

大深度開削トンネルの施工報告

Construction of Large Depth Cover Tunnel

渡部 勝敏*
Katsutoshi Watabe

藤縄 浩*
Hiroshi Fujinawa

佐野 雅治*
Masaharu Sano

要 約

本工事は、開削工法によって高速道路トンネルを構築するものである。本工事の特徴は、以下の6点があげられる。第1にSMWの深度が55mと大深度であること、第2に盤膨れ防止対策として18m以上もの地下水位低下を行わなければならないこと、第3に当工区の始点妻部においてグラウンドアンカーを施工しなければならないこと、第4に大深度掘削の安全対策上、計測管理を行わなければならないこと、第5にトンネル側壁の厚さが1.5mであるため温度ひび割れ対策を実施しなければならないこと、第6に地下水汚染防止のため埋戻し材を慎重に選定しなければならないこと、である。

そこで、本報告は、各施工段階における問題点・対策について報告する。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 大深度SMWの施工
- § 3. 地下水位低下工
- § 4. グラウンドアンカーの施工
- § 5. 大深度掘削における計測管理
- § 6. マスコンクリート対策
- § 7. トンネル頂部の埋戻し材の品質管理
- § 8. おわりに

§ 1. 工事概要

本工事は、埼玉県南部の浦和・与野・大宮市に跨る旧国鉄大宮操作場跡地に建設されている「さいたま新都心」事業の一環で、首都高速道路高速大宮線を建設するものである。「さいたま新都心」の位置図を図-1、構想図を図-2に示す。

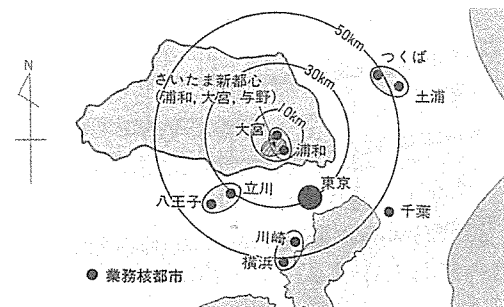


図-1 工事位置図

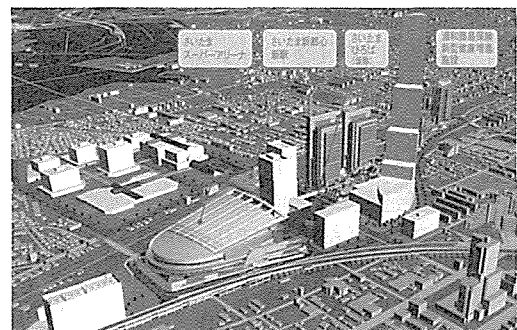


図-2 さいたま新都心

*関東(支)首都高新都心(出)

工程表

①平成5年 3月17日	OE26工区(2)トンネル工事契約	契約
②平成5年 4月から11月まで	施工検討委員会による土質調査及び工法検討	A工事=西松・若菜・東鉄共同企業体
③平成5年12月から平成6年6月まで	SMWの施工(φ650)	①OE26工区(2)トンネル工事・・・打切工事
④平成6年 7月から平成7年8月まで	揚水試験及び揚水過多調査検討	②OE26工区(2)トンネル工事(その1の2)・・・再発工事
⑤平成6年 7月から平成7年12月まで	GL-1.4m迄(4段戻)掘削完了	
⑥平成7年 9月から平成8年6月まで	止水注入	B工事=西松建設株式会社
⑦平成8年 8月から平成9年3月まで	掘削工事(最終床付けまで)完了	①OE26工区(2)トンネル工事(その2)
⑧平成9年 4月から平成10年11月まで	躯体構築工事及び埋戻工事…しゅん功	

工種	平成5年												平成6年												平成7年												平成8年												平成9年												平成10年																																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																				
工事経緯	施工検討委員会												揚水試験												止水注入工事												5~床付掘削												躯体工事・埋戻工事																																															
契約	OE26工区(2)トンネル工事(山留工事) 3/18												SMW工事 1~1.5段掘削												1.5~4段掘削												3/31												4/1												3/20												2/15												11/7											
契約経緯	その1の工事(平成5年3月18日~平成6年8月29日まで)																																				その2の工事(平成8年4月1日~平成8年10月31日まで)												その3の工事(平成8年2月15日~平成9年9月16日まで)																																															

