

キーワード：砂，せん断，透水，斜面安定

1. まえがき

鉄鋼生産の過程で生産されるスラグはその冷却方法によって種々の物性を有するものが出現する。その中で耐火水による急速冷却によって、いわゆる水砕スラグが製造される。この水砕スラグは細粒状をなし、硬質水砕スラグと軟質水砕スラグがあり、一見、天然砂の外観を呈する人工砂というべきものである。とくに、軟質水砕スラグは土質工学的に極めて興味ある特性を有しており、いわゆる特殊土としての位置づけも可能であると考えられる。それらの基礎的な試験から土工材料としての現場への適用に至るいくつかの実験研究を実施してきた。本文は、それらの研究結果をとりまとめたものである。

2. 土質工学的特性と利用状況

2・1 土質工学的特性と意義

天然砂は一般に岩石が風化して細粒化して生成されたものであるのに対し、水砕スラグは、鉄鋼石を高温で溶融して鉄分を取り除いた岩石分を急冷させることによって粒状化させたいわゆる人工砂である。

その外観は、天然砂に極めて類似しているが、その個々の粒子は写真-1に示されるように、天然砂（海砂）と比較して著しく異っている。水砕スラグの粒子はその中に数多くの気泡を有しており、また川砂や海砂のように水で運搬されたことがないので、表面の凹凸が多く角ばっている様子が確認される。

また、急冷操作により鉱物が結晶する時間的余裕がないため、粒子の表面は非結晶でガラス質の部分が多く残されている。こうしたことから次のような工学的特性を有する人工土砂となっている。

- (1) 粒子内の空げきと粒子間の間げきが大きく、単位体積重量が小さい。
- (2) 粒子が角ばっているため、粒子のかみ合せがよく、大きい内部まきつ角を有する。
- (3) 透水性がよい。
- (4) ガラス質による潜在水硬性

がある。

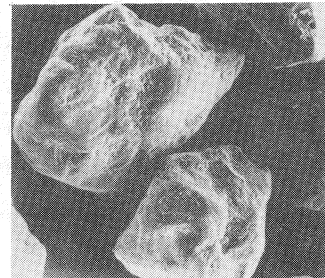
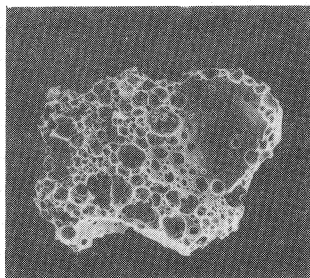
水砕スラグ

海砂

(5) 人工的に一定の製法で工場

生産されたものであるから、その性状は均一で、施工管理が容易で安全性の高い地盤や土構造物が造成できる。

これらの特性は土質工学的にみて好ましい性質となることが多いが、しかし、ときには不利な条件となることもあり、その適用にあ



たつては十分な検討を要することはいうまでもない。とくに、大きな集中荷重が作用したときの粒子破砕は天然砂に較べて大きいと考えられるし、砂と同様に透水性が大きく、保水性が小さいため植生には適さない。また工場製品であるため、一度に大量の水砕スラグを必要とするときには十分量が確保できないことがある、などである。

2・2 現在の利用状況

昭和57年度の土工用水砕ス

ラグは、鉄鋼協会の統計に

よれば全国で約1000万t、

西日本で約700万tとなっ

ている。その利用状況は図

ー1に示されているように

セメント用が圧倒的に多い

ことがわかる。土質材料と

しての利用はわずかに10%

程度となっている。その理

由はいろいろ考えられよう

が、セメント用としての水

砕スラグの利用の歴史は古

いこと、時間あたりの生産

量がほぼ決っており、工場生産品であるセメント混入材として定常的な利用が好ましいこと、などが考えられる。

しかし、土質材料としての有利な特性を考えると今後その利用率は高まるものと期待できる。

3. 物理的性質

3・1 比重と単位体積重量

水砕スラグ粒子の比重については、粒子内空けきの取扱いによって、真比重Gs、見かけ比重（絶乾比重Gse，表乾比重）を区別する必要がある。すなわち真比重は粒子の鉱物成分のみの比重であり粒子間空けきを取除いて算定すべきもので、具体的には水砕スラグ粒子を強制的に破砕して、通常の比重試験（JIS A 1201）を行って求める。また、絶乾比重は、土粒子内の空けきを粒子の一部として取扱うものであり、粒子を破砕せずに比重試験を行って求めることができる。表乾比重は水砕スラグを水浸して、粒子内空けきに侵入し得る水分を粒子自体に含ませて求める比重である。

