

地下鉄函体建設における地下水流保持対策とその効果

EFFECT OF THE COUNTERMEASURES FOR PRESERVING GROUNDWATER FLOW IN CONSTRUCTION OF SUBWAY TUNNEL STRUCTURES

渡邊誠司¹⁾・古山章一²⁾・高木芳光³⁾

Seiji WATANABE, Shouichi FURUYAMA, Yoshio TAKAKI

A part of JR Senseki Line in Sendai City was switched to underground. We adopted Soil Mixing Wall(SMW) method for the construction work. As this wall cut off most of the groundwater flow, we had analyzed the influences in advance using the finite element analysis and conceived to control the groundwater flow by replacing the retaining wall partially with permeable materials after construction.

This paper shows variation of groundwater level affected by the SMW and recovered by the effective countermeasures. Furthermore, it is also referred to the accuracy of the prediction checked by regression formula.

Key Words: groundwater flow, Soil Mixing Wall, countermeasures, recover

1. はじめに

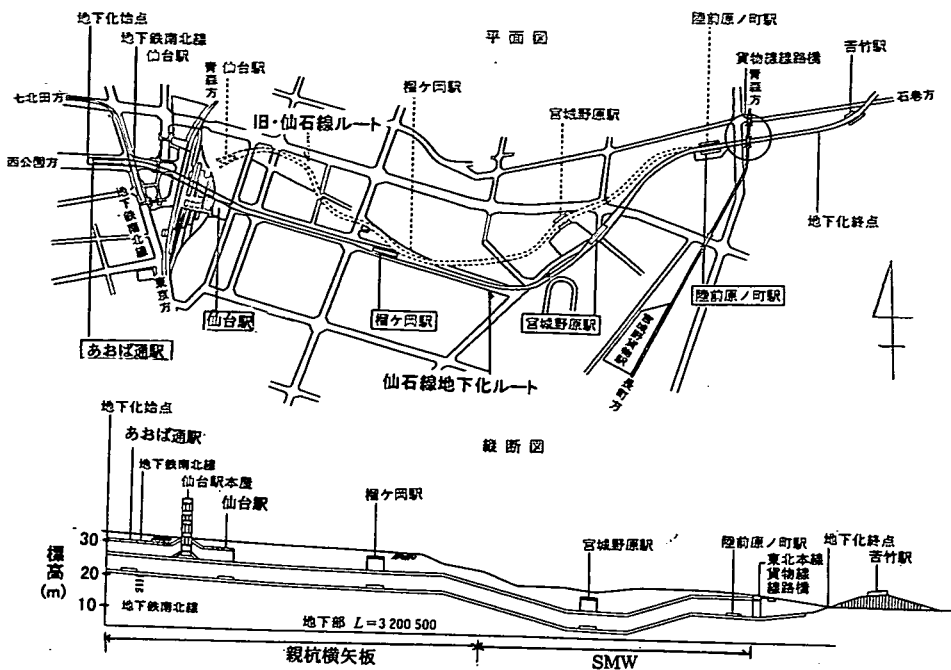
都市部において、地下鉄函体など線状構造物を構築する場合、構造物を横断する地下水流が堰き止められ上流側ではダムアップ現象、下流側では枯渇現象の発生が懸念される。平成12年3月に開業を迎えたJR仙石線地下化工事では、このケースに該当する箇所があった。そのため、事前に地下水が地下鉄函体建設によりどうなるかを把握するため予測解析をおこなった。解析の結果、影響が出ることが予測されたため、対策工を検討し実施した。あわせて工事着手前からルート周辺の地下水調査を継続して行ってきた。本報告では、それらの対策工およびその結果について述べる。

2. 工事概要

仙石線地下化のルートは図-1に示すように、市営地下鉄南北線仙台駅に接続するあおば通駅から、東北新幹線・東北本線仙台駅直下を横断し、苦竹駅に至る区間のうち約3.9kmを地下化したものである。このルートは仙台市街地に広く発達する5つの河岸段丘のうち標高30m前後の上町段丘と標高20m前後の中町段丘を通過している。周辺の地下水位測定結果から仙石線地下化ルート周辺の地下水は、北西から南東に向かって、ルートを横断するように流れていると考えられ、地形状況とよく一致している。また、地下水流の傾向は年間を通して変わっていないと判断された。

