

地盤掘削工事における最適化手法を用いた排水設計方法に関する考察

竹下祐二*・河野伊一郎**

地盤掘削工事において地下水位低下施工を行う場合、排水設計は工事全体の成否を左右する重要な問題である。本研究では従来の井戸理論を用いた排水設計法の難点を克服し、合理的な排水設計方法の開発を目的として、数値解析による定常・非定常浸透流解析手法と最適化手法とを組み合わせた方法の提案を行った。また、井戸配置の決定に際しては情報量基準の導入を試み、適切な井戸配置を選択する基準について考察した。本方法の適用性は、従来法では検討が困難であった排水設計事例についての計算例によって吟味した。

Key Words : pumping design, dewatering, groundwater, optimization, AIC, FEM

1. はじめに

国土が狭く人口密度の高い我国において、空間の有効利用という観点から建設工事はますます大規模化する傾向にある。特に近年では、大深度地下空間利用を目的として、地下深く工事が進められるようになってきた。地下水位の高い我国において、地下水処理の問題は建設工事を安全かつ合理的に行うために回避することのできない検討事項である。また、環境問題の一環として、地下水の過剰揚水に起因する地下水の枯渇や地盤沈下、そして地下水汚染等に対する社会的な関心が非常に高くなってきている。そのため、地下水処理を最適化して工費を節約すると共に周辺地下水環境への影響を最小限に抑えることが、建設工事における重要な課題となっている。

一般に、地盤掘削工事において、地下水圧の軽減や湧水の防止などを目的として地下水低下施工が行われるが、その代表的な工法にディープウエル工法がある。ディープウエル工法の施工に際しては、必要な排水流量やディープウエル（以後 D. W. と記す）の本数および配置の決定が重要な問題となる。この作業は排水設計と呼ばれ、従来より井戸理論に基づいて実施されてきた。しかし、従来の排水設計手法では地盤の不均質性や掘削条件の十分な考慮は困難であり、また、複数本の D. W. 配置やその揚水操作についても半ば経験的に決定されているなど、多様化、複雑化する地下水処理問題を検討するための手法としては、必ずしも有効な方法であるとは言いがたい。

井戸群からの取水量の決定法に関する研究としては、地下水流の支配方程式と最適化手法との組み合わせにより、地下水に関する最適化問題を解析する方法が提示さ

れ、多くの研究がなされている^{1)~9)}。これは地下水管理問題の観点から、地下水位や揚水流量、あるいは地盤沈下量等に関する制約条件のもとに、対象領域での総取水量が最大または地下水位低下量が最小となる状態を最適状態として、井戸群からの最適取水量を算定しようとするものである¹⁰⁾。

建設工事における地下水位低下施工を対象とした研究として、Aguado らは、差分法と線形計画法を用い、掘削区域内の地下水位を制約条件として、最小定常揚水量を決定する問題を検討している²⁾。また、我国では、神野らが有限要素法と線形計画法を用いて最適な定常揚水流量の決定を行い、その結果に基づき、最大原理を用いて非定常状態における最適揚水流量の決定および揚水操作法について検討を試みている³⁾。しかし、地盤掘削工事における排水設計という立場から、D. W. の揚水施工効率や井戸配置等を総合的に判断し、定常～非定常過程での系統的な排水設計を行う方法は未だ確立されていない。

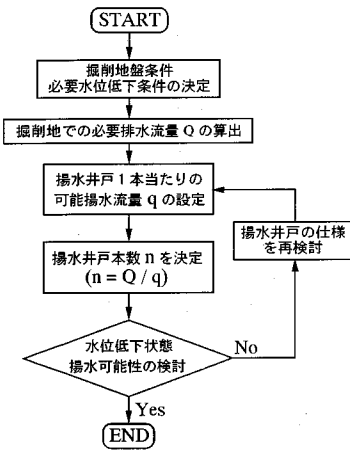
本文では、このような現状を鑑みて、従来の理論的な方法では困難であった掘削地盤条件や施工条件を考慮し、各井戸での必要揚水流量や井戸配置等の検討を系統的に行う排水設計方法の提案を行う。必要揚水流量の算定には、数値解析による浸透流解析手法と最適化手法とを組み合わせる方法を用い、井戸配置の決定に際しては情報量基準の導入を試みて、複数の井戸配置案の中から適切な井戸配置を選択する基準についての考察を行った。本研究で提案した方法を用いて、従来法では検討が困難であった排水設計事例についての計算例を示し、その有用性について吟味した。

2. 従来の排水設計手法における問題点

従来の井戸理論による排水設計法では、地盤掘削における必要排水流量は掘削地を等価な井戸と考えて、定

* 正会員 学術博 岡山大学講師 大学院自然科学研究科 (〒700 岡山市津島中3-1-1)

** 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科



図一 従来の排水設計手順

常・非常揚水井戸理論により算出し、揚水井戸の配置計画は群井戸公式を用いて検討されている¹¹⁾。それらの手順を簡単に示すと図一のようなものである。その際、考えられる問題点を以下に示す。

a) 掘削地からの必要排水流量の算定

掘削地での必要排水流量の算定値は、掘削地を等価な井戸とみなし、その井戸内の水位を所定位置まで低下させた場合の井戸内への集水量であり、この値が必ずしも掘削地周辺に配置された井戸の揚水量とは一致しない。

b) 井戸の配置計画

群井戸公式を用いる場合、各井戸では同一流量の排水を仮定しており、井戸一本あたりの可能揚水量は経験式等により推定されている。また、井戸総数は、単に必要な排水流量を可能揚水量で除して決定され、その配置パターンも掘削地を中心とする同心円周上、または対角線上に計画される場合が多い。しかし、このような井戸配置は地盤状態が均質で、水理境界や掘削地形状が単純な場合に成り立つものであり、それらが満足されない場合や施工条件等により井戸の配置に制約を受ける場合には新たな検討が必要となる。

c) 定常・非常状態での排水設計法

平衡式を用いた定常状態での排水設計法と非平衡式を用いた非常状態での排水設計法が一体化していないため、別々に算定されるか、または、算定された定常揚水流量を経験的に2~3倍して非常揚水流量とし、排水設備の設計に用いられることが多い。