水砕スラグの比重の試験値の範囲を表ー1に示す。

土粒子の破砕を考察しなくてよい範囲での工学的な問題では、見かけ比重を用いることになる。

単位体積重量については、土粒子の比重と締固め度（開けき比e）によって乾燥密度 ρ_d が求まり、含水比がわかると湿潤密度 ρ が計算で求まる。ここで気になるのは水砕スラグ粒子の破砕であるが、通常の締固め試験（JIS A 1210）の4.5kgランマーで締固めたときの粒径加積曲線を図ー2に示している。ここでよく観察してみると粒子が破砕されるよりも、粒子の突起

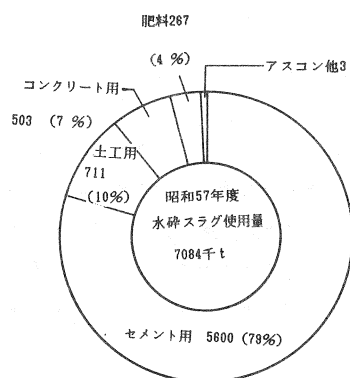


図-1 (a) 西日本における水砕スラグの用途別使用実績

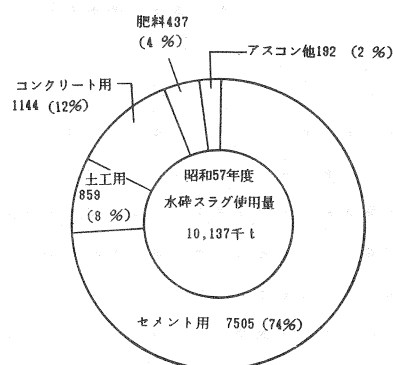


図-1 (b) 全国における水砕スラグの用途別使用実績

表ー1 天然砂と水砕スラグの比重

			真比重	表乾比重	絶乾比重	単位体積重量	吸水率
			Gs		Gse	γ (t/m ³)	(%)
川砂	徳島	吉野川	2.683		2.612		1.01
	滋賀	日野川	2.636		2.519		1.77
まさ土	岡山	西大寺	2.653				
	山口	下の関	2.683				
水砕スラグ	A		2.53	2.37	2.25	1.25	5.27
	B		2.65	2.57		1.25	1.26
	C		2.53		2.18	1.00	0.32
	D		2.69	2.44	2.32	1.18	5.2

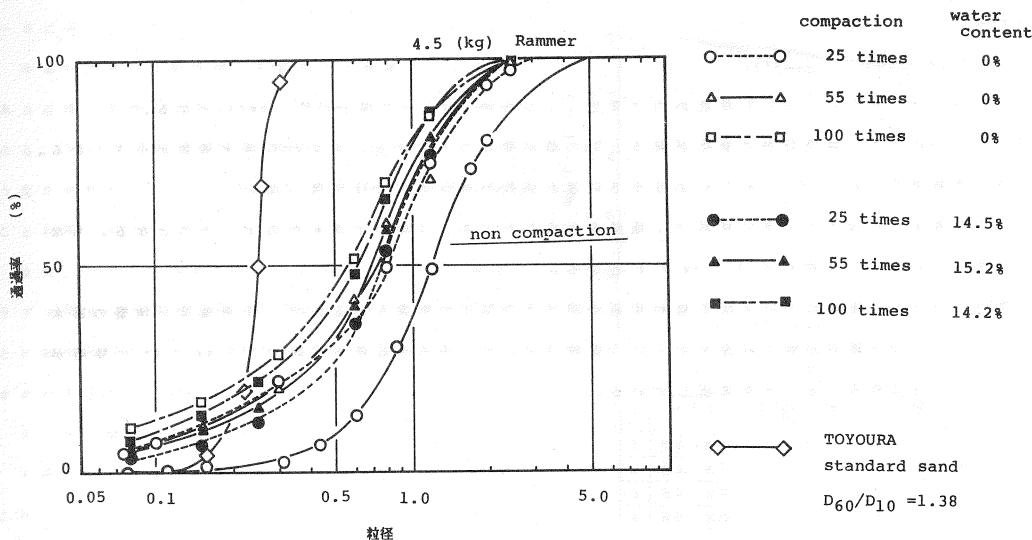


図-2 水砕スラグの粒径加積曲線 (mm)

