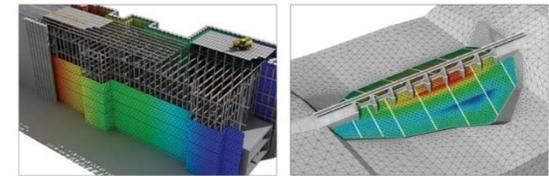


# Release Note

---

**GTS NX**  
Geo-Technical analysis System New eXperience



최적화된 차세대 플랫폼과 64bit 통합솔버를 탑재한  
지반분야 유한요소 해석 솔루션

**MIDAS**

# Enhancements

## 1. Pre Processing

- 1.1 하중테이블 불러오기/내보내기 (MODS)
- 1.2 인공지진파 생성 (MODS)
- 1.3 자유장 요소 (동해석 무한경계요소)
- 1.4 비탄성한지 (MODS)

## 2. Analysis

- 2.1 Mohr Coulomb 파괴기준 안전율 출력 (Mohr Coulomb Criteria)
- 2.2 재료모델 : von Mises - Nonlinear
- 2.3 재료모델 : Modified UBCSAND (MODS)
- 2.4 재료모델 : Sekiguchi-Ohta(Inviscid) (MODS)
- 2.5 재료모델 : Sekiguchi-Ohta(Viscid) (MODS)
- 2.6 재료모델 : Generalized Hoek Brown (MODS)
- 2.7 재료모델 : 2D 이방성 (2D구조요소)
- 2.8 재료모델 : Hardening Soil(개선된 Modified Mohr Coulomb)
- 2.9 재료모델 : Ramberg-Osgood (MODS)
- 2.10 재료모델 : Hardin-Drnevich (MODS)
- 2.11 재료모델 : Hardening Soil(small strain stiffness)
- 2.12 활성화된 요소의 초기응력 추정
- 2.13 응력-비선형 동해석 (MODS)
- 2.14 대변형을 고려한 변형률/응력 산출 (기하비선형 고려) (MODS)



최적화된 차세대 플랫폼과 64bit 통합솔버를 탑재한  
지반분야 유한요소 해석 솔루션

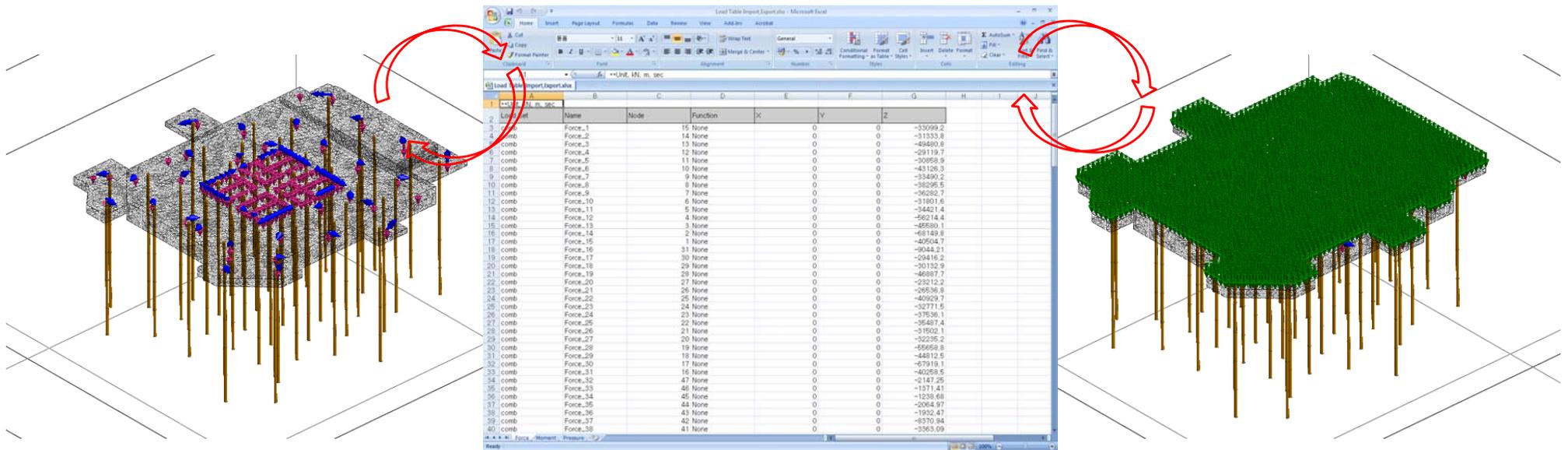


# 1. Pre Processing

## 1.1 하중테이블 불러오기 / 내보내기 (MODS)

- 자주 사용하는 하중타입을 엑셀(excel) 파일에서 정의하여 불러오거나, 정의된 하중 정보를 내보낼 수 있습니다. ( 불러오기 할 때는 **한 번에 엑셀파일을 1개씩만 선택 가능**)
- 적용 가능한 하중타입은 아래와 같습니다.
  - 집중하중/모멘트하중 : 전체직교좌표계(GCS) 타입으로만 하중테이블 불러오기/내보내기 가능
  - 강제변위 : 체크박스에서 체크한 방향으로의 변위에 대해서 하중으로 테이블 불러오기/내보내기 가능
  - 압력하중 : 선/면 타입 압력하중만 테이블 불러오기/내보내기 가능, 이 중 기하형상을 선택하여 정의하는 방식(면)은 제외되며, 방향은 '법선방향'과 '방향선택' 지원
  - 보 하중 : 보요소하중 타입만 하중테이블 불러오기/내보내기 가능

### ▪ 정적/사면 해석 > 하중 > 테이블 > 하중테이블 불러오기 / 내보내기



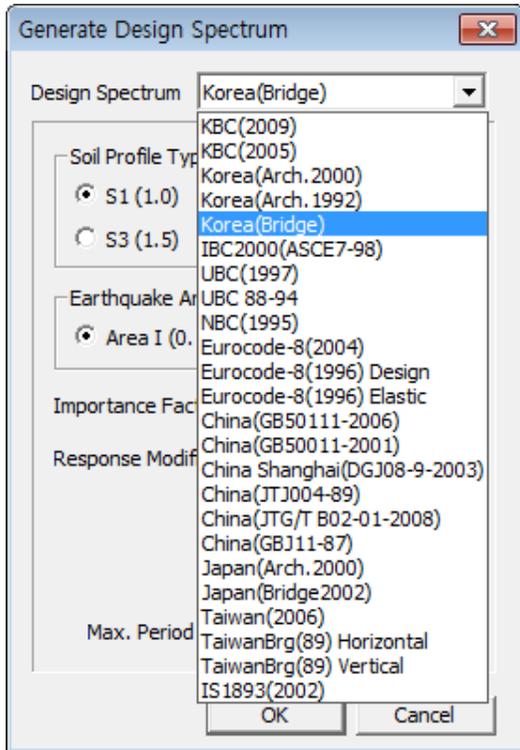
[하중테이블 불러오기/내보내기 예 : 말뚝지지 전면기초]

# 1. Pre Processing

## 1.2 인공지진파 생성 (MODS)

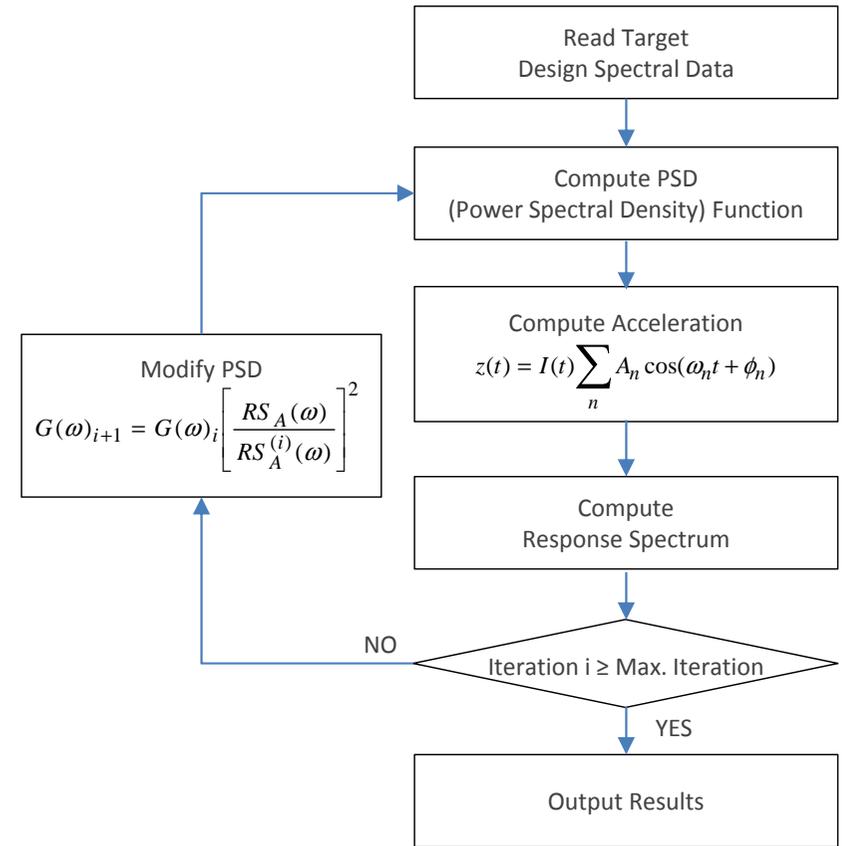
- GTS NX에 내장되어 있는 **응답 스펙트럼 데이터베이스를 이용하여 가속도 데이터로 변환**
- 인공지진파는 프로그램 내부적으로 랜덤함수를 사용하므로 생성할 때마다 다른 결과가 출력되며, **응답스펙트럼과 유사한 응답을 가지는 지진파를 사용하는 것을 권장함**

### 동적 해석 > 도구 > 인공지진파



[ 프로그램에 탑재된 설계 스펙트럼 ]

- KBC(2009) : 한국, 건축구조설계기준(2009)
- KBC(2005) : 한국, 건축구조설계기준(2005)
- Korea(Arch, 2000) : 한국, 건축물 하중기준 및 설계(2000)
- Korea(Arch, 1992) : 한국, 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙
- Korea(Bridge) : 한국, 도로교 설계기준
- IBC2000(ASCE7-98) : 미국, International Building Code 2000
- UBC(1997) : 미국, UBC 97 기준
- UBC 88-94 : 미국, UBC 91 기준
- NBC(1995) : 캐나다, National Building Code of Canada
- Eurocode-8(2014) : 유럽, 구조물의 내진설계 기준
- Eurocode-8(1996) Design : 유럽, 구조물의 내진설계 기준
- Eurocode-8(1996) Elastic : 유럽, 구조물의 내진설계 기준
- China(GB50111-2006) : 중국, 철도공정 항진 설계규범 (Code for Seismic Design of Railway Engineering)
- China(GB50111-2001) : 중국, 건축물 내진 설계기준
- China Shanghai(DGJ08-9-2003) : 중국, 상해시 건축물 내진 설계기준
- China(JTJ004-89) : 중국, 도로공사 내진설계 기준
- China(JTG/T B02-01-2008) : 중국, 내진설계 시방서
- China(GBJ111-87) : 중국, 철도공사 내진설계 시방서
- Japan(Arch, 2000) : 일본, 건축물 하중지침 및 동해설
- Japan(Bridge, 2002) : 일본, 도로교 설계 기준
- Taiwan(2006) : 대만, 내진설계 기준
- TaiwanBrg(89) Horizontal : 대만, 도로교 내진설계기준
- TaiwanBrg(89) Vertical : 대만, 도로교 내진설계기준
- IS 1893(2002) : 인도, Indian Seismic Code



[ 인공지진파 생성 순서도 ]

# 1. Pre Processing

## 1.2 인공지진파 생성 (MODS)

- GTS NX에 내장되어 있는 **응답 스펙트럼 데이터베이스를 이용하여 가속도 데이터로 변환**
- 인공지진파는 프로그램 내부적으로 랜덤함수를 사용하여 생성할 때마다 다른 결과가 출력되며, **응답스펙트럼과 유사한 응답을 가지는 지진파를 사용하는 것을 권장함**

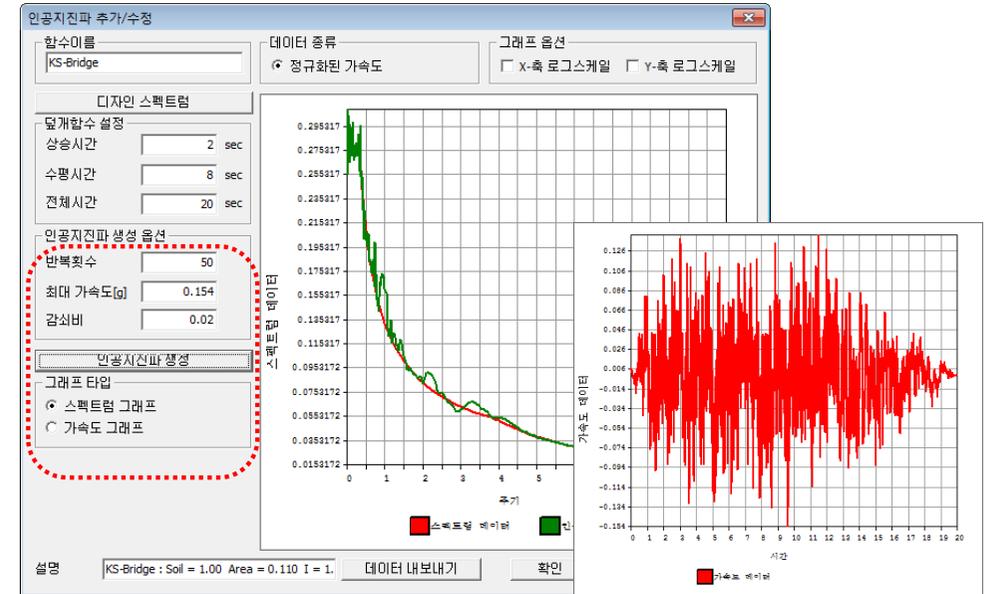
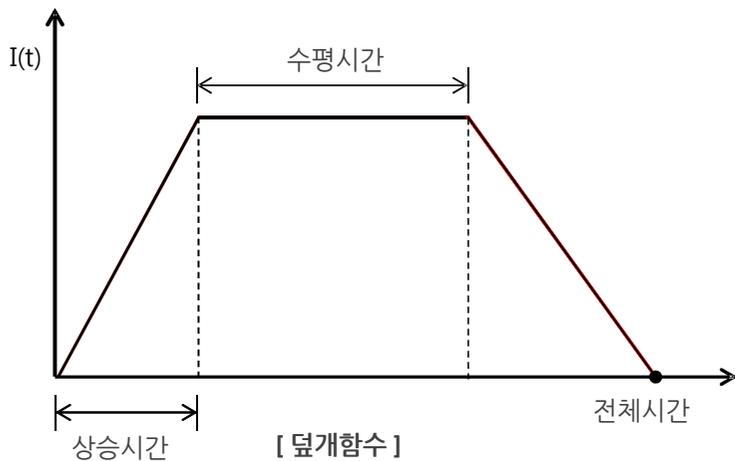
[ 응답스펙트럼에 상응하는 가속도 시간이력을 생성하기 위한 식 ]

$$z(t) = I(t) \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n)$$

여기서,  $\omega_n$  = 주파수,  $A_n$  = 진폭,  $\phi_n$  = 위상각,  $I(t)$  = 덮개함수

### 덮개함수

- 실제 지진의 일시적인(Transient) 특성을 모사하기 위해 정상운동(Steady State Motion)에 곱해지는 함수
- 덮개함수가 없는 경우 가속도 시간이력은 시작부터 끝까지 거의 일정한 크기의 형태를 가짐
- GTS NX에서는 사다리꼴(Trapezoidal) 형태의 덮개함수를 지원



[ 인공지진파 추가/수정 ]

