

泥水工法における鉄筋とコンクリートの付着力の低下防止法に関する研究

(第1報)

喜田大三
守屋正裕

Study on Prevention of Deterioration of Bond Strength between Concrete and Reinforcing Bars in Underground Excavation with Slurry (Part 1)

Daizo Kita
Masahiro Moriya

Abstract

In reinforced concrete constructed by underground excavation using slurry, it is known that bond strength between concrete and reinforcing bars is lower compared with normal reinforced concrete. The main cause of this is that clay particles dispersed in the slurry, mainly bentonite, stick to the bars which are inserted into the trench filled with slurry. As a result of experiments and investigations carried out, it was proved that bond strength between concrete and bars was influenced by the volume of bentonite bonded to the bars. The cause of bentonite sticking to bars was an electrochemical reaction of iron ions released from the bars. As a result of investigations on methods of preventing bentonite from sticking to bars, it was found that sticking of bentonite to bars was completely prevented by polarization to about -700 mV (against S.C.E.). The current density needed was about 20 mA/m^2 .

概 要

泥水工法によって構築された鉄筋コンクリートでは、鉄筋とコンクリートとの付着力が通常の鉄筋コンクリートに比べて低下することが知られている。この主な原因は、掘削孔内の泥水中に挿入された鉄筋に泥水中の粘土分主としてベントナイトが吸着するためであると考えられる。そこで、鉄筋へのベントナイト吸着および鉄筋の付着に寄与する泥水の諸因子について検討した。その結果によれば、ベントナイトおよび増粘剤CMCの濃度が増して粘性が高くなるほど吸着量は増加し付着力は減少した。一方、分散剤添加によって泥水の懸濁分散性が向上すると吸着量は減少し付着力は増加した。また、ベントナイトが鉄筋に吸着する機構を推定し、電気的な方法によるベントナイトの吸着防止法について検討した。その結果、鉄筋の電位をおよそ -700 mV (S.C.E.基準)以下に分極させることによってベントナイトの吸着を完全に防止できることが判明した。なおその際の必要電流量は $10\sim 20\text{ mA/m}^2$ であった。

1. まえがき

OWS・SOLETANCHE工法では、ベントナイト泥水を用いて地盤を掘削し、その掘削孔に鉄筋をカゴ形に組んだ鉄筋カゴを挿入する。その後泥水を生コンクリートで置換して鉄筋コンクリートの地下壁や杭を構築する。この工法は、騒音や振動がほとんどないことから、市街地での建築工事や地下鉄などの土木工事で多くの実績をあげている。

ところで、このような泥水工法によって施工された鉄筋コンクリートでは、その施工条件によって、普通

の鉄筋コンクリートに比べて鉄筋とコンクリートとの付着力が低下するという現象が現場実験や室内実験で認められている。その主な原因は次のように考えられる。この施工法においては、泥水の満たされた掘削孔内に鉄筋カゴを挿入してからコンクリートを打設するまでに通常数時間を要するが、現場の状況によっては十数時間鉄筋が泥水中に放置されることがある。この間に泥水中の粘土分主としてベントナイトが鉄筋に吸着して、その後に打設したコンクリートと鉄筋とが一部絶縁されるためである。

近年泥水工法による地下構築物はますます大規模と

なり、鉄筋カゴが泥水中に放置される時間も必然的に長くなってきている。したがって、このような条件下で施工される鉄筋コンクリートの鉄筋とコンクリートとの付着力の低下は無視できない要因になると思われる。

そこで、本研究の目的は、泥水工法における鉄筋とコンクリートの付着力の低下現象について研究し、付着力の低下を抑制する方法を確立することである。この報告では、今まで行ってきた一連の実験研究の中から、鉄筋へのベントナイトの吸着と鉄筋とコンクリートの付着力に影響する各種泥水側因子の検討、ベントナイトの吸着量と鉄筋の付着力との関係および電気によるベントナイトの吸着防止法の一部について報告する。

なお、文中において、鉄筋へのベントナイトの吸着をベントナイトの吸着あるいは単に吸着とし、鉄筋とコンクリートとの付着力を鉄筋の付着力あるいは単に付着力とし、付着強度も付着力と同じ意味で用いている。

