

中心角の大きい急曲線，急勾配推進工事における 推進メカニズムについて

THE MECHANISM OF DRIVING THE TUNNEL BY JACKING METHOD WITH AN OBTUSE-ANGLE SHARP CURVE AND A STEEP SLOPE

鶴岡 裕¹⁾・寺内 保男¹⁾・鹿野 聡²⁾・中野内 美孝³⁾

Yutaka TSURUOKA, Yasuo TERAUCHI, Satoshi KANO and Yoshitaka NAKANOUCHI

The progress of tunneling technique by jacking method is remarkable recently, therefore we can construct curved and sloped tunnels by jacking method without difficulty. However, the process to determine for reasonable design about intermediate jacks or consolidated grouting is not established now. In this report, we explain tunnel behavior by analysis, and estimate about possibility of jacking method with the curved and sloped in very soft ground by these methods. On the basis of the results, the construction work has completed without intermediate jacks and consolidated grouting. This paper describes the method of analysis on the considering of the mechanism by driving the tunnel and measurement of tunnel behavior under driving.

Key Words : jacking method, curved tunnels, sloped tunnels, analysis, tunnel behavior

1. はじめに

推進工法における施工技術の進歩は近年著しく，急曲線，急勾配等の厳しい条件下での施工が可能となってきた。しかしながら，その設計においては，経験に基づく部分が多く，地盤改良等の補助工法の要否，中押し設備の必要性等に関する合理的な検討手法が確立されていないのが現状である。

東京電力(株)では，軟弱地盤に計画された急曲線・急勾配推進工事において，推進時のトンネル挙動を模擬した解析を行い，急曲線・急勾配施工の可能性について評価を行った。そして，その結果に基づき，地盤改良を省略し，中押し設備を用いずに，無事に推進工を完了することができた。本報告は，急曲線・急勾配施工時の推進メカニズムを考慮した解析事例ならびに現場計測結果について報告するものである。

2. 工事概要

本工事は，地中送電用管路を新設するため，延長 104 m の区間を推進工法により施工するものである。平面・縦断線形は，図-1 および図-2 に示すとおり，中心角が 106.8° と非常に大きな平面急曲線（曲線半径 20 m）に続き，縦断曲線（曲線半径 100 m）を挟んで 21.6 % の急勾配となる線形である。

工事箇所は，東京都葛飾区の三方を川に囲まれた沖積平野低地であり，軟弱な粘性土および緩い砂質土で構成される「有楽町層」が地表面下 40 m まで堆積している。トンネル土被りは 4.5 ～ 9.8 m で，推進位置の土質は N 値 0 ～ 1 のシルトおよび N 値 3 のシルト混じり砂である。このような土質条件を考慮し，泥濃式推進工法（超流バランスセミシールド工法）を採用した。

