

# 標準貫入試験の力学機構に関する基礎的研究

名古屋大学大学院 学生員 ○田辺昭博  
 名古屋大学工学部 正会員 大塚 悟  
 名古屋大学工学部 正会員 松尾 稔

1. はじめに: 地盤の現位置試験では、標準貫入試験がよく用いられる。しかし、標準貫入試験の力学機構は従来、それほど明確でなく、地盤の弾性係数を始めとする多くの土質係数と標準貫入試験によるN値との間に経験式が数多く提案されてきた。しかし、標準貫入試験は残留変形を取り扱っている点で基本的に塑性に関するパラメータに関連すると考えられる。本研究では、土の強度と標準貫入試験から得られるN値との間の関係について明らかにすることを目的に、剛塑性仮定を用いて標準貫入試験のシミュレーションを実施する。ここでは標準貫入試験を単純化して、変位速度境界の初期値境界値問題の解析を実施した。簡単のために地盤は粘性土地盤として非排水強度 (Mises 降伏関数) を用いたが、カムクレイモデルを用いて解析結果を考察する。

## 2. 解析手法

1) 境界値問題の設定: 図1のように粘性土地盤の表面の一部 (変位速度境界  $S_u$ ) が物体の衝突によってある初期速度で変形し始める際の最終変形量を剛塑性仮定に基づいて算出する。本解析では (1) 初期変位速度  $\dot{u}(t=0)$  のみを指定、(2) 初期変位速度  $\dot{u}(t=0)$  および表面力  $t$  を指定、する場合の2ケースについて解析を行う。

### 2) 変形のモデル化 (Martin, 1964, 1981)

2.1) 上界定理: 次式のような変位速度を考える。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_0(t) &= \bar{\epsilon}_0 \quad (\text{const.}) \quad \text{for } 0 \leq t \leq T \\ \dot{\epsilon}_0(t) &= 0 \quad \text{for } T \leq t \end{aligned}$$

この速度場を用いて外力仕事率と内部消散率を等値とすると、最大塑性仕事の原理から次の不等式が得られる。

$$\int_v D(\dot{\epsilon}_0) dv \geq \int_{S_u} \dot{u}_0 \cdot t ds + \int_v \dot{u}_0 \cdot \rho \dot{u} dv$$

この式を変形が収束するまでの時間  $T$  で積分すると、若干の変換の後に次の時間  $T$  に関する不等式が得られる。

$$T \geq \frac{\int_v \dot{u}_0 \cdot \rho \dot{u}(t=0) dv}{\int_v D(\dot{\epsilon}_0) dv - \int_{S_u} \dot{u}_0 \cdot t ds}$$

したがって、運動学的に可能な変位速度  $\dot{u}_0$  を操作して変形が収束するまでの時間  $T$  を求めれば、最終変形量が  $u = \dot{u}_0 \cdot t$  より求められる。

2-2) モード解: 図2に初期変位速度  $\dot{u}(t=0)$  が与えられる場合の地盤の変位 (ひずみ) 速度の変化の模式図を示す。初期条件で与えられた  $\dot{u}(t=0)$  は加速度項と共に表面力と釣り合う。しかし、変位速度は加速度の存在のために次の瞬間には異なる変位速度に変化し、関連流れ則に基づいて応力は降伏曲面上を移動する。ところが、図2に示すように変位速度の方向と加速度の方向が一致すると、応力は一定値になり、そのまま変形は収束 (表面力  $t$  単独では地盤が破壊しない場合) または発散 (表面力  $t$  単独で地盤が破壊する場合) する。この変形パターンをモード解と呼び、次のひずみモードを考える。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_0(x, t) &= \alpha \bar{\epsilon}_0(x) T(t) \quad \text{for } 0 \leq t \leq T \\ \dot{\epsilon}_0(x, t) &= 0 \quad \text{for } T \leq t \end{aligned}$$

上式を力の釣り合い式に代入することにより、 $T(t)$  の時間に関する1階の微分方程式が得られ、変形が収束するまでの時間およびその際の変位速度パターン  $\bar{\epsilon}(x)$  が求められ、最終変形量を求めることができる。

|            |                           |           |      |
|------------|---------------------------|-----------|------|
| $M$        | 1.20                      | $K_0$     | 1.0  |
| $\kappa$   | 0.1304                    | $\lambda$ | 0.25 |
| $\gamma_t$ | 16.3 (kN/m <sup>3</sup> ) |           |      |

