

開削トンネル工事に伴う盤ぶくれ対策工法の検討

計画部 調査課

安田 扶 律

神戸第一建設部 用地調査課

大西 和 行

要 旨

本研究では、周辺地盤の地下水頭が高く、掘削による地盤の盤ぶくれが予想される開削トンネル工事に際して、地盤の透水特性に着目した盤ぶくれ対策工法の検討を行った。すなわち、まず、現地で揚水試験を実施し、地盤の透水特性を考察するとともに揚水工法およびリチャージ工法の適用性を検討した。さらに、ボーリング調査によって不透水層を中心とした地質層序を明らかにし、止水壁工法、底盤改良工法の適用性を検討した。その結果、当該地盤では、底盤改良工法が最適であることを示すとともに、底盤改良工法について施工上の検討を行った。

キーワード：開削トンネル、盤膨れ、揚水試験、底盤改良

1. はじめに

本検討で対象とした開削トンネル工事は、伏見丘陵東側に存在する段丘堆積層を地表から最大20.5 mの深さまで掘削し、コンクリートボックスを構築する工事である。地盤は被圧滞水層の存在する砂質土と粘性土の互層からなる傾斜地盤を形成しており、周辺には民家が多い上に京都という地域性から地下水利用も多いため、周辺の地下水

位並びに地盤沈下に注意を払いつつ、掘削地盤の安定を検討する必要がある。

一方、事前検討では滞水層の被圧水頭が高いため、掘削時に盤ぶくれの発生が懸念された。このため、図-1のフローに従い周辺地盤への影響に特に着目して対策工法の検討を行った。

