

排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグの有効利用を 目的とした安定処理土の降雨侵食特性

EROSION LOSS CHARACTERISTICS IN THE STABILIZED SOIL FOR
EFFECTIVE UTILIZATION OF FLUE GAS DESULFURIZATION
BY-PRODUCT AND GRANULATED BLASTFURNACE SLAG

川村満紀*・鳥居和之**・榎場重正***

By Mitsunori KAWAMURA, Kazuyuki TORII and Shigemasa HASABA

1. ま え が き

多雨多湿であり、集中豪雨の発生しやすい気象条件をもつわが国では、降雨による土壌の侵食およびのり面の崩壊が最近の土木工事の大型化に伴い問題となっている。

降雨侵食に対するのり面の保護としては、これまで美観上の理由により植生工が多く用いられている。しかし、植生工が完成するまでの期間中における土壌の侵食防止が環境保全および完成時における手戻り作業の防止の点から最近では重要となっており、その経済的な工法の開発が望まれている。

降雨侵食の機構は、気象、地形および土質等の各種要因が絡み合うために、非常に複雑である。

一般には、雨滴が地表面に落下した際の衝撃によって土粒子が離脱および分散し、薄層状に流出する層状侵食 (sheet erosion) が初期においてみられ¹⁾、その後雨水による掃流作用が増加するにつれて、リルおよびガリー侵食 (rill and gully erosion) へと加速度的に進行する。

したがって、土粒子間の結合力を増加させることによって土粒子集合体の構造を雨滴の衝撃に対し抵抗性の大きなものとする如果能够できれば、土壌の降雨侵食に対する抵抗性はかなり増加するものと思われる。

このような考え方に基づいて、土粒子間に結合力を与えるために少量のセメントまたは消石灰を添加することは、土壌の降雨侵食抑制に有効であることがすでに明らかにされている^{2), 3)}。すなわち、降雨侵食の抑制を主たる目的とする土質安定処理においては、強度および変形特性の改善を目的とする土質安定処理ほど多量に安定材を添加する必要はない。

一方、近年火力発電所等における亜硫酸ガスの処理および鉄鋼生産の過程で多量に発生する産業副生産物である排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグ (本論文では石膏および高炉スラグと称する) の建設材料としての有効利用が望まれている。

排煙脱硫石膏は消石灰 (またはセメント) とともに安定材として使用すれば、土中に存在する粘土鉱物に含まれるアルミナ分とすみやかに反応し、エトリンガイトを生成する^{4), 5)}。また、高炉水砕スラグは消石灰およびセメント等のアルカリ刺激により硬化する性質 (潜在水硬性) を有する。したがって、このような石膏および高炉スラグの特性を利用することによって、これらの産業副生産物を土粒子間に結合力を与える安定材として有効に利用できる可能性がある。

本論文は排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグをのり面安定処理材として利用することを目的として、セメント、消石灰、石膏および高炉スラグを土質安定材として使用した処理土における降雨侵食に対する性能を明らかにするために、作製した降雨実験装置を使用して各処理土の降雨侵食試験を行った。その結果、安定材の種類、混合割合および添加量が処理土の降雨侵食特性に及ぼす影響について明らかにするとともに、走査型電子顕微鏡を使用して処理土の降雨侵食における微視的構造の変化を調べ、降雨侵食のメカニズムについて 2, 3 の考察を行った。

また、一般に安定処理土は最適含水比および最大乾燥密度で締め固められる。しかし、急な斜面を対象とする安定処理工法の施工では十分な締固めが困難であり、また自然含水比が液性限界を越えているようなわが国の多くの粘性土では含水比を最適含水比付近に維持管理することが困難であるのが実状である。このような事情を考え、締固め度を変化させることによって、締固めが十分でない場合における安定処理土の降雨侵食についても検討を行った。

* 正会員 工博 金沢大学教授 複合材料応用研究センター

** 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科

2. 降雨実験装置の設計および性能

降雨実験において重要となる降雨特性のパラメーターとしては、降雨強度、雨滴の粒径分布、落下速度および降雨継続時間が考えられる。降雨実験ではこれらのパラメーターを自然降雨の場合とできるだけ一致させることが重要である。しかし、室内における降雨実験では種々の制約を受けるために、実験の目的に応じたパラメーターの選択が必要である。降雨侵食実験においては雨滴が地表面に落下した際に生じる衝撃力が重要であることから、パラメーターとしては単位面積当たりの運動エネルギーを選択することが適当であると思われる。

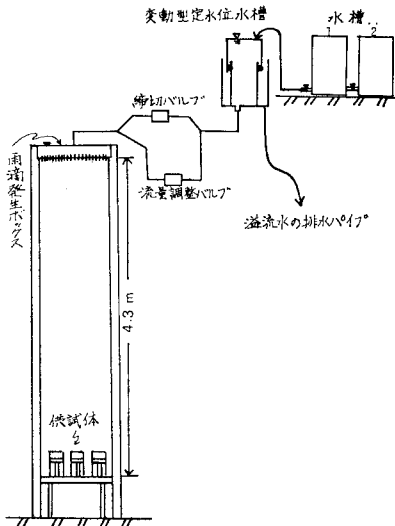


図-1 降雨実験装置の概略

本実験において採用した単一粒径の雨滴を作る降雨実験装置においては、単位面積当たりの運動エネルギーは雨滴の最終速度によって決まるので、自然降雨のもつ運動エネルギーとできるだけ等しくなるように図-1および図-2に示すような降雨実験装置を試作した。本装置は620本の内径0.5mmのステンレスパイプを三角網状に3cm間隔で配置したものであり、ヘッドタンクより

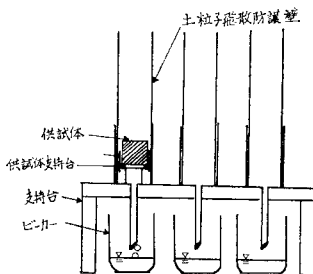


図-2 流出した土粒子の回収装置の概略

り雨滴作成装置に圧力を与え、作った雨滴を約4.3mの高さより自由落下させるもので、降雨強度はニードルバルブにより0~300mm/hの範囲に調整することが可能である。本実験で採用した降雨

強度100mm/hは北陸地方の100年確率降雨⁶⁾を参考にして決定したものである。なお、本実験装置によって得られた雨滴の粒径は3.2mmである。Wishmeier and Smithによって求められた公式⁷⁾を使用した計算によると、降雨強度100mm/hにおける本人工降雨のもつ運動エネルギーは利用できる空間の高さ制限および降雨強度の均一性の確保によって制約を受けたため自然降雨のもつ運動エネルギーの約82%となった。

