

Inelastic Seismic Response Assessment of Short Period Structures Subjected to High-Frequency Earthquakes

‘18. 5. 18.

Ju-Hyung Kim*, Hyeon-Keun Yang, Jang-Woon Baek, Hong-Gun Park

00. 목차

01. 연구 소개

1.1 연구 배경

- 확률론적 지진 안전성 평가 절차
- 지진 취약도 평가 절차
- 지진 취약도 평가의 변수

1.2 연구 필요성

02. 연구 내용

2.1 비탄성 에너지 흡수계수 (F_{μ})

2.2 국내 지진 특성

2.3 지진 특성에 따른 비탄성 에너지 흡수계수

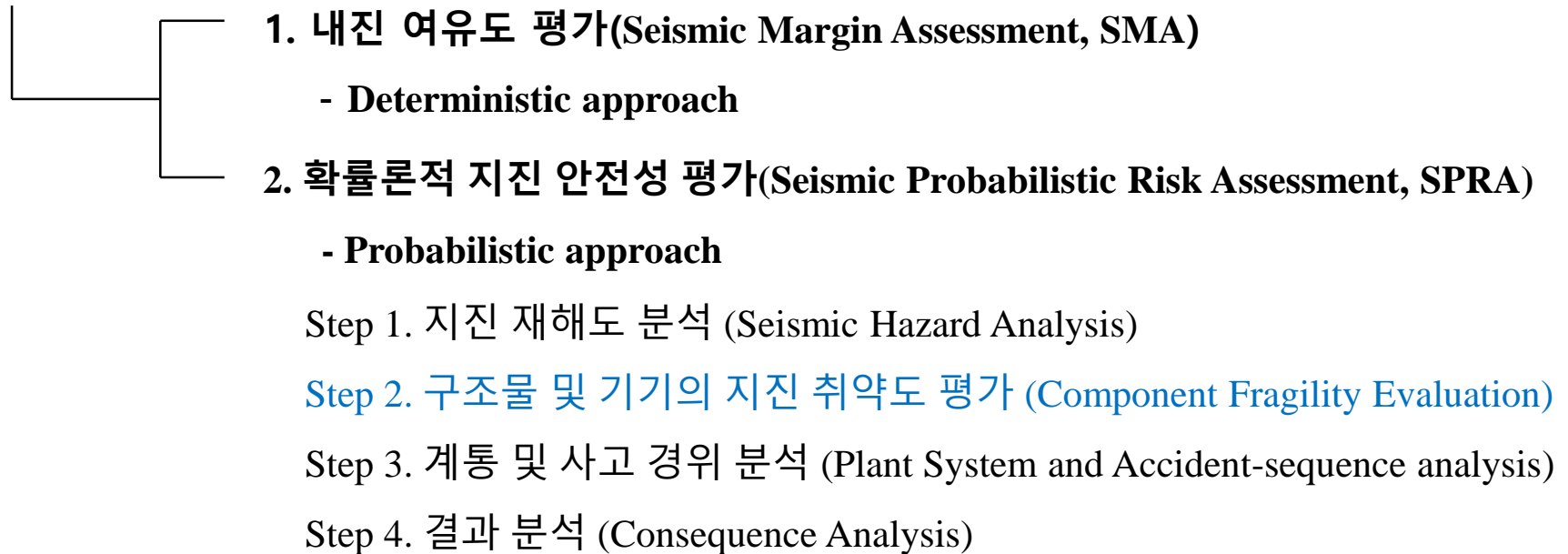
- 근거리 지진의 특성
- 지진파의 진동수 성분
- 강진 지속시간의 영향

03. 결론

01. 연구 배경

: 경주 지진 이후 원전 구조물의 설계 초과 지진에 대한 지진 안전성 평가 방법 검토 필요성

원전 구조물의 지진 안전성 평가 방법



국내의 평가기준: KEPIC (해외의 평가 기준 참조하여 반영)

확률론적 지진 안전성 평가 (구조 분야: 취약도 평가)의 국내 기준 및 지침 개발 필요성

01. 연구 배경

: 현행 지진 취약도 분석 절차 검토 및 연구 방향 설정

지진 취약도 분석 Seismic Fragility Analysis (Approximate Second Moment Procedure)

취약도 변수 Fragility Parameters (Random Variable - Factor of Safety)

