

(46) L D C 工法による深度の浅い地山掘削に関する検討

九州大学工学部 正会員 ○ 島田 英樹
九州大学工学部 正会員 松井 紀久男

Shallow Tunnel Drive by Using Long Distance and Curve Method

Hideki SHIMADA and Kikuo MATSUI, Kyushu University

Abstract

In recent years, shallow tunnels are often constructed by using the LDC Method (Long Distance and Curve Method) which is one of the sewage tunnel drive systems. This method utilizes the mud screen which is formed around the drive pipe for the stability of the surrounding soil. However, it was not well understood the behaviour of the soil and the mud screen around the pipe.

From this point of view, this paper discusses the performance of the mud screen around the drive pipe and deformational behaviour of the soil.

1. 緒言

都市開発事業において、推進工法は埋設工法の中で有効な工法として多用され、急速な進歩を遂げてきている¹⁾。一般的な推進工法は、掘削に伴う地盤の緩みによる土荷重を推進管自体の剛支保作用により保持しているが、L D C 工法（長距離泥水推進工法；Long Distance and Curve Method）では、推進管の外周の余掘り箇所へ充填材を注入し、泥水被膜を形成させることにより地盤の土荷重を保持し、その中で推進管を推進させ、推進抵抗の低下を図るという点で、従来の推進工法と異なっているとされている²⁾。

本報告では、深度の浅い地山を対象とした L D C 工法の安全かつ効果的な施工の検討の第一歩として、L D C 工法で掘削された現場における計測、観察結果やそれと数値解析により得られた結果との比較により、掘進に影響を及ぼす要因の抽出および地山の安定性に大きな影響を及ぼす要因について検討を行った。

2. L D C 工法について

図 1 に本工法の標準施工図を示す。本工法の基本は、推進管の先端に取り付けられた掘進機の推力を元押しジャッキの推進力によって推進管を通して、その耐荷力の範囲内で与えて掘削が行われる。本工法の特徴は、積極的にオーバーカットした余掘り外周部に図 2 に示すように充填材を注入し、泥膜を形成させ、土被り等の荷重に対して一体構造として

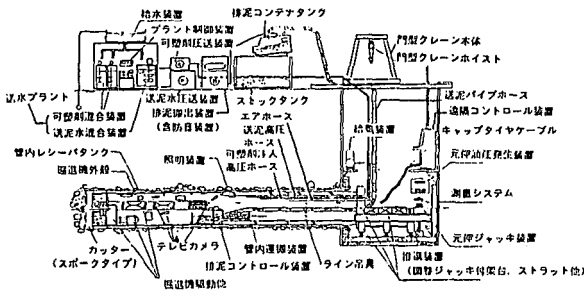


図 1 L D C 工法の標準施工図

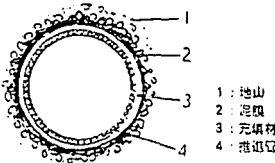


図 2 推進管とその周辺の概要

挙動させることにある。そのため本工法では、確実な安定充填材内の推進による推進抵抗値の低減および固化した充填材と泥膜の効果による地山の安定性が要求される。

3. 現場計測方法および結果

3. 1 現場計測箇所および計測方法

前述の効果の検討を現場計測によって行った。計測箇所は川崎市および水戸市の下水管埋設工事現場であり、表1に土被り、土質、推進管径、推進長およびN値を示す。測定データとしては推進管近傍の地山（充填材、泥膜等を含む）の比重および充填材の内圧であり、比重測定用の試料は推進管の充填材注入孔を利用して2.5m毎に採取した。その際、充填材周辺の泥膜や地山の状態も観察した。充填材の内圧は、この注入孔よりフラッシュダイヤフラム型圧力計を挿入して求め、推進力は工事日報をもとに算出した。

