

# R I コーンによる砂質地盤の原位置含水比・ 湿潤密度検層とその精度評価について

三村 衛<sup>1</sup>・Abhay K. SHRIVASTAVA<sup>2</sup>・柴田 徹<sup>3</sup>・延山政之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 (〒239-8704 横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>3</sup>フェロー 工博 福山大学教授 工学部土木工学科 (〒721-0000 福山市学園町 1 三蔵)

<sup>4</sup>「リルアンド ロックエンジニアリング」株式会社 (〒561-0834 豊中市庄内栄町 2-21-1)

筆者らが開発したラジオアイソトープコーン貫入試験機 (RI コーン貫入試験機と呼称する) は、従来の電気式静的コーンに中性子線源と  $^3\text{He}$  計数管を内蔵した水分コーン (NM-Cone) とガンマ線源と NaI シンチレータを内蔵した密度コーン (ND-Cone) の総称で、それぞれコーン貫入時に地盤の水分量と湿潤密度を測定できるものである。本論文では、RI コーンを用いていくつかの異なった種類の砂質地盤の検層を行い、同時に実施された凍結サンプリングによって採取された乱さない試料を用いた室内試験から求められた結果に基づいてその測定精度を検証する。また RI コーンによる砂地盤の相対密度評価法について議論するとともに、RI コーンの測定値の妥当性を有限要素解析に基づいて検討する。

**Key Words :** cone penetrometer, radio isotope, wet density, water content, sandy deposit, in-situ test

## 1. はじめに

砂質地盤の原位置における状態を正確に把握することは非常に重要であるが、原位置で持っている構造を壊すことなく試料を採取し、室内試験によってその物理値を求ることは容易ではない。細粒分の少ないわゆるきれいな砂に対しては、地盤をゆっくり凍結させてサンプリングする方法が高品質の試料を得る最良の方法であるとされている。しかしながら、この方法は地盤凍結に莫大な費用がかかることから大規模プロジェクトの一環として例外的に行われることはあってもルーティンとして実施できるような状況はない。

従来、砂地盤に対しては標準貫入試験が万能的に用いられており、N 値さえあれば砂地盤は処理できるといった感がある。確かに長年の経験と豊富に蓄積されたデータに基づいて N 値は地盤の諸物理値と関連付けられてはいるものの、既に指摘されているように、データの不連続性、貫入打撃エネルギーのばらつき等の問題点を有している。世界各国で標準的に実施されている電気式静的コーン貫入試験は、深さ方向にデータを連続的に取ることができ、コーン先端抵抗以外にもコーン周面摩擦や貫入時の間隙水圧が測定できる。こ

れらの成分を多角的に組み合わせることによって細かい地層の変化に敏感に対応できると同時に、土質分類を行うことができるといった特長を有しており、近年わが国でも使用頻度が徐々に上がってきている。また近年飛躍的な進歩を遂げているエレクトロニクス技術を駆使しようとすると、打撃を与える試験である標準貫入試験では精密機械を付加するのが難しいのに対して、静的に貫入するタイプの試験であるコーン貫入試験は比較的容易に精密センサーを内蔵することができるという大きな利点がある。事実、地震計を内蔵したサイズミックコーンやコーンの欠点として指摘されてきた試料が目視できないという問題を解決しうるビデオコーン、地盤環境問題への適用が期待される電気比抵抗コーンといった新しいコーンの開発が急ピッチで進められ、その多くが実用化段階に至っている。

本論文では、筆者らによって開発されたラジオアイソトープコーン貫入試験機<sup>1)</sup> (以後 R I コーンと呼称する) の砂地盤への適用性について議論する。R I コーンは電気式静的コーンに中性子線源と  $^3\text{He}$  計数管を内蔵した水分コーン (Neutron Moisture Cone Penetrometer : NM-Cone) とガンマ線源と NaI シンチレーション検出器を内蔵した密度コーン (Nuclear Density

Cone Penetrometer : ND-Cone) の 2 種類の総称である。原位置試験を実施したサイトは、川崎市東扇島、千葉市花見川、バンクーバー市 Massey Tunnel Site, KIDD2 Site の 4 ケ所で、すべてのサイトで凍結サンプリングによる乱さない試料が採取されている。東扇島は 1970 年代に埋立てられた若齢埋立砂地盤、花見川は洪積成田砂層、バンクーバーの 2 サイトはフレーザー川流域に広がる沖積砂層とそれぞれ異なった堆積環境でできた砂地盤である。各サイトにおける R I コーンによる原位置含水比、湿潤密度検層結果を凍結試料を用いた室内試験結果と比較するとともに、大変形有限要素法によるコーン貫入過程の数値解析結果によって R I コーンによって得られる検層値の妥当性を検討し、本試験機の広範な砂地盤への適用性について議論する。また、R I コーンによる砂質地盤の相対密度評価能力についても議論する。

## 2. R I コーンの構造と測定原理

### (1) RI 検層と RI コーン開発の背景

R I を用いて地盤の含水量や密度を測定する試験法それ自体は新しいものではなく、ボーリング孔を使って行われる密度検層<sup>2)</sup> や水分量検層<sup>3)</sup>をはじめ、高速道路盛土やロックフィルダムなどの締固め管理<sup>4)</sup>において実績を有している。R I 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。前者が主として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。Preiss<sup>5)</sup> 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、挿入・散乱型の R I 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<sup>6), 7)</sup> が報告されているが、ボーリング孔壁の乱れ、センサーと孔壁間の間隙流体の存在、ケーシングを用いる場合にはその材質と厚みなどが計測値に大きく影響するため、原位置測定値を補正して地盤の物性値としなければならないという深刻な問題がある。一方、R I コーンはコーンをそのまま地盤に貫入するだけで含水比と湿潤密度を測定できるため、R I 密度・水分量検層が有している欠点をすべて克服することができる画期的なツールであり、サンプリングが難しい砂質地盤への適用が可能になれば非常に有効な地盤調査手法となる。

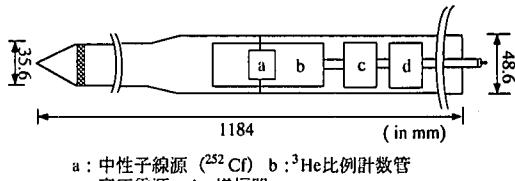


図-1 水分コーン (NM-Cone) の構造

### (2) RI コーンの構造と測定原理

R I コーン貫入試験機として、電気式静的コーンに R I 水分計を取り付けた水分コーン (NM-Cone) と R I 密度計を取り付けた密度コーン (ND-Cone) 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。

#### a) 水分コーン (NM-Cone)

水分コーン (NM-Cone) の構造を図-1 に示す。コーン貫入試験機先端部は従来の電気式静的コーン貫入試験機であり、直径 35.6mm、コーン先端角は 60 度である。水分計プローブ部は直径 48.6mm と先端部に比べてやや太く、コーン全長は 1184mm である。同図に示すように、<sup>3</sup>He 計数管の中央に高速中性子線源の <sup>252</sup>Cf (カリフォルニウム 252・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って 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。<sup>3</sup>He 計数管は線源から放出される高速中性子には反応せず、熱中性子だけを検出する性質を持っている。このため、線源は最も検出効率の高くなる <sup>3</sup>He 計数管中央に格納されている。

つぎに水分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<sup>8)</sup>。地盤内の水素は大部分が H<sub>2</sub>O 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比を深さ方向に計測することができる。水分コーンの設計と測定原理の詳細については文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

#### b) 密度コーン (ND-Cone)

密度コーン (ND-Cone) の構造を図-2 に示す。コーンの外形および寸法は水分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

