

I-12 耐負圧性としての土の被膜機能について

○中央開港 正負 瀬古祐助
日本文理工学部正負 浅川美利

まえがき

鉛直排水による土の圧密促進をはかる場合の一次的載荷重として大気圧の利用が可能であるという考え方は、すでに W. Kjellman 氏によって提唱され、*Swedish vacuum method* としてかなり大規模な実験によってその効果が実証されている。

筆者らもウエルポイント工法の実施において地中に真空が発達していくことをな。その効果が期待できることを認め、一昨年来それに関する基礎的な研究を行なってきた。

筆者らの考え方も W. Kjellman 氏の提案と本質的には違わないが、次のような点で相違がある：

(1) ウエルポイントの実施は、地下水低下をある目的とするものである。負圧の効果は補足的なものであること。この点は初期の目的と異なすものである。

(2) 負圧効果をうるために必要な排水地域をカバーする被膜材料として特別なプラスチックシートを用いないで、土自体の被膜機能を利用すること。この被膜はプラスチック膜を用いるほど完全な材料ではないが、現位置材料の利用という点で経済的であることはいうまでもない。

今回の報告では、上で述べた負圧に対する土の被膜機能の問題を中心に次のようなことがらを検討し、その結果を述べるつもりである。

- (1) 土の被膜機能は土のどのような性質によって発揮されるか。
- (2) 被膜の能力を支配するおもな因子は土のどのような性質であるか。
- (3) いのような自然土の耐負圧能力はいかほどのものであるか。
- (4) 被膜機能を発揮させるための土の被膜処置はどんな考慮を必要とするか。
- (5) 表面を細粒土でカバーし、ポーラスな圧縮層を通して負圧を砂層に伝へるようなモデル的な地層での適用負圧と有効応力とを定量してみよう。
- (6) 過去に実施したウエルポイント工事で事実上どのくらいの負圧効果があったかを調べよう。

なおいままでに行なってきた負圧効果に関する実験および理論的研究の結果を要約して付記しておく。

(1) 地表面の被膜が完全な気密性を有するのである。ウエルポイントによる負圧力が一極に地中に発達しているものとすると、大気圧による一次的載荷重効果は、大気圧と地中の減圧力との差に等しい圧力が加わる。

(2) 土自体の被膜の気密性は、土の毛管中の水膜によるもので、その被膜としての能力は、土の受動毛管力 (*passive capillarity*) に等しいと考えることができる。

(3) 地中に発達する負圧は、土の間隙の大きさでその速度が変わる。たとえば間隙の大きい砂層中では、きわめて迅速に 100% の負圧が生ずる。

(4) 被膜層にはそれぞれ砂層にウエルポイントが設置され、その配列が二次元的に考えられるような場合の砂層中に発達する負圧分布は理論的に次式で表わすことができる。

$$\frac{p_t}{p_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}}\right)$$

ここに $\frac{p_t}{p_0}$ は任意時間 t 、ウエルポイントからの任意の距離 x における負圧度であり、 α は土の含水比の大きさなどで変化する負圧伝達係数である。

I. 被膜能力の理論的考へ方

土が被膜の機能を有するためには、水膜の気密性によらなければならないわけであるが、その水膜が負圧に耐えるには水膜の全張力が適用した負圧以上であることが必要である。

いまその水膜の全張力を Haines や Fisher の理論にもとづいて考えると、水膜の全張力 F_c は、メニスカス内部の圧力による力 $F_1 = p_{GL} \cdot \pi r_2^2$ と空気-水界面に働く張力 $F_2 = 2\pi r_2 \cdot T_s$ との和に等しいとして次式で表わされる。

$$F_c = F_1 + F_2 = p_{GL} \cdot \pi r_2^2 + 2\pi r_2 \cdot T_s = \pi r_2^2 \cdot T_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2\pi r_2 \cdot T_s = \pi r_2 \cdot T_s \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1} \right) \dots (1)$$

ここに r_1, r_2 はそれぞれ二つの主方向の水膜の弯曲半径で、 T_s は液の表面張力である。

また $p_{GL} = T_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ で、内部圧力である。

r_1, r_2 と粒子半径 d との幾何的關係は、 $r_1 + r_2 = d \tan \theta$ であるので、上式にこの關係を代入して土の粒徑関数としての全張力の式は次のようになる。

$$F_c = \frac{2\pi \cdot d \cdot T_s}{1 + \tan \frac{1}{2}\theta} \dots (2)$$

以上のことから、土が耐負圧性として土中負圧を維持する能力は、ちょうど毛管の全張力に相当した量であると考えられるのである。

II. 被膜の能力を支配するおもな因子

上式からわかるように水膜の全張力は、土および水の本質的な性質、すなわち水の表面張力と土粒徑によって変化する量である。さしずめこれらの相互關係を述べると、全張力は $\frac{T_s}{d}$ に応じて変わることがわかる。これらの關係から、 T_s の変化があまり大きくないと考えると、結局被膜能力は土の粒徑のいかんによると考えてよいことになる。

