

下負荷面モデルを導入した有限要素法による降下床実験のシミュレーション

Lowering Trap Door Simulation by Finite Element Method Introduced Subloading Surface Model

尾崎利行*, 岡安崇史**, 橋口公一***, 矢嶋泰基****

Toshiyuki OZAKI, Takashi OKAYASU, Koichi HASHIGUCHI and Taiki YAJIMA

*正会員, 九州電技開発株式会社 電力技術部 (〒810-0005 福岡市中央区清川 2-13-6)

**博士 (農学), 九州大学大学院助教授, 農学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***正会員, 工博・農博, 九州大学大学院教授, 農学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**** 九州大学大学院生物資源環境科学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Deformation behavior of the ground at the trapdoor descent is analyzed by the finite element method program in which the subloading surface model falling within the framework of unconventional plasticity is incorporated. The stress acting on the trapdoor predicted by this program agrees well with the experimental results tendency. Progressive failure behavior due to lowering of the trapdoor, in particular, the formation of arch action in the overburden ratio $H/B=3$ (deep ground) is described realistically. And we investigate that the effect on redistribution of earth pressure and the surface settlement. Furthermore when the adjacent trapdoor is displaced downward the large arch action is newly formed the surrounding the arch formed by the first trapdoor descent and we analyzed the surface settlement.

Keywords: elastoplastic finite element method, subloading surface model, unconventional plasticity, trapdoor, progressive failure, shear band

キーワード: 下負荷面モデル, 弾塑性有限要素法, 非古典塑性論, 降下床, 進行性破壊, せん断帯

1. 緒言

都市部においてトンネルなどの地下構造物を新設する場合は, 地表面の変位のみならず, 周辺の既設構造物に対する影響を十分に検討しておく必要がある。また, 山岳トンネルでも, 近年は, 住宅地の直下や送電用鉄塔基礎等の既設構造物に近接した施工が行われることが多く, 地盤の変形挙動を高精度に評価する必要性が増してきている。特に, 従来の吹付けコンクリート, ロックボルトおよび鋼製支保工のような薄肉柔支保構造¹⁾を用いた工法では, 支保構造の強度が地山自身の強度に左右されるので, 以前にもまして支保構造に作用する応力ならびに周辺地盤の変位・応力の詳細な把握が必要不可欠となりつつある。このような掘削問題に対する地盤内応力の評価に関する研究は, 落し戸問題と称され, 支保工自身への作用応力の評価に関する研究^{2,3)}の遙か以前から取り組まれている⁴⁻⁶⁾。中でも, 村山・松岡⁶⁾は, アルミ積層体における落し戸降下実験から, 落し戸の降下に伴う地盤の変形挙動が, 図-1に示すような3つの異なるパターンを呈することを指摘している⁷⁾。しかしながら, 既往の

研究の多くは, 落し戸降下時に観察されたせん断帯を直線, 円弧, 対数らせん等の関数で近似するか, 地盤内の微小要素における外力のつりあいから作用土圧を求めるので, 地盤内の変形についての検討が十分にできない等の限界がある。

これに対して, 有限要素法は, 落し戸降下に伴う地盤の変形挙動, すなわち, 地盤の進行性破壊についても解析し得るため, 近年広く活用されている⁸⁻¹⁵⁾。例えば, 足立ら⁸⁾は, 村山・松岡の実験を踏襲し, 直径可変装置により, 土被りが異なるトンネル地山内の鉛直応力の変化ならびにトンネル周辺地盤の変形挙動に関して,

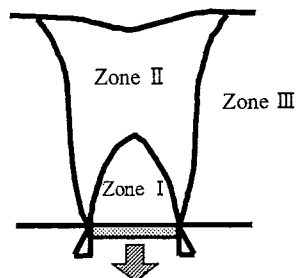


図-1 落し戸降下に伴う地盤の変形挙動パターン

Drucker-Pragerモデルを導入したソリッド要素もしくはジョイント要素を用いた二次元平面ひずみ解析を試みている。菊本¹⁰⁾は、上記研究を継承しつつ3次元降下床実験と移動降下型弾塑性モデルによって、応力再配分やせん断帯の発達過程について検討を行っている。さらにNakai et al.^{11),12)}は、模型実験および有限要素法解析によって砂地盤と正規圧密状態の粘土との比較および掘削過程における土圧や地表面沈下量を検討している。また、田中ほか^{14),15)}は、落し戸幅を変えた実験結果と降伏条件にはMohr-Coulombモデルを用い、塑性ポテンシャルには、Drucker-Pragerモデルを用いた非関連流動則を適用した有限要素解析により、実験値との比較を検討している。

しかしながら、これらの解析で用いられる構成モデルは、降伏面内部を純弾性域とする古典塑性論に基づいており、降伏面内部の応力速度に対して塑性変形を表現できない上、一般に過圧密状態の土の力学挙動表現のみを対象としているので、正規圧密状態の土には適用できない。

他方、橋口により提案された下負荷面モデルは、降伏面内部を純弾性域と仮定することを前提としない非古典塑性論に属し、関連流動則を採用するので、シンプルな構造を維持しつつ、連続性条件、滑らか条件、仕事率・剛性緩和等の力学的要求条件を満たす合理的な数学的基本構造を有している¹⁶⁾。Hashiguchi and Chen¹⁷⁾、Hashiguchi et al.¹⁸⁾は、本モデルが単調ならびに繰返し負荷を受ける正規圧密から過圧密状態わたる広範の土の力学挙動を現実的に表現し得ることを実証している。さらに、本モデルをFEMに導入することにより、様々な応力履歴を受ける土や地盤に対する諸境界値問題の具体的解析も種々行われており、その妥当性も実証されている^{19),21)}。

Nakai et al.¹³⁾は、アルミ積層体を用いた落し戸降下実験結果に対しsubloading t_{ij} モデルを用いて数値解析を行い、実験結果をよく反映していることを示している。

上記のように、トンネル掘削に伴う力学挙動および非古典塑性論に基づく数値解析は、既に実施されているが、掘削時の地盤の挙動を定量的に把握することがトンネル設計において重要であるにもかかわらず、実際の設計においては、古典塑性論に基づく数値解析が多い。Nakai et al.¹³⁾が提案した t_{ij} モデルに下負荷面概念を導入した、subloading t_{ij} モデルは、一般の応力ではなく修正応力を用いてモデルの誘導が行われており、橋口により提案された、一般の応力を用いて記述されている下負荷面モデルとは、有限要素法における定式化が異なる。

