

第3章 固化处理土の工学的性質

3-1 軟弱土固化のしくみ

3-1-1 セメントの水和機構

我が国で初めてセメントが製造されてから既に125年余りが経過し、この間、製造方式の改良ならびに各種セメントに関する品質企画の制定がなされ、今日では目的に応じて多種類のセメントが製造されており、セメントは建設産業の主要基材となっている。

セメントを水と混合すると、セメントの主成分である各種の化合物結晶が水中で分解し、水を結晶水とする新しい水和物結晶を析出し、これらが互いに結びついて強固な構造体を形成する。骨材として砂またはレキを加えた場合、これらを糊着・結合して、堅牢なモルタルまたはコンクリートが形成される。

代表的なセメントである普通ポルトランドセメントの主要な化合物の含有量の一例と諸特性を表3-1に示す。表に示すように、セメント中の化合物の主体は、エーライト(ケイ酸三カルシウム、 C_3S)とビーライト(ケイ酸二カルシウム、 C_2S)であり、この2種の化合物の含有量は一般に75%~80%と化合物の大部分を占めている。これらの化

合物が水和して発現する強度は他の化合物よりも大きく、セメントの中長期強度を支配している。

一方、その他の化合物であるアルミネート相(アルミン酸三カルシウム、 C_3A)とフェライト相(鉄アルミン酸カルシウム、 C_4AF)は、エーライト・ビーライトの間隙を埋めるように存在する物質であるが、特にアルミネート相は水和反応の速度が極端に速いため、ごく初期の凝結を促進するために欠かせない成分である。

ちなみに、セメント組成鉱物の水和の速さを図3-1に、クリンカー鉱物の強度発現速度を図3-2に示す。

3-1-2 軟弱土固化用セメントの特徴

普通ポルトランドセメントを用いて軟弱土を固化しようとする時、対象土の成分の影響により強度発現がしにくいことがあり、使用セメント量の増加に伴って不経済となることがある。そのため、比較的少量で固化し、化学的にも有害物質を固定できる安定した固化機能を有する、軟弱土固化に適したセメント系固化材の開発が求められた。

セメントに含まれている化合物の水和速度は、

表3-1 普通ポルトランドセメントの主要化合物含有量の一例および諸特性

クリンカーの化合物			平均含有量(%)	強度発現		水和熱	化学抵抗性	乾燥収縮
化学組成・名称	略記	短期		長期				
エーライト (Alite)	$3CaO \cdot SiO_2$ (ケイ酸三カルシウム)	C_3S	50	大	大	大	中	中
ビーライト (Belite)	$2CaO \cdot SiO_2$ (ケイ酸二カルシウム)	C_2S	25	小	大	小	大	小
アルミネート相 (Aluminate)	$3CaO \cdot Al_2O_3$ (アルミン酸三カルシウム)	C_3A	9	中	小	極めて大	小	大
フェライト相 (Ferrite)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (鉄アルミン酸カルシウム)	C_4AF	9	小	小	中	中	大

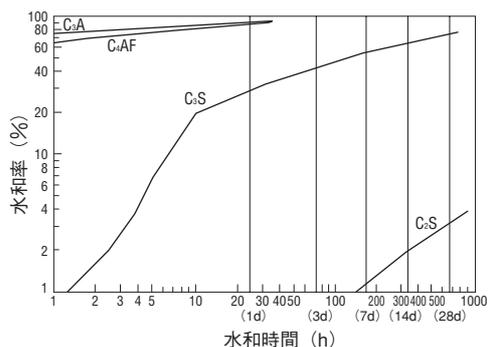


図3-1 セメント組成鉱物の水和の速さ

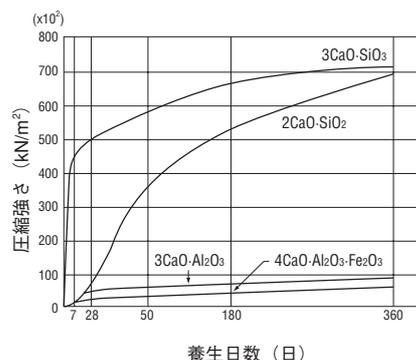


図3-2 クリンカー鉱物の強度発現速度

アルミネート相がエーライト・ビーライトに比べて非常に速い。このため、軟弱土用固化材としては水和速度の速いアルミネート相の組成物を多くすることが望ましい。これは、水和速度の早い化合物は、液相中に溶出したカルシウムイオンが有機酸類と反応して不溶性の塩を析出する前に水和物結晶を析出し、有機物による水和反応の阻害を回避するためである。

