

シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析 (その2)

RESULT AND ANALYSIS ON SITE MEASUREMENT OF LOAD ACTING ON SHIELD TUNNEL (2ND REPORT)

有泉 毅¹⁾・岡留 孝一²⁾・長屋 淳一³⁾

Takeru ARIIZUMI, Koichi OKADOME and Junichi NAGAYA

In order to evaluate the load acting on segments based on in-situ measurements, it is necessary to understand the relation between the deformation of segments, the deformation of ground, the measured earth pressure and the geometry of the segments. Up to now, because of the difficulty to conduct an in-situ measurement on the ring deformation and the joint deformation of the segments, few researches about the ring deformation and the joint behavior during tunneling are reported. In this paper, the relation between the observed load and segment deformation is examined based on the data measured at the three sites.

Furthermore, the effect of jack strength under 3-dimensional stress condition of the segments is investigated based on the data measured with the strain gauges installed on shield tunnelling segments.

Key words : shield tunnel, earth pressure, ring deformation of segments, deformation of segment joints

1. まえがき

筆者らは、現在、シールドトンネルにおけるセグメントの設計荷重について、現地計測に基づいたデータから現行設計法に対し、より合理的な設計手法確立を目指す研究を行っている。この研究の一環として実施した沖積粘性土ならびに洪積粘性土地盤を対象とした2現場の計測結果について、主として土圧計・間隙水圧計による土水圧荷重の短・長期的発生状況と鉄筋ひずみ計より換算したセグメント断面力の発生状況について報告¹⁾した。さらに、施工時荷重のうち主としてセグメントがシールド機テールシールに接触してテールを離脱するまでの荷重状態について現場計測値ならびに室内実験による検討結果を報告^{2), 3)}している。

セグメントに働く荷重を現場計測値から評価するには、セグメントの変形挙動を把握し、地盤の変位-土水圧計測値(荷重値)-セグメント変形(リング変形・継手挙動)-セグメント断面力といった一連のシールドトンネル周辺およびセグメント自体の変形-応力に関する相互関係を明確化する必要がある。これまで、現場計測の困難性等からセグメントのリング変形や継手挙動計測に関する報告例も少なく、またその評価も長期的に安定した状態を対象としたもので、セグメント組立から長期間に至る、施工時荷重による変形と長期的土水圧による変形挙動が把握されていない状況にある。本論文では、前述の2現場(沖積、洪積粘性土)ならびに3番目の計測現場(粘土と砂の互層)における変形に関する計測データを分析し、荷重計測値とセグメント変形について実挙動を検討する。さらに、トンネル軸方向・円周方向に配置したひずみ計等の計測結果からジャッキスラスト力の3次元的セグメント応力状態への影響について報告するものである。

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

2. 現場計測概要

2. 1 計測対象としたシールド工事概要

計測 A Bは既報告¹⁾、計測 Cは新規実施したもので、各々の工事概要を以下に記載する。

(1)計測 A（以下、この計測を沖積と呼ぶ）

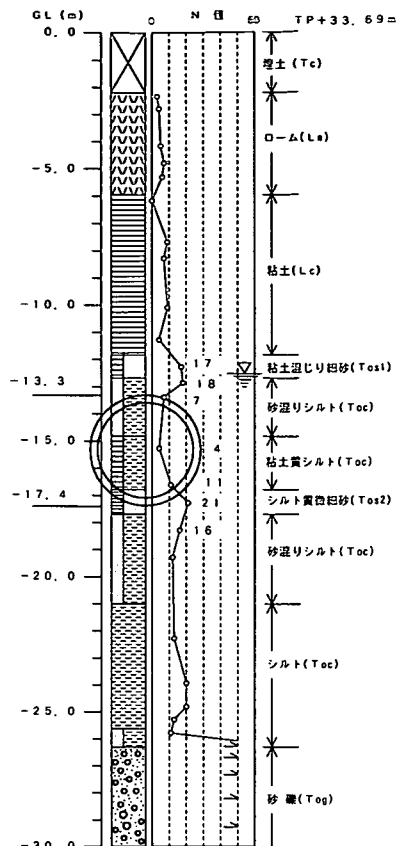
本工事は、川崎市の臨海地区でセグメント外径3,950mm、桁高275mm、幅 1,200mm、6 分割の R C 平板形セグメント（継手：長ボルト）で亘長1,866mを泥水式シールドで施工した工事である。荷重計測断面は、土被り21.6mの沖積シルト質粘土(Uc2)地盤である。

