2017 The 6th DIDAS Construction Seminar



MIDAS ITは世界の技術者を支援します



About MIDAS IT

MIDAS ITは、工学技術用ソフトウェア開発および普及、そして構造分野のエンジニアリングサービスと ウェブビジネス統合ソリューションを提供する会社です。

2000年9月に設立、現在は約600名のグローバル専門技術者が在籍し、日本、アメリカ、中国、インド、 ロシア、イギリス、ドバイ、シンガポール、フィリピンの現地法人や35ヶ国の代理店など、全世界ネット ワークを通し、110ヶ国に工学技術用ソフトウェアを販売する世界的な企業として成長しました。

また、技術者の皆様の技術力向上のために各分野別に技術講座を実施しており、今後もこのような 技術講座を定期的に開催していきたいと考えております。

このようなセミナーに是非ともご参加頂けますようお願い申し上げます。



Dubai Tower







Odeon Tower

2017 第 6 回 MIDAS 建設分野 技術講座

GTS NX 3次元モデリング / 解析事例紹介 株式会社 マイダスアイティジャパン 建設技術部 廣瀬 栄樹

3-20

地盤の変形・破壊予測における構成モデルの大切さ 21-109 名古屋工業大学 名誉教授・中部大学 客員教授 中井 照夫 先生

2017 第 6 回 MIDAS 建設分野 技術講座

GTS NX 3次元モデリング / 解析事例紹介 株式会社マイダスアイティジャパン 廣瀬栄樹 3-20

2017 The 6th MIDAS CONSTRUCTION SEMINAR

第6回 建設分野 技術講座

MIDAS

2017 MIDAS The 6th CONSTRUCTION SEMINAR

AGENDA

GTS NX 3次元モデリング/解析例紹介 -製品デモンストレーションを交えて-

01 MIDAS製品群の紹介

02 GTS NXの紹介 - デモを交えて

MIDAS製品群の紹介

MIDAS Family Progra	MIDAS Family Program は			
MIDAS 製品紹介	最先端CAE(Computer Aided Engineering) ソリューションです。			
建築	上木		地盤	機械
Building Engineering	Bridge Engineering		Geotechnical Engineering	Mechanical Engineering
midasiGen midas Civil 速源分野の 汎用構造解析あよび 許容応力度計算 midas eGen 第宿前刀目動計算+構造計圖/ 設計最近にシステム 正成力算分の CAD 基盤モデリング 難能形解析および 最適股 midas Drawing 理影羽之次元構築CADブログラム 構造図自動生成 第二		計システム	SoilWorks 2次元地盛汎用解析/設計 プログラム SoilWorks for FLIP 液状化解析プログラム HP用のプリ・ポスト SoilWorks for LlQCA 液状化解析プログラム LQCA用のプリ・ポスト (文字:3次元地鑑汎用解析 プログラム SOIFLIKFE 河川堤影の東水化 満葉数学び リーニンタン	midasNFX 機械分野の 汎用構造解析システム midasFX・ 有限要素解析汎用の プリ・ポスト処理プログラム

GTS NXの紹介





2017 MIDAS The 6th CONSTRUCTION SEMINAR











2017 MIDAS The 6th CONSTRUCTION SEMINAR メッシュモデリング - メッシュ生成の高速化 176秒 78% 並列処理+64ビット化 39秒 **GTS NX** GTS ソリッド 142個 要素 195万個 節点 34万個 326.5秒 93% ソリッド 62個 21.7秒 要素 11万個 **GTS NX** GTS 節点 16万個



2) オート	メッシュ 生成時間比較		
区分	従来プログラム	GTS NX	
要素サイズ (5m)	 ・ 所要時間:31.81 SEC ・ モデリング:8,551 節点、42,737 要素 	 約 5.2倍 UP 所要時間:6.68 SEC モデリング:8,551 節点、42,737 要素 	
要素サイズ (3m)	 ・ 所要時間:360.29 SEC ・ モデリング:33,774 節点、180,414 要素 	 約 30倍 UP ・ 所要時間:12.21 SEC ・ モデリング:33,774 節点、180,414 要素 	
要素サイズ (2m)	生成不可 (2時間以上経過してもPGが動かない)	 所要時間:26.24 SEC モデリング:107,586 節点、595,589 要素 	
要素サイズ (1m)	生成不可 (2時間以上経過してもPGが動かない)	 所要時間:285.79 SEC モデリング:817,693 節点、4,700,046 要素 	
		·	





















