

シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について

RESULT AND ANALYSIS ON SITE MEASUREMENT OF LOAD ACTING ON SHIELD TUNNEL

有泉 毅¹⁾・岡留 孝一²⁾・長屋 淳一³⁾

Takeru ARIIZUMI, Koichi OKADOME and junichi NAGAYA

In design of shield tunnelling segment, the analytical method is being established as shown in a representative, beam-spring model analysis. The method is rational compared with commonly used calculation method. Tunnelling load used for the rational design, however, does not correspond to the structural analysis, because the experiment for knowing the real tunnelling load is very difficult, and site measurement is not so reliable. Recently, a large-scale earth pressure transducer (oil pad type) was developed, and site measurement by its application is on the increase.

The results and analysis of the site measurement with this earth pressure transducer for 2 sites (clay ground of alluvium and diluvium) are reported here as a news flash.

Key words : shield tunnel, earth pressure, soft and stiff clay, oil pad type earth pressure transducer

1. まえがき

シールドトンネルのセグメントの設計において、構造系と荷重系のうち構造系の解析技術については、梁-バネモデル解析を代表として近年セグメントの実規模実験を基に慣用計算法に比べ合理的な設計が確立しつつある。しかし、荷重系については、実験自体が難しいこと、現場計測による方法も計測機器の信頼性や裏込注入の影響評価の方法が難しいことから、シールド工法草創期に設定した現行の荷重設計を現状のシールド技術に即応した合理的な設計へと見直すまでには至っていないのが実状である。

また、セグメントの設計における限界状態設計法の適用を考えると、この荷重系について実現場における挙動を踏まえた限界状態の設定が急務の課題となっている。

本論文では、最近上記の現場計測の問題を解決できうる大型土圧計が開発され¹⁾、その適用計測事例も多くなってきており、この計測器を用い、いままでも過大評価されてきたと予想される粘土地盤において電力用シールド洞道のセグメントに働く荷重等を計測した2現場（沖積粘性土、洪積粘性土）の計測結果について速報として報告するものである。

2. 現場計測概要

2. 1 沖積粘性土を対象とした計測工事概要

(1) 工事概要

-
- 1) 正会員 東京電力(株)電力技術研究所
 - 2) 正会員 東京電力(株)送変電建設本部
 - 3) 正会員 (財)大阪土質試験所

本工事は、川崎市の臨海地区でセグメント外径3,950mm、桁高275mm、幅1,200mm、6分割のRC平板形セグメント（継手：長ボルト）で亘長1,866mを泥水式シールドで施工した工事である。

(2)計測対象地盤

荷重計測断面は、図－1に示す土被り21.6mの沖積シルト質粘土(Uc2)地盤である。当該地盤の地盤物性値を表－1に示す。

2. 2 洪積粘性土を対象とした計測工事概要

(1)工事概要

本工事は、東京都大田区の東京湾岸から武蔵野台地東縁に至るルートでセグメント外径4,950mm、桁高275mm、幅1,200mm、6分割のRC平板形セグメント（セグメント間継手：鋼製ボックス、リング間継手：調芯ピン付きピン）で亘長2,528mを泥水式シールドで施工した工事である。

