

各種要因の q_u への影響度に関する実験的研究(Experimental Study on Contribution of
Various Factors Influencing q_u)松 尾 稔* (Minoru Matsuo)
正 垣 孝 晴** (Takaharu Shogaki)キーワード：一軸圧縮試験／サンプリング／試験方法／室内実験／試料の乱れ／粘性土／ボーリング
(IGC: C6/D6)

1. はじめに

土質試験結果の変動の原因には、地盤本来の不均質性と、土質調査や試験実施者の技術差による人為的なものとがある。著者らは、後者に起因する強度差を生まない調査法の提案を最終目的とした研究の一環として、経験豊富な技術者・研究者に対する意識調査（アンケート）結果をもとに、各種作業要因が一軸圧縮強さ q_u （以下、 q_u と略記）の増減に対して持つ相対的な寄与率を明らかにした¹⁾。なお、寄与率とはアンケート調査で実施した 33 個の作業要因の中で、 q_u に与える影響度が最大の要因を 1.0 にした場合の相対的影響度のことである。アンケート調査は、土質や気象条件のあらゆる組み合わせを実験で再現して寄与率を定量化することの困難さに加え、サンプリング、土質試験、設計という一連の作業経験豊富な技術者の判断が多くの場合科学的に裏打ちされているという実績に基づいて行われた。しかしながら、意識調査の結果を可能な範囲の実験や実態調査で照査することは、地味な作業ではあるが、極めて重要なことと考える。

本論文は、アンケート調査で取り上げた作業要因に着目して、攪乱要因を単純化した室内実験と現地サンプリング実験を行い、各種攪乱要因の q_u への影響度を調べたものである。また、現地の実態調査結果を含めてアンケートの解析結果を定性的に照査するとともに、意識調査としての寄与率と q_u との関係づけも試みる。

2. 実務設計における q_u に対する基本的な考え方

土質調査法は設計法と適切に結びつくことが望まし

く、例えば新しく開発された設計法にはそれに適した土質調査法が工夫されるべきであるという考え方を先に提示した²⁾。 q_u に関しても例外ではない。

q_u は軟弱粘性土地盤の短期安定に関する事前設計や破壊事例の解析等に、中心的な役割を果たしてきた。 q_u が広く用いられている背景として次のことが考えられる。一般に強度がかなりの範囲でばらつく粘性土層に関しては、地盤内の応力や変形を忠実にシミュレートする、精度は高いが複雑で、かつ少数個しか得られない地盤強度を求めるよりも、むしろ、多数の試料を簡単な方法で試験して、設計対象領域に関する多くの情報（平均やばらつき）を得ることのほうが、実務設計では有用だとする考え方が強いからである。

今日、乱さない試料採取の技術は広く普及し、一般の現場技術者にとっても通常業務として、多量の試料採取が可能となった。原地盤の真値に近い物性値を追求するため試料採取や試験技術の向上を図る努力がなされるのは当然であり、かつ必要である。しかし、それが工学的な意味で広く行き渡らない限り、サンプリングや土質試験実施者の差による q_u の差を益々助長する側面を有することもまた事実である。換言すると、量が満たされるようになれば、質の向上を図るのは技術者として当然の志向である。しかし、 q_u —設計のように、これほど広くかつ多人数が用いている問題においては、一部の技術者あるいは技術集団しかできない質の向上を急激に普及することは困難であるから、多くの技術者が現実に行える範囲で調査法の質の向上を図ることが重要と考える。サンプリングから一軸圧縮試験に至る諸官公署の調査指針や指導内容には、今日なお統一的な見解がない³⁾。一定の品質の q_u を得るためには、統一的な基準や仕様が必要である。そして、それが現実性のある適切な仕様であれば技術者の一層の創意工夫も期待でき、品質の良い q_u も得やすい。ただし、仕様が厳し過ぎると技術者の活力を阻害することになり、結果的に規則が守られないという状況も生ずる。一般の技術者が努力すれば守れるような作業規制であれば、活用範囲も広がり、かつ q_u の品質向上にもつながるものと考えている。

* 名古屋大学工学部地盤工学教室 教授（名古屋市千種区不老町）

** 名古屋大学工学部土木工学教室 助手（名古屋市千種区不老町）
(1985. 8. 9 原稿受付・討議期限 1987. 1. 1, 要請があれば1か月の
期限延長可能)

表-1 q_u に影響を与える作業要因¹⁾

作業要因	作業内容
A	1 サンプラー貫入後の試料採取
	2 逸水による試料の膨潤
	3 削孔中の異常ポンプ圧
B	1 サンプラー内の試料移動
	2 剛度不足のチューブ使用による試料の変形
	3 通水孔不良による 110% 圧縮
C	1 ロッドホルダー不使用：サンプラーの貫入
	2 ピストン浮上のままサンプリング
	3 チューブ刃先の変形
D	1 ピストンの固定不良：105% 圧縮
	2 自由ピストン式サンプラー使用
E	1 サンプラーを不規則にゆすり込んだ
	2 貝がらによる試料の乱れ
	3 サンプラーの 110% 押込み
F	1 縁切りによる試料の乱れ
	2 追切りによる試料の乱れ
	3 孔底への試料落下
G	1 ピストン引抜き時のチューブ圧迫
	2 ピストン引抜き時の負圧
	3 エンジンによる振動・衝撃
H	1 チューブにキャップのみして 3 日後に試験
	2 シール中の試料移動
	3 シール中の転倒
I	1 温度変化によるチューブの変形
	2 高温度によるチューブの変形
	3 運搬中の振動
J	1 押し出し時の壁摩擦
	2 横に押し出した
	3 押し出し時のチューブ締め過ぎ
K	1 サンプリング後 7~10 日して試験
	2 1 断面で 2 供試体
	3 初心者による乱れ
	4 圧縮速度 5%/min

以上が、 q_u を用いる土質調査法に関する著者らの基本的な考え方である。

3. 各種攪乱要因が q_u に与える影響に関する室内実験

すべての要因の影響度を実験的に調べることは不可能だがそれでもなお、意識調査の結果を実験や実態調査と照査する努力が必要であると述べた。表-1 にアンケート調査で取り上げた作業要因を示す¹⁾。室内実験では、アンケートの作業内容を可能な限りシミュレートすることが肝要である。そのためには、土試料の選定、強度、サンプリングや採取試料の取扱い等に留意し、要因間の相対的關係を保持した実験でなければならない。供試粘性土は、比重 $G_s=2.701$ 、液性限界 $w_L=45.3\%$ 、塑性限界 $w_p=22.8\%$ であり、日本統一土質分類によれば CL に分類される細粒土 (図-1) である。アンケート調査では沖積の海成粘性土地盤を想定したが、上記供試粘性土はシルト分の含有量がやや高いとはいえ、我が国の

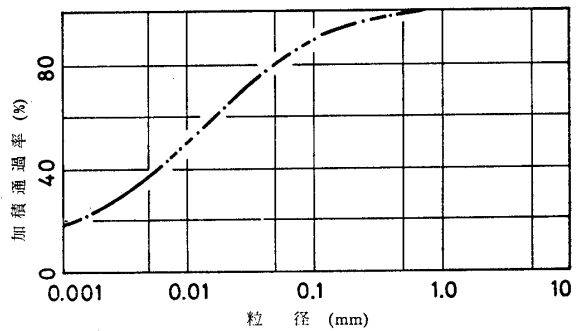


図-1 粒径加積曲線

港湾で一般にみられる粘性土と同様の指数性質を有している。

3.1 実験方法

実験目的が、各種要因の q_u への影響を調べることであるため、実験方法を通常より少し詳しく述べたい。

1) 供試体作成方法

供試粘性土の粉末に水を加え (含水比 80% 程度)、大型のソイルミキサーで 24 時間以上の混練後、供試体作成用の圧密土槽で一次的に圧密する。圧密土槽は小型 (内径、高さともに 26 cm) および大型 (同 1 m) の 2 種類を用いた。圧密荷重は、大型土槽の場合にはコンプレッサーからの空気圧で、また、小型土槽ではコンプレッサーからの空気圧を調圧シリンダーで水圧に変換して圧力を加える方式である。小型土槽では、1 つのコンプレッサーに対し同じ型式の土槽を 4 個接続して、同時に 4 つの土槽で試料が作成できるようにしている。試料採取に必要な粘土層厚 (小型：約 20 cm、大型：約 70 cm) を得るため、小型土槽では途中 2 回 (大型土槽では 5 回) 試料の補充を行うが、これを含めて試料採取までの圧密時間は 20 日 (大型では 10 か月) 程度である。アンケートのモデル地盤における下層部の強度を想定し、 $q_u=1 \text{ kgf/cm}^2$ ($1 \text{ kgf/cm}^2=98 \text{ kPa}$) が得られるように圧密圧力 $p=3 \text{ kgf/cm}^2$ を採用し、圧密度ほぼ 100% まで圧密した。

