

風化砂礫地盤における透水係数の評価と地下水対策

Estimation of permeability on weathered gravel ground and measure for ground water

原田 弘幸* 松野 忠彦**
 Hiroyuki Harada Tadahiko Matsuno
 西濱 康朗*** 渡辺 広明***
 Yasuaki Nishihama Hiroaki Watanabe
 佐藤 靖彦**** 高田 渉太郎*****
 Yasuhiko Sato Syotarou Takata
 明石 健****
 Takeshi Akashi

要 約

地下水位を低下させて行う工事においては、地盤の透水係数の評価が特に重要となる。本事例は、風化礫を含む扇状地砂礫地盤での掘削工事において、地下水処理対策検討のためにボーリング調査および現場透水試験、揚水試験などの詳細な地盤調査を実施し、透水係数の評価、地質構造の評価を慎重に行って、調査結果をもとに遮水壁延長等による地下水対策工を採用したものである。これにより施工時には周辺地域に影響なく施工することができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 工事計画における検討課題
- § 4. 透水性評価のための地盤調査
- § 5. 地下水対策工の施工
- § 6. 掘削時の挙動
- § 7. おわりに

§ 1. はじめに

地下水位を低下させて行う掘削工事の場合、揚水計画、周辺地域への影響検討のために、地盤の透水性評価が重要となる。本報では、掘削深度18mの雨水ポンプ場建設工事において、工事計画時に詳細な地盤調査を行い、適切な地下水対策工法を検討した事例について報告する。

当該地盤は扇状地形による風化砂礫土が堆積していること、また海岸近傍であり地下水位に潮位変動があることなどが、地盤特性の評価を難しくしていた。そこで、対象地盤の正確な透水係数の把握、および不透水層の存在をはじめとする地盤構造の把握を目的に、詳細な地盤

調査を実施した。

その調査結果をもとに、適切な地下水対策方法を再検討し、薬液注入による遮水壁延長を採用した。掘削施工中には地中の間隙水圧や揚水量等の計測を行い、慎重な施工を行った。

本報では、正確な水理地質構造把握のための詳細地盤調査、地下水対策工、および掘削時における地下水挙動について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

- 雨水ポンプ場建設工事
- (その1) SMW造成工 $L=27\sim 31.5\text{m}$, $A=5,000\text{m}^2$
- (その2) 薬液注入工
- 掘削工 23,800m³
- 躯体工 (地下3F)
- 建築工 (地上2F)

2-2 地形・地質

当該地は、瀬戸内沿岸に位置し、平野部ではあるが山地が近接しており、扇状地および扇状地性の三角州として形成された厚い砂礫層が堆積している。

当該地における柱状図の例を図-1に示す。地表から厚さ15m程度は砂礫(Ag)、シルト混じり砂(As)の沖積層が堆積し、その下位に洪積砂礫層(Dg1~Dg5)があり、

* 四国(支)大影トンネル(出)

** 四国(支)佐古ダム(出)

*** 四国(支)新居浜(出)

**** 技術研究所技術研究部土木技術研究課

***** 東北(支)土木部

間に幾つかの粘土層が介在している。洪積砂礫層の土質はシルト混じり砂礫層を主体とするが、礫分が40~60%、シルト・粘土分が10~20%程度であり細粒分がやや多い。また砂礫層中にはくさり礫と呼ばれる風化礫が一部混入することが特徴的である。

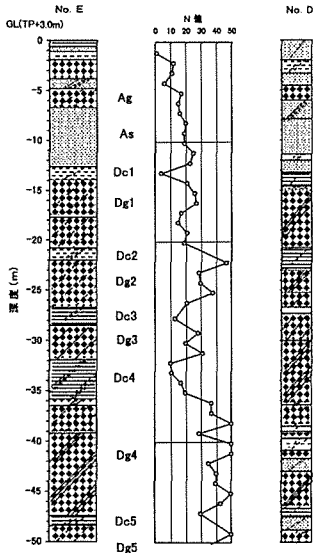


図-1 土質柱状図

§ 3. 工事計画における検討課題

当該工事は図-2に示すようにポンプ棟で深さ18m、沈砂池で深さ15mの掘削、躯体構築を行うものであり、(その1) 工事では深度27.0~31.5mのSMW工法による土留め壁を造成した。

当初計画の地下水処理対策工として、砂礫地盤の透水係数は $2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ とされて、SMW止水壁と釜場排水工法が計画され、計画揚水量は $1.37 \text{m}^3/\text{min}$ であった。

