

広く使われている三成分コーン(コーン先端抵抗, 周面摩擦抵抗, 間隙水圧)の機能に加え地盤の密度と水分量を連続的に測定できるものである。図-1にRIコーンとその調査の様子を示す。RIコーンには、中性子-水分コーンと γ 線-密度コーンの二種類あり、この二つを利用することで、地盤の自然含水比と湿潤密度が正確に測定できる。RI線源には極低レベルの密封線源を使用しているため、安全な調査が実施可能である。RI密度計の測定原理は、 γ 線と電子との相互作用(散乱と吸収)を利用して、電子の空間存在度に比例する質量の空間存在度=湿潤密度を測定する。RI水分計は中性子の運動エネルギーを減衰させる能力において水素原子の原子核=陽子が際立って高い事を利用して、エネルギーを失った中性子の量から水素原子の空間濃度、つまり単位体積辺りの水の量を測定する。軟弱地盤調査では、三成分コーンなどを用いることで地盤の力学特性は比較的容易に現場で実施できるものの、物理特性となるとサンプリング試料を後日土質試験で調査するという手順が多く、現場調査のみで明らかにするのは困難とされてきた。しかし、RIコーンを用いることで現場にて迅速かつ簡便に地盤の力学特性、物理特性の両面からの調査が実施可能である。

今回の調査方法は、自重貫入型RIコーン試験機を用いた。このため、RIコーン自体が100kg近くあり、調査地点に櫓を設置しRIコーンを吊り下げる方式をとった。吊り下げたRIコーンをウインチによって下降速度をコントロールすることで貫入速度を一定速度に保つことで貫入試験を行った。調査項目は、三成分コーンで測定される先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u に加えて、湿潤密度 ρ_w 、乾燥密度 ρ_d 、含水比 w 、間隙比 e を測定した。

2.2 土質試験方法

現場調査の際、極力乱さないように採取したヘドロを用いて土質試験を行った。試験は、強熱減量試験、液性限界試験、圧密試験を実施し、ヘドロ内の有機物がヘドロの圧密挙動にどのようなメカニズムで影響を及ぼすか検討を行った。ヘドロは通常の土に比べ低い荷重で変形が進むと考えられたので圧密試験の載荷板は軽量化のためにアクリル製とした。

2.3 フロー試験、粘性測定試験

ヘドロはその堆積状況から固体とも液体とも判定し難い様相を呈している場合がある。この両面性を持つ代表としてゲル物質が挙げられるが、その代表的特性である流動特性についても調べることにした。また、巻き上がり現象の解明には降伏強度と粘性は不可欠な力学特性である。本論文ではモルタルフローコーンを用いたフロー試験(フロー値は底部の最大直径とその直角方向の長さの平均)により流動性の定量的な評価を行なった。

粘性は回転粘度計を用いて測定した。試験の特長は、ずり速度を連続的に変化させ、それぞれのずり速度に対応するせん断応力や粘度を測定できることであり、非ニュートン流体の流動特性を把握するときには有効な方法である。本研究では、ヘドロの擬塑性流体としての特徴を調べるため回転粘度計による測定を行った。

測定に用いたのは内筒と外筒からなる二重円筒式回転粘度計で、試料を流し込んだ外筒に内筒をはめ込み、内筒が回転することで測定させる。

2.4 沈降・堆積試験

沈降・堆積挙動を観察するとともに、塩分濃度の影響についても検討した。アクリル製円筒(内径46mm、高さ70mm)内にヘドロ200gと水を合わせて1000mlにしたものを入れる。塩分濃度は0.3, 10%の3パターンを用意し、それぞれ十分に攪拌し均一とした後、沈降状態を観察した。試験時間は24時間とし、終了した時点での堆積したヘドロを観察する。

沈降の終了した円筒内の堆積層について、投錘による貫入試験を行った。この方法はレッドとよばれる錘を水中に投入する、港湾などの水深調査に用いられるものを参考にした。今回は室内試験用に改良したもの(図-2:釣りの錘)で試験し評価を行った。室内試験用錘(重量:4.2g、接地圧:1.33kN/m²)を堆積ヘドロに自然落下により堆積層内で停止した際の深さ、その後レッドにかかる上下振動を加えそれに伴う沈下終了後の深さの2つの深さを読み、それぞれから、堆積層上面からの2つの貫入量を算定した。

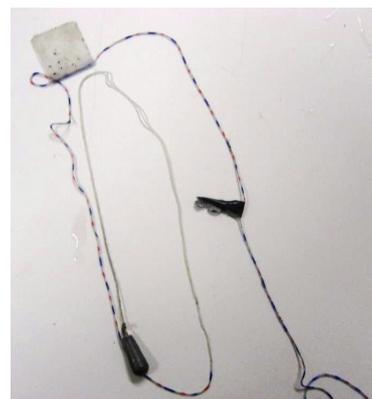


図-2 用いた室内試験用レッド錘

3. 原位置調査結果および考察

3.1 調査箇所の選定

堀川におけるヘドロ堆積状況は、事前の調査によると流れの穏やかな淀みや流路が拡幅している地点で多量のヘドロ堆積が確認されている。また、堀川の複数地点でヘドロの簡易サンプリングを行い、土質試験によって地点ごとの物理特性を調査している。今回のRIコーン調査に当たって、それら経験データを元に調査箇所を代表的な2地点に選定した。土質試験によって堀川堆積ヘドロは、有機質含有量によってその性質が大きく異なることが確認されている。我々は有機質の多いヘドロを有機質ヘドロ、砂分の多いヘドロを砂質系ヘドロと定義した。今回の調査は堆積層厚が1m以上観測されている堀川においても堆積量が多い地点である、