以下に、これらの検討により明らかとなった対象地盤の透水性、盤ぶくれ対策各工法の適用性について述べる。

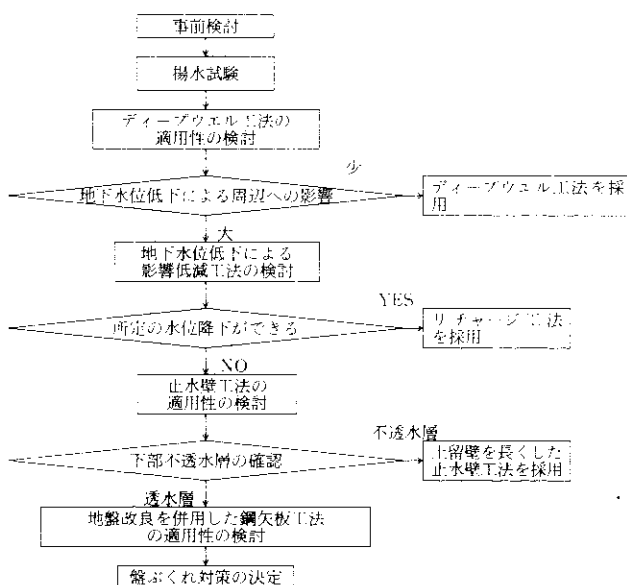


図-1 検討フロー

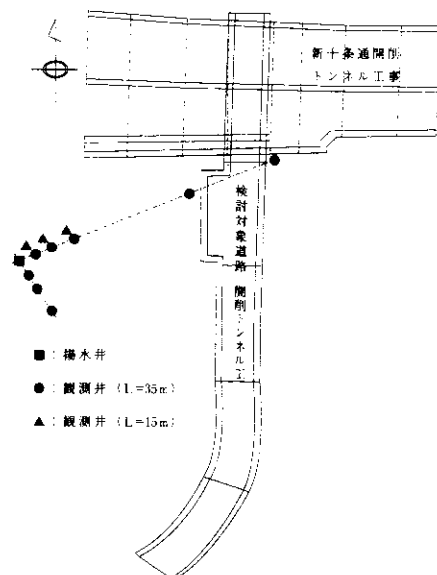


図-2 平面図

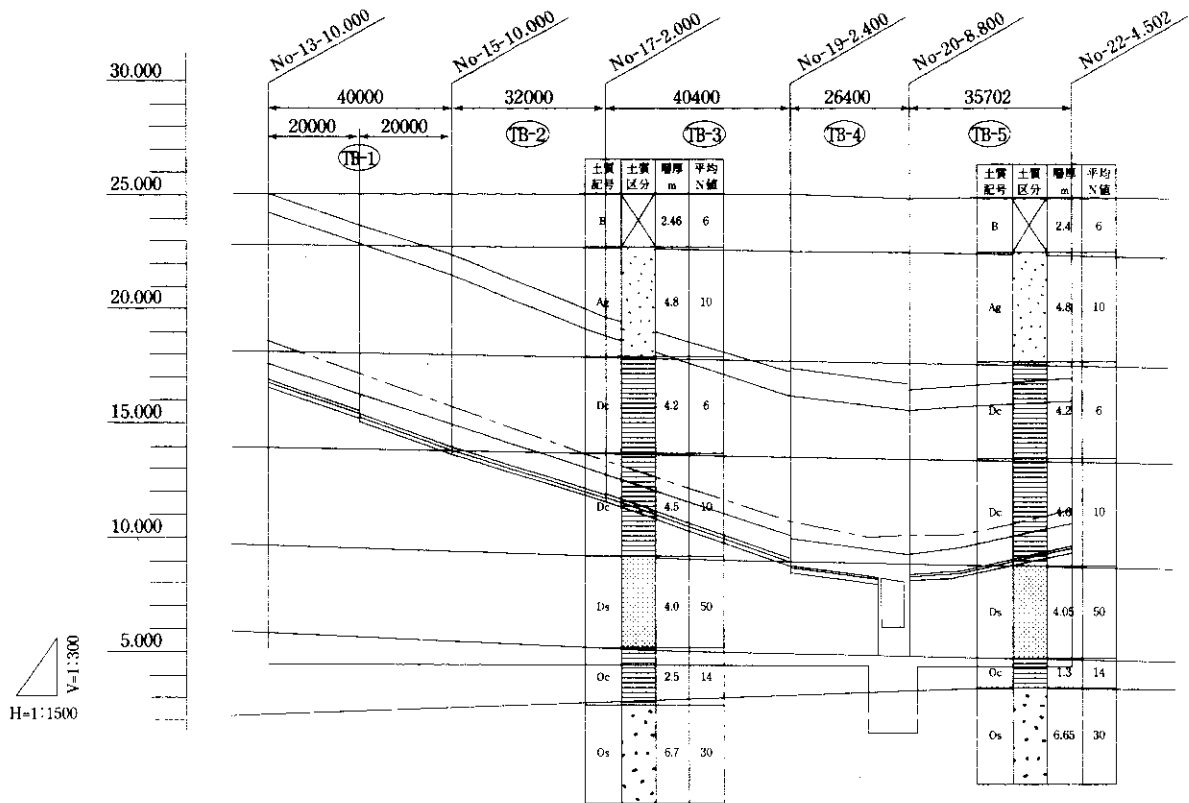


図-3 検討対象道路の土質縦断面図

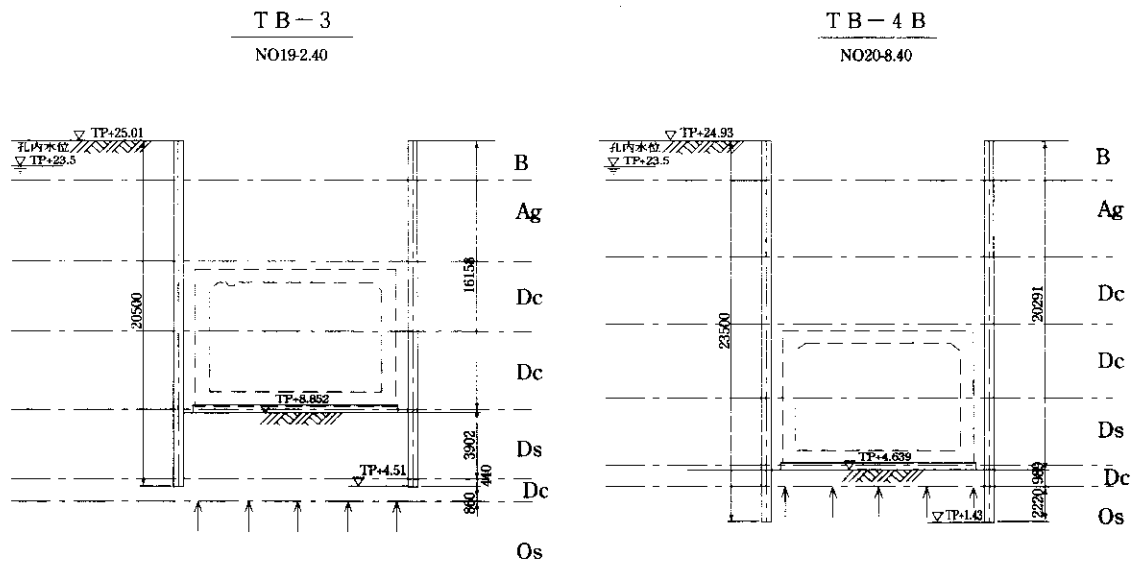


図-4 断面図

2. 揚水試験に基づく地盤の透水特性の考察

2-1 揚水試験の概要

盤ぶくれ対策工法としてディープウェル工法、リチャージ工法等の地下水位低下工法を検討する上で必要な透水係数などを把握するために揚水試験を実施した。

観測井は、計画敷地内の1地点において揚水井(深度 L=35 m)と既往の地盤調査で報告されている地下水流向(NS→SW)の上流側に5箇所(深度 L=35 m)、90度方向(SE)に3箇所(深度 L=35 m)、さらに、調査対象土層(Os層)上方地盤の透水特性(被圧特性)を確認するため、NE方向上層地盤に3箇所(深度 L=15 m)の計11箇所に設置した(図-2参照)。

