

# 건축물 성능기반 내진설계의 이해

## Introduction on Performance Based Seismic Design

2019. 4. 22

청주대학교 건축공학과

김 동 관

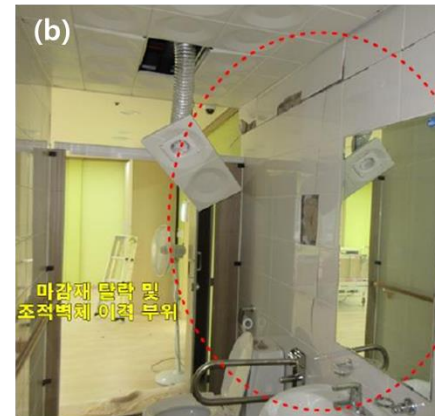
1. 경주지진, 포항지진의 피해
2. 내진설계의 이해
3. 지진 시, 건축물에 요구되는 성능
4. 성능기반 내진설계 방법
5. 건축물의 내진보강
6. 요약

## 9.12 경주지진

규모 5.8 , 진원깊이 : 약 10 km

국내에서 계측된 가장 큰 지진 , 저층건물의 국부적인 피해

23명 부상, 재산피해 5,367 건



## 11.15 포항지진

규모 5.4 , 진원깊이 : 약 5 km

부상자 92명, 이재민 1,797명, 재산피해 : 672억원

내진설계 미적용 건물



진앙거리: 2.3km



## 11.15 포항지진

규모 5.4, 진원깊이 : 약 5 km

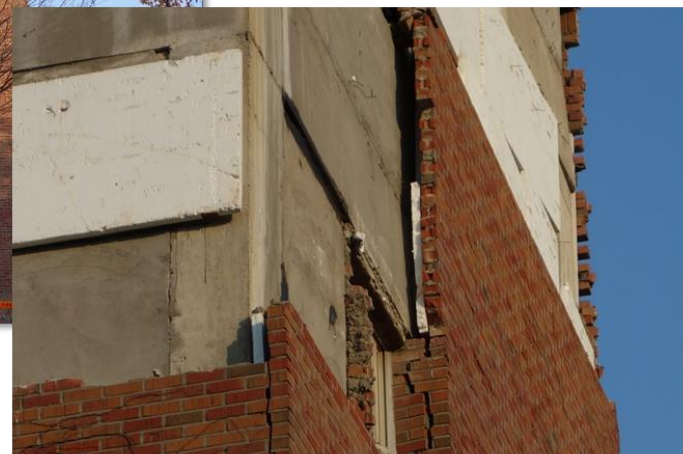
학교



## 11.15 포항지진

규모 5.4 , 진원깊이 : 약 5 km

비구조재의 파괴





## 11.15 포항지진

규모 5.4 , 진원깊이 : 약 5 km

필로티 건물



## 11.15 포항지진

내진설계 1등급, 완공 3년된 아파트의 손상

→ 내진설계 된 건물이 손상되었다 ??!





1. 경주지진, 포항지진의 피해
2. 내진설계의 이해
3. 지진 시, 건축물에 요구되는 성능
4. 성능기반 내진설계 방법
5. 건축물의 내진보강
6. 요약

# 지진의 이해

## 지진관련 용어

### 규모 (Magnitude)

- 발생한 **지진에너지**의 **크기**를 나타내는 척도. (**절대값**)
- 지진계에 기록된 진폭(지진의 크기)을 깊이, 진앙거리를 고려하여 나타낸 지수.

### 리히터 지역 규모 (Richter Local Magnitude, $M_L$ )

- 1953년 Bero Gutenberg와 Charles F. Richter가 천문학 연구에서 아이디어를 얻어 '규모(Magnitude)'라는 개념을 처음 도입, Richter Scale을 제안.
- 1956년 Richter가 에너지의 개념을 도입하여 수정된 규모를 제안.

# 지진의 이해

## 지진관련 용어

### 진 도 (Intensity)

- ① 지진의 크기를 나타내는 가장 오래된 척도
- ② 지반진동의 크기를 사람이 느끼는 감각, 주위의 물체, 구조물 및 자연계에 대한 영향을 계급별로 분류시킨 **상대적 개념**의 지진크기
- ③ 정성적으로 표현된 지진의 피해는 역사적인 기록에서도 찾아낼 수 있으므로 역사적인 크기를 나타낼 때도 사용.



# 지진의 이해

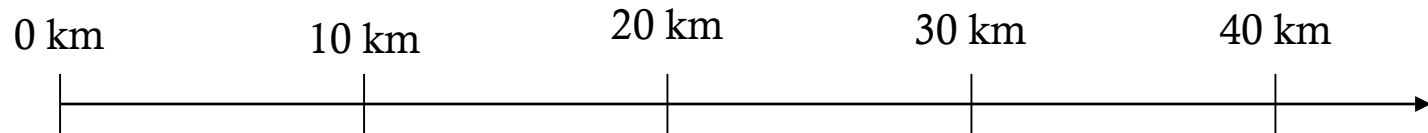
## 지진관련 용어

### 12 등급의 수정 메르켈리 (Modified Mercalli) 진도계급

MMI	피해상황
I	극히 미세한 진동, 특수조건하의 극히 일부만 느낌.
II	실내에서 극히 일부만 느낌.
III	실내에서 소수가 느낌. 매달린 물체가 약하게 움직임.
IV	실내에서 대다수가 느낌. 실외에서 감지 불가
V	건물 전체가 흔들림. 물체가 깨어지거나 전도 또는 추락. 가벼운 물체의 위치이동
VI	똑바로 걷기 어려움. 약한 건물의 회벽이 떨어지거나 균열이 감. 무거운 물체의 이동이나 전도
VII	서 있기가 곤란. 운전 중에 지진을 느낌. 회벽이 붕괴, 느슨한 적재물 또는 담장이 무너짐.
VIII	차량의 운전이 곤란. 일부 건물이 붕괴. 사면이나 지표의 균열. 탑, 굴뚝의 붕괴
IX	견고한 건물의 심한 피해 혹은 붕괴. 지표면의 균열 발생 지하 파이프관 파손
X	대부분 견고한 건물 및 구조물이 기초와 함께 파괴 지표면 균열, 대규모 사태, 아스팔트 콘크리트 포장도로 균열
XI	철로 심하게 휘어짐, 구조물 거의 완전파괴. 지하 파이프 완전 작동 불능.
XII	지면이 파도형태로 움직임, 물체가 공중으로 던져짐.

# 지진의 이해

## 지진 진도와 규모의 관계



진도 VII

진도 VI

진도 V

진도 IV

 규모 5.3의 지진 발생

발생한 지진에 대하여

규모는 5.3으로 일정하지만, 진도는 거리에 따라 다름!!

# 지진의 이해

## 지진관련 용어

### 혼동하기 쉬운 지진관련 용어

- 잘못 알고 있는 규모 표기법 : 리히터 지진계로 진도 5.6의 지진  
규모 5.6에 대하여 내진설계 되어있다.
- ☞ 올바른 규모 표기법 : '리히터 스케일 5.6의 지진' '리히터 규모 5.6의 지진'  
'규모 5.6의 지진'
- 잘못 알고 있는 진도 표기법 : 진도 5.6
- ☞ 올바른 진도 표기법 : '진도 V', '진도 V+', '진도 VII+',
- 내진설계 관련 올바른 표기
- ☞ 이 건물은 규모 6.5 지진이 20 km 이상에서 발생한 경우에 대하여 내진설계가 되어있음
- ☞ 이 건물은 인접부지에서 진도 VII+ 의 지진동이 유발되었을 경우에 대하여 내진설계가 되어있음  
(다만, 진도는 정량화하기 어려움)

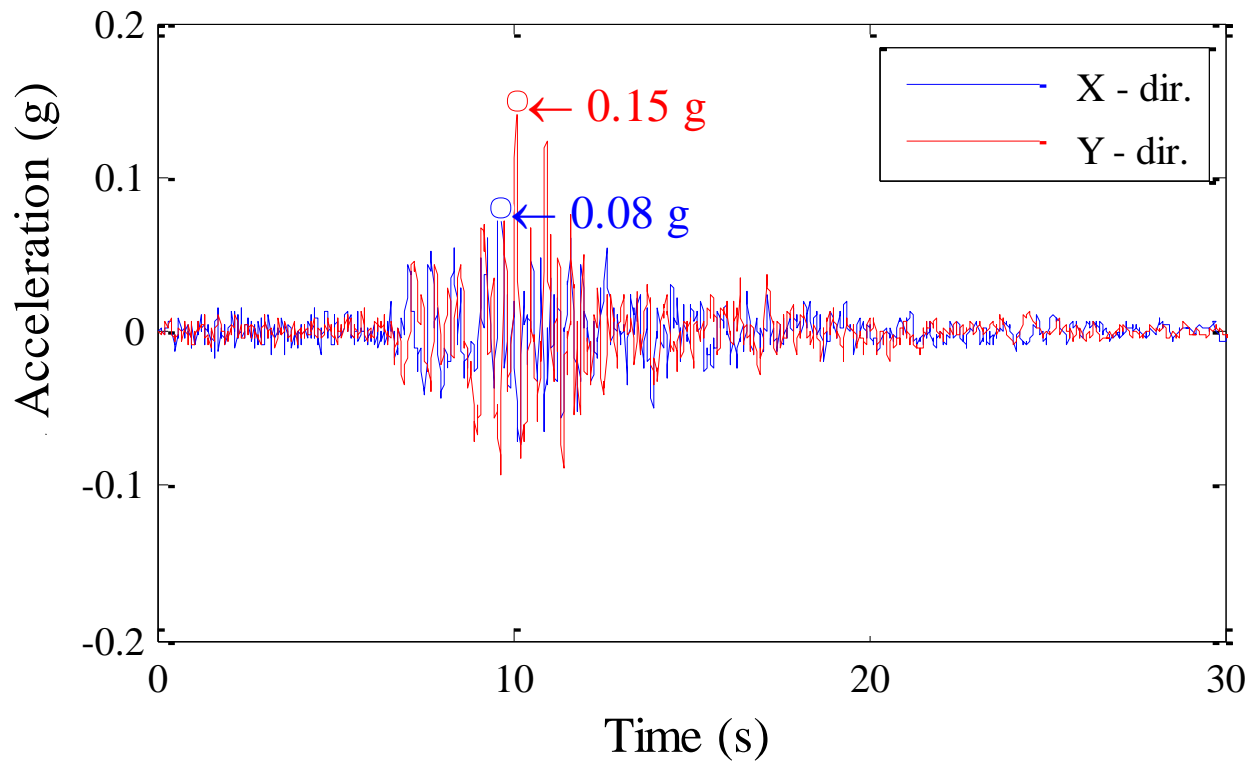


# 지진의 이해

## 지진의 기록

관측소에서 남-북, 동-서, 수직방향으로 기록된 지진기록으로부터 구조물의 횡력을 유발하는 수평방향 2성분을 입력지진으로 사용

Loma Prieta 지진 (1989년),  $M=6.93$ , Station : San Francisco Sierra



# 지진의 이해

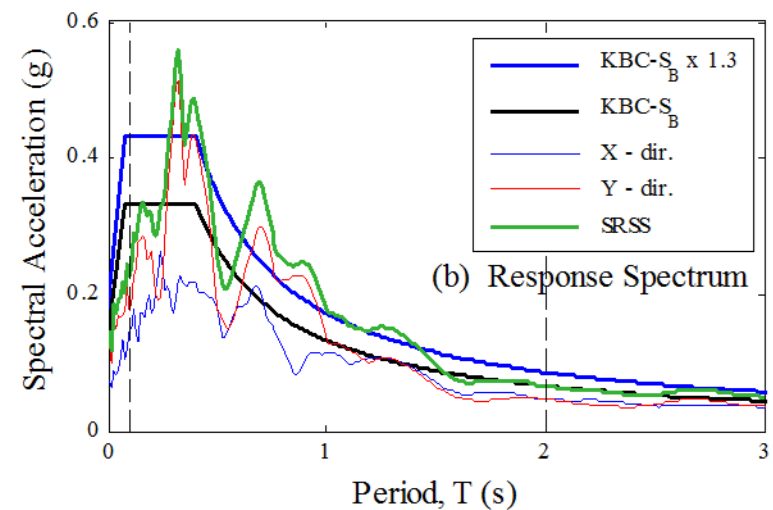
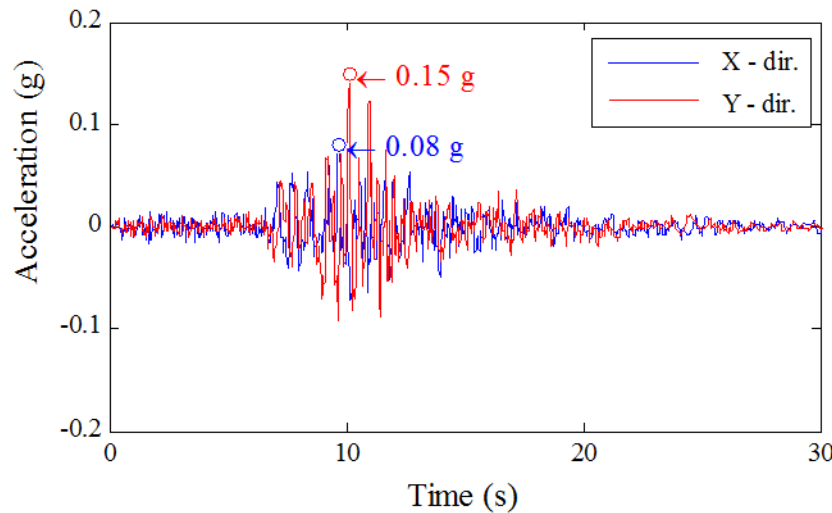
## 응답스펙트럼

해당 지진에 대하여

- 1) 다양한 주기의 단자유도 구조물에 대한 해석을 수행
- 2) 구조물에 예상되는 밀면전단력을 구함
- 3) 밀면전단력을 등가의 가속도로 치환  
→ 구조물의 질량을 적용하면, 밀면전단력을 구할 수 있음

즉, 응답스펙트럼은 해당 지진의 크기를 알 수 있는 하나의 지표

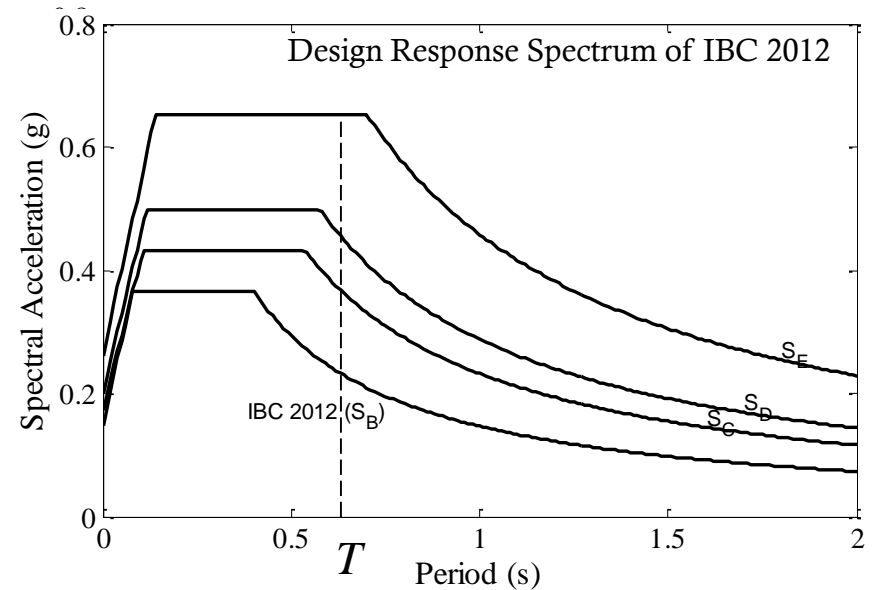
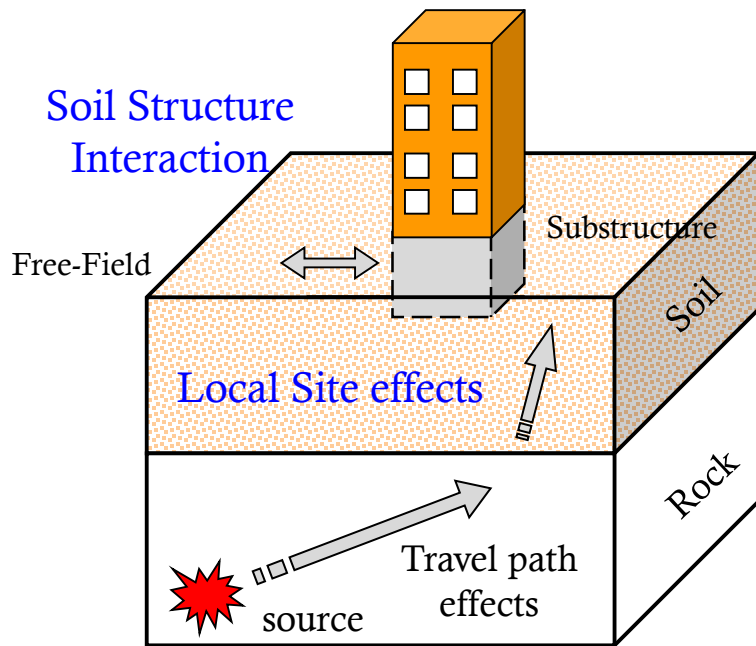
$$SRSS = \sqrt{X^2 + Y^2}$$



# 지진의 이해

## 설계응답스펙트럼

지반에 의한 지진동의 증폭을 고려하여 설계 하중 증가





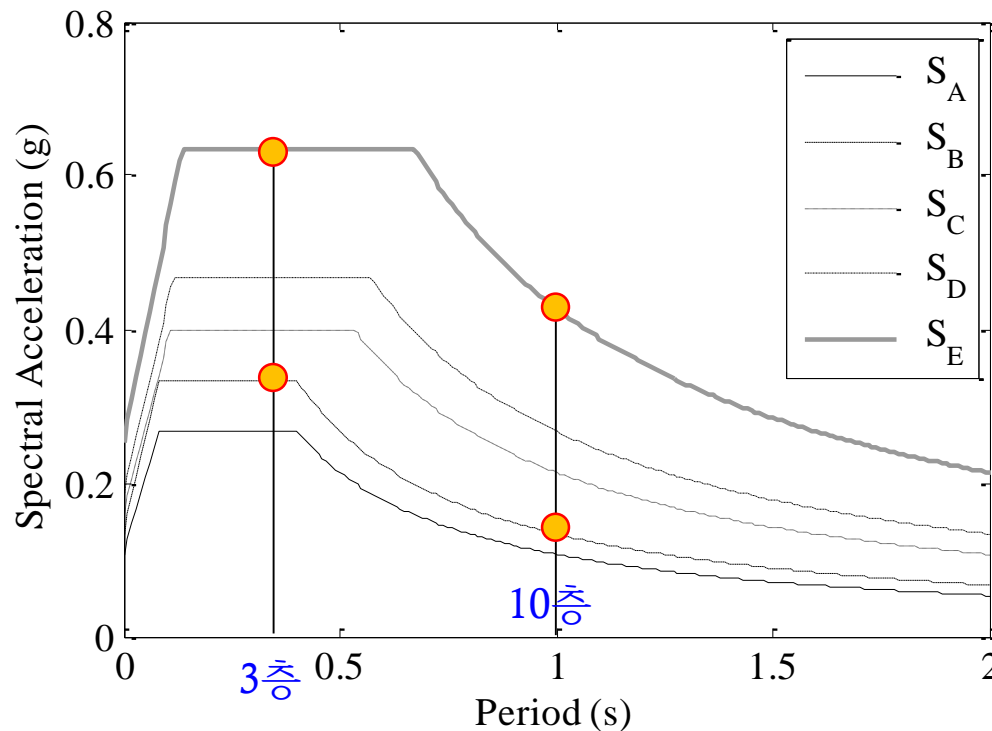
# 내진설계의 이해

## 설계응답스펙트럼

2400년에 1번 발생할 지진의 2/3 수준(약 1000년에 1회)에 대하여 설계하중 결정

3층 건물 ( $T=0.3\text{s}$ ) =  $0.22\text{g} \times 2.5 \times 2/3 \times \text{지반조건} = 0.36 \sim 0.65 \text{ g}$

10층 건물 ( $T=1.0\text{s}$ ) =  $0.22\text{g} \times 2/3 \times \text{지반조건} = 0.15 \sim 0.45 \text{ g}$



# 내진설계의 이해

---

## 설계응답스펙트럼

0.15~0.45g 의 수평력은 매우 큰 하중

- 탄성상태로 건물을 내진설계하기에는 부재크기의 증가로 사용성 및 경제성의 문제가 야기됨
- 지진 시, 건물의 비탄성 거동을 고려하여 내진설계 수행
- 탄성상태 : 지진을 겪은 후, 본래의 상태로 복원되는 것
- 비탄성 거동 : 지진 시, 철근의 항복, 콘크리트의 압괴 등 **구조부재가 손상되고**, 그에 따른 하중의 감소를 고려함

# 내진설계의 이해

## 설계응답스펙트럼

0.15~0.45g 의 수평력은 매우 큰 하중

→ 지진 시, 건물의 비탄성 거동을 고려하여 내진설계 수행

→ 반응수정계수 : 1.5 ~ 8

→ 중요도계수 : 1.0 ~ 1.5

→ 탄성하중의 1~1/8로 내진설계

$$\text{설계지진계수, } C_s = \frac{S_{DS}}{\left[ \frac{R}{I_E} \right]}$$

<표 1006.2.1> 지진력저항시스템에 대한 설계계수

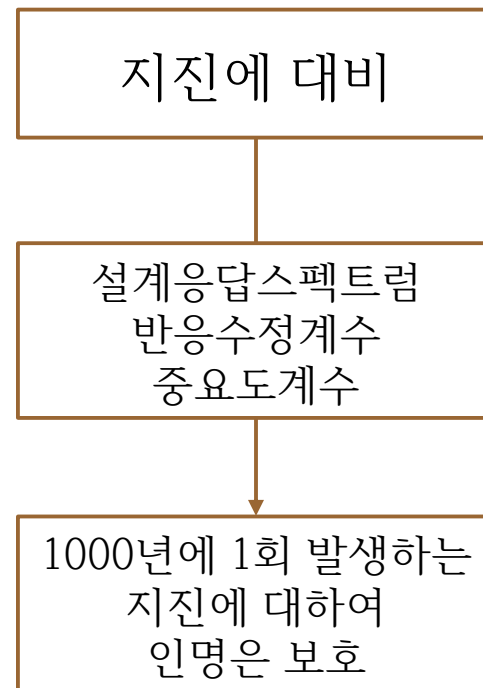
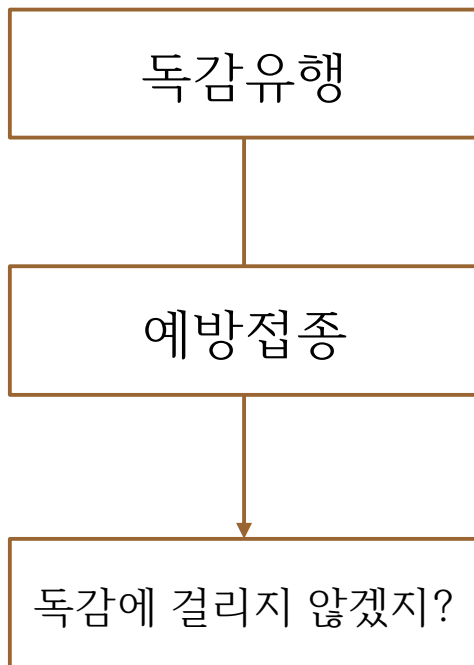
기본 지진력저항시스템 <sup>1)</sup>	설계계수		
	반응수정 계수 $R$	시스템 초과강도 계수 $\Omega_0$	변위증폭 계수 $C_d$
1. 내력벽시스템			
1-a. 철근콘크리트 특수전단벽	5	2.5	5
1-b. 철근콘크리트 보통전단벽	4	2.5	4
1-c. 철근보강 조적 전단벽	2.5	2.5	1.5
1-d. 무보강 조적 전단벽	1.5	2.5	1.5
1-e. 구조용 목재패널을 덧댄 경골목 구조 전단벽	6	3	4
1-f. 구조용 목재패널 또는 강판시트 를 덧댄 경량철골조 전단벽	6	3	4
2. 건물골조시스템			
2-a. 철골 편심가새골조 (링크 타단 모멘트 저항 접합)	8	2	4
2-b. 철골 편심가새골조 (링크 타단 비모멘트 저항접합)	7	2	4
2-c. 철골 특수중심가새골조	6	2	5
2-d. 철골 보통중심가새골조	3.25	2	3.25
2-e. 합성 편심가새골조	8	2	4
2-f. 합성 특수중심가새골조	5	2	4.5
2-g. 합성 보통중심가새골조	3	2	3
2-h. 합성 강판전단벽	6.5	2.5	5.5
2-i. 합성 특수전단벽	6	2.5	5
2-j. 합성 보통전단벽	5	2.5	4.5



# 내진설계의 이해

건축구조기준(KBC) 기준을 따르는 의한 내진설계

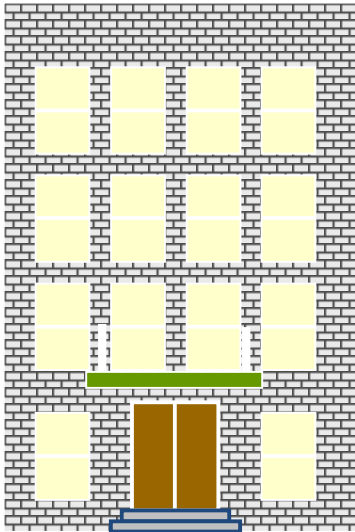
→ Prescriptive Seismic Design : 규정적인 내진설계



1. 경주지진, 포항지진의 피해
2. 내진설계의 이해
3. 지진 시, 건축물에 요구되는 성능
4. 성능기반 내진설계 방법
5. 건축물의 내진보강
6. 요약

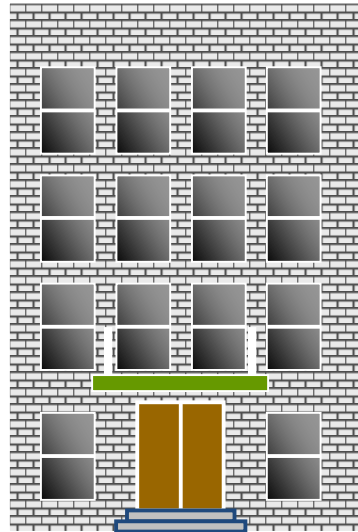
# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

## 기능수행



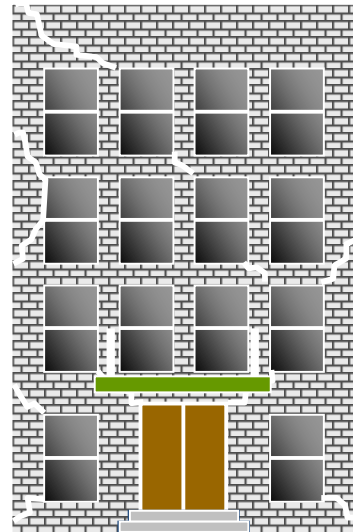
지진발생 이전의 강성/강도 유지, 거의 손상이 없음.

## 즉시입주



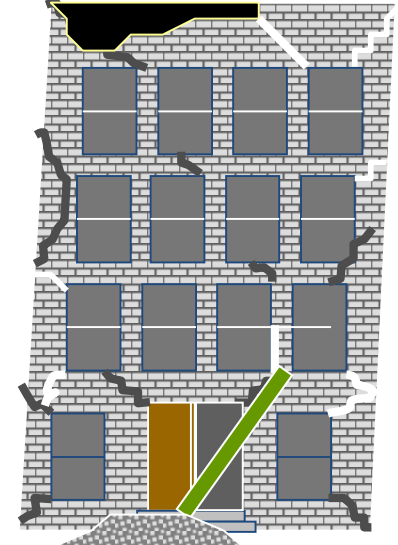
구조체에 대한 손상은 거의 없으나 청소나 경미한 수선이 필요할 수 있는 정도.

## 인명안전



“구조체/비구체 모두에 상당한 손상 발생, 그러나 인명안전은 달성, 보수/보강 이후 거주가 가능”

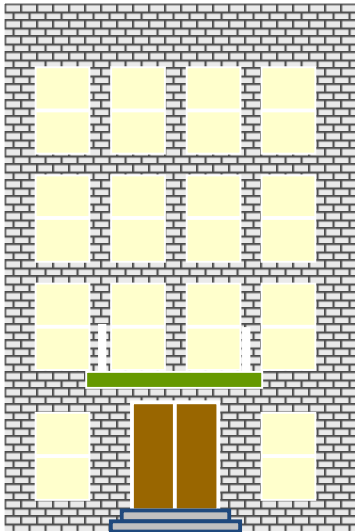
## 붕괴임박



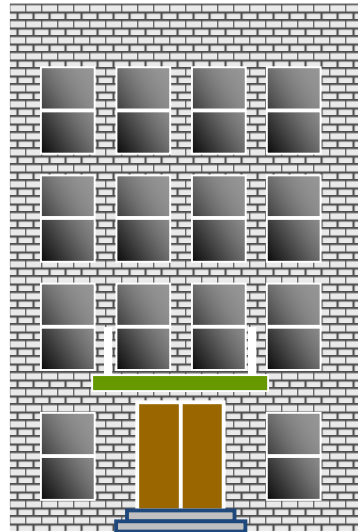
지진발생 이전의 횡력에 대한 강성/강도 거의 손실, 기둥이나 벽체가 경우 중력하중을 겨우 떠 받치고 있는 붕괴직전 수준, 여진에 의한 붕괴 가능성 높음.

# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

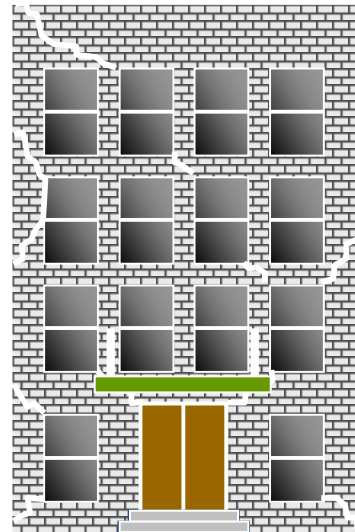
기능수행



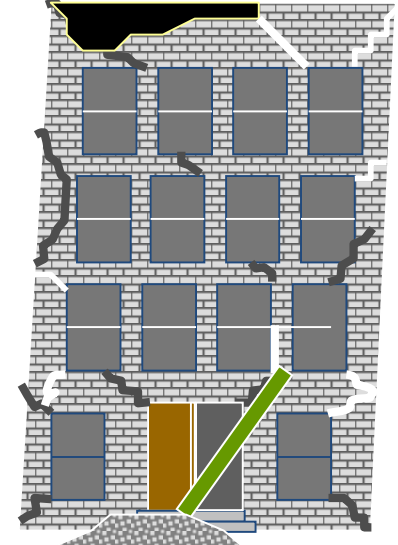
즉시입주



인명안전



붕괴임박



건축물 중요도, 특등급

종합병원, 위험물 저장 및 처리시설, 소방서, 발전소, 방송국, 긴급대피수용시설

규모 7.0 지진이 20km 이상 거리에서 발생해도 “기능수행” 혹은 “즉시입주” 가능하도록 설계 요구



# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

롯데월드타워

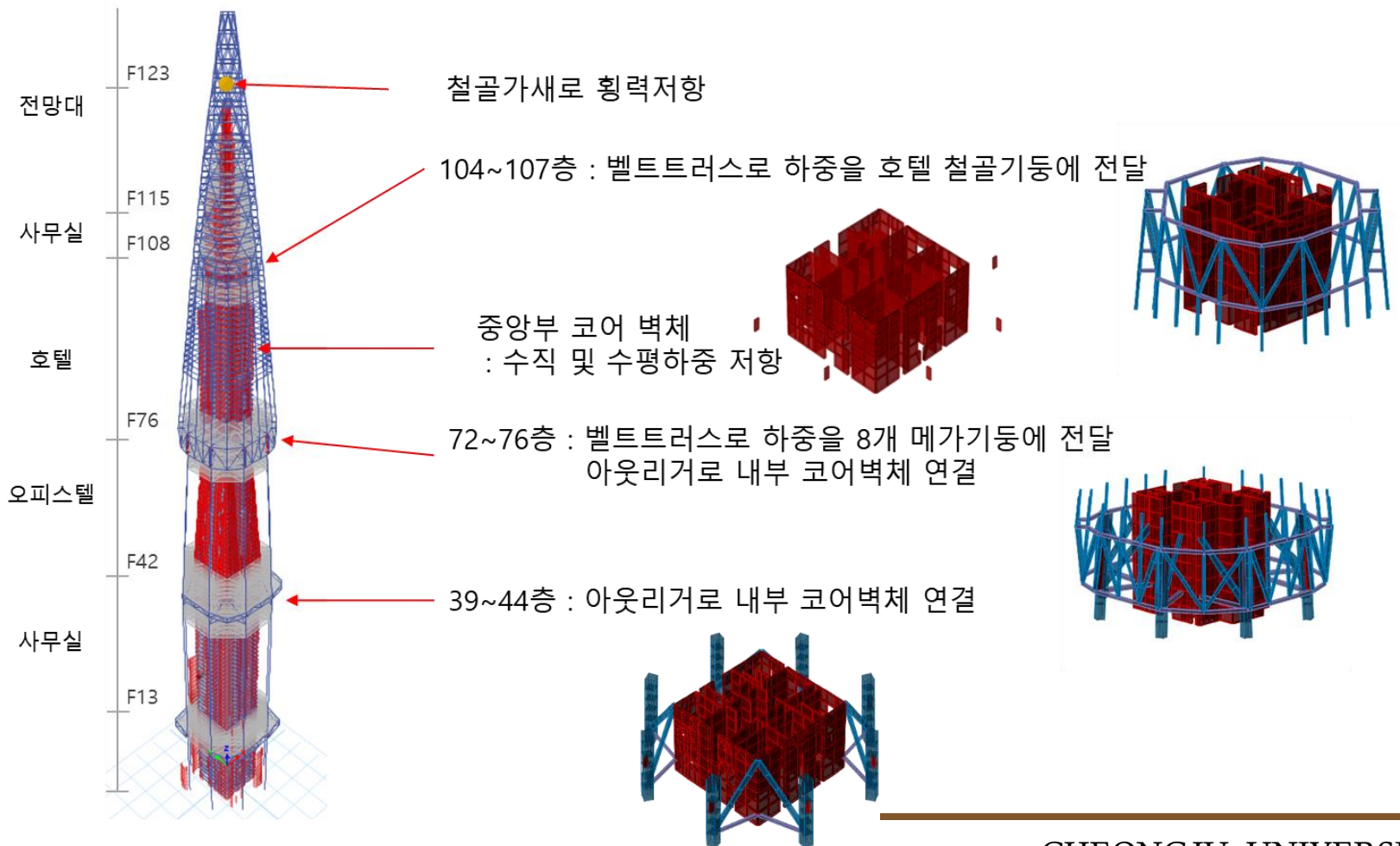


GBC 타워



# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

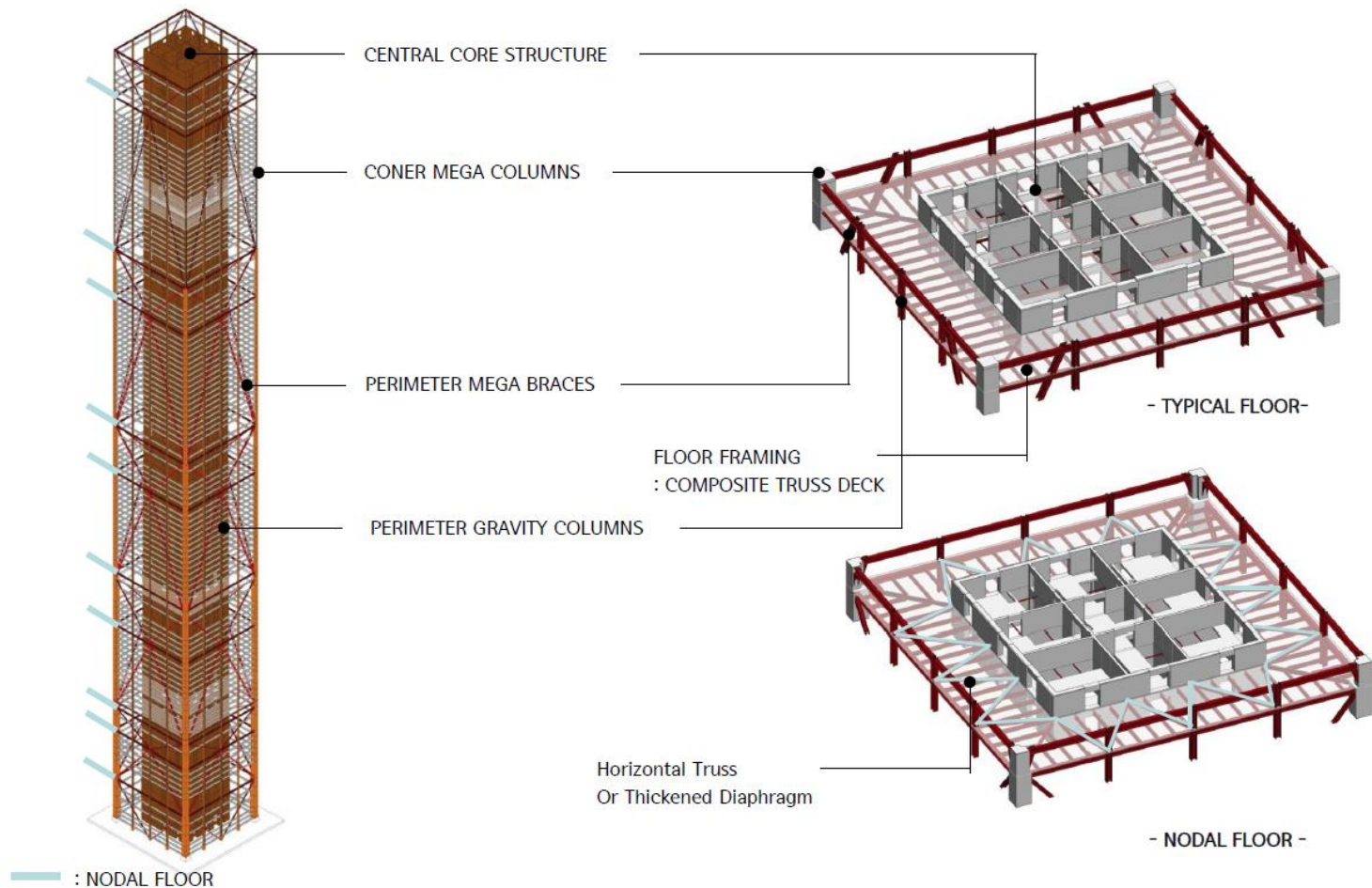
롯데월드타워 = 코어벽체 + 메가기둥 + 벨트트러스(아웃리거)  
= 진도 IX+ 이상 지진에 대한 내진성능평가



# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

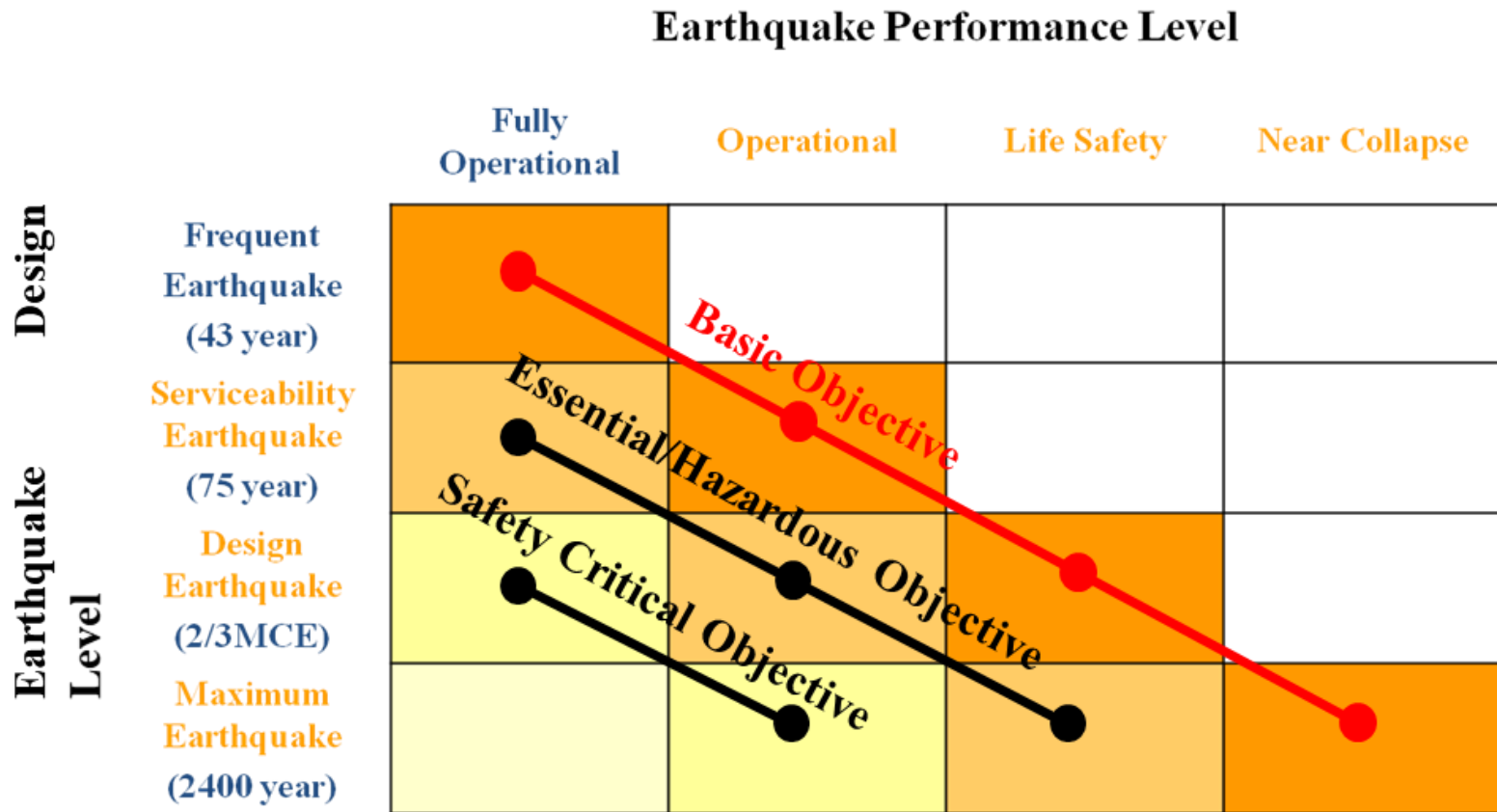
GBC 타워 = 코어벽체 + 메가컬럼 + 메가브레이스

= 규모 7.3 지진이 타워 인근 5km 이내에서 발생해도 안전하게 설계



# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

소유자가 지진수준에 따른 해당 건축물의 성능을 요구





# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

## 구조설계 및 시공개선



<벽체 배근>

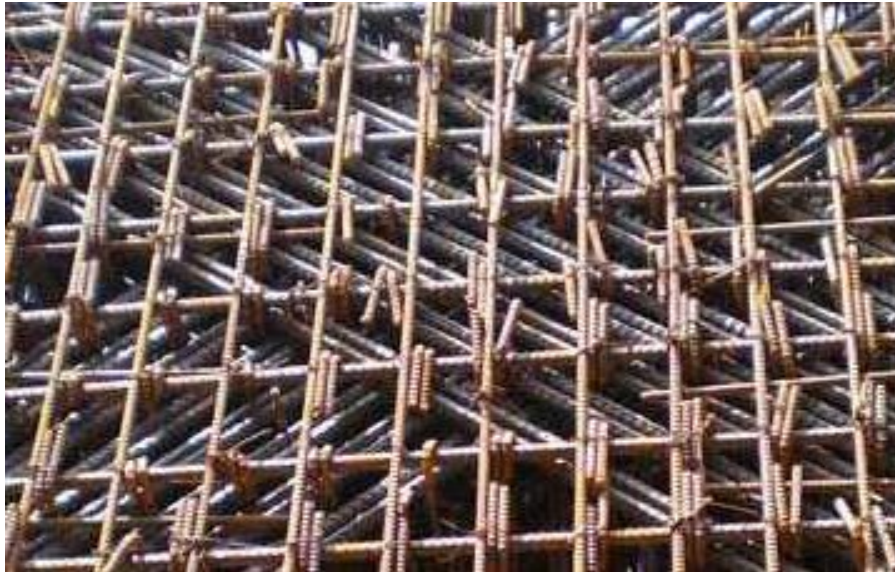


<인방보 배근>

- KBC 구조기준에서 내진설계범주 D에 속하고, 높이가 60m초과인 경우, 특수전단벽으로 설계
- 최외단부에 경계요소를 적용하여 부재의 연성능력 증가 목적

# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

## 구조설계 및 시공개선



<인방보 대각철근 조립>



<벽체 경계요소 철근 조립>

- KBC 구조기준에서 내진설계범주 D에 속하고, 높이가 60m초과인 경우, 특수전단벽으로 설계
- 최외단부에 경계요소를 적용하여 부재의 연성능력 증가 목적
- 경계요소 적용은 철근배근시공 난이도를 요하며 콘크리트 타설이 용이하지 않음 (균열 및 피복탈락 등 문제)
- 시공성 저하 및 철근물량 증가 -> 정착 및 구조일체화 문제점

# 지진 시, 건축물에 요구되는 성능

## 구조설계 및 시공개선

- 1) 건축구조기준(KBC2009)에 예외 규정에 의해 철근콘크리트구조 형식이라도 실험이나 해석에 의해 이 장에서 요구되는 사항을 만족하거나, 그 이상의 구조성능을 갖는 것이 증명된다면 이를 사용할 수 있다고 규정
  - 2) KBC 2016 “비탄성해석을 사용하여 구조물의 비탄성변형응답을 보다 정확히 설계에 반영하거나, 다양한 성능수준을 만족하도록 설계하고자 하는 경우 또는 규정된 각 시스템계수를 적용 어려운 경우 **성능설계법**을 적용할 수 있다.”
- > 이러한 규정에 근거하여 **비선형 정적해석 및 동적해석**을 수행하여 구조물의 성능수준 확인 및 합리적인 설계를 통한 시공성 향상을 목적으로 함

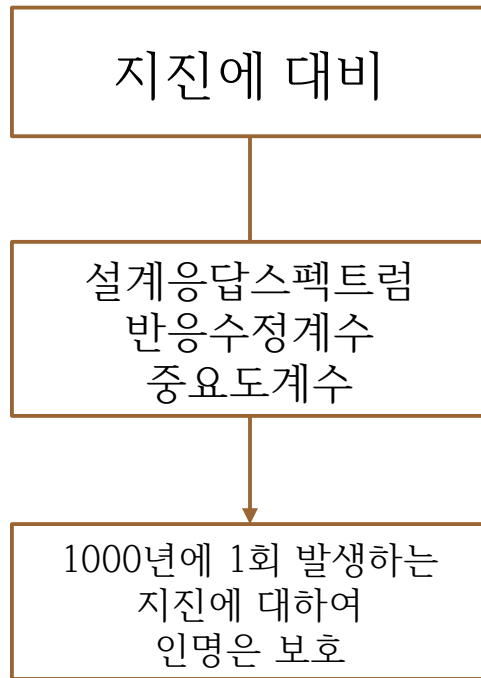


1. 경주지진, 포항지진의 피해
2. 내진설계의 이해
3. 지진 시, 건축물에 요구되는 성능
4. 성능기반 내진설계 방법
5. 건축물의 내진보강
6. 요약

# 성능기반 내진설계 (Performance Based Seismic Design)

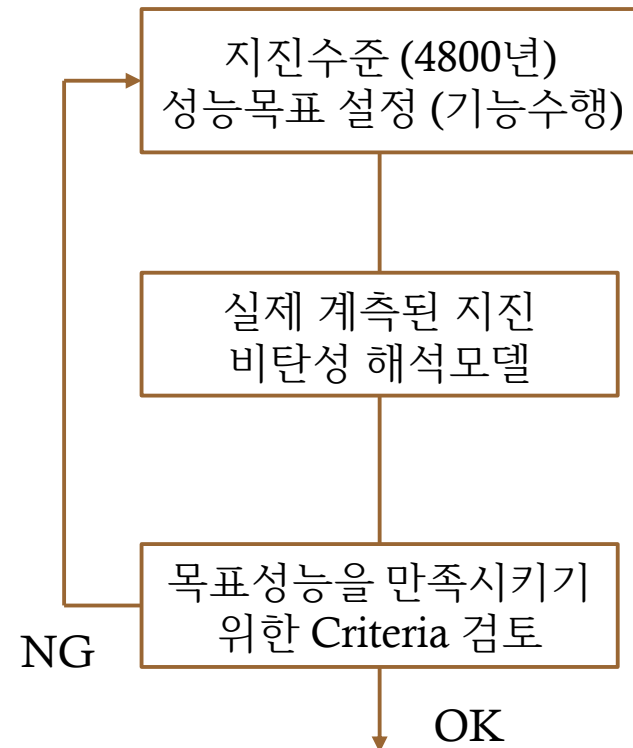
매우 정밀한 수치해석으로, 실제 지진에 대한 구조물의 거동 분석

## Prescriptive design



규모 6.5를 견디는가?  
진도 VIII을 견딜 수 있는가?  
포항지진에 금은 왜 갔는가?

## PBD



규모 7.0, 거리 20km 이상 지진  
진도 VIII 등에 대하여 기능수행 가능  
포항지진에 금은 왜 갔는가? (답변가능)  
특수전단벽을 사용하지 않아도 됨 ?

# 성능기반 내진설계 (Performance Based Seismic Design)

탄성해석 + KBC 기준 설계응답스펙트럼을 적용하던 기존방법과 달리

→ 설계결과가 큰 차이 없음

비선형해석프로그램 + 실지진파 입력

→ 실무자에 따라 해석 및 설계결과가 큰 편차가 있음

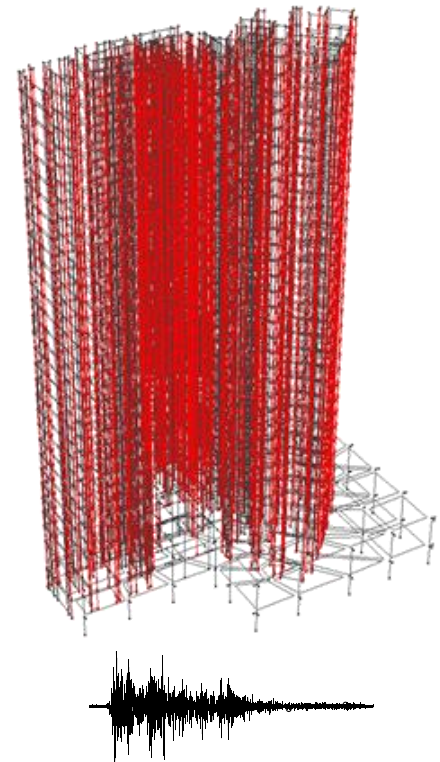
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g$$

건축구조공학

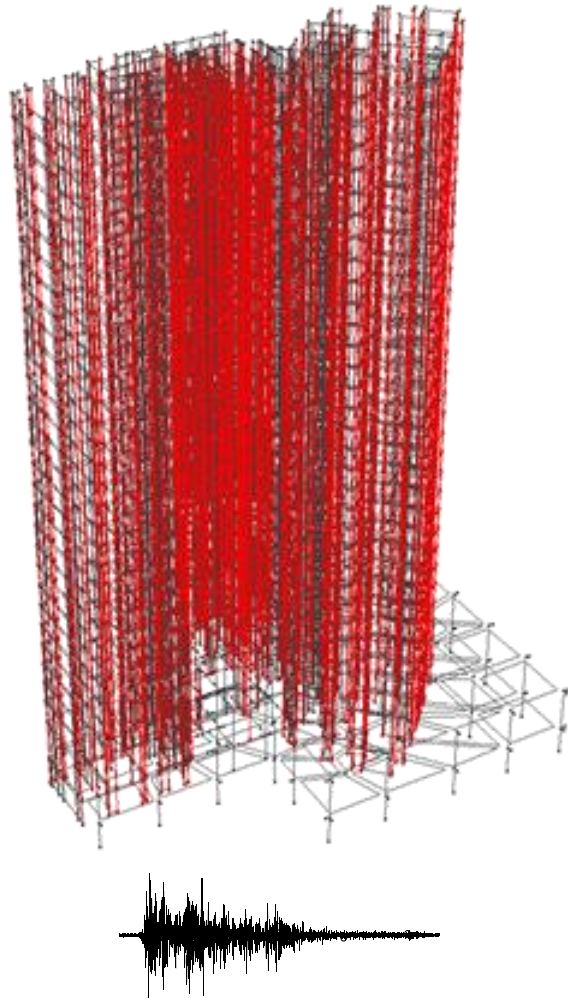
지반공학

제 3자 검토 (Peer Review) 동시 수행

- 지진·지반
- 지진해석
- 내진설계



# 성능기반 내진설계 (Performance Based Seismic Design)



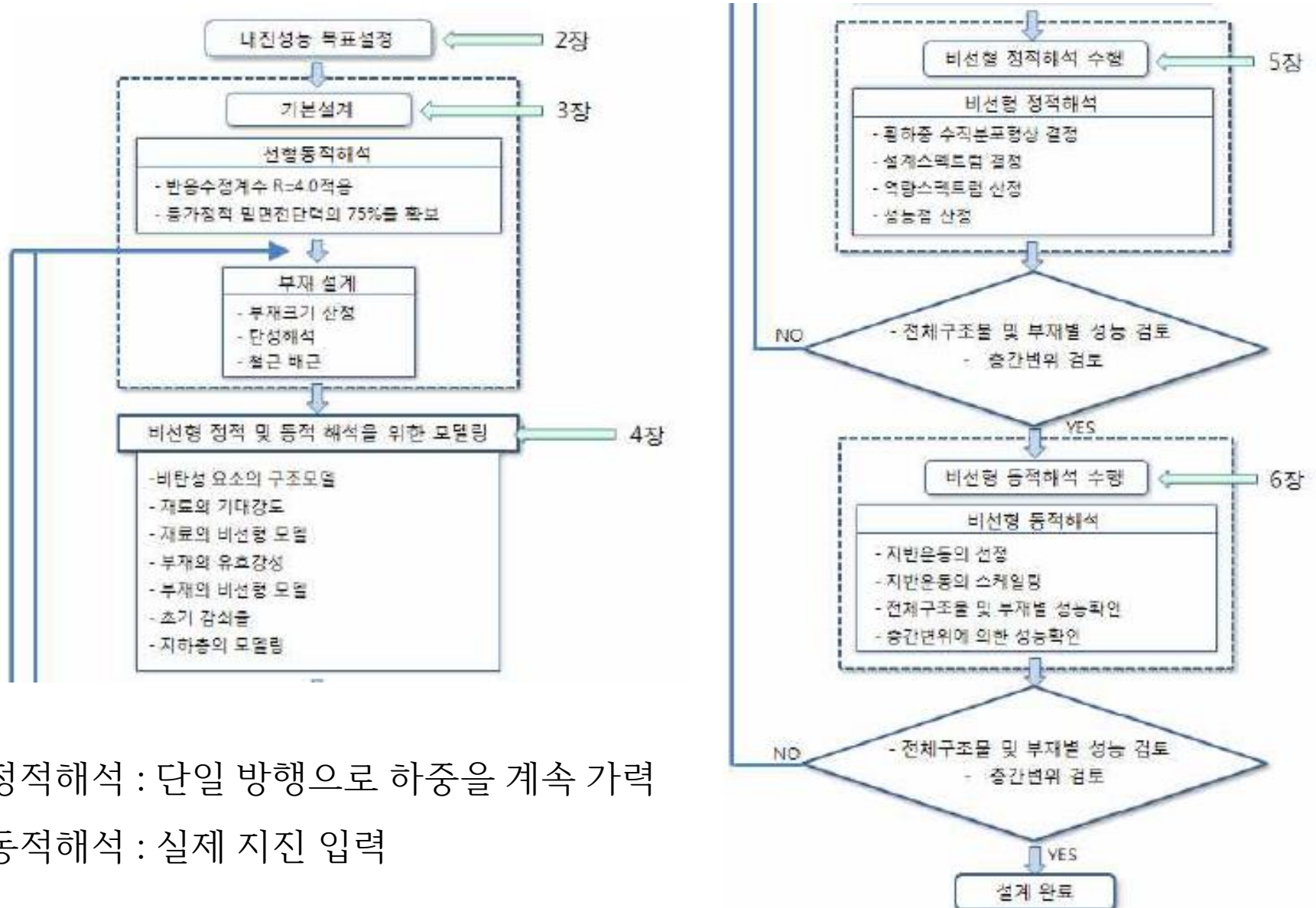
## 수치해석모델

- 철근, 콘크리트 재료특성
- 감쇠장치
- 지반에 의한 실제 지진의 증폭 반영

## 검토기준 (Criteria)

- 층간변형각
- 콘크리트 압축변형율
- 전단강도
- 소성회전각

# 성능기반 내진설계 (Performance Based Seismic Design)



정적해석 : 단일 방향으로 하중을 계속 가력

동적해석 : 실제 지진 입력

1. 경주지진, 포항지진의 피해
2. 내진설계의 이해
3. 지진 시, 건축물에 요구되는 성능
4. 성능기반 내진설계 방법
5. 건축물의 내진보강
6. 요약

# 내진설계 방안

- 내진(耐震) 설계

한자 풀이 : 耐 [ 견딜 **내** ] 震 [ 지진 **진** ]

- 지진에 견디어 낸다는 뜻으로 지진이 발생할 때 구조물이 무너지지 않도록 하는 것

- 제진(制震) 설계

한자 풀이 : 制 [ 절제할 **제** ] 震 [ 지진 **진** ]

- 지진을 제어한다는 뜻으로 지진이 구조물에 작용하면 구조물에 설치된 제진 장치에 의해 구조물이 받는 진동이 줄어 피해가 감소하도록 하는 것

- 면진(免震) 설계

한자 풀이 : 免 [ 면할 **면** ] 震 [ 지진 **진** ]

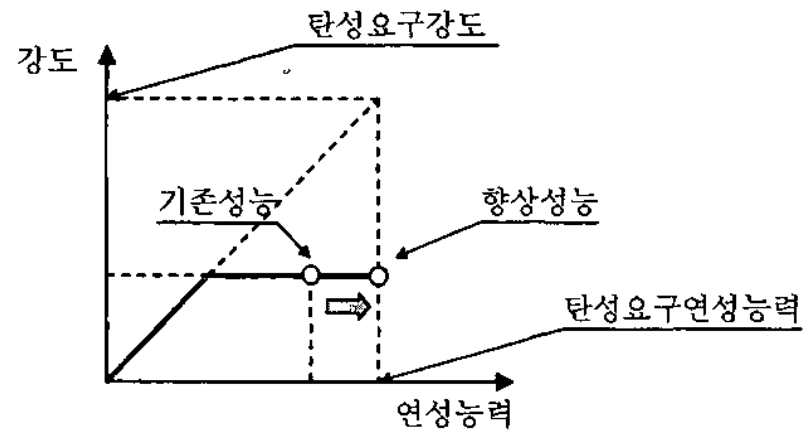
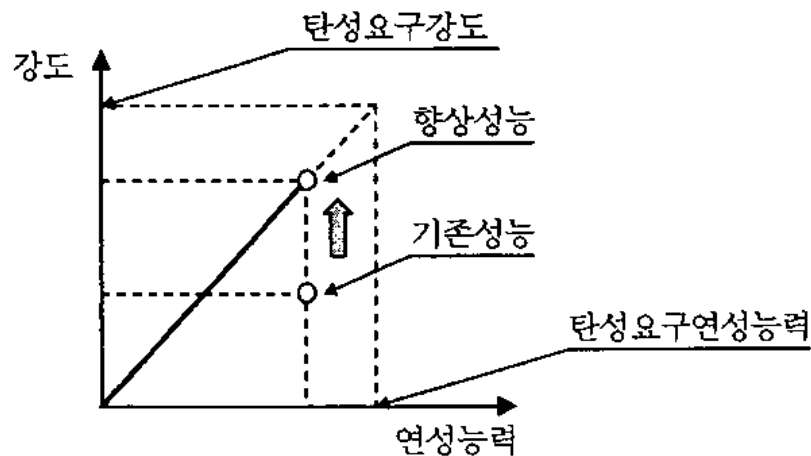
- 지진을 면한다는 뜻으로 구조물에 면진 장치를 설치하여 지진 하중이 구조물에 침입 하기 전에 미리 방어하는 것



# 내진보강 방법

## 내진성능보강 전략

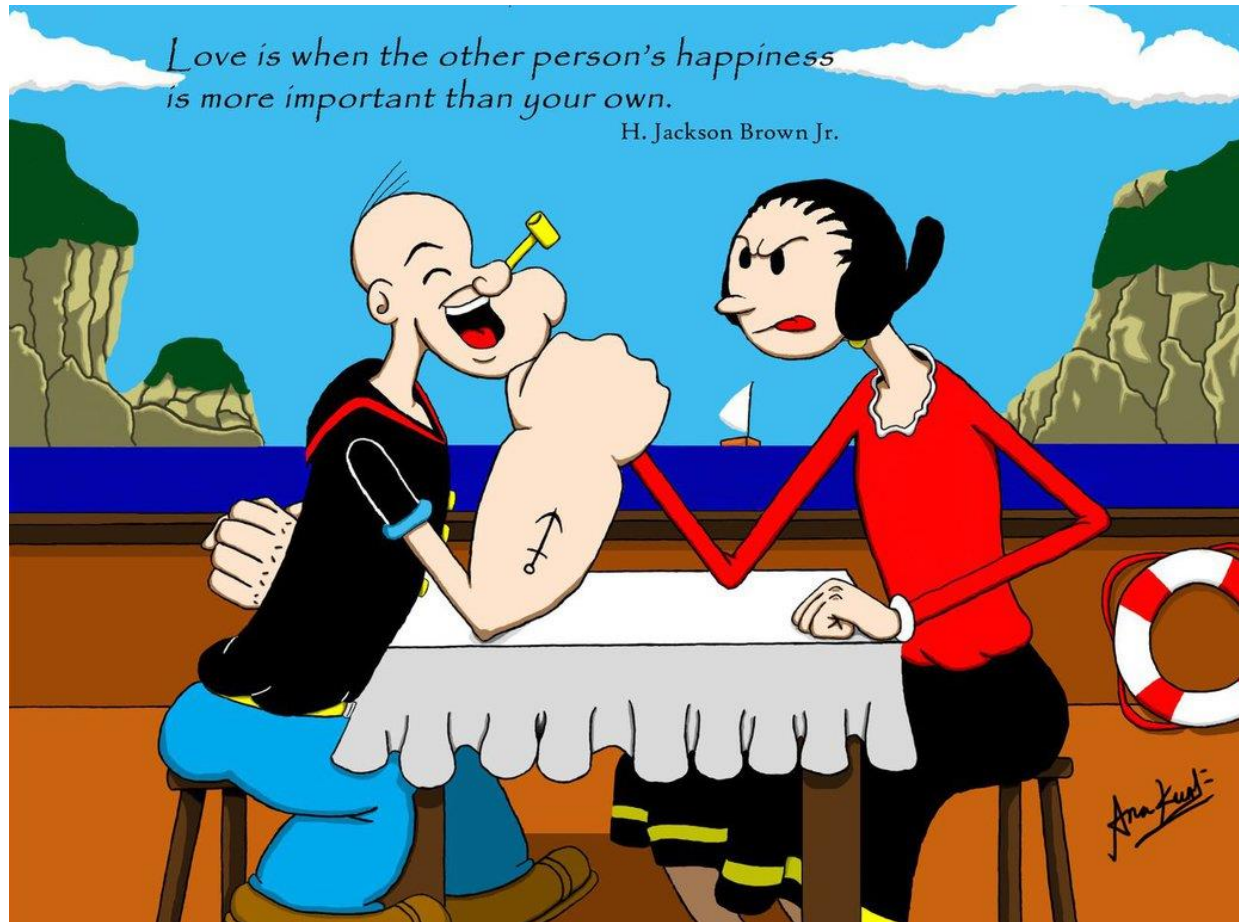
1. 강도 및 강성 증가 : 건물을 더욱 튼튼하게
2. 연성증가 : 건물의 변형이 잘 유지되도록
3. 하중저감 : 특별한 장치로 지진력을 감소



학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼 (2018)

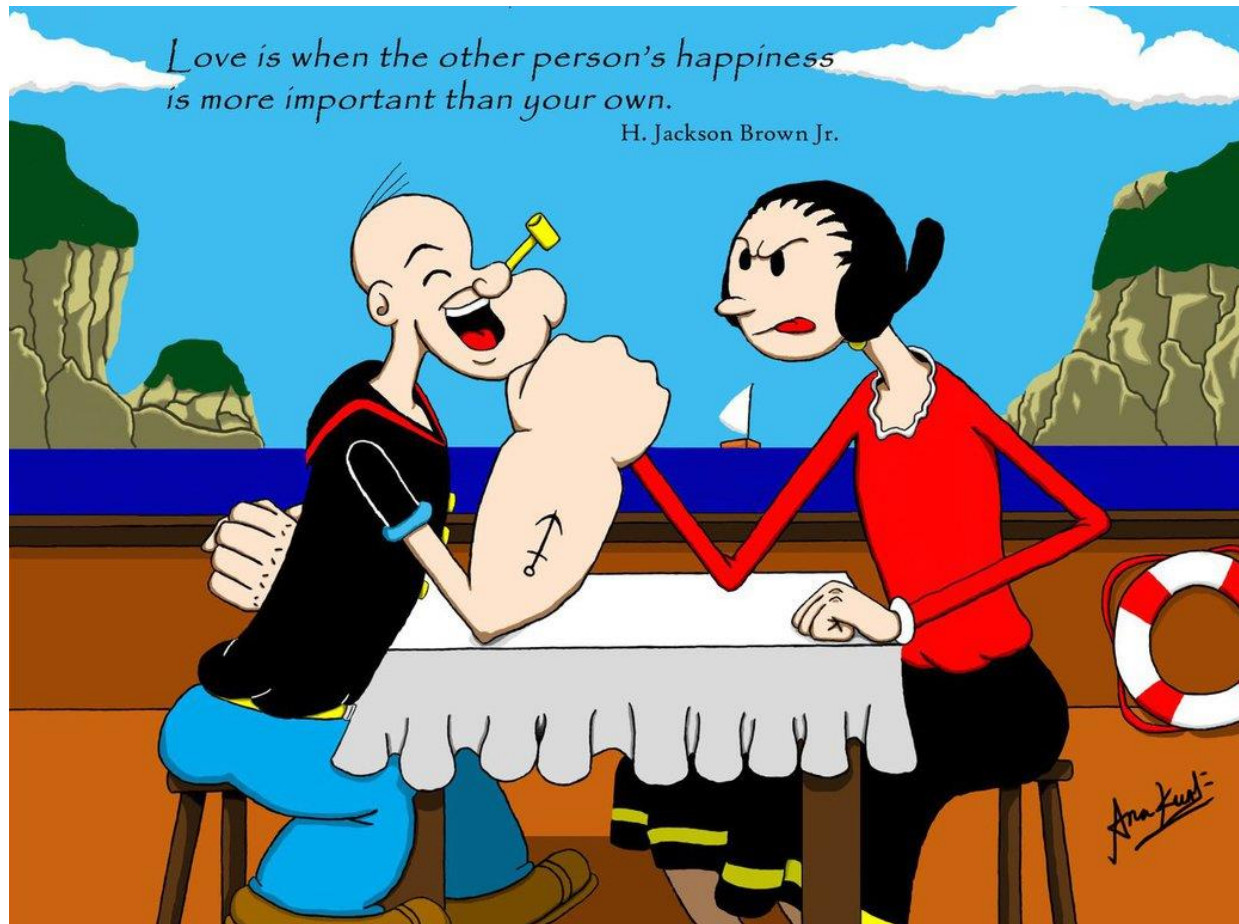
# 내진보강 방법

뽀빠이와 올리브가 팔씨름을 한다면??



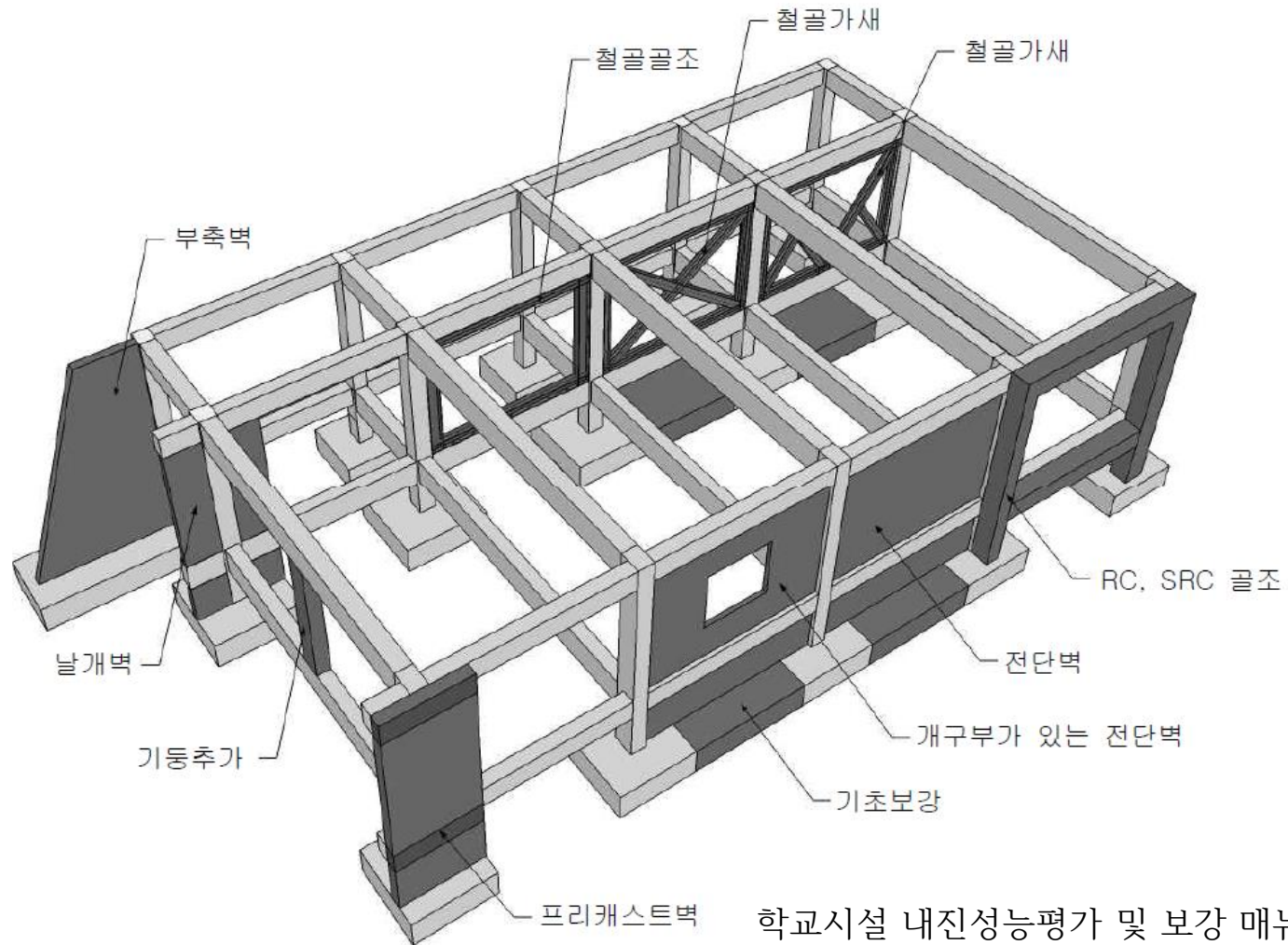
# 내진보강 방법

아래팔이 두꺼운 뽀빠이지만, 어깨근육이 약한  
뽀빠이가 지지할 수 있는 힘은 어깨근육에서 결정됨



# 내진보강 방법

## 주요 시스템보강공법의 종류



학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼 (2018)

# 내진보강 방법

## 구조항목별 보강전략

항목		보강전략				
		부재신설	부재단면증설	연결성제고	하중저감/연성 능력	부재제거
시스템	강도	굴조/벽체/가새	-	-	채움벽제거	채움벽제거
	강성	굴조/벽체/가새	-	-	채움벽제거	채움벽제거
	연성 및 에너지소산 능력	-	-	-	감쇠장치	-
시스템 형상	약층	벽체/가새	기둥보강	-	-	-
	비틀림	벽체/가새	-	-	-	-
하중경로	수직하중경로	수직부재의 추가	필로티기둥의 보강	수직부재의 연결	-	-
	수평하중경로 (인접건물간격)	-	-	격막슬래브의 연결	-	-
기초	기초판	기초판신설	-	-	-	-
	지반	마이크로파일	-	-	-	-
부재	단면	날개벽	단면증설, 섬유보강	-	섬유보강	-
	접합부	날개벽	단면증설	-	-	-

# 내진보강 방법

〈표 11-1〉 철근콘크리트 구조에 대한 주요 시스템보강 방법의 비교

평가항목 보강방법	평면 계획	시공성	채광	외관	기초 보강	경제성	보강 성능
전단벽 신설	△	△	×	△	×	○	○
전단벽 두께 증가	○	○	△	△	△	△	△
기둥 날개벽 신설	○	△	△	×	△	○	△
골조 신설	○	△	○	△	△	△	△
철골가새	△	○	△	△	×	△	○
부축벽	△	△	○	×	×	○	○
프리캐스트 벽체	○	○	△	△	×	△	○

○: 좋음, △: 보통, 나쁨: ×

〈표 11-2〉 강구조에 대한 주요 시스템보강방법의 비교

평가항목 보강방법	평면 계획	시공성	채광	외관	기초 보강	경제성	보강 성능
가새 신설	△	○	△	△	×	○	○
내진철골조 신설	○	△	△	○	△	△	△
내진기둥	○	○	○	△	△	△	×
골조내부 채움벽	×	△	△	△	×	△	○

○: 좋음, △: 보통, 나쁨: ×



# 내진보강 방법

## 감쇠장치

지진시 건물에 관성력으로 유발된 지진력을 소산할 수 있는 장치를 설치하여 주구조체의 피해를 방지함





# 내진보강 방법

벽체 외부에 감쇠기를 설치하여 내진보강

1. 변위가 크지 않은 벽체외부에  
큰 변형시 작동하는 감쇠기 설치
2. 감쇠기 작용하중을 지지하는  
접합부 설계 부족

매우, 매우 잘못된 내진보강사례!!



