

地盤改良におけるセメント硬化不良対策と現場管理手法

安藤ハザマ（正会員） ○根岸 敦規
 足立 有史 ゲン ホン ツ 山田 実
 三菱マテリアル(株) 北山 博之

1. はじめに

かん止堤とは鉱さい等を安定的に集積するための堤防の役目を果たす構築物である。本検討対象は、砂を主たる築堤材料とする土かん止堤に該当する。検討対象としたかん止堤には 16 世紀から 20 世紀にかけて主に銀山として操業した日本有数の鉱山から集積した捨石および鉱さいが埋め立てられている。主な鉱石鉱物は黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱で、銅、亜鉛、カドミウム、鉛、錫、タングステン、ヒ素などの重金属が含有されている¹⁾。なお、鉱さい中には、選鉱で採取できなかったこれらの重金属が存在し、鉱山休止から長期間が経過した後の現在でも、浸透水には、基準を超える重金属が含まれるため、排水処理施設が稼働している。

かん止堤および集積場の安定度は、「鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針(内規)」²⁾、および「捨石-鉱さいたい積場建設基準及び解説」³⁾において、以下の基準を満足する必要がある。



写真-1 硬化不良改良土

- ① レベル 1 地震動に対して、すべり安全率 1.2 以上
- ② レベル 2 地震動に対して、下流の重要構造物に重大な被害を生じさせないこと。
- ③ 被害防止措置として滑動量を抑制する場合には、滑動量 0.5m 未満を満足すること。

図-1 に地盤改良対象場所の地質断面を示す。上記の基準を満足させるために、図-1 に示すように当該地盤において一軸圧縮強さを、原地盤強度 (100kN/m² 未満) から改良箇所により上段部② : 1,000 kN/m² 以上、下段部 (上部) ① : 800 kN/m² 以上、下段部 (下部) ③ : 2,000 kN/m² 以上にする必要があったため、セメントによる改良を実施することとした。当該地盤に対するセメント添加量を決定するために、改良対象土を用い、配合試験を実施したところ、下段部 (上部) ① の砂 (設計強度 800 kN/m²) において、写真-1 に示すように硬化不良 (材齢 28 日の一軸圧縮強さの平均 : 27.3 kN/m²) が認められた。今回、この硬化不良原因の推定と硬化不良土に対する改良手法、および現場での品質管理手法を検討したので、報告する。

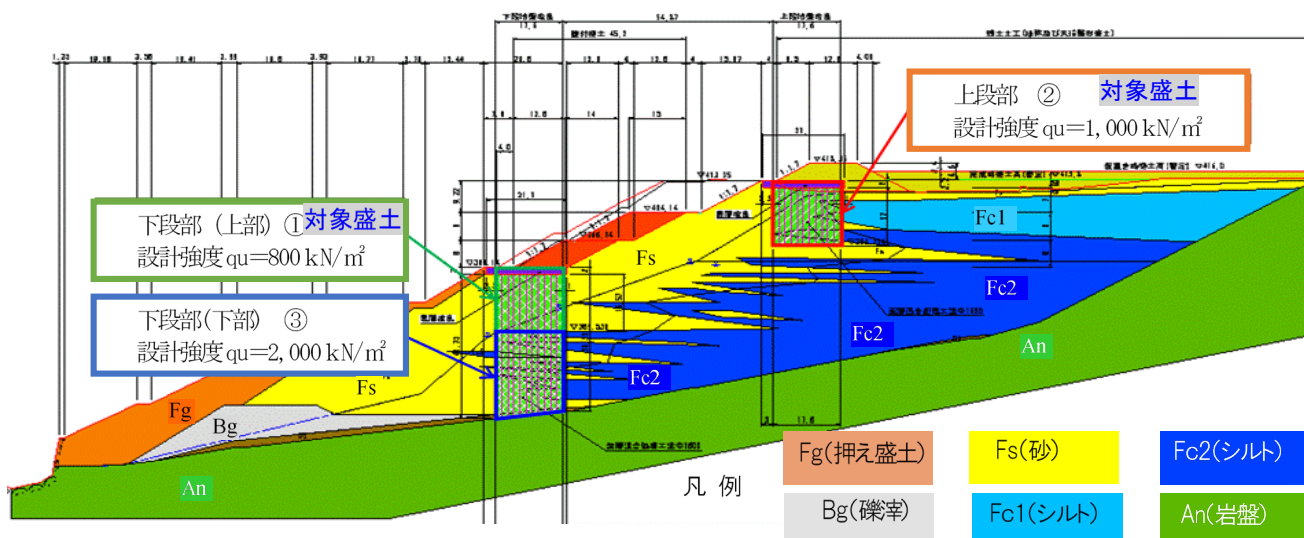


図-1 かん止堤地盤改良対象地質断面(下段部(上部)①, 上段部②が今回検討対象土)

