

壁体の変形履歴を考慮した土圧実験とその解析

名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
 名古屋工業大学大学院 学生会員 ○河野 伊知郎
 大阪土質試験所 正会員 橋本 正

本研究では、2次元掘削モデル試験機を用いて、各種の壁体の変形様式を与えた2次元土圧モデル実験を行うとともに、等方および移動硬化型の弾塑性モデルを用いた有限要素解析を行った。そして、これらの実験結果や解析結果をもとに、壁体の変形様式や変形履歴の違いによる壁面土圧や地表面沈下形状の差異について実験・解析の両面から検討する。

1. 2次元掘削モデル試験機の概要¹⁾

図-1に装置の概要を示す。本試験機では片側の側壁(45cm)が15個の可動なブロック(高さ3cm)に分割されており、各ブロックが自由に水平変位できる構造となっている。各ブロックはマイクロメーターで変位が制御(0.01mmの精度)でき、ブロックとマイクロメーターの間のロードセルにより各ブロックに作用する壁面荷重(壁面応力)が測定できる。地表面変位は、装置上部のスライドシャフト上を自由に移動できるレーザー式変位計(精度0.01mm, 測定範囲-40mm~40mm)で測る。

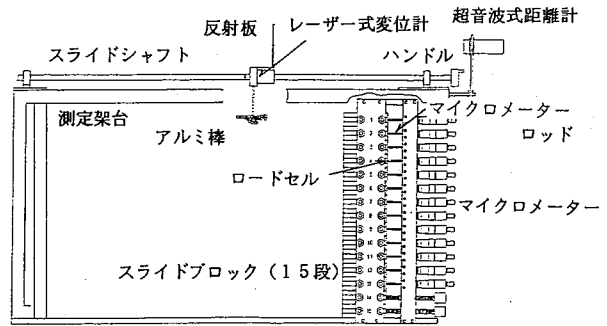


図-1 2次元掘削モデル試験機

そして各ブロックのロードセルで測った荷重をデータロガーに取り込みパーソナルコンピュータのCRT上に表示することにより、壁面土圧分布や全土圧の変化をリアルタイムで知ることができる。

2次元モデル地盤材料としてアルミ丸棒($G_s=2.69$)積層体を用いた。長さ50mmで $\Phi=1.6$ mmと3.0mmの2種類のアルミ丸棒を重量比3:2で混合し、上述のモデル試験機に高さ45cm、横幅47cmに積んだ。この時、初期水平土圧分布ができるだけ三角形分布となるようにしている(初期の水平土圧分布もCRTでチェックでき、この場合K.値は0.6~0.7となる)。このようにして作った積層体の初期間隙比は $e_0=0.25$ で単位体積重量 $\gamma_s=2.15$ gf/cm³、内部摩擦角 ϕ は約27°となる。実験では15個の可動ブロックの上部13個の可動ブロックを使って、任意の壁体の変形パターンや変形の順序を与えた。

2. 解析方法ならびに解析で用いた等方硬化型および

移動硬化型モデルの特徴²⁾

解析はモデル試験の100倍のスケールで行った。図-2に要素分割図を示すが、解析では右側のWallの部分に種々の変位を与えて主働土圧状態を生じさせている。地盤材料としては豊浦砂を想定し、その地盤の初期応力は有効単位体積重量 $\gamma' = 1.58$ tf/m³と静止土圧係数 $K_0 = 0.57$ (モデルから得られる値)から決め、壁面はなめらか(摩擦角 $\delta = 0^\circ$)として解析している。なお、解析は壁体に変位増分を与えることにより計算しているが、地盤内に引張り領域が発生した時はそれ以後の計算を打ち切っている。

