

# コーン貫入による砂地盤の変形機構

小林 泰三<sup>1</sup>・深川 良一<sup>2</sup>・小林 俊一<sup>3</sup>・柿田 隆弘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 立命館大学 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

コーン貫入試験 (CPT) 結果と地盤定数をより合理的に関連づけるための基礎的研究として、砂地盤を対象に X 線透視装置を用いた可視化手法によってコーンペネトロメータ周辺地盤の変形機構の解明を試みた。また、コーン周辺地盤の粒子破碎状況を定量的に評価するための実験も別途実施した。その結果、コーン貫入時の土粒子の変位経路図や変形場のひずみ分布、破碎の分布などを定量的に示すことができた。また、コーン貫入機構は砂の詰まり方や境界条件による影響を著しく受けるが、比較的先端角が鈍い場合にはコーン先端形状の相違による影響はほとんど見られなくなることが分かった。

**Key Words** : cone penetration test, X-ray radiography, sand, strain analysis, particle breakage

## 1. まえがき

コーン貫入試験 (CPT) は、地中の地層区分ならびに土質判別、地盤定数の推定、あるいは土構造物の直接的な設計パラメータの算定など、広範な適用性を有する地盤調査法である<sup>1)</sup>。また、経済性、信頼性に優れ、今日では地盤調査法として国際的に定着した技術となっている。元来、CPT は標準貫入試験で得られる  $N$  値と同様、インデックス試験としての利用が考えられてきた。ところが近年の研究でコーンの貫入機構が解明されるにつれて、また計測技術の進歩や測定機能の付与も相まって、単なるインデックスではなく測定値に物理的な意味を与え、それを評価・解釈するという利用が考えられるようになった。このとき、CPT 測定値は、基本的に土要素としての応答を示すものではなく、地盤とコーンによる固有の境界値問題としての応答を直接反映するものであることに留意する必要がある。したがって測定されたデータを土質定数や設計パラメータに変換する際には、実測値の物理的な意味が適確に理解されていることが重要となる。また、より汎用性の高い利用を期待するには CPT と地盤の相互関係を合理的に結びつけることが不可欠であるが、貫入機構の理解が十分でない部分も多く、問題の複雑さゆえに測定値と地盤の諸パラメータの関連づけを経験則で補っていることが多いのが現状である。そこで本研究では、コーンペネトロメータの貫入による地

盤の変形機構を明らかにすることを目的とした模型実験を行った。

## 2. 既往の研究および本実験の意義

コーン貫入による周辺地盤の変形機構を理論的に明らかにすることは、CPT データと地盤の相互関係を合理的に関連づける上で有効であると考えられる。そのため、従来から数多くの貫入理論解析が研究・報告されてきた。しかしながら理論解析の妥当性に対する検証は、模擬土槽やサイトで計測された実測値との比較・検討を行っているに過ぎない場合が多く、実際の変形挙動の実現象を実験的に明らかにしている研究は極めて少ないのが現状である。実験的な研究としてキャリブレーションチャンパー試験が多く実施されているが、これは経験的なデータを蓄積するためのものであり、貫入過程における地盤の変形機構を調べることを直接の目的としたものではない。

コーンの貫入による周辺地盤の変形挙動を直接観察した研究例<sup>2), 3), 4), 5)</sup>がいくつか見られるが、楔形状あるいは半割コーンをガラスのような透明板からなる土槽壁面に押し当てながら貫入するという可視化方法を採用していることが多い。この手法では壁面と土の間の摩擦や三次元軸対称条件の実現性の問題が残るだけでなく、また、上載圧を負荷していな

い模型土槽への貫入実験がそのほとんどであるため、コーンが深く貫入した場合のような高拘束条件下での貫入特性を必ずしも十分説明し得るものとは言えない。また、これまでのコーン貫入可視化実験は地盤の破壊モデルの視覚的な裏付けを目的としている場合が多く、定量的な評価を行っている研究例は稀である。

また、CPT はもともと容易に貫入できる粘土地盤を対象として開発が進められてきたこともあって、砂質系の固い地盤への適用性は低いとされてきた。現在では高い貫入能力を有する CPT システムが開発され、その適用範囲の拡大が促されるようになってきた<sup>9)</sup>。砂質土は粘性土と異なり、粒状体ゆえの変形特性を有しており、それらを加味した CPT 結果の解釈法の確立は今後の大きな課題といえる。特に従来から杭端における土の粒子破碎<sup>7), 8), 9)</sup>が問題とされていることに鑑みると、コーンの貫入時においても先端部は非常に高圧となるため、一般的に破碎性地盤と呼ばれる材料だけでなく堅固で細かい土粒子からなる地盤においても粒子破碎が生じる可能性がある。周知のように土の粒子破碎はせん断特性をはじめとして力学的・工学的性質に著しい影響を及ぼすため、破碎現象が生じているような場合の CPT 実測値の解釈は極めて難しい問題となるだろう。これは破碎が生じると従前の土質とは異なってしまうため、破碎後あるいは破碎中の応答をそのまま地盤情報として直接採用することができるかどうかという問題が懸念されるからである。粒子破碎の及ぼす力学的な影響については要素レベルを中心とした基礎的な研究<sup>10)</sup>が積み重ねられてきているが、それらの成果が CPT の実問題へと合理的に還元されるためには、変形機構に及ぼす破碎の影響についての検討も重要になってくるだろう。

本研究ではこれらの背景を受け、粘性土に比べて適用性の低いと言われている砂地盤を対象に、上載圧を負荷することのできる室内模型実験を行い、X 線透視装置を用いた可視化手法によってコーン先端の周辺地盤に発生するひずみ分布の定量的評価を試みた。また、レーザー回折/散乱式粒度分析装置を用いてコーン先端周辺地盤の粒子破碎状況を検討するための実験も別途実施し、両実験を通して、先端形状、砂の詰まり方、土被り圧などの貫入機構に及ぼす影響を実験的な立場から明らかにした。

インデックス試験であるという元来の性格上、データの蓄積が重要視され依然として経験則に頼る部分の多い CPT に対して、本研究で得られた成果は、地盤条件や先端角などの相違による影響を体系的に説明するとともに、これまでに数多く提案されてき

た理論的アプローチの妥当性を検討するため、あるいはさらなる合理化のための糸口としていくつかの知見を与えるものとして位置付けたい。

### 3. X 線による可視化手法の原理とその応用

X 線が物質を透過する際、その物質の密度と透過厚さによって X 線の透過エネルギーが減衰する。この原理を利用すると、供試体を透過する X 線の強度を測定することによって供試体の密度の差異(変化)を調べることができる。また、粒状体のような材料においては、密度の高い鉛玉などを埋設し、その動きを標点として X 線で可視化することができる。このような X 線による土質実験技術は一般に X 線ラジオグラフィ法と呼ばれ、これまでにも多く用いられてきた可視化の一手法である。ただし、鉛玉を埋設して可視化を試みる場合には、鉛標点と土の動きの一体性や標点座標の読み取り精度についての検討が重要となる。ケンブリッジ大学の Roscoe<sup>11)</sup>は、本手法を用いた実験において、変形量の比較的小さい問題では、土と鉛標点の動きが十分に同一視できることを示している。また、大石<sup>12)</sup>は、剛な平刃による水平切削時の周辺土の大変形問題において、直径 2.0 mm の鉛標点と土の挙動の一体性を実験的に確認している。本実験では彼らより小さい直径 1.5 mm の鉛玉を用い、それらの挙動が土の動きを代表するものとして可視化を試みた。また、本実験では市販のデジタイジングソフトを用い、鉛標点の座標をコンピュータのモニター上で読み取った。なお、鉛標点 1 点に対して複数回の読み取りを行ったところ、読み取り値のばらつきは最大でも  $\pm 0.1$  mm 以内であった。この読み取り誤差がひずみの計算結果に及ぼす影響は、垂直ひずみで最大  $\pm 2.0$  %、せん断ひずみで最大  $\pm 3.3$  % である。さらに、読み取り精度を向上し、誤差の及ぼす影響を軽減するために複数回の読み取り値の平均値を用いてデータ整理を行った。

### 4. 装置と実験方法

#### (1) 実験装置

本研究では以下で詳しく述べるように、目的の異なる 2 種類の実験を行った。以下では各実験を区別するため、X 線による可視化実験を実験-1、粒子破碎状況を把握するための実験を実験-2 とする。

