

基礎地盤の電気化学的安定工法について

松 尾 新 一 郎*

要旨 構造物の軟弱基礎地盤に適用した電気化学的安定工法の原理、適用の理由、設計およびその施工結果の概要について述べたものである。

1. ま え が き

毎日大阪会館の設計計画に先立つその基礎地盤の調査の結果、ビル基礎版下約 13 m にわたり軟弱粘土層の介在することが判明した。この層はビル建設後沈下にいちじるしい影響があることが予想せられ、種々検討の結果、その対策として電気化学的安定工法が適用されるに至った。

すなわち軟弱地層に電極を挿入し直流を通じ、粘土の間隙水を陽極より陰極に向つて移動せしめ、陰極付近に設けたウエルポイントから揚水量を飛躍的に増加させ、軟弱粘土層の圧密を促進せしめ、同時に電極棒にアルミニウムを用いてその電解によつて生じたアルミニウム化合物にて地盤を固結（この反応は元に戻らない）したものである。他の基礎工法、たとえば杭打基礎などに比較して工費および工期を短縮することができ、効果的、経済的であつた。

すでに本工法を適用した国道 1 号線熱田伝馬跨線橋橋台基礎地盤（名古屋市内）ならびに国道 30 号線稔橋取合道基礎地盤（岡山県内）における成果¹⁾²⁾をもとにして、本ビルに対する土質調査、予備実験の結果、本工法の有利なることが確かめられた。

以下これらの概要について述べよう。

2. 本工法の原理

飽水状態にある細粒土の中に埋設した 1 対の電極を直流電源に接続すると、つぎのような現象が起る。

(1) 間隙水は電極のうちの一つに向つて、ほとんどの土質においては陰極に向つて流れる。この現象を電気滲透と呼ぶ。

(2) 圧縮性のある土質においては通常、体積が減少し、またある場合には体積が増加する。体積の減少する場合には土質強度の増加をとまなうことになる。この現象は電気化学的固結と称せられている。

(3) 粘土質鉱物の表面に付着しているイオンが間隙水中に存在したり、あるいは電流により運び込まれた他

のイオンと交換せられる。この現象を塩基交換といつている。

(4) 電極の電気化学的分解の結果、コロイド物質の間隙に金属塩が堆積する。またかかる金属塩は間隙水中や分子表面に存在していることがある他の自由因子に対して、反応作用を起すことがある。この反応の結果、土の分子が結集すれば、これを電気化学的硬化と呼んでいる。

土を電氣的に処理している間に、このような現象が全部同時に発生することがある。土ならびに電極として用いる金属材料の種類によつては、上記の現象のうちの 2 つ以上が、この方法で処理される土の強度を増加するのに役立つことがありうる。本実施例では主として (1) と (4) を利用したのである。

3. 構造物と基礎地盤の概要

構造物は毎日大阪会館で、鉄筋コンクリート造ベタ基礎を G.L.-12.300 m におき、主体は鉄骨鉄筋コンクリート造の地下 3 階、地上 12 階（軒高 G.L.+31.000 m、最高 G.L.+43.000 m）、建坪 321 坪、延坪 3 982 坪で、昭 29.7.18 着工、昭 31.6.30 竣工したものである。

現場周囲の状況としては、東側に大阪毎日新聞社印刷局（鉄筋コンクリート造、地下 1 階、地上 3 階）、南側に幅員 4.5 間の道路を隔てて木造 2 階建家屋、西側に大阪市南北線道路、北側に毎日新聞社社屋（鉄筋コンクリート造地下 1 階、地上 5 階）がある。

敷地内に実施された数本のボーリング結果から判明した基礎地盤の概況はつぎのようである。

表層より深度約 10 m 付近までは大体において砂質の層が続く、以下約 25 m 付近まで第 1 粘土層（これは特に問題となる層）がある。この粘土層は 10 m 以上におよぶ厚さを有しており、かつ土質は深度が増大するにつれ悪くなつていく。

この第一粘土層の下に 13 m 程度の厚さをもつ砂礫層が介在し、深度 38 m あたりから再び粘土層が現出する。この粘土層も深度約 48 m 付近まで続く比較的厚い層であり、第二の問題となる層である。

