

石炭灰・赤土の土質工学的性質と土工上の問題点

Studies on Use of Coal Ash and Red Soil in Road Construction

荻野 治雄* 能登 繁幸**
島谷 登*** 工藤 節男****

本報告は、産業発生材の有効利用に関する調査研究の第1報であり、石炭専焼発電所から排出される石炭灰とアルミニウムの製錬原料であるアルミナをボーキサイトから抽出する際の残さい物である赤土の土質工学的性質を明らかにし、道路盛土材料として利用する際の問題点について述べている。その結果、現状では含水調整の困難さや強アルカリ雰囲気などの問題があり、現場で使用する際にはなんらかの対処が必要であると結論づけている。

《締固め；土工；廃棄物；膨脹；物理化学的性質；粒状体》

1. ま え が き

道民の念願である自立化のための均衡ある発展を指向して、北海道に広く分布する泥炭性軟弱地や広大な原野の開発計画、広域利用計画が、環境問題との調整をはかりつつ進められているところであるが、これに伴う各種土木工事の実施にあたり、工場用地などの造成用材料や道路盛土用土の入手確保が次第に困難になってきている。

一方、産業技術の発展と産業生産物の需要量の増大に伴い、産業廃棄物も増加の一途を辿っているが、石炭灰や赤土などの産業排出鉱物質土は発生量も膨大で、適切な処理技術や処分方法の早期確立が望まれている。現在までに、これら産業発生材（ここでは、産業廃棄物の中でも有効利用の可能性が大きいものをとくに産業発生材と呼んでいる）を資源として有効利用するための試験研究が行われ、土木材料としての利用についても一部実用化されたものもあるが、盛土（造成）用土としての使用実績はほとんど見当たらない。

本報告は、産業発生材を盛土用土として有効利用するための技術の確立を意図した一連の研究の中から、石炭灰と赤土を対象として、これらの土質工学的性質を明らかにし、土木材料として利用する際の問題点について述べるものである。

2. 石炭灰・赤土の発生状況と利用の現況

2-1 石炭灰について

北海道には現在5カ所の石炭専焼発電所があり、年間約130万トンの石炭灰が発生しているが、今後の石炭へのエネルギー依存度を考慮すると、昭和70年には国内で約1,000万トン¹⁾、道内でも200万トンを越える石炭灰が発生するものと予想される。

石炭灰は、炭種、燃焼温度、燃焼方式、捕集方式や捕集場所によって工学的性状が異なる。通常、ボイラー底に自然落下したものをクリンカまたはボトム・アッシュ（炉底灰）、節炭器下で採取されるものをシンダーアッシュ、煙道内で採取されるものをフライアッシュと分類しているが、ここでは、シンダーアッシュとフライアッシュ中の粗粉を「粗粒灰」、フライアッシュ中の細粉を「細粒灰」としている。これらの発生比率は、クリンカが約15%、粗粒灰が約70%、細粒灰が約10%である。また、採取後貯灰サイロに貯留されている石炭灰を「新生灰」、灰捨て地に投棄されて、ある程度時間経過したものを「既成灰」と称して区別している²⁾。

石炭灰の有効利用技術の中で実用化されているものは、クリンカではコンクリート骨材、道路用路盤材、細粒灰ではセメント混和材、セメント原料の粘土の代替、特殊肥料などであるが、有効利用率は全体量の約30%であり、残りの約70%は灰捨て地への投棄、埋立、廃坑埋戻しなどで処理されている。

2-2 赤土について

*土質研究室長 **同室副室長 ***同室主任研究員 ****同室員

熱帯地方の特殊な地表風化作用で火成岩が分解し、アルミナと酸化鉄に富んで赤色土に変じたものをラテライトと呼んでいる。ボーキサイトもそのひとつであり、これからアルミナを抽出したスラリー状の残さい物は、酸化鉄を多量に含むために鮮かな赤色を呈していることから、一般に赤泥と呼ばれている。その発生量は、アルミナ1トンの製造に際しほぼ700~900kgであり、北海道では年間約30万トン、全国では150万トン以上となっている³⁾。

従来、赤泥の処理は海洋投棄や陸上沈澱池への排出が主であったが、環境保全の立場や用地確保の困難さから、これらの処理も限界に近づいている。このため、赤泥の有効利用を前提とした圧搾脱水処理の検討が行われ、現在、その技術がほぼ確立されるにいたっている。かくして得られる塊状「赤泥」は、「赤土」と称されている。

