

SSS 工法に関する実験的研究 (その5)

—沈殿物除去方法の検討—

大塚 義之
岡田 武二
山城 幸治

§ 1. まえがき

SSS工法を含め、場所打ちぐいにおけるぐい底部の処理に関する問題は、すでにとり上げられてその重要性が指摘されている¹⁾。支持地盤とぐい体との間に何らかの原因で、挟雑物が存在し、その挟雑物が支持地盤にくらべていちじるしく軟弱な場合は、構造物基礎として有害な沈下の原因となる。SSS工法で使用するウォールドリルは、泥水を循環させることにより、掘削土を搬出するという方式をとっている。SSSぐい底部に挟雑物が存在する原因として次のような事柄が考えられる。

(1)掘削時に攪拌された泥水中に浮遊する土粒子で、掘削をやめると沈殿して底にたまるもの。

(2)泥水により溝壁表面に形成されるマッドケーキ。

その他、鉄筋そう入中に溝壁を削り落とすなど、施工上の不注意が原因となって生ずるものがある。

底部挟雑物は、その発生原因によって以上の二つに分れる。(1)の沈殿によって生じる挟雑物、いわゆる溝底沈殿物は、厚く堆積する可能性をもっている。すなわち、溝内の泥水中に含まれる土粒子は、特別に底ざらいを行なわない場合には、数10cmの厚さで堆積する。

(2)のマッドケーキは、泥水が地盤中へ浸透するときに汚過されて境界面に付着する場合のほか電気的に吸着されて形成される場合もあるが、いずれにしても厚さは最大40mm程度と推定される。したがって、構造物の沈下に対して有害な影響をおよぼすと考えられるものは、主に溝底沈殿物である。

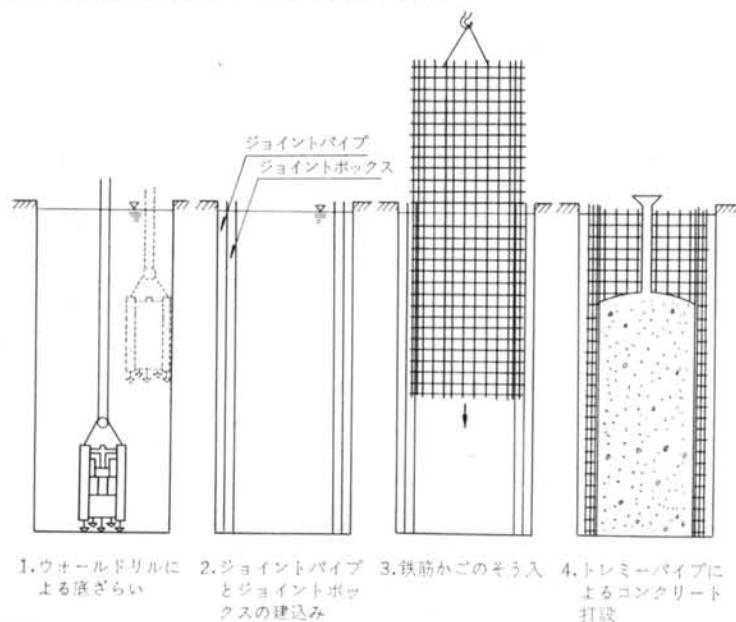
次に、溝底沈殿物の堆積機構を検討し、泥水性質と掘削土質との関係から適当な沈殿終了時間を設定する方法について考察する。

§ 2. 沈殿物の堆積機構

2.1 施工過程で沈殿物の堆積する条件

SSS工法の底ざらい作業後の施工順序を図一に示す。ウォールドリルにより、底ざらいを行なう場合の施工順序は図一1のようなになる。ウォールドリルにより、底ざらいを行なった場合、鉄筋かご等をそう入してコンクリート打設開始までの時間は、かなり長いものになる。したがって、この時間に生じる堆積物の量が有害量を越えなければ問題はない。

沈殿物が生じる原因として次のようなことが考えられる。沈殿物は、主に掘削土粒子からなり、それらが沈殿堆積して生じる。したがって、泥水中に沈殿土粒子を含まなければ沈殿を生じ



図一1 底ざらい以後の施工順序 (A要素)