Basflow は土の毛管力を capillary-meter を用いて測定し、土粒徑を関数として毛管力 K (cm) の経験式を次のように求めた。

$$K = C_K \times \frac{1}{D} \dots (3)$$

ここに C_K は土粒子の詰まり度による比例常数で、 D (cm) は土粒子直径である。

上で述べたことを総合して、土の被膜能力の支配因子を考えると、(i) 液相の表面張力、(ii) 土粒子の径、(iii) 土粒子の詰まり度などがあげられる。その中 (iii) の粒徑が主要因子であることは上で述べた通りである。

Ⅲ. 土の粒径と詰まり度による耐負圧能力の値と範囲

毛管の全張力 E の代りに毛管力 h (capillarity) (cm) と耐負圧能力と考え、その値が、毛管力を支配するおもな因子である土の粒子径や詰まり度によってどのように変わるかと、Beskowの測定値(表-1)と筆者らの測定値(表-2)によって考察してみた。

(表-1) (Beskowによる)

人為的に作られた土粒子			自然堆積土		
粒径は土の分類	粒径 (mm)	毛管力	土のタイプ	毛管力 緩い状態	密な状態
粗 砂	0.2 ~ 0.6	3 ~ 10 (cm)	粗 砂	3 ~ 12 (cm)	4 ~ 15 (cm)
中 砂	0.6 ~ 0.2	10 ~ 30 "	中 砂	10 ~ 35 "	12 ~ 50 "
細 砂	0.2 ~ 0.06	30 ~ 100 "	細 砂	30 ~ 200 "	40 ~ 350 "
シルト	0.06 ~ 0.02	1 ~ 3 (cm)	シルト	1.5 ~ 5.0 (m)	2.5 ~ 8 (m)
細いシルト	0.02 ~ 0.006	3 ~ 10 "	細いシルト	4 ~ 10 "	6 ~ 12 "
非常に細いシルト	0.006 ~ 0.002	10 ~ 30 "	粗な粘土	8 ~ 15 "	10 ~ 18 "
粗な粘土	0.002 ~ 0.0002	30 ~ 300 "	中位の粘土	14 ~ ?	15 ~ ?
細い粘土	0.0002	300 "			

表-1, 表-2から次のようなことがわかる;

(i) 土の毛管力すなわち耐負圧能力は、土の粒径が支配的因子で、わずかの粒径変化でも毛管力はいちぢるしく変わる。

(ii) 粗密度も毛管力に影響する因子ではあるが、粒径による影響にくらべて大きいものではない。

Beskowによると、(3)式の C_k (詰り度による係数)を0.6と近似している。

(iii) 耐負圧性として土を被膜として使用する場合、土の粒径による種類に応じて毛管力を定め、その量が

が適用負圧以上のものであればよいわけである。いま仮に負圧によって $2.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ の載荷重を得ようとする場合と考えてみると、それに必要な土の耐負圧能力は200 cm以上となる。

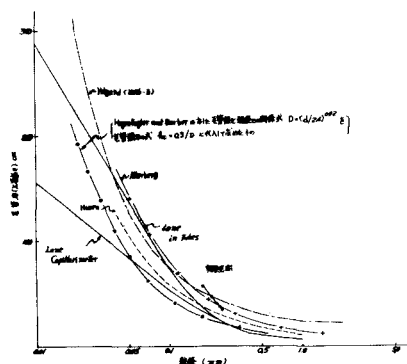
この耐負圧能力をうるためには、粒径 $0.03 \sim 0.02 \text{ mm}$ 以下のシルト質土であればよいことがわかる。

図-1は、Hazen, Hilgard, Laneが測定したものを図表的に示し、またHogentoglerの経験式を計算して図に示したものである。さらに筆者らの測定値も挿入してみた。

この図から、粒径を関数とする毛管力の増減は、値の差はあるが、傾向としてどの測定値も類似するものであることがわかる。また能動毛管力の方が受動毛管力より大きく表われるようである。土の耐負圧能力を定める場合は、加圧の機構からよまね設計上の安全性から、受動毛管力による方が妥当であると思う。

(表-2) (瀧本, 浅川)

