

併設シールドトンネルの付加土圧に関する実験的研究

Experimental study on the additional earth pressure in neighboring construction during shield machine advancement

細川勝己¹⁾・小宮一仁²⁾・赤木寛一³⁾

Katsumi HOSOKAWA, Kazuhito KOMIYA, Hirokazu AKAGI

In case of the design of the neighboring construction of tunnel, it is necessary to take account of the influences of tunnelling on the pre-existing structures. These influences are experimentally investigated using model test apparatus of a pair of tunnels. The deformation of the pre-existing tunnel during a twin tunnel construction is estimated by model tests in detail and the pressure applied to the pre-existing tunnel is calculated using the boundary element analyses.

Key Words: Shield tunnelling method, neighboring construction, model test, excavation, Sandy soil

1. はじめに

都市部の地下は、各種のインフラがかなり輻輳した状態にあるため、これから新しく地下構造物を施工する際には、既設構造物と近接して施工せざるを得ない状況が増大している。近接構造物の施工にあたっては、今まで以上に周辺地盤や既設構造物へ影響を与えないように慎重かつ正確な施工が求められる。

以上のような背景を踏まえ、本研究では、大型土槽を用いて飽和砂地盤中に構築される2本の近接シールドトンネルを想定した泥水式シールド模型の掘進実験を行い、後行トンネルのシールド機掘進が既設線状構造物に及ぼす影響を調査した。実験のパラメータとしては、泥水圧、掘進速度、カッター回転数、カッターディスクのスリット開口率などがあげられるが、今回は、泥水圧の違いが泥水式シールドの掘進特性と既設構造物に与える影響、特に付加土圧について検討した。

2. 実験概要

図-1に泥水式シールド模型実験装置の概略を示す。土槽の内寸法は、 $1400 \times 1400 \times 1600\text{mm}$ で、シールド機模型は外径 $D=215\text{mm}$ の鋼製円筒形で先端にはカッターディスクが装着されている。2本の近接トンネルの位置関係を図-2に示す。先行トンネルと後行トンネルの離隔は $64.5\text{mm}(=0.3D)$ である。また、シールド機掘進による先行トンネルの内周面応力を測定するために、図-3に示すように先行トンネルの内側に、 45° の等間隔でひずみゲージを貼り付けた。計測断面は、シールド機の掘進距離 600mm における切羽面に一致する箇所とした。なお、先行トンネル模型には、硬質塩化ビニル管(VU200)を用い、その寸法は外径 216mm 、厚さ 6.5mm 、長さ 1000mm 、弾性係数は $3.0 \times 10^6 \text{kN/m}^2$ であり、両端を完全固定した。