SE方向の観測井は、揚水井から5 m(No. 1), 10 m(No. 2), 20 m(No. 3)離れた各地点に設置した。NE方向の観測井は、揚水井から5 m(No. 4), 10 m(No. 5), 20 m(No. 6), 60 m(No. 7), 90 m(No. 8)離れた各地点に設置した。NE方向の観測井は、揚水井から5 m(No. 9), 10 m(No.10), 20 m(No.11)離れた各地点に設置した。

本揚水試験は、段階揚水試験により限界揚水量を把握し、その限界揚水量の約80%を揚水量として、継続揚水試験を実施し、揚水量、地下水位低下量、水理定数を把握した。

2-2 試験対象の地盤

試験対象地区周辺の地盤構成は、大阪層群(Oc層, Os層, Og層)基盤層の上部に位置し、その上に低位段丘堆積層(Ds層, Dc層, Dsg層, Dsgc層)が分布する。対象道路周辺では沖積層(Ac層, Ag層)が発達し、地表部は盛土層(Bk層)が見られる。大阪層群、低位段丘堆積層とともに砂質土層、粘性土層が互層構造となっており、沖積層が見られる箇所と見られない箇所があるなど複雑な地盤構成を呈している。

本試験揚水試験の対象とする滞水層はOs層であり、揚水試験地点では層厚が10 m程度となっているが、東方向に徐々に層厚が薄く標高が高くなっている。

2-3 地盤の透水特性

段階揚水試験では、図-5に示すように限界揚水量は0.9 m³/min程度と推定できる。これをもとに継続揚水試験では、適正揚水量を限界揚水量の約80%にあたる0.75 m³/minに設定した。

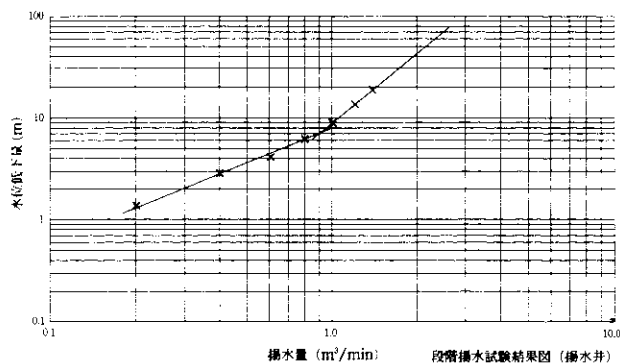


図-5 段階揚水試験結果図

継続揚水試験結果より、揚水時の測定結果を用いて平衡式による方法(Jacobの方法)、回復時の測定結果を用いて非平衡式による方法により水理学的定数を求めた。また、揚水井中心からの距離と地下水低下量を用いて影響半径を求めた。

本試験では、開削トンネル工事における施工基盤下層の滞水層(Os層)を対象とした揚水試験を行っており、この滞水層を対象とした揚水井とNo. 1~No. 8観測井における水位低下量は、揚水井から遠いほど水位の変動は小さくなる傾向を示している。一方、地表面付近における不圧滞水層に設置した観測井(No. 9~No.11)の測定結果はごく微小な変動となっている。この結果から、Os層はほぼ被圧滞水層と判断できる。よって、後述する解析においては被圧滞水層として検討を行うことが妥当と判断できる。

経時変化図をみると各観測井とも揚水停止時点においても若干の水位低下はあるものの、ほぼ定常に至っていると判断することができる。

(1) 影響半径

揚水停止後の安定した水位低下量を用い、揚水井と各観測井のそれぞれの水位低下量と揚水井から観測井までの距離関係を図-6に示す。これらの図より水位低下量が0となる影響半径はNE方向で2,700m、SE方向で4,800mと考えられる。

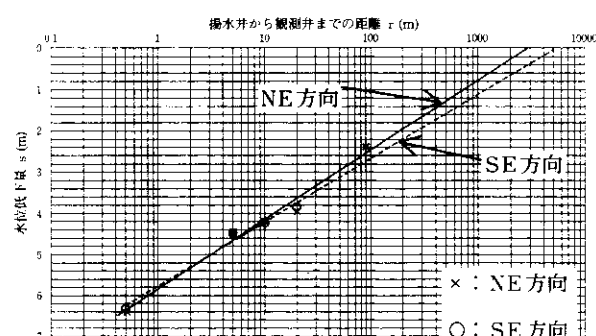


図-6 継続揚水試験による影響半径

表-1 Jacobの方法による試験結果

地点名	Δs cm	T cm ² /s	D m	k cm/s	S
NE	106.5	24.48	11.19	1.92×10^{-2}	9.60×10^{-6}
SE	174.7	13.11	9.96	1.32×10^{-2}	8.26×10^{-6}