1) 東京電力(株) 東京東支店 流通設備部

2) 正会員 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター

3) 正会員 東電設計(株) 第二土木本部 都市土木部

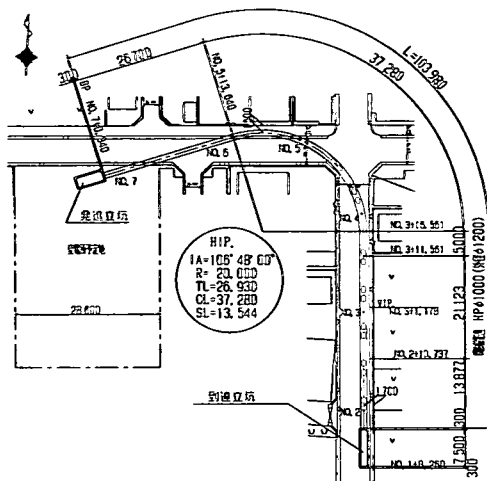


図-1 平面図

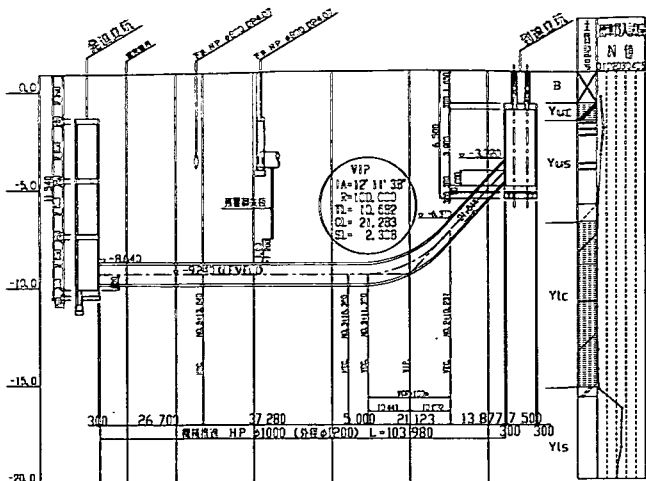


図-2 縦断面図

推進管は、1種 50N、内径φ 1000mm の NS（ニュー・セーフティ）推進管で、急曲線施工に対応して管長を 0.8 m（1/3 管）とした。

3. 急曲線部における推進メカニズム

中心角の大きい急曲線施工において、曲線始点での推進力が曲線終点に向かってどのように伝達されていくかは、幾何学的な見地から次のように表すことができる。

図-3 に示すように、曲線始点から 1 本目の推進管に手前から伝わる推進力を F_1 とすると、 F_1 が作用することにより軸直角方向への分力 F_{N1} が生じる。

$$F_{N1} = F_1 \cdot \sin \alpha$$

ここに、 α ：推進管の折れ角、 $\alpha = 2 \cdot \sin^{-1} [\ell / \{2(R - D/2)\}]$

ℓ ：管長、 R ：曲線半径、 D ：管外径

急曲線部において α が大きくなると F_{N1} が大きくなり、曲線外側の地盤強度が不十分な場合、地盤反力 (F_{R1}) が確保されず推進管は曲線外側へ押し出されることとなる。したがって、所定の曲線半径を保持するためには、地盤反力が十分得られること ($F_{R1} = F_{N1}$) が必要であり、そのとき、1 本目の推進管の推進方向に伝わる推進力 F_1' は、 F_1 と F_{R1} ($= F_{N1}$) の合力として次式で表される。

$$F_1' = \sqrt{F_1^2 - F_{R1}^2} = F_1 \cdot \cos \alpha$$

次に、2 本目の推進管に伝わる推進力 F_2 は、 F_1' から周面摩擦抵抗 (f) を差し引き次式で表される。

$$F_2 = F_1' - f \cdot \ell = F_1 \cdot \cos \alpha - f \cdot \ell$$

このようにして曲線始点から n 本目の推進管の推進方向への合力 F_n' を求めると次のようになる。

$$F_n' = F_1 \cdot \cos^n \alpha - f \cdot \ell \cdot \frac{\cos^n \alpha - \cos \alpha}{\cos \alpha - 1} \quad \dots \dots (1)$$

式 (1) に示したように、曲線始点での推進力 F_1 が n 本目の推進管にどの程度伝達されるか（推進力の伝達率）は、推進管の折れ角、本数、および周面摩擦抵抗に影響され、中心角の大きい急曲線部では、推進管の折れ角が大きく、本数が多くなることから、周面摩擦抵抗を極力小さくする工法が必要とされる。

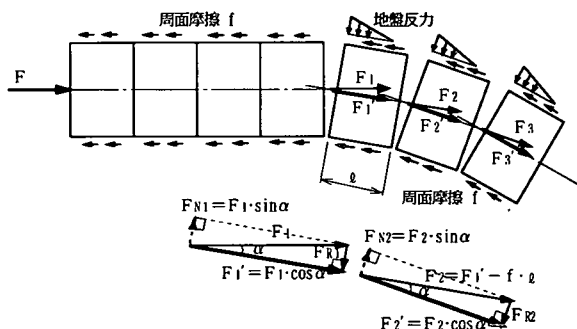


図-3 曲線推進における推進力伝達の模式図

4. 急曲線・急勾配施工の事前解析

前章で示した推進力の伝達機構を踏まえ、本工事における急曲線・急勾配施工の可能性を評価するため、事前解析を行った。

(1) 解析モデル

解析にあたっては、図-4に示すように、推進管を地盤ばねに支えられた梁、継手部をヒンジにそれぞれ模擬し、後端より元押し推進力を作用させた。また、実際のトンネル線形は3次元となるが、簡便のため、縦断曲線を平面に投影した2次元モデルを用いることとし、縦断曲線および急勾配部については、勾配による推進距離の増分を考慮してモデル長を割り増した。

構造条件、地盤ばね定数、作用荷重等の入力条件は表-1に示すとおりである。

ここで、軸方向の地盤ばね（せん断ばね）定数は、解析結果から得られるばね反力が、超流セミシールド協会の推進力算定式で用いられる周面摩擦抵抗値と同等となるような値に設定した。また、先端抵抗を考慮するため先端部に支点ばねを設置し、同様に、解析結果から得られる支点ばね反力が、推進力算定式で得られた先端抵抗値と同等となるように、ばね定数を設定した。

