

中海干拓彦名地区の埋立て粘土の力学的性質と乾燥過程

鳥 山 暁 司

The Mechanical Properties and Process of Drying of the Reclaimed Clay of Hikona Area in Nakaumi Reclamation
Koushi TORIYAMA

The oedometer tests and triaxial compression tests were performed for the soft reclaimed clay of Hikona area. From these tests, the consolidation yielding stress p_y of the clay about 30 cm depth is about 0.07-0.12 kgf/cm² and this value is about 2.5 times of the overburden pressure. The coefficient of consolidation c_v from \sqrt{t} method is larger than that from $\log t$ method and c_v calculated from the settlement data of the field is the largest. The shearing properties of the clay is similar to that of remoulded clays.

The process of drying of the surface were carried out a survey with cone penetration tests and sampling of soils. The moisture content of surface soil about 30 cm is decreased by the drying for four years but the moisture content of soils deeper than 30 cm are affected by the drainage of surface water and groundwater. The cone bearing capacity is increased gradually for four years but the trafficability for the bulldozer for super swamp is not obtained in the part of soft clay layer. The drainage ditches for the surface water and groundwater are necessary for the more drying of the reclaimed clay layer.

1. ま え が き

中海干拓彦名地区は埋立て干拓地として計画され、1977年以降、順次埋立てが施工されている。埋立て当初、彦名干拓地の堤防前面には海底粘土層のみが存在すると考えられたため、第1次埋立ては海底の沖積粘土をポンプ船で掘削、水送して行われた。このため、含水比300%以上の超軟弱な埋立て土層が形成された。この埋立て粘土の土性および沈下状況は別報(1)に示した。埋立て土層は自重圧密沈下により、大きい所では1m以上の沈下を生じたため、1982年より第2次埋立てが行われた。この第2次埋立て後の粘土層の性状と沈下、乾燥過程の進行については別報(2)に示した。

第2次埋立て当初は非常に軟弱な粘土層であるため、乱さない試料を採取して圧密試験や剪断試験を行うことはできなかった。しかし、自重圧密沈下と表面の乾燥の影響および粘性土のチキソトロピックな強度回復につれ

て、乱さない試料土の採取が可能となった。そこで、埋立て粘土の力学的性質をより明確にするため、乱さない試料土での圧密試験と三軸圧縮試験を行った。また、1985年5～6月に仮排水路が各工区1本ずつ掘削されたため、排水路の効果を調査したので、その結果も報告する。なお1987年7～8月に干拓地の草刈りと火入れが行われ、9月には本格的な乾燥促進のための溝掘りが行われた。このため、1987年にこれまでの調査地点の杭が消失したため、乾燥の継続調査は不可能となった。

2. 調査地点について

第2次埋立て後、設置した調査地点は含水比調査のためのC、D、E、Fとこの地点周辺のコーン支持力測定のためのC-I～C-H、D-I～D-H、E-I～E-H、F-I～F-Hである。このうち、CとC-I～C-Hは仮排水路線上にあったため、1985年に消滅した。そこで仮排水路の効果を調べるため、C地点近くに仮排水路より

1, 2, 4, 6, 10m 地点に S-3~S-7 地点を設置した。

C, D, S-3~S-7地点は軟弱粘土よりなっており、沈下量が大きく、仮排水路掘削までは 20cm 以上の湛水深となっている場合もあった。夏期の乾燥によってクラックが発生しても、周囲から土がクラック内に風や雨水で運ばれて、クラックを埋めてしまうため、乾燥の進行は遅い。E地点は第2次埋立て砂層の横にあり、沈下が小さく、常に乾燥状態にあるためクラックの発達がよく、埋立て2年目には草が生育し、最近では乾燥の進行のため草の生育が衰え、乾燥地の草の侵入が認められている。F地点は表層部が砂と粘土の互層であるが、やや低地となっているため、排水が悪く、草の生育もあまり良くなかった。

埋立て粘土層の土性は別報(1), (2)に示したように、粘土分50%以上で液性限界が100%以上である。第1次埋立て当初の含水比300%以上の粘土は湛水深1m近くにまで沈下し、含水比は約200~250%に低下していた。これが第2次埋立てによって干陸し、約6ヶ月で含水比150~200%になった後、乾燥の調査を始めたものである。