3. 降雨侵食実験の概要

(1) 使用材料

本実験に使用した2種類の試料土の物理的性質および化学成分は、それぞれ表-1および表-2に示すとおりである。排煙脱硫石膏(H電力(株)産)の主成分は、約8%の付着水を含む2水石膏であり、高炉水砕スラグ粉末はK製鉄所より供給された高炉水砕スラグをボールミルにより粉碎し、88 μ m以下としたものである。排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグの化学成分は、それぞれ表-3および表-4に示すとおりである。使用したセメントおよび消石灰は、普通ポルトランドセメントおよび工業用消石灰である。

セメント(または消石灰)、セメント(または消石灰)-高炉スラグ、セメント(または消石灰)-石膏およびセメント(または消石灰)-石膏-高炉スラグの各安定材の組

表-1 試料土の物理的性質

分類	粘性土		砂質土	
	粘土ローム	砂質ローム	粘土ローム	砂質ローム
砂分 (%)	41.0	76.5		
シルト分 (%)	30.0	17.1		
粘土分 (%)	29.0	6.0		
L.L (%)	50.6	—		
P.L (%)	23.1	—		
P.I (%)	27.5	—		
最適含水比 (%)	26.0	23.4		
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.530	1.570		
比重	2.723	2.677		

表-3 排煙脱硫石膏の化学成分(%)

CaSO ₄ ·2H ₂ O	96.71
MgSO ₄	1.23
SiO ₂	0.53
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	1.51

表-2 試料土の化学成分(%)

	粘性土	砂質土
Ig.Loss	8.51	4.08
SiO ₂	62.83	60.92
Al ₂ O ₃	17.07	12.46
Fe ₂ O ₃	6.19	14.31
CaO	0.60	0.16
MgO	1.92	3.88
K ₂ O	0.72	1.20
Na ₂ O	0.30	1.91

表-4 高炉水砕スラグの化学成分(%)

SiO ₂	33.74
Al ₂ O ₃	15.82
CaO	39.61
MgO	8.39

合せに対して、安定材の添加量は試料土の乾燥重量の1.25%~5%の範囲である。

(2) 実験方法

降雨侵食実験に用いた供試体は直径10cm、高さ3cmの円板状であり、金属製のモールド中に2層に分けてランマーで突き固めることによって作製したものである。

供試体の締固め度は最適含水比で最大乾燥密度(締固め度100%)および最大乾燥密度の80%の密度(締固め度80%)となるように突固め回数を変化させることによって決定した。作製した供試体は直にビニール袋で密封して、恒温恒湿室内(温度20°C、相対湿度90%)において所定期間中養生を行った。

降雨侵食試験は供試体に降雨強度100mm/hの人工降雨を1時間与え、各供試体から離脱した土粒子の乾燥重量を測定することによって得られる供試体表面の単位面積当たりの土粒子の損失量(g/cm²)により、降雨侵食に対する抵抗性を評価するものであり、試験値は供試体3個の平均である。なお、粘性土および砂質土を用いた各種処理土の試験値の変動係数は、それぞれ8~17%および5~14%の範囲である。本研究の目的から考えて、初期材令における降雨侵食に対する抵抗性が重要であるので、降雨侵食試験は1日、3日、7日および28日の各材令に対して行った。また、降雨侵食後の供試体表面部分より乱さないように採取した試料を真空乾燥した後、炭素および金で蒸着し、走査型電子顕微鏡の観察に供するとともに、採取した試料片を乳ばちで74μmふるいを通すまで粉砕した試料10gと蒸留水50ccを分散装置で10分間攪拌した後ただちにろ過し、得られた浸出液についてpH値の測定を行った。

4. 安定処理土の降雨侵食特性

(1) セメントおよび消石灰処理土

図-3および図-4は粘性土および砂質土を用いたセメントおよび消石灰処理土の降雨侵食試験における土粒子損失量と材令の関係を示したものである。図-3に示すように、セメント処理土では粘性土および砂質土のいずれも早い材令から降雨侵食に対する抑制効果が現われ、特に比表面積の小さい砂質土では反応生成物の固結力による効果が顕著であり、2.5%程度の添加量により降雨侵食を完全に抑制できる(写真-1(c),(d)参照)。すなわち、セメント処理土ではセメントの水和反応およびセメントの水和によって生成された水酸化カルシウムと粘土粒子との反応生成物が土粒子を結合し、雨滴の衝撃に対して抵抗性の大きな土構造を形成するようであ

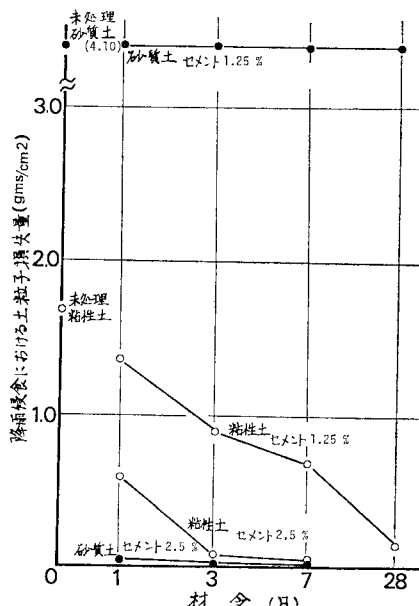


図-3 粘性土および砂質土を用いたセメント処理土の土粒子損失量と材令の関係

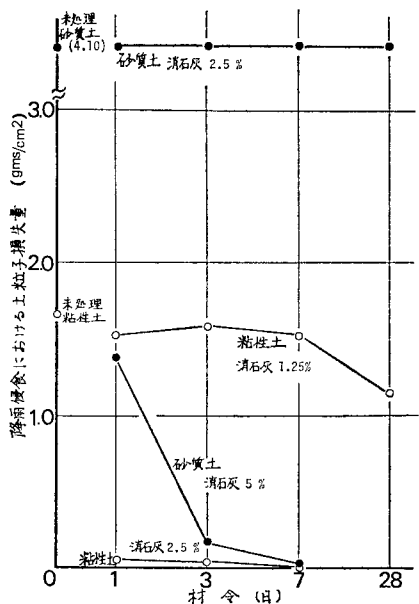
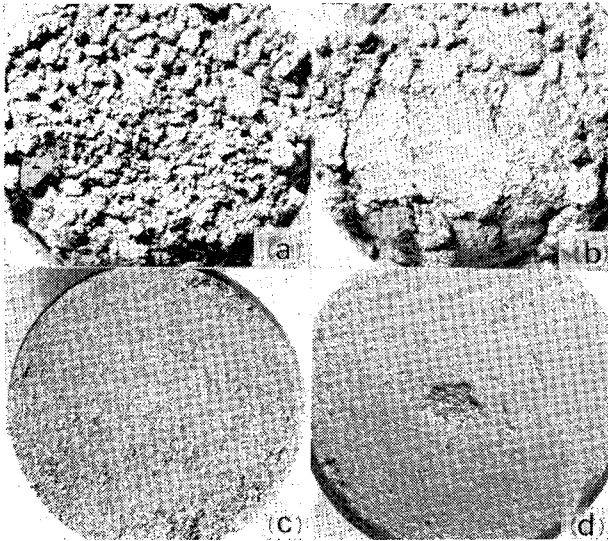