- ・ 朝日橋船着場: 砂質系ヘドロ(液性限界95%, 強熱減量11%)が堆積
 - ・ 松重開門: 有機質ヘドロ(液性限界46-51%, 強熱減量8-12%)が堆積
- を調査箇所に定めた。

3.2 調査結果および考察

図-3 にポータブルコーンによる有機質ヘドロが堆積した松重開門の調査結果の一例を示す。赤線で示されているのがレッドの測定結果である。レッドの自然落下点とポータブルコーンの強度発現深度がほぼ等しいことから、レッドで堆積層の存在する深さが測定可能といえる。この地点のヘドロ堆積層は深度 2.5m 辺りに存在していることになる。堆積層内は一様な構造ではなく、深度 2.5m~3m はコーン貫入抵抗の増加率が緩やかであるが、3m~3.3m 区間では増加率が急激に上昇している。これは、堆積ヘドロは深部になるにつれ、土被り圧によって圧密され密度を増し、地盤としての強度を増していると思われる。このことから堆積ヘドロ層が沈降圧密過程に則して堆積していると考えられる。しかし、深度 3.5m 以深では強度増加がなく、一定値を記録している。沈降圧密過程では説明ができず、異なる堆積原理に基づく新たな堆積層の存在が予想される。

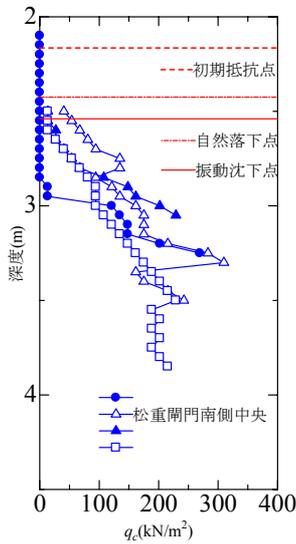


図-3 ポータブルコーン，レッド投錘調査結果例

(1) RI コーン調査結果：朝日橋船着場（砂質系ヘドロ）

図-4 に朝日橋船着場ヘドロにおける RI コーン測定結果を示す。図中には破線で水深に伴う静水圧分布も示している。先端抵抗、周面摩擦は深度 2.5m 辺りで、急激に強度を発揮している。これは力学的に抵抗が発生し泥水ではなく堆積層に達したことを示している。この 2.5m 地点は、物理特性である間隙比 e 、含水比 w の遷移点であり、急激に低下後さらに深い箇所では収束傾向を示す。急激な低下は河川水が浮遊ヘドロによって泥水となる様子を示しており、水から土への変化過程にあるといえる。遷移点以降は、土からより密な土に変化する過程にあるので含水比、間隙比ともに緩やかな変化を見せているといえる。深度 2.5m 以深から、緩やかな増加で先端抵抗は増していることが分かる。ヘドロ層は一様な堆積ではなく、沈降圧密過程に則って、下部にいくに従って徐々に圧密されながら密度を増して堆積層化しているとおもわれる。

