

立坑と横坑を連続して掘進するシールド施工の 地盤に与える影響の考察

A STUDY ON THE EFFECTS OF EXCAVATING VERTICAL SHAFT BY THE VERTICAL-HORIZONTAL CONTINUOUS SHIELD TUNNELING METHOD ON THE GROUND

金子研一**・里 優**・石島洋二***

Kenichi KANEKO, Masaru SATO and Youji ISIJIMA

A shield tunnelling method which permits continuous excavation of a vertical shaft and a main tunnel to considerable depths is beginning to be introduced in the Metropolitan area.

This is a study on coupled FEM analysis performed to investigate the effects of shaft excavation on the mechanical and hydraulic properties of the ground that vary between the said method and conventional techniques, most typically the pneumatic caisson method. The analysis revealed that the method prevents shear strains due to main tunnel excavation from concentrating in shaft-main tunnel junctions, and thereby decreases a likelihood of local stress concentrations occurring in these sections.

Keywords : *Vertical-Horizontal continuous shield, coupled FEM, shaft excavation, slurry pressure*

1. はじめに

大深度のシールド掘進立坑を施工するために、近年、シールドで立坑を掘削し、引き続きトンネルを掘進していく新しい施工法が開発され、首都圏で採用され始めている。本施工法は立坑築造の高速化や立坑寸法の小型化を特徴としているが、地下水を乱すことが少ないことでも注目されている。従来、シールド掘進立坑は地下連続壁工法やニューマチックケーソン工法で施工するのが一般的であった。ここでは、シールドによる立坑とトンネルの連続施工を「新工法」、地下水位低下工法を併用するニューマチックケーソン工法に代表される立坑掘削を「従来工法」と呼び区別することにする。

地下連続壁工法の場合には、掘削底面の安定を確保することが重要になる。このため、砂地盤の場合、しばしば土留壁を難透水性地盤に根入れする方法が用いられるが、掘削底面に作用する圧力を低下させるため難透水性地盤下の被圧水をポンプで排水しているのが現状である。

ニューマチックケーソン工法における沈設深度は、補助工法を用いない場合、水位差40mが限界である。これより大きな水圧が作用する大深度に対してケーソンを用いるには、何らかの方法で作業気圧を低減するか、遠隔操作による無人施工法を採用する必要がある。実績のある気圧低減工法は、地下水を低下させ

* 正会員 大成建設(株)技術開発第二部

** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所

*** 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科

る作業を伴う。

これに対し、シールドによる立坑の施工においては、切羽面を常に地下水圧より高い泥水圧で保持するため、地下水を低下させる必要がない。したがって、本工法による立坑とシールドトンネルの連続掘削工法は、地下水を低下させない工法といえ、従来の施工法に比べ地盤の擾乱を押さえることができると期待される。

このために、有限要素法による連成解析を行い、施工に伴う擾乱を明らかにしようとした。また、若干の施工事例によって解析結果を確認した。本研究の目的は、施工が地盤の力学的・水理学的状態に与える影響に関して、新工法と従来工法とで差がでるか否かを検討することにある。

2. 施工に伴う擾乱の予測

2. 1 連成解析の概要

地下水で飽和された地盤内に立坑を掘削すると、立坑周囲の地盤は掘削に伴う応力解放によって変形し、水の流れが悪くなる。また、間隙水圧が上昇すると地盤の有効応力は増加する。このように水を含む地盤では、地盤の変形と地下水の流れは相互に影響を及ぼす。両者の作用を同時に考慮するのが連成解析である。

このために、地盤を水で飽和された空隙を有する等方均質な弾性体で理想化し、かつ、以下の3つの仮定が成立するものとする。

1) 地盤の空隙率の変化は、体積ひずみの変化に等しい。

2) 地盤に等方圧を加え、これを一定に保った場合には、間隙水圧の増分と体積ひずみの増分は比例関係にある。

3) 間隙水圧を一定に保ち等方圧を増加させた場合の体積ひずみと、等方圧を一定に保ち、間隙水圧をこれと同じだけ増加させた場合の体積ひずみの絶対値は等しい。

また、地盤中の間隙水の流れは、ダルシーの法則に従い、地盤の透水性は等方的であるものとする。これらの仮定の下で支配方程式を導き、数値解析によって所定の境界条件と初期条件における近似解を得た。連成解析における支配方程式は、地下水流れの方程式(式1)と地盤の平衡方程式(式2)である。

