

長距離・急曲線推進工事における推進管の挙動計測

MEASURING BEHAVIOR OF HUME PIPES IN THE LONG AND CURVED TUNNEL BY JACKING METHOD

藤森 高輝¹⁾・矢島 英邦²⁾・門 弘行³⁾・高見沢 滋⁴⁾・中野 正明⁵⁾

Takateru HUZIMORI, Hidekuni YAZIMA, Hiroyuki KADO, Shigeru TAKAMISAWA, Masaaki NAKANO

While many long and curved tunnels by jacking method are constructed in recent years, there are few examples that measured behavior of Hume pipes. Calculation of driving forth by jacking method is not established completely, because it is complicated by various soil and execution methods. Therefore designers cannot help judging by experience expressions from past results. This report describes that we measured stress and examined behavior of Hume pipes for the purpose of collecting data to establish reasonable design technique about jacking method.

Key Words: jacking method, long and curved tunnels, Hume pipes

1. はじめに

近年、長距離・急曲線推進工事が増加しているが、推進管の挙動を計測した事例はほとんどない。推力の算定も土質・施工方法により複雑で、確立された検討手法ができあがっていない。そのため、過去の実績をもとにした経験式等により設計者が判断しているのが実情である。

そこで、今回、長距離・急曲線推進工事における合理的な設計手法を確立する上で必要なデータ収集を目的として、推進管に発生する応力を測定し、推進管の挙動、作用荷重に関する検討を行った。

2. 工事概要

2-1 工事内容

対象となる工事は、神奈川県南西部地域のガス安定供給を目的とした横浜湘南ラインⅠ期工事で、仕上がり内径φ1800mmのヒューム管を設置する工事である。特徴を以下に示す。

- ①長距離(409m)を急曲線($R=50\text{ m}$ 2ヶ所、 $R=135\text{ m}$ 1ヶ所)で施工するため、アルティミット工法を採用した。
- ②推進機は泥水式とし、掘削外径はオーバーカット25mmを含むφ2170mmとした。
- ③推進機にジャイロ、ターゲットを設置し、坑口からのトラバース測量は自動追尾トータルステーションによる自動測量を実施した。

2-2 地形・地質概要

地形は起伏が少なくほぼ平坦である。土被りは5~12mで、上位より、埋土・表土層、新期ローム層、下末吉ロームより成る。推進管は下末吉ロームである凝灰質粘土~新期ローム層の部分を通過する。トンネル切羽における地下水位は $20\sim60\text{ kN/m}^2$ ($0.2\sim0.6\text{ kgf/cm}^2$) であった。(図-1、図-2参照)

1)2) 東京ガス(株)導管保安本部 3) (株)熊谷組横浜支店 4) 正会員 (株)熊谷組土木技術部 5) 機動建設工業(株)