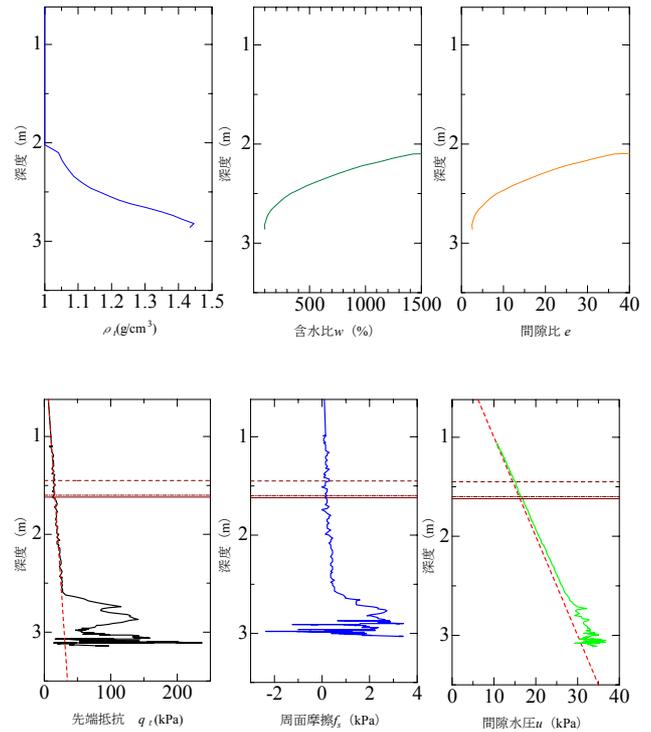


図-4 RI コーン調査結果：朝日橋船着場（上左から $q_t, f_s, u, \rho_t, w, e$ ）

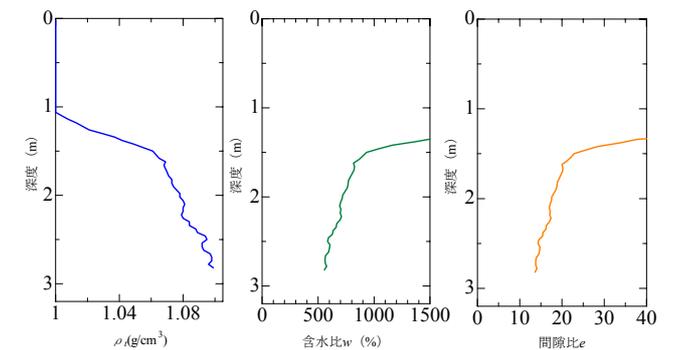
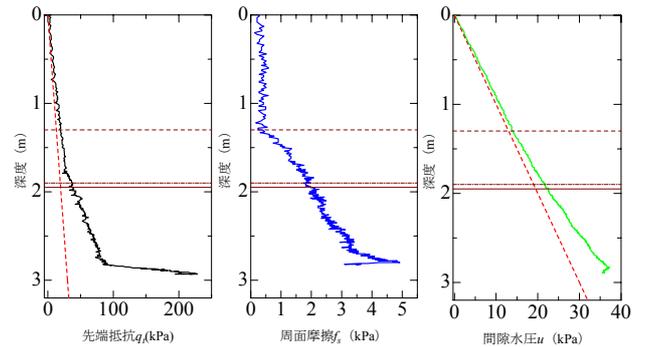


図-5 RI コーン調査結果：松重開門（上左から $q_t, f_s, u, \rho_t, w, e$ ）

(2) RI コーン調査結果：松重開門（有機質ヘドロ）

図-5 は松重開門ヘドロの RI コーン調査結果である。松重開門ヘドロでも朝日橋船着場ヘドロと同様に、深度 1.4m~1.5m 付近まで含水比、間隙比が急激な低下をしている。その後深度 1.5m から含水比、間隙比は低下傾向がゆるかになっている。先端抵抗、周面摩擦も深度 1.5m で増加し始めている。松重開門

では 1.5m 地点で泥水状態から堆積層状態に変化していると考えられる。深度 1.5m 以下の堆積層内では先端抵抗、周面摩擦が深度に比例して増加している。これは、沈降圧密過程によってヘドロが下部になるほど密度を増しながら堆積していることを示している。しかし、先端抵抗が深度 2.8m 地点に達すると急激に強度が高くなっている。これは沈降圧密過程に則した深度 1.5m~2.8m 区間とは、明らかに異なる挙動である。深度 2.8m 地点での物理特性は、含水比が 600%程度、間隙比が 15 程度と非常に高い状態である。この状態で先端抵抗が得られている深度まで続いている場合を考えると、この状態は通常の地盤では形を保持できる状態にはなく泥水状態に近いと考えられ、この高いせん断抵抗を發揮することは、地盤工学的には考えられない。この急激な強度を發揮している層は土とは別の捉え方、たとえばゲル化層として考える方が妥当であることが推測された。ゲルは化学合成によって分子が網目構造を構成し、その内部に大量の水分を保持する機能を持つものである。ヘドロ内の有機物がゲルを構成する物質となることで、ゲル化層は大量の水分を保持した土壌となり非排水状態になり、高い間隙比でも高い先端抵抗を發揮するということが考えられた。

今回の調査で得られた特徴を明確にするために、朝日橋（有機質が少ない砂質ヘドロ）と松重開門（有機質が多い有機質ヘドロ）の調査結果を比較して図-6 に示しておく。

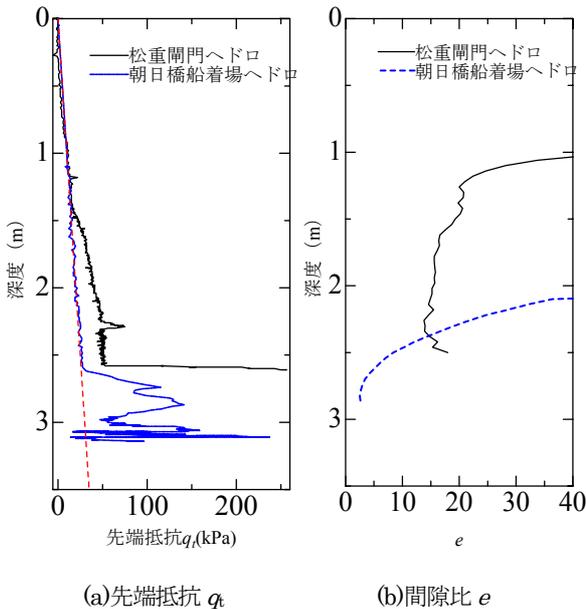


図-6 RI コーン調査結果：朝日橋と松重開門の比較

4. 土質試験結果および考察

強熱減量、液性限界といったヘドロの物理的性質が圧密特性にどのように影響するのかを調べた。図-7 に各地点の圧密試験で得られた $e-\log p'$ 曲線を示す。図には朝日橋と同じような砂分が多く有機質が少ない砂質系ヘドロと松重開門と同じように砂分が少なく有機質が多い有機質ヘドロのデータも加えた。

ヘドロの主成分の違いによって、初期間隙比も大きく異なる。一般に、間隙比の高い試料ほど、圧密指数 C_c が高い値を示すといわれているが、砂質系ヘドロは初期間隙比も小さく圧縮性も低

