

地下水位の変動記録とその解釈 (SKP の例)

高橋 賢之助

三宅 紀治

天利 実

§ 1. はじめに

根切り工事などの地下工事における地下水対策工の巧拙は、工事そのものの安全性や、経済性を大きく左右するばかりでなく、周辺環境に対しても重大な影響を及ぼす。そして、地下水対策工の巧拙は地下工事施工計画の検討に必要な水理定数の把握方法、特に自然^{注1)}状態の下での地下水位^{注2)}変動を補正するか否かで決まる場合も少なくない。

地下水位は自然状態の下でも常に変動している。したがって、水理定数の把握を始め地下水対策工の検討、さらに施工管理のために行なわれる地下水位の測定結果の判断など、すべての場合にこの自然状態の下での水位変動を加味して行われなければならないことは説明を要しないところである。

しかし、われわれが入手できる自然状態の下での水位変動についての情報は、実測による水位測定値だけであり、その変動が何に起因するものか、またその大きさがどれ位であるかについては、正しく測定された水位測定値を詳細に検討し、それを解釈する以外によい方法がないようである。

このようなことから筆者らは、揚水試験などの地下水調査あるいは施工管理での水位測定に際して、必ず自然状態の下での水位変動測定を行ない、その解釈に最大の努力を払ってきた。

しかし、自然状態の下での水位変動には天然現象によるもの、人為的なもの、あるいは幾つかの要因が重なったものなど種々雑多があり、しかもその変動原因の

いかんにかかわらず、水位は上昇と下降とを繰り返して、どのようにして解釈するかの手掛りさえ見い出せないものすらある。したがって、この水位変動記録の解釈が、地下水調査法確立のための研究^{注3)}における最大の課題であると認識している。

本論は、このような認識から施工管理のために測定した地下水位の変動について、地質・気象・地下工事との関連で若干の考察を加えたものである。

§ 2. 実施場所の概要

SKP 建設所は図-1に示すように、西側地上には東海道新幹線を始めとする国鉄各線、地中には総武線シールドトンネル(図-2参照)があり、さらに新幹線とシールドトンネルの間には都心と羽田空港とを結ぶ高架の



図-1 現場案内図

注1) 本論では自然と天然とを区別して用いる。自然とはその現場で何ら影響を与えない場合、天然とは人為的影響が全くない場合とする。

注2) 不圧地下水の場合に不圧水位、被圧地下水の場合に被圧水頭と呼んで区別すれば明確になるが、共通する問題を取扱うために煩雑を避け、地下水位あるいは水位で代表させる。

注3) 地下工事現場での地下水による諸災害、例えばボーリング・流砂・山止め崩壊などを完全に防止するためには、その対策工が優れたものでなければならないし、それを優れたものにするには、その基になる地下水調査の結果が満足な精度で得られなければならない。したがって、地下水調査法の確立が現在の研究課題である。

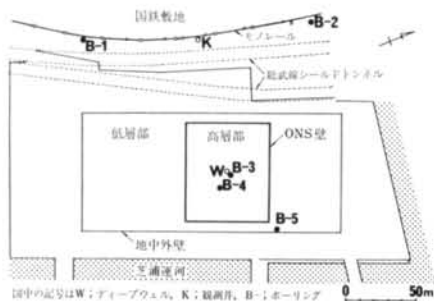


図-2 敷地平面図

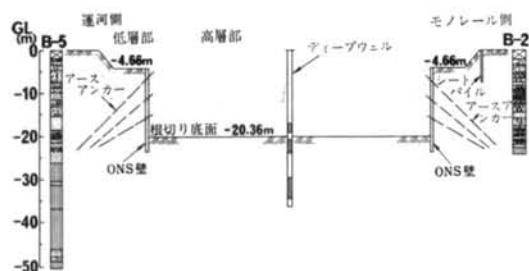


図-3 根切り深さと地質などを示す概念図

東京モノレールがある。また、北側運河内と東側運河を挟んで首都高速道路、東側高速道路のさらに東には日の出栈橋や竹芝栈橋があって、陸海空への交通機関が錯そうしている地域の中（東京都港区芝浦1丁目1番地）に位置する。