2) 試料採取および実験方法

試料採取方法の概念図を図-2 に示す。同図の (a)~(d) は小型土槽の場合であるが、その手順を簡単に説明すると (i). シンウォールチューブサンプラー (以後 TWS と略記：肉厚 1.5 mm、肉径 75 mm、長さ 30 cm) を 3 cm 程度人力で鉛直に押し込む (土槽中央部：TWS-1 の試料) ((a) 図) (ii). ホイストクレーンにつるした鋼板 (重量 $\approx 250 \text{ kgf}$) を荷重として、土槽本体の底まで TWS を静的 (10 cm/s 程度) に押し込む ((b) 図) (iii). (i) (ii) の作業を繰り返して、TWS-1 の周囲に順次 6 本の TWS を押し込む ((c) 図) (iv). 土槽本体から底板を取りはずし、本体を上下逆にして台座に置き、土槽本体を押し下げ ((d) 図) TWS を取り出す

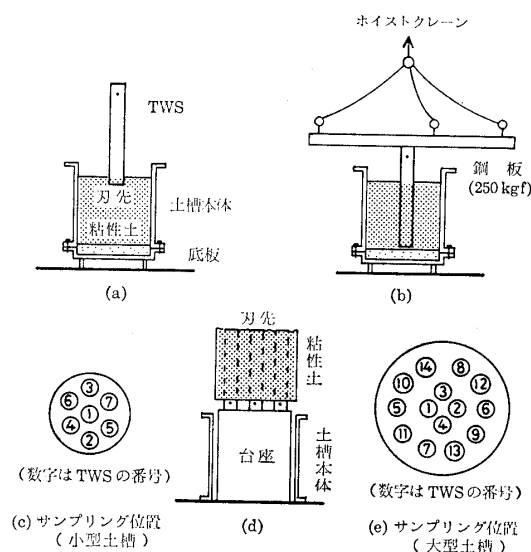


図-2 サンプル位置とサンプル位置

のである。(e) 図は大型土槽のサンプル位置図である。大型土槽の試料採取手順は (i). 対角線上にある2本の TWS (例えば (e) 図に示す TWS-1 と 2) に対し, TWS が自立する程度に人力で鉛直に押し込み, (ii). ホイストクレーンにつるした鋼板 (重量 $\approx 1\text{tf}$) を荷重として, 所定深さまで静的 (10cm/s 程度) に押し込む。(iii). (i) (ii) の作業を繰り返し, 14 本の TWS の押し込みが終了した後, TWS の周囲の土をスクレーパーで取り除き, 試料を採取するのである。一軸圧縮試験は, 原則として試料採取直後に行う。貯蔵時間が q_u に与える影響等を調べるため保存が必要な場合は, 重量比で松脂 5% 程度を添加したパラフィンで厚さ 2cm 程度シールして専用棚に横置して貯蔵した。また, 供試体の成形および一軸圧縮試験は JIS A 1216 に従い, 供試体寸法は直径 35mm, 高さ 80mm である。

3) 実験実施項目の選定

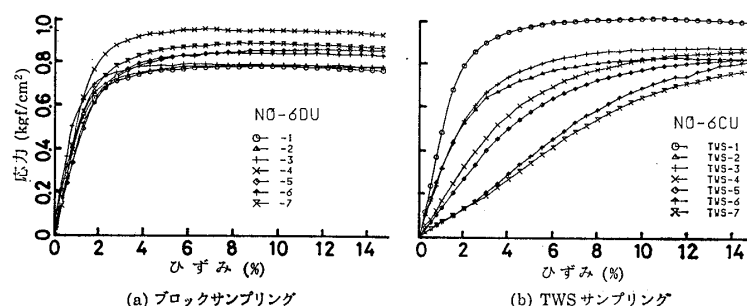
室内実験に際しては, まず表-1 に示す 33 個の作業要因の中で, 室内では実施できない作業要因 (A, B, C, D, E の各作業項目と F-1, 2, G-2, 3, H-2 の計 18 個) を除外した。残った作業要因に対し, 小型圧密土槽でも実際に近い作業状況が再現できる要因として, I-1,

2, 3, J-2, K-1, 2, 3, 4 の 8 要因を実験対象として選定した。一方, 小型圧密土槽では実施困難な作業要因として G-1, H-1, 3, J-1, 3 の 5 要因を選定し, 大型土槽を用いた室内実験により, q_u への影響度を明らかにする。なお, 大型の圧密土槽は最大層厚 70cm 程度のモデル地盤を作ることができるため, 実務で使用する TWS (長さ 1m) を用いた比較実験が可能である。すなわち, 実際に近い作業状況を作り出せるのが最大の利点である。

3.2 実験結果と考察

1) 小型圧密土槽による実験結果と考察

3.1 で選定した小型圧密土槽に関する作業要因の大部分は, 採取した TWS ごとに攪乱要因を与えてその影響度を比較するため, 個々の TWS によって供試体の指数的・力学的性質に有意な差のないことが重要である。小型圧密土槽では, 土槽内径 26cm の中に内径 75mm の TWS を 7 本挿入するため, TWS 押し込みによる他の採取試料への影響が懸念された。この影響を調べるため, 同じ指数的性質を有する 2 つの土槽ペアを選定して, 一方は TWS の押し込みで, 他はブロックサンプリングで採取した供試体の指数的・力学的性質を比較した。含水比 $w_0 \approx 0.8\%$, $\gamma_t \approx 0.04\text{gf/cm}^3$ ($1\text{gf/cm}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$) と指数的性質の差はわずかであり, 両土槽の試料は工学的には同じ土質であると判断された。小型土槽では深さ方向に連続して 2 つの供試体が作成できる。図-3 に, 土槽上部供試体の (応力 σ -ひずみ ϵ) 曲線を示す。同図 (a), (b) は, それぞれブロックサンプリングと TWS 押し込みによるサンプリングの結果であり, 凡例に示した記号の (σ - ϵ) 曲線は, 両者とも同じ土槽位置の供試体に対応している。両図を見ると, TWS サンプリングによる (b) 図では, TWS-1 を除きサンプラー押し込みとともに (σ - ϵ) 曲線の立ち上がり勾配が小さくなり, 押し込みに起因する試料の乱れが明らかである。しかし, $\epsilon \approx 15\%$ に至っては, ブロックサンプリングの結果と同様な q_u を与え, TWS-7 についても TWS-2, 3 とほぼ同様な強度を発揮している。また, この傾向は土槽下部の供試体についても同じであった。

図-3 応力とひずみ曲線 ($1\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kPa}$)