表3-1に示したように、主要化合物の中で高強度を発現するのはエーライト・ビーライトである。アルミネート相の発現強度は低いものの、混合物中に水和物結晶を析出することにより、混合表面積を拡大し、対象土中の固相を固定する効果が生じる。また、液相中の有機物は新しく生じた結晶の表面に吸着されるため、水和反応の阻害要因は相対的に減少されることになる。

なお、一般的に使用されているセメント系固化材は、一般軟弱土用・特殊土用・高有機質土用・産業廃棄物処理用であるが、対象土により普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種も使われる。

3-2 固化処理土の強度に影響する要因

軟弱土を固化した処理土の評価法である力学的試験の代表的なものが一軸圧縮試験であるが、そこから得られる一軸圧縮強さの強度発現に作用する要因として、

- ① 固化材の種類と添加量
- ② 原地盤の土質性状
- ③ 混合条件及び養生条件
- ④ 養生温度
- ⑤ 水セメント比

などが考えられる。

3-2-1 固化材添加量と一軸圧縮強さ (室内配合試験)

海域ヘドロと淡水域ヘドロを、セメント系固化材と普通ポルトランドセメントで固化した処理土

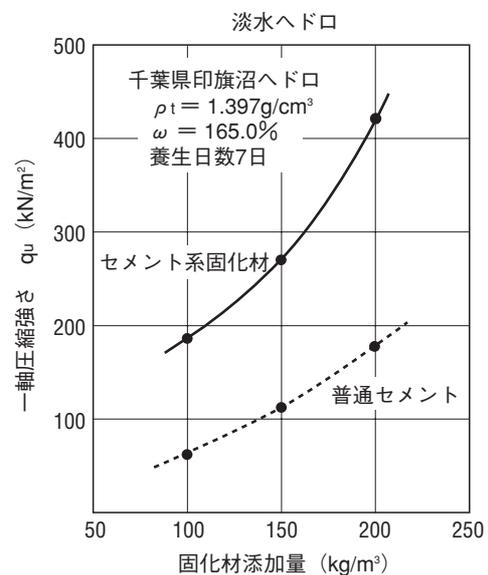
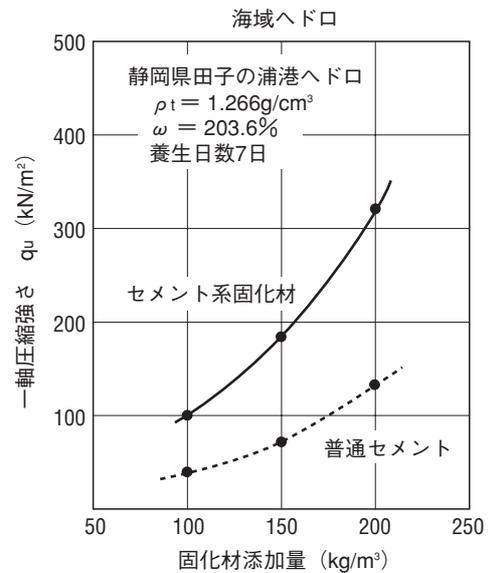


図3-3 ヘドロに対する固化材添加量と一軸圧縮強さ
(普通セメントとセメント系固化材の対比)