敷地平面を図-2に示す。敷地面積は34,525㎡、建築面積は14,741㎡、設計基準GLはTP+2.500mである。また、図中に示したW, K, Bの記号はディープウェル、観測井、ボーリングを指している。

2.1 地下工事計画

地質状況については後に述べるが、敷地内で着工数年前に行なった地質調査結果では約20m（GLを省略、以後同様）までが比較的軟弱であったこと、高層部周囲の低層部では根切り深さが4.66mで、約21mまで根入される径1～1.2mのペント杭で支持されるが、高層部では20.36mまで根切りされて三浦群層（上総層群ともいう）に属するとみられる固結粘性土層（いわゆる土丹層）に直接支持されること、またモノレールは約11.3mまで根入された径2mのアースドリル杭で支持されており、低層部の根切りから約50m、高層部からは約60mしか離れていないこと、総武線シルドは29.4～37mの深さにあり、高層部からの最も近い部分における水平距離が約18mであること、東側運河から低層部外壁面までは18.8mしか離れていないことなどから、地下の施工法についてはあらゆる角度から検討された。最終的には図-3に示

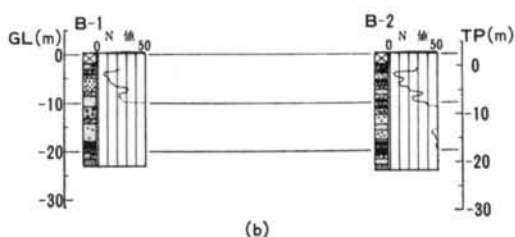
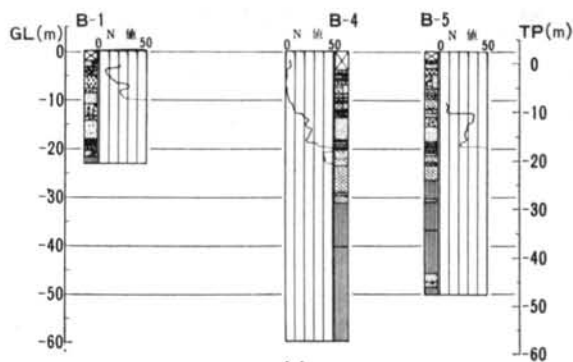


図-4 地質柱状図

すように、モノレールに細心の注意が払われた計画になっている。

すなわち、低層部全体の根切りにはいわゆるアイランド工法を採用するが、特にモノレール側には長さ8mの鋼矢板（FSP-II型）を打設し、約3.8m以浅にある不圧地下水の水位降下が少なくなるようにした。また、高層部根切り（約68m×約59mで東西に長い）の山止めにはソイルセメント柱（径61cm）に鋼管（径50cm）を挿入するいわゆるONS工法を採用し、約23.6mまで根入させて20m以浅にある地下水の根切り部への流入を防止するようにした。

また、高層部でのONS壁と土丹層とに囲まれた地下水については、当初は根切りの施工性だけを考え、釜場代りのディープウェルを設置することになっていたが、土丹層の中にも水圧の高い砂層を挟むことがあり、後述する再調査（電気検層）を行なって削孔径60cm、削孔深さ37m、井戸管径が45cmで3箇所（17～19m, 21～24m, 30～35m）にスクリーンを設けたディープウェル（パークッション工法による）1本を中央に設置することにした。

2.2 地質状況

図-4には、図-2に示したボーリング5地点（実際

高層部およびその付近			モノレール付近		
設計GLからの深さ (m)	地層名	土質	設計GLからの深さ (m)	地層名	土質
0	—	埋土 (瓦れき混入)	0	—	埋土 (瓦れき混入)
2~4	沖積層 (有楽町層)	粘性土・砂質土	2	沖積層 (有楽町層)	粘性土・砂質土
12	洪積層 (東京層)	砂質土(部分的に礫混入)	3.5~4	洪積層 (東京層)	粘性土
			6.5~8.5		砂質土
			9.5~10.5		砂礫 (層厚約3m)
			12.5~13		砂質土
20~21	三浦層群	砂質土・硬質粘性土	20~21	三浦層群	砂質土・硬質粘性土

