

土の動電現象を用いた土と鋼材の摩擦低減効果に関する基礎的研究

野田 兼司*1・矢嶋 貴大*2・安井 利彰*3

Fundamental study on reduction of friction between the soil and the steel by electrokinetic phenomenon of soil

Kenji NODA, Takahiro YAJIMA, Tosiaki YASUI

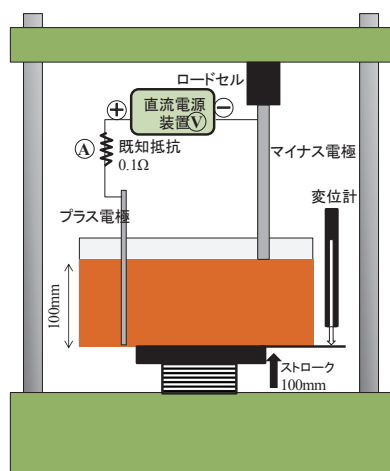


図-1 実験装置概要

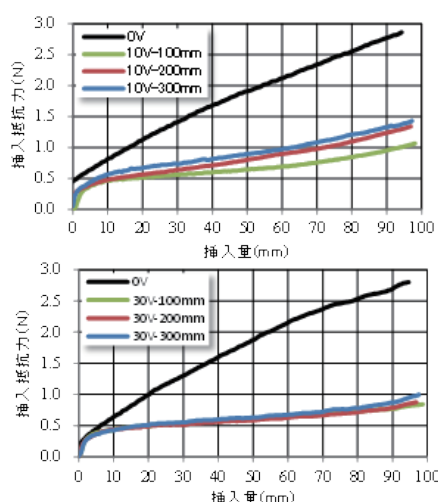


図-2 鋼材挿入時の挿入抵抗力結果の一例

(上段：通電 10V、下段：通電 30V)

研究の目的

土に直流電圧を加えると、土と鋼材の摩擦抵抗を低減させる現象が発生することが報告されている。その他、土の動電現象の利用としては、土壤汚染対策として、電気泳動現象を利用し、イオン化した重金属等の汚染物質を電極周辺で回収して浄化する方法の研究や、電気浸透現象を利用した粘性土地盤からの脱水方法の研究が報告されている。しかしながら、建設現場での適用事例はどれも少ない。そこで、通電による土と鋼材の摩擦抵抗低減現象の建設分野への適用を検討するため、その現象の発生メカニズムの解明を目的に種々の実験を行った。

技術の説明

土はマイナスに帯電していると言われ、地盤中に電流を流すことにより電気浸透現象が起きていると言われている。電気浸透現象とは、土粒子がマイナスの電荷を帯びているため、接する水がプラスの電荷になることで電気的な二重の層ができる電気二重層現象が発生する。そこに電圧を与えた場合にマイナス側に水が引き寄せられる現象である。今回、室内実験を通し、摩擦抵抗の低減は、この電気浸透現象の他にマイナスに帯電している土粒子の斥力が影響していると想定できる結果が得られた。

主な結論

- 鋼材の挿入実験を行い、通電しないケースと 10V・30V を通電したケースを比較すると通電したケースでは明らかに通電しないケースよりも挿入抵抗力は小さくなる。
- 同じ電圧を通電した場合、通電する電極の間隔が広がると挿入抵抗力の低減効果が小さくなる。
- 土と鋼材の摩擦低減の発生メカニズムとしては、土粒子がマイナスに帯電して存在している場合、鋼材を通して電流が流れると、マイナス電極側となった鋼材と土粒子間に瞬間的にマイナス同士で斥力が発生し、マイナス極側となった鋼材に接する土粒子の接触面積が減少するためではないかと想定された。
- 通電引抜き実験により鋼材への土砂の付着減少が室内実験で見られることから、鋼矢板引き抜き時の周辺地盤の変状抑制への適用も可能と考えられる。

*1 本店 技術研究所 環境研究室
*3 本店 技術研究所 生産性革新技術研究室

*2 本店 土木設計部

土の動電現象を用いた土と鋼材の摩擦低減効果に関する基礎的研究

野 田 兼 司^{*1} 矢 嶋 貴 大^{*2}
安 井 利 彰^{*3}

要 旨

本報では、土の動電現象を用いた土と鋼材の摩擦低減現象の建設分野への適用を検討するため、発生する現象のメカニズム解明を目的として、通電後の鋼材周辺で生ずる水分量の変化や鋼材への付着状況の確認、および通電しながらの鋼材の挿入や引抜きなどの室内実験を行った結果を示す。結果から、通電により、マイナス極とした鋼材周辺の水分量が増加すること、マイナス極とした鋼材への土の付着が少なくなること、および通電中マイナス極とした鋼材の挿入・引抜きの抵抗力が小さくなることなどが分かった。また、通電による土と鋼材の摩擦低減メカニズムとして、従来から言われている電気浸透や電気分解の他、土粒子と鋼材の電氣的反発力（クーロン斥力）も摩擦低減に大きく関与していると想定できる結果が得られた。

キーワード 動電現象／土中通電／鋼材挿入・引抜き／室内実験

目 次

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| 1. はじめに | 3. 現場適用に向けての室内中型実験 |
| 2. 室内小型実験による
メカニズムの解明 | 4. 考察 |
| | 5. まとめ |

FUNDAMENTAL STUDY ON REDUCTION OF FRICTION BETWEEN THE SOIL AND THE STEEL BY ELECTROKINETIC PHENOMENON OF SOIL

Kenji NODA
Toshiaki YASUI

Takahiro YAJIMA

Synopsis:

Study on the electrokinetic phenomena of soil in the construction field has been studied such as soil remediation, dehydration of clay, reduction of friction between the soil and the steel material.

