

フッ素不溶化処理済廃石膏ボード粉と安定材とを 混合した粘土の支持力および強度特性

HARDENING BEHAVIOR OF CLAY STABILIZED WITH
WASTE PLASTERBOARD POWDER
CONTROLLING ELUTION OF FLUORINE

山田幹雄*・佐野博昭**・坪川 茂***・山田武史****

By Mikio YAMADA, Hiroaki SANNO, Shigeru TSUBOKAWA and Takehumi YAMADA

1. はじめに

2008年度の建設副産物実態調査結果¹⁾によると、建設廃棄物排出量は約6,380万トン(2005年度比17%減)、建設発生土排出量は約1億4,063万m³(28%減)であった。建設廃棄物について、搬・排出量の上位5品目はコンクリート塊3,127万トン、アスファルト・コンクリート塊1,992万トン、建設汚泥451万トン、建設発生木材410万トン、建設混合廃棄物267万トンであった。このうち、建設混合廃棄物の削減率を除く4品目の再資源化(等)率は2012年度の目標値をすでに達成、あるいは、その値に向けて順調に推移している。

廃石膏ボードの量は、建設混合廃棄物として排出されている分を合わせると2008年推計値で約161万トン、2013年には約199万トンに達するとの見通しにある。内訳を発生源別にみると建物新築現場が12~16%、解体現場が84~88%となっている。一方、リサイクルの実績をみると、新築現場発生材の7割近くは回収してボード用原料に再利用しているのに対して、解体現場発生材は全ての用途(ボード用原料、セメント原料、肥料、土壌固化材など)を合算しても1割程度に止まり、相当な量が管理型処分場へ搬送されている現状にある²⁾。

このように、とりわけ解体現場で発生する廃石膏ボードのリサイクル率向上は喫緊の課題であって、まずは現場分別・異物除去を徹底する必要がある。

次なる要件として安全面に対する配慮、つまり、有害物質への対応が挙げられる。1970年から1986年に製造した不燃積層石膏板などにアスベストが用いられ、1973年から1997年に製造した一部の石膏

ボードに高濃度のヒ素やカドミウムが、また、製造時期にかかわらず大部分の石膏ボードには原料由来のフッ素が含まれている。アスベストは製品に印されている防火材料認定番号から、ヒ素やカドミウムはJISマークと許可番号から識別が可能であるものの解体、回収、処分には慎重を期さねばならない。フッ素の含有が問題となるのは廃石膏ボード粉砕物を直接、または、石灰系や石膏系の固化材に再利用して土に混合した後の溶出量が土壌環境基準を上回る場合であり、対策の早期普及が望まれている³⁾。

フッ素の溶出抑制に関して、著者らはこれまでに廃棄物中間処理施設で原紙と分離、粉砕した廃石膏ボード(二水石膏:以後、廃石膏ボード粉と称する)に加水を前提に軽焼マグネサイトを添加すると濃度低下の効果が現れること、さらに、不溶化処理した廃石膏ボード粉を混ぜた粘土や砂はpHの変化に対しても土壌環境基準を満足することを確かめた⁴⁾。

そこで、次の段階として「フッ素不溶化処理済廃石膏ボード粉」の混入が安定処理土の支持力および強度特性におよぼす影響を調べることにした。この論文では、混入量や安定材の種類、添加率とCBRとの関係ならびにフッ素、六価クロムの溶出挙動を述べるほか、20℃の温度条件下で空气中養生した供試体のせん断強さ、一軸圧縮強さの経時変化や材齢180日の供試体で求めた結晶情報について記述する。

2. 試験に用いた材料の性質および配合条件

2.1 フッ素不溶化処理済廃石膏ボード粉⁴⁾

写真-1に示すように、フッ素含有量が670mg/kgまたは1100mg/kgで、溶出量が3.2mg/Lまたは5.7mg/Lの廃石膏ボード粉200g(水分付着率⁵⁾=0.4~0.6%)にMgO分92%の軽焼マグネサイトを10gないし20g添加・攪拌し、蒸留水を100mL注いで30分間静置、風(室温)を2時間当てて乾かすと径5mm程度の粒状を呈する。これを指で圧すと、容易に径1mm以下の粉混じりの顆粒となる。

*福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町), **大分工業高等専門学校 教授 都市システム工学科, ***福井工業高等専門学校 教育研究支援センター, ****轟産業株式会社 福井支社