(2) 推進力の伝達に関する評価

解析結果より、推進力の伝達状況を調べるため、元押しでの軸力（推進力）と先端での軸力を比較した（表-2参照）。これより、本工事の急曲線、急勾配を考慮しても、元押し推進力は先端まで伝達される（伝達率11%）ことを確認した。

また、前章で示した理論式(1)より、平面曲線始点での推進力と平面曲線終点での推進力との関係を図-5に示し、これに解析値（施工段階の異なる2ケース）をプロットすると理論式に合致していることから、本解析モデルは曲線部での推進力伝達機構をよく再現しているといえる。

(3) 地盤反力に関する評価

曲線部における軸直角方向の地盤反力は、平面曲線始点付近で最大46kN/m²、縦断曲線始点付近で最大10kN/m²と、ともに原地盤の強度113kN/m²より小さいことから、地盤改良による強度増加を行わなくとも十分な地盤反力が確保できると判断した。

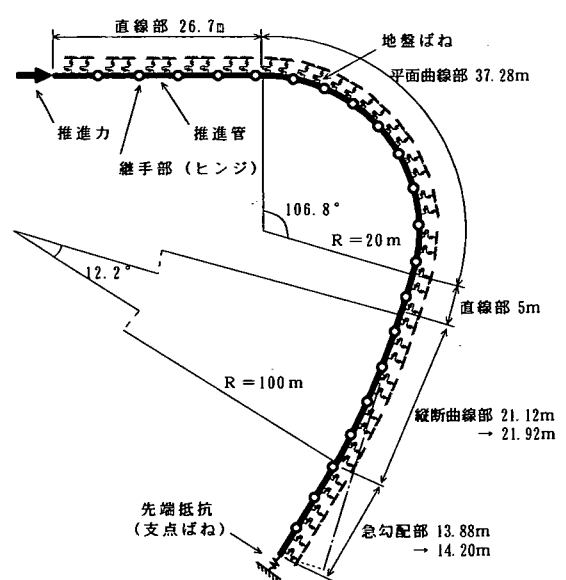


図-4 トンネル縦断方向の解析モデル

表-1 入力条件

内 径 ϕ (mm)	1000
外 径 D (mm)	1200
弾性係数 E (kN/m ²)	3.24×10^7
断 面 積 A (m ²)	3.46×10^{-1}
断面二次モーメント I (m ⁴)	5.27×10^{-2}
軸直角方向の地盤ばね定数 k_{gv} (kN/m ³)	1100
軸方向の地盤ばね定数 (せん断ばね) k_{gu} (kN/m ³)	平面曲線部 1.5 その他 1.2
先端部の支点ばね定数 K (kN/m)	96
元押し推進力 F (kN)	平面曲線終点まで 461 到達まで 608

表-2 推進力の伝達状況の比較

着目範囲	着目点の軸力 (kN)		伝達率 (%)
全 区 間	元 押 し	先 端	11
平面曲線部	曲線始点 480	曲線終点 263	55
縦断曲線部	曲線始点 240	曲線終点 138	58

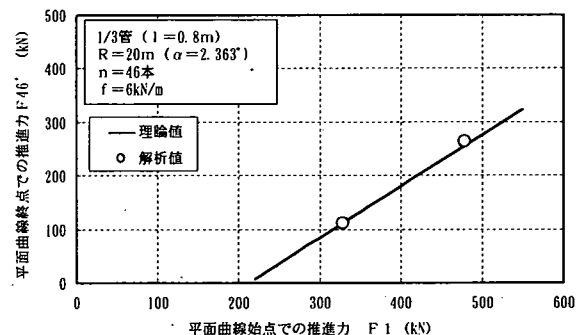


図-5 平面曲線部における推進力の伝達

(4) 目開き量に関する評価

解析結果より、推進管の折れ角を算定した結果、平面曲線始点付近で局所的に 4.0° （設計値 2.4° ）と大きくなる箇所が生じることがわかった。実際の施工では緩衝材を挿入して曲線内側でのポイントタッチを防止することを考慮し、曲線内側の目開き量を 5mm として上記折れ角より曲線外側の最大目開き量を算定すると 87mm となり、NS推進管の許容目開き量 60mm を超える。

