

## 中間土の圧密パラメータと砂分含有率

## Consolidation Parameters of Sandy Clays based on Sand Fraction

住岡 宣博\* (Nobuhiro Sumioka)

福原 和顕\*\* (Kazuaki Fukuhara)

森脇 武夫\*\*\* (Takeo Moriwaki)

一瀬 泰啓\*\*\*\* (Yasuhiro Ichinose)

実際の地盤は粘土と砂が混じりあったいわゆる中間土とよばれるものが多い。実務においては通常、このような中間土に対して不攪乱試料採取と圧密試験等の実施がなされることは少なく、圧密パラメータの設定が問題となることも多い。そこで、筆者らは4地点の土質試験結果について中間土の物理特性と圧密パラメータの関係を整理を行い、それをもとに現場の沈下管理を試みた。その結果、①塑性指数と圧縮指数、圧密係数、初期間隙比については相関が認められた。②砂分含有率と圧縮指数の間には砂分含有率が10%を越える部分について相関が認められた。③砂分含有率と圧密係数、初期間隙比の間には地点毎で固有の相関が認められた。④砂分含有率と圧密パラメータの相関に着目し、浚渫粘性土による埋立地盤の沈下予測を行なったところ、予測値と実測値は平均的に良好な一致を示した。

キーワード/圧密、圧密パラメータ、圧密試験、フィールドデータ、物理特性 (IGC : D5, E2)

## 1. はじめに

土質力学においては、地盤を粘土あるいは砂のように単純化して考える。しかし、実際の地盤では粘土と砂が混ざりあったいわゆる中間土とよばれるものが多く、実務において、この中間土の各種定数の判定が問題となることも多い。

中間土の工学的特性についてはこれまでに多くの研究がなされている<sup>1)</sup>。しかし、その多くは載荷速度と強度、すなわち、透水性とせん断特性を対象にしており、圧密特性、特に圧縮性について問題にされたことは少ない。

通常、ボーリング調査の現場判定の段階で砂質土とされたものについては、不攪乱試料の採取と圧密試験等の実施が行われることはまれである。

沈下検討について考えれば、この中間土の圧密パラメータの設定が問題となる。概略的であっても、簡便な方法で圧密定数の把握ができることは重要である。

そこで、筆者らは瀬戸内海の4つの地点で得られた標準圧密試験結果をもとに、中間土の物理的特性

と圧密パラメータの関係について整理を試みた。また、これをもとに浚渫粘性土による埋立地盤の沈下管理を行なったところ興味深い成果を得たのでここに報告する。

## 2. 標準圧密試験結果と物理特性

## 2.1 検討方法

調査対象とした土質試料は、シンウォールサンブラーで採取された不攪乱試料である。採取された試料に対して物理試験ならびに標準圧密試験を行い、物理定数、圧密定数を求めた。

表-1に試験から求めた粒度特性と塑性指数 $P_I$ および圧縮指数 $C_c$ 、圧密係数 $C_v$ の分布範囲を示す。

物理特性には塑性指数 $P_I$ および砂分含有率(75 $\mu m$ のふるいにとどまる質量百分率)を選定し、おのおの圧縮指数 $C_c$ 、圧密係数 $C_v$ 、初期間隙比 $e_0$ 、圧密降伏応力 $p_c$ との関係を整理した。

ここで、砂分含有率で整理を試みたのは、塑性指数がその値の小さい範囲に関して砂分含有率との間

\* 中電技術コンサルタント株式会社臨海計画部総括課長 \*\* 中電技術コンサルタント株式会社臨海計画部

\*\*\* 広島大学工学部第4類助教 \*\*\*\* 中国電力株式会社土木部

表-1 土質試料の特性

|     | 粘土<br>(%) | シルト<br>(%) | 砂<br>(%) | C <sub>v</sub><br>(cm <sup>2</sup> /day) | C <sub>c</sub> | P I   |
|-----|-----------|------------|----------|------------------------------------------|----------------|-------|
| A地点 | 29~62     | 56~92      | 1~87     | 20~1,000                                 | 0.16~4.15      | 16~76 |
| B地点 | 7~30      | 9~50       | 22~84    | 165~1,200                                | 0.19~0.86      | 9~49  |
| C地点 | 5~65      | 10~70      | 1~85     | 38~1,500                                 | 0.14~2.03      | 16~82 |
| D地点 | 11~70     | 19~63      | 0~65     | 37~1,300                                 | 0.26~1.98      | 15~99 |