# 내진보강 방법

## 내진보강시 고려사항

1. 신설되는 시스템 (벽체, 가새, 감쇠장치) 등에 의해 **추가로 부가되는 하중에 대하여 기초까지의 하중전달경로가 확보**가 요구됨
  - 기존 구조체가 부가되는 하중을 수용
  - 수용하지 못하면, 하중전달경로 내의 부재 단면 증가 등 보강이 필요함
2. 신설되는 시스템과 기존시스템의 **접합부 확인**
3. 감쇠장치 등 특수공법이 적용될 시 요구되는 해석방법 (정적해석, 시간이력해석)
4. 감쇠장치 등 특수공법이 **작동하는 변위**가 유발되는 시스템인지 확인

## 요 약

---

1. 국내 건축구조기준에서는 2400년에 1회 발생예상되는 지진의 2/3 수준에 대하여 인명안전수준으로 내진설계 수행
2. Prescriptive Seismic Design 은 실제 지진시 건축물의 정확한 성능을 알기 어려움
3. 기능수행이 요구되는 주요한 시설물, 발주처의 요구 등에 따라 특정 지진수준에 대한 건축물의 성능을 확보하는 Performance Based Seismic Design 이 시행되고 있음
4. 정밀한 구조해석모델과 실제 지진으로 구조물의 지진시 거동을 예측 및 평가
5. 제 3자 검토(Peer Review) (교수, 건축구조기술사, 지진지반 전문가) 등이 함께 수행
6. 내진보강시, 하중경로의 확보 및 검토와 보강장치의 작동 여부가 잘 판단되어야 함

경청해주셔서 감사합니다.

# 지반운동을 고려한 건축물의 내진설계

---

2019. 4. 25

청주대학교 건축공학과

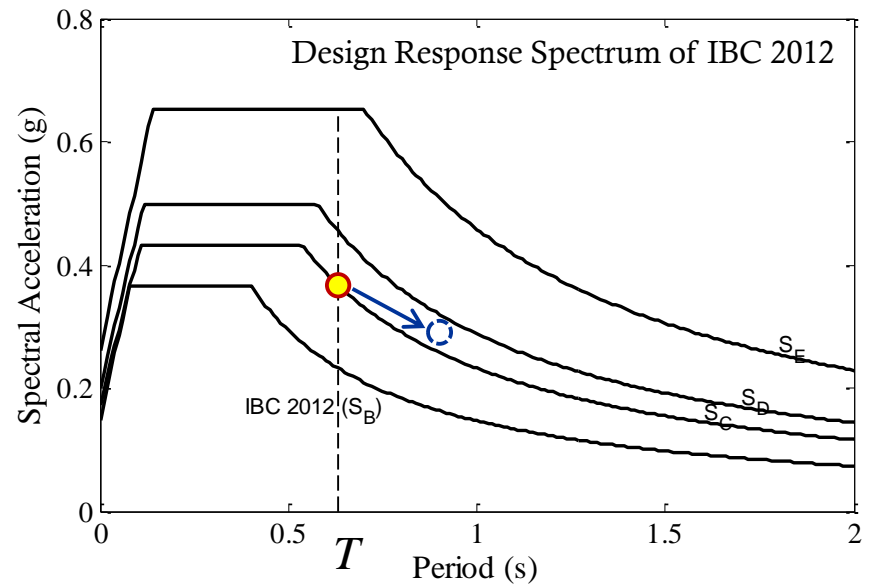
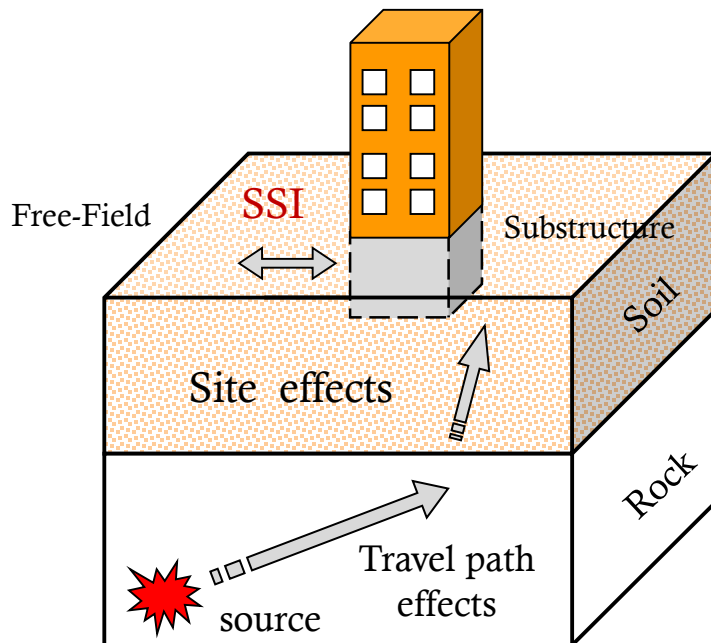
김 동 관

1. 지반운동의 영향
  - a. 지반운동과 응답스펙트럼
  - b. 지반진동이론
2. 국내 지반운동의 특성과 기준
3. 지하구조물의 내진설계

# 지반운동의 영향

## 토사지반과 하부구조의 영향

1. Site effect
2. Soil-structure interaction (SSI)



# 지반운동의 영향

## Mexico Earthquake (1985)

호수를 매립하여 세워진 Mexico City에서 연약지반에 의하여  
저층건물보다 고층건물의 피해가 매우 큰 지진

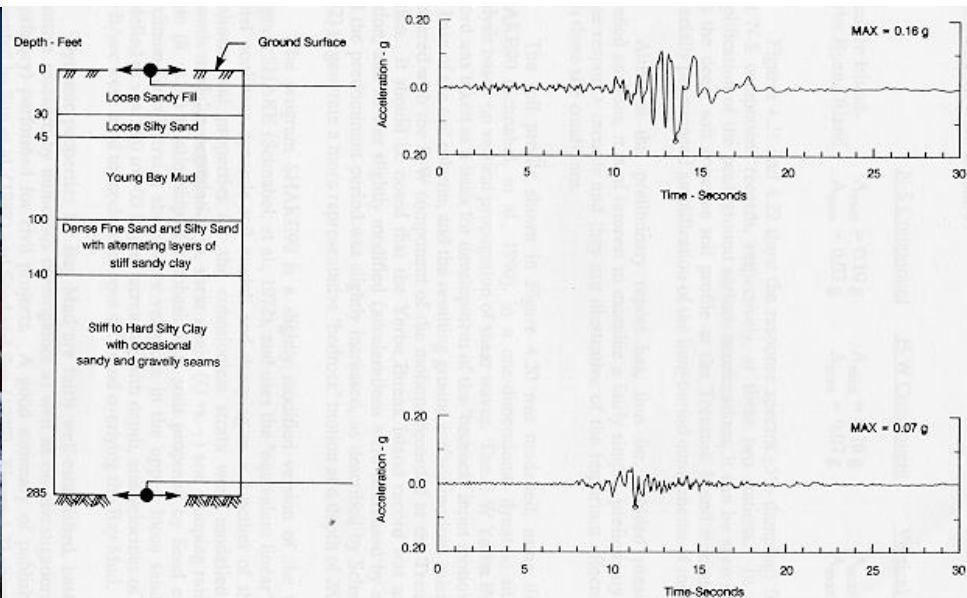
## Loma Prieta Earthquake (1989)

지반에 의한 지진파의 증폭을 계측하고, 현 설계기준의 근거가 된 지진

멕시코 지진시, 15층 건물의 붕괴



Loma Prieta 지진시, 지반에 의한 지진의 증폭





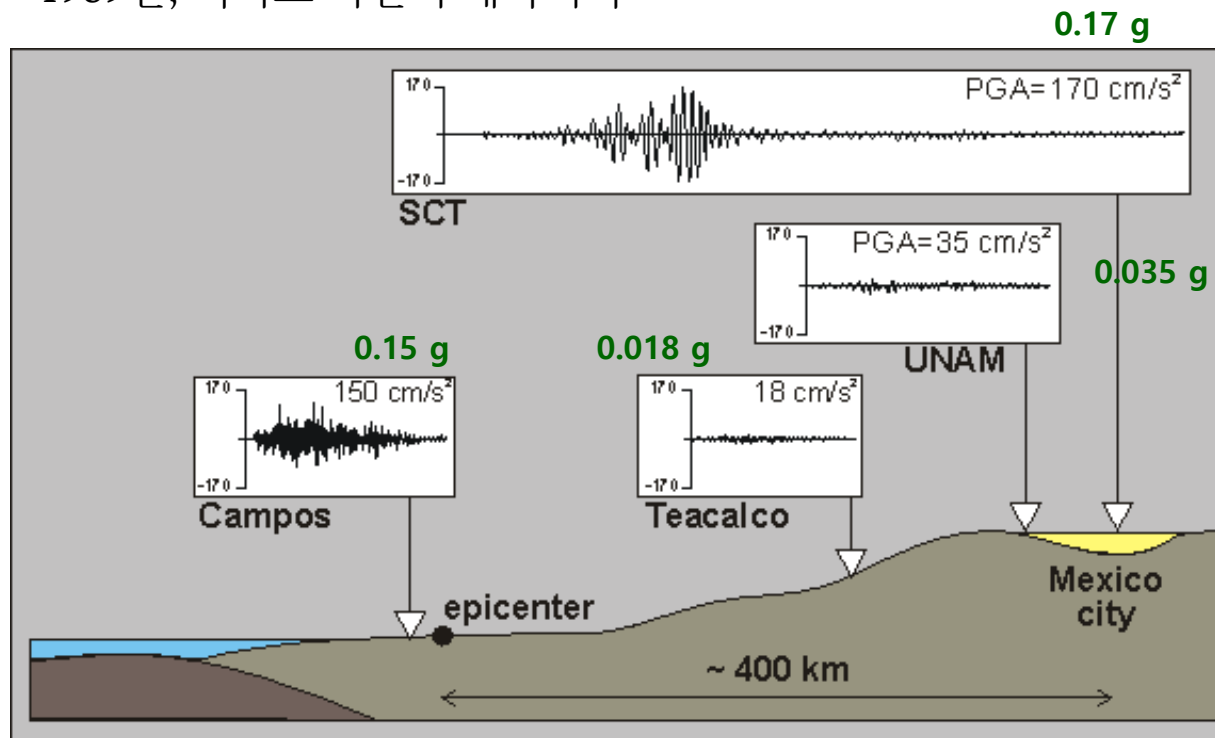
# 지반운동의 영향

## 실제 사례

1989년 9월 19일, 멕시코 지진 → 고층건물에 주된 피해

2017년 9월 19일, 멕시코 지진

< 1989년, 멕시코 지진시 계측기록 >

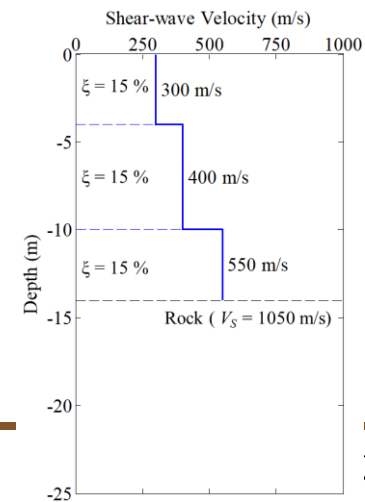
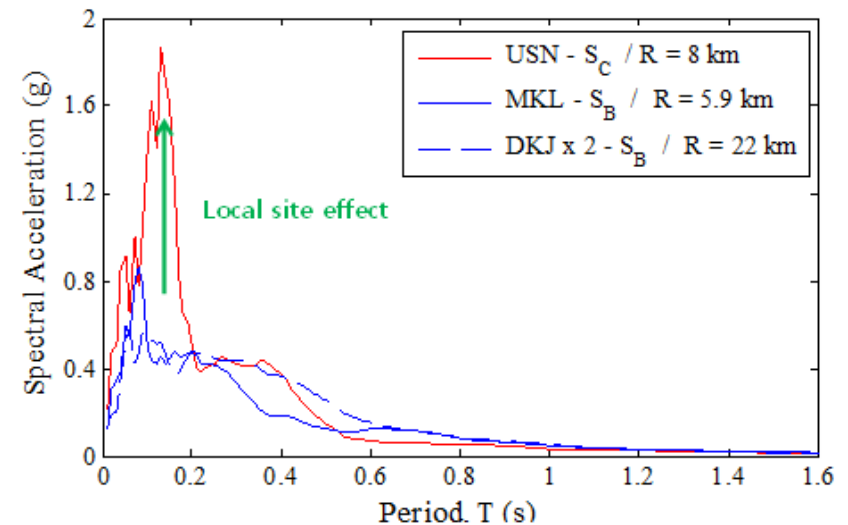
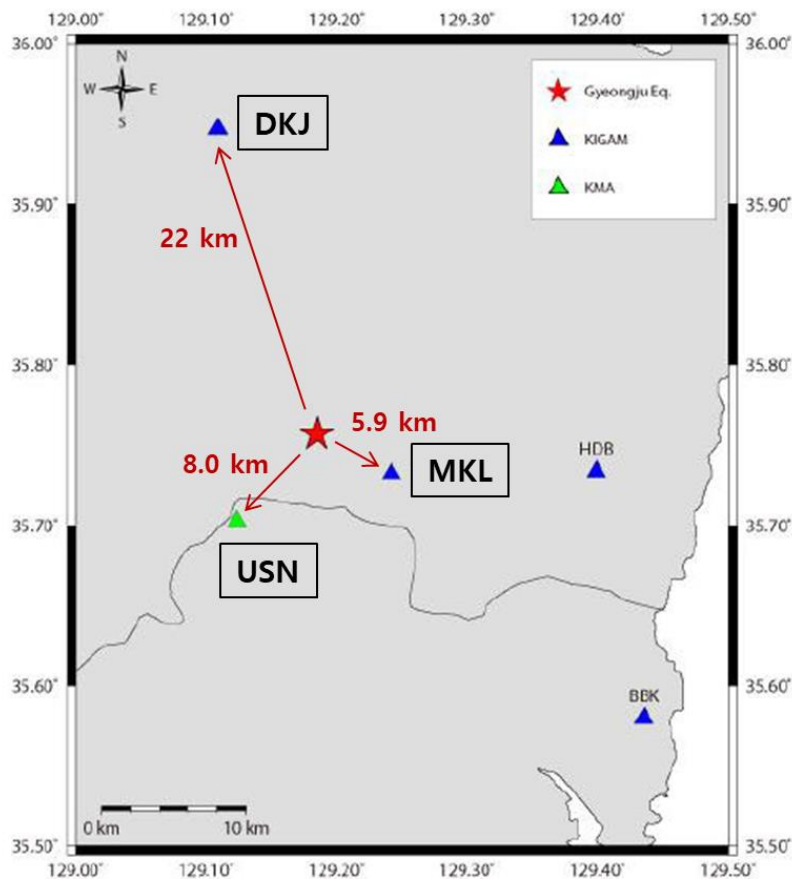


# 지반운동의 영향

## 실제 사례

2016년 9월 12일, 경주 지진

단주기 지반조건 → 저층건물에 주된 피해

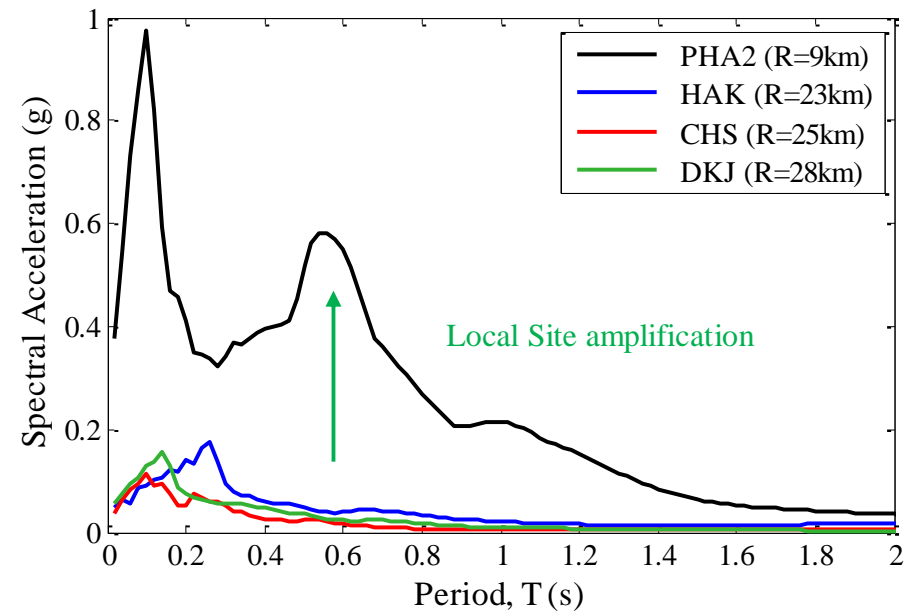
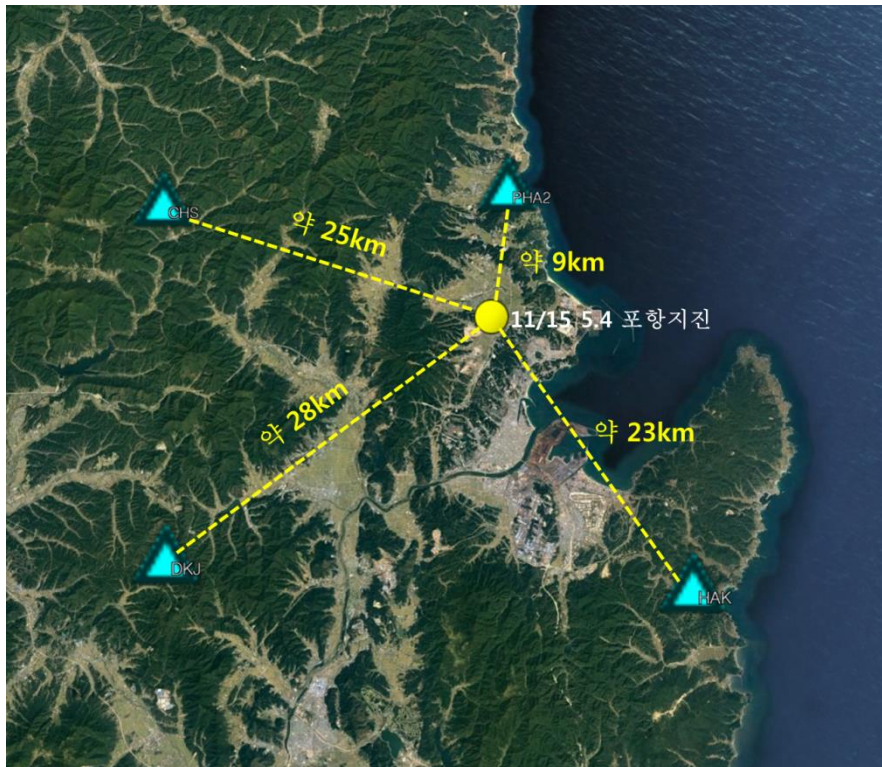


# 지반운동의 영향

## 실제 사례

2017년 11월 15일, 포항 지진

중,장주기 지반조건 → 중층건물에 피해 유발

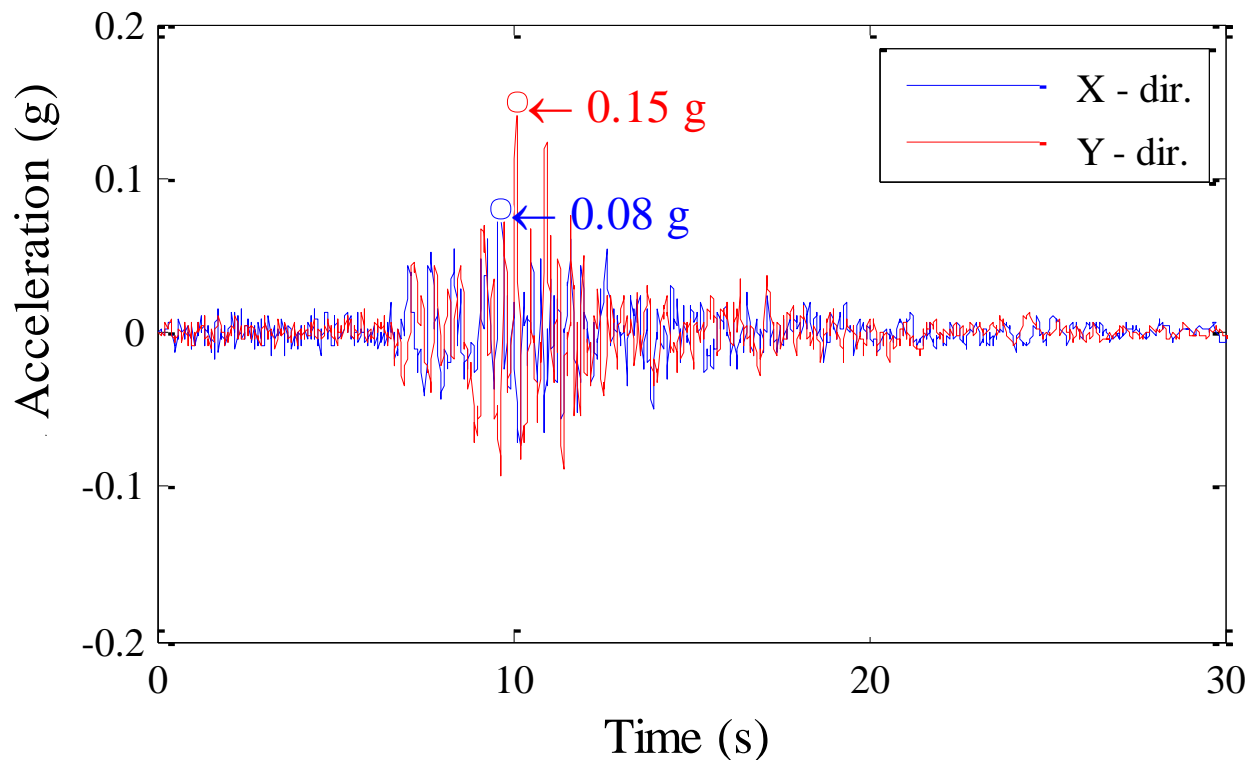


# 지반운동의 영향

## 지진의 기록

관측소에서 남-북, 동-서, 수직방향으로 기록된 지진기록으로부터 구조물의 횡력을 유발하는 수평방향 2성분을 입력지진으로 사용

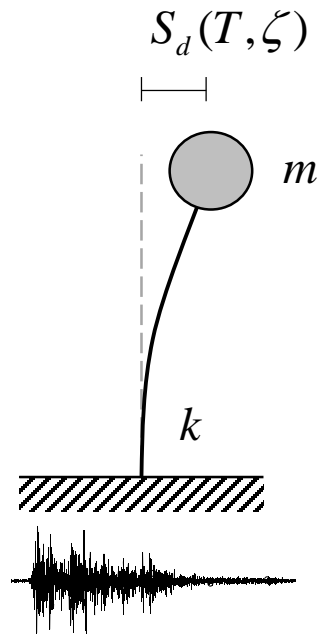
Loma Prieta 지진 (1989년),  $M=6.93$ , Station : San Francisco Sierra



# 지반운동의 영향

## 구조물의 지진응답

다양한 해석법 (Newmark method, 중심차분법, 상태-공간방정식) 등으로 운동방정식을 풀어  
서 구조물의 주기와 감쇠비에 따른 구조물의 변위를 구함



Fixed base model

운동방정식 :  $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$

구조물의 주기 :  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

구조물의 감쇠비 :  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_n}$

구조물의 변위 :  $u = S_d(T, \zeta)$

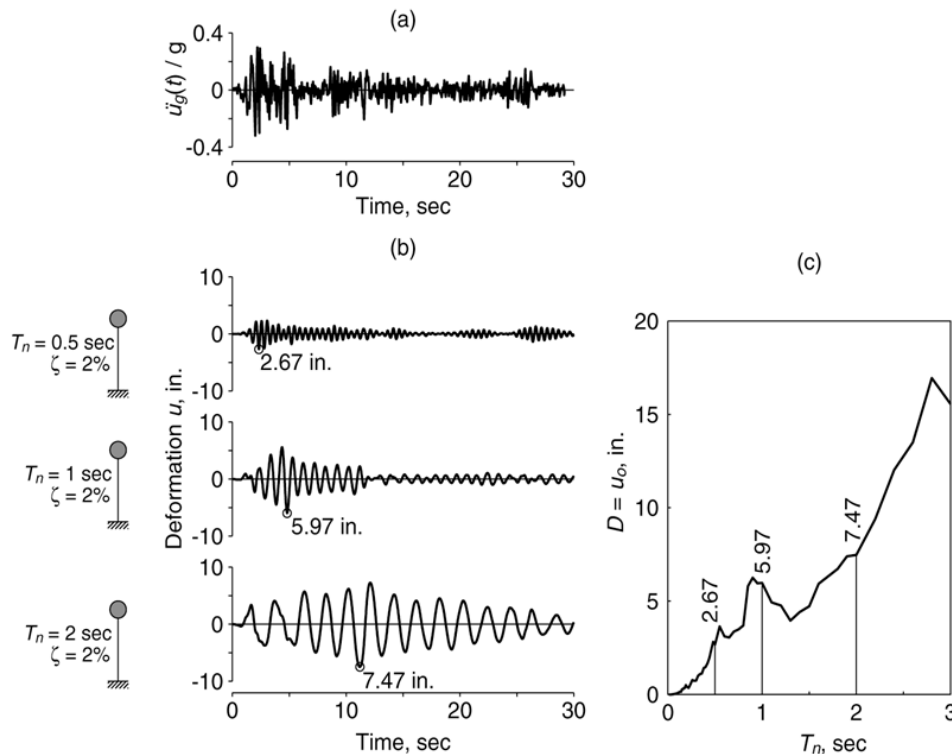
# 지반운동의 영향

## 응답스펙트럼

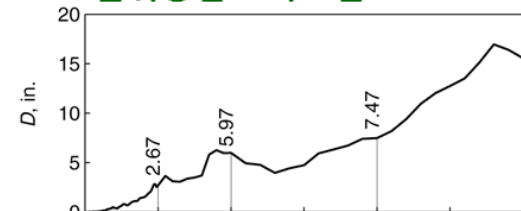
구조물의 주기를 변화시켜서 지진응답을 수행하고, 도출된 변위로부터 구조물에 가해지는 밑면전단력과 설계를 위한 pseudo-acceleration 계산

$$V = k_s \times S_d(T, \zeta) = m_s \times S_a(T, \zeta)$$

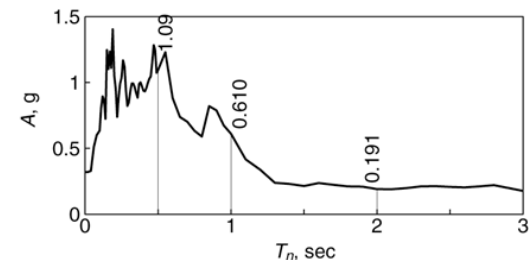
Dynamics of Structures (Chopra)



변위응답스펙트럼



$$S_a(T, \zeta) = \omega_n^2 \times S_d(T, \zeta)$$



의사가속도 응답스펙트럼

# 지반운동의 영향

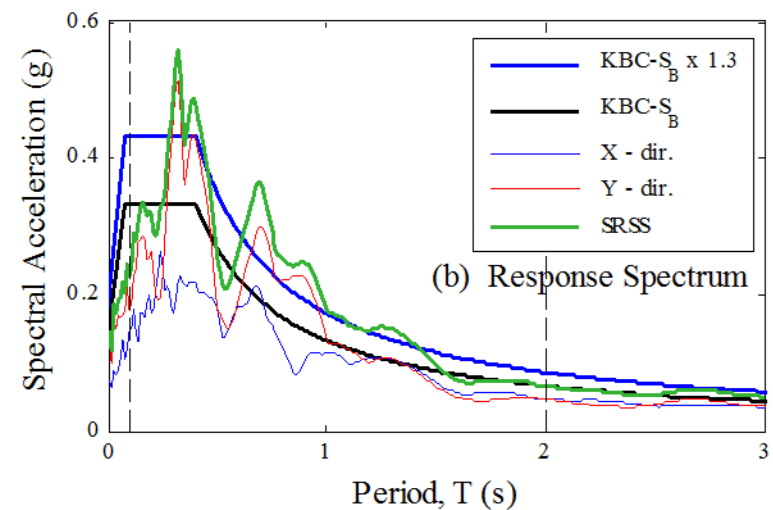
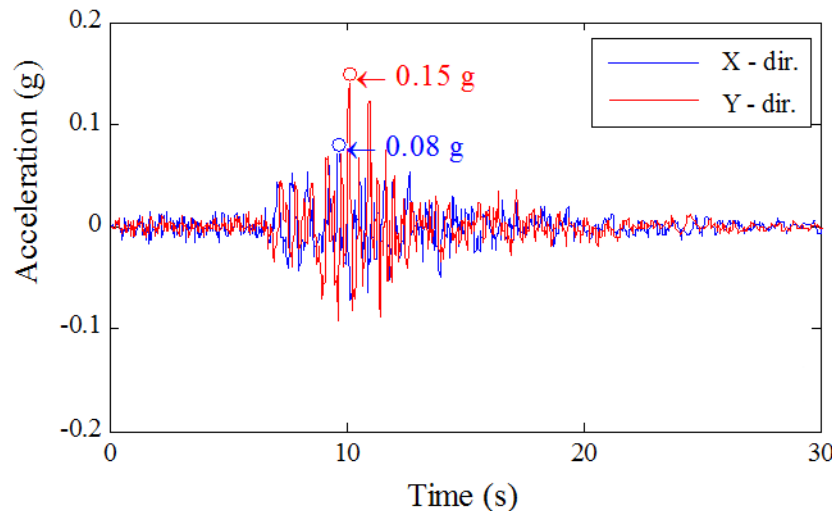
## 응답스펙트럼

해당 지진에 대하여

- 1) 다양한 주기의 단자유도 구조물에 대한 해석을 수행
- 2) 구조물에 예상되는 밀면전단력을 구함
- 3) 밀면전단력을 등가의 가속도로 치환 → 구조물의 질량을 적용하면, 밀면전단력을 구할 수 있음

즉, 응답스펙트럼은 해당 지진의 크기를 알 수 있는 하나의 지표

$$SRSS = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

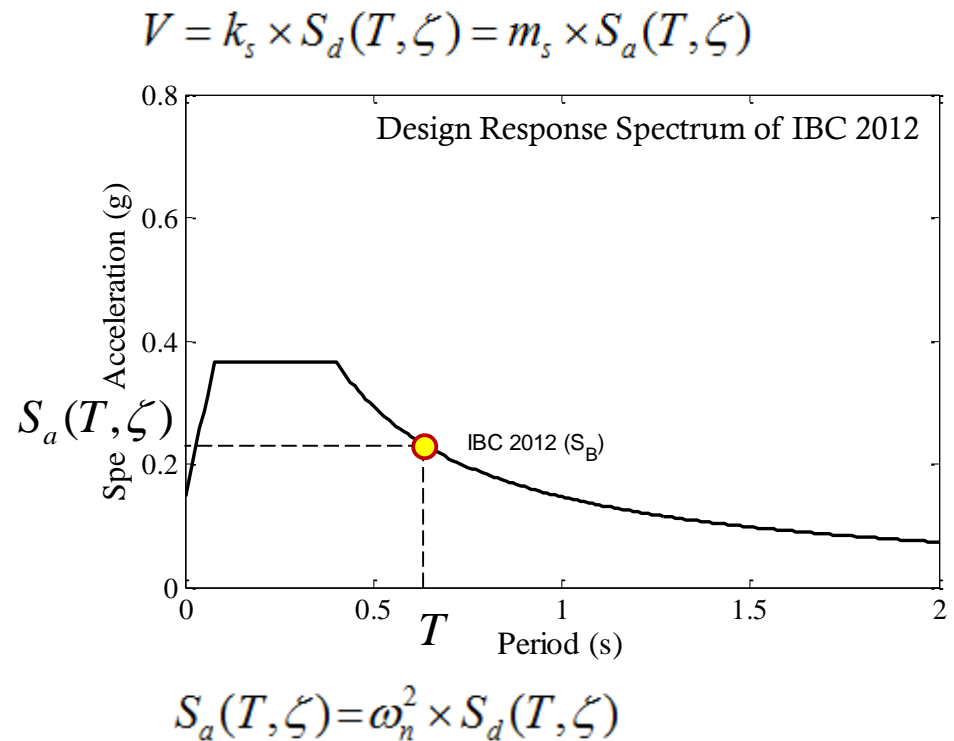
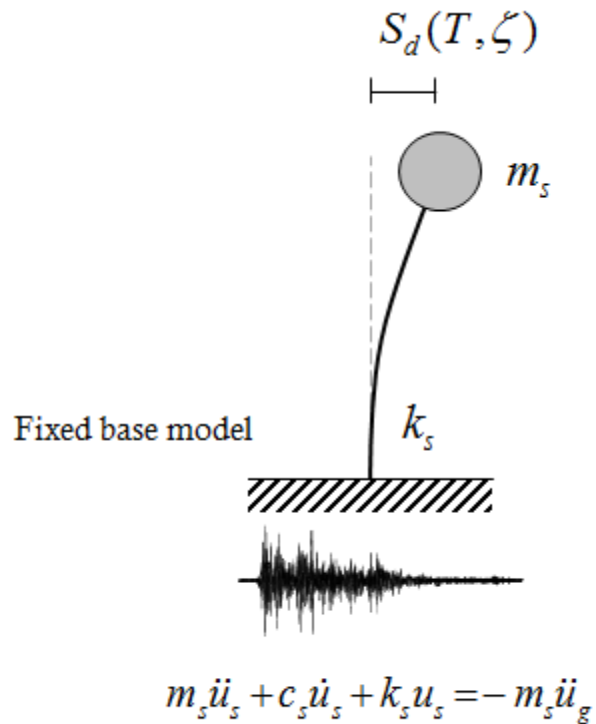