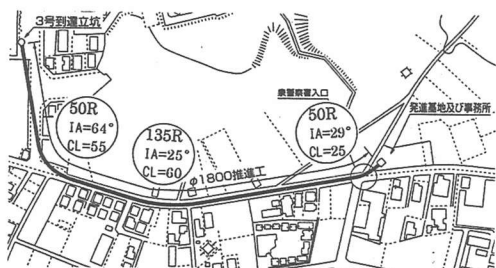


図-1 平面図

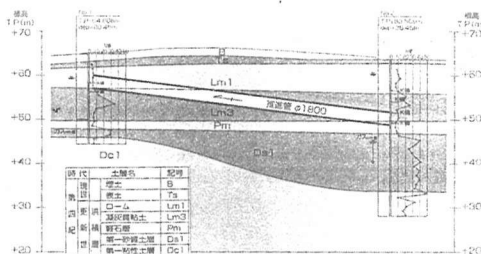


図-2 地質縦断面図

3. 工法概要

アルティミット工法は、長距離・急曲線工事を円滑に施工するため、従来の泥水式工法及び泥土圧工法に以下に示す機能を加え合わせた工法である。

①推進管接続部毎に塑性領域の広い推力伝達部材を設置することにより、追従性を高め管破損を防止する「センブラカープシステム」を採用する。

②一定間隔毎に推進管内部の注入孔から注入箇所・注入時期を自動制御して滑材を効率的に注入する自動滑材注入方式を採用する。

本工事での具体的な措置を以下に示す。

3-1 推進管

内径φ1800mm、管厚160mmのヒューム管（1種-500）で、曲線施工のため、長さは1.2m（1/2管）である。推進管継手部に低発泡性スチロールの推力伝達材（センブラリング）を上下2ヶ所に各々90°の範囲で設置した。管端の応力集中を防ぎ、左右を空隙とし、低発泡性スチロールの塑性変形と弾性変形を利用して、できるだけ推力を管の上下に分散させることを目的としている。（図-3、写真-1参照）

3-2 自動滑材注入システム

滑材注入に関しては、掘進機直後の1次注入と推進管路での2次注入の2系統に分けて行った。1次注入は掘進機の直後で速やかにオーバーカット量を充填するため、全量を注入する量管理で行った（試験的に、固結性を高めた）。2次注入は圧力管理で行い、自動的に後続推進管の注入箇所を移設しながら全線均等に連続して低圧で注入した。注入材料は粘性が高いポリマーと粘土のプレミックスタイプ（アルティーK）とした。（図-4参照）

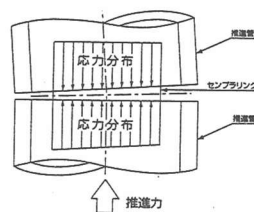


図-3 イメージ図

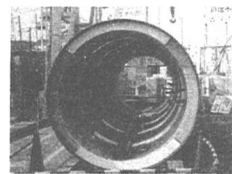


写真-1 センブラリング

4. 計測概要

4-1 計測内容

推進管に発生する応力を測定するため、元押しジャッキに作用する総推力の測定等と合わせて、切羽より1本目、5本目、170本目に計測用推進管を設置した。各計測用推進管内には、埋設型ひずみ計（軸方向応力度）を8台/本（1列）、鉄筋ひずみゲージ（円周方向応力度）を48台/本（3列）配置した。（図-5参照）

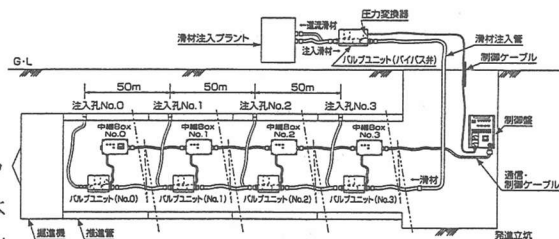


図-4 自動滑材注入システム

6. 考察

6-1 総推力低減の理由

本施工では、長距離・急曲線を設計推力の約28%で推進ができ、曲線部においても、明確な地盤反力を受けずに、施工ができた。そのため、推進管の破損、クラック等は一切生じなかった。その理由は以下によると推察できる。

- ①自動滑材注入システムにより、土質と推進経過日数に合わせ滑材を効率的に注入できた。そのため、推進路線に絶えず、まんべんなく滑材が充填される状況が可能となり、推進力の低減が図れた。
- ②自動追尾トータルステーション方式による自動測量に基づき、的確な方向制御が実現でき、蛇行の少ない安定した精度で推進できた。
- ③セシプラカーブシステムにより、推進管の外に向かうせり出しが防止できた。
- ④対象となる土質は、比較的自立性の高い地山であった。

6-2 推進可能距離の算定

今回の条件の場合、推進距離がどこまで延長可能かを確認するため、本計測から得られた周面摩擦抵抗力(1.4kN/m²)を4-2の推進力の算定式に入れ直した結果を図-13に示す。残り区間がすべてが直線と仮定すると、 $\sigma_c=500\text{kgf/cm}^2$ 管の場合、 $L=890\text{ m}$ まで、 $\sigma_c=700\text{kgf/cm}^2$ 管の場合、 $L=1180\text{ m}$ まで推進が可能であることがわかる。推進管の耐荷力以外に長距離推進を規制する要因は、今回の条件では存在しないため、適切な施工管理の元、上記長距離・急曲線施工は十分可能と考えられる。また、推進管初動時の推力は推進中の推力に比べ2割程度大きな力を要すことを考慮に入れる必要はあるが、自立性の高い地山における推進力算定式のm当たりの推進抵抗値は、今後、低減する工夫が必要と考えられる。

