

天満砂礫層の力学的特性と地下水位変動

Mechanical properties and watertable variations of the Tenma gravel layer

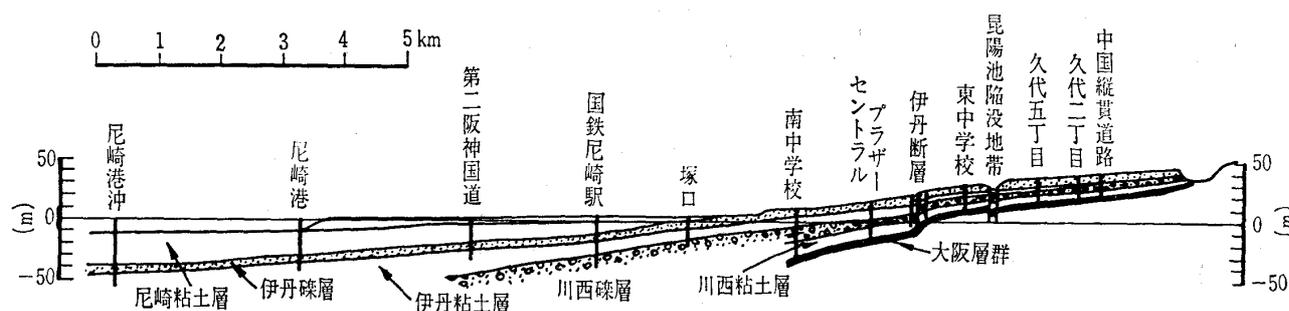
にし がき よし ひこ
西 垣 好 彦*

1. まえがき

平野部や丘陵地において、建築・橋梁等の構造物のための地盤調査を行う際、砂礫層があると支持層の対象として考える程砂礫層は重要である。しかし、礫質地盤の地盤調査手法としては標準貫入試験のみしかなく、しかも、礫質地盤に対して標準貫入試験は誤差の大きい調査であり、試料採取も行えない場合が多いが、現在これに代わる適切な調査法がない。

層は基礎の支持層として重要な役割をしてきたため、天満層は地質学者より建設技術者の間で親しまれ、この名が多く使われてきた。この天満層は上町台地の西縁から西へ行く程深くなり、臨海部では深度は約30mとなり、昔から百尺層と呼ばれ、大阪の支持層および第一滞水層として非常に重要な層であった。本文ではこの天満砂礫層の力学的特性と滞水層としての特性について述べる。

2. 天満砂礫層の分布



図一 伊丹-尼崎地域断面図³⁾

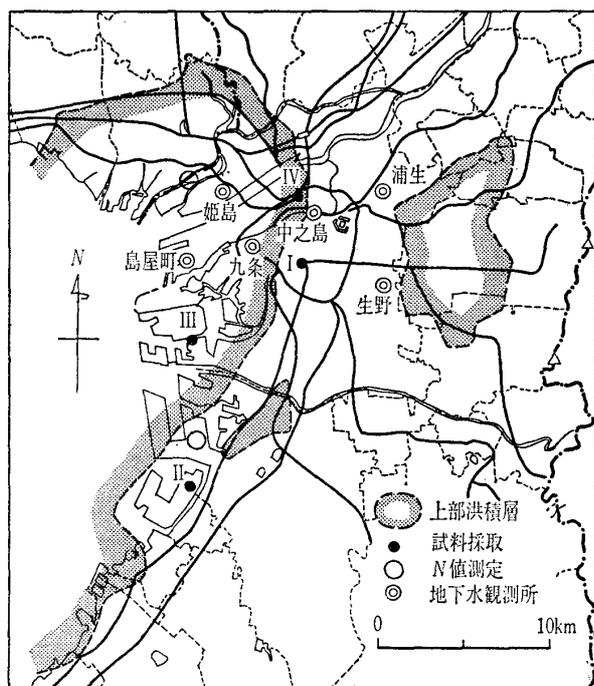
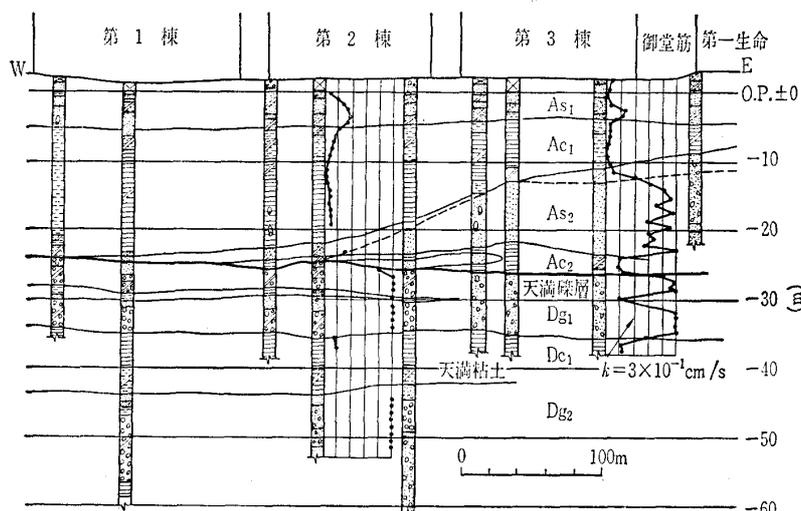
N値以外に更に詳しいデータが必要な時は載荷試験を実施せざるを得ないが、礫質地盤は一般に透水性が良いため、載荷面を露出させて、載荷面を整形した後試験を実施することができず、載荷面の凹凸を犠牲にして地下水位をバランスさせた状態で実施するか、あるいは杭基礎の場合は実杭を用いた載荷試験が実施されてきた。この両者とも問題があり、前者は載荷面が乱れていること、後者は地盤破壊まで載荷できないことである。したがって、礫質地盤に関して、室内試験・原位置試験等の一連の試験から総合的に検討された例は非常に少ないのが現状であり、工学的に最も重要な支持層である礫地盤についての工学的性質に関するデータは少ない。

