

電気アナログ法について(第5報)

—建築基礎工事における地下水解析—

齋藤 二郎 大石 守夫
西林 清茂 須藤 賢

Electrical Analogue Method (Part 5)

—Analysis of Ground Water Problems in Building Foundation Construction—

Jiro Saito Morio Oishi
Kiyoshige Nishibayashi Ken Sudo

Abstract

Reducing the volume of ground water as much as possible within limits of economy during building foundation construction not only makes excavation work more safe and sure, but also leads to alleviation of adverse effects on existing structures caused by lowering of the ground water table and reduction in drainage water disposal costs. However, it is extremely difficult to use the conventional numerical methods for multiple permeable layers and complex foundation forms, and the authors thus use the electrical analogue method for these problems.

The following two examples are shown: 1) determination of economical wall depth from the relation between the depth of continuous water cut-off walls and volume of seepage in a permeable formation as much as 30 m in thickness, and 2) analysis of seepage volume under the condition of three sides closed by walls and one side open. The paper also describes fundamental facts useful for dealing with ground water problems.

概要

建築基礎工事において工事中の地下水処理を経済的範囲内で極力少なくすることは、掘削工事を安全確実にするばかりでなく、周辺地下水位低下による既設構造物に与える弊害や排水処理費の軽減にもつながる。しかし、多層透水性地盤や複雑な基礎構造のもとで地下水解析を従来の数値的解析法で行うことは困難なことが多く、著者らは、このような問題を電気アナログ法で解析している。ここに紹介するのは、1)30mにもおよぶ透水性地盤において連続止水壁長と湧水量の関係を求めて、必要かつ経済的に止水壁長を決定した例と、2)三方向のみ連続止水壁を造成して一方向を開口した場合の湧水量解析例である。なお、地下水解析上必要な基礎的問題の解析結果についても紹介する。

1. まえがき

前4報までは電気アナログ法の土木分野における適用例を主体に報告してきたが、今回は建築基礎(ビルディング基礎)工事における地下水処理問題の解析例を紹介する。この種の工事に関連した具体的な地下水問題としては、

- (i) 湧水量大(工事遂行上の支障, 排水処理費用)
- (ii) 周辺地下水位低下(周辺井戸の能力低下, 地盤沈下)

その他、掘削時のパイピング現象、背面土の地下水による流出などがあるが、上記2点に集中している感がある。

とくに、最近、都市部の建築工事では排水施設の新設あるいは既排水施設の利用に多額の費用を必要とするケースが見られ、経済的見地からも地下水処理が問題となってきた。ここに紹介する2例は、大量の湧水量が懸念されるために、有効かつ経済的な止水壁長を計画する目的で行った電気アナログ解析に関するものである。

2. 解析例—1 岐阜市十六銀行ビル基礎工事

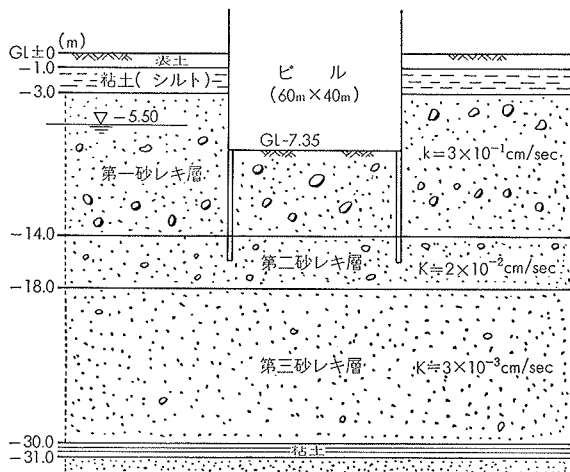
岐阜市一帯の地盤は地表面下数mの浅い位置から、100mにおよぶ深さにわたって非常に透水性大の砂レキ層が分布しており、地下水の豊富な立地条件下にあるために、基礎工事に伴う湧水量が多く、既存建築物も地下水位下に地下構造を有するものは数少ない。