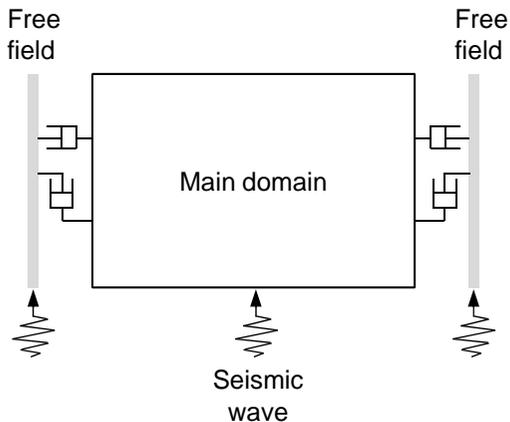
- 인공지진파 생성 옵션**
  - 반복횟수 : 인공지진파의 응답스펙트럼 결과를 입력된 응답스펙트럼에 일치시키기 위한 최대 반복계산 횟수
  - 최대 가속도(g) : 인공지진파의 최대 지진가속도
  - 감쇠비 : 인공지진파로부터 응답스펙트럼을 정의할 때 적용할 감쇠비
- 인공지진파 생성** : 응답스펙트럼 데이터로부터 가속도 데이터로 변환
- 그래프 타입**
  - 스펙트럼 그래프 : 스펙트럼 데이터 기준으로 가속도 데이터를 확인
  - 가속도 그래프 : 가속도 데이터 기준으로 그래프를 확인

# 1. Pre Processing

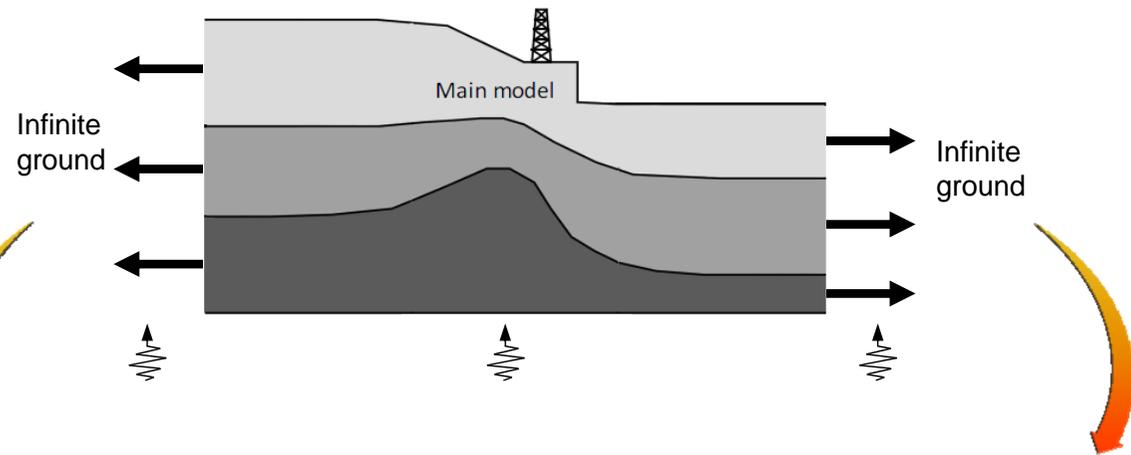
## 1.3 자유장 (무한경계)

- 지진해석을 하는 경우 무한한 지반과 비슷한 결과를 얻기 위해 자유장(무한경계) 요소 추가 (※ 응력해석에서도 무한한 지반을 모사하기 위한 조건으로 사용 가능)
- 자유장 해석으로 인해 발생하는 traction은 내력으로 관심 영역에 전달
- 모델의 경계에서 발생하는 반사파는 흡수 경계 조건(absorbent boundary condition)을 사용하여 제거

### 요소망 > 요소 > 자유장



[ Free field 요소가 포함된 지반 해석 모델 ]

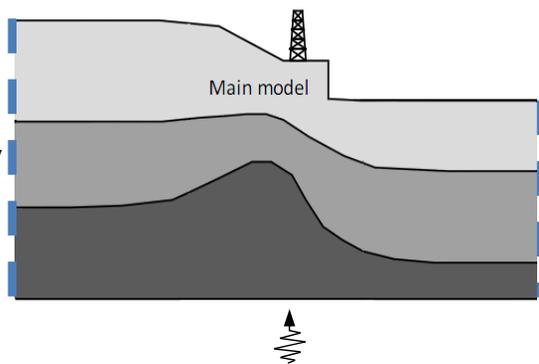


기존:  
1972년 Lysmer & Wass가 제안한 점성경계(viscous boundary 적용)

$$C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9.81}} = c_p \cdot A$$

$$C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9.81}} = c_s \cdot A$$

Viscous boundary



[Free field effect(X), Absorb reflection(O)]

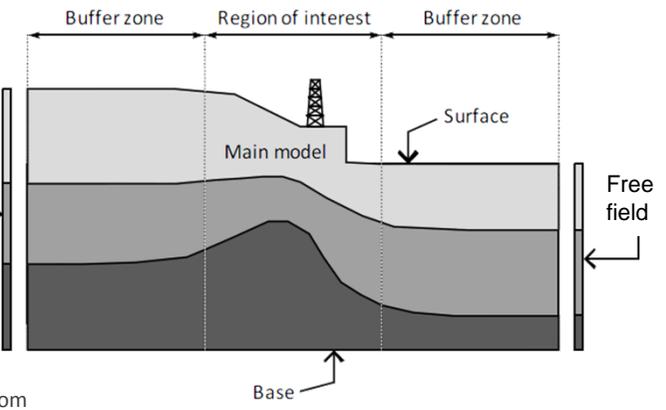
추가:  
자유장 조건으로 적용  
(free field + absorb reflection)

Free field

$$t_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff}) + \tau_{xx}^{ff}$$

$$t_y = -\rho C_s (v_y^m - v_y^{ff}) + \tau_{xy}^{ff}$$

Viscous boundary (Lysmer & Kuhlemeyer)      Traction from Free field



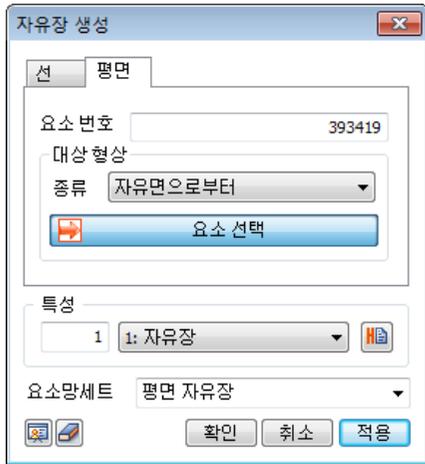
[Free field effect(O), Absorb reflection(O)]

# 1. Pre Processing

## 1.3 자유장 (무한경계)

- 지진해석을 하는 경우 무한한 지반과 비슷한 결과를 얻기 위해 자유장(무한경계) 요소 추가 (※ 응력해석에서도 무한한 지반을 모사하기 위한 조건으로 사용 가능)
  - 자유장 해석으로 인해 발생하는 traction은 내력으로 관심 영역에 전달
  - 모델의 경계에서 발생하는 반사파는 흡수 경계 조건(absorbent boundary condition)을 사용하여 제거

### ■ 요소망 > 요소 > 자유장



[ 자유장 요소 생성 ]



[ 특성/좌표계/흡수 > 특성 > 기타 > 자유장 ]

#### ■ 자유장

- 무한한 지반과 비슷한 결과를 얻기 위한 자유장 요소를 지반 경계

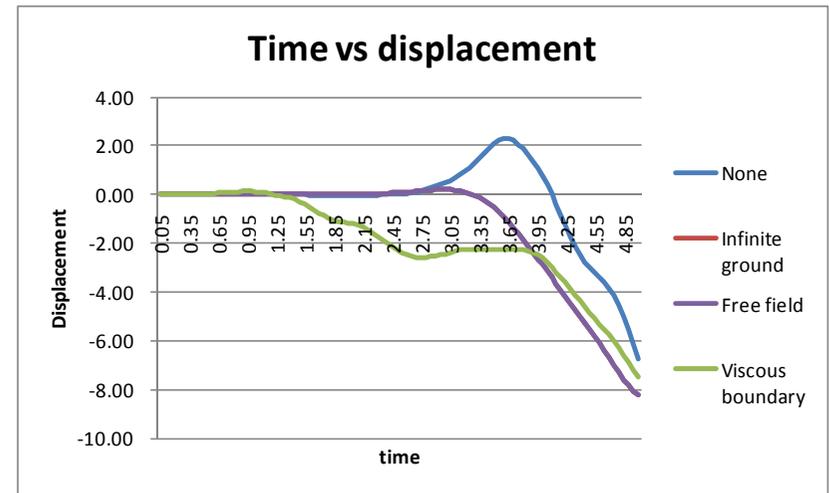
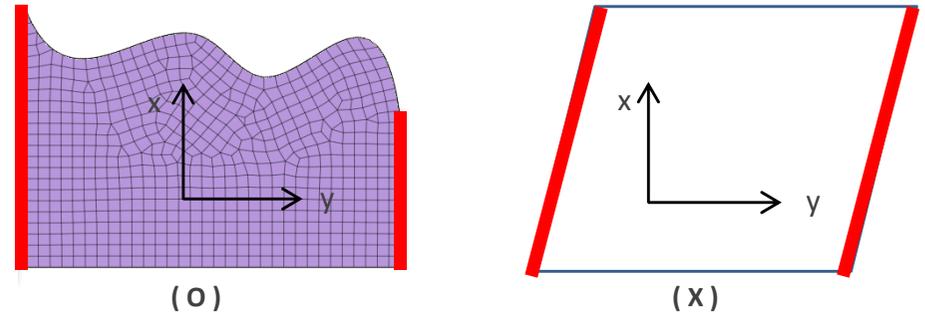
#### ■ 흡수경계

- 모델의 경계에서 발생하는 반사파를 제거하기 위한 흡수 경계조건

#### ■ 폭 계수

- 관심 영역 모델의 영향을 받는 것을 최소화하기 위해 사용하는 계수  
 - 실제 관심 모델의 폭에 곱해져 사용되며, 최소 10<sup>4</sup> 배 보다 커야 함

### ■ 자유장(free field)은 좌표축과 수직인 면에 생성해야 함



[ 시간에 따른 변위 형상 ]

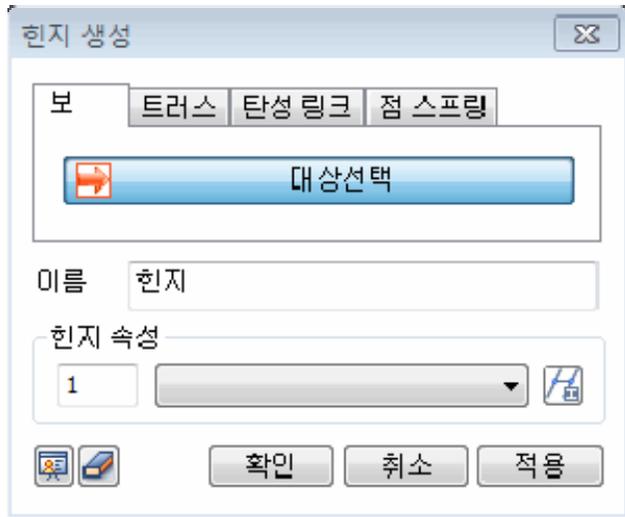
※ 무한한 지반을 모델링한 결과와 free field로 모델링한 결과가 유사하게 나타남

# 1. Pre Processing

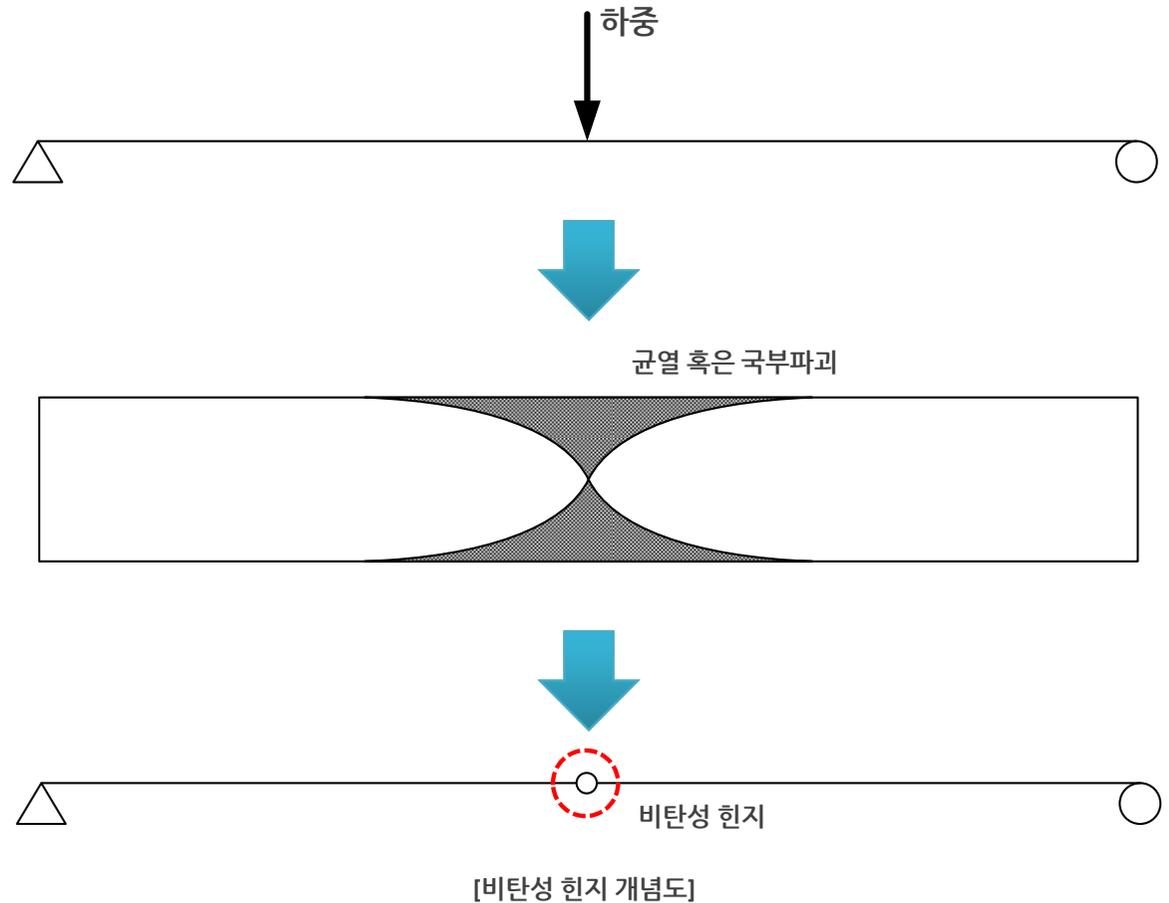
## 1.4 비탄성 힌지 (Inelastic Hinge) (MODS)

- 보요소 트러스요소에 비탄성 힌지 속성을 지정하여 균열과 국부 소성파괴를 모사가능.
- 비탄성 힌지는 주로 지진하중과 같은 불규칙한 반복하중을 받는 부재의 거동을 파악하기 위해 사용  
( GTS NX 적용해석 범위 : 비선형정적해석, 시간이력해석, 시공단계해석, 압밀해석, 완전연계해석, SRM 해석 )
- 비탄성 힌지 적용 가능한 요소 : Beam(빔), Truss(트러스), Elastic Link(탄성 링크), Point Spring(점 스프링)

※ 요소망 > 요소 > 힌지



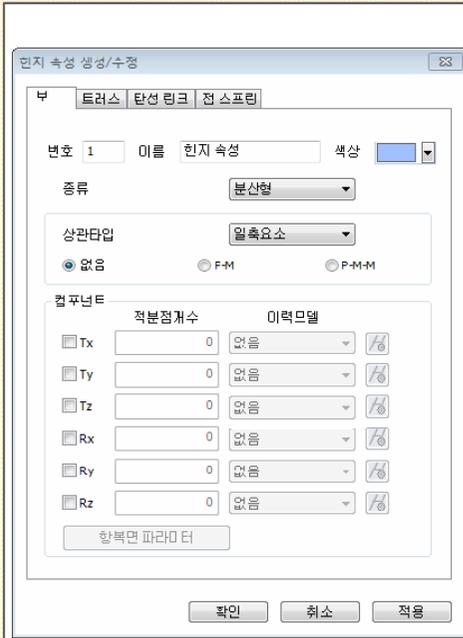
[힌지 생성]