い。その理論に則した挙動を示している。しかし、松重開門サンプリング試料は初期間隙比が高く大きな圧縮量が期待されるが、砂質系と同程度の非常に小さい圧密沈下であり、高い耐圧性を有していることが分かった。この結果は RI コーン調査の結果と対応する。そこで、松重開門の試料を攪拌し十分に攪乱した試料を圧密すると高い耐圧性は失われ高い沈下挙動を示した。さらに、圧密特性をより詳細に検討するために、Skemptonによって提案されている C_c -液性限界関係についてまとめたものが図-8 である。この関係式を元に日本の地盤条件で考えられる範囲を破線で図示して圧縮指数の上限と下限を計算してみると¹⁾、松重開門のサンプリング試料は上記の範囲内には収まらず、通常の地盤材料と異なっているといえる。以上のことから、ヘドロ内の有機物の水分保持性能が大きく影響していると考えられる。そこで、考えられるのはヘドロのゲル化である。

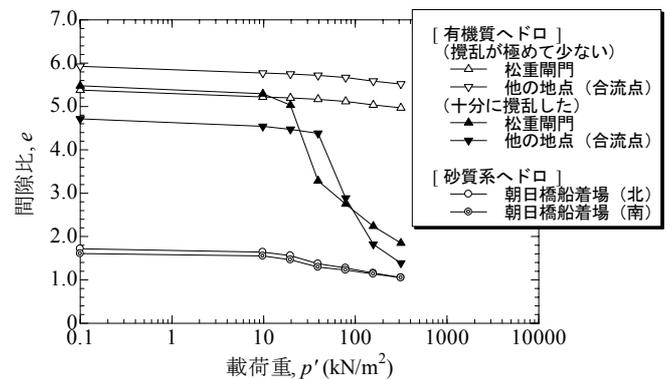


図-7 ヘドロの圧密試験結果：攪乱有無の比較

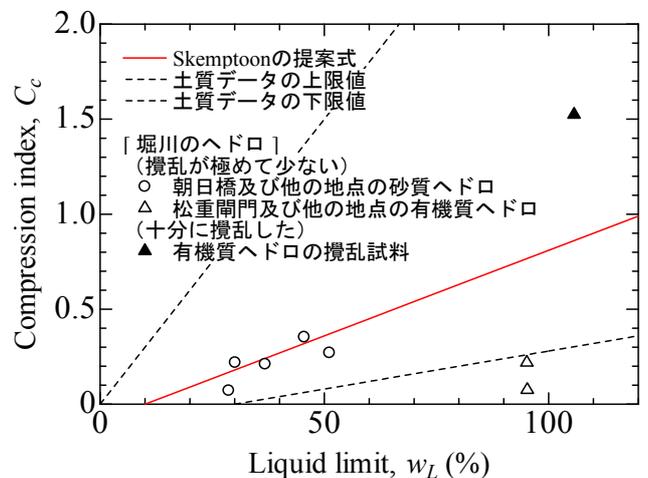


図-8 ヘドロの圧縮指数と液性限界の関係

ゲルになることをゲル化といい、そのメカニズムは3官能性モノマーを用いると高分子鎖は三次元に網目構造を形成しながら成長し、分子量が無限大となり、不溶不融となることをいう。ゲルは、流動性を失った分散系溶液（ゾル）で、網目構造が生成された結果、分散系全体が異常粘性を示し流動性を失う。分散質間の結合は弱く、且つ一時的なものなので温度変化や応力などにより容易にゾル状態に変わり流動性を復元するものである。つまり、高分子鎖が網目構造をつくる事で網目構造内に多量の水分が保有できるため、分子量に比して膨大な水分量が物質内に存在する事になる。このゲル化がヘドロに起こっているとすれば、現場調査、

土質試験で示された現象も論理的に説明できる。つまり、ある条件下（応力、密度、温度）になるとヘドロ内の有機物はゲル化し、ゲルの高い水分保持能力によって間隙水は移動できず非排水状態になり貫入抵抗値の増大や圧密による土壌化を妨げる。これにより、ヘドロの浮遊が促進されることになる。

5. フロー試験、粘性測定試験および考察

(1) フロー試験結果

フローコーン内にヘドロ試料（含水比約 100%）をつめ、コーンを取り除いたところ図-9 のようになった。ヘドロは多くの水分を構造内に取り込んだ状態にもかかわらず自立するほどの強度をもつことがわかる。