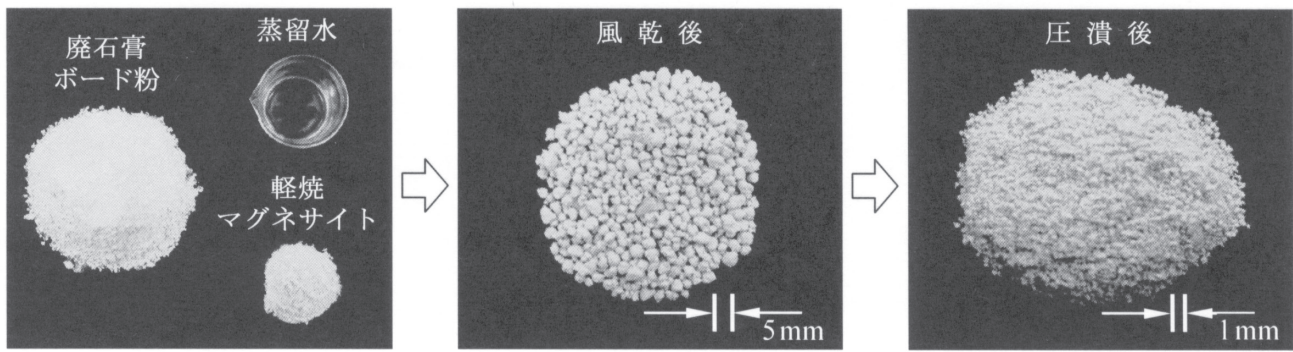


写真-1 フッ素不溶化処理済廃石膏ボード粉の構成と外観

このときの水分付着率は21.8～23.7%、pHは10.3～11.2であり、フッ素溶出量は0.6～0.8mg/L(土壤環境基準 \leq 0.8mg/L)である。なお、フッ素溶出量は軽焼マグネサイトの配合を増やすにしたがって少なくなり、かつ、日数を経ても変動する兆候はみられない(ただし、確認期間の最長は約4ヶ月)。以後、「フッ素不溶化処理済廃石膏ボード粉」を処理済粉と称することにする。

2.2 現場採取土

処理済粉を混入する土として、大分市吉野原[よしのばる]地区の現道拡幅工事にもなう地山斜面掘削現場で採取した土を用いた。

表-1は、文献6)に準拠あるいはこれを準用して行った土質試験の結果ならびに蛍光X線分析の結果を示す。ここで、CBRや一軸圧縮強さなど支持力や強度に関する諸値は最適含水比を目標に水分調整、最大乾燥密度を目安にモールドに充填して作製した供試体で求めたものである。粒度組成や液性限界、塑性指数から、採取土は粘土(高液性限界:CH)に分類される。懸濁液は酸性を呈し、実質上不透水である。また、安定処理後の長期にわたる強度発現、いわゆるポズラン反応の進行には SiO_2 や Al_2O_3 の溶出を必要とするが、当該粘土はこれらの酸性成分

をおよそ80%含んでいる。

表-2は、JIS K 0102の検査方法(環境省告示第18号)で分析した第二種特定有害物質の溶出量を示す。入手した粘土は、土壤環境基準に抵触するような重金属等を含有していないことがわかる。

2.3 処理済粉混入土

今回の試験において母材、すなわち、安定材を加えていない材料は前節に述べた粘土のほか、これに処理済粉を10%および30%(乾燥質量比)混入した材料の計3種とした。ただし、混入率30%の母材のフッ素溶出量は0.8mg/L、10%の母材は1.5mg/Lであり、後者は基準値を2倍近く上回っていた。

これは、マイナスイオンに帯電している粘土はフッ化物イオン F^- を退けるので、濃度を下げるにはある程度の量の処理済粉を要することに根拠を置いた。したがって、混入率10%の母材は一連の研究の主意に適うものとは言い難いが、処理済粉量の支持力特性への関与を明らかにする目的をもって、後述するCBR試験までは敢えて供することにした。

表-3は、土質試験の結果をまとめたものである。これを前出表-1に比較すると、粗砂・中砂分(径2000～250 μm)が大半を占める処理済粉の増量にもない細粒分(シルトと粘土との合計)が漸減して

表-1 採取土の物理・化学試験、力学的試験および蛍光X線分析の結果

土粒子の密度(g/cm^3)	2.67	最適含水比(%)	23.6	SiO_2 (mass%)	55.1
砂 分(%)	23.1	最大乾燥密度(g/cm^3)	1.58	Al_2O_3 (mass%)	24.7
シルト 分(%)	46.9	透水係数(m/s)	1.08×10^{-9}	Fe_2O_3 (mass%)	12.1
粘土 分(%)	30.0	CBR _{2.5} (%)	4.2	CaO (mass%)	1.03
液性限界(%)	53.5	吸水膨張量(mm)	0.1未満	MgO (mass%)	0.97
塑性限界(%)	25.8	コーン指数(MPa)	1.06	K_2O (mass%)	2.26
塑性指数	27.7	粘着力(MPa)	0.12	Na_2O (mass%)	0.58
土質材料の工学的分類	粘土(CH) [高液性限界]	せん断抵抗角(deg.)	15.5	TiO_2 (mass%)	1.69
強熱減量(%)	9.8	一軸圧縮強さ(MPa)	0.17	MnO (mass%)	0.53
pH[H ₂ O]	5.9	変形係数(MPa)	18.3	P_2O_5 (mass%)	0.16
				SO_3 (mass%)	0.17

表-2 粘土の重金属等溶出量

第二種特定有害物質	粘土 [mg/L]	基準値 [mg/L]
カドミウム	0.001 未満	0.01
全シアン	不検出 (定量限界0.1)	検出されないこと
鉛	0.005 未満	0.01
六価クロム	0.01 未満	0.05
ヒ素	0.009	0.01
総水銀	0.0005 未満	0.0005
セレン	0.004	0.01
フッ素	0.1 未満	0.8
ホウ素	0.02	1.0

粒径の幅が幾分広がり、透水性の改善をもたらしている。また、少しずつ最適含水比は高くなり、最大乾燥密度は小さくなる傾向が現れている。

一般に、土砂にセメントや石灰などを混ぜ合わせると含水比は当初よりも低下する。その分を考慮に入れて、今回は粘土の含水比をいくらか高目に設定して母材を準備することにした。具体的には、図-1に示すように粘土の最大乾燥密度の95%に当たる 1.50g/cm^3 と締固め曲線とが交差する点(湿潤側)の含水比27.2%を目標に水分を一旦調整した上で処理済粉を10%、30%ずつ混入した。

