

壁面土圧および地表面沈下形状におよぼす施工過程の影響

名古屋工業大学大学院 学生会員 川野 広道

名古屋工業大学 正会員 中井 照夫

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た主動土圧問題のモデル実験を行うとともに、すでに提案している密度・拘束応力依存性を考慮した移動硬化型の弾塑性構成モデル¹⁾を用いた有限要素解析を行った。そして、壁体の最終的な変形モードは同じであっても、そのモードの与え方や地盤の初期間隙比が地表面沈下壁面土圧に大きく影響することを実験・解析の両面から検討した。

モデル実験の概要

2次元掘削モデル試験機²⁾の概要を図-1に示す。本試験機は、右側の側壁が15個の可動なブロック（高さ $m \times 15$ ）に分割されており、マイクロメーターにより種々の変形モードを与えることができる。実験では上10段に1cmの強制変位を主動方向（右方向）に与えた。地盤材料として ϕ が1.6mmと3.0mmのアルミ丸棒を量比3:2で混合し、初期水平土圧分布が $K_0=0.6\sim 0.7$ の三角形分布になるようにした。アルミ棒積層体の初期空隙比は $e_0 \approx 0.25$ で単位体積重量 $\gamma_t \approx 2.15 \text{gf/cm}^3$ 、内部摩擦角は約 27° である。なお水平応力（壁荷重）は、ブロックとマイクロメーターの間ロードセルにより測定し、地表面変位は電動モーターにより装置上部のスライドシャフト上自由に移動できるレーザー変位計を用いて測定した。各実験の変形モードの与え方は次のとおりである。

- type I 同時にすべての壁体を水平移動
 - type II 上部から順次壁体を同一量移動
 - type III 下部から順次壁体を同一量移動
- ただし、最終的な変形モードは上から10個のブロックが同一量変位しておりいずれのタイプでも同じである。

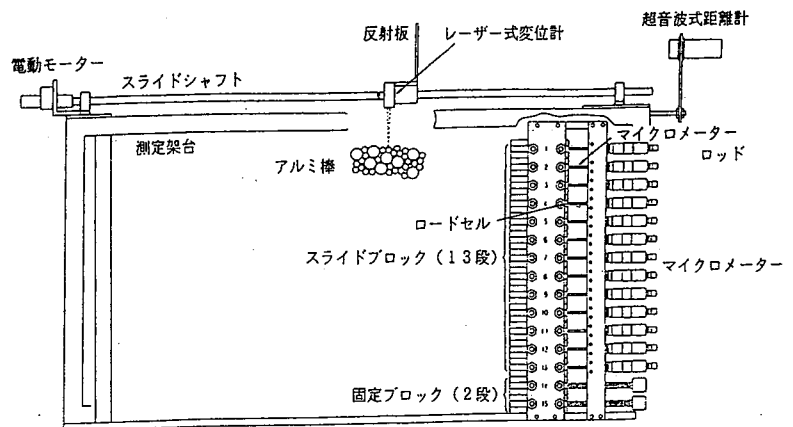


図-1 2次元掘削モデル試験機の概要図

有限要素解析の概要

従来の砂の移動硬化型弾塑性構成式(kinematic t_{ij} sand model)³⁾は、

- ① 土の変形・強度特性に及ぼす中間主応力の影響
- ② ひずみ増分方向の応力経路依存性
- ③ 正負の両ダイレイタンス
- ④ 繰り返し载荷時や主応力回転時の応力誘導異方性

が表現可能なモデルである。しかし、このモデルで用いるパラメーターはある限られた密度や拘束応力のもとで決定されるため、载荷中に拘束応力や空隙比が大きく変化する場合の砂の応力～ひずみ挙動を妥当に表現することができない。そこで、

Influence of construction process on the settlements and earth pressure;

