

RI コーンによる粘土地盤の検層について

三村 衛・柴田 徹・アブハイ・クマール・シュリバスタバ

USE OF RI-CONE PENETROMETER IN CLAY FOUNDATIONS

By Mamoru MIMURA, Toru SHIBATA and Abhay Kumar Shrivastava

Synopsis

RI cone penetrometer tests are carried out at four different sites. The foundation grounds discussed here mainly consist of clayey materials. The measured results by RI cone penetrometers are shown for Kyobashi, Hachirougata, Kurihama and Kinkai Bay site. According to comparison of water content and density profiles by RI cone measurement with the conventional testing results, RI cone penetrometers are proved to be versatile tools for site investigation. Settlement assessment by RI cone penetrometer is also discussed by exemplifying the embankment at Kinkai Bay site. Elasto-viscoplastic finite element analysis correspondingly performed strongly supports the RI cone based assessment. Repeated use of RI cone penetrometer with the advance of construction enables us to assess the consolidation process of the clay foundation.

1. はじめに

我が国における地盤調査といえば標準貫入試験が大半を占めており、その打撃回数である N 値から設計に関するすべての地盤定数が決定されるというシステムが確立されている。これはひとつには、山地と海岸平地が近接して存在するという日本の地形的な特徴により、地盤が砂や礫を多く含んだ構成になりがちであるということが原因となっている。すなわち、こうした礫混じり地盤では、静的貫入試験のような地盤調査法は非常に不利であり、動的なエネルギーで打撃によって貫入する動的貫入試験がより適しているために、標準貫入試験が広く行われるようになり、データの蓄積が進むにつれてさらにその傾向が強まった結果であると考えられる。

しかしながら近年、沿岸部の埋立やその展開、また沖合における埋立人工島の建設が盛んに行われるにしたがい、N 値だけでは軟弱粘土地盤の変形と安定性を評価する地盤情報としては不十分なケースが多くなってきている。またエレクトロニクスの飛躍的な発達により、精緻な構成式を組込んだ数値解析がごく普通に行われるようになってきた。数値解析に際しては、地盤の幾何的形狀、地盤材料の物理特性、載荷工程を正しくモデル化しなければ信頼するに足る結果が得られないので、いきおい入力情報としてより詳細な地盤情報が要求される。こうした場合、地盤情報が N 値だけという状態ではお手上げというのが現状である。

三成分コーン貫入試験は軟弱地盤に対して非常に有効な試験法であり、ヨーロッパ、北米などでは標準的に実施される地盤調査法である。この試験の特長は、コーン先端抵抗、コーン周面摩擦、間隙水圧といった情報がコーン貫入と同時に深さ方向に連続的に測定できることである。筆者らは三成分コーンのこうした利点に着目し、さらに地盤の変形解析にも供することのできる情報をも同時に検層することを目的として、地盤の含水量と密度を併せて計測できる RI (放射性同位元素) コーン貫入試験装置を開発した。この装置を

用いることにより、従来の三成分の検層によって地盤の層序や強度特性を把握するとともに、含水量分布から地盤の間隙比を、密度分布から地盤の初期応力状態を深度方向に連続的に求めることができるため、地盤内の情報をより詳しく知ることが可能となる。こうした地盤のデータは数値解析の入力情報としても非常に有用であり、基礎地盤の挙動の把握に大いに貢献し得るものと考えられる。

本研究では、RI コーン貫入試験装置の概要を説明した後、4つの現場で実施した原位置実験の検層結果を示し、サンプリング試料を用いた室内試験結果との比較に基づいてRI コーン貫入試験装置の地盤調査法としての有用性を明らかにし、そのうちの1つの現場を取り上げて、検層結果を有限要素法と組み合わせることによって粘土地盤の沈下解析を行い、より広範な地盤工学への適用性について論ずるものである。

2. RI コーンの構造と原理

2.1 RI コーン開発の背景

前章でも述べたように、三成分コーン貫入試験はコーン先端抵抗、周面摩擦力、間隙水圧をコーン貫入と同時に深さ方向に連続的に計測できるという利点を有しており、対象地盤の土質の微妙な変化をも探知できることから、近年我が国においても用いられるようになりつつある。しかしながら、変形や破壊を予測するためには地盤の応力状態、締り具合といった情報の把握が必要となり、三成分コーンによる計測量だけでは十分とはいえない。一方、ラジオアイソトープ (RI, 放射性同位元素) を用いて地盤の密度、水分量を測定する方法は、現在、高速道路やフィルダムなどの締固め管理においてその威力を十分に発揮している¹⁾。

RI によって実地盤の密度を計測する方法は透過型と散乱型の2種類に分類される。前者は土中を透過してくるガンマ線を検出するのに対して、後者の場合は散乱線だけを検出する方式である。また、測定深度によって地表部を対象とする表面型と地盤深部の検層を目的とする挿入型に分けられる。プライス²⁾は挿入・透過型密度検層装置を用いて海底の浅い部分の地盤の密度を計測する方法を報告している。その後ヨーロッパを中心に、挿入・散乱型のRI密度計が開発され、実地盤に適用して従来法による土の密度と比較を行った例がいくつかある^{3),4)}が、未だ地盤調査法として確立されたものとはなっていない。

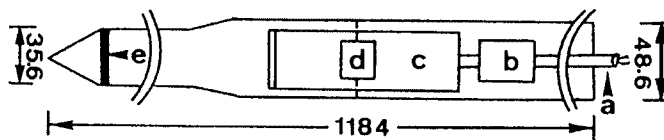
そこでRI線源と放射線検出器を三成分コーン内部に設置したラジオアイソトープコーン貫入試験装置(以後RIコーンと称する)を新たに開発し、三成分コーンによって従来求められていた3つの成分に加えて、コーン貫入と同時に地盤の水分量、および密度の深さ方向の分布を連続的に計測することにより、地盤の初期応力、含水比、間隙比といった情報を現場試験によって求める方法を提案する。製作したRIコーンは、地盤の水分量を計測できる水分コーン (Neutron Moisture Cone Penetrometer, NMコーンと称する)と密度を計測する密度コーン (Nuclear Density Cone Penetrometer, NDコーンと称する)の2種類である。また実地盤への適用に際して、精度の高い較正試験を実施する必要があるため、室内土層を用いた較正試験を行い、NMコーン、NDコーンに対してそれぞれの較正曲線を求めている。

