

泥水掘削壁面の安定に関する一考察

佐藤 寛
吉田 隆次

概 要

本報告は泥水掘削壁面の安定問題を解明するために実施した基礎的な調査結果に関するものである。今回の調査内容は従来の文献にもとずき泥水掘削壁面の性状を室内模型実験によって定性的に調査すること、および実際に現場で使用されている泥水の比重調査であった。

本報告においては、第1章において従来の文献についてその概略を紹介し、次いで第2章において室内模型実験の結果から泥水掘削壁面の性状を明らかにすると共に壁面の崩壊状況から壁面安定のための条件に関して考察をおこなった。また第3章においては現場泥水比重の実態調査結果にもとずき種々の考察をおこない、現在、現場で利用されている安定計算法でも一応1以上の安全率が得られることを示した。

序

泥水を使用して地中に穿孔する方法は古くから石油鉱山部門において実施されているが、この方法が建設部門の一地下方法として採用され実施されるようになったのは1950年代になってからである。特に、わが国においては、騒音、振動等の公害が社会問題化されるにしたがって泥水工法が無音無振動工法として脚光を浴びるようになり、市街地における実績は飛躍的に増加しつつあるのが現状である。また、施工実績の増加にもない施工技術面での進歩発展もまさに日進月歩ともいべき状況を示している。

このように泥水工法が飛躍的に発展し、施工実績が増加してきている反面、泥水工法の理論面での進歩はほとんどみられていない。特に、泥水掘削壁面の安定機構についてはいまだに理論的な解明がなされていない状態であり、泥水工法は理論よりもむしろ経験が先走った工法であるといわれるゆえんとなっている。

この原因として考えられることとして、建設部門における泥水工法そのものの歴史が浅く、特殊工法であるため興味を持たれる機会にめぐまれなかったこと、あるいは施工上問題化されるような壁面崩壊がほとんど発生していないことなどがあげられよう。事実、泥水工法の施工にたずさわった人達の中にも、泥水を使用しさえすれば必ず孔がうまく掘れるという固定観念を持っている人が非常に多い。

しかし、泥水工法が最近、有力な無音無振動工法としてクローズアップされるにもなって、掘削壁面安定問題についても注目されるようになり、わが国でも

この問題を論じた報告が2、3みられている。

このような状況のもとで著者等も昨年来泥水掘削壁面の安定に関する研究の一環として基礎的な実験、調査を実施してきたが、その結果がまとまったのでとりあえずここに報告する次第である。

なお、泥水工法には場所打ちコンクリートクイ等を対象とした円形掘削と、地中連続壁体構築を対象とした矩形掘削とがあるが、ここでは後者を対象とするものである。

1. 泥水掘削壁面の安定機構に関する文献について

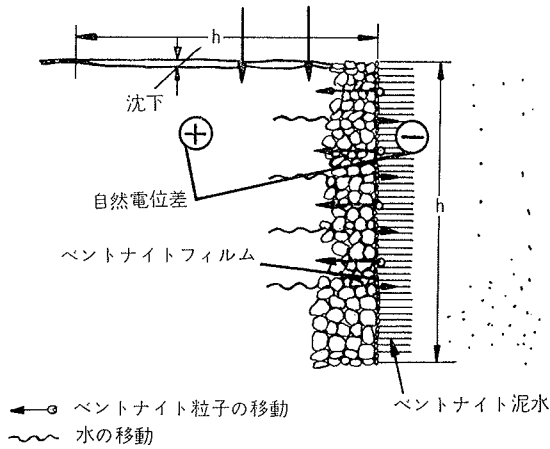
泥水掘削壁面の安定問題を論じた報告は主にヨーロッパにおいてなされており、おのおの特徴があって非常に興味深いものがあるのでここに紹介する。

