

帯水地盤における土圧式シールド施工に伴う 有効応力変化と地盤変位に関する研究

Correlations between Effective Stress and Displacement of Ground due to Earth
Pressure Balanced Shield in Sand Aquifer

高田正治¹・木村宏²・神田大³・小山幸則⁴・水原勝由⁵

Masaji Takada, Koh Kimura, Hiroshi Kanda, Yukinori Koyama and Katsuyoshi Mizuhara

¹正会員 工修 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 国鉄清算事業本部 (〒105-8434港区西新橋2-8-6)

E-mail:takada@jnrsh.gr.jp

²正会員 工博 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 (〒231-8315横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 工修 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部東京支社 (〒105-0011港区芝公園2-11-1)

⁴正会員 工博 (財)地域地盤環境研究所 東京事務所 (〒113-0034文京区湯島1-8-4)

⁵正会員 (財)地域地盤環境研究所 (〒550-0012大阪府西区立売堀4-3-2)

The parallel railway tunnels in a sand aquifer, constructed by the earth pressure balanced shield machine, have the diameter of 7.45m, the length of 300m, the overburden depth of 4~7m, and the distance between two tunnels of 2m. During excavating the second tunnel, pore water pressure, earth and water pressure, and ground displacement were monitored. The results show ground heaving and pore pressure rising when shield advanced, whereas, ground subsiding and pore pressure dissipating when shield stopped. For investigating these phenomena, the correlations between the effective stress and the displacement of ground were analyzed. The results prove, the change of an effective stress due to shield tunneling, is the significant factor causing ground displacement.

Key Words : effective stress, pore water pressure, ground displacement

1. はじめに

近年、シールドの施工管理技術が進歩し、掘削に伴う地盤変位が的確に制御されて、地上施設や近接構造物に及ぼす影響が少なくなってきた。

土圧式シールド施工においても、従前から地盤変位を抑止するため、チャンバー内泥土圧の適切な設定と維持、掘進に伴う掘削土量と排土量のバランス確保、マシンと地山の摩擦の軽減化、更に裏込め注入の量と圧力のコントロール等が施工管理の主要因とされてきたところである。最近の施工技術の進歩は、地盤条件・施工環境・掘進管理計画を適切に反映したシールドマシンの設計製作とともに、掘進中の情報と管理基準との照合の自動化や変位等の地盤状態の計測結果に基づいて掘進管理の適否をリアルタイムに分析し、その結果を次の掘進管理へ反映させるサイクル作業による施工技術が浸透してきている段階に達しつつあると考えられる。

一方、工法と管理技術の進歩に相反して地表陥没

など異常な地盤変位を招き、道路交通や周辺構造物に影響を与える事例が後を絶たない現実もある。

施工に際して、更なる地盤変位の抑止による安全な施工法の確立という基本的かつ重要な課題に対処するため、帯水地盤での土圧式シールド施工における間隙水圧・土水圧の経時変化の諸計測データを検討することにより、掘進時の作用力による地盤の応力状態の変化のメカニズムを明らかにし、その一般性を示すことがこの施工技術の根幹を裏付ける重要な条件であるという認識に立って、計測データの分析を試み、さらに土水圧と間隙水圧から求めた有効応力変化と地盤変位との相関性を分析した結果を以下の手順で報告する。

先ず、今回計測を行ったシールド工事の概要と地盤条件、計測項目について示す。次に、一般的に土圧式シールドの掘進に伴う切羽近傍における土圧と水圧の変化、地盤変位を生じさせる作用とそのメカニズムについて考察する。その後、現場計測結果から、掘進と停止に伴う間隙水圧変化、地盤変位と間

隙水圧の変化、有効応力変化と地盤変位について分析し、考察したメカニズムの発生の可能性について検討する。最後に、以上を総合的に考察し、土圧式シールド掘進に伴う切羽近傍における土圧と水圧の変化、地盤変位を生じさせる作用とそのメカニズムについて、得られた成果と課題について述べる。