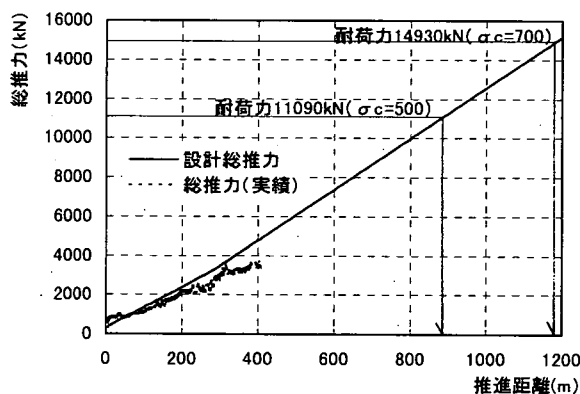


図-13 推進可能距離

7. 今後の展望

総推力や曲線時の地盤反力は、地質条件や推進管理方法により大きく左右される。そのため、今後、多くの推進工事で推進管の挙動計測を行い、データベース化を図ることにより、長距離・急曲線施工が実現可能かどうかの判断ができるようにする必要がある。また、推進時の計測結果を速やかに設計にフィードバックさせ、適切な修正を実施しながら、施工を行う情報化施工の要素も取り入れていく必要がある。崩壊性の高い地山や玉石・礫を含む地山を除けば、適切な推進管理の元、長距離・急曲線施工は十分可能で、今後、より長距離化した急曲線施工が実施されていくと考えられる。

8. おわりに

本内容が今後の合理的設計手法の確立に少しでも参考になれば、幸いである。そして、本計測の実施にあたり、協力して頂いた皆様には、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

5-2 円周方向力に関して

曲線部通過時、外周地山と接触することなどにより、直線部通過時との違いが最も顕著に現れた坑口側計測面（計測管内に設置した3列の内の1列）について、その結果を以下に示す。

(1) 円周方向モーメント（図-11 参照）

曲線部において、推進管は掘進機の軌跡より余掘り分（25mm）外側の軌跡をたどり、外側地山と接触していることが測量結果から確認された。しかし、直線部と曲線部でモーメント分布形状に明確な差が認められない。Na 5 推進管においてのみ、「左上-右下」方向から僅かな地盤反力を受ける形状となっているだけである。そのため、曲線部に明確な地盤反力が生じていないことがわかる。したがって、周辺地山の自立が保たれ、推進管の外側へのせり出しが少なかったことが推察できる。