2017 MIDAS The 6th CONSTRUCTION SEMINAR











20 | 2017 第 6 回 MIDAS 建設分野 技術講座

2017 第 6 回 MIDAS 建設分野 技術講座

地盤の変形・破壊予測における構成モデルの大切さ 21-109 名古屋工業大学名誉教授・中部大学 客員教授 中井 照夫 先生

MIDAS建設分野技術講座 平成29年9月26日、地盤工学会会議室、東京

地盤の変形・破壊予測における 構成モデルの大切さ

(株)地域地盤環境研究所技術顧問 中部大学客員教授

中井 照夫









地盤力学における3つのモデリング

 ■Constitutive Modeling (構成モデル+要素試験)
 ■Numerical Modeling (数値解析)
 ■Physical Modeling (モデル実験)

1次元弾塑性モデル



正規圧密土の初期型弾塑性論によるモデル化(1/2)















自然堆積粘土の定ひずみ速度(CSR) 圧密試験結果



Luiseville clay (Watabe et al. 2009)









 $\rho_0 = 0 2 ext{total}$ を正規圧密粘土、 $G(\omega) = 0$ とするとボンディングのない練返し過圧密粘土、 $W = \text{const. } \& (-e)^p = 0$ とすると時間効果のないモデルになる。

解析例

科ハワメーター(月	泰冧柏工を忠止
λ	0.104
ĸ	0.010
$N(\mathbf{e}_N \text{ at } \boldsymbol{\sigma} = 98 \text{ kPa})$	0.83
а	100
b	40, 100
λ_{lpha}	0.003 unless otherwise stated
$(-\dot{e})_{ref}^p$	1 x 10 ⁻⁷ /min.

材料パラメーター (藤森粘土を想定)

ここに、初期間隙比速度: $(-\dot{e})_0^p = (-\dot{e})_{ref}^p = 1 \times 10^{-7} / \min$.

 λ_{α} は2次圧密係数







自然堆積粘土のCSR試験結果



Leroueilらの実験結果(1985)



標準圧密試験の有限要素解析



正規圧密状態で圧密係数*c*,が一定となるように決めた透水係数*k*と間隙比*e*の関係

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{e - e_0}{\lambda_k}\right)$$

 $e_0 = 0.83, k_0 = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/min}, \lambda_k = 0.104.$
正規圧密粘土の標準圧密試験の解析(1/2)



2次圧密係数の影響



過圧密粘土の標準圧密試験の解析







構造化した粘土の1次元圧密試験の実測値



Crushed mudstone pebbles (金田, 1999)

3次元弾塑性モデル





















Cam clay タイプのモデル

e.g. Original Cam clay model Modified Cam clay model Sekiguch · Ohta model (inviscid)





1次元モデルからCam clay modelへ-着目する実験事実









Cam clay modelの特徴

Cam clay model (e.g., Schofield and Wroth, 1968) は実際の地盤の変 形解析に曲がりなりにも適用できた最初の弾塑性モデルといえる。 Cam clay model は特に次の点で地盤材料の特徴を記述できる。

- ▶ せん断と圧密の両挙動を同じ考え方で説明。
- ▶ 限界状態線の存在(せん断するとはじめは違っていても最後は同じ)
- ▶ 負のダイレイタンシー(体積圧縮)を伴うひずみ硬化挙動と正のダイレイ タンシー(体積膨張)を伴うひずみ軟化挙動



Cam clay model の特徴(続き)

Cam clay model はシンプル(材料パラメーターの数が少なく、材料パラメーターの意味が明確)。しかし、次に示す地盤材料の 典型的な力学特性を考慮出来ない(ほぼ半世紀前のモデルだからこれは当然)。

