

開削工事における不連続粘性土層の調査と止水対策

Research of discontinuous clayey soil layer and groundwater control in excavation works

塚元 龍馬* 木村 秀爾**
Ryouma Tsukamoto Syuji Kimura

要 約

本工事はアンカー式土留め工法により掘削した後、地下駐車場を構築する工事である。施工はJR高松駅舎の撤去に伴い1期工事から3期工事に分割され、現在は1期工事（85³×95⁴×12⁴）の施工中である。

特徴としては、①建設地が旧河川河口部に位置した洪積層地帯であり、盤ぶくれの安全性に対し影響の大きい粘性土層が掘削平面内にて複雑な地層構成であったため、この粘性土層の存在を事前調査を行い施工したこと、②ソイルセメント残土を埋戻土として有効利用するために、ソイルセメント壁の透水係数を試験練りにより確認しながら施工したこと、③揚水試験・現場透水試験を実施し、ソイルセメントの透水係数および薬液注入による不透水層形成の確認を行い掘削を開始したことが挙げられる。

これらの検討により、1期工事においては安全に施工することができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 土質調査
- § 4. 山留め壁工による止水
- § 5. 薬液注入工法による不透水層の形成
- § 6. 揚水試験
- § 7. 建設汚泥の個別指定による再利用の実施
- § 8. おわりに

§ 1. はじめに

本工事は、宇高連絡船発着地であった高松港頭地区の再開発事業の一貫として高松駅前広場地下駐車場を構築する工事である（図-1参照）。

山留め工事は、壁長24.5mのソイルセメント柱列式連続壁による12mの掘削である。当該地は旧河川河口部に位置し複雑な土層構成を呈している。土質調査によれば床付面以深の粘性土層は不連続性が認められ掘削時には盤ぶくれの恐れがあった。

このため、二重管複相式注入工法により2.0mの不透水層を形成し、地盤の水平方向および鉛直方向の止水性を高めた。

本稿は、粘性土層の調査、不透水層形成の薬液注入工、山留め壁工およびその確認のための揚水試験について述べたものである。

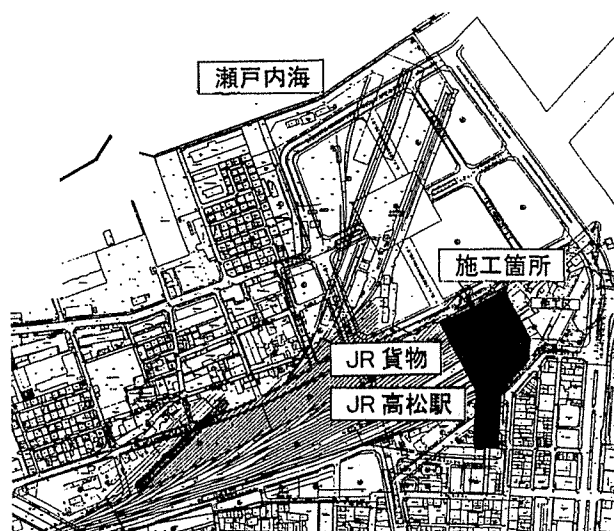


図-1 工事位置図

§ 2. 工事概要

工事件名：高松駅前広場地下駐車場（仮称）建築工事
 施工場所：高松市浜ノ町および西の丸町
 発注者：香川県
 設計監理：日本技術開発株式会社
 工 期：平成10年10月14日～平成13年3月23日

* 四国（支）営業部営業課

** 四国（支）サポート地下駐（出）

工事数量：山留め壁工（SMW工・TRD工） 9,000m²
 薬液注入工 2,100m²

§ 3. 土質調査

当該工事において、掘削底面安定のため、止水効果が期待される粘性土層（Dc2層）を把握することが必要である。

既存のボーリングデータから、各地点での粘性土層厚は把握できるが、本数が5本と少ないためDc2層の連続性は確認できなかった。

このDc2層が不連続の場合は、掘削時にDc1層下端に水圧が作用し、盤ぶくれの安全率が小さくなる。

そこで当現場では追加ボーリングを実施し、その結果を見ながら順次、ボーリングを追加していった。

調査箇所数を増やすため、ボーリングだけでなくエンパルによる補間も計画した。

以上の結果、①SMW根入部（GL-22m）付近でDc2層が連続していないこと（図-2参照）、②全体的にレンズ状に分布していること、③特に砂質土層（As層）では、油分を含んでいることが分かった。