3. 圧密特性

圧密試験用の乱さない試料土は S-3~S-6 地点を深さ40cm 程度掘った後、シンウォールサンプラーの円筒を10cm に切断し、エッジを付けた採土円筒を手で静かに押し込んで採取した。

間隙比-圧密圧力の関係を図-1に示す。S-3の間隙比がS-4, S-5, S-6に比べて大きい。S-3の $w_L = 143\%$ 、S-4の $w_L = 134\%$ 、S-5の $w_L = 124\%$ 、S-6の $w_L = 103\%$ であり、S-3の液性限界が他に比べてやや大きいことも一つの原因と考えられる。試料土の土かぶり厚さは40cmであるから、浮力を考慮しなければ、

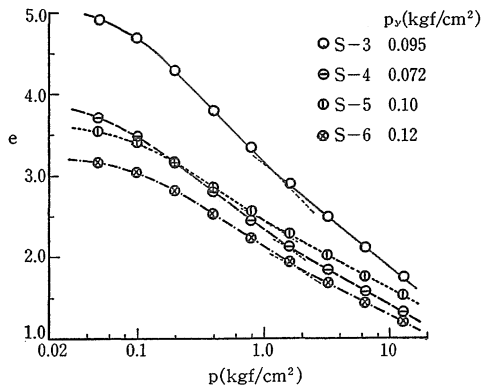


図-1：間隙比-圧密圧力の関係

先行圧密圧力 p_c は約 0.06 kgf/cm^2 、地下水位が地表面と仮定すると $p_c = 0.02 \text{ kgf/cm}^2$ である。実験より求めた圧密降伏応力 p_y は図-1に示したように $p_y = 0.072 \sim 0.12 \text{ kgf/cm}^2$ であり、上載圧密圧力 p_c より大きい。この原因としては埋立て後の4年間の粘土のチキソトロピックな強度回復、表層の乾燥の影響が考えられる。

正規圧密部分の $e \sim \log p$ 関係は鋭敏な粘土に多い2本の直線となった。低圧側の直線の勾配より圧縮指数 C_c を求め、別報(2)に示した $w_L \sim C_c$, $w_o \sim C_c$ 関係の図に●印でプロットしたものを図-2, 3に示す。今回の●印以外は練返し供試体での実験結果であるが、乱さない試料土での値と差はない。自然の沖積粘土は堆積後、100年以上を経過しているが、埋立て粘土では4年の経過のみのため、土の構造がまだ練返し土に近い状態にあり、圧縮指数 C_c には差が生じなかったものと考えられる。したがって、圧密降伏応力が先行圧密圧力より大きい原因は表層の乾燥の影響がわずかに40cm深さに及んでいるものと考えられる。

圧密係数 c_v と圧密圧力 p の関係を図-4に示す。 c_v の求め方には Taylor の \sqrt{t} 法と Casagrande の $\log t$ 法がある。図に示すように \sqrt{t} 法での c_v は $\log t$ 法での c_v の2~5倍の値になっている。 \sqrt{t} 法では Terzaghi の一次元圧密方程式の近似解では圧密度52.6%までは沈下量 s と \sqrt{t} が比例関係にあることを利用しているため、二次圧密の影響の少ない部分を用いて c_v を求めている。これに対して $\log t$ 法では $s \sim \log t$ 関係の二次圧密部分の直線と一次圧密の変曲点近くの直線の交点より一次圧密沈下量を求めているから、一次圧密に二次圧密の影響がはいっている。このため、一次圧密沈下量は $\log t$ 法の方が \sqrt{t} 法より大きくなり、圧密に要する時間は長くなり、 c_v が小さくなる。図-5に一次圧密比を示すが、 \sqrt{t} 法より $\log t$ 法の一次圧密