地下水位の比較的低い、仙台駅～宮城野原(1k805m)付近は、親杭横矢板による開削工法、地下水位の高い宮城野原付近から陸前原ノ町駅間は遮水性の土留壁(以下SMW)による開削工法で施工を行った。

-
- 1) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室
 - 2) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室
 - 3) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 担当課長(東北・南)



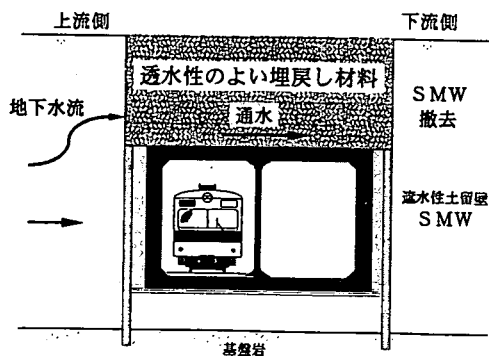
図一 仙石線地下化概要

3. 影響予測と地下水対策工

3-1 影響予測

本工事に於いては、地下化工事が地下水流況に与える影響を予測するために解析を行い対策工の検討を行った。特に、遮水性の高いSMW区間では影響が懸念されたため対策工を検討した。対策工の選定にあたっては、確実性、経済性、施工性から、土被りの大きい区間では図一2に示す通水層による対策を基本的に行うこととし、解析を行った。函体上部にNTTの洞道がありルート中で最も地下水を遮断すると考えられる2k240m付近の断面を選定し断面二次元浸透流解析により、函体上部の埋め戻し材の透水係数の検討を行った。図一3に示すように透水係数 $1.7 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ の材料で埋め戻せば施工による地下水の流れの変化をかなり抑えることが出来ると判断された。しかし、断面二次元浸透流解析では断面の側方との地下水の移動を考慮することが出来ず、平面的な地下水の流れの変化を判断する事が出来ない。そのため、施工区間を分割して対策をおこなった場合の地下水位の変動や井戸などの水利用施設への影響を判断できない。そこで、準三次元浸透流解析を行い、施工区間に合わせた、SMW撤去率の検討を行った。

その後、土被りの無い地下化終点付近の陸前原ノ町駅部分でも地下水対策を検討することとなり、前述の準三次元浸透流解析のモデルを元に、範囲を絞って再度解析を行った。この区間では函体上部を通水させる方式は不可能であるため、函体下部に導水管を用いることとして解析を行った。さらに、



図一2 通水層による対策

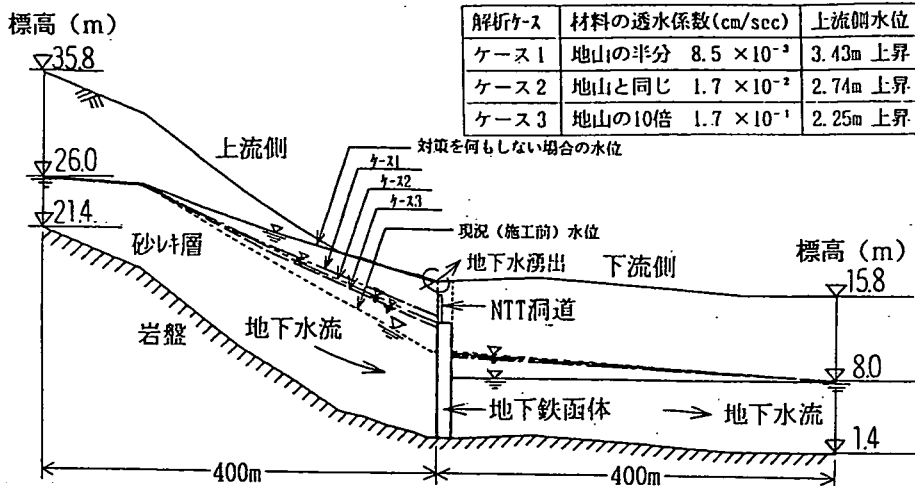


図-3 断面二次元解析結果(2k240m 付近)

