

MIDAS 건설분야 기술강의

おわんモデルと液状化解析

오완모델(Bowl model)과 액상화 해석

清水建設株式会社 福武 毅芳

시미즈건설주식회사 후쿠타케 키요시

CONTENTS

01 오완모델 (Bowl model)의 발상의 근원

02 이력함수 모델과의 병용과 파라미터

03 요소 계산 결과

04 해석사례 (재해지 사례분석, 실무의 적용)

session.1

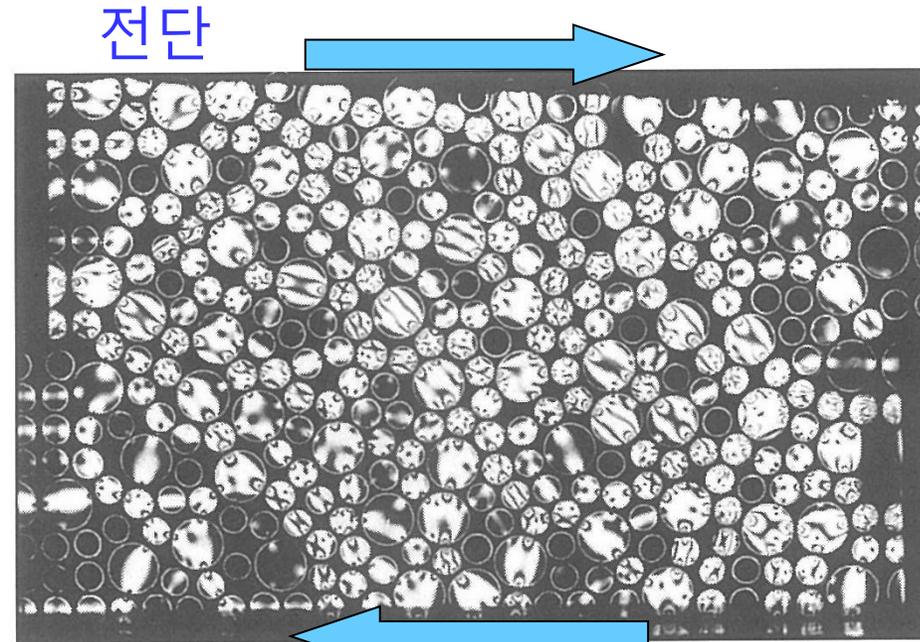
오완모델 (Bowl model)의 발상의 근원

다방향 반복에서의 Dilatancy (다일러턴시)

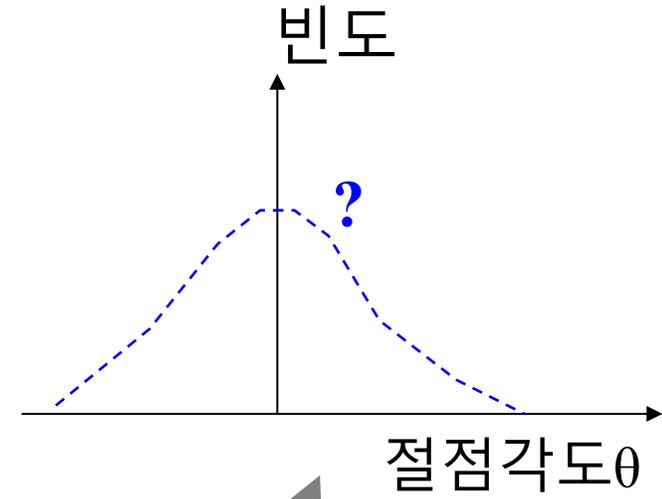
※ Dilatancy (다일러턴시) : 전단으로 인한 체적 변화

오완모델의 발상의 근원

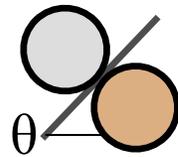
단순전단 시의 입자접점



광탄성 재료의 전단 시험



히스토그램으로 표시

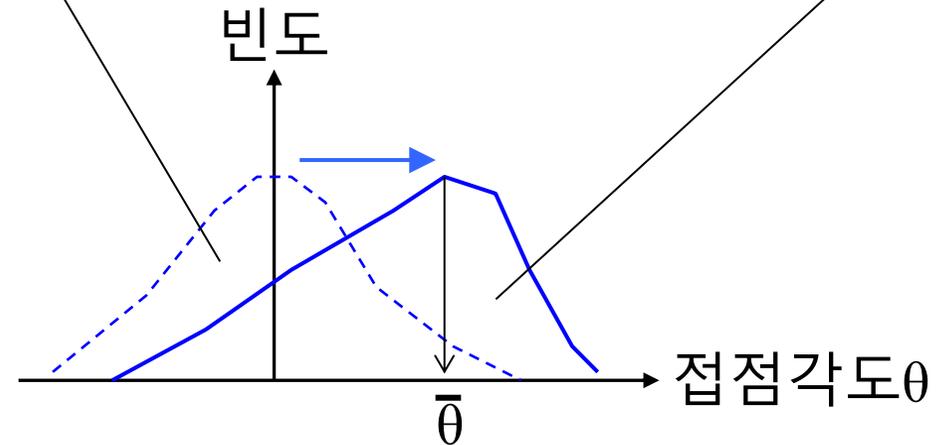
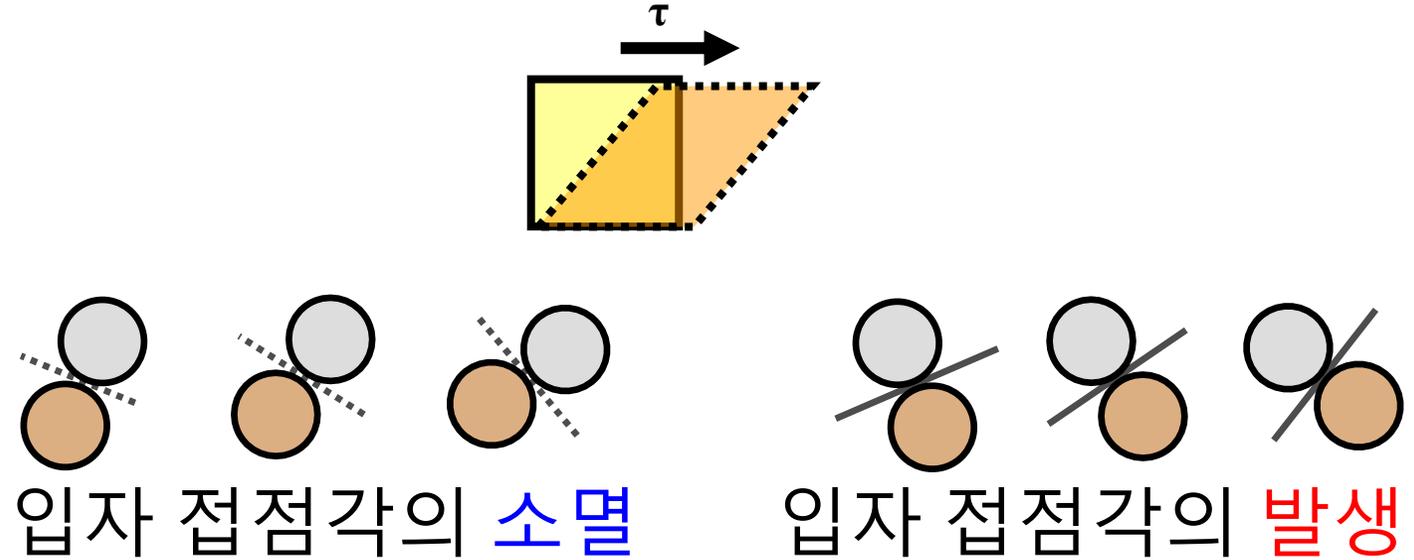


모든 절점 및 각도를 스테이지에서 측정

(Matsuoka, 1974)

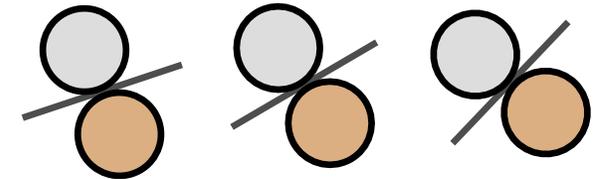
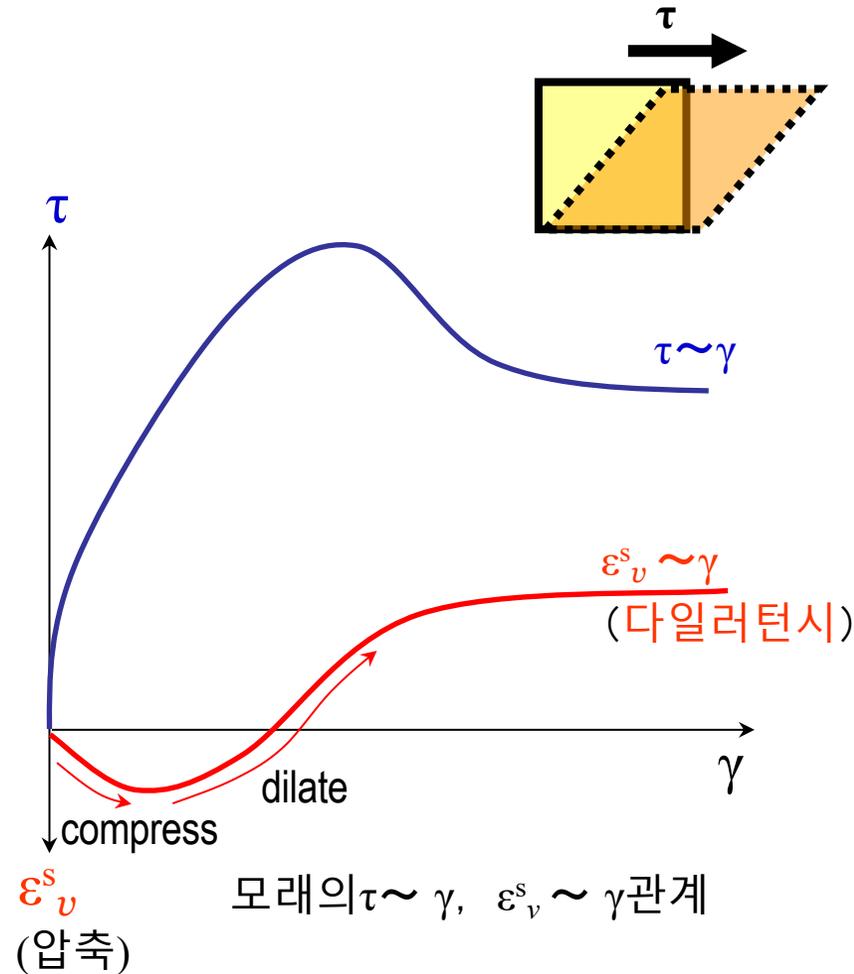
오완모델의 발 상의 근원

입자 접점의 발생과 소멸

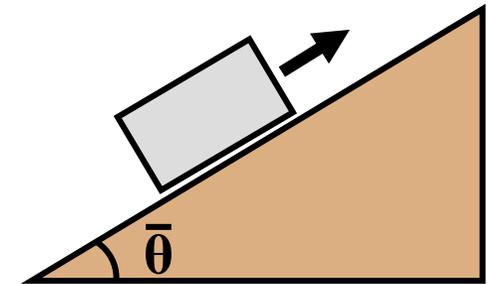


오완모델의 발상의 근원

응력-변형-Dilatancy(다일러턴시) 관계



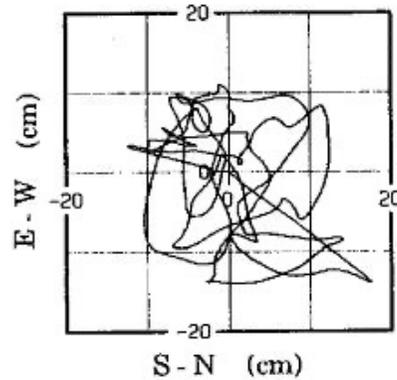
평균화된 대표사면



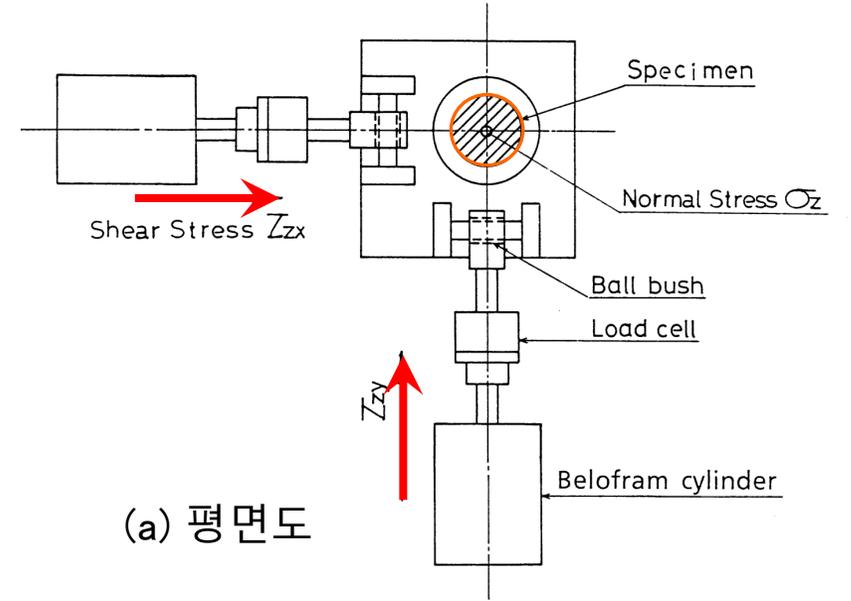
오완모델의 발상의 근원

다방향 단순 전단 시험기

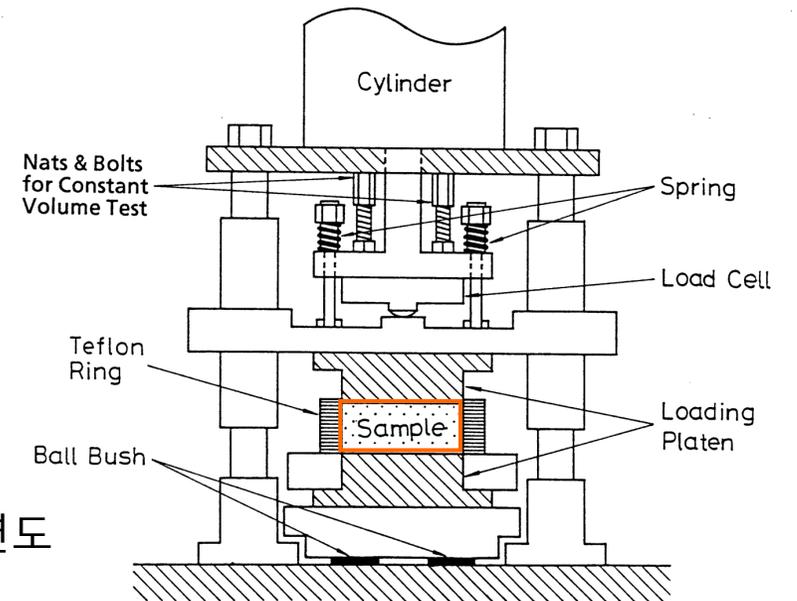
실제지진 = 다방향의 반복 전단



Trajectory of displacement recorded in Hachinohe (Tokachi-oki earthquake, 1968).



(a) 평면도

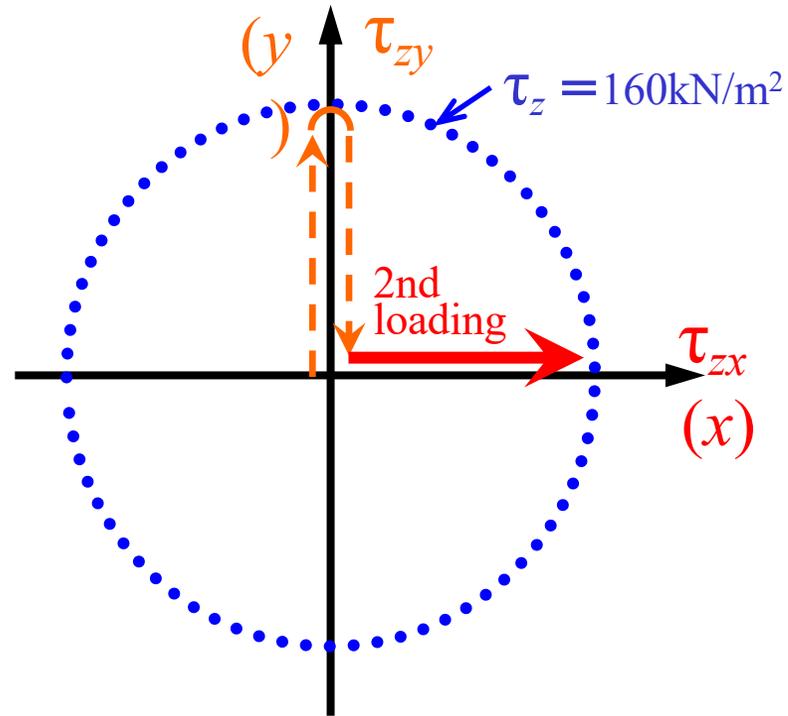


(b) 단면도

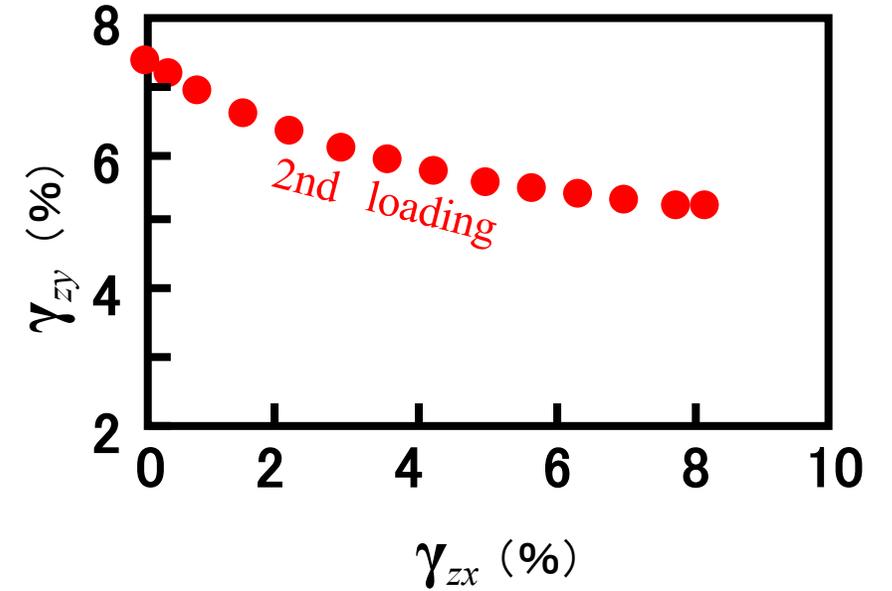
오완모델의 발상의 근원

직교 이방향 하중 시험

응력 경로



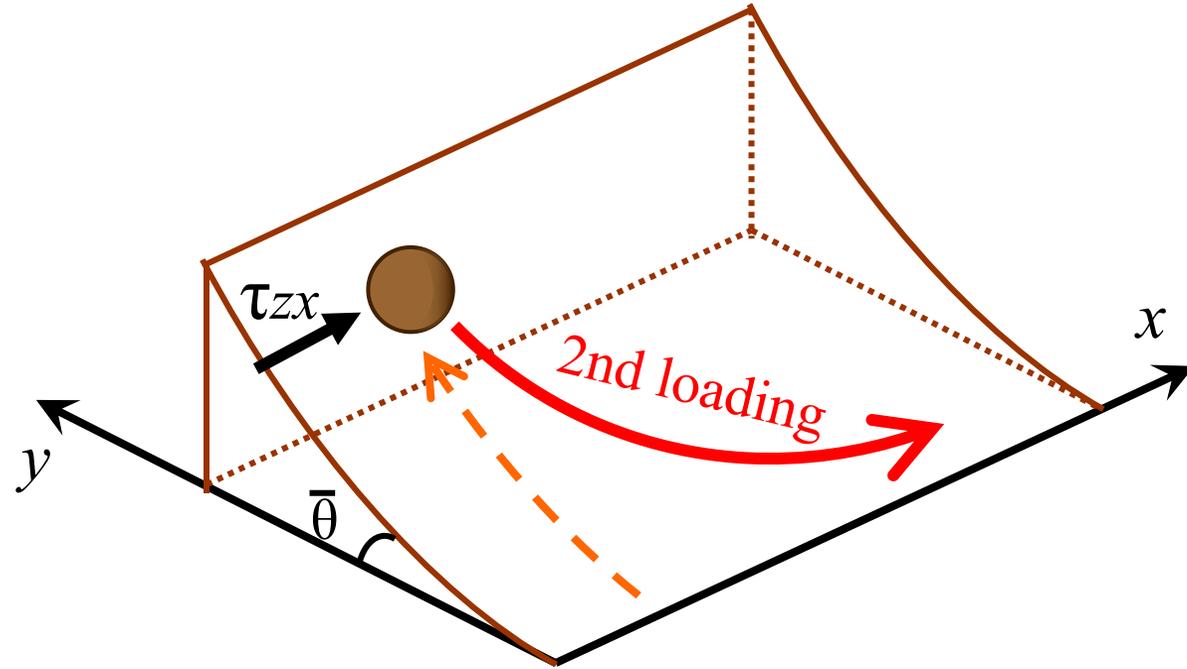
변형 경로(x방향)



(福武らFukutake, 1984)

오완모델의 발상의 근원

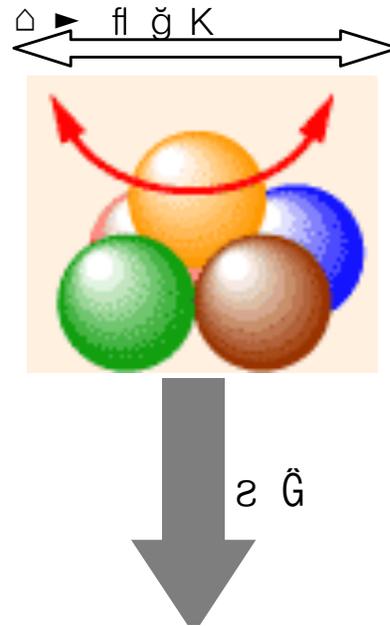
경사면을 따라 미끄러지며 전단되는 토양 입자



(福武ら Fukutake, 1984)

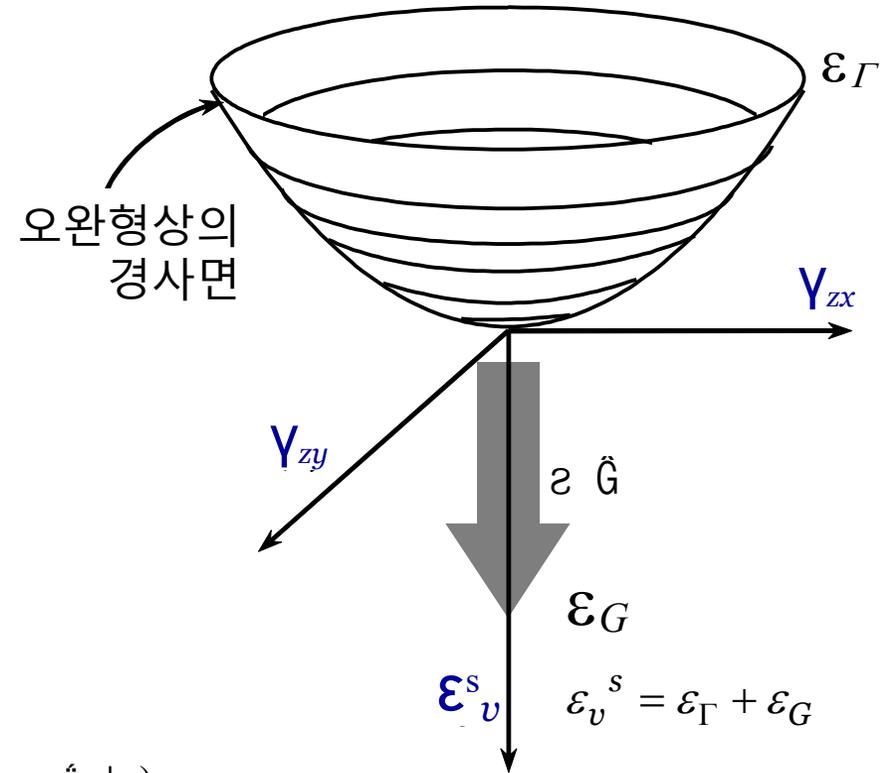
오완모델의 발상의 근원

입자의 움직임과 다이레이턴시에 대한 직관적 이해



입자 움직임의 미시적 이미지

- ϵ_v^s : $\text{fl } \ddot{\theta} \text{ } \dot{\cup} \text{ } [\text{ , Dilatancy } (\hat{G}_{\text{T}} \cdot \dot{\cup} \text{ } |)$
- ϵ_r : 오완형상을 나타내는 성분 (가역적)
- ϵ_G : 오완자체의 압축을 나타내는 성분 (비가역적)



변형 공간에서 압축되어 가는 [오완]

오완모델의 발 상의 근원

다일러턴시 ε_v^s 의 팽창성분 ε_I 과
압축성분 ε_G 에의 분리

$$\varepsilon_v^s = \varepsilon_I + \varepsilon_G$$

오완모델의 발상의 근원

오완모델을 기반으로한 Dilatancy (다일러턴시)

Dilatancy (다일러턴시) ϵ_v^s

= 팽창 성분 (주기적인 Positive(양)의 Dilatancy (다일러턴시))
+ 압축 성분 (단조로운 Negative(음)의 다일러턴시)

$$\begin{aligned}\epsilon_v^s &= \epsilon_{\Gamma} + \epsilon_G \\ &= A \cdot \Gamma^{1.4} + \frac{G^*}{C+D \cdot G^*}\end{aligned}$$

합 전단변형률 ... 입자의 상승

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

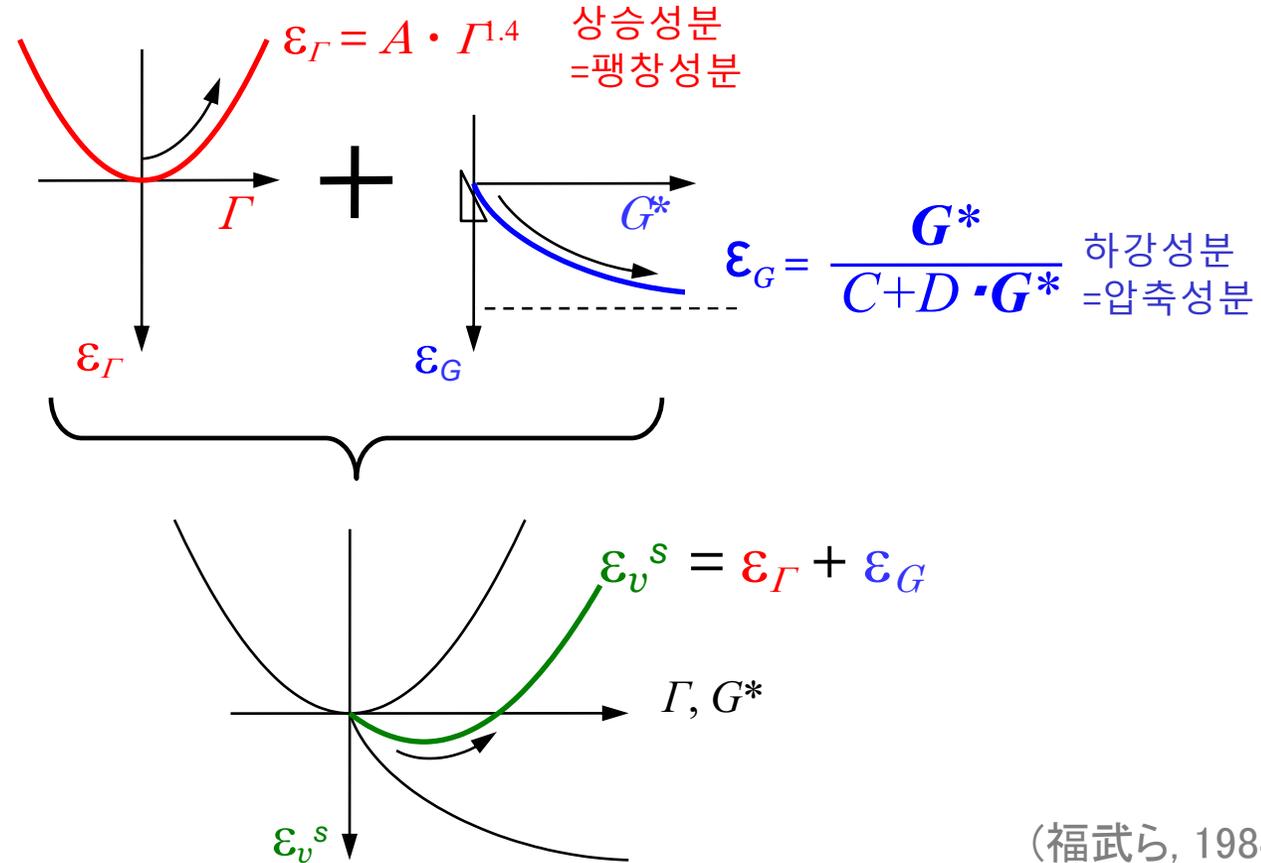
누가 전단변형률 ... 입자 구조의 압축

$$G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{zx}^2 + \Delta\gamma_{zy}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \Delta(\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + \Delta(\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

(福武ら, 1984; 1989)

오완모델의 발상의 근원

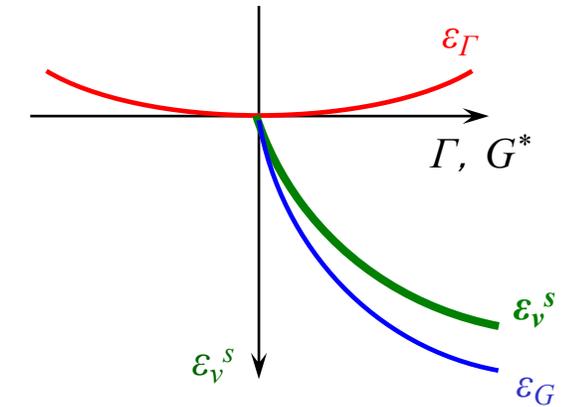
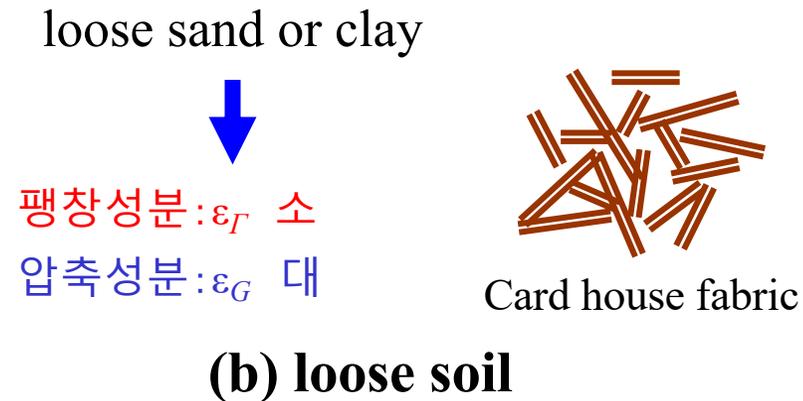
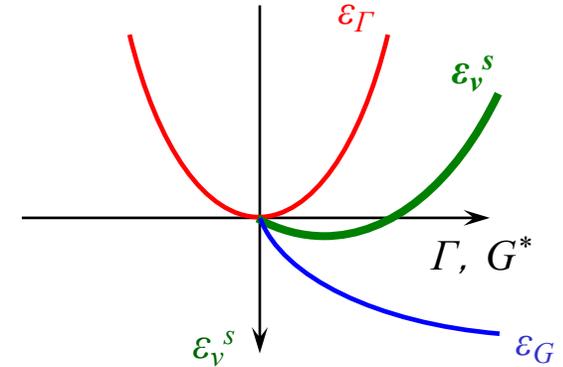
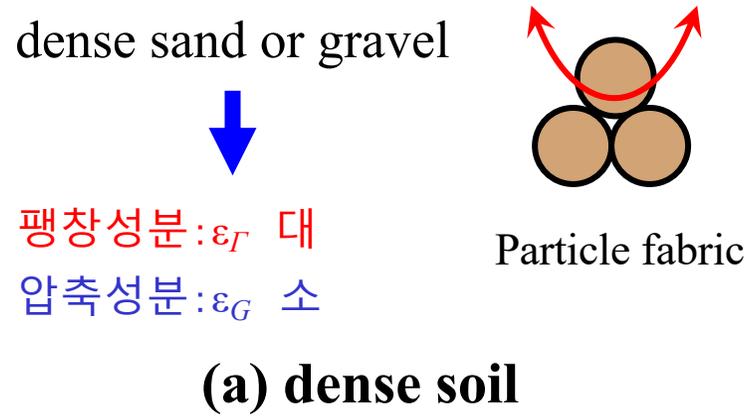
단조하중이 가해진 경우의 중첩 법칙 $\epsilon_v^s = \epsilon_\Gamma + \epsilon_G$



(福武ら, 1984; 1989)

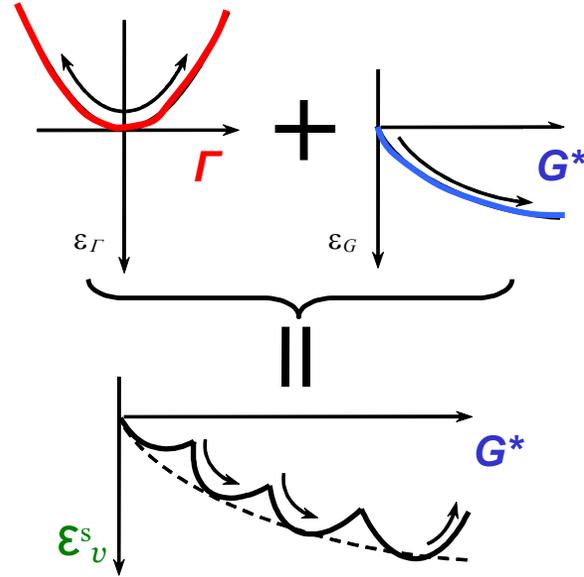
오완모델의 발상의 근원

밀도나 입자 구조의 차이로 인한 Dilatancy(다일러턴시)의 차이

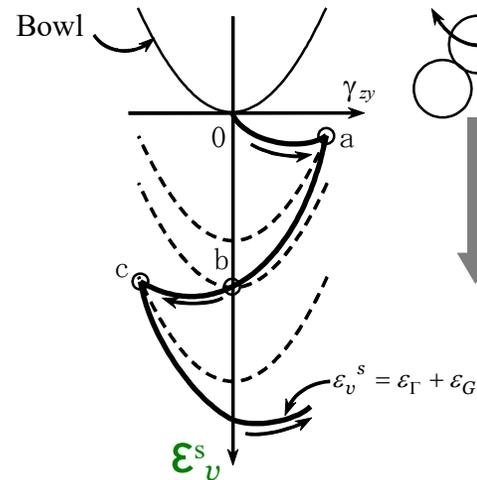


오완모델의 발상의 근원

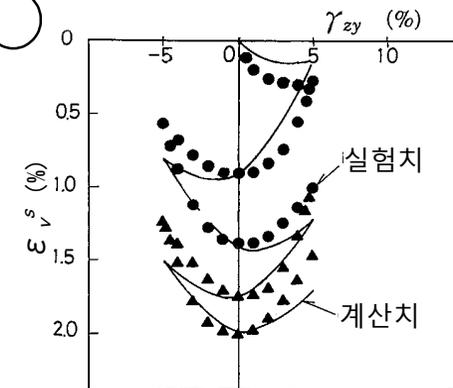
반복 전단의 Dilatancy(다일러턴시) 접근 방식



(福武, 1989)

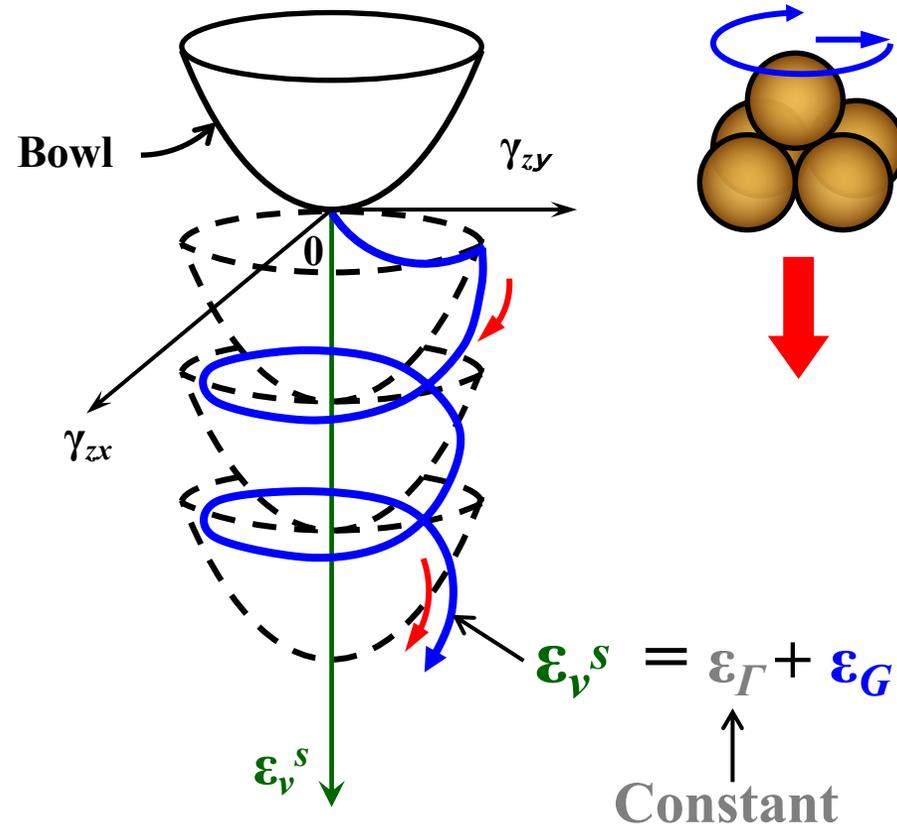


[실험결과와 계산결과]



오완모델의 발상의 근원

Dilatancy in the case of repeated circular simple shearing.