2. ベントナイト吸着量および鉄筋付着力に影響する各種因子の検討

2.1. 実験 I

2.1.1. 実験概要 この実験は、実験計画法の多元配置法により、ベントナイトの吸着量および鉄筋付着力に影響を与える因子のうち、特に泥水側の諸因子について検討したものである。

検討した因子およびその水準を表-1に示した。これらの因子を直交配列表の $L_{32}(2^{31})$ にわりつけ、32通りの条件で実験を行なった。測定した特性値は、ベントナイトの吸着量および鉄筋の付着力で、鉄筋を泥水中に浸漬する前と浸漬後の重量差からベントナイトの吸着量を求め、この鉄筋をただちにモールド (15×15×15cm)に移し、コンクリートを打設して硬化させた後に、引き抜き試験によって鉄筋付着力を測定した。なお、実験方法の詳細は紙数の関係で省略する。

因子	水準	
	1	2
A ベントナイトの種類	赤城	クニゲルV ₁
B ベントナイトの濃度	4 %	8 %
C C M C の種類	G-2	A-1
D C M C の濃度	0 %	0.05%
E 分散剤の種類	カルゴン	フミン酸塩
F 分散剤の濃度	0 %	0.5 %
G 鉄筋の泥水浸漬時間	3 hr	24 hr
H 鉄筋の種類	異形	丸鋼

表-1 検討因子と水準

2.1.2. 実験結果と検討 実験の結果得られたデータについて、実験計画法に基づく統計解析を行ない、各因子の寄与率および交互作用について検討した。ベントナイト吸着量および鉄筋付着力に関する分散分析の結果を表-2に示す。

検討の結果、ベントナイトの吸着量および鉄筋の付着力に有意な影響を与える因子はほぼ共通しており、特に次の5因子の影響が大きいと判定された。ベントナイトの種類と濃度、分散剤の種類と濃度、鉄筋の種類。なお、当然ながら鉄筋の付着力に対しては鉄筋の種類 (異形または丸鋼) の影響が他の因子に比べてきわめて大きい。

要因	ベントナイト吸着量		鉄筋付着力	
	注1) 分散比(F ₀)	寄与率(%)	注2) 分散比(F ₀)	寄与率(%)
A ベントナイト種類	27.91 **	14.33	25.3 **	0.61
B ベントナイト濃度	25.68 **	13.14	19.3 **	0.46
D C M C 濃度	9.64 **	4.60	—	—
E 分散剤種類	6.95 *	3.17	—	—
F 分散剤濃度	29.10 **	14.96	17.7 **	0.42
G 鉄筋の泥水浸漬時間	4.41	1.82	—	—
H 鉄筋の種類	18.73 **	9.44	3850 **	96.7
交互作用	A × B	3.73	1.45	13.3 **
	A × C	10.00 **	4.79	—
	B × D	7.54 *	3.48	2.8
	B × E	8.18 *	3.82	—
	C × E	5.68 *	2.49	—
用	C × F	5.32 *	2.30	7.4 *
	D × E	7.91 *	3.68	—
ε'	—	16.53	—	—

注1) * F(1.17:0.05)=4.45, ** F(1.17:0.01)=8.40
注2) * F(1.19:0.05)=4.38, ** F(1.19:0.01)=8.18

表-2 分散分析表

2.2. 実験 II

2.2.1. 実験概要 実験 I の結果有意であると判定された因子について、ベントナイトの吸着量および鉄筋付着力への影響をより詳細に調査するために、実験 I の結果を参考に、一元配置法による表-3の泥水内容で、ベントナイトの吸着量および鉄筋付着力の測定を各々3連で行なった。

なお、鉄筋は異形鉄筋 (径22mm) を用い、泥水浸漬時間はすべて3時間とした。

また、ベントナイトの吸着量および鉄筋の付着力と泥水の一般的性質との関係について検討するために、表-3に示した供試泥水について、pH、懸濁分散性、粘性の測定もあわせて行なった。なお、実験方法の詳細は省略する。

2.2.2. 実験結果と検討
実験結果を図-1, -2に示し、以下に検討した。

(1) ベントナイト濃度の影響 (図-1)

