

NEW EXPERIENCE OF
GEO-TECHNICAL ANALYSIS SYSTEM



GTS NX

VERIFICATION & APPLICATION MANUAL



NEW EXPERIENCE OF
GEO-TECHNICAL ANALYSIS SYSTEM

GTS **NX**

**VERIFICATION
& APPLICATION
MANUAL**

序論

この本は、実務で使用される解析を解析法および分野で区分し、GTS NX の結果の信頼度を比較/検討し、細分化された解析手法の理解のため作成しました。また、midas GTS との比較を行い、結果の違いが発生する場合、原因および同じ条件での比較方法を共に明示しています。より複雑な問題を解析で解くために追加された高度な解析機能およびオプションについて、本文とは別に、Note、Tips として収録し、地盤工学者が GTS NX を信頼し、実務の問題にすぐに適用できるように構成しました。

この本は次に示す 6 つの Chapter で構成されています；

Chapter 1 : Construction Stage (施工段階解析)

Chapter 2 : Seepage (浸透解析)

Chapter 3 : Fully Coupled Analysis (応力-浸透の完全連成解析)

Chapter 4 : Consolidation (圧密解析)

Chapter 5 : Slope Stability (斜面安定解析)

Chapter 6 : Dynamics (動解析)

“Verification & Application Manual” が皆様が GTS NX プログラムをご利用になる上で少しでもお役立てできることを願っております。



GTS NX は、最新のハードウェアと OS に対応した次世代プラットフォームと 64bit 統合ソルバーを搭載した地盤分野の汎用有限要素解析ソリューションです。

GTS NX は便利な pre-post 機能をベースに、多様な材料モデルと高度な解析機能で初級実務者から高度な解析を行う研究者の方までご利用いただけるプログラムです。

New eXperience of
GeoTechnical analysis System

Verification &Application Manual

TABLE OF CONTENTS

01

Chapter 1. Construction Stage

23

Chapter 2. Seepage

29

Chapter 3. Fully-coupled Analysis

39

Chapter 4. Consolidation

45

Chapter 5. Slope Stability

49

Chapter 6. Dynamic



Chapter 1

Construction

Stage

| | |
|--------------------------------|----|
| Section 1. 盛土施工段階解析 (2D) | 1 |
| Section 2. トンネル施工段階解析 (2D) | 3 |
| Section 3. 水位が変化する土留め掘削解析 (2D) | 12 |
| Section 4. 一般施工段階解析 (3D) | 15 |
| Section 5. トンネル施工段階解析 (3D) | 17 |



Verification & Application

Chapter 2

Seepage

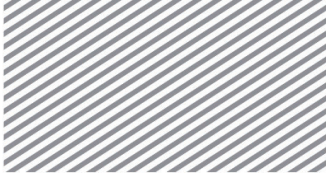
| | |
|--------------------------|----|
| Section 1. 定常浸透流解析 (3D) | 23 |
| Section 2. 非定常浸透流解析 (2D) | 25 |



Chapter 3

Fully-Coupled Analysis

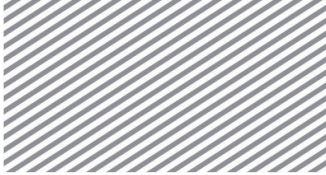
| | |
|-----------------------------------|----|
| Section 1. 応力-浸透完全連成解析概要 | 29 |
| Section 2. 真空圧密工法 (Suction-Drain) | 31 |
| Section 3. ウェルポイント工法 (Well-Point) | 32 |
| Section 4. 土留め掘削施工手順 (地下水位を考慮) | 34 |
| Section 5. トンネル掘削施工解析 (地下水位考慮) | 36 |



Chapter 4

Consolidation

| | |
|---------------------------------------|----|
| Section 1. 軟弱地盤盛土圧密解析 (2D) | 39 |
| Section 2. 排水材間隔に従う圧密解析 (3D) | 41 |
| Section 3. 盛土圧密解析 (地盤特性(部分飽和)詳細検討) | 43 |



Verification & Application

Chapter 5

Slope Stability

Section 1. 斜面安定解析 (2D) 45

Section 2. 3次元斜面安定解析 (3D) 47



Verification & Application

Chapter 6

Dynamic

| | |
|----------------------------|----|
| Section 1. 1 次元地盤応答解析 | 49 |
| Section 2. 2 次元等価線形解析 (2D) | 52 |
| Section 3. 発破動解析 (3D) | 54 |

Chapter 1

Construction

Stage

TABLE OF CONTENTS

Section 1. 盛土施工段階解析 (2D)

Section 2. トンネル施工段階解析 (2D)

Section 3. 水位が変化する土留め掘削解析 (2D)

Section 4. 一般施工段階解析 (3D)

Section 5. トンネル施工段階解析 (3D)

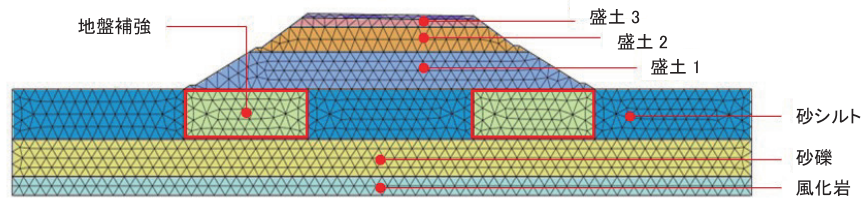
Section 1

盛土施工段階解析 (2D)

| | |
|---------|---------------------------|
| 要素特性 | 地盤 - 平面ひずみ (Plane Strain) |
| 節点数、要素数 | 3,801 節点、1,822 要素 |
| 施工段階数 | 6 段階 |

軟弱地盤上の盛土を施工する際の安定性を検討するモデルです。

[施工段階 (6 段階)] 初期応力 → 地盤改良 → 1 段階目盛土 → 2 段階目盛土 → 3 段階目盛土 → 等分布荷重
最終段階において、盛土上面に等分布荷重を作用させ地盤内の応力と変位を確認します。



[単位 : KN, m]

▶結果比較 (GTS-GTS NX)

| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|-----|------------|------------|------------|------------|---------------------|---------------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| DX | -3.9650e-2 | 3.9779e-2 | -3.9662e-2 | 3.97851e-2 | 0.03% (-1.22e-5) | 0.02% (6.10e-6) |
| DY | -1.9028e-1 | 4.42316e-3 | -1.9027e-1 | 4.42348e-3 | 0.00% (6.00e-6) | 0.01% (3.20e-7) |
| SXX | -4.43249e2 | 1.18053e2 | -4.43160e2 | 1.18048e2 | 0.02% (8.90e-2) | 0.00% (-5.00e-3) |
| SYX | -4.82578e2 | 8.79152e0 | -4.82577e2 | 8.78310e0 | 0.00% (1.00e-3) | 0.10% (-8.42e-3) |

Note 応力・ひずみの計算位置の設定

応力・ひずみを算出する方法には、[中心]、[中心+節点]の2つがあります。

- ✓ [中心]で設定された場合、要素中心での値を利用してコンター表示し、[中心+節点]である場合には、要素の中心点と各節点での値を利用してコンター表示します。



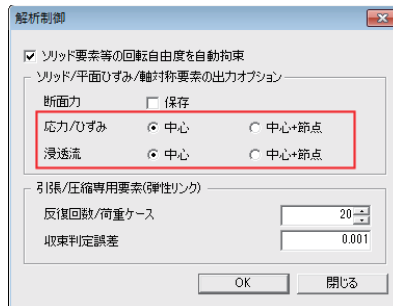
- ✓ [中心+節点]では、[中心]の結果より精度の高い結果を得ることができます。異なるプログラム間で解析結果を比較する場合には、設定が同じになるようにする必要があります。

GTS NX では [中心+節点]をデフォルト設定としています。

| 区分 | デフォルト設定 | 備考 |
|---------|---------|------------------------------------|
| GTS NX | [中心+節点] | 解析 > 解析ケース > 解析ケース > 出力制御 > 要素出力位置 |
| GTS 440 | [中心] | 解析 > 一般解析制御 |

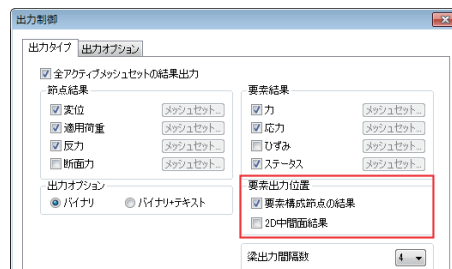
GTS 440

- コマンド：解析 > 解析制御
- ✓ デフォルト設定は[中心]に設定されており、GTS NX と結果を比較する際には[中心+節点]に変更し解析を再実行する必要があります。



GTS NX

- コマンド：解析 > 解析ケース > 解析ケース > 出力制御 > 要素出力位置
- ✓ デフォルト設定は[要素構成節点の結果]にチェックされており ([中心+節点])、従来の GTS の結果 ([中心]) と比較するためには [要素構成節点の結果] チェックをオフした後に解析を実行します。



Section 2

トンネル施工段階解析(2D)

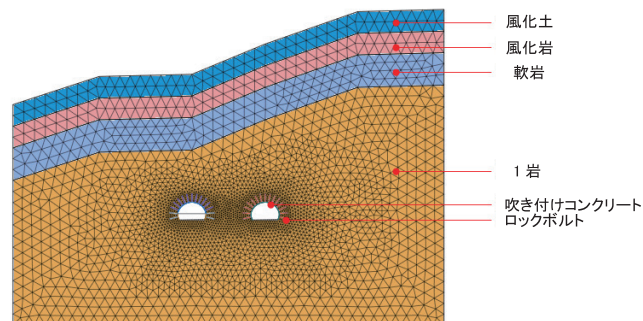
| | |
|---------|--|
| 要素特性 | 地盤 - 平面ひずみ(Plane-Strain)、 吹き付けコンクリート - 梁要素(Beam) ロックボルト - トラス要素(Truss) |
| 節点数、要素数 | 3,284 節点、6,618 要素 |
| 施工段階 | 11 段階 |

原地盤が水平成層ではない斜面区間に設置するトンネル施工段階モデルです。

[施工段階(11段階)] 初期応力解析 → 初期化 → 左側トンネル上半分掘削 → 左側上部梁要素設置 → 左側上部トラス要素設置 → 左側下半分掘削 → 左側下部梁要素設置 → 左側下部トラス要素設置 → 右側トンネル掘削 → 右側梁要素設置 → 右側トラス要素設置

2次元モデルでアーチ効果を考慮するため、応力解放率には掘削、梁要素設置、トラス要素設置段階でそれぞれ 0.4、0.3、0.3 を適用しました。

各施工段階での地盤の変位及び梁要素の断面力を確認します。



[単位 : KN, m]

▶結果比較 (GTS-GTS NX)

| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio (Value) | |
|----------|-------------|------------|-------------|------------|---------------------|---------------------|
| | Min | max | min | max | min | max |
| DY | -2.41192e-3 | 2.14727e-3 | -2.41212e-3 | 2.14718e-3 | 0.01% (-2.00e-7) | 0.00% (-9.00e-8) |
| DXY | 0 | 2.41228e-3 | 0 | 2.41248e-3 | 0.00% (0) | 0.01% (2.00e-7) |
| SXX | -1.38952e3 | 7.79525e2 | -1.38954e3 | 7.79529e2 | 0.00% (-2.00e-2) | 0.00% (4.00e-3) |
| SYX | -5.76764e3 | -1.99282e2 | -5.76783e3 | -1.99320e2 | 0.00% (-1.90e-1) | 0.02% (-3.80e-2) |
| Beam Fx | -2.7790e2 | -2.0037e1 | -2.7759e2 | -1.99448e1 | 0.11% (3.10e-1) | 0.46% (9.22e-2) |
| Beam My | -5.13862e-1 | 9.84391e-1 | -5.1333e-1 | 9.82997e-1 | 0.10% (5.32e-4) | 0.14% (-1.39e-3) |
| Beam Fz | -1.82635e0 | 2.16416e0 | -1.82503e0 | 2.16169e0 | 0.07% (1.32e-3) | 0.11% (-2.47e-3) |
| Truss Fx | -1.58588e0 | 9.79546e0 | -1.5888e0 | 9.76705e0 | 0.18% (-2.92e-3) | 0.29% (-2.84e-2) |

 **Note** 初期応力解析方法

一般的な施工段階解析では原地盤に対する自重解析から得られる応力を初期応力として設定します。GTS では初期応力を K_0 手法やポアソン比を用いた手法で計算することができます。

 K_0 手法

$K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ で定義される K_0 値を利用し、垂直応力から水平応力を計算し初期応力を設定する手法です。この手法を使用すると最初に自重解析によって垂直応力 σ_v を求め、その値から $\sigma_h = K_0 \times \sigma_v$ によって水平応力を求めます。この際、せん断応力は 0 と仮定されます。

以下の条件の場合には、 K_0 手法を適用することができます。

- ✓ 水平方向に対する地盤形状の変化が小さい
- ✓ 間隙水圧分布が水平方向に対し変化がない
- ✓ 側方の境界条件によって水平方向の応力が発生する
- ✓ 異方性材料の材料軸が垂直または水平軸と一致する

上記の条件に適合しない場合の K_0 手法の適用には注意が必要です。

地盤が水平成層ではない場合(傾斜している場合)には、応力の分布が水平方向に一樣ではなく、せん断応力が発生するため、 K_0 手法を適用すると応力が平衡状態にありません。 K_0 手法を用いて初期応力を計算するためには、 K_0 手法で応力状態を計算した後に、不平衡力を解消するためのダミーのステージ(Null Stage)を設定し、初期応力を再計算する必要があります。

ポアソン比を用いた手法

地盤が水平成層である場合、この手法は $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ である K_0 手法と同じ結果を得ることができます。地盤が傾斜している場合には、水平方向のひずみが発生し、せん断応力も発生するため、 K_0 手法の適用は難しくなります。このような場合には、ポアソン比を用いた手法を適用する必要があります。ただし、想定される地盤の K_0 値が 1 より大きい場合には、ポアソン比を用いた手法が適用できないため、 K_0 手法を用いることになります。

Note 原地盤の初期状態の設定方法

基本的には、初期状態で塑性状態とならないため、原地盤の状態では安定であるという仮定の下で解析を行います。そのため、初期応力は Ko 状態で仮定することができます。

しかし、地盤が水平成層でない場合には、Ko 条件で計算すると不平衡となるため、Ko 条件で計算を行った後にダミーのステージ([Null Stage + 変位初期化])を設定する必要があります。

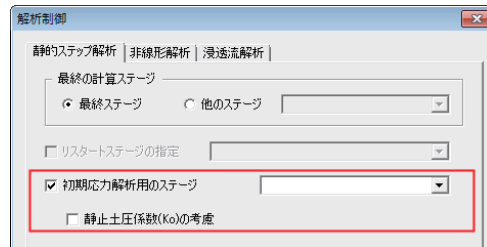
Ko 条件において初期状態は安定であると仮定するため、不平衡力により発生するひずみもしくは変位は“0”に設定し、続く解析を実行することを推奨します。

GTS NX と GTS 440 の結果比較において、地盤が傾斜している場合には以下の表を参考にし、解析を実行することを推奨します。

| 区分 | ポアソン比を用いた手法 | Ko 手法 |
|---------|--------------------|---|
| GTS NX | Step 1 : Ko チェック解除 | Step 1 : Ko チェック Step 2 : Null Stage + 変位初期化 |
| GTS 440 | Step 1 : Ko チェック解除 | Step 1 : Ko チェック |

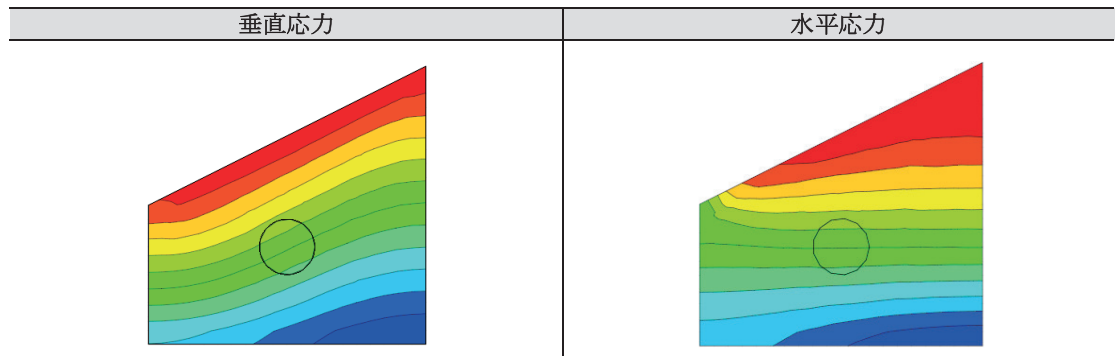
Note Ko オプションの理解 - GTS 440

- コマンド：解析 > 解析ケース > 解析ケースの作成/編集 > 解析制御 > 静的ステップ解析タブで初期応力解析用のステージチェックボックスをオンにした後、静止土圧係数(Ko)の考慮チェックボックスで設定することができます。



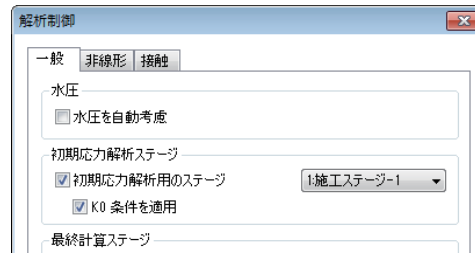
Ko 状態を初期条件として収束解を求めます。(一つのステップ内で垂直応力を先に計算し Ko 条件を付加した後、収束計算を行います → 不平衡力の収束した応力状態)