(福武, 1989)

오완모델의 발상의 근원

비배수 조건에서의 유효 응력

체적변형률 $d\varepsilon_v=0$ 으로부터 산정

Dilatancy 성분 $d\varepsilon_v^s$ + 압축성분 $d\varepsilon_v^c = 0$

$$\frac{d\varepsilon_v^s}{\uparrow} + \frac{d\varepsilon_v^c}{\uparrow} = 0$$

오완

$$d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_s}{1 + e_0} \cdot \frac{d\hat{\sigma}_m}{\hat{\sigma}_m} \quad (\text{for } d\hat{\sigma}_m < 0)$$

$$d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_c}{1 + e_0} \cdot \frac{d\hat{\sigma}_m}{\hat{\sigma}_m} \quad (\text{for } d\hat{\sigma}_m > 0)$$

$$d\sigma'_m = \frac{\sigma'_m \cdot d\varepsilon_v^s}{0.434(C_s \text{ or } C_c)/(1 + e_0)}$$

$$\sigma'_{mt+1} = \sigma'_{mt} + d\sigma'_m$$

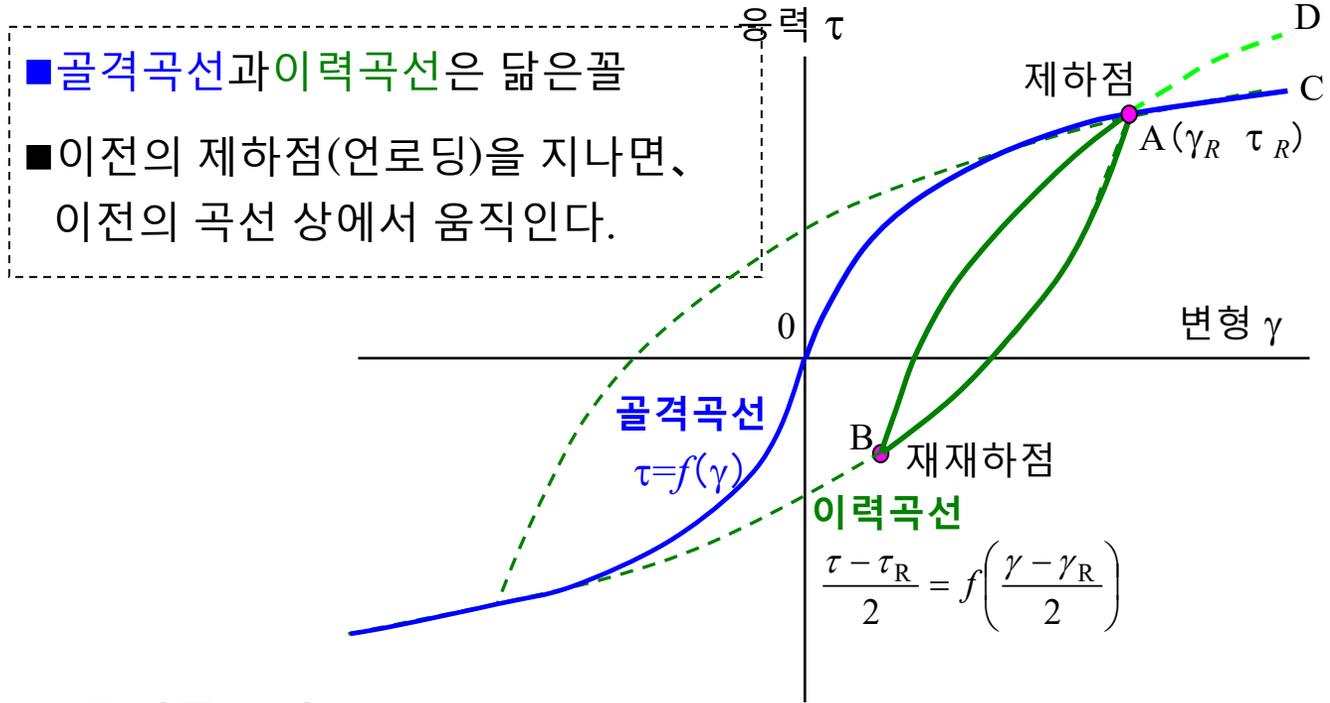
session.2

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

토양 구성식의 구축 (모래, 점토, 개량토)

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

$\tau \sim \gamma$ 관계 : 이력함수 모델화, Masing법



※골격곡선이

- ① 쌍곡선 (수정H-D모델) . . . G_0, τ_f
 - ② 이력함수 R-0모델 . . . $G_0, \gamma_{0.5}, h_{max}$
- 유효응력의 관계



이력함수 모델과의 병용과 파라미터 계산방법

누적전단변형률 ... 입자구조의 압축

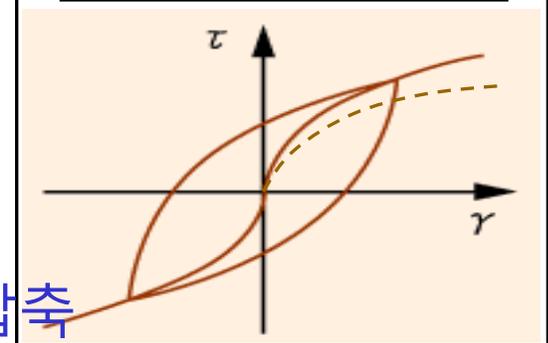
$$G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{zx}^2 + \Delta\gamma_{zy}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \Delta(\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + \Delta(\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

합성전단변형률 ... 입자의 상승

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

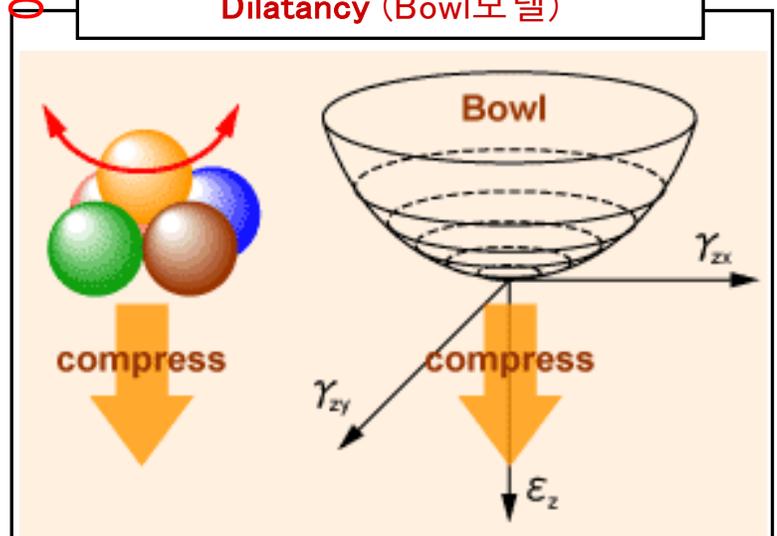
⇒ 유효응력해석 HiPER

응력-변형률관계
(이력함수 모델)



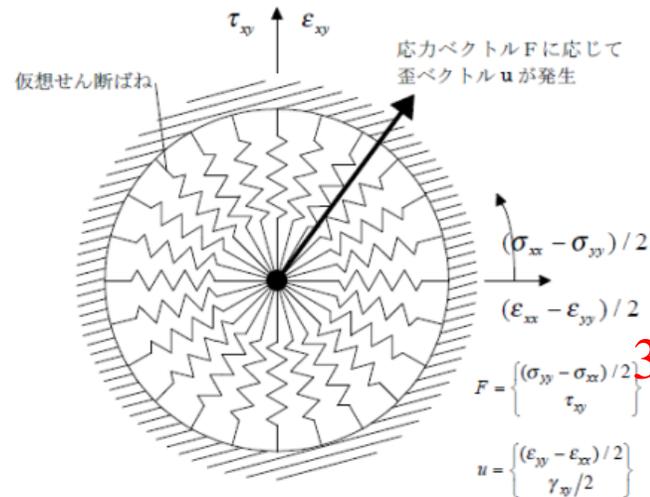
과잉 간극수압

Dilatancy (Bowl 모델)



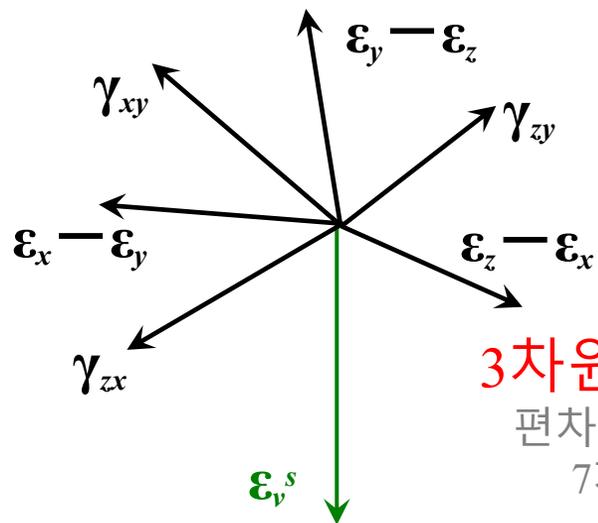
이력함수 모델과의 병용과 파라미터

3차원 구성식으로



3차원으로 확장

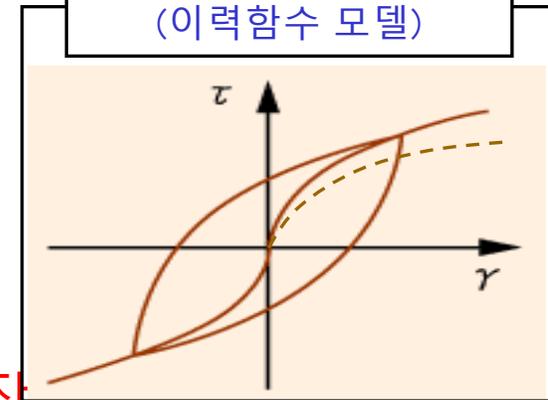
다중전단 스프링모델



3차원으로 확장

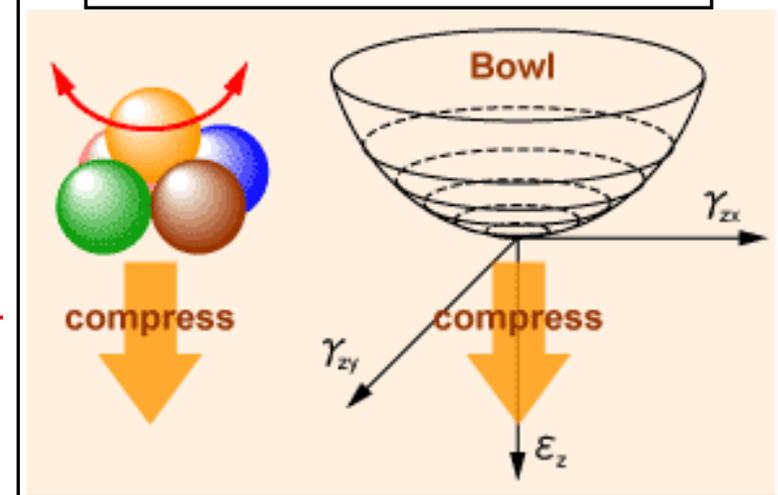
편차·체적변형률
7차원 공간

응력-변형률관계
(이력함수 모델)



과잉 간극수압

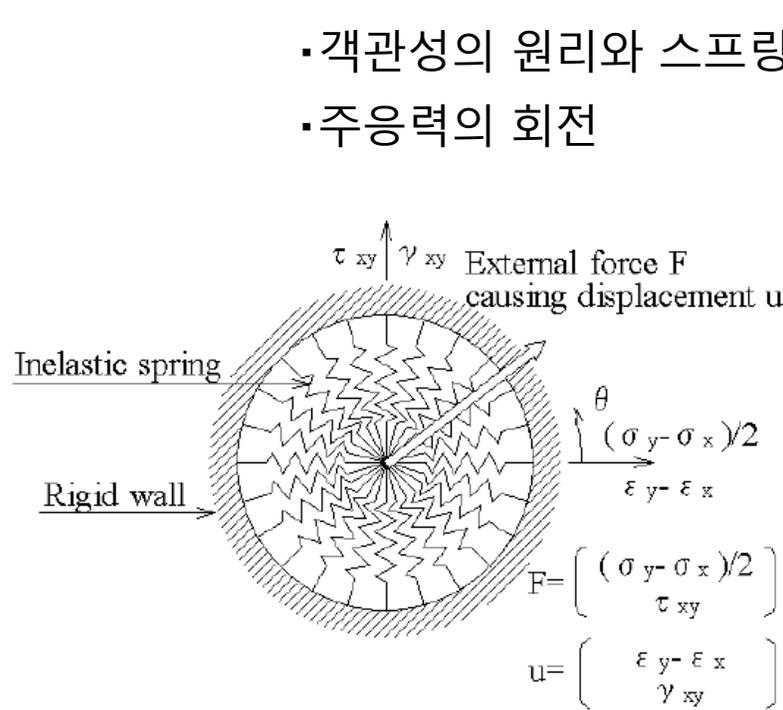
Dilatancy (Bowl 모델)



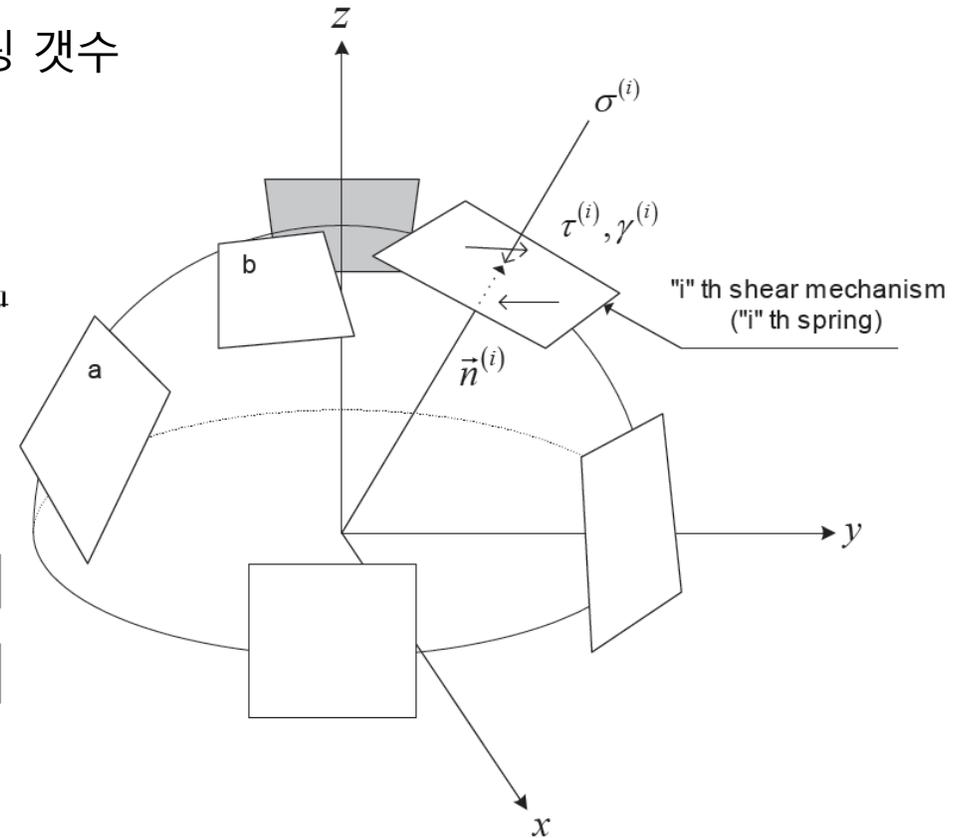
이력함수 모델과의 병용과 파라미터

다중전단 메커니즘에 의한 전단응력~전단변형관계의 2차원화, 3차원화

- 객관성의 원리와 스프링 갯수
- 주응력의 회전

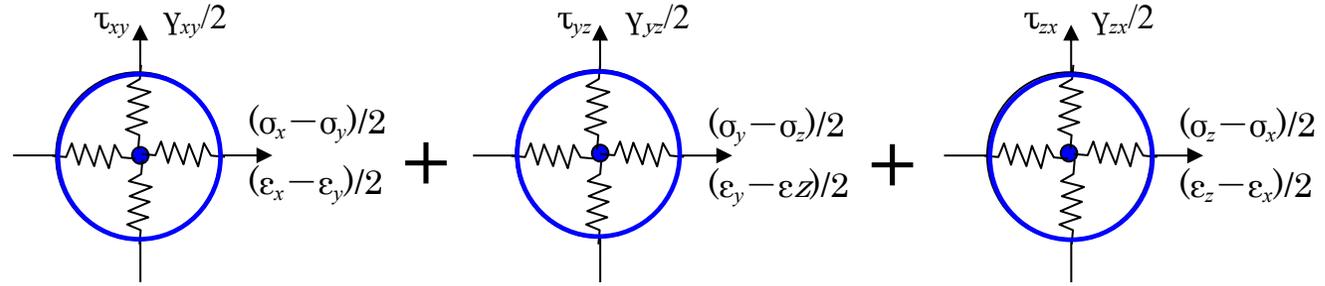


2D Multi-spring model
(Towhata, 1981)



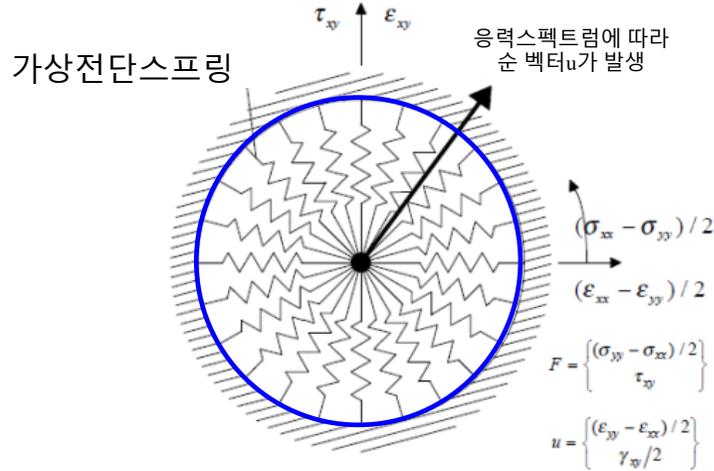
3D Multi-spring model
(Nishimura, S. and Towhata, 2004)

이력함수 모델과의 병용과 파라미터 구성식의 확장 (Nishimura·Tobata식의 간소화)

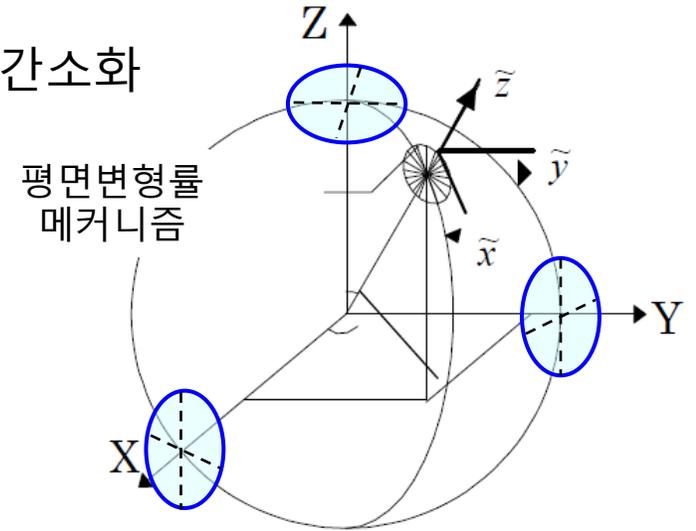


편차응력 ~ 편차변형률 관계

- 스프링 갯 감소
- 구면 메커니즘의 간소화



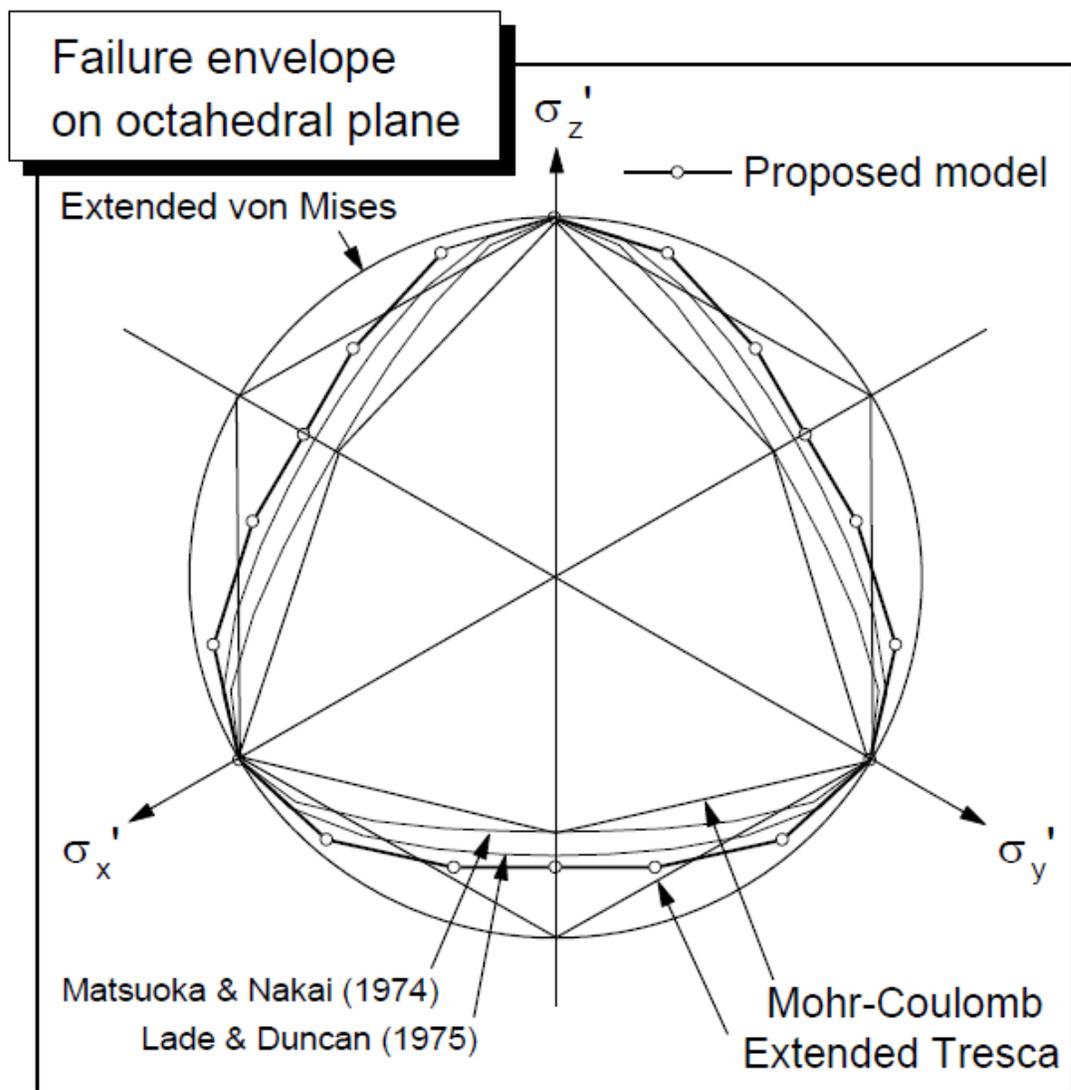
평면변형률 메커니즘



※스프링 개수, \oplus 가 적은 경우 → 객관성의 원리가 충족하지 않는다

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

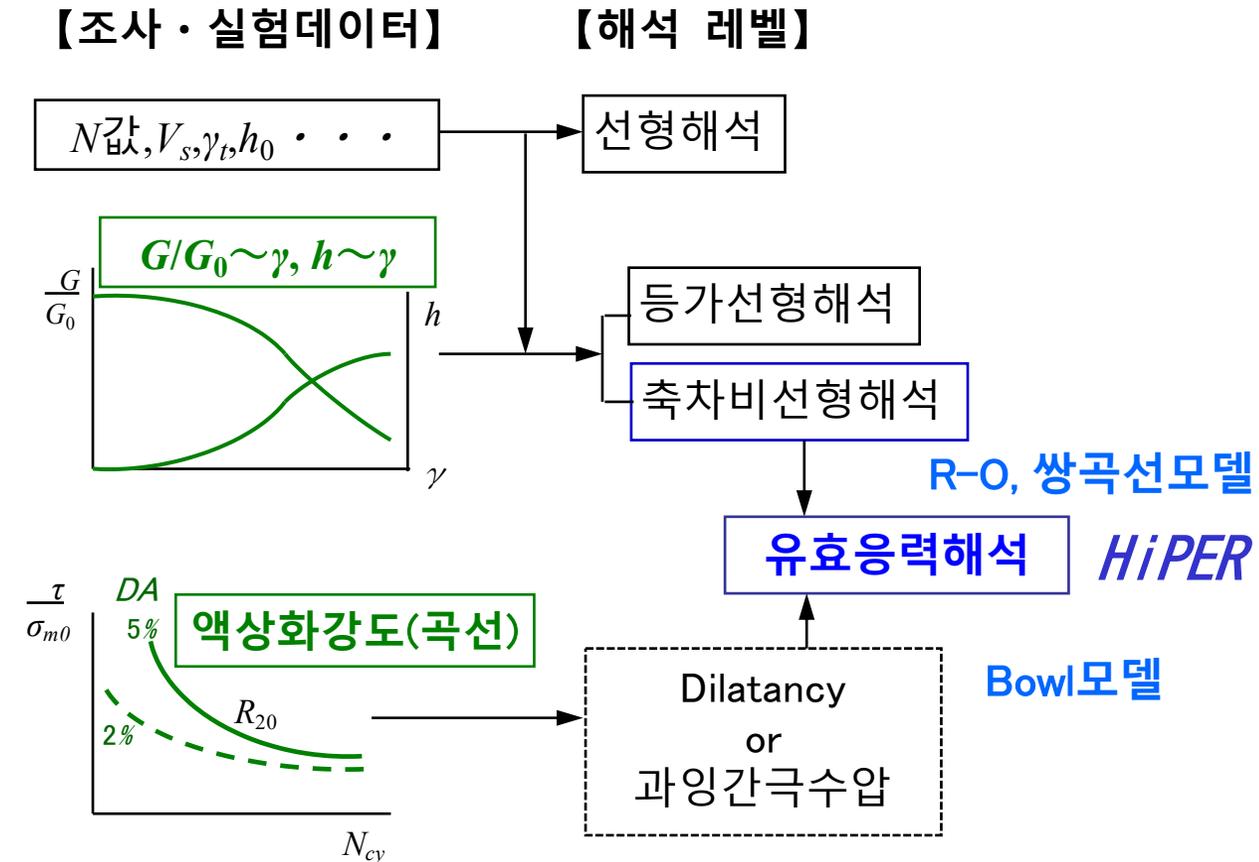
다중전단모델에 의한 파괴기준 (Nishimura)



이력함수 모델과의 병용과 파라미터

해석방법과 토질 파라미터

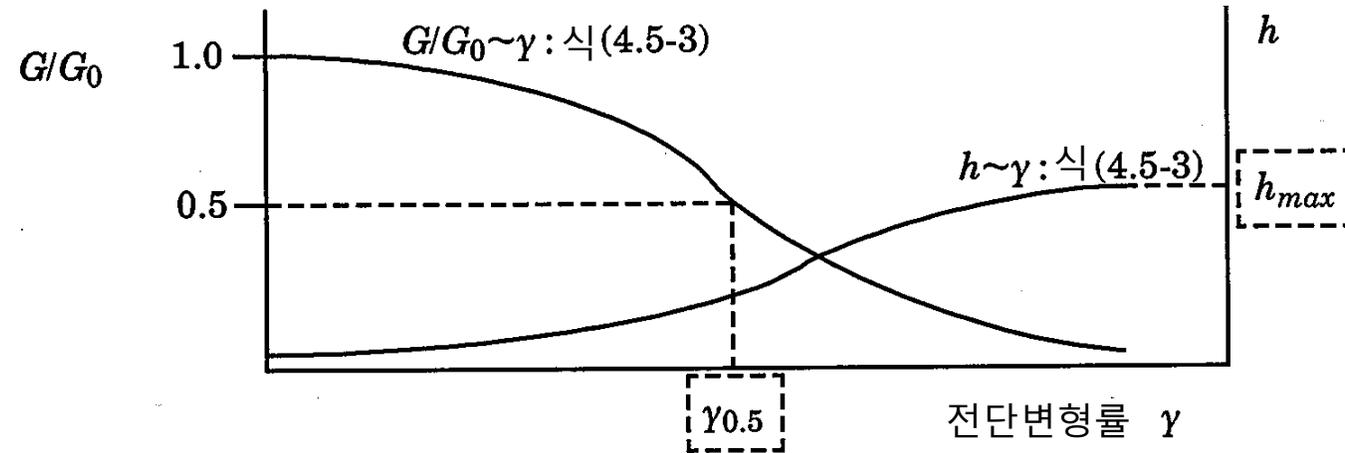
일반적인 요소 시험 결과에서 쉽게 설정



이력함수 모델과의 병용과 파라미터 토질 파라미터

① 수정R-0모델의 파라미터

파라미터	파라미터의 물리적 의미
G_0	초기 전단 탄성 계수. $G_0 = \rho V_s^2$
h_{max}	최대 감쇠 정수.
$\gamma_{0.5}$	$G/G_0 = 0.5$ 에서의 전단 변형(기준 전단 변형률).



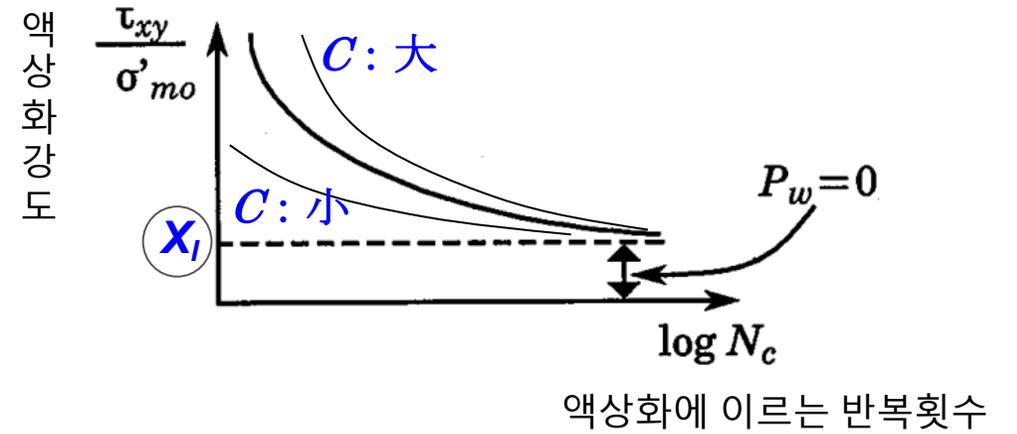
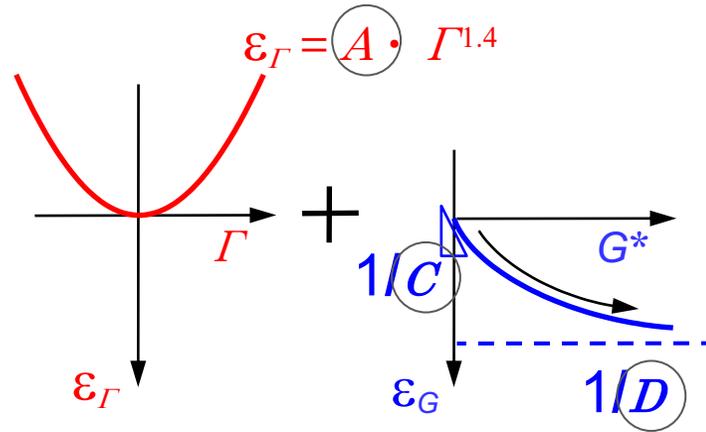
동적변형시험 : $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 관계

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

토질 파라미터

② 오완모델의 파라미터

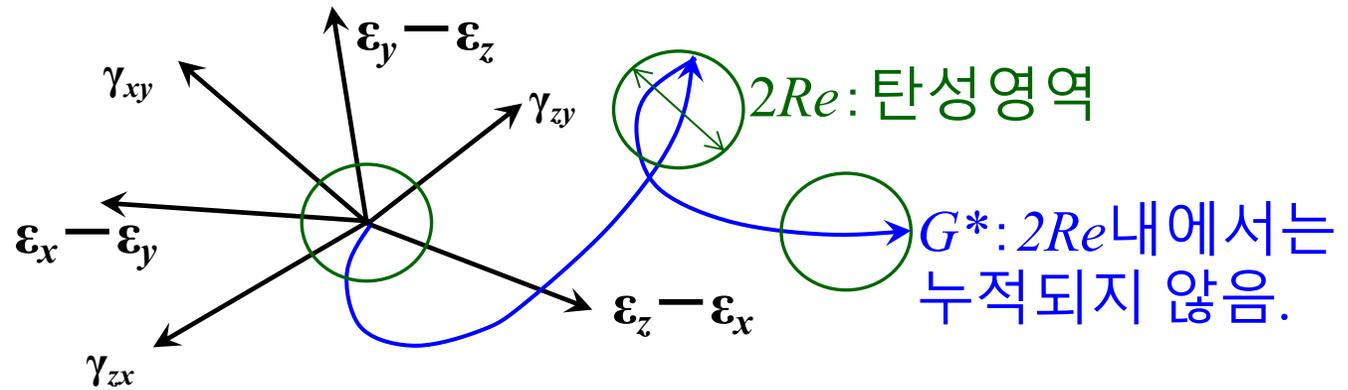
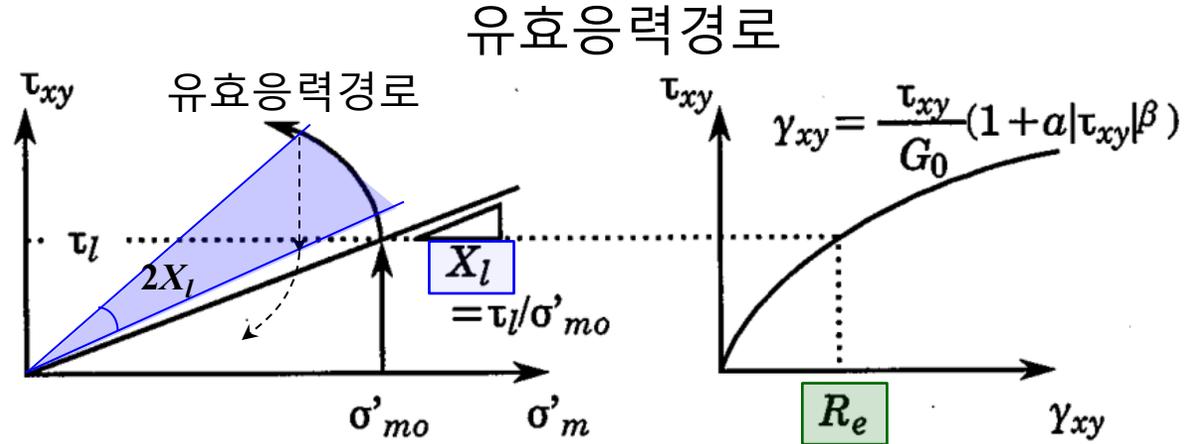
	파라미터의 의미
A	Dilatancy 내의, 팽창성분을 나타냄. $ A $ 가 클수록 팽창이 두드러지며 순환이동성이 높아진다
C, D	Dilatancy 내의, 압축성분 G^* 을 나타냄. G^* 은 G^* 에 대한 쌍곡선을 나타냄. $1/C$ 는 전단 초기에 대한 다이레이턴시의 기울기. $1/D$ 는 쌍곡선의 접선.
$C_s/(1+e_0)$	C_s 는 팽창지수, e_0 는 초기간극비.
X_l	액상화강도 R_l 의 하한 값. $\tau/\sigma' > X_l$ 일 경우 수압이 발생.



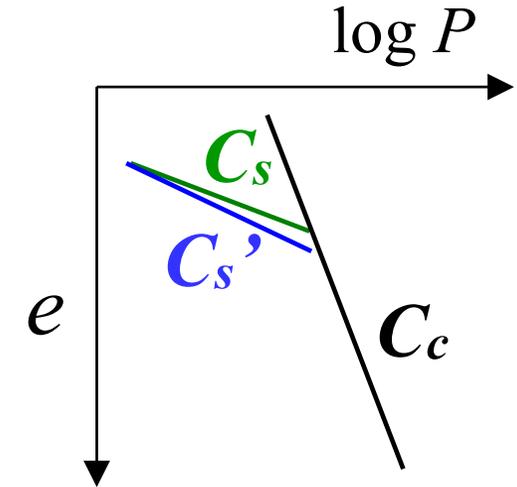
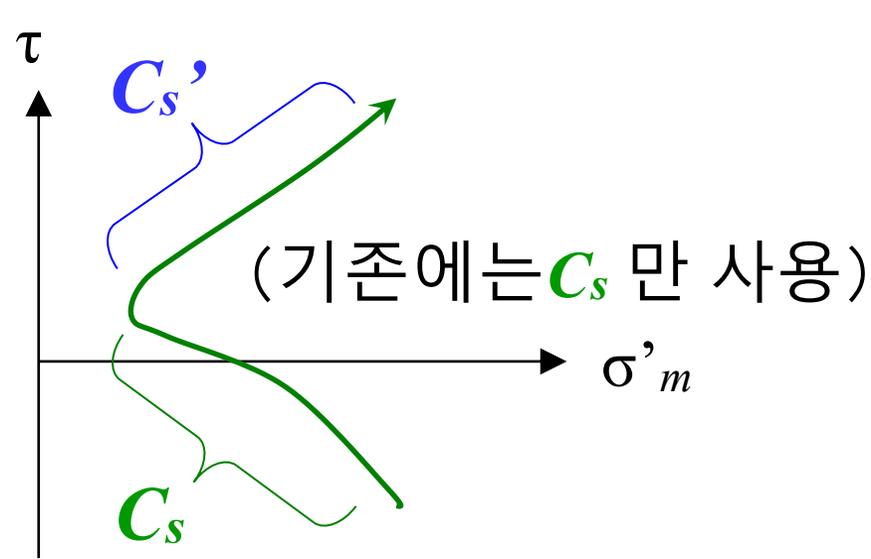
$$\frac{1}{D} = \frac{e_0 - e_{min}}{1 + e_0}$$

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

액상화 강도의 하한값 X_l 과 유효 누적 변형률



이력함수 모델과의 병용과 파라미터 개선점 (2)



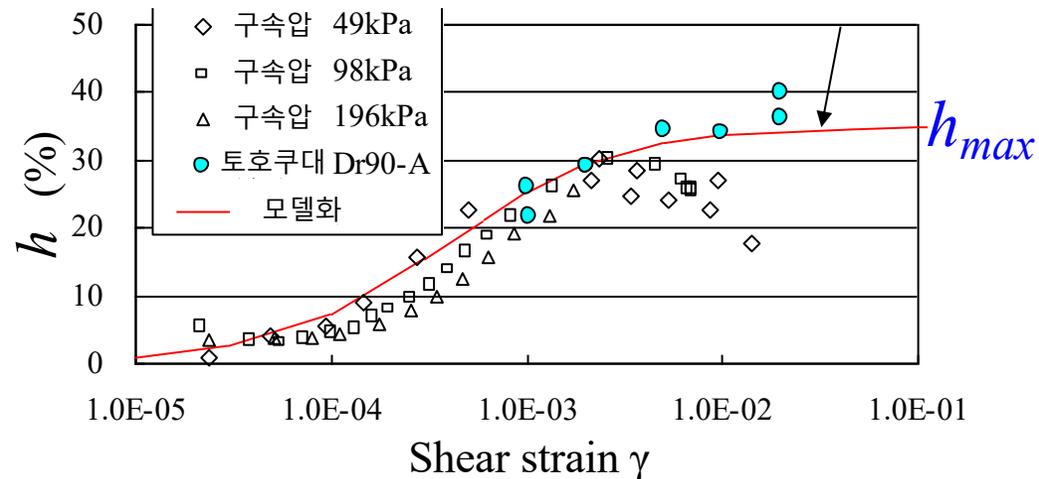
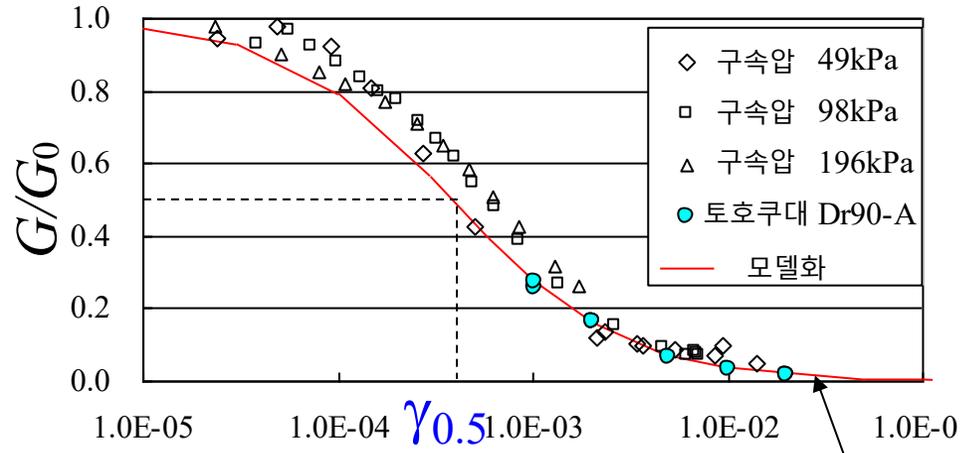
$$d\sigma'_m = -\frac{\sigma'_m}{\frac{0.434(C_{c,s})}{1+e_0}} \cdot d\varepsilon_v^s \leftarrow d\varepsilon_v^s + \frac{0.434 \cdot C_{c,s}}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} = 0$$

(非排水条件: $\varepsilon_v=0$)

→ 액상화 이후의 유동 ($\tau \approx 0$ 에서 변형률이 크게 변화하는 현상)이 표현 가능.