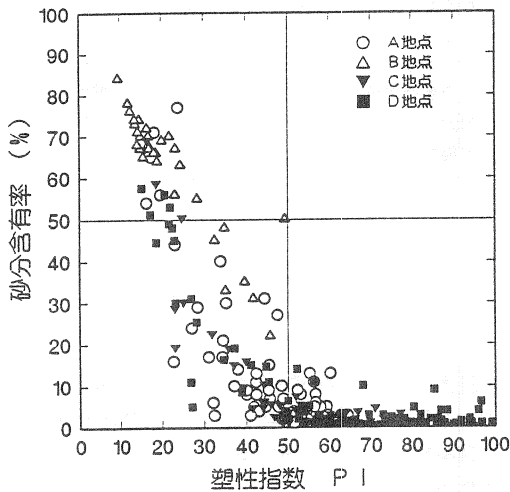


図-1 砂分含有率～P I 関係

に相関が認められること、また、砂分含有率の大きい試料の場合はコンシステンシー試験が困難となることが多くあることから、簡便なふるい分け試験結果によって圧密定数の推定ができないかと考えたからである。

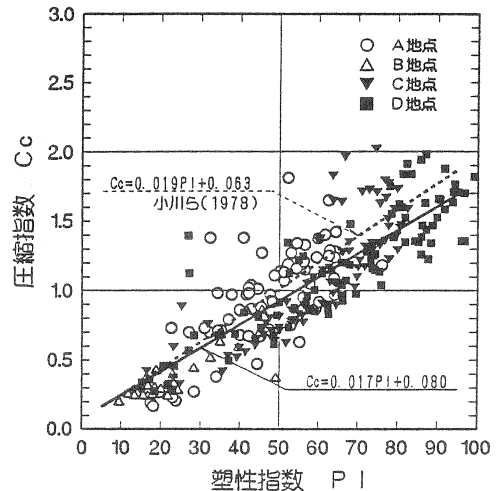
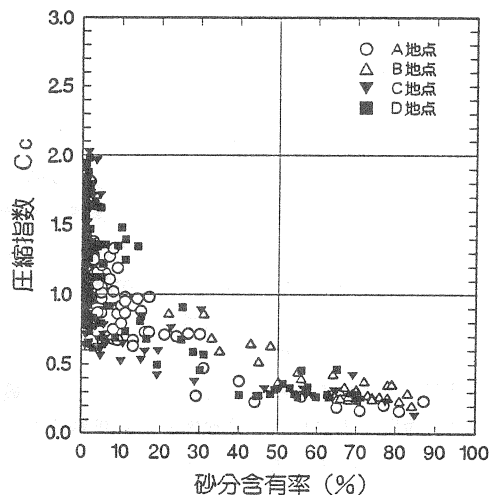
図-1に今回対象とした地点について、塑性指数と砂分含有率の関係を示しているが、両者は塑性指数の小さい範囲について地点毎に固有の相関を示している。

## 2.2 物理特性と圧密パラメータ

### 2.2.1 圧縮指数 C<sub>c</sub>

図-2にC<sub>c</sub>とP Iの関係を示す。多くの研究者に示されているとおり両者の関係には強い相関があり、砂質土から粘性土まで連続した直線関係が認められる。同図中に小川ら<sup>2)</sup>が日本各地の港湾地域の土に対して求めた関係を示しているが、ほぼ同様の関係が得られている。

図-3に砂分含有率とC<sub>c</sub>の関係を示す。砂分含

図-2 C<sub>c</sub>～P I 関係図-3 C<sub>c</sub>～砂分含有率関係

有率5%以下ではC<sub>c</sub>が広範囲に分布しており両者に相関は認められない。また、砂分含有率が50%を越えるあたりからはC<sub>c</sub>の変化が非常に小さくなり0.3程度となっている。このことは、現場で砂質土と判定される土であってもかなりの圧縮性があることを示している。

