

セグメントに作用する土・水圧および応力の計測結果

MEASUREMENT OF EARTH PRESSURE AND STRESS ACTING ON SEGMENT

太田 擴*, 塩谷智弘*, 杉原和彦*, 橋本 正**, 長屋淳一**

Hiromu OHTA, Tomohiro SHIOTANI, Kazuo SUGIHARA, Tadashi HASHIMOTO, Junichi NAGAYA

In design of shield tunnel, the earth pressure acting on segments is very important. But it is not clear the mechanism of acting earth pressure on the segments. Especially it is not clear to determine of designing earth pressure in stiff clay. So the field measurement of earth pressure and stress were carried out to clear the earth pressure acting on segments. This paper presents the acting earth pressure and stress on segments data in the field measurement. As a result, the measured earth pressure on segments is more circular than design one and the design is very safety.

Key Word: Shield tunnel, Earth pressure, Field measurement, Backfill grouting.

1. はじめに

現行のシールドトンネルにおけるセグメント設計¹⁾では、設計土圧として軟弱粘土地盤では全土被り圧、砂質土では $1 \sim 2D$ (D :セグメント外径) 以上の場合には緩み土圧、硬質粘土地盤で土被りは $1 \sim 2D$ 以上の場合には緩み土圧を採用している場合が多い。(ただし、Terzaghi の式による緩み土圧は、粘着力を考慮すると緩み土圧が非常に小さくなったり負となる場合があるので、最小土被り圧を設定する場合もある。) また、側方土圧は地盤種類毎に N 値を目安に決められる側方土圧係数および地盤反力係数より設計側方土圧が計算される。しかし、セグメントに作用する土圧(以下、セグメント土圧と称する。尚、本論文中の土圧は、全土圧を意味する。)は地盤特性のみでなく裏込注入などの施工条件にも影響され、硬質地盤であるほどシールド施工に伴う地盤反力も大きいため施工条件の影響は大きくなると考えられる。本報告では、地盤や施工条件の異なった数ケースのシールド工事におけるセグメント土・水圧および応力の計測結果を示し、施工条件および土質条件との関係を整理する。また、各シールド現場における設計値と実測値の比較を行い、現行設計法と実際の現場における挙動の違いについて検討を行う。

2. 計測現場の概要

セグメント計測事例は、軟弱粘土地盤で1現場、硬質粘土地盤で2現場)^{2) 3)} (3断面)、砂地盤が1現場⁴⁾ (2断面)である。表-1に計測現場の施工条件および土質条件を示し、図-1に各計測断面における土質柱状図とシールド掘進深度図を示す。軟弱粘土地盤のA現場は沖積粘土であるが沖積粘土としては比較的強度が大きく、沖積粘土と洪積粘土の中間的な粘土である。硬質粘土のB現場は大阪層群粘土層であり Ma_6 に相当し、C現場は洪積粘土層の Ma_{12} に相当する。砂層のD現場は、 N 値50以上の非常に締め固まっ

* 正会員 大阪市交通局 建設技術本部

** 正会員 財団法人 大阪土質試験所

た地盤であるが均等係数が小さくシールド掘削により崩壊しやすい地盤である。

表-1 計測現場の施工概要

	A現場	B現場	C現場	D現場
シールドマシン	泥土圧式	土圧式	泥水加圧式	土圧式
セグメント	9'×9'10セグメント	RCセグメント	RCセグメント	RCセグメント
セグメント外径	φ5300	φ5300	φ8150	φ5300
裏込注入方法	同時	同時	即時	同時
土被り厚	14.09m	28.2m	22.5m	16.8m
掘進土層	沖積粘土層	大阪層群粘土層	洪積粘土	大阪層群砂質土層
N値	3~5	8~9	3~6	50≤
q ₀ (kgf/cm ²)	1.7~2.0	5.4	2.0~2.5	—

