

水平方向噴射攪拌工法における施工時地盤内圧力の設計と管理に関する検討

小田恵之輔¹・鍛冶茂仁²・居相好信³・中島浩平⁴・中川浩二⁵

¹正会員 (株)奥村組 電算センター (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²正会員 工博 鹿島建設(株) 土木技術本部技術部開発課

³正会員 (株)大林組 東京本社土木技術本部技術第二部

⁴柏山工業(株)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

地盤改良工法の一つである高圧噴射攪拌工法は、従来鉛直方向の施工が主に行われてきた。水平方向への施工法を確立するための一つの課題が、周辺地盤や近接構造物への影響を未然に防ぐことであると考え、強制排泥装置を有する新しい工法の実証的な検討を行った。影響を与える原因は噴射攪拌に伴い地盤内の応力を変化させることにあると考えられるが、施工時に地盤を一時的に液化させるため応力がある程度変化することは避けられない。実際の施工では地盤内圧力を適切な値に維持することによって影響を最小にすることを目標にして、その適切な圧力を数値解析と現地実験によって検討した。これらの結果を用いて、施工時に維持すべき適切な圧力とその圧力を維持する方法について考察した。

Key Words : soil improvement, jet mixing method, horizontal direction, proper design soil pressure

1. はじめに

地盤改良工法の一つである高圧噴射攪拌工法は10 cm程度の小さな直径のロッドを用いて直径が2m以上の大きな造成体が作成可能であること、狭い作業領域や構造物への近接施工も可能であること、さらに対象とする地盤にあまり左右されずに比較的信頼性の高い造成体が作成可能である等の特徴から、今日まで多くの現場で実用に供されてきた。

従来、鉛直方向の施工が主として行われてきたが近年、水平方向に施工可能な噴射攪拌工法(RJFP: Rodinjet fore piling工法等)が開発されNATMにおける先受工法として水平方向に施工¹⁾する場合が見られる。

水平施工においては、その機構上造成体の延長距離が鉛直方向の施工に比較して短く、造成径が小さくなるなどの課題がある。筆者らは水平施工に関するこれらの課題を解決するためには排泥機構の改良が必要であるとして実証的な研究²⁾を行い、強制排泥装置を特徴とする高圧噴射攪拌工法(以下本工法と称す)の実用化を検討してきた。また本工法は実際の長距離水平施工^{3), 4)}にもすでに数件採用されている。

水平施工のもう一つの課題は土被りの浅い条件下の施工で造成に伴う地盤の変形や近接構造物への影響を未然に防ぐことである。たとえば未固結地山のトンネル掘削において地表面の沈下の防止を目的として従来の水平方向噴射攪拌工法が実際に用いられているが^{5), 6)}この場合には地山の変形に対して細心の注意が払われている。

造成に伴って周辺地盤や近接構造物へ影響を与えるのは地盤内応力を変化させることにあると考えられ、なるべくこの変化を小さくすることが望ましい。つまり、実際の施工時には地盤内圧力を適切な値に維持することが必要になる。

筆者らは、適切な圧力として施工時に維持すべき圧力、つまり設計圧力の検討を数値解析で行うとともに、現地実験によって検証を試みた。この結果有用と思われる知見を得たので報告する。

2. 工法の概要

強制排泥装置を特徴とする本工法は高圧ジェットを用いて地盤を切削し、硬化材と切削した土砂を混合攪拌して地盤を強化する高圧噴射攪拌工法の一つである。

3. 水平施工における周辺地盤への影響

噴射攪拌工法はトンネル坑口の防護や地表部の変位防止あるいはトンネル切羽の崩壊防止ばかりでなく、軟弱地盤におけるシールド工事の近接構造物に対する防護、あるいは道路や軌道直下の工事に対する防護、さらに都市域において錯綜する地下の工事に対する近接構造物の防護等、本工事に対する補助工法として利用されることが多い。このような場合、補助工法の施工による周辺地盤や近接構造物への影響は極力減少させる必要がある。

高圧噴射攪拌工法では造成時に地盤が一時的に液化するため、造成以前に作用していた地盤内応力は必然的にある程度変化することは避けられない。周辺地盤や構造物に影響を与える主たる要因は地盤内応力を変化させることにあると考えられるので、噴射攪拌にともなって周辺地盤への影響を皆無にすることは困難としても、施工時に地盤内圧力を適切な値に維持することによってこの影響を少なくする方法が考えられる。

4. 地盤内圧力の設検討

造成体の施工による周辺地盤への影響を少なくするために未固結造成体が維持すべき圧力、すなわち施工時の設計圧力に関する指針を得るとともに、施工時の圧力の過不足に対する周辺地盤への影響の程度を見るために、以下に示すような現場で施工可能と思われる範囲の造成体の各種条件に関してパラメトリックに解析的検討を行った。

(1) 計算方法

数値解析は2次元FEMを用いて①造成体の断面形状に関する検討、②土被り厚に関する検討、③造成体断面の大きさに関する検討を行った。さらに、後述する現地実験のシミュレーションを含めて3次元逐次解析を用いて、④造成体の延長長さに関する検討を加えて4項目について検討した。

すべての計算で地盤は均一な弾性体と仮定し、弾性係数は後述の実験地盤のN値(2~7)から推定した。すなわち、ここでは宇都⁷⁾が示したN値と横方向地盤変形係数Eとの関係を表す $E=7N$ を用いてN値を5として $E=35\text{kgf/cm}^2$ を用い、またポアソン比は0.4と仮定した。

さらに地盤の単位体積重量は 1.6tf/m^3 とし、未固結造成体の単位体積重量は 1.5tf/m^3 とした。計算では造成体と現地盤の境界は硬化材の漏洩や地下水の浸透がなく圧力のみ伝達すると仮定している。