現在まで実用化された赤泥の利用方法は図-14)のとおりであるが、その有効利用率はわずかに数%であり、土木材料としての大量利用技術の確立が望まれている。

3. 石炭灰・赤土の土質工学的特性と土工上の問題点

3-1 石炭灰について

石炭灰の土質工学的性質は、表-1に示すとおりであ

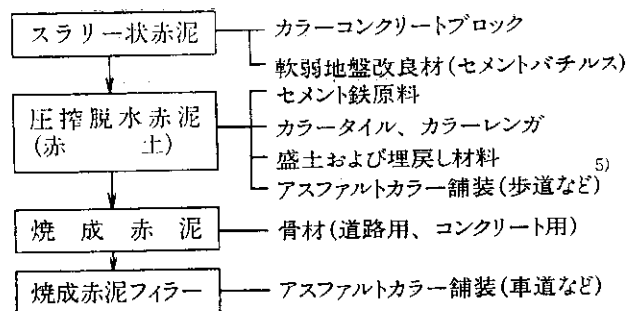


図-1 赤泥の用途

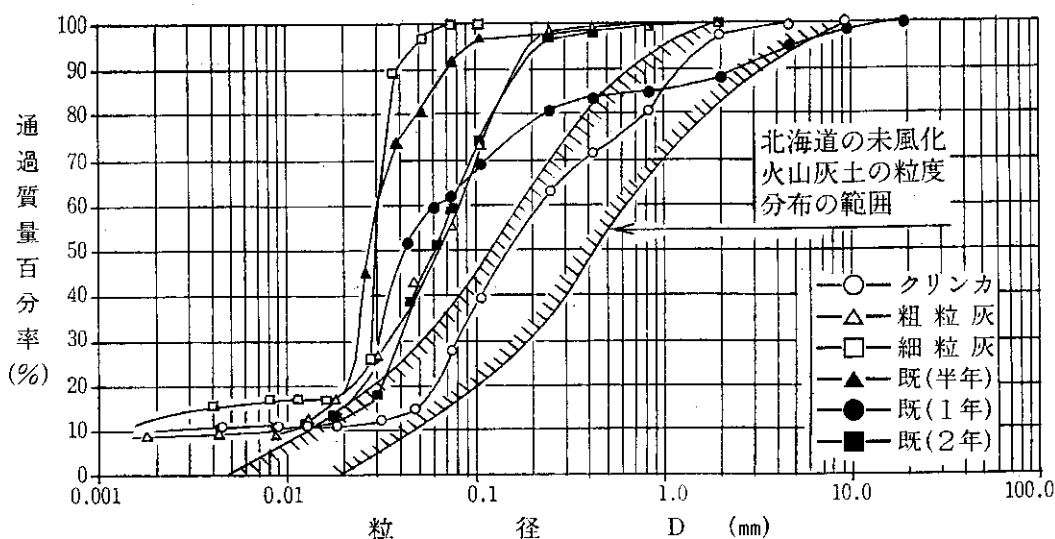
り、以下にその概要と土工上の問題点を述べる。

① 比重は2.0~2.2で、一般土質($G_s=2.6$ 程度)や未風化火山灰($G_s=2.4$ 程度)と比べて小さい値であり、粗粒になるほど小さくなる。コンシステンシーはいずれもNPで、図-2に粒度分布曲線を示すように、比較的均一粒径で粒度配合が悪い。このように粒度がそろった材料は、一般に転圧による十分な締固め効果は期待できないとされている。図-2に示した北海道における未風化火山灰土の粒度分布と比べると、クリンカがほぼその範囲に入るものの細粒分がやや多く、他の石炭灰はいずれも未風化火山灰よりも細粒であることがうかがわれる。日本統一土質分類では、クリンカがSM(シルト質砂)に属するほかはML(低圧縮性のシルト)に属している。