2.4 安定材の種類と配合条件

安定材には市販の消石灰(L)、セメント系固化材(C)、高炉セメントB種(S)を使用した。

配合条件を表-4に示す。安定材の3つの母材への添加率はいずれも0%、3%および5%とした。表中のL、C、Sに続く下付きの数字は添加率を表す。また、母材が粘土単体である場合をCase I、粘土に処理済粉を10%混入する場合をCase II、30%混入する場合をCase IIIと表記している。材料の組み合わせは、各Caseで7通りずつの全21種である。

3. 母材および安定処理した母材の支持力特性

3.1 CBRと吸水膨張量

初めに、安定材を加えていない母材のCBRを求めるためにCase I、II、IIIの母材を個別に質量4.5kgのランマーで突固め(67回/層、3層)でモールドに充填し、端面修正後水槽内に4日間静置した。

貫入試験およびこれに先立つ吸水膨張試験の結果を表-5に示す。この表には、供試体作製時の乾燥密度 ρ_d も併記してある。直径50mm、長さ200mmの鋼製ピストン貫入量2.5mmにおける $CBR_{2.5}$ はCase I < II < III、つまり、処理済粉を含まない母材より

表-3 フッ素不溶化処理済石膏ボード粉を混入した粘土の土質試験結果

処理済粉*の粘土への混入率	10%**	30%**
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.75	2.80
砂 分 (%)	26.6	31.2
シルト 分 (%)	69.4	63.8
粘土 分 (%)	4.0	5.0
均等係数	4.7	4.6
曲率係数	0.6	0.7
液性限界 (%)	59.6	61.1
塑性限界 (%)	23.2	26.6
塑性指数	36.4	34.5
pH [H_2O]	7.4	7.7
最適含水比 (%)	23.9	27.3
最大乾燥密度 (g/cm^3)	1.57	1.50
透水係数 (m/s)	1.66×10^{-6}	9.34×10^{-7}

*水分付着率 (JIS R 9101) は21.8~23.7%。

**粘土の乾燥質量に対する比率。

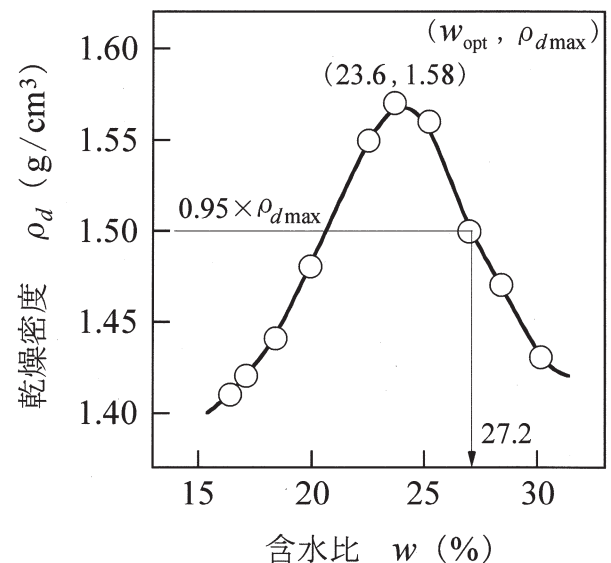


図-1 粘土の締固め曲線および設定含水比

も混入した母材で、さらに、量を多く配合した母材で大きくなるのがわかる。吸水膨張量 d_e は3つの母材ともに少なく、膨張比 r_e に換算すると1%以下となつて、例えば道路路床(原地盤)の質を評価する場合には良好な材料に区分される⁶⁾。しかしながら、 ρ_d の $CBR_{2.5}$ や d_e への関与は認められない。

ここで、Case IIの初期含水比 w は28.3% (飽和度 $S_r \approx 91\%$)、IIIの w は29.8% ($S_r \approx 90\%$)であり、Iに比べて w は1%ないし2.5%高く、 S_r はおよそ2%

表-4 母材と安定材との組み合わせ

Case	消石灰 (L)			セメント系固化材 (C)			高炉セメントB種 (S)			母材
	添加率* (%)			添加率* (%)			添加率* (%)			
	0	3	5	0	3	5	0	3	5	
I - L ₀ , C ₀ , S ₀	○	-	-	○	-	-	○	-	-	粘土 単体
I - L ₃ , C ₃ , S ₃	-	○	-	-	○	-	-	○	-	
I - L ₅ , C ₅ , S ₅	-	-	○	-	-	○	-	-	○	
II - L ₀ , C ₀ , S ₀	○	-	-	○	-	-	○	-	-	10 処理 済粉 混入 率 (%)
II - L ₃ , C ₃ , S ₃	-	○	-	-	○	-	-	○	-	
II - L ₅ , C ₅ , S ₅	-	-	○	-	-	○	-	-	○	
III - L ₀ , C ₀ , S ₀	○	-	-	○	-	-	○	-	-	30
III - L ₃ , C ₃ , S ₃	-	○	-	-	○	-	-	○	-	
III - L ₅ , C ₅ , S ₅	-	-	○	-	-	○	-	-	○	

* Case I では「粘土の乾燥質量」に対する比率。
Case II, III では「粘土の乾燥質量」と「処理済粉の湿潤質量」との合計に対する比率。

表-5 安定材無添加で作製した供試体の CBR, 吸水膨張量および乾燥密度

Case	CBR _{2.5} (%)	吸水膨張量 d _e (mm)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)
I - L ₀ , C ₀ , S ₀	1.7	0.1未満	1.50
II - L ₀ , C ₀ , S ₀	2.7	0.23	1.48
III - L ₀ , C ₀ , S ₀	6.7	0.1未満	1.45

