

摩擦と水平応力の同時測定コーンの開発

Development of a Friction and Lateral Stress Measurement Cone

武 居 幸次郎

要 約

杭の周面摩擦挙動を詳細に把握するためには、杭周面に作用する摩擦と有効水平応力の同時測定が重要であるが、実際の杭では有効水平応力の測定は困難である。そこで、これらの測定を簡易に行う試験器として、摩擦と水平応力の同時測定コーン (FLC) を開発した。FLCは、模型杭としての利用のほか、地盤調査用コーンとしての利用も想定して設計されている。本報告は、FLCの構造と特性及びFLCを用いた原位置試験結果についてまとめたものである。原位置試験を通じて、FLCを用いることにより、様々な因子が摩擦に及ぼす影響、摩擦と変位の関係、土と構造体の境界面の有効応力経路など、杭と土の間の摩擦特性を考察する上で有益な情報を原位置で得られることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. FLCの構造と特性
- III. 原位置試験
- IV. まとめ

I. はじめに

杭の周面摩擦挙動を詳細に把握するためには、杭周面に作用する摩擦と有効水平応力の同時測定が重要であるが、実際の杭では有効水平応力の測定が困難なため、各種のセンサーを組み込んだ模型杭を用いた研究が進められている¹⁻⁴⁾。模型杭としては、数成分のセンサーを組み込んだ地盤調査用コーンと同程度のものから、10成分以上のセンサーを組み込んだ比較的大型のものまである。一般に、模型杭の寸法を大きくすると高精度なセンサーを多数組み込むため高度な測定が可能になるが、載荷荷重が増加し実験が大掛かりになるといった問題が発生する。杭の設計の合理化のためには、この方面のデータの蓄積が大切であるが、そのためには簡易に高精度の測定ができる試験器の開発が重要である。そこで、小型で比較的簡易に高精度の測定ができる試験器として、摩擦と水平応力の同時測定コーン (FLC: Friction and Lateral Stress Measurement Cone) を開発した。摩擦と水平応力の同時測定は一般的な地盤特性の評価にも役立つと考えられるため、FLCは模型杭としての利用のほか、地盤調査用コーンとしての利用も想定して設計されている。本報告は、FLCの構造と特性及び東京の沖積低地で実施したFLCを用いた原位置試験結果についてまとめたものである。

II. FLCの構造と特性

1. FLCの構造

Fig. 1に開発した FLC の構造を示す。FLCは地盤調査用コーンをベースにして設計されている。FLCの、直径、摩擦スリーブの長さ

及び先端コーンの形状は標準仕様の三成分コーンと同一である。

FLCには、スリーブ摩擦計1個、水平応力計2個、間隙水圧計2個、傾斜計2個を組み込み、摩擦スリーブに作用する摩擦応力 (f_s)、摩擦スリーブの直下と直上に作用する全水平応力 (σ_{L1} , σ_{L2}) と間隙水圧 (u_1 , u_2) 及び貫入中の傾斜を測定できるようにしている。摩擦スリーブに作用する有効水平応力は直接測定することはできないが、摩擦スリーブの直下と直上に作用する有効水平応力 ($\sigma'_{L1} = \sigma_{L1} - u_1$, $\sigma'_{L2} = \sigma_{L2} - u_2$) から推定することができる。有効水平応力の測定方法は、先行して開発した水平応力コーン⁵⁾と同じである。FLCに用いた水平応力計、間隙水圧計及び傾斜計は、何れも水平応力コーンに用いたものと同じ型式のものである。スリーブ摩擦測定部は、

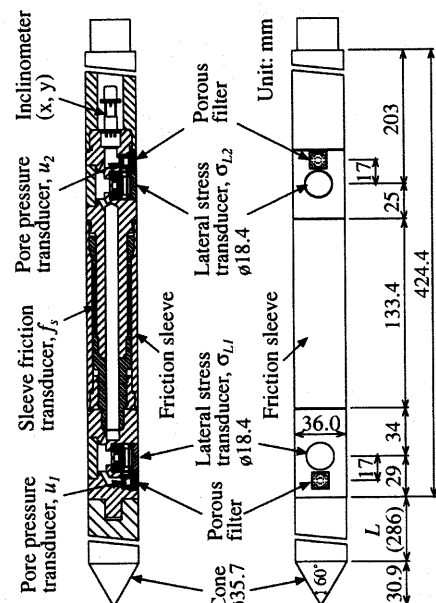


Fig. 1 Structure of FLC

キーワード：杭，摩擦，原位置試験，貫入試験，試験装置，模型実験，有効応力，静止土圧，せん断強さ

摩擦スリーブを荷重計にねじで固定した構造としており、押し引き2方向の測定が可能である。FLCは分割可能な複数のモジュールで構成されており、摩擦スリーブは現場で容易に交換可能である。コーンの軸部に作用する摩擦や水平応力はコーン先端からの距離に依存するため、コーン先端と各センサーの距離は先端部の長さ L を調整することにより変化できるようにしている。