調査位置図およびDc2層等厚線図を図-3に示す。

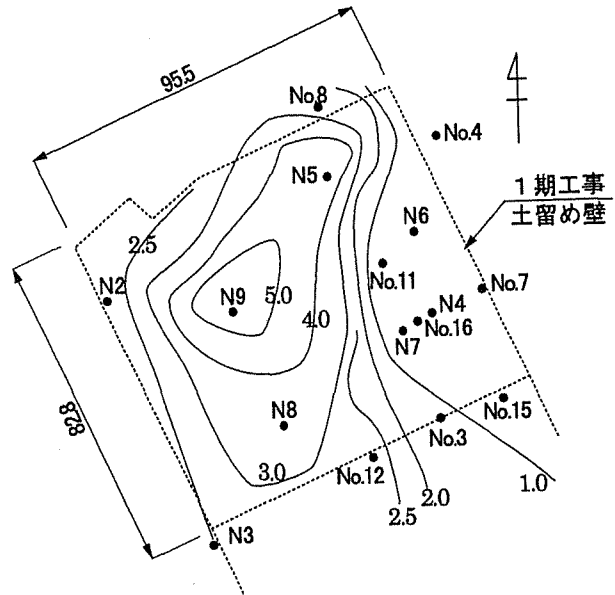


図-3 調査位置図およびDc2層等厚線図

配合は、セメント280kg、ペントナイト15kg、W/C=200%とし、増粘材は使用しなかった。

表-1に示すように油分の増加に伴い強度は低下するが、設計基準強度（500kN/m²）を確保すること、および10⁻⁶オーダーの透水係数を確保することから上記配合のとおり山留め壁を施工した。

表-1 油分の影響試験結果

土質	油含有状況	一軸圧縮強度(kN/m ²)			透水係数 (cm/sec)
		7日	14日	28日	
細砂	油分なし	360	430	1100	5.8×10 ⁻⁶
	油分少量	240	600	940	1.2×10 ⁻⁶
	油分多量	210	580	920	1.5×10 ⁻⁶

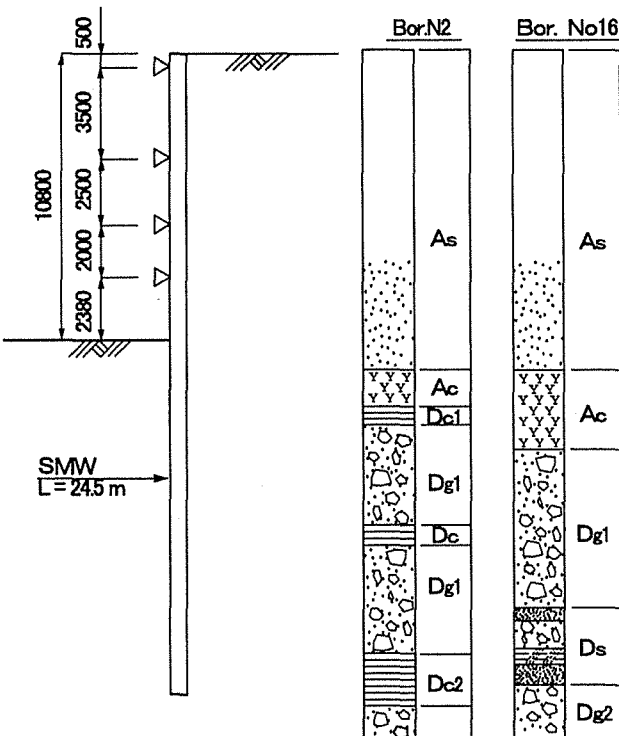


図-2 土質柱状図

§ 4. 山留め壁工による止水

4-1 油分が止水性に及ぼす影響

土質調査により、As層には油分を含んでいることが判明したため、油分による土質工学的特性について試験を実施した。

4-2 SMW工法とTRD工法の併用

当初は山留め壁としてSMW工法が計画されていたが以下の理由により止水性に優れるTRD工法を山留め壁の50%採用した。

当現場では近接するJR営業線や道路および家屋があり、冬期施工時の風等により、これらの場所に混練液が飛散し、JR利用客のほか、周辺の通行人、通行車輛等を汚す等の被害を発生させる危険性がある。