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial x_i^2} = \frac{\partial \varepsilon_{ii}}{\partial t} - \frac{n}{K_w} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{2} C_{ijkl} (\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + \Delta \phi \delta_{ij} \right)_{,j} = 0 \quad (2)$$

ここに、 k は地盤の透水係数、 h は間隙水の全水頭、 ε_{ii} は体積ひずみ、 $1/K_w$ は水の圧縮率、 ϕ は間隙水圧、 C_{ijkl} は地盤の弾性定数マトリックス、 n は地盤の空隙率、 u は地盤の変形である。また、 j は x_i による微分、 Δ は増分を表し、 δ はKroneckerのデルタである。なお、 x_i ($i=1, 2, 3$)は直角座標であり、添え字は総和規約に従うこととする。

式1は、間隙水圧の変化により地下水流れが変化すると、地盤が膨張したり収縮したりすることを示しており、式2は掘削などの応力変化によって地盤が変形すると、間隙水圧も変化することを示している。したがって、応力変化により間隙水圧が変化すると、これにより地下水流れが変化し地盤が変形するが、この結果応力分布に変化が生じ間隙水圧が変化する、といった循環的な現象が生ずることとなる。これが、地盤の変形と地下水流れの相互作用である。

数値解析にあたって式1に現れる時間微分は前進差分により近似した。また、式1,2に現れる座標微分は有限要素法により離散化した。掘削部分を含む地盤は3次元有限要素によりモデル化した。形状が複雑であり、また掘削過程を追跡するために細かい要素分割が必要であったため、4面体要素のみを用いた。

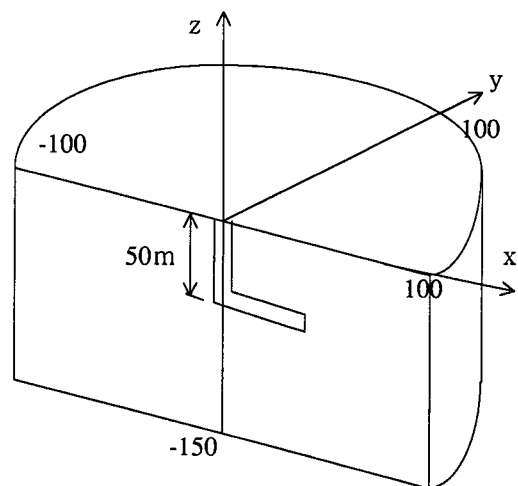


図-1 解析領域

表-2 入力パラメータ

地盤	ヤング率E	100000tf/m ²
	ポアソン比 ν_d (排水条件)	0.1
	ポアソン比 ν_u (非排水条件)	0.4
	透水係数 κ	1.0×10^{-5} cm/sec
	単位体積重量 γ	2.0tf/m ³
コンクリート	ヤング率E	1000000tf/m ²
	ポアソン比 ν_d (排水条件)	0.1
	ポアソン比 ν_u (非排水条件)	0.1
	透水係数 κ	1.0×10^{-5} cm/sec
初期条件	初期応力	$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma z$
	初期間隙水圧	$P = z$ (静水圧状態)