土槽中央部では、ゴムベローズを用いる圧力载荷の機構上、圧密圧力が若干大きくなりその分大きめの q_u を与えることがわかっている。したがって、TWS-1 を除いた q_u の変動幅に着目すると両者とも 0.1 kgf/cm^2 とほぼ同じ値を与えている。このことは、TWS-1 以外の試料に対しても q_u そのもので各種要因の影響度を比較することに十分意義があることを示している。また、TWS サンプリングの TWS-1 試料に関して、直径 75 mm の断面から並列して2個の供試体を作成して一軸圧縮試験を行ったところ、 $q_u = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対し両供試体の変動幅は3%程度と極めて小さく、また、 w_0 , r_t , 間隙比 e , 飽和度 S_r の指数の性質に関しても有意な差は認められなかった(図-6)。したがって、TWS-1 については TWS で比較する必要のない未熟練者による成形(表-1の作業要因: K-3)と圧縮速度(同作業要因: K-4)の作業要因について、 q_u に与える影響を検討する。他の要因については、図-2(c)に示す TWS-3, 5, 7 と TWS-2, 4, 6 のグループが TWS 押込みによる影響が同じ試料であると判断して、前者に対しては要因を与え、要因を与えない後者と比較する。この場合、影響度を検討する際の基本条件として、両供試体が工学的に同じ指数の性質を有することを確認している。本論文では重複を避けるため、指数の性質を各試験結果の図に示し、特に差が認められる場合にそれを記述する。

① 圧縮速さが q_u に与える影響(作業要因: K-4)

K-4 は、圧縮速さとして $5\%/ \text{min}$ を設定している。今回用いた一軸圧縮試験機は、モーターの能力が最大 $4.3\%/ \text{min}$ であった。そこで、直径 75 mm の採取試料の断面から並列して作成した2つの供試体に対し、 $1\%/ \text{min}$ と $3\%/ \text{min}$, $1\%/ \text{min}$ と $4\%/ \text{min}$ というペアで実験を行った。図-4, 5 は実験結果である。 $1\%/ \text{min}$ を分母にした q_u 比に着目すると、図-4, 5 とともに 1.0 を中心にして2割程度変動するが、特に速度効果の影響等は明らかでない。 $1\%/ \text{min}$ を分母にした $3\%/ \text{min}$, $4\%/ \text{min}$ の q_u の低下率($1 - (\text{要因を与えた } q_u / \text{要因を与えない } q_u)$)は、それぞれ平均値にしてわずか 0.01

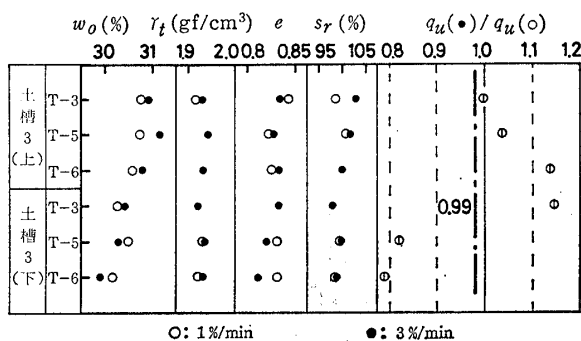


図-4 圧縮速さが q_u に与える影響 ($3\%/ \text{min}$ と $1\%/ \text{min}$) ($1 \text{ gf/cm}^3 = 9.8 \text{ kN/m}^3$)

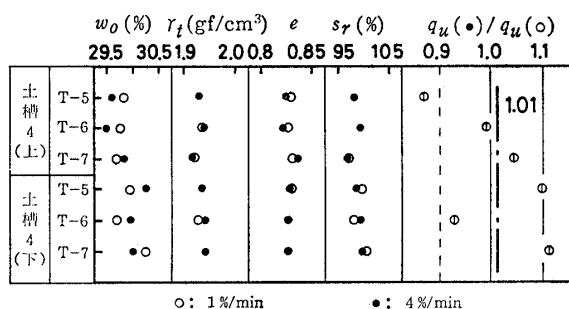


図-5 圧縮速さが q_u に与える影響 ($4\%/ \text{min}$ と $1\%/ \text{min}$) ($1 \text{ gf/cm}^3 = 9.8 \text{ kN/m}^3$)

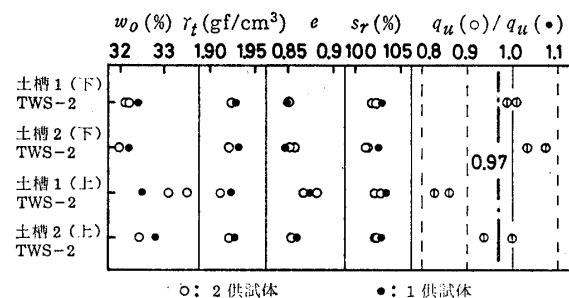


図-6 1断面2供試体が q_u に与える影響 ($1 \text{ gf/cm}^3 = 9.8 \text{ kN/m}^3$)

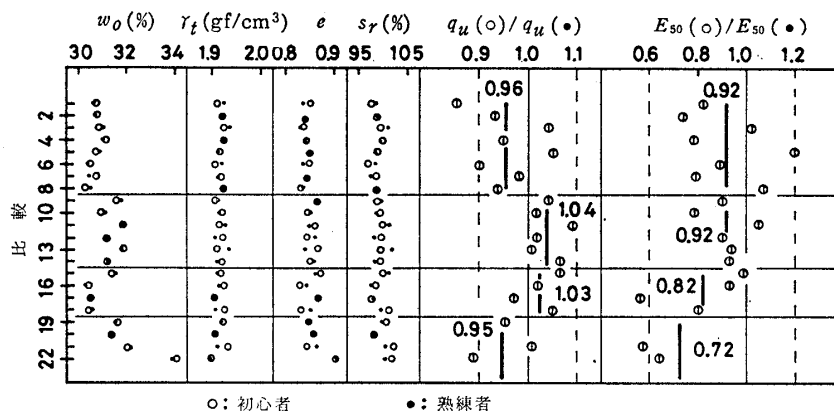
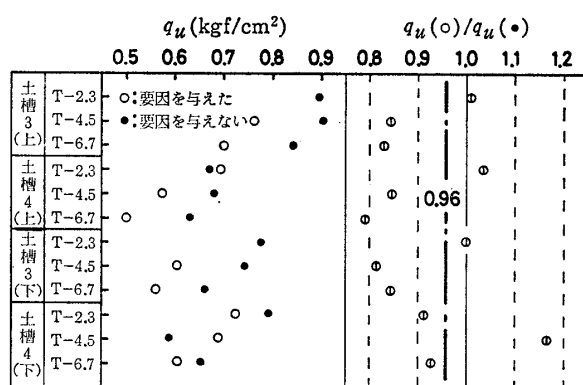
(強度低下), 0.01 (増加) である。以上の結果を基に、以下に述べる比較実験では軸ひずみ速度を $3\%/ \text{min}$ に統一した。 $3\%/ \text{min}$ は試験時間の効率を考慮したものであるが、運輸技術研究所の提案³⁾により、今日運輸省港湾局等では広く用いられている圧縮速度である。

② 1断面2供試体が q_u に与える影響(作業要因: K-2)

図-6 は、直径 75 mm の採取試料の断面から並列して2つの供試体を作成した場合(以下、2供試体と略記)と断面中央部から1つの供試体を作成(同、1供試体と略記)した場合の試験結果である。 q_u 比を見ると、2供試体の q_u が若干低めの値を与える傾向がうかがえるが、 q_u の低下率の平均値は 0.03 である。

③ 初心者の成形による乱れが q_u に与える影響(作業要因: K-3)

TWS-1 の2供試体のペアの試料に対し、熟練者と初心者がそれぞれ供試体を作成して q_u に与える影響を検討した。熟練者は土質試験の経験を数年有し、初心者は初めて一軸圧縮試験を行うものである。図-7 に試験結果を示すが、同図の縦軸の番号は、上から比較した順番を示している。また、図中の3本の横線は4回に分けて行った比較試験を区別したものである。熟練者を分母にした q_u 比は、比較試験1回目の結果で初心者の q_u が最大 15% 程度小さいが、比較試験2回目ではむしろ大きな値を与えている。比較試験ごとの q_u 低下率の平均値は、それぞれ 0.04 , 0.04 (強度増加), 0.03 (強度増