# 지반운동의 영향

## 지진하중의 결정방법 - 응답스펙트럼

Displacement by ground motion

Pseudo-acceleration for design





# 지반운동의 영향

## 설계응답스펙트럼과 지반분류

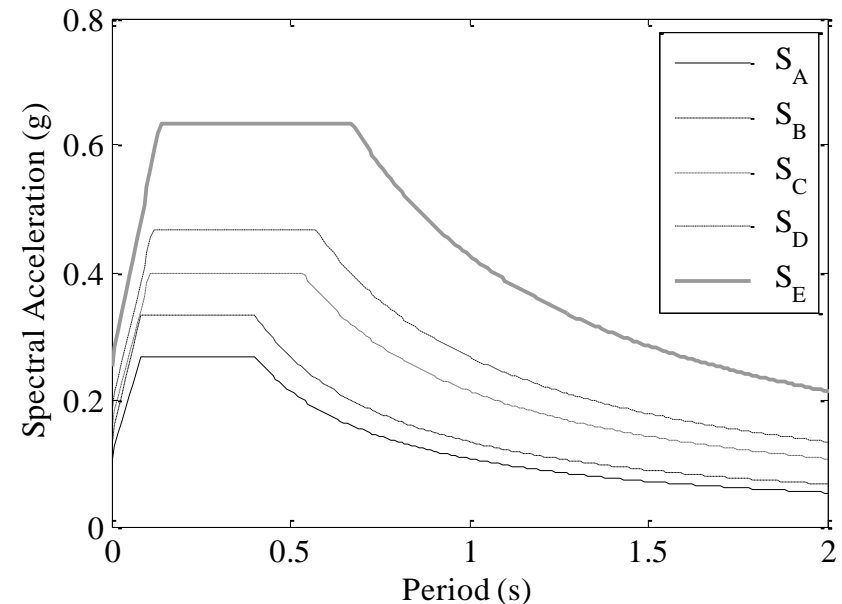
평균전단파속도로 지반을 분류함

지반종류에 따라 지진하중을 최대 3.5배 증가

$$V_s = \frac{4 \times H}{\sum \frac{4D_i}{V_i}}$$

표 1. 건축구조기준 (KBC 2016) - 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험	비배수전단강도
$S_A$	경암 지반	1500 초과	-	-
$S_B$	보통암 지반	760에서 1500 미만		
$S_C$	매우 조밀한 토사지반	360에서 760 미만	> 50	> 50
$S_D$	단단한 토사지반	180에서 360 미만	15에서 50	50에서 100
$S_E$	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50



## 1. 지반운동의 영향

a. 지반운동과 응답스펙트럼

b. 지반진동이론

## 2. 국내 지반운동의 특성과 기준

## 3. 지하구조물의 내진설계

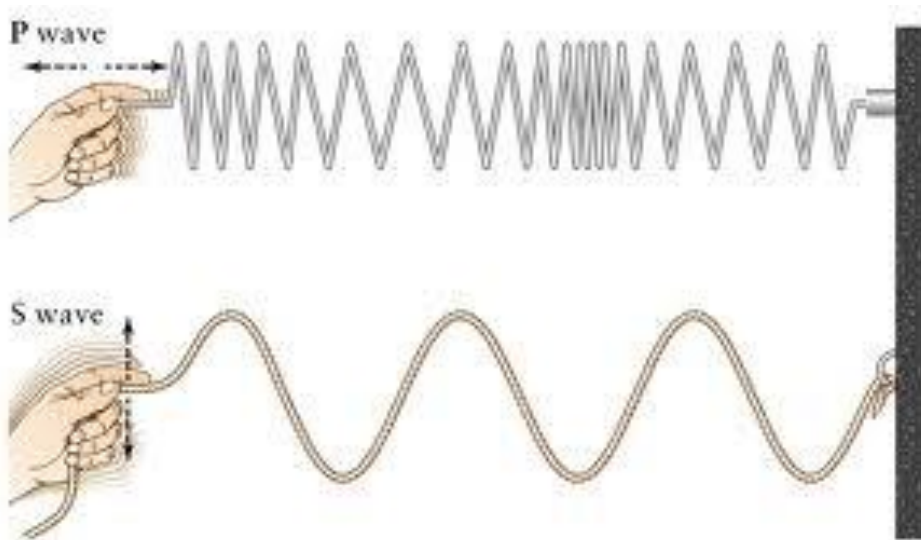
# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

### 파동 전달 이론

파동(지진파)이 매질(지반)을 통하여 전달되는 현상에 대한 이론

< 파동 전달의 예 >



P-파 : 전달방향과 동일한 방향으로 변형이 발생

S-파 : 전달방향과 직각 방향으로 변형이 발생

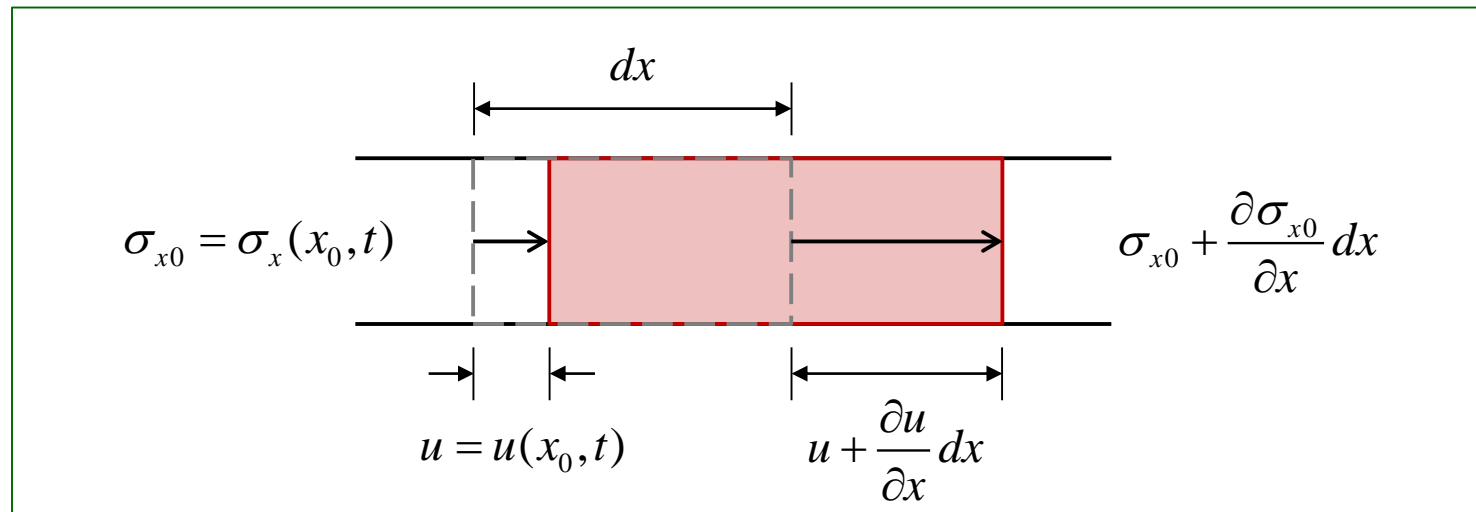
# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

파동 전달에서는 공간과 시간을 동시에 고려  
파동 전달 = 정적인 응력 + 가속도

$$u = u(x, t)$$

rod 내에서 1차원 파동전달 (P파)



Dynamic Equilibrium Equation :  
( 힘의 평형조건 )

$$\sigma_{x_0} A + \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( \sigma_{x_0} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) A$$

# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

1차원 길이방향 파동 전달식 (one-dimensional longitudinal wave equation)

$$\sigma_{x_0} A + \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( \sigma_{x_0} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) A$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad V_p = \sqrt{M / \rho} \quad : \text{파동(응력) 전달 속도 (wave propagation velocity)}$$

$$M = \left\{ (1-\nu) / [(1+\nu)(1-2\nu)] \right\} E \quad : \text{구속탄성계수}$$

1차원 전단파동 전달식 (one-dimensional transverse wave equation)

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial x^2} \quad V_s = \sqrt{G / \rho} \quad : \text{전단파속도 (shear-wave velocity)}$$

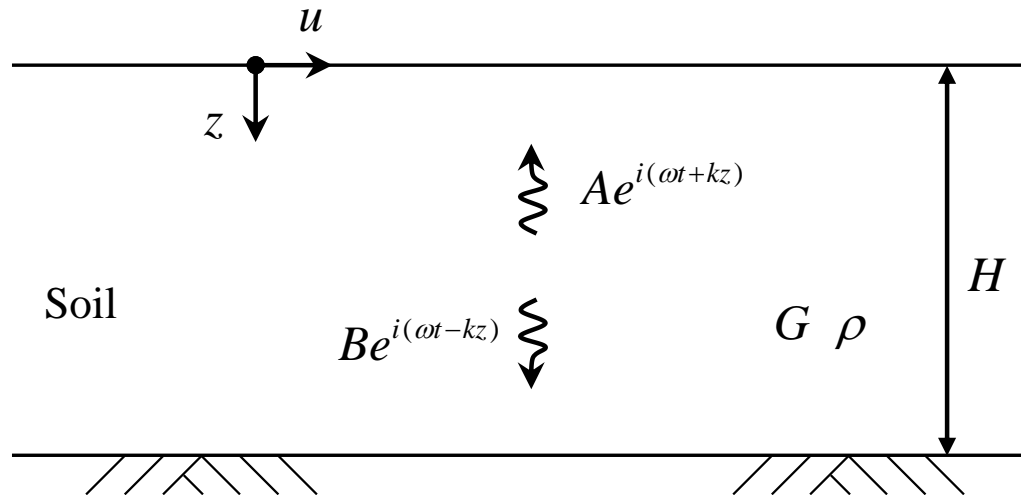
$G$  : 전단탄성계수

지반지진공학에서 가장 중요한 물성

# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

### 1) 고정단 위에 균질하고, 감쇠가 없는 지반 조건



변위의 해 : 
$$u(z, t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t}$$

전달함수 : 두 지점 사이 (고정단 - 지표면) 의 변위 비

$$F_1(\omega) = \frac{u_{\max}(0, t)}{u_{\max}(H, t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kH e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos(\omega H / V_s)}$$

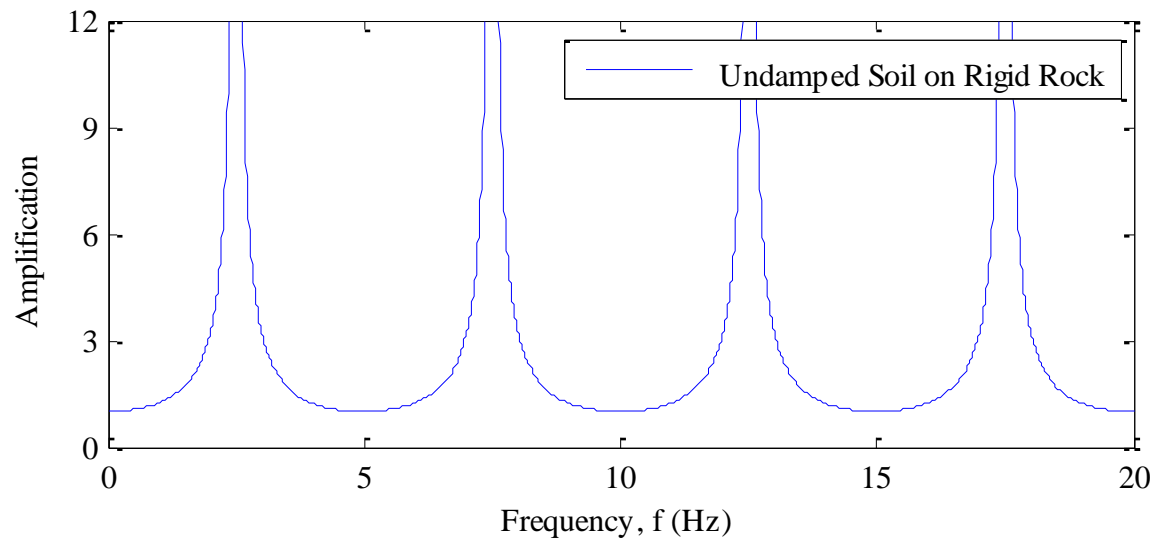
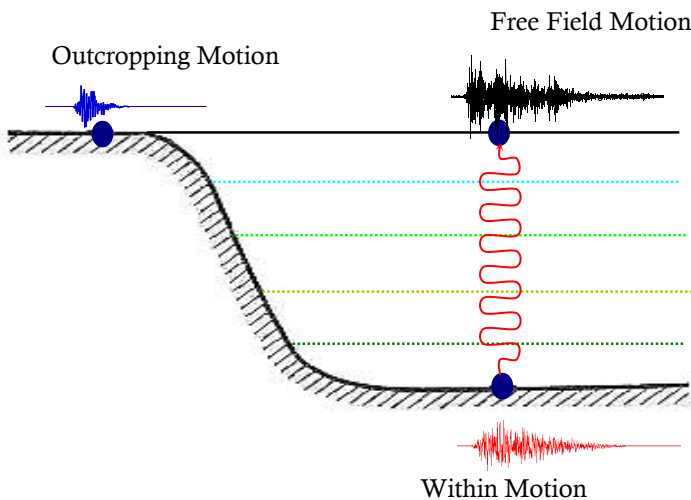
# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

증폭함수 : 전달함수의 절대값

$$|F_1(\omega)| = \sqrt{\left\{ \text{Re}[F_1(\omega)] \right\}^2 + \left\{ \text{Im}[F_1(\omega)] \right\}^2} = \frac{1}{|\cos(\omega H / V_s)|}$$

$H = 30\text{m}$ ,  $V_s = 300\text{m/s}$  인 경우, 증폭함수

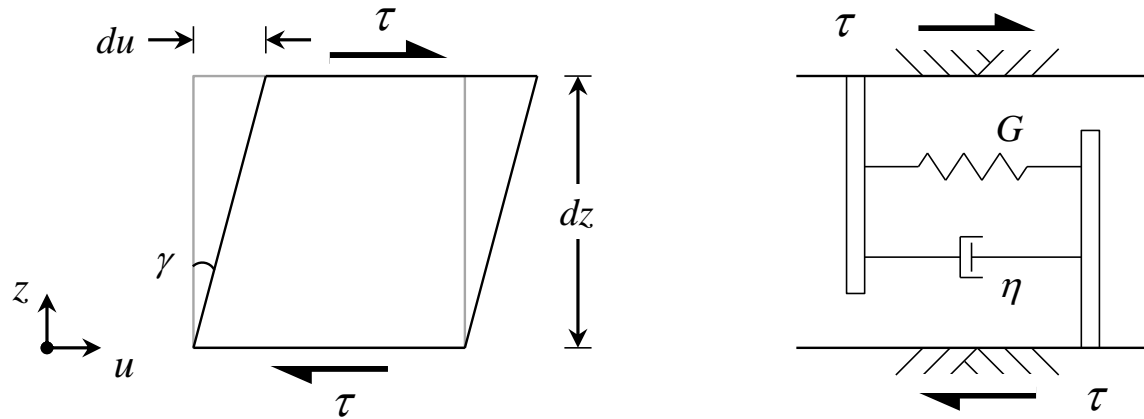




# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

### 2) 고정단 위에 균질하고, 감쇠가 있는 지반 조건



Kelvin-Voigt Solid model

전달함수 : 
$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos[k(1-i\zeta)H]} = \frac{1}{\cos[\omega H / V_s(1+i\zeta)]}$$

증폭함수 : 
$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + \sinh^2 \zeta kH}}$$

# 지반운동의 영향

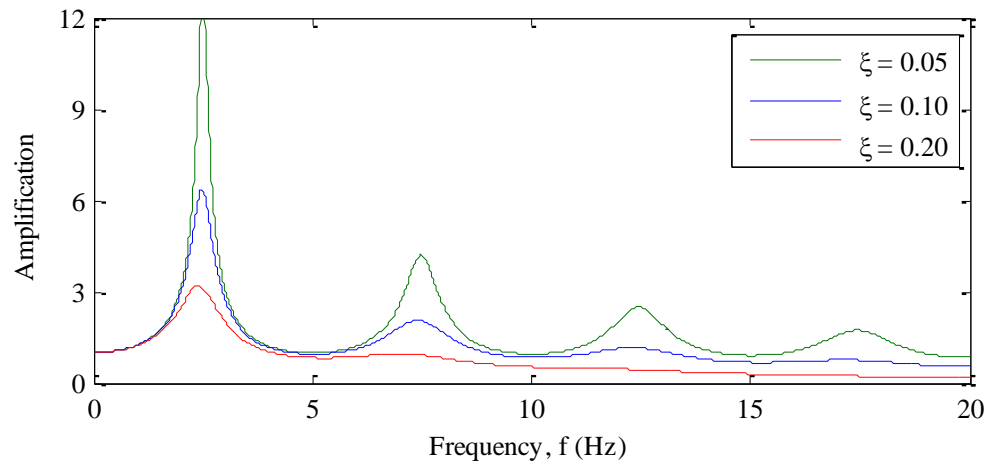
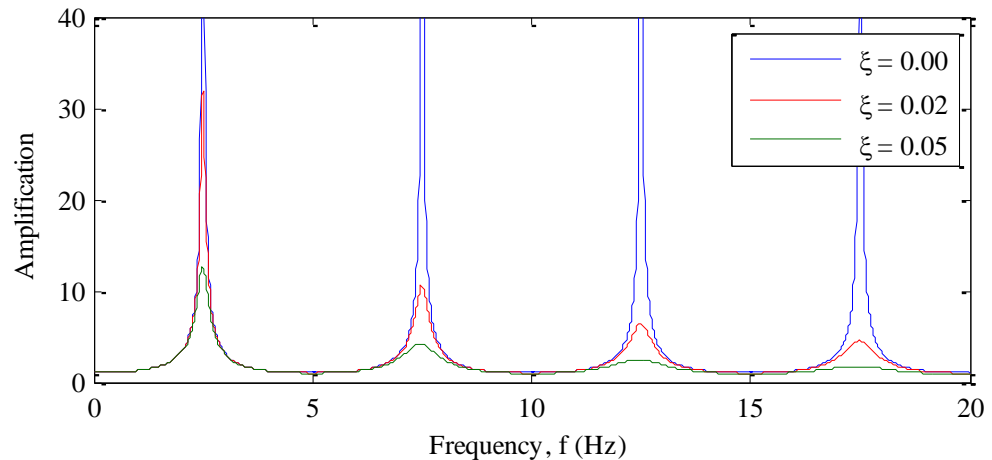
## 지반 진동 이론

### 2) 고정단 위에 균질하고, 감쇠가 있는 지반 조건

$H = 30\text{m}$

$V_s = 300\text{m/s}$  인 경우

증폭함수



# 지반운동의 영향

## 지반 진동 이론

### ○ 지반의 주기

증폭함수에서 최대값이 발생하는 주파수가 지반의 고유진동수

균질하고, 감쇠가 없는 지반조건에서 증폭함수 :  $|F_1(\omega)| = \frac{1}{|\cos(\omega H / V_s)|}$

분모의 cosine 항이 0에 가까워야 증폭함수의 최대값 따라서,

$$\omega_n \approx \left( \frac{\pi}{2} + n\pi \right) \frac{V_s}{H} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

$$\omega_0 = \frac{\pi V_s}{2H}$$

$$T_g = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{4H}{V_s}$$

지반의 주기는 지반의 강성( $V_s$ )과 깊이( $H$ )로 표현됨

$$V_s = \frac{4H}{T_g}$$

지반주기와 지반의 강성( $V_s$ )은 역수관계  
30m 평균 전단파속도도 이로부터 도출됨

# 지반운동의 영향

## 공진 효과 (Resonant Effect)

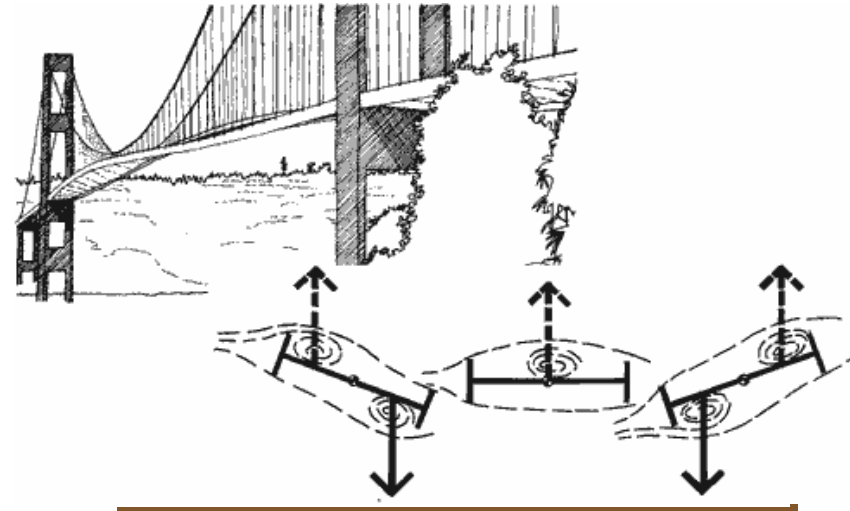
구조물의 주기( $T_n$ )와 외부진동의 주기가 유사하면, 구조물의 진동응답이 크게 증가하는 현상

예) Tacoma Narrow Bridge의 붕괴 (1940)

→ 지반주기( $T_g$ )에서 지진동이 증폭되어, 해당 구조물의 지진하중을 증가시킴  $T_g = \frac{4H}{V_s}$

Mexico City에서 고층건물의 피해도 토사지반이 지진의 장주기성분을 증폭시켜서

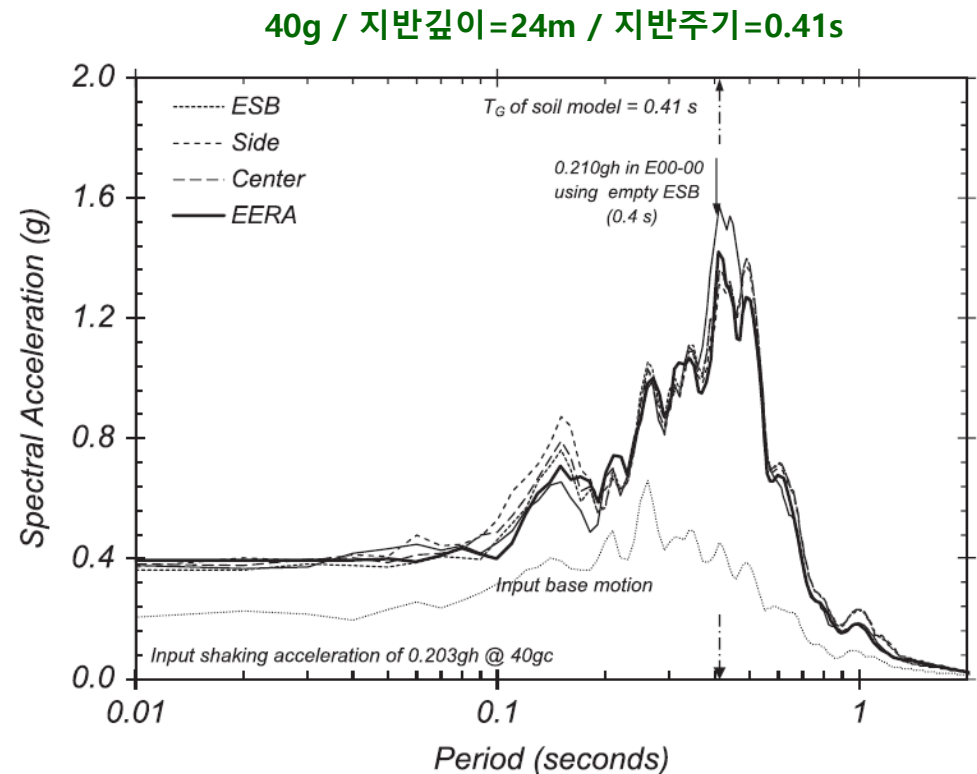
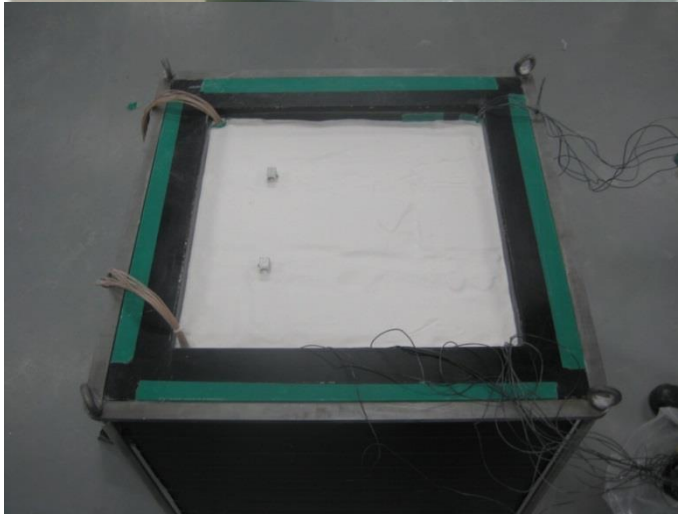
장주기 구조물에 큰 지진하중을 유발



# 지반운동의 영향

## 공진 효과 (Resonant Effect)

원심모형실험으로부터 지반에 의한 지진의 증폭을 확인  
60cm 실험체에 40g의 원심력을 적용하여 24m 지반조건 모사



## 소 결

지반 및 구조동역학을 바탕으로 지반운동의 영향에 대한 소개

- 1) 파동전달이론에 대한 소개 – 파동의 전달에서 **전단파속도**가 가장 중요함
- 2) 부지응답해석의 절차로 암반에 도달한 지진파가 지반에 의해 전달되는 전달함수와 증폭함수를 구함 → **단층지반의 주기식** 도출
- 3) 응답스펙트럼 : 하나의 지진파에 대하여 다양한 주기의 구조물들에 대한 시간이력해석을 수행 후, 구조물에 유발되는 밀면전단력을 쉽게 구하기 위한 **의사 가속도(pseudo-acceleration)**을 **스펙트럼**으로 정리
- 4) 설계응답스펙트럼 : 암반에 대한 설계응답스펙트럼에 단주기 및 장주기 증폭계수 적용
- 5) 원심모형실험 결과를 바탕으로 지반응답에 대한 등가선형해석연구를 검증할 수 있음



1. 지반운동의 영향
2. 국내 지반운동의 특성과 기준
  - a. 서울시 지반 통계
  - b. 부지응답해석의 예
  - c. KBC 2016
  - d. KDS 41 17 00
3. 지하구조물의 내진설계

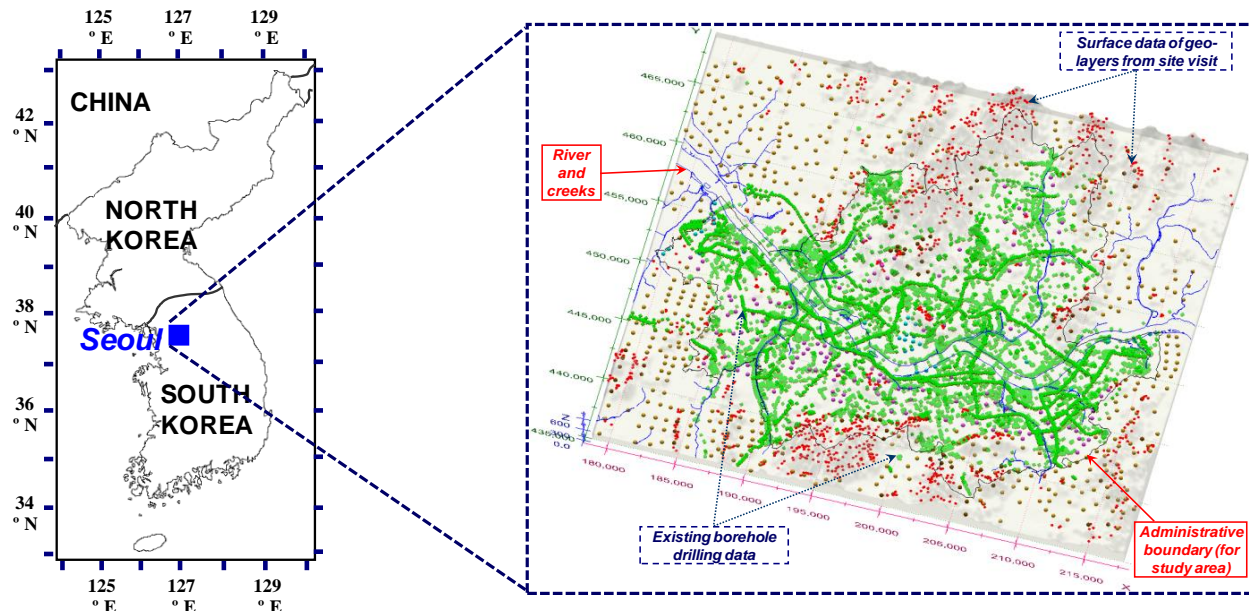
# 서울시 지반의 특성 (선창국 등, 2014)

서울 포괄 확장 영역의 지진공학적 지반 DB 구현 자료 가시화

가. 전문가 GIS software (tool) 적용의 삼차원 자료 위치 표출

나. 확장 영역 내 자료(서울특별시 지반정보시스템 내 제시 및 연구진의 추가 확보 시추 자료)는 총 22,300 여공

나. 연구진의 지반지진공학적 전문가 관점의 추가 확보된 지반-지식 기반 지표 지층 자료는 총 1,700 여개



# 서울시 지반의 특성 (선창국 등, 2014)

## 서울 지역 공간 지반 정보

가. 지반지진공학 전문가 관점의 지층 구성 간편 표준화

나. 지표면부터 매립토(Fill), 퇴적토(Alluvial Soil),

풍화토(Weathered Soil), 풍화암(Weathered

Rock) 및 기반암(Bed Rock)으로

구성

다. 평면 상의 동서 100 m와

남북 100 m 간격 격자에

대한 지층별 두께 예측

라. 예측 지층 두께들의 공간

상의 중첩을 통한 전문가

GIS 툴을 통한 삼차원

가시화

마. 최종적으로 공간

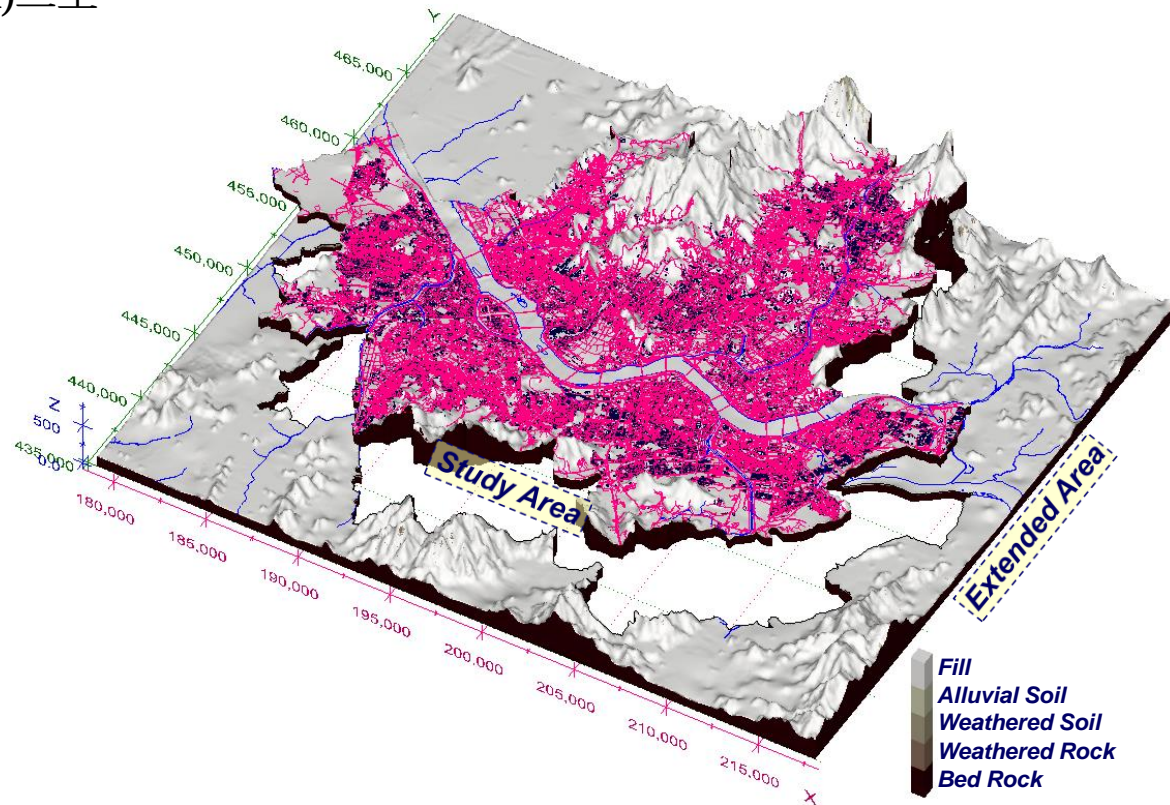
GIS 기반 지반정보

시스템 (Spatial

GIS-based Geotechnical

Information System

(GTIS)) 구현

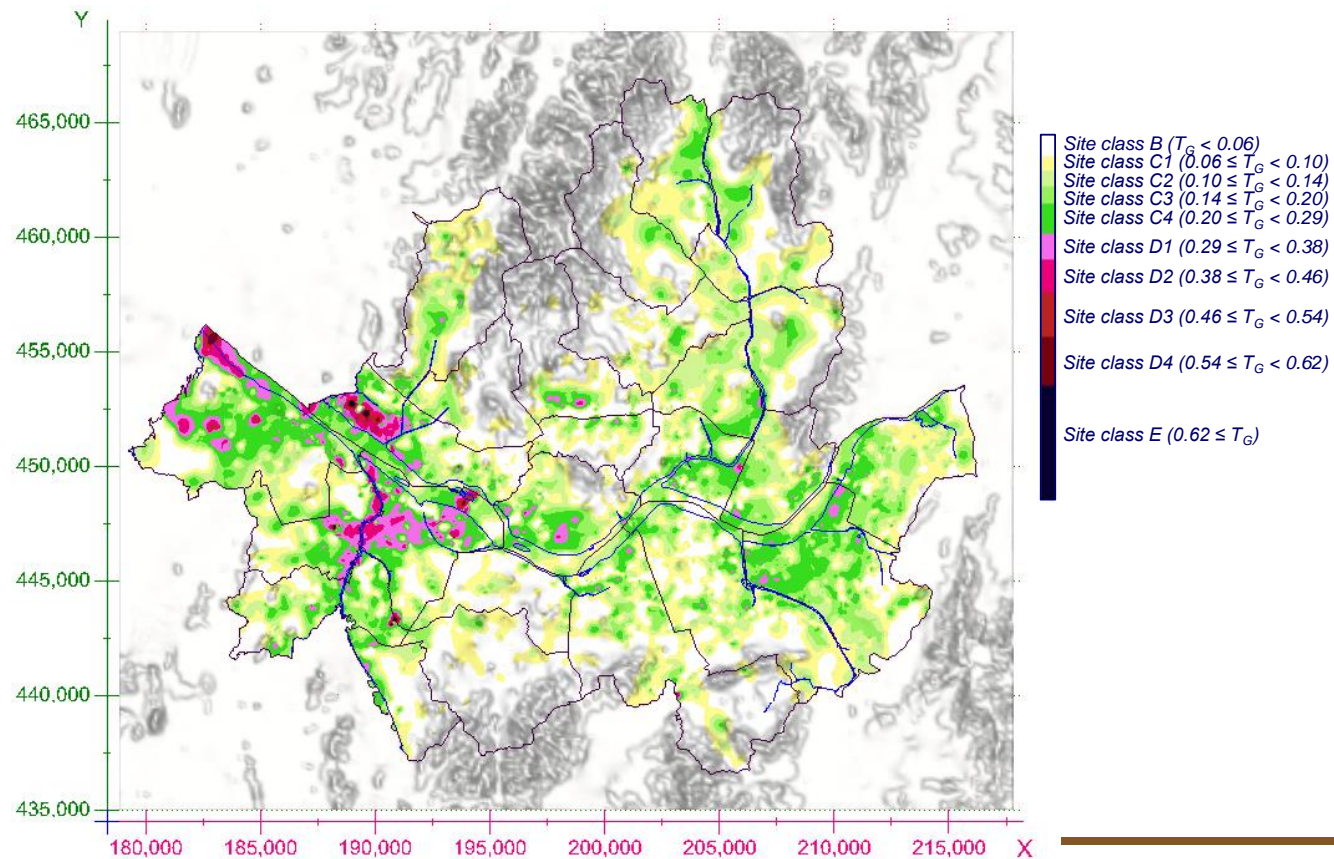


# 서울시 지반의 특성 (선창국 등, 2014)

서울시 영역 지반 분류 정보의 상세 확인 및 호환 자료 도출 제시

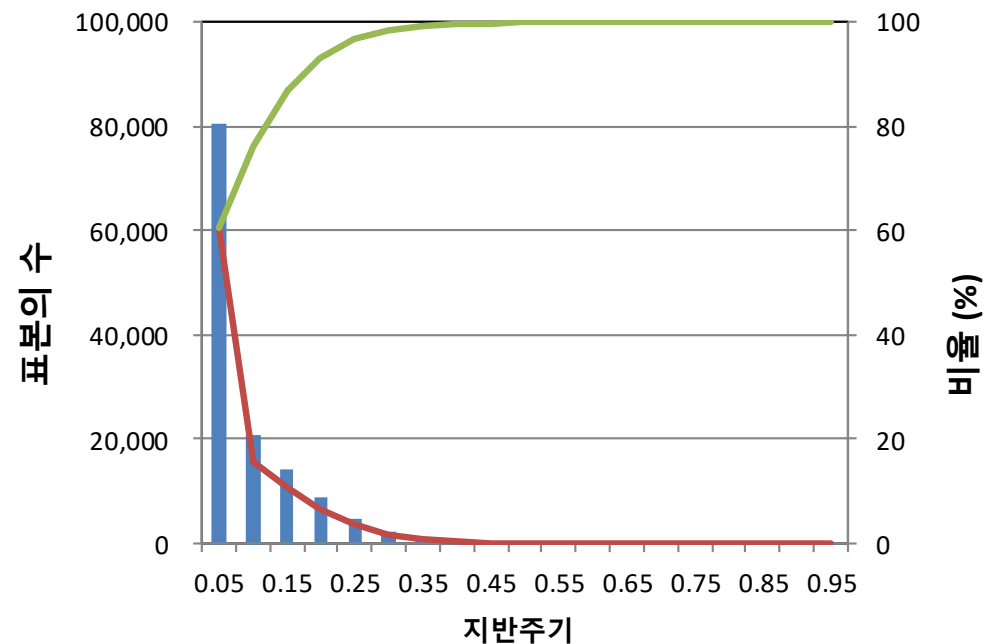
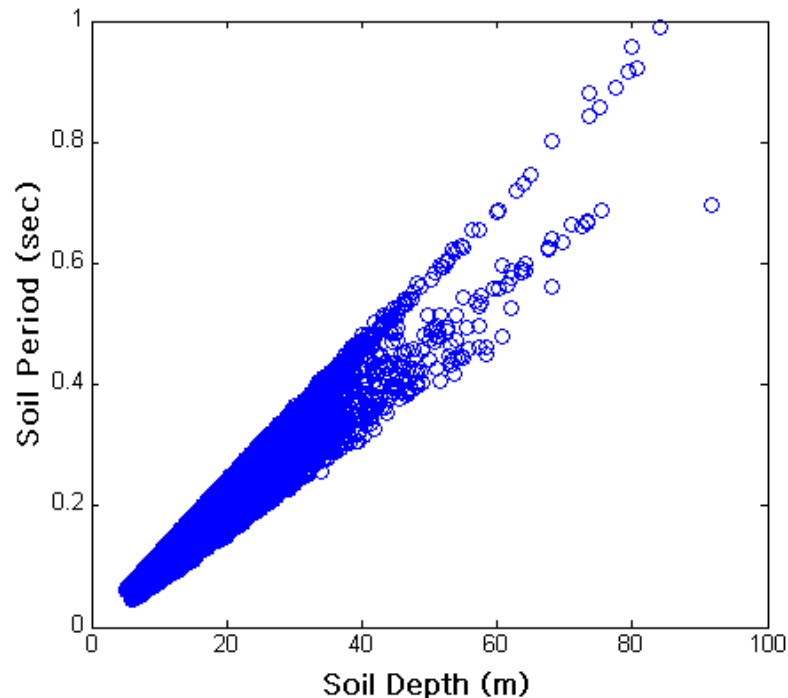
가. 평면 상의 100 m 단위 격자에 대한 지반지층 정보 확인