2.2 RI コーン貫入試験装置の構造と原理

RIコーン貫入試験機として、三成分コーンにRI水分計を取り付けた水分コーン (NMコーン) とRI密度計を取り付けた密度コーン (NDコーン) の2種類を製作した。それぞれの構造と測定原理について以下に説明する。

2.2.(1) 水分コーン (NMコーン)

水分コーン (NMコーン) の構造を Fig. 1 に示す。コーン貫入試験機先端部は従来の三成分コーン貫入試験機であり、直径 35.6 mm、コーン先端角は60度である。水分計プローブ部は直径 48.6 mm と先端部に比べてやや太く、コーン全長は 1184 mm である。同図に示すように、He³ ガス検出管の中央に高速中性子線源の Cf²⁵² (カリフォルニウム・半減期2.65年) が格納されている。カリフォルニウムは自発核分裂によ



a: cable leading to data collection system;
 b: pre-amplifier; c: He³-filled proportional tube;
 d: Cf²⁵² fast neutron source; e: porous ceramic filter (all dimensions in mm)

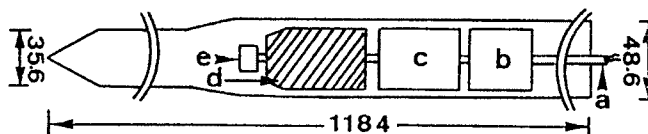
Fig. 1. Schematic diagram of NM-cone penetrometer.

て MeV オーダーのエネルギーを有する高速中性子を放出する。この高速中性子は地盤内を通過する際、地中に存在する物質の原子核と弾性散乱をおこすことによってエネルギーを失いつつ拡散し、熱中性子が生成される。He³ 検出管は高速中性子には反応せず、熱中性子だけを検出する。このため、線源は最も検出効率の高くなる検出管中央に格納されている。

つぎに NM コーンの測定原理について簡単に説明する。弾性散乱過程における各元素の中性子に対する減速能は、その質量数が小さい元素ほど大きくなり、水素の持つ減速能は他の元素に比べて著しく大きい⁵⁾。地盤内の水素は、大部分が H₂O の形で含まれる水として存在するため、較正試験によって検出される熱中性子の強度（単位時間あたりのカウント数）と土の含水量の関係をあらかじめ求めておくことにより、コーン貫入と同時に地盤の含水量を深さ方向に計測することができる。

2.2.(2) 密度コーン (ND コーン)

密度コーン (ND コーン) の構造を Fig. 2 に示す。コーンの外形および寸法は NM コーンと全く同じである。密度計プローブ部はガンマ線を放出する線源、地盤内を散乱して到達するガンマ線を検出する検出器、線源から放出されたガンマ線がコーン内部を通過して直接検出器に到達するのを防ぐシールド鉛の3つの部分からなっている。ガンマ線源としてはセシウム137 (Cs¹³⁷・半減期30年) を用いている。また検出管はヨウ化ナトリウムの結晶を用いたシンチレーションカウンターを用いている。線源から放出されたガンマ線光子は、地中を通過する際、そのエネルギーレベルによって地中の物質と異なった相互作用を起こす。密度コーンの測定原理については、このうちのコンプトン散乱によって説明することができる^{5),6)}。コンプトン散乱によって、地中を通過するガンマ線光子の数は土の密度によって変化する。検出されるガンマ線束は次式で表わされる。



a: cable leading to the data collection system;
 b: pre-amplifier; c: photomultiplier tube;
 d: lead (Pb) shield; e: Cs¹³⁷ gamma-ray source (all dimensions in mm)

Fig. 2. Schematic diagram of ND-cone penetrometer.

$$\phi = \frac{S \cdot B}{4 \pi r^2} \cdot \exp(-\Sigma \cdot \rho \cdot r) \dots \dots \dots (1)$$

ここに ϕ はガンマ線束, S は線源強度, Σ は質量吸収係数で原子量の関数として表わされ、一定の媒質に

対しては一定値をとることが知られている。 r は線源と検出管の距離, ρ は対象とする物質の密度を表わしている。また B はビルドアップ係数とよばれるものであり, 実験的に決定される量である。式-(1)より, 通常の土質, 岩石材料では Σ がほぼ一定とみなすことができるので, ガンマ線束 ϕ は密度 ρ のみによって変化することがわかる。したがって, 土の密度と透過ガンマ線量の関係を較正試験によって求めておくことにより原位置検層で検出されるガンマ線強度から未知の地盤の密度を求めることができる。

2.3 較正試験と較正曲線

2.3.(1) 実験方法

前節でも述べたように, RI コーンによって原位置における地盤の水分量および密度分布を正確に評価するためには, 事前に精度の高い較正曲線が得られていることが必要である。本節では, 原位置試験に先立って実施した室内土槽を用いた較正試験の概要と, NM コーン, ND コーンに対して得られた較正曲線を示し, RI コーン貫入試験装置の有効性について議論する。

較正試験の概略を Fig. 3 に示す。鋼製の円形土槽 (直径 65 cm, 深さ 98.8 cm) の中心にコーンを直立させ, その周囲に土試料を投入する。この時, 投入重量の計測と締固めによる密度調整を行う。用いた土試料は粗粒礫, 細粒礫, 山砂の 3 種類である。所定の投入完了時点で供試体の体積を測定し, 水分量, 密度の RI による計測を行う。続いて土槽下端に設置したストレーナパイプを介して注水し, 供試体を水浸した状態で再度同じ手順で計測を行う。

2.3.(2) 較正試験結果

NM コーンに対する較正試験結果を Fig. 4 に示す。ここで, 水分計数率比は「実測される熱中性子の計数率とその時点における物理化学的に安定な基準物質に対する水分計数率 (スタンダード値) の比」と定義される。同図において, 土の含水量が増加するにしたがって水分計数率比の値も大きくなる傾向を示しており, Bum⁷⁾ が同じタイプの水分計に対して行った較正試験と同様の結果となっている。得られた結果を非線

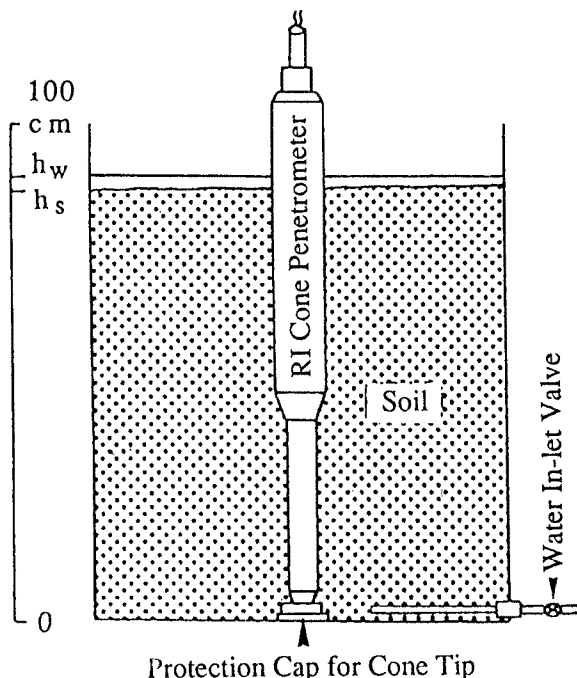


Fig. 3. Calibration chamber test for RI-cone penetrometer.