2. シールド施工と諸計測

高速道路直下の帯水砂層において外周離隔2mの単線併設鉄道トンネルを構築するため、土圧式シールド工法によるUターン施工を行った¹⁾。平面図を図-2-1に示す。

道路交差点部で約7m、アプローチ部で約4~5mの低土被りである。地山変位を極力抑止するためシールド直上約2m位置に水平方向ボーリング孔内に鉛直方向変位計を5mピッチで設置し、地盤変位を連続的に計測しながら施工管理に反映させた。合わせて後行シールド施工による先行シールドへの影響を計測し必要により変位防止工等の対策を検討するため、地盤の土水圧・間隙水圧・水平変位の計測を行った。施工は平成15年9月に道路交通に一切支障を与えることなく完了している。

図-2-2は、図-2-1での計測点A, B, C, Dにおける併設シールド直上2mの鉛直方向地盤変位、先行シールドのセグメント背面部に設置した土水圧計・間隙水圧計、および両シールド中間のSL高さの間隙水圧計の位置を示したものである。また水平傾斜計は、左・センター・右の3側線上で上部をTP+19.5mとして鉛直方向に2mピッチで測点を設置した。地下水位は概ねセグメント天端付近にある。各計測点の発進立坑からの距離は、A=25m, B=81m, D=164m, C=280mである。

図-2-3に地質縦断面図を示す。道路交差点部では凝灰質粘土層(tc)の上部に「盛土層(B)」がある。表-2-1に施工トンネルの概要を示す。また地山物性値は概ね表-2-2のとおりであり、掘削断面に出現する洪積砂層(Ds3-1)は、ほぼ飽和しており、やや緩いが中程度にしまっている状態にある。また、その上層部の凝灰質粘土層の一軸圧縮強度は98kN/m²程度である。

3. 地盤応力状態を変化させる作用

(1) 掘進時の地山への作用力

シールドマシンの掘進時に地盤の応力状態を変化させる作用力として次の事項が考えられ、模式図で示すと図-3-1のようになる。

① マシンの推進に伴う周辺地盤のせん断作用力

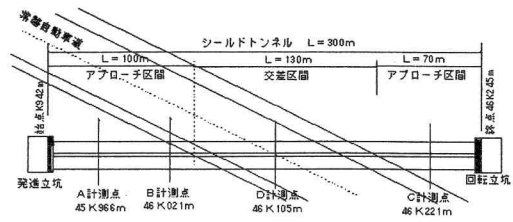


図-2-1 平面図と計測位置

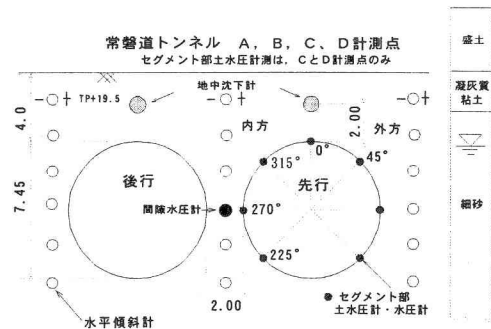


図-2-2 計測機器設置位置

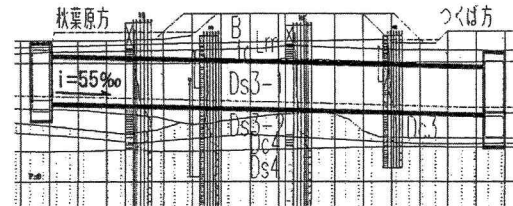


図-2-3 地質縦断面図

表-2-1 現場計測したトンネルの概要

シールド形式	泥土圧シールド (マシン外径 φ7,450mm)
トンネル延長	上り線・下り線とも 303m (単線並列, 離隔2m)
縦断勾配	最大 ±5.5‰
セグメント外径	Do=7,300mm
セグメント幅	B=1,500mm
セグメント厚	h=300mm
セグメント分割	等6分割
土被り	3.7m(0.5D)~7.5m(1.0D)
地下水位	シールド中心位置から4~6m上方 (GL-1.2m)
シールド通過地盤	洪積砂質土(N値5~10)