以下深度約 48 m より約 61 m までは砂礫層、深度 61 m より約 83 m まで粘土層、それ以下は再び砂礫層が続いている。

* 正員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室

敷地内ではこれらの地層が水平に分布しているようである。

自然地下水位は地表面下 1.90 m にあり、揚水試験によると深度 8 m 付近までの砂層からはかなりの湧水がみられる。さらに第 2 地下水は深度約 25~27 m 付近の砂礫層に認められ、かなりの水頭を有している。

4. 本工法適要の理由

前記のような土質条件において本ビルのようなかなりの規模の構造物を築造する際、最も確実な方法は信頼するにたる地層まで達する杭打ちを行うか、あるいは潜函を下げるなどの工法を行うことであろう。

このビルの場合、基礎下端を地盤面下 12 m と仮定すれば、第 1 粘土層の上部に達している。従つて杭打あるいは深礎工法による場合は、地表面下 26 m 前後の砂利層に達するまで杭を打つか、あるいは潜函を下げることになり、この場合の沈下は第 2 粘土層以下の層に影響され、沈下量は 5 cm 程度と推定される。

しかしながら、いまの場合、信頼するに足ると考えられる地表面下 26 m にある砂利層まで確実な基礎を下げることが、構造物の規模にもよるが、はなはだ高価となることはまぬかれない。

沈下しない、あるいは沈下を極限した基礎のため巨額のコストを支出することは必ずしも正当であるとは限らない。問題は沈下による影響の程度いかんである。

一方周囲地盤の全体的沈下にさからうことを止め、構造物が沈下してもよいように、技術的処理をなすことが考えられる。そこで適切な技術的処理を行うことを前提として、ビルの基礎をベタ基礎とした場合を考えると、沈下には主として第 1 粘土層の影響が現われてくる。

この場合、ビルが沈下するお主な原因としては、粘土層の圧密沈下や塑性流動沈下などが考えられるが、このうち塑性流動沈下はこのビルの場合、土質試験、極限支持力の計算などから考察して、その危険性は考えられない。

表一 沈下の時間的变化

沈下 (%)	時間係数	年数	沈下 (cm)
20	0.03	0.45	4.6
30	0.07	1.05	6.9
40	0.12	1.80	9.2
50	0.20	3.00	11.5
60	0.29	4.35	13.8
70	0.41	6.15	16.1
80	0.56	8.40	18.4
90	0.85	12.70	20.7
93	1.00	15.00	21.4

このビルの北東部には旧館があり、その部分の地層は一応落着いているものと考えられ、新館を建設した場合には南西に傾く傾向の方が大きい。この傾斜を予測することは困難であるが、いまかりに南北方向に両端で

10 cm の差が生じたとすると、ビルのこの方向の延長 40 m に対して、10/4 000、すなわち 2.5/1 000 の傾斜で、実用上全くさしかへはない（現在すでに建設されたビルなどで 10/1 000 程度の傾斜をしているものが多いと多く、通常それは感知できない程度のものである）。しかも不同沈下による主体構造への影響は無視できるようあらかじめ設計することができる。

さらにこの新館ビルの沈下が旧館におよぼす影響を考察すると、旧館は若干南西の方向に傾けられるが、旧館の平面は L 型で、しかも新館に比し平面的にかなり拡がりをもっているから、これが一体となつて抵抗するため、構造強度上大した影響は認められない。万々一不同沈下によるきれつが生じても僅少の費用で補修することができる。

各工法を比較してみると表-2 のようである。

表-2 基礎工法の比較

	工 期 ^{*1}	沈 下 ^{*2}	不同沈下	工事中の振動音響	工 費 ^{*3}
杭打工法	約 3 ヵ月	約 5 cm	小	大	約 5 000 万円
深礎工法	約 6 ヵ月	約 5 cm	小	小	約 7 000 万円
ベタ基礎	0	約 15~20 cm	大	小	0

註：*1 杭打、深礎工事の期間のみ

*2 第 1 及び第 2 粘土層の圧密沈下

*3 杭打、深礎工事のみに要する金額概算で、工期の増減による工費の増減は考えられていない

ベタ基礎を採用する場合、ビルの沈下を許容することによつて工費を節減し、工費を短縮することができる。この場合、設計施工上、つぎの諸点について考慮する必要がある。

(1) 第 1 粘土層の圧密沈下を促進する方法を講ずること。これがため電気化学的安定工法などの方法により粘土層に含まれている水を抜き、できるだけ早く沈下がおちつくようにする。