(2) 透水係数, 貯留係数

継続揚水試験における水位低下過程での揚水量, 滞水層厚 D , 水位低下量 Δs , 継続時間を用いて Jacob の方法により透水係数 K , 貯留係数 S を求めた。

継続揚水試験での Jacob の方法による解析結果を表-1, 図-7, 図-8 に示す。

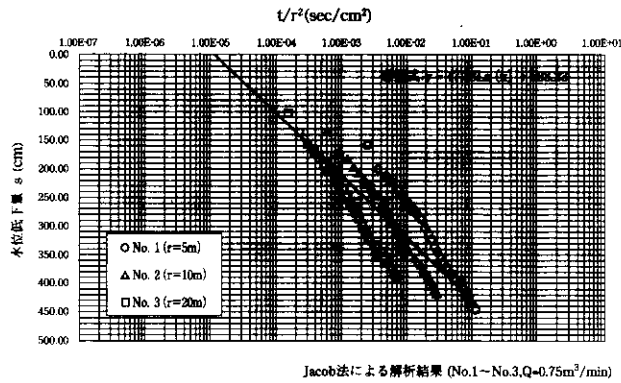


図-7 Jacob による解析結果 (1)

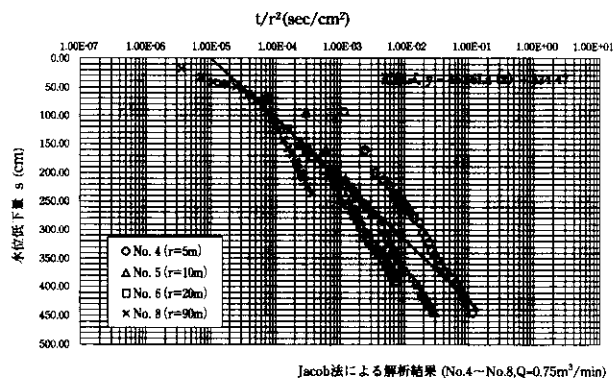


図-8 Jacob による解析結果 (2)

3. 揚水工法の適用性検討

3-1 検討概要

周辺地盤における地下水低下工法による地下水流動を把握する目的から, 周辺地盤, 地下水位低下工法に用いるディープウェルをモデル化し, 有限要素法により地下水流況をシミュレートすることにより解析的に検討を行った。当該地点における既往の検討報告書では, 自然地盤における当該地区の地下水流向は東から西と報告されている。対象道路はこの地下水流向に対しほぼ直角 (N.→S) に計画され延長は 170 m 程度となっている。そこで, 本来地下水の流れは 3 次元的な挙動と考え

られるが, これらの当該箇所状況を考慮し, 対象道路横断方向方向を鉛直 2 次元断面にモデル化した。

検討対象モデルの設定にあたり, 端部境界は, 掘削中心から 415 m とした。施工断面は, 地下水低下工法を対象とし, 施工区間のうち矢板長の最も深い TB-4A をモデル化した。

解析における地下水の初期状態の設定は, 上流側をボーリング孔内水位を参考に GL-1.0 m, 下流端を道路の直近を流れる鴨川における平水位程度の T.P.+19.5 m とした, 自然地盤(構造物無)における定常解析結果の地下水流況(圧力水頭分布)を用いる。各検討ケースでは, この定常解析結果を初期値とし, 揚水量, 止水矢板などの条件を考慮し非定常解析を行い, 地下水挙動の経時変化を解析した。

3-2 ディープウェル工法による周辺地盤への影響検討

ディープウェル工法(以下 DW 工法という)による地下水流況の把握を目的として行った解析結果を図-9, 10, 11 に示す。

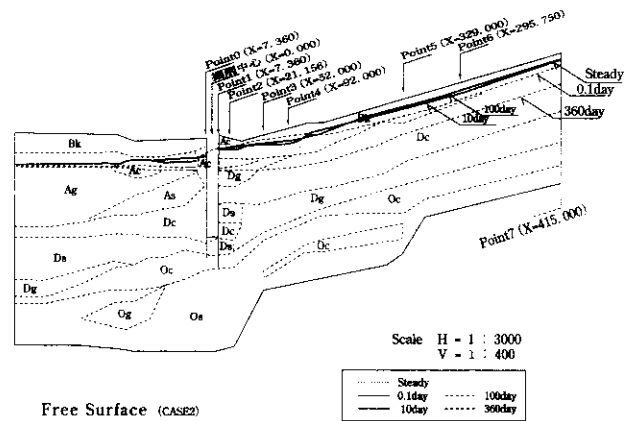


図-9 解析結果 (CASE 2)

