

泥水工法における泥水管理に関する研究 (第25報)

——地中壁ジョイント部のマッドケーキの形成とその防止法——

喜田大三
川地武

Studies on Control of Slurry for Underground Excavation (Part 25)

——Formation and Prevention of Mud Cake on Joint Parts of Diaphragm Wall——

Daizo Kita
Takeshi Kawachi

Abstract

Recently, attention has been paid to slime and mud cake formed at joint parts of in-situ diaphragm walls from the standpoint of watertightness of the walls. Accordingly, laboratory experiments were carried out to clarify the process of mud cake formation, properties of cake, and effects on watertightness of walls. The results obtained were as follows. (1) Mud cake is formed in a short time on the surface of concrete casted in slurry. (2) The cake formation is localized flocculation of clay particles caused by calcium ions released from the surface of concrete. (3) The permeability of mud cake is of the order of 10^{-5} cm/sec, while the pressure-resisting properties are dependent on thickness and length of cake.

概要

地中連続壁工事の大型化、大深度化に伴って地中壁にはますます高い止水性が要求される。地中壁の止水性低下の要因の代表的なものはジョイント部のスライム、マッドケーキであるが、本報ではマッドケーキの発生状況と止水性への影響について検討した。その結果、(1)泥水に接触したコンクリート硬化体の表面にはマッドケーキが付着し、その厚さはベントナイト泥水では2日で10~20mmに及び、ポリマー泥水では僅かである。(2)マッドケーキの付着はコンクリート表面から溶出するCaイオンによる泥水成分の局所的な凝集によるものである。(3)マッドケーキの透水係数は 10^{-5} cm/secのオーダーであり、ほぼ不透水性であるが、その耐圧性はケーキ厚、ケーキ長さによって異なる。ケーキの耐圧力をケーキの厚さ、長さを含む実験式で表示し、実際の地中壁の規模を考慮して耐圧力を算出すると、深い根切りを行なう地中壁では数ミリのケーキでも漏水の恐れがある。(4)ケーキ付着の防止法としてはジョイント部の中性化などが有効である。ことなどが判明した。

1. はじめに

地中連続壁工法によって構築される地中壁は優れた止水性を有するが、時にはジョイント部からの漏水が見られることがある。ジョイント部の止水性低下の要因としてはスライムおよびマッドケーキが考えられる。掘削孔底に堆積したスライムの除去が不十分な状態でコンクリートが打設されると、スライムは端部に移動し、不完全なジョイントとなるため、スライムの処理は入念に行なわれる。筆者らはスライム処理を考慮した泥水管理のあり方を前報¹⁾において述べた。

一方、先行して構築された地中壁の端部に付着するマッドケーキが地中連続壁の止水性を低下させるため、一部ではマッドケーキの物理的除去などの方法が採用されている。しかし、マッドケーキの形成機構や性状などは不明のまま対策が論じられているのが現状であり、必ずしも適切な対策が講じられていないものと考えられる。そこで、ケーキ形成の状況と止水性への影響について室内実験による検討を行なった。

2. 実験方法

2.1. 供試体の作成

泥水は家庭用ミキサーで混練した。その際の使用材料は次の通りである。

- ベントナイトA: 群馬産250メッシュ
- ベントナイトB: 山形産250メッシュ
- ポリマー: OP-4
- 分散剤: トリポリリン酸ソーダ
- 土: 東京沖積層の粘性土であり, LL 99.8%, PL 33.5%のものを湿潤状態で使用した。

また, ケーキを付着させるコンクリートおよびモルタルの水セメント比は52.9%, 70%とした。なお, 試験の大部分はモルタルを使用し, コンクリートは確認用に供試した。これらは型ワクに打設し, 脱型後, 所定日数の水中養生を行ない, 養生後の硬化体を泥水中に浸漬してケーキを付着させた。ケーキの透水性, 耐圧性を試験する供試体ではケーキを付着させた後, ケーキの一部を残してモルタルを打ち足した。