部が折れて分離するという変化が卓越している。その結果、フルイ通過分に大きな変化が生じるようである。また突固め回数が増大するに従って粒径の変化が進むということだけでなく初期において弱い部分が分離する。このような事情から単位体積重量は締固めの程度や粒子破砕によって巾をもつことになるが、多くの締固め試験の結果から $\rho_d = 1.0 \sim 1.3$ の範囲に入ると考えてよい。いずれにしても、天然土に較べて小さい乾燥密度が得られる。また含水比については、保水率が低いために自然含水比は 5 ~ 15% である。

3・2 透水性

土の透水性は、連続した間げきの大きさと量が大きな支配要素であり、間げきの形や土粒子の表面状態が影響因子としてこれに加わる。その間げきの大きさと量は粒子の大きさと形、それに締固めの割合によってほとんど決るといってよい。こうした透水性媒体のモデルから、よく知られている Hazen-Poiseuille の式 (1) が導かれている。

$$k = C_s \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot D_s^2 \quad \text{---(1)}$$

ここに、 k : 透水係数, μ : 水の粘性係数, γ_w : 水の単位体積重量, e : 間げき比, D_s : 土粒子の径, C_s : 形状係数と呼ばれ間げきの形, すなわち土粒子の形から決る定数である。

μ と γ_w は常温では大きな巾で変化しない。 C_s と D_s については天然土では大きな範囲で変化するが、一方、水砕スラグの場合には工場製品であるから比較的变化の巾が小さい。したがって水砕スラグの透水係数 k と間げき比 e の関係式は実用的に汎用性が高くなる。

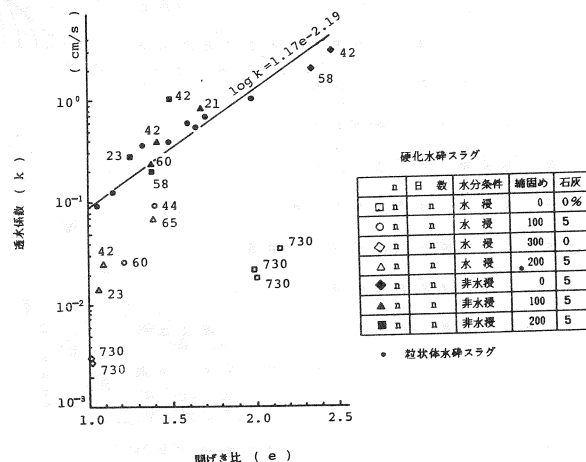


図-3 間げき比と透水係数の関係

図-3は透水試験の結果を $e \sim \log k$ で整理したものであるが、これを直線で近似してみると次式のような関係式が得られる。

$$\log k = 1.2e - 2.2 \quad \text{--- (3)}$$

開げき比については、 $e = 0.8 \sim 2.0$ 程度の巾で変化し、したがって $k = 1.0 \sim 10^{-1} \text{ cm/s}$ となる。

よく締固めることにより、粒径分布に変化が起ると D_s の値が変わることになる。すなわち透水係数が小さくなる。著者らの実験等の結果から $k = 10^{-2} \text{ cm/s}$ より小さい透水係数の値は通常では出現しない。

いずれにしても透水性が極めて大きい材料で、地盤を形成したときには極めて排水性のよいものとなる。ちなみに、降雨強度 100 mm/hr は約 $3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となる。

降雨が地盤中に浸透する現象については不飽和状態や開げき空気圧の影響もあるので、降雨強度が地盤の透水係数より小さい場合には全降雨が地下浸透するという保障はないが、後述する降雨実験で 250 mm/hr の降雨がすべて水砕スラグ地盤に浸透することを確認している。

4. 力学的性質

4.1 セン断強度

一般に土のせん断強度は粘着力 C と内部まさつ角 ϕ によって表わされる。

三軸圧縮試験結果の一例を図-4に示すが、同図にみられるように、破壊包絡から見かけの粘着力が現われる。その大きさは $C = 0.3 \sim 0.5 \text{ tf/m}^2$ となる。これは水砕スラグの粒子のかみ合わせから出現する粘着力の項であると推定される。

また図-5には、開げき比と内部まさつ角の相関が示されている。同図に側圧が小さい範囲で内部まさつ角が大きくなっている。この結果については破壊包絡線を引く際に $C = 0$ として原点よりの直線から ϕ を求めているためにこのような傾向がみられるものと推定される。さらには粒子破碎の影響が加わる可能性もある。いずれにしても実際の設計に際して $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$ ($C = 0$)とすることが可能であろう。