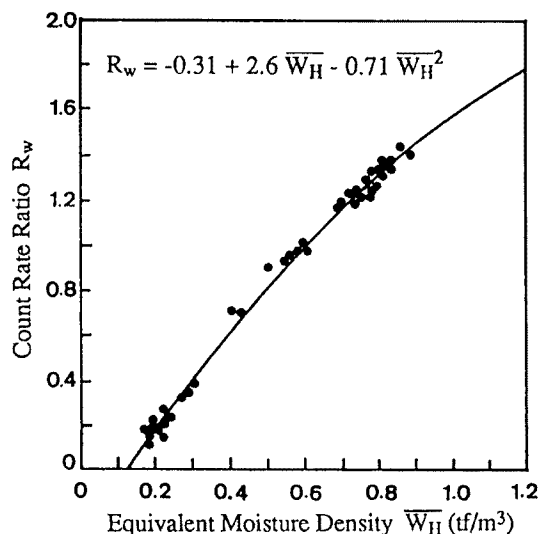


Fig. 4. Calibration curve for NM-cone penetrometer.

形最小二乗法を用いて回帰すると、含水量と水分計数率比は図中に示すような2次式で近似できる。

ND コーンに対する較正試験結果を Fig. 5 に示す。Homilius and Lorch⁹⁾によれば、散乱型の密度計の密度～密度計数率比関係は、線源と検出器の距離をパラメータとして Fig. 6 に示すような形になる。地盤工学において対象とする土の密度は 1.0 t/m^3 以上の領域にあり、Fig. 6 においても、この領域では密度の増加に対して密度係数率比の値は単調に減少している。したがって本研究では、ND コーンの較正曲線を Fig. 5 に示すような指数関数によって近似している。なお同図において、ND コーンに対しても、RI カウントそのものではなく、スタンダード値との比である密度計数率比を指標として用いていることに留意しよう。

以上より、NM コーン、ND コーンともに計測される計数率比と含水量、密度の間には一義的な関係があり、今回実施した較正試験によって求められた較正曲線を用いることによって、原位置貫入試験に適用することができる。

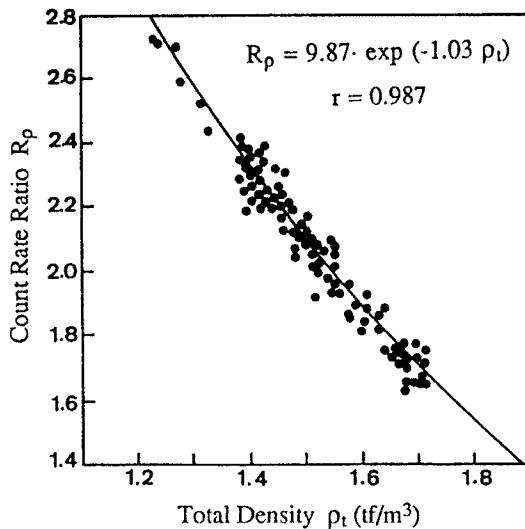


Fig. 5. Calibration curve for ND-cone penetrometer.

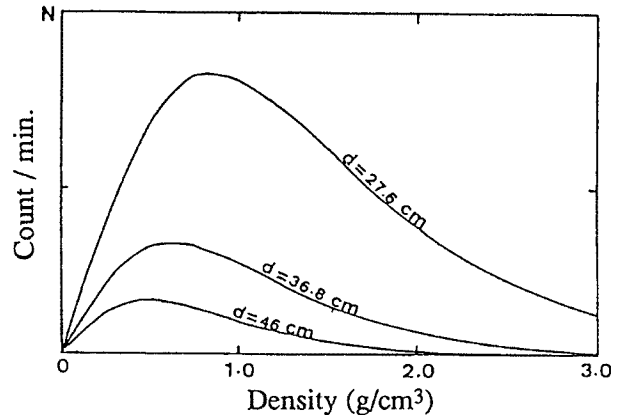


Fig. 6. Effect of the distance between the source and the detector for back-scatter density probe.

2.4 原位置試験にあたって留意すべきポイント

実際に RI コーンを原位置試験に適用する際に留意すべき点について以下に述べる。

計数率比の利用：RI コーンの線源として用いているカリホルニウムやセシウムは、壊変によってエネルギーレベルを刻々低下させるため、試験を行う時点ごとに線源から放射される放射線量が異なってくる。このため、RI カウントそのものを指標にすれば、試験のたびに固有の較正曲線が必要となり、試験法として、精度、作業性の両面で問題となる。したがって前節でも述べたように、原位置試験を実施する時点で必ずスタンダード値を測定し、実測 RI カウントとの比の形である計数率比を指標として用いることによって、線源の壊変の影響を除去し、事前に実施した較正試験の結果に基づいて普遍的な値を得ることができる。

バックグラウンド値の測定：ND コーンについては、地盤内に自然に存在するガンマ線量（バックグラウンド値）をあらかじめ測定し、実測 RI カウントからこの分を差し引いて密度分布を求めなければならない。このため、必ず原位置試験サイトにおいてバックグラウンド値計測用の貫入試験を別途実施する必要がある。ただし同一地盤におけるバックグラウンド値は深度方向にさほど大きく変化しないので、全層にわたって丹念に検層する必要はないと考えられる。

塩素濃度の影響：NM コーンについては、熱中性子が塩素、ボロン、カドミウムといった元素によって吸収

される性質を有していることに起因する問題に留意すべきである。この中で地盤工学上最も問題となるのは、塩素が含まれる海水の存在である。沿岸部埋立地や、陸上であっても海成粘土層が分布している地盤の水分検層にあたっては、塩分濃度の程度によって水分計数率が過小にカウントされるため、その定量的な補正について十分に考慮すべきである。塩素イオン濃度に関する考察は、次章で具体的に行うことにする。

