

土の塑性指数とpHに着目した 土壌洗浄における凝集沈殿・脱水プロセス管理

赤木寛一¹・毛利光男²・田中仁志³・石田聖一⁴

¹正会員 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: akagi@waseda.jp

²正会員 清水建設株式会社エンジニアリング事業本部土壌環境本部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)
E-mail: mouri@shimz.co.jp

³清水建設株式会社エンジニアリング事業本部土壌環境本部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)
E-mail: m.tanaka@shimz.co.jp

⁴早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (現, 大成建設株式会社)

土壌洗浄技術の基本はフルイ, サイクロン, フローテーション等の分級・洗浄プロセスによって重金属や油の汚染物質を, 細粒分を主体とした濃縮残渣に分離, 濃縮することである. 分級・洗浄プロセスによって分離された細粒分は, 凝集沈殿・脱水プロセスを経て脱水ケーキ (濃縮残渣) として場外処分される. 高品質かつ経済的な土壌洗浄を行うためには, 効率的な凝集沈殿と脱水操作を行い, 濃縮残渣の重量をできるだけ低減することが必要である. このためには, 細粒分の物性に応じた凝集剤 (無機系, 有機高分子系) を選定するだけでなく, 使用する凝集剤の最適注入条件を把握することが重要である. 本研究は, 凝集沈殿プロセスの管理指標として土の塑性指数と懸濁液のpHに着目し, 細粒分懸濁液に対する凝集剤の最適注入量について実験的検討を行った.

Key Words : clay, suspension, soil washing, flocculants, plasticity index, pH

1. はじめに

土壌洗浄法は油, 重金属類などの汚染物質の多くが砂分や礫分などの粗粒分よりも細粒分 (粘土, シルト分) に付着しやすいという性質を利用して, 汚染土壌から細粒分を分離, 除去することによって土壌を浄化する技術である¹⁾. 土壌洗浄法といってもそのシステムは一定ではなく, 湿式フルイのみの洗浄システムから, 湿式フルイにサイクロン, 磁性分離機, フローテーションなどの分離プロセスを組み合わせたものまでさまざまである.

本研究で対象とした土壌洗浄プラントでは, 湿式フルイ, ハイドロサイクロン, 泡浮遊式分離機, 重力式分離機に分級・洗浄プロセスを組み合わせた洗浄システムによって, 汚染土壌中の重金属類や油の汚染物質を, 細粒分を主体とした濃縮汚染土 (脱水ケーキ) に分離, 濃縮している^{2)~5)}. これによって, 場外処分 (管理型処分場など) の対象量が汚染土壌全量 (100%) から濃縮汚染土の量 (10~30%) へ大幅に減量できるため, 低

コストの土壌処理が可能となる. 例えば, 汚染土壌の粒度構成が礫・粗砂分25%, 砂・細砂分50%, 細粒分25%の場合では, 再利用が可能な砂と粗砂の量が75%, 場外処分となる濃縮汚染土の量が25%となる.

濃縮汚染土 (脱水ケーキ) の場外処分費用は湿重量 (ton-wet) 当たりのコストで決まるため, 洗浄コストを安く抑えるためには, 脱水ケーキの水分量をできるだけ低減する必要がある. このためには, (a)汚染土壌の粒度構成と汚染物質のロードカーブ (負荷分布曲線) から最適と判断される分級点で細粒分を分級することで, 洗浄砂の品質を保ちながら濃縮汚染土量を最小限にすること, (b)脱水ケーキの湿重量が最小になるように凝集沈殿及び脱水工程の運転管理を行うことが重要である. これらの工程では, 凝集剤の種類と注入条件によってフロックの品質とスラッジの脱水効率が変化するため, 脱水ケーキの湿重量が大きく異なる場合が少なくない. このため, 添加した凝集剤の種類と注入量, 凝集沈殿槽のpH, 滞留時間に対応して得られたフロックの性状, 脱水ケーキの観察結果に基づいて試行錯誤的に凝集剤種類

や注入量などを調整しているのが現状である。

また、土壤洗浄プラントでは大量の水を使用するため、凝集沈殿及び脱水工程は含水率の低い脱水ケーキを作るだけではなく、洗浄プロセスで循環利用可能な清澄な処理水を遅滞なく作成する役割も担っている。このため、本土壌洗浄プラントでは、凝集沈殿にアニオン系高分子凝集剤を脱水工程にカチオン系高分子凝集剤を用い、基本的に無機凝集剤を使用しないことを特徴としている。

汚染土壤の粒度分布や特性は汚染サイトによってさまざまであり、同様に凝集沈殿及び脱水工程で処理される細粒分(概ね63 μm未満)も汚染サイトによってその特性がかなり異なる。汚染サイトが異なれば、細粒分スラリーの固形物含有率(%)と注入条件(pH, 凝集剤添加率)が同じであっても、凝集特性や脱水特性が大きく異なる場合が少なくない。

このような汚染土壤に含まれる細粒分の特性の違いを定量的に表すことのできる尺度が、土の液性限界や塑性指数に代表されるコンシステンシー(Consistency)指数である。細粒分の主体を構成する粒径2 μm以下の粘土粒子には、水分子の吸着水膜が存在する。吸着水膜をまとった粘土粒子を主とする細粒分の材料としての柔らかさ、硬さといった性質のことをコンシステンシー特性という。このコンシステンシー特性は、細粒分に含まれる水分量によって劇的に変化する。高含水比の細粒分懸濁液の水分量を低下させたときに、そのコンシステンシー特性が液体状から粘土細工が可能な塑性的な状態に変化する境界となる水分量(含水比)が液性限界(w_L)である。さらに水分量を低下させて、塑性的な状態から半固体的なボロボロに崩れる状態に変化する境界となる含水比が塑性限界(w_p)である。この両者の差が、塑性指数 $I_p(= w_L - w_p)$ である。塑性指数の大きな土は粘土分を多く含み、かつその粘土分は水を多く吸着する。逆に塑性指数の小さな土

は粘土分含有率が小さく、その粘土分は吸着水量の小さな土である。さらに有機質土においては、有機物含有量が増加するほど液性限界、塑性限界ともに大きくなることが報告されている⁶⁾。

日本各地の港湾地域に堆積した沖積粘土について塑性指数を調査した結果によると、塑性指数の値の範囲は10~80程度であり、東京湾や大阪湾、瀬戸内海などの内湾に面した地域の粘土の塑性指数の方が、太平洋や日本海の外洋に面した地域の粘土よりも大きい傾向がある⁶⁾。沖積粘土地盤が支配的な日本の平野部での汚染土壤洗浄を考える上で細粒分処理は重要であり、かつ細粒分の特性の違いを定量的に把握できる尺度として塑性指数がきわめて有効であることがわかる。