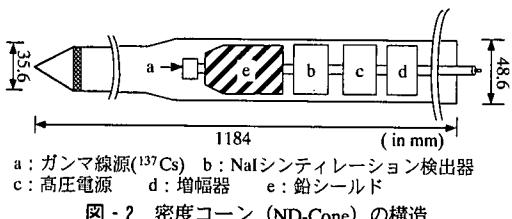


図-2 密度コーン (ND-Cone) の構造

を散乱して到達するガンマ線を検出する検出管、線源から放出されたガンマ線がコーン内部を通って直接検出管に到達するのを防ぐシールド鉛の3つの主要部分からなっている。ガンマ線源としてはセシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ・半減期 30 年) を用いている。また検出管としてヨウ化ナトリウム (NaI) の結晶を用いたシンチレーション検出器を用いている。線源から放出されたガンマ線光子は、地中を通過する際に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<sup>8)</sup>。コンプトン散乱によって地中で散乱されるガンマ線光子の数は土の密度に比例して変化し、検出されるガンマ線束は一般に次式で表わされる。

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

ここで、 $\phi$  は検出されるガンマ線束、 $S$  は線源強度、 $\Sigma$  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。 $r$  は線源と検出器間の距離、 $\rho$  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  $\Sigma$  がほぼ一定とみなすことができるので、ガンマ線束  $\phi$  は密度  $\rho$  のみによって変化することになる。したがって、土の密度と検出される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。

### (3) R I コーンに対する較正試験と較正曲線

R I 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前提となる。したがって原位置試験に先立って土槽を用いた室内較正試験を実施し、水分コーン、密度コーンに対してそれぞれ較正曲線を求めている。

較正試験は鋼製の円形土槽(直径 65cm、深さ 98.8cm)

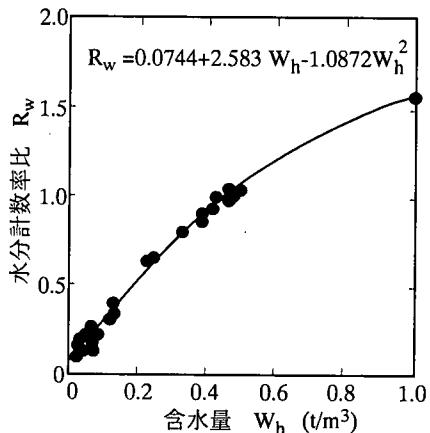


図-3 水分コーン (NM-Cone) の較正曲線

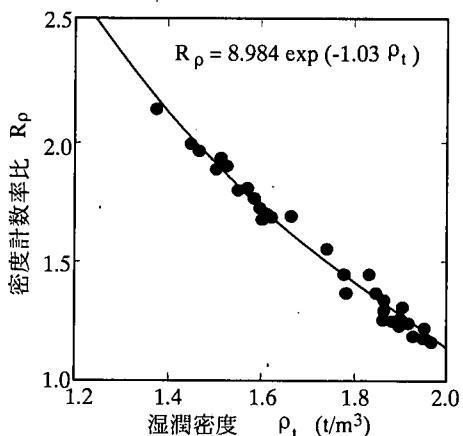


図-4 密度コーン (ND-Cone) の較正曲線

の中心にコーンを直立させ、その周囲に含水比を調整した土試料を投入し、締固めによる密度調整を行って作製した供試体を用いて実施した。実験の詳細については文献 1)を参照されたい。

水分コーンに対する較正試験結果を図-3 に示す。ここで、水分計数率比とは「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」と定義されるものである。また含水量  $W_h$  は単位体積当たりの土に含まれる水の重量である。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、Burn<sup>10)</sup>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を得ている。得られた結果を非線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二次式で近似できる。

次に密度コーンに対する較正試験結果を図-4 に示

す。ここで、密度計数率比とは「実測されるガンマ線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密度計数率（スタンダード値）の比」と定義されるものである。Homilius and Lorch<sup>11)</sup>によれば、散乱型の密度計の密度～密度計数率比関係は、線源と検出器間の距離をパラメータとして指數関数で表わされる。したがって、密度コーンの較正曲線を図-4に示すような指數関数によって近似する。

#### (4) 原位置試験にあたって留意すべきポイント

実際にR I 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。

##### a) 計数率比の利用

R I コーンの線源として用いているカリウォ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、R I カウントそのものを指標にすると、試験のたびに固有の較正曲線が必要となり、試験の精度、作業性の両面で問題となる。したがって、原位置試験を実施する時点でスタンダード計測容器を用いて必ずスタンダード値を測定し、実測R I 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。

##### b) バックグラウンドの測定

密度コーンについては、地盤内に自然に存在するガンマ線量（バックグラウンド）をあらかじめ測定し、実測R I 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、原位置試験サイトにおいてバックグラウンド計測用の貫入試験を別途実施する必要がある。バックグラウンドは一般に土の種類によって変化するので、地盤の成層状況を評価する補足データとしても利用できる。

##### c) 塩素濃度の影響

熱中性子は塩素、ほう素、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る必要がある。これについては、旧塩田で塩素イオン濃度が非常に高い岡山県・錦海湾における粘土層の検層結果を用いて詳細に検討し、室内試験から求めた塩素イオン濃度と計数率比の低下的関係を較正係数に加えることによって、実際の地盤の含水比を非常に精度よく評価

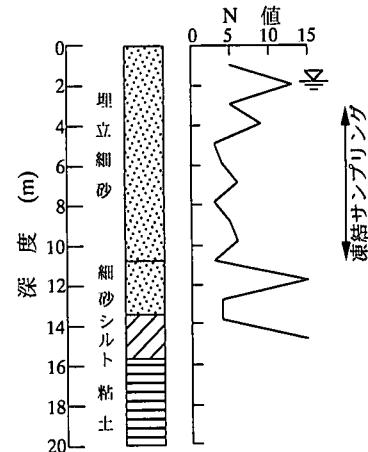


図-5 東扇島地盤の柱状図と標準貫入試験結果

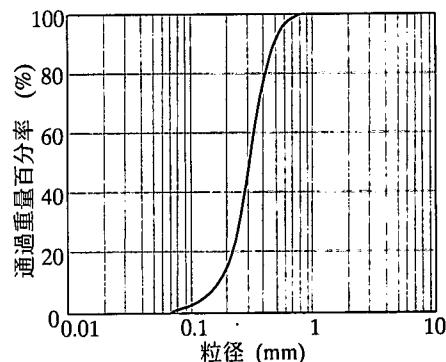


図-6 東扇島砂の粒径加積曲線

できることが報告されている<sup>12)</sup>

### 3. 原位置試験サイトと砂地盤の物理特性

R I コーン貫入試験は川崎市・東扇島埋立地、千葉市・花見川地区、バンクーバー市・CANLEX 試験サイト（2 地点）で実施した。コーン貫入に際しては、世界標準に準拠して貫入速度 2.0cm/s で静的に貫入した。またすべてのサイトで凍結サンプリングが併せて行われており、凍結試料による室内試験結果と R I コーンによる原位置含水比、湿潤密度検層結果とを比較することによって本試験装置の検層結果の精度評価を行う。本章では、R I コーン貫入試験を実施した現場の概略と基本的な砂の物理特性について説明する。