#### a) コーン貫入装置

実験に用いた貫入装置の概略を図-1 に示した。実

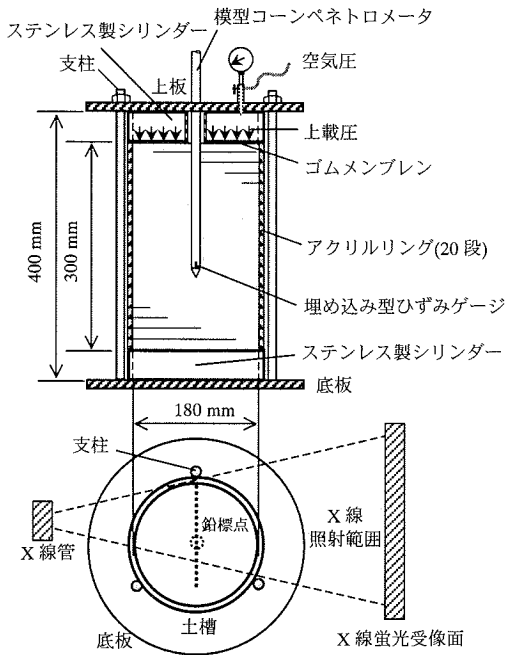


図-1 貫入実験装置の概略図

験-1 に用いた土槽チャンパーは、砂中に鉛標点を等間隔に配置するために、高さ 15 mm、直径（内径）180 mm のリング（厚さ 10 mm）を 20 段重ね合わせ、上板と底板に取り付けられたステンレス製のシリンダー（各高さ 50 mm）と連結させることによって合計高さ 400 mm となるように作られている。ただし、上板のシリンダー部（高さ 50 mm）は空気圧を負荷するため空洞となっており、砂層の実質高さは 350 mm である。チャンパーリングの材質は X 線の透過性を考慮してアクリル製のものを用いた。また、土槽の直径については、使用する X 線発生装置の透過能力を事前に調べ、その限界を考慮して内径を 180 mm とした。積み上げられる各リングの両端面には凹凸が施され上下を連結し、さらに 3 本のステンレス製支柱によってリングを上板と底板で挟み込んでチャンパーの安定性を確保した。また、土被り圧を模擬するために地表面に敷いたゴムメンブレンを介して空気圧を負荷できる仕組みとなっている。

実験-2 では土槽チャンパーとして、高さ 300 mm、直径（内径）180 mm の二つ割りシリンダーを用いた。材質は実験-1 と同一のアクリル製のものを用いた。また、貫入時において二つ割りの境界の分離を防ぐため、複数個の金属製バンドを巻いてシリンダーを固定した。

ペネトロメータの先端形状は、先端角が 30° と 60° のものと先端をフラットとする場合の合計 3 種

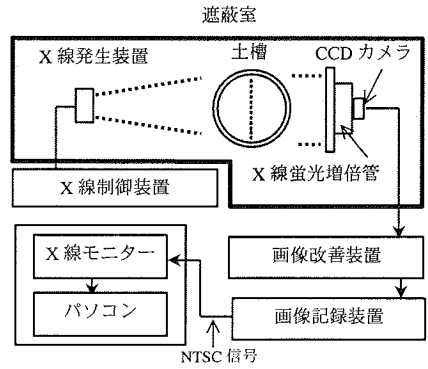


図-2 X線透視システムの概略図

類とした。ただし、限られたチャンパー径に対してサイズ効果を少しでも軽減させるため、基準化されているコーン（底面積 10 cm<sup>2</sup>）<sup>13)</sup> に比べて小型のものを用いることにした。これらのコーン底面の直径は、いずれの場合も 16 mm（底面積約 2.0 cm<sup>2</sup>）であり、コーン部の高さは約 30 mm（30° コーン）と約 14 mm（60° コーン）である。また、ロッド部は、コーン底面と同じ直径 16 mm の円柱シャフトとした。このコーン径は、岸田ら<sup>14)</sup>の行った杭の模型試験において、砂の最大粒径と杭径の比が 10 以上であれば支持力に影響を及ぼさないという報告を満足するものである。材質はステンレス製とし、コーン底面中央付近にひずみゲージ（ボルトゲージ、東京測器研究所製、BTM シリーズ）を埋め込んで先端部のみに作用する抵抗力を計測できるようにした。また、コーンロッドの端部には可変速式リニアドモーターのラック端が連結されており、コーンシャフトの上下運動を可能にしている。ラックストロークは 400 mm である。さらに、同時に変位計（東京測器研究所製、SDP-D タイプ）を取り付けて貫入量の同時計測を可能としている。

#### b) 土質試料

本実験（実験-1 および 2）には洗浄後、気乾燥状態とした豊浦砂を用いた。使用した豊浦砂の物理特性は、土粒子密度  $\rho_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$ 、最大および最小の間隙比は  $e_{max} = 0.95$ 、 $e_{min} = 0.58$  である。また 60, 50, 30, 10 % 粒径はそれぞれ 0.29, 0.27, 0.24, 0.21 mm であり、均等係数は  $U_c = 1.38$ 、曲率係数は  $U'_c = 0.95$  である。

#### c) X線透視システム（実験-1）

実験に用いた X 線透視システムは X 線 TV と呼ばれ、動的な現象をリアルタイムで捉えることのできる特徴を有している。図-2 は X 線透視装置の概略を示している。試験に供される土槽は、X 線発生装置（高電圧ジェネレータおよび X 管（フィリップス

社製, MG165 型)) と X 線検出装置 (X 線蛍光増倍管 (東芝製, E5764HV-P1K) および CCD カメラ (東芝製, E5764VCY-3K)) の間に設置される。

土槽を通過した X 線は, X 線蛍光増倍管によって映し出される蛍光像として CCD カメラで撮影され, NTSC 信号としてモニタリングされる。得られた原画像は, リアルタイムで画像処理装置 (日本アビオニクス製, Image  $\Sigma$ -V) に入力され, SN 比 (信号電力と雑音電力の比) の向上や, コントラストの調整などによって画像の改善処理が図られる。さらに視覚的な改善処理が必要な場合, 市販のフィルターソフトを用いてコントラスト処理を事後的に行った。本実験システムの詳細については文献<sup>15)</sup>を参照されたい。

#### d) 粒度分布測定装置 (実験-2)

実験-2 では, 粒子破碎の程度を調べるために, レーザー回折式粒度分布測定装置 (島津製作所製, SALD-3000) を用いてコーン先端周辺地盤における貫入前後の粒度分布を調べた。この試験装置では, サンプラ部に少量の土粒子を直接投入することによって粒度分布や任意の加積百分率に相当する粒径など様々なデータを自動的かつ迅速に求めることができる。このため本実験のように粒度試験を数多く実施するような場合には従来の JIS 法 (土の粒度試験法<sup>16)</sup>, JIS A 1204 : 2000) に比べて極めて効率的に実験を遂行することができる。なお, この測定装置の試験原理は一般にレーザー回折/発散法<sup>16)</sup>と呼ばれ, 水中に分散させた土粒子にレーザー光を照射し, その回折/散乱光の光強度分布パターンを理論的に解析することによって粒径を求めるものである。土への適用性に関しては, 古河と藤田<sup>17)</sup>などの研究があり, 従来の JIS 法に近い結果を与えることが報告されている。

## (2) 実験の条件と方法

### a) 実験条件

実験-1 における貫入実験は, 表-1 に示した条件で合計 6 ケース行った。表中に付されたテストナンバーに従って, Test No.1-1~1-3 は 60° コーンを用い, 密詰め地盤 ( $D_r = 77 \sim 88 \%$ ) に対して負荷する空気圧を変化させた場合の貫入を行った。Test No. 1-3~1-5 では先端形状の異なるベネトロメータによる貫入を行い, さらに砂の詰まり方による影響を調べるために, 比較的緩い状態の地盤 ( $D_r = 30 \%$ ) への 60° コーンの貫入 (Test No. 1-6) も行った。

実験-2 については, 粒子破碎の発生が予想される密詰め状態かつ高圧 ( $p_v = 50, 100 \text{ kPa}$ ) 負荷条件下のケースのみの貫入を行った。地盤の相対密度に若

表-1 実験条件

実験	Test No.	ベネトロメータの先端形状	$D_r$ (%)	$p_v$ (kPa)
実験-1	1-1	60°cone	80	0
	1-2	60°cone	77	50
	1-3	60°cone	88	100
	1-4	30°cone	86	100
	1-5	Flat-ended	73	100
	1-6	60°cone	30	100
実験-2	2-2	60°cone	90	50
	2-3	60°cone	90	100
	2-4	30°cone	90	100
	2-5	Flat-ended	90	100

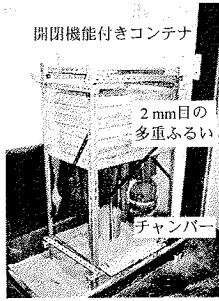
干の差異は見られるものの, 表中の Test No. 2-2~2-5 は, 実験-1 の 1-2~1-5 に対応した実験条件となっている。

負荷する上載圧の伝播に関して, 実験に用いたチャンバーの構造上, サイロ作用<sup>18)</sup>による鉛直土圧の低減が予想される。このとき, 半無限地盤のような理想的な応力状態を完全には再現していないことになるが, 低減された鉛直土圧の分布状況は計算によって予想することができる (付録参照)。計算の結果, 付録に示したように, 本論文で変形場の観察対象とした貫入深さにおいては, 上載荷重  $p_v = 50 \text{ kPa}$  の場合に約 35~40 kPa,  $p_v = 100 \text{ kPa}$  の場合で約 60~75 kPa までの応力低下が想定されることになる。したがって, 実際には, Test No.1-1 ( $p_v = 0 \text{ kPa}$ ) のケースを除いて上載荷重より小さい土被り圧状態への貫入となるが, 実際に作用している鉛直応力は, 付録の計算結果を参照することでおおよそ把握することができるものと考えた。ただし, この計算結果はあくまでコーンの貫入前の初期応力状態を示しているに過ぎないことに注意する必要がある。