本論文では、最もシンプルな非古典塑性論に属する初期下負荷面モデルに基づく有限要素解析プログラムを用いて、まず、下負荷面モデルの材料定数を種々の条件で与えて、落し戸の降下実験の数値シミュレーションを行い、落し戸問題に対する下負荷面モデルの妥当性を検証する。さらに数値シミュレーションと実験値との比較を行い、解析結果の妥当性を検証し、降下に伴う応力再配分および進行性破壊の過程について検討する。特に本研

究では、双対トンネルを想定した連続落し戸に関して、後続落し戸の近接度合いに対する進行性破壊の過程について解析を行い検討した。

なお、本論文では、応力(速度)およびひずみ(速度)は引張を正とする¹⁹⁾。

2. 解析手法²²⁾⁻²⁴⁾

2.1 支配方程式²²⁾⁻²⁴⁾

力の釣合い式の物質時間微分を次式で与える。

$$\text{div} \dot{\Pi}^T = 0 \quad (\dot{\Pi}^T = \dot{\sigma} + (\text{tr} D) \sigma - \sigma L^T) \quad (1)$$

ここに、 $\text{div}()$ および $(\cdot)^T$ は発散および物質時間微分を表す。また、 $\dot{\Pi}$ は公称応力速度である。 σ 、 $\text{tr}()$ および $(\cdot)^T$ はCauchy 応力(真応力)、対角和および転置を示す。また、 $D = (L + L^T)/2$: 速度勾配 L の対称部分) はストレッチングを表し、さらに速度勾配 L は次式で与えられる。

$$L = \text{grad } v = \partial v / \partial x \quad (2)$$

ここに、 x および v は基準配置における物質点 X の現配置における位置ベクトルおよびその物質点での速度ベクトルを表す。

客観性を有する応力速度として次式で表されるJaumann速度を採用する。

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma} + \sigma W - W \sigma \quad (3)$$

ここに、 $(\cdot)^\circ$ は共回転応力速度を表し、 $W = (L - L^T)/2$: 速度勾配 L の反対称部分) は連続体スピンを表す。弾塑性構成式は次式で与えられる。

$$\dot{\sigma} = C^{\text{ep}} D \quad (4)$$

ここに、 C^{ep} は後述する初期下負荷面モデルに基づく4階の弾塑性構成テンソルである。

式(2)–(4)を式(1)に代入し、さらにGaussの発散定理および部分積分を適用して、線形化された仮想仕事の原理を得る。

$$\begin{aligned} & \int_V \{ \dot{\sigma} + W \sigma + (\text{tr} D) \sigma - \sigma D \} : \delta L dv \\ & = \int_S \dot{\Pi}^T n \otimes \delta v ds \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\delta()$ は力の均衡を破らない仮想な量、 n は表面力境界上の単位法線ベクトルを表す。

境界値問題、特に落し戸のようなせん断帯発達過程を把握する必要がある問題に関しては、上記のような定式化が重要であると考えられる。また、収束計算は、野田ら²⁰⁾の方法を参照とした。

2.2 初期下負荷面モデル

下負荷面モデルは、降伏面の内部を純弾性域とせず、その内部における応力速度によって塑性変形を表現し得るモデルである。図-2に下負荷面モデルの概念図を示す。下負荷面を次式で与える。

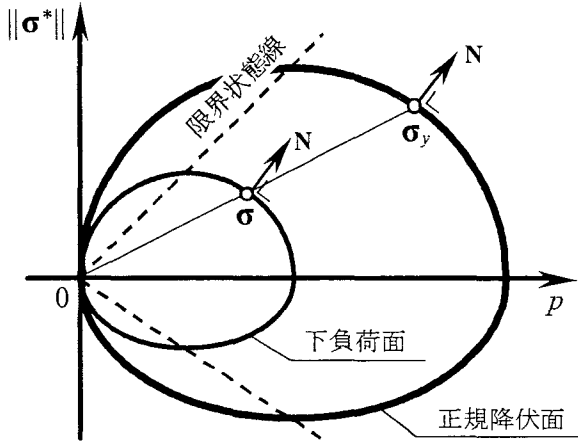


図-2 下負荷面モデルの概念図

$$f(\sigma) = RF(H_A) \quad (6)$$

ここに、 H_A は等方硬・軟化変数を表す。

本モデルに基づく弾塑性構成式は次式で与えられる。

$$\dot{\sigma} = C^{ep} D = \left(E - \frac{EN \otimes NE}{M_p + \text{tr}(NEN)} \right) D \quad (7)$$

$$N \equiv \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} / \left\| \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \right\| \quad (8)$$

$$M_p \equiv \left(\frac{F'}{F} h + \frac{U}{R} \right) \text{tr}(N\sigma), \quad h \equiv \frac{H}{\lambda} \quad (9)$$

ここに、 E 、 N および M_p はそれぞれHooke型の弾性係数テンソル、下負荷面の正規化外向き法線テンソルおよび塑性係数である。また、 h は一般に σ および H の関数である。さらに、下負荷面の発展則を規定する関数 U として、次式を採用する。

$$U = -u \ln R \quad (10)$$

ここに、 u は材料定数を表す。

次の負荷基準を導入する。

$$\begin{cases} \text{tr} NED > 0; & D^p \neq 0 \\ \text{tr} NED \leq 0; & D^p = 0 \end{cases} \quad (11)$$

土に対する材料関数を次式で与える。

$$f(\sigma) = p \left\{ 1 + \left(\frac{\|\sigma^*\|/p}{m} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

$$p \equiv -\sigma_m = -\frac{1}{3} \text{tr} \sigma, \quad \sigma^* \equiv \sigma + pI \quad (13)$$

$$m = \frac{2\sqrt{6}\sin\phi}{3 - \sin\phi\sin 3\theta_\sigma} \quad (14)$$

$$\sin 3\theta_\sigma \equiv -\sqrt{6} \frac{\text{tr} \sigma^{*3}}{\|\sigma^*\|^3} \quad (15)$$