(2)計測 B（以下、この計測を洪積と呼ぶ）

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 R C 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。荷重計測断面は、土被り12.9 mの洪積粘土質シルト(Tocm)地盤である。

(3)計測 C（以下、この計測を互層と呼ぶ）

本工事は、武蔵野段丘南東部の山の手台地に位置し、セグメント外径 4,100mm、桁高200mm、幅1,200mm、5 等分割の平板形高流動コンクリートセグメント（継手：鋼製ボックス、リング間継手には調芯ピン付き）で亘長1,283mを泥土圧式シールドで施工した工事である。荷重計測断面は、図－1 に示す土被り13.3m の洪積シルト(Toc)と細砂(Tos)との互層地盤である。



図－1 互層計測位置

2. 2 計測計器設置状況

3 現場各々の計測計器の種類と個数について、表－1 に示す。ここで網掛け部はスケール等による手動計測を示し、他は自動計測項目を示す。互層では、セグメント本体ならびに継手挙動を定量的に把握できるようにひずみ計等の個数を多く実施した。

計測期間は、沖積・洪積はほぼ1年間、互層については8カ月間とした。

表－1 計測計器の種類と個数

沖積	洪積	互層
坑内荷重計測	坑内荷重計測	坑内荷重計測
土圧計 5個	2036R 主鉄筋ひずみ計 20個	729R 土圧計 5個
間隙水圧計 5個	内空変位 5個	間隙水圧計 5個
主鉄筋ひずみ計 20個	継手目違い 20個	シールド材圧力計 10個
温度計 2個	2048R 主鉄筋ひずみ計 20個	主鉄筋ひずみ計 20個
内空変位	内空変位 5個	配力筋ひずみ計 10個
継手目違い	継手目違い 20個	ボルト軸力計 15個
	2054R 土圧計 5個	継手目開き計 10個
	間隙水圧計 5個	温度計 2個
	鉄筋ひずみ計 20個	継手背面目開き計 14個
	温度計 2個	内空変位
	内空変位	継手目違い、目開き
	継手目違い	733R 主鉄筋ひずみ計 20個
		配力筋ひずみ計 10個
		継手目開き計 10個
		温度計 1個
		内空変位
		継手目違い、目開き
		737R 主鉄筋ひずみ計 20個
		内空変位

3. 沖積・洪積におけるセグメント変形挙動

3. 1 内空変位計測

内空変位計測は、コンバージェンスメータにより鉛直・水平方向について行い、正計測値が伸び、負が縮む変位を示す。ここで、沖積ならびに洪積で実施した計測結果について示す。

(1)長期計測結果

沖積における内空変位の長期経時変化を図－2 に示す。図から計測セグメントリングは縦長形状（縦に5

mm伸び、横に5mm縮む)にセグメント組立から短期間に変形し、その後外荷重の変動もなくこのリング形状を維持している。一方、洪積における内空変位を同様に図-3に示す。洪積では沖積と異なり、縦も横も収縮(縦に4mm、横に2mm縮む)する変形がやはり短期に生じて、長期的にそのリング形状を維持している。

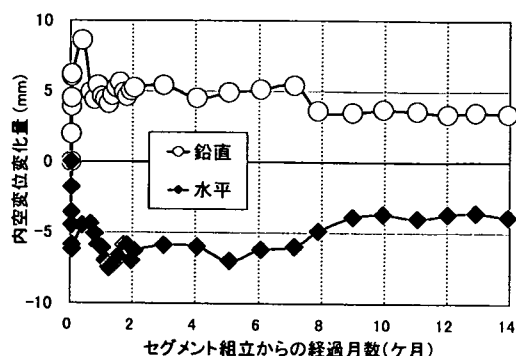


図-2 内空変位長期経時変化(沖積)

