

テーパー形状を有する貫入体の地盤抵抗特性

02A3733 中里 友春
02A3739 花田 真悟
02A3743 松田 俊作
指導教員 前田 良刀

1. はじめに

コーン貫入試験のコーン指数 q_c や摩擦強度 f_s に代表されるようにテーパー形状を有する貫入体により地盤抵抗の諸定数を求める原位置試験法が実務に用いられつつある。しかしながら、これらの試験法は試験時の力学的境界条件が不明確で試験から得られる地盤定数は曖昧である。このため、従来からの標準貫入試験 N 値を超えて実務に定着させるにはこのような試験法での基本的な地盤抵抗特性を把握する必要がある。

本研究では、小さなテーパー角度を有する貫入体を地盤中に押し込み、貫入体と地盤の境界面で滑りが発生するような状況下で室内载荷試験を行った。ここでは、試験から得られる地盤の抵抗特性に関して地盤の拘束圧と摩擦強度の関係から力学的特徴を考察する。

2. コーン貫入試験による地盤調査法と問題点

テーパー形状を有する貫入体を用いて原地盤の強度特性を調査する代表的なものにコーン貫入試験がある。図-1 は代表的なコーン形状を示したものであるがテーパー角は $\theta = 15^\circ \sim 45^\circ$ が用いられている。先端コーンの形状はコーン指数 q_c に大きく影響を与えることが知られており、これまでの経験では $\theta \geq 15^\circ$ のときほぼ同じコーン指数 q_c となるとみなされている。このことは、図-2 に示すようなコーン先端地盤の支持力破壊に伴う抵抗が先端支持力 q_c として評価されていることになる。

これまでのほとんどの研究では、このコーン指数 q_c をもとに図-2 に示すような破壊メカニズムが実際に生じると仮定して地盤の強度特性を評価している。¹⁾ すなわち、地盤支持力とみなせる q_c から支持力理論を援用して図-2 のような仮定するすべりを生じるための地盤強度 c 、 ϕ を逆算する方法である。

地盤のような摩擦性粒状体の支持力問題における破壊メカニズムは極めて複雑であり、①すべり面を観察することが困難、②境界面での釣合い応力条件が不明、などの問題から均質な金属塑性体を出発点としている現在の地盤支持力理論の適用性に限界のあること

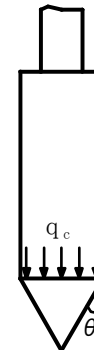


図-1 コーンの形状の一例（コーン貫入試験）

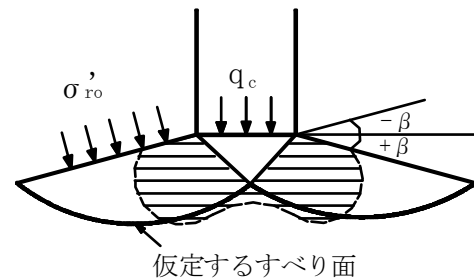


図-2 コーン貫入と仮定する破壊メカニズム¹⁾

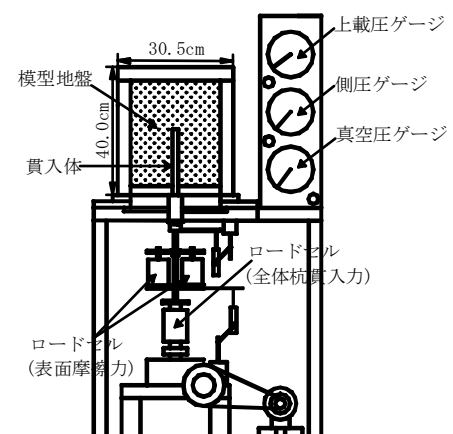
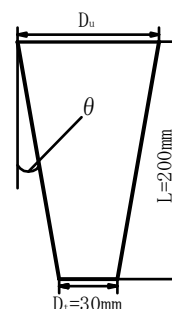


図-3 室内模型载荷試験装置模式図



θ	D_u
0°	30 mm
1.4°	39.8 mm
4.1°	58.5 mm

図-4 貫入体模式図

は既に定説となってきた。したがって、現行のような地盤調査法と強度評価法は力学的境界条件が不明確であるため得られる地盤特性はあくまでも経験的なものに留まることは明らかであり、標準貫入試験 N 値を用いて地盤強度を推定する方法と同じ範疇に入る。