これらの報告を総合すると、基本的には泥水圧と土圧(水圧も含む、以下同様)との釣り合いを考えているが、これを詳しく分類すると、

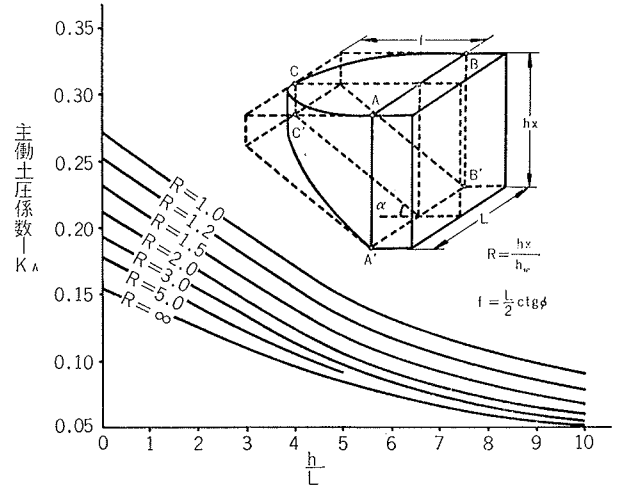
- (1) 泥水圧の他に(+ α)の力を考慮するもの(Veder¹⁾²⁾ Lorenz³⁾ 浅川⁴⁾等)。
- (2) アーチ作用の効果を考慮して土圧係数の低減を図るもの(Piaskowski⁵⁾等)。
- (3) 安全率を導入し、土圧と泥水圧との釣り合いから所要泥水比重を求めるもの(Nash⁶⁾ Morgenstern⁷⁾ Grewe⁸⁾等)。

となり、いずれも泥水と土との境界面に不透水性の膜(マッドケーキ)が形成されることを前提としている。

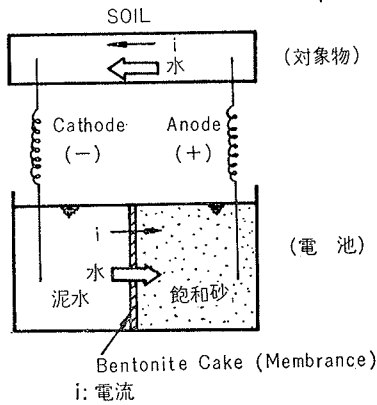
Vederは泥水掘削壁面が安定を保つためには泥水圧の他に何らかの要因が存在しなければならないとし



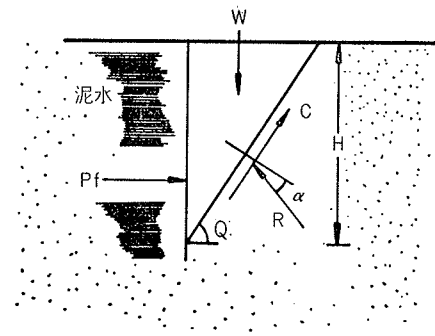
図一 起電力による粒子移動(Veder)



図三 アーチ作用の効果を導入した土圧係数(Piaskowski)



図二 起電力による水の移動(浅川)



図四 掘削壁面における力の釣り合い(Nash)

て、マッドケーキの強度を考慮することを提案した。

すなわち、Vederはマッドケーキを付着させた砂の供試体について三軸圧縮試験を実施した結果から σ_{III} が理論値より減少することを示し、これはマッドケーキの強度に起因するものであるとした。さらに、この σ_{III} の減少分が、現場における泥水掘削壁面に作用する土圧、泥水圧の釣合計算より求められた泥水圧の不足分と比較的よい一致を示したことから、マッドケーキの強度の重要性を主張した。また、マッドケーキ形成については一般に泥水が(-)、土が(+)となるような起電力が発生し、これにもとづいて図一1のごとき粒子移動が生ずることによると説明している。

Lorenzは、泥水掘削がおこなわれると掘削壁面は泥水側に変位しようとし、そのために泥水は上方へ移動させられる傾向があるとした。そしてこのとき泥水と掘削壁面との間にせん断抵抗が生じ、この力が安定上重要な役割を果すものと考えた。

また、浅川はVederの起電力の考え方を支持したがVederと異なり図二のごとき系を考えたとすなわ

ち、泥水—水の系を一種の電池と考え、電池内では電流が(-)から(+)へ流れるため、これにともない水も(-)から(+)へ移動するとした。そのため膜(マッドケーキ)面に圧力が作用するとして、これを異常浸透圧と称し、これが安定上重要であると考えた。

以上が泥水掘削壁面が安定を保つための要因として泥水圧以外の力を考慮した代表的な考え方であるが、いずれも泥水圧のみでは釣り合いが保たれないということから出発している。