- (1) 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響
- (2) ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- (3) ひずみ硬化中の正のダイレイタンシー
- (4) 応力誘導異方性と繰返し載荷時の挙動
- (5) 堆積過程で生じる固有異方性
- (6) 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- (7) 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- (8)時間効果特性すなわちレオロジー特性
- (9) 温度効果特性
- (10) 不飽和土の挙動

これらの特徴を適切に説明できるモデルは実際の地盤応力・変形解析に信頼性を持って適用可能となる。なお後で述べるt_{ij}のconceptは(1)中間主応力の影響を合理的に説明するものである。



(p, q) 平面上のoriginal Cam clay modelの降伏曲面



Subloading t_{ii} model

Nakai & Hinokio (S&F; 2004) Nakai, Shahin, Kikumoto, Kyokawa, Zhang & Farias (S&F; 2011) Nakai (CRC Press: 2012)

Cam clay model が表現できない地盤材料の特性

- (1) 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響
- (2) ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- (3) ひずみ硬化中の正のダイレイタンシー
- (4) 繰返し載荷時の挙動
- (5) 堆積過程で生じる固有異方性
- (6) 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- (7) 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- (8)時間効果特性すなわちレオロジー特性
- (9) 温度効果特性
- (10) 不飽和土の挙動

t/に基づく3次元モデルの定式化(1/4)



*t_{ij}*に基づく3次元モデルの定式化(2/4) 修正応力 *t_{ij}* (中井・三原, 1984) • *t*₁ = *a*₁ σ_1 , *t*₂ = *a*₂ σ_2 , *t*₃ = *a*₃ σ_3 • *t_{ij}* = *a_{ik}\sigma_{kj} ここに, (<i>a*₁, *a*₂, *a*₃) はSMPに垂直な方向の単 位ベクトル(方向余弦) *a*₁ = $\sqrt{\frac{I_3}{I_2\sigma_1}}$, *a*₂ = $\sqrt{\frac{I_3}{I_2\sigma_2}}$, *a*₃ = $\sqrt{\frac{I_3}{I_2\sigma_3}}$ *cf.* 佐武の修正応力 $\sigma_{ij}^* = \frac{1}{2} \phi_{ik}^{-1} \sigma_{kj}$ where, $\phi_1: \phi_2: \phi_3 = \sigma_1^a: \sigma_2^a: \sigma_3^a$ & *a* = 0.5



t/に基づく3次元モデルの定式化(4/4)

正規圧密土の1次元モデルを3次元化(Cam clay modelにt;;の概念を導入)



通常およびt_{ij}モデルで使われる応力・ひずみ増分パラメーター

	ordinary concept	t _{ij} concept	
tensor normal to reference plane	δ_{ij} (unit tensor)	a_{ij} (tensor normal to SMP)	
stress tensor	$\sigma_{_{ij}}$	t _{ij}	
mean stress	$p = \sigma_{ij} \delta_{ij} / 3$	$t_{N} = t_{ij}a_{ij}$	
deviatoric stress tensor	$s_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij}$	$t_{ij}' = t_{ij} - t_N a_{ij}$	
deviatoric stress	$q = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$	$t_S = \sqrt{t'_{ij}t'_{ij}}$	
stress ratio tensor	$\eta_{ij} = s_{ij} / p$	$x_{ij} = t'_{ij} / t_N$	
stress ratio	$\eta = q/p$	$X = t_S / t_N$	
strain increment normal to reference plane	$d\varepsilon_{v} = d\varepsilon_{ij}\delta_{ij}$	$d\varepsilon_{N}^{*}=d\varepsilon_{ij}a_{ij}$	
deviatoric strain increment tensor	$de_{ij} = d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_v \delta_{ij} / 3$	$d\varepsilon_{ij}' = d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_N^* a_{ij}$	
strain increment parallel to reference plane	$d\varepsilon_d = \sqrt{(2/3)de_{ij}de_{ij}}$	$d\varepsilon_{s}^{*} = \sqrt{d\varepsilon_{ij}^{\prime}d\varepsilon_{ij}^{\prime}}$	
$\sigma(\sigma_y)$	$(p\delta_{ij})$ $k\delta_{ij}$ oct. plan	$e \underbrace{t(t_{ij})}_{t_N a(t_N a_{ij})} \underbrace{t'(t_{ij})}_{t_N a(t_N a_{ij})}$	SM
T:=snace	- *	t _{ij} -space	



t_{ij} modelの降伏曲面(2次元平面での表示)





t_{jj} modelの降伏曲面(3次元空間での表示)







