

周辺地下水への影響と排水量を考慮した連続地中壁の根入れ深さの決定法

名古屋大学工学部 正会員 大東憲二
 名古屋大学工学部 正会員 植下 協
 愛知県 正会員 山本卓也

1. まえがき

本報告では、これからの大深度地下空間の利用を進めていく上で、シールド工法の水平方向掘削技術とともに、鉛直方向の掘削技術として今後ますます採用されるであろう連続地中壁工法について、事前の環境アセスメントの段階の土質調査によって推定された地盤の工学的定数を基にして設計された連続地中壁が、掘削工事に伴う排水量と周辺地下水状態へどのような影響を及ぼすかを有限要素法を用いた数値解析によって明らかにした結果を紹介する。また、掘削工事直前の追加調査によって、実際の地盤状況が環境アセスメント段階で推定していた地盤状況と異なっていることが明らかになった場合、当初予想された周辺地下水への影響と排水量がどのように変化するのかを同様の数値解析によって明らかにした結果を紹介する。そして、これらの解析結果をもとにして、経済性を考慮した連続地中壁の最適根入れ深さの決定法を提案する。なお、この研究では、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析手法¹⁾を用いた。

2. 事前調査で推定された地盤条件での地下水環境影響解析

研究対象とした地下掘削工事現場では、山留め壁として連続地中壁を用いている。その厚さは1.2mであり、G.L.-30m~-50m付近に堆積する粘性土層を貫通し、その下位の砂礫層まで貫通する。その先端深度は事前の環境アセスメント段階では、G.L.-56mであった。この地下掘削工事計画を参考にして作成した対象地盤の解析モデルは、図1のようである。地盤のモデル化に際しては、この掘削工事に係る環境影響評価書を参考にした。この解析モデルは、掘削部を中心とした断面二次元軸対称モデルとしたため、掘削部の半径は面積置換²⁾し45.2m、地下水位低下の影響半径は環境影響評価書で

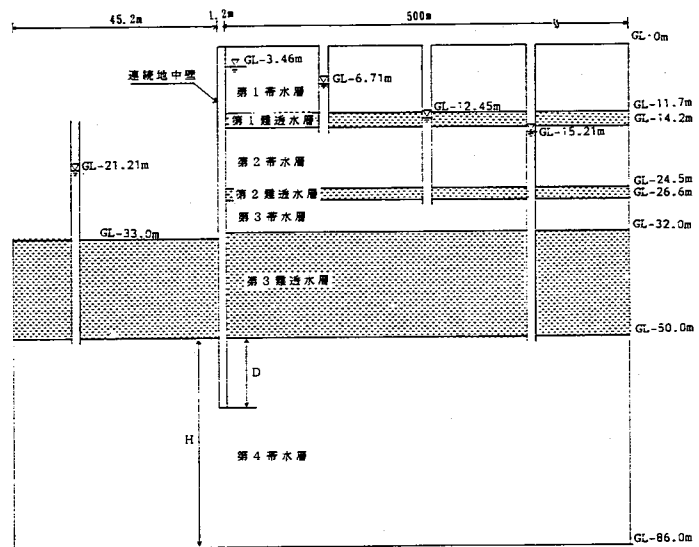


図1 事前調査に基づいた解析モデル

設定されたのと同様に、連続地中壁の外周から500mとした。解析モデルの底面は厚さ6mの粘土層が確認されたG.L.-86mとし、帯水層4層、難透水層3層を考え、それぞれ上から第1、第2、第3、第4帯水層とした。境界条件は、影響半径の地点では水頭固定、掘削部では第4帯水層上部の水頭値をその上部の粘土層がヒービングしない程度に下げた値に固定する。

Determination of Depth of Diaphragm Wall with Considering Influences for Surrounding Groundwater Condition and Discharge from Excavation Pit: Kenji DAITO, Kano UESHITA (Department of Geotechnical Engineering, Nagoya University), and Takuya YAMAMOTO (Aichi Prefecture)

以上の条件に従って、総要素数540、総節点数954のFEMモデルを作成した。解析に用いた透水係数の値を表1に示す。なお、連続地中壁の透水係数は、ソイルセメントの透水係数を用いた。この解析モデルを用いて、連続地中壁の根入れ深さが、工事に伴う排水量と連続地中壁の外周での地下水位低下量と与える影響について解析した。