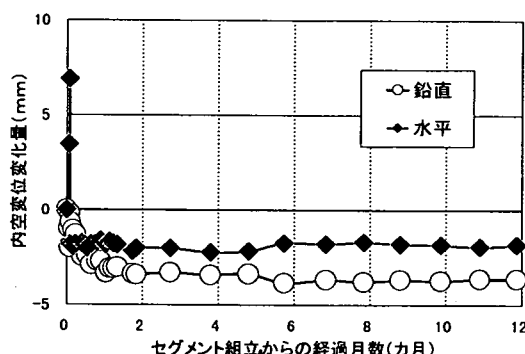


図-3 内空変位長期経時変化(洪積)

(2) 短期計測結果

図-4, 5にそれぞれ沖積・洪積の内空変位短期経時変化を示し、パッド式土圧計にシールド機テールシールが接触した時点をもゼロ点とした。また、時間ゼロ点では測定できなかったため仮に隣接点の1/2をプロットした。施工工程の違いにより両者の測定頻度は異なり、また変位が一定に落ち着くまで差が生じている。図-4における沖積では、計測リングの裏込注入が行われる時点でほぼ変形が完了し、計測リングがテールを離脱する図中+2掘進前の変位量からシールド機内に計測リングがある間に半分以上の変位量が発生していることが判る。一方、図-5における洪積では、計測リングがテール離脱直後に一旦横楕円(縦が縮み、横が伸び)に変位するが、その後縦横とも縮む変位になり、その後緩やかに縦方向が縮む変位を示す。これら内空変位の違いは、沖積はセグメント継手・リング継手ともに長ボルトを使用し、洪積はリング継手に調芯ピン付きピン継手を用いているため、特にリング継手剛性による変位に対する拘束性として説明できるとと思われる。また内空変位そのものの発生傾向は、外荷重によるというよりも、施工時荷重とりわけシールド機テール部のグリス圧ならびに裏込注入圧によりテール内ならびにテール近傍で変形が生じ、セグメントリング剛性によりその後の変形が左右されると考えられる。

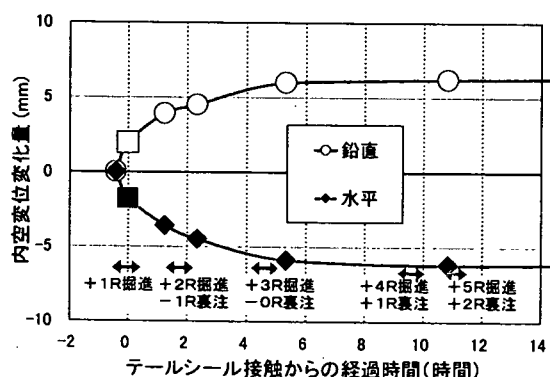


図-4 内空変位短期経時変化(沖積)

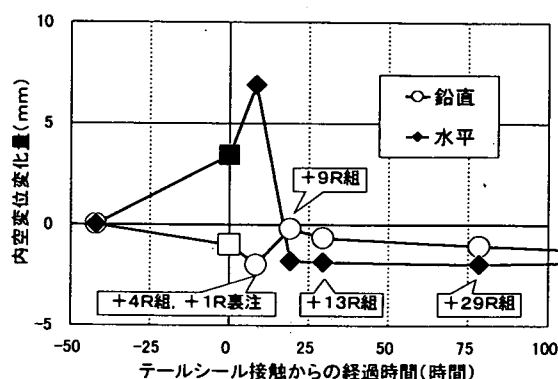


図-5 内空変位短期経時変化(洪積)

3. 2 継手目違い計測

セグメントリングの内空変位を評価する上で、セグメント継手面の挙動を把握しておく必要がある。図-6, 7に沖積ならびに洪積における土圧計測定リングのリング継手目違い量の最終状態を示した。図中、目