表1 計測現場の概要

計測箇所	土質	土被り(m)	推進管径(mm)	推進長(m)	N値
川崎地区	砂質粘土層	4.9~5.6	800.0	608.3	9~10
水戸地区	砂層	5.0~5.3	800.0	291.6	6~8

3. 2 現場計測結果および考察

図3に川崎地区における掘進切羽面と推進立坑間の距離と推進力および充填材の内圧の関係を示す。この図より、掘進切羽から離れるにつれて推進管に作用する摩擦力が増大するため、推進力は推進立坑（切羽より約230m）に近づくにつれて増加する傾向にある。次に充填材の内圧をみると、切羽面付近では内圧は安定し良好な結果が得られており、推進力もほぼ一定である。しかし、切羽面から95~145m地点では、内圧は0.3~0.4 kgf/cm²と他に比べて大きく、推進力も急増する傾向にある。この箇所は砂礫層が分布していたことから判断すると、得られた内圧は測定した充填材の内圧に周辺の地下水圧が作用したと思われる。一方、推進力の増加は、この砂礫層が他に比べて掘削し難かったことを示唆している。さらに、210~225m地点でも推進力が急増しているが、これらの箇所の充填材を採取した結果、充填材が完全に固化し地山と一体化していることが分かった。したがって、より小さい推進力を保つためには、充填材の安定した内圧を維持し、かつ推進管周辺の充填材がある期間においては固化しないような対策を施す必要があると思われる。

次に、充填材およびその周辺に存在する泥膜、地山の性状の観察により充填材の固化メカニズムについて検討する。掘進切羽近くで充填材が未固化の状態で存在するところでは、推進管周辺にかなり堅固な泥膜（10~20mm）が常に存在していたことから、充填材が推進管周辺からまず固化すると考えられる。そして、この固化領域が徐々に拡大し、やがて完全に固化すると思われる。これは、切羽から離れるにつれて充填材が固化し採取不可能になることから裏付けられる。したがって、切羽からある程度離れた推進管の周辺には充填材の固化による泥膜が存在し、その外側には固化した充填材が、さらに外側には充填液の影響により固化した地山が存在していると考えられる。図4に掘進切羽面からの距離と推進力および比重の関係を示す。この図より、推進力が安定な箇所の比重は1.2~1.4とほぼ安定した値が得られているが、切羽面から約170m以遠では比重の増大傾向が認められる。これは、充填材の固化による水分の脱水に起因していると思われ、

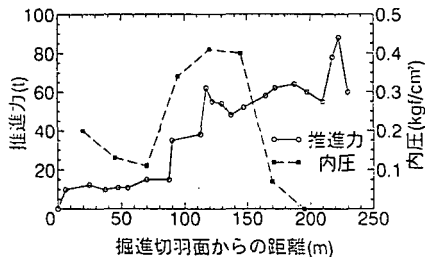


図3 掘進切羽面からの距離と推進力および充填材の内圧の関係

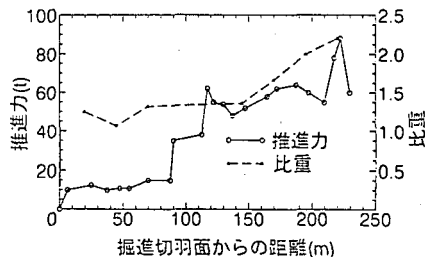


図4 掘進切羽面からの距離と推進力および推進管近傍地山の比重の関係

先に示した充填材の固化状態の観察結果とほぼ対応している。

これらのことから、地山の安定性および推進力は、推進対象地山の状態や充填材の性質、充填材の固化領域の形成過程や固化の程度等に大きく影響を及ぼされることが認められた。

