

## 改良型真空圧密工法の開発と施工事例

—N & H 強制圧密脱水工法—

市川 尋 士・横 山 勝 彦・三 反 畑 勇

強制圧密脱水工法が本誌で紹介されてすでに3年が経過した。この間、現場実績は約400万 $m^3$ に達し、工法にも改良が加えられた。真空圧密工法の最大の課題として、地中深く真空圧を伝搬させ、かつそれを維持することがある。真空圧伝搬効率を上げるため、ドレーン材の厚みを7mmとし、改良地盤内に気水分離タンクを設置することにより、この課題を克服した。改良地盤内の気水分離タンクは沈下に追従するため沈下に伴う損失水頭を解消でき、真空ポンプの配置が容易になった。また、排水管内を移動する水量が減少するので、空気の移動が容易になり、地表部の真空圧の伝搬範囲がより拡大し、確実にした。このため、ポンプ1台当たりの改良面積を増やすことが可能となる。

キーワード：真空圧密工法、軟弱地盤、地盤改良、盛土、気水分離

### 1. はじめに

盛土材を用いないで軟弱地盤の圧密促進改良が可能で、環境への負担が少ない工法として、真空圧密工法が注目されている。この工法の基礎的な技術はスウェーデンで開発され、1960年代に我が国に技術導入されたが、真空度を維持する技術が未熟でコストパフォーマンスが悪かったため、本格的な普及に至らなかった。最近になって使用材料、施工方法、管理システムにおいて根本的な技術改良がなされ、N&H強制圧密脱水工法としてリニューアルされた<sup>1)</sup>。また、真空圧密工法と盛土を併用すると、限界盛土高を大きく超える高盛土部でも、押さえ盛土なしに安定した盛土が短期間で実現でき<sup>2)</sup>、軟弱地盤地帯での高規格道路の建設等に際して、工期短縮、工費縮減に極めて有望な工法となっている。真空圧密工法の施工品質の確保においては、高い真空圧を維持することが最大の課題であった。今回新たに改良地盤内部に分離タンクを設置し、水と空気を分離して水を水中ポンプで強制排水することにより、改良内の真空度80~90 $kN/m^2$ を容易に維持できるようになった。施工事例としても、道路盛土部で採用し良好な成果が得られたので、改良型真空圧密工法の概要と開発経緯および施工事例を紹介する。

### 2. 強制圧密脱水工法の開発

#### (1) 経 緯

初期の改良型真空圧密工法は1992年茨城県の河川

改修工事において、高有機質土地盤の掘削安定対策に従来の真空圧密工法（大気圧工法）を試験的に実施することから始まった。当初の施工方法では真空度40~50 $kN/m^2$ を維持するのがかなり困難な状況であったため、気密シートの改良、有孔集水管の断面形状やフィルタ材料の選定を行った。また、動態観測システムの採用、真空ポンプ等の専用排水装置（真空駆動装置）の開発、その後、水平ドレーン材の採用により、真空度50~60 $kN/m^2$ の確保が容易となり、工法が普及する基礎が確立した。この間に改良された主な内容を表-1に示した。

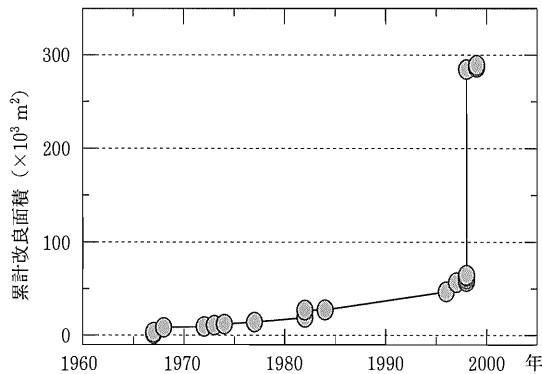
表-1 強制圧密脱水工法の開発経緯

年 代	主な開発改良点
1992年	従来型大気圧工法の試験施工
1993年 ~ 1994年	・軽量気密シートの開発、2枚張り合わせ構造により、ピンホールの克服
1995年 ~ 1997年	・沈下、真空圧、流量、水温等の自動計測システムの採用 ・有孔集水管の改良、有孔位置、フィルタ材、水平ドレーン、保護シート等の専用材料の開発 ・専用真空駆動装置の開発
1998年	・施工規模拡大に伴う施工ノウハウの確立
1999年 ~ 2000年	・初期生分解シートの開発 ・動態管理計測システムの改良 ・真空圧密室内試験機の開発
2001年 ~ 2003年	・気水分離システムの採用により高い真空圧を実現 ・鉛直ドレーン材厚の7mm化