나. 그에 따른 지반지진공학적 매개변수 자료 확인 및 제시(Text 및 Spread Sheet)



# 서울시 지반의 특성 (선창국 등, 2014)

대상지역, 서울시를 39.0km x 34.0km 로 설정한 후,  
가로-세로100m 간격으로 나누어 지반자료 획득 → 133,331 가지  
전체지반의 97%가 지반주기 0.25초 이하



< 구축된 서울시 지반 DB - 깊이 및 주기 >

총 133,331 가지

## 1. 지반운동의 영향

## 2. 국내 지반운동의 특성과 기준

- a. 서울시 지반 통계
- b. 부지응답해석의 예
- c. KBC 2016
- d. KDS 41 17 00

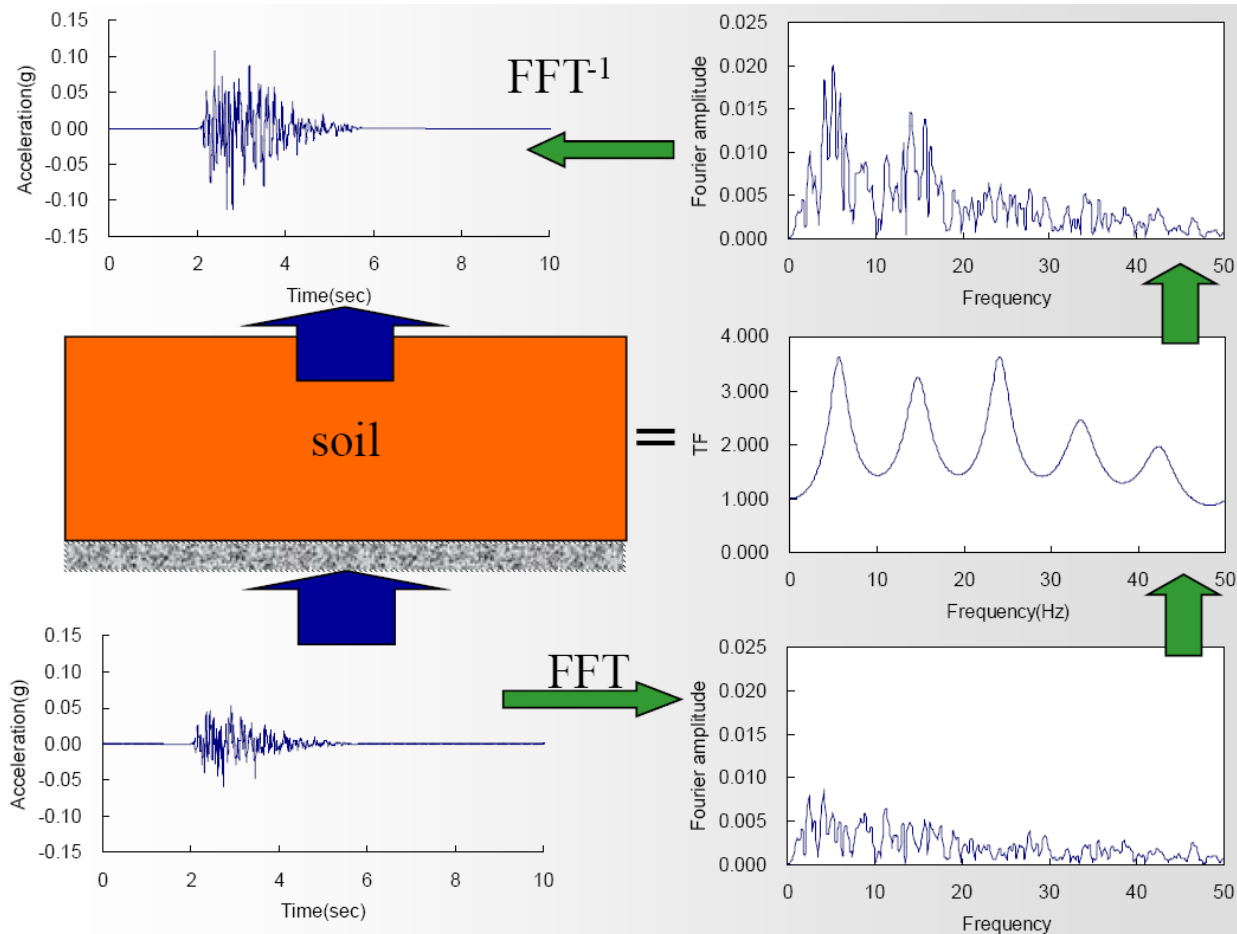
## 3. 지하구조물의 내진설계



# 지반에 의한 지진동의 증폭

## 부지응답해석

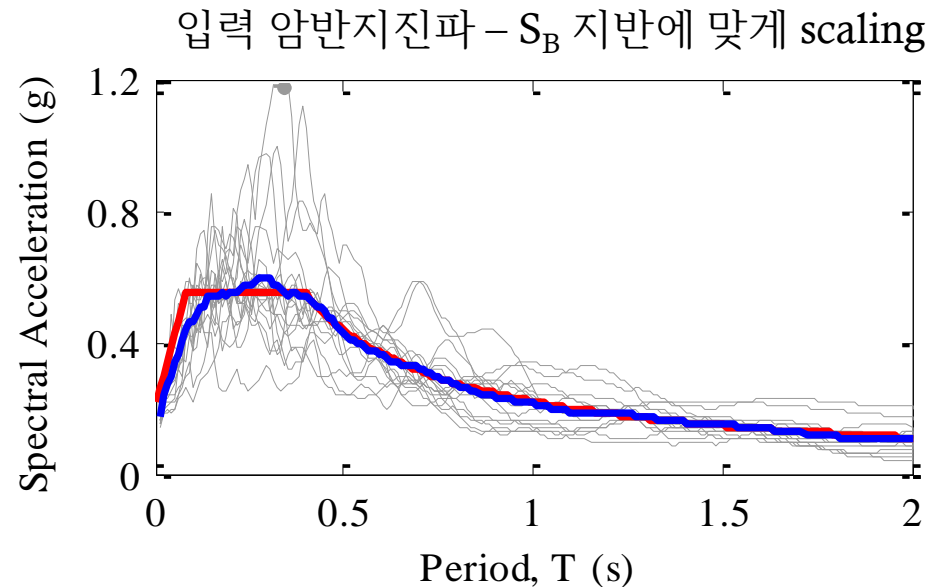
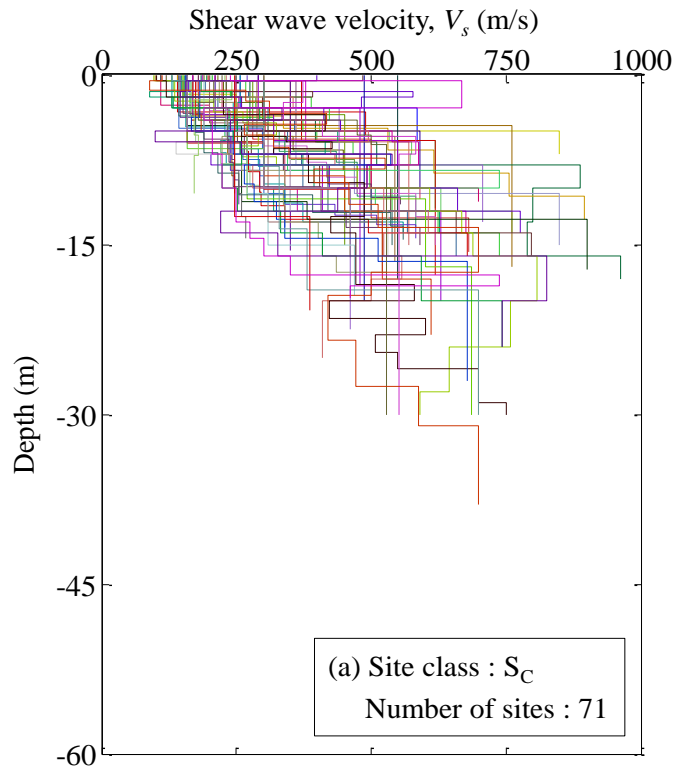
암반까지 전달된 지진파가 지반에 대한 전달함수(Transfer Function)를 적용하여 지반에 의한 지진파의 증폭을 계산



# 지반에 의한 지진동의 증폭

## 부지응답해석

- 1) 등가선형 해석프로그램 - SHAKE 사용
- 2) 암반 위의 지반조건을 모두 모사
- 3) 암반에서 기록된 지진기록을 Deconvolution 하여, 암반과 지반 사이에 입력

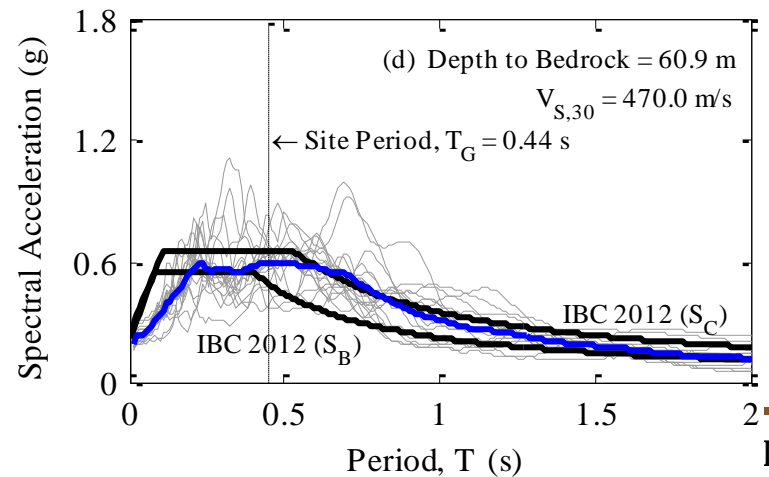
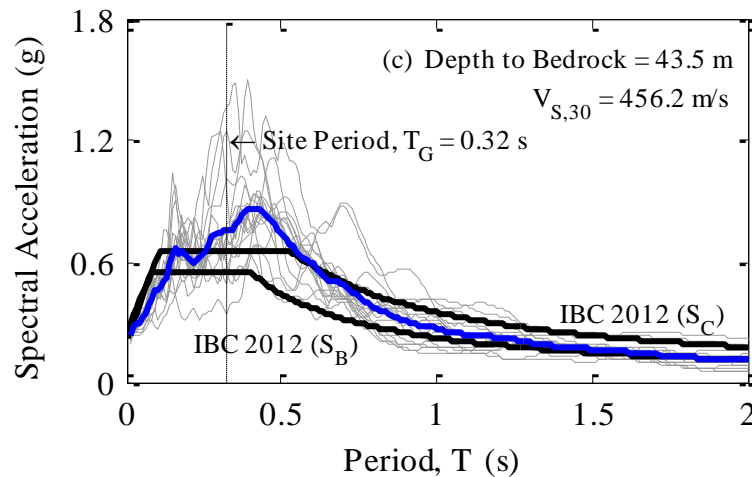
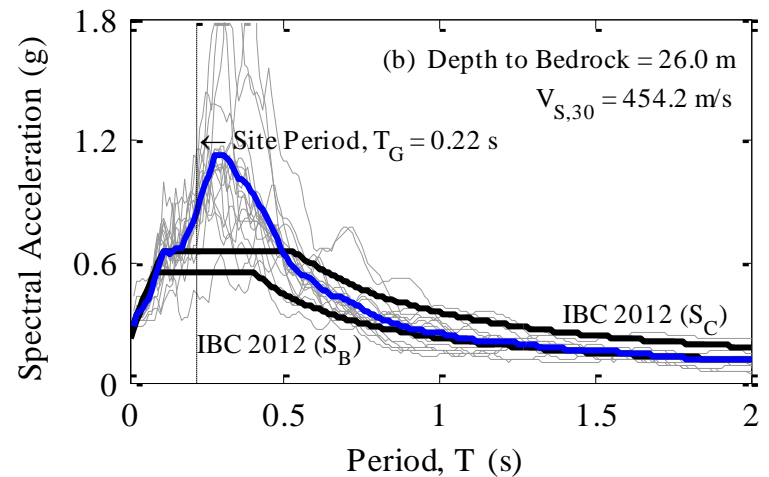
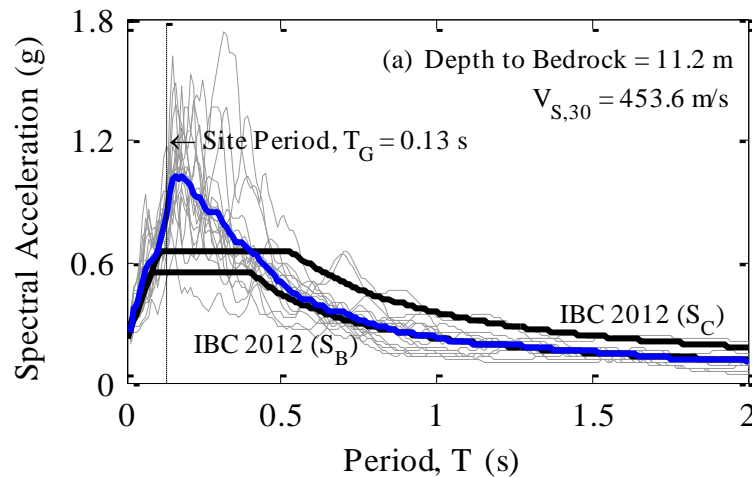


# 지반에 의한 지진동의 증폭

## $S_C$ 지반조건

- 1)  $V_{s,30}$  유사하더라도, 지반주기가 다름에 따라 증폭의 경향이 달라짐
- 2) 단주기 지반조건에서 구조물 응답의 증폭은 KBC의 가속도 일정구간보다 큼

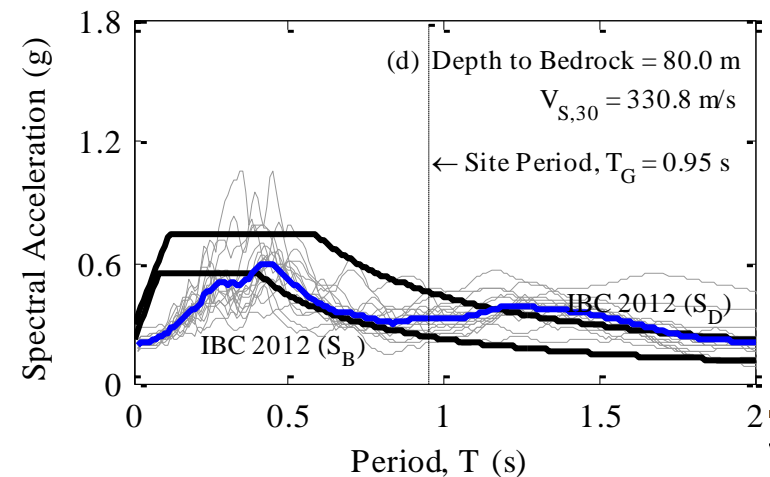
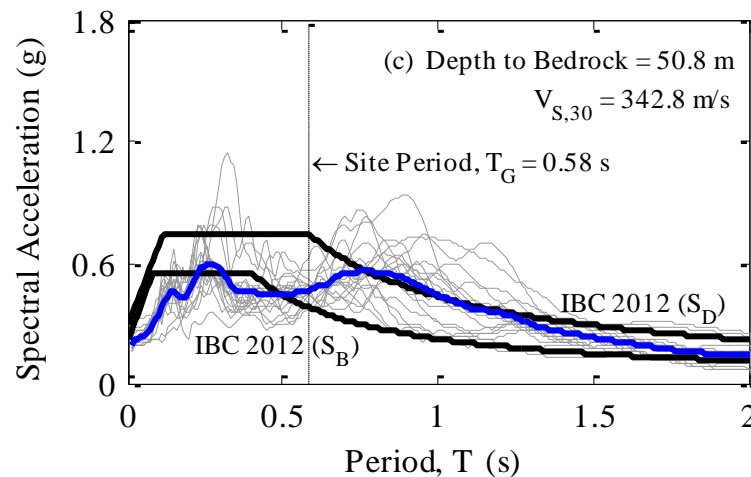
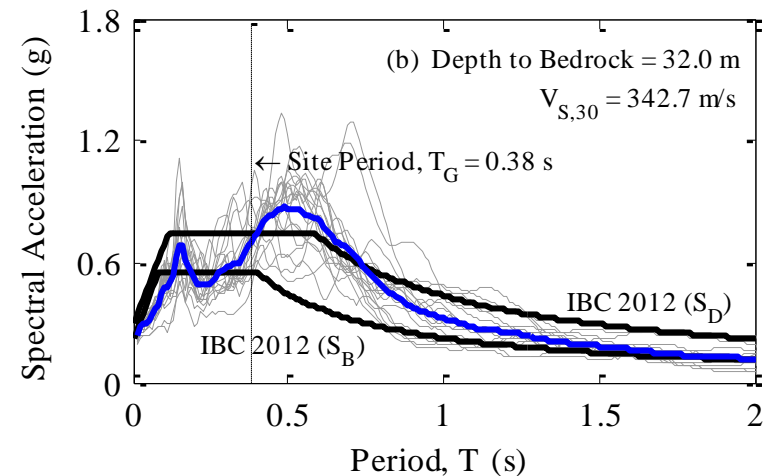
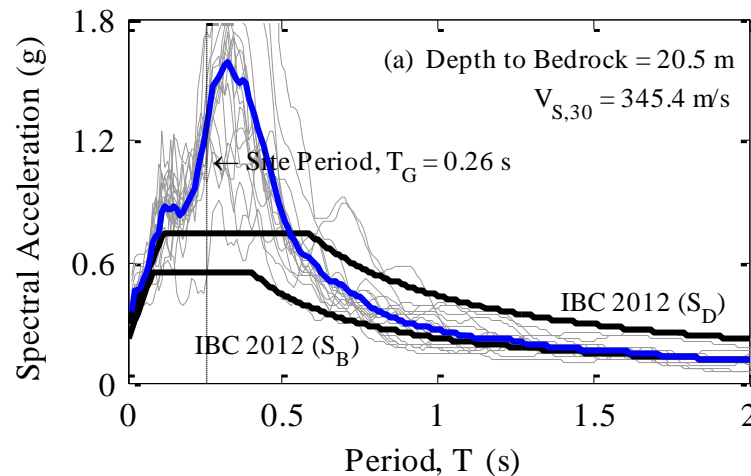
$$T_g = \frac{4H}{V_s}$$



# 지반에 의한 지진동의 증폭

## $S_D$ 지반조건

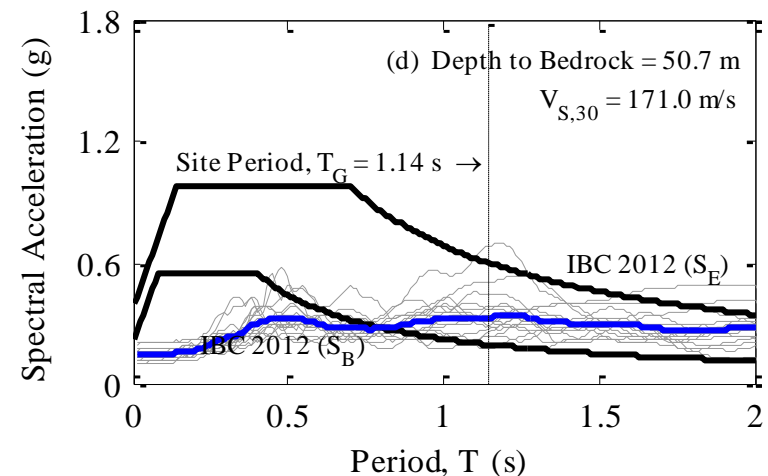
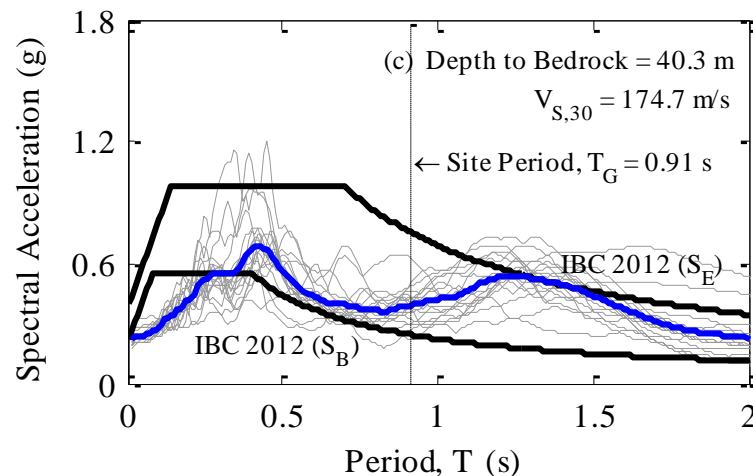
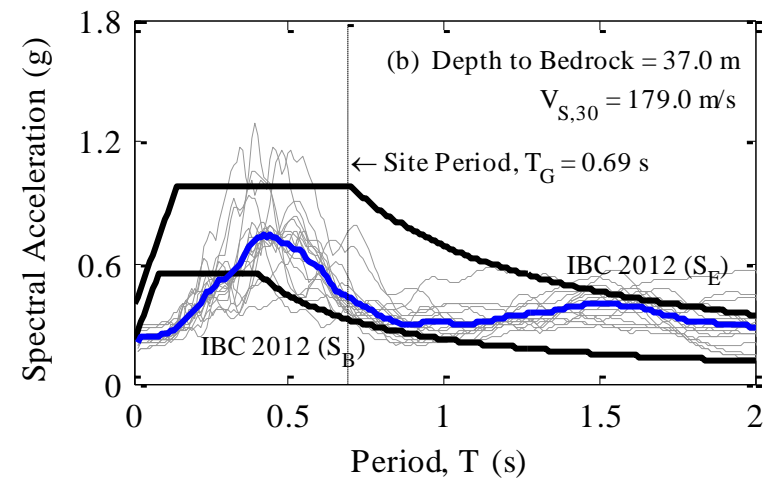
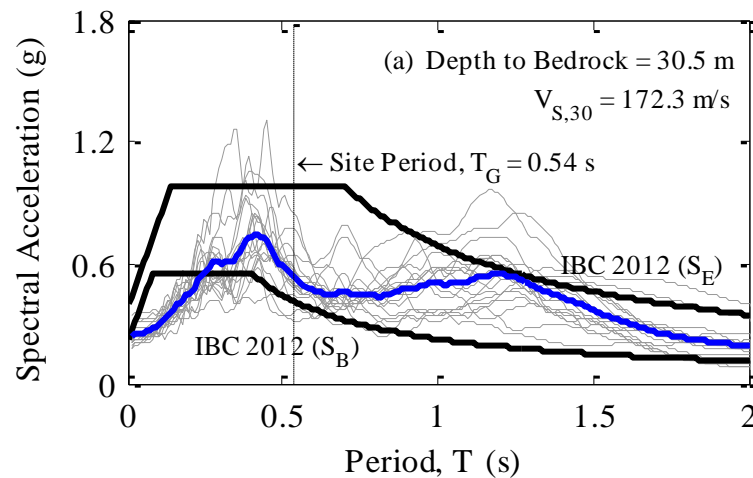
- 1)  $S_D$  지반이더라도 지반깊이가 얇음에 따라 단주기 구조물에서 증폭이 크게 발생
- 2) 지반주기에 의해 지진파가 증폭되고, 공진에 의해 구조물 응답도 크게 증폭됨



# 지반에 의한 지진동의 증폭

$S_E$  지반조건

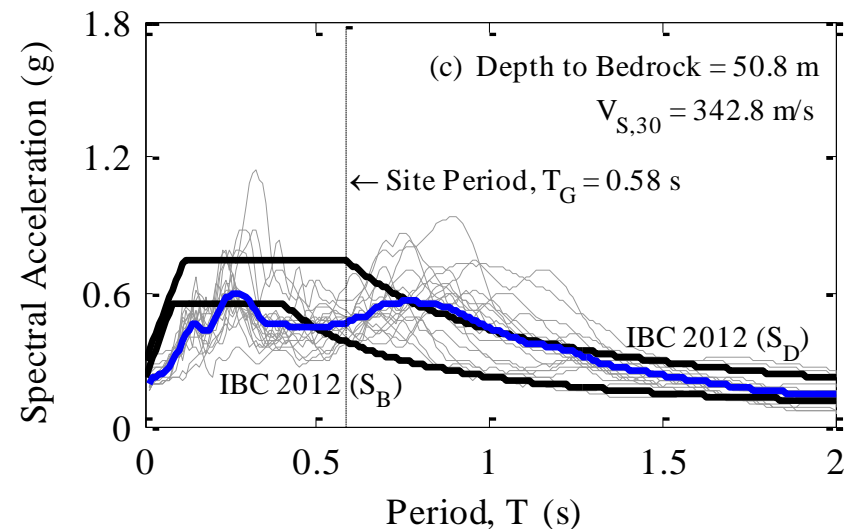
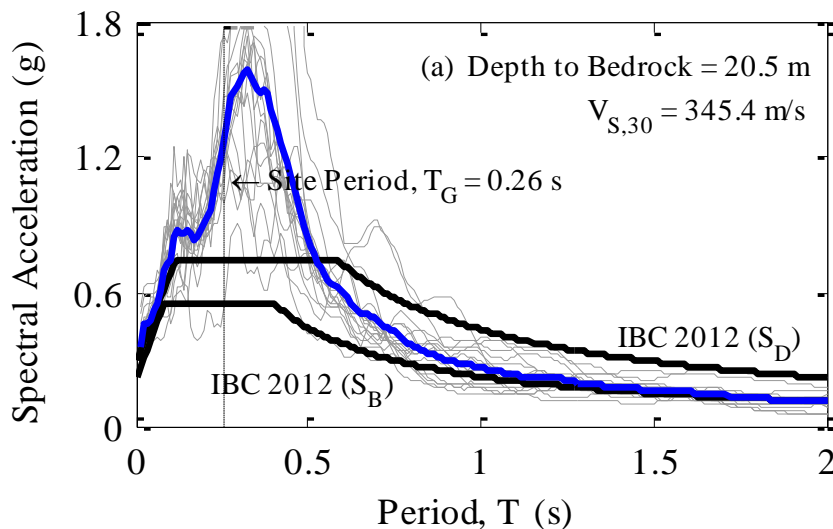
- 1) 지반주기에서 증폭의 최대값이  $S_E$  지반 설계응답스펙트럼에 부합함
- 2) 단주기 구조물의 경우, 지반의 고주파영역에서 감쇠에 따라 응답이 감소함



# 지반에 의한 지진동의 증폭

## 지반에 의한 구조물 응답 증폭의 경향

- 1) 지반주기에 의해 지진파가 증폭되고, 공진에 의해 구조물의 응답도 지반주기와 유사한 구간에서 증폭됨
- 2) 지반주기를 벗어나는 구간에서는 구조물 응답의 증폭이 발생하지 않음
- 3) 국내와 같이 기반암까지의 깊이가 얇은 경우, IBC 지반계수가 부합되지 않음
- 4) 김동수, 윤동구, 선창국, 이세현, 김동관 등이 국내 지반조건에 따른 지반분류체계 및 지반계수를 제안하고 있음



## 1. 지반운동의 영향

## 2. 국내 지반운동의 특성과 기준

- a. 서울시 지반 통계
- b. 부지응답해석의 예
- c. KBC 2016
- d. KDS 41 17 00

## 3. 지하구조물의 내진설계



# KBC 2016

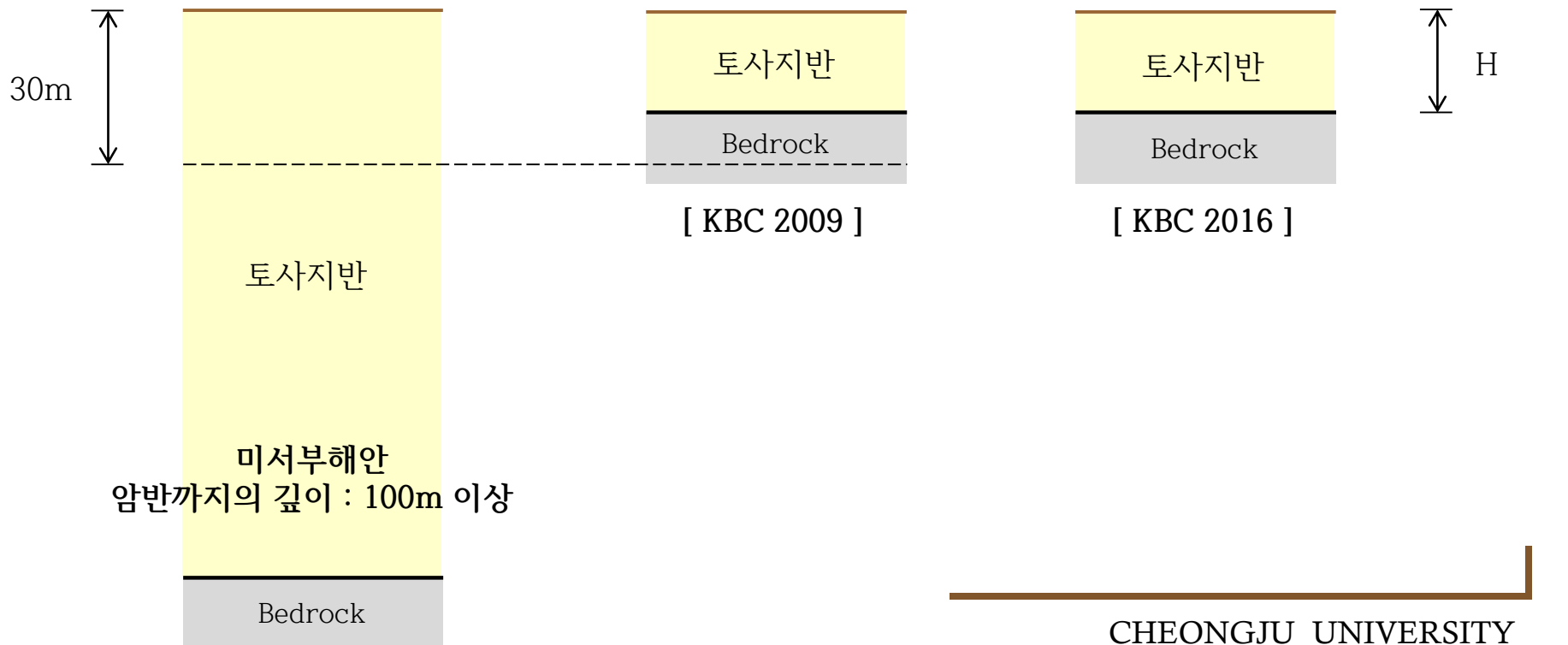
## 지반의 분류

KBC 2009 : 지표면으로부터 30m 깊이의 평균전단파속도 ( $V_{s,30}$ ) → 암반이 포함됨

KBC 2016 : 암반의 깊이가 5 ~ 30m인 경우, 토사지반의 평균전단파속도 ( $V_s$ )로 분류

지반분류 –  $S_C$  :  $360 < V_s < 760$  m/s

지반분류 –  $S_D$  :  $180 < V_s < 360$  m/s



## 지반증폭계수

국내 지반조건과 같이 기반암까지 심도가 얇은 경우, 단주기지반이므로 구조물 응답의 증폭이 단주기 구조물에서 크게 발생하는 경향을 반영하여, 기반암까지의 깊이를 20m 기준으로 스펙트럼을 추가 → EUROCODE의  $S_E$  지반분류와 동일

<표 0306.3.3> 단주기 지반증폭계수,  $F_a$

지반종류		지진지역		
		$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
$S_A$		0.8	0.8	0.8
$S_B$		1.0	1.0	1.0
$S_C$	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.2	1.2	1.1
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.4	1.4	1.3
$S_D$	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.6	1.4	1.2
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.7	1.5	1.3
$S_E$		2.5	1.9	1.3

\*  $S_s$ 는 <표 0306.3.1>와 설계스펙트럼 가속도 산정식(0306.3.1)에 적용된  $S$ 를 2.5배한 값이다. 위 표에서  $S_s$ 의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