また、 ϕ は材料定数である。等方硬・軟化関数 F は次式で表される。

$$F = F_0 \exp\left(\frac{H_A}{\rho - \gamma}\right) \quad (16)$$

ここに、 F_0 は初期の降伏面の大きさである。また、 ρ および γ はそれぞれ圧力 p と体積 v の両対数($\ln p - \ln v$)線形関係における正規圧密線および膨潤線の勾配を示す。等方硬・軟化変数 H_A の発展則は $\dot{H} = -D_v^p = -\text{tr} D^p$ で表される。さらに、 $\ln p - \ln v$ 線形関係より体積弾性係数 K およびせん断弾性係数 G をそれぞれ次式で与える。

$$K = \frac{p}{\gamma}, \quad G = \frac{3K(1-2\nu_p)}{2(1+\nu_p)} \quad (17)$$

ここに、 ν_p はPoisson比を表す。

このように、下負荷面モデルに基づく有限要素法解析においては、Cam-Clayのパラメーターに加え、下負荷面の膨脹速度を規定する定数 u を入力するのみである。

3. 落し戸問題の有限要素解析

3.1 地盤のモデル化

本研究における解析モデルを示す。地盤は平面ひずみ条件でモデル化を行い、4節点アイソパラメトリック要素(完全積分)を用いて有限要素メッシュに分割している。境界条件は側面水平方向ならびに底面の鉛直方向の変位を拘束した。また、落し戸に相当する節点に対して鉛直下向きの強制変位増分を与えて、落し戸降下時の状況を再現した。降下床実験においては、固定板と降下床の接点に変位の特異点となるため⁸⁾、有限要素解析では、せん断変形による要素のロッキング現象を軽減する必要がある。このような箇所の対処方法としては、独立節点を設ける場合がある。独立節点では、降下床端部の内外の要素において、応力の授受が無くなるなどの欠点を有するが、落し戸外の要素を過度に変形させることを回避し、実際に近い変形モードが得られるため、ここでは、図-3に示すような独立節点を設けて、要素の過度なロッキングを解消している。表-1に解析に用いた地盤のサイズおよびメッシュ数を示す。

表-2に地盤条件および下負荷面モデルに用いる材料定数と初期値を示す。ここで想定した地盤は、気乾状態の砂質土を一定間隔から均等に撒くことによって、等方応力状態になるような実験を想定し、粘着力 $c=0(\text{kN/m}^2)$ 、ピーク応力発生時の内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ 程度の地盤を想定した。なお、表中において、 ϕ_r は限界状態における内部摩擦角を表す。下負荷面モデルにおいては、ピーク応力発生時の内部摩擦角は材料定数ではなく、計算結果として得られるものである²⁾。ここでは、 $\phi_r=27^\circ$ の地盤として解析を行った。

このとき、地盤の初期応力は次式により与えられるものと仮定する。

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v, \quad \sigma_v = \rho_s h \quad (18)$$

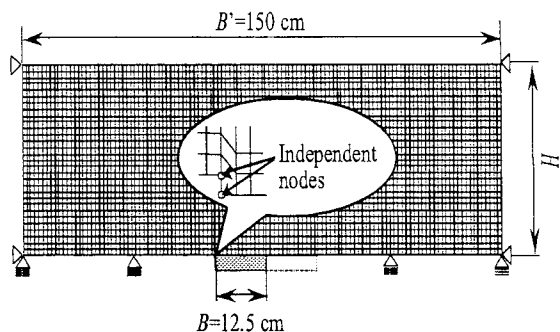


図-3 FEM解析用メッシュ

表-1 解析サイズとメッシュ数

検討ケース	H (cm)	Elements	Nodes
$H/B = 1$	12.5	1,200	1,334
$H/B = 2$	25.0	2,400	2,544
$H/B = 3$	37.5	3,600	3,754

表-2 地盤条件および下負荷面モデルの材料定数と初期値

(a) 地盤条件

Material Properties	Value
γ_g (kN/m ³)	15.1
K_0	1.0

(b) 下負荷面モデルの材料定数および初期値

Material Properties	Value	Material Properties	Value
F_0 (kPa)	10.0	ρ	0.008
ν	0.3	γ	0.0008
ϕ_r (°)	27.0	u	5.0

ここに、 σ_h および σ_v はそれぞれ水平応力および鉛直応力、 ρ_g は単位体積重量、 K_0 は静止土圧係数を表す。ここでの静止土圧係数 K_0 は、過圧密土を想定し、本研究のような比較的小さな土槽での実験を想定した場合は、初期応力の分布が等方に近いと仮定し、1.0 とした¹⁹⁾。

3.2 下負荷面モデルの特性

図-4に落し戸変位と土被り圧で正規化された落し戸作用土圧（以下、単に正規化土圧と称する） $\sigma_z/\gamma_g H$ との関係を示す。ここに、 σ_z は落し戸に作用する鉛直土圧、 γH は土被り荷重を示し、 γ_g は単位体積重量、 H は土被り厚を示す。解析は、土被り厚 H と落し戸幅 B との比（土被り比 H/B ）を変えて行なった。 $\sigma_z/\gamma_g H$ は、落し戸の下降に伴って減少し、一旦極小値に達した後、緩やかに増加して残留状態に移行している。また、土被り比 H/B が大きくなると、正規化土圧の減少量は大きくなり、その極小値は、比較的小さい変位で発生する。 H/B が 2 以上となると残留状態における $\sigma_z/\gamma_g H$ は、

0.1~0.2 程度であるが、 $H/B = 1$ では、0.4~0.5 程度となっており、 H/B が小さくなると地盤が変形しやすくなることがわかる。また、各土被り比におけるピーク時の正規化土圧と、Terzaghiの理論解²⁶⁾との比較を図-5示すとともに参考として足立ら²⁷⁾の三次元実験結果を図-6に示す。ここで、Terzaghiの理論解は、単位体積重量は同一とし、粘着力 $c=0$ (kN/m²)、ピーク時内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ および、水平土圧係数 K_h を変化させた結果を示した。

なお、図中における数値は、土圧の絶対量を示し、単位は kPa である。

また、Terzaghiの理論解²⁶⁾は、次式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{B\gamma_g - 2c}{2K_h \tan \phi} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2K_h H \tan \phi}{B}\right) \right\} \quad (18)$$

