

泥水式シールドの面板の山留め効果に関する一考察

A STUDY ON SUPPORT EFFECT BY CUTTER HEAD OF SLURRY SHIELD

山崎 宏¹⁾・大塚正博²⁾・渡辺 徹¹⁾・磯 陽夫¹⁾・坪井広美³⁾

Hiroshi YAMAZAKI, Masahiro OTSUKA, Toru WATANABE, Akio ISO, Hiromi TSUBOI

The mechanism of face stability under slurry shield tunnelling method is ordinary regarded that slurry pressure transferred through mud cake is balanced earth and water pressure at cutting face. However, recent experiments on slurry shield report that support effect by cutter head contributes to face stability besides slurry pressure. Therefore we measured axial thrust of cutter head under construction and researched support effect by cutter head.

As the results of research, axial thrust and its scatter showed specific tendency to soil. The scatter of axial thrust was affected by strength of soil and existence of gravel.

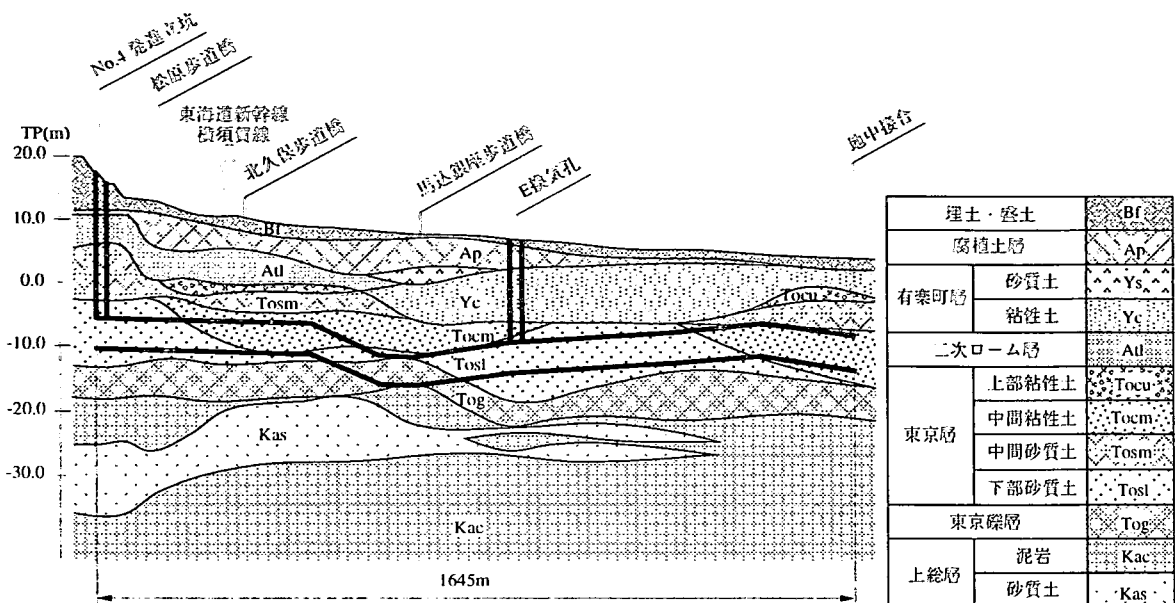
Key Words: shield tunnel, slurry shield, face stability, axial thrust

1. はじめに

泥水式シールド工法の切羽安定機構は、泥膜を介して伝達される泥水圧が、切羽面に作用する土水圧に対抗することで成り立っていると考えられている¹⁾。このため、地盤条件に応じた泥水圧を適切に設定することが、切羽の安定を図り地盤変状を抑えるうえで重要であり、掘削管理もこの考え方に基づいて泥水圧を設定しているのが一般的である。しかし、最近の実験的研究²⁾によれば、切羽面において加圧された泥水が地盤に浸透して地山の間隙水圧を上昇させ、結果として有効泥水圧(=切羽水圧-間隙水圧)を小さくしていること、また面板による山留め効果が少なくないことなどが示されている。このため、実工事における切羽安定機構を解明するためには、泥水圧以外に、面板に作用するスラスト力や面板近傍の地山の間隙水圧を詳細に計測する必要があると考えられる。しかし、間隙水圧については設置位置を始め、コスト面などから、実験に示されているような条件で間隙水圧計を設置することが困難なのが実状である。