キーワード 地盤改良, 重金属, セメント硬化不良, 不溶化, 品質管理

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ技術研究所 先端・環境研究部 TEL 029-858-8815

2. 硬化不良の原因

(1) セメントの硬化阻害要因

コンクリート硬化遅延剤の既往の研究^{4)~8)}から、セメント改良土の硬化不良の原因として考えられるのは、無機物である銅、鉛、亜鉛などの重金属イオンと有機物である砂糖に代表される多糖類の存在である。

セメントの初期の硬化反応には少量添加されている石膏が寄与しており、(1)式のようにアルミネート相(C₃A)と石膏との反応により、水和反応と同時にアルミネート相の表面に析出する針状結晶のエトリンガイトによって硬化が進行する。また、セメント中のエーライト(C₃S)、ビーライト(C₂S)は、(2)式、(3)式に示すように、水和物のほかに水酸化カルシウムを生成する。

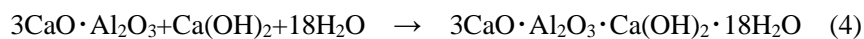
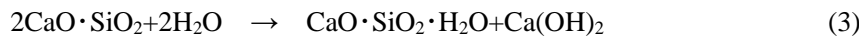
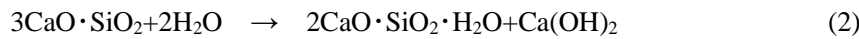
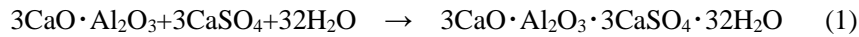


表-1 に各種金属の硫酸塩、水酸化物の溶解度を示す。

鉛は硫酸イオンと反応して、石膏より溶解度の小さい不溶性の硫酸鉛を生成し、(1)式で示される初期硬化に必要な硫酸イオンを消費するため、硬化不良を引き起こす原因となる。銅、鉛、亜鉛は水酸イオンと反応し、水酸化カルシウムより溶解度の小さい化合物を生成する。その際、(4)式に示されるようにアルミネート相(C₃A)の反応に必要な水酸化カルシウムの生成を阻害するために、硬化を遅らせる作用があると考えられる。一方、多糖類の場合は、Ca(OH)₂との反応で生じるカルシウム錯塩の存在において硬化不良が生じる。これは、硬化過程で必要となる水酸イオンの供給が断たれるためと考えられる。セメントと亜鉛の反応は、鉛と異なり、硫酸イオンと不溶性の化合物は生じないが、水酸化物として不溶化合物を生成する。土中の亜鉛がすべて水酸化物に置き換わると、水酸イオンが関与するセメントの水和反応は進行することになる。この現象のみ生じる場合は、亜鉛による硬化不良は考えられるが、指定材齢(28日)における硬化不良の原因とは考えにくいので、別の硬化阻害機構の存在が疑われた。

(2) 亜鉛によるセメントの硬化阻害

図-2 に銅、鉛、亜鉛の pH による溶解度曲線を示す。銅はアルカリ側では難溶性の水酸化物で存在する一方、鉛と亜鉛は pH=10 付近で難溶性の水酸化物が生じ、溶解度は最小となるが、さらに pH が上昇すると再溶解し、鉛酸イオン、亜鉛酸イオンで存在することがわかる。これは鉛、亜鉛が両性金属のため、その性質によるものである。

表-1 各種金属の溶解度

金属	溶解度 (g/100g 水)	
	硫酸塩	水酸化物
カルシウム	0.255	0.173
銅	32.0	5.20×10^{-4}
鉛	3.84×10^{-3}	1.72×10^{-6}
亜鉛	53.8	1.62×10^{-4}

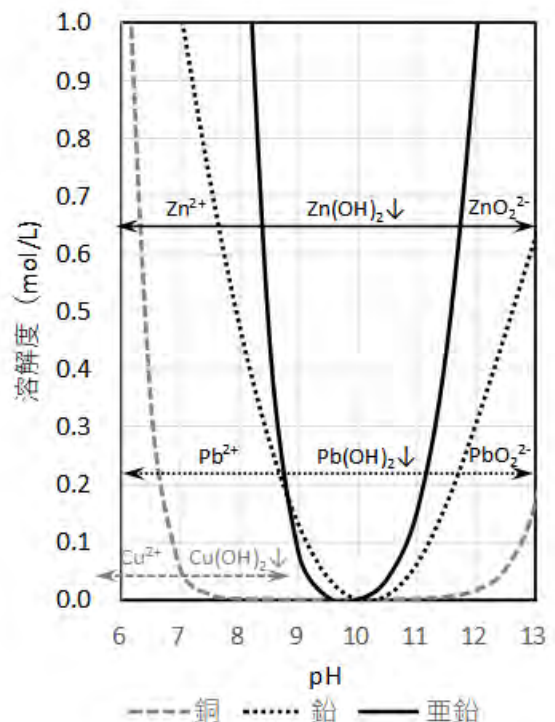
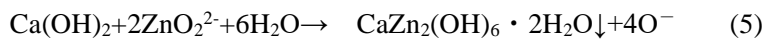