解析条件として、掘削底面でヒーピングが生じないようにするために、掘削深度(G.L.-33m)の粘土層の下の第4帯水層(G.L.-50m以深)の地下水位を6m低下させた。また、各帯水層の初期地下水位は、図1に示した値とした。連続地中壁の根入れ深さとしては、第4帯水層に連続地中壁が貫入していない場合から第4帯水層最下部まで連続地中壁が達した場合までの10通りの仮定で計算した。その結果得られた連続地中壁の根入れ深さと排水量との関係を図2に示した。また、連続地中壁の根入れ深さが変化するときの周辺地下水位の変化を図3に示す。さらに、連続地中壁の根入れ深さと壁外周での地下水位低下量との関係を図4に示す。

この解析結果からは、掘削工事に伴う排水量は十分許容できる程度であり、また周辺の地下水位低下の著しい範囲はそれほど広くないことが示された。

次に、影響半径の設定が変わると、掘削工事に伴う排水量と周辺地下水状態へどのような影響が及ぶかを解析した。ここでは、影響半径として、60mから1000mまでの10通りについて計算した。他の計算条件は、掘削部の地下水位低下量を6m、連続地中壁の根入れ深さをG.L.-62m、第4帯水層の透水係数を 5.0×10^{-2} (cm/s)、掘削前の地下水位を図1に示

表1 事前調査に基づいた解析モデルに与えた透水係数

土層	透水係数 (cm/s)
第1帯水層	2.5×10^{-2}
第2帯水層	2.2×10^{-3}
第3帯水層	2.5×10^{-3}
第4帯水層	5.0×10^{-3}
第1難透水層	1.0×10^{-7}
第2難透水層	1.0×10^{-7}
第3難透水層	1.0×10^{-6}
連続地中壁	5.4×10^{-7}

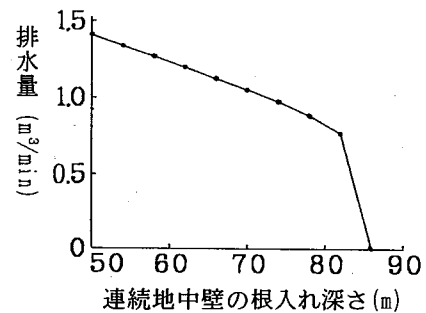


図2 事前調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さと排水量の関係

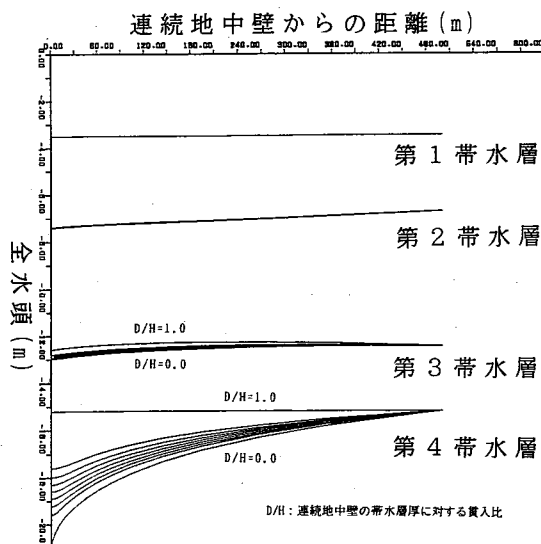


図3 事前調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さが変化した場合の周辺地下水位の変化

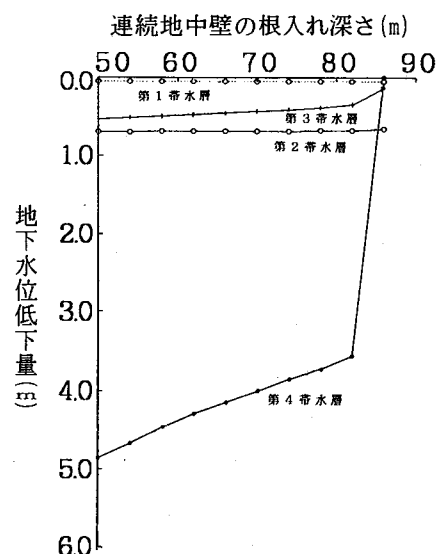


図4 事前調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さと壁外周での地下水位低下量

した値とした。影響半径を環境影響評価書の設定と同じ 500mとした場合の排水量 ($Q_{R=500}$) に対する各ケースの排水量の比 ($Q/Q_{R=500}$)、あるいは排水量と影響半径との関係を図5に示す。また、影響半径と連続地中壁外周での各帯水層の地下水位低下量との関係を図6に示す。さらに、図7には影響半径の違いによる第4帯水層の地下水位低下量の違いを示す。