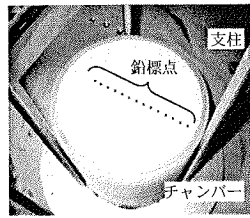
### b) 模型地盤の作製方法

密に詰まった砂地盤を作製するために, Test No. 1-1~1-5 および Test No. 2-2~2-5 では多重ふるいによる空中落下法を応用した装置を作製した (写真-1(a)参照)。多重ふるいは 2 mm 目の網 (約 460×800 mm) を約 55 mm 間隔に 7 段重ねることによって構成されている。また開閉機能を有する穴あきのコンテナをふるいの上方に設置して砂をまんべんなく降らすことができるようにした。コンテナの底に施された穴は直径 4 mm (20 mm 間隔) である。また, 多重ふるいの最下段より土槽の底面までの距離は約 700 mm である。

砂がチャンバー内に堆積していくと落下高さが変化することになるが, この変化の地盤密度に及ぼす影響を把握するために次のような予備的な実験を行った。



(a) 多重ふるい装置



(b) 鉛標点の設置

写真-1 密詰め模型地盤の作製の様子

予備実験では、チャンバーの代わりに薄肉のモールド（高さ 60.0 mm、内径 66.8 mm）を高さの異なる位置に設置して砂を落下させ、モールドの余盛り分を除去したときの試料質量を計測することによって落下高さとの関係を得た。なお、落下高さは模型実験時のチャンバーの底面と上端面の高さを含む合計 4 段階に設定し、各段階ごとに 10 以上のデータを得た。結果は、同一の落下高さにおける相対密度が最大で 10 % 程度のばらつきを呈するケースがあったのに対し、それぞれの段階での平均値の落下高さに対する変動は最大でも高々 3 % であった。また、落下高さの変化に対する明瞭な傾向は見られなかったため、本研究ではこの影響を無視し得るものとした。

実験-1 では鉛標点を埋設するために、次のような作業を行った。チャンバーを構成するアクリルリング一段ごとに砂の落下を中断し、均した表層面に土槽中心軸を通る直線に沿って 10 mm の一定間隔で鉛標点を一列に配置する（写真-1(b)参照）。砂の落下と鉛玉配置の一連の作業をリングごとに積み重ねていくことで、チャンバーの中心を通る鉛直断面上に鉛標点を等間隔に配置した。ただし、X 線の照射範囲から大きく離れる場所については鉛標点を配置していない場合がある。また、チャンバーの中段付近において、鉛標点の配置に加え、鉄粉を薄く撒いた層を一段設けた。これは、面的に撒布された鉄粉層を X 線で可視化することによって、離散的に配置された鉛標点間の土の挙動をより詳しく調べるための試みである。

また、実験-1 における緩い地盤への貫入実験（Test No. 1-6）では、図-3 に示した手順にしたがってモデル地盤を作製した。まず、チャンバーの内径に合わせて作製された円形の網（約 1 mm 目）をアクリルリング底面に設置し、続いて網の上へ砂試料をハンドスコップで静かに注ぎ込む。その後、ふるい落ちて堆積する砂と網の間に空間ができない程度の一定

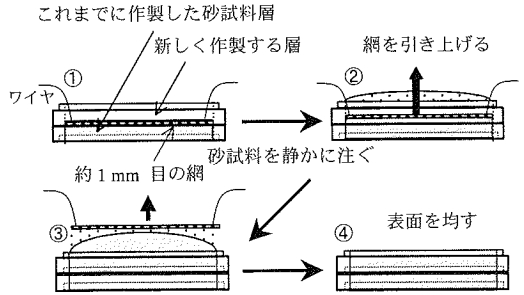


図-3 緩詰め地盤の作製方法

速度で網を引き上げることによって比較的緩い状態の砂地盤を作製した。なお、この手法はふるい引き上げ法<sup>19)</sup>をヒントにしたものである。また、鉛玉の設置方法は空中落下法による密詰め地盤作製時の方法と同様である。

上述の方法で作製された各地盤の相対密度は表-1 に示したとおりである。

### c) 実験方法

地盤作製（実験-1 では鉛標点の配置を含む）の完了したモデル地盤を貫入装置にセットし、所定の空気圧を負荷してからコーンの貫入を開始する。貫入時には先端抵抗力と貫入量を同時に測定する。

本実験に使用した X 線 TV システムは、貫入過程をリアルタイムで観察しながら実験を制御することができる。ただし、鉛標点の座標をできるだけ精度よく正確に捉えるため、画像処理上、より鮮明な処理画像の得られる静止画を撮影することにした。コーンの貫入速度は約 2 mm/s とし、コーンの先端が地表面からある程度貫入した時点をもって X 線の撮影を開始し、その時点からの貫入量  $z$  がコーン底面半径  $R$  の 0, 2, 4, 6, 8 倍となる時点ごとに一時的に貫入を停止して X 線撮影を行った。なお、X 線撮影開始点は、コーン先端が地表面から 90~100 mm 貫入した時点に設定した。これは、地盤の上・下端面の影響が及びにくいと予想されるチャンバー中央付近を観察対象区間とするためである。ただし Test No. 1-1 については土被りの浅い場合の貫入機構を調べるため、コーン先端が地表面の位置にあるときを X 線撮影の開始点とした。

実験-2 では、コーン先端の貫入深さが  $D =$  約 150mm（実験-1 の貫入量  $z/R = 8$  に相当する）に達した時点で貫入を停止し、破碎状況を調べるために次のような手順で試料の採取を行った。貫入終了後、チャンバーを水平方向に寝かし、二つ割りシリンダーの片方を静かに外す。さらにチャンバーの中心断面が露出するように砂をトリミングした後、霧吹き

を用いて表層に水分を与え、土粒子の自立性を確保する。試料は、中空の角柱パイプ(内寸 $10 \times 10$  mm, 肉厚 $0.28$  mm)を地表断面に $5$  mm程度挿入し、静かに引き抜くことで簡単にサンプリングすることができた。採取区域については実験結果のところで明示する。

## 5. 実験結果と考察

### (1) 先端抵抗

図-4は、実験-1および実験-2における貫入深さ $D$ (地表面からの貫入量)と先端抵抗 $q_c$ (先端抵抗力をコーン断面積で除した値)の関係を示している。なお、図-4(a)において網掛けした領域は、おおよそのX線撮影区間を表している。ただし、Test No. 1-1に関しては、貫入深さ $D = 0 \sim 64$  mmを撮影区間としている。

図-4(a)と(b)を比較すると、Test No. 1-3~1-4と2-3~2-4では、両者で同一の実験条件にかかわらず、貫入がある程度進むと相対密度の小さい実験-1の先端抵抗が実験-2のそれを全体的に少し上回る傾向が見られることや、実験-1では貫入に伴う $q_c$ 値に乱れが目立つものがある。これらの原因に関して、チャンパー構造の相違や、実験-2では連続貫入しているのに対して実験-1では貫入を間欠的に行っているという貫入プロセスの違いなどが考えられるが、実際にはその要因を特定することはできなかった。また、図-4(a)のTest No. 1-2~1-5に関して、作製した地盤の初期密度にばらつきが見られるため必ずしも厳密な比較を保証するものではないという問題も考えられる。しかしながら本論文では、CPTデータとしての先端抵抗の重要性に鑑み、得られた結果の全体を示すことにした。ここでは、図-4から示唆される特徴的な傾向について簡単に考察する。

図-4(a)において、上載圧を負荷していない地表面への土被りが浅い場合の貫入であるTest No. 1-1と緩い地盤への土被りが深い場合の貫入であるTest No. 1-6は、他のケースと大きく異なる結果を得ており、このことから砂の詰まり方や自由表面の及ぼす影響の大きいことが分かる。一方、先端形状の相違による抵抗力の差異は、貫入初期段階には見られるものの、貫入がある程度進むと顕著には現れないようである。また、ここでは $p_v = 50$  kPa (Test No. 1-2)と $100$  kPa (Test No. 1-3)の違いによる影響はほとんど見られない。一方の図-4(b)において、 $p_v = 50$  kPa (Test No. 2-2)のケースが $p_v = 100$  kPa (Test No. 2-3)の場合より小さな抵抗値を示していることから上載

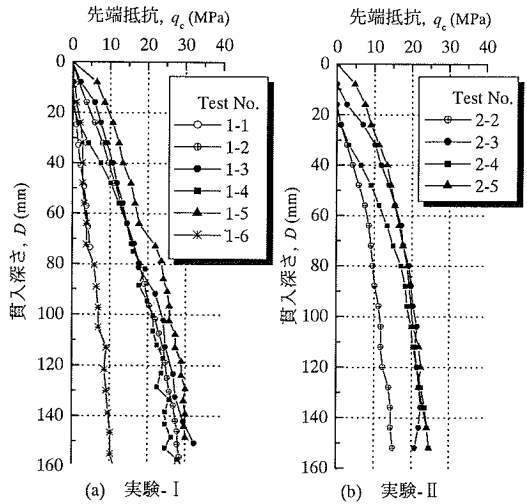


図-4 先端抵抗と貫入深さの関係

荷重の違いによる影響が伺えるが、先端形状の相違による影響は、図-4(a)と同様に、ここでも貫入が進むとほとんど見られなくなる。これらのことから、コーン抵抗値は、地盤の詰まり方には大きな影響を受けるが、密に締まった砂地盤への深い貫入時にはコーンの先端形状の影響を受けにくいことが予想される。上載荷重の先端抵抗に及ぼす影響については、 $p_v = 50$  kPa時の挙動が両実験で異なっており、その原因が特定できないためここでは考察を控えることにする。