そのため、地面が傾斜している場合には、初期応力段階で水平応力/垂直応力比が Ko と一致しません。



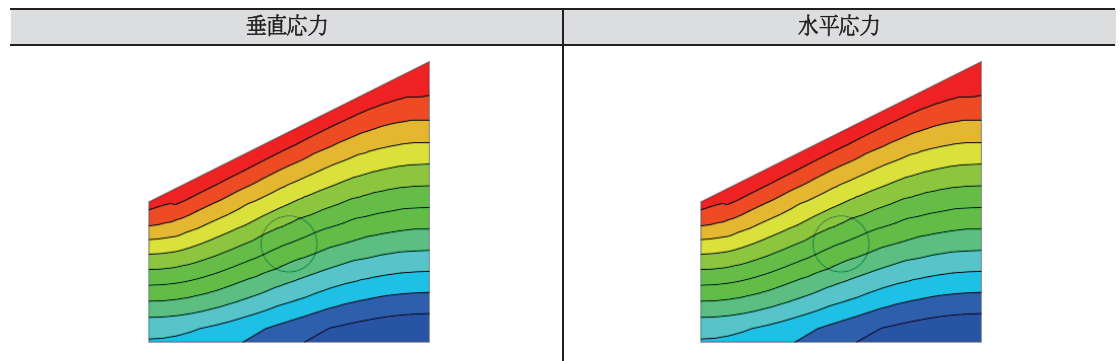
Note Ko オプションの理解 - GTS NX

- 位置：解析 > 解析ケース > 解析ケース > 解析制御 > 一般タブで初期応力解析用のステージチェックボックスをオンにした後、Ko 条件を適用チェックボックスで設定することができます。



Ko 条件適用後、平衡状態でない場合でも不平衡力が残る状態で解析を実行します。

そのため、初期応力段階で水平応力/垂直応力比が K_0 と一致します。



Note トンネル補強材-吹き付けコンクリート：梁要素(Beam)要素と結果項目

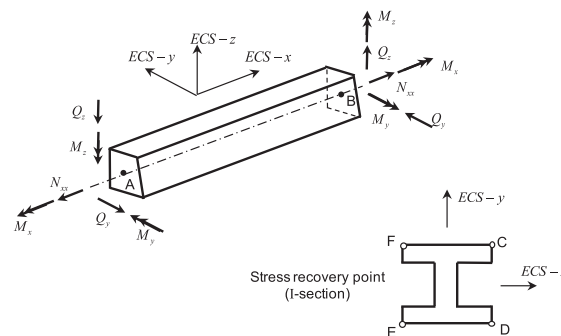
- 断面の寸法に比べ、軸方向に長い部材が曲げ変形を受ける際に、使用される要素で、部材には軸力、せん断力、モーメントが発生します。
- 長さに対する断面の幅または高さの比が 1/5 より大きくなる場合(部材長さの比に対する断面が大きい場合)にはせん断変形による影響が大きくなるので、
 - ✓ 2次元の場合：梁要素 → 2D平面ひずみ要素
 - ✓ 3次元の場合：梁要素 → シェル要素またはソリッド要素を使用することが望ましい。

梁要素の応力結果

| 区分 | GTS 440 | GTS NX |
|--------|-------------|-------------|
| 曲げ圧縮応力 | fiber 1-SXX | 梁要素応力 S-MIN |
| | fiber 2-SXX | 梁要素応力 S-MAX |

GTS NX 応力計算位置の設定

GTS NX では追加で梁要素断面に表記される各位置において計算される応力を出力することができます。この位置はユーザが調節することもできます。



応力リカバリ(i断面)

断面

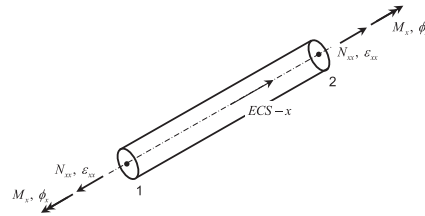
| | Y座標 | Z座標 |
|--------|--------|-------|
| C (RT) | 0.025 | 0.05 |
| D (LT) | -0.025 | 0.05 |
| E (LB) | -0.025 | -0.05 |
| F (RB) | 0.025 | -0.05 |

Unit: m

OK 閉じる

Note トンネル補強材-ロックボルト：トラス要素(Truss)要素と結果項目

- ✓ 断面積に比べ軸方向に長い部材をモデリングするのに使用される要素で、主にアンカー、ネイル、ロックボルトのように曲げ挙動を無視することができる構造部材をモデリングする際に使用されます。部材には軸力のみ発生します。



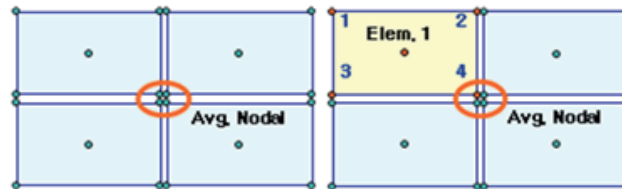
既存の GTS 440 では梁/トラス要素の結果が一緒に出力され、トラス要素の結果を確認するにはトラス要素のみのメッシュセットを表示する必要がありましたが、GTS NX ではトラス要素の部材力のみ確認できるように結果項目を分離しました。

GTS 440 との結果比較の際には、GTS NX では結果 > 表示/全応力 > 節点平均オプションのチェックを解除した後に比較する必要があります。
(オプションをチェックした場合 GTS NX では梁要素の I、J 端結果を平均して出力)

| GTS 440 | GTS NX (節点平均) | GTS NX (節点平均解除) |
|---------|---------------|-----------------|
| | | |

Note 節点平均 (Nodal Average)

四角形要素の場合、要素一つ当たり5つの結果が出力され、一つの節点を基準として見ると、4つの値が存在するようになります。結果値の出力の際に、この4つの値の平均値を出力させる機能が節点平均 (Nodal Average) です。



一般的に、要素の結果値と節点平均の結果値を比較すると、要素の結果が大きくなります。また、応力の変化が大きい箇所では要素の結果と節点平均の結果値に大きな差がある場合があります。解析結果の評価は、設計者もしくは解析者の判断に大きく左右されるため、構造物の種類、モデリング方法などに応じた結果確認を行う必要があります。GTS NXでは、多くのオプションがあるので、ユーザーの望む結果表示および確認を行うことができます。一つの例として、スラブの中央部の場合、連続性した解析結果の算出のために節点平均を使用し、スラブと壁体が接する箇所では、節点平均すると異なる部材間の結果が平均化されてしまうので、要素の結果での確認が妥当です。要素の結果は節点や中心で出力され、結果抽出で得られる値は節点平均を解除した状態での結果となるので、テーブルの確認の際には節点平均チェックを解除した後に、確認してください。

Note 部材の奥行き配置間隔の考慮

2次元解析では1D要素に対し奥行き配置間隔を入力することができます。

▶ コマンド：静的/斜面解析 > 特性/座標系/関数 > プロパティ



既存の GTS 440 では2次元モデルで梁、トラス/埋め込みトラス要素の部材力の出力の際に単位 m 当りに発生する軸力が出力されたが、GTS NX では部材力の出力の際には、奥行き配置間隔を乗じた部材当りの軸力値で出力されます。

$$✓ \quad \text{GTS 440: } f = \sigma A^* = E\varepsilon(nd) \frac{A}{n} = E\varepsilon(d)A$$

$$✓ \quad \text{GTS NX: } f^* = nf$$

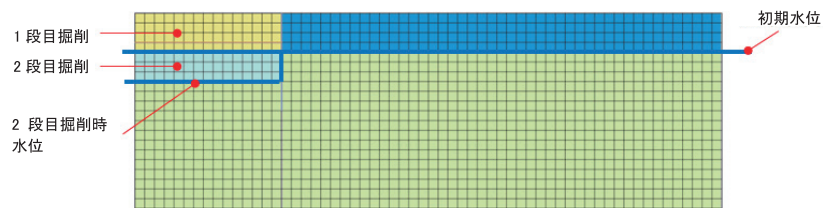
Section 3

水位が変化する土留め掘削解析(2D)

| | |
|---------|---|
| 要素特性 | 地盤 - 平面ひずみ(Plane Strain) 鋼矢板 - 梁要素(Beam) 土留め支保工- トラス要素(Truss) |
| 節点数、要素数 | 1,281 節点、1,211 要素 |
| 施工段階 | 5 段階 |

2 段目の掘削の際に地下水位が変化するように設定し、地表面に道路荷重が作用させた隣接する道路周辺の仮設構造物の掘削施工段階解析です。

[施工段階(5 段階)] 原地盤状態 → 土留め施工 → 道路荷重載荷 → 1 段目掘削 → 2 段目掘削
地盤内の変位と応力、間隙水圧を確認します。



[単位 : KN、m]

▶結果比較(GTS-GTS NX)

| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|---------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| DXY | 0 | 1.75406e-2 | 0 | 1.84590e-2 | 0.00% (0) | 5.24% (9.18e-4) |
| SXX | -2.6330e2 | 1.183e-1 | -2.62957e2 | -6.04597e0 | 0.13% (3.43e-1) | - (6.16e0) |
| SYX | -3.69030e2 | 1.43329e0 | -3.68392e2 | -5.82082e-1 | 0.17% (6.38e-1) | - (-2.02e0) |
| Pore Pressure | -1.56906e2 | 0 | -1.56906e2 | 0 | 0.00% (0) | 0.00% (0) |

Note 水位設定

GTS NX では施工段階解析において、施工段階ごとの水位を定義できます。

静的/斜面解析または浸透/圧密解析 > 施工段階ステージ > 施工ステージで段階ごとに地下水位の高さを直接入力したり、予め定義した水位関数を選択したりして水位を設定することができます。

設定された水位は指定した施工段階以降の施工段階に適用され、水位関数を使用する場合に入力する値は関数値を掛けた値が適用されます。



- ✓ 水位の高さが変化しない場合には既存の GTS 440 の結果と GTS NX の結果は同様です。
- ✓ 水位の高さが変化する場合には既存の GTS 440 の結果と GTS NX の結果に差があることがあります。

これは間隙水圧によって発生される応力($f_p = \int \mathbf{B}^T(\mathbf{I}, p) d\Omega$)の考慮の方法が2つのプログラム間で異なるからです。

既存の GTS 440 では間隙水圧によって発生される応力が内力及び外力で同時に作用される反面、GTS NX では内力の一部でのみ作用するようになります。これにより外力を出力した際に水圧による荷重の分だけ差が発生されます。すなわち、水位差による浸透力(seepage force)が GTS NX では解析に反映されます。

Note 自動水圧考慮

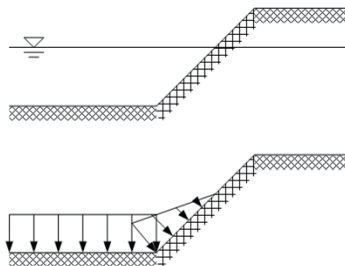
- コマンド：解析 > 解析ケース > 解析ケース > 解析制御 > 一般 (GTS NX)



既存の GTS 440 では以下の図のように水位が地表面より上に存在する場合、水位高さに相当する圧力荷重を入力し浮力による荷重を相殺させる必要がありました。

GTS NX ではモデルのすべての自由面(free surface/edge)に作用する水圧を外力として自動定義することができ、水圧は指定された自由面での間隙水圧を基準に計算されるようになります。

- ✓ 水位を指定した場合水位基準とし静水圧状態で仮定
- ✓ 以前の浸透解析を実行した場合各節点で計算された間隙水圧分布(大きさ)を使用
- ✓ 間隙水圧が負(-)の値を持つ場合水圧が自動で考慮されない。



(注意) モデル内部間隙水圧に相当する外部水圧が存在しない状態をモデリングする場合にはこのオプションを解除しないといけません。水位線を指定し応力解析を実行する場合自由節点と該当節点で水位高さにより間隙水圧が計算されるため、より正確な地下水水位影響性検討のためには浸透-応力連携解析を勧めます。

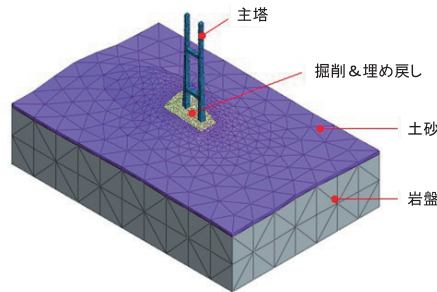
Section 4

一般施工段階解析 (3D)

| | |
|---------|--------------------|
| 要素特性 | 地盤 - ソリット要素(Solid) |
| 節点数、要素数 | 4、261 節点、20、630 要素 |
| 施工段階 | 5 段階 |

斜張橋は橋梁の特性上大規模の荷重が作用される区間で地形及び地盤状態により安定性に敏感であることがあります。従って、斜張橋の主塔部に対する3次元挙動特性を分析する必要があります。

[施工段階(5段階)] 初期応力 → 掘削 → 基礎部の設置及び荷重載荷 → 主塔設置 → 埋め戻し
地盤の応力及び変位傾向を検討します。



[単位 : KN, m]

▶結果比較(GTS-GTS NX)

| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|----------------|------------|------------|--|------------|--------------------|------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| DXYZ | 0 | 2.12693e-2 | 0 | 2.26911e-2 | 0.00% | 6.68% |
| | | | | | (0) | (1.42e-3) |
| SZZ | -2.24138e3 | 6.70184e1 | -2.24138e3 | 6.70184e1 | 0.00% | 0.00% |
| | | | | | (0) | (0) |
| Von Mises | 1.06531e-1 | 1.64421e3 | 1.06531e-1 | 1.6440e3 | 0.00% | 0.01% |
| | | | | | (0) | (-2.10e-1) |
| Plastic Status | | | 最後の段階で発生されたプログラム間の変位差は解析で発生した塑性領域が違う影響によるものだと判断される | | | |

Note 収束条件

非線形解析での解は反復法を使用して得られます。この際、ある基準が満たされると反復法を使用し得られた解が収束したと考えることができます。このような収束判断基準を提供するためには収束条件を適用する必要があります。収束条件では**変位基準(U)**、**力基準(P)**、**エネルギー基準(W)** などがあり、この値が許容値より小さくなると解が収束したと判断します。

収束可否を判断するために選択する基準は解析種類により異なります。自由に変形するような構造を持つ構造物の場合には、力基準は不適切です。材料の軟化(softening)挙動は、硬化(hardening)挙動より収束条件が複雑になります。どんなモデルを解析する場合にも収束基準になる収束条件の選択は、妥当な理由を持つ必要があります。そして非線形モデルで収束条件を選択するのが厳しい場合、2つの収束条件を使用しそれぞれの結果を比較してみることがいいです。

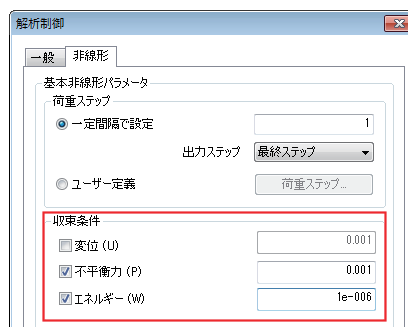
$$\text{変位基準(U)} = \frac{\sqrt{\delta u_i^T \delta u_i}}{\sqrt{\Delta u_i^T \Delta u_i}} \quad \text{力基準(P)} = \frac{\sqrt{\delta g_i^T \delta g_i}}{\sqrt{\Delta f_{int,i}^T \Delta f_{int,i}}} \quad \text{エネルギー基準(W)} = \frac{\delta u_i^T g_i}{\Delta u_i^T \Delta f_{int,i}}$$

収束基準の基本値比較

| 区分 | GTS 440 | GTS NX |
|------------|------------------------------|------------------------------|
| 変位基準 | 10 ⁻³ (UnChecked) | 10 ⁻³ (UnChecked) |
| 力基準(P) | 10 ⁻³ (Checked) | 10 ⁻³ (Checked) |
| エネルギー基準(W) | 10 ⁻³ (UnChecked) | 10 ⁻⁶ (Checked) |

✓ GTS NX では基本設定として、力基準とエネルギー基準による同時収束基準を満たすように提示しており、収束基準値も上の表のように強化された条件でもソルバーが収束することができるように改善されより信頼性ある結果値を得ることができます。

➤ コマンド：解析 > 解析ケース > 解析ケース > 解析制御 > 非線形



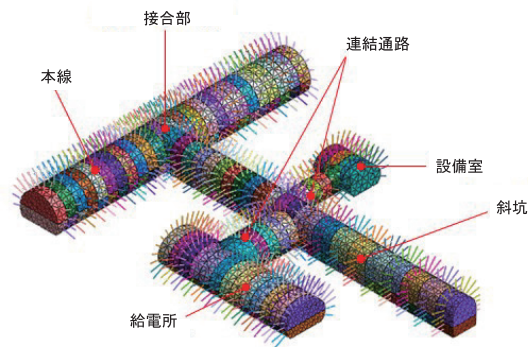
Section 5

トンネル施工段階解析(3D)

| | |
|---------|--|
| 要素特性 | 地盤 - ソリッド要素 (Solid) 吹き付けコンクリート - 板/シェル要素 (Shell) ロックボルト - 埋め込みトラス要素 (Embedded truss) |
| 節点数、要素数 | 26,257 節点、120,931 要素 |
| 施工段階 | 78 段階 |

斜坑と本線の接続部に追加的に設置される給電所および機械室は、構造物の相互挙動による安定性と現場の状況を考慮した上で計画する必要があります。このような関連する構造物が本線と斜坑の接続部に近接したところに位置することで、狭い空間に構造物が集中し、構造物間の相互挙動と応力集中などが誘発されるため、3次元解析を実施し、周辺地盤および構造物間の安定性の検討が必要となります。