平均粒径 (mm)	毛管力 (cm)	75μm過土の 配合率 (%)	試料厚さ (cm)
0.25	33.6	0	2.5
0.24	37.4	5	2.5
0.23	39.6	10	2.4
0.22	—	—	—
0.21	46.3	20	2.3
0.20	—	—	—
0.19	56.6	30	2.1
シルト質土I (大塚式)	314 cm	3 mmの厚さで標準 砂の上で被膜に用いる。	
シルト質土II (豊洲東部)	350 "		



(図-1 粒径による毛管力の変化)

Ⅳ. 被膜性としての土の被膜厚さとその処置

被膜した土の間ゲキに水膜が全面にわたって形成されていて、その状態が変化しなければ、毛管力は厚さに関係なく、被膜した土の毛管力を被膜能力と考えていい。

しかし実際には、土の上面からの水分の蒸発や夏圧による下方向への水の移動によって水膜の状態変化が起る。

したがって土の毛管力を維持するためには、それらの影響が生じて被膜能力にさしつかえがないだけの厚さを与えておかなければならぬ。また表面からの乾燥のほげれいところでは、水の補給によって水膜の状態維持を考慮しておかなければならぬ。

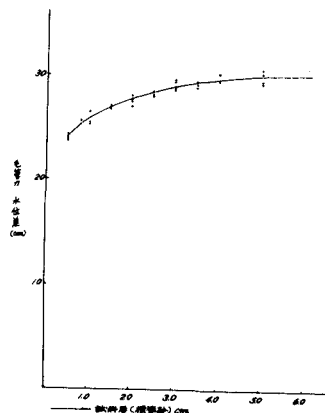


図-2は砂(標準砂)を使って、厚さによる毛管力の変化を示す結果を示したものである。土の厚さが相対的に(図-2毛管力の厚さによる影響)薄いとき毛管力の値が小さく、ある厚さまで増すと、その影響は少ないようである。

7. 過去に実施したウエルポイント工事における夏圧効果の吟味

ウエルポイントによる地下水低下で、地盤の圧密安定処理を行なった現場で、地盤低下による有効土圧の増加に伴う圧密以外のさらに増加された圧密が起っている場合が多いことを認めため、その追加された量の圧密を夏圧によるものと解して、その効果を明らかにした。ここでは仙台発電所の基礎の安定処理の実施結果を一例としてそれを吟味する。

次表は施工前の土性、地下水低下によって得ようとする計画値および施工後得られた土性を示したもので、これらの数値から夏圧効果による圧密を推定してみた。

表-3

夏圧効果の吟味	間ゲキ比	施工前の土性	計画した値	施工後得た土性	夏圧効果の推定値	理論夏圧効果
		$e_0 = 2.30$	$e_1 = 1.94$	$e_2 = 1.88$	推定増加圧力 $\Delta p = p_2 - p_1$ $= 1.8 - 1.6 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ ($C = 0.25 p_1$) $\Delta p = 1.65 - 1.40$ $= 0.25 \text{ kg/cm}^2$	(i) 水低下による増加圧力 $\Delta H = p_1 - p_2 = 260 \text{ mmHg}$ $\Delta H = 260 \text{ mmHg}$ 、夏圧による夏圧500mmHg (ii) $p_2 = p_0 - 500 = 760 - 500 = 260 \text{ mmHg}$ $p_1 = p_2 + \Delta H = 260 + 260 = 520 \text{ mmHg}$ $\therefore \Delta p = p_0 - p_1 = 760 - 520 = 240 \text{ mmHg}$ $240 \text{ mmHg} = 3.2 \text{ kg/cm}^2 = \Delta p$
夏圧効果の吟味	対応圧密率(%)	$p_0 = 0.63$	$p_1 = 1.60$	$p_2 = 1.80$		
夏圧効果の吟味	粘着率(%)	$C_0 = 0.215$	$C_1 = 0.350$	$C_2 = 0.405$		
夏圧効果の吟味	対応圧密率(%)	$p_0 = 0.63$	$p_1 = 1.40$	$p_2 = 1.65$		

上述のことを検討してみれば、夏圧による圧密圧力増加量は、 $2.0 \sim 2.5 \text{ kg/m}^2$ であると見積ることができる。理論夏圧効果 Δp が 3.2 kg/m^2 であると見積られ、それに比べて実際の推定値とは若干差異があるが、土中での圧力損失などを考慮すると、有意な効果があったと判断してよいと思う。

現地のシルト質砂の毛管力が $260 \sim 300 \text{ cm}$ であるので、土の耐被膜能力は十分であると考えられる。

研究に当って始終教示下さった日本大学當山教授に深謝の意を表す。