
土木工事における水砕スラグの用途

Useful Engineering Properties of Granulated Slag for Civil Works

河野 伊一郎(Ichiro Kono) 萩原 明(Akira Hagiwara) 富永 真生(Masanori Tominaga) 二町 宣洋(Nobuhiro Nicho) 渡辺 茂身(Shigemi Watanabe)

要旨：

国内では現在「省資源」をテーマにあらゆる分野で、材料の見直しが行われつつある。鉄鋼産業も同様な問題を抱えており、この報文では、副生する水砕スラグの土木工学的特性について述べ、さらにその建設材料としての最良の使い方を述べる。室内試験や屋外実験の結果、自然土に比較して水砕スラグには、軽量性、透水性および水硬性などの特性がある。これらの優れた特性を利用することにより、土構造物の優れた安全性と経済性が期待できるであろう。

Synopsis：

The technical problem of saving and making use of natural resources has become serious in many fields in Japan recently. This report explains the useful engineering properties of granulated slag, by-product of iron making process, and some examples of its utilization for earth structures. Through various examinations in laboratories and sites, the authors clarified the engineering properties of granulated slag which has smaller density, higher permeability and milder cementation than natural sandy soil. These useful engineering properties of granulated slag as construction materials are more advantageous and economical for design and performance of earth structures.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

土木工事における水砕スラグの用途

Useful Engineering Properties of Granulated Slag for Civil Works

河野 伊一郎*
Iichiro Kono

萩原 明**
Akira Hagiwara

富永 真生***
Masanari Tominaga

二町 宣洋****
Nobuhiro Nicho

渡辺 茂身*****
Shigemi Watanabe

Synopsis:

The technical problem of saving and making use of natural resources has become serious in many fields in Japan recently. This report explains the useful engineering properties of granulated slag, a by-product of iron making process, and some examples of its utilization for earth structures.

Through various examinations in laboratories and sites, the authors clarified the engineering properties of granulated slag which has smaller density, higher permeability and milder cementation than natural sandy soil. These useful engineering properties of granulated slag as construction materials are more advantageous and economical for design and performance of earth structures.

1. はじめに

近年、わが国の経済政策は第1次オイルショックを契機に高度成長路線から安定成長路線へ大幅な軌道修正を迫られてきた。これと同時に、海外の天然資源に国の経済を支えられているわが国で「省資源・省エネルギー」さらには「環境保護」がクローズアップされてきたのは、当然のことである。

鉄鋼の生産過程で副生するスラグもまた、従来より建設材料等に相当量使用されてきたが、鉄鋼製造技術の進歩に比較してスラグに関する利用技術の立ち遅れは、否めないところであった。

多様な潜在利用価値をもつスラグを、省資源・省エネルギーの観点から利用を試み、建設材料として広く認識を求めることは、国の経済・社会政策に結びつき、鉄鋼会社の土木技術者としても真

剣にとり組まなければならない。

種々の鉄鋼スラグの中で、筆者らが対象としているのは、軟質水砕スラグ（以下、水砕スラグと記す）である。

水砕スラグは、高炉セメントの原料として使われはじめて久しく、その利用に関する技術はセメント業界において、進展著しいものがあるが、建設業界での有効利用¹⁾に関しては、未だしの感がある。一方、今後国内における開発は地盤条件のよい内陸部よりもむしろ軟弱地盤地域ではあるが、交通の便に恵まれた沿岸部に集中するであろう。

この2点を考えあわせると、地盤条件の悪い軟弱土と水砕スラグの適応性が一つのポイントにもなってくる。

2. 材料としての特性

自然界における土は、主として地殻を構成する

* 岡山大学工学部土木工学科教授(工博)
*** エンジニアリング事業部土木技術部長
***** 水島製鉄所土建部土木課
〔昭和55年2月1日原稿受付〕

** 岡山県土木部長
**** 水島製鉄所スラグ部兼利材部長

岩石から、物理的に、もしくは化学的作用を受けて生成されたものであり、一部には有機物が堆積して生成されたものもある。これらの上が水・風等により運搬されて各地に分布されているわけであるが、そこに至るまでに経てきた環境や条件の違いにより、その性質に著しい差異がある。したがって、自然土を材料とした場合の設計は、その地域における土質調査や土の力学試験を事前に行い、十分にその地域土の性質を把握したうえで行わなければならない。すなわち、自然界の土の材料としての難しさは、第一に「ローカリティ（地域性）があること」にある。

一方、水砕スラグは人工的産物であり、一定の製法により工場生産されるため、性状はほぼ均一であるといえる。

構造物を構築する材料のうち、例えば鋼やコンクリート等は各部材が連続体をなしており、材料の性質さえ把握しておれば、構造解析に比較的仮定の入り込む余地が少なく、真実に近い解が期待できる。

しかし、自然界の土は粒状体であり、これを連続体としてみなす場合には、粘性や粒子の摩擦角の係数として取り扱わなければならない、完全な連続体の解析と比較すると、精度が落ちるのは、止むを得ない。自然界の上の材料としての難しさの第二は「土は粒状体であること」にある。

水砕スラグも粒状体を呈しているものの、砂状のため、水分の変化にともなう強度・変形特性の変化が少ないことと、経時的に硬化するため、連続体とみなすこともでき得ることにより、難しさはかなり減少する。

つぎに、自然土の性質を表すせん断強さは、支持力、土圧、斜面安定などの計算に用いられる。これは土質力学上の重要な特性の一つである。せん断強さは(1)式で表される。

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

- ここに τ : せん断強さ (tf/m²)
 c : 粘着力 (tf/m²)
 σ : せん断面上の直応力 (tf/m²)
 ϕ : 内部摩擦角 (°)