図-7 供試体作成者の相違が q_u に与える影響 ($1\text{gf/cm}^3=9.8\text{kN/m}^3$)図-8 試料運搬中の振動・衝撃が q_u に与える影響 ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$)

加), 0.05 である。しかし, 比較試験ごとの変形係数 E_{50} 比の平均値に着目すると, それぞれ 0.92, 0.92, 0.82, 0.72 である。 q_u では明瞭でなかった初心者の供試体の乱れが E_{50} では顕著に現われている。

④ 試料運搬中の振動・衝撃が q_u に与える影響 (作業要因: I-3)

図-8 は, 試料の入った TWS をライトパンの荷台に直接置いて運搬した場合と運搬しない場合の試験結果である。運搬に際しては, 試料の両端に 2cm 厚のシールを施した TWS を直接荷台に置き, TWS 相互の固定も

していない。したがって, 走行中の振動・衝撃が TWS 内の試料に直接作用し, TWS は荷台の中 (幅×長さ: $1.2\text{m} \times 2.0\text{m}$) を走行状態にまかせて自由に移動することができる。特に車の発進・停止時には, TWS 相互の接触や車体内壁への衝突で, 試料は大きな衝撃を受ける。このような状況で一般の舗装道路を 70 km 走行した。両端にシールを施しているため, 指数性質の変化はないが, q_u の低下は明らかであり低下率の平均として 0.04 を得る。

また, 作業要因 I-1, I-2, J-2 については, 小型土槽を用いた同様な室内実験で q_u の低下率を明らかにした^{4), 1)}。それによれば q_u の低下率は, それぞれ 0.04 (強度増加), 0.01 (強度増加), 0.01 (強度増加) であった。

2) 大型圧密土槽による実験結果と考察

表-2 に, 大型圧密土槽からの採取試料と作業要因の組合わせを示す。土槽内の平面位置における (あるいは深度方向に対しても) w_0 , γ_t 等の指数性質の変動は工学的には無視できる (詳細は後述)。そこで, 表-2 に示す組合わせは, TWS 押込み時に生ずる TWS 内の試料の移動量 (品質) が同程度のものを比較ペアとして選定した。実験は, 比較ペアの一方に要因を与え, 要因

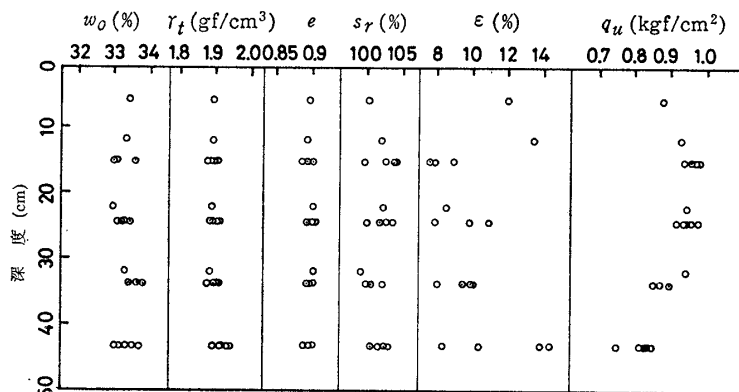
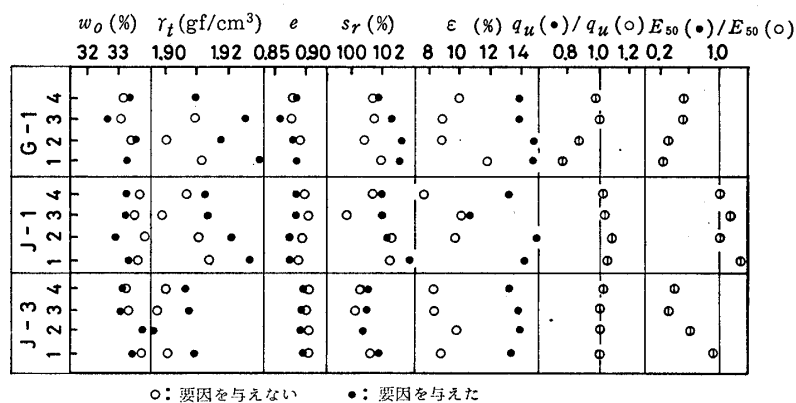
図-9 大型土槽地盤の試験結果 (要因を与えない試料) ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$, $1\text{gf/cm}^3=9.8\text{kN/m}^3$)

表-2 採取試料と作業要因 (大型圧密土槽)

作業要因	採取試料番号 (TWS)	
	要因を与える	要因を与えない
H-1	5	6
H-3	8	7
J-3	9	11
G-1	10	12
J-1	13	14

図-10 大型土槽実験結果 (1 gf/cm³=9.8 kN/m³)

を与えない他の試料と比較するが、その際同じ深度の供試体で影響度の検討を行う。TWS-1~4については、今後の追加実験に備え保存試料とした。

i) 供試地盤の作成結果

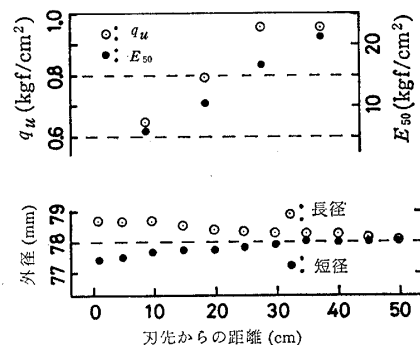
影響度を検討する場合、比較する土試料が工学的に同じ指数的性質を有することが必要である。図-9は、土槽地盤の指数的・力学的性質を明らかにするため、要因を与えない試料 (TWS-6, 7, 11, 12, 14) の試験結果を土槽深度に対してプロットしたものである。 w_0 , r_t , e , S_r の変動幅は $w_0 \approx 0.8\%$, $r_t \approx 0.6 \text{ gf/cm}^3$, $e \approx 0.3$ と小さく、 $S_r \approx 100\%$ の飽和粘性土である。また、 q_u の深度分布を見ると、深さとともにわずかながら減少している。これは、土槽下部の ε が大きいことから、サンプリングに起因する試料の乱れが考えられるが、同一深度での q_u の変動幅は 0.05 kgf/cm^2 程度と小さい。このことは、土槽内の同じ深度では場所に関係なく、工学的には同じ物性を持つ試料としてよいことを示している。したがって、次節からの影響度の検討では、表-2 に示した比較ペアの同じ深度の供試体で影響度を実験的に調べる。

ii) 実験結果と考察

大型土槽を用いた各種作業要因の一軸圧縮試験結果を図-10 に示す。縦軸は各作業要因であり、試験結果を土槽深さに対してプロットしている。

① ピストン引き抜き時の TWS の圧迫が q_u に与える影響 (作業要因: G-1)

G-1 の単純化として、コンクリート床上に TWS を横置き、刃先より 30cm 離れた個所を体重 60 kgf の大人が数度踏みつけて TWS を変形させその直後に試験した。図-11 は、その際に生じた TWS の変形と q_u , E_{50} の変化を示している。踏みつけによる TWS の変形は、刃先ほど大きく、最大 0.7mm 程度 (TWS 内径 75mm の約 1%) 変形した。また、TWS の変形が大きいほど q_u , E_{50} の低下が大きくなるのが明らかである。踏みつけによる試料への衝撃力は (ステンレス製 TWS の剛性

図-11 TWS の変形と q_u , E_{50} の変化

を考えると) TWS 内ではほぼ一定であると考えられ、したがって、 q_u の低下は TWS の変形によるものと推察される。また、図-10 より、TWS の断面変形で試料の圧縮が生じ r_t の増加とそれに伴う e , w_0 の減少、 S_r の増加が生じたものと考えられる。要因を与えない TW S-12 と比較すると、 ε の増加と q_u , E_{50} の低下が著しい。