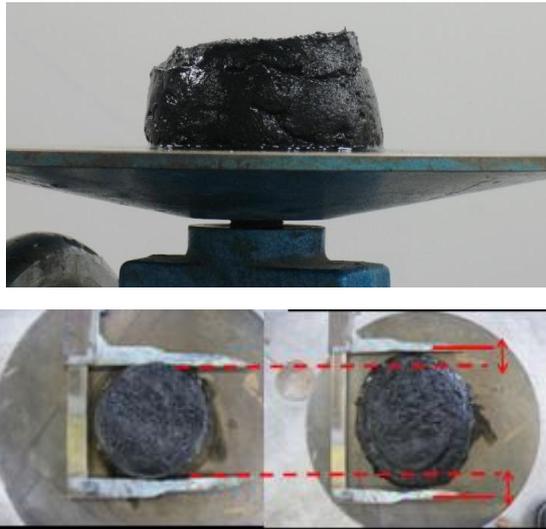


図-9 フロー試験の様子：松重開門の不攪乱試料

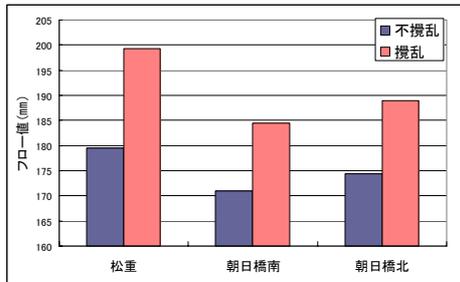


図-10 不攪乱状態と攪乱試料のフロー値の比較

試験において不攪乱試料（できるだけ乱さないように詰めた試料）と約 1 分間練り返した試料とでフロー値の比較を行なった。その結果を図-10 に示す。攪乱試料は不攪乱試料よりもフロー値が増大し流動化することがわかった。ゲル状の粘土コロイドなどに力を加えることで流動的となり、さらに静止状態に置くことで強度を回復し再ゲル化を起こす現象をチキソトロピーという³⁾。攪乱により流動的になったヘドロが再ゲル化を起こせば、チキソトロピー性を有しているといえ、ヘドロのゲル化の検証となる。練り返して流動的になった攪乱ヘドロを温度一定(16℃)状態で放置し、一週間ごとのフロー値と含水比の関係の変化を調べた。松重開門のヘドロでの試験結果を図-11 に示す。攪乱によりフロー値が上昇した後、1 週間目は変化が見られなかったものの 2 週目以降

ではフロー値が不攪乱試料に近い状態まで回復していくことが示した。これより、ヘドロが強度回復、チキソトロピー性を有し、ゲルとしての性質を持つことがわかった。

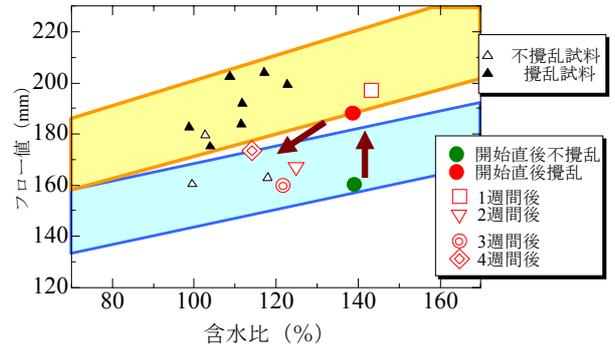


図-11 放置に伴う松重開門ヘドロのフロー値の回復特性

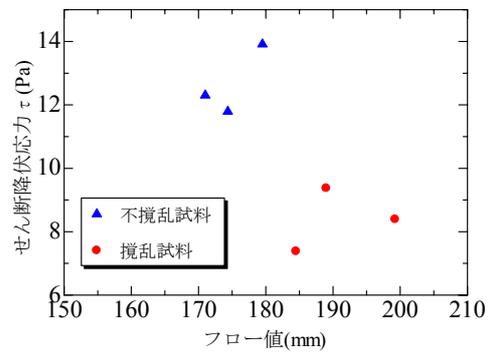


図-12 せん断降伏応力とフロー値の関係

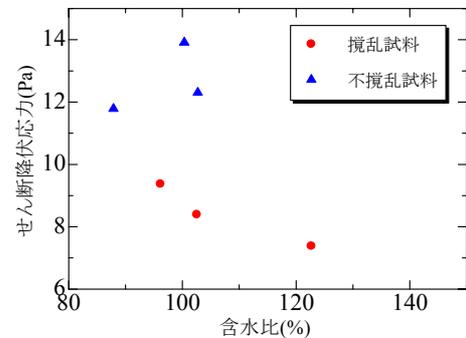


図-13 せん断降伏応力に及ぼす含水比の影響

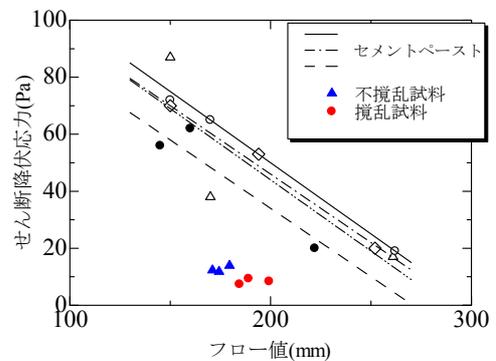


図-14 ヘドロとセメントペーストのフロー特性の比較

塑性的な流動をする流体は、加わるせん断応力がある一定の降伏値以上になると流動を開始する。つまり堀川においても、

河川の流れなどの何らかのせん断力が河床に作用することによってヘドロが流動を開始し、巻き上がりが起きると考えることができる。底泥の流動特性値の簡便な測定法としてスランプ試験が行われるようになってきており、その結果から降伏値を正確に評価する方法について提案されている²⁾。コーンの種類や試料によらずほぼ式(1)の関係で表現できる。

$$\tau_y / \rho gh = 0.015 + 0.075 h / H \quad (1)$$

ここで、 τ_y : せん断降伏応力、 ρ : 試料密度、 h : スランプ高さ、 H : コーンの高さである。本研究ではこの式を用いて、測定したフロー値、密度、スランプ高さからせん断降伏値を求めた。図-12 はフロー値とせん断降伏応力の関係、図-13 は含水比と降伏値の関係をプロットしたものである。攪拌した試料は不攪拌試料よりも降伏値が低く、流動や巻き上がりが起こりやすいことがわかる。また攪拌試料は、含水比が大きいものは降伏値が小さい傾向にある。参考のため、セメントペーストのフロー値と降伏値³⁾との関係を図-14 に示した。ヘドロの降伏値はセメントペーストと比較してかなり低い値であり、堀川のヘドロが低いせん断応力で流動を開始することが予想される。