図-2 各種金属の溶解度曲線

セメントの水和反応液中の pH は生成する水酸化物により、一般的に 12~13 の高アルカリ側に位置する。表-2 に検討対象土である硬化不良を起こした対象土下段部（上部）①（砂質）（以下①（砂質）と記す）、上段部②（砂質）（以下②（砂質）と記す）の物性を示す。図-1 における改良対象①（砂質）、②（砂質）、下段部（下部）③（シルト）（以下③（シルト）と記す）の盛土中の銅、鉛、亜鉛の含有率（酸化物換算）を表-3 に、溶出量分析結果を表-4 に示す。表-3, 4 に示すように、硬化に影響を与える銅、鉛、亜鉛は硬化不良を起こした対象土①（砂質）において、含有量の合計が 1% を超え、また、亜鉛の溶出量が 0.5mg/L を上回っていた。

表-5 に対象土に対し実施したセメント改良試験において 7 日後の各種金属の溶出量分析結果を示す。表-5 に示すように硬化不良を起こした対象土①（砂質）において、亜鉛の溶出量が多くなっていることが判明した。セメントが硬化する領域（pH=12）では図-2 から、鉛酸イオンが約 0.3 mol/L、亜鉛酸イオンが約 1.0 mol/L と多く存在するため、この亜鉛酸イオンがセメントの硬化に影響を及ぼしていることが示唆された。

セメント硬化過程で生じた珪酸カルシウム水和物（CSH ゲル）と亜鉛酸イオン（ ZnO_2^{2-} ）は(5)式のように CSH ゲルの表面に付着した水酸化カルシウム（ $Ca(OH)_2$ ）と反応して亜鉛酸カルシウム 2 水和物（ $CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$ ）を生じる。



生成した亜鉛酸カルシウム 2 水和物は水に不溶でかつ、(4)式に示すように、アルカリ刺激によりセメントの硬化を促進させる水酸化カルシウムの生成を阻害する。さらに、亜鉛酸カルシウム 2 水和物は、初期のセメントの水和反応で生成された CSH の表面を覆うように生成されるため、それ以降の水和反応が妨げられると考えられる。

以上のことから、今回の硬化不良の原因は、土に含有している亜鉛イオンとアルカリとの反応によって生じた亜鉛酸カルシウム 2 水和物が、セメントの硬化を妨げたためであると判断した。

3. 亜鉛による硬化不良の対策検討

セメント改良による硬化不良土において、その主原因は改良対象土の亜鉛と判明したので、硬化不良原因を除去するために亜鉛の溶出量低減薬剤の検討を実施した。

(1) 亜鉛の溶出量低減薬剤の検討

亜鉛のセメントとの反応を抑制するために、セメントと亜鉛が反応する前に亜鉛の溶出を抑制すれば、セメント硬化に寄与する水酸化カルシウムの生成が促進されることになる。まず市販されている重金属不溶化剤を用いて、その有効性を確認した。次に一般的な土と異なり、アルカリ状態になるセメント改良土中にお

表-2 改良対象土の物性

対象土	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	粒度組成 (%)			pH	強熱減量 (%)
				礫	砂	細砂		
①(砂質)	18.8	2.061	1.735	0	77	23	6.8	3.08
②(砂質)	21.2	2.072	1.710	1	81	18	6.8	2.91

表-3 改良対象土の各種金属の酸化物含有量

対象土	含有率（酸化物換算） (%)			
	銅	鉛	亜鉛	合計
①（砂質）	0.238	0.107	0.690	1.035
②（砂質）	0.222	0.053	0.414	0.689
③（シルト）	0.118	0.088	0.350	0.556

表-4 改良対象土からの各種金属の溶出量

対象土	溶出量 (mg/L)			pH
	銅	鉛	亜鉛	
①（砂質）	0.008	0.008	0.555	7.48
②（砂質）	0.002	0.002	0.528	7.71
③（シルト）	N.D.	0.005	N.D.	7.72

表-5 改良した土からの各種金属の溶出量(σ7)

対象土	溶出量 (mg/L)			pH
	銅	鉛	亜鉛	
①（砂質）	0.012	0.224	0.554	11.90
②（砂質）	0.007	0.148	0.101	11.96
③（シルト）	0.007	0.338	N.D.	11.97

いても亜鉛と反応して不溶性の硫化亜鉛を生成する薬剤として、硫化水素ナトリウム (NaHS) を用いて、その有効性を確認した。その際、硫化水素ナトリウム (NaHS) として、取扱いのし易さや、経済性も勘案し、フレーク状、液体状の硫化水素ナトリウム (NaHS) 薬剤を用いて不溶化効果の試験を実施した。