よって、これら影響を及ぼす恐れのある箇所については、掘削機械高の低い安定したTRD工法を採用し、その他の箇所についてはSMW工法を採用した。

なお、TRD工法の採用にあたっては溝壁の安定性が、1パス目の混合土の単位体積重量と当日の施工長に左右されることから、以下の検討を行った。

検討条件

- ①すべり解析方法は、三次元円筒すべり理論とする。
- ②TRD機はタイヤローラーにより転圧改良された堅固な地盤上に鉄板(t=25mm)を敷いて施工するため、TRD

機の荷重は等分布荷重とする。また、TRD機の施工中は3°以上傾斜させない。

③混合土の単位体積重量は14.5kN/m³、16.0kN/m³、17.5kN/m³とする。〔TRD機の施工実績より、最小単位体積重量は14.5kN/m³（土砂）が報告されている〕

④最小安全率はF_s=1.2とする。

検討結果

三次元円筒すべり計算結果より得られた1パス目の混合土単位体積重量と限界開放長の関係を図-4に示す。この限界開放長より1日当りの施工長を決定した。

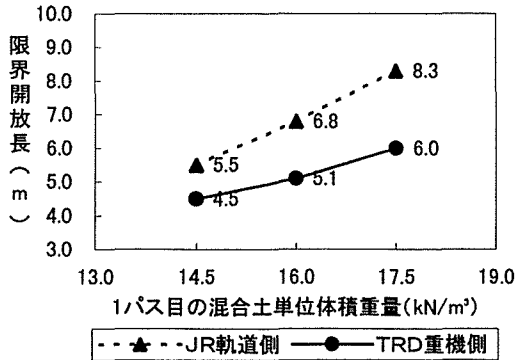


図-4 1パス目の混合土単位積重量と限界開放長

施工管理方法

この検討結果に従い基礎地盤の円弧すべりや周辺地盤の沈下防止対策として、1パス目の混合土を溝壁中より深度方向3ヶ所から採取し、平均単位体積重量を求め、限界開放長を決定した。その結果、溝壁が崩壊することはなかった。