ない。泥水中の土粒子の沈殿は、(1)土粒子の沈降速度
(2)泥水の土粒子保持力の2つの要素によって規制される。

土粒子の沈降速度は、土粒子の比重、粒径、泥水の密度、粘性などによって変化し、泥水の土粒子保持力は泥水のイールドバリューなどによって影響される。

沈殿する土粒子はすべて沈殿させ、浮遊するものは、そのまま泥水中に保持し続けられるものとすれば、溝内泥水中には沈殿を生じるような土粒子は含まれないことになる。このような状況をつくり出すことが可能であるかどうかの検討を以下の各節でのべることにする。

2.2 土粒子の沈殿と浮遊に関する考察

静止した液体中の球形単体粒子の沈降運動に関して、ストークスは次のような実験式を導びいた。すなわち、

$$v = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho' - \rho)gD^2}{\mu} \quad \dots(1)$$

v : 沈降速度 (cm/sec) ρ' : 土粒子の真比重 ρ : 液体の比重 g : 重力加速度 D : 粒径 (cm) μ : 液体の粘性係数 (g/cm·sec)

式(1)で、 ρ を泥水の比重、 μ を泥水の粘性係数とすれば、土粒子の沈降速度が計算によって求められる。

式(1)に含まれる仮定は、土粒子の粒径が完全な球形であること、および集団ではなく単体の土粒子が沈降する場合であることである。したがって、泥水中を沈降する沈殿物の場合には必ずしもあてはまるとは限らないが、一つの目安を与えるものとして意味があるものと思われる。

泥水は、静止した状態においては半固体のゲル状になるが、流動している状態では液体としての性質を示す。いま、土粒子の微粒なものが泥水中にあり、泥水が流動状態から静止状態へ移行するものとしよう。このとき泥水のイールドバリューは増大する。このことは、流動状態では沈降する土粒子も、静止状態では保持されて浮遊状態におかれる土粒子が存在することを示している。

同じ流動状態でも乱流状態では、土粒子は水流の影響を受けて、静止状態で沈降するものも浮遊することになるが、層流の中では、粒子の沈降する方向と逆向きの流れでないかぎり、土粒子は、式(1)に示す速度で沈降すると考えられる。

静止した泥水中では沈降せず、層流の中では沈降するというような粒径をもった土粒子は、考えることができる。このような土粒子の堆積物を二次スライムとよぶ。二次スライムはごく微量であり、その厚さは1 cm以下である。

土粒子の中で、静止した泥水中を沈降する土粒子と、沈降しないで浮遊する土粒子との区別は、次のように考えられる。

- 1) 泥水のイールドバリューを泥水のゲルがもつせん断強さと考える。
- 2) 土粒子を球形と仮定し、粒径の直径とする球の投影面積に土粒子の荷重が加わるものとする。
- 3) 土粒子の荷重がイールドバリューをこえるものは泥水中では保持できないから沈降し、そうでないものは浮遊状態に保持される。

いま、土粒子の投影面積あたりに加わる荷重を A (g/cm²)、粒径を D (cm)、土粒子の比重を G_s としたとき、上記2)でのべた事柄は次のように書き表わされるものとする。

$$A = \frac{2}{3} D \cdot G_s \quad \dots(2)$$

泥水のイールドバリューを Y (g/cm²) としたとき、沈降するかしないかの条件は次のようになる。すなわち、 $Y > A$ のときは浮遊し、 $Y < A$ のときは沈降する。ここに $Y = A$ の場合は、沈降するかしないかの限界を表わす。式(2)を変換して $Y = A$ としたときの式(3)で定義される粒径を限界粒径 D_c とよぶ。

$$D_c = 1.5 \frac{Y}{G_s} \quad \dots(3)$$

泥水のイールドバリューから、限界粒径 D_c が求めれば、 D_c の沈降速度 V_c は、式(1)によって求まる。溝の深さを Z とすれば、 $\frac{Z}{V_c}$ が理論的に求めた沈降の終了時間となる。これらの関係を図に表わすと図-2のようになる。図-2は、泥水のイールドバリューから、土粒子の限界粒径 D_c とその沈降速度 V_c を求めるためのものである。沈降速度-粒径曲線は、泥水の粘度 μ がパラメータとなっていくつもあつたわけであるが、泥水の条件に