正規圧密粘土の三軸圧縮および伸張試験結果と解析結果



p=196kPa

正規圧密粘土の3主応力制御試験 15° σ_1 30° $\theta=15^{\circ}$ $\theta = 0^{\circ}$ (a) 15 45 comp. 00 $\nabla \nabla$ obs. cal. θ=60° 0 0.5Δ ext. E *p*=196kPa ∇ Fujinomori clay ε $\cdot 10$ σ_{1} σ ε (% 正8面体面状の応力経路 $\theta = 15^{\circ}$ 1.5 d/p *θ*=30° $\theta = 45^{\circ}$ 1.5 (b) (c) obs. cal. ○ △ ----▽ ---obs. cal. 0 ∆ ε_1 --- \varepsilon_2 - -\$ *p*=196kPa *p*=196kPa ▽ □ E Fujinomori clay Fujinomori clay 10 10 $\cdot 10$ ε (% E (% θ=30° $\theta = 45^{\circ}$

正規圧密粘土のstress-dilatancy関係の実測値



三軸圧縮および伸張試験



 t_{s}/t_{s} : $d\varepsilon_{s}^{*}/d\varepsilon_{s}^{*}$ 関係

正規圧密粘土の3主応力制御試験





正規圧密粘土の非排水三軸圧縮および伸張試験結果と解析結果



有効応力経路



偏差応力~偏差ひずみ関係

Cam clay model が表現できない地盤材料の特性

- (1) 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響
- (2) ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- (3) ひずみ硬化中の正のダイレイタンシー
- (4) 繰返し載荷時の挙動
- (5) 堆積過程で生じる固有異方性
- (6) 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- (7) 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- (8)時間効果特性すなわちレオロジー特性
- (9) 温度効果特性
- (10) 不飽和土の挙動



藤森粘土の材料パラメーター

	Same parameters as Cam clay model	
0.020		
0.83		
3.5		
0.2		
1.5	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta = 1$)	
	0.020 0.83 3.5 0.2 1.5	





正規圧密粘土の繰返し載荷(三軸圧縮・伸張)試験









豊浦砂の材料パラメーター

λ	0.070		
К	0.0045	Same parameters as Cam clay model	
$N(\mathbf{e}_N \operatorname{at} p = 98 \mathrm{kPa})$	1.10		
$R_{CS} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.2		
Ve	0.2		
β	2.0	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta = 1$)	
$a^{(\lambda - \kappa)} = a^{(AF)}/(\lambda - \kappa)$	30	Influence of density	
$a^{(IC)}/(\lambda - \kappa)$	500		

等方圧縮試験の実測値と解析結果



密な砂および緩い砂のせん断試験結果と解析



3軸圧縮条件

3軸伸張条件

密な砂および緩い砂のせん断試験のstress-dilatancy関係



種々の応力経路下の密な砂の三軸圧縮および伸張試験



3軸圧縮条件

3軸伸張条件

種々の応力経路下の緩い砂の三軸圧縮および伸張試験



3軸圧縮条件

3軸伸張条件



密な砂の3主応力制御試験



密な砂の3主応力制御試験のstress-dilatancy関係



密な砂の3主応力制御試験



正8面体面上の応力経路とひずみ増分方向

自然体積土の材料パラメーター

λ	0.104		
K	0.010		
$N(\mathbf{e}_N \operatorname{at} p = 98 \mathrm{kPa})$	0.83	Same parameters as Cam clay model	
$R_{CS} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS (comp.)}$	3.5		
Ve	0.2		
β	1.5	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta = 1$)	
а/(<i>λ-к</i>)	500	Influence of density	
b/(λ -к)	40	Influence of bonding	