3. 本研究の特徴と試験概要

3.1 本研究の目的

本研究では現在使用されているコーン形状のテーパー角 θ を極力小さくし、地盤破壊が先端地盤全領域におよぶ支持力問題ではなく貫入体と地盤の接触面でのみ破壊が生じる摩擦問題として評価できる可能性について検討する。地盤抵抗が摩擦問題として評価できれば貫入体と地盤の接触面での拘束圧を測定する技術を開発することにより原位置での地盤調査法の信頼性を向上させることが可能である。

3.2 試験装置と試験方法

(1) 試験装置

本研究で用いる試験装置は、図-3 に示すように直径 30.5cm、高さ 40cm の円筒型の模型地盤を側方で厚さ 1mm のメンブレンを用いて空気圧で拘束する模型地盤と貫入体の組合せからなる。装置の特徴は以下のとおりである。

①地盤の三軸圧縮試験の機構を取り入れ地盤の初期応力状態として鉛直応力 σ_v および水平応力 σ_h の組合せにより任意の応力状態が表現できるようになっている。本文では初期応力状態としての試料圧密時の応力の組合せを K_0 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v$) として表現している。

②貫入体の外管と载荷軸部を分離した 2 重管構造とすることにより、周面抵抗と先端抵抗をそれぞれ分離して測定できるのが特徴である。試験に用いる鋼製の貫入体は、図-4 に示すように、先端部は直径 $D_t = 30\text{mm}$ で一定とし長さ $L = 200\text{mm}$ 、の間でテーパー角度 $\theta = 0, 1.4, 4.1^\circ$) により円錐形の大きさを変化させている。また貫入体の粗さは、 $R_{\max} = 150\mu\text{m}$ であり十分に粗いため境界面では地盤の摩擦角と同程度のせん断抵抗が期待できる。²⁾

③貫入体への载荷が下方から上方へ行われる構造となっているため予めセットされた貫入体を含むセル中に地盤試料を敷設して行うことから貫入体の偏心や地盤の乱れを防ぐことができ均質な試験地盤の作成が可能である。

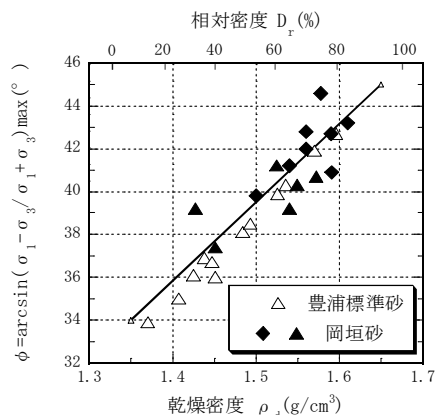


図-5 内部摩擦角 ϕ と乾燥密度 ρ_d の関係

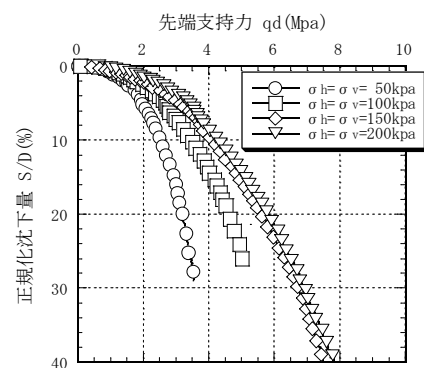


図-6(a) 先端支持力の発現特性 ($\theta = 0^\circ$ 、 $k_0 = 1.0$)

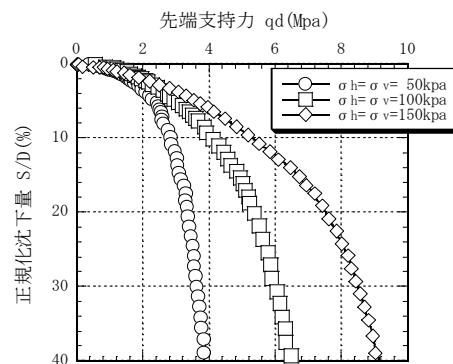


図-6(b) 先端支持力の発現特性 ($\theta = 1.4^\circ$ 、 $k_0 = 1.0$)