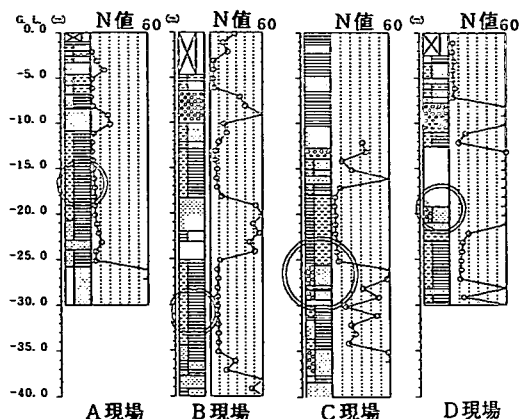


図-1 土質柱状図とシールド掘進深度

3. セグメント土圧の経時変化

図-2～図-7に各計測現場の上下部および左右側部におけるセグメント土圧および水圧の経時変化図を示す。経時変化図は左側にテール通過直後の短期データ、右側に長期データを示してある。

3. 1 軟弱粘土地盤 (A現場)

図-2にA現場のセグメント土・水圧の経時変化図を示す。セグメント土・水圧は、セグメント側部においてテール通過後より減少し、テール通過後1~2ヶ月後より左側部を除いて上昇傾向に転じている。その土圧の増加はトンネルの右側部で顕著であり、増加量は、0.7~1.2kgf/cm²である。また、この間のセグメント水圧は、ほぼ一定でありこの土圧上昇分は有効土圧の上昇である。左側部では、テール通過後より土圧が大きく減少し、その後の土圧上昇量も小さい。

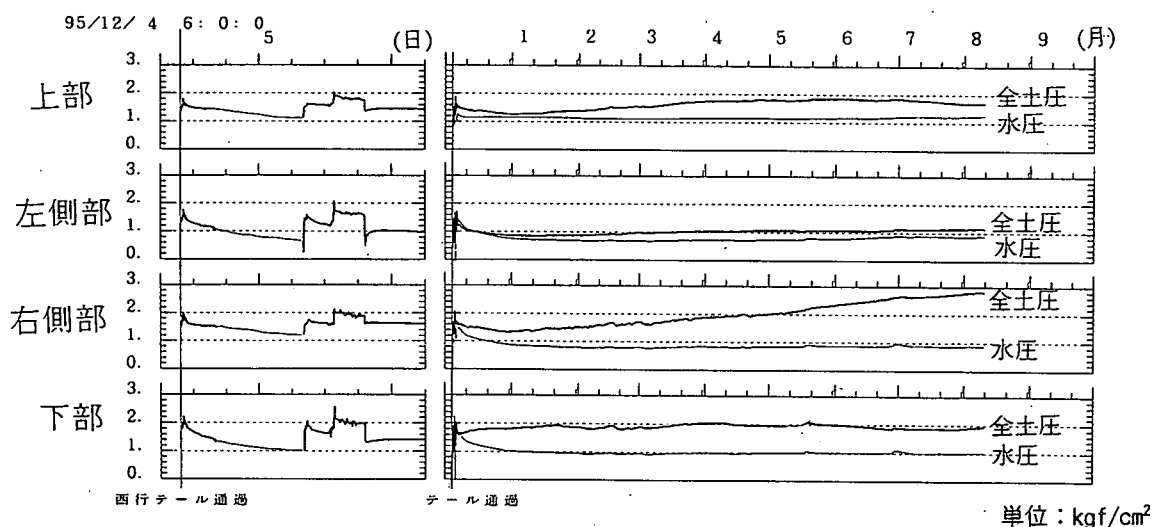


図-2 A現場のセグメント土・水圧の経時変化図

3. 2 硬質粘土地盤 (B現場, C現場)

図-3, 5にB, C現場のセグメント土圧の経時変化図を示す。B現場では、セグメント土圧に対する裏込注入の影響を調べるために、2つの計測断面を設け、異なる裏込注入条件で施工された。1断面は通常注入(注入圧=1.5kgf/cm²)、2断面は裏込注入による影響を排除するために低圧力(注入圧=0.5kgf/cm²)で施

