

Table 1 土丹層の基本物性
Basic Properties of Mud Stone

	調査地点A	調査地点B	調査地点C
土丹層深度	約GL-20m以下	約GL-18.5m以下	約GL-33m以下
粒度組成	礫分 0.0%	礫分 0.1%	礫分 0.0%
	砂分 19.2%	砂分 18.0%	砂分 19.2%
	シルト分 53.4%	シルト分 60.4%	シルト分 53.4%
	粘土分 27.4%	粘土分 21.4%	粘土分 27.4%
コンステシ-特性	$W_L = 51.6\%$		$W_L = 65.7\%$
	$W_p = 21.8\%$		$W_p = 24.2\%$
	$I_p = 29.8\%$		$I_p = 41.5\%$
自然含水比	30.8%	31.3%	25.5%
単位体積重量	1.93gf/cm ³	1.92gf/cm ³	1.89gf/cm ³
間隙比	0.81	0.85	0.83
修正N値	50~100	90~180	50以上
変形係数	6,830~		
	7,450kgf/cm ²	6,604kgf/cm ²	5,025kgf/cm ²
一軸圧縮強度	33.2kgf/cm ²	20~30kgf/cm ²	30.53kgf/cm ²
圧密降伏応力	33.2kgf/cm ²	25.1kgf/cm ²	80.43kgf/cm ²
土丹層の平均透水係数	$5.2 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$	$4.2 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$	$2.2 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$

の上総層群には、数条の褶曲構造が発達している¹⁾。図中には、今回対象としている3箇所の調査地点を併記する。調査地点A, Bは東京半ドーム, C地点は星川ドーム付近に分布する上総層群に位置する。ドームとは、褶曲の背斜の高まりから四方へ地層が同じように傾斜している構造であり、この褶曲作用が、調査地点の土丹層が後述するような亀裂構造を持つ一因と推察される。

3. 物理特性

東京湾北西部の3地点から得られた土丹層の、基本的な物理特性、力学特性をTable 1に示す。N値50以上、一軸圧縮強度20~30kgf/cm²で、構造物の支持層としては十分な強度を有している。80%以上の粘土・シルト分を含む粒度特性からは難透水層と判断されがちであるが、揚水試験から得られる土丹層全体の平均的な透水係数は、どの地点ともおよそ10⁻⁴cm/secオーダーで、一般的な粘土・シルト質地盤よりはるかに大きい。A地点に分布する土丹層のボアホールTV画像の一例をPhoto 1に示す。砂の薄層や亀裂が認められる。挟在砂層の層厚は数cm~数10cmまで確認されており、平均すると層厚1mに1枚の割合で含まれている。亀裂を含まない健全な固結シルトの透水性はきわめて低いと考えられるため、土丹層の見かけの高い透水性は、層中に分布している挟在砂層(サンドシーム)や亀裂の影響によるものと判断できる。Fig. 2に、B地点で実施した土丹層での電気検層(マイクロ検層)結果を示す。比抵抗値の違いは、粒径分布、間隙率や不均質性の相対的な違いを示し、TP-10m以深の土丹層深度での大きな変化が、薄い砂層の存在を示している。Fig. 3にボアホールTVから得られた挟在砂層や亀裂の走向・傾斜分布の一例(A地点)を示す。走向は一定せず、様々な方向を示し、大部分が水平(0°)~30°に傾斜している。地下水の“みずみち”は、このように傾斜した挟在砂層に、亀裂が交差して形成されているものと考えられる。