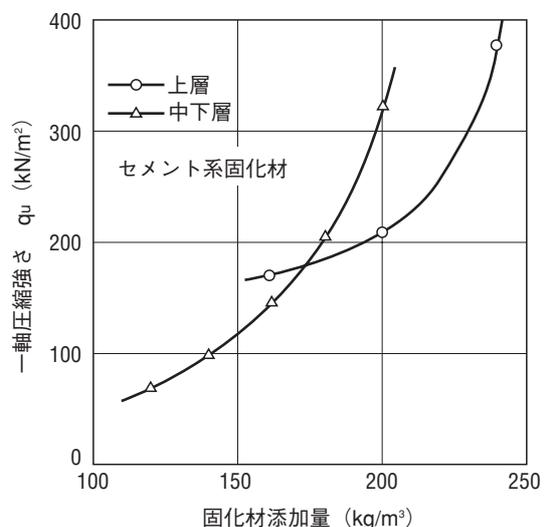


図3-4 固化材添加量と強度の関係

の一軸圧縮強さの対比例を図3-3に示す。図によると、同一セメント量の場合、普通セメントに比べてセメント系固化材の方が強度発現が大きいことがわかる。

河床軟弱土の上層と中下層をセメント系固化材で固化した処理土の一軸圧縮強さの対比例を、図3-4に示す。この場合の上層とは河床から0.5mで含水比は200%、また、下層は河床から3.5～5.5mで含水比は150%であった。

3-2-2 原地盤の土質性状

処理土の一軸圧縮強さに対しては、含水比と有機物含有量が特に大きく関係する。有機質土やヘドロに含まれていてセメントの水和反応を阻害する有機物の代表的な有害成分に「フミン酸」がある。図3-5はフミン酸含有量と改良強度の関係を示したものである。

また、改良対象土が高含水比になるほど強度の低下を生じていることを示しているのが図3-6、図3-7である。

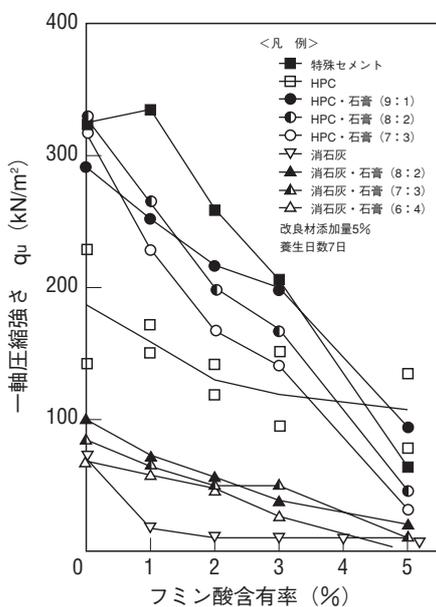


図3-5 フミン酸含有量と一軸圧縮強さの関係

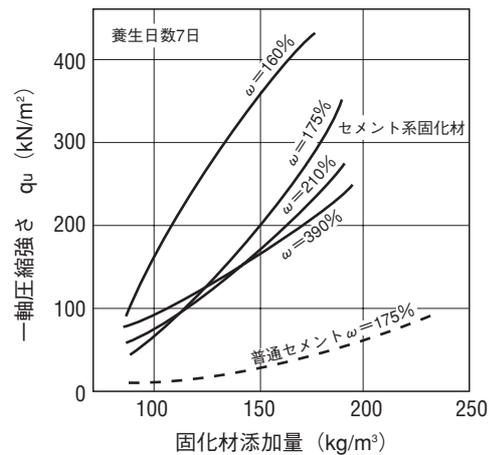


図3-6 有機質土の改良強さの一例

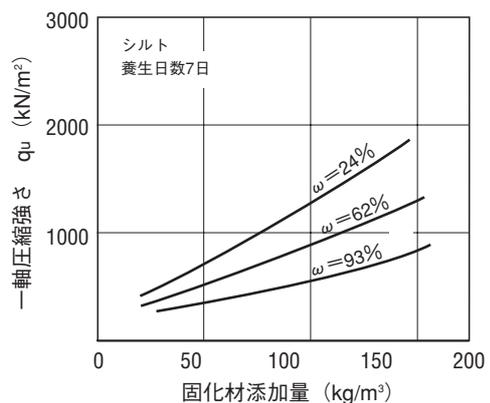
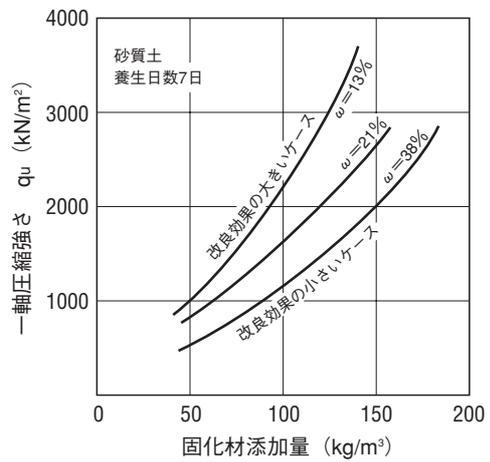