[施工段階(78段階)] 斜坑掘削 → 斜坑/本線の接合部掘削 → 本線の掘削 → 給電所への連結通路掘削 → 給電所の掘削 → 設備室への連結通路掘削 → 設備室掘削 の順で作られた大規模モデルです。



[単位：KN、m]

▶結果比較(GTS-GTS NX)

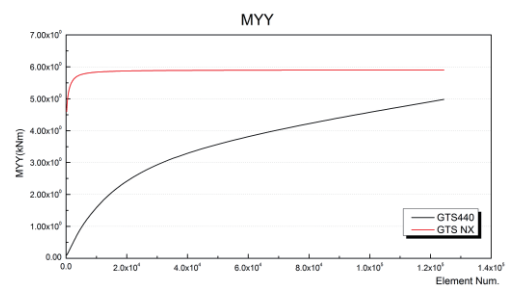
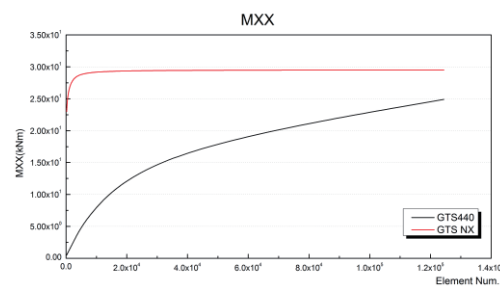
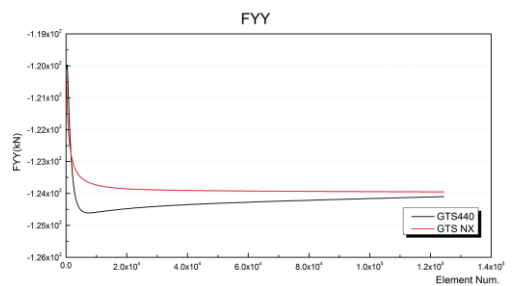
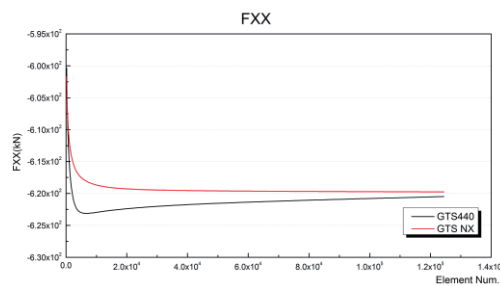
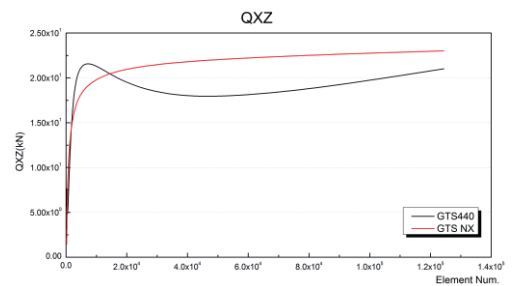
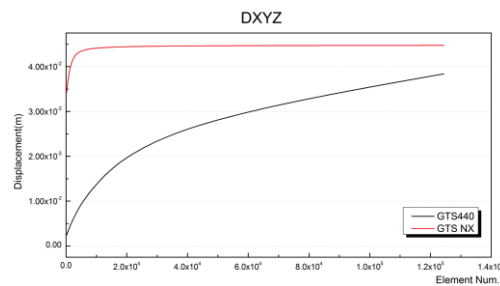
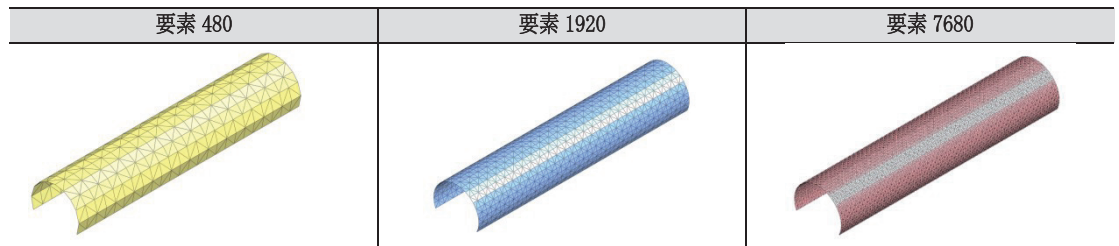
| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|------|-------------|------------|-------------|------------|---------------------|--------------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| DZ | -7.60877e-3 | 5.74341e-3 | -7.61089e-3 | 5.74476e-3 | 0.03% (-2.12e-6) | 0.02% (1.35e-6) |
| DXYZ | 0 | 2.41228e-3 | 0 | 2.41248e-3 | 0.00% (0) | 0.03% (2.00e-7) |

| | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|---------------------|---------------------|
| SXX | -6.27515e3 | 2.52936e3 | -6.33397e3 | 2.52935e3 | 0.94% (-5.88e1) | 0.00% (-1.00e-2) |
| | | | | | | |
| SYX | -5.22074e3 | 1.67981e3 | -5.21461e3 | 1.68163e3 | 0.12% (6.13e0) | 0.11% (1.82e0) |
| | | | | | | |
| SZZ | -4.38275e4 | -1.70078e2 | -4.39621e4 | -1.70074e2 | 0.31% (-1.35e2) | 0.00% (4.00e-3) |
| | | | | | | |
| Shell SXX-TOP | -8.60325e3 | 3.72135e3 | -8.54261e3 | 4.00694e3 | 0.70% (6.06e1) | 7.67% (2.86e2) |
| | | | | | | |
| Shell SYX-TOP | -1.3997e4 | 3.32956e3 | -1.50733e4 | 3.34097e3 | 7.68% (-1.08e3) | 0.34% (1.14e1) |
| | | | | | | |
| Shell SZZ-TOP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% (0) | 0.00% (0) |
| | | | | | | |
| Truss Fx | -6.43942e0 | 2.69402e1 | -6.44214e0 | 2.69478e1 | 0.04% (-2.72e-3) | 0.03% (7.60e-3) |
| | | | | | | |

Note 板/シェル要素の理解 - 1

- ✓ GTS NX では少ない要素で精度よく結果を計算することができるようにソルバーの解析性能と収束性が改善したため、GTS 440 結果と比較する場合地盤/構造部材などで結果に差が発生することがあります。
- ✓ GTS 440 では要素の数及び収束性により結果に差が発生し、板/シェルに対してより精度の高い解を求めるためには要素数を増やすか、高次要素を使用しないとけません。

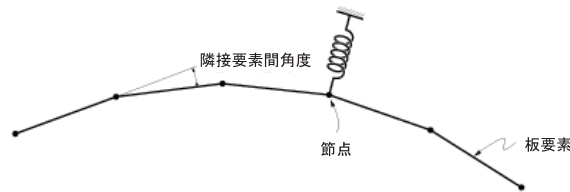
要素数による板/シェル要素の変位/部材力傾向



➤ **Tip!** : GTS NX で Bottom / Middle / Top は GTS 440 の板面の layer 1、2、3 に該当します。

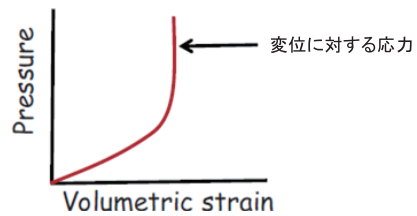
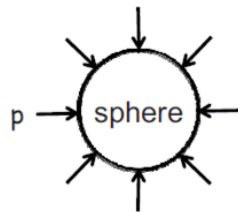
Note 板/シェル要素の理解 - 2

- ✓ 板/シェル要素は平面方向の挙動と面外曲げ挙動を考慮することができ、コンクリートライニング、吹き付けコンクリート、土留め壁、基礎板などのモデリングに使用することができます。
- ✓ また板/シェル要素で曲面構造(曲率を持った板)をモデリングする際は隣接した要素間の角度が 10° を超えないようにする必要があり、厳密解が要求される部位では $2\sim 3^\circ$ を超えないようにすることが望ましいです。応力の変化が激しい部分や厳密解が要求される部位に対してはできるだけ正四角形に近い 4 節点要素で細分化することを推奨します。

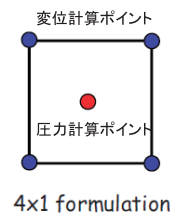


ロッキング現象

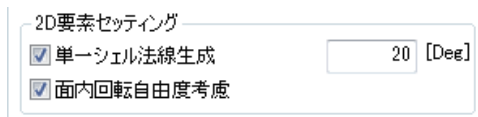
ロッキング現象は荷重の変化にも変形が発生しない現象を意味し、非線形解析で解が収束しない原因の一つです。ひずみから圧力を計算する一般的な計算方法では計算ができず、既存の GTS 440 では板要素で発生されるロッキング現象に対し脆弱でした。



GTS NX では圧力と変位を独立的に扱うこと (mixed formulation) で、ロッキング現象に対しても合理的な結果を導出することができるように変更されました。例えば、線形要素の場合、各要素当り 1 つの点で追加的に圧力を計算する方式になっています。



2D要素設定： ツール > オプション > 解析/結果 > 2D要素セッティング



2D要素セッティング

単一シェル法線生成 20 [Deg]

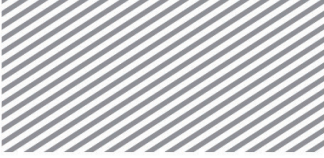
面内回転自由度考慮

➤ 単一シェル法線生成

- ✓ 隣接したシェル要素間の垂直方向ベクトルのなす角が入力された値より大きい場合、お互い違う垂直方向を持った要素だと判断し結果を計算します。
- ✓ 要素の大きさが曲率より相対的に大きくでこぼこした曲面メッシュが生成された場合、この値を増やすとより幾何形状の曲率が反映されたスムーズなコンターで計算することができます。

➤ 面内回転自由度考慮

- ✓ 面外軸に対する回転(drilling 自由度)を考慮し面内変形の剛性を計算するオプションです。
- ✓ 既存の GTS 440 では別に定義できる項目がなく、内部的に自動計算されたが、GTS NX ではこれを考慮することができるようにオプションが追加されました。
- ✓ 既存製品と比較するためでも必ず[面内回転自由度考慮]をチェックしなといけません



Chapter 2

Seepage

TABLE OF CONTENTS

Section 1. 定常浸透流解析 (3D)

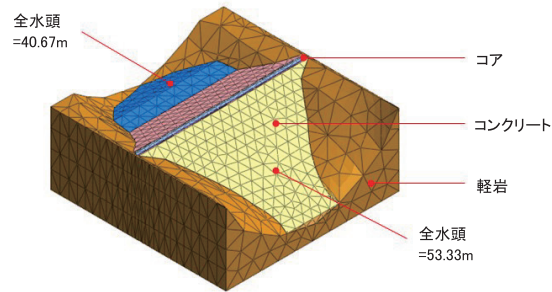
Section 2. 非定常浸透流解析 (2D)

Section 1

定常浸透流解析 (3D)

| | |
|---------|---------------------|
| 要素特性 | 地盤 - ソリッド要素 (Solid) |
| 節点数、要素数 | 14,823 節点、9,408 要素 |
| 解析方法 | 定常解析 (Steady State) |

ダム堤体での水位差による水の流れを解析する 3 次元定常浸透モデルです。左側部分では水がダム高さまで満たされているとし、右側の部分では水がないとした場合の定常状態の水の流れを計算し、全水頭、圧力水頭、流量、動水勾配などを確認します。



[単位 : KN、m、day]

収束解▶結果比較
(GTS-GTS NX)

| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|---------------|-------------|------------|-------------|------------|---------------------|---------------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| Total Head | -5.33321e1 | 4.067e1 | -5.33322e1 | 4.067e1 | 0.00% (-1.00e-4) | 0.00% (0) |
| Pore Pressure | -9.60396e2 | 1.05708e3 | -9.60397e2 | 1.05709e3 | 0.00% (-1.00e-3) | 0.00% (0) |
| Flow Rate | -1.83103e-4 | 1.74708e-4 | -1.83103e-4 | 1.74708e-4 | 0.00% (0) | 0.00% (0) |
| Gradient | 9.07962e-5 | 1.78716e1 | 9.04056e-5 | 1.78713e1 | 0.43% (-3.91e-7) | 0.00% (-3.00e-4) |

Note 浸透流解析の境界条件

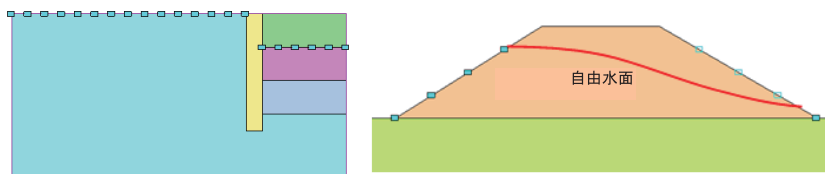
GTS の浸透流解析は定常解析 (steady state analysis、地盤内部及び外部の境界条件が時間によって変化しない場合) と非定常流解析 (transient analysis、地盤内部または外部の境界条件が時間に伴い変化する場合) に分けて考えることができます。

他の汎用有限要素解析プログラムと同様に GTS の場合にも浸透流解析は境界値問題として分類され計算されます。すなわち、モデルの境界面にユーザーが境界値を入力すると、その値によりモデル内部の変数を計算する方式を取っています。

GTS NX では次の3つの方式を用いてモデルに境界条件を適用することができます。

節点水頭：浸透/圧密解析 > 境界条件 > 節点水頭

- 水位の位置が既知の場合に適用
- 自由地下水面 (phreatic surface) が発生しない被圧地下水の流れ (confined flow) を計算したり、浸潤面が形成される不圧地下水の流れ (unconfined flow) を計算することができます。
- 全水頭：モデルの位置に関係なく原点で計算された水頭値を入力
- 圧力水頭：地下水面に該当する節点に "0" を入力し地下水位の条件設定



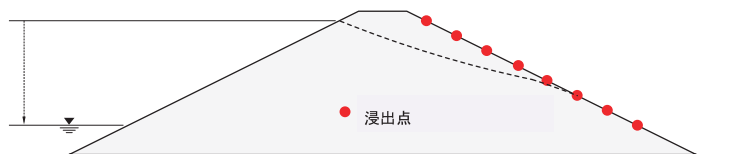
<節点水頭適用(例)>

節点流量/面流量：浸透/圧密解析 > 境界条件 > 節点流量、浸透/圧密解析 > 境界条件 > 面流量

- 節点流量/面流量は、節点や要素エッジで発生する流出入を定義する際に使用
 - ✓ 節点流量：単位時間当りに発生する流出入の流量を体積単位で入力
 - ✓ 面流量：単位時間当りに発生する流出入流量を単位面積に対して入力
- (+) 値：降雨などによって発生する流入を定義する場合に入力
- (-) 値：掘削または汲み上げなどによる流出を定義する場合に入力

浸出点：浸透/圧密解析 > 境界条件 > 浸出点

- 堤体の法面における地下水位の位置を知りたい場合などに適用
- ダム下流の堤体法面で水が浸出すると仮定した場合、浸出位置がわからないため境界条件を変化させて繰り返し計算を実行



<材検討節点の指定(例)>

浸出点が設定された節点で計算された間隙水圧 P は次のような条件で考慮され、これを用いて浸出面を自動探索します。

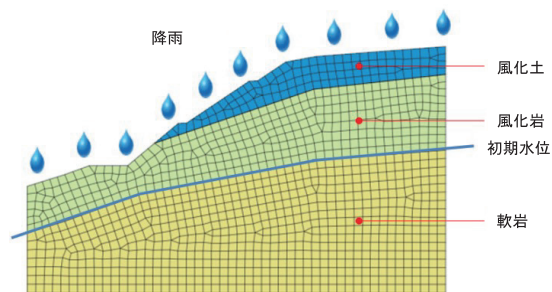
- ✓ $P > 0 \rightarrow P = 0$
- ✓ $P < 0 \rightarrow$ 削除

Section 2

非定常浸透流解析 (2D)

| | |
|---------|--------------------------|
| 要素特性 | 地盤 - 平面変形 (Plane-Strain) |
| 節点数、要素数 | 1,208 節点、1,149 要素 |
| 解析方法 | 非定常解析 (Transient) |

本モデルは斜面に一定量の降雨が流入した場合の地下水位の変化を計算した浸透流解析モデルです。地盤には不飽和土特性を適用し、地表面に一定量の降雨強度を流入させる非定常解析を実施しました。集中降雨持続時間による初期水位の変動を浸透流解析を用いて確認します。



[単位 : KN、m]

▶結果比較
(SoilWorks-GTS NX)

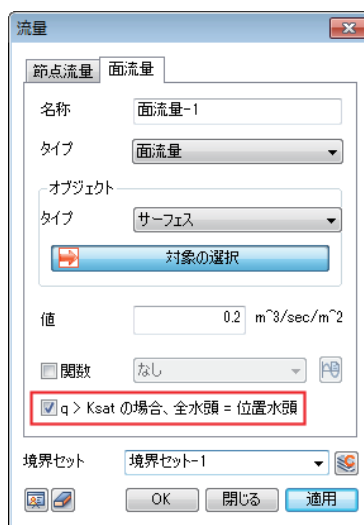
| | SoilWorks | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|---------------------------|------------|-----------|------------|-----------|---------------------|--------------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| 初期 Pore Pressure | -2.00000e1 | 1.53260e2 | -2.00007e1 | 1.53260e2 | 0.00% (-7.00e-4) | 0.00% (0) |
| 1日経過際 Pore Pressure | -1.99616e1 | 1.53197e2 | -2.04963e1 | 1.53817e2 | 2.68% (-5.35e-1) | 0.40% (6.20e-1) |
| 2日経過際 Pore Pressure | -1.98433e1 | 1.53609e2 | -1.96828e1 | 1.54964e2 | 0.81% (1.60e-1) | 0.88% (1.35e0) |
| 3日経過際 Pore Pressure | -1.96011e1 | 1.54351e2 | -1.92426e1 | 1.56330e2 | 1.83% (3.58e-1) | 1.28% (1.98e0) |