本研究では、清澄な処理水と低含水率の脱水ケーキを遅滞なく作成するため、凝集沈殿と脱水プロセスでの凝集剤の最適な添加条件を決定することを目的としている。このため、土壤洗浄における凝集沈殿及び脱水プロセスの新しい管理指標として、上記の有機質土を含めた細粒分の特性の違いを的確に把握することができる土の塑性指数と凝集剤の性能に關係するpHに着目し、細粒分スラリーに対する凝集剤注入条件の実験的検討を行った。

2. 土壤洗浄フロー

(1) 土壤洗浄^{2)~5)}

本研究で対象とした土壤洗浄プラントによる汚染土壤の処理フローを図-1に示す。土壤洗浄プラントの設置面積は約400 m²、高さは11.4 mである。汚染土壤の処理能力は、35~40 ton/hrである。通常は月10,000 tonのペースで汚染土壤の洗浄処理を行っている。土壤洗浄プラント事業所へ運ばれた汚染土壤は、ストックヤードに仮置きされる。汚染土壤は重機によってストックヤードから受

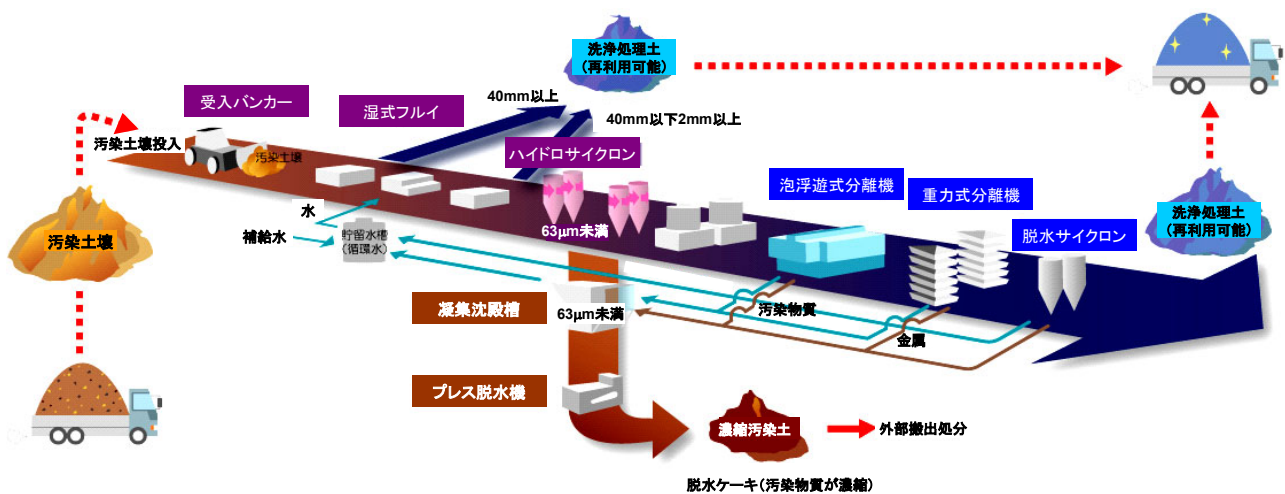


図-1 土壤洗浄プラントにおける汚染土壤の処理フロー

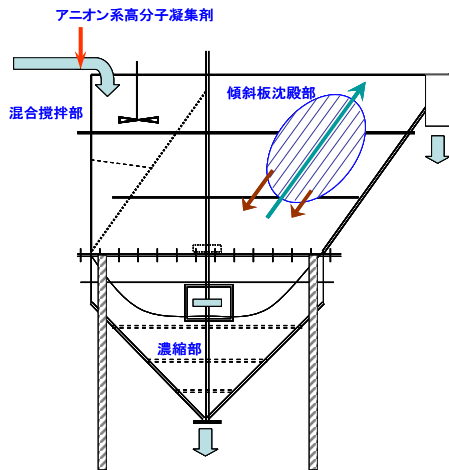


図-2 凝集沈殿槽

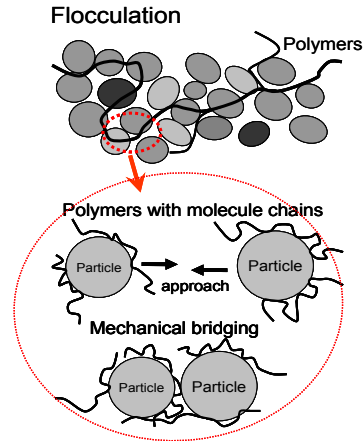


図-3 高分子凝集剤によるフロクの形成と成長

け入れバンカーへ順次投入される。受け入れバンカーに投入された汚染土壌は、湿式フルイにより2 mm以上の礫・粗砂を取り除いた後、2段のハイドロサイクロンによって細粒分と砂・細砂分に分離される。汚染物質はその多くが細粒分に付着・吸着しているため、細粒分を分級することによって、砂・細砂分から汚染物質が効率良く分離、除去される。砂・細砂分は、スクラバーにおいて洗浄薬剤とよく混合された後、泡浮遊式分離機に入る。ここで土壌中の汚染物質は、清浄な土壌粒子との表面性状の違いを最大限利用して洗浄・分離される。

泡浮遊式分離機で洗浄された砂・細砂分は、重力式分離機と脱水サイクロンを経て洗浄処理土となる。汚染物質が濃縮されている細粒分から構成された濃縮汚染土は脱水ケーキとして外部処分場へ搬出される。

(2) 凝集沈殿、脱水

土壌洗浄における凝集沈殿プロセスの目的は、ハイドロサイクロンで分級される細粒分（細粒分には汚染物質が多く含まれる）を速やかに凝集沈殿によって分離すること、及び循環利用が可能な清澄な処理水を回収することである。図-2に示すように凝集沈殿槽は混合攪拌部、傾斜板沈殿部、及び濃縮部から構成されている。アニオン系高分子凝集剤は混合攪拌部で供給され、細粒分スラリーと混合攪拌される。この過程でフロクが形成されて、傾斜板沈殿部（図-2を参照）で沈降分離が促進される。濃縮部でフロクは圧密によって濃縮される。この凝集沈殿プロセスでは、濁りの無い清澄な処理水を確実に回収するために、沈降性の良好なフロクを形成することが強く求められる。