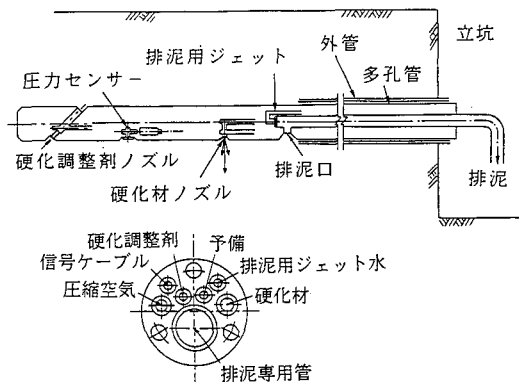


図-1 先端の造成機と多孔管

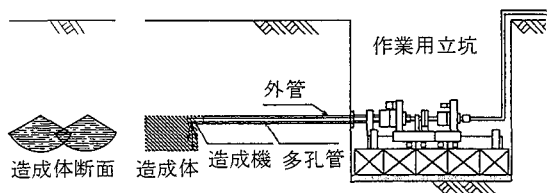


図-2 水平施工の概要と造成体

従来、高圧噴射攪拌工法は鉛直方向の施工が多く切削で生じた余剰の土砂等をロッド周囲の間隙を通過させて地上に自然排出させている。このため、施工延長が長くなれば地盤内圧力が上昇しジェットによる地盤の切削効率を低下させるだけでなく、水平施工の場合は地盤内の圧力の変動が周辺地盤へ影響を与える要因となる可能性があった。

本工法では地盤内圧力を安定させるためには排泥を常に適切な量に維持することが必要であると考えて図-1に示すように専用の多孔管ロッドの内部に排泥専用管を設けた。そして高圧の排泥専用の水ジェットを用いて噴射攪拌時に用いられた圧縮空気を含む余剰排泥の強制的な排除を行うこととした。

水平方向への施工は図-2に示すように、多孔管ロッド先端部にとりつけた造成機を外管を利用して地盤内の所定の位置まで挿入した後、セメントミルクを主成分とした高圧の硬化材に圧縮空気を沿わせて噴射させる。造成機は回転ではなく揺動(左右180°以内の正逆の半回転の繰り返し)を行い硬化材を噴射しながら所定の速度でロッドを引き抜いて造成を行う。造成機には噴射攪拌により液化した地盤内の圧力を計測するセンサーを取り付けて圧力を常時監視し、噴射時の地盤内圧力を適切な値に維持するため排泥量を調整することを特徴としている。

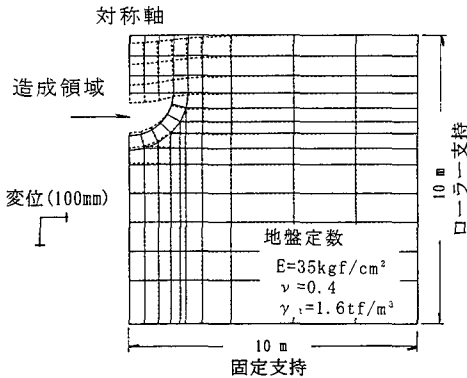


図-3 造成体中心角180° の計算結果の一例

(2) 計算条件と結果

a) 造成体の断面形状の影響

本工法では前述のようにロッドを揺動で施工するため、任意の角度で扇形断面の造成体を作成できる(図-2参照)。ここでは扇形の中心角(60, 90, 120, 150, 180度)をパラメータとして未固結の造成体に加える圧力と地表面変位の関係を検討した。

計算は2次元平面ひずみ状態を仮定し、土被り厚2mで造成体の半径は1.5mとして造成領域の応力を完全に解放し、次に解放した空洞内に単位体積重量が1.5tf/m³の液体を充填した。この状態の沈下量を造成体に作用する圧力が0の場合の沈下量とした。

その後、弾性計算であることから液状の造成体に単位圧力を加え、圧力が0の地盤変位と合成して任意の圧力における地盤の変形を求めた。境界条件は造成体の中心軸を対称軸とし外周部とともにすべてローラー支持とし、下端部は固定とした。

計算結果の一例として造成体の中心角180°の場合の圧力0の状態の変位分布を図-3に示す。

図-4に圧力0の場合の地表面変位量(負は沈下)と造成体中心角の関係を示し、図-5に任意の圧力を作用させた場合の変位を示す。図-5から今回の計算では周辺への影響を最小にする目的から施工時に維持すべき設計圧力が土被り厚2m($\gamma_1=1.6\text{tf/m}^3$)の扇形上端における初期の地盤内応力に近似できるとともに、図-4から造成体の中心角が60~180°の範囲では角度と変位がほぼ比例することがわかる。

さらに、今回の計算条件では適切な圧力に対して0.1kgf/cm²の圧力の過不足が生じれば角度が180°の場合、最大の地表面変位がほぼ10mm程度であることがわかる。なお、圧力値±0.1kgf/cm²は後述するように、現状では本工法の機構上圧力制御範囲に対する一つの目安となる数値である。

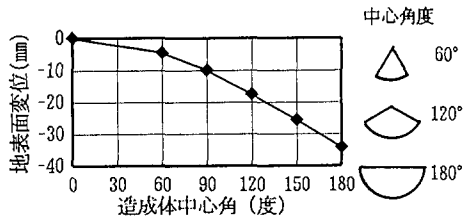


図-4 造成体中心角と直上の地表面変位

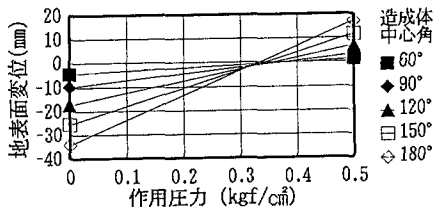


図-5 造成体に加える圧力と地表面変位

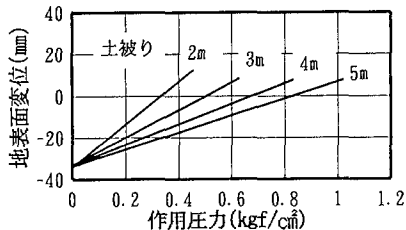


図-6 土被り厚毎の作用圧力と地盤変位

b) 土被り厚の影響

2次元平面ひずみを仮定し造成体の土被り厚(2, 3, 4, 5 m)をパラメータとして地表面の変位を算定した。造成体の断面形状は半径を1.5mの半円形とし、他の計算条件は形状の検討と同様とした。

作用圧力0の場合を含めて任意圧力下の造成体直上の地表面変位(負は沈下)を図-6に示す。計算では圧力0の場合の地表面変位は土被り厚の増加とともにわずかながら沈下も増加する結果になっている。