表-1 地質概要

には19地点で実施、本論での説明に不必要な地点は省略)のうち、B-3地点を除く4地点の地質柱状図を2つの断面で示したが、約20m以浅の地質状況が現場内とモノレール側とは異なっている(表-1参照)。

2.2.1 現場内の地質

図-4(a)に示したB-4, B-5によれば、2~4mまでは瓦礫を混入する埋土、約12mまでは有楽町層(沖積層)と思えるN値10以下の粘性土と砂質土層、20~21mまでは東京層(洪積層)と思えるN値20~35の砂質土層(部分的に礫混入)であり、それ以深は三浦層群のものと思える固結粘性土と砂質土との互層になっていて、N値はおおむね50以上である。

2.2.2 モノレール側の地質

図-4(b)に示したB-1, B-2によれば、約2mまでは瓦礫を混入する埋土、3.5~4mまでは有楽町層と思える粘性土と砂質土層、6.5~8.5mまではN値10~30の粘性土層、20~21mまではN値20~50以上の砂質土層になっているが、その間の9.5~13mには厚さ3m程度の砂礫層、また18m付近には薄い粘性土層を挟む。20~21m以深は現場内の地質とほぼ同様であろう。

上記3.5~4mから6.5~8.5mまでにある粘性土層はN値が比較的大きく、東京層に属するものと思えるが、この層は現場内には存在しない。したがって、東京層の上端はモノレール側で高く、しかも厚くなっているようである。

2.3 土丹層での電気検層

着工前に行なった地質調査結果から、約20m以深の土層はほぼ粘性土と砂質土との互層であろうと想像していた。しかし、どの程度の砂質土層を挟むものかについては全く不明であり、B-3(径65mm)において50mまでの電気検層(比抵抗測定)を実施した。

電気検層で得られる比抵抗値の違いは、相対的に地質の違いを示し、地下水が淡水であれば、一般に砂質土の方が大きな値を示す。また、電気検層による測定値は、2つの電極間の側方における土層についてのものと考えられる。

したがって、土層厚さに比較して電極間隔が大きい場合は、個々の土層を的確には検知できないことになる。これに対して、電極間隔を非常に小さくできれば的確に検知できるものとする。

今回採用した電極間隔は2.5, 5, 25, 50cmの4通りであり、測定結果を図-5に示す。またこの図には、地質と対比できるようにB-3, B-4の柱状図を併示しておいた。なお、ノルマル検層とは電極間隔が25cmと50cmの場合、マイクロノルマル検層(マイクロ検層と呼ぶことにする)とは2.5cmと5cmの場合を指している。

まず、ノルマル検層によると15m付近および21m付近で値が大きく、砂層あるいは砂礫層であろうと推定される。しかし、21m以深では値が小さく、しかも変化に乏

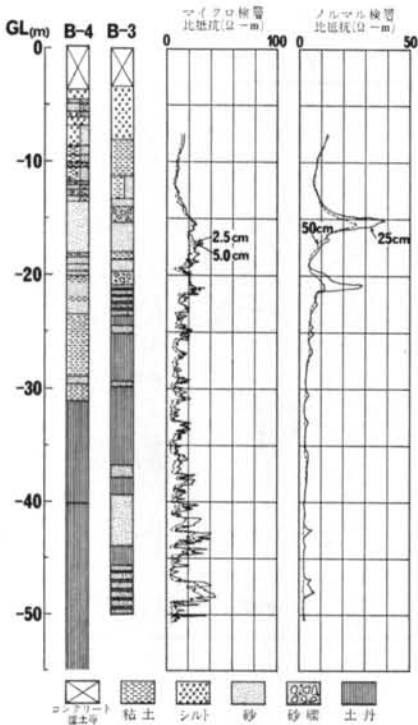


図-5 B-3地点での電気検層結果

しいことから粘性土層のように見られる。これに対してマイクロ検層の場合には、21m以深においても変化が激しく、非常に薄い粘性土と砂質土との互層になっていることが推定できる。