(2) 付近の地下室工事、その他予測できない原因によつて生じるスベリなどによる不同沈下にそなえ、工事中常にビルの傾斜を測定し、万一 10/1 000 以上の傾斜となるようならば、アンダー ピンニングなどにより不同沈下を抑制せしめるようあらかじめ配慮しておくこと。

(3) 旧館との取合は新旧館の沈下の差により若干ずれを生じるかも知れないが、新旧館は階段で接合されるから補修は容易である。

(4) 新館に対する各種配管の導入点で、ビルの沈下により配管が切断されるおそれがあるが、適当なエキスパン ジョイントを考えれば防止することができる。

(5) ビルの沈下により生ずる一階床面と前面道路との差は、設計時に適当な床高を決定すれば、道路補修を若干行うことにより解決できる。

以上の諸点より、あるいは起らないかも知れない不同沈下などに対する対策を考慮して、ベタ基礎とし、その

軟弱基礎地盤に電気化学的安定工法を適用して基礎圧密の促進と強化をはかり、万が一の場合に備えてアンダーピング用の孔を基礎版に準備しておくことになった。

もし電気化学的安定工法とアンダーピングを併用しても、その工費は最初より杭打ちなどを行うときに比して大した差異はなく、建築全体の工期は約2ヵ月短縮できるので、それだけ早くビルの利用が可能となる。アンダーピングを用いずにすれば、基礎工費は他の工法に比していちじるしく軽減される。すなわち本ビルの基礎工事には2種の工法を予定し、二段構えとし、工事の進捗中十分なる観測と判断をなすことにより任意の時期、必要にして十分なる工事に達したら基礎工事を打ち切り、もって基礎を完成する方針をとつた。

このような手段は必要にして十分な基礎を構築するに役立ち、その方針は実物試験的設計施工ともいえるもので、この基礎設計の特色である。

5. 本工法の設計

本工法実施計画に対して必要な基本的諸量を推定するため、縮尺1/100の模型による予備実験を行つた。その原理などは文献1)、2)にゆづるが、結論の概要をあげると、つぎのようである。

(1) 電気量

予定電気量を処理土1m³ 当り 10 kWh とすれば、

本法で処理されるべき総土量は、敷地面積 40×30m=1200m² で深度10mであるから、12000m³ となり、従つて総電気量は120kWhとなる。

(2) Alの所要量

50極として1極当り2400kWhとなる。使用電圧を100Vとして24000Ahである。Alは1Ah当り0.35gが析出されるから、1極当り0.35g×24000=8400g≒9kgとなる。50極分として9kg×50=450kgとなるが、諸種の余裕をみて約1t(約90万円)のアルミニウムを用いることにした。

(3) 通電期間

1日10時間として6ヵ月を予定した。

予備実験結果、現場事情などより図-1のような方式とした。実施された各部の設備はつぎのようであつた。

1) 陽極 純度99%程度の外径50mm、肉厚8mm、長さ10mのアルミニウムパイプを用いた。製作ならびに植立に当つては特別の配慮を必要とした。写真-1は斜上より撮つたもので、中央部に円形の陽極の上端がわずかに見え、結線されている。

2) 陰極 径240mm、深さ10mのサンドパイル構造とし、その中にφ4インチの鋼管を集水管として挿入し、さらにその中にφ1インチのガス管を吸水管として挿入したもので、吸水管には真空ポンプを接続した。