工を行った。1, 2断面ともに長期的には後続シールドやインバートおよび歩廊・トラフ台のコンクリート打設の影響を受けているため増加傾向にある。これらの影響のない後続シールド通過前までの挙動は、通常注入の1断面では裏込注入による初期土圧が3～4 kgf/cm²まで上昇した後、上下部で減少傾向が見られる。一方、注入率100%の2断面では、左右側部および下部における初期土圧が小さく(約2 kgf/cm²)、その後上昇傾向にある。1断面と2断面を比較すると初期土圧は1断面の方が2断面よりも大きなセグメント土圧が作用している。しかし、長期的には2断面においてセグメント土圧が増加し、両断面の差は小さくなる。両断面ともにクラウン部における最終セグメント土圧は3.7～3.8 kgf/cm²であった。C現場で裏込注入により3～4 kgf/cm²のセグメント土圧が発生するが、その後の数リング間で若干の増減を繰り返しながら、2.5～4.5 kgf/cm²の値に落ち着く。長期的には0.3～0.8 kgf/cm²程度の季節変動を示し、温度変化の影響を受けている。周辺地域における地下水のくみ上げにより地下水位が変化し、セグメント水圧も季節変動を示すが、土圧と水圧の挙動は一致しておらずピーク時にずれが生じている。すなわち、セグメント土圧の変化は有効応力に依存している。また、C現場のセグメント土圧は、左側部において大きな土圧が発生している。これは、C現場は裏込注入をグラウトホールから行う即時注入であり、計測断面における裏込注入を左側部から行ったため注入孔近辺に大きな圧力が発生したと考えられる。また、この裏込注入時に発生したセグメント土圧は、長期的にも残存している。