一方、Piaskowskiは、泥水掘削断面が矩形でしかも有限長さであることに着目し、土圧の考え方としてトンネル頂部に作用する土圧と同様な考え方にもとづきアーチ作用の効果を導入した。図三はその1例であるが、同図にみられるように掘削深さと地下水位との比をパラメーターとして、掘削深さと掘削長さとの比から土圧係数を求めるようになっている。この方法によれば、通常の泥水掘削における深さと長さの割合から判断して、土圧係数を相当小さくとってもよいことになる。

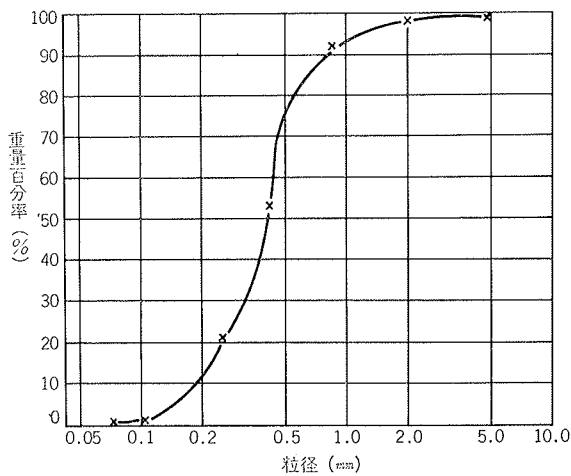
Nash, Morgenstern, Grewe等の考え方は、先に紹

介したように泥水圧と土圧と安全率とを用いて所要泥水比重を求めるといごく一般的な方法にもとづいたものである。1例としてNashの理論を紹介すると、Coulomb直立面の臨界高さを求める式を基本とし、図一4のごとき力の釣り合いを考へて所要泥水比重を求めている。この方法にもとづいて所要泥水比重を求めた場合、調泥不可能なほど大きな比重をもつ泥水を必要とすることも起りうる。

2. 泥水掘削壁面の性状に関する考察

ベントナイト泥水を使用して掘削すると、泥水は地盤中に侵入すると共に掘削壁面にマッドケーキを形成する。本章においては泥水掘削壁面におけるこれらの性状を調査する目的でおこなわれた室内模型実験の結果について考察をおこなうものである。

実験は、観察を容易にするためガラスの壁面をもつ実験槽に土を詰め、この土を泥水を注入しながら掘削する方法によっておこなわれた。土としては、図一5のごとき粒度分布の砂、および海成粘土が使用され、また泥水材料としては、250メッシュの群馬産ベントナイトおよびCMCが使用された。

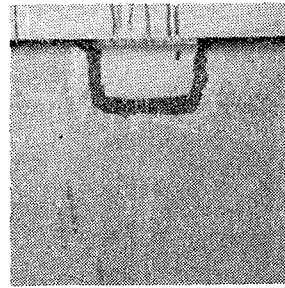


図一5 実験砂の粒度分布

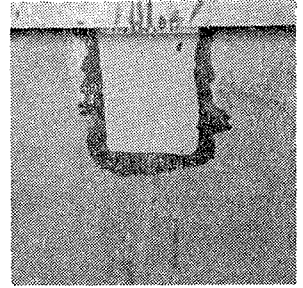
2.1. 土中への泥水の浸透、およびマッドケーキの形成に関する考察

実験の1例として、10%ベントナイト泥水を使用して乾燥砂地盤を掘削した際の状況を図一6～図一11に示した。写真中、白く見える部分が泥水で満たされたトレンチであり、黒く見える部分が泥水が乾燥砂中に浸透した部分である。また、マッドケーキの形成については写真からでは明確に判定できない。

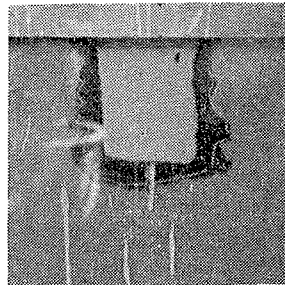
マッドケーキは別名フィルターケーキと称されていることから明らかなように、その形成原因として泥水が地盤中に浸透する際、壁面において泥水がろ過さ



