

ニューマチックケーソン工法を用いた 地下水流動阻害対策工に関する一考察

島田剛¹・丹圃賢治¹・竹石英之¹

藤田隆雄²・木佐貫徹³・山本佳正²・櫻井昭二⁴

¹正会員 東京都建設局第四建設事務所（〒170-0005 東京都豊島区南大塚 2-36-2）

²正会員 鹿島建設(株)東京支店（〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8）

³正会員 工博 鹿島建設(株)東京支店（〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8）

⁴正会員 (株)千代田コンサルタント東京支店（〒114-0024 東京都北区西ヶ原 3-57-5）

近年、大規模な開削工法を用いた線状地下構造物を構築する際、地下構造物が、地下水流動を阻害し地盤沈下を始めとする様々な社会的な影響を生じることが課題となってきた。これまで、この地下水流動阻害の対策として、山留め壁の撤去や集復水井を用いた工法等が提案され検討および設置されてきた。環状第8号線南田中トンネルでは、従来工法の知見を踏まえ新たな対策工法として、トンネル線形と地盤構成を考慮し、現状の帯水層を通水層として確保できるニューマチックケーソン工法を用いた地下水流動阻害対策工を開発し施工している。本論文では、対策工の考え方と施工前後の地下水位の計測結果を基に、本工法の効果について考察したものである。

キーワード：地下水流動阻害対策工、線状構造物開削施工、ニューマチックケーソン工

1. はじめに

線的に利用される道路施設等では、従来は高架方式を中心に事業が計画されてきたが、近年では騒音や排気ガスおよび日照等の環境対策等の観点から、地下化および半地下化されることが多くなってきた。この構造物の地下化および大型化に伴い、新たに生じてきた課題が「地下水流動阻害」である。これは、トンネル等の線状構造物を帯水層中に設置すると、地下構造物により地下水流動が遮断され、上流側では地下水位が上昇し、下流側では地下水位が低下し、地盤沈下を始めとする数々の影響を地盤や周辺環境等へ及ぼす現象である。

この「地下水流動阻害」は、一度発生すると地下構造物そのものによる影響が広範囲に及び、元の状態に戻るまで多くの時間を要し、半永久的に継続する特徴がある。このため「地下水流動阻害」は、平成11年度建設省令第10号にて、平成11年6月に施行された「環境影響評価法」の環境影響評価対象の標準外項目として規定され、地下構造物の施工に際して重要な検討項目となっている。一方、この「地下水流動阻害」の対策工は、自然流下方式を用いた数々の工法が提

案され検討および設置されてきた。杉本¹⁾や西垣・木佐貫ら²⁾は、この対策工法の施工事例から効果を調査し、有効な対策効果を得るための留意事項や設計方法等について研究し報告している。

この様な既往の研究成果等を踏まえ、東京都が施工中である環状8号線南田中トンネル(以下、本トンネルと称す)の地下水流動阻害対策工では、トンネル線形と地盤構成を考慮し、現状の帯水層を改変することなく通水層を確保できるニューマチックケーソン工法等を開発し施工している。本論文では、対策工の考え方と、ニューマチックケーソン工法を用いた工区での施工前後の地下水位観測結果を基に、本工法の効果について考察したものである。

2. 事業と施工方法の概要

(1)事業概要

図-1に示す様に、環状8号線は、大田区の羽田空港を起点として、世田谷区や練馬区等を経由し、北区岩淵町に至る延長44.2kmの都市計画道路である。本トンネルは、この環状8号線の未整備区間である笹目通

りから目白通りに至る上下各2車線(4種1級)で、延長約1.8kmの掘削スリット形式トンネルである。

(2)施工方法の概要

図-2に示す様に、トンネルは、比較的深度が浅いため開削工法で計画された。山留め壁は、計画周辺の地形地質状況から掘削に伴う地下水の湧水が多いと判断されたため、遮水性が高いソイルモルタルを用いた工法(TRD 工法等)が採用された。さらに、山留め工は、近接構造物防護等の観点から、剛性の比較的高い芯材と鋼製支保工を用いた。この山留め工の掘削底面の安定対策としては、トンネルの深度に対し確実に連続した不透水層が存在しないことや、地下水の揚水に伴う周辺地盤の沈下を防止するため、揚圧力に抵抗できる深度まで山留め壁を延長し、山留め壁先端に薬液注入工法による人工不透水層を設ける工法を採用した。この結果、山留め壁は、3.に詳細を示すように第1帯水層を遮断する形状となっている。

また、当該地域は閑静な住宅地域であるため、工事車両は、トンネル坑口にある幹線道路からの搬出入に限定された。そこで、工事車両の作業および通行路を確保するため、全区間で全面路面覆工を設けた。