図-1 電気化学的固結法一般概要図

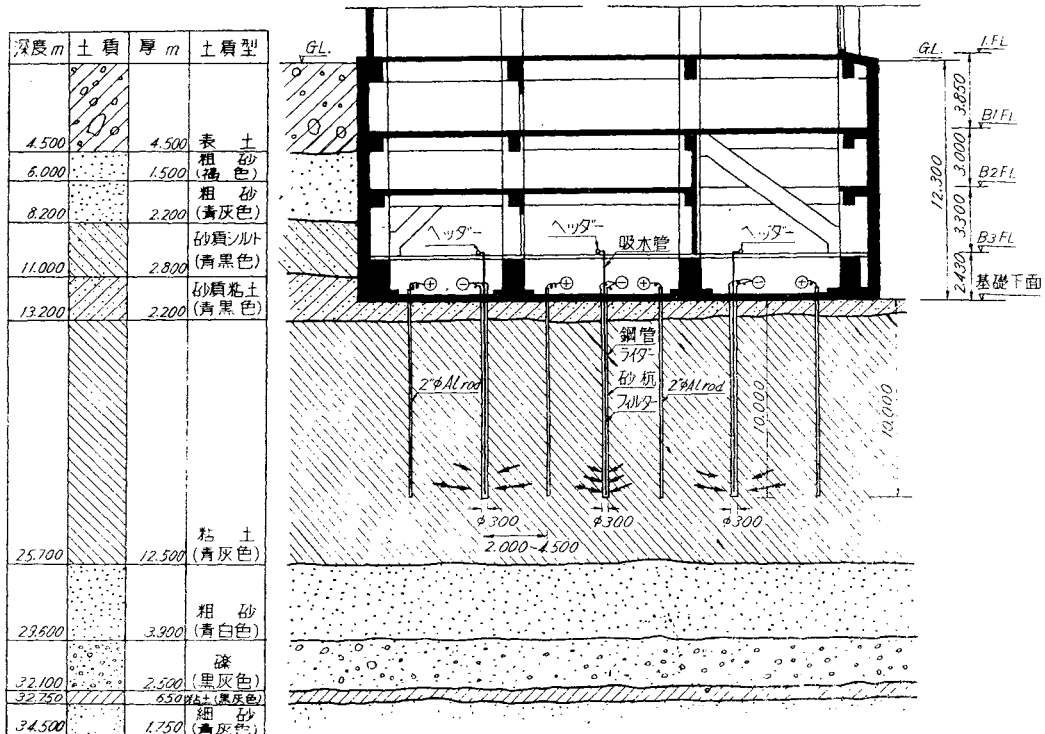


写真-1 陽 極



写真-2 陰 極

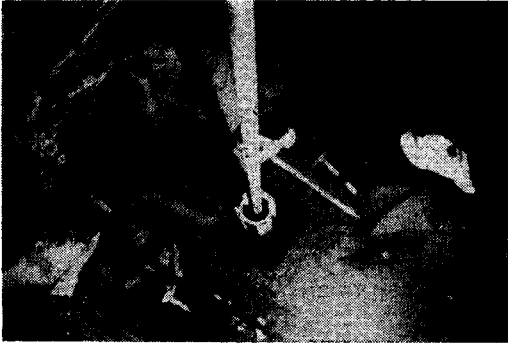


写真-2 は斜上より撮つたもので、陰極の上端がわずかに見えている。中央に突出しているのは吸水管である。

3) 電極配置および配線 陰極の周囲を陽極にて取巻くよう配置し、その間隔を 3~5m とし、13 本の陰極を 7 組、37 本の陽極を 9 組に分け、組別け配線がな