表-1 石炭灰の土質工学的性質

項目		石 炭 灰					
		新 生 灰			既 成 灰		
		クリンカ	粗粒灰	細粒灰	半年	1年	2年
物理試験	含水比(%)	54.18	0.12	5.06	14.41	24.30	22.06
	比重	2.006	2.037	2.251	2.219	2.079	2.086
	コンシステンシー	NP	NP	NP	NP	NP	NP
日本統一土質分類		SM	ML	ML	ML	ML	ML
力学試験	締固め	ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.925	0.985	1.393	1.374	1.111
		w_{opt} (%)	48.77	36.09	21.60	20.51	23.54
	q_u	(kg f/cm ²)	0.53	0.53	1.52	1.66	0.54
	一面	C_u (kg f/cm ²)	0.90	0.60	0.33	0.20	0.23
		ϕ_v (°)	50°50'	40°10'	30°40'	36°00'	43°00'
	ϕ_v (°)		50°50'	40°10'	30°40'	36°00'	43°00'
吸水膨脹率(%)		2.7	17.2	8.9	5.2	13.0	17.3
pH		10.23	12.70	9.70	10.14	12.95	10.23

注) 一軸圧縮試験および一面せん断試験の供試体は、新生灰は ρ_{dmax} , w_{opt} のもの、既成灰は自然含水比で突固めたものを用いた。



図一2 石炭灰の粒度分布曲線

既成灰については、投棄後半年のものに比べて1年後、2年後の粒度は粗めになっており、石炭灰成分中の石灰とアルミナ、シリカとのポズラン反応とによる団粒化の現象とも思われるが、投棄時の粒度が不明であり、断言できない。

② JIS・A・1210 1・1・C 法による締固め曲線は図-3に示すとおりであり、細粒灰と既成灰は最大乾燥密度を生ずる凸型曲線となっているが、粗粒灰とクリンカは曲線が平らで、締固め効果を生じていない。また、同図に示すように、締固め後のコーン貫入試験結果によれば、細粒灰と既成灰(半年)は最適含水比を越えると著しく強度が低下するし、1年以上経過の既成灰もある含水比を越えると急激に強度が低下している。これに対し、粗粒灰は含水比を増してもある程度の強度が得られており、クリンカはいずれの含水比でもコーンの貫入が不能なほどの強度を有していた。したがって、クリンカを除く新生灰は通常ほぼ絶乾状態で排出されるから、盛土材料として使用する際は最適含水比付近まで加水して締固める必要があるが、最適含水比を越えると著しく強度が低下してトラフィカビリティの確保もむずかしくなる恐れがあり、含水調整に注意を払う必要がある。既成灰についても、堆積時の含水比が最適含水比付近かそれより低い状態にあり、加水して締固める際には同様の注意が必要であろう。

③ 一面せん断試験による強度定数は、表-1に示したとおり、粗粒材ほど大きな値を示すが、これは粗粒子が角ばった不規則形状であり、細粒子はほぼ球形であることによるインターロッキング効果の差によるものと思われる。

④ 山岳道路や起伏の多い地形での道路建設では土量のバランスを考慮した設計・施工を行うため、産業発生材を使用する可能性は小さいが、平地、とくに泥炭性軟弱地のような湿地帯ではこれらの利用が多くなると考えられる。この場合、石炭灰は常に水利条件の悪い状態で施工され、盛土底部が水浸することが予想される。また、降雨によって盛土表面が吸水し、膨潤する恐れもある。このため、吸水による石炭灰の挙動を調べる目的で、図-4に示すような圧密試験器を用いて吸水膨脹試験を実施した。供試体は新生灰の場合は最適含水比で最大乾燥密度に締固めたもの、既成灰は堆積時の含水比で締固めたものを用いた。

試験の結果は図-5に示すとおり、クリンカを除きいずれも膨脹率が5%以上となり、膨脹性が高い材料であると判断される。一般に水酸化鉄、水酸化アルミニウム、炭酸塩などのセメンテーション物質が土中にあるとき、吸水による膨潤は抑制されるが⁶⁾、石炭灰の場合は1,600°Cの火炉内でこれらの物質が分解されてしまうため、吸水膨脹が大きくなるものと思われる。膨脹の程度は、図-6に示すように試験前の飽和度が低いほど大きく、同じ飽和度では新生灰の方が既成灰よりも吸水膨脹する。

一般に土が膨潤すると土粒子間の結合が弱まり、せん断抵抗が低下するが、表-2に示した吸水膨脹後の含水比をもって図-3の締固め後のコーン貫入試験結果とつぎ合わせてみると、クリンカを除くいずれの石炭灰もコーン貫入抵抗はゼロに等しいものと推定される。