### (2) コーン先端周辺地盤の変位経路

コーンの貫入問題のように、時々刻々と変化していくような変形場を解析する場合、変形中のどの状態からどの状態までを対象とするのが重要となる。また、連続的なデータとして得られる貫入抵抗などの発現機構を解明するには、微小な区間ごとの変形プロセスを時々刻々と追跡していくことが合理的な方法となる。前述したように、本実験ではコーンの底面半径 $R$ の2倍(コーン径 $16$  mmに相当する)となる貫入量増分ごとにX線撮影を行った。そこで、本論文ではこの貫入増分を微小な一区間と見なし、以下に示すような結果の整理を行うことにする。

図-5は、実験-1において、貫入量が $z/R = 0, 2, 4, 6, 8$ となる各貫入区間(図-4(a)の網掛け区間に相当する)における鉛標点の変位経路図である。ただし、実スケールのままでは変位量が小さ過ぎて視覚的に特徴を捉えることが困難であるため、3倍のスケールで変位を表示している。また、図-5(a)の左上の経路に対して表示した $0 \sim 8$ の番号は貫入量 $z/R$ に対応しており、鉛標点の推移の一例を表している。

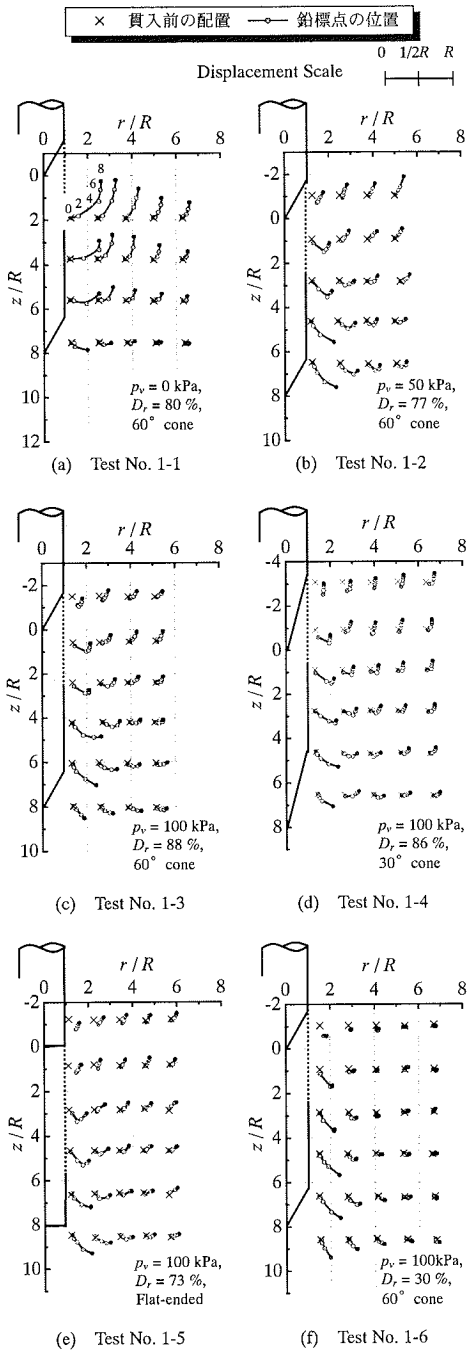


図-5  $z/R = 0 \sim 8$  における鉛標点の変位経路

図が煩雑になることを避けるため、他の経路には同様の表示は付さなかったが、上下方向の差異はあるものの、いずれのケースも鉛直軸から遠ざかる方向への挙動であった。また、コーンの貫入開始から X 線の撮影開始までの間に生じた変位量や変形前後の鉛標点の相対的な位置関係を明らかにするために、

コーンを貫入する前の鉛標点の配置位置を×印で示している。なお、図中の縦軸、横軸はともにコーン底面の半径  $R$  で正規化した値をとっている。

図-5(a)は密に締まった地盤表層部への貫入であり、曲線を描きながら地表面へと移動する鉛標点の変位経路が観察された。また、地表面、コーンに近いほど地盤の変位量は大きいようである。図-5(b)は  $p_v = 50$  kPa における貫入であり、他の  $p_v = 100$  kPa のケースに比べて浅い深さにおける貫入を想定したものといえる。図-5(c)~(e)に比べ、変位量は若干大きいように見てとれるが、移動パターンへの影響は顕著に現れていないようである。図-5(c)~(e)では先端形状の異なるコーンの貫入結果を示しているが、概略的な移動パターンは類似しており、土粒子のたどる変位経路は先端の形状にあまり依存しないことが分かる。また、図-5(f)は相対密度が比較的小さい地盤への貫入であり、斜め下方への変位が目立っている。このとき、他の実験ケースで見られるような上方への変位は見られない。これらのことから、コーン貫入に伴う土粒子の移動経路は、先端形状や土被り圧よりも自由表面などの境界条件や砂の詰まり方に大きく影響を受けることが分かる。

また、興味深い結果として、図-5(f)を除くすべてのケースにおいて、変位経路が曲線を描くことが判明した。このことはコーン貫入の進行に伴って、地盤内の主応力方向が刻々と変化していることを示唆するものである。また図-5(b)~(e)では屈曲点が存在するような移動パターンが多くみられた。これらの屈曲は、コーン底面が通過した直後に発生する傾向があり、この時点をも境に地盤内の応力状態が急変していることを示唆するものである。

図-6 は Test No. 1-1, 1-2, 1-3, 1-6 について、 $z/R = 2 \sim 4$  の貫入区間における鉛標点の移動を変位増分ベクトルとして示したものである。ただし、変位量は 10 倍のスケールで示している。これらの図から、コーンが通過する瞬間に生じる変位増分の相対的な大きさや位置関係が明らかとなる。なお、同一の貫入量増分となる他の区間（例えば  $z/R = 0 \sim 2$  や  $4 \sim 6$  など）についても同様の傾向や特徴を示す結果が得られたが、本論文では図の描写上、変形場の全体像を最もよく表している  $z/R = 2 \sim 4$  の区間で得られた結果を代表して掲載した。また、Test No. 1-4 と 1-5 は、Test No. 1-3 と類似した結果であり、これまでの考察と同様、先端形状の影響を明確に判断できる程度ではなかったため、ここでは先端形状以外の条件の及ぼす影響について検討することにした。図-6(a)から、上載圧のない地盤表面への貫入では、コーンの現在位置より下方への動きはほとんど見ら

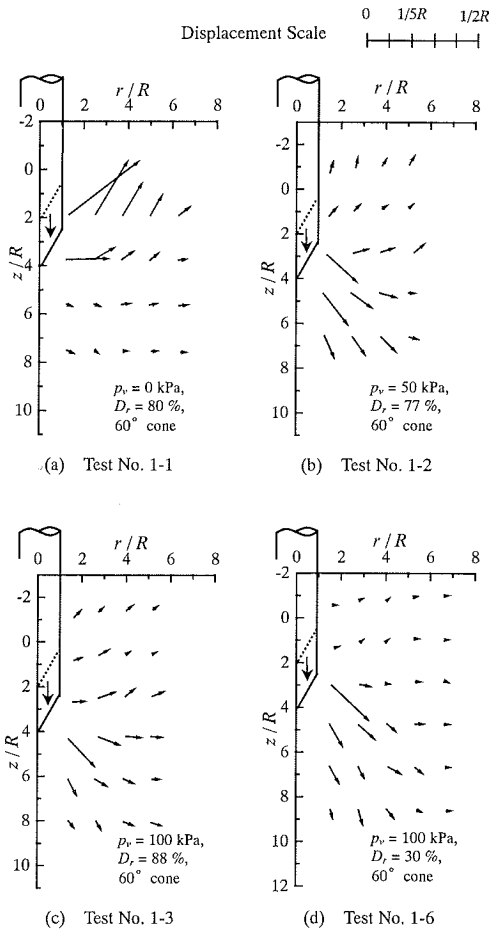


図-6  $z/R = 2 \sim 4$  における変位ベクトル

れず、斜め上方への動きの大きいことが覗える。一方、図-6(b)および(c)から、密詰状態でかつ土粒子の移動が拘束されているような場合、コーン先端部から放射する方向へと広がる変位が観察される。また、緩い地盤への貫入を示した図-6(d)では、コーン先端から斜め下方への変位が卓越していることが分かる。さらにこの場合、コーンの通過後には地盤はほとんど変位しないことが覗える。

現在、コーン貫入問題に関する理論的アプローチの主流とされている空洞押し広げ理論<sup>20), 21)</sup>を考えた場合、図-6(b)および(c)で見られるような密詰状態でかつ土被りの深い場合の貫入には、その変形パターンから同理論の適用性を示唆することができる。

ただし、図-6(b), (c)のいずれにしても、コーン先端の近傍では斜め下方への変位が若干卓越しているため完全な円筒あるいは球体が対称的に押し広げられていくという理論上の挙動とは様子が異なるようで

ある。また、図-6(a)や(d)のような挙動を示すケースに関しては同理論の適用は難しいと考えられる。したがってこの事実を認識した上で、空洞押し広げ理論とは、貫入による地盤変形を厳密にシミュレートしようとするものではなく、あくまで抵抗値を簡便に算出する手段としての位置付けが明確になされるべきである。