また3軸圧縮試験におけるstress-strain curveから一般にはつぎのような性質がみられる。

- 1) 圧縮ひずみ曲線からはピークが明確でない。すなわち、ゆるずめの砂の場合に近い。
- 2) よく締った状態(e が小さい)ほど内部まさつ角が大きくなる傾向がみられるが、必ずしも顕著ではない。
- 3) 体積ひずみ(Dilatancy)もひずみ量が小さいときに負であり、ひずみが大きくなるに従って正に移行する。

4.2 圧縮特性

水砕スラグに長期載荷を行ったときの圧縮(あるいは膨張)がどのように進行するのか、を目的として実

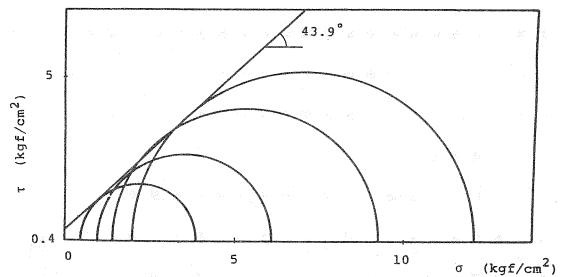


図-4 セン断試験結果の一例

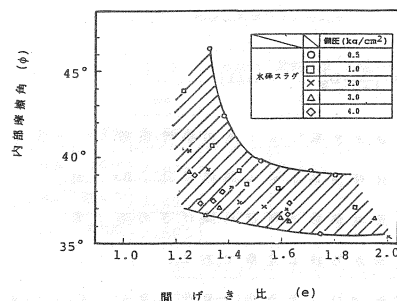


図-5 内部摩擦角と開げき比の関係

験室内で簡単な測定観測を行った。その結果の一例を図-6に示している。

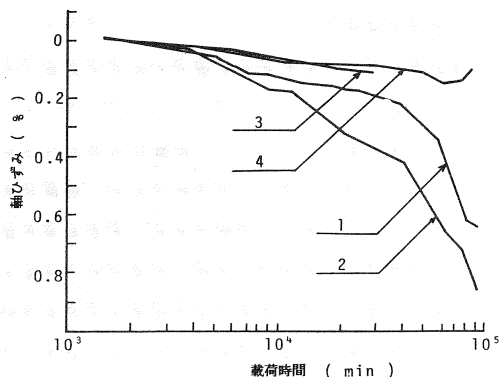
ゆるい状態では経時的に圧縮沈下が継続しているが、ある程度の締固めによって小さくなり無視しうるものとなる。とくに以前、スラグは膨張するのではないかという危惧が持たれたことがあるがその危険性は皆無であることが明らかとなった。

また、マサセにみられるような水浸沈下、いわゆるコラプス現象についてはどうかの疑問が考えられ、マサ土と比較実験を実施し、図-7のような結果を得ている。すなわち水浸沈下の心配は無いことも判明した。

4・3 締固め特性

水砕スラグの締固め実験結果の一例を図-8に示す。これにも示されているように最適含水比-最大乾燥密度の明確なポイントが現われない。すなわち、締固め度はその含水比に敏感ではない。

従来から一般に土をよく締固めるといふ目的は、密度を



	水分条件	締固め(回数 (1.5kgランマー))	荷重 (t/m ²)	アルカリ 刺激材
1	真水(水浸)	無し	3.7	無し
2	海水(水浸)	無し	3.7	無し
3	真水(水浸)	100	3.7	無し
4	真水(水浸)	300	3.7	無し