本報告では割合に調査データが多く、西大阪の支持層として非常によく知られている天満砂礫層と呼ばれる砂礫層について述べる。天満層は昭和初期に山根¹⁾により、沖積層の下にある洪積層が地表に露出するのが天満橋付近であるとして、この名がつけられた。西大阪での天満砂礫

山根が天満層を定義したのは昭和初期で、当時の調査技術も十分でなかったこと、およびその後建設技術者の間で支持層の意味でその名称が使われてきたため、かなりあいまいなところがあった。そこで1966年「大阪地盤図」²⁾が作成された時、天満層として「天満層とは沖積層の下にある最も新しい洪積層の地層名とする。最も新しい洪積層は粘土層と砂礫層の1対よりなるものであって、それぞれ天満粘土層、天満砂礫層と称する。天満砂礫層は洪積三角州の上部層に相当する」と定義され、現在もこの定義が広く用いられているが、一部では依然として支持層の意味で使用されていることがある。

西大阪では天満砂礫層までの沖積粘土層が厚いため、大半の大型構造物は杭やケーソン基礎等で天満砂礫層に支持されている。天満砂礫層は大阪市内では露頭していない。一方、伊丹丘陵に分布する伊丹礫層は図一³⁾に示したように伊丹で地上に露出し、それが尼崎港で-30mにもぐりこんでいる。多くの調査資料から、この伊丹礫層は天満砂礫層と梅田付近で連続していることが明らかにされ、これ

*基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西技術センター所長

図-2 上部洪積層の分布⁴⁾図-3 大阪駅前土質断面図⁷⁾

らは同一層である。しかし、伊丹礫層は大径の礫を含んでいるのに対し、天満砂礫層は大径の礫は少ない。この原因は砂礫を運搬してきた古水系が異なるため、前者は古生層を後背地とする武庫川・猪名川により、後者は花崗岩類を後背地とする淀川水系により運搬されたものである。

天満砂礫層がどこに分布しているかについてはいまだ詳細な調査結果はないが、Ikebe ら⁴⁾は上部洪積層の分布として図-2を示しており、天満砂礫層は上部洪積層の最上部層であるので、ほぼこれに近い分布をしている。しかし、後述の堺臨海部のN値測定場所はその範囲外となっていることから、天満砂礫層の分布については詳細な調査が必要である。

天満層の分布を明らかにするためには、天満層の定義を前述のものとしても、いまだあいまいなところがある。すなわち、最も新しい洪積層をどう決めるかということであ

る。その決定は西大阪においては沖積層と洪積層の境界の定義、すなわち「沖積層」の定義の問題であり、これがまだ完成されたものとなっていない。大阪地盤図ではその境界の判然としないところに対し、砂礫層中のN値が $N=30 \sim 40$ に急増するところをその境界とした。その後、沖積層の年代測定が多く実施され^{5),6)}、その境界も部分的に明らかにされてきた。その研究結果をもとに、梅田近辺の土質断面図を作成すると図-3のようになる⁷⁾。掘削現場の観察結果は沖積粘土層(Ac₁)とN値30前後の貝殻まじり砂層(As₂)の境界は明確でなく、しだいに砂分が増加し、不整合面は存在しない。また、その下部の腐植物を含む層(Ac₂)を前田⁶⁾が大坂港で観察した沖積下部の南港層と同時異相堆積物層と考えて図中の実線をその境界とした。これに対し、大阪地盤図では破線のところを境界としていることから、両者の沖積層下限等深線はかなり異なった結果となる⁸⁾。As₂層はこの地点より東および南へ行く程厚くなり、東の扇町公園では砂礫層となる。これと類似の地層は西大阪、特に上町台地西側に分布することが確かめられつつあり、沖積層ではあるが支持層として期待できる層である。