標記ビル工事は地下水位以下の基礎掘削工事が必要であり、湧水量減少のためにOWS、ソレタンシュエ工法による地中連続壁の深さを止水効果と経済性の見地からどの程度に決定するかが難問題の一つであった。

そこで、止水壁長と湧水量の関係を求めるために電気アナログ法を適用したものである。

2.1. 地盤状態と工事概要

図一1に地盤状態を示すが、GL-30m程度まで砂レキ層が分布した後、厚さ数mの粘土層が存在し、ついで再び砂レキ層が深く分布している。この粘土層の平面的な拡がり状態については、このビルを中心として半径500m以内で実施した過去のボーリングデータを調査したところ、資料数としては十分とはいえなかったが、深さ、層厚に若干の変化がみられるもののほぼ連続して分布していると見なすことができた。



図一1 十六銀行地盤状態

したがって、基礎工事に伴う湧水はこの粘土層より上に分布する砂レキ層からとなる。砂レキ層の透水性に関しては、各代表深さの試料についての粒度組成を分類して3層に分け、第一砂レキ層に対しては現場透水試験、第2、3砂レキ層は攪乱試料による室内透水試験を実施して求めたところ、各層の透水係数Kは
 第1砂レキ層(GL-3m~-14m) $k=3 \times 10^{-1}$ cm/sec
 第2砂レキ層(GL-14m~-18m) $k=2 \times 10^{-2}$ cm/sec

第3砂レキ層(GL-18m~-30m) $k=3 \times 10^{-3}$ cm/secであった。なお、平均地下水位は第1砂レキ層内のGL-5.50mであった。

基礎工事は、掘削面積が約 $60\text{m} \times 40\text{m} = 2,400\text{m}^2$ であり、掘削深さはGL-7.35mであった。地下水位がGL-5.50mであるので、水頭差はわずかに1.85mであるが、掘削面積が大であることと砂レキ層の透水性が大であるために止水対策なしでは大量の湧水が懸念され、土留め、および止水を兼ねた地中連続壁が計画されることとなった。

2.2. 実験方法

模型はタテ、ヨコとも1.50mの実験槽内に建物を中心とした1/4円を縮尺1/300であらわした。

この縮尺であれば影響半径を450mにすることができる。通常、砂レキの影響半径は500m以上といわれているが、450mでも精度的には十分であり、むやみに模型縮尺を大にすると、地盤の層厚や構造物の模型が小さくなって逆に不都合になることがある。

模型地盤は各砂レキ層の透水係数に対応する比電導度を与えた寒天で作成し、地中連続止水壁は非電導物質であるアクリル板を模型として使用した。

地下水流入境界は実際半径460mに相当する円周であり、流出境界はいうまでもなく掘削敷である。

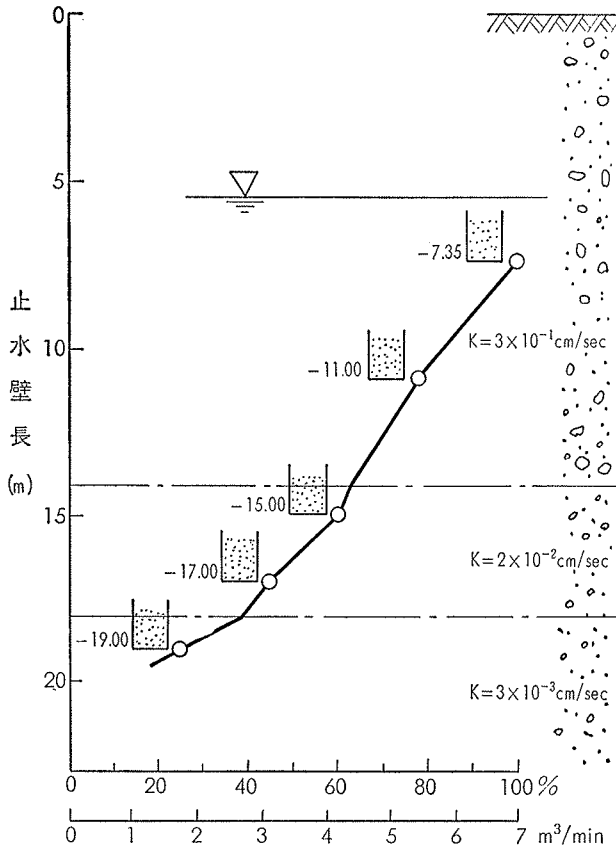
実験は模型止水壁の深さを段階的に変えて電気計測を行うとともに、代表断面におけるポテンシャル測定も実施した。