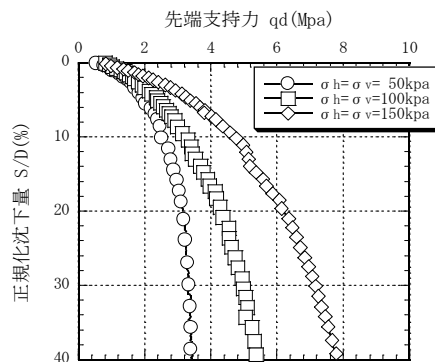


図-6(c) 先端支持力の発現特性 ($\theta = 4.1^\circ$ 、 $k_0 = 1.0$)

④模型地盤として砂から粘土まで殆どの地盤が試験可能であるが、今回は当研究室で長年実績のある芦屋産の岡垣砂を用いた。岡垣砂の乾燥単位体積重量 γ_d と内部摩擦角 ϕ の関係は図-5 のようである。試験地盤の作成には空気乾燥した試料を使用し多重ふるいをを用いた空中落下法で地盤の相対密度を調整した。今回の試験では、ふるいの網目は 4mm の 5 重, 落下高さは $H=70\text{cm}$ とし相対密度 $Dr \approx 60\%$, 内部摩擦角 $\phi \approx 40^\circ$ の地盤を想定している。

また、貫入体への载荷は変位制御方式(貫入 0.1% /min)で行いほぼ摩擦強度のピークが測定される変位量よりも大きいところまで貫入させた。

(2) 試験手順

貫入体の载荷試験手順は以下のようである。

- ①下部ペダスタルにろ紙をセットしメンブレンを取り付ける。
- ②モールドを装着しメンブレンを密着させる。
- ③供試体作成時に試料が周囲にこぼれないようモールド上部に受け皿をセットする。
- ④予め試料の必要重量を測っておき地盤重量の損失がないよう注意しながら多重ふるいをを用いて極力均質な地盤を作成する。
- ⑤作成した供試体の上にもろ紙および上部ペダスタルをセットし供試体に約 20kPa の負圧をかけ供試体を自立させモールドを外す。
- ⑥上部载荷フレームと加圧セルをセットする。
- ⑦側圧を供試体の負圧と入替え、その後所定の地盤応力(初期圧密応力)となるよう鉛直応力 σ_v および水平応力 σ_h を段階的に加圧する。
- ⑧所定の応力状態で地盤の安定を確認した後载荷を開始する。
- ⑨貫入量は摩擦強度のピークが測定された時点より十分大きいところまで貫入させ载荷を終了する。
- ⑩供試体をセットした方法と逆の手順で片付ける。

4. 試験結果とその考察

4.1 先端支持力の発現特性

図-6(a) (b) (c)に等方圧密試料($K_0=\sigma_h/\sigma_v=1.0$)での先端支持力の発現特性を示す。一般に先端支持力の発現は先端地盤の強度と変形特性の影響を大きく受けるため明確な極限抵抗値が生じることは少ない。本試験結果においても貫入体の沈下に伴い先端支持力は順次増大するものの極限支持力を特定する結果は得られ

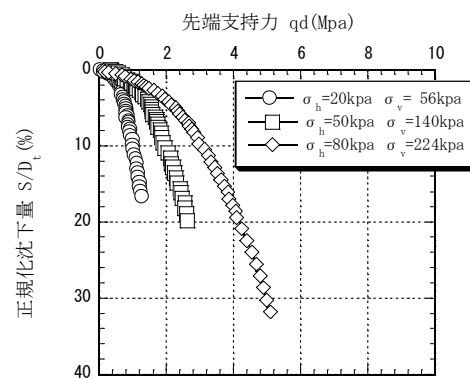


図-7(a) 先端支持力の発現特性 ($\theta=0^\circ$, $k_0=0.3$)

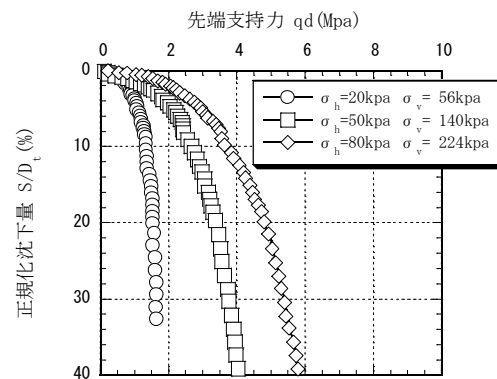


図-7(b) 先端支持力の発現特性 ($\theta=1.4^\circ$, $k_0=0.3$)