H. kawano, T. Nakai (Nagoya Institute of Technology) & T. Hashimoto (Osaka Soil Test Laboratory)

⑤ 砂の変形・強度特性に及ぼす密度・拘束応力依存性

を考慮できる砂の弾塑性構成モデル³⁾を用いて豊浦砂($G_s=2.65, e_0=0.6$)を地盤材料と考え、モデル試験の100倍のスケールで有限要素解析を行った。地盤の初期応力は、例えば初期間隙比 e_0 が0.6の時は単位体積重量($\gamma' = 1.66 \text{tf/m}^3$)と静止土圧係数(モデルから理論的に得られる値 $K_0=0.45$)から決定している。表-1に解析で用いた豊浦砂の土質パラメーターを示す。図-2に要素分割図を示すが右側のwallの部分に実験と同じパターンで強制変位(10cm)を与えた。図-3は、同じ拘束応力で初期間隙比を変えた時($e_0=0.6, 0.9$)の側圧一定三軸圧縮試験の解析結果である。図-4は、同じ初期間隙比で拘束応力を変えた時($P_0=196 \text{kPa}, 9800 \text{kPa}$)の解析結果である。これら2つの図を見てわかるように解析で用いたモデルは初期間隙比及び拘束応力の違いが土の応力～ひずみ挙動に与える影響をもよく表現していることがわかる。なお、間隙比や拘束応力の影響をダイレクトには考慮していない砂の構成モデル (①～④を考慮) による解析は別報^{4,5)}で報告している。

表-1 土質パラメーター

λ	0.08029
κ	0.02387
N	1.01
m	3
$R_{cs}=(\sigma_1/\sigma_3)_{f(\text{comp.})}$	2.8
α	0.85
a	0.7
l	0.25
p	0.25