土被り厚の増加に伴い沈下がわずかに増加する今回の計算結果は円形トンネルの掘削による地表面沈下の解析的な理論解⁸⁾による結果と同じ傾向である。

この計算結果から、それぞれの土被り厚に対する(作用圧力)と(上載圧)の比をとり地表面変位との関係を示す図-7から、設計圧力が造成体上端の土被り圧に近似できることが確認できた。ここで、上載圧は造成体上端の土被りに対するものであり、造成体中心部に対するものより若干小さくなる。

同じ計算結果を用いて作用させる圧力が土被り荷重相当の圧力よりも不足した場合の最大地表面沈下を図-8に示した。同図によれば今回の計算条件では内部圧力が0.1kgf/cm²不足した場合、地表面沈下は

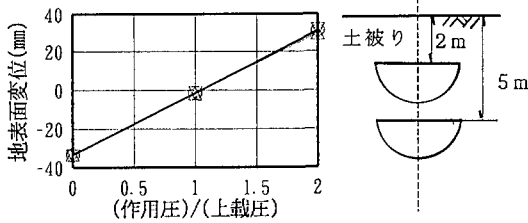


図-7 作用圧力と上載圧の比と地表面変位

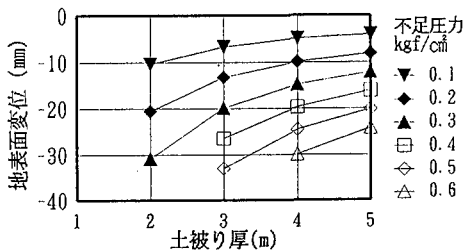


図-8 圧力が不足した場合の地表面変位

土被り厚が2mでは10mm程度であることがわかる。過大な圧力に対しては同じ値が隆起量となる。

c) 造成体の断面の大きさの影響

解析としては土被り厚の検討と同じであるが、造成体の半径をパラメータ (0.5, 1.0, 1.5, 2.0m) として地表面変位の検討を行った。断面形状は半円形で、土被り厚は2mとした。

圧力0における地表面変位 (負は沈下) と造成体の半径の関係を図-9に、任意の圧力を作用させた結果を図-10に示した。図-10から造成体上部の土被り厚に相当する圧力が設計圧として適切であるとともに、前項までの造成体の形状、土被り厚の検討とは若干異なり、図-10から 0.1kgf/cm²の圧力不足が生じた場合、今回の計算条件では実際に施工できる範囲の造成体半径(2m)に対して沈下量が20mm程度になることがわかる。この値は形状と土被り厚の検討で想定された変位の2倍に達している。

本工法で用いる高圧ジェットによる切削長が2m程度に大きくなる地盤は一般的には弾性係数が小さく変形が生じやすいと考えられる。経済的には大きな造成径は効率的であるが、周辺部への影響を避ける立場から余り大きな造成径は有効でないと思われる。

d) 造成過程の3次元解析

後述する現地実験の造成過程をシミュレートする目的と、造成体の延長方向の長さに対する地表面への影響の検討を行うため3次元の逐次変形解析を行った。

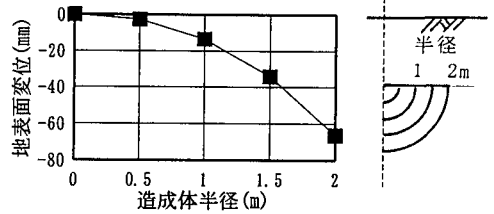


図-9 造成体の大きさと圧力0での地表面変位

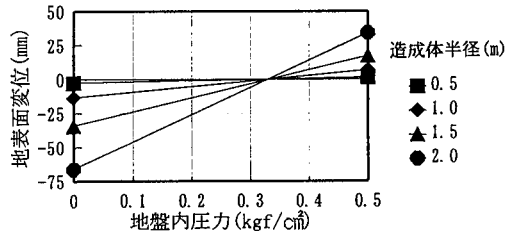


図-10 作用圧力と地表面変位

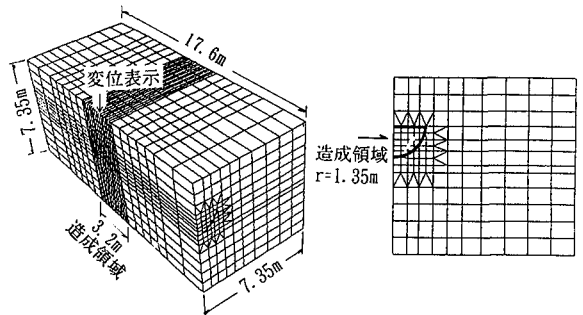


図-11 半円柱状造成体の逐次3次元解析要素分割

計算では半径を現地実験²⁾で得られた造成体のでき型形状の平均的な半径に近似させて1.35mとし半円柱状の造成体を連続して3.2m区間作成することにした。図-11の要素分割図に示すように造成体の片側だけを計算領域として3次元要素でモデル化した。地盤の自重を作用させて地盤の初期応力とし境界条件は対称軸及び外周部はローラー支持とし、底部は固定とした。

造成の過程は造成体の延長方向の20cm区間毎に造成領域の初期応力を解放してから、定まった圧力を加える操作を繰り返した。

造成する過程で加える圧力が0の場合と、作用させる圧力が 0.32kgf/cm²の場合を例として、造成体中心部の地表1点(図-11参照)だけの鉛直変位の計算結果を図-12に示す。この計算では全造成長の3.2m区間が完成すれば変位を図示した直上地盤は沈下するが、造成の進行が1.6mに至るまで微量ではあるが隆起が生じている。

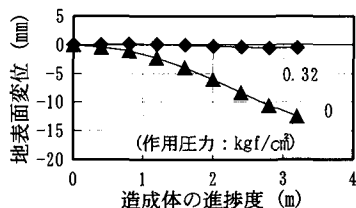


図-12 造成の進行にともなう地表面変位

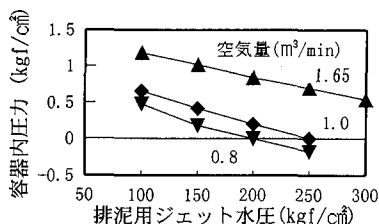


図-13 容器内の圧力と排泥用ジェットの圧力

3次元計算では造成体の前後の切羽方向にも鉛直方向と同じ圧力を加えるが、この圧力は造成以前に作用していた水平方向の圧力よりも大きい。2次元解析で適切と考えられる圧力を水平方向にも作用させた結果、図-11に示した地点に造成体が接近すると地表面は若干隆起し、造成位置が直下を通過すれば沈下が生じる結果になるが、水平方向の圧力が過大である影響はごく少ないことが確認できた。