実験条件を表-1に示す。実験手順は、次のとおりである。まずシールド発進口とシールド到達部に発進到達

1) 正会員 西松建設(株) 技術研究所

2) 正会員 千葉工大 工学部 土木工学科

3) 正会員 早稲田大学 理工学部 土木工学科

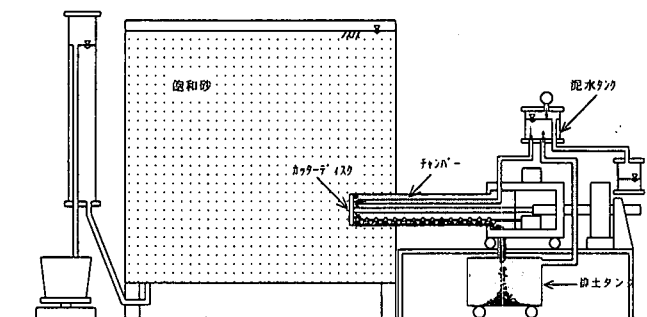


図-1 泥水式シールド模型の実験装置

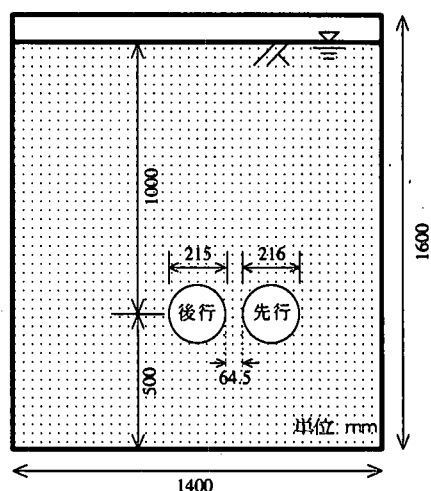


図-2 2本の近接トンネルの位置関係

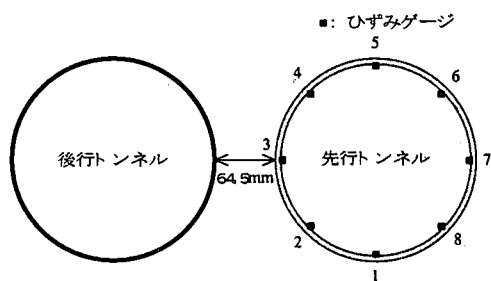


図-3 ひずみゲージの設置位置

表-1 実験条件

地山試料	使用泥水	泥水圧 kN/m ²	スリット開口率 %	掘進速度 cm/min	カッター回転数 rpm	地下水位 kN/m ²
珪砂6号	12%ベントナイト	10 30 50	27.5	1	1	10

用の改良体ブロックを設置する。次に、地山試料の珪砂6号を4層に分けて水中落下させ、各層をバイブレーターにより十分締め固める。このとき、先行トンネル模型を所定の位置に配置、固定する。

次に、12%のベントナイト泥水を泥水タンク、チャンバーおよび排土タンク内に満たし、設定泥水圧まで加圧しシールドを掘進させる。シールド機の掘進中は、掘進5mmごとに、カッター圧力、先行トンネルのひずみ等を計測し、シールド機が到達用改良体ブロックに到達したら掘進を停止させる。なお、地盤の透水係数は $k = 5.02 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、乾燥密度は $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ 、相対密度は $D_r = 72.3\%$ である。

3. 実験結果および考察

3. 1 シールド機の掘進特性について

(1) 泥水圧と間隙水圧の関係

図-4は、カッターディスクのスリット開口率を27.5%とし、3種類の泥水圧で掘進させたときの切羽地盤における過剰間隙水圧の発生量（水圧計の設置位置は、掘進距離600mmにおける切羽面に一致）を比較したものである。図より、泥水圧10kN/m²のときは、過剰間隙水圧の発生はほとんどみられない。これは、差圧（泥水圧-地下水位）が0kN/m²であり、泥水が地盤に浸透しなかったためと考えられる。一方、泥水圧30～50kN/m²では、水圧計が設置されている位置にシールド機が接近するにつれ、過剰間隙水圧は増加してい

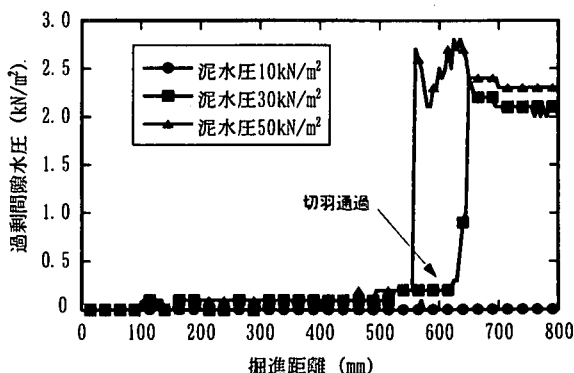


図-4 過剰間隙水圧と掘進距離の関係

る。しかし、それらの発生量は、設定泥水圧(30～50kN/m²)に比べ非常に小さく、差圧(泥水圧－地下水圧)がそのまま泥水圧として作用していると考えられる。

(2) 泥水圧と排土率の関係

表-2は、カッターディスクのスリット開口率を27.5%とし、3種類の泥水圧で掘進させたときの泥水圧と排土率の関係を示したものである。ただし、ここでいう排土率とはシールドが掘進した部分の体積に対する排土量の割合のことである。この表より、泥水圧が大きいほど排土率は小さくなっている。また、泥水圧の違いによる排土率の差が明確に出ていることがわかる。

(3) 泥水圧とカッター圧の関係

表-3は、カッターディスクのスリット開口率を27.5%とし、3種類の泥水圧で掘進させたときの泥水圧とカッター圧の関係を示したものである。ただし、ここでいうカッター圧とはシールド掘進に要する押し込み圧のことである。この表より、泥水圧が大きくなるとカッター圧も大きくなる傾向にある。これは、泥水圧が大きいほど、切羽面上のせん断抵抗が増加し、カッターディスクに作用する応力が大きくなったためと考えられる。