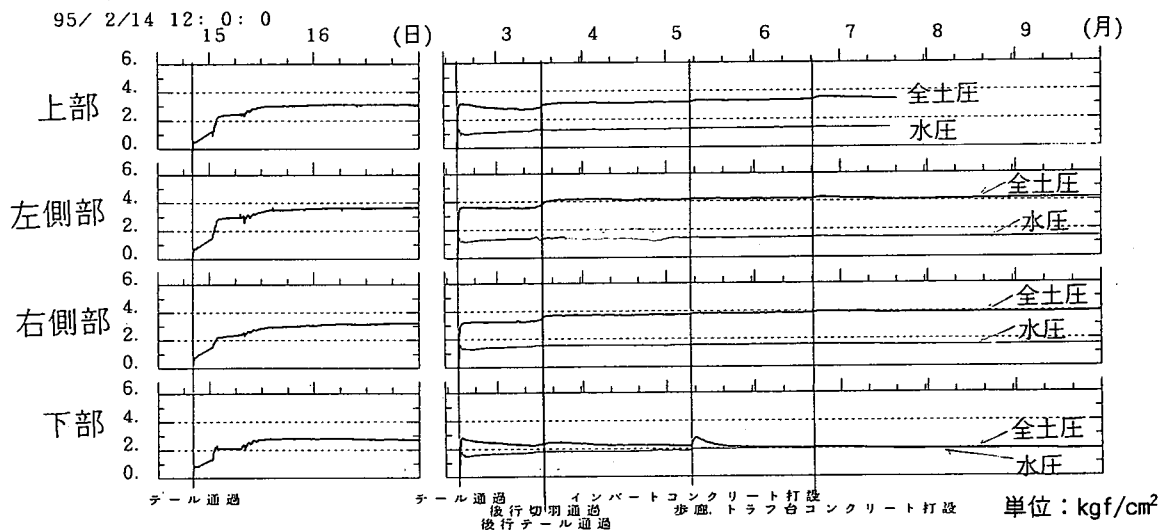


図-3 B現場(1断面)のセグメント土圧の経時変化図

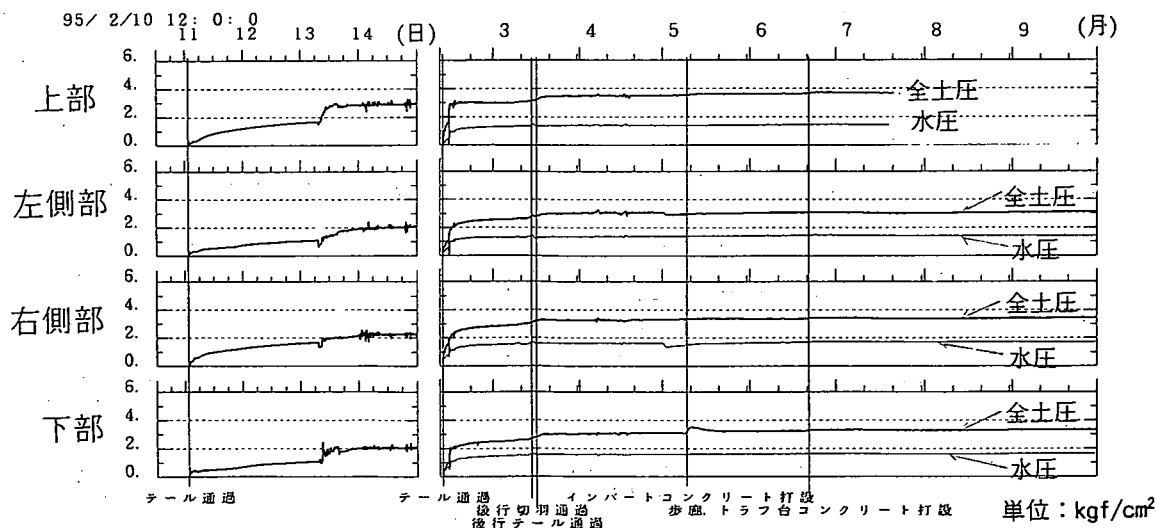


図-4 B現場(2断面)のセグメント土圧の経時変化図

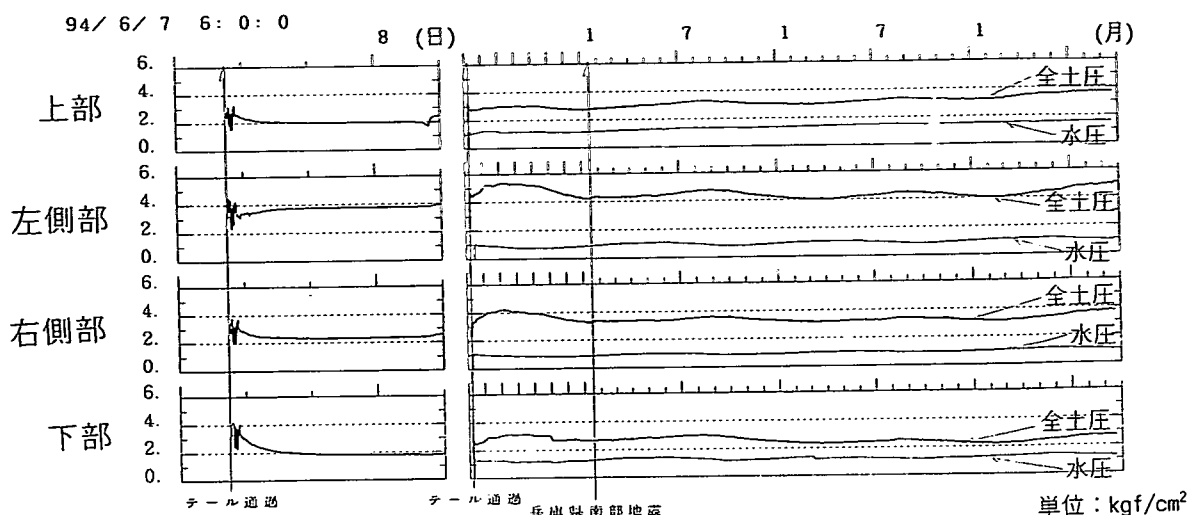


図-5 C現場のセグメント土圧の経時変化図

3. 3 砂地盤 (D現場)