し、層厚10m程度で水平に堆積している。場所によっては、旧河川の堆積物が混入しており、OCRが1.3程度の箇所がある。また、遮水性が高い層(平均 $k=1.0 \times 10^{-9}$ m/s程度)でもある。



図-1 位置図

3.地盤と地下水特性

(1) 地盤概要

本トンネル建設地点は武蔵野台地北東部に位置し、標高はA.P.+40~50mである。図-3に示す様に、この武蔵野台地は、上位からローム層(Lm層)、武蔵野礫層(Mg層)、江戸川層(Ed層)という層序になっている。また、図-4に示す様に、当該地域は、石神井川によって開析された谷底地域でもある。このため、江戸川層(Ed₁層)は北東方向(石神井川方向)に約1%程度傾斜している。各地層の特徴は以下のとおりである。

①Lm層は、N値5程度で平均OCR2.3程度の特徴を有

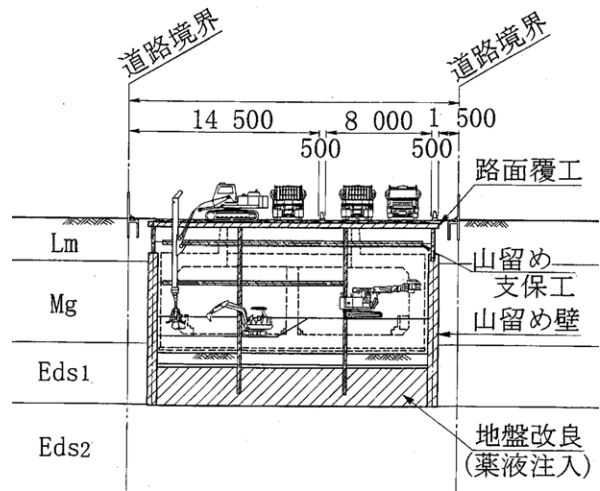


図-2 トンネル施工法の概要図

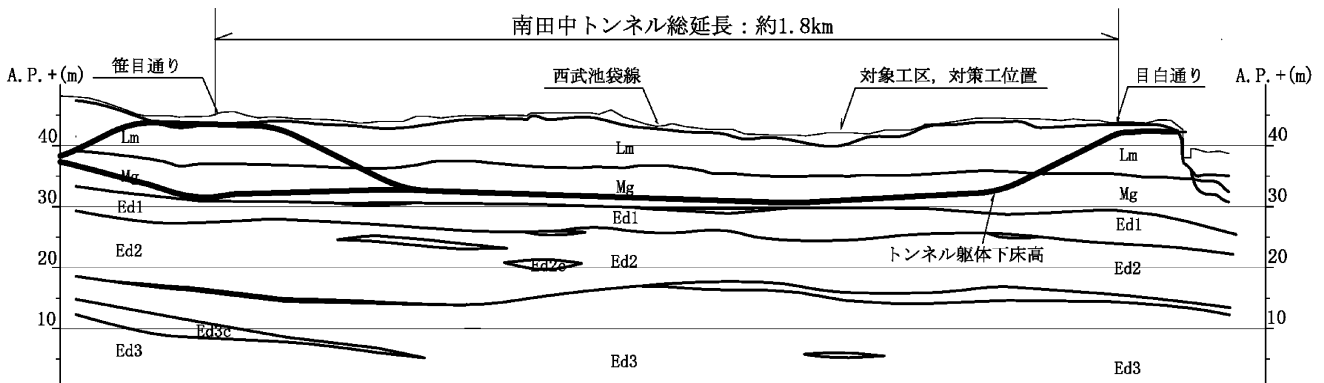


図-3 地盤概要図

②Mg 層は、最大礫径 100mm 程度、N 値 50 以上の砂礫層で層厚が 5～7m 程度で水平に堆積している。

③Ed 層は、上位 (Ed_{s1} 層) から下位 (Ed_{s2} 層) に向かうに従い、砂礫から砂質土に変化する特徴を有している。N 値は、概ね 50 以上を示し、層厚は 100m 程度である。また、不連続ではあるが、Ed_{s1} 層と Ed_{s2} 層間に厚さ 1.0m 程度の粘性土層 (Ed_c 層) を介在している。

(2)地下水流向状況

揚水試験で得られた各土層の透水係数は、Mg 層および Ed_{s1} 層で 1.0×10^{-4} m/s 程度、Ed_{s2} 層で 1.0×10^{-5} m/s 程度であった。この結果、帯水層は、不圧地下水である第 1 帯水層として Mg 層と Ed_{s1} 層、被圧地下水である第 2 帯水層として Ed_{s2} 層に区分された。図-4 は、当該箇所を設置した観測井を基に得られた渇水期の第 1 帯水層の地下水位分布である。地下水は、Ed_{s1} 層の傾斜に伴い、かつ石神井川の流向（東北東）方向に流れていることがわかる。