図-6 膨張、収縮ひずみの経時変化

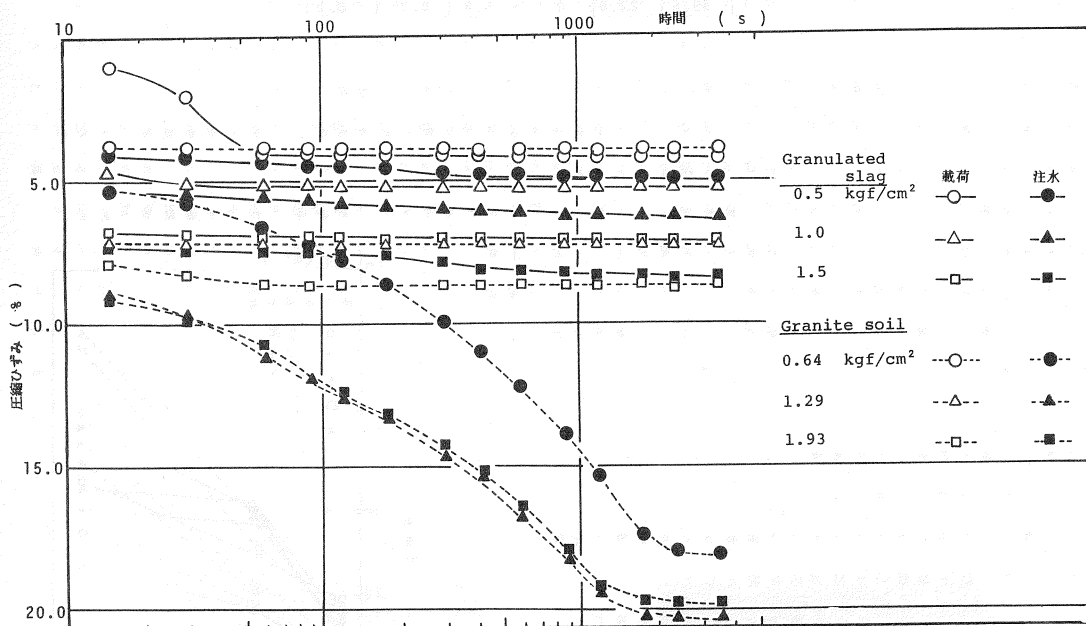


図-7 浸水圧縮試験結果

大きくして土の強度を大きくし、透水性を小さくすること、であった。それがためには、粗細土粒子が適当に混合されている土が望ましく、よい配合の土と呼ばれることがある。しかし、水砕スラグは上記のような目的には全く逆であり、軽くて、透水性がよいことが注目されるべきであり、かつ強度定数(内部まきつ角)が大きいことが期待できる。

また、締固め時において含水比の管理を厳しく実施する必要性が少いということを利用点として応用することがで

きよう。

4・4 潜在水硬性

表-2 は水砕スラグの化学組成を他の天然土と比較したものである。

水砕スラグの含有成分は、もともと鉄鋼石の岩石分であるから天然土や岩石とほとんど変りないのは当然である。熔融状態の岩石が徐々に冷却されると、石灰、ケイ酸を主体とする各種の鉱物結晶を形成するが、水砕スラグの場合、急冷されるため、結晶する時間的余裕がなくガラス質となる。水砕スラグのガラス化率は85~99%であり、これは含水状態でアルカリ刺激を受けると容易に反応して粒子間の接点に新たな鉱物を生成して凝結硬化する。この性質を潜在

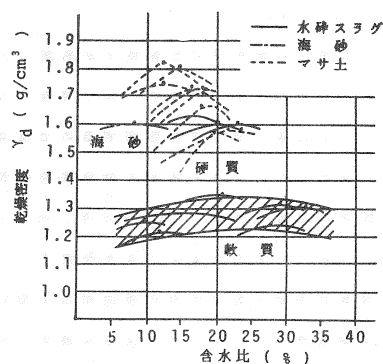


図-8 締固め曲線

表-2 化学成分

(単位%)

種類	化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO	FeO
水 砕 ス ラ グ		3.34	14.5	41.0	6.0	1.0	0.7	0.4
普通ポルトランドセメント		22.0	5.5	65.0	1.4	1.0	—	3.0
天 然 石 (山砂)		60.0	22.0	0.5	0.8	0.1	0.1	—
安 山 岩		60.0	17.0	6.0	3.0	0.2	1.0	3.0
山 土		59.6	22.0	0.4	0.8	0.01	0.1	—

水硬性と呼ぶ。アルカリ刺激剤としては石灰やポルトランドセメントが用いられる。

現実の施工に際しては石灰やポルトランドセメントを混合する労力を無くするのに、石灰と水を混合したものを水砕スラグにふりかけるといった方法がとられることもある。

図-9 は水砕スラグに石灰をアルカリ刺激剤として混合した場合の強度発生（水硬性）の一実験結果である。

潜在水硬性に関しては、アルカリ刺激剤の有無あるいは混合比率、締固め度、含水比や温度などの養生条件、とくに、アルカリ刺激剤を添加しない状態での固化について、解明されるべき研究課題をいくつか残している。

5. 現場への適用事例とその考察

5・1 軟弱地盤上の盛土

軟弱地盤上に高盛土をするとすべり破壊や大きな側方流動を起すことがある。軟弱粘土地盤の支持力の目安として、

$$q = 5C \quad (q: \text{支持力}, \quad C: \text{粘着力})$$

がある。いま、 $C = 2.0 \text{ tf/m}^2$ の地盤では $q = 10 \text{ tf/m}^2$ となるので、土の単位体積重量を 2.0 t/m^3 とすると、最大 5.0m が限界盛土