吸着量は、ベントナイト濃度の高い方が多くなる傾向がある。しかし2つ以上のくりかえしの平均値の差を検定するための判定値 (LSD) を求めて検定したと

実験No	泥 水 内 容		分 散 剤	
	ベントナイト (赤城) 濃度	CMC (A-1) 濃度	種 類	濃 度
1	0(水)	—	—	—
2	4 %	—	—	—
3	8	—	—	—
4	12	—	—	—
5	8	0	—	—
6	〃	0.05%	—	—
7	〃	0.10	—	—
8	〃	0.15	—	—
9	8	—	Na ₂ CO ₃	0
10	〃	—	〃	0.5%
11	〃	—	〃	1.0
12	〃	—	〃	2.0
13	8	—	フミン酸塩	0
14	〃	—	〃	0.5%
15	〃	—	〃	1.0
16	〃	—	〃	2.0

表-3 供試泥水

ころ、ベントナイト濃度 4, 8, 12%の間では吸着量に有意差は認められなかった。

一方付着強度は、ベントナイト濃度 4%までは徐々に低下し、それ以上の濃度で急に、8%以上で徐々に低下している。8%ではプレーンに比べて約14%低下している。なお、LSD 値による検定結果では、プレーンと 0%(水)では有意差は認められず、プレーンと 4%では有意差が認められた。

(2) Na₂CO₃ 添加の影響 (図-1)

吸着量は、Na₂CO₃ 0.5%の添加によって無添加(ベントナイト 8%)よりも減少し、さらに添加量を増すと逆に吸着量は増加する傾向がある。

一方付着強度は、Na₂CO₃ 無添加でプレーンに比べて約14%低下しており、Na₂CO₃ を0.5% 添加した場合には付着強度は無添加に比べて約10%回復し、さらに添加量を増した場合には付着強度は逆に低下しており、2%添加した場合には無添加に比べて約25%、プレーンに比べて約39%低下している。

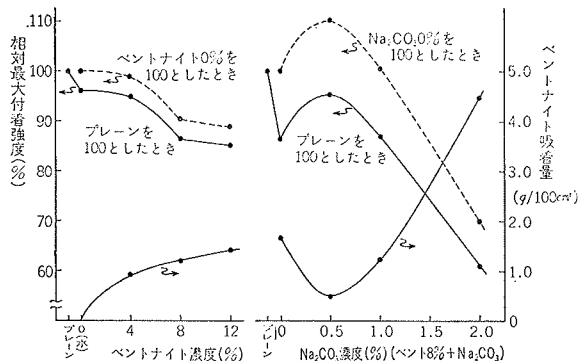


図-1 ベントナイト濃度および Na₂CO₃ 濃度の影響

(3) フミン酸塩添加の影響 (図-2)

吸着量は、フミン酸塩を添加することによって減少する傾向がある。ただし、LSD 値による検定の結果では、添加濃度0.5%から2.0%の間では吸着量に有意差は認められない。

一方付着強度は、フミン酸塩無添加(ベントナイト 8%)でプレーンに比べて約14%低下しているが、フミン酸塩を添加することによって付着強度は回復する傾向があり、0.5% 添加した場合には無添加に比べて約7%付着強度が高くなっている。なお、0.5% から2.0%の間では付着強度に有意差は認められない。

なお、最近よく使用されている分散剤ヘキサメタリン酸塩もフミン酸塩と類似の効果を有している。

(4) CMC 添加の影響 (図-2)

実験 I で0.05%CMC 添加ではその影響は少なかったが、最近 CMC を高濃度で使用する傾向があるのでここに実験を行なった。

吸着量は、CMC の添加によってわずかに増加する傾向であるが、LSD 値による検定の結果いずれの測定値間にも有意差は認められなかった。

一方付着強度は、CMC無添加(ベントナイト 8%)でプレーンに比べて約9%低下しており、CMC 添加濃度0.1%までは無添加の場合と同程度であるが、0.1%以上になると付着強度は急に低下し、0.15%添加した場合には無添加に比べて約18%、プレーンに比べて約25%低下している。