この項では、コーンの貫入に伴って経時的に変化する土粒子の変位経路とコーンの通過する瞬間における周辺地盤の挙動について検討した。任意の土粒子に注目し、その挙動を経時的に追跡した場合、前述したように土粒子はコーンの貫入とともに刻々と向きを変えながら変位していくことが判明した。また、ある瞬間におけるコーン周辺地盤の変位方向は、コーン先端部との相対的な位置関係によって場所に異なることが判明した。このことから、貫入中の任意の瞬間においては、新たに動き出した土粒子や既にある程度移動してきた土粒子が同時に変位していることとなり、場所によって変位の進行度合いが大きく異なっていることが分かる。したがって、コーン抵抗力を理論的に検討するには、進行性破壊あるいはひずみの局所化を考慮することが重要であると考えられる。

### (3) コーン先端周辺地盤のひずみ解析

#### a) ひずみの算出法

本論文では、有限要素法で用いられる定ひずみ三角形要素<sup>22)</sup>の考え方をを用いてひずみ成分を算出した。ここではまず、撮影したX線画像における鉛標点の座標を節点とする三角形要素群を構成し、実測した各節点の変位から形状関数を用いてそれぞれの三角形要素内の変位成分を一次式で近似する。ここで近似された変位式は、変位-ひずみ関係式によってひずみに関連づけることができる。本論文では、微小変形理論に基づいて、次に示す軸対称条件下の変位-ひずみ関係式を用いて各ひずみ成分を算出した。ただし、円筒座標系は鉛直下向きを正とし、ひずみ成分は微小区間を対象としているので増分として表記する。

$$\left. \begin{aligned} \delta \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, & \delta \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r}, \\ \delta \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, & \delta \gamma_{rz} &= \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\delta \varepsilon_r$ ,  $\delta \varepsilon_\theta$ ,  $\delta \varepsilon_z$ : 半径方向, 周方向, 鉛直方向の垂直ひずみ増分,  $\delta \gamma_{rz}$ :  $r$ - $z$  平面におけるせん断ひずみ増分,  $u_r$ ,  $u_z$ : 半径方向, 鉛直方向の変位成分である。なお、他のひずみ成分はゼロとなる。



また、体積ひずみ増分 $\delta\varepsilon_v$ （膨張を正とする）は、垂直ひずみ成分を用いて次式のように表される。

$$\delta\varepsilon_v = \delta\varepsilon_r + \delta\varepsilon_\theta + \delta\varepsilon_z \quad (2)$$

さらに本論文では、ひずみを生じるような変形だけでなく、変位に伴う回転成分にも着目することにした。このときの回転成分 $\omega_{rz}$ は変位勾配を用いて次のように表すことができる。

$$\delta\omega_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (3)$$

ただし、反時計回りを正とする。

式(1)~(3)に示した変位-ひずみ関係式は、いずれも微小変形理論に基づいて導かれたものであるため大きなひずみを生じる変形場に対して適用できなくなる。また、コーンの貫入問題のように変形プロセスを時々刻々と追跡していくべき問題に対しては、基準となる状態を刻々と変更し、微小な区間ごとにひずみを算出していく Updated Lagrange 法が有効であると考えられる。そこで、本研究では、図-6 に示した変位ベクトル増分と同様に、X線撮影間隔（コーン貫入量変化は 16 mm）を微小区間と見なしてひずみ解析を行った。図-7, 8, 9, 10, 11 は、それらの解析結果のうち、 $z/R = 2$  の貫入時点を基準にとり、 $z/R = 2 \sim 4$  の貫入区間を対象とした場合に計算されたひずみのコンター図であり、それぞれに半径方向の垂直ひずみ、鉛直方向の垂直ひずみ、体積ひずみ、せん断ひずみおよび回転成分の各増分を表している。ただし、ここでは上載圧一定の下で先端形状や砂の密度の影響を調べるために Test No. 1-3~1-6 についての結果のみを示した。また、コーン先端が他の貫入区間にある場合についてもひずみ解析を行ったところ、コーン先端周辺では、同様の特徴や傾向を示す変形場が形成されていることを確認することができた。したがって、コーンの貫入は、この微小区間に示された変形場がコーンの貫入に伴って連続的に次々と再現されていくような定常的なプロセスであると見なすことができる。そこで本論文では、図-6 のときと同様に、変形場の全体像を最もよく表している  $z/R = 2 \sim 4$  の区間で得られた結果のみを代表して考察を進めることにする。ただし、本論文のように Updated Lagrange 法を適用する場合、算出されるひずみ値は、解析者側の設定する解析対象区間の長さに依存するものであることに留意する必要がある。すなわち、本論文ではコーンが 16 mm 貫入する間を解析区間長さとしたが、その区間長さを変更すれば計算結果も変化することになるためそれを絶対的な変形量として取り扱うことができない。

これを受けて本論文では、ひずみの算出結果をコンター表示によって定量的に図示したが、それらに対する考察は、同一の貫入区間における各実験ケースの相対的な比較・検討を定性的に行うに留めることにする。

## b) 解析結果の一般的傾向

ここではまず全実験ケースで共通して見られる傾向について述べる。また、図中に分布するひずみの物理的あるいは幾何学的なイメージを直感的に捉えやすくするため、各種ひずみの算出結果を総括的に捉えて模式化した変形パターンを図-12 に示した。なお、ここで示した模式図は、実験条件の相違にかかわらず、全てのケースで見られた一般的な傾向や特徴を概略的に図化したものであり、図 7~11 の各ひずみ分布図と対照することで考察を容易に進めることができると考えた。なお、図中に示した「領域 I : 破碎した砂によって半球状に形成されたコア」については後に詳しく説明する。

図-7 と 8 から、いずれの実験ケースについてもコーン先端直下において半径方向には伸張、鉛直方向には圧縮の卓越する領域（図-12 領域 II）が観察される。また、コーンのエッジ部周辺において半径方向には圧縮、鉛直方向には伸張の卓越領域（図-12 領域 IV）が見られる。一方、各垂直ひずみ成分の和で示される体積ひずみ分布（図-9）では、正值・負値となるそれぞれのひずみ成分が相互に打ち消しあって複雑な分布を形成しており、各実験ケースに共通して見られるような一般的な傾向を読み取ることが困難な結果となった。図-10 からは、コーン直下あるいはエッジ部にかけて負のせん断ひずみが卓越していることが分かる。この領域は、図-12 における領域 II と IV の間の過渡領域に発達するものとして位置付けられそうである。また、図-11 から、反時計回りを示す回転成分の卓越領域が上述したせん断ひずみの卓越領域と概ね一致して発生していることが観察される。これらの結果から、実験ケースごとにひずみ成分の大きさや位置関係は異なるものの、垂直ひずみだけでなく、せん断変形や回転を含む複合的かつ多次元的な変形場（あるいは変位場）が特定の領域に集中して発生しているものと考えられる。

## c) 地盤の密度の及ぼす影響

図-7~11 における(a)と(d)は、それぞれ密詰めと緩詰め（ $p_v = 100 \text{ kPa}$  の負荷条件下）へ  $60^\circ$  コーンを貫入させた場合のひずみ分布図である。前述したように、図-7, 8 に見られる垂直ひずみには、コーン直下とエッジ部に圧縮と伸張の相反するひずみが発生するという特徴的な傾向が見られるが、それらの卓越領域は、緩い状態ではよりコーン近傍に