3.2 泥水圧の違いが既設線状構造物に与える影響について

図-5は、カッターディスクのスリット開口率を27.5%とし、ひずみの計測断面と後行シールド切羽との距離が、手前1D、0D、後方1Dのときの先行トンネル内周面応力 σ の分布を泥水圧別に示したものである。また、図-6は、先行トンネルのスプリングライン、クラウン部およびインバート部における内周面応力と泥水圧の関係を示したものである。ここで、内周面応力 σ はシールドセグメント等のトンネル覆工の内周面に作用する応力に相当するもので、ひずみゲージの出力値 ε と硬質塩化ビニル管の弾性係数 $E=3.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ から $\sigma=E \cdot \varepsilon$ の関係によって求めた。

これらの図より、泥水圧が大きいほど、内周面応力の増加量は大きくなっており、いずれの泥水圧でも、後行トンネル側のスプリングラインでは引張応力が、またクラウン部およびインバート部では圧縮応力が発生していることがわかる。これは、先行トンネルが後行トンネルの掘進に伴い泥水圧やカッター圧の影響を受けて、側方につぶれるように変形していることを意味している。また、内周面応力の増加量は、後行トンネル側のスプリン

表-2 泥水圧と排土率の関

泥水圧 (kN/m ²)	10	30	50
排土率 (%)	100.8	98.9	96.1

表-3 泥水圧とカッター圧の関係

泥水圧 (kN/m ²)	10	30	50
カッター圧 (kN/m ²)	8.3	11.2	11.8

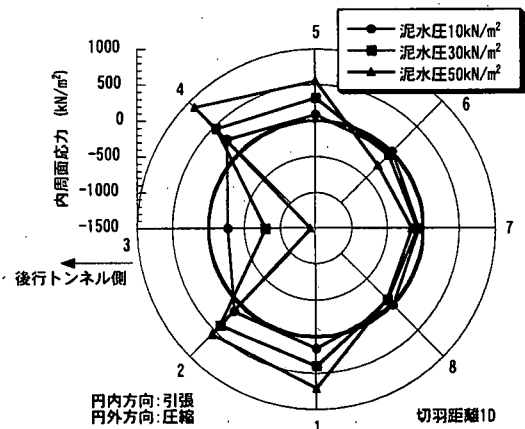
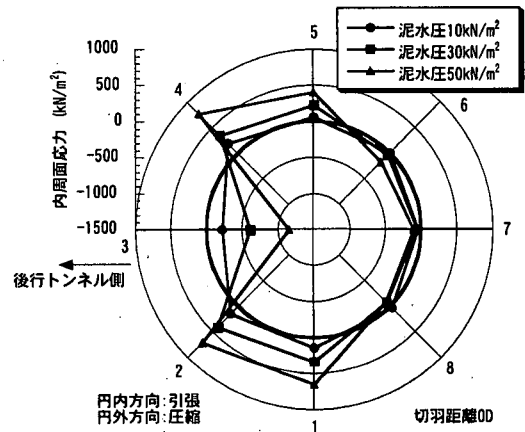
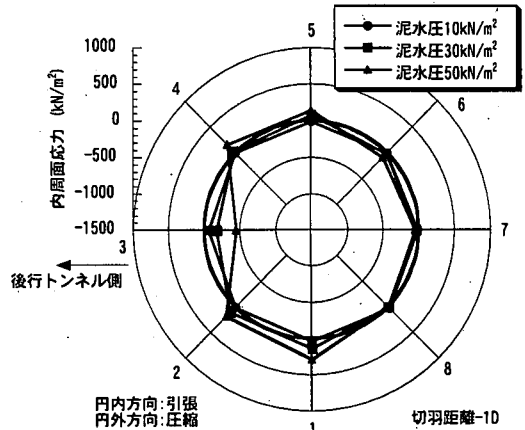


図-5 泥水圧の違いによる内周面応力の分布

グラインで最も大きく、クラウン部とインバート部を比較すると、インバートの方がクラウン部よりも大きくなっていることがわかる。なお、後行トンネル反対側の内周部では地盤反力の影響等により、内周面応力の増加はほとんど見られない。

図-7 は、カッターディスクのスリット開口率を20.0%とし、泥水圧 30kN/m^2 で掘進したときの先行トンネル外周（スプリングライン、測点3の外周面）に設置した小型土圧計の変化を示したものである。図より、シールド機の掘進に伴いトンネル外周に作用する付加土圧は上昇し、後行シールド切羽が計測断面を通過する掘進距離 300mm 付近でピークに達し、切羽通過後は減少していることがわかる。