集水管を地山の中に布設することによる効果を、断面二次元浸透流解析により検討した。

3-2 対策工

①土被りの大きい区間における対策工

土被りの大きい区間では図-2に示す、通水層による対策を行った。このうち道路直下の区間では、地表近くに構造物を残すことが許されないため、函体上床版より上部のSMWを100%切断撤去し函体上部を透水性の優れた埋め戻し材で埋め戻した。埋め戻し材は施工に先だち現場透水試験・締固め試験などから透水性の優れた埋め戻し材(クラッシャーランC-40)を用いることに決定した。

撤去については全区間についてSMWを100%撤去するのは経済的でないことなどから、住宅地についてはSMWを部分撤去することにした。

部分撤去についての解析は準三次元浸透流解析プログラム「UNISSF」を用い定常解析を平成5年度に行った¹⁾。解析条件を、図-4、図-5に示すが、図-5に示す、当時の未施工区間において、SMWの撤去率を変えることにより、撤去率と地下水位変動の関係を求めた。なお、ここで撤去率とは函体に沿った単位長さ当たりの函体上のSMW面積を何%撤去するかということであり、図-5の上部の数字はそれを表している。検討ケース

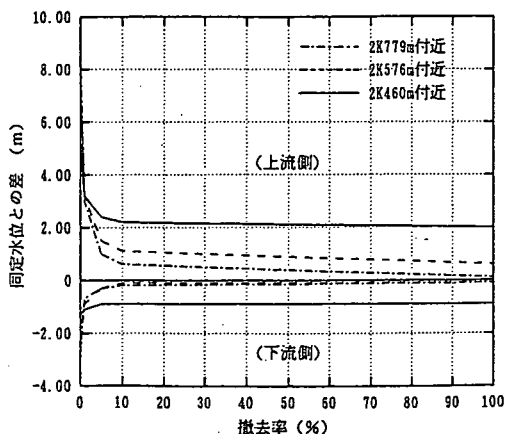


図-6 各断面における同定水位との差

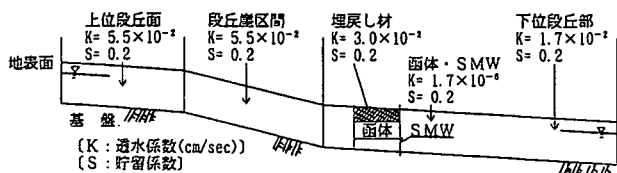


図-4 解析条件(線路直角方向)

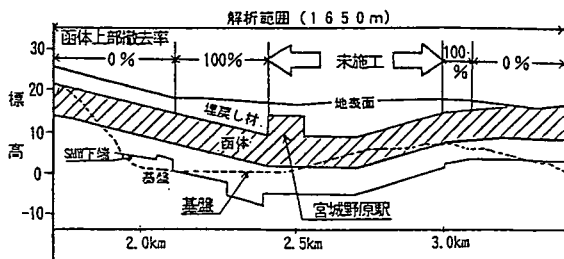


図-5 解析条件(線路方向)

は撤去率 0, 1, 5, 10, 100% の 5 通りで行った。図一 6 は SMW を撤去しない場合最も同定水位 (函体施工前) との差が大きかった点 (2k779m 付近)、宮城野原駅部 (2k460m 付近)、2 点の中間点 (2k576m 付近) の撤去率と同定水位との差をグラフ化したものである。この結果から上流下流とも 10% を越える撤去率において大きな変化は見られなかったため、撤去率は 10% 以上とした。

②土被りの無い区間における対策工

当初の計画では、陸前原ノ町駅は半地下式にする予定だったが、線路敷跡地の有効利用等から陸前原ノ町駅 (3k260m) を中心とした 3k125m～3k325m 間は地下式で施工した。地上へ出る直前であり、図一 7 のように土被りの無い 2 層のボックス構造となり、函体上部を通水させる方式は不可能であるため、函体の下部に導水管を用いることとした。