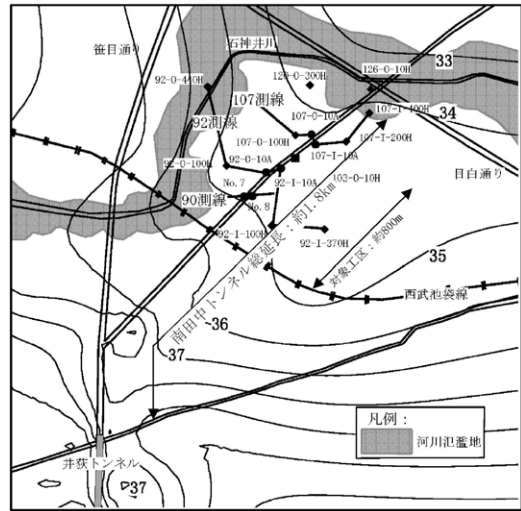


図-4 現状の地下水流動状況

(3)地下水位の変動状況

Mg 層および Ed 層は、上流域の多摩丘陵地や石神井川と連続しており、上流域からの降雨等や河川等からの浸透水によって涵養されている。ここで、当該地区での過去 50 年間の降雨量観測結果 (日本気象協会) を図-5 に示すが、降雨量の変動が大きい地区である。また、第 1 帯水層の透水性を考慮すると、年間の地下水位変動が大きい地区であることが予想された。

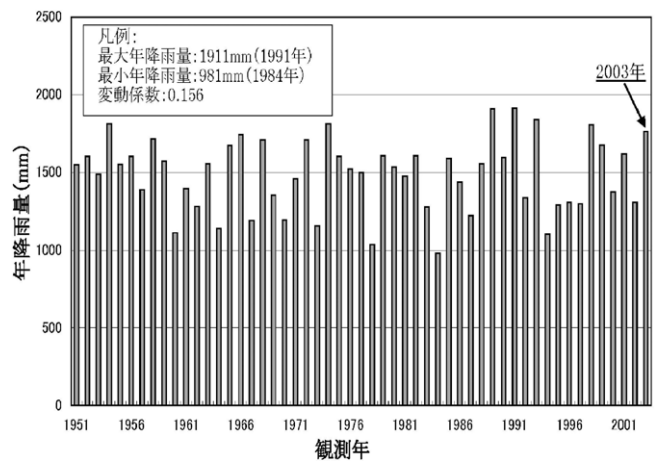


図-5 過去 50 年間の降雨量

近年、地下水位観測と降雨量を用いて年間地下水位変動量を推定する方法等³⁾が提案されている。しかし、ここでは、過去 3 年間の当該地区での地下水位と降雨量観測結果を整理して年間地下水位の変動量を算定した。この結果、年間地下水位変動量は、±1.2m となり、同地区での第 1 帯水層は、降雨量との連動性が高い地盤であることがあらためてわかった。

(4)地下水の利用状況

本トンネル付近には、約 120 箇所の井戸が分布している。これらの大半の井戸は、第 1 帯水層から浅井戸を用いて取水しており、生活用水および防災用水として使用されている。

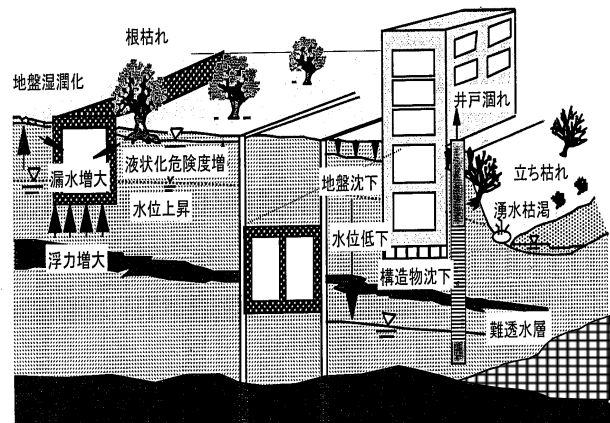


図-6 地下水流動阻害の影響概念図²⁾

4.地下水流動阻害の影響検討

本トンネルが、3. に示した様な地盤および地下水特性を有する地区に帯水層を遮断する状態で建設されると、図-6 に示す様な地下水流動阻害が発生し、地盤および周辺環境等へ影響を及ぼすことが懸念され

た。このため、本トンネルの建設による地下水位変動が、どの程度影響を及ぼすか検討する必要がある。

(1)現状の地下水位流動状況把握（現状解析）

この地下水流動阻害の直接的な影響は地下水位変動である。地下水位の変動による影響を把握するためには、現状の地下水位を把握する必要がある。この

ため、現地に設置した第1帯水層の観測井の結果を基に、降雨量等の影響が比較的少ない渇水期の平均地下水位から、図-4に示す等ポテンシャル線を描き現状の地下水流動状況を把握した。