表-1 工程表

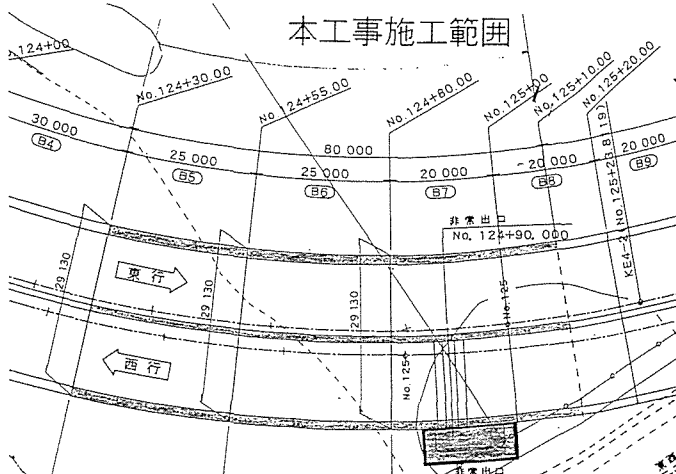


図-3 平面図

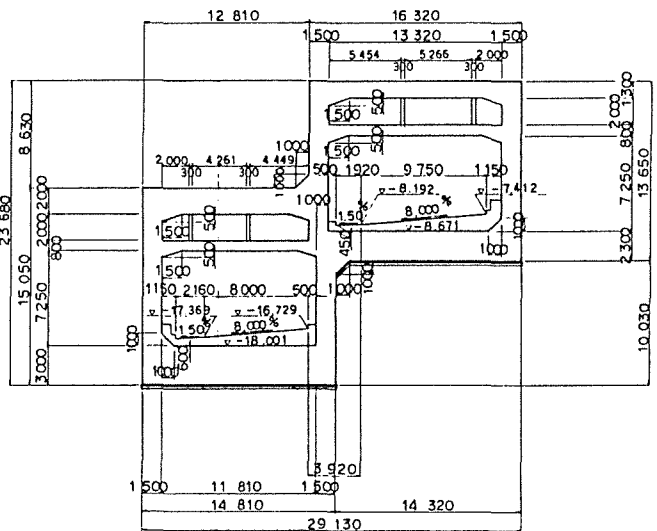


図-4 断面図

1-1 工事概要

工事件名: OE26工区(2)トンネル工事
 工事場所: 埼玉県与野市上落合
 企業先: 首都高速道路公団
 工事期間: 平成5年3月18日~平成10年11月7日
 工事内容: 工事延長 L=80m

SMW (φ650, L=55.0m)	11,361m ²
掘削工	72,000m ³
埋戻工	20,000m ³
グラウンドアンカー	170本

切梁腹起工	3,800t
薬液注入工	2,000m ³
コンクリート(BB272B)	17,400m ³
鉄筋(SD345)	3,600t
ディープウエル	8本
リチャージウエル	12本

当工区は、土留め壁をSMWとした開削工法によって地下構造物(ボックスカルバート)を構築するものである。全体工程表を表-1に、平面図を図-3に、断面図を図-4に示す。

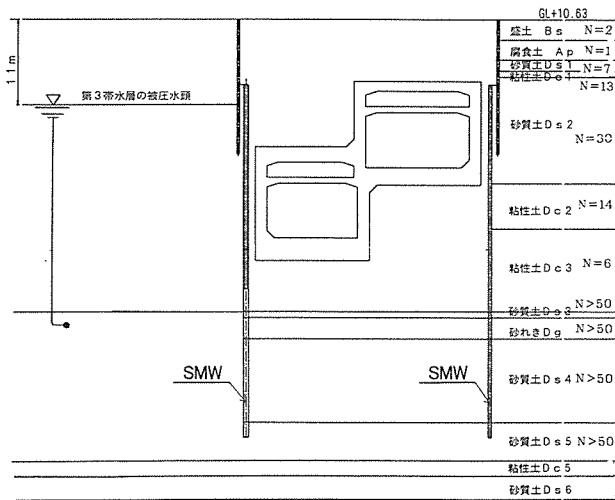


図-5 地質柱状図

1-2 地質の特徴

地質柱状図を図-5に示す。地質の特徴として土留壁のSMW施工深度内にN値が50以上の砂礫層がある。また、この層は掘削時の盤膨れが懸念される層であり、砂層と地下水位はGL-11.0mである。

