# 大規模埋立に伴う三成分コーン(CPTU)の利用

The Use of Piezocone (CPTU) in Land Reclamation Works



# 1. まえがき

近年,関西国際空港を始めとして大規模な埋立造成が各 地の沿岸部および沖合水域において盛んに行われている。

埋立予定地に粘土層が堆積している場合,支持力検討の 際に必要となる粘土の非排水強度や,埋立荷重による圧密 の進行状況(圧密度)を把握することは,施工計画・施工 管理のために必要不可欠な項目である。

しかし、埋立規模が拡大するにつれて調査地点数が増え、 検討すべきすべての地点について従来法の不攪乱試料によ る室内力学試験を実施するには、膨大な調査費用・時間が 必要となる。このような状況に対処するために、従来の調 査手法の一部を機動性に富み精度の良い原位置試験に替え て、土質調査を行うことが考えられる。

本文に示す三成分コーンは、電気的センサー(先端抵抗, 間隙水圧,周面摩擦)を内蔵した電気式コーン貫入試験機 で、一般に CPTU 試験装置と呼ばれている。この種のコ ーン試験機は従来のメカニカルコーンの機動性に加えて、 精度の高い計測と貫入による地盤の間隙水圧変化を測定す ることが可能であり、特に粘性土の力学特性を迅速にかつ 精度良く知る事ができる原位置試験法として注目されてい る<sup>1</sup>。

このようなコーン試験装置の登場によって,近年欧米で は飽和粘性土や砂質土地盤において,コーン貫入試験 (CPTU 試験)が積極的に実施されており,豊富な現場デ ータが得られている。これらのデータを基に,CPTU 試験 より地盤の力学定数・設計定数を求める種々の経験式が提 案されている<sup>20,80,40</sup>。 我が国においても CPTU 試験の有 効性が認識され徐々に利用されつつあるが,欧米に比較す るとその利用頻度は依然として低いのが現状である。

そこで本報告では大阪湾岸の沖積粘土層を対象に行った CPTU 試験の結果から,

- ① 粘土の非排水強度と先端抵抗との関係
- ② 圧密進行中の粘土層の圧密度を推定する方法<sup>11)</sup>
- ③ サンドドレーン施工地盤の調査において重要な,調査孔と砂杭との距離を弾性波探査から推定した例

\*神戸大学助手 工学部土木工学科 \*\*川崎地質梯 大阪支店 技術部技術課課長代理 \*\*\*川崎地質梯 大阪支店 技術部長

July, 1989

を紹介し、CPTU 試験の積極的な利用を提案したい。

#### 2. 使用機器概要

#### 2.1 コーン貫入部本体

今回使用したコーン貫入部本体は,先端抵抗,間隙水圧, 周面摩擦を計測する検出部(図一1)と,検出された信号 を処理する電気回路部より構成される。また本体の後方に はボーリングロッドとの接続部がある。

先端コーンの寸法は、コーン先端角度  $60^{\circ}$ , 直径 44 mm, 断面積  $15.2 \text{ cm}^2$ で、フリクションスリーブの表面積は  $200 \text{ cm}^2$ である。コーン断面積は、特に軟らかい粘土を対象と した場合に計測精度が 上がるように 標準的な  $10 \text{ cm}^2$  より 約50%大きくした。

検出部には,先端抵抗,周面摩擦抵抗計測用の2種類の ロードセルと間隙水圧測定用の圧力変換器が内蔵されてい

る。各検出部の仕様を以下に示す。

- (1) 貫入抵抗検出部 荷重容量 3 tf 最大貫入抵抗 197 kgf/cm<sup>2</sup>
- (2) 周面摩擦抵抗検出部
- 荷重容量
  1.2 tf
  最大周面摩擦抵抗 6 kgf/cm<sup>2</sup>

(3) 間隙水圧検出部

最大圧力 10 kgf/cm<sup>2</sup>

電気回路部には,印加電圧供給回路と出力信号増幅回路 が内蔵されている。印加電圧供給回路は,地上部より送ら れてくる電圧が低下し,それに伴い出力信号が変動しない ように貫入部本体内部に設置した。



図-1 コーン貫入部本体 (検出部)

#### No. 1932

間隙水圧の測定は、コーン直後の円筒形のポーラスメタ ルを介して行う。現場での間隙水圧部およびポーラスメタ ルの飽和には、グリセリン液を使用した。

また CPTU 試験機では、先端抵抗に及ぼす間隙水圧の 影響を次式により補正する必要がある5)。 式中の a 値はコ ーンの有効軸断面積から決まるが、本機においては室内で 検定試験を実施しa=0.7である事を確認している。