3. RI コーンによる原位置貫入試験

本章では、RI コーンを用いた原位置貫入試験結果を示し、本装置の地盤調査法としての有用性を明らかにする。実験を実施した現場は、Fig. 7 に示すように、京橋、八郎潟、久里浜、錦海湾の4ヵ所である。それぞれコーン先端抵抗 q_t 、間隙水圧 u 、含水比 w_n 、密度 ρ_t の深度分布の検層結果を示す。ここで、 q_t は貫入時にコーンによって直接計測される先端抵抗値 q_c に対して、間隙水圧による影響を補正した先端抵抗であり、コーンの有効断面積比を a として、 $q_t = q_c + u(1 - a)$ で表わされる。またコーン周面摩擦については、測定精度が信頼できるレベルに至っていないこと、値自身が極めて小さいこと、地盤工学的にあまり大きな意味を持たない(実際問題に使えない)といった理由で今回は省略した。

3.1 京 橋

片福線の大川シールドの発達立杭建設地点において、RI コーン貫入試験を実施した。この地区は西大阪粘土と呼ばれる比較的鋭敏な沖積粘土が堆積している。地表面は建設残土が覆っているため、ケーシング掘りを行い、粘土層を確認できた深度 3.1 m から貫入試験を開始した。最終深度は 23.4 m とした。RI コーンによる検層結果を Fig. 8 に示す。先端抵抗 q_t は測定開始直後の浅い部分で 40~50 kgf/cm² と軟弱粘土にしてはかなり大きな値を示している。このあたりは、残土のがらや砂分が混入した複雑な構成になっている。間隙水圧の発生も非常に小さく、こうした事実を裏付けている。その下部に軟らかい粘土層を咬んだ後、 q_t が 100 kgf/cm² を越える固く締った砂層が現われる。約 50 cm 程度の砂層を抜けるとそれ以深は比較的一様な粘土地盤が続いている。ところが間隙水圧分布を見ると、所々に大きく消散している箇所があり、高透水性材料(砂系)のシームが頻繁にかみこんでいる可能性を示唆している。Fig. 8 (c) に示す含水比分布は 10 m 以浅の砂、粘土の層変化に対応して変化しており、10 m 以深の粘土層に対しては約45% 前後の値を示している。図中のプロットは同時に実施したサンプリング試料による室内試験結果である。NM コーンによる検層結果は従来法によるものと一致しており、地盤の含水量分布を正確に評価できることがわかる。また密度分布についても、Fig. 8 (d) に示すように、室内試験結果とほぼ一致しており、ND コーンも地盤調査法として十分機能し得ることがわかる。

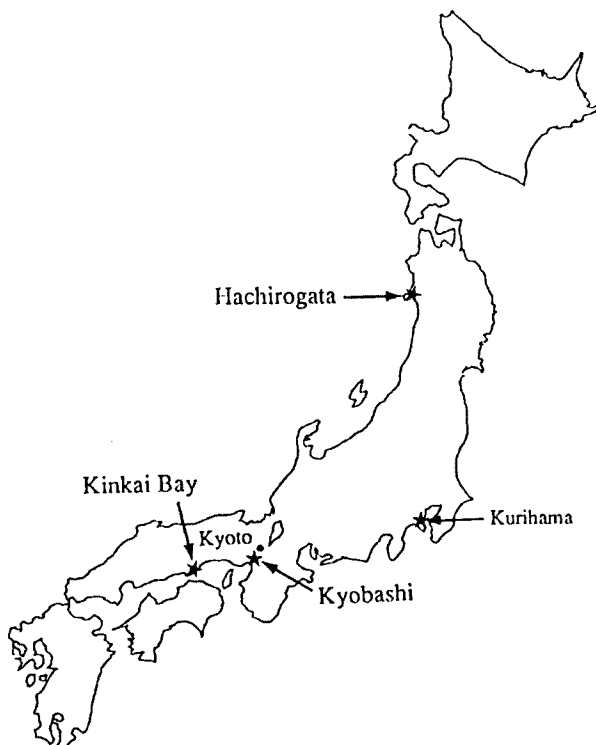


Fig. 7. In situ testing sites.

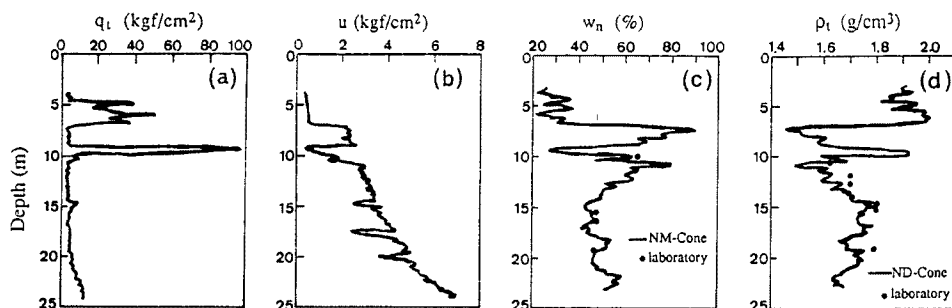


Fig. 8. Measured results through RI-cone penetrometer at Kyobashi.

3.2 八郎湯干拓地

干拓によって造成された秋田県八郎湯は地表から非常に軟弱かつ均質な沖積粘土が約 45 m にわたって堆積しており、特に上部は含水比が150%を越える超軟弱粘土である。RI コーンによる検層結果を Fig. 9 に示す。検層は地表面から深度 33 m まで実施した。Fig. 9 (a) において、コーン先端抵抗は深さ方向に一樣に増加しており、深度 33 m における q_t は 10 kgf/cm² 程度となっている。また途中に地盤の不均質などは見あたらない。このことは Fig. 9 (b) の間隙水圧分布に急激な凹凸がないのをもても明らかである。Fig. 9 (c), (d) はそれぞれ含水比と密度の深度方向分布の検層結果である。これらについては同時に行った従来法による室内試験結果を比較のため図中に示している。当地点の含水比は地表付近で部分的に200%に達し、深度方向に漸減して 30 m 付近では約100%程度の値を示す。このような広い範囲の含水比に対しても NM コーンは非常に精度よく検層できることがわかる。一方密度についても含水比分布に対応して 1.2 g/cm³~1.51 g/cm³ の範囲で変化するが、ND コーンはほぼ完璧にこれを検層し得ることがわかる。