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

동적 변형 시험 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$) \Rightarrow R-O모델의 파라미터 설정

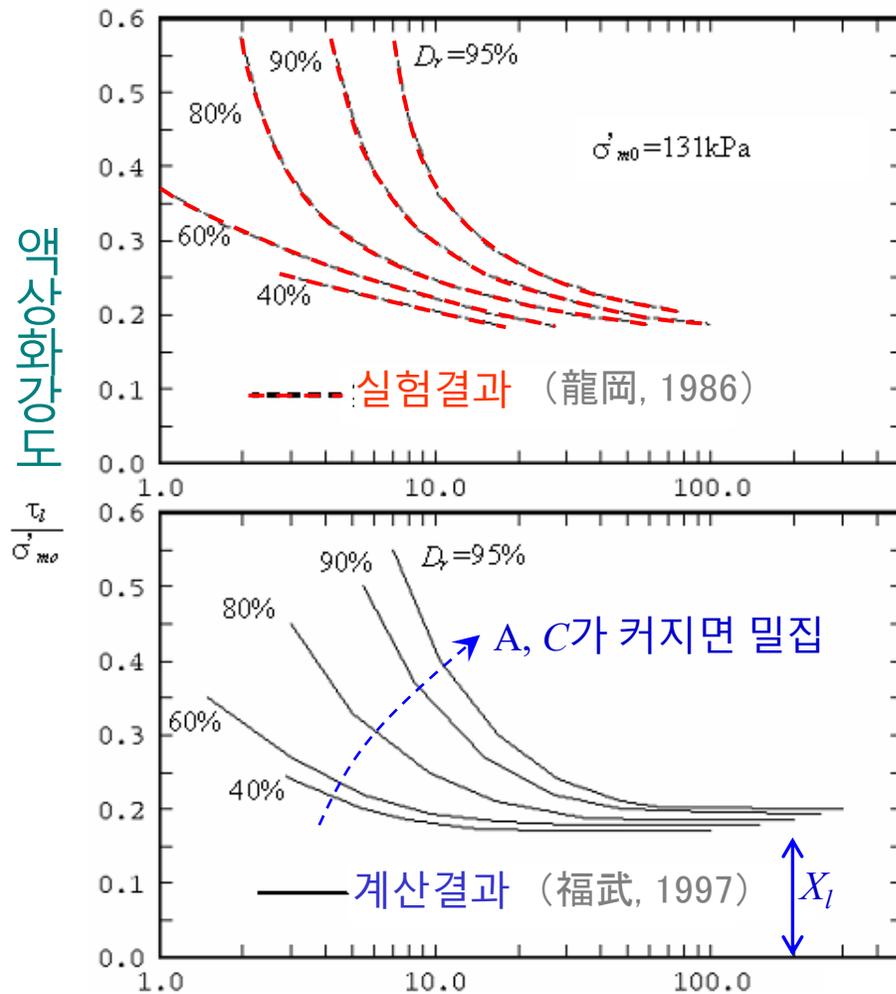


(E-defence보고서)

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

액상화 강도 곡선 (비배수 반복 강도 ~ 반복 횟수)

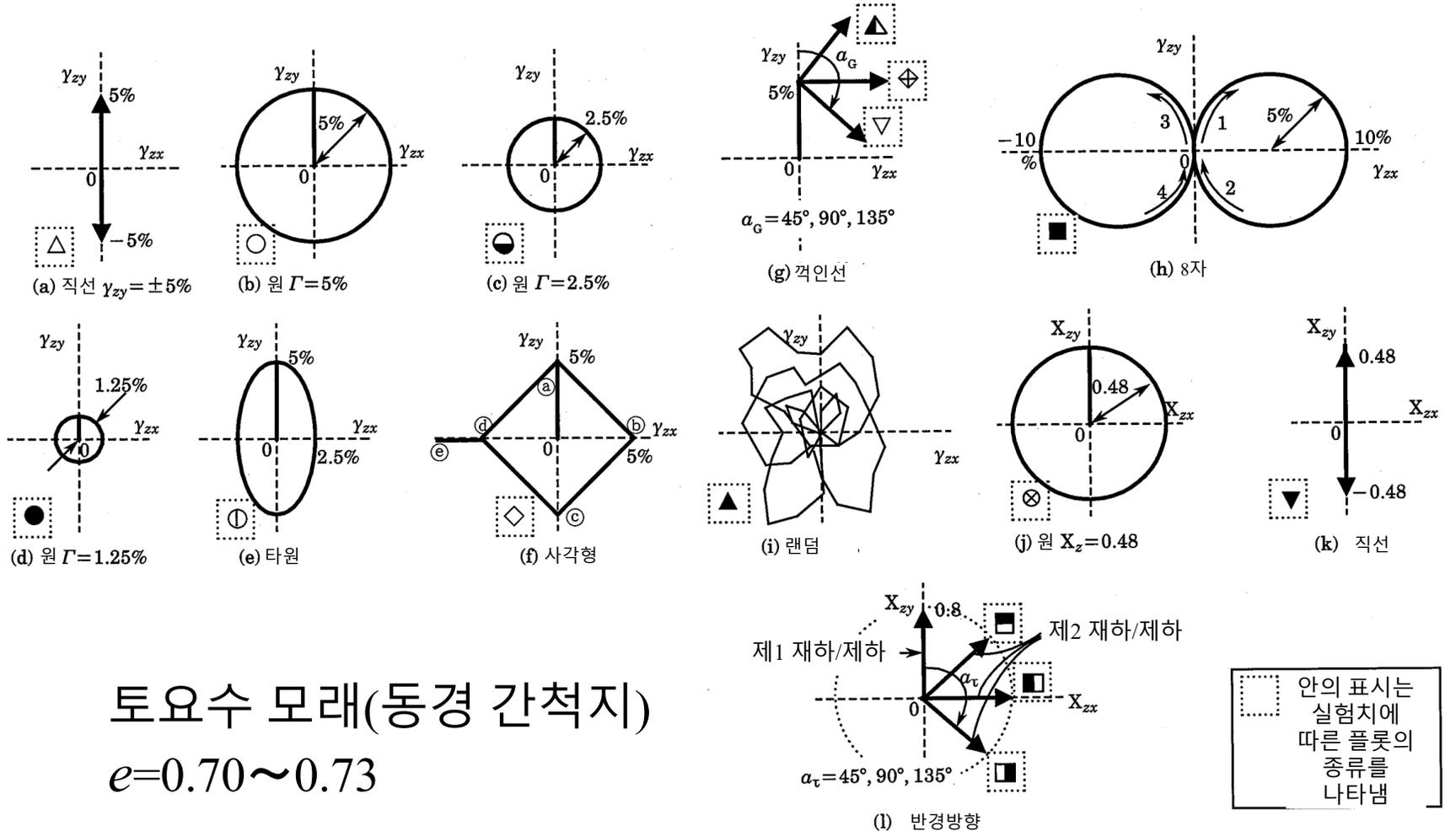
➔ 오완 모델의 파라미터 설정



반복 횟수

이력함수 모델과의 병용과 파라미터

다방향 단순 전단 시험에서의 여러 전단 경로

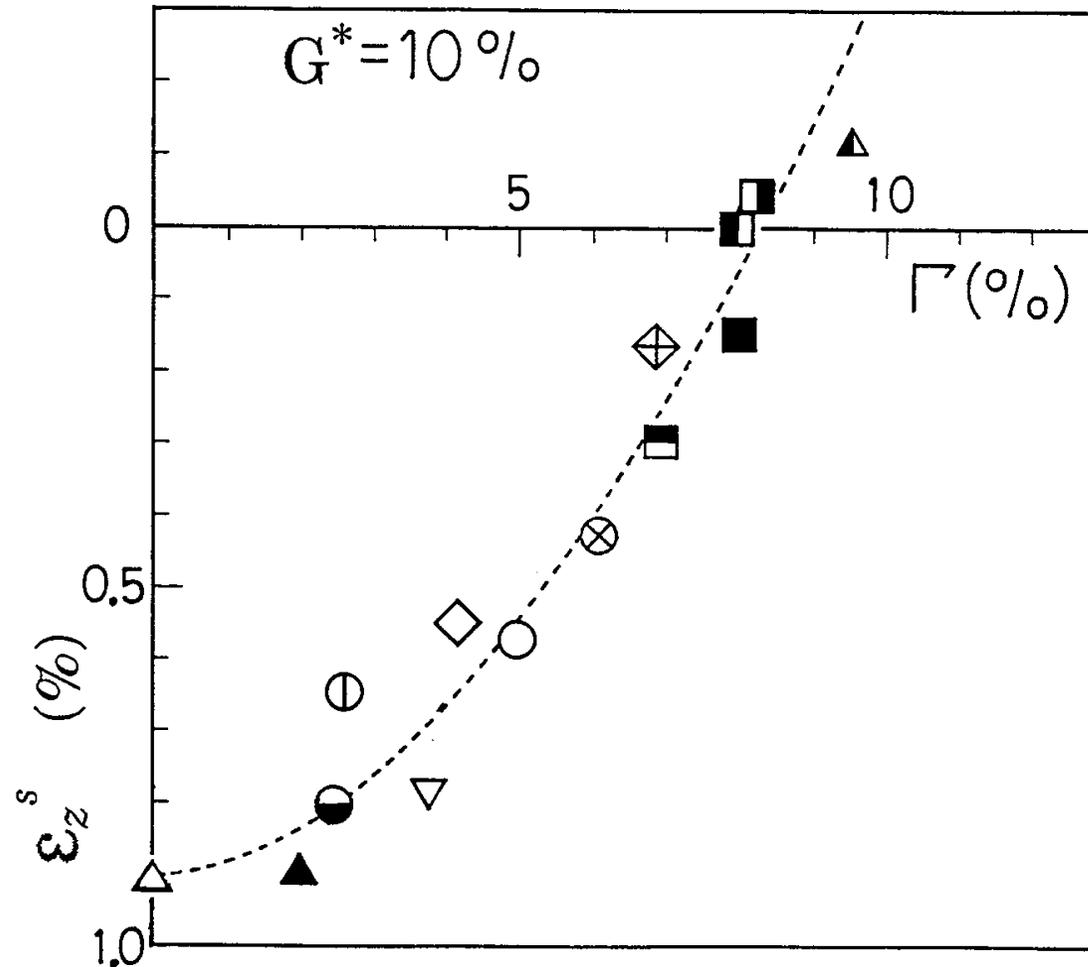


토요수 모래(동경 간척지)
 $e = 0.70 \sim 0.73$

(福武ら, 1989; 1997)

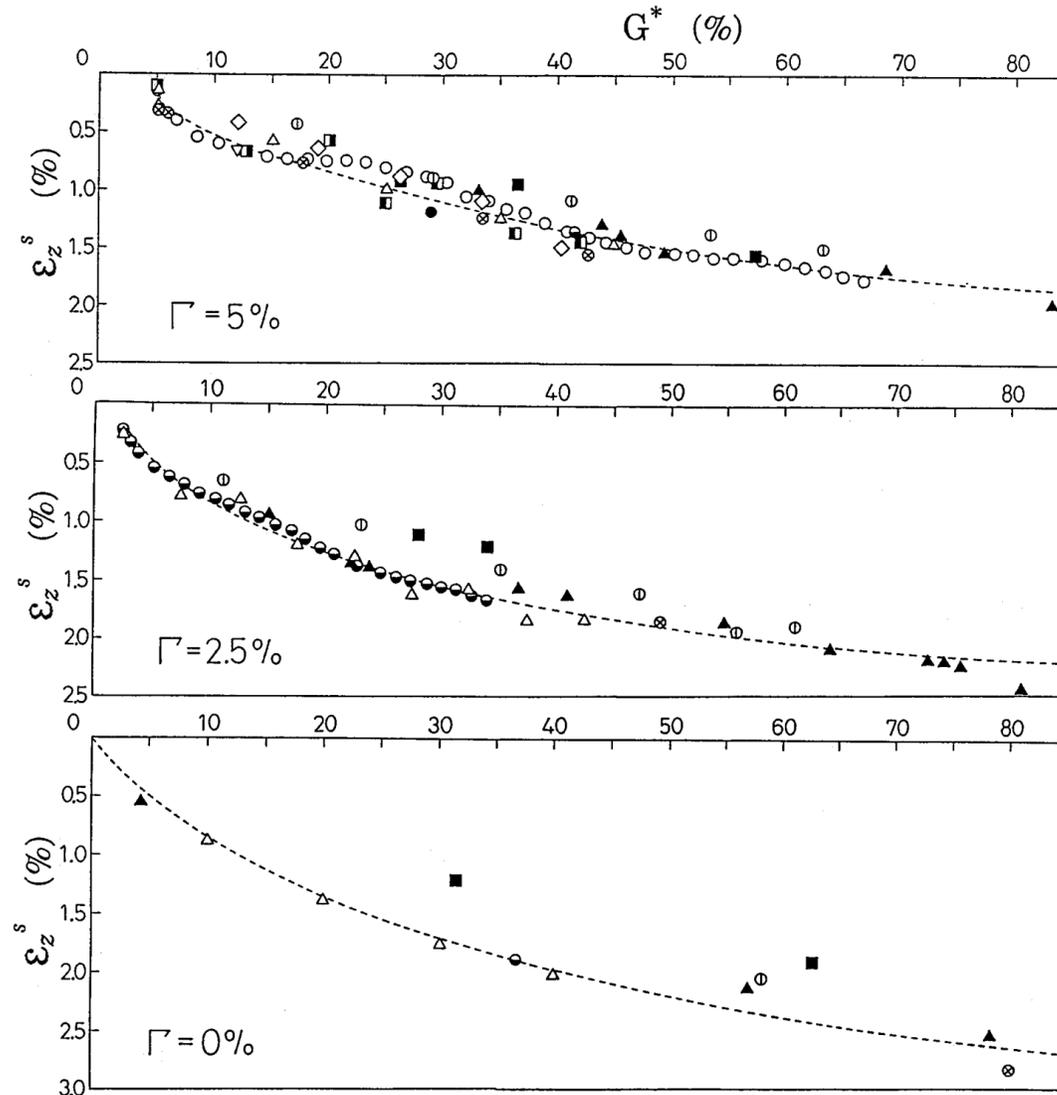
이력함수 모델과의 병용과 파라미터

여러 전단 경로에서의 $\Gamma \sim \sim \varepsilon_v^s$ 관계($G^*=10\%$)



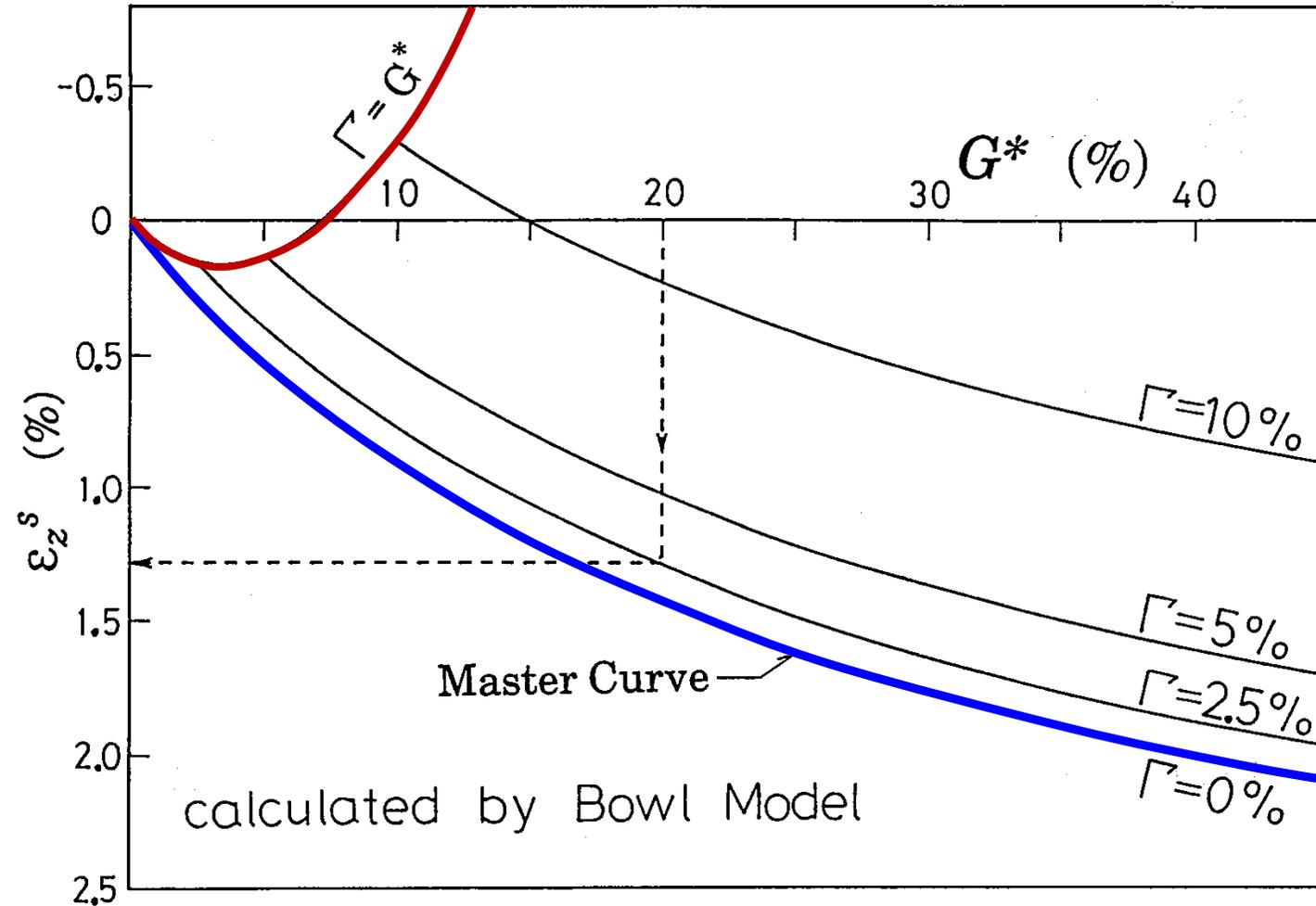
이력함수 모델과의 병용과 파라미터

여러 전단 경로에서의 $G^* \sim \varepsilon_v^s$ 관계 ($\Gamma=5\%$, 2.5% , 0%)