$A = F A_{SSE}$ (A : Actual ground motion acceleration capacity) SSE: Safe shutdown Earthquake

$$F = \frac{\text{Actual seismic capacity of element}}{\text{Actual response due to SSE}}$$

$$F = \frac{\text{Actual seismic capacity of element}}{\text{Design response due to SSE}} \times \frac{\text{Design response due to SSE}}{\text{Actual response due to SSE}}$$

Capacity Factor (F_C) X *Structural Response Factor (F_{SR})*

For structures, $F = F_S F_\mu F_{SR}$

Strength Factor *Inelastic Energy Absorption Factor* *Structural Response Factor*

01. 연구 배경

구조물의 지진 취약도 변수 Fragility Parameters (Random Variable - Factor of Safety)

$$A = F A_{SSE} \quad (A: \text{Actual ground motion acceleration capacity})$$

For structures, $F = F_S F_\mu F_{SR}$

Strength Factor
(Capacity variable)

Inelastic Energy Absorption Factor
(Capacity variable)

Structural Response Factor
(Demand variable)

The ratio of ultimate strength to the stress calculated for A_{SSE}

Structures or equipments are capable of absorbing substantial amounts of energy beyond yield w/o loss-of-function.

$$F_{SR} = F_{SA} F_{GMI} F_\delta F_M F_{MC} F_{EC} F_{SSI}$$

F_{SA} = Spectral shape

F_{GMI} = Ground motion incoherence

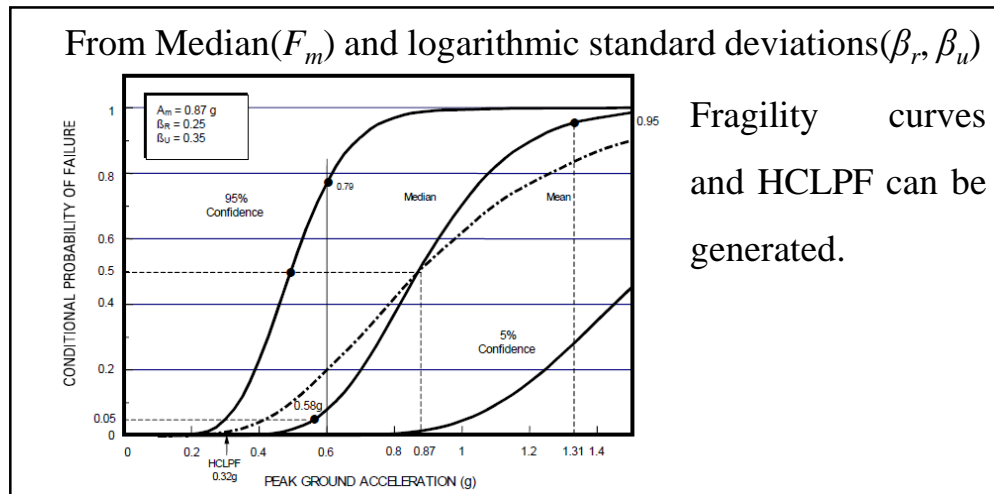
F_δ = Damping

F_M = Modeling assumptions

F_{MC} = Mode combination

F_{EC} = Earthquake component combination

F_{SSI} = Soil-structure interaction

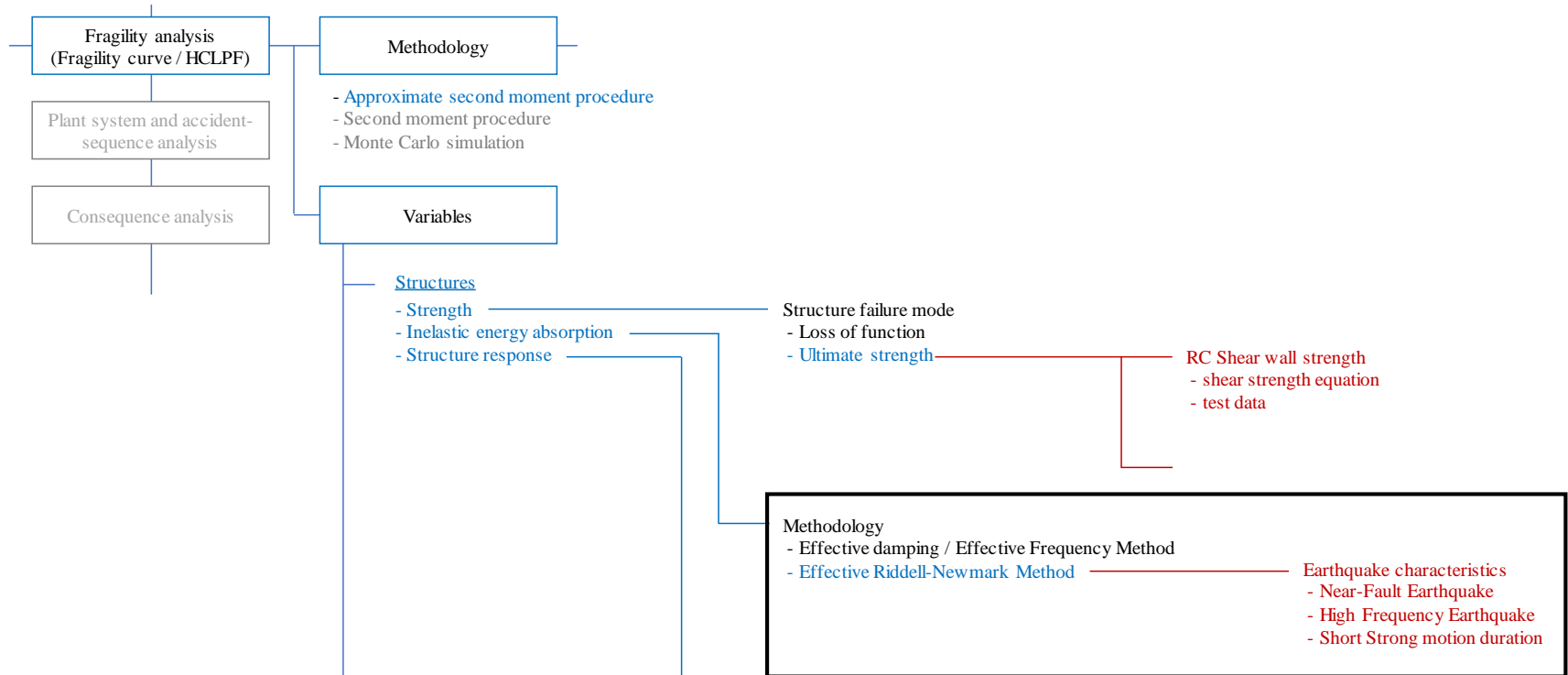


01. 연구 배경

구조물의 지진 취약도 변수 Fragility Parameters (Random Variable - Factor of Safety)

$$A = F A_{SSE} \quad (A: \text{Actual ground motion acceleration capacity})$$

For structures, $F = F_S F_\mu F_{SR}$



01. 연구 배경

저주기 구조물의 비탄성 에너지 흡수 계수(F_{μ}) 평가 = Strength Reduction Factor (R)

- 원전 구조물의 탄성 설계 결과를 바탕으로 설계 초과지진 발생 시 비탄성 응답을 고려하여 내진 성능을 평가하기 위한 계수
- 구조물 및 기기의 취약도 평가 결과에 상대적으로 큰 영향을 미치는 변수