Note 浸透流解析境界追加考慮オプション - 1

不飽和土特性を考慮する非定常浸透流解析の場合、地盤の透水条件と水頭差または流量以外の追加オプションを設定することで、実際の浸透現象をより適切に再現することができます。
GTS NX ではこのような追加オプションを別途定義することができます。

降雨解析のための流量-水頭変換境界($q > K_{sat}$ の場合、全水頭 = 位置水頭)

➤ コマンド：浸透/圧密解析 > 境界条件 > 面流量



地表面に降雨強度を入力する場合、地表面に境界条件として面流量を定義します。これは地表面に降雨強度だけの流入量を強制的に与えることで、地盤が降雨を吸収できる能力が降雨強度より大きい場合は地盤が全部吸収するが、地盤が降雨を吸収できる能力が降雨強度より小さい場合は、降雨量のうち地盤が吸収できる量だけ吸収し、残りの降雨量は地表面に沿って流れることを意味します。

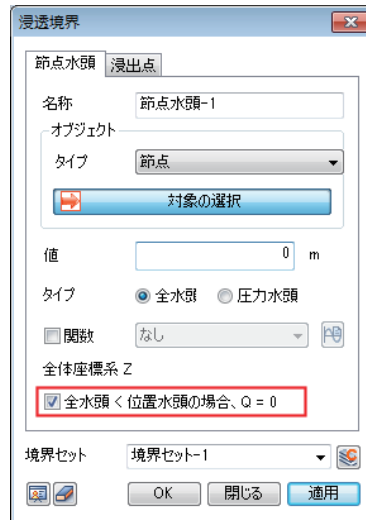
このように降雨強度が地表面が降雨を吸収する能力より大きい場合、地表面の境界は降雨が発生する間飽和された状態となり地表面に水位があることと同じ現象で表すことができます。

- ✓ GTS NX では“ $q > K_{sat}$ の場合、全水頭 = 位置水頭”というオプションを用いると、地表面に作用する降雨強度 q 値が地表面が吸収することができる流入能力(入力された初期透水係数)より大きい場合には、地表面の境界を既存の降雨強度流入条件から水位条件に自動で変更して解析を実行します。
- ✓ 断面流量の場合、地表面がコンクリートのような不透水層で覆われている場合には使用できません。

Note 浸透流解析境界追加考慮オプション - 2

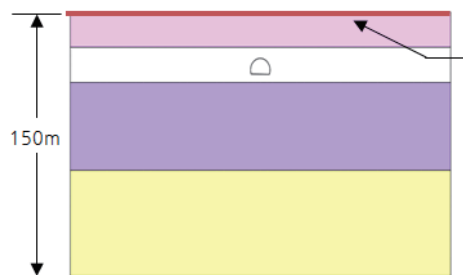
水位変化解析のための水頭 - 流量変換境界 (全水頭 < 位置水頭の場合、 $Q = 0$)

➤ コマンド：浸透/圧密解析 > 境界条件 > 節点水頭



水位の急激な低下のように、水位が時間に伴い変化する場合、毛管圧 (suction) が発生し浸透流れが逆行する現象が起こります。特に堤防、ダムのように水位の低下を、実際の現象どおりに再現するためには、間隙水圧が発生する場合毛管圧による浸透流れを防ぐために負の間隙水圧を制御する必要があります。

- ✓ この機能は日本のように季節による降雨差が発生し、水位が周期的に変化する場合に適用すると便利であり、時間の変化による関数と同時に適用ができます。
- ✓ 全水頭で入力する水位の高さが選択した領域より下にある場合、このオプションがチェックされていると、境界条件が自動で削除されるので、この際には必ずこのオプションを[解除]する必要があります。



全体水頭 140m 入力時水位の高さが選択領域下にあるので、
➔ [前水頭<位置水頭なら、流量=0 で扱う] オプションの
チェック解除

Note 浸透流解析の境界追加考慮オプション - 3

最大間隙水圧に対する制限

➤ コマンド：解析 > 解析ケース > 解析ケース > 解析制御 > 一般



- ✓ 長い期間、降雨がない場合、蒸発などが持続されることにより地盤の毛管力は増加するようになります。高い毛管力が分布された状態にある斜面に降雨が起こると、地盤の透水性は急激に落ちている状態であるため斜面内で浸透があまり発生しません。一方で、先行して起こった降雨により斜面表層に十分な水分が存在し、毛管力が小さくなっている状態では地盤の透水性が大きいため降雨は簡単に地盤内部に浸透することができます。
- ✓ このような現象を正しく反映させるためには地盤の初期毛管力条件が考慮されないといけません。
- ✓ 工学的な観点から 500 kPa までの範囲において自然現象として起こるうるが、実際の斜面では 200 kPa までの範囲で変化が現れます。
- ✓ GTS NX では負の間隙水圧制限のオプションを用いてモデル領域内の初期地下水位位置と無関係に設定された最大の負の間隙水圧より大きい範囲では設定した負の間隙水圧を示すようにできます

Note 浸透流解析境界条件及びオプションの比較

| 境界条件/オプション | GTS 440 | GTS NX | 機能及び用途 |
|-------------------------|---------|--------|-----------------------------------|
| 節点水頭(全体/圧力) | ○ | ○ | - 静水位/変水位線(面)設定 |
| 流量(節点/面) | ○ | ○ | - 流入/流出量入力 |
| 浸出点 | *△ | ○ | - 水位変化による浸出点探索 - 流入/流出による浸出点探索 |
| 水位変化の考慮 (オプション) | × | ○ | - 水位変化による浸透流れ逆行防止 |
| 地表面流入量調節 (オプション) | × | ○ | - 地表面最大浸透能以下の流入量のみ解析に反映 |
| 最大間隙水圧(負) 制限 (オプション) | × | ○ | - 初期地表面毛管力設定 |

* 水位変化による浸出点探索のみ可能

<表 浸透境界条件及びオプションの比較>

Chapter 3

Fully-Coupled Analysis

TABLE OF CONTENTS

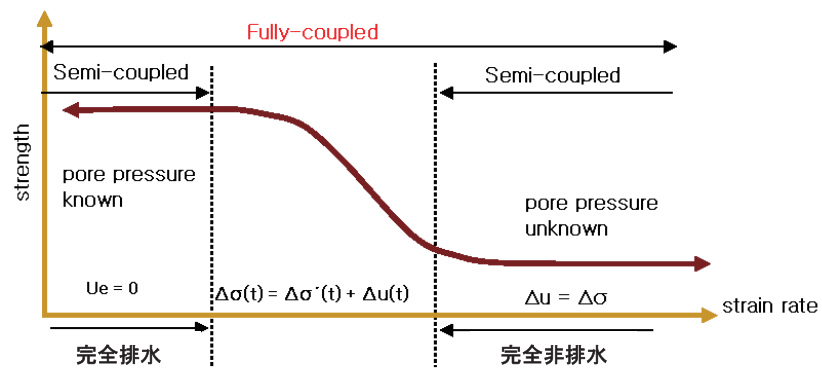
- Section 1. 応力-浸透完全連成解析概要
- Section 2. 真空圧密工法 (Suction-Drain)
- Section 3. ウェルポイント工法 (Well-Point)
- Section 4. 土留め掘削施工手順 (地下水位を考慮)
- Section 5. トンネル掘削施工解析 (地下水位考慮)

Section 1

応力-浸透完全連成解析概要 (Fully-Coupled Analysis)

一般に、地盤工学の問題を数値解析で再現する場合、完全排水、あるいは非排水を仮定して解析を行います。しかし、地盤の挙動は時間と密接に関係し、この間、間隙水圧は地盤の透水性、荷重の荷重速度および水理学的境界条件などによる影響を受けます。これらの影響を考慮して実際の地盤の挙動を把握するため、地盤内の水の流れや、荷重による地盤の変形を同時に考慮する解析を「応力-浸透連成解析」と言います。

原則的には、浸透・応力の問題は相互に影響を及ぼすため完全連携解析で解くべきだが、解析手法が複雑になるため、一般的には水圧と応力を別々に扱い、組み合わせる準連成解析手法(Semi-Coupled)を用います。間隙水圧が0の完全排水の問題や、間隙水圧の増分と応力の増分が等しい完全非排水状態では、この解析手法を適用することができます。しかし、時間に応じて応力と間隙水圧が同時に変化する場合には、変位と間隙水圧を組み合わせた完全連成解析手法(Fully - Coupled Analysis)を用いる必要があり、既存の圧密解析はこれに該当します。



〈連成解析の概要〉

応力-浸透完全連成解析では各ステップの浸透流解析の結果を応力解析に使用し、応力解析を実施した結果発生した地盤の変形の透水特性への影響を次ステップの浸透流解析に反映させます。したがって、水位の条件を考慮したすべての解析分野で適用可能です。施工段階だけでなく、もっと細かな時間経過に伴う地盤の沈下、部材力の変化を確認することができます。

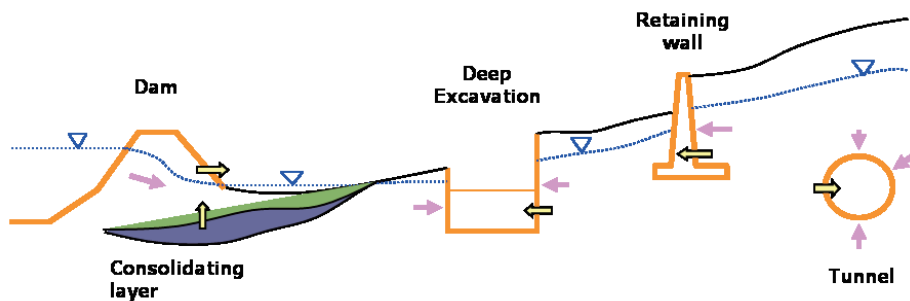
特に、浸透流解析のみに適用される水頭、流量、浸出点等の条件を、応力変化と圧密過程の両方に反映することができるため、既存の手法では実現出来なかった様々な特殊工法(Suction Drain, Well-Point 等)に適用したり、一般的な施工段階解析でも地下水の流出や降雨などの水位条件の変化を設定するだけで、地盤の応力と変形の傾向を分析することができます。

次の表に示すとおり、応力-浸透完全連成解析では、圧密排水条件を完全水頭=0 に設定することが可能なので、既存の連成解析で個別に考慮された全ての荷重/境界条件を合わせて使用することができます。

| | 応力-浸透連成解析 (Semi-Coupled) | 圧密解析 (Consolidation) | 応力-浸透完全連成解析 (Fully-Coupled) |
|------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 節点水頭(全水頭) | ○ | × | ○ |
| 節点水頭(圧力水頭) | ○ | × | ○ |
| 浸出点 | ○ | × | ○ |
| 排水条件 | × | ○ | ○ (全水頭=0) |
| 全応力要素 | × | ○ | ○ |
| 節点/面流量 | ○ | × | ○ |

〈連成解析種類別に適用可能な荷重/境界リスト〉

本章では、従来の準応力-浸透連成解析と、同条件で実行した応力-浸透完全連成解析の結果比較および完全連成解析のみ実現することができる特殊な工法への適用事例について検討します。



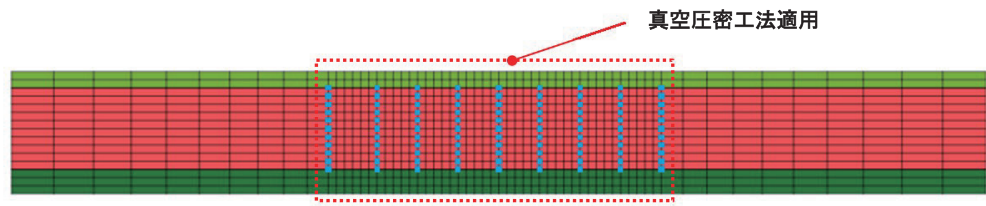
〈地盤-地下水の相互作用の例〉

Section 2

真空圧密工法 (Suction-Drain)

軟弱地盤分野で応力-浸透完全連成解析が適用可能な真空圧密工法を検討します。

特殊工法に適用可能であるか検討するために、盛土のない状態の軟弱地盤に真空圧密工法 (Suction Drain) を適用し、圧密を進行させ時間経過による沈下や地盤応力の変化を確認します。軟弱層の深さに同じ大きさの大気圧を作用させることにより、等方圧密効果でせん断破壊をさせずに荷重を載荷することができます。現場の状況に応じて、作用させる真空圧は 50~100kN/m² 程度になります。真空圧密工法のほかに盛土荷重を同時に考慮した場合と比較し、与えた真空圧の大きさを盛土荷重に換算した場合にどれくらいになるかを把握することができます。



[単位 : KN, m]

| 真空圧密工法適用 (Pressure = -50 kN/m ²) | |
|--|--|
| DY | |
| 真空圧により地盤の圧密沈下が発生し、有効応力が増加します。 真空圧の大きさに応じて圧密沈下量は変化し、最終的な沈下量は約 0.53m となりました。 | |
| 盛土荷重(85kN/m ²) + 真空圧密 (Pressure = -50 kN/m ²) | |
| DY | |
| 盛土と真空圧密を同時に作用させた場合、最終沈下量は約 1.18m となりました。 真空圧による沈下量への影響は、約 80kN/m ² の盛土荷重に置換した場合に相当します。 | |

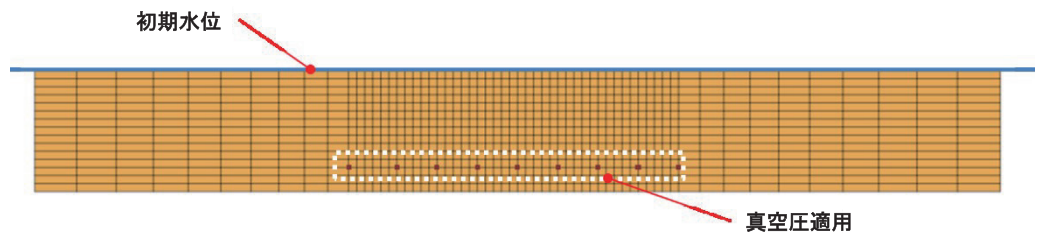
Section 3

ウェルポイント工法 (Well-Point)

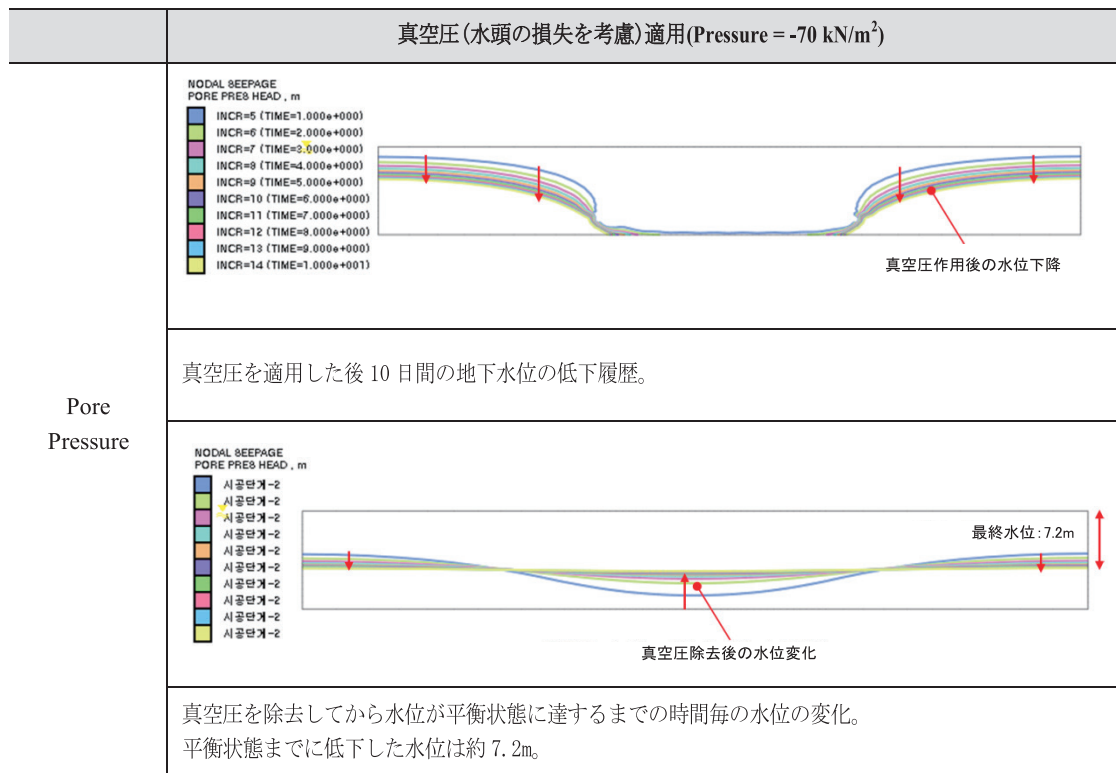
応力-浸透完全連成解析が適用可能なウェルポイント工法を検討します。

地下水位が高い地盤を掘削する場合に地下水位を下げる排水方法で、掘削部周辺にウェルポイントを地下水位以下の地中に一定の間隔で施工し、掘削部分に直接排水をさせず地下水位を低下させ、地盤の有効応力を増加させる工法です。透水係数が大きい砂質土に適用され、真空ポンプを利用して、理論的には 10.3m(大気圧)まで水位を低下させることができるが、実際には水頭損失を考慮し、一般的に 5~7m の水位低下が期待できます。真空ポンプによる強制排水による水位低下と地盤沈下の傾向を同時に解析することができ、以下の手順で解析を実行します。