構造化した粘土の非排水せん断試験のシミュレイション(時間効果なし)



構造化した粘土の非排水せん断試験の実測値



Osaka Pleistocene clay (Ma12) (Asaoka et al., 2000)

Cam clay model が表現できない地盤材料の特性

- (1) 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響
- (2) ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- (3) ひずみ硬化中の正のダイレイタンシー
- (4) 繰返し載荷時の挙動
- (5) 堆積過程で生じる固有異方性
- (6) 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- (7) 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- (8)時間効果特性すなわちレオロジー特性
- (9) 温度効果特性
- (10) 不飽和土の挙動





自然体積土の材料パラメーター

		•	
λ	0.104	Same parameters as Cam clay model	
К	0.010		
$N(\mathbf{e}_N \text{ at } p = 98 \text{kPa})$	0.83		
$R_{CS} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.5		
Ve	0.2		
β	1.5	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta = 1$)	
а/(λ-к)	500	Influence of density	
b/(λ-κ)	40	Influence of bonding	
λ_{lpha}	0.003	Coefficient of secondary consolidation	
(-ė)	1 x 10 ⁻⁷ /min.	Rate of plastic void ratio change at reference state	

粘土(時間効果を含めすべての特性を考慮したとき)



正規圧密粘土のひずみ速度効果のシミュレイション



正規圧密粘土のひずみ速度効果の実測値



ひずみ速度を変えた三軸圧縮および伸張試験(Nakai & Tsuzuki, 1988)




Cam clay model が表現できない地盤材料の特性

- (1) 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響
- (2) ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- (3) ひずみ硬化中の正のダイレイタンシー
- (4) 繰返し載荷時の挙動
- (5) 堆積過程で生じる固有異方性
- (6) 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- (7) 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- (8)時間効果特性すなわちレオロジー特性
- (9) 温度効果特性
- (10) 不飽和土の挙動



Cam clay およびtij (AF) model のstress-dilatancy 関係と研究のmotivation



ひずみ増分方向(stress-dilatancy関係)の応力経路依存性ついては昔から知 られている実験事実であるにも拘わらず最近はあまり注意が払われていない。 これに関して、これまでに一つの降伏関数であっても、塑性ひずみ増分を関 連流動則(AF)成分と等方圧縮(IC)成分に分けることで応力経路依存性を説明 できることを示してきたが、ここではより合理的で安定な定式化について解説 する。 2重硬化(Double hadening)則の概念図



ただし、

- ひずみ増分方向の応力経路依存性を説明できるのはdf1>0 & df2>0 の領域だけ
- 降伏関数、ひずみ硬化パラメーター等が2セット必要。



関連流動則モデル(2) - tij (AF)

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa}} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G+Q}{t_{N}} \right\} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{h^{p}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}}$$

$$d\varepsilon_{v}^{p} = \frac{dF}{h^{p}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \qquad \left(\text{ where, } h^{p} = \frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G+Q}{t_{N}} \right\} \right)$$

$$\Box \Box \iota, \quad F = \ln \frac{t_{N}}{t_{N0}} + \varsigma(X) \downarrow \forall, \quad dF = \frac{\partial F}{\partial X} dX + \frac{\partial F}{\partial t_{N}} dt_{N} = \varsigma'(X) dX + \frac{1}{t_{N}} dt_{N}$$
Loading condition:
$$\left(d\varepsilon_{ij}^{p} \neq 0 \qquad \text{if } \Lambda = \frac{dF}{h^{p}} \ge 0 \\ d\varepsilon_{ij}^{p} = 0 \qquad \text{otherwise} \end{array} \right)$$

$$NB., \quad \Box h \equiv COSubloading t_{ij} \mod l \ge \Box \cup C \otimes \Delta h, \quad \exists Oformulation Ofthere \delta \otimes \lambda, \quad dF \in Oformulation Ofthere \delta \otimes \lambda,$$

