

第2章 調査および試験

2-1 固化処理対象土の性質

1) 海域ヘドロ

主として閉鎖型海域・干潮河川(河口)に堆積した底質で、その主体は粘土鉱物である。産廃、生活污水等の蓄積により嫌気性発酵の著しいものもある。また、干満により、酸化、還元が繰返されることにより、一般に有害物質の溶出量が増加しやすい環境にある。

2) 淡水域ヘドロ

湖沼・都市河川の底質で、生活系からの汚染や洗剤等の流入により、ポリリン酸塩の混入が指摘されている。有機物の嫌気分解により、悪臭の激しいものが多い。また、富栄養化によるラン藻類の異常発生が繰返され、これらの腐敗により水中の溶存酸素が消費され、湖沼・河川の水産環境が汚染される。自然堆積物としての腐植土も含む。

3) 産業廃棄物

金属工業・皮革・食品工業等で排出される汚泥で、業種により偏った化学種の有害物(塩水マッド、メッキスラッジ等)が卓越して含有される。

4) 上下水処理汚泥

上水処理汚泥は初沈泥・濾過槽排土等であり、主体は粘土鉱物であるが、藻類の腐敗物を含み悪臭がある。また、アルミニウム塩類を含む場合がある。一方、下水処理汚泥は、活性汚泥法による濃縮汚泥の凝集・脱水工程を経て排出される脱水スラッジケーキが主体で、大部分繊維質からなる有機質汚泥である。合流式処理場からの汚泥には、有害物が含まれることがあり、悪臭が著しい。

5) 建設汚泥

主としてベントナイト泥水、薬液注入剤あるいはセメントと原位置土との混合物であり、一般に含水比が高く、一時的に大量に排出される。

以上のように、固化処理の対象となる軟弱土は、建設汚泥を除いて有害物を含有している恐れ

があり、また悪臭の激しいことにおいて共通している。建設汚泥は主として粘土質よりなるが、塩類を含む場合があり、含水比が高い点は他の軟弱土と共通している。

2-2 固化処理対象土の調査および試験

対象土は前述のように大部分が人為的な環境で堆積した経緯を持つものであり、自然堆積土と比較すれば、対象土の土質分布のバラツキが著しく大きいことが指摘されている。しかもその層序は歴史的な経緯をそのまま留めるものも少なくない。例えば、深度方向で有害物の質および量の顕著な偏りが見られる場合などがあり、調査に当たっては、まずその歴史的経緯・堆積経緯を予め十分に確認しておく必要がある。

以上より、対象土の化学的性質について予め調査・試験をしておくことは、固化処理効果を事前に知る上で重要となる。また、物理的性質を知ることには対象土の基本性状を知り、固化処理の設計をする上での基礎的データを得るために必須のことである。さらに、力学的調査・試験は対象土の力学的性質(せん断強さ)を把握するためのものであるが、乱さない試料の採取が困難なこともあり原位置調査が多用されている。一軸圧縮試験はむしろ固化処理地盤の強度把握のために行われることが多い。

なお、固化処理の基本となる室内配合試験は、固化材の添加量の設定、固化効果の予測のため必要不可欠である。

2-2-1 化学的性質

対象土には多少とも有機物の混入が考えられる。有機物の混入は、普通ポルトランドセメント等の水和反応を阻害することがあり、このような場合にはセメント系固化材が必要となる。また、共通して自然含水比が高く、この土中水に種々の塩類が溶解している場合がある。さらに排出・堆積の経緯、堆積後の環境条件によって、有害物を溶出する場合がある。これら対象土の化学的性質は、固化処理に先立って十分調査し実態を確認することが、適正な処理および処分方法を選定するための重要な決め手となる。