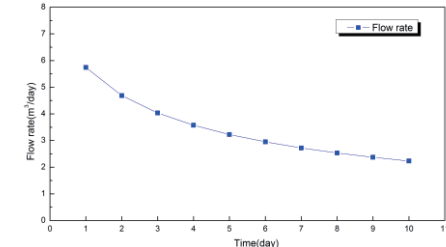
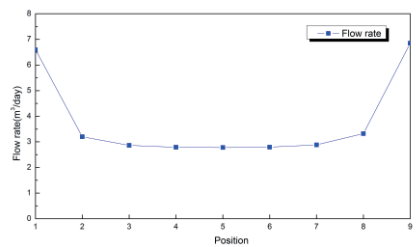
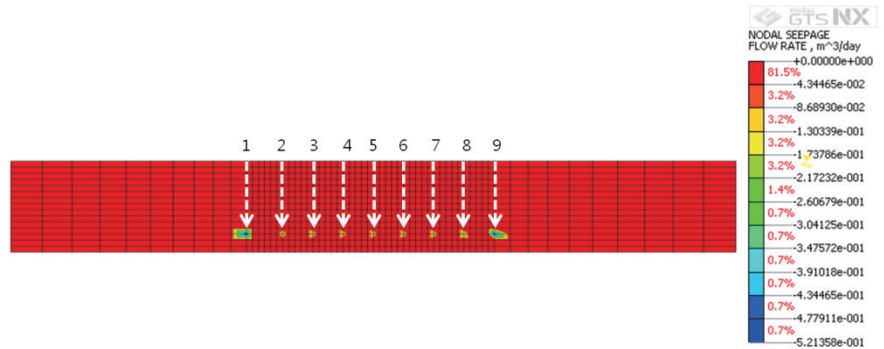
[初期水位(現地盤状態) → JET PUMP を利用して約 10 日間真空状態を維持 → 真空圧除去(ウェルポイントの周囲で急激に低下した水位が平衡状態に達したあとの最終的な水位の検討]



[単位 : KN, m]

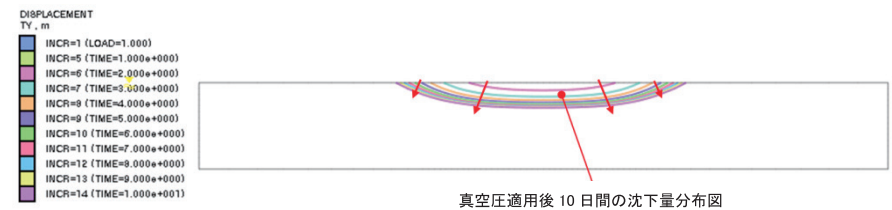


Flow Rate

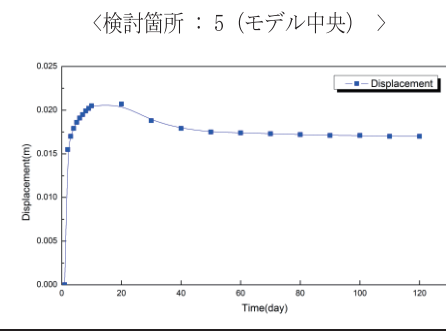
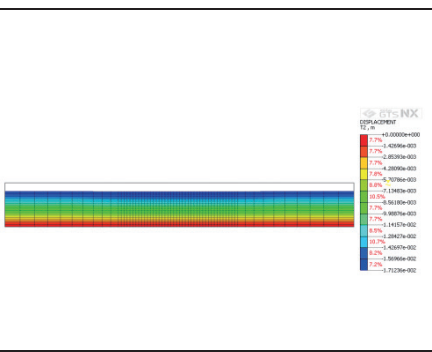


各 well-point の位置に応じた流出量 (上) と、10 日間の流出量の変化 (下)。
 両端の well-point からの流出量が最も多く、各 well-point の平均合計流出量は 3.41m³/day

DY



真空圧適用後 10 日間の沈下量分布図



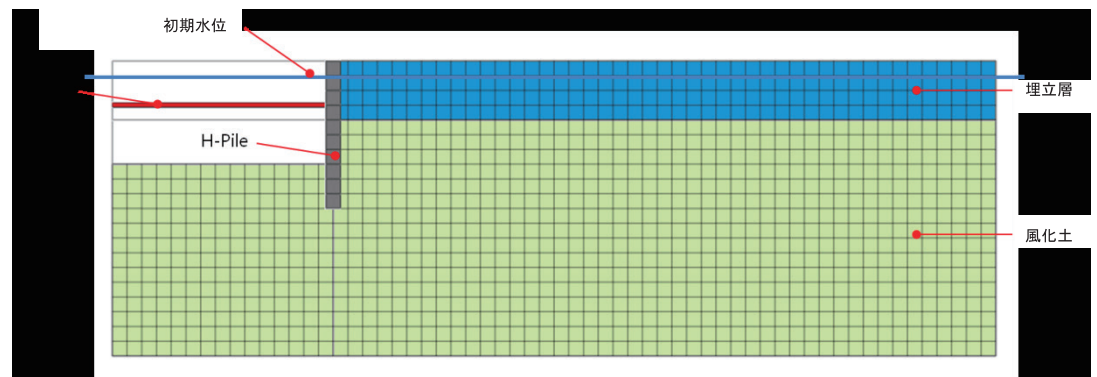
真空圧により砂質土が強制排水され、地表面沈下が発生。
 一定時間放置した後の地表面沈下結果 (約 1.71cm)を確認することができる。

Section 4

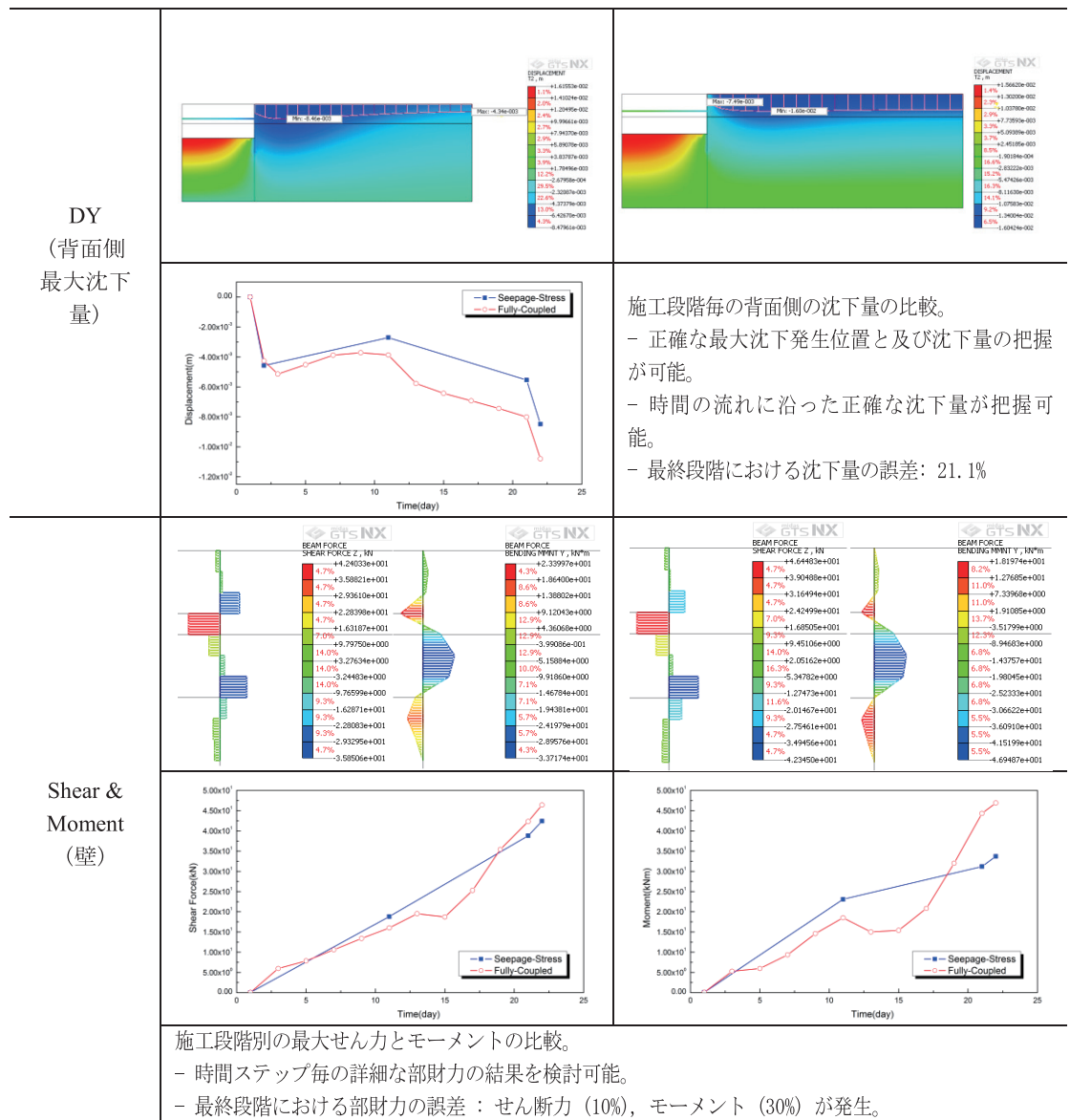
土留め掘削施工手順(地下水位を考慮)

既存の地下水位を考慮した掘削段階の応力-浸透連成解析は、地盤の応力、変形が浸透解析に影響を与えない準連成解析(Semi-Coupled)であるため、掘削段階の時間経過による水位と応力の変化を確認することができませんでした。

この Section では、既存の掘削段階の準連成解析と同条件で実行した応力-浸透完全連成解析の地盤変形と部材力の結果を比較し、完全連成解析による時間ステップ毎の詳細結果の項目を確認します。



| | 応力-浸透連成解析 | 応力-浸透完全連成解析 |
|-------------------|-----------|--|
| DX (壁 最大変位) | | |
| | | <p>施工段階毎の壁の最大変位の比較。</p> <ul style="list-style-type: none"> -正確な最大変位発生位置の把握が可能。 -時間の流れに沿った変位の把握が可能。 -最終段階における最大変位の誤差：2.98% |



Note 完全連成解析 (Fully-Coupled) 結果の詳細

完全連成解析は、排水による水位の変化と変形/圧密による透水特性の変化が同時に考慮されます。

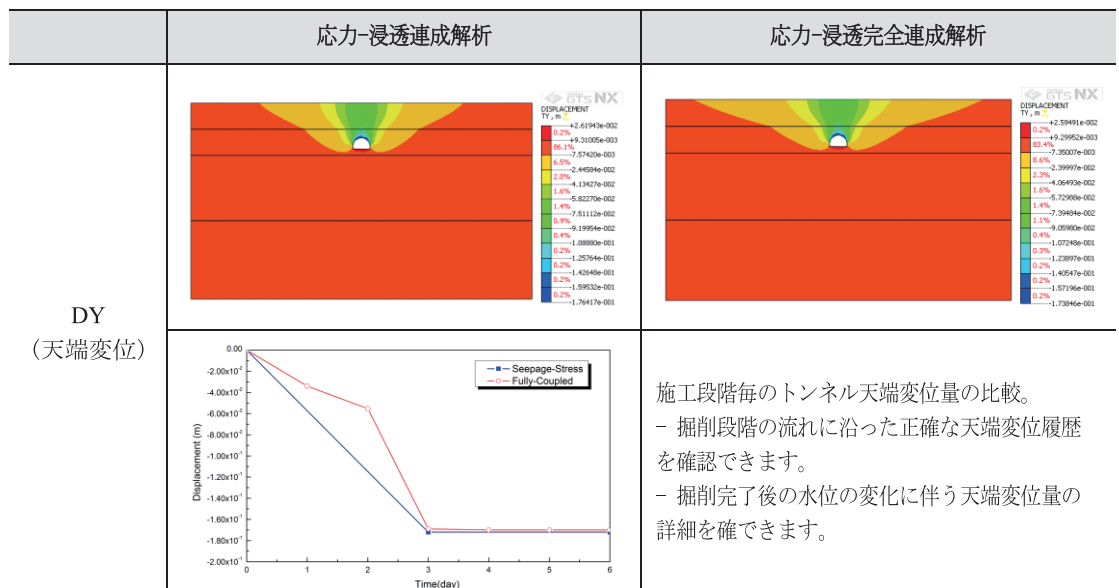
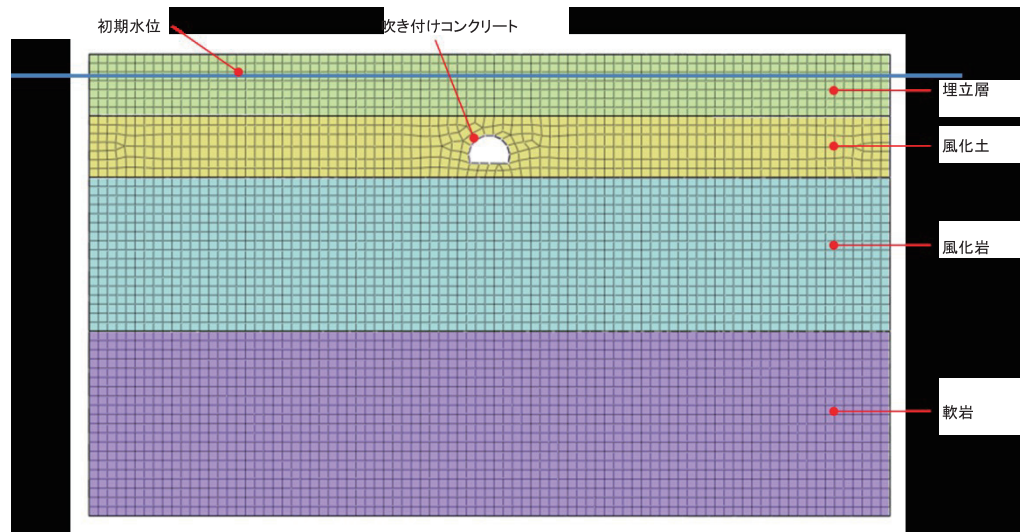
既存の準連成解析では、掘削ステップ毎の結果が過小あるいは過大評価される傾向がみられたが、完全連成解析により時間ごとの地盤の変形、構造の部材力の変化を詳細かつ正確に求めることができます。特に、圧密解析にのみ適用することができた施工中や施工完了後の放置期間を追加し、水位変化と地盤変形が収束完了した最終結果を確認することができます。

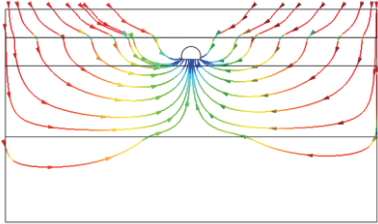
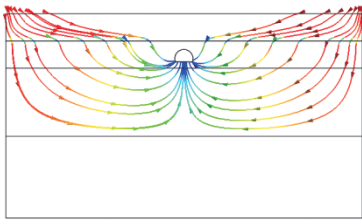
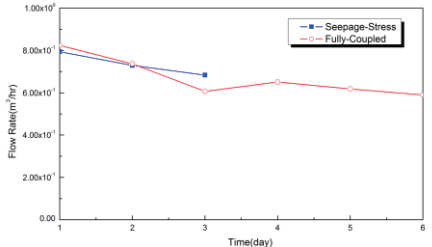
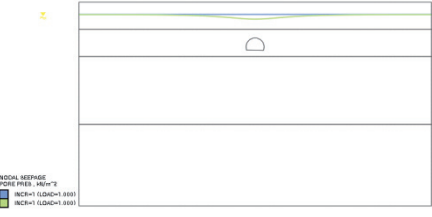
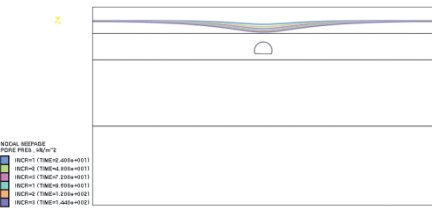
Section 5

トンネル掘削施工解析(地下水位考慮)

この Section では前の Section と同様に、既存のトンネル掘削段階における準応力-浸透連成解析と、同条件で実行した応力-浸透完全連成解析の水位変化やトンネル天端の沈下量の結果を比較し、完全連成解析による時間ステップ毎の詳細項目を確認します。

特に、完全連成解析のトンネル掘削工事中、吹き付け打設からの時間経過に沿ったトンネル切羽面流出量の変化を確認します。

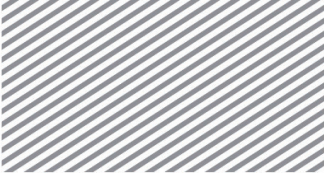


| | | |
|---------------------------------|--|--|
| <p>Flow Rate (流出量)</p> |  |  |
| |  | <p>施工段階トンネル切羽面流出量の比較。</p> <ul style="list-style-type: none"> - 施工中の地盤変形による間隙比と透水特性の減少に伴う面流量の減少が確認できる。 - 掘削完了後の時間に応じた面流量の詳細な変化を確認できる。 - 時間平均流出量の誤差は約 8.7%。 |
| <p>Pore Pressure (間隙水圧)</p> |  |  |
| | <p>トンネル掘削に伴う初期推移の変化。</p> <ul style="list-style-type: none"> - 掘削中/掘削後の時間ステップ毎の水位変化を確認できる。 | |