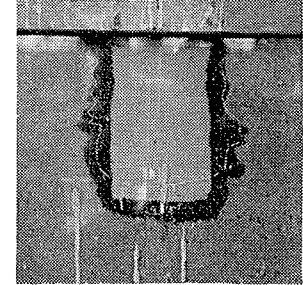
図一6 10cm掘削時



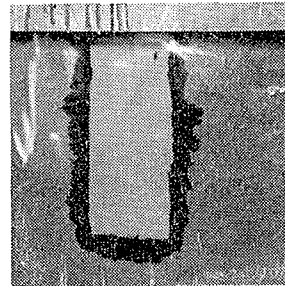
図一7 20cm掘削時



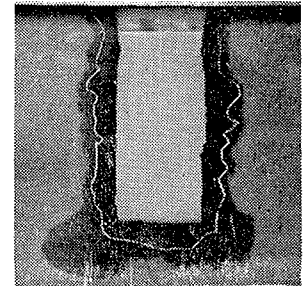
図一8 20cm掘削時
(2時間放置)



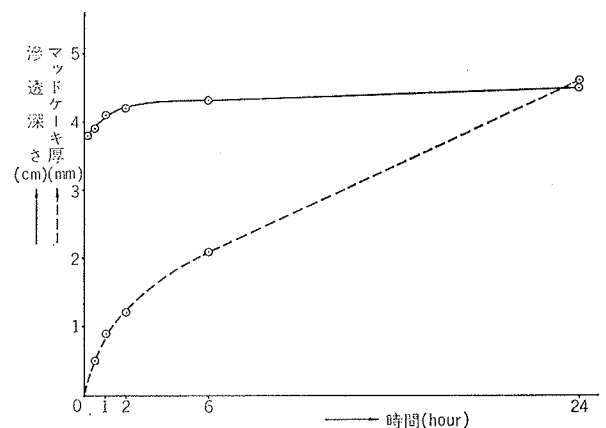
図一9 30cm掘削時



図一10 40cm掘削時



図一11 40cm掘削時
(18時間放置)



図一12 泥水の浸透深さとマッドケーキの形成厚さとの経時変化

れることによると説明されている⁹⁾。したがって、泥水の浸透とマッドケーキの形成とは相互に密接な関連があるといえよう。

図一12は10%ベントナイト泥水を使用して砂地盤を掘削した場合における泥水の浸透深さとマッドケーキ

の形成厚との経時変化を示したものである。泥水の浸透深さ、マッドケーキ共に掘削深さの中間部の値を測定し、数回の実験結果の平均値がプロットされている。図-12からも明らかなように、泥水の浸透は土が排出されると同時におこなわれ、マッドケーキが形成されるにしたがって浸透量も減少してゆく。実験においてマッドケーキが可視となるのは掘削終了後10分ないし30分経過後であったが、浸透深さの曲線から判断すれば掘削終了後10分経過までに既にマッドケーキが形成されていると推定できる。また、泥水の浸透量は掘削終了後2時間を過ぎると非常に少なくなるが、一方マッドケーキ厚に関しては、2時間経過後においても増加割合は鈍るが相変わらず増加していることが認められる。この現象および粘土地盤の場合に砂地盤の場合の約2倍の厚みのマッドケーキが形成されたことを考慮すると、マッドケーキの形成原因としていわゆるろ過のみでなく、他の原因によるベントナイト粒子の付着も考えられる。

