

53. 東京大学構内深井戸の水位変化

(1968年末まで)

地震研究所 山口林造

(昭和44年5月27日発表—昭和44年9月30日受理)

要旨

東京大学構内にある深井戸の、その後の水位変化について報告する。1968年末における水位は、東京湾中等潮位以下 33.5 m までも達した。1932年の観測開始当初からすると実に 36.6 m も低下したことになる。このような驚くべき程の地下水位の低下は、人为的な地下水汲み上げによる結果と考えられ、その影響はかなり広範囲にわたっているものと思われる。

最近 4 年間における深井戸の水位の低下速度は、それ以前に比較すれば半減し、次第に小さくなってきた。しかし、まだ 1 年につき約 1 m の低下を示している。

東京の江東地区にある 100 m 以下の浅井戸、ならびに近辺の井戸の水位変化と比較し、その差異と類似性を示す。それはまた地域的な地下水利用の特徴を表わしている。

地下水位の低下が重視されるのは、われわれの日常生活に密接な関係を持つからであり、特に地盤沈下といつた災害問題と関連してくるからである。東京の軟弱地盤地域の沈下の様子を長年にわたって見ると、深井戸の水位変化とある相関を持つていることが分る。この相関を最近の 10 年間にについて見ると、かなり簡単な関係式で表現することが出来た。そして間接的にはあるが深井戸の水位変化から見ても地盤沈下問題については、依然として楽観を許さないし、その対策がもつと積極的に進められなければならないことを指摘した。

1. 序言

東京大学構内にある深井戸の水位観測は、1932 年に松沢武雄によつて始められて以来、今年で実に 37 年目を数える。このような長期にわたる井戸の水位観測は、他に余り例がないので大変貴重な資料になつてゐる。筆者がこの観測を引継いでからでも既に 10 年になろうとしており、機会を見てはたびたびその水位変化について報告を重ねてきた。

われわれの住んでいる地域の地下水位が、どのように変化しているかを知ることは、事実として大切であるばかりでなく、水はわれわれの生活にとつては最も重要で身近な問題であるからである。現に地下水位の目立つた低下によつて深刻な水不足の問題がたびたび生じている。

特に地下水位の顕著な低下が江東地区のように低地の軟弱地盤に起これば、いわゆる地盤沈下を起こし、高潮そして洪水の危険にさらされ、さらには地震動災害にも密接な関係をもち、重要な災害問題となつてくることは、今さら申すまでもないことである。

まして最近のように無計画的に東京周辺に都市化、工業化が促進されているような現状では、こういつた公害問題は益々内陸部まで広がつてきている。

そのようなわけで深井戸の水位変化から見た地盤沈下問題についても、たびたび楽観を

許さないことを警告し、また指摘してきたような経過を辿つて現在に至つてきたと思つてゐる。

さて、この誌上で、これに關係した報告を書いてからは、既に5年を経過したので、その後における変化を一応纏めて記載することにした。

今回の報告では、深井戸の水位の低下速度が最も大きかつた頃に比較すれば半減してしまつたことが顯著なことである。

また浅井戸の水位変化との比較、ならびに地盤沈下の問題についても検討を加え、深井戸の水位と江東地区の地盤沈下との間には、間接的にではあるが、ある相関を持つていると考えられ、その相関を簡単な関係式で表現することを試みた。

関係ある資料としては東京都土木技術研究所から毎年出されている報告¹⁾を随所に使用させて頂いた。

2. 深井戸の水位変化

この深井戸の水位変化については、松沢武雄の指導のもとに多くの先輩諸氏^{2)~6)}が、詳しい研究をしていることは、前回の報告⁷⁾で簡単に紹介し、深井戸の由来についても、ふれておいた。

1日の水位の変動は数センチ程度であるが、その僅かの変動のある期間にわたつて調和解析し、いくつかの潮汐常数を求め、それを靈岸島のそれらと比較している。勿論気圧変化による変動、さらに降水による影響などについても検討を加えている。

さらに観測が続くに従つて地下水汲み上げによる人為的効果の影響が次第に有力な因子として考えられるようになつた。最近では、このような人為的な影響の方に注目し、長期間にわたる月平均的な変化を検討することに重点を置いている。

観測を開始した1932年10月から1968年末までの深井戸の水位の月平均値をTable 1に、またその変化を図示したものがFig. 1であり、縦軸には観測開始当初からの低下量とA.P.基準を目盛つた。水位を表わすA.P.基準は東京湾中等潮位よりも1.134m低い基準である。深井戸の水位は鉄管を不動として求めたわけであるが、厳密にいえば36年の間には幾らかの変動はある筈である。しかし、この場所の地盤からして水位変動を問題とする場合には考慮する程ではない量である。

図に見られるような経過を辿つて1968年末における水位は、観測開始当初からすると実に36.6mも低下したことになり、A.P.基準で-32.4mまでにも達したのである。全く驚くべき程低下したものである。

この図を見てすぐ分る顯著な事実は、終戦の年1945年の前後における数年間水位が上昇したことであろう。米軍の空襲により東京の工業地帯が全く廃墟と化し、地下水の利用

- 1) 東京都土木技術研究所「水準測量と地盤沈下、地下水位の観測成果」(毎年発行)。
- 2) 前田 競「一深井に於ける水位の変化」地震 6 (1934), 275.
- 3) 森田 稔「東京帝国大学構内に在る深さ380米の深井の水位の変化に就て」地震 7 (1935), 395.
- 4) 表俊一郎「東京帝国大学構内に在る深井の水位変化」地震 8 (1936), 531.
- 5) 佐藤泰夫「東京大学構内深井戸の水位」科学 26 (1956), 633.
- 6) 松沢武雄「佐藤の寄書に対する補足」科学 26 (1956), 633.
- 7) 山口林造「東京大学構内深井戸の水位変化」地震研究所彙報 42 (1964), 585.

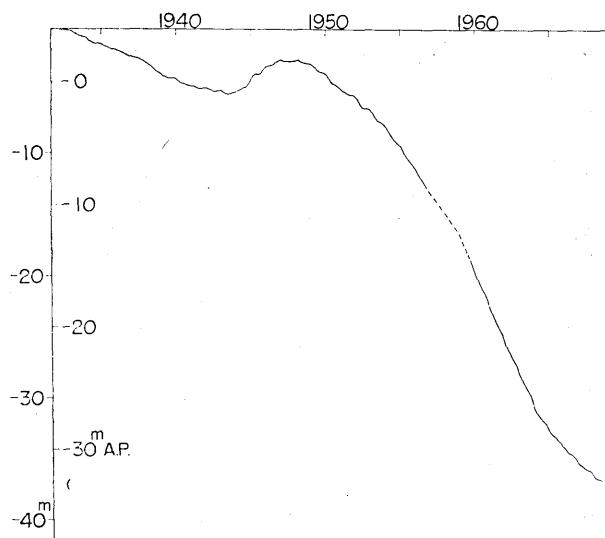


Fig. 1. Change of the water level of a deep well in the University of Tokyo. A.P. level is 1.134 meter under T.P. (nearly equal to the mean sea level of Tokyo Bay)

が全く停止と同然の状態になつたことを明らかに示している。今後この上昇した水位にまで回復するためには、現在までの経過から推察して余程の一大事件が起らない限り、まず不可能に近い。

1950 年以降における水位の減少は、終戦前にも増して活潑である。1957 年 6 月から 1960 年 4 月まで、図中点線で示した部分は、いろいろな事情によつて、ほとんど欠測と同様な期間が続いた。そして 1960 年以降の高度経済成長に伴つて起る急激な工業化ならびに都市化は、益々地下水の利用度を高め、水位の低下速度は最も激しい時期を迎えることになった。

1963 年末までの、その間の事情も前報告において既に説明した。1964 年以降の結果については、既に地震研究所談話会あるいは地震学会などに於て数回にわたり報告している。

それら各年における水位の月変化の様子を前回の報告に加えて Fig. 2 に示す。1964 年における変化は、1962 年あるいは

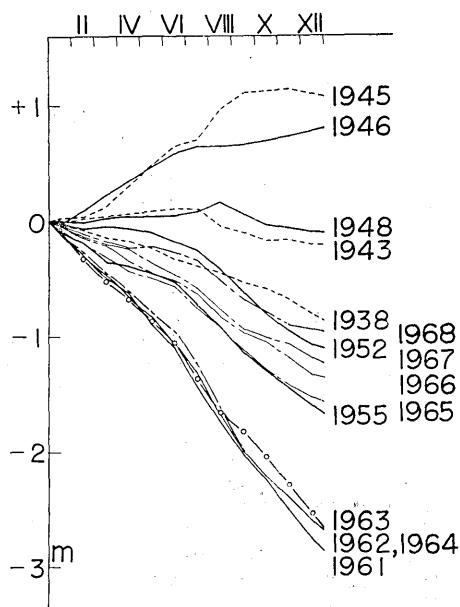


Fig. 2. Change of the water level of the deep well in each year.