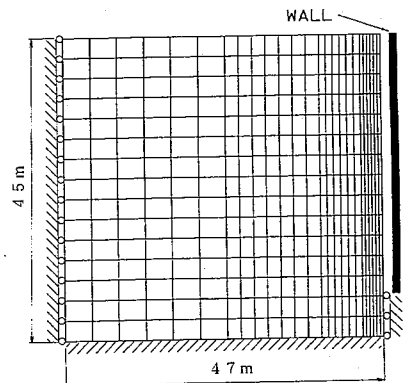


図-2 要素分割図

次に解析で用いた砂の構成モデルの特徴について述べる。まず、砂の等方硬化型モデル(t_{ij} -sand model)³⁾

Experiments and Analysis of Earth Pressure considering wall deflection history;

T. Nakai, I. Kohno(Nagoya Inst. of Tech.) & T. Hashimoto(Osaka Geo. Lab.)

では、

①土の変形強度特性におよぼす中間主応力の影響

②塑性流動方向の応力経路依存性

③ 正・負のダイラタンシー特性

が妥当に考慮されている。さらに移動硬化型モデル(kinematic hardening model)では、

④ 応力履歴の影響や主応力方向の回転つまり応力誘導異方性を

考慮している。表-1に解析に用いた豊浦砂の土質パラメータを示すが、 ξ 以外は等硬化型モデルと移動硬化型モデルで共通である。

表-1 豊浦砂の土質パラメーター

C_c	0.84×10^{-2}
C_e	0.60×10^{-2}
m	0.3
$R_f \equiv (\sigma_1/\sigma_3)_{f(comp.)}$	4.7
$D_f \equiv (d\epsilon_v/d\epsilon_1)_{f(comp.)}$	-0.6
α	0.85
ξ	0.3

3. 壁体の変形パターンを変えたモデル試験とその解析

図-3に各実験の壁体の変形パターンを示す。type

Iは壁面を下端を軸として回転させ、壁体を三角形形状に動かすものである(可動な壁体の高さ $H_0=3\text{cm} \times 13=39\text{cm}$)。type IIは15個のスライドブロックの上部13個を平行に右側に8mmまで動かす実験である。type

IIIは図に示すように壁面の上下端を固定し放物線上に移動させる実験である。有限要素解析での壁体の変形様式もモデル試験と同様の3種で行った。

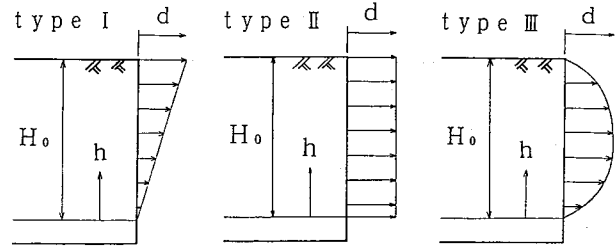


図-3 壁体の変形パターン

ここでは、水平全土圧、壁面水平土圧分布および地表面沈下形状について検討するが、水平全土圧(P_x)については $(1/2)\gamma' H_0^2$ (γ' :有効単位体積重量、 H_0 :可動壁の高さ)で割り、水平土圧分布(p_x)は $\gamma' H_0$ で割り、地表面沈下量(S)は H_0 で割ることにより、それぞれ無次元した量で示す。壁体の変位量についても、変形様式が種々であるので、図-3の各様式で変形させた部分の面積 a を H_0^2 で割ったものを指標としている。また、地表面の壁体からの距離(x)および壁体内の位置(h)も H_0 で割り無次元化して表している。

図-4に各変形様式の壁面水平土圧分布のモデル試験結果を、図-5に対応する解析結果を示す。まず、type I, II, IIIでの等硬化型モデルと移動硬化型モデルの比較を行うと、どのtypeでもほぼ同じ土圧分布になっており、type IではRankineの三角形分布に対応している。type IIでは全体的に土圧が減少しているが壁体下端の境界面で急増している。type IIIでは壁面中央部で減少しその周辺部で増大する分布となる。これらの解析結果は図-4のモデル試験結果の傾向と対応している。