これらの図から、影響半径を大きくとれば排水量は少なくなるが、広範囲で地下水位が低下することがわかる。また、影響半径を小さくとれば、水位固定の地点が近くにあるため広範囲に地下水位は低下しないが、排水量は多くなることわかる。影響半径を小さくするという事は言い換えれば、注入工法（あるいは復水工法）により、掘削部からの排水を周辺の地盤に戻し、掘削工事現場の近くに水頭固定の地点を作り出すことにより、周辺地下水位の低下量を少なくすることができるということになる。

図5、6より、影響半径が小さい範囲では、影響半径の変化に対する排水量及び連続地中壁外周での地下水位低下量の変化率が大きくなる傾向があり、影響半径が大きくなるにつれてそれは小さくなる。つまり、影響半径をある程度大きくとれば、影響半径の変化が排水量及び連続地中壁外周での地下水位低下量にあまり影響を与えなくなり、工学的に無視できる程度の変化しか生じないような影響半径を設定することができる。今回の解析では、影響半径を1000mと仮定した場合には、影響半径を500mと仮定した場合の排水量の約85%となり、また、第4帯水層の連続地中壁外周での地下水位低下量の約107%となった。この解析結果より、環境影響評価書で設定した影響半径500mは、十分であるとは言えないまでもある程度妥当な影響半径であったように思われる。

次に、掘削工事に伴う排水量と地下水位低下量が、どのような時間的変化を経て、定常解析で求めた排水量と地下水位低下量に近づくかを明らかにするために非定常解析を行った。この解析で用いた透水係数と比貯留係数の値を表2に示す。この表の比貯留係数については、第4帯水層では揚水試験結果よりJacobの方法で求めた値であり、その他の層では地下水ハンドブック³⁾に記載されている一般的な値とした。