ここで、先行トンネル横断方向の2次元問題を仮定し、図-5 に示した先行トンネル内周面で測定した垂直ひずみと図-7 に示した外周面の1点で測定した土圧をもとに、先行トンネル外周面に作用する土圧分布を推定する。推定方法の概要は以下のとおりである²⁾。先行トンネル内周面ではトンネル半径方向に応力が作用しないため、内空面の垂直ひずみに先行トンネル模型の弾性係数を乗じた垂直応力は主応力和である。弾性体の主応力和はラプラス重調和関数を満足することが知られており、与えられた境界条件のもとで、このラプラス方程式を解けば、任意の位置の主応力和を求めることができる。ここでは実験によって得られた内空面の主応力和を境界条件とし、内空を有する半無限遠弾性体を仮定した境界要素法によってトンネル外周の位置の主応力和を解析した。解析で得られた主応力和と先行トンネル模型の断面内応力から算定した主応力の差がトンネル外周部に作用する土圧に相当する。解析によって得られた、後行トンネル切羽通過時の先行トンネル外周部に作用する土圧分布を図-8に示す。図より、付加土圧の増加量は、後行トンネル側のスプリングラインで最も大きく、その値は、約 17.0kN/m^2 であり、泥水圧の60%程度まで上昇している。

4. あとがき

後行トンネルシールド機の設定泥水圧の大小によって、既設線状構造物に及ぼす影響が異なることがわかった。今後は、シールド離隔と付加土圧発生量との関係を明らかにするとともに、付加土圧の発生機構を詳細に検討する予定である。【参考文献】1) 栗原・森・田村：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，pp. 37～46，1989。2) 赤木・小宮：近接したトンネル工事が既設構造物に及ぼす影響について，第24回土質工学研究発表会，pp. 1691～1694，1989。

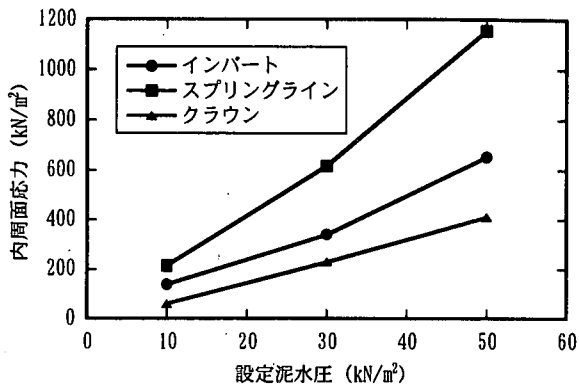


図-6 内周面応力と設定泥水圧の関係

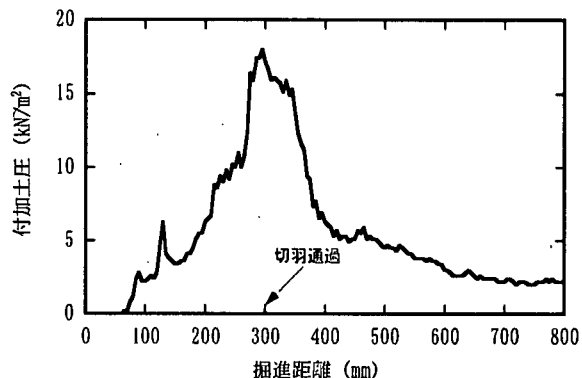


図-7 先行トンネルに作用する付加土圧
(測点3, スプリングライン)

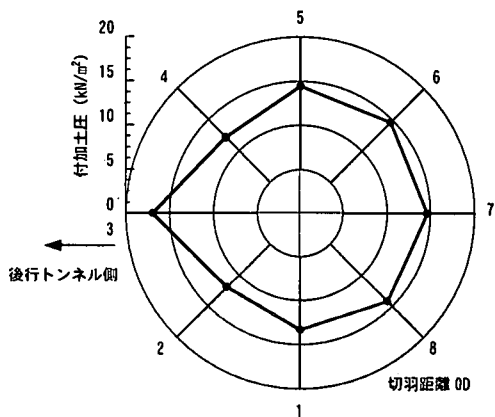


図-8 先行トンネルに作用する付加土圧の分布