 $q_t = q_c + u_{\max}(1-a) \cdots (1)$ 

 $q_t$ :全先端抵抗(補正値)(kgf/cm<sup>2</sup>)

qc: 見かけの先端抵抗値(計測値)(kgf/cm<sup>2</sup>) umax: 間隙水圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

a:コーンの有効軸断面積/全断面積比

2.2 計測システム

出力信号は、 電源コードを 介して 地上計測部へ 送られ る。地上部のシグナルコンディショナーで再度調整増幅さ れ, A/D 変換器 (12 bit) を経てパーソナルコンピュータ ーのフロッピィーディスクに収録される。海上調査など通 常の電源が確保しにくい場合は、ハンドヘルド型コンピュ ーターを利用した。

# 2.3 貫入方法

コーン本体の貫入は,10 ton コーン (ダッチコーン)用 貫入装置を利用し、1 cm 毎秒の速度で実施した。また、 油圧式スピンドルの通常のボーリングマシンと \$ 40.5 mm の通常のロッドでも貫入ができるようにした。貫入量は、 磁ひずみ型の変位検出器を利用し、1ストロークの貫入量 を積算して求めた。磁ひずみ型の変位検出器は、貫入装置 の形式にかかわらず、着脱が簡単であり、振動による影響 を受けにくい。

計測間隔は、一定時間間隔と、一定貫入量のいずれかの 方式で行い,実質的には1データ/0.5~1 cm 程度である。

#### 3. 非排水強度と先端抵抗との関係

今回の CPTU 試験は、いずれも大阪湾岸域の埋立地お よび沖合いの沖積粘土を対象として実施した。粘土の圧密 状態は、未圧密から正規圧密状態にある。CPTU 試験から 非排水強度 Su を推定する方法として、 次式が提案されて いるの。





図-2 コーン支持力係数 Nkt と塑性指数 Ip の関係

La Rochelle (ラ・ロッシェ)  $6^{8}$  はカナダ 粘土について 図-2の●印に示すような  $N_{kt} \sim I_p$  の関係を得ている。

一方, Robertson(ロバートソン)ら<sup>n</sup> によれば,  $N_{kt}$  は 4~20 の範囲であるとされ、その平均値として Nkt=15 が 実用に適すると報告されている。

今回の CPTU から得られた  $N_{kt}$  値を, 図一2の結果と 比較するが、今回の実験では Su を一軸圧縮試験から決定 したため、Chandler (チャンドラー)<sup>9)</sup> が提案した次式を 利用して原位置ベーン強度に換算した Su を用いた。

 $V_r = 0.55 + 0.008 I_p \dots (3)$ 

 $V_r: 原位置ベーン強度 (S_u)_r と三軸試験強度$ 

 $(S_u)_{k0c} \mathcal{O} \not\vDash (= (S_u)_{fv}/(S_u)_{k0c})$ 

 $I_p: 塑性指数$ 

La Rochelle らによれば、 カナダの 鋭敏粘土 の  $N_{kt}$  値 は、一定値になると言われているが、図のように我が国に 多い高塑性粘土( $I_p=40\sim80\%$ )では、より小さな値とな るようである。

#### 圧密進行中の粘土層の圧密度推定法 4.

## 4.1 従来の方法

従来から、埋立工事に伴う圧密度の検討には、以下に示 すような手法を単独、もしくは複数で用いることが多い。 (1) 埋設型の間隙水圧計を圧密対象層内に多数設置し、

20

 $u_{\rm max}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

10 0



 $f_s$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

計測された過剰間隙水圧の消散から圧密度を判断する。

- (2) 地表面および層別沈下計を設置し、計測された沈下 量の時間変化から判断する。
- (3) 施工後にチェックボーリングを実施し、不攪乱試料 による室内試験の結果から判断する。

いずれの手法も埋立工事の施工管理には有効な手法であ るが,問題点も多い。例えば,(1)や(2)の場合,一般には数 年にわたる長期的な計測が必要で,埋設機器,特に間隙水 圧計の耐用年数に疑問がある場合は,設置個数を増やし計 測中の故障に対処しなければならず,設置費用が大きくな る。一方,(3)は実際の地盤内の土性の変化を把握できるた めに信頼性に富むが,調査・試験・解析に時間がかかり, 調査頻度を多くすることは費用の増大につながる。また, 大規模埋立工事のように調査範囲が大きくなると調査・試 験に要する時間や費用は膨大なものとなる。