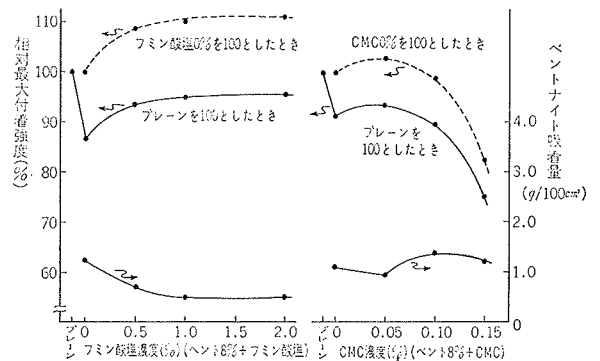


図-2 フミン酸塩濃度および CMC 濃度の影響

次に、泥水の一般的性質とベントナイト吸着量および鉄筋付着力との関係について検討した結果次のことが明らかとなった。

供試した泥水の pH, 懸濁分散性 (耐凝集能), 粘性などの一般的性質とベントナイト吸着量および鉄筋付着力との関係について相関分析を行ない、相関関係の有意性を検定した。その結果、泥水の懸濁分散性、粘性と吸着量および付着力の間にはそれぞれ有意な相関関係が認められ、泥水の懸濁分散性が良くなるほど、

粘性が小さくなるほどベントナイトの吸着量は減少し、鉄筋の付着力は増大することが明らかとなった。

ところで、懸濁分散性(耐凝集能)は、 Na_2CO_3 、フミン酸塩などの分散剤を適正量添加することによって向上する。このことは上述の(2)、(3)の結果をうらづけている。一方、粘性は、懸濁分散性とも密接な関係があり、懸濁分散性が良いほど粘性は小さく、懸濁分散性が低下すると粘性が大きくなる。また、ベントナイトおよび増粘剤 CMC の濃度が増すことによって粘性は大きくなる。このことは前述の(1)、(4)の結果をうらづけており、特に必要以上の CMC の添加は好ましくない。

以上、実験Ⅱに基づく検討の結果次のことが明らかとなった。

(1) 鉄筋へのベントナイトの吸着量が多くなるほど鉄筋とベントナイトの付着力は低下する傾向がある。

(2) 異形鉄筋をベントナイト濃度8%の泥水(添加剤なし)中に3時間浸漬した際に鉄筋に吸着したベントナイトの影響によって、鉄筋とコンクリートの付着強度はプレーンに比べて9~14%低下した。

(3) 泥水の懸濁分散性が悪くなるほど、粘性が大きいほどベントナイト吸着量は増加し、鉄筋の付着力は低下し易い。そのため、分散剤の適量添加は吸着量を減少させ、付着力を増加させるが、 Na_2CO_3 の過剰添加は逆効果を示すので注意する必要がある。一方、増粘剤 CMC の添加は吸着量を増加させて付着力を減少させ、特に必要以上の添加は好ましくない。

2.3. ベントナイト吸着量と鉄筋付着力との関係

実験Ⅰおよび実験Ⅱの結果から、それぞれベントナイトの吸着量と鉄筋の付着力との関係について相関分析を行ない、回帰直線を推定してその有意性を判定した。その結果を表一4に示す。同表から明らかなように、実験Ⅰ、Ⅱの結果ともにベントナイトの吸着量と鉄筋の付着力(相対最大付着強度)との間には、直線で表わされる高度は負相関の関係が認められた。

	実験Ⅰ	実験Ⅱ
試料数(n)	13	15
相関係数(γ)	-0.914	-0.887
検定結果	危険率1%で有意	危険率1%で有意
回帰直線	$y = -8.90x + 99.38$	$y = -9.93x + 97.53$
不偏分散の平方根	4.49	4.91

y = 相対最大付着強度 (%)
 x = ベントナイト吸着量 (g/100cm²)

表一4 吸着量と付着力との相関分析結果

次に、実験Ⅰ、Ⅱの結果から得られたこの2つの回帰直線について、回帰直線の差の検定により比較したところ、分散の差、回帰係数の差および切片の差ともに有意性は認められず、2つの回帰直線は差がないと判定された。このことから、吸着量と付着強度との直線関係の信頼性がいっそう認められる。