本解析結果では、Terzaghiの理論解が $K_h = 1$ の場合よりも、 $K_h = 1.5 \sim 2.0$ のほうが比較的良好に一致する。足立らが行った三次元実験結果では、 $K_h = 1.5 \sim 2.0$ が実験値と合致するため、降下床荷重にTerzaghiの理論解を適用するのが困難であるという見解を示している²⁷⁾。足立らの実験は、三次元での実験結果からの指摘であり、本研究における二次元解析結果とは数値的には異なると考えるが、一般的な降下床実験結果および理論解が足立らの結果と一致すると仮定すると、本解析結果は、定性的に一致すると考えられる。これは、Terzaghiのゆるみ土圧理論による解は、落し戸上方の微小区間での極限状態における外力のつり合いから算出されるため、ダイレイタンシーに伴う体積膨張を起こしながら、せん断破壊する現象を表すことができないことによるものと考えられる。また、図-5の解析結果は、二次元と三次元では定量的な比較はできないが、土被り比に対する正規化された土圧の関係は、足立らの結果やその他の実験結果(Papamichos et al.⁹⁾ などとも定性的に一致した傾向である。さらに、本研究では、下負荷面モデルに基づくFEM解析プログラムの予測特性を調べるために、図-7に示すような下負荷面特有のパラメーターである、下負荷面の発展則に関する材料定数 u を変化させた場合の最小正規化土圧との関係を検討した。図-7から明らかなように、 u の増加に伴い正規化土圧も減少している。また、図-7により、 u が増加すると、下降伏状態における塑性変形の発生が抑制され、正規化土圧も減少している様子が確認できる。特に、 $H/B = 2$ においては、 $u = 5 \sim 10$ で正規化土圧の値が著しく変化している。これは、落し戸降下による地盤の破壊形態が異なるため、 $u = 5$ の場合はせん断帯が地表面まで達しているのに対して $u = 10$ の場合はせん断帯がアーチ状に形成されて地表面までせん断帯が発達していないためであると考えられる。

一般に、 u の値を増加させると、下降伏状態での塑性変形の発生が抑制され、より剛性の高い力学応答を示す

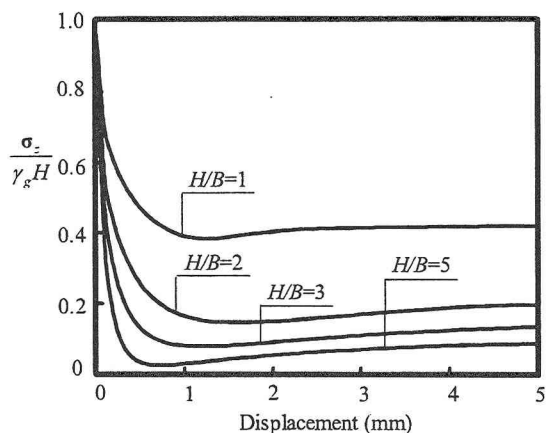


図-4 落し戸変位と正規化土圧との関係

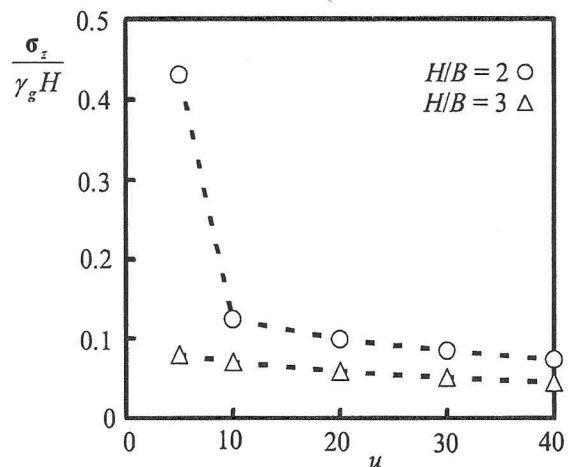


図-7 u の違いによるピーク時正規化土圧の関係

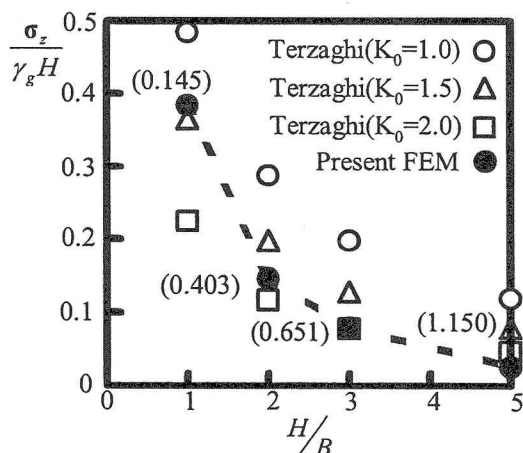


図-5 土被り比とピーク時正規化土圧との関係
(Terzaghi理論解との比較)

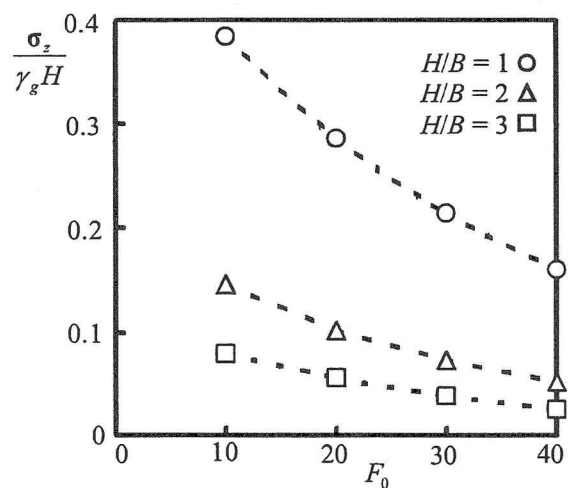


図-8 F_0 の違いによるピーク時正規化土圧の関係

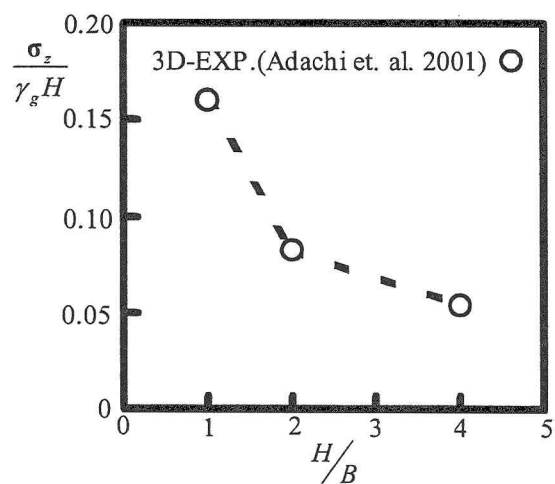


図-6 土被り比とピーク時正規化土圧との関係
(三次元実験結果) (足立ら)