以上に10%ベントナイト泥水を使用した場合におけ

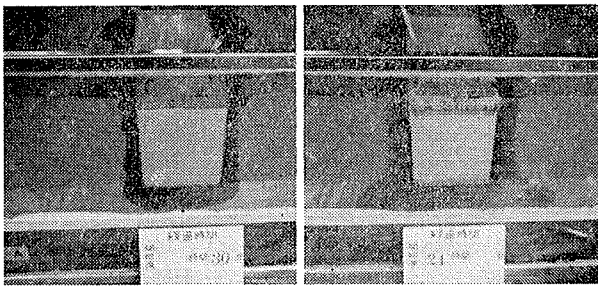


図-13 30分経過時

24時間経過時

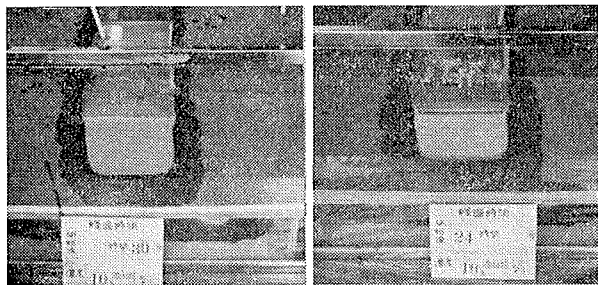


図-14 30分経過時

24時間経過時

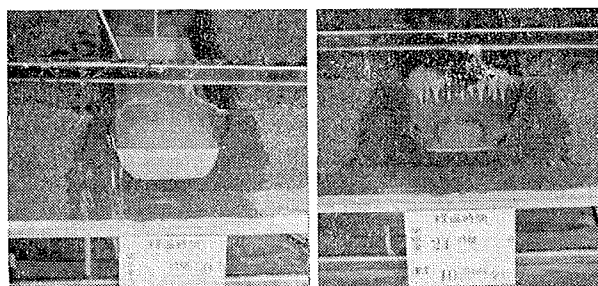


図-15 30分経過時

24時間経過時

る泥水の浸透深さとマッドケーキ形成とに関する考察をおこなったが、双方共、ベントナイト濃度、CMC等の添加剤の有無、あるいは地盤を構成する土粒子の粒度等によって影響を受けることはもちろんである。1例として、土粒子の粒度を変えた場合の実験について図-13～図-15に示した。いずれも10%ベントナイト泥水を使用して掘削したものであるが、図-13においては粒度0.4mm以下の砂が、図-14においては粒度0.4mmから0.6mmの間の砂が、図-15においては0.6mmから5mmの間の粒度の砂が使用されている。なお、図-15の場合にはマッドケーキの形成はほとんどみられなかった。

このように砂地盤中において泥水掘削をおこなう場合、必ず泥水の浸透がおこなわれるが、それにともなってベントナイト粒子も土中に侵入し、土の間隙を埋

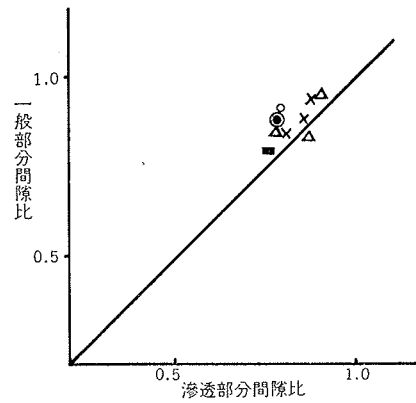


図-16 泥水の浸透部分と一般部分の間隙比

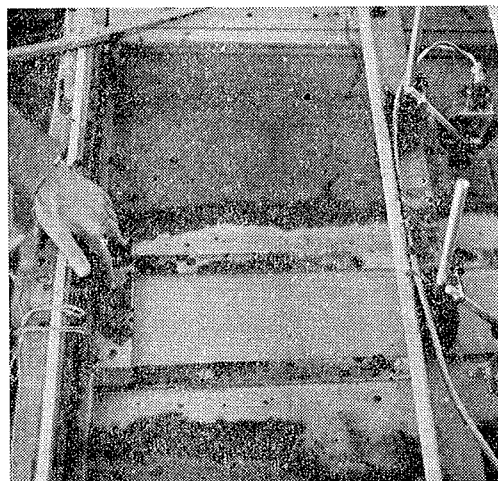
めることによって一種の土質改良がおこなわれる。このことは、図-16にみられるように泥水の浸透部分の間隙比が一般部分の間隙比よりも小さくなっていることから容易に推定できよう。この土質改良の意義はこれによる強度増加よりもむしろ泥水を持つ粘性により土粒子個々の挙動を拘束することにあると考えられる。すなわち、水によって乾燥砂地盤の掘削ができないのは、個々の土粒子が独立した挙動を示すためであるが、ベントナイト泥水あるいはCMC溶液によって掘削した場合には、これらの泥水が土粒子間に侵入することによって土粒子を拘束し、土粒子がのりづけされた状態にするために掘削が可能となると考えられる。

したがって、砂地盤における掘削壁面の安定が保たれるのはマッドケーキよりもむしろ地盤中に侵入した泥水によって砂粒子が拘束される結果になると考える方が妥当なようである。このような考え方をすれば、掘削時のマッドケーキの形成に多少の時間を要しても壁面が崩壊しないことの説明がつけられる。