自然土を工学的に分類すると、基本的には、粘性土と砂質土に分けられるが、一般的にせん断強さに及ぼす影響は粘性土の場合、 c が卓越し、砂

質土の場合、 ϕ が卓越する。これは、それぞれの土の透水性の大きさに起因するもので、粘性土の場合、透水性が小さいため、間隙水の影響をさらに受けやすい。また、含水比の大きさにより、単位体積重量も異なるため、自然土には最も大きなせん断力を期待するための最適含水比が存在する。このように、自然土を対象とした場合、水の存在を無視することは不可能で、自然土の材料としての難しさの第三は「水の挙動が大きな影響を与えること」にある。

これに対して、水砕スラグと水の相性は極めてよく、自然土と異なり水の存在下では、逆にせん断強さは増加する。これは水砕スラグのもつ特性のうち、潜在水硬性によるものである。

このように、水砕スラグは自然土のもつ「材料としてのむずかしさ」という点に関しては、ほとんど問題がなく、材料特性さえ把握すれば、自然土ではなし得なかった工法ですら土木工事が実施可能であるといえる。

ここで水砕スラグのもつ材料特性と特性値について述べる。

2・1 軽量性

Photo. 1・2 は水砕スラグと川砂の拡大写真である。水砕スラグの表面は角ばっており、粒子内部は気泡を含んでいる。水砕スラグの比重を論じる場合、この粒子内空隙をどのように考えるかが問題となる。

水砕スラグのせん断強さや圧密特性、締固め特性は粒子自体の強さや摩擦角が要因となるため、これらの特性について考える時は、粒子内空隙も粒子間の空隙と同じとみなした方が合理的である。しかし透水性については粒子内空隙が水砕スラグの工学的性質に関与しないため、粒子内空隙も粒子の一部と考えた方が合理的である。

前者の考え方で求めた比重を見かけ比重 (G_s)、後者を絶対比重 (G_{se}) とすると、Table 1 のようになる。また、密度試験の結果、破碎されない状態では、最大乾燥密度 $\gamma_{dmax} = 1.26\text{g/cm}^3$ 、最小乾燥密度 $\gamma_{dmin} = 0.97\text{g/cm}^3$ と非常に軽く、自然土の約 70% 程度である。ここに、間隙比 e を次式で表し、(2)式より、最大間隙比 e_{max} と最小間隙比 e_{min} を求めると Table 2 のようになる。

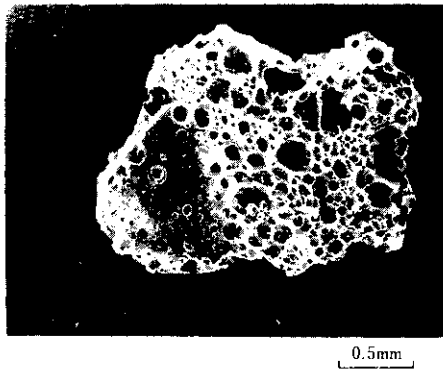


Photo.1 Microphotograph of granulated slag



Photo.2 Microphotograph of river sand

Table 1 Specific gravities of slag and sands

	Granulated slag	River sand (Tokushima, Kyoto, Shiga)	Sea sand (Yamaguchi, Okayama)	Weathered granite sand (Okayama)
G_s	2.69	2.63~2.69	2.64~2.70	2.65
G_{se}	2.31	2.50~2.67	2.51~2.60	2.50

G_s : Apparent specific gravity

G_{se} : Specific gravity under dry condition

Table 2 Void ratios of granulated slag and sand

	Granulated slag	Sand
e_{max}	1.77	0.95
e_{min}	1.13	0.35

e_{max} : Void ratio of granulated slag in loosest condition

e_{min} : Void ratio of ganulated slag in densest condition

$$e = \frac{G_s}{r_d} - 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

水砕スラグの軽さは、粒子内空隙と粒子間空隙とが砂と比べ非常に大きいためであることがわかる。すなわち、水砕スラグのつまり方は砂より粗であり、軽いことが第一の特徴である。

2.2 透水性

つぎに、粒子間空隙が大きいことにより、透水性のよさが第二の特徴となる。透水性は粒子内の空隙にはあまり左右されないと考えると、透水係数 k と空隙比 e または相対密度 D_r の関係はカサ比重 G_{se} から求めた値を用いるべきである。

$$\text{ここに } D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100(\%)$$

Fig. 1 は水砕スラグの透水試験結果であり、 k と e の関係は (3) 式のようにになった。

$$\log k = 1.32e - 2.18 \quad \dots \dots \dots (3)$$

Table 3²⁾ は自然土の透水係数で、これらと比較

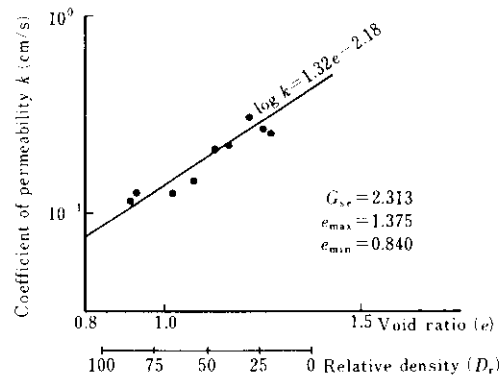


Fig.1 Permeability test data of granulated slag

Table 3 Coefficient of permeability of common soil

Formation	Degree of permeability	Value of k (cm/s)
Coarse sand Gravel	High	Over 10^{-1}
Sand, fine sand	Medium	$10^{-1} \sim 10^{-3}$
Silty sand	Low	$10^{-3} \sim 10^{-5}$
Silt	Very low	$10^{-5} \sim 10^{-7}$
Clay	Practically impermeable	Less than 10^{-7}