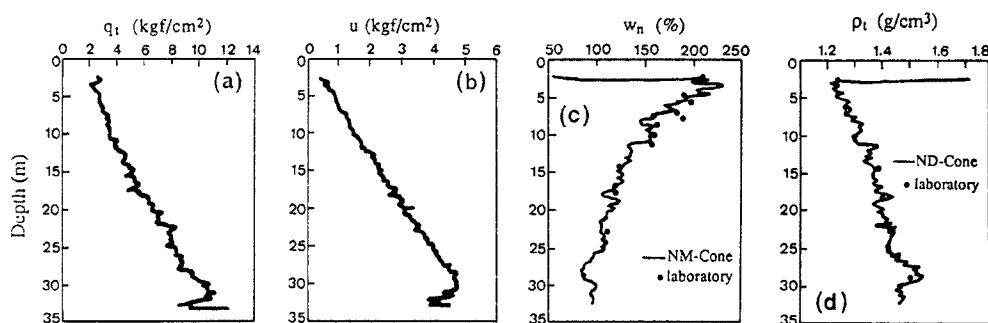


Fig. 9. Measured results through RI-cone penetrometer at Hachirougata.

3.3 久里浜

久里浜における原位置試験は、運輸省港湾技術研究所の実験サイトで行われた三成分コーン貫入試験の一斉試験の一環として実施された。Fig. 10 に検層結果を示す。地表付近はやや硬い乾燥したクラストが存在するため、事前に掘削して貫入を開始し、25 m の深さまで貫入試験を行った。3 m 付近からはほぼ均質な粘土層が続いており、先端抵抗は一樣に増加している。深度 25 m の地点における q_t は約 10 kgf/cm² となっている。また間隙水圧も深度にしたがって一樣に増加しており、途中に砂層の貫入や層の不均質は見当たらない。 q_t , u の値の妥当性については一斉試験結果において確認されており、久里浜地区の地盤を正確に検層しているものと考えられる。RI コーンによる含水比と密度検層結果を Fig. 10 (c), (d) に示す。含水比は 5 m 付近で約100%を示し深度とともに減少することがわかる。ちなみに 25 m では60%という値を示している。同図に併せてプロットした港湾技術研究所で実施された室内試験結果は RI コーン検層結果と

ほぼ一致している。一方密度検層結果は深度によらず 1.5 g/cm^3 で一定値を示しているが、含水比分布同様室内試験結果を再現しており、RI コーンが地盤調査法として非常に有用であることがわかる。

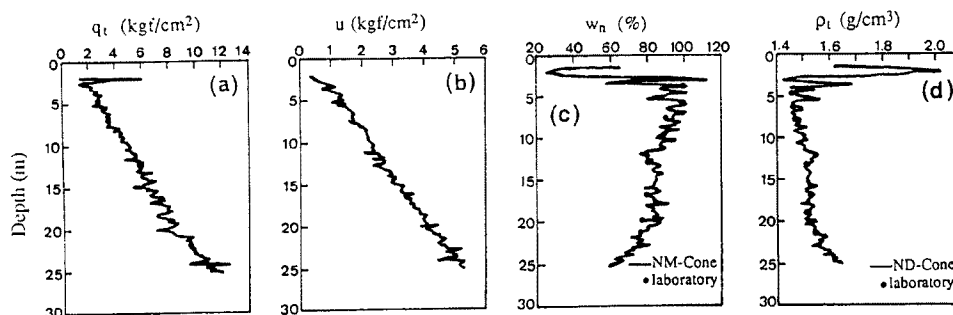


Fig. 10. Measured results through RI-cone penetrometer at Kurihama.

3.4 錦 海 湾

湾の入口を堤防で締め切って人工的に陸地を造成した錦海湾は旧塩田跡地で、地表から沖積粘土が約 25 m にわたって堆積している。Fig. 11 に錦海湾における RI コーンによる検層結果を示す。Fig. 11 (a), (b) より、非常に均質で軟弱な粘土地盤が続いていることがわかる。また Fig. 11 (c) および (d) に示すように、15 m 付近が最も高含水比、低密度域であり、深度が大きくなるにつれて含水比は急激に減少し密度は逆に上昇する。ところで、ここの特徴はその歴史的な要因により、地盤の塩分含有量が非常に高いことである。前章で説明したように、中性子によって含水量を計測する水分コーンでは熱中性子を吸収する塩素イオンの存在が正確な含水量測定を妨げるため慎重な対応が必要となる。ちなみに希塩素性の八郎潟と錦海湾の塩素イオン濃度の深度方向分布を比較してみよう。Fig. 12 に両者の塩素イオン濃度を示す。同図には参考のために、甲子園で実施した沖積粘土に対する結果も併せて示してある。甲子園や八郎潟では 0.1~0.2% に留まっている塩素イオン濃度が錦海湾では 10 倍以上の値を示していることがわかる。室内キャリブレーション試験による中性子の計数率比と塩素イオン濃度の関係を示した Fig. 13 からわかるように、塩素イオン濃度が高くなるにしたがって中性子の計数率比は低下する。このため塩素による計数率比の低下を勘案しなければ地盤の含水量を過小評価することになる。したがって筆者らは、オリジナルの較正曲線に塩素イオン濃度の効果を取り込んだ形で検層結果を求めている。Fig. 11 に示した室内試験結果は検層結果の妥当性を支持するものとなっており、RI コーン貫入試験装置が地盤調査法として非常に優れたものであることがわかる。

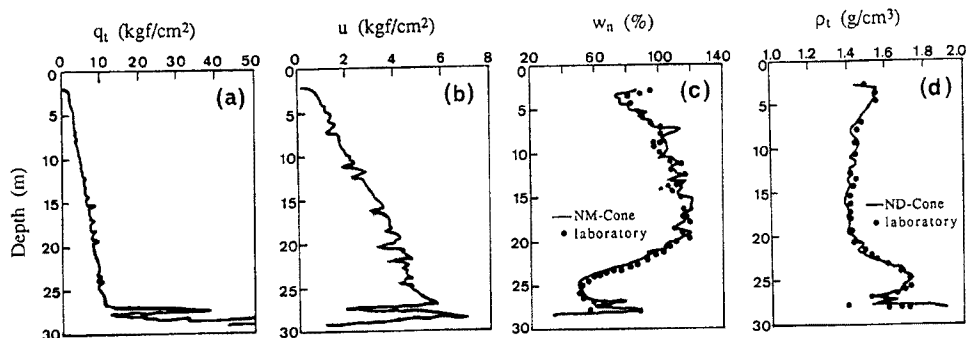


Fig. 11. Measured results through RI-cone penetrometer at Kinkai Bay.