② 試料押出し時の壁摩擦が q_u に与える影響 (作業要因: J-1)

ここでは、J-1 として試料押出し方法の違いが q_u に与える影響を検討する。今、便宜的に刃先側からの供試体を、それぞれ 1, 2, 3, 4 とする。1 と 3 については、かなり速い速度 (約 2.4 cm/s) で一気に押し出し、2 と 4 については 9.5 cm の押し出し量のうち、2 cm 刻みで緩 (約 0.07 cm/s)、速 (約 2.4 cm/s) と押し出し速度を変化させた。図-10 の J-1 を見ると、要因の影響と推察される r_t の増加と e の減少が認められるが、 q_u , E_{50} に与える影響はわずかである。

③ 試料押出し時の TWS 締め過ぎが q_u に与える影響 (作業要因: J-3)

TWS を試料押出し装置にセットした際に、TWS 固定バンドを締め過ぎ、TWS に若干の変形を与えたという作業要因である。実験では、TWS 刃先部を直径で 2mm (断面積で 5.3%) 程度内側へ一様に絞り込み試料を押出した直後に試験を行った。断面積の減少で、9.5 cm の押し出し量に対して、刃先から出る試料長は 10 cm であった。要因を与えることにより試料が圧縮し r_t の増加、それに伴う w_0 , e の減少、 S_r の増加が図-10 から読みとれる。 ε と E_{50} の変化は大きい、 q_u への影響は明らかでない。

以上、大型土槽の実験結果を表-3 に示した。また、作業要因 H-1, H-3 は、既に同様な室内実験で q_u に与える影響を明らかにした⁴⁾。それによれば q_u の低下率は、それぞれ 0.01 (強度増加)、0.11 であった。

本研究は、限界的な破壊問題を対象として特に q_u に

表-3 大型土槽実験結果 ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$)

TWS	No.	作業 要因	q_u^* (kgf/cm^2)	q_u (kgf/cm^2)	q_u/q_u^*	低下率の 平均値
10	1	G-1	0.832	0.638	0.767	0.099
	2		0.899	0.784	0.872	
	3		0.960	0.951	0.991	
	4		0.983	0.956	0.973	
13	1	J-1	0.759	0.792	1.043	0.037 (強度増加)
	2		0.855	0.911	1.065	
	3		0.921	0.944	1.025	
	4		0.944	0.958	1.015	
9	1	J-3	0.839	0.848	1.011	0.028 (強度増加)
	2		0.901	0.933	1.036	
	3		0.978	0.989	1.011	
	4		0.964	1.014	1.052	

q_u^* : 要因を与えない q_u q_u : 要因を与えた q_u

着目している。しかし、G-1、H-3、J-3 のように ε 、 E_{50} 等の変形特性に与える影響が大きな作業要因には注目しておく必要がある。FEM 等の変形解析を対象とする設計問題に、これらの要因が与える影響は今後の課題としたい。

4. 各種攪乱要因が q_u に与える影響に関する 現地サンプリング実験⁵⁾

室内の大型および小型圧密土槽ではシミュレートできない作業要因について、現地サンプリング実験（以下、現地実験と略記）を実施した。現地は東海地域のある沿岸であり、 $z=-7\text{m}\sim-20\text{m}$ まで比較的均質で水平方向の連続性に富む沖積海成粘性土層である。水深 -7m の海上で可搬式の鋼製足場と木製の三脚を用い、試料採取は固定ピストン式 TWS を用いた。

4.1 作業要因の選定と現地実験の方法

3.1 では、現地作業を伴うため室内実験ではシミュレートできない作業要因として 18 個を選定した。この中で B-2、D-2、F-2、3 の 4 要因については、既に実態調査に基づき q_u に与える影響を明らかにした^{2),6)}。また、A-2、B-1、E-2、G-2、H-2 の 5 要因は、実務作業の中でも偶然性が高く、現地実験を行ってもその結果の一般性が疑問視される要因である。したがって、上述の 18 個の作業要因の中から通常頻度の高い要因として、A-1、A-3、C-2、C-3、D-1、E-3、G-3、K-1 の 8 要因を選定して q_u に与える影響を検討した。図-12 は採取試料と作業要因の組み合わせ、ならびに w_0 、 γ_t 、 q_u 、 ε の深度分布の結果である。図中の各点はすべての供試体の試験結果を正確な深度に対しプロットしている。 q_u に対する影響度の検討は、要因を与えない試料および要因を与えてもその影響が認められない試料の試験結果から基準とする q_u の深度分布線を決定し、その基準線からの乖離の大きさで行った。基準とする q_u の深度分布線は、最小二乗法などの直線近似法では適切に行えないため、以下の 2 点を考慮し詳細な検討を加えて決定した。

i) w_0 、 γ_t の指数的性質は、作業要因を与えてもその変化が少ないと考えられる。したがって、 q_u の深さに対する連続性を考えるうえで、 w_0 、 γ_t の深度変化を参考にする。

ii) $\varepsilon \geq 5\%$ の供試体は、明らかに乱れがあると判断して棄却した。棄却基準値 $\varepsilon = 5\%$ は以下の理由による。調査地近傍で、砂杭打設による周辺地盤の乱れを正確に把握するために高精度のボーリング調査が行われた²⁾。

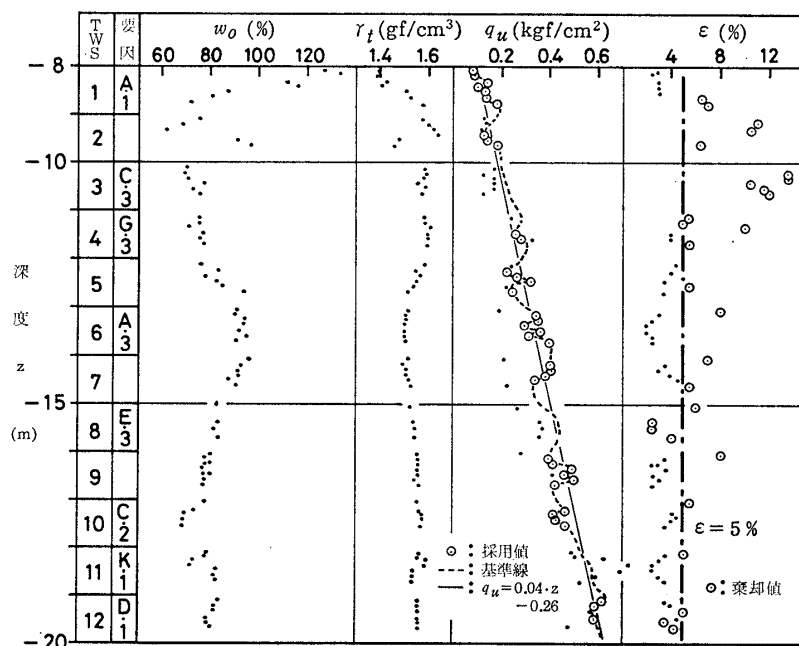


図-12 w_0 、 γ_t 、 q_u 、 ε の深度分布 ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$, $1\text{gf/cm}^3=9.8\text{kN/m}^3$)

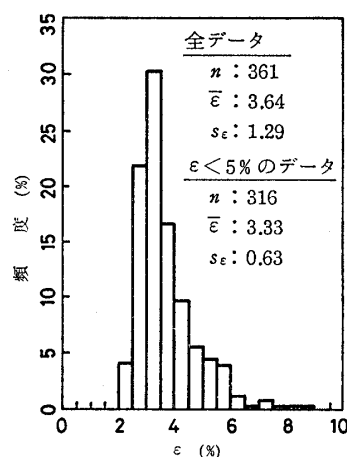
図-13 ϵ のヒストグラム

図-13 は ϵ のヒストグラムであるが、棄却値として $\epsilon = 4\%$, 4.5% , 5% を設定すると各棄却値以上のデータが全データに占める割合は、それぞれ 27.2%, 17.3%, 11.8% となる。この値を参考にして、今回行ったすべての供試体の (σ - ϵ) 曲線と試料押出し時の観察状況を詳細に検討して $\epsilon = 5\%$ が最も妥当であると判断した。