(2) 粘性測定試験結果

図-15 は朝日橋北で測定した結果である。ずり速度が大きくなると流動性が増し、塑性的な流動を示している。またずり速度が大きくなるほどせん断応力の上昇が緩やかになり粘度が低下する擬塑性流体の挙動を示している。粘性とせん断降伏応力の値は、ずり速度が大きくなり数値が安定したあたりの平均値をとり決定した。朝日橋北のせん断降伏応力はフロー試験から求めた値と同等であり、また、粘性は $\varepsilon = 0.366(\text{Pa}\cdot\text{s})$ となった。

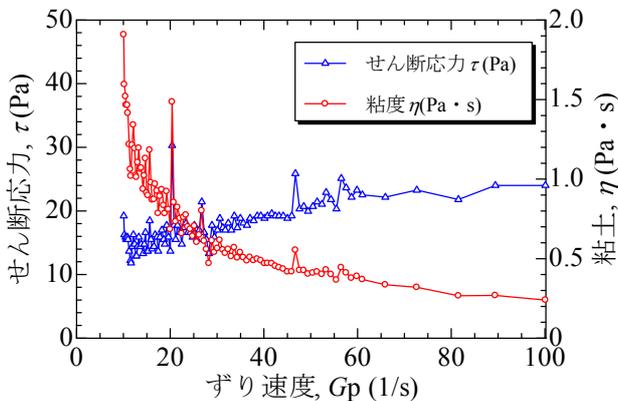


図-15 粘性測定結果 (朝日橋北)

6. 沈降、堆積試験および考察

3章から5章で示したように、現地調査や土質試験の結果から、間隙比が6以上ととても高いにも関わらず貫入抵抗が100kPa相当もあるような堆積層の存在が明らかとなり、それがヘドロのゲル化によるものであることを示唆した。この現象に対するヘドロの沈降・堆積メカニズムをすることは重要な課題である。本章では、伊勢湾の潮汐の影響を受ける感潮河川・堀川において、河川水内の塩分がヘドロの沈降・堆積に及ぼす影響について検討する。

(1) 沈降・堆積試験結果および考察

ヘドロの沈降の経過について、図-16 に示す。砂粒などの粗粒分は開始直後に沈降し、塩分による差は見られなかった。細粒分や有機物は、塩分0%下では沈降がほとんど見られず、24時間後も円筒内は濁ったままであった。一方、塩分3、10%の場合、2時間程度で濁りは取れたが、凝集した有機物や細粒分が円筒壁面に付着または水面に浮遊した(図-17)。有機物の浮遊は塩分0%では見られず、塩水環境に特有の現象であった。粘土などの細粒分は塩化物イオンの作用により凝集⁴⁾しやすくなるという性質を持つが、堀川のヘドロにおいても同様の現象が起こることが確認された。

このような塩水内のヘドロの沈降のイメージ図を図-18 に示す。沈降が終了した堆積層を観察すると、底面より順に次のような3層に分かれていた⁵⁾。直ぐに沈下し堆積する砂質層、有機物や細粒分を多く含む高含水比で流動層、凝集した浮遊物からなり巻き上げが発生しやすい浮遊層である。同様な堆積層の形成は3.2節で示したように実際の堀川でも観察されており、塩水を用いることで室内試験においても現地の堆積状況が再現できたといえる。

(2) 堆積層の特性計測結果および考察

砂質分を多く含む朝日橋南のヘドロとゲル化が考えられる松重閘門のヘドロについて試験を行った結果を図-19 に示す。朝日橋南のヘドロでは、どの塩分濃度の場合においてもレッド錘は底部に堆積した砂質層付近で停止した。また、塩分濃度0%よりも3、10%の場合の方が貫入量は大きくなった。これは、塩分による凝集効果が沈降促進をもたらすものの地盤としては弱い堆積層を形成することを意味している。理由として、塩分濃度3、10%の場合、塩分による凝集沈降が生じ沈降開始から早い段階で細粒分や有機物が深い箇所にも堆積したためにゆるく強度が低い堆積層が厚く形成されたためと考えられる。また、レッド錘が最初の停止後に上下にしゃくって振動させたことによる沈下変位は、塩分濃度にほとんど影響されないことがわかる。

一方、松重閘門ヘドロでは、レッドは塩分0%において最も深く(円筒底部)までささったが、レッドの上下振動による貫入量は少なかった。しかし、塩分3、10%では初期の貫入量が0%よりも小さかったものの、レッドの上下振動による貫入量は大きく、最終貫入量は塩分濃度による違いはほとんどみられない結果となった。この結果について、砂質分が多い朝日橋のヘドロの結果とは違うメカニズムが働いており、松重ヘドロの堆積層内でのゲル化によるものではないかと考えた。図-20 にヘドロのゲル化堆積層のイメージを示す。図-20 左に示すようにヘドロがゲル化することでゲル構造が水分を保持し有機物と間隙水が一体化するため、非排水状態となる。高い間隙比でも見かけ上、高い強度を示す。塩水内の堆積層においてレッドの初期貫入が小さかった理由である。つぎに、図-20 右のように、レッド上下振動後に貫入量が增大したのはこの攪乱でゲル構造が破壊され間隙水が解放され排水状態となったためと考えられる。このような現象は塩水内のヘドロ堆積層にのみ発生しており、塩分がゲル化層形成の大きな一因である。