ちなみに、土壤環境基準を表2-1に示す。

表2-1 土壤環境基準

分類	特定有害物質の種類	地下水基準 (mg/L)	特定基準		第二溶出量 基準 (mg/L)
			土壤溶出量基準 (mg/L)	土壤含有量基準 (mg/L)	
第一種特定有害物質 (揮発性有機化合物)	四塩化炭素	0.002以下	0.002以下	—	0.02以下
	1、2-ジクロロエタン	0.004以下	0.004以下	—	0.04以下
	1、1-ジクロロエチレン	0.02以下	0.02以下	—	0.2以下
	シス-1、2-ジクロロエチレン	0.04以下	0.04以下	—	0.4以下
	1、3-ジクロロプロペン	0.002以下	0.002以下	—	0.02以下
	ジクロロメタン	0.02以下	0.02以下	—	0.2以下
	テトラクロロエチレン	0.01以下	0.01以下	—	0.1以下
	1、1、1-トリクロロエタン	1以下	1以下	—	3以下
	1、1、2-トリクロロエタン	0.006以下	0.006以下	—	0.06以下
	トリクロロエチレン	0.03以下	0.03以下	—	0.3以下
	ベンゼン	0.01以下	0.01以下	—	0.1以下
第二種特定有害物質 (重金属等)	カドミウム及びその化合物	0.01以下	0.01以下	150以下	0.3以下
	六価クロム化合物	0.05以下	0.05以下	250以下	1.5以下
	シアン化合物	検出されないこと	検出されないこと	50以下 遊離シアンとして	1以下
	水銀及びその化合物	水銀が0.0005以下、かつ、アルキル水銀が検出されないこと	水銀が0.0005以下、かつ、アルキル水銀が検出されないこと	15以下	水銀が0.0005以下、かつ、アルキル水銀が検出されないこと
	セレン及びその化合物	0.01以下	0.01以下	150以下	0.3以下
	鉛及びその化合物	0.01以下	0.01以下	150以下	0.3以下
	砒素及びその化合物	0.01以下	0.01以下	150以下	0.3以下
	ふっ素及びその化合物	0.8以下	0.8以下	4,000以下	24以下
ほう素及びその化合物	1以下	1以下	4,000以下	30以下	
第三種特定有害物質 (農薬等)	シマジン	0.003以下	0.003以下	—	0.03以下
	チオベンカルブ	0.02以下	0.02以下	—	0.2以下
	チウラム	0.006以下	0.006以下	—	0.06以下
	ポリ塩化ビフェニル	検出されないこと	検出されないこと	—	0.003以下
	有機リン化合物	検出されないこと	検出されないこと	—	1以下

〔土壤汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説〕(平成15年9月、(社)土壤環境センター)

表2-2 産業廃棄物に係る判定基準

種別	廃棄物処理法				海洋汚染防止法	
	埋立処分		海洋投入処分		埋立場所への排出	
対象	汚泥等 ¹⁾	水溶性汚泥	廃酸 廃アルカリ	非水溶性 汚泥	水底土砂	
試験方法	溶出法	含有量	含有量	溶出法	溶出法	含有量
基本的考え方	=排水基準	環境基準 × 500	水溶性汚泥 ÷ 5	=排水基準	=排水基準	=排水基準
単位	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
アルキル水銀	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
水銀またはその化合物	0.005	2	0.05	0.005	0.005	0.005
カドミウムまたはその化合物	0.3 ²⁾	5	1	0.1	0.1	0.1
鉛またはその化合物	0.3 ²⁾	5	1	0.1	0.1	0.1
有機燐化合物	1	5	1	1	1	1
六価クロム化合物	1.5 ²⁾	25	5	0.5	0.5	0.5
砒素またはその化合物	0.3 ²⁾	5	1	0.1	0.1	0.1
シアンまたはその化合物	1	5	1	1	1	1
PCB	0.003	0.15	0.03	0.003	0.003	0.003
有機塩素化合物	—	40	8	—	40 ⁴⁾	—
銅またはその化合物	—	70	15	3	3	—
亜鉛またはその化合物	—	450	90	5	5	—
弗化物	—	1000	200	15	15	—
トリクロロエチレン	0.3	15	3	0.3	0.3	0.3
テトラクロロエチレン	0.1	5	1	0.1	0.1	0.1
ペリリウムまたはその化合物	—	125	25	2.5	2.5	—
クロムまたはその化合物	—	100	20	2	2	—
ニッケルまたはその化合物	—	60	12	1.2	1.2	—
バナジウムまたはその化合物	—	75	15	1.5	1.5	—
ジクロロメタン	0.2	10	2	0.2	0.2	0.2
四塩化炭素	0.02	1	0.2	0.02	0.02	0.02
1,2-ジクロロエタン	0.04	2	0.4	0.04	0.04	0.04
1,1-ジクロロエチレン	0.2	1.0	2	0.2	0.2	0.2
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.4	20	4	0.4	0.4	0.4
1,1,1-トリクロロエタン	3	150	30	3	3	3
1,1,2-トリクロロエタン	0.06	3	0.6	0.06	0.06	0.06
1,3-ジクロロプロペン	0.02	1	0.2	0.02	0.02	0.02
チウラム	0.06	3	0.6	0.06	0.06	0.06
シマジン	0.03	1.5	0.3	0.03	0.03	0.03
チオベンカルブ	0.2	1.0	2	0.2	0.2	0.2
ベンゼン	0.1	5	1	0.1	0.1	0.1
セレンまたはその化合物	0.3	5	1	0.1	0.1	0.1
ダイオキシン類 ⁵⁾	3ng-TEQ/g	—	—	—	—	—