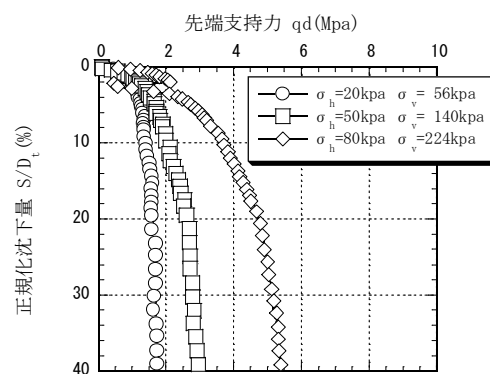


図-7(c) 先端支持力の発現特性 ($\theta=4.1^\circ$, $k_0=0.3$)

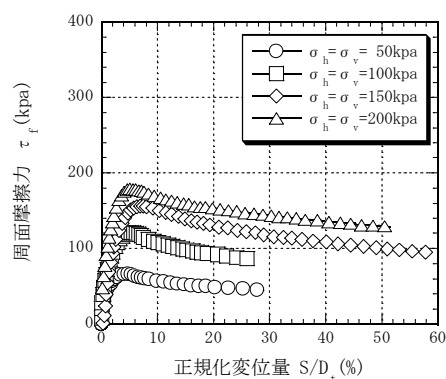


図-8(a) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta=0^\circ$, $k_0=1.0$)

ていない。一般に杭の先端支持力評価において実務的には正規化沈下量 $S/D=10\%$ 付近の抵抗力を先端支持力とすることが多いが、図-6(a) (b) (c) の結果を比較するとテーパー角 θ の有無は先端抵抗力に影響を及ぼしていないことが分かる。

また、図-7(a) (b) (c) は異方圧密試料 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$) での载荷試験結果である。異方圧密時の試験値は等方圧密試料に比較してテーパー角の無い $\theta = 0^\circ$ の場合先端支持力が小さくなっているものの、試験誤差と考えられるため、この場合も全体的な傾向としてはテーパー角 θ により先端支持力は影響を受けないと考えてよい。

4.2 周面摩擦力の発現特性

(1) 等方圧密試料 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$)

図-8(a) にテーパー角 $\theta = 0^\circ$ で等方圧密条件下での貫入体の変位による正規化変位量と周面摩擦力関係を示す。ダイレイタンシーの効果によりいずれの拘束圧下でもピーク強度が発現した後次第に摩擦強度が低下していくことが分かる。図-8 (b) はこの条件下での拘束圧と周面摩擦力ピーク値をプロットしたものである。図中には、岡垣砂の室内三軸圧縮試験から得られた内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ ($Dr \approx 60\%$) を併せて図示しているが、貫入体と地盤の周面摩擦力の粗さ角は地盤の内部摩擦角とほぼ同じであることが分かる。このことから貫入体の表面を十分粗にすることにより地盤の内部摩擦角 ϕ と同程度の粗さ角を測定できることが分かる。

図-9(a) および図-10(a) はテーパー角 $\theta = 1.4^\circ$, $\theta = 4.1^\circ$ と変化させた場合での周面摩擦力の発現特性である。テーパーのない $\theta = 0^\circ$ の場合に比べて周面摩擦力が増大することが分かる。また、テーパー角 θ の増大により地盤のダイレイタンシー後の強度低下が緩和されている。図-9(b), 図-10(b) は試験時の初期拘束圧と周面摩擦力の関係をそれぞれ示したものである。 $\theta = 1.4^\circ$, $\theta = 4.1^\circ$ とともに測定値の包絡線はほぼ直線で、かつ勾配はテーパーの無い $\theta = 0^\circ$ よりも大きくなっている。さらに、テーパー角が $\theta = 1.4^\circ$, $\theta = 4.1^\circ$ と大きくなるにつれ測定値の包絡線の勾配は大きくなる。これから次のことが分かる。

①破壊が貫入体と地盤の境界面で生じる。(支持力破壊の場合破壊包絡線の勾配は直線とは限らない)

②テーパー角 θ の幾何学的効果により接触面での拘束圧が増大する。

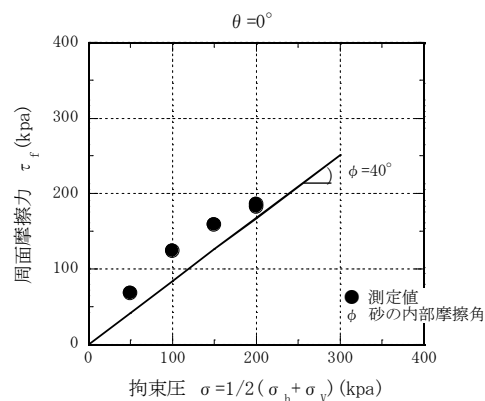


図-8(b) 拘束圧と周面摩擦力の関係 ($\theta = 0^\circ$, $k_0 = 1.0$)