そのため、NS推進管の曲げ水密試験を実施し、継手部のゴム輪1本が機能する限界目開き量 110mm において、当該地盤の地下水圧 0.1MPa に対して止水性能に問題がないことを確認した。

(5) 地盤反力に対する推進管横断面の安全性評価

曲線部での地盤反力が推進管横断面に偏荷重として作用することに対する推進管の安全性を評価するため、横断面の構造解析を行った。その結果、ひび割れ荷重により求まる抵抗モーメント M_r と推進管の曲げモーメント M との比は 2.35 と、安全率 1.2 を満足することを確認した。

(6) 事前解析のまとめ

事前解析の結果より、①元押し推進力が先端まで伝達されること、②曲線外側への地盤反力に対して原地盤の強度が十分であること、③継手部の目開き量に対して止水性能に問題がないこと、④急曲線部での地盤反力に対して推進管横断面の構造上の安全性が確保されることから、本工事では、急曲線部での反力確保のための地盤改良を必要とせず、かつ、中押し設備を設置しなくとも元押し推進力のみで全区間推進することが可能であると判断した。

5. 現場計測による検証

(1) 計測の概要

事前解析で得られた推進管の挙動を確認し、解析手法の検証を行うため、現場計測を行った。

計測は、図-6に示すように、No.1, No.41, No.85 推進管の3断面を対象とし、推進管軸方向および円周方向のひずみ、推進管外周面の土圧、継手部の目開き量等の各データを、元押し推進力とともに、自動計測により同時刻、同頻度で記録した。

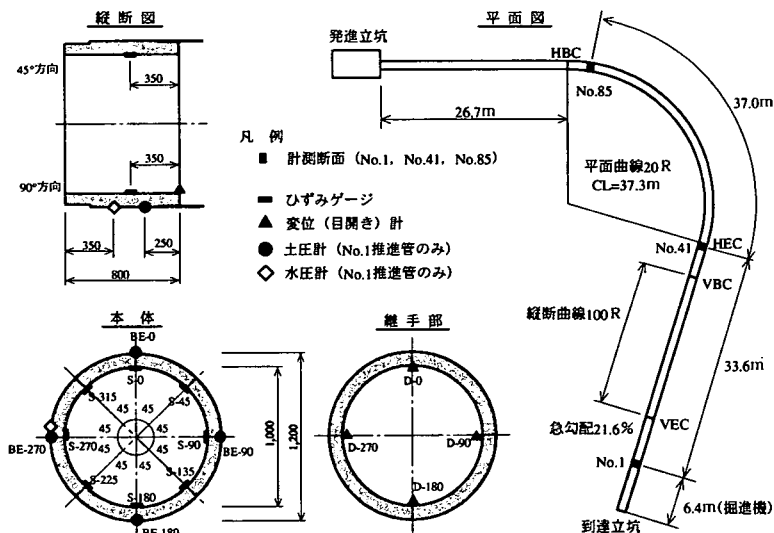


図-6 計測位置図

(2) 推進力（軸力）の伝達状況

推進管の軸方向ひずみより各断面の平均ひずみを求めて応力に換算し、これに管の有効断面積を乗じて軸力を算定した。軸力算定に用いたひずみデータは、推進1回毎の停止時から推進時の増分を用いた。

各計測断面が平面曲線始点あるいは終点を通過する施工段階に着目し、元押し推進力（停止時からの増分）と各断面の軸力を、発進立坑からの距離との関係で図-7に示す。これより、区間Ⅰ（坑口から平面曲線始点までの直線区間）および区間Ⅲ（平面曲線終点から到達側の急勾配を含む区間）に比べ、区間Ⅱ（平面急曲線区間）では軸力の減衰が少ないことがわかる。ただし、区間ⅡおよびⅢでは推進管のひずみから求めた軸力どおしを比較しているのに対し、区間Ⅰではジャッキ圧から求めた推進力とひずみから求めた軸力とを比較しているため誤差が含まれるものと考えられる。

そのため、区間ⅡおよびⅢに着目し、軸力の傾きより周面摩擦抵抗値を算定したところ、区間Ⅱでは平均 0.2kN/m^2 （設計値は 1.5kN/m^2 ）、区間Ⅲでは平均 1.0kN/m^2 （設計値は 1.2kN/m^2 ）であり、区間Ⅱの周面摩擦抵抗値は区間Ⅲより小さく、設計値の13%程度であった。その原因として、図-10に示す推進管外周面での土圧計測結果より、平面曲線始点から約10mの区間で土圧が下がっており、この区間で地盤による拘束が小さくなっていること、および、急曲線部では推進管が曲線外側に片寄り接地面積が小さくなること、等が考えられる。また、区間Ⅲの方が区間Ⅱより周面摩擦抵抗が大きい理由としては、急勾配部での自重の影響等が考えられる。