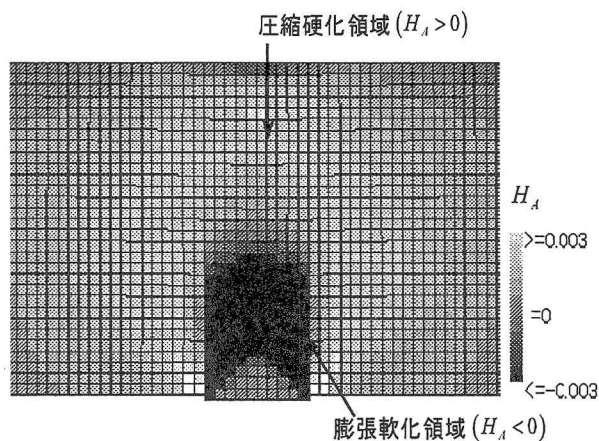


図-9 落し戸 5mm 変位時における
等方硬・軟化変数の値($H/B=3$)

ようになる。 $H/B=2$ の場合は、落し戸降下時に、降伏状態の塑性変形の発生が顕著に表れるため、 u が小さい場合は落し戸に作用する土圧も大きくなるが、 u の増加に伴い、減少する。一方、 $H/B=3$ の場合は、降下床付近の地盤がほぼ正規状態、すなわち、 $R=1$ に近い状態となっているので、式(10)の関数 U はほぼゼロとなり、本モデルは修正 Cam-clay モデルに帰結するようになる。

図-8に F_0 を変化させた場合の最小正規化土圧との関係を示す。地盤密度の違いは初期の正規降伏面の大きさ F_0 の違いにより表現されるものと仮定して、密な地盤は F_0 が大きく、緩い地盤は F_0 が小さいものとして表現する¹⁹⁾。

地盤は密な程、落し戸に作用する正規化土圧が減少していく傾向が見られる。これは、密な地盤ほど落し戸降下時において、地盤内にアーチ形成が起こり、降下床作用土圧が小さくなる、すなわち、降下床に全土被り圧が作用するのではなく、一部は地山自体で支持するようになるものと考えられる。

以上の結果から、下負荷面モデルは修正 Cam-clay モデルで用いられる材料定数に加えて下負荷面の発展速度を規定する材料定数 u を加えただけで、塑性変形の度合いおよび密度の異なる地盤の変形挙動も解析可能であると言える。

3.3 偏差ひずみの分布と進行性破壊

図-10に、 H/B の違いによる落し戸変位が 5mm 時の解析結果を示す。また、図-11は、 $H/B=3$ における落し戸降下時の偏差ひずみの変化をそれぞれ示す。

落し戸降下前は、落し戸の鉛直土圧は、土被り圧 $\gamma_g H$ が作用する。しかし、落し戸が降下すると、全土被り圧は、落し戸に作用する土圧と地山応力とに分担される、応力再配分が起こると考えられている。本解析結果図-10では、 $H/B=2$ 以下ではせん断帯落し戸両端から発達し、地表面まで達するが、 $H/B=3$ 以上では落し戸両端部から発達したせん断帯がアーチ状に形成されている。これは本研究におけるの材料定数を用いた解析では、 $H/B=2\sim3$ を境界として、落し戸周辺の地盤内応力の分

布が著しく変化しているためである。すなわち、 $H/B=2$ 以下では、落し戸上方の地盤がすべて塑性膨張を起こし、残留状態においては落し戸に追従してほぼ同一の変位を生じるが、 $H/B=3$ 以上では、グラウンドアーチ内の地盤のみ落し戸と同一の変位で移動するのに対し、図-9に示すようにグラウンドアーチ周辺地盤は、膨張軟化状態であり、その周辺が圧縮硬化状態で変位を生じているものと考えられる。また、このとき落し戸の降下に伴う地盤内応力の変化により、圧縮硬化状態の領域は、球根状に拡大しているのがわかる。

村山・松岡⁶⁾は、落し戸降下時の地盤変形について、①落し戸に追従して降下する領域（領域Ⅰ）、②領域Ⅰに追従して移動する領域（領域Ⅱ）、③移動しない領域（領域Ⅲ）があることを明らかにした。上記を考慮すると、 $H/B=3$ 以上の深い地盤において、下負荷面モデルによる解析では、図-9における膨張軟化領域が、地盤の強度が低下し落し戸に追従する、領域Ⅰと考えられる。このように、落し戸問題における地盤内の鉛直土圧のような地盤特性に支配される現象の把握には、室内実験のみならずより合理的な数値解析法の利用が不可欠であり、これらの結果を総合的に分析する必要があると考える。

3.4 後続降下床試験の解析

前節においては、単一の落し戸が変位した際の落し戸作応力と地盤の変形挙動について調べた。しかし、既設の地中構造物に近接して新たにトンネル等の地中構造物を建設する際には、建設に伴う既設構造物周辺地盤への影響、例えば、周辺地盤の変形挙動や応力状態の変化等について十分に把握しておく必要がある。本節では、特に、隣接する落し戸が段階的に降下する場合における、落し戸の離隔が変化する時の、地表面沈下量とせん断帯の発生過程について検討を行う。

図-12および13は、先行落し戸の降下後（降下量は 5 mm）、後続の落し戸を離隔幅 $\Delta d = 0$ （離隔なし）および $0.5B$ でそれぞれ 5 mm 降下させた場合の地盤内偏差ひずみ分布

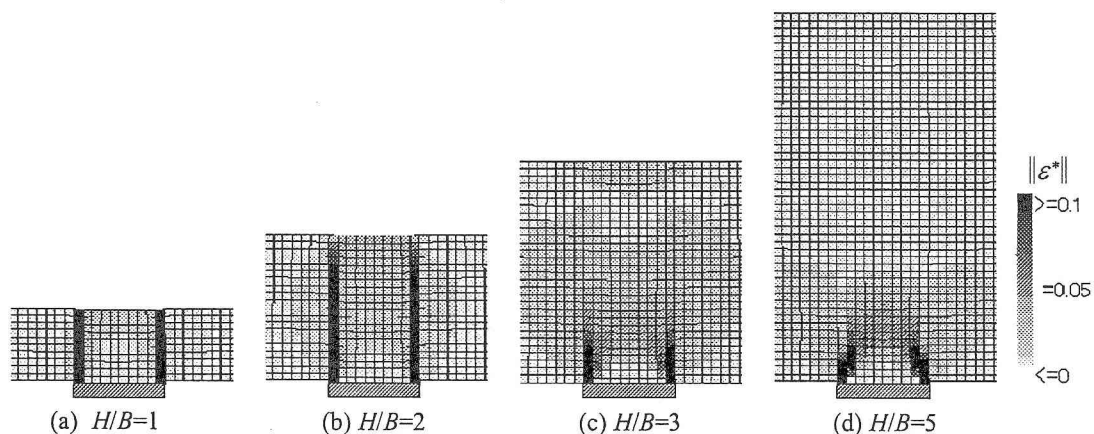


図-10 土被り比の違いによる 5mm 変位時の偏差ひずみの分布($u=5.0$)