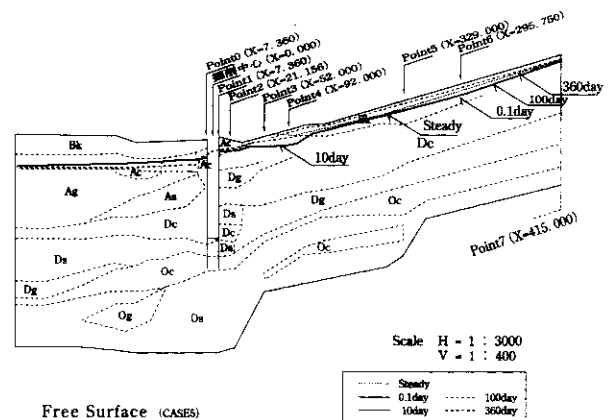


図-10 解析結果 (CASE 5)

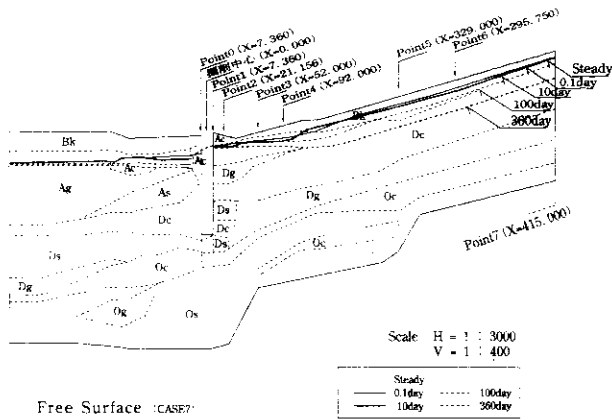


図-11 解析結果 (CASE 7)

- ・Os層の水頭低下に着目すると、宅地境界付近となる POINT 2 では開削部端部とほぼ同じ 5.2 m の水頭低下が生じ、京阪鉄道付近となる POINT 4 においても、4.7 m の水頭低下となる。この結果から、揚水試験から得られた影響半径よりもさらに広い範囲に揚水による地下水低下が及ぶと考えられ、この層を対象とした井戸に何らかの影響があると考えられる。また、この Os 層の水頭低下により上下粘性土層の圧密沈下も懸念される。
- ・自由水面に着目すると、Os 層がほぼ定常となる揚水開始後 10 日までは、ほぼ初期状態に近くなっているが、その後、水位低下は顕著に現れ、2、3 m の水位低下となる。これは、Os 層上方の水頭低下量からもわかるように、不透水層と考えられる粘性土層 (Oc 層) の層厚が局所的に薄くなっていることによるものと考えられる。この自由水面の低下が顕著になると浅層部に位置する生活井戸の枯渇が問題となる。

3-3 リチャージ工法の適用性検討

DW 工法により周辺地盤に水頭低下が及ぶことから、周辺地盤への水頭低下対策としてリチャージ工法の適用性を把握する目的から検討を行った。検討にあたっては、揚水対象となる Os 層にリチャージするケース (CASE 5) とこの Os 層上方の Dg 層にリチャージするケース (CASE 7) を行い以下の結果を得た。

- ・CASE 5 の結果に着目すると、掘削底面の盤ぶくれ対策のために必要となる水頭低下とならな

い。これは、Os 層の透水特性が大きいことから、揚水、注水の影響はほぼ即時に広範囲にわたるためと思われる。

- ・CASE 7 の結果に着目すると、リチャージを施す Dg 層周辺の水頭低下は抑制されるが、掘削底面においては、所要の水頭低下量とはならない。また、Os 層においても水頭低下は若干抑制されるものの宅地境界、京阪鉄道付近における水頭低下量は 4 m 程度と大きいことから、粘性土の圧密沈下が生じることが懸念される。

3-4 検討結果

①ディープウェル工法を併用した鋼矢板土留

解析結果より Os 層では広範囲に及ぶ地下水位低下により上下粘性土層の圧密沈下が懸念される。さらに自由水層でも水位低下が予想され、影響半径 (WE 方向 2,700 m) 内には約 55,000 軒の家屋が存在する。この影響範囲には多数の井戸が存在しており、揚水に伴い枯渇等の影響を及ぼすと思われる。

②地下水水位低下による影響低減工法 (リチャージ工法) の検討

解析結果より Os 層では即時広範囲に地下水が循環するため、リチャージを行っても盤ぶくれ対策に必要な水頭低下ができない。また、Dg 層では地下水等の低下が大きく、粘土層の圧密沈下を引き起こすことも考えられる。