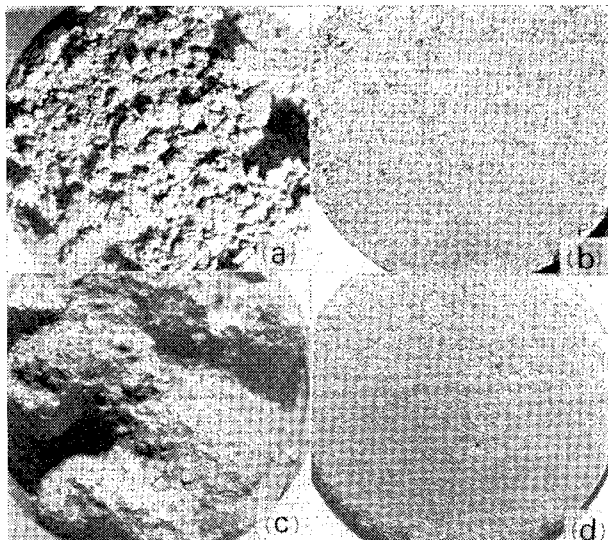
図-4 粘性土および砂質土を用いた消石灰処理土の土粒子損失量と材令の関係

る。

一方、図-4に示すように、粘性土を用いた消石灰処理土においては消石灰添加量が1.25%では降雨侵食抑制効果はほとんど認められず、降雨侵食を抑制するためには2.5%程度の添加量が必要である(写真-2(a),(b)参照)。しかし、砂質土を用いた消石灰処理土においてはシリカおよびアルミナ分の供給源である粘土分が少な



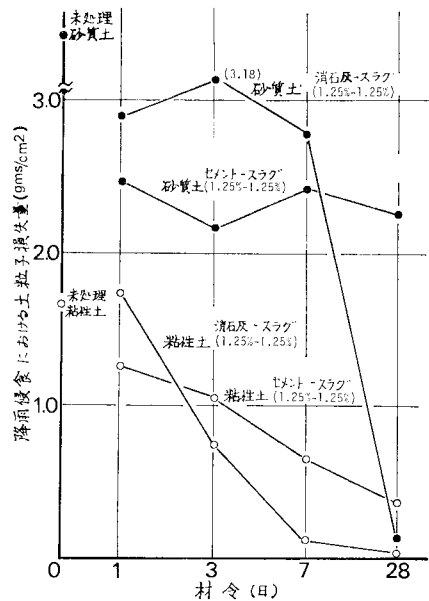
写真一1 セメント処理土の降雨侵食試験後の供試体表面
 (a) 粘性土, セメント 1.25%, 3日材令, (b) 粘性土, セメント 2.5%, 1日材令, (c) 粘性土, セメント 2.5%, 3日材令, (d) 砂質土, セメント 2.5%, 1日材令)



写真一2 消石灰処理土の降雨侵食試験後の供試体表面
 (a) 粘性土, 消石灰 1.25%, 7日材令, (b) 粘性土, 消石灰 2.5%, 7日材令, (c) 砂質土, 消石灰 5%, 1日材令, (d) 砂質土, 消石灰 5%, 7日材令)

いために、1日材令では消石灰添加量が5%の場合でもあまり大きな降雨侵食抑制効果は期待できない(写真一2(c),(d)参照)。

以上の結果より、消石灰添加による降雨侵食抑制効果はセメント添加と比較して緩速ではあるが、粘土分の比較的多い土に対して十分な養生期間が確保できる場合にはセメントと同程度の処理効果が期待できる。



図一5 粘性土および砂質土を用いたセメント(または消石灰)-高炉スラグ処理土の土粒子損失量と材令の関係

(2) セメント(または消石灰)-高炉スラグ処理土

図一5は粘性土および砂質土を用いたセメント(または消石灰)-高炉スラグ処理土の降雨侵食試験における土粒子損失量と材令の関係を示したものである。図一4に示したように、粘性土および砂質土とも1.25%程度の消石灰添加量では処理効果がまったく期待できないのに対し、さらに1.25%の高炉スラグを添加した消石灰-高炉スラグ処理土(1.25%-1.25%)においては粘性土および砂質土とも7日材令から28日材令における土粒子損失量の減少が顕著である(写真一3参照)。

一方、セメント-高炉スラグ処理土(1.25%-1.25%)は消石灰-高炉スラグ処理土(1.25%-1.25%)より処理効果は小さい。これはセメント-高炉スラグ処理土(1.25%-1.25%)におけるセメント量では高炉スラグのアルカリ刺激材としては不十分であり、添加した高炉スラグの潜在水硬性が十分に発揮されていないためと思われる。

(3) セメント(または消石灰)-石膏-高炉スラグ処理土

図一6, 7, 8 および 9 は、それぞれ粘性土および砂質土を用いたセメント(または消石灰)-石膏-高炉スラグ処理土の降雨侵食試験における土粒子損失量と材令の関

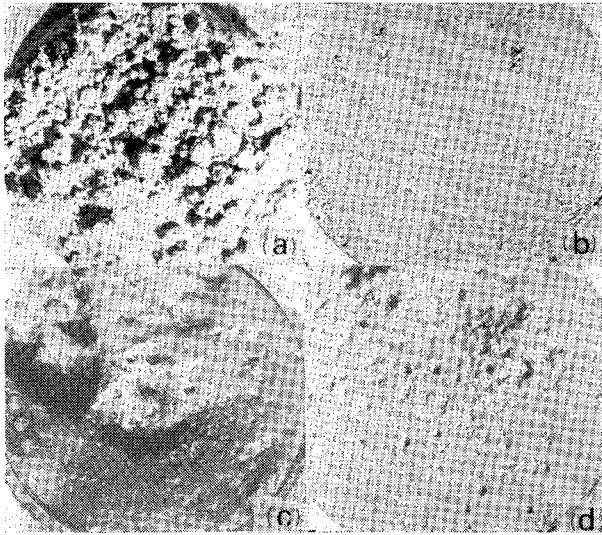


写真-3 消石灰-高炉スラグ処理土の降雨侵食試験後の供試体面表 ((a) 粘性土, 消石灰-高炉スラグ (1.25%—1.25%), 1日材令, (b) 粘性土, 消石灰-高炉スラグ (1.25%—1.25%), 28日材令, (c) 砂質土, 消石灰-高炉スラグ (1.25%—1.25%), 1日材令, (d) 砂質土, 消石灰-高炉スラグ (1.25%—1.25%), 28日材令)