表-2-2 地山物性値

	N値	相対密度	D50 mm	飽和度 %	内部 摩擦角	透水係数 cm/sec
凝灰質粘土	2~5	-	0.007	92	30	10~5
砂	6~25	0.50	0.194	93	35	10~3

- ② スプークの回転による切羽近傍地盤のせん断作用力
- ③ 泥土圧・ジャッキ推力による地盤押付け作用力
- ④ 地盤の掘削による応力解放作用力（掘削と排土の量のバランスにより、載荷または除荷に変化）
- ⑤ 添加材の注入により地山間隙中に浸透する作用

(2) 作用力による地山への作用

(1)の作用力によって、地盤は次の2つの作用を重ねて受けることになると考えられる。

- 掘削した部分の地山に含まれている間隙水や添加材注入によって地盤に加えらるる余剰水を、チャンパー内に取り込まずに地山へ排出する作用（排水作用）
 - 地盤をせん断または圧縮する作用
- 両作用の内容について、想定するメカニズムを次に説明する。

a) 地山へ余剰水を被圧して排出する作用

地山中に余剰水が排出され、間隙水圧が上昇する作用として概念図を図-3-2に示すが、具体的には次の3つのメカニズムがある。

- ① 砂質地盤において、切削により土粒子骨格が壊されて自由水に近くなった間隙水は、透水性の非常に小さい泥土による加圧の結果、地山中に排水される。
- ② 掘削土の塑性流動化と不透水性化を図るため、泥土圧の2～3倍の圧力で注入される添加材が、掘削土砂中の間隙水と置換して、余剰分を含む加圧され

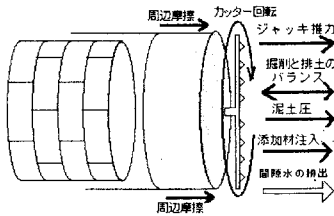


図-3-1 掘進に伴う作用力の模式図

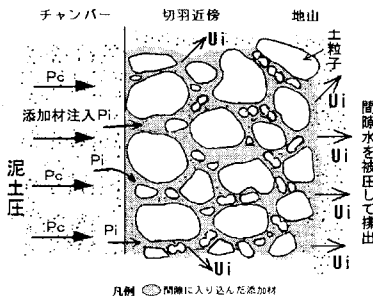


図-3-2 添加材と泥土による間隙水排出の概念図

た地下水（過剰間隙水）が地盤中へ排出される²⁾。

③ 地山への載荷作用によって生じる地盤の体積変化の結果、掘進により間隙水を地盤中へ排出される。

なお、これらの排水作用は下記の事項によっても確認される。

- 一般に、帯水砂層地盤の掘削においては、掘削土の良好な泥土化のために掘削地盤体積の約20～30%程度の添加材が注入されるが、排出される土砂の含水量が地山よりかなり減少していること。
- 三次元浸透流解析を用いたシールド掘進時に切羽部に「泥土圧と静水圧の差」に等しい過剰水圧を与えながらの経時変化シミュレーションで、間隙水圧の変動挙動を再現することができること²⁾。

b) 地山をせん断または圧縮する作用

① 圧縮作用

等方な圧縮作用に伴う地盤の体積縮小変化により、間隙が減少して、非排水状態であれば間隙水圧が上昇する。

② ゆるい砂の非排水せん断作用

せん断作用力を受けた場合に、非排水状態でのせん断応力～ひずみ関係は図-3-3に示すように変化し、また有効応力～せん断応力関係は図-3-4のようになることが知られている⁴⁾。