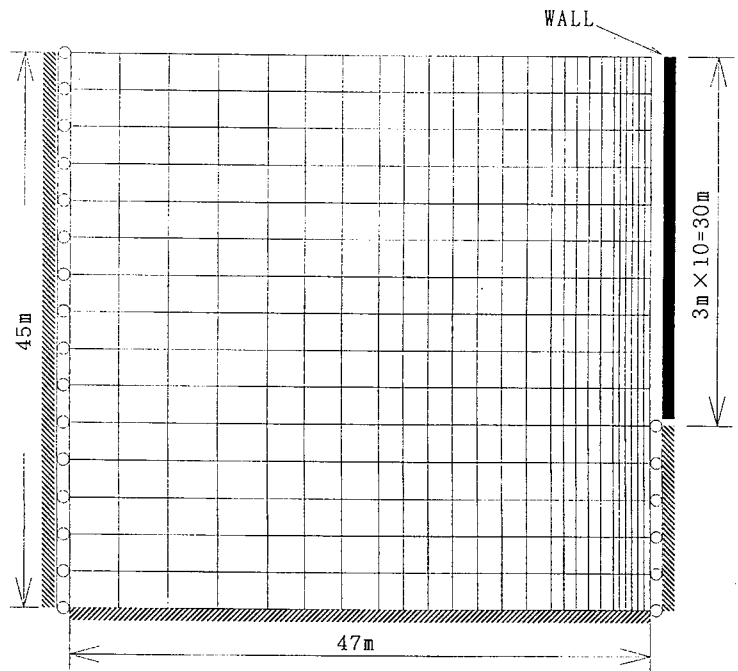


図-2 要素分割図

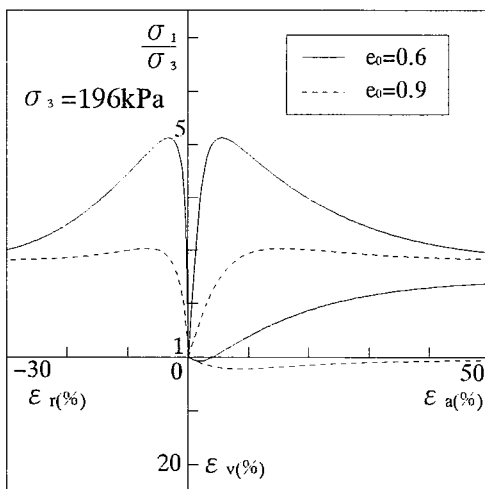


図-3 初期間隙比を変えた側圧一定三軸圧縮試験の解析結果

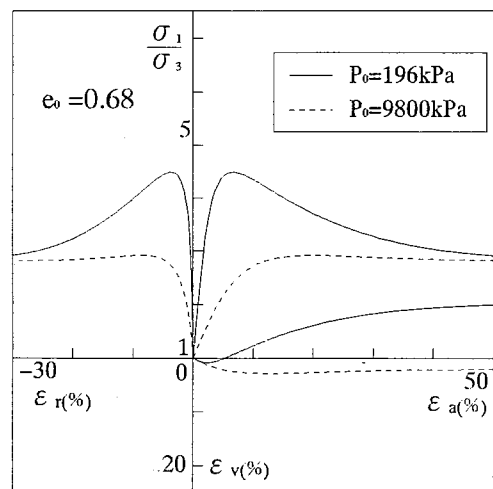


図-4 初期拘束応力を変えた側圧一定三軸圧縮試験の解析結果

3.結果と考察

図-5に地表面沈下形状の(a)実験結果(type I と type II) (b)実験結果(type I と type III) (c)解析結果(type I と type II) (d)解析結果(type I と type III)を示す。横軸の壁体からの距離 x は可動壁の高さ H_0 で無次元化し、縦軸の沈下量 s は変位量 d で無次元化している。実験結果をみるとtype I では、アルミ棒が剛体的に落ち込んだため壁体付近の地表面ではほぼ一定の沈下形状をしており沈下の影響が遠くまで及んでいる。type II と type III は、ともに壁体付近で局所的な沈下が見られるが沈下の影響は遠くまで及んでいない。解析結果は、このような実験結果の傾向を表現している。図-6に壁面土圧分布の(a)実験結果(type I と type II) (b)実験結果(type I と type III) (c)解析結果(type I と type II) (d)解析結果(type I と type III)を示す。横軸の応力は、 γH_0 (γ :単位体積重量)で無次元化している。実験結果をみるとtype I は、ランキン的な土圧分布を示し壁体下端の境界面ではアーチング作用により土圧が増加している。type II は、中央部がはらみだした円弧型の土圧分布になっている。しかし、type III は地表面の沈下形状とは異なりtype I とよく似た土圧分布を示している。ここでも、解析結果は地表面沈下形状と同様に実験結果と対応しており、土の材料特性を考慮した解析が現実的な沈下性状や土圧分布を表現できることを示している。開削工事は通常、地上から順次掘削していくのでどちらかといえばtype II に相当する。言い換えれば、山留め掘削に伴う沈下や土圧の評価は壁体の最終的な変形モードだけでなくそのプロセスに大きく依存することになる。なお、弾性解析ではたとえ非線形であっても上記のような違いは当然のことながら表現できない。従って、地盤の応力・変形を妥当に評価するためには、施工過程の影響を考慮できる弾塑性体として地盤を扱わなければならない。