연구 목표

(1차) 평가 식에 대한 검토 / (2차) 개선 방안

현행 지진 취약도 분석에서 비탄성 에너지 흡수계수(F_{μ}) 평가 방법

EPRI TR-103959(1994): Methodology for Developing Seismic Fragilities

METHOD I

METHOD II

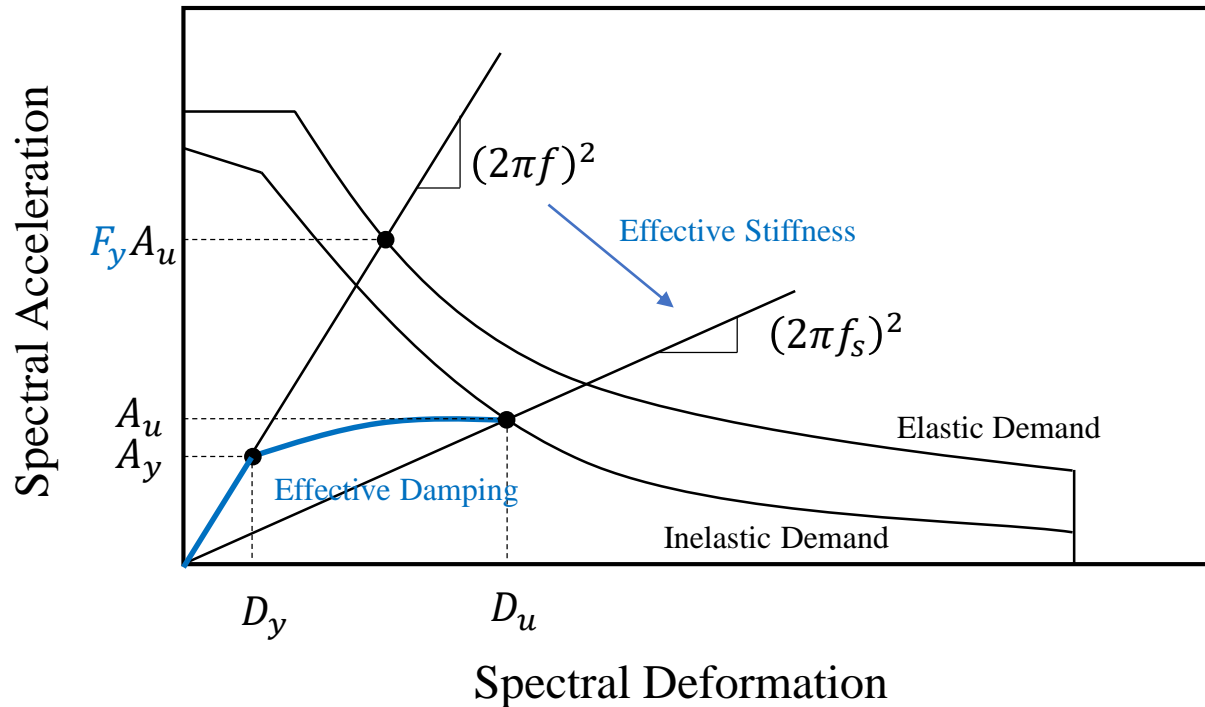
Effective Frequency / Effective Damping

Effective Riddell-Newmark

두 가지 방법을 모두 인정하고 있으며 두 방법을 통해 계산된 값의 평균으로 비탄성에너지 흡수계수 (F_{μ}) 결정
두 방법은 서로 다른 가정을 적용하여 계산

01. 연구 배경

METHOD I: Effective Frequency / Effective Damping Method



등가의 탄성 강성(secant stiffness) &

비탄성 구조물의 에너지 소산량과 동일한 등가의 점성 감쇠를 갖는 탄성 구조물로 치환

→ CSM(Capacity Spectrum Method) 방법과 동일

01. 연구 배경

METHOD II: Effective Riddell-Newmark Method ($R-\mu-T$ relation)

Riddell-Newmark(1979) – 10 earthquake ground motions recorded on rock and alluvium sites.

Elghadamsi and Mohraz(1987) – considered the effect of soil conditions. This study concluded that deamplification factors are not significantly influenced by soil conditions.

Nassar and Krawinkler(1991) – the epicentral distance, yield level, strain hardening and the type of inelastic material behavior was examined. The study concluded that epicentral distance and stiffness degradation have a negligible influence on strength reduction factors.

Miranda(1993) – ground motions were classified into three groups. (rock, alluvium, soft soil)

다양한 평가 식 존재 → 지진에 의한 지반 운동의 불확실성

01. 연구 배경

METHOD II: Effective Riddell-Newmark Method

Riddell-Newmark(1979) - $R_\mu = f(\mu, T, \beta)$

$$0 \leq T < 0.0303s \quad R_\mu = 1$$

$$0.0303 \leq T < 0.125s \quad R_\mu = (pa\mu - qa) r_a \left[\frac{1}{8T} \right]^{1.625 \log[(pa\mu - qa)^{-ra}]}$$

