

大阪湾海成粘土層の土質特性と地盤工学的課題

Soil Properties and Geotechnical Problems of Marine Clay Deposits in Osaka Bay

山本 浩司 (やまもと こうじ)

財地城 地盤 環境 研究所 主席研究員

田中 泰雄 (たなか やすお)

神戸大学教授 都市安全研究センター

三村 衛 (みむら まもる)

京都大学助教授 防災研究所

大島 昭彦 (おおしま あきひこ)

大阪市立大学助教授 工学研究科

松井 保 (まつい たもつ)

福井工業大学教授 建設工学科

1. はじめに

大阪湾ペイエリアは関西経済圏の拠点であり、埋立人工島の建設をはじめ様々な大規模プロジェクトが展開されている。そのような建設活動を背景として、この地域の地盤特性を明らかにすることが求められ、1984年より土質工学会関西支部（当時）に設けられた「大阪湾海底地盤の研究委員会」が起点となり、現在もその活動は母体を変えながらも引き継がれている^{1)~3)}。

大阪湾海底地盤の特徴は、軟弱な粘土層が沖合に向かって厚く堆積し、さらに10数枚の海成粘土層（Marine clay）が砂層との互層を成していることにある。この海成粘土層は、本誌の別稿⁴⁾に解説されるように約100万年の時代を経て自然界の作用により生成されたものであり、土質特性に地域性を有するとともに、深くに堆積する洪積粘土は擬似的な過圧密状態にある。

本稿では、大阪湾地盤の研究活動の中で構築された地盤情報データベース（約4300本）による研究成果より、Ma13層（沖積粘土層）とMa12層（最上位の洪積粘土層）の地域的な土質特性、および地盤工学の新たな課題である擬似過圧密粘土の圧縮特性について述べる。

2. 土質特性と地域性

2.1 地域性の全体像

大阪湾岸の粘土層は「神戸型」、「大阪型」、「泉南型」に大別されることが知られている¹⁾が、その間は急変するのではなく、連続的に変化している。まずは、その全体像を口絵に示す。

口絵写真—5は、大阪湾沖合の土質断面（コンシステンシーを併記）である。海底面からMa13, Ma12, Ma11.....の海成粘土層が砂・礫層との互層を成して堆積し、場所（地域）によって層厚と堆積深度が異なることがわかる。さらに各Ma層の土性は深度方向に変化し、地域的にも違いのあることがわかる。大阪湾とその周辺のMa13層とMa12層の堆積状況については、別稿⁴⁾の口絵写真—3, 4を参照されたい。

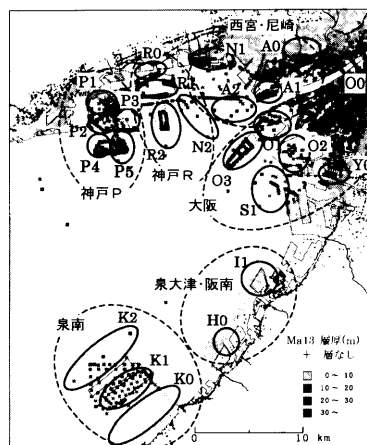
口絵写真—6, 7は、Ma13層とMa12層の層中央付

近の液性限界（上下端2割の部分を除く）を取り出し、カラーコンター図に示したものである。図からは、両層ともに大阪湾最奥部の大阪港周辺で液性限界が大きく、神戸港付近では南北にコンター線が立って西から東へ急増するように変化し、泉州沖の関西空港海域では沖側に液性限界が大きくなる状況が見て取れる。さらに、Ma13層に比べてMa12層は、液性限界の大きい高塑性な粘土の分布域が現在の陸域（尼崎・西宮等）にある。

同じ時代に、20~30 km四方の海域において堆積した粘土層がこのような地域性をなぜ有するのか、その理由はまだ十分に解明されていないが、当時の地形（海域の入り込みの深さと土砂供給源との関係）や、大阪湾内の潮流（明石海峡と紀淡海峡が海水の出入口）の影響等が要因として推察されている。今後、地盤工学や地質学等が協力して取り組むべき研究課題の一つである。

2.2 Ma13層の土質特性

Ma13層における各地域の土質特性を以下に述べる。研究³⁾では、図—1に示すように大阪湾に面する神戸から泉南までの地域を海岸域（旧海岸線沿い）、沿岸域、沖合域に属する24地区に分け、さらにそれらを6地域にゾーン化し、大阪湾地盤情報データベースより各地区のボーリングデータ（埋立地は自然地盤のデータ）を集約して土質特性を比較した。