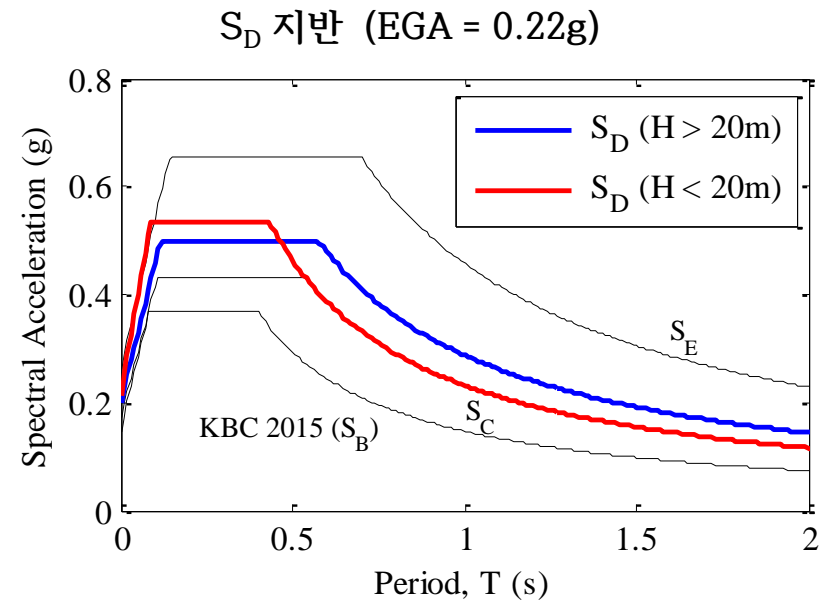
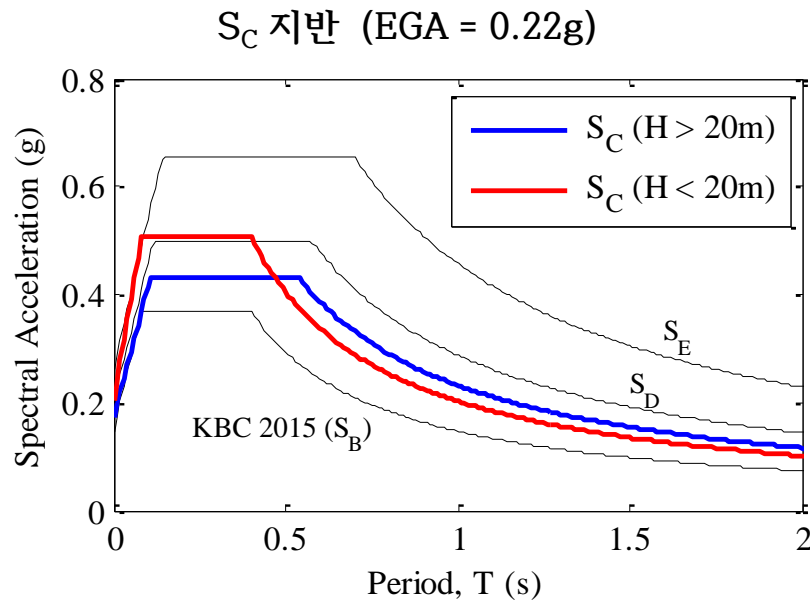
<표 0306.3.4> 1초주기 지반증폭계수,  $F_v$

지반종류		지진지역		
		$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_A$		0.8	0.8	0.8
$S_B$		1.0	1.0	1.0
$S_C$	보통암까지의 깊이 20m 이상	1.7	1.6	1.5
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.5	1.4	1.3
$S_D$	보통암까지의 깊이 20m 이상	2.4	2.0	1.8
	보통암까지의 깊이 20m 미만	1.7	1.6	1.5
$S_E$		3.5	3.2	2.8

\*  $S$ 는 <표 0306.3.1> 설계스펙트럼 가속도 산정식(0306.3.2)에 적용된 값이다. 위 표에서  $S$ 의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

## 설계응답스펙트럼

국내 지반조건과 같이 기반암까지 심도가 얇은 경우, 단주기지반이므로 구조물 응답의 증폭이 단주기 구조물에서 크게 발생하는 경향을 반영하여, 기반암까지의 깊이를 20m 기준으로 스펙트럼을 추가 → EUROCODE의  $S_E$  지반분류와 동일



## 1. 지반운동의 영향

## 2. 국내 지반운동의 특성과 기준

- a. 서울시 지반 통계
- b. 부지응답해석의 예
- c. KBC 2016
- d. KDS 41 17 00

## 3. 지하구조물의 내진설계

# 내진설계기준 공통적용사항 (행정안전부, 2017)

20 m를 기준으로 얇은 지반, 깊은 지반으로 분류

토층 평균 전단파속도( $V_{S,Soil}$ )로 지반을 분류 ( $S_2 \sim S_5$ )

《 표1. 지반분류체계 》

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암* 깊이, $H$ (m)	토층 평균 전단파속도, $V_{S,Soil}$ (m/s)
$S_1$	암반 지반	1 미만	-
$S_2$	얇고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
$S_3$	얇고 연약한 지반		260 미만
$S_4$	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
$S_5$	깊고 연약한 지반		180 미만
$S_6$	부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

\* 전단파속도 760m/s 이상을 나타내는 지층

※ 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균 전단파속도가 120m/s 이하인 지반은  $S_5$  지반으로 분류

《 표3. 지반증폭계수 》

지반분류	단주기 증폭계수, $F_a$			장주기 증폭계수, $F_v$		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_2$	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
$S_3$	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
$S_4$	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
$S_5$	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

# 내진설계기준 공통적용사항 (행정안전부, 2017)

## 지반분류

KBC 2016 :  $V_s = 760 \text{ m/s}$  이하 지반분류 5종

내진설계기준 공통적용사항 :  $V_s = 760 \text{ m/s}$  이하 지반분류 4종

### • 공통기준 《 표1. 지반분류체계 》

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, $H$ (m)	토층 평균 전단파속도, $V_{s,ave}$ (m/s)
$S_1$	압반 지반	1 미만	-
$S_2$	알고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
$S_3$	알고 연약한 지반		260 미만
$S_4$	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
$S_5$	깊고 연약한 지반		180 미만
$S_6$	부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

\* 전단파속도 760m/s 이상을 나타내는 지층

※ 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균 전단파속도가 120m/s 이하인 지반은  $S_5$  지반으로 분류

### • 건축구조기준(KBC)

〈표 0306.3.2〉 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $N$ (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\bar{s}_u$ ( $\times 10^{-3} \text{MPa}$ )
$S_A$	경암 지반	1500 초과	-	-
$S_B$	보통암 지반	760에서 1500 미만		
$S_C$	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760 미만	> 50	> 100
$S_D$	단단한 토사 지반	180에서 360 미만	15에서 50	50에서 100
$S_E$	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

### • 전단파 속도와 기반암위치에 따른 지반분류비교

	1500초과	760이상 1500이하	360이상 760미만	260이상 360미만	180이상 260미만	180미만
20m미만	Sa	Sb	Sc-	Sd-		Se
	S1		S2		S3	
20m초과	Sa	Sb	Sc+	Sd+		Se
	S1		S4			S5

# 내진설계기준 공통적용사항 (행정안전부, 2017)

## 단주기 및 장주기 지반증폭계수 비교 (유효지반가속도 $S = 0.20 \text{ g}$ )

- ❖ 20 m 이하 증폭계수는 KBC 2016과 「내진설계기준 공통적용사항」이 유사함
- ❖ 「내진설계기준 공통적용사항」에서 20 m 초과 지반조건을 전단파속도  $180 \text{ m/s}$  를 기준으로 분류하기 때문에 기존  $S_C$ ,  $S_D$  분류가 모두 포함됨
- ❖ 20 m 초과,  $V_{s,soil} \geq 360 \text{ m/s}$  지반조건에서 「내진설계기준 공통적용사항」과 IBC 2015 및 KBC 2016에 비해 지진하중의 차이가 크기 때문에 이에 대한 보완이 필요함

### 단주기 증폭계수

기반암 깊이	토층평균 전단파속도	IBC 2015	KBC 2016	내진설계기준 공통적용사항
20 m 이하	360 이상 760 미만		1.4	1.4
	260 이상 360 미만		1.5	1.4
	180 이상 260 미만		1.5	1.5
	180 미만		1.9	1.5
20 m 초과	360 이상 760 미만	1.2	1.2	1.4
	180 이상 360 미만	1.4	1.4	1.4
	180 미만	1.7	1.9	1.3

### 장주기 증폭계수

기반암 깊이	토층평균 전단파속도	IBC 2015	KBC 2016	내진설계기준 공통적용사항
20 m 이하	360 이상 760 미만		1.4	1.4
	260 이상 360 미만		1.6	1.4
	180 이상 260 미만		1.6	1.6
	180 미만		3.2	1.6
20 m 초과	360 이상 760 미만	1.6	1.6	2.0
	180 이상 360 미만	2.0	2.0	2.0
	180 미만	3.2	3.2	2.7



## 건축물의 내진설계범주 (Seismic Design Category)

- ❖ 건축물은 지진하중에 따라 내진설계범주를 정하여 내진설계시, 해석방법, 구조 시스템의 높이제한, 철근상세 등을 결정하여, 장주기에 큰 지진하중이 작용하는 조건에 대하여 구조안전성을 높이고 있음

<표 1005.1> 단주기 설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주

$s_{DS}$ 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.50 \leq s_{DS}$	D	D	D
$0.33 \leq s_{DS} < 0.50$	D	C	C
$0.17 \leq s_{DS} < 0.33$	C	B	B
$s_{DS} < 0.17$	A	A	A

<표 1005.2> 주기 1초 설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주

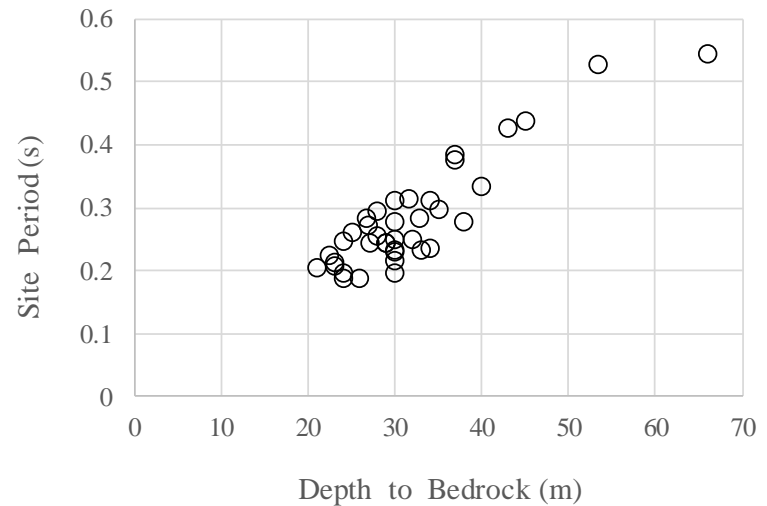
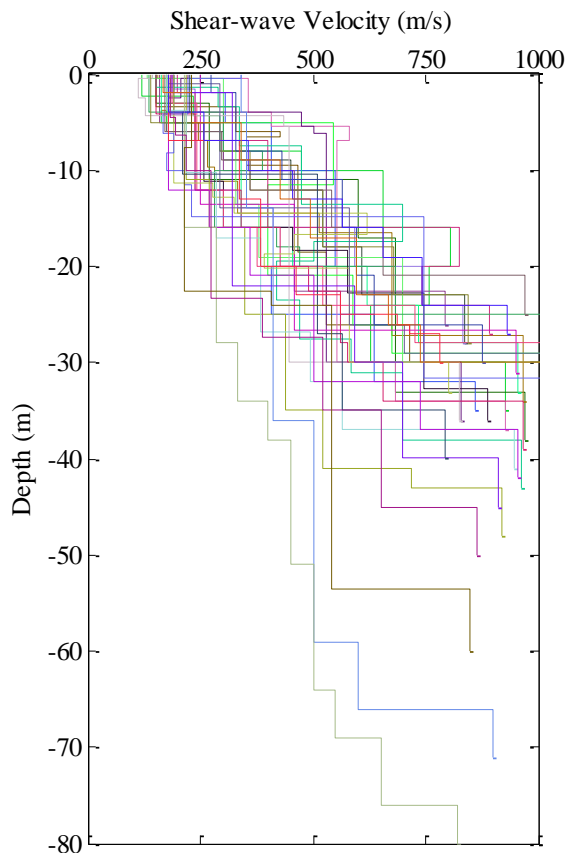
$s_{D1}$ 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.20 \leq s_{D1}$	D	D	D
$0.14 \leq s_{D1} < 0.20$	D	C	C
$0.07 \leq s_{D1} < 0.14$	C	B	B
$s_{D1} < 0.07$	A	A	A

**내진설계범주 D에 대하여 다음과 같이  
벽체두께의 증가와 과다한 철근이 배근됨**



## 지반응답해석 수행

- ❖ 20 m/s 이상,  $V_s > 360$  m/s 조건
  - 깊이 : 20 ~ 70 m
  - 지반주기 : 0.2 ~ 0.6 초
  - $V_s = 374 \sim 610$  m/s 총 31 가지 지반조건



# KDS 41 17 00

## 지반응답해석결과의 예

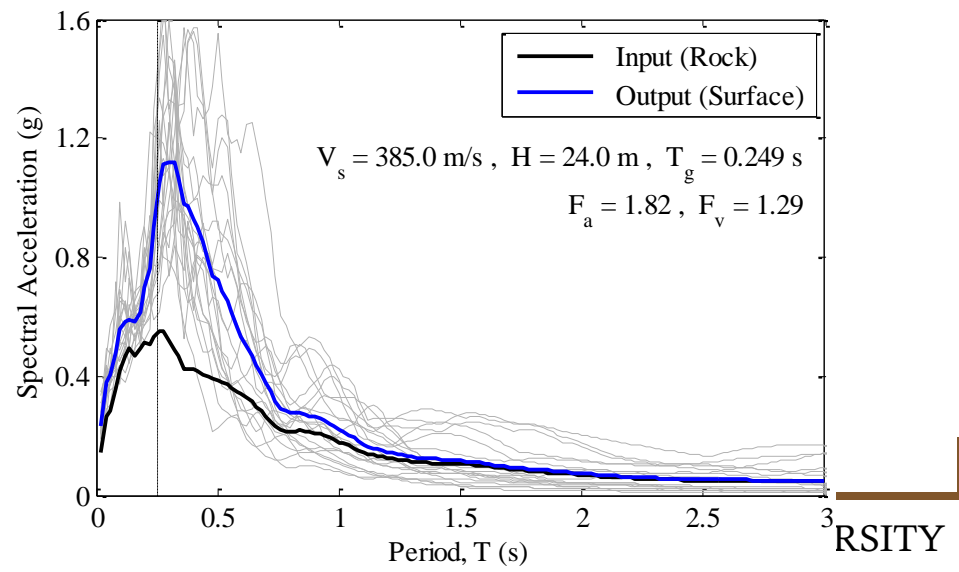
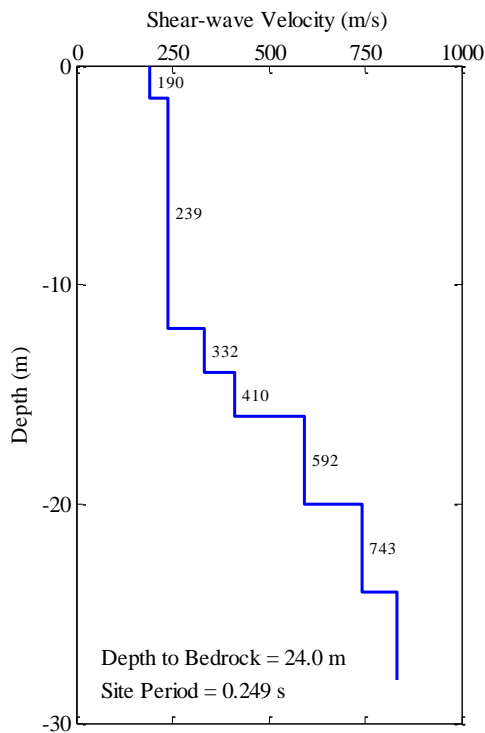
깊이 = 24 m , 평균전단파속도 = 385 m/s

지반주기 : 0.249 초

지반의 비선형성에 의해 지반주기보다 약간 증가된 구간에서 큰 증폭이 발생함

단주기 지반조건임에 따라 단주기 증폭계수가 증가함

$F_a = 1.82$  ,  $F_v = 1.29$



# KDS 41 17 00

## 지반응답해석결과의 예

깊이 = 66 m , 평균전단파속도 = 484 m/s

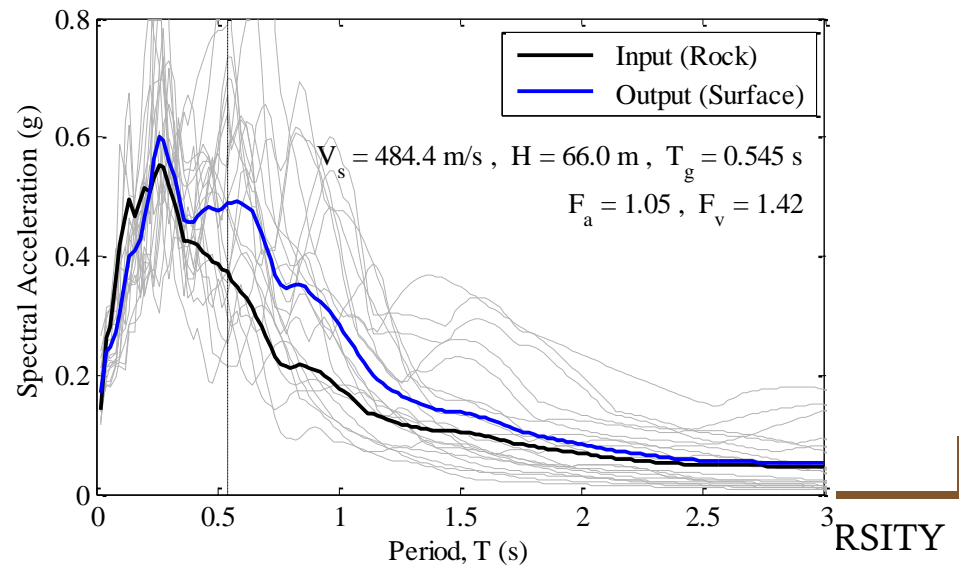
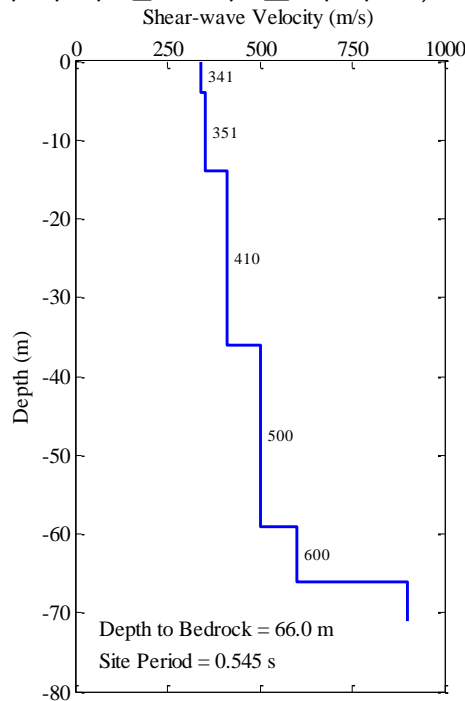
지반주기 : 0.545 초

지반의 비선형성에 의해 지반주기보다 약간 증가된 구간에서 큰 증폭이 발생함

중간주기 지반조건임에 따라 장주기 증폭계수가 증가하지만, 그 크기가 S4 보다 작음

$F_a = 1.05$  ,  $F_v = 1.42$

암반까지의 심도가 깊더라도, 토층이 단단하면 장주기 구조물의 지진하중을 키우지 않음



## 지반증폭계수의 조정이 요구됨

기반암 깊이 20 이상,  $V_s > 360$  m/s 조건해석결과 도출된  $F_v = 1.40 \sim 1.55$ 

내진설계기준 공통적용사항 S4,  $F_v = 2.0$  은 지진하중을 약 25% 이상 증가시키므로 이에 대한 조정이 요구됨

《 표3. 지반증폭계수 》

지반분류	단주기 증폭계수, $F_a$			장주기 증폭계수, $F_v$		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_2$	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
$S_3$	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
$S_4$	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
$S_5$	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

해석결과에 비해 과대함

개정되는 KDS 41 17 00 에 반영

→ 지반분류를 변경하지 않고, 다음과 같은 문구 삽입

1004.2.2 단주기와 1초주기 설계스펙트럼가속도

(1) 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼가속도  $S_{DS}$ ,  $S_{D1}$ 은 다음 식에 의하여 산정한다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \quad (1004.2.4)$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 \quad (1004.2.5)$$

여기서,  $F_a$ 와  $F_v$ 는 각각 <표 1004.2.1>와 <표 1004.2.2>에 규정된 지반증폭계수이다.

(2) 기반암의 깊이가 20 m 초과이고, 지반의 평균 전단파속도가 360 m/s 이상인 경우, <표 1004.2.2>에 규정된  $F_v$ 의 80%를 적용한다.

(3) 지반분류가  $S_5$ 이고 기반암의 깊이가 불분명한 경우, <표 1004.2.1>와 <표 1004.2.2>에 규정된  $F_a$ 와  $F_v$ 의 110%를 적용한다.

## 소 결

### 국내 지반운동의 특성과 기준

- 1) GTIS로부터 서울시 지반의 97% 가 0.25초 이하의 단주기 지반조건
- 2) 기반암까지의 깊이가 20m 이내인 단주기 지반에 대하여 단주기 구조물의 지진하중을 증가시키고, 장주기 구조물의 지진하중을 감소시키는 KBC 2016 소개
- 3) 「내진설계기준 공통적용사항」과 IBC 2015, KBC 2016과 비교한 결과, 암반까지의 깊이 20 m 이상, 전단파속도 360 m/s 이상인 지반조건에서 기존보다 큰 지진하중이 유발됨
- 4) KDS 41 17 00에서는 「내진설계기준 공통적용사항」의 지반분류와 지반계수를 유지한 상태에서 깊이 20 m 이상, 전단파속도 360 m/s 이상 지반조건에 대하여  $F_v$ 의 80%를 적용하는 문구를 삽입



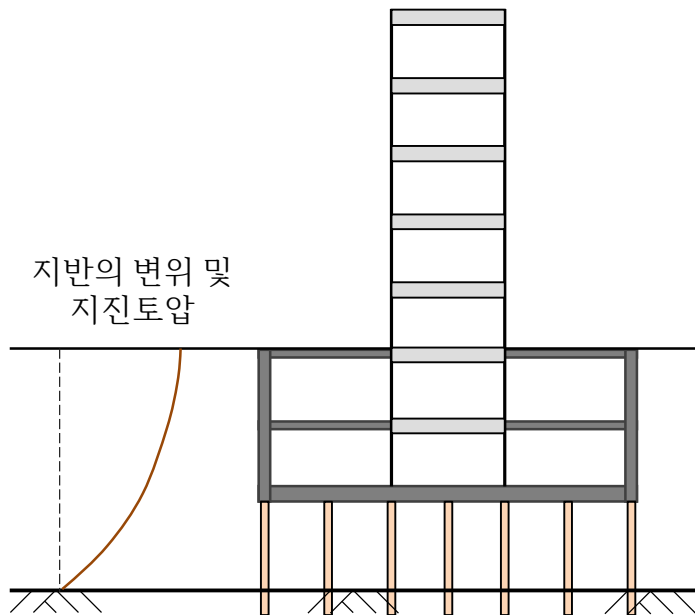
1. 지반운동의 영향
2. 국내 지반운동의 특성과 기준
3. 지하구조물의 내진설계
  - a. 일반사항
  - b. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향
  - c. 지진토압 산정방법

# 건축 지하구조물 내진설계 제정의 배경

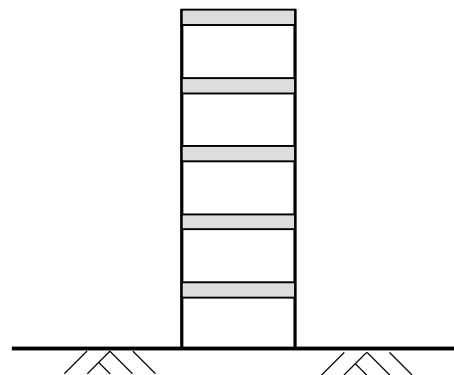
## 기존 설계

지하구조물은 지반과 같이 움직이는 것으로 가정 & 지반스프링 적용

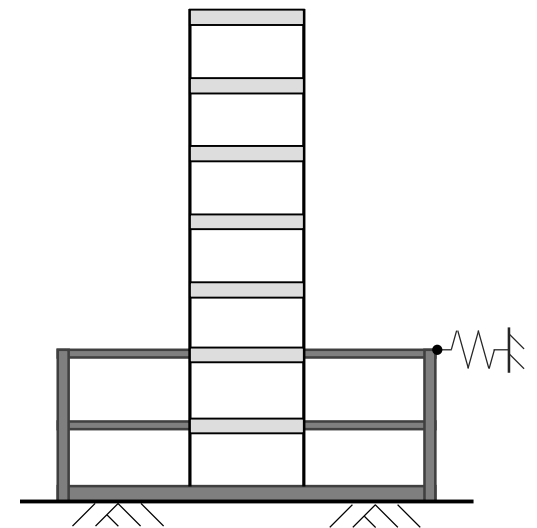
→ 지하구조물에 대한 내진설계를 수행하지 않거나, 지반으로 지진하중이 전이되어 상부구조물의 지진하중이 지하에 영향을 미치지 않는 것으로 가정



실제 조건



지하구조물 내진설계  
미수행 해석모델



지반스프링 적용

# 건축 지하구조물 내진설계 제정의 배경

## 원심모형실험

Ng의 원심가속도로 축소모형에 대한 지진실험을 수행할 수 있음

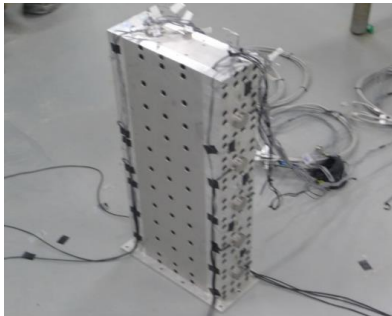


124 rpm / Centrifugal Acceleration : 80g

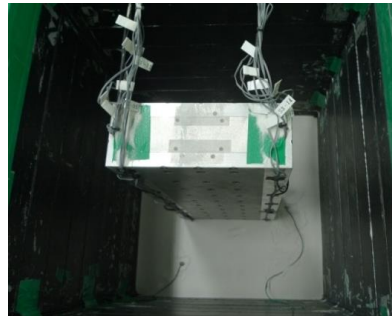
# 건축 지하구조물 내진설계 제정의 배경

국내 원심모형실험 : 김동관, 박홍근, 김동수, 하정곤 (2016). 지하층이 있는 구조물의 지진응답을 위한 원심모형실험, 한국지진공학회 논문집, Vol. 20 No. 4.

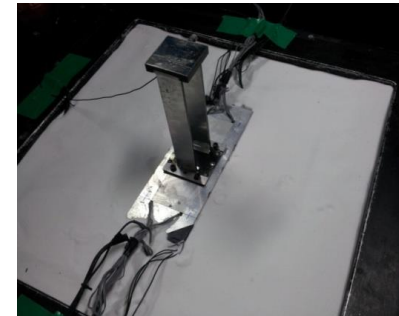
지하층의 하부가 고정된 경우, 1/2 묻힌 지하층에 대한 실험 수행



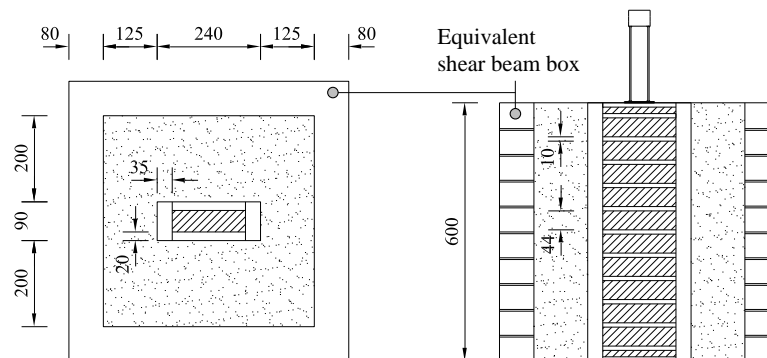
(a) Small scale basement model



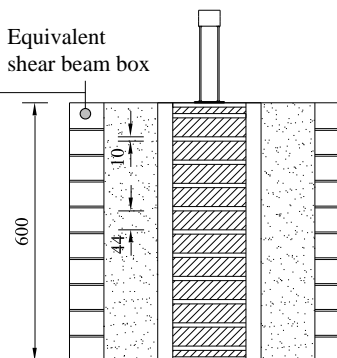
(b) Soil raining



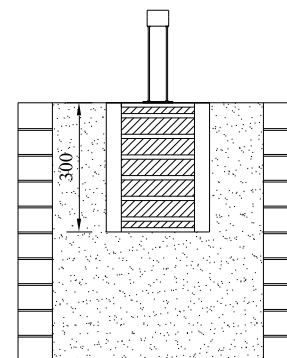
(c) SDOF structure with basement



(d) Plan



(e) Fixed basement model



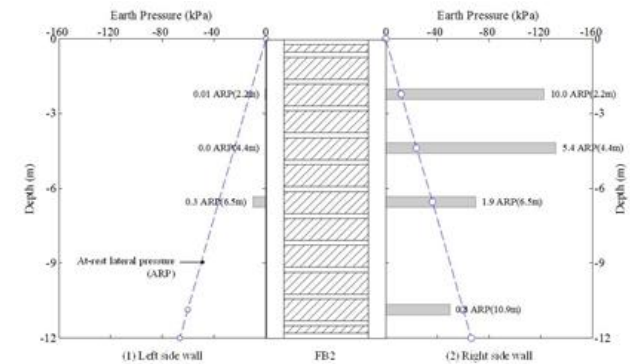
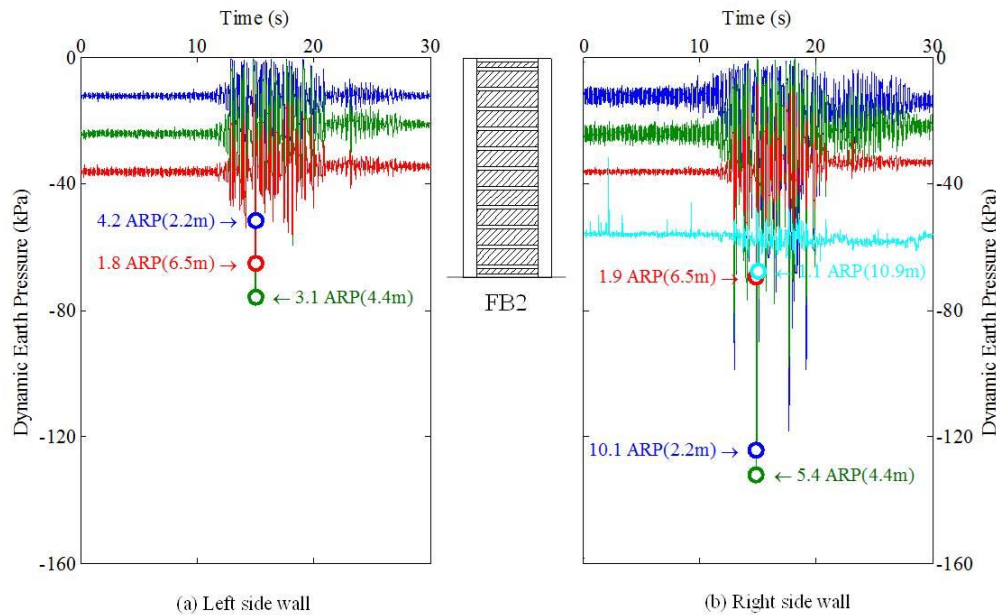
(f) Half-embedded basement model

# 건축 지하구조물 내진설계 제정의 배경

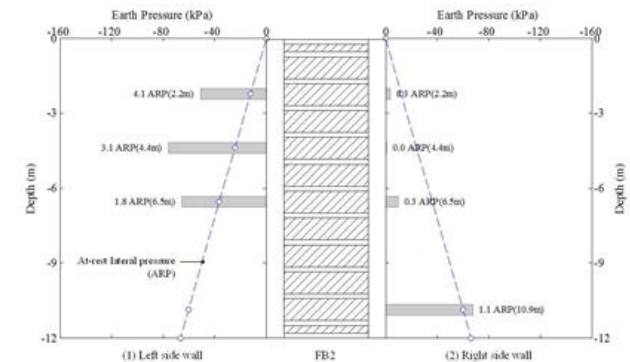
김동관 등(2016) : 지반과 지하층 사이에 간격(Gap)이 발생하여 토압이 사라짐

→ 편토압으로 작용되어 이에 대한 구조설계가 요구됨

→ 배면의 지반이 지하층을 지지하는 가정이 맞지 않음



(a) 우측면에 최대토압이 작용할 경우, 토압분포



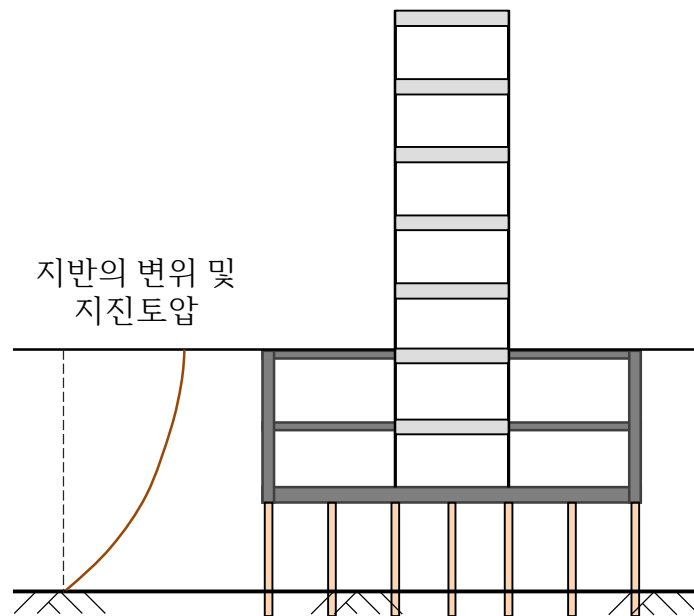
(b) 좌측면에 최대토압이 작용할 경우, 토압분포

# 건축 지하구조물 내진설계 제정의 배경

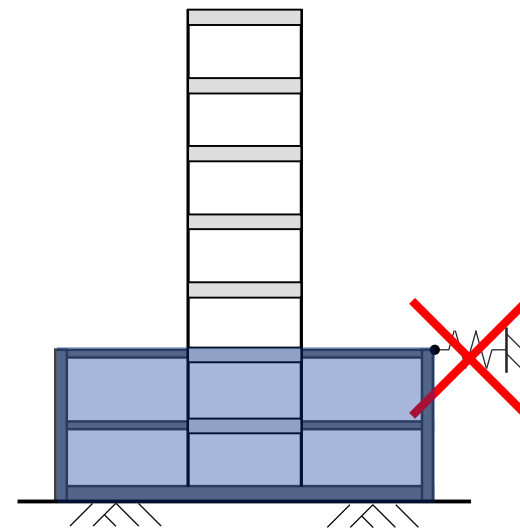
배면의 지반에 의한 지지력(지반스프링)이 없음

→ 지반으로 지진하중이 전이되어 상부구조물의 지진하중이 지하에 영향을 미치지 않는 것으로 가정이 옳지 않음

다만, 지하구조물은 상부에서 내려오는 구조체+지하외벽으로 강성이 매우 큼



실제 조건



지반스프링 적용 불가

# 건축 지하구조물 내진설계의 목적과 범위

## 1.1 목적

건축법에 따라 건축물로 분류된 지하구조물과 지하층을 가진 건축물

- 1) 지하층에 대한 내진설계방법
- 2) 지상층의 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향을 고려하는 방법 제시