図-6に全土圧～壁変位量(変位面積)関係のモデル試験結果を、図-7に解析結果を示す。type I, II, IIIでの等硬化型モデルと移動硬化型モデルの比較を行うと、type Iではほぼ一致しているのに対し、type II, IIIでは等硬化型モデルの全土圧が多少高めになっている。このような差異が生じた原因はtype Iでは地盤内に主応力軸の回転がほとんど生じないのに対して、type II, IIIでは場所により主応力軸の回転が生じる変形様式となっていたためである。解析結果もモデル試験結果も、わずかな変位で主働土圧に近い土圧となるが、変形様式により差異があることもわかる。

図-8, 9は地表面の沈下形状のモデル試験結果および解析結果であるが、壁体の変形様式により差異があることがわかる。図-9よりType Iでは壁面に近づくほど変位量が大きくなっている。Type IIでは壁面にある程度近づくまでは沈下量は増大するが、その先ではほぼ一定となっている。Type IIIでも壁面にある程度近づくまでは沈下量は増大するが、壁面付近で沈下量は逆に小さくなるのがみられる。図-8のモデル試験結果についても、解析結果と同様な傾向がみられる。

最後に、図-10に地盤内の安全率分布を示す。各Typeの最終変位での等硬化型モデルと移動硬化型モデルの解析結果は、比較的類似している。また、いずれの場合も壁体の変位の大きい所から破壊や安全率の低い領域が発達するのがみられ、特にType Iの変形様式ではこれらの領域がRankineの塑性領域に対応している。

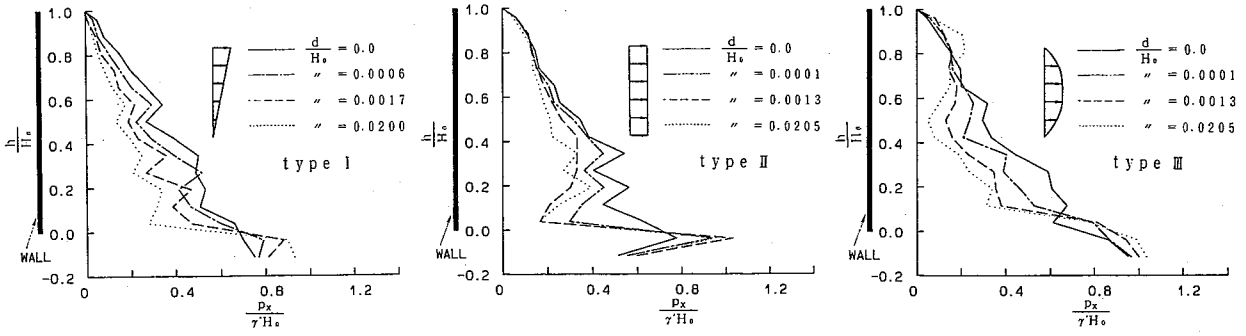


図-4 壁面水平土圧分布(モデル試験結果)