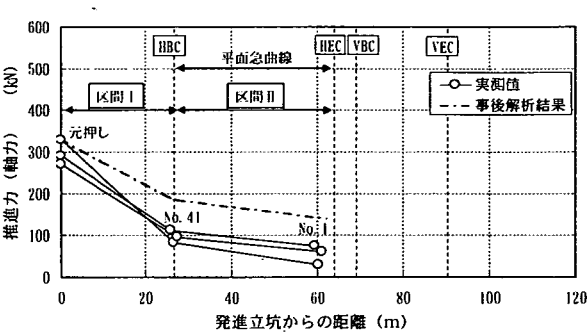
そこで、次に、図-7に示した各施工段階を対象に、元押し推進力および周面摩擦抵抗値の実績値を考慮し、事前解析と同様のモデルによりトンネル縦断方向の解析（事後解析）を行った。事後解析の結果は、図-7に併記したとおり、実績値に近い値が得られており、周面摩擦抵抗値の適切な設定により、本解析モデルを用いて推進力（軸力）の伝達状況を再現できることが確認された。

(3) 推進管の折れ角

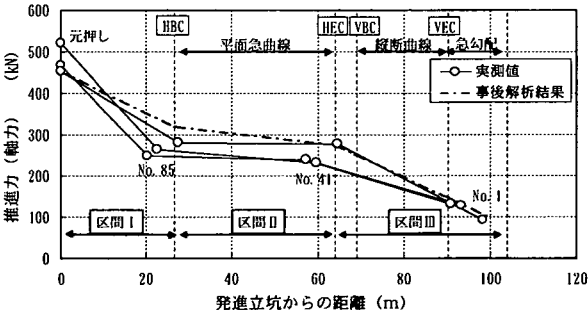
No.1 および No.41 推進管で計測された目開き量より、推進管の折れ角を算定し、推進距離との関係で図-8 および図-9 に示す。

いずれの推進管も平面曲線始点通過時において折れ角は最大となり、かつ、計画値（線形から幾何学的に求まる値）よりも大きくなった。折れ角の実測最大値は No.1 で 2.7° 、No.41 で 2.6° であり、これに対して施工実績を反映した事後解析の結果では、それぞれ 3.2° および 3.5° とほぼ近い結果を得ることができたことから、解析モデルの妥当性を確認した。

解析値の方が若干大きくなった理由としては、解析では継手部をヒンジ構造としているのに対し、実際には止水ゴム等の拘束により継手部が完全に自由な状態ではないことが考えられる。したがって、より厳密な解析を行うためには、継手部を回転ばね等により評価することが考えられる。



(a) No.41 が平面曲線始点を通過する段階



(b) No.85 が平面曲線始点を通過する段階

図-7 推進力（軸力）の伝達状況

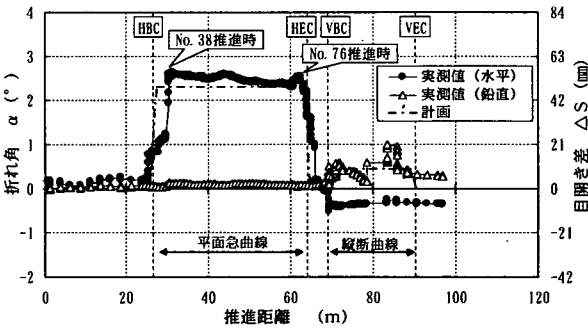


図-8 No.1 推進管の折れ角の実績

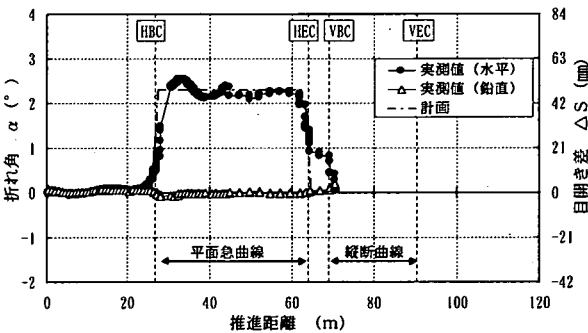


図-9 No.41 推進管の折れ角の実績

(4) 曲線部での地盤反力

推進管外周面における停止時と推進時の土圧差をみると、図-10に示すとおり、直線部、曲線部ともに、推進時に土圧が大きくなる傾向があるが、この傾向は曲線外側、内側とも同様であり、掘削機の泥水圧等の影響によるものと考えられる。