(その1) 工事のSMW造成前に、ディープウェル等の検討を目的として原地盤での揚水試験を実施したところ、透水係数は 10^{-3}cm/s オーダーである可能性が判明した。その場合にはSMW壁だけでは止水が不十分で釜場排水工法では対処できないことが予想され、地下水処理対策工の再検討が必要となった。

ただし、透水係数の評価についてこの時点では、揚水

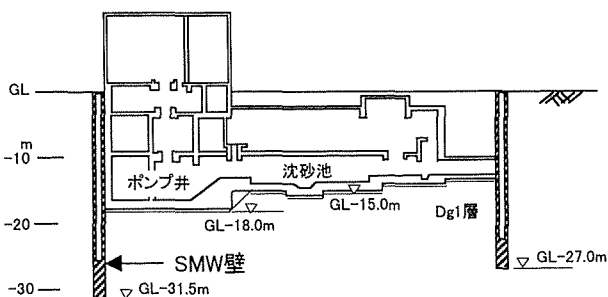


図-2 ポンプ場概略図

試験で測定した地下水位に潮位の影響による変動が大きいこと、また砂礫層が被圧層か不圧層か判定できなかったため、さらに検討する必要がある。

地下水対策工の検討のためには、特に以下の点についての地盤評価が求められた。

- ① 正確な透水係数の把握
 - ・ 潮位変動の影響を補正する
 - ・ 地下水の不圧・被圧の評価
 - ・ 試験方法による差異の把握
- ② 連続した不透水層または難透水層の把握
 - ・ 地下水対策工法の選定

§ 4. 透水性評価のための地盤調査

4-1 調査計画

§ 3で述べた様な当該地盤の評価のために、表-1および図-3に示すような調査計画を立てた。

透水係数把握のために、現場透水試験は揚水法と回復法を行ったほか、粒度分布からの推定も行いそれぞれ比較検討した。

また、地層の判定のためにヤード内7箇所ではボーリング調査を行ったほか、地下水位の変動観測、電気検層等を実施し、多くの視点からの評価を行った。

表-1 調査試験一覧表

項目	対象土層	数量、内容
ボーリング調査		7箇所 (L=25~50m)
水位観測孔	As~Dg ₅	5箇所
現場透水試験	Dg ₁ ~Dg ₅	5深度で揚水法、回復法を実施
粒度試験	Dg ₁ ~Dg ₅	1~2m毎に試料採取
一軸圧縮試験 圧密試験	Dc ₂ , Dc ₃ , Dc ₅	
電気検層	Dg ₁ ~Dg ₅	
揚水試験	Dg ₁ ~Dg ₃	3回 (SMW造成前、造成後、遮水注入後)

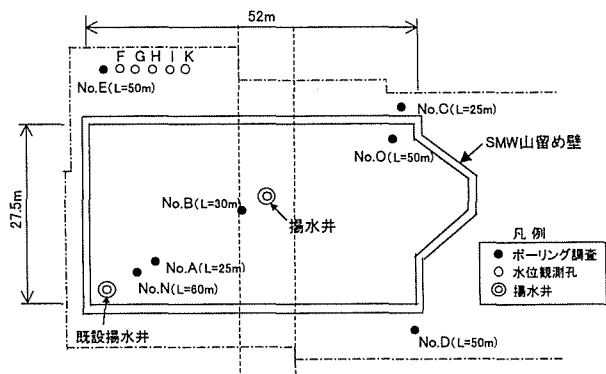


図-3 調査位置平面図

4-2 透水係数の把握

ボーリング孔を利用した現場透水試験の方法には、大きく分けて非定常法(回復法)と定常法(揚水法または注水法)とがあるが、透水性の高い地盤では定常法が行われることが多い。

以下に、各試験方法における要点と結果を示す。

(1) 揚水法

当現場は護岸から約200mの場所に位置し、地下水位は潮位変動の影響を受けており、図-4に示すように平衡水位が時間的に変化するため、観測地下水位の補正が必要となった。