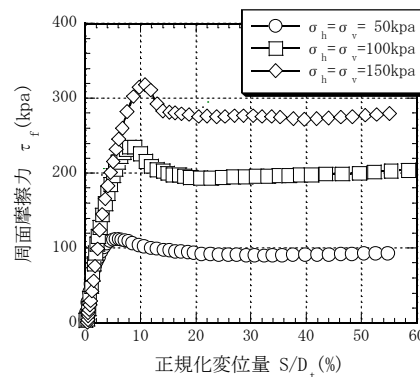


図-9(a) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta = 1.4^\circ$, $k_0 = 1.0$)

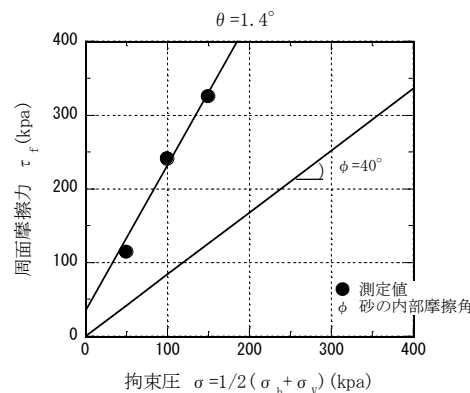


図-9(b) 拘束圧と周面摩擦力の関係 ($\theta = 1.4^\circ$, $k_0 = 1.0$)

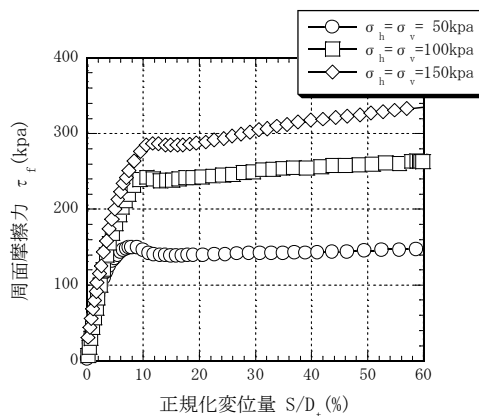


図-10(a) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta = 4.1^\circ$, $k_0 = 1.0$)

(2) 異方圧密試料 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v = 0.3$)

図-11(a) (b) (c)は異方圧密試料の $K_0 = 0.3$ における周面摩擦力の発現特性を示している。等方圧密の $K_0 = 1.0$ とほぼ同様にテーパ角 $\theta = 1.4^\circ$, $\theta = 4.1^\circ$ と変化させた場合テーパのない $\theta = 0^\circ$ の場合に比べて周面摩擦力が增大することが分かる。

また、テーパ角 θ の増大により地盤のダイレイタンス後の強度低下が緩和されていることも等方圧密試料と同じ結果となる。なお、初期拘束圧と周面摩擦力の関係もほぼ $K_0 = 1.0$ と同じ結果が得られているがこれに関しては次節5で考察する。

5. テーパーの存在による拘束圧増加に対する幾何学的効果

今回の試験では小さなテーパ角 θ の存在により周面摩擦力の増加が見られた。同じ摩擦角 ϕ を有する地盤材料のでは周面摩擦力が増加する為にはすべり面での拘束圧 σ が増加する必要がある。ここでは、その幾何学的効果を検討する。

図-12(a)は周面摩擦力 τ_f と垂直応力 σ の関係を貫入体の地盤支持力問題として考えたときの応力関係の模式図である。試験から得られる周面抵抗の鉛直軸方向応力成分を τ_v 、テーパに沿う摩擦成分を τ_f ($\tau_f = \tau_v \cdot \cos \theta$) とすると貫入体表面に作用する垂直応力 σ は、図-12(a)を参考にして次のように求めることができる。