すなわち、中程度にゆるい砂層が非排水状態でせん断作用を受けると、ひずみの初期段階においては

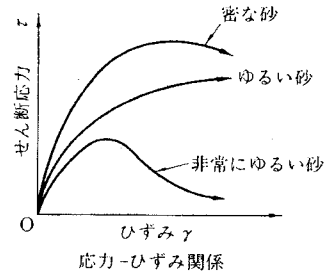


図-3-3 砂の非排水せん断応力-ひずみ

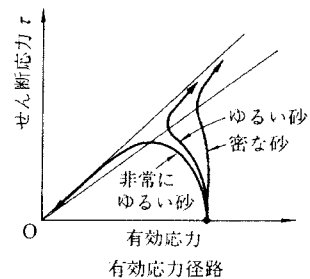


図-3-4 せん断応力と有効応力との関係

有効応力が減少することとなる。

これに伴い体積収縮が生じると間隙水圧が上昇するものと推測される。

しかし、透水係数等により、地盤は非排水状態と排水状態の中間的挙動を示すのが実態であるものと考えられる。

いずれにしても、本報告の対象としている帯水地盤の相対密度を勘案すると、この特性による地盤の応力状態変化は考慮すべきものと考えられる。

なお上記のメカニズムによれば、「密な砂層」では、せん断作用によるダイレタンシーにより、逆に間隙水圧が低下する可能性がある。しかし密な砂礫層での土圧式シールド施工に際しても掘進と停止に伴って間隙水圧の上昇と低下が計測されていることから⁹⁾、「密な砂層」におけるせん断作用については、更なる研究が必要と考えられる。

(3) 掘進停止による除荷と排水作用の停止

掘進停止時には泥土圧を除く各作用力による荷重がなくなるとともに、添加材の注入も基本的には停止されることから、間隙水の排出も停止することとなる。これらより過剰間隙水圧は地盤への浸透により低下・消散し、間隙水圧は、時間の経過とともに、ほぼ静水圧まで低下する。

また、掘進時の作用により地盤の体積圧縮により間隙水圧の上昇が生じた場合には、掘進の停止による除荷に伴い間隙水圧の低下が生じると、「排水による地山の収縮」が生じることから、地盤の可逆的変位が起こることになるが、初期状態に比較して、より大きな収縮変形が生じる可能性がある。

4. 掘進と停止に伴う間隙水圧変化について

(1) 間隙水圧の計測と変動

シールドの掘進と停止において間隙水圧計測値の変動が生じる事象が計測された。図-4-1に後行シールド施工時に先行セグメント背面の間隙水圧計の計測値を示す。

シールドの掘進と停止に応じて、計測器の設置位置にかかわらず、ほぼ同様な増加と減少の変動モードを示している。図中の掘進ストロークは斜め部が掘進中を、水平部はセグメント組み立て等による掘進停止中を示す。なお、セグメント幅は1.5mである。