#### (1) 東扇島埋立地

東扇島埋立地は京浜運河に沿って展開する埋立地で、千葉県富津市浅間山一帯に産出する山砂を用いて 1971

年から埋立が開始され、70年代の後半には全体の埋立が完了している。試験実施地区は1972年～73年にかけて埋立てられた矢板式護岸背面の物揚場の一角である<sup>13)</sup>。現地の地盤は図-5に示すように、現海底面から埋立砂層が約11mにわたって堆積し、その下位に元々の沖積粘土地盤が現れる。対象とする埋立砂層は上部に一部突出した高いN値が認められるものの、概ね全層にわたってN値が5前後の緩い状態で非常に均質一様に堆積している。地下水位はG.L.-1.9m、土粒子の密度 $\rho_s$ は深さによらずほぼ2.7で一定となっている<sup>14)</sup>。また、図-6に示すように細粒分がほとんどなく、 $D_{50}=0.3\text{mm}$ 、均等係数 $D_{60}/D_{10}=2.0$ の均一粒径のきれいな砂で、緩くて極めて液状化しやすい状態にあることがわかる。サンプリングに際しては、液体窒素を用いて地盤を凍結させ、直径150mmのコアボーリングによって深度3m～11mから試料を採取した。

## (2) 花見川洪積砂層

千葉市・花見川地区は花見川区畠町、京葉道路南側に位置し、図-7に示すように、地表面から3.5mは埋戻土で、それに続いて腐植土層が約2.5mにわたって続き、さらに約2mのシルト質層を経て、深度8.5mから自然堆積砂層が厚く堆積している。標準貫入試験結果によると、対象とする砂層のN値は深さとともに増大し、深度18m付近以深はN値>40の非常に硬く締まった砂となっている。地下水位はボーリング孔内水位から地表面下1.42mとなっている。深度15m地点から採取した凍結試料から求めた粒径加積曲線を図-8に示す。非常に均一粒径で、均等係数 $D_{60}/D_{10}=1.7$ 、 $D_{50}=0.15\text{mm}$ 、また75μm以下の細粒分は4%というきれいな細砂に分類され、当該深度における標準貫入試験のN値は30前後とかなり大きいものの、粒度からは液状化に対して注意を要する地盤ということができる。凍結サンプリングは深度7m～17mについて実施された。

## (3) CANLEX試験サイト

カナダ・バンクーバー市を流下するフレーザー川周辺はフレーザーデルタと呼ばれる軟弱な堆積層が広がっている。このフレーザーデルタの中にCanadian Liquefaction Experiment (CANLEX) Projectの実験サイトとして、図-9に示すような2ヶ所が用意されている。

まずKIDD2サイトは、Richmondの北端、フレーザー川の北支流沿いに位置し、約4000年前の堆積物と考えられている自然堆積砂を中心とした層で形成されている。Monahan et al.<sup>15)</sup>によれば、深度3.6m～12.5mまでは中～粗粒の砂を中心とする層で若干の細粒分と砂

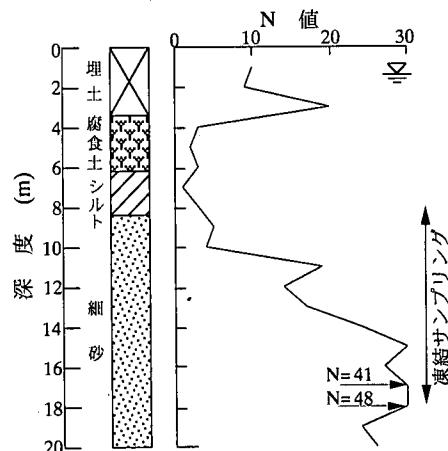


図-7 花見川地盤の柱状図と標準貫入試験結果

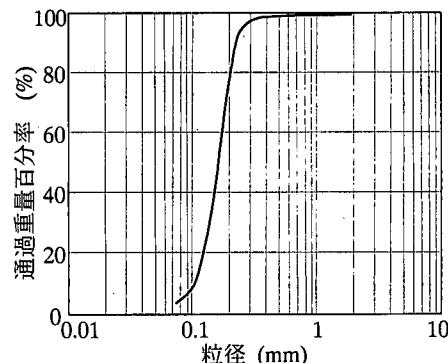


図-8 花見川砂の粒径加積曲線

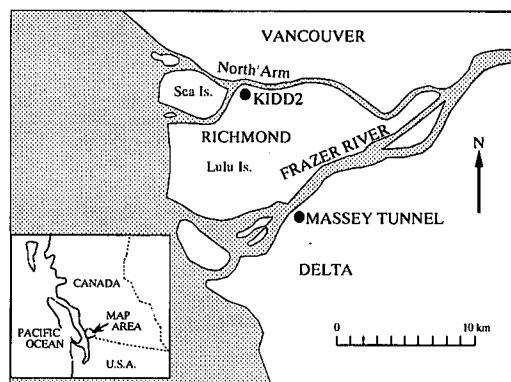


図-9 カナダ・CANLEXサイトの位置

礫分を含んでいる。12.5m以深は中～細砂から成る層が堆積している。平均地下水位は地表面下1.5mで、凍結サンプリングは深度12m～17mの間で実施された。

表 - 1 KIDD2 サイトと Massey Tunnel サイトの砂の物性値<sup>15)</sup>

	KIDD 2	Massey Tunnel
堆積年代	4000年前	200年前
凍結試料採取深度	12m ~ 17m	8m - 13m
平均地下水位	1.5m	1.5m
鉱物組成	石英 70% 長石 15% 雲母 5% カオリケト 5% クロライト&スマクタイト 5%	石英 70% 長石 15% 雲母 5% 材けけト 5% クロライト&スマクタイト 5%
均等係数	2.5	2.14
最大間隙比	1.061	1.056
最小間隙比	0.73	0.67
土粒子密度	2.72 g/cm <sup>3</sup>	2.68 g/cm <sup>3</sup>
静止土圧係数	0.5	0.5

次に、Massey Tunnel サイトはフレーザー川本流沿いに位置し、約 200 年前の堆積物と考えられている自然堆積砂を中心とした層で形成されている。凍結サンプリングは深度 8 m~13 m の間で実施された。この部分は細砂が中心で、まれに植物性の有機物質の混入が認められるものの、ほぼきれいな砂である。また平均地下水位は地表面下 1.5 m である<sup>16)</sup>。両サイトの砂の基本的な物性値を表 - 1<sup>15)</sup>に示す。

#### 4. R I コーン貫入試験結果と考察

東扇島における R I コーン貫入試験結果を図 - 10 に示す。同図 (a), (b)より、間隙水圧はほぼ静水圧を示し、コーン先端抵抗  $q_t$  も一部浅い部分で突出して大きくなっているものの深さとともに漸増しており、東扇島の埋立地盤が一様な緩い砂であることが容易にわかる。

図 - 10 (c)は水分コーンによる含水比検層結果を、(d)は密度コーンによる湿潤密度検層結果をそれぞれ示したものである。またそれぞれの図におけるプロットは凍結サンプリングによって採取された不搅乱試料を用いて室内試験から求めた含水比と湿潤密度を表わしている。凍結サンプリングによって採取された試料に含まれる水分は氷の形で存在しており、凍結試料をそのまま用いて測定される含水比は原位置の状態から地盤凍結を経た後の含水比である。今、凍結状態における含水比を  $w_{n,f}$  とする。凍結サンプリングが原位置の砂の状態を保つて理想的に行われるためには土粒子間の間隙を変化させず（ひずみを発生させず）に地盤を凍結させることが求められる。水は凍結すると体