2.2. 測定項目と方法

- (1) ケーキ付着量 モルタル硬化体を泥水から引上げ, 十分に水切りした後, ケーキ厚さを測定するとともに重量増加量を求めた。
- (2) ケーキの含水比, Ca イオン含有量 付着したケーキを2 m/m 厚さごとに採取し, その含水比を測定し, また塩酸で抽出し, その抽出液についてCa イオンを測定した。
- (3) ケーキの透水係数 付着ケーキを挟む円筒供試体につき, 図-1に示す中空円筒法による透水試験を行ない, ケーキの透水係数を求めた。
- (4) ケーキの耐圧性 ケーキを挟む板状供試体について, 図-1に示す方法によって水圧を作用させ, ケーキが押し流される最低圧力を求めた。

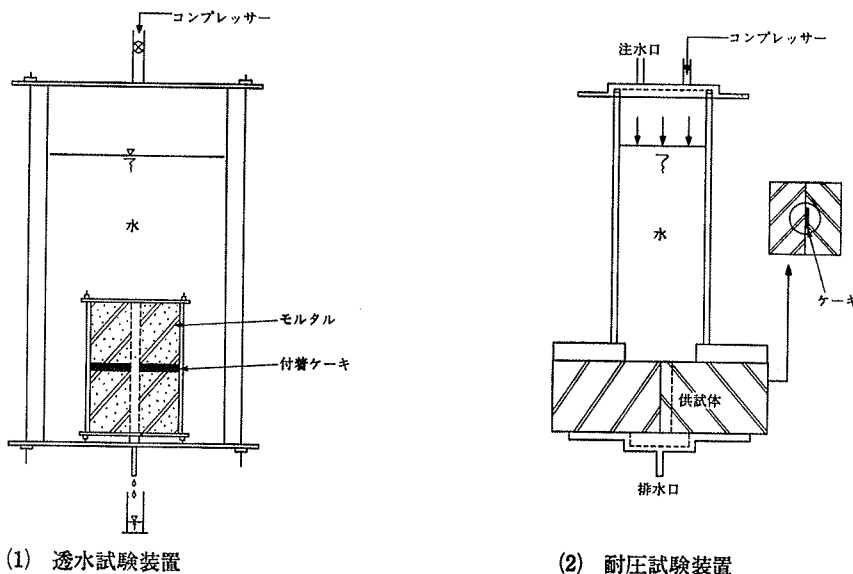


図-1 試験装置

3. 実験結果

3.1. ケーキの付着状況

泥水に浸漬したモルタル硬化体の表面の全面にわたってケーキが付着する。その経時変化を図-2に示しているが, ベントナイト泥水では浸漬後数時間でかなり厚いケーキが形成され, その厚さは時間経過とともに増大する。浸漬は3日間行なったが厚いものでは20 m/mにも及び, さらに厚くなる傾向にある。ケーキの厚さは泥水によって著しく異なり, ポリマー泥水に比べてベントナイト泥水で厚く, ベントナイト泥水の中ではベントナイトBの泥水で厚くなる。また, 掘削土の混入によってケーキは厚くなる。表-1に示すように, ベントナイト泥水では分散剤の添加によって厚さが減少し, ポリマー泥水ではベントナイトの添加によって厚さが増大する。なお, 当然ながら, ケーキの厚さはケーキ付着重量に比例し, 10 m/mのケーキは約1.1 g/cm²の重量に相当する。形成されたケーキはモルタル表面にしっかりと付着