#### (2) 実績と改良

各種の試験工事においても工法開発の過程での課題が試され、改良が行われた。真空圧密工法の施工実績としても図-1に示されるように1990年代末から急

速に増加しており、そのほとんどは改良型真空圧密工法（強制圧密脱水工法）の実績である。



図一 我が国における真空圧密工法の施工実績

真空圧密工法について従来から設計・施工上の問題点としては次の8項目が指摘されている。

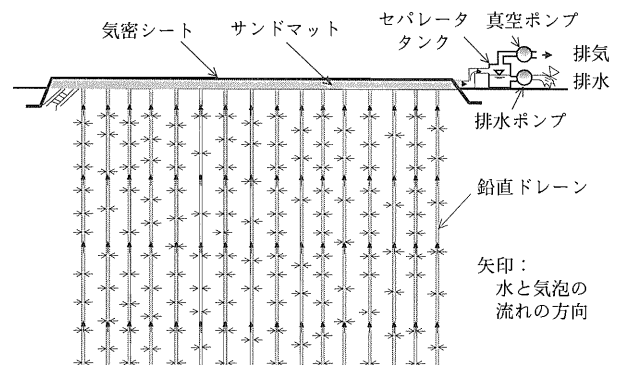
- ① 一定の真空圧の維持が困難であり施工管理システムが確立していない。
- ② 水や空気が周辺および下層より流入することや鉛直ドレーン内の損失水頭によって効率が低下するため、地表面においても50~60 kN/m<sup>2</sup>前後の真空圧を維持するのが限度である。
- ③ 地盤内における深度方向での圧密応力の増加程度が不明である。
- ④ 地下水を有する砂層が介在するとそれ以深の改良効果が期待できない。
- ⑤ 従来の載荷盛土工法に比べると真空ポンプ等の運転コストの高い工法である。
- ⑥ 24時間真空ポンプを稼働させるため騒音対策が必要となる。
- ⑦ 沈下量や強度増加の評価、圧密終了の確認や真空ポンプの停止時期の判定、盛土併用時の安定性など設計手法が確立していない。
- ⑧ 周辺地盤への影響が不明である。

これらの問題点については、初期の改良型真空圧密工法による現場施工の拡大に伴い、施工技術の改良と現象の解明が進み、ある程度弱点は克服された。この成果は、真空圧密技術協会の「技術資料」<sup>9)</sup>に集約されている。しかし、理論的には真空圧を圧密荷重に置換えただけの立場で、バロン式によるペーパードレーン工法理論を基本としており、真空圧密に特有な不飽和圧密や水圧の減圧効果は十分考慮されていない。真空圧密の独自の理論構成は今後の課題であると考えている。

### (3) 問題点の克服

真空圧密工法の標準的な概念図を図一2に示す。従

来型と改良型が大きく異なる点は、真空圧密専用の使用材料を開発したこと、水平ドレーン材の全面採用である。従来型は鉛直ドレーンと集水有孔管はサンドマットを介して結合されていた。このため、サンドマットの透水性による圧力損失が大きく、真空ポンプの真空圧が鉛直ドレーンまで十分伝達されない状況にあった。鉛直ドレーンと水平ドレーンを結合することにより真空圧の伝達効率が良くなり、損失水頭を10~20 kN/m<sup>2</sup>以下に押さえることができた。また、ドレーンのコア材や有孔管を専用の耐圧構造排水材料として開発し、真空圧100 kN/m<sup>2</sup>以上に耐えて通水面積を確保できるようになっている。