図—1 24地区、6地域の区分

図一 2 と図一 3 に代表的な 3 地域の液性限界 w_L と液性指数 I_L の深度分布を示す。図は海岸域、沿岸域、沖合域に位置する地区を中抜き（線が上）、白塗り、黒塗りの記号で示した。各データは地区毎の平均値である（以下、同様）。まず、各地区の沖合域のデータに注目すれば、神戸型： w_L が深度方向に一定、大阪型：層中央で大きい弓形、泉南型：深度方向に単調減少の様子を見ることができる。それが、各地区間では次のように変化している。割愛した地域は文献³⁾を参照されたい。

神戸 P： $w_L = 80 \sim 100\%$ で最も低く、深度方向に一定。海岸域～沖合域へは北西・南東方向の地区で類似し、東側ほど w_L が高い。
 神戸 R： $w_L \geq 100\%$ で深度 15 m まで一定、下部で減少傾向。北西・南東方向に類似。
 西宮・尼崎：中央部で 120% 程度の弓形分布。北西・南東方向で類似傾向。
 大阪：典型的な弓形分布。海岸域の w_L は低く沖合域へと増加。

泉大津・阪南：泉南と同程度。

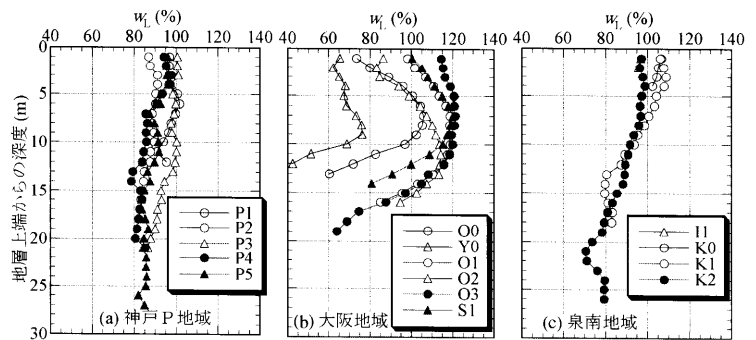
泉南： $w_L \approx 100\%$ より深度方向に単調に減少。層上部は沿岸域より沖合域の方が低い。また、海域部の各地区の I_L は神戸 P が最も低く、東側ほど高くなり、泉南が最も高い。これは w_L とは異なる傾向で実に興味深い。

図一 4 に圧縮曲線（粘土層上端から深度 7 ～ 9 m の平均値）を示す。神戸 P の圧縮曲線が最も下位にあり、大阪側ほど、かつ沖合域ほど上位に移動し、泉南では再び下方に移動する。その形状は、神戸 P では直線性が良く、大阪側では下に凸の曲線形状を示し（海岸域の Y0, O0 を除く）、圧密圧力が大きくなると収束する傾向にある。なお、破線は土田⁵⁾による基準堆積圧縮曲線である。

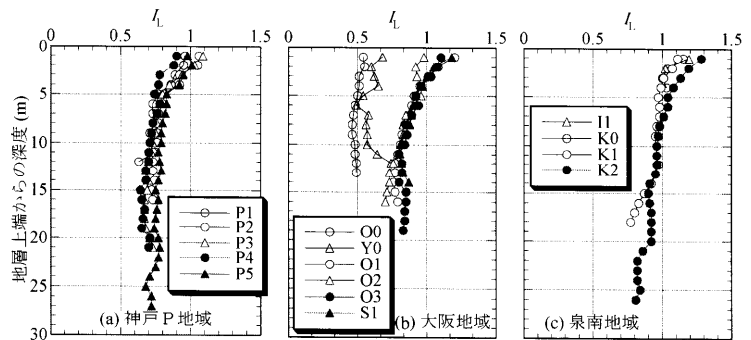
図一 5 に圧密降伏応力 p_c の深度分布を示す。各地区ともに p_c は深度方向に直線的に増加するが、神戸 P が最も大きく、有効土被り圧 p_0 線をかなり上回って、明らかに過圧密状態となっている。一方で東側ほど p_c は小さくなって大阪で最も小さく、 p_0 線とはほぼ一致し、ほぼ正規圧密状態となっている。泉南では逆に大きくなり、やや過圧密状態となっている。また、図示はしていないが、一軸圧縮強さ q_u も p_c と同様の状態を呈している。神戸 P の q_u が最も大きく p_0 線を上回り、東側ほど q_u は小さくなって大阪で最も小さく、神戸 P の半分程度の強度となっている。泉南では逆に大きくなり、神戸 R 付近と同程度の強度を示している。