## 1.2 건축지하구조물의 정의

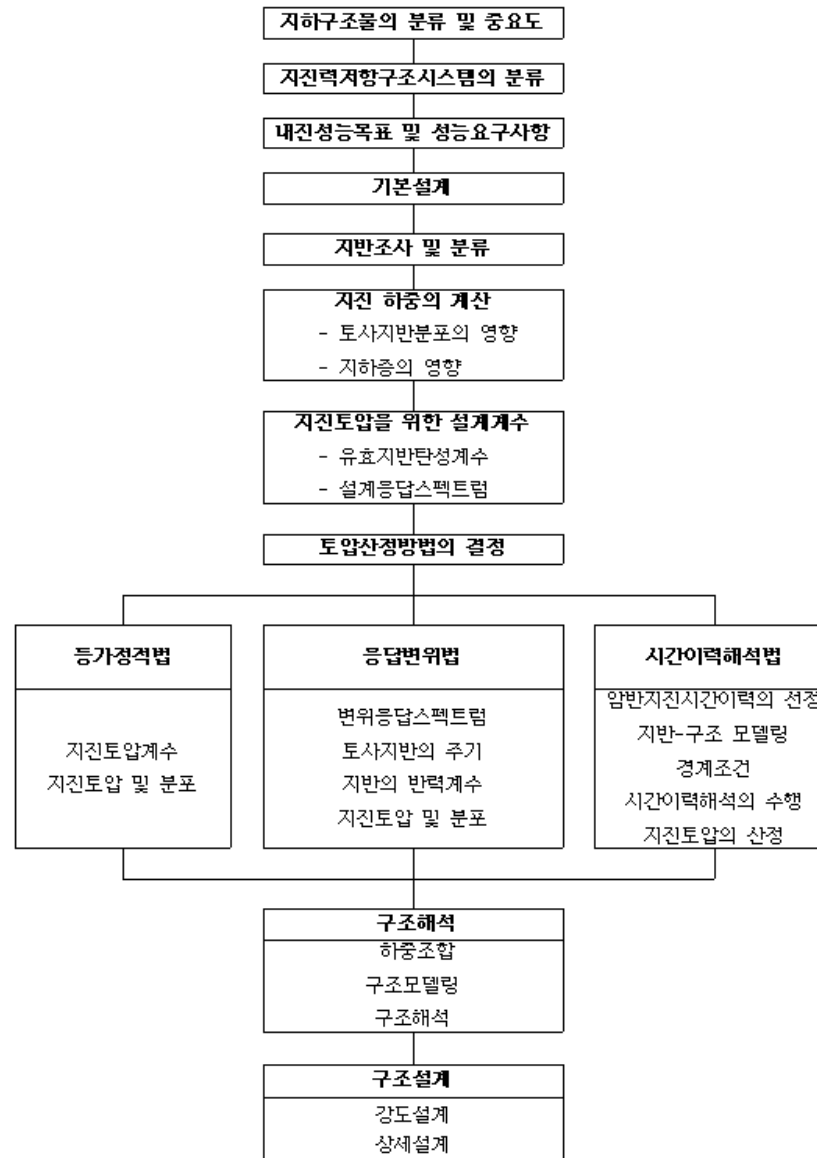
- 1) 건축물로 분류된 지하구조물 (단독 지하주차장, 지하역사, 지하도시 상가 등)
- 2) 건축물의 지상층과 연결되어 있는 지하층 구조 (아파트 지하주차장 등)

옹벽 등 토목구조물은 이 기준의 적용범위에 해당하지 않음



## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.1 설계절차



## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

---

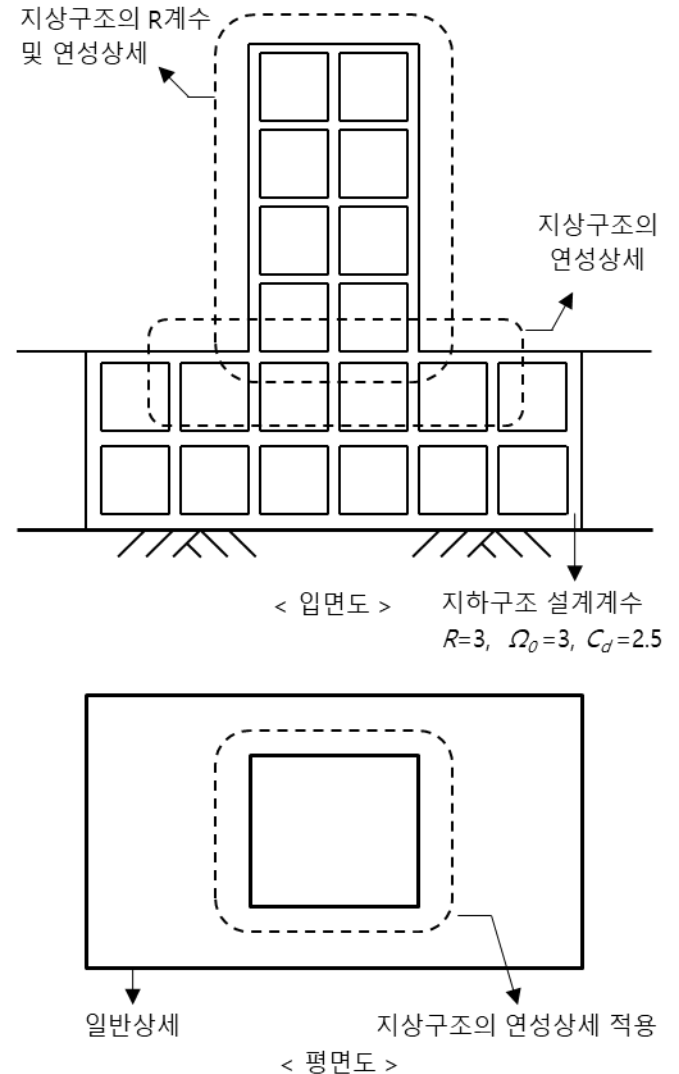
### 2.2 지하구조물의 중요도

- 1) 건축구조기준(KBC)에 준하여 결정
- 2) 지하층이 지상층에 비하여 넓은 경우, 지상층으로부터 전달되는 하중을 부담하는 영역 및 주요한 횡력을 지지하는 부재는 지상층의 중요도를 따르며, 이외 부분의 중요도는 지하층 용도에 따라 다르게 적용될 수 있다.

## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.3 지진력저항시스템의 선택

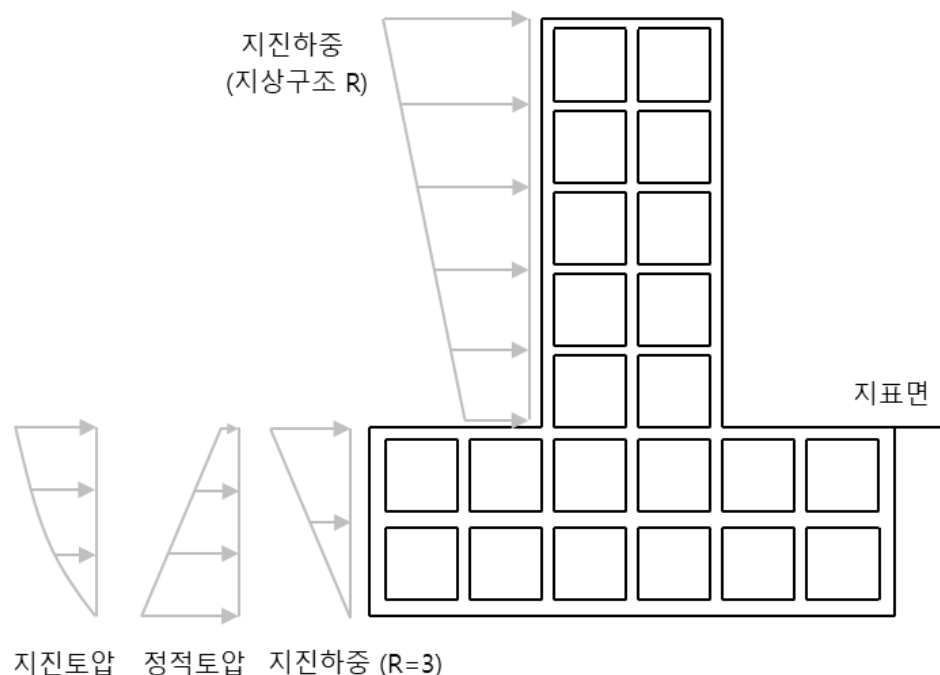
- 1) 지하구조물의 반응수정계수  $R = 3$  적용
- 2) 지상층과 연결되어 지하층으로부터 지진하중이 전달되는 지하층영역은 지상층의 지진하중이 전달될 수 있도록 지상층과 동일한 연성상세를 사용한다.



## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.4 지진하중과 하중조합

- 1) 상부구조물의 관성력, 지하구조물의 관성력, 정지토압, 지진토압 등을 고려하여 지진하중을 산정
- 2) 지진토압에 대해서는 반응수정계수(R)에 의한 하중저감을 ~~고려하지 않음~~  
**고려함**



#### 1014.4.1 지진하중

지하구조가 일정한 수준의 초과강도와 비탄성변형 능력을 가지고 있다면, 지진토압하중을 감소시킬 수 있다. 1014.5에서 설계지진토압은 지반의 변위가 강체 혹은 탄성상태인 지하구조물에 작용하는 것으로 가정되어 계산되므로 지반의 변위가 증가함에 따라 설계지진토압이 증가한다. 그러나, 지하구조물이 항복강도에 도달하면 지반의 변위가 증가하더라도 지하구조에 작용하는 하중이 증가하지 않는다. 이를 고려하여 1014.3.2.에서 정의된 반응수정계수를 사용하여 지진토압하중을 저감할 수 있다.

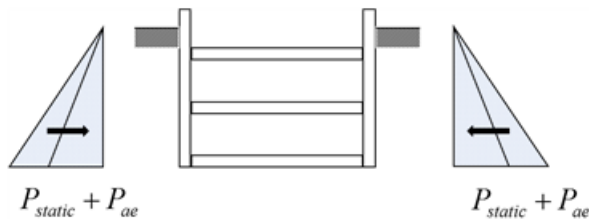
## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.4 지진하중과 하중조합

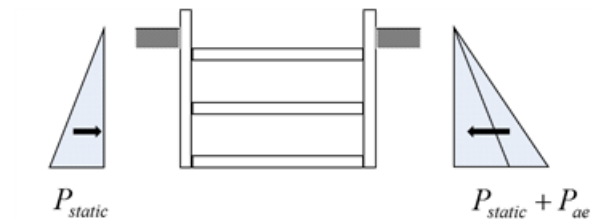
$$3) \quad 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \quad / \quad 0.9D + 1.0E$$

여기서, 정적토압은 L에 포함되고, 설계지진토압은 E에 포함된다.

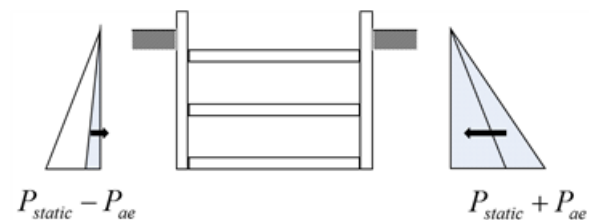
4) 정적토압과 지진토압의 다양한 조합에 대하여 설계되어야 함



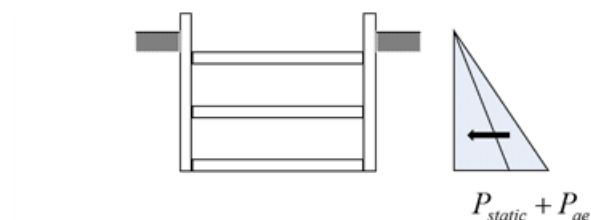
(a) 양쪽 벽면에 작용하는 지진토압의 작용 방향이 같은 경우



(c) 왼쪽 벽면에 작용하는 지진토압이 0인 경우



(b) 양쪽 벽면에 작용하는 지진토압의 작용 방향이 반대인 경우



(d) 왼쪽 벽면에 작용하는 토압이 0인 경우

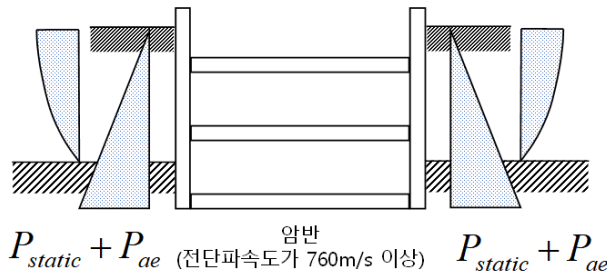
## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.4 지진하중과 하중조합

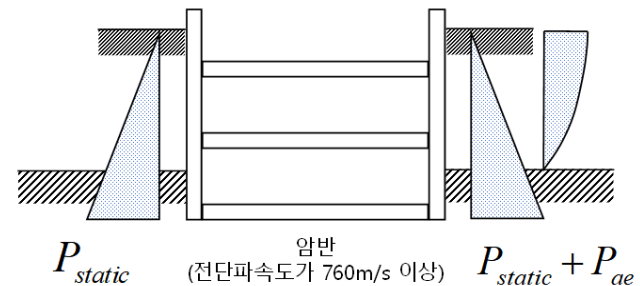
$$3) \quad 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \quad / \quad 0.9D + 1.0E$$

여기서, 정적토압은 L에 포함되고, 설계지진토압은 E에 포함된다.

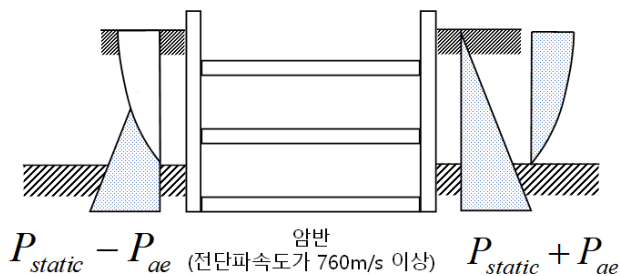
4) 정적토압과 지진토압의 다양한 조합에 대하여 설계되어야 함



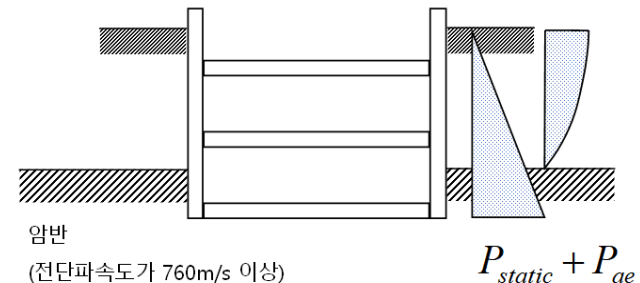
(a) 양쪽 벽면에 작용하는 지진토압의 작용 방향이 같은 경우



(c) 왼쪽 벽면에 작용하는 지진토압이 0인 경우



(b) 양쪽 벽면에 작용하는 지진토압의 작용 방향이 반대인 경우



(d) 왼쪽 벽면에 작용하는 토압이 0인 경우



## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.5 지진해석 및 내진설계 방법

KDS 41 17 00 14.6 (6)에 대한 해설

일반적으로 건물의 지하구조는 박스형태의 지하외벽을 가지고 있으며, 지하외벽이 강한 횡지지력을 제공한다. 따라서, 기둥, 보와 같은 지하구조 내부의 부재들을 무시하고, 전체 횡하중을 박스형태의 외벽이 지지하도록 설계할 수 있다.

이때 전도모멘트는 박스형태의 외벽구조가 지지하고, 전단력은 횡력방향과 평행한 외벽이 지지하도록 설계할 수 있다.

구조해석상 전도모멘트에 의하여 기초에 인발이 발생할 수 있으나, 실제로는 벽체와 토사의 마찰저항과 토압에 의하여 인발이 발생할 가능성은 없다.

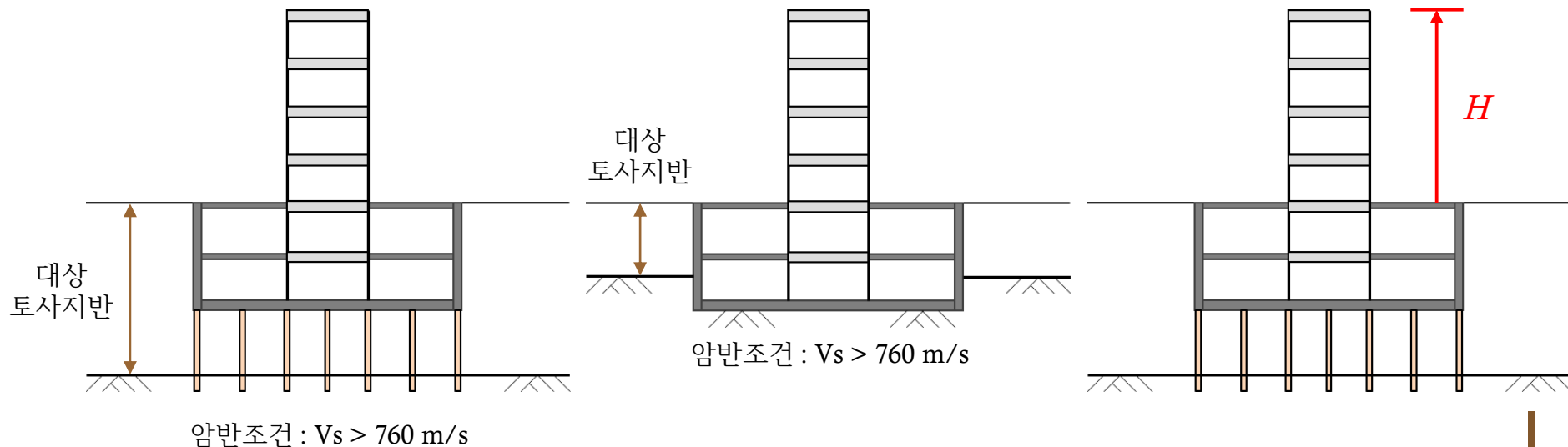
설계편의를 위하여 다음과 같은 모델링을 사용할 수 있다. 지상구조와 그로부터 직접 연결되는 지하구조 일부분을 함께 구조모델링을 하고, 이외의 지하구조는 무시하며, 지하외벽은 수평무한강성으로 연결하여 모델링할 수 있다. 이외의 지하구조는 별도의 구조해석모델을 사용하여 횡력을 제외한 하중에 대하여 설계를 수행할 수 있다.



## 2. 지하구조물 내진설계 일반사항

### 2.6 기반암(=기반면)의 정의에 따른 토사지반의 영향

- 1) 전단파속도  $760 \text{ m/s}$  이상은 기반암으로 가정, 지표면으로부터 기반암까지의 토사에 대한 영향에 대하여 내진설계
- 2) 암반에 묻힌 지하층은 지진토압 없이 암반과 같이 거동하며, 기반암 상부 토사에 의한 지진토압만 고려
- 3) 건물의 주기 산정시, 지표면 이하 토사는 모두 고정 조건

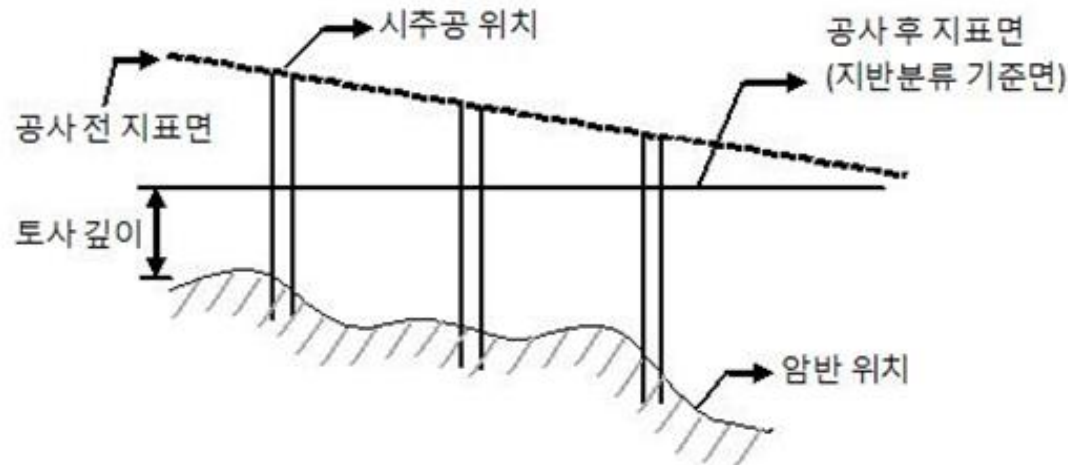


1. 지반운동의 영향
2. 국내 지반운동의 특성과 기준
3. 지하구조물의 내진설계
  - a. 일반사항
  - b. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향
  - c. 지진토압 산정방법

### 3. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향

#### 3.1 대표지반증폭계수의 결정

- 1) 공사후 지표면이 지반분류의 기준면이 되어야 하며, 3곳 이상의 지반조사가 수행되어야 함
- 2) 지하층 및 지상층건물의 설계에는 단일값의 대표지반증폭계수를 사용해야 하며, 이때 대표지반증폭계수는 각 지반조사위치에서 결정된 값의 평균값으로 정하거나, 설계상에 가장 불리한 값 적용

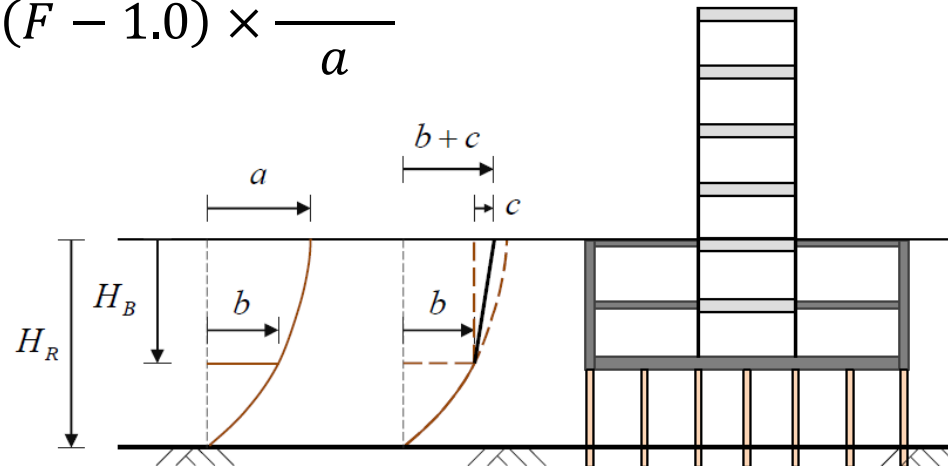


### 3. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향

#### 3.2 지하층의 영향에 의한 지반증폭계수 저감

- 1) 지하층의 강성이 크고, 지진토압에 대하여 안전하게 설계되어 있는 경우
- 2) 기초저면 지반등급이  $S_2$  이상이고, 지진토압과 지진하중이 기초저면의 지반에 직접 전달될 수 있도록 기초저면이 지반에 견고히 정착되어 있는 경우
- 3) 유효지반증폭계수

$$F_{eff} = 1.0 + (F - 1.0) \times \frac{b + c}{a}$$



a : 지표면에서 지반의 횡변위

b : 지하구조바닥에서 지반의 횡변위

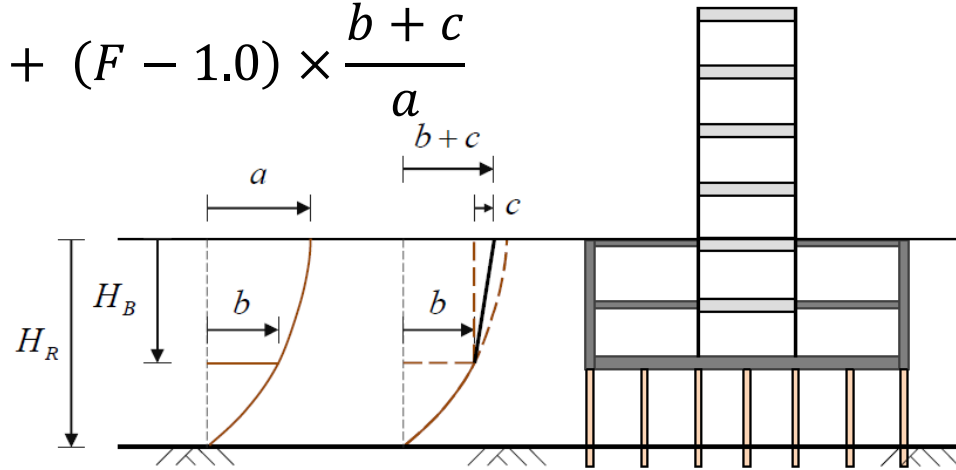
c : 지진토압에 의한 지하구조물의 횡변위

b+c : 유효지반계수 산정을 위한 지진시 지하구조물의 총변위

### 3. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향

#### 3.2 지하층의 영향에 의한 지반증폭계수 저감

3) 유효지반증폭계수  $F_{eff} = 1.0 + (F - 1.0) \times \frac{b + c}{a}$

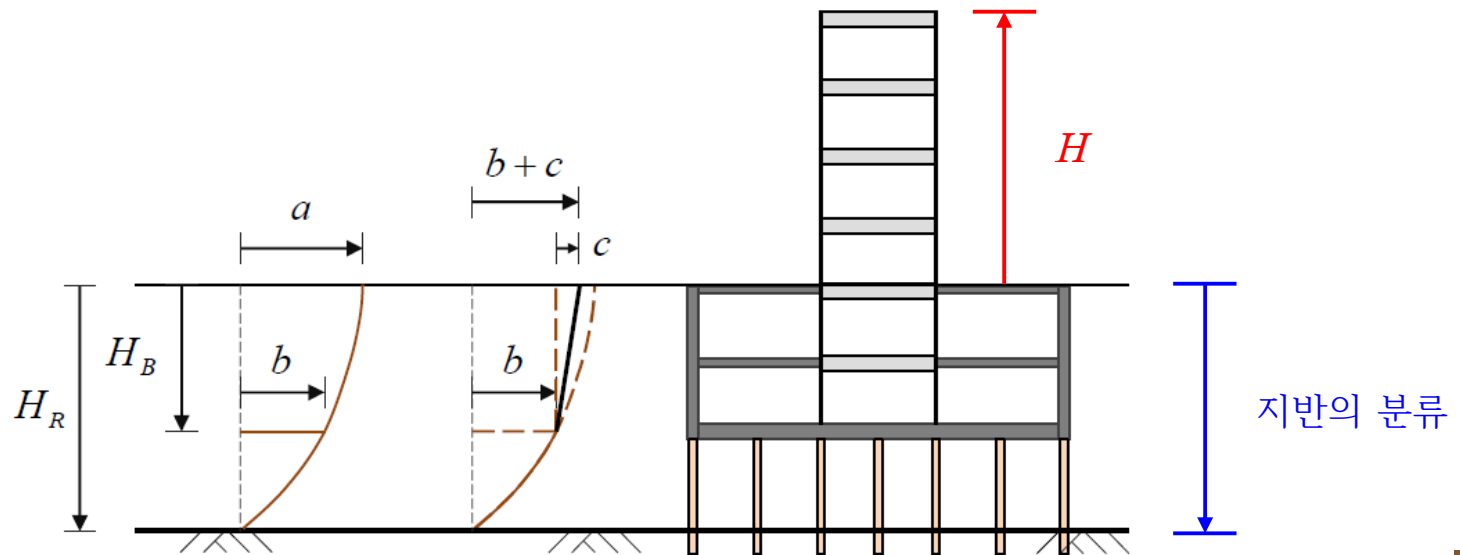


지하구조물의 강성	지하구조물 변위	유효지반증폭계수	
매우 약하거나 고려하지 않음 $\approx 0$	$b + c = a$	$F_{eff} = F$	지하층 고려하지 않음
지진토압에 의해 변형이 c 만큼 발생	$b + c$	$F_{eff} = 1.0 + (F - 1.0) \times \frac{b + c}{a}$	
지하구조가 암반에 정착되어 있지 않고, 강성이 매우 큼	$b + c \cong b$	$F_{eff} = 1.0 + (F - 1.0) \times \frac{b}{a}$	기초저면 기준
지하구조가 암반에 정착되어 있고, 강성이 매우 큼	$b + c \cong 0$	$F_{eff} = 1.0$	암반 기준

### 3. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향

#### 3.3 지하층의 영향을 고려한 구조물의 지진해석

- 1) 지반분류 : 지표면으로부터 기반암 ( $V_s : 760 \text{ m/s}$  이상)
- 2) 지하층에 의한 지반운동의 제한을 고려하여 지반증폭계수를 저감할 수 있음
- 3) 구조물의 주기산정(등가정적해석의 밑면전단력 산정) 및 60m 제한을 판단하는 높이( $H$ ) : 지표면으로부터 건물의 최상부



1. 지반운동의 영향
2. 국내 지반운동의 특성과 기준
3. 지하구조물의 내진설계
  - a. 일반사항
  - b. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향
  - c. 지진토압 산정방법

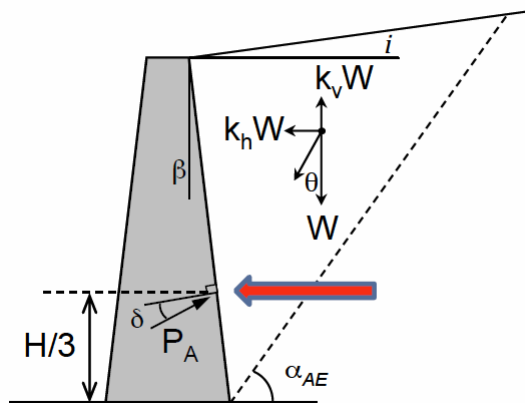
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

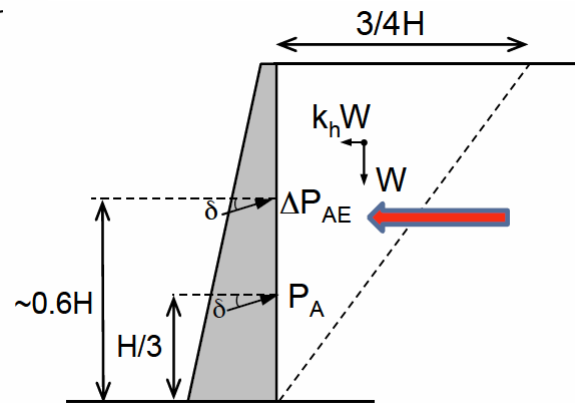
1) Mononobe-Okabe(1926), Seed and Whitman(1970), Wood(1973)

응답변위법 등 다양한 지진토압 산정이론이 있음

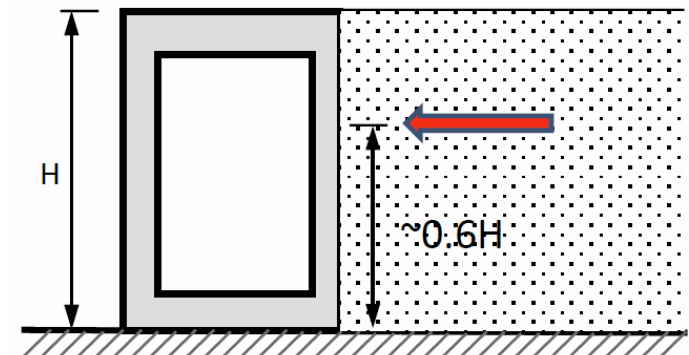
< Mononobe-Okabe (1926) >



< Seed and Whitman (1970) >



< Wood (1973) >

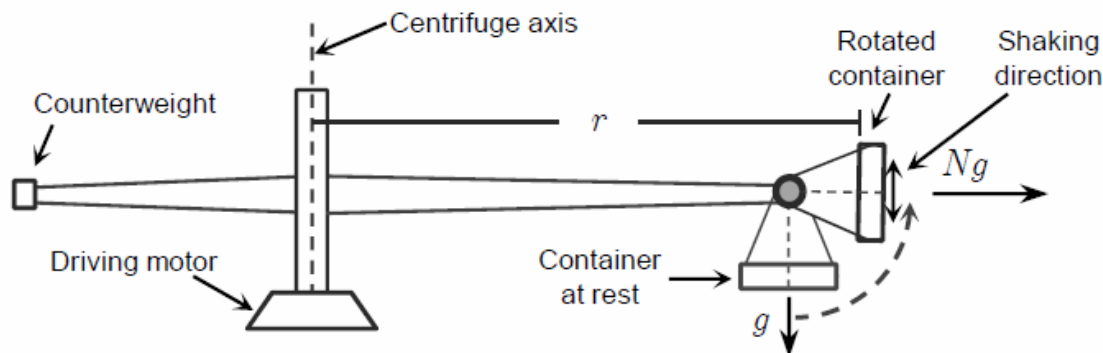




## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

- 2) 해외 원심모형실험 : Mikola and Sitar (2013), Seismic Earth Pressures on Retaining Structures in Cohesionless Soils, California Department of Transportation.



## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

2) Mikola and Sitar (2013) : 깊이 12.5 m 사질 지반 위의 전면기초를 가진 높이 6m의 철근콘크리트 벽체 모사

실험결과로 지표면 가속도에 따른 지진토압의 비례상수(0.75)를 도출함  
지진토압의 분포는 지표면으로부터 깊어질수록 토압이 증가하는 삼각형

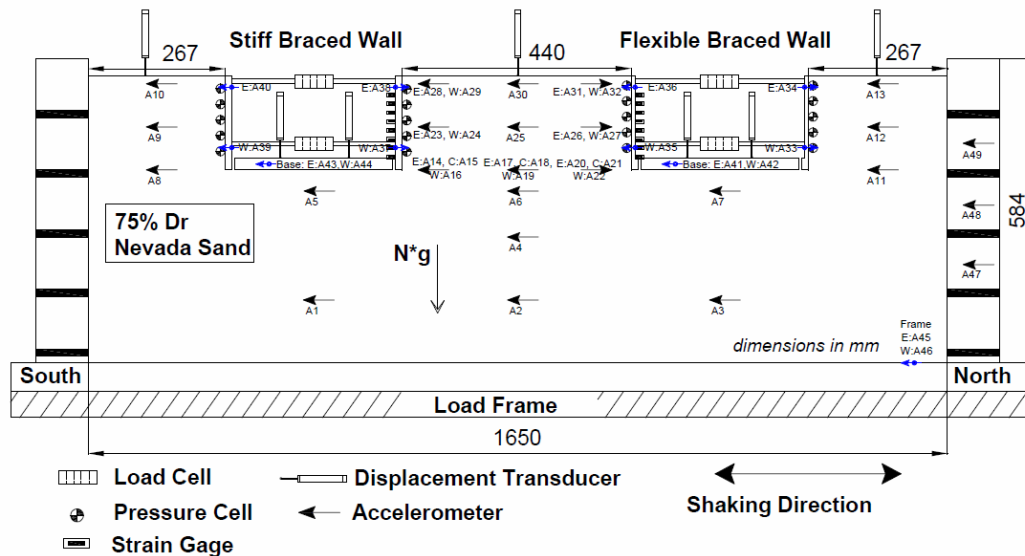
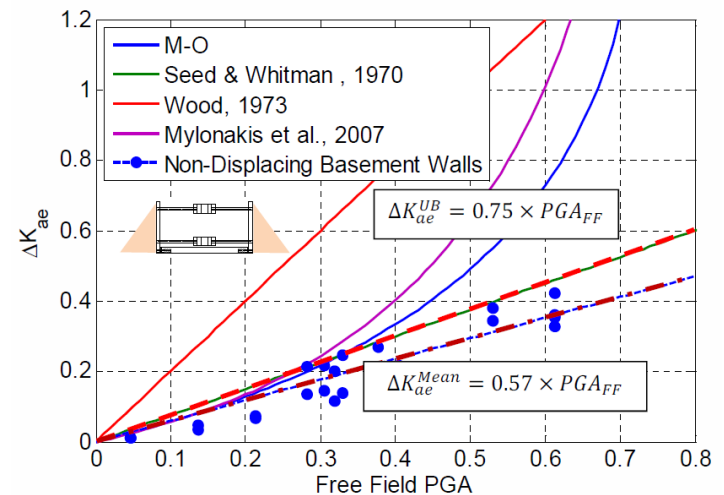


Figure 3.3. ROOZ01 Model configuration, profile view (dimension in mm).

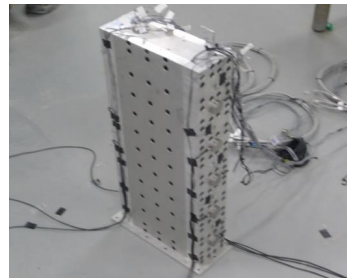


## 4. 지진토압 산정방법

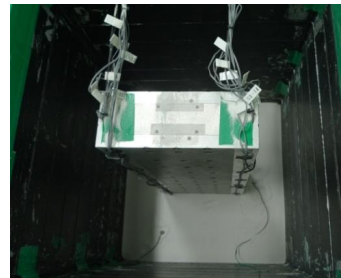
### 4.1 배경이론

- 3) 국내 원심모형실험 : 김동관, 박홍근, 김동수, 하정곤 (2016). 지하층이 있는 구조물의 지진응답을 위한 원심모형실험, 한국지진공학회 논문집, Vol. 20 No. 4.

