

CEMによる地盤のモデル化とその入力 パラメーターの決定法

村上敏夫¹・久武勝保²・櫻井春輔³

¹正会員 (株)地崎工業 技術開発部 (〒105 東京都港区西新橋 2-23-1)

²正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科

³正会員 工博, Ph.D 神戸大学教授 工学部建設学科

複数の要素を集合体として一体化するパッキング手法により、地盤を迅速にモデル化する方法、および要素集合体の力学特性を定量的に把握するための圧縮試験解析手法を提案した。また、要素集合体の強度特性・変形特性と、CEMの入力定数との関係を定量的に考察することにより、所要の力学特性を示すモデル地盤を作成するための入力定数決定法を示した。

Key Words : numerical analysis, compression test, granular material, identification

1. 緒 論

トンネルや斜面などの地盤構造物の安全性を評価する場合、その連続体挙動のみならず不連続体挙動までを統一的に解析する手法が望まれる。著者らは、このような手法としてCEM(Contact Element Method)を開発し^{1),2)}、トンネル切羽や斜面の崩壊現象³⁾⁻⁶⁾を表現できるまでに至っている。しかし、この手法を実際に適用するには、実地盤の強度特性や変形特性に対応するように入力パラメーターを客観的かつ合理的に決定する必要がある。

個別要素法を有限な数のアルミ棒積層体の挙動解析に適用する場合は、個々の要素の形状や大きさ、配列状態などを実際の積層体に一致させ、力学モデルの剛性を弾性円柱の理論解などから定めることにより、積層体挙動を定量的にシミュレートできる程度に至っている⁷⁾。しかし、無数といえる程の土粒子で構成される地盤を対象とする場合においては、上記積層体の解析と同じように、地盤を構成する個々の土粒子に対応させて要素の大きさや形状をモデル化するのは不可能といつてよい。本研究では、地盤を個々の要素レベルでモデル化するのではなく、複数要素の集合体として地盤を巨視的に捉えてモデル化し、その力学挙動を実地盤の力学挙動に一致させることを考える。そのためには、要素集合体の力学特性を定量的に把握する手法を確立する必要がある。さらに、この集合体の力学特性とCEMの入力パラメーターとの関係を定量的に把握することも必要になる。

本論文では、要素集合体のパッキングに工夫を凝らす

ことにより、地盤のモデル化を合理的かつ迅速に行う方法を提案している。この方法では、地盤全体を一挙にモデル化するのではなく、先ず、本論文で提案するパッキング手法により複数要素が密集する矩形ブロックを作成しておき、次に、この矩形ブロックをひとつのユニットとみなし、これを縦横に敷き詰めることにより地盤全体のモデル化を行う。結果的に、モデル地盤は複数の矩形ブロックから構成されることになる。したがって、このようにしてモデル化された地盤の力学特性は、基本的に矩形ブロックの力学特性に依存することになる。実地盤の力学特性値が地盤採取試料を用いた力学試験から得られるならば、矩形ブロックを一定条件下で圧縮破壊させるシミュレーション解析を行い、この解析結果に基づきモデル地盤の力学特性値を定義するのが合理的と言えよう。本研究では、このようなモデル地盤の力学特性を定量的に把握するため圧縮試験解析手法を提示する。

また、砂質地盤を想定したモデル地盤において、CEMの入力定数がモデル地盤の力学特性におよぼす影響について定量的に考察する。その成果に基づき、所定の力学特性値を有するモデル地盤を作成するための入力定数決定法について考察する。

2. 圧縮試験解析の方法

緒論で述べた方法により地盤をモデル化するためには、矩形ブロックを作成する際の要素集合体のパッキングに特別な工夫が必要とされる。以下では、パッキング方法と矩形ブロックを一定拘束圧下で破壊させる圧縮試

験解析の内容を示す。

(1) 要素集合体のパッキング方法

圧縮試験解析の前段階として、まずCEM要素により試験体すなわち矩形ブロックを作成しておく必要がある。著者らは、比較的広い矩形領域にランダムに配置した要素を自然落下させた後、周囲の壁を狭めてゆく方法でパッキングを行ってきた^{2),3)}。しかし、この方法では重い要素ほど底部に溜ったり、壁に近い要素ほどより密集する傾向がある。また、地盤をモデル化する段階では、試験体作成に用いた要素数の数十倍から数百倍の要素数でパッキングを行うため、これに要する計算時間も増大する。そこで、要素配置の偏りを改善し、さらに実地盤をモデル化する段階での要素パッキングに必要な計算時間を大幅に短縮するため、以下で示す方法を提案する。

提案手法においては、壁や自然落下を用いない方法でパッキングを行う。まず、試験体を構成する要素の初期配置を図-1(A)に示す一定の矩形領域内に乱数発生により決定する。ただし、この矩形枠は前述した従来の方法における壁とは全く異なるものであり、枠と要素の接触はない。次に、壁を用いて要素を密集させるかわりに、矩形領域内の全ての要素を次式

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i \cdot L_x' / L_x \\ y_i' &= y_i \cdot L_y' / L_y \end{aligned} \quad (1)$$