注)

- 1) 汚泥、燃え殻、煤塵、銻さいを含む(燃え殻、煤塵、銻さいについては、水銀、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素のみを対象)
- 2) カドミウム、鉛、六価クロムおよび砒素については、土壌への吸着の可能性が考慮されている。
- 3) 環境基準においては全シアンに名称変更。
- 4) 含有量。
- 5) ダイオキシン類については、既設分は適用猶予の期間が定められているものがある。
廃棄物、排水については、廃棄物焼却炉にかかるものが対象。

3) その他

その他に注意する項目は次のとおりである。

- ① 嫌気性菌活性度、重金属イオン形態
- ② 悪臭物質

悪臭防止法では、表2-3に示す悪臭物質が指定され、それぞれに規制基準値が定められている。軟弱土に関連して特に重要な悪臭物質は、*印を付した5種類である。

表2-3 悪臭防止法における規制基準

悪臭物質名	規制基準
アンモニア*	1 ppm
メチルメルカプタン*	0.002ppm
硫化水素*	0.02ppm
硫化メチル*	0.01ppm
二硫化メチル	0.009ppm
トリメチルアミン*	0.005ppm
アセトアルデヒド	0.05ppm
プロピオンアルデヒド	0.05ppm
ノルマルブチルアルデヒド	0.09ppm
イソブチルアルデヒド	0.02ppm
ノルマルバレリルアルデヒド	0.009ppm
イソバレリルアルデヒド	0.003ppm
イソブタノール	0.9ppm
酢酸エチル	3ppm
メチルイソブチルケトン	1 ppm
トルエン	10ppm
スチレン	0.4ppm
キシレン	1 ppm
プロピオン酸	0.03ppm
ノルマル酪酸	0.001 ppm
ノルマル吉草酸	0.0009ppm
イソ吉草酸	0.001 ppm

悪臭防止法施行令(昭和47年政令第207号)第2条第2項の規定により、悪臭防止法(昭和46年法律第91号。以下法という。)第3条の規定に基づく規制地域及び第4条の規定に基づく規制基準を次のとおり定める。

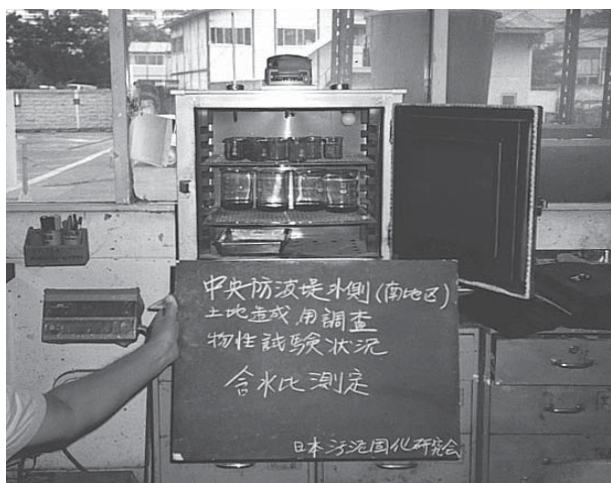
2-2-2 物理的性質

対象土の物理的性質については、一般に次の項目について試験しておけばよいと考えられる。

- ① 自然含水比 W_n
- ② コンシステンシー W_L, W_p, I_p, W_s
- ③ 湿潤密度 ρ_t
- ④ 土粒子密度 ρ_s
- ⑤ 粒度分布