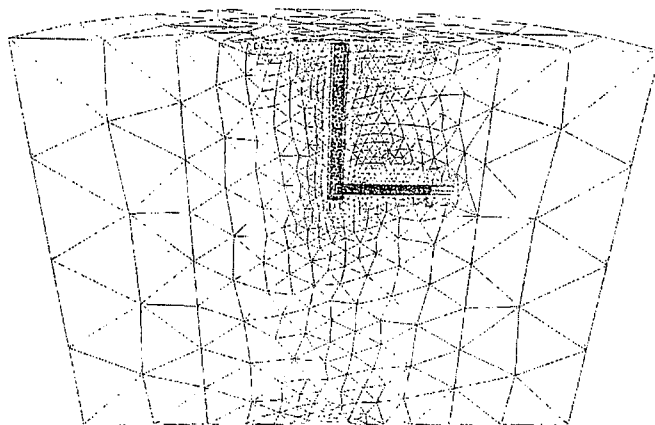


図-2 解析メッシュ図

表-1 境界条件

	変位	水頭	流速ベクトル
底面	完全固定		$f_z = 0$
側面	上下スライド	固定	
対称面	y軸方向固定		$f_y = 0$

2. 2 解析条件

新工法と従来工法では、立坑断面形状や施工方法が異なる。しかし、立坑掘削時に周囲の地盤から地下水を低下させることの有無の効果を明確にするために、同一形状寸法の立坑、横坑が同一のステップで掘削されるものとした。すなわち、直径5.5mの円筒形立坑を深度50mまで掘削し、次に、深度46.75mの位置で直径3.5mの横坑を32.75m掘削するものとした。3次元解析の領域は対称性を考慮し、図-1に示すように、立坑を中心とし、水平方向に100m、地表から鉛直方向に150mの広がりをもつ半円柱とした。図-2は解析領域の有限要素モデルで、境界条件は表-1に示すとおりである。

領域は透水性のある砂質地盤から構成されているものとし、物性値を表-2のように設定した。砂質地盤では、構造骨格の体積弾性定数が間隙水のそれに比べ十分低いと考えられるため、非排水条件下のポアソン比の第一近似値は0.5である。しかしながら、この値を採用すると、非排水条件の体積弾性定数が極端に大きくなり、数値解析上は桁落ちなどで解が不安定となることが懸念される。そのため、ポアソン比を0.4とした。以下に示す立坑掘削の解析は、新工法と従来工法の違いを定性的に検討することが目的であり、ポアソン比のこの違いが解析結果に重大な影響を及ぼすことはないと考えられる。

3段階から成る解析は合計22のステップ（ステージ）数に分けて逐次的に進める。つまり、全施工範囲を22の区間に分けて逐次掘削を行う。まず、第1段階の立坑掘削（ステージ1～3）から始め、引続いて立