この現状の地下水流動状況を解析にて再現(現状解析)し、地盤水理特性を把握した。解析方法は、帯水層が単一でほぼ水平に積層していることや、不圧地下水位であること考慮し、準3次元浸透流解析を用いた。解析範囲は約5km四方とし、境界条件は石神井川および観測井の水位を既知の水位条件とした。解析の結果、降雨浸透量は約8%程度であった。

(2)完成時の地下水流動状況把握(予測解析)

次に、現状解析手法を用いて、本トンネルが、地下水流動状況にどの程度影響を及ぼすか検討した。2.に示した様に、山留め壁長は、約20m程度あり、第1帯水層をほぼ遮断する形状となっている。ここで、山留め壁の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ と設定し解析した結果を図-7に示す。地下水の流動方向と本トンネルの交差角度が15度程度であるため、本トンネルによる地下水位差は、約1.8mとなった。また、地下水位の低下量は、約1.2mとなった。この結果は、古本ら⁴⁾が、本地盤に近い想定土層で地下水流動方向と地下構造物の交差角度をパラメータとしたモデル解析で示しているように、交差角度が15度程度での傾向と同一の結果を示している。

(3)影響評価

地下水流動阻害によって地下水位が変動した場合、地盤および周辺環境が許容できる地下水位(許容地下水位変動量²⁾)を設定する必要がある。図-6に示す影響事項を当該地域の条件を踏まえ工学的に整理すると、既設構造物(木造民家)への影響と井戸涸れとなる。既設構造物に対しては、第1帯水層の地下水位低下による1m層の沈下が課題となった。解析は、既設構造物の許容沈下量を 2.0 cm^5 としMv法を用いて検討した結果、許容地下水位低下量は1.0m程度となった。また、井戸涸れについては、浅井戸のため水位低下量5.0mと設定した。この結果、許容地下水位変動量の内低下量は、1.0mとなり、予測解析の結果の1.2mと対比すると対策工が必要となった。

5. 対策工の選定

対策工の選定に当たっては、既往の対策工から得られた留意事項と、当該地域の地盤および周辺環境条件を考慮した。

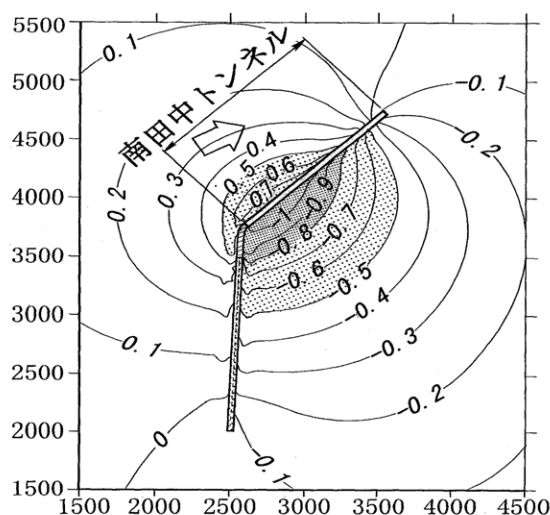


図-7 無対策時の地下水流動状況予測解析結果

(1)対策工の基本的考え方

開削工法での地下水流動阻害対策は、自然流下方式を用いた数々の工法が提案され、すでに15件程施工事例がある。これらの大半の施工事例は、地下構造物が帯水層を遮断しており、かつ遮断される帯水層が地下構造物の道路路盤で浅で互層構成になっているため、集複水井方式や山留め壁破碎方式等を採用している。杉本¹⁾や西垣・木佐貫ら²⁾によるとこれらの方式は、山留め壁施工に伴う帯水層の変化や集複水面積の大小による地下水流速に伴う帯水層および対策工法の見詰まり等に留意すれば、十分な効果が得られることを指摘している。

ここで、本トンネルでは、地層構成が既往の事例と異なり単一地層で、かつ地下構造物が遮断する帯水層は道路路盤で深にある。つまり、山留め壁根入れ部が帯水層を遮断している。この地盤構成および道路線形の特性を十分に活用し、山留め壁を用いない(帯水層の変化しない)工法を一定区間に適用すれば、上記留意事項を満足し、十分な通水性が確保できると考えられた。このため、本トンネルでの対策工は、非山留め工法を用いることを基本とした。