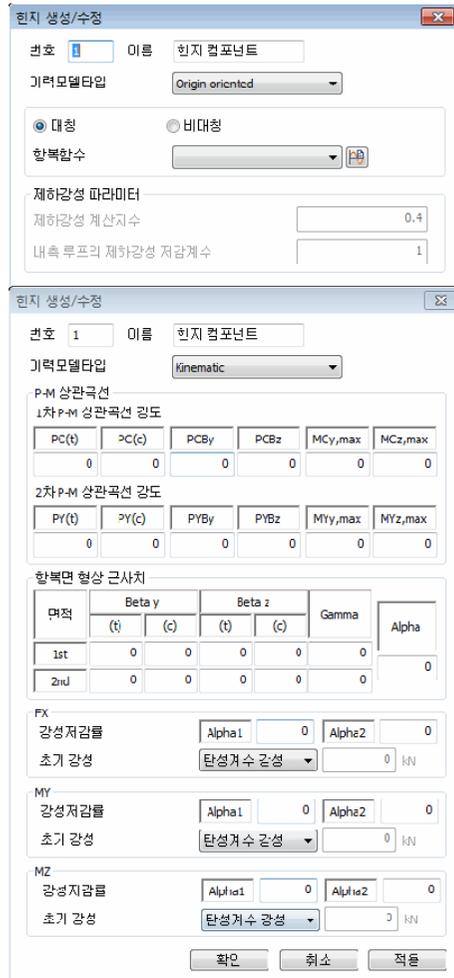
# 1. Pre Processing

## 1.4 비탄성 힌지 (Inelastic Hinge) (MODS)

- 보요소 트러스요소에 비탄성 힌지 속성을 지정하여 균열과 국부 소성파괴를 모사가능.
- 비탄성 힌지는 주로 지진하중과 같은 불규칙한 반복하중을 받는 부재의 거동을 파악하기 위해 사용  
( GTS NX 적용해석 범위 : 비선형정적해석, 시간이력해석, 시공단계해석, 압밀해석, 완전연계해석, SRM 해석 )
- 비탄성 힌지 적용 가능한 요소 : Beam(빔), Truss(트러스), Elastic Link(탄성 링크), Point Spring(점 스프링)

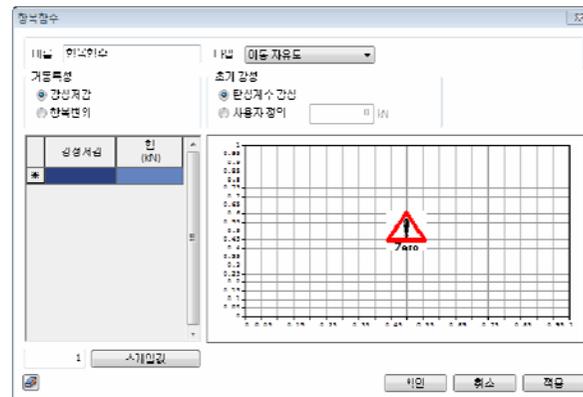


[힌지 속성]



[힌지 컴포넌트 (집중형/분산형)]

- 힌지 타입 : 보 (집중형 / 분산형), 트러스, 탄성링크, 점 스프링
- 상관타입 : 일축요소(없음, P-M, P-M-M), 다축요소
- 컴포넌트 : 단면내력의 각 성분 별로 입력되는 비탄성 힌지의 속성입니다.
  - 힌지위치 : 집중형 힌지의 위치를 선택합니다.
  - 적분점개수 : 분산형 힌지에 대하여 적분점의 개수를 입력합니다.
  - 이력모델 : 비탄성 힌지에 대한 이력모델을 선택합니다
- 이력모델 타입 : 비탄성 힌지 이력모델을 정의합니다.  
다축 힌지 컴포넌트는 보요소에만 할당 가능합니다.



[항복함수]

- Origin-oriented
- Peak-oriented
- Kinematic
- Clough
- Degrading Type
- Takeda
- Modified Takeda
- Normal Bilinear
- Multi-Linear
- Ramberg-Osgood
- Hardin-Drnevich

[이력모델 타입: Single Component]

## 2. Analysis

### 2.1 Mohr - Coulomb 파괴기준 안전율 출력

- Mohr-Coulomb 기준에 근거하여, **재료가 얼마나 항복되어 있는지**를 현재의 응력상태와 파괴응력 상태에 대한 비율(안전율)로 출력
- 점착력, 마찰각, 인장강도를 파괴기준으로 정의
- **출력된 안전율로부터 안전한 영역과 소성파괴 영역을 직관적으로 확인 가능**
- 안전율 결과는 결과트리에서 확인 (2D : Plain Strain Stresses > SAFETY FACTOR, 3D : Solid Stresses > SAFETY FACTOR)
- 안전율이 1(혹은 1.2) 이하인 경우에는 소성파괴영역과 동일한 결과가 출력될 수 있음.

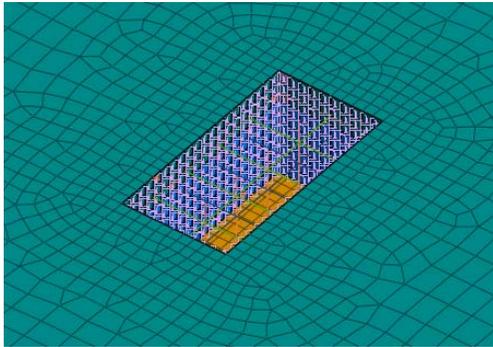
☑ 안전율 계산 (Mohr-Coulomb)

점착력 (C)  kN/m<sup>2</sup>

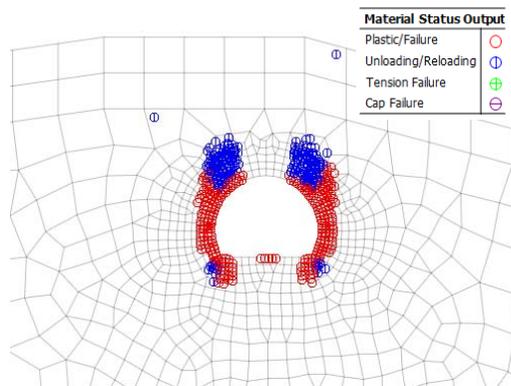
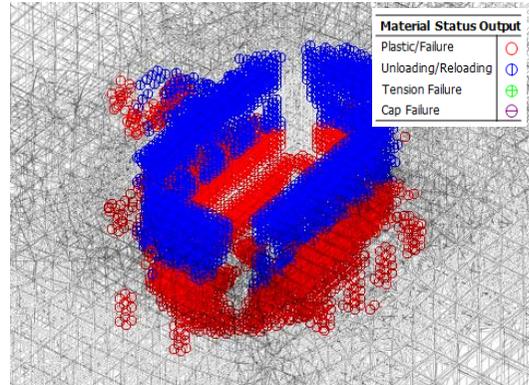
마찰각 (φ)  [deg]

☐ 인장강도  kN/m<sup>2</sup>

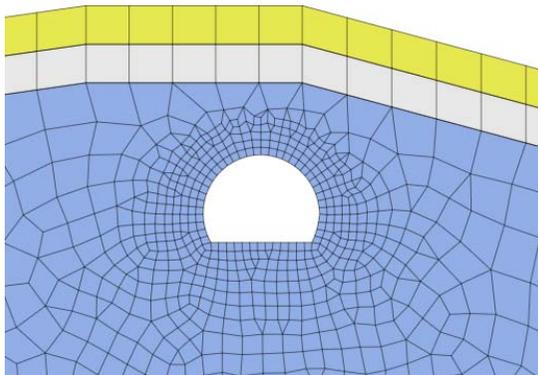
- 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > 일반 탭



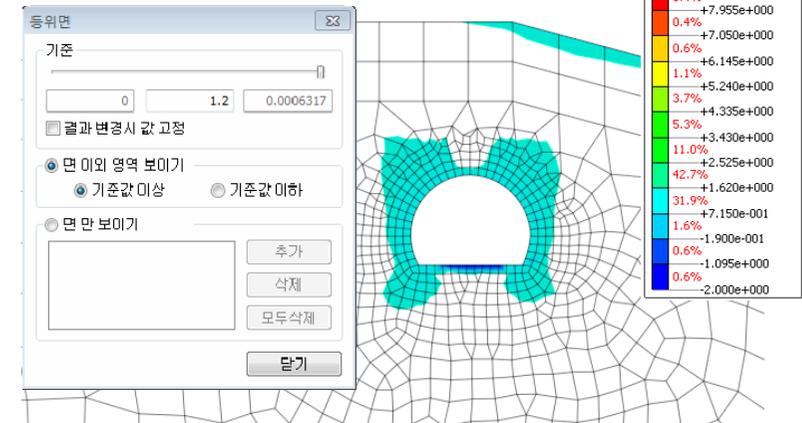
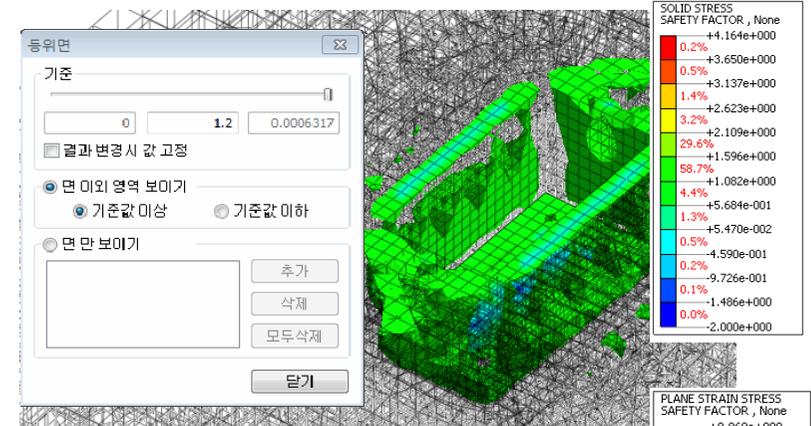
[3D 가시설 굴착]



[소성영역]



[2D 터널 굴착]



[안전율 결과(1.2이하 영역)]

## 2. Analysis

### 2.2 재료모델 : von Mises - Nonlinear

- von Mises 모델은 구속압과 무관하게 편차응력으로 항복을 예측하는 모델로써, **연성재료를 표현하기에 적합한 모델임**
- 경화곡선과 응력-변형률 곡선으로 비선형 거동을 모사하는 기능 추가**
- 항복조건에 대하여 등방성(Isotropic) 경화, 이동성(Kinematic) 경화, 혼합(Combined) 경화 모델을 지원
- 포화된 흙 재료의 비배수 전단강도를 표현하는데 von Mises 모델을 사용할 수 있음

#### 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Von Mises

| 일반  | 비선형 | 시간 증속 |
|---|-----|-------|
| <input type="radio"/> 완전 소성 재료<br>항복응력: <input type="text" value="0.002"/> kN/mm <sup>2</sup> |     |       |
| <input checked="" type="radio"/> 경화 곡선: <input type="text" value="없음"/>                       |     |       |
| <input type="radio"/> 응력-변형률 곡선: <input type="text" value="없음"/>                              |     |       |
| 경화규칙: <input type="text" value="등방성"/>  |     |       |
| 복합경화 계수 (0.0-1.0): <input type="text" value="0.0"/>   |     |       |

▪ **완전 소성 재료** : 항복응력을 입력합니다.

▪ **경화곡선** : 경화곡선은 재료의 소성 특성을 나타내는 재료 물성치로, 단축 인장/압축 시험이나 순수전단 시험등의 실험을 통해 얻는 물성치입니다.

▪ **응력-변형률 곡선** : 진응력-소성변형률 곡선을 입력합니다.

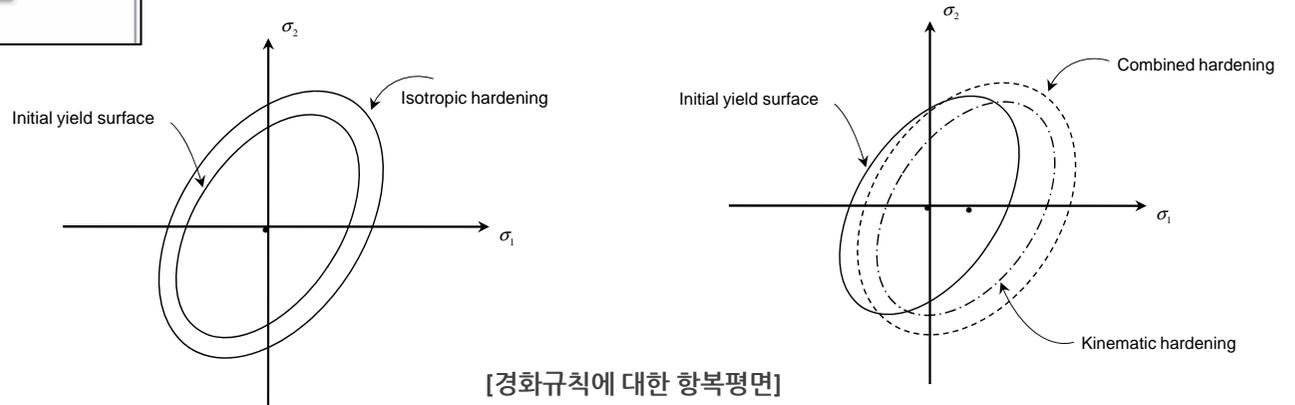
▪ **경화규칙**: 등방성, 이동성, 등방성+이동성

- 소성의 증가량은 등방성 그리고 이동 경화에 대하여 다음과 같이 표현됩니다.

$$\sigma_y = \lambda_c h_y(0) + (1 - \lambda_c) h_y(e_p)$$

- **복합경화계수 ( $\lambda_c, 0 \sim 1$ )** 복합경화의 정도를 나타냅니다.

'1' 등방성, '0' 이동성, '0~1' 등방성+이동성.



## 2. Analysis

### 2.3 재료모델 : Modified UBCSAND (MODS)

- 유효응력을 기초로 한 소성이론을 활용하여 액상화 현상을 모사하기 위하여 개발된 모델
- 2차원 응력 상태에 액상화 현상 모사에 적용하기 위하여 개발된 재료모델을 기초로, 3차원 응력상태에 대해 비선형 해석이 가능하도록 확장
- 탄성영역에서는 기본적으로 압력에 대해 탄성계수가 변화하는 비선형 탄성거동을 보임
- 소성거동은 전단, 압축, 압력차단의 3 가지 항복함수로 결정됨. 특히 전단항복함수는 반복하중(cyclic loading)에 대해 재료의 고밀도화(densification)을 고려

#### ▪ 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Modified UBCSAND

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 일반                                       | 다공성 재료   | 비선형 |
| 기준압                                      | 0.0001 kN/mm <sup>2</sup>  |     |
| 탄성                                       | <input type="radio"/> 선형탄 <input checked="" type="radio"/> 멱법칙   |     |
| 무차원 전단탄성계수                               | 200  |     |
| 전단탄성 지수                                  | 0.5  |     |
| 소성/전단                                    | <input type="checkbox"/> 최대 마찰각 <input type="checkbox"/> 등체적 마찰각 |     |
| 최대 마찰각                                   | 35 [deg]   |     |
| 등체적 마찰각                                  | 32 [deg]   |     |
| 점착력                                      | 1e-006 kN/mm <sup>2</sup>  |     |
| 무차원 전단소성계수                               | 400  |     |
| 전단소성 지수                                  | 0.5  |     |
| 파괴비                                      | 0.99   |     |
| 액상화 후 조정계수                               | 0.01   |     |
| <input checked="" type="checkbox"/> 반복하중 | <input type="checkbox"/> 소성/압력차단                                 |     |
| 지반 고밀도화 조정계수                             | 0.45   |     |
| 인장강도                                     | 0 kN/mm <sup>2</sup>   |     |
| 무차원 켈체계수                                 | 400  |     |
| 소성켈 지수                                   | 0.5  |     |
| 과압밀비(OCR)                                | 1  |     |

- **탄성** : 탄성구간은 유효압력(p')에 대해 탄성계수가 변화하는 비선형 탄성 특성을 보입니다.
  - 허용전단응력은 마찰각과 점착력으로부터 자동 계산됩니다.
  - 포아송비는 압력에 따라 변하지 않으며, 등방성 성질이 유지된다고 가정하여 체적탄성계수는 아래와 같이 계산됩니다..

$$G^e = K_G^e p_{ref} \left( \frac{p' + p_t}{p_{ref}} \right)^{ne}$$

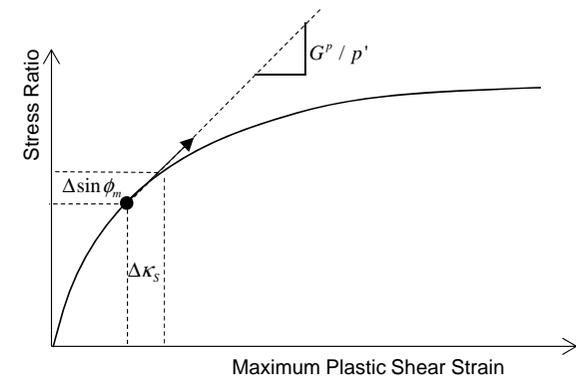
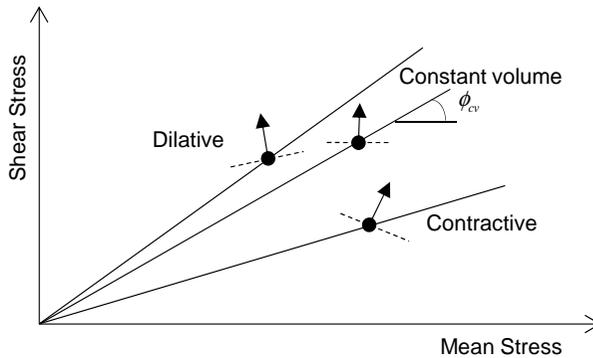
$$K^e = \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} G^e$$

- **소성/전단** : 전단으로 인한 팽창은 최대마찰각과 등체적 마찰각의 차이로 부터 예측됩니다.
  - 소성 전단 변형 증분은 전단응력 비율의 변화와 관련이 있으며, 아래의 설명과 같이 쌍곡선 관계로부터 추정할 수 있습니다.

$$\sin \psi_m = \sin \phi_m - \sin \phi_{cv}$$

$$\Delta \sin \phi_m = \frac{G^p}{p'} \Delta \kappa_s = K_G^p \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^{np-1} \left\{ 1 - \left( \frac{\sin \phi_m}{\sin \phi_p} \right) R_f \right\}^2 \Delta \kappa_s$$

$$\Delta \kappa_s = |\Delta \epsilon_1^p - \Delta \epsilon_3^p|$$



Beatty, M. and Byrne, PM., "An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand," *Geotechnical Special Publication 75(1)*, 1998, pp. 766-777.

