合物組成で、化合物のいずれもCaOを主成分としている。

混練試料は、容器内で所定の時間養生硬化したあと、鑄鉄製乳鉢で12 mesh (1.4 mm) 以下に粉碎した。次いで、粉碎試料は

プラスチックの円筒容器($\phi 200 \times 150$)に充填し、所定の圧力と時間をかけて圧密した。図5に上記操作過程における発現強度の変化を示す。まず、混練試料の固結強度は、養生時間に応じて強度発現カーブ(以下、一次強度発現カーブと呼ぶ)上を増大し、粉碎によって0まで低下する。次いで、圧密によって載荷圧まで上昇し、強度再発現過程をたどる。この過程で発現する強度カーブ(以下、二次強度発現カーブと呼ぶ)は、粉碎前のセメント水和反応生成物による固結効果が減殺されているため、一次強度発現カーブより劣化したものになる。なお、二次強度発現カーブの増加特性は、後述のごとく養生時間や圧密度等のパラメータに支配されるが、これらのパラメータを加減することによって土壌強度を植生限界と流失限界の間の設計強度に収束させることが強度発現試験の目的である。

2・2 発現強度の計測法

土壌試料の強度発現試験は、図6の計測システムで実施した。すなわち、土壌試料の圧密固結面に対して鋼製コーン(円錐圧子)を圧入したときの抵抗値から発現強度を求めた。試験に当たっては、土壌供試体と鋼製コーンを材料試験機(Instron 1127)にセットしたあと、0.5 mm/min の速度で圧入した。圧入抵抗は、ロードセル(共和電業 LU-100K)の出力をストレイン・アンプ(DPM-305A)で増幅し、ペン・レコーダ(理化電機 B-28M)で記録した。

一般に土の強度特性は次式の内部摩擦論によって評価されてい

表2 ポルトランドセメントの化合物組成²⁾

化学物名	組成式	略記号	含有割合(%)
エーライト	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	55
ビーライト	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	20
アルミニイト相	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	12
フェライト相	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	9
その他*1	—		4

*1 石膏、硫酸アルカリ、酸化マグネシウム等の微量成分

表1 原料鉾津の化学成分分析表

成分	含有割合 (wt. %)		成分	含有割合 (wt. %)	
	串木野鉾山鉾津	岩戸鉾山鉾津		串木野鉾山鉾津	岩戸鉾山鉾津
SiO_2	78.11	95.05	P	0.01	0.01
CaO	9.77	1.12	S	0.32	0.09
Al_2O_3	0.83	0.80	TiO_2	0.67	0.47
MgO	0.19	0.02	Na_2O	0.15	0.15
T-Fe	1.47	1.02	K_2O	0.77	0.07
Fe_2O_3	1.62	1.41	CO_2	7.03	—

図4 人工土壌試料の粒度分布

図5 人工土壌の強度発現、植生限界および流失限界

図6 人工土壌の強度発現の計測システム

る¹⁾。

$$\tau_s = \sigma \tan \phi + c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 τ_s :せん断抵抗、 σ :垂直応力、 c :粘結力、 ϕ :内部摩擦角

この場合、 c および ϕ を決定するのに単軸圧縮試験を含めた封圧圧縮試験が必要で、これらテストピースによる試験は強度の経時変化を求めるのに複雑すぎる。したがって、本研究では、土壌の圧密固結面に対して頂角90°のコーンを深さ5.0 mmまで圧入したときの最大抵抗値 $R(\tau, \rho)$ を次式で求め、発現強度として代用した^{a)}。

$$R(\tau, \rho) = \frac{F}{\pi \left(d \tan \frac{\theta}{2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 F :圧入荷重、 d :圧入深さ、 θ :コーン頂角