積膨張を起こし、液体時には  $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$  である密度が氷の状態では  $\rho_{w,f} = 0.917 \text{ g/cm}^3$  となる。本研究では細粒分の少ない砂に対して凍結サンプリングが理想的に行われたとし、採取された試料は凍結によって体积膨張していないと仮定する。この仮定にたてば、凍結試料は凍結以前に原位置に存在した状態を保持しており、間隙比の変化を起こしていないことになる。つまり空隙の体積は凍結前後で変化せず、飽和状態では空隙を占有する水の体積も凍結前後で一定となる。変化するのは水の状態だけであり、凍結による水の密度の変化のみが砂の含水比の変化を支配することになる。したがって、原位置における凍結前の含水比  $w_n$  は室内で測定される凍結試料の含水比  $w_{n,f}$  から  $w_n = w_{n,f} / 0.917$  と求められる。以後、水分コーンの測定値と比較される砂の含水比はすべてこのようにして換算されたものである。均質な砂による埋立地盤であっても局所的な不均質性は不可避であり、実測含水比にも一部ばらつきが認められる。水分コーンによる検層結果は深度 5 ~ 6m 付近で最大 10% 近い差が生じているのを除けば、概ね実測含水比の値を評価し得ており、原位置における砂地盤の含水比を評価できているものと考えられる。

図 - 10 (d)における密度コーンによる原位置湿潤密度検層結果によると、当該地盤は同じ山砂によって一様に埋め立てられたにもかかわらず、深度 5 m 付近で値のやや小さい部分をはさんでその上下で  $1.9 \text{ t/m}^3$  程度の値を示すという不均質性を呈している。また凍結試料による実測結果も全く同様の傾向を示しており、比較的短い区間でこうした不均質が現れる原因については今のところ不明であるが、いずれにしてもこの湿潤密度分布性状は東扇島埋立地盤の特徴である。密度コーンによる検層結果と比較する湿潤密度は含水比の場合と同様、凍結状態のではなく、原位置における未凍結時のものでなければならない。したがって、原位置湿潤密度  $\rho_i$  を以下のようにして算定した。まず、東扇島のケースのように、凍結試料に対する含水比  $w_{n,f}$  と湿潤密度  $\rho_{i,f}$  がともに測定されている場合は、凍結状態で測定した湿潤密度  $\rho_{i,f}$  と含水比  $w_{n,f}$  から式(2a)によって乾燥密度  $\rho_d$  を求める。

$\rho_d$  は土の状態によらない固有の量であるので、未凍結状態の湿潤密度  $\rho_i$  と含水比  $w_n$  は式(2b)を満足する。前述した方法を用いて凍結状態の含水比  $w_{n,f}$  から算定した原位置含水比  $w_n$  を式(2b)に代入することによって原位置における湿潤密度  $\rho_i$  を求めた。この値を原位置実測湿潤密度として密度コーンの検層結果と比較している。同図より、密度コーンの検層結果は、含水比の場合と同様、深度 5 ~ 6m 付近で不一致が認められるものの、全体として実測結果とよく一致している。一連

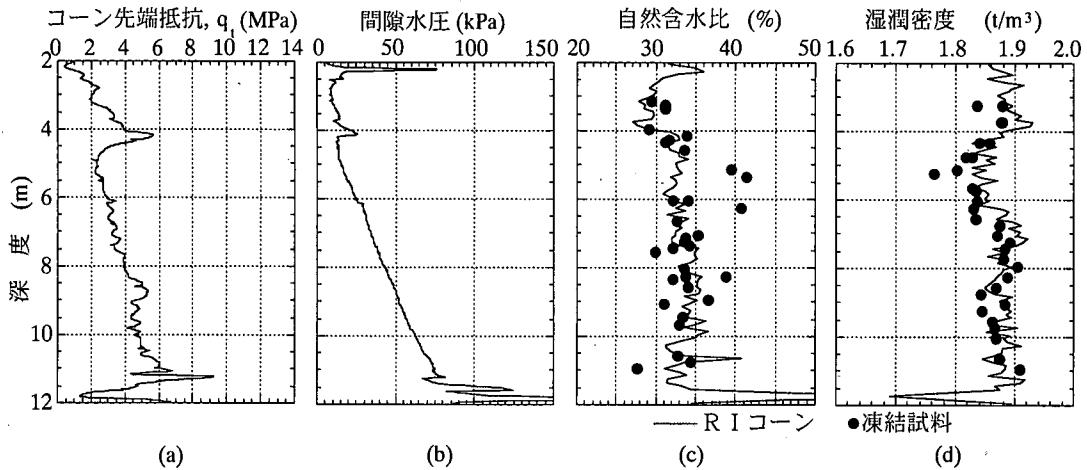


図-10 東扇島埋立砂地盤におけるR-Iコーン検層結果と凍結試料による含水比・湿潤密度との比較

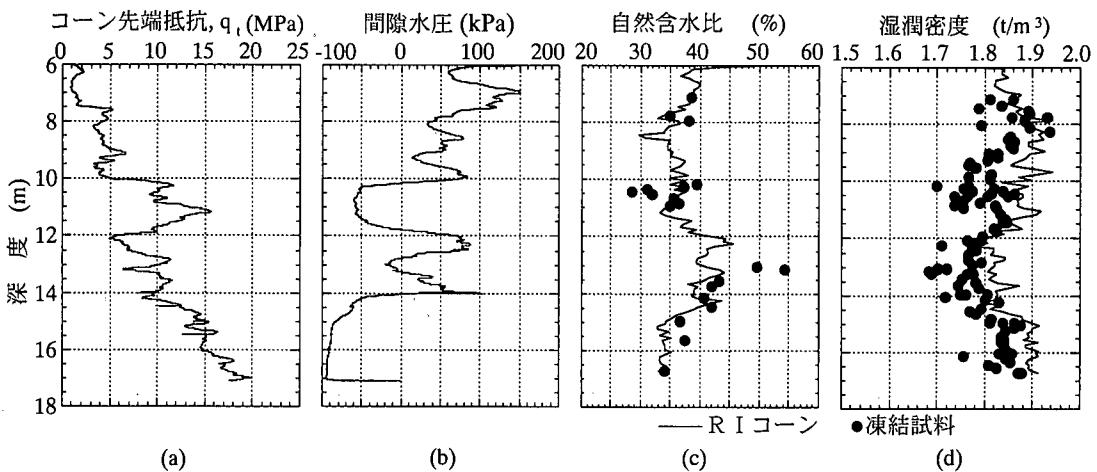


図-11 花見川洪積砂層におけるR-Iコーン検層結果と凍結試料による含水比・湿潤密度との比較

の検層結果の妥当性と、高品質の情報が得られる凍結サンプリングがコスト的にルーティンとして実施できない状況を考え併せると、R-Iコーン貫入試験は緩い埋立砂地盤の検層に優れた手法であると考えられる。

$$\rho_d = \frac{\rho_{t,f}}{1 + w_{n,f}/100} \quad (2a)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w_n/100} \quad (2b)$$

花見川サイトの対象砂層に対するR-Iコーン貫入試験結果を図-11に示す。深度8m付近から洪積砂層に入ると、コーン先端抵抗値は深度にしたがって増大し、N値が40を超える17m付近では20MPaに達する。こ

れと対応して間隙水圧の傾向もほぼ静水圧を示していた東扇島のような緩い地盤とは対照的に負の間隙水圧が発生するようになり、局所的な変動も極めて大きくなることがわかる。これは自然堆積地盤、特に硬い砂地盤でよく見られる傾向で、定性的にではあるが、コーン先端抵抗の増加に反比例して負圧が増大する傾向が認められる。図-11(c)は水分コーンによる含水比検層結果を、(d)は密度コーンによる湿潤密度検層結果をそれぞれ示したものである。実測含水比は、東扇島の場合と同様、未凍結状態である原位置の値に戻してプロットしている。含水比については測定数が少なく評価が難しいが、水分コーンによる含水比検層結果は実測含水比をほぼ妥当に評価し得ている。これに対して(d)の湿潤密度は密度コーンによる湿潤密度検層結果と実測値との差が認められる。定性的な分布傾向は満足