Table 1. Monthly mean values of the water level of the deep well in the University of Tokyo. (in meter A.P., A.P. level is 1.134 meter under T.P.)

Date	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941
I		4.12	3.66	3.08	2.66	2.18	1.80	0.92	0.29	-0.17
II		4.12	3.63	3.05	2.61	2.14	1.75	0.84	0.28	-0.24
III		4.09	3.62	3.04	2.61	2.12	1.70	0.80	0.28	-0.29
IV		4.07	3.59	3.04	2.60	2.06	1.66	0.75	0.30	-0.31
V		4.06	3.57	3.02	2.56	2.03	1.59	0.67	0.28	-0.34
VI		4.06	3.54	2.97	2.52	1.99	1.50	0.62	0.23	-0.33
VII		4.04	3.46	2.91	2.50	1.98	1.44	0.56	0.14	-0.32
VIII		3.95	3.31	2.85	2.46	1.96	1.38	0.47	0.02	-0.34
IX		3.85	3.24	2.82	2.44	1.93	1.29	0.42	-0.07	-0.40
X	4.18	3.79	3.18	2.80	2.38	1.91	1.24	0.36	-0.13	-0.47
XI	4.17	3.75	3.15	2.76	2.34	1.87	1.15	0.34	-0.15	-0.54
XII	4.13	3.70	3.09	2.71	2.26	1.85	1.02	0.29	-0.16	-0.57
Date	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951
I	-0.57	-0.81	-1.00	-0.45	0.57	1.43	1.64	1.54	0.85	-0.20
II	-0.58	-0.79	-0.96	-0.44	0.68	1.53	1.63	1.49	0.78	-0.24
III	-0.57	-0.77	-0.90	-0.35	0.83	1.48	1.67	1.46	0.74	—
IV	-0.53	-0.74	-0.95	-0.18	0.95	1.66	1.68	1.45	0.76	—
V	-0.49	-0.72	—	0.01	1.06	1.73	1.68	1.42	0.70	—
VI	-0.50	-0.70	—	0.17	1.18	1.77	1.68	1.42	0.68	-0.53
VII	-0.55	-0.70	—	0.23	1.24	1.73	1.71	1.39	0.57	-0.62
VIII	-0.61	-0.85	-0.75	0.49	1.24	1.65	1.80	1.28	0.47	-0.75
IX	-0.62	-0.90	-0.74	0.63	1.26	1.65	1.70	1.17	0.26	-0.81
X	-0.67	-0.97	-0.62	0.65	1.30	1.66	1.61	1.14	0.07	-0.83
XI	-0.74	-0.97	-0.57	0.66	1.33	1.63	1.58	1.03	-0.04	-0.90
XII	-0.80	-1.01	-0.51	0.62	1.38	1.63	1.54	0.91	-0.14	-0.98
Date	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961
I	-1.00	-2.11	-3.20	-4.66	-6.30	-8.17	—	—	—	-16.74
II	-1.06	-2.14	-3.26	-4.76	-6.41	-8.30	—	—	—	-16.93
III	-1.03	-2.14	-3.33	-4.93	-6.55	-8.47	—	—	—	-17.12
IV	-1.05	-2.18	-3.37	-4.96	-6.65	-8.65	—	—	—	-17.26
V	-1.09	-2.23	-3.46	-5.02	-6.75	-8.76	—	—	-14.81	-17.52
VI	-1.17	-2.26	-3.50	-5.10	-6.86	—	—	-12.25	-15.06	-17.73
VII	-1.24	-2.35	-3.60	-5.29	-7.00	—	—	—	-15.36	-18.07
VIII	-1.41	-2.50	-3.79	-5.49	-7.22	—	—	—	-15.63	-18.37
IX	-1.60	-2.65	-3.97	-5.71	-7.48	—	—	—	-15.87	-18.65
X	-1.79	-2.89	-4.14	-5.86	-7.63	—	—	—	-16.05	-18.87
XI	-1.94	-3.03	-4.35	-6.02	-7.82	—	—	—	-16.30	-19.12
XII	-2.05	-3.14	-4.49	-6.16	-8.01	—	—	—	-16.52	-19.37
Date	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968			
I	-19.57	-22.20	-24.83	-27.41	-28.94	-30.32	-31.50			
II	-19.77	-22.45	-25.00	-27.53	-29.05	-30.41	-31.58			
III	-19.93	-22.64	-25.17	-27.66	-29.11	-30.47	-31.65			
IV	-20.13	-22.80	-25.34	-27.79	-29.25	-30.52	-31.71			
V	-20.29	-22.98	-25.51	-27.85	-29.36	-30.64	-31.70			
VI	-20.52	-23.17	-25.68	-27.91	-29.42	-30.74	-31.75			
VII	-20.77	-23.49	-25.96	-28.11	-29.52	-30.86	-31.82			
VIII	-21.14	-23.78	-26.34	-28.28	-29.74	-31.05	-32.00			
IX	-21.45	-23.93	-26.70	-28.45	-29.86	-31.21	-32.15			
X	-21.67	-24.16	-26.94	-28.63	-29.94	-31.28	-32.26			
XI	-21.84	-24.40	-27.13	-28.77	-30.08	-31.34	-32.37			
XII	-22.04	-24.64	-27.29	-28.86	-30.23	-31.45	-32.41			

その前後の年の変化とほとんど同じで最も著しい低下のあつた時期である。この年を最後にして1965年には水位の低下速度は急激に減少して1年につき約1.6mとなり、それ以後次第に減少している様子がよく分る。これらの現象は地下水汲み上げに関する規制の効果、ならびに南千住および南砂町の浄水場など工業用水道の建設、更には東京のいわゆるゼロ・メートル地帯を中心とした江東、墨田、荒川、足立、江戸川、葛飾の6区における大量の地下水汲み上げの全面禁止といった一連の処置からの影響と思われる。

このように水位の低下速度については各年によつてかなりの変化が見られるが、しかし、それぞれの年における月平均の変化の様子を見ると、6月以後における水位の低下速度は、それ以前に比較すると大きくなり明瞭に差別ができる。そのことは夏季に入り地下水の利用度が高くなつた効果を良く示していると言えよう。そのことは過去においても多少の時期的なずれはあるが共通して見られる現象である。