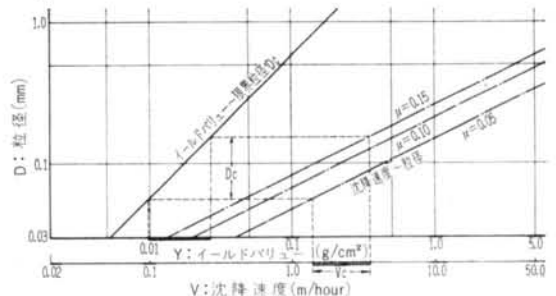


図-2 限界粒径とイールドバリューおよび沈降速度との関係 (計算値) (斜線は管理基準内の泥水が示しうるイールドバリューの範囲。ただし、土粒子比重2.65、泥水比重1.10とする。)

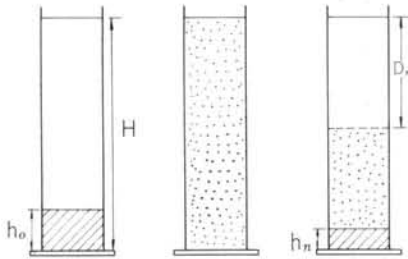
合ったものを選ぶのはもちろんである。通常用いられている泥水条件から、限界粒径の範囲および沈降速度の範囲を図の斜線の範囲で示した。

§ 3. 泥水中における土粒子の運動

3.1 室内実験

土粒子の沈降速度を測定するため、図-3のように1,000ccのメスシリンダーを用意し、その中に粘性と比重のわかっている泥水を一定量入れる。次に、一定の粒径の土粒子を一定量投入し、メスシリンダーを振とうさせ、土粒子を泥水中に均等になるように分散させた後にこれを静置する。土粒子はメスシリンダーの底に堆積し始める。試料が一定の厚さに堆積するまでの時間を測定すれば、図-3の式に従って沈降速度を算定できる。

以上にのべた方法により、泥水の粘性と土粒子の粒径をいろいろ変えて測定した結果は、すでに報告した²⁾。図-4は、このようにして測定した沈降速度の測定値と式(1)により計算で求めた沈降速度との関係を示したものである。計算では、土粒子の粒径を一つの値とする沈降



〔I〕土粒子と泥水をメスシリンダーに一定量入れる
〔II〕振とうし、分散させる
〔III〕静置させ沈降速度を測定する

H: 泥水の全高 (cm) D_n: 静置 t_n 時間 (sec) 後の土粒子沈降量 (cm)
h₀: 土粒子の全高 (cm) h_n: t_n 時間後の沈降高さ (cm)

いま、t_n および h_n が測定されたとする。このときの沈降速度を V_n とすれば、V_n は次式により与えられる。

$$V_n = D_n / t_n \quad \dots\dots (i)$$

ここにおいて

$$D_n = \frac{h_n \left(1 - \frac{h_n}{H}\right)}{\frac{h_0}{H}} \quad \dots\dots (ii)$$

故に

$$V_n = \frac{h_n \left(1 - \frac{h_n}{H}\right)}{\frac{h_0}{H} \cdot t_n} \quad \dots\dots (iii)$$

土粒子の沈降速度 V は V₁, V₂, …, V_n の平均だから

$$V = \frac{1}{n} (V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad \dots\dots (iv)$$

図-3 メスシリンダーによる沈降速度測定法説明図

速度の値はひとつであるが、実測ではフルイ分けられた範囲の粒径をもった土粒子の平均値となるため、計算値の方は、フルイに残留する土粒子の最大粒径と最小粒径についてそれぞれ計算し、これを線で結んで範囲を示してある。

図-4によると計算値の方が実測値よりも値が小さくなっているものが多いことがわかる。これは、式(1)に含まれる仮定の中で単粒子の沈降速度としたことが大きな原因と考えられる。