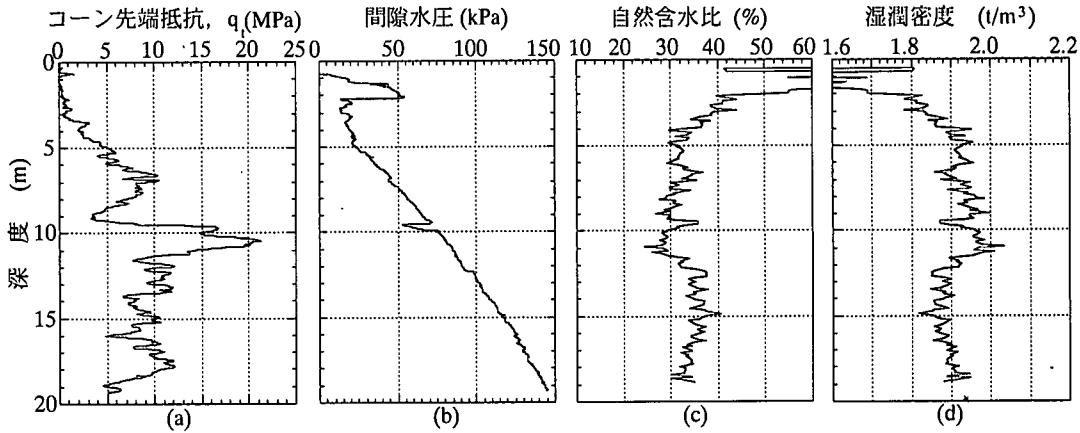


図-12 カナダ・KIDD2 サイトにおける R I コーン検層結果

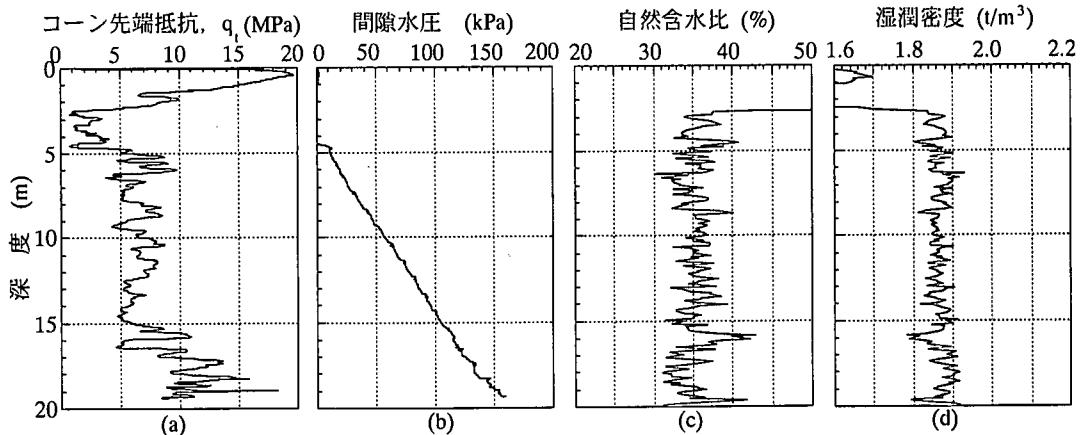


図-13 カナダ・Massey Tunnel サイトにおける R I コーン検層結果

しているものの、全体に検層結果は実測値よりも大きくなっていることがわかる。このサイトでは、湿潤密度は採取試料すべてについてノギス法で測定されているが、含水比については室内力学試験に際して測定されたものに限られている。したがって、ほとんどの試料に対して式(2a, b)をそのまま用いて原位置湿潤密度 $\rho_t$ を求めることができない。このため、以下のような方法によって凍結試料の湿潤密度 $\rho_{tf}$ から未凍結状態の湿潤密度 $\rho_t$ を求めた。土の湿潤密度と含水比は、土粒子密度 $\rho_s$ と飽和度 $S_r$ (%)を介して一義的な関係にある。すなわち、凍結状態の土に対しては式(3a)の、未凍結状態の土に対しては式(3b)が満足される。まず、地下水位以下は完全に飽和していると仮定して $S_r=100\%$ の仮定の下で式(3a)を $w_{nf}$ について解き、凍結試料に対して直接測定される湿潤密度 $\rho_{tf}$ から凍結状態の含水比 $w_{nf}$ を算定した後、 $w_n=w_{nf}/0.917$ によって原位置含水比に換算する。土粒子密度 $\rho_s$ は三村・五十嵐の報告<sup>17)</sup>に基づいて $2.68 \text{ g/cm}^3$ とした。次に求めた $w_n$ の値を式(3b)に代入

$$\rho_{tf} = \frac{(1 + w_{nf}/100) \cdot \rho_{w,f}}{\rho_{w,f}/\rho_s + w_{nf}/S_r} \quad (3a)$$

$$\rho_t = \frac{(1 + w_n/100) \cdot \rho_w}{\rho_w/\rho_s + w_n/S_r} \quad (3b)$$

することによって原位置湿潤密度 $\rho_t$ を算定した。式(3a, b)からも明らかなように、湿潤密度と含水比は全く独立して存在する量ではなく、土粒子密度と飽和度を介して一義的な関係にある。R I コーンの検層結果は水分コーンと密度コーンの検層結果を補完させながら最終結果を導く方法を探っているので、(c)と(d)の検層結果は常に式(3b)を満足している。(c)において含水比の検層結果が一致して、(d)において湿潤密度の実測値が検層結果に比べてやや低めになる原因については、残念ながら現在のところ確定するに至っていない。本研究では、地下水位以下の試料は飽和度を 100% と仮定して議論を進めており、試料の飽和度についての詳細な

検討は行っていない。式(3b)において、飽和度の値は湿潤密度の値に影響を与えるやすい形になっており、同じ含水比であっても飽和度が低くなると、湿潤密度の値は低下する。この点を含め、花見川砂層のような比較的硬い砂層に対して、CPT が問題なく適用でき、凍結サンプリングで原位置の構造を保持した乱さない試料が採取できるのか否かについて今後さらに検討する必要がある。

図-12 にカナダ・CANLEX の KIDD2 サイトにおける R I コーン貫入試験結果を示す。間隙水圧分布は地表面付近の表土層が細粒分を多く含んでいるために、50kPa 程度の値を取るもの、その後は均質な砂層となり、所定の深度 20m までほぼ静水圧を示している。途中、10m 付近に局部的に硬い層が存在し、これに対応して水圧の低下が見られる。コーン先端抵抗  $q_i$  の分布は浅い部分では深度とともに増大する傾向にあるが、10m 付近の局部的な硬い層を抜けて不搅乱サンプリング対象深度に入ると、10MPa 前後の値で推移している。湿潤密度と含水比についても  $q_i$ ,  $u$  の検層結果と符合する傾向を示している。すなわち、表面付近の細粒分の多い表土を抜けると湿潤密度は  $1.85\sim1.95\text{g/cm}^3$ 、含水比は  $30\sim35\%$  の間の値をとり、深度 10m 付近の硬い層を境として下層の方がやや高含水比、低密度であることがわかる。

Massey Tunnel サイトで実施した R I コーン貫入試験結果を図-13 に示す。KIDD2 サイトと同様に、表土とそれに続く細粒分の多い地層を抜けると、深度 4.5 m 付近からは均質な砂層が続いており、間隙水圧の深度方向分布もほぼ静水圧を示している。 $q_i$  の分布も砂層内では 7MPa 前後で深度によらずほぼ一定の値をとり、15m 付近から徐々に増大する傾向を示している。湿潤密度と含水比の分布は、対象とする砂層では深さ方向にはほぼ一様であり、湿潤密度は  $1.85\text{g/cm}^3$ 、含水比は  $35\%$  前後で推移していることがわかる。