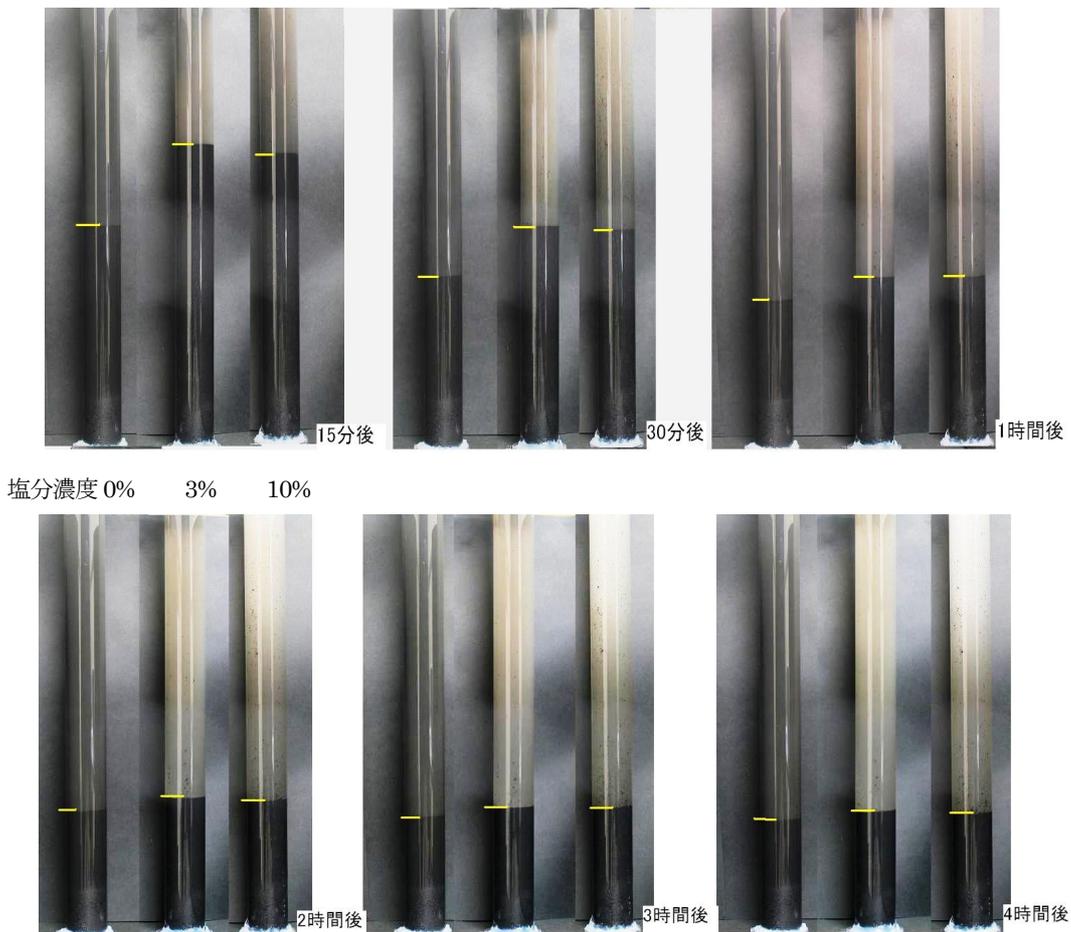


図-16 沈降・堆積試験の様子：左から塩分濃度0, 3, 10%の溶液中の沈降・堆積

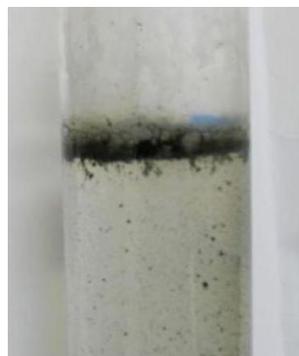


図-17 塩分10%円筒水面付近

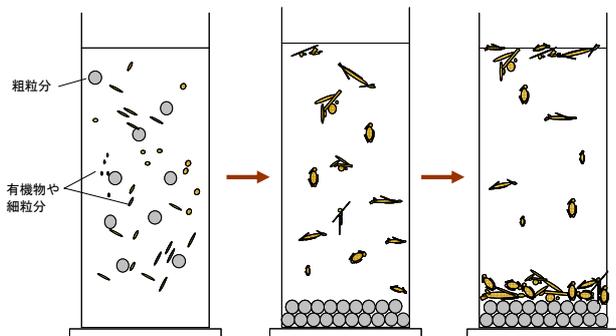
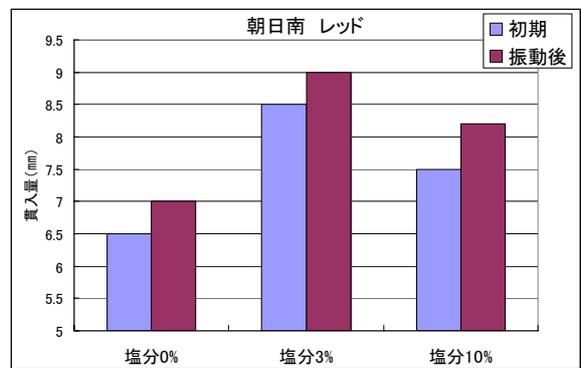
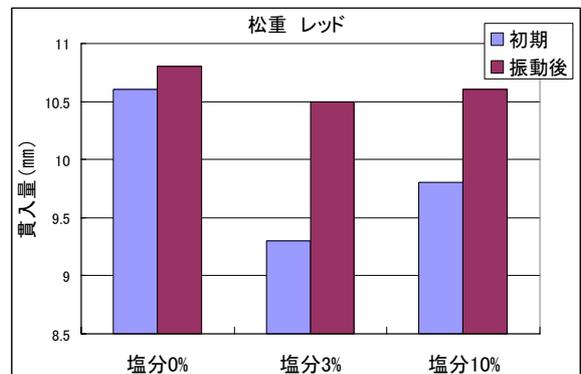


