

地下水位の回復に伴う地盤隆起に起因する トンネルの変形について

野口 利雄¹・伊藤 民夫²・Sreng SOKKHEANG³・日下 拓也⁴・小泉 淳⁵

¹正会員 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 科学・工学技術部

(〒100-6080 東京都千代田区霞が関三丁目2-5)

E-mail:toshio.noguchi@ctc-g.co.jp

²正会員 日本工営株式会社 地盤環境部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2)

E-mail:a3895@n-koei.co.jp

³正会員 日本工営株式会社 総合技術開発部 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: a6407@n-koei.co.jp

⁴学生会員 徳島大学 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻

(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail:kusaka@ce.tokushima-u.ac.jp

⁵正会員 早稲田大学教授 理工学術院創造理工学部社会環境工学科

(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail:koizumi@waseda.jp

我国の大都市圏では、昭和30年前後から地下水の汲み上げによる広域地盤沈下が多く発生し、地上、地下構造物の共用に支障が発生するなどして社会生活に問題が生じた。この反省を踏まえ、地下水汲み上げ規制を実施した結果、昭和40年頃を境に地下水位は上昇に転じ、それに伴い地盤も隆起傾向にあることが報告されている。そのため既存のトンネルは、このような地下水位の低下、上昇に追従して変動を生じていると推測され、変形計測例も存在するが、地下水位の変動がトンネルに与えるメカニズムはまだ不明な点が多い。本研究は地下水上昇時に発生する、シールドトンネルの天端と下端の変位量、つぶれ方の変形モードについて考察するものである。

Key Words : ground water, ground upheaval, rebound, FE analysis

1. はじめに

都市に敷設されている既設のトンネルでは維持管理の対応、安全性の確保の観点から経時変状計測が行われている例があり、近傍での地下水位経時変化と併行して、内空部変位の経時変化、ひび割れ幅や成長状況などの記録がその代表的な項目であるが、その変状が地下水位上昇に起因しているかの因果関係は特定されていないのが現状である。今回は東京の地下鉄シールドトンネルを対象を絞り込み、二次元FEM解析を用いて地下水上昇時におけるシールドトンネル変状に関するシミュレーションを行い、地下水上昇時の特徴的な挙動の把握と、既往のシールドトンネル変状計測結果に対する適用性の検証を行う。以下シールドトンネルをトンネルと称する。

2. 地下水位の観測値

地下水位上昇時におけるトンネル変状のシミュレーションを行うために、地下水位の変動に伴う変位が算出可能な応力浸透連成解析を用いる。水位データの入力条件として、初期水位と変動速度が必要であるが、初期水位付与時の地盤の圧密度により、算出される変位結果が異なると考えられるため、地下水位低下時から連続して解析を実施する。そのため地下水位上昇時のデータのみならず、低下時のデータも必要となる。

東京では地下水位の低下が顕著になる昭和30年以前から都内各所で地下水位の経時変化が観測されている。¹⁾ここで解析時の水位変動速度は、水位低下と上昇が連続して観測されている東京低地部の4地点のデータを参考

にして求める。水位低下期間は観測開始時から水位最低時まで、水位上昇期間は水位最低時から水位上昇が緩やかになったとみなせる昭和59年までとする。観測された水位変動速度を表-1に示す。値は地下水位が10m低下、または上昇するのに要した日数である。表-1の水位低下値と水位上昇値を系列として近似直線から R^2 値を求めると、図-1に示すように0.98となり、水位低下時間と水位上昇時間は相関があると言える。そこで解析に用いる水位低下および上昇速度は、10m/1000day、10m/2000dayとする。

表-1 観測された水位変動速度

観測No	水位低下 (-10m/day)	水位上昇 (10m/day)	ストレナ深部深さ (-m)
15	2113	2890	70
16	1521	1926	115
17	1356	1318	108
25	1217	1130	113