(3) 計算結果のまとめ

造成体の各種条件に対するパラメータスタディを行った結果、施工時に作用させる設計圧力として造成体上部の土被り厚に相当する圧力が適切であることを確認するとともに、圧力の過不足の影響に関し今回の計算条件の範囲内で以下のことがわかった。

- ・扇形造成体の角度の検討：適切な圧力に対して0.1kgf/cm²程度不足した場合、中心角が180°では地表面の沈下が10mm程度になる。
- ・土被り厚の検討：適切な圧力に対し、0.1kgf/cm²の圧力不足は土被り厚2mの場合、10mm程度の沈下が生じる。
- ・造成体断面の大きさ(半径)の検討：適切な圧力に対して圧力が不足する場合、実際に施工可能な範囲において地表面沈下が20mm程度になる可能性があり、余り大きな造成径は有効ではない。
- ・逐次3次元解析：2次元解析で適切とした圧力を切羽側に水平方向へ作用させても、地表面に与える影響はごく少ない。
- ・圧力の過不足が±0.1kgf/cm²程度生ずれば、条件によっては影響が過大になる可能性も否定できないため、施工時には設計圧力を中心に圧力変動を小さく維持し変形を抑制する必要がある。

5. 設計圧力の維持

(1) 排泥量の調整による設計圧力の維持

造成時の地盤内部の圧力を設計値に保持する手段として本工法では排泥量(排出空気を含む)の制御を行う方法を採用している。圧力が設計値以上に上

昇すれば排泥量を増加させ、逆に圧力が低下すれば排泥量を抑制して圧力を一定に保持することになる。

排泥量の制御は、本工法では造成機に排泥専用のパイプを備え、そのパイプ内で工事用の立坑に向けて高圧ジェット水を噴射し、強制的に排泥を行う排泥装置を備えているので、この排泥用ジェット水の圧力を調節し排泥量を制御する方法が可能となる。

この手法の有効性を確認する目的で、圧力容器を用い実際の排泥とは異なるが、単純な条件として水と空気を用いた実験²⁾を行った。

密閉した容器に、実施工で使用使用する硬化材量と等しい約96l/minの水と、硬化材のジェットに沿わせて噴射する空気を同時に噴射し、排泥専用管から排泥ジェットを用いて排出した場合の容器内の圧力を測定した。

実験結果を示す図-13によれば、同一空気量において排泥用ジェットの圧力と容器内の圧力はほぼ直線的な関係を示した。同図において、本工法で使用している1m³/min(大気圧換算)の空気量において容器内の圧力を0.7から0kgf/cm²に低下させるのに排泥用ジェットの圧力は100から250kgf/cm²まで上昇させている。つまり容器の圧力を0.1kgf/cm²低下させるのに排泥用ジェットの圧力をほぼ20kgf/cm²上昇させることになる。排泥用ジェットの圧力を20kgf/cm²程度の範囲で制御する事は十分可能であるから、少なくとも圧力を0.1kgf/cm²単位で制御することが可能であることが確認できた。

実験では境界条件が明白な密閉した容器内の圧力制御の検討を行ったが、実際の地盤では造成体と地盤の境界はわずかな条件の違いによって一定とは限らない。このため実証実験が必要である。

(2) 設計圧の変動への対応

造成体に加えるべき設計圧力は造成体の作成途中で土被り厚や造成体の形状、地盤などの諸条件に変動がなければ変化させない。ところが、一本の連続した造成体の作成途中において上記の条件が変化するには設計圧力も造成途中で変更しなければならない。この場合の圧力維持方法が必要になる。

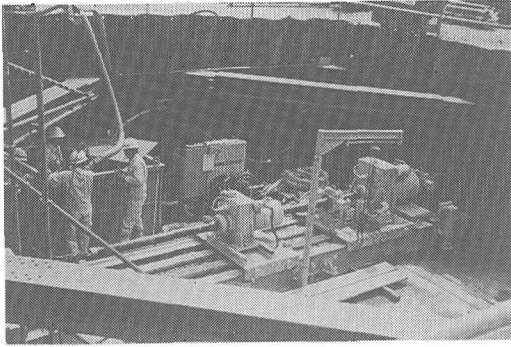


写真-1 立坑内での水平方向造成実験

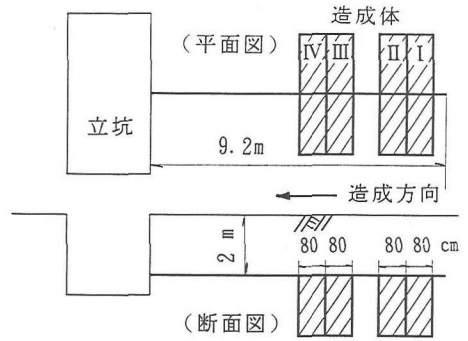


図-14 水平方向造成実験の概要

本工法に用いる造成機には高圧の硬化材のジェットとは別に、前掲の図-1に示したように硬化調整剤（急結材）を噴射する別のノズルが備わっている。造成途中で設計圧力を変更する場合は、硬化材噴射の後方でこのノズルから急結剤を噴射して造成体の固化を促進し圧力が造成体全域で平均化されるのを抑制して各造成箇所ごとに適切な設計圧を保持する方法を用いることが可能である。

この手法は一本の造成が終了する場面で設計圧力を維持する目的でバルクヘッドを作成する場合にも有効に利用できる。

6. 設計圧力の確認実験

実施工の場合、多種多様な状況下にある実地盤に対して未固結な造成体と地盤がどのような挙動をするか明らかではない。そこで実際に未固結造成体の圧力制御を含め写真-1に示すような噴射攪拌実験を行い、圧力と地盤挙動の関連を実証するとともに実施工において生じるであろう問題について検討した。

(1) 実験方法と地盤

実験を行った地盤は地表部から1mまではコンクリート片を含む埋土層である。GL-1～-2.6mは貝殻片を多量に含む細砂層で、GL-2.6～-5.5mはシルト層を介在したN値が2～7、 $\gamma_s=1.61\text{t/m}^3$ 程度の細砂層である。