なお、図7は圧入抵抗 $R(\tau, \rho)$ と単軸圧縮強度 S_c の関係で、それぞれ養生硬化試料の圧入および強度試験結果である。これらの間には、 $S_c \geq 2 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で次式の直線関係が成立する。

$$R(\tau, \rho) = 8.27 S_c - 9.95 \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、内部摩擦論によれば、 S_c と c 、 ϕ の間にも次式の関係が成立する。

$$S_c = 2c \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この結果、 $R(\tau, \rho)$ も(1)式の τ_s と同様、 c の一次関数と ϕ の三角関数になり、 c および ϕ の増加に応じて増大する。したがって、 2.0 kgf/cm^2 以上の圧密土壌面の発現強度を評価するのにコー

図7 静的圧入抵抗と単軸圧縮強度の関係

図8 人工土壌試料の二次強度発現 (パラメータ: 養生硬化時間 τ) 図9 人工土壌試料の二次強度発現 (パラメータ: 圧密度 ρ)

a) 土壌試料の発現強度は、主として養生硬化時間 τ と圧密度 ρ に応じて変化するから、本文では $R(\tau, \rho)$ の記号で表示した。

ンの圧入抵抗を代用しても問題ないとみなされる。

3. 強度発現の支配要因

3・1 養生硬化時間の影響

人工土壌材の二次強度発現は構成粒子間の接触、接着に起因すると考えられる。また、粉碎後の接着能力は養生硬化時間に応じて低下し、接触頻度は圧密によって増大する。したがって、二次強度発現の支配要因の中で基本的パラメータは養生硬化時間 τ と圧密度 ρ であるとみなされる。まず、図8は、 τ をパラメータとした強度発現試験の結果で、静的圧入抵抗 $R(\tau, \rho)$ を圧密後の経過日数に対してプロットすることにより引いた二次強度発現カーブである。試験条件は、原料の混合比率と圧密度が一定で、養生硬化時間が $\tau = 0, 24, 48, 72 \text{ h}$ である。なお、圧密度 $\rho = 20 \text{ kgf/cm}^2$ である。

図8において、いずれの二次強度発現カーブも経過日数に応じて指数関数的に一定値に収束する傾向で増大している。いま、養生硬化時間 τ の二次強度発現カーブ $R(\tau, 20)$ への影響を比較すると、 $R(\tau, 20)$ のカーブは経過日数の全域で $\tau = 0, 24, 48, 72 \text{ h}$ の順に低くなっており、それだけ経過日数に対する増加傾向も小さくなっている。逆にいえば、養生硬化時間 τ を短縮するほど二次強度発現カーブは増大している。これらの結果から、混練から粉碎までの養生硬化時間の二次強度発現への影響は大きく、養生硬化時間を加減することによって圧密後の強度再発現を制御できることがわかる。

図8には、養生硬化させたままの一次強度発現カーブを参考のため追記している。すなわち、 $\tau = 0, \rho = 0$ としたときの一次強度発現カーブ $R(0, 0)$ は $R(24, 20)$ と $R(48, 20)$ の間を上昇している。この結果から、養生時間を短縮しても圧密しない限り、設計強度は必ずしも得られないことがわかる。つまり、施工条件として圧密は不可欠である。

なお、図8には、植生限界と流失限界もマークしている。これらの限界は、土壌の圧密固結面に対する芝の植生試験と噴射水の侵食試験から決定した強度である。試験の詳細については次報を参照されたい。

3・2 圧密度の影響

既に指摘したように、人工土壌材の施工条件である圧密度も二次強度発現に対する支配要因の一つである。図9は、圧密度 ρ をパラメータとした強度発現試験の結果で、圧密固結面の二次強度発現カーブである。試験条件は、原料の混合比率と養生硬化

時間が一定で、圧密度が $\rho = 2, 5, 10, 15 \text{ kgf/cm}^2$ である。なお、養生硬化時間は $\tau = 72 \text{ h}$ である。