ないし3%低くなった。したがって、平均水分付着率22.8%の処理済粉を混入することで母材は湿潤側に調整され、わずかず供試体の締まり具合を減じて(ρ_d→小)、隙間の量を増やす(S_r→低)こととなった。

次に、「安定処理土の CBR 試験方法」⁷⁾に準拠して母材に消石灰(L),セメント系固化材(C),高炉セメントB種(S)を添加して作製した供試体の吸水膨張量d_eを測るとともにCBR_{2.5}を求めた。養生期間はL使用のCaseで10日(空气中6日+水浸4日),CとS使用のCaseでは7日(空气中3日+水浸4日)である。

試験結果を図-2に示す。図中の括弧内の数値は吸水膨張量d_e-乾燥密度ρ_d(供試体作製時)を表す。母材とCBR_{2.5}との間にはCase I < II < IIIの関係があり、これは先の表-5と同様の傾向といえる。また、安定材とCBR_{2.5}の間にはS < C < Lの関係があり、これは添加率の高いCase(S₅, C₅, L₅)でより明確に現れている。一方、d_eは最大でも0.18mm、ほとんどが0.1mm未満であり、特異なCaseは存在しない。ρ_dについてはCase I, II, IIIともに安定材を加えずに作製した供試体(前出表-5)に比べると

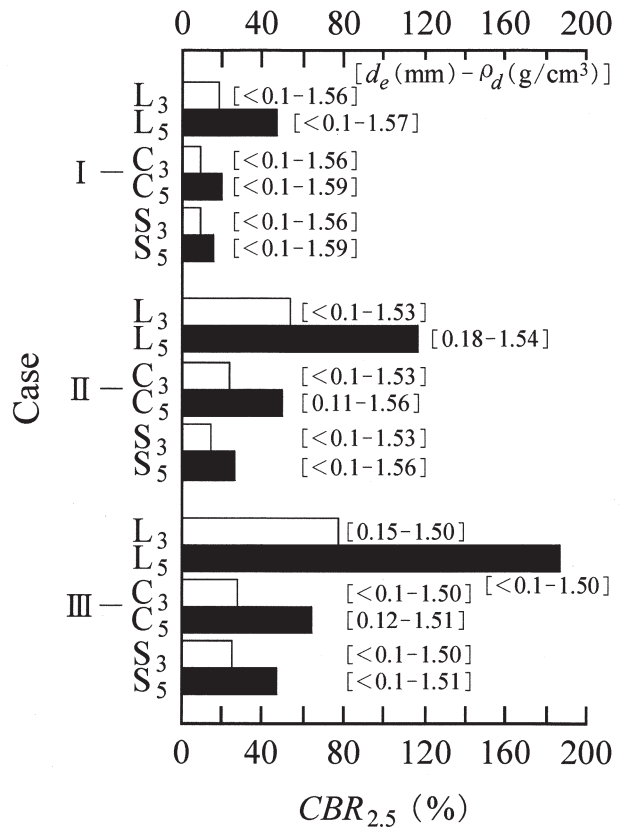


図-2 安定処理した母材の CBR

0.05~0.1g/cm³大きくなっているもののL, C, Sで差はないことから、安定処理した母材についてもρ_dのみがCBR_{2.5}の大小に影響をおよぼしているとは考えにくい。

これら18種のCaseにおける初期含水比wに安定材の種類による相違はほとんど生じず、Case Iでは24.0%(飽和度S_r≒93%:添加率5%) ≤ w ≤ 25.7%(飽和度S_r≒96%:添加率3%), IIでは24.8%(S_r≒89%:5%) ≤ w ≤ 26.2%(S_r≒91%:3%), IIIでは27.1%(S_r≒88%:5%) ≤ w ≤ 28.1%(S_r≒91%:3%)となって、wは上述した処理済粉量とは別に、添加率によっても1~2%変動した。

3.2 処理済粉の結晶情報およびフッ素、六価クロムの溶出量

CBR試験と並行して、廃石膏ボード粉および処理済粉のX線回折を行って双方の結晶情報を求めた。

一例までに、処理済粉のX線回折パターンを図-3に示す。二水石膏(G),半水石膏(Ba),無水石膏(A_n)のほかに回折角2θ≒19°,38°に水酸化マグネシウム(M)のピークが現れている。このうち、硫酸塩(G, Ba, A_n)は廃石膏ボード粉で常に同定されることから、水酸化物(M)の生成が廃石膏ボード含有フッ素の溶出を抑制する主因とみなされる⁸⁾。なお、

処理済粉のX線回折は繰り返し実施したが、水には難溶のフッ化マグネシウム (MgF_2) の定性にはいたらなかった。

続いて、*CBR* 試験を終えた供試体から塊 (検体) を採取して、フッ素と六価クロムの溶出量を調べた。フッ素溶出試験には処理済粉を混入した *Case II, III* のうち安定材無添加 (L_0, C_0, S_0) を除く12検体を、また、それらから消石灰 (L) を添加した4つの *Case* を除いた8検体を六価クロム溶出試験に供した。

