

長距離・急曲線推進工事における推力伝達

THRUST DISTRIBUTION IN PIPE-JACKING ON A LONG TUNNEL WITH SHARP CURVES

藤森 高輝¹⁾・矢島 英邦²⁾・宮田 信二³⁾・藤井 信也⁴⁾・道嶋 弘志⁵⁾

TakakiFUJIMORI, HidekuniYAJIMA, ShinjiMIYATA, ShinyaFUJII, HiroshiDOJIMA

This jacking project involves such an unusual factors as driving through a long distance tunnel with sharp S curves in complex ground conditions of clay and sandy gravel layers.

Comparisons are made between the actual thrust and the design thrust and influences to the thrust arising from the ground and the alignment are studied.

Strains (and stresses) caused to Hume concrete pipes together with joint-gaps are measured in real-time for grasping the mechanism of thrust distribution and construction accuracy.

It is found that the calculation of the design thrust should be modified if the alignment is with sandy gravel and sharp curved.

Key Word: pipe-jacking, the mechanism of thrust distribution, sandy gravel, sharp S curves

1. はじめに

推進工事においては、基本的に推進とともに追従するヒューム管がそのまま永久構造物（本設）としての機能を求められる場合が多い。しかしながら、推進途中においては地盤や線形の影響等、さまざまな要因により局部的な偏荷重や集中荷重が作用し、ヒューム管の本設としての機能に影響を及ぼす懸念がある。これに対し、現状の管理手法としては、元押し推力のみに依存した管理が主流である。

現在、設計総推力の算出方法が各工法毎に確立されてはいるものの、施工時の総推力が設計推力の半分に満たないケースが数多くある。反面、掘進不能まで推力上昇を引起すケースもある。

推進工事の施工実績は数多くあるが、工事の小規模性から、データ収集、計測、解析事例が少なく、設計手法への反映がされていない。

今回工事は、長距離・急曲線（S字）・複数地盤（粘性土と砂礫層）掘進という注目要素を含むため、元押し推力（実績総推力）と設計総推力との比較をし、地盤や線形が推力に与える影響について考察した。またヒューム管に発生するひずみ（応力）や、目開きをリアルタイムに計測し、出来形と合わせて推力伝達メカニズムの把握を目的とした。

2. 工事概要

2-1 概 要

対象工事は、神奈川県南央部、西湘地区（藤沢市・茅ヶ崎市・平塚市）のガス需要増大に対応するための高圧ライン設置に伴う内径φ1,800mmのヒューム管設置工事である。なお、工法には泥水式を採用した。（図2-1工事平面・縦断図参照）

1) 2) 東京ガス湘南導管 3) 4) 佐藤工業(株)東京支店 5) 佐藤工業(株)土木本部技術部

2-2 特 徴

- (1) 長距離推進 (L=335m) である。
- (2) 急曲線およびバーチカルを含む多曲線推進である。
(平面線形: R=700・400・50・50m、縦断線形: R=200m)
- (3) 複数地盤(粘性土および砂礫層)である。

2-3 地 質

図一1に地質想定図を示す。発進より約140m区間は新規ローム層であり、それより到達まで約200mは、砂礫層となる。新規ローム層はN値4~7が主体の凝灰質粘土(Lm層)である。砂礫層(Dg層)は礫率60%~70%でN値50以上の亜円礫が主体で最大礫径はφ360mmとなっている。