1) 自然含水比 W_n JIS A1203

対象土は通常の自然堆積土に比べて含水比が高いという特徴があり、また有機物を含有している。JISに定められた方法は、110℃で一定質量になるまで乾燥し、この際の減量の残分(固質部分)に対する割合を%であらわす方法である。また、迅速な方法として、電子レンジ法(JGS0122)があるが、さらに簡便・迅速法として、メチルアルコールを加えて燃焼する方法や直接加熱する等の現場的方法もある。



2) コンシステンシー W_L, W_p, I_p, W_s JIS A1205

液性限界試験、塑性限界試験とも試料土を乾燥したものに水を加えて、規定の方法により W_L, W_p を測定するものであるが、対象土のうち特に有機物含有量の多いものについては、乾燥する過程でコロイド分が団粒化し、原土の水分保持力が著しく減少し疎水化現象が顕著になる。したがって試

料土の乾燥は空気中での自然乾燥によって粘土粒子の吸湿水を保持し、土のコンシステンシーを変化させないように、注意して行うことが重要である。

3) 湿潤密度 ρ_t

JIS A1225, JGS 0191

土の密度は土の基本的な物理量の1つである。土粒子の質量と空隙に含まれる水の質量の両方を考える場合を湿潤密度 ρ_t と言い、土粒子の質量のみを考える場合を乾燥密度 ρ_d と言う。

ρ_t, ρ_d はそれぞれ次式で得られる。

$$\rho_t = m/v \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\rho_d = \rho_t / (1 + \frac{w}{100}) \quad (\text{g/cm}^3)$$

m : 供試体の質量

v : 供試体の体積

w : 供試体の含水比

4) 土粒子の密度 ρ_s JIS A1202

土粒子の密度は、ある温度における試料土の空気中の質量と、それと同容積の純水の空気中の質量との比である。対象土には有機質土や下水汚泥等大部分が有機物からなる泥状物も含まれるが、これらは、空気乾燥あるいは炉乾燥によって粒子の表面特性が著しく変化して測定し難い場合があるので、湿ったままで測定することが好ましい。この場合は測定後に炉乾燥して質量(乾燥試料質量)を測定することとなる。

粘土鉱物は殆ど 2.65 ± 0.10 の範囲内にあるとされているが、有機物を多く含む下水汚泥脱水ケーキでは $1.7 \sim 2.1$ であり、一般に有機物の平均密度は 1.50 とされている。

5) 粒度分布 JIS A1204, JIS A1223

JISに定められた粒度試験は、 $75 \mu\text{m}$ より大きな粒子はフルイ分けの方法によって行ない、 $75 \mu\text{m}$ 標準網フルイを通過した試料土の粒度は、浮ひようを用いて、ストークスの法則に基づく方法で測定するように定められている。

軟弱土は大部分がシルト以下($< 75 \mu\text{m}$)の粒群に属すると考えられるので、主に浮ひようによる測定方法が用いられる。

2-2-3 力学的性質

原地盤状態での対象土は一般に超軟弱であり、乱さない試料の採取が困難な場合が多い。したがって、対象土の強度把握にはサウンディングが行なわれるケースが過半である。ただし、改良後の固化処理土の強度把握には、ボーリングにより乱さない試料を採取して一軸圧縮試験を行なう必要がある。