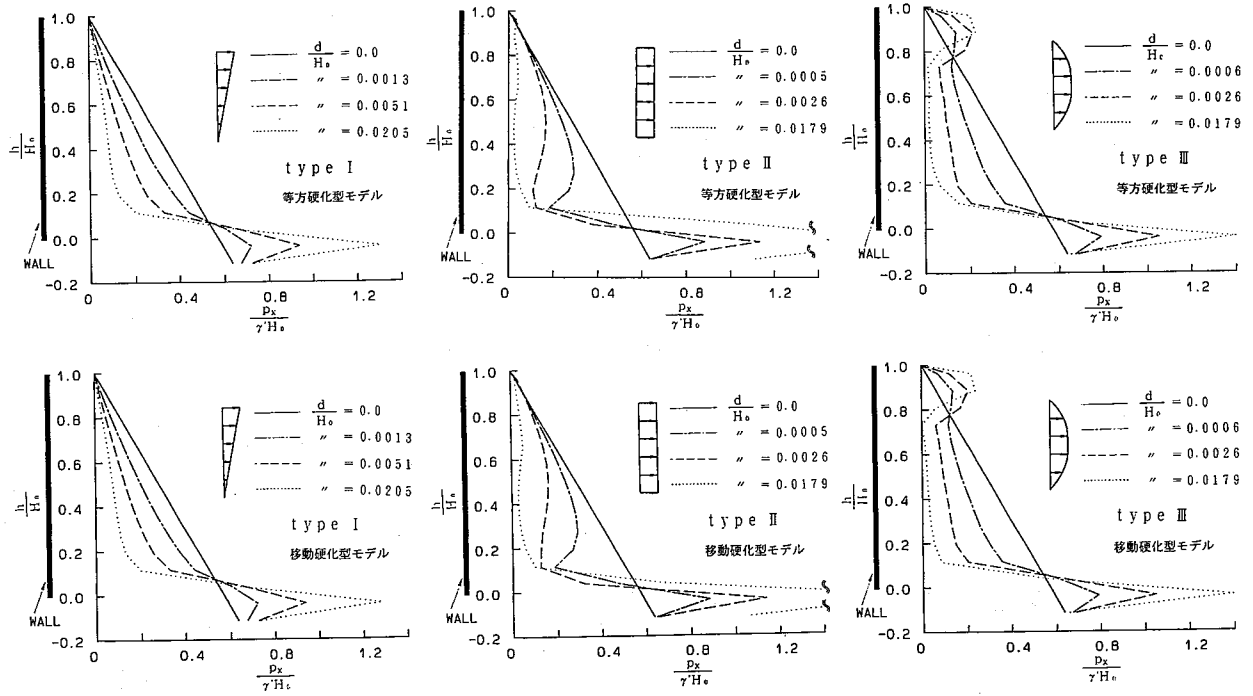


図-5 壁面水平土圧分布(解析結果)

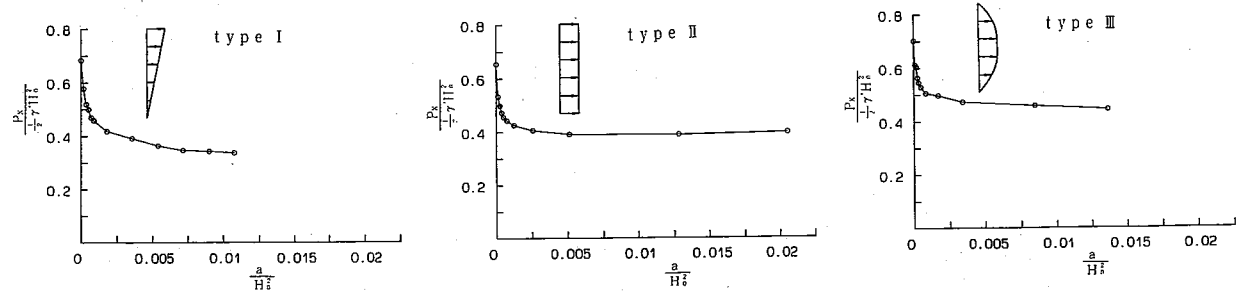


図-6 全土圧～壁変位量(変位面積)関係(モデル試験結果)

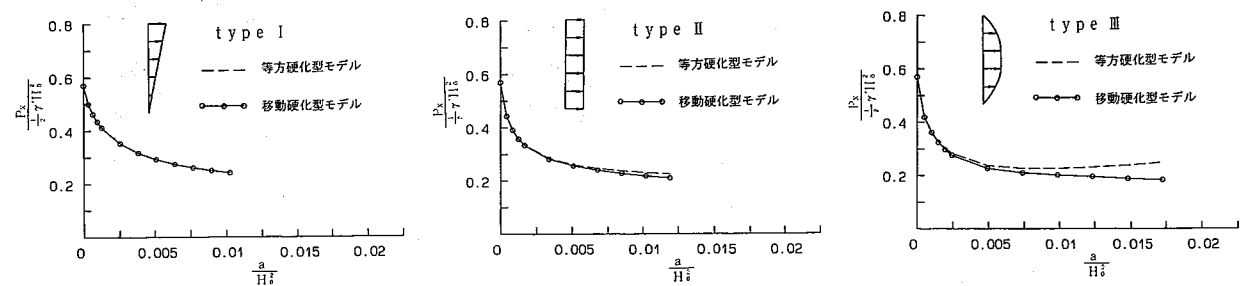


図-7 全土圧～壁変位量(変位面積)関係(解析結果)