2.2. 泥水掘削壁面の崩壊性状

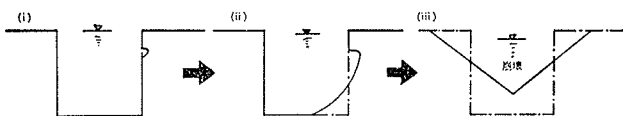
今回の実験において、著者等は数回の壁面崩壊を経験した。その状況についてここで考察を行なう。

砂地盤において壁面崩壊が発生する場合、本実験に関する限り、泥水に起因するものであることは明らかである。もちろん、泥水濃度が非常に薄い場合には水で掘削することと大差がないので論外とする。砂地盤における壁面崩壊の性状は次のごとくである。すなわち、掘削中壁面から砂粒子が分離し、壁面に沿ってわずかずつ下方に落下するのが認められ、この状態が続くと土粒子が分離している部分の壁面に欠陥部が生ずる。さらにこの欠陥部が拡大し、この欠陥部より上の部分の砂が自重による崩壊し全面崩壊にいたる。この状況を図示すると図一17のごとくなる。この原因は前節で述べたごとく、泥水の砂粒子拘束力が不足していたことによると推察される。ということはやはり泥水濃度の不足、あるいは泥水劣化が原因ということになり、事実、泥水を反覆使用した場合、あるいは濃度が不足気味の泥水を使用した場合に、このような壁面崩壊が発生した。いまひとつの砂地盤における壁面崩

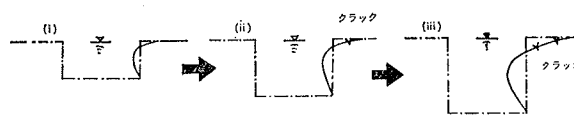


図一21 ガイドウォール裏の土の陥没

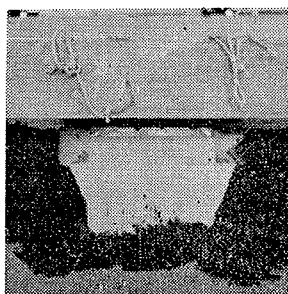
壊例は、図一18～図一21に示すごとのきもである。この原因はガイドトレンチが固定されていなかったこと、ガイドトレンチ裏の地表面に泥水が多量とほれたこと、および泥水濃度が不足気味であったこと等である。この崩壊例においても、泥水濃度が適正であれば全面崩壊にはいたらなかったものと考えられる。



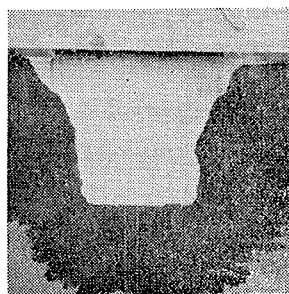
図一17 砂地盤の壁面崩壊状況



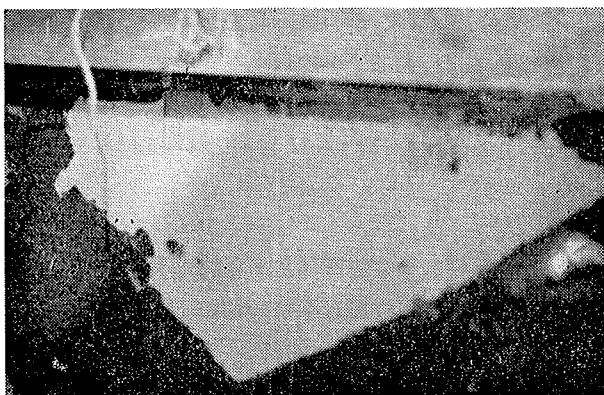
図一22 粘土地盤の壁面崩壊状況



図一18 10cm掘削



図一19 15cm掘削



図一20 崩壊(20cm掘削時)

次に、粘土地盤における崩壊例について述べる。この実験には含水比を100%として練り返した粘土が使用されたが、掘削深さが増大すると共に図一22のごとく壁面がふくらみ、地表面沈下が生じた。この原因は明らかに泥水圧の不足によるものといえる。

