

軟弱地盤における変状対策に関する研究（その2）

—変位吸収法のメカニズムと実用設計手法—

伊藤 智治 西林 清茂
上野 孝之 高橋 真一

Measures Against Deformation of Soft Ground (Part 2)

—Practical Design for Utilizing the Deformation Absorption Mechanism—

Tomoharu Ito Kiyoshige Nishibayashi
Takayuki Ueno Shinichi Takahashi

Abstract

Construction operations such as driving piles and Deep Mixing Method can cause volume increase and force. This can disturb the surrounding ground and affect nearby existing structures. The deformation absorption mechanism can be effectively used to prevent this disturbance. However, the design which includes the installation of absorption holes still has many unsolved problems.

This report describes a new design for utilizing this mechanism. We carried out an elasto-plastic analysis using modified Cam-Clay models to examine deformation absorption effect which depends on the distance between volumetric changes the absorption holes, the soil strength, and the volumetric changes produced in executing the work. As a result, in order to obtain the required absorption effect, it is necessary to set the distance to correspond to the volumetric changes, soil strength, etc., and the distance to be set could be determined. In addition, we propose a practical design using a nomogram to determine the distance of 60 cm-diameter absorption holes, which are often used in actual constructions.

概 要

変位吸収法は、既設構造物に近接して地盤内に新たな体積増加や力を発生させる杭や深層混合処理工法などを施工する場合に、周辺地盤の変状防止に有効な対策工法であるが、吸収孔の配置など、設計手法に未解明な点が多い。

この報告は、変位吸収法の設計手法の確立を目的として、修正 Cam-Clay モデルを用いた弾塑性解析を行い、吸収孔設置間隔や地盤強度、施工時に発生する体積変化量の違いによる変位吸収効果を検討した。その結果、所定の吸収効果を得るためには、体積変化量や地盤強度などに対応して設置間隔を設定する必要があり、その設定法を定量的に把握した。また、実際工事で多用される $\phi 60$ cm の吸収孔を対象として、ノモグラムを用いた実用設計手法を提案する。

1. はじめに

建設工事に伴う近接構造物の変状防止は、工事遂行上最も重要な事項の一つである。変位吸収法は、工事区域と近接構造物の間に周辺地盤より変形しやすい孔や溝を設けて、地盤改良工事や盛土工事、杭打工事等により発生する地盤変位を吸収する原理に立脚している変状防止対策工法である。これまで筆者らは、変位吸収法を適用した現場調査、模型実験等を行い、工法確立の研究を進めてきている¹⁾。

これまで、橋台変状対策やトンネル変状対策に適用し、変位吸収法の効果を確認している²⁾が、吸収孔（溝）の配置等に関する適切な設計手法はまだ確立されておらず、前例にならって配置等を決定しているのが現状である。

この報告は、効果的な吸収孔の配置等の設計手法を確

立するために、深層混合処理工法施工時の変状対策を想定して、変位吸収孔の挙動特性を数値解析的に検討するとともに、吸収孔の配置と地盤強度を設計パラメータとする実用設計手法を検討したものである。

2. 解析方法

過去の工事例から、吸収孔の変位吸収特性を支配する要因は、地盤条件では地層構成と各層の土質特性、特に強度・変形特性、吸収孔条件では吸収孔の形状、大きさ、そして吸収孔配置条件では設置位置（既設構造物および新規工事位置との関連）、設置間隔、吸収孔数等が考えられる。しかし、これらすべての要因を組合せて解析を行うのは現実的ではない。そのため、この報告では実用的な適用範囲を考慮し、次のような解析条件の簡略化を図った。

表-1 解析に用いた要因一覧

地盤条件	
対象地盤：粘土地盤	
層構成：単一層，層厚1m，土被厚10m	
地盤強度 q_u ：0.3, 0.4, 0.5 kgf/cm ² 相当	
吸収孔条件	
円形，径 60 cm	
吸収孔設置位置条件	
荷重位置と吸収孔の離れ：2 m	
設置間隔：0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9 m	