により微量強制移動させる。ここに、 L_x 、 L_y は要素を移動させる前の矩形領域の縦横の長さであり、これらの長さが L_x' 、 L_y' となるように矩形領域を縮小させ、移動前の要素位置座標 x_i 、 y_i に矩形領域の x 、 y 軸方向の縮小比率 L_x'/L_x 、 L_y'/L_y を乗じることにより移動後の要素位置座標 x_i' 、 y_i' を決定する。図-1(B)は、(A)の要素を式(1)にしたがって強制移動させたときの状況を模式的に示したものであり、壁を用いる場合よりも要素が均等に接近することがわかる。この計算は、CEM解析プログラムにおける接触判定計算の直前に、式(1)の計算プログラムを追加して行う。また、強制移動後、 L_x 、 L_y および x 、 y をあらためて L_x' 、 L_y' および x 、 y と置き換え、次ステップでの強制移動の計算に備える。

強制移動および要素どうしの接触により、矩形枠を跨ぐ要素が発生する。その要素はステップ毎に計算される要素と矩形枠の位置および要素半径から判定できる。提案手法では、図-1(C)に示す要素a、bのように矩形枠を跨ぐ要素の接触判定、接触力計算は、以下に示す特別な考え方に基いて行う。

要素aのように x 軸に平行な境界を跨ぐ要素の場合については、まず要素aを y 軸方向に L_y シフトさせた要素a'を出現させ、次に要素aとその周辺要素および

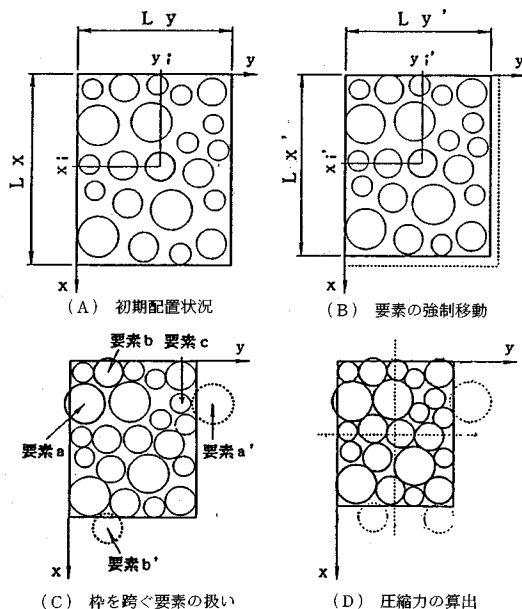


図-1 要素集合体のパッキングの概念図

要素a'とその周辺要素との間で別々に接触判定、接触力計算を行っておき、両者の結果を足し合せたものを要素aの接触判定結果、接触力計算結果とする。たとえば、図-1(C)において要素a'と要素cが接触しているが、これは要素aが要素cと接触しているものと判定し、要素aは要素cからも接触力を受けると解釈する。要素bのように y 軸に平行な境界を跨ぐ要素についても同様である。

パッキングでは、境界上の要素が対辺の境界上にも位置し、あたかも要素が循環するような特殊な境界条件下で計算を行うため、緒論で言及したように矩形領域内の要素群をひとつのユニットとして考え、これを L_x または L_y ずらして敷き詰めることにより地盤全体のパッキングが短時間でできるようになる。

パッキングは、図-1(D)に示す領域を上下に2分する破線より上側にある要素が下側にある要素に対しておおよそ接触力の x 軸方向成分の総和を L_y で除した値を σ_x 、同様な考えで y 軸方向の平均応力を σ_y として求め、式(1)による要素位置の微調整により、 σ_x 、 σ_y が予め設定しておいた拘束圧力 σ_3 に収束するまで行う。本研究では、その差が1%以内になった時点でパッキングの計算を終了させている。

(2) 試験体の圧縮方法

σ_x 、 σ_y が σ_3 に収束した時点において矩形領域内の要素を取りだし、図-2に示すように要素を中心座標により領域①~⑤にグルーピングする。なお、②~⑤の幅は