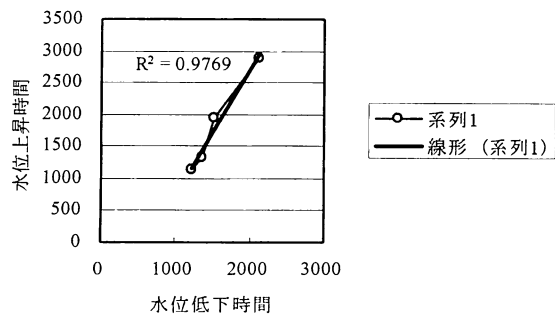


図-1 水位低下時間と水位上昇時間の関係

下値を20mとしたものをC03とし、基本ケースと位置付けた。C01,C03に対し、水位低下過程の途中で水位上昇に転ずる場合を想定し、圧密度を50%程度にしたものをそれぞれC02,C04、C01に対し透水係数を1/10にしたものをC05とした。圧密度は20mの水位低下ののち、地盤変位が収束するとみなされる十分長い時間として、C01では約4000日、C03では約6000日、C05では約12000日の放置を行った結果に対し、地表面の変位の比率で表す。表-2に解析ケースを、図-2に入力する水頭の変時変化を示す。

表-2 解析ケース

解析ケース	水位低下値 (m)	圧密度 (%)	透水係数 k(cm/sec)	底部水頭
C01	-20.0	89	1.00E-06	水頭01
C02	-12.0	53	1.00E-06	水頭02
C03	-20.0	95	1.00E-06	水頭03
C04	-9.5	52	1.00E-06	水頭04
C05	-20.0	33	1.00E-07	水頭01

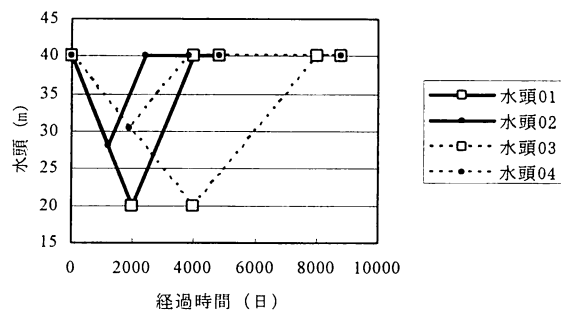


図-2 水頭の変時変化

3. 数値解析²⁾³⁾

(1) 解析手法

検討には関口太田モデルを適用した静的有効応力解析コードSoilPlus CAPオプションを使用し、平面ひずみ要素で地盤を、梁要素でトンネルをモデル化した二次元FEM解析によりトンネルの変位量および変形モードを算出した。

(2) 解析条件と解析ケース

解析領域は深さ40m、横幅50mとした。変位境界条件は側方が水平方向固定、底面が水平鉛直方向固定とした。水位境界は側方が非排水、地表面を水頭0mで固定、底面を水頭40m→水位低下値→40mとして水位低下、水位上昇、および水位保持を考慮した。

解析ケースは水位低下時および水位上昇時の速度を10m/1000day、水位低下値を20mとしたものをC01、水位低下時および水位上昇時の速度を10m/2000day、水位低

トンネル直径は6mとし、トンネル位置はトンネル中心深度がGL-10m、GL -20m、GL -30mの3種類を考え、それぞれ上トンネル、中トンネル、下トンネルとした。図-3に上トンネルの解析モデルおよび設定条件を示す。初期応力は地盤のみの二次元モデルで自重解析を行い求め、トンネルの掘削は考慮していない。

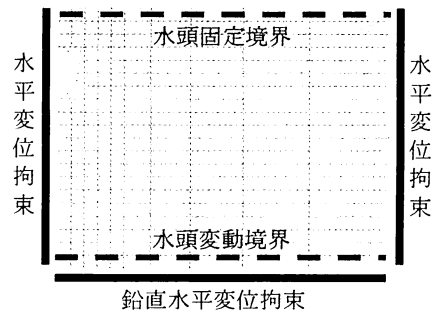


図-3 上トンネルの解析モデルおよび設定条件

(3) 物性値

粘性土の物性は典型的な沖積地盤の正規圧密粘土を想定して決定した。トンネルは桁高0.45mのRCセグメントを想定し、ヤング係数は継手の等価剛性を考慮し単体の1/10とした。表-3に地盤とトンネルの物性値を示す。