이력함수 모델과의 병용과 파라미터

Γ 을 파라미터로 한 $G^* \sim \varepsilon_v^s$ 관계



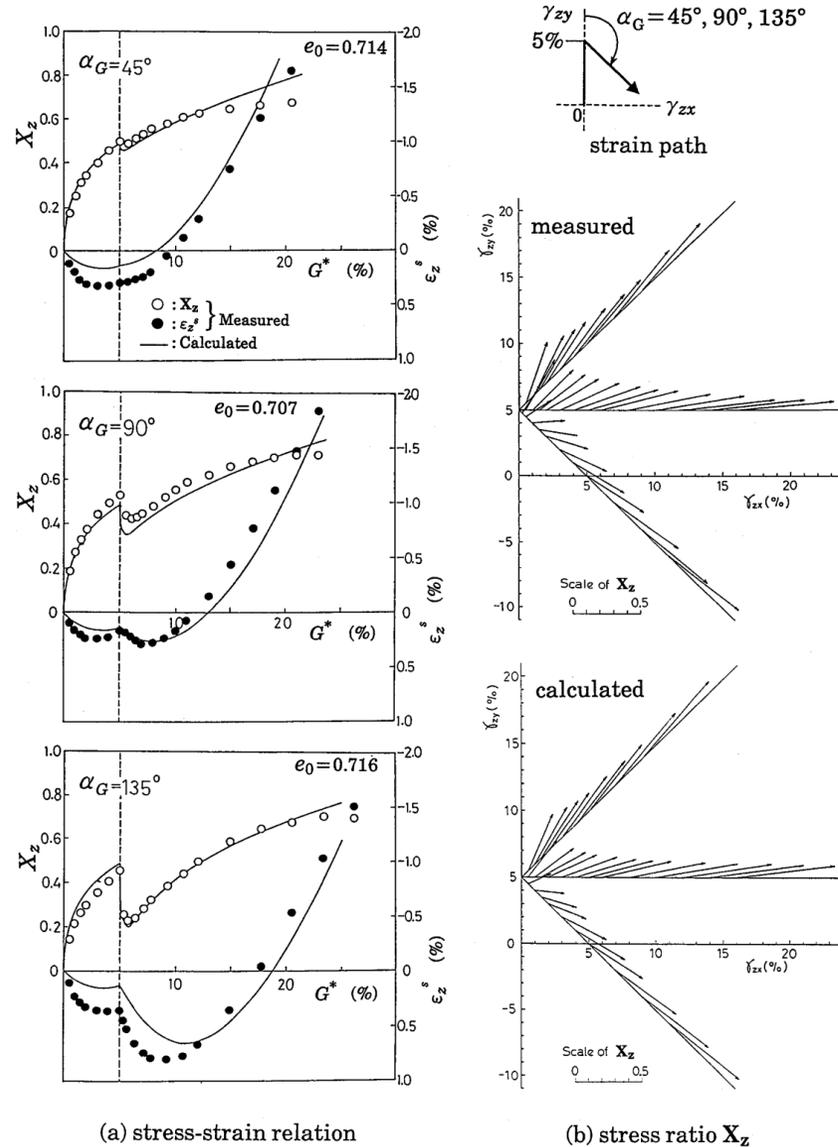
session.3

다양한 토질의 요소 계산 결과

- 1방향 및 다방향의 반복 전단 (오완모델의 검증)
- 밀도의 차이 · 모래, 실트, 점토의 차이
- 약액주입개량토

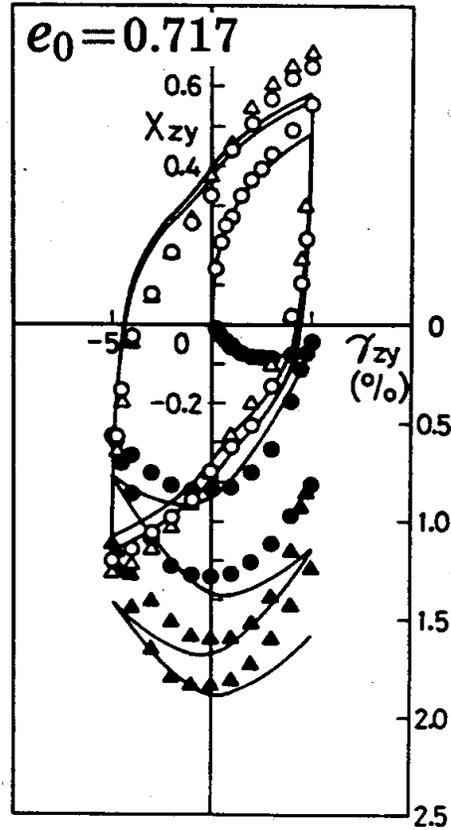
다양한 토질의 요소 계산 결과

응력·변형률·Dilatancy 관련 시뮬레이션 · 꺾은선 경로

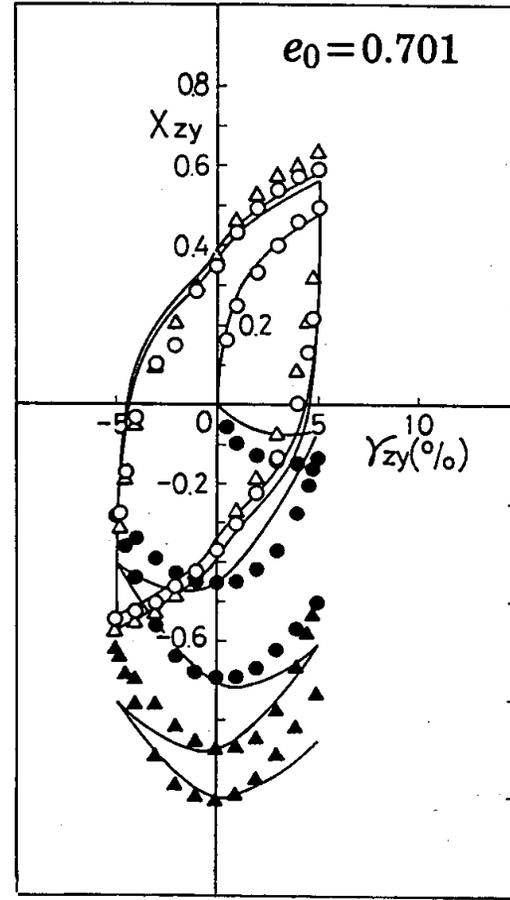


다양한 토질의 요소 계산 결과

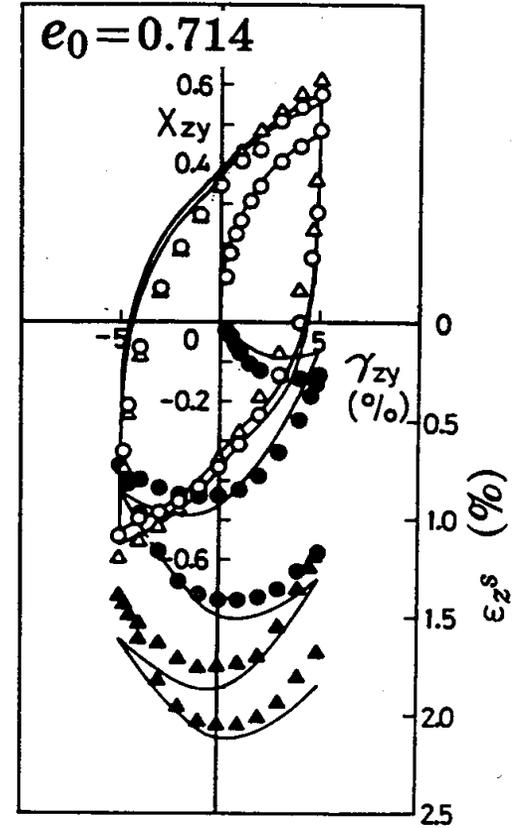
· 변형률 직선 경로



(a) $\sigma'_z = 100 \text{ kN/m}^2$



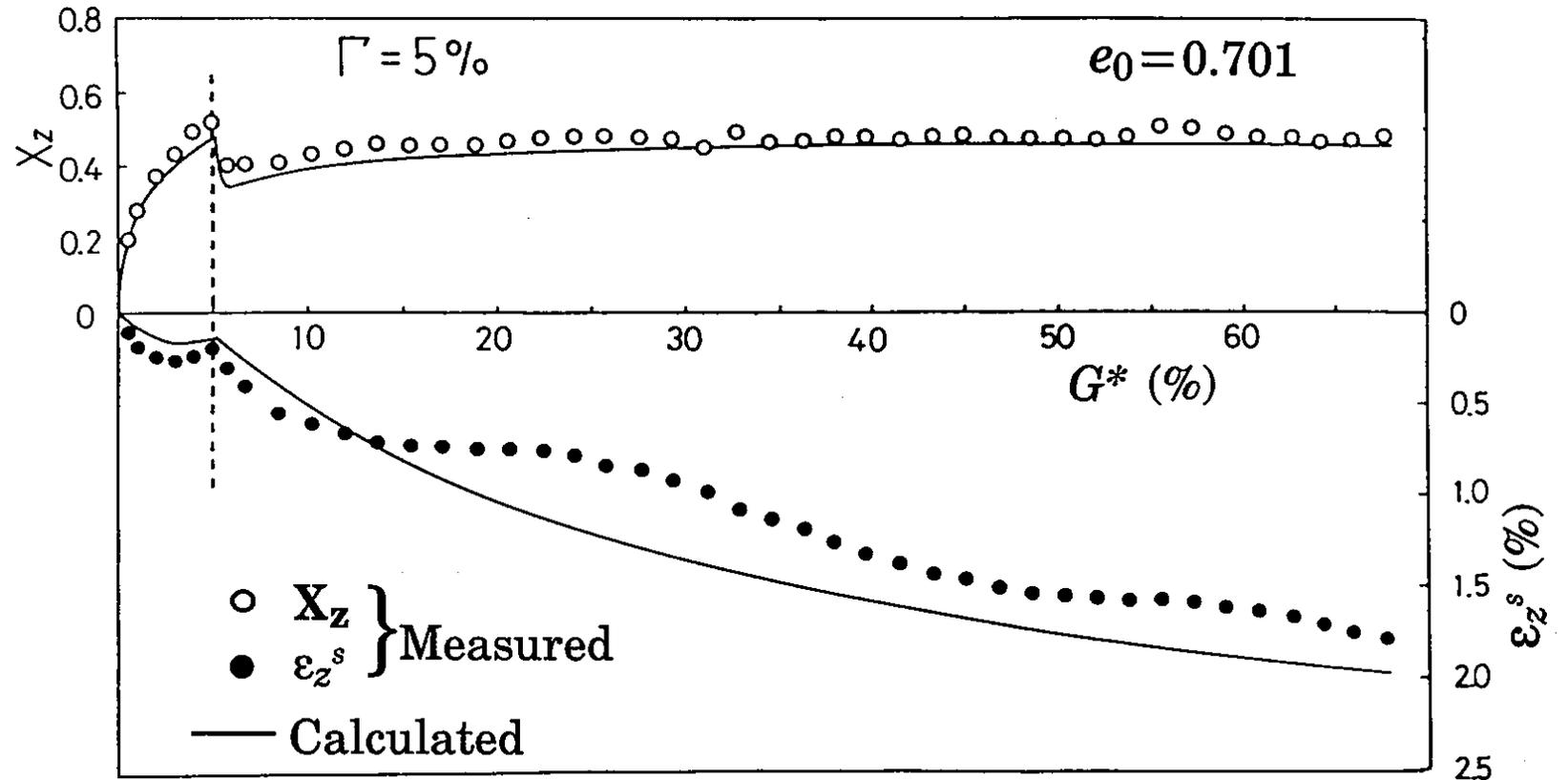
(b) $\sigma'_z = 200 \text{ kN/m}^2$



(c) $\sigma'_z = 500 \text{ kN/m}^2$

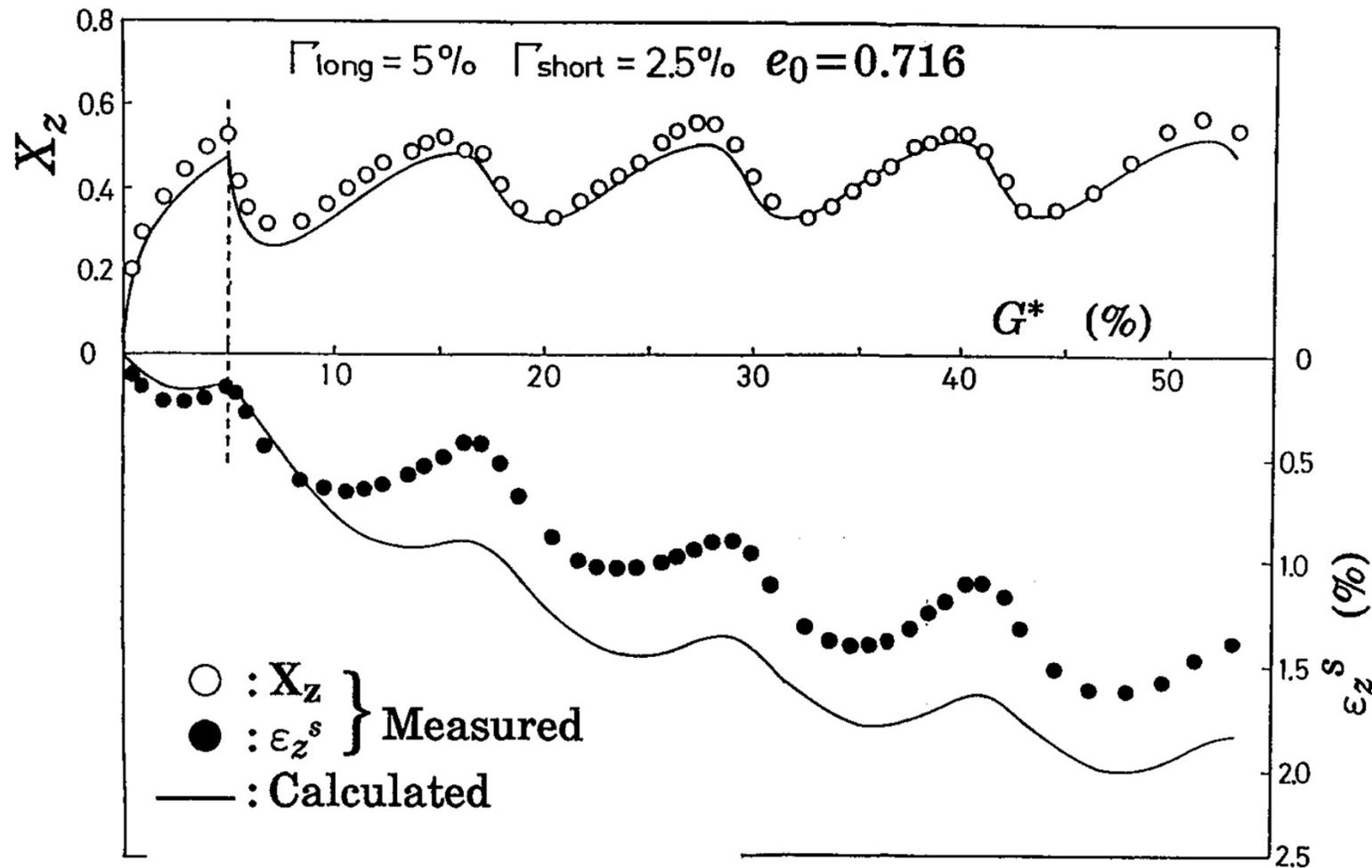
다양한 토질의 요소 계산 결과

· 변형률 원형 경로



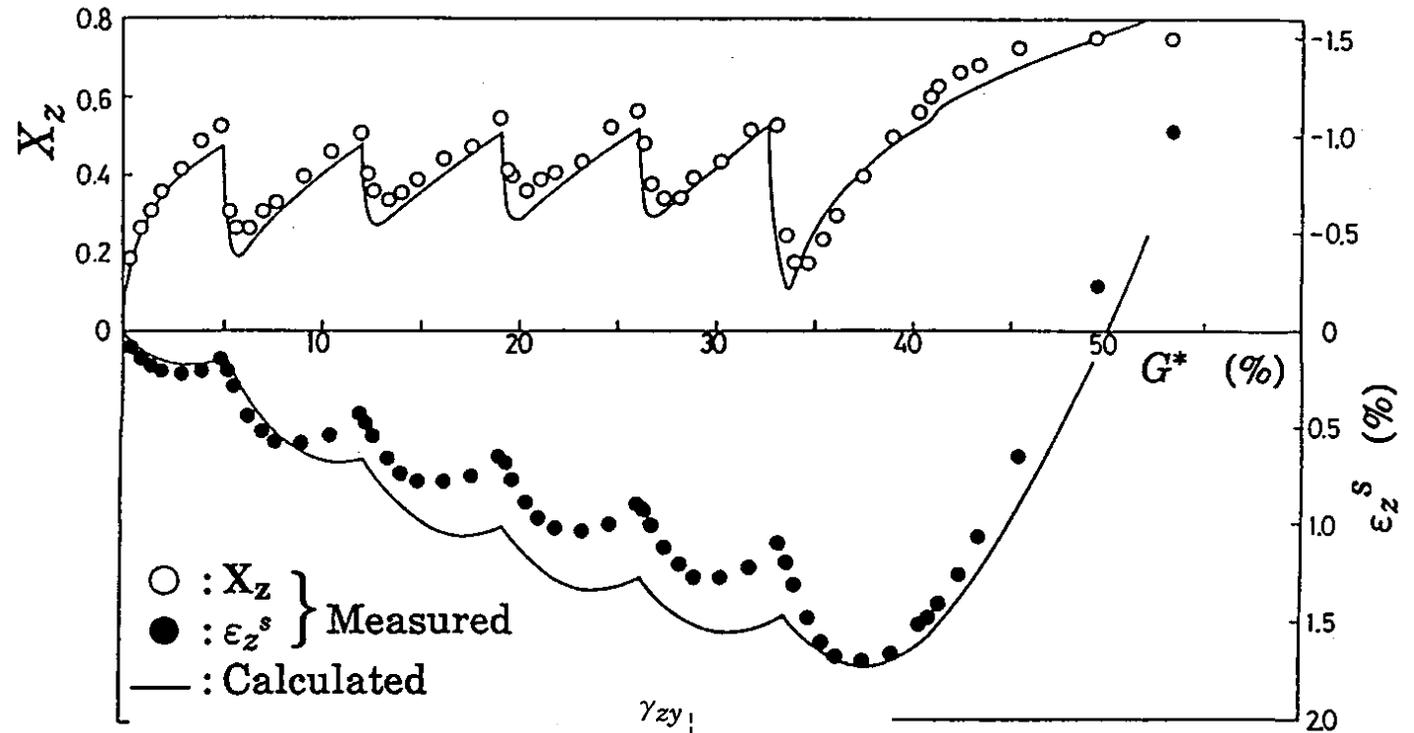
다양한 토질의 요소 계산 결과

· 타원 경로

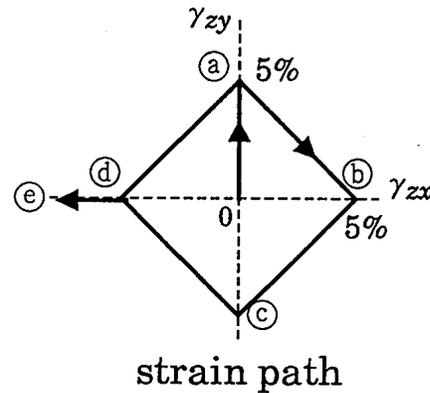


다양한 토질의 요소 계산 결과

·사각 경로

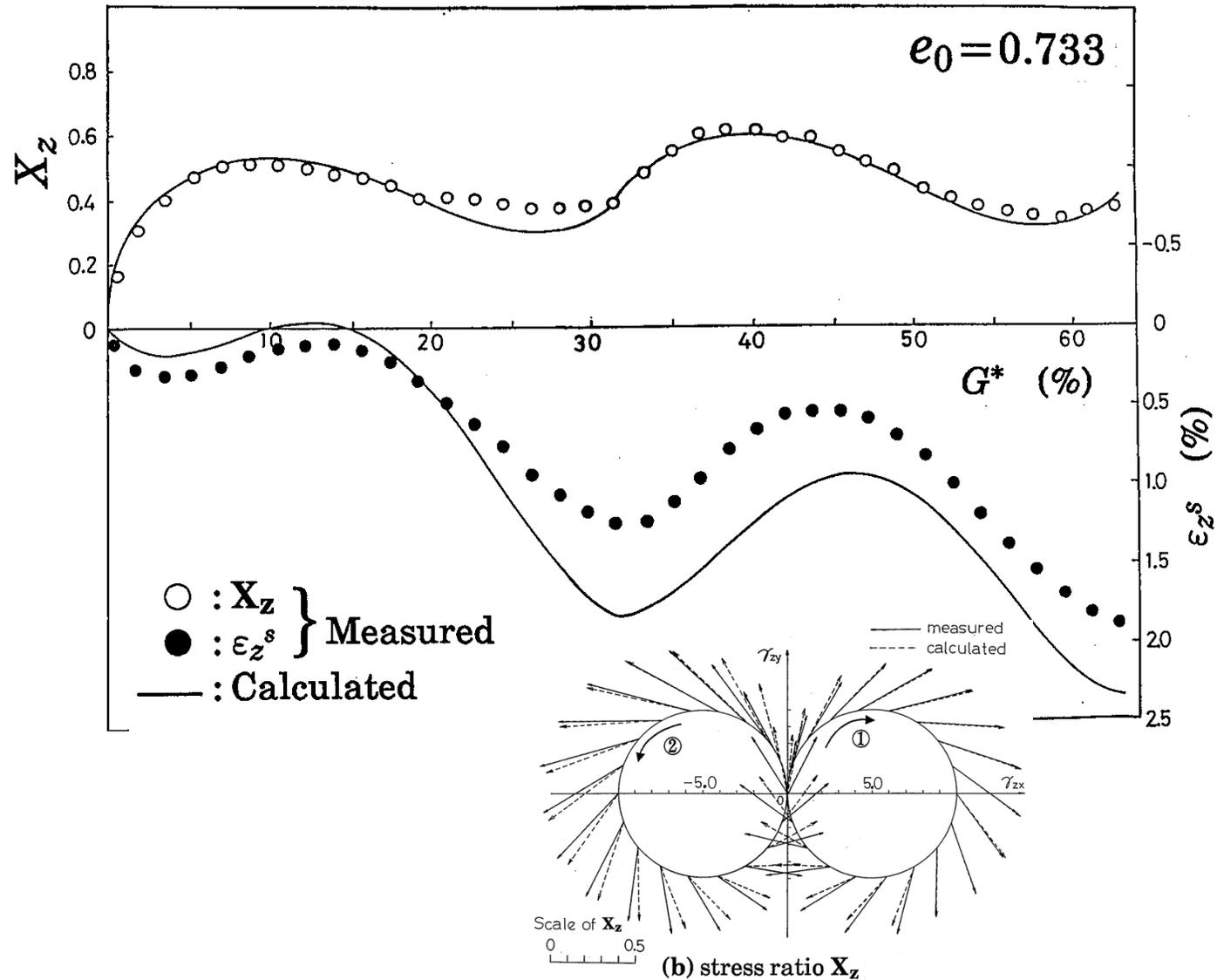


○ : X_z } Measured
 ● : ϵ_z^s } Measured
 — : Calculated



다양한 토질의 요소 계산 결과

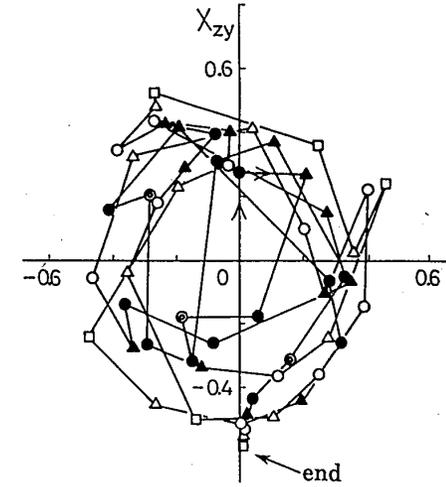
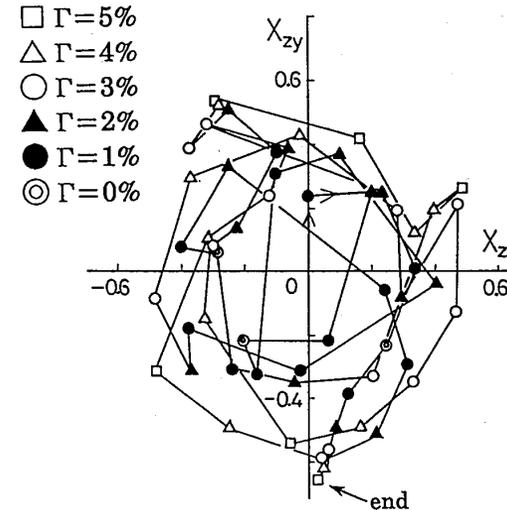
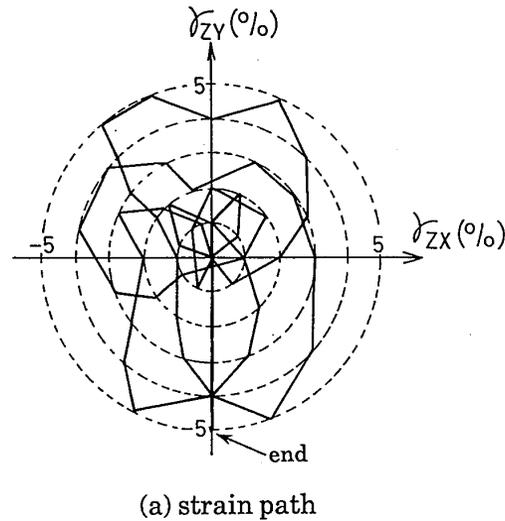
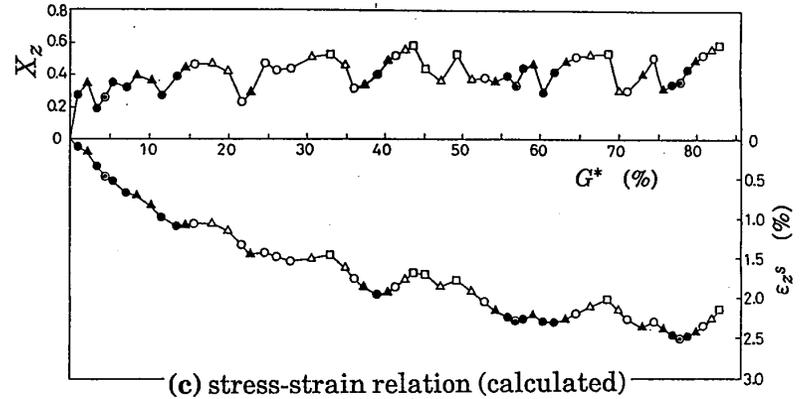
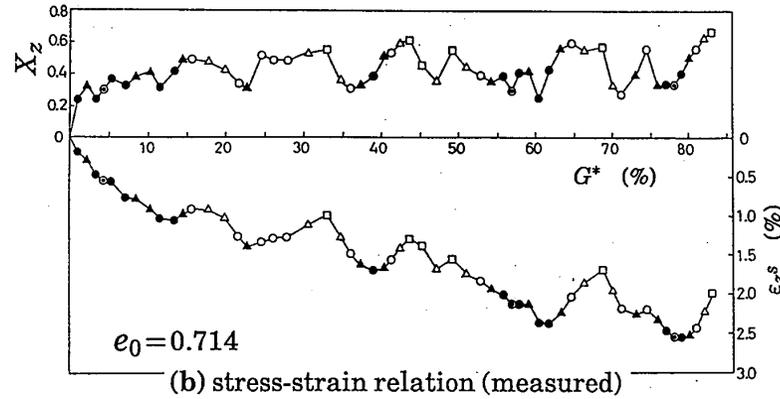
· 8자 전단 경로



다양한 토질의 요소 계산 결과

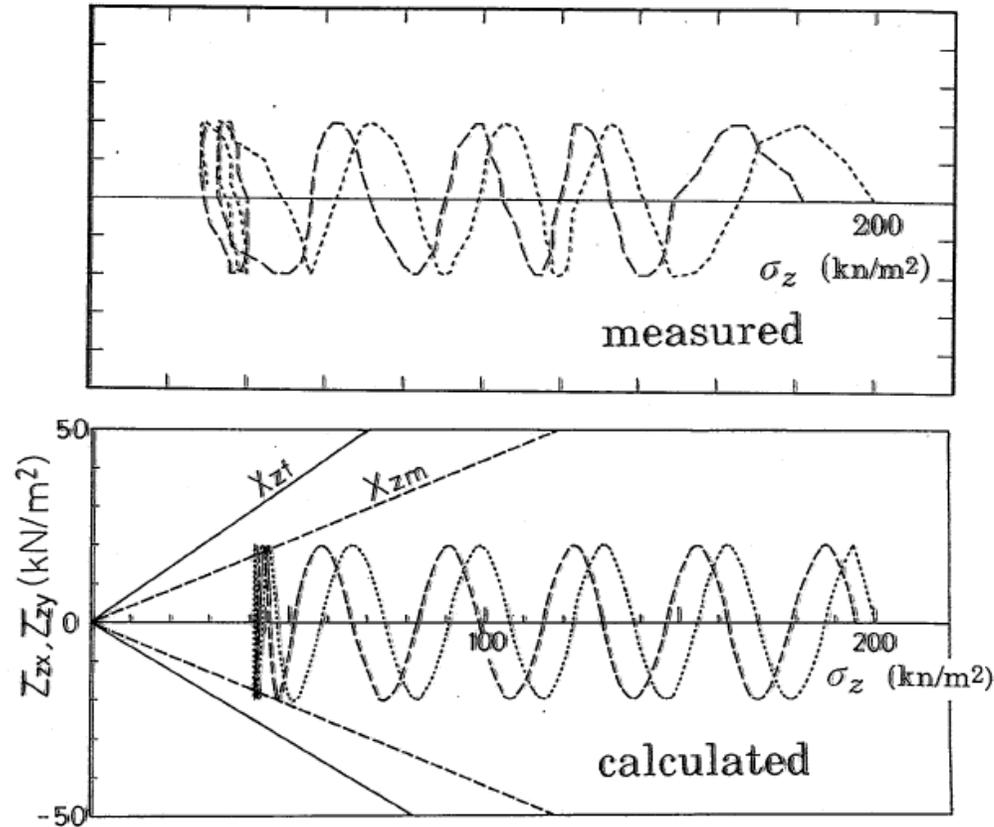
· 랜덤 변형률 경로

실험 전에 계산!



다양한 토질의 요소 계산 결과

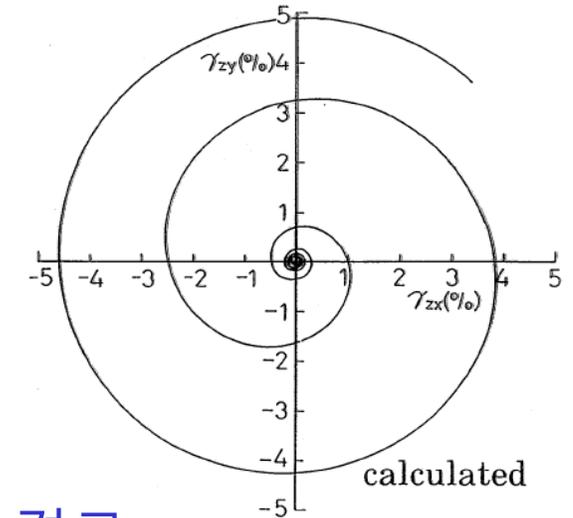
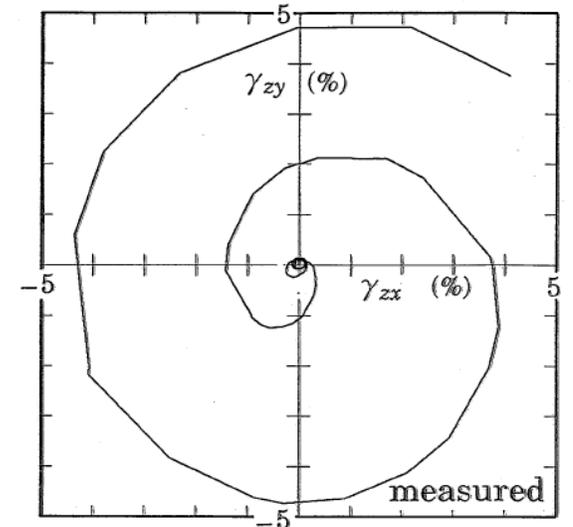
·원경로 : 비배수



(a) $\tau_z = 20 \text{ kN/m}^2$

유효응력경로

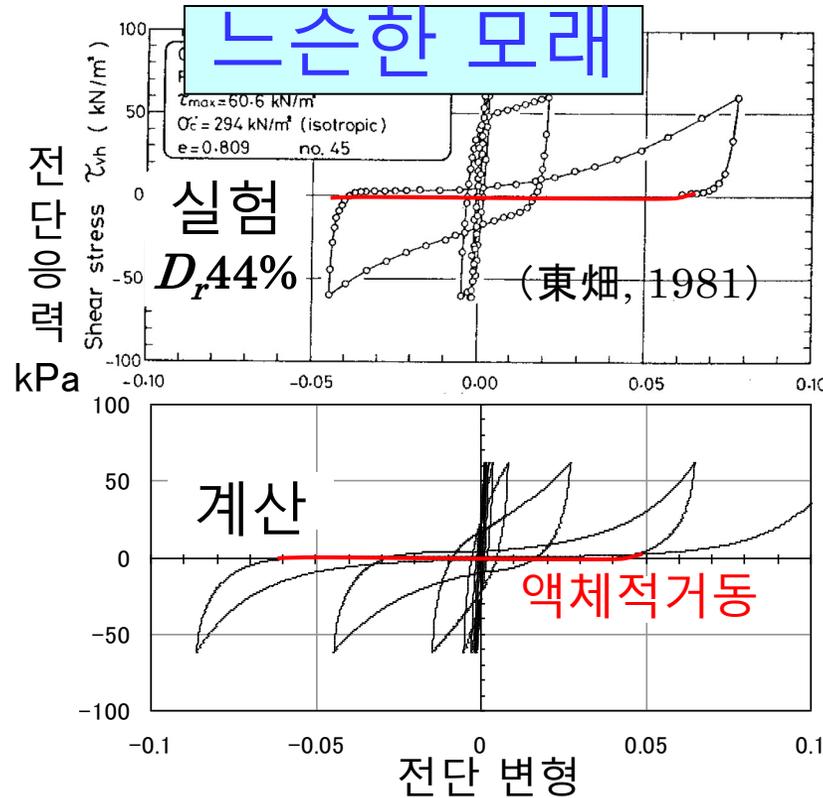
전단변형 경로



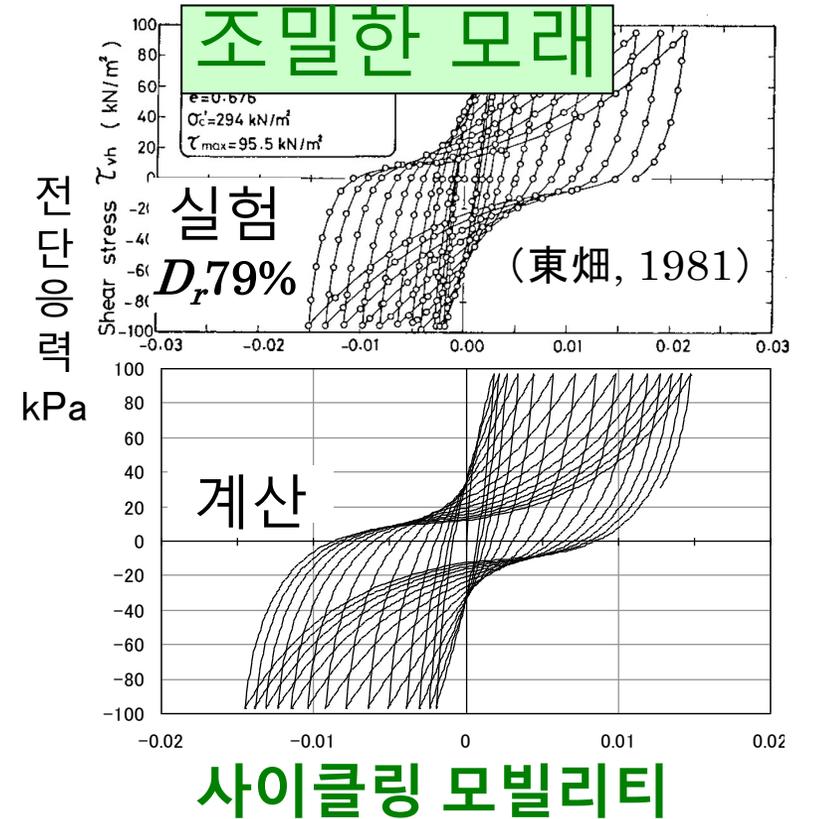
(a) $\tau_z = 20 \text{ kN/m}^2$

다양한 토질의 요소 계산 결과

· 반복시험 결과와 구성식에 기반한 시뮬레이션



느슨한 모래는 한번에 액상화 됨



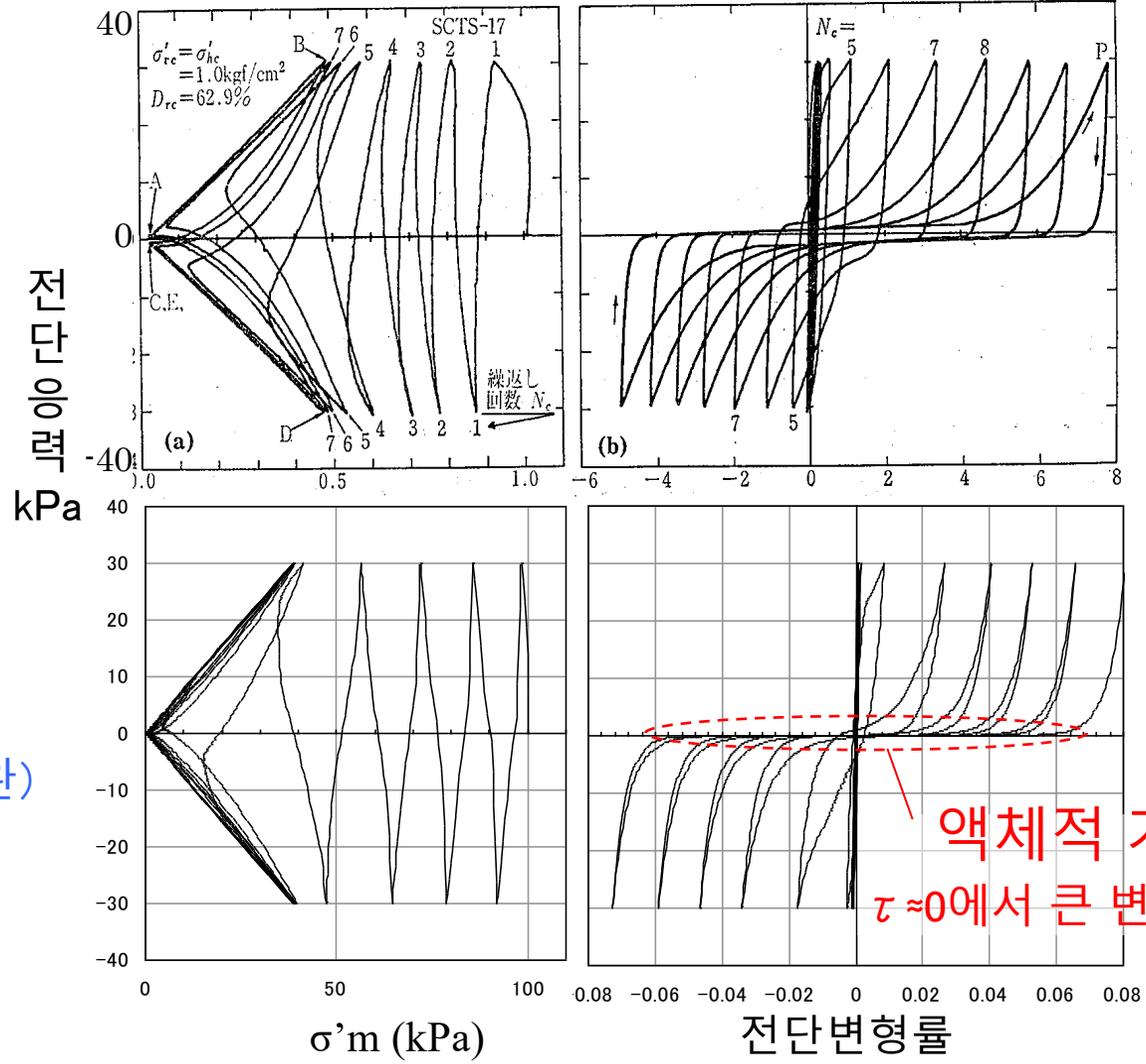
조밀한 모래는 "점착력"이 있으며 액상화 되기 힘들 (\rightarrow SCP)

다양한 토질의 요소 계산 결과

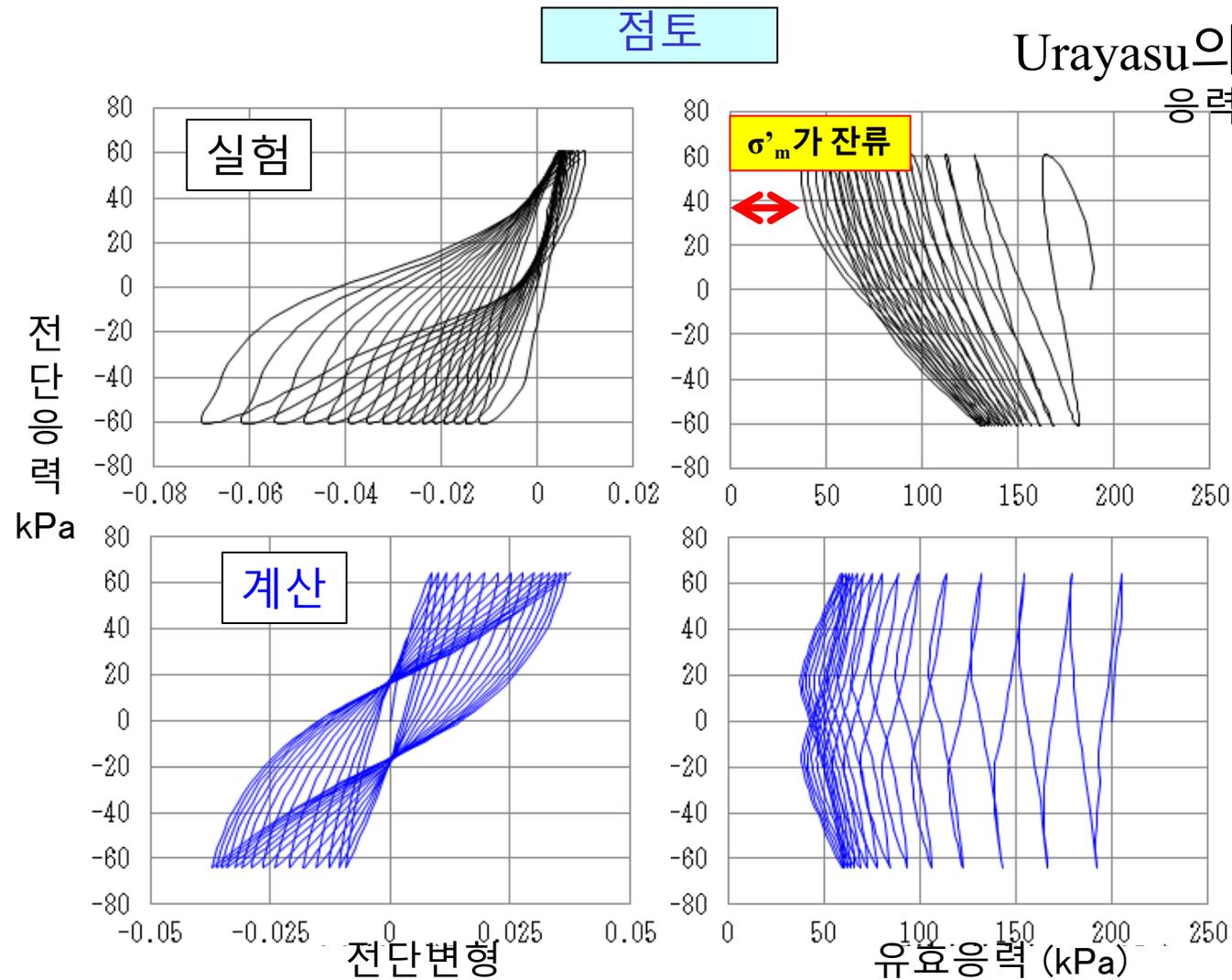
실험

계산
(쌍곡선
+오완)

$D_r=63\%$



다양한 토질의 요소 계산 결과

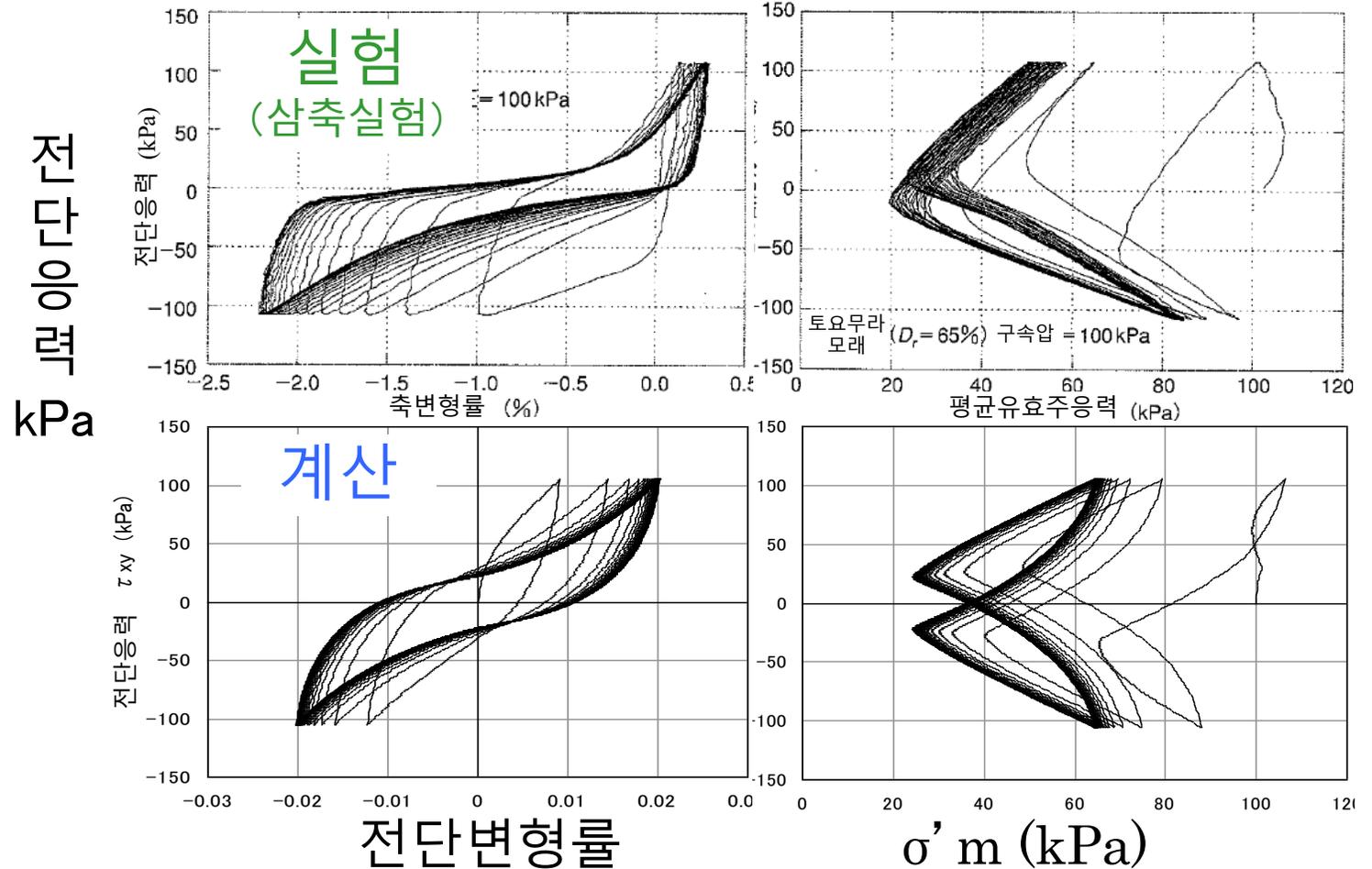


- 변형이 서서히 증가(연화 함)
- 유효응력은 0이 되지 않음(액상화는 일어나지 않음)

다양한 토질의 요소 계산 결과

개량토 (Toyoura sand) 의 요소시험 시뮬레이션

$D_r=65\%$ 약액주입개량체 Silica계 약품 4% 침투

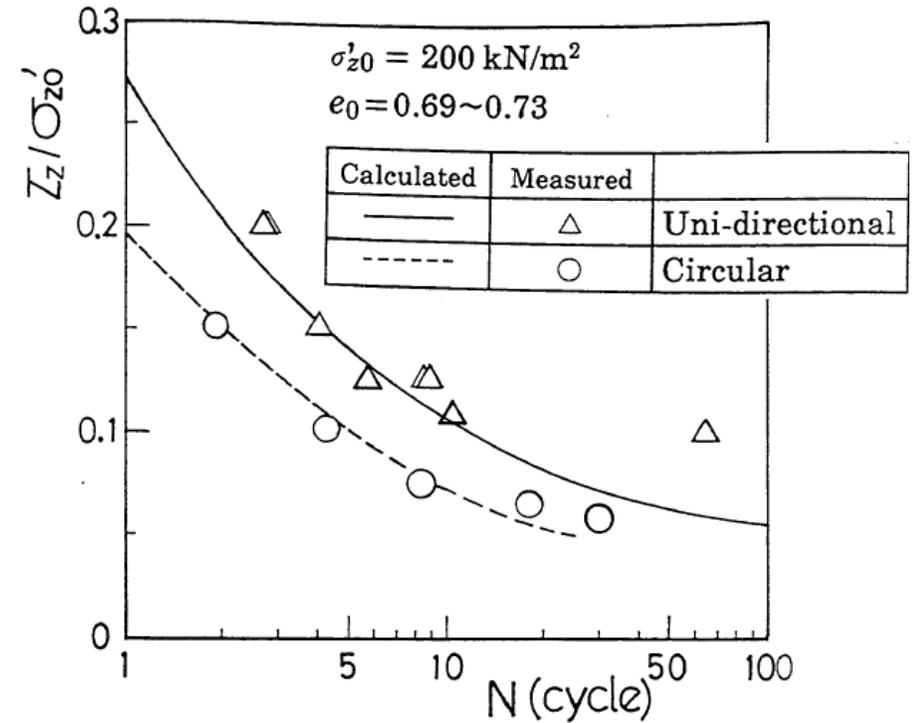
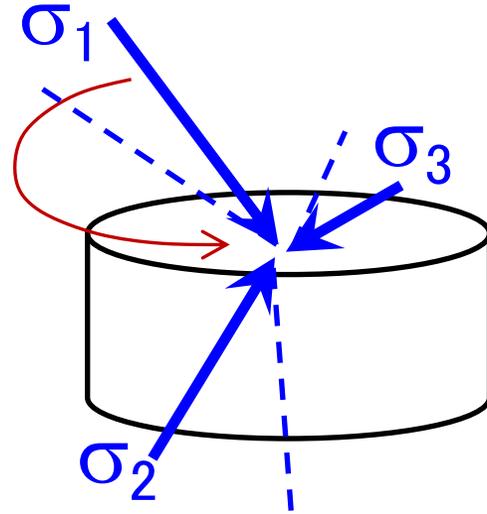


(실험: 社本ら, 2006, 해석: 福武ら, 2008a)

다양한 토질의 요소 계산 결과

원경로 반복 전단

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 값은 변하지 않고 방향만 회전
→ 일반적인 탄성-플라스틱 이론에서는 평가가 어려움



$\Gamma = 5\%$ 에 이르는 반복회수 N 과 반복응력비 (τ_z / σ'_{z0}) 관계

session.4

해석 사례

- 연직배열 관측 기록
- 모형진동실험 (E-defence, 점토원심실험)
- 나가오카 고등전문학교 캠퍼스 성토포해、
- 현업 적용 사례

해석 사례

순차비선형 해석 방법

■ 운동방정식

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + \mathbf{f}(\mathbf{u}) = F(t) = -m\ddot{u}_g \quad u \rightarrow \Delta u$$

비선형 복원력 τ 증분형

■ 공간

- ◎ 유한요소법
- 차분법



■ 시간(차분) ... 시간 영역에서 Step by Step

- ◎ Newmark- β , ○ Wilson- θ , ○ Runge-Kutta 법
- 중앙차분

■ 증분법, 반복법 → Hysteresis를 충실히 추적

증분 형태의 운동방정식=

$$[K]_i \{x\}_i + [C]_i \{\dot{x}\}_i + \frac{[K]_i \{\Delta x\}_{i+1} + f_{i-1}}{\Delta t} = \text{외력}$$

Δx : i 로 부터 $i+1$ 의 사이에 발생하는 변위 증분

해석 사례

유효응력 해석 (기본식)

① 유효응력의 정의식: $\{\sigma'\} = \{\sigma\} - p_w\{m\}$

($\{m\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$: Kronecker의 δ 에 해당)

② 흙골격의 구성방정식: $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$

③ 변형률·변위식: $\{\varepsilon\} = [L]\{u\}$ ($[L]$: 미분 오퍼레이터)

④ 2상계 전체의 균형식:

⑤ 물의 균형식: (Darcy 법칙 + 흙과 물의 상호작용식 + 관성력)

⑥ 연속 방정식:

(흙요소의 체적변형 =

물의 입출입에 따른 변형 + 수압변화에 따른 변형률)

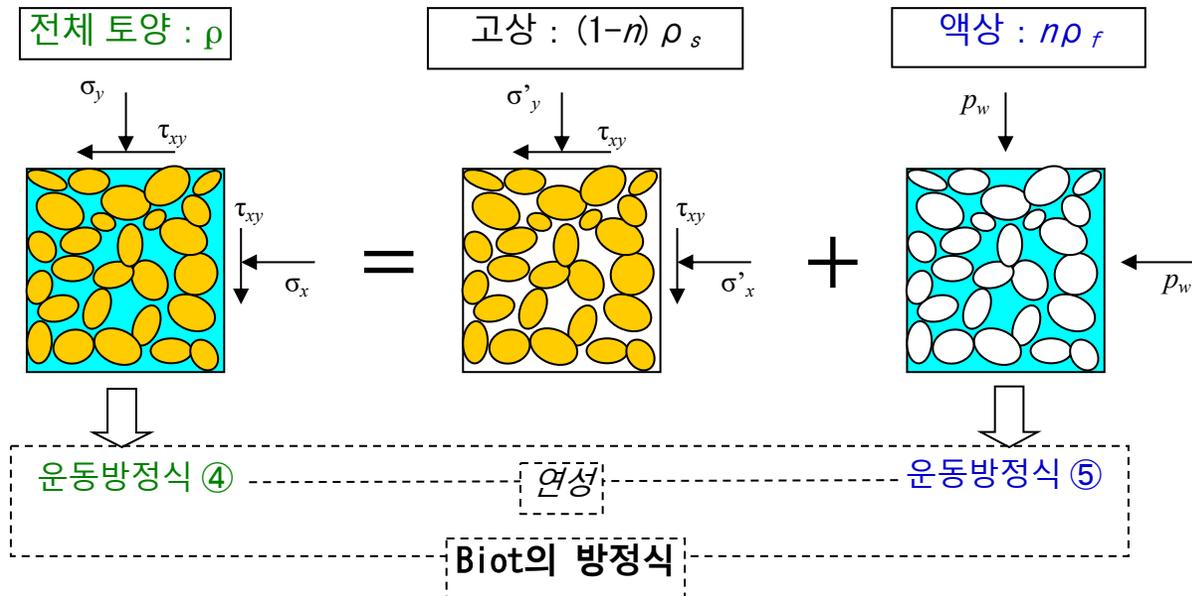
→ 기초식(2상계의 식)의 여러 근사화

해석 사례

2상계 유효응력 해석

포화된 토양의 총 응력과 유효응력의 관계 및
토양 전체의 균형식④과 **액상의 균형식⑤**

ρ : 토양 전체의 질량
 ρ_s : 토양 입자의 질량
 ρ_f : 물의 질량
 n : 간극률=공극체적/전체체적



해석 사례

운동방정식

- 전체 응력 해석 (1상계)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\ddot{u}_g [M]\{1\}$$