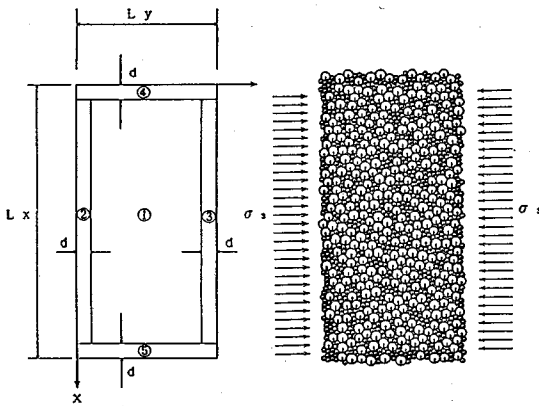


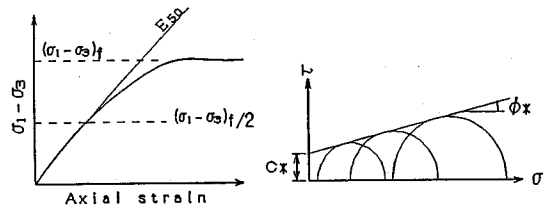
図-2 要素のグルーピング 図-3 試験体モデル

図中の d 値で与える。図-3は d 値を要素最大直径にした場合のパッキング例であり、要素中心が②～⑤内に位置する要素を太線で表している。

圧縮試験解析では、まずパッキング解析で得られた要素配列を引き継ぎ、④および⑤に属する要素を拘束し、②および③に属する要素の中心に拘束圧 σ_3 に見合う水平力を作用させた予備解析を行う。ここで、水平力の大きさは、図-3に示す拘束圧 σ_3 の作用方向に投影した要素面積に σ_3 を乗じて求める。この予備解析において、④に属する要素が他の要素から受ける接触力の鉛直成分の総和を試験体の水平幅で割った値を軸圧縮応力 σ_1 として求めておく。予備解析とパッキング解析では境界条件が違うため、予備解析で求められる σ_1 と σ_3 の値には若干の差が生じる。そこで、この差を縮小するように④に属する要素を上下に微小量移動させた予備解析を繰り返し、 σ_1 と σ_3 の差が1%以内になる状態を作り出す。ただし、④に属する要素の上下動は、互いの相対的位置を変化させずに行うこととする。この後、④に属する要素を一定の軸ひずみ速度で降下させ、試験体を圧縮する。

(3) 試験結果の整理方法

軸応力 σ_1 、拘束圧 σ_3 および上端要素の降下量より求める軸ひずみの3量を図-4 (A) に示す軸差応力と軸ひずみの関係で整理する。この関係図から軸差応力の最大値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を読み取り、この時の σ_1 、 σ_3 からモール円を描く。拘束圧を変化させた圧縮試験解析から図-4 (B) に示すモール円群が得られるので、これらにほぼ接する直線を描き、この直線の傾きの角度 ϕ_* と切片 c_* を読み取る。また、図-4 (A) の曲線の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ である点と原点を結ぶ直線の勾配 E_{50} を求める。以後、このように定義した強度に関する ϕ_* 、 c_* を一括して強度定数、変形に関する E_{50} を変形係数と呼ぶことにする。また、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ をピーク強度と呼ぶことにする。



(A) 軸差応力と軸ひずみの関係 (B) モールの応力円

図-4 変形係数と強度定数の定義

なお、CEM での入力強度定数と解析の結果得られる強度定数の混同を避けるため、CEM の入力定数には e の添字を付し、また圧縮試験解析によって得られるモデル地盤の強度定数には $*$ の添字を付すことにする。

3. モデル地盤の力学特性と CEM の入力定数の関係

砂質地盤を対象とした解析を想定し、強度定数の値が $c_* = 0$ 、 $\phi_* = 0$ であるモデル地盤の作成方法およびモデル地盤の力学特性と CEM の入力定数の関係について考察する。ただし、CEM の入力定数には、要素間摩擦角 ϕ_e 、要素間粘着力 c_e 、法線および接線方向の単位面積当たりのバネ定数 k_n 、 k_s および減衰定数 ζ_n 、 ζ_s があるが、このうち ζ_n 、 ζ_s は力学モデルを構成するダッシュポットの粘性係数が臨界粘性係数となるように値を1に固定^{1), 2)}しているため、この2量を除いた ϕ_e 、 c_e 、 k_n 、 k_s を本論文における入力定数とする。

また、モデル地盤の力学特性は、要素の詰まり具合、噛み合わせの程度といった骨格構造の違いによっても影響を受けるので、圧縮試験解析に用いる試験体は表-1に示す半径の異なる3種類の要素を用いて作成するが、骨格構造に密接に関係する要素半径 r_1 、 r_2 、 r_3 、個数の比率 $N_1 : N_2 : N_3$ および体積和の比率 $\sum V_1 : \sum V_2 : \sum V_3$ は、全ての圧縮試験解析で共通とする。

(1) 軸ひずみ速度の決定と積分時間間隔の決定

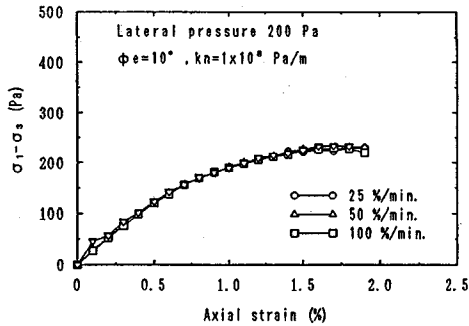
軸ひずみ速度を決定するため、積分時間間隔を 0.5×10^{-4} sec、 ϕ_e を 10° 、拘束圧を 200 Pa、他の入力定数を表-2に示す値で与え、軸ひずみ速度のみを変化させた圧縮試験解析を行った。図-5に軸ひずみ速度が毎分25%、50%、100%の場合の結果を示す。これより、軸ひずみ速度が毎分25%~100%の範囲においては、軸ひずみ速度が圧縮試験解析結果にほとんど影響をおよぼさないことがわかる。したがって、解が発散しない程度に軸ひずみ速度を大きくとることができ、計算時間を節約することができる。本論文の圧縮試験解析では、上記の結果から毎分100%の軸ひずみ速度を採用する。

表一 試験体の要素構成に関する条件

半径 (m)	$r_1=0.0014, r_2=0.0028, r_3=0.0032$
個数の比率	$N_1 : N_2 : N_3 = 6.48 : 2.30 : 1$
体積和の比率	$\Sigma V_1 : \Sigma V_2 : \Sigma V_3 = 1.24 : 1.76 : 1$

表二 力学モデルに与える入力定数

バネ定数	$k_n = 1.00 \times 10^4 \text{ Pa/m}$
	$k_s = 0.25 \times 10^4 \text{ Pa/m}$
密度	$\rho_e = 2500 \text{ kg/m}^3$