1) コーン貫入試験

最も簡便な原位置サウンディング方法として、ポータブルコーンペネトロメーターによる試験がある(JGS 1431)。

単管式ポータブルコーンペネトロメーターの構造を図2-1に示すが、この他に二重管式の試験機もある。

コーン指数 q_c は次式により算出される。

$$q_c = Q_c / A \quad (\text{kN/m}^2)$$

Q_c : 先端コーン貫入力

A : 先端コーン底面積

単管コーン試験は、周辺土と軸との間に発生する周面摩擦が測定値に影響を及ぼす場合がある。このような場合には、摩擦抵抗を除去するための二重管式コーン貫入試験を行うことが必要になってくる。

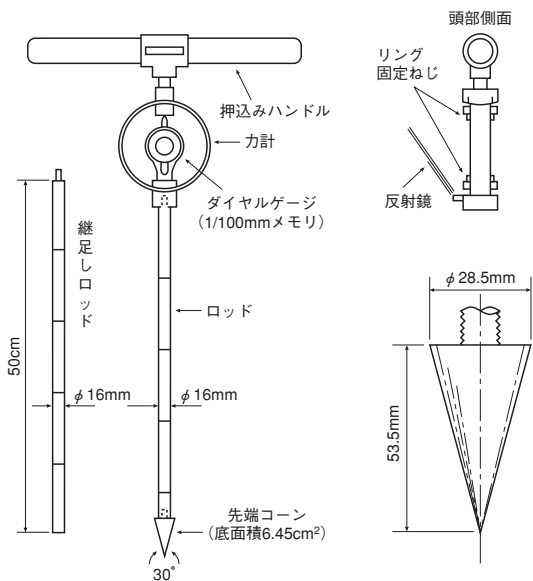


図2-1 ポータブル・コーン貫入試験機

代表的な二重管コーンペネトロメーターは、オランダ式二重管コーン貫入試験、通常、ダッチコーンと呼ばれるものである(JIS A1220)。ダッチコーンに使われる先端コーンは図2-2に示すようなマントルコーンで、外管内部への土の侵入を防止し、先端コーン部の抵抗と全周面摩擦を分離して、純粋に土層の貫入抵抗のみが検出できる構造になっている。この試験機は圧入能力として100kNおよび20kNの二種類があり

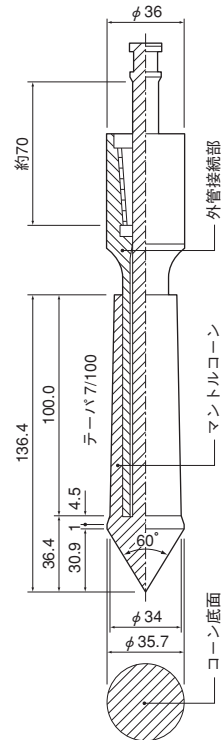


図2-2 ダッチコーン用の先端コーン

固化処理土の強度確認にも用いられる。 q_c はポータブルコーンと同様に Q_c/A で求められる。なお、 q_c と他の強度指数との間には一般的に次の関係が知られている。

粘性土では一般に $q_c = (10 \sim 20)C$

砂地盤では $q_c = 4N$

C : 粘着力(kN/m^2)

N : N 値

また、 q_c は車両のトラフィカビリティを判定する指数としても使われる。



2) ベーンせん断試験

主として、原地盤状態の軟弱土の強度を測定する場合に適用する。原地盤のせん断強さが 50kN/m^2 以下では $D=75\text{mm}$ タイプが使用される。測定は軸を垂直にして土の中へ押し入れ、軸を水平に回転させて、土を円筒状に切るのに要する軸の最大トルク $M(\text{kN}\cdot\text{m})$ を計測するが、土のせん断力 $\tau_v(\text{kN/m}^2)$ は次式により求められる。