(2) 計測位置による計測値の差異

D計測点付近を後行シールド切羽が通過中の間隙水圧の変動を図-4-2に示す。D計測点とB計測点との離隔は約83mであり、間隙水圧変動の反応の差異

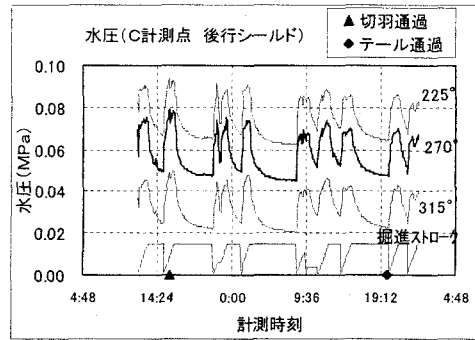


図-4-1 間隙水圧の変動

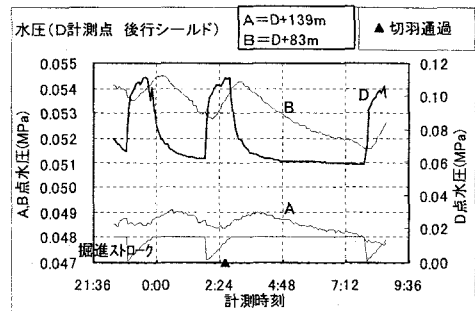


図-4-2 間隙水圧の伝播

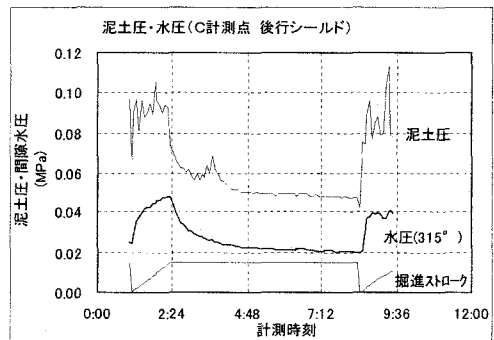


図-4-3 間隙水圧と泥土圧の低下

を調べると、掘進開始に対しては約20分、停止に伴う低下の開始には約40分の遅れを生じている。同様にA計測点では掘進開始は約45分、停止は約70分遅れて反応している。

(3) 停止に伴う過剰間隙水圧の消散

図-4-3に示すように、掘進中に増大した地山の間隙水圧は掘削の停止に伴い一旦、一部が急激に低下するが、以後、時間経過に伴い漸次低下し、ほぼ静

水圧になる。この現象は、シールドの推進力の解放、間隙水圧の消散過程を示すものと考えられる。また間隙水圧の低下に連動してチャンバー内泥土も低下することも確認されている。

(4) 間隙水圧の変動と伝播についての考察

シールド掘進、停止に伴う間隙水圧の変動と伝播について、計測データから得られた結果を考察すると以下ようになる。

- ① シールド掘進と停止に伴う間隙水圧の変動は切羽からの距離に応じて時間差を持って伝播するとともに、減衰がみられる。
- ② 切羽近傍においても、掘進開始により間隙水圧がほぼ一定値まで上昇するのに約10～15分を要している。この時間は掘進により切羽付近での地山に対する持続的な荷重と添加材注入に伴い発生する過剰間隙水圧が一部浸透拡散しながら上昇し、排出水量と浸透量がバランスするのに必要な時間であると推察される²⁾。
- ③ 他の土圧式シールド工事中において切羽の通過前後において地下水位が変動した観測事例が報告されている⁶⁾。
- ④ ①～③および4 (3)の現象を総合的に考察すると、掘進と停止に伴う間隙水圧の変動は、掘進に伴って切羽付近で発生した過剰間隙水圧が周辺地盤へ「漸次浸透伝播」するメカニズムと、停止に伴って「漸次浸透消散」するメカニズムによるものであると考えられる。

5. 地盤変位と間隙水圧の変化について

(1) 鉛直方向および水平方向の地盤変位

シールドの施工において間隙水圧の変動と高い相関性を持つ地盤の変位が計測された。図-5-1に後行シールド直上の鉛直方向地盤変位と先行セグメント部315°位置の間隙水圧の経時変化状況を示す。

図-5-2には、後行と先行シールドの中間部に設置した水平変位計のTP+19.5m（シールド天端+2m）位置でのトンネル横断方向の地盤変位の経時変化を示す。

後行シールドの施工に伴う間隙水圧の上昇と低下に応じて鉛直方向の変位は隆起と沈下を示し、水平方向の変位は後行シールド断面の外方（+方向）と内方（-方向）への変位を示している。

なお、図-5-1、図-5-2において、テールが通過する直前の2リング区間の施工において、掘進時にそれまでと異なる大きい隆起モードを示しているが、これは図-5-3の矢印部に示すとおり、裏込め注入圧