造成実験は図-14に示すように、土被り厚を2mとし長さ80cmの造成体を4区間作成した。造成体の形状は下向きの半円状を2区間下向き120°の扇型を2区間としその中間にロッド部分のみに注入する80cm区間を設けた。

造成時の噴射の条件は表-1に示すように硬化材の噴射圧力、造成体の形状、多孔管の引抜き時間を変えている。同表に示す引抜き時間は全円を造成する

表-1 造成時の噴射条件

項目	造成体			
	I	II	III	IV
造成形状	180°		120°	
引抜き時間(min/m)	60	40	20	40
硬化材圧力	400 (kgf/cm ²)			
硬化材噴射量	90 (l/min)			
空気添加量	1.0 (m ³ /min)			
排泥ジェット圧	200 (kgf/cm ²)			
排泥ジェットノズル径	2.8 (mm)			

場合の単位m当たりの造成に要する時間を示しており、実際の引抜きでは、例えば半円形状の造成であれば表示の半分の時間で引き抜くことになる。

(2) 測定項目と方法

実験では造成に伴う地盤内圧力の変動が生じた場合に地表面への影響を顕著にするため土被り厚を2mと浅くした。周辺地盤への影響は地表面の鉛直変位で代表させることとし、変位への影響因子として硬化材ジェットの圧力、排泥用ジェットの圧力、排泥量、地盤内の圧力として未固結造成体の圧力を測定し、計測データ相互の関連が分かるように時系列データとして収録した。

硬化材の圧力および排泥用ジェットの圧力は高圧ポンプの位置で検出し、それぞれの値を流量に換算した。地盤内の圧力は本工法に用いる専用の造成機に取り付けた圧力センサーで検出して、多孔管ロッド内の同軸ケーブルを経て記録器に接続し収録した。

排泥量は排泥専用管で導いた排泥を作業用立坑で水槽に貯留し、水槽の水面の上昇量から計測した。このため、排泥量は過去2分間の積算データになっている。また、排泥に含まれている切削の補助に用いた空気は排泥専用管からタンクに排出される時点で空中に放散したので、今回の実験で排出空気量は

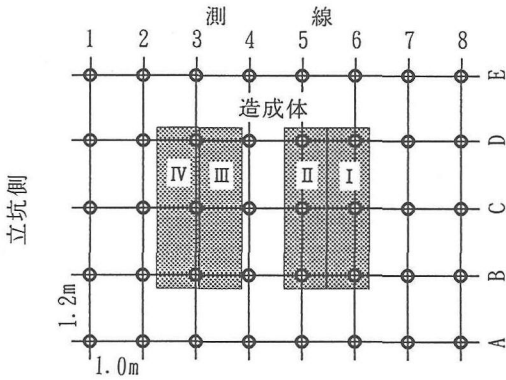


図-15 地表面変位計測の測点配置と造成体の位置

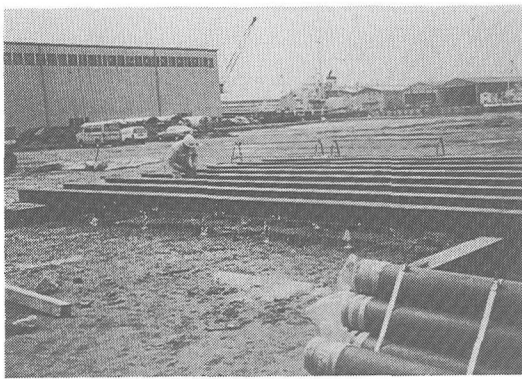


写真-2 立坑側から見た地表面変位計測装置

測定していない。

一方、地表面沈下の測定は図-15および写真-2に示すように造成領域の外部の両側に不動梁としてH鋼を各1本置きその上にH鋼を直角に渡して変位計を合計40箇所に所定の間隔で設置した。地表部には釘状の突起の付いた金属製の板を打ち込み、測点とした。

(3) 実験結果と考察

a) 時系列測定データ

造成を始める直前のテスト噴射時および造成体 I, II 作成時に測定した時系列データを図-16 に示す。同じく造成体 III, IV のデータを図-17 に示す。テスト噴射は造成体 I の開始位置においてロッドを引抜かずにその場で揺動だけで実施した。今回の実験では排泥用ジェット圧力は変化させず一定にしている。

同図の a (残留量累計) には硬化材噴射量から排泥量 (排泥量と排泥用ジェット水量の和) を差し引いた値を地盤内への残留量として、その時間的な累計値を示した。前述のように排泥量のデータは2分間の積算量として測定したため a (残留量累計) のデ

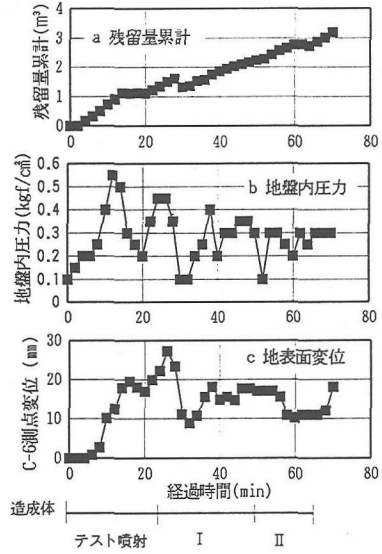


図-16 造成体 I, II の作成時の測定データ

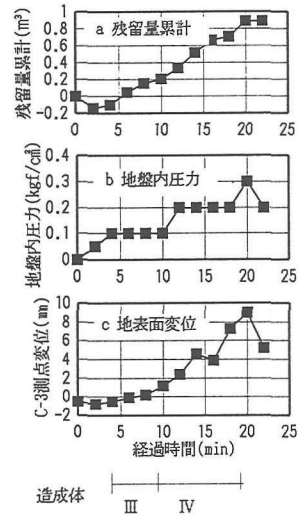


図-17 造成体 III, IV 作成時の測定データ

ータも圧力、変位とは時間的な遅れが生じている。

実験装置の機構上、造成体形状が下向きの 180° までの場合には排泥口は最も高い位置にある。そのため地盤中に硬化材と共に噴射された空気は優先的に排出されたものと考え、ここでは地盤内の残留量に空気は考えていない。

一方同図の b (地盤内圧力) には本工法専用の造成機にとりつけた圧力センサーで測定された地盤内の未固結造成体の圧力を示した。また両図の c (地表面変位) には地盤変位の測定値の代表として 図-