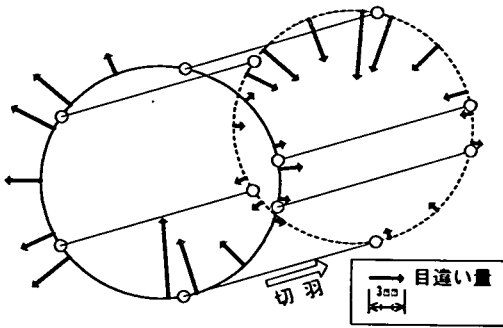


図-6 継手目違い量（沖積）

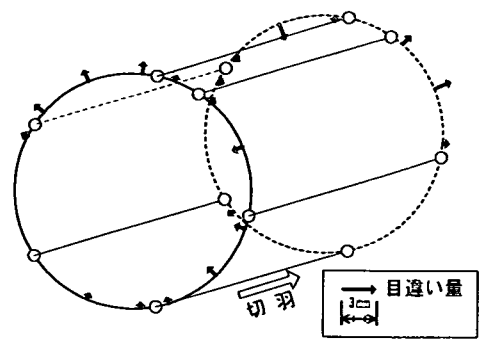


図-7 継手目違い量（洪積）

違い量をベクトル表示しているが、ベクトルの方向は両継手面とも隣接リングを基準にし、対象リングが地山側に発生しているか内空側に発生しているか示している。なお、リング継手面と同様にセグメント継手面においても目違い量を測定しているが、立坑側リング継手面近傍で実施した内空変位測定に影響を及ぼす程の目違い量は発生しておらず、ここでは表示を省略している。

図-6, 7を比較すると明白なように沖積では、かなり大きいリング目違いが発生している。この目違い量は、図-4, 5に示す内空変位の短期発生状況とほぼ同様の発生傾向を示し、以後長期的には全く変動しない。さらに内空変位におけるリング変形形状とリング継手目違い形状を比較すると、ほとんど合致していないことが判る。両者はいずれも相対変位量であるため正確な評価は難しいが、これらは独立に変位・変形しているものと想定される。すなわち、沖積の場合で表現すれば、内空は縦長変形しながら、隣接する手前のリングに対し、左外側にせん断変位する挙動である。

4. 互層における荷重・変形計測

4.1 荷重計測結果

パッド式土圧計で計測された全土圧の最終計測値であるテール通過後8ヶ月の計測値と、計測断面の地盤条件における設計荷重の法線方向成分を比較したものを図-8に示す。ここでは、セグメント設計に用いられた設計の考え方を元にして、慣用設計法では全土被り・土水分離で扱った。

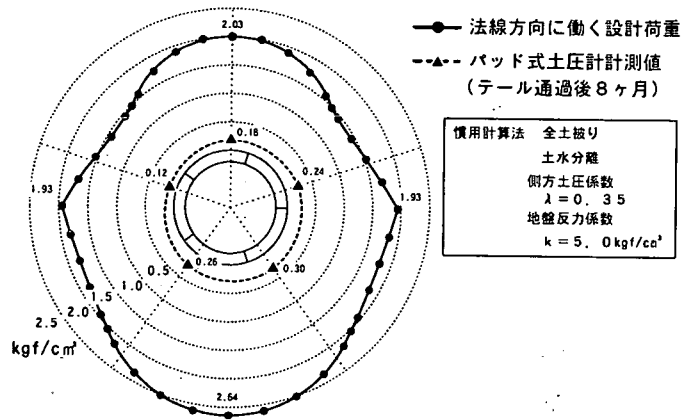


図-8 設計荷重と計測値の比較（互層）

パッド式土圧計における計測値は、5点いずれも設計荷重よりかなり小さい値を示した。これは、セグメント周辺のLc層およびToc層の自立性が高くまた上下部砂層の地下水位が低く、小さい計測値になったと思われる。

4.2 内空変位ならびに目違い量計測結果

沖積・洪積と同様に図-9, 10に互層のパッド式土圧計設置リングにおける内空変位の長期経時変化ならびに短期経時変化を示した。さらに、図-11にはリング継手目違い量の最終状態を示した。