図一五 軸ひずみ速度を変化させた場合の解析結果

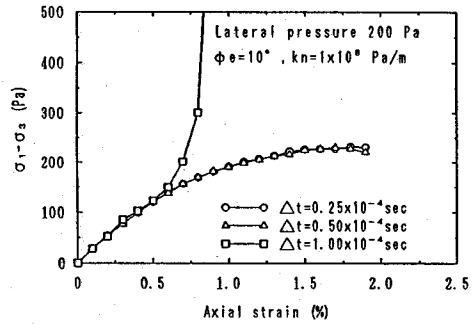
次に、積分時間間隔を決定するため、積分時間間隔のみを変化させた圧縮試験解析を行った。積分時間間隔がそれぞれ $0.25 \times 10^{-4} \text{ sec}$, $0.5 \times 10^{-4} \text{ sec}$, $1.0 \times 10^{-4} \text{ sec}$ の場合の結果を図一六示す。これより、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ sec}$ では、解が発散することがわかる。そこで、本論文の圧縮試験解析では、積分時間間隔を $0.5 \times 10^{-4} \text{ sec}$ とする。

(2) 試験体を構成する要素数の決定

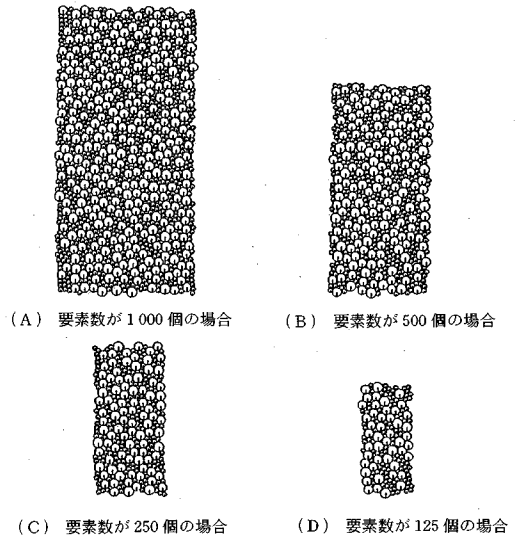
圧縮試験解析の計算時間を節約するためには、試験体を構成する要素数が少ないほど都合がよい。そこで、表一に示す要素半径毎の混合比率 $N_1 : N_2 : N_3$ は変更せず、試験体を構成する要素数のみを、1000個から500個、250個、125個に変化させて圧縮試験解析を行った。図一七に試験体のモデル図を示し、図一八に圧縮試験解析から得られた軸差応力と軸ひずみの関係を示す。同図より、要素数が少ないほど、応力・ひずみ曲線が乱れることがわかる。したがって、滑らかな応力・ひずみ曲線を得るためには、ある程度の要素数を確保する必要があり、本論文では要素数が1000個の試験体を圧縮試験解析に用いる。

(3) 軸圧縮試験解析結果

砂のせん断強さが土粒子間の摩擦によるせん断抵抗に起因することを考えるならば、CEMの入力定数において摩擦抵抗に関与する要素間摩擦角 ϕ_e を非ゼロ、粘着抵抗に関与する要素間粘着力 c_e をゼロとすることによ



図一六 積分時間間隔を変化させた場合の解析結果



図一七 要素数を変化させた場合の試験体モデル

り、上記の力学特性をもつモデル地盤の作成が可能と思われる。図一九は、 $\phi_e=15^\circ$, $c_e=0$ とし、他の入力定数を表二に示す値で与え、拘束圧 σ_3 の値を 100~400 Pa の間で 100 Pa 刻みに変化させて行った圧縮試験解析結果である。図一九 (A) の結果から図一九 (B) に示すモデルの応力円と破壊線を描き、これからモデル地盤の強度定数を読み取ると $c_* = 0.4 \text{ Pa}$, $\phi_* = 27.4^\circ$ が得られた。 c_* は拘束圧に比し無視できる程小さいことから、CEMの入力定数において $c_e=0$, $\phi_e \neq 0$ とすることにより強度定数が $c_* = 0$, $\phi_* \neq 0$ であるモデル地盤を作成できることがわかる。

以下では c_e の値をゼロに固定し、 ϕ_e , k_n , k_s の値を変化させて行った圧縮試験解析結果を示す。ただし、 k_s の値については、その大きさを k_n との比 k_s/k_n を用いて表現する。また、圧縮試験解析結果から ϕ_e , k_n , k_s/k_n と強度定数 ϕ_* , 変形係数 E_{50} の関係について考察する。さらに、考察結果に基づき、任意の ϕ_* , E_{50} を与える入力定数の決定法を示す。