図二 真空圧密工法の概念図

専用の真空駆動装置については、真空ポンプ、排水ポンプ、気水分離タンクを一体型にすることにより、排水効率の向上による高真空の維持、騒音の軽減、施工作業性能や管理性能の向上が図られた。

圧密促進を改良原理とするこの工法は、時間経過に伴う真空圧と沈下の管理が最も重要である。そこで、水盛り式沈下計、圧力計、間隙水圧計および、排水流量・排水温度を基本的な測定項目とする自動計測システムを構築した。このことにより真空圧密工法で問題点とされている項目について、リアルタイムな情報収集を行い、地盤改良効果の把握と評価に役立てている。

以上のように問題点を克服し、成功した施工事例と



写真一 石狩郡当別町での試験盛土（1997年）

して、北海道の泥炭性軟弱地盤での道路試験盛土<sup>4)</sup>の実例を写真—1に示す。

### 3. 新しい改良型真空圧密工法の開発

#### (1) 改良点と特徴

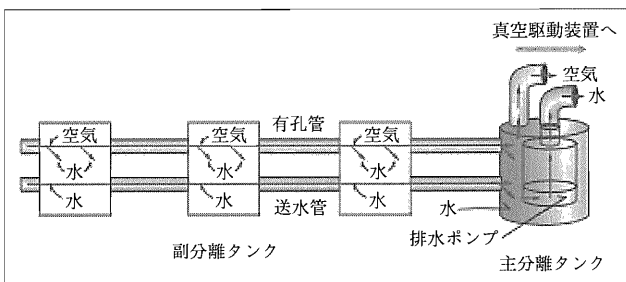
真空圧密は真空ポンプにより地表面およびドレーン内の圧力を減圧し、地盤内の間隙水圧を減少させ、その間隙水圧の減少分を有効応力の増加として、圧密応力 ( $\Delta\sigma$ ) とする考え方が一般的である。

このため、改良効率を上げるためには改良域内をより高い真空度に維持し、圧密応力をより増加させることが最大の目標となる。今回開発に成功した新しい改良型真空圧密工法は、この課題を実現するため改良域内に気水分離タンクを設置した。また、分離タンク内に設置された排水ポンプを利用して排水を行うことが最大の改良点であり、特徴である。

#### (2) 気水分離システム

気水分離システムは、原則として初期の改良型真空圧密工法に用いる専用真空駆動装置に接続して用いる。このため改良域の分離タンクから直接に真空駆動装置排水タンクまで送水する管が新たに追加された。

今までの排水管は従来の分離タンクに接続されているが、実際には空気だけが排出される。空気の重量は水に比べて極めて軽量なため、圧力損失が小さく、高い真空度が維持しやすい。また、沈下量が大きくなり、真空ポンプ位置と地下面の水頭差が大きくなる場合でも、空気だけの排水管のため沈下に伴う圧力損失は全く生じない。図—3に改良域に設置される気水分離システムの構造説明図を示した。