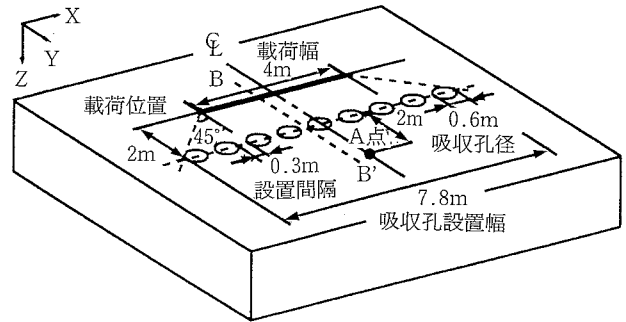


図-2 解析モデルの吸収孔周辺部（設置間隔 0.3 m）

表-2 入力定数（地盤強度 $q_u=0.5$ kgf/cm²）

γ_t (tf/m ³)	M	λ
1.87	1.26	0.14
κ	K_0	ν
0.01	0.63	0.39

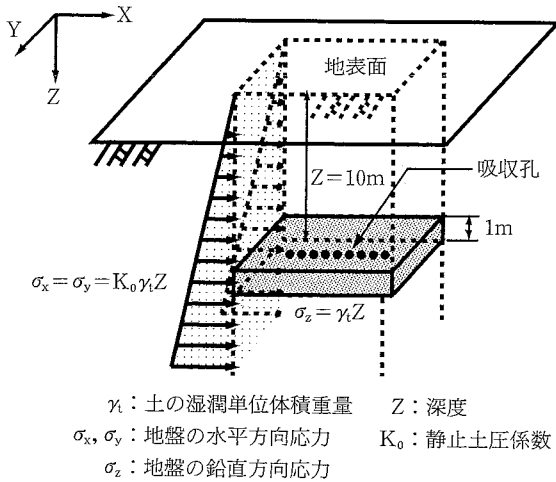


図-1 解析対象地盤

モデル地盤は、図-1 に示すような深さ 10 m，層厚 1 m の粘土地盤を対象として，吸収孔設置間隔や地盤強度，施工時に発生する体積変化量の影響を検討した。解析条件の一覧を表-1 に示す。

図-2 に，吸収孔設置間隔 0.3 m の解析モデルの吸収孔周辺部を示す。モデルの大きさは，32 m (X) × 24 m (Y) × 1 m (Z) とした。20 節点要素を用い，節点数は 4,560，要素数は 579 である。構成則は修正 Cam-Clay モデルを用いた。表-2 に，地盤強度 $q_u=0.5$ kgf/cm² の時を例にとり入力定数を示す。

荷重方法は，深層混合処理工法による地盤改良時の注入圧力によって，地盤が側方に押し出される現象を表現するため，水平方向に等分布荷重を与える方法とした。なお，解析対象の深さ 10 m の粘土地盤では，水平方向の変位が卓越して発生すると考えられるので，Z 方向（鉛直方向）の変位は上下面とも固定した。

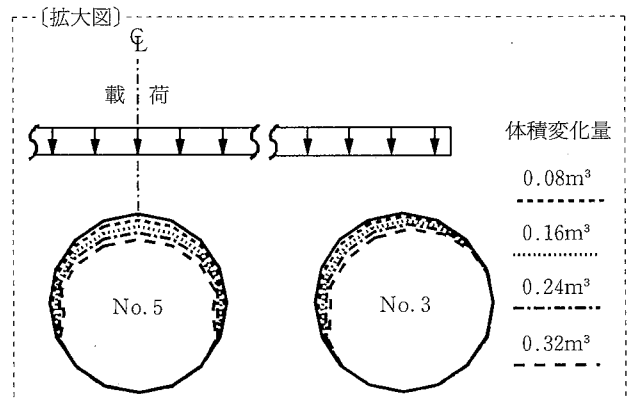
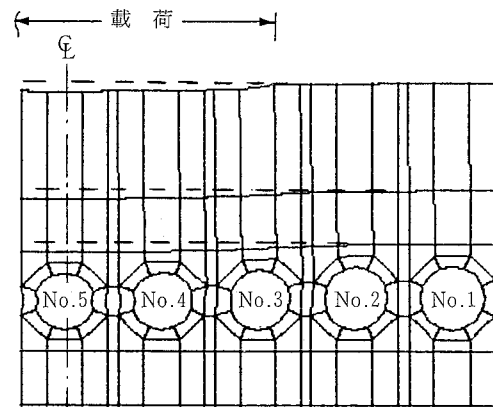