表-3 地盤とトンネルの物性値

地盤	
ポアソン比	0.37
透水係数	(cm/sec) 1.00E-06
初期間隙比	1.350
塑性指数	50
圧縮指数	0.365
膨潤指数	0.018
ダイレイタンシー係数	0.089
湿潤単位体積重量	(kN/m ³) 17.0
シールドトンネル	
ヤング係数	(kN/m ²) 3700000
ポアソン比	0.20
断面積	(m ²) 4.50E-01
断面二次モーメント	(m ⁴) 7.60E-03

4. 解析結果

(1) トンネル各部の変位量

解析ではトンネル天端と下端の鉛直変位に着目し、鉛直上向きを正とした場合に、天端変位量と下端変位量の差が正の場合を縦長変形、負の場合を横長変形とした。図-4～図-6に水位上昇開始時を0とした、C01からC05の水位上昇開始後の経過日数とトンネル天端と下端の変位差をトンネル位置別に示す。

C01からC04では、水位上昇時にすべてのトンネル位置でまず横長変形が生じ、その後の時間の経過とともに徐々に縦長変形に移行してゆく。横長変形の発生は上ト

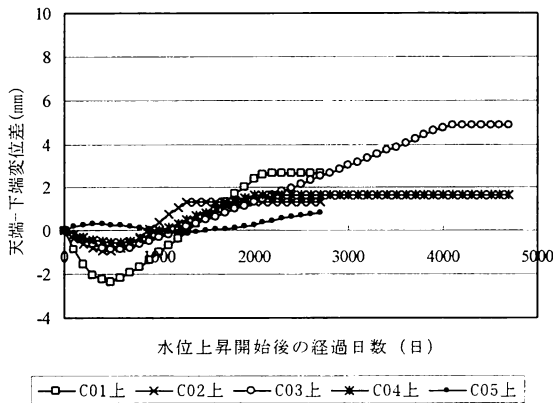


図-4 トンネル天端と下端の変位差 上トンネル

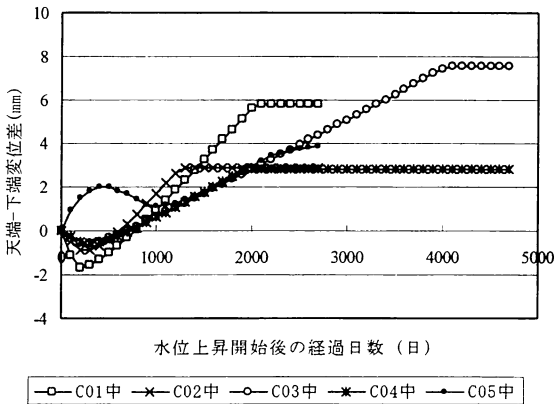


図-5 トンネル天端と下端の変位差 中トンネル

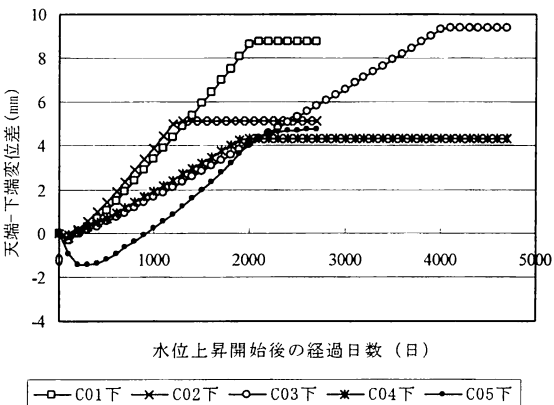


図-6 トンネル天端と下端の変位差 下トンネル

ンネルで顕著であり、下トンネルでは少ない。いずれのケースも水位上昇が終了した時点で変位差の変動はほぼなくなり、一定値となる。透水係数の小さいC05では、まず下トンネルで横長変形が発生し、上トンネルでは時間がやや経過したのち、横長変形が一時的に発生する。水位上昇が終了しても変位差の変動はやや続く。

表-4にトンネル位置変位差最大・最小値を示す。鉛直方向については前述のように、正値が縦長変形、負値が横長変形となる。水平方向については負値が縦長変形、正値が横長変形となる。そのため各ケースごとに示され