砂分含有率が10%を越える部分については、C<sub>c</sub>の分布幅が小さくなり下に凸な曲線形状を呈し、両者には相関が認められる。これは、粒度試験結果を利用して中間土の概略の圧縮指数を求めることが可能であることを示している。

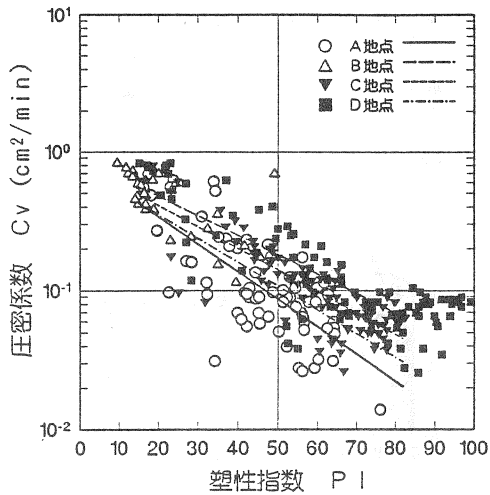


図-4  $C_v \sim PI$  関係

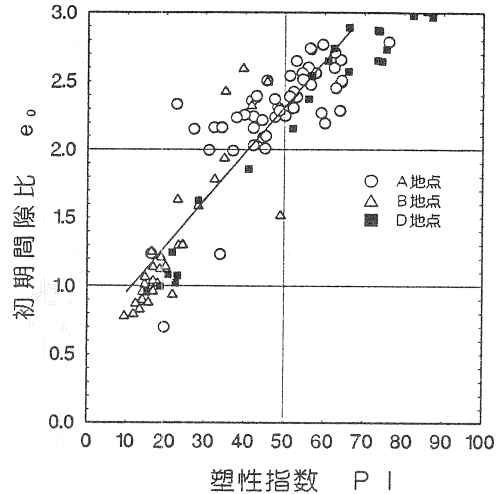


図-6  $e_0 \sim PI$  関係

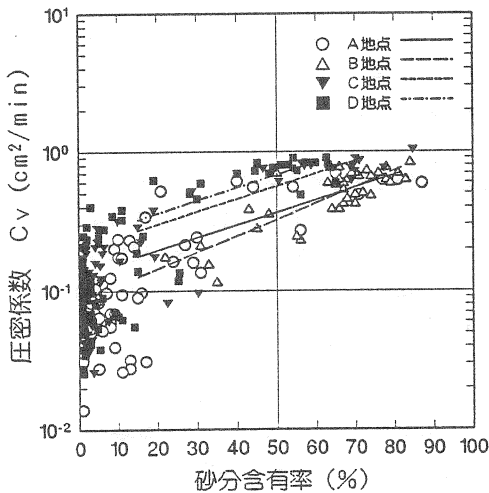


図-5  $C_v \sim$  砂分含有率関係

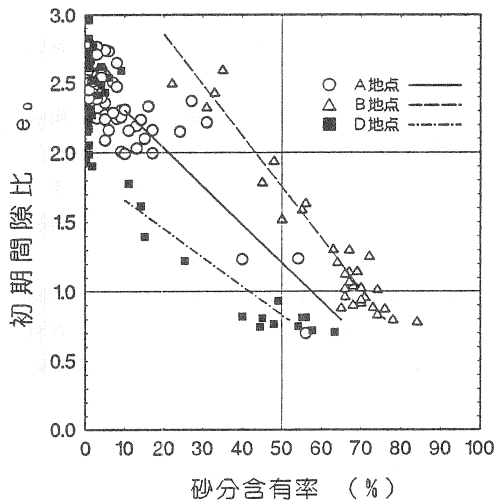


図-7  $e_0 \sim$  砂分含有率関係

### 2.2.2 圧密係数 $C_v$

$C_v$ については、その値がほぼ一定となる正規圧密領域の値で整理した。図-4に $C_v$ と $PI$ の関係を示す。ばらつきは多いが両者の間には地点毎に固有の相関が認められる。図-5に砂分含有率と $C_v$ の関係を示す。かなりの範囲で分布しているが、砂分含有率20%前後からはその増加に伴い右上がりの傾向を示す。また、地点毎に固有の分布をしていることから、地点毎でデータがそろえば概略の $C_v$ が推定できることとなる。