4. 土留め壁延伸による盤ぶくれ対策工法の検討

4-1 地盤概要

土留め壁を延伸して地下水を遮断するには、深部における詳細な地質分布を知ることが重要となる。既存の上質調査結果では、①間隙水圧の観測結果から大阪層群の滞水層は連続性が良く砂質土が優勢で、しかもこの粘性土層上下の被圧滞水層の水頭差が小さいことから、上下の滞水層が連続している可能性が高いこと、②地下水の流向・流速測定結果から滞水層の起伏が激しいことがうかがえ、旧河道や窪みが局部的に存在することが判明していた。従って、止水壁に囲まれた不透水層

が欠損していることも予想され、層厚および連続性を判定するには不十分であったため、揚水試験観測井等を利用して追加ボーリングを行った。

その結果、図-12 ような土質分布が想定され、下記の知見を得ることができた。

- ・シルト層 a は No. 1 TP-11 m 付近では層厚 1.45 m で、No. 3 付近では層厚が 1.35 m と薄く、層厚から見て止水層としては不適當である。
- ・粘土層 b は No. 1 TP-18 m 付近では層厚が 1.25 m で No. 2 では 1.0 m しかない、No. 3 では TP-21 m 付近では層厚 1.4 m となっており、層厚からみて止水層としては不適當である。

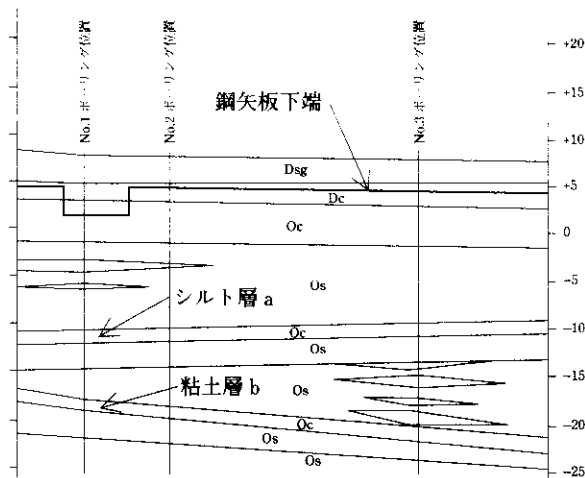


図-12 地層推定断面図

4-2 止水工法の適用性

本工法を採用するためには土留壁先端の地層が不透水層として利用できるかどうかを検討しなければならない。不透水層としての要件は、一般には難透水層として透水係数が 10^{-5}cm/s 以下、層厚は一般に止水壁の施工性を考えて 2.0 m 程度が必要である（薬液注入工法などによる止水層の目安は 2 m ~ 3 m 程度とされている）。また層順の連続性や傾斜方向が確認されている必要がある。

当工区の地盤は、地質調査から明らかなように間隙水圧の観測結果から大阪層群の滞水層は連続性が良く砂質土が優勢で、しかも、この粘性土層上下の被圧滞水層の水頭差が小さいことから、上下の滞水層が連続している可能性が高い。これに

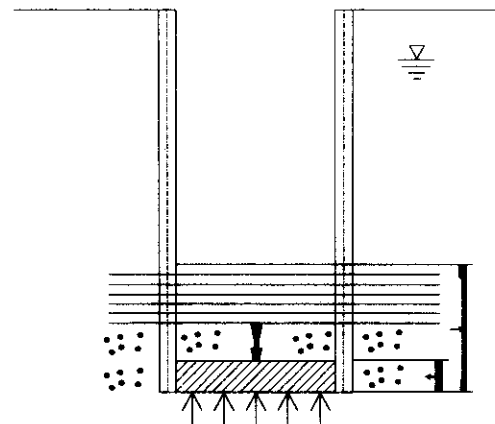
対し、根入れ部の粘土層は 1.5 m 未満と薄く、不透水層とするには信頼性が低い。このため、施工途中において深部から掘削面へ浸透流が発生して掘削底盤が崩壊した場合には、その後何らかの対策工を実施しても周辺への影響は免れない。

5. 地盤改良を併用した工法の検討

5-1 底盤改良工法の検討

(1) 薬液注入工法

薬液注入工法では、改良体の強度、均一性の面で高圧噴射工法に比べて劣るため、一般に盤ぶくれの安定計算は土留壁内の重量バランスによる方法で行い、改良範囲を決定する。（図-13）