図3-7 含水比の一軸圧縮強さに対する影響

3-2-3 混合条件および養生条件

図3-8および図3-9は、室内強度 q_{ul} (室内試験で得られる固化強度)と現場強度 q_{uf} (現地での施工によって得られる固化強度)との差を、混合の程度と養生方法(養生温度)の相違に着目して調査した表層固化処理の結果である。

図中に示す①～④の強度を比較すると、いずれのセメント添加量でも強度順位は②>①>③>④である。強度の発現性は、現地混合よりも完全混合の方が、また現地養生よりも室内養生の方が高い、という結果を示している(現地養生外気温温度 10°C)。

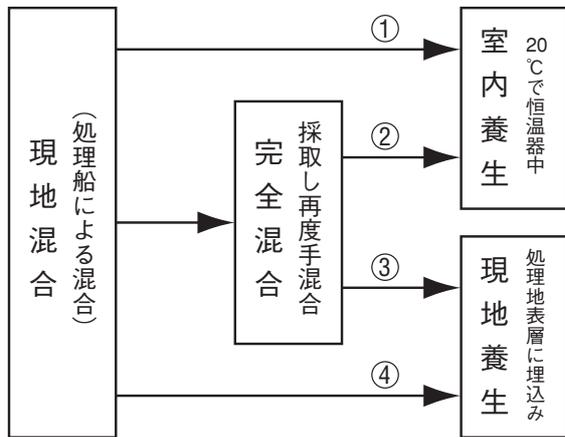


図3-8 室内強度と現場強度の差に関する試験フロー

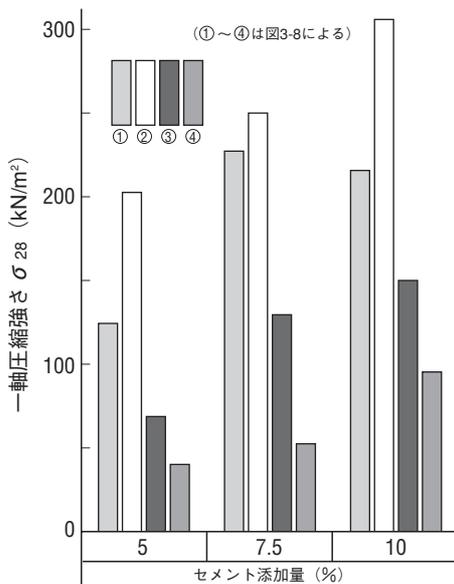


図3-9 混合条件および養生条件の相違が固化強度に及ぼす影響

3-2-4 処理土の養生温度

セメント系固化材は、気温の高いとき水和反応が活発になり、温度が低くなるに従って緩慢になることは普通ポルトランドセメントと同様であり、 0°C 以下になると強度の発現は期待できない。セメント系固化材による安定処理土の養生温度と一軸圧縮強さの関係の一例を表3-2に示す。

養生温度が 5°C のときの強さおよび標準養生温度 20°C のときの強さを比較すると、固化材添加率の少ない(5%以下)範囲でより影響が大きく、また、養生日数の初期(3日)において大きく影響を受ける傾向が見られる。

表3-2 セメント系固化材による改良土の養生温度と一軸圧縮強さ

固化材添加率%	強 さ 比					
	5/20°C			35/20°C		
	3日	7日	28日	3日	7日	28日
5	0.65	0.84	0.84	-	-	-
7	0.82	0.85	0.94	-	-	-
10	0.85	0.95	1.02	1.00	1.17	1.02

3-2-5 スラリーの水セメント比(w/c)

スラリーの水セメント比(w/c)によっても改良強度は異なる(図3-10参照)。w/cが大きくなると平均強度は小さくなり、変動係数が大きくなっていく。w/cを大きくしすぎると改良強度のバラツキが大きくなる。そのため実用的にw/c=1.0を用いることが多い。また、処理土の含水比も改良体の強度発現に大きな影響を及ぼすが、含水比が高いと強度発現が低くなるともいえる。