以上のように、石炭灰は吸水膨脹により泥ねい化の可能性が大きく、水利条件の悪い個所ではなんらかの対策

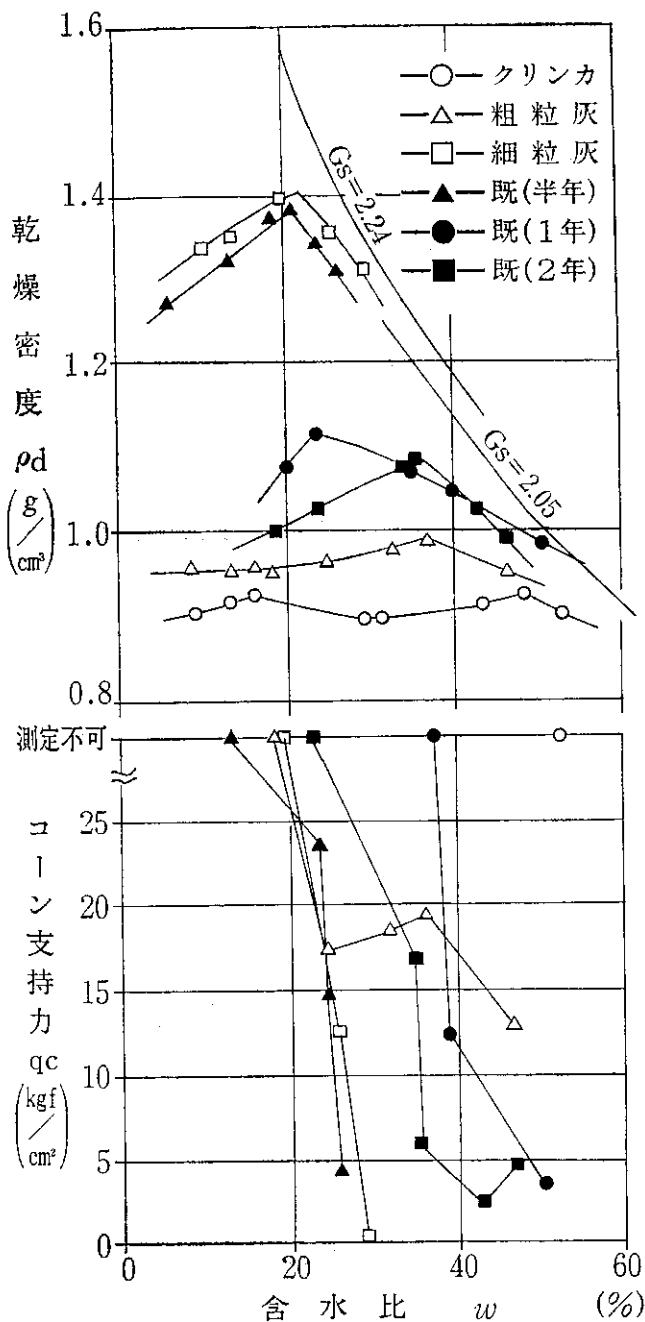


図-3 石炭灰の締固め曲線とコーン支持力

を施す必要があるものと思われる。なお、現在、石炭灰にセメントを混入させた試料について種々の実験を行っているところであり、セメント混入率が2% (重量比) 程度で、吸水膨脹率がほぼゼロとなり、一軸圧縮強度も相当大きな値が得られているが、これらの成果については別途報告する予定である。

⑥ 石炭灰についてのその他の問題としては、pHが高いこと、飛散しやすいことなどである。石炭灰のpHは9.7~12.9と高く、強アルカリ性の物質であり植生上好ましくないため、客土などの対策が不可欠となる