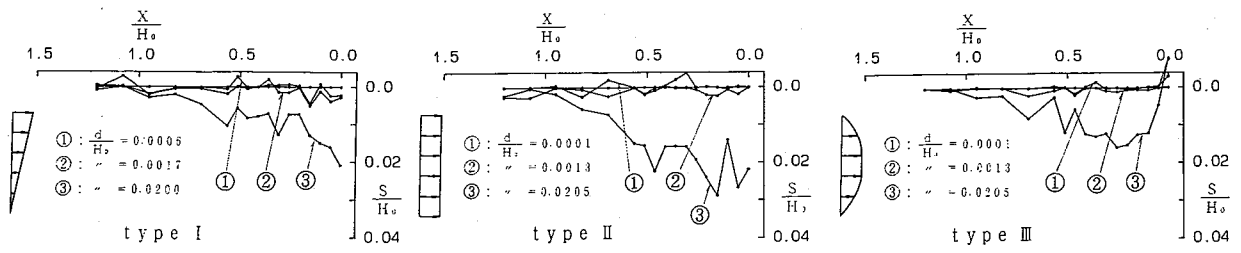


図-8 地表面の沈下形状の解析結果(モデル試験結果)

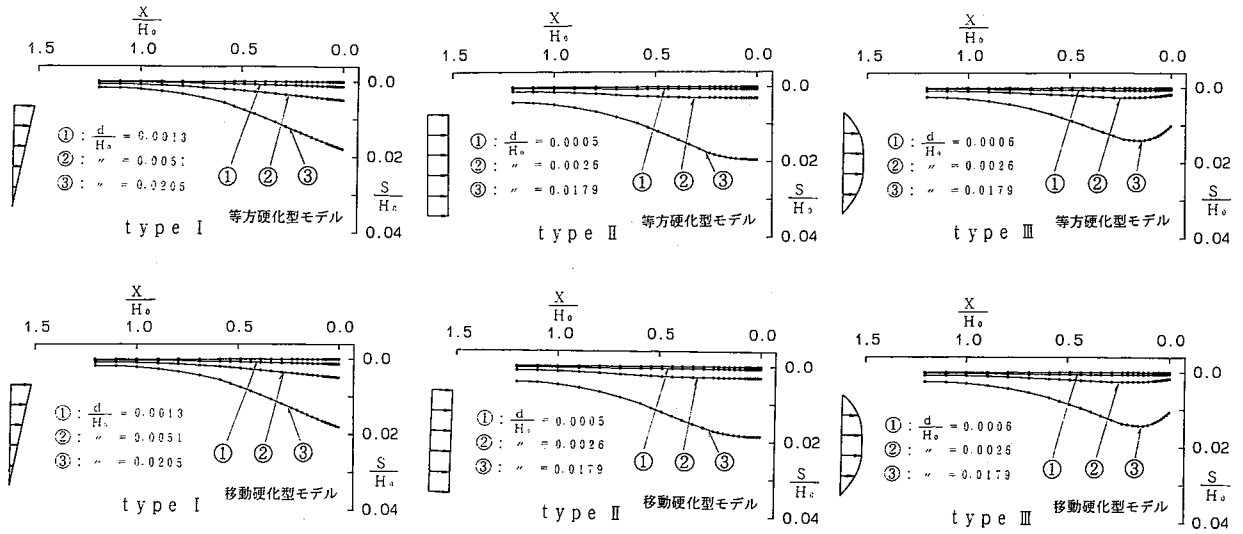


図-9 地表面の沈下形状の解析結果(解析結果)