表-4 トンネル位置変位差最大・最小値

ケース	上トンネル		中トンネル		下トンネル	
	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直	水平
C01	-2.36	1.19	-1.66	0.84	--	--
	2.65	-1.32	5.84	-2.90	8.76	-4.36
C02	-0.95	0.48	-0.86	0.43	--	--
	1.35	-0.67	2.88	-1.44	5.14	-2.54
C03	-0.88	0.43	-0.58	0.29	--	--
	4.88	-2.45	7.59	-3.79	9.37	-4.67
C04	-0.54	0.36	-0.58	0.29	--	--
	1.67	-0.81	2.84	-1.42	4.36	-2.17
C05	-0.05	0.01	--	--	-1.46	0.77
	0.83	-0.46	3.85	-2.00	4.79	-2.30

ている2行の値で、上段が横長変形の値、下段が縦長変形の値である。

図-7～図-11に水位上昇開始時を0とした、C01からC05の水位上昇開始後の経過日数とトンネルの変位量を示す。凡例の意味は上天端を例にとると、上トンネルの天端位置の意味である。上トンネルではすべてのケースで水位上昇開始に関わらず、トンネル自体は下降を示す。ただしその現象はC02,C03,C04ではすぐに逆転し隆起となるが、C01とC05では下降している時間が長く、特にC05では水位上昇時間2000日に対して1500日程度まで下降することがわかる。下トンネルでは上トンネルで見られる下降現象はほとんど起こらず、全ケースで水位上昇とともに隆起が発生している。中トンネルは上トンネルと下トンネルの中間的な挙動を示すが、トンネルの下降現象は各ケースで若干発生している。ただしC05では発生して