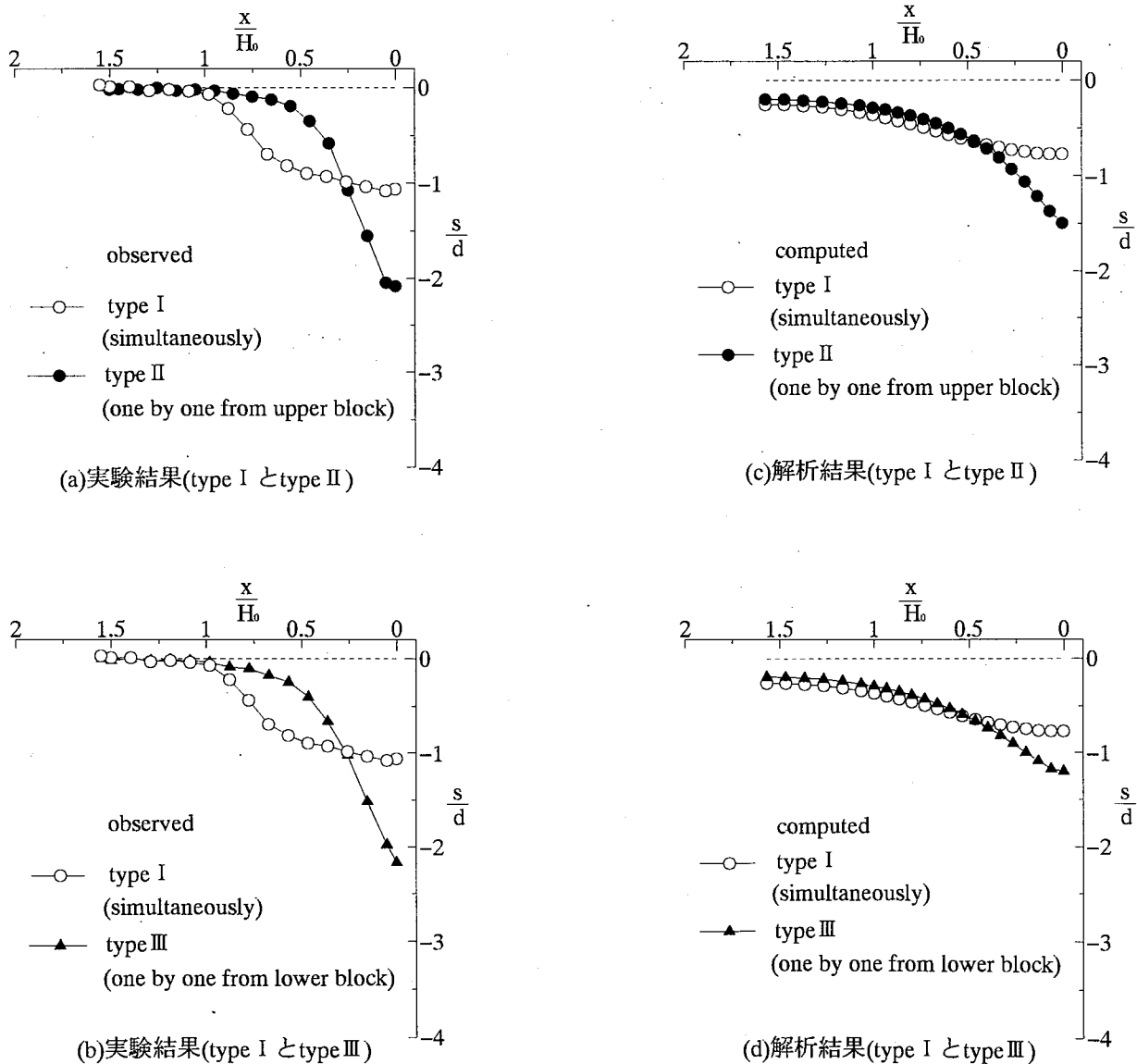
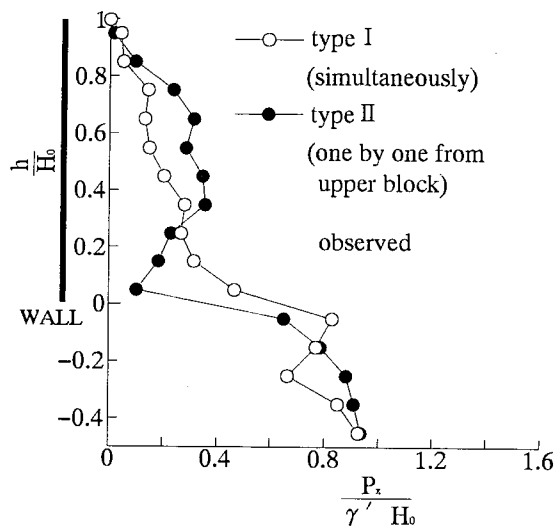
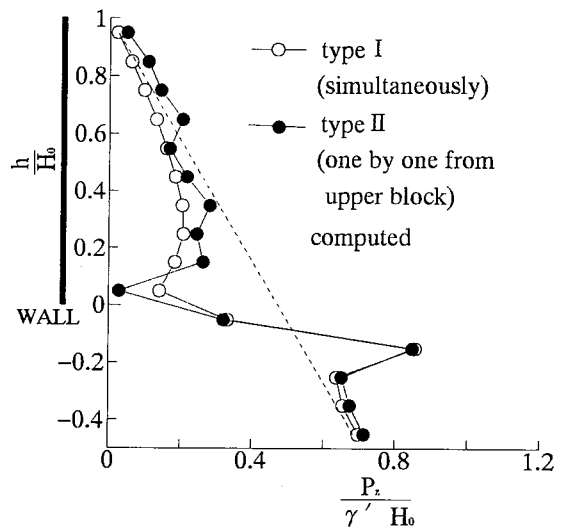