以上の問題点を克服するためには、従来の理論的な方法では限界があると考えられる。そこで、本研究では最適化手法と数値解析による浸透流解析手法を適用する。

3. 最適化手法を用いた定常・非常排水設計方法

掘削工事における地下水位低下施工では、地下水位を

所定値以下に迅速に低下させる期間（以後、初期揚水期間と記す）と低下させた地下水位を維持する期間（以後、定常揚水期間と記す）に大別される。本文では、各期間における排水設計をそれぞれ非常排水設計、定常排水設計と定義し、最適化手法と有限要素法による平面浸透流解析¹²⁾を行って必要排水流量の算定を行う。

平面浸透流解析では止水壁の下部を迂回する鉛直浸透流や多層帯水層での浸透現象など三次元的な浸透挙動の解析に難点を有しているが、

①掘削地形状や水理境界条件を考慮した地盤のモデル化が容易である。

②任意の複数井戸配置を考慮した解析が少ない演算量にて実行できる

等、井戸理論式による従来法に比べて、十分な利点が期待できる。

なお、浸透流解析において井戸揚水の問題を扱う場合、井戸損失や井戸半径の影響についての考慮が必要となる^{13),14)}。しかし、現在の土木施工技術では、これらの影響の定量的評価は困難であると考えられるため、本解析では、井戸のモデル化についての特別な考慮は行わず、井戸は単一節点にて表現し、定水位または定流量既知の境界条件によって処理した。

以下に本文で提案する排水設計手順を説明する。

(1) 定常排水設計方法

定常排水設計の目的は、掘削領域等、施工期間中に地下水位の管理を行う必要のある地点（以後、水位管理地点または添字 j を用いて地点 j と記す）において、所定値以下に低下させた地下水位を継続維持するために最小限必要な定常揚水流量を算定することである。これは以下に示す最適化問題であると考えられる。

$$\text{目的関数： } Q_{TOTAL} = \sum_{i=1}^N q_{a,i} \rightarrow \text{最少} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{制約条件： } h_j(Q_{TOTAL}) \leq h_{a,j} \quad (j=1 \sim M) \dots \dots \dots (2)$$

$$\quad \quad \quad : \quad q_{a,i} \geq 0 \quad (i=1 \sim N) \dots \dots \dots (3)$$

$$\quad \quad \quad : \quad h_{w,i} \geq h_{p,i} \quad (i=1 \sim N) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 Q_{TOTAL} ：総定常揚水流量

$q_{a,i}$ ：井戸 i における定常揚水流量

h_j ：地点 j における地下水位

$h_{a,j}$ ：地点 j において定常揚水期間に維持すべき地下水位

N ：井戸の総数

M ：水位管理地点の総数

$h_{w,i}$ ：井戸 i における井戸内水位

$h_{p,i}$ ：井戸内水位の許容下限値（揚水ポンプの設置深度等）

式(4)は井戸枯れを防止し、揚水施工の可能性を確保するために導入した制約条件である。式(1)~(4)で表される最適化問題を線形問題として解析するため

に、制約条件式(2)に群井の理論を適用し、水位管理地点での水位低下量と揚水流量との関係を線形関数にて表現する。

まず、被圧帯水層の場合、群井の理論より地点*j*での水位低下量は次のように表される。

$$H_j - h_j = \frac{1}{2\pi k D} \sum_{i=1}^N q_{a,i} \ln \frac{R_i}{r_{ij}} \quad (j=1 \sim M) \quad \dots\dots (5)$$

- ここに、 H_j : 地点*j*での初期地下水位
- r_{ij} : 地点*j*から井戸*i*までの距離
- R_i : 井戸*i*の影響圏半径
- k : 透水係数
- D : 帯水層厚

式(2)に式(5)を代入し、 h_j を消去すると被圧帯水層における制約条件式(6)を得る。

$$\sum_{i=1}^N q_{a,i} \cdot b_{ij} \geq H_j - h_{a,j} \quad (j=1 \sim M) \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

$$b_{ij} = \frac{1}{2\pi k D} \ln \frac{R_i}{r_{ij}} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim M) \quad \dots\dots (7)$$

一方、不圧帯水層の場合には同じく群井の理論より、

$$H_j^2 - h_j^2 = \frac{1}{\pi k} \sum_{i=1}^N q_{a,i} \ln \frac{R_i}{r_{ij}} \quad (j=1 \sim M) \quad \dots\dots (8)$$

と表せる。ここで、水位低下量と揚水流量との線形性が近似的に満足されるものと仮定すれば、式(2)に式(8)を代入し、変形すれば不圧帯水層での制約条件式(9)を得る。

$$\sum_{i=1}^N q_{a,i} \cdot b_{ij} \geq H_j^2 - h_{a,j}^2 \quad (j=1 \sim M) \quad \dots\dots (9)$$

ここに、

$$b_{ij} = \frac{1}{\pi k} \ln \frac{R_i}{r_{ij}} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim M) \quad \dots\dots (10)$$