Note 応力-浸透完全連成解析 (Fully-Coupled) の特徴

- ✓ 時間に応じて水位が変化すると地盤内の飽和度が変化し、自重や地盤の変形に影響を与えます。その地盤変形は間隙比（透水係数）に影響を与え、間隙水圧に影響を与えます。
- ✓ 水位による地盤挙動の全ての現象と特性を分析し、既存の解析では再現出来なかった様々な特殊工法に適用することができます。
- ✓ 今まででは圧密解析でのみ施工期間、放置期間を考慮できたが、完全連成解析ではすべての応力（施工段階）解析に適用することが可能なため、実際の施工中、施工後の地盤の応力詳細履歴を確認することができます。

このように、応力-浸透完全連成解析により、地盤の挙動に大きく関わる水位の影響を詳細に分析し、実際の現場条件、施工期間、状態等をそのまま反映した解析結果を設計に適用することができます。



Chapter 4

Consolidation

TABLE OF CONTENTS

Section 1. 軟弱地盤盛土圧密解析 (2D)

Section 2. 排水材間隔に従う圧密解析 (3D)

Section 3. 盛土圧密解析
(地盤特性(部分飽和)詳細検討)

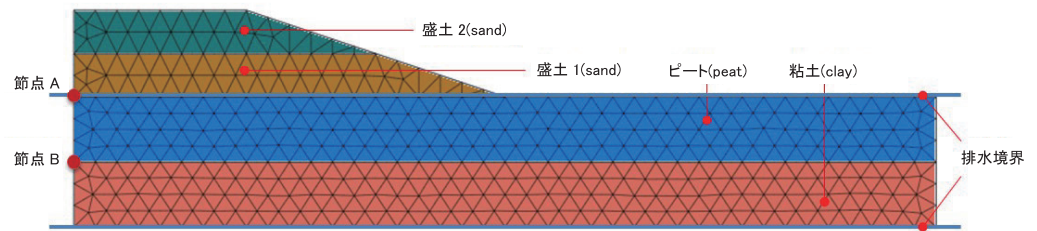
Section 1

軟弱地盤盛土圧密解析 (2D)

| | |
|----------|-------------------------|
| 要素タイプ | 地盤-平面ひずみ (Plane Strain) |
| 節点数, 要素数 | 1,633 節点, 768 要素 |
| 施工段階 | 5 段階 |

軟弱地盤上に構造物を施工する場合、地盤の沈下量や側方変位、深さ方向の水平変位分布、過剰間隙水圧の大きさ、過剰間隙水圧の消散速度を考慮した地盤のせん断破壊に対する、安定性、任意の時点で盛土を追加したときの状況などが問題となります。

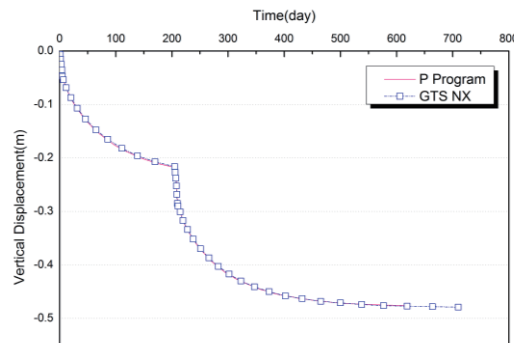
このモデルでは、軟弱地盤上に盛土を施工したときの時間経過に伴う地盤の沈下量と過剰間隙水圧の分布を確認します。



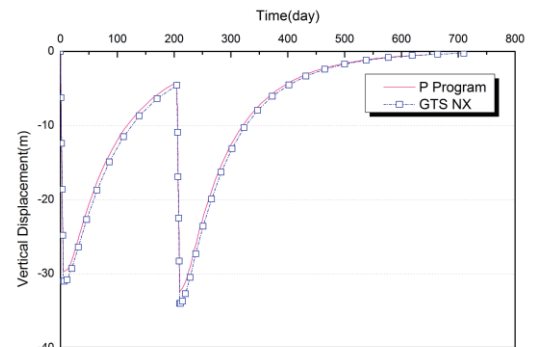
[単位 : KN, m]

▶結果の比較
(P Program-GTS NX)

| | P Program | GTS NX | Error Ratio(Value) |
|-----------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| | min/max | min/max | min/max |
| DX | 2.1682e-1 | 2.26759e-1 | 4.58% (9.49e-3) |
| DY | -5.3246e-1 | -5.29725e-1 | 0.51% (2.74e-3) |
| S'-YY | -8.731e1 | -8.74224e1 | 0.13% (-1.12e-1) |
| Excess. Pore Pressure | -8.4787e-1 | -8.21629e-1 | 3.09% (2.62e-2) |



[A 点の時間経過に伴う沈下量]



[B 点の時間経過に伴う沈下量]

Note 圧密要素について

圧密解析

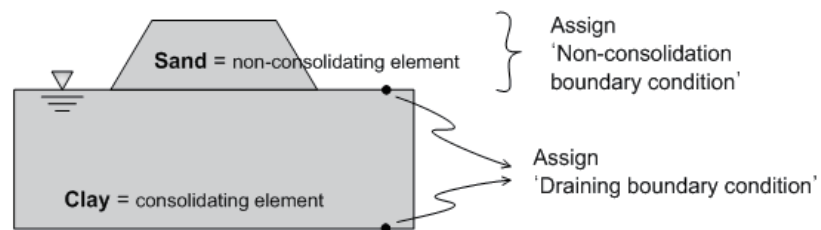
圧密解析は、間隙水が荷重に抵抗する際に過剰間隙水圧が発生し、時間経過に応じて過剰間隙水圧が消散する過程を計算する解析です。

- ✓ 透水係数の小さな地盤内の間隙水は、一時的に非排水条件と同じ挙動となります。
- ✓ 荷重状態の変化に応じて過剰間隙水圧が発生し、初期荷重のほとんどを負担します。
- ✓ しかし、時間経過とともに浸透現象によって過剰間隙水圧は再分配され、排水境界がある場合は、過剰間隙水圧は時間とともに減少します。
- ✓ これにより、過剰間隙水圧が担う応力は、徐々に土の骨格による抵抗に変換され、土の骨格が変形し、有効応力が増加します。
- ✓ 有効応力の増加による土の骨格の変形は鉛直方向に蓄積され、時間経過に伴い全体的に沈下する現象が発生し、地盤変形の増加により構造物の基礎部に沈下が生じます。
 → 構造物の基礎部に発生する不同沈下等の影響は、構造物の安定性に大きく影響を与えます。

圧密要素

圧密要素は、節点変位、過剰間隙水圧に対して自由度を持ちます。

- ✓ 圧密解析では、非圧密要素に指定されていない限り、全ての要素が間隙水圧に対する自由度を持つと仮定されます。
- ✓ 盛土材のような圧密挙動が発生しない要素は、次の図のように非圧密条件を定義して、一般的な構造要素として取り扱うように設定する必要があります。
- ✓ 圧密要素で排水が発生する場合には、排水条件を設定する必要があります。
- ✓ 正常に境界条件が定義されて圧密解析が実行された場合、非圧密条件と排水条件が適用された部分の過剰間隙水圧 (excess pore pressure) です。



[圧密要素の境界条件]

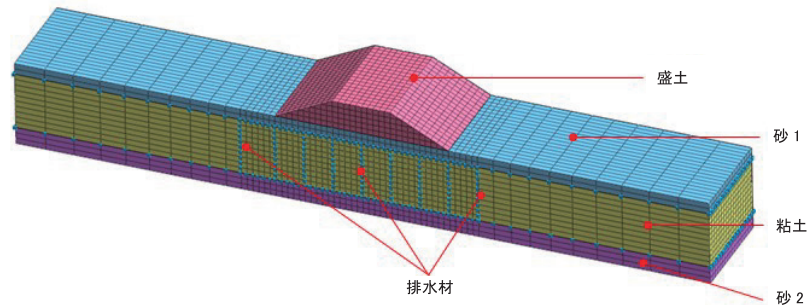
Section 2

排水材間隔に従う圧密解析(3D)

| | |
|----------|----------------------|
| 要素タイプ | 地盤-ソリッド(Solid) |
| 節点数, 要素数 | 20,843 節点, 19,475 要素 |
| 施工段階 | 5 段階 |

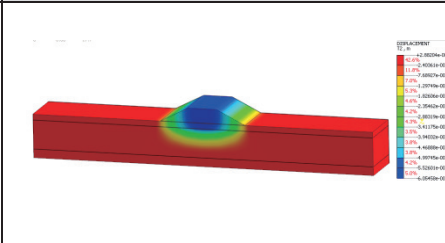
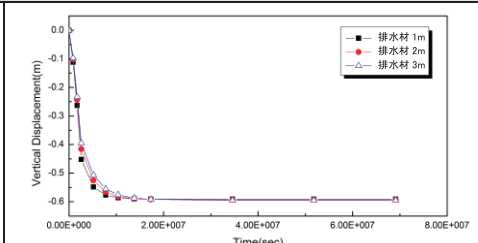
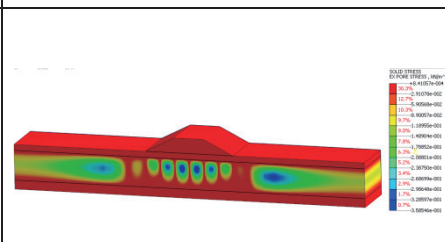
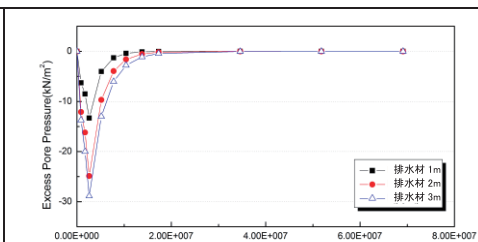
修正 Cam Clay モデルを使用した 3次元圧密解析です。

[施工段階(5段階)] 初期応力解析 → 盛土(30日) → 放置期間1(90日) → 放置期間2(80日) → 放置期間3(1,800日)
排水材間隔を 1m, 2m, 3m とし、それぞれ時間経過による地盤沈下量と過剰間隙水圧の分布を確認します。



[単位 : KN, m]

▶3次元圧密解析結果

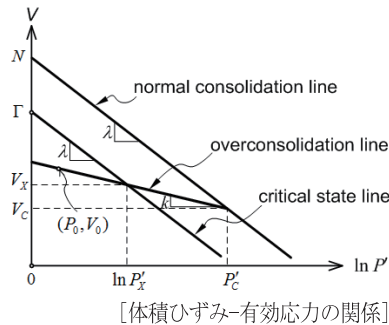
| | | GTS NX | |
|-----------------------|---|---|--|
| DY |  |  | |
| | 排水材間隔が狭いほど、最大沈下量に到達する時間は短くなります。 最大沈下量は排水材間隔に関係なく一定となります。 | | |
| Excess. Pore Pressure |  |  | |
| | 排水材間隔が狭いほど、過剰間隙水圧が急速に消散され、最終段階では過剰間隙水圧は全て消散されます。 | | |

Note 修正 Cam Clay

修正 Cam Clay model

修正 Cam Clay モデルは、粘土材料をモデル化する場合に使用します。

- ✓ 初期間隙比、初期応力、初期の先行圧密荷重を設定する必要があります。
- ✓ OCRを使用し、自重による現地盤の応力状態の応力分布を計算します。
- ✓ 入力した OCR により応力を計算すると、地表面の応力が実際の地盤よりも過小評価されることがあるため、Pc (Pre-consolidation pressure) を設定する必要があります。
- ✓ OCR と Pc を同時に設定した場合は、Pc が優先されます。
- ✓ Pc を入力した場合、入力された Pc と原位置の応力状態が降伏関数を満足させるかをソルバー内部で検討します。満足する場合は入力された Pc を使用し、そうでない場合は Pc を再計算します。



過圧密比 (OCR)

圧密指数 (λ)

膨潤指数 (κ)

限界状態応力比 (M)

Pc ユーザー定義 N/m²

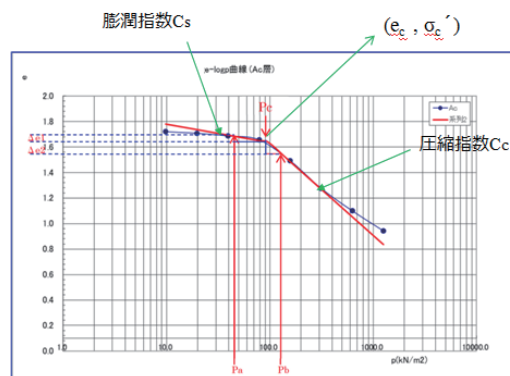
許容引張応力 N/m²

[MCC 入力物性ダイアログ]

| 記号 | 意味 |
|----|----------------|
| κ | 過圧密線の傾き(膨潤指数) |
| λ | 正規圧密線の傾き(圧縮指数) |
| M | 限界状態線の応力比 |

- ✓ 地盤の物性値は、1次元圧密試験の間隙比 (void ratio) のグラフから圧縮指数と膨潤指数を読み取ります。正規圧密線、過圧密線の傾きは、以下の関係式から推定されます。

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303} \quad , \quad \kappa = \frac{C_s}{2.303}$$



<e-log P 曲線>

- ✓ 限界状態線の傾きは、有効せん断抵抗角 (排水試験によるせん断抵抗角) との関係より推定します。

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad \text{ここで、} \phi : \text{三軸圧縮試験から求めた有効内部摩擦角}$$

Section 3

盛土圧密解析 (地盤特性(部分飽和)詳細検討)

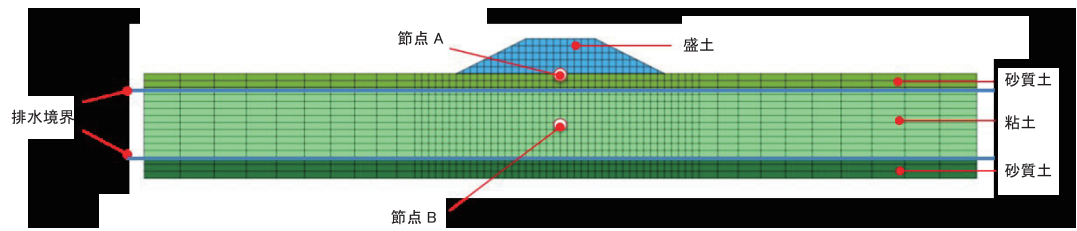
Section 1.2 の例のように、圧密解析は、初期水位条件、排水条件を使用して、ステップ毎の盛土や、荷重による軟弱地盤の沈下量と過剰間隙水圧を検討することができる解析であり、浸透-応力完全連成解析に対応しています。すなわち、圧密解析においては応力-浸透完全連成解析のように、圧密の進行に伴って発生する地盤変形が間隙比や透水特性にも影響を及ぼし、圧密沈下に影響を与えます。

この Section では、より解析精度を高めるために追加された地盤の詳細特性（間隙比依存透水係数、部分飽和度を考慮）を適用した場合と、適用しない場合の圧密解析結果を比較/検討します。

| | 地盤の詳細特性 | 説明 |
|-----------------------|--------------------------------------|--|
| ck (間隙比依存 透水係数) | | 間隙比の変化に伴う浸透率の変化。 - 地盤にかかる圧力に応じて間隙比は減少し、それに伴い透水力も減少。 $k = 10^{(\Delta e/c_k)} k_{sat}$ |
| | 圧密の進行に応じて透水特性が低下し、沈下量、圧密期間が増加。効果を考慮。 | |
| 部分飽和度 | | 部分飽和使用時の地盤の密度 $\rho = (1 - S_e) \rho_{unsat} + S_e \rho_{sat}$ 部分飽和未使用時の地盤の密度 $\rho = \begin{cases} \rho_{unsat} & (p \leq 0) \\ \rho_{sat} & (p > 0) \end{cases}$ |
| | 飽和度に応じて変化。地盤の密度、非排水特性と応力の変化を詳細に検討。 | |

修正 Cam Clay モデルを使用した 2 次元圧密解析モデルです。
 [施工段階(5 段階)] 初期応力解析 → 盛土(30 日) → 放置期間 1(90 日) → 放置期間 2(80 日) → 放置期間 3(1,800 日)

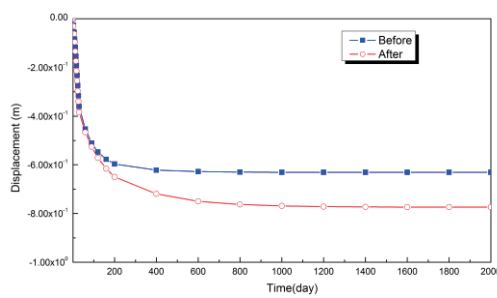
| | |
|---------|-------------------------|
| 要素タイプ | 地盤-平面ひずみ (Plane Strain) |
| 節点数、要素数 | 1,097 節点, 1025 要素 |
| 施工段階 | 5 段階 |



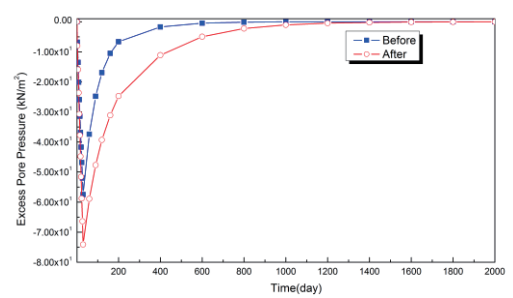
[単位 : KN, m]