2.3. 実験結果

2.3.1. 止水壁長と湧水量の関係 実験解析結果によると、湧水量は予想以上に大きく、地中連続壁長(止水壁長)が掘削敷と同一のGL-7.35mの場合には $q=7.0\text{m}^3/\text{min}$ であった。

図一2に各止水壁長と湧水量の関係を示す。図中には止水壁長GL-7.35mのときの湧水量を100%として各止水壁長の湧水量を比率でも表示している。

この図からわかるように、止水壁長を増大させるにしたがって湧水量は低減しているが、第1砂レキ層を完全に止水したとしても65%にとどまっており、第2砂レキ層完全止水状態で40%、第3砂レキ層に入った止水壁長GL-19.00mにいたってようやく当初の1/4程度に減少している。実際工事では止水効果と経済性を考慮して第1砂レキ層を完全遮断し、第2砂レキ層に1m根入れした形になるGL-15.00mの止水壁長とした。このときの実際工事での実測湧水量を図一3に示す。図でわかるように約4ヶ月間の実測値はかなり増減が激しい。これは併示しているように周辺の地下水位が降雨等の影響で季節変動しているためであって、

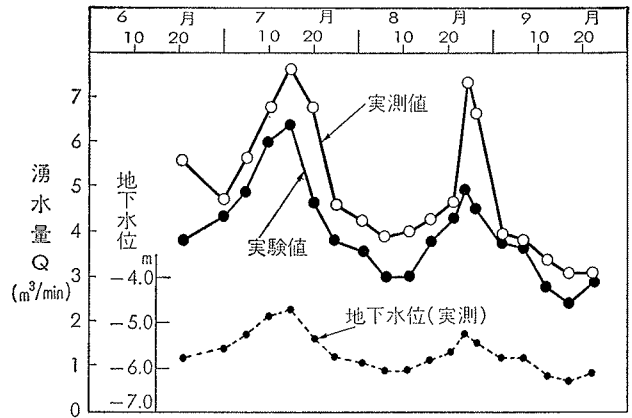


図一 2 止水壁長と湧水量の関係

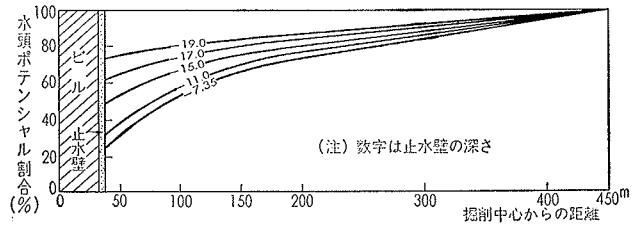
この地下水位変動を考慮して実験値を補正すれば、実測値の場合と同様の変動であることがわかる。両者の値を比較すると、実験値は実測値より若干低目の値であるが、この程度の誤差は許容される範囲と見なして差しつかえないものと思われる。

2.3.2. 周辺地下水ポテンシャル分布 掘削工事で揚水を行えば、当然のことながら周辺の地下水位が低下する。今回の実験では湧水量の解析が主目的であり、また、予想される水頭差も平均1.85mときわめてわずかであったので心配することはなかったが、参考までにビル周辺の地下水ポテンシャル分布を求めてみた。今回の実験で求めた地下水ポテンシャルは地下水位分布、すなわち自由水面を求めたものではないが、地下水位分布を類推することはできる。