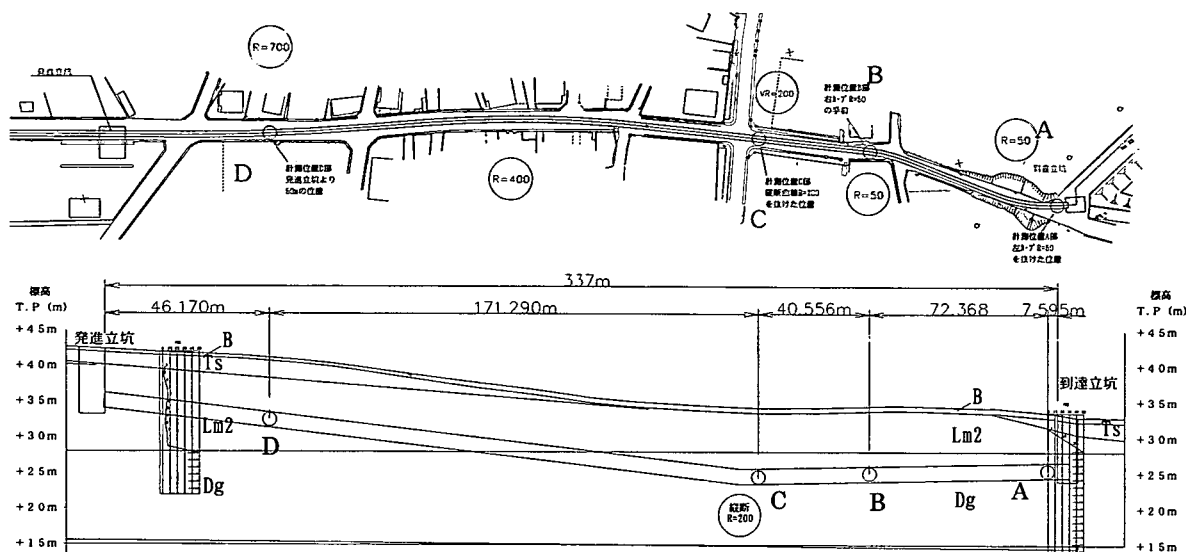


図2-1 工事平面・縦断図

2-4 長距離・急曲線対策

- (1) 管外周抵抗の低減を目的として、推進機の掘削外径を25mmオーバーカットし、発生したテールボイドに滑材を自動注入装置により継続的に注入(量管理)することで、滑材効果の保持を図る。
- (2) 局所的な応力集中を防止する手段として、推進管継手部に塑性領域の広い低発泡性スチロールの推力伝達材(以下センブラリングと称す)を上下90度の範囲で2箇所、曲線半径を考慮した厚さ相当設置し、曲線内側の応力集中防止と中央断面付近での推力伝達による推進管の追従性の向上を図る。
- (3) 推進管は、外径2120mm, L=2430mm, 設計基準強度700kgf/cm²を採用し、急曲線部(50R部)においては目地開口長の検討により、1/2管(L=1200mm)を採用した。(埋め込みカラーラップ長: 170mm, 許容目開き長: 60mm)

また、実施工で用いたヒューム管と同じものより供試体採取し、静弾性試験を行った。図2-2の結果より、ヒューム管に発生するひずみは許容耐力17.5N/mm²より約400μ、局所的には設計基準強度70.0N/mm²より約1600μまでとなる。

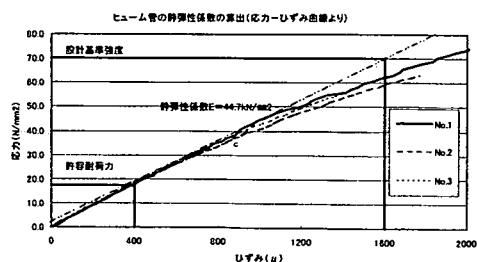


図2-2 静弾性係数試験結果

3. 計測概要

3-1 計測目的

推力伝達状況のメカニズムとセンブラリングの効果を確認するために計測を行った。長距離・急曲線（S字）・複数地盤（粘性土と砂礫）掘進という注目要素を含むため、元押し推力と設計総推力との比較をし、推力伝達メカニズムの把握を目的とした。また地盤や線形が推力に与える影響について着目した。またヒューム管に発生するひずみ（応力）をリアルタイムに計測し、推力伝達メカニズムの把握とセンブラリングの効果を確認を目的とした。

- ①元押し推力に与える影響を把握するため平面線形・縦断線形による地山への片当り、推進の蛇行、土質の変化に着目した。
 - ・設計総推力と元押し推力との比較（線形および地盤変化）
 - ・蛇行量による地山への片当り箇所の選定
 - ・周方向（掘進直角方向）ひずみによる地山へ片当りの識別
- ②センブラリングの効果を把握するために、軸方向ひずみに着目した。
 - ・軸方向（掘進方向）ひずみによる曲線内側への応力集中の判定