(2)計測対象地盤

荷重計測断面は、図－2に示す土被り12.9mの洪積粘土質シルト(Tocm)地盤である。当該地盤の地盤物性値を表－1に示す。

2. 3 セグメント計測計器設置状況

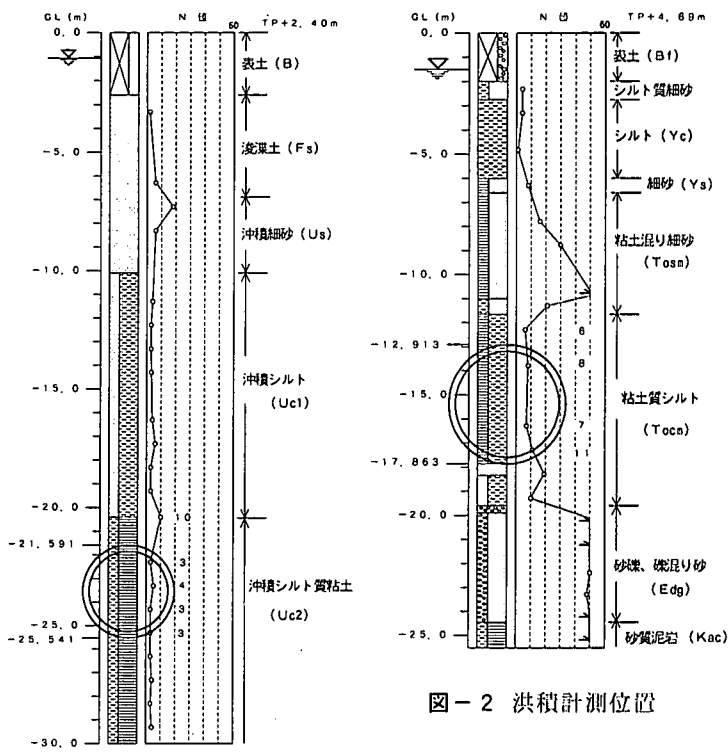
沖積粘性土を対象とした工事における計器配置について、図－3にパッド式土圧計ならびに間隙水圧計の配置を示す。パッド式土圧計の受圧面はトンネル軸方向600mm、円周方向350mmのものを用了。また、セグメント内部応力算定の為、溶接型鉄筋ひずみ計を外筋・内筋各1箇所をリング10方向に、さらにセグメント内空変位は、コンバージェンスメータにより鉛直水平方向についてセグメント組立直後より計測した。基本的に、洪積粘性土を対象とした工事における計器配置も同様である。

3. 沖積粘性土における荷重計測結果

3. 1 土圧計・水圧計

(1)長期計測結果

図－4には、土圧計の計測リングがシールド機テール通過直後から0.5月ピッチでプロットした長期経

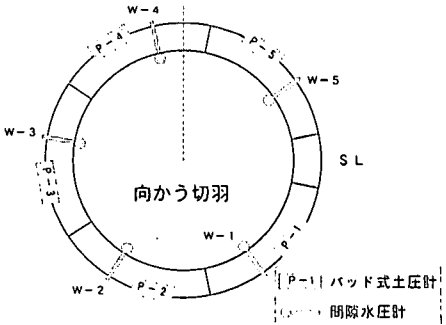


図－2 洪積計測位置

図－1 沖積計測位置

表－1 地盤物性値

		単位	沖積地盤(Uc2)	洪積地盤(Tocm)
物理試験	湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)	1.49	1.76
	自然含水比	w _n (%)	54.3 ~ 83.8	45.7
	粒度	2~75 μ m	0	0
		75 μ m~2mm	3	5
		5~75 μ m	78	59
		5 μ m未満	19	36
力学試験	一軸圧縮強度	q _u (kgf/cm ²)	1.28 ~ 2.08	4.03 ~ 4.18
	変形係数	E ₅₀ (kgf/cm ²)	25.0 ~ 130.0	503.8 ~ 522.5
	一軸圧縮強度	C' (kgf/cm ²)	0.13	0 ~ 1.65
		ϕ (度)	33.5	35.8 ~ 20.8



図－3 土圧計・水圧計配置（沖積）

時グラフを示す。土圧計の長期的傾向は、テール通過直後に裏込注入により変動するがほぼ一定である。図中経過月数6月頃は夏期に相当し、天端部のP-4, 5で凸型の傾向を示す。図-5には、土圧計計測値のテール通過直後・1・6・12か月後の円周方向分布を示す。土圧計計測値は、右下方で大きい非対称形を示すが、長期的にはテール通過後からほとんど変動しないことが判る。