3. 地盤沈下の主な地域

海岸平野に発達した大都市における地盤沈下問題は、前にも報告したごとく決して新し

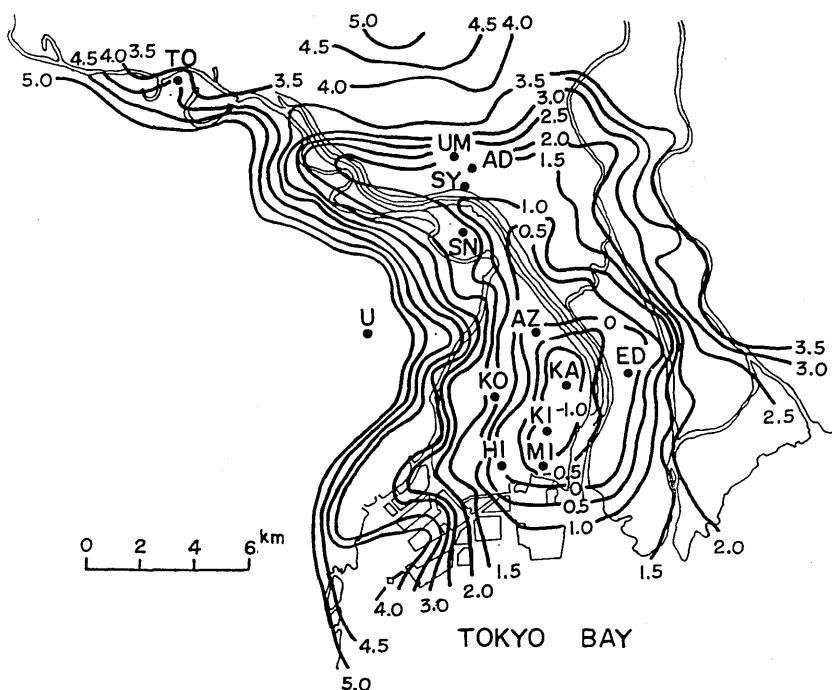


Fig. 3. Distribution of the ground height as of February 1968 for the eastern and northern parts of Tokyo and the locations of the observation points used in this paper.

numerals in the figure: meter in A.P. level

AD: Adati AZ: Azuma ED: Edogawa HI: Hirai KA: Kameido
KI: Kita-Sunamati KO: Kotobashi MI: Minami-Sunamati SN: Senzyu-Nakamati SY: Senzyu-Yatiyo TO: Todabashi UM: Umeda U:
University of Tokyo

(adapted from Tokyo Institute of Civil Engineering, Oct. 1968)

い問題ではない。既に 1923 年における未曾有の大被害をもたらした関東大地震の頃から地震との関連を始め、いろいろな原因説が出ている。しかしながら軟弱地盤地域における沈下問題は、地下水位の観測が次第に長期にわたるにおよび地下水位の変化が最も有力な原因と思われるようになり、現在においてもこの考えを変更する必要はほとんどない。

最近における東京の地盤沈下地域における現状は、東京都土木技術研究所から詳しく述べてある。それによると 1968 年 2 月現在における地盤高の概況は Fig. 3 に示したようなものである。前からもたびたび言わされているように江東ゼロ・メートル地帯を中心と荒川に沿つて、その左右に冲積層のいわゆる河川デルタ地帯の低地が形成されている。そしてその報告によると 0 m A.P. 以下の土地の面積は 26.6 km^2 になり、前年に比較し 2.1 km^2 の増加、1960 年頃の 3 倍にもなっている。また 2 m A.P. 以下の面積は 114.8 km^2 で都区内面積 570 km^2 の 5 分の 1 を越えてきた。即ち、それらの土地は何の対策もしてなければ、満潮面になると水没してしまうような低地になつてゐる。全く東京における地盤沈下は憂慮すべき状態にあると言わねばならない。

さらに困つたことは、その沈下の変動が依然として続いているということである。1967

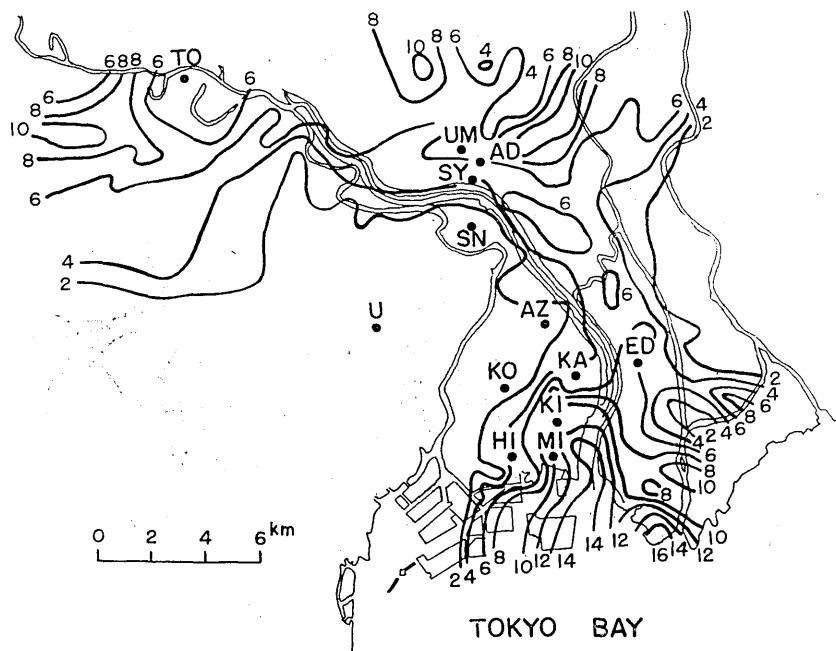


Fig. 4. Distribution of the land subsidence in 1967 for the eastern and northern parts of Tokyo and the locations of the observation points used in this paper.

numerals in the figure: centimeter

AD: Adati AZ: Azuma ED: Edogawa HI: Hirai KA: Kameido
KI: Kita-Sunamati KO: Kotobasi MI: Minami-Sunamati SN: Senzyu-Nakamati SY: Senzyu-Yatiyo TO: Todabashi UM: Umeda U: University of Tokyo

(adapted from Tokyo Institute of Civil Engineering, Oct. 1968)

年における1年間の変動量の分布ならびに、その等変動曲線を示したのがFig. 4である。それによると10cm以上も沈下した面積は 17.6 km^2 、5cm以上沈下している面積は、 120.5 km^2 もある。これらの変動量が沖積粘土層の厚さと関係していることは、今迄にも指摘されている。そこで図示された変動量の分布と、最近発行された地盤地質図⁸⁾の中で沖積粘土層の厚さが30m以上の分布とを比較して見ると、かなりの相関があるようと思える。

ましてや地盤沈下地域の広さが 289 km^2 と、その前年に比較して 13 km^2 も増加し、都区内面積の半分を越えてしまった。さらに未調査の区域を含めると、もっと広い地域にわたっているというに至つては、いろいろと災害問題が出て来ない方が不思議なくらいである。

現に今迄問題になつた江東地区以外の新しい地区においても、地下埋設物の破損、出水、建物の不等沈下、そして亀裂といった現象は新聞紙上にも何度か報道されている。

それでは地盤沈下の長期にわたる変動はどうであつたかを見る必要があるであろう。江東、墨田、足立の各区における主なる水準点の経年沈下量を示したのがFig. 5である。深井戸の水位変化との比較に便利なように、1932年頃を基準にして示した。前にも述べたごとく深井戸の水位が上昇している時期には、地盤沈下もほとんど止み、あるいは少し上昇している傾向が見られる。勿論各地区によつて変化には、いくらかの違いが見られる。

しかし、それらの変化の傾向から推察して、たとえ深井戸の位置が、それらの地域から離れた本郷台地の斜面にあるとは言え、その水位変化とそれら軟弱地盤地域の沈下傾向との間には、ある相関があると考えられる。それに関しては後のところで説明することにする。

さて沈下の傾向が激しくなり始めた1953年頃からは、地盤沈下に対しても関心が高まり、江東地区でも水位の観測が始まられるようになつてきた。そして軟弱地盤地域における

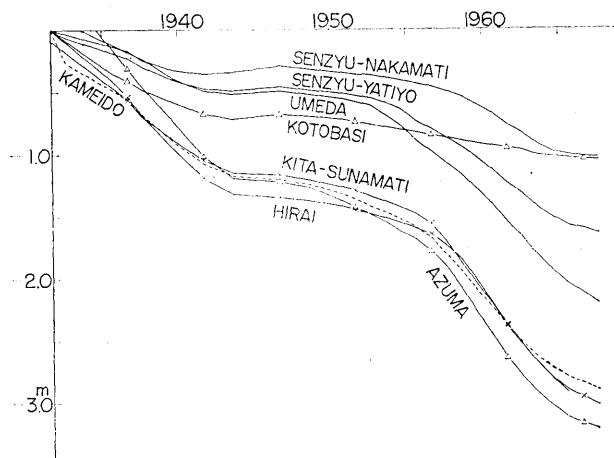


Fig. 5. Variations of the ground heights for regions in the eastern part of Tokyo.