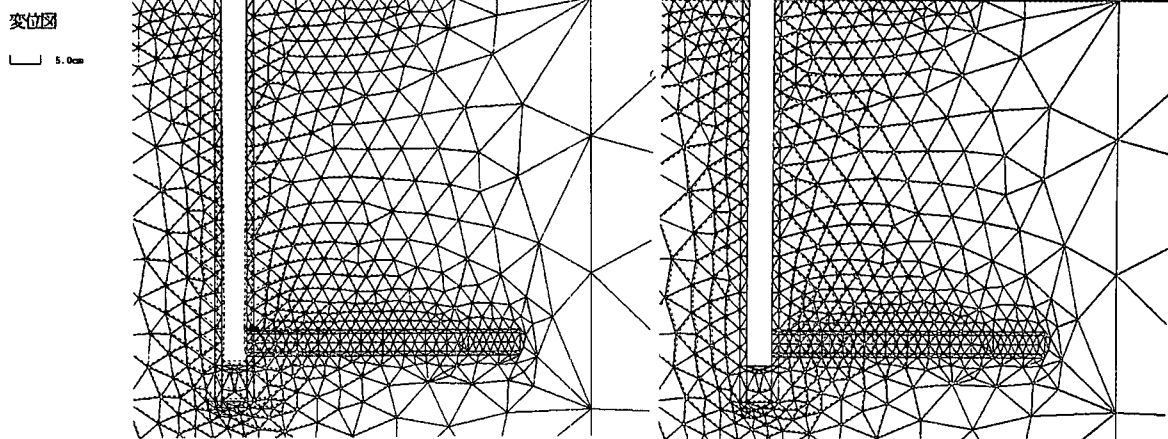


図-3 新工法による立坑掘削完了時の地盤変位図

図-4 従来工法による立坑掘削完了時の地盤変位図

坑底から行う横坑発進（ステージ4：5.75m掘進）の第2段階を経て、第3段階（ステージ22）では横坑を32.75m掘進する。

立坑はセグメントを付加した状態で一気に掘削するものとする。このとき新工法では水は抜かないものとする。従来工法でも同様に躯体壁を付加し、立坑を一度に掘削するが、立坑完成後、0.5日間水を抜くものとする。この処置は、ニューマチックケーソン工法で気圧低減工法を採用した場合、ケーソンの内圧を下げるために地盤から水を排出することを想定したものである。解析では、掘削深度に応じて地下水を低下させる作業を想起し、立坑壁全体から水を抜くものとする。

2. 3 解析結果

立坑掘削完了、横坑掘進開始、横坑掘進中の3段階に対する解析結果を示す。

(a) 立坑掘削完了時

新工法では立坑掘削の初期の段階から完了時に至るまでの間、地盤は隆起を示す。図-3は掘削完了時の状態を示したもので、地表面はわずかに隆起している。隆起量の最大値は22mmである。実際の施工に当たっては、解析では考慮しなかったガイドウォールの重量やテールボイドの発生は立坑周囲を沈下させる作用をする。したがって、隆起量は実際には予測よりもさらに小さくなると考えられる。従来工法では、立坑掘削完了時の地盤変位を示した図-4から、地表面は最大27mm沈下すると予測される。また、立坑壁の変位が新工法の方が大きく出ているのは立坑周囲の間隙水圧が高いためである。

新工法による立坑掘削完了時の圧力水頭を示した図-5をみると、立坑周囲の水頭は周辺地盤と比較してわずかに高くなると予測される。深度が増すほどこの傾向は顕著になる。これは、立坑掘削に伴う底部の地盤の圧縮力が深度に比例して増加し、これによって間隙水圧が上昇するためである。なお、水頭分布の乱れは立坑のごく近傍に限定されており、擾乱の程度も小さい。

従来工法では、図-6に示すように、底部から水を抜きながら立坑を掘削するため、立坑周囲の水頭は周辺地盤と比較して小さくなり、立坑底部では5m近く水頭が下がっている。図-5、6を比較すると、立坑の掘削に際し新工法は従来工法に比べ地下水位に対する影響が少ないことがわかる。

図-7、図-8は、それぞれ新工法、従来工法による立坑掘削完了時の八面体せん断ひずみ分布を示したものである。新工法の場合、立坑の近傍に従来工法に比べて大きなせん断ひずみが発生している。従来工法の場合、周囲の間隙水圧が減少するため掘削解放力は小さくなり、これに伴ってせん断ひずみも小さい。しかし、立坑の影響が現れている範囲をみると、新工法の方が従来工法に比べて狭い。また、立坑完成後、間隙水圧が回復するにつれて、せん断ひずみは増加すると予想される。