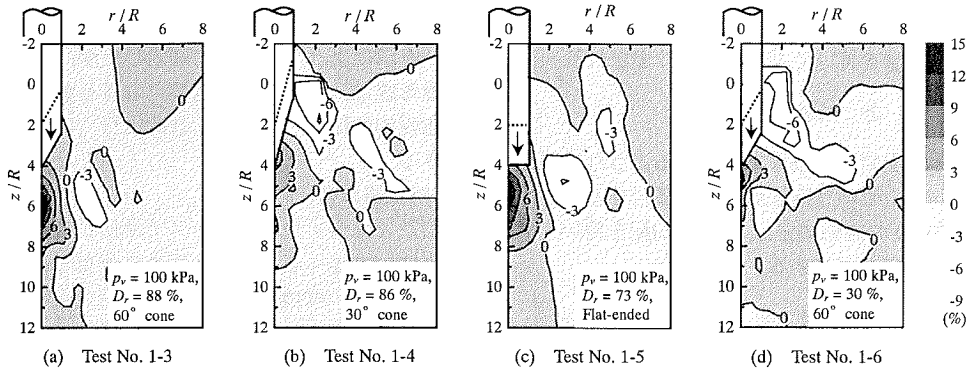


図-7 半径方向の垂直ひずみ増分  $\delta\epsilon_r$  の分布図

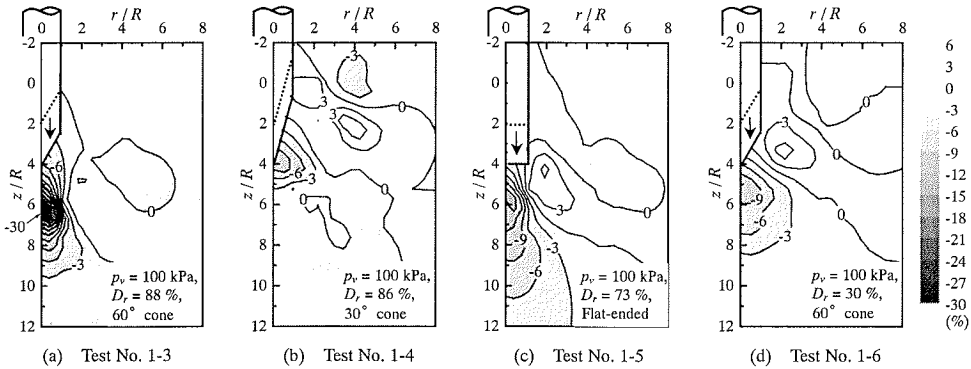


図-8 鉛直方向の垂直ひずみ増分  $\delta\epsilon_z$  の分布図

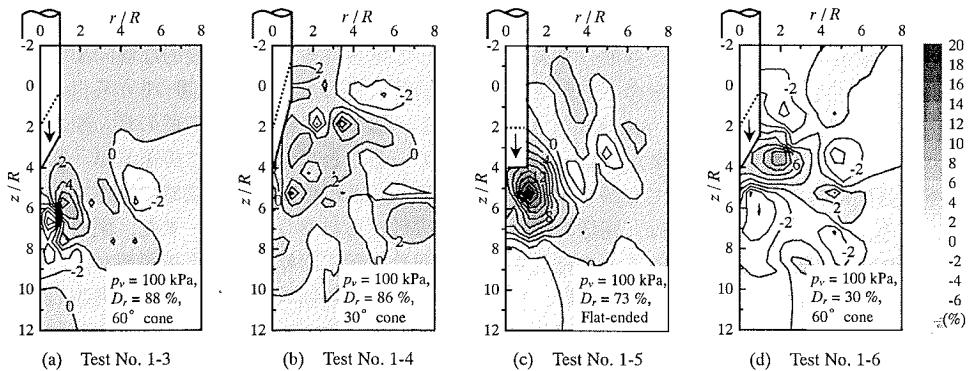


図-9 体積ひずみ増分  $\delta e_v$  の分布図

唆される。接近して発生する傾向がある。また、緩い状態では、密な状態に比べてエッジ部に発生するひずみ（鉛直方向に伸長，半径方向に圧縮（図-12 領域IV））がより明瞭に卓越して現れていることが分かる。図-9 に示された体積ひずみに関しては、密詰め、緩詰めにかかわらず、コーンのエッジ部近傍から先端部近傍にかけての領域で正のダイレイタンスー挙動を示唆する体積膨張を確認することができる。ただし、緩詰めの場合（図-9(d)）にはその領域を取

り囲むようにして圧縮領域が広く分布していることから、地盤の密度が圧縮特性に及ぼす影響の大きいことが分かる。また図-10, 11 から、緩い状態におけるせん断ひずみおよび回転成分の卓越領域は、密な場合のそれより上方に位置し、またその値も小さいことが視える。これらのことから、圧縮変形が卓越する緩い状態の砂地盤では密な状態に比べてせん断変形が起りにくくなり、逆に圧縮しにくい密な状態の地盤ではせん断変形が卓越しやすくなるとい

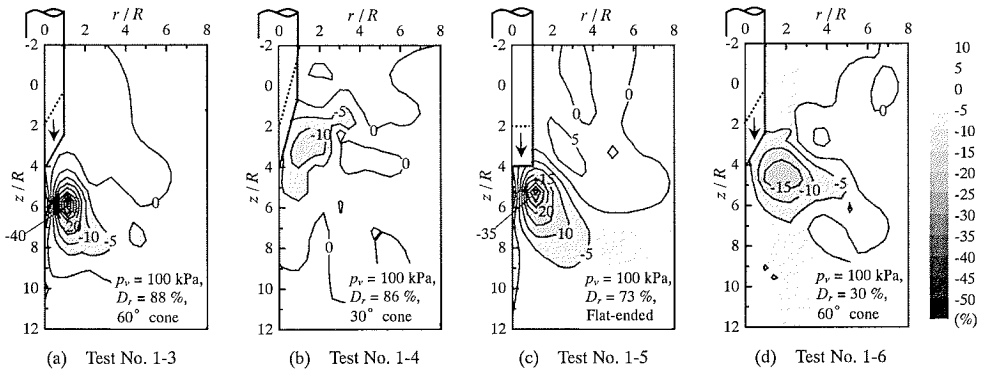


図-10 せん断ひずみ増分 $\Delta\gamma_{rz}$ の分布図

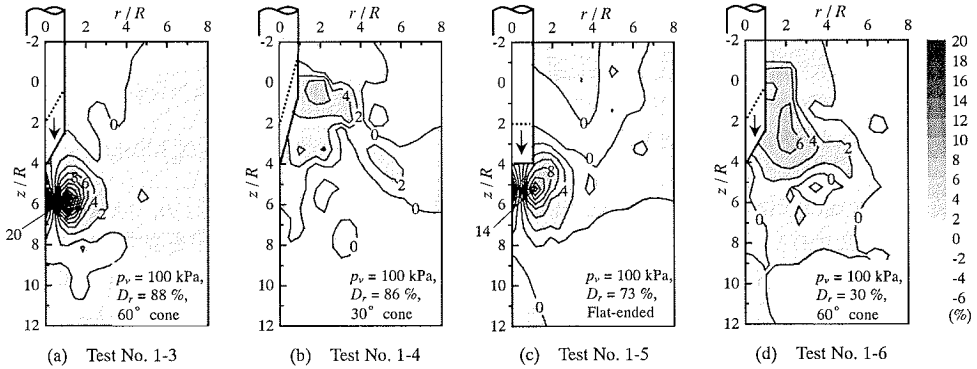


図-11 回転成分 $\Delta\omega_{rz}$ の分布図

う傾向が示唆される。

d) 先端形状の及ぼす影響

図-7~11における(a), (b), (c)は、先端形状の異なる貫入による変形場を示している。いずれのひずみに関しても、図(a)と図(c)の示す60°コーンと先端がフラットな場合には類似したパターンが観察される。一方で、図(b)の示す30°コーンの場合にはそれらとは若干異なる様子が視られる。このことから、ある程度先端角が鈍くなると先端形状の影響は現れにくくなることが予想される。

また、図-7の各コーンのエッジ部周辺において、おおよそ同レベルの圧縮ひずみ(約3~6%)が発生していることから、半径方向の土の圧縮特性は先端形状にはあまり依存しないことが予想される。一方、図-8においてコーン先端部直下に卓越した鉛直方向の圧縮ひずみでは先端形状による差異が見られ、先端角の鈍い場合に比べて30°コーンの場合にはその卓越領域範囲は小さく、圧縮の起こりにくいことが読み取れる。さらに図-10, 11についても同様に、60°コーンや先端がフラットな場合に比べて30°コーンの場合にはせん断ひずみと回転成分が発

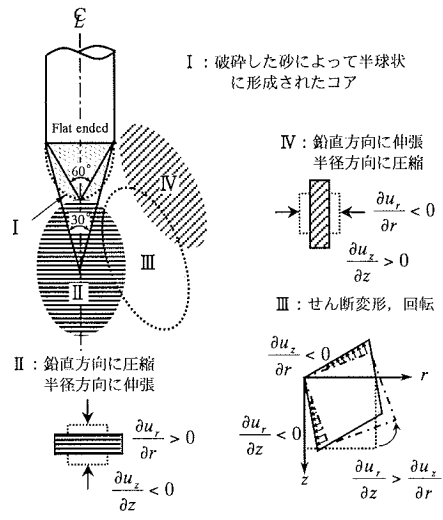


図-12 変形パターンの模式図

達しにくいことが分かる。

図-13は、砂中の一層に撒いた鉄粉がコーンの貫入によって変形する様子を捉えたX線画像である。図中、若干黒く影として現れているのが鉄粉である。ただし、画質上、視覚的に捉えにくい場合があるの

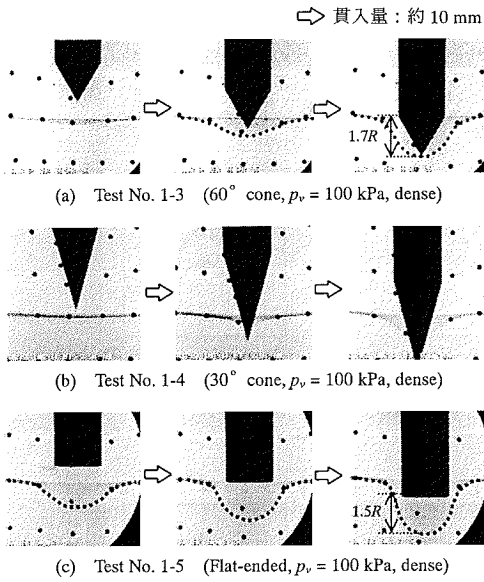


図-13 ペネトロメータ先端近傍の鉄粉の挙動

で鉄粉の及ぶ領域の縁を点線で強調した。図中に散在する黒点は鉛標点であり、また、図-13(a)右下端、図-13(c)右端の黒い部分は X 線検出スコープの縁である。貫入時において、もし、コーンの表面上を沿うようにして砂粒子のすべりが生じていると仮定すると、鉄粉は図-13(a)に見られるような下に湾曲する挙動は示さないものと考えられる。図-13(c)の先端がフラットな場合にも類似した挙動が観察される。このような挙動を示すのは、コーンと一体となって貫入してきた半球状のコア(図-12 領域 I)が鉄粉を下方へと押し下げることによって生じるものと推測される。特に図-13(c)では下方への圧縮が先端より先行して発生していることが明確に観察できる。コーン底面が鉄粉層に没した時点で、底面から鉄粉の最下点までの距離は 60° コーンで約 1.7R、フラットの場合で約 1.5R であった。また、発生したコアは剛体として振る舞うため、実質的な変形は、コア生成領域の周辺において生じるものと予想される。一方、図-13(b)の 30° コーンでは上述のペネトロメータとは異なり、半球状に発達したコアの存在は認められない。このことから、図-7~11 におけるひずみ分布において、60° コーンと先端がフラットな場合の結果が類似するのに対して 30° コーンの場合に若干異なる傾向が見られたのはコーン先端部に発生するコアの有無によるものと考えられる。