2.3 Ma12層の土質特性

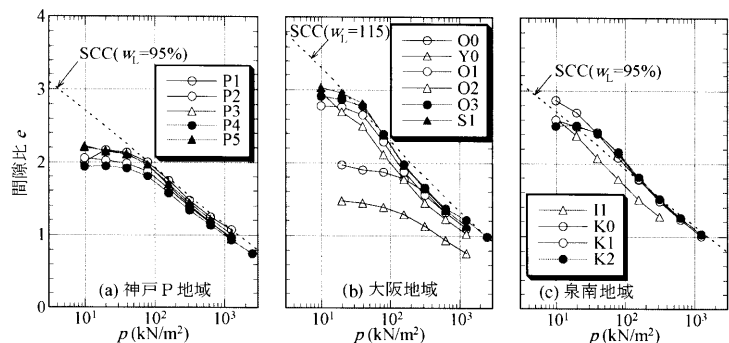
Ma12層は、今から約 12 万年前の大阪湾に堆積した粘



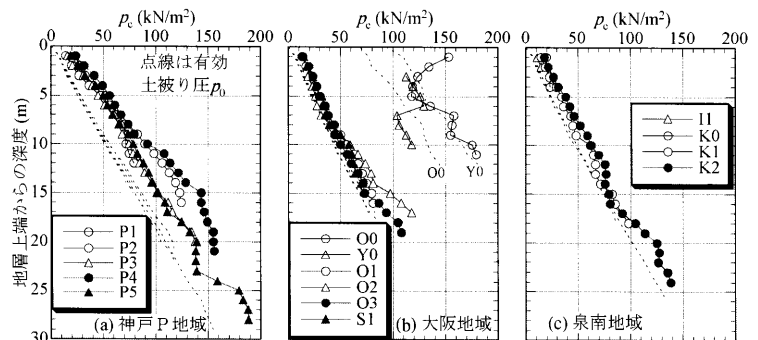
図一 2 各地区の平均液性限界の深度分布 [Ma13層]



図一 3 各地区の平均液性指数の深度分布 [Ma13層]



図一 4 各地区の代表圧縮曲線の深度分布 [Ma13層]



図一 5 各地区の平均圧密降伏応力の深度分布 [Ma13層]

土層である。いわば、当時において Ma12層は沖積粘土層であり、堆積環境に大きな差がなければ、現在の沖積粘土層（Ma13）と同様な土質特性と地域性が見られるはずである。そのような観点から Ma12層における地域の土質特性の要旨を述べる。

図一 6 に代表的な 3 地域における Ma12層の液性限界 w_L の深度分布を示す。地域区分は、Ma13の場合と同様に 24 地区、6 地域に区分し、検討を行った（図一 1 参照）。また、ここでは口絵写真一 7 に示したように、Ma12層

論文

の塑性が最も高い西宮・尼崎地域を大阪地域に代えて示した。図からは、図-2のMa13層と全く同様な深度分布と値を見ることが出来る。図示はしていないが、神戸R地域でも「大阪型」の弓形分布が現れ、「大阪型」の地域は大阪のみでなく西宮・尼崎の陸域にまで分布している。このことは、Ma12層が堆積した時代には、この地域は現在よりも海岸線が陸域に入り込んで水深が深かったことを示唆している。

図-7にMa12層の圧縮曲線（粘土層中央付近の平均値）を示す。神戸地域でMa13層とMa12層に挟まれる砂・礫層の層厚が厚いという荷重条件の違いはあるものの、図-4のMa13層と同様な圧縮性の違いを見ることが出来る。このほかに液性指数や強度特性などのデータより、各地域の粘土は、神戸地域は「構造があまり発達していない鋭敏性の低い擬似過圧密粘土」、大阪地域は「構造が発達した圧縮性の高い擬似過圧密粘土」、泉南地域は「構造が最も発達した鋭敏性の高い擬似過圧密粘土」と推察される。

3. 擬似過圧密特性

大阪湾では大規模埋立により洪積粘土層の沈下現象が顕在化している。この現象は深い洪積粘土層にまで達し、Ma12層以深のMa11～Ma9層にも時間依存性沈下が観測されている³⁾。大阪湾の各Ma層は、地史的に現在の土被り圧以上の荷重を受けたことがないので、土質力学的には正規圧密の状態にあるが、室内試験（段階荷重圧密試験）からはOCR=1.3程度の過圧密性が得られ、深い洪積粘土層ではこの過圧密領域において沈下が生じている。この擬似過圧密性はセメンテーション等の年代効果が成因であり、“構造の発達”の程度は沈下挙動に深く関与していると推察される。ここでは、その挙動を示す一つの試験データを示す。