脱水プロセスの目的は、できるだけスラッジを脱水し、含水率の低い脱水ケーキを得ることである。本洗浄プラントの脱水ケーキの含水率は概ね45～50%であり、カチオン系高分子凝集剤を添加して効率を高めている。

(3) 高分子凝集剤

高分子凝集剤は、巨大分子鎖にイオン性基や活性官能基をもつ化学構造をしている。図-3に示すように懸濁粒子の表面電荷の中和による粒子間の電的反発力の低下、活性官能基との架橋作用、巨大分子鎖による絡み作用などにより、あたかも粒子間を繋げる接着剤のように働いて大きく強い凝集フロクを生成させ、沈降分離を促進させる。少量の使用で微細粒を効果的に捕捉することができるので、処理水の清澄性が向上する。高分子凝集剤は少量の添加で凝集効果があるが、逆に過剰に存在すると粒子表面が同一電荷となり架橋作用が働かなくなる。このとき、凝集剤自身が高分子電解質であり親水性が強いいため、粒子が分散状態となる。

高分子凝集剤は、イオン性によってアニオン系、ノニオン系、カチオン系、両性に大別される。アニオン系は、主に排水中の懸濁物の凝集沈殿除去に用いられる。pHによって凝集効果の変化が大きいため、効果を発揮する中性～アルカリ性の排水に適用される。カチオン系は、主に汚泥の脱水促進に用いられる。マイナスに帯電している汚泥中の懸濁物の荷電中和に有効で水抜けの良い凝集物を作るため、凝集した汚泥の脱水を効率良く行うことができる。

今回の実験では、Ashland社のアニオン系高分子凝集剤Drewfloc267とカチオン系のDrewfloc448を用いた。

3. アニオン系高分子凝集剤による凝集沈降特性

ベルトフィルタープレスによる加圧脱水前の段階として、凝集沈殿槽での凝集剤による沈降プロセスを想定してメスシリンダーを用いた沈降試験を行い、沈降速度と沈降試験終了後の上澄み液のSS濃度を測定することによってアニオン系高分子凝集剤(Drewfloc267)の最適添加濃度を検討した。

表-1 細粒分試料

試料の種類	サンプル名称	カオリン:ベントナイト 重量比	pH	備考
カオリン・ベントナイト 混合試料	サンプルA	10 : 0	7.37	
			10.00	NaOHでpH調整
			11.00	NaOHでpH調整
	サンプルB	9 : 1	8.18	
	サンプルC	8 : 2	8.78	
	サンプルD	7 : 3	9.05	
汚染土壌の細粒分試料	サンプルE	6 : 4	9.36	
	サンプル1	63 μ m未満の細粒分	8.00	
	サンプル2	63 μ m未満の細粒分	11.49	
			8.88	HClでpH調整
サンプル3	63 μ m未満の細粒分	11.23		
			8.40	HClでpH調整

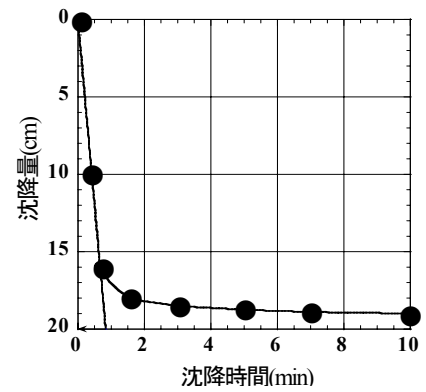


図-4 沈降速度の定義

表-2 各サンプルの物性

	サンプルA	サンプルB	サンプルC	サンプルD	サンプルE	サンプル1	サンプル2	サンプル3
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.62	2.61	2.60	2.60	2.59	2.70	2.49	2.63
液性限界 w_L (%)	40.08	61.98	82.09	113.29	140.19	72.72	109.40	114.24
塑性限界 w_P (%)	17.59	20.19	21.77	22.80	22.02	34.70	55.54	62.40
塑性指数 I_P (%)	22.49	41.79	60.32	90.49	118.17	43.02	53.86	51.80
平均粒径 D_{50} (mm)	0.00323	0.00323	0.00137	0.00136	0.00134	0.00378	0.00102	0.00102
pH	7.37	8.18	8.78	9.05	9.36	8.00	11.49	11.23
含水比 (%)	1900	1900	1900	1900	1900	1080	1290	2290
有機物含有量 (%)						2.867	4.228	5.666

(1) 実験概要

a) 細粒分試料

今回の実験に用いた細粒分試料を表-1に示す。本研究においては、土壌洗浄プラントで受け入れた実際の汚染土壌をハイドロサイクロンで分級した63 μ m未満の細粒分試料(スラリー状)を3種類と、比較的水分の吸着性の小さいカオリン粘土と多くの水分を吸着できる高い保水性を有するベントナイト粘土の混合割合を変化させ、塑性指数などの物性を変化させた混合試料をスラリー状にしたものを使用した。カオリンとベントナイトの乾燥重量比は、表-1に示すように10 : 0, 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3 および6 : 4の5種類とした。

一方、サンプルAに水酸化ナトリウム溶液、サンプル2, サンプル3に塩酸を加えることによりpHを調整した試料も別に用意した。表-2にpH調整前の各細粒分試料の液性限界, 塑性限界, 塑性指数などの物性値⁶⁾を示す。なお、pH調整後の試料の塑性指数は今回のpHの範囲では変化しないことを確認している。また、ハイドロサイクロンによって分級されたサンプル1, 2, 3のpHは、汚染土壌のpHを反映していると考えてよい。

b) 凝集剤

凝集剤はアニオン系高分子凝集剤を0.3 w/w%となるように水に溶解して使用した。本論文で使用する凝集剤添加濃度とは、土粒子乾燥重量に対する凝集剤乾燥重量の割合を百分率で表示したものである。

c) 実験方法

細粒分スラリーに対する凝集剤注入条件を検討するため、500 mlのメスシリンダーを用いて凝集沈降試験を行

った。凝集沈降試験終了後に上澄み液のSS濃度を測定した。最初に試料+凝集剤=500 mlとなるよう容量500 mlのメスシリンダーに投入し、フィルムで蓋をし上下に十分振とうする。静置後20 sec, 40 sec, 1 min, 1.5 min, 2 min, 2.5 min, 3 min, 3.5 min, 4 min, 4.5 min, 5 min, 7 min, 10 min, 15 minの時刻において固液界面の高さを測定する。図-4に示すような沈降量と時間の関係を表す沈降曲線図を求め、沈降時間0~40 secの間に観測された沈降曲線の初期接線の傾きから沈降速度を求めた。なお、凝集沈降試験終了後(15 min経過後)に上澄み液のSS濃度を測定した。