高さとなり、安全率をとえば 1.5 とするとせいぜい 3.0m が許容盛土

高さということになる。天然土の代りに水砕スラグを盛土材料として

用いると、その単位体積重量は 1.2 t/m^3 程度であるから同様に許

容盛土高さを推定すると約 5.0m となる。このように単位体積重量が小

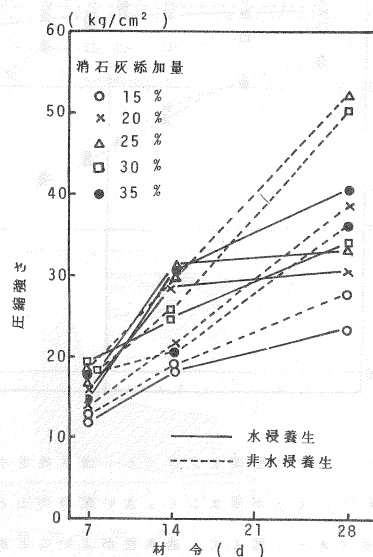


図-9 石灰添加による潜在水硬性

さいということは荷重軽減であるから容易にかつ信頼できる判断を下すことができる。

岡山地域では日本有数の軟弱地盤をかかえており、ここに道路等の盛土を建設するケースが多いが、盛土材料として天然土の代りに水砕スラグを用いることにより、地盤改良等なしに高盛土に成功した事例も多い。

また道路の路床材としての適性についての実験も行っている。それらの結果、現場CBR値として20をとってよいという結論も示されている。

支持力がほとんどないような超軟弱地盤（いわゆるヘドロ地盤）に土をまき出して地盤を造成しなければならぬ場合がある。天然土の場合、そのほとんどが、超軟弱地盤に埋没して土地造成ができず、シート張りやロープの助けを借りて造成を行うことがよく行われる。一方、この場合に水砕スラグを用いると少い埋没で造成が可能となり、成功した例がある。この問題に関しては単に超軟弱地盤の支持力のみでは判断できない。すなわち埋没した土や水砕スラグの残りに対する浮力を考え合わせねばならない。

いま、地盤の支持力が皆無と仮定して、天然土がヘドロと同じ重量あるいはそれより大きいとすれば、そのほとんどが埋没するのは当然である。一方、水砕スラグがヘドロより軽い場合には、埋没した水砕スラグに浮力が作用し、その分だけもとの地盤面より上に盛土をすることができるはずである。現実には、わずかの支持力と上記の浮力の両者によってヘドロ地盤での水砕スラグの盛上げが可能となるものと考えられる。

5・2 斜面の安定

斜面の破壊は、いわゆるすべり型の破壊と表面侵食型の破壊がある。

すべり型の破壊に対しては、長大斜面の安定解析や円弧すべり安定解析が行われるが、斜面の形を一定とすれば土の単位体積重量、浸透力、土の強度定数（内部まさつ角と粘着力）によって安全性が判断できる。

水砕スラグのように単位体積重量が小さいことは、すべらそうとする力がそれだけ小さくなるのであるから、その斜面は安定の方向へ移る。また透水性が大きい場合には排水が速やかで浸透力の発生も少ない。内部まさつ角については前述のように $\phi = 35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ と考えてよく、天然砂に較べて小さくない。このように、天然砂に較べて水砕スラグの斜面は安全側に位置することが理解できる。さらに必要ならば石灰などのアルカリ刺激剤を添加することによって大きい粘着力を発生させることが可能である。

また、降雨等による表面侵食破壊については、雨滴のエネルギーによって斜面の土粒子が乱されること、斜面を流下する表面流によってガリやリル侵食が発生すること、が最も大きい要因である。人工斜面による降雨実験によれば、 250mm/hr の降雨強度はすべて水砕スラグ斜面内に浸透し、表面は安定していることが判明した。写真-2はマサ土斜面と水砕スラグ斜面による人工降雨実験を示したものであるが、左側のマサ土斜面が大きく表面侵食を受けたのに対し、水砕スラグ斜面はほとんど損傷がなかった様子を示している。写真-3は岡山県下での長大斜面の施工事例である。