すると水砕スラグの透水性のよさがよくわかる。

Photo. 3 は水砕スラグとマサ土の降雨による耐久性を現場実験により確認した例である。

実験の結果、マサ土でつくった盛土は雨水が流下し法面崩壊を起こしているが、水砕スラグでつくった盛土は透水性が大きいため、雨水が法面を流下せずに盛土内に吸い込まれて法面崩壊は起こらなかった。水砕スラグの透水係数を、 $k=1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ として、これを雨量に換算すると、3600mm/h となり、今回の実験で散水した 250mm/h 程度では影響が出ないのがその理由であった。

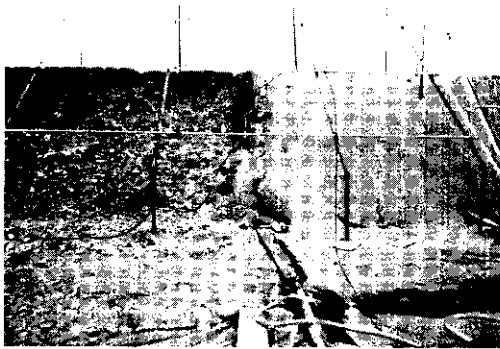


Photo. 3 Comparison of embankment failure by rainfall test

2・3 潜在水硬性

Table 4 は水砕スラグと他材料の化学成分を比較したものである。

化学成分の比率からみると、現在市販されているセメントと比較的類似している。溶融状態のこれら化学成分はゆっくり冷やされると、石灰・珪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、化学成分が結

合して鉱物結晶を形成する余裕がなくガラス質となる。

一般に鉱物組織が完全に結晶化した場合は、化学的に安定した状態になって、特別な外的要因（高温加熱、高圧を加えるなど）を与えない限り、通常は化学的に反応しないが、鉱物組織がガラス質になっている場合には、結晶化のエネルギーを内部に保存しているため、比較的単純な要因によって反応し、新たな鉱物組織を形成しやすい。

水砕スラグはほとんどがガラス質（97～99%）であるため水との反応性が高く、含水状態でアルカリ刺激により容易に反応して、粒子間の接点に新たな鉱物組織を形成し、粒子同志で凝結硬化する。

この反応はセメントの水和反応と類似しているが、水砕スラグの場合、アルカリ刺激が必要である。この性質を潜在水硬性といい、水砕スラグの第三の特徴である。

Fig. 2 はアルカリ刺激剤として、セメントを添

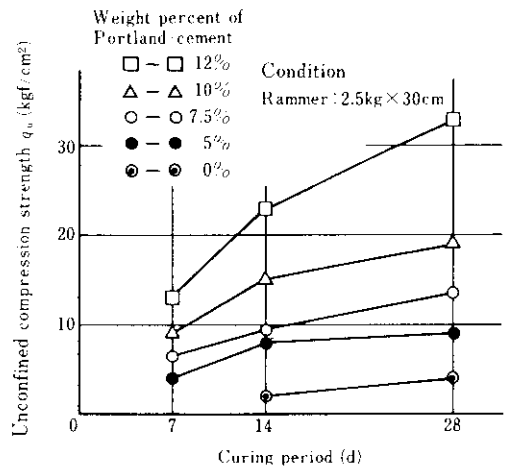


Fig. 2 Unconfined compression strength curves of granulated slag

Table 4 Chemical composition of materials

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	S	MnO	TiO ₂
Granulated slag	33.6	40.4	14.4	0.3	8.3	1.2	0.6	1.2
Weathered granite sand	69.6	0.4	22.0	2.8	0.8	0.01	0.1	—
Andesite	59.6	5.8	17.3	3.1	2.8	—	0.2	0.8
Portland-cement	22.0	65.0	5.3	3.2(Fe ₂ O ₃)	1.2	1.9(SO ₃)	—	—

加した水砕スラグの一軸圧縮強度の経時変化である。

水砕スラグは弱アルカリ性であるため、アルカリ刺激剤が無添加の場合でも、強度が発現する。

この傾向は、マッシュになるほど強くなることが経験上いえる。この潜在水硬性を工学的に用いる場合は、粒子同志の凝結力が発生し、粘着力が増加したと考え、(4)式を適用できる。

$$C = \frac{10 \cdot a_u}{2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに c : 粘着力 (tf/m²)

a_u : 一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

2.4 強度特性

潜在水硬性が発現するまでの水砕スラグは砂状をしており、そのせん断強さは(5)式で求められる。

$$\tau = \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (5)$$

砂状体のせん断強さは、その粒形、粒度分布、粒径、粒子の強さ、粒子の表面性質等によって異なる。

これらの要素がせん断強さに及ぼす成分としては、摩擦成分とダイレイタンスー成分に分けられる。

同一初期間隙比のサンプルでは、摩擦成分は一定であるが、圧密圧 σ_3 の増加とともに粒子が破砕されてダイレイタンスー成分が減少するため、せん断強さ τ も減少し、内部摩擦角 ϕ も減少する。しかし、ダイレイタンスー成分と比較して水砕スラグは粒子形状が角ばっていることによる摩擦成分の大きさが卓越しているため、優れた内部摩擦角をもつ材料であることには変りない。

Fig. 3 に圧密圧を変えることによる、内部摩擦角と間隙比の関係を示す。

水砕スラグの内部摩擦角は、すべての条件の下で 35° を上まわっており、(1)式において設計値として $\phi = 35^\circ$ を用いることができる。しかし、前述した潜在水硬性の発現による粘着力 c は経時増加する性質で早期には期待できないので、設計値としての適用にあたっては注意しなければならない。