まず、比貯留係数を一定とし、第4帯水層の透水係数を変化させることにより排水量がどの

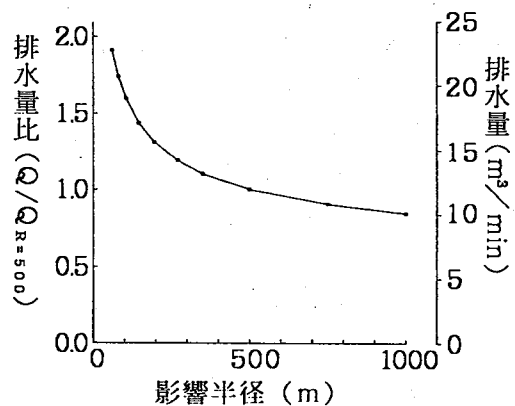


図5 事前調査に基づいた解析モデルによる影響半径と排水量の関係

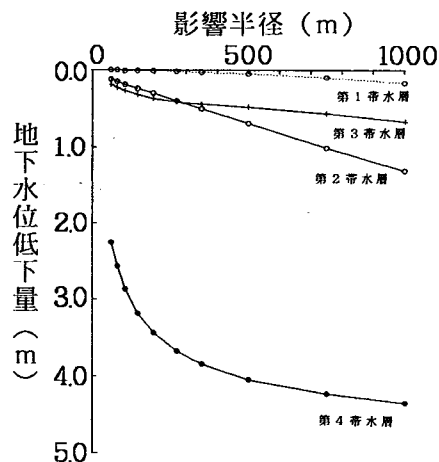


図6 影響半径と連続地中壁外周での地下水位低下量との関係

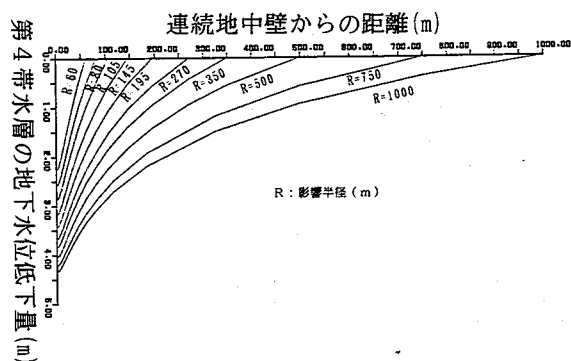


図7 影響半径の設定の違いによる第4帯水層の地下水位低下状況の違い

ように変化するかを計算した。第4帯水層の透水係数の違いによる排水量の時間的変化を定常状態での排水量に対する比として図8に示した。この図から、比貯留係数を一定とした場合には、第4帯水層の透水係数が小さくなればなるほど定常状態に達するまでの時間が長くなり、また定常状態の排水量に対する比も大きくなることわかる。

次に、連続地中壁の外側で地下水位低下量が時間的にどのように変化していくかを計算した。図9には周辺地下水位の時間的変化を、また図10には連続地中壁外周での各帯水層の地下水位低下量の時間的変化を示す。これらの図から、連続地中壁外周の第4帯水層の地下水位低下量は、2日後には既に定常状態の水位とほとんど等しくなっていることがわかる。一方、第1、2、3帯水層の地下水位は、第1、2、3難透水層の漏水の影響を受けて、定常状態の地下水位に達するまでに数十日かかることがわかる。ただし、第1帯水層の地下水位は絶対的な変化量が小さいため、掘削工事による影響は、ほとんど考慮しなくてもよいと考えられる。

表2 非定常解析で用いた透水係数と比貯留係数

土層	透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (m^{-1})
第1帯水層	2.5×10^{-2}	5.0×10^{-5}
第2帯水層	2.2×10^{-3}	5.0×10^{-5}
第3帯水層	2.5×10^{-3}	5.0×10^{-5}
第4帯水層	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-5}
第1難透水層	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}
第2難透水層	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}
第3難透水層	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}

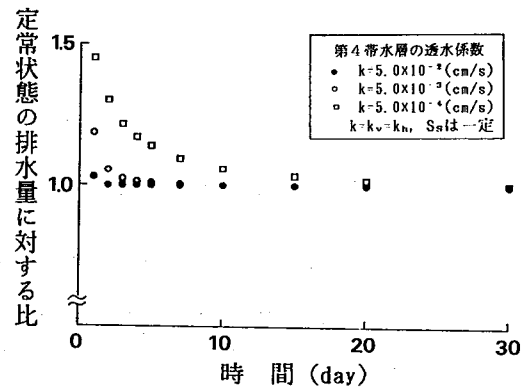


図8 第4帯水層の透水係数の違いによる排水量の定常状態での排水量に対する比の時間的変化

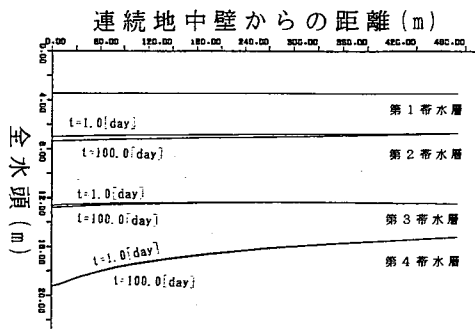


図9 非定常解析による周辺地下水位の時間的変化

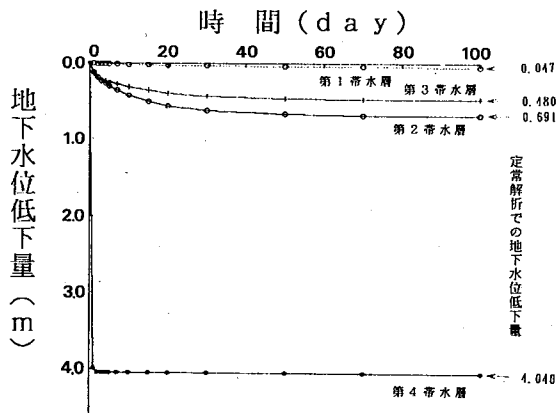


図10 非定常解析による連続地中壁外周での地下水位低下量の時間的変化

3. 追加調査で確認された地盤条件での地下水環境影響解析

実際に工事を行う直前の追加調査によって、第4帯水層の上部には、事前調査では確認されていなかった透水性のよい層があることが判明した。この追加調査の結果、連続地中壁の根入れ深さが G.L.-56mのままでは、排水量がかなり多くなると予想されたので、透水性のよい層を遮断する形で G.L.-62mまで根入れを深くするように設計変更された。そこで、追加調査によって明らかになった地盤の透水性を考慮した解析モデルによって、連続地中壁の根入れ深さが変更されることによって生じる排水量及び周辺地下水