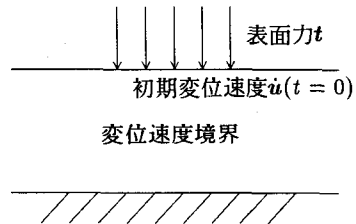


図1. 境界値問題

**3. 解析結果と考察:** 地盤に 15m/s の初期変位速度が与えられた場合の最終変形量を有限要素解析により算出する。解析は軸対称条件とした。図 3 は 2.1) のモデルによる解析結果である。地盤の強度は一様で  $16.25\text{kN/m}^2$  とした。中央の変形量は  $0.915\text{cm}$  となった。一方、図 4 は 2.2) のモード解を用いた結果である。図 3 に対して図 4 はやや大きい変形量 (中央沈下  $14.979\text{cm}$ ) を与える。どちらのモデルが実際現象のよい近似を与えるのかは早計には判断できないが、表面力  $t(30\text{kN/m}^2)$  のある場合の解析結果である図 5、6 では、モード解を用いた場合に変形が過大になることが分かる。これは図 2 の模式図からも分かるように、変形に占めるモード解の割合が解析の精度に大きく影響するためであり、適用する問題に解析の精度は依存する。他方、2.1) による方法は地盤の変形挙動の平均的なひずみを取り扱うことから、安定した最終変形量を与えている。

モード解によると図 2 に示すように変形が収束する直前の応力が直接求められる。カムクレイモデルを用いると、非排水条件では初期応力に基づいて限界状態における平均有効応力が求められることから、モード解を用いた解析による平均応力によって過剰間隙水圧分布、図 7 (表 1 の土質定数に従う地盤) が得られる。この過剰水圧分布を用いれば、物体の自由落下と荷重の除荷による過剰間隙水圧の評価に適用が可能であり、動圧密工法による圧密促進効果の解析に応用することができる。

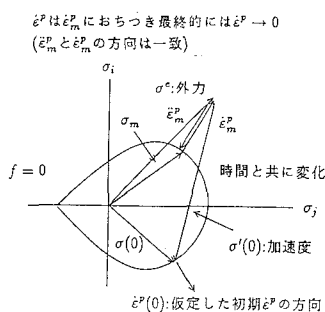


図 2. 境界値問題の特性

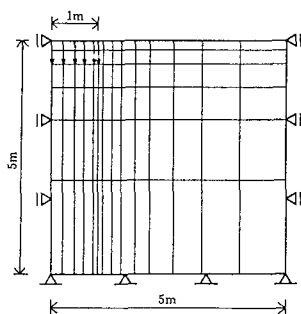
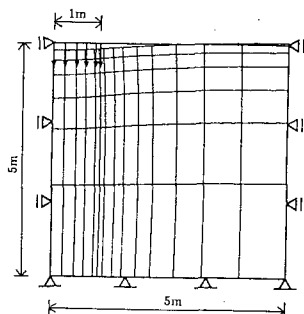
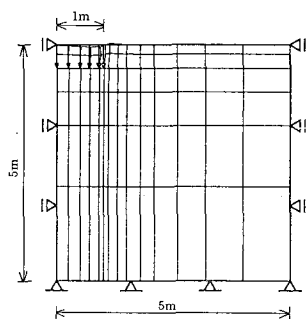
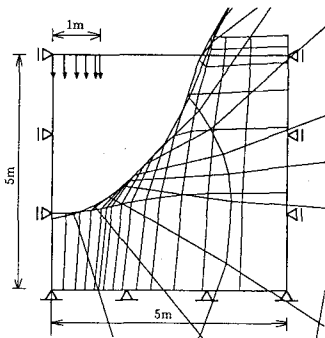
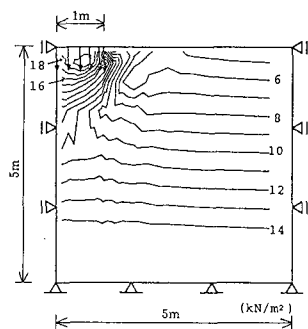
図 3.  $\dot{u}_0$  による最終変形 (2.1)図 4.  $\dot{u}_0$  による最終変形 (2.2)図 5. 表面力  $t$  のある場合 (2.1)図 6. 表面力  $t$  のある場合 (2.2)

図 7. 過剰間隙水圧分布

**4. おわりに:** 本報告では、粘性土地盤を対象に土の強度乗数と  $N$  値との関係を明らかにするための方法論を示したが、今後この解析法を砂質土等の強度乗数 ( $c, \phi$ ) を取り扱うための拡張化を行い、最終的には土被り圧の効果を考慮した土の強度乗数  $\sim N$  値関係を明らかにしたい。

**参考文献:** 1) MARTIN J.B., *Impulsive Loading Theorems for Rigid - Plastic Continua*, Proc. Eng. Mech. Div., ASCE, 90, (EM5), 27-42, 1964. 2) MARTIN J.B., *The Determination Mode Shapes For Dynamically Loaded Rigid - Plastic Structures*, MECCANICA, 3, 42-45, 1981.