大阪港と南港埋立地を結ぶ港大橋の調査結果⁹⁾の天満砂礫層はO.P.-33mから7mの層厚であるが、中央部に礫分の少ない部分があり、この付近ではかなり連続性がよい。しかし、木津川以南では天満砂礫層中に粘土層をレンズ状に挟み、とうたの悪いシルトまじり礫層も多く、かつ粘土層を多く挟むところも多いため、大型構造物の支持層としては問題があり、O.P.-60mの砂礫層に支持されることもある。天満砂礫層は堺の臨海埋立地ではO.P.-10mからみられ、大阪港とでは20m近くの差があり、その間に断層のあることを意味している。堺での天満砂礫層はかなり厚く、かつ複雑に粘土層を挟ん

でいる。

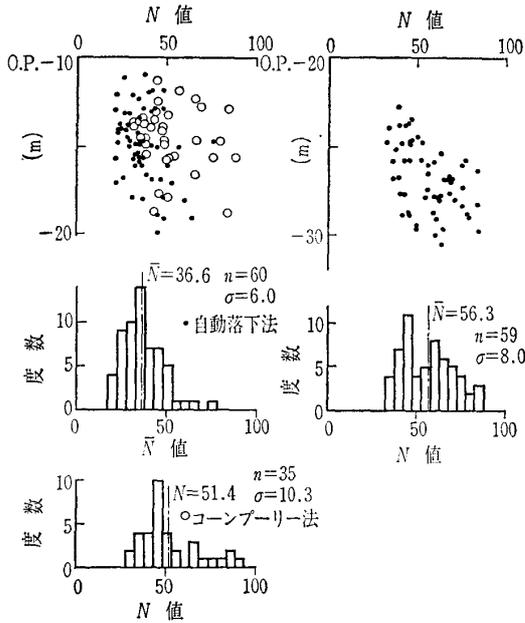
3. 天満砂礫層のN値

天満砂礫層のN値について、図-2の○印点の堺臨海部と尼崎付近の詳細な調査結果を述べる。ただし、 $N > 50$ については50回貫入量より30cm貫入打撃数を比例的に求めてそのN値とした。堺臨海部の天満砂礫層におけるN値の分布は図-4¹⁰⁾のようになり、平均値は自動落下法で $\bar{N} = 36.6$ に対し、コーンプリー法では $\bar{N} = 51.4$ と前者の方が小さく、ばらつきも少ない。一方、尼崎近くの伊丹礫層での自動落下法の結果は図-5¹⁰⁾のように $\bar{N} = 56.4$ と堺のそれと比較して大きい。この理由は伊丹礫層は大径の礫を含むためである。図-4の自動落下の分布は正規分布に近いのに対し、図-5は二つのピークがみられる。伊丹礫層で形成されている伊丹段丘の研究³⁾によると、伊丹段丘は海

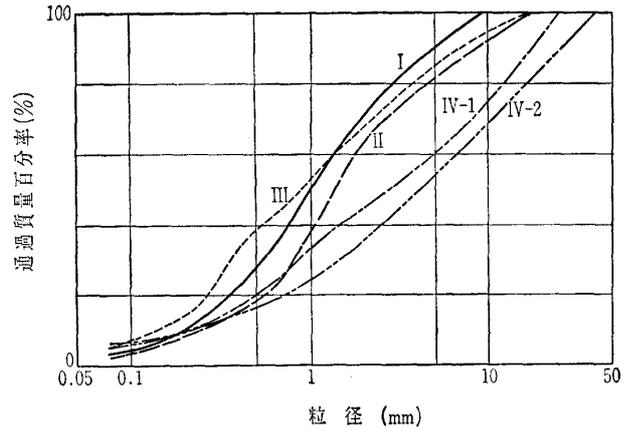
表一 天満砂礫試料の試験結果

供試体番号	採取場所	N 値	採取法	試験法	供試体寸法 cm	供試体直径 最大粒径	$\phi_a(\phi')$	間隙比	文献
I	難波	42	ブロック	C \bar{U}	15×30	31.5	(37.5)	0.52	11)
				CD	10×20	21.0	38.0	0.52	11)
II	堺臨海	—	ブロック	CD	15×30	15.8	38.5	0.50	13)
III	大阪南港	45*	大型貫入	CD	5×10	5.3	43.0	0.46	
IV-1	大阪駅前	73*	大型貫入	C \bar{U}	5×10	1.6~2.8	(45.0)	0.3	14)
IV-2		56*		C \bar{U}	5×10	1.3~3.3	(42.5)	0.3	14)