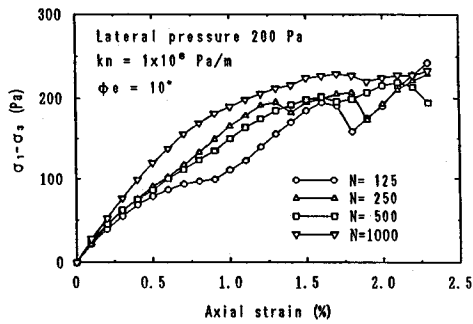
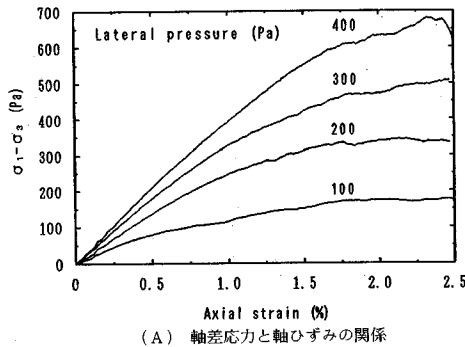
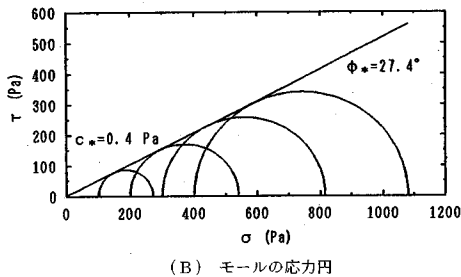


図-8 要素数を变化させた場合の解析結果



(A) 軸差応力と軸ひずみの関係



(B) モールの応力円

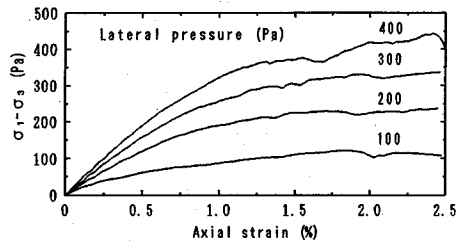
図-9 要素間摩擦角 ϕ_e が 15° の場合の解析結果

a) 強度定数 ϕ_* と入力定数の関係

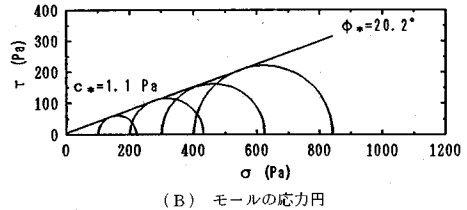
入力定数 ϕ_e が強度定数 ϕ_* におよぼす影響を調べるため、 k_n の値を 1×10^8 Pa/m、 k_s/k_n の値を 0.25 に固定し、 ϕ_e の値を 15°、10°、5° と変化させて行った圧縮試験解析結果をそれぞれ図-9、図-10、図-11 に示す。これらの軸差応力と軸ひずみの関係図から、たとえば拘束圧が 200 Pa の場合について、 ϕ_e が 5°、10°、15° のピーク強度を読みとると、それぞれ 140、240、330 Pa であり、 ϕ_e の値が大であるほどピーク強度が大になることがわかる。図-12 は、図-9 (B)~図-11 (B) に示す破壊線から強度定数 ϕ_* を読み取り、これらと ϕ_e との関係を示したものである。これより、 k_n 、 k_s/k_n が一定の場合、強度定数 ϕ_* は入力定数 ϕ_e を変数とする関数 $f_1(\phi_e)$ として、次式

$$\phi_* = f_1(\phi_e) \quad (2)$$

で表されることとなる。

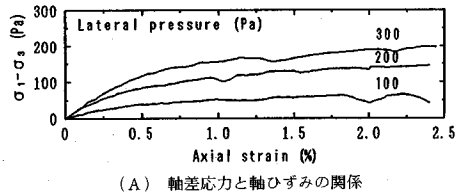


(A) 軸差応力と軸ひずみの関係

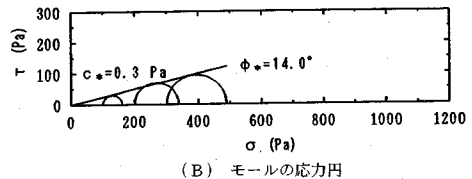


(B) モールの応力円

図-10 要素間摩擦角 ϕ_e が 10° の場合の解析結果



(A) 軸差応力と軸ひずみの関係



(B) モールの応力円

図-11 要素間摩擦角 ϕ_e が 5° の場合の解析結果

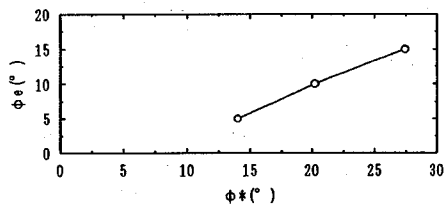


図-12 強度定数 ϕ_* と入力定数 ϕ_e の関係

入力定数 k_n の値が 0.5~2.0 倍の間で変化した場合の強度定数 ϕ_* の変化を調べるため、 k_n の値のみを変化させた圧縮試験解析を行った。図-13 に示す△の曲線は、 $\phi_e = 10^\circ$ 、 $\sigma_3 = 200$ Pa、 $k_s/k_n = 0.25$ 、 $k_n = 0.5 \times 10^8$ Pa/m とした場合の軸差応力と軸ひずみの関係であり、○および□の曲線は、入力定数のうち k_n の値のみを 0.5 倍および 2.0 倍に変化させた場合の結果である。△の曲線のピーク強度と○、□の曲線のピーク強度はほぼ同じ値を示すことから、 k_n の値が 0.5~2.0 倍程度に変化しても強度定数 ϕ_* はあまり変化しないことがわかる。したがって、式 (2) で表す強度定数 ϕ_* と入力定