- 유효응력 해석 (2상계) u : 토양골격의 변위
 U : 물의 변위

$$\begin{bmatrix} [M^u] & [0] \\ [0] & [M^U] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{U}\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C^{uu}] & -[C^{uU}] \\ -[C^{uU}]^T & [C^{UU}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{U}\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K + K^{uu}] & -[K^{uU}] \\ -[K^{uU}]^T & [K^{UU}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u\} \\ \{U\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F^u\} \\ \{F^U\} \end{bmatrix}$$

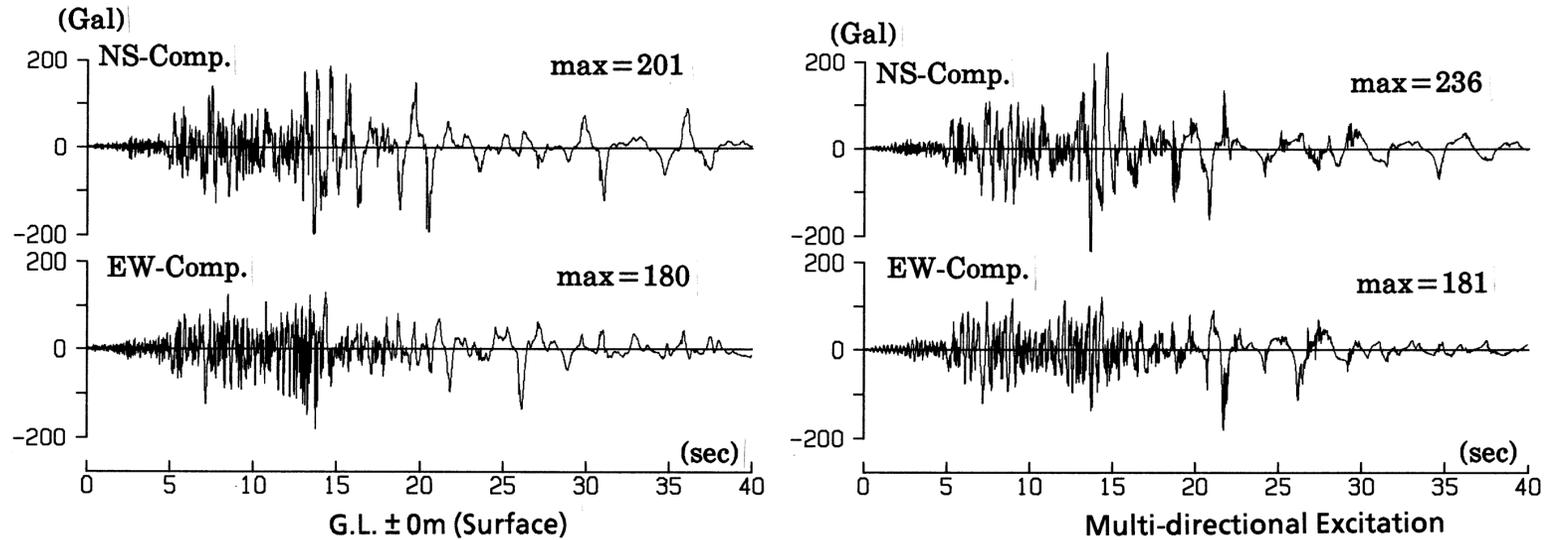
□ 고상
□ 액상
□ 연성

해석 사례

지진동 아레이 관측기록과의 비교

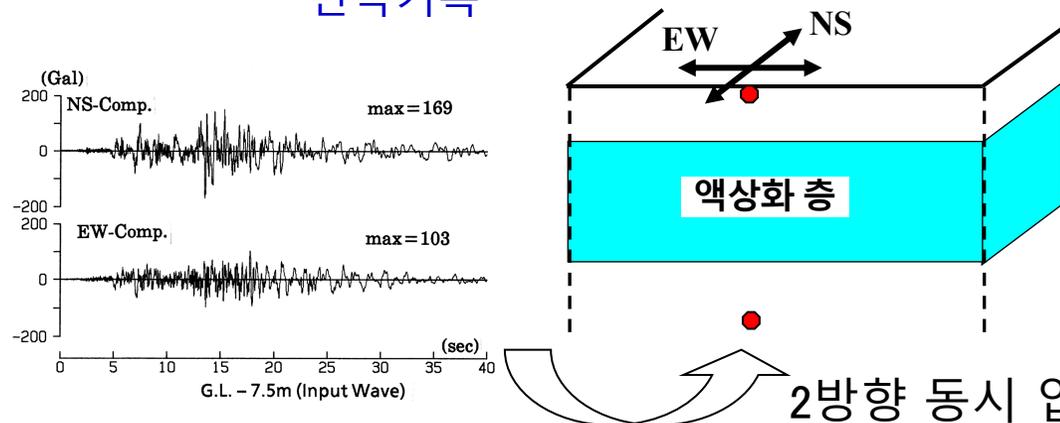
1987년 Superstition Hills 지진

(福武ら, 1997)



관측기록

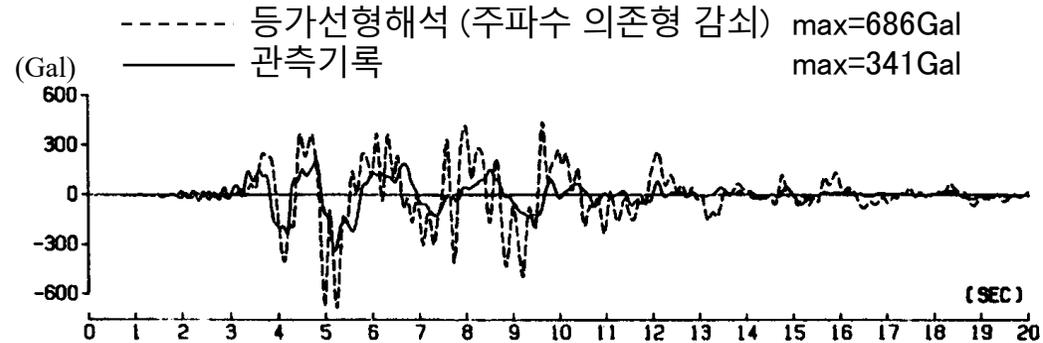
계산결과



※1방향 진동은 재현성이 좋지 않음

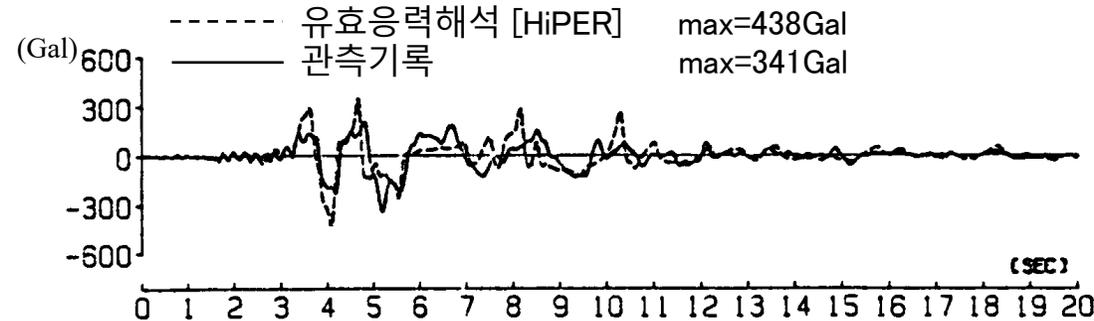
해석 사례

효고현 남부 지진에서 고베 포토 아일랜드의 지표 가속도 시간이력 (NS성분)의 비교



(福武ら, 1997)

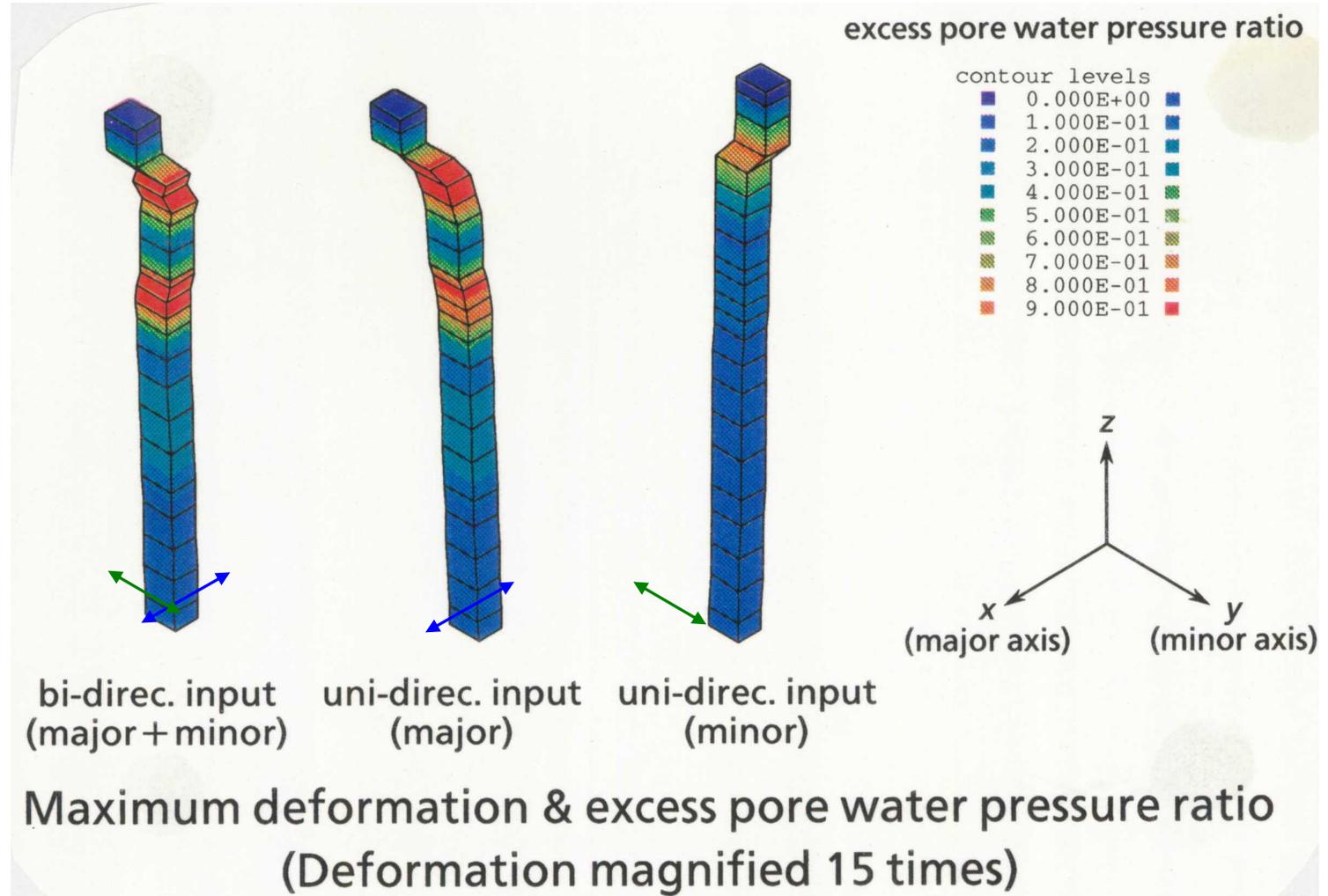
(a) 등가선형해석(주파수 의존형 감쇠)과 관측기록의 비교



(b) 유효응력해석(R-O+오완모델)과 관측기록의 비교

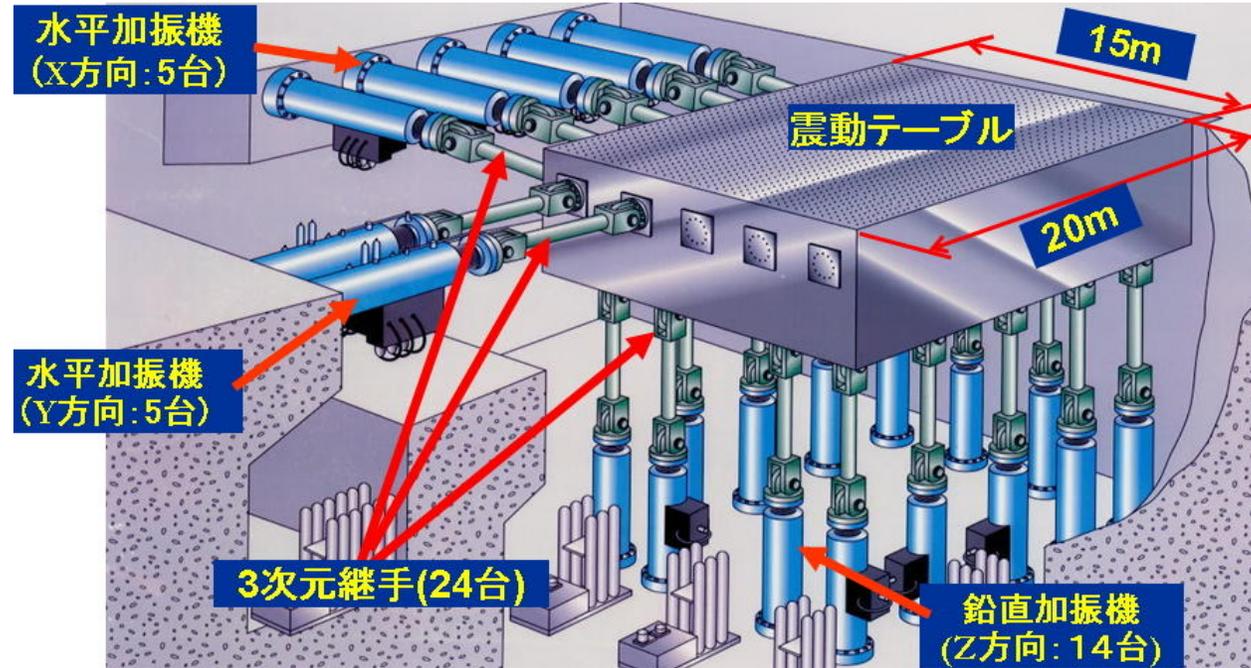
해석 사례

고베 포토 아일랜드의 최대 변형과 과잉 간극 수압의 비교



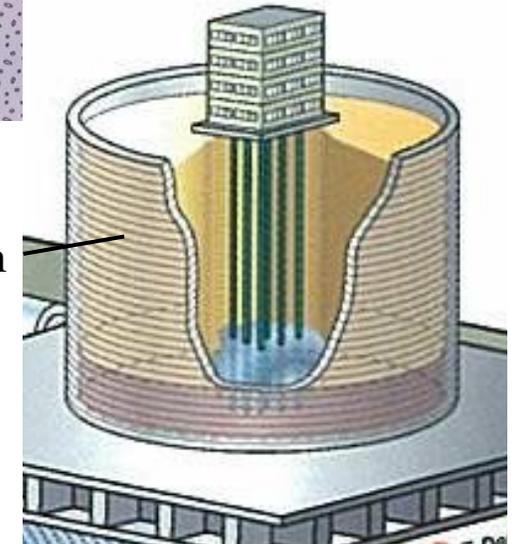
해석 사례

E-Defense (세계 최대 진동대 실험)



- 지반·말뚝·건물계
- 건조된 모래지반
 - 포화된 모래지반

높이 6.5m × 지름 8m



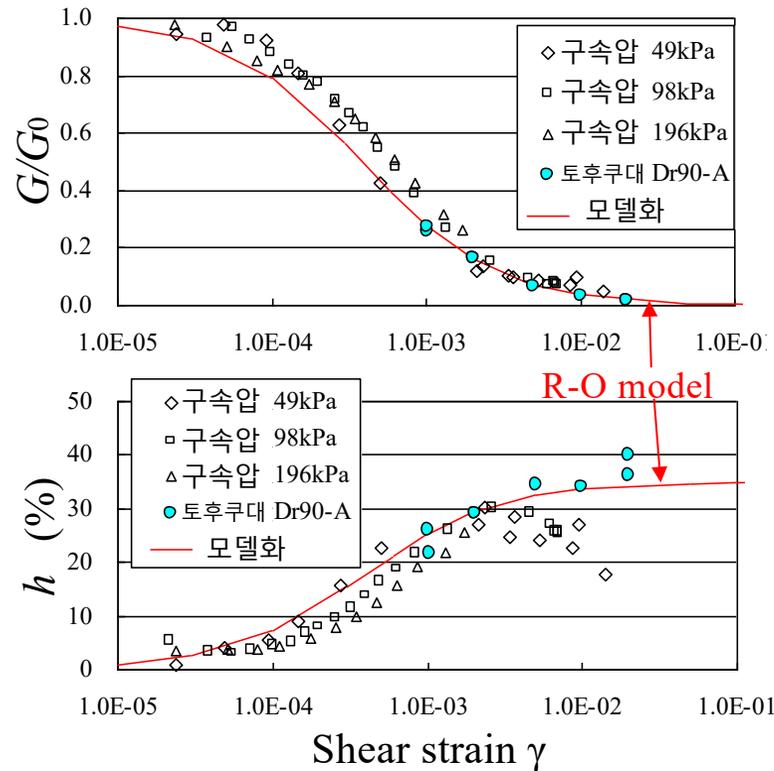
※ 실험 전 예측 분석

(방재과학기술연구소, 2006, 2007)

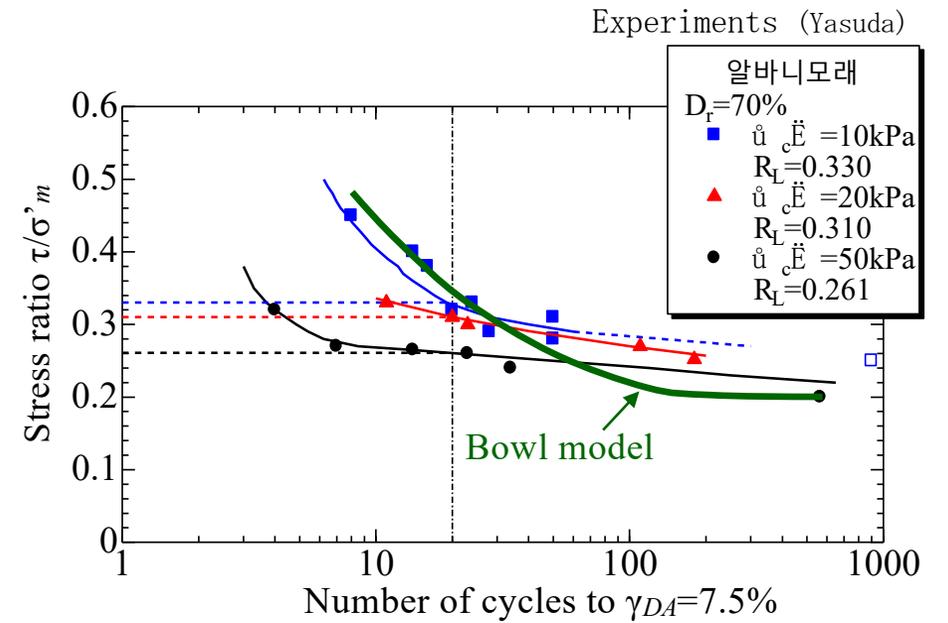
해석 사례

Determination of Parameters

R-O model

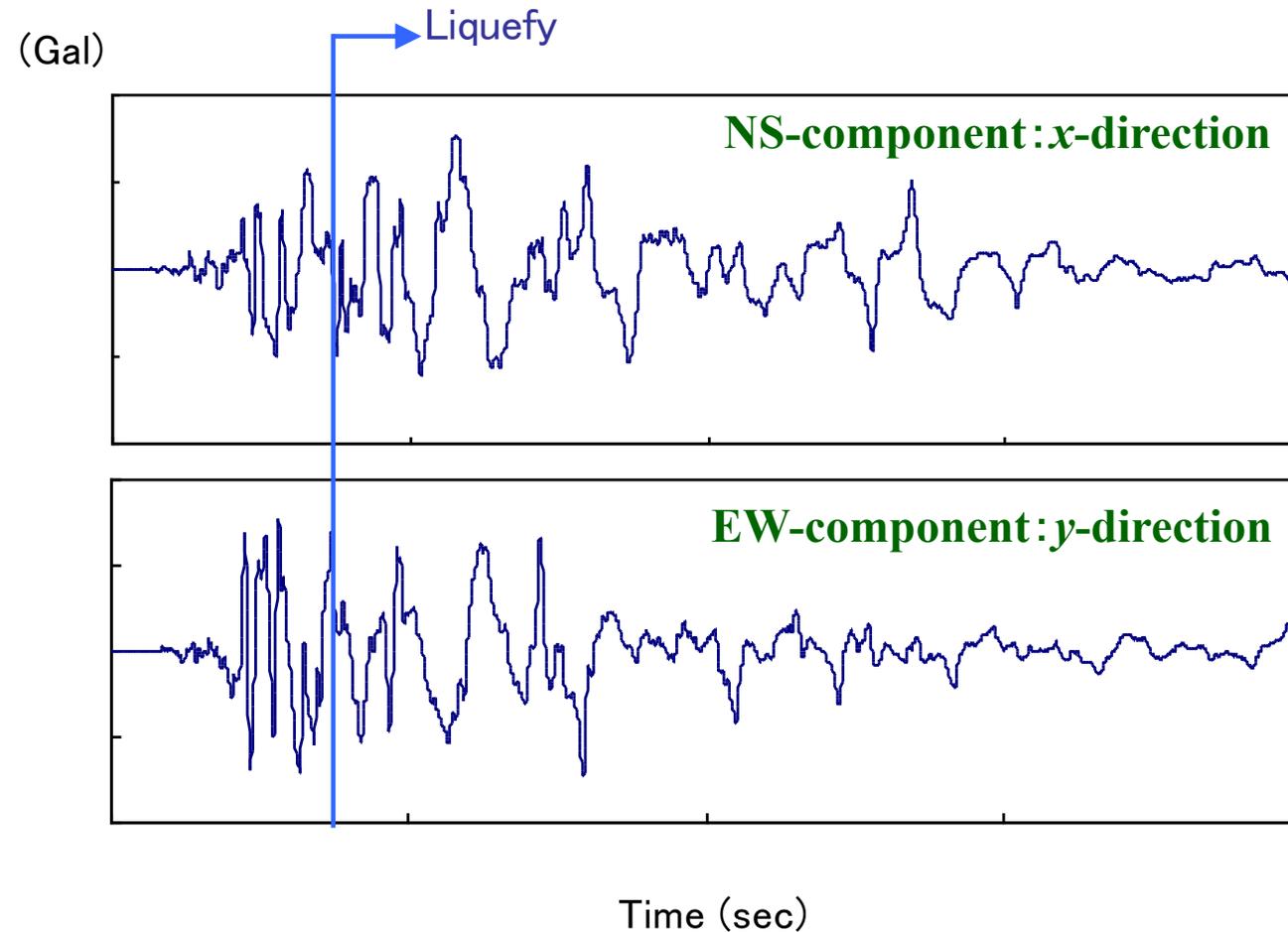


Bowl model



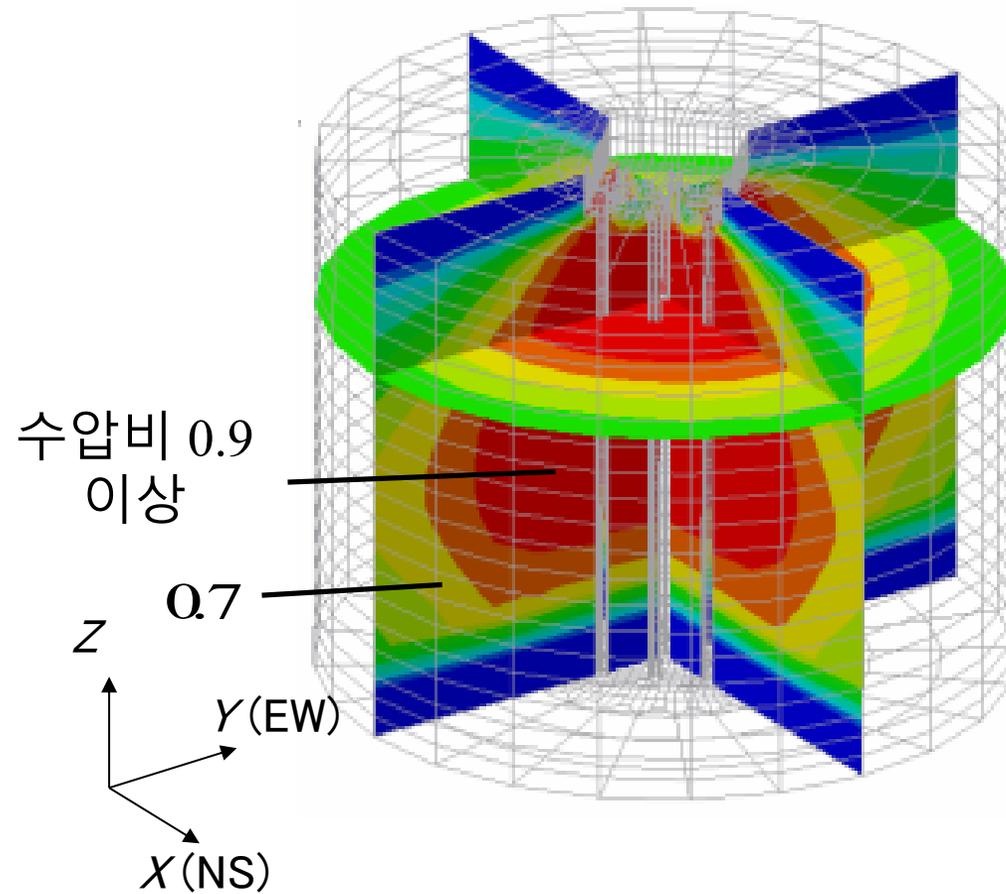
해석 사례

Input motion (Observed records in JR-Takatori station, 1995 Hyougo-ken Nambu Earthquake) $\times 0.3$



해석 사례

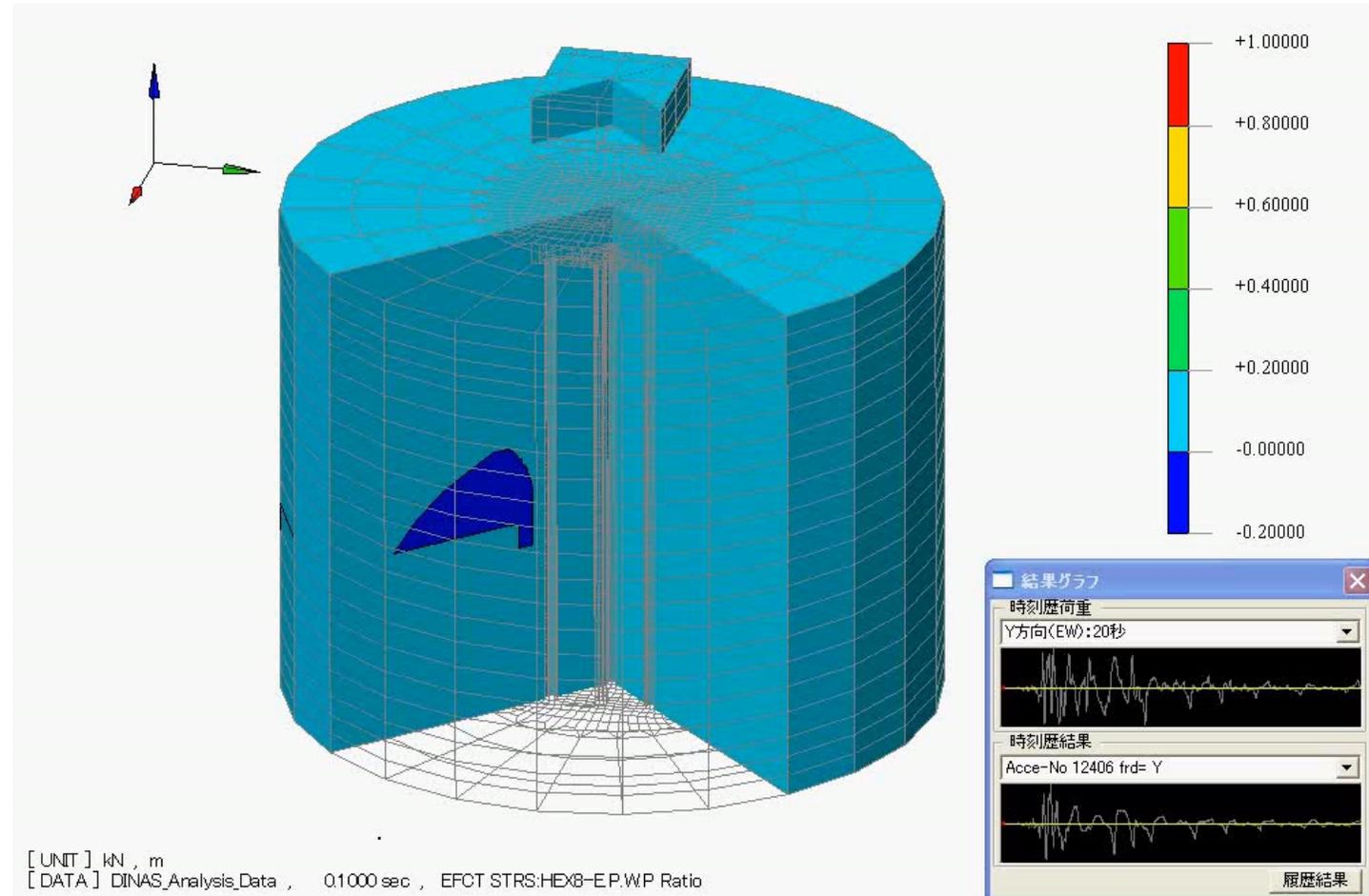
진동에 의한 과잉간극수압비의 컨투어(진동을 가하는 중)



가진 중의 기초 주변 상황

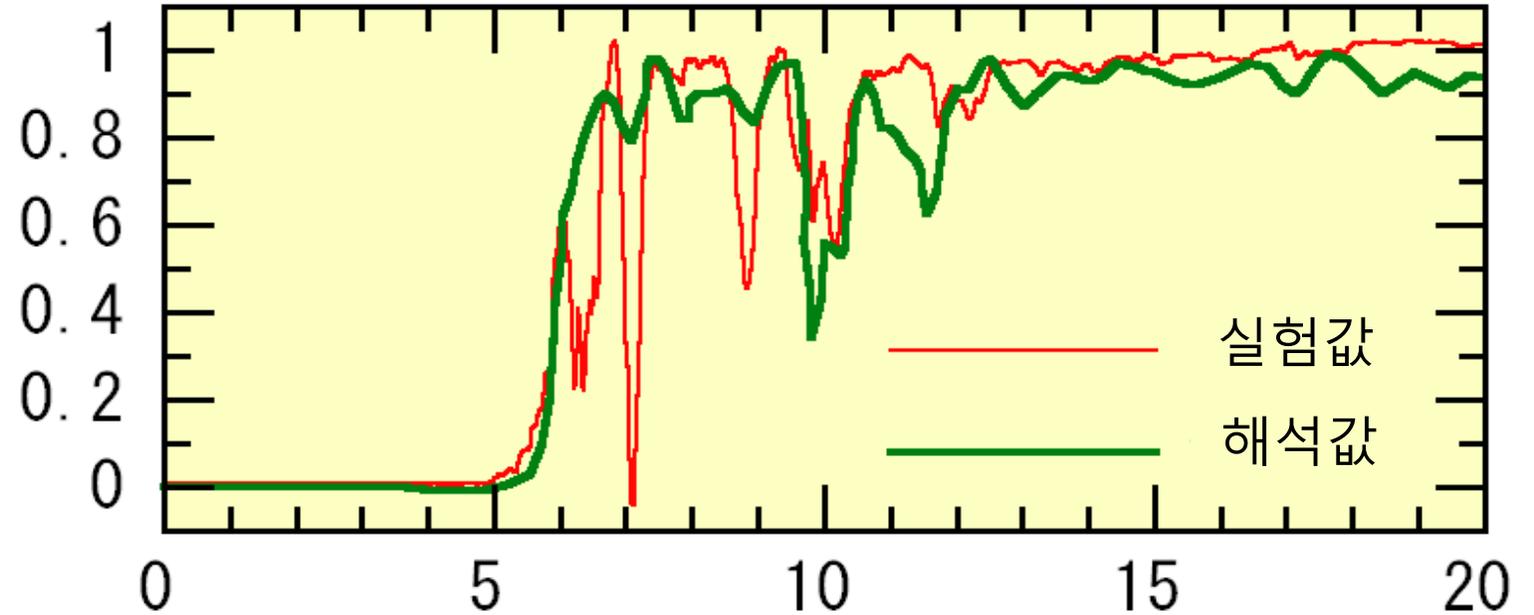
해석 사례

과잉간극수압비 Animation



해석 사례

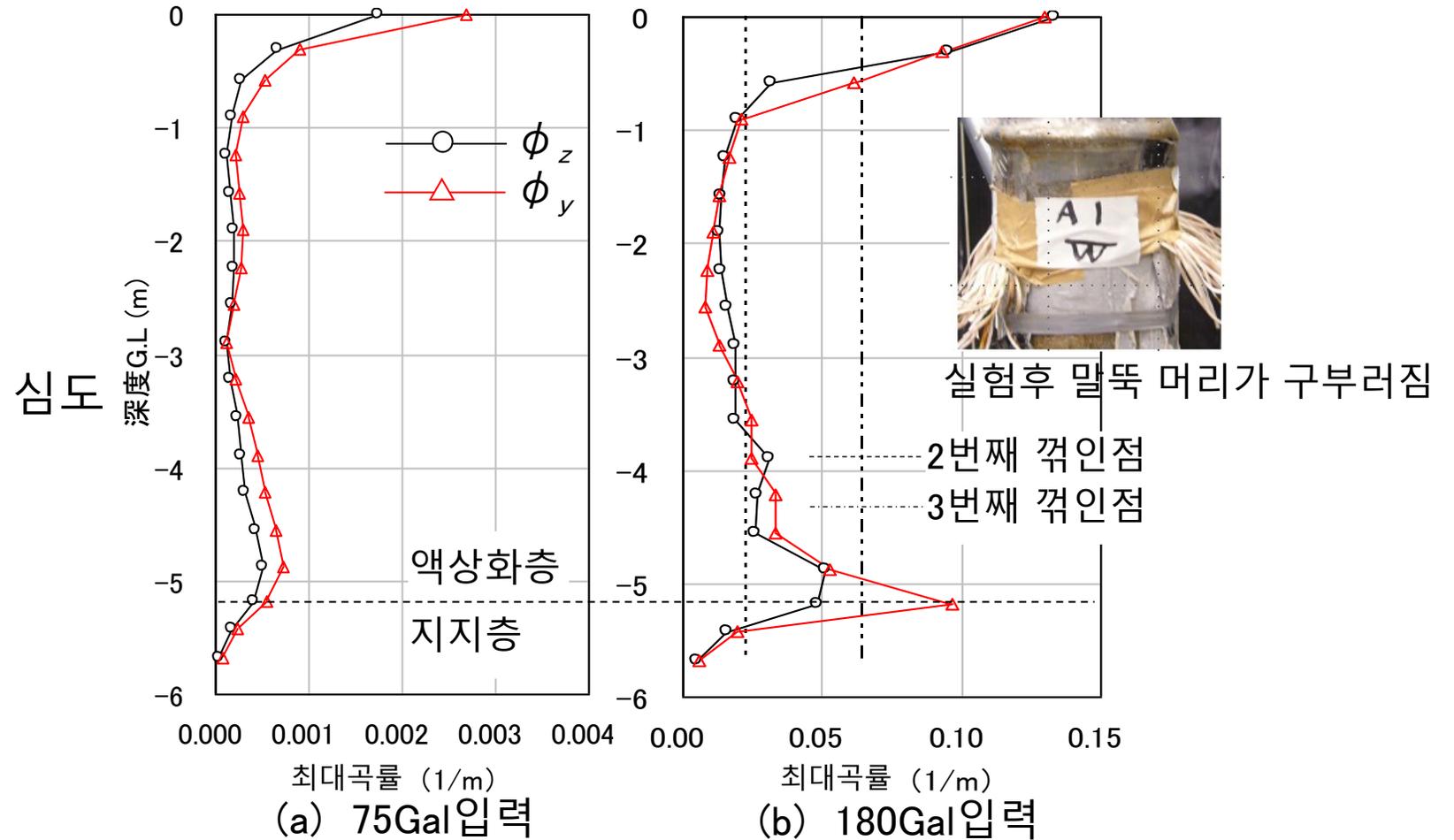
과잉간극수압비의 시간이력



해석 : 180Gal 입력(원파의30%)、실험 : 목표진폭의 40%

해석 사례

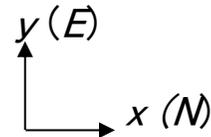
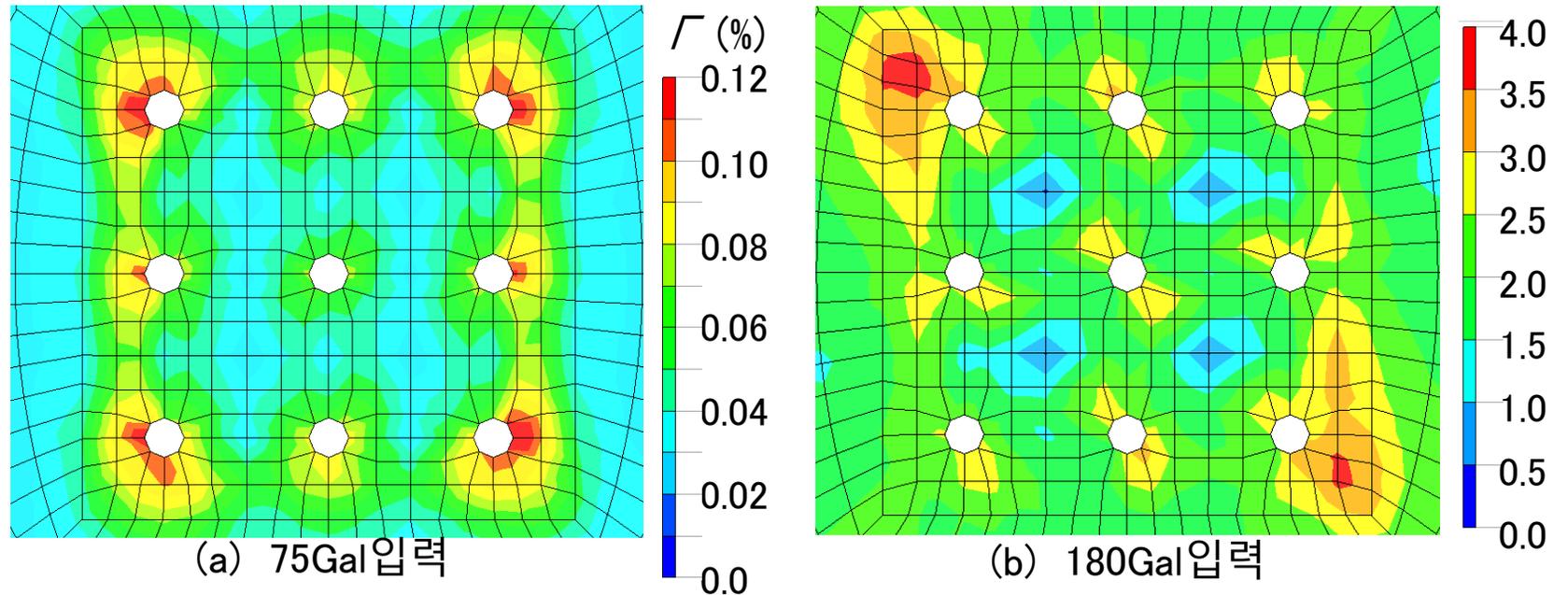
말뚝의 곡률 ϕ 의 최대 깊이 분포 (모퉁이 말뚝)