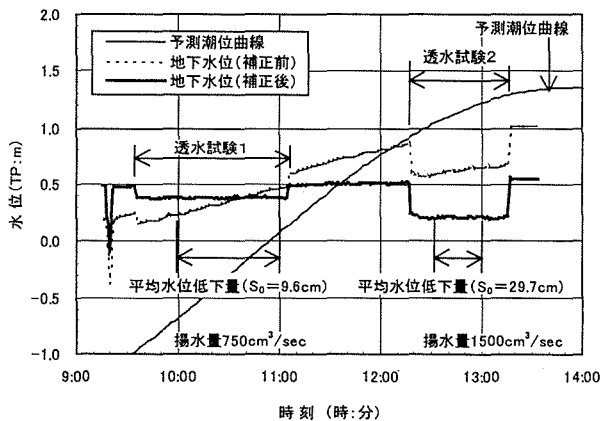


図-4 現場透水試験結果(揚水法, GL-30m)

①観測地下水位の潮位補正方法²⁾

まず、地下水位の潮位変動の影響度合いをみるために、現場透水試験前に観測孔の地下水位と潮位を観測し、変動の振幅を確認した。滞水層によって異なるが、GL-30mの深度では地下水位の両振幅が約1mで潮位振幅の30%程度と大きな変動が認められた。この潮位による水位変化を正弦曲線で近似させ、透水試験中の観測水位を補正することにした。

揚水法による現場透水試験では、試験孔に孔壁崩壊防止のため先端部をストレーナー加工した測定パイプを打設し、逆止弁を付けた孔内水汲み上げパイプと小型ポンプを用いて揚水を行なった。計測には電気式水位計とパソコンを使用して、5秒間隔で測定して細かいデータを収録するとともに、上記補正方法により試験中にリアルタイムで潮位補正が可能なシステムとした。

図-4にGL-30m(Dg3層)における観測地下水位の時刻歴を示す。潮位が低潮から高潮に上昇する時間帯であったため、地下水位も増加傾向を示した。これに対して、潮位補正をすることにより、地下水位はほぼ一定になり、揚水後比較的早くから平衡水位に達したことがわかる。

②揚水法の試験結果

各深度で実施した揚水法による現場透水試験結果を表-2に示す。透水係数は、洪積砂礫層の最上部層で $1 \times 10^2 \text{ cm/s}$ であったが、それ以深では 10^1 cm/s オーダーと非常に大きいことが判明した。特に、GL-30mのDg3

層では透水係数が $5 \times 10^1 \text{ cm/s}$ と大きくなっている。

なお、深度の大きいGL-45mおよびGL-50mでは、上部層に比べて細粒土層の介在がやや多くなっており、別途行なった試験によると透水係数 10^2 cm/s オーダーという結果も得られている。

表-2 揚水法による現場透水試験結果

深度	対象土層	揚水量 (l/min)	水位低下 (cm)	透水係数 (cm/s)
GL-16m	Dg1	13	160	1.1×10^2
GL-23m	Dg2	30	22	1.4×10^1
		60	78	
GL-30m	Dg3	45	10	5.2×10^1
		90	30	
GL-44m	Dg4	47	42	1.5×10^1
GL-50m	Dg5	21	23	1.4×10^1

(2) 回復法

揚水法を終了後、ポンプを停止して引き続き水位回復量の経時変化を電気式水位計により連続的に1秒間隔で測定し、回復法による測定も行った。GL-16m(Dg1層)における回復法試験は、水位低下2.5mに対して水位回復に2分かかり、透水係数は $1.7 \times 10^2 \text{ cm/s}$ と揚水法の結果とほぼ同じとなった。他の深度についても揚水法と概ね同じ値となり、回復法によっても洪積砂礫層の透水係数はかなり高いことがわかった。すなわち、回復法でも正確な測定をすれば揚水法と同じ結果が得られる。

(3) 粒度分布から推定した透水係数

図-5にDg1~Dg5層の粒度試験結果からクレーガー法により推定した透水係数と現場透水試験の値を深度毎に示し比較した。クレーガー法により推定された透水係数 k は、概ね $10^3 \sim 10^2 \text{ cm/s}$ のオーダーであり、現場透水試験より1オーダー小さい傾向にある。

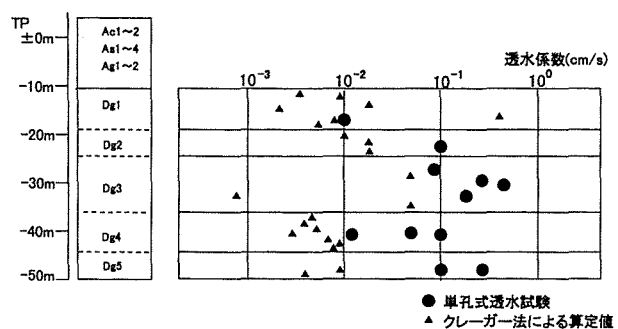


図-5 クレーガー法と現場透水試験の比較

その原因の一つとして、 $\phi 66 \text{ mm}$ で採取される試料と大きな礫を含む実際の粒度とは多少異なることが考えられる。また、混入する風化礫(くさり礫)がボーリング採取時およびふるい分け分析時に細粒化した可能性が考えられる。したがって、このような地層の場合には粒度