Puebla, H., Byrne, PM., and Phillips, R., "Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models," *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 1997, pp 641-657.

[UBCSAND 모델에 대한 참고문헌]

## 2. Analysis

### 2.3 재료모델 : Modified UBCSAND (MODS)

특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Modified UBCSAND

|  |   |                           |
|--|---|---------------------------|
| 일반                                       | 다공성 재질  | 비선형                       |
| 기준압                                      | 선형탄성  | 0.0001 kN/mm <sup>2</sup> |
| 탄성                                       | <input type="radio"/> 선형탄<br><input checked="" type="radio"/> 멱법칙 |                           |
| 무차원 전단탄성계수                               |   | 200                       |
| 전단탄성 지수                                  |   | 0.5                       |
| 소성/전단                                    |   |                           |
| 최대 마찰각                                   |   | 35 [deg]                  |
| 등체적 마찰각                                  |   | 32 [deg]                  |
| 점착력                                      |   | 1e-006 kN/mm <sup>2</sup> |
| 무차원 전단소성계수                               |   | 400                       |
| 전단소성 지수                                  |   | 0.5                       |
| 파괴비                                      |   | 0.99                      |
| 액상화 후 조정계수                               |   | 0.01                      |
| <input checked="" type="checkbox"/> 반복거동 |   |                           |
| 지반 고밀도화 조정계수                             |   | 0.45                      |
| <input type="checkbox"/> 소성/압력차단         |   |                           |
| 인장강도                                     |   | 0 kN/mm <sup>2</sup>      |
| <input type="checkbox"/> 소성/캡            |   |                           |
| 무차원 캡체적계수                                |   | 400                       |
| 소성캡 지수                                   |   | 0.5                       |
| 과압밀비(OCR)                                |   | 1                         |

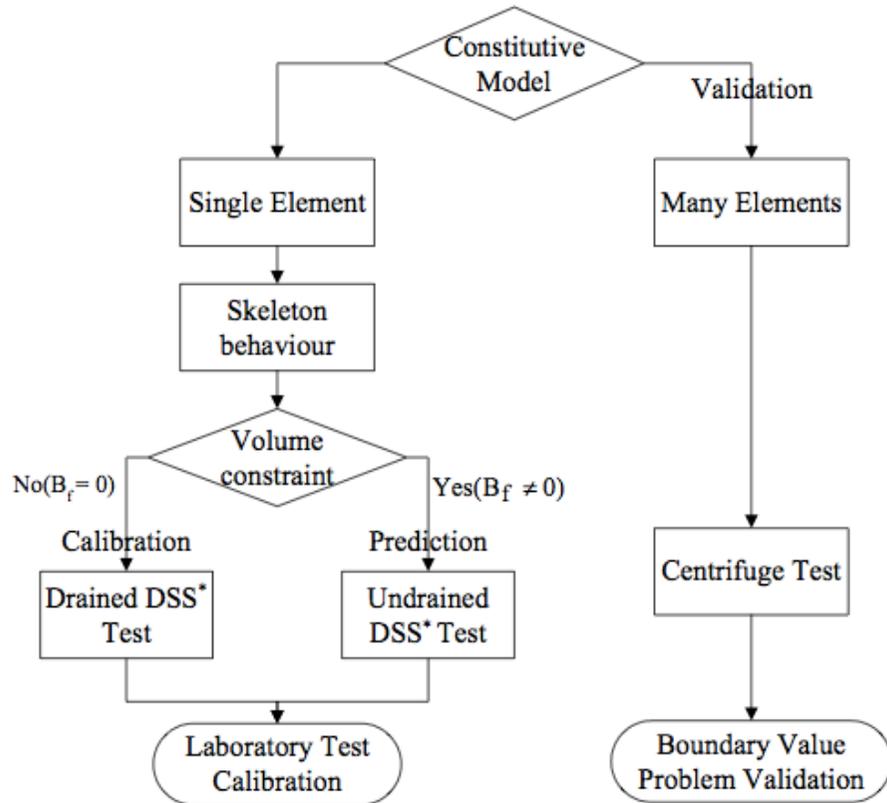
| 파라미터        | 항목             | 설명                              |
|-------------|----------------|---------------------------------|
| Pref        | 기준압            | 현장 토사층 중간 깊이의 수평응력              |
| 선형탄성 / 멱법칙  |                |                                 |
| $K_G^e$     | 무차원 전단탄성지수     | 무차원                             |
| $n_e$       | 전단탄성계수         | 무차원                             |
| 소성 / 전단     |                |                                 |
| $\phi_p$    | 최대 마찰각         | MC 모델의 강도정수                     |
| $\phi_{cv}$ | 등체적 마찰각        |                                 |
| C           | 점착력            | MC 모델의 강도정수                     |
| $K_G^p$     | 무차원 전단소성계수     | 무차원                             |
| $n_p$       | 전단소성 지수        | 무차원                             |
| $R_f$       | 파괴비 (qf / qa)  | 0.7~0.99 (< 1), 상대다짐도 증가에 따라 감소 |
| $F_{post}$  | 액상화 후 조정계수     | 잔류 전단계수                         |
| $F_{dens}$  | 지반 고밀도화 조정계수   | 반복 거동                           |
| 고급 파라미터     |                |                                 |
| Pcut        | 소성/압력차단 (인장강도) |                                 |
| $K_B^p$     | 무차원 캡체적계수      |                                 |
| $m_p$       | 소성캡 지수         |                                 |
| OCR         | 과압밀비           |                                 |

## 2. Analysis

### 2.3 재료모델 : Modified UBCSAND (모델 검증) (MODS)

- 단일하중, 반복하중에 대한 배수 drained Direct Simple Shear (DSS) 시험
- 등 체적 DSS 시험 (비배수 조건)
- 단일요소에 대한 시험과 STP 시험에 의한 보정 -  $((N_1)_{60}$  : 보정된 SPT 타격 횟수 (clean sand))

▪ 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Modified UBCSAND



\* DSS stands for Direct Simple Shear.

$$K_G^e = 21.7 \times 20.0 \times (N_1)_{60}^{0.333}$$

$$30^\circ < \phi_{cv} < 34^\circ$$

$$\nu = 0.0163$$

$$K_G^p = K_G^e (N_1)_{60}^2 \times 0.003 + 100.0$$

$$ne = 0.5$$

$$np = 0.4$$

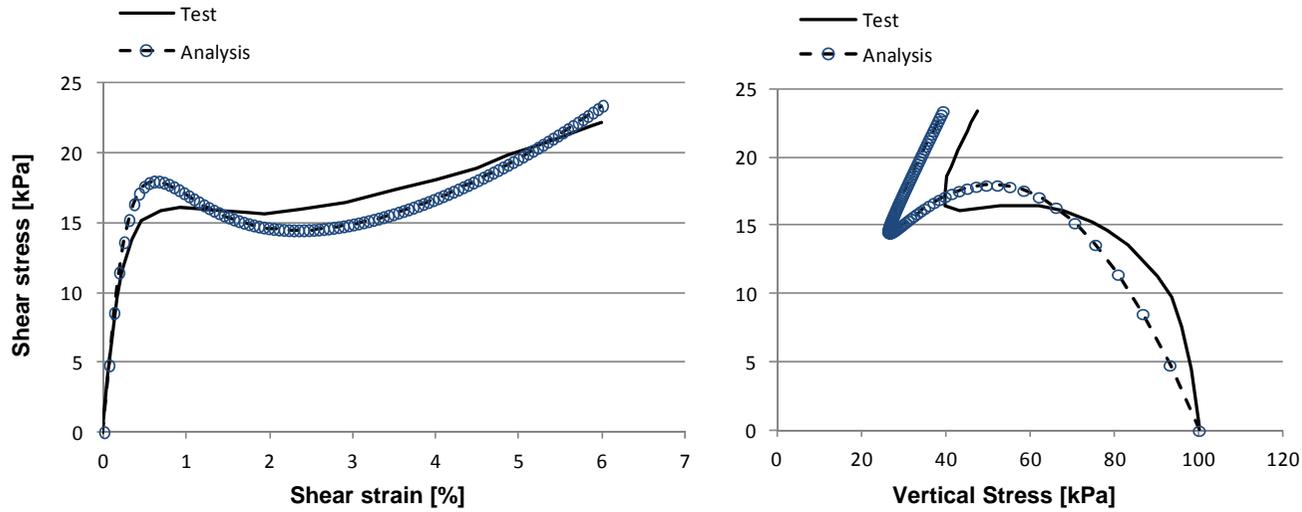
$$\phi_p = \begin{cases} \phi_{cv} + (N_1)_{60} / 10.0 & ((N_1)_{60} < 15.0) \\ \phi_{cv} + (N_1)_{60} / 10.0 + \max\left(0.0, \frac{(N_1)_{60} - 15}{5}\right) & ((N_1)_{60} \geq 15.0) \end{cases}$$

$$R_f = 1.1 \times (N_1)_{60}^{-0.15}$$

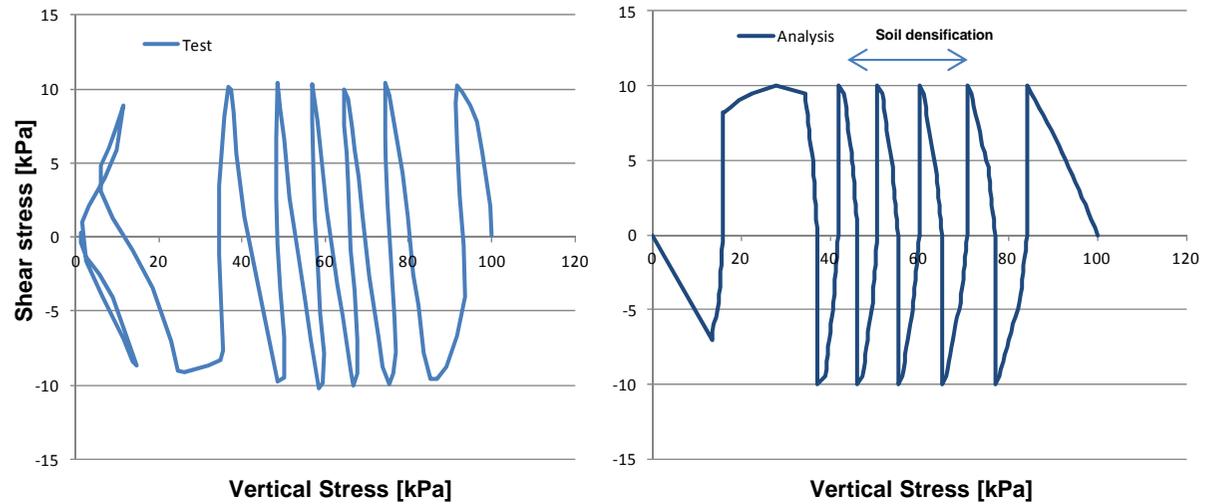
[입력변수와 보정 관계식]

## 2. Analysis

### 2.3 재료모델 : Modified UBCSAND (모델 검증) (MODS)



[Undrained DSS 시험과 해석 결과비교 (Monotonic)]



[Undrained DSS 시험과 해석 결과비교 (Cyclic)]

## 2. Analysis

### 2.4 재료모델 : Sekiguchi - Ohta (개요) (MODS)

- Sekiguchi와 Ohta에 의해 개발된 이래로 일본에서 널리 사용되고, 여전히 개선되고 있는 모델
- **한계상태이론을 근거한 모델로써 Modified Cam Clay(MCC)와 유사한 형태의 모델**
- Inviscid(비점성)와 Viscid(점성) 타입이 있으며, 이 중 Inviscid 타입은 시간 종속성이 없는 소성 모델임
- 응력으로 인한 이방성 -  $K_0$  의존적 항복함수 : 지반의 초기 응력계산을 위해  $K_0$ 값이 반드시 적용 되어야함 ( $K_0$  이방성 적용불가)

$$f_{so} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \bar{\eta} - \varepsilon_v^p = 0$$

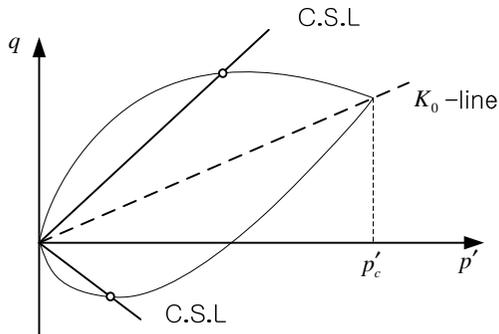
$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{s_{ij}}{p} - \frac{s_{cij}}{p_c} \right) \left( \frac{s_{ij}}{p} - \frac{s_{cij}}{p_c} \right)}$$

$K_0 = 1$

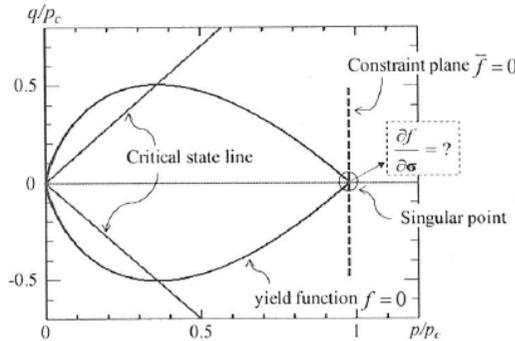
$$f_{CC} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \frac{q}{p} - \varepsilon_v^p = 0$$

$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{s_{ij}}{p} \right) \left( \frac{s_{ij}}{p} \right)} = \frac{q}{p}$$

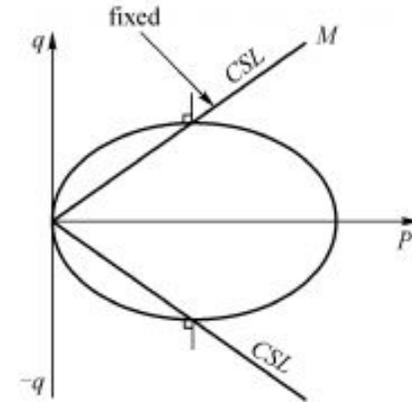
$$f_{MCC} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \ln\left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2}\right) - \varepsilon_v^p = 0$$



[Sekiguchi-Ohta (Inviscid)]



[Cam Clay]



[Modified Cam Clay]

[항복함수 :  $K_0=1$ 인 경우, Cam Clay 모델과 Sekiguchi-Ohta 모델은 동일]

- 1) 위의 방정식들의 첫번째 항은 동일합니다.
- 2) 각 방정식의 두 번째 항은, **부피 변화를 나타내는 항으로**, 정수압 응력에 대한 전단 응력의 비율의 변화를 의미합니다.