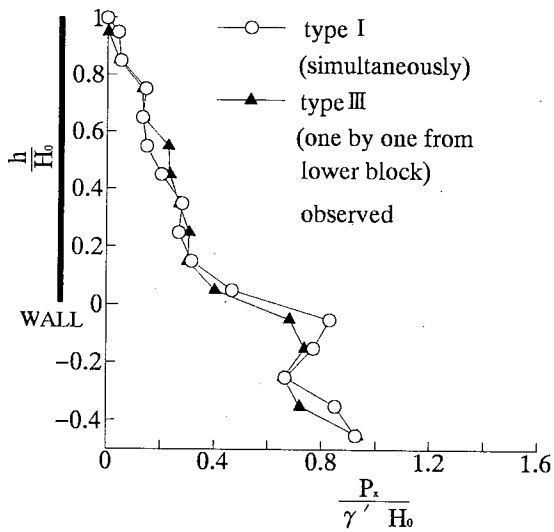
図-5 地表面沈下形状



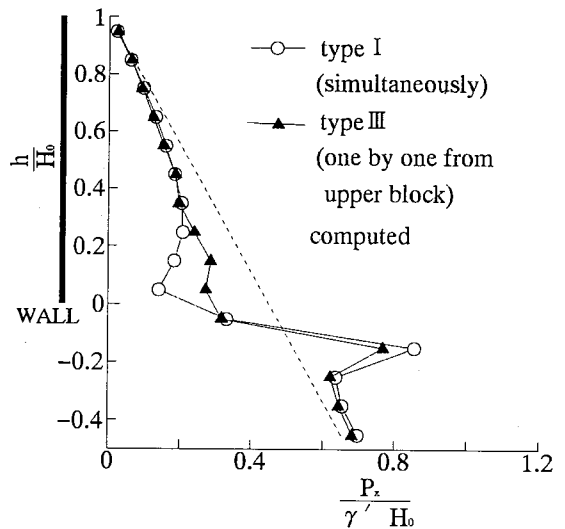
(a)実験結果(type I とtype II)



(c)解析結果(type I とtype II)



(b)実験結果(type I とtype III)



(d)解析結果(type I とtype III)