図一4は止水壁外側の地下水ポテンシャルを自然水位を100%とした比率で表示し、止水壁長との関係でまとめたものである。止水壁長が増大するにつれて止水壁外側の地下水ポテンシャル割合が増加(復元)していることがわかる。このことは止水壁長の増大が湧水量の減少だけでなく、周辺地下水位低下量も少なくさせることを意味している。



図一 3 湧水量の実測と実験値の比較



図一 4 止水壁周辺の地下水ポテンシャル分布

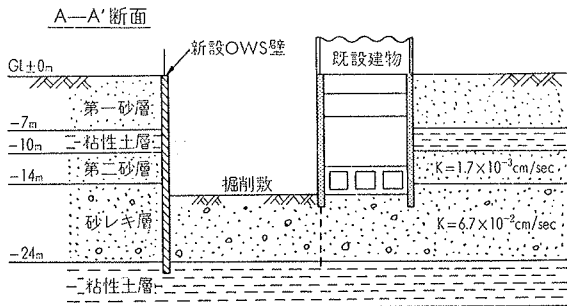
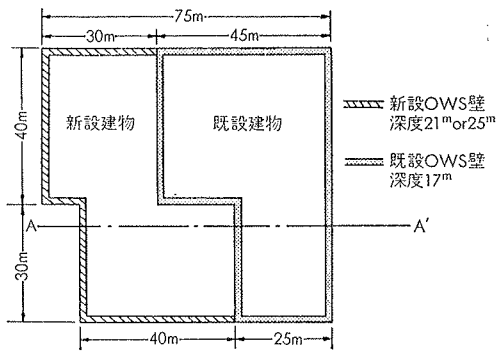
3. 解析例—2 大阪日生ビル増築工事

この工事は旧ビルに隣接してほぼ同規模の新ビルを増築するものである。その際透水性地盤をGL-17.00mまで掘削する基礎工事を伴うために、解析例—1と同じように湧水量減少を目的とした地中連続壁(止水壁)設置方法を検討したものである。ただし、解析例—1と異なっているのは、止水壁設置方式案の一つとして図—5に示すようにGL-24mまで分布している滞水砂レキ層を新設ビルの3側面については完全止水するが、旧ビル境界部を開口させたままの状態とする止水方式案があり、この特殊な止水条件の湧水量解析も実施したことである。

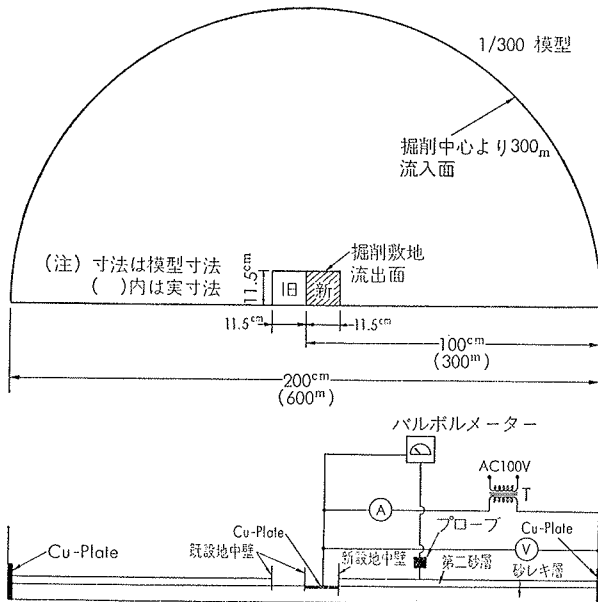
この種の止水条件の湧水量算定は三次元的解析が必要であり、一般の井戸理論式や浸透流量算定式では解析が非常に困難である。強いて算定手段を探せば、フローネット作成による図式解法が考えられるが二次元的に概略値を求める程度に終る。