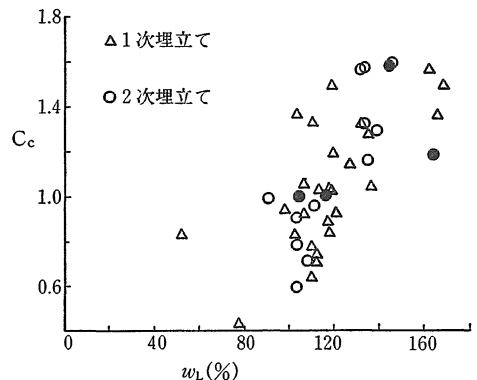


図-2：圧縮指数と液性限界の関係

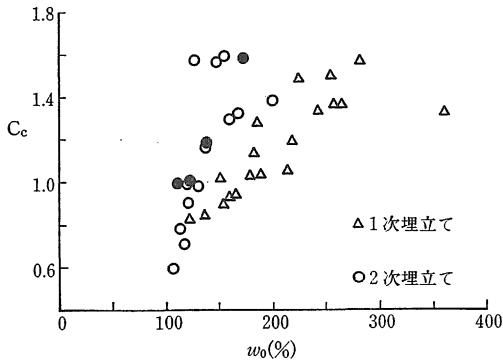


図-3：圧縮指数と自然含水比の関係

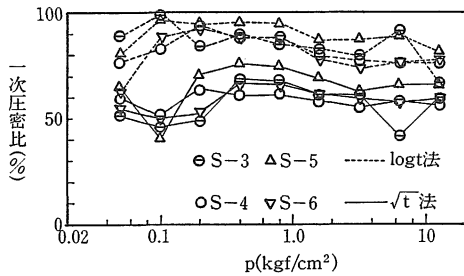


図-5：一次密比と圧密圧力の関係

比の方が20~30%程度大きくなっている。実際の粘土層の圧密沈下時間は5年以上を要しているから、二次圧密沈下の一次圧密への影響はさらに大きいはずである。しかし別報(2)に示したように、実際の埋立て粘土層の c_v は $1.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 以上あり、 \sqrt{t} 法で求めた値よりさらに大きい。これは多くの現場の圧密沈下においても認められており、この原因の1つは供試体厚さが実際の粘土層の $1/100 \sim 1/1000$ と小さいことにあると考えられている。

(2)
彦名の沈下測定の解析結果より、今後の圧密沈下は二次圧密が主となるものと推定されている。二次圧密沈下量の計算には二次圧密速度 $\alpha_s = de/d \log t$ が必要である。これを図-6に示す。圧密降伏応力 $p_0 = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 以上では α_s はほぼ一定値となっている。S-5の α_s のみが小さいがこの原因はわからない。

4. 剪断特性

実験に用いる供試体はD地点から8本、S-4地点から4本を採取した。前者をD-1~D-8、後者をS-1~S-4供試体とする。試料土はシンウォールサンプラーを長さ20cmに切り、エッジを付けた円筒を手で静かに押し込んで採取した。