このサイトではカナダ側が室内試験を実施したために、日本の試料に対して行ったような詳細な含水比と湿潤密度の深度分布は求められておらず、比較できる量としては間隙比の情報が得られている。図-14 に KIDD2 サイトにおいて、図-15 に Massey Tunnel サイトにおいて R I コーン検層結果から直接求めた間隙比の深度分布をそれぞれ示す。図-14 中のプロットは凍結試料から室内試験によって求めた間隙比を、図-15 中のプロットは凍結試料と大口径ラバルサンプラーで採取された乱さない試料を用いて行った室内試験から得られた間隙比である。両サイトともに R I コーン検層に基づいて算定された間隙比分布は室内試験結果を概ね評価し得ていることがわかる。CANLEX ではボ-

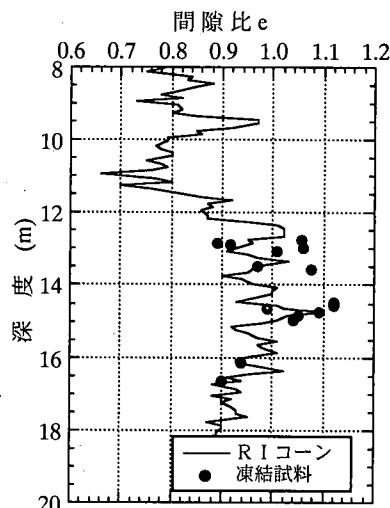


図-14 KIDD2 サイトにおける間隙比の比較

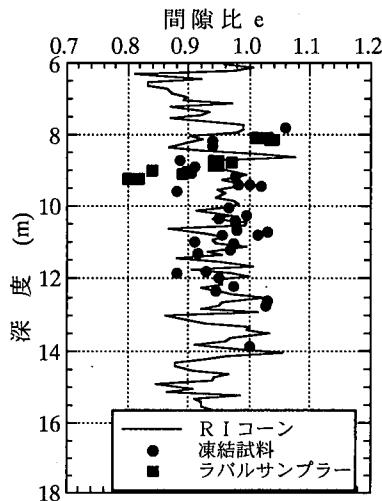


図-15 Massey Tunnel サイトにおける間隙比の比較

リング孔を用いた密度検層が実施されているが、この方法は、ボーリング孔掘削によって生じる孔壁の不規則形状によって生じるケーシングとの空隙の存在の影響を強く受けるとともに、用いるケーシングの材質と肉厚による計測値への影響を補正しなければ正しい値は得られない。これに対して挿入式で地盤との密着性がよい R I コーンではこうした問題は考慮する必要がない。実際、Wride and Robertson<sup>16)</sup>は CANLEX のレポートにおいて、既往のボーリング孔内密度検層結果に比べて R I コーン検層結果がよりよい結果を得ていることを報告している。

## 5. R I コーンによる砂地盤の相対密度評価

砂地盤の特性を評価する場合、相対密度  $D_r$  が有用な情報となる。最大・最小密度試験はサンプリングの品質を問わないが、原位置の間隙比を知るために乱さない試料の採取が求められる。本節では、R I コーンの検層結果を用いて得られる原位置の相対密度分布を紹介し、その妥当性について議論する。

コーン貫入試験結果を用いて砂の相対密度を評価する方法については、Lancellotta<sup>18)</sup>、Jamiolkowski et al.<sup>19)</sup>、周ら<sup>20)</sup>の研究成果が挙げられる。これらはいずれも再構成試料を用いた室内土槽実験によって実験的に求められた関係である。特徴的なことは、いずれの手法においてもコーン貫入抵抗と有効上載圧がパラメータとして用いられている点であり、サウンディングから相対密度を求める際に地盤の拘束圧が重要な役割を果たしていることがわかる。R I コーン貫入試験では、前節で示したように、貫入時に含水比と湿潤密度が深さ方向に連続的、正確に測定できるため、地下水位がわかれれば自動的に各深度の鉛直有効応力が、土粒子密度がわかれれば含水比から各深度の間隙比が求められる。この利点を活かしてR I コーンに基づく砂地盤の相対密度を求め、室内試験によって求めた各深度の相対密度と比較することによってその妥当性と有効性を検証する。

東扇島試料に対しては、土粒子の密度試験と最大・最小密度試験が各深度ごとに実施され、それぞれのサンプルから求めた間隙比に基づいて相対密度の深度分布が求められている。本節で示したコーンから相対密度を求める既存の手法は相互に類似したものとなっているため、ここでは Lancellotta の手法を用いた結果を示す。Lancellotta は 5 種類の砂を用いて 144 ケースのチャンバー試験を実施することによって砂の相対密度  $D_r$  とコーン先端抵抗  $q_c$  の関係を有効上載圧をパラメータとして次式のように誘導した。

$$D_r = -98 + 66 \log \frac{[0.1 \cdot q_c]}{[0.1 \cdot \sigma'_v]^{0.5}} \quad (\text{in kPa}) \quad (4)$$

図-16 に R I コーン検層結果から式(4)によって求めた東扇島地盤の相対密度の深度分布と、水分コーンによって測定された含水比と土粒子密度から算定した間隙比から求めた相対密度の深度分布を示す。水分コーンから直接算定した相対密度は、深さ 4m 附近から 40～50% 程度の値をとり、その後 7m 附近からは 30～40% の非常に低い値をとる傾向を示している。一方、

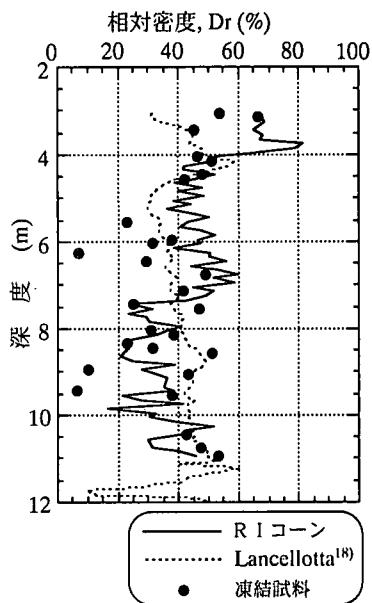


図-16 R I コーンによる東扇島地盤の相対密度評価

Lancellotta の方法による相対密度分布は水分コーンによる算定結果に比べて浅い部分ではやや低めに、7m 以深の領域ではやや高めの相対密度を与える傾向にある。しかしながら、全体として両者ともに相対密度 40% 前後の値を算定しており、概ね一致していると考えられる。一方、凍結試料から求められた相対密度の実測値はかなりばらついているものの、概ね両予測値と整合していることがわかる。凍結試料による実測値が均質な埋立砂地盤に対しては大きく値がばらついているが、コーンに基づいた予測値は図-10 においてコーン貫入抵抗や間隙水圧の測定値が示す地盤の均質性をよりよく反映したものとなっている。以上の結果から、R I コーンの検層結果に基づいて算定した東扇島砂地盤の相対密度と Lancellotta の方法によって求めた相対密度は、東扇島のような比較的新しく、地盤改良などが行われていない埋立砂地盤に対しては極めて有効であるといえる。

## 6. R I コーンの測定値の妥当性に関する検証

R I コーン貫入試験が様々なタイプの砂地盤に対して有効であり、原位置の含水比と湿潤密度を評価しうるものであることが前節までに示されたが、貫入時に地盤の一部が押し広げられ、体積変化が生じるにもかかわらず、何故不搅乱状態の地盤の含水比や湿潤密度が測定できるのかという疑問が提起される。この問い

かけに実証的に応えるのは非常に難しいが、一つの方法としてコーン貫入過程の数値解析による結果が何らかの示唆を与えると考え、検層結果と実測値が合致することの傍証として以下に示すこととする。