3.1. 実験方法

図—5の平面図からわかるように、模型実験のために新旧ビルの配置を調整すれば、止水壁の延長が若干短縮するものの、新旧ビルの面積がほぼ同一で長方形と見なし得るので、模型を図—6に示すように1/2円で作成できる。実験槽としては長辺が2.00mのものを使用し、模型縮尺を1/300としたので、影響半径は300



図一五 大阪日生東館地盤状態



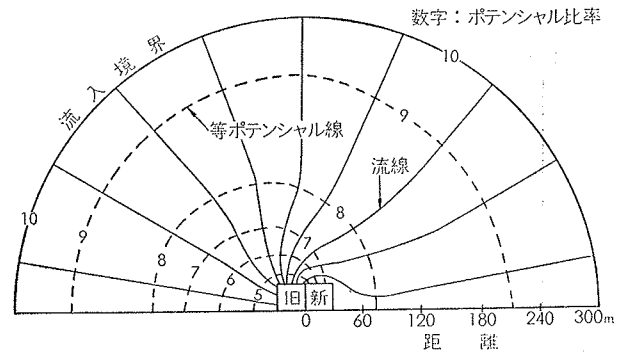
図一六 実験槽および模型地盤

mとなる。(影響半径は500m以上が望ましいが、実験槽の関係上やむをえなかった。)

模型地盤はGL-7.00m~10.00mの粘土層を不透水層と見なして、GL-10.00m以下を寒天で作成した、止水条件は表一のとおりである。

3.2. 実験結果

この例では、当初、砂レキ層の透水係数を周辺地盤の資料を引用して $k=5 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ としていたが、



図一七 水頭分布と流線網 (大阪日生東館)

実験種類	止水壁深さ	
	新ビル	旧ビル
case 1.	GL-25m (完全止水)	GL-17m
case 2.	GL-21m (砂レキ層中間)	GL-17m

表一

旧ビル建設当時の湧水量と自然地下水位が判明したので、旧ビルの掘削条件および止水条件を模型に再現して測定を行い、透水係数を逆算した結果、 $k'=6.7 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ を得た。(ここで砂レキ層は第二砂層と比較して透水係数、層厚とも大であるので、湧水の大部分を供給する水脈とみなして算定した。)

砂レキ層の修正透水係数を用いて算定した湧水量解析結果によると、case 2 (中間止水) のときの湧水量は $9.7 \text{m}^3/\text{min}$ である。これに対して case 1 (新ビル部完全止水、旧ビル開放) のときは $6.1 \text{m}^3/\text{min}$ であった。止水壁延長の効果は湧水量減少率で約37%である。この低減効果は止水条件の割には予想以上に大きく、新ビルの止水壁が不透水性の粘土層に完全に根入れされたために、図一七に示すように浸透流が旧ビルの開口部へまわり込まねばならず、水頭損失が大きくなった上に、開口部も小さくなったことが原因である。

しかしながら、この程度の湧水量減少であれば、実際工事では不足であったので、旧ビル境界部にも止水壁を延長して、四方すべてを完全に止水することに決定した。この止水壁条件でも水処理費用と比較すれば経済的である。

4. 地下水解析上の基本問題について

4.1. 浸透流量と滞水層厚の関係 (二次元解析)

井戸の揚水量算定式や締切りの浸透流量算定式には滞水層厚が必ず計算条件として入っている。しかし、

場合によっては、対象としている滞水層が深すぎてその層厚を未確認のまま仮定して算定しなければならないことがある。

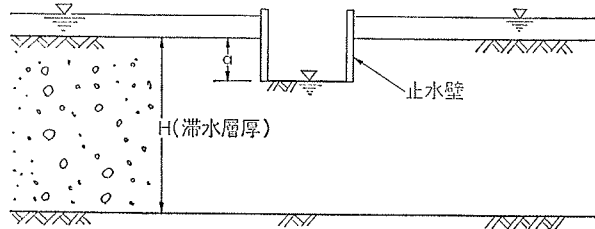
筆者らも、最近、実際問題の電気アナログ解析において、滞水層厚が深すぎて不明のために苦慮したことがあった。