(b) 横坑掘進開始時

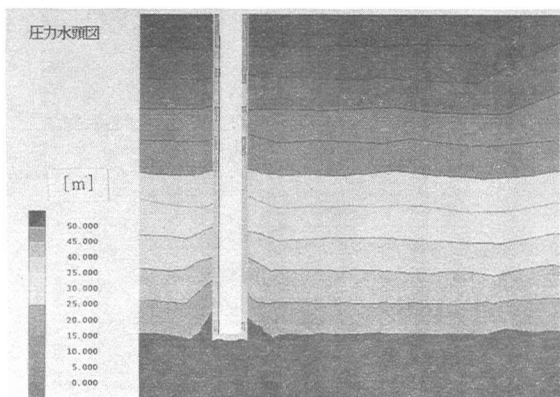


図-5 新工法による立坑掘削完了時の圧力水頭図

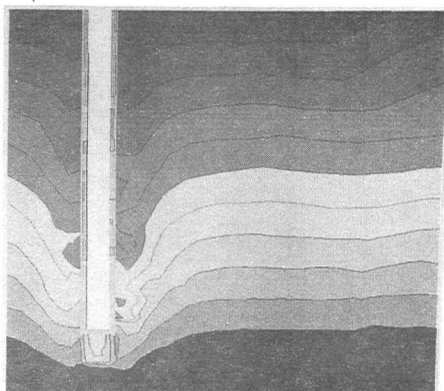


図-6 従来工法による立坑掘削完了時の圧力水頭図

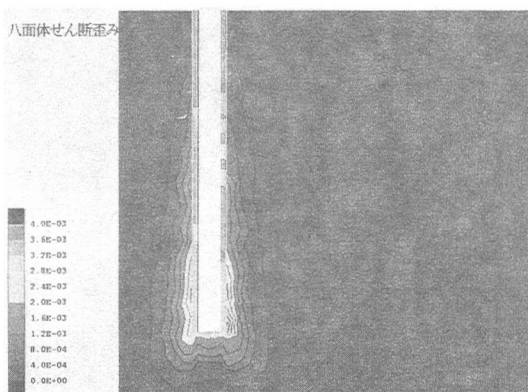


図-7 新工法による立坑掘削完了時の
八面体せん断ひずみ図

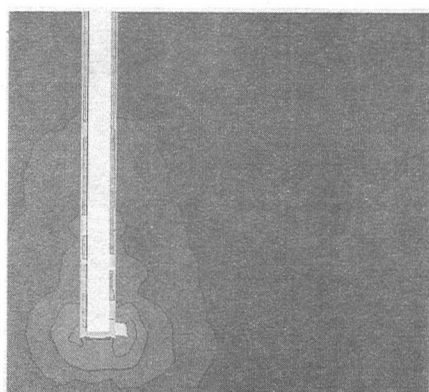


図-8 従来工法による立坑掘削完了時の
八面体せん断ひずみ図

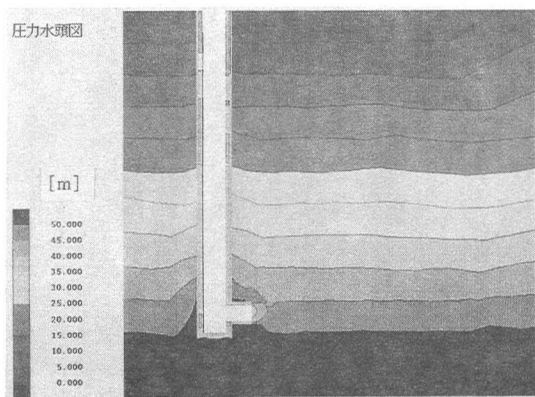


図-9 新工法による横坑発進時の圧力水頭図

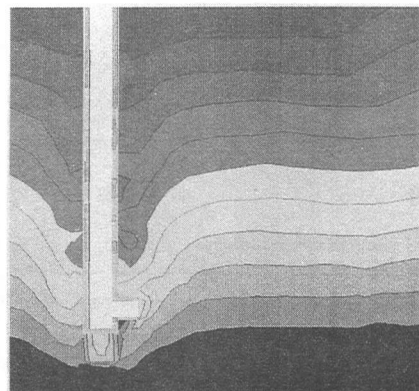


図-10 従来工法による横坑発進時の圧力水頭図

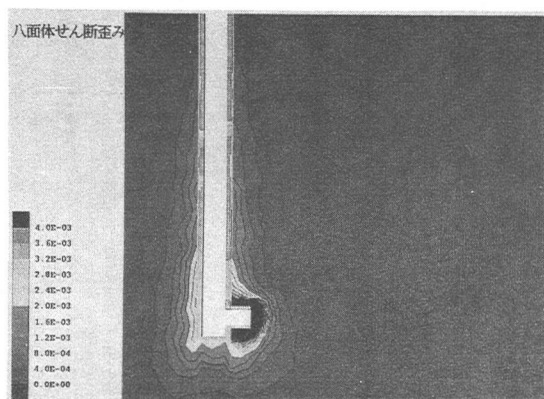


