

真空圧密工法

Vacuum Consolidation Method

三反畑 勇 (さんだんばた いさむ)

機関組技術研究所 主席研究員

1. 真空圧密工法とは

真空圧密工法は、軟弱地盤にパーチカルドレーンを打設し、地表面を気密シートなどで覆って密封した後、真空ポンプを用いて地盤内の間隙水圧を低下させて圧密促進（予圧密）を図る地盤改良工法である。軟弱な粘性土地盤の改良に適用でき、泥炭にも効果が高い。改良深さについても、国内では最大30 m以上、海外では40 mを越える実績がある。ただし、表層付近に通気性の高い砂層などがある場合や、透水性の高い中間砂層が存在する場合には適用性を十分に検討する必要がある。

2. 施工法の開発

真空圧密工法は1950年代にスウェーデンの Kjellman¹⁾ (チェルマン) によって考案されたもので、①排水材（パーチカルドレーンなど）、②気密システム（地表の密封）、③真空ポンプの三つの基本要素から構成される。

当初はドレーン材の通水性やシートの気密性が不十分で、高い真空圧を維持するのが困難であった。また間隙水圧の低下は深さ10 m程度までと考えられていたこともあり、長く休眠工法となっていた。しかし、透水性に優れたドレーン材や気密性の高いシートの開発などにより、1990年代以降、主に欧米、中国、日本で実用化され普及するに至った。気密システムからみると、図-1の地表面を気密シートで覆うタイプ（以下、気密シート方式）と図-2の表層の粘性土層を気密層として利用するタイプ（以下、粘性土密封方式）がある。気密シート方式では角礫や貝殻などによるシートの破損、粘性土密封方式では表層の乾燥収縮クラックなどによる漏気に注意する。なお、実績は少ないが、水中施工の例もある。

3. 原理

軟弱地盤対策技術は、その原理によって一般に、①置換、②圧密・排水、③締固め、④固化、⑤補強、⑥荷重軽減に分類されるが²⁾、真空圧密工法は表-1のように「圧密・排水工法」の一種である。ただし、各工法は必ずしも一つの原理に基づくわけではなく、真空圧密工法もパーチカルドレーン工法の一形態であるともいえる。

圧密とは土が内部間隙水の排出を伴いながら徐々に圧縮していく現象をいい、その結果として有効応力が増加する。真空圧密工法は、全応力 σ 一定の下で間隙水圧 u を低下させ、結果的に有効応力 $\sigma' = \sigma - u$ を増大させる