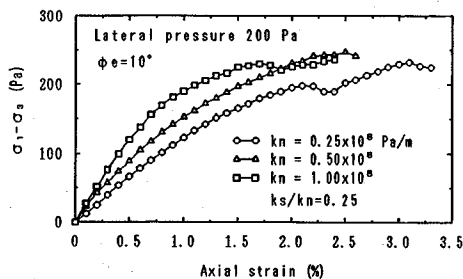


図-13 k_n が変化する場合の軸差応力と軸ひずみの関係

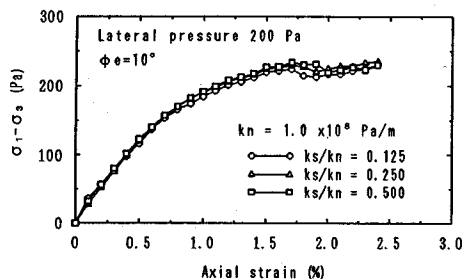


図-14 k_s/k_n が変化する場合の軸差応力と軸ひずみの関係

数 ϕ_e の関係もあまり変化しないことが理解できる。

入力定数 k_s/k_n の値が 0.5 倍～2.0 倍の間で変化した場合の強度定数 ϕ_* の変化を調べるため、 k_s/k_n の値のみを変化させた圧縮試験解析を行った。図-14 に示す Δ の曲線は、 $\phi_e=10^\circ$ 、 $\sigma_3=200$ Pa、 $k_n=1 \times 10^8$ Pa/m、 $k_s/k_n=0.25$ とした場合の軸差応力と軸ひずみの関係であり、 \circ および \square の曲線は、入力定数のうち k_s/k_n の値のみを 0.5 倍および 2.0 倍とした場合の結果である。 Δ の曲線のピーク強度と \circ 、 \square の曲線のピーク強度がほぼ同じ値を示すことから、 k_s/k_n の値が 0.5～2.0 倍程度に変化しても強度定数 ϕ_* はあまり変化しないことがわかる。したがって、式 (2) で表す強度定数 ϕ_* と入力定数 ϕ_e の関係もあまり変化しないことが理解できる。

b) 変形係数 E_{50} と入力定数の関係

図-15 は、 $\phi_e=15^\circ$ 、 $k_n=1 \times 10^8$ Pa/m、 $k_s/k_n=0.25$ の場合の圧縮試験結果である図-9 (A) の軸ひずみと軸差応力の関係から、拘束圧 σ_3 が 100, 200, 300, 400 Pa の場合の変形係数 E_{50} を求め、これと拘束圧の関係を両対数グラフで表したものである。これより、変形係数 E_{50} は拘束圧 σ_3 に大きく依存することがわかる。

図-16 は、 ϕ_e の値のみを 15° 、 10° 、 5° と変化した場合の試験結果である図-9 (A)、図-10 (A)、図-11 (A) の軸差応力と軸ひずみの関係から拘束圧が 200 Pa のときの変形係数 E_{50} を求め、これと入力定数 ϕ_e との関係を示すものである。これより、変形係数 E_{50} は入力定数 ϕ_e の影響を受けることがわかる。

図-17 は、 k_n の値のみを変化させた場合の圧縮試験解析結果である図-13 の軸差応力と軸ひずみの関係から求めた変形係数 E_{50} と入力定数 k_n の関係を示したものである。これより、変形係数 E_{50} は入力定数 k_n の影響を受けることがわかる。また、 k_s/k_n の値のみを変化させた場合の試験結果である図-14 より、 k_s の値を k_n の 0.125～0.5 倍程度とする場合、変形係数 E_{50} は k_s の影響をあまり受けないことがわかる。

以上より、変形係数 E_{50} は入力定数 ϕ_e 、 k_n および拘束圧 σ_3 の影響を受けることがわかる。

図-18 (A)～(C) の \circ 印で表す曲線は、図-10 に示

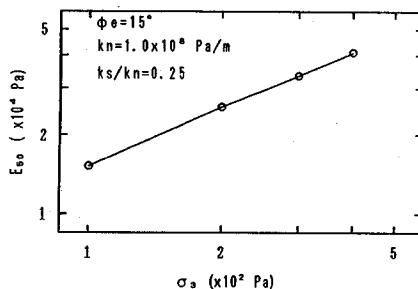


図-15 変形係数 E_{50} と拘束圧 σ_3 との関係

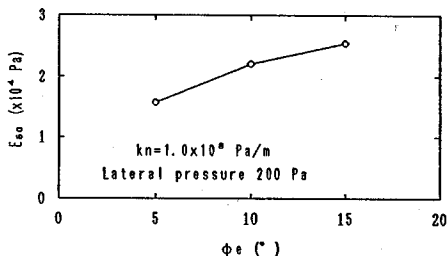
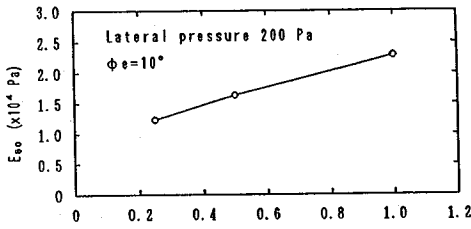