2. FLCの特性

原位置試験の実施に先立って、FLCの基本特性を確認するために、室内で次のような校正試験を実施した。

- 圧力校正試験：重錘式圧力標準器で油圧を加え、水平応力計と間隙水圧計の出力特性を測定した。
- 荷重校正試験：専用治具で摩擦スリーブの外周部を掴み、押し引き2方向の荷重を加えて摩擦測定用荷重計の出力特性を測定した。
- 零点の温度影響確認試験：水槽にFLCを入れ、水温を変化させて各センサーの零点の変化を測定した。
- 軸力の影響確認試験：アムスラー型圧縮試験器でFLCに軸力を加え、各センサーの零点の変化を測定した。
- 周面摩擦の影響確認試験：水平応力計の受圧板に周面摩擦に相当する荷重を加え、水平応力計の零点の変化を測定した。

Table 1にa～c項の試験の結果を示す。FLCに組込んだ各センサーは、何れもこれらの試験で良好な特性を示すことが確認されている。d、e項の試験からは、コーンに作用する軸力と周面摩擦は、対象外のセンサーの測定値には殆ど影響を及ぼさないことが確認されている。

Ⅲ. 原位置試験

1. 試験概要

東京湾沿岸の沖積低地の試験サイトで、FLCを用いた原位置試験を実施した。この試験サイトでは、これまでに各種の方法で地盤調査が実施されている⁵⁾。Fig. 2に試験サイトの土層構成と三成分コーン貫入試験(CPT)の結果を示す。試験サイトでは、深度8～41mの範囲に沖積層が厚く堆積しており、沖積層の上部は不均質な砂質土層(A_s 層)、下部は均質な粘土層(A_c 層)となっている。

FLCでは、先端部の長さや摩擦スリーブの表面粗さを適宜変えることができる。今回の試験では、先端部の長さは $L=286\text{mm}$ とし、摩擦スリーブは円周方向に溝加工を施し表面を粗くしたものを用いた。Fig. 3に、用いた摩擦スリーブの表面粗さ測定結果を示す。三成分コーンの摩擦スリーブの表面は、最大高さ R_{max} ⁶⁾が $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度と滑らかであるが、今回用いた摩擦スリーブの表面は、 R_{max} が 0.5mm と極めて粗いものとなっている。

試験は下記の3ステップの測定を順次繰返す方式で行った。

- 連続貫入測定(変位速度 $R=20\text{mm/s}$)
- 貫入停止測定(各測定値が平衡値に達するまで測定)
- 低速載荷測定(変位速度 $R=0.05\text{mm/s}$)

FLCを模型杭と考えると、aステップは杭の設置、bステップは杭設置後の養生、cステップは鉛直載荷試験に相当している。FLCを地盤調査用コーンと考えると、aステップは標準的な貫入測定、bステップは貫入停止後の間隙水圧消散測定に相当している。

b及びcステップの測定は、 A_s 層では1深度、 A_c 層では3深度で

行った。貫入停止測定は、 A_s 層では約1時間、 A_c 層では約18時間行った。

Fig. 4にcステップの測定で採用したFLCの変位の測定方法を示す。通常のコーン貫入試験では、地上のロッドの動きからコーンの深度を求めるが、この方法では測定値にロッドの歪みの影響が含まれるため、コーンの細かな動きを正確に求めるのは困難である。cステップの測定ではこの影響を考慮し、ロッドの内部を通したワイヤーの動きからFLCの変位を求める方法を採用した。