係を示したものである。これらの図に示されるように、粘性土および砂質土ともにセメント（または消石灰）-石膏処理土（1.25%—1.25%）における石膏の一部分を高炉スラグで置換することにより初期材令における土粒子損失量を大きく減少することができる（写真-4 参照）。これはエトリンガイトの生成に必要なアルミナ分が高炉スラグより供給されるため、エトリンガイトの生成が活

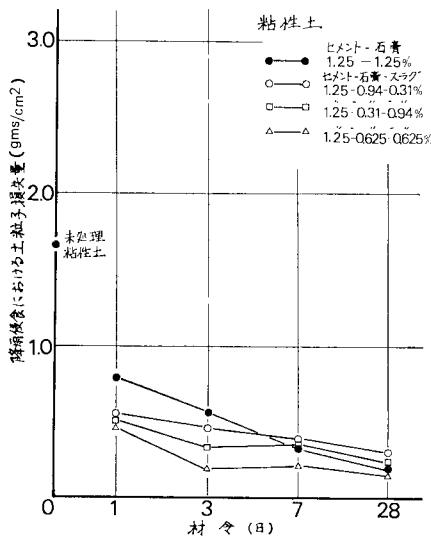


図-6 粘性土を用いたセメント-石膏-高炉スラグ処理土の土粒子損失量と材令の関係

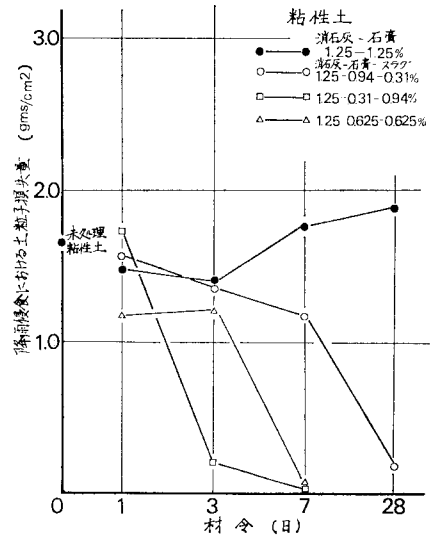


図-7 粘性土を用いた消石灰-石膏-高炉スラグ処理土の土粒子損失量と材令の関係

発になったことによるものと思われる。

一般に、エトリンガイトの生成反応を利用する安定処理においては、各種土質の条件に応じてセメント（または消石灰）、石膏および高炉スラグ間に最適な混合割合が存在するようである。本実験に用いた粘性土に対してはセメント-石膏-高炉スラグ処理土（1.25%—0.625%—0.625%）、砂質土に対しては消石灰-石

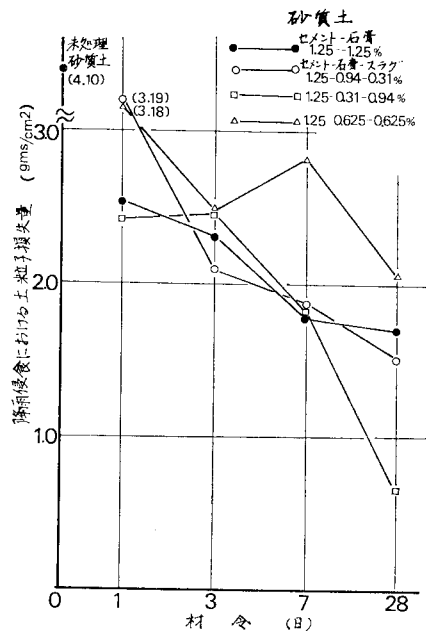


図-8 砂質土を用いたセメント-石膏-高炉スラグ処理土の土粒子損失量と材令の関係

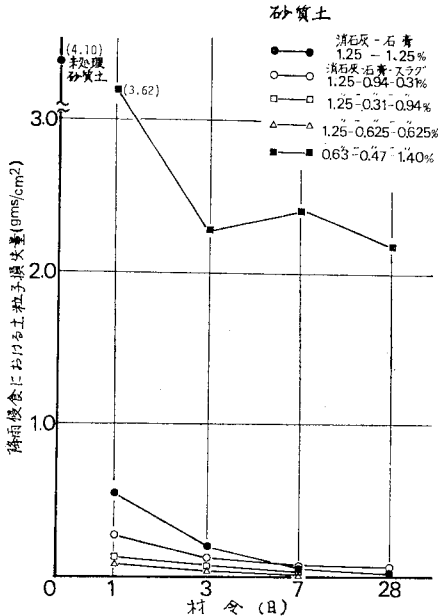


図-9 砂質土を用いた消石灰-石膏-高炉スラグ処理土における土粒子損失量と材令の関係

膏-高炉スラグ処理土 (1.25%—0.625%—0.625%) がそれぞれ最も大きな降雨侵食抑制の効果を示した。

(4) 締固め度が安定処理土の降雨侵食特性に及ぼす影響

未処理粘性土の降雨侵食試験における土粒子損失量は締固め度 100% および 80% に対して、それぞれ 1.62 g/cm² および 0.89 g/cm² である (図-10 参照)。このように締固め度の少ないものの方が降雨侵食に対する抵抗性に優れているのは、粘性土においては締固め度を少なくすると供試体がより多孔質になることにより、透水性が大となり、このため雨滴の衝撃下における粘土の膨潤および分散に対する抵抗性が大となるためと考えられている⁹⁾。

一方、未処理砂質土においてはいずれの締固め度とも試験開始と同時に急速に侵食が進行するために、締固め度による侵食量の差異は明確でない。これはもともと透水性の大きい砂質土では締固め度が侵食量に及ぼす影響は粘性土よりも小さいためであると思われる。

図-10 に示すように、粘性土および砂質土を用いたセメント処理土 (添加量：2.5%) では締固め度 80% の供試体でも締固め度 100% のものと同程度の降雨侵食抵抗性を示す。一方、図-11 に示すように、粘性土を用いた消石灰処理土 (添加量：2.5%) では締固め度 100% のものは 1 日材令においてはまったく侵食がみら

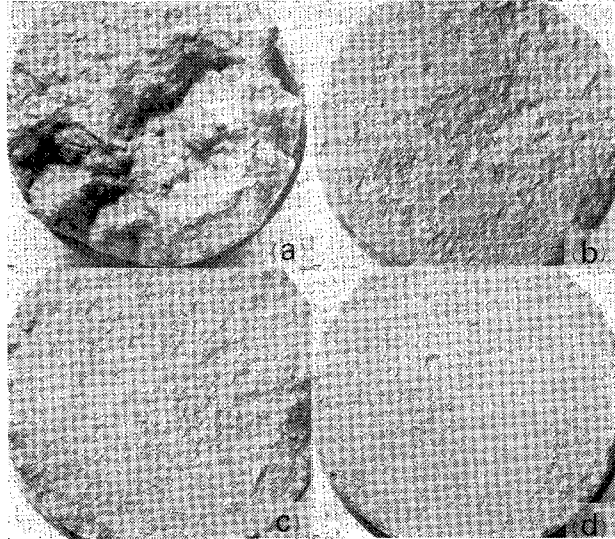


写真-4 消石灰-石膏および消石灰-石膏-高炉スラグ処理土の降雨侵食試験後の供試体表面 (a) 砂質土, 消石灰-石膏 (1.25%—1.25%), 1 日材令, (b) 砂質土, 消石灰-石膏 (1.25%—1.25%), 3 日材令, (c) 砂質土, 消石灰-石膏-高炉スラグ (1.25%—0.625%—0.625%), 1 日材令, (d) 砂質土, 消石灰-石膏-高炉スラグ (1.25%—0.625%—0.625%), 3 日材令)