解析プログラムは、前述の準三次元浸透流解析プログラムを用い、解析モデルは平成 5 年度に行ったものを元にして範囲を絞って行った²⁾。なお、導水管部の透水係数は管径 $\phi 20\text{cm}$ の場合を $1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ とし、透水係数を $1.7 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ($= \phi 8.4\text{cm}$)、 $4.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ($= \phi 4\text{cm}$) と変えることにより管径のパラメーターとし、設置間隔を 10m、20m、30m、40m、50m と変化させて解析した。

ただし、解析では定常状態のみを検討することとしたため、時間の項はない。また、初期水位は、平成 5 年度に行った解析値を適用したため、境界面では水位を固定している。

上記解析で導水管は SMW 施工範囲まで設置する形状で検討しているため、集水管を地山中に布設することにより、どのくらいの効果が期待できるかは、断面二次元浸透流解析により検討した。集水管の設置による地下水流出量を現況 (工事前) と比較した場合の効果を図一 8 に示す。現況 (工事前) の地下水流動量を確保する場合が効果 1.0 であるが、集水管の径によらず集水管が 1.5m 程度あれば現況の 80% 以上の流量が確保できることがわかる。

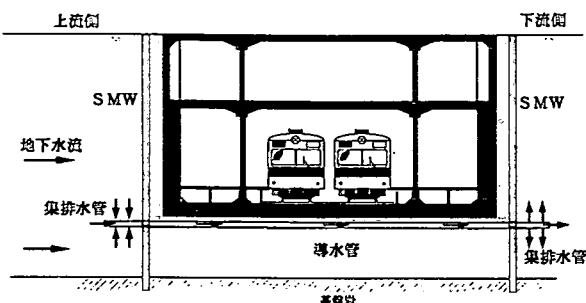
解析結果と経済性から、導水管は直径 10cm のものを 20m 間隔で用いることとした。また、集水管は 1.5m の長さのものに、フィルターを取り付けて目詰まりを防止している。

4. 地下水位計測結果

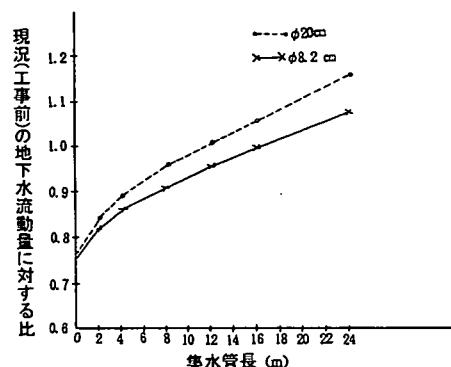
SMW により施工したルートおよび計測断面を図一 9 に示す。ルート沿いの範囲の地下水位コンタ図を図一 10～12 に示す。下流側の地下水位 8m, 10m の線に着目すると、SMW の施工によりルートに近づく (水位低下) が対策後は離れる (水位上昇) 傾向にあることがわかる。地下水位の形状も工事前の状態に近づいており、全体的には地下水の流れも回復していることが確認された³⁾。

通水層による対策をおこなった、2k800m の断面における、地下水位の変動状況を図一 13 に示す。対策実施直前 (H9.4) に函体から約 150m 離れた下流側で 3m 程度低下していた水位が対策後 (H10.4) には SMW 施工前 (H7.4) の傾向に近づいていることが分かる。

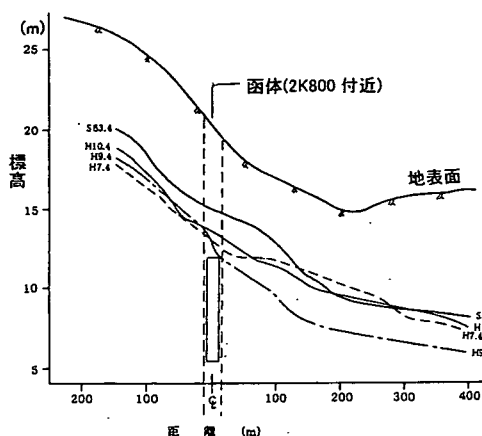
導水管による対策をおこなった 3k400m の断面に設置した自記水位形による地下水位変動と降水量のグラフを



図一 7 導水管による対策



図一 8 集水管の長さに対する流量比



図一13 地下水断面の変化(2k800m 断面)