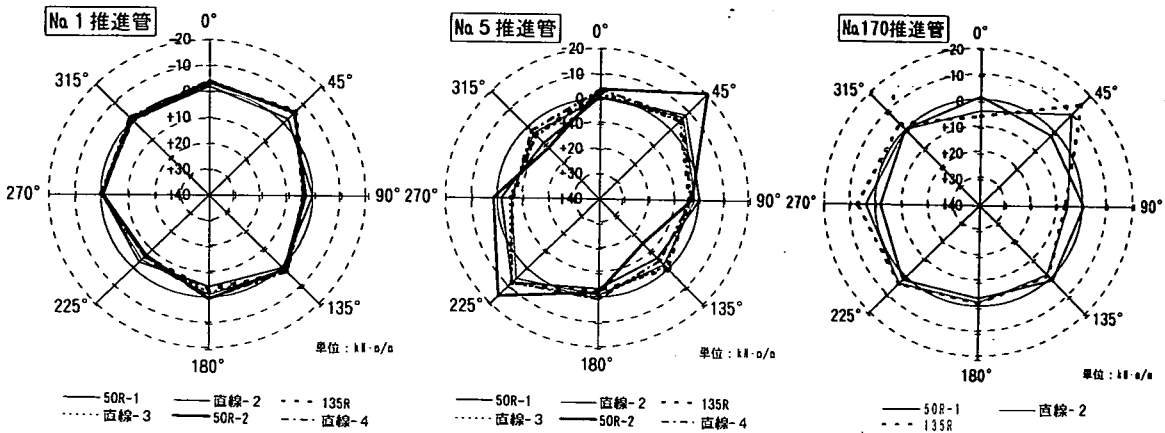


図-11 円周方向モーメント図

(2) 円周方向軸力（図-12 参照）

軸力が増加しているのは、推進機直後（Na 10 推進管）から固結性の高い滑材が定量注入されたためと考えられる。掘進に伴い、管の周囲に付着・圧密されていき、軸力が漸増したと推察できる。Na 170 推進管は上記注入位置から離れているため、上記現象は生じなかったと考えられる。

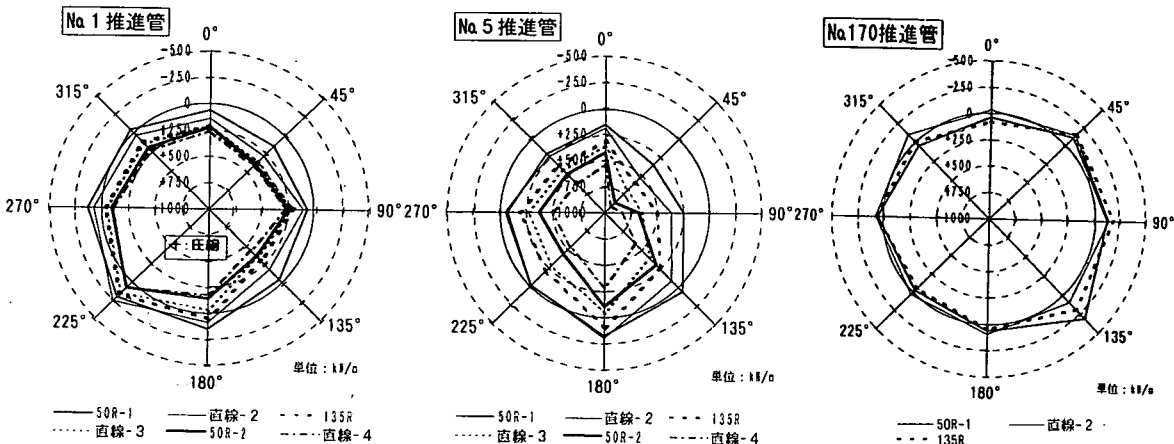


図-12 円周方向軸力図

170 管軸力と総推力の差から算出)、坑口側の方が周面摩擦抵抗力が大きいことがわかる。

④発達当初、各推進管の管軸方向軸力が約 600kN (60t) 減少している。これは、坑口部の摩擦抵抗が大きかったため、以下の理由によると考えられる。

- ・坑口部という条件から、周辺地盤がゆるんでいる。
- ・坑口部からの湧水を防ぎ、止水性を確保するため、固結性の高い滑材を注入した。

(2)管軸方向応力度 (図-8 参照)

①曲線部と直線部で応力伝達位置が変化するため、直線部から曲線部に变化する時点(あるいは曲線部から直線部)で、管軸応力度が変化している。そして、90° (右)、270° (左)では、推力伝達材(センブラリング)が存在しないため、軸力がほとんど発生せず、一定となっている。

②管軸方向軸力が大きいため、Na 170 推進管の変動幅は Na 1、Na 5 より大きい。

(3)管軸方向モーメント (図-9、図-10 参照)

①曲線内側の軸力が卓越するため、左右モーメントが曲線時に対応して生じている。

②上下モーメントは正の向き(上側圧縮、下側引張)に生じている。原因の1つとして、推進管が滑材中に浮かび、地山天端に接触することにより、上方からの土圧が卓越していることが考えられる。