However, it seems that there are few cases used in actual construction sites.

In this report, the results of laboratory experiments conducted to elucidate the mechanism of friction reduction between the soil and the steel by energization are shown. As a result, reduction of friction between the soil and the steel material by energization resulted in the assumption that the electric repulsion force between the soil particles and the steel material contributed to friction reduction in addition to electroosmosis and electrolysis.

* 1 本店 技術研究所 環境研究室

* 2 本店 土木設計部

* 3 本店 技術研究所 生産性革新技術研究室

1. はじめに

土に直流電圧を加えると、土と鋼材の摩擦抵抗を低減させる現象が発生することが報告されている¹⁾。その他、土壌汚染対策として、電気泳動現象^{*1}を利用し、イオン化した重金属等の汚染物質を電極周辺で回収して浄化する方法の研究²⁾や、電気浸透現象^{*2}を利用した粘性土地盤からの脱水方法の研究³⁾が報告されている。しかしながら、建設現場での適用事例はどれも少ない。そこで、通電による土と鋼材の摩擦抵抗低減現象の建設分野への適用を検討するため、その現象の発生メカニズムの解明を目的に種々の実験を行った。

※1 電気泳動現象：プラスイオンのマイナス極側への移動やマイナスイオンがプラス極側へ移動する現象

※2 電気浸透現象：マイナスに帯電した土粒子近傍の水がプラスに帯電し、その反対の極性であるマイナス側に移動する現象

2. 室内小型実験によるメカニズムの解明

2.1 通電による鋼材周辺で生ずる変化

(1) 実験概要

通電による土と鋼材の摩擦抵抗低減のメカニズム解明のため、通電による鋼材付近での水分量変化および鋼材への試料付着状況を確認する目的で実験を実施した。

使用した実験装置を写真-1に示す。模擬地盤の土槽にアクリル容器(長さ 330mm×幅 50mm×深さ 110mm)を使用し、挿入する鋼材にアルミ平板(長さ 300mm×幅 30mm×厚さ 5mm)を使用した。

模擬地盤は、アクリル容器中に含水比を 40%、60%となるように計量した木節粘土と水を 10L のホバートミキサーを用い混練したものを容器底面から 100mm の高さまで充填し作製した。

通電する鋼材の距離(鋼材間隔)は 150mm とし、30V の電圧を通電時間 10 分および 20 分とした時の鋼材付近の含水比の変化を確認した。含水比の測定は鋼材から 10mm 範囲の土を集め測定した。

表-1 に実験条件の一覧表を示す。

表-1 通電による鋼材周辺で生ずる変化の確認実験の条件一覧表

通電鋼材間隔	150mm
通電電圧	30V
マイナス極条件	通電中静置 10 分, 20 分
マイナス極形状	平板
地盤含水比	40%, 60%
地盤条件	木節粘土のみ

(2) 実験結果

図-1 に鋼材周辺の通電後の含水比を示す。

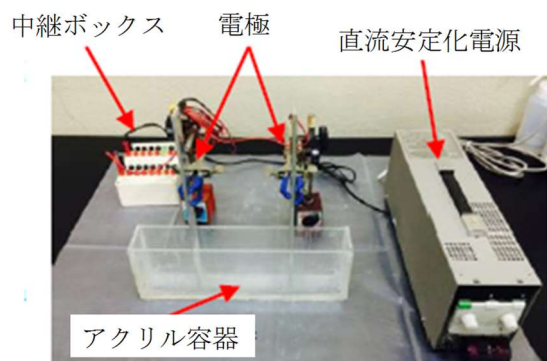


写真-1 実験装置の概要

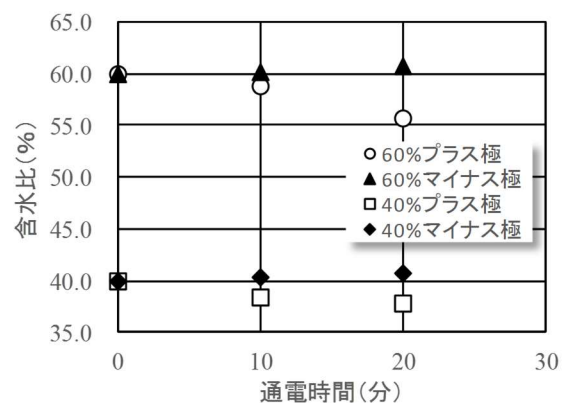


図-1 鋼材周辺の通電後含水比



写真-2 通電後の付着状況
(含水比 40% t=10 分)