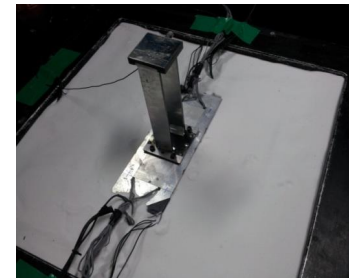
지하층의 하부가 고정된 경우, 1/2 묻힌 지하층에 대한 실험 수행



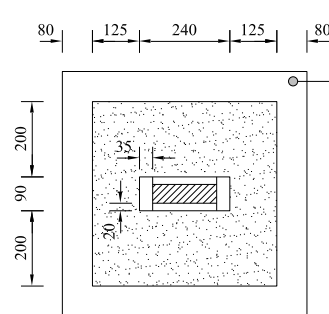
(a) Small scale basement model



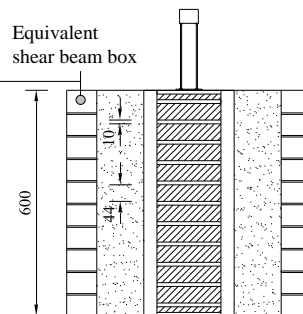
(b) Soil raining



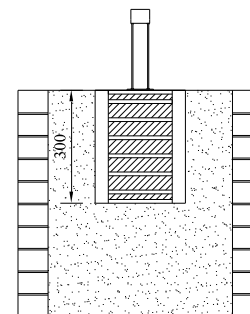
(c) SDOF structure with basement



(d) Plan



(e) Fixed basement model

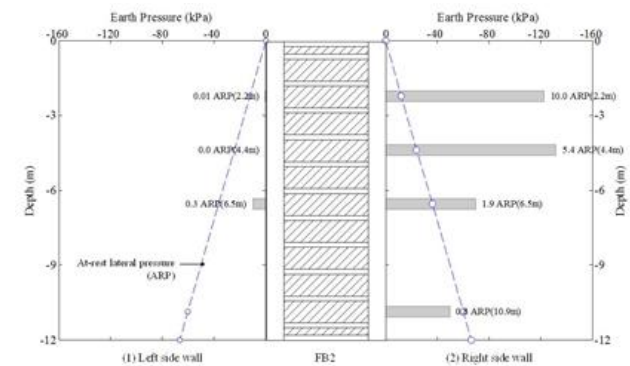
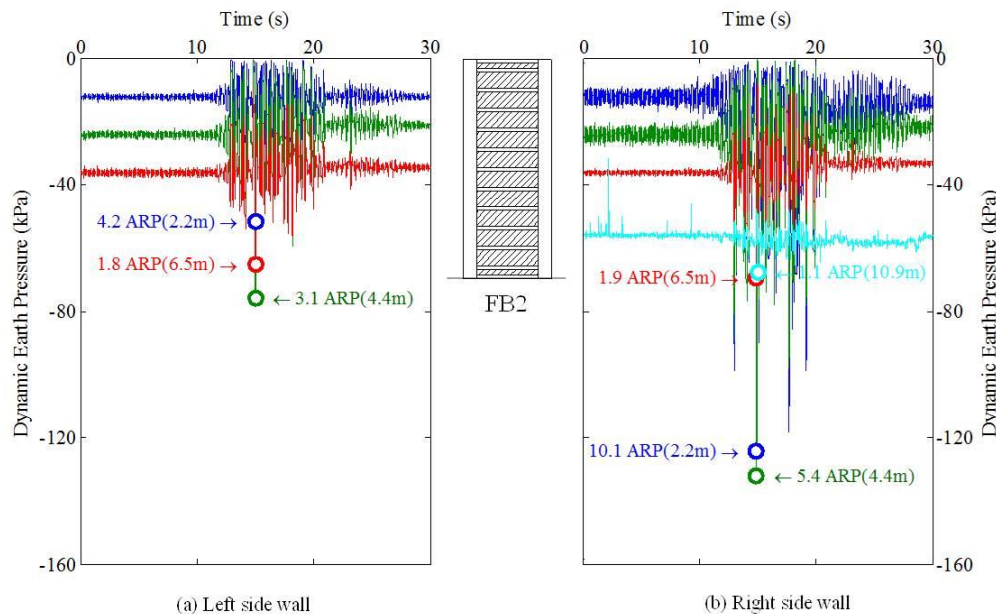


(f) Half-embedded basement model

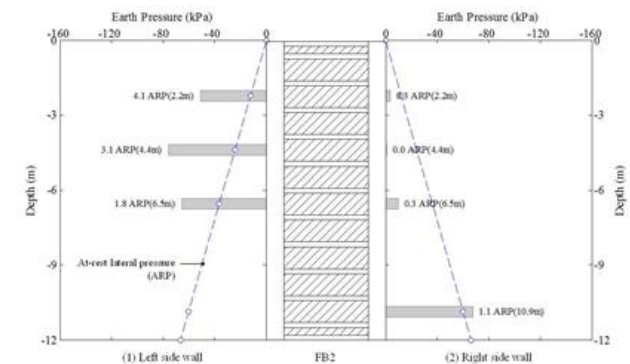
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

- 3) 김동관 등(2016) : 지반과 지하층 사이에 간격(Gap)이 발생하여 토압이 사라짐 → 편토압으로 작용되어 이에 대한 구조설계가 요구됨



(a) 우측면에 최대토압이 작용할 경우, 토압분포

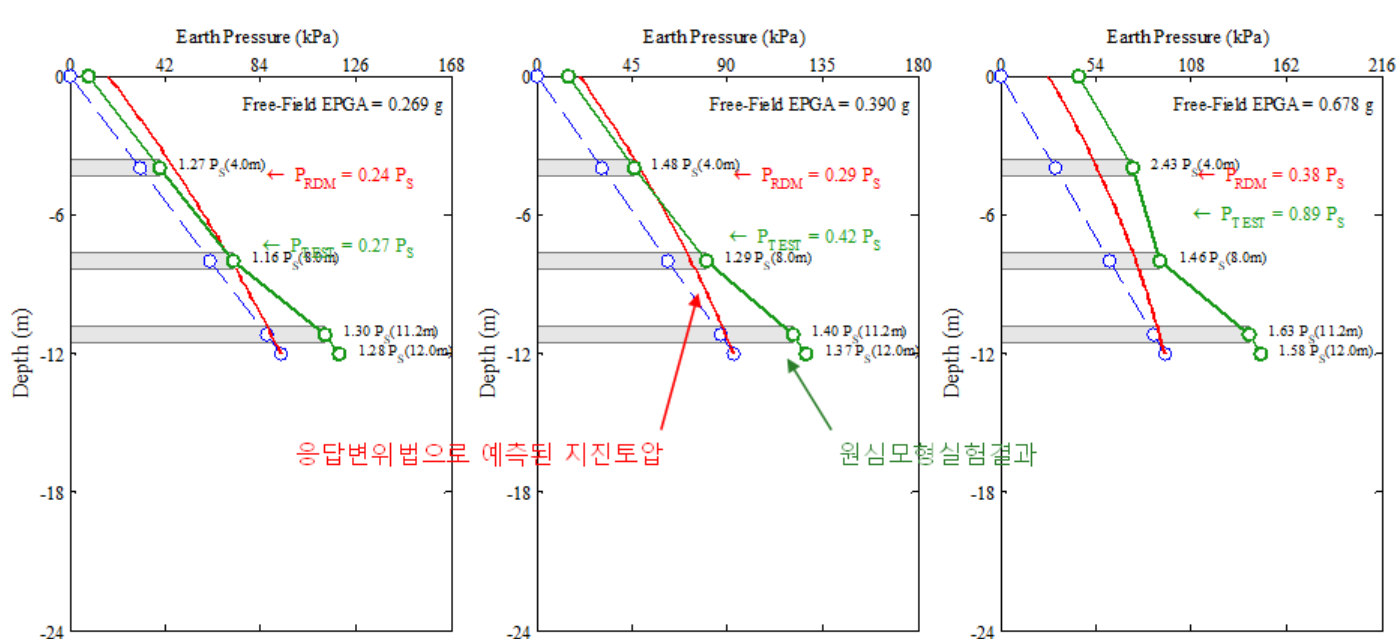


(b) 좌측면에 최대토압이 작용할 경우, 토압분포

## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

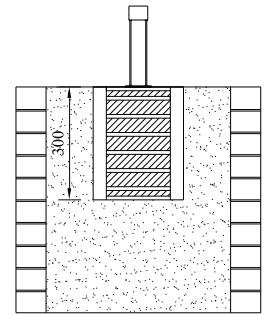
- 3) 김동관 등(2016) : **1/2 문힌 지하층**에 대한 지진토압분포는 지표면으로부터 깊어질수록 증가하는 경향 → 지반에 문힌 지하층의 강성이 발현되지 않고, 지하층이 지반의 움직임과 같이 거동하며 상대변위가 작게 유발되어 지진토압이 작용하기 때문 → **Mikola and Sitar (2013) 연구결과와 유사**



(a) Free-Field EPGA = 0.319g

(b) Free-Field EPGA = 0.513g

(c) Free-Field EPGA = 0.792g



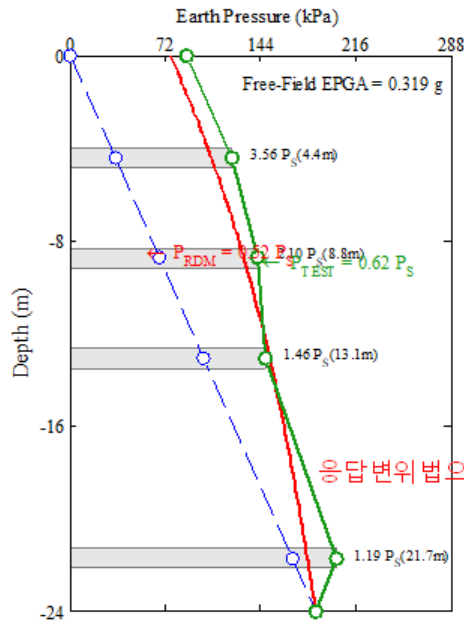
(f) Half-embedded basement model

## 4. 지진토압 산정방법

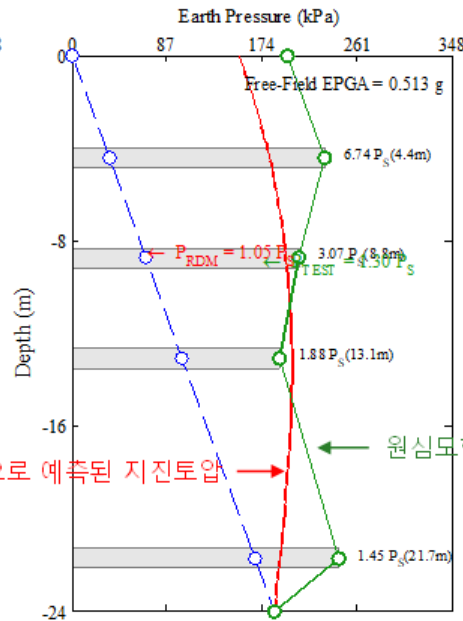
### 4.1 배경이론

- 3) 김동관 등(2016) : **하부가 고정된 지하층**에 대한 지진토압분포는 지표면으로부터 깊어질수록 감소하는 경향 → 하부가 고정된 지하층의 강성이 발현되어 지하층에 의해 저항되는 지반의 움직임이 지진토압으로 치환됨

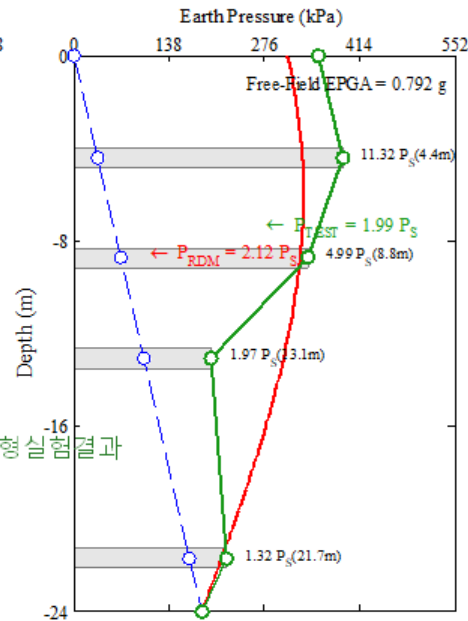
→ **응답변위법과 유사함**



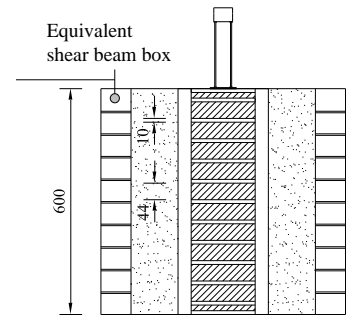
(a) Free-Field EPGA = 0.319g



(b) Free-Field EPGA = 0.513g



(c) Free-Field EPGA = 0.792g



## 4. 지진토압 산정방법

### 4.1 배경이론

- 4) 국내·외 연구결과로부터 **지하층의 매입깊이**와 **지하층 하부 경계조건**에 따라 지진토압의 분포가 달라지므로 이를 고려하여 지진토압 산정방법을 구분

지표면으로부터 기반암의 깊이가 15 m 이내이고, 지하층이 전체토층의  $2/3$  이내에 묻혀있는 경우 : 등가정적법, 응답변위법, 시간이력해석법

지표면으로부터 기반암까지의 깊이가 15 m 이상이거나, 지하층이 전체토층의  $2/3$  이상~암반에 고정된 경우 : 응답변위법, 시간이력해석법

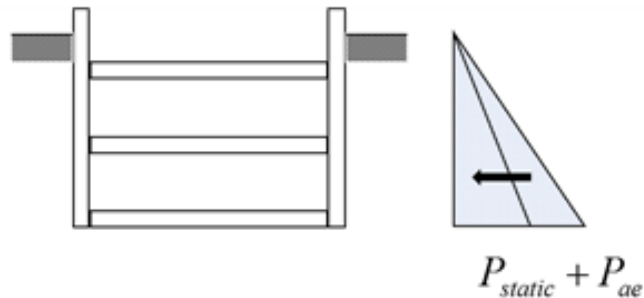
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.2 등가정적법

- 1) 지표면으로부터 기반암의 깊이가 15 m 이내이고, 지하층이 전체토층의 2/3 이내에 묻혀있는 경우
- 2) 지표면으로부터 깊이가 증가함에 따라 선형으로 증가하는 토압분포
- 3) 지진토압계수  $K_{ae}$  는 지표면의 최대유효지반가속도에 비례하여 산정됨

$$K_{ae} = 0.75 \left( \frac{EPGA_{ff}}{g} \right)$$

$$EPGA_{ff} = S \times F_a \times 2/3$$

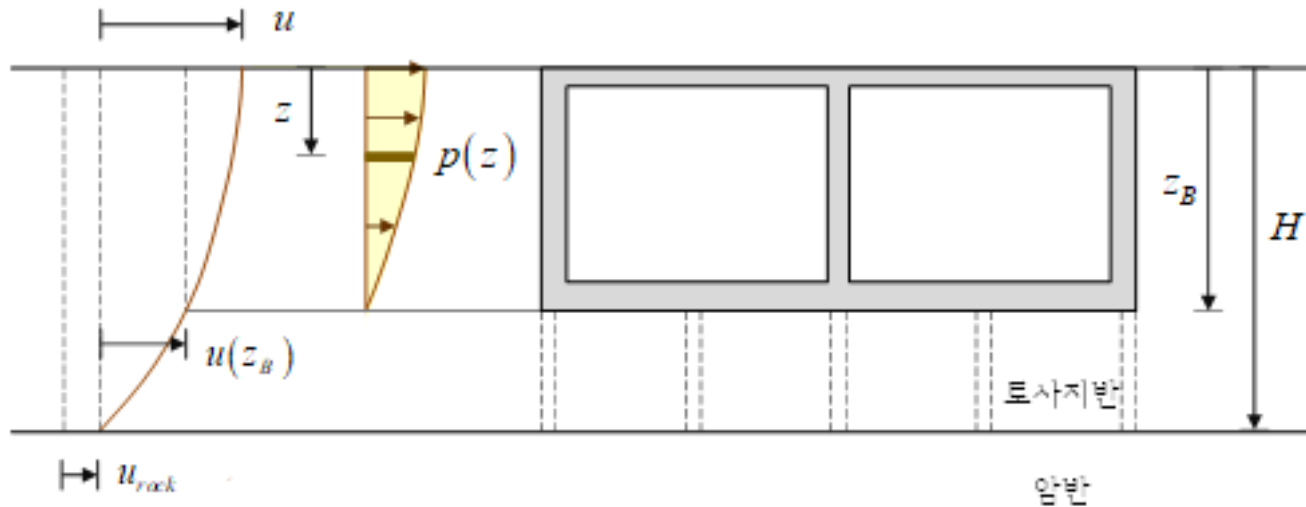




## 4. 지진토압 산정방법

### 4.3 응답변위법

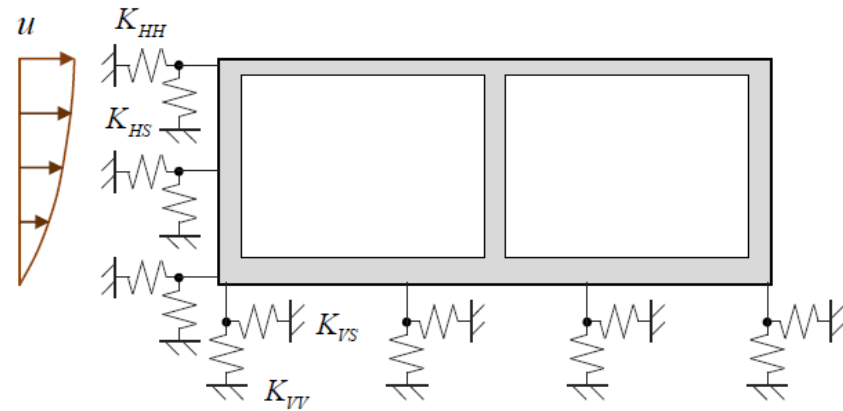
- 1) 지진시 지반에 유발되는 변위를 지반의 물성이 고려된 반력계수와 같이 모사된 지하구조물에 가하여 지진해석 및 내진설계를 수행하는 방법
- 2) 지반의 깊이, 지하구조물의 매설깊이, 기초형식에 관계없이 적용될 수 있음



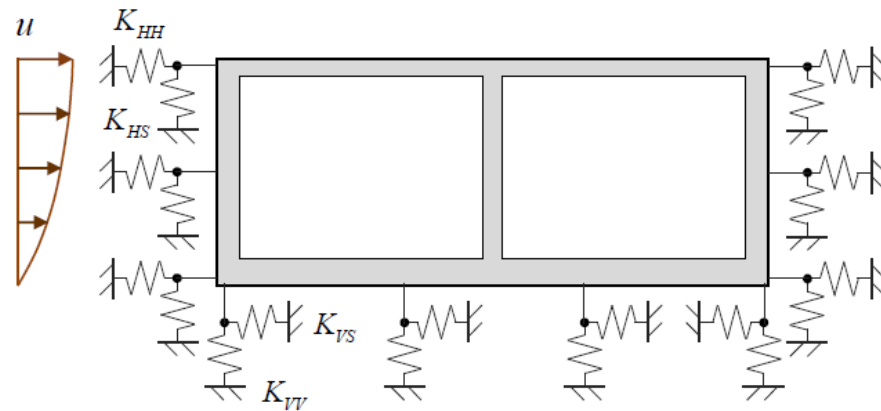
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.3 응답변위법

3) **지반의 변위와 지반반력계수**를 고려하여 지하구조물에 대한 지진해석 수행



(a) 배면의 지반반력계수를 고려하지 않는 경우



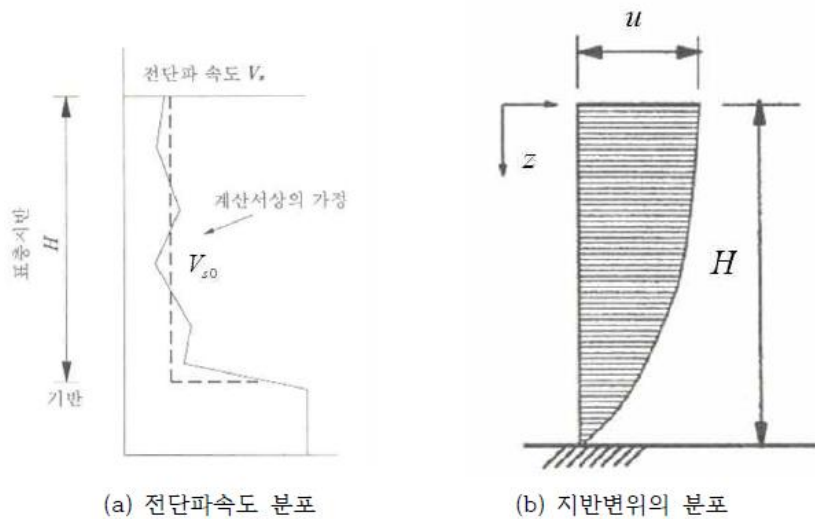
(b) 배면의 지반반력계수를 고려하는 경우

## 4. 지진토압 산정방법

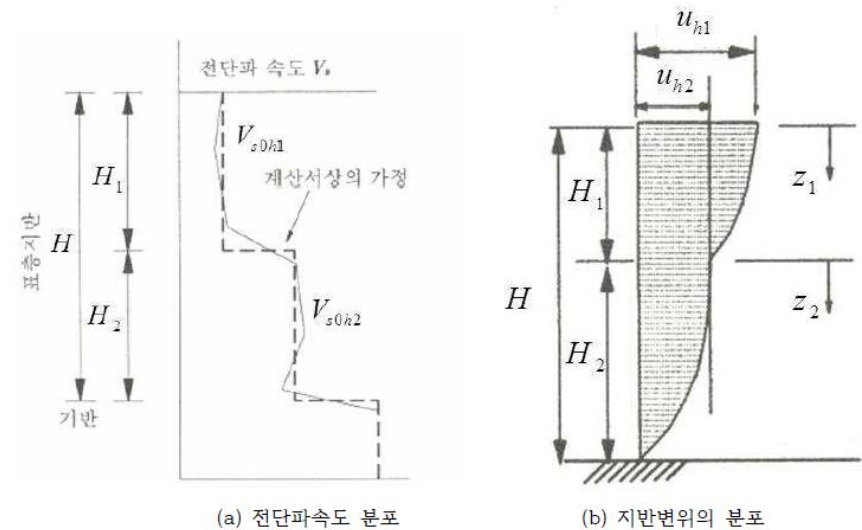
### 4.3 응답변위법

지반의 변위를 구하는 방법 : 단일코사인 방법, 이중코사인 방법, 부지응답해석에 의한 방법 등이 있다.

< 단일코사인 방법 >



< 이중코사인 방법 >



참고문헌 : 지반구조물의 내진설계 ((사) 한국지반공학회))

건축물의 지하구조 내진설계 지침 ((사) 대한건축학회))

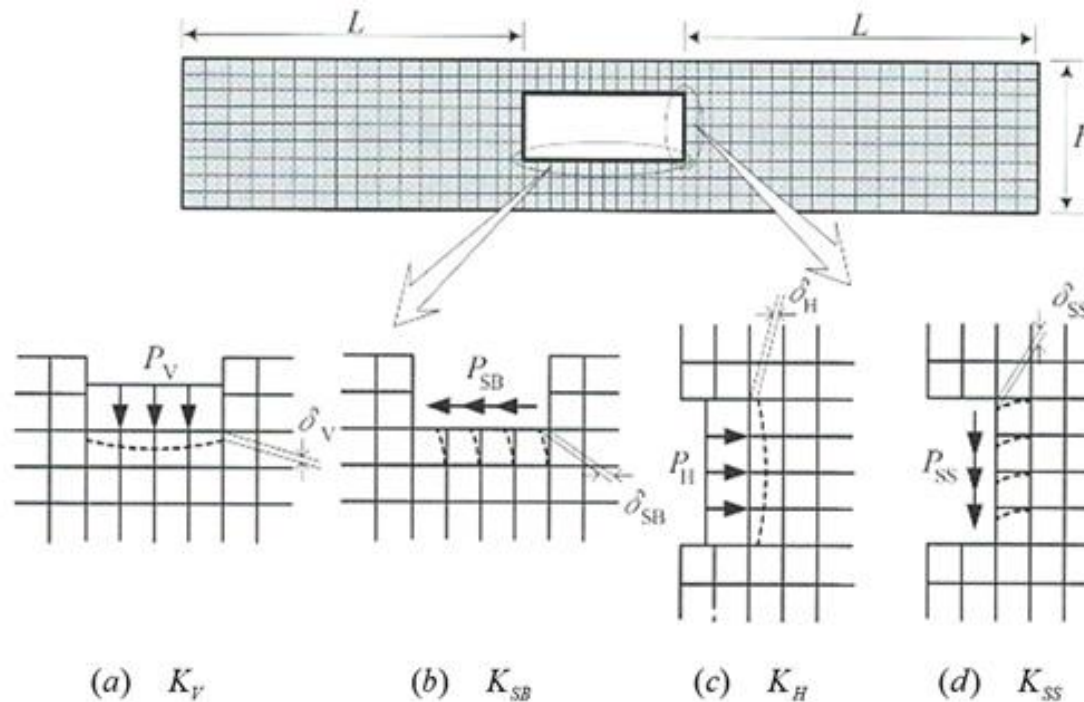
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.3 응답변위법

지반반력계수를 구하는 방법 : 관용적 방법과 2차원 유한요소해석에 의한 방법

$$K = \frac{\sum P}{\delta}$$

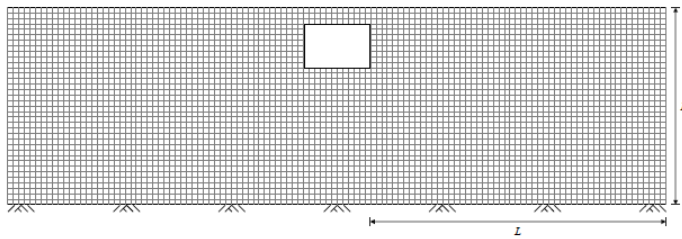
< 2차원 유한요소해석법 >



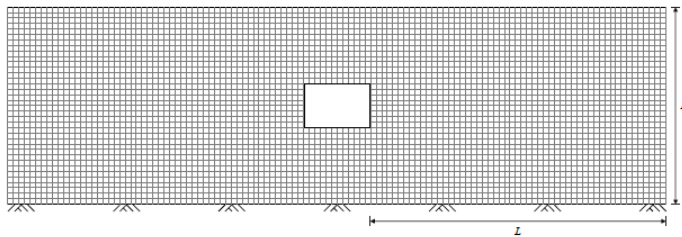
## 4. 지진토압 산정방법

### 4.3 응답변위법

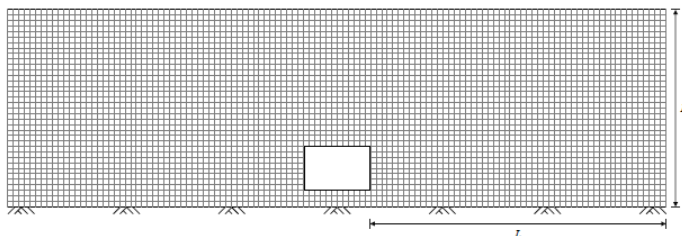
지반반력계수를 구하는 방법 : 해석결과를 바탕으로 지반반력계수를 제안



(a) 지표면으로부터 기반면까지의 깊이( $H$ )의  $1/3$  이내에 위치한 토사에 대한 지반반력계수 산정



(b)  $H/3 \sim 2H/3$ 에 위치한 토사에 대한 지반반력계수 산정



(c)  $2H/3 \sim$ 기반면에 위치한 토사에 대한 지반반력계수 산정

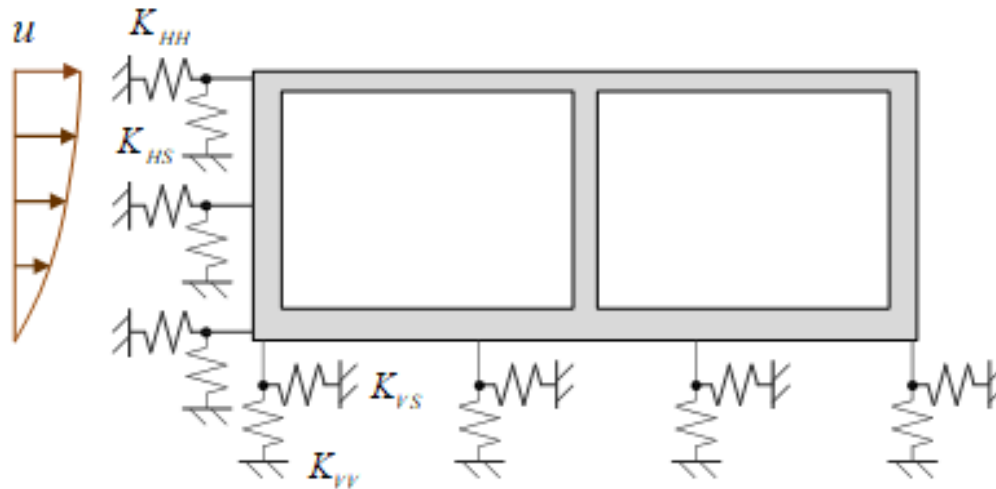
$V_s$ (m/s)	질량밀도 ( $\text{ton/m}^3$ )	프아송 비	전단탄성계 수(kPa)	탄성계수 (kPa)	수평지반반력계수, $K_H$ ( $\text{kN/m}^3$ )		
					지표면 ~ $H/3$	$H/3 \sim$ $2H/3$	$2H/3 \sim$ 기반면
100	1.8	0.4	18000	50400	4082	5695	8770
200	1.8	0.4	72000	201600	16360	22725	34997
300	1.8	0.4	162000	453600	36809	51130	78743
400	1.9	0.4	304000	851200	69074	95948	147764
500	1.9	0.4	475000	1330000	107929	149919	230881
600	1.9	0.4	684000	1915200	155417	215883	332469
700	2.0	0.4	980000	2744000	222673	309307	476345

## 4. 지진토압 산정방법

### 4.3 응답변위법

- 5) 지하구조물과 이를 둘러싼 지반의 영향을 고려한 지반반력계수가 적용된 해석모델에 지진시 예상되는 지반의 변위를 가하여 스프링모델의 압축력으로 부터 토압을 계산
- 6) 지하구조물이 강체로 가정되는 경우는 다음의 식을 사용할 수 있다.

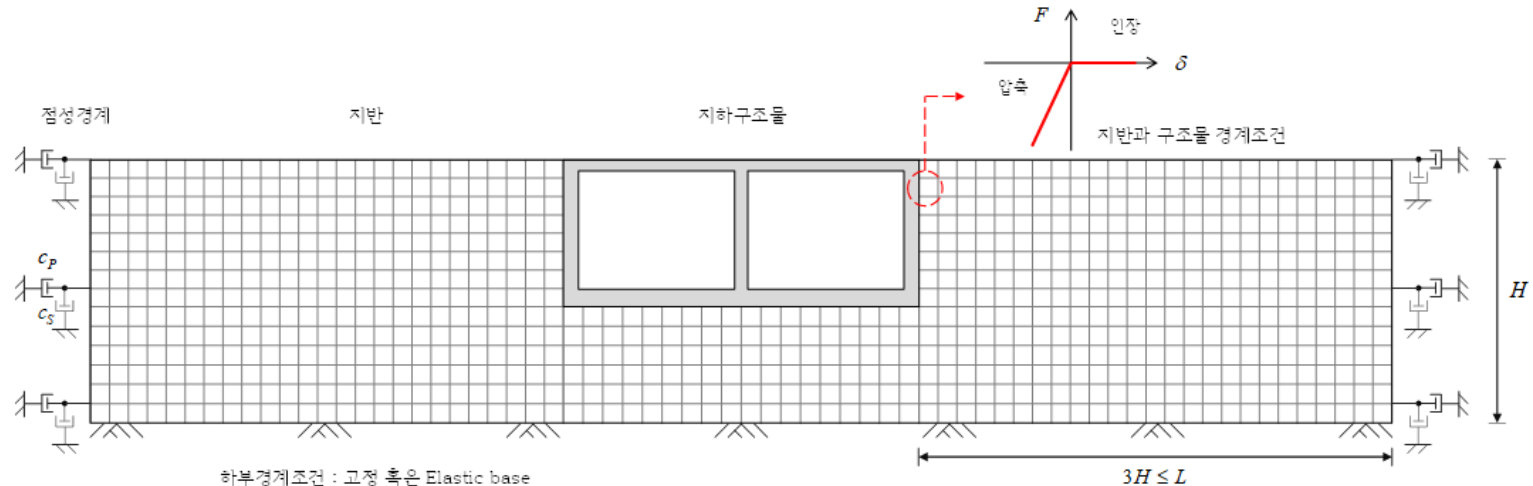
$$p(z) = K_H \times \{u(z) - u(z_B)\}$$



## 4. 지진토압 산정방법

### 4.4 시간이력해석법

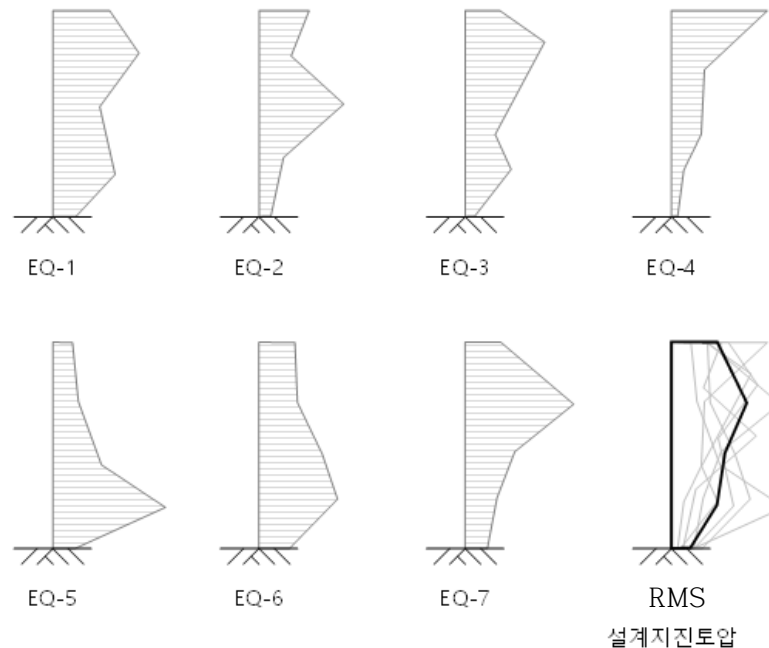
- 1) 지반조건, 지하구조물을 수치해석적으로 모사하고, 실제 지진기록을 입력하는 동적해석을 바탕으로 구조물에 작용하는 지진토압을 직접 구하는 방법
- 2) 본 지침에는 시간이력해석법 적용시 고려해야할 사항에 대하여 기술하고 있음
  - 1) 암반가속도 시간이력
  - 2) 지반 모델링 : mesh의 최대 크기
  - 3) 지반과 지하구조물의 강성과 감쇠 고려
  - 4) 경계조건



## 4. 지진토압 산정방법

### 4.4 시간이력해석법

- 3) 각 시간간격의 해석시점에서 지하구조물에 작용하는 지진토압의 합을 구하고, 지진에 의하여 지하층에 최대 수평력이 작용하는 시점과 그 때 지진토압의 분포를 구함
- 4) 7개 지진에 대하여 각 심도별 지진토압을 제곱평균제곱근(RMS) 조합하여, 설계 지진토압을 구함



설계지진토압



## 소 결

---

1. 본 지침이 적용되는 건축지하구조물 정의
2. 지하구조물 내진설계 일반사항으로 중요도계수, 지진력저항시스템, 하중조합, 지하구조물을 고려한 지진해석 및 내진설계 방법을 명시함
3. 상부구조물 지진하중에 대한 지반과 지하층의 영향으로 **대표지반증폭계수** 산정과 강성이 큰 지하층을 고려하여 지반증폭계수를 저감하는 **유효지반증폭계수** 명시
4. 지진토압 산정방법으로 **등가정적법, 응답변위법, 시간이력해석법**의 적용범위와 제한사항을 기술

경청해주셔서 감사합니다.