以上により、上記の最適化問題は制約条件式(6)または式(9)の導入により線形問題として扱えるため、シンプレックス法を用いて解析し、各井戸からの定常揚水流量を算定できる。

ここで、 b_{ij} は井戸*i*における揚水施工が地点*j*での水位低下に及ぼす影響度合いを表す感度行列であり、その算出方法が問題となる。本研究では b_{ij} の計算は井戸理論式ではなく、前述の浸透流解析によって数値解析的に行う。そのため、井戸*i*での単位流量*q*の揚水によって、地点*j*に生じる水位低下量*s_j*を求める定常浸透流解析を設置井戸個数回行い、式(11)によって感度行列を算定する。ただし、帯水層が被圧状態か不圧状態かによって制約条件が式(6)または式(9)のように異なるため、式(11)における水位低下量*s_j*の計算式としてはそれぞれ式(12)、(13)を用いた。

$$b_{ij} = \frac{\partial s_j}{\partial q_i} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim M) \quad \dots\dots (11)$$

$$\text{被圧帯水層: } s_j = H_j - h_j \quad \dots\dots (12)$$

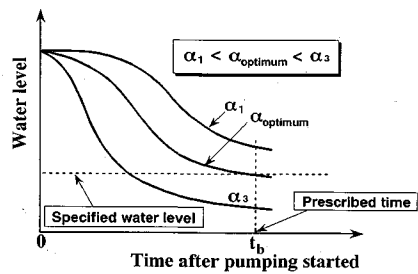


図-2 パラメータαの変化による初期揚水期間での水位変化

$$\text{不圧帯水層: } s_j = H_j^2 - h_j^2 \quad \dots\dots (13)$$

(2) 非定常排水設計方法

非定常排水設計の目的は、初期揚水期間(通常、10日前後)において所定の地下水位低下を得るために最小限必要な非定常揚水流量を算定し、揚水ポンプの容量等、排水設備の上限値を算定することとした。そのため、初期揚水期間から定常揚水期間に至るまでの揚水流量の操作方法については解析対象とはしない。また、非定常揚水流量は、定常排水設計にて算定された定常揚水流量を一律に実数倍した値であるとし、一定流量の揚水施工を行うものとした。これらの条件は次式のように表される。

$$0 \leq t \leq t_b : q_{b,i} = q_{a,i} * \alpha \quad (i=1 \sim N) \quad \dots\dots (14)$$

$$t \geq t_b : h_j(q_{b,i}) \leq h_{b,j} \quad (j=1 \sim M) \quad \dots\dots (15)$$

ここに、 $q_{b,i}$: 井戸*i*における非定常揚水流量

h_j : 地点*j*における地下水位

$h_{b,j}$: 地点*j*において初期揚水期間中に低下させるべき地下水位

t : 揚水施工開始からの時間

t_b : 初期揚水時間

α : 未知パラメータ

すなわち、問題は上記の制約条件式(15)を満足し、かつ、図-2に示すように、必要以上に水位低下を生じさせないようなパラメータαの最適値(図-2中の $\alpha_{optimum}$)を求め、式(14)より非定常揚水流量の算定を行うことになる。そこで、非線形最小二乗法と非定常浸透流解析を用い、次式で示される残差平方和*R*(α)を最小にするα値を推定した。

$$R(\alpha) = \sum_{j=1}^M \{h_{b,j} - h_j(\alpha)\}^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots (16)$$

ここに、 $h_j(\alpha)$ は各井戸から $q_{b,i}(=q_{a,i} * \alpha)$ なる揚水を行った場合、初期揚水時間*t_b*において計算される地点*j*での地下水位である。

式(16)の解析アルゴリズムとしては修正 Marquardt 法¹⁵⁾を用いた。また、非定常浸透流解析時には、各時間ステップにおける井戸節点での境界条件として、井戸内水位の計算値*h_{w,i}*と井戸内水位の許容下限値*h_{p,i}*とを比較し、次のような境界条件を設定した。

$$\text{① } h_{w,i} \geq h_{p,i} \text{ では } q_{b,i} = q_{a,i} * \alpha \text{ なる定流量境界}$$

② $h_{w,i} < h_{p,i}$ では $h'_{w,i} = h_{p,i}$ なる水位一定境界

(3) 井戸配置の検討方法

一般に、掘削地内において大きな地下水位低下を得るためには、掘削地近傍に多数の井戸を設置すれば良いことになる。しかし、井戸本数が増加すれば井戸施工費等、経済的に不利であるし、また、井戸干渉の影響による揚水効率の低下も予想される。一方、井戸本数が少なくなれば、一本の井戸から多量の揚水施工が必要であり、水理境界および掘削地の形状によっては掘削地内の地下水位が均等に降下しない場合があるなど井戸配置の影響を強く受ける。

井戸配置の検討に際して、井戸の個数や位置と各井戸からの揚水流量との組合せは無限であり、それらを直接評価することは極めて困難である。しかし、通常の建設工事では、井戸が設置可能である地点は掘削地形状や施工条件によってある程度制約を受けるため、検討すべき井戸の配置パターンは限定されるものと考えられる。したがって、設計担当者は複数の井戸配置計画案を評価し、それらの中から最も効率の良い地下水位低下施工を行える井戸配置を選択することになる。

そこで、本研究では数値解析手法を用いて井戸配置の評価を行うための判断基準の算定を行う。その際、井戸配置の望ましい条件として以下の3点を考えた。

- ① 井戸本数はできるだけ少ないこと。
- ② 水位管理地点での水位が所定値以下まで低下しており、特定地点にて過剰な水位低下が生じることなく、均等な水位低下が得られていること。
- ③ 各井戸での必要揚水流量の較差が小さく、同一の排水設備で対応できること。