(2) 実験結果

a) 最適凝集剤添加濃度

本研究では細粒分の物性に応じた適切な凝集剤添加濃度を決定することとした。沈降速度試験の結果を図-5に、上澄み液のSS濃度試験の結果を図-6に示す。図-6に関してはサンプルA, Bの上澄み液のSS濃度は非常に小さくほぼ0となったためプロットを省いた。図-5より、各サンプルとも凝集剤の添加濃度が増加するにつれ沈降速度は大きくなること、またある凝集剤添加濃度に達すると沈降速度は一定もしくは減少するということが認められた。沈降速度が最大もしくは一定となる注入量を沈降速度からみた最適凝集剤添加濃度と定め、図中に矢印で示した。なお、実験の再現性を確認するために実施した同一の濃度での複数の実験結果をもとに、最適値を求めている。

図-6よりサンプルC, D, Eに関しては、凝集剤添加濃度の増加に伴ってSS濃度が減少し一定値となる傾向が

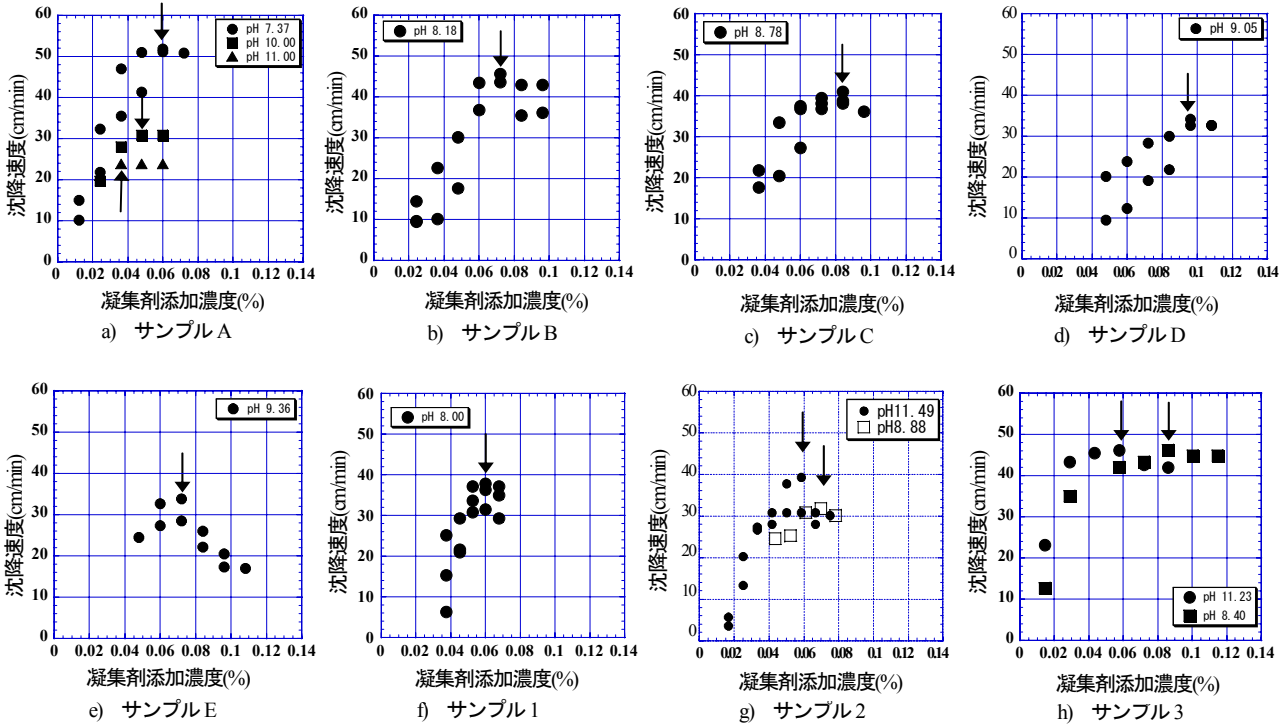


図-5 凝集剤添加濃度と沈降速度の関係

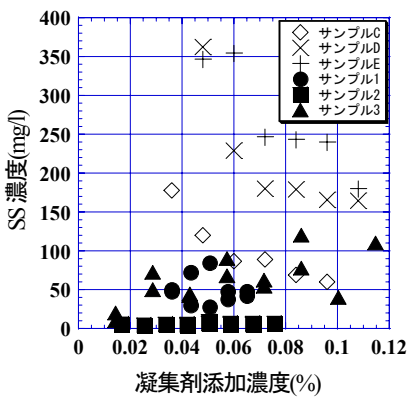


図-6 凝集剤添加濃度と上澄み液 SS 濃度の関係

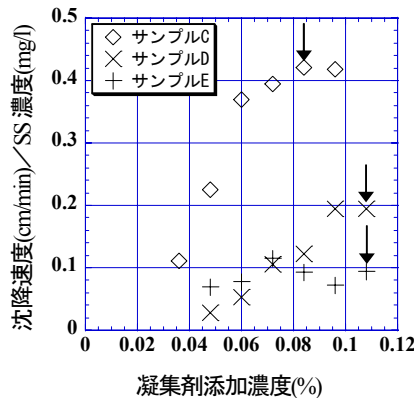


図-7 凝集剤添加濃度と沈降速度/上澄み液 SS 濃度の関係

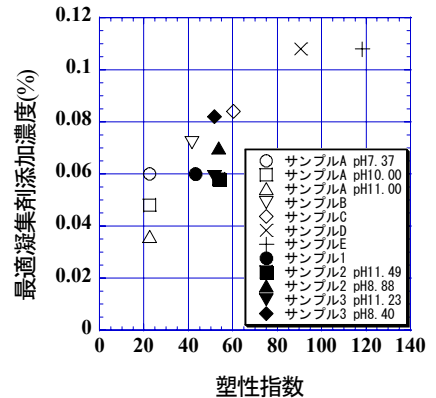


図-8 土壌試料の塑性指数と最適凝集剤添加濃度の関係

見られた。SS濃度は上澄み液に残存した土粒子の量を表しているため、上澄み液のSS濃度が最小となる注入量は上澄み液の清澄度からみた最適凝集剤添加濃度と判断される。サンプル1, 2, 3に関しては、上澄み液のSS濃度は比較的小さな値であったため凝集剤の添加濃度による変化は判別できなかった。