図一14 に示す。当初ほぼ同じであった水位が、H8 年の SMW 施工ならびに工事進捗とともに下流側で低下したが、地下水対策を施工した H9.4 以降下流側で特に回復傾向が見られる。H10 年末から H11.3 にかけて下流側で大きな低下傾向が見られるが、この時期はかつて無いほど少ない降水量であり、その後の降雨により再び回復している。

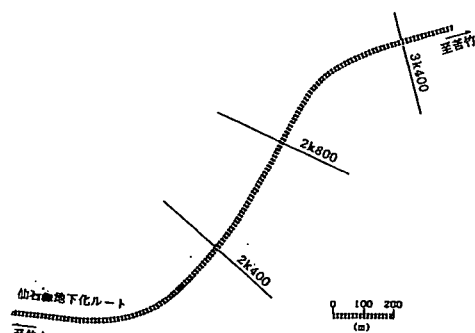
地下化工事の影響を把握するために昭和 62 年から地下水位の観測を行ってきたが観測箇所は年度ごとに増減しており、各箇所での変動傾向に差は有るものの、地形と工事工程により概ね似た傾向が現れていた。

ここで、水位変動と降水量の相関性を把握するために、自記水位計を取り付けた、2 箇所の井戸について検討を行った。具体的には、前日に対して 0.1m 以上変化があった日を基準に前 1 日、前 5 日、前 10 日、前 30 日、前 60 日、前 90 日、前 180 日までの降水量合計との相関を検討した。この結果、一方では 30 日前からの降水量合計と 0.3m 以上の水位変化との間に相関係数 0.80 の相関性、他方では 90 日前からの降水量合計と 0.7m 以上の水位変化との間に相関係数 0.93 の相関性が認められた。

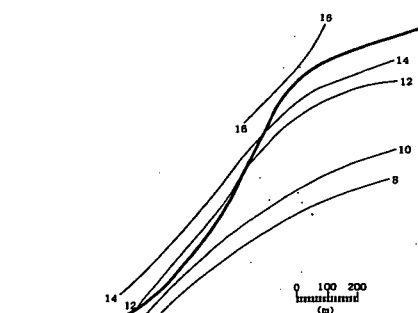
これらの結果から調査地域の地下水面は、極めて近い時期にあった降水より、1 ヶ月～3 ヶ月前からの降水量の影響を受けている傾向が認められた。

地下水位の予測値と実測値との比較を行うにあたって、予測値の条件に最も近い日の地下水面を比較対象とした。予測計算では、昭和 61 年から平成 4 年までの間で年間最高水位の平均に最も近い平成 2 年 9 月の地下水面を用いた。この時の降水量は直前 0mm、前 30 日は 228mm、前 90 日が 521mm であった。これに近い条件である平成 11 年 9 月 20 日の地下水面を比較の対象とした。

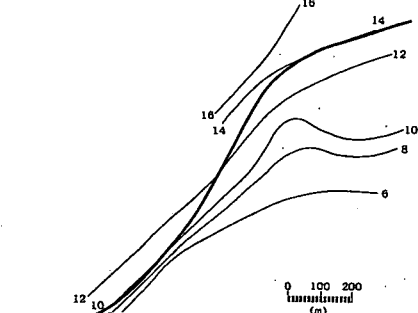
予測水位と実測水位の比較のうち通水層による対策箇所を表一 1、導水管による対策箇所を表二にそれぞれ示す。



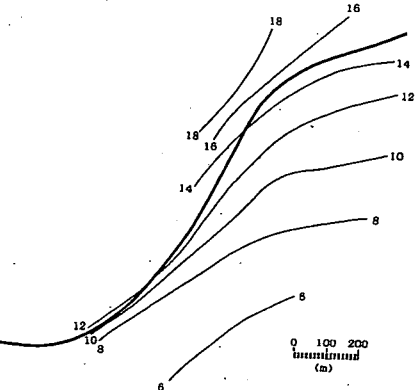
図一9 ルートおよび計測断面



図一10 SMW 施工前の地下水位(H7.4)