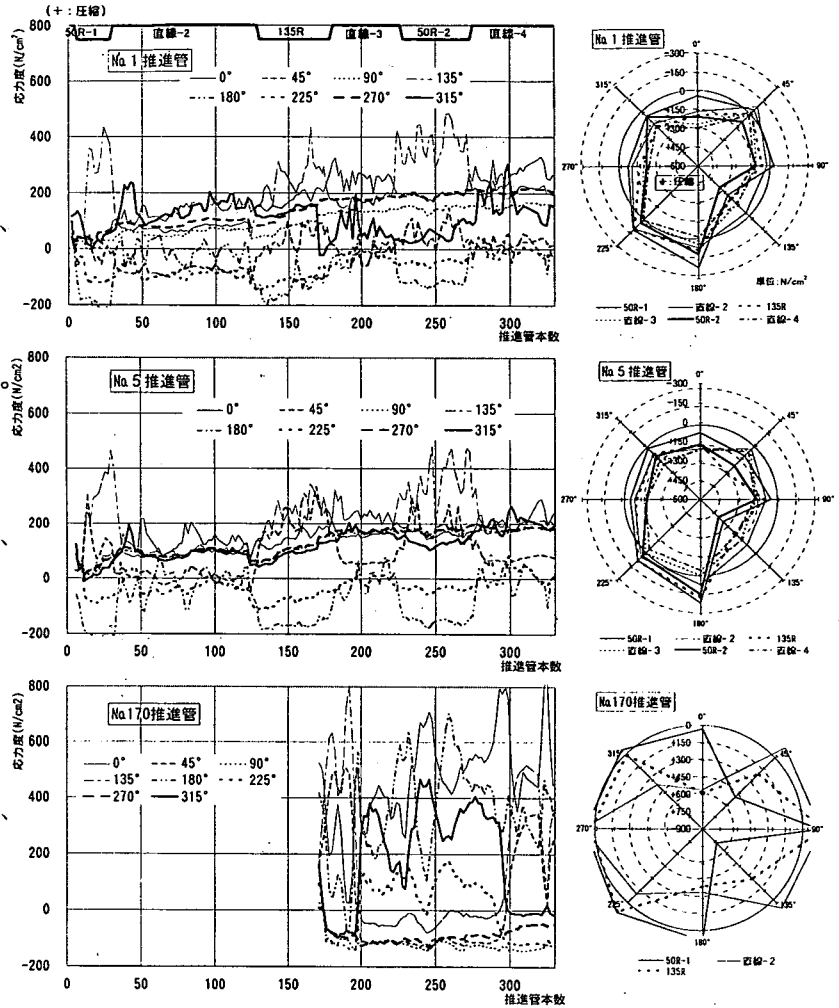


図-8 管軸方向応力度推移図

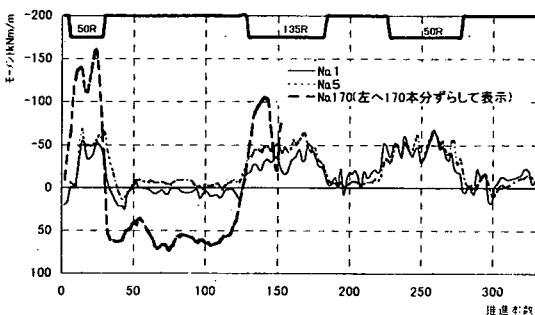


図-9 左右モーメント推移図

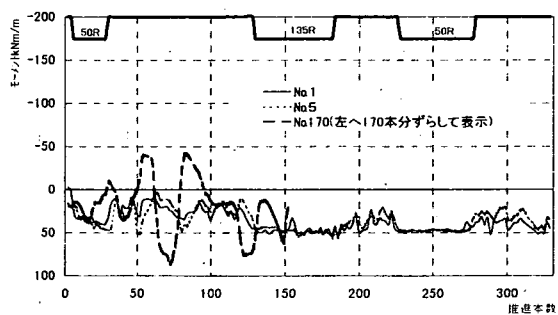


図-10 上下モーメント推移図

4-2 設計推進力の算定

下記の計算式より設計推進力 (12600kN) を算出した。

(1) 直線部分の推進力

$$F = F_0 + f \times L$$

F : 総推力 (kN)