剪断試験は全て圧密非排水三軸圧縮試験とした。圧密のため、供試体周囲にドレーン用の短冊状の濾紙をま

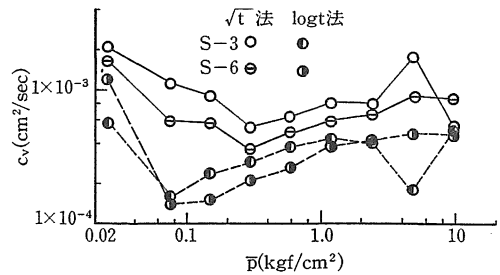


図-4：圧密係数と圧密圧力の関係

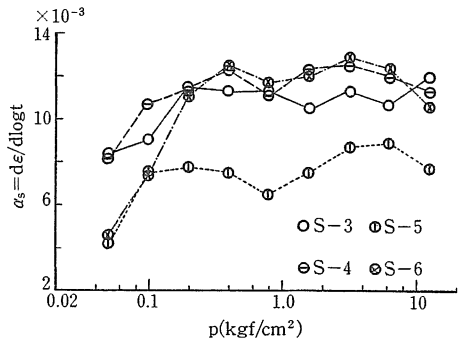


図-6：二次圧密速度と圧密圧力の関係

表-1：三軸圧縮試験供試体諸元

供試体 番号	実験前		実験後		σ_{3c}' (kgf/cm ²)
	w (%)	e	w (%)	e	
D-1	122.62	3.355	91.25	2.691	0.50
D-2	121.78	2.870	73.06	2.014	1.01
D-3	131.72	3.662	77.85	2.090	1.50
D-4	133.99	3.622	70.78	1.930	2.00
D-5	132.88	3.575	67.79	1.716	2.50
D-6	127.05	3.477	65.66	1.783	3.00
D-7	125.38	3.492	96.54	2.593	0.25
D-8	124.34	3.419	84.60	2.366	0.75
S-1	166.20	4.464	108.54	3.359	0.50
S-2	148.96	4.051	89.66	2.779	1.50
S-3	116.17	4.697	87.90	3.098	2.00
S-4	157.83	4.365	79.21	2.753	1.01

た。圧密は24時間とし、剪断速度は $\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$ である。表-1に実験前後の供試体の含水比と圧密圧力を示す。

応力-ひずみ関係と間隙水圧-ひずみ関係をD-1~D-8の供試体について図7, 8に示す。応力-ひずみ関係にははっきりしたピークが生ぜず、練返し粘土の剪断特性に近い曲線形である。圧密圧力 $\sigma_{3c}' = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ のD-7は $\sigma_1 - \sigma_3$ が小さく、非常に大きな間隙水圧 Δu

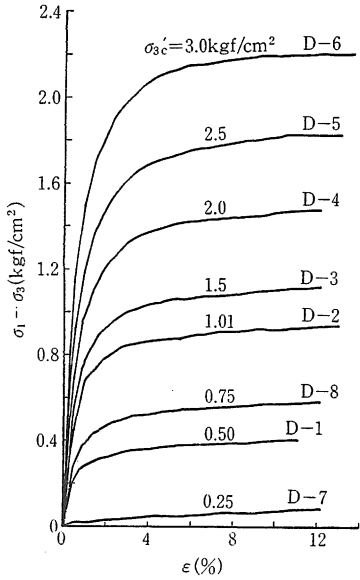


図-7: \overline{CU} 試験での応力-ひずみ関係

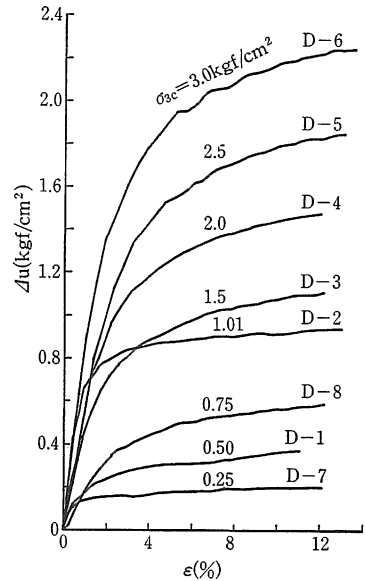


図-8: \overline{CU} 試験での間隙圧-ひずみ関係

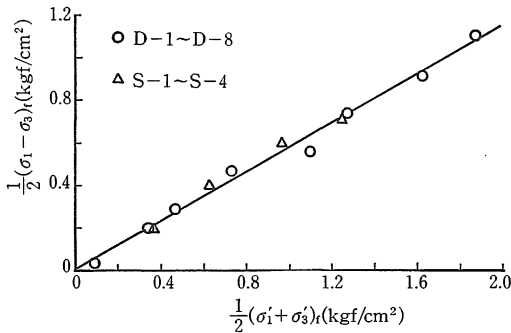


図-9: 有効応力での強度特性

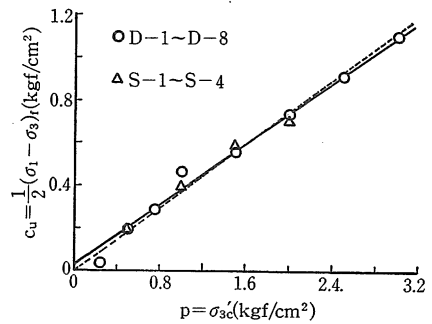


図-10: 圧密圧力と非排水強度の関係

が生じており、破壊時の間隙圧係数 $A_f = 2.53$ となっているが、SおよびDの他の供試体の A_f は0.8~1.04で標準的な値となっている。

有効応力での破壊時の $\frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')_r \sim \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ の関係を図-9に示す。これより、