2.4 観測井の設置

図-2には1地点しか示していないが、実際にはモノレール沿いの4地点に1地点当たり2~3本、計10本の観測井が設置してある。このように1地点当たり2~3本もの観測井を設置したのは、約3.8mまでの不圧地下水、約9.5~13mにある砂礫層中の地下水、20m付近砂質土層中の地下水を別々に測定するためである。

観測井の概略構造を図-6に示す。すなわち、径150mmのロータリー式ボーリングを用いて所定の深さ(対象帯水層の深さにより異なる)まで削孔し、スクリーンを設けた径10cmの井戸管(ガス管)を挿入してスクリーンの周囲にはフィルター(鹿島産珪砂3号A)を、またその上50cm間には細砂を充填し、さらに地表まではセメントミルクを注入している。

また、スクリーン部分には開孔率が4%になるように径10mmの丸穴を多数開け、さらに20メッシュのステンレス製金網を1重に巻いてあり、スクリーン部分の下端には土砂の進入を防止するためにキャップが設けてある。

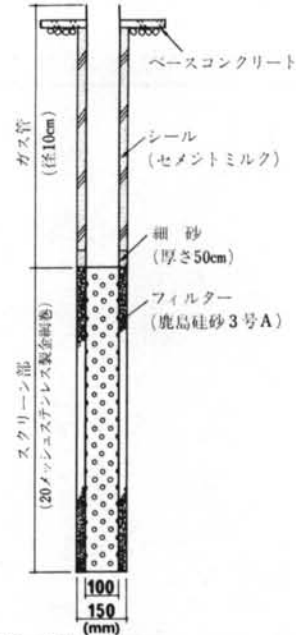


図-6 観測井の概略構造

なお、循環泥水には帯水層の透水性を損わないために植物性多糖類を主成分とする泥水を用いている。

§ 3. 地下工事の工程と土丹層の観察

3.1 地下工事の実際工程

地下水位に影響を与え得る地下の工事は、低層部では基礎杭の打設、モノレール側鋼矢板の打設と引抜き、それに根切りであり、高層部では山止め壁の設置、根切り、支保工(アースアンカー)、それにディープウェルの設置と揚水である。

これら地下工事の開始・終了年月日を表-2に示す。なお、現場における全休日は毎週日曜日とお盆休み(8月13~17日)、それに年末年始(12月30日~1月3日)である。

3.2 土丹層と山止め壁の観察結果

高層部での根切り終了後、三浦層群のものと思える土丹層と山止め壁の観察を行なった。その結果、それまではほぼ水平であろうと考えていた土丹層が実は水平ではなく、東京湾側(芝浦運河側)に約1割の勾配で傾斜していた。したがって、ほぼ水平に堆積した土丹と砂との互層が地殻変動によって傾斜し、その後ほぼ水平に侵食されたものとする。また、この傾斜と侵食のために根切り底には砂層が縞状に露出していて、ディープウェル