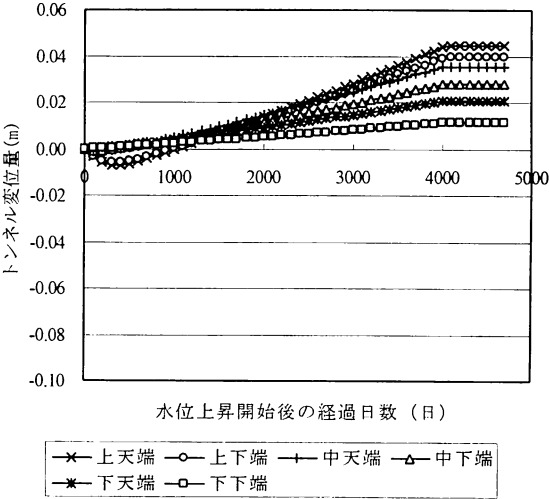


図-9 トンネル各部の変位量C03

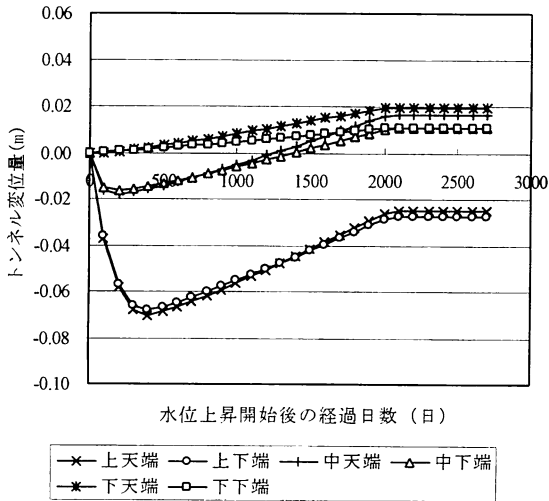


図-7 トンネル各部の変位量C01

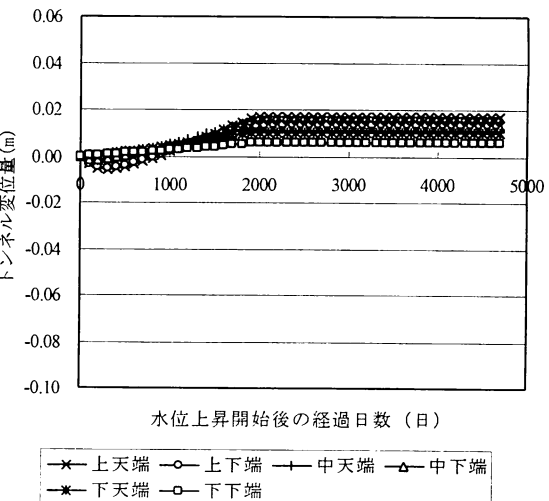


図-10 トンネル各部の変位量C04

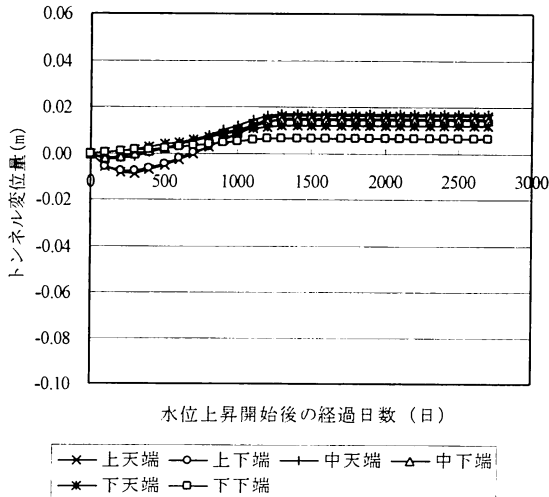


図-8 トンネル各部の変位量C02

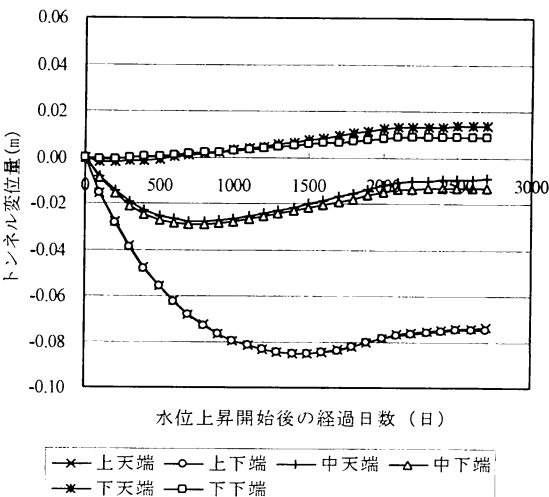


図-11 トンネル各部の変位量C05

いない。またC01とC02、およびC03とC04の対比で、圧密度が小さい場合はトンネル自体の変位も小さくなることがわかる。C01とC03の対比で、水位低下（上昇）速度が小さい場合もトンネル自体の変位が小さくなっている。

(2) 地盤内間隙水圧の分布

図-12～図-16に水位上昇開始時を0とした，C01からC05の水位上昇開始後の経過日数と地盤内間隙水圧の増分分布を示す．増分なので経過時間0では全深度で0mである．その後モデル底部水頭の増加に伴い間隙水圧分布は増加してゆくが，分布形状は直線ではなく，図上で左に凸形状を示し，浅い位置，すなわち上トンネルが存在するような領域では一時的に負になる場合が生じる．この現象は全体の水頭は上昇するが，局部的には水位低下時と同じ，水頭の減少が共存していることを示す．このことが顕著に現れているのはC01上トンネル，C05下トンネルであり，トンネル位置での変位を参照すると，横長変形になっている領域であることがわかる．