図-3 吸収孔周辺部の変形図（孔 No. 3 と No. 5）

3. 吸収孔の変位吸収メカニズム

地盤強度 $q_u=0.5$ kgf/cm²，吸収孔設置間隔 0.3 m の解析結果を示す。

図-3 に，荷重荷重時に荷重位置で生じる体積変化量（以後，体積変化量と称す）が 0.32 m³ の時の吸収孔周辺部の変形と，各体積変化量に対応した吸収孔 No. 3，No. 5 の形状変化を拡大して示した。体積変化量の増加に対応して各吸収孔が変形している。荷重中心に位置する吸収孔 No. 5 は，荷重位置から見た遠方側以外の荷重側および両側面が変形している。これに対し荷重中心から離れた吸収孔 No. 3 は，荷重側および荷重中心側の片側側面のみが変形しており，吸収範囲の差が認められる。

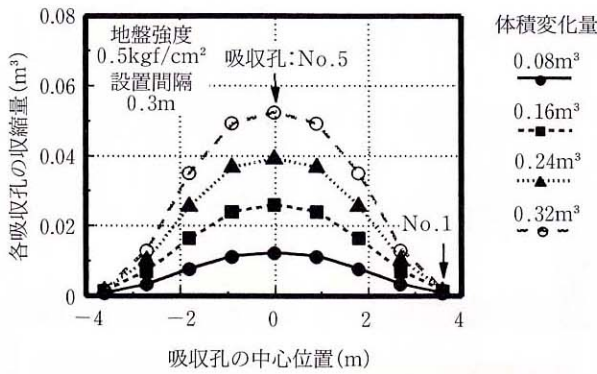


図-4 吸収孔の中心位置と各吸収孔の収縮量

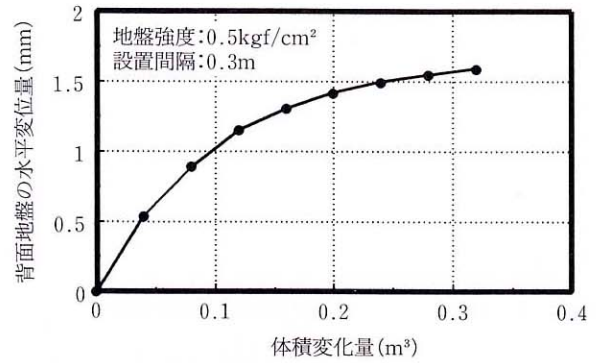


図-6 体積変化量と吸収孔背面地盤の水平変位量

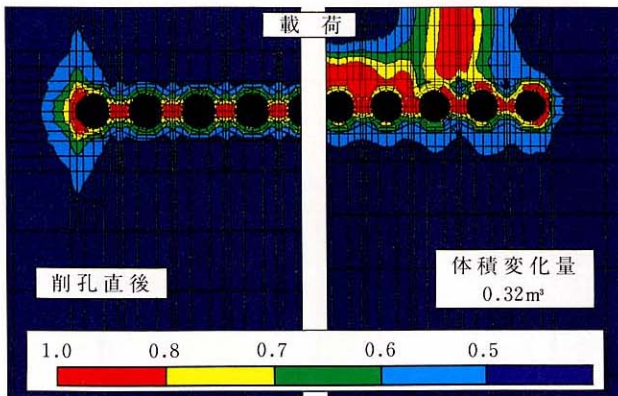


図-5 吸収孔周辺部での応力比分布 (吸収孔設置間隔 0.3 m)

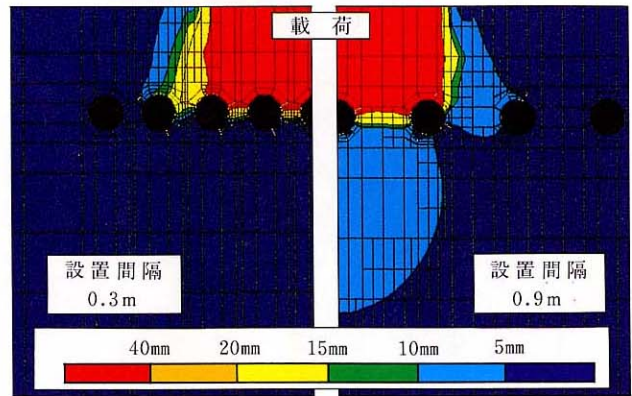


図-7 吸収孔設置間隔の変化による水平変位分布 (体積変化量 0.32 m³)