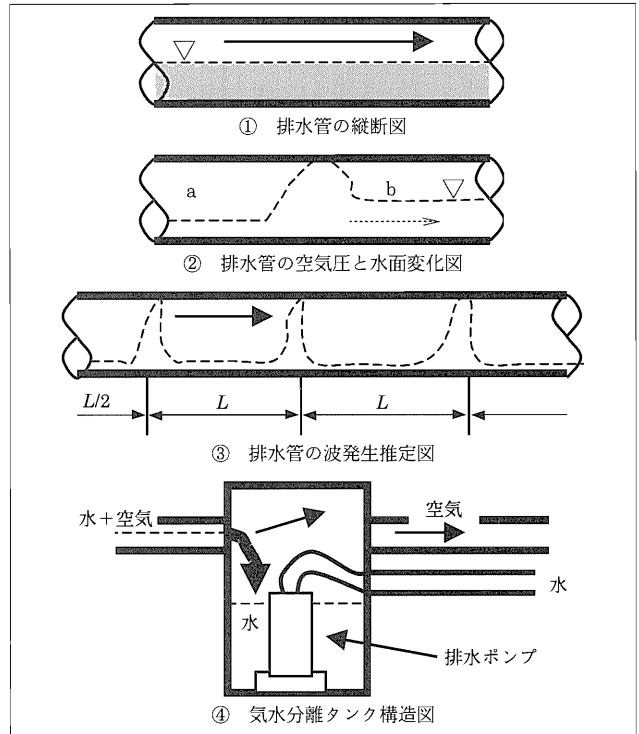
図—3 気水分離システムの構造説明図

有孔集水管で集められた水は、適切な間隔に配置された副分離タンクにより水と空気に分離され、空気は有孔集水管を通じて主分離タンクを経て真空ポンプに接続される。一方、分離タンクに貯まる排水は下段の送水管を通じて主分離タンクに集められ、排水ポンプにより強制排出される。なお、沈下に不陸が生ずる場

合は、副分離タンクにも小型の排水ポンプを設置し、主分離タンクまで直接強制排水をする。

#### (3) 気水分離型の原理

気水分離システムにおける排水の原理をまとめると、図—4において①～④のような過程が考えられる。



図—4 気水分離システムの排水原理説明図

①は有孔集水管（有孔管）の断面図である。

管内上部の矢印は空気（風）の流れを示す。上部の空気（風）の流れにより下部の水の表面が波立つ。

②は有孔管内の空気（風）の流れと管内水位の変化を示したものである。

波の成長に伴い、水位は上昇し、やがて有孔管断面を充満し、空気の流れを一時的に遮断する。真空ポンプは常時運転しており、有孔管内部の圧力バランスは駆動機械に近いb側がa側より低い。このため管を塞いだ水は圧力差によりb側に動く。

③は有孔管内の波の発生状況を示す。

波長は真空度によって決まってくる。このような形状で吐出口へ移動・排水される。波長の谷間の真空度は真空ポンプより遠ざかるほど低くなる。改良ヤードが広がると、真空駆動装置より最も遠い地点での真空度は、はるかに小さくなる。

④は気水分離タンクの構造を示す。有孔管内の波高の数を減少させることにより、真空駆動機器より遠い箇所を高真空にすることが出来る。

その方法として有孔管の適当な箇所気水分離タンク

クを設置する。鉛直ドレーンで集められた水は水平ドレーンを経て有孔管へ集水される。圧密水は有孔管の断面を塞ぎつつ、排水する方向へ移動する。圧密水は有孔管の途中に設置した分離タンクに入る。分離タンク内では重量がある水はタンクの下へ、重量がない空気は上へ分離される。空気は次の有孔管を通して次の分離タンクへとさらに集水しながら吸引される。分離タンクに集まった水は排水ポンプを用いて別系統（下段）の排水管（無孔管）を通じて送水される。

(4) 設計上の留意点

気水分離システムの採用により地表面の真空度は高い値が確保される。しかし、地盤内の間隙水圧の分布は鉛直ドレーンからの距離と土の透水性に応じて負圧の伝達が遅れる。沈下計算においては、圧密過程を考慮した平均圧密増加応力で計算する。

4. 新しい改良型真空圧密工法の施工事例

(1) 工事概要

宮城県桃生町における道路建設工事（三陸縦貫自動車道）において、真空圧密工法を併用した試験盛土（真空・盛土方式）が実施された<sup>5)</sup>。現場は厚さ約5mの泥炭層を含む深さ12m程度の軟弱地盤からなる溺れ谷地形であり、計画盛土高さ8.5mに対して3m以上の沈下が想定された。そこで、気水分離システムを採用した。図-5に施工概要を示す。

真空駆動装置1台当りの最大施工面積は、2,000~2,500m<sup>2</sup>を標準としているので、施工範囲は2ブロックに区分けし、分離タンクも3台ずつ用いた。なお、真空運転等は2ブロック同時施工とした。写真-2~写真-3に施工状況を示す。

(2) 施工結果

30日間の真空単独载荷の後、真空圧密を継続しながら気密シート上に厚さ12.5mの盛土を施工した。盛土中央部の沈下量は約3mで、ほぼ計画通りの盛土高さ8.5mを確保できた。図-6に施工結果の概要を示すが、気密シート下（地表面）の真空圧は、ほぼ90kN/m<sup>2</sup>（kPa）以上の高い真空圧を維持しており、新しい気水分離システムの効果が実証された。