4.2 実験結果と考察

① サンプラー貫入後の試料採取が q_u に与える影響 (作業要因: A-1)

図-12 の TWS-1 の結果を見ると、刃先部 20cm までの供試体を除き $\epsilon = 2.5 \sim 3.0\%$ と小さく、また試料押出し時の観察や軸圧縮試験終了後の破壊形態でも、供試体に明確なすべり面が発生している。したがって、要因による試料の乱れや強度低下は明瞭でない。

② チューブ刃先の変形が q_u に与える影響 (作業要因: C-3)

本要因は TWS の刃先が変形した状態でサンプリングした場合であり、変形の程度は採取試料の断面方向の中央部付近まで影響がおよぶ状況を設定している。図-14 に、TWS-3 を採取したチューブ刃先の形状と供試体位置を示す。刃先の最大変形量は、TWS 内径 75mm の 23% であり、オペレーターが実際の作業で容認する限界に近いものである。TWS-3 の破壊ひずみ ϵ を見ると、 $\epsilon = 10.5 \sim 15.0\%$ でありすべての供試体に大きな乱れが生じ、その結果 q_u の低下が著しい。

③ エンジンによる振動・衝撃が q_u に与える影響 (作業要因: G-3)

TWS-4 は、採取した試料の両端にシールもキャップも装着せずに、エンジン近くの足場板上に 40 分間放置した。貝殻片の混入した供試体 (TWS-4 の刃先から 4 番目) を除いて、TWS の端部ほど、振動・衝撃に起因すると推察される ϵ の増大が明らかである。

④ 削孔中の異常ポンプ圧が q_u に与える影響 (作業要因: A-3)

A-3 の単純化として、前日のスライムが孔底に沈積した状態のまま、クランクを孔底に静置して送水圧 5 kgf/cm^2 程度 (運輸省港湾局によると、軟弱層では削孔中の送水圧を 3 kgf/cm^2 以下と規定している⁷⁾) を 2 分間程度保持し、その後サンプリングした。TWS-6 の最浅部の供試体の ϵ を見ると $\epsilon = 8\%$ であり、要因に起因する試料の乱れは明らかである。しかし、他の供試体は $\epsilon = 2.0 \sim 3.0\%$ と 5 kgf/cm^2 程度の送水圧では表層部の 10cm を除いて特にその影響はない。

⑤ サンプラーの 110% 押込みが q_u に与える影響 (作業要因: E-3)

本要因を与えた TWS-8 の試料押出し時の観察状況では、採取試料の刃先部 50cm の範囲に、鉛直方向に供試体を 2 分する縦のクラックが生じた。このクラックは、TWS の押し込み過ぎによるものであることは明白である。その結果、 $\epsilon = 2.5\%$ と小さなひずみ領域でこのクラックに沿うすべり破壊が生じ q_u の低下も著しい。採取した試料に原因不明の縦のクラックが発生していたという経験を持つ技術者は多い。この観点からも興味深い結果が得られた。

⑥ ピストンが 10cm 浮上した状態でのサンプリングが q_u に与える影響 (作業要因: C-2)

TWS-10 の試験結果を見ると、最浅部の供試体の ϵ が $\epsilon = 5.5\%$ と大きな値を持つ以外は他の供試体で $\epsilon = 3.5 \sim 4.5\%$ である。また、試料押出し時の観察状況からも要因を与えたことの影響は明らかでない。

⑦ サンプリング後 (7~10) 日経過してから試験が q_u に与える影響 (作業要因: K-1)

実務では 2 か月あるいはそれ以上の長期間にわたり、採取試料を貯蔵することもある。そこで、貯蔵時間として 4 か月をとり q_u に与える影響を調べた。TWS-11 の指数的性質は TWS-10, 12 の試料と同様であり、貯蔵による試料の乾燥等は認められない。また、 ϵ においても、例えば正規の方法でサンプリングした TWS-9 と同様な値を持ち、要因を与えたことによる変化はないが、 q_u が増加する傾向は明らかである。自然堆積した乱さない試料に対しても、室内実験⁸⁾ と同様なシキソトロピー現象が存在しているようである。

⑧ サンプラーの 105% 押込みが q_u に与える影響 (作業要因: D-1)

⑤は、試料採取有効長を 10cm 越えた押込みの影響を明らかにした。ここでは、過押し込み量が 5cm の場合の影響を TWS-12 で検討する。試料押出し時の観察状況から、押し込み過ぎに起因するクラックの発生は刃先から 20cm であり、過押し込み量 10cm に対するクラックの発生範囲 50cm より小さいことがわかる。TWS-12 を見ると、刃先部 20cm の影響範囲は作業要因 E-3 と同様

表-4 現地サンプリング実験結果 ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$)

TWS	No.	作業 要因	q_u^* (kgf/cm^2)	q_u (kgf/cm^2)	q_u/q_u^*	低下率の 平均値
1	1	A-1		0.185	1.000※	0.000
	2			0.138	1.000	
	3			0.135	1.000	
	4			0.101	1.000	
	5			0.141	1.000	
	6			0.089	1.000※	
	7			0.083	1.000※	
3	1	C-3	0.245	0.172	0.702※	0.264
	2		0.228	0.120	0.526	
	3		0.221	0.169	0.765	
	4		0.216	0.174	0.806	
	5		0.208	0.176	0.846	
	6		0.200	0.129	0.645※	
4	1	G-3	0.300	0.296	0.987※	0.009
	2			0.282	1.000	
	3			0.259	1.000	
	4		0.270	0.266	0.985	
	5		0.280	0.274	0.979	
	6		0.274	0.237	0.865※	
6	1	A-3		0.400	1.000※	0.000
	2			0.313	1.000	
	3			0.365	1.000	
	4			0.298	1.000	
	5			0.352	1.000	
	6			0.343	1.000※	
	7			0.186	1.000※	
8	1	E-3	0.412	0.355	0.862※	0.143
	2		...	...	...	
	3		0.426	0.375	0.880	
	4		0.428	0.357	0.834	
	5		...	...	...	
	6		...	...	...	
	7		0.370	0.267	0.722※	
10	1	C-2		0.469	1.000※	0.000
	2			0.422	1.000	
	3			0.419	1.000	
	4			0.463	1.000	
	5		...	...	...	
	6		0.430	0.326	0.758※	
11	1	K-1	...	0.495	...	0.086 (強度増加)
	2		0.538	0.505	0.939	
	3		0.555	0.627	1.130	
	4		0.570	0.732	1.284	
	5		0.574	0.693	1.207	
	6		0.573	0.596	1.040	
	7		0.576	0.528	0.917	
12	1	D-1	0.598	0.375	0.627※	0.133
	2		0.587	0.290	0.494	
	3			0.583	1.000	
	4		0.578	0.563	0.974	
	5			0.588	1.000	
	6			0.618	1.000※	

q_u^* : 基準とする q_u q_u : 要因を与えた q_u ※: 棄却値

にクラックに沿うすべり破壊による強度低下が著しい。

また、作業要因 B-3, C-1 は試料に与える変形量が、それぞれ E-3, A-1 と同じである。したがって、 q_u の低下率はそれらの結果を用いて、それぞれ (B-3)=0.14, (C-1)=0.00 とする。以上の結果をまとめて、攪乱要因

による q_u の低下率を表-4 に示した。

5. 圧密圧力および供試粘性土の違いが q_u に与える影響に関する検討

スラリー再圧密粘性土を対象とした室内実験では、圧密過程や圧密時間の相違から自然堆積した粘性土と微視的構造特性が異なり、 q_u の低下率を過少評価することが懸念された。また、室内実験や現地実験で用いた q_u の低下率という指標は、用いた粘性土や圧密圧力が異なるため、同じ尺度で統一的に解釈できないのではないかという危惧もある。本章ではこれらの点に関して実験的考察を行う。