図-4に、各吸収孔の収縮量を示す。载荷中心に位置する吸収孔 No. 5 の収縮量を最大として载荷中心から離れるに伴って正規分布状に小さくなっており、载荷中央部の3つの吸収孔の収縮量が全収縮量の約60%と大部分を占めている。载荷端部から45°の位置にある吸収孔 No. 1 にはほとんど収縮していない。このことから、载荷による体積変化量を有効に吸収できる範囲は载荷両端から45°以内であることがわかる。

図-5に、吸収孔の削孔直後と体積変化量0.32 m³の時の八面体せん断応力 (τ_{oct}) と、同じ平均主応力 σ_m における限界状態での八面体せん断応力 (τ_{oct}^* : *は限界状態を示す) との比 (以後、応力比と称す) を用いて吸収孔周辺部の応力状態を示す。この応力比は、1.0に近いほど地盤が破壊に近く、1.0の時には地盤が限界状態であることを示す。図より、吸収孔の削孔直後には各吸収孔の間ですでに破壊に近く、载荷荷重が加わると吸収孔周辺に破壊域が拡大していることがわかる。この破壊域の拡大によって吸収孔を小さくするような大きな変形が生じやすくなり、载荷によって生じた体積変化を吸収していると考えられる。

図-6に、载荷によって生じた体積変化量と吸収孔背面の代表点 (図-2に示したA点) でのY方向の変位量 (以後、吸収孔背面地盤の水平変位量と称す) の関係を示す。载荷初期には、吸収孔背面地盤の水平変位量は体積

変化量に比例して大きくなり、背面地盤へ及ぶ変位を完全には取り除くことはできていない。これは、载荷初期には吸収孔周辺で発生する応力も小さく、吸収孔を顕著に収縮させるまでには至らず、背面地盤へ“すり抜け”しているためである。ただし、背面地盤へすり抜けた変位量は小さい。しかし、体積変化量が大きくなると、吸収孔背面地盤の水平変位量の増加割合は小さくなり、吸収孔の吸収効果がより一層発揮されていることがわかる。

4. 効果的な吸収孔設置間隔の設計法

4.1 体積変化量と効果的な吸収孔設置間隔の関係

地盤強度 $q_u = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を例にとり、吸収孔設置間隔の影響の検討結果を示す。

図-7に、吸収孔周辺部でのY方向の変位分布を吸収孔設置間隔が狭い場合 (設置間隔 0.3 m) と広い場合 (設置間隔 0.9 m) を並べて示す。吸収孔設置間隔によらず、载荷によって生じた体積変化量が、吸収孔まで距離減衰や分散することなく、ほぼ直線的に伝達されていることがわかる。設置間隔が狭い場合、吸収孔背面地盤に水平変位がほとんど生じていない。これに対し設置間隔が広い場合、载荷中心線を最大として吸収孔間を変位がすり抜けるかのように吸収孔背面地盤に水平変位が発生している。

図-8に、载荷中心付近の隣り合う吸収孔間 (図-2

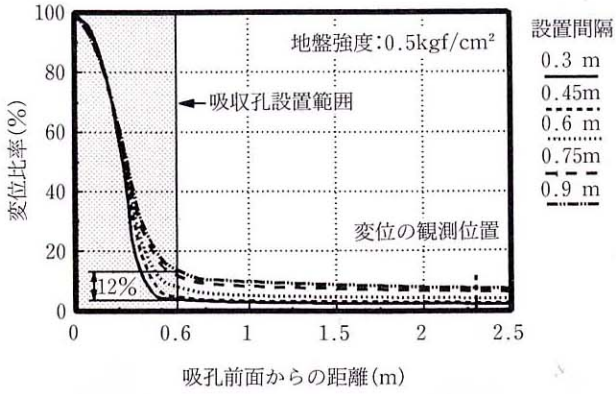


図-8 吸収孔前面からの距離と変位比率
(体積変化量 0.32 m³, B-B'断面)