2. 連続貫入測定結果

Fig. 5にFLCの連続貫入測定結果を示す。この結果をFig. 2のCPTの結果と比較すると次のような現象が確認できる。

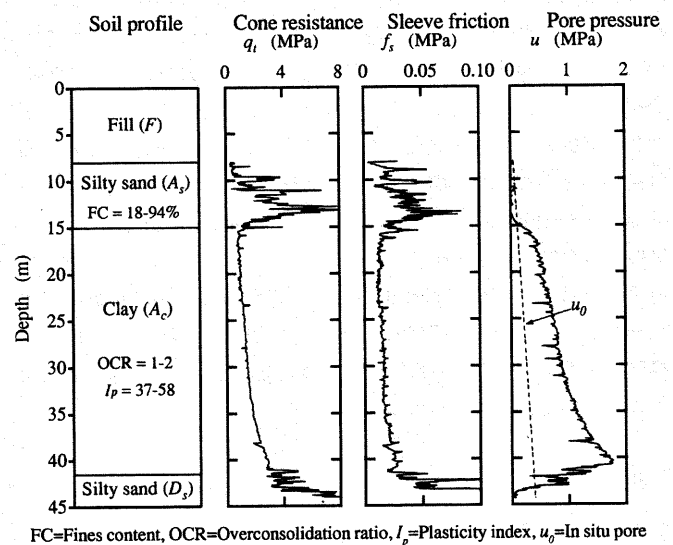
- FLCのスリーブ摩擦 f_s はCPTのスリーブ摩擦 f_s より大きい。特に A_s 層で顕著。
 - A_c 層ではFLCの間隙水圧 u_1, u_2 はCPTの間隙水圧 u より小さい。
- a項の主な原因としては、FLCとCPTの摩擦スリーブの表面粗さの相違が考えられる。b項の原因としては、FLCとCPTの間隙水圧測定位置の相違が考えられる。CPTでは先端コーン直上部で間隙水圧 u を測定しているが、FLCでは先端コーンから30cm以上離れた位置で間隙水圧 u_1, u_2 を測定している。

Fig. 5において、摩擦スリーブの直下と直上で測定した値を比較すると次のような現象が確認できる。

Table 1 Calibration Results

	Rated load (MPa)	Nonlinearity & hysteresis (%RO)	Temperature effect (%RO/°C)
Lateral stress σ_{Li}, σ_{Ll}	3	0.6	0.05
Pore pressure u_1, u_2	3	0.2	0.02
Sleeve friction f_s	1	0.9	0.03

%RO: Percentage of rated output



FC=Fines content, OCR=Overconsolidation ratio, I_p =Plasticity index, u_0 =In situ pore

Fig. 2 Soil Profile and CPT Results at Research Site

- a. 全水平応力, 間隙水圧: A_c 層では $\sigma_{L1} > \sigma_{L2}$, $u_1 > u_2$
 b. 有効水平応力: A_s 層では $\sigma'_{L1} > \sigma'_{L2}$, A_c 層では $\sigma'_{L1} \approx \sigma'_{L2}$
 A_s 層で $\sigma'_{L1} > \sigma'_{L2}$ となるのは, 今回の試験では表面が粗い摩擦スリーブを用いたため, 摩擦スリーブの直下と直上のコーン近傍の土粒子配列に変化が生じたためと考えられる。

3. 停止測定結果

Fig. 6 に A_c 層における貫入停止後の FLC の各測定値の変化を示す。FLC に作用する有効水平応力は, 貫入停止後増加し平衡値に至っている。貫入停止後, ロッド頭部の押込み力は解放しているため, スリーブ摩擦の平衡値は 0 付近に落ち着いている。

Fig. 7 に FLC に作用する有効水平応力を原位置の有効水平応力の推定値と比較して示す。FLC の測定値としては, 連続貫入時の値 (σ'_{L1} , σ'_{L2}) と貫入停止後の平衡値 (σ'_{L1e} , σ'_{L2e}) を併せて示している。 A_c 層では, 貫入停止後の平衡値は連続貫入時の値の約 2, 3 倍になっている。原位置の有効水平応力 σ'_{h0} は, セルフボーリングプレッシャーメータ試験 (SBP) と K_0 圧密試験 (K_0 -OED) で推定している。 A_c 層ではこの 2 つの試験による σ'_{h0} の推定値はやや異なっているが, σ'_{h0} の真の値はこれらの間にあると考えられる。 A_c 層では, FLC の連続貫入時の有効水平応力は σ'_{h0} より少し小さな値となっているが, 貫入停止後の平衡値は σ'_{h0} より大きな値となっている。