D 試料 $c' = 0.004 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' = 35^\circ 08'$

S 試料 $c' = 0.022$, $\phi' = 34^\circ 57'$

D, S 共通 $c' = 0.011$, $\phi' = 35^\circ 00'$

試料土は正規圧密であるから $c' = 0$ となる。そこで、 $c' = 0$ として ϕ' を求めるとD, S 共通で $\phi' = 35^\circ 34'$ となる。

粘性土は圧密に長時間を要するため、強度は非排水強度 $c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ が用いられ、圧密による強度増加は $\Delta c_u / \Delta p$ より求められる。図-10に圧密圧力 p と非排水

強度 c_u の関係を示す。これより

D 試料 $c_u = 0.020 + 0.360p$ (c_u, p : kgf/cm²)

S 試料 $c_u = 0.004 + 0.394p$

D, S 共通 $c_u = 0.028 + 0.356p$ (1)

非排水強度 c_u と圧密圧力 p も正規圧密状態では比例関係にあるとされるため、定数項を0とおくと

D, S 共通 $c_u = 0.373p$ (2)

となる。故に $\Delta c_u / \Delta p = 0.373$ となる。D, S 共通の c_u と p の関係(1), (2)を図-10に実線と点線で示す。 $p \leq 1.65 \text{ kgf/cm}^2$ では(2)式は(1)式より小さな c_u を与える。 $p = 1.65 \text{ kgf/cm}^2$ は地下水面以下の土柱を考えると20m程度となるから、実際には $\Delta c_u / \Delta p = 0.373$ を用いるか、さらに安全側として、(1)式の定数項を無視して $\Delta c_u / \Delta p = 0.356$ を用いるかであろう。

コーン支持力 q_c と c_u の関係は一般に

$$q_c \approx 10c_u$$

で与えられる。D 試料の $\gamma_t = 1.35 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$, S 試料の $\gamma_t = 1.25 \sim 1.32 \text{ g/cm}^3$ であるから、地下水位が 30cm とすれば、30cm 以深の p は

$$p \approx 0.35 \times 10^{-3} z + 0.03 \quad (z: \text{cm})$$

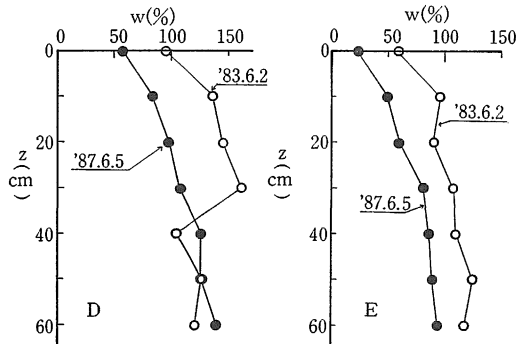


図-11：表土層の含水比分布

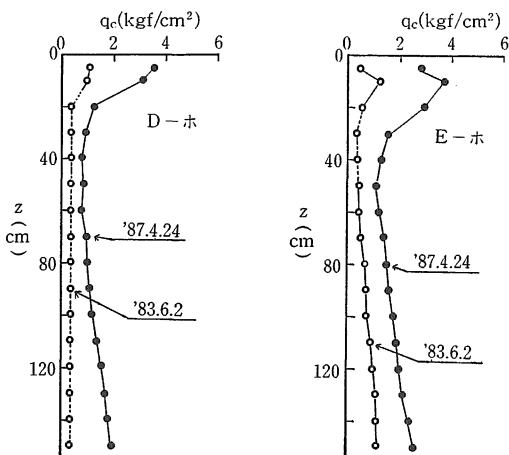


図-13：コーン支持力 (点線は自沈区間)

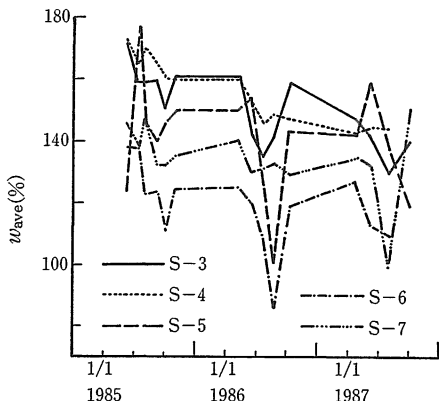


図-15：仮排水路近くの 30~60cm の平均含水比の経時変化

$$c_u = 0.356p \approx 1.2 \times 10^{-4} z + 0.011 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$q_c = 10c_u \approx 0.0012z + 0.11 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