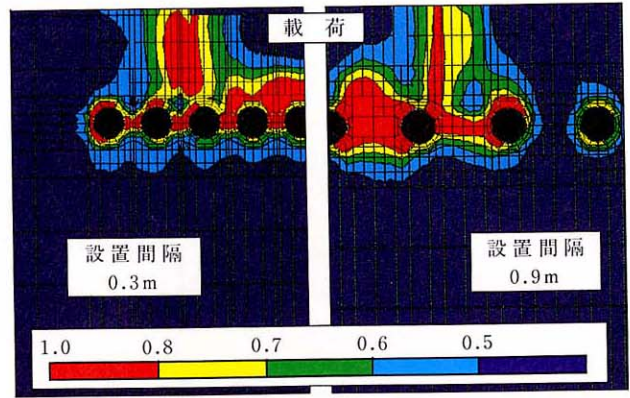


図-10 吸収孔設置間隔の変化による応力比分布
(体積変化量 0.32 m³)

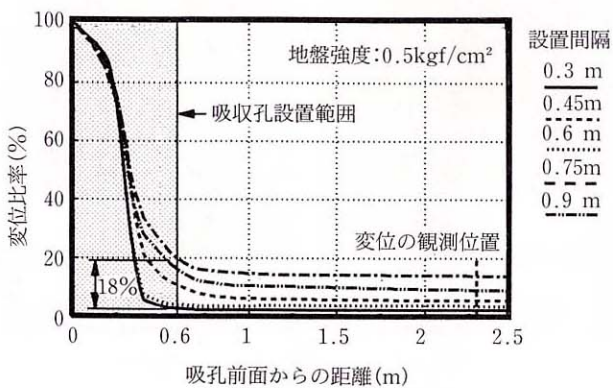


図-9 吸収孔前面からの距離と変位比率
(体積変化量 0.32 m³, 荷端部)

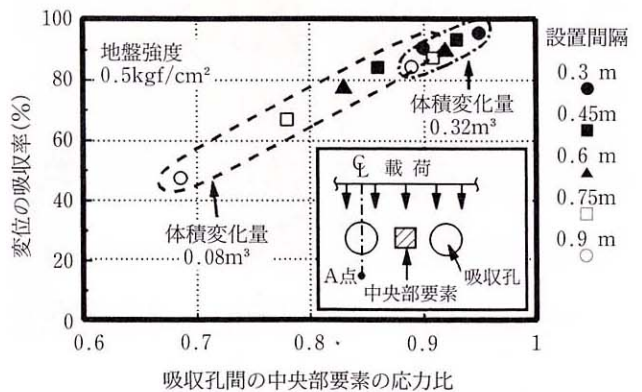


図-11 吸収孔間の中央部要素の応力比と
変位の吸収率

に示した B-B'断面)の吸収孔前面からの距離と変位比率(各位置での変位量/吸収孔前面での変位量)の関係を示す。吸収孔設置間隔によらず、図中の網掛け部で示した吸収孔設置範囲(吸収孔に挟まれた範囲)で、変位の減少が大きい。これは、吸収効果の発揮される吸収孔設置範囲での応力状態が影響している。すなわち、両側の吸収孔をつぶすような変形が生じやすく、その結果として吸収効果が得られたと考えられる。なお、今回設定した設置間隔の違いにより約12%の吸収効果の差が見られる。

図-9は、荷端部での図-8と同様の関係である。今回設定した吸収孔設置間隔の違いにより、約18%の吸収効果の差が見られる。ただし、図-7で見たとおり、吸収孔背面地盤での水平変位量の絶対値は、荷中心線を最大として左右端部に離れるに従って小さく分布している。また、図-8と図-9より、設置間隔や荷中心からの距離によらず、吸収孔背面での変位比率は変化が少なくほぼ一定となっており、変位の観測点A点で、吸収孔背面地盤の水平変位量を評価しても妥当であることを示している。

次に、図-7～9で示した水平変位の状態を地盤の応力の観点から検討を行う。図-10に、吸収孔周辺部での応力比の分布を吸収孔設置間隔が狭い場合(設置間隔0.3 m)と広い場合(設置間隔0.9 m)について並べて示す。

設置間隔が広いほど、隣り合う吸収孔間から吸収孔背面地盤へ応力がすり抜けている様子が見られる。

吸収効果の差(吸収孔背面地盤に及ぶ水平変位量)に特に関係が深いと考えられる隣り合う吸収孔間(B-B'断面)の中央部にある要素の応力比と、変位の吸収率(中央部にある要素での荷側の変位増分と吸収孔背面側にすり抜けなかった変位増分の割合)の関係を図-11に示す。体積変化量が小さい0.08 m³の時は、応力比は吸収孔設置間隔に依存し、設置間隔が広い場合応力比が小さく変位の吸収率も低い。設置間隔が狭くなれば、応力比が大きくなって変位の吸収率も高い。それに対し体積変化量が大きい0.32 m³の時は、応力比が大きく塑性域に近い。したがって、変位の吸収率も高い。