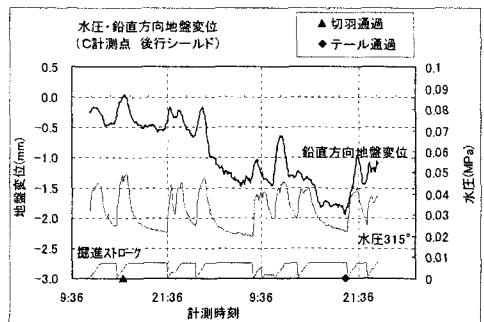


図-5-1 間隙水圧と鉛直方向変位

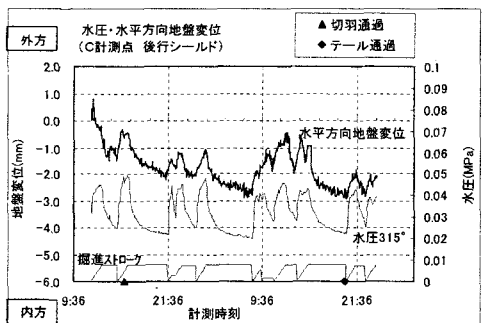


図-5-2 間隙水圧と水平方向変位

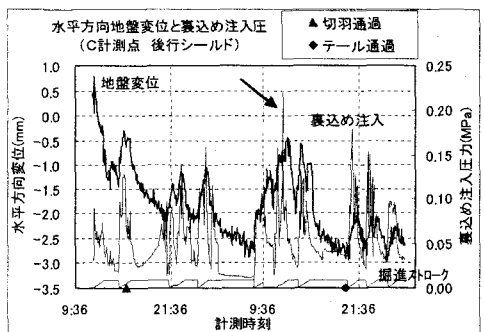


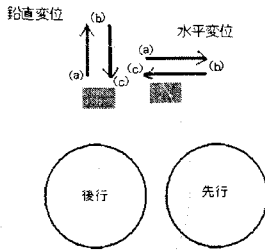
図-5-3 地盤変位と裏込め注入圧

がそれまでより約0.02MPa高くなっていることに起因しており、また、同時裏込め注入管の吐出口が計測点の近傍に近づいていることも要因となっているものと推測されるが、裏込め注入の圧と量コントロールが地盤変位を左右することは留意する必要がある。

(2) 地盤変位についての考察

鉛直方向および水平方向の地盤変位と間隙水圧変化を考え合わせると、下記のとおり整理される。

- ① 後行シールドの掘進により間隙水圧は上昇し、停止に伴い間隙水圧は低下している。



凡例： 影響範囲を示す
 (a)~(b)掘進時、(b)~(c)停止時

図-5-4 地盤変位の模式図

- ② 切羽周辺の地山は、掘進により掘削断面の外方に変位し、停止により切羽周辺の地山は掘削断面の内方に変位している。
- ③ 地盤変位と間隙水圧の変動は強い相関性を有している。
- ④ 図-5-4に掘進と停止に伴う地盤変位の模式図を示す。周辺地山は掘進と停止により、鉛直及び水平変位から推定すると、外方への膨張と、内方への収縮を示しているが、応力状態変化と地盤変形の関係については、更なる分析が必要である。

6. 有効応力変化と地盤変位について

(1) 有効応力変化と地盤変位

a) 土水圧と水圧変化について

図-6-1、図-6-2にC計測点における土水圧計測値と水圧計測値の、シールドの掘進と停止に伴う経時変化を示す。

図-6-3には、切羽通過時の土水圧と間隙水圧の変動を示す。土水圧の変動は、間隙水圧の変動に比較して小さい計測値となっている。

シールド掘進に伴う「地盤のせん断」による過剰間隙水圧の発生と3(2)a)に述べた「間隙水を被圧して地盤中に排出」させる作用が相まって、間隙水圧の大きな変動が生じているものと考えられる。

b) 有効応力変化と地盤変位について

図-6-4は、C計測点315°位置における土水圧計測値と間隙水圧計測値との差（計算有効応力と称する）と鉛直方向地盤変位の経時変化を示したものである。極めて相関性が高く、有効応力変化により地盤変位が生じていることと考えられる。