§ 2. 大深度SMWの施工

2-1 SMW工事の問題点

当工事は、盤膨れ防止対策として18.15mもの水位低下を行う計画であり、さらに土留壁には高い遮水性が要求された。また、土留壁の施工に伴う問題点としては次の3点が挙げられる。

- ①遮水性：掘削面内、地下水位低下工法の効果の向上
- ②大深度：L=55.0m
- ③地盤条件：最大れき径（約200mm）

これらの問題に対処するため、先行削孔を用いた試験施工を行うとともに、SMW削孔精度の計測を行った。

2-2 削孔精度の管理

前述の問題点に対し先行削孔の精度と、SMWの傾斜等の出来形把握が重要と考え以下の計測を行った。

(1)先行削孔

先行削孔は、ラップ状況の精度の確保を図るため、SMW壁を造成前に1本おきに単軸で削孔する。その後、2つの穴をガイド孔として3軸削孔を行い、SMW壁を造成する。先行削孔施工手順を図-6に示す。先行削孔の精度は、杭打機のオーガー先端に取り付けられた傾斜計から確認した。計測システム概念図を図-7に示す。

(2)SMWの精度

SMWの変位量の計測結果を図-8に示す。

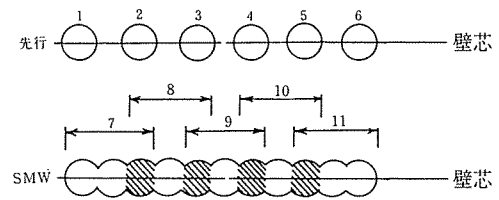


図-6 先行削孔施行順序

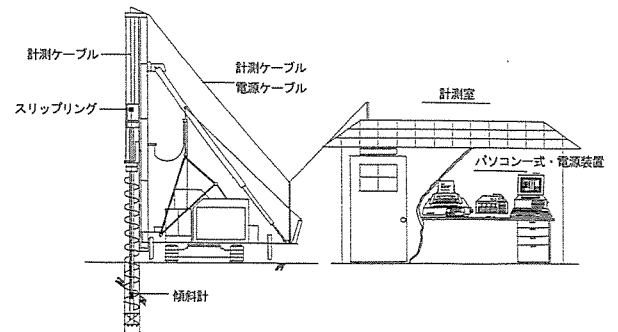


図-7 計測システム図

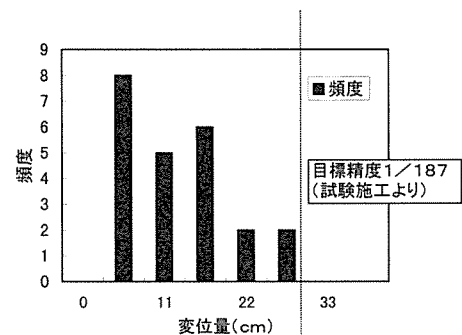


図-8 SMWの精度

2-3 大深度SMWの考察

計測施工を行った23本（全数量464本の5%）については、試験施工で得られた精度1/187を満たすものであった。計測本数は全体の5%に過ぎず全体の施工精度を適切に把握することは出来ないものの、結果の数値の分布状態から、定性的な傾向は把握できたと考えられる。

§ 3. 地下水位低下工

当工事の盤膨れ防止対策としてGL-38m以深の砂・砂礫層の被圧地下水頭（GL-11.0m）を18.15m低下させる必要があった。また、社会的条件の中で周辺地盤の井戸涸れ・沈下、地下水の地下ダム化を考慮した施工が求められた。

そこで、地下水低下工法としてディーブウエルによる揚水とリチャージウエルによる復水の揚水・復水工法が採用された。

表-2 揚水試験結果

項目	計画	結果
必要揚水量 (t/日)	720	11,000
水位低下量 (m)	18.15	9.85

表-3 地下水解析比較

項目	当初設計	再設計
モデル	軸対称	準3次元
揚水量 (t/日)	720	6,388
SMW 透水係数	0	2×10^{-5}
Dg層	1×10^{-1}	1×10^{-1}
Ds4層	4×10^{-3}	8×10^{-3}
Ds5層	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Dc5層	5×10^{-6}	2×10^{-4}