分布から求めた推定値の取り扱いに注意が必要である。

4-3 地下水位観測

地下水位観測から、各地層の地下水位は図-6に示すように潮位変動の影響があることがわかった。

地下水の変動挙動から、以下のことが考察される。

- ・潮位は最大で約3mの変動が見られ、これに応じてAg層およびAs層の沖積層で約20cmの変動が、Dg1~Dg5の洪積砂礫層は約1mの変動がある。また、潮位変動との位相差は、沖積層で約1時間、洪積砂礫層で約10分程度の差が認められる。
- ・Dg1層とAg層、As層とは異なる挙動を示していることから、その間にあるAc2層またはDc1層が連続した不透水層となっており、Dg1層以下は被圧層と判断される。
- ・Dg1層、Dg2層およびDg3層は、いずれも同じ水位を示し挙動も同一である。これによりその中間に存在する粘土層は不連続であり、Dg1~Dg3層は水理的につながっている。
- ・Dg4層およびDg5層は、Dg1~Dg3層とは似た挙動を示すものの、10~20cmの水位差が認められる。

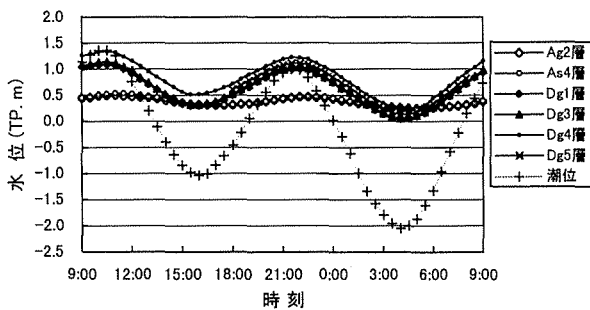


図-6 地下水頭の経時変化

4-4 SMW造成後の揚水試験

また、SMW造成完了後に山留め壁内において揚水試験を行い、中間粘性土層の連続性ならびにSMW壁の遮水性について検討した。揚水量1.5m³/minで揚水井の水位は4.1m、山留め壁内部の地下水位は2.6mしか低下せず、床付け掘削の必要低下量16mに対しては莫大な揚水量が必要となると予想された。また、SMW壁外のDg3層の観測孔No.Hの水位も揚水に伴って低下傾向を示した。このことから、SMW壁だけでは遮水が不十分と判断された。

なお、フォルヒハマー式³⁾を用いてSMW壁内部地盤の見かけの透水係数kを以下に評価した。

$$k = Q / (4 \cdot r \cdot s)$$

Q: 揚水量 (=1.5m³/min)

r: 井戸半径 (=19.95m = $\sqrt{(50m \times 25m) / \pi}$)

s: 水位低下量 (=2.67m: SMW壁内観測孔)

$$k = 1.2 \times 10^{-2} \text{ (cm/s)}$$

得られた透水係数の値は10⁻²オーダーとなり、SMWの遮水効果、壁内の鉛直方向の透水性により、SMW造成前の透水係数から1オーダー小さくなった。

4-5 地質構造の推定

以上の調査結果から、当該地盤の地質構造は図-7のように推定した。

- ・洪積砂礫層に介在する粘性土層Dc2~Dc4は不連続となっており、そのためDg1~Dg4は水理的につながっていることが判明した。
- ・洪積砂礫層Dg1~Dg3の透水係数は、10⁻¹cm/sオーダーと非常に大きく、鉛直方向の透水性を考慮しても10⁻²cm/sオーダーとみられる。
- ・GL48m付近において層厚1m程度の粘性土層Dc5が、4箇所のボーリング地点 (No.D, E, N, O) から確認された。上下層の地下水頭の挙動からDc5層がある程度連続していると判断した。