塑性ひずみ増分の応力経路依存性を考	「慮するモデル(1/2) − tij (AF+IC)
dt_N による塑性体積ひずみ増分は、 $\frac{\partial F}{\partial t_N} \leq \frac{\sqrt{3}}{t_N}$ (2)	ここに、等号は等方応力(X=0)の時)より
$d\varepsilon_{v}^{p}\Big _{dt_{N}} = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial t_{N}}\right)dt_{N}}{h^{p}}\frac{\partial F}{\partial t_{kk}}$	1
$= \frac{dt_N/t_N}{\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G+Q}{t_N} \right\}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}}$	0 0.2 0.4 0.6 0.8 V 1
$\geq \frac{dt_N/t_N}{\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\sqrt{3}}{t_N} + \sqrt{3} \frac{G+Q}{t_N} \right\}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}}$	$ \begin{array}{c} & X \\ & {\longrightarrow} <\partial F/\partial t_{kk} \cdot t_N/\sqrt{3} > \\ & {\longrightarrow} <\partial F/\partial t_{kk} \cdot t_N/\sqrt{3} >^2 \\ & \overset{-1}{\longrightarrow} t_N/t_{N1} \end{array} $
$=\frac{dt_{N}/t_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa}\left\{1+G+Q\right\}}\cdot\left(\frac{\partial F}{\partial t_{kk}}\frac{t_{N}}{\sqrt{3}}\right)$	$ \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} は等方応力(X=0)で1、応力比Xの増加 \\ とともに減少し、\partial F/\partial t_{kk} = 0となる応力比で0となる無次元関数。$
(where, $\partial F / \partial t_{kk} > 0$)	

したがって、 dt_N の変化による塑性体積ひずみ増分の等方圧縮(IC)成分 $d\varepsilon_v^{p(IC)}$ を下式で与えれば、 等方応力状態では $d\varepsilon_v^p\Big|_{d_N}$ に一致し応力比の増加とともにその割合を小さくする特性を表現できる。

$$d\varepsilon_{v}^{p(IC)} = \frac{dt_{N}/t_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa}\left\{1+\langle G+Q\rangle\right\}} \cdot \left\langle\frac{\partial F}{\partial t_{kk}}\frac{t_{N}}{\sqrt{3}}\right\rangle^{m}$$

$$\subset \subset \langle \zeta_{N}\langle A\rangle = A \text{ if } A > 0; \text{ otherwise}\langle A\rangle = 0$$

塑性ひずみ増分の応力経路依存性を考慮するモデル(2/2) – tij (AF+IC)

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{v}^{p} &= \frac{dF}{h^{p}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} - \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1+e_{0}}{\lambda-\kappa} \left\{ 1+\langle G+Q \rangle \right\}} \cdot \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \cdot \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m-1} \frac{1}{\sqrt{3}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{ik}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{ik}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{ik}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{ik}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{k}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{k}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \right\rangle^{m} \frac{1}{t_{N}} dt_{N}}{\frac{1}{t_{N}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{N}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{k}} \frac{t_{N}}{\sqrt{3}} \frac{1}$$

粘土の材料パラメータ

λ	0.104						
ĸ	0.010						
$N(\mathbf{e}_N \operatorname{at} p = 98 \mathrm{kPa})$	0.83	Same parameters as Cam clay model					
$R_{CS} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS (comp.)}$	3.5						
Ve	0.2						
β	1.5	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta =$					
а	290 (≈500/√3)						
(Do	0.0 (no bonding)						
	0.4 (with bonding)	Influence of bonding					
b	23 (≈40/√3)						
nowarIC	1.0 (AF+IC)	Degree of IC component					
poweric	$2.0(AF+IC \cdot Alt)$						

where, *powerIC=m*





粘土(OCR=2)の非排水試験の解析結果





地盤力学における3つのモデリング

 Constitutive Modeling (構成モデル+要素試験)
 Numerical Modeling (数値解析)
 Physical Modeling (モデル実験)