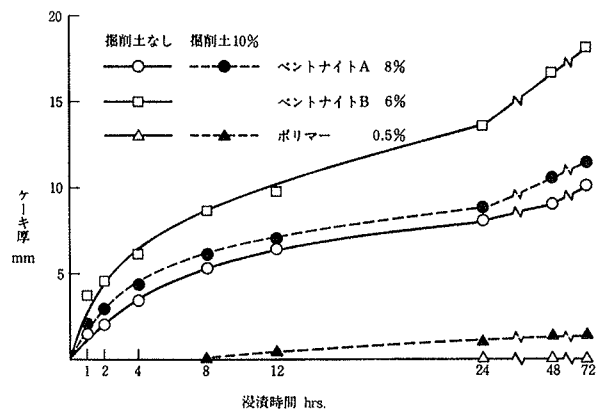


図-2 ケーキの付着状況

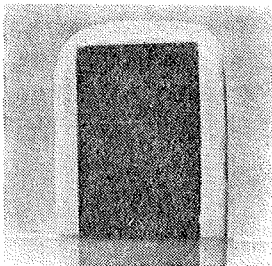
し, 水中で揺動した程度では剝離しないがブラシ等で容易に除きうる。これらはモルタル供試体に関して得られた知見であるが, コンクリート供試体についても全く同様であることを確認している。

3.2. ケーキの性状

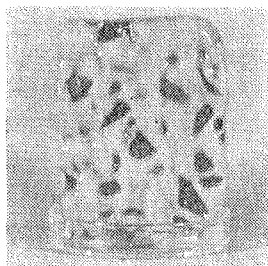
モルタル表面に形成されたケーキについて含水比を測定したところ, 図-3のようにモルタルに近い部分ほど低い値を示し, 付着界面では400~500%と泥水の含水比の1/3~1/2にまで低下している。ケーキの外表面でも泥水の含水比より300%近く低い値を示しており, ケーキと泥水は明瞭に区別し

泥水の配合	ファンネル粘度 (sec)	ケーキ厚 (mm)		付着量 (g/cm ²)	
		24時間後	48時間後	24時間後	48時間後
ベントナイトA 8%	23.6	8.0	9.2	0.75	0.91
ベントナイトB 6%	26.2	13.5	16.5	1.40	1.55
ベントナイトA 8% 分散剤 0.3%	22.0	4.9	6.0	0.47	0.57
ベントナイトA 8% 掘削土 10%	24.3	8.2	10.5	0.84	1.02
ポリマー 0.5%	24.7	—	—	0.04	0.04
ポリマー 0.5% ベントナイトA 1.5%	28.2	1.5	2.0	0.16	0.22
ポリマー 0.5% 掘削土 10%	25.0	1.0	1.5	0.13	0.17

表-1 各種泥水のモルタル表面への付着量



モルタル表面のケーキ



コンクリート切断面への付着ケーキ (骨材には付着していない)

写真 形成されるケーキ

うる。このようにケーキの含水比が泥水に比べて低いということはモルタル表面において脱水を伴ったベントナイト粒子の凝集が生じていることを示唆している。

一方、ケーキ中の Ca イオンの分布を見ると、図-4 に示すように、ケーキ中の Ca イオンの含有量は泥水に比べて高く、特にモルタルとの付着界面の近くで高い。このようなケーキ中の Ca イオンの含有量および分布状態から考えると、Ca イオンの増加はモルタル表面から溶出する Ca イオンに由来するものと思われる。ケーキ中の Ca イオンの増加がモルタル表面から溶出する Ca

イオンと仮定して、溶出量を概算すると 6~8 mg Ca/cm² となり、この値は若材令のモルタルを水中に浸漬した際の Ca イオンの溶出量として報告されている値²⁾に近い。

さて、モルタルあるいはコンクリート硬化体の表面から溶出する Ca イオンは泥水を凝集化させる作用がある。ベントナイト泥水の Ca イオンによる凝集の際の凝集価は別報³⁾で述べたように、15mgCa/g 前後であり、一方、モルタル表面に溶出する Ca はベントナイト乾土当り 50~70 mgCa/g であるので、硬化

体の周囲のベントナイトは容易に凝集するであろう。硬化体に付着したケーキはこのように局所的な凝集によって化学的に形成されたものである。なお、ベントナイト A の泥水よりベントナイト B の泥水で厚いケーキが形成されるのは、ベントナイト B の方が凝集価が低いことに対応している。また、ポリマー泥水でケーキ付着量が少ない理由はポリマー泥水の高い凝集価にあることも明らかである。