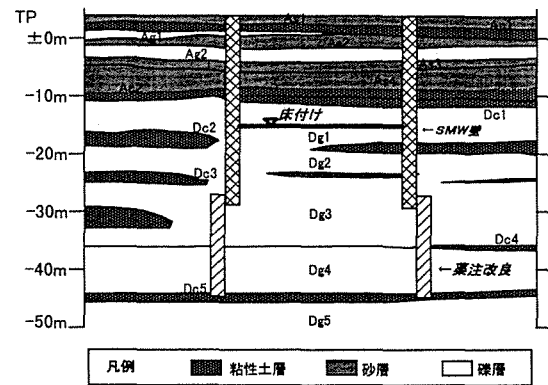


図-7 推定された地質構造

§ 5. 地下水対策工の施工

5-1 対策工の検討

推定された地質構造に基づき、地下水対策方法を検討した。SMW壁下端の洪積砂礫層は透水係数が大きいため、底盤改良または遮水壁延長が考えられた。底盤改良の場合には、盤ぶくれ対策のため深度GL-40mでの改良が必要であるが改良面積が大きく工費が相当かかる。GL-48m付近に存在する層厚1m程度のDc5層は、難透水性の粘性土層で層厚が薄いものの連続している可能性が高いと判断されたため、Dc5層までの薬液注入工法による遮水壁延長を採用することにした。

注入工法には、砂礫地盤でも注入効果が高く確実な二重管ダブルパッカー工法を採用した。SMW壁外周に直径1mの改良を1mピッチ、2列でSMW壁下端からDc5層までの範囲を改良し遮水壁を造成した。(GL-25~48m)

また、Dc5層の一部不連続や遮水壁からの漏水の可能性を考慮して、ディープウェル併用および地下水挙動の計測も行うことにした。深度GL-42mまでのディープウェル2本を施工し、揚水試験で使用した井戸2本とあわせ

て、最大4本のディープウェルを計画した。

図-8に採用した地下水対策工の概要を示す。

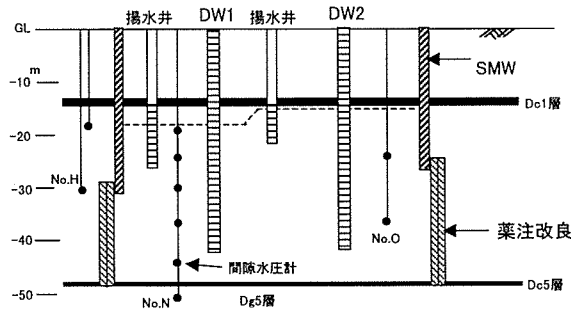


図-8 地下水対策工の概要

5-2 薬液注入工

(1) 注入率の算出

注入率は以下のように算出した。

$$\alpha = \rho \cdot \eta$$

ここに α = 注入率

ρ = 薬液充填率

(二重管ダブルパッカー工法; 0.90)

η = 間隙率 (0.45)

$$\alpha = \rho \cdot \eta = 0.9 \times 0.45 \approx 40\%$$

注入対象の砂礫層は、平均細粒分含有率は15%と通常の砂礫よりやや多いため、一次注入(セメントベントナイト液)を5%にし、二次注入(水ガラス系溶液タイプ)を35%の注入率を計画した。

(2) 試験注入

基準注入率を40%として、注入率を35%、40%、45%と変え、試験注入を行った。コア観察、試薬による薬液反応、および現場透水試験とを行い改良効果を確認した。その結果、注入率40%の場合に注入範囲全体に均一に薬液が浸透していることが確認されたため、注入率40%を採用した。

5-3 効果の確認

薬液注入工施工後において、新たに施工したディープウェル2本(DW1, DW2)を使用して揚水試験を実施し、遮水効果を確認した。図-9に試験結果を示す。2箇所から計2.15m³/minの揚水により、山留め壁内の地下水位をGL-15mまで下げることができた。また、山留め壁外周の観測孔No.Hの地下水位は、揚水による影響がほとんど見られないことから、対策工の効果を確認できた。さらに、深度GL-50mにおける間隙水圧にもほとんど変化がなく、粘性土層Dc5層の連続性についても認められた。

揚水量と水位低下量を用いて、Dc5層下部からの地下水流入が無いものと仮定して、遮水壁の見かけの透水係

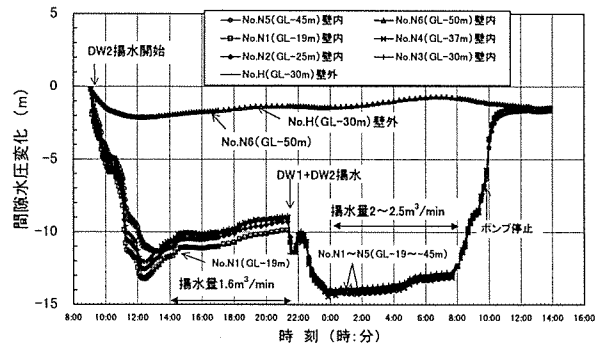


図-9 対策後の揚水試験結果

数を算定したところ2×10⁻⁴cm/sであった。また、フォルヒハイマー式を用いて求めたSMW壁内部地盤の見かけの透水係数は3×10⁻³cm/sと算定され、表-3に示すように薬液注入による遮水壁延長の対策でさらに1オーダー小さくすることができた。