図-6 壁面土圧分布

4. 初期間隙比を変えた解析結果

図-7は初期間隙比 e_0 を0.6,0.9とした場合の地表面沈下形状(a)type I (b)type II (c)type IIIの解析結果を比較したものである。初期間隙比 e_0 が0.9の初期応力は単位体積重量($\gamma'=1.39\text{tf/m}^3$)と静止土圧係数($K_0=0.575$)から決定している。どのタイプでも初期間隙比 $e_0=0.9$ の地表面沈下量は $e_0=0.6$ の地表面沈下量よりも大きい。これは、図-5に示すように初期間隙比 $e_0=0.9$ の時は負のダイレイタンスーしか示さないのに対し、初期間隙比 $e_0=0.6$ の時は正のダイレイタンスーを示すからである。またこのような傾向はtype Iよりせん断の影響を受ける領域が多いtype II、type IIIの方が顕著である。なお、ここでは最終的に同じ壁体変位を与えることになるので弾性解析ではたとえ剛性を変化させてもこのような地表面沈下量および沈下形状の差を説明することができない。図-8は初期間隙比 e_0 を0.6,0.9とした場合の壁面土圧分布(a)type I (b)type II (c)type IIIの解析結果を比較したものである。どのタイプとも初期間隙比 $e_0=0.9$ の方が初期間隙比 $e_0=0.6$ よりも K_0 値が大きくなっただけ土圧分布は大きくなっているが分布形状そのものには間隙比の影響はあまりない。

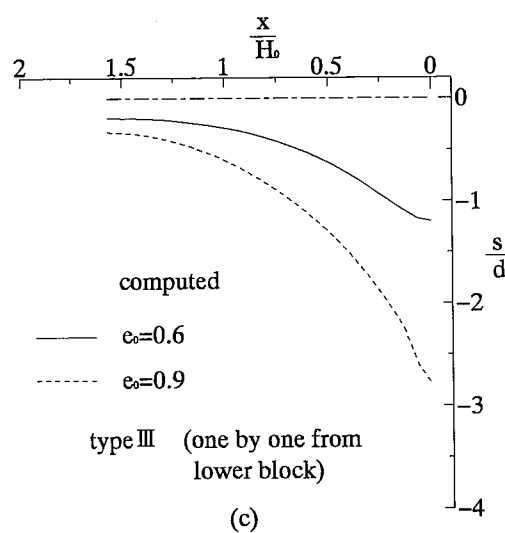
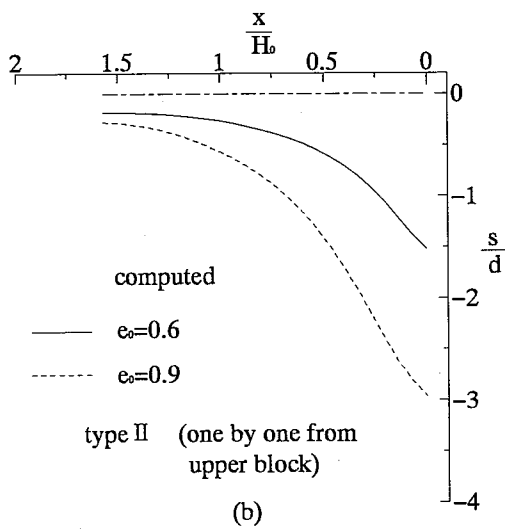
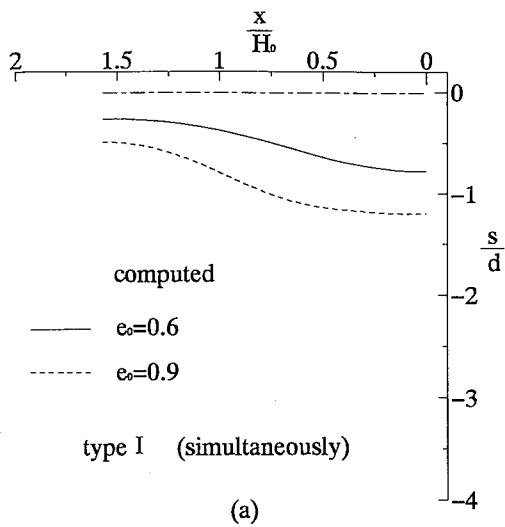