F_0 : 初期抵抗 (kN)

$$= \pi \times B \times s^2 / 4 \times \gamma \times s \times h / 2$$

B : 掘削機の外径 (m) γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)

h : 推進管中心までの高さ (m)

f : m 当たりの推進抵抗値 (kN/m)

$$= (1/8 \times \alpha \times B \times c^{0.6} \times N^{0.2}) \times S + 0.2W$$

α : 礫率による摩擦抵抗係数 N : N 値 B : 推進管の外径 (m) S : 推進管外周 (m)

W : 推進管重量 (t/m) L : 推進延長 (m)

(2) 曲線部分を考慮した推進力

$$F_n = K^n \times F_0 + F' \times (K^{(n+1)} - K) / (K - 1)$$

F_n : BC 点での推進抵抗 K : 曲線推進抵抗係数 $= 1 / (\cos \alpha - k \times \sin \alpha)$ n : 曲線区間の管本数

F_0 : EC 点での推進抵抗 F' : 推進管 1 本当りの推進抵抗 $= f \times$ 推進管長

α : 管の折れ角 k : 管と地山のせん断抵抗率 $= \tan \phi / 2$ ϕ : 土の内部摩擦角

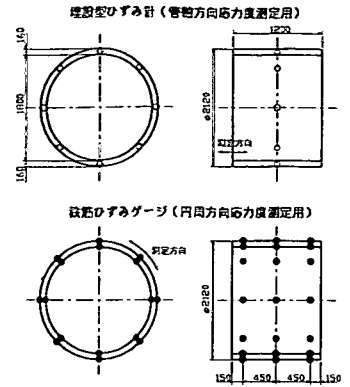


図-5 計測器配置図

5. 計測結果

推進管内に発生した各応力から軸力、曲げモーメント等を算定した結果を以下に示す。

5-1 管軸方向力に関して

(1) 総推力、管軸方向軸力 (図-6、図-7 参照)

① 総推力は掘進距離に応じて増加している。増加割合は直線部より曲線部の方が大きい。総推力は最終的に 3500kN (350t) となり、設計総推力 12600kN (1260t) の約 28% に収まった。

② 管軸方向軸力は坑口に近い程、大きい (Na 170、Na 5、Na 1 の順)。

③ 総推力は管の先端抵抗力 (初期抵抗力) と外周面摩擦による抵抗力に大別される。先端抵抗力は切羽泥水圧と貫入抵抗圧より約 330kN (33t) と想定できる (Na 1 推進管の管軸力に近い)。そのため、周面摩擦抵抗力は、最終到達時に 3170kN (317t) と推定できる。これを管の単位周面積当たりの抵抗力として計算すると、全区間平均で 1.4kN/m² (0.14tf/m²) となる (設計値は 3.8kN/m²)。また、Na 1~170 区間平均では、0.6kN/m² (Na 1 と Na 170 の管軸力の差から算出)、Na 170~坑口区間平均では、1.5kN/m² となり (Na

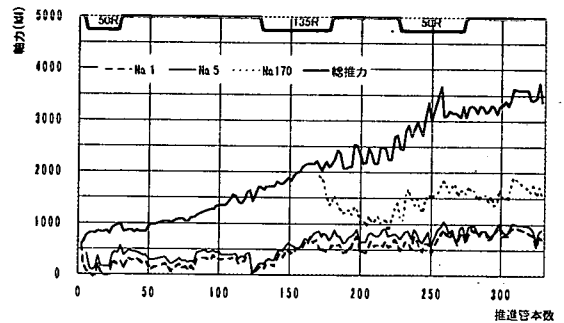


図-6 総推力、管軸方向軸力推移図

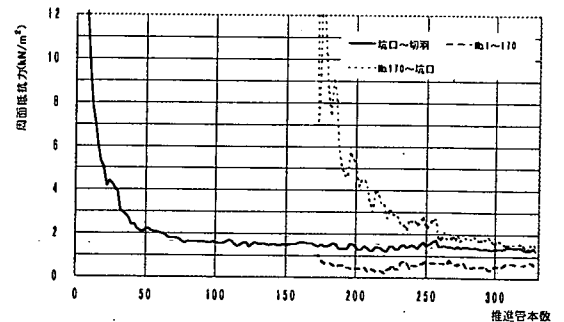


図-7 周面摩擦抵抗力推移図