以上の点を考慮し、次の手順にて井戸配置の検討を行う。

a) 複数の井戸配置計画案について、前述の定常排水設計方法を適用し、各井戸での定常揚水流量を算定する。その結果、各井戸での揚水流量の較差を検討し、一部の井戸群に多大な揚水が集中するような計画案は削除する。

b) 井戸配置計画案の客観的な評価基準として、赤池の情報量基準 (AIC)⁶⁾ を用いる。ここで、AIC は次式にて算出し¹⁷⁾、その値が小さい程、良好な井戸配置であると判断する。

$$AIC = M * \ln E + 2N \dots \dots \dots (17)$$

ここで、

$$E = \sum_{j=1}^M (h_{a,j} - h'_{a,j}(Q_{TOTAL}))^2 \dots \dots \dots (18)$$

ここに、

$h'_{a,j}(Q_{TOTAL})$: 定常揚水期間における地点 j での浸透流解析による計算水位

つまり、式 (17) では井戸本数が少なく、かつ、水位

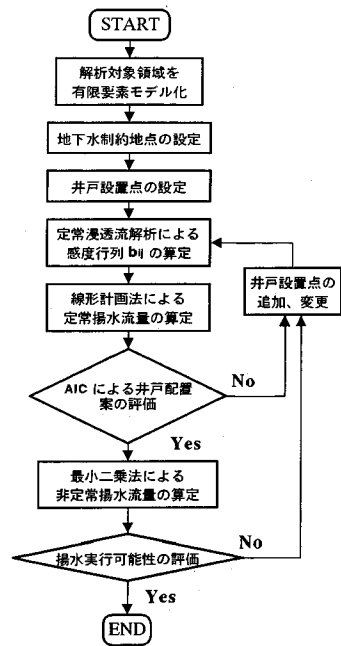


図-3 浸透流解析と最適化手法を用いた排水設計方法の手順

管理地点において定常揚水期間に維持継続すべき水面形状と定常排水設計結果から浸透流解析された計算水面形状との差異が小さい場合の井戸配置を見出そうとしていることになる。

以上、本研究で提案する定常・非定常排水設計方法のフローチャートを図-3 に示す。

4. 解析例

(1) 不均一な水理境界を近傍に有する例

a) 解析条件

不均一な水理境界を有する排水設計事例として、掘削地近傍に河川境界が存在する不圧帯水層地盤モデルを考えた。解析領域は掘削地 (30 m × 50 m) を中心に 1 km 四方の区域とし、その境界条件は水位固定とした。また、河川境界は定水位境界条件を与えた。図-4 は掘削地周辺の平面図および断面図であり、D. W. 設置点は図中に示す D. W. 1 ~ D. W. 8 の 8 地点を考えた。水位管理地点は掘削地全域とし、定常揚水期間に維持すべき地下水位を 15 m 以下とした。また、各 D. W. の孔内水位の許容下限値は 3 m に設定した。

b) 定常排水設計および井戸配置の検討

図-5 は全 D. W. 設置点において式 (11) により算定された感度行列値の和 $\sum b_{ij}$ を $\sum b_{ij}$ の最大値に対する比によって整理した図である。河川境界側に位置する D. W. では河川による水理境界の影響を受け、他の D. W. に比べて揚水による水位低下効率が悪いことがわかる。そこで、検討すべき井戸配置としては図-6 に示

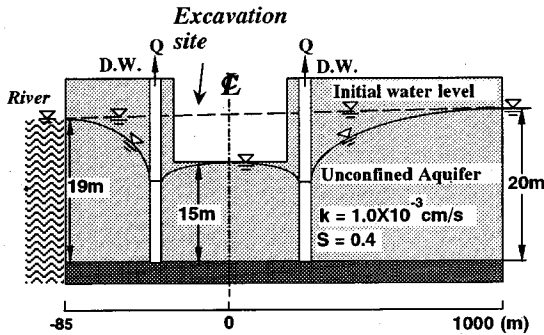
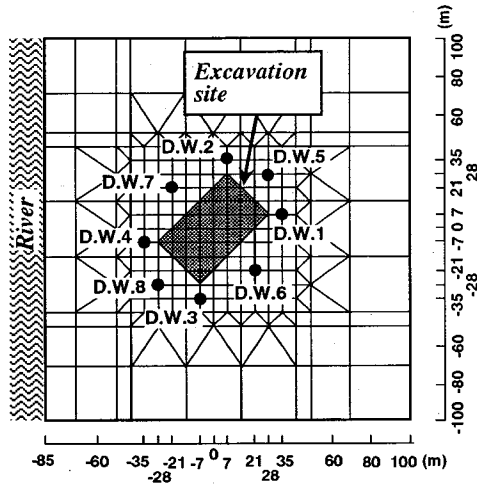


図-4 掘削地近傍に河川境界が存在する不圧帯水層地盤モデル

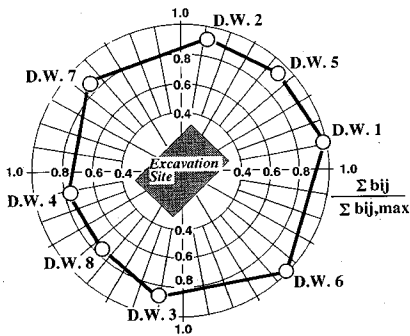


図-5 D.W. 設置点での水位低下効率の比較

すように、掘削地を中心にして4~8本の井戸をやや河川境界側に配置した計8パターンの配置案を設定した。

定常排水設計にて算出された総定常揚水流量、各井戸での揚水流量の較差（定常揚水流量が最小であるD.W. に対する比、 $q-rate$ にて表示）、そして、 AIC の値を表-1に示す。この表より、Case 8、Case 6、Case 5Aの3ケースは総定常揚水流量が少なく、また、 AIC の値が小さいことから掘削地での均等な水位低下施工が推測され、良好な井戸配置であると判断される。