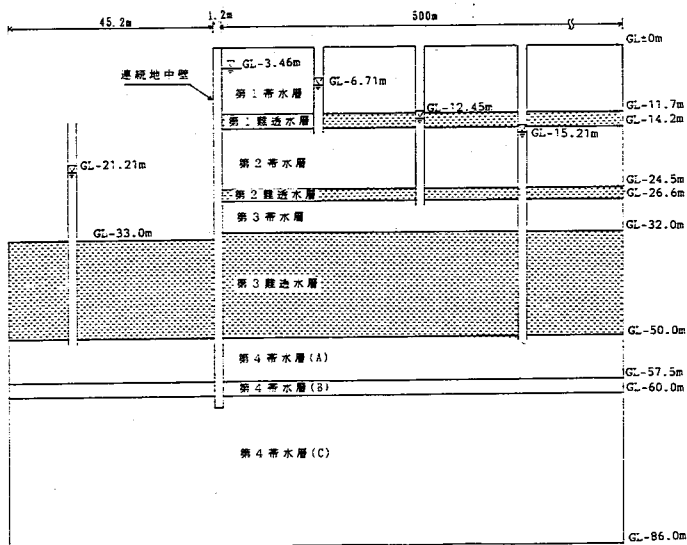


図11 追加調査に基づいた解析モデル

への影響について解析した。解析モデルを図11に、また解析に用いた透水係数の値を表3に示す。

解析条件は、前章と同様に掘削部での地下水位低下量を6m、各帯水層の地下水位は図11に示した値とする。連続地中壁の根入れ深さとしては、第4帯水層に連続地中壁が貫入していない場合から第4帯水層最下部まで連続地中壁が達した場合までの10通りの仮定で計算した。その結果得られた連続地中壁の根入れ深さと排水量の関係を図12に示した。また、連続地中壁の根入れ深さが変化したときの周辺地下水位の変化を図13に示す。さらに、連続地中壁の根入れ深さと壁外周での地下水位低下量との関係を図14に示した。

連続地中壁の根入れ深さが G.L. -62m の場合の排水量は、 $5.4 \text{ (m}^3/\text{min)}$ という値が得られ、当初計画されていた根入れ深さ G.L. -56m の場合に想定される排水量約 $8.8 \text{ (m}^3/\text{min)}$ の約6割に減少させることができる計算になる。これは、連続地中壁の根入れ深さを G.L. -56m から G.L. -62m に変更したことにより、第4帯水層(A)の透水性のよい層を連続地中壁が遮断するために、このような大きな止水効果が得られると考えられる。また、連続地中壁外側での地下水位低下量は、連続地中壁を深くしたことにより、第1、第2、第3帯水層についてはほとんど変化がないものの、第4帯水層については周辺の地下水位低下をかなり軽減できることが明らかになった。

表3 追加調査に基づいた解析モデルに与えた透水係数

土層	透水係数 (cm/s)	
第1帯水層	2.5×10^{-2}	
第2帯水層	2.2×10^{-3}	
第3帯水層	2.5×10^{-3}	
第4帯水層	(A)	1.0×10^{-1}
	(B)	5.0×10^{-2}
	(C)	1.0×10^{-2}
第1難透水層	1.0×10^{-7}	
第2難透水層	1.0×10^{-7}	
第3難透水層	1.0×10^{-6}	
連続地中壁	5.4×10^{-7}	