5.1 実験方法

実験に用いた土試料は、4 の実験地の近傍から採取した沖積海成粘性土であり、 $840\mu\text{m}$ ふるいを用いて貝殻片などの粗粒分を除去した。 $G_s=2.669$, $w_L=70.2\%$, $w_p=26.5\%$ で日本統一土質分類によれば CH に分類される細粒土（粘土分 58%, シルト分 42%, 砂分 0%）である。以下この粘性土を A 粘性土と略記する。実験は小型土槽に対して 7 本の TWS を 1 本ずつ順番に押し込み、TWS 押し込みという同じ攪乱要因に対し、A 粘性土と 3 で用いた粘性土（以後、B 粘性土と略記）について、また、圧密圧力 1kgf/cm^2 と 3kgf/cm^2 の粘性土に対する乱れの程度を比較検討する。供試体作成方法およびサンプリング方法は、3.2 小型圧密土槽の場合と同様である。また、圧密時間は両者とも 30 日程度であり、圧密度はほぼ 100% である。

5.2 実験結果と考察

1) 一軸圧縮試験結果と考察

図-15 は、TWS-1 を基準にした q_u , E_{50} の相対比率と ε を A 粘性土の土槽下部供試体について示したものである。TWS 押し込みにより q_u と E_{50} の低下、また、 ε の増大する傾向が明瞭である。図-16 は、A 粘性土の圧密圧力 3kgf/cm^2 を縦軸にとり、A 粘性土の (同) 1kgf/cm^2 と B 粘性土の (同) 3kgf/cm^2 の q_u , E_{50} を TWS-1 を基準にした相対比率で比較している。図で明

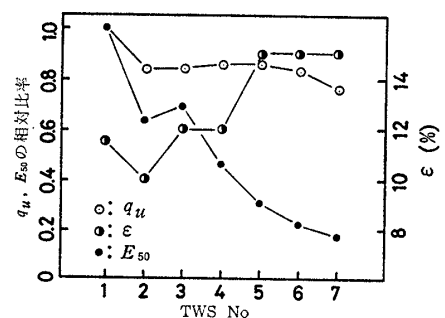
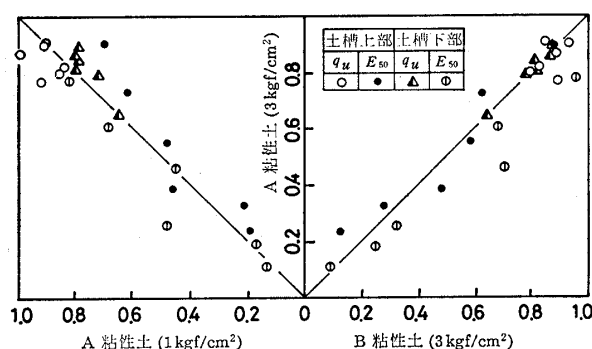


図-15 TWS 押し込みによる q_u , E_{50} , ε の変化 (A 粘性土 3kgf/cm^2) ($1\text{kgf/cm}^2=98\text{kPa}$)


図-16 圧密圧力と供試粘性土の q_u , E_{50} の相対比率の比較

らかなように q_u , E_{50} とともに圧密圧力や供試粘性土の差に関係なくほぼ 1 : 1 に対応しており, TWS 押込みという同じ要因に対する影響度に有意差はない。以上のことから, q_u の低下率という指標は本研究で用いた圧密圧力や粘性土の範囲内では, その差によらず統一的な解釈が可能である。なお, ここに示した圧密圧力や粘性土の範囲は, q_u を用いる設計問題の対象範囲である。更に, アンケート回答者に対する質問の設定も, 各種攪乱要因を与えた q_u が標準的作業による q_u からどの程度相対的に乖離するかというものであり, q_u の低下率と同義の質問型式であった⁹⁾ ことを付記する。

2) 鋭敏比と粒度組成, 活性度に関する検討

B 粘性土を用いた大型および小型圧密土槽実験では, スラリー再圧密試料を用いている。これらの実験では, ε が大きいことや鋭敏比 S_t が小さいことから, 圧密度がほぼ 100% であっても自然堆積した粘性土に比べて元々土の構造に“乱れ”があるのではないかと危惧があった。例えば B 粘性土は $S_t \approx 3$ であり, 一般に知られる沖積粘性土の $S_t \approx 10 \sim 20$ に比較して小さい。図-17, 18 は, それぞれ本研究に使用した供試粘性土の粒径加積曲線と塑性図である。両図より明らかであるが, 細粒分の含有量が多く粒径加積曲線が上に位置する粘性土ほど, 塑性図の A 線上の右上に位置している。また, 図-19 に, S_t と活性度 A_c の関係を示す。 S_t と A_c 間の正の関係を明らかにするために, 外浦港の自然堆積した沖積粘性土に対するデータ¹⁰⁾ もプロットしている。図-19 から, A, B の両粘性土は, 現地実験の粘性土の S_t あるいは A_c より小さな値を示すことがわかる。 S_t に土の化学的作用が大きく影響することは, クイックレイが攪乱を受けた場合の軟弱化などでよく知られている。また, 蒸留水を用いて混練し再圧密した試料 (A 粘性土) は, 綿毛構造と分散構造の中間的な構造モデルをとるのに対して, 海水中で堆積した粘性土 (現地実験の粘性土) は, より不安定な綿毛構造を形成することもよく知られている¹¹⁾。以上のことから, スラリー再圧密粘性土の S_t が小さいのは, 供試粘性土の微視的構造の乱

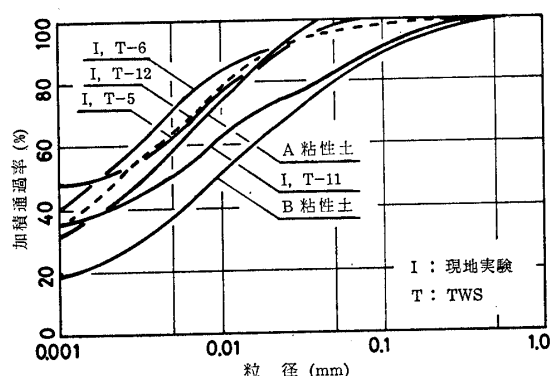


図-17 粒径加積曲線

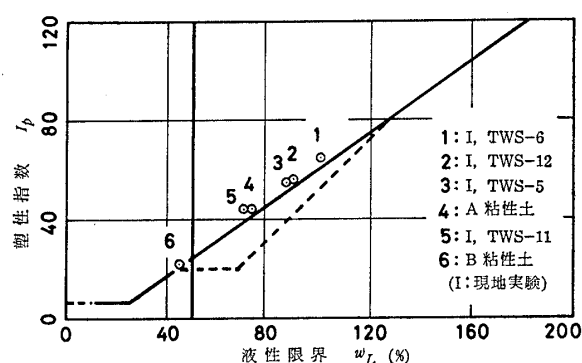


図-18 塑性図

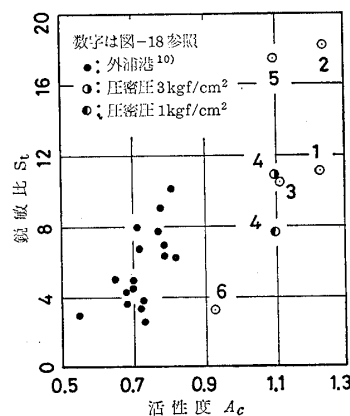
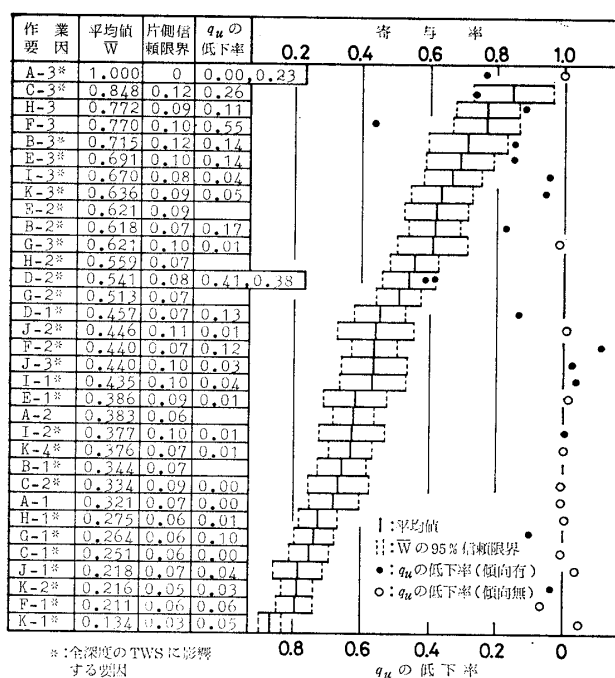