図-11 新工法による横坑発進時の
八面体せん断ひずみ図

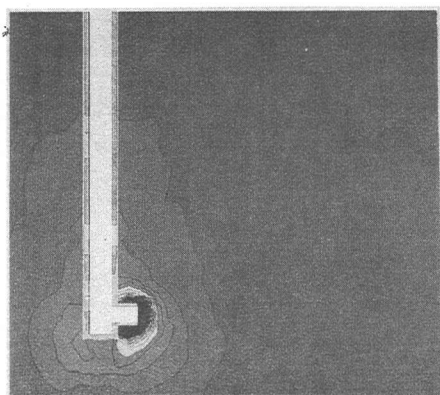


図-12 従来工法による横坑発進時の
八面体せん断ひずみ図

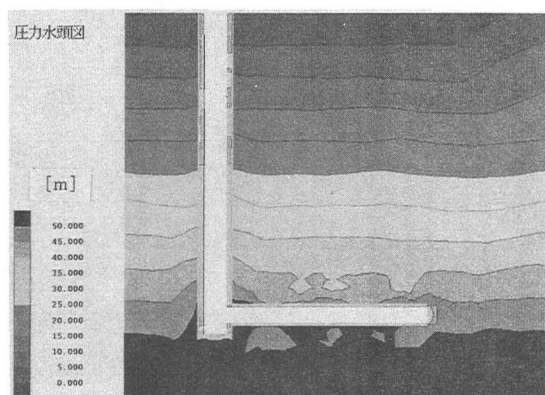


図-13 新工法による横坑掘進時の圧力水頭図

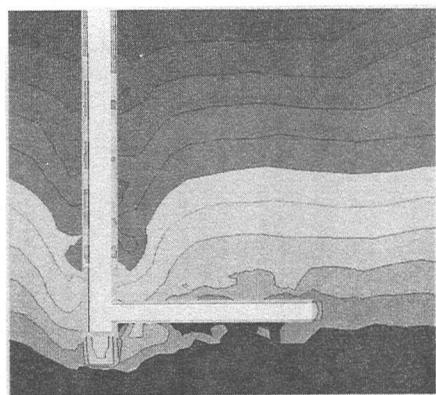


図-14 従来工法による横坑掘進時の圧力水頭図

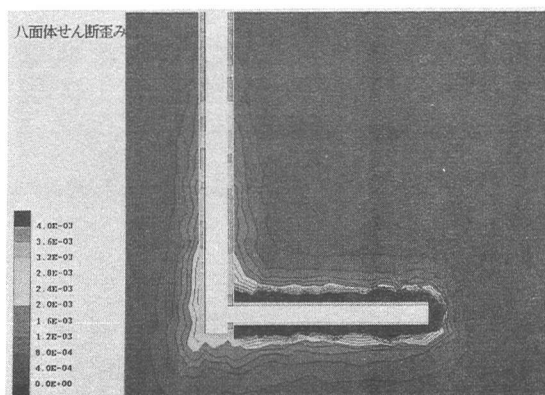


図-15 新工法による横坑掘進時の
八面体せん断ひずみ図

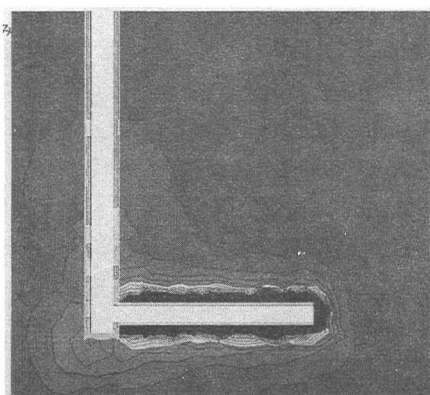


図-16 従来工法による横坑掘進時の
八面体せん断ひずみ図

図-9, 図-10は, それぞれ新工法, 従来工法による横坑掘進時の圧力水頭図である。図-5, 図-6に示した立坑完了時の水頭分布と比較して, 勾配は低くなっている。