上記のような問題点を補完し、埋立工事に伴う粘土層の 圧密度の検討をより迅速に精度良く実施する方法として、 原位置試験(例えば CPTU 試験)の利用が考えられる。 ここでは、現在圧密進行中の地盤で実施された CPTU 試 験から、粘土層の圧密度を判定する上で非常に有効と考え られる結果が得られたので、以下に報告する。

4.2 圧密度の推定方法

(1) CPTU 試験結果

図-3は、載荷盛土によって未圧密状態にある地盤で実施された、CPTU 試験の結果の一例を示したものである<sup>100</sup>。図中の圧密降伏応力 ( $p_e$ )は、乱さない試料の標準圧密試験から得られたものである。また、図中の標高は平均海面高さを $\pm 0$ m としたもので、調査時の地盤高さは標高+3.5mであった。粘土層の中央部で $p_e$ の値が小さくなる弓形の分布を示しており、調査地盤が未圧密状態にあることが分かる。

一方 CPTU の結果に注目すると、全先端抵抗 $q_t$ は粘土 層中央部で小さくなり、圧密降伏応力の分布と類似した弓 形の形状を示す。また貫入中の間隙水圧  $u_{max}$  も $q_t$  と同様 な傾向を示している。このような弓形の $q_t$  と $u_{max}$  の傾向 は、正規圧密状態の粘土層における CPTU の結果とは大 きく異なる。正規圧密の粘土層における CPTU の結果の 一例を図一4に示したが、 $q_t$ および $u_{max}$ ともに深度方向 にほぼ直線的な分布となる。したがって、未圧密地盤と正 規圧密地盤とでは、CPTU 試験結果に相違がみられる。

次に図-3の\*印で示した3箇所の深度で,コーンを貫 入後約24時間放置し,間隙水圧の変化を測定した例を示 す。このような試験は一般にコーン水圧消散試験として知 られる。図-5は各深度で計測された間隙水圧の消散過程 を示したものである。間隙水圧は圧密沈下曲線と同様な時 間変化を示し,約24時間後にはほぼ消散し,平衡状態の水 圧値に達していることが分かる。一方,調査地点では埋設 型間隙水圧計によって,粘土層内の水圧分布が長期間観測



図一4 正規圧密状態の粘土層における CPTU 結果



図-5 各深度での間隙水圧の消散過程(コーン水圧消散試験)



されている。図-6は CPTU と間隙水圧計からの測定結 果を比較したもので、○印は間隙水圧計から得られた水圧 を示し、●印は CPTU からの水圧を示している。図のよ うに両者は同様な値を示すとともに、地盤内に静水圧(u<sub>0</sub>) 以上の高い間隙水圧が残留していることが確認できる。

以上のように、CPTU 装置を押込み型の間隙水圧計として使用できることは明らかで、CPTU の消散試験を深度方向に数箇所で実施すれば、地盤内の過剰間隙水圧分布(圧

#### No. 1932

密度)を推定できることが分かる。しかし,粘土層内の複数の深度で約24時間の消散試験を実施することは,時間的に非常に不経済である。

そこで、コーン貫入中のデータ(*q*t および *u*max)を利用 して、未圧密粘土層内の過剰間隙水圧を推定する方法につ いて検討した。

(2) 貫入中の CPTU 結果を用いた圧密度の検討 正規圧密地盤と未圧密地盤で行った CPTU の結果を比







図—9  $S_u \ge q_t - \sigma_{v0}$ の関係

較するために、 $q_t - \sigma_{v0}$ 、 $\Delta u (= u_{max} - u_0)$ 、 $S_u 03 種類 の$ パラメーターを用いて検討すると、図一7~9が得られる。 なお、図中の結果は異なる調査地点から得られたもので、  $S_u$ は乱さない試料の一軸圧縮試験から求めたものである。 図中の〇印は正規圧密地盤での結果、●印は未圧密地盤で の結果を示す。

図から正規圧密地盤での  $\Delta u$  は,  $q_u - \sigma_{v_0}$  および  $S_u$  の増加に伴って、ほぼ直線的に増大することが分かる。

一方,未圧密地盤では、図一7,8に見られるように、 正規圧密地盤に比べて大きな  $\Delta u$  が発生していることが分 かる。しかし 図一9の $q_t - \sigma_{v0} \ge S_u$ の関係では、地盤の 圧密状態の違いにかかわらず、ほぼ同じ直線関係を示して いる。