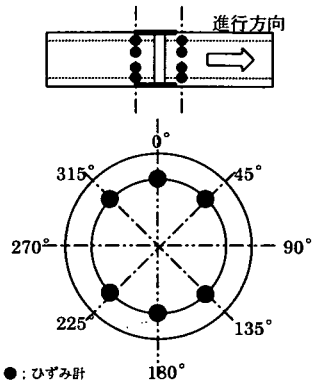


図 3-1 計器設置平面・断面図

3-2 計測内容

① 推力伝達状況の把握について

- ・実績総推力は元押しジャッキ操作盤のジャッキ圧を計測し実績総推力に換算した。
- ・蛇行量については、水平方向は光波距儀計、鉛直方向はオートレベルを使用した。
- ・周方向ひずみについては、軸方向ひずみと同じ箇所と同様に計測を行う。

② センブラリングの効果について

- ・軸方向ひずみについては、図2-1A～D に示す最終計測位置において、急曲線（R=50mS 字）の始点・終点と、R=200mパーチカル終点、および発進から 50m 付近の計 4 箇所（A～D 断面）となるよう配置し、それぞれの箇所において、図3-1に示すとおり各 6 ヶ所×2 列のひずみ計測を軸方向・周方向について測定した。設置目的を表 3-1 に示す。またひずみゲージは、ポリエステル樹脂をベースにした箔ゲージを同成分の接着材によりヒューム管内部の表面に貼付する方式とした。
- ・ヒューム管の目開きは目開き計を用いて計測を行った。計測断面、計測頻度はひずみ計測と等しい。これより得られたひずみと、実際に使用したヒューム管を用いたコンクリートの静弾性係数試験結果（図2-2参照）より応力および推力を算出し、元押し推進ジャッキ荷重（油圧）から算出した推力と比較するものとした。

設置断面	最終位置	設置目的
A	R50 S 字通過	全ての曲線通過時の挙動の把握
B	R50 S 字手前	AB 間（S 字曲線）での消費推力の把握
C	VC200 通過	BC 間（縦断曲線）での消費推力の把握
D	発進より 50m	最終的なヒューム管のひずみ応力の把握

表 3-1 ひずみゲージ設置目的

4. 結果および考察

4-1 推力伝達状況

実績総推力の結果を図 4-1 に示す。この結果より実績総推力は次の 3 つの区間に大別出来る。

- ①粘性土で急曲線を含まない場合
- ②砂礫土で急曲線を含まない場合
- ③砂礫土で急曲線を含む場合

なお①～③の区間における管外周抵抗力をそれぞれ算出し比較した。管外周抵抗力算出結果を表4-1に示す。

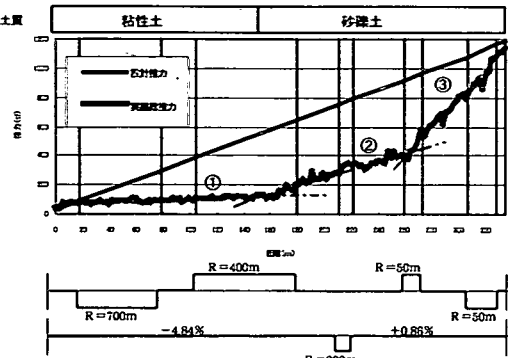


図4-1 設計推力と実績推力の関係

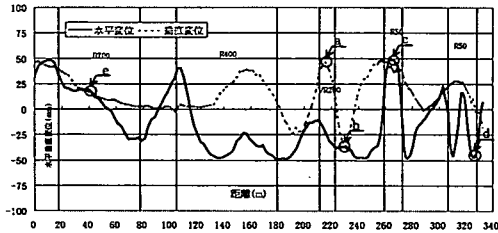


図4-2 平面線形出来形図

区間	管外周抵抗力(設計) (t/t/m ²)	管外周抵抗力(実績) (t/t/m ²)
①	0.52	0.052
②	0.52	0.423
③	0.52	1.472