3.2 現場実験

3.2.1 土粒子の沈殿終了時間の測定

実験に用いた溝の配置を図-5に示す。S-1 溝は、沈殿物の沈降速度の実験をするために施工された。

また、S-2 および S-4 において壁体底部のスライムの状況を観察した。その他のものは本論とは別の試験に用いたものであり、これらの説明は省略する。

沈殿終了時間の測定は S-1 の溝において行なった。

沈殿物に相当する土砂として、川砂、シルト、関東ロームを用意した。これらの土砂を溝の上から投入し、検尺により底にたまる沈殿物の量の経過時間による増加量を測定した。図-6は、この結果を表わしたものである。図中の下部に実線で示したものは、試験溝の下部を底ざらいした後に測定した沈殿物の増加量である。

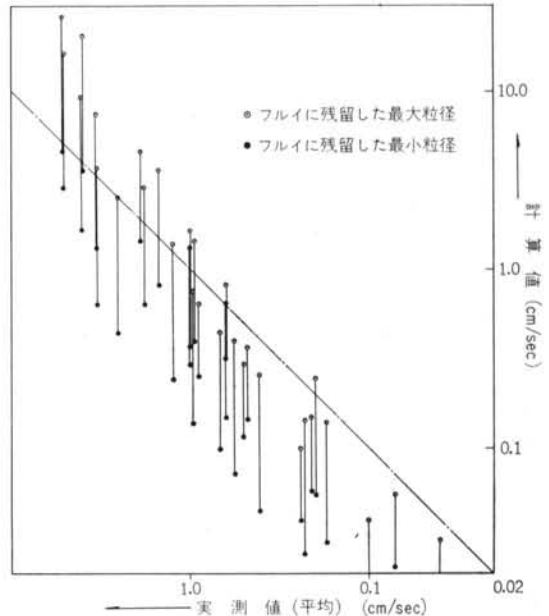
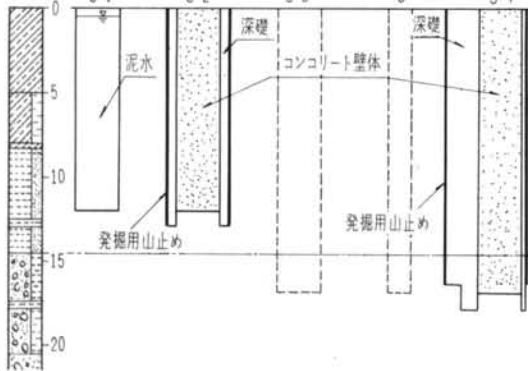
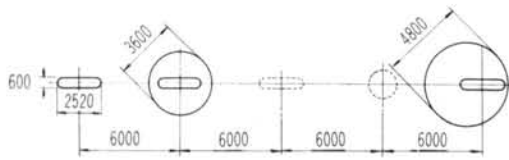
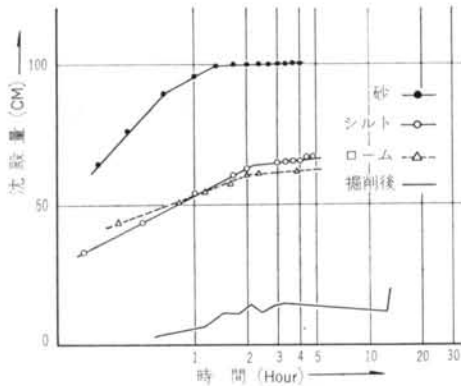


図-4 土粒子沈降速度の実測値と実測土粒子の最大粒径、および最小粒径の沈降速度計算値との関係



図一五 試験溝とSSSくい試験体の配置



図一六 S-1エレメントにおける沈殿量測定結果

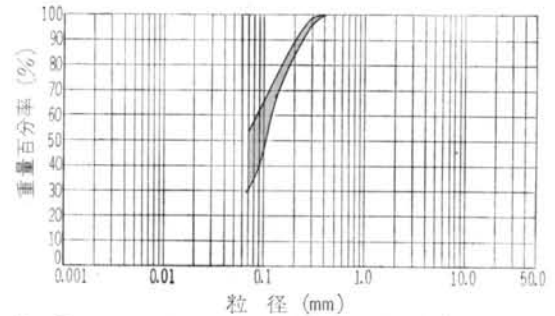
このときの泥水の条件を表一に示す。

図一六から読みとられることは、土砂投入開始後2時間程度で、単位時間当りの沈殿量が極端に小さくなる点のあることがわかる。これは、投入土砂の粒径にはあまり関係なく、また沈殿物の量にも関係しないことがわかる。