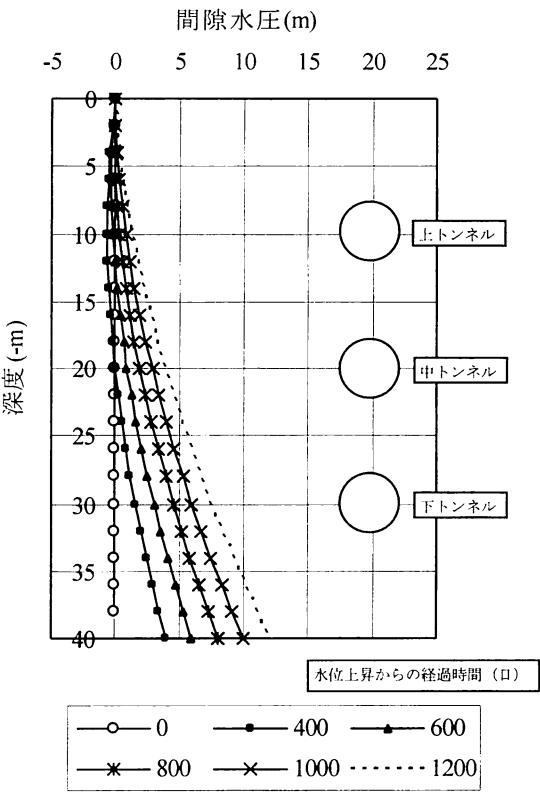


図-13 水位上昇時の地盤内間隙水圧の分布 C02

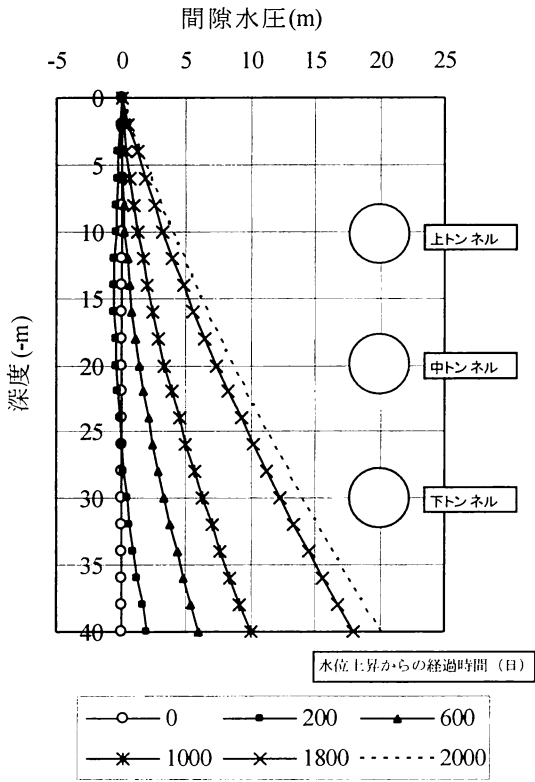


図-12 水位上昇時の地盤内間隙水圧の分布 C01

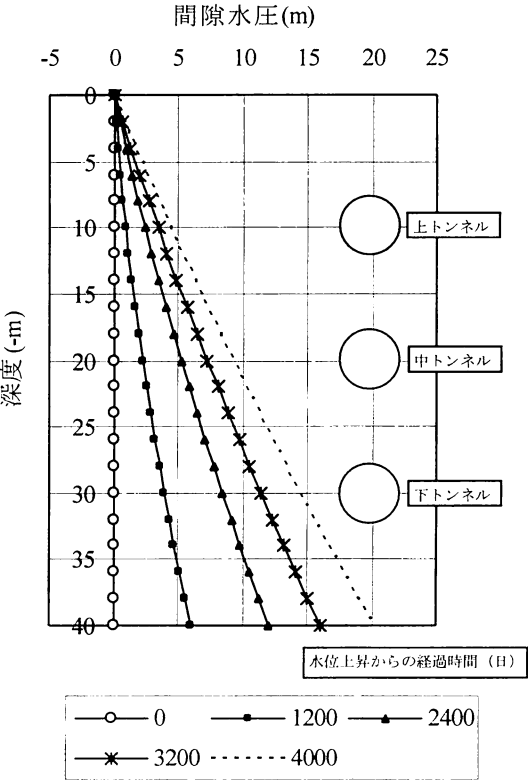


図-14 水位上昇時の地盤内間隙水圧の分布 C03

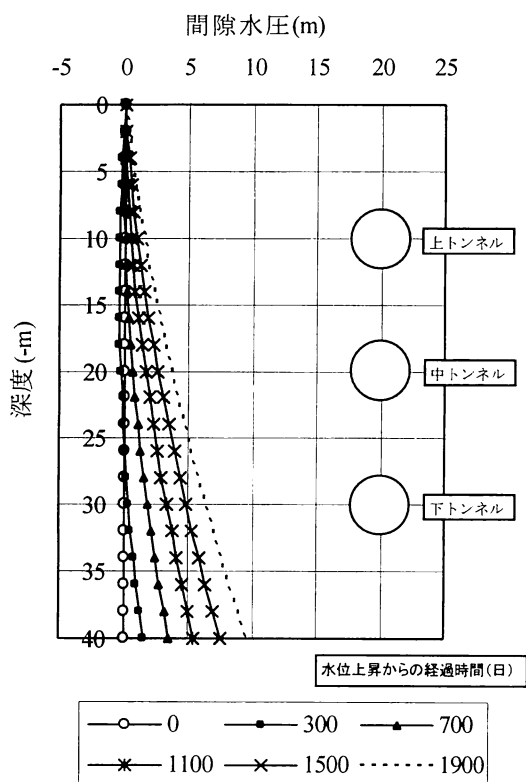


図-15 水位上昇時の地盤内間隙水圧の分布 C04

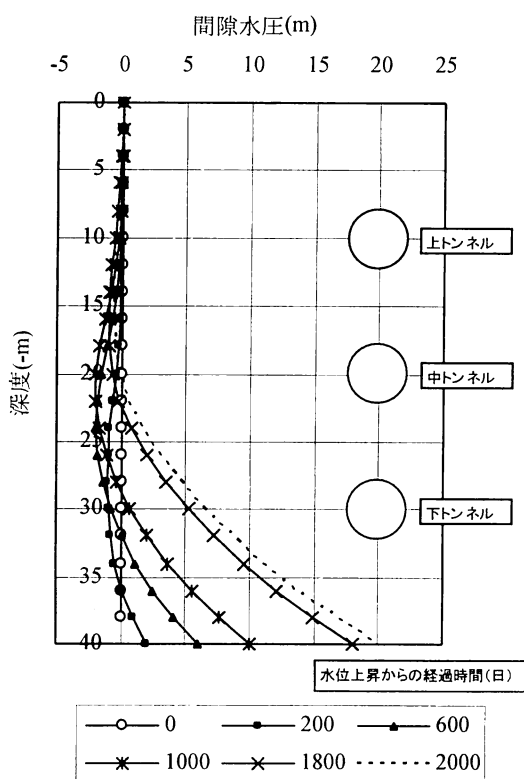


図-16 水位上昇時の地盤内間隙水圧の分布 C05

(3) 地盤内応力の分布