そこで、次に実験Ⅰ、Ⅱの測定値を合せて相関分析を行ない、次の結果を得た。なお、散布図を図一3に示した。

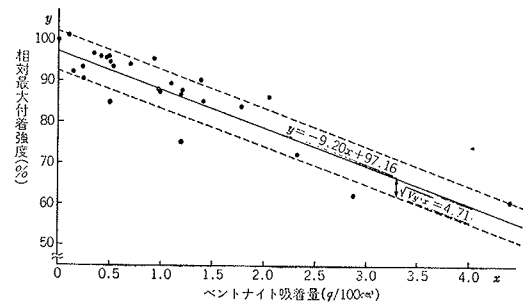
相関係数： $\gamma = -0.890$ (危険率1%で有意)

回帰直線： $y = -9.20x + 97.16$

不偏分散の平方根： $\sqrt{V_{y,x}} = 4.71$

x = ベントナイト吸着量 (g/100cm²)

y = 相対最大付着強度 (%)



図一3 吸着量と付着強度との相関性(異形鉄筋)

3. ベントナイトの吸着防止法

2章の検討結果から、泥水工法によって構築した鉄筋コンクリートにおける鉄筋とコンクリートとの付着力が低下する原因として、泥水中に浸漬した鉄筋に粘土分主としてベントナイトが吸着することが少なからず影響していることが明らかとなった。そして、ベントナイトの吸着量と鉄筋の付着力との間に直線で表わされる逆比例の関係が認められた。したがって、ベントナイトの吸着を防止することによって鉄筋付着力の低下を抑制できることが明らかである。そこで、ベントナイトの吸着防止法について検討した。

3.1. ベントナイトの吸着原因とその機構についての考察

泥水中に浸漬した鉄筋にベントナイトの粘土粒子が吸着する原因および機構は次のように推定される。

図一4に模式的に示すように、泥水中に浸漬した鉄筋のミルスケール剝離部分から鉄イオン(Fe²⁺)が溶出(鉄の腐食)し、この鉄イオンを介して負荷電をもつベントナイトの粘土粒子が凝集吸着する。その際、ミルスケールと鉄素地との電位差が鉄の溶出を促進している。

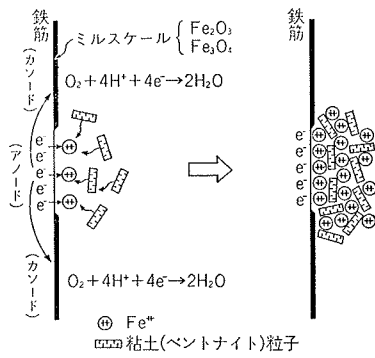


図-4 ベントナイトの吸着機構模式図

以上のように吸着原因を推定した理由を以下に列記する。

(1) ベントナイトの粘土粒子は水中において負に帯電しており、粒子間の電気的な反発力によって分散状態を保っている。この中に、陽イオンたとえば、Ca⁺⁺、Na⁺、Fe⁺⁺などを添加すると粘土粒子の負の荷電は陽イオンによって相殺され、その結果いわゆる凝集状態となる。

(2) 鉄筋へのベントナイトの吸着状態を観察すると、図-5に示すように、鉄筋の全面に吸着するのではなく、まばらに粒状に吸着している。またその吸着箇所は、鉄筋表面のミルスケールが剥離して発錆したり、キズがついている部分である。

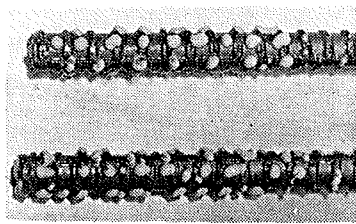


図-5 ベントナイトの吸着状況

(3) 吸着したベントナイトはうすい青色を呈しており、空气中に放置しておくこと茶褐色に変化することから鉄イオン (Fe⁺⁺) の存在が予想され、吸着したベントナイトを分析した結果、ベントナイトの CEC (陽イオン交換能) の約50%に相当する鉄イオン (Fe⁺⁺) が検出された。