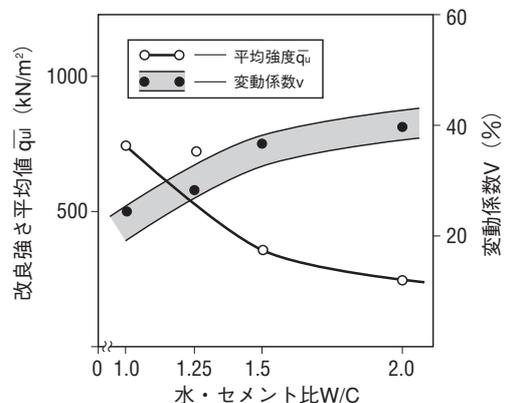


図3-10 w/cと改良土の平均強度、変動係数の関係

3-3 固化処理土の強度と他の指数との関係

3-3-1 一軸圧縮強さと曲げ引張強さ

一軸圧縮強さ q_u と曲げ引張強さ σ_b の関係を図3-11に示す。 σ_b は q_u の0.33~0.75倍程度である。

3-3-2 一軸圧縮強さと変形係数

図3-12に処理地盤のサンプリング試料による q_{uf} と変形係数 E_{50} の関係を示した。両者の関係は、ほぼ $E_{50} = 50 \sim 150q_u$ に分布しているが、 $E_{50} < 50q_u$ となるデータもいくつかみられる。一般にセメント系固化材による改良土の例をみると、粘性土地盤を中心とした深層混合改良土(スラリー系)の例では $E_{50} = 400 \sim 600q_u$ 、また粉体系では $E_{50} = 100q_u$ 等が報告されている。どちらも室内配合供試体のデータであり、単純に比較はできないが、今回の処理土の変形係数は、深層混合処理のデータに比べて小さい値となっており、高含水比の軟弱土を対象とした処理土の特徴と考えられる。

3-3-3 一軸圧縮強さとコーン指数

図3-13はFAM工法で処理した処理杭体のサンプリング試料による一軸圧縮強さ q_{uf} と、同一処理杭体で実施した q_c との関係を示したものである。各々の値は同一深度で比較するため、一軸圧縮試験用供試体高さ15cm間の q_c 値を平均し、その供試体深度における q_{uf} 値と対比して評価した。

水上からの貫入試験による測定深度の誤差や処理杭体強度のばらつき等があり、両者の関係はかなりばらついているものの、回帰分析の結果、

$$q_{uf} = \frac{1}{9} q_c \text{ (相関係数: 0.77)}$$

の関係が得られ、概ね $q_c = 10 q_{uf}$ と考えて良さそうである。

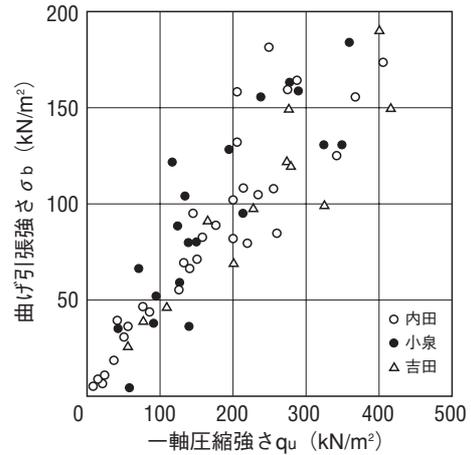


図3-11 一軸圧縮強さと曲げ引張強さの関係

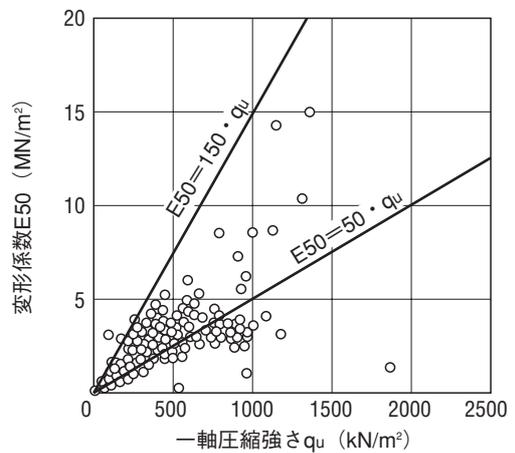


図3-12 一軸圧縮強さと変形係数の関係 (大阪正蓮寺川の例)