図-6には、土圧計計測値（全土圧）から水圧計計測値（間隙水圧）を差し引きした値を有効土圧

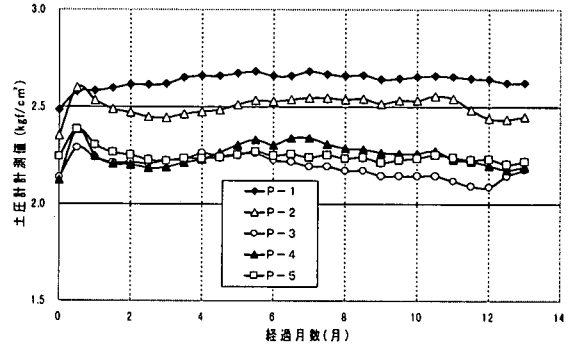


図-4 土圧計長期経時変化（沖積）

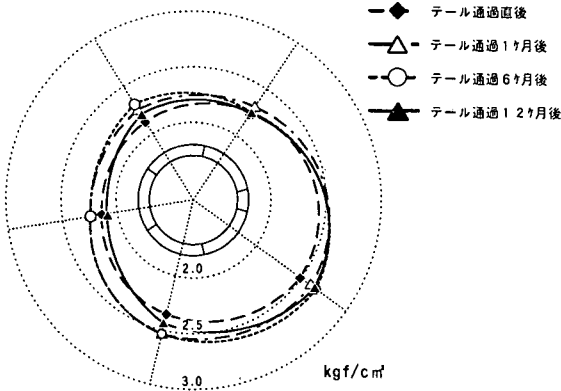


図-5 土圧計長期円周方向分布（沖積）

とし、それを土圧計計測値で除した値を有効土圧率と称し図-4と同様に長期経時グラフを示した。これによると土圧計位置と水圧計位置が若干異なるため誤差を含むが、有効土圧として発生する荷重はせいぜい1割程度で土圧計計測値のほとんどが水圧であると評価できる。

(2) 短期計測結果

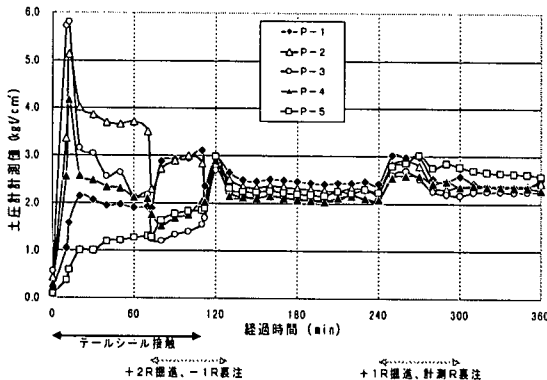


図-7 土圧計短期経時変化（沖積）

図-7には、土圧計計測リングにおいて土圧計がテールシールに接触した時点から6時間までの10分ビッチの計測値をプロットした。図からシールドテール内ではテールシールによる高い押し付け力が発生するが、テール通過直後から安定した値を示すことが判る。ただし、パッド式土圧計はテールシール等受圧面に対し載荷面積が小さい場合高い応答値になるとされており²⁾、計測値そのままをテールシールの押し付け荷重として評価できないので今後荷重値として定量化するための分析が必要である。

図-8には、テールシール接触時からテール通過直後までの各時点の円周方向分布を示す。図中実線の上

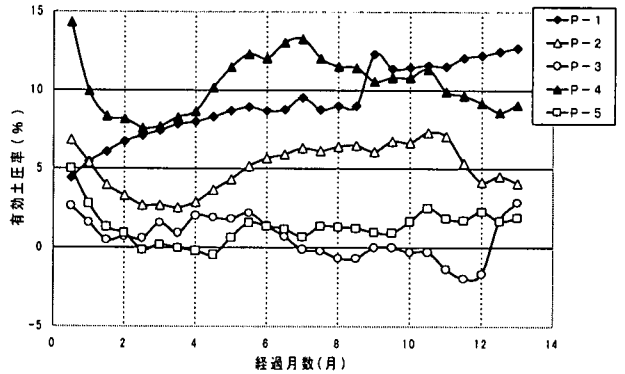


図-6 有効土圧率長期経時変化（沖積）

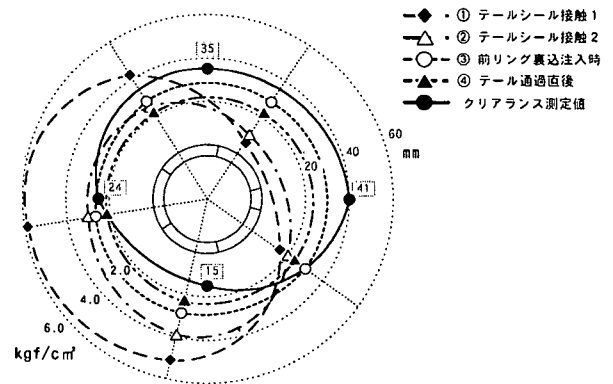


図-8 土圧計短期円周方向分布（沖積）

下左右方向におけるテールクリアランス計測値を示す。土圧計がテールシールに接触している時点では、左下側にテールシールのセグメントへの高い押し付け力が加わり、これはクリアランスの測定値と合致する。また、前リングの裏込注入からテール通過直後においてはほぼ円周方向均等な分布が形成されている。