(2)対策工の設置箇所の選定

対策工は、多く設置すれば効果が高いことは自明だが、以下の当該地域の施工条件および対策工による事業費の増加等により設置箇所が限定された。

①2.に述べた様に事業用地内が、工事車両の搬出入路になっているため、事業および近隣用地に余裕があり搬出入路が確保できる地域に設置箇所が限定される。

②本トンネルでは、閑静な住宅街でトンネルと住宅等の既設構造物が極めて近接している区間が多い。

このため、近接構造物が無い区間に設置することや近接構造物が有る場合には、対策工の施工による影響が少ない工法を採用する必要がある。

③対策工設置箇所は、大きな区間が取れ、事業費の観点から少ないことが望ましい。

上記条件より、図-8 に示す様に 4 ヶ所を設置箇所として選定した。この選定箇所で、第 1 帯水層の通水面積を 120m² とし、4. に示した解析手法を用い予測した結果を図-9 に示す。完成後の地下水位低下量は、約 70cm 程度となり、許容地下水位変動量 1.0m を満足する結果となった。

(3)対策工法の選定

a)選定条件

工法を選定する上での条件を以下に示す。

①対策工法は、既往の対策工の留意事項を踏まえ当該地域の地盤および水理特性を十分に考慮し、経済的かつ十分な通水性を確保する。

②対策工法の施工によって、周辺の地盤および生活環境に影響を及ぼさない。

③対策工法の施工が、全工区のトンネル本体施工に影響を及ぼさない。

④対策工法は、頻繁なメンテナンスを必要としない。

b) 対策工法の選定

対策工法は、上記 a) を満足する非山留め工法として、ニューマチックケーソン工法、パイプルーフ等の非開削工法、水中躯体移動設置工法（陸上沈埋工法）が考えられた。これらの工法について、上記(1)、(2)を踏まえ、補助工法（地盤改良）等による帯水層への影響や事業費を含めた検討を総合的に実施し、以下の工法を選定した。

①近接構造物がある場合（図-8 に示す④）、施工に伴う変位を抑制できるニューマチックケーソン工法。

②近接構造物がない場合（図-8 に示す①～③）には水中躯体移動設置工法。

6. 対策工の施工と考察

ここでは、5. で選定された対策工の内、ニューマチックケーソン工法を用いた西武池袋線交差部から目白通りに至る約 800m の工区での対策工の施工と地下水位計測結果について述べる。

(1)対策工の施工概要

a)対策工の構造概要

本工区は、延長約 800m 区間で幅約 20m、高さ約 18m の堀割スリット形式トンネルを長さ約 20m の TRD 山

留め壁工法を用いて施工する区間である。この区間の対策工は、図-8 に示す④に位置しており、対策工の形状は図-10 に示すとおりである。対策工は、幅約 20m、高さ約 18m の横断面で路線軸方向約 30m 区間

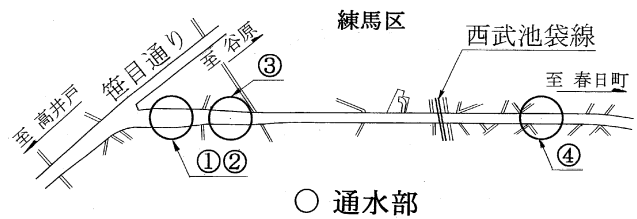


図-8 対策工の設置位置

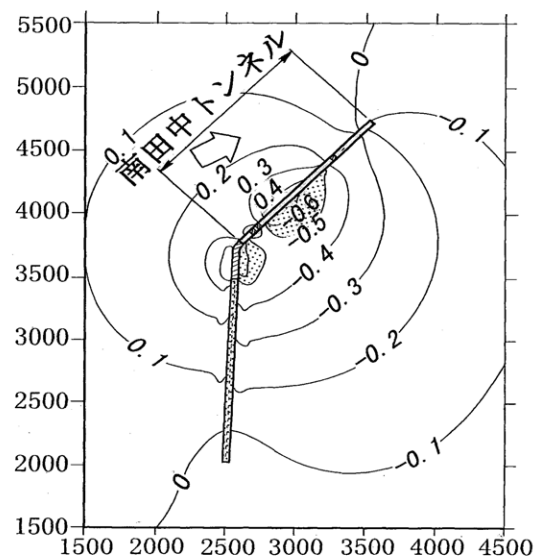


図-9 対策時の地下水流動状況予測解析結果

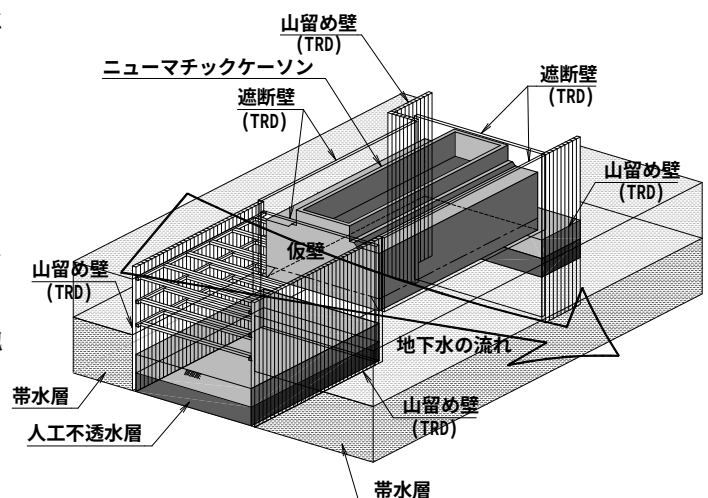


図-10 対策工の概念図

にニューマチックケーソン工法を用いている。本工法は、施工時に躯体の剛性で周辺地盤の変位を抑制するため、トンネル構造では路線軸直角方向に仮壁が必要となる。本工区では、対策区間の両端に約 50cm の仮壁を設置した。本構造の場合、鉛直方向の第 1 帯水層の遮断率は 20%程度で、かつ必要とする通水面積 120m²を十分に確保できる形状となっている。