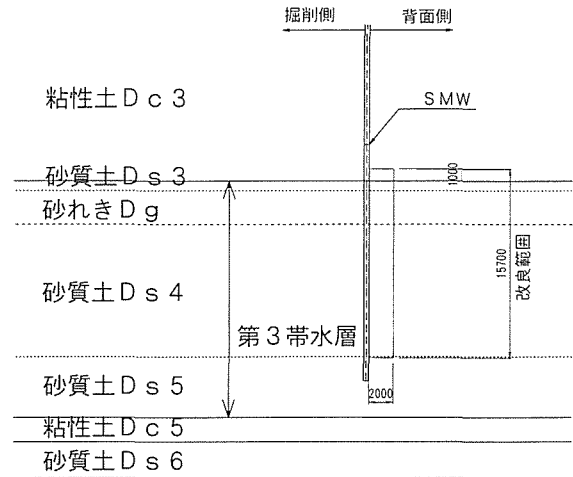


図-9 改良範囲断面図

3-1 揚水量の検討

SMW造成完了後掘削内に設けた4本のディープウエルにより揚水試験を実施した。

試験の結果(表-2), 計画された揚水量と試験結果がかけ離れたため, 原因追究のために次に列記する各種調査を実施した。

- ・壁体のオールコアボーリング (1本)
- ・追加地盤調査ボーリング
- ・色素水通過試験
- ・電気電位試験
- ・観測井戸の設置
- ・ディープウエルの増設

しかし, 上記の調査を行ったが, 決定的な原因を追求できなかった。そこで, 上記結果を踏まえSMWの透水係数を難透水層相当 ($2 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) として再度地下水の浸透流解析を行い揚水量を算定した。当初設計時および再設計時における地下水解析比較を表-3に示す。

浸透流解析の結果, 1日当たりの揚水量は6388t/日となった。現場で設置可能なディープウエルの本数は8本(200m³/本/日)であり, ディープウエルによる1日当たりの揚水量は1600t/日である。しかし, ディープウエルのみでは解析上の揚水量に達しないため, 止水対策を併用する必要があった。

3-2 止水対策の検討

止水対策を行うに当たり各種工法を比較検討した。その結果, 約3年の効果があり, 大深度(約60m)の施工実績がある, 二重管ダブルパッカー工法ソレタンシユ工法を採用した。改良範囲は第3帯水層の上部15.7mの高さとし, SMW壁体の背面に行うことにした。改良範囲断面図を図-9に示す。また, 薬液の注入率を表-4に, 1次注入, 2次注入の配合をそれぞれ表-5, 6に示す。

表-4 注入率

項目	間隙率	注入率
Dg	40%	40%
Ds4	40%	40%

表-5 1次注入率 (1m³当たり注入率5%)

普通セメント	250 kg
ベントナイト	50 kg
水	895 kg

表-6 2次注入率 (1m³当たり注入率5%)

SL水ガラス	250 (リットル)
SLリアクター	60 (リットル)
水	690 (リットル)

3-3 地下水位低下工の考察

上記の薬液注入工による止水対策の結果, 18.15mの水位低下に対し, ディープウエルによる揚水量は1600t/日となった。

GL-50m以深の地盤状態, 壁体は目視で確認できず, 不確定要素が多い。また, 揚水量は, 透水係数に左右される。平面積の大きい掘削においては土質のばらつきや地層の変化が大きく影響することが考えられる。今後の対策として, 現場の原位置ボーリングはもちろんのこと, 現場揚水試験を実施し現状に即した透水係数を把握する事が重要である。

§ 4. グラウンドアンカーの施工

当工区の始点側妻部(幅35m)において, 隣接工区との発注時期の違いにより, SMW妻壁を施工後グラウンドアンカーを施工した。妻部断面図を図-10に, 用いた

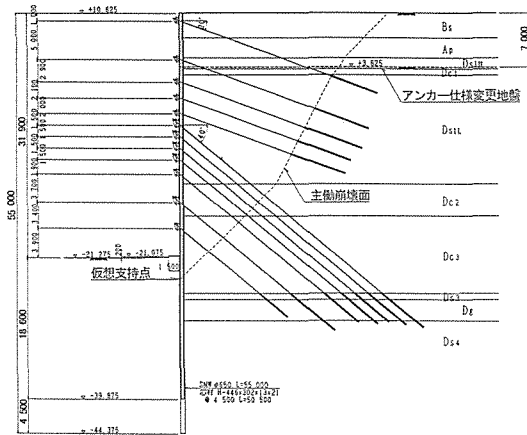


図-10 妻部断面図

表-7 工法仕様

工法	VSL工法 (埋殺)
削孔機	ロータリーパーカッション (2重管)
グラウト材	セメントペースト
緊張材	PC鋼より線 (φ12.7mm)