表4-1 管外周抵抗力逆算表

また、推力上昇に起因するものとして急激な方向修正による影響が考えられる。これを知る上で平面・縦断線形出来形測定を行った。この結果を図4-2に示す。推力上昇の大きいR50区間では約100mmの方向修正が認められるが、他区間での同様の修正においては上昇が認められないことから、方向修正と推力上昇との相関は少ないと思われる。

図4-2におけるa～e点の周方向ひずみに着目した。図4-3に粘性土e点における各断面通過時の周方向ひずみ、図4-4にA断面が砂礫層a～d点を通過する際の周方向ひずみを示した。粘性土では各断面ほとんどひずみが発生しておらず、砂礫層では線形や方向修正によらず同様な変位をしているといえる。次頁に実績総推力との関連を述べる。

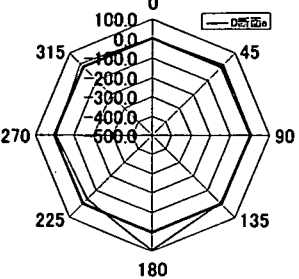
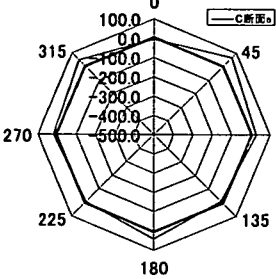
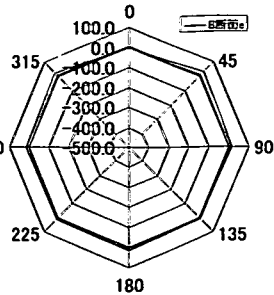
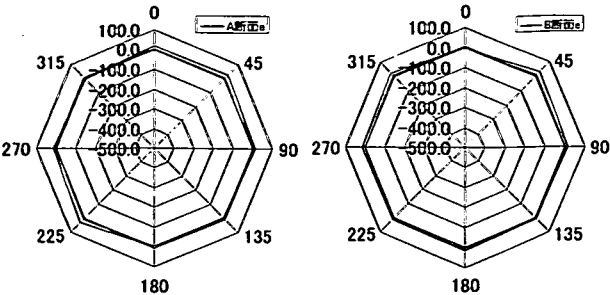


図4-3 粘性土e点における各断面周方向ひずみ

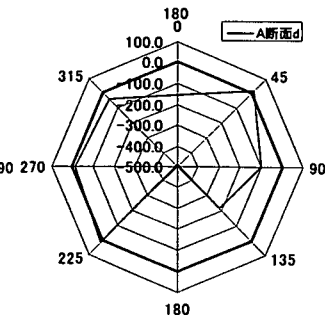
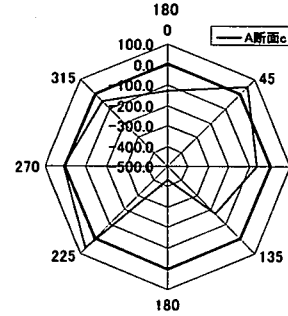
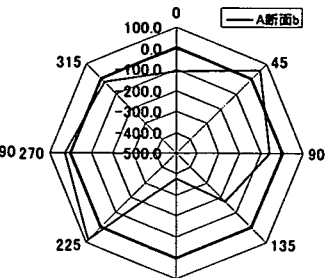
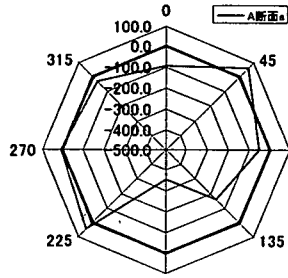