表-6 に溶出量低減薬剤として検討した不溶化剤の物性を示す。

a) 試験方法

表-7 に市販の薬剤に対する不溶化試験の配合を示す。不溶化剤は改良対象土重量比で 2.0% 添加、セメントは高炉 B 種を用い、300kg/m³ 添加、水セメント比は 100% とした。

b) 試験結果

試験結果を表-8 に示す。市販 A 薬剤では、無添加と同様に硬化不良が確認された。市販 B 薬剤では材齢 7 日で若干の硬化不良は認められたものの、材齢 28 日では硬化が確認された。市販 A 薬剤に含まれる高分子系薬剤の主成分はジエチルジチオカルバミン酸塩であり、その効果は pH に依存することが文献⁹⁾に述べられている。すなわち亜鉛と結合した薬剤の溶解度は、pH=8 で最小になり、pH の上昇と共に増大するため、セメント改良土のように高 pH 領域では十分に不溶化されず、硬化不良になったと考えられる。

市販 B 薬剤にもジエチルジチオカルバミン酸塩が含まれており、長期的な安定性に問題が生じる恐れがあるため、アルカリ領域でも亜鉛の不溶化を発揮する硫化水素ナトリウムに着目して検討することとした。

(2) 亜鉛の硫化物による溶出量低減の検討

表-6 に示したように、重金属の硫化物による固定化に対する不溶化剤として主に用いられる薬剤は、硫化水素ナトリウム (NaHS) である。硫化水素ナトリウムはフレーク (含有量 75%) と水溶液 (含有量 25%, 30%) として市販されている。フレーク状の硫化水素ナトリウムは、土への添加に際し、水を加えて水溶液とする必要があるのに対して、水溶液の硫化水素ナトリウムは、現場で取扱い易いため、本検討には硫化水素ナトリウム 25% 溶液を用いることとした。最適な添加量を決定するために、セメント量と硫化水素ナトリウムの添加量を変化させて試験を実施した。

a) 試験方法

本試験では (1) と同様に表-5 に示した物性の土を用いた。表-9 に本試験における配合を示す。原土以外の水セメント比は 100% とした。硫化水素ナトリウムは、25% 水溶液の製品を用い、混練水は現場で実際に使用される沢水を用いた。混練時には、硫化水素ナトリウムと空気の反応により有毒な硫化水素ガスが生じる恐れがあるので、ガス検知管を用い、作業環境のモニタリングを実施した。

表-6 亜鉛不溶化剤の物性

不溶化剤	主成分	状態	pH	粘度(mPa・s)
市販 A(10%)	高分子系	水溶液	11.5	8.7
市販 B(1%)	〃+NaHS	水溶液	11.3	23
NaHS(75%)	NaHS	フレーク	強塩基性	—
NaHS(25,30%)	NaHS	水溶液	10 以上	6

表-7 不溶化試験の配合

不溶化剤	添加量(%)	セメント量(kg/m ³)	水(kg/m ³)
無添加	0	300	300
市販 A	2.0	300	300
市販 B	2.0	300	300

表-8 市販薬剤の不溶化試験結果

不溶化剤	pH		亜鉛溶出量(mg/L)		供試体の状態※ (材齢 7→28)
	σ7	σ28	σ7	σ28	
無添加	11.90	11.97	0.554	0.176	×→×
市販 A	11.92	12.00	0.743	0.514	×→×
市販 B	11.94	11.81	1.028	0.076	△→○

※供試体の状態の凡例：○:硬化、△:やや硬化、×:硬化不良

表-9 NaHS による不溶化試験の配合

試験体	NaHS 添加量 (wt%)	セメント添加量 (kg/m ³)	測定項目※
原土	0	0	XRF,AA
無添加	0	200	〃,強度
0.1-1	0.1	100	〃,強度
0.1-2	0.1	200	〃,強度
0.1-3	0.1	300	〃,強度
0.2-1	0.2	100	〃,強度
0.2-2	0.2	200	〃,強度
0.2-3	0.2	300	〃,強度
0.3-1	0.3	100	〃,強度
0.3-2	0.3	200	〃,強度
0.3-3	0.3	300	〃,強度

※測定項目凡例：XRF:含有量測定、AA:溶出量測定

b) 試験結果

表-10 に試験結果を示す。目標強度を上回った配合と材齢に青色ハッチングを施している。亜鉛の溶出量に関して、原土およびセメントのみでの改良土においては、それぞれ 0.425 mg/L, 0.416 mg/L と硬化不良の指標の 0.5 mg/L に近い値であった。室内試験の材齢 28 日 (σ_{28}) の目標強度を 1,600kN/m² に設定したが、これは安全率を 2 として改良対象土の設計強度の 800kN/m² を 2 倍にしたものである。目標強度を満足したケースは、表-9 中の 0.2-3, 0.3-2, 0.3-3 の試験体(赤太線囲み)のみであった。また、180 日以降に目標強度に達したのは、0.2-2, 0.3-1 の試験体(青点線囲み)のみであった。表の最右欄に示したように、それ以外の配合においては、強度の若干の伸びは認められるが、360 日を経過しても、目標強度の 13.3~21.1%程度しか発現しなかった。