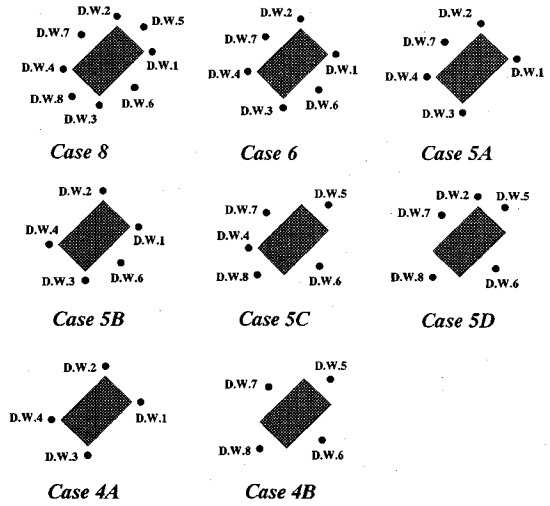


図-6 井戸配置パターン図

表-1 定常排水設計による算定結果

Case	D.W. No.	Q-total	rank	q-rate	rank	AIC	rank
8	all	183.7	1	5.64	7	310.2	1
6	1,2,3,4,6,7	184.0	2	4.73	4	346.2	2
5A	1,2,3,4,7	184.8	3	2.08	1	371.2	3
5B	1,2,3,4,6	221.1	8	5.13	6	405.9	6
5C	4,5,6,7,8	191.4	4	2.68	3	445.2	8
5D	2,5,6,7,8	196.1	6	28.90	8	386.5	5
4A	1,2,3,4	192.2	5	2.17	2	415.0	7
4B	5,6,7,8	196.2	7	4.82	5	384.8	4

Q-total：総定常揚水流量 (l/min)

q-rate：定常揚水流量の較差

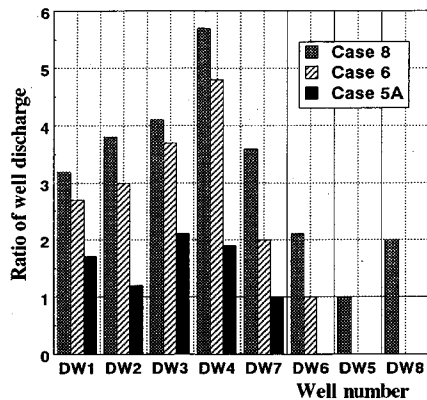


図-7 D.W. における定常揚水流量の較差

図-7はこれらのケースについて定常揚水流量の較差を比較した結果である。各D.W.での揚水流量は井戸配置によって異なり、特にCase-8ではD.W.4からは多くの揚水施工が必要である反面、D.W.5での揚水量は少ない等、井戸の追加や配置変更の余地を残していることがわかる。

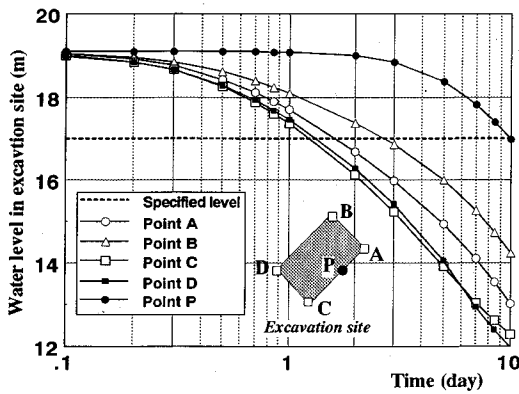


図-8 掘削地内での地下水位の非定常挙動 (Case 5 A)

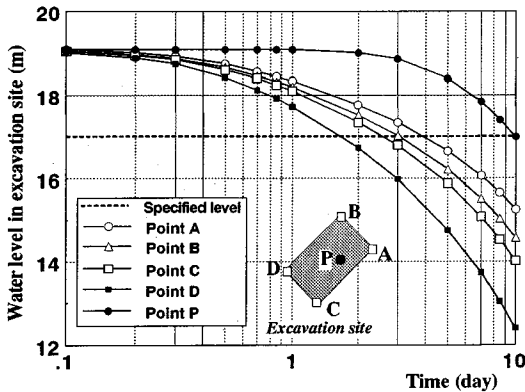


図-9 掘削地内での地下水位の非定常挙動 (Case 8)