図-6, 7にD現場におけるセグメント土圧の経時変化図を示す。D現場もB現場と同様に裏込注入条件の異なる2断面を設けている。1断面は通常注入(注入圧=3.0kgf/cm²), 2断面は裏込注入による影響を排除するために低圧力(注入圧=1.7kgf/cm²)で施工を行った。1断面のセグメント土圧は裏込注入直後では1.0~1.5kgf/cm²であるが、後続リングの裏込注入時に計測断面における土圧が約2.0kgf/cm²まで上昇し、さらにコンクリート打設の影響を受けて下部では3kgf/cm²まで上昇している。一方、2断面では計測断面の裏込注入後は0.8~1.1kgf/cm²であり、後続リングの注入時に若干の増加が見られるが、その増加量は小さく最終状態では1.7~2.0kgf/cm²の土圧である。また、両ケースとも長期的な土圧は増加傾向にあるが、これは後続シールド通過、兵庫県南部地震、コンクリート打設、セグメント周辺地盤の水位回復によるものであり裏込注入後の有効土圧に大きな変化はないと考えられる。セグメント周辺地盤の水圧はシールド上部において0.79kgf/cm²ではほぼ静水圧分布であった。1断面では裏込注入による押し抜けにより0.6~1.2kgf/cm²の有効土圧が作用しているが、2断面ではセグメントに作用する有効土圧はセグメント上部で0.5kgf/cm²、下部では0.03kgf/cm²であり、1断面に比べて小さな値である。