해석 사례

기초 저면 심도의 합 전단 변형율

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

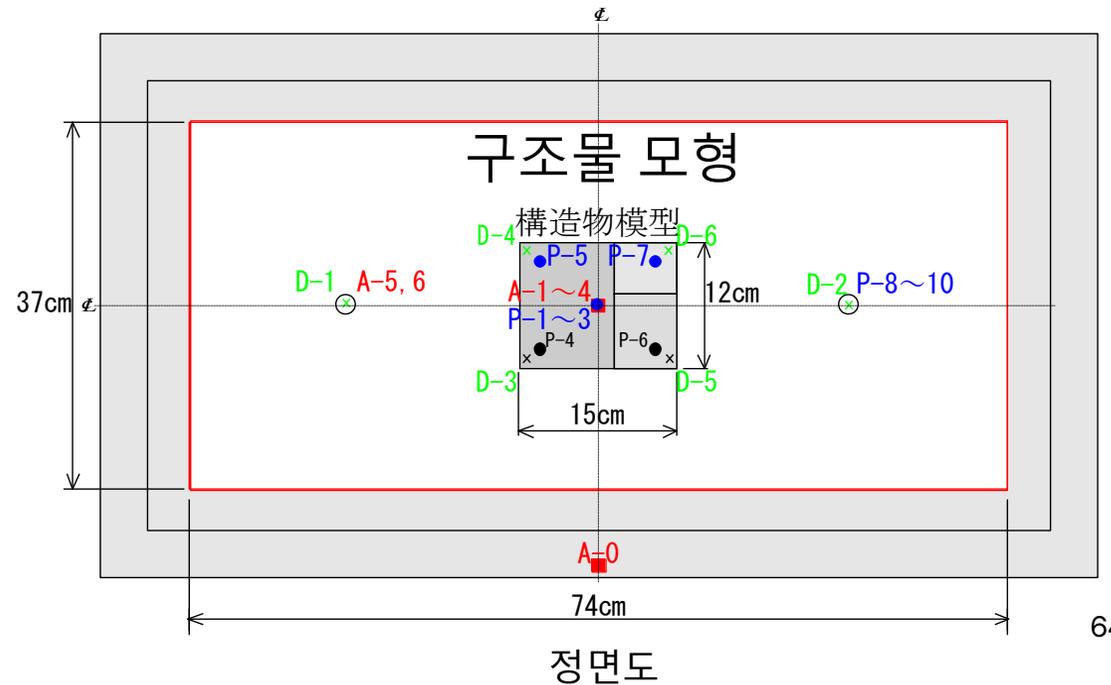
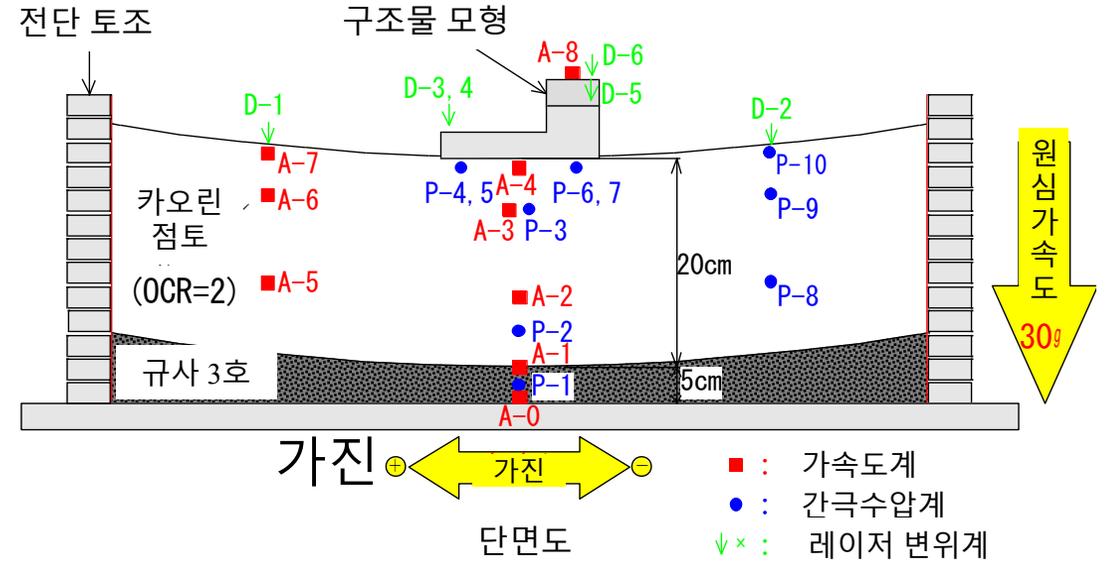


해석 사례

원심모형실험개요 【점토지반】

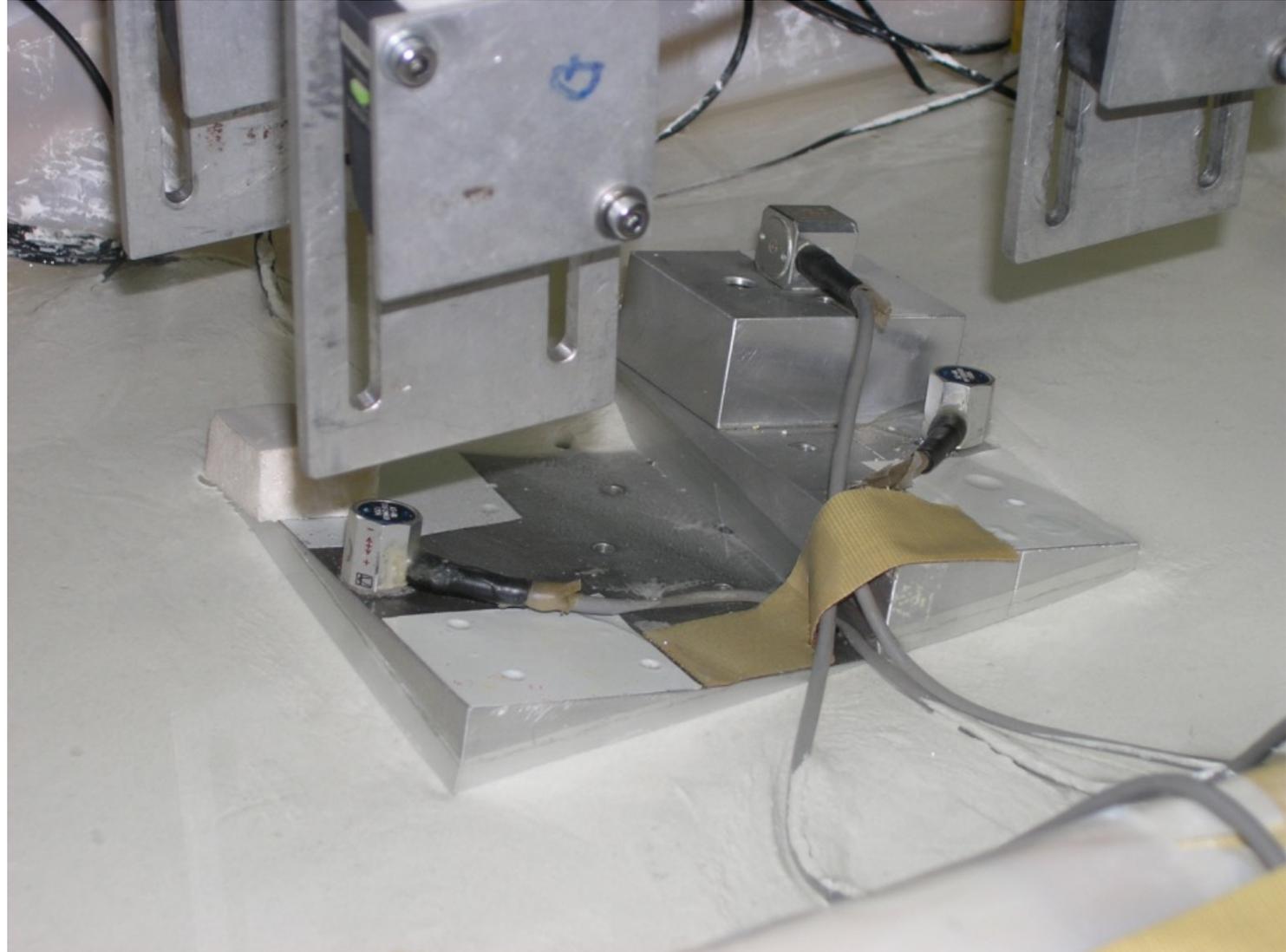
구조물하중편심률
X(좌우)방향:0.080
Y(깊이)방향:0.029

진동입력파
도쿄 해안L2
모의지진동
 $\alpha \text{ max}=304\text{Gal}$



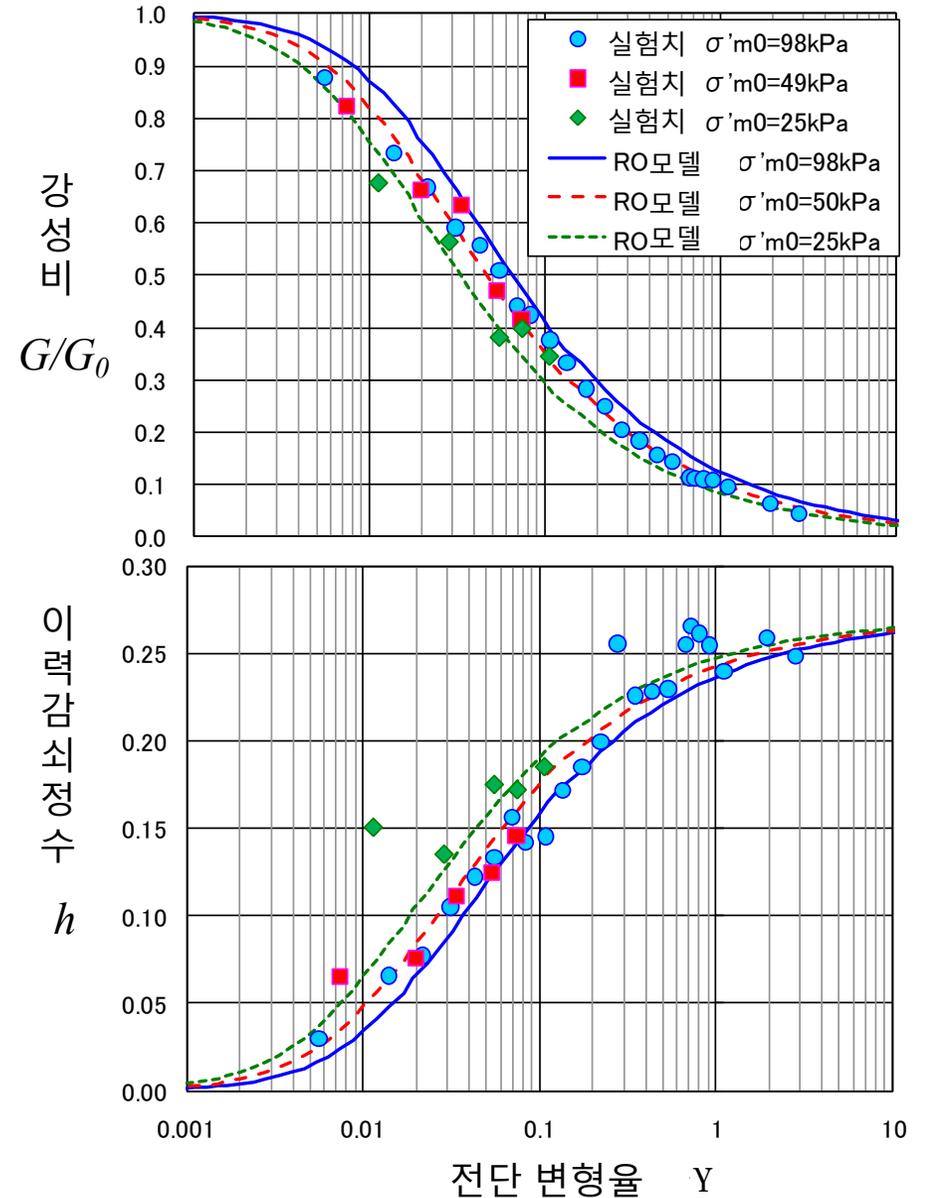
해석 사례

진동후 기초의 침하·경사



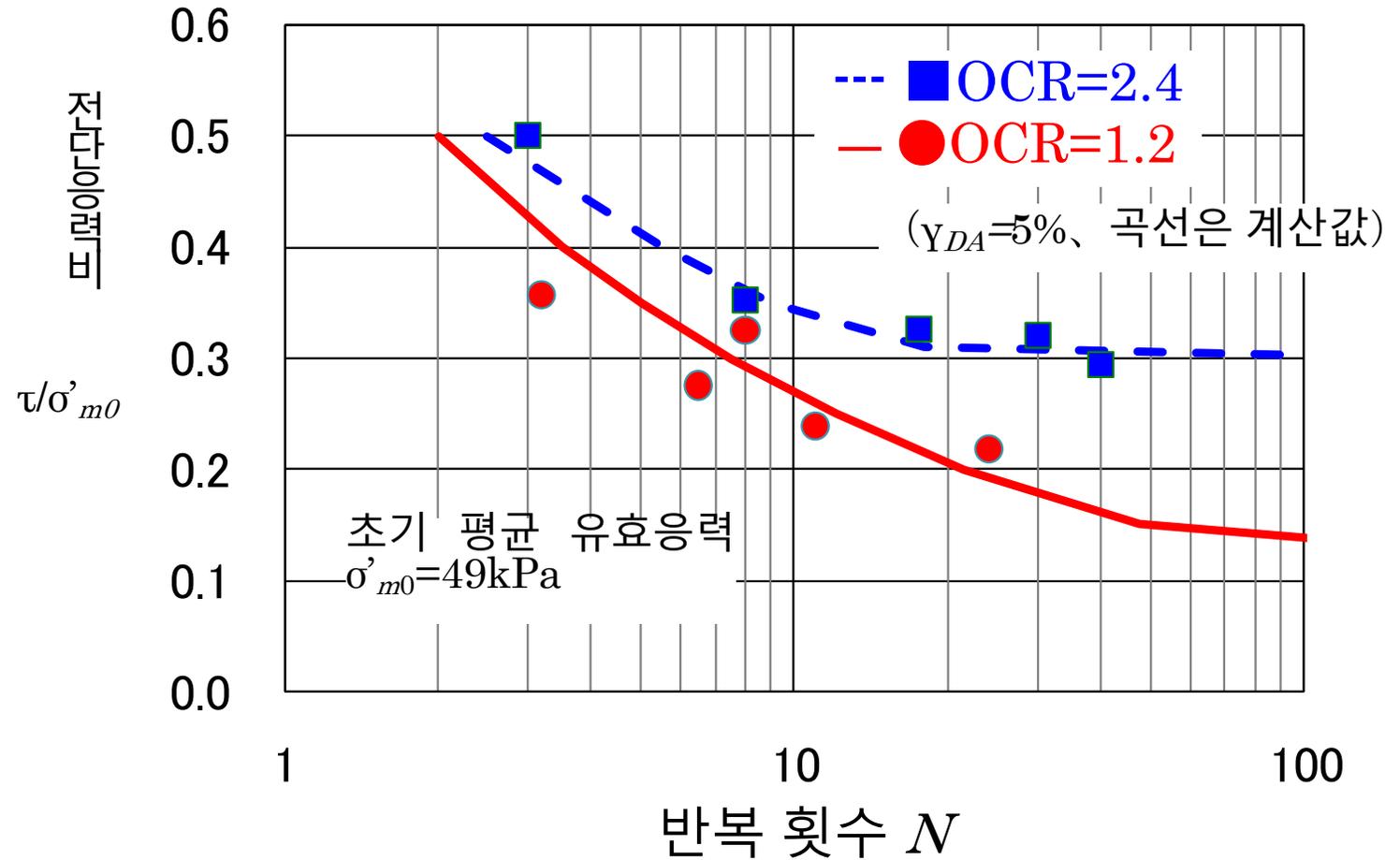
해석 사례

카오린 점토의
동적변형특성
($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)



해석 사례

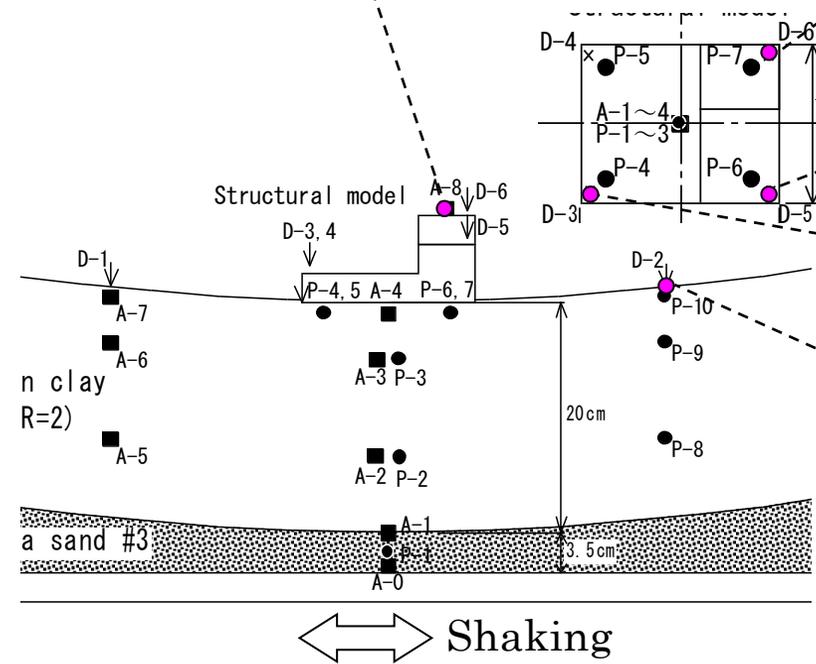
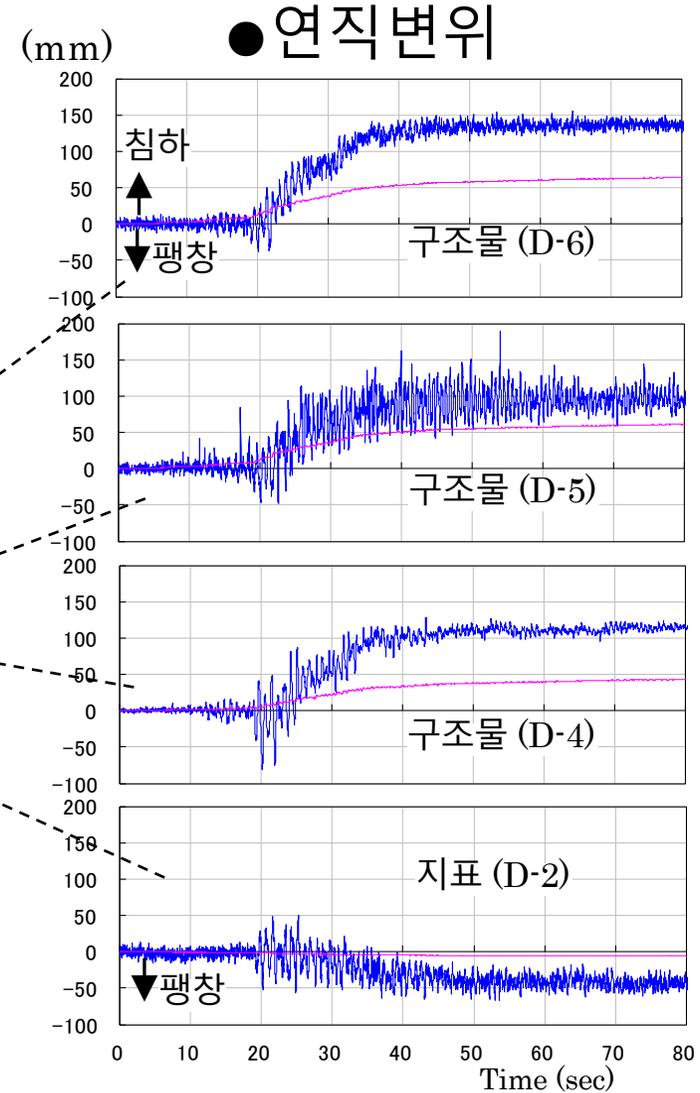
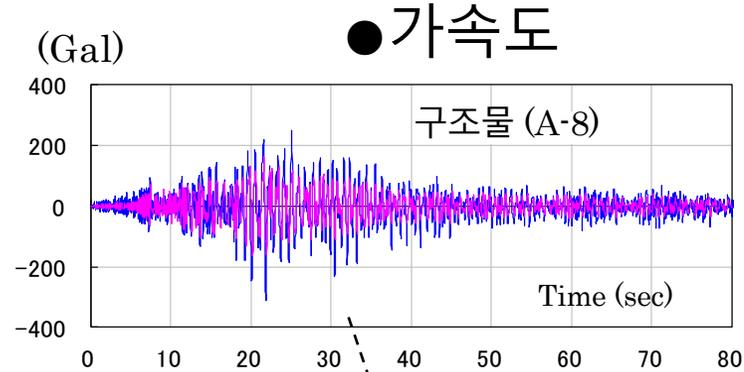
카오린 점토의 전단응력비와 반복 횟수의 관계



해석 사례

가진중인 시간이력 응답

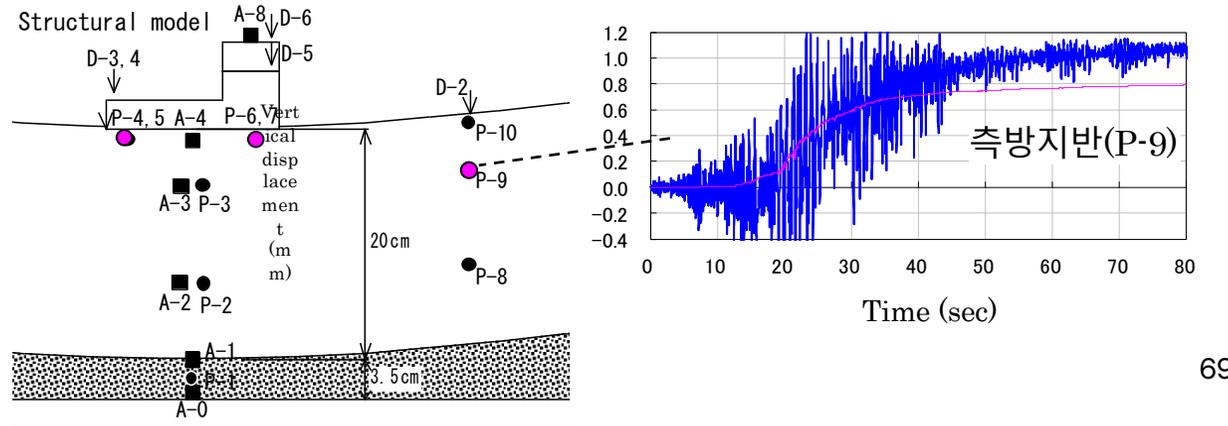
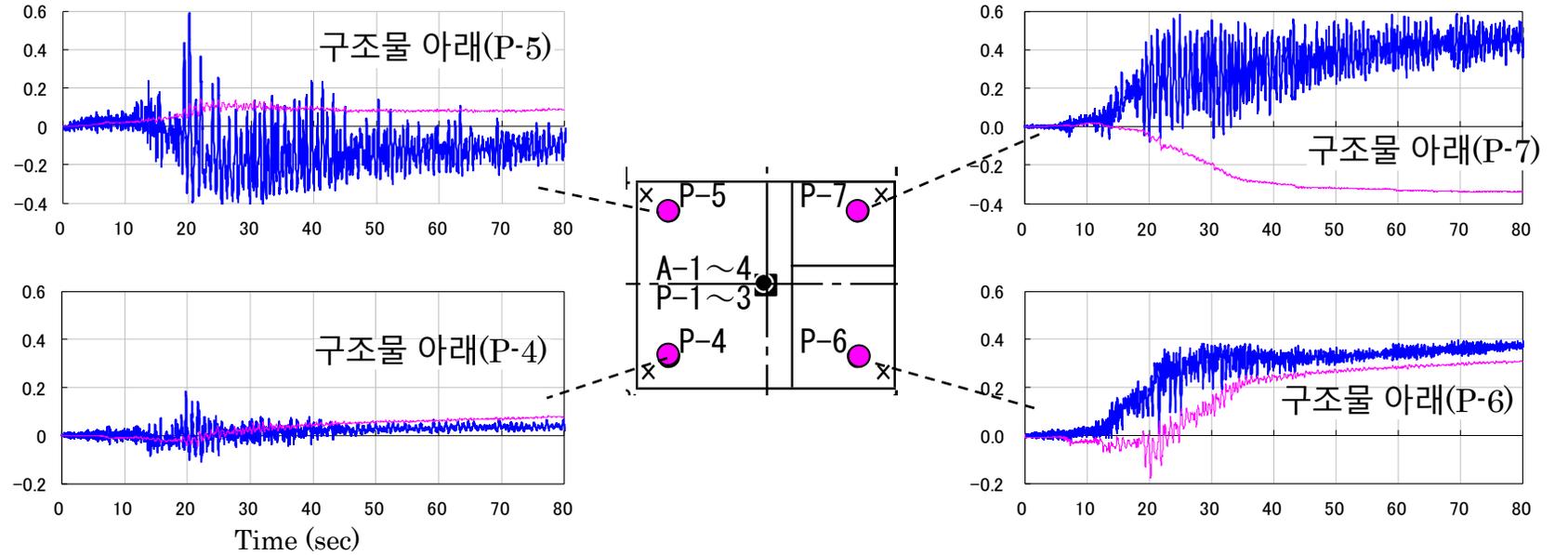
파랑 : 실험값
 핑크 : 해석값



해석 사례

과잉간극수압비

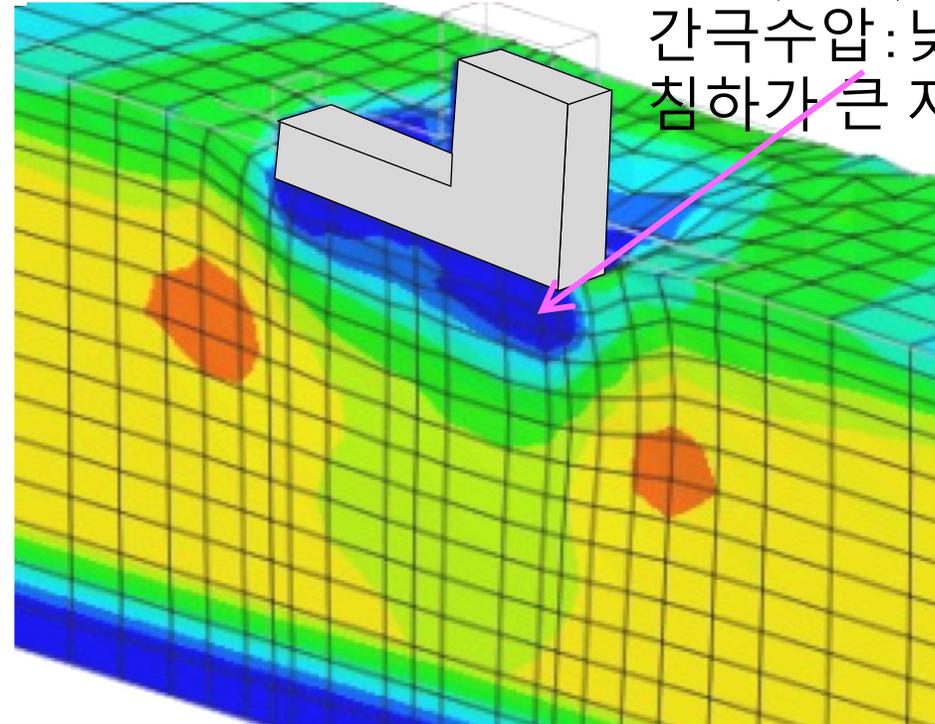
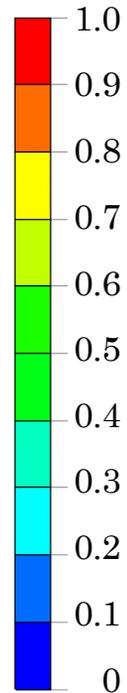
파랑 : 실험값
핑크 : 해석값



해석 사례

진동종료시점(80초)에서의 과잉간극수압비 분포 (중심단면으로 절단하여 표시)

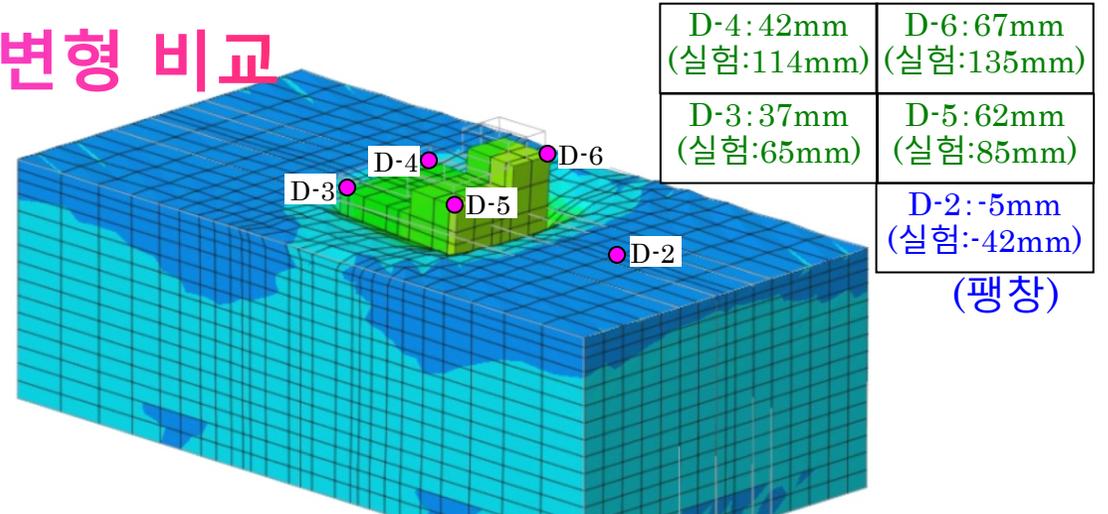
간극수비



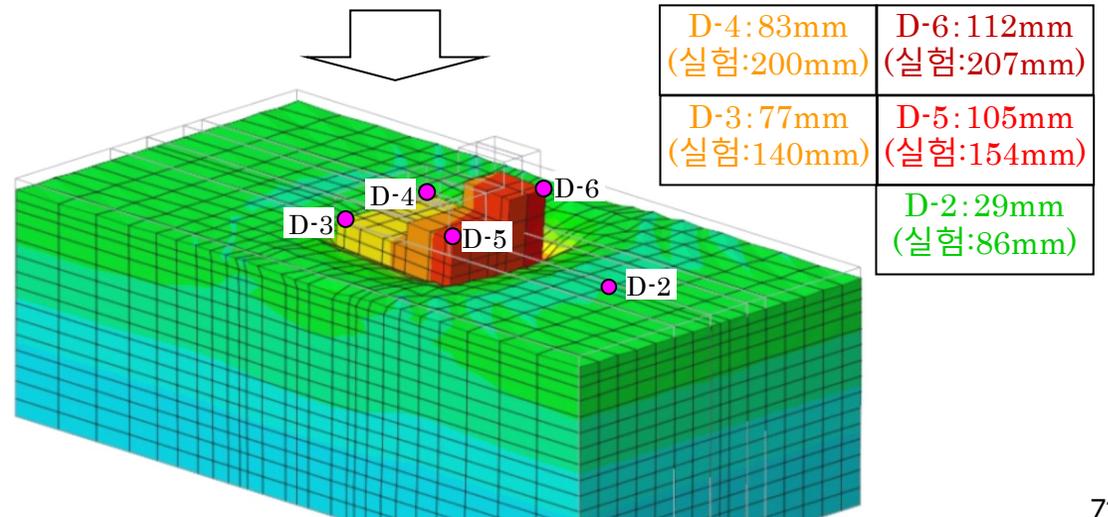
직하(直下)에서 과잉
간극수압: 낮음
침하가 큰 지점에서 뚜렷함

해석 사례

진동종료시점(80초)과 과잉간극수압 소멸 후(60일)의 변형 비교



(a) 진동종료시점 (80초)의 변형

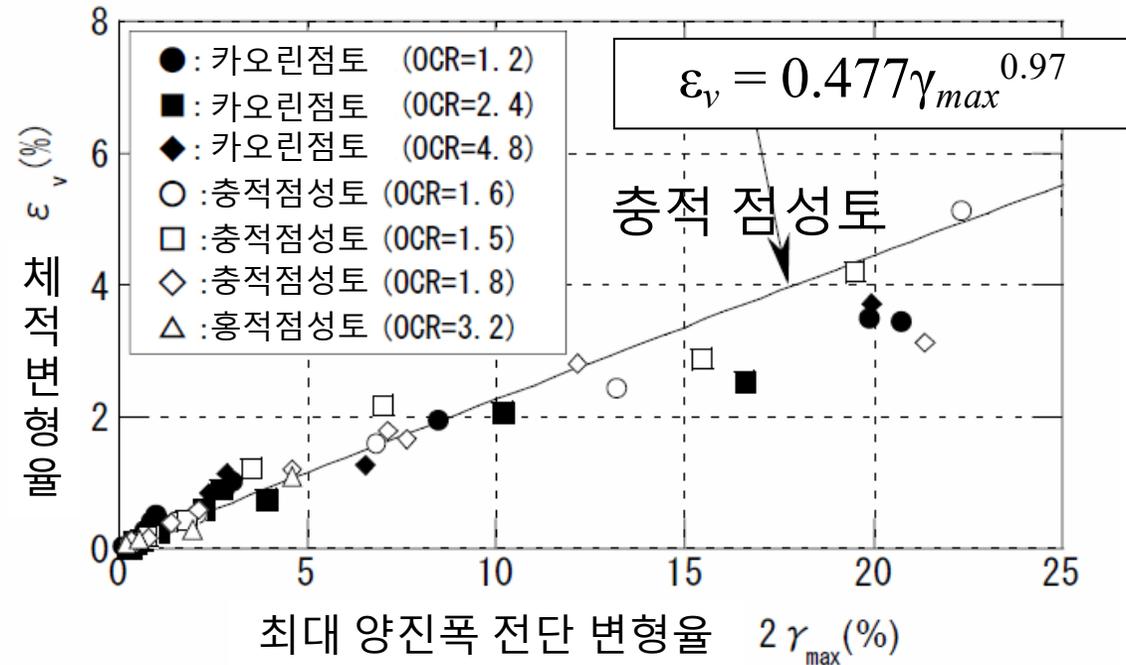


(b) 과잉간극수압 소멸 후 (60일)의 변형

해석 사례

진동 후 침하 검토 최대 전단 변형에 따른 잔류 체적 변형

- 가진중에 경험한 γ_{max} 으로부터 가진 후의 체적변형 ϵ_v 을 산정
→침하량



반복 전단후 체적변형율과 반복 전단과정에서
경험한 최대 양진폭 전단변형율의 관계

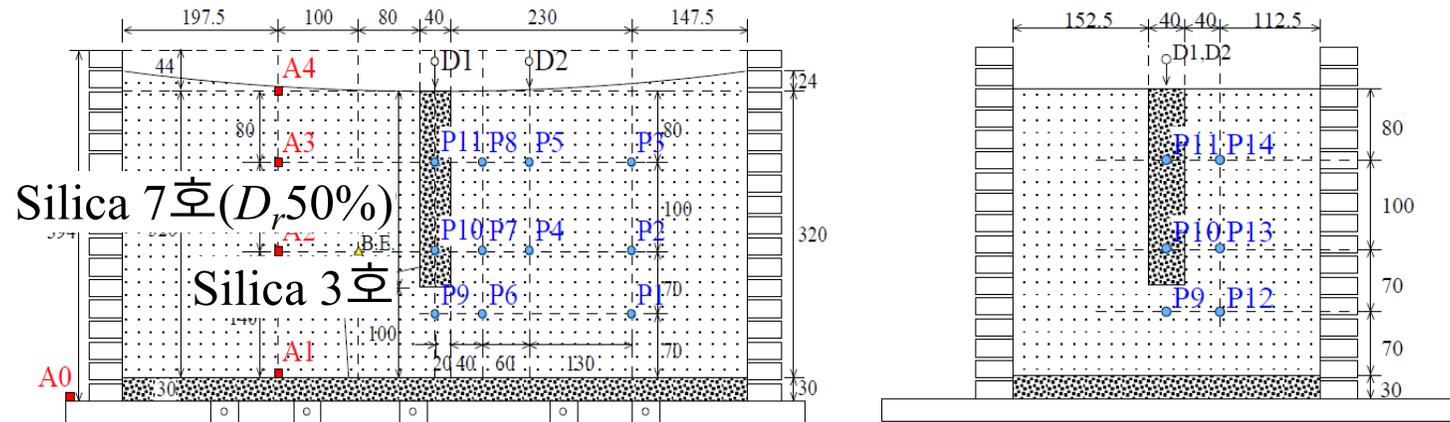
(田村ら, 2006b)

해석 사례

자갈레인공법의 시뮬레이션 분석 (2상계)

원심모형실험 단면도(30g)

가속도계(A0~A4), 간극수압계(P1 ~ P14), 변위계(D1 ~ D2)



(a) 토층 긴 방향

(b) 토층 짧은 방향

图 1 원심모형실험 단면도 (30g)、가속도계와 간극수압계

unit : (mm)