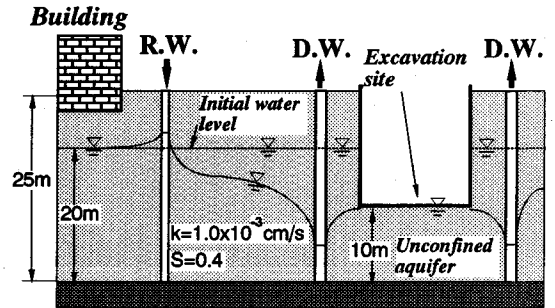
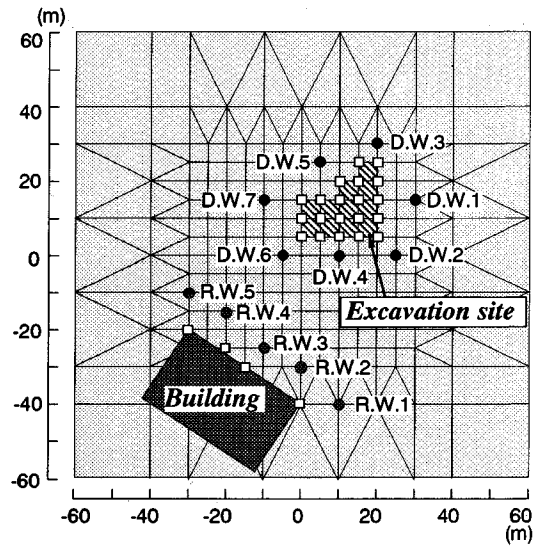


図-10 復水工法を併用した解析モデル図

c) 非定常排水設計

定常排水設計により良好であると判断された井戸配置のうち、Case 5 A と Case 8 の 2 ケースについて非定常排水設計を行う。初期揚水期間を 10 日間とし、掘削地全域の地下水位を 17 m 以下に低下させることを条件に、式 (16) より α 値を計算した。その結果、Case 5 A では $\alpha=6.0$ 、Case 8 では $\alpha=5.4$ であった。

これらの α 値を用いて、式 (14) より非定常揚水量を計算し、非定常浸透流解析を行った。図-8, 9 は掘削地内の代表的な地点における地下水位挙動の算定結果である。図中の点 P は α の算出過程で最も水位低下が困難であった地点であり、両ケースとも掘削地内の水位は均等に低下していない。これは井戸配置と各井戸での揚水流量の影響によるものであり、この例では、Case 8 の方が他の地点 A~D と地点 P との水位差が小さく、水位低下状況としては望ましい傾向にあると判断される。

(2) 復水工法を併用する場合

掘削施工区域に近接した既設構造物への地下水位低下防止対策として復水工法を併用した例を示す。現在、復水工法を併用した場合の排水設計法は確立されてい

ない¹⁸⁾。本研究で提案する排水設計方法によれば、揚水井と復水井の配置を考慮し、それぞれにおける揚水および注水流量の算定が可能である。

a) 解析条件

解析に用いたモデルは掘削地を中心に 1 km 四方の領域を有する不圧帯水層地盤であり、その境界条件は初期水位 20 m にて定水位とした。掘削地周辺の平面図および断面図を図-10 に示す。掘削地を中心に D.W. を 7 本、また、既設構造物と掘削地との間に復水井 (R.W.) 5 本を計画し、図-10 のように配置した。

水位管理地点は図中に□印で示した点であり、定常揚水期間において掘削地内の 20 地点では地下水位を 10 m 下に、また、既設構造物における 4 地点では地下水位が 20 m 以上、21 m 以下に維持されるように設定した。なお、復水井では過度の動水勾配を発生させないように孔内水位は 21 m 以下に設定し、揚水井では孔内水位の許容下限値を 3 m とした。排水設計は復水工法の効果を確認するため、復水工法を併用する場合としない場合の 2 ケースについて行った。

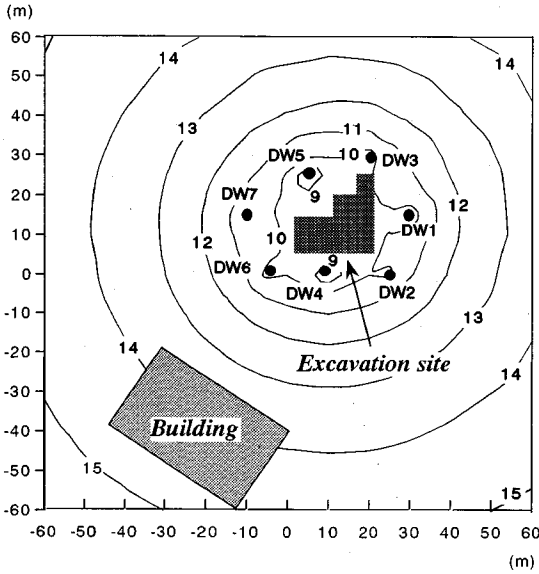
b) 定常排水設計

両ケースについての定常排水設計結果を表-2 に、ま

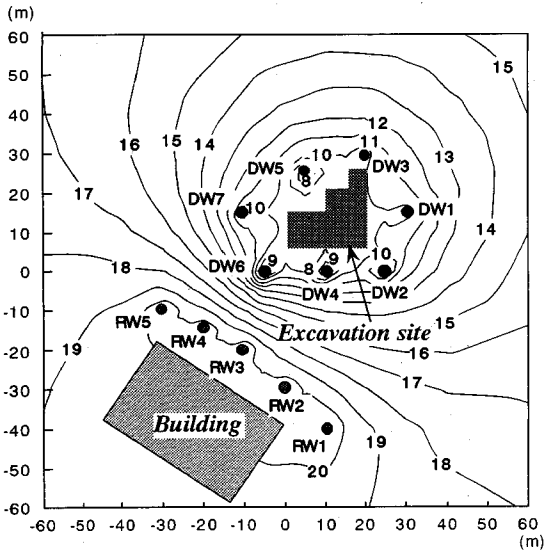
表—2 定常排水設計結果

Deep well Method			Deep well method with artificial recharge					
DW	Qd (l/min)	WLD(m)	DW	Qd (l/min)	WLD(m)	RW	Qr (l/min)	WLR(m)
1	25.2	9.50	1	34.5	9.52	1	68.0	20.98
2	15.0	9.88	2	50.9	8.90	2	48.6	20.96
3	23.1	9.54	3	30.6	9.49	3	58.6	20.96
4	31.2	8.17	4	65.6	7.11	4	51.4	20.97
5	33.0	8.17	5	51.5	7.05	5	67.3	20.98
6	18.1	9.74	6	102.0	7.40			
7	16.8	9.98	7	48.1	9.40			
Σ	162.4		Σ	383.3		Σ	293.8	