図-2 電極配置および配線図

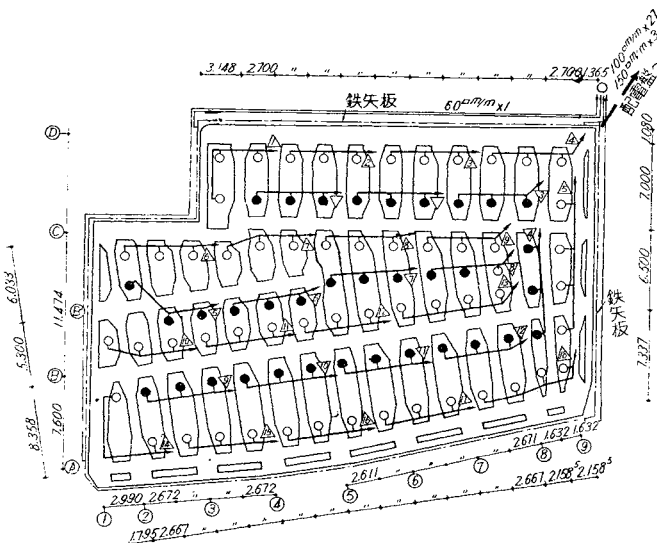


図-3 電源設備および配電盤配線図

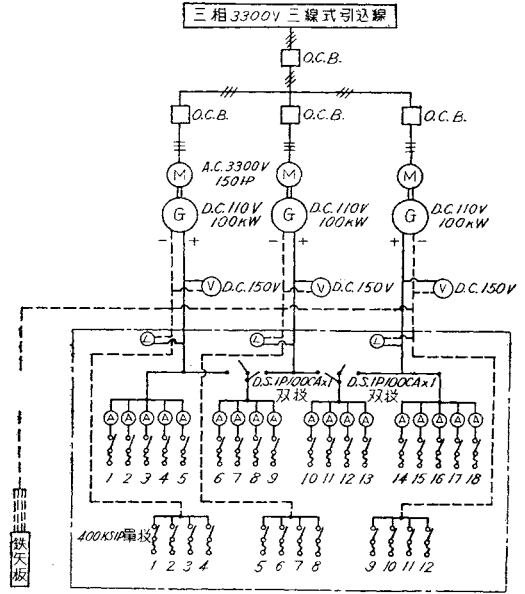
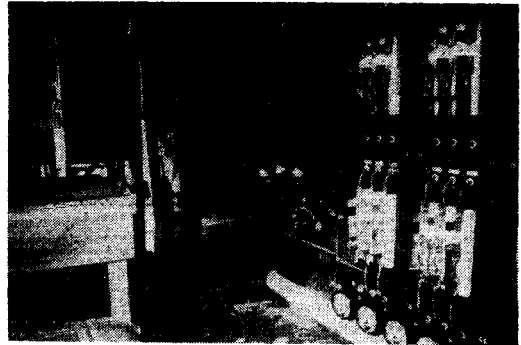


写真-3 発電機と配電盤

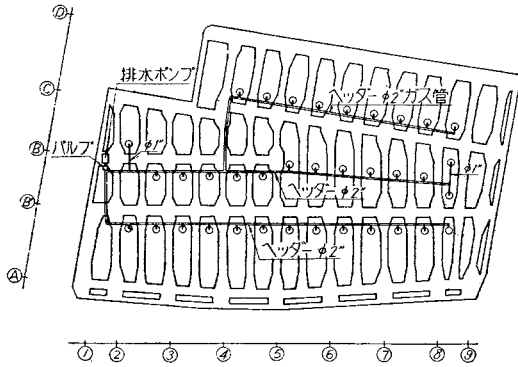


れた(図-2 参照)。

4) 電源および操作室 電源としては電圧調整可能の 75 kW 直流発電機が使用され、それに各種メーター、通電力所表示盤などが一括して現場より若干離れた操作室に設備された(写真-3 参照、直流発電機用電動機と配電盤が見える)。

5) 揚排水設備 地下 3 階の 1 カ所に真空タンクを設け、これより床上に $\phi 2$ インチ ガス管を環状に設置し(図-4 参照)、これを吸水本管とし、これに各陰極の吸水管を耐圧ゴムホースで接続した。真空タンクを真空にするための真空ポンプは真空スイッチにより圧力が 500 mmHg になれば運転を開始し、650 mmHg になれば停止するよう自動装置が施された。この排水管には、本工法効果の目安の 1 つとなる揚

図-4 陰極集水管敷設図

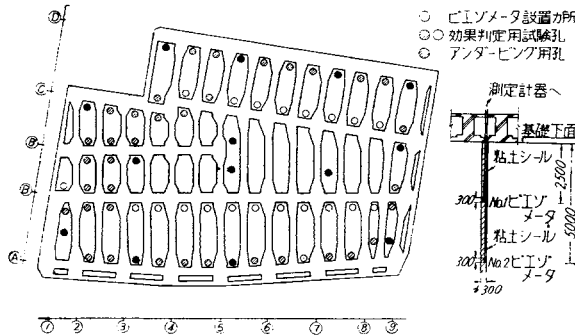


水量が測定できるよう量水計を取付けた。前記の実施例¹²⁾ではこのような大規模の揚排水設備は用いていなかった。ビルの地下3階という特殊事情もあるが、ぜひとも必要な設備ではなく、もちろん、本工法本来の一部をなすものでもない。