層別	地下水位に影響を与えるかも知れない 地下の工事		工 事 実 施 日		特 記	
			開 始	終 了		
低 層 部	基礎杭工	ベノト杭	打 設	1981. 8. 5	1981.10. 7	径1~1.2m, 282本
			打 設	1981. 8.18	1981. 9. 5	FSP-II型, ℓ=8m
	不圧地下水位 降下防止工	シートパイル	引抜き	1982. 1.15	1982. 1.20	
			91.7%	1981. 9.18	1981.11.14	4.66m
根 切 り 工	掘削・土砂搬出	8.3%	1981.12.14	1981.12.23	4.66m	
高 層 部	山止め壁工	ONS 柱列壁	設 置	1981. 9.21	1981.10.26	径61cm, 470本
	根 切 り 工	掘削・土砂搬出	1 次	1981. 8.25	1981. 9.19	4.51m
			2 次	1981.10.26	1981.11.17	6.26m
			3 次	1981.11.20	1981.12.12	11.21m
			4 次	1981.12.10	1982. 1. 9	15.90m
			5 次	1982. 1.12	1982. 2. 9	20.36m
	山止め支保工	アースアンカー	1 段	1981.10.26	1981.12. 4	98本
			2 段	1981.11.30	1981.12.25	166本
			3 段	1981.12.23	1982. 2. 1	166本
	地下水排水工	ディーブウェル	設 置	1981. 8.24	1981. 9. 1	
予備揚水			1981. 9. 2	1981. 9. 8		
本揚水			1981.11.16	1982.11. 2	数回の揚水停止あり	

表一 2 地下工事の実際工程

で揚水していたにもかかわらず、若干の地下水が浸出しており、それ以外には山止め壁から漏水もなかった。

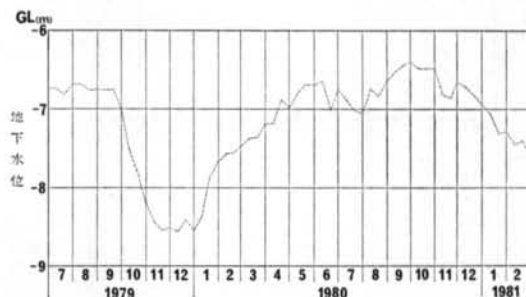
§ 4. 地下水位の変動とその解釈

地下水位の測定は、全部の観測井について昭和54年7月1日から57年11月8日頃まで、そのほとんどを精度1mmの水位測定器で行なっているが、K地点での約9.5~13mにある砂礫層を対象にした観測井については、56年2月21日以降自記水位計（W711型、フロート径32mm、縮率1/10、送り速度10mm/hr、中浅測器製）に切り換えている。なお、本論では自記水位計を設置したK地点での水位変動についてのみ述べることにする。

4.1 56年2月以前の水位変動

図一7は54年7月1日から56年2月末日までの、ほぼ10日に1回の割合で測定された水位の変動記録である。

これによると、測定開始から同年9月中旬まではほぼ6.75mを保っていたが、その後は急激に降下して11月中旬から翌年1月初旬まではほぼ8.5mを保ち、中旬からは逆に上昇して10月初めにほぼ6.4mに達し、それ以降はまた降下して56年2月末日にほぼ7.5mになっている。



図一7 56年2月末日以前の実測水位

このような激しい水位変動が何に起因するものか、そのすべてについて解説することは到底できないが、54年9月下旬からの急激な降下については当時この観測井から約700mの地点で某社が根切り工事を行なっており、それ以外に近くでの根切り工事がなかったことから、その影響であることにほぼ間違いはない。

4.2 56年2月21日以降の水位変動

自記水位計を設置してからは、その記録紙から3時間ごとの水位を読み取っており、それを1日1点（毎日9時）の水位変動記録図2枚（1年分が1枚）と1日8点（0, 3, 6時と3時間ごと）の水位変動記録図22枚（1か月分が1枚）に整理した。