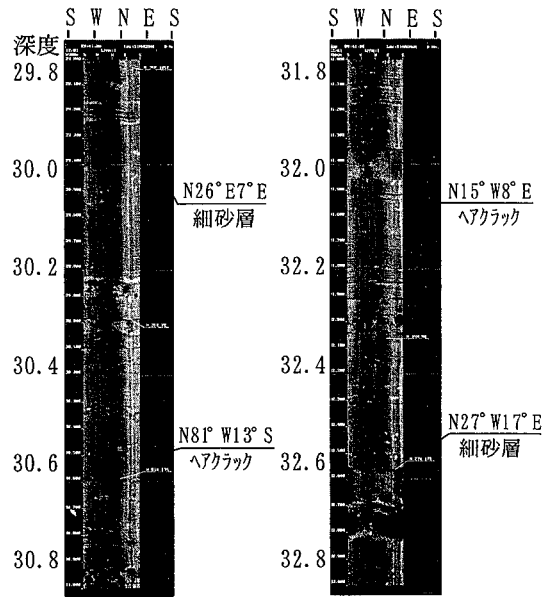


Photo 1 ボアホールTV画像例
Examples of Borehole TV

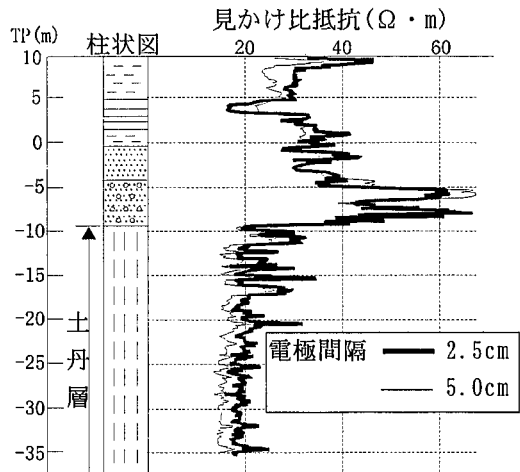


Fig. 2 電気検層(マイクロ検層)結果
Result of Micrologging

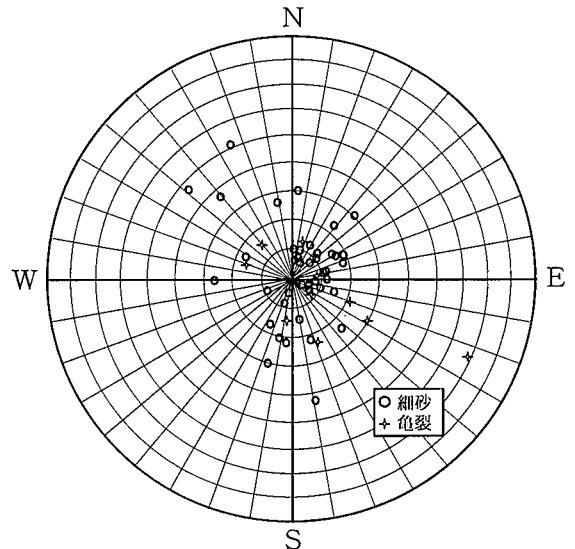


Fig. 3 シュミット投影
Schmidt Projection

4. 水理学的特性

4.1 地盤の透水特性

段階揚水試験から得られる井戸内水位低下量Sと揚水量Qの値が、両対数グラフ上で直線関係を示すことから、

$$Q = a \times S^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

a : 単位水位低下量(S = 1)に対する比湧出量
n : 両対数グラフ上での直線勾配(n ≤ 1が原則)

の関係式が得られる。SとQの幾何学的関係から得られた(1)式中のa, n値は、地盤や揚水井の特性を示す固有の値であることが確認されている²⁾。土丹層での段階揚水試験から得られたa, n値を、砂や砂礫地盤の値と併せてFig. 4に示す。10⁻⁴cm/secオーダーの土丹層の透水係数では、湧出量を規定するaはおよそ0.0008~0.004を示す。地盤種別ごとの平均a値は、砂礫で0.33, 砂で0.069, 土丹層で0.003であるから、土丹層の湧出量は、およそ砂礫の1%, 砂の4%と推定される。少ない湧水量ながら地下水が供給されており、揚圧力対策が必要である。同一調査地点でa値が異なるのは、個々の揚水井位置で砂層厚や亀裂量に差があり、地下水供給量に違いが生じているためと予想される。井戸効率に大きく寄与しているn値は0.7~1.3に分布しており、砂や砂礫に比べて値のバラツキが大きい。理想的な単一層の被圧井戸では1を越えないはずのn値であるが、C地点では1.2強に集中している。この傾向は、多層地盤での経験的特性を示している³⁾と同時に、亀裂地盤内の地下水流れは、従来のダルシー則のもとでの井戸理論から外れてくることを示唆しているものと思われ、今後のデータの蓄積が必要と考えられる。以上より、土丹層の揚水井のS-Q特性としては、まれにn値が1を越える場合もあるが、

$$S = (0.0008 \sim 0.004) \times Q^{(0.7 \sim 1.0)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と仮定して井戸損失を考慮した設計に適用できる⁴⁾。

4.2 影響圏

一般に、シルトのような細粒土主体の地盤の影響圏Rは、5~50mと言われている⁵⁾が、この値は水位低下量や揚水量の影響を考慮していないため、単純には適用できない。ここでは影響圏について、以下の3種類の方法を用いて算定し、検討を加える。(3)式はSichardtの経験式で、従来から排水設計に多く用いられている。(4)式はThiem式と呼ばれる平衡式で、観測井を設けた単孔揚水試験から求められる。(5)式は平衡群井式を変形し、(4)式中の揚水井からの距離rを各揚水井からの相乗平均距離 $(x_1 \cdot x_2 \cdots x_m)^{1/m}$ で示したものであり、群井戸揚水試験から求められる。Fig. 5に被圧帯水層における揚水試験の模式図を示す。

$$R = 3000 S_w \sqrt{k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

S_w : 揚水井水位低下量(m), k : 透水係数(m/sec)