以上述べたような水砕スラグの物性をもつ共通の特徴は、人工的産物であるため、バラツキが少なく、ほぼ均一な性状をもつことにある。したが

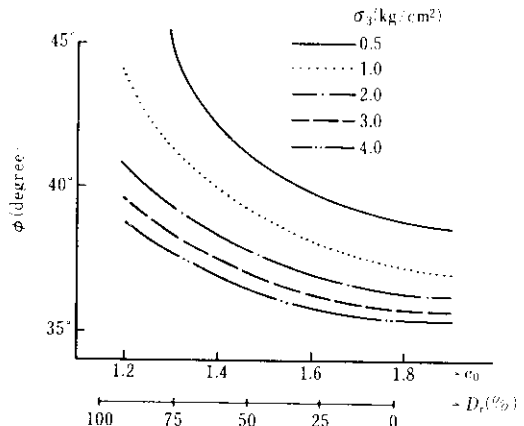


Fig.3 Relation between initial void ratio e_0 and angle of internal friction ϕ

って、設計値としての信頼性が非常に高いことと、加えて自然土にない特異な物性を有する水砕スラグを土木工事へ利用することは、土木工事に新たな可能性を提供することになる。

3. 土木工事への応用例

3.1 道路における路床材^{3,4)}

舗装は下部より順に、路床、路盤、表層と構成される。路床は路盤下厚さ 1m の部分をいい、舗装の厚さを決定する基盤となるため、路床土は経済性・施工性を考慮して選択しなければならない。特に、軟弱な路床を改良するため、路床を 1 部または全部良質な材料と置き換える場合、置換材料としては下記の条件が求められる。

- (1) 軟弱地盤上での路床材としてできるだけ軽量であること。
- (2) 交通荷重に対して大きな変化を起こさず、支持する十分な強度をもつこと。
- (3) 舗装を均一に支持できるものであること。
- (4) 交通荷重や浸透水に対して強度低下を起こさないこと。

水砕スラグがこれらの条件をどの程度満足できるか、水砕スラグで厚さ 1m の盛土を行い、車輻の走行試験を行った。

走行試験はアスファルト舗装要綱における D 交通区分を想定し、AASHO 道路試験結果を拡張し、実施した。すなわち、走行車輻は軽装タイヤローラー (8.5t) で、走行回数 は 5 000 回であるが、これは輪荷重 0.2t で換算すると、走行回数 1 100 000 回に相当する。1 000 000 回の走行で、破壊につな

がるような大きな変形を生じなければ、供用後の走行車輛による影響に対して安定な路床であると評価しうる。

Fig. 4 は走行回数ごとの現場密度試験結果で、つぎのような解釈ができる。

(1) 走行回数ごとの密度変化はほとんど見うけられず、したがって全体の圧密沈下量は微少である。

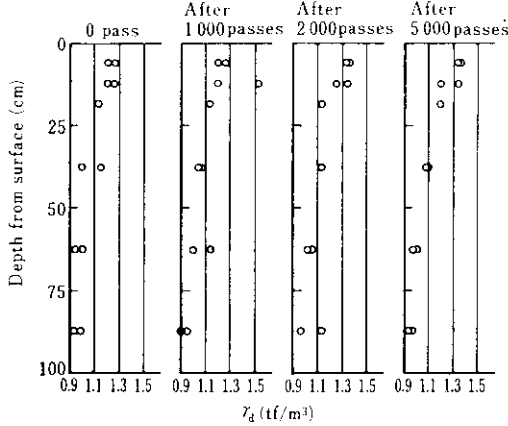


Fig. 4 Variation of dry density γ_d under repeated traffic load

(2) 平均密度は 1.15tf/m³ 程度で、自然土に比較して軽量である。

Table 5 は締固めエネルギーと養生条件を変えて、C.B.R. 値の経時変化を測定したものである。水砕スラグを路床土として使用する場合、C.B.R. 値は Table 5 より 15% と判断できる。養生条件をかえたのは、水砕スラグが水浸状態で、C.B.R. 値にどのような影響があるか調べたものである。試験の結果、水浸状態でより大きな C.B.R. 値が得られたことは、在来土との境界付近に地下水が集中

しても、強度が低下しないことを表している。

交通量を D 交通とし、路床に水砕スラグを使用した場合の設計例を Fig. 5 に示す。この C.B.R. 法で設計した舗装断面に対し、弾性理論（バーバー近似式）を適用して、Fig. 6 に示す二層構造での舗装変位量を算出すると、(6)式のようになる。

$$w = \frac{2(1-\mu) \cdot a \cdot \rho \cdot F_{co}}{E_s} = 0.03 \text{cm} \dots\dots (6)$$

ここに、 w ：変位量 (cm)

$\mu = 0.5$, ポアッソン比

$a = 12 + p$ (cm), 輪荷重の等値円の半径

$\rho = p / \pi \cdot a^2 = 5.51$ (kgf/cm²), 荷重強度

$p = 5000$ (kgf), 輪荷重

$$F_{co} = \frac{(1 - E_s/E_e)}{[1 + (T/a)^2 \cdot (E_e/E_s)^{2/3}]^{1/2}} + \frac{E_s}{E_e}, \text{ 変位係数}$$

E_s ：水砕スラグの変形係数。Fig. 7 の走行試験結果より、2000kgf/cm³ とする。

$$E_e = \frac{\left(T_1 \times \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} + T_2 \right)^3}{(T_1 + T_2)^3} \text{ (kgf/cm}^3\text{)},$$

上層の合成変形係数

$T = T_1 + T_2$ (cm)

$T_1 = 15$ (cm), 表層の厚さ

$T_2 = 30$ (cm), 路盤の厚さ

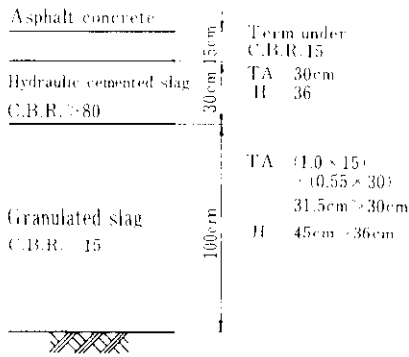
E_1 ：(kgf/cm³), 表層の変形係数

E_2 ：(kgf/cm³), 路盤の変形係数

一般国道の場合の変位量を 0.1cm とすると、か

Table 5 C.B.R. values by changing compaction energy and curing condition

Compaction energy (cm·kg/cm ³)	Dry density γ_d (tf/m ³)	Curing in air (month)			Curing in water (month)	
		0	1	2	1	2
1.9	γ_d	0.925	0.920	0.917	0.941	0.919
	C.B.R.(%)	9.0	10.1	10.5	10.6	10.3
5.6	γ_d	1.012	1.000	1.046	1.006	0.990
	C.B.R.(%)	12.4	13.1	13.5	12.2	14.0
18.4	γ_d	1.128	1.145	1.133	1.135	1.130
	C.B.R.(%)	15.6	15.9	17.0	16.8	22.2