8) 東京都土木技術研究所「東京都地盤地質図(23区内)」。

る浅井戸の水位変化と、地盤沈下が問題にならない場所にある深井戸の水位変化との間に、どのような関係が見られるかを次に示そうと思う。

4. 軟弱地盤地域の地下水位との比較

1953年以降に軟弱地盤地域の主なところとして江東地区の北砂町、南砂町、亀戸町、墨田区の吾嬬町、足立区の千住弥生町などで水位観測が次々と始められた。それらの水位変化に関する最近までの報告と深井戸のそれとを比較したのがFig. 6である。

図にはそれぞれの観測所の当初からの低下量を示したわけであるが、一見して分るように1961年頃までは深井戸の水位変化を中心に、それ程大きな差は見えない。しかしながら、1962年から1964年までの変化については、深井戸および足立の水位変化は、それ以前に較べてそれ程変わらないのに、江東地区の浅井戸の水位変化は明らかに前者とは異り、低下量は可成り減少していることが分る。

さらに顕著なことは、1965年以降においては水位が上昇に転じたことである。それらの影響は、やはり深井戸の水位変化にも現われており、低下量は次第に減少する方向に変化していることが容易に認められる。

これらの異なる変化は、明らかに1961年当初における工業用水地域の指定、あるいは1963年中頃におけるビル用水地域の指定によって、地下水利用が規制を受けた結果と受取られるわけである。また1965年以降においては、南千住浄水場、南砂町浄水場など、合せて1日における給水能力が30万トン余りの工業用水道の建設とともに、地下水利用についての減少の影響も当然考えられる。

要するに地下水位の低下の大きな原因は人為的な地下水汲み上げによるものであることが明瞭であり、政治的にもつと積極的な対策が望まれる所以である。

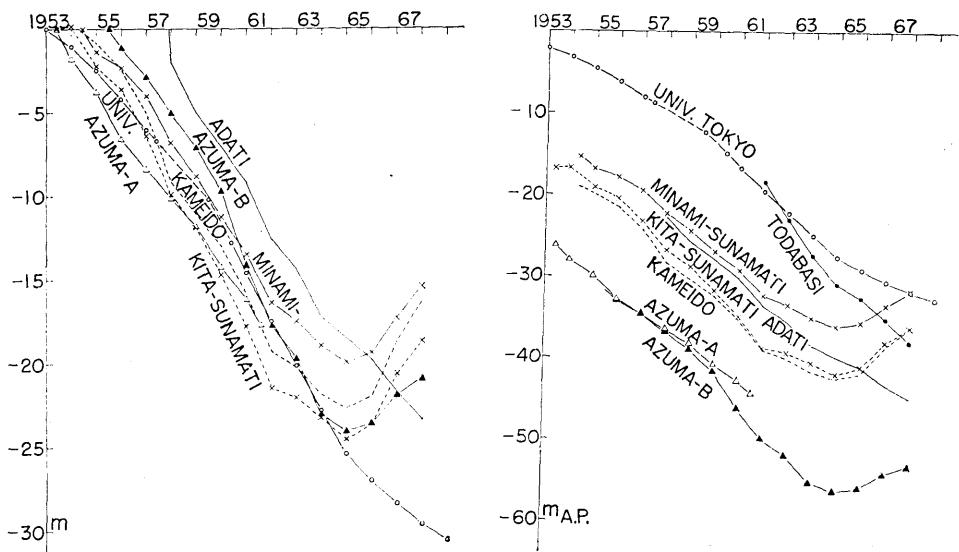


Fig. 6. Comparison of the lowering of ground water level for various wells.

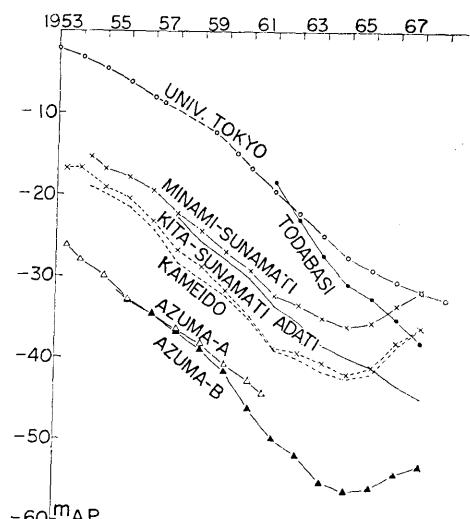


Fig. 7. Change of the water level of the deep well and those of wells in the eastern part of Tokyo.

さて、各観測所は、それぞれ違った場所に位置しているわけであるが、それらの水位変化を同一の基準で眺めて見ると、どうであるかを示したのが Fig. 7 である。図では水位の基準として、A.P. 基準がとられている。勿論水位を測定するためには基準鉄管をもとにしているわけであり、その基準鉄管は沈下のはげしい場所もあるから、いくらかの低下を示す。その変動量をも考慮に入れて図示したわけである。

観測井の深さが約 50 m から 380 m までの違いはあつても、そして地域的に変ついてもさらにはその水位に差があつても、1961 年以前においては、その減少速度に関する限り大変良く似た傾向をもつていたことは大変興味深い。また、1962 年以後における変化についても、江東地区については共通な現象を示しているが、他の地区については異なる変化を示してきたことは、相互における影響の範囲と仕方についての問題を提起していると思われる。

前にもたびたび述べたことであるけれど、1957 年前後に見られる深井戸と浅井戸の水位変化の類似性は終戦前においては見られなかつた現象である。そのような事から地下水汲み上げによる水位低下が可成り広範囲に影響を及ぼして来たと考えたわけであるが、1962 年以後における変化の相違は、深井戸の変化が遅れた位相で現われていることを示し、上述の見方の妥当性を裏付けていると言えよう。

それでは、そのような地下水位の変化は、地盤の沈下にどのような影響をもたらしたか、同様な期間における、それぞれの観測所の地盤沈下についての報告を見ることにする。

5. 軟弱地盤の沈下傾向

土木技術研究所では水位の観測とともに、基準鉄管をもとにして鉄管底より上の部分の沈下量を常時観測している。既に前に述べた観測所に参考のために江戸川区内のものを加えて、各観測所の基準鉄管の深さを示すと次の通りである。

北砂町	65.5 m	吾嬬 A	47.0 m
南砂町	70.0	吾嬬 B	115.0
江戸川	55.0	足立	111.5
亀戸	60.8	戸田橋	290.0

1954 年以降における上層部の沈下の傾向を Fig. 8 に示す。1957 年から 1962 年までの間は最も沈下が激しく、1963 年以降は次第に沈下速度は鈍つてきている。これらの傾向は前述した水位変化と比較して簡明な関係を有しているとは言い難いが、かなりの相関を持つていていることは確かである。特に深井戸の水位変化とは表面的には良く似た傾向を示している。ただ観測所吾嬬 A、足立、戸田橋に関しては、水位変化の様子からして他の観測所と同様な扱い方は出来ない。

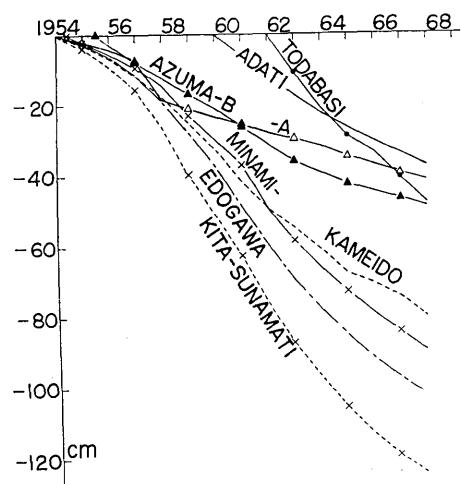


Fig. 8. Change of the shrinkage of the upper part from that at the bottom of each well.