§ 5. 薬液注入工法による不透水層の形成

5-1 薬液注入工法

Dc2層が連続している場合、山留め壁の根入れをこの層に貫入していれば、掘削中の盤ぶくれ対策は必要ない。

しかし、Dc2層の連続性が十分に確認されていない場所や、確認されても薄い場所があるため、山留め壁を所定位置まで打設したとしても底盤部からの湧水が予想される。

したがって、この範囲についての対策としては①地下水位低下工法、②薬液注入工法の2案が考えられるが、地下水位低下工法を選択した場合、

- ・水位低下に伴う周辺地盤（JR軌道）の沈下
- ・揚水量に応じた濁水処理・排水処理
- ・周辺井戸水の変動・枯渇
- ・放流先の海域の汚濁

以上の問題点があり、それぞれに対策が必要となる。これに対して薬液注入工法は地下水位低下工法に比べ上記問題がない。

よって今回の工事では、薬液注入工法により止水効果を高めることにした。

薬液注入工法として、礫質土に対し良好な効果が得られ、かつ経済性に優れている二重管複相式注入工法を採用した。

5-2 目標透水係数の設定

二重管複相式注入工法にて得られる透水係数(k)は、5×10⁻⁵~5×10⁻⁴cm/sであり、また、湧水量の算定より1×10⁻⁵cm/s以上を目標値とした。

5-3 試験施工の実施

材料、配置タイプ、注入間隔、注入率、ステップ長を決定するために、本施工に先立ち試験施工を実施した。表-2にその種類を示す。

表-2 試験項目・結果一覧表

試験	材料	配置 type	注入 間隔	注入 率	注入 step	番号	透水係数 (cm/sec)
試験 I	A	正方形	1.0m	32%	25cm	①	2.5×10 ⁻⁴
				36%	25cm	②	1.7×10 ⁻⁴
				40%	25cm	③	5.3×10 ⁻⁵
		正三角形	1.2m	36%	25cm	④	3.0×10 ⁻⁴
				40%	25cm	⑤	4.3×10 ⁻⁴
試験 II	B	正方形	1.0m	36%	50cm	⑥	3.4×10 ⁻⁵
				40%	50cm	⑦	2.4×10 ⁻⁴
		正三角形	1.2m	32%	50cm	⑧	1.7×10 ⁻⁴
				36%	50cm	⑨	2.6×10 ⁻⁵
				40%	50cm	⑩	6.5×10 ⁻⁵
		正三角形	1.2m	36%	25cm	⑪	3.5×10 ⁻⁴
				40%	25cm	⑫	5.7×10 ⁻⁵

(1)材料

本工事においては、砂層と砂礫層に対する浸透注入による改良を目的とすることから、浸透性の良い水ガラス系反応剤であるA剤、B剤2種類の注入剤について試験した。両者の違いはゲルタイムにある（表-3参照）。

表-3 材料別ゲルタイム

	瞬結剤が 秒	緩結剤が 分
A剤	5sec~10sec	2min~4min
B剤	5sec~7sec	10min~20min

(2)配置タイプおよび注入間隔

1.0m正方形配置、1.2m正三角形配置の2種類とした。

(3)注入率

注入率については、32%、36%、40%の3種類とした。

(4)注入ステップ

注入ステップは、25cmと50cmの2種類とした。

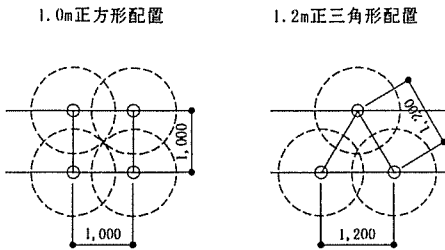


図-5 配置タイプおよび注入間隔図

5-4 試験施工結果および薬液注入工法の仕様決定

フェノール反応および現場透水試験の結果から正三角形配置、注入率40%、注入step25cmを採用した(表-2 試験項目・結果一覧表⑩)。

(1)注入状態の目視(フェノール反応)による観察

- ・ A剤は脈状注入であるのに対し、B剤は浸透注入の形態であった。特にB剤の試験のうち細粒分が多い箇所では1ステップによる浸透範囲が25cmであり、瞬結剤が割裂により広がり、その後、緩結剤が割裂部から周囲に浸透する割裂注入の形態を示した。
- ・ 注入ステップは、25cmとした方が50cmよりも均質な浸透注入となった
- ・ 細粒分が多い箇所では脈状注入となりやすく、また上層砂礫層への逸走があった。

(2)現場透水試験結果

- ・ 注入率の効果については、注入率に応じて改良効果が高まっていることが改めて確認できた。
- ・ 正三角形配置の方が正方形配置より改良効果が確認できた。

(3)改良厚さおよび範囲

当現場の改良厚さの設定においては不透水粘性土層厚を1.0mとし、Dc2層が1.0m未満の箇所では $t=2.0m$ の薬液注入を行った。

これに基づき設定された改良平面範囲を図-6に示す。

細粒分が多い箇所では脈状注入となりやすく、上層砂礫層への逸走があるという結果から注入対象地盤はDg1層とし、Dc2層がある場合はその上方に注入する階段施工とした。この時のラップ長は最低2.0mとした。

改良断面を図-7に示す。

§ 6. 揚水試験

薬液注入部の遮水性確認、山留め壁の止水性確認、Dg1層における地下水揚水量と水位低下量の関係把握、ディープウェル必要本数の検討を目的として揚水試験を実施した。図-8にディープウェル配置図を示す。