表-3 揚水試験による遮水壁内の見かけの透水係数

試験時点	地盤の透水係数 k
原地盤	1 ~ 5 × 10 ⁻¹ cm/s
SMW壁造成後	1 × 10 ⁻² cm/s
遮水壁延長施工後	3 × 10 ⁻³ cm/s

揚水試験における揚水量と山留め壁内Dg1層の地下水位の関係を図-10に示す。揚水量と地下水位とはほぼ直線的な関係にあり、これによれば床付け面TP-15m (GL-18m) までの水位低下に3m³/min近くの揚水量が必要と推定されたが、ディープウェル3~4本の稼働によって対応可能と判断された。

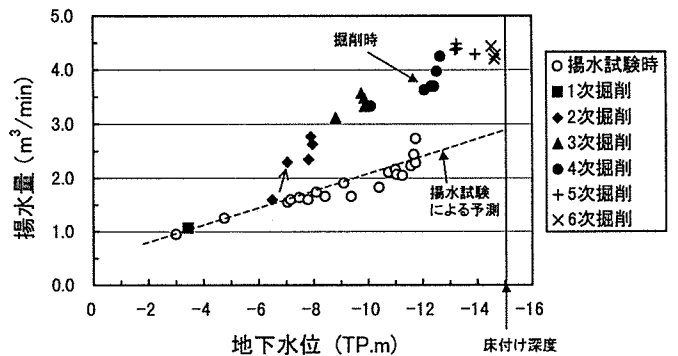


図-10 揚水量と地下水位の関係

§ 6. 掘削時の挙動

掘削施工中には周囲観測孔水位、地中の間隙水圧、ならびに揚水量の計測を行い、慎重な施工を行った。水位計6箇所、間隙水圧計9箇所、揚水量計を設置し自動計測により、揚水量の増減、地下水の挙動について監視した。

図-10に施工中における揚水量と地下水位の関係も

プロットしている。1～2次掘削までは揚水試験で得られた予測ライン上にあった。しかし、2次掘削時において地下水位をTP-8mまで下げたとき、揚水量が増加傾向を示し、予測ラインから外れた。長時間の揚水によって一部水みちが形成されたことによるものと考えられる。

その後は揚水量が増える勾配となったが、揚水量と地下水位は直線関係で推移した。床付け掘削において最終的には揚水量が4.5～5m³/minにまでに達したが、揚水ポンプ4台（6インチ2台、4インチ2台）および補助的な簡易ポンプの稼働で何とか対応できた。

SMW壁外周の地下水位は1m程度の低下傾向を示したが、床付け掘削以降は比較的安定して推移し、周辺地下水への影響は小さかった。

§ 7. おわりに

工事計画時において地下水処理対策検討のために詳細な地盤調査、試験を実施し、地盤の透水係数および地質構造の正確な評価を行った。調査結果から洪積砂礫層の透水係数はかなり高いことが判明し、またGL-48m付近で連続した粘性土層の存在を判定し、遮水壁延長による地下水対策工を採用した。さらに掘削時には地下水、揚水量の挙動の計測管理を行い慎重な施工を行った結果、トラブルなく無事に床付け掘削、躯体構築ができた。このように施工事前において地盤評価の問題点を十分に再検討することにより、適切な対策を施すことができたと考える。

地盤の透水性および地質構造の評価は、遮水対策工の選定や揚水計画にあたって計画・工法を左右させることになるため非常に重要であり、計画時点において地域特性等を考慮した慎重な検討が必要である。

最後に、本工事の施工にあたり多大なご指導・ご支援戴きました本社一般土木委員会、土木設計部、四国支店をはじめ関係各位の方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査法，pp.288-293,平成7年.
- 2) 高田・佐藤・平岡・明石・原田・松野：現場透水試験における観測地下水位の潮位補正,土木学会第54回年次大会講演集,Ⅲ部門,pp.690-691,平成11年9月.
- 3) 鈴木音彦：地下水処理工の事例，東洋書店，1994年.