4. 推進に伴う地山の安定性

本節では、推進管周辺の地山と充填材の内圧の相互作用について検討し、推進に伴う地山の安定性について理論的に考察する。推進により開削された空洞の変形は、種々の要因が複雑に関係して生ずるものである。また、対象地山が浅部であるため、空洞周辺に作用する重力の影響や水平方向からの不均質な地圧の影響等を無視することができないため、これらの要因を厳密に考慮することは非常に困難である。それゆえ多くの仮定を導入し、問題をより単純化する必要がある。そこでこの問題を、二次元平面ひずみ状態の地山断面に充填材の内圧のみが均一に作用すると仮定し、FEM弾性解析を行い種々検討した。

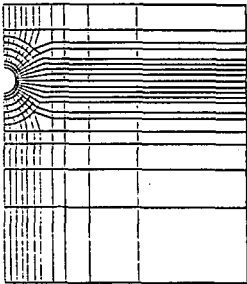


図5 解析モデル

4. 1 解析方法

図5に解析モデルの一例を示す。解析条件は、推進管径と土被りの比 $r : z$ 、地山に作用する充填材の内圧および土質の力学特性である。表2にこれらの解析条件を示す。なお、充填材の内圧は前述の実測結果を参考にした。このモデルは、推進管中心鉛直線に対して左右対称であるので、左側の半分を要素数293~315、節点数321~348の四辺形定ひずみ要素に分割して解析した。ただし、問題を簡単にするために地下水の影響を考慮していない。

表2 解析条件

推進管径：土被り	1:4	1:6	1:8		
充填材の内圧(kgf/cm ²)	0.1	0.2	0.5	1.0	
地山の力学特性	E (kgf/cm ²)	ν (-)	γ (g/cm ³)	c (kgf/cm ²)	ϕ (deg)
A	1,000	0.4	1.8	0.0	15.0
B	2,500	0.4	1.8	0.5	15.0
C	5,000	0.4	1.8	1.0	15.0

ただし、E：ヤング率 ν ：ポアソン比 γ ：密度
c：粘着力 ϕ ：内部摩擦角

破壊判定には次式に示すMohr-Coulombの破壊条件式³⁾を用いた。

$$\tau_i = c - \sigma_m \tan \phi \tag{1}$$

ただし、 τ_i は破壊時のせん断応力、 c は粘着力、 σ_m は平均応力、 ϕ は内部摩擦角である。いま、Mohr円の中心と(1)式で示される直線の最短距離は、

$$\tau_i' = (c - \sigma_m \tan \phi) \cos \phi \tag{2}$$

として表せるので、これを用いて安全率 S_i を下式で定義する。

$$S_i = \tau_i' / \tau \tag{3}$$

ここで、要素は $S_i \geq 1$ のとき破壊すると仮定する。

解析は3つのステップで行っており、ステップ1で初期地圧状態を設定し、ステップ2で推進管部の掘削を行い、ステップ3で充填材の内圧を作用させる。このような掘削は、推進面に掘削相当価外力を作用させることでシミュレートした。

4. 2 解析結果および考察

図6に4種の充填材の内圧を作用させた場合の推進管頂部から地表までの鉛直方向の距離と地山の変形量との関係を示す。ただし、地山の力学特性は表2のBであり、推進管径と土被りの比は1：6である。また、図6の変形量は空洞に向かう方向を正としている。この図より、推進管周辺から地表に向かうにつれて変形量が漸近的に小さくなり、また充填材の内

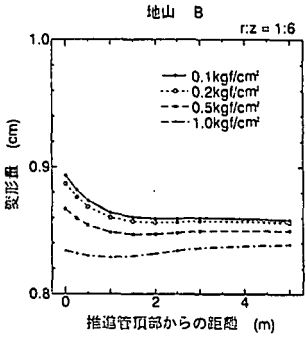


図6 推進管頂部から地表までの距離と地山の変形量の関係 (充填材の内圧の影響)