16では造成体 I 直上の測点C-6の値（隆起が正）を、図-17においては造成体Ⅲ、Ⅳ直上のC-3測点変位の時系列データを表示した（測点は図-15参照）。

図-16 において地盤内圧力と地表面変位を対比すると実験開始後40分程度までは圧力の山部と地盤変位の山部の発生時刻がほぼ一致するようである。これらの山部および谷部が生じる時刻は、地盤内残留量累計の勾配が変化する時刻とほぼ一致していることが読みとれる。

また、40分を過ぎてからは変位と圧力の関係が明瞭ではなくなるが、この原因は以下のように説明できる。すなわち、造成体 I の作成途中の38分ごろ、図-15に示すE-6および E-7測点付近の地表部に硬化材と空気の漏洩が生じた。漏洩の結果、地盤内圧力と地盤変位の関係が崩れるとともに、残留量累計が増加しているにも関わらず、地盤内圧力と地盤変位が増加しなくなったと考えられる。漏洩以後、地盤内への残留量累計値は地表部への漏洩量を含んだものになっている。硬化材の漏洩は造成体Ⅱの終了まで継続して生じ、造成体Ⅲ以後は発生していない。

以上のように硬化材の漏洩が生じる38分頃までは地盤内残留量累計と地盤内圧力および地表面変位の測定値は定性的ではあるが相互に相関関係が認められる。

一方、造成体Ⅲ、Ⅳの作成時のデータを示す 図-17では、地盤内圧力、地表面変位とも図-16 に比較して値が小さく相互の関係がわかりにくい。図-17の a, b, c のデータは造成体Ⅲ作成開始以後、Ⅳの終了まで大きな山部谷部が認められず、15分経過時点で変位が少し減少したのを除けば、時間経過に伴いほぼ単調に増加していると見なすことができる。つまり、図-17においても図-16と同様に相互に相関関係があることを示していると考えられる。

実際の施工では今回の実験のように設計圧力を大きく超過した状態で硬化材の漏洩に至るまで噴射攪拌を継続することはないので、解析で検討した設計圧力程度に上昇するまでの初期のデータを中心に後で検討を加える。

b) 地表面の変位分布

造成時に発生した地表面変位（正は隆起）の分布形状を図-18および図-19 に示す。前図は造成体 I、Ⅱの直上で、図-15 に示した第6測線と第5測線上の分布形状を示し、図-19では造成体の縦断方向のB, C, D測線上的変位分布形状を表している。

今回の実験で地表面変位の最大値は実験開始後約26分経過した造成体 I を作成時に、図-15 に示す測点 C-8で観測された。両図とも地盤変位の最大値が発生した実験開始後26分間までの変位の時間経過を

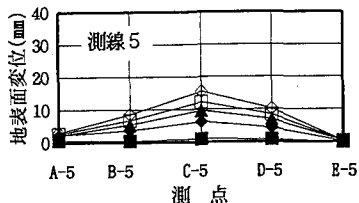
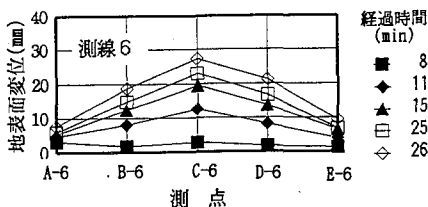


図-18 造成体横断方向の地表面変位分布

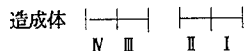
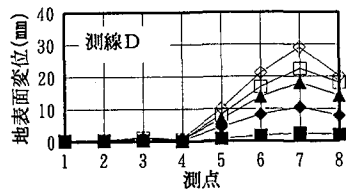
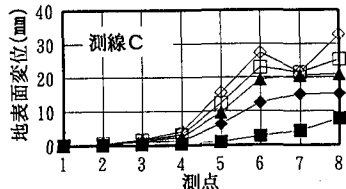
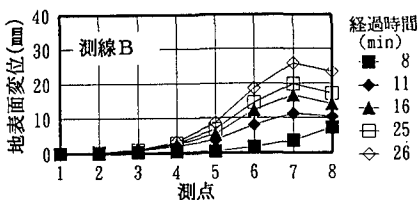


図-19 造成体縦断方向の地表面変位分布

示しており、造成体Ⅱ以後を作成する時のデータは含まれていない。

図-18 では造成体を作成する多孔管ロッドの直上の地盤で最大変位が生じ、変位分布はほぼ左右対象で滑らかな分布形状をしている。

一方、縦断方向の分布形状は図-19 に示すように造成体 I の直上ではなく少し前方に最大変位が発生していることが分かる。変位が前方に偏った要因として、硬化後に造成体を掘り起こしたときに明らかになったが、造成体 I の前方および側方の地盤にはコンクリートの破片などが疎な状態で存在しており、硬化材が侵出し易い状態であった。図-15 に示した測点E-6、E-7付近では前述のように38分ごろ硬化材

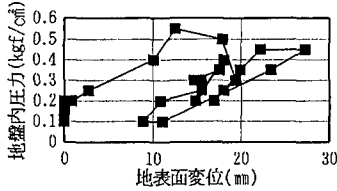


図-20 造成体 I 作成時の地表面変位と圧力

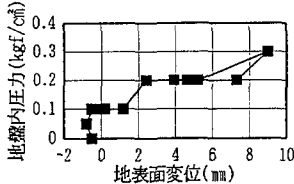


図-21 造成体Ⅲ, Ⅳ作成時の地表面変位と圧力

が漏洩しており、測点C-7、C-8付近では地表部には漏洩しなかったが、漏洩が生じる以前から浅い領域に硬化材や空気が浸透した可能性があると考えられる。

硬化材の漏洩の影響を受けたと見なされるC-7、C-8測点を除外すれば、最大変位が生じるまでの変位分布を表した両図において、地盤変位はほぼ各測点が一齐に隆起し、分布形状は凹凸が少なくなめらかである。このため、地表面変位と地盤内圧力との関連を検討する場合に変位の代表として、造成体 I の直上のC-6測点および造成体Ⅲ、Ⅳ直上のC-3測点のデータを用いることにする。前掲の時系列データを表した図-16、17 ではこれらのC-6およびC-3測点のデータを表示している。

c) 地盤内圧力と地表面変位

実験結果を示す時系列データ(図-16, 17)において、地盤内部の圧力と地表面の変位に相関関係が認められたが、この関係を明白にするため圧力と地表面変位の関係を描き図-20、21に示した。