図9において、いずれの二次強度発現カーブも図8と同様指数関数的に一定値に収束する傾向で増大している。いま、圧密度 ρ の影響を比較すると、二次強度発現カーブ $R|72, \rho|$ は ρ の値に応じて目立って増大している。この結果から、圧密度の二次強度発現への影響は大きく、施工時における圧密度の管理は重要であることがわかる。

3・3 その他の影響因子

前記2例の強度発現試験結果から、二次強度は構成粒子間の接着によって発現することが明らかになった。土壌粒子間の接触頻度と接着能力を高める要因としては、養生硬化時間 τ および圧密度 ρ 以外に圧密荷時の水分量と粒度構成も考えられる。したがって、本研究では粉碎、圧密試料の水分 γ と粒度分布均等数 n をパラメータにとった強度発現試験も行った。

図10は、水分 γ をパラメータにとった強度発現試験結果で、圧密後の二次強度発現カーブである。試験条件は、養生硬化時間 τ と圧密度 ρ が一定で、それぞれ $\tau = 72 \text{ h}$, $\rho = 20 \text{ kgf/cm}^2$ である。水分の調節に当たっては、混練した標準試料（混合比率：鉱滓73，水22，セメント5％）を72時間養生硬化後粉碎し、粉碎試料1.0 kgfに対して水分を+50（添加）， ± 0 （無添加），-50 gf（乾燥脱水）加減した。試料に添加した水分は、以上の操作過程と圧密後の二次強度発現過程でセメント反応と蒸発によって減少するから、一定に保つことはできない。この理由で水分のパラメータ γ は二次加減量で表示した。なお、二次水分調節直後における含水率は、それぞれ17，14，10％程度である。

図10の二次強度発現カーブ $R|C, \gamma|^{b)}$ は、いずれも一定値に向けて指数関数的に増大している。いま、水分 γ の影響を比較すると、水分の多い $R|C, +50|$ と $R|C, \pm 0|$ の増加傾向にはほとんど差がなく、同程度の強度が発現している。一方、水分の少ない $R|C, -50|$ の強度発現は $R|C, \pm 0|$ の60％程度で、これらの増加傾向には大きな差が現れている。この結果から、構成粒子間の保持液量が減少し、気相空隙が増加すると、強度発現が起こり難くなることがわかる。

図11は、粒度分布の均等数 n をパラメータにとった強度発現試験結果である。試験条件は、養生硬化時間および圧密度とも一定で、それぞれ $\tau = 72 \text{ h}$, $\rho = 5 \text{ kgf/cm}^2$ である。試料の調製に当たっては、整粒した石英砂とその粉碎産物を用いた。図4のRosin-Rammler 線図にはこれらの粒度分布もプロットしてい

るが、均等数はそれぞれ $n = 2.8$ と 0.5 である。なお、混合比率は、 $n = 2.8$ に対しては石英砂75，水20，セメント5％で、 $n = 0.5$ に対しては石英粉65，水30，セメント5％とした。

図11の二次強度発現カーブ $R|C, n|^{c)}$ は、いずれも一定値に向けて指数関数的に増大している。いま、カーブの増加傾向を比較すると、 $R|C, 0.5|$ の方が $R|C, 2.8|$ よりも300％以上も大きな強度が発現している。この強度発現の差は、均等数の小さい粒度分布の方が粒子の充填密度および接触頻度も高くなることを裏付けているとみなされる。

4. 二次強度発現機構

4・1 圧密試料の固結構造

前節で述べた人工土壌の強度発現試験結果から、二次強度発現は粒子接点の液体架橋におけるセメントの水和反応に起因すると推察される。この見解を確認するため、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡（日本電子，JXA-8900）によって固結構造を観察するとともに、水和反応生成物の析出を確認した。

図12は、 $R|72, 5|$ の条件で強度発現させた鉱滓標準試料の顕微鏡写真で、空隙はブルー・レジンを浸透させることによって着色している。この種の薄片の観察の結果、鉱滓はほとんど石英からなっており、若干の方解石と粘土鉱物を含んでいる。グレインは、約0.3 mm以下から鏡下での判別が困難な粒径まで認められ、極めて広い粒度分布を示している。固結構造は団粒状の固結組織からなっており、各団粒は複雑に連続した空隙によって仕切られている。