b) 対策工の施工法の特徴と概要

図-11 に対策工の施工手順を示す。本工区での対策工の施工法の特徴と概要を以下に示す。

①対策工施工中の地下水流動阻害対策

山留め壁と対策工の施工順序によっては、施工中に予期せぬ地下水流動阻害が生じる可能性がある。このため、施工は、完成系に近い形状ができるように、まず、対策区間以外に山留め壁を構築した後に対策工に着手した。

②圧気圧のブロー防止

当該地盤でニューマチックケーソン工法を施工する際、圧気圧のブローが懸念された。この対策として 1m 層については、無圧気で有人掘削方法を用いて、同層から地表面へのブローを防止した。

第1帯水層では、地下水を有するため圧気を使用した機械化掘削を用いている。この圧気圧の周辺井戸等へのブロー防止対策としては、ケーソンの刃口先端までソイルセメント壁で周囲を閉合する方法を用いた。さらに、山留め工を用いた隣接ブロックへのブロー防止対策としては、沈設完了後、掘削を開始することとしている。

③躯体の耐久性や防水性の向上

躯体の耐久性や防水性の向上を図るためには、施工目地（打継）箇所を減らす事や後防水による防水対策を確実に行う必要がある。これらの対策として、本対策工の躯体は、地上で一括構築することとした。

④近接防護対策と沈設方法

対策工区間には、極めて近接した（約 1.5m）地上 3 階の RC 直接基礎建物があるため、沈設中の地中変位を防止する必要がある。高い沈設精度が求められた。この精度を確保するため、沈設方法は圧入ジャッキ 4 台（総 1200 t）を併用し、最大圧気圧約 0.1Mpa を載圧させる方法を用いた。

本法を用いた結果、設置精度については規格値を十分に満足した。

⑤トンネルの接続方法

沈設完了後、隣接ブロック掘削および躯体構築を行った。トンネルの接続時の止水対策として、この隣接ブロック躯体とケーソン間に高圧噴射置換工法による地盤改良を行った。その後、仮壁を撤去し、可