そこで、筆者らは実工事における面板による山留め効果を確認する第一段階として、東京電力(株)環7東海松原橋管路新設工事(3工区)において、泥水シールド機のセンターシャフトのひずみを計測し、面板に作用するスラスト力を把握することとした。本報では、事前に工場内で実施したセンターシャフトのひずみ計測に関するキャリブレーションの結果と、実工事から得られたスラスト力と地盤および掘削条件との関係を整理した結果について報告する。

1) 正会員 西松建設(株) 技術研究所 土木技術課
2) 正会員 東京電力(株) 地中線建設所 大森工事事務所
3) 正会員 西松建設(株) 関西支店・平野川シールド出張所



図－1 地質縦断面図

2. 地質概要およびシールドの諸元

地質概要図を図－1に示す。トンネル路線は谷底低地に位置しており、その地層は上層より沖積層（腐植土層、有楽町層）、および洪積層（二次ローム層、東京層、礫層、上総層）で構成されている。地下水位は、ほぼ腐植土層の上面と一致している。シールドトンネル部のおもな土質は、発進部から洪積砂質土層（N値30～40）、200～500m区間で洪積粘性土層（N値10～15）、650～750m区間で東京礫層（N値50以上）となっており、その後、洪積砂質土層（N値45以上）を再度通過し、到達部（地中接合）付近では東京層の中間粘性土層（洪積層、N値10）となっている。

シールド機の仕様を表－1に示す。面板はセンター支持方式を採用している。このため、シャフト内部にひずみゲージを設置できること、計測システムの簡略化が可能であること、防水性に優れていることなどスラスト計測に対し有利な条件となっている。

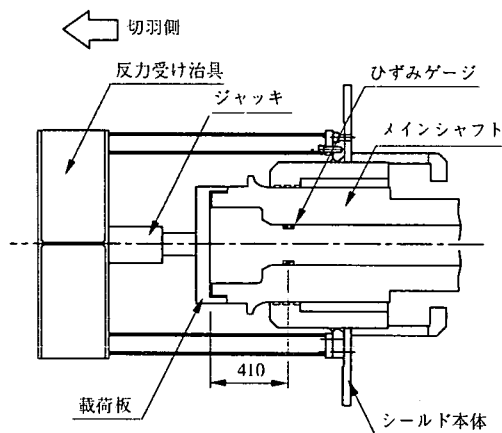
表－1 シールド機の仕様

シールド外径	φ4950mm
シールド機長	7050mm
シールドジャッキ	150tf×16本×1650st
装備推力	2400tf
掘削トルク	152tfm(常時), 182tfm(最大)
面板開口率	31.0%
中折れ装置	後胴押し