経済性に関しては配合試験結果から得られた薬剤の添加量と排出土の産業廃棄物処理費用より検討した。材齢 28 日において、目標強度を満足した 3 配合(試験体 0.2-3, 0.3-2, 0.3-3)において、セメント添加量とそれに伴う産業廃棄物の排土量などを考慮して、硫化水素ナトリウムの添加量を 0.3% に設定した。またセメント量は、図-3 に示すように、目標強度を満足する添加量 100kg/m³~200 kg/m³ の比例配分で求め、得られた 108kg/m³ から余裕を見て安全側で考えて、120kg/m³ の配合で改良することを提案した。なお、混練時の作業環境を確認するために実施した硫化水素ガス濃度測定は、作業環境基準の 10ppm 未満を満足する結果であった。

以上の結果を鑑み、亜鉛の不溶化剤については、現場で取扱い易い硫化水素ナトリウム水溶液をもちいることとし、セメントへは混練水と同時に添加して改良することとした。

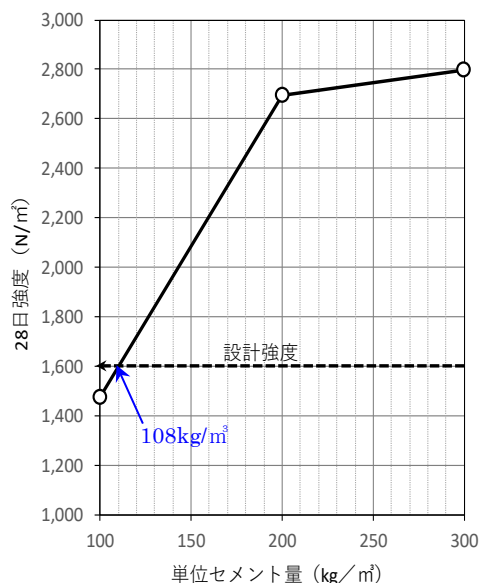


図-3 NaHS 0.3%添加時の
単位セメント量と 28 日強度の関係

表-10 硫化水素ナトリウムによる不溶化試験結果

試験体	NaHS 添加量 (wt%)	セメント 添加量 (kg/m ³)	亜鉛 含有量 (%)	溶出量(mg/L)		一軸圧縮強度 (kN/m ²) (N=3 の平均値)					σ360 での 目標強度 比(%)	
				σ28	σ360	σ7	σ28	σ90	σ180	σ360		
原土	0	0	2.11	0.425(初期値)		-	-	-	-	-	-	-
無添加	0	200	2.06	0.416	-	39.2	74.4	-	-	-	-	-
0.1-1	0.1	100	2.09	0.210	0.066	61.4	84.9	128	160	260	16.3	
0.1-2	0.1	200	2.04	0.116	0.057	58.4	99.8	147	171	213	13.3	
0.1-3	0.1	300	1.78	0.091	0.107	35.0	85.8	120	155	271	16.9	
0.2-1	0.2	100	2.32	0.104	0.035	136	194	225	230	338	21.1	
0.2-2	0.2	200	2.06	0.038	0.046	189	445	934	3,008	3,235	202.2	
0.2-3	0.2	300	2.17	0.072	0.051	286	4,060	5,673	5,759	9,684	605.3	
0.3-1	0.3	100	2.19	0.189	0.038	446	1,477	1,592	2,007	2,213	138.3	
0.3-2	0.3	200	2.23	0.105	0.077	1,053	2,697	2,906	3,711	4,071	254.4	
0.3-3	0.3	300	2.00	0.084	0.083	1,169	2,798	3,196	4,071	7,641	477.6	