*大型貫入試験結果からの換算値



図一四 堺臨海部天満砂礫層のN 値の分布¹⁰⁾ 図一五 尼崎近辺伊丹礫層のN値の分布¹⁰⁾



図一六 天満砂礫の粒度分布

退時に堆積したものと、海進時に堆積した二種類があるとされており、海退時に堆積した砂礫はその後の海進までの長期間空中に露出し、その間の風化作用によって砂・礫は弱化し細粒分が増し、その後の海進時には上流にあるこれらの層が再運搬されてマトリックスとして粘土分の多い礫層が堆積し、N値の小さい層ができたと考えられる。したがって、前述の堺はこのような風化した砂礫やマトリックスに粘土分の多い砂礫によって構成された地区で、尼崎では両者が存在する地区といえる。

4. 強度特性

最近では緩い砂は乱さない試料が採取されるようになってきたが、それ以外の砂質土や礫質土の乱さない試料の採取が難しいため、原位置の密度にあわせた締固め試料を用いて強度試験を実施するのが一般的である。筆者¹¹⁾は砂質について乱さないブロックサンプルと締固め試料との比較を行い、両者に差のあることを明らかにした。そこで、天満砂礫層の強度特性についてはブロックサンプリングした乱さない試料と、大型貫入試験¹²⁾で採取した比較的乱さない試料についての試験結果について述べる。

試料の採取場所は図一2の黒丸の4箇所である。試料の採取法・試験法・寸法等について表一1に示した。試料の粒度や間隙比は採取場所で異なり、図一6に粒度分布を示すが、礫分はIV試料が47~66%に対し、I試料が24%、II試料が36%、III試料が32%と少ないが、細粒分はいずれの試料も4~6%である。間隙比は表一1に示したようにIV試料が特に小さい。これは最大径40mmの礫を含んでいたため試料の間隙比は小さいが、後述のように採取地点近くの透水係数は 10^{-1} cm/sオーダーであり、地盤の間隙比はほかと大差ないと思われる。表一1には(供試体直径/最大粒径)を記したが、大型貫入試験試料は直径が5cmのため、その値は小さく、礫径に対し供試体径が小さいといえる。

I試料の圧密排水試験の応力~ひずみ曲線は図一7のように、試験応力範囲($\sigma_3=5\sim27$ kgf/cm²)ではすべて体積変化は正で、ピーク強度を示す。更に高压下のII試料の結果¹³⁾は $\sigma_3\geq 38.5$ kgf/cm²では $\epsilon=15\%$ までにピークはみられず、試験後の試料で粒子破砕が確認され、粒度分布も高压下の試料程細粒分が増加している。この現象はBCP委員会の打込み杭先端で観察されたもの¹⁵⁾と同じで、かなり高压下では粒子を破砕しながら体積が圧縮して行く破壊をする。このことは図一8の平均主応力と間隙比との関係で、等方圧縮過程よりもせん断過程の方が間隙比の変化が大きいで示されている。モール円の破壊包絡線は低压では $\phi_a=38.5^\circ$ に対し、高压では ϕ_a が減少する傾向を示す。竹

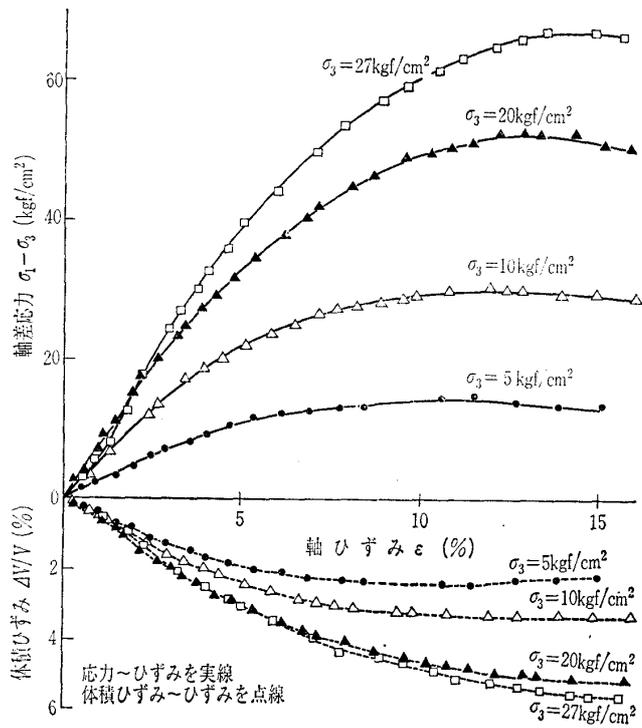


図-7 I 試料圧密排水試験応力～ひずみ曲線
平均主応力 σ_m (kgf/cm²)