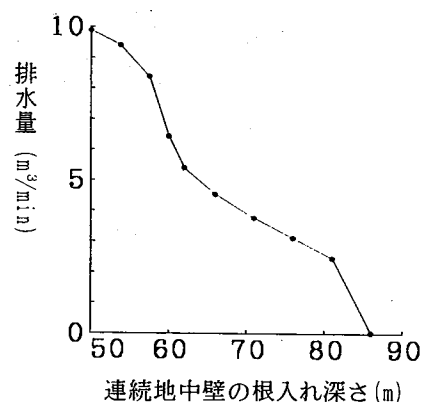


図12 追加調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さと排水量の関係

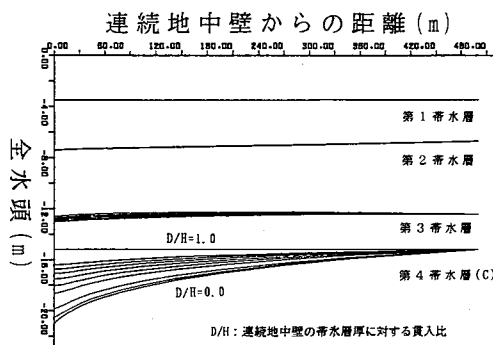


図13 追加調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さが変化した場合の周辺地下水位の変化

表4 建設費用等の一覧

連続地中壁の外周	306m
工事期間	18ヵ月
連続地中壁建設費	120,000円/m ² (厚さ1.2m)
下水料金	207円/m ³

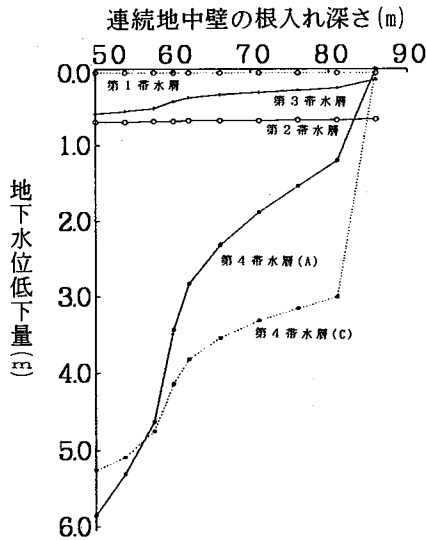


図14 追加調査に基づいた解析モデルによる連続地中壁の根入れ深さと壁外周での地下水位低下量

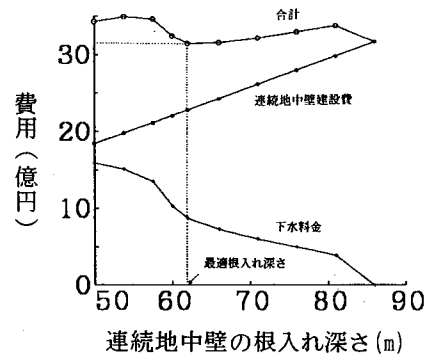


図15 地下連続壁の建設費用、排水費用、総費用の関係

4. 地下掘削工事における経済性の評価

連続地中壁の建設費用は、概ね根入れ深さの一次式で計算できると仮定した。一方、地下排水は下水に放流するために排水量に比例した費用が必要である。この計算で用いた費用等の一覧を表4に示す。前述の解析によって得られた連続地中壁の根入れ深さと排水量との関係をもとにして、図15に示すような連続地中壁の建設費用、排水費用、総費用の関係を求めた。図15より、経済的に見た連続地中壁の最適根入れ深さは G.L.-62mとなる。これは追加調査後に変更した根入れ深さであり、変更前の根入れ深さ G.L.-56mの場合よりも約4億円の費用節約となることがわかった。

5. あとがき

本報告では、地下掘削工事に際して、連続地中壁の根入れ深さの違いや影響半径の設定の違いによる地下水環境影響解析結果への影響や、排水量と地下水位低下量の時間的変化の違いを生ずる要因の検討を通して、地下水問題の視点から連続地中壁の最適深さを決める方法を紹介したが、その最適深さは環境アセスメント段階での事前調査で G.L.-56mと予想されていたものが、工事直前の追加調査で G.L.-62mにあることを見出した例である。このように、工事直前まで、調査精度を上げながら地下排水問題の安全性・経済性と周辺への影響評価を検討し続けることによって、排水を伴う工事費を節約し、周辺地下水位低下への影響も低減できる一つのよき具体例を示すことができたと考えている。

参考文献

- 1) 土質工学会・中国支部：浸透問題の数値解析法、講習会テキスト、1987。
- 2) 進士喜英、小野紘一、西垣 誠：地盤掘削における排水流量の算定法に関する一考察、土木学会第43回年次学術講演会概要集Ⅲ、1988、pp.892~893。
- 3) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック、建設産業調査会、1979、p.76。