同様に、315°位置での計算有効応力とセンターでの側線のTP+19.5mの位置の水平変位を図-6-5に示す。水平変位は、+は後行シールドの外方側、-は内方側への変位を表す。

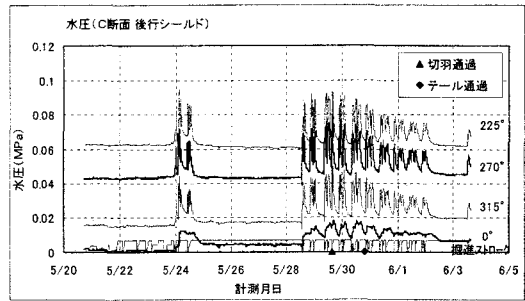


図-6-1 間隙水圧計測値

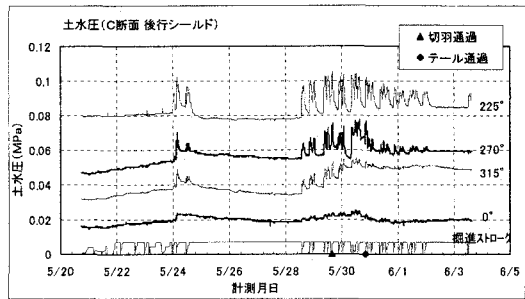


図-6-2 土水圧計測値

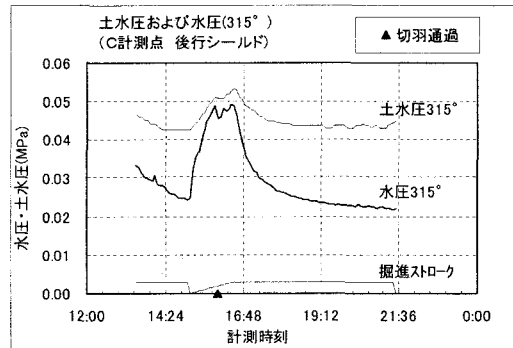


図-6-3 土水圧と間隙水圧の変化

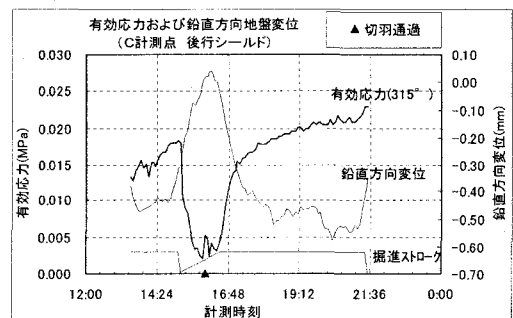


図-6-4 計算有効応力と鉛直変位

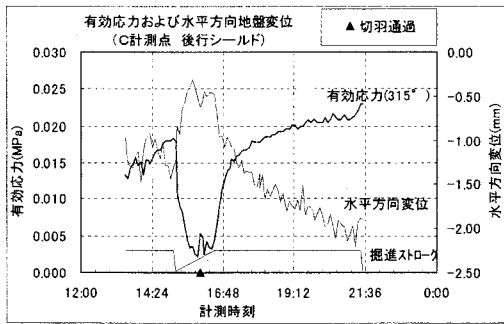


図-6-5 計算有効応力と水平変位

各図によると、掘進中の有効応力は低下傾向を示し、後行シールドの外方側に変位するモードとなっており、停止に伴い有効応力は増加傾向を示し、後行シールドの内方側に変位している。有効応力変動に水平変位は敏感に反応しており、相関性が強く現れている。なお、図の範囲における計算有効応力の変動は0.002～0.024MPaであり比較的小さい変動幅であるが、約3mm程度の水平変位の変動をもたらしていることに注意が必要である。