表-6に示すように、母材の段階では基準値を超えていた *Case II* をも含めて、フッ素溶出量は全ての検体で0.8mg/L以下であった。それでも、廃石膏ボードの循環利用を目指す上には、固化材などの再生品も併せて土に混ぜる前のフッ素溶出量が土壤環境基準を満たすのが趨勢に適っている³⁾ので、その点を重視すれば、*Case II* の配合は依然として安全性を担保していないといえる。六価クロム溶出量はセメント系固化材 (C) を添加した *Case* の過半数で0.05mg/Lを上回った。このため、以降の試験ではセメント系固化材 (C) の使用を差し控えることにした。

これらの結果を踏まえて、引き続き実施する定圧一面せん断試験や一軸圧縮試験における材料の組み合わせならびに供試体の作製条件を表-7のように設定した。ここに含水比 w 、乾燥密度 ρ_d は *CBR* 試験用供試体に倣った値である。なお、安定材添加率を3%までとしたのは、*Case III-L5* (添加量 $a = 71\text{kg/m}^3$) の $CBR_{2.5}$ が188% (前出図-2) と a の割に大きくなった経緯を考慮に入れたことによるものである。

4. 日数の経過にともなうせん断強さおよび一軸圧縮強さの推移

4.1 せん断強さと強度定数

一面せん断試験には在来型の装置 (荷重計容量4.9kN、変位測定限度30mm) を使用した。せん断変位速度は排水、排気状態の充足よりも実験効率を優先して0.2mm/minとした。

供試体の寸法は直径100mm、高さ50mmであり、作製にあたってはカッターリングの中に母材のみ (L_0, S_0)、あるいは、安定材を添加した母材 (L_3, S_3) を締固め用円板で押しながら3ないし4回に分けて充填した。*Case I, III* ともに L_3, S_3 についてはカッターリングごとビニール袋に入れて密封し、20°Cに調節した恒温器の中に3, 7, 14日間静置した後、リング内の供試体をせん断箱に移した。

せん断応力 τ - せん断変位 δ 曲線の例を図-4に示す。 τ の最大値 τ_f 、いわゆるせん断強さは垂直応力 σ に比例して増加すること、処理済粉量や養生日数が同じでも消石灰 (L) を添加した *Case* で約2倍増と

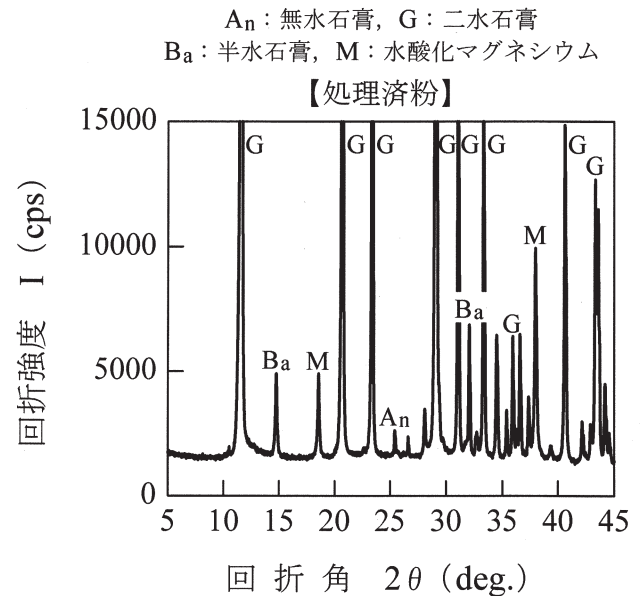


図-3 処理済粉のX線回折パターン

表-6 検体のフッ素および六価クロム溶出量

Case	フッ素		六価クロム	
	溶出量 [mg/L]	基準値 [mg/L]	溶出量 [mg/L]	基準値 [mg/L]
II -	L ₃	0.1 未満	0.8	0.05
	L ₅	0.1 未満		
	C ₃	0.3		
	C ₅	0.3		
	S ₃	0.6		
	S ₅	0.3		
III -	L ₃	0.1 未満	0.8	0.05
	L ₅	0.1 未満		
	C ₃	0.4		
	C ₅	0.2		
	S ₃	0.5		
	S ₅	0.3		

【備考】 検体は貫入試験を終えた供試体 (*CBR*) から採取。

表-7 一面せん断試験、一軸圧縮試験に用いる供試体の含水比と乾燥密度の設定値

Case	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	安定材添加量 a (kg/m^3)
I -	L_0, S_0	27.2	1.50
	L_3	25.6	1.56
	S_3	25.7	1.56
III -	L_0, S_0	29.8	1.45
	L_3	27.5	1.50
	S_3	27.8	1.50