圧が大きいほど変形量は小さくなっている。したがって、推進により生じた空洞に直ちに充填材を注入し、適度な内圧を作用させることにより地山を安定させることが可能であることが分かる。次に、土被りを変化させた場合の推進管頂部から地表までの鉛直方向の距離と地山の変形量の関係を図7に示す。ただし、地山は表2のBであり、充填材の内圧は 0.5kgf/cm^2 である。この図より、土被りが増大するにつれて推進管周辺に作用する荷重が増大するため変形量も増大する傾向にあることが分かる。したがって、土被りが大きくなるにつれて充填材の内圧を大きくしなければ推進管周辺の地山の変形が大きくなり、結果的に推進の際地山から推進管への締めつけにより摩擦力が増大する可能性がある。図8には、異なる地山の力学特性による推進管頂部から地表までの鉛直方向の距離と地山の変形量を示す。ただし、充填材の内圧は 0.5kgf/cm^2 であり $r : z = 1 : 6$ である。この図より、地山の土質が良好であるほど変形量が小さいことが分かる。この結果より、地山の力学特性が推進管周辺の地山の安定性に影響を及ぼす要因のひとつであることが分かり、これと先述の要因の総括的な考慮により推進地山が安定であるか否かについて判断する必要があることを示している。図9には、推進管の頂部、側方部および底部からの距離と地山の変形量の関係を示す。ただし、充填材の内圧は 0.5kgf/cm^2 であり $r : z = 1 : 6$ である。また、地山の力学特性は表2のBであり、側方部については水平方向と鉛直方向の変位を記載している。この図より、推進管底部において約1m程度まで離れるにつれて変形量は増大するが、それ以降は減少する傾向にある。

最後に、推進に伴う推進管周辺地山の破壊状態について検討する。図10(1)~(3)に土被りが異なる場合

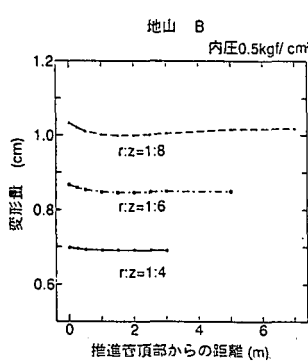


図7 推進管頂部から地表までの距離と地山の変形量の関係 (土被りの影響)

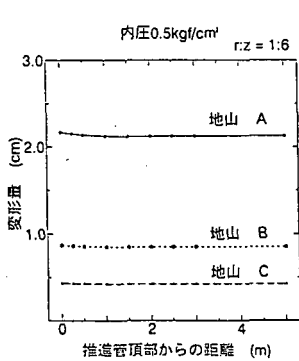


図8 推進管頂部から地表までの距離と地山の変形量の関係 (地山の力学特性の影響)

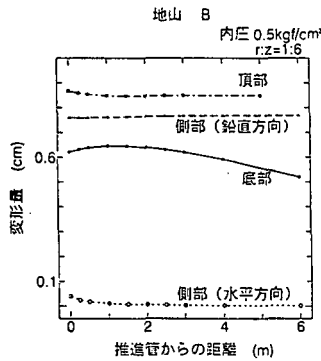
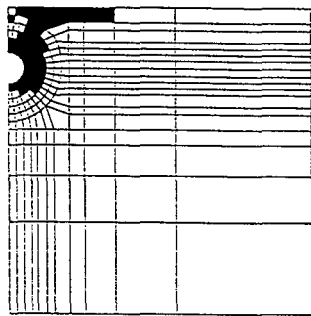
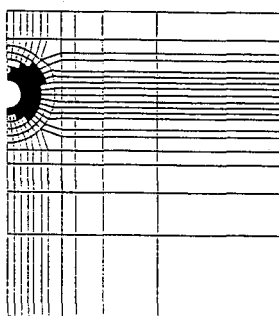