Numerical modeling and physical modeling

地盤工学問題のモデル実験と解析 -トンネル掘削問題、開削・擁壁土圧問題、 支持力問題、補強土問題等 -



アルミ棒積層体

2次元モデル実験で用いる材料



アルミ棒積層体の二軸試験

アルミ棒積層体の材料パラメータ

λ	0.008
К	0.004
$N(e_N \text{ at } p = 98 \text{ kPa})$	0.3
$R_{CS} = (\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	1.8
Ve	0.2
β	1.2
a/(<i>λ</i> - <i>κ</i>)	1300





http://jp.midasuser.com/geotech | 79



トンネル掘削問題





・トンネル土圧: Terzaghiの緩み土圧式

 ・トンネル覆工材の曲げモーメント・軸力・変形:地盤バネを使った梁バネモデル
 ・地表面沈下:トンネルが収縮した分だけ地表面が沈下すると考え、正規曲線を 仮定もしくは弾性有限要素解析



トンネル周面土圧分布



トンネル周面土圧分布(D/B=1.0 & 4.0)



地盤内偏差ひずみ分布





地表面沈下プロファイル



トンネル内空変位dr~トンネル中心変位dc関係





地盤内偏差ひずみ分布(直接基礎)



地表面沈下プロファイル(直接基礎)



トンネル周面土圧分布(直接基礎)



大深度地下利用法

東京、大阪、名古屋の3大都市圏が対象で、2001年4月に施行。対象地域の地下40-100メートルの地下で、道路や鉄道など公共性の高い事業を行う際、同法を適用すると地上の土地所有者に補償や用地買収の必要がなくなる。



杭基礎の支持力試験と解析結果











地表面沈下プロファイル



先行トンネルの真下に後続トンネル



先行トンネルの斜め下方に後続トンネル



先行トンネルの真横に後続トンネル



先行トンネル周面土圧分布





Mohamad, Bannett, Soga, Mair and Bowers (2010): Geotechnique, 60(12)より引用加筆

弾性および弾塑性解析による地表面沈下プロファイル



円形トンネル掘削時の地表面沈下プロファイル



弾性解析と弾塑性解析の偏差ひずみ(大深度・杭基礎)



http://jp.midasuser.com/geotech | 93



擁壁土圧および 山留め掘削問題

擁壁土圧問題



土圧係数~壁体変位関係



http://jp.midasuser.com/geotech | 95





既往の山留め掘削問題の予測法



弾塑性法(梁ばねモデル)



周辺地盤挙動予測方法 (強制変位法)

地表面沈下







アンカー式山留め掘削問題







見場解れ	斤例												
B I Stage excutation 2 ^{2/4} stage excutation 3 ^{-3/4} stage excutation 1 ^{2/4} stage excutation 1 ^{3/4} stag													
Geological age	Layer symbol	Bottom depth (GLa-m)	z	Paramete κ	rs foi V	r FE A	naly:	ses B	a	パ (kN/m ³)	k (cm/s)	SPT N	
Man-made	В	-1.4	0.07	0.0045	0.2	1.10	3.2	2	30	17.0	1.67E-05	19	
	Auc	-2.2	0.16	0.02	0.2	1.23	2.1	1.3	500	17.24	1.67E-07	3	
Alluvium	Aus	-7.05	0.07	0.01	0.2	0.68	3.5	1.5	200	19.56	9.00E-04	3	
layer	Ame	-10.95	0.16	0.02	0.2	1.23	2.25	1.57	40	16.09	1.67E-07	1	
	As	-12.3	0.07	0.0045	0.2	1.10	3.2	2	30	19.40	2.80E-04	9	材料バラメータ
	Tc12	-17.55	0.5630	0.00639	0.2	2.81	2.4	1.5	500	15.75	1.67E-07	5	
Diluvium	Tsc	-18.1	0.07	0.0045	0.2	1.10	3.2	2	30	20.80	8.90E-03	12	
layer	Tg12	-22.3	0.07	0.0045	0.2	1.10	3.2	2	30	20.80	8.90E-03	56	
	Tc11	-30.25	0.3255	0.01090	0.2	1.91	3.4	1.5	500	16.97	1.67E-07	9	
Osaka	Os8	-40	0.07	0.0045	0.2	1.10	3.2	2	30	19.80	3.80E-03	49	
layer	Oc	-50	0.6540	0.0170	0.2	3.23	3.4	1.5	500	15.42	1.67E-07	-	l