3.3. ケーキの透水性、耐圧性

地中壁ジョイント部のケーキの弊害は特に止水性の低下を招くことにある。そこで、ケーキを挟んだモルタル供試体について、中空円筒法による透水試験を行なった。その結果、ケーキの透水係数は $2.0 \times 10^{-5} \sim 5.7 \times 10^{-5}$ cm/sec となった。この値は泥水によって掘削壁面に形成される一般のマッドケーキの値が $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec である⁴⁾のに比べてかなり高いものである。この理由はモルタル硬化体のマッドケーキがベントナイトの凝集作用によって形成されたものであることによるとと思われる。

さて、このようにジョイント部のマッドケーキは一般のそれに比べて止水性に劣るが、 10^{-5} cm/sec のオーダーの透水係数であるので、ケーキを通じた漏水は微々たるものであろう。

そこで、ケーキの耐圧性を図-1 に示した試験装置によって検討した。すなわち、種々の厚さのケーキを挟むモルタル供試体について、ケーキが流去する際の圧力を求め、さらに、モルタル供試体の厚さを種々に変え、ケーキの耐圧性を求めた。図-5 にケー

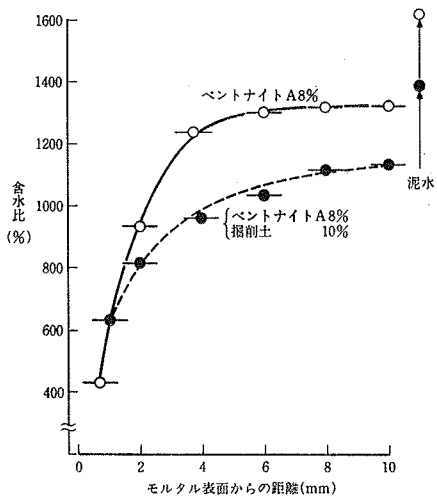


図-3 付着ケーキの含水比

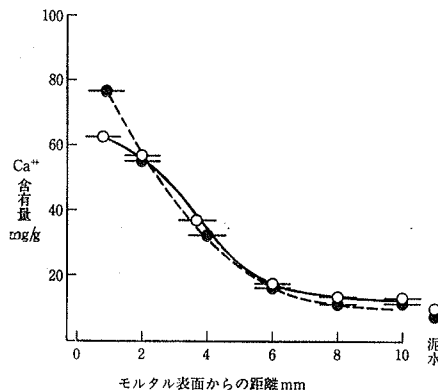
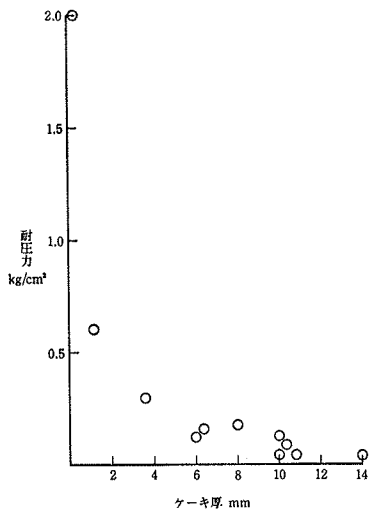


図-4 付着ケーキの Ca⁺含有量 (記号は図-3 と同様)

キ厚さと耐圧力の関係を示した。この結果から明らかのように、耐圧力はケーキ厚の増大につれて急激に低下し、厚さが 10 m/m を越えると 0.1 kg/cm² 前後の耐圧力となる。なお、耐圧力はケーキの長さすなわち地中壁の場合の壁厚にも支配されると思われる、実験の結果、ケーキの長さに比例して耐圧力が增大することが判明した。

そこで、これらの関係を数式化すると、次のような実験式が得られた。

$$P = \frac{0.3l}{d} \dots\dots(1)$$



図—5 ケーキ厚と耐圧性との関係 (l=4 cm)