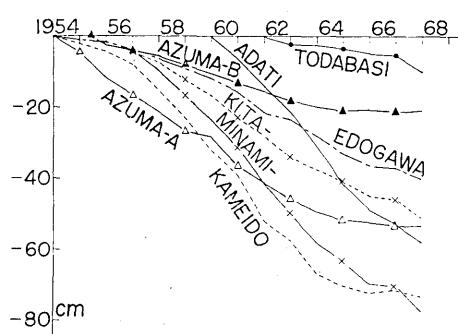


Fig. 9. Change of the shrinkage of the lower part from that at the bottom of each well.

のことは深井戸の水位変化から見て、前にも述べたごとく推察できる事実ではある。即ち最近のように水の汲み上げが益々深部の方に向つて行く時は、その部分の収縮が可成り大きな役割を果すことになる。一つの例として足立の場合がそうであろう。この観測所における沈下量は、1960~1967 年の間に下層部の沈下量の方が上層部より 20 cm も逆に多いのである。

以上のように基準鉄管底よりも上層部と下層部に地層の収縮性を分割して考えられるわけであり、それらを加算したものが地表面の沈下量になる。それを図示したのが Fig. 10 である。

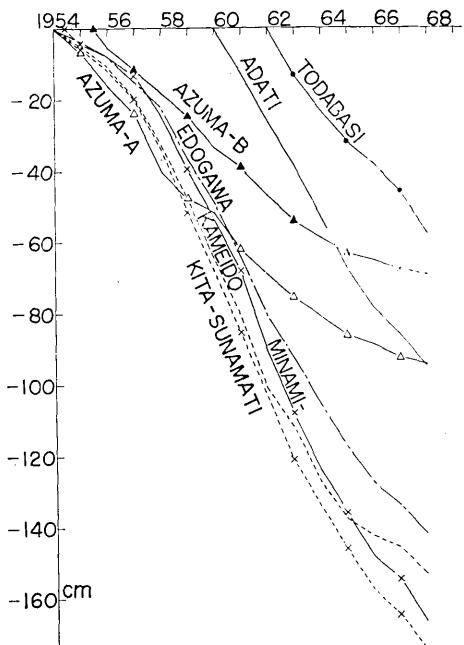


Fig. 10. Land subsidence, or the total shrinkage for each station.

しかし基準鉄管の最も短い観測所吾嬬 A に関しても、基準鉄管底よりも深い部分の沈下の傾向を見ると、1963 年以降では、それ以前よりは沈下速度が衰えていることが分る。それらに関する図を示したのが Fig. 9 である。これらの図から分るごとく地盤沈下が単に軟弱な沖積粘土層に限らず、それ以下の深い部分の収縮にもかなり関係していることを注意しなければならない。

1954~1967 年の期間に南砂町、亀戸では鉄管底より下の部分で 80 cm にも及ぶ沈下を起しているのである。これら

のことは深井戸の水位変化から見て、前にも述べたごとく推察できる事実ではある。即ち最近のように水の汲み上げが益々深部の方に向つて行く時は、その部分の収縮が可成り大きな役割を果すことになる。一つの例として足立の場合がそうであろう。この観測所における沈下量は、1960~1967 年の間に下層部の沈下量の方が上層部より 20 cm も逆に多いのである。

以上のように基準鉄管底よりも上層部と下層部に地層の収縮性を分割して考えられるわけであり、それらを加算したものが地表面の沈下量になる。それを図示したのが Fig. 10 である。

いわゆるゼロ・メートル地帯というものが毎年拡がっていくのも、この図を見れば当然のことと思われる。干潮面よりも低い土地が 30 km² になるのも、1969 年度中に実現するかも知れない。既に満潮面以下の土地が都区内面積の 20 % を越えているのであるから、恐怖を感じない方が不思議

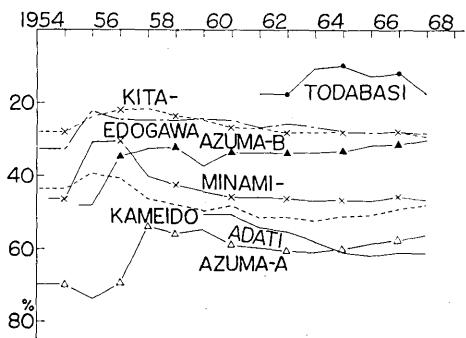


Fig. 11. Ratio of the shrinkage of the lower part to the total shrinkage.

である。

このように沈下が激しいと護岸工事に見られる嵩上げも、なかなか追いつくのに大変である。まして範囲が拡がつて行くわけであるから、それに要する費用と労力は莫大なものになつてしまふ。抜本的な対策が望まれる所以である。

さて、このように毎年騒がれる地盤沈下が、ごく上層の軟弱な沖積粘土層に限られるなら、見通しも比較的楽であり、その対策も建て易い。しかし前にも述べたように、そうではない所に心配しなければならない点がある。全沈下量に対して鉄管底より下層部の受持つ割合を図に示したのが Fig. 11 である。

図には、それぞれの場所で観測を開始してから、その年までにおける全沈下量に対する下層部の収縮量の割合を示した。各観測所における基準鉄管の長さが違うので、この図から直ちに各場所の特徴を比較するわけには行かない。しかし 1958 年以降においては各観測所とも、それ程顕著な変化はなく、大体一定な値なので比較に便利である。例えば前にも述べたごとく足立などは基準鉄管が比較的長いことを考慮すれば、他の観測所に比して著しく下層部の収縮量の割合が大きく、またそのように年とともに変化してきたことが一見して分る。

以上過去十数年にわたる水位と地盤沈下の大体の様子を説明してきたわけであるが、それではごく最近における月々の変動は、どのように変つているかを見ることにしよう。

6. 最近における水位変化と地盤沈下

1961 年における工業用水地域の指定、さらには 1963 年のビル用水の地下水汲み上げ規制というように地盤沈下問題についての対策が建てられ、地下水位もいくらか改善できる方向に変つた。しかしながら、その程度の対策では地盤沈下については余り影響を与えていないのが現状である。

勿論これらの対策を受けた地域は、いわゆる江東ゼロ・メートル地帯を中心とした地域だけであり、他の広範な地域での地下水位が低下する限り、それ程の効果は期待できない。

1964 年以降における各月末の水位の変動を示したのが Fig. 12 である。水位変動の傾向を比較するには月末値より月平均値を以てした方が妥当であるけれども、前の報告を引継ぐ関係上月末値で示することにした。しかし逆に、それによつて月末における特殊な変化が、各観測所によつて異なり、また変動も大きく表わされる。特に足

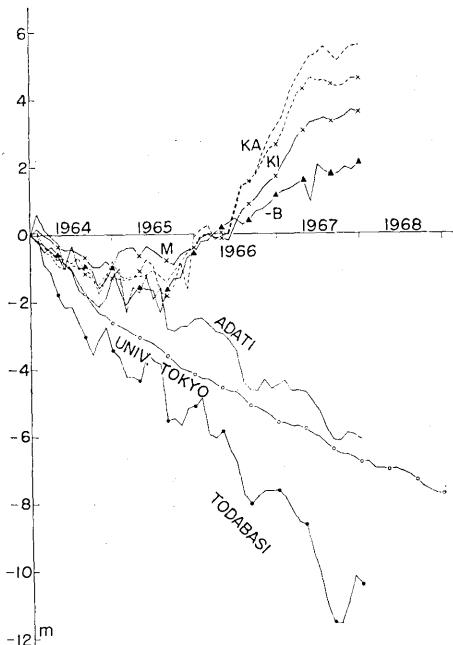


Fig. 12. Change of the water level of each well for the years. The values at the end of each month are used as the data.