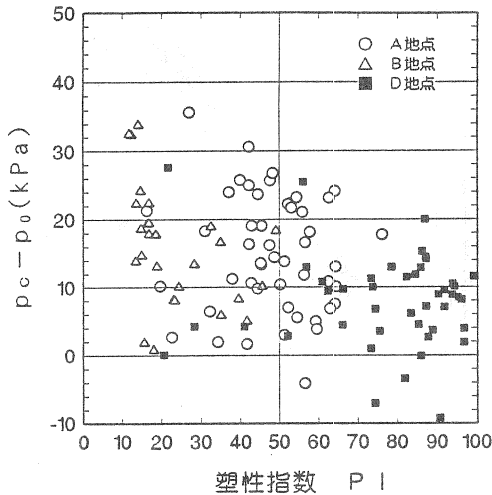
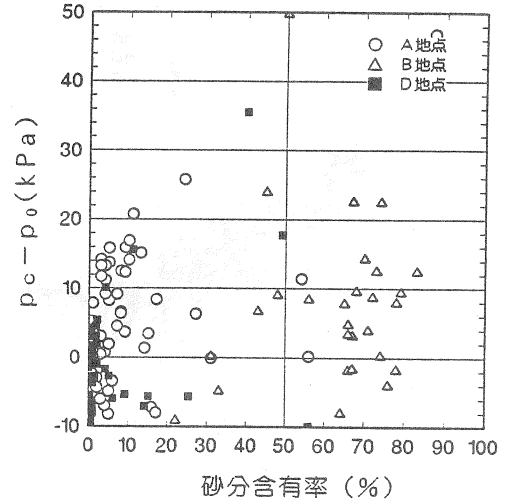
また、どの地点についても $C_v$ が $0.8 \text{ cm}^2/\text{min}$ 前後で砂分含有率に関係なく一定値となっている。これ

は従来より指摘されている<sup>3)</sup>とおり、 $C_v$ の大きい土に対して試料厚の小さい標準圧密試験を行なった場合には、沈下が速く測定が困難になることに起因する。したがって、標準圧密試験で得られた $C_v$ が $0.8 \text{ cm}^2/\text{min}$ 前後となった場合には取り扱いに注意を要する。

### 2.2.3 初期間隙比 $e_0$

$e_0$ については浚渫工事や盛土工事を行われていない正規圧密状態とみなせる地盤の不攪乱試料の試験結果に対して整理した。

図-6に $e_0$ と $PI$ の関係を示す。両者にはかな


図-8  $(p_c - p_0) \sim PI$  関係

図-9  $(p_c - p_0) \sim$  砂分含有率関係

りの相関が認められ、ほぼ全域にわたって直線関係がある。

図-7に $e_0$ と砂分含有率の関係を示す。両者間にもかなりの相関が認められ右下がりの直線がひける。ただし、 $e_0 \sim PI$ 関係では地点に関らず1本の直線で整理できたのに対して $e_0 \sim$ 砂分含有率関係では地点により分布が異なる。

なお、間隙比は基本的には有効応力によって変わってくるものであるにも関わらず、 $PI$ や砂分含有率のみで整理できたことは非常に興味深い結果であり今後もデータの収集を行い照査を行っていきたい。

#### 2.2.4 圧密降伏応力 $p_0$ 。

一般に正規圧密状態と考えられる地盤においても $p_0$ は有効土被り圧よりもやや大きく、過圧密状態であると評価されることが多くある。ここでは、物理定数と圧密降伏応力 $p_0$ の関係について整理を試みる。

$e_0$ と同様に $p_0$ は有効応力により変化するものである。ここでは土層構成と物理試験で得られた単位体積重量から有効土被り圧 $p_0$ を求め標準圧密試験により求められた圧密降伏応力との差と物理定数の関係で整理した。

図-8に $(p_c - p_0) \sim PI$ 関係を示すが、かなりの範囲で分布しており相関は認められない。傾向としては、 $PI$ が小さい場合に $(p_c - p_0)$ の分布幅が大きく、 $PI$ の増加に伴い分布幅も小さくなる。図-9に $(p_c - p_0) \sim$ 砂分含有率関係を示す。こ