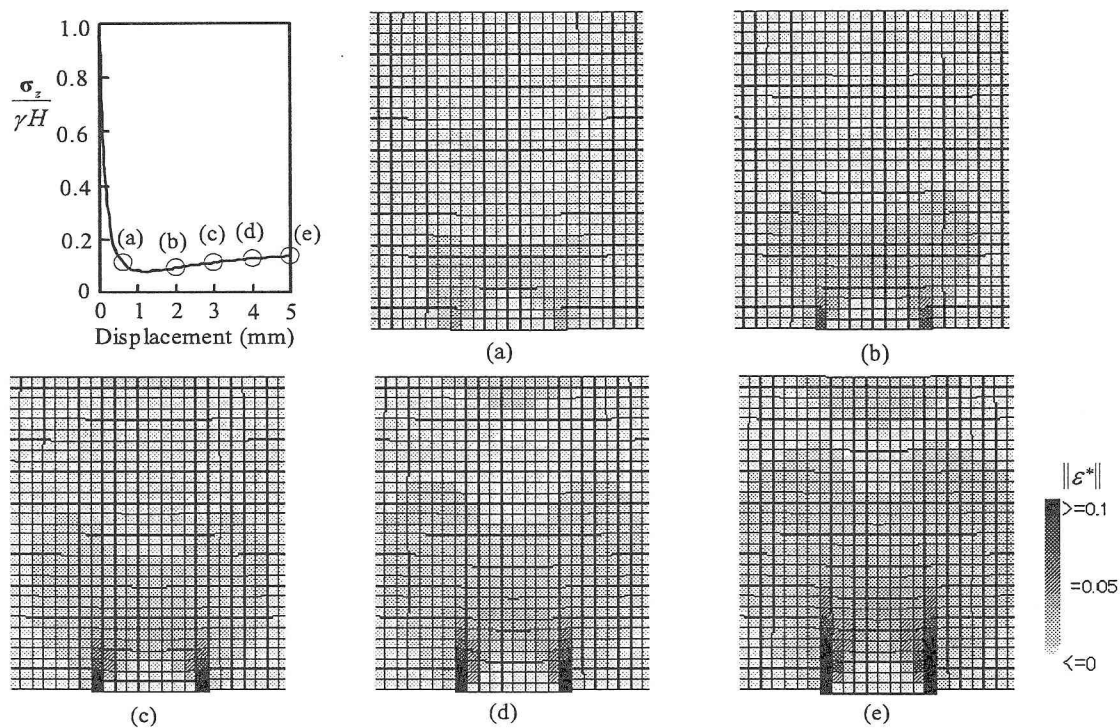


図-11 地盤内の偏差ひずみ分布の経時変化 ($H/B=3$)

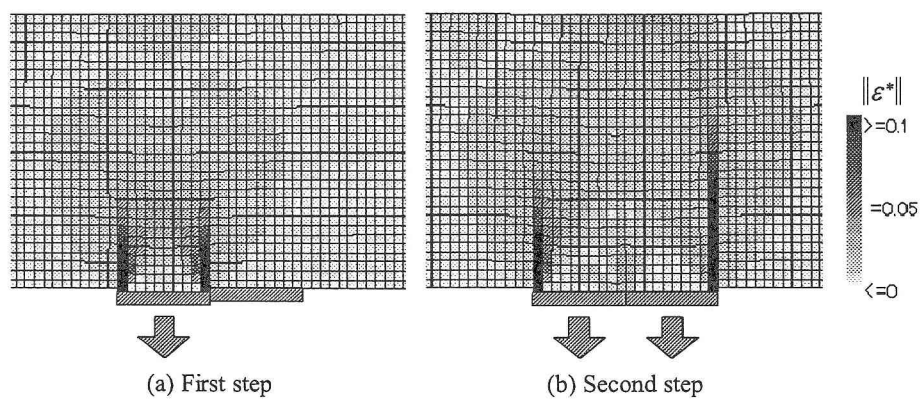


図-12 離隔距離なしで後続降下した場合の地盤内の偏差ひずみ分布 ($H/B=3$)

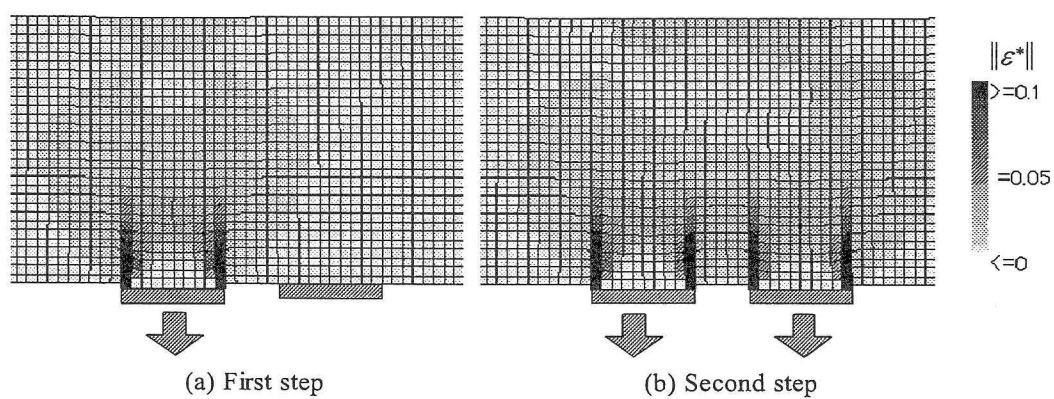


図-13 $0.5B$ 離れで後続降下した場合の地盤内の偏差ひずみ分布 ($H/B=3$)

の変化を示す。離隔なしの場合(0B), 後続落とし戸の両端から発達したせん断帯は, 単一降下時において形成されたグラウンドアーチと重なって上方へ発達しているのがわかる。これは単一降下時に形成された圧縮硬化領域が後続落とし戸の降下によって乱され, 徐々に軟化膨張してしまったためであると考えられる。さらに, これに伴い落とし戸に追従して移動する上方土量が再び増加し, 地表面の沈下量が增大している。