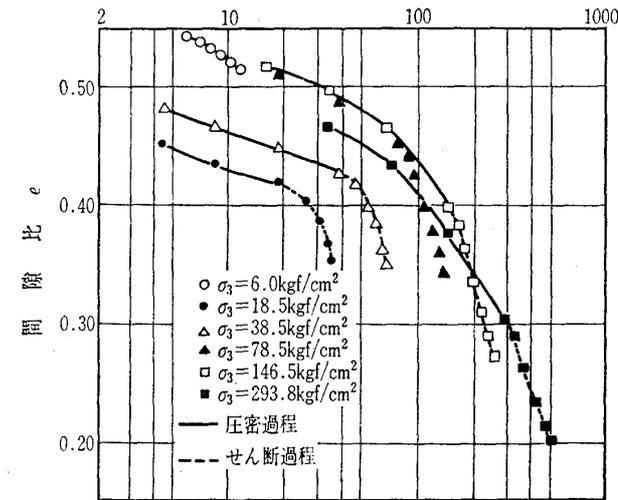


図-8 圧密およびせん断過程における間隙比 e と平均主応力 σ_m の関係

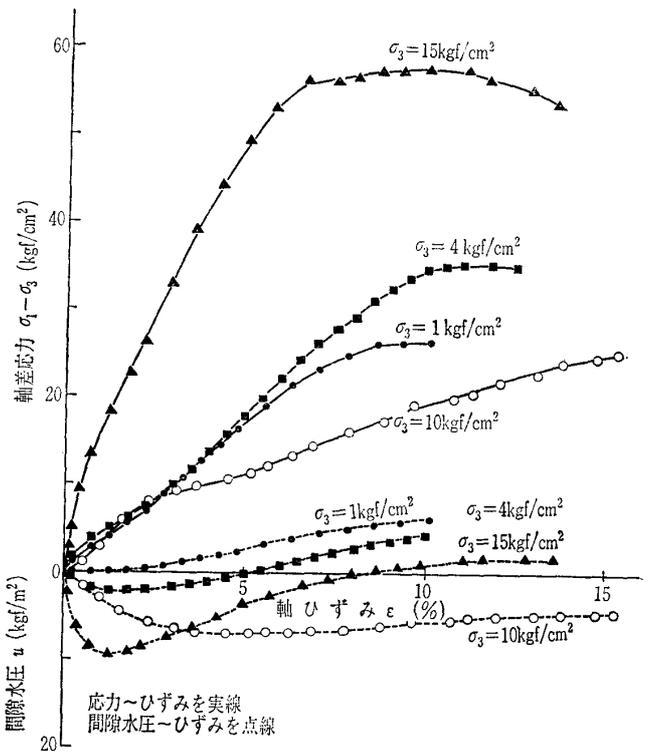


図-9 IV 試料圧密非排水試験応力～ひずみ曲線

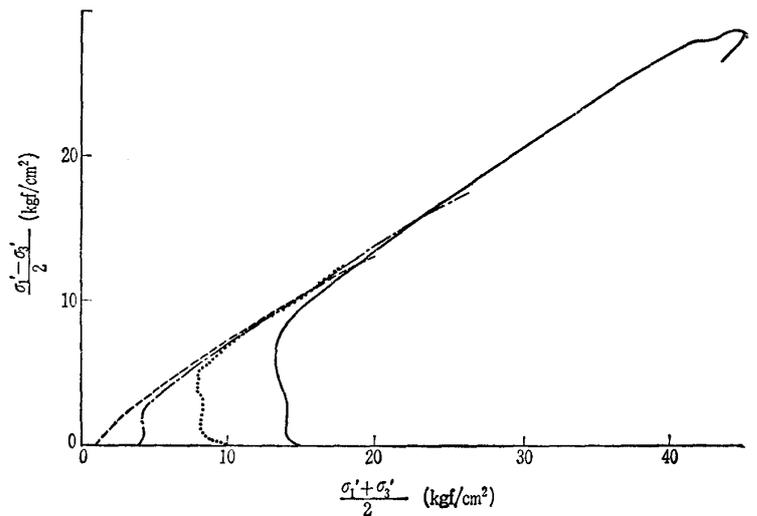


図-10 IV 試料応力経路図

中ら¹⁶⁾は ϕ_a が更に大きく変化した例を報告している。これは竹中らが用いた試料の方が弱い粒子を多く含み、細粒化が多いことを示している。

一方、IV 試料の圧密非排水試験の応力～ひずみ曲線を図-9に、応力経路を図-10に示した。図中の $\sigma_3 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ の試料は試験準備過程で乱れたもので、ほかの試料の傾向と異なり、正の間隙水圧が発生し、 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は乱されない試料に比べかなり小さい。しかし、この結果を有効応力で整理すると乱されない試料とほぼ同じ破壊包絡線となることが図-10の応力経路で分かる。I 試料の乱されない試料の圧密非排水試験結果のモール円の包絡線は図-11のようになり、全応力表示の結果は粘性土と同様に圧密降伏応力を境に二つに分かれる。筆者¹¹⁾はこの傾向がほかの乱