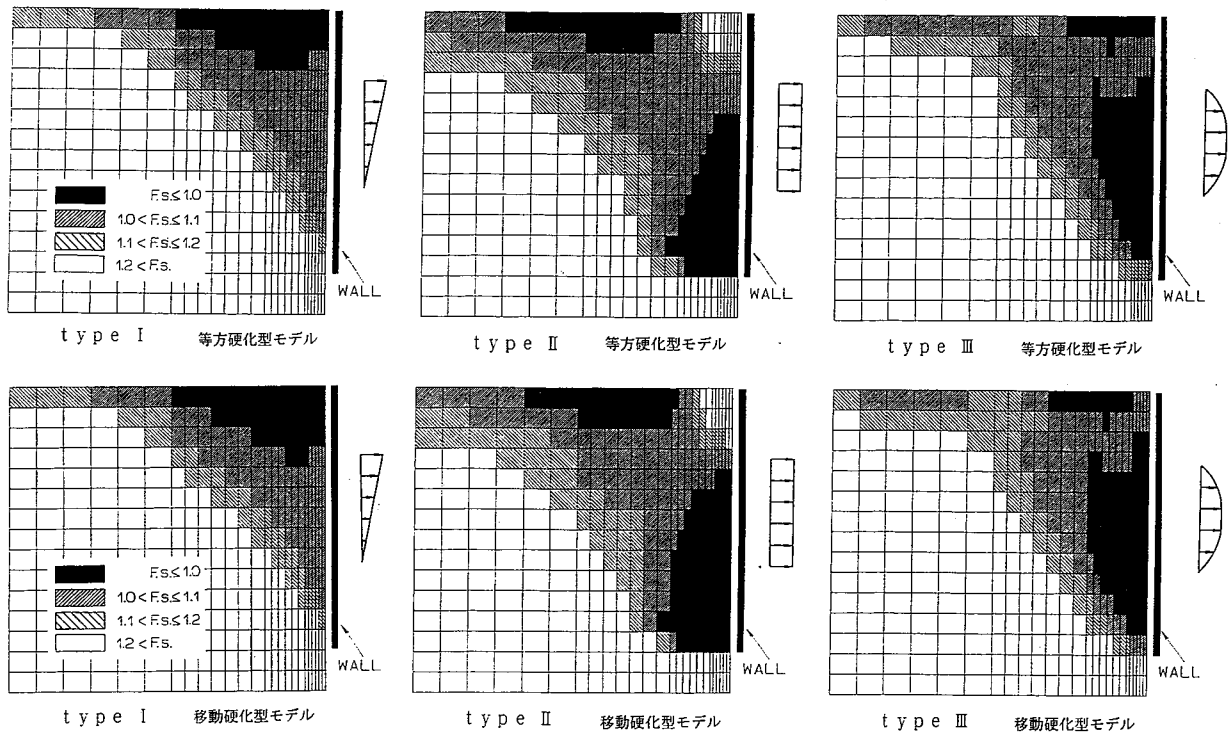


図-10 地盤内安全率分布の解析結果

4. 掘削過程をシミュレーションしたモデル試験とその解析

図-1 1 に Type IV の壁体変形パターンを示す。Type IV は任意の変形様式の一つとして、まず step① で上部壁体だけを三角形形状に動かし、step② でその下の壁体を平行にずらし、その後 step③ で下部壁体を図-1 1 のように動かすモデル実験である。このような異なる変形様式を組合せた実験を行った理由は、たとえば掘削時の山留め壁では切ばりをいれること等により掘削途中で壁体の変形様式が変化するが、このような状況をモデル化して検討することにある。また、ここでの解析には移動硬化型モデルのみを用いて行った。