ちらもかなりの範囲で分布しており、砂分含有率が増加するに伴い $(p_c - p_0)$ の分布幅が大きくなる傾向がみられる。

このような傾向を示すのは、試験段階の技術的な問題が大部分を占めるものと思われる。すなわち、 $PI$ が小さいほど、あるいは砂分の含有量が多いほどサンプリングや試料整形の段階で攪乱の影響を受け、その結果として $e \sim \log p$ 関係は屈曲点不明確でなだらかな曲線となる。そのため、この曲線に対してキャサグランデの方法を適用し $p_0$ を求めると大きめの値となるものと考えられる。したがって、このような中間土に対して圧密試験による $p_0$ を用いると沈下を少なめに見積もることとなり注意を要する。

#### 2.2.5 塑性指数と砂分含有率

これまでの検討で $PI$ および砂分含有率と圧密パラメータの間に相関があることが判明したが、 $PI$ は $420 \mu m$ のふるいを通したものに対して求めた値、砂分含有率については $75 \mu m$ のふるいにとどまるものに対して求めた値であることから共通する部分は $75 \sim 420 \mu m$ の粒径のものということになる。砂分含有率が比較的大きい土の圧密特性はこの部分で左右されるということになるがメカニズムについては今後検討を加えていく予定である。

### 3. 浚渫粘性土による埋立地の計測管理

これまでの検討を踏まえ、海底軟弱地盤上の埋立

表-2 浚渫土の特性(土取り場)

| 砂分含有率<br>S (%) | 初期間隙比<br>$e_0$ | 圧縮指数<br>Cc | 圧密係数<br>Cv(cm <sup>2</sup> /day) |
|----------------|----------------|------------|----------------------------------|
| 2~88           | 0.65~2.76      | 0.16~1.05  | 9~310                            |

造成工事の計測管理を行なったので、現場への適用事例<sup>4)</sup>としてその結果を紹介する。

当現場では、海底軟弱地盤上の約500,000m<sup>3</sup>を埋立造成するにあたり、泊地浚渫土の有効利用を目的に埋立材料のほとんどを浚渫粘性土で行なった。埋立に用いた浚渫土の砂分含有率、初期間隙比、圧縮指数、圧密係数の分布範囲(土取り場でのもの)を表-2に示す。

海底粘性土のポンプ浚渫による埋立では、細粒土と粗粒土が分離堆積するため平面的にも深度方向にもばらつきの多い非常に複雑な地盤が形成される。このため、浚渫土の堆積状態や土の性状を把握することは非常に困難であり、同時に、個々の地点での沈下量や沈下速度も様々となることが予想された。

そこで、浚渫土吹き込み完了後の複雑な地盤の土性の把握方法等を工夫するとともに高密度な計測管理を行なったものである。

### 3.1 地盤の概況

#### 3.1.1 在来地盤の土性

在来海底地盤は、表層から16~18mの海成沖積粘性土層、以下に砂質土層、洪積砂礫層と続く地盤である。上層の沖積粘性土層の土性は自然含水比 $w_n$  = 75~100%、間隙比 $e_0$  = 1.8~2.5、標準圧密試験から求めた圧縮指数Cc = 0.8~1.2、圧密係数Cv = 130~310cm<sup>2</sup>/dayと高圧縮性を示す正規圧密状態の粘性土である。

#### 3.1.2 埋立浚渫土層の土性

浚渫土投入終了時の含水比、砂分含有率の深度方向分布は、深い位置には砂分が多い土が堆積し、逆に表層から3~6m付近では細粒度主体で150~400%の超高含水比状態であった。また、平面的には浚渫土投入口である排砂管から遠く離れた地点では細粒分が多く堆積し、近くの地点では砂分の多い土が堆積した。