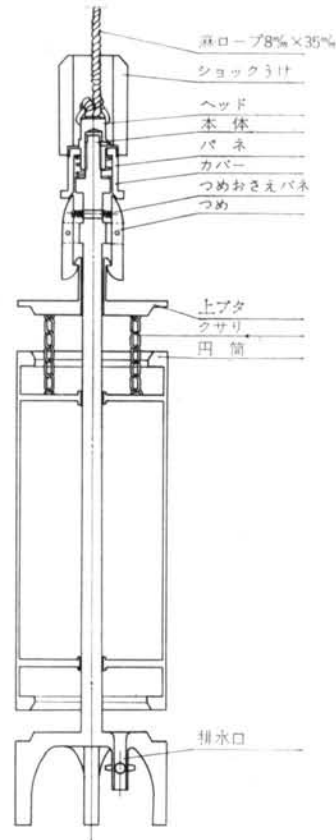
図一七は、沈殿が終了した時点における溝内泥水の粒度分布を示したものである。粒度試験試料は、74 μ フルイで水洗いを行ない、フルイに残留したものを乾燥させ通常の方法により粒度分析を行なった。これにより、0.3mm以上の粒径の土粒子は、ほとんど溝内にはみられない。

	粘性 (秒500/500)	粘度 (CP)	イーロードバリュ YV (g/cm ²)
掘削終了	23.0	5.3	0.011
川砂投入	23.8	5.75	0.005
シルト投入	22.6	5.15	0.003
ローム投入	28.3	11.5	0.012

表一 沈殿量測定時における泥水条件



図一七 試験溝(S-1)より採取した泥水の粒度分布
(0.074 μ フルイで水洗後の残留試料)



図一八 泥水採取器全体断面図

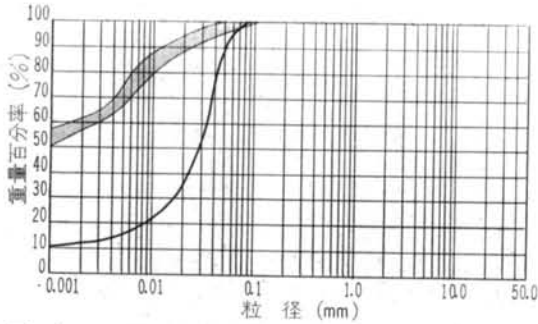


図-9 沈殿終了後の孔内泥水と、泥水中の二次スライムの粒径加積曲線の分布範囲

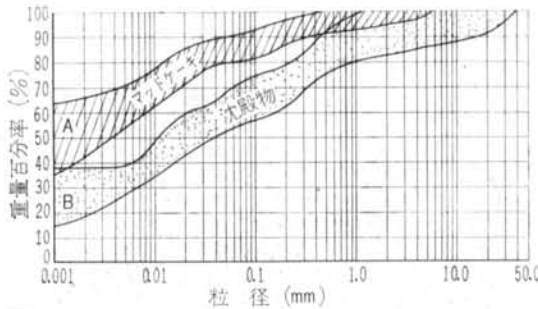


図-10 底ざらい後の沈殿物と、ベントナイト泥水のマッドケーキの粒径加積曲線の分布範囲

	粘性 (秒500/500)	粘度 (CP)	イールドバリュー YV (g/cm ²)
S-3	25.7	9.7	0.014
S-4	23.8	5.95	0.004

表-2 S-3, S-4エレメント底ざらい終了時における泥水条件

土砂投入後2時間を沈殿の終了時間とすれば、深さ12mとすると、沈降する最小の土粒子の沈降速度は、6.0m/hourとなる。 $v=6.0\text{m/hour}=0.167\text{cm/sec}$ としたときの粒径 D を式(1)により算出すると0.3mmとなる。この場合の計算結果と実測結果はよく一致する。

3.2.2 浮遊土粒子および沈殿土粒子の粒径

式(3)で定義した土粒子の限界粒径が、実際の掘削溝の中で成立するかどうかを確認するため、底ざらいを行なった後の溝の中の浮遊土粒子、および沈殿土粒子の状態を調査した。