6-1 段階揚水試験

段階揚水試験は2本のディープウェルを用いて揚水量3段階(0.11~0.5m³/min)で実施し、揚水量と水位低下量の関係の把握を試みた(表-4参照)。

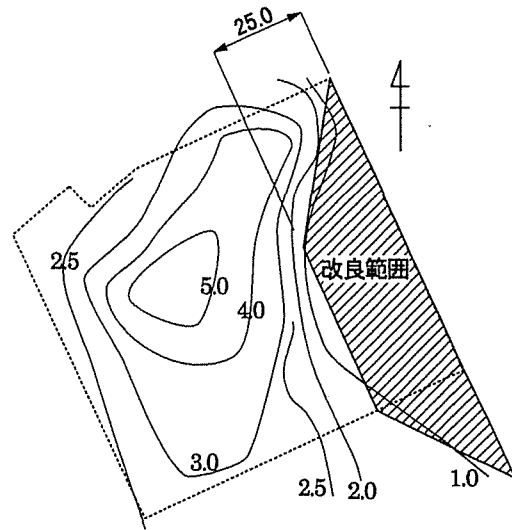


図-6 改良範囲平面図

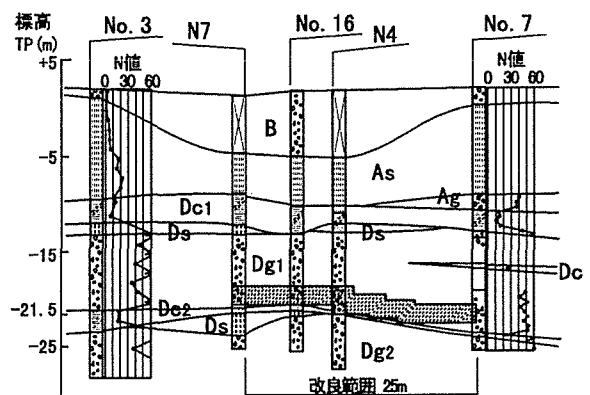


図-7 改良断面図

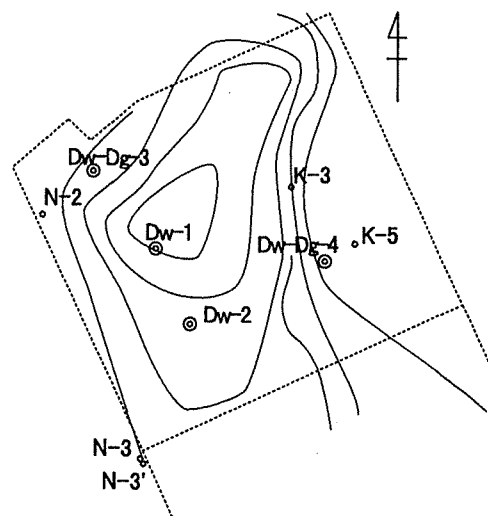


図-8 ディープウェルおよび観測井配置図

- ・ ディープウェル2本のバルブを全開としても揚水量は0.3m³/min程度に落ち着いた。
- ・ 各揚水段階2時間の揚水では水位低下が継続する傾向を示し、平衡状態には至らなかった。
- ・ 比較的少ない揚水量で、ある程度水位は下がる傾向にあるが水位低下にはかなりの時間を要することが予想

され、定量揚水試験により長期の水位低下傾向を把握することにした。

表一 4 段階揚水試験の内容

段階	揚水量	揚水井 ²⁾	揚水時間	備考
第1段階	0.25 →0.11 (m ³ /min)	DW-Dg4 (全開)	2時間	揚水開始時には揚水量0.25 m ³ /minで揚げたが、水量が徐々に減少して0.11m ³ /minになった。
第2段階	0.25 (m ³ /min)	DW-Dg4 (全開) + DW-Dg3 (半開)	2時間	DW-Dg3も稼働させ、揚水量0.25m ³ /minにした。
第3段階	0.50 →0.27 (m ³ /min)	DW-Dg4 (全開) + DW-Dg3 (全開)	5時間	DW-Dg3を全開にし、0.50 m ³ /minの揚水量で揚げたが、水量が徐々に減少して0.27 m ³ /minになり、そのまま揚水を続けた。
回復時		両ポンプ 停止		ポンプ停止後の水位回復を計測した。

²⁾ DW-Dg3,4ともDg1層からの揚水を行うためGL-14~19m間スクリーンを設置

6-2 定量揚水試験

定量揚水試験の前半ではディープウェル2本のポンプバルブを全開にして0.3m³/min程度の揚水を5日間継続した。なおAs層からDg1層への漏水の影響を除くためAs層の貯留水も併せて汲み上げた。後半ではディープウェル3~4本からの揚水を行い、目標の水位低下(T.P.-10m)を確認した。定量揚水試験における各観測孔の地下水頭の経時変化を図-9に示す。また、各揚水段階での地下水頭の分布断面図を図-10に示す。