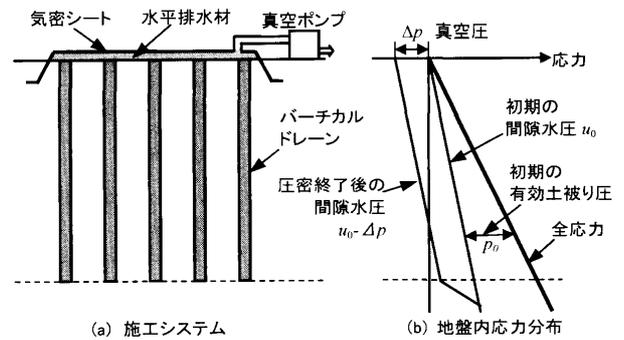


図-1 真空圧密工法（気密シート方式）の概要

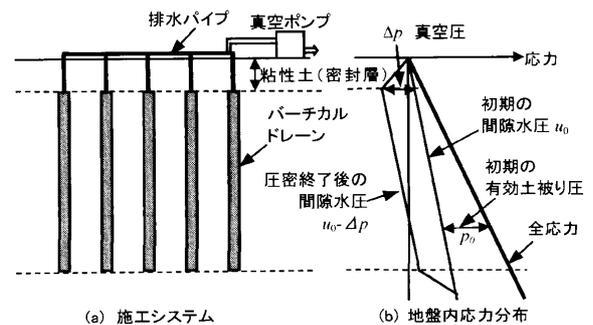


図-2 真空圧密工法（粘性土密封方式）の概要

表-1 改良原理、施工原理に基づく工法分類（圧密・排水）

改良原理	施工原理	工法の名称
圧密・排水	盛土など荷重を載荷させ間隙水圧を上昇させて排水を促進する	プレロード工法
	地下水位を低下させ荷重を増し間隙水圧を上昇させ排水を促進する	サーチャージ工法
	地盤に真空圧を作用させ（地盤内を減圧して）圧密を促進する	地下水位低下工法
	透水性の良い材料で地盤内に鉛直の排水路を形成し水を抜けやすくする	真空圧密工法
	礫よりなる排水路を砂地盤内に形成し地震時の間隙水圧の上昇を防止	パーチカルドレーン工法
	排水性の良い材料により水平方向の排水路を形成し排水を促進する	グラバルドレーン工法
	化学的吸引作用による脱水効果を利用して排水する	表面排水工法
	地盤中に電極を設置して通電して水を集めて排水する	浸透圧工法
		生石灰杭工法
		電気浸透工法

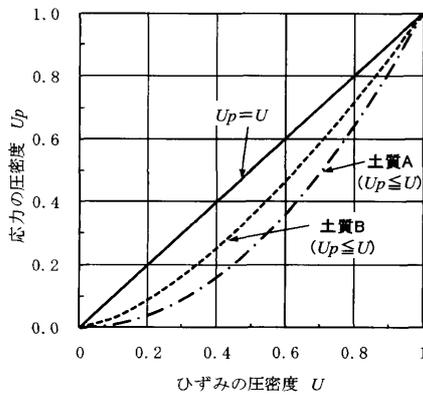
ことによって圧密を進行させる工法である。「気密シート下を負圧にして大気圧を地表に載荷する」といった解説は、全応力 σ を増加させる工法と誤解するのでよくない。最終的には真空ポンプを停止することで圧密荷重としての減圧量（真空圧）を除荷し地盤を過圧密化するので、本質的にはプレロード工法と同じ予圧密工法である³⁾。

技術手帳

表一 2 真空圧密工法に適用する主な設計計算式

項目	計算式	
最終沈下量	e 法	$s_f = \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} \cdot H$
	m _v 法	$s_f = m_v \cdot H \cdot \Delta p$
	C _c 法	$s_f = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0}\right)$
圧密時間 (沈下速度)	バロソ式	$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log_e \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$
		$n = \frac{d_e}{d_w} \quad T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2}$
強度増加予測 ⁵⁾	$\Delta c_u = m \cdot \Delta p \cdot U_p$ (正規圧密地盤の場合)	

S_f: 最終圧密沈下量
*e*₀: 載荷前の間隙比
*e*_f: 載荷後の最終間隙比
*p*₀: 載荷前の有効土被り圧
C_c: 圧縮指数
c_h: 水平方向の圧密係数
d_e: 等価有効円の直径
 Δc_u : 非排水せん断強度の増加分
U: ひずみの圧密度
H: 圧密層の層厚
e_f: 載荷後の最終間隙比
 Δp : 地中増加応力
m_v: 体積圧縮係数
T_h: 時間係数
d_w: ドレーンの打設間隔
m: 強度増加率
U_p: 応力の圧密度