されない砂質土にもあることを確認している。

以上の試験から求められた ϕ_a および ϕ' については表-1に記した。大型貫入試験の試料の ϕ がほかより大きい、これは礫径に対し供試体寸法が小さかった影響と考えられる。ブロックサンプルでは $\phi_a \div \phi' \div 38^\circ$ とみなせる。この値は N 値から求まる値に比べて小さいが、筆者¹⁷⁾は N 値と ϕ の従来との関係が成立せず、非排水強度と関係のあることを多くの乱さない試料で明らかにしており、天満砂礫層もその例外ではない。したがって、 N 値から ϕ を求めることには問題がある。また、砂礫の破壊は支持力理論で考えられているようなせん断破壊ではなく、圧縮変形であることに注目する必要があり、砂礫層の支持力について今後検討される必要がある。

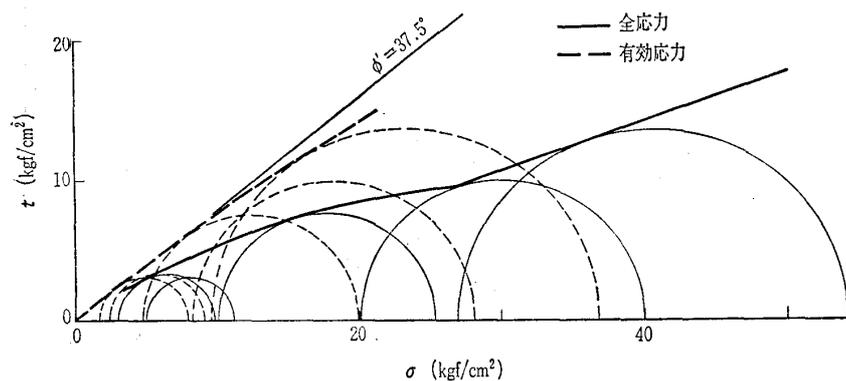


図-11 I 試料モール円と破壊包絡線

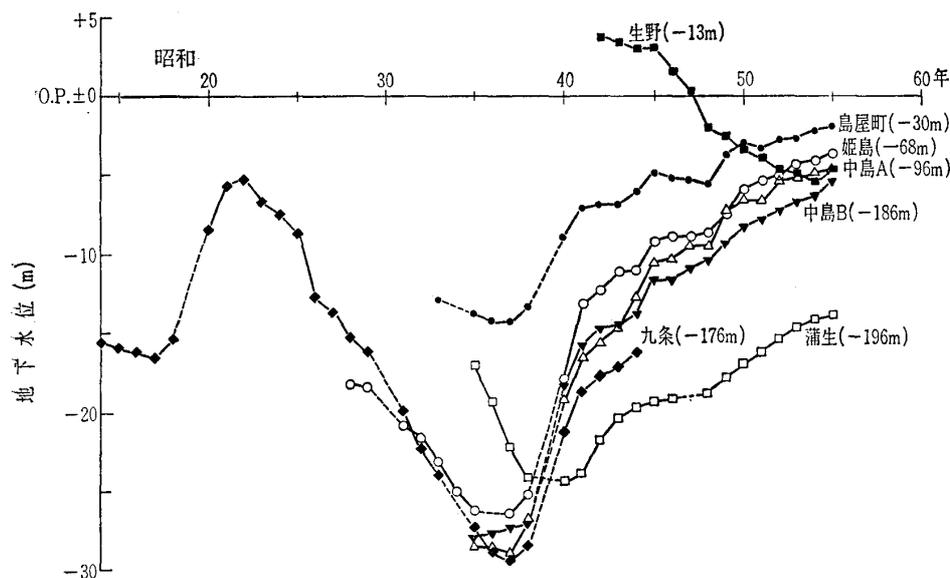


図-12 大阪の滞水層の地下水位¹⁸⁾

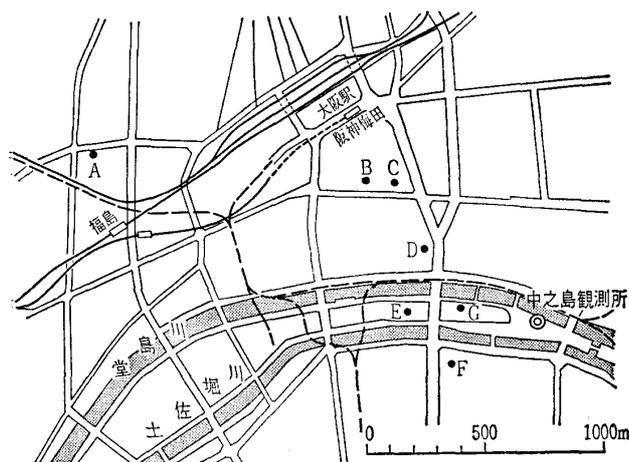


図-13 地下水位変動測定位置

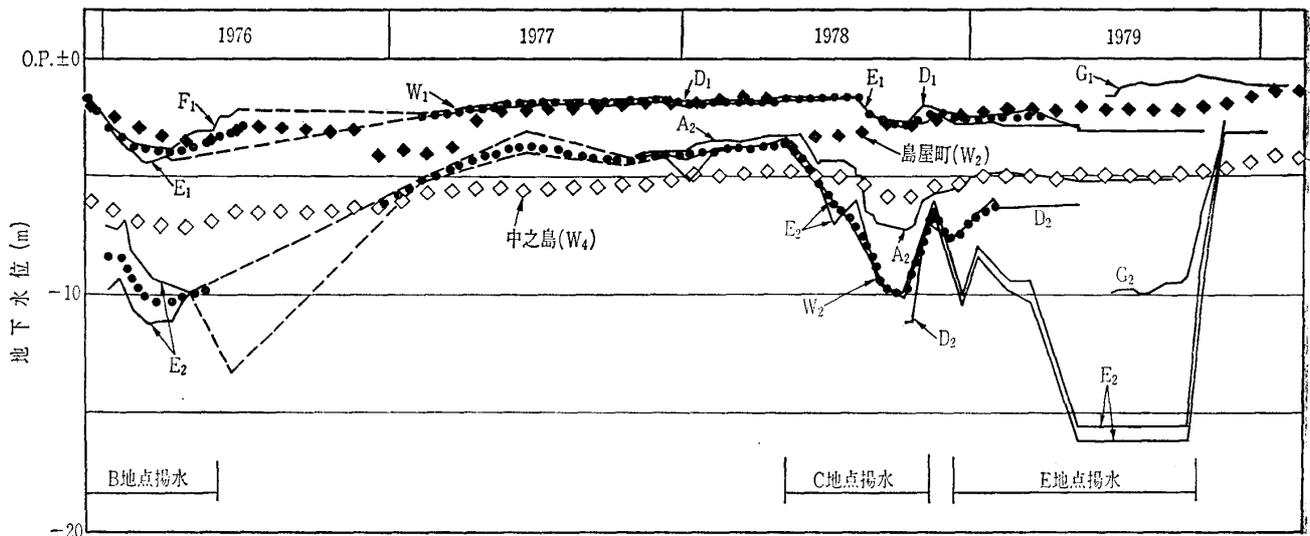
5. 地下水位と透水性

戦後西大阪における地盤沈下が激化し、種々の原因説があったが、多くの研究結果から地下水の過剰揚水であることが判明し、昭和37年にいわゆる地下水規制二法により地下水採取が西大阪では事実上禁止され、その後、地盤沈下

は鈍化した。地下水採取禁止以前は天満砂礫層は支持層であると同時に、第一滞水層として非常に重要な層であった。大阪の滞水層の水位変動は図-12¹⁸⁾に示したように、上記のことを如実に示している(図中の地下水位観測所位置は図-2に示した)、すなわち、地下水採取が禁止された昭和37年までは地下水位は急激に低下し、地下水規制後昭和40年までに地下水位は急激に回復した。