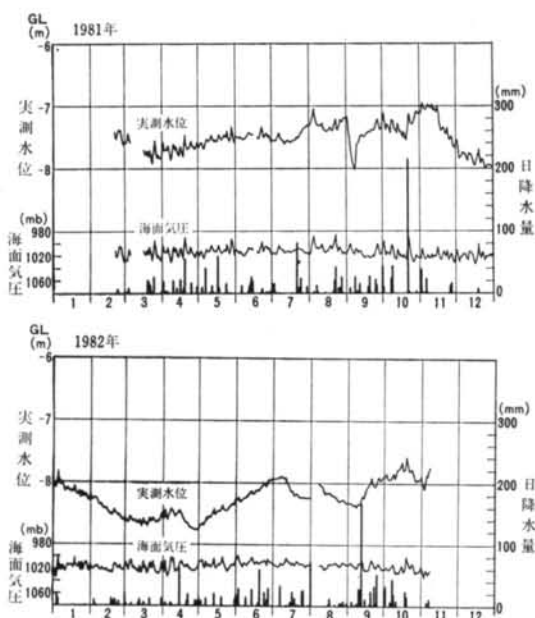


図-8 56年2月21日以降の実測水位(毎日9時)

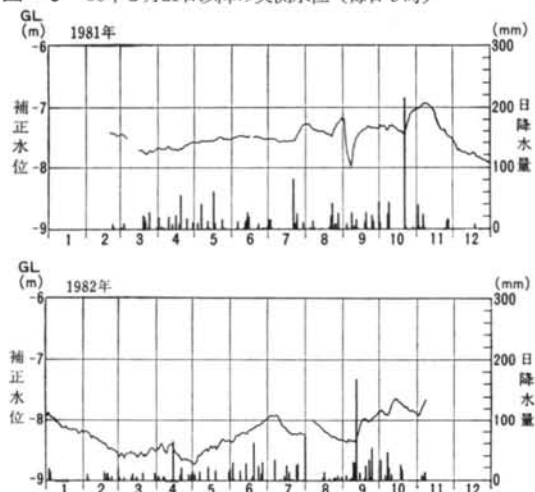


図-9 56年2月21日以降の補正水位(毎日9時)

本論では、1日1点の水位変動と1日8点の水位変動のうちの56年4月分および10月分について若干の考察を加える。

4.2.1 56年2月21日以降1日1点の水位変動

図-8は、毎日9時における実測水位と海面気圧、それに日降水量を示したものであり、図-9は後に述べる気圧効率を用いて1気圧における水位に換算(補正という)し示したものである。なお、海面気圧と日降水量については気象庁(東京都千代田区大手町)におけるデータを用いた。

まず、図-8から56年8月4日までの水位について見

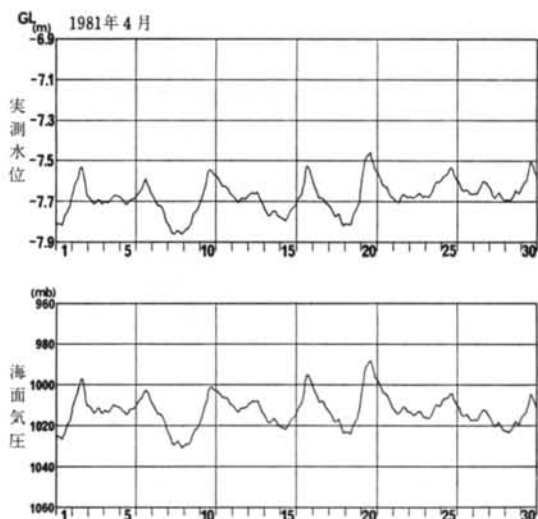


図-10 56年4月の3時間ごと実測水位と海面気圧

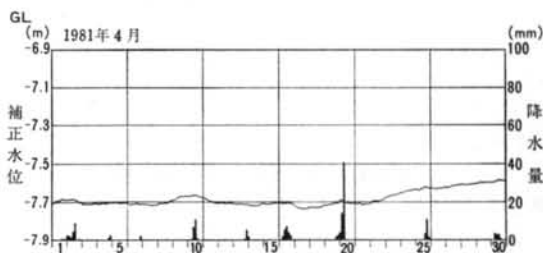


図-11 56年4月の3時間ごと補正水位と降水量

ると、変動の大部分が気圧変化に伴うものであること、また降水の影響も受けていそうなが分かる。それ以降については、表-2に示したように地下工事中であり、ディープウェルでの予備揚水、また本揚水中には水中ポンプの故障などもあって特に激しくなっている。