(4) 泥水の pH は通常の9前後であり、金属の腐食傾向を判定する電位-pH 平衡状態図から、鉄は泥水中において腐食溶出する傾向にある。

(5) ミルスケール付着部分とミルスケール剥離部分の泥水中における鉄筋の電位を測定したところ、ミルスケール付着部分の電位が貴であり、両者間の電位差は 150~170mV であった。

なお、実験Ⅱにおいて分散剤添加によって吸着量が減少した現象もこの吸着機構によって説明できる。すなわち、鉄筋から溶出した鉄イオンによってベントナイトが凝集吸着するのであるから、フミン酸塩、ヘキ

サメタリン酸塩、少量の Na₂CO₃ の添加によってベントナイトの耐凝集能が向上し、鉄イオンによっても凝集しにくくなり吸着が抑制されるのである。

3.2 電気によるベントナイト吸着防止法

3.2.1. 原理 前述のように、ベントナイトの粘土粒子が鉄筋に吸着する原因は、鉄筋からの鉄イオンの溶出に起因した電気化学的な作用であることが明らかとなった。

さて、ベントナイトの吸着原因となる鉄イオンの溶出は、鉄筋が泥水中で腐食することによっておこる。したがって、電気防食の原理を応用して、泥水中に浸漬した鉄筋を電気防食することによって鉄イオンの溶出を防止し、ベントナイトの吸着を防止することが可能である。

一般に、金属の腐食はその表面に各種形態の腐食電池が構成されて起こり、泥水中における鉄筋の腐食も例外ではない。泥水中に浸漬した鉄筋の場合には、ミルスケールの付着している部分がカソード、ミルスケールの剥離している部分がアノードとなって局部電池腐食が起こる。この局部電池における局部陰極部の電位を外部から電流を与えることによって、局部陽極部の開路電位まで陰分極させることにより、局部電池は事実上なくなって完全防食され、金属の溶出が止まる。

3.2.2. 室内実験による吸着防止効果の確認

図-6に示す装置を用いて、泥水中に浸漬した鉄筋を陰極、炭素棒を陽極として外部から電流を流し、鉄筋の電位を一定に保持した時のベントナイトの吸着状況を観察した。

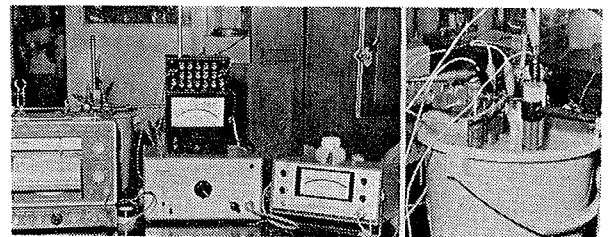
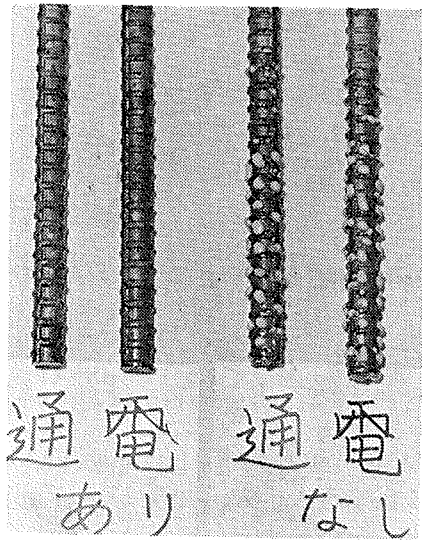


図-6 吸着防止実験装置

実験の結果、図-7に1例を示すように、鉄筋の電位をおよそ -700mV (S. C. E.基準) 以下に保持することによって、ベントナイトの吸着を完全に防止できることが判明した。

なお、その際の必要電流量は、鉄筋表面の分極が進むにしたがって時間とともに減少し、通電開始の数時間後では 10~20mA/m² であった。なお、この必要電流量は、鉄筋の表面状態や泥水の性質によって変化する。



図一七 吸着防止実験後の鉄筋

4. おわりに

ここでその一部を紹介した電気によるベントナイトの吸着防止法による泥水コンクリートの施工法については、著者らが昭和42年11月に特許出願を行ない特許を得ている。なお、この方法を実際の現場に適用した例などについては又の機会に報告する。