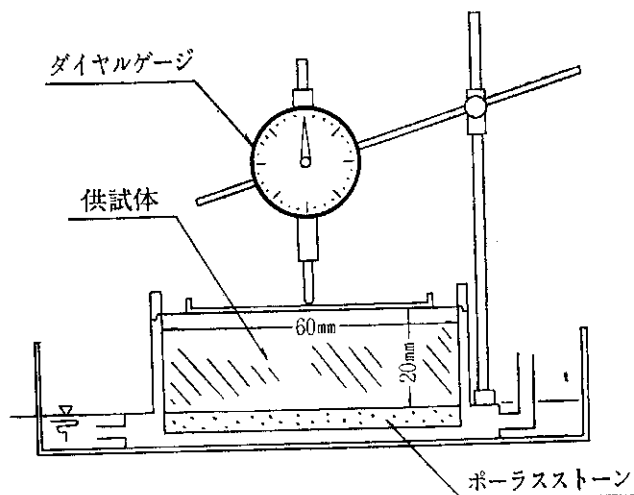


図-4 吸水・膨脹試験

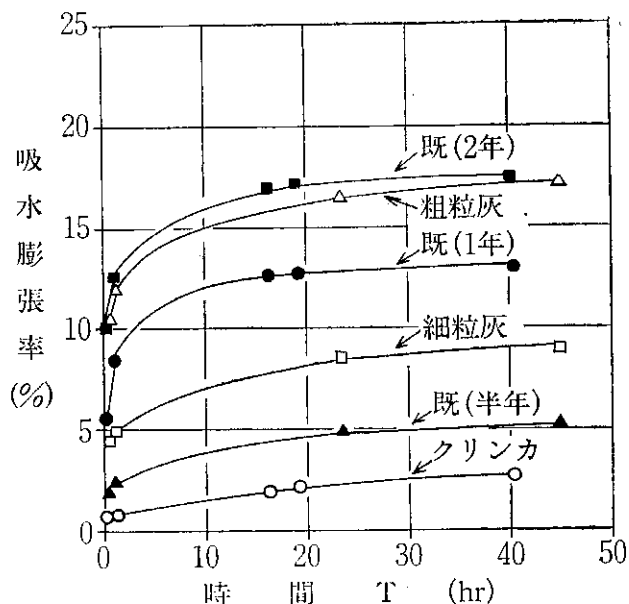


図-5 石炭灰の吸水膨脹率

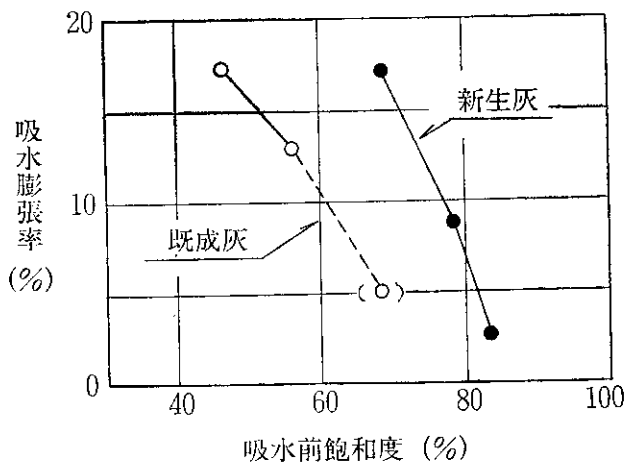


図-6 吸水前飽和度と膨脹率の関係

表-2 石炭灰の吸水膨脹試験前後の含水比など

試料 項目		新 生 灰			既 成 灰		
		クリンカ	粗粒灰	細粒灰	半年	1年	2年
前	含水率 (%)	48.8	36.1	21.6	(27.4)	23.5	22.9
	飽和度 (%)	83.7	68.8	78.9	(68.2)	56.2	46.2
後	含水比 (%)	56.3	64.2	36.2	44.6	44.2	52.4
	飽和度 (%)	92.0	91.7	107.3	100.0	82.5	78.9
pF=1.8の含水比 (%)		24.9	30.5	29.8	29.6	27.0	29.8

注) () 内は試験前湿潤密度と試験後含水比 ($s_r=100\%$) から推定

表-3 赤土の土質工学的性質

状 態		脱 水 直 後	堆 積 数 日 後
項 目			
含 水 比 (%)		43.0	39.7
比 重		3.2~3.3	3.32
L. L. (%)		46	43.6
P. L. (%)		31	18.0
PI		15	25.6
粒 度	2000 μm 以上	0	0.1
	2000~74 μm	10	12.8
	74 μm 以下	90	87.1
日本統一土質		ML	CL
$\rho_{d\max}$ (g/cm ³)		1.47	1.50
w_{opt} (%)		32.8	31.2
q_u (kg f/cm ²)		0.4~1.6	1.8
— 面	C_u (kg f/cm ²)	—	1.0
	ϕ_u (°)	—	15°~50°
q_c (kg f/cm ²)		—	20.6
吸 水 膨 脹 率		—	0
pH		—	12.0