Mimura and van den Berg<sup>20)</sup>は東扇島、花見川地盤から採取された凍結試料を用いて室内排水三軸圧縮試験結果に基づいて土質定数を決定し、Euler 法に基づく有限要素法によって大変形を伴うコーン貫入過程を解析し、計算で得られる先端抵抗値が原位置の測定値を精度よく表現できることを報告している。解析手法の詳細と原位置コーン貫入抵抗との比較結果などについては文献 20)を参照されたい。東扇島埋立地盤の深度 7m 地点と花見川地盤における深度 13m 地点におけるコーン貫入に伴う周辺地盤の体積ひずみ分布を図 - 17 に示す。いずれもコーン周辺で集中的に体積変化を生じているものの、コーンから離れるにしたがってその量は急激に減少し、コーン貫入による地盤の体積変化がコーン周辺の限られた領域に局所的に発生していることがわかる。R I コーンによる測定は図 - 18 に模式的に示すように、半径約 30cm の球状領域内の値を探知することによって行われるため、図 - 17 に示した有限要素解析で得られた地盤要素の体積ひずみから該当測定領域の体積ひずみを求ることによって R I コーンが測定する当該領域の平均含水比を計算し、貫入による周辺地盤の体積変化が測定値にどのように影響を及ぼすかについて検討する。コーン貫入解析は軸対称条件で行われているので、任意の要素の体積  $V_i$  は、要素の内径を  $r_1$ 、外径を  $r_2$ 、高さを  $h_i$  とすると次式のように表わされる。

$$V_i = \pi(r_2^2 - r_1^2) \cdot h_i \quad (5)$$

一方、有限要素解析によって各要素の体積ひずみ( $\epsilon_v$ )<sub>i</sub>が得られている。R I の測定領域は厳密には密度や含水比の大きさによって変化するが、図 - 18 に示すように、およそ測定中心(水分コーンの場合は線源の位置、密度コーンの場合は線源と検出器中心のほぼ中間点)から半径約 30cm 以内の範囲と考えられている。測定領域内では、測定の重みは一様ではなく、測定中心から離れるにしたがって重みが低下するが、測定中心からの距離や方向に対してどのように重みづけされているかについてはよくわかっていないので、ここでは測定中心からの距離に対して単調に減少する簡単な重み関数を仮定する。すなわち、図 - 18 に示す測定領域内に含まれる要素が n 個であるとすると、実測される重みを考慮した測定領域内の平均体積ひずみ v が各要素

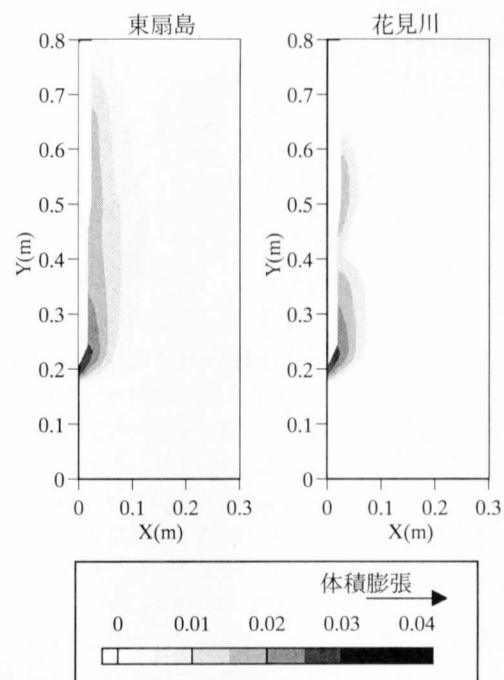


図 - 17 有限要素解析によるコーン周辺の体積ひずみ分布

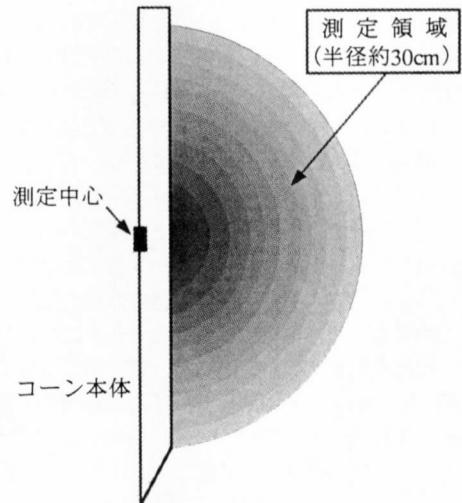


図 - 18 R I コーンの測定領域の概念図

の重心と測定中心間の距離  $d_i$  を用いて式(6)のように表わされるものとする。ここで、変数 b は重みの度合いを示すパラメータである。最もシンプルな場合として b=1 と仮定して式(6)を用いて計算すると、東扇島における地盤の平均体積ひずみは 0.2%，花見川における地盤の平均体積ひずみは 0.082% と計算される。これを海面以下および地下水位以下の砂地盤は飽和している

という仮定の下で、東扇島砂の土粒子密度； $\rho_s = 2.7 \text{ t/m}^3$ 、花見川砂の土粒子密度； $\rho_s = 2.68 \text{ t/m}^3$ を用いて含水比の変化に換算する。

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i} \right)^b \cdot V_i \cdot (\epsilon_v)_i}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i} \right)^b \cdot V_i} \quad (6)$$

当該深度における含水比は図-10, 11より、東扇島、花見川ともに約33%となっている。これを貫入前の初期値と仮定して図-18に示す測定領域の貫入後の含水比を計算する。コーン貫入によって生じる平均体積ひずみから計算される貫入後の含水比は東扇島については33.28%，花見川については33.14%となり、それぞれ初期含水比からわずかに変動するだけであることがわかる。比較のためにR I 計測の重みが測定中心からの距離により強く反比例すると仮定した場合（ $b=2$ ）と逆に距離に全く関係なく一定とした場合（ $b=0$ ）の検討も行った。これらの結果を表-2にまとめて示す。測定中心からの距離の影響を非常に強く見積もる（ $b$ を大きく仮定する）にしたがって、コーン周辺の大変形領域の影響度合いが相対的に増大するため、 $b=2$ の場合には、東扇島については33.50%，花見川については33.27%という値が得られ、初期値との乖離の度合いは大きくなるが、誤差のレベルは低いものとなっている。

湿潤密度は飽和度と土粒子密度を介して含水比と一義的な関係にある。この関係に基づいて表-2に示す有限要素解析によって求められた含水比の値を用いて湿潤密度の値に換算し、R I コーン貫入によって生じるコーン周辺の体積変化が湿潤密度の測定値にどのように影響するかについて検討する。含水比の値から換算された湿潤密度の値を東扇島、花見川ごとにまとめて表-3に示す。東扇島については湿潤密度の初期値である、含水比33%に対応する値は $\rho_t = 1.899 \text{ t/m}^3$ となる。R I コーン貫入の影響を考慮して、 $b=1$ とした場合には $\rho_t = 1.895 \text{ t/m}^3$ となり、初期値とほとんど変わらない値となっていることがわかる。また、最も変化が大きくなる $b=2$ の場合でも $\rho_t = 1.893 \text{ t/m}^3$ という値にとどまっている。一方、花見川についても初期密度となる含水比33%に対応する湿潤密度は、 $\rho_t = 1.892 \text{ t/m}^3$ となり、 $b=1$ とした場合には $\rho_t = 1.890 \text{ t/m}^3$ 、 $b=2$ とした場合には $\rho_t = 1.888 \text{ t/m}^3$ と求められ、やはりR I コーン貫入による周辺砂地盤の平均密度変化は無視しうるレベルにとどまっていることがわかる。