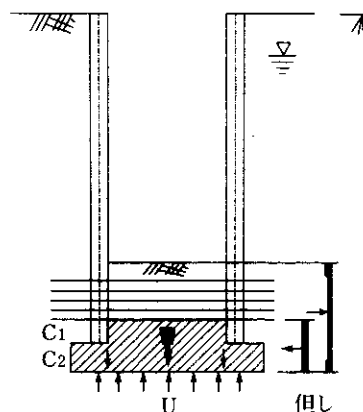
$$U \leq W/F1$$

但し U：被圧水

W：土塊重量

F1：安全率

図-13 薬液注入の改良範囲



$$U \leq \frac{W}{F1} + \frac{C1}{F2} + \frac{C2}{F3}$$

但し

U：被圧水頭
W：土塊重量
C1：壁面摩擦
C2：せん断力
F1-3：安全率

図-14 せん断抵抗から決まる改良厚

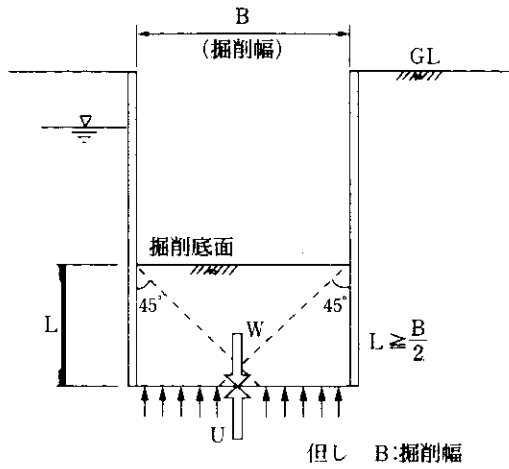


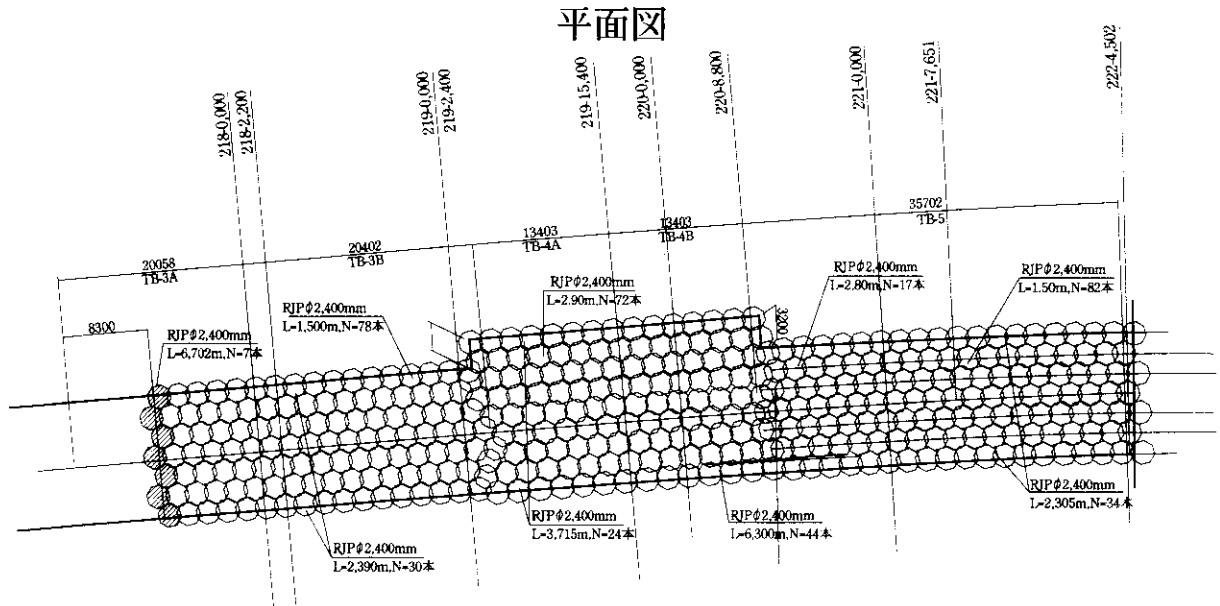
図-15 曲げから決まる改良厚

薬液注入工法を用いると不透水層厚 (2.0~3.0 m)を確保して重量バランスをとるためには、当該地盤では土留長を7.0m~13.5m長くする必要がある。したがって、土留としてはSMWを用いなければならないと経済的に合理的な工法とはいえない。

(2) 高圧噴射工法

高圧噴射工法による改良厚さを決定するには①土塊重量、壁面摩擦およびせん断抵抗から決まる厚さ(図-14)、②曲げから決まる厚さ(図-15)、③施工性から決まる最小改良厚さの内、最も大きい厚さを選定しなければならない。