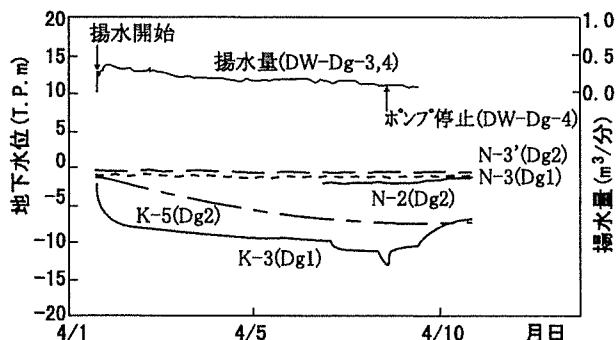


図-9 地下水位と揚水量の経時変化 (定量揚水試験)

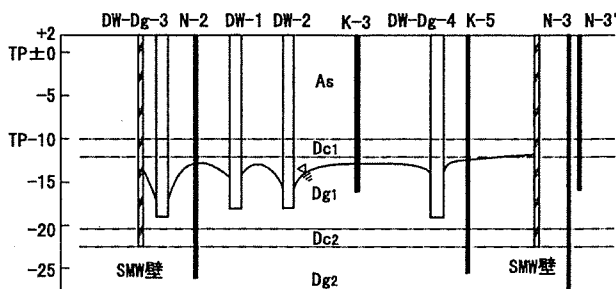


図-10 定量揚水試験地下水頭分布図

6-3 結果の評価

(1) 山留め壁の遮水性の確認

揚水に伴い山留め壁内部におけるDg1層の地下水頭は9mの低下に対し、山留め壁外部におけるDg1層の地下水頭の変動は10~30cm程度とかなり小さいものであった。

また、揚水量も0.3m³/min程度と少ない。これらのことから山留め壁は十分な遮水性を有していると考えられる。

(2) 薬液注入部(Dc2層含む)の遮水性について

揚水量は0.3m³/min程度でありその量は少ない。また、揚水によって、山留め壁内部におけるDg1層の地下水頭は大きく低下するが、薬液注入部の下方にあるDg2層の地下水頭の低下は小さいことが確認された。これは、薬液注入の遮水効果によるものであり、その効果が確認された。

(3) 粘土層(Dc2層)の確認と評価

Dc2層の下方に設置された観測孔N-2の地下水頭は、Dg1層内の揚水による影響が比較的小さいことから、Dc2層が底盤としての遮水性を有することが分かった。

なお、山留め壁、薬液注入部および粘性土層(Dc2層)の各箇所からの推定浸透量と透水係数について揚水量、山留め壁内外の水頭差、およびDg1層とDg2層の水頭差の測定値を用いて推定した結果を表-5に示す。

表-5 各部位における浸透量と透水係数の推定

	断面積A (m ²)	厚さL (m)	推定浸透量Q (m ³ /min)	透水係数k (cm/sec)
山留め壁	2,750	0.5	0.21	5.8×10 ⁻⁶ 1)
薬液注入改良部	1,650	2.0	0.04	1×10 ⁻⁵ 2)
Dc2層	6,500	2.0	0.02	1×10 ⁻⁶ 2)
			計0.27	

1)室内透水試験結果 2)仮定 3)現場透水試験結果

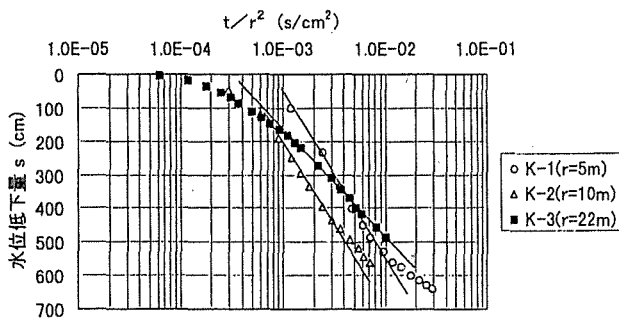
この時 $Q = k \cdot A \cdot \Delta H / L$ 、揚水6日後の揚水量 = 0.27m³/min、山留め壁内外水頭差 = 10.9m、Dg1層とDg2層の水頭差 = 9.0mであった。また上表に示すとおり、山留め壁の透水係数は10⁻⁶オーダー、薬液注入部では10⁻⁵オーダー、Dc2層は10⁻⁶オーダーであることが分かった。