通電時間 0 分に初期の含水比を示す。10 分および 20 分通電後、マイナス極側の鋼材周辺では含水比が増加し、プラス極側の鋼材周辺では含水比が低下する現象が生じた。時間の経過に伴い、マイナス極側では含水比の増加、プラス極側では含水比の減少が進む傾向が見られ、初期状態 60%の方が顕著であった。

実験中、初期状態では模擬地盤表面上には水が浮いている状態ではなかったが、通電時間の経過に伴い、マイナス極側の鋼材周辺の模擬地盤表面に水が浮いている様子が確認できた。これは、電気浸透による水分の移動によるものと考えられる。また、数分後にはマイナス極側の鋼材付近から気泡が発生していることが確認でき鋼材で電気分解の発生によるものと考えられる。

写真-2 に、通電後の木節粘土の鋼材への付着状況を示

す。マイナス極側の鋼材にはほとんど付着していないが、プラス極側の鋼材には付着しており、両極の付着状況の差が顕著に出た。

2.2 鋼材の挿入実験

2.2.1 挿入実験

(1) 実験概要

通電による土と鋼材の摩擦抵抗の低減効果を，実施工を模擬した実験で確認するため，一軸圧縮試験機を用い模擬地盤へ通電しながら鋼材を挿入する実験を行った。

実験には，2.1の実験に用いた実験装置を使用した。

模擬地盤は，アクリル容器中に含水比 57%となるように計量した木節粘土と水を混練したものを容器底面から 100mm の高さで充填し，模擬地盤とした（図-2）。実験風景を写真-3 に示す。

通電による土と鋼材の摩擦抵抗の低減効果は，マイナス極の鋼材で起こることから，プラス極側の鋼材はあらかじめ土槽に挿入しておき，通電しながらマイナス極側の鋼材を挿入した。

鋼材間隔と加える電圧をパラメータとし，マイナス極側の鋼材挿入時の挿入量と挿入抵抗力の変化を測定した。

また，マイナス極側の鋼材の形状による挿入抵抗力の違いの確認のため，通電電圧 10V でマイナス極側の鋼材の向きを横向きに変えたケース(負極横向)とマイナス極側の鋼材の形状を H 型にしたケース（負極H型）の実験も併せて実施した(写真-4 参照)。

その他に，地盤への適用性の考察のため，模擬地盤の砂分量（砂重量/（砂重量+粘土重量））を 5%，20%，40%，60%，100%と変えた挿入実験も実施した。

鋼材の挿入速度は，試験中一定（0.5mm/sec）とした。

表-2 に挿入実験の実験条件の一覧表を示す。

表-2 挿入実験条件一覧表

	挿入実験	鋼材形状 変更挿入	地盤条件 変更挿入
鋼材間隔	100mm 200mm 300mm	100mm	100mm
通電電圧	0V 10V 30V	0V 10V	0V 10V
マイナス極 条件	一定速度挿入 0.5mm/sec 挿入量 100mm		
マイナス極 形状	平板	H 型 平板(横向き)	平板
地盤含水比	57%		
地盤条件 (砂分量)	粘土のみ		5% 20% 40% 60% 100%

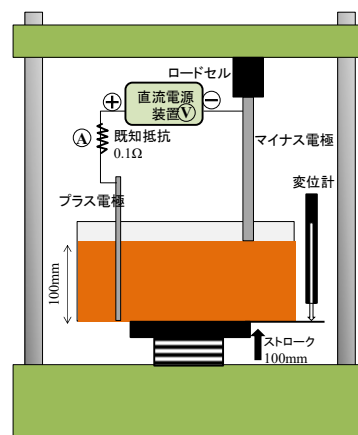


図-2 挿入実験装置概要

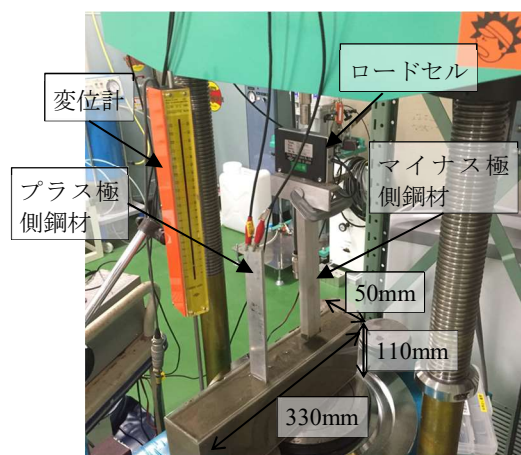


写真-3 挿入実験風景



写真-4 挿入実験追加ケース
(左：負極横向 右：負極H型)