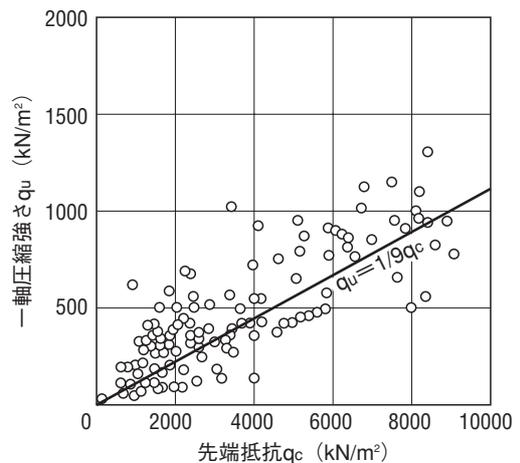


図3-13 qcとqufの関係 (大阪正蓮寺川の例)

3-3-4 処理土の長期強度

セメントを用いて改良した地盤の強度は、セメント中の水和生成物とポゾラン反応によって得られ、原理的には超長期材令においても安定した強さが保たれる。図3-14は軟弱な浚渫土を改良したものの一例である。

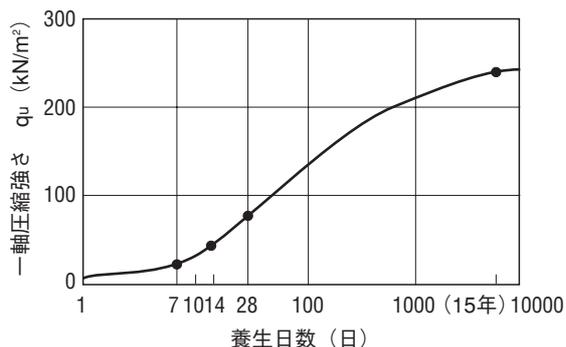


図3-14 改良土の長期強度の例

3-3-5 処理土の有効利用

軟弱土は、固化処理することによって再利用することができる。

例えば、「道路土工指針」等に従って適用すれば、埋戻しや裏込めあるいは道路用盛土に使用が可能である。固化処理を行った軟弱土を再利用する場合は、搬出時に砕いたうえ、再利用現場で締固めて(転圧)使用することが多い。

図3-15に湖沼ヘドロの再転圧による強度発現の室内配合試験結果例を示す。これは、湖沼ヘドロ(砂分13%、シルト分53%、粘土分34%)の含水比を300%、500%に調整したものを、地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」に基づき作製した試料の一軸圧縮試験結果、また同様に固化処理した試料を3日、7日養生後、「土質試験のため乱した試料の調整法」により調整・突き固め成形した供試体を再養生したものの一軸圧縮強さ測定例である。