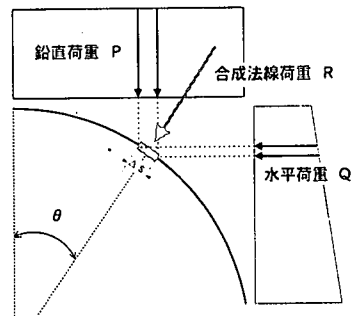


図-9 合成法線荷重

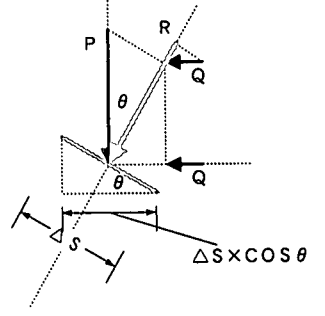


図-10 合力の換算

(3) 設計荷重と計測値の比較

土圧計で計測された土水圧は、セグメント円周面に垂直な、すなわち法線方向の全土圧を計測するもので、接線方向の荷重は構造上計測できない。したがって、ここでは慣用計算法における鉛直荷重Pと水平荷重Qの合力の接線方向成分Rを図-9、10に基づき算定したものと土圧計計測値と比較する。

図-11に計測断面の地盤条件で設計荷重の法線方向成分とテール通過後12か月の土圧計計測値を比較し、次の傾向である。

- ①クラウン部の鉛直荷重は、設計値が3.68 kgf/cm² に対して約2.2kgf/cm²で60%程度である。
- ②同様にインバート部も設計に対し60%程度である。
- ③設計側方土圧係数 $\lambda=0.7$ としているが計測値は水圧成分がほとんどで円周方向に等方的な分布であり、 $\lambda \approx 1.0$ である。

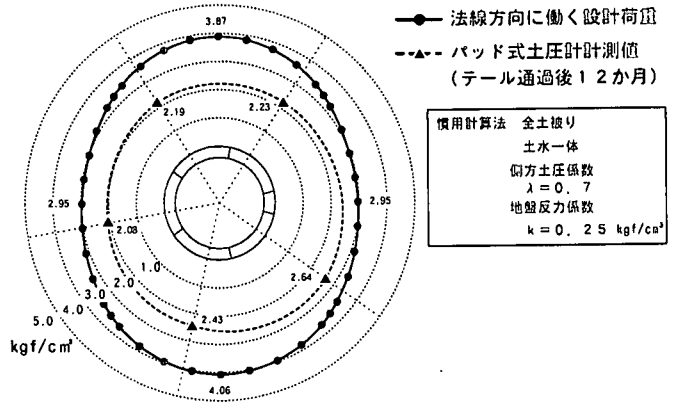


図-11 設計荷重と計測値の比較（沖積）

3. 2 鉄筋ひずみ計によるセグメント断面力

(1) 長期計測結果

図-12、13に軸力ならびに曲げモーメントのテール通過直後・1か月後・6か月後・12か月後各時点の円周方向分布を示す。ただし、ひずみ計が現状では温度の影響を受けているため、換算断面力は今回参考として示す。なお、軸力の符号は+引張、-圧縮で、モーメントは+負曲げ、-正曲げとしている。また、断面力は1リング当たり（B=1,200mm）に換算している。これらから次のような傾向がある。

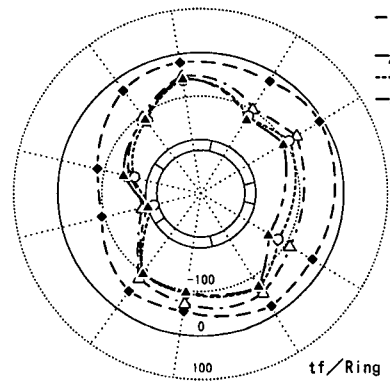


図-12 軸力長期円周方向分布（沖積）

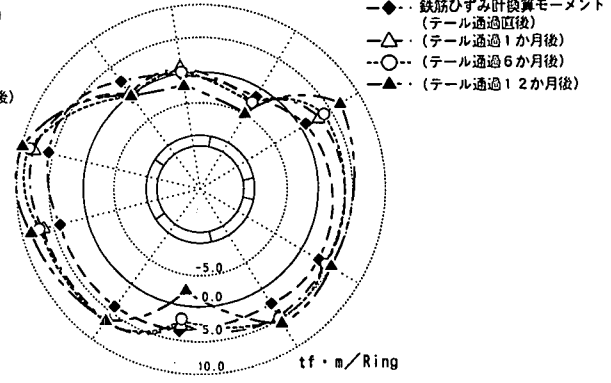


図-13 曲げモーメント長期円周方向分布（沖積）

①軸力・曲げモーメントとも左側横部で高い断面力が発生しており、図-8のクリアランス分布に伴うテールシール押し付け荷重分布の傾向と合致する。

②テール通過直後は、断面力も小さく円周方向に等方的な分布を示すが、1か月後で急激に変化し、以後の変化は小さい。すなわち、断面力は施工時荷重で形成されていることが推定される。