図-12に、吸収孔設置間隔と吸収孔背面地盤の水平変位量との関係を示す。体積変化量0.08 m³の時には設置間隔0.65 m、また体積変化量0.32 m³の時には設置間隔0.55 mより狭い設置間隔では、吸収孔背面地盤で発生する水平変位量が小さく有効な吸収効果が得られている。このように、吸収効果が顕著に出始める吸収孔設置間隔を“臨界設置間隔”と称することにする。吸収孔背面での変位の発生は、吸収孔が荷に伴う変位を吸収できなかった変位が、隣り合う吸収孔間から吸収孔背面に伝達される、いわゆる“応力のすり抜け現象”であると

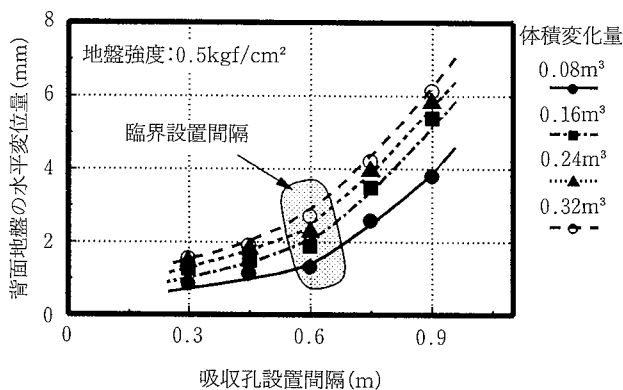


図-12 吸収孔設置間隔と吸収孔背面地盤の水平変位量

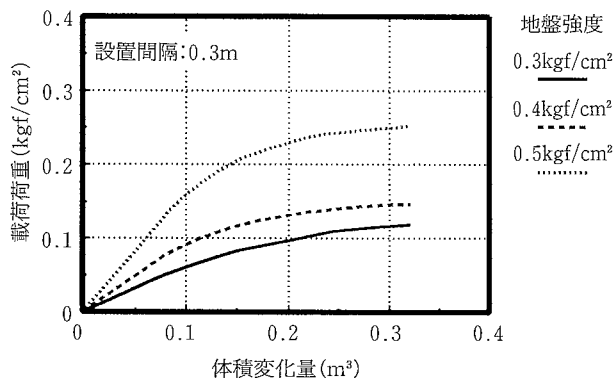


図-15 体積変化量と載荷荷重

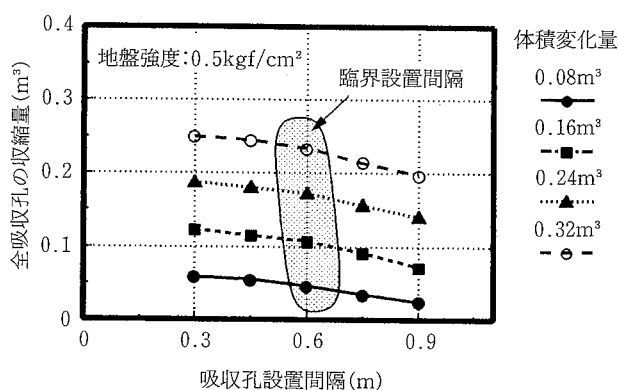


図-13 吸収孔設置間隔と全吸収孔の収縮量

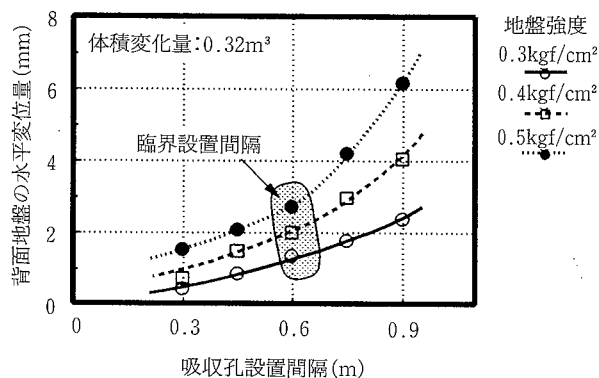


図-16 吸収孔設置間隔と吸収孔背面地盤の水平変位量

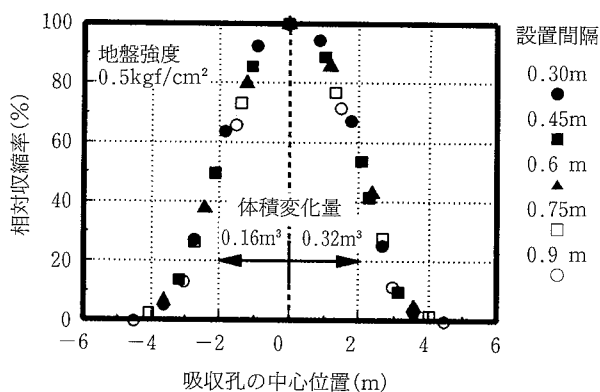


図-14 吸収孔の中心位置と相対収縮率

考えられる。吸収効果が顕著に出始める“臨界設置間隔”以内であれば、吸収孔が効果的に働き、背面地盤への応力伝達を減少させ、吸収孔背面地盤に発生する水平変位量も小さくなることを示している。また、臨界設置間隔は、体積変化量の増加とともに、小さくなる傾向を示している。