このように、埋立浚渫土層の土性は平面的にも深度方向にも非常にばらつきの多いものであった。

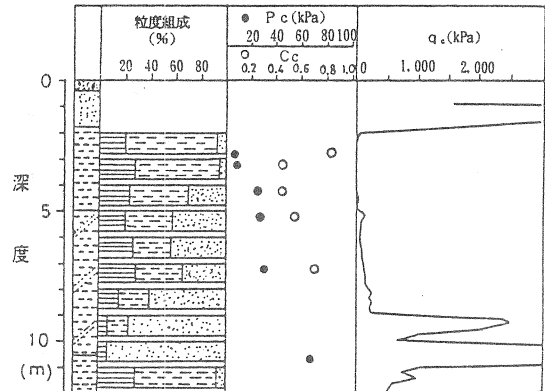


図-10 浚渫土層の粒度組成とコーン指数の関係例

### 3.2 埋立浚渫粘性土層の調査

#### 3.2.1 調査方法

浚渫土の投入後(投入厚約10m)、シートネットの敷設、サンドマットおよび山土による覆土が終了したブロックから自動コーン貫入試験機によりコーン貫入抵抗値を高密度で調査した。さらに、代表地点でボーリングを行い、埋立浚渫土層の土層構成を把握するとともにシンウォールサンプリングを行なった。また、採取した試料に対して室内土質試験を行い、含水比、粒度組成、圧密特性について調査した。なお、土質調査は浚渫土投入後3~5ヶ月の経過後に行っている。

#### 3.2.2 調査結果

自動コーン貫入試験結果とボーリング調査結果から図-10に示す埋立浚渫土層の粒度組成の深度方向分布とコーン指数の関係を得た。これは、砂分含有率が小さくなるほどコーン指数が小さくなることを示している。砂分含有率とコーン指数の関係を図-11に示す。コーン指数 $q_c \leq 100$ kPa程度で砂分含有率が50%以下となることから、これを細粒土と粗粒土の区分の基準と考え $q_c \leq 100$ kPaの分布厚を整理した。その結果、浚渫土の投入口とした外周付近は軟弱層が薄く、中央部分にいくほど厚くなるすり鉢状の堆積が確認された。

### 3.3 沈下予測計算

#### 3.3.1 埋立浚渫土の砂分含有率と圧密特性

これまでの検討で、砂分含有率と圧縮特性との間には一意的な関係が認められることが多いことが判明したので、埋立浚渫土の土質試験結果を砂分含有率

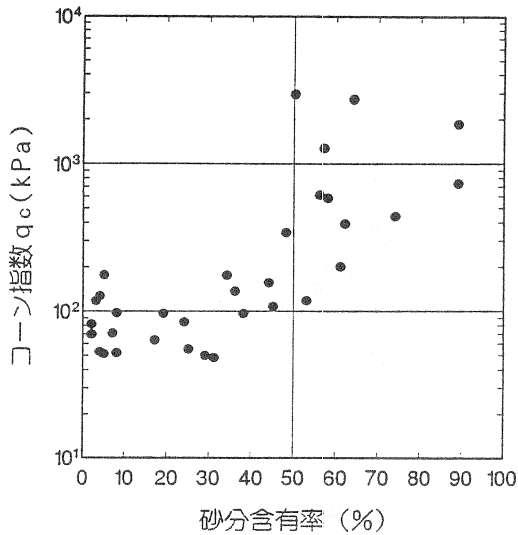


図-11 コーン指数と砂分含有率の関係

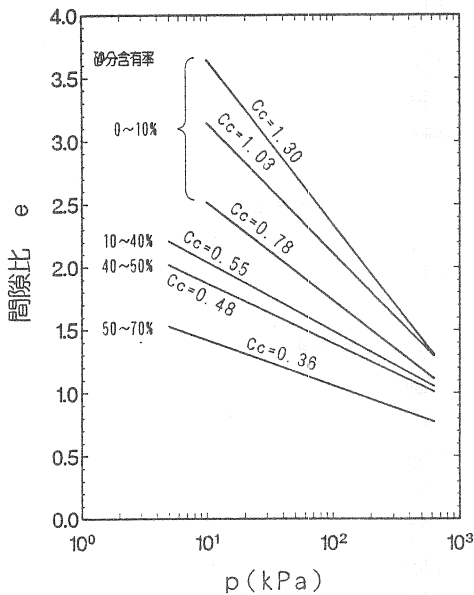


図-12 代表的な  $e \sim \log p$  関係

でグループ分けした。各砂分含有率に対する代表的な  $e \sim \log p$  関係を示すと図-12のようになる。

参考として、 $C_c$  と砂分含有率の関係を整理すると図-13のようになる。 $C_c$  と砂分含有率  $S$  を直線関係にあるとみなせば両者の関係は、

$$C_c = -0.0080(S - 106.0)$$

ただし、 $S$  : 砂分含有率 (%)