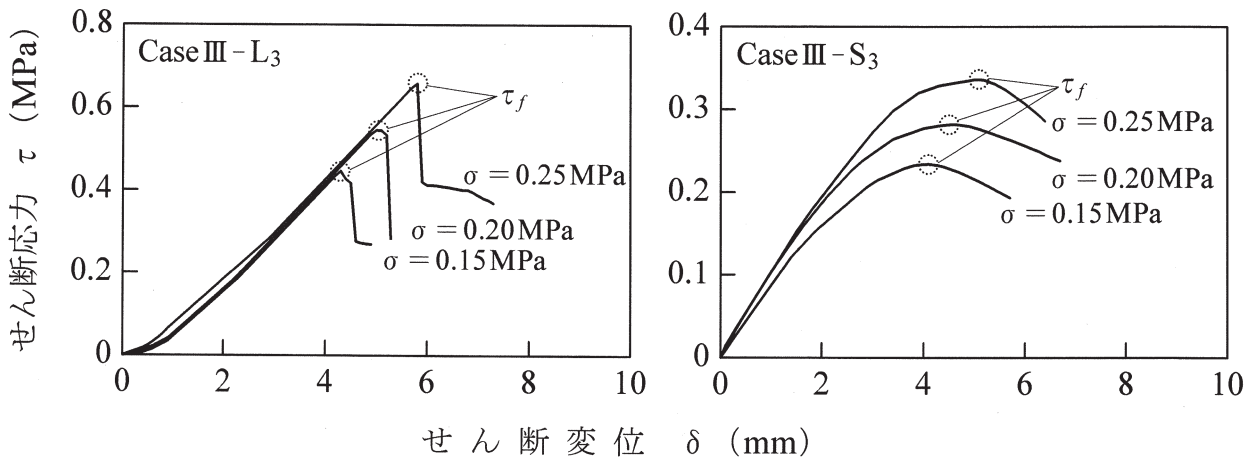


図-4 せん断応力 τ —せん断変位 δ 曲線の例(養生日数14日)

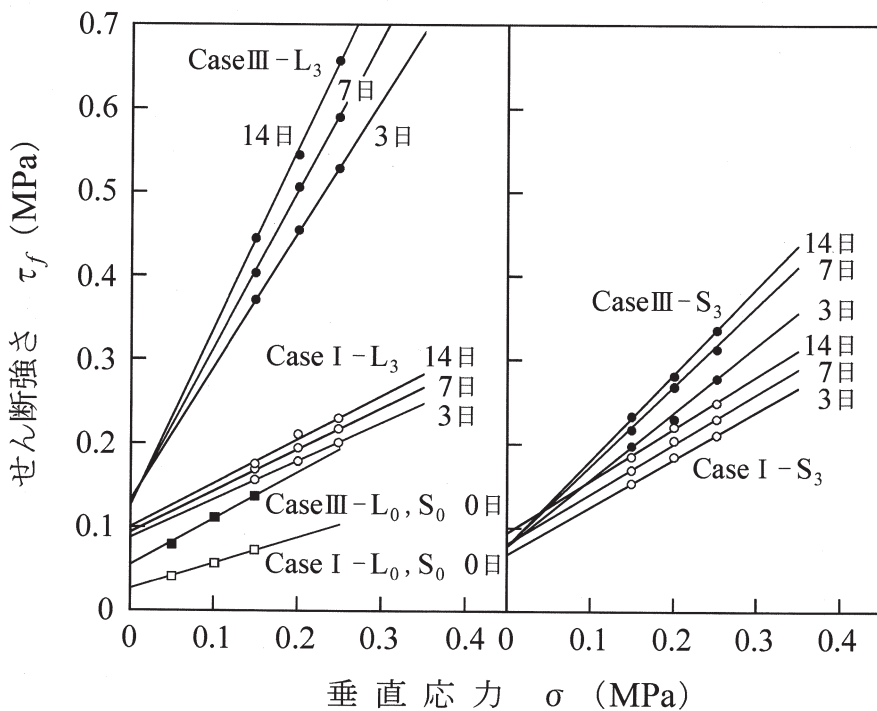
なっていることがわかる。ここで、 σ は供試体作製当日の一軸圧縮強さ $q_u = 0.31\text{MPa}$ (S_3)および 0.48MPa (L_3)を参考に定めた値である。

図-5は、垂直応力 σ とせん断強さ τ_f との関係から求めた養生日数ごとの粘着力 c_d 、せん断抵抗角 ϕ_d をまとめたものである。 c_d に処理済粉混入の有無、安定材の種類や養生日数の長短が関与する兆候は認められない。これに対して、 ϕ_d は処理済粉を30%含むCase IIIで明らかに大きくなり、安定材添加のもと(L_3, S_3)で経時的に変化する傾向にある。さらに、Case I- L_3 とI- S_3 の τ_f はいずれの養生日数においてもほぼ同じとなるものの、Case III- L_3 の τ_f は

III- S_3 の2倍近くに達している。

このように、比較の対象を限った6つのCaseからせん断強さ τ_f はせん断抵抗角 ϕ_d に専ら依存し、かつ、母材と τ_f とはCase I < IIIの関係にあることが判明した。加えて、Case IIIの安定処理には消石灰(L)の使用がより効果的との知見も得られた。これらは、前章に述べた $CBR_{2.5}$ の動向に似通うものである。

図-6は、安定材を添加した母材(L_3, S_3)で記録したせん断強さ τ_f にいたった時点のせん断変位 δ を示す。 δ は τ_f に比例して増加し、その範囲はCase I, IIIの区別なく、また、安定材の種類にかかわらず概ね3.5~7mmであったことがわかる。



Case	養生日数(日)	粘着力 c_d (MPa)	せん断抵抗角 ϕ_d (deg.)
I - L_0, S_0	0	0.03	17.2
III - L_0, S_0		0.05	29.2
I - L_3	3	0.09	24.7
	7	0.10	26.1
	14	0.10	27.5
	14	0.10	27.5
III - L_3	3	0.13	58.0
	7	0.13	61.7
	14	0.13	64.7
I - S_3	3	0.07	29.7
	7	0.08	30.5
	14	0.09	31.8
III - S_3	3	0.08	38.7
	7	0.08	43.5
	14	0.08	45.6