ここに、P: 耐圧力 kg/cm²
 l: ケーキの長さ cm
 d: ケーキの厚さ m/m

4. 考察

4.1. ケーキ付着の防止法

実験結果によって明らかのように、地中壁ジョイント部におけるケーキの発生は若材令コンクリート表面から溶出する Ca イオンによる ベントナイト粒子の局部的な凝集現象に基づくものである。したがって、その防止方法は泥水の凝集に対する抵抗性を増大させることや、コンクリート表面からの Ca イオンの溶出の抑制などが考

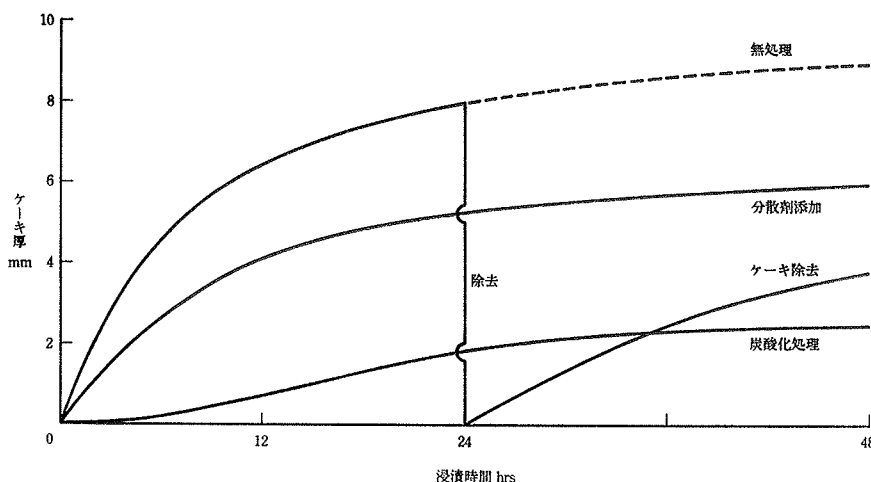
えられる。そこで、泥水に分散剤を添加したところ、図—6 に示すようにケーキの付着量はかなり減少し、分散剤の添加量を増大させることによってさらに減少させることも可能である。一方、コンクリート表面からの Ca イオンの溶出抑制方法の一つとして表面を炭酸化（中性化）させる方法がある。コンクリートをあらかじめ炭酸ソーダ溶液に浸漬し、表面を中性化したのちにベントナイト泥水に浸漬したところ、ケーキの厚さは無処理のもの約20%にまで減少し、この方法が有効であることが確認できた。なお、表面からの Ca イオンの溶出抑制の方法としては表面に炭酸ガスを吹付ける方法やリン酸ソーダなどの Ca イオンと難溶性の化合物を形成する薬品で表面処理する方法などが考えられ、これらについては特許出願中である。

一方、最近ジョイント部に形成されるケーキをブラシなどで物理的に除去する方法があるが、これは図—6 に示しているように必ずしも有効な方法ではない。すなわち、ケーキを除去しても付着は再び始まり、付着速度はかなり低下するものの、除去後1日で除去直前の約半分となる。現場におけるジョイントの清掃がコンクリート打設の直前に行われれば、ケーキ除去という方法も有効であろうが、清掃の後に鉄筋カゴのそう入などに長時間を要する場合には再びケーキが付着することになり、有効な対策とは言えない。

なお、これらのケーキ防止対策を採用してもベントナイト泥水においては完全にケーキの付着を防止することはできない。したがって、ケーキの付着を完全に防止する必要のある場合にはベントナイトを含まないポリマー泥水を使用する方が得策であろう。

4.2. ジョイント部の止水性

地中壁ジョイント部に形成されるケーキの止水性への影響はケーキ自身からの漏水およびケーキの洗い出しによる空洞部からの漏水の形を取って表面化するであろう。前述のように、ケーキの透水係数は 10⁻⁵ cm/sec のオーダーであるので、たとえ数ミリの厚さのものであり、水圧が 1 kg/cm 程度となっても、ジョイント部からの漏水は 1 l/min にも満たないと概算され、止水上の欠陥とはならない。ところが、ケーキが水圧によって洗い流されてしまえば、この部分からの漏水は無視できない。そこで、実際の地中壁の