TA : Conversion thickness in asphalt concrete
 H : Thickness of asphalt concrete and hydraulic cemented slag

Fig. 5 Subbed design by C.B.R. method

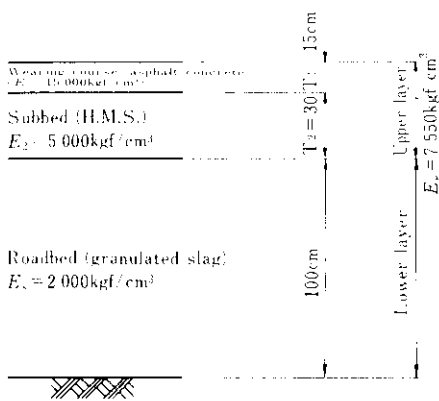


Fig. 6 Subbed design based on modulus of deformation

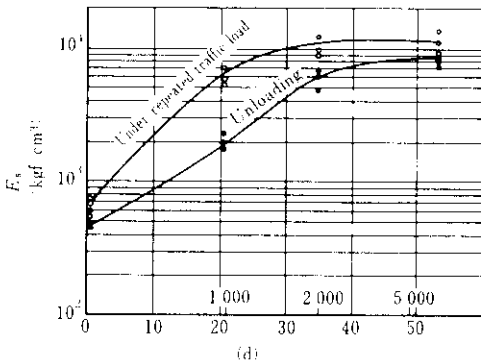


Fig. 7 Variation of modulus of deformation E_2 of granulated slag

なり余裕のあることがわかる。このように、水砕スラクを路床土として使用した場合、軽量で、また交通荷重に対して変形もあまり起こさず、輪荷重を十分支持できる強度をもつ材料であると判断できる。しかも、浸入水に対しての強度増加と長期的な強度増加（3箇月経過で、C.B.R. $\geq 20\%$ ）

を加味した設計を採用すれば、より経済設計ができることになる

3.2 斜面の保護⁵⁾

斜面の崩壊は一般には、円形すべりで説明され、円の半径が大きいほど大規模なすべり現象となる。しかし、現実には、古来安定しつづけていた斜面が特別な外力でも加えない限り、大規模なすべりを惹起することは少なく、その頻度よりも降雨などの外力で斜面内すべりの発生する頻度の方が多い。

斜面内すべりの対策として従来とられてきた工法としては簡便なものから、土羽打ち、木杭打ちしがら工・芝などの植生、張りブロック、石積、コンクリート擁壁などがある。これらのほとんどは多分に経験的工法であるといえるが、斜面内すべりのメカニズムをつぎのように考えると、合理的な工法でもある。

- (1) 雨のエネルギーにより、斜面の土粒子が乱される。
- (2) 流下する表面水により、斜面の土粒子が乱される。
- (3) (1)、(2)の結果、斜面へ雨水がさらに浸透しやすくなり、荷重が増えると同時に、見かけの粘着力を低下させ、斜面が崩壊する。

Fig. 8 は、斜面の見かけの粘着力の低下にともない低減する安全率の関係をモデルにより解析した例である。

水砕スラクにアルカリ刺激剤を添加すると硬化することは、Fig. 2 で述べたが、硬化後も Fig. 9

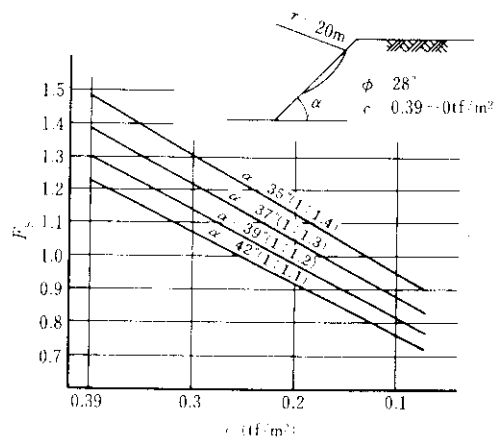


Fig. 8 Relation between safety factor F_s and cohesion c

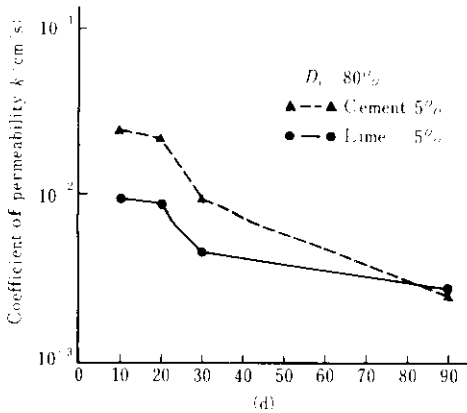


Fig. 9 Permeability change of granulated slag

に示すように $k = 1 \times 10^{-3}$ (cm/s) 程度の透水性は残存している。この性質を利用して、Fig. 10 に示すように水砕スラグを主材料とした透水性硬化体を設置すると、つぎのようなことがいえる。

- (1) 硬化体が雨のエネルギーを吸収する。
- (2) 雨水の排水径路となるため上粒子の乱れを起こさず、硬化体が斜面の崩壊や洗掘を阻止する。
- (3) 降雨による背面の滞溜水の排水もスムーズに行われる。