細粒分スラリーの凝集沈降実験において高分子凝集剤(Drewfloc267)の各サンプルに対する最適注入量を決定するに当たって、沈降速度が大きかつ上澄み液のSS濃度が小さくなる注入量を最適な凝集剤添加濃度と判断した。サンプルA, B, 1, 2, 3に関しては、上澄み液のSS濃度が比較的小さな値であり凝集剤添加濃度による変化を判別できなかったことから、沈降速度データから最適凝集

剤濃度を判断した。その他の試料については、凝集剤添加濃度に対して、沈降速度(cm/min)とSS濃度(mg/l)の比をプロットした図-7を用いて最適な凝集剤添加濃度を決定し、図中に矢印で示した。なお、塑性指数が118程度で粘土分を多く含むサンプルEについては、凝集剤添加濃度を増加させても縦軸の値はほぼ0.1程度でありあまり変化しない。これはサンプルEの場合、粘土分を多く含むので凝集剤添加に伴う図-5e)の沈降速度変化と図-6)のSS濃度変化の幅が小さいことに対応している。そこで、サンプルEについてはSS濃度が最小となる凝集剤添加濃度を最適濃度とした。各サンプルの最適凝集剤添加濃度を表-3に整理して示す。

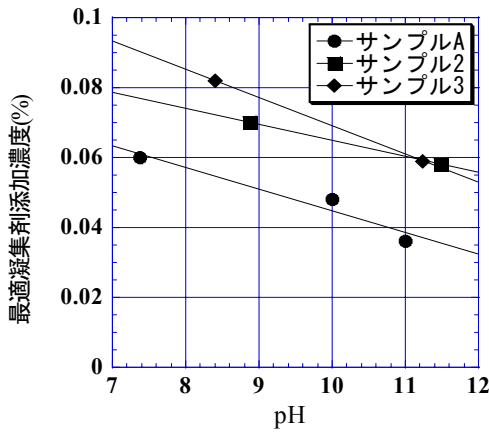


図-9 pHによる最適凝集剤添加濃度の変化

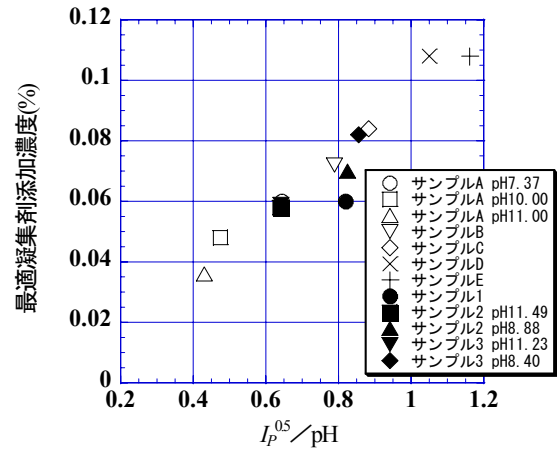


図-10 $I_p^{0.5}/pH$ と最適凝集剤添加濃度

表-3 各サンプルの最適凝集剤添加濃度

サンプル名称	塑性指数 (-)	pH (-)	最適凝集剤添加濃度 (w/w%)
サンプルA	22.49	7.37	0.060
		10.00	0.048
		11.00	0.036
サンプルB	41.79	8.18	0.072
サンプルC	60.32	8.78	0.084
サンプルD	90.49	9.05	0.108
サンプルE	118.17	9.36	0.108
サンプル1	43.02	8.00	0.060
サンプル2	53.86	11.49	0.058
		8.88	0.070
サンプル3	51.80	11.23	0.059
		8.40	0.082

b) 塑性指数と最適凝集剤添加濃度の関係

本研究では細粒分の物性の違いを表現するパラメータとして塑性指数を採用した。図-8に塑性指数と最適凝集剤添加濃度の関係を示す。カオリン・ベントナイト混合試料(サンプルA~E)では、塑性指数60 (サンプルC)あたりまでは、塑性指数が大きくなるにつれて最適凝集剤添加濃度が大きくなっていくが、サンプルDとEではほぼ同じ値である。

サンプルA~Eのカオリン・ベントナイト混合試料においては、塑性指数の高い試料ほどベントナイトすなわち微細かつ水分の吸着性が高い粘土粒子を多く含むため、土壤試料の平均粒径は小さくなるとともにその見かけ密度は減少するものと考えられる。すなわち、塑性指数の高い土壤試料では、乾燥重量当りの土壤粒子の数も多くなるとともに沈降速度が小さくなることが予想される。

図-3に示した高分子凝集剤の作用機構から考えてみても、ベントナイト粘土粒子を多く含む土壤サンプル、すなわち塑性指数の大きな土壤サンプルほど最適凝集剤濃度は大きくなるものと推測された。しかし、サンプルDよりも塑性指数が大きなサンプルEでは、最適凝集剤添加濃度がサンプルDとほぼ同じであった。

また、実汚染土壤のサンプル1の塑性指数は43.02であ

り、カオリン・ベントナイト混合試料のサンプルBの塑性指数41.79とほぼ同じ値である。サンプル2, 3の塑性指数は51~54であり、混合試料のサンプルB (塑性指数41.79) とサンプルC (塑性指数60.32) の中間に位置している。図-8より、塑性指数がほぼ同じ値であるサンプル1とサンプルBの最適凝集剤添加濃度はサンプルBの方がやや大きく、サンプル2, 3の最適凝集剤添加濃度はサンプル1とほぼ同等であることがわかる。

c) 土壤試料のpHが凝集沈降に及ぼす影響

凝集沈降に及ぼすpHの影響を調べるために、表-1に示すようにサンプルAについてはNaOHで、サンプル2, サンプル3についてはHClで所定のpHに調整した土壤試料を別途作成した。図-9にpHを変化させた場合の最適凝集剤添加濃度の変化を示す。図-9よりpHが高くなるにつれて最適凝集剤添加濃度が低くなる傾向が認められる。表-2から、混合試料のサンプルAからEの順にベントナイトの割合が増え塑性指数が大きくなるにつれてpHは中性域から弱アルカリ性へ移行したことがわかる。今回のpH領域において、pHが高くなるに従ってサンプルA, サンプル2, 3の最適凝集剤添加濃度が減少したのは、土壤試料のpHが高い方がアニオン系凝集剤の凝集効果が増進されたためと考えられる。

d) アニオン系凝集剤の最適添加濃度

土壤洗浄プラントにおいて経済的な凝集沈殿を行い、清澄な処理水を回収するためには、汚染土壤の物性に応じて適切な凝集剤添加濃度を定めることが重要である。前述のように、アニオン系高分子凝集剤の凝集効果は土壤の塑性指数とpHにそれぞれ影響を受けること、塑性指数が大きくなると最適添加濃度は高くなるが、ある塑性指数以上では一定値もしくは減少すること、pHが高くなると最適添加濃度は低くなるという反比例関係であることがわかった。そこで、汚染土壤の細粒分スラリー