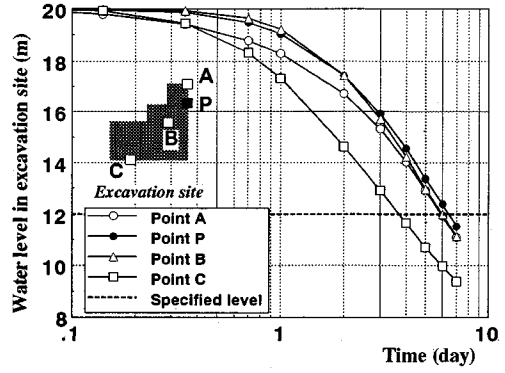
Q_d: 揚水流量, Q_r: 注水流量,
WLD: D. W. 内水位, WLR: R. W. 内水位



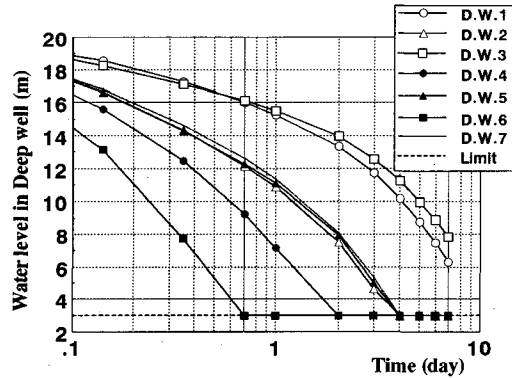
図—11 掘削地周辺部の定常地下水位コンター図 (復水工法なし, コンター単位は m)



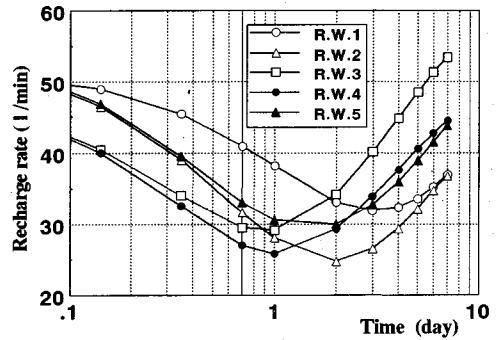
図—12 掘削地周辺部の定常地下水位コンター図 (復水工法併用, コンター単位は m)



図—13 掘削地内での地下水位の経時変化



図—14 D. W. における孔内水位の経時変化



図—15 復水井における注水流量の経時変化

た, 得られた定常揚水流量によって浸透流解析を行い, 掘削地周辺の定常地下水位コンターを描いた結果をそれぞれ図—11, 12 に示す. 復水工法を用いない場合は, 掘削地を中心にほぼ同心円状の地下水位コンターが得られており, 均等な地下水位低下施工がなされているが, 既設構造物周辺では約 6 m の地下水位低下が生じている. 一方, 復水工法を併用した場合は, 掘削地での地下水位低下を確保した上で, 復水井からの注水施工により既設構造物での地下水位低下が低減されており, 復水工法の効果が定量的に把握できる.

c) 非定常排水設計

復水工法を併用した場合について、初期揚水期間7日において掘削領域の地下水位が12m以下に低下する条件を設定し、各D.W.での非定常揚水流量および復水井からの注水流量の算定を試みた。その際、復水井内の水位は21mに固定とした。

式(6)より得られた α 値は5.0であり、その値から計算された非定常揚水流量を用いて浸透流解析を行った。図-13は掘削地内の代表的な地点における地下水位の計算結果であり、点Pは水位低下が最も困難であった地点、点Cは最も容易であった地点である。その差は約2mであり、ほぼ均等な水位低下が得られていると考えられる。また、図-14はD.W.の孔内水位の挙動であり、D.W.1とD.W.3以外は設定した孔内水位の許容下限値に達していることがわかる。

一方、各復水井における注水可能流量の経時変化図を図-15に示す。施工開始初期には、復水井内の設定水位が周辺地下水位より高いことにより発生した動水勾配が徐々に減少するため、注水可能流量は単調に減少するが、施工開始後2日程度から周辺地下水位の低下により、注水可能流量が増加していく状況が解析されている。

(3) 実際問題への適用に関する考察

以上の解析例題で示したように、本方法によれば不均一な水理境界を有する場合や復水工法を併用した施工のように複雑な井戸配置を有する場合等、従来の理論的な方法では十分な検討が行えなかった地盤掘削工事に対しても排水設計が可能であると思われる。また、非定常～定常過程での系統的な排水設計を行う上では、まず、定常排水設計によって定常排水流量や井戸配置の評価を行い、その結果を基に選択された井戸配置を用いて、初期揚水期間での水位低下施工の実行可能性を吟味することによって、施工期間中に要求される排水設備の最大値を算定することができる。