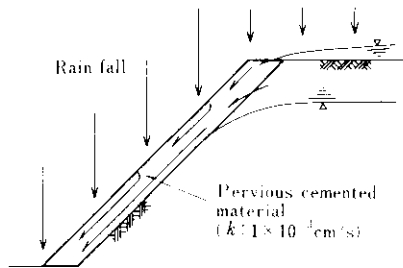


Fig. 10 Conceptual model of slope pavement

- (4) 硬化体の強度が抵抗モーメントを増大させることにより、斜面崩壊の安全率を高める。

Fig. 11 は硬化体の軸圧縮強度 q_u を 4kgf/cm^2 とした場合の硬化体の厚さと安全率の増加傾向を示したものである。

この工法の従来工法における位置づけは、張りブロックか石積程度であると考えるが、経験だけではなく数値計算を必要とすることと、迅速な施工性に特徴がある。

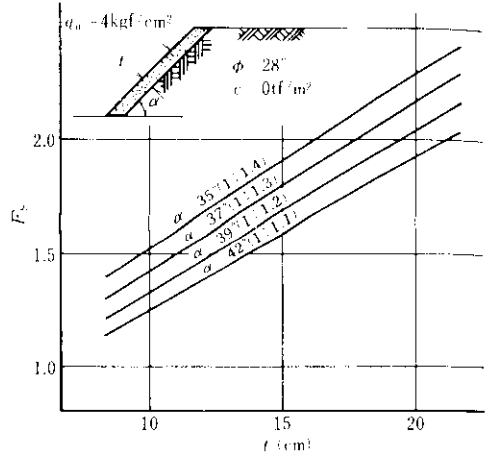


Fig. 11 Relation between F_s and thickness t

3.3 互層盛土工法

一般に、盛土で土地を造成をする場合、造成仕上り面積は使用する土に左右される。

すなわち、不良質土で盛土を行うと法勾配が緩くなり、良質土で行うと法勾配を急にすることができる。

これを円形すべりで説明すると、あるすべり面を仮定した場合、すべり面より上の土の重力によるモーメントに対して、すべり面に沿って作用するせん断強さによる抵抗モーメントが大きいほど、安全率 F_s は大きくなり、斜面は安定しているといえる。

ここに、

$$F_s = \frac{\text{すべりに対して抵抗する力のモーメント}}{\text{すべりをおこさせようとする力のモーメント}}$$

しかし、現実には造成敷地面積の関係から、高盛土や急勾配の法面を不良質土で形成せざるを得ないことがよくある。

このような場合に、水砕スラグの特性を生かした工法として、不良質土と水砕スラグを互層に敷きならす互層盛土工法が提案できる。その特徴はつぎのとおりである。

- (1) 水砕スラグが軽量のため、すべりモーメントが低減する。
- (2) 水砕スラグの内部摩擦角が大きいので、大きな抵抗モーメントが期待できる。
- (3) 水砕スラグが経時的に硬化するため、抵抗モ

ーメントも経時増加する。

(4) 水砕スラグ層を法方向に向けて、やや傾斜させることにより、盛土内の排水がスムーズに行え、すべりを起こすもう一つの要因である間隙水圧の低下に役立つ。

Fig. 12, 13 はマサ土だけによる盛土と互層盛土のモデルで、盛土高さと同法勾配を同一にした場合の円形すべりに対する安全率を示す図である。

Table 6 はこれらのモデルの解析結果である。各層の厚さを変えることにより、安全率も増減するので、実施にあたっては十分検討する必要がある。

Photo. 4 は、このような水砕スラグのメリットを基にして、高さ14m、法勾配1:1.2で施工した盛土の実例である。

Table 6 Stability analysis of multi layered banking

	Weathered granite sand		Granulated slag			
			Beginning		3 months later	
M_D (t·m)	2936.36	1.0	2446.96	0.83	2446.96	0.83
M_R (t·m)	2668.98	1.0	3339.42	1.25	7291.42	2.73
F_s	0.91	1.0	1.36	1.49	2.98	3.27

M_D : Moment of weight of failure mass

M_R : Moment of shear strength along failure arc

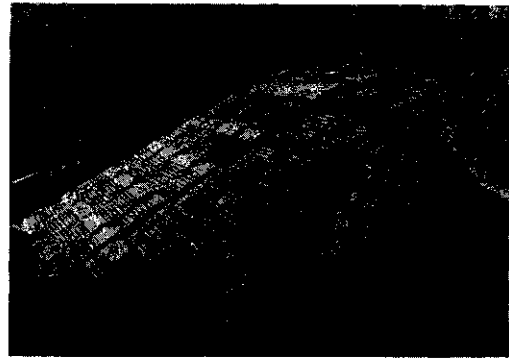


Photo. 4 View of multi-layered slag banking (Okayama Golf Club)

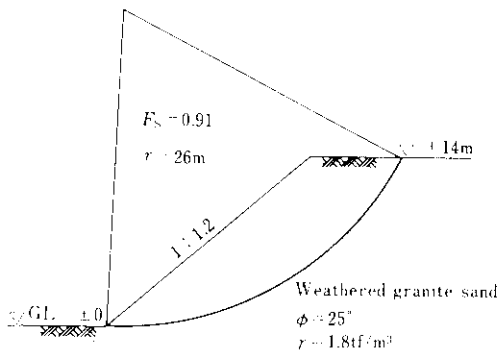


Fig. 12 Safety factor against circular sliding of embankment model by weathered granite sand

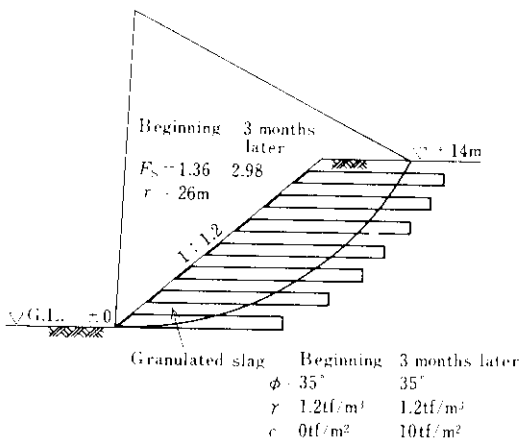


Fig. 13 Safety factor against circular sliding of embankment model by multi layered method