工法の仕様を表-7に示す。本章では、種々問題点の内、被圧水対策について報告する。

4-1 被圧水対策

(1)口元止水

削孔中、山留壁のSMWを貫通した瞬間に背面の地下水が噴き出してくる。この地下水は、削孔中・鋼線挿入・注入・緊張定着まで出水するものであり土砂も含むため周辺地盤陥没の危険がある。そこで、本工事ではガイド管と呼ばれる掘削径よりも一回り大きい鋼管を先に打設し鋼管の中の地下水を止水する方法を用いた(図-11)。

(2)高被圧水対策

定着層が高被圧水 (30.4N/cm²) のため、定着体の造成の際グラウト材が逆流し、所定の引き抜き力を確保できない。これを防止するためにパッカーにより逆流を防止した。被圧水圧より高い圧力でパッカーを膨らましさらに高い圧力で加圧注入した(図-12,13)。

4-2 アンカー工の考察

仮設山留支保工としてのアンカーは、躯体構築の際、躯体打ち継ぎを少なくする、材料・重機の投入、引き上げが容易である事から施工例は多い。今回のような、大断面(35m)、大深度(32m)、全12段、高被圧水である条件でのアンカー工は非常に困難であったが、綿密な計画のもと異常出水事故もなく施工できた。しかしながら、ガイド管からの湧水は0.2t/分にもおよび排水計画が重要であると考えられた。検討段階から排水が重要であること

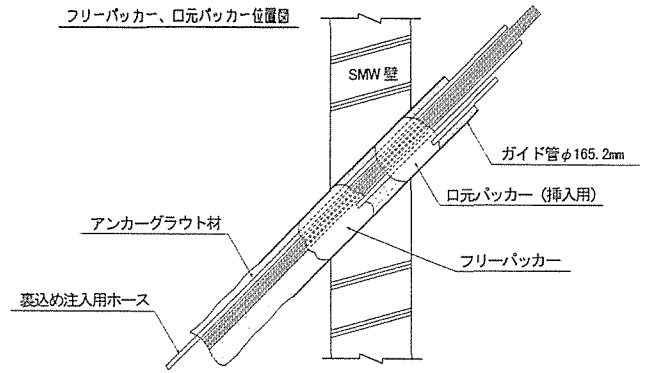


図-11 口元止水概念図

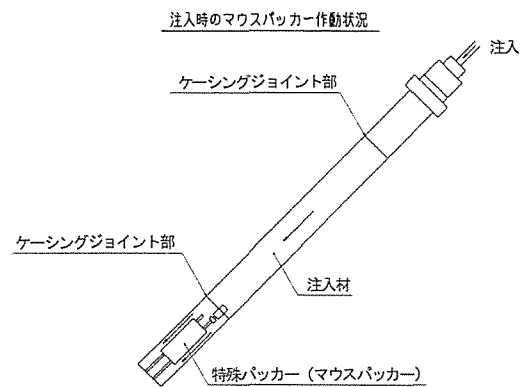


図-12 逆流防止注入時概念図

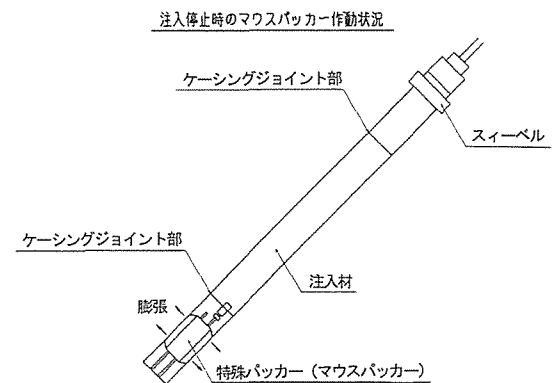


図-13 逆流防止装置作動時概念図

が予想されていたが、実際には予想を遙かに超えていた。

§ 5. 大深度掘削における計測管理

現場の各所に取り付けた計測器はモデムを通じ一般電話回線より事務所内に設置したコンピューターにデータを入力する。計測値は管理値により白・黄・赤の3色に色分けした。黄・赤では同時にサイレンがなるシステムとした。