上記鉱滓試料の団粒組織は微粒子で複雑に充填されているので、

p: 空隙

図12 鉱滓標準試料の光学顕微鏡写真

図10 人工土壌試料の二次強度発現（パラメータ：水分量 γ ）

図11 人工土壌試料の二次強度発現（パラメータ：粒度分布の均等数 n ）

p: 空隙, qz: 石英, rp: セメント反応生成物, 矢印: 気液界面跡

図13 整粒石英砂固結試料の光学顕微鏡写真

b) τ, ρ を一定, γ をパラメータとしたときの発現強度を $R|C, \gamma|$ で表示する。

c) τ, ρ を一定, n をパラメータとしたときの発現強度を $R|C, n|$ で表示する。

図14 石英砂固結試料の間隙構造を示す走査型電子顕微鏡写真

図15 セメント反応生成物（石英砂固結試料）の走査型電子顕微鏡写真、柱状結晶はエトリンガイト（C-A-S-H）

図16 セメント反応生成物（石英砂固結試料）の走査型電子顕微鏡写真、板状結晶はアルミニウム酸カルシウム水和物（C-A-H）

鏡下で水和反応による粒子間の凝結の様相を観察することは困難である。このため、微細構造の観察に当たっては、整粒した石英砂を R72, 5 の条件で強度発現させた試料を適用した。図13は、整粒石英砂の固結組織の顕微鏡写真である。写真中の石英粗粒子間には気液界面跡が現れており、気液界面と粒子接点間の液体架橋跡には水和反応生成物が析出している。また、図14の走査型電子顕微鏡写真では、石英粗粒子表面および粒間に析出した水和反応生成物を確認することができる。これら微細構造の観察結果から、強度発現が粒子接点近傍の接着に起因するものであることが理解される。

4・2 セメント水和反応生成物

図15および図16も石英砂固結試料の走査型電子顕微鏡による拡大写真である。セメントの水和反応生成物には、図15のような針状結晶や柱状結晶と図16のような板状結晶や放射状結晶集合体等がある。これらのサイズは1~10 μm程度で、大半は2~3 μmである。

セメントの水和反応生成物を同定するため、X線回折によって石英砂固結試料の定性分析を行った。なお、鈹滓でなく石英試料を供試した理由は、試料組成の回折線を単純化し、水和反応生成物の回折パターンを判別しやすくするためである。X線回折パターンに現れている組成は、珪酸カルシウム水和物、水酸化カルシウム、エトリンガイト相およびモノサルフェート相等であり、図17にその一例を示す。回折線ピークの出力から判定すると、水和反応生成物の主要組成は珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムで、他は少量組成である。

C: 水酸化カルシウム (C-H), E: エトリンガイト (C-A-S-H), CS: 珪酸カルシウム水和物 (C-S-H), CA: アルミニウム酸カルシウム水和物 (C-A-H), Q: 石英

図17 石英砂固結試料のX線回折パターン

図18 セメント化合物の水和反応率の経時変化²⁾

図19 人工土壌間隙水のCa²⁺およびSO₄²⁻イオン濃度の経時変化

4・3 セメントの水和反応

前述の水和反応生成物は非常に複雑なセメント反応によって生じたと推察されるが、主要反応は次式^{d)}であるとみなされる²⁾。

セメント化合物の中で、水和反応によって強度を発現させる化合物は主として速効性のエーライトと遅効性のビーライトであり、これらの反応生成物が珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムである。図18はセメント化合物の水和反応率の経時変化で、最初3日間の反応速度はC₃A > C₃S > C₄AF > C₂Sの順になっている²⁾。セメント化合物主要組成(55%)であるエーライトの反応は養生硬化時間(τ = 72 h)内に60%近く終了するとみなされる。また、アルミネート相およびフェライト相は、反応速度は大きくても水和物に膨張性があるため、強度発現への寄与は少ないといわれている²⁾³⁾。これらの文献資料を総括すると、養生硬化後の二次強度発現は主としてビーライトの水和反応に起因していると推察される。