図-17にC01の水位上昇時から500日後の地盤内鉛直応力コンターを、図-18にC01の水位上昇時から2500日後の地盤内鉛直応力コンターを示す。黒色正値が圧縮、白色負値が引張である。図-17は横長変形が発生している時間であり、トンネル天端、下端とも圧縮応力が発生している。図-18は縦長変形が発生している時間であり、トンネル天端、下端とも引張応力が発生している。

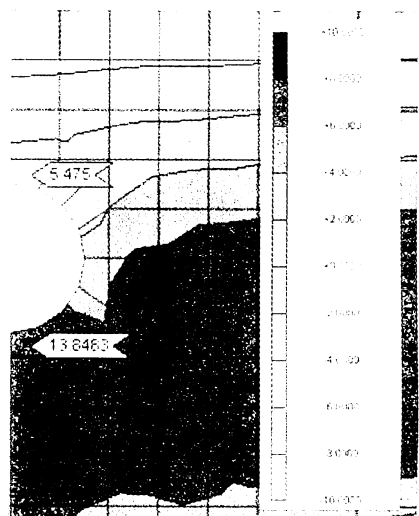


図-17 水位上昇時から500日後の地盤内鉛直応力 C01

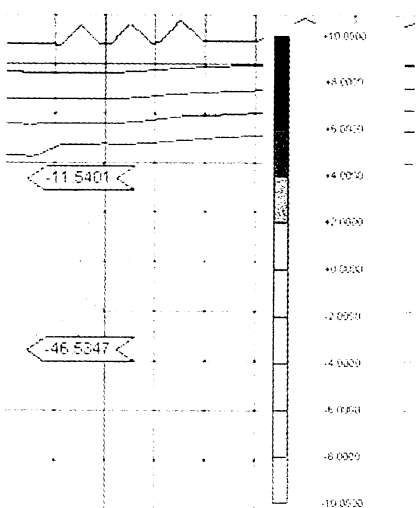


図-18 水位上昇時2500日後の地盤内鉛直応力 C01

(4) トンネルの変形

図-19にC01の水位上昇時から500日後と2500日後のトンネルの変形の一例 (C01) を示す。変位の値は実寸の200倍で表示している。3本見える線のうち、中央が変形前、天端・下端で内側に描画されている横長変形が500日後、天端・下端で外側に描画されている縦長変形が