その後も徐々にではあるが水位の回復がみられ、現在もその過程にある。昭和40年までは天満砂礫層の水位は回復しつつあるものの、西大阪の掘削工事では釜場揚水程度でドライワークが可能であった。しかし、最近では天満砂礫層の水位はO.P.-2mまで回復し、昭和37年に比べ10m以上の水位回復であるため、かなりの揚水設備を準備しなければ掘削工事が不可能になっている。かつ、最近では地下掘削工法は地下連続壁を多用するようになり、過去の多くの地下掘削工事における経験とは条件が異なり、施工計画にかなり難しい問題が生じている。

以上のような状況から、最近実施される西大阪の大規模地下掘削工事の時には、天満砂礫層の地下水条件の調査が実施され、施工時の地下水位変動の実測例が多くなった。そこで、今後の工事の参考となるようにそれらの例⁷⁾を以下に紹介する。

天満砂礫層の揚水試験結果の透水係数は場所により大きな差がみられ、 $k=10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/sの範囲を示している。その理由は前節でも述べたように、天満砂礫層の粒度組成が異なるためである。大阪駅前で実施された揚水試験結果は図-3に記したように $k=3 \times 10^{-1}$ cm/sで、図-6の粒度分布の内でも最も粗粒分の多い粒度組成である。大阪駅近辺で地下掘削工事が実施された際に図-13の位置で地下水位が実測された。それらの結果から各滞水層の地下水位はどのように変動したかを示したのが図-14である。従来の天満砂礫層を2.で述べたように二層に分け、天満砂礫層上部の沖積砂層をW₁層、天満砂礫層をW₂層とした。したがって、従来呼ばれた滞水層番号が一つずつずれていることに注意されたい。図中の細線は各地点での実測値であるが、それらから揚水地点以外の場所での滞水層の水位変動をモデル化したものを点線で示した。また、図中に大阪市が定期的実施している地下水位観測結果¹⁸⁾のうち、天満