3. キャリブレーション

3.1 試験目的および試験方法

面板に作用するスラスト力とシャフトに発生するひずみの関係を把握することを目的とし、実機のセンターシャフトの载荷試験を実施した。試験は、図－2に示す



図－2 予備载荷試験概要図

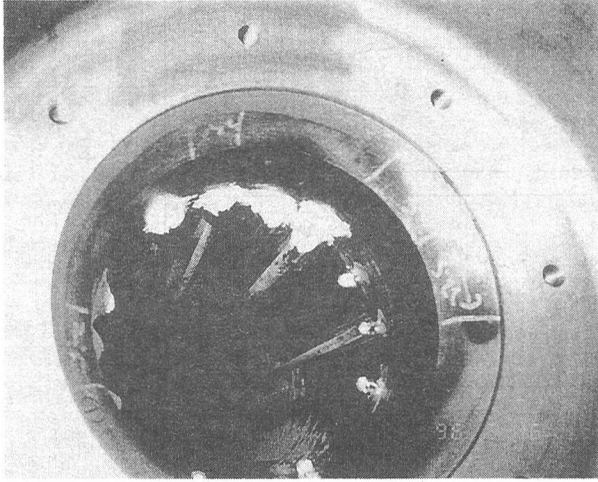


写真-1 ひずみゲージ貼付状況

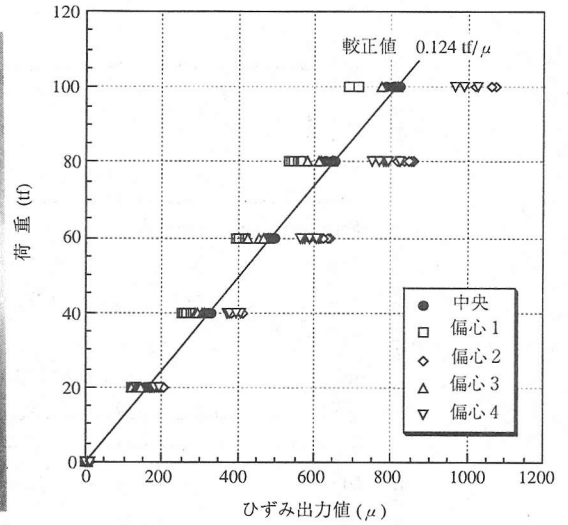


図-3 載荷荷重とひずみ出力値の関係

ように、実機のシャフト部と反力受け治具を接続し、ジャッキにより集中荷重を載荷した。センターシャフト方式のシールドでは、シャフトに作用する外力は純粋なスラストだけでなく、偏心荷重による曲げが作用すると考えられる。したがって、ひずみゲージは曲げ成分を消去するようなブリッジ回路に組み、スラスト成分のみを検出できるように配慮した。ひずみゲージの貼付状況を写真-1に示す。また、集中荷重をシャフト中心以外に20cm偏心させた条件(4点)でも載荷し、その出力値の違いについても確認した。

3.2 較正值

荷重とひずみ出力値の関係を図-3に示す。出力値は、同一点の載荷条件では線形の関係があり再現性も良いが、シャフト中央に載荷したときの出力値に対し偏心させた条件では10～15%の違いを生じた。実工事のデータ整理に当たっては、荷重の載荷位置を特定できないことから、これらすべてのデータに対し一次式で近似したものを較正值として用いることにした。