図-5 養生日数, 垂直応力とせん断強さとの関係

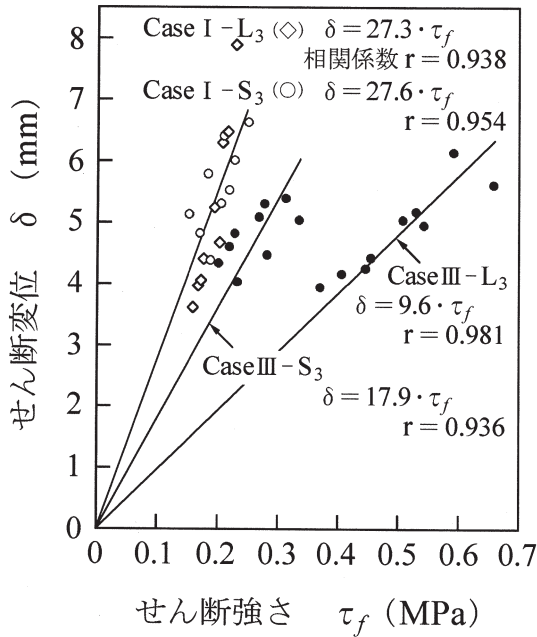


図-6 せん断強さとせん断変位との関係

4.2 一軸圧縮強さと変形係数

一軸圧縮試験に用いた供試体の寸法は直径50mm、高さ100mmであり、作製にあたっては母材のみ(L₀, S₀)、あるいは、安定材を添加した母材(L₃, S₃)を内径50mm、高さ125mmの二つ割モールドの中に入れ、これを手動の試料充填装置により5mm/minの速度で静的に締め固めた。

Case I, IIIともにL₃, S₃については水分の損失を防ぐためにラップフィルムで供試体を包んだ上でビニール袋に入れて厳密封し、20°Cに調節した恒温器内に最長で180日間静置した。試験には容量19.6kNの載荷装置を用い、ひずみ速度は1%/minに設定した。

安定材を添加した母材(L₃, S₃)で求めた一軸圧縮強さ q_u の推移を図-7に示す。横軸の養生日数Dは、対数で目盛っている。全てのCaseで q_u とDの対数との間には高い相関をもって直線関係が成り立ち、その勾配を表す係数は0.42(Case I - L₃, 記号○)~0.56(III - L₃, ●)となっている。Case IのD=1から180までの q_u の増分はL₃で0.9MPa, S₃(□)では1.0MPa、同様にIII - L₃で1.3MPa, S₃(■)では1.1MPaであり、強度発現の面からみても、処理済粉を30%含む母材(Case III)と消石灰(L)との組み合わせが幾分有利との結果にいたった。

図-8は、応力-ひずみ曲線から求めた変形係数 E_{50} と一軸圧縮強さ q_u との関係をCaseごとにまとめたものである。 E_{50} は q_u に比例して大きくなり、 q_u のおよそ84倍(Case I - S₃, 記号□)~163倍(I - L₃, ○)の値に換算できることがわかる。

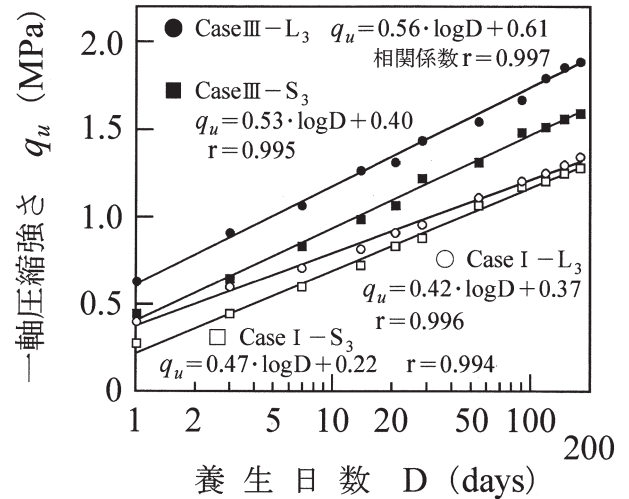


図-7 一軸圧縮強さの経時変化 ($1 \leq D \leq 180$)

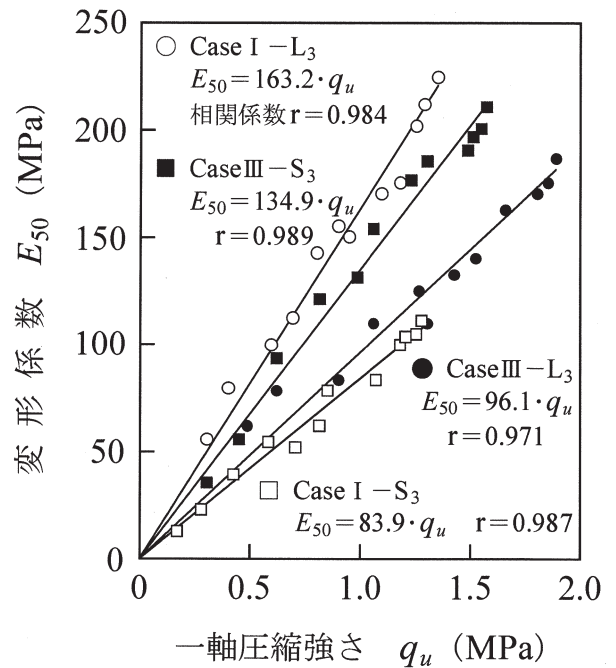


図-8 一軸圧縮強さと変形係数との関係

180日間の養生を経て一軸圧縮試験を終えた4つのCase(L₃, S₃)から検体を採取してX線回折を行った。例として、Case III - L₃とS₃の結晶情報を図-9に示す。水酸化マグネシウム(M)のピークに加えて、回折角 $2\theta = 9^\circ, 16^\circ$ にエトリンサイト(E)の生成が確認できる。このアルミン酸石灰塩系水和物は土粒子の移動を拘束して固化の進行を促すだけでなく、重金属類を固定する能力をも有している⁹⁾。なお、MgOは土に含まれている可溶性非晶質成分(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)と結合して安定した硬化化合物を形成するようである¹⁰⁾。