2500日後の変形図であり、図-17,図-18の時間と対応している。

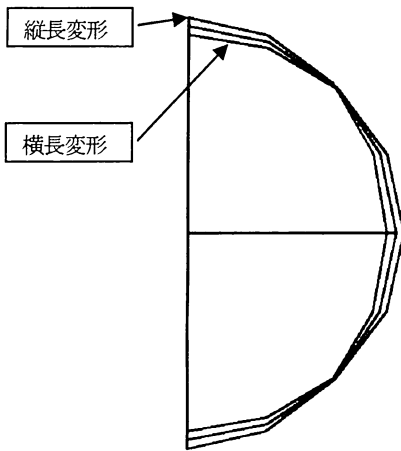


図-19 トンネルの変形の一例 (C01)

5. 考察

地下水位上昇が停止した時点でトンネルの変形も一定値となることがわかった。解析では最終的に縦長変形になるケースでも、水位上昇の停止状況によっては横長変形のまま推移する場合もあると推測される。

底部水頭が減少から増加に転じて、間隙水圧が減少を続ける時間および領域が存在することがわかった。また横長変形が発生するトンネルの位置は地盤の透水係数により異なることが示された。C01では上トンネルで、C05では下トンネルで横長変形である時間が長い、地盤の透水係数によっては中トンネル程度の位置で横長変形が発生する可能性も存在する。

水位上昇時においてトンネルに変形が発生するメカニズムについては、トンネルが地盤の変形に追随すると仮定すると、トンネル構築部の地盤の鉛直方向応力が、水位上昇によって引張方向に変動する場合はトンネルが鉛直方向に引っ張られ縦長変形を、水位下降によって圧縮方向に変動する場合はトンネルが鉛直方向に押されて横

長変形を呈すると考えられる。

総括すると、地下水位の上昇により発生するトンネルの変形は、地盤の特性（圧密度、透水係数、圧縮指数など）、地下水位の低下・上昇速度、トンネルの位置などの条件により、縦長にも横長にも成りうることが示された。

6. おわりに

結論として、地下水位上昇時のトンネルの変形モードおよび変形量を定性的かつある程度定量的に把握することができた。実トンネルの変状計測結果では横長変形の報告が比較的多くされているため⁴⁾、今後は地盤の特性をより詳細に検討し計測結果との対比を行い、解析精度の向上に努めたい。

参考文献

- 1) 東京都土木技術支援・人材育成センター：平成 22 年地盤沈下調査報告書、付図 図-7～図-9 平成 23 年 7 月。
- 2) Sokkheang Sreng, Hiroshi Tanaka, Teijiro Saito, Takuya Kusaka, Tamio Ito and Atsushi Koizumi :Study on Regional Ground Upheaval Phenomenon caused by the Rising of Groundwater Level and its Effect on Underground Infrastructure, One day International Symposium on Recent Advances in Geotechnical Engineering , Indonesia 2011.
- 3) 齋藤禎二郎, 日下拓也, 伊藤民夫, スレン・ソッキアン, 田中弘：地下水位の回復に伴う広域地盤隆起の問題とその地中施設への影響（その 4）－ 2 次元 FEM 解析による構造物への影響の検討－, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.785-786, 2011.
- 4) 津野究, 三浦孝智, 石川幸宏, 山本務, 河畑充弘：内空断面測定および変状展開図より把握したシールドトンネルの変形傾向, トンネル工学報告集第 17 巻, pp.257-261, 2007.

STUDY ON TUNNEL DEFORMATION CAUSED BY GROUND UPHEAVAL DUE TO THE RISING OF GROUNDWATER LEVEL

Toshio NOGUCHI, Tamio ITOH, Sreng SOKKHEANG, Takuya KUSAKA and
Atsushi KOIZUMI

The purpose of this study is to investigate the deformation of shield-tunnel due to the rising of ground water level, using two dimensional FE analysis. The analysis code used for the simulation is “Soil Plus CAP option” which is commercial coupled deformation-seepage flow analysis software. Results of FE

analysis show that, the deformation at top and bottom portion of the tunnel during of rising of ground water level, stretches vertically or stretches horizontally. This phenomenon depends upon the rate of rising ground water level, depth of tunnel in ground, and coefficient of permeability of soil.