진동방향

진동의 수직방향

해석 사례

가속도 및 초과간극수압비의 시간이력

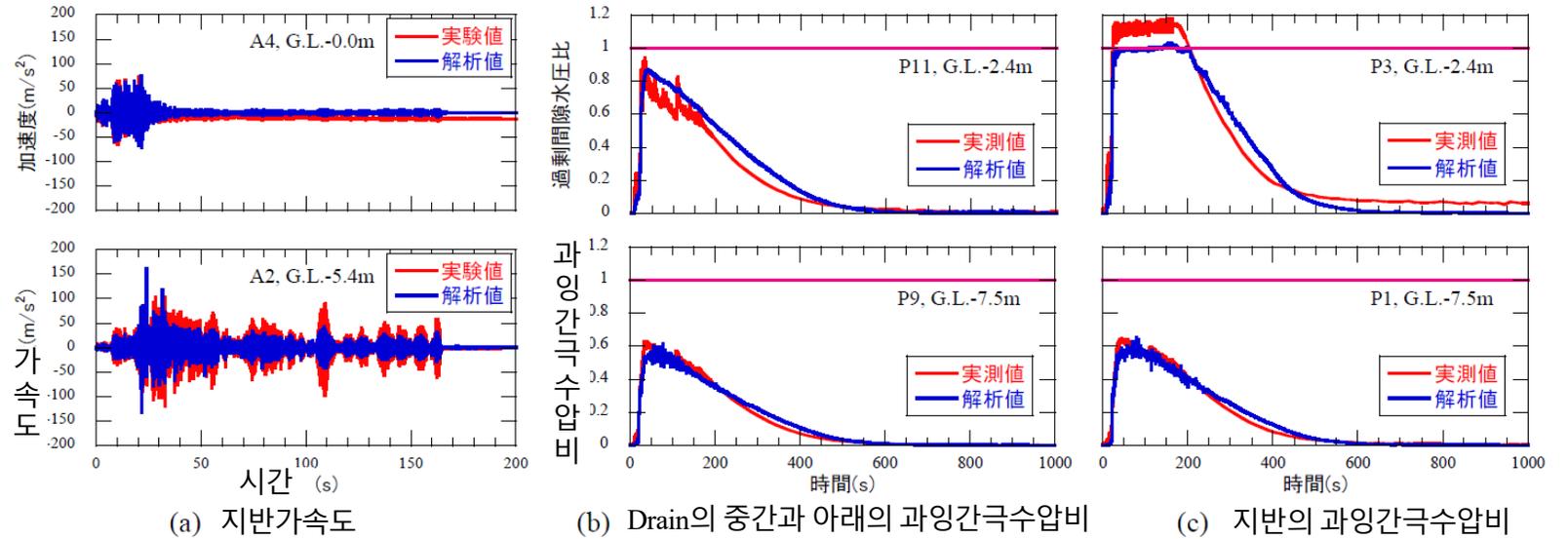
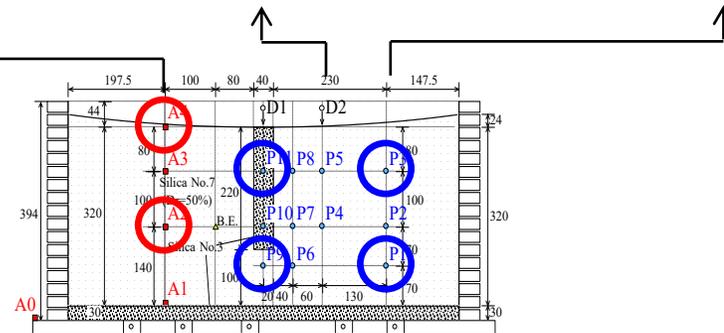


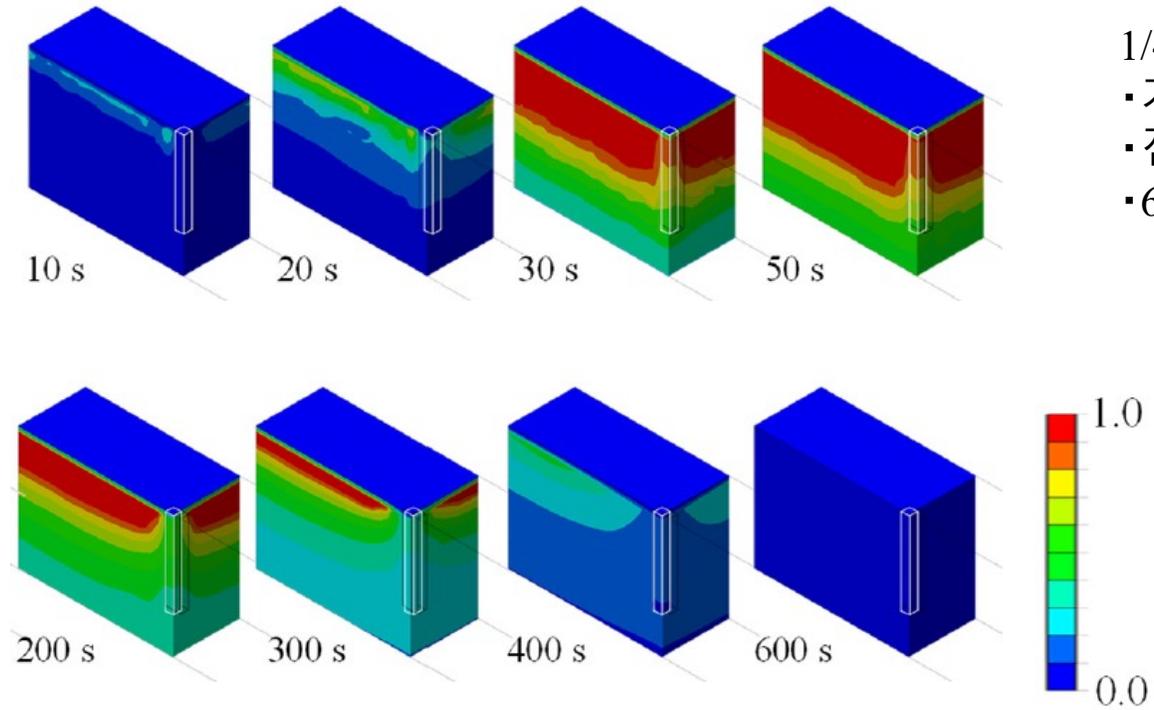
图 2 가속도와 과잉간극수압비의 시간이력 (100Gal)

초과간극수압비의
 • 소산 시작 시간
 • 소산 구배
 가 실험과 해석으로 일치함.



해석 사례

과잉간극수압비 등고선도



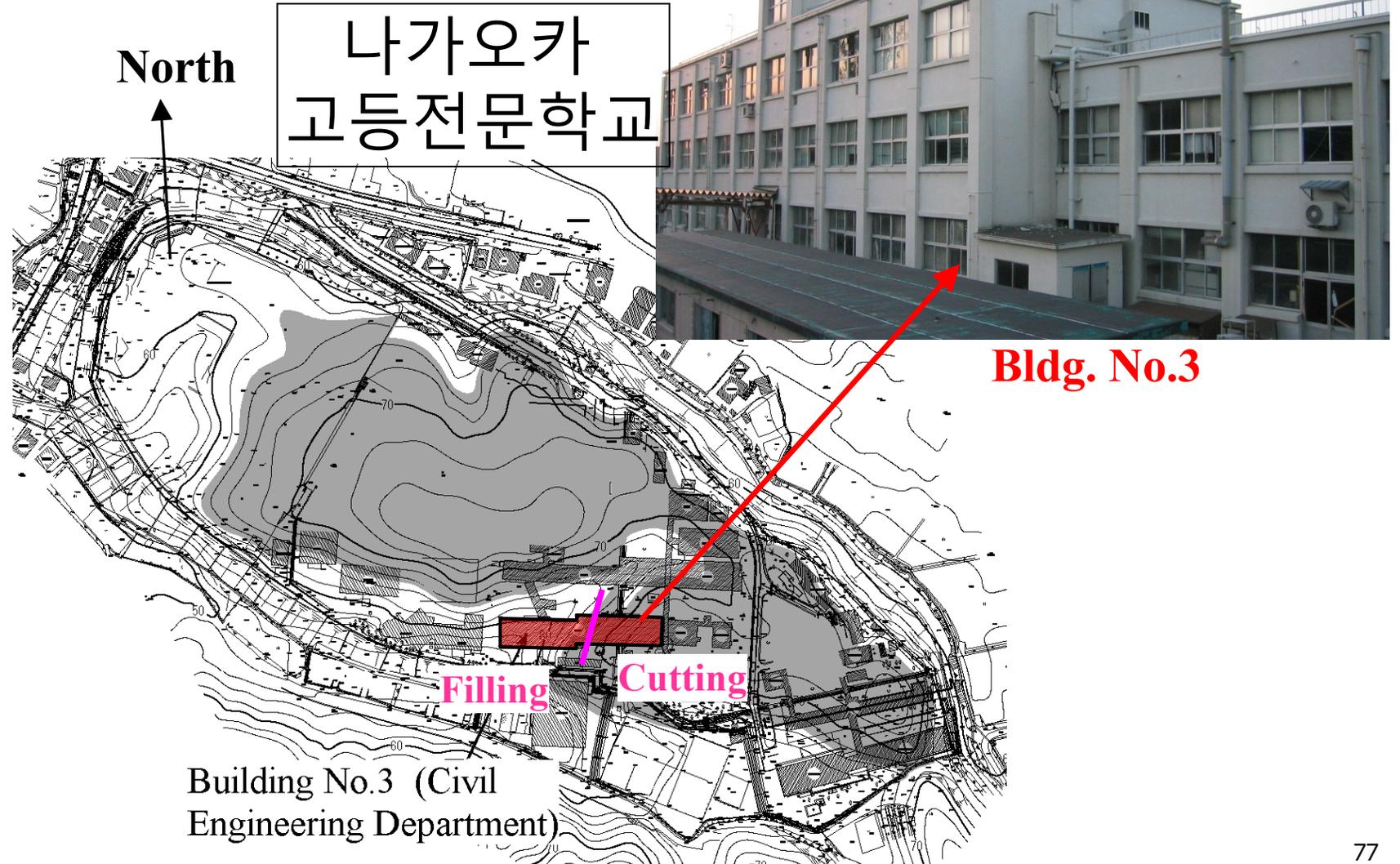
- 1/4모델만 표시.
- 가진중 수압비 1에 도달
- 진동후 지표면 방향으로 소산
- 600s에서 초기상태로.

지진 피해 사례 시뮬레이션

2004년 니가타현 츄에쓰 지진에서의 나가오카
고등전문학교 캠퍼스

지진 피해 사례 시뮬레이션

(Fukutake and Onoue, 2007)

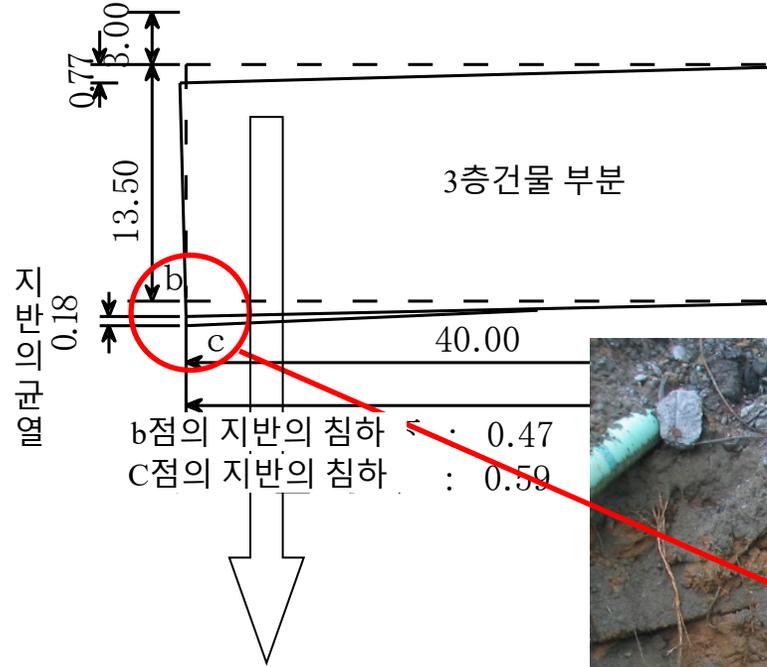


지진 피해 사례 시뮬레이션



지진 피해 사례 시뮬레이션

건물의 변위와 말뚝 머리 파괴

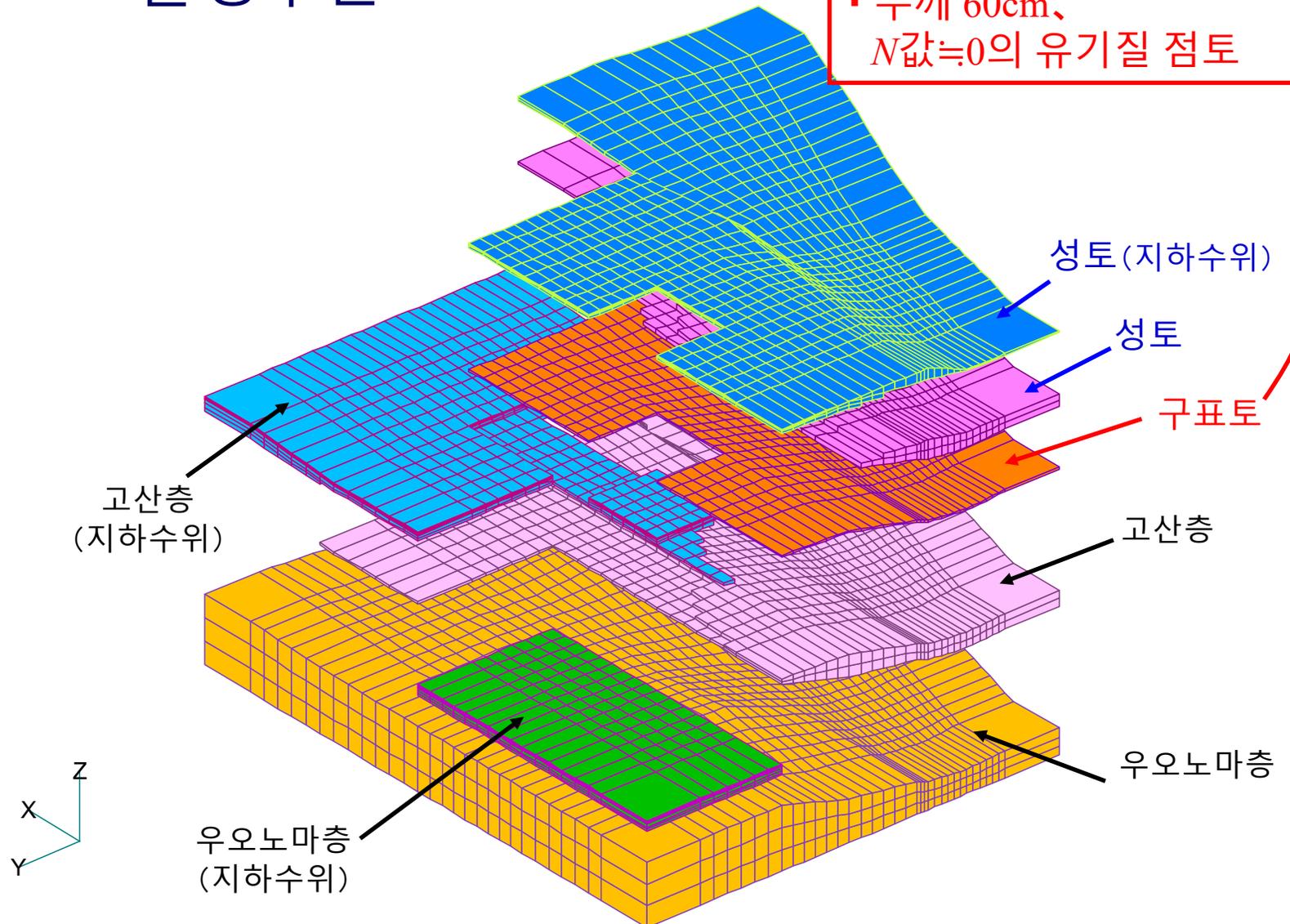


기초보다 말뚝이 더 큰 변형
→ 지반 변형으로 파괴 발생

지진 피해 사례 시뮬레이션

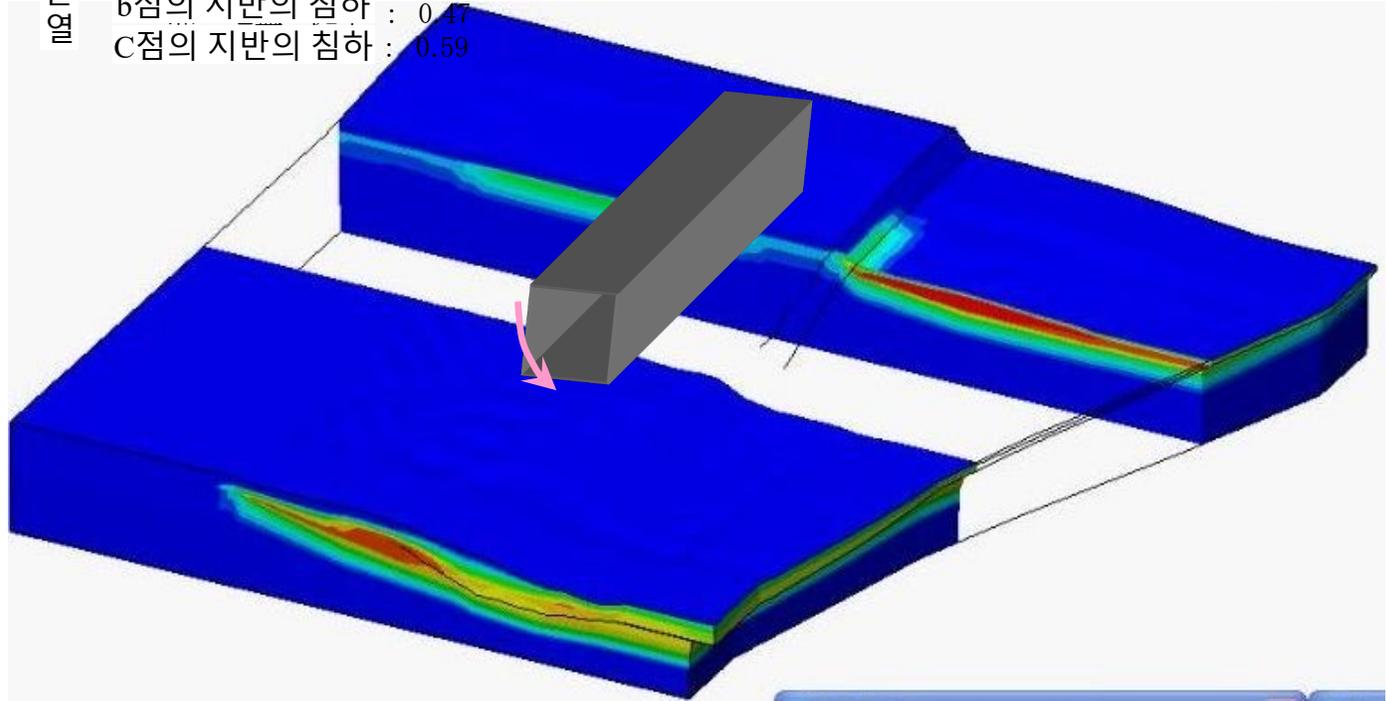
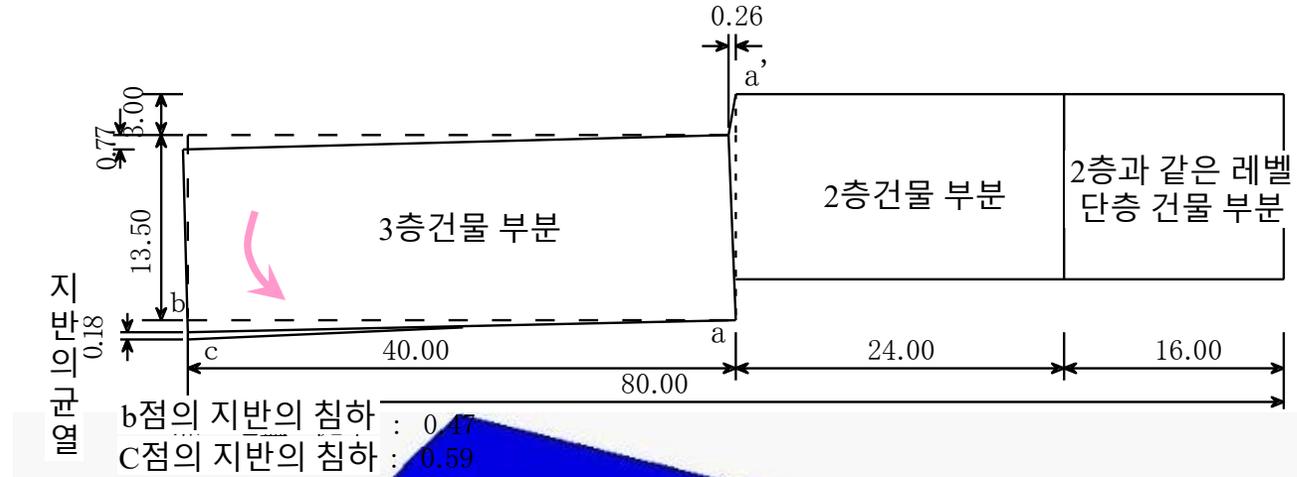
물성구분

- 지반의 구곡 표면에 따라 존재
- 두께 60cm,
 $N_{값} \approx 0$ 의 유기질 점토



지진 피해 사례 시뮬레이션

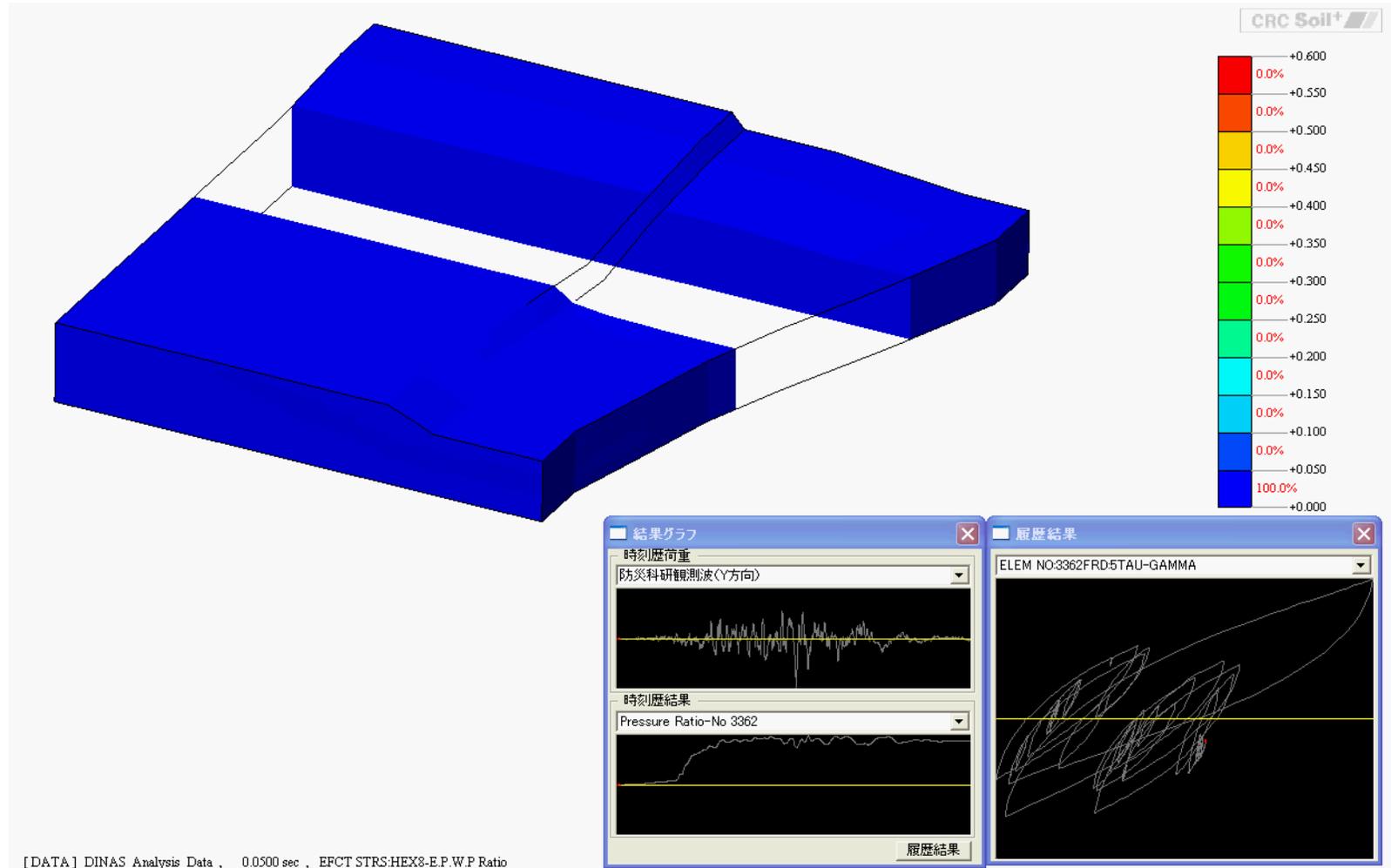
지반변형으로 인한 기초의 강제변형



지진 피해 사례 시뮬레이션

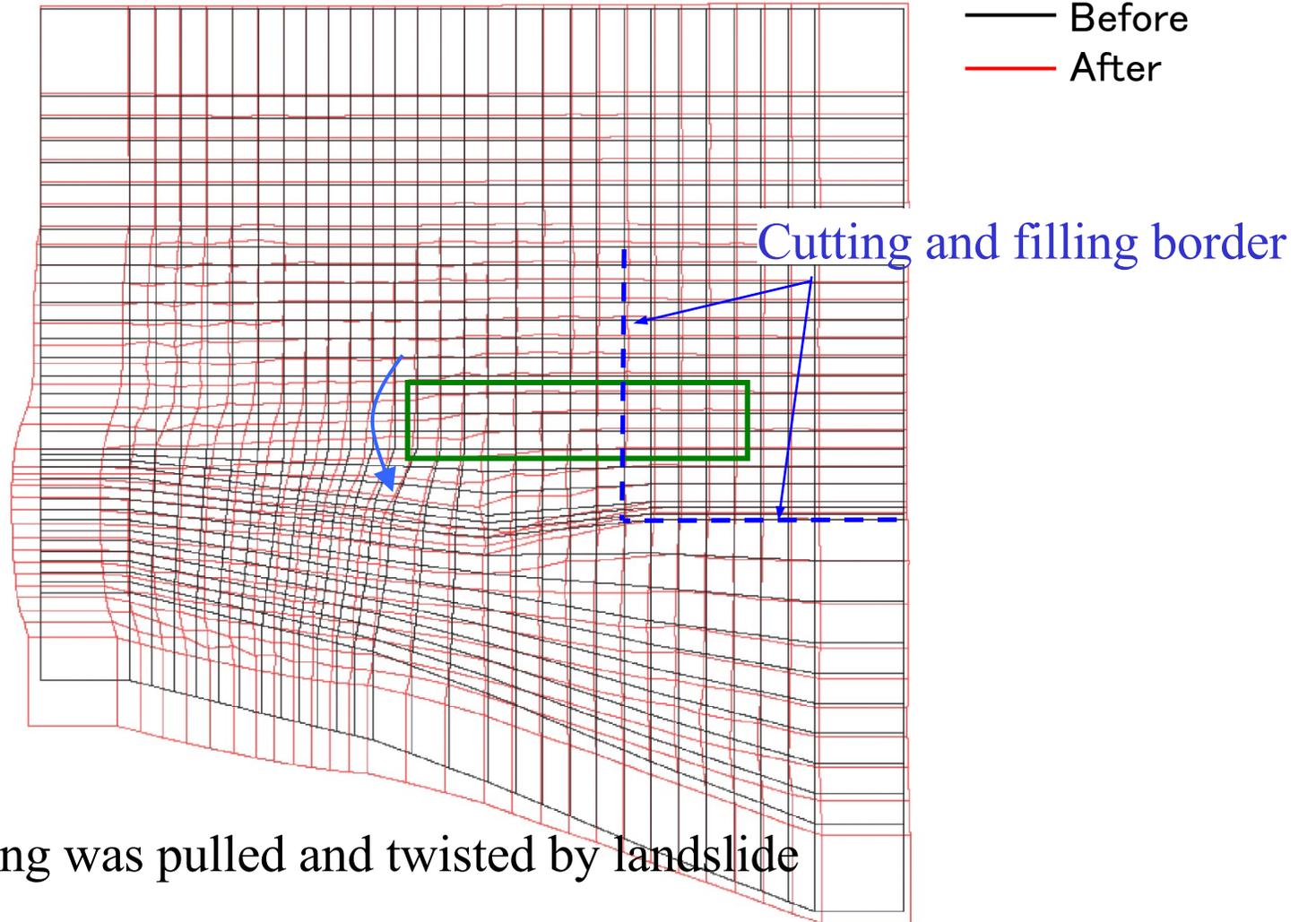
택지조성지반의 지진시 거동 (2004 칠레즈 지진)

[HiPERによる. 福武・尾上ら, 2005]



지진 피해 사례 시뮬레이션

Plan view of residual deformation (time=15sec)



설계 실무에의 적용

안정성과 경제성을 목표로 하여

CONTENTS

• SMW의 사용

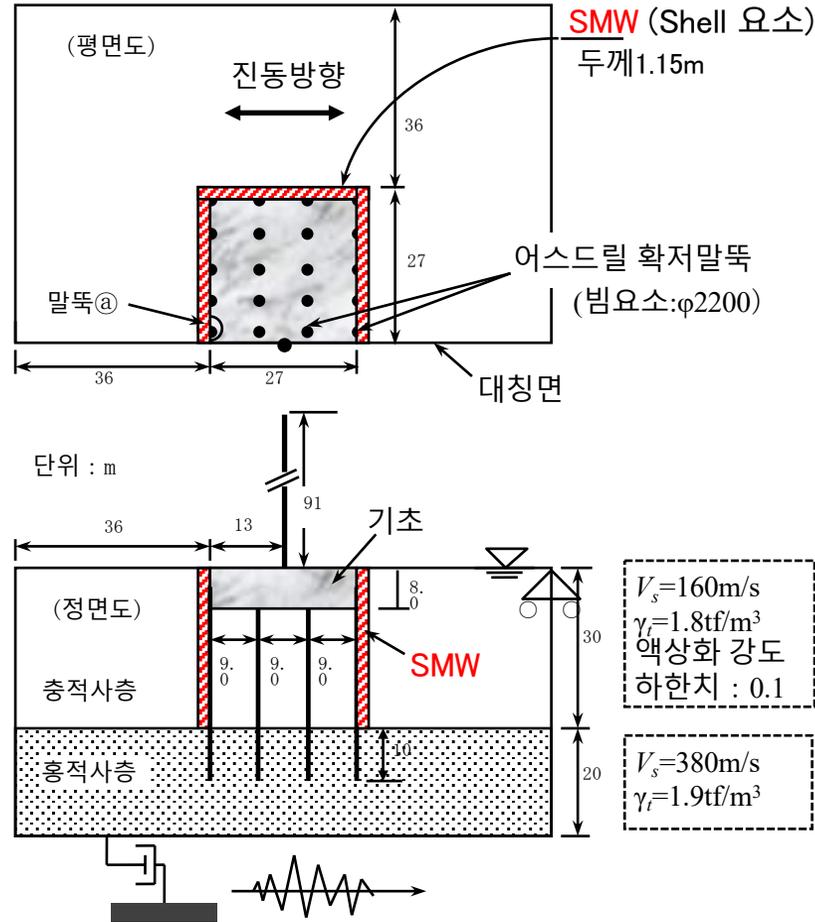
• 구조물 아래의 침투 고결 대책

• Tank와 지반 개량

• 액상화 지반과 면진구조물

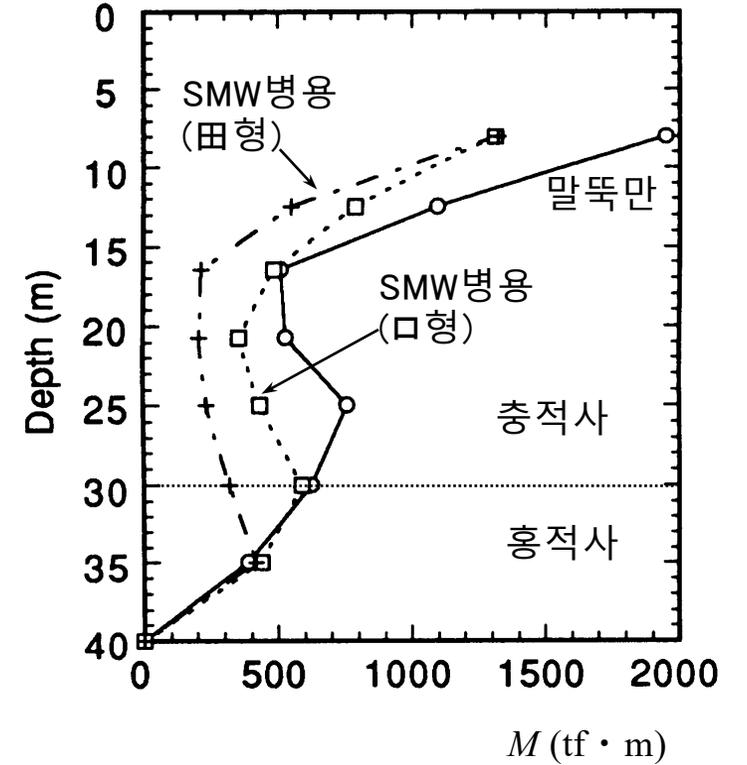
설계 실무에 적용

SMW의 사용



초고층 해석 모델 (SMW: □형)

말뚝@의 최대힘모멘트 분포

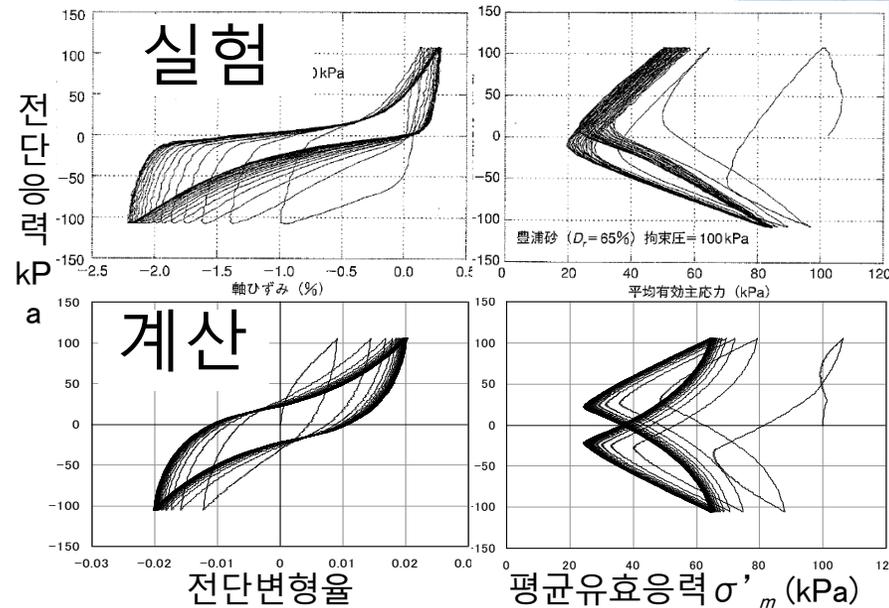
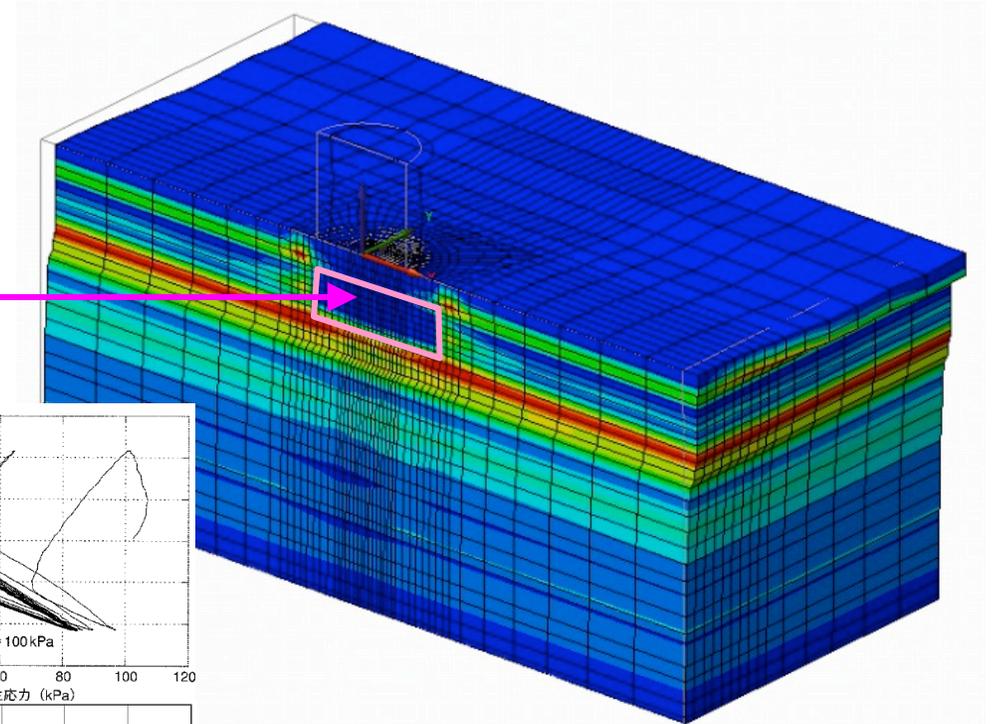


(藤川ら, 1994)

설계 실무에 적용

건물 아래의 침투 고결 대책

약액 주입
개량체의 모델화



(福武ら, 2010)