そのとき、考慮すべき滞水層厚には限界があるものと考え、二次元的問題における滞水層厚の変化と流量の関係を導電紙を用いた電気アナログ法で解析した。

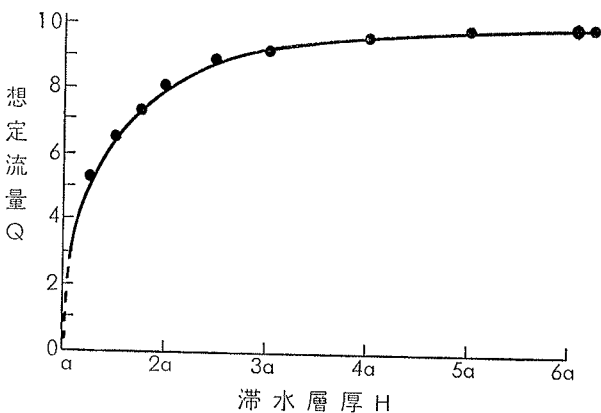
図一八は解析対象のモデルを示したものである。解析方法は滞水層厚 H を掘削深さ a （地下水位下）の関数として $H=1.25a \sim 6a$ まで段階的に変化させて、そのときの流量 Q を求めた。

図一九に示した解析結果によると、流量（想定値）は滞水層厚と密接な関係にあり、滞水層厚の増大とともに増加傾向が次第に低減して一定値に漸近している。とくに滞水層厚 $H=2.5a \sim 3a$ 程度以上になると急激に漸近し始める。

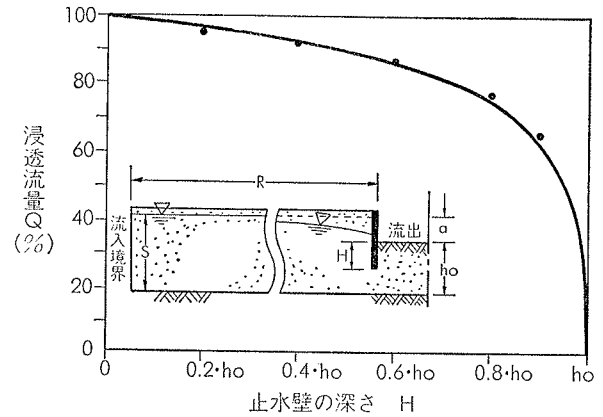
この結果から、滞水層厚が大でしかも不明のときには、計算上の滞水層厚を掘削深さ（地下水位下）の3



図一八 解析モデル



図一九 想定流量 Q と滞水層厚 H



図一十 止水壁の深さと浸透流量の関係（解析例）

倍程度にすれば十分である。また逆に滞水層厚確認を目的としたボーリング調査の深さについても同様のことがいえる。なお、ここでは実際問題との関連から掘削幅は掘削深さの2倍としたので、上記のことはこの値に近いが、この値以内のときにのみ適用できる。しかし、掘削幅も考慮すべき滞水層厚に関係すると思われるので今後の研究課題とした。

4.2. 止水壁長と浸透流量の関係

建築基礎や締切り工事で止水壁を設けて浸透流量を低減させようという試みは、この報文で紹介した解析例を見ても数多い。ところが、止水壁長と浸透流量の基本的関係については必ずしも十分には理解されていないようである。

図一十は、最も簡単な止水壁長と浸透流量の関係を二次元的に解析した例である。

この例に見られる止水壁長と浸透流量の関係は基礎掘削工事の際の止水壁長と湧水量の関係にも基本的に共通したものであって、同一透水性地盤では完全止水に近い状態にならないければ止水効果があがらないことを示唆している。

5. あとがき

本文中にも述べたように、最近の都市部の建築工事では地下排水処理費も高価となる傾向があり、地下水対策が重要課題となっている。今回の2例に見られるように電気アナログ法は特殊な問題でも解析可能であり、今後もますます有用な地下水解析手段として役立つものと考えている。

最後に、資料提供いただいた工事関係諸氏に感謝の意を表します。