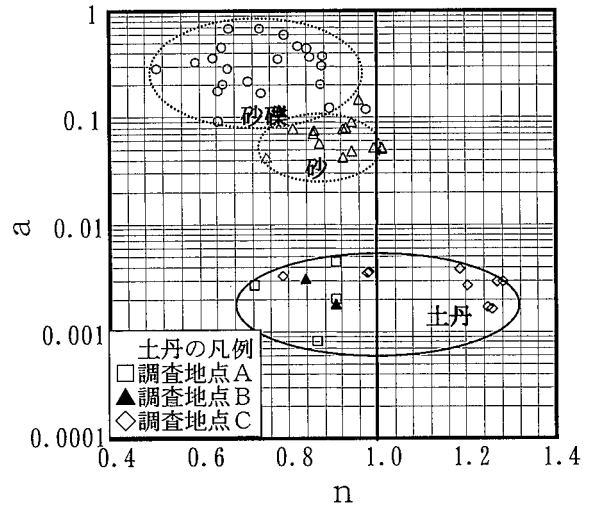


Fig.4 井戸特性値 a, n の分布
Distribution of Well Characteristic Value a, n

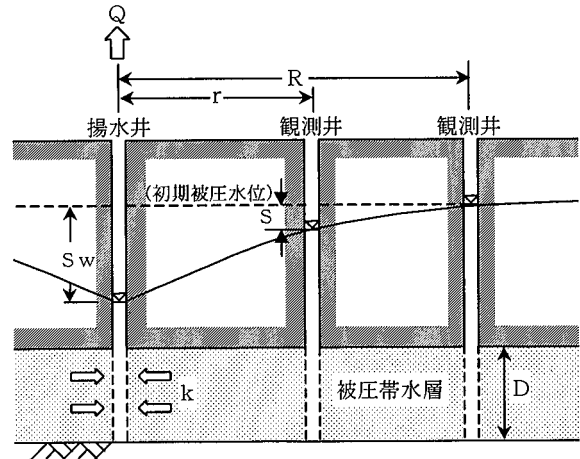


Fig.5 揚水試験模式図
Form of Pumping Test

$$R = r \times \exp\left(\frac{2\pi kDS}{Q}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

r : 揚水井中心からの距離(m), D : 帯水層厚(m)
S : 水位低下量(m), Q : 揚水量(m³/sec)

$$R = (x_1 \cdot x_2 \cdots x_m)^{1/m} \times \exp\left(\frac{2\pi kDS}{Q}\right) \quad \dots\dots (5)$$

x₁ · x₂ ··· x_m : 観測井から各揚水井までの距離(m)
m : 揚水井本数, Q : 各揚水井の合計排水量(m³/sec)

(4), (5)式で求められた影響圏を(3)のSichardt式から得られる影響圏に対してプロットしたものをFig. 6に示す。(3)式に示されるようにRは水位低下量Sに比例するものと仮定し、単位水位低下量に対する影響圏R' (= R/S)の値で図示した。単孔揚水のThiem式と群井戸揚水からのR'値は、A, B地点では比較的一致しており、10⁻⁴cm/secオーダーの透水係数では、1mの水位低下量に対して7~12mの値となり、Sichardt式の1~3倍である。

(4), (5) 式の結果がC地点で大きく異なるのは、地盤の不均質性が影響しているものと考えられる。単孔での点揚水に比べ、群井戸揚水によって、井戸径が見掛け上大きくなった場合の方が、広範囲の挟在砂層や亀裂を含んだ平均的な透水場となるため、(5) 式の結果が平均的な影響圏の大きさを表していると考えられる。C地点の群井戸揚水から得られたR'値は、A, Bに比べてかなり大きいことから、亀裂や砂層が相対的に多く分布しているものと推定される。これらの結果より、土丹層の影響圏は亀裂と挟在砂層に大きく影響され、一義的に決めることは難しく、揚水試験を実施することが望ましい。設計段階では、図に示すようにSichardt式から得られる値の1.5~2.5倍、つまり、