表-8 計測管理項目

設置箇所	検出器	数量	計測項目
鋼矢板	挿入式傾斜計	2	累積水平変位
	構造物傾斜計	2	天端の挙動
	土圧計	2	作用する土圧
SMW	埋設型傾斜計	19	累積水平変位
	土圧計	6	作用する土圧
地盤	間隙水圧計	7	間隙水圧
	ワイヤ式変位計	22	鉛直変位
	地表面沈下計	4	地表面の沈下
切梁	歪み計	9	切梁軸力

表-9 地下水低下工実績

段階	計画水位(TFm)	揚水量 (t/日)
自然水位	-2.5	—
5段掘削	+2.4	66
6段掘削	-2.0	282
7段掘削	-8.3	708
8段掘削	-12.5	1476
9段掘削	-15.9	1612
床付け掘削	-19.7	1873

5-1 計測管理フロー

計測管理項目を表-8に、計測管理フローを図-14に示す。

5-2 計測管理法

(1) 盤膨れ対策 (被圧水の水圧管理)

盤膨れ対策である被圧水の水圧管理フローを図-15に示す。さらに、地下水低下工を行った実績値を表-9に示す。

(2) 山留壁計測管理

本工事で行った計測管理手順を以下に示す。

「時期」 掘削工事、切梁腹起工事の解体の前後

「準備」 1週間の変位、軸力量の把握

「方法」 計測結果の把握および目視確認

ここで、図-16に床付け掘削時の計測結果を示す。

5-3 計測結果の考察

計測の警報システムは、たまに誤作動があり夜中にサイレンが鳴り響くことがあった。しかし、計測結果は色で識別できるので全職員の目に留まり現場全体で管理できた。地下水位の計測は、計測器および手動計測により管理するという二重の管理をし、さらに、地下水位は計算値より1m以上低下する揚水量を設定したため地盤の隆起等の傾向も全く見られなかった。

山留壁の計測については、計測結果から、切梁解体時には、最大100mm程度の変位が見られたが、他の箇所では

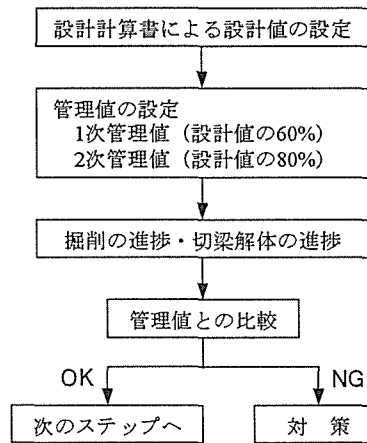


図-14 計測管理フロー

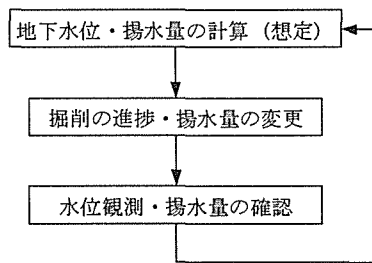


図-15 被圧水の水圧管理フロー

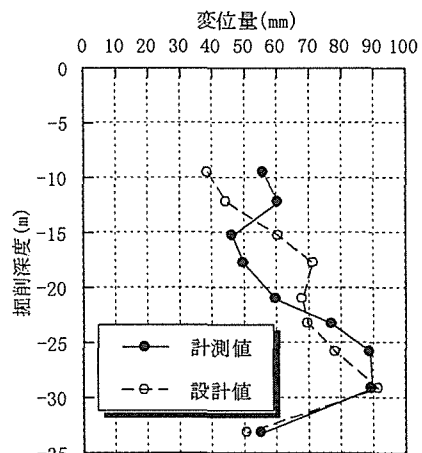


図-16 計測結果 (床付け掘削時)

の現場施工では、切梁のコマ材切断時に最大150mm程度の変位が見受けられた。この事はコマ材切断の切断代で確認された。

§ 6. マスコンクリート対策

本ボックスカルバート (図-17) はスラブ厚1.3~3.0m、壁厚1.5mのマスコンクリートであり、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念された。さ