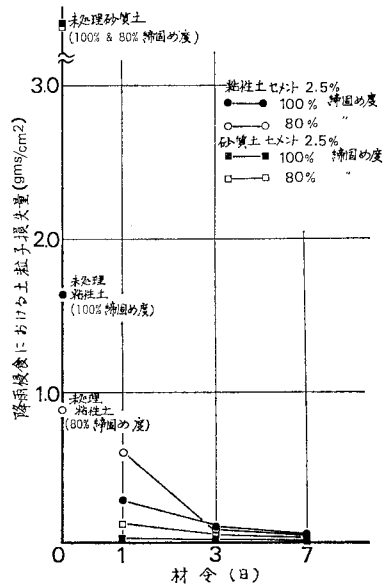


図-10 粘性土および砂質土を用いたセメント処理土における締固め度 100% と 80% の土粒子損失量の比較

れないのに対して、締固め度 80% のものは 1 日材令において 0.4 g/cm² の土粒子損失量を示し、その後、材令に伴う土粒子損失量の減少もほとんどみられない。このようにセメント処理土が消石灰処理土よりも締固め度

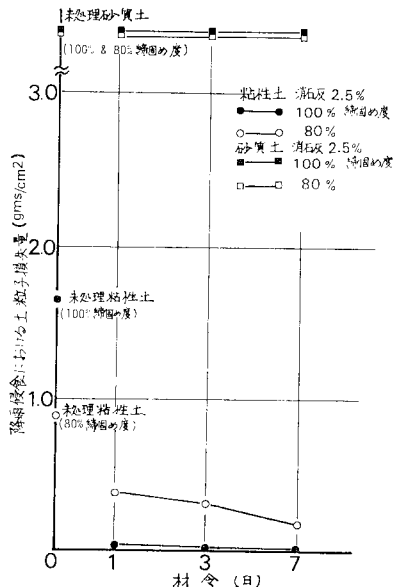


図-11 粘性土および砂質土を用いた消石灰処理土における締固め度 100% と 80% の土粒子損失量の比較

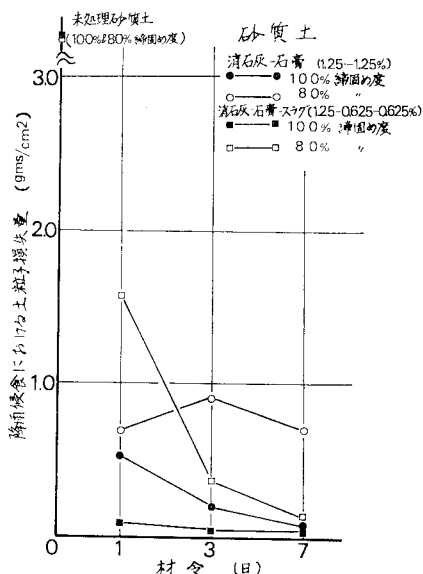


図-13 砂質土を用いた消石灰-石膏および消石灰-石膏-高炉スラグ処理土における締固め度 100% と 80% の土粒子損失量の比較

の降雨侵食量に及ぼす影響が小さいのは、両処理土における土粒子結合機構の相違によるものと考えられる。すなわち、7日材令までのセメント処理土においてはおもにセメントの水和により生成する反応生成物（けい酸石灰水和物およびアルミン酸石灰水和物）が土粒子間を直接結合することにより、雨滴の衝撃に対して抵抗できる土構造が形成されるため、セメント処理土では消石灰

と粘土間の反応（ポズラン反応）により土粒子間を結合することによって耐侵食性を発揮する消石灰処理土におけるほど土粒子と安定材が密接に存在していなくても処理効果が期待できるものと思われる。

すでに 4.(3) において述べたように、締固め度 100% においてはセメント（または消石灰）処理土におけるセメント（または消石灰）の一部分を石膏および高炉スラグで置き換えることによって降雨侵食量を大幅に減少させることができる。しかし、図-12 および 図-13 に示すように、主としてエトリンガイトの生成反応によって侵食の抑制を期待する石膏および高炉スラグを用いた処理土では締固め度が 80% に低下すると降雨侵食における土粒子損失量はかなり増加する。

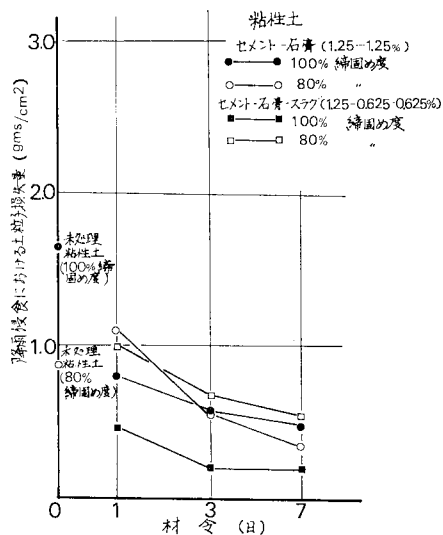


図-12 粘性土を用いたセメント-石膏およびセメント-石膏-高炉スラグ処理土における締固め度 100% と 80% の土粒子損失量の比較

5. 安定処理土の降雨侵食量と反応過程および土粒子の結合状態

(1) 安定処理土の pH 値の経時変化と降雨侵食量

消石灰およびセメント処理土において土粒子間を結合するポズラン反応が生じるには、処理土が高い pH 値を保持する必要がある、処理土の pH 値を測定することにより処理効果の判断および最適な添加量の決定が可能であると指摘されている^{9),10)}。