(2) 実験結果

鋼材挿入時の鋼材にかかる荷重（挿入抵抗力）を計測した結果の一例を図-3(a)(b)に示す。通電しないケース（0V）と 10V, 30V 通電した場合の挿入抵抗力と挿入量の関係を鋼材間隔（100mm, 200mm, 300mm）毎に示す。通電 0V（通電しないケース）に比べ、10V, 30V 通電したケースでは明らかに挿入抵抗力は低下しており、また、電圧 10V のケースでは鋼材間隔が短いほど、挿入抵抗力が小さくなる結果となった。

鋼材の挿入抵抗力の低減効果を比較するために、挿入応力低減率を定義する。鋼材を土中に挿入した時の挿入抵抗力を挿入時表面積で除した値を挿入応力とし、以下の式で挿入応力低減率を算出した。

挿入応力低減率(%) =

$$\frac{0V50mm \text{ 挿入時の挿入応力}-各ケースでの 50mm \text{ 挿入時の挿入応力}}{0V50mm \text{ 挿入時の挿入応力}} \times 100$$

この挿入応力低減率と鋼材間隔との関係を図-4 に示す。

図には「負極横向」の結果と「負極H型」の結果も併記する。通電電圧が 10V の場合は、通電する鋼材間隔が大きくなるに従い挿入応力低減率が小さくなるが、30V 通電時には鋼材間隔による挿入応力低減率の変化は見られなかった。また、電極形状の違いにより、挿入応力低減率に差が出る結果が得られた。

次に、木節粘土と珪砂の重量混合率を変えた模擬地盤を作製し、粘土から砂までの広範囲の模擬地盤に対して、電気的な低減効果が発揮されるか否かの実験を行った。その結果を図-5 に示す。

横軸には砂分量（砂重量/（砂重量+粘土重量））、縦軸には前述の挿入応力低減率を示す。

粘土の時と同様、電圧が大きいほど低減効果が大きい結果となり、砂分の量が多くなると効果が小さくなる傾向が見られた。このことから、通電の効果は砂には作用しにくく、粘土分が卓越するほど効果があることがわかる。

2.2.2 摩擦抵抗低減のメカニズム検証実験

(1) 実験概要

浅川⁴⁾は、摩擦抵抗低減の発生メカニズムとして電気浸透および電気分解によるガスの発生によるものと示唆している。今回の通電後の鋼材周辺状況を確認する実験でも、これらの現象は見られたが、いずれも通電開始後数分から数十分経過後に観察された。一方、図-3 の結果から土と鋼材の摩擦抵抗の低減は即時に生じており、電気浸透や電気分解のような時間のかかる現象ではなく、別の瞬間的なメカニズムがあるのではないかと考えた。

そこで、土と鋼材の摩擦抵抗低減のメカニズム検証のため一定電圧（10V）を通電し続ける連続通電と 10V を 30 秒間通電し、30 秒間停止する「通電-停止」を繰り返