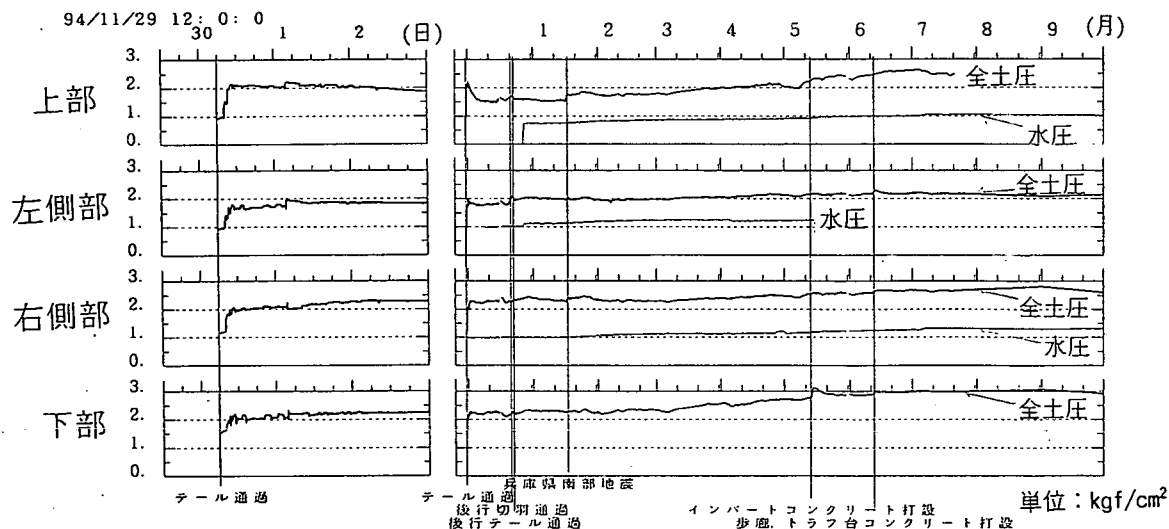


図-6 D現場 (1断面) のセグメント土圧の経時変化図

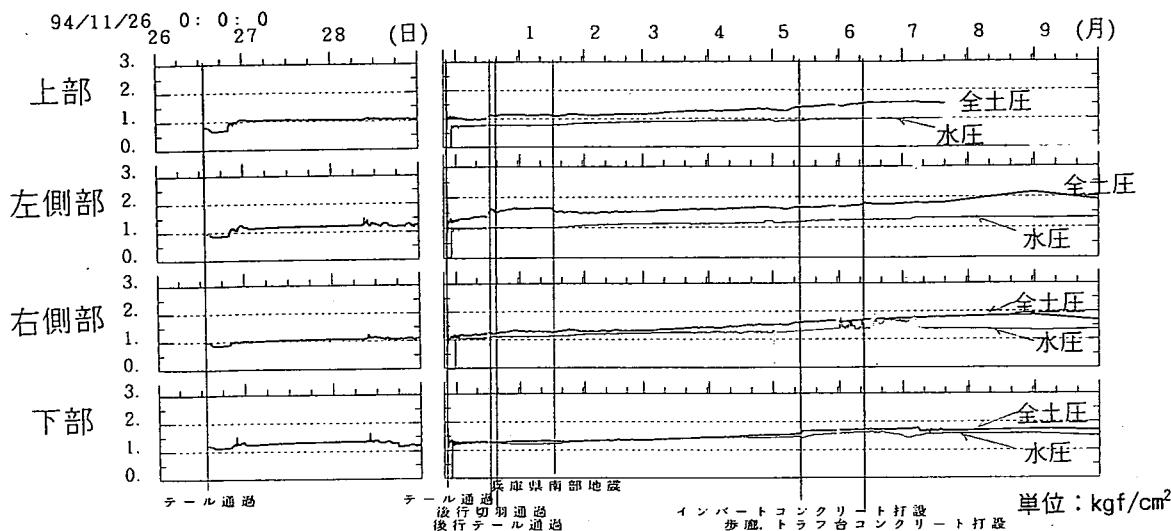


図-7 D現場（2断面）のセグメント土圧の経時変化図

4. セグメント土圧および断面力分布および設計との比較

図-8～図-11にセグメント土圧および断面力の分布図を示す。A現場とD現場については、セグメント土圧が温度変化の影響を受けていると考えられるため、シールド坑内の温度が計測リングの組み立て時の温度に近く、しかもより長期経過時点（A現場：'94/5/4、D現場：'97/6/7）を選んで分布図を描いた。B現場（1断面）、D現場（1断面）は双設シールドであり、後続シールドの影響を受けているため、その影響を受ける直前を示した。また、分布図中には、計測断面における土質条件下で慣用計算法により設計した場合の設計土圧および断面力を示してある。設計土圧は、慣用計算法における地盤反力も含んでいる。

4.1 軟弱地盤（A現場）

セグメント土圧は比較的等方的な分布であり、設計土圧に比べて小さく、設計土圧（全土被り圧：2.37kgf/cm²）の70%程度である。セグメント断面力は、セグメント土圧が設計に比べて全体的に小さいことに対応して軸力は設計値よりも小さく、等方的な土圧分布に対応して曲げモーメントの発生量も小さい。

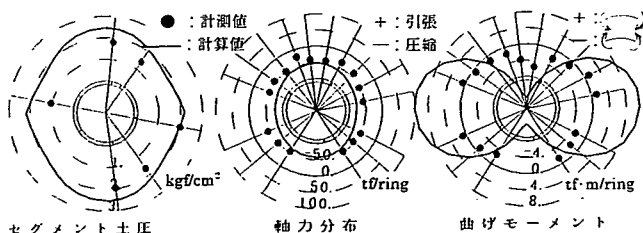


図-8 A現場におけるセグメント土圧および断面力の分布図

4.2 硬質粘土地盤（B現場、C現場）

B現場は、トンネル上部において全土被り圧を用いた設計土圧（5.0kgf/cm²）に比べて約50%の土圧であり、トンネル全体としては、設計に比べて等方的な土圧が作用しており曲げモーメントの設計値に比べて非常に小さい値である。またC現場は、地下河川のシールド工事であり供用後の内水圧に対処できるように通常の裏込注入よりの大きな圧力で注入し

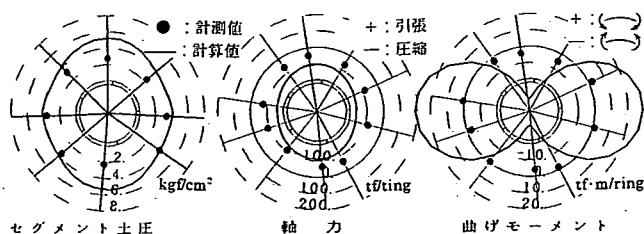


図-9 B現場におけるセグメント土圧および断面力の分布図

たため、上部におけるセグメント土圧は全土被り圧に相当する土圧が作用している。また、裏込注入を左側部の注入孔より行ったために、側方土圧が鉛直土圧よりも大きな分布を示している。これにより曲げモーメントは、セグメントが横方向に潰されるようなモードを示しているが、発生曲げモーメントは設計値に比べて非常に小さい。