$$\tau_v = 6(M - M_f) / 7\pi D^3$$

M_f ：試験機の摩擦トルク

最近の研究によると、ベーン試験で得られたせん断力 τ_v は、一軸圧縮強さから得られたせん断強さ(粘着力 C)にほとんど一致すると言われている。

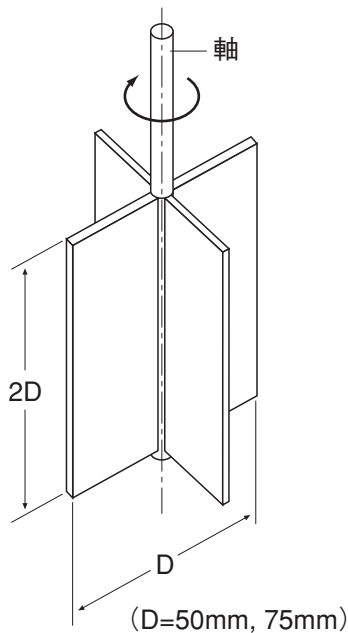


図2-3 ベーンせん断試験

3) 一軸圧縮試験 JIS A1216, JGS 0511

軟弱土固化処理における一軸圧縮試験は、対象土の強度を知るためというより、むしろ固化後の処理土の強さを判定するための代表的な試験と言える。乱さない試料の採取は一般にはダブルコアサンプラー等のボーリングによることが多いが、施工直後の処理土をモールドに詰めて実施することもある。採取したコアは成形後、一軸圧縮試験に供する。

圧縮ひずみが15%に達するまでの圧縮応力の最大値が一軸圧縮強さ(q_u)であり、その時のひずみが破壊ひずみである。

非排水せん断強さ(粘着力) C_u は、内部摩擦角を 0° として $C_u = \frac{1}{2} q_u$ から求められる。

また変形係数 E_{50} は次式により算出する。

$$E_{50} = \frac{q_u}{2} / \epsilon_{50}$$

ϵ_{50} ： $\sigma = \frac{q_u}{2}$ のときの圧縮ひずみ

なお、一軸圧縮試験は後述する室内配合試験でも使われる。

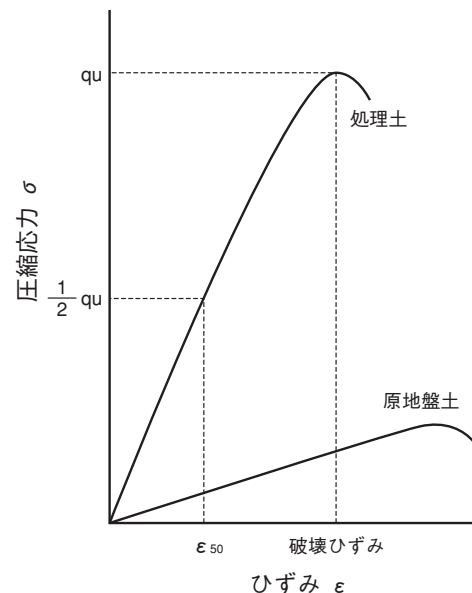


図2-4 応力ひずみ曲線

2-2-4 種別による調査・試験項目

対象土はその種類によって性質が大きく異なるため、対象土の種類毎に必要なと思われる試験・調査を表2-4に示す。

表2-4 調査・試験項目

凡例 ○：必要 △：状況に応じて適用

項目		種別	処 理 前					処 理 後					
			a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
事前踏査 ・ 調査	処 理 目 的		○	○	○	○	○						
	歴 史 的 経 緯		○	○	○	○	○						
	環 境 条 件		○	○	○	○	○						
	先 行 調 査		○	○	○	○	○						
化学的性質	有 機 物 含 有 量		○	○	○	○	△						
	硫 化 イ オ ウ		△	△	△	△					△		
	有害物質	含 有 量		△	△	△	△	△					
		溶 出 量				△	△		△	△	○	△	△
		Cr ⁶⁺ 溶出試験		○	○	○	○	○	△	△	△	△	△
	参 考	pH		△	△	△	△	△	△	△	○	△	△
		O R P		△	△	△	△		△	△	△		
	悪 臭	臭 気		△	△							○	
		悪臭物質				△	△				△	△	
	そ の 他	鉍物組成	鉍物組成										
物理的性質	自 然 含 水 比		○	○	○	○	○	△	△	△	△	△	
	コ ン シ ス テ ン シ ー		△	△									
	湿 潤 密 度		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	土 の 密 度		△	△	△	△	△						
	粒 度 分 布		○	○	△	△	△						
力学的性質	強 度		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