図-16 変形係数 E_{50} と入力定数 ϕ_e の関係

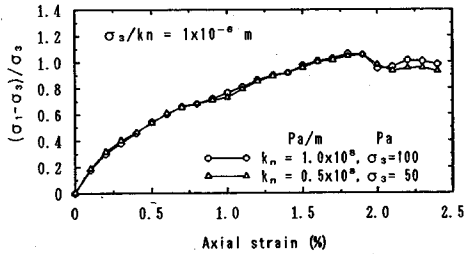
す k_n が 1×10^8 Pa/m、 ϕ_e が 10° の場合の軸差応力と軸ひずみの関係において、拘束圧が 100, 200, 300 Pa の場合の軸差応力をそれぞれの拘束圧で無次元化したものである。同様に、 Δ 印で表す曲線は、 k_n の値を \circ 印の曲線の $1/2$ の値で与えた圧縮試験解析結果において、拘束圧が 50, 100, 150 Pa の場合の軸差応力をそれぞれの拘束圧で無次元化したものである。 \circ 印と Δ 印で表す曲線の σ_3 と k_n の比は (A)～(C) で一致しており、これらの値は順に 1×10^{-6} 、 2×10^{-6} 、 3×10^{-6} m である。これらより、 σ_3/k_n の値が一定であれば、曲線の形状もほぼ一定となることがわかる。なお、 ϕ_e が 5° 、 15° の場合についても ϕ_e が 10° の場合と同様な結果を得ている。このことは、変形係数を拘束圧で無次元化した E_{50}/σ_3 が ϕ_e と σ_3/k_n を変数とする関数 $f_3(\phi_e, \sigma_3/k_n)$ として、次式

$$E_{50}/\sigma_3 = f_3(\phi_e, \sigma_3/k_n) \quad (3)$$

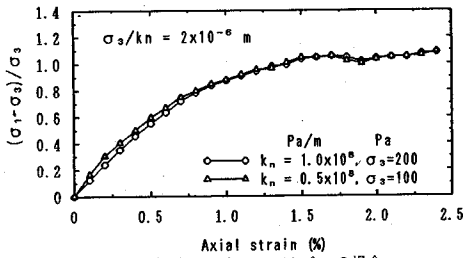
で表現できることを意味している。そこで、 E_{50}/σ_3 が次式により表されると仮定する。



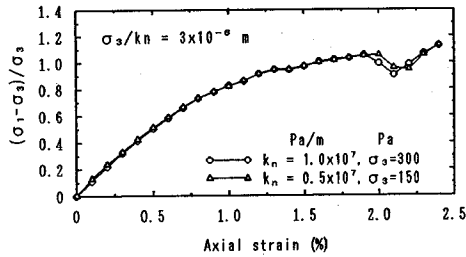
図—17 変形係数 E_{50} と入力定数 k_n の関係



(A) $\sigma_3/k_n = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ の場合



(B) $\sigma_3/k_n = 2 \times 10^{-6} \text{ m}$ の場合

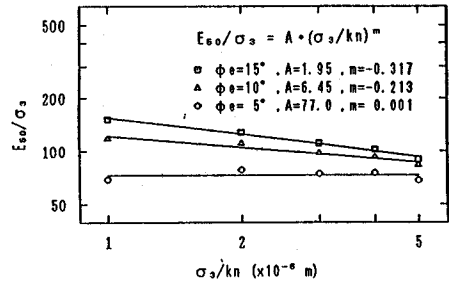


(C) $\sigma_3/k_n = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$ の場合

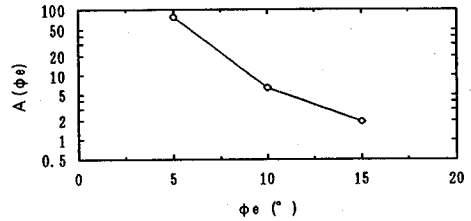
図—18 σ_3/k_n が一定の場合の解析結果

$$E_{50}/\sigma_3 = A(\phi_e) (\sigma_3/k_n)^{m(\phi_e)} \quad (4)$$

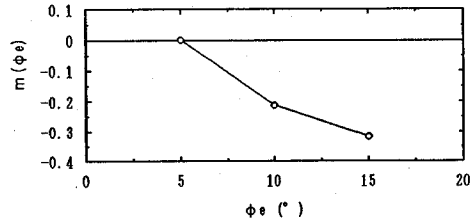
ここに、 $A(\phi_e)$ 、 $m(\phi_e)$ は入力定数 ϕ_e に依存する定数である。図—19の両対数グラフ上にプロットされた○、△、□印の点は、 ϕ_e の値がそれぞれ 5° 、 10° 、 15° の場合の圧縮試験解析結果（図—11、図—10、図—9）から求められる E_{50}/σ_3 と σ_3/k_n の関係を表したものである。図中の直線は、プロットされた点に最小自乗法を適用して求めた回帰直線である。これら回帰直線に沿って○、□、△の点がきれいに分布していることから、 E_{50}/σ_3 が式（4）により近似できることがわかる。なお、図—20、図—21は、このときの ϕ_e と $A(\phi_e)$ 、 ϕ_e と $m(\phi_e)$ の関係を示したものである。