図一 3 ひずみの圧密度と応力の圧密度の関係の概念図

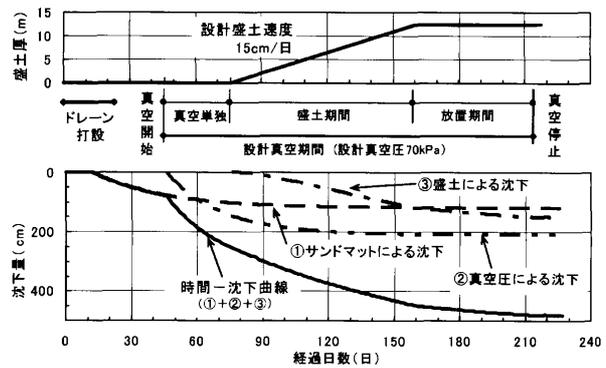
4. 設計法

真空圧密工法はバーチカルドレーンの設計法に準じるのが一般的である。まず目標地盤強度や残留沈下量許容値などの要求性能を設定し、次に地盤モデル、設計真空圧、工期などの設計条件を整理する。そしてバーチカルドレーンの打設深度とピッチを選定し、圧密沈下(時間-沈下関係)、地盤強度増加、地盤安定などを検討する。場合によってはサーチャージ盛土などの併用も検討する。

真空圧(地中応力増分)は、施工方式によって深度分布が異なるが、実績に基づき通常50~70 kN/m²程度に設定される。深さ方向には一定とすることが多いが、深度に応じて低減する場合もある。なお、気密シート下で95 kN/m²程度の高い真空圧を達成した例⁴⁾もある。

ドレーンピッチは、工期や経済性を考慮して設定するが、通常0.7~1.5 mの範囲内で、1.0 m程度の実績が多い。

地盤強度の増加は、一般に強度増加率と圧密度を考慮して予測するが、図一3のように強度増加(応力)に関する圧密度は沈下(ひずみ)に対して遅れが生じる点に注意が必要である。表一2に主な計算式を、図一4に盛土工事での工期設定、計算結果の例を示す。



図一 4 真空圧密工法の設計計算例(盛土工事)

5. 品質管理

施工中の真空圧の管理は重要で、真空ポンプ内だけでなく気密シート下などでも真空圧を計測する。圧密状況の確認も、沈下測定だけでなく地盤内の間隙水圧を測定することが望まれる。盛土の残留沈下量軽減には過剰間隙水圧の消散を確認するのがよく、過圧密比が1.5程度の場合に二次圧密も含めて残留沈下がほとんど生じなかった事例⁶⁾の報告もある。圧密特性が大きく異なる地層が存在する場合には、層別沈下と間隙水圧を各層で把握しながら真空停止時期を判断する。なお、施工後の土質調査などは間隙水圧が回復するのを待つて行う。

6. おわりに

真空圧密工法は、道路盛土の基礎地盤改良、河川改修工事での掘削法面安定、掘り込み式調整池の掘削土量低減、軟弱な掘削土砂や浚渫土の含水比低下・減容化など多様な用途に活用されている。特に気密シート方式は、地表面の水平排水材によって表層地盤の圧密が早く進むため、気密シートとともに補強効果が期待できるので盛土急速施工に適する。最適な真空期間の設定方法や地盤変位の予測などに関しては未解明の部分も残されているが、今後も現場データの蓄積やFEM解析などによって研究が進むことが期待される。

参考文献

- 1) Kjellman, W.: Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, Proceedings of Conference on soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology, Boston, pp. 258~263, 1952.
- 2) 地盤工学会編: 地盤工学ハンドブック, p. 1203, 1999.
- 3) 今井五郎: 招待論文「真空圧密工法」のさらなる発展に向けて—真空圧密を利用した地盤改良の原理に対する現状認識とその適用, 土木学会論文集, No. 798, VI-68, pp. 1~16, 2005.
- 4) 三反畑勇・久保正顕・市川尋士: 真空圧密工法による軟弱地盤対策—N & H 強制圧密脱水工法の概要と施工例—土木技術, Vol. 59, No. 8, pp. 66~73, 2004.
- 5) 日本道路協会: 道路土工軟弱地盤対策工指針, 1986.
- 6) 林 宏親・西本 聡・深井健吾・菅藤喜之: 真空圧密工法のポンプ停止時期と残留沈下に関する検討, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第44号, 2004.

(原稿受理 2008.4.22)