(4) Dg1層およびDg2層の評価

揚水初期には揚水井周囲の貯留水が汲み上げられるため山留め壁等の影響は未だ少なく、Dg1層の透水性が卓越することから、Dg1層内に設置した観測孔K-1、K-2、K-3の水頭について、初期データを非定常解析のJacobの方法で図-11に示すように整理した。

同図よりDg1層の透水係数を算出すると $k = 3 \times 10^{-3}$ cm/sとなった。山留め壁の影響を考慮するとDg1層の透水係数は 1×10^{-2} cm/sに近い値であることが推測される。

ボーリング調査記録によればDg2層もDg1層と同程度の透水性を示すものと考えられる。



k-3の場合 1サイクル水位低下量 S=320cm
 Dg1層厚 D=850cm
 揚水量 Qp=0.3m³/min

$$k = \frac{2.3Qp}{4\pi\Delta SD} = \frac{2.3 \times 0.3 \times 10^6 / 60}{4 \times \pi \times 320 \times 850} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

図-11 Jacob法による整理

6-4 現場での対応

掘削域内でディープウェルからの換算距離と地下水頭低下量とについて、揚水試験結果を基に検討した結果を図-12に示す。

ディープウェルを4本とすれば69.5m地点（山留め壁内でディープウェルから最も離れた地点）において目標地下水頭T.P.-10mまで低下することが可能であることが揚水試験によって確認できた。また、薬液注入部の遮水機能を長期に渡って維持させるためには、Dg1層での局所的に大きな水位降下をさせるよりもなるべく均等な水圧分布となるような揚水方法をとるべきである事が分った。これに従い本数を2本から4本へ設計変更した。

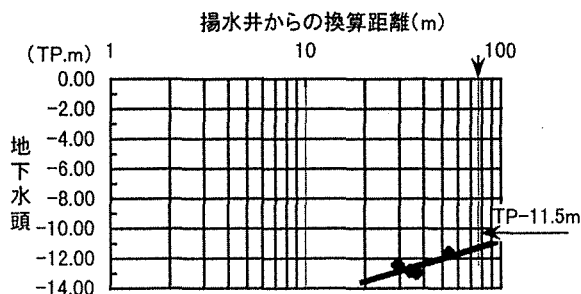


図-12 水平距離と水頭低下量の関係

§ 7. 建設汚泥の個別指定による再利用の実施

通常、SMW工法等で発生するソイルセメント残土は自硬性により固化すれば十分利用できる材料であるが、廃棄物処理上の建設汚泥として処分される。

当現場では、①側面を透水係数k=10⁻⁶cm/sの山留め壁を施工すること、底盤部を薬液注入にてk=10⁻⁶cm/sに改良することにより周辺と遮水されたこと、②ソイルセメント残土が自硬性により埋戻し土として使用できるまでのストックヤード仮置する場所が確保できたこと、③ソイルセメント残土をSMW壁内にて埋戻す場所に恵

まれたことから香川県より再生利用業の個別指定をうけ現場内においてソイルセメント残土を有効利用することができた。

この個別指定は、四国では初めての試みであり、現在四国地方建設局、日本道路公団、愛媛県、高知県等から問い合わせがあり、展開をみせている。

§ 8. おわりに

現在、当現場が順調に躯体工事が進捗している要因として、土留め壁内の不連続粘性土層把握のための徹底的な土質調査と計測施工による安定性の把握と予防処置対策によるところが大きい。これら一期工事の施工実績をもとに、二期工事も成功させる所存である。また、同工種現場へ積極的に情報を提供し、共有し、利益の追求を図りたいと考える。

最後に、今回の施工に当たって様々な面で協力頂いた本社土木部、土木設計部、技術研究所の方々のご協力に対し深謝致します。