図-11, 図-12は, それぞれ新工法, 従来工法による横坑掘進時の八面体せん断ひずみ図である。新工法の場合, せん断ひずみの等高線は立坑に沿って広がっている。これに対し, 従来工法の場合, 立坑と横坑の接合部の等高線が密になっており, 局所的な応力集中の発生を示している。また, 従来工法の方がせん断ひずみがわずかに小さいのは, 新工法に比べて間隙水圧が低下しているためである。しかし間隙水圧の回復に伴い, せん断ひずみが増加し, 立坑と横坑の接続部に局所的な応力集中が起きる可能性がある。なお, 両工法ともに, 実質的な大きさの地盤変位は生じなかった。

(c) 横坑掘進中

図-13, 図-14は, それぞれ新工法, 従来工法による横坑掘進時の圧力水頭図である。水頭の分布を, 立坑施工時と比較すると, 立坑周辺では立坑施工時との差異が小さく, 立坑施工の影響が消えていないことがわかる。ただし, 立坑底付近の水頭の乱れは従来工法の方が大きい。

図-15, 図-16は, それぞれ新工法, 従来工法による横坑掘進時の八面体せん断ひずみ図である。いずれも, 横坑に沿って平行な等高線が現れている。これは, 横坑のどの断面でもせん断ひずみ状態が同一で, 平面ひずみ状態になっていることを示している。

図-17, 図-18は, 式3で示される有効応力安全率 S の分布を示したものである。この有効安全率 S とは, Drucker-Pragerの降伏条件から導かれる破壊強度を八面体せん断応力 τ_{oct} で割った値である。

$$S = \frac{\frac{\sqrt{8}}{3 \cdot \sin \phi} \cdot \sigma_m \cdot \sin \phi + c \cdot \cos \phi}{\tau_{oct}} \quad (3)$$

ここに, σ_m は有効応力での平均主応力, c は粘着力, ϕ は内部摩擦角である。有効応力とは全応力から間隙水圧を引いた値である。計算では, $c=0$, $\phi=40^\circ$ を仮定した。

両工法とも横坑切羽面で安全率が1になっている。これは計算上, 切羽ではシールド掘進に伴い応力が解放されているためである。これ以外は立坑, 横坑とも安全率はかなり大きくなっている。したがって, 地盤制御の観点から, 切羽面で安全率が1であることは大きな問題ではないと判断される。地表面沈下量の増分も1.7mm以下であり, 両工法とも横坑掘削に伴う有意な大きさの地盤変位は生じなかった。

3. 実施工との比較

東京都下水道局の足立区花畑七・八丁目付近枝線工事では, 立坑と横坑を連続してシールドで掘進する施工法が採用された。この事例について述べる。土質はN値が0~2の粘性土層であり, 立坑の形状は外径5.7m, 深度38mの円筒形で, 横坑の外径は2.75mである。立坑の掘進初期において地表に3mmの隆起が発生したが, その後, 立坑掘進とともに沈下傾向に転じ, GL-34.3m以深の掘削時には地表に変化が見られなくなった⁴⁾。立坑掘削による地表面沈下量は最大6mmであり, ガイドウォール上でのシールド組み立てにより発生した沈下量11mmと合わせて17mmであった。また, 横坑の掘削は地表面の隆起・沈下を伴わなかった。

この事例と解析結果を比較すると, 地盤変位に関して次のことが分かる。立坑掘削の初期の段階で起こる地表の隆起に関しては, 予測と実績は一致している。予測では掘削が進行しても初期の傾向は変らない。しかし, 実績では反対の傾向が生じている。実施工で生じた立坑周囲の沈下は, 解析では考慮しなかったテールボイドの発生が主因と考えられる。したがって, 地表面の沈下量を少なくするためには, 裏込め充填の管理が重要である。