①では、高圧噴射工法による盤ぶくれ対策の検



断面図

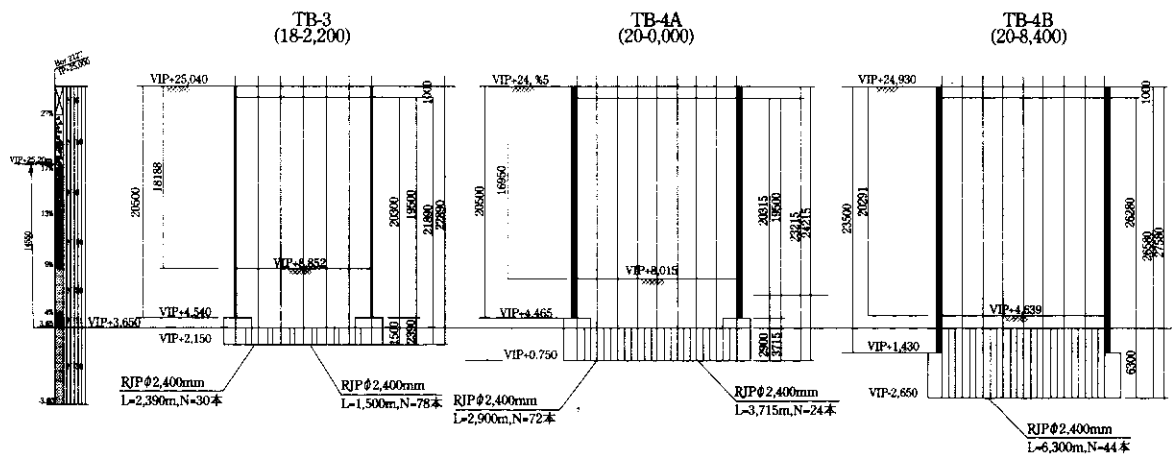


図-16 高圧噴射工法改良計画

討は鋼矢板根入れ以深の砂質土に改良範囲を設定し、揚圧力に対抗するため、土塊重量・壁面摩擦抵抗・せん断力を考慮する。②では改良体の強度や付着力に均質性が無く、曲げ引張り強度も小さいため、ディープピームとみなせるように、掘削底面から地盤改良下端までの厚さLを土留内空幅Bの1/2以上となるようにした。③では改良特性（固結体の改良強度、改良効果）と施工実績から最小改良厚を1.5mとした。

以上の考えに基づき必要改良厚を決めた場合、高圧噴射工法は薬液注入工法と比較して地盤改良単価では高圧噴射工法の方がコスト高であるが、土留め壁の延伸を必要とせず、トータルでは経済的な設計となる。

5-2 施工面からみた安全性の検討

実際の工事では高圧噴射工法として、N値50程度の砂質土においても大口径の改良体を築造できるRJP工法を選択した。同工法は、改良深度まで三重管ロッドを貫入後、水と硬化材スラリーを含む超高压噴流体により地盤内の土粒子と硬化材を混合攪拌し大口径（2,400～3,200mm）の改良体を築造する工法である。

施工に当たっては、ロッド引き上げ速度および地盤性状から杭径を $\phi 2,400$ mmとし、地盤強化に加えて止水性が要求されることから完全ラップとなる配置とした。（図-16）

掘削に先立ち改良効果を確認するため、コアボーリングにより6ヶ所で改良体からコアを採取し、改良パターンのコアの出来形を観察すると共に一軸圧縮試験を行って改良効果の確認を行った。その結果、改良体は設定値 3.0 N/mm^2 （砂質土）を全て満足しており、安全性に問題のないことを確認できた。

6. まとめ

開削トンネル工事における土留工の掘削地盤の安定に関して詳細検討を行った結果をまとめると①～⑤のようになる。

①掘削地盤以下の洪積層や大阪層群中では地下水

を多量に含む砂質土の連続性はよいが、粘性土層は薄く連続性に乏しい。

②揚水試験より被圧水層と判断されるOs層は、透水係数が大きく、揚水に伴う影響も広範囲に及ぶ。

③DW工法を併用した鋼矢板工法については、リチャージ工法を併用しても、周辺への影響と掘削地盤安定の両方を満足できないことから、今回工事の工法としては採用できないと判断した。

④土留壁を大阪層群下部粘性土層まで長くする工法は、下部粘性土層が止水層として信頼できないために、今回工事の工法としては採用できないと判断した。

⑤土留壁に鋼矢板を採用した地盤改良工法として薬液注入工法、高圧噴射工法のいずれも盤ぶくれに対する安全性が望めると判断できた。しかし、これらを比較すると高圧噴射工法の方が経済性で有利であり、高圧噴射工法を対策工法として採用した。

実際の施工において、掘削中に搬出される土砂を観察すると地盤が砂質土から粘性土へと頻繁に変化し、当該地盤の複雑さがよく分かった。また、最深部掘削時には底盤から若干の湧水がみられたが、期待したとおりの止水性は得られ、盤ぶくれに対する安全性を検証できた。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：開削トンネル設計指針（案）、平成9年10月
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、平成8年7月
- 3) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー／建設工事と地下水 P72～73
- 4) 土質工学会：土質・基礎工学のための地質学入門 P102～105
- 5) 日本ジェットグラウト工法・技術資料
- 6) RJP協会：RJP工法・技術資料
- 7) 日本薬液注入協会：薬液注入工法・設計資料