図-8は、大阪港沖合で採取されたMa12粘土試料の長期圧密試験結果を、ひずみ速度および荷重時間による圧縮曲線にまとめたものである³⁾。図より明らかなように、過圧密領域で時間依存性沈下が発生する様子が示されている。ただし、このような室内試験のデータが現地の粘土層の沈下予測とどのように結びつくかは、現在各方面で鋭意研究が進められているが、今後の研究成果を待たなければならない。

4. ま と め

約20年におよぶ大阪湾地盤の研究結果より、大阪湾海成粘土の土質特性と地盤工学的課題に関して一端を紹介した。土質特性については、同じ時代に20～30 km四方の海域において堆積した粘土層であるにもかかわらず、特徴的な地域性を有することを示した。地盤工学的課題については、擬似過圧密性とその圧縮挙動を示す試

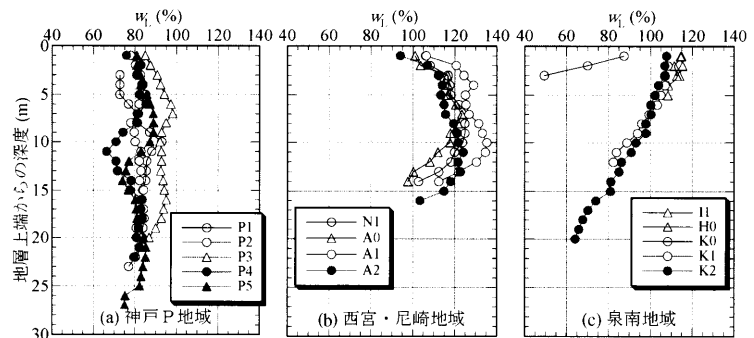


図-6 各地区の平均液性限界の深度分布〔Ma12層〕

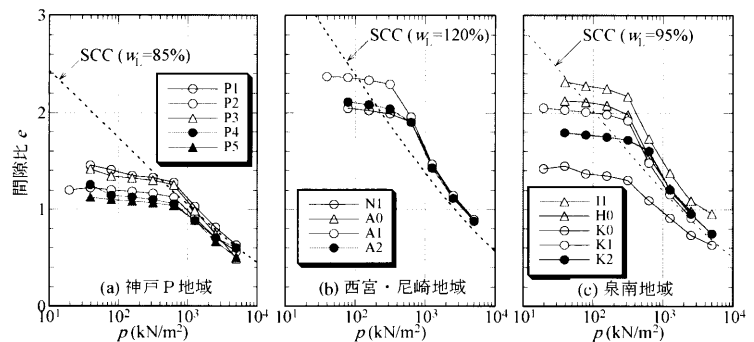
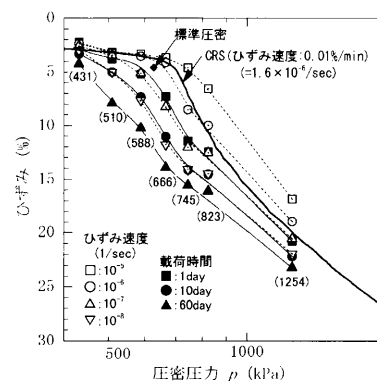


図-7 各地区の代表圧縮曲線の深度分布〔Ma12層〕

図-8 長期圧密試験による $\varepsilon \sim \log p$ 関係の時間的推移〔Ma12層〕

験データを示した。

現在、この研究活動の視点は、事実として存在する地域の地盤特性の生成要因を知ることに移行している。“堆積環境”をキーワードに、地盤工学のみならず地質学等とも協力して研究を進めているところである。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会関西支部・大阪湾海底の地盤研究委員会：大阪湾海底地盤，171p. 1990.
- 2) 土質工学会関西支部・大阪湾地盤情報の活用に関する研究委員会：海底地盤—大阪湾を例として—，590p. 1995.
- 3) 大阪湾地盤情報の研究協議会・大阪湾地盤研究委員会：ベイエリアの地盤と建設—大阪湾を例として—，505p. +65p. 2002.
- 4) 北田奈緒子・竹村恵二・三田村宗樹・中川康一：大阪堆積盆地（大阪湾岸域～大阪平野部）の堆積環境と表層構造，土と基礎，Vol. 53, No. 6, pp. 7～9, 2005.
- 5) 土田 孝：海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈，地盤工学会論文報告集，Vol. 41, No. 1, pp. 127～143, 2001.

（原稿受理 2005.2.15）