凡例 ■ : 目標強度以上, □ : 材齢 28 日で目標強度以上, □ : 材齢 180 日で目標強度以上

硬化不良のメカニズムと硫化水素ナトリウムによる不溶化剤による硬化不良の抑制効果の概要を図-4 に示す。

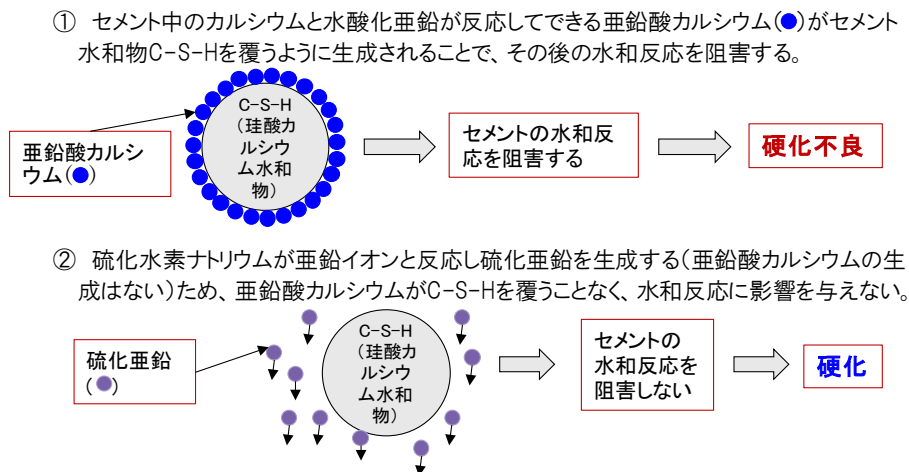


図-4 硬化不良のメカニズムと不溶化剤の効果

4. 現場品質管理試験 (上段部②地盤改良時に実施)

本工事で使用される地盤改良機の概要を図-5 に示す。本現場で地盤改良に用いられる深層混合改良掘削機は地盤への改良材の投入・混合に伴い機械の掘削軸に螺旋状の排出翼が取り付けられており、掘削深度に対応した改良土の一部が、迅速に排出できる機構となっている。この余剰の改良土(以下、「盛上り土」と称する)、中の硫化水素ナトリウム添加量とセメント添加量を現場で把握できれば、改良体の品質を推定することが可能となると考え、現場での簡易な品質管理手法を検討した。施工が上段から開始されたため、本検討では、硬化不良の検討土壌と異なる上段部②(砂)を用いたが、対象土の物性は表-5 に示したように、下段部(上部)①とはほぼ同じであった。上段部での改良本数は 814 本であり、1 日あたり 8 本改良した。盛上り土の強度測定用のサンプリングは毎日 1 箇所を実施し、品質管理手法の検討は 33 か所の盛上り土をもちいて実施した。

(1) 測定方法

図-6 に試験方法のフローを示す。サンプリングは 1 日①所定の深さ(約 15m)まで掘削し、スラリー状の盛上り土をサンプリングする。②サンプリングした盛上り土はブフナーロートで No.2 ろ紙を用いて吸引ろ過(粗ろ過)する。③ろ液を、45 μ m メンブランフィルターを装着したシリンジに導き、ろ過する(ほぼ透明な液になる)。このろ液を 100 倍に希釈して、各種試験に供することとした。

(2) pH 測定

盛上り土の pH は、改良土中のセメント量と相関があり、改

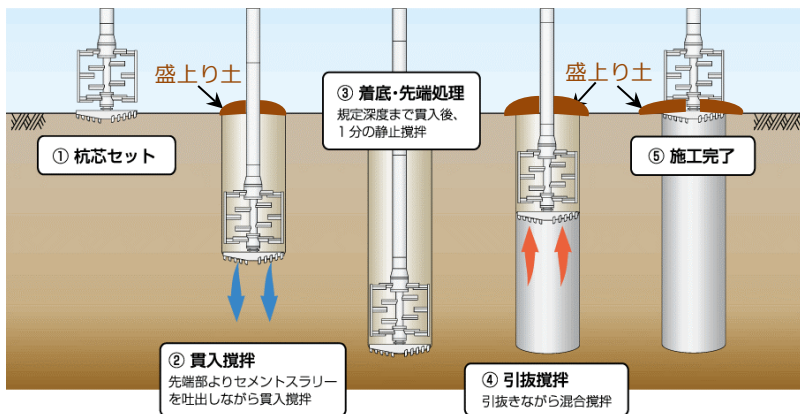


図-5 地盤改良機の掘進概要(DH508 クラス ϕ 1,600mm)

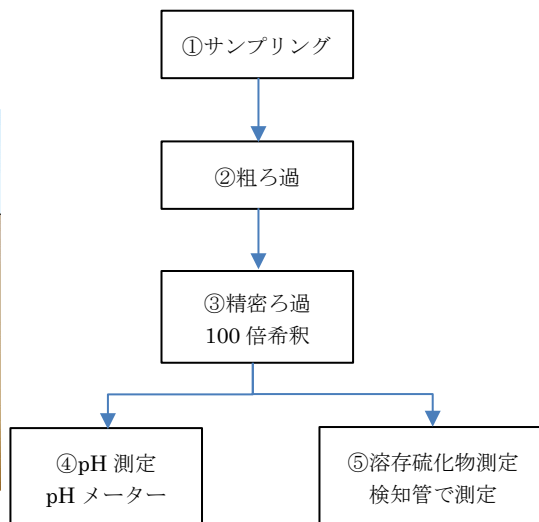


図-6 現場簡易試験フロー

良土の強度を推定できると考えられる。図-7 に地盤に注入する前の改良材の pH と盛上り土の pH の関係を示す。盛上り土の pH は改良材の pH より小さくなっているが、これは、地盤中の水分および、土の緩衝作用によるものと考えられる。