以上、壁面崩壊例についてモデル化して述べたが、これらの崩壊例から逆に壁面安定のための条件を求めると次のようになる

- (i) 壁面を構成する土粒子個々の挙動が拘束されること。
- (ii) 泥水圧と土圧との釣り合いが保たれること。

3. 現場泥水比重の実態調査結果に関する考察

泥水掘削壁面の安定を考える場合の基本が泥水圧と土圧との釣り合いにあることは第1章においても言及した。この場合、土圧の考え方に問題があることは泥水掘削壁面と一般土留との相違から当然考えられることである。他方、泥水圧についても、現場においてどの程度の値となっているのか、その実測値について発表された例はない。このような現状であるので、基礎

的調査の一環として現場で使用されている泥水比重の実測をおこなった。実測は、現場で掘削が終了した直後のトレンチから深さ2m毎に採水器で泥水を採取し、その比重を測定する方法、および土圧計を泥水中に吊り下げて直接泥水圧を実測する方法とを併用しておこなわれたが、両者の間によい一致がみられた。

表一に、現場別の土質、泥水比重実測結果一覧表を示した。表からわかるように、京都の土質は砂レキ日本橋は砂質土、十三は上部砂質土、下部粘性土、内幸町は粘性土となっている。

の泥水比重実測結果である。ソレタンシュ掘削では、リバースサーキュレーション方式により泥水を循環させ、その過程にサイクロンを経るため、内幸町比重Aと比較しても明らかなように、比重増分が低くなっている。

このように、泥水比重増分は土質、掘削形式、泥水濃度によって異なるが、現在おこなわれているクラムシェル方式による掘削においては、泥水比重は粘性土層で1.3、砂質土層で1.1程度まで増加することは十分に考えられることである。

3.2. 実測泥水圧と 計算土圧との比較

表一に示した泥水比重実測結果にもとづいて、各現場における泥水圧と土圧との比較をおこなった。その場合、先にも述べたように土圧の考え方に問題があるが、ここでは土の塑性平衡状態にもとづくRankine式によって土圧算定をおこなうことにした。

図一23にその結果を示した。図中太線は泥水圧分布であり、細線は土圧分布である。図から各現場における泥水圧および土圧分布を比較すると、十三の16m以深を除いて他はすべて泥水圧が土圧よりも大きくなっていることがわかる。また、これらの分布から求めた全泥水圧に対する全土圧の割合を示すと、京都：0.64、日本橋：0.68、十三：0.94、内幸町：0.61、となる。また内幸町のソレタンシュ掘削の場合には泥水比重がクラムシェル掘削に比較して小さいため、0.74となった。

この結果から推定すれば、特殊な場合（例えば、サーチャージが非常に大きい場合、あるいは地下水位が非常に高い場合）を除いて一般的には泥水比重増分によって十分土圧に対抗できるものと考えられる。

結 語

泥水掘削壁面の安定問題に取り組んでから1年有余の月日が過ぎたが、まだ初歩の段階を脱しえない状態である。室内実験を実施するにしても、最も重要な壁面の挙動を定量的に把握することが、現在の計測方法では不可能であり、さしあたり計測方法の開発からは

京 都		日 本 橋			十 三		新 霞 ヶ 関			
土質	比 重	土質	比重A	比重B	比重C	土質	比 重	土質	比重A	比重B
	1,080		1,100	1,070	1,112		1,055		1,253	1,157
0										
2	1,080		1,105	1,092	1,112		1,178		1,370	1,180
4	1,090		1,112	1,085	1,120		1,239		1,335	1,181
6	1,095		1,115	1,100	1,112		1,270		1,375	1,180
8	1,080		1,115	1,105	1,110		1,318		1,319	1,180
10	1,195		1,105	1,100	1,112		1,315		1,310	1,190
12	1,005		1,115	1,100	1,115		1,321		1,325	1,188
14	1,095		1,115	1,105	1,108		1,335		1,335	1,182
16	1,100 (-15.5m)		1,110	1,112	1,128		1,361		1,265	1,185
18			1,110	1,118	1,120		1,305		1,303	1,185
20			1,120	1,122	1,121		1,320		1,320	1,190
22			1,105	1,135	1,122				1,225	1,200
24			1,120	1,140	1,118					
26			1,135	1,148	1,110					
28			1,120 (-27.5m)	1,170 (-27.1m)	1,135					
平均	1,091	平均	1,114	1,112	1,116	平均	1,294	平均	1,303	1,184
備考	粘土分を含む	備考	掘削終了直後	掘削終了後約19時間経過時	-27.1m掘削終了直後	備考		備考		
○使用泥水 (ベントナイト10%) CMC0.05% ○掘削機 クラムシェル		○使用泥水 (ベントナイト8%) CMC 0.05% ○掘削機 クラムシェル			○使用泥水 (ベントナイト8%) CMC0.05% ○掘削機 クラムシェル		○使用泥水 (ベントナイト10%) ○掘削機 クラムシェル (A) ソレタンシュ (B)			