これらの結果から、互層では沖積・洪積の計測結果と比較し、次のような傾向を示す。

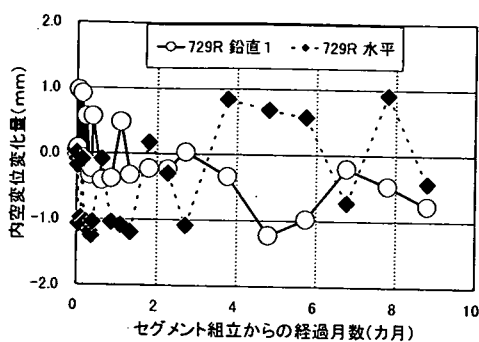


図-9 内空変位長期経時変化（互層）

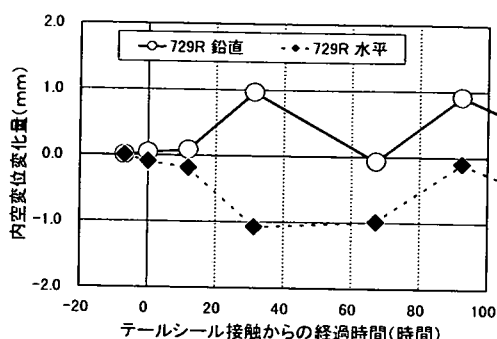


図-10 内空変位短期経時変化（互層）

①内空変位の長期的変化傾向は、沖積・洪積が1カ月程度経過したら、ほぼ一定の傾向を示すのに対し、互層では変位量が1mm程度と小さいが、特に水平方向が伸縮する傾向がみられた。伸縮変動する直接的な原因は把握できないが、沖積・洪積が泥水式シールドで施工し、互層は泥土圧式シールドで施工していること、互層は地下水位が低くセグメントにかかる圧力（荷重）が非常に微妙なかかり方をしているものと推定される。

②内空変位の短期的変化傾向は、一旦沖積と同様な縦長変形を示すが、以後水平・鉛直方向とも安定しない。

③リング継手目違い量の円周方向分布については、互層に

おいても洪積と同様にリング継手に調芯ピンを採用しているためか、目違い量自体は小さい。目違いの発生傾向については、ベクトルの方向性はややばらつくが、手前の継手面（発進側）が左側に相対変位する沖積と同様の傾向を示した。

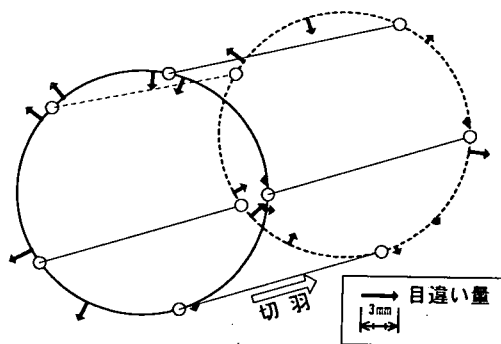


図-11 継手目違い量（互層）

4. 3 掘進ジャッキ作動時のトンネル軸方向・円周方向応力状態への影響

前記の表-1に示すように互層では、セグメント本体ならびに継手挙動を定量的に把握できるようにひずみ計等を数多く配置しており、その中でパッド式土圧計測定リングにおける配力筋・主筋に配置した鉄筋ひずみ計の計測結果から掘進時すなわち掘進ジャッキ作動時におけるトンネル軸方向ならびに円周方向の応力状態のジャッキスラスト力の影響を検討した。