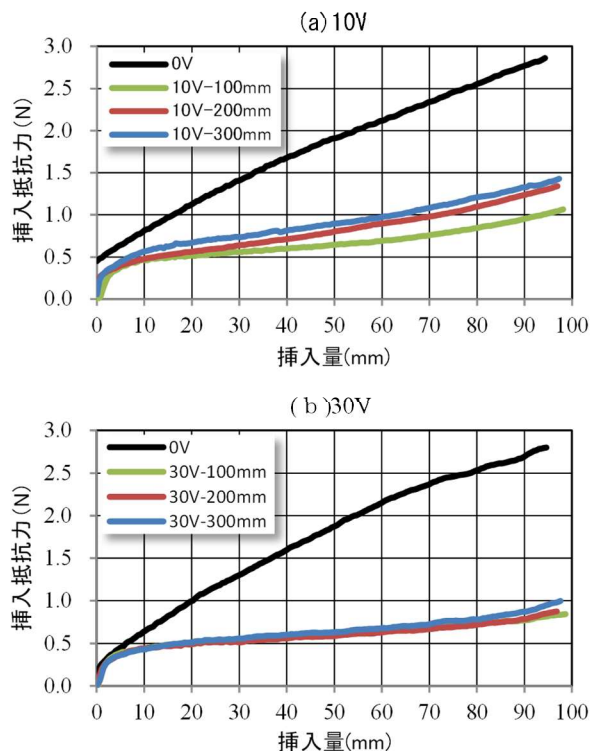


図-3 挿入実験結果の一例

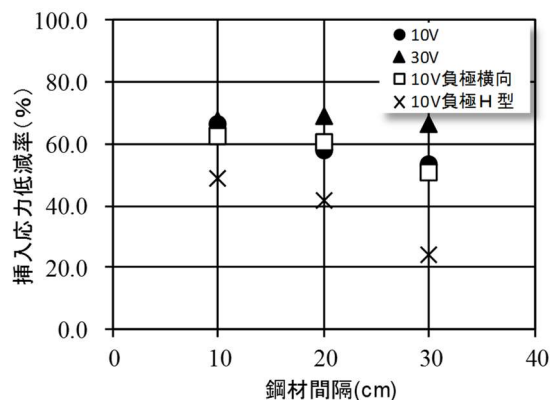


図-4 鋼材間隔と挿入応力低減率の関係

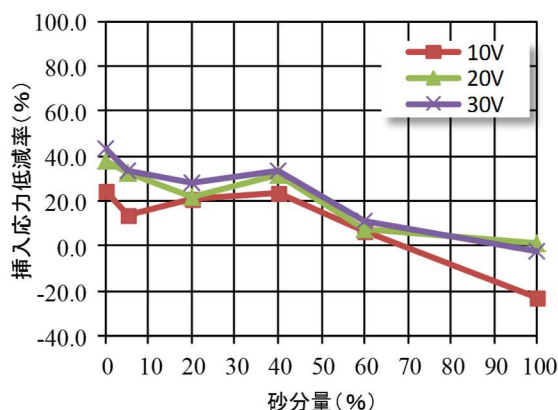


図-5 地盤の砂分量と挿入応力低減率の関係

し行う断続通電の比較実験を行った。

実験は、木節粘土のみで作製した模擬地盤（含水比 57%）の実験容器に、あらかじめプラス極とする鋼材を設置する。

その後、鋼材間隔 100mm の位置にマイナス電極とする鋼材を地盤の深さ 50mm 程度まで手で挿入し、そのままでは自沈しないことを確認してからマイナス電極とする鋼材にロードセルを装着し初期状態とした（図-6）。

その状態から直流電圧を通电し、マイナス極側の鋼材に設置したロードセルの荷重の変化を確認した。

自沈しない状態（鋼材重量と土と鋼材の摩擦抵抗力が釣り合っている状態）を初期状態としているため、通电の影響により土と鋼材の摩擦力が低減した場合、土と鋼材の摩擦力の低減分だけ鋼材の重量が下向き作用し、その値がロードセルに摩擦抵抗低減量としてでると考えた。

表-3 にメカニズム検証実験の実験条件一覧表を示す。

表-3 メカニズム検証実験条件一覧表

通电鋼材間隔	100mm
通电電圧	10V
マイナス極条件 (通电条件)	50mm 挿入静置 (連続通电, 30 秒断続通电)
マイナス極形状	平板
地盤含水比	57%
地盤条件	木節粘土のみ

(2) 実験結果

図-7 に連続通电の結果を図-8 に断続通电の結果を示す。

連続通电の場合には、土と鋼材の摩擦抵抗の低減は連続的に発生し定常状態を迎えた。一方、断続通电の場合には、通电を開始すると土と鋼材の摩擦抵抗の低減による引張り抵抗力増加の傾向がみられ、電気を停止すると引張り抵抗力の増加も即座に停止する現象が見られた。

本実験により、通电による土と鋼材の摩擦抵抗の低減は通电と共に瞬時に発生し、通电を止めると瞬時に消失するというを確認した。森⁵⁾や小林ら⁶⁾を参照すると、通电の有無に関わらず、粘土粒子は飽和状態でマイナスに帯電して存在すると言われている。鋼材間で通电すると、マイナス電極側の鋼材では、瞬間的に鋼材と土粒子の間にマイナス同士のクーロン斥力が発生し、鋼材に接する粘土粒子の接点数や接触面積が減少し、よって土と鋼材との付着抵抗が低減するのではないかと考えられる。図-9 に想定した土と鋼材の摩擦低減メカニズムの模式図を示す。

なお、連続通电と断続通电の土と鋼材の摩擦抵抗の低減量の絶対値の違いについては、初期状態作製時のマイナス電極側の鋼材の設置やロードセルの装着など手作業による微妙な力のかけ具合の違いによるものとも考えられるが、精査できていない。したがって、今回は土と鋼材の摩擦抵抗低減の傾向の違いにのみ着目することとした。