表一 現場泥水比重の調査結果

3.1. 泥水比重の増分について

表一において、内幸町比重Bを除く他の実測値はすべてクラムシェル掘削によるものである。各現場で使用された泥水の混練時比重は1.05程度であるので、各現場共比重が増加している。この比重増加の程度は地盤中に占める粘性土の割合が多いほど大きくなっており、内幸町においては1.3を越える比重となっている。したがって、ここに示されている程度の割合による泥水が掘削に使用される場合には、主として粘性土が泥水中に混入し比重を増加させることが推定できる。

次に、内幸町比重Bはソレタンシュ掘削による場合

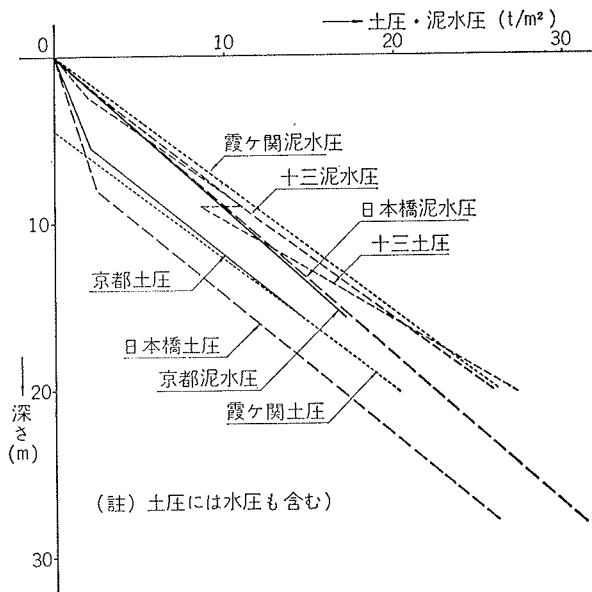


図-23 泥水圧(実測値)分布, 土圧(計算値)分布

じめなければならぬ。現状では、このような制約があまりにも多すぎるきらいがあるが、今後もこの研究をすすめてゆきたいと考えている。

なお、本研究にあたって、当技研土質基礎研究室、喜田室長に種々のご助言をいただいたこと、および実験をすすめるにあたり当組東名沼津工事事務所 小谷職員にご苦勞をおかけしたことを付しここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) C. Veder: Die Bedeutung natürlicher electrischer Felder für Electroosmose und Electro-kataphoresis im Grundbau, Der Bauingenieur. 38 Heft 10(1963) 50~55
- 2) C. Veder: Excavation of Trenches in the Presence of Bentonite Suspensions for the Construction of Impermeable and Load-bearing Diaphragms, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. (1963)
- 3) H. Lorenz: Utilization of a Thixotropic Fluid in Trench Cutting and the Sinking of Caissons, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice.
- 4) 浅川美利, 手島 渚, 吉田泰治: 泥水による壁面安定機構に関する2,3の考察, 土木学会第22回年次学術講演会, 講演概要(1967)
- 5) A. Piaskowski, Z. Kowalewski: Application of Thixotropic Clay Suspensions for Stability of Vertical Sides of Deep Trenches without Strut-

ting, 6th International conference on S. M and F. E. (1965)

- 6) J.K.T.L. Nash, G.K. Jones: The Support of Trenches Using Fluid Mud. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice (1963)
- 7) N. Morgenstern, I. Amir-Tahmasseb: The Stability of a Slurry Trench in Cohesionless Soils Géotechnique, Vol. 15 No. 4 (1965)
- 8) H. Grewe: Die stabilisierenden Eigenschaften Thixotroper Flüssigkeiten im Grundbau Bautechnik-Arciv, Heft 17. (1965)
- 9) 藤井清光: 基礎工における地盤の安定(泥水工法) (1966)