となる。故に深さ 1m = 100cm で $q_c = 0.23 \text{ kgf/cm}^2$ となり、後述するようにコーンは自沈するはずである。しかし、1m 深さでコーンは自沈しないから、(1)式の c_u の定数項は存在することも考えられる。このためには超低下下での正規圧密粘土の剪断特性の正確な実験が必要であるが、現状では当研究室での実験は不可能である。

5. 乾燥状態

表土の乾燥状態の調査のための含水比、コーン支持力の調査は1983年6月2日より始めた。乾燥にともなって不飽和となるため、深さ 60cm までは 100 cm^3 の採土円筒を手で静かに土中に押し込んで試料土を採取した。

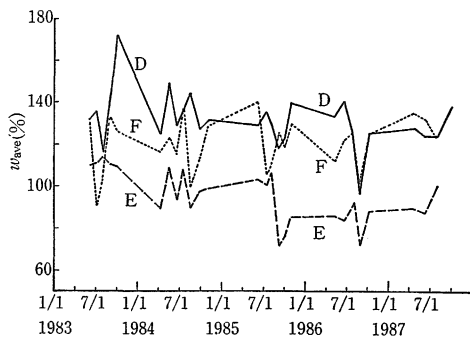


図-12：深さ 30~60cm の平均含水比の経時変化

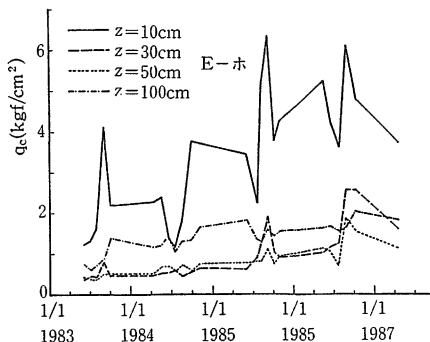
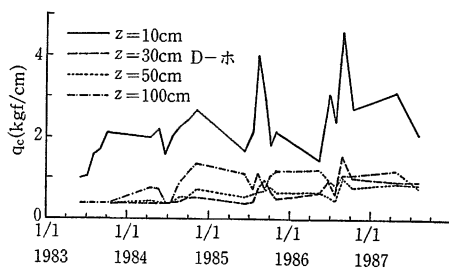


図-14：コーン支持力の経時変化

乾燥の遅い D 地点と 40cm までクラックの生じている E 地点の調査開始時と1987年6月5日の含水比分布を図-11に示す。1983年6月2日には D, E 地点とも表層から飽和状態にあった。1987年6月5日には D 地点は 20cm 以深が飽和していたのに対して、E 地点は 40cm 以深が飽和していた。D 地点では 4 年間の乾燥期間にもかかわらず、表層にわずかにクラックが生じたのみで、葦の侵入も最も遅く、1986年になって生長を始めた。これに対して E 地点は葦の根が 40cm 以深まで存在し、1984年には葦が繁茂し、最も乾燥が進んだ地点である。このため、D 地点では 30cm 程度まで乾燥による含水比の低下が認められ、それ以深ではほとんど変化していないのに対して、E 地点では 60cm 深さまで含水比の低下が認められる。

表層の 10~20cm までは降雨や乾燥による含水比変化が大きいため、30~60cm の平均含水比 w_{ave} の経時変化を示すと図-12になる。各調査時点による w_{ave} の変動が大きいが、E 地点の w_{ave} は 20~30% の低下をしている。しかし乾燥の遅い D と F の 30~60cm の含水比はほとんど低下していないことがわかる。