설계 실무에 적용

연직단면에서 최종변형상태

성립성 확인

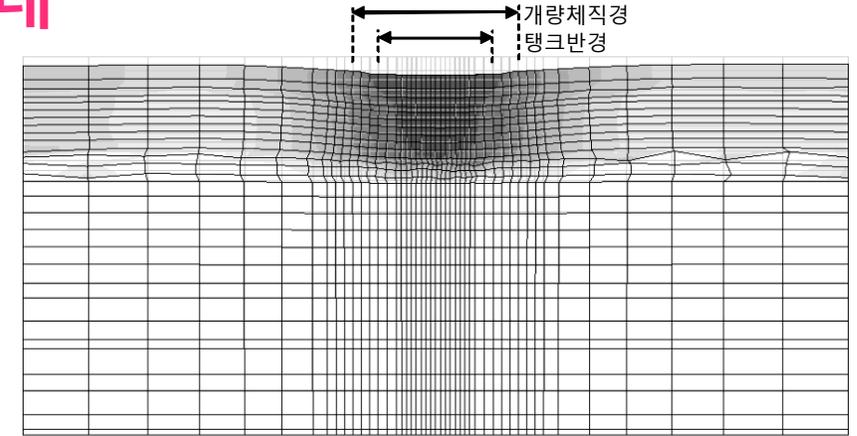
■ 침하량

Tank 바닥판 : 11cm

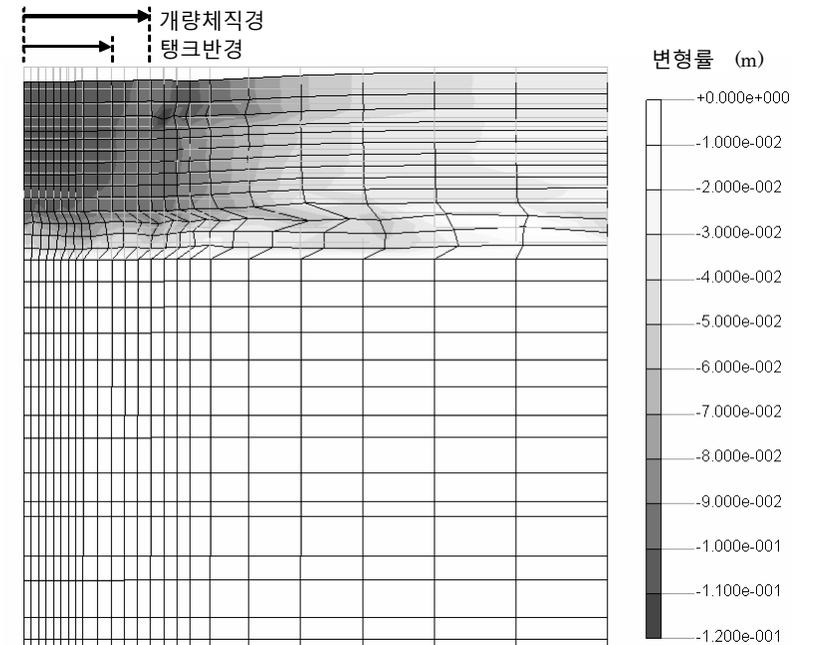
주변지반 : 5cm → 흡수가능

■ Tank 중심과 단부의

변형구배 : 1/970 < 허용값



대칭면 (단면①, 변형배율 20)



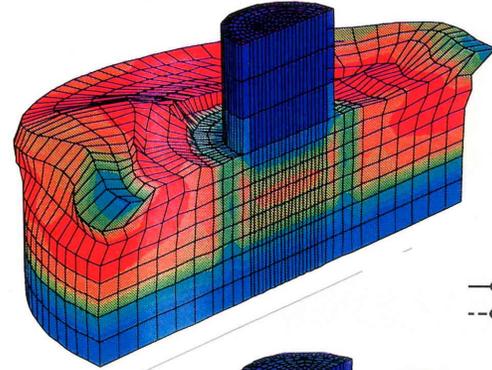
대칭면과 직교면 (단면②, 변형배율 10)

설계 실무에 적용

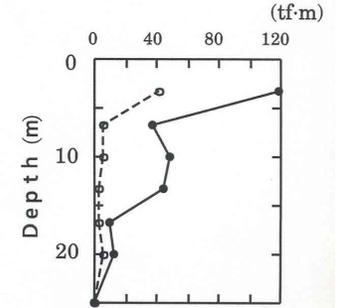
다양한 액상화 대책 효과 (말뚝 기초)

말뚝의 휨 모멘트

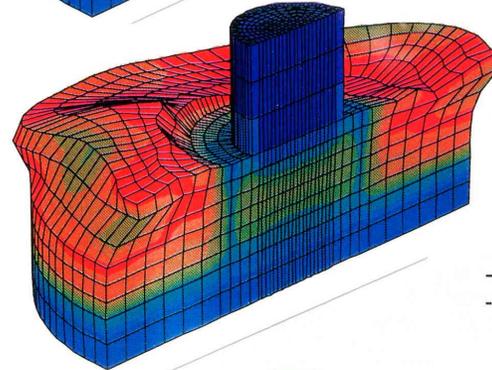
SCP



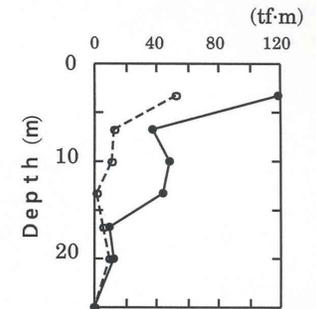
—●— 미개량
--○-- SCP 다짐



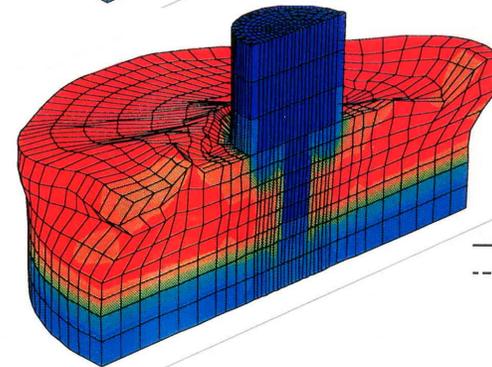
DM-Ring



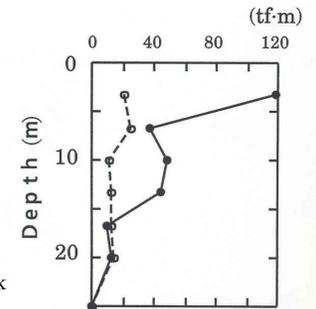
—●— 미개량
--○-- DM-ring



DM-Block



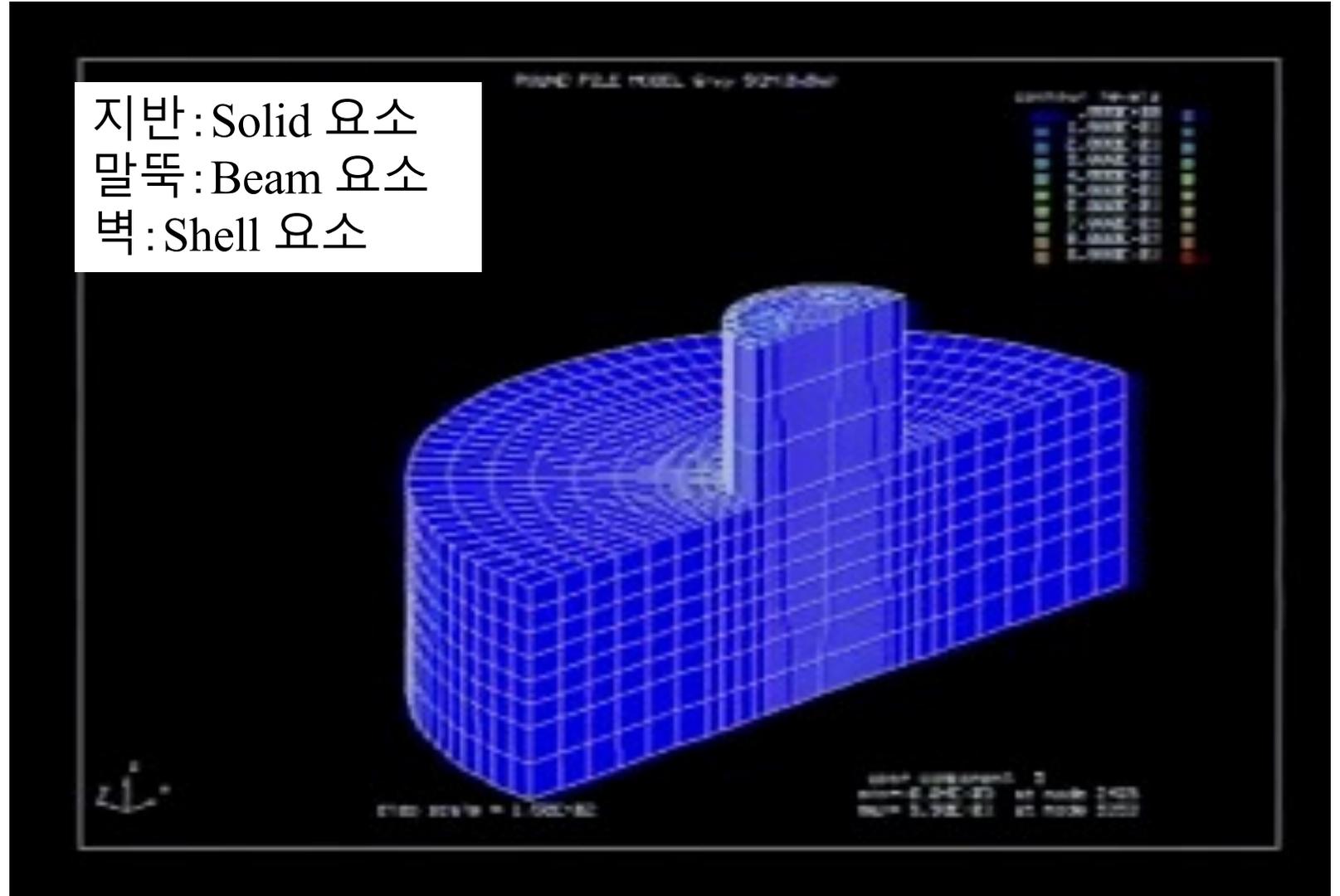
—●— 미개량
--○-- DM-block



설계 실무에 적용

군집말뚝 기초의 액상화 대책 (CDM개선) 、 상호작용

지반: Solid 요소
말뚝: Beam 요소
벽: Shell 요소



액상화 지반과 면진구조물

액상화 지반과 면진구조물

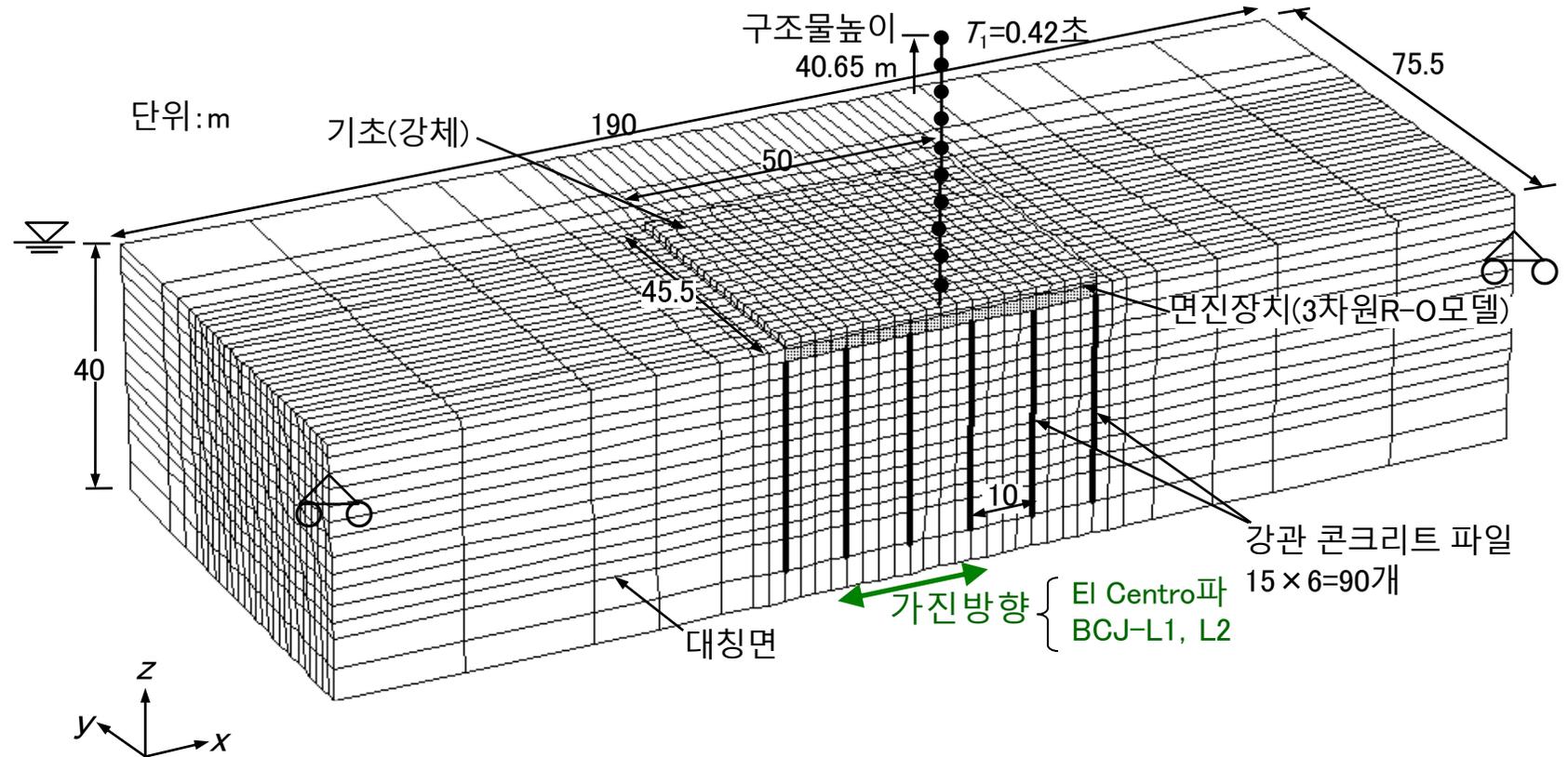
액상화 : 지반의 장주기화
면진구조물 : 구조물의 장주기화 } 관참은가?

충전단력 Q 의 감소 → 관성력에 의한 M_i 의 감소

(福武ら, 1999)

액상화 지반과 면진구조물

면진건물-말뚝-지반계의 3차원 FEM 모델 (대칭성을 고려한 1/2모델)



액상화 지반과 면진구조물

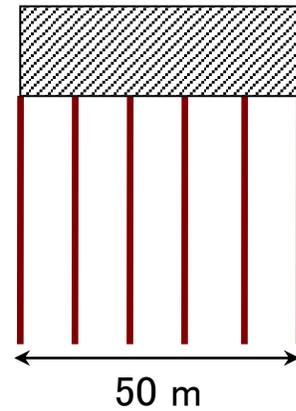
지반조건 및 지반 케이스



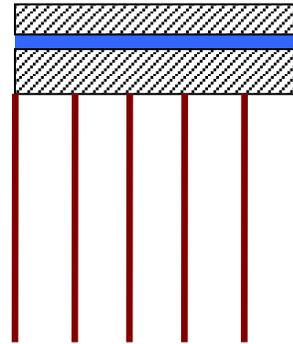
액상화 지반과 면진구조물

3가지 기초 형태

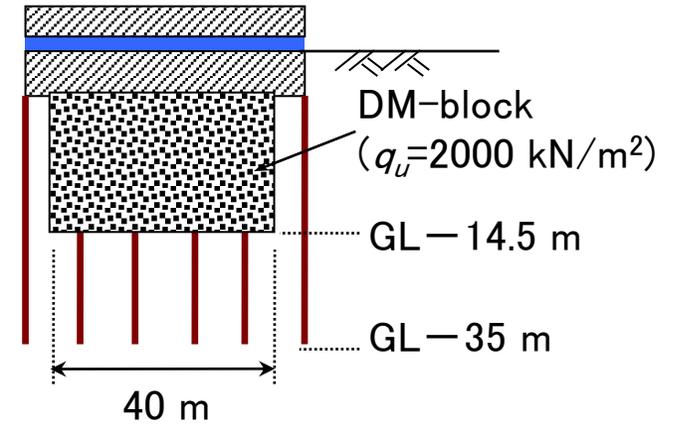
[Case a]
미개량, 비면진



[Case b]
미개량, 면진

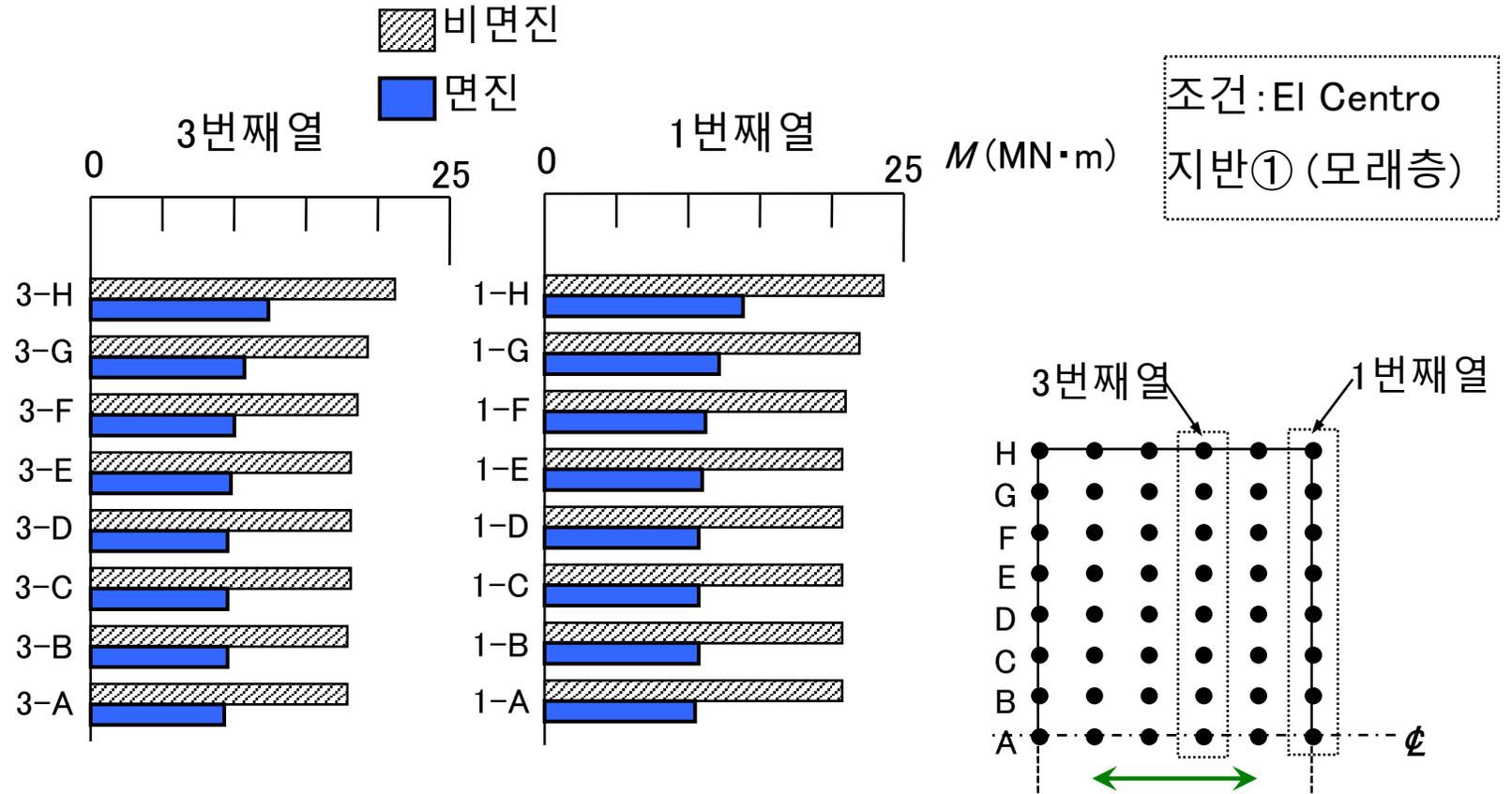


[Case c]
개량(DM-block), 면진



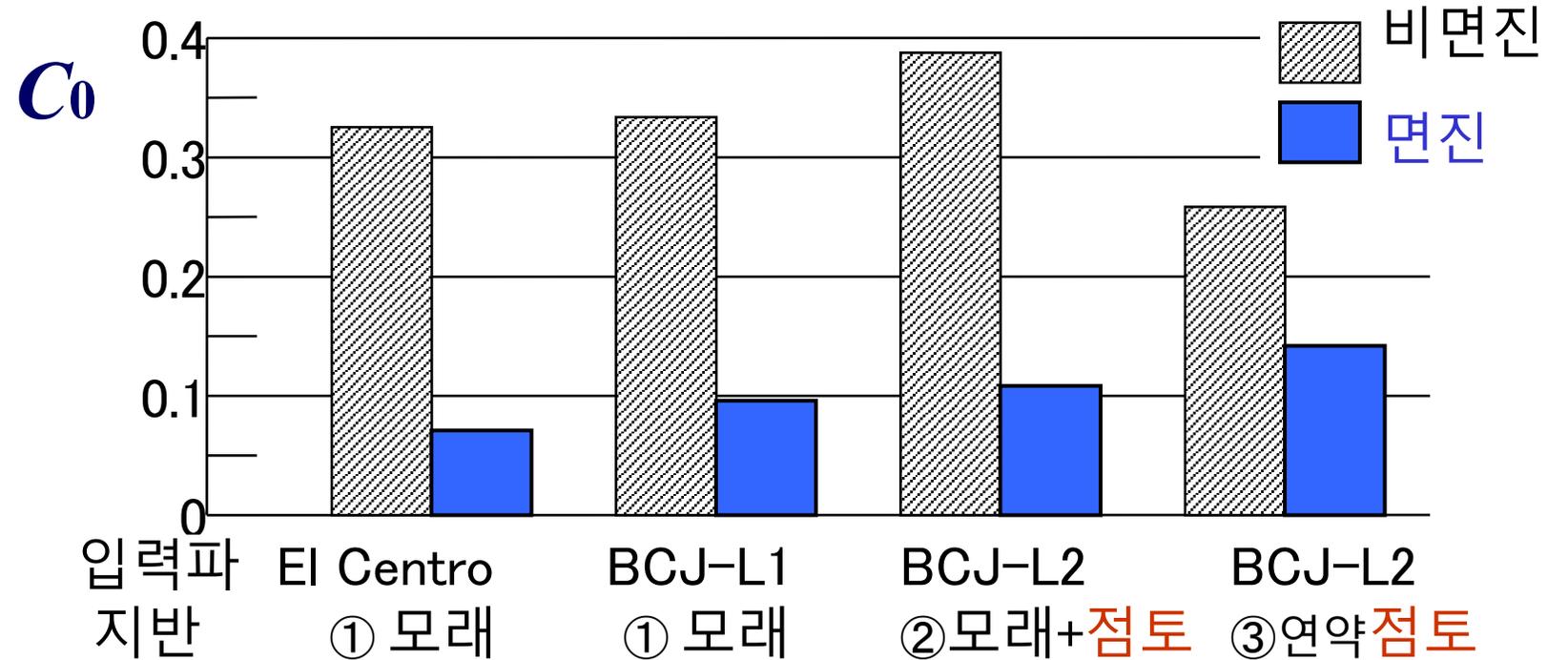
액상화 지반과 면진구조물

면진구조와 비면진구조의 말뚝머리의 최대휨모멘트 비교



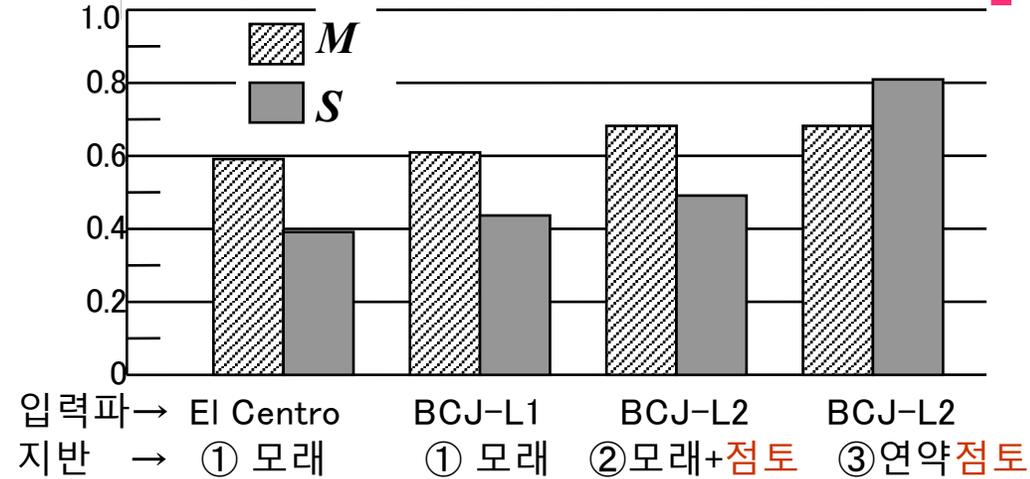
액상화 지반과 면진 구조물

Base Shear 계수 C_0

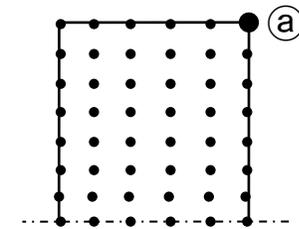
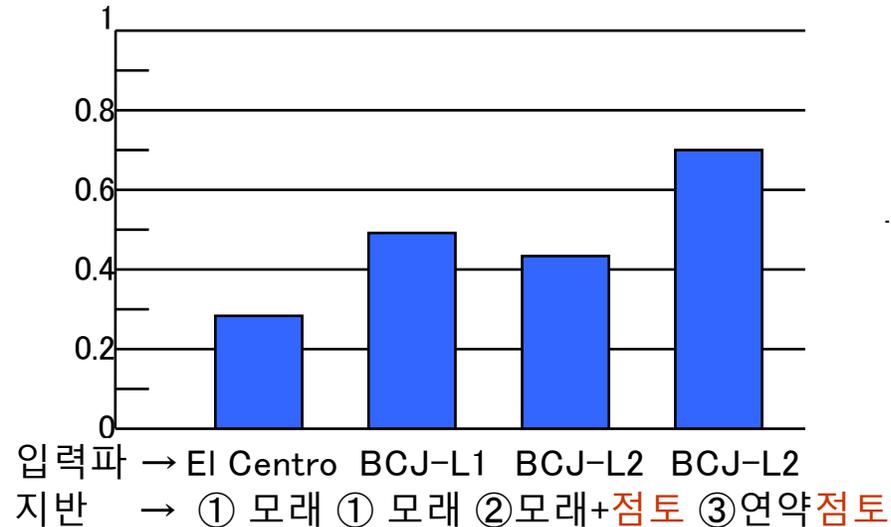


액상화 지반과 면진구조물

면진화한 경우의 제량의 비율 [비면진의 경우의 값으로 정규변환]



(a) 말뚝 머리(a)의 M과 S의 비교

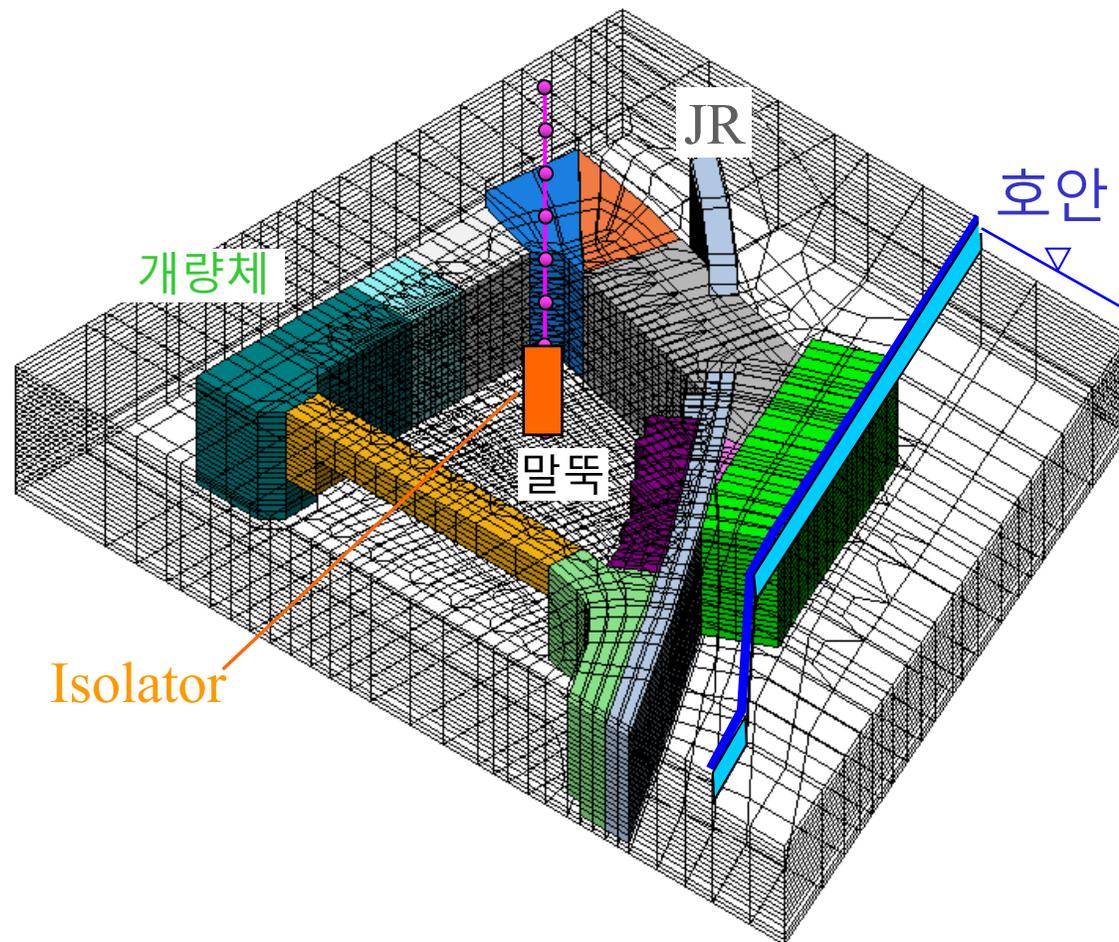


(b) 기초의 가속도 비

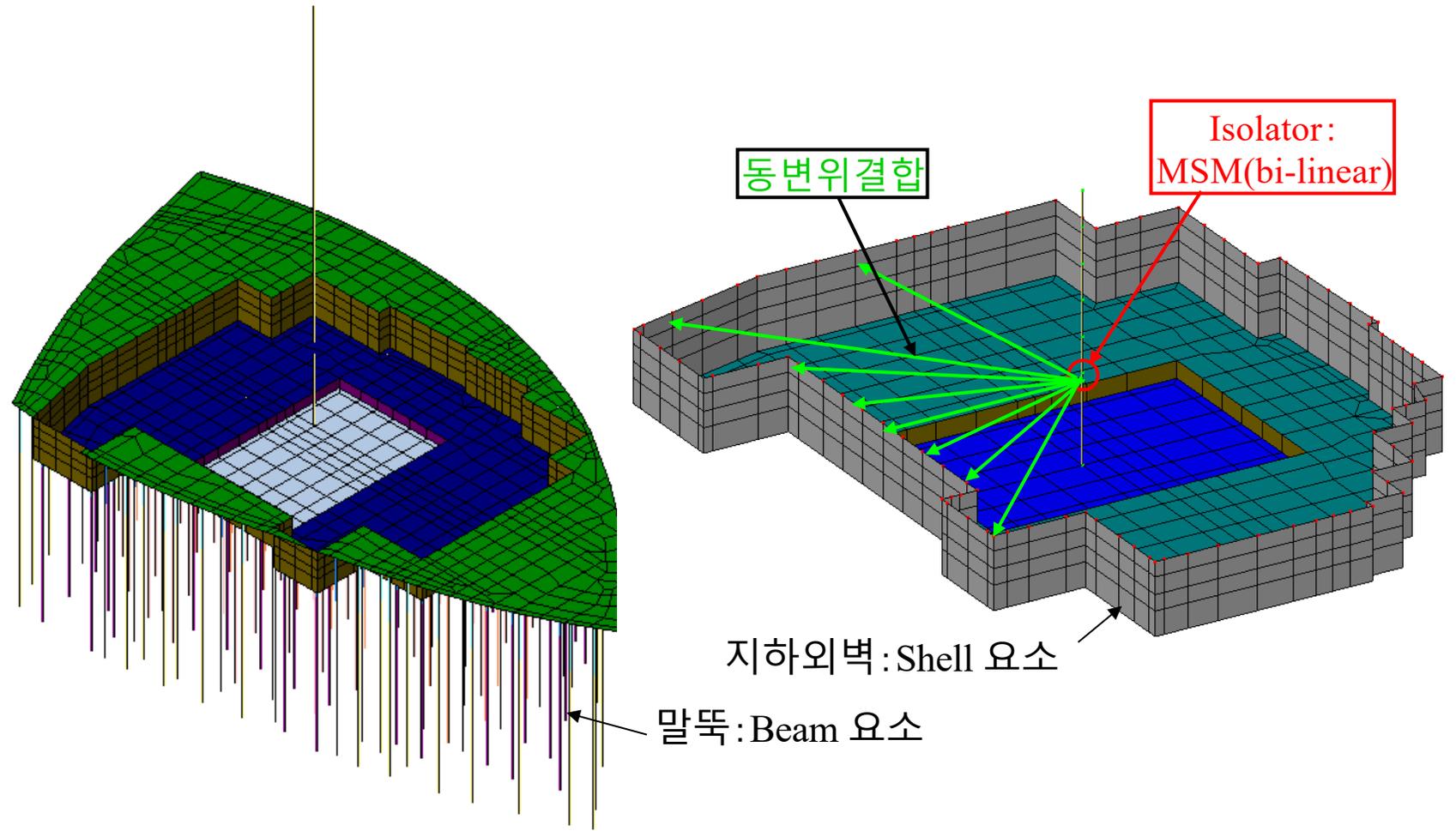
연약지반 + 면진 + 개량체

연약지반 + 면진 + 개량체

주변개량체·호안을 고려한 분석



연약지반 + 면진 + 개량체



오완모델이 포함되어 있는 범용 소프트웨어

- SoilPlus (CTC)
- DIANA (TNO)
- ShakePro (유니온 시스템)
- GTS NX & FEA NX (MIDAS)

※ FLIP의 칵테일 글라스 모델

참고문헌 (1/2)

- 防災科学技術研究所(2006, 2007) : 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ 震動台活用による建造物の耐震性向上研究, 成果報告書
- 藤川 智・福武毅芳・大槻 明・吉見吉昭・中村康一(1994) : 連続地中壁による杭-地盤系の液状化防止に関する三次元解析, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.991-996
- 福武毅芳・松岡 元・竹田一夫・陳越(1984) : 任意方向単純せん断における体積ひずみ特性, 第39回土木学会年次学術講演会Ⅲ, pp.57-58
- 福武毅芳・松岡 元(1989) : 任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈, 土木学会論文集, No.412/Ⅲ-12, pp.143-151
- 福武毅芳・松岡 元(1993) : 任意方向繰返し単純せん断における応力・ひずみ関係, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22号, pp.75-84
- 福武毅芳 (1997) : 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文
- 福武毅芳・菊地 優・竹間信博・玉置克之(1999) : 軟弱地盤・液状化地盤における免震構造の成立性について, 清水建設研究報告, 第69号, pp.25-36
- 福武毅芳・佐藤正義・田端憲太郎・大槻 明 (2007) : E-ディフェンスによる非液状化地盤中の杭基礎の震動実験(その2 : 杭の損傷位置と入力方向に着目した事前予測解析), 日本建築学会大会学術講演概要集, 構造I, pp637-638
- Fukutake, K. and Onoue, A.(2007) : SIMULATION OF CUTTING AND FILLING GROUND IN NIIGATA-KEN CHUETSU EARTHQUAKE 2004, Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.723-730
- 福武毅芳, 馬淵倉一, 吉田望, 社本康広(2008a) : 砂や薬注改良体の初期サイクリックモビリティ後のシミュレーション, 第43回地盤工学研究発表会, pp.437-438
- 福武毅芳・馬淵倉一・吉田 望(2008b) : 双曲線+おわんモデルを用いた初期サイクリックモビリティ後のシミュレーション, 第63回土木学会学術講演会Ⅲ, pp.127-128
- 福武毅芳・佐藤正義・田端憲太郎・田地陽一(2008c) : E-ディフェンスによる液状化地盤中の杭基礎の震動実験—その3 : R-Oモデルとおわんモデルによる事前予測解析—, 日本建築学会大会学術講演概要集, 構造I, pp.709-710

참고문헌 (2/2)

福武毅芳(2010) : 液状化時の地盤特性のモデル化と表層注入固化対策によるタンクの液状化時の挙動解析, 清水建設研究報告,第87号,pp.69-76

福武毅芳・社本康広・田村正・堀田洋之・馬淵倉一(2011) : 粘土地盤上の偏心直接基礎の動的挙動と残留変形の数值シミュレーション, 第46回地盤工学研究発表会, 766

福武毅芳・社本康広・田村正・堀田洋之・馬淵倉一(2012) : 粘土地盤上の偏心直接基礎の動的挙動と残留変形の3次元数值シミュレーション, 第47回地盤工学研究発表会, 695, pp.1381-1382

今津雅紀・福武毅芳 (1986) : 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp.509-512

Matsuoka, H.(1974):A microscopic study on shear mechanism of granular materials, Soils and Foundations, Vol.14, No.1, pp.29-34

Nishimura, S. and Towhata, I (2004):A three-dimensional stress-strain model of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes, *Soils & Foundations*, Vol.44, No.2, pp.103-116

プラダン,テージ,B.S.・龍岡文夫・原勝重 (1985) : 非排水繰返しねじりせん断における砂の応力-ひずみ特性, 土木学会第40回年次学術講演回III , pp.25-26

社本康広・風間広志・島田俊介・米倉亮三 (2006) : 恒久グラウトと本設地盤改良⑤, 活性シリカコロイドを用いた液状化対策工の設計と改良効果の評価法, 土木施工7月号, pp.106-111

田村正・社本康広・堀田洋之(2006a) : 粘性土地盤上に建つ基礎構造の地震後の残留変形評価、日本建築学会構造系論文集No.602, pp.179-185

田村正・社本康広(2006b) : 粘性土地盤の地震後の簡易沈下予測法, 日本建築学会構造系論文集No.599, pp.95-101

龍岡文夫 (1986) : 土質試験の課題と試験結果の評価—東京湾横断道路における土質工学の諸問題と室内土質試験—, 最近の土質基礎に関する講習会講演資料, 土質工学会編, pp.55-103

東畑郁夫 (1981) : 砂の繰返しせん断変形特性に及ぼす主応力軸回転の影響, 東京大学博士論文

吉見吉昭・福武毅芳 (2005) : 「地盤液状化の物理と評価・対策技術」, 技報堂出版

福武毅芳 : 三次元有効応力解析プログラムHiPER (おわんモデル) と液状化シミュレーション, 清水建設研究報告, Vol. 96, pp.5-18, 2018.