次に、図-9の補正水位を見ると、本揚水による水位降下深さの最大値は約8.75mであり、約700m離れた某社の根切り工事による降下深さに比較して約25cmしか大きくない。

しかし、ONS壁が止水壁であり、先に述べたように山止め壁からの漏水がなかったことからすると、この水位降下は少々大きいように見られるが、約20m以深の土丹層が傾斜していたこと、モノレール側6.5~8.5m以深の地質がほとんど砂質土であったことから、やむを得ない降下であったといえる。

4.2.2 56年4月の水位変動

図-10は、4月における1日8点の実測水位と海面気圧(気象庁データ)とを示したものであり、変動のほとんどが気圧変化によるものであることが理解される。筆者らは先に(1978年)被圧地下水の気圧効率約96%であることを発見し公¹²⁾にしたが、この観測井について

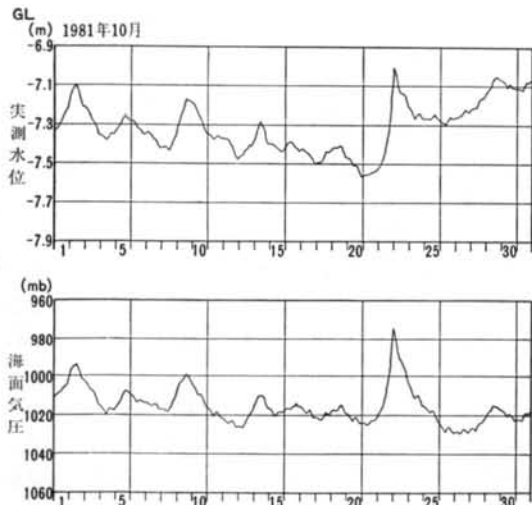


図-12 56年10月の3時間ごと実測水位と海面気圧

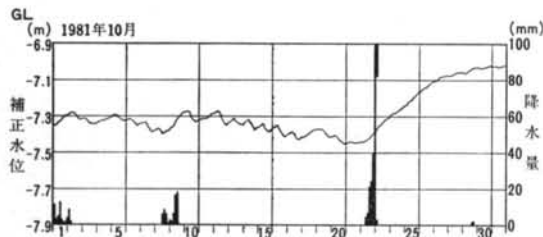


図-13 56年10月の3時間ごと補正水位と降水量
は約97%が得られた。

図-11は、図-10の実測水位を1気圧における水位に換算して示したものであり、それに3時間降水量（気象庁データ）も併示した。

これによると、図-10の実測水位とは比較にならないほどスムーズな曲線になっていて、気圧効率が97%でほぼ間違いのないものといえる。したがって、自記水位計による水位についてはすべてこの値を用いて、1気圧における水位に換算することにした。

4.2.3 56年10月の水位変動

図-12は、10月の実測水位と海面気圧とを示したものであり、また図-13は気圧補正後の水位と3時間降水量とを示したものである。

まず、図-12において22日までは気圧変化に伴う変動だけのように見える。それ以降については気圧の影響が以前に比較して小さくなっているように見られるし、また水位が大きく上昇していて何か別の原因も加わっているようである。しかし、この図だけではその原因を明らかにすることができない。

これに対して、補正後の図-13では22日以前においても比較的規則正しい日変動が見られ、またそれ以降の上

昇は22、23日の降水（台風24号、約220mm）が影響（流入）していることも分かる。

そこで、22日までの日変動がなぜ生じたのか、また台風24号の降水がなぜ流入したかについての疑問を生ずる。降水の流入については後述するものとし、ここでは日変動について考察を加えてみる。

まず、21日までを詳細に観察すると、1日の間に上昇だけがあった日と上昇・下降が見られる日のあることが分かる。そこで上昇だけの日（1、4、9、11、18日）について調べてみると、4日、11日、18日については日曜日であって現場が全休日であること、また1日、9日については降水量の記録からそれが流入した（台風24号による上昇からみて）ものと考えられる。残りの上昇と下降の見られる日については、当時ONS壁の設置（表-2参照）が行なわれており、その影響であると判断される。