彦名干拓地の圃場化のためには、施工機械のトラフィカビリティーの確保が必要である。このため、コーン支持力 q_c が一般に測定される。含水比調査の D, E 地点と約 5m 離れた D-ホ、E-ホの1983年6月2日と1987年4月24日の q_c の深さ 1.5m までの分布を図-13に示す。コーンのロッドとブルーピングリング等の重量として $q_c = 0.37\text{kgf/cm}^2$ あるため、コーン自沈区間の $q_c = 0.37\text{kgf/cm}^2$ となっており、図中に点線で示してある。1983年6月2日にはD-ホでは表層 10cm を除いて、コーンは自沈し、E-ホでも 20~50cm 間でコーンは自沈している。これに対して、1987年4月24日ではコーンの自沈区間はなくなっているが、D-ホでは 20cm 以深の $q_c < 2.0\text{kgf/cm}^2$ であり、超湿地ブルドーザでの施工も困難な状態にある。これに対して、E-ホでは $q_c > 1.5\text{kgf/cm}^2$ であり、超湿地ブルドーザでの施工が可能な状態にまで乾燥が進んでいる。

コーン支持力の経時変化を図-14に示す。E-ホ地点の q_c は 4 年間にわたって増加している。これは E-ホが常に干陸状態にあり、降雨の排水がよいためである。これに対して D-ホの 30, 50cm の q_c は仮排水路が掘削され、表面湛水が排水された1985年夏以後に増加しはじめており、湛水排除が乾燥化の第 1 歩であることが明らかとなっている。

仮排水路が掘削された後、排水路より、1, 2, 4, 6, 10m の位置に S-3~S-7 を設置し、含水比の変化を測定した。この結果を図-15に示す。排水路近くの S-3, S-

4 より 6, 10m 離れた S-6, S-7 の含水比の方が低くなっている。これは仮排水路の深さが 30~40cm であり、S-3からS-7に向って高くなっているため、排水路から離れた方が含水比が低下したものと考えられる。

6. あとがき

中海干拓彦名地区の超軟弱埋立て粘土層の第 2 次埋立て後の圧密特性、剪断特性と表層の乾燥の状態を示した。これより

(1) 深さ 40cm の位置での粘土の圧密降伏応力 p_y は $0.07 \sim 0.12\text{kgf/cm}^2$ であり、上載圧力より大きく、これは埋立て後の乾燥によるわずかな含水比の低下によるものと考えられる。

(2) 圧密係数 c_v は \sqrt{t} 法の値が $\log t$ 法の値より大きくなる。この原因は二次圧密にあると考えられる。しかし、実際の粘土層の沈下測定結果より求めた c_v は実験値より大きな値となる。

(3) 二次圧密速度 $\alpha_s = de/d \log t$ は圧密降伏応力以上ではほぼ一定で、 $\alpha_s = 0.010 \sim 0.012$ である。

(4) 三軸圧縮試験より求めた $\phi' \approx 35^\circ$ であり、普通の正規圧密粘土の内部摩擦角の値である。

(5) 正規圧密状態でも 0.02kgf/cm^2 程度の粘着力 c' が得られた。これは実験誤差かあるいはチキソトロピックな強度回復によるものかは明らかでない。

(6) 強度増加率 $\Delta c_u / \Delta p = 0.35 \sim 0.37$ であるが、これから推定したコーン支持力は実測値より小さい。

(7) 乾燥は湛水の排除が重要であるが、その効果は表層 20~30cm 程度である。これ以深の含水比の低下には地下水位の低下が必要である。

(8) コーン支持力は徐々に増加しているが、現状では超湿地ブルドーザの利用困難な場所が存在する。

彦名干拓地は1987年9月から10月にかけて泥上車によって 10m 間隔で深さ 1m の排水溝が掘削された。これは軟弱粘土の乾燥促進に非常に有効と考えられる。この排水溝の乾燥への効果とその埋立て地の沈下への影響については今後とも調査を続ける予定である。

なお、本研究の調査・実験には昭和58年度以降の農業施設工学研究室の専攻生諸君に多大のご協力を賜りました。厚く感謝の意を表します。また、昭和62年度の研究には文部省科学研究費一般研究(B)、課題番号28231003 2541の補助を受けました。

参 考 文 献

1. 鳥山昉司・山本勝三・小林一夫：農土誌，54(12)：1093-1098, 1986.
2. 鳥山昉司・山本勝三・高橋清一：農土誌，55(2)：117-122, 1987.