盛土の安定管理は、真空圧密技術協会の「技術資料」<sup>3)</sup>に準じ、地中の過剰間隙水圧や周辺地盤変位速度などの動態観測データを活用しながら総合的に実施した。平均盛土速度は図-7のように11.5cm/日であったが、最速期間（2月）には27日間で盛土厚5.1

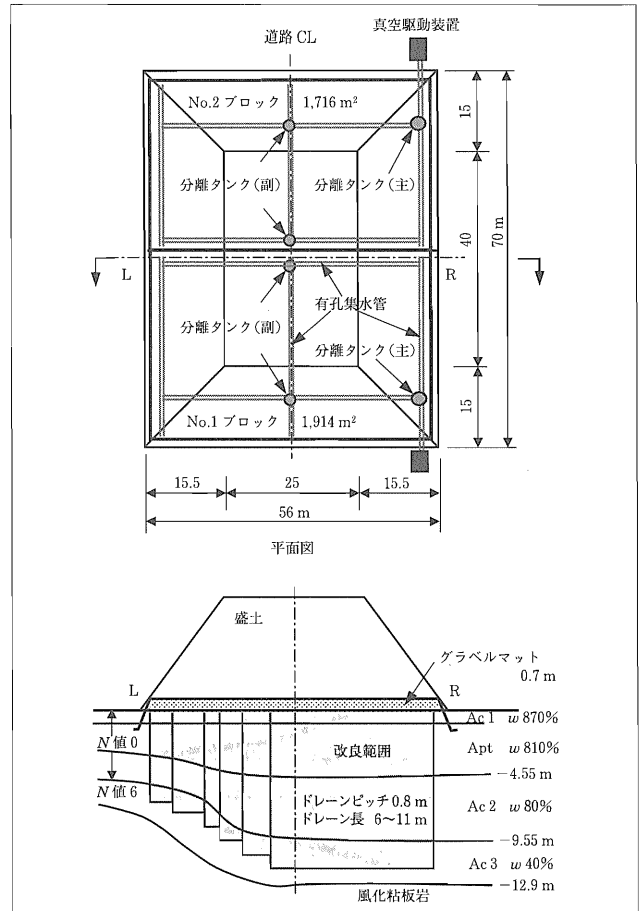


図-5 施工概要



写真-2 主分離タンクの設置状況



写真-3 試験盛土完成状況（高さ約8.5m）

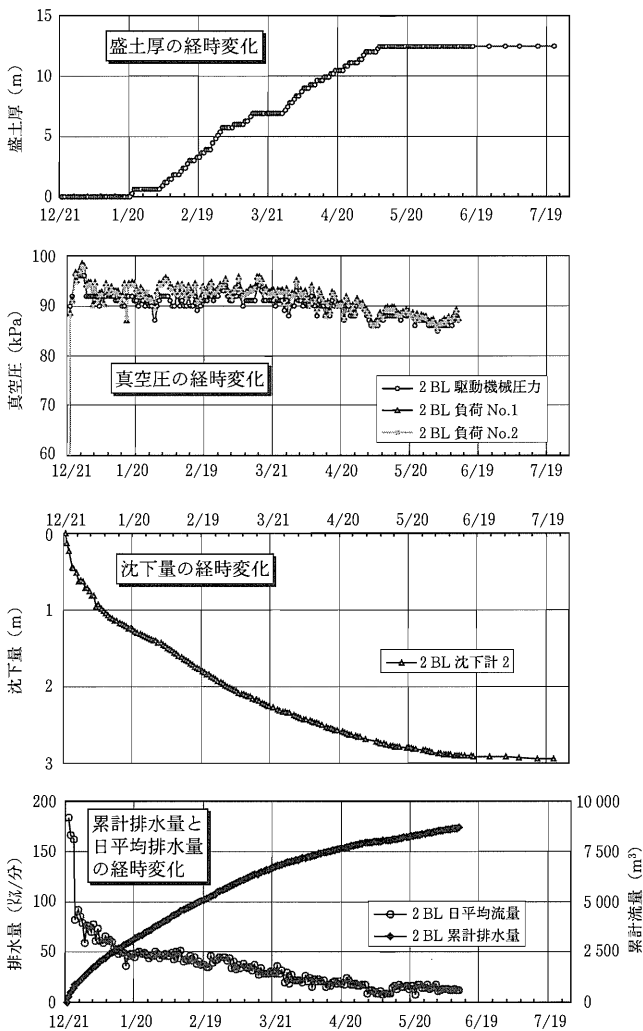


図-6 施工結果 (No. 2 ブロック)

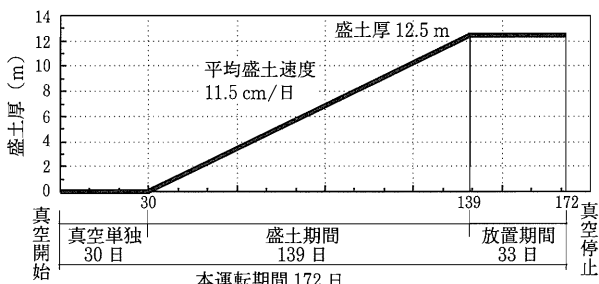


図-7 試験盛土の工程概要

m と、18.9 cm/日の盛土速度で施工した。

盛土完了後は、真空圧密を 33 日間継続して施工を終了したが、真空停止後の沈下はほぼ落ち着いている。このことから、高い真空圧を維持できたことは、残留沈下の低減にも効果があったと考えられる。今後は設計計算などとの比較検討により、気水分離システムの効果を定量的に検証していく予定である。

## 5. 新しい改良型真空圧密工法の課題

新しい気水分離型システムにより真空圧密工法の最

大の課題であった高い真空度の確保が達成できた。ただ、この高い真空度が地盤改良効果に与える影響について、定量的な評価が得られるまでの十分な実績はまだ得られていない。しかし、高い真空度の実現は地盤に載荷できる真空圧のコントロールを容易とする。したがって、今後この制御技術を確認することにより、改良面積単位の拡大、効率的真空運転、圧密制御、周辺変形抑制、といった真空圧密の特性を生かした地盤改良が可能となるであろう。