図-20において初期に地盤内圧力が 0.2 kgf/cm^2 程度に上昇するまで地表面変位はほとんど現れず、その後圧力が上昇する過程で圧力と変位はほぼ比例している。さらに圧力が 0.5 kgf/cm^2 程度以上を維持する区間において地盤変位は継続して増加を示す。その後圧力が低下すると地盤は沈下傾向に転じ圧力が 0.1 kgf/cm^2 まで低下した時点で測点は約 10 mm の残留変位が生じた。

ここで再び圧力が増加する過程は初期とほぼ同じ勾配で地盤は隆起に転じ、概ね地盤内圧力に比例して地表面は再隆起し弾性的な挙動が見られる。

また造成体Ⅲ、Ⅳに関する図-21 では圧力が 0.1 kgf/cm^2 程度からさらに上昇する過程で圧力にほぼ

比例して地盤が隆起していると見なすことができる。

以上のように、設計圧力の付近であれば地盤内圧力と地表面変位はほぼ比例の関係にあるため、周辺地盤への影響を抑制する方法として地盤内圧力を適切な値に維持する方法は有効と考えられる。

しかしながら、前章の解析的検討によれば、いずれの計算条件の場合も地盤内圧力が上載荷重 ($\gamma = 1.6 \text{ tf/m}^3$, 土被り 2 m) である 0.32 kgf/cm^2 程度以下では地盤は沈下する結果になったが、今回の実験ではこの圧力よりも低い値で隆起が生じた。この原因として硬化材のジェットに沿わせて噴射した圧縮空気が排泥として完全には地盤から排出できずに地盤内に漏洩し地盤に何らかの影響を与えた可能性、各種の測定手法や精度に問題があった可能性、さらに解析モデルに問題がある可能性等が考えられるが、その要因を特定できず、課題として残された。実施工でのデータの積み重ねにゆだねたい。

一方、従来用いられている水平方向の高圧噴射攪拌工法(RIFP工法)がトンネルの先受けに利用された施工実績^{6)、9)、10)}によれば、造成時に多くの場合地盤隆起が生じる。測定例では、土被り厚が 7 m の場合 14 mm の隆起が生じ、土被り厚が 16.1 m の場合 3 mm の隆起が生じたことが報告されている。数例ではあるが他の例も含めると土被りが 15 m 以下では 10 mm 程度の隆起量が想定できる。これら数例の施工条件は土被り厚は概ね $3 \sim 20 \text{ m}$ 程度で、トンネル上部のN値は概略 $6 \sim 50$ であった。

今回の実験時の土被りが 2 m と浅く、未固結の細砂層でN値が $2 \sim 7$ 程度であるから、施工実績に示されたトンネル現場よりもさらに地盤変位が生じやすい条件であると推定できる。

このような実験地盤においても、前掲の 図-21 および、図-20 の場合は圧力が 0.5 kgf/cm^2 程度以上に上昇して塑性的な変形が生じるまでの初期の区間に限れば、 0.32 kgf/cm^2 程度の圧力では地表面の鉛直変位が 10 mm 以下になっている。このことから本工法では従来の噴射攪拌工法よりも周辺地盤に対する影響を少なく施工できる可能性が期待できる。

d) 地盤内圧力と排泥量

実験データを用いて、排泥量の調整によって地盤内圧力を適切な値に維持する手法の可能性を検討する。ここでは、地盤内への噴射量から排泥量(排泥用ジェットの水量を含む)を差引いた残留量の時間的な累計値を用いて検討している。

図-22と 23に地盤内圧力と地盤内への残留量累計値の関係を示した。前図は造成体 I と II 作成時のデータを表し、後図が造成体ⅢとⅣ作成時のデータを表している。

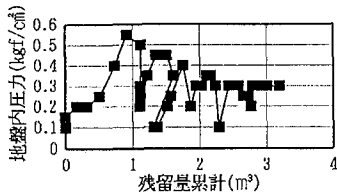


図-22 造成体 I, II 作成時の残留量累計と圧力

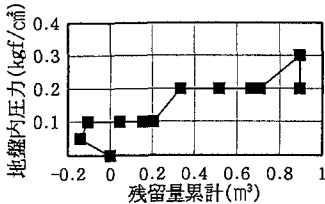


図-23 造成体 III, IV 作成時の残留量累計と圧力

図-22において残留量が 1.0m^3 程度に増加する初期の過程において地盤内部の圧力と残留量累計値はほぼ比例している。その後、残留量累積値が一定値を維持するかあるいは減少傾向になると圧力の値は急激に低下することが分かる。つまり圧力が上昇しすぎた場合、排泥量を増加させ残留量の累計値の増加を抑制すると地盤内の圧力を低下させることが可能と考えられる。図-23においては圧力が 0.1kgf/cm^2 に至る初期においてデータが乱れているが、この初期部分を除外すれば、圧力と残留量累計値は概ね比例していると考えられる。

図-22において地盤内への残留量累計が 2m^3 に至る直前で、前述のように硬化材が地表部に漏洩し、それ以後の残留量累計値は地表への漏洩量を含むため、地盤内圧力との関係が崩れたと考えられる。

以上のように、硬化材等の漏洩がなければ噴射攪拌に伴う余剰の切削土砂等の排出量を適切に調整することによって地盤内部の圧力を実際の排泥においても設計圧付近に維持できると考えられる。

施工管理は排泥量を中心に行う方法も考えられるが空気を含んだ排泥の流量は電磁流量計などを用いたりリアルタイムの測定が容易ではないため、施工時には地盤内部の圧力を管理の主体とし、時間が若干遅れて得られる排泥量のデータを従とすることが施工管理上有効と思われる。圧力値によって排泥量を制御する方法は自動化が比較的容易であり、将来の自動化施工への発展が期待される。

(4) 実験結果のまとめ

今回の実験結果から、下記のことが判明した。

図-20, 21 に見られるように地盤内の圧力が最初

に設計圧付近に上昇し塑性的な変形が生じるまでの区間において、地盤は弾性的な挙動を示し、地盤内圧力と地盤の鉛直変位は、ほぼ比例の関係にあることから、地盤内圧力を調整することが周辺地盤への影響を抑制するために有効であると考えられる。