図-13に、吸収孔設置間隔と全吸収孔の収縮量の関係を示す。体積変化量が等しい場合、設置間隔が狭い方が吸収孔の収縮量は大きい。これは、吸収孔背面地盤に発生する水平変位量と対応した結果となっている。

ところで吸収孔の収縮量は、載荷中心線上が最も大き

く、載荷中心線から離れるにしたがって小さくなっているのは、図-4に示したとおりであるが、この吸収孔の収縮量の分布に、吸収孔設置間隔による差が生じるのであろうか。図-14に、設置間隔が異なる場合の吸収孔の中心位置と相対収縮率の関係を示す。ここに相対収縮率とは、各吸収孔の収縮量と最も収縮量の大きな載荷中心線上の吸収孔の収縮量との百分率である。設置間隔や体積変化量の違いに関係なく、ほぼ等しい分布形状となっている。各吸収孔の収縮量の分布形状は、荷重載荷場所との位置関係に強く依存しており、載荷中央部を狭く、載荷端部を広く吸収孔を設置することが有効であることがわかる。

以上のことから、体積変化量に関して、効果的な吸収孔設置間隔は、

- ① 許容変位量以内に変位を収めるには、体積変化量が大きくなるほど、設置間隔を狭くする必要がある。
 - ② 臨界設置間隔は、体積変化量が大きくなると、小さくなる傾向がある。
- また、体積変化量の違いに関係なく、効果的な吸収孔設置間隔は、
- ③ 吸収孔の載荷中心線上からの距離による吸収能力の違いを勘案して、載荷中央部を狭く、載荷端部を広くすることを配慮することが有効であることがわかる。

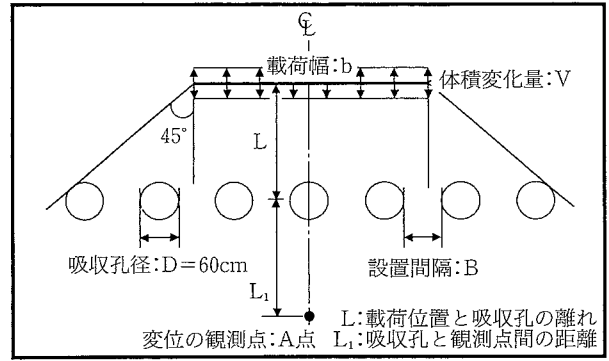
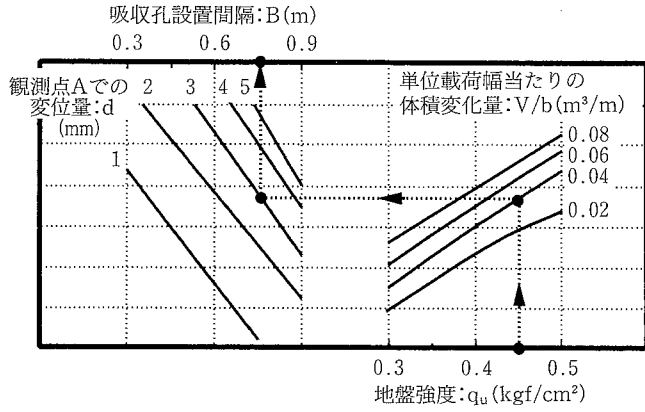