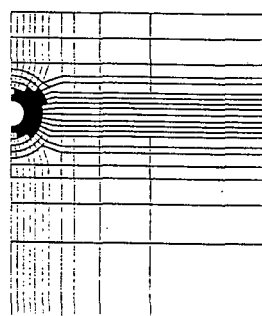
図9 推進管の頂部、側方部および底部からの距離と地山の変形量の関係



(1) $r : z = 1 : 4$



(2) $r : z = 1 : 6$



(3) $r : z = 1 : 8$

図10 推進管周辺地山の破壊状態 (土被りの影響)

の推進管周辺地山の破壊状態を示す。ただし、破壊した要素は黒く塗り潰している。この図より、土被りが小さい場合には地表まで破壊が生じており、地表付近の建設物に影響を与える可能性がある。このため、土被りが浅い場合には地表の沈下が起こり易くなるため、さらなる内圧を与えることにより地表への影響を回避する必要がある。一方、土被りが大きくなるにつれて、破壊領域が地表まで到達していないことから、推進管が地表に影響を及ぼし得る土被り深さについて厳密に検討する必要があると思われる。図11(1)~(3)には、内圧が異なる場合の推進管周辺地山の破壊状態を示す。この図より内圧が増大するほど破壊領域が減少する傾向にあることが分かる。これは充填材の内圧が増大するにつれてより多くの土被り圧あるいは側圧を保持することによるものと思われ、結果的に地山の緩み領域が減少することが分かる。

以上のことから、推進管周辺の地山の安定性を図るために、土被り、地山の力学特性等を十分把握し、最適な充填材の内圧を与えることにより推進管周辺地山の緩み領域を制御できると思われる。

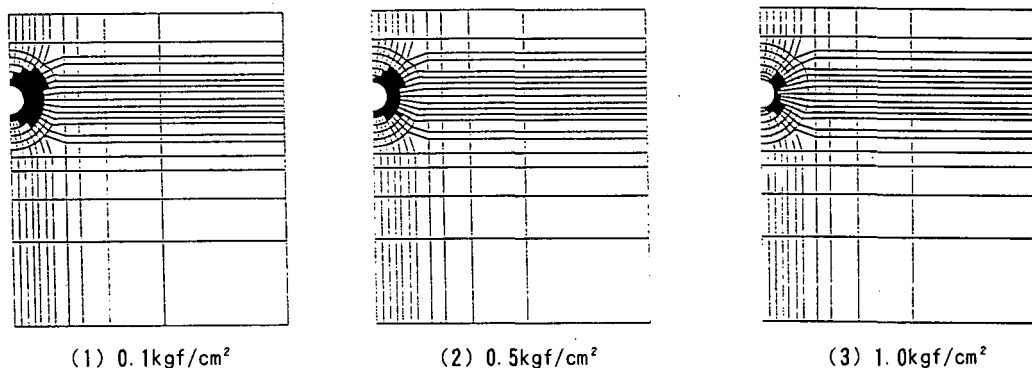


図11 推進管周辺地山の破壊状態（充填材の内圧の影響）

5. 結 言

今回の現場計測および数値解析により以下のことが明らかとなった。

- (1) 切羽からある程度離れた推進管の周辺には充填材の固化による泥膜が、その周辺には固化した充填材が、さらに外側に充填材の影響により固化した地山が存在している。
- (2) 充填材はまず推進管周辺から固化してゆき、この固化領域が徐々に拡大し、やがて完全に固化する。これにより推進力が急増する。
- (3) 推進管周辺の地山の安定性を図るためには、土被り、地山の力学特性等を十分把握し、最適な充填材の内圧を与えることにより推進管周辺地山の緩み領域を制御できる。

最後に、現場実績データおよび試料の採取に当たり、多大のご協力を得た昭和土木（株）の今泉七郎氏および井上雅文氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：推進工法の調査・設計から施工まで、新日本印刷、(1986)
- 2) 井上雅文：第14回「最近の推進工法講習会テキスト」、pp. 71~88、(1994)
- 3) 例えば、市川康明・亀村勝美：土と基礎、Vol. 36[No. 12]、pp. 77~85、(1988)