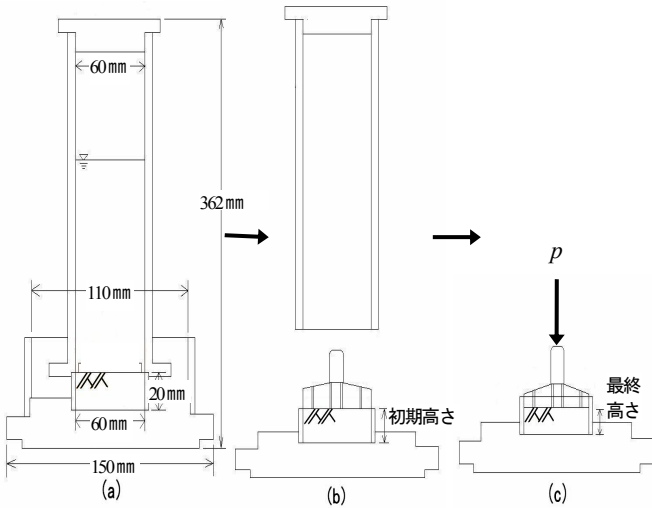


図-11 圧密試験用供試体作成容器概要図

の凝集沈殿に適した高分子凝集剤注入量を整理するために $I_p^{0.5}/pH$ (塑性指数の平方根とpHの比) というパラメータを考案した。

図-10にこのパラメータと凝集剤最適添加濃度の関係を示す。図-10より、 $I_p^{0.5}/pH$ と最適凝集剤添加濃度の間には、ほぼ比例関係が成り立っていることが認められる。したがって、図-10の関係を利用して、今回の実験で用いたような塑性指数が20~120程度で、pHが7~11の範囲の沖積粘土を主体とする汚染土壌細粒分の塑性指数とpHからアニオン系高分子凝集剤の最適添加濃度を求めることができる。

4. カチオン系高分子凝集剤による沈降物の圧密脱水特性

アニオン系凝集剤で沈降後に濃縮させた細粒分はまだ含水率が高いため、ベルトプレスによる加圧脱水が不可欠である。ベルトプレスでの脱水性を向上させるために沈殿物にカチオン系高分子凝集剤を添加した後で加圧脱水が行われている。本実験では、段階载荷による圧密試験⁶⁾を行って、カチオン系高分子凝集剤(Drewfloc448)の添加濃度による沈降物の圧密脱水特性の変化を実験的に求めた。この結果をもとに、沈降物(細粒分)の加圧脱水に適したカチオン系高分子凝集剤添加濃度について検討した。

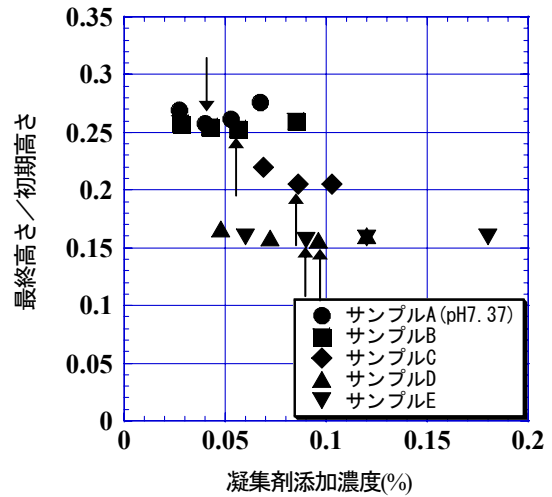
(1) 実験の概要

a) 試料

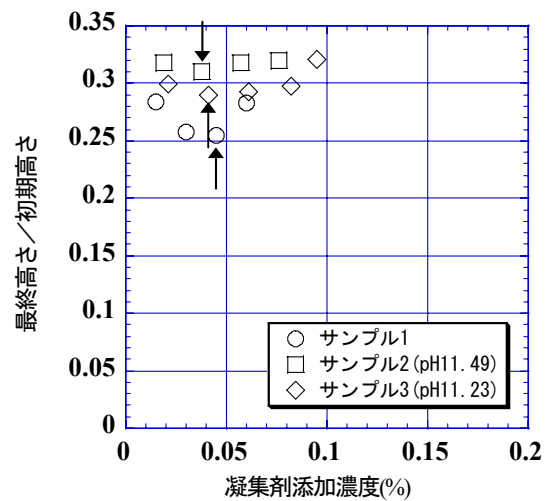
本実験では、3章の凝集沈降試験で用いたものと同じ土壌試料を使用した。

b) 凝集剤

アニオン系高分子凝集剤(Drewfloc267)とカチオン系高



(a) 土壌サンプルA~E



(b) 土壌サンプル1~3

図-12 カチオン系凝集剤の添加濃度と残量比 (最終高さ/初期高さ) の関係

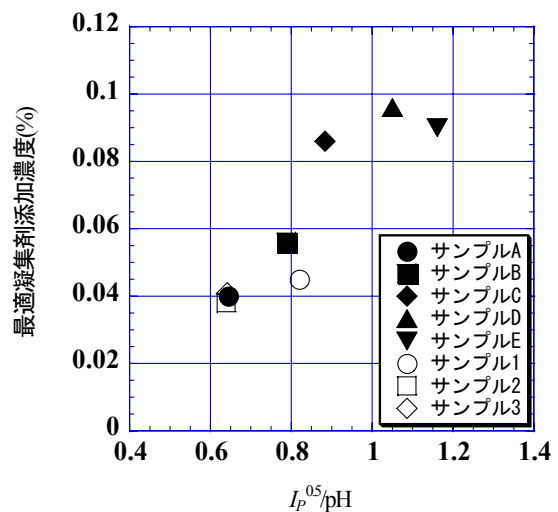


図-13 $I_p^{0.5}/pH$ とカチオン系高分子凝集剤の最適凝集剤添加濃度の関係

分子凝集剤(Drewfloc448)をそれぞれ0.3w/w%濃度となるように水に溶解した。前述のように本論文で使用される凝集剤添加濃度とは、土粒子乾燥重量に対する凝集剤乾燥重量の割合を百分率で表示したものである。

c) 実験方法

図-11(a)に示す試験装置に沈降最終高さがほぼ2 cmになるように、メスシリンダーで細粒分スラリー含水量を調整した土壌試料を投入する。土壌試料にはアニオン系高分子凝集剤を土壌試料の塑性指数とpHに応じて、3章で検討した最適凝集剤注入量となるように添加した後で攪拌しフロックを形成させた。静置してフロックが沈降したのを確認した後、カチオン系高分子凝集剤を所定の量加えて攪拌を行った。再び沈降したのを確認した後、上澄液を取り除いて図-11(b)に示す試験装置の上部の筒を取り外し、初期高さ約2 cmの圧密試験用供試体を準備した。