An: 無水石膏, G: 二水石膏, M: 水酸化マグネシウム, Q: 石英
E: エトリンガイト, Ka: カオリナイト, Mu: 白雲母

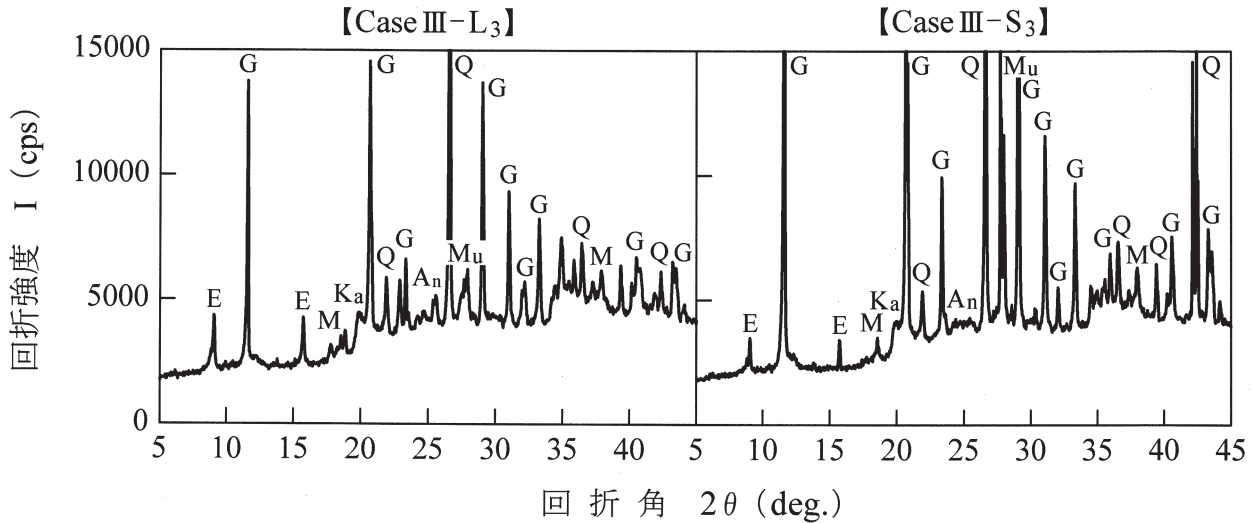


図-9 X線回折パターン例(検体は養生180日目の一軸圧縮試験用供試体から採取)

5. まとめ

本研究において、すでに効用を確認した「フッ素不溶化処理廃石膏ボード粉(処理済粉)」を安定材とともに混ぜ合わせた粘土の支持力、強度特性を調べたところ、以下のような新たな知見が得られた。

(1) $CBR_{2.5}$ と母材との関係において、 $CBR_{2.5}$ は処理済粉を多く含む母材ほど大きくなる。また、安定材との関係において、 $CBR_{2.5}$ は高炉セメントB種→セメント系固化材→消石灰の順に大きくなる。この傾向は、添加率を高くするほど明確に現れる。

(2) 強度定数のうち、せん断抵抗角 ϕ_d は処理済粉を混入した母材の方で大きくなり、かつ、安定材添加のもとでは養生日数の経過とともに増加する。一方、粘着力 c_d に処理済粉混入の有無や安定材の種類による増減ならびに経時的な変化は認められない。

(3) 一軸圧縮強さ q_u と養生日数の対数($\log D$)との間には回帰直線が成立し、その勾配は処理済粉を含む母材と消石灰との組み合わせで最も大きくなる。

謝辞

実験用資材をご提供いただいた松田技研工業株式会社、株式会社大総に厚く御礼申しあげる。また、種々の室内試験やデータの整理に携わった福井工業高等専門学校の学生諸君に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局：平成20年度建設副産物実態調査結果について(2010年3月)
- 2) (社)石膏ボード工業会：廃石膏ボードの対応策について(2008年9月)

3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：平成20年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書(2009年3月)

4) 山田幹雄・佐野博昭・山田武史・坪川 茂：廃石膏ボード粉の土質材料への転用促進を目的とした含有フッ素の不溶化処理に関する研究、建設用原材料、第18巻、第1号、pp.17-23(2010年3月)

5) (社)日本規格協会：セッコウの化学分析方法、pp.2-3(1995年5月)

6) (社)地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編：地盤材料試験の方法と解説(2009年11月)

7) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、第4分冊、pp.155-158(2007年6月)

8) 大山 将・奥村正孝・保賀康史・西村良平：酸化マグネシウム系材料による固化・不溶化処理技術、地盤工学会誌、第57巻、第7号、pp.20-23(2009年7月)

9) 松山祐介・富田 治・守屋政彦・大森啓至：フッ素およびホウ素を含む土壌の固化・不溶化技術に関する研究、日本材料学会・第5回地盤改良シンポジウム論文集、pp.255-258(2002年11月)

10) 西形達明・山田哲司・西田一彦・松田 豊：酸化マグネシウムの地盤改良への適用について、土と基礎、第54巻、第7号、pp.19-21(2006年7月)

(2010年9月10日受付 2011年2月10日受理)