(3) 硫化物濃度測定

盛上り土中の硫化物濃度は、改良土中の重金属との反応量を反映しているため、改良材の硫化物濃度と盛上り土中の硫化物濃度の差が、重金属との反応で消費されたと考えられる。図-8 に地盤中で消費された硫化物減少率と盛上り土中の亜鉛溶出量の関係を示す。明確な相関は認められないが、硫化水素ナトリウムによる亜鉛の不溶化により、セメントの硬化を阻害する亜鉛の溶出量が硬化不良を起こす指標として設定した 0.5mg/L を大幅に下回り、0.0~0.2mg/L 程度に減少していることが確認できた。

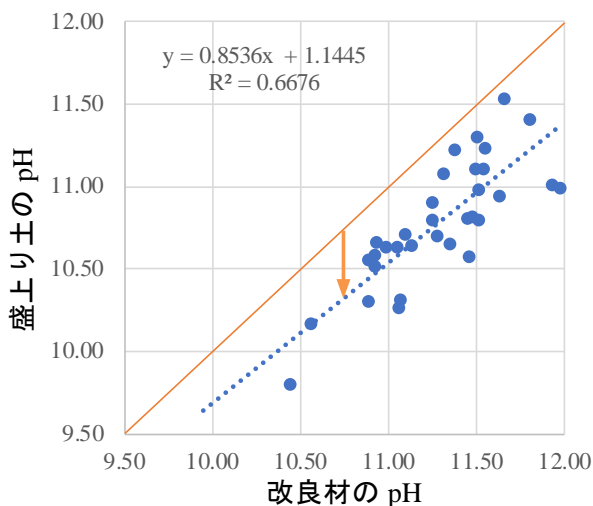


図-7 改良材と盛上り土の pH

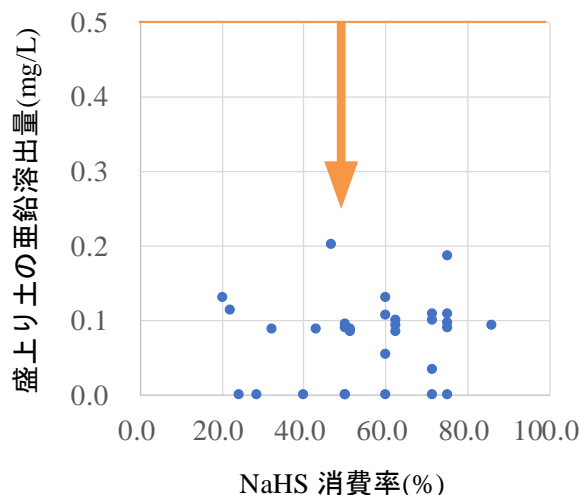


図-8 硫化水素ナトリウム消費率と盛上り土の亜鉛溶出量

(4) 強度試験

図-9 に施工後の改良土の強度を確認するためにサンプリングしたコアの圧縮強度試験結果を示す。図中には改良工事時の盛上り土でサンプリングした試験体の 28 日強度も示す。ただし、改良箇所 D-31、F-69 はそれぞれ、深さ 10m、9m における盛上り土のデータを、改良箇所 J-7、C56、J20 は盛上り土のデータを取得し