4. 低速載荷測定結果

Fig. 8 に 4 深度で実施した低速載荷測定におけるスリーブ摩擦 f_s と FLC の変位 d の関係をまとめて示す。 f_s は $d=1.5 \sim 2.5$ mm でピーク値に達し, その後やや低下して残留値に至る傾向が見られる。 f_s の残留値はピーク値の 82~97% となっている。

Fig. 9 に連続貫入時と低速載荷時のスリーブ摩擦 f_s を一軸圧縮試験 (UCT) で求めた非排水せん断強度 c_u と比較して示す。低速載荷時の f_s はピーク値を示している。 A_s 層では, 連続貫入時と低速載荷時の f_s はほぼ一致しており, 試験条件の相違の影響は見られない。一方 A_c 層では, 低速載荷時の f_s は連続貫入時の値に比べて大きく, c_u に近似した値となっている。一般に A_c 層のような沖積粘性土では

杭の極限周面摩擦力度 τ が c_u に近似することから, FLC の低速載荷時の f_s は実際の杭の極限周面摩擦力度 τ に近似した値になっていると考えられる。低速載荷時の f_s が連続貫入時の値より大きくなる原因としては, 低速載荷時に FLC 作用する有効水平応力の方が連続貫入時に作用する有効水平応力より大きいためと考えられる。

Fig. 10 に A_c 層の 3 深度で実施した低速載荷測定における摩擦スリーブに作用する有効応力の経路を示す。摩擦スリーブに作用する有効水平応力 σ'_L は σ'_{L1} と σ'_{L2} を補間して求めている。○印は載荷開始時の値を示し, ●印は f_s がピークに達した時の値を示している。載荷開始時の値は貫入停止後の平衡値に相当する値である。何れの方法の試験においても, FLC が動きだすと σ'_L は初め低下し, f_s がピークに達する付近で少し回復する傾向を示している。ピーク