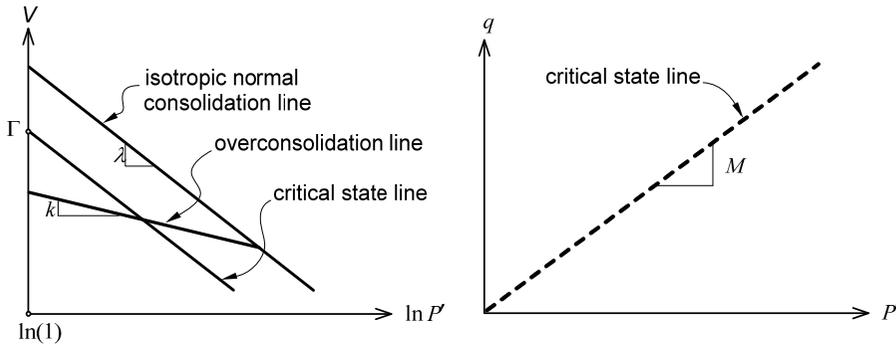
## 2. Analysis

### 2.4 재료모델 : Sekiguchi - Ohta (Inviscid) (MODS)

- 시간중속성이 없는 소성모델로 탄소성 거동을 모사
- MCC 와 여러가지 특징을 공유하지만, 정규압밀의  $K_0$  응력 상태를 고려하여 비가역적인 체적 팽창을 엄밀하게 모사 한다는 차이가 있음  
단, 탄성계수의 증감량이나 이방성 응력상태를 고려할 수 없음

#### ▪ 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Sekiguchi - Ohta (Inviscid)

|                        |   |                                   |      |
|------------------------|---|-----------------------------------|------|
| 일반                     | 다공성 재료  | 비선형                               | 시간의존 |
| 과압밀비 (OCR)             | <input type="text" value="1"/>                    |                                   |      |
| 정규압밀선기울기 ( $\lambda$ ) | <input type="text" value="0.3"/>                  |                                   |      |
| 과압밀선기울기 ( $\kappa$ )   | <input type="text" value="0.05"/>                 |                                   |      |
| 한계상태선 기울기 ( $M$ )      | <input type="text" value="1"/>                    |                                   |      |
| 정규압밀 응력비               | <input type="text" value="0.65"/>                 |                                   |      |
| $P_c$                  | <input type="text" value="0"/> kN/mm <sup>2</sup> | <input type="checkbox"/> 사용자 정의   |      |
|                        | <input type="text" value="0"/> kN/mm <sup>2</sup> | <input type="checkbox"/> 허용 인장 응력 |      |



| 파라미터        | 설명               | 추천 값   |
|-------------|------------------|--|
| 비선형         |                  |  |
| $\lambda$   | 정규압밀선 기울기        | $C_c / 2.303 / (1 + e_0)$                                    |
| $\kappa$    | 과압밀선 기울기         | $C_s / 2.303 / (1 + e_0)$<br>( $C_c / 5$ 개략적인 추정값)           |
| $M$         | 한계상태선 기울기        | $6 \times \sin\Phi' / (3 - \sin\Phi')$<br>( $\Phi'$ : 내부마찰각) |
| $K_{Onc}$   | 정규압밀 응력비         | $1 - \sin\Phi' (< 1)$  |
| 캡 항복면       |                  |  |
| OCR / $P_c$ | 과압밀비 /<br>선행압밀하중 | 두 개의 값을 동시에 입력하는<br>경우, $P_c$ 값이 우선 고려됨                      |
| $T_{allow}$ | 허용인장응력           | * 참고   |

#### \* 참고 : 허용 인장 응력

Sekiguchi - Ohta 모델의 파괴기준은 인장응력의 발생을 허용하지 않습니다. 하지만, 다양한 조건에서 인장응력이 발현될 수 있기 때문에(예 : 성토로 인해 발생하는 인접 지반의 융기)이러한 재료모델의 한계를 극복하기 위해 '허용 인장응력'의 범위를 설정할 수 있습니다.

적절한 '허용 인장응력'의 값을 얻기 위해서는 반복해석을 통해, 성토하중이나 지반 파괴로 인해 발생하는 인장응력 값 보다 큰 값을 입력해야 합니다. 하지만, 선행압밀하중을 고려하는 경우, 허용 인장응력은 선행압밀하중 값을 초과할 수 없습니다. 선행압밀하중 값은 OCR 값으로부터 자동 계산되며 초기에 입력된 허용인장응력 값을 고려하여 계산됩니다.

## 2. Analysis

### 2.5 재료모델 : Sekiguchi - Ohta (Viscid) (MODS)

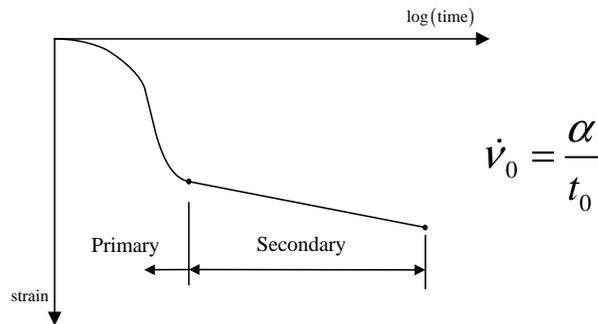
- 지반의 크리프 거동을 모사하기 위한 다양한 점소성 이론 중에서, 비정상성 흐름면 이론(nonstationary flow surface theory)을 따르는 모델임
- 비선형 파라미터는 Inviscid와 동일하고, 시간중속 파라미터를 추가로 입력 받음

특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Sekiguchi - Ohta (Viscid)

|                         |                                   |                                   |                    |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 일반                      | 다공성 재질                            | 비선형                               | 시간의존               |
| 과압밀비 (OCR)              |                                   | <input type="text" value="1"/>    |                    |
| 정규압밀선 기울기 ( $\lambda$ ) |                                   | <input type="text" value="0.3"/>  |                    |
| 과압밀선 기울기 ( $\kappa$ )   |                                   | <input type="text" value="0.05"/> |                    |
| 한계상태선 기울기 ( $M$ )       |                                   | <input type="text" value="1"/>    |                    |
| 정규압밀 응력비                |                                   | <input type="text" value="0.65"/> |                    |
| $P_c$                   | <input type="checkbox"/> 사용자 정의   | <input type="text" value="0"/>    | kN/mm <sup>2</sup> |
|                         | <input type="checkbox"/> 허용 인장 응력 | <input type="text" value="0"/>    | kN/mm <sup>2</sup> |

|          |        |                                     |       |
|----------|--------|-------------------------------------|-------|
| 일반       | 다공성 재질 | 비선형                                 | 시간의존  |
| 2차압축계수   |        | <input type="text" value="0.002"/>  |       |
| 초기체적변형속도 |        | <input type="text" value="1e-008"/> | 1/min |

\* 참고 : 시간의존



| 파라미터        | 설명               | 추천값  |
|-------------|------------------|--|
| 비선형         |                  |  |
| $\lambda$   | 정규압밀선 기울기        | $C_c / 2.303 / (1 + e_0)$                                    |
| $\kappa$    | 과압밀선 기울기         | $C_s / 2.303 / (1 + e_0)$<br>( $C_c / 5$ 개략적인 추정값)           |
| $M$         | 한계상태선 기울기        | $6 \times \sin\Phi' / (3 - \sin\Phi')$<br>( $\Phi'$ : 내부마찰각) |
| KOnc        | 정규압밀 응력비         | $1 - \sin\Phi' (< 1)$  |
| 캡 항복면       |                  |  |
| OCR / $P_c$ | 과압밀비 /<br>선행압밀하중 | 두 개의 값을 동시에 입력하는 경우,<br>$P_c$ 값이 우선 고려됨                      |
| $T_{allow}$ | 허용인장응력           | * 참고   |
| 시간의존        |                  |  |
| $\alpha$    | 2차압축계수           | $C_c / 20$ (개략적인 추정값)  |
| $\dot{v}_0$ | 초기체적변형속도         | * 참고   |
| $t_0$       | 1차압밀 종료시간        | * 참고   |

## 2. Analysis

### 2.5 재료모델 : Sekiguchi - Ohta (입력 파라미터) (MODS)

- 모델의 입력값들은 삼축압축 시험으로부터 구해짐
- 아래의 경험적 관계식으로 입력 물성치를 추정 (Karibe Method)

| 설명   | 파라미터   | 파라미터                 | 설명          | 추천값              |  |
|--|--------|----------------------|-------------|------------------|--|
| 소성지수   |        | $I_p$                |             |                  |  |
| 압축지수   |        | $C_c$                |             |                  |  |
| 배수 간격  | 단위: cm | $H$                  |             |                  |  |
| 비선형 파라미터   |        |                      |             |                  |  |
| $\lambda = 0.015 + 0.007I_p$                     |        | $\lambda = 0.434C_c$ | $\lambda$   | 정규압밀선 기울기        | $C_c / 2.303 / (1 + e_0)$                                      |
| $e_0 = 3.78\lambda + 0.156$                      |        |                      | $\kappa$    | 과압밀선 기울기         | $C_s / 2.303 / (1 + e_0)$<br>( $C_c / 5$ 개략적인 추정값)             |
| $\sin \phi' = 0.81 - 0.233 \log I_p$             |        |                      | M           | 한계상태선 기울기        | $6 \times \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$<br>( $\phi'$ : 내부마찰각) |
| $\log c_v = -0.025I_p - 0.25 \pm 1 (cm^2 / min)$ |        |                      | KOnc        | 정규압밀 응력비         | $1 - \sin \phi' (< 1)$   |
| $T_v(90\%) = 0.848$                              |        |                      | 캡 항복면 파라미터  |                  |  |
| $\dot{v}_0 = \frac{\alpha}{H^2 T_v(90\%) c_v}$   |        |                      | OCR / Pc    | 과입밀비 /<br>선행압밀하중 | 두 개의 값을 동시에 입력하는 경우,<br>Pc 값이 우선 고려됨                           |
|  |        |                      | $T_{allow}$ | 허용인장응력           | * 참고   |
|  |        |                      | 시간의존 파라미터   |                  |  |
|  |        |                      | $\alpha$    | 2차압축계수           | $C_c / 20$ (개략적인 추정값)  |
|  |        |                      | $\dot{v}_0$ | 초기체적변형속도         | * 참고   |
|  |        |                      | $t_0$       | 1차압밀 종료시간        | * 참고   |

## 2. Analysis

### 2.5 재료모델 : Sekiguchi - Ohta (모델 검증) (MODS)

- 비배수 삼축압축 & 인장 시험 - 변형율

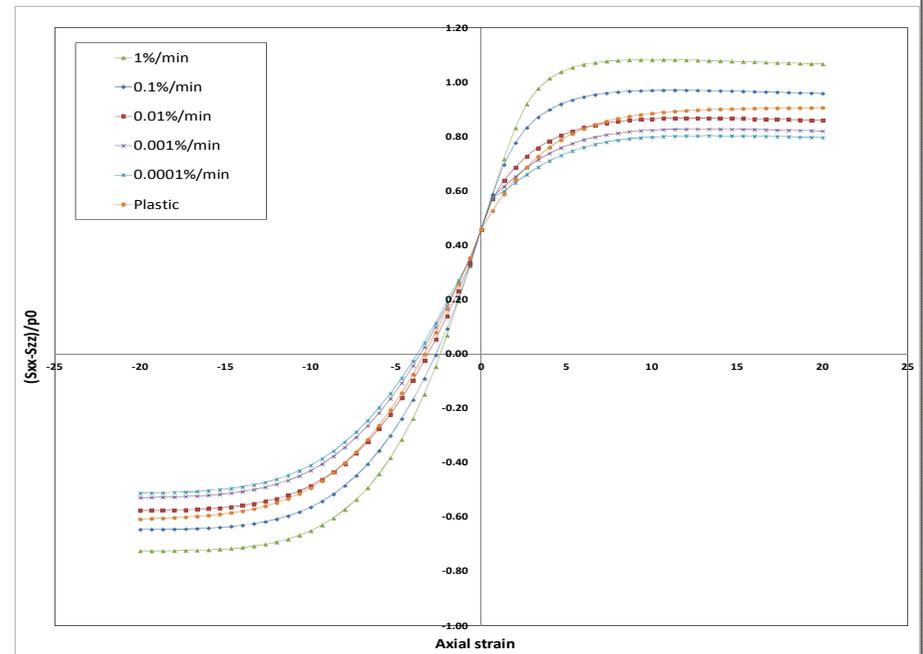
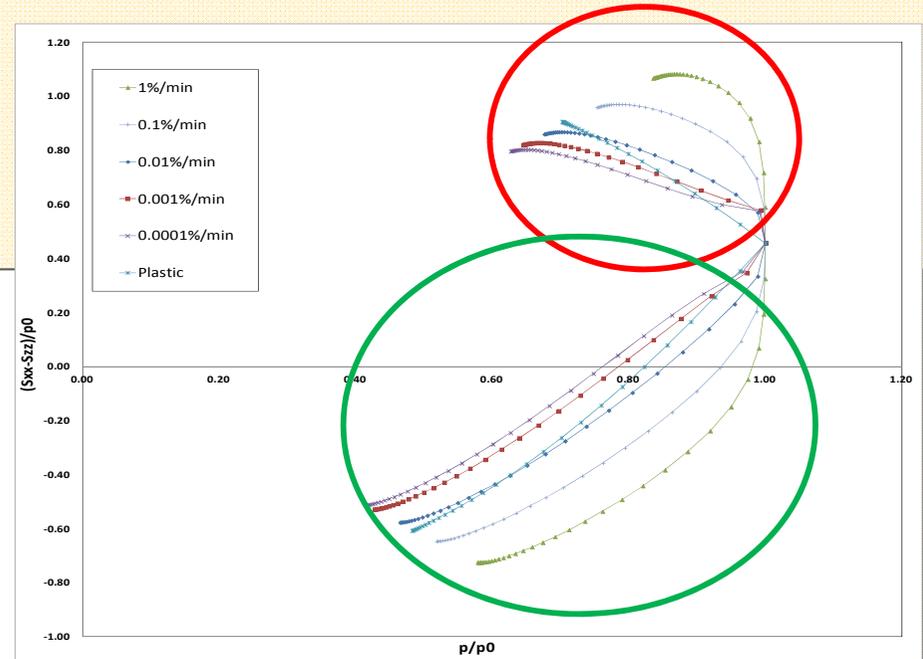
$\lambda = 0.3325$     $\kappa = 0.15$   
 $M = 1.12$     $e_0 = 1.5$   
 $K_0^{nc} = 0.65$   
 $\nu = 0.364$

strain : 20%

$t_1 : 2.0e1 \text{ min.}$   
 $t_2 : 2.0e2 \text{ min.}$   
 $t_3 : 2.0e3 \text{ min.}$   
 $t_4 : 2.0e4 \text{ min.}$   
 $t_5 : 2.0e5 \text{ min.}$

비배수강도 :  $\max \frac{|\sigma_{xx} - \sigma_{zz}|}{2}$

비배수 강도는 전단율에 대한 의존적 거동을 보이며, 압축전단과 인장전단에 대해 다르게 나타납니다.