立、戸田橋など規制の効果がない地域では、水位も低下し図に見られるように変動も顕著に出ている。さらに季節的にも夏季における低下は著しく示されている。

このような変化は深井戸の場合には、たとえ月末値をとつてみても、そのような大きな変動は表われない。水位の低下の平均は、足立などとそれほど変わらないけれど、明らかに軟弱地盤地域の井戸とは、異なる傾向を示していることは明瞭に見られる。このような点でも深井戸の水位変化は、ある範囲にわたつて、かなり平均化されたものを与えていたと見られる。

一方、規制の効果が上つた北砂町、南砂町、亀戸、吾嬬Bの観測では、1965年からは水位は上昇に転じている。そして、それぞれの変動の様子も、たとえ月末値をとつても、ほぼ同様な水位変化を示していることは、他の地域と比較するとき歴然たる差が見られる。

しかし、この地域における1966年と1967年の水位の上昇の変化を比較して見ると、1966年においては水位は一方的に上昇しているが、1967年では夏季に入つて上昇が止つてきた傾向を示している。これは地下水位の回復に樂觀の出来ない事実が起つてきたことを示唆している。

他の地域における地下水位が低下の一途を辿つているわけであるから、当然江東地域における水位上昇も、ある水位までにしか回復が出来ないことは予想される。しかし、それに加えて先程述べた事実が季節的な変化のある点から見て人為的な要素が再び多少つけ加えられたとなると、益々地盤沈下に対して悲観的にならざるをえない。

それでは、この期間における地盤の上層部の沈下傾向はどうであつたかをFig. 13に示す。月変動をとつて見ても水位変化の余りに激しい変動に比較して余りにも単調である。ただ戸田橋のものは、他に比べてかなり変動が著しい。

地盤沈下の速度は北砂町、南砂町、吾嬬B、江戸川に関しては年ごとに少しづつ遅くはなつてゐるが、それ程は改善されていない。亀戸などは水位が上昇しているにかかわらず逆に沈下速度が増加している傾向さえあり、特に1967年後半における沈下速度の激しさは特異な変化である。

足立などは水位が下る一方だが、沈下速度はほぼ一定で、水位と沈下速度の間によく言われる平行的な関係などはない。このような例は前の報告でも述べておいた。むしろ表面的には深井戸の水位変化と同じように、それぞれの地盤に特有な割合で変化しているように見える。

勿論鉄管底より下の部分の変動は、毎月精しく測定されていないから、図示されたものは上層部の変動だけであるが、前にも述べたごとく長期の変動の地盤沈下と水位の比較から推察しても、全沈下量に対して左程違つた結論は導かれないのであろう。

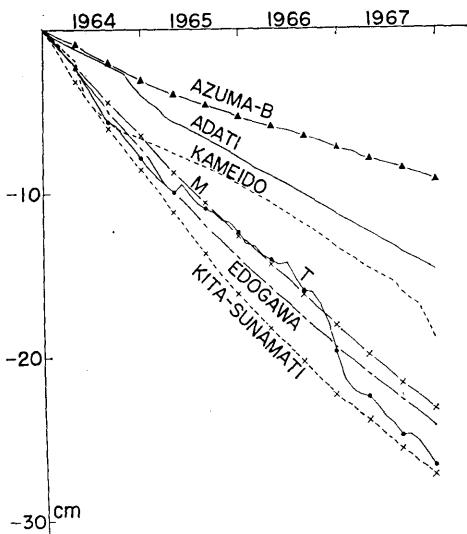


Fig. 13. Change of the shrinkage for the upper part from that at the bottom of each well for the years.

さらに今後の変化を見るために、1967年における各観測所の水位変化ならびに1968年の深井戸の水位変化の様子を、特に比較しやすく示したのがFig. 14である。ここでは各月における平均水位の変化を図示した。

これらの変化を見てよく分るごとく各観測所とも揃つて夏季に入つた6月から、それ以前の変化に比べて明瞭に様子が変る。江東地区のように水位が上昇していたものは、上昇が僅かになり、また低下するものもある。また低下していたものは一層低下が激しくなる。そして10月から冬季に入るに従い、いずれも次第に回復の方向に向つている。

これらの事実は、かつて幾度も指摘したように人為的な汲み上げによる特徴が季節的に表われているものであり、当分は似た傾向が続くものと思われる。

ここで特に注意しておきたいのは深井戸の水位変化についてである。1968年における変化は、前年に比較して結果的には約26cmも低下は少なくなつたわけであるが、低下の傾向はほとんど同じである。ただ4月から5月にかけて僅かではあるが上昇した差が、その後引続いて区別されているということである。ただ異常な変化と言う意味では、特に1967年の戸田橋および吾嬬Bの水位の変化にも顕著に見られるが、それは同時に深井戸ならびに他の井戸には表れていない。それで現在のところ、それらは地域的に特別な人為的要素が加わつた変動と思われる。

しかし深井戸における上述した変化は、たとえ僅かな水位の上昇であるが、そのような例は最近では見当らない変動である。

そこで参考のために、地震活動として特に変つた大きな動きに注意すると、4月に起つた日向灘地震、そして5月の十勝沖地震、6月の三陸沖地震とマグニチュード7以上の大地震がたて続けに起つている。しかしこれらは、いずれも東京から遙かに離れた地点で起つたものであり影響は無さそうである。ただ問題があるとすれば、その後の7月1日に起つた埼玉県中部の地震であろう。それは関東中心に強い地震を感じ、東京では12年ぶりの震度4を記録した地震であつた。そして地下水系から見ても、いわゆる浦和水脈といわれるものに関連した地域に起つたものであり、多少の影響は考えられないことも無いからである。

しかし関係があると思えば、むしろ地震の後でこそ、もつと影響が顕著に出ても良いと思う。実際地震と地下水との関連は、最近でも話題の一つになつてゐる。例の松代の群発

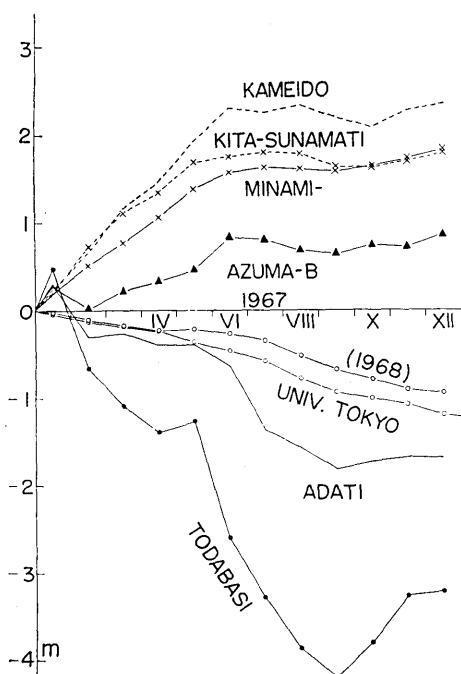


Fig. 14. Change of the water level of each well in 1967 and that of the deep well in 1968. The monthly mean values are used as the data.

地震についても、地殻変動と相呼応して地下水の異常な動きがあつたことは記憶に新しい。

いざれにしても大地震後における地下水の変化は、数多く報告されているが、大地震前のものは比較的少なく、それも直接の関係があると断定するにはなかなか難しいものである。しかし 1923 年の関東大地震前の熱海温泉大湯の異常な変化などは特に顕著な現象であり、また地震区域の方々であつた井水の異常な変化などの報告は、注意せねばならない事実であろう。

従つて非常に稀ではあろうが井戸が特別な位置を占め、あたかも水管傾斜計に似た働きとか、あるいは思いがけぬ繋がりをもつていた場合には、地震に関連した前兆としての変化を取り得ることが予想される。

しかし実際に地震が起ることを防げないわれわれにとつては、まず災害を出来るだけ未然に防ぐ対策をとつておくことが何よりも必要である。そして地盤沈下を防ぐことは、地震災害を軽減する一つの大きな役割を果すものであり、地下水位の観測がその地盤沈下問題に重要な役割を持つているのである。それでは深井戸の水位変化から見た地盤沈下を、どのように関係づけて行くかが次の問題となる。

7. 深井戸の水位変化から見た地盤沈下

地盤沈下の問題について、最も有力な原因が人為的な地下水汲み上げによる地下水位の低下であると言われてから、かなりの年月を経過している。しかしながら各場所における地層構造の複雑さから、なかなか地盤沈下と地下水位の変化との定量的な関係というものは、一意的に簡単な関係式では説明し難い。