一方, 離隔距離 0.5B の場合, 後続落とし戸の両端から発生したせん断帯は, 先行落とし戸の降下の際に発生したせん断帯とは別に後続落とし戸周辺の地盤に発達し, 先行落とし戸によって形成されたグラウンドアーチにも影響はほとんど見られない。同様に離隔距離が 1.0B と 2.0B の場合についても解析を行っているが, せん断帯の発達過程は 0.5B 離隔の場合と同様の結果であった。つまり, 先行落とし戸との離隔距離がある一定の大きさ以上であれば, 後続落とし戸の降下によって生じる地盤の変形は先行落とし戸周辺の地盤には影響を与えないものと判断される。次に, 離隔距離の違いによるせん断帯形成パターンの差異が地表面の沈下特性に及ぼす影響について検討する。図-14に $H/B = 3$ における各離隔距離による地表面沈下量の分布を示す。なお, 図中には, 先行および後続降下床を先行と同時に降下(落とし戸幅 2B に相当)させた場合の結果も示している。本図から明らかなように, 落とし戸幅が大きくなると沈下量も増大しているのがわかる。これは, グラウンドアーチ形成の効果が期待できる地盤の場合, 落とし戸に追従して下方へ変位する土量が多いほど, すなわち, 前述した領域 I の大きさが大きいほど, 沈下量が增大することを示している。一方, 離隔距離が大きくなると最大沈下量も徐々に小さくなり本解析においては離隔距離 1B 以上で最大沈下量に差異が認められなくなっている。さらに, 離隔距離 2B では沈下量のピーク値が 2 箇所発生しているのがわかる。以上のことより, 離隔距離が 1B 以上の場合には, 落とし戸降下に伴う周辺地盤の応力再配分は, 各ステップの落とし戸周辺に限定され, 先行落とし戸の降下で生じた地盤の変形状態は, 後続落とし戸の降下によって生じる地盤の変形によって影響を及ぼされないものと考えられる。

図-15に H/B の違いによる各離隔距離別(離隔なし(0B), 1B, 2B)の地表面沈下量の分布を示す。 $H/B = 2$ で観察されるような, せん断帯が地表面まで発達している地盤の場合には, 地表面沈下は範囲は狭くなるものの, そのピーク値が 2 箇所存在する。一方, $H/B = 3$ の場合は, 多くの現場計測結果のような正規分布曲線に近い分布形状²⁸⁾を示す。この結果により, グラウンドアーチを形成するような地盤では, 沈下量が小さい(沈下範囲は広い)が, せん断帯が地表面まで達するような場合は, その沈下量は大きい(沈下範囲は狭い)ことがわかる。

4. 結言

本研究では, 下負荷面モデルを用いた有限要素解析によ

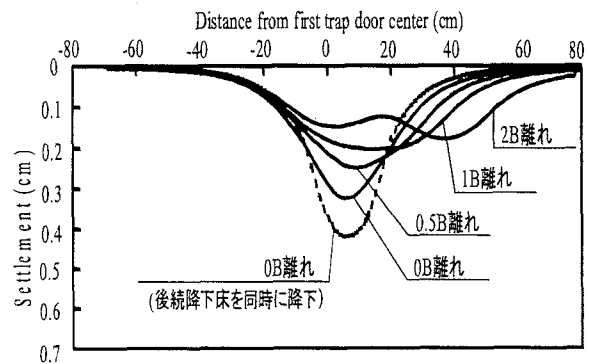
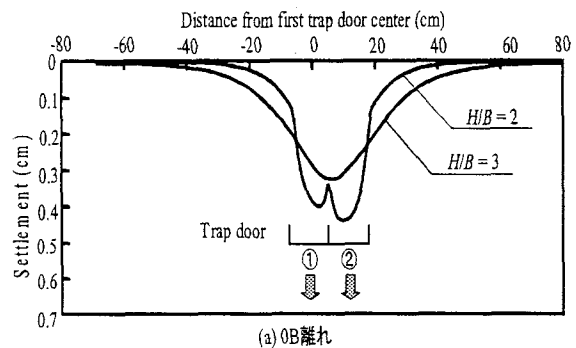
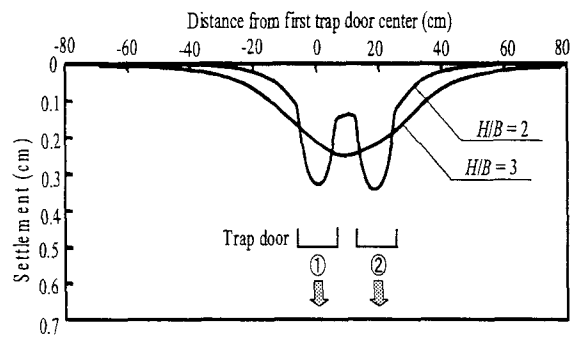


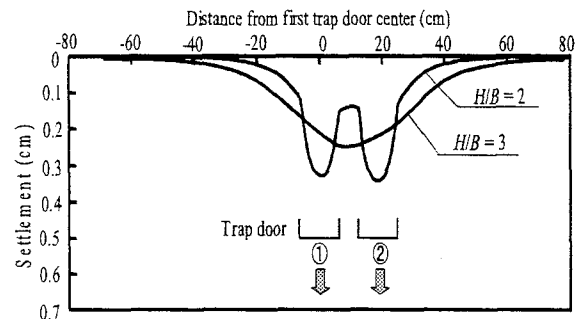
図-14 $H/B = 3$ における地表面沈下量



(a) 0B 離れ



(b) 0.5B 離れ



(c) 1.0B 離れ

図-15 H/B の違いによる地表面沈下量

り、落し戸降下実験の数値シミュレーションを行い、ケーススタディーを通して、本解析プログラムの予測性能を実験結果から定性的に比較検討した。本研究での結果は以下のとおりである。