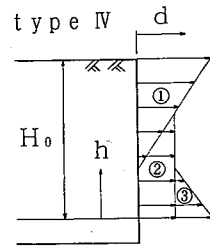


図-1 1 壁体の変形パターン

図-1 2, 1 3 はモデル試験結果および解析結果の各stepの終わりでの壁面水平土圧分布を表している。また、図-1 4, 1 5 は Type IV の全土圧～壁変位置関係のモデル試験および解析結果の全土圧の変化を示している(↓印は各stepの終わりを意味する)。壁面水平土圧分布、全土圧とも壁体の変形様式によって異なった挙動をすることがわかる。また、図-1 1 の変形パターンと図-1 2, 1 3 の壁面水平土圧分布を対応させると、いずれのパターンでも変位を大きく与えた部分の土圧が減少し、そのまわりでは主働状態にもかかわらず土圧の増加がみられる(この傾向は図-4 の Type III の土圧分布でもわかる)。図-1 6, 1 7 は各stepの終わりでの地表面沈下形状の実験結果と解析結果を表すが、ここでも沈下形状が壁体の変形様式の影響を受けている。また、壁面水平土圧分布、全土圧～変位置関係、地表面沈下形状、全てにおいてモデル試験と解析結果の間にはよい対応関係が得られた。

最後に、図-1 8 に step①、②、③ での地盤内の安全率分布を示す。step① での安全率分布の形状は図-1 0 で示した type I の安全率分布と同じ分布となるが、その後の壁体の変形パターンの違いにより安全率分布の形状は大きく異なる。つまり、地盤内のある要素が降伏状態であってもその後の変形様式が変化することにより応力の再分配が生じ、安全率が上昇する。

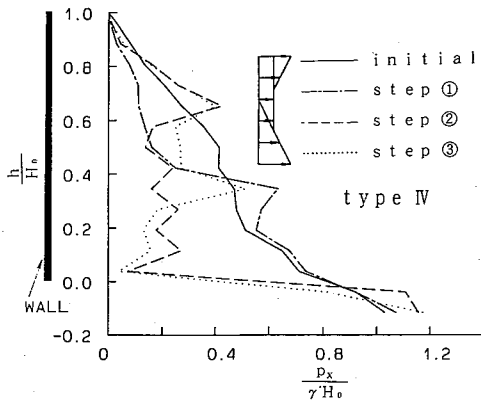


図-1 2 壁面水平土圧分布(モデル試験結果)

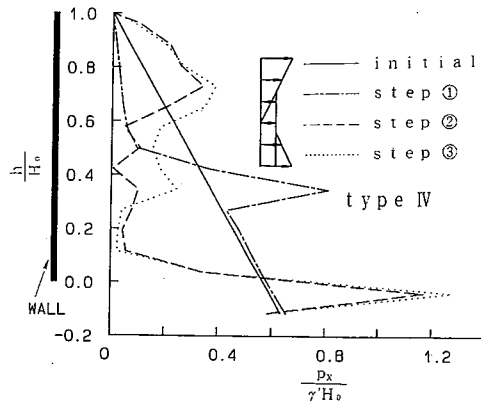


図-1 3 壁面水平土圧分布(解析結果)

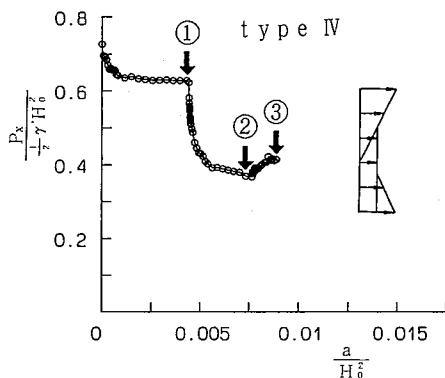


図-1 4 全土圧～壁変位置(変位面積)関係(モデル試験結果)

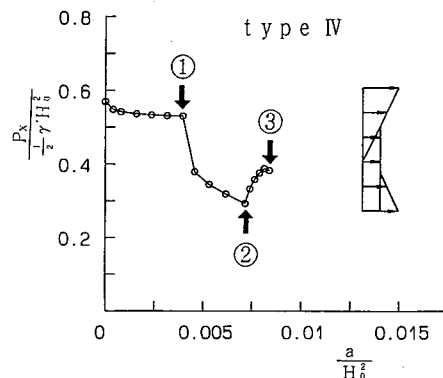


図-1 5 全土圧～壁変位置(変位面積)関係(解析結果)