#### (4) コーン先端周辺地盤の破碎状況

##### a) 粒子破碎を示す指標

粒子破碎の発生の有無は、破碎前後の粒度分布を

比較することで明示することができる。しかし、破碎の程度を定量的に示すにはなんらかのインデックス(指標)が必要となる。そこで本実験では、粒子破碎前後の粒径加積曲線に囲まれる面積を尺度として指標を定義した。この場合の物理的意味は必ずしも明確ではないが<sup>23), 24)</sup>、初期粒度を一定とした同一の砂を対象としていることから、実験ケースごとの破碎の度合を相対的に評価するには有用であると考えられる。試験の精度上、5~95% 粒径を対象とし、粒径加積曲線の通過百分率(縦軸)を等間隔で分割したときの間隔を  $h = 5\%$  とすると粒子破碎前後の粒径加積曲線に囲まれる面積の差  $A$  は次のように表せる。

$$A = \frac{1}{2}h\{(\log D_5 - \log D'_5) + (\log D_{10} - \log D'_{10})\} + \frac{1}{2}h\{(\log D_{10} - \log D'_{10}) + (\log D_{15} - \log D'_{15})\} + \dots + \frac{1}{2}h\{(\log D_{90} - \log D'_{90}) + (\log D_{95} - \log D'_{95})\} \quad (4)$$

ただし、 $D_x$ : 破碎前の粒径、 $D'_x$ : 破碎後の粒径である。ここに  $x$  は通過加積率を表す。 $h$  は定数であるので  $h \rightarrow 1$  としたとき式(4)は次のようになり、本論文ではこれを破碎量  $I$  として定義した。

$$I = \frac{1}{2} \log \left( \frac{D_5 \cdot D_{95}}{D'_5 \cdot D'_{95}} \right) + \log \left( \frac{D_{10} \cdot D_{20} \cdots D_{90}}{D'_{10} \cdot D'_{20} \cdots D'_{90}} \right) \quad (5)$$

##### b) 実験結果

図-14 は、採取区分ごとに得られた粒径加積曲線から求められた各実験ケースに対する破碎量  $I$  の分布図である。破碎量の示していない区分はいずれも  $I = 0$  である。なお、図-14 に図示した①~④の 4 領域を例にとって粒径加積曲線と破碎量  $I$  の関係を図-15 に示した。

図-14, 15 を比較して分かるように、いずれの実験ケースにおいてもコーン先端部で破碎量が突出して大きくなる傾向があり、特に図-14(b)と同図(d)ではその他のケースに比べて極めて大きい破碎を生じていることが分かる。ただし、コーンのロッド部近傍ではこのような極めて大きい粒子破碎を示す値は観察されないことから、破碎された砂は上方へと押しやられず、図-13(a), (c)で見られた半球状のコアとなってコーンの貫入に伴伴することが推測される。

ここに述べたコア以外の領域においても破碎は確認できるものの、その量は比較的微小であり、いずれの実験ケースでも半径方向には約 20 mm ( $r/R = 2.5$ ) 程度離ればほとんどゼロとなる。鉛直下方の分布では、コーン先端角が大きくなるにつれて破碎領域も拡大するようであるが、その発生範囲はせい

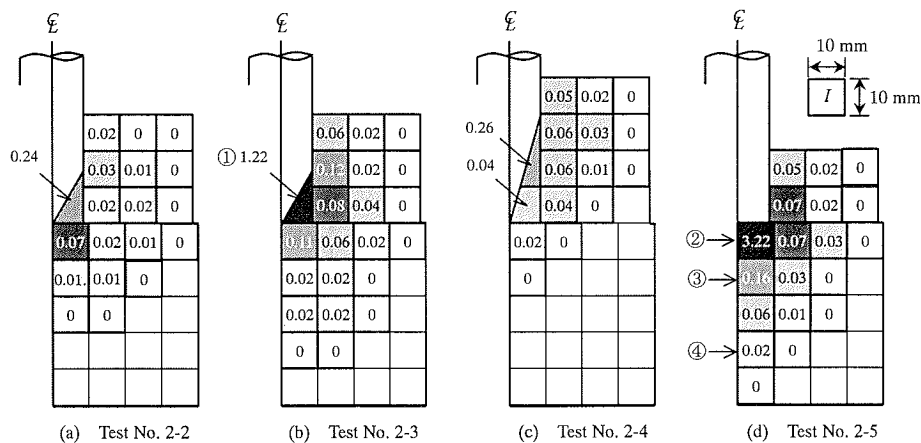


図-14 破砕量の分布

ぜい 30~40 mm ( $r/R = 3.75 \sim 5$ ) である。なお、図-15を見ると、例えば  $I = 0.02$  程度では粒径加積曲線にほとんど差異が見られないことから分かるように、これらの微小な破砕量は、コア領域の破砕状況に比べて圧倒的に小さく、ほとんど破砕は生じていないと見なせる程度のものである。

また、図-14(c)の先端の鋭いコーンの場合には、コーン近傍の破砕量は比較的小さく、また、鉛直下方にはほとんど破砕が生じていないことが分かる。

さらに図-14の(a)と(b)を比較すると、同一の先端形状( $60^\circ$ )にかかわらず、上載荷重の大きい Test No. 2-3 に比べてその小さい Test No. 2-2 の場合にはコア領域の破砕量や破砕領域が小さくなることから、破砕には拘束圧の影響が大きく関与していることが予想される。

これらのことから、豊浦砂のように土粒子自体が堅固な砂の場合、大きい先端角を有し、密詰めかつ高い拘束圧条件下における貫入においては、著しく破砕した砂によるコアが先端部に形成されるものの、その周辺での変形による破砕は生じにくいことが判明した。また、ここに見られたコアの存在は、結果として先端抵抗や変形場に先端形状の影響を与えにくくしている大きな要因と考えられる。ただし、コアの発生しないような土質材料や貫入条件においては、先端形状の及ぼす影響が顕在化する可能性があることに留意する必要がある。

## 6. 結論

本研究では、砂地盤を対象に X 線透視装置を用いた可視化手法によってコーンペネトロメータ周辺地盤の変形機構の解明を試みた。また、コーン周辺

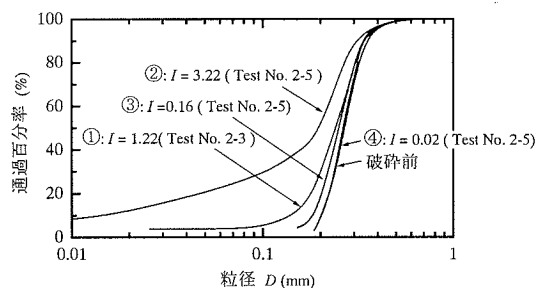


図-15 破砕量と粒径加積曲線の関係

地盤の粒子破砕状況を定量的に評価するための実験も別途実施した。これらの実験結果を要約すると以下のような知見が得られた。

- (1) コーンの先端抵抗値は、自由表面などの境界条件や砂の詰まり方には大きな影響を受けるが、密に締まった砂地盤への深い貫入時には、コーンの先端形状の影響を受けにくい。
- (2) コーン周辺地盤の土粒子は、コーンの貫入とともに刻々と向きを変えながら変位する(図-5参照)。また、ある瞬間におけるコーン周辺地盤の変位方向は、コーン先端部との相対的な位置関係によって場所的に異なる(図-6参照)。
- (3) コーン貫入による変形場のひずみ分布図(図-7~11)を定量的に示すことができた。それらの結果から、コーン通過の瞬間において、先端部近傍では次のような複合的かつ多次元的な変形が特定の領域に集中して発生することが判明した。コーン先端直下では半径方向に伸張、鉛直方向に圧縮を示すひずみが発生し、コーンのエッジ部周辺では半径方向に圧縮、鉛直方向に伸張を示すひずみが発生する。また、これら相反する両領域に挟まれるようにしてせん断ひずみ

および回転成分の卓越する領域が発生する。

- (4) 砂の詰まり方にかかわらず、コーンのエッジ部近傍から先端部近傍にかけての領域で正のダイレイタンスー挙動が観察された。ただし緩詰めの場合には、その領域を取り囲むようにして圧縮領域が広く分布する。また、圧縮変形が卓越する緩い状態の砂地盤では密な状態に比べてせん断変形が起りにくくなり、逆に圧縮しにくい密な状態の地盤ではせん断変形が卓越しやすくなる。
- (5) コーンの先端形状の及ぼす影響に関して、コーンのエッジ部周辺における土の圧縮特性は先端形状にはあまり依存しない。ただし、コーン直下部における鉛直方向の圧縮ひずみやエッジ部近傍のせん断ひずみ、回転成分についてはコーン先端角が小さくなると発達しにくくなる。
- (6) 豊浦砂のように土粒子自体が堅固な砂の場合、大きい先端角を有し、密詰めかつ高い拘束圧条件下における貫入においては、著しく破碎した砂によるコアが先端部に形成されるものの、その周辺での破碎は生じにくい。また先端部を包囲するように形成されるコアによって、先端抵抗などに及ぼす先端形状の影響はほとんどなくなる。