$$R' = (4500 \sim 7500) \sqrt{k} \text{ (m/水位低下1m)} \quad \dots\dots (6)$$

が目安になると考えられる。影響圏が大きくなると、低透水性にも関わらず、少ない井戸本数で広範囲に水位低下させることができる。

4.3 地下水排水設計と水理モデル

土丹層には被圧地下水が存在することから、掘削工事を行う場合、掘削底部の盤ぶくれや湧水等に対する検討が必要となる。対策として地下水位低下工法を考える場合、水位低下分布や揚水量を算定して井戸設計を行う。その際、止水壁や複雑な地層構成・掘削形状・境界条件が容易に考慮できる、有限要素法による浸透流解析は有効な手法となる。この方法は、地盤を多孔質媒体による連続体モデルとし、透水係数や影響圏を設定して解析するものである。土丹層の透水係数や影響圏は、従来の考えや経験則とは異なるため、水理モデルの設定に際しては、4.1, 4.2で既述したような知見を考慮することが必要である。亀裂や挟在砂層による“みずみち”を、土丹層の平均透水係数で評価して均質な透水場を仮定し、従来より大きな影響圏で地下水理現象をシミュレートすることで、井戸設計ができるものとする。ただし、同じ調査地点に設置した複数井戸の揚水量に10倍程度の差が生じた実績から、地盤調査を計画する際には、広範囲の地層構成が把握できるように、調査孔の位置や本数を設定することも重要である。

5. まとめ

土丹層を対象とした地盤調査、揚水試験等から得られた知見を、以下にまとめて示す。

- 1) 東京湾北西部に分布する土丹層は、褶曲作用によって亀裂が発達したと推察される。
- 2) 亀裂の発達した土丹層には、さらに挟在砂層が広い範囲で分布しており、帯水層と見なせる。平均的な透水係数は、砂層や亀裂の分布や密度に依存すると考えられるが、およそ 10^{-4} cm/secオーダーを示す。
- 3) 土丹層からの湧水量は砂礫層の1%程度と予想されるが、被圧水による揚圧力は地下水問題となる。

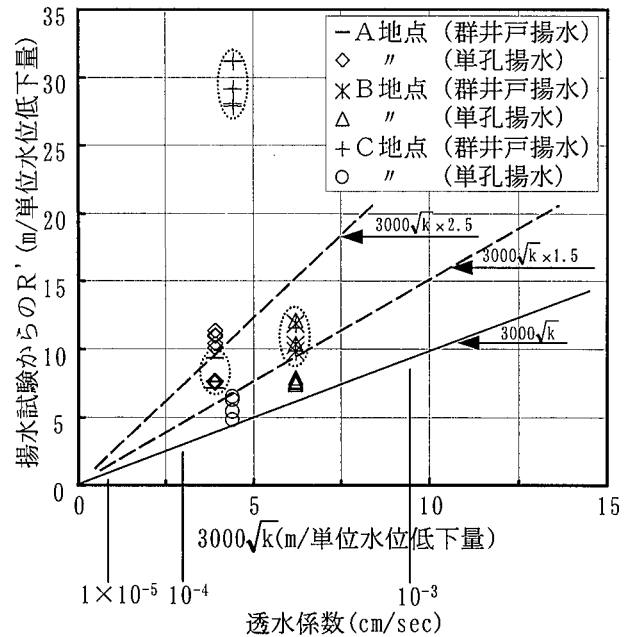


Fig. 6 影響圏の推定
Radius of Influence

4) 影響圏は、

$$R' = (4500 \sim 7500) \sqrt{k} \text{ (m/水位低下1m)}$$

の値を仮定することができる。

5) 排水設計の際、亀裂や挟在砂層を土丹層の平均透水係数で評価し、従来よりも大きな影響圏を仮定すると実現場での揚水量、水位低下量に近似する。

土丹層には被圧地下水が絶えず供給されており、掘削工事を行う場合に、地下水対策の検討が必要であることを確認した。現在、実際の排水設計には、これらの土丹層の水理特性を考慮した設計を行って対応している。なお、土丹層の水理特性は、砂や砂礫地盤から得られた事実と異なる部分もあり、亀裂等の影響を受けた地下水流れの可能性があると思われる。今後、さらにデータを蓄積して水理特性に関する検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 鈴木、他：東京湾とその周辺地域の地質(第2版)、地質調査所、p. 75~77、(1995)
- 2) 栗原、他：段階揚水試験から得られるS-Q関係に関する考察、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、III-A、p. 578~579、(1998)
- 3) 伊藤、他：揚水現場における井戸効率の算定方法に関する再検討、地下水技術、第37巻第1号、p. 33~37、(1995)
- 4) 深見、他：群井戸能力の評価方法に関する考察、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、III-A、p. 638~639、(1998)
- 5) 河野：地下水工学、鹿島出版会、p. 54、(1989)