6) 換気設備 地下3階の換気をはかるためパイプ、仮設ダクトが用いられた。この設備もビル地下3階という特殊事情のためでもあるが、ぜひとも必要なものでもない。もつとも、極から若干の水素ガスが発生するが、爆発するには至らないので心配することはない。本工法を屋外において適用するときには全然その心配はない。屋内の場合には火気厳禁とする程度でよい。

7) 間隙水圧測定設備 本工法の効果を随時知るため、土質試験のボーリング孔を利用して間隙水圧計を3

図-5 効果判定試験孔配置図



カ所に設置した(図-5参照)。図中アンダーピンング用孔とあるのは、電気化学的安定工法が万々不成功の場合や、その効果が低いとき支持力の補備として計画したものであるという意味で、本例では電気化学的処理がもつばら用いられて成功をおさめたので、利用する必要がなくなり、電極の後始末ののち、すべて閉塞されたものである。

8) 沈下量測定設備 本工法の効果を計る手段の一つとして、鉄骨の G.L.+1.00 m の所に砲金製金物を取りつけ、その表面に十字の溝を刻み、絶体沈下量測定指標とした。不動点として 70 m 離れた既存のビルの一定点をとつた。

また不同沈下測定のため地下3階7カ所にウォーターゲージを設けた。これはガス管で相互に連絡されており、簡単であつて精度がきわめてよいものである。

6. 本工法の効果の判定および結論

通電5カ月後におけるおもなる記録はつぎのようである。

消費電流量	約 1 800 000 Ah
消費電力量	94 120 kWh
処理土に対する消費電力量	7.84 kWh/m ³
揚水量	214 m ³
ビル沈下量	平均 16.2 cm
間隙水圧(基礎版下5m)	平均 15.8 cmHg
単軸圧縮強度(昭 30. 6.6~7)	平均 0.69 kg/cm ²
(昭 30.11.2~8)	〃 0.75 〃
(昭 30.12)	〃 0.82 〃
標準貫入試験(昭 30.11.2~8)	平均 3.0
(昭 30.12)	〃 3.8

これらの記録を検討すれば、つぎのようである。

(1) 陽極アルミニウムの電解量

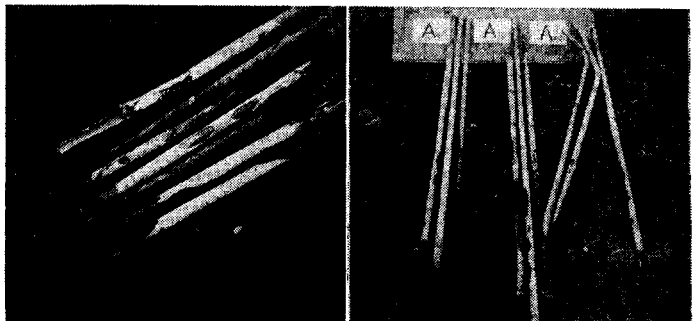
アルミニウムの電気化学的の化学当量は 0.335 g/Ah である。陽極アルミニウム総量を消費電流量で除すると 0.64 g/Ah/g となる。おのおの逆数を比較してみると、

陽極アルミニウムを完全に電解するのに必要な電流量は 2.98 Ah/g で、すでに消費した電流量は 1.56 Ah/g である。従つて陽極アルミニウムの総量の 53% を電解したことになる。陽極の設計では余裕をとつてアルミニウム量を2倍にしてあつたから予定量の 106% を電解したことになる(写真-4は通電終了後の陽極棒を示す)。