表-2 RI コーン測定領域内における平均含水比の検討結果

	初期 $w_n$	$b=0$	$b=1$	$b=2$
東扇島	33%	33.14%	33.28%	33.50%
花見川	33%	33.06%	33.14%	33.27%

表-3 RI コーン測定領域内における平均湿潤密度の検討結果

	初期 $\rho_t$	$b=0$	$b=1$	$b=2$
東扇島	1.899 t/m <sup>3</sup>	1.897 t/m <sup>3</sup>	1.895 t/m <sup>3</sup>	1.893 t/m <sup>3</sup>
花見川	1.892 t/m <sup>3</sup>	1.891 t/m <sup>3</sup>	1.890 t/m <sup>3</sup>	1.888 t/m <sup>3</sup>

以上、有限要素解析に基づいて得られる周辺砂地盤の体積ひずみに基づいた検討によって、R I コーンによる検査結果は、貫入による周辺地盤の体積変化の影響を考慮しても自然含水比と湿潤密度を精度よく評価し得ることが確認された。

## 7. 結論

R I コーンによる砂質地盤の検査結果と相対密度の評価、および数値解析による検査結果の妥当性に関する検討を行い、以下のような結論を得た。

- (1) R I コーン貫入試験は緩い若齢の埋立砂地盤、河川性の沖積砂地盤、洪積砂地盤という広範な種類の砂質地盤に適用され、通常の電気式静的コーンの成分に加えて含水比、湿潤密度検査を行うことができる。その検査結果は同じ地点で実施された凍結サンプリング試料による室内試験によって求められた含水比、湿潤密度を精度よく評価することができる。
- (2) R I コーンによって得られる湿潤密度の深度分布に基づいて計算される原位置の上載圧とコーン先端抵抗から砂地盤の相対密度を求めることができる。また最大・最小密度と土粒子密度がわかっていてれば、R I コーン貫入試験によって求められる含水比検査結果から直接相対密度を求めることができる。この両手法で求められた相対密度分布を東扇島砂の凍結試料による室内試験結果と比較したところ、いずれの方法でも概ね原位置の相対密度を評価できることがわかった。
- (3) コーン貫入による地盤のひずみがR I コーンによる間隙比の測定値に及ぼす影響について、有限要素解析結果に基づく検討を行った。その結果、貫入による地盤の変形はコーン周辺に局所的に発生するため、半径約30cmのコーン周辺領域の値を探知するR I コーン検査結果に対する影響は無視できる程度に小さいことがわかった。したがって、R I コーン貫入時に測定される含水比と湿潤密度は不搅乱状態

の原位置の値を精度よく測定できる。

謝辞：本研究を行うに当たり、運輸省港湾技術研究所・田中洋行氏、鹿島建設技術研究所・笹尾光氏、アルバータ大学・Peter K. Robertson 教授に多大の御協力をいただきました。記して深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 柴田 徹, 三村 衛, ブラダン TBS, 延山政之 : RI コーン貫入試験装置の開発について, 第 26 回土質工学研究発表会講演集, 第 1 卷, 89-92, 1991.
- 2) 物理探鉱技術協会編 : 物理探査用語辞典, 1978.
- 3) 物理探査学会編 : 図解物理探査, 1989.
- 4) 石井恒久, 三嶋信雄 : 日本道路公団試験所報告, 1986.
- 5) Preiss, K. : In Situ Measurement of Marine Sediment Density by Gamma Radiation, *Deep Sea Research*, Vol.15, pp.637-641, 1968.
- 6) Tjelta, T.I., Tieges, A.W.W., Smits, F.P., Geise, J.M. and Lunne, T. : In Situ Density Measurement by Nuclear Back scatter for an Offshore Soil Investigation, *Norwegian Geotech.Inst. Pub.*, No.169, pp.1-5, 1987.
- 7) Sully, J.P., and Echezuria, H.J. : In Situ Density Measurement with Nuclear Cone Penetrometer, *Proc. ISOPT-1*, Vol.2, pp.1001-1005, 1988.
- 8) 日本アイソトープ協会編 : 新ラジオアイソトープ, 講義と実習, 1989.
- 9) Shibata, M., Mimura, M., Shrivastava, A.K. and Nobuyama, M. : Design Aspects of Neutron Moisture Cone Penetrometer, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol.41, Part 4, No.361, pp.225-241, 1991.
- 10) Burn, K.N. : Calibration of a Neutron Moisture Meter in Leda Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1, No.2, pp.94-103, 1968.
- 11) Homelius, J. and Lorch, S. : On the Theory of Gamma-Ray Scattering in Boreholes, *Geophysical Prospecting*, VI, pp.342-364, 1958.
- 12) Shibata, T., Mimura, M. and Shrivastava, A.K. : RI-Cone Penetrometer Experience in Marine Clays in Japan, *Proc. 4th Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering*, Vol.3, pp.1024-1033, 1993.
- 13) 田中洋行, 濵谷 啓, 山下 聰, 三村 衛 : 緩い砂で埋立てられた地盤の工学的特性, 土と基礎, 第 44 卷, 第 5 号, pp.13-16, 1996.
- 14) Mimura, M., Shibata, T., Shrivastava, A. K. and Nobuyama, M. : Performance of RI Cone Penetrometers in Sand Deposits, *Proc. Int. Symp. on Cone Penetrometer Testing, CPT'95*, Vol.2, pp.55-60, 1995.
- 15) Monahan, P.A., Luternauer, J.L. and Barrie, J.V. : The Geology of CANLEX Phase II Sites in Delta and Richmond British Columbia, *Proc. of the 48 th Canadian Geotechnical Conference*, pp.59-68, 1995.
- 16) Wride, C.E. and Robertson, P.K. : CANLEX Phase II Data Review Report, Vol.1, 1997.
- 17) 三村 衛, 五十嵐謙一 : RI-CPT による自然堆積砂の原位置液状化強度に関する検討, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, 第 1 卷, pp.721-722, 1997.
- 18) Lancellotta, R. : Analisi di Affidabilità in Ingegneria Geotecnica, *Atti Istituto Scienza Costruzioni*, No.625, Politecnico di Torino, 1983.
- 19) Jamiolkowski, M., Gionna, V.N., Lancellotta, R. and Pasqualini, E. : New Correlations of Penetration Tests for Design Practice, *Proc. of the First International Symposium on Penetration Testing*, Vol.1, pp. 263-296, 1988.
- 20) 周神根, 龍岡文夫, 末永裕樹, 谷澤房郎, 岩崎公俊, 統誠 : 各種砂のコーン貫入抵抗と液状化強度, 第 24 回土質工学研究発表会講演集, 第 1 卷, pp.733-736, 1988.
- 21) Mimura, M. and Berg, P. van den : Numerical Assessment for the Process of CPT in Sandy Deposits, *Proc. Int. Symp. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, pp.805-810, 1997.

(1999. 1. 18 受付)

## EVALUATION OF IN-SITU NATURAL WATER CONTENT AND WET DENSITY WITH RI-CONE PENETROMETER FOR SANDY DEPOSITS

Mamoru MIMURA, Abhay K. SHRIVASTAVA, Toru SHIBATA and Masayuki NOBUYAMA

RI-cone penetrometers have been applied to sandy deposits to detect the natural water content and wet density profiles. Soil freezing sampling technique has been used to obtain the undisturbed sand samples and the laboratory experimental results on these samples are compared with RI-cone measurement. RI-cone measurement agrees well with the laboratory experimental data. The validity of RI-cone measurement is also confirmed with the calculated performance for the process of RI-cone penetration in terms of Eulerean finite element analysis. Relative density,  $D_r$ , can be derived from RI-cone measurement. The accuracy of derived  $D_r$  has been confirmed with the laboratory experimental results on undisturbed samples.