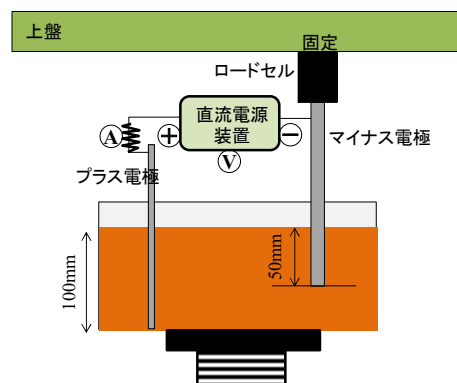


図-6 摩擦抵抗低減メカニズム検証実験装置

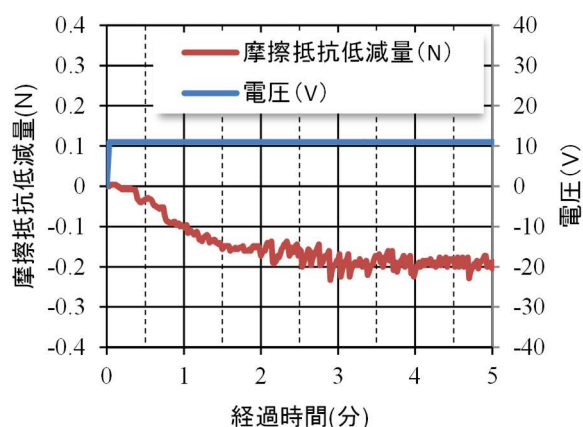


図-7 連続通电結果

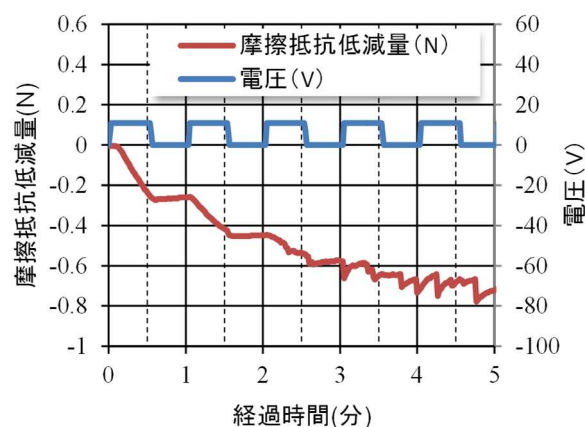


図-8 断続通电結果

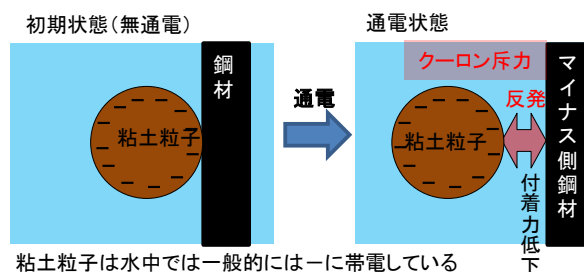


図-9 土と鋼材の摩擦低減のモデル図

2.3 鋼材の引抜き実験

(1) 実験概要

鋼材引抜き時の土と鋼材との摩擦低減や鋼材への土の付着状況を確認する実験を行った。

実験は、挿入実験に用いた実験装置を用いた。電極となる鋼材を土中に設置後、引抜く対象の鋼材(図中 a)をプラス極として 10 分間通电(図-10①)し、土の付着を増加させ(写真-2 のプラス極参照)、初期状態とした。その後、鋼材に接続したプラス極とマイナス極を入れ替え、通电しながらマイナス極の鋼材(図中 a)の引き抜きを行うケース(図-10②)と通电せずに対象の鋼材を引き抜くケース(図-10③)の比較実験を実施した。

実験では木節粘土のみで含水比 57%の模擬地盤を作製し、鋼材間隔は 100mm、電圧は 10V を通电させながら引抜いた。引抜き速度は、0.5mm/sec で一定とした。

表-4 に引抜き実験の実験条件一覧表を示す。

表-4 引抜き実験条件一覧表

通电鋼材間隔	100mm
通电電圧	0V, 10V
マイナス極条件	(設置後プラス極として 10 分間通电) 一定速度引抜き 0.5mm/sec 引抜き量 100mm
マイナス極形状	平板
地盤含水比	57%
地盤条件	木節粘土のみ

(2) 実験結果

通电しながら鋼材を引抜くケース(通电あり)と通电せずに鋼材を引抜くケース(通电なし)の引抜き量と引抜き抵抗力の関係を図-11 に示す。

通电による土と鋼材の引抜き抵抗力の低減は顕著に表れており、最大値および引抜き途中の引抜き抵抗力も小さくなっている。

また、引抜いた電極の土の付着量の違いを写真-5 に示す。付着土量にも大きく違いが出ており、通电しながら引抜くことにより、土の付着量が低減することがわかった。

このことは、鋼矢板などの引抜き時に問題となる周辺地盤の変状を抑制するのに非常に有効な方法となりうると思われる。

3. 現場適用に向けての室内中型実験

3.1 実験概要

実施工への展開を考え、電極となる鋼材の大きさの影響を検討するため、H 型鋼材(SS400 100mm×100mm×6mm×8mm)を用いた室内中型実験を行った。実験容器は長さ 1000mm×幅 300mm×深さ 600mm の木製容器を作成し、模擬地盤は底面から 400mm の高さとした(図-12)。模擬地盤は、木節粘土と水を含水比 57%となるように計量し、100L の二軸パドルミキサで 50L 毎 3 回混練して容