(2) 土水圧計測値と計算有効応力の取り扱い

土水圧計測値と計算有効応力の取り扱いについては次のような注意が必要である。

- ① 先行セグメント組み立て前に背面部に設置したパッド式土水圧計の外周には、セグメントの組立後に裏込め注入が施工されていることから、地盤の土水圧を直接計測しているのではない。
- ② しかしながら、計算有効応力の変動と地盤の変動はその経時変化において強い相関を示していることから、計算有効応力は土圧式シールド施工に伴う地盤の変位を解明するためには有用であり、その方向性を含めた研究が望まれる。
- ③ シールド施工に伴う土水圧の計測値の評価については、種々研究がなされているが⁷⁾、今回の計測結果を考えると、地盤条件や施工方法を考慮した土水圧計測値から地盤の全応力の評価手法については更なる研究が必要である。

7. 本研究による成果と今後の課題について

本研究の成果と今後の課題をまとめると、次のようになる。

(1) 間隙水圧の変動のメカニズム

- ① 掘進中の地山の過剰間隙水圧発生の要因として、 γ :掘進に伴う地盤のせん断作用と、 ι :添加材による間隙の充填とシールド側から地山への作用力

による余剰水分の地山への排水作用の2つの作用を推定し、掘進停止に伴うその消散は地盤への浸透であるとして計測データの分析と解析を行った。その結果、 ι の作用影響が大きいとの結論に達した。しかし γ の作用との量的割合については、今後研究を要する。

- ② 掘進停止中に間隙水圧の低下と連動して泥土圧が低下し、地盤沈下が進んでいることが判明した。一方、掘進停止中に泥土圧の低下を抑止するため、添加材の注入効果は確認されている¹⁾が、その効果の発現機構については今後更なる研究を要する。

(2) 有効応力の変化と地盤変位の相関

- ① 計算有効応力の変化と地盤変位には明白な相関性があり、掘進による間隙水圧の増加が土水圧の増加を上回り、有効応力が低下することにより地盤の沈下等を引き起こすことについて確認できた。
- ② 地下水の地盤浸透による間隙水圧の上昇と低下については、三次元浸透流解析により定量的評価が可能なことを示した²⁾が、シールド掘進に伴う地盤の全応力、有効応力の変化量と地盤変位の相関性を定量的に明らかにするためには、本研究で明らかになった地山の挙動を再現する過剰間隙水圧の発生と消散メカニズムを地盤応力の変動とを連成させた解析モデルでの検討が必要である。

8. おわりに

比較的緩い砂層における土圧式シールドの掘進と停止に伴う地山の間隙水圧や全応力変化についての現場計測結果と現場で観測されている事象について、有効応力の原理と地盤特性に基づいて検討した。

その結果、想定したメカニズムが現象として確認できることが明らかになった。このメカニズムについて、地盤条件が異なる他の現場における計測結果についての評価を更に進め、現象発生に及ぼす地盤条件、シールド掘進状況等の影響を検討し、地盤応力状態の変動機構の細部を解明するとともに、シールド施工における地盤変位の更なる抑止につながる掘進管理方策を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 石徳博行, 松永卓也, 平手知, 岸本章士: つくばエクスプレス(常磐新線)常磐道トンネルにおける超低土被りシールドの施工, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003
- 2) 高田正治, 木村宏, 岸本章士, 増井仁: 土圧式シールド施工による地山間隙水圧の変動に関する考察, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005

- 3) 高田正治, 木村宏, 神田大, 小山幸則, 水原勝由: 滞水砂層における土圧式シールドの施工に伴う間隙水圧変化と地盤変位についての考察, 第40回地盤工学研究発表会, 2005
- 4) 岡 二三生: 基礎土木工学シリーズ16 土質力学演習, 森北出版, 1995
- 5) 日本鉄道建設公団名古屋建設局ほか: 上飯田連絡線瀬古T(シールド)施工報告書, 2001
- 6) 野沢邦臣, 片平啓氏: 横2連形DOT工法による近接施工について, トンネル技術協会, 第31回施工体験発表会, 1992
- 7) 都市NATMとシールド工法の境界領域, 土木学会, トンネルライブラリー第13号, 2003