この供試体に対して、図-11(c)に示すように段階载荷による圧密試験を行った。载荷圧力*p*は供試体を乱さないように10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 (kN/m²)の順に段階的に増加させて各24時間圧密し、640 (kN/m²)载荷後の供試体最終高さを求めた。

(2) 実験結果

a) 最適凝集剤添加濃度

脱水プロセスの目的は、できるだけスラッジ（細粒分）を脱水し、含水率の低い脱水ケーキを得ることである。本実験では圧密終了後の供試体の最終高さに注目し、最終高さと初期高さの比（以下、残量比と称する）からカチオン系高分子凝集剤の注入率を検討した。圧密過程では試料中の間隙水のみが脱水されるので、この残量比が小さいほど多量の間隙水が脱水されて含水率の低い脱水ケーキが得られる。

図-12に各試料のカチオン系高分子凝集剤(Drewfloc448)の添加濃度と残量比（最終高さ/初期高さ）の関係を示す。残量比が小さくなるほど沈殿物のボリュームが減少しているということなので、この残量比が最小となる凝集剤注入量を最適添加濃度とし、図中に矢印で示した。

b) 塑性指数、pHと最適凝集剤添加濃度の関係

第3章で得られた成果をもとに、土壌試料の塑性指数とpHの両者の影響を考慮するパラメータ $I_p^{0.5}/pH$ に対して、カチオン系高分子凝集剤の最適添加濃度と対応する残量比をプロットした結果を図-13、図-14に示す。

図-13に示される $I_p^{0.5}/pH$ と最適添加濃度の関係は、ほぼ比例関係にあると認めてよい。一方、 $I_p^{0.5}/pH$ が大きくなるにつれて、残量比は単調に減少している。

サンプルA～Eは土壌pHが中性～弱アルカリ性であるのに対して、塑性指数が22～118と大きく異なっている。

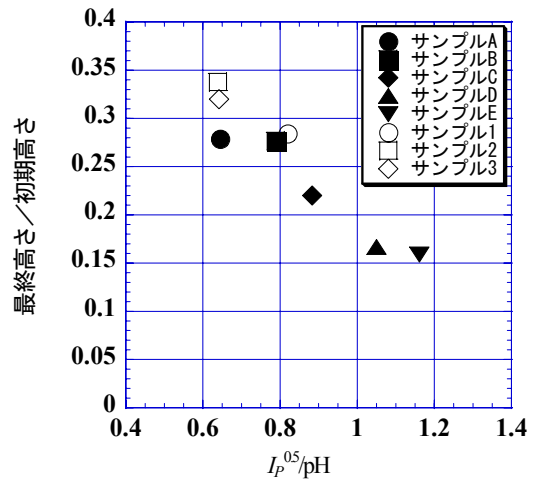


図-14 $I_p^{0.5}/pH$ と残量比(最終高さ/初期高さ)の関係

そこで、サンプルA～Eでは塑性指数の影響に、サンプル1～3ではpHの影響に着目して考察する。試料の塑性指数が大きくなると、土壌粒子の粒径が小さくなるともに、多くの水分を吸着して見かけ密度も減少する。塑性指数が大きい試料では単位体積当りの沈降物フロックに含まれる土壌粒子数が増加し比表面積が大きくなるので、カチオン系高分子凝集剤の注入量はより多く必要となる。ところが、そのフロック中に含まれる水分量が多いので、残量比は低下することになる。

一方、サンプル1～3について土壌pHの影響に着目すると、pHが高いと残量比が高いこと、最適な凝集剤添加濃度が判別しにくいこと（図-12(b)）がわかる。pH=11を超えるアルカリ性ではカチオン系凝集剤の効果が低下し、効率の良い脱水が難しくなることが示唆される。

以上をまとめると、汚染土壌細粒分の塑性指数とpHを調べることによって、図-13の関係からカチオン系高分子凝集剤の適切な注入量を決定することができる。すなわち、土壌試料の塑性指数とpHはカチオン系高分子凝集剤注入量についても管理指標となることがわかる。

5. 塑性指数とpHによる凝集剤添加濃度管理の検証

塑性指数とpHを凝集沈殿・脱水プロセスの管理指標とすることの妥当性を検証するために、土壌洗浄プラントにおける凝集剤注入の実績濃度と塑性指数とpHから得られた最適添加濃度の比較検討を行った。

図-15は土壌洗浄プラントにおける2004年4月1日から11月30日までのアニオン系、カチオン系凝集剤の注入実績を示したものである。本研究で用いたサンプル1, 2, 3はこの土壌洗浄プラントで受け入れた土壌から採取したものである。図中の3箇所（6月5日、8月7日、11月30