Sekiguchi, H. and Ohta, H., "Induced anisotropy and time dependency in clays", 9th ICSMFE, Tokyo, Constitutive equations of Soils, 1977, 229-238

## 2. Analysis

### 2.6 재료모델 : Generalized Hoek-Brown (MODS)

- 암반은 일반 사질토/점성토와는 다른 거동을 나타내기 때문에, Hoek과 Brown은 암반에 적합한 파괴함수를 제안
- Hoek과 Brown이 제안한 **Hoek-Brown 모델은 암반의 거동을 모사하는 대표적인 모델임** (흙 재료보다 강성과 강도가 큰 재료)
- Generalized Hoek-Brown 모델은 암반 분류법 중 하나인 Rock Mass Rating을 이용하여 경험적인 데이터를 수치적으로 접목한 모델임
- Generalized Hoek-Brown 항복함수의 계수값( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ )은 아래의 식과 같이 지질강도지수(GSI) 및 교란 계수(D)로 연관된 계수값으로 나타낼 수 있음
- 강도감소법에 적용 가능 (**비탈면 안정해석**)

#### 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Generalized Hoek-Brown

|                                    |        |                   |       |
|------------------------------------|--------|-------------------|-------|
| 일반                                 | 다공성 재질 | 비선형               | 시간 종속 |
| 초기 $m_b$ 값                         | 10     | ...               |       |
| 초기 $s$ 값                           | 0.004  |                   |       |
| 초기 $a$ 값                           | 0.5    |                   |       |
| <input type="checkbox"/> 잔류상태 파라미터 |        |                   |       |
| 잔류상태 $m_b$ 값                       | 0      | ...               |       |
| 잔류상태 $s$ 값                         | 0      |                   |       |
| 잔류상태 $a$ 값                         | 0      |                   |       |
| 일축압축강도                             | 30000  | kN/m <sup>2</sup> |       |
| 팽창각                                | 30     | [deg]             |       |

Hoek Brown 파라미터

무결암 파라미터 ( $m_i$ )

지질강도지수 (GSI)

교란계수 (D)

확인 취소

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

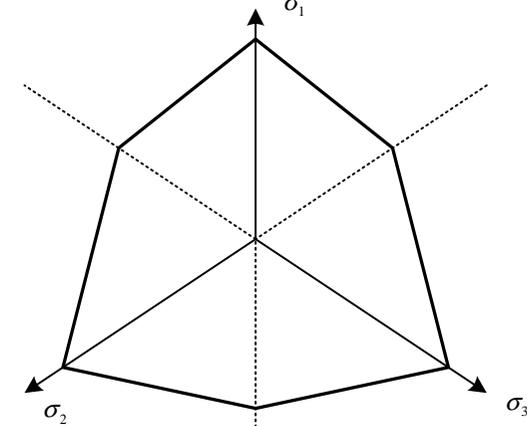
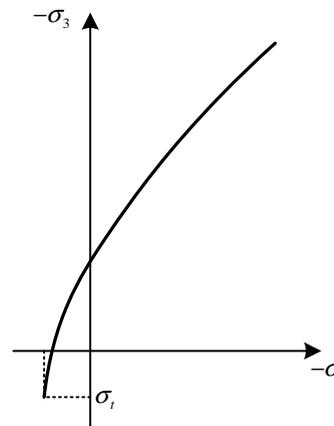
$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

$$f_{HB} = (\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_{ci} \left( -\frac{m_b}{\sigma_{ci}} \sigma_1 + s \right)^a$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

[항복 함수]



[주응력 평면에서의 항복면]

## 2. Analysis

### 2.6 재료모델 : Generalized Hoek-Brown (입력값 정리, Geological Index (Hoek,1999))

| Grade | Term             | Uniaxial Comp. Strength (MPa) | Field estimate of strength  | Examples  |
|-------|------------------|-------------------------------|---|---|
| R6    | Extremely strong | > 250                         | Specimen can be chipped with a geological hammer  | Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite  |
| R5    | Very strong      | 100 – 250                     | Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.   | Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff |
| R4    | Strong           | 50 – 100                      | Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.   | Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale   |
| R3    | Medium strong    | 25 – 50                       | Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.     | Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone   |
| R2    | Weak             | 5 – 25                        | Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer. | Chalk, rocksalt, potash.  |
| R1    | Very weak        | 1 – 5                         | Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.                               | Highly weathered or altered rock.   |
| R0    | Extremely weak   | 0.25 – 1                      | Indented by thumbnail   | Stiff fault gouge   |

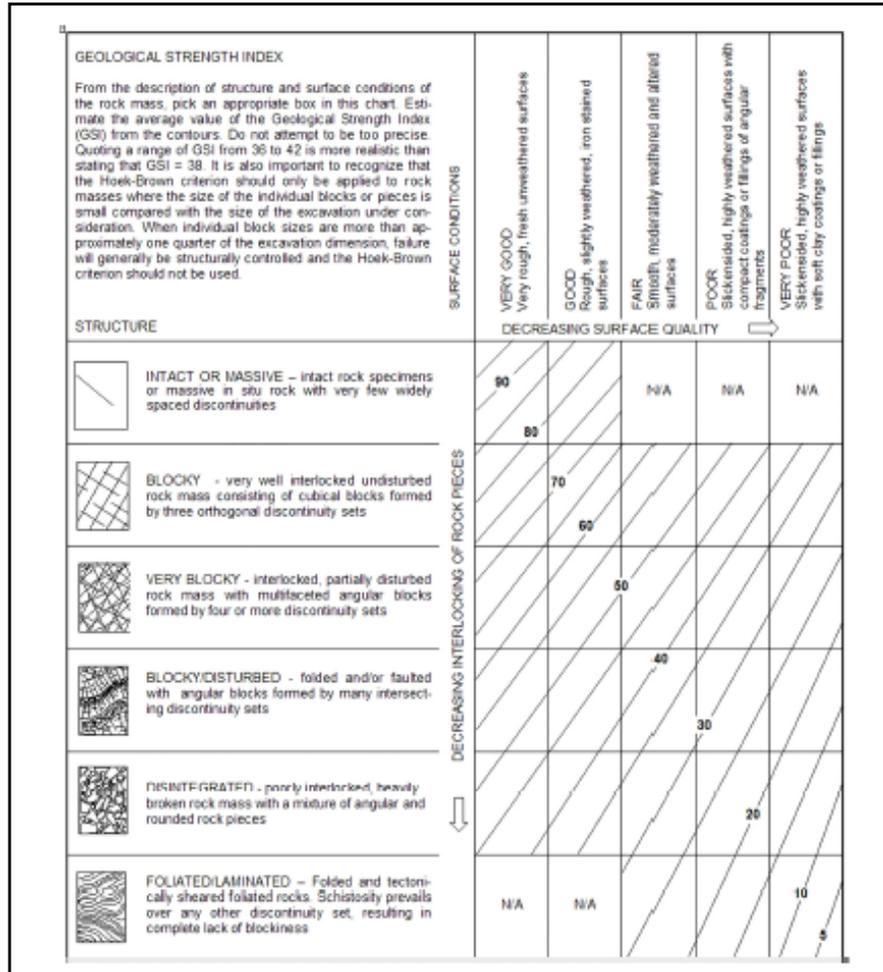
[일축압축강도]

| Rock type   | Class                     | Group     | Texture   |                                |   |             |
|-------------|---------------------------|-----------|---|--------------------------------|---|-------------|
|             |                           |           | Coarse  | Medium                         | Fine  | Very fine   |
| SEDIMENTARY | Clastic                   |           | Conglomerate (20)                               | Sandstone 19<br>Greywacke (18) | Siltstone 9                                 | Claystone 4 |
|             | Non - Clastic             | Organic   |   | Chalk 7<br>Coal (8-21)         |   |             |
|             |                           | Carbonate | Breccia (22)                                    | Sparitic Limestone (10)        | Micritic Limestone 8                        |             |
|             |                           | Chemical  |   | Gypstone 16                    | Anhydrite 13                                |             |
| METAMORPHIC | Non Foliated              |           | Marble 9  | Hornfels (19)                  | Quartzite 24                                |             |
|             | Slightly foliated         |           | Migmatite (30)                                  | Amphibolite (25 - 31)          | Mylonites (6)                               |             |
|             | Foliated*                 |           | Gneiss 33                                       | Schists 4 - 8                  | Phyllites (10)                              | Slate 9     |
| IGNEOUS     | Light                     |           | Granite 33<br>Granodiorite (30)<br>Diorite (28) |                                | Rhyolite (16)<br>Dacite (17)<br>Andesite 19 |             |
|             | Dark                      |           | Gabbro 27<br>Norite 22                          | Dolerite (19)                  | Basalt (17)                                 |             |
|             | Extusive pyroclastic type |           | Agglomerate (20)                                | Breccia (18)                   | Tuff (15)                                   |             |

[무결암 파라미터]

## 2. Analysis

### 2.6 재료모델 : Generalized Hoek-Brown (입력값 정리, Geological Index (Hoek,1999))



[지질강도지수(GSI)]

| Appearance of rock mass   | Description of rock mass   | Suggested value of <i>D</i>  |
|---|--|--|
|    | Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.  | <i>D</i> = 0   |
|    | Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed. | <i>D</i> = 0<br><i>D</i> = 0.5<br>No invert                                      |
|   | Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.   | <i>D</i> = 0.8   |
|  | Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.   | <i>D</i> = 0.7<br>Good blasting<br><i>D</i> = 1.0<br>Poor blasting               |
|  | Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.              | <i>D</i> = 1.0<br>Production blasting<br><i>D</i> = 0.7<br>Mechanical excavation |

[교란 값 추정 가이드 (*D*), (0 ~ 1)]

## 2. Analysis

### 2.6 재료모델 : Generalized Hoek-Brown (모델 검증)

- 참고논문

#### The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion

Hammah, R.E., Yacoub, T.E. and Corkum, B.C.

Rocscience Inc., Toronto, ON, Canada

Curran, J.H.

Lassonde Institute, University of Toronto, Toronto, ON, Canada

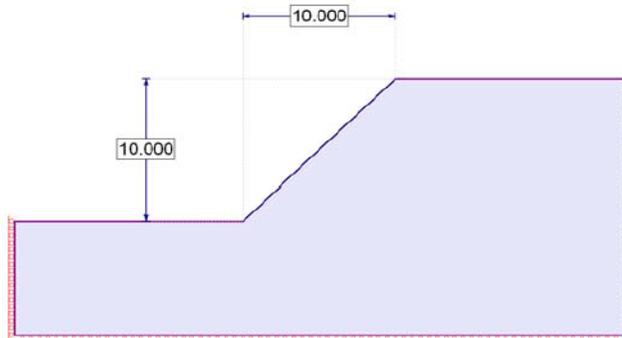


그림. 참고문헌 예제모델의 비탈면 기하형상

Table 1. Properties of the rock mass in the Example 1 slope

| Property  | Value                |
|---|----------------------|
| Young's modulus, E (MPa)                          | 5000                 |
| Poisson's ratio, $\nu$                            | 0.3                  |
| Weight, $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )             | 0.025                |
| Uniaxial compressive strength $\sigma_{ci}$ (MPa) | 30                   |
| GSI   | 5                    |
| Intact rock parameter $m_i$                       | 2                    |
| Disturbance factor, $D$                           | 0                    |
| Parameter $m_b$                                   | 0.067                |
| Parameter $s$                                     | $2.5 \times 10^{-3}$ |
| Parameter $a$                                     | 0.619                |

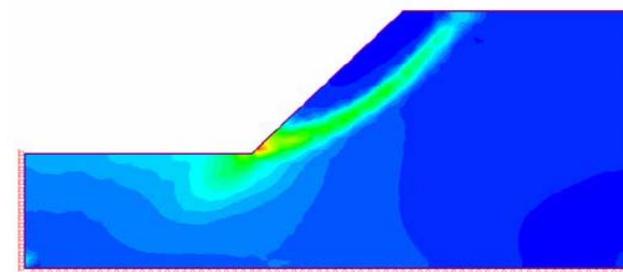
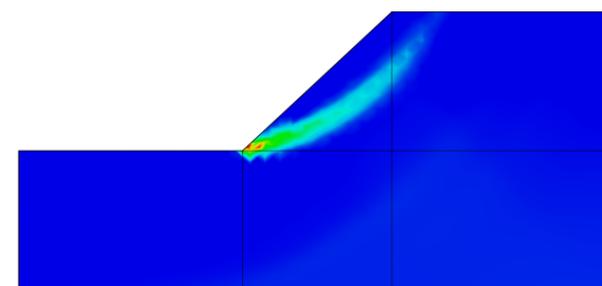
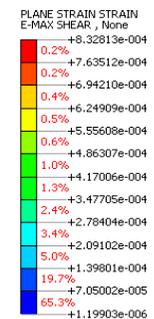


그림. 파괴시점의 최대 전단변형률 결과 컨투어. 강도감소법 해석 결과로부터 얻어진 파괴 컨투어 도시

[참고문헌 - F.S. : 1.15]



[GTSNX 결과 - F.S. : 1.19]



## 2. Analysis

### 2.7 재료모델 : 2D Orthotropic (직교이방성)

- 기하학적 형상으로 인해 수직 수평방향의 강성의 차이가 큰 경우 유용한 재료모델.
- Shell 요소, Plane Stress 요소, 2D Geogrid 요소와 같은 2D 요소에 적용 가능함.
- “E1, E2, V12, G12, G23, G31” 으로 정의되는, 방향에 대한 강성을 입력할 수 있음.

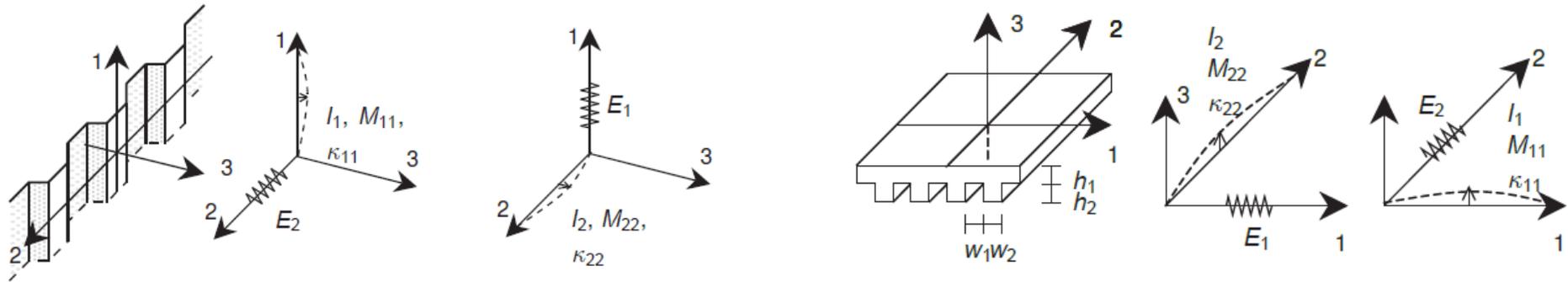
#### 특성/좌표계/함수 > 재료 > 직교이방성 > 2D Orthotropic

| 파라미터1      | 파라미터2                  |
|------------|------------------------|
| 탄성계수 (E1)  | 2 kN/mm <sup>2</sup>   |
| 탄성계수 (E2)  | 1 kN/mm <sup>2</sup>   |
| 포와송비 (V12) | 0.4                    |
| 전단계수 (G12) | 0.8 kN/mm <sup>2</sup> |
| 전단계수 (G23) | 0.4 kN/mm <sup>2</sup> |
| 전단계수 (G31) | 0.4 kN/mm <sup>2</sup> |

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} - \alpha_{11}\Delta T \\ \epsilon_{22} - \alpha_{22}\Delta T \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{31} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{31} & 0 \\ 0 & G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{31} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

[응력-변형률 관계 / 2D]



[직교이방성 적용 예]

## 2. Analysis

### 2.8 재료모델 : Hardening Soil (개선된 Modified Mohr Coulomb 모델: 입력 파라미터)

- 해석 알고리즘을 개선하여 수렴성 향상 : 암시적 후방 오일러법
- 허용인장응력 입력 항목 추가

특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Modified Mohr Coulomb

The screenshot shows the '재료' (Material) dialog box with the following fields and values:

- 번호: 2, 이름: 등방성, 색상: [Green]
- 모델 타입: Modified Mohr-Coulomb, 구조: [ ]
- 일반 탭:
  - 삼축시험 시 접선강성계수(E50ref): 0.05 kN/mm<sup>2</sup>
  - 초기 Oedometer 재하시험 시 접선탄성계수(Eoedref): 0.05 kN/mm<sup>2</sup>
  - 재하시 탄성계수 (Eurref): 0.1 kN/mm<sup>2</sup>
  - 파괴비: 0.9
  - 기준압: 0.0001 kN/mm<sup>2</sup>
  - Power Law 비선형탄성 모델 계수: 0.5
  - 공극률: 0.6
  - 정규압밀 응력비: 0.5
  - 전단마찰각: 36 [deg]
  - 극한 팽창각: 36 [deg]
  - 점착력 (C): 3e-005 kN/mm<sup>2</sup>
  - 캡:
    - OCR: 1
    - Pc0: 3e-008 kN/mm<sup>2</sup>
    - 캡 형상 계수: 0.22
    - 캡 경화 파라미터: 0.5
    - 인장강도: 0 kN/mm<sup>2</sup>
- 전단 경화 파라미터 탭:
  - 전단 경화:
    - 자동계산
    - 경화 함수: [ ]
  - 팽창 절삭:
    - 최대 공극률: 0.5
- 점착력 파라미터 탭:
  - 점착력 증감량: 0 kN/mm<sup>2</sup>
  - 점착력 증감량 기준높이: 0 mm

| 파라미터                       | 설명                          | 추천 값 (kN, m)   |
|----------------------------|-----------------------------|--|
| Soil stiffness and failure |                             |  |
| E50ref                     | 배수 삼축압축 시험의 할선 탄성계수         | $E_i \times (2 - R_f) / 2$ ( $E_i$ = 초기강성)               |
| Eoedref                    | 초기 oedometer 재하시험 시 접선탄성계수  | E50ref   |
| Eurref                     | 재하시 탄성계수                    | 3 x E50ref   |
| m                          | Power Law 비탄성모델 계수          | $0.5 \leq m \leq 1$ (0.5 for hard soil, 1 for soft soil) |
| C (C <sub>inc</sub> )      | 점착력 (Increment of cohesion) | MC model 에서의 입력 값  |
| $\phi$                     | 전단마찰각                       | MC model 에서의 입력 값  |
| $\psi$                     | 극한 팽창각                      | $0 \leq \psi \leq \phi$                                  |
| 고급 파라미터 추천값                |                             |  |
| Rf                         | 파괴비                         | 0.9 (< 1)  |
| Pref                       | 기준압                         | 100  |
| KNC                        | 정규압밀 응력비                    | $1 - \sin\phi$ (< 1)                                     |
| 팽창 절삭 (Tensile Cutoff)     |                             |  |
| Porosity                   | 공극률                         | -  |
| Porosity(Max)              | 최대 공극률                      | 공극률 < 최대 공극률   |
| 캡                          |                             |  |
| OCR / Pc                   | 과압밀비/ 선행압밀압력                | 두 개 값을 동시에 입력하는 경우 선행압밀압력을 우선순위로 고려                      |
| $\alpha$                   | 캡 형상 계수(선행압밀응력의 형상계수)       | KNC 값에서 자동계산   |
| $\beta$                    | 캡 경화 파라미터                   | Eoedref 값에서 자동계산   |
| 인장강도                       |                             |  |
| Tallow                     | 인장강도                        | * Sekiguchi-Ohta model 설명 참고                             |

## 2. Analysis

### 2.9 재료모델 : Ramberg-Osgood (MODS)

- 금속재료의 동역학 모델로 제안된 Ramberg-Osgood이 타츠오카에 의해 수정된 모델로, 비탄성한지 이력모델의 하나로써 2D와 3D 요소에 적용 가능
- 크랙이나 국부 (소성)파괴를 모사하는데 적용 가능
- 적용가능 해석법 : 비선형 정적해석, 시간이력해석, 시공단계 해석, 압밀해석, 완전연계 해석, 강도감소법(비탈면)

#### ▪ 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Ramberg-Osgood

비선형

초기전단탄성계수  kN/mm<sup>3</sup>

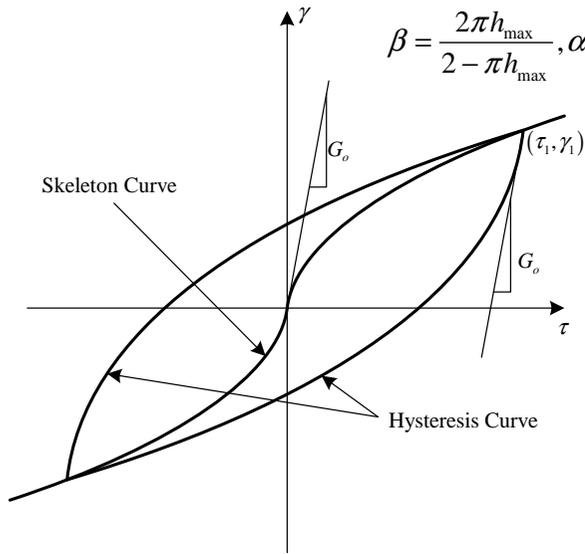
기준변형률

최대감쇠비

전단만 고려

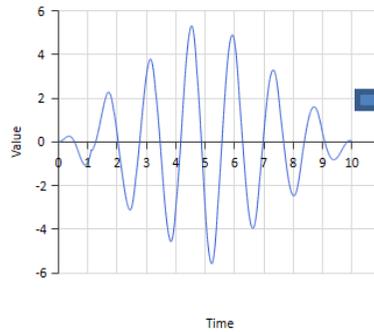
$$G_o \gamma = \tau + \alpha |\tau|^\beta \tau$$

$$\beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}}, \alpha = \left( \frac{2}{\gamma_r G_o} \right)^\beta$$

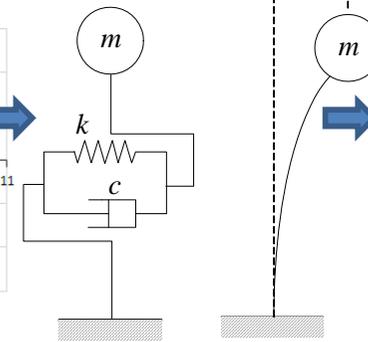


[ Ramberg-Osgood 모델 ]

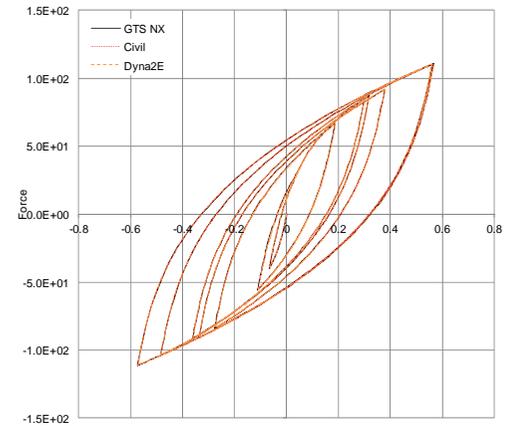
| 파라미터       | 설명   | 참고값  |
|------------|--|--|
| $G_o$      | 초기전단탄성계수   |  |
| $\gamma_r$ | 기준변형률  | $\gamma_r = \frac{\tau}{G_o}$                                  |
| $h_{max}$  | 최대감쇠비  | 0.05 (for soil), $h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$ |
| 전단만 고려     | 체크시 : 전단성분만 독립적으로 거동(Gxy, Gyz, Gzx)<br>미체크시 : 편차응력과 편차변형률을 이용하여 등가 전단탄성계수 계산 (Geq) |  |



[ 시간에 따른 하중값 ]



[ 시스템 ]



[ 결과 ]

[ 검증 예 ]

## 2. Analysis

### 2.10 재료모델 : Hardin-Drnevich (MODS)

- 골격곡선만 제한되어 있는 Hardin-Drnevich 모델에 코쿠쇼가 Masing 법칙을 적용시켜 이력곡선을 정의한 모델
- 비탄성한지 이력모델의 하나로써 2D와 3D 요소에 적용 가능
- **크랙이나 국부 (소성)파괴를 모사하는데 적용 가능**
- 적용 가능 해석법 : 비선형 정적해석, 시간이력해석, 시공단계 해석, 압밀해석, 완전연계 해석, 강도감소법(비탈면)

#### 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Hardin-Drnevich

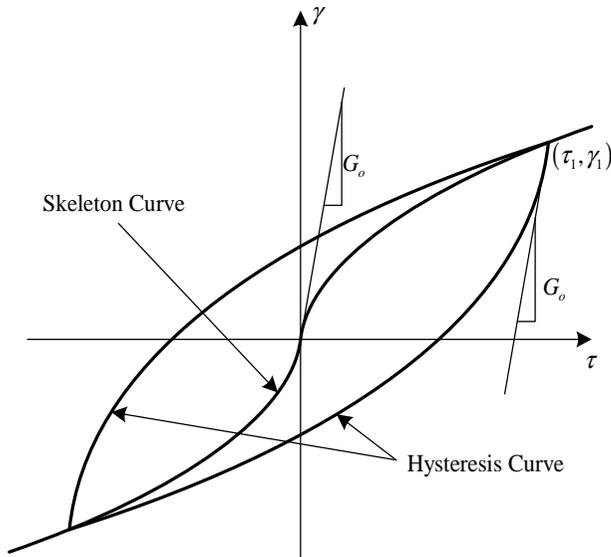
비선형

초기전단탄성계수  kN/mm<sup>3</sup>

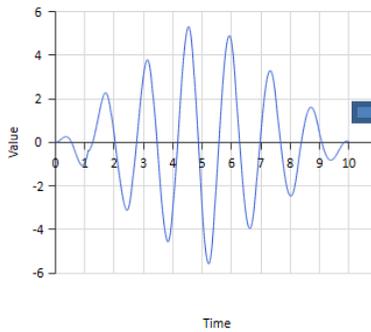
기준변형률

전단만 고려

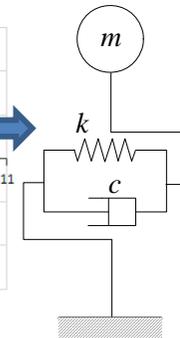
| Parameter  | Description  | Reference  |
|------------|--|--|
| $G_o$      | 초기전단탄성계수   | $\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \left  \frac{\gamma}{\gamma_r} \right }$ |
| $\gamma_r$ | 기준변형률  |  |
| 전단만 고려     | 체크시 : 전단성분만 독립적으로 거동(Gxy, Gyz, Gzx)<br>미체크시 : 편차응력과 편차변형률을 이용하여 등가 전단탄성계수 계산 (Geq) |  |



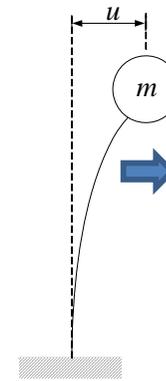
[ Hardin-Drnevich 모델 ]



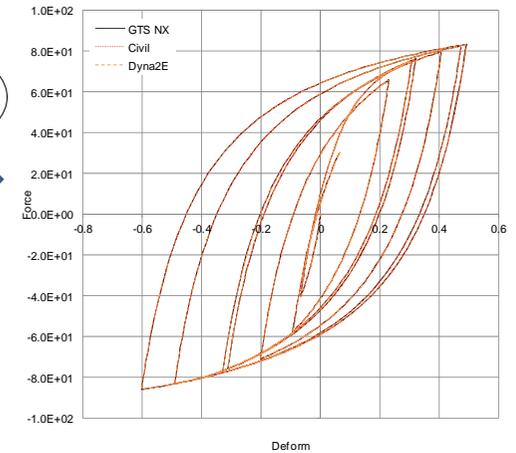
[ 시간에 따른 하중값 ]



[ 시스템 ]



[ 검증 예 ]



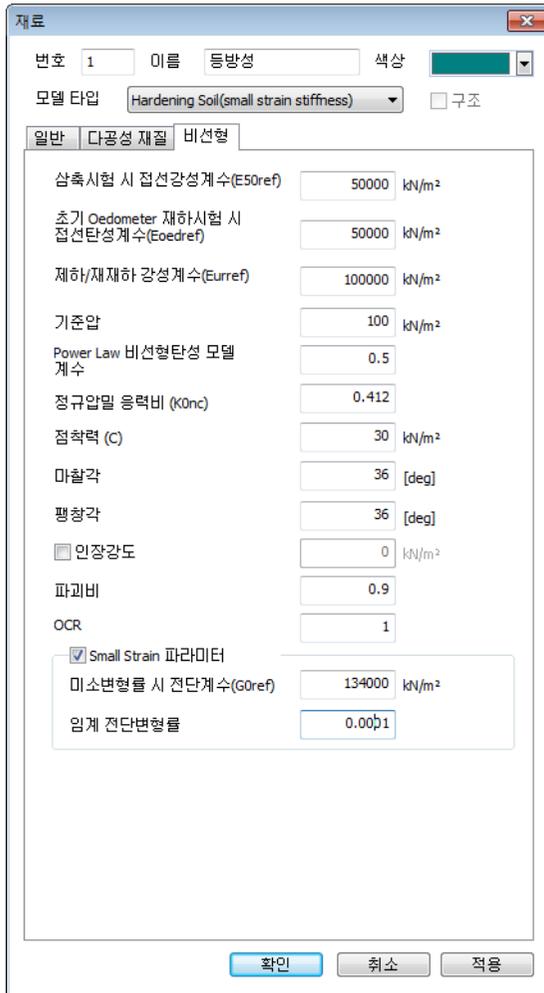
[ 결과 ]

## 2. Analysis

### 2.11 재료모델 : Hardening Soil(small strain stiffness)

- 복합항복면 모델(Double hardening model) - 전단과 압축경화 거동을 모사
- Hardning Soil 모델과 Small Strain overlay 모델을 이용하여 구성, 추가적으로  $G_0^{ref}$  (미소변형률시 전단계수),  $\gamma_{0.7}$  (임계전단변형률, 전단강성이 초기 전단 강성의 70%일 때의 전단변형률) 입력받아, 수정된 Hardin & Drnevich 관계식을 이용함
- 이력곡선은 masing 규칙을 따름

특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Hardening Soil(small strain stiffness)



#### 전단경화:

$$f^s = \frac{2q_a}{E_i} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma_{ps} = 0$$

$q_a$  : 점근(asymptotic) 편차응력

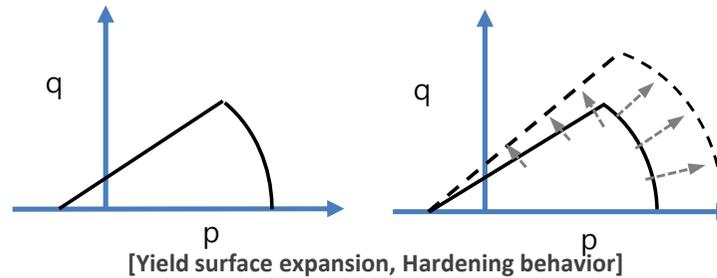
$E_i$  : 초기 탄성계수

$\gamma_{ps}$  : 유효 소성변형률

#### 압축경화:

$$f^c = \frac{\tilde{q}^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2$$

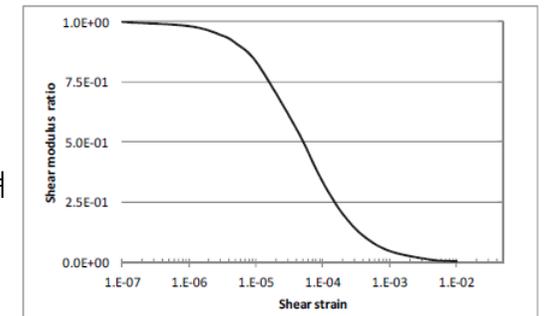
$$\tilde{q} : \sigma_1 + \left(\frac{1}{\delta} - 1\right)\sigma_2 - \frac{1}{\delta}\sigma_3, \quad \delta = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad \alpha : \text{캡형상계수} \quad p_p : \text{선행압밀응력}$$



#### Modified Hardin-Drnevich :

지반의 강성이 변형률의 영역에 따라 비선형적으로 감소하는 영향을 고려

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|}$$



[지반의 강성-변형률 특성 그래프]

#### Masing's rule

- 1) 재하시의 전단 강성은 초기 재하시의 초기 전단 강성과 같다.
- 2) 제하-재재하 곡선의 형상은 초기 재하시와 같으나 곡선의 크기는 2배로 커진다.