図-19 鋭敏比と活性度

れと考えるより, 図-17, 18 で示した粒度組成や指数性的性質の差 (特に A と B 粘性土) と微視的構造の基本モデル, あるいは化学成分の差 (特に A 粘性土と現地実験の粘性土) と考えるのがより自然である。

6. 各種要因の影響度と要因制御の考え方について

アンケート調査で取り上げた作業要因のうち, ①A-3, ②F-3, ③B-2, ④D-2, ⑤F-2, ⑥E-1, ⑦F-1 の q_u に与える影響度については実態調査に基づき既に報告した^{2), 5), 6)}。結果のみを簡単に再録すれば q_u の低下率は, それぞれ ①=0.23, ②=0.55, ③=0.17, ④=0.41,

図-20 寄与率と q_u の低下率

0.38, ⑤=0.12 (強度増加), ⑥=0.01 (強度増加), ⑦=0.06 であった。図-20 は、アンケートの分析結果である各作業要因の相対的な寄与率の平均値をその95%信頼区間と併せて、高いものから順に並べてある¹⁾。同時に、上述の実態調査および3, 4で述べた室内実験結果、現地実験結果より得られた28個の作業要因による q_u の低下率も併記した。この場合、 q_u の低下率が試験結果のばらつきの範囲であるのか、また明らかな傾向であるのかを区別するとともに、要因を与えることで強度増加する作業要因については、 q_u の低下率0の右側にプロットして、強度低下する作業要因と区別している。図-20を概括的に見ると、経験豊富な技術者の下す判断(寄与率)は、限られた環境下のデータではあるが室内実験や現地実験、また実態調査結果の傾向を満足するものと考えられる。ただし、作業要因D-2は一般に技術者が経験することの少ない作業要因であるため、アンケート回答者の過小評価が出ているものと推察される。

さて、図-20の寄与率の平均値を見ると、1.0から0.134まで連続的に分布し、各作業要因を影響度大、中、小などと離散的に区分することは困難である。このことは、寄与率平均値の差の有意差検定において、隣り合ういずれの作業要因に関しても95%の信頼度で有意差がないことによっても裏付けられる。したがって、意識調査結果としての寄与率を実務に反映させるためには、今後種々の工学的判断が必要である。すなわち、サンプリングや土質試験実施者に対し、すべての作業要因に関する詳細な規制をあらゆる場合に厳守するように要請することは実際には困難である。そのため、構造物の重要性

やプロジェクトの大小に応じ、設計代替案の決定を左右する作業要因の把握と作業規制の程度を明示し、図-20を参考にして、最低限守らなければならない作業規制を課すのが工学的であると考えている。しかしながら、3, 4の実験で得られた q_u の低下率は、アンケートで設定した作業内容を可能な限りシミュレートし、また要因間の相対的關係を十分配慮して実施した結果である。これらの一連の実験結果をもとに、現場技術者が特に注意を要する作業要因として、現時点で挙げられるものは次の作業要因である。

i) 各要因の q_u の低下率が試験結果のばらつきの範囲以上となり、明らかに一定の傾向が認められる作業要因。

ii) 深さ方向のすべてのTWSに影響する作業要因。換言すると、ボーリング深度全体に影響する作業要因であり、土質試験の整理段階でもその影響が発見されにくい作業要因。

iii) 上記i), ii)の要因の中で、 q_u の低下率が0.1以上の作業要因。

7. おわりに

本論文は、機械的・人為的な差のない q_u を得るための土質調査に関する研究の一環として行ったものである。本論文の大きな目的は、アンケート調査で取り上げた作業要因の q_u に対する影響度を室内および現地サンプリング実験から明らかにし、寄与率を定性的に照査することであった。しかし、室内再圧密試料の品質に関するいくつかの新しい知見も得られた。従来から、各種要因の強度・変形特性への影響度に関する優れた研究は多い。しかし、各要因の相対的關係を保持した系統立った研究はないようである。本論文で取り上げた実測例は限られた環境下のものではあるが、それでもなお、現時点において工学的に十分有用な情報になりうると同時に、今後普遍性のある方法論開発のための基礎的知見として重要と考えている。

本論文で得られた主要な結論を簡単に列記すると以下のようなものである。

1) サンプリングから室内試験に至る過程で q_u に影響する攪乱要因に着目し、室内および現地サンプリング実験により q_u の増減に対する影響度を定量的に明らかにした。

2) q_u の低下率という指標は、本研究で用いた供試粘性土や圧密圧力の範囲では、その差に関係なく統一的な尺度とみなしうる。

3) アンケート調査結果である寄与率の大小と、室内実験および現地サンプリング実験による q_u の低下率の大小の相対的順位に矛盾のないことを明らかにした。

最後に、実験やその整理の一部は、村上義典（(株)白石）、金聲漢（名古屋大学大学院）の両氏が、卒業研究の一環として協力されたものである。付記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松尾 稔・森杉壽芳・正垣孝晴（1985）：粘性土の一軸圧縮強度に影響する要因の寄与率分析，「土質工学会論文報告集」，Vol. 25, No.1, pp. 125～136.
- 2) 松尾 稔・正垣孝晴（1984）： q_u 値に影響する数種のかく乱要因の分析，「土質工学会論文報告集」，Vol. 24, No.3, pp. 139～150.
- 3) 土質工学会編（1964）：「土質試験法」，p. 349.
- 4) 正垣孝晴・金 聲漢・松尾 稔（1985）：試料の乾燥およびサンプルチューブの転倒が q_u に与える影響，「土木学会 第40回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ」，pp. 505～506.
- 5) 正垣孝晴・松尾 稔（1985）：粘性土の強度低下に与える外的要因と微視的構造特性への影響，「サンプリングシンポジウム論文集」，pp. 109～116.
- 6) 松尾 稔・正垣孝晴（1982）：土質調査実施者やその手順の差が試験結果に与える影響の統計的分析，「土質工学における確率・統計の応用に関するシンポジウム論文集」，pp. 5～12.
- 7) 日本港湾協会編（1983）：「港湾工事共通仕様書」，pp. 18～23.
- 8) 正垣孝晴・村上義典・松尾 稔（1985）：土質調査手順の差が一軸圧縮強度に与える影響，「土木学会 中部支部研究発表会講演概要集」，pp. 208～209.
- 9) 松尾 稔・正垣孝晴（1980）：粘性土地盤の土質調査に関するアンケート調査票，「名古屋大学工学部地盤工学教室設計学講座資料」，pp. 1～26.
- 10) 藤本 広（1962）：宮崎県外浦港海底滞積層粘土の指数的性質について，「土と基礎」，Vol. 10, No.5, pp. 12～16.
- 11) 山口柏樹（1984）：「土質力学（全改訂）」，技報堂出版，pp. 27～28.