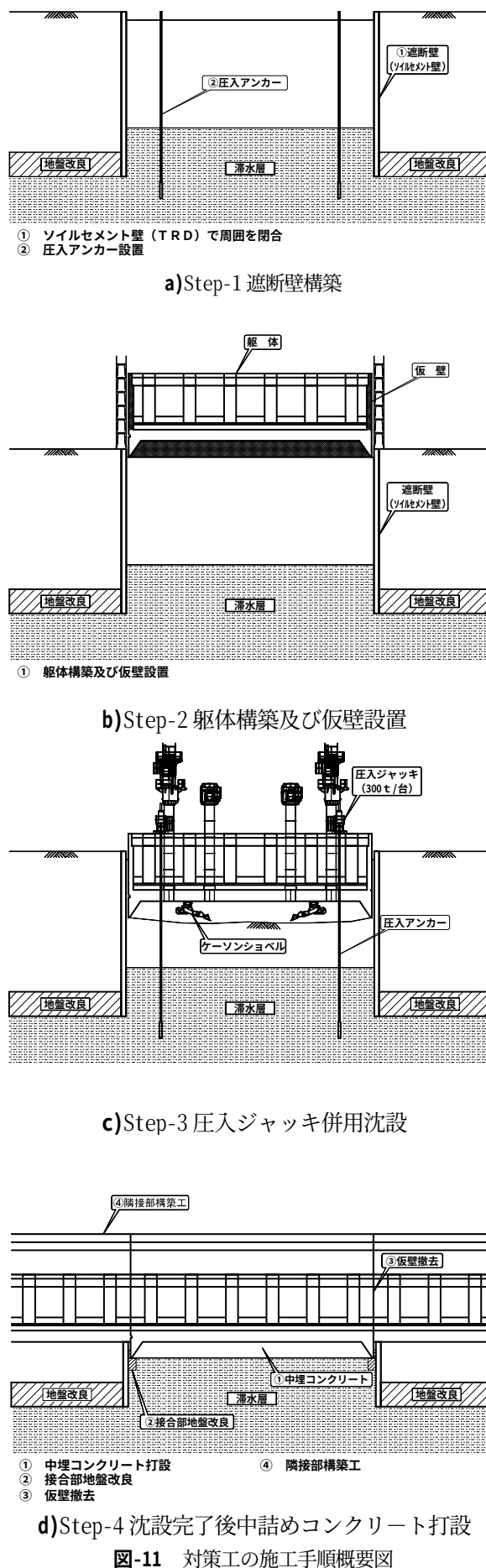


図-11 対策工の施工手順概要図

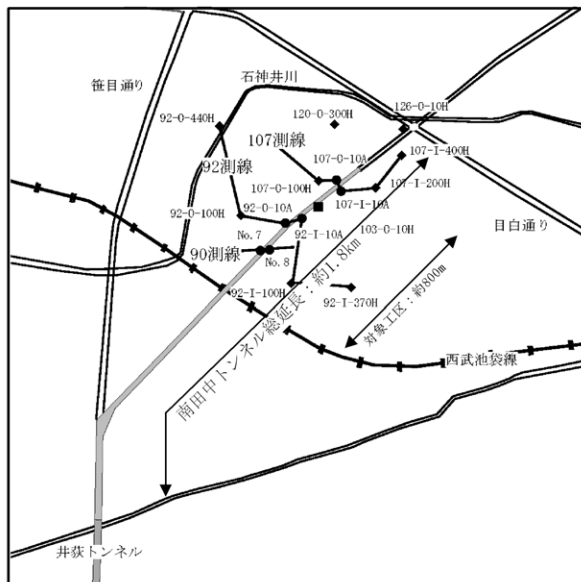


図-12 地下水位観測箇所

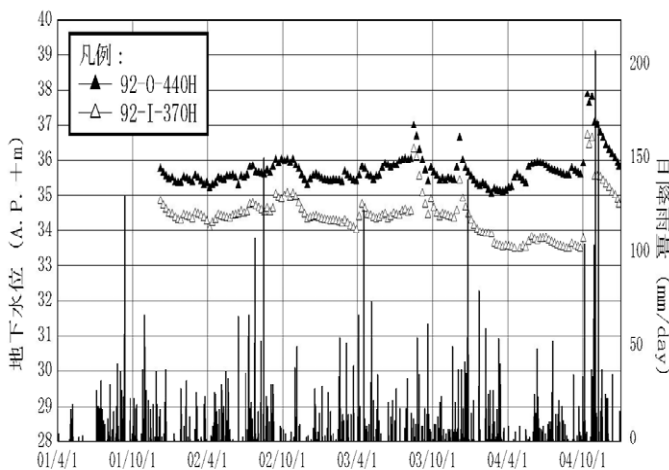


図-13 降雨量と地下水位の観測結果

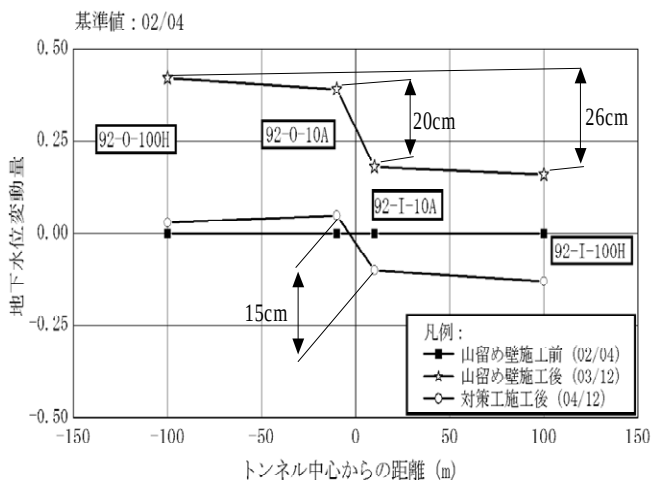


図-14 対策工前後の地下水位観測結果

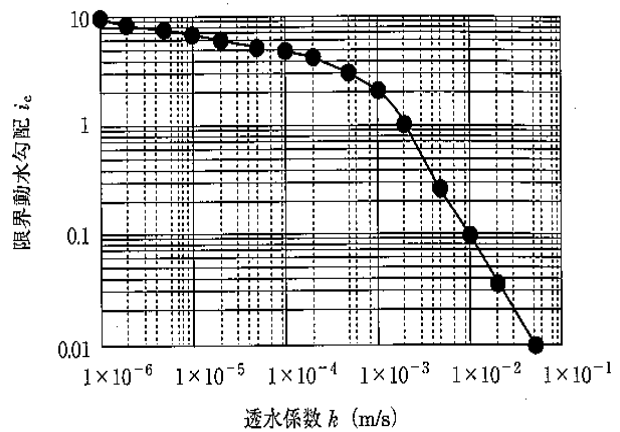


図-15 境界動水勾配と透水係数の関係⁶⁾

とう性継手や止水板等を設置し、堀割スリット形式トンネルとした。

(2)計測箇所と計測結果

a) 計測箇所

計測は、図-12 に示す様に、第1帯水層であるMg層に観測井を15箇所設置し、トンネル路線軸直角方向に3測線設置した。92測線が本工区の中央部に位置する代表測線である。観測は、自動方式で月1回、人力方式で週1回の頻度で実施した。