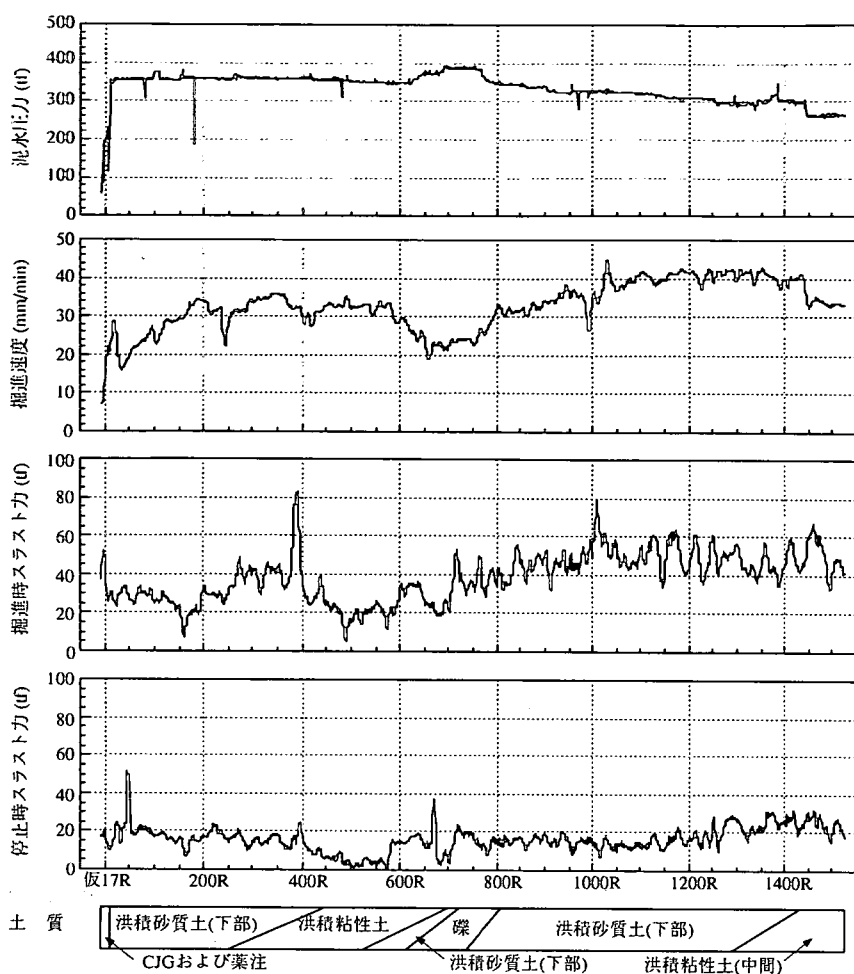
4. 計測結果と考察

4.1 計測項目

計測項目は、センターシャフトのひずみ計測のほかに、切羽水圧、ジャッキスピード等も含めた。

4.2 スラスト力の推移

シールド停止時と掘進時のスラスト力および掘進速度、泥水圧力の推移を図-4に示す。掘進時のスラスト力は、最大値が85tf、最小値が5tfとなっており、それぞれ洪積砂質土から洪積粘性土へと地盤が変化する400R付近と、洪積粘性土区間の500R付近で生じている。トンネル路線全体を見ると、前半では概ね20～40tfのスラスト力が作用しているが、中間部の礫地盤から徐々に増加して、後半の洪積砂質土区間では30～60tf程度となっており、前半部の2倍弱のスラスト力が作用している。一方、掘進速度との関係で見ると、451～550Rの洪積粘性土区間を除き、掘進速度の速い方が高いスラスト力を示す傾向が認められる。このため、土質および掘進速度との関係を考察することにした。なお、停止時のスラスト力は、洪積粘性土区間を除き、ほぼ20tf前後の値を示していることから、掘進時とは異なり常に一定の力で山留め効果を発揮していることが認められる。



図－４ スラスト力の推移

4.3 スラスト力と泥水圧力および有効泥水圧の関係

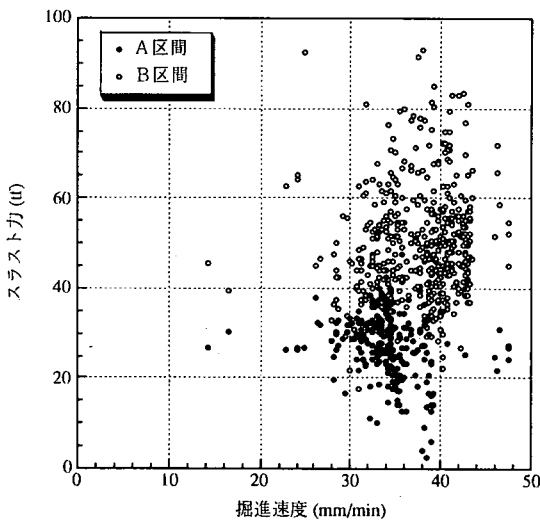
泥水圧力（泥水圧×断面積）の推移を見ると、礫層区間で若干高い設定となっているが、地盤改良区間を除き300～400tfで推移しており、掘進時のスラスト力は、泥水圧力の10～20%に相当しており、停止時のスラスト力は、泥水圧力の5%に相当している。一方、透水性土質（砂質土、礫層）について、地下水位から間隙水圧を設定して有効泥水圧を算出し、切羽の山留め力（有効泥水圧＋スラスト力）に対するスラスト力の分担率を求めた結果、掘進中のスラスト力は山留め力の約65%を占めていた。すなわち、山留め力としては、有効泥水圧よりもスラスト力の方が大きいことが判明した。この結果は、間隙水圧の計測を行わなかったことからあくまでも推定にすぎないが、泥水式シールド工法の切羽安定機構の考察において、スラスト力の計測が重要な要素であることを示唆していると考えられる。