本研究では解析方法の一部として、最適化手法を用いているが、最終的な最適解が得られているわけではなく、設計担当者が排水設計を行う上で有意義であると思われる判断資料を算出しているに過ぎない。実際の施工における井戸配置や排水設備の決定は、井戸の施工経費や、各井戸での揚水可能流量の推定、さらには周辺地下水環境を含めた施工条件などの総合的な評価によって設計・施工担当者が決定すべき事項である。また、施工中においても、随時、地下水位の計測を行って、揚水操作を検討することは極めて重要である。計測結果は現場にて直ちに解析され施工に反映されることが望まれ、その手段として、マイクロコンピュータの使用は極めて有効である。本方法で必要とされる演算量はこれに十分対応するものであり、現場における解析可能性を有している。

5. 結 論

本文では、井戸理論による排水設計法に代わる排水設計手順として数値解析による定常・非定常浸透流解析手法と最適化手法とを組み合わせた方法を用い、掘削地盤条件や施工条件を考慮した上で、各井戸での必要排水流量や井戸配置等の検討を行う方法を提案し、計算例を示した。

本研究により得られた成果を要約すれば、以下のようになる。

(1) 掘削工事における排水設計を地下水位低下施工期間に応じて定常排水設計と非定常排水設計に大別し、各期間で求めるべき定常、非定常揚水流量を浸透流解析手法と最適化手法を用いて系統的に算定する方法を提案した。

(2) 排水設計で問題となる井戸配置の決定法として、赤池の情報量基準の導入を試み、複数の井戸配置計画案の中から最も効率の良い地下水位低下施工を行えるものを評価、選択するための客観的な判断基準を提案し、その有用性を吟味した。

(3) 本研究で提案した排水設計方法の適用例として、従来の方法では検討が困難であった不均一な水理境界を有する場合や、復水工法を併用する場合の地下水位低下施工を例にとり、計算例を示した。本方法によれば複雑な水理境界条件を有する場合においても排水設計が実施できると考えられる。

本研究は文部省科学研究費(一般研究(C)04650440)研究代表者:河野伊一郎)の援助を受けた。また、解析コードの開発に協力をいただいた本学卒業生、千々松正和君(現、ハザマ)に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Aguado, E. and Remson, I. : Groundwater hydraulics in aquifer management, ASCE, Vol. 100, HY 1, pp.103~118, 1974.
- 2) Aguado, E., Remson, I., Pikul, M. and Thomas, W. : Optimal pumping for aquifer dewatering, ASCE, Vol.100, HY 7, pp.869~877, 1974.
- 3) Elango, K. and Gerhard, R. : Finite element linear programming model, ASCE, Vol.106, HY 10, pp.1641~1688, 1980.
- 4) 佐藤邦明・渡辺邦夫: 地下水の適正揚水システムに関する研究, 水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.429~434, 1977.
- 5) 上田年比古・神野健二・長野益徳: 広領域地下水からの最適井戸取水について, 土木学会論文報告集, No. 283, pp. 33~43, 1979.
- 6) 上田年比古・藤野和徳・平野文昭・神野健二: 準一様流を仮定できる定常3次元地下水密度流の数値解析と最適

- 井戸取水について, 土木学会論文報告集, No. 301, pp. 83-92, 1980.
- 7) 神野健二・長野益徳: 深井戸工法における最適揚水量の決定および揚水操作法について, 土木学会論文報告集, No. 305, pp. 73-84, 1981.
- 8) 川谷健・黒坂昌弘: 多層帯水層における地下水流の有限要素法解析と最適取水に関する研究, 第28回水理講演会論文集, pp. 609-614, 1980.
- 9) 青木一男・嘉門雅史・金井主税: FEMとLPによる最適揚水手法について, 昭和60年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, Ⅲ-2-1-Ⅲ-2-2, 1985.
- 10) Kinzelbach, W. (上田年比古監訳): パソコンによる地下水解析, 森北出版株式会社, pp. 142-159, 1990.
- 11) 土質工学会: 根切り工事と地下水一調査・設計から施工まで一, pp. 177-191, 1991.
- 12) 河野伊一郎・西垣 誠: 有限要素法による広域地下水の準三次元解析, 岡山大学土木工学教室レポート, 1982.
- 13) 西垣 誠・下村雅則: 井戸損失に関する二, 三の考察, 第27回土質工学会研究発表会講演集, pp. 1195-1196, 1992.
- 14) 上村佳司・礪 利博・田中良弘: 浸透流解析における井戸のモデル化に関する一考察, 第28回土質工学会研究発表会講演集, pp. 2245-2246, 1993.
- 15) 中川 徹・小柳義夫: 最小二乗法による実験データの解析, 東京大学出版会, pp. 95-110, 1982.
- 16) 北川敏男編: 情報量統計学, 共立出版, pp. 42-64, 1983.
- 17) 文献15) の pp. 150-156.
- 18) 西垣 誠: 復水工法, 土と基礎, Vol. 41, No. 1, pp. 62-64, 1993.

(1993. 9. 8 受付)

STUDY ON OPTIMAL PUMPING DESIGN FOR DEWATERING IN EXCAVATION SITE

Yuji TAKESHITA and Iichiro KOHNO

An optimal design method is presented for dewatering an excavation site. It predicts the optimum number of deep wells, their locations, and the rate of pumping needed to maintain ground water levels below specified elevations at steady and unsteady state. In our proposed method a linear programming method is used to determine the pumping rate at steady state and AIC is used to suggest the optimum deep well locations. This is accomplished by including the finite element analysis of two-dimensional steady seepage flow. Nonlinear least-squares algorithm incorporating finite element analysis of unsteady seepage flow is used to compute the pumping rate required to reach ground water levels below appointed elevation in a prescribed time. The method is applied to several examples of dewatering for a large excavation site in unconfined aquifer models.