しかし将来の地盤沈下量を推定しようとすると、何等かの方法が必要となり、実際には圧密計算によるとか、あるいは過去の実績から推定するような立場がとられる。

前者の圧密計算による方法は、いわゆる Terzaghi のよく知られた圧密理論の取扱いを応用するわけである。

即ち井戸から水を汲み上げることによって水位が低下し、そのため滯水層内の水圧が下ることになる。それによつて今迄滯水層内の水圧と平衡関係にあつたと見られる粘土層内の間隙水圧は、相対的に大きくなり、粘土層内の水は滯水層内に滲み出す。その結果滲み出した水の容積だけ粘土層の間隙が減少して収縮することになる。このことは丁度粘土層に荷重が加つて、収縮が起る場合の Terzaghi の圧密理論と同じ取扱いができるわけである。

既によく知られているように、この理論では数式化するために、一軸的な圧密で、間隙比と圧力が直線的な関係にある等、いくつかの条件を仮定している。そして次の基本式を得る。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (1)$$

ここで u は間隙水圧、 t は時間、 z 軸は圧密方向、 C_v は圧密係数である。粘土層の厚さを $2H$ として境界条件を

$$\left. \begin{array}{ll} z = 0, 2H & \text{で } u = 0 \\ t = 0 & \text{で } u = u_i \end{array} \right\} \quad (2)$$

のようにとれば、(1) の解として次の式を得る。

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 C_v t}{4H^2}\right) \cdot \sin \frac{n \pi z}{2H} \cdot \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n \pi z}{2H} dz. \quad (3)$$

また $z = 0$ から $z = 2H$ までの間の平均の圧密比は

$$U = 1 - \frac{\int_0^{2H} u dz}{\int_0^{2H} u_i dz}. \quad (4)$$

これと最終的な圧密量が分れば、この層における任意の時間における圧密量が計算できるわけである。

しかし実際問題としては、その場所の土質柱状図によつて各層の厚さ、それに体積圧縮係数、圧密係数などの土質常数をきめ、また荷重も考慮するなど、計算する上に、いろいろと選択しなければならない問題点もある。

従つて簡単に将来の沈下量を推定しようとすると、過去の実績を見て曲線を当てはめ、それを適当に延長して予測する方法がとられる。しかしこれは余りにも物理的な考察もなく、水位変化の事実をも考慮していない単なる形式的な方法である。

そこで深井戸の水位変化から地盤沈下の問題を考察するとすれば、上述の二つの方法は余り適当な方法ではない。もともと深井戸の水位の測定は、江東地区の地盤沈下を見るために始めたものではない。ここでは単に間接的に、それらの間にどのような相関があるかを見ようとしているからである。

そのようなわけで深井戸の水位変化と地盤沈下との関係を見るときに、単なる統計的な取扱いではなくて、いくらか Terzaghi の圧密理論をも考慮して扱つて見ようというわけである。

Fig. 5 に示したごとく江東、墨田、足立の各区における主なる水準点の経年沈下量は、深井戸の水位が上昇している時期にあつては、沈下現象は、ほとんど見られない。

そこで深井戸が、ある水位 p_0 では沈下量 S は 0 であるとする。そしてその時を時間軸の原点にとる。また水位が下り、時間が経過すれば、それだけ沈下が進行するであろう。しかしいくら沈下が進んでも、それ以上は沈下しない最終的な沈下量 S_e というものが考えられる。また地域によつて異なる地盤係数というものを k とおく。

上述のように想定すれば、ある水位 p 、ある時間 t における沈下量 S は、もつとも大雑把に考えると次のような関係式で表わすことができるであろう。

$$S = S_e [1 - \exp\{-k(p_0 - p)t\}]. \quad (5)$$

従つて沈下速度は

$$\frac{dS}{dt} = k S_e \left\{ (p_0 - p) - t \frac{dp}{dt} \right\} \exp\{-k(p_0 - p)t\}. \quad (6)$$

$$\therefore \log \left[\frac{dS}{dt} / \left\{ (p_0 - p) - t \frac{dp}{dt} \right\} \right] = \log(k S_e) - k(p_0 - p)t. \quad (7)$$

よつて縦軸には、 $Y = \log \left[\frac{dS}{dt} / \left\{ (p_0 - p) - t \frac{dp}{dt} \right\} \right]$ の値、横軸には $(p_0 - p)t$ の値を、年々の深井戸の水位 (m) および地盤沈下 (mm) の観測値から求め、それを図示したものが Fig. 15 (a)~(h) である。時間軸の原点としては、深井戸の水位が最も回復された時

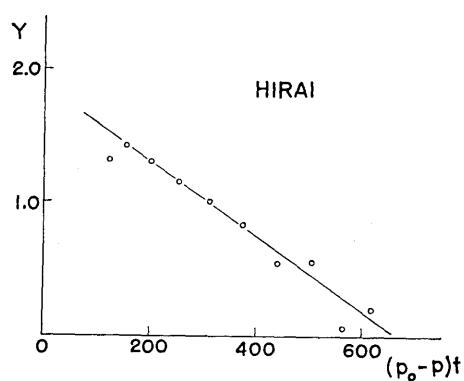


Fig. 15 (a)

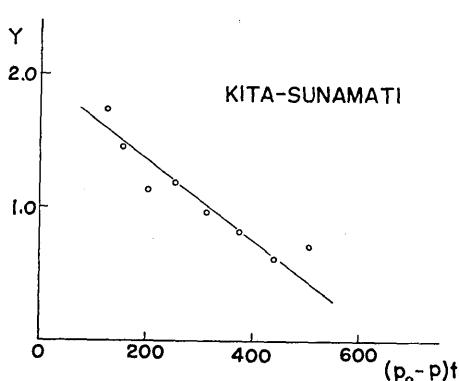


Fig. 15 (b)

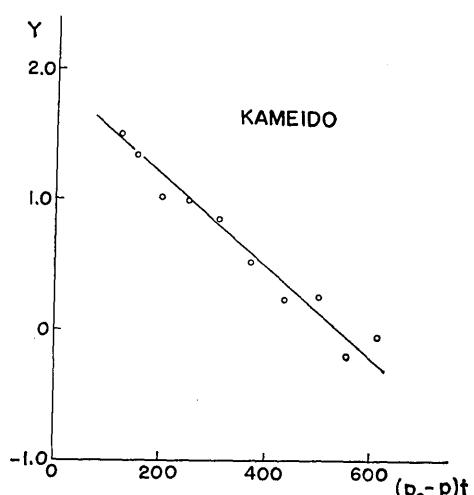


Fig. 15 (c)

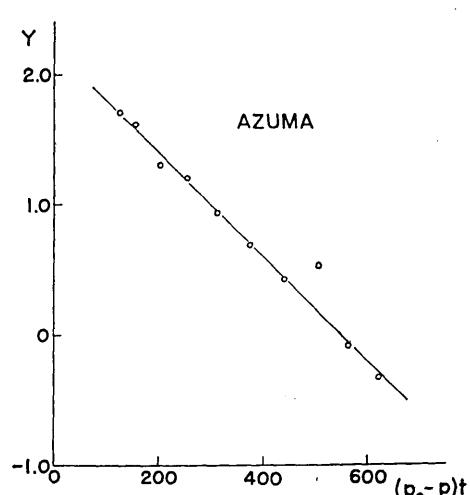


Fig. 15 (d)

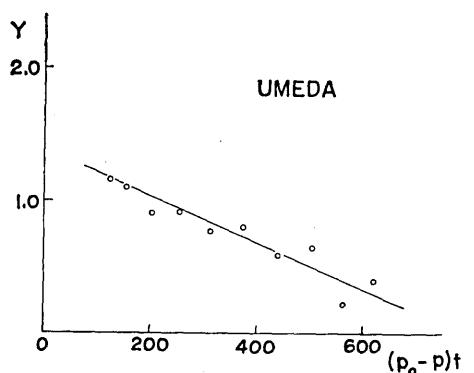


Fig. 15 (e)