▶圧密終了後の結果の比較
(オプション使用前/後)

| | オプション使用前(前) | オプション使用后(後) | Error Ratio(Value) |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| | max | max | max |
| DX | 1.96775e-1 | 2.52079e-1 | 21.9% (5.53e-2) |
| DY | -6.32926e-1 | -7.77969e-1 | 18.6% (-1.45e-1) |
| Excessive Pore Pressure | -1.68e-5 | -1.94e-2 | - (-1.94e-2) |



[A 点の時間経過に伴う沈下量]



[B 点の時間経過に伴う過剰間隙水圧]

地盤解析における水位は、最も大きな影響を与える要素のひとつです。沈下が進むにつれて間隙比（透水特性）が減少し、過剰間隙水圧の再分配に影響を及ぼし、自重と地盤の剛性を時間に応じて変化させます。これら全ての現象が段階毎に考慮され、より精度よく最終沈下量と圧密期間を算定することができます。

Chapter 5

Slope

Stability

TABLE OF CONTENTS

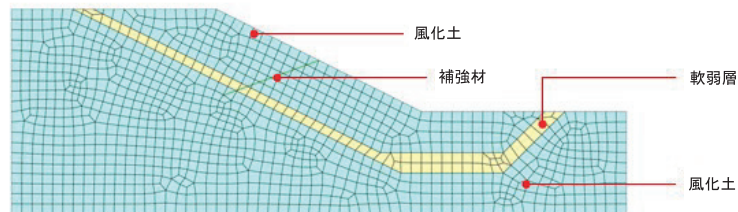
Section 1. 斜面安定解析 (2D)

Section 2. 3次元斜面安定解析 (3D)

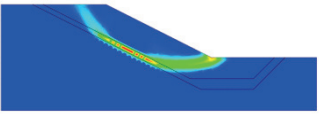
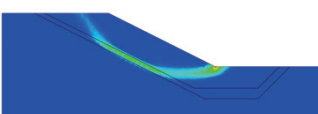
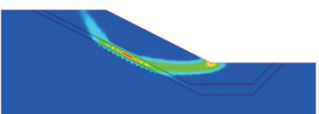
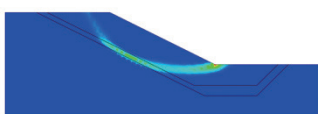
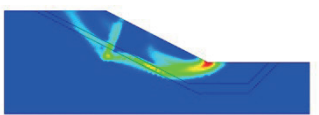
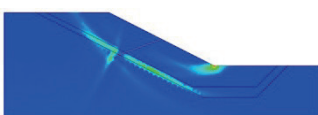
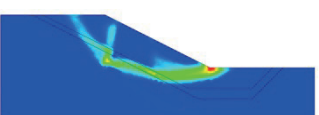
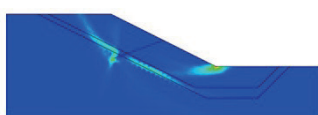
Section 1 斜面安定解析 (2D)

| | |
|---------|---|
| 要素特性 | 地盤 - 平面変形(Plane Strain) 補強材 - 埋め込みトラス(Embed Truss) |
| 接点数、要素数 | 3,317 接点、1,062 要素 |
| 解析方法 | せん断強度低減法(SRM) |

斜面安定解析では、斜面の崩壊挙動の解析と最小安全率の計算が必要です。本モデルでは、軟弱層が存在する斜面に対してせん断強度低減法 (Strength Reduction Method) で斜面安定解析を行い、計算された安全率の確認、および最大せん断ひずみのコンターから斜面の崩壊挙動の確認を行います。



▶結果比較(GTS-GTS NX)

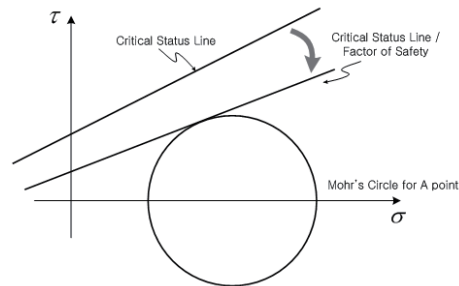
| | GTS440 | GTS NX | 安全率差 |
|-----------|---|--|---------|
| | Factor of Safety | Factor of Safety | |
| 乾期 | 1.8750 | 1.87695 | 0.00195 |
| |  |  | |
| 雨期 | 1.0625 | 1.07734 | 0.01484 |
| |  |  | |
| 乾期 -補強 | 2.0625 | 2.07311 | 0.01061 |
| |  |  | |
| 雨期 -補強 | 1.1875 | 1.19162 | 0.00412 |
| |  |  | |

Note 斜面安定解析法

GTS NX では有限要素法によるせん断強度低減法(strength reduction method)および限界平行法に基づいた応力解析法(stress analysis method)を使用することができます。

せん断強度低減法(SRM)

せん断強度低減法ではせん断強度 (c, ϕ) を徐々に減少させていき、計算が収束されない地点まで解析を実行し、その地点を斜面の破壊と見なし、その時の最大強度低下率を斜面の最小安全率とする解析法です。このような方法は非線形解析を何回も実行させる必要があり解析に時間がかかるという欠点がありますが、より正確な結果を得ることができ、円弧すべり計算のように破壊面をあらかじめ仮定する必要がなく、斜面の破壊までの変形過程を確認することができるという長所があります。



[せん断強度低減法]

- ✓ せん断強度低減法で利用される材料モデルは **Mohr Coulomb**、**Drucker Prager** と **Modified Mohr Coulomb** です。
- ✓ この際使用される入力変数の中で、せん断破壊を決定する粘着力と摩擦角及びダイレイタンスー角を除外してから一定な値を持つと仮定し、地盤要素 (plane strain、axisymmetric、solid) に該当する粘着力と摩擦角及びダイレイタンスー角を徐々に減少させて斜面が破壊に至る地点の安全率 F_s を算定します。

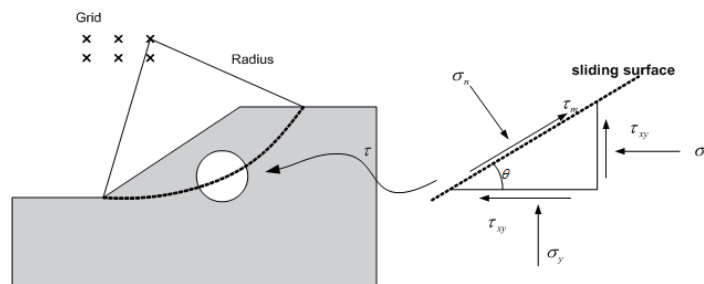
限界平行法に基づいた応力解析法(SAM)

限界平行法は、実務における設計で一番多く使用される斜面安定解析方法であるが、実際の斜面の応力履歴もしくは地盤の変形挙動を把握することができないという欠点があります。

一方、有限要素法を利用した斜面安定解析法は斜面の変形過程やその他地盤特性を考慮することはできるが、何回も非線形解析を実行する必要があり、多くの解析時間が必要となります。

このような限界平行法と有限要素法に基づく斜面安定解析法の両方の長所を同時に得るために、近年多くの研究がされており、GTS では、有限要素応力解析の結果を利用した斜面安定解析法を提供しています。この方法は限界平行法の円弧すべり面の概念と応力解析による結果を基にしています。すなわち、有限要素解析で得られた応力の結果を使用し、多数の仮定された円弧すべり面に対し安全率を算定してその中で最小となる安全率とすべり面を求めます。

- ✓ 応力解析法で利用される材料モデルはせん断強度低減法と同様に **Mohr Coulomb**、**Drucker Prager** と **Modified Mohr Coulomb** です。



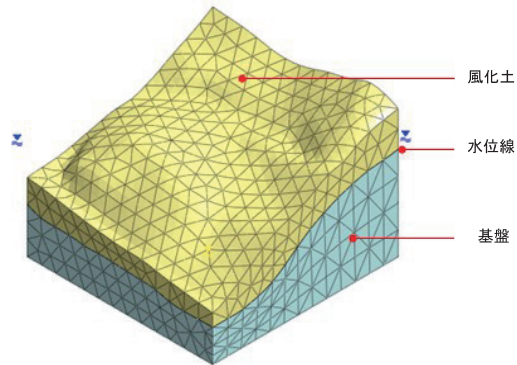
[応力解析法]

Section 2

3次元斜面安定解析(3D)

| | |
|---------|-------------------|
| 要素特性 | 地盤-ソリッド(Solid) |
| 接点数、要素数 | 8,968 接点、5,668 要素 |
| 解析方法 | せん断強度低減法(SRM) |

斜面の断面のみを解析する2次元解析では、斜面の3次元的な挙動を把握するには限界があります。2次元解析と3次元解析の一番大きな違いは、地表面及びすべり面の形状、地盤物性の分布、すべり面の強度などの考慮の可否にあります。本モデルでは3次元斜面安定解析を行いすべりが発生する位置を検討します。



▶結果比較(GTS-GTS NX)

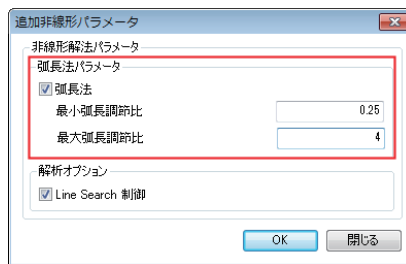
| | GTS 440 | GTS NX | 安全率差 |
|----|------------------|------------------|--|
| | Factor of Safety | Factor of Safety | |
| 乾期 | 1.9875 | 2.0423 | 0.0548 |
| | | | |
| 雨期 | - | 0.9974 | 既存GTS 440では3次元斜面安定解析際工間関数で定義した水位を適用することができなかった |
| | × | | |

Note 弧長法を利用したせん断強度低減法

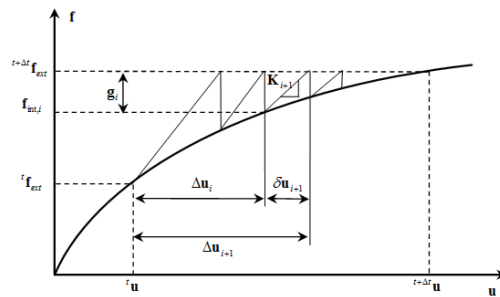
弧長法(Arc-length)法

弧長法によるせん断強度低減法と既存のせん断強度低減法が一番大きな違いは、強度減少の基準になる安全率の増加または減少させる方法です。

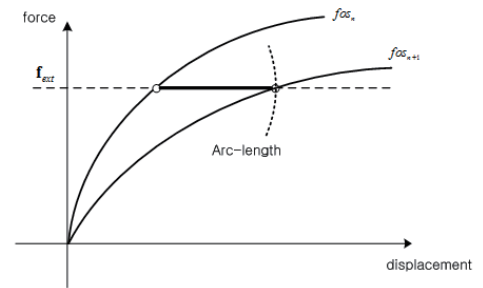
- コマンド：解析 > 解析ケース > 解析制御 > 斜面安定 (SRM) > アドバンスド非線形パラメータ



- ✓ せん断強度低減法は安全率をユーザが指定した増分で調節し次の段階の安全率を算定します。そのため、非常に安定なモデルである場合と不安定なモデルでは、エンジニアの判断なしでは一律的に安全率が増減されて効率の悪い計算が実行される可能性があります。
- ✓ しかし、弧長法を利用すると前段階の収束速度に従って弧の長さを算定するためより適切な安全率の増分を得ることができる長所があります。



[非線形有限要素法の収束過程]



[Arc-length による安全率増減]

Chapter 6

Dynamic

TABLE OF CONTENTS

Section 1. 1 次元地盤応答解析

Section 2. 2 次元等価線形解析 (2D)

Section 3. 発破動解析 (3D)

Section 1

1次元地盤応答解析

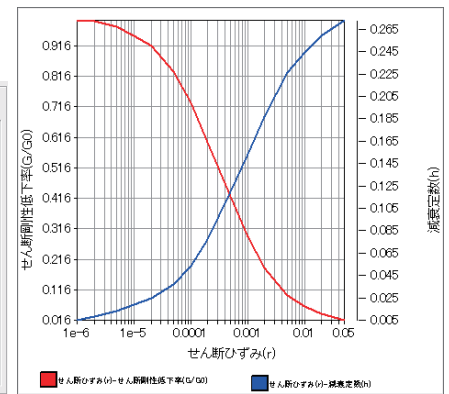
構造物が建設される以前の地盤状態において、地震動を入力し、地盤の応答を求めることを自由地盤(Free Field)解析と言います。自由地盤解析はすべての地層の境界が水平で、地盤の応答は基盤岩から垂直に伝播される水平せん断波に支配されると仮定しています。本モデルでは最下部層を基盤岩として扱い、1次元解析を行った後、原地盤条件下で2次元解析を行い、地盤の最大応答加速度を確認します。

- ▶地層モデリング
- ▶ひずみ依存特性曲線

地層データ

土質種類から地層データを作成

| No. | 深さ (m) | 厚さ (m) | 土質 No. | 浮遊重量 (kN/m ³) | Vs (m/sec) | G0 (kN/m ²) | H0 | ひずみ依存特性種類 | 出力タイプ |
|-----|---------|--------|--------|---------------------------|------------|-------------------------|---------|----------------|-------|
| 1 | 2.0000 | 2.0000 | 1 | 18.0000 | 155.0000 | 44097.627 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 2 | 3.8800 | 1.8800 | 2 | 18.0000 | 155.0000 | 44097.627 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 3 | 4.9800 | 1.1000 | 3 | 18.0000 | 155.0000 | 44097.627 | 0.01000 | 2Clay | 線弾 |
| 4 | 3.1800 | 3.2000 | 4 | 19.0000 | 390.0000 | 294467.78 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 5 | 11.1600 | 3.0000 | 5 | 19.0000 | 390.0000 | 294467.78 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 6 | 14.1800 | 3.0000 | 6 | 19.0000 | 390.0000 | 294467.78 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 7 | 17.1800 | 3.0000 | 7 | 19.0000 | 390.0000 | 294467.78 | 0.01000 | 1Sand-Average | 線弾 |
| 8 | 20.1800 | 3.0000 | 8 | 20.0000 | 640.0000 | 895381.52 | 0.01000 | 3Sand-Upper Bo | 線弾 |
| 9 | 22.1800 | 2.0000 | 9 | 20.0000 | 640.0000 | 895381.52 | 0.01000 | 3Sand-Upper Bo | 線弾 |
| 10 | 24.1800 | 2.0000 | 10 | 20.0000 | 640.0000 | 895381.52 | 0.01000 | 3Sand-Upper Bo | 線弾 |
| 11 | 26.8800 | 2.7000 | 11 | 24.0000 | 980.0000 | 2350405.0 | 0.01000 | 4Rock | 線弾 |
| 12 | 29.8800 | 3.0000 | 12 | 24.0000 | 980.0000 | 2350405.0 | 0.01000 | 4Rock | 線弾 |
| 13 | 32.8800 | 3.0000 | 13 | 24.0000 | 980.0000 | 2350405.0 | 0.01000 | 4Rock | 線弾 |
| 14 | 33.8800 | 0.5000 | 14 | 26.0000 | 1200.0000 | 3817817.5 | 0.01000 | 4Rock | 線弾 |
| 15 | 34.3800 | 1.0000 | 15 | 26.0000 | 1200.0000 | 3817817.5 | 0.01000 | 4Rock | 線弾 |



- ▶深さによる最大加速度結果比較(GTS-GTS NX)

[単位 : g]

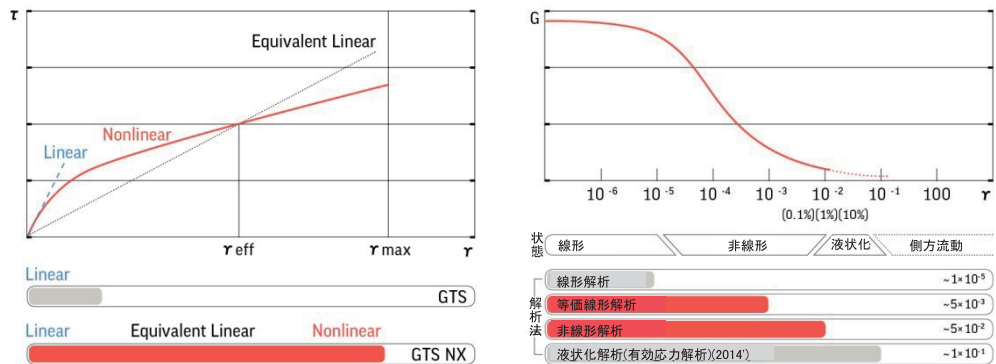
| | GTS 440 | | GTS NX | | Error Ratio(Value) | |
|-------|---------|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| | max | max | min | max | min | max |
| 長周期波 | 0.1259 | 0.2978 | 0.1259 | 0.2978 | 0.00% (0) | 0.00% (0) |
| 短周期波 | 0.2406 | 0.1339 | 0.2404 | 0.1338 | 0.08% (-2.00e-4) | 0.07% (-1.00e-4) |
| 人工地震波 | 0.4363 | 0.1557 | 0.4363 | 0.1558 | 0.00% (0) | 0.06% (1.00e-4) |

Note 動解析の理解

動解析は大きく線形動解析・等価線形解析・非線形解析に分類できます。GTS NX では線形から非線形動解析法をサポートします。

| 解析法 | | 特徴 |
|--------|------------------------|---|
| 線形動解析 | 応答スペクトル 時刻歴解析(線形) | ✓ 地盤剛性が非常に大きく、微小なひずみ領域で有効な解析法 |
| 等価線形解析 | 1次元自由地盤解析 2次元等価線形解析 | ✓ 有効せん断ひずみに該当するせん断弾性係数を利用した周波数領域解析法で解析速度に優れている ✓ 地盤剛性が大きいまたは入力加速度が小さいと地盤非線形性が小さいため効果的に合理的な結果を得ることが可能 |
| 非線形動解析 | 時刻歴解析(非線形) | ✓ 地盤の非線形性をそのまま再現できる時間歴解析法で間隙水圧の発生と消散も考慮可能 ✓ 地盤の変形が非常に大きい・共振現象で大きな応答が発生する場合には非線形解析が必要 |