图-7 地表面沈下形状

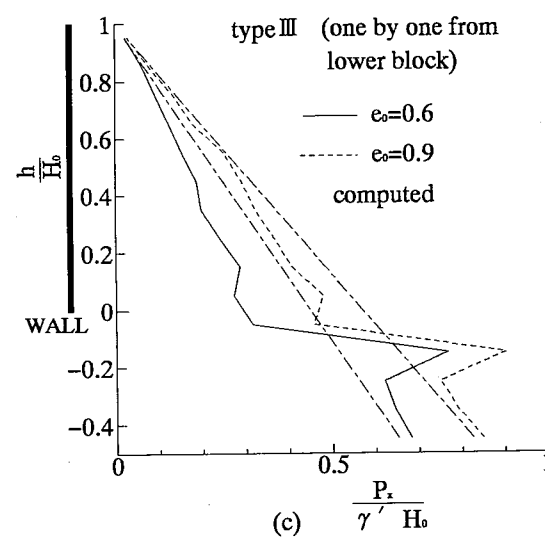
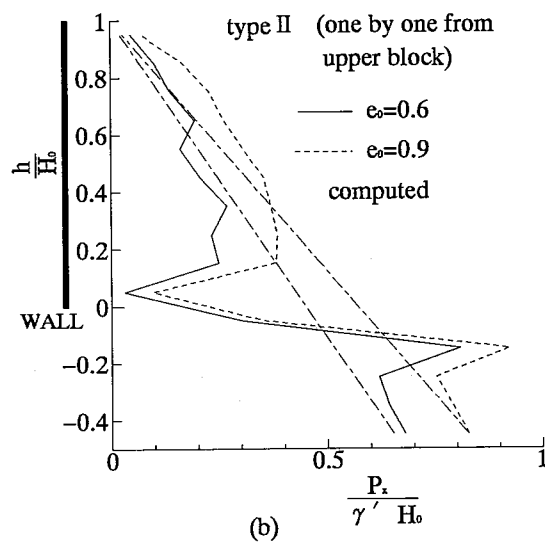
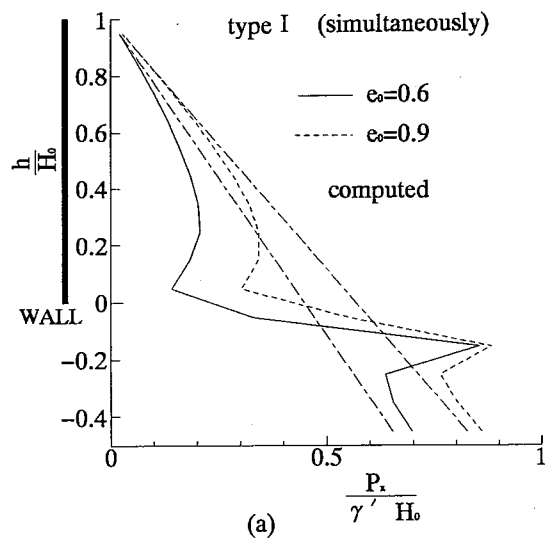


图-8 壁面土压分布

5. 結論

山留め掘削にともなう地表面沈下や背面土圧は、壁体の最終的な変形モードだけでなくそのプロセスやダイレイタンシー特性の影響を大きく受ける。従って地盤の応力・変形を妥当に評価するためには地盤を施工過程やダイレイタンシー特性の影響を考慮できる弾塑性体として扱わなければならない。

参考文献

- 1)武馬・中井・赤堀(1995):広範囲の密度および拘束応力下にある砂の構成モデル,第30回土質工学研究発表会,投稿中
- 2)中井・河野・田岡・橋本・小山・為岡(1991):2次元土圧モデル試験機の試作とその試験結果,第27回土質工学研究発表会,vol.2.1837-1838.
- 3)Nakai,Fujii & Taki(1989): kinematic extension of an isotropic hardning model for sand , Proc. NUMOG III. Vol.1, 36-45.
- 4)川野・中井・檜尾・橋本(1995):壁体の変形モードの与え方と背面土圧・地表面沈下の関係,第30回土質工学研究発表会,投稿中
- 5)T.Nakai&L.M.Xu&H.Kawano&T.Hashimoto(1995):Influence of Construction History in Excavation,10th ARCSMFE,Beijing(in print)