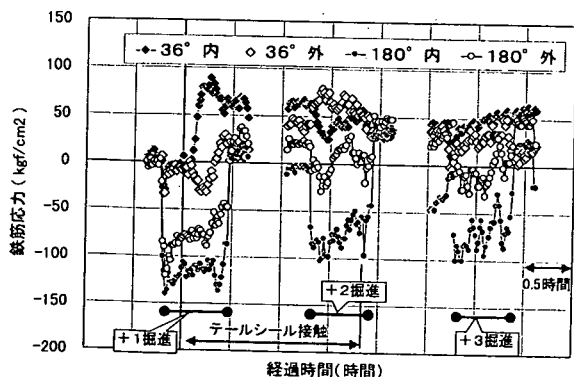


図-12 配力筋応力掘進時経時変化（互層）

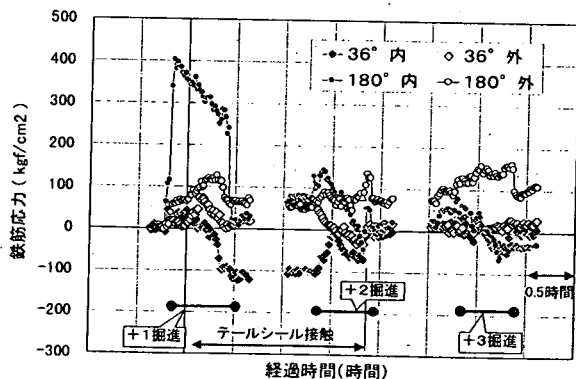


図-13 主鉄筋応力掘進時経時変化（互層）

図-12に配力筋（トンネル軸方向）、図-13に主筋（円周方向）の鉄筋応力の経時変化について、計器設置リングの掘進（+1掘進）ならびに次々リング掘進（+2、+3掘進）のジャッキ作動開始終了期間に前後15分を加え示した。主筋はクラウンを0度とし時計回りに10等分配置したものうち36度と180度方向の内外筋を、配力筋は36、108、180、252、324度に配置したものから同一箇所のものをプロットした。なお、正值が引張、負値が圧縮を示す。計測結果から次のような傾向がみられた。

- ①配力筋応力では、特に180度（インバート部）に顕著であるジャッキ作動時の圧縮力が確認され、このような反応を後続リングの掘進時で確認したところ、8リング目までで以降は反応がなかった。
- ②配力筋応力におけるクラウン部近傍の36度での+1掘進では内側が引張応力が生じており、ジャッキ偏心による法線方向の曲げ引張が生じているものと思われる。
- ③主筋応力では、図-13に示すように、特に+1掘進における180度内側位置の引張応力の発生は顕著である。本来掘進時に作用するジャッキ推力はトンネル軸方向の応力は発生させるが、円周方向の主筋応力への影響は考えにくい。掘進と同時に発生・変動するシールド機グリス圧の影響も考えられる。しかし、図中に当該セグメントリングがシールド機のテールシールに接触し、グリス圧を受けている期間を示しており、グリス圧が原因であればこの期間中反応は生じるはずであるがジャッキ作動を終了した時点でもとの応力状態に戻っており、この影響は他の荷重状態であると想定される。

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組立直後を初期値としたセグメントリングの内空変位計測結果から、シールド機テールシール接触時の円周方向偏圧分布をもつ施工時荷重により変形を起こし、テール離脱したセグメントリングに働く土水圧ならびに裏込注入圧による変形への影響は小さい。
- ②セグメント組立直後の短期荷重状態とセグメント変形の状態を図-14に示す。このようにトンネル軸方向または時系列的に荷重状態が存在し、徐々にセグメントリングが安定した状態のリング形状に変形していくものと想定される。
- ③セグメントリングの変形形状は、通常慣用設計法では横楕円に変形し、この変形量に見合う地盤反力が生じるように設計するが、施工時荷重の円周方向分布やセグメントリング剛性への依存性が高く、様々な形に変形する。
- ④泥水式と土圧式の施工状態で短期荷重の状態が異なり、セグメントリング変形も異なる可能性がある。
- ⑤ジャッキスラスト力のトンネル軸方向伝達性は、今回工事が比較的浅く推力も小さいこともありトンネル軸方向数リングしか後方に伝達しない。ジャッキ推力は、セグメントリングの円周方向応力状態にも影響する。

【参考文献】

- 1) 有泉 毅 他：シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について、トンネル工学研究論文・報告集第8巻、土木学会、pp. 367～372、1998.11
- 2) 有泉 毅 他：シールド洞道の施工時荷重に関する研究（1）－模型実験－、土木学会第54回年次学術講演会、Ⅲ-B110、1999.9
- 3) 長屋 淳一 他：シールド洞道の施工時荷重に関する研究（2）－計測値分析－、土木学会第54回年次学術講演会、Ⅲ-B111、1999.9

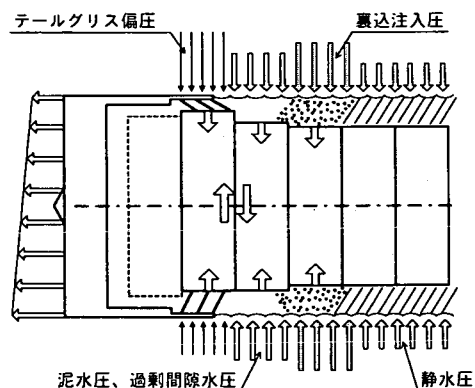


図-14 短期荷重状態と変形