用途により制約はあるが、この例からもわかるように軟弱土は固化処理をすることによって再利用が可能となる。

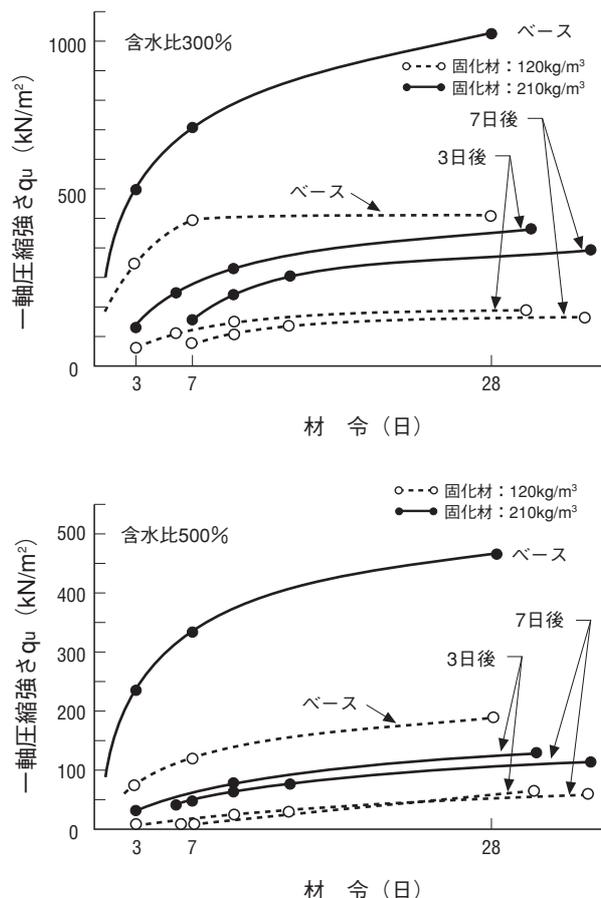


図3-15 湖沼ヘドロの再転圧による強度発現例

3-4 固化処理土の化学的特性

軟弱土固化処理の実施に伴う対象土の化学的特性の改善効果には、主として次の3点がある。

- ① 対象土中の有害物質の固定効果
- ② 対象土の有害細菌類、BOD、COD、リン分などの水質汚濁物質の除去・低減効果
- ③ 悪臭の防止ないし低減効果

3-4-1 対象土中の有害物質の固定効果(無害化)

対象土の重金属イオン含有量が比較的低い場合、一般に水酸化物沈殿効果として知られている有害物の固定効果は、石灰類やセメント類に共通して以下のようなものである。

セメント系固化材は、水と反応して水和物を生成する際、解離によって液相中にCa²⁺イオンと共

にOH⁻イオンが溶出する。水中に水酸イオン〔OH⁻〕が増大すると、液相が強いアルカリ性(pH=12~13)を呈し水中に溶存している金属イオン〔M⁺〕は、M⁺+OH⁻→MOHの反応によって、水酸化物を生成して沈殿する。このようにして生成した水酸化物は溶解度が低いため、液相中に溶け出す金属イオンの濃度は大幅に低減して無害化される。なお、セメント系固化材の固定効果を期待とおりに発揮するためには、十分な強度をもつ固化体とすることが必要である。

また、問題点としてアルミン酸カルシウム塩水和物は炭酸化作用によって分解される傾向があるので、処理土は転圧等によってしっかり締固め、湿潤状態に保つことに留意する必要がある。このような処理土は、物理的・化学的に信頼度の高い安定性を長期間保つことができる。

3-4-2 対象土中の有害細菌類、BOD、COD、リン分などの水質汚濁物質の除去・低減効果

この効果も石灰類と共通した効果であって、pH12に及ぶ高いアルカリ性の雰囲気の中で多くの細菌類は死滅する。例えば、サルモネラ菌はpH11のとき2時間で消滅する。

BOD、COD等の汚濁物質にかかわる指標値もカルシウムによるアルカリによって大幅に低減できる。石灰分〔Ca(OH)₂〕の解離によって生ずるアルカリ性で、pH10までにBODは60%除去されたとする報告がある。

リンPの除去は、特に淡水系へドロについて問題となる。Pはいろいろな形で存在するが、大部分は正リン酸塩MH₂PO₄、MHPO₄、MPO₄である。またポリリン酸塩類があり、これらは洗剤のビルダーとして用いられ、河川汚染や湖沼富栄養化・赤潮の原因となる。リン酸塩類は、無機・有機を問わず時間の経過と共に加水分解して、正リン酸塩になる。この場合、アルカリ金属との化合物NaH₂PO₄、KH₂PO₄は水に易溶性であるが、カルシウム、マグネシウムなどのアルカリ土類金属とは、CaHPO₄、MgHPO₄などの正リン酸塩を生

成し、これらは難溶性であるため、安全に固定・除去される。対象土中に含まれているリン酸根H₂PO₄は、可溶性塩が液相中に解離して生じたものであるが、これにCa²⁺が添加されれば、下式によりカルシウム・ヒドロキシ・アパタイトとなって沈殿し、再び溶け出すことはない。