- ▶ 応力-ひずみの関係
- ▶▶ 動解析法によるひずみ適用範囲



GTS NX でサポートしている動解析法および適用分野を見てみると以下のようになります。

応答スペクトル解析

- ▶ 一自由度系でそれぞれの荷重に対する構造物の最大変位、最大速度、最大加速度などの応答を表した応答スペクトルを用いて構造物の応答を求める方法
- ▶ 時刻歴解析法に比べると多少誤差の生じる近似的方法であるが、大規模構造物/精密な結果が必要ない場合に簡便に構造物の動的特性が把握できる。

線形時刻歴解析(モード/直接)

- ▶ 構造物の動的特性と荷重を用いて、任意の時間に対する構造物の挙動(変位、部材力等)を運動方程式から計算する方法
- ▶ モード重ね合わせ法：入力地震波による個別モードでの応答を求めた後、結果を重ね合わせる方法。
- ▶ 直接積分法：全体の自由度に対する運動方程式を時間積分して解を求める方法。

| 区分 | 直接法 | モード法 |
|-------|------------------|----------------------|
| 解析時間 | 解析時間が長い | 解析時間が短い |
| 主要事項 | 時間ステップの選定が重要 | モード数の選定が重要 |
| モデル規模 | 小規模モデルに適合 | 大規模モデルに適合 |
| 解析精度 | 解析時間が比較的長い、精度は高い | 選択されたモード数によって精度に差が発生 |

1D 自由地盤解析 (1D Free Field Analysis)

- 構造物が建設される以前の地盤状態で地震入力に対する地盤の応答を求めるため、すべての地層の境界が水平であり、地盤の応答は基盤岩から垂直に伝播される水平せん断波に支配されるという仮定を基本としている
- 設計応答スペクトルを決定するための地表面加速度と液相化評価のための動的応力とひずみの算定などに用いる

2D 等価線形解析(2D Equivalent Linear Analysis)

- 振動荷重の大きさによってせん断ひずみの持続的な変化考慮が可能であり、地盤領域の無限性によって生じる発散減衰(radiation damping)現象を模写
- 地盤に対する解析だけではなく地盤 - 構造物の相互作用解析(Soil-Structure Interaction: SSI)が可能

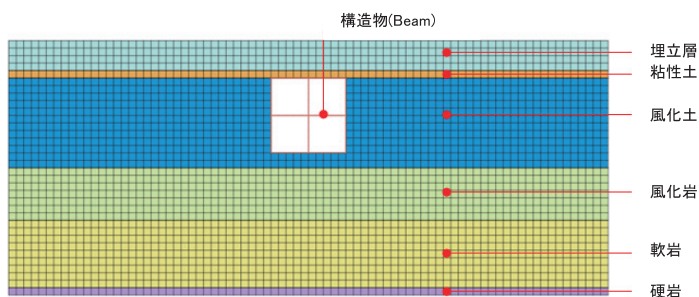
非線形時刻歴解析 (Nonlinear Time History Analysis)

- 地盤は材料非線形性を示すため、地盤に対する動的応答は非線形時刻歴解析を行うことでより精度よく実現象を再現可能

Section 2 2次元等価線形解析(2D)

| | |
|----------|-------------------------------|
| 要素特性 | 地盤 - 2D 等価線形 構造物 - 梁(Beam) |
| 節点数、要素个数 | 2,835 節点 , 2,780 要素 |
| 解析方法 | 2次元等価線形解析 |


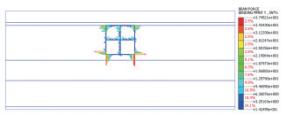
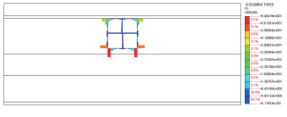
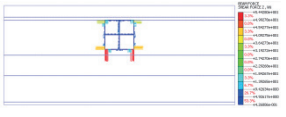
地盤内に構造物が存在する場合には、2次元等価線形解析を行うことで、地盤と構造物の相互作用に関する検討を行うことができます。地盤は、地震のような時間歴荷重によってせん断ひずみが増加します。せん断ひずみが増加することによってせん断弾性係数は減少し、減衰比は増加する傾向が見られます。本モデルでは風化土層にコンクリート構造物を追加し2次元等価線形解析から地盤/構造物の地震応答結果を求め、構造物の安定性を評価します。



▶結果比較(GTS-GTS NX)

[単位 : KN, m]

| | GTS 440 | GTS NX | Error Ratio(Value) |
|---------|----------------|----------------|--------------------|
| | min/max | min/max | min/max |
| DY | 2.33385e-3 | 2.33627e-3 | 0.10% (2.42e-6) |
| DX Y | 1.35694e-2 | 1.36600e-2 | 0.67% (9.06e-5) |
| Beam Fx | 2.96019e2 | 2.94378e2 | 0.55% (-1.64e0) |
| Beam | 3.75011e1 | 3.74521e1 | 0.13% |

| | | | |
|------------|---|--|---------------------|
| My |  |  | (-4.90e-2) |
| Beam Fz | 5.46478e1 | 5.44280e1 | 0.40% (-2.20e-1) |
| |  |  | |



Note 2D 等価線形解析設定

- ✓ 2D 等価線形解析を行うためには解析法の設定が[2D 等価線形]に設定されなければなりません。また、地盤物性も 2D 等価の物性(単位重量、せん断係数、ポアソン比、減衰比、ひずみ適合特性)が定義されなければなりません。

| 区分 | 解析法設定 | 備考 |
|---------|---------|---|
| GTS NX | 2D 等価線形 | 1. 解析 > 解析設定 > モデル種類を 2 次元モデルで設定 2. 動的解析 > 材料 > 2 次元等価で地盤物性を定義 3. 解析 > 解析ケース > 追加 > 2 次元等価線形解析を選択 |
| GTS 440 | 2D 等価線形 | 1. ファイル > プロジェクト設定 > モデルタイプを 2D 等価線形解析で設定 2. モデル > プロパティ > プロパティ > 平面に地盤物性を定義 2. 解析 > 解析ケース > 追加 > 2D 等価線形解析を選択 |

Note 時間ステップ設定

- ✓ ユーザが指定した時間増分量、終了時間、出力増分ステップ個数により動解析結果が出力されます。これは結果 > 特別な結果 > 時刻歴 > グラフから時間による結果が確認できます。

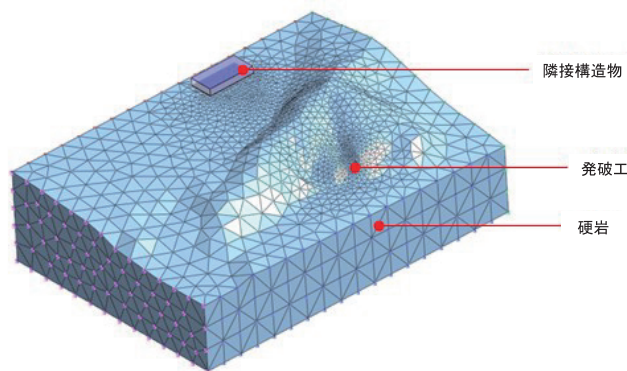
| 区分 | 時間ステップ設定 | |
|---------|--|---|
| GTS NX | 解析 > 解析ケース > 追加 > 時間ステップで目標時間ステップを定義 |  |
| GTS 440 | モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 時刻歴荷重セットで出力増分ステップ個数設定 (時間増分量は 0.01 秒で固定であり、終了時間は内部計算により出力) |  |

- ✓ 2D 等価線形解析では履歴関数を周波数領域に変換して解析を行い、これを更に時間領域で表現するため、時刻歴関数(地震波データ)定義の際、時間増分量を一定に設定し、時間ステップ設定でも時間増分量を時刻歴関数の定義時間と同様に使用することをお勧めします。

Section 3 発破動解析 (3D)

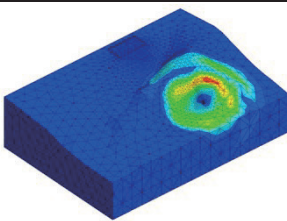
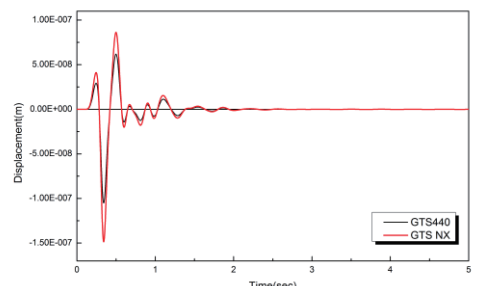
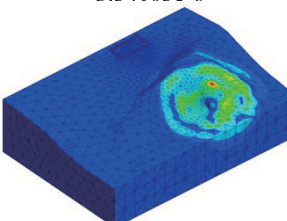
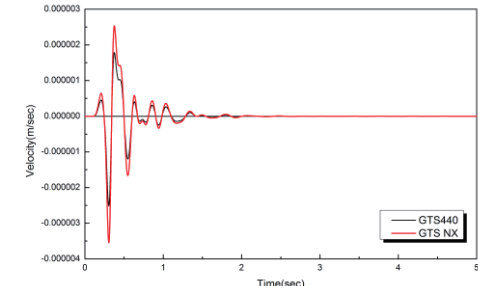
| | |
|----------|--------------------|
| 要素特性 | 地盤-ソリッド |
| 節点数、要素個数 | 3,621 節点、17,286 要素 |
| 解析法 | 時刻歴解析(直接) |

地盤に発破を行う場合、振動や騒音などを必ず伴うため、周りに構造物があった場合の発破振動による安定性評価は非常に重要な項目です。本モデルでは硬岩で構成された地盤に標準の発破工法より中規模の振動制御発破を適用させ、時間による隣接構造物の変位および速度を確認します。





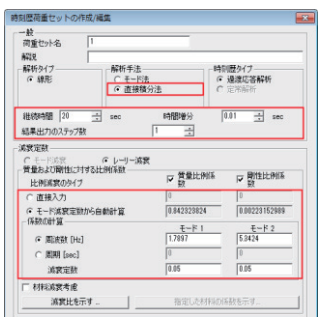
[単位 : KN, m, sec]

▶Time History Graph (GTS-GTS NX)

| | GTS NX min/max | Time History Graph |
|--------------|--|--|
| Displacement | -1.48548e-7  |  |
| Velocity | -3.54105e-6  |  |

Note 固有値モード入力

- ✓ 固有値解析は構造物固有の動的特性を分析することに使用され、固有値解析をから求められる構造物の主要な動的特性としては固有モード(またはモード形状)、固有周期(または固有振動数)、モード寄与係数(modal participation factor)などがあります。これらは構造物の質量と硬度によって決まります。
- ✓ 時刻歴解析(直接法)では固有値解析を行い、質量寄与率が最も高い2つのモード値を入力します。

| 区分 | モード入力 | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|------|------|--------|------|--------|---|---|----|------|---|
| GTS NX | 解析 > 解析ケース > 追加 > 線形時刻歴解析(直接積分) 1) 時間ステップで目標ステップ定義: 終了時間、時間増分量、出力増分ステップ個数 2) 解析制御 > 動的解析 > 減衰定義グループでモード減衰計算を選択 3) 周波数または周期および減衰比を入力 |  <table border="1" style="margin: 5px auto;"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>名称</th> <th>継続時間</th> <th>時間増分</th> <th>結果出力間隔</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>20</td> <td>0.01</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> | No | 名称 | 継続時間 | 時間増分 | 結果出力間隔 | 1 | 1 | 20 | 0.01 | 1 |
| | No | 名称 | 継続時間 | 時間増分 | 結果出力間隔 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 20 | 0.01 | 1 | | | | | | | | |
| ※ GTS NX では複数の時間ステップ定義が可能です。これを通じてそれぞれ異なる時間スケールでの結果確認が可能となります。 (ex. 1 番に全体時間 10 秒、時間スケールを 5 秒、出力ステップを 1 で設定し、2 番に全体時間 10 秒、時間スケール 1 秒、出力ステップを 2 で設定した場合 5, 10, 12, 14, 16, 18, 20 秒の結果が出力されます。) |  | | | | | | | | | | | |
| GTS 440 | モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 時刻歴荷重セット 1) 直接積分を選択 2) 出力時間定義: 終了時間、時間増分量、出力増分ステップ個数 3) モード減衰計算選択 4) 周波数または周期および減衰比の入力 |  | | | | | | | | | | |

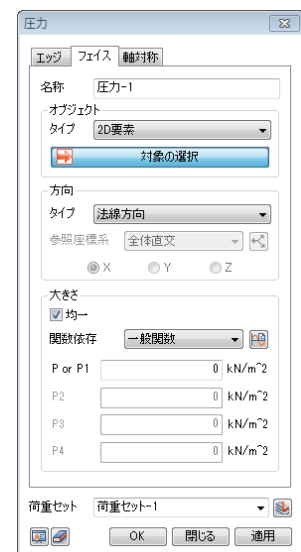
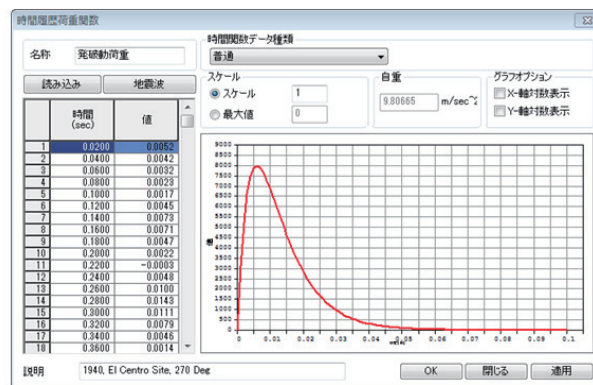
Note 時間依存関数の定義と適用

- ✓ 時刻歴解析は構造物に動的荷重が作用する場合に構造物の動的特性と加えられる荷重を使用して任意時間に対する構造物の挙動(変位、部材力等)を計算する解析で、時間による関数を入力しなければなりません。

| 区分 | 時間依存関数の定義/適用 |
|---------|---|
| GTS NX | <p>[定義] 特性/座標系/関数 > 関数 > 時刻歴関数 データタイプ：無次元加速度、加速度、荷重、モーメント、普通で分類される</p> <p>[適用] 荷重/モーメント：動的解析 > 荷重 > 動的節点荷重で使用 加速度/無次元加速度：動的解析 > 荷重 > 地盤加速度で使用 普通：動的解析 > 荷重 > 動的面荷重、時刻歴静的荷重で使用</p> |
| GTS 440 | <p>[定義] モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 時刻歴荷重 データタイプ：無次元加速度、加速度、力、モーメント、無次元で分類される</p> <p>[適用] 力/モーメント：モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 動的切点荷重、動的面荷重で使用 加速度/無次元加速度：モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 地盤加速度で使用 無次元：モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 時間変化静的荷重で使用</p> |

- ✓ GTS 440 では発破動荷重のように面に作用する荷重を入力する際、時間関数データ種類を‘力’として入力する必要があり、単位面に作用する力の大きさを入力すると自動的に換算され解析が行われました。(例：力 1kN 入力時、1kN/m²で計算)
- ✓ GTS NX では圧力形態の荷重入力時、時間関数データを[普通]に変更した後、動的解析 > 荷重 > 動的面荷重入力時、P or P1 で単位荷重の大きさを入力すると GTS 440 の結果と同様な値が確認できます。

- ▶時刻歴荷重関数の定義
- ▶動的面荷重の定義



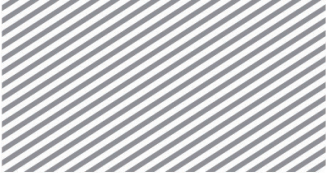


Note

履歴結果探索

- ✓ 時刻歴の結果が存在する解析の解析ケース(非定常流浸透、圧密、応力浸透完全連携、線形/非線形時刻歴解析、2D 等価線形)で特定位置の結果をグラフで出力させるためには**[解析実行前]**に履歴結果を求める節点を登録しなければなりません。
- ✓ GTS 440 では全体解析結果を解析ツリーに出力しましたが、使用性や性能の側面から非効率的であったため GTS NX ではユーザが望む位置を効率的に定義し解析に反映できるように変更されました。

| 区分 | 履歴結果探索 |
|---------|---|
| GTS NX | 1. 解析 > 時刻歴出力条件 > 時刻歴出力で結果項目および結果確認位置指定 2. 解析 > 解析ケース > 追加 > 出力制御 > 時刻歴出力で確認する履歴登録 3. 結果 > 特別な結果 > 時刻歴 > グラフを通して履歴結果の確認 |
| | 全体時間ステップに対する履歴結果の出力 (GTS 440 でより合理的な履歴曲線の抽出が可能) |
| GTS 440 | 1. モデル > 荷重 > 時刻歴データ > 時刻歴結果関数で位置指定 2. 結果 > 時刻歴解析 > 時刻歴グラフを通して履歴結果の確認 |
| | 使用者が定義したステップだけに対して履歴結果を出力(ex. 終了時間 : 10 秒, 時間増分量 0.01 秒, 出力ステップを 100 にした場合 1, 2, ..., 10 秒に対する結果だけに関して履歴結果を出力) |



GTS NX

NEW EXPERIENCE OF
GEO-TECHNICAL ANALYSIS SYSTEM



Copyright © Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.
www.MidasUser.com