写真-2 散水実験

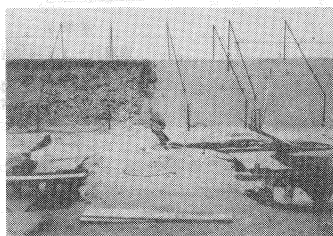
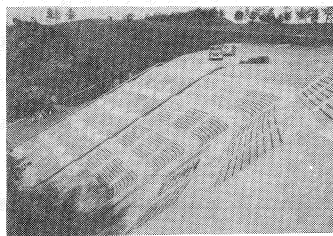


写真-3 互層盛土例



5・3 土留めの裏込め

擁壁や矢板土留めの安定は、裏込め土による土圧と裏込め土中の水圧が作用力である。当然作用力が小さくなれば土留めは安定に移行する。主動土圧は土の単位体積重量が小さい程、土のせん断抵抗力が大きい程小さくなる。とくに単位体積重量に関しては、 $C = 0$ の場合、それに比例する。

$$P_a = \gamma_z \cdot \frac{1}{N_\phi} = \frac{2C}{\sqrt{N_\phi}} \quad N_\phi = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad \text{---(4)}$$

天然砂に較べて水砕スラグを用いることにより、作用土圧を $1/2 \sim 2/3$ に軽減することができる。

裏込め土からの排水が不十分であると、土圧以上の水圧が作用することもあり、極めて危険である。この点に關しても排水性のよい水砕スラグの有利性が強調されてよい。

5・4 透水性舗装

都市部での舗装化が進むにつれ、最近では、地下水のかん養、植樹保護のための透水性舗装が注目されつつある。またカラー舗装等も出現するようになった。水砕スラグの潜在水硬性と硬化した後も透水性が $k=10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度に保たれる特性（図-10）、また着色が容易であること、あるいは天然土の色彩を保ちうることなどの性質を利用して透水性舗装も施工されている。

しかし、アスファルト舗装やコンクリート舗装のような耐摩耗強度を期待することはできず、車輛荷重に耐えることは不能である。岡山県下では自然道の透水性舗装としての利用が行われている。

6. 環境問題としての考察

公害問題については、有害物質の溶出、生活環境への影響、その他環境汚染等に関して各項目が法律で定められている。それらについて試験が実施され、有害物質の溶出は検出されず、生活環境に関する項目についても、各基準値をほとんど下まわっている。水素イオン濃度（PH）、浮遊物質（SS）の水溶液テストの値が実験室内の試験によればわずかに基準値を上まわることがあり、唯一の留意ポイントとなる。しかし、現場での施工の場合には、実験室内の場合と異って、大気中の炭酸ガスによる中性化、周囲の自然水による希釈、土壤中通過による中和作用等によって影響の度合が著しく低くなると考えられる。