図—19 E_{50}/σ_3 と σ_3/k_n の関係



図—20 要素配列から決定される ϕ_e と $A(\phi_e)$ の関係



図—21 要素配列から決定される ϕ_e と $m(\phi_e)$ の関係

c) 入力定数の決定法

ϕ_e と $A(\phi_e)$ 、 ϕ_e と $m(\phi_e)$ の関係は要素の初期配列に依存すると考えられるため、ここでは、要素の初期配列を変化させない場合における入力定数の決定法を示す。具体的には、強度定数が ϕ_* 、拘束圧が σ_3 のときの変形係数が E_{50} であるモデル地盤の作成を想定し、入力定数 ϕ_e 、 k_n を未知量として、これらを既知量 ϕ_* 、 σ_3 、 E_{50} から決定する手法を示す。ただし、 k_s の値は k_n の値の $0.125 \sim 0.5$ 倍とする。

先ず最初に、 k_n を仮定し、 ϕ_e を変化させた数回の圧縮試験解析を行い、図—12に示すような ϕ_e と強度定数 ϕ_* の関係図を作成する。これにより、式（2）に示す関数 $f_1(\phi_e)$ が定まるため、 ϕ_* に対応する ϕ_e は次式

$$\phi_e = f_1^{-1}(\phi_*) \quad (5)$$

から決定できる。

次に、式（5）により ϕ_e が得られたならば、これに対応する $A(\phi_e)$ 、 $m(\phi_e)$ を図—20、図—21より求める。拘束圧が σ_3 のとき変形係数が E_{50} となるモデル地盤に対応する入力定数 k_n の値は、式（4）を変形した次式

$$k_n = E_{50}^{-1/m(\phi_e)} \cdot A(\phi_e)^{1/m(\phi_e)} \cdot \sigma_3^{-1+1/m(\phi_e)} \quad (6)$$

から決定できる。

なお、ここで決定された k_n の値が最初に仮定した k_n の値と極端に異なる場合には、 k_n の値を仮定し直して再び圧縮試験解析を行い、式(5)の関係性を求め直す必要がある。なぜなら、3.(3)a) で述べたように、 k_n の値が0.5~2.0倍程度に変化する範囲において、 ϕ_e と ϕ_* の関係性はあまり変化しないことが確認されているが、この範囲を越える場合については、 ϕ_e と ϕ_* の関係性がどの程度変化するか明らかでないからである。

7. 結 論

本研究により得られた成果を下記に列挙する。

- 1) 要素集合体としての矩形ブロックを本論文で示した手法で作成しておけば、この矩形ブロックを縦横に敷き詰めることにより合理的かつ迅速にモデル地盤を作成できる。
- 2) 前記の方法で作成したモデル地盤の力学特性は、矩形ブロックの力学特性に基本的に依存することから、一定条件下で矩形ブロックを圧縮破壊させるシミュレーション解析を行い、その結果に基づきモデル地盤の力学特性を定義する圧縮試験解析手法を提案した。提案手法では、モデル地盤の強度特性が c_* 、 ϕ_* で、また変形特性が E_{50} で定義された。
- 3) 砂質地盤を想定したモデル地盤において、CEMの入力定数 ϕ_e 、 k_n 、 k_s が強度定数 ϕ_* 、変形係数 E_{50} におよぼす影響を定量的に考察し、 ϕ_* と ϕ_e の関係、 E_{50} と ϕ_e 、 k_n および拘束圧 σ_3 との関係性を明らかにした。さらに、強度定数が ϕ_* 、拘束圧が σ_3 のときの変形係数が

E_{50} となるモデル地盤を作成するための入力定数の決定法を示した。

なお、CEM解析では要素間で引張抵抗力が発揮される場合の解析も可能であるが、本論文では要素間の引張抵抗力を考慮しない場合での入力定数決定法について述べた。したがって、ここで提案する基本思想は、個別要素法に対しても応用できると思われる。

参考文献

- 1) Hisatake, M. & Murakami, T. : Unified Analysis of Continuous and Discontinuous Behavior of the Ground by CEM, *Proc. Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomenon in Rock Eng.*, pp.915-920, 1993.
- 2) 久武, 村上, 森: CEMによる連続体・不連続体の統一解析の試み, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.286-290, 1992.
- 3) 久武, 村上: 地盤の連続体・不連続体挙動の統一解析, 第9回岩の力学国内シンポジウム, pp.7-12, 1994.
- 4) 久武, 村上, 金澤, 角谷: トンネル切羽の崩壊挙動とそのCEM解析, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 第3部門, pp.246-247, 1993.
- 5) Hisatake, M., Murakami, T., & Eto, T. : Stability and Failure Mechanisms of a Tunnel Face with a shallow Depth, *Proc. 8th Int. Cong. on Rock Mech.*, 1995 (Tokyo) in press.
- 6) 久武勝保: トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 517/III-31, pp.57-68, 1995.
- 7) 松岡, 山本, 武馬: 個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察, 第28回土質工学研究発表会, pp.521-524, 1993.

(1994.7.26 受付)

MODELING OF THE GROUND BY CEM AND DETERMINATION OF ITS INPUT PARAMETERS

Toshio MURAKAMI, Masayasu HISATAKE,
and Shunsuke SAKURAI

CEM(Contact Element Method) is an effective numerical method for analyzing continuous and discontinuous behavior of the ground. In this paper, a packing method to assemble particle elements has been presented to reduce the time required for modeling the ground by CEM. An analytical compression test method has been proposed. The relationships between input parameters in CEM and output parameters in compression analysis such as strength and deformation parameters have been made clear. By using the above relationships, it becomes possible to determine values of the input parameters from experimental compression test results.