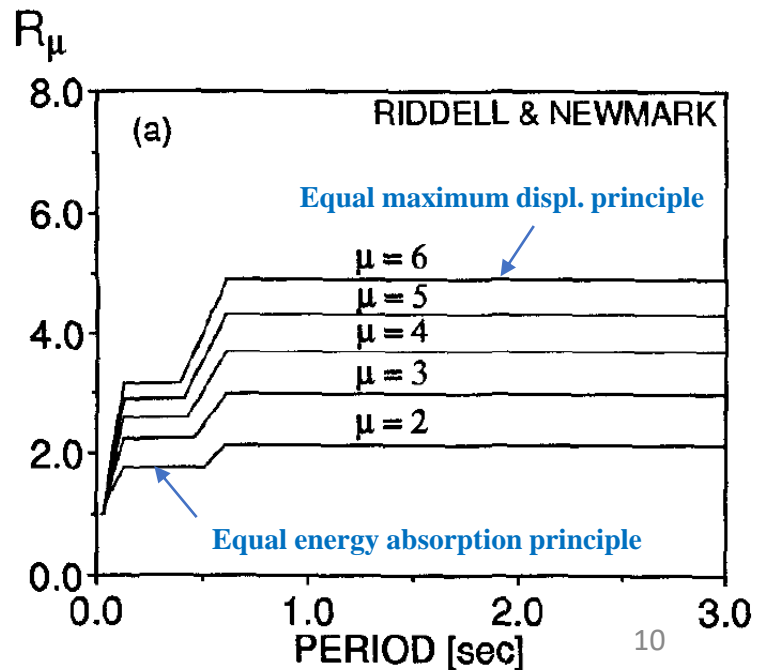
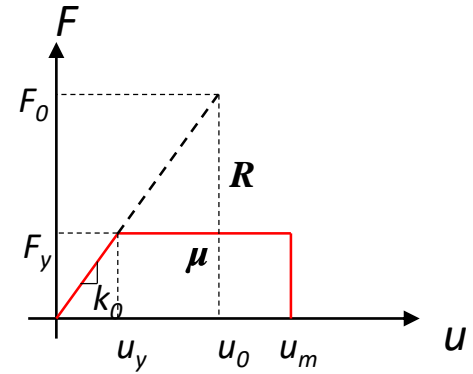
$$0.125 \leq T < T'_1 \quad R_\mu = (pa\mu - qa) r_a \quad R_\mu$$

$$T'_1 \leq T < T_1 \quad R_\mu = \frac{T}{T_1} (pv\mu - qv) r_v$$

$$T_1 \leq T < T'_2 \quad R_\mu = (pv\mu - qv) r_v$$

$$T'_2 \leq T < T_2 \quad R_\mu = \frac{T}{T_2 p_d \mu^{-rd}}$$

$$T_2 \leq T < 10.0s \quad R_\mu = \frac{T}{p_d \mu^{-rd}}$$



01. 연구 배경

METHOD II: Effective Riddell-Newmark Method

EPRI Effective Riddell-Newmark(1994) – $F_\mu = f(\mu, T, \beta, \text{strong motion dur., yield stiffness ratio})$ Failure mode: Loss of function

$$0 \leq T < 0.0303s \quad F_{\mu 4} = \frac{Sa(f, \beta)}{pga} \mu'^\alpha \quad (\text{극단주기 영역})$$

$$0.0303 \leq T < 0.125s \quad R_\mu = (pa\mu - qa)^{r_a} \left[\frac{1}{8T} \right]^{1.625 \log[(pa\mu - qa)^{-ra}]}$$

$$0.125 \leq T < T'_1 \quad F_{\mu 3} = (pa\mu' - qa)^{r_a} \quad (\text{가속도 증폭 영역})$$

$$T'_1 \leq T < T_1 \quad F_{\mu 2} = \frac{T}{T_1} (pv\mu' - qv)^{r_v} \quad (\text{속도 증폭 영역})$$

$$T_1 \leq T < T'_2 \quad F_{\mu 2} = (pv\mu' - qv)^{r_v}$$

$$T'_2 \leq T < T_2 \quad R_\mu = \frac{T}{T_2 p_d \mu'^{-rd}} \quad F_{\mu'} = \max(F_{\mu 2}, \min(F_{\mu 3}, F_{\mu 4}))$$

$$T_2 \leq T < 10.0s \quad R_\mu = \frac{T}{p_d \mu'^{-rd}} \quad F_\mu = 1 + C_D (F'_{\mu} - 1)$$

$C_D = 0.6 \sim 1.0$

Long strong motion duration

Short strong motion duration

02. 연구 내용

METHOD II: Effective Riddell-Newmark Method (결과적으로 근거리 지진에 더 적합한 방법

등가 점성 감쇠 / 강성 가정하는 Method I은

2016. 9. 12 경주 지진 - 월성 원전 (27km) 근거리 지진의 응답 평가에 적합하지 않을 수 있음)

2017. 11. 15 포항 지진 - 월성 원전 (45km)