図—6 各種処理の効果 (ベントナイト A 8%)

規模を想定してケーキの耐圧性を前出の実験式(1)を用いて計算してみた。ここで、地中壁の壁厚を600mmと仮定し、 l を94.2cmとしている。地下水位の高い地盤において深い根切りを行なう場合、水圧が2~3 kg/cm²に及ぶことはまれ

ではなく、したがってケーキが10m/mも付着すればこの部分のケーキが洗い流されることになる。したが

ケーキ厚さ mm	耐圧力 kg/cm ²
1	28.2
2	14.1
5	5.6
10	2.8
15	1.8

って、深い根切り工事の場合には特にケーキの発生を防止するような対策が必要であろう。また、ここでは化学的に付着したケーキのみの影響を見ているが、後行部のコンクリート打設の際にスライム処理が不十分であれば、ジョイント部には砂などが押しやられ、ケーキはさらに厚くなることもあり得るので、ジョイント部の止水性すなわち耐圧性がさらに低下しよう。

5. おわりに

地中連続壁の止水性能、耐力の高いことが大規模な根切りを伴う地下構造物の構築技術の開発をもたらしている。このような地中壁においては特にすぐれた止水性が要求されるが、その際、ジョイント部の止水性が問題となる。そこで、ジョイント部の止水性低下の原因の一つであるマッドケーキについて、その発生原因と止水性への影響などについて検討した。その結果、以下に列挙する事実が判明した。

(1) マッドケーキのコンクリートへの付着はベントナイト泥水で著しく、泥水への浸漬時間とともに厚くなり、2日後には10~20 m/mに及ぶ。ポリマー泥水では付着量は比較的少なく2日後でも1~2 m/mである。

(2) 付着するマッドケーキはコンクリート表面から溶出するCaイオンによるベントナイトあるいは泥水中の掘削土粒子の凝集によるものであり、単なる物理的な付

着によるものではない。

(3) 付着したケーキの透水係数は10⁻⁵ cm/secのオーダーであり、掘削壁面に形成されるマッドケーキのそれに比べれば大きい。ケーキを通しての漏水は微々たるものである。

(4) 付着したケーキは水圧を作用させることによって洗い流される。その際の水圧をケーキの耐圧力とすると、耐圧力(P)はケーキ厚(d)に反比例し、ケーキの長さ(L)に比例し、 $P=0.31/d$ の実験式で表わすことができる。

(5) 実験式を用いて地中壁ジョイント部の止水性を耐圧力によって表示すると、標準的な壁厚の場合、ケーキ厚が10 m/mで耐圧力は2.8 kg/cm²であり、地下水位の高い地盤で根切り深さが深い場合にはジョイント部のケーキが洗い流されることによって漏水が生じる可能性がある。

(6) ジョイント部のマッドケーキの防止法として行なわれているブラシなどによるケーキの除去はコンクリート打設の直前でなければ効果は小さい。一方、先行パネルの端部を炭酸塩や炭酸ガスで中性化する方法はかなり効果的である。

ジョイント部の止水性は今後地中壁が大深度になるにつれて重要な課題となると思われ、単にマッドケーキのみでなくスライムなどにも着目して、これらの発生防止にさらに努める必要があり、より一層の研究開発が求められる。

参考文献

- 1) 喜田, 川地: 大林組技術研究所報, No. 17, (1978) pp. 81~85
- 2) 沢村, 川田, 宮野: セメント技術年報 XVI, (1962) pp. 176~181
- 3) 喜田, 川地: 大林組技術研究所報, No. 4, (1970) pp. 107~116
- 4) 喜田, 中田: 大林組技術研究所報, No. 4, (1970) pp. 101~106