注) 表中の各強度定数は脱水後含水比で締固めた供試体によるものである。

う。また、比重が小さく、微粒子を多く含むため風によって飛散しやすいという欠点があり、積卸し、運搬、敷均し転圧時には常に湿潤状態を保ち、客土でおおうなどの対処も必要となる。このほか石炭灰の溶出水については、主成分がシリカとアルミナであることから、埋立処分にかかわる判定基準や水質汚濁防止法に定める排水基準を十分満足することが証明されており、⁷⁾ 問題はないようである。

3-2 赤土について

赤土の土質工学的性質と化学組成⁴⁾をそれぞれ表-3、4に示し、以下に概要と土工上の問題点を述べる。

① 赤土は、その名のとおり鮮やかな赤色を呈することから、まず、有害重金属の溶出に関する調査が行われた。その結果、化学組成からも明らかなように有害物質を含まず無害であることが判明している⁸⁾。一般土質に比べて、鉄分の含有量が多いのとシリカが少ないほかはほぼ同様の化学組成となっている。

② 比重は3.2~3.3と大きく、脱水直後は塑性指数が小さく見かけ上はシルト質土であり、日本統一土質分類でもMLに属するが、堆積数日後の赤土は塑性指数が大きくなってCLに分類される。含水比は液性限界に近く、このためかなりプラスチックな状態にある。粒度分布は図-7に示すとおりであり、ほぼ90%以上が74 μm 以下の微細粒径のものからなっている。

③ JIS-A・1210・1・1・C法による締固め曲線および締固め後のコーン貫入試験結果は図-8に示すとおりである。脱水後の含水状態で締固めた供試体の一軸圧縮強さ

表-4 赤土の化学組成 (乾土 %)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	NaO	Lig
20	13	41	8	2	6	9