원전 부지 근거리 지진 (Near-Fault Earthquake) 발생 가능성

- Pulse type(velocity) ground motion
- High frequency earthquake (원전-암반지반)
- Short strong motion duration (less than 6 sec)

02. 연구 내용

Chi-Chi Earthquake ground motion data

KAERI TR-2745(2004)- 근거리 지진에 대한 철골 구조물의 비탄성 응답 특성 분석

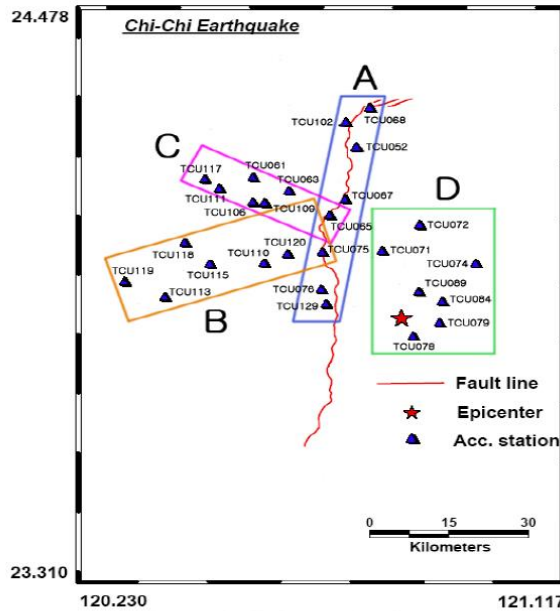
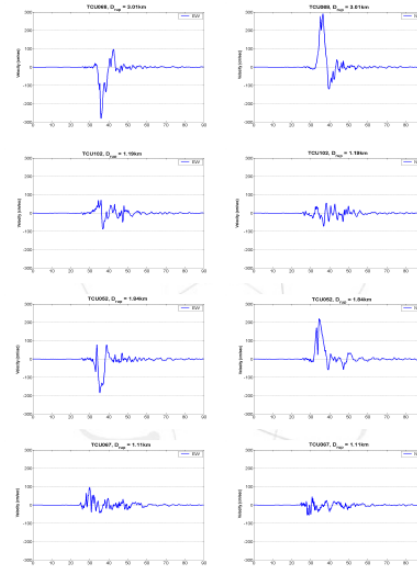
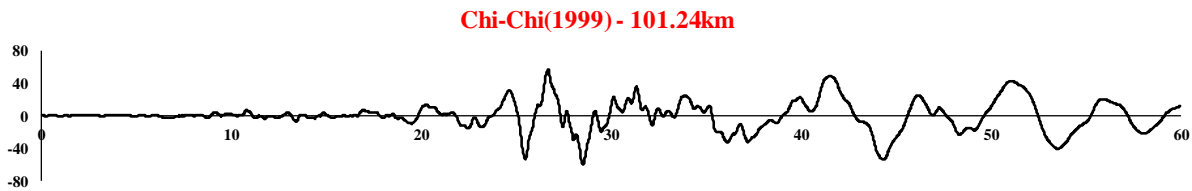