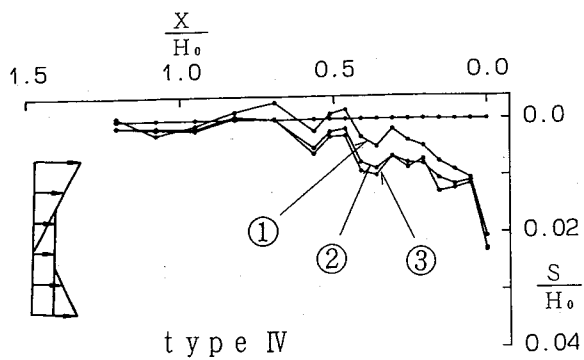


図-1 6 地表面の沈下形状の解析結果(モデル試験結果)

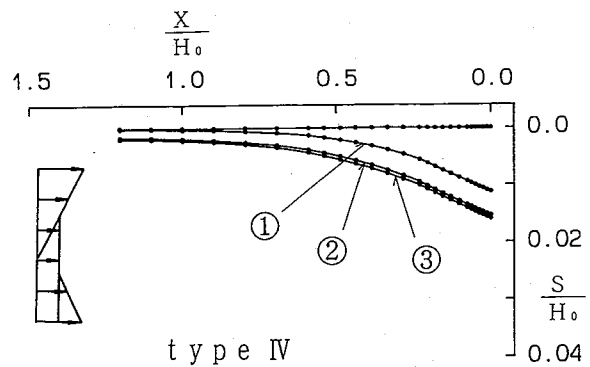


図-1 7 地表面の沈下形状の解析結果(解析結果)

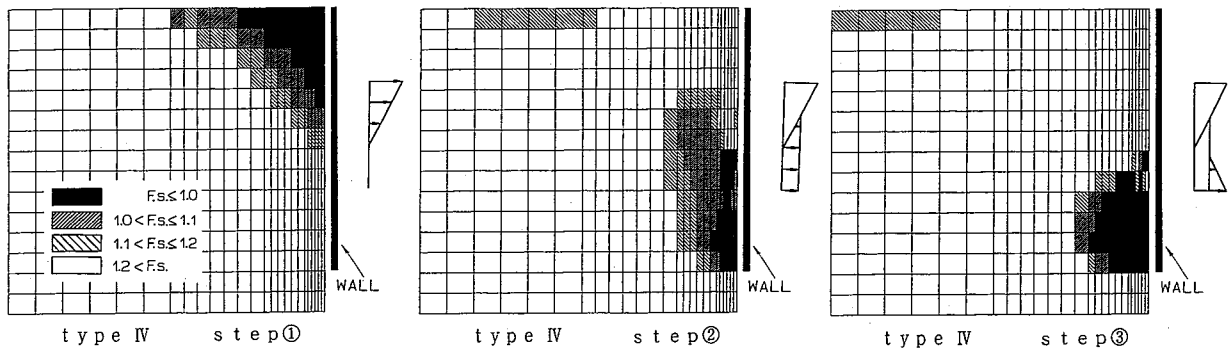


図-1 8 地盤内安全率分布の解析結果

5. まとめ

本研究では壁体の変形パターンや変形順序を任意に与えられる2次元掘削モデル試験機を用いて、モデル実験を行うとともに、地盤材料の種々の力学特性を評価できる構成モデルを用いた有限要素解析を行った。解析結果は壁面土圧分布、壁面全土圧分布、地表面沈下形状等においてモデル試験結果とよい対応関係を示した。また、主働変形であっても途中で壁体の変形パターンが変化すれば地盤内の安全率分布(地盤内応力)が大きく変わることも解析的に示した。

参考文献

- 1)中井・河野・田岡・橋本・小山・為岡(1992):第27回土質工学研究発表会“2次元土圧モデル試験機の試作とその試験結果”。
- 2)中井・河野・田岡・橋本(1992):第27回土質工学研究発表会“種々の壁体変形様式を与えた2次元主働土圧実験”。
- 3)中井(1989):S&F, Vol. 29, No. 1, 119-137.
- 4)Nakai, Fujii & Taki (1989):Proc. NUMOG III.