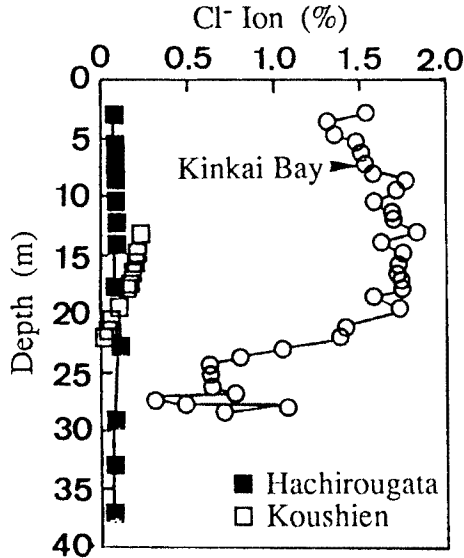


Fig. 12. Distribution of halide content with depth.

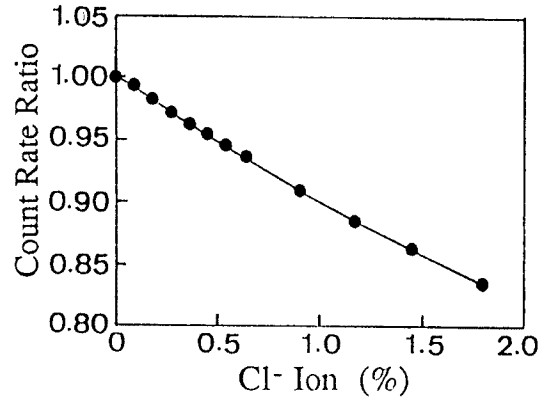


Fig. 13. Reduction in count rate ratio of NM-cone penetrometer as determined in the laboratory.

4. 有限要素法を併用した地盤の強度変形解析への適用

軟弱地盤の地盤調査法として RI コーン貫入試験が非常に有効であることは、前章で示した原位置試験例からも明らかである。そこで本章では次のステップとして、RI コーンの地盤工学へのより広範な適用について検討する。粘土地盤の沈下特性は $e \sim \log p$ 関係によって支配され、載荷応力に対応した間隙比の変化を深度方向に積分したものが沈下量となる。RI コーンを建設過程で繰り返し用いることで間隙比の変化を観測することができる。本研究ではこの特長を利用して、載荷に伴う地盤の変形を RI コーンを用いて把握することを試みる。またこの時、弾粘塑性有限要素解析⁹⁾を併せて行い、RI コーンに基づいて得られた結果の妥当性を検証する。解析の対象として前節で述べた錦海湾を取り上げる。

Fig. 14 に錦海湾の平面図を示す。解析は同図に示した締切堤防に直行する断面を用い、平面ひずみを条件下で行うものとする。用いた有限要素メッシュを Fig. 15 に示す。同図において A で示した地点について

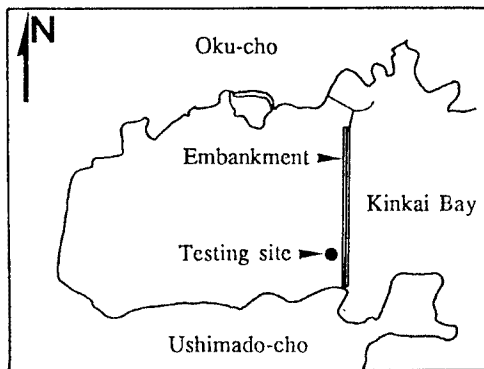


Fig. 14. Plan view of Kinkai Bay.

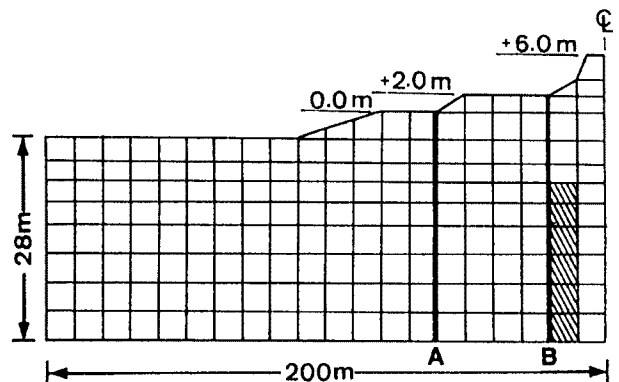


Fig. 15. Finite element mesh for Kinkai Bay. The bold lines are the testing sites, and the calculated results are discussed for the hatched element.

ては Fig. 11 にその検層結果を示した。一方 B で示した堤防下でも堤防建設による地盤の強度増加を調べる目的で同時に RI コーン貫入試験を実施した。締切堤防は昭和30年代初頭に建設されており¹⁰⁾、すでに建設後30年以上経過している。そこで本報告では、A 地点を堤防建設前の初期状態、B 地点を堤防建設後状態と考えて両方の検層結果を比較する。解析にあたり、地盤の初期応力 σ_{v0} ' は ND コーンの密度分布に、初期間隙比 e_0 は NM コーンの含水比分布に基づいて決定し、土質定数は同地点で別途実施された土質試験結果¹¹⁾を用いて決定した。また荷重工程は堤防施工手順に対応した有限要素を発生させることによってモデル化した。事前のボーリングによって、堤防建設に用いられた捨石が B 地点において地表面から約 10 m にわたって存在することが確認されている。これは圧密によるものというよりはむしろ投入された捨石による置換効果によるものが大半をしめていると考えられるので、沈下解析はこの捨石層の厚さに相当する荷重を載荷外力として基礎地盤に作用させることによって行った。

まず解析結果に基づいて、締切堤防建設による地盤強度の増大をコーン先端抵抗によって評価することの妥当性について議論しよう。有限要素解析によって求められた、B 地点における締切堤防建設に伴う鉛直応力の増加を Fig. 16 に示す。荷重が局部的であり応力分散が起きているため、堤防の荷重として基礎地盤に作用する有効上載圧 20.6 tf/m² に対し、鉛直応力増分はたかだか 2.5 tf/m² にとどまっていることがわかる。