b) 計測結果

図-13 に本トンネルの代表測線である92測線の中で、本トンネルの施工による影響が最も小さいと考えられるトンネル中心から約400m離れた観測井戸の地下水位と降雨量の計測結果を示す。この結果を見ると、降雨期間は、概ね12月から5月が渇水期で6月から11月が豊水期である。また、地下水位は、降雨量と密接に連動しており、降雨量の最大月に対して、概ね1月遅れ程度で地下水位のピークが生じていることがわかる。さらに、観測開始時(2001年12月)から山留め壁施工前の期間(2003年4月まで)の地下水位を見ると観測井0-440Hが約50cmに対し、観測井I-370Hが約1.0m程度で変動幅が大きい傾向を示している。

図-14 は、代表側線である92測線で山留め壁施工開始前を初期値(2002年4月)とし、山留め壁施工時(2003年3月)および対策工施工終了後(2004年12月)の地下水位変動量を示したものである。山留め壁施工時の計測結果を見ると、地下水流上流側では地下水位が上昇し、下流側では地下水位が低下する傾向を示している。さらに、地下水位低下量は概ね20cm程度であることがわかる。また、山留め壁施工時と対策工終了後と比較すると、大きな地下水位変動量が表れていないこともわかる。

(3)考察

上記計測結果を基に、以下のことがわかる。

- ①観測結果で見ると降雨量に対する地下水位の反応速度は約 1 月程度である。この結果は、東京周辺地区で木佐貫・西垣³⁾らが示した結果とほぼ同一の傾向を示しており、同地区は、降雨量と地下水位が極めて密接に連動していると言える。
- ②計測結果を見ると、山留め壁施工完了時には、地下水流動阻害が生じていると言える。この阻害量は、約 20cm 程度であり許容地下水位変動量を満足する結果となっており、事前予測の妥当性が検証されている。
- ③山留め壁施工完了後と対策工施工完了時において地下水位の大きな変動が生じていない。このことより、本対策工が有効に機能していると考えられる。現段階での対策工付近での動水勾配は 0.01(20cm/20m)程度であり、**図-15** に示す高坂⁶⁾が提案している限界動水勾配 6 に安全率 3 程度³⁾見込んだ許容動水勾配 2 を十分に満足しており、対策工付近での地下水流動による帯水層の目詰まりも生じていないと考えられる。このことは、西垣・木佐貫²⁾の既往の研究で示されているように、通水面積を多くとることによって、帯水層の目詰まり等を防止でき十分な効果が得られることとも合致する結果である。

7. まとめ

本トンネルは、地層構成が既往の事例と異なり単一地層で、かつ地下構造物が遮断する帯水層は道路路盤以深にある。つまり、山留め壁根入れ部が帯水層を遮断している形状であった。これらの状況にある

施工区間の地盤構成を踏まえ、現状の帯水層を確保できるニューマチックケーソン工法を用いた対策工を開発し施工した。本論文で示した様に、本工法は、このような地層や道路線形では帯水層を改変しないことに加え、通水面積を多く取れる。このため、帯水層および対策工の目詰まり等を防止でき十分な効果が得られていると考えられる。

現在、全線にわたりトンネルの躯体構築中で、平成 18 年にトンネルを供用開始する予定である。今後、さらに観測を継続し、別の機会にさらなる本工法の考察を紹介する予定である。

参考文献

- 1) 杉本隆男：環八井荻・開削トンネル工事における地下水復水対策、地盤工学会構造物と地下水に関する事例講習会講習資料、pp.25-40, 1998.
- 2) 西垣誠, 木佐貫徹, 山下知之, 渡邊雄二：地下水流動阻害対策工の設計方法に関する研究, 土木学会論文集 No749/VI-61, pp.49-62, 2003.
- 3) 木佐貫徹, 西垣誠, 野田誠司, 山下知之：東京周辺地盤における地下構造物の設計地下水設定方法, 土木学会論文集 No721/VI-57, pp.167-176, 2002.
- 4) 古本一司, 三木博史：地下構造物の地下水流動阻害要因について, 基礎工, pp.34-37, 2002.4.
- 5) 日本トンネル技術協会：地中送電線土木工事における構造物近接部設計施工指針, p.120, 日本トンネル技術協会, 1985.
- 6) 高坂信章：井戸の限界揚水量に関する考察, 第 35 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1545-1546, 2000.