図-14 地下水位変動測定結果⁷⁾

砂礫層の島屋町と、上記水位測定近辺の中之島(W₄)の結果を併記した。図の下部に各地点での天満砂礫層からの揚水時期を示した。天満砂礫層からの揚水により各滞水層とも水位変動を示していることが図から読みとれる。B, C地点の揚水により 1.3 km 離れたA地点の W₂ 層の水位変化がみられ、W₂ 層はかなりの透水性を示すことが分かる。また、W₁ 層と W₄ 層の水位はほぼ 3 m の水位差で平行に変化を示し、W₂ 層とは変動量が異なり、W₁ 層は W₂ 層と連続していないことがうかがえる。

以上のように、天満砂礫層の水位は現在かなり高くなっていることから、掘削工事には特に注意せねばならず、地下掘削に限らず、場所打ち杭の施工においても、地下水位のバランスを誤ると掘削孔底でボイリングを起こす可能性があり、支持力低下の原因となる。

6. あとがき

以上、天満砂礫層の力学的性質を中心に述べたが、支持層として最も重要な支持力については検討されねばならない問題が多く本文では割愛した。砂礫地盤の支持力理論はすべり面を考えたものであるが、BCP 委員会の調査結果や乱さない試料の力学試験結果ともあわないことを問題提起しておくにとどめる。砂礫層の地下水は工事に当たっては力学特性と同じように重要な問題であるのでふれておいた。実際の工事に当たって本文が何かの参考になれば幸いである。

本文をまとめるに当たっては建設省建築研究所からの委託である大阪地盤区分図委員会の活動成果を多く参考にさせていただいた。委員会のメンバーの方々には感謝の意を表します。また、力学試験の実施に当たって多くの御指導をいただいた大阪市大の故竹中教授および三笠教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山根新次：大阪市地質概観，小川博士還暦記念地学論叢，pp. 187-203, 1930.
- 2) 日本建築学会近畿支部・土質工学会関西支部：大阪地盤図，コロナ社，1966.
- 3) 藤田和夫・前田保夫：伊丹段丘，伊丹市史第1巻抜刷，1971.
- 4) Ikebe, N., J. Iwatsu & J. Takenaka: Quaternary Geology of Osaka with Special Reference to Land Subsidence, Jour. of Geoscience, Osaka City Univ. Vol. 13, Art 4, 1970.
- 5) 梶山彦太郎・市原 実：大阪平野の発達史，地質学論集，第7号，pp. 101-112, 1972.
- 6) 前田保夫：大阪湾の自然，科学，Vol. 47, No. 9, pp. 514-523, 1977.
- 7) 大阪地盤区分図委員会：地盤区分図に関する研究，建設省建築研究所，1979.
- 8) 三木幸蔵・森島和之：上町台地の形成と形態について，第15回土質工学研究発表会，pp. 9-12, 1980.
- 9) 土質工学会編：大阪地盤一特に洪積層の研究とその応用一，p. 113, 1977.
- 10) 西垣好彦・竹中準之介：標準貫入試験の基礎的研究(IV)，第10回土質工学研究発表会，pp. 27-30, 1975.
- 11) 西垣好彦・岡島洋一・吉田達夫：乱さない砂質土の2, 3の力学特性，第9回土質工学研究発表会，pp. 235-238, 1974.
- 12) 貝戸俊一・阪口 理・西垣好彦・三木幸蔵・湯上英雄：大型貫入試験，土と基礎，Vol. 19, No. 7, pp. 15-21, 1971.
- 13) 土質工学会編：大阪地盤一特に洪積層の研究とその応用一，pp. 132-145, 1977.
- 14) 西垣好彦・三木幸蔵・北川義治・森島和之・池尻勝俊：天満砂レキ層の強度特性について，第15回土質工学研究発表会，pp. 505-508, 1980.
- 15) BCP 委員会：砂層に支持されるくいの支持力に関する実験的研究，1969.
- 16) 竹中準之介・柳 大夏：大阪洪積砂レキ層の高圧下での力学特性，第5回土質工学研究発表会，pp. 69-72, 1970.
- 17) 西垣好彦：砂地盤におけるN値，サウンディングシンポジウム，pp. 95-100, 1980.
- 18) 大阪市環境保健局環境部：大阪市内地盤沈下地下水水位観測年報，1980.

(原稿受理 1982.10.13)