注) a. 海域ヘドロ b. 淡水域ヘドロ c. 有害な産業廃棄物 d. 上下水汚泥 e. 建設汚泥

2-3 室内配合試験

固化材の添加量を設定するための室内配合試験は、軟弱土固化処理のみならずセメントを使用する表層処理工法あるいは深層混合処理工法にとって必須のものである。

対象土の物理的・化学的性質を分析することによって、経験的に目標強度に対する固化材の選定あるいは所用添加量をおおよそ推定することはできる。しかしながら、対象土はその性状が大きく異なるため、事前に室内配合試験を実施して適切な固化材および添加量を設定しなければならない。

試験方法は地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作成方法(JGS 0821)」に標準化されている。一般的には対象となる軟弱土について、適すると考えられる固化材を軟弱土試料に対して3水準以上設定し、専用ミキサーにより所定時間(10分程度)混合する。混合した試料を直径5cm、高さ10cmのモールドに詰め密封材で被覆して恒温(恒湿)器で所定日数養生した後、一軸圧縮

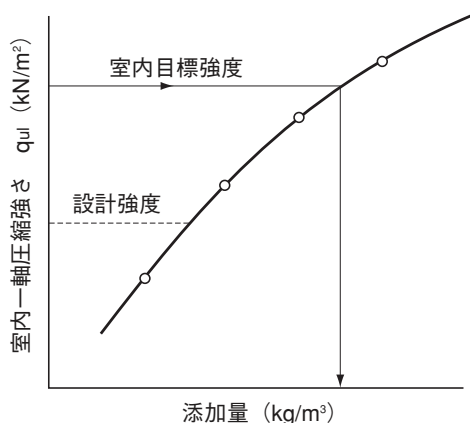


図2-5 現場における固化材添加量の決め方

試験を行なう。

得られた一軸圧縮強さと固化材添加量の関係を図2-5のように整理して、次の手順により必要な固化材添加量を決定する。

- ① 固化処理土の設計強度 q_{uck} を決定する。
- ② 室内一軸圧縮強さ q_{ul} と現場一軸圧縮強さ q_{uf} の強度比を考慮して室内目標強度 q_{ul} を設定する。
- ③ 図2-5より所用固化材添加量を決定する。

(現場/室内)強さ比とは、現場での実施工と室内試験による完全混合との攪拌・混合程度の相違や養生条件あるいは土質のバラツキによる現場強さの変動等に対応するためのもので、一般的には表2-5に示す数値となる。また、当研究会の固化処理実績から得られた(現場/室内)強さ比を工法別に表2-6に示すが、実際に使用するにあたっては十分な検討が必要となる。

表2-5 (現場/室内)強さ比の一例

固化材の添加方式	改良の対象	施工機械	(現場/室内)強さ比
粉 体	軟弱土※	スタビライザー バックホウ	0.5~0.8 0.3~0.7
	ヘド□※ 高含水有機質土	クラムシェル バックホウ	0.2~0.5
スラリー	軟弱土※	スタビライザー バックホウ	0.5~0.8 0.4~0.7
	ヘド□※ 高含水有機質土	処理船	0.5~0.8
		泥上作業車 クラムシェル・バックホウ	0.3~0.7 0.3~0.6

※締固めを行なう場合も含む。

表2-6 当研究会工法の(現場/室内)強さ比の実績例

工法名	q_{uf}/q_{ul}	備 考
FSM工法	0.50~0.70	標準値であり対象土、水セメント比、添加物等により減少する場合もある。
FVM工法	0.30~0.50	
FAM工法※	〃	
VM工法	〃	
LVM工法	〃	
RM工法	〃	
ARM工法	0.50~0.70	
BH-RM工法	0.30~0.50	

※水中泥面上部50cm程度の強度は期待できない。

【参考文献】

- 1)土質工学会編：「技術手帳」昭和56年
- 2)松尾 稔：「土質実験」,1975年 丸善
- 3)セメント協会編：「セメント系固化材による地盤改良マニュアル」,1994年 技報堂