謝辞：本実験は、京都大学所有の X 線透視 TV 装置を用いて行ったものである。本試験装置の使用についてお取計らい頂きました京都大学 建山和由助教授をはじめ、関係各位に心から厚く謝意を表します。また、実験装置の製作・準備におきまして、立命館大学 理工学部 工作センター 弓山都志夫氏、山植肇氏、杉本弘之氏、京都大学 榎垣義雄氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

### 付録 サイロ作用による鉛直土圧の低減

図-16(a)に示すような半径  $R$  の円筒土槽内に自重を  $\gamma$  とする土が詰まっている場合を考える。任意の高さにおいて厚さ  $\Delta Z$  の土の薄層に関する力の釣り合いから次式を得ることができる。

$$\gamma R \Delta Z - \Delta \sigma_z R - 2 \Delta Z \Delta f = 0 \quad (6)$$

ここに、 $\sigma_z$ ：任意深さにおける鉛直土圧、 $\Delta f$ ：壁面の摩擦抵抗応力である。また、砂とチャンパー壁面との間の摩擦角を  $\delta$ 、静止土圧係数を  $K_0$  とすると次式が成り立つ。

$$\Delta f = K_0 \sigma_z \tan \delta \quad (7)$$

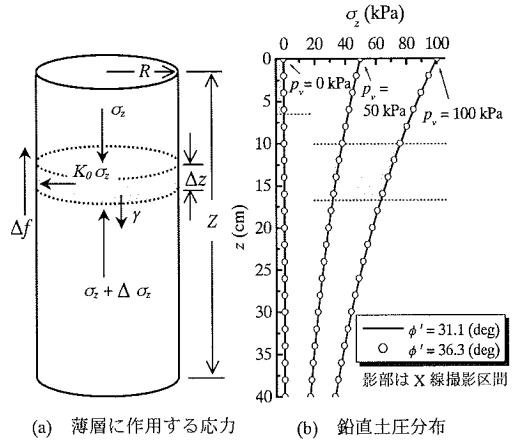


図-16 サイロ作用による鉛直土圧の変化

これを式(6)に代入して整理すると次のような微分方程式を得る。

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2K_0 \tan \delta}{R} \cdot \sigma_z = \gamma \quad (8)$$

さらに境界条件として  $z = 0$  で  $\sigma_z = p_v$  と与え、微分方程式(8)を  $\sigma_z$  について解くと次のようになる。

$$\sigma_z = \frac{1}{2K_0 \tan \delta} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-2K_0 \tan \delta}{R} \cdot z\right) \right\} \gamma + p_v \exp\left(\frac{-2K_0 \tan \delta}{R} \cdot z\right) \quad (9)$$

また、実験に用いた豊浦砂について一面せん断試験を実施したところ、相対密度  $D_r = 30\%$  (Test No.1-6 に対応) では内部摩擦角  $\phi' = 31.1^\circ$ 、 $D_r = 73 \sim 90\%$  (Test No.1-6 以外の実験ケースに対応) では  $\phi' = 35.7 \sim 36.9^\circ$  となる結果を得た。さらに、せん断箱の下箱にチャンパーと同質のアクリルを設置し、砂-アクリル間における一面せん断試験を行った結果、 $\delta = 0.47 \phi'$  という関係を得た。ただし、それぞれの摩擦角はピーク強度に対応するものである。これらのデータに基づいて式(9)を計算した結果を図-16(b)に示した。ただし、静止土圧係数には Jaky の式： $K_0 = 1 - \sin \phi'$  を使い、内部摩擦角として  $\phi' = 31.1^\circ$  ( $D_r = 30\%$ ) と  $\phi' = 36.3^\circ$  ( $D_r = 73 \sim 90\%$  におけるせん断試験結果の中央値) の 2 ケースで計算を行った。この図から、上載荷重が大きいほど鉛直土圧の低減の度合いが著しく、本論文で変形場の解析対象とした貫入区間においては、 $p_v = 50 \text{ kPa}$  の場合で約 20~30%、 $p_v = 100 \text{ kPa}$  の場合で約 25~40% の低減が見られることが分かる。なお、内部摩擦角の差異(あるいは地盤の詰まり方)による土圧伝播の影響はほとんど見られない。

## 参考文献

- 1) Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. : *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, 1997.
- 2) Davidson, J. L., Mortensen, R. A. and Barrerio, D. : Deformations in sand around a cone penetrometer tip, *Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engng.*, Stockholm, pp. 467-470, 1981.
- 3) Davidson, J. L. and Boghrat, A. : Displacements and strains around probes in sand, *Proc. of Specialty Conf., Geotechnical Practice in Offshore Engng.*, ASCE, pp. 181-202, 1983.
- 4) Koumoto, T. and Kaku, K. : Three dimensional analysis of static cone penetration into clay, *Proc. of 2<sup>nd</sup> European Symp. on Penetration Testing*, Vol. 2, pp. 635-640, 1982.
- 5) 室町忠彦:静的コーンペネトロメータの軟弱地盤への適用に関する実験的研究, 鉄道技術研究報告, 第757号, 鉄道技術研究所, 1971.
- 6) 續 誠:CPTの適用性と様々なコーンシステムの紹介, 土と基礎, Vol. 47, No. 9, Ser. No. 500, pp. 9-12, 1999.
- 7) BCP Committee : Field tests on piles in sand, *Soils and Foundations*, Vol. 11, No. 2, pp. 29-49, 1971.
- 8) Miura, N. : Point resistance of piles in sand, *Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engng.*, San Francisco, Vol. 3, pp. 1445-1448, 1985.
- 9) Yasufuku, N. and Hyde, A. F. L. : Pile end-bearing capacity in crushable sands, *Géotechnique*, 45, No. 4, pp. 663-676, 1995.
- 10) 例えば, 破砕性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会:破砕性地盤の工学的問題に関する研究委員会報告およびシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 1999.
- 11) Roscoe, K. H., Arthur, J. R. F. and James, R. G. : The determination of strains in soils by X-ray method, *Civ. Engng. & Pub. Wks. Rev.*, 58, pp. 873-876, 1963.
- 12) 大石善啓:X線ラジオグラフィ法を用いた土の切削機構の可視化, 土木学会論文集, No. 454/III-20, pp. 19-26, 1992.
- 13) 地盤工学会:地盤調査法, 第7章, pp. 233-241, 1995.
- 14) 岸田英明, 高野昭信, 吉沢孝夫:砂地盤中のNon-displacement pile先端部の荷重-沈下量関係に杭径が与える影響, 日本建築学会論文報告集, 第284号, pp. 17-27, 1979.
- 15) 関口秀雄(代表研究者):X線TVによる動的荷重下の粒状体地盤-流体系の内部変形機構可視化に関する研究, 平成9~10年度科学研究費補助金(基礎研究C(2))研究成果報告書, 京都大学土木工学科, 1999.
- 16) 地盤工学会:土質試験の方法と解説-第一回改訂版-, 第4章, pp. 69-92, 2000.
- 17) 古河幸雄, 藤田龍之:レーザー回折/散乱式粒度分析装置による粒度試験の自動化に関する検討, 第33回地盤工学研究発表講演集, pp. 363-364, 1998.
- 18) 山口柏樹:第8章, 土質力学(全改訂), 技報堂, pp. 240-242, 1984.
- 19) 谷本喜一, 岩崎照昌:砂の最小密度の測定法, 第10回土質工学シンポジウム, 土質工学会, pp. 11-14, 1965.
- 20) 例えば, Vesic, A. S. : Expansion of cavities in infinite soil mass, *Jour. of Soil Mech. and Foundation Div.*, ASCE, Vol. 98, SM3, pp. 265-290, 1972.
- 21) 山口柏樹:無限土中における空洞押し広げの弾塑性解析と応用, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 15, pp. 1-11, 1973.
- 22) 鷺津久一郎, 宮本 博, 山田善之, 川井忠彦:有限要素法ハンドブック I 基礎編, 第3章, pp. 234-237, 1981.
- 23) 福本武明:粒子破砕の程度を示す指標, 技術手帳3(実務に役立つ土質工学用語の解説), 土質工学会, pp. 339-341, 1992.
- 24) 石井武美:粒子破砕の表示尺度のもつ物理的意義, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 4, pp. 155-164, 1989.

(2002.6.27 受付)

## DEFORMATION MECHANISM AROUND A CONE PENETROMETER IN SAND

Taizo KOBAYASHI, Ryoichi FUKAGAWA, Shun-ichi KOBAYASHI  
and Takahiro KAKITA

Characterization of the deformation behavior of sands around a cone penetrometer was conducted using an X-ray fluoroscope technique in order to establish a clear understanding of the experimental penetration process. Further experiments to evaluate, quantitatively, the situation of particle breakage during the penetration process were also conducted. Model penetration tests were performed with the following parameters as the variables : the tip form, overburden pressure and relative density. From the results, it became clear that the deformation characteristics of the penetrometer in sand significantly depend upon the sand state (packing of the grains), while it is hardly affected by the tip form of the penetrometer when the tip angle is comparatively blunt.