図-14 および 図-15 は粘性土および砂質土を用いた各種安定処理土の材令に伴う pH 値の変化を示したものである。粘性土と砂質土および各安定材の混合割合と

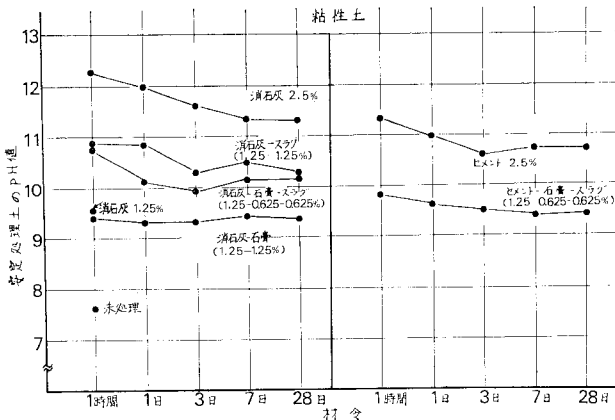


図-14 粘性土を用いた各種安定処理土の pH 値と材令の関係

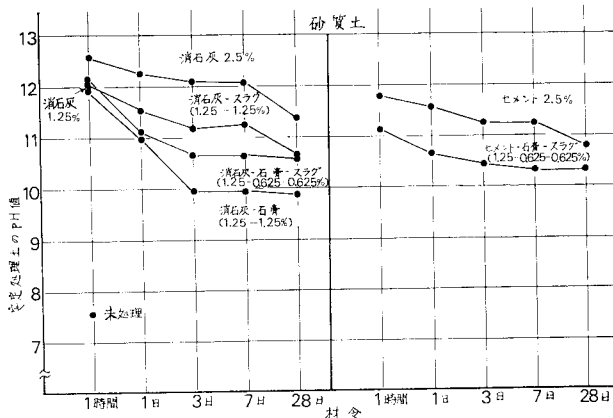


図-15 砂質土を用いた各種安定処理土の pH 値と材令の関係

添加量により安定処理土の pH 値は大きく異なる。図-14 に示すように、粘性土においては各混合割合の中で消石灰添加量が 1.25% のものは添加量が 2.5% のものと比較して混合後 1 時間における pH 値がかなり低く、材令に伴う pH 値の減少も小さい。特に、消石灰-石膏処理土 (1.25%—1.25%) は混合後 1 時間における pH 値は 9.3 と最も低く、材令に伴う pH 値の減少もまったくみられない。このことより、図-4 および 図-7 に示すように、粘性土を用いた消石灰処理土 (添加量: 1.25%) および 消石灰-石膏処理土 (1.25%—1.25%) において降雨侵食抑制効果がまったくみられないのは、両処理土では pH 値が低いため、土粒子間に結合力を与えるポズラン反応およびエトリンガイトの生成反応がほとんど生じなかったことによるものと思われる。

一方、図-15 に示すように、砂質土においては同一添加量および混合割合における pH 値は全体として粘性土の場合よりも高く、消石灰を用いた各混合割合の処理土の混合後 1 時間における pH 値はいずれも石灰飽和溶液の pH 値に近い 12.3 程度を示している。しかし、

その後石膏が添加されている消石灰-石膏-高炉スラグ処理土 (1.25%—0.625%—0.625%) および 消石灰-石膏処理土 (1.25%—1.25%) は、消石灰処理土 (添加量: 2.5%) および 消石灰-高炉スラグ処理土 (1.25%—1.25%) と比較して 3 日材令までに pH 値が急激に減少する。この急激な pH 値の減少は、活発なエトリンガイトの生成反応により添加した消石灰が急速に消費されたことを意味している。さらに、両処理土では 3 日材令以後の pH 値の変化はほとんどみられないことから判断して、エトリンガイトの生成反応は pH 値が 11 以上の状態に維持されている 3 日材令までにほぼ終了しているものと思われる。このことより、図-9 に示すように砂質土を用いた消石灰処理土における消石灰の一部を石膏および高炉スラグで置き換えることにより初期材令における降雨侵食量を大きく減少できるのは、主としてエトリンガイトの生成により土粒子間の結合力が増加したことによるものと思われる。また、セメント処理土 (2.5%) およびセメント-石膏-高炉スラグ処理土 (1.25%—0.625%—0.625%) の材令に伴う pH 値の変化は、粘性土および砂質土ともに消石灰を用いた各処理土と比較して小さく、材令に伴う pH 値の変化と降雨侵食量との関係もあまり明確ではない。

以上の結果より、ポズラン反応およびエトリンガイトの生成反応は処理土の pH 値に対する依存性が大きく、両反応を利用して降雨侵食抑制効果を期待する場合には粘性土および砂質土ともに混合後 1 時間における処理土の pH 値が少なくとも 11 以上となるような安定材の添加量および混合割合を選択することが必要であると思われる。

(2) 降雨侵食に対して抵抗性を示す安定処理土における反応生成物と土粒子間の結合力

写真-5, 6 および 7 は、1 日材令からすでに降雨侵食に対する抑制の効果が認められた砂質土を用いたセメント処理土 (添加量: 2.5%) における降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像である。これらの写真より、砂質土を用いたセメント処理土では比較的大きな砂粒子間の空隙に存在する粘土およびシルトの微細粒子がセメントの水和反応生成物により互いに結合され、さらに砂粒子間はそのような連続構造によって結合されている様子が認められる。

写真-8, 9, 10 および 11 は、比較的大きな降雨侵食に対する抑制効果が認められた粘性土を用いたセメント



写真-5 砂質土を用いたセメント処理土（添加量：2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：100）



写真-8 粘性土を用いたセメント処理土（添加量：2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：100）

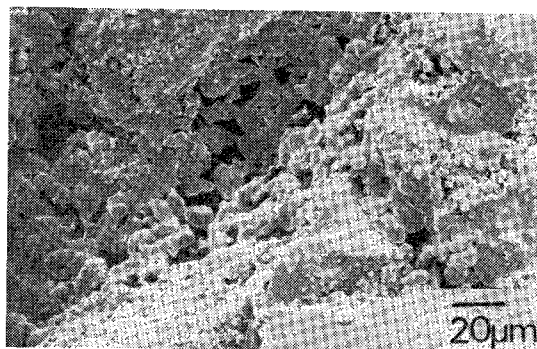


写真-6 砂質土を用いたセメント処理土（添加量：2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：450）

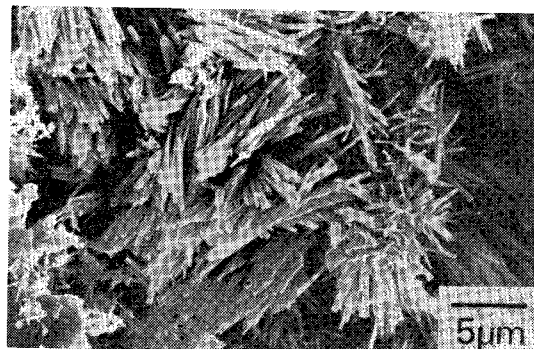


写真-9 粘性土を用いたセメント処理土（添加量：2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：3 000）

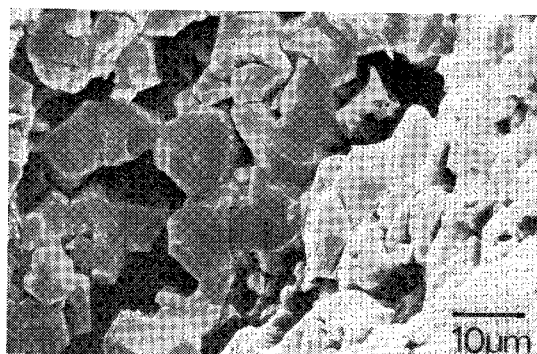


写真-7 砂質土を用いたセメント処理土（添加量：2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：1 500）