次に、施工時の設計圧として地盤の土被り荷重に相当する圧力が最適であるとは断定できなかったが、下記の状況から設計圧としてほぼ妥当であると考えられる。

- ・図-20, 21に見られるように圧力が $0.1\sim 0.2\text{kgf/cm}^2$ 以下の区間では地表面に変位はほとんど現れない。
- ・地盤内圧力が $0.2\sim 0.5\text{kgf/cm}^2$ 程度の範囲では地表面変位と圧力がほぼ比例し、圧力の降下時は沈下が生じる。この圧力の範囲では地盤はほぼ弾性的な挙動と考えられる。
- ・圧力が 0.5kgf/cm^2 程度以上になると硬化材が漏洩し地表面には 10mm 程度の残留変形が生じたことから今回の実験条件下では地盤内圧力として 0.5kgf/cm^2 は過大であると考えられる。
- ・解析によって適切と考えられた設計圧以下においても、若干地盤隆起が生じたことの原因が特定できず課題として残されたが、設計圧を維持すれば少なくとも従来工法の施工時に発生する影響に比較して影響を抑制できる可能性が期待できる。

7. 結論

高圧噴射工法の実施に伴い周辺地盤や近接構造物への影響を抑制するためには、地盤内圧力を適切な値に保持することが有効と考え、その有効性を確認すると共に、設計圧として適切な圧力の検討、設計圧の維持方法に関する検討を行い以下の結論を得た。

①設計圧の解析的な検討結果

計算条件の範囲内では施工時に作用させる設計圧として地盤の土被り荷重に相当する圧力が適切であるが、本工法における圧力制御の目安である $\pm 0.1\text{kgf/cm}^2$ 程度の圧力の過不足に対して施工の条件と許容量によっては過大な影響を生じる可能性がある。

②地盤内の圧力制御の有効性

図-20, 21 に示すように初期の領域において設計圧付近では地盤は弾性的な挙動を示し、地盤内圧力と地盤の鉛直変位は、ほぼ比例の関係にあることから、地盤内圧力を調整することが周辺地盤への影響を抑制するために有効であると考えられる。

③設計圧の実験による検証結果

実規模の実験を実施し、周辺地盤への影響として地表面変位に着目し、地表面変位と排泥量（地盤内

への残留量累計値) および地盤の内部圧力との関係を考察した結果、設計圧力として最適とは断定できないが、初期地盤の土被り荷重に相当する圧力がほぼ妥当であると考えられる。

④施工時設計圧力の維持方法

図-22, 23 に示すように設計圧力付近では地盤内への残留量累計値と圧力がほぼ比例すると考えられるので、排泥量を制御することは地盤内圧力維持の方法として有効であると思われる。

⑤実施工における圧力管理

本実験でも見られたように地盤は数値解析において仮定したような理想状態にはない。従って地表面や構造物への厳しい影響管理が必要な場合には計測と施工への迅速なフィードバックが必要であり、排泥量の調整によって地盤内圧力の制御を行い影響を管理することが望ましい。

謝辞: 本研究はMJS協会が工法の開発を実施し、ジェオフロンテ研究会が後援して実施した実証実験結果の一部をとりまとめたものである。本論文をまとめる機会を与えていただいた研究会の長友成樹会長および中釘俊洋事務局長、また終始ご指導いただいた協会の中西渉名誉会長、中嶋志朗理事長、さらに熱心な討議と貴重な意見をいただいた同研究会WG.のメンバー諸氏に深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) 木嶋康雄, 青木高臣, 竹林垂夫, 西地文夫: 市街地の成田砂層をNATMで掘る, トンネルと地下, 第20巻7号, pp.37~45, 1989.7.
- 2) 小田恵之輔, 鍛冶茂仁, 中島浩平, 中川浩二: 強制排泥装置を有する水平方向噴射攪拌工法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.528/VI-29, pp.155~165, 1995.12.
- 3) 原節男, 山口学, 五十嵐瑞穂, 岡田憲明: MJSによる坑口長尺先受けの施工, トンネルと地下, 第26巻7号, pp.13~26, 1995.7.
- 4) 伊藤三夫, 高久節夫, 小田信幸, 田邊輝之: 河底下の複雑な近接施工をMJSで克服, トンネルと地下, 第27巻5号, pp.51~57, 1996.6.
- 5) 加島裕夫, 堀内喜久雄, 宮崎今朝男: 超高圧噴射攪拌工法でトンネル変位を克服, トンネルと地下, 第22巻2号, pp.33~40, 1991.2.
- 6) 小泉光政, 今村修, 岡憲二郎, 合田和哉: 土砂地山に土かぶりの薄い3車線トンネルを掘る(その2), トンネルと地下, 第21巻6号, pp.43~51, 1990.6.
- 7) 土質調査試験結果の解釈と適用例-土質基礎工学ライブラリー4, 土質工学会(現地盤工学会), pp.54~56, 1979.1.
- 8) 山岳トンネルの地表沈下防止および不良地盤対策に関する調査研究(その2)報告書, 社団法人日本トンネル技術協会, 1981.3.
- 9) 師岡紀男, 清水明美, 高橋義忠, 手島克明: 坑口部の軟弱二次堆積ロームを克服, トンネルと地下, 第22巻12号, pp.7~14, 1991.12.
- 10) 大谷幹夫, 伊藤公一: 崩壊性斜面での補強RJFP工法の施工, トンネルと地下, 第24巻3号, pp.43~52, 1993.1.

(1997.6.9受付)

CONSIDERATIONS FOR PROPER DESIGN SOIL PRESSURE AND CONTROL METHOD IN PRACTICING HORIZONTAL JET-MIXING METHOD

Keinosuke ODA, Shigehito KAJI, Yoshinobu IAI, Kouhei NAKAJIMA
and Koji NAKAGAWA

Jet-mixing method, as one of the ground improvement methods, has been applied to the vertical direction generally. Considering that one of the subjects to establish the horizontal execution of jet-mixing is to prevent any influence to the surrounding ground caused by varying earth pressure from the initial state. It is inevitable to vary the soil pressure on its execution since the ground becomes liquefied instantaneously. Therefore, aiming that the most proper soil pressure should be maintained during the execution in order to minimize the influence, the authors have determined the most proper soil pressure by using numerical analysis and verified its effectiveness by field experiment.