以上のことから、コーン貫入中に発生する間隙水圧は、 対象とする地盤の圧密状態の違いによって異なる反応を示 すが、 図一9のように $q_i - \sigma_{v0}$ に代表される貫入抵抗は、 粘土の非排水強度 $S_u$ のみに依存すると考えられる。

ここで正規圧密粘土と未圧密粘土の違いを考えてみる。 未圧密粘土では現在消散しつつある過剰間隙水圧の影響で、 全応力  $\sigma_v$  が有効応力  $p_o$  より大きく、一方正規圧密粘土で は両者は一致する。しかし、図一10に示すようにいずれも 現在の有効応力  $p_o$  のもとで正規圧密ライン上に位置する ため、基本的に両粘土は  $p_o$  に対して同じ正規圧密状態に あると考えられる。

一般に 正規圧密状態の粘土の非排水強度  $S_u$  とせん断に より発生する間隙水圧  $Au_s$  との関係は、非排水三軸試験の 間隙水圧係数 Aのように、一義的な関係を示すと考えられ るため、 未圧密粘土においても  $Au_s$  はその時の 粘土の  $S_u$ によって決まると考えられる。

したがって、未圧密地盤でのコーン貫入中に発生する間隙水圧 umaxを、以下のように分けて考える。

ここで, uo:静水圧,

4us: せん断により発生する間隙水圧 (非排水強度と関係づけられる)



土と基礎, 37-7 (378)

∆uc: 過剰間隙水圧

#### $(\Delta u = \Delta u_s + \Delta u_c)$

具体的な duc の求め方は、以下のようである。

- (a) コーン先端における静水圧(uo)を求める。
- (b) 正規圧密粘土の *u* と *q<sub>t</sub>*-*σ<sub>00</sub> の関係を求める。
  大阪湾岸域の沖積粘性土の場合,図-7 に示すよう
  に次式で近似できる。 正規圧密粘土では <i>duc*=0 であ
  るから,

- (c) (5)式に未圧密地盤での CPTU 試験から得られる *q<sub>t</sub>* -*σ<sub>v0</sub>* を代入し、*Δu<sub>s</sub>* を求める。
- (d) (4)式より未圧密地盤の *Δuc* が次のように 計算 できる。

先の図-3のデータを用いて過剰間隙水圧 *Δu*eを推定した結果を示すと図-11のようである。推定値はコーン水圧 消散試験の値とほぼ一致している。

上述した手法を用いて、他の未圧密地盤での過剰間隙水



図-11 過剰間隙水圧 *Δuc* の推定結果(コーン水圧消散試験結果との比較)



図-12 過剰間隙水圧 *Aue*の推定結果(圧密試験から予測した過剰間隙水圧との比較)

圧を推定した例を示すと図—12のようである。図中の実測  $\Delta u_e$ は、室内圧密試験結果から間接的に求めたものである。 すなわち、実測  $\Delta u_e$ は、全鉛直応力 ( $p_0$ ) と圧密降伏応力 ( $p_c$ ) との 差 ( $\Delta u_c = p_0 - p_c$ ) としている。 図から分かるよ うに、推定値は妥当な結果を示すと考えられる。

# 5. 弾性波探査による調査孔と砂杭の距離推定例

サンドドレーンを施工した埋立造成地盤では、砂杭間の 粘性土の圧密促進状況を把握することが、地盤改良効果を 評価する上で必要である。このような粘性土は、排水層す なわち砂杭までの距離の違いによって圧密状況が水平方向 に変化するため、改良効果の判定には、ボーリング調査や CPTU を実施した地点から砂杭までの距離を知ることが 重要となる。

ー般には、チェックボーリングによって砂杭位置を確認 するなどの方法がとられているが、その作業は試行錯誤に 近い状況になる。ここでは、砂杭までの距離の測定法とし て、通常のボーリング孔で弾性波探査(孔内マルチチャン ネル反射法)を実施した例を示す。

### 5.1 現場状況および試験方法

直径 0.5m の砂杭が 3.5m ピッチで打設された埋立造成 地内において試験を実施した。今回利用した孔内マルチチ ャンネル反射法は,一つの発震点に対して複数(6成分) の受震点で反射波を検出する方法で,受震,発震点間の距 離(オフセット距離)を一定にすることにより複数の反射 面を検出するとともにその間の弾性波速度を算出すること ができる。

今回は、図-13に示すようにオフセット距離を1.0mから3.5mにとって、0.5m間隔で設定した6個の受震セン サーで反射波を検出した。

5.2 試験結果

図ー14は、プロファイル記録に種々の補正処理を施し、 見かけ上オフセット距離が0mであるように反射波形を補 正したものである。図には、A~Fの6つの反射波形が認



図-13 孔内マルチチャンネル反射法のモデル

No. 1932



図-14 プロファイル記録(補正後:オフセット距離0m)