4. おわりに

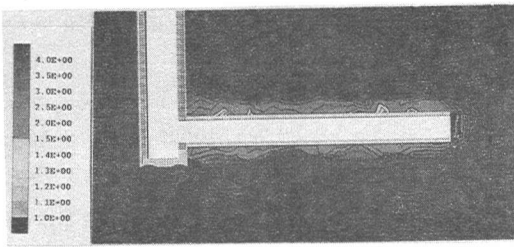


図-17 新工法による横坑掘進時の有効応力安全率図

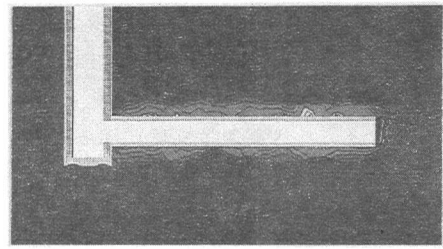


図-18 従来工法による横坑掘進時の有効応力安全率図

今回の解析では、新工法の場合、水密な状態で掘削がなされるものとしている。実際には、立坑を掘削するときに切羽面である立坑底部に泥水圧をかけているが、この作用は考慮していない。泥水の圧力は水頭に換算して地下水位+2m程度であり、地盤に影響を及ぼす可能性もある。また、従来工法の場合、ケーソン躯体が沈下する時に、フリクションカットによる余掘りにより、立坑周囲の沈下を招く場合もある。しかし、これらは現場の条件によって異なり一律に評価できないため検討しなかった。

なお、本文で得られた解析結果および施工事例をまとめると以下のとおりである。

- ①新工法による立坑掘削は、地下の間隙水圧をほとんど乱さない。これに対し、大深度立坑を地下水位低下工法を併用した従来工法で掘削する場合には、揚水により、地下の間隙水圧分布が大きく擾乱される。
- ②新工法では従来工法より掘削解放力が大きい分、掘削に伴って生じる地盤のせん断ひずみが大きい。
- ③新工法では、立坑掘削時には隆起の傾向を示す。テールボイドの発生は立坑周囲の沈下を起こすが、事例ではこの影響の大きいことがわかった。
- ④従来工法では立坑掘削時に、間隙水圧の低下に伴って地表面が沈下する。これに加えて施工時の余掘り、周辺地山の引き込みを考慮すると、地表面の沈下量はさらに大きくなると予想される。
- ⑤従来工法では、立坑完成後、間隙水圧が回復するにつれて、せん断ひずみが増加する。これに対して、新工法ではせん断ひずみの経時変化は小さく、安定している。
- ⑥横坑発進時に生じる地盤のせん断ひずみは、従来工法の方が新工法に比べ、間隙水圧が低下している分、わずかに小さい。しかし、間隙水圧が回復するにつれてせん断ひずみが増加する。その結果、立坑と横坑の接続部に局所的な応力集中が起きる可能性がある。
- ⑦横坑では、掘削が進行すれば、工法の差異の影響はなくなる。

以上述べたように、立坑掘削を水密状態で施工する新工法は、従来工法に比較して、地下水の状態を乱さないうえに地盤制御の観点からも優れていることがシミュレーションで予測され、また、一部は事例によって確認された。

5. 参考文献

- 1) Biot, M. A. : General Theory of Three-dimensional Consolidation, Journ. Appl. Phys. , Vol. 12, pp.152-164, 1941
- 2) 田村武: Biotの圧密方程式に関する一考察, 土木学会論文報告集, No.274, pp.57-67, 1978
- 3) 里優, 福井勝則, 飯星茂: 間隙水の移動を考慮した岩盤の変形解析手法に関する一試案, 資源と素材, No.108, pp.27-33, 1992
- 4) 並木克之, 前田教昭, 小林信明, 浜本健一: 縦横連続シールド工法による立坑掘進時の地盤挙動, 土木学会第50回年次学術講演概要集第6部, pp.434-435, 1995