コーン先端抵抗 q_t はコーンファクター N_{kt} と鉛直応力 σ_v ならびに非排水強度 c_u によって次式のように表わされる。

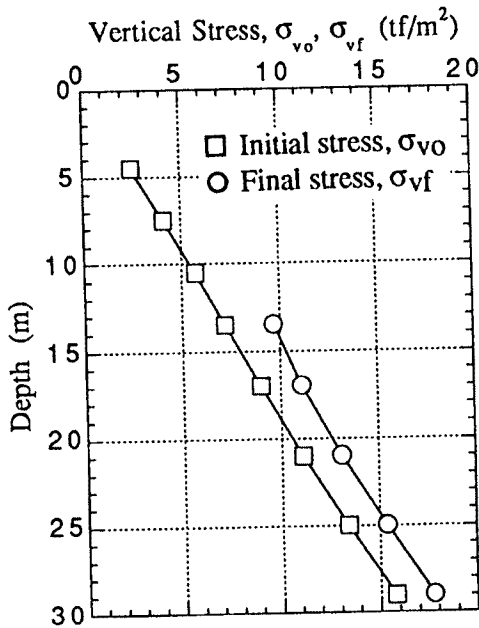


Fig. 16. Calculated results of the increase in vertical stress due to embankment construction.

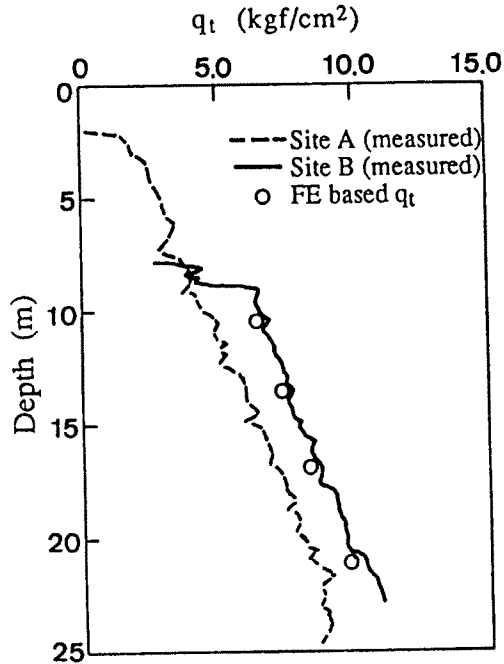


Fig. 17. Calculated cone tip resistance together with the measured results by RI-cone penetrometer.

$$q_t = c_u \cdot N_{kt} + \sigma_v \dots\dots\dots (2)$$

A 地点 (堤防建設前の地盤) における原地盤の非排水強度 c_u は、鉛直上載応力 σ_{v0} と先端抵抗 q_t は RI コーン貫入試験結果を用い、コーンファクター N_{kt} の値については Robertson and Campanella¹²⁾の提案による15を用いることにより、容易に計算することができる。つぎにこれら初期状態の諸値を用いてB地点 (堤防建設後の地盤) の強度を推定する。まず数値解析によって求められた鉛直応力の増分を、初期鉛直応力

σ_{v0} に加えることにより堤防建設後の鉛直応力 σ_{vf} を求める。次に圧密による強度増加 (c_u/p) を 0.33 と仮定すると、B 地点における非排水強度 c_{uf} を計算することができ、これに $N_{kt} = 15$ を考慮することにより、式-(2)に基づいて B 地点におけるコーン先端抵抗 (q_t)_f を求めることができる。A, B 両地点におけるコーン先端抵抗 q_t の検層結果と式-(2)によって理論的に求めた各深度の q_t を Fig. 17 に示す。有限要素解析による鉛直応力の増加に基づいて求めた q_t が B 地点における実検層結果と一致していることがわかる。また堤防下におけるコーン先端抵抗の増加が小さいのは、上載荷重の分散効果によって地盤の強度が堤防荷重に相当する程には上昇していないことが原因であることがわかる。

次に基礎地盤の変形について議論する。粘土地盤の沈下特性は $e \sim \log p$ 関係によって支配され、載荷応力に対応した間隙比の変化を深度方向に積分したものが沈下量となる。RI コーンを建設過程で繰り返し用いることで間隙比の変化を観測することができる。本報告ではこの特長を利用して、載荷に伴う地盤の変形を RI コーンを用いて把握することを試みる。

NM コーン (水分コーン) の検層結果に基づいた A 地点 (初期状態) と B 地点 (堤防建設後) における間隙比分布を Fig. 18 に示す。一点鎖線で示した A 地点は地表面から比較的大きな間隙比を有しているのに対し、実線で示した堤防下の B 地点は堤防建設の影響で間隙比の減少が見られる。さらに上述したように、捨石が地表面下 10 m 付近まで存在するので、事前にケーシング掘りを行って粘土層の天端を確認した後に貫入試験を実施したため、B 地点の検層結果は 10 m 以深のものが得られている。この両者の間隙比の差が基礎地盤の沈下に寄与することになる。変形を一次元と仮定して次式にしたがって沈下量を簡易的に求めてみよう。

$$s_{\text{cone}} = \int_0^z \frac{(e_0 - e_f)}{(1 + e_0)} dz \dots\dots\dots (3)$$

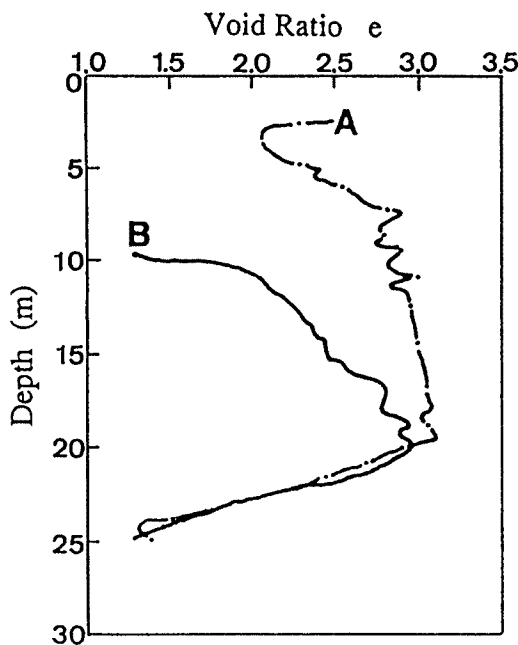


Fig. 18. Change in void ratio, e as determined through NM-cone penetrometer.