地盤抵抗の合応力 r とテーパに沿う接触面での摩擦成分の τ_f の関係は、

$$r \cdot \cos(\pi/2 - \theta - \phi) = \tau_f / \cos \theta$$

一方、合応力 r と拘束圧としての垂直応力 σ の関係は、

$$r \cdot \cos \phi = \sigma$$

これら二つの釣合い条件から次式が得られる。

$$\sigma = \tau_f \cdot \cos \phi / \{ \cos \theta \cdot \cos(\pi/2 - \theta - \phi) \} \quad \dots (1)$$

ただし式 (1) の場合、地盤抵抗合応力 r は接触面での周面摩擦力のみならず地盤内の受働抵抗も考えているので接触面での τ_f と合力の τ_{fr} 成分の大きさは一致する必要はない。

図-12(b)は地盤抵抗力の全てが貫入体と地盤の接触面で発揮されたと考えたときの応力関係の模式図である。このとき、合応力 r は全て摩擦抵抗のみで発現されるので、 τ_f と τ_{fr} は一致しなければならないことから貫入体表面に作用する垂直応力 σ は式 (2) で求められる。

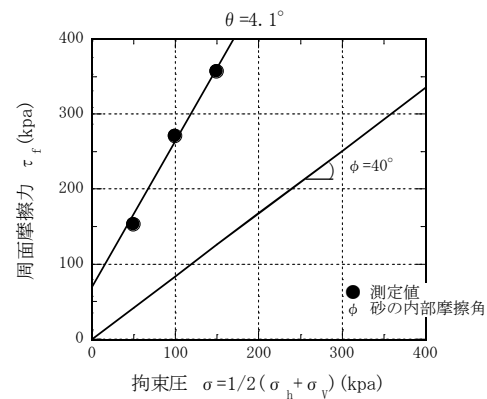


図-10(b) 拘束圧と周面摩擦力の関係 ($\theta = 4.1^\circ$, $k_0 = 1.0$)

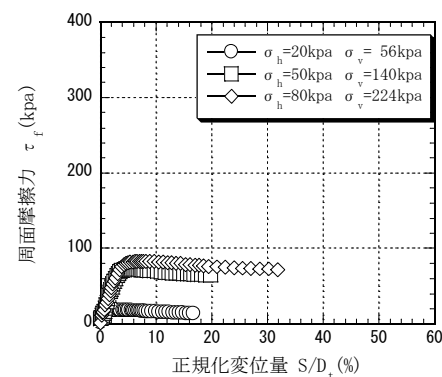


図-11(a) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta = 0^\circ$, $k_0 = 0.3$)

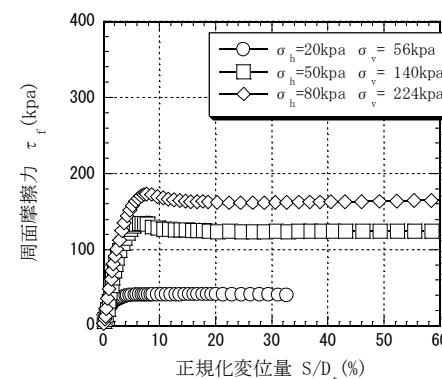


図-11(b) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta = 1.4^\circ$, $k_0 = 0.3$)

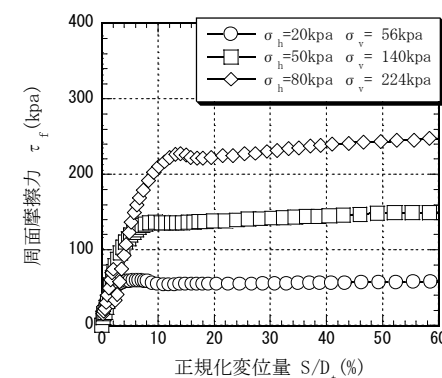


図-11(c) 周面摩擦力の発現特性 ($\theta = 4.1^\circ$, $k_0 = 0.3$)

$$\sigma = \tau_f \cdot \cot \phi \quad \dots \dots (2)$$

図-13(a) (b)は等方圧密試料 $K_0=1.0$ ，異方圧密試料 $K_0=0.3$ に関して，測定された周面摩擦力 τ_f と初期拘束圧の関係（塗り潰し部記号）に対して，式（1）（2）によるテーパーの存在による拘束圧増加に対する計算上の幾何学的効果（白抜き部記号）を併せて示したものである。