(2)短期計測結果

図-14、15に、土圧計がテールシールに接触した時点から6時間までの10分ピッチの軸力ならびに曲げモーメントの計測リング右断面の計測値を示した。図中の角度はクラウンを0度した場合の時計回り位置を示す。これから次の傾向がある。

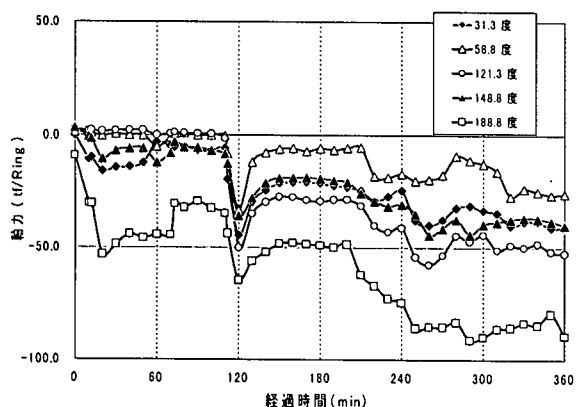


図-14 軸力短期経時変化（沖積 右断面）

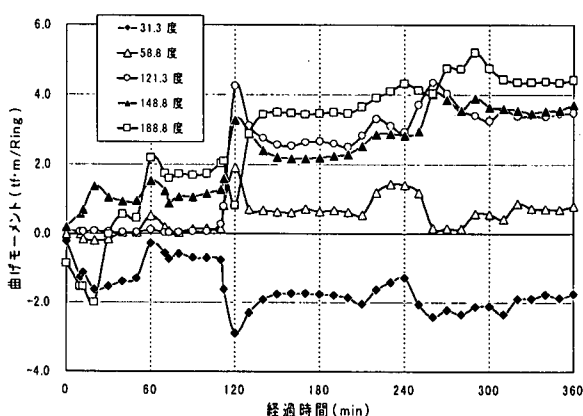


図-15 モーメント短期経時変化（沖積 右断面）

①軸力・曲げモーメントともテールシール接触時より断面力が発生し、6時間後の計測値は図-12、13の12か月後の計測値に比べ4～8割程度が既に発生している。

②図-7の土圧計経時変化図の傾向と合致するが、土圧計計測値はテールシール押し付け荷重ならびに裏込注入圧ともピーク値が時間的に残存しないが、これら断面力は累積して増加するような経時変化を示す。

3.3 セグメント内空変位

セグメント内空変位の測定結果は、リング組立直後の状態に対し、鉛直方向が5mm程度伸びを示し、水平方向に5mm程度縮む変位すなわち縦楕円変形を示した。この変位は、テールシール接触から数時間で一定になりテールシールのセグメント押し付け力で整形されたリング変形が、裏込注入圧による荷重でさらに変形したものと想定される。

4. 洪積粘性土における荷重計測結果

4.1 土圧計・水圧計

(1)長期計測結果

沖積粘性土と同様に、図-16に土圧計計測値の長期経時グラフを示す。図-17には土圧計計測値のテール通過直後・1か月後・4か月後・8か月後の各時点の円周方向分布を、図-18には有効土圧率の長期経時変化を示した。土圧計配置は、図-17に示す。

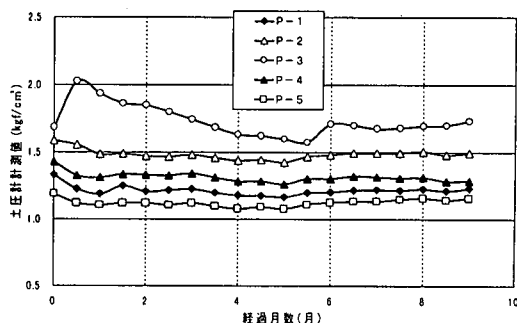


図-16 土圧計長期経時変化（洪積）

これから次の傾向がある。①土圧計計測値の長期的傾向については、P-3すなわちインバート部の土圧計のみ変化するが他はほとんど変化なく安定している。P-3の0～4か月の変動は、セグメントリングならびに後方台車の自重による反力およびこの期間が夏期に相当するため沖積粘性土の傾向と同様に季節温