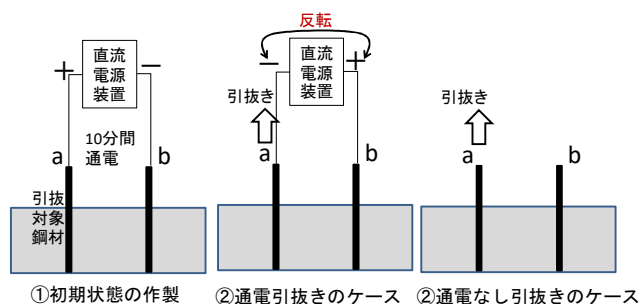


図-10 引抜き実験の概要

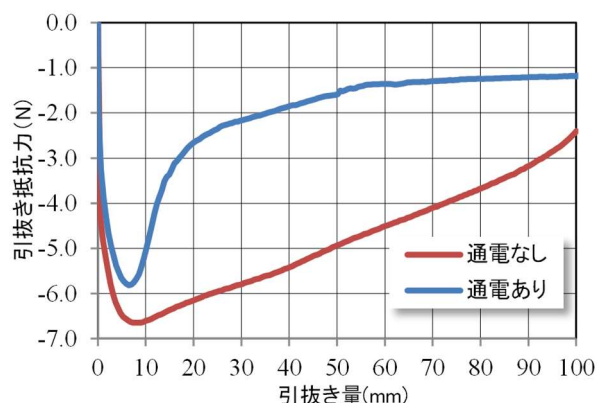


図-11 引抜き実験時のマイナス極引抜き抵抗力



写真-5 引抜き実験後のマイナス電極の状況

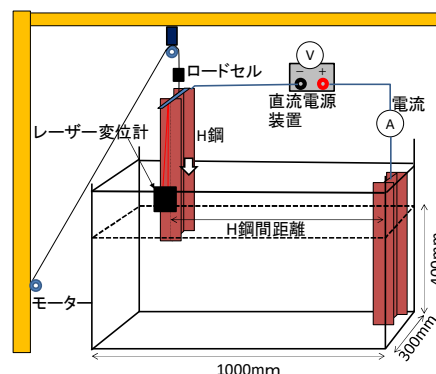


図-12 室内中型実験装置の概要

器に充填し、再度容器内で攪拌して作製した。

小型実験と同様、あらかじめ、プラス電極となる H 鋼は容器短辺に接する位置の中央に設置し、所定の鋼材間隔の位置にマイナス電極となる鋼材をロードセルを介して吊り下げる（鋼材間隔はウェブ間の距離とした）。

通電をしながら、一定速度でマイナス電極となる鋼材を下降させ土中に挿入する。挿入速度は、小型実験に極力近づけ 0.7mm/sec とした。

電圧は 10V、30V とし、鋼材間隔は、450mm、600mm、800mm として実験を実施した。

表-5 に室内中型実験の実験条件一覧表を示す。

表-5 引抜き実験条件一覧表

通電鋼材間隔	450mm,600mm,800mm
通電電圧	10V, 30V
マイナス極条件	一定速度挿入 0.7mm/sec 挿入量 400mm
地盤含水比	57%
地盤条件	木節粘土のみ

3.2 実験結果

室内中型実験結果を図-13、図-14 に示す。室内小型実験と同様に、通電なしの場合に比べ、通電した場合には挿入抵抗力は小さくなっている結果が得られた。また、10V に比べ 30V 通電の場合の方が低減効果も大きいという結果が得られた。

4. 考察

室内小型・中型の挿入実験結果を統一的に評価することを目的として、図-15 を準備した。図は、挿入する鋼材の摩擦抵抗が鋼材と土との付着面で発生することから、鋼材が模擬地盤の半分（小型試験では 50mm、中型試験では 200mm）挿入時の電流値を付着表面積で除した「電流密度」を横軸とし、縦軸には、前述の「挿入応力低減率」で整理し直したものである。

鋼材の挿入応力の低減効果は、電流密度が 4A/m^2 程度までは電流密度に比例して上昇し、それ以上では効果が頭打ちなることが見て取れる。このように電圧、通電する鋼材の間隔・配置・形状等の実験条件の違いに関わらず、電流密度によって実験結果を統一的に評価できる。また、青色で示した含水比 100% のケースは、挿入時にかかる土と鋼材の摩擦抵抗が極端に小さいため、低減率の小さい変曲点のない曲線となったと考えられる。

本結果は、現場への適用にあたって、土と鋼材の摩擦抵抗低減のための適切な電圧や電流のレンジが存在すること、電流密度により土と鋼材の摩擦低減効果の制御が可能であることを示唆していると思われる。