4.4 スラスト力と土質の関係

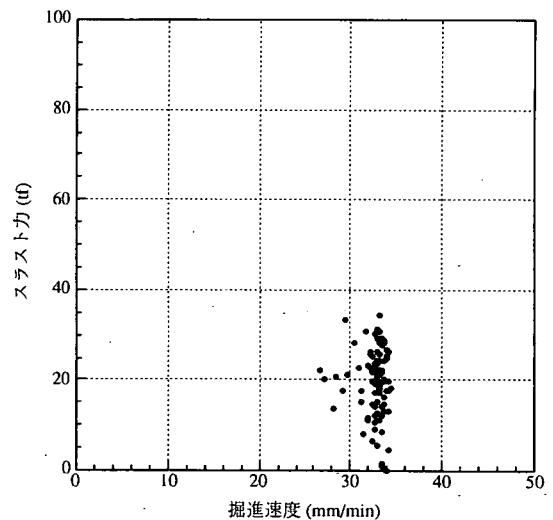
各土質区間ごとの平均スラスト力と標準偏差を表－2に示す。スラスト力に着目すると、停止中および掘進中とも451～550Rの洪積粘性土区間が最も小さい値を示す。ただし、この表からは粘性土を除く各区間において、スラスト力と土質の関係が明確でないため、掘進速度の影響と併せて考察することにした。次に、スラスト計測値のばらつきの程度を示す標準偏差に着目すると、地盤改良部（CJG）が最も大きく451～

表－２ 各区間の平均スラスト力と標準偏差

リング No.	土 質	停止中		掘進中	
		スラスト力 (tf)	標準偏差 (tf)	スラスト力 (tf)	標準偏差 (tf)
仮10～仮16R	地盤改良(CJG)	18.10	19.79	48.88	26.17
仮17～13R	地盤改良(薬注)	12.40	5.49	31.29	17.06
14～250R	洪積砂質土（下部）	18.95	6.16	26.43	7.58
251～450R	砂質土→粘性土	14.20	6.80	39.31	14.74
451～550R	洪積粘性土（中間）	4.90	5.12	19.38	7.46
551～670R	砂、粘土、礫の互層	12.96	10.23	26.79	9.48
671～770R	東京礫層	15.14	13.08	33.15	14.30
771～800R	礫層→砂質土	13.55	5.74	36.87	11.09
801～1300R	洪積砂質土（下部）	15.92	7.42	48.92	12.56
1301～1450R	下部→中間粘性土	24.58	8.00	46.12	9.02
1451～1527R	洪積粘性土（中間）	24.36	8.44	50.47	12.04



図－５ スラスト力と掘進速度の関係（砂質土）



図－６ スラスト力と掘進速度の関係（粘性土）

550Rの洪積粘性土区間が最も小さい。また、地盤改良部を除く各土質区間を比較すると、東京礫層区間の標準偏差が比較的大きな値を示す。このことから、標準偏差の大きさには地盤の強度と礫の存在が影響していると考えられる。