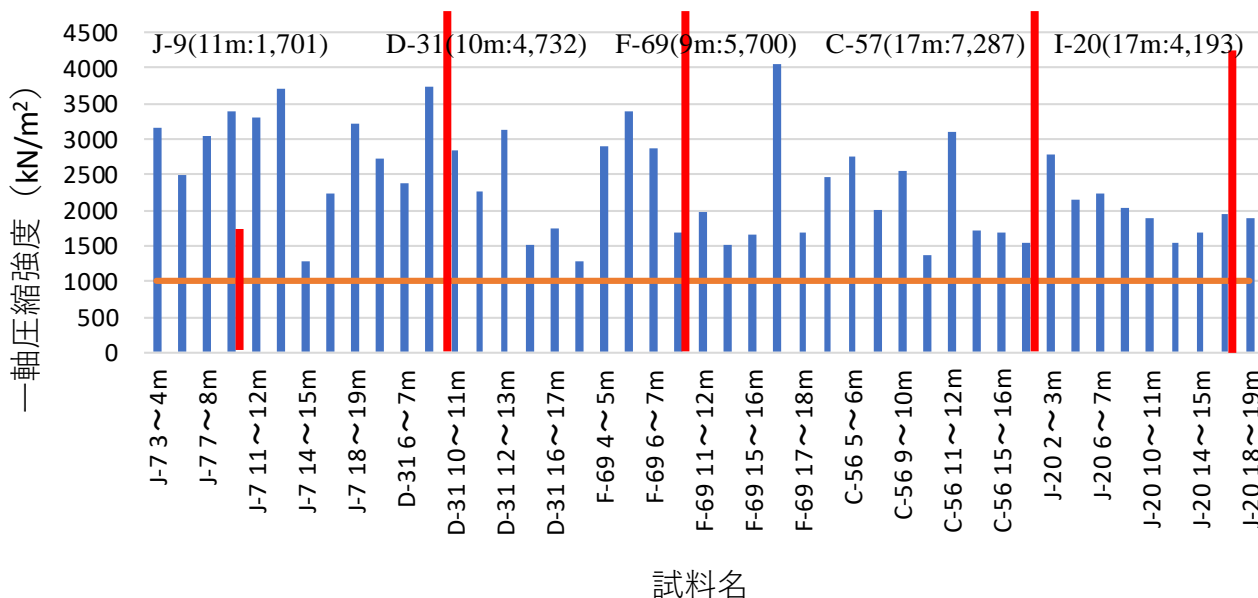


図-9 盛上り土とサンプリングコア強度(青：コア強度，赤：盛上り土強度，橙線：設計強度)

ていなかったため、5m 以内近傍の改良箇所、それぞれ J-9(11m), C-57(17m), I20(17m) のデータを示した。すべての地点で、コア強度も盛上り土強度も設計値 1,000kN/m² を満足する結果となった。盛上り土の強度が、改良体からサンプリングしたコアの強度を上回っているが、これは、盛上り土にはセメントペーストなど微粒分が多く含まれ、試験室内での標準養生後に強度試験を実施したためと考えられる。

5. あとがき

セメントが硬化する領域の pH(12~13) で存在する亜鉛酸イオンがセメントの硬化に影響を及ぼしていることが示唆された。セメント固化で生じた珪酸カルシウム水和物 (CSH) と亜鉛酸イオンは CSH の表面に付着した水酸化カルシウムと反応して亜鉛酸カルシウムを生じ、セメントの水和反応で生成された CSH の表面を覆うように生成されるため、それ以降の水和反応が妨げられ、硬化不良を引き起こすことが明らかとなった。対策として改良材に添加した硫化水素ナトリウムにより、亜鉛イオンは硫化亜鉛として不溶化されてセメントの硬化が進行した。また、改良体の品質は、盛上り土の pH, 硫化物濃度, 圧縮強度を測定することにより把握できることが確認できた。

写真-2 に下段部地盤改良状況を示す。掘削に関しては、大深度施工の精度管理手法として、高精度で先端位置を計測可能な先端位置計測システムを開発¹⁰⁾し、現場に適用した。本計測システムを用いることで、掘削に伴う先端位置を深さ 40m で 7cm の誤差内で計測することが可能となり、出来形管理だけでなく、改良範囲を三次元的に確認することができ、地盤改良を計画通りに実施することができた。



写真-2 下段部地盤改良状況

謝 辞

本研究を進めるにあたり、宇部三菱セメント (株) 大阪土質試験室の方々には膨大な試験を実施していただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中 威, 森 洋, 佐々木 薫 : 生野鉱山の地質鉱床, 特に金銀鉱床について, 鉱山地質, Vol.21, No.106, pp.162-173, 1971
- 2) 経済産業省 : 鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針(内規), 平成 24 年 11 月
- 3) 通産省立地公害局 : 捨石-鉱さいたい積場建設基準及び解説, 昭和 57 年 12 月
- 4) 竹内徹, 長瀧重義 : 超遅延剤を用いたコンクリートの特性, コンクリート工学, Vol.37, No.11, pp.9-19, 1999
- 5) 上中一真, 斉藤忠, 藤井隆史, 綾野克紀 : モルタルの凝結に銅化合物および亜鉛化合物が与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.164-170, 2014
- 6) 中原万次郎, 笠井順一, 宮川継男, 青木繁樹, 国友義和, 門倉利夫 : ボルトランドセメントおよび焼セッコウの凝結におよぼす銅, 亜鉛, 鉛などの化合物および砂糖の影響, Gypsum & Lime, No.41, pp.25-32, 1959
- 7) Werner Lieber : Supplementary Paper II -22 The Influence of Lead and Zinc Compounds on the Hydration of Portland Cement, Proceedings of The Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement Tokyo, 1968
- 8) 下坂建一, 田中久順 : セメントの諸物性に及ぼす酸化亜鉛の影響, 宇部三菱セメント研究報告, No.6, pp.1-9, 2007
- 9) 橋本茂 : ジエチルジチオカルバミン酸による重金属処理, 全国公害研会誌, Vol.4, No.1, pp.11-16, 1979
- 10) グエン ホン ソン・足立有史・山田実・高植俊彰・小林雅人・高田守康・稲積真哉 : DCS 工法のリアルタイム位置計測管理システムの開発, 第 14 回地盤改良シンポジウム, 2020