(2) ビル沈下量と揚水量

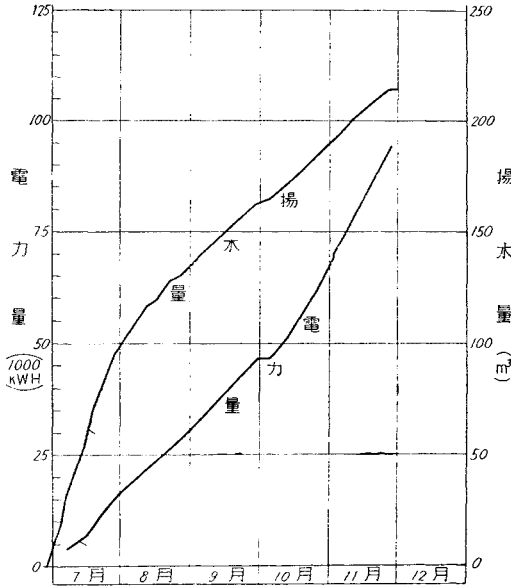
基礎版底面積は 1 050 m² で平均 18cm 沈下して

写真-4 通電終了後の陽極棒



いるので、 $1050 \times 0.18 = 189 \text{ m}^3$ の間隙水が排除されただけである。もつとも圧密に直接関係しないところの土や水の若干の出入があつたであろうから、必ずしも一致するものではないが、揚水量 214 m^3 とほぼ近似している。なお、揚水量の経過は図-6に示すようであつた。

図-6 消費電力量と揚水量



(3) 間隙水圧

基礎版下 5 m の点における間隙水圧平均は 15.8 cm Hg であり、これは静水面に換算すると基礎版下面より $15.8 \times 13.55 + 25 + 243 = 472 \text{ cm}$ 上位に相当する。これは当時なお安定せる間隙水圧ではないし、また引続きピットへの湧水を排水中でもあつたから、この値をもつてにわかには効果判定の資料とはいはしがたいが、通電、当初において相当な開きのあつた3点の間隙水圧がほぼ一致してきた経過は圧密のかなりの進行と今後大した不同沈下のないことを暗示しているものと考えられた。

(4) 単軸圧縮強度

6月、11月、12月に採取した試料による単軸圧縮強度はそれぞれ 0.61, 0.75, 0.78 と増大し、その効果が認められた。

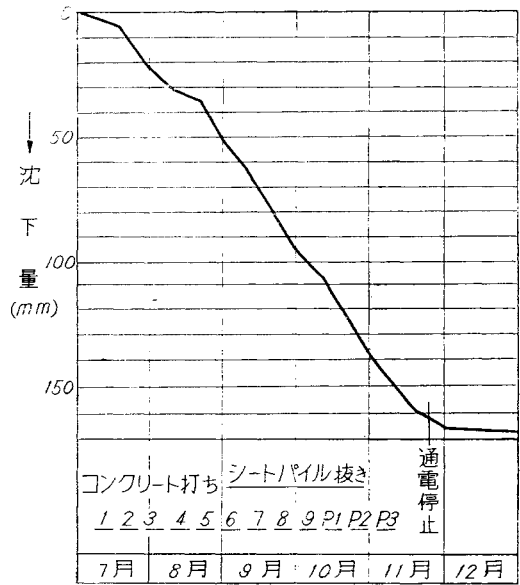
(5) 標準貫入試験

11月および12月に行つた標準貫入試験によると、平均打撃数は3から3.8と増大が認められた。

(6) 予想沈下量と実施沈下量

11月25日現在における総沈下量は平均約 18 cm であり、その経過は図-7に示すようである。これは自然圧密によれば約8カ年かかる量である。

図-7 沈下曲線



以上のような結果から、アンダーピンニングを必要とせず、本工法の目的が大方達成せられたことが総合判断せられたので、12月はじめ通電を停止し、電極の跡始末をして、本工法は無事終了することとなつた。

7. あとがき

日頃考えていることを利用する機会に恵まれたことは大きい喜びであり、ここに日建設計工務株式会社の塚本猛次、清水勝馬、山田英雄、小島初三、宮川達郎、松井彰、株式会社 大林組の藤本達二、高屋 猛、福井文夫、谷口尙武、寺沢一夫の各氏に敬意と謝意を表する次第である。

参考文献

- 松尾新一郎：電気化学的土壌安定工法，土と基礎，Vol. 1, No.2, 昭-28.
近藤泰夫・松尾新一郎・坂下芳男・谷 重幸：国道1号線熱田伝馬跨線橋々台基礎の電気化学的固結工事，第1回日本道路会議論文集，昭-28.
- 松尾新一郎：築堤のための軟弱基礎地盤の電気化学的安定工法，道路，日本道路協会，昭-31.11.

× × × ×