浮遊土粒子に関しては、掘削中から底ざらい後にかけて溝の中の泥水を泥水採取器(図-8)により各深度から採取した。沈殿土粒子に関しては、底ざらい後十分な時間をおいてシンウォールサンプラーを用いて採取したものと、次節以下でのべる壁体下部の状況観察を行なった際の沈殿物を試料とした。

浮遊土粒子の粒度構成は、図-9に粒径加積曲線で示した。斜線で示した範囲に粒径加積曲線は分布する。このことは、泥水中にほとんど粒径0.1mm以上の土粒子を含まないことを示している。図中の実線で示した粒径加積曲線は、浮遊状態にあった土粒子が泥水を攪拌したりすることによって、泥水のゲルの強さが一時的に壊れることによって沈殿した二次スライムのものである。

このような沈殿物は、いずれも浮遊物の粗粒な部分が再沈殿して生じるものであることは図-9からわかる。すなわち、最大粒径が浮遊物の最大粒径に一致する。

沈殿土粒子の粒度構成は、図-10に示す。沈殿土粒子の性状に関しては、後にのべる。ここでは、図-9との対応で、比較してみる。斜線の部分がマッドケーキの曲線範囲で、点で示した部分がマッドケーキの下に存在するスライムの曲線範囲である。いずれも、浮遊物より粗粒なものを多量に含むことを示している。図-9および図-10より、土粒子の限界粒径は0.1mmとなる。このときの泥水条件を表-2に示す。

§ 4. くい底部の状況

4.1 ボーリングによる調査

底ざらい終了後の沈殿物の状況を調査するため、底部地盤にシンウォールチューブを押しこみ、スライムの厚さを調査した。この結果を写真-1に示す。これによると約40mmのマッドケーキがみられ、粗粒分はほとんどみられない。



写真-1 底部沈殿物のサンプリング結果
(地盤の上に斜めにマッドケーキが形成されている)

4.2 コンクリート打設後の壁体発掘

4.2.1 底部を粘土地盤に位置させた場合

ドリルの歯型とそこにあたるスライムの状況を観察する目的で、型をとるために砂質粘土地盤中で掘削を中止した。(図-5, S-2) 底ざらいを実施した後に鉄筋をそう入し、コンクリートを充填した。約1カ月後、深礎工法により、周囲の地盤をとり除きくい体を掘り出した。このとき先端のドリルの歯型とスライム状況がよくわかるように細心の注意を払った。図-11は、コンクリート壁体とそれに付着するマッドケーキおよび地盤をスケッチしたものの1例である。その写真を写真-2に示す。

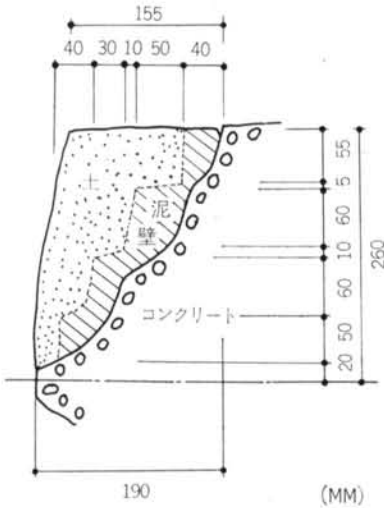


図-11 コンクリート壁体に付着した泥壁の状況(スケッチ)



写真-2 S-2試験体下底面にみられるマッドケーキと地盤の断面



写真-3 S-2試験体の底部



写真-4 S-2試験体底部断面の観察

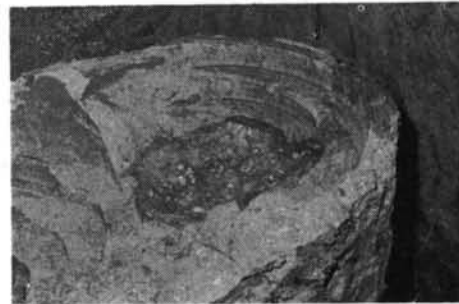


写真-5 S-2試験体底部地盤面に残された歯型



写真-6 S-2試験体歯型の清掃後の状況



写真一七 ドリルの歯型から採取した沈殿物とマッドケーキの断面(下部に歯型の凹凸が認められる)