となる。

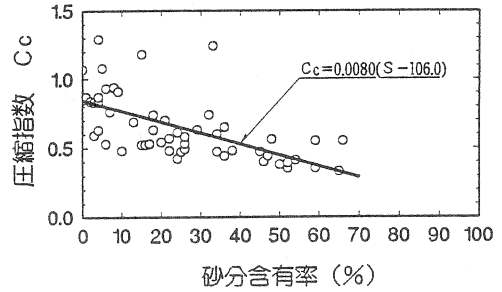


図-13  $C_c \sim$  砂分含有率関係

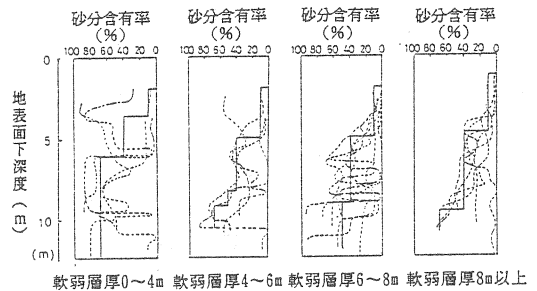


図-14 軟弱層厚と砂分含有率の深度方向分布

表-3 浚渫埋土層の砂分含有率と圧密係数

| 砂分含有率<br>(%) | 平均圧密係数<br>$C_v$ ( $\text{cm}^2/\text{day}$ ) |
|--------------|----------------------------------------------|
| 10 以下        | 8 6                                          |
| 10 ~ 40      | 1 8 6                                        |
| 40 ~ 70      | 3 8 2                                        |

同様に、圧密係数  $C_v$  について分類を行うと表-3のようになる。

### 3.3.2 圧密沈下予測計算

軟弱層厚に比して埋立は広い範囲で行われており荷重および変形が一次的であるとみなせるため、沈下予測計算は一次元として行なった。

埋立浚渫土層のモデル化は、上記  $q_c \leq 100 \text{ kPa}$  の軟弱層の総厚で4つのグループに分け行なった。グループ毎の砂分含有率の深度方向分布を整理すると図-14のようになる。同図中に実線でモデル化した深度方向の粒度分布を示している。あとは初期間隙比  $e_0$  と初期応力  $p_0$  が仮定できれば沈下計算が可能となる。沈下予測開始時点では地盤が圧密進行中であると判断されるため、 $e_0$  は土質調査より求め

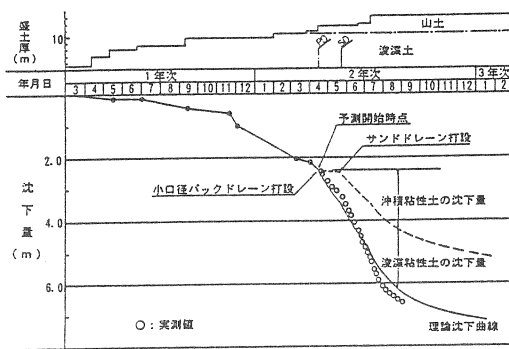


図-15 沈下曲線の例

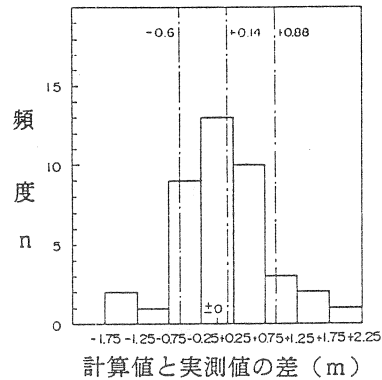


図-17 計算値と実測値の差の頻度分布

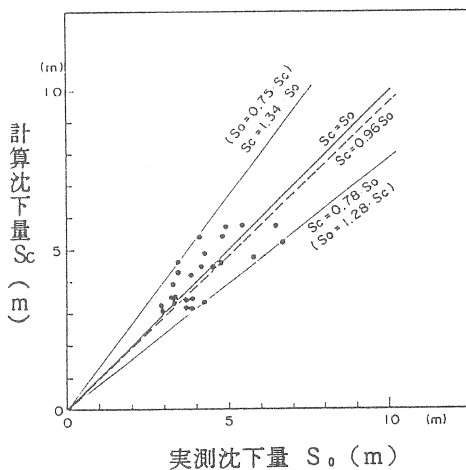


図-16 沈下予測計算値と実測値の関係

られている含水比と土粒子の比重から、飽和度100%を仮定して求める。初期応力は求めた間隙比に対して、対応する  $e \sim \log p$  関係から定める。