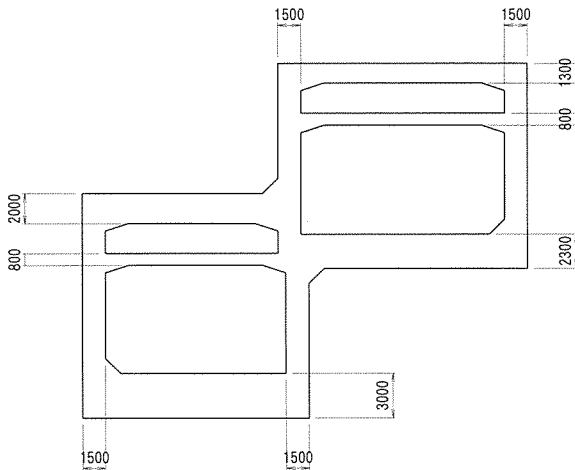


図-17 断面図

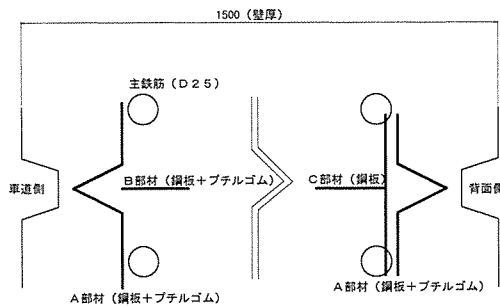


図-18 ひび割れ誘発目地設置断面図

らに、特記仕様書にも温度ひび割れ対策が記載されているため、温度ひび割れに対する検討を行った。

本章では、壁部で実施した温度ひび割れ対策（ひび割れ誘発目地）について報告する。

6-1 ひび割れ誘発目地

使用した誘発目地は、主筋のかぶり間、および主筋間に、スパンシール（水と反応し膨張するゴム）を巻いた鋼板を設置し、さらに型枠に幅50mm、深さ30mmの面木を入れた構造とした（図-18）。このひび割れ誘発目地の働き（断面欠損）により、有害なひび割れを誘発させた。その後、止水工事を行う時に、ウレタン材と弾性シーリング材で断面欠損部分を仕上げた。

6-2 断面欠損率の算定

有害なひび割れを抑制し、予定箇所にはひび割れを確実に入れるには、断面欠損率を20~30%以上にする事が望ましいとされている。断面欠損率は、下式から計算する。

$$\text{断面欠損率(\%)} = \frac{(X_1 + X_2) \times 2 + X_3 + X_4}{B} \times 100$$

表-10 材料の選定

項目	コンクリート	流動化処理	砕石+転圧
地耐力	◎	◎	○
地下水	×	×	◎
工事費	高い	ふつう	安い

ここに、B：壁厚（1500mm）、 X_1 ：化粧目地の深さ（30mm）、 X_2 ：A部材の幅（40mm）、 X_3 ：B部材の幅（100mm）、 X_4 ：C部材の幅（300mm）、である。

上式に本工事で用いたひび割れ誘発目地材の諸元を代入すると、

$$\text{断面欠損率(\%)} = \frac{(30 + 40) \times 2 + 100 + 300}{1500} \times 100 = 36(\%)$$

となり、目標値以上の断面欠損率を確保した。

6-3 結果及び考察

コンクリートを打設し、養生、型枠の脱型、埋戻と進捗する中で漏水は発生する。本工事でも打継ぎ目からの漏水が多く止水工事を施した。今回設置した誘発目地からの漏水は、誘発目地以外からの漏水よりも多く、ひび割れ誘発目地の効果が現れていると考えられる。

なお、漏水の多い箇所は当工事の盛替梁（H400）の設置した高さにかかった。躯体と山留（SMW）の間をコンクリート（ $t=300, 15-12-25BB$ ）で充填し、他の部分は砂を基本とした流動化処理土で施工したものであり、コンクリートの充填性の悪い所から水みちがついたと考えられる。

§7 トンネル頂部の埋戻し材の品質管理

トンネル頂部には「さいたま広場」が建設される。地下3階+人工地盤の公園であり上載荷重は9t/m²である。また、さいたま新都心の近隣はいまだ井戸を使用している住民が多く、ボックスカルバートという連続的なコンクリート構造物は、地下水の流れを遮断する。そのため、トンネル頂部には、地耐力があり、かつ透水性が小さい材料および施工法を選定する必要があった。

埋め戻し材は、表-10に示す3種類を検討した。表-10より、砕石+転圧工法を採用した。しかし、施工条件に見合った施工実績がないことから、室内試験（3軸圧縮試験、透水係数試験）を実施した。また、室内試験を行う砕石は首都高速工事全体で約5万m³にもなるため比較的流通の良い、C-40（切込砕石）、RM-40（再生粒度調整砕石）、M-40（粒度調整砕石）の3種を