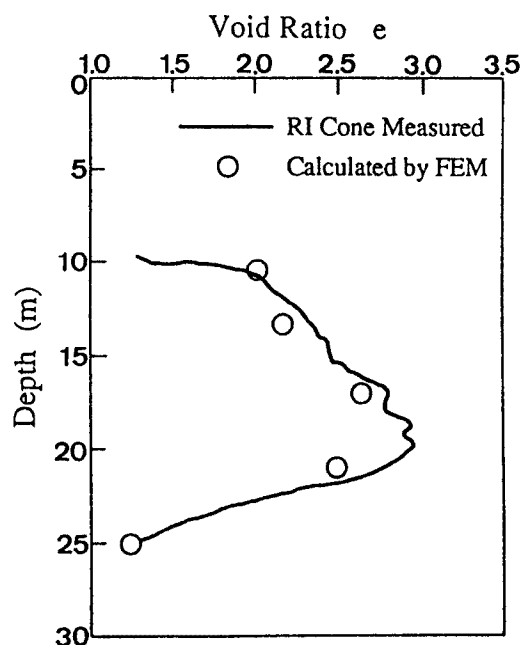


Fig. 19. Comparison of void ratio, e generated for clay layer through finite element analysis and as determined through NM-cone penetrometer beneath the embankment.

ここに e_0 は A 地点 (初期状態) の, e_f は B 地点 (堤防建設後) の間隙比である。式(3)によって計算された粘土地盤の沈下量は 1.18 m となる。次に有限要素解析による当該要素の間隙比を NM コーン検層による間隙比分布と比較してみよう。Fig. 19 に B 地点における間隙比の検層結果と有限要素解析結果を併せて示す。堤防建設による基礎地盤の圧縮を解析した結果は同地点で実施した NM コーン原位置試験結果によって強く支持される結果となっていることがわかる。具体的な沈下量については有限要素解析からは 1.26 m という解を得ており、式(3)によって求められた沈下量と非常によく一致している。このように、同じ現場で施工、圧密過程にかけて繰り返し RI コーン貫入試験を実施することにより、RI コーン検層によって圧密による粘土地盤の沈下量を比較的簡便に評価することができる。

本章では、事前の地盤調査としてだけでなく、粘土地盤の強度増加や圧縮に対しても RI コーンが非常に有効に機能し得ることを示し、数値解析と併用することにより、より広範な利用法があることを明らかにした。

5. おわりに

RI コーン貫入試験装置を用いて4つの現場で地盤調査を実施した。RI コーン貫入試験は従来の三成分コーンが与える情報に加えて、地盤の含水比および密度分布を連続的に検層し得るものである。本研究では京橋、久里浜、八郎潟、錦海湾のそれぞれ堆積環境の異なる粘土地盤を対象とした原位置試験を行った。同時にすべての現場でサンプリングを実施し、RI コーンによる検層結果を従来法による室内試験結果によって評価した。その結果、八郎潟のような希水性粘土から錦海湾のような塩田跡地の高塩素イオン濃度の粘土に対して、また京橋地区のような陸上地盤における低含水比領域から八郎潟のような200%に達する高含水比領域にわたって RI コーン貫入試験による検層結果は室内試験結果とほぼ一致しており、非常に有用な地盤調査法であることがわかった。

また検層結果を用いて数値解析における地盤の締切堤防建設に伴う基礎地盤の変形を、RI コーン検層データに基づいて設定したパラメータを用いた弾粘塑性有限要素法によって解析した。これによると、締切堤防の荷重は分散が大きく地盤内における鉛直応力の増加は非常に小さい。このため、堤防下におけるコーン貫入抵抗値も平地部における値と比べてさほど上昇していない。有限要素解析に基づいた q_c 値はこの検層結果とよく一致しており、当地盤は締切堤防建設によってもさほど強度増加がおこっていないことが明らかとなった。また数値解析による粘土層の圧縮は RI コーンによる間隙比変化に基づいた予測値とほぼ一致し、建設過程において繰り返し貫入試験を実施することによって、粘土地盤の圧密挙動を把握することができることがわかった。このように、本試験装置は粘土地盤の強度および沈下量管理にも十分適用でき、より広範な地盤工学への適用の可能性を示した。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ソイルアンドロックエンジニアリング(株)延山政之氏には装置の設計とラジオアイソトープの基礎的な原理について多大の御教授を賜りました。記して深甚の謝意を表します。また原位置試験に際して多大の御協力を賜った、ソイルアンドロックエンジニアリング(株)金子義信氏、間瀬勝則氏、野村隆氏、鉄道建設公団大阪支社、木村宏氏、東亜建設工業(株)半沢秀郎氏、深沢健氏、運輸省港湾技術研究所、田中洋行氏、応用地質(株)松本一明氏および同岡山支店の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 石井恒久・三嶋信雄, 日本道路公団試験所報告, 1986.
- 2) Preiss, K.: In Situ Measurement of Marine Sediment Density by Gamma Radiation, Deep Sea Research, Vol.15, 1968, pp. 637-641.
- 3) Tjelta, T. I., A. W. W. Tiegies, F. P. Smits, J. M. Geise, and T. A. Lunne: In Situ Dnsity Measurement by Nuclear Back Scatter for an Offshore Soil Investigation, Norwegian Geotechnical Inst. Pub., No. 169, 1987, pp. 1-5.
- 4) Sully, J. P., and H. J. Echezuria: In Situ Density Measurement with Nuclear Cone Penetrometer, Proc. ISOPT-1, Vol. 2, 1988, pp. 1001-1005.
- 5) 新ラジオアイソトープ, 講義と実習, 日本アイソトープ協会編.
- 6) 三成分コーンおよびシンウォールスキャナー実技セミナー, 土質工学会関西支部.
- 7) Burn, K. N.: Calibration of a Neutron Moisture Meter in Leda Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, No. 2, 1964, pp. 94-103.
- 8) Homelius, J. and S. Lorch: On the Theory of Gamma-Ray Scattering in Boreholes, Geophysical Prospecting, VI, 1958, pp. 342-364.
- 9) Mimura, M., T. Shibata, M. Nozu and M. Kitazawa: Deformation Analysis of Reclaimed Marine Foundation Subjected to Land Construction, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, 1990, pp. 119-133.
- 10) 奥村樹郎・小林正樹・松本一明: ある締切堤防の長期圧密沈下について, 第24回土質工学シンポジウム発表論文集, 1979, pp. 63-70.
- 11) 錦海湾堤防および塩田跡地の地盤強度検討土質調査報告書, 応用地質株式会社, 1990.
- 12) Robertson, P.K. and R. G. Campanella: Guidelines for Use, Interpretation and Application of the CPT and CPTU, Soil Mechanics Series, No.105, Dept. of Civil Eng., Univ. of British Columbia, 1986.