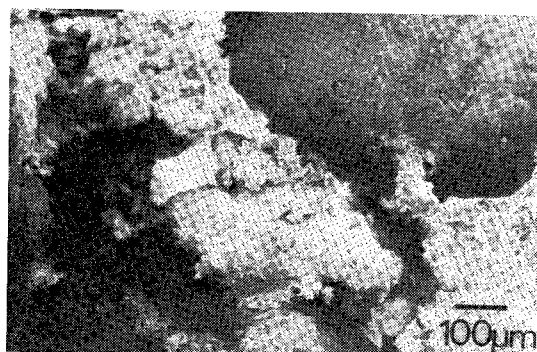


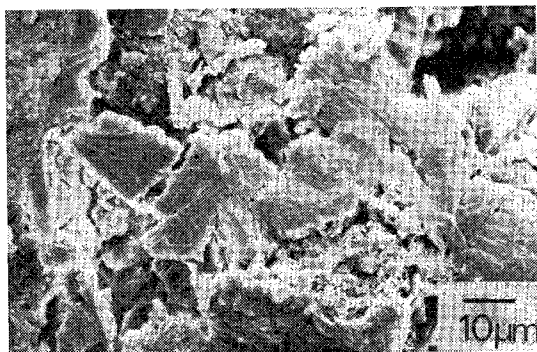
写真-10 粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：2.5%，材令：7日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：100）

処理土（添加量：2.5%）および消石灰処理土（添加量：2.5%）における降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像である。

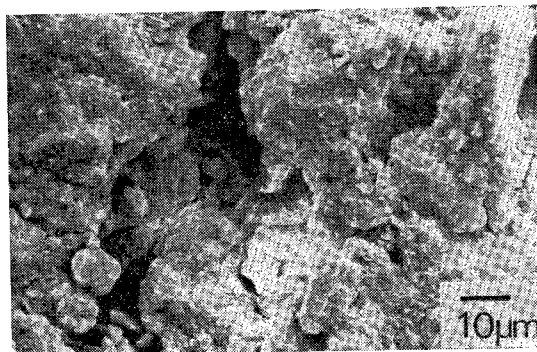
写真-9 に示すように、粘性土を用いたセメント処理土では C-S-H ゲルと思われる繊維状の反応生成物が認められる。粘性土を用いた消石灰処理土では写真-11 に示すように微細な粒子と消石灰間の反応によって生じ

たと思われる生成物により粘土粒子からなる団粒が結合されている。このように大きな耐侵食性を示す安定処理土においては、反応生成物によってち密な構造が形成されている。

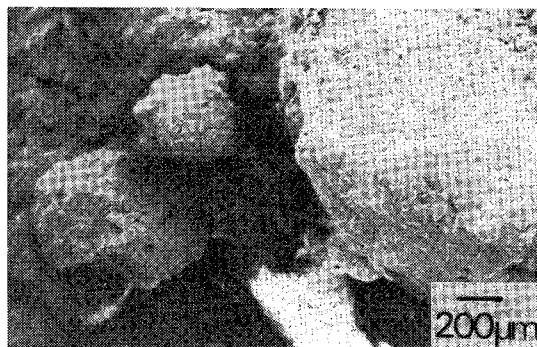
一方、降雨侵食に対する抑制効果がまったく認められない粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：1.25%）では、写真-12、13 および 14 に示すように個々の粘土粒



写真—11 粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：2.5%，材令：7日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：1000）



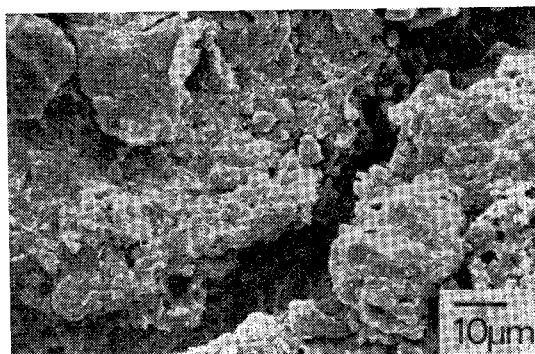
写真—14 粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：1.25%，材令：7日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：1000）



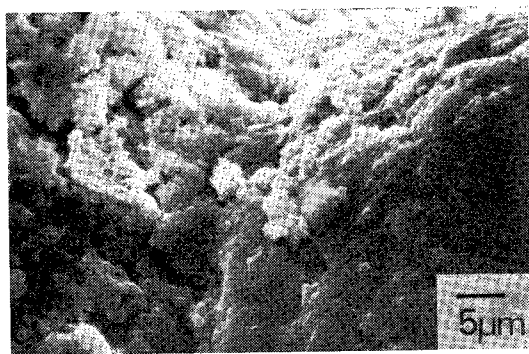
写真—12 粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：1.25%，材令：3日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：45）



写真—15 粘性土を用いた未処理土の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：100）



写真—13 粘性土を用いた消石灰処理土（添加量：1.25%，材令：3日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：1000）



写真—16 砂質土を用いた消石灰-石膏処理土（添加量：2.5%—2.5%，材令：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面の SEM 像（倍率：2000）

子よりなる団粒が独立して存在しており、全体として連続した構造となっていない。このことは 写真—15 に示すように未処理粘性土においても同様に認められる。

写真—16 および 17 は、砂質土を用いた消石灰-石膏処理土（2.5%—2.5%）における代表的なエトリンガイトの生成状況を示したものである。消石灰-石膏処理土においては、写真—17 に示すように1日材令から 1 μm

程度の針状のエトリンガイトが土粒子間の空隙を充填するように存在しており、ち密な構造の形成が認められる。

図—16 は安定材の添加によってもたらされた土粒子間の平均的な結合力の変化と耐侵食性との関係を調べるために、一面せん断試験（せん断速度：1 mm/min）によって求めた粘着力と降雨侵食試験における土粒子損失