表-11 砕石の変形係数

側圧 σ_3 (kgf/cm ²)	0.5	1	3
M-40 $\gamma_d=2.10$ g/cm ³	738	1160	1900
C-40 $\gamma_d=2.07$ g/cm ³	492	887	1390
RM-40 $\gamma_d=1.77$ g/cm ³	1020	1510	1470

表-12 透水係数試験結果

試料番号	M-40	C-40	RM-40
乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	1.997	1.897	1.775
透水係数 k (cm/sec)	1.9×10^{-4}	1.1×10^{-2}	1.3×10^{-4}

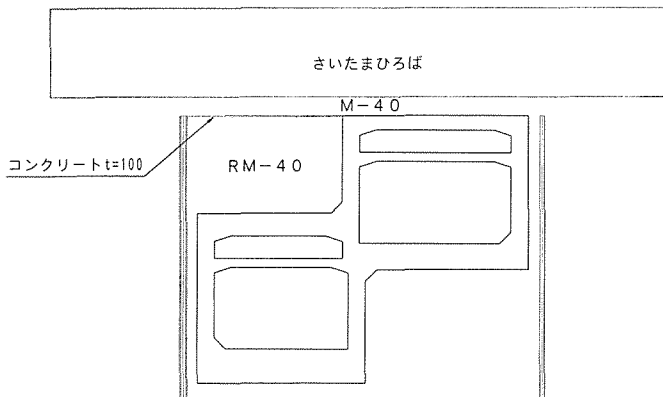


図-19 埋戻断面図

選定した。3軸圧縮試験結果を表-11に、透水係数試験を表-12に示す。室内試験の結果、地耐力が大きく、透水係数が小さいRM-40とM-40の2種類を採用した。

次に、埋戻工事費の見直し、および表-13に示す機械の使用を想定した転圧法、転圧回数、現場施工管理基準を決定するために、表-14に示す現場施工前試験を行った。この結果、RI試験による密度管理を重視する事とし、表-15の施工管理基準を用いて施工を行った。

施工は、トンネル段差部についてRM-40材で施工し、地下水の汚染防止のためその上をt=100のコンクリートで蓋をした。さらに、RM-40の上部はM-40で埋め戻した(図-19)。

§ 8 おわりに

工事の受注以来69ヶ月に及ぶ工事でも平成10年11月に無事竣功致しました。乗り込み当初は、見渡す限り野草の生い茂った空き地でありましたが、現在では「さいたま新都心」建設事業も最盛期を迎え、人、重機の立ち並ぶ一大プロジェクトの全貌、進捗が一目で分かります。こ

表-13 使用機械

機械名	規格
ブルドーザー	3 tクラス
振動ローラー	3 tクラス
クラムシエル	0.8m ³
バックホウ	0.7m ³

表-14 施工前試験実施項目

試験項目	試験方法	箇所
地盤の平板載荷試験	JGS-1521	1
道路の平板載荷試験	JIS-A-1215	2
RI器による密度試験	JGS-1614	20
RI器による含水比測定	JGS-1614	20
現場密度試験(砂置換)	JIS-A-1214	16
沈下長量測定	水準測量	24
現場CBR試験	JIS-A-1222	3

表-15 施工管理基準

項目	基準
巻き出し厚さ	35cm以下
仕上がり厚さ	30cm以下
密度管理(RI試験)	乾燥密度2.10kg/cm ³
転圧回数	4回

※RI試験は、1測点6点、計3測点の4回の平均値である。
 ※施工単位毎に、地盤の平板載荷試験を実施した。

の様な工事に従事できたことに感謝すると共に、土木設計部、技術研究所、支店、一般土木委員会の方々の強力な支援に深く感謝いたします。大深度の開削工事の事例は多くあり、当工事も構造物本体は、さほど特殊な事はなく、その構造物を築造する過程における仮設工事に数々の問題点がありました。まだ、書ききれない事も多くありキーワードのみを掲載しましたが、今後の同様な工事に参考にしていただければ幸いです。

参考文献

- 1) SMW研究会：SMW連続壁標準積算資料,pp.20,1993.3
- 2) ソレタンシュ注入協会：ソレタンシュ地盤改良工法,pp.2,1996.4
- 3) ソレタンシュ注入協会：ソレタンシュ地盤改良工法,pp.4,1996.4
- 4) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説,1992
- 5) 青山一郎：掘削における計測施工,鹿島出版会,1984
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」,pp.181,1996