曲線部において曲線外側から地盤反力が作用する傾向はさほど顕著ではないものの、図-8において推進管の折れ角が特に大きかった平面曲線始点、終点付近などでは、曲線外側の土圧が推進時に大きくなっており、曲線推進に伴う地盤反力の作用状況が捉えられている(図-11参照)。これは、前述した曲線部での推進力伝達機構に示したように、折れ角が大きいほど推進力の水平分力が大きくなることを表している。

次に、事後解析結果より、平面曲線始点付近の推進管に着目して地盤反力の分布形状を調べたところ、各推進管に三角形分布の地盤反力が作用していることが判明した(図-12参照)。これは、推進管の後端部が曲線外側に振られるような挙動をしながら推進することによるものと考えられる。

また、土圧計の設置位置(推進管の後端から25cm)を考慮して、図-12に実測値をプロットすると、解析値とほぼ一致した。したがって、推進管の折れ角と同様、本解析モデルを用いて施工段階を考慮した解析を行うことにより曲線推進時の地盤反力についても評価できると考えられる。

6. おわりに

以上に示したように、急曲線・急勾配推進施工を模擬した解析を行い、推進力の伝達機構やトンネル挙動を明らかにするとともに、解析モデルの妥当性を現場計測により検証した。その結果、周面摩擦抵抗値および元押し推進力の実績値を用いた事後解析において、トンネル軸方向の軸力の分布、推進管の折れ角、曲線部の地盤反力が実測値に合致したことから、本解析モデルで実際のトンネル挙動を再現できることが確認された。ただし、設計時に設定すべき周面摩擦抵抗値あるいは設計推進力に関しては、その適切な設定方法を検討する必要があるため、今後、更なるデータの蓄積と詳細な分析が必要であると考えられる。その上で、本解析モデルを適用することにより、複雑な線形を有する推進トンネルに対して、急曲線防護工および中押し設備の必要性、目開きに関する評価等を含む推進工法の合理的な設計が可能になると考えられる。

<謝辞>

本検討を進める上で、現場計測ならびに施工データの収集においては(株)関電工 協政美氏、藤田泉氏に多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

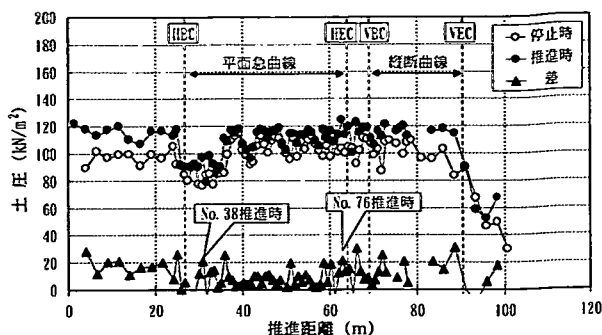


図-10 土圧の推移 (No.1 推進管・曲線外側)

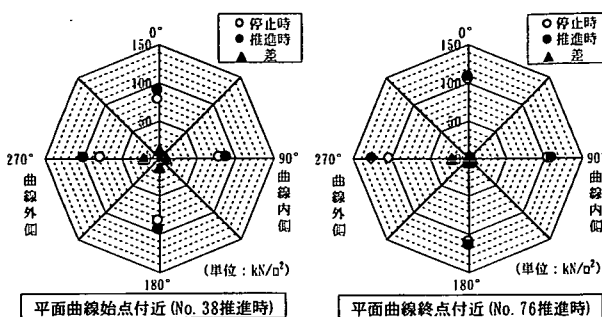


図-11 推進管断面の土圧分布

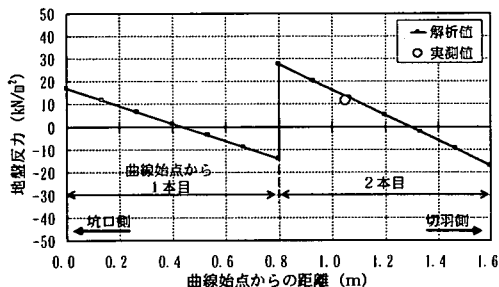


図-12 地盤反力の分布形状