4.5 スラスト力と掘進速度の関係

スラスト力と掘進速度の関係を図－５～７に示す。ここで、図－５におけるA区間およびB区間とは、それぞれ下部洪積砂質土層のうち、14～250R区間および801～1300R区間を指す。また、1451～1527R区間の粘性土層については、一部砂質土層を含んでいたため図－６に示していない。

(1) 砂質土

スラスト力と掘進速度の相関関係は明確でない。A、B区間のN値はA区間で平均35、B区間で45以上となっており、N値の大きいB区間の方がスラスト力の分布が大きい。また、同一掘進速度では、B区間の

方が大きなスラスト力が作用していることがわかる。このことから、掘削地盤が硬いと掘進速度が一定でもスラスト力は大きく、またその変動が大きいことがわかる。

(2) 粘性土

掘進速度がほぼ一定であったため一概には言えないが、スラスト力と掘進速度の間に相関関係は見られない。スラスト力は、砂質土層に比べ全体的に小さく変動も少ない。これは、地盤強度が低いほど、ビットの貫入抵抗やその変化が少なくなるためと考えられる。

(3) 礫層

スラスト力と掘進速度の相関関係は明確でない。粘性土よりも遅い掘進速度であるが、スラスト力は大きな変動を示している。これらのことは、礫の分布や大きさなどのばらつきの程度がスラスト力に影響を与えたものと推定できる。

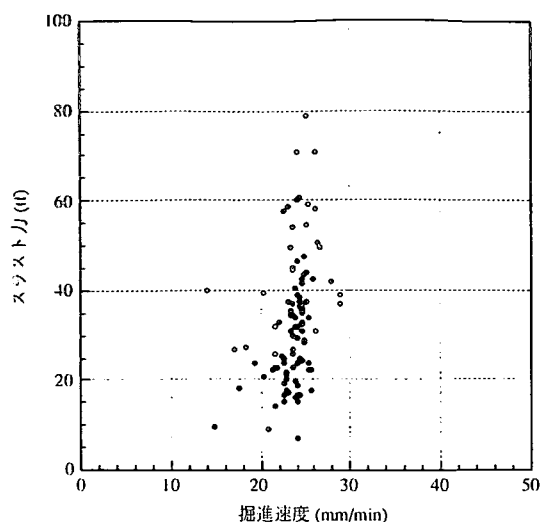


図-7 スラスト力と掘進速度の関係（礫層）

5. まとめ

実工事におけるスラスト計測結果から得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ① スラスト力の大きさと分布の程度は各土質によって特有の傾向を示すこと、また、各土質におけるスラスト力と掘進速度の相関性はほとんど無いことが判明した。
- ② スラスト力のばらつきは、地盤強度や礫の存在が影響しており、強度が高いほどまた礫層になるほど、その程度が大きくなること傾向を示した。
- ③ 値としては小さいが、シールド停止中もスラスト力が作用しており、山留め効果を発揮していることが判明した。

今回の計測で、掘進中における山留め力は有効泥水圧よりもスラスト力が大きいこと、停止中にもスラスト力が作用していることなど、面板が切羽安定に関係していることが示された。

今後は、間隙水圧の計測を含め、軟弱地盤の同規模のシールド工事において計測を行い、面板による山留め効果を明らかにしていきたいと考えている。

謝 辞

スラスト計測にあたり、東京電力(株)松尾和俊氏、西松建設(株)水口宇市氏、三菱重工業(株)森 輝幸氏、松永 聖氏、谷本公正氏に多大な尽力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 「シールドトンネルの掘進管理」連載講座小委員会：シールドトンネルの掘進管理(2) 切羽安定管理(1) 泥水式シールド、トンネルと地下 vol. 28, No.7, pp.67 ~ 74, 1997.
- 2) 栗原和夫, 森 麟, 田村昌仁: 泥水式シールドの適正泥水圧に関する実験的研究, 土木学会論文集 第409号/VI-11, pp.102 ~ 111, 1989.