## 謝 辞

この報文をまとめるに際し、塩野敏昭氏 (丸山工業) の学位論文「真空圧密工法の適用性とドレーン内に生じる気泡の影響に関する基礎的研究」より一部引用させて頂きました。ここに、記して感謝致します。

JCMIA

## 《参考文献》

- 1) 石原公明, 大野睦雄, 島 博保, 中熊和義: 真空圧密工法による地盤改良—N&H 強制圧密脱水工法—, 建設の機械化, No. 603, pp. 16-22, 1999. 11
- 2) 三反畑 勇, 市川尋士, 久保正顕, 吉田貴志: 軟弱地盤上の道路盛土への真空圧密工法の適用例, 基礎工, vol. 30, no. 10, pp. 60-64, 2002. 1
- 3) 真空圧密技術協会: N&H 強制圧密脱水工法—改良型真空圧密工法—「技術資料」第 1 回改訂版, 2002. 10
- 4) 梅崎健夫, 塩野敏昭, 永山 勝, 有田良治, ニノ宮秀彦, 林 宏親: 軟弱地盤改良における真空圧密工法の適用性, 第 44 回地盤工学シンポジウム, pp. 217-222, 1999. 11
- 5) 三反畑 勇, 松本江基, 佐藤善栄, 中熊和義, 市川尋士: 真空圧密工法を併用した道路盛土の周辺地盤への影響について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, III-597, 2003. 9

## 【筆者紹介】

市川 尋士 (いちかわ ひろし)  
丸山工業株式会社  
取締役



横山 勝彦 (よこやま かつひこ)  
清水建設株式会社  
土木事業本部  
技術第 1 部課長



三反畑 勇 (さんだんばた いさむ)  
株式会社間組  
技術・環境本部  
技術研究所  
主席研究員