図4-4 砂礫層におけるA断面周方向ひずみ

- ① 粘性土で急曲線を含まない場合、管外周抵抗は 0.052 tf/m^2 であり、設計の 10% 程度であった。周方向のひずみは A~D 断面においても各点で顕著なひずみは認められない。これは地山が自立しておりテールボイドが充分確保され滑材が全周に行渡ることにより管が浮き上がっていると考えられる。
- ② 砂礫土で急曲線を含まない場合、管外周抵抗は 0.423 tf/m^2 であり、設計の 80% 程度であったが、粘性土に比べ約 8 倍の抵抗増となった。周方向のひずみは、A 断面のポイント a・b (図 4-4) については、下端に $300 \sim 400 \mu$ 程度、上端に $200 \sim 300 \mu$ 程度内側変位のひずみが見られる。これは滑材が地山に逸して下端は地山に接し、上端は緩んだ部分の土被り圧が作用するため、上下方向から荷重が加わり、このような変位を起こすものと考えられる。その結果、滑材の地盤浸透による効果の低減および管頂、管底において局部的に礫・玉石と管が接触することにより、このような抵抗増になると考えられる。
- ③ 砂礫土で急曲線を含む場合、管外周抵抗は 1.472 tf/m^2 であり、設計の約 280% と著しい増加傾向を確認した。ただし、この上昇傾向は最初の R50 (右カーブ) 進入直後に発生し、次の R50 (左カーブ) に進入しても管外周抵抗はほぼ一定で、これによる影響は認められなかった。また、推力上昇に起因するものとして急激な方向修正による影響が考えられる。推力上昇の大きい R50 区間では約 100 mm の方向修正が認められるが、他区間での同様の修正においては上昇が認められないことから、相関は少ないと思われる。

4-2 センプラリングの効果

A・B・D 各々の断面が、図 4-5 に示す位置を通過する際の管軸方向のひずみを表したのが図 4-6 である。

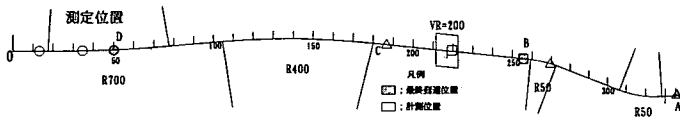


図 4-5 計測位置図

次に直線および曲線通過時のひずみ分布について考察を示す。

A 断面 (△) ; 180m 付近の直線と 270m 付近の R50 を通過する際の比較である。ひずみの傾向にほとんど差異は認められない。このことはセンプラリングが有効に働き、急曲線においてもスムーズな応力伝達が成されていることを示す。

B 断面 (□) ; 縦断曲線通過時の応力伝達を示すものである。ひずみは曲線内側である上部中央へ 1 点集中している。この点のひずみは、許容耐ひずみ 400μ の 1.5 倍である 600μ の値を示した。設計基準強度相当のひずみ 1600μ 未満ではあるが、縦断曲線においては曲線内側への応力集中は避けられないことが確認された。

D 断面 (○) ; 到達直前の推力負担が大きい D 断面の直線と曲線の比較である。曲率半径の大きい R700 (左カーブ) においても、左側 ($225^\circ \sim 315^\circ$) のひずみが増大していることから、センプラリングのつぶれ量が最大域に達し、曲線内側へも応力配分が発生している。

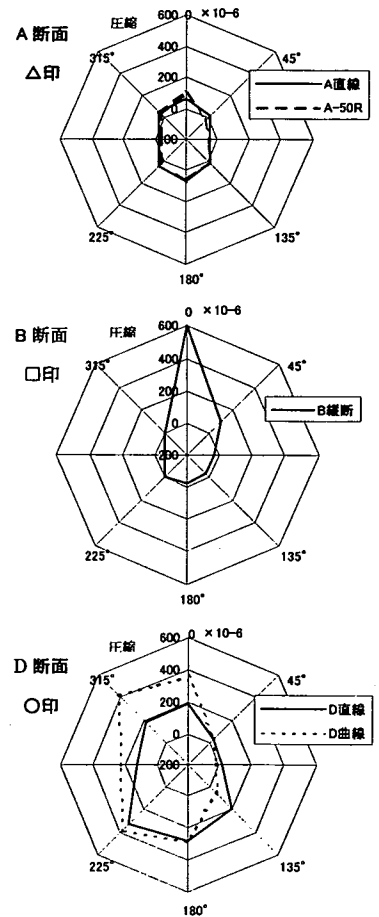


図 4-6 管軸方向ひずみ遷移図

4-3 元押し推力との比較

最初の R50 を通過した位置 (158 本) における、推進中のひずみと推力の遷移を図 4-7 に示す。また、ひずみより静弾性係数試験結果を用いて換算した推力、管外周抵抗および位置関係を図 4-8 に示す。