図-15 孔内マルチチャンネル反射法で推定した砂杭の深度方 向および平面的な位置関係

められた。この内Aは,最初の明りょうな波であることから,最も近接した砂杭からの反射波であると判断され,B からFは,その他の砂杭からの反射波と考えられる。

これらの反射波の走時時間と地盤の弾性波速度によって 各反射面までの距離を算出し,砂杭の深度方向および平面 的な位置関係を推定すると図一15となる。

試験位置から各砂杭までの距離は、A:1.5~1.9m, B:1.8~2.1m, C:  $\pm 2.8m$ , D:  $\pm 2.9m$ , E:3.3~ 3.7m, F:  $\pm 3.9m$ となり、平面上の位置関係も推定でき る。なお、砂杭までの距離の推定精度は、地盤の弾性波速 度に左右されるため、弾性波速度の精度について今後検討 する必要がある。しかし、上記のような相対的な砂杭の位 置関係の深度変化を把握できることは有用であると考えら れる。

このように, 孔内マルチチャンネル反射法は, 試験位置 と砂杭の関係を立体的に測定することができるため, CPTU と併用実施すると,砂杭を打設した改良地盤におけ る改良効果の評価を、より詳細に実施できるものと考える。

また,本体に組み込んで貫入させることにより,深度ご とに反射面(砂杭)までの距離とその地層の弾性波速度を 求める事ができる。

# 6. あとがき

大阪湾岸部の沖積粘土を対象に実施した CPTU 結果から,全先端抵抗と非排水強度の関係,過剰間隙水圧の推定 方法,更に試験位置から砂杭までの距離の測定方法につい て述べた。

内容をまとめると以下のようである。

- CPTU より非排水強度を 推定するのに 必要なコーン支持力係数 (*N<sub>kt</sub>*)は,我が国の粘土が欧米と違って高塑性(*I<sub>p</sub>*>40)であるためか,欧米の提案値より小さくなる。
- 2. CPTU の静的貫入試験結果から未圧密地盤の 過剰 間隙水圧分布を,迅速にかつ精度良く求める方法を提 案した。
- 3. 孔内マルチチャンネル反射法を利用して, 試験位置 から砂杭までの距離を測定できることを示した。

#### 参考文献

- J. De Ruiter: The Static Cone Penetration Test, Stateof-the-art-report, Proc. of ESOPT II, Vol.2, pp. 389~ 405, 1982.
- G.E. Horvitz, D.R. Stettler, J.J. Crowser: Comparison of Predicted and Observed Pile Capacity, Cone Penetration Testing and Experience, ASCE, pp. 431~433, 1981.
- M. Jamiolkowski, R. Lancellotta, L. Tordella, M. Battaglio: Undrained Strength from CPT, Proc. of ESOPT II, Vol. 2, pp. 599~606, 1982.
- K. Senneset, N. Janbu, G. Svanø: Strength and Deformation Parameters from Cone Penetration, Proc. of ESOPT II, Vol.2, pp.863~870, 1982.
- M.M. Baligh, A.S. Azzouz, A.Z.E. Wissa, R.T. Martin, M.J. Morrison: The Piezocone Penetrometer: Cone Penetration Testing and Experience, ASCE, pp. 247~ 263, 1981.
- 6) T. Lunne, H.P. Christoffersen, T.I. Tjelta: Engineering Use of Piezocone Data in North Sea Clays, Proc. of XI ICSMFE, San Francisco, pp. 907~912, 1985.
- P.K. Robertson, 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.
- P. La Rochelle, M. Zebdi, S. Leroueil, F. Tavenas, D. Virely: Piezocone Test in Sensitive Clays of Eastern Canada, Proc. of ISOPT-I, Vol.2, pp.831~841, 1988.
- Richard J. Chandler: The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Fieled Vane, Vane Shear Strength Testing in Soils, ASTM STP 1014, pp. 14~45, 1987.
- 田中泰雄・谷本喜一・田村建一郎:未圧密地盤における三成 分コーン貫入試験,第23回土質工学研究発表会発表講演集, 2分冊の1, pp.155~156,1988.
- 11) Tanaka, Y. and Sakagami, T.: Piezocone Testing in Under-Consolidated Clay, Can. Geotech. J., 1989 (to be published).

(原稿受理 1989.4.7)

土と基礎, 37-7 (378)

46