写真一八 砂礫層に定着させたS-2試験体の先端状況(壁体側面をみたもので右側下方がコンクリート壁体)

写真一三は 掘り出した壁体底部の状況を示す。写真一四は、同じく掘り出した壁体の底部を部分的にコンクリートの地肌が出るまで削りとり、スライムの断面をみやすくしたもので、図一11、写真一二は、この部分を横から観察したものである。これによるとマッドケーキを除けば、ほとんど沈殿物らしいものは付着していない。写真一五は、深礎による堅穴の底部で、壁体をとり除いた状態である。ウォールドリルの歯型が明瞭に示されている。実際には、溝の長さが長くドリルの位置は変化するので、歯型の凹凸はこの写真よりも平均化されて少なくなるものと考えられる。ドリル歯型の最も深い部分には、小砂利ぐらいの大きさのものから砂粒大の沈殿物が存在し、その断面を写真一七として示した。これ

は、主にウォールドリルによる底ざらいにおいてはとりきれなかったと思われるもので、その厚さは最大20mm程度である。また、写真一六はマッドケーキおよび沈殿物をとり除いたところで、シンウォールチューブを押し込んだ穴も明瞭に認められる。

この結果から、ドリルの中央の凹部には、コンクリートがまわっていない。これは、ドリルを1回下ろしただけで、底部の凸凹を平滑化することができなかったためである。沈殿物の粒度分析結果は図一10に示した。

4.2.2 底部を砂礫地盤に位置させた場合

図一五のS-4エレメントは、別途に載荷試験を行なった。試験後、S-2と同様に深礎工法で先端を掘り起した。このときの先端状況は、写真一八に示す。コンクリート壁体と砂礫層との間には、沈殿物もマッドケーキも介在していない。これは、礫層の空げきに浸透したものと考えられる。

§ 5. 結び

地中連続壁の壁体を基礎杭としても利用するという方向が打ち出され、先端の沈殿物の処理が場所打ち杭におけるのと同様重要視されるに至った。この報告は、先端沈殿物の堆積状況を考察し、スライム除去方法の基本方針を定めたものである。要約すると次のようになる。

- 1)沈殿物の沈降速度は、式(1)により計算すれば、実際よりも遅くなり、その結果から沈殿終了時間を設定すれば安全側となる。泥水が管理基準内にある場合は、土粒子の沈降速度を6.0m/hour と考えればよい。
- 2)土粒子が浮遊していることのできる限界の粒径は、式(3)を用いれば、実際よりも小さな値を得る。図一四の管理基準内の泥水中においては0.3mm以下の土粒子が浮遊するという結果が得られている。
- 3)沈殿物は、実験的には約6.0m/hour の速度で沈降するので、掘削深さによって、沈殿の終了時間を計算することができ、結果は安全側になる。また、図一二から求めることも可能である。
- 4)沈殿終了時間を経過した後沈殿物の除去作業を行なえば、その後の沈殿量はほとんどない。底部の地盤上に残るものは、泥水のマッドケーキ、二次スライムのみであり、その厚さは5cmを越えることはない。砂礫層では0cmに等しい。

結果は以上のようなものであるが、沈殿物処理法の全般に関していくつかの問題点を挙げて、今後の課題とし

たい。

- 1)沈殿終了時間が施工工程上大きな時間を占めることになり勝ちである。
- 2)沈殿終了時間経過後も、沈殿物はわずかずつ堆積している。
- 3)鉄筋かご等をそう入する際に、溝壁の土をかき落して底部に沈殿物を生じることがある。

以上の問題点解決について共通していえることは、コンクリートを打設する直前に確実な方法で沈殿物を処理することができれば解決するということである。現状では、鉄筋かご等をそう入した後に沈殿物を処理する確実な方法がないため、鉄筋かご等をそう入する以前に沈殿物を処理し、コンクリート打設までの工程に要する時間をできるだけ短縮することにより、成功を収めている。

〈参考文献〉

- 1) 高橋賢之助：“カルウエルド式アースドリルグイの沈下の原因と解決法の研究” 清水建設研究所報第9号 1967. 4, など
- 2) 大塚義之, 松田昌三：“泥水工法の問題点とその考察” 清水建設研究所報6号 1965. 10.