度変化に追従した反力と想定される。また、6か月頃の上昇はインバート歩床コンクリート打設のための硬化熱の影響と考えられる。②有効土圧率については、図-18からほぼゼロで土圧計計測値は水圧そのものと判断できる。また、短期的傾向も沖積粘性土とほぼ同様の傾向が得られている。

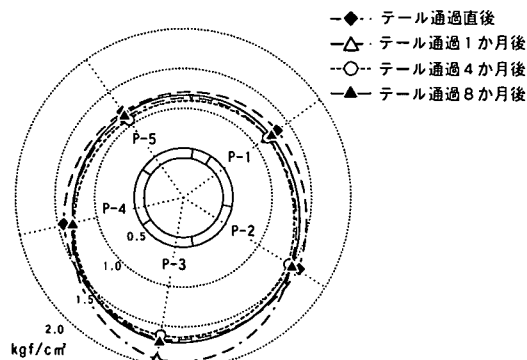


図-17 土圧計長期円周方向分布（洪積）

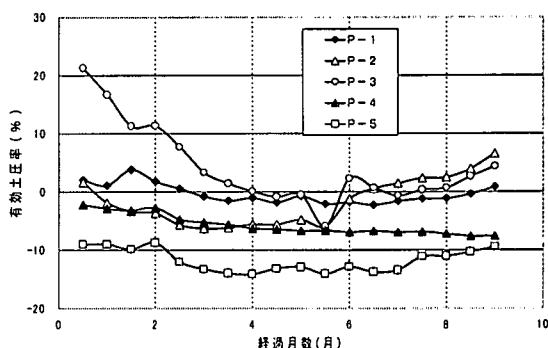


図-18 有効土圧率長期経時変化（洪積）

(2)設計荷重と計測値の比較

沖積粘性土と同様に慣用設計法における法線方向設計荷重と8か月後の土圧計計測値を図-19に示す。ここで慣用設計法では2D下限値のゆりみ荷重を用いた。①クラウン部鉛直荷重は設計値に対し、65%程度。②インバート部鉛直荷重は設計値に対し、83%程度となる。③側方土圧係数は、沖積粘性土と同様 $\lambda \approx 1.0$ である。

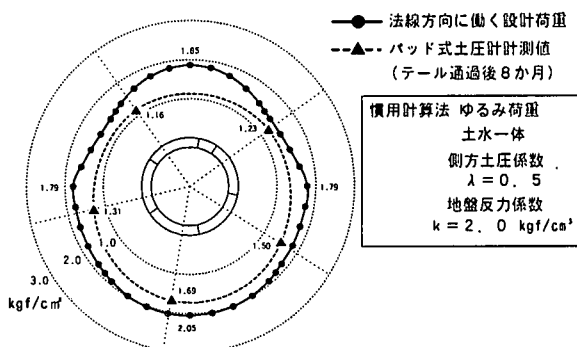


図-19 設計荷重と計測値の比較（洪積）

5. まとめ

以上の計測結果から次のようにまとめられる。

- ①土圧計で計測される長期的荷重は、季節変動による坑内温度の影響を受けて若干経時変化するが、短期的な施工時荷重の影響が無くなる1～2か月程度からほぼ一定である。
- ②土圧計で計測される長期的荷重は、有効土圧が極めて小さく水圧成分が卓越する。
- ③土圧計で計測される短期的荷重は、テールシールによるセグメントへの押し付け荷重ならびに裏込注入圧等であるが、一時的であるが長期的荷重よりかなり大きいため定量的な設計が必要である。
- ④土圧計計測値は水圧成分が卓越するが、セグメント断面力として曲げモーメントが生じており、これは土水圧で形成されるというより、短期的な施工時荷重ならびに坑内温度の変動によって形成されていると想定される。この点については、今後十分検討する必要がある。

また、今回は速報として荷重計測値について報告したが、上記の検討課題を含めさらに詳細な分析を加えた結果について、別途報告を予定している。

【参考文献】

- 1) 橋本 正 他：パッド式シールドセグメント用土圧計の開発、第28回土質工学研究発表会、pp. 2055～2058, 1993. 6
- 2) 橋本 正 他：パッド式シールドセグメント用土圧計の応用、土木学会第49回年次学術講演会、pp. 1354～1355, 1994. 9