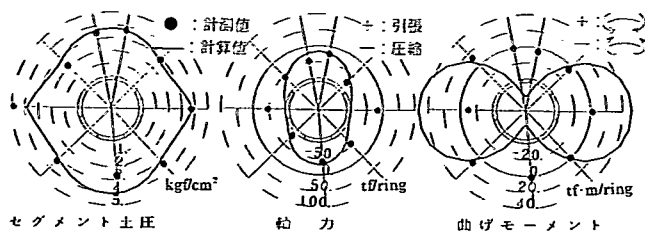


図-10 C現場におけるセグメント土圧および断面力の分布図

4. 3 砂地盤 (D 現場)

砂地盤における設計土圧は土水分離で設計され、設計鉛直土圧には緩み土圧が採用される。D現場のように緩み土圧が小さい場合には、水圧が支配的となり設計土圧は等方的な土圧となる。トンネル上部における土圧は緩み土圧+水圧相当であり、設計と良く一致しているが、トンネル全体としては設計値よりも若干大きな土圧が作用している。曲げモーメントについても、他の現場計測結果に比べて曲げモーメントが小さい。これは水圧が卓越した等方的な土圧がトンネルに作用したことによると考えられる。

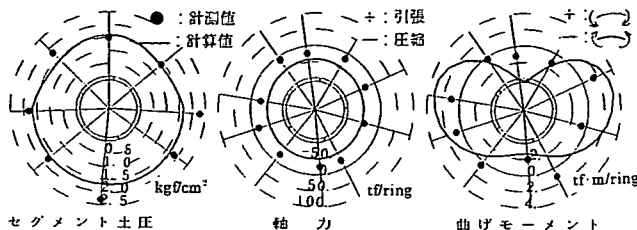


図-11 D現場におけるセグメント土圧および断面力の分布図

4. 4 設計との比較

セグメント土圧および断面力について現場計測事例結果より以下のような結論が得られた。

- 1)セグメントに作用する土圧は、設計土圧よりも等方的であり、曲げモーメントは非常に小さい。これは、最初にセグメントに作用する裏込注入圧が等方的に作用し、長期的にも残存するためであると考えられる。
- 2)軟弱地盤におけるセグメントに作用する鉛直土圧は、設計土圧(全土被り圧)の約 70%であった。逆に硬質地盤で土被りが大きい場合においても全土被り圧が作用した事例がある。これは、裏込注入条件に依存し、硬質な地盤であるほど裏込注入の影響が大きくなると考えられる。
- 3)大きな裏込注入圧で施工した場合、注入孔近辺で大きな土圧が発生し、長期的にも残存することがわかった。

5. おわりに

現場計測事例より土質条件によらず、セグメントに作用する土圧および断面力の計測値は現行の設計に比べて等方的であり、セグメントに発生する曲げモーメントは非常に小さいとの結果が得られた。すなわち、現行の設計手法は、かなり安全側の設計となっており、シールドトンネルも大深度化が進むにつれて現行の設計法ではかなりの安全率を持つこととなると思われる。今後、さらに多くの計測事例を収集し、セグメント土圧の実態を把握し、安全性と経済性のバランスを考慮した合理的な設計となる設計土圧を確立していくことが必要であると思われる。

参考文献

- 1)土木学会：トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説 第2章 荷重, pp.41~57, 1996.7.
- 2)西沢勝巳, 塩谷智弘, 土屋幸三郎, 美馬健作, 橋本 正, 長屋淳一：硬質粘土地盤におけるセグメント作用土圧の測定結果, 第31回地盤工学研究発表会, pp2289~2290, 1994.7
- 3)戸上拓也, 堀内孝治, 橋本 正, 長屋淳一：地下河川トンネルの覆工に作用する土圧および応力の計測結果, 第30回土質工学研究発表会, pp.2011~2012, 1995.7.
- 4)伊奈昭二, 伊藤 仁, 土屋幸三郎, 美馬健作, 橋本 正, 長屋淳一：砂質地盤中の覆工作用土圧に与える裏込注入の影響, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.1318~1319, 1995.9.