- 1) 深層地盤の場合 ($H/B=3$) には、降下床付近の地盤がほぼ正規状態、すなわち、 $R=1$ に近い状態となり、式(10)の関数 U はほぼゼロとなることから、本モデルは修正 Cam-clay モデルに帰結するようになる。したがって、本研究で想定した材料において、 $H/B=3$ の場合には、 u による影響が小さくなる。
- 2) また、初期の正規降伏面の大きさ F_0 が增大すると、落し戸に作用する土圧が減少する。このように F_0 は、地盤の密度の状態を規定するパラメーターと考えることができる。本解析プログラムでは、従来の Cam-Clay モデルのパラメーターに加え、 u および F_0 によって、落し戸に作用する土圧が表現できるとともに、地盤内の応力再配分に伴う進行性破壊が表現できる。これらの特徴は土被り比が異なる落し戸降下の実験において実際に観察される地盤の変形挙動と定性的に一致する。
- 3) 同一材料においては、土被り比が小さい場合は、地表面までせん断帯が発達し、落し戸上部は軟化膨張となるが、土被り比が大きくなると落し戸周辺地盤にグラウンドアーチが形成され、アーチ内の地盤は、落し戸に追従して移動し、その周辺の地盤は、圧縮硬化となる (図-9 参照)。このような変形挙動を下負荷面モデルを用いた解析によってシミュレートすることができた。
- 4) 落し戸を連続して降下させた場合、同一降下量における、最大地表面沈下量は、離隔距離によって決まることを確認することができた。また、数値解析では、 $H/B=3$ において、離隔距離が $2B$ 以上になると、先行落し戸の影響を受けなくなるような結果が得られた。
- 5) 落し戸降下に伴う地盤内の応力再配分は、地盤の特性によって定まり、進行性破壊の過程についてもまた、地盤材料特性に強く依存する。そのため、数値解析で用いる土の構成式は、合理的なモデルである、下負荷面モデルが有効である。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚: 薄肉柔支保構造 (吹付けコンクリート・ロックボルト) の支保機構に関する研究, 土木学会論文集, No. 358, III-3, pp.47-52, 1985
- 2) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚, 木村亮: トンネルの支保効果に関する基礎研究, 京都大学防災研究所年報, Vol. 25B-2, pp.85-99, 1982
- 3) 足立紀尚, 八嶋厚, 上野洋: トンネルの支保効果に関する研究, 京都大学防災研究所年報, Vol. 26B-2, pp.45-51, 1983.
- 4) 小野諒兄, 眞井耕象: 乾燥砂層における垂直土圧, 土木学会誌 論説報告, Vol. 24, No. 5, pp.437-459, 1938.
- 5) 村山朔郎: 砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧, 京都大学防災研究所年報, Vol. 11B, pp.549-565, 1968.
- 6) 村山朔郎, 松岡元: 粒状土地盤の局部沈下現象について, 土木学会論文集, No. 172, pp.31-41, 1969.
- 7) 櫻井春輔, 川嶋幾夫, 川端康祝, 皿海章雄: 土被りの浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル実験, 土木学会論文集, No. 487, III-26, pp.271-274, 1994.
- 8) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚, 上野洋: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木学会論文集, No. 358, III-3, pp.129-136, 1985.
- 9) Papamichos, E., Vardoulakis, I., and Heil, L.K.: Overburden Modelling Above a Compacting Reservoir Using a Trap Door Apparatus, Phys. Chem. Earth(A), Vol.26, No. 1-2, pp.69-74, 2001.
- 10) 菊本統, 木村亮, 岸田潔, 足立紀尚: トンネル掘削時の力学挙動に関する 3 次元降下床実験とその数値解析, 土木学会論文集, No. 750, III-65, pp.145-158, 2003.
- 11) Nakai, T., Xu, L. and Yamazaki, H.: 3D and 2D Model Test and Numerical Analysis of Settlements and Earth Pressures due to Tunnel Excavation, Soils and Found., Vol. 37, No. 3, pp. 31-42, 1997.
- 12) Nakai, T., Wood, D. M. and Stone, K. J. L.: Numerical Calculations of Soil Response Over a Displacing Basement, Soils and Found., Vol. 35, No. 2, pp. 25-35, 1995.
- 13) Shahin, M. H., Nakai, T., Hinokio, M., Kurimoto, T., Sada, T.: Influence of Surface Loads and Construction Sequence on Ground Response due to Tunneling, Soils and Found., Vol.44, No.2, pp.71-84, 2004
- 14) 田中忠次, 酒井俊典: 有限要素解析による進行性破壊とスケール効果の検討 -砂地盤におけるトラップドア問題の研究(II)-, 農業土木学会論文集, Vol. 153, pp.1-10, 1991.
- 15) 酒井俊典, 田中忠次: 模型実験による進行性破壊とスケール効果の検討 -砂地盤におけるトラップドア問題の研究(I)-, 農業土木学会論文集, Vol. 147, pp.15-26, 1990
- 16) Hashiguchi, K.: Fundamentals in constitutive equation: continuity and smoothness conditions and loading criterion, Soils and Found., Vol. 40, No. 3, pp. 155-161, 2000.
- 17) Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P.: Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol.22, pp.197-227, 1998.
- 18) Hashiguchi, K., Saitoh, K., Okayasu, T. and Tsutsumi, S.: Evaluation of typical conventional and unconventional plasticity models for prediction of softening behaviour of soils, Geotechnique, Vol. 52, No. 8, pp.561-578, 2002.

- 19)岡安崇史, 橋口公一, 尾崎利行, 竹添亮: アンカー引抜き時の地盤の変形挙動に関する弾塑性有限要素解析, 応用力学論文集, Vol.3, pp.11-20, 2003
- 20)野田利弘, 高稲敏浩, 浅岡顕: 水～土連成計算による土留めに作用する力の時間依存性挙動の解析, 土木学会論文集, 617, 125-138, 1999.
- 21)Okayasu, T., Hashiguchi, K. and Tsutsumi, S.: Deformation behavior of shallow sand foundation beneath footing subjected to cyclic load, Proc. Int. Symp. Plasticity 2000, pp. 309-311, 2000.
- 22)Okayasu, T. and Hashiguchi, K.: Time-dependent elastoplastic constitutive equation of soils and its application to fem implementation, Lowland Tech. Int. Vol. 3, No. 2, pp.58-73, 2001.
- 23)Yatomi, C., Tashima, A., Iizuka, A. and Sano, I.: General theory of shear bands formulation by a non-coaxial cam-clay model, Soils and Found., Vol. 29, No. 3, pp.41-53, 1989.
- 24)Asaoka, A., Nakano, M., and Noda, T.: Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state. Soils and Found., Vol. 34, No. 1, pp.91-105, 1994.
- 25)Hashiguchi, K., Saitoh, K., Okayasu, T. and Tsutsumi, S.: Evaluation of typical conventional and unconventional plasticity models for prediction of softening behavior of soils, Geotechnique, 52, 561-573, 2002.
- 26)Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, pp.194-198, 1943.
- 27)足立紀尚, 木村亮, 岸田潔, 伊藤浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明, 土木学会論文集, No. 694, III-57, pp.277-294, 2001.
- 28)島田隆夫: 土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下, 土木学会論文集, No. 296, pp.97-109, 1980.

(2004年4月16日 受付)