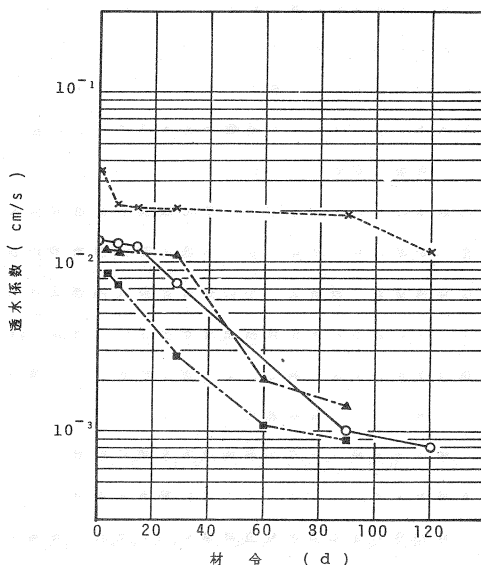


図-10 各種アルカリ刺激剤による透水性の経時変化例

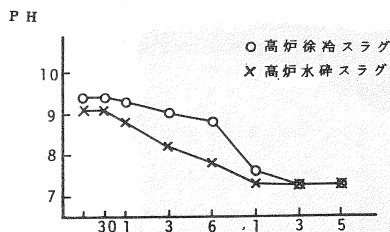


図-11 スラグ溶出水のPH値経時変化試験例

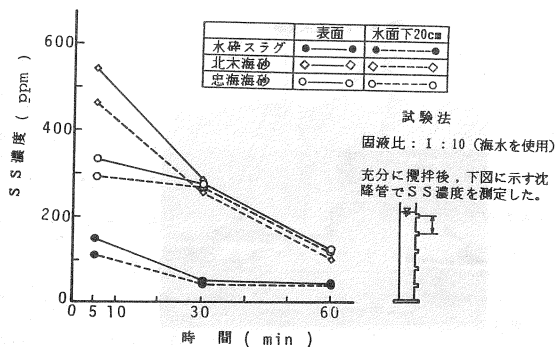


図-12 SS濃度測定結果

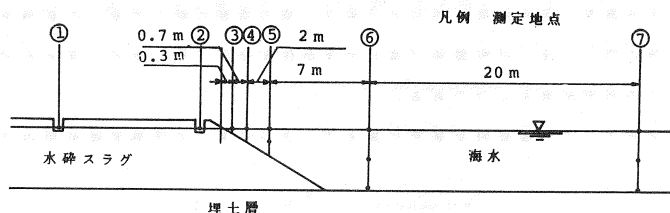


図-13 PH 測定位置

表-3 PH 測定結果

測定地点	1	2	3	4	5	6	7
施工完了時より約0.5ヶ月経過後	8.70	8.35~8.54	8.10~8.28	8.27~8.50	8.14~8.88	8.10~8.50	8.15~8.40
施工完了時より約3ヶ月経過後	—	—	8.50	8.65	8.55~8.70	8.55~8.60	8.45~8.55

PH および S S の挙動の確認のための現場実験調査の一例を図-11~13, 表-3 に示す。

図-11 に水砕スラグ溶出水の PH 経時変化, 図-12, 表-3 に水砕スラグ埋立地における測定結果を示している。また S S については図-13 に示すように天然砂の値を下まわっているのでほとんど問題は無いといえる。

6. 結論

人口土質材料としての水砕スラグの土質工学的性質と現地への適用事例を紹介し, その考察を行った。それらの結果をまとめるとつぎのようである。

- (1) 水砕スラグは鉄鋼石から鉄を生産する際, 高温溶融状態の鉄鋼石の岩石分に射水急冷して製造される人工砂ともいうべきものである。
- (2) その土質工学的特性は, 軽量であること, 透水性が大きいこと, 内部まざつ角が大きいこと, そして潜在水硬性を有することによって代表される。
- (3) 乾燥密度は, 通常 $\rho_d = 1.0 \sim 1.2$ の範囲にある。保水性は小さく, 自然含水比は $5 \sim 15\%$ である。したがって単位体積重量が小さく $\gamma = 1.1 \sim 1.4$ である。

単位体積重量が小さい特性は, 軟弱地盤上の盛土, ヘドロ地盤の埋立, 土留め裏込め材として土圧軽減を図ることができる。

- (4) 透水係数は, $k = 10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ で極めて排水性が大きい。この特性を利用すれば斜面排水, 土留め裏込め部の排水が有利となる。特殊な事例として透水性舗装も行われている。
- (5) 水砕スラグの粒子は天然砂に較べて表面の凹凸が多く, 角ばっているため, 内部まざつ角が大きくなる。 $\phi = 35^\circ \sim 45^\circ$ である。よく締固めると粒子のかみ合わせにより粘着力の項が発生し, 自律がみられる。
- (6) 石灰やポルトランドセメント等のアルカリ刺激材の添加により硬化して, 大きな粘着力を発揮する。

硬化後の透水性はやや低下するが, $k = 10^{-3} \text{ cm/s}$ であり実用上十分な排水性を有している。

アルカリ刺激材を加えることなくして硬化する自硬性があるが, その環境条件や時間的な変化については定量的に明確でなく今後の研究課題である。

岡山地域は, 国道2号線より南部一帯は日本有数の軟弱粘土地盤であり, また岡山の名が示すように岡や山が数多く分布し斜面安定の課題も少なくない。また水島工業地帯には川崎製鉄(株)があり水砕スラグの製造を行っている。こうした事状に加えて, 岡山県, 岡山市, あるいは建設省(国道工事事務所)などが, 土質材料として

の水砕スラグの利用に関する調査，研究に積極的に取り組み，他の地域に較べて多くの事例を集積し得たと考えている。水砕スラグの製造に関しては，川崎製鉄（株）のほか住友金属（株）など，ほとんどの製鉄所で生産されており 土質材料としての利用が増大しつつある。

今後，水砕スラグの土質材料としての基礎的な研究に加えて，さらに多くの現場実績が期待される。

「参考文献」

- 1) 河野伊一郎，二町宣洋，西垣誠：土質材料としての水砕スラグに関する研究，材料，Vol.31, No.341, 1982, PP.169 ~ 175
- 2) 鉄鋼スラグ協会：水砕スラグ（土工用材料としての技術資料），1983, PP.5 ~ 18
- 3) 川崎製鉄（株）：土木材料としての高炉水砕スラグ，1977, P.2