図-18 塩水内のヘドロの沈降・堆積過程の概念図



(a) 朝日橋南のヘドロ (砂質分が多いヘドロ)



(b) 松重閘門のヘドロ (有機分が多いヘドロ)

図-19 塩水中の沈降・堆積層の貫入試験結果

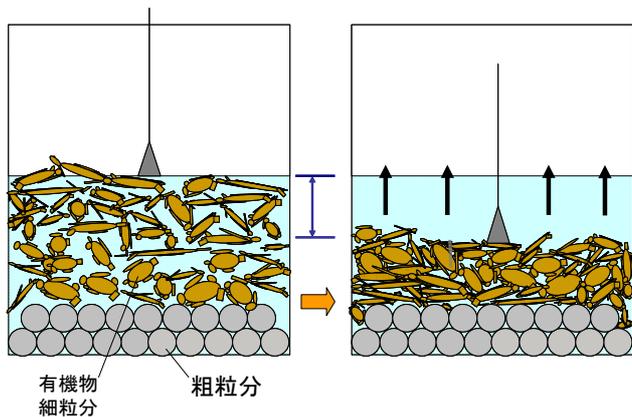


図-20 塩水中のゲル化層の概念図: 左: 間隙水のゲル化構造による見かけの耐力をもつヘドロ; 右: 攪乱によるゲル化構造の消失と耐力の沈下の増加

7. まとめ

名古屋の都市河川で伊勢湾の干満の影響を受ける、堀川のヘドロの堆積メカニズムと力学的特性について、現地調査、室内土質試験、フロー・粘性試験、塩水下での沈降・堆積実験を行った(便宜上、砂質分が多く有機物が少ない砂質系ヘドロと砂質分が少なく有機物が多い有機質ヘドロに分けて考察した)。

結果を簡単にまとめると以下のようである。

- (1) 有機質ヘドロでは、ヘドロ堆積メカニズムが本来考えられていた沈降圧密過程に則った堆積ではないことが分かった。汚れの原因である有機物と塩分が存在する場合、ヘドロ層深部にはゲル化層という間隙水の構造化が進んだ圧密沈下しにくい層が形成されることがわかった。これが、河川内でヘドロの浮遊層を継続させ、干満によって励起された堀川全体の流れて巻き上げられることで河川環境の悪化を継続させていると考えられる。
- (2) ゲル化したヘドロは、攪拌によって降伏応力や流動抵抗が極端に低下し、鋭敏性を示す。また、静穏状態が継続されるとシキソトロピーによって間隙水の構造化が復元される。このため、ヘドロに期待する強度を見誤る可能性がある。今後、沈降・堆積過程、土壌化に関するさらに詳細な検討を要する。
- (3) 以上のように、堀川はこうしたヘドロ層を中心とした負のスパイラルに陥っていることになる(図-21)。このスパイラルを断ち切る効率的な浄化方法の提案が必要である。現在、曝気による浄化方法を検討中である。

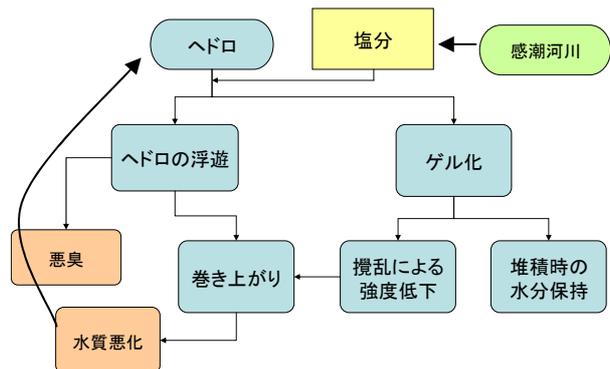


図-21 堀川における汚れの循環

謝辞

朝日橋船着場の使用許可を頂きました東山ガーデン株式会社、回転粘度測定をお手伝い頂きました名古屋工業大学 加藤禎人研究室、計測機器をお貸し頂きました応用地質株式会社中部支社、玉野総合コンサルタント(株)、現地調査をお手伝い頂きました大同工業大学大東憲二研究室に末筆ながら深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂出版, 1969.
- 2) 小野幹夫・中野晋: スランプ試験による底泥の降伏値の評価手法, 土木学会年次学術講演会概要集第2部, 46巻, 1991.
- 3) 湯浅幸久、村田和美ほか: 多自然型河川作りに関する研究 - ポーラスコンクリートの製造技術について -, 三重県工業技術総合研究報告 No. 24, 2000.
- 4) 嘉門雅史、浅川美利: 新体系土工学16 土の力学 (I) - 土の分類・物理科学的性質 -, 技報堂出版, 1988
- 5) 小林、山川 他: 沈降過程を考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析, 港湾技研資料, No.680, 1990.