## 2. Analysis

### 2.11 재료모델 : Hardening Soil(small strain stiffness) (입력 파라미터) ▪ 특성/좌표계/함수 > 재료 > 등방성 > Hardening Soil(small strain stiffness)

**재료**

번호 1 이름 등방성 색상  

모델 타입 Hardening Soil(small strain stiffness)  구조

일반 다공성 재질 비선형

삼축시험 시 접선강성계수(E50ref)  kN/m<sup>2</sup>

초기 Oedometer 재하시험 시 접선탄성계수(Eoedref)  kN/m<sup>2</sup>

제하/재제하 강성계수(Eurref)  kN/m<sup>2</sup>

기준압  kN/m<sup>2</sup>

Power Law 비선형탄성 모델 계수

정규압밀 응력비 (K0nc)

점착력 (C)  kN/m<sup>2</sup>

마찰각  [deg]

팽창각  [deg]

인장강도  kN/m<sup>2</sup>

파괴비

OCR

Small Strain 파라미터

미소변형률 시 전단계수(G0ref)  kN/m<sup>2</sup>

임계 전단변형률

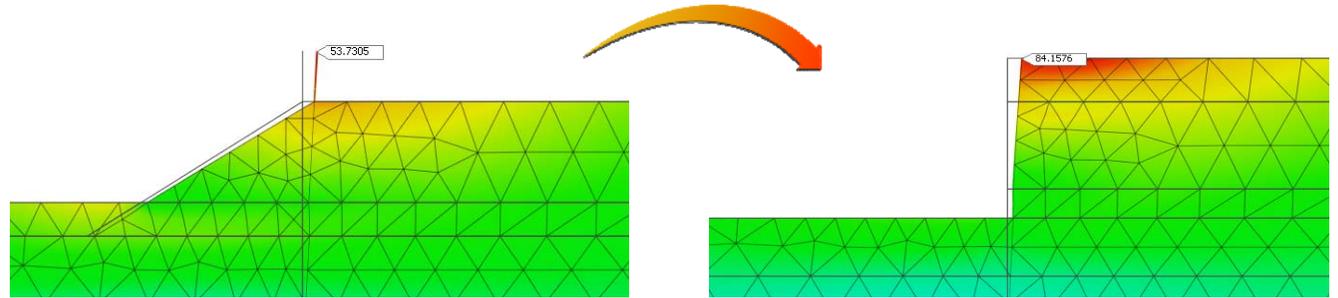
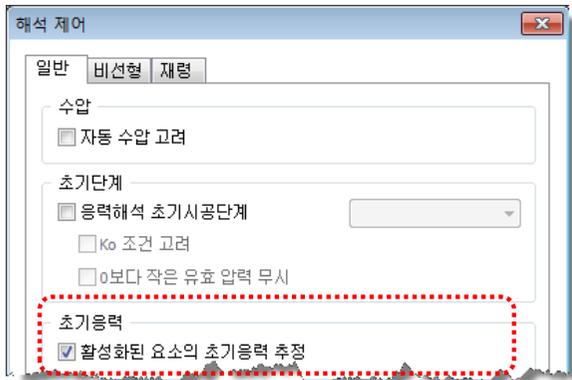
| 파라미터                       | 설명   | 추천값  |
|----------------------------|--|--|
| Soil stiffness and failure |  |  |
| E50ref                     | 배수 삼축압축 시험의 할선 탄성계수  | $E_i \times (2 - R_f) / 2$ ( $E_i$ = 초기강성)   |
| Eoedref                    | 초기 oedometer 재하시험 시 접선탄성계수                                   | E50ref   |
| Eurref                     | 제하/재제하 탄성계수  | 3 x E50ref   |
| m                          | Power Law 비탄성 모델 계수  | $0.5 \leq m \leq 1$ ( <b>0.5</b> for hard soil, 1 for soft soil)                           |
| C                          | 점착력  | MC model에서 입력값   |
| $\phi$                     | 전단마찰각  | MC model에서 입력값   |
| $\psi$                     | 극한마찰각  | $0 \leq \psi \leq \phi$  |
| 고급파라미터                     |  |  |
| 파괴비                        | 파괴비 (qf / qa)  | 0.9 (< 1)  |
| Pref                       | 기준압  | 100  |
| K0NC                       | 정규압밀 응력비   | $1 - \sin \phi$ (< 1)  |
| 인장강도                       | 인장강도   | -  |
| OCR                        | 과압밀비   | -  |
| Small strain 파라미터          |  |  |
| G0ref                      | 미소변형률 시 전단계수   | $G_0^{ref} = 33 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} [MPa]$ for $p^{ref} = 100 [kPa]$                |
| 임계전단변형률                    | 전단강성이 초기 전단 강성의 70%일 때의 전단변형률 ( $G_s = 0.722G_0$ 일 때의 전단변형률) | $\gamma_{0.7} \approx \frac{1}{9G_0} [2C(1 + \cos 2\phi) - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\phi]$ |

## 2. Analysis

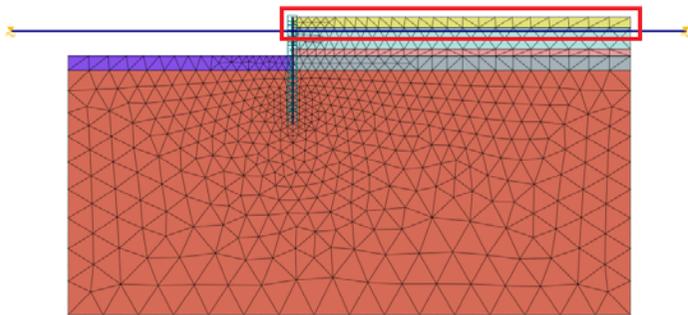
### 2.12 활성화된 요소의 초기응력 추정

- 옵션이 적용하지 않는 경우 : GTS NX에서 비선형 재료들(MCC, SSC, MMC, UBC Sand 등)은 그 재료특성을 가진 요소가 활성화되는 단계에서는 선형으로 적용됨
  - 선형 재료로 해석할 경우 다소 과하게 수평방향으로의 변형이 발생
  - 성토된 요소의 압력이 작거나 인장이 걸리는 문제 발생(성토 다음 단계에서 바로 항복(yield)이 발생하는 문제가 생길 수 있음)
- 옵션을 적용하는 경우 : 계산된 초기응력으로부터 소성상태를 판정하고, 소성 상태인 경우에는 그에 맞는 응력으로 업데이트됨

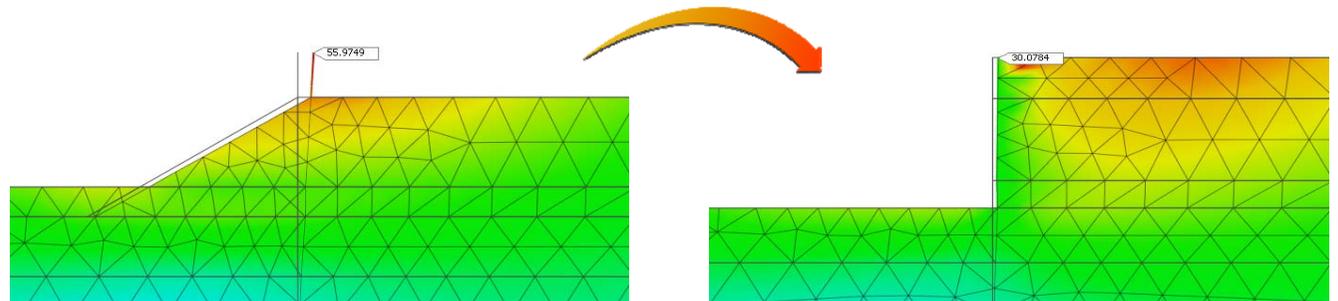
#### ▪ 해석 > 해석케이스 > 추가 > 해석제어



[ 활성화된 요소의 초기응력을 추정하지 않는 경우 - 수평변위 : 84mm ]



[ 가시설 굴착 모델링 ]



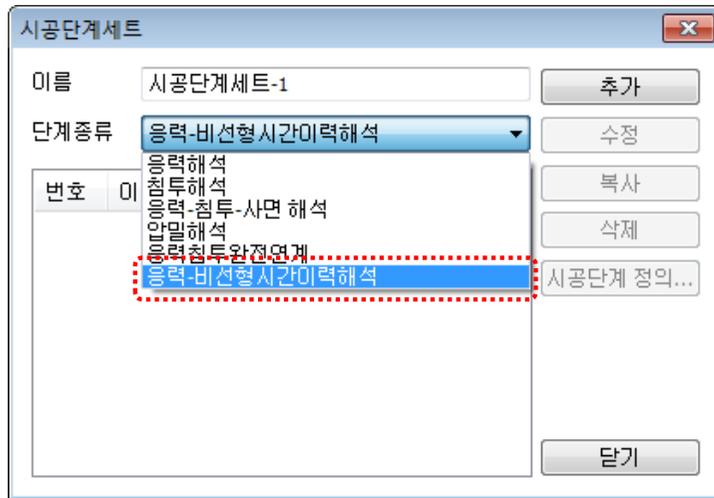
[ 활성화된 요소의 초기응력을 추정하는 경우 - 수평변위 : 30mm ]

## 2. Analysis

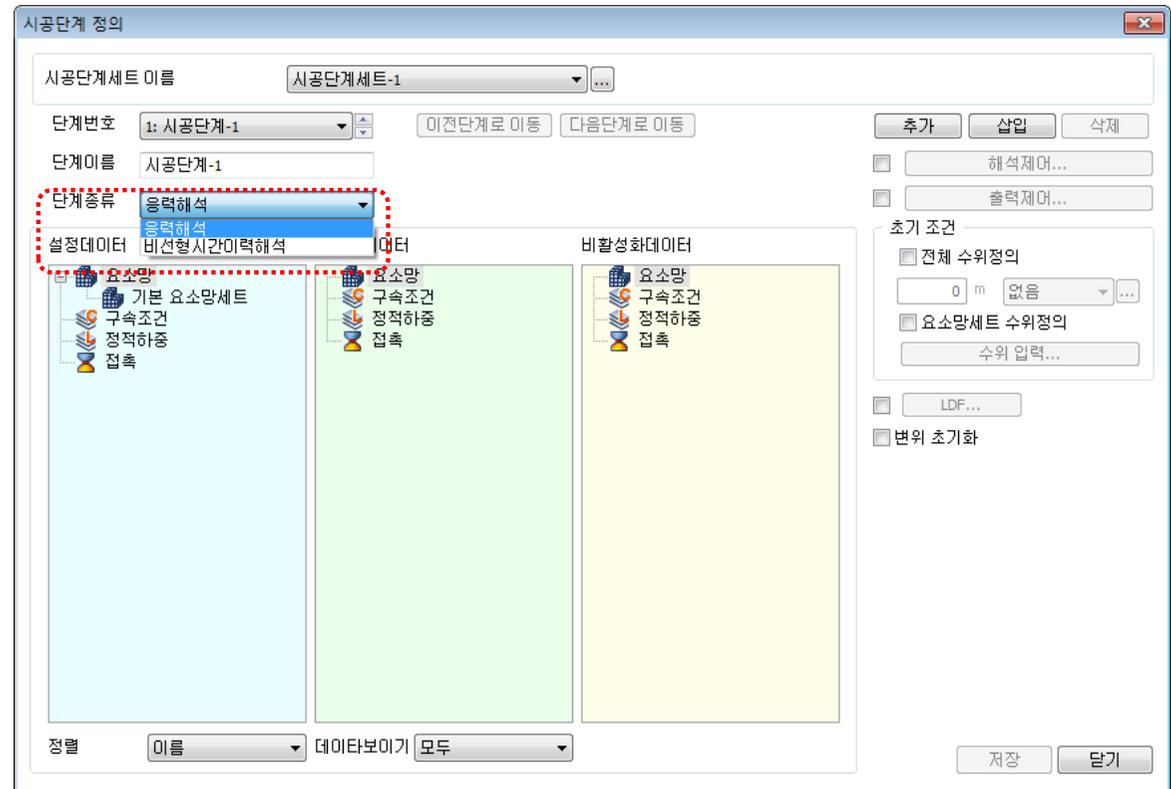
### 2.13 응력-비선형 시간이력해석 (MODS)

- 정해석 결과로부터 동해석의 초기응력 상태를 계산하여 내진검토를 한 번에 수행
- 정해석과 동해석에 사용되는 요소/경계/하중 조건을 달리하여 실제 거동을 모사
- 동해석은 시공단계의 제일 마지막에만 배치할 수 있고, "응력해석" 이 비선형 해석인만큼 해석의 연계성을 고려하여 "비선형시간이력해석" 을 제공

- 해석 > 해석케이스 > 추가 > 해석제어



[ 시공단계세트 : 응력-비선형 시간이력해석 ]



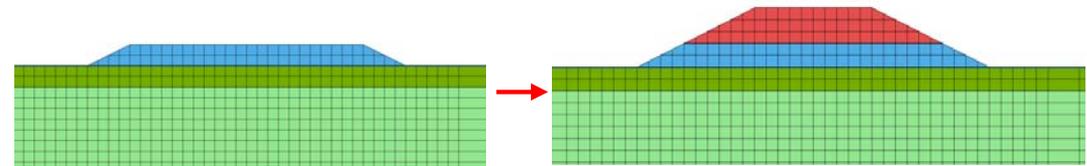
[ 시공단계세트 정의 ]

## 2. Analysis

### 2.14 대변형을 고려한 변형률/응력 산출 (기하비선형 고려) (MODS)

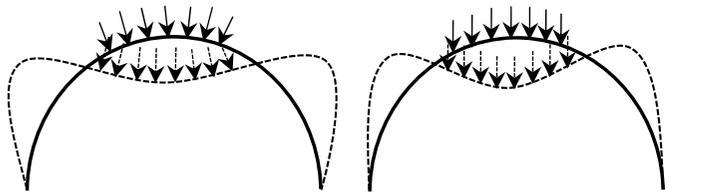
- 해석 > 해석케이스 > 추가 > 비선형 : 기하비선형
- 대변형을 고려한 기하학적 비선형 해석, **대규모 연약지반 및 비탈면 영역에서 대변형에 의한 검토** 가능  
(이 때 지하수위를 고려한 모델에서 간극수압도 변형된 모델을 따라 업데이트 되도록 계산할 수 있음)
- 해석 > 해석케이스 > 추가 > 일반 : 초기형상
- 성토 시공단계 해석에서, **“활성화된 절점의 초기형상 수정”** 옵션을 통해 보다 합리적인 변형 거동을 확인 가능

#### ▪ 해석 > 해석케이스 > 추가 > 비선형 : 기하비선형

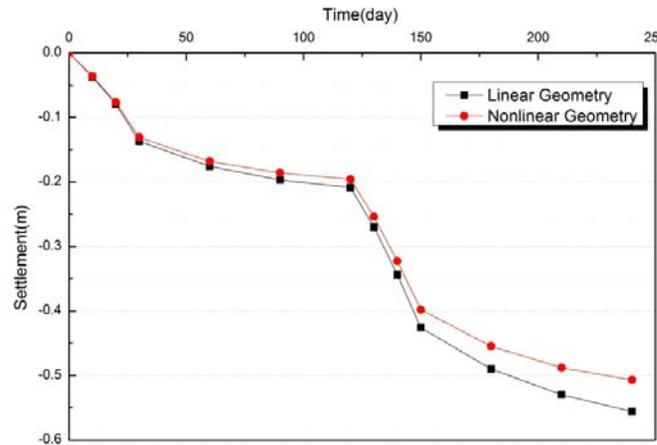


[압밀 성토 시공단계 해석]

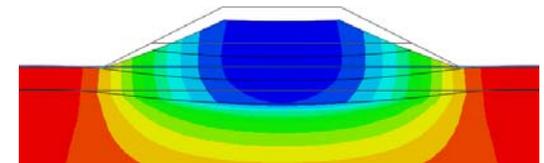
#### ▪ 해석 > 해석케이스 > 추가 > 일반 : 초기형상



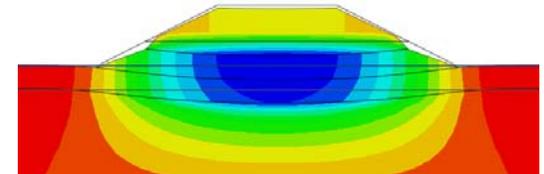
Normal pressure      Pressure in specified direction  
[대규모 변형에 의한 압력하중 작용 방향 변화]



[결과비교]



[기하비선형 + 활성화된 절점의 초기형상 추정]



[기하비선형 옵션 고려안함]