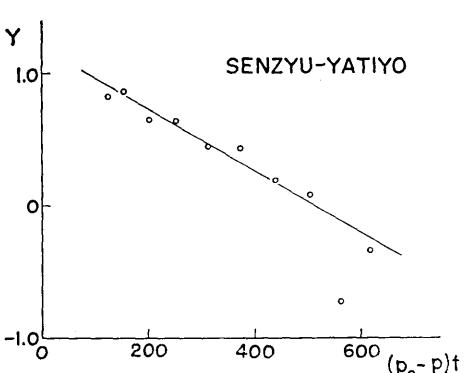


Fig. 15 (f)

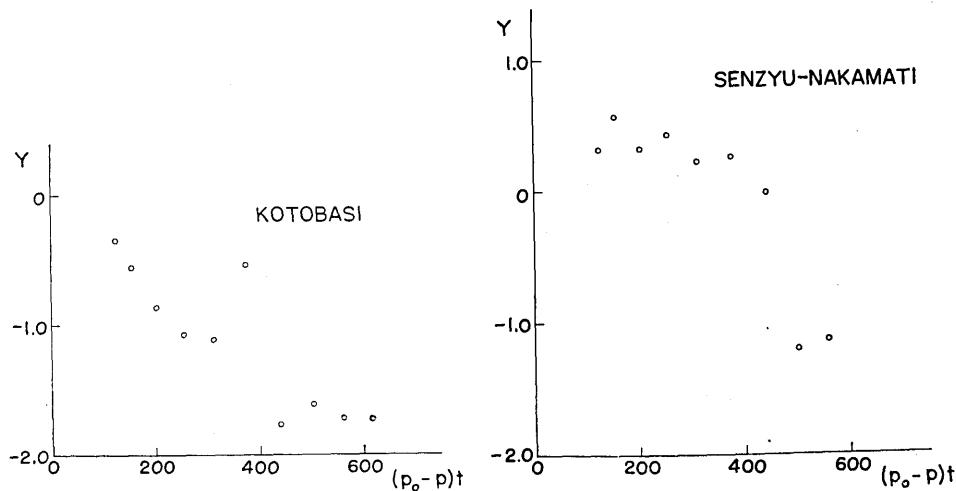


Fig. 15 (g)

Fig. 15 (h)

Fig. 15 (a)~(h). Relationship between the change of water level of the deep well and Y , which refers to the velocity of the land subsidence of each station in the eastern part of Tokyo.

$$\text{Vertical scale: } Y = \log \left[\frac{dS}{dt} / \left\{ (p_0 - p) - t \frac{dp}{dt} \right\} \right]$$

期として、かりに 1948 年 6 月としているが、図示したのは最近 10 年間についてである。それは水位が一旦回復された後における、ある範囲の水位低下による地盤沈下は、同一視して取り扱うわけにはいかない点があるからである。その点に関しては、別な考慮をしなければならず今後の残された問題であろう。

さて図示されたものについて見ると、8 カ所の観測地点の中、江東区の平井町、北砂町、亀戸町、墨田区の吾嬬町、足立区の梅田町、千住八千代町については、上述の関係式でかなり良く説明ができる事を示している。

これらの各地点について、得られた関係式が今後も同じように満足されるという条件で、将来における沈下量を推定することができる。それらの値と各地点での地盤係数 k を Table 2 に示す。

勿論地盤沈下の原因が人為的な地下水位の変化によるものである以上、今後の沈下量についても非常に左右されやすい要素を持つてはいるが、ここに示された推定値は現在にお

Table 2. Estimated values of the amount of subsidence in future and ground coefficients for each observation point.

Observation point	Hirai	Kita-Sunamati	Kameido	Azuma	Umeda	Senzyu-Yatiyo
Estimate	41 cm	37	24	19	84	34
k	0.00282	0.00304	0.00344	0.00400	0.00180	0.00234

ける一つの目安としての意義はあるであろう。

しかし墨田区江東橋および足立区千住仲町においては、そう簡単な関係では表わせない。

以上のようなことから深井戸の水位変化と、それぞれの地域における地盤沈下との間にはかなりの相関があると見られるわけであり、それだけ深井戸の水位変化の推移を見守ることは、この地域における地盤沈下の将来についての示唆を与える役割をも果すことになるわけである。

8. 結 語

以上で深井戸の水位変化を中心に、それに関連した軟弱地盤地域の浅井戸の水位変化ならびに地盤沈下問題についても述べてきた。

もともと深井戸の水位観測は、松沢武雄先生が1923年の関東大地震との関係の有無に疑いをもたれたのが契機となり再開された。しかし幸いにして、この地方にはその後この大地震に匹敵するような地震には、未だに会わないで現在に至っている。それ故この深井戸の水位変化からは、その当時の目的である地震との関連について報告するまでには至っていない。

しかしながら長期にわたる深井戸の水位変化の観測は、他には余り例を見ず、たとえその変化の大半が人為的なものであるとしても、それは自然現象に変化を与えてるものであり、また大きな公害問題の原因となるべき事実を記録しているものとして貴重な資料となつている。

江東地区における浅井戸の水位変化が上昇に転じ、地盤沈下にもいくらか安易な見方が出されていた時も、この深井戸の水位変化から見て楽観できないことを機会あるごとに警告した。そして現実は、その警告通りに悲観的な方向に進んでいるのである。

そして抜本的な対策がなされないまま、地盤沈下問題はますます都市周辺の新しく開発されて行く地域まで拡がりつつある。しかし何といつても災害面から考えるとき、いわゆる江東ゼロ・メートル地帯は最も憂慮すべき危険地帯である。

即ち地盤沈下は、いろいろな構造物の不同沈下を誘起し、それが地震時の被害を大きくし、護岸は亀裂そして強度を弱め、地震水害にもなる。まさに東京の低地に住む百万の民衆の生活は、危険にさらされているといつても過言ではない。

またゼロ・メートル地帯の拡大は、高潮対策の効果を弱め、あるいは下水道の整備、拡充、排水能力の増大、護岸の嵩上げ、そして増強と莫大な経費を必要としてくる。なるほど工業用水法、ビル用水法と揚水規制が実施されてはいる。しかしその効果は余りにも薄く、もつと広範囲の全面的な実施と抜本的な対策が早急になされなければならない。

終りに、この報告が松沢武雄先生による終戦前後の困難な時期も、欠かすことなく観測された連綿たる御努力に負うところが大きく、また原稿については佐藤泰夫先生より、いろいろと御注意を頂いた。心より厚くお礼申し上げる。さらに東京都土木技術研究所の稻葉佳氏には、同所から出されている報告について、いろいろ御便宜を頂いた。厚く感謝の意を申し述べたい。

53. *Change of the Water Level of a Deep Well in the University of Tokyo.*

(Until the End of 1968)

By Rinzo YAMAGUCHI,
Earthquake Research Institute.

Measurements of the ground water level of a deep well in the University of Tokyo have been made since 1932. The depth of this well is about 380 meters and the pipe head of the well is 15 meters higher than the mean sea level of Tokyo Bay.

In this paper, the change of the water level of this well is shown until the year 1968. The lowering of the water head amounted to about 36.6 meters at the end of 1968, the water level being 33.5 meters under the mean sea level of Tokyo Bay. The lowering rate of the water level was about 1 meter per year for the year 1968 and has become about one third of that in 1964.

Comparing the water level of the deep well with those of shallow wells situated in the eastern part of Tokyo for the last three years, it is inferred that the ground water has recently been pumped-up mainly from a layer deeper than 100 meters from the surface of the surrounding area of the Koto region, eastern part of Tokyo.

It is reported by the Tokyo Institute of Civil Engineering that the area of land subsidence made a total of 289 km², the area under the high water level of Tokyo Bay being about 115 km².

The fact mentioned above is a disastrous situation to those who are living in the eastern part of Tokyo.

As is well known, the principal cause of the land subsidence is the lowering of the ground water level, and the lowering of the water level of the deep well suggests that the land subsidence is still remarkable in the region where the alluvial deposit is thick.

A simple expression is presented for the relationship between the change of the water level of the deep well and the ground subsidence in the eastern part of Tokyo. The amount of subsidence in future for this region can be estimated by the relation mentioned above.