図3-16に廃液中のカルシウム濃度と残留リン濃度の関係を示す。

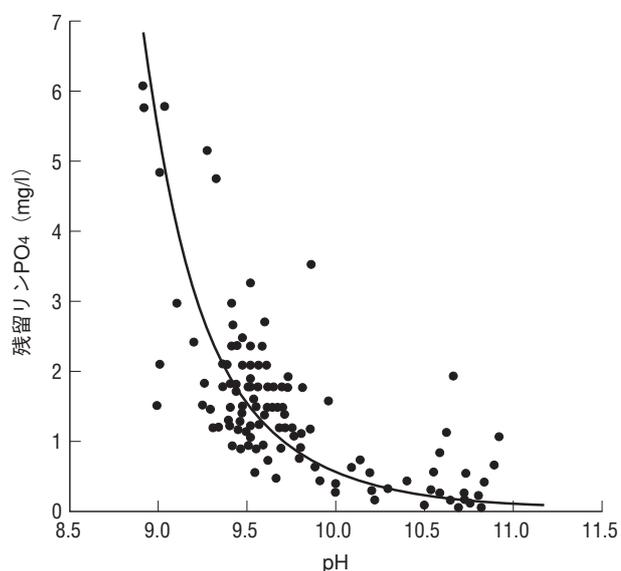


図3-16 廃液中の残留リンとpHとの関係

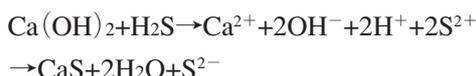
3-4-3 悪臭の防止ないし低減効果

軟弱土(汚泥)は類型別にそれぞれ特有の臭気があるが、その原因は主として対象土中の細菌の作用によって有機物が嫌氣的に分解され、硫化水素、メルカプタン類などのイオウ化合物のガスを発生するためである。セメント系固化材によって固化する過程では、カルシウムによるアルカリ化によってpH12程度になることにより、悪臭物質のうち最も多量に発生する硫化水素は、下式によって硫化カルシウムを生じ、pH9以上では全く発生しなくなる。

軟弱土(汚泥)の液相中でのH₂Sの解離



石灰の作用



この間の硫化物—pH平衡関係を図3-17に示す。

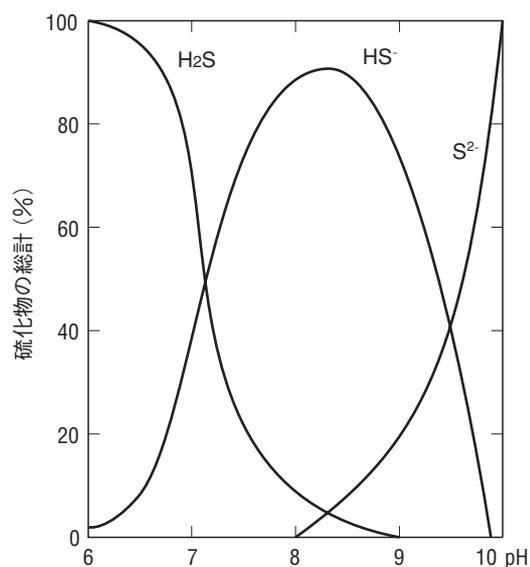


図3-17 pH—硫化物(H₂S)平衡

【参考文献】

- 1)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」, 第二版、技報堂(1994)
- 2)江原 武、他：阪神道路公団, 「正蓮寺川工区におけるヘドロ改良について」, 第1回地盤改良シンポジウム発表論文集、日本材料学会、平成6年6月、pp47
- 3)芳沢秀明、細谷芳巳、山田哲司、奥村良介、須藤先二：「改良土の品質に影響を与える施工要因について」、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、平成8年2月、pp83
- 4)細谷芳巳、木幡行宏、日比義彦、牧原依夫、奈須徹夫、萩野拓哉：「セメント系改良材による現場改良土の品質評価」セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、平成8年2月、pp45
- 5)馬場先亮一、鈴木健夫、川村政史、寺師昌明、前川淳、深沢栄造：「安定処理土の強度に及ぼす影響因子」、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、平成8年2月、pp21
- 6)山田哲司、中沢重一、新田喜宣、中村幾夫：「セメント系固化材による浅層改良地盤の特性について」、第1回地盤改良シンポジウム発表論文集、日本材料学会、平成6年6月、pp44
- 7)建設産業調査会編：「コンクリート工事ハンドブック」 1996
- 8)土木学会編：「土木工学ハンドブック」 1989