d) 組成式は複雑であるから略記号で表示した。

図 19 は、鉍滓標準試料の混練後における間隙水の Ca^{2+} および SO_4^{2-} イオン濃度と pH の経時変化である。これらの測定に当たっては、JIS の土質試験法を適用し、 Ca^{2+} および SO_4^{2-} の濃度はそれぞれ原子吸光分光分析装置（日本ジャーレルアッシュ AA880）とイオンクロマトグラフィ（Shodex IC）によって測定した。いま、 Ca^{2+} の濃度は最初の 1 日目に低下してから反転増大し、5 日目にピークに達したあと緩慢な減少傾向をたどっている。これら Ca^{2+} の増減はそれぞれ主要組成であるエーライトおよびビーライトの溶解と水和反応の現れである。前述の反応速度を考慮すると、初日の急減は主としてエーライトの溶解と反応の差で、5 日目以降の緩減はビーライトの差であるとみなされる。一方、 SO_4^{2-} の濃度変化は最初の 2 日間で急減しており、石膏の介在下でアルミネート相およびフェライト相の水和反応が急速に進んだことを示唆している。なお、pH の変化は経過日数に応じて 12.0 から 12.7 近くまで徐々に上昇しており、上述の溶解と水和反応の進行を裏付けている。

以上のセメント水和反応と強度発現の検討結果から、速効性のエーライトの水和反応は混練後の一次強度を発現させ、遅効性のビーライトは粉碎後の二次強度を発現させることがわかった。すなわち、養生硬化後の粉碎効果によってエーライトの固結効果は限定され、ビーライトの固結能力は選択的に発現される。ここで注意すべき点は、ビーライトの水和反応は石膏や不純物によって促進されることである。すなわち、セメント化合物の反応速度曲線から二次強度発現の制御条件を決定することは困難である。

5. 土壌性能と強度発現の制御

人工土壌試料の顕微鏡観察によれば、図 12 に示したように固結構造は、1 mm 前後の団粒状結合組織（以下、団粒と称す）とそれを歪な亀甲状に取り巻く間隙からなっている。上記団粒は、大小の粒子間が微粒子で充填された構造からなっている。一方、間隙は疎密な空隙で、大小粒子が複雑に分散している。この集塊構造が透水性、保水性および通気性といった土壌性能を発現させ、植生を保障しているとみなされる。なお、 $R\{72, 5\}$ 、 $R\{72, 10\}$ および $R\{72, 20\}$ の条件で固結した土壌試料の透水係数はそれぞれ 4×10^{-5} 、 2×10^{-6} および 1×10^{-6} cm/sec で、自然含水率は 22 % 程度である。

いま、前節の水和反応と強度発現に関する検討結果から団粒構造の成立を考察する。まず、団粒は養生硬化後の粉碎によって形成されたものであり、混練後の養生硬化過程から固結はじめたとみなされる。これらの過程で団粒強度は一次強度発現カーブに沿って上昇するはずである。次いで、土壌の施工に際して団粒は圧密充填によって変形、破壊するから、団粒間隙も破片を挟み込んだ状態で複雑に変形する。これ以降、団粒間隙の接着強さは二次強度発現カーブに沿って増大する。したがって、一次と二次の強度発現カーブの差は団粒と間隙の強度差になる。人工土壌の団粒構造は上述の工程から成立したとみなされる。なお、団粒径は養生硬化後の粉碎条件に規制され、供試土壌における 1 mm 程度の団粒径は 12 mesh (1.4 mm) 以下のふり条件に起因したサイズであるとみなされる。