以上のような手順で沈下予測計算を行った。

なお、砂分含有率が0~10%については、同じ間隙比に対して有効応力の取りうる範囲が広い場合、含水比で区分した3つの  $e \sim \log p$  関係を用いている。

### 3.4 沈下管理結果

#### 3.4.1 実測沈下と予測沈下曲線

図-15は代表的な地点の表層実測沈下と予測沈下曲線を比較したものである。実測値の初期沈下量は原地盤上に設置した沈下板とボーリング調査の結果から設定している（2年次4月中まで）。実測値と

予測値の比較対象となるそれ以降の沈下はよい一致を示している。

#### 3.4.2 実測沈下量と予測沈下量

実測された沈下量  $S_o$  と圧密計算モデルで計算した沈下量  $S_c$  の関係を図-16に示す。沈下量は3~8mの間で生じている。これは場所により圧密特性が大きく異なっていることを示しており、事前の調査結果と符合する。

予測値は実測値の78~134%の範囲に分布し原点を通る回帰直線は、

$$S_c = 0.96 S_o$$

ただし、 $S_c$  : 予測計算沈下量

$S_o$  : 実測沈下量

で示される。なお、沈下量は地表面で観測されるものであり、在来層と埋立層の沈下の合計値である。

#### 3.4.3 実測値と予測値の差

実測沈下量と予測沈下量の差の頻度分布を図-17に示す。実測値と予測値の差は-1.75~2.25mと幅が大きい、大半は0.75m以内である。実測値と予測値の差の平均は0.14mで分散の幅は0.74mであった。

浚渫土吹き込みによる埋立地盤であったこと、また、沈下量が非常に大きい値であったにもかかわらず比較的予測誤差にばらつきが少なかったことは興味深い成果であった。

### 4. おわりに

中間土の圧密特性と物理特性との関係の整理を試

みた結果、次のような結論を得た。

- (1)  $C_c$ と $P_I$ の間にはこれまでの多くの報告のとおり直線関係が認められる。
- (2)  $C_c$ と砂分含有率の間には砂分含有率が20%以上の範囲について相関が認められる。
- (3)  $C_v$ の対数と $P_I$ の間には地点毎に固有の相関が認められる。
- (4)  $C_v$ の対数と砂分含有率の間には地点毎に固有の相関が認められる。
- (5)  $e_o$ と $P_I$ の間には直線関係が認められる。
- (6)  $e_o$ と砂分含有率の間には地点毎で固有の相関が認められる。
- (7)  $P_I$ が小さいあるいは砂分含有率の大きい試料に対して、 $p_o$ をキャサグランデの方法で求めると過大に評価する場合があるので注意を要する。
- (8) 砂分含有率と圧密パラメータの相関性に着目して浚渫粘性土の沈下予測を行なったところ、計算値と実測値は平均的に良好な一致を示した。

以上のことは、簡便な物理試験結果から圧密パラメータの概略値の推定が可能であることを示しており、現場への適用結果もこのことを証明していると考ええる。

#### 参考文献

- 1) 中間土編集委員会(1992)：中間土－砂か粘土か，ジオテクノート2
- 2) 小川富美子，松本一明(1987)：港湾地域における土の工学的諸係数の相関性，運輸省港湾技術研究所報告，Vol. 11，No. 3，PP. 3～PP. 89
- 3) 土質工学会編(1979)：土質試験法(第2回改訂版)
- 4) 住岡宣博，森平猛，一瀬泰啓，乗安直人(1991)：浚渫粘性土による埋立地盤の沈下管理，土と基礎，Vol. 39，No. 7，PP. 31～PP. 36