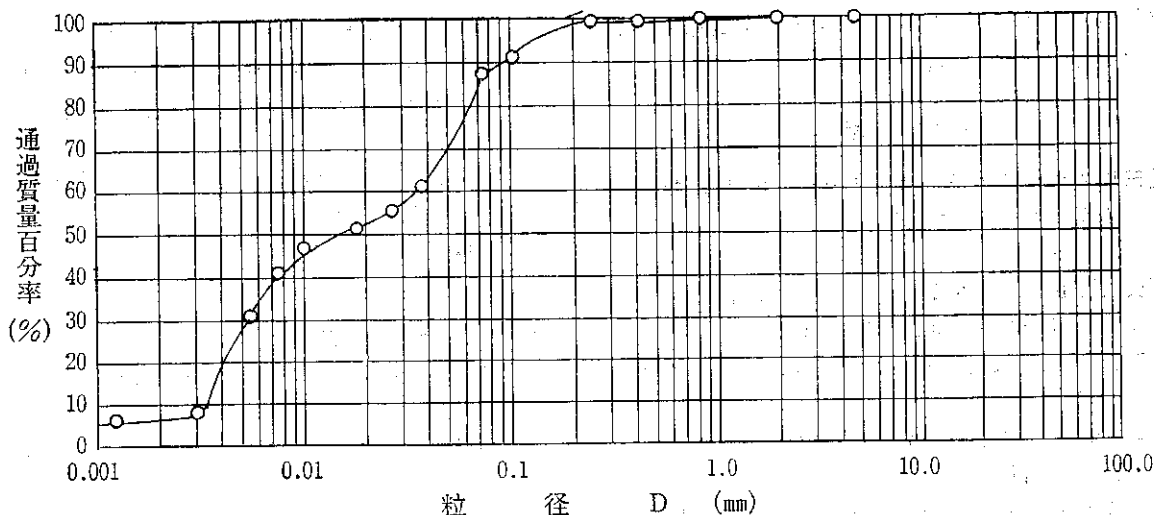


図-7 赤土の粒度分布曲線

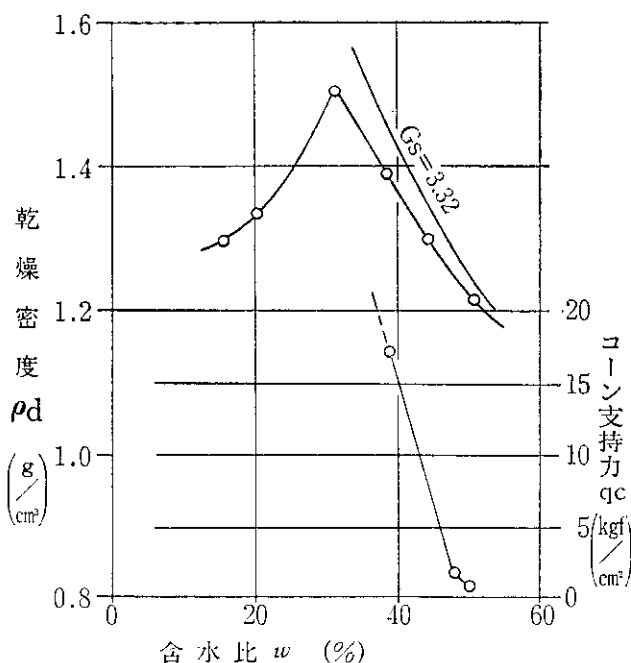


図-8 赤土の線固め曲線とコーン支持力

やコーン支持力はかなり大きな値を示していて、トラフィックビリティも十分に確保できるようであるが、図-8で明らかなように、また、脱水後含水比が液性限界に近いことから推測できるように、それ以上の含水比では、ほとんど強度を持たない状態となることが予測される。したがって、施工に際しては脱水後含水比が施工可能の限界の含水比であることに留意し、現場条件によっては含水比の低下をはかったり、なんらかの土質改良をするなどの考慮をする必要があろう。

④ 石炭灰と同様の吸水膨脹試験を実施したが、膨脹率は0.2%程度でほとんど吸水膨脹を生じない結果となっている。

⑤ pHが12と高く、石炭灰と同様の問題点を有している。アルカリ溶出による地下水への影響については、締固めた赤土が不透水 ($k=10^{-7}$ cm/sec 程度) であり、わずかに表面から溶出するアルカリ成分も周辺土の緩衝作用でほとんど問題とならないことが確かめられている⁹⁾。

4. 今後の課題

以上述べたとおり、石炭灰・赤土は、クリンカのようにほぼ良質材料として取扱えるものもあるが、含水調整の困難さや吸水膨脹、強アルカリ雰囲気などの問題を有しており、現場で使用する際にはなんらかの対処が必要と考えられる。これらの問題は、土質工学的性質を改良することにより解決できるものもあり、現在、各種添加材による改良効果や適切な施工方法について調査検討を行っているところであるが、長期的な利用方法を検討するに際しては次のような問題についても考慮する必要がある。すなわち、一般に産業発生材の品質は一定ではないが、とくに石炭灰については原料や排出方法によって工学的特性が変化したり、品質がばらつく恐れがある。盛土材料としては品質のばらつきが少ないものが望ましく、出荷時の品質管理を十分に行う必要がある。一方、石炭灰・赤土は発生個所が固定であるのに対し、これらを土工に供するとすれば利用個所は不特定であり、また、発生量がほぼ一定量であるのに対し、利用量は工事規模に応じて変わるものである。このため、需要と供給のバランスがむずかしいものと予想される。したがって、長期的な需要予測を行って、それに見合った貯留方法を考えねばならないであろう。

なお、石炭灰・赤土、さらに石炭ズリについても近々

現場試験盛土を行う予定であり、これらの調査結果がまとまり次第報告したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 前田慶之助；石炭灰の埋立素材化の技術課題，石炭灰処理システムと有効利用技術，フジテクノシステム，56. 9.
- 2) 石炭灰資源化研究委員会；石炭灰の道路への利用について，昭和55年度研究報告，56. 3.
- 3) 日軽金苦小牧工場；赤土（圧搾脱水赤泥）の利用について，55. 2.
- 4) 伊藤 伝；圧搾脱水赤泥（赤土）の利用について，苦小牧商工会議所報告会，57. 2.
- 5) 例えば久保，中村；赤泥の道路舗装への活用につ

いて，土木試験所月報，No. 311，54. 4.

- 6) 土質工学会；土質工学における化学の基礎と応用，土質基礎工学ライブラリー15，pp. 120, 53. 3.
- 7) 前出1).
- 8) 日軽金苦小牧工場；赤土の性状データ集，56. 1.
- 9) 丸山，長野；脱水赤泥（赤土）の耐水性，道立工業試験場，55. 10.

その他の参考資料

- 石橋，剣持，織田，熊谷；石炭灰の土質工学的性質，技術報告集第19号，土質工学会北海道支部，54. 2.
- 谷口秀男；セメント混入赤泥（改良赤土）による道路盛土の試験実施例について，土質工学会北海道支部技術報告集，第22号，57. 2.

*

*

*

1

2

3

4

5

はじ
鋼結
る方

*構造

土木試験