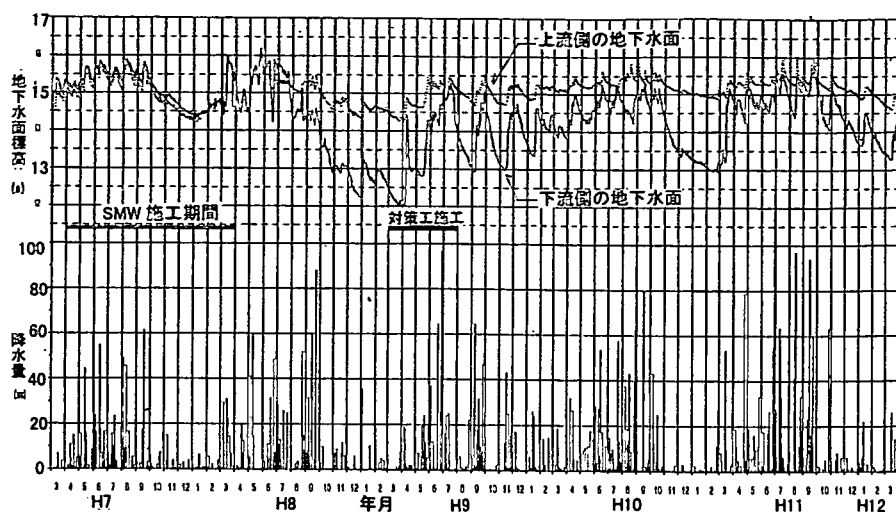


図一11 対策直前の地下水位(H9.4)



図一12 対策後の地下水位(H10.4)

予測値の効果量は予測計算から求めた同定水位（SMW 施工前の地下水面）に対し、対策工施工後の予測計算の地下水面を比較し、同定水位を基準とするパーセントで表したものであり、実測値の効果量は同定水位に対し、実際の水位を比較し、同定水位を基準とするパーセントで表したものである。同定水位と実際の地下水面とに差



図一14 地下水位変動と降水量(3k400m 断面)

が無ければ 100%、上昇なら 100%より大きく、低下なら 100%より小さい値となる。

効果量の差分はそれらの差を求めたもので通水層による対策をおこなった区間で±20%以内、導水管による対策をおこなった区間で平均 11%、最大で 25%程度のずれであった。

事前の解析は定常状態で時間経過は考慮していないのに対し、実際の工事では、施工時期のズレがあったり、条件が異なったりしているので単純に比較は出来ないが、事前解析は概ね適切な結果を得られたと考えられる。

5. おわりに

本工事において施工した地下水流保持対策は概ね効果をあげているという結果が得られた。長期的な計測結果を見ると、地下水流の回復には時間を要しているところもあるので、今後時間をかけて回復が進むものと思われる。

【参考文献】

- 1)大野、松本、縄田：FEM 準 3 次元浸透流解析を用いた地下水流況予測、平成 6 年度土木学会年次学術講演会
- 2)西條、瀧内、大野：仙石線地下化に伴う陸前原ノ町付近の地下水対策、第 16 回地盤工学フォーラム東北 96 研究討論会、1996.11
- 3)渡邊、高浜、阿部：仙石線地下化工事地下水対策による効果について、平成 11 年度土木学会年次学術講演会

表一 予測水位と実測水位の比較(通水層による対策)

観測地点			効果量		
番号	位置	離れ(m)	予測値(%)	実測値(%)	差分(%)
20	上流	96	107.2	119.5	12.3
23	上流	56	103.1	118.9	15.8
24	下流	34	98.4	92.0	-6.4
28	下流	74	93.6	99.1	5.5
31	下流	428	99.0	88.5	-10.5
38	下流	26	100.8	90.8	-10.0
39	下流	204	98.2	95.3	-2.9
42	下流	70	92.9	89.7	-3.2
43	下流	140	95.8	93.0	-2.8

表二 予測水位と実測水位の比較(導水管による対策)

観測地点			効果量		
番号	位置	離れ(m)	予測値(%)	実測値(%)	差分(%)
29	上流	194	86.5	99.2	12.8
40	上流	44	80.5	104.4	23.8
41	下流	26	81.9	107.8	25.8
44	下流	230	100.0	107.2	7.2
45	下流	278	96.4	96.8	0.4
46	下流	370	99.0	95.4	-3.6