土と鋼材の摩擦低減のメカニズムについては、従来言われている、電気浸透現象や電気分解によるもの以外に、図-3 や図-7、図-8 に示したように、土と鋼材の摩擦低減

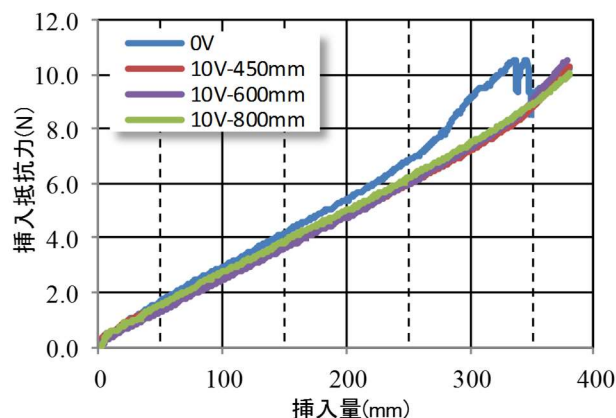


図-13 H 鋼の挿入量と挿入抵抗力の関係（10V）

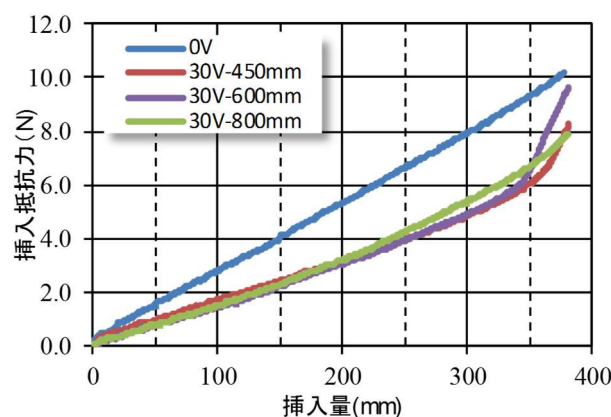


図-14 H 鋼の挿入量と挿入抵抗力の関係（30V）

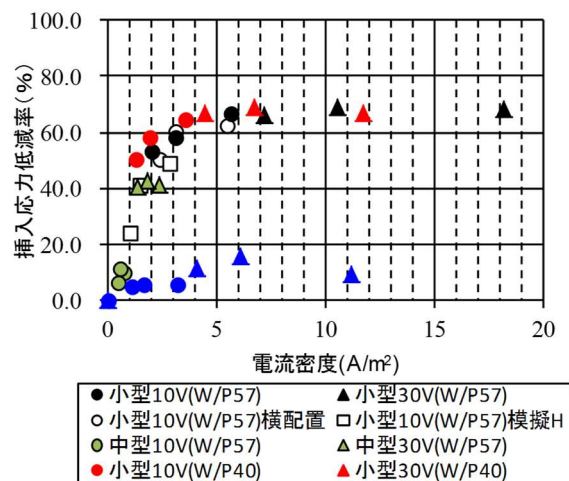


図-15 挿入実験における電流密度と挿入応力低減率の関係

効果が通電を開始した直後より即時に発揮されていることから、何らかの要因が存在することが示唆された。

その要因として考えられるのは、土を介して鋼材間で通電すると、マイナス電極側では、瞬間的にマイナスに帯電した鋼材と土粒子の間にマイナス同士のクーロン斥力が発生し、鋼材に接する粘土粒子の接点数や接触面積が減少することによって付着抵抗が低減するためではないと思われる。この斥力が地盤を介して鋼材間を流れる電流値に比例する（ファラデーの法則）ことが図-13 の

整理結果を説明しうられるが、現時点では明言し難く、今後の課題である。

5. まとめ

本研究で実施した各実験で得られた結果を以下に整理する。

- ・通電しながらの鋼材の挿入実験を行い、通電しないケースと 10V および 30V を通電したケースを比較すると通電したケースでは明らかに通電しないケースよりも挿入抵抗力は小さくなる。

- ・10V を通電した場合、通電する鋼材の間隔が広がると挿入抵抗力の低減効果が小さくなる。

- ・30V 通電した場合、通電する鋼材の間隔が広がっても今回の実験の範囲内(100mm~300mm)では低減効果に変化がなかった

- ・通電をしながらの引抜き実験では、通電なしのケースよりも通電ありのケースの方が引抜き抵抗力が小さくなり、引き抜いたマイナス電極側の鋼材への土の付着量も少なくなった。

建設分野への適用の一例として、通電により鋼材への土砂の付着が減少することが室内実験で見られることから、鋼矢板引き抜き時の周辺地盤の変状抑制や鋼矢板再利用時の付着土砂除去作業の省力化などへの適用が可能と考えられる。

今後は、実施工に適用するにあたって、スケール効果

や地盤の不均一性による影響を実規模の実験により確認するとともに、地盤への電気通電による周辺影響についての詳細な検討（測定・管理および安全対策等）、および具体的な施工要領・手順を確立させることが必要である。

参考文献

- 1) 最上武雄：土質力学，岩波全書，pp.145-149，1958.
- 2) 川地 武：農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線：6.電気泳動による汚染土壌の修復技術，日本土壤肥科学雑誌，第 79 巻第 2 号，pp.209-211，2008.
- 3) 三瀬 貞：粘土の電気浸透による脱水工法の一考察，土木学会論文集，第 69 号，pp.22-28，1960.
- 4) 浅川美利：電気浸透と電解の原理による土と壁体間摩擦の軽減に関する実験，土木学会論文集，第 64 号，pp.55-66，1959.
- 5) 森 麟：電氣的逆性土の添加による土の性質の変化について，土木学会誌，第 38 巻第 10 号，pp.452-456，1953.
- 6) 小林幹佳，杉本卓也，山田健太，チェン ダック パム，本莊雄太：土壌と界面電気現象 3.界面動電現象とその利用，日本土壤肥科学雑誌，第 85 巻第 3 号，pp.251-258，2014.