4.2.4 降水の流入についての考察

一般に、被圧帯水層を対象にして観測井を設置する場合、上位帯水層との間で行なう止水が完全であれば降水や散水、あるいは上位地下水の増加が直ちにその被圧帯水層の水位上昇につながることはない。

しかし、図-13から分かるように、22日以降の水位上昇が降水の流入と断言できるから、この観測井でのセメントミルクによる止水が不完全であったと判断せざるを得ないことになる。

先に述べたように、本観測井が対象にした帯水層は約9.5~13mにある砂礫層で、その上位3.5~4mから6.5~8.5mまでの間には厚さ2m程の粘性土層がある。また設置方法は、削孔を径150mmのボーリングで行ない、循環泥水には植物性多糖類を主成分とした泥水を使用し、径10cmの井戸管を挿入してスクリーンの周囲には珪砂、その上50cmには細砂を充填し、細砂以浅は地表までセメントミルクを注入している。

筆者らがこれまで設置してきた多くの観測井や試験井（ディープウェル）とこの観測井との相違点は、循環泥水に植物性多糖類を主成分とした泥水を使用したことだけである。したがって、この循環泥水に問題があったと判断しなければならない。

植物性多糖類を主成分とした泥水は、混ぜ練り約1週間後には完全に粘性を失う性質がある。したがって、ペントナイト泥水や粘土水に比較して帯水層の透水性を損わない点で優れた材料である。

しかし、現実にはこのような現象があり、さらに突っ込んで考察してみるとこの優れた点が逆に欠点になっていたのである。すなわち、井戸管挿入時には孔内が植物性

多糖類を主成分とした粘液で満たされており、その中に
珪砂・細砂の充填、さらにセメントミルクの注入が行な
われる。このセメントミルクが粘液と完全に入れ替われ
ば、止水は完全になる。しかし、孔壁と井戸管周囲には
粘液の膜が残る筈であり、セメントミルクが硬化した数
日後に粘性を失うことになる。したがって、孔壁と硬化
セメントとの間、また井戸管と硬化セメントとの間には
間隙ができ、止水が不完全になるのである。

§ 5. おわりに

以上、SKP建設所における地下水位の測定結果につ
いて、その変動記録の解釈を中心に若干の考察を加えた
が、それによって得られた知見をまとめてみると次のよ
うになる。

(1)地質について——東京層上端深さは、敷地内で約12
m、モノレール側では3.5~4mである。また、土丹層は

薄い砂との互層になっており、東京湾側に約1割の勾配
で傾斜した後侵食され、現在の深さは約20mである。

(2)気圧効率について——この水位測定によって得た気
圧効率は約97%で、先に求めた値96%¹⁾²⁾とほぼ等し
い。

(3)変動補正の重要性について——揚水試験などの地下
水調査、あるいは施工管理が目的の地下水位測定に際し
ては自然状態の下での変動測定が必要で、特に水理定数
の把握にはその補正が重要である。また、施工管理が目
的の測定であっても、的確な判断を下すために補正を必
要とすることがある。

(4)循環泥水について——被圧帯水層を対象にした観測
井や試験井の設置に植物性多糖類を主成分とした循環泥
水を用いると、上位帯水層との間で行なう止水が不完全
になることもある。

この調査研究を進めるに当たっては、松井建設所長を
始め、吉田副所長、天野工務長など多くの方々の協力を
得た。厚くお礼を申し上げる。

<参考文献>

- 1) 高橋賢之助、三宅紀治、藤沢勝、天利実：“東京千代田区内幸町および霞ヶ関付近建設3現場の被圧地下水処理と若干の考
察”清水建設研究所報第31号（1979年10月）pp.43~53
- 2) 高橋賢之助：“現場経験からの根切りのための地下水調査法”山海堂（1981年）pp.177~205