壁体変位







支持力および補強土問題





基礎の支持力問題 – 3D














まとめ

- トンネル掘削、壁面土圧、山留め掘削、支持力問題、補強土問題等の地盤挙動を主として1gモデル実験と有限要素解析を通して検討した。
- すべての問題に対して材料が同じであれば、同一の材料パラメ ーターで解析を行える。
- ・ 地盤の基本的な挙動予測には、
 - ①地盤材料の力学特性(弾塑性、中間主応力の影響、密度・ 拘束応力の影響、ひずみ増分方向の応力経路依存性、ダイ レイタンシー等)を評価できる構成モデル、
 ②構造物および境界面の力学特性の評価、
 ③施工過程や境界条件の評価
 - が大切。
- 地盤工学の諸問題を同じ考え方で取り扱うことが必要
- ・ 地盤挙動の予測では、ある時間ある場所での変形が合う合わないではなく、全体のメカニズムとして考えることが必要。
- Subloading tij modelを用いた解析コード(FEMtij)はこれらの要求に対して応えている。

本の宣伝



CRC Press (Taylor and Francis) 2012

- Webで"nakai teruo crc"と入れると案内がでます。
- 最近 Hardback(£106), eBook(£42)版に加えて Paperback(£60)版が出版されました。
- 新設された平成28年度地盤工学会出版賞を受賞しました。

簡単にそして精緻に



MIDAS Total Solution



........

SoilWorks for FLIP FLIP専用のプリ・ポスト

SoilWorks for FLIPはFLIP「地震時の液 状化による構造物被害予測プログラム」 専用のプリ・ポストです。SoilWorksの操 作性をそのまま継承しており、AutoCAD 感覚でデータを作成することができます。 データ作成後は、FLIPを起動させ計算を 実行することもでき、FLIP解析のための 統合された作業環境を提供します。



GTS NX

GTS NX - 地盤分野汎用解析システム

GTS NXは最先端プリ・ポストと解析機能を搭載した新しい概念の地

盤汎用解析プログラムです。GTS NXは最新のOS環境変化に合わせ

て64ビット、並列処理を適用した統合ソルバを搭載しており、初心者

も使いやすいように直観的なリボンメニュー形式を用意しておりま

す。また、様々な解析機能、圧倒的に速い解析速度、優れているグラ

フィック表現および結果整理機能などを提供します。



SoilWorks for LIQCA LIQCA専用のプリ・ポスト

SoilWorks for LIQCAはLIQCA専用の プリ・ポストです。SoilWorksの操作性を そのまま継承しており、AutoCAD感覚で データを作成することができます。データ 作成後は、LIQCAを起動させ計算を実行 することもでき、LIQCA解析のための統 合された作業環境を提供します。

* LIQCAは1987年京都大学の岡 二三生教授 をはじめとするLIQCA開発グループにより開発 された有効応力に基づく液状化解析プログラム です。





midas iGen 任意形状構造物の 汎用構造解析 及び許容応力度計算

midas eGen 任意形状建物の 一貫構造計算 CAD基盤モデリング

midas **Drawing** 建築構造図面の 自動生成プログラム





midas Civil 土木分野の 汎用構造解析および 最適設計システム

midas FEA 建設分野の非線形解析 および詳細解析システム

midas CIM **開発中 3D情報モデルを活用した 土木構造物のモデリング/ 図面生成/施工管理 ソリューション





GTS NX 2/3次元地盤汎用解析 プログラム

SoilWorks 2次元専用地盤汎用解析 プログラム

SoilWorks for FLIP 液状化解析プログラム FLIP用のプリ・ポスト

SoilWorks for LIOCA 液状化解析プログラム LIQCA用のプリ・ポスト

midas **GeoXD** 土留め設計図面生成 プログラム

SOLIFLUK PE 河川堤防の液状化 対策設計ソリューション





midas NFX 機械分野の 汎用構造解析システム

midas NFX CFD 流動解析システム





株式会社マイダスアイティジャパン 〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail g.support@midasit.com Copyright© Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.