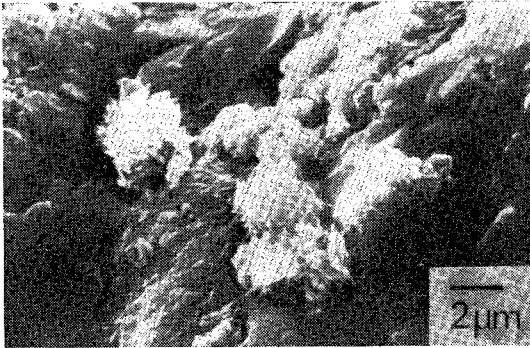


写真-17 砂質土を用いた消石灰-石膏処理土（添加量：2.5%—2.5%，材合：1日）の降雨侵食試験後の供試体表面のSEM像（倍率：5000）

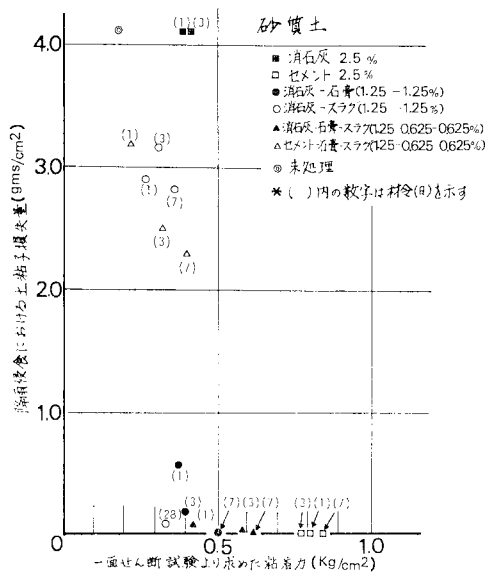


図-16 砂質土を用いた各種安定処理土の土粒子損失量と粘着力の関係

量との関係を砂質土を用いた各種安定処理土に対して示したものである。図-16に示すように、一面せん断試験より求めた粘着力と降雨侵食試験における土粒子損失量との間には相関性が認められる¹¹⁾。すなわち、砂質土を用いた安定処理土（添加量：2.5%）では粘着力が0.4 kg/cm²以上になると土粒子損失量が激減する。この事実は本安定処理土に関する限り0.4 kg/cm²以上の粘着力をもつ安定処理土では連続的な構造が形成されていると思われる。

6. 結 論

降雨によって発生するのり面侵食および表層崩壊を防止するための経済的な工法を開発することを目的として、セメント、消石灰、石膏および高炉スラグを種々の

割合で土壌に添加した場合の降雨侵食試験を行い、降雨侵食抑制に対する各安定材添加の有効性および安定材添加量の比較的少ない処理土における土粒子の結合機構について実験的検討を行った。

安定処理工法が植生が完成するまでの一時的な土壌侵食を対象とする場合には、植生との関連から安定処理土のpH値が重要な問題となる。各種安定処理土における植生の成否を調査するための現場実験の結果¹²⁾によると、セメント、消石灰、石膏および高炉スラグのいずれの安定材を用いても添加量が5%以下においては植物の発芽および成長が阻害されることはなく、安定処理工と植生工の併用が十分可能であることが確認された。

また、環境保全の点から、安定処理土より流出する水のpH値についても検討しておく必要がある。しかし、本研究で対象とした安定処理では安定材の量が比較的少ないため、降雨侵食試験における流出水のpH値は8~9程度であったが、実際の流出水はさらに雨水等により希釈されると考えられる。

本研究で得られたおもな結果をまとめると次のようである。

(1) 本実験において使用した粘性土および砂質土に2.5%程度のセメントを添加した処理土では、ち密な土粒子構造が形成され、雨滴の衝撃による降雨侵食を効果的に抑制できる。

(2) 消石灰処理土では、材合に伴う降雨侵食の抑制効果の増進はセメント処理土と比較して緩速であるが、粘土分の比較的多い土において十分な養生期間が確保できる場合にはセメント処理土の場合と同程度の処理効果が期待できる。

(3) 産業副生産物である石膏および高炉スラグを消石灰またはセメントとともに使用するとき、適用する土質によって安定材の混合割合を適切に選択すれば、エトリンガイトの生成により大きな降雨侵食に対する抑制効果が期待できる。本実験に使用した粘性土および砂質土に対しては、それぞれセメント-石膏-高炉スラグ(1.25%-0.625%-0.625%)および消石灰-石膏-高炉スラグ(1.25%-0.625%-0.625%)の混合割合が初期材合から効果的に降雨侵食を抑制できる。

(4) セメント処理土では締固め度は降雨侵食量にそれほど重大な影響を与えないが、消石灰処理土および石膏、高炉スラグを用いた処理土では締固め度を小さくすると降雨侵食に対する抑制効果が発揮されるまでに必要な材合が長くなる。

(5) 降雨侵食に対する抵抗性の増加はセメントおよび消石灰処理土ではおもにC-S-Hゲル、セメント（または消石灰）-石膏-高炉スラグ処理土ではエトリンガイトの生成により雨滴の衝撃によって破壊されない土構造

が形成されるためである。

(6) 安定処理土の降雨侵食に対する抵抗性およびポズラン反応およびエトリングイト生成反応の進行状況は、安定処理土の pH 値を計測することにより推定可能であることが再確認された。

(7) 砂質土を用いた安定処理土の降雨侵食による土粒子損失量と一面せん断試験より求めた粘着力との間には相関性が認められる。

参 考 文 献

- 1) Young, R.A. and J.L. Wiersma : The role of rainfall impact on soil detachment and transport, *Water Resources Res.*, Vol. 9, pp. 1629~1636, 1973.
- 2) Diamond, S. and M. Kawamura : Soil stabilization for erosion control, Report No. JHRP-74-12, Joint Highway Research Project, Purdue University, 1974.
- 3) Kawamura, M. and S. Diamond : Stabilization of clay soils against erosion loss, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 23, No. 6, pp. 444~451, 1975.
- 4) 有泉 昌・大場正男 : アロファン質粘土の消石灰-石膏による化学的処理方法に関する研究 (5), *土木研究所報告*, No. 119, pp. 83~103, 1963.
- 5) 柳場重正・川村満紀ほか : 脱硫副生産物による土質安定処理, *土と基礎*, Vol. 26, No. 5, pp. 11~16, 1978.
- 6) 岩井重久・石黒政儀 : 応用水文統計学, 森北出版.
- 7) Wischmeier, W.H. and D.D. Smith : Rainfall energy and its relationship to soils loss, *Trans. Amer. Geophysical Union*, Vol. 39, pp. 285~291, 1958.
- 8) Machan, G., S. Diamond and L. Edmond : Laboratory study of the effectiveness of cement and of lime stabilization, *Transportation Research Board*, No. 641, pp. 24~28, 1977.
- 9) Eades, J.L. and R.E. Grim : A quick test to determine lime requirements for lime stabilization, *Highway Research Record*, No. 139, pp. 61~72, 1966.
- 10) Tompson, M.R. and J.L. Eades : Evaluation of quick test for lime stabilization, *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 96, pp. 795~800, 1970.
- 11) Cruse, R.M. and W.E. Larson : Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 41, pp. 777~781, 1977.
- 12) 稲松敏夫・今越 茂ほか : 排煙脱硫石こうによるのり面安定処理に関する実用化研究, *土と基礎*, Vol. 27, No. 12, pp. 11~16, 1979.

(1982.3.17・受付)