図-17 実用設計手法（ノモグラム）

4.2 地盤強度と効果的な吸収孔設置間隔の関係

図-15に、吸収孔設置間隔0.3mにおける体積変化量と載荷荷重の関係を示す。同一載荷荷重に対しては、地盤強度が小さいほど、体積変化量が大きくなり、地盤強度と体積変化量は反比例の関係が認められる。この関係は、他の吸収孔設置間隔でも同様である。

図-16に、体積変化量 0.32 m³における吸収孔設置間隔と吸収孔背面地盤での水平変位量の関係を示す。吸収孔背面地盤の水平変位量は、その差は小さいものの地盤強度に比例して、大きくなる傾向にある。図-15で示したように、同一体積変化量であれば、地盤強度が大きいほど載荷荷重も大きくなることから、吸収孔背面地盤への応力のすり抜けが大となって水平変位量が大きくなったと解釈できる。また、臨界設置間隔は、地盤強度が大きくなるほど、小さくなる傾向がある。

以上のことから、地盤強度に関して、効果的な吸収孔設置間隔は、

- ① 許容変位量以内に変位を収めるには、地盤強度が大きくなるほど、設置間隔を狭くする必要がある。
 - ② 臨界設置間隔は、地盤強度が大きくなると、小さくなる傾向がある。
- ことを配慮することが有効であることがわかる。

4.3 変位吸収法の実用設計手法の提案

体積変化量と、地盤強度をパラメータとする効果的な吸収孔設置間隔について検討を行い、効果的な吸収孔設置間隔は、許容変位量以内に変位を収めるには、体積変化量や地盤強度が大きくなるほど狭くする必要があるとの結果を得た。これらの結果を実際工事で多用されるφ60cmの円形吸収孔を対象として、地盤強度 (qu)、工事により発生する単位載荷幅当たりの体積変化量 (V/b)、変位の観測点Aでの許容変位量 (d)、吸収孔設置間隔 (B) の関係を図-17に示すノモグラムを用いた実用設計手法としてまとめた。この際、吸収孔設置によって背面の守るべき構造物の位置条件等が問題になる。しかし、

- ① 載荷位置と吸収孔の離れ (L) では、変形の距離減衰や応力分散が少なく、載荷幅両端から45° 範囲内に吸収孔を設置すれば、載荷位置の違いによる吸収効果の差

異は小さい。

- ② 複数の吸収孔間をすり抜けた変位は載荷中心線を最大として分布し、吸収孔と観測点間の距離 (L1) によらずほぼ一定となる。

したがって、変位の観測点としたA点は、吸収孔背面地盤の変位評価を普遍化できると考えられる。この図を用いると、例えば地盤強度が qu=0.45 kgf/cm²の地盤で、地盤改良により発生する単位載荷幅当たりの体積変化量が 0.04 m³/m に対して変位を 3 mm 以内に収めたいとすると、適切な吸収孔設置間隔は、0.8 m 程度である。

このように、このノモグラムを用いて実際工事における適切な吸収孔設置間隔の目安を知ることができる。

5. まとめ

この報告は、変位吸収孔の挙動特性を数値解析的に検討するとともに、吸収孔の配置と地盤強度を設計パラメータとする実用設計手法を検討し、以下の結果を得た。

効果的な吸収孔設置間隔は、

- ① 許容変位量以内に変位を収めるには、体積変化量や地盤強度が大きくなるほど、設置間隔を狭くする必要がある。
- ② 吸収効果が顕著に出始める“臨界設置間隔”が存在し、この臨界設置間隔は、体積変化量や地盤強度が大きくなると、小さくなる傾向がある。

上記の解析結果をもとに、

- ③ 実際工事で多用される φ60cm の吸収孔を対象として、適切な吸収孔設置間隔を求めるためノモグラムを用いた実用設計手法を提案した。

参考文献

1) 柴田, 西林, 上野: 軟弱地盤における変状対策に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No.46, p.63~68, (1993)

2) 西林, 渡辺, 他: 土質工学会編, 土質基礎工学ライブラリ-34, 近接施工, p. 323~374, (1989)