3・4 テールアルメ盛土工法と水砕スラグ

テールアルメ盛土工法はフランスで端を発した工法で、盛土前面の崩落防止の部材（スキン）を盛土内に埋めたアンカー（ストリップ）で固定することにより垂直盛土を可能にしたユニークな工法である。

テールアルメ盛土工法で、ストリップの果たす役割は非常に大きく、壁土にワラを混ぜるのと同じような意味をもち、砂質土に、見かけの高い粘着力を与えている。

したがって、ストリップにより補強された盛土は高い安定性を保有するようになり、盛土前面のスキンに対する土圧も軽減されることになる。

テールアルメ盛土工法の盛土材料として水砕スラグを用いると、水砕スラグの特性のうち、軽量であること、内部摩擦角が大きいこと、潜在水硬性があることなどが相乗効果として作用し、水砕スラグ単体でストリップにより補強された砂質土以上の性能を持つことになる。

ストリップに引き抜き力が作用した際の水砕ス

ラグとストリップ間の摩擦係数は、Fig. 3 に示したように、盛土における程度の拘束圧下でも、グレイタンシー成分も加味された大きな内部摩擦角により、2.0 以上という大きな実験値を得た。

このメカニズムを追求することにより、自然土を盛土材料とした場合の設計摩擦係数 0.4 に対して水砕スラグの場合、もっと大きな摩擦係数を採用することも可能となるであろう。

Fig. 14 はテールアルメ盛土工法のモデルで、このモデルに盛土材料として、自然土と水砕スラグを使用した場合の解析結果が Table 7 である。

水砕スラグを使用すると、潜在水硬性により硬

	Weathered granite sand		Granulated slag	
	Beginning	3 months later	Beginning	3 months later
ϕ	25	35	35	35
c (tf/m ²)	0	0	10	10
r (tf/m ³)	1.8	1.2	1.2	1.2

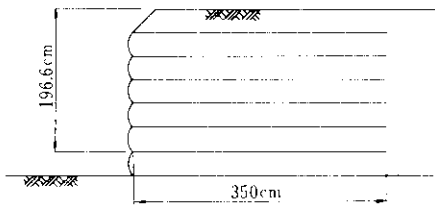


Fig. 14 Model of banking by "Terre-Armée" systems

Table 7 Stability analysis of "Terre-Armée" banking

	Weathered granite sand		Granulated slag			
	Beginning	3 months later	Beginning	3 months later	Beginning	3 months later
Earth (t) pressure	0.48	1.0	0.21	0.44	0	0
Friction (t)	0.99	1.0	1.32	1.33	1.32	1.33
F_s	2.0	1.0	6.3	3.4	∞	∞

化が進むにつれて主働土圧は漸減し、最終的には 0 となる。

すなわち、スキンとストリップには施工直後の応力のみが残留しているだけということになる。

3・5 矢板背面の裏込め^{5,6)}

3・4 で述べたように、土留壁の背面に水砕スラグを使用することは、主働土圧を大幅に低減させることにつながる。

一方、土留壁の裏込めに水砕スラグを使用する際、主働土圧を増大させる要因としては、水砕スラグの潜在水硬性が発現する過程での膨張特性の有無がある。

Fig. 15⁷⁾ は、ある荷重下における水砕スラグのひずみ量を測定した例である。

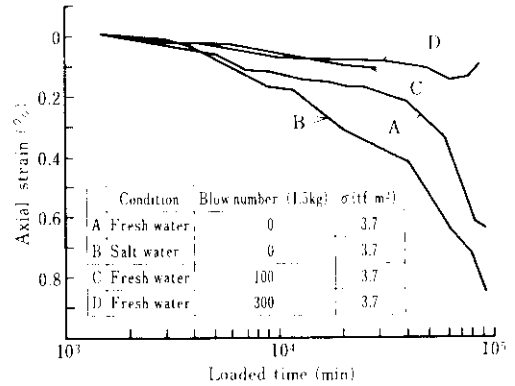


Fig. 15 Results of confined compression tests on several conditions

この結果、膨張に関しては極めて安定であり、収縮に関しても十分な締固めを行えば、安定であることがわかる。

すなわち、主働土圧に影響を及ぼす、懸念するような膨張特性は皆無であることがわかる。

つぎに、矢板の安定計算を行う場合、背面の水圧が矢板の応力に与える割合は非常に大きい。

これに対して、透水性の優れた水砕スラグを裏込めに使用して、矢板の根切り面付近に排水用の開孔を設けると、背面水の供給量がかなり多量でない限り、地下水位は低減されたままとなり、水圧として働かない。

このように静的設計を考えると、矢板背面の裏込めに水砕スラグを使用すると、水砕スラグの軽量性、強度特性、透水性がすべて効果的に働き、加えて経時的に増加する粘着力により、最終的に主働土圧が 0 になる。