人工土壌の性能は団粒を圧密充填したときの間隙構造によって決まると考えられる。土壌の間隙構造は、団粒の粒度分布と形状だけでなく、圧密時の変形、破壊および摩擦によって複雑化する。また、これら締め固めとセメントの水和反応に対しては水分が大きく影響する。この理由で粉碎、圧密時における団粒の強度は土壌性能を左右すると考えられる。団粒強度は、鉍滓、水、セメントの混合率と混練から粉碎までの養生硬化条件で決まる。原料混

合率が決まっている場合、養生硬化時間は、非流失性を確保するための二次強度発現だけでなく、土壌性能に対しても最も的確な制御パラメータであると判定される。土壌施工時の団粒の粒度分布、圧密度および水分等も土壌性能に影響するが、制御パラメータとしては不適当である。

6. 結 論

以上、非流失性人工土壌の開発を目的として串木野鉍山製錬鉍滓に水、セメントを混練し、養生硬化後粉碎することによって土壌試料を調製した。土壌試験に当たっては、混練後の一次強度発現試験と粉碎後の二次強度発現試験を実施し、強度発現の支配要因を明らかにした。次いで、固結構造の顕微鏡観察によって団粒の集塊構造を確認した。また、固結土壌の X 線回折と間隙水のイオン濃度の測定結果に基づいてセメントの水和反応に起因する強度発現を検討し、団粒構造と土壌性能の粉碎による発現理由について考察した。以下、人工土壌の試験結果を結論としてまとめる。

(1) 人工土壌に要求される植物の生育性と土壌の非流失性は養生硬化後の粉碎によって二次強度発現を制御すれば得られる。

(2) 二次強度発現は、養生硬化時間の短縮と圧密度の増加に応じて増大する。また、圧密充填時の水分および原料の粒度分布の影響も受ける。

(3) 人工土壌の強度は、粒子接点の液体架橋でセメントの水和反応生成物が析出することによって発現する。なお、強度発現に寄与する反応生成物は主として珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムである。

(4) 一次強度発現は主として速効性のエーライトの水和反応に起因し、二次強度発現は遅効性のビーライトの反応に起因する。

(5) 人工土壌は、粉碎によって形成された団粒と圧密充填によって形成された間隙からなり、集塊状を呈する。なお、透水性、保水性および通気性等の土壌性能は団粒構造から発現する。

(6) 団粒と間隙の強度はそれぞれ一次と二次の強度発現カーブに沿って増大し、一定値に達する。

(7) 団粒構造の間隙密度は、圧密充填時における団粒の変形、破壊によって増大する。したがって、土壌性能は圧密充填時の団粒強度によって決まる。

(8) 人工土壌の性能にとって養生硬化後の粉碎効果は不可欠で、エーライトの固結効果を団粒の形成に限定し、ビーライトの固結能力を間隙の接着に選択的に発揮させる。

(9) 圧密充填時の団粒強度と圧密充填後の間隙強度発現は粉碎までの養生硬化時間で決まる。したがって、養生硬化時間は植物の生育性と土壌の非流失性を保障するための制御パラメータになる。

謝辞 本研究を遂行するに当たって、三井串木野鉍山(株)から鉍滓試料の提供をいただいた。北海道大学工学部の恒川昌美教授および広吉直樹助手には粉粒体の処理と化学反応に関してご指導を受けた。また、工学研究科資源開発工学専攻の吉兼理説、岡澤太郎の両君には実験の一部を担当いただいた。本文を閉じるに当たって、深甚なる謝意を表したい。

引 用 文 献

- 1) 例えば Taylor, D. W. : Fundamentals of soil mechanics, Wiely, p. 311-405, (1978)
- 2) Young, J. Francis : JME, Vol. 3, No. 3, (大門 正 編訳：セメントの科学, p. 47-68, 内田老鶴圃, (1989))
- 3) Taylor, H. F. W. : JME, Vol. 3, No. 3, (大門 正 編訳：セメントの科学, p. 71-93, 内田老鶴圃, (1989))