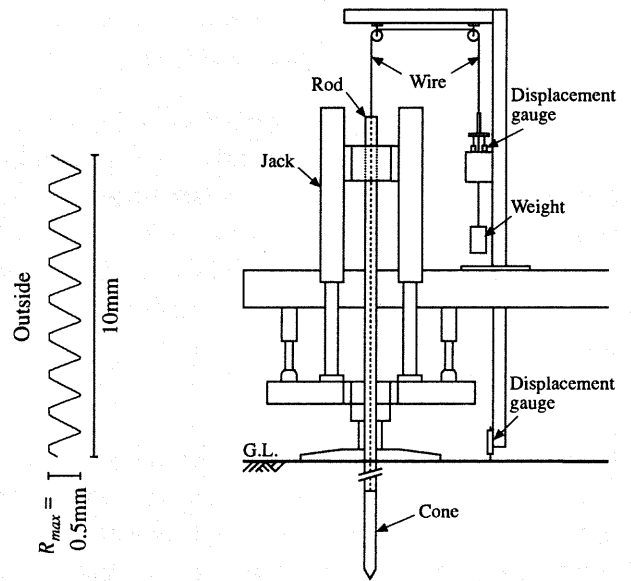


Fig. 3 Surface Profile of Friction Sleeve

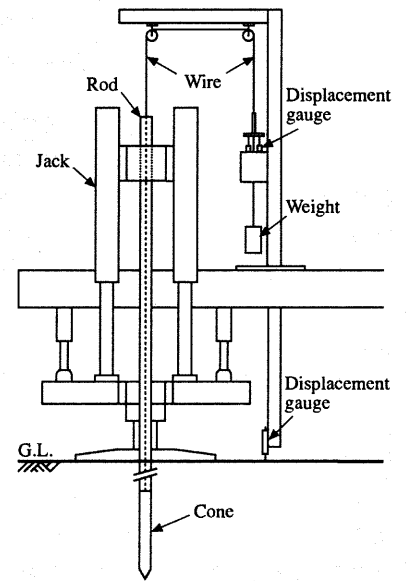


Fig. 4 Measurement Method of Cone Displacement during Slow Loading

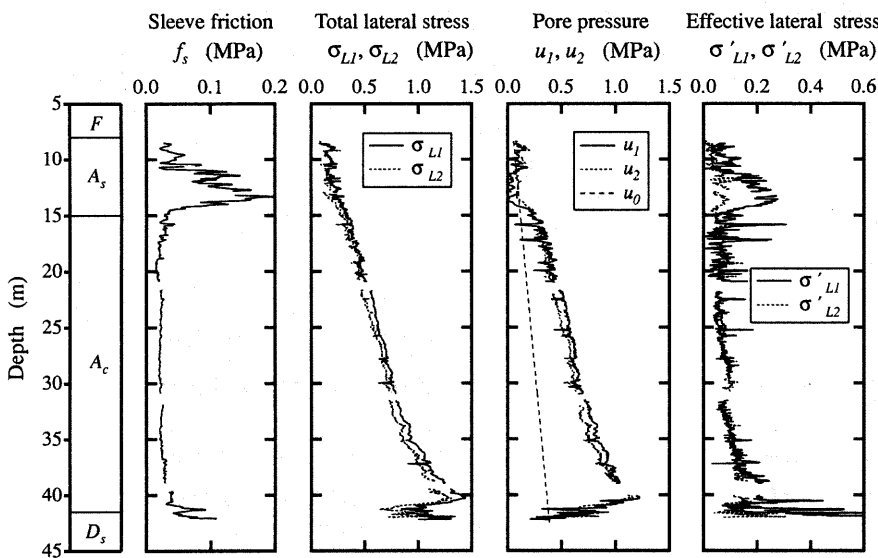


Fig. 5 FLC Measurements during Continuous Penetration

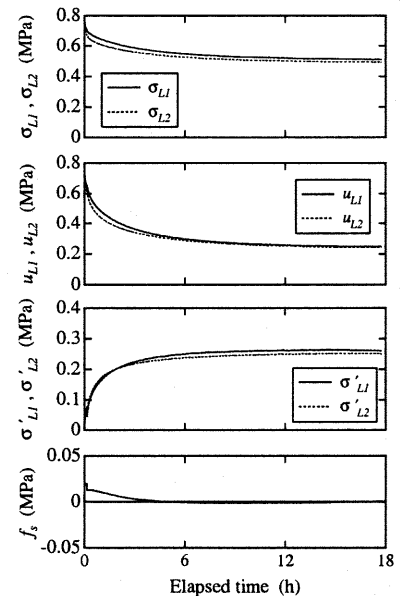


Fig. 6 FLC Measurements during Equalization Period (A_c -layer, Depth 31m)

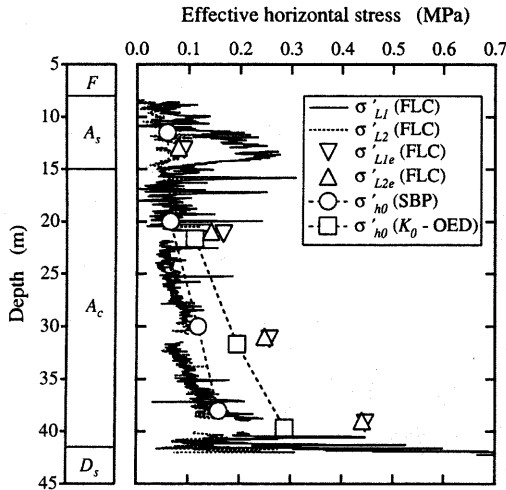


Fig. 7 Effective Lateral Stresses Acting on FLC and In Situ Effective Horizontal Stress

時の摩擦スリーブと土の間の境界面摩擦角 $\delta = \tan^{-1}(f_s / \sigma'_{L1})$ は、何れの方法の試験においても $25^\circ \sim 30^\circ$ 範囲にあり、圧密非排水三軸試験で求めた A_c 層の有効応力に関する内部摩擦角 $\phi' = 24^\circ \sim 33^\circ$ と概ね一致している。 $\delta \approx \phi'$ となった理由としては、今回の試験では表面が粗い摩擦スリーブを用いたため、摩擦スリーブの表面近傍の土粒子間で滑りが生じ、土のせん断特性が δ に十分反映されたためと考えられる。

IV. まとめ

本報告では、新しく開発した FLC の特徴と FLC を用いた原位置試験結果を示した。FLC を用いることにより、様々な因子が摩擦に及ぼす影響、摩擦と変位の関係、土と構造体の境界面の有効応力経路など、杭と土の間の摩擦特性を考察する上で有益な情報を原位置で比較的容易に得られることが分かった。東京の沖積低地で行った原位置試験では、次のような挙動を把握することができた。