그림 2.1 Chelungpu 단층선과 지진 계측점의 위치



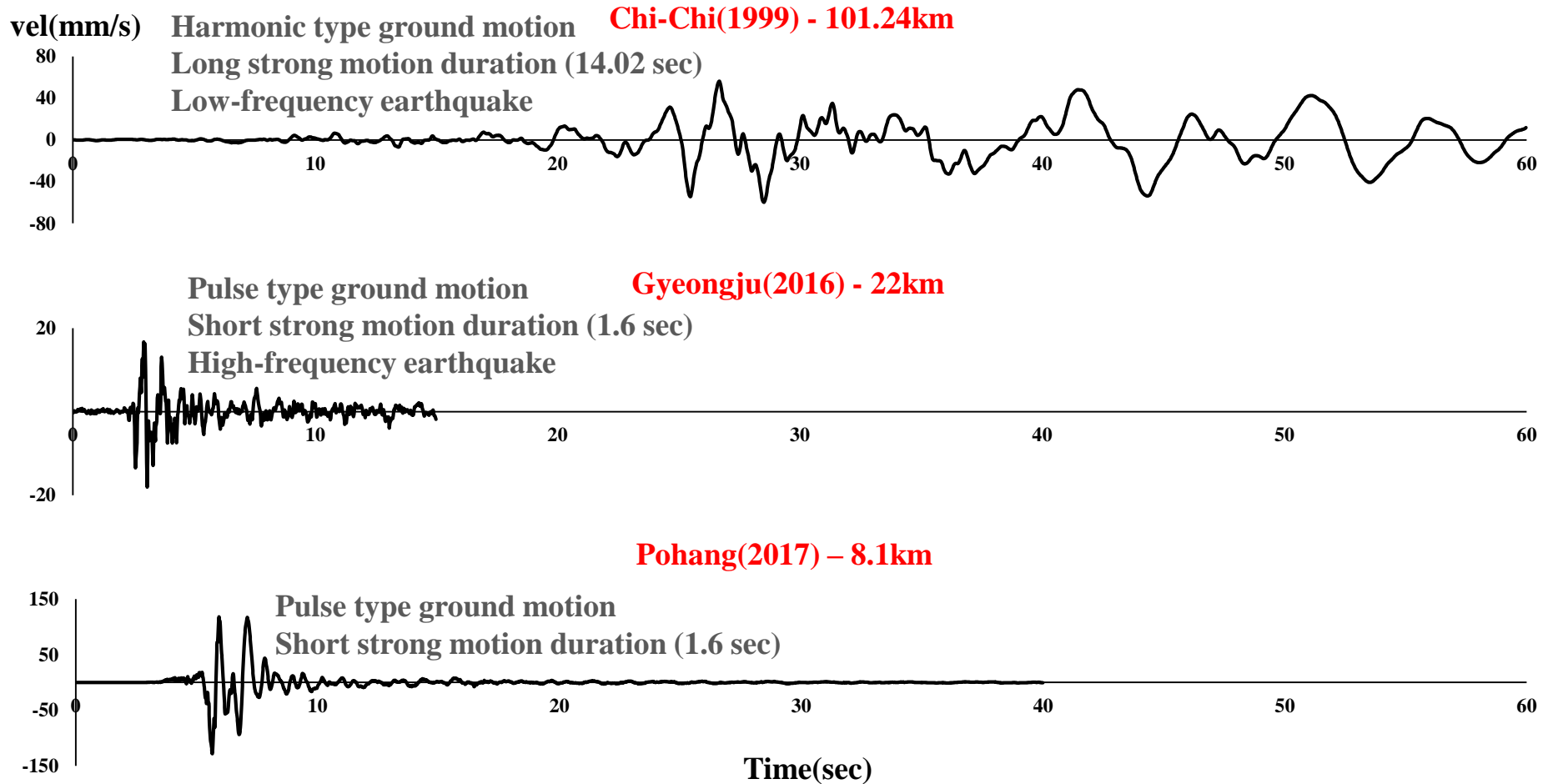
(a) EW (b) NS

그림 2.2 A 지역에 포함된 계측점들의 동서 및 남북 방향 성분 에 대한 속도 시간이력



02. 연구 내용

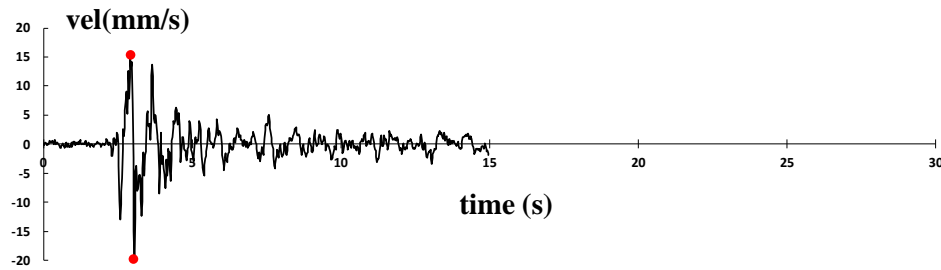
Velocity history of three earthquake records