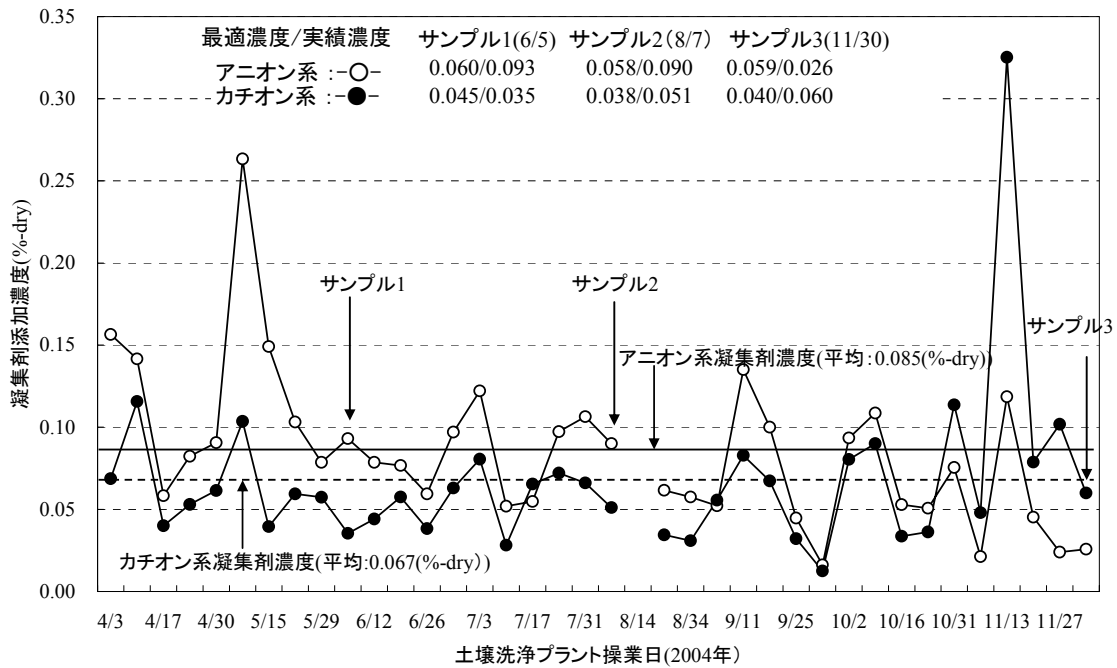


図-15 塑性指数とpHから得られた最適濃度と土壤洗浄プラント実績濃度との比較

日) に示した矢印は、これら3種類のサンプル1, 2, 3の採取時期を示している。図中には、あわせて3種類のサンプルを採取した時の土壤洗浄プラントでの凝集剤注入実績濃度と本研究で得られた最適濃度の値が比較されている。

土壤洗浄プラントでは、各種の現場から連続的に搬入された汚染土壌を連続的に処理している。その際の凝集剤注入濃度は、前述のようにブロックとスラッジの状態を観察し、含水率の低い脱水ケーキが得られるようにプラント運転者の観察と経験による判断に基づいて調節されている。汚染土壌の物性は現場によって大きく異なるだけでなく、同じ汚染サイトであっても異なることが少なくない。このため、その調整は試行錯誤的なプロセスとならざるを得ないために、凝集剤添加濃度の実績値は図-15のように大きく変動する場合がある。それにもかかわらず図-15からわかるように、本研究で得られたアニオン系及びカチオン系高分子凝集剤の最適添加濃度は概ね実績値の平均値と比較しうる値を与えている。

以上の成果をもとに、土壤洗浄プラントにおいて比較的容易に実行可能な土壤サンプルのコンシステンシー試験とpHデータに基づいて凝集剤濃度の最適値を求めることで、従来熟練したプラント運転管理者の観察と豊富な経験に基づいて試行錯誤的に行わざるをえなかった凝集剤濃度管理を合理的に行うことが可能となる。

6. 結論

本研究は、土壤洗浄プロセスにおいて受入れ汚染土壌の性状に適したアニオン系、カチオン系凝集剤濃度を環境地盤工学的に合理的に決定する方法について実験的に検討したものである。その結果、汚染土壌の塑性指数とpHを管理指標として用いることにより、土壤洗浄プロセスにおけるアニオン系、カチオン系凝集剤の添加濃度を一義的に決定できることを確認した。以下に得られた結論を記す。

- (1) アニオン系高分子凝集剤による汚染土壌懸濁液の沈降速度から見た最適添加濃度は、汚染土壌の塑性指数が大きくなるに従い増加し、pHが大きくなるほど減少する。
- (2) アニオン系高分子凝集剤の最適添加濃度は、今回の実験で用いたような塑性指数が20~120程度で、pHが7~11の範囲の沖積粘土を主体とする汚染土壌については、その塑性指数とpHに応じて、 $I_p^{0.5}/pH$ という値をもとに一義的に決定できる。
- (3) カチオン系高分子凝集剤による汚染土壌ケーキの圧密脱水特性から見た最適添加濃度についても、 $I_p^{0.5}/pH$ が大きくなるに従い増加する。一方、脱水ケーキのボリュームに相当する残量比は、 $I_p^{0.5}/pH$ の増加とともに低下する。
- (4) カチオン系高分子凝集剤についても、最適添加濃度は $I_p^{0.5}/pH$ という値をもとに一義的に決定することができる。

- (5) 本研究で得られたアニオン系, カチオン系凝集剤の最適添加濃度の値は, 土壌洗浄プラントにおける凝集剤注入実績値と比較しうる値を与えている.
- (6) 土壌洗浄プラントにおいて比較的容易に実行可能な土壌サンプルのコンシステンシー試験とpHデータに基づいて凝集剤濃度の最適値を求めることで, 従来熟練したプラント運転管理者の観察と豊富な経験に基づいて試行錯誤的に行わざるをえなかった凝集剤濃度管理を合理的に行うことが可能となる.

謝辞: 本研究の実施に当たり, 清水建設株式会社の高田博充氏, 羽田義治氏, 今井孝一氏, 早稲田大学学生の新谷雄三氏, 藤木寛氏の協力を得た. 記して, 謝意を表する.

参考文献

- 1) EPA: A Citizen's Guide to Soil Washing, 542-F-01-008, 2001.
- 2) 田中仁志, 毛利光男, 熊本進誠, 羽田義治, 今沢正樹: 高効率土壌洗浄プラント(MRP)による土壌浄化, 土壌環境センター・技術ニュース, No.7, pp.36-38, 2003.
- 3) 毛利光男: 土壌洗浄による汚染土壌の浄化処理, 分離技術, Vol.34, No.6, pp.384-389, 2004.
- 4) 毛利光男, 田中仁志, 赤木寛一: 土壌洗浄における液体サイクロン系統のモデル化, 水環境学会誌, Vol.27, No.8, pp.535-540, 2004.
- 5) 毛利光男, 赤木寛一: MRP土壌洗浄プロセスにおける汚染物質の分離, 水環境学会誌, Vol.28, No.9, pp.589-594, 2005.
- 6) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 2000.

(2006. 3. 7受付)

FLOCCULATION AND DEHYDRATION CONTROL DURING SOIL WASHING PROCESS USING SOIL PLASTICITY INDEX AND pH

Hirokazu AKAGI, Mitsuo MOURI, Masashi TANAKA and Seiichi ISHIDA

The target of soil washing is to separate and densificate fine soil particles by sieving, cycloning and floatation, since the heavy metal and the oil pollution exist in the fine soil particles. The fine soil particles separated from polluted soil are flocculated and densificated to be conveyed to the controlled waste deposit. It is necessary to conduct the rapid flocculation and the large dehydration to create the efficient and economic soil washing system. The proper selection of flocculant type and its concentration is essential for the rapid flocculation and large dehydration. In this paper, the experimental investigation on the proper flocculants concentration criterion for the rapid flocculation and large dehydration is conducted using soil plasticity index and its pH value. The criterion was validated by the actual flocculants usage in the soil washing plant.