- 表面が粗い摩擦スリーブを用いた FLC の摩擦は、滑らかな摩擦スリーブを用いた CPT の摩擦より大きくなる。
- 粘土層では、FLC に作用する有効水平応力は貫入停止後増加する。この現象に対応して、低速載荷時の摩擦は連続貫入時の値より大きくなり土の非排水せん断強度に近似した値となる。
- 粘土層における低速載荷時の有効応力経路は、何れの載荷方向においても同様の傾向を示す。有効水平応力は載荷開始後初めは低下し、摩擦がピークに達する付近で少し回復する。
- 低速載荷時の表面が粗い摩擦スリーブと粘土の間の境界面摩擦角は、有効応力に関する土の内部摩擦角とほぼ等しくなる。

参考文献

- 1) 上杉守道, 岸田英明, 日下部治; 四成分コーンの原位置摩擦試験への応用, 土と基礎, Vol. 37, No. 7, (1989), pp. 23-28.
- 2) Bond, A. J., Jardine, R. J., & Dalton, J. C. P.; Design and performance of the Imperial College instrumented pile, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 4., (1991), pp. 413-424.
- 3) Lehan, B. M. & Jardine, R. J.; Displacement-pile behaviour in a soft marine clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, (1994), pp. 181-187.

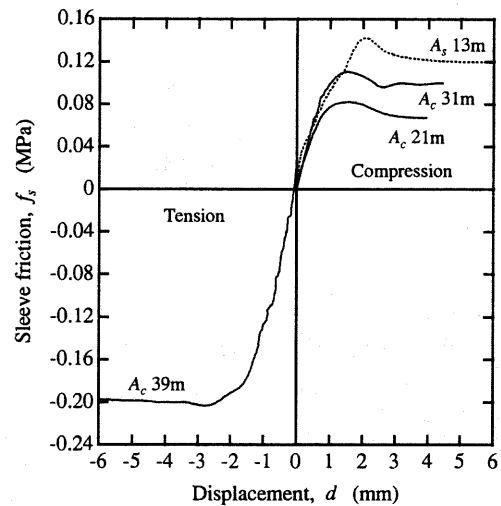


Fig. 8 Variations of sleeve friction with displacement during Slow Loading

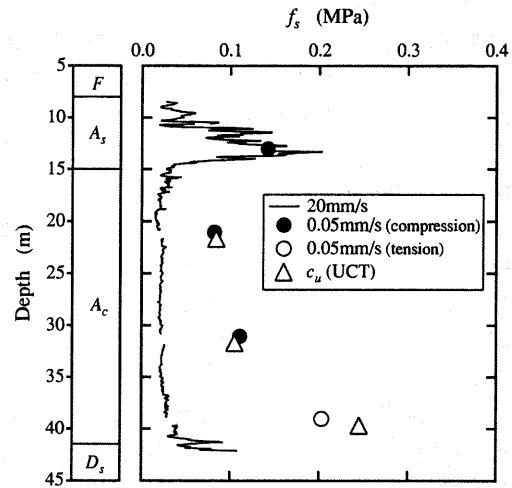


Fig. 9 Sleeve Friction and Undrained Shear Strength

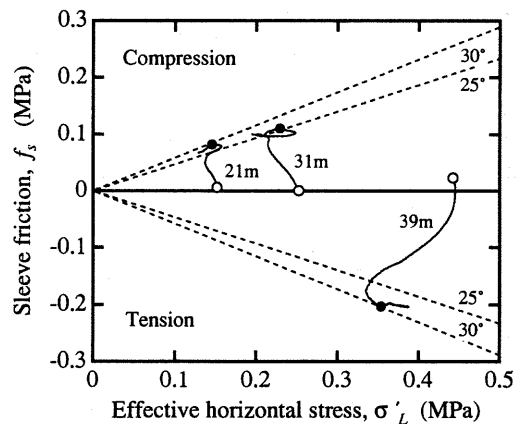


Fig. 10 Effective Stress Paths during Slow Loading

- 4) 田中実, 桑原文夫; 四成分センサーを使用した模型杭の鉛直載荷試験, 第30回土質工学研究発表会講演集, (1995), pp. 1365-1368.
- 5) 武居幸次郎, 伊佐野建; 水平応力コーンの開発と応用, 鹿島技術研究所年報, Vol. 48, (2000), pp. 61-66.
- 6) 日本規格協会; JIS B 0601-1982, 1982.