したがって、テールアルメ盛土工法同様、施工直後の安定さえ確立できればよいことになる。

Fig. 16, 17 はマゼ土と水砕スラグを裏込めに使ったモデルである。

Table 8 はそれぞれのモデルの矢板に発生する

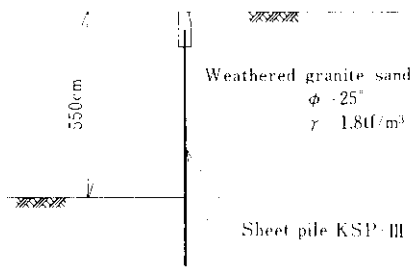


Fig. 16 Model of back filling by weathered granite sand

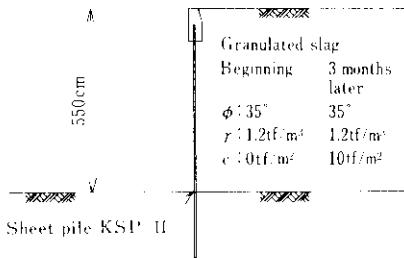


Fig. 17 Model of back filling by granulated slag

Table 8 Bending moment, stress and safety factor on sheet pile with back filling

	Weathered granite sand		Granulated slag			
			Beginning		3 months later	
M (kg·cm)	2085 000	1.0	895 000	0.43	0	0
Z (cm ³)	KSP-III 1 556	1.0	KSP II 1 024	0.66	KSP II 1 024	0.66
σ (kg/cm ²)	1 340	1.0	874	0.65	874	0.65
F_s	1.34	1.0	2.06	1.53	2.06	1.53

M : Bending moment

Z : Modulus of section of sheet pile

σ : Bending stress on sheet pile

応力と安全率を計算した結果である。

いずれも、背面水位を無視したにもかかわらず、水砕スラッグの場合、矢板断面を1ランク下げても十分な安全率が得られた。

3・6 透水性舗装⁸⁾

都市部での舗装化が進むにつれ、最近では植樹保護のための透水性舗装が望まれるようになった。また、明るい町づくりを演出する手段として、

カラー舗装が見直されはじめたのも最近の傾向である。

水砕スラッグは潜在水硬性、優れた透水性および着色が容易にできる自然色といった特性を生かして、上記のような要求を満足することができる。

しかしながら、水砕スラッグ混合物の強度が Fig. 2 に示した程度のものであるため、軽車輻までを対象とした舗装としかならないのが現状である。

そこで、水砕スラッグにアルカリ刺激剤を添加したものを舗装し、表面にはく脱を防止するための液状高分子材料を散布するという簡単な工法を考えてみた。

この舗装の特徴をつぎに述べる。

- (1) 降雨による水たまりができず、歩行の際の水はぬがない。
- (2) 雨水を上中に還元するので、周辺植物の生育に好都合である。
- (3) 舗装表面のキメが粗く、すべりにくい。透水性が優れているため、降雨時にもこの傾向は変わらない。
- (4) 着色剤をかえることで、色のセッティングは自由である。

Photo. 5 は施工例である。

施工にあたっては、つぎのような点に注意しなければならない。

- (1) 材料は混合のムラを生じないように、できるだけ中央混合方式をとる。
- (2) 転圧は可使時間内に、振動ローラー等によく締め固める。
- (3) 養生は寒気、乾燥、降雨等から防護することを考える。養生温度は高いほど望ましい。
- (4) 表面処理剤は養生が終了後、スプレー等て

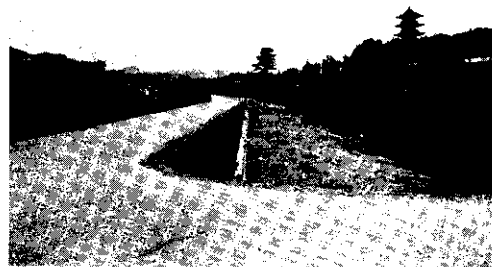


Photo. 5 View of pervious pavement

(Okayama Pref.)

均等に散布する。

3・7 軟弱地盤の覆土工

軟弱地盤を水砕スラグで覆土する際の工法は種々あるが、採用にあたっては、その現場の立地条件、覆土面積、工期等をよく検討し決定しなければならない。

力学上の検討せねばならない項目としては、円形すべり、圧密沈下、側方流動等が考えられる。

円形すべりについては、軽くて強度特性の優れた水砕スラグでは、覆土形状の如何を問わず常に優れた安全率を示す結果となり、いまや検討項目から除外しても差し支えないと思われる。

しかし、圧密沈下と側方流動については、検討結果が軟弱地盤層の改良の必要性を左右することにもなるので慎重に行いたい。

いずれにしても、水砕スラグを使用することの優位性は動かし難い。

Photo. 6 は遊水池埋立てに先立ち、水砕スラグで試験工事を行った際のものである。大きな内部摩擦角により、優れたトラフィカビリティを有していることがよくわかる。

ユールゲンソン理論を用いた側方流動のチェックとこの試験の結果より、池底の軟弱層の地盤改良を省略できたことを付記しておく。



Photo.6 Reclamation test of slag filling

(Kasaoka City)

4. むすび

水砕スラグの材料特性と応用例について述べたが、水砕スラグの土木用材料としての歴史は浅く、未だ確立されたものはない。

このような状況下で、筆者らが多様な使い方を水砕スラグに求めた目的は、水砕スラグの可能性を試すことと、それらをより多くの人に知って貰うためであった。

端緒についたにすぎない水砕スラグの利用技術が今後とも発展するには、さらに多くの積み重ねが必要であると思われる。

本文がその一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄㈱水島製鉄所：土木材料としての高炉水砕スラグ、(1977)
- 2) 土木設計便覧編集委員会：土木設計便覧、(1974)、297〔丸善〕
- 3) 河野伊一郎、二町宣洋、渡辺茂身：第13回土質工学研究発表会、(1978)、1337
- 4) 河野伊一郎、毛利博光、二町宣洋、斎藤碩：材料、(1977)、23
- 5) 河野伊一郎、鮎浦站、二町宣洋、渡辺茂身：第14回土質工学会論文集、(1979)、729
- 6) 沢口正俊、富永良生、二町宣洋ほか：土と基礎、(1975)、19
- 7) 河野伊一郎、二町宣洋、入見公一郎：第33回土木学会年次学術講演会集、(1973)、302
- 8) 河野伊一郎、藤原啓隆、二町宣洋、斎藤碩：土木技術、(1977)、70