ここで，拘束圧は平均値として， $\sigma_m = (\sigma_h + \sigma_v)/2$ で評価している。多少のばらつきはあるものの，移動後（白抜き部）の各点を結ぶ線も $\theta = 0^\circ$ の場合の破壊包絡線とほぼ同様の勾配となっている。これから，接触面での周面摩擦力は地盤の内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ が十分に発揮されていることが分かる。なお，式（1）の地盤抵抗を支持力問題と考えた場合の計算結果はやや大きめの拘束圧与えるが，式（2）の単純な摩擦問題と考えた場合には計算値は内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ のせん断抵抗力と良く対応している。このことから，今回の試験では破壊面が貫入体と地盤の接触面で生じていると考えてよい。したがって今回の試験のようにかなり小さなテーパーでも拘束圧を効果的に増大させ得ることが分かる。このことから，もし今後実際の拘束圧を測定する技術が開発されるならば小さなテーパーを有する貫入体を地盤に挿入して明確な力学条件の下で原位置の地盤抵抗を測定できる可能性がある。これから得られる地盤強度特性はテーパー角 θ の大きい現在のコーン貫入試験に比較して信頼性が向上していることは明らかである。

6. まとめ

本研究での成果を要約すると以下のようなものである。

- ① 貫入体の表面を十分に粗にすることにより地盤の内部摩擦角 ϕ を測定できることが分かった。
- ② 小さな角度のテーパー形状を有する貫入体においては破壊面が抵抗体と地盤の接触面で生じるため力学的な条件が明確となる。
- ③ テーパー形状の幾何学的効果により境界面での拘束圧を効果的に増加させることができるため，将来の測定技術の開発により，より合理的な原位置地盤調査法へと発展する可能性がある。

参考文献

- 1) 例えば，地盤工学会：地盤調査法 1995. 7
- 2) H. Kishida, M. Uesugi: Test of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus, Geotechnique 37, 1987

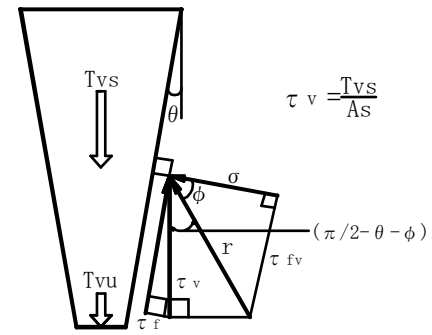


図-12(a) 周面摩擦力 τ_f と垂直応力 σ の関係模式図
(支持力問題)

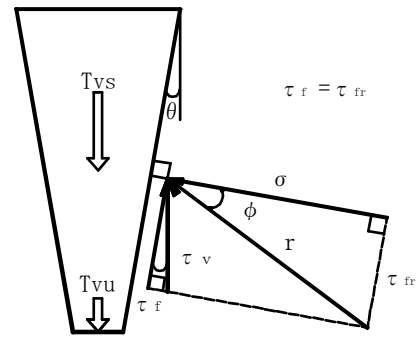


図-12(b) 周面摩擦力 τ_f と垂直応力 σ の関係模式図
(摩擦問題)

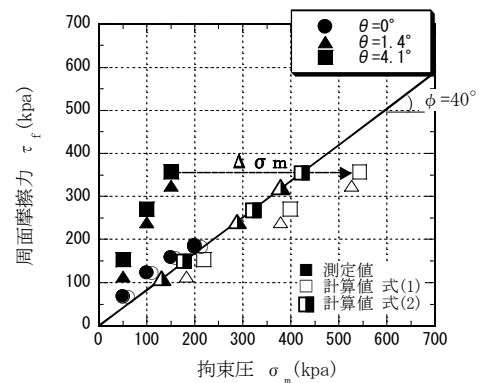


図-13(a) テーパーの存在による拘束圧増加の検討
($k_0=1.0$)

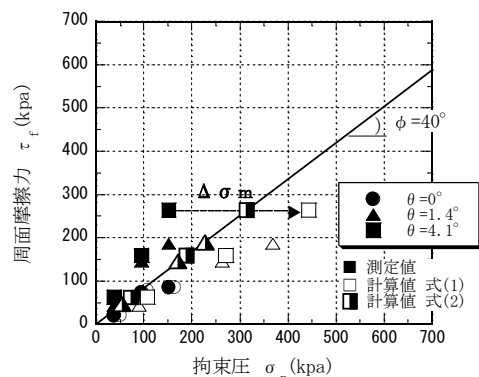


図-13(b) テーパーの存在による拘束圧増加の検討
($k_0=0.3$)