各々の断面に発生するひずみは、(先端抵抗力) + (切羽～測定断面までの管外周抵抗) によるため、坑口に近い程大きく表れると考えられる。図 4-7 の測定結果からも $A < B < C < D$ の順で管に発生するひずみ量は大きくなっている。

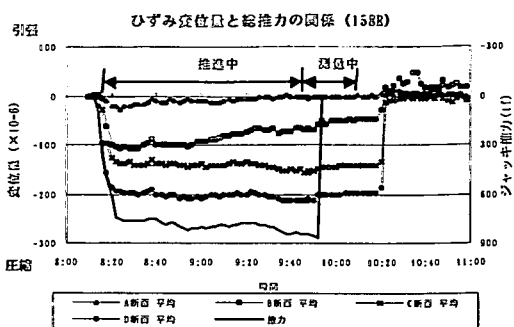


図4-7 ひずみ変位量と総推力の関係

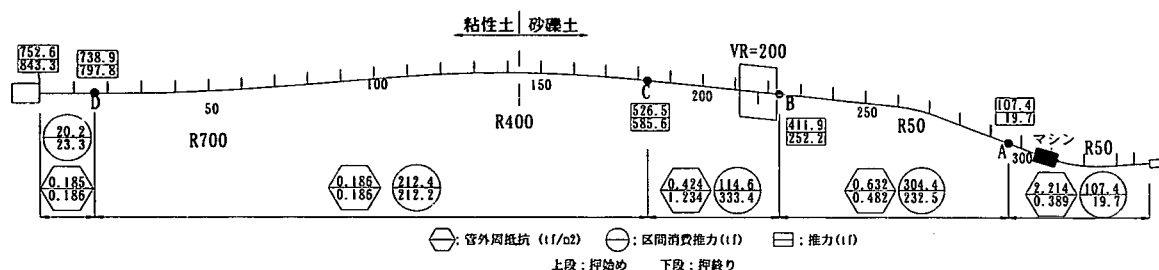


図4-8 換算推力および管外周抵抗図

管外周抵抗は粘性土が 0.186 t/m^2 以下、砂礫土は 0.389 t/m^2 程度と推測できる。また、推進中の挙動として、マシン～A 断面区間の消費推力は 107.4 t から 19.7 t へと減少したのに対し B～C 断面区間では 114.6 t から 333.4 t へと上昇したように、線形等の要素により推力が移行する傾向が見られた。また換算総推力 821 t に対し、推力 843 t とほぼ等しい値であることより、ひずみ計測は有効といえる。

5. おわりに

曲線を造成するためのベンプリングは、推力に応じた発泡倍率、枚数を設置すれば、縦断曲線を通過する場合を除いては十分その目的を果たしたといえる。

蛇行による地山への片当りは認められず、推力の上昇は砂礫による周面抵抗の増大と急曲線部での幾何学的な推力のロスが大きな原因であるといえる。

設計総推力の算出は、掘進距離の増加と、それに伴う推進管の重量の増加が大きな要素となる。特に曲線部は幾何学的な推力伝達の減少分による推力増しか考慮されておらず、良好な余掘部の確保と確実に滑材注入が行われたという仮定のもとに算出されている。

今回の範囲では、総推力は、砂礫土において急曲線を伴う場合、その推力の算出方法を見直す必要があるといえる。また、急曲線の S 字は、その間の直線も含め、曲線の集合体として考慮する必要があると思われる。

推進工法における設計総推力は、ジャッキやヒューム管の選定に大きな影響を与え、推進工事のすべての根幹にかかわるものである。今回の施工結果を見る限り、設計総推力は実施工結果を反映させる余地が十分存在するといえる。