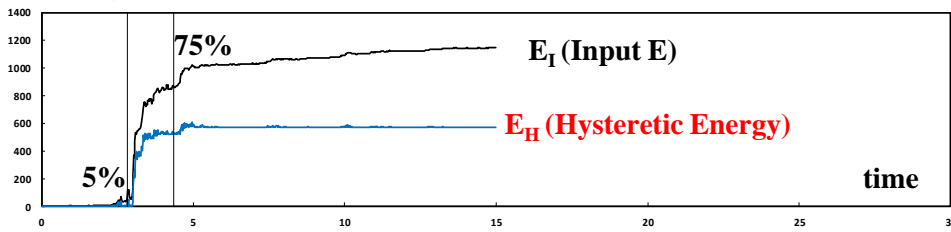
02. 연구 내용

Method II(Effective Riddell-Newmark Method) : 근거리 지진 응답 표현에 더 적합

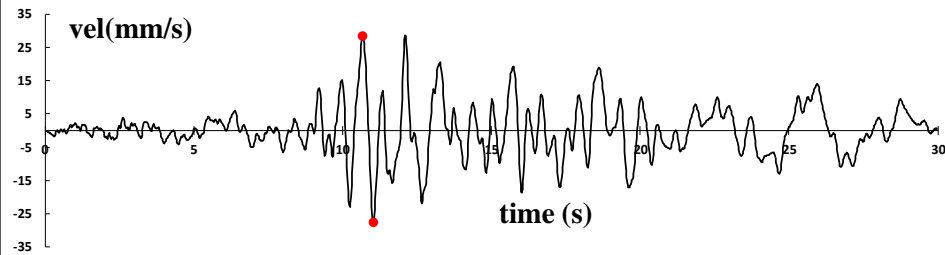
Near-fault EQ (Gyeongju)



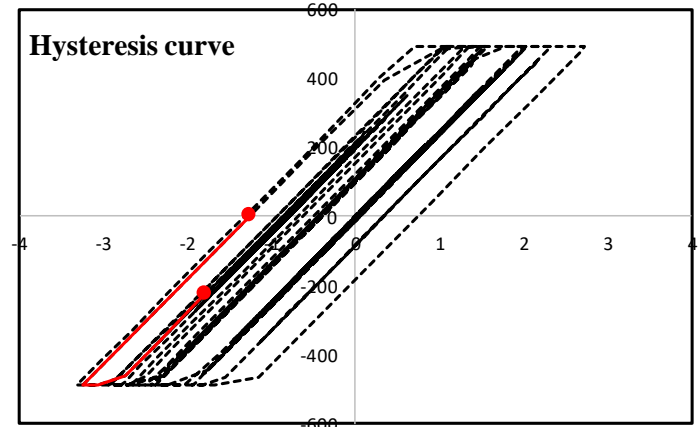
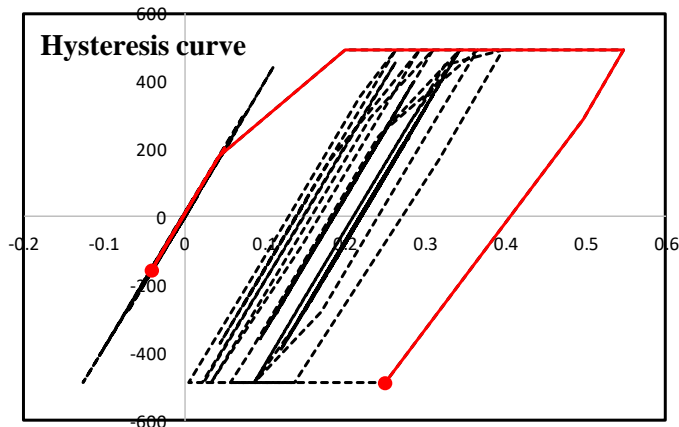
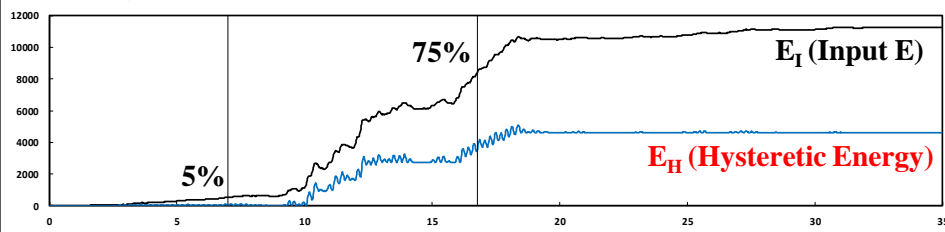
Energy 1 cycle 내에서 구조물 에너지 흡수



Far-fault EQ (Montenegro)



Energy 여러 cycle에 걸쳐 구조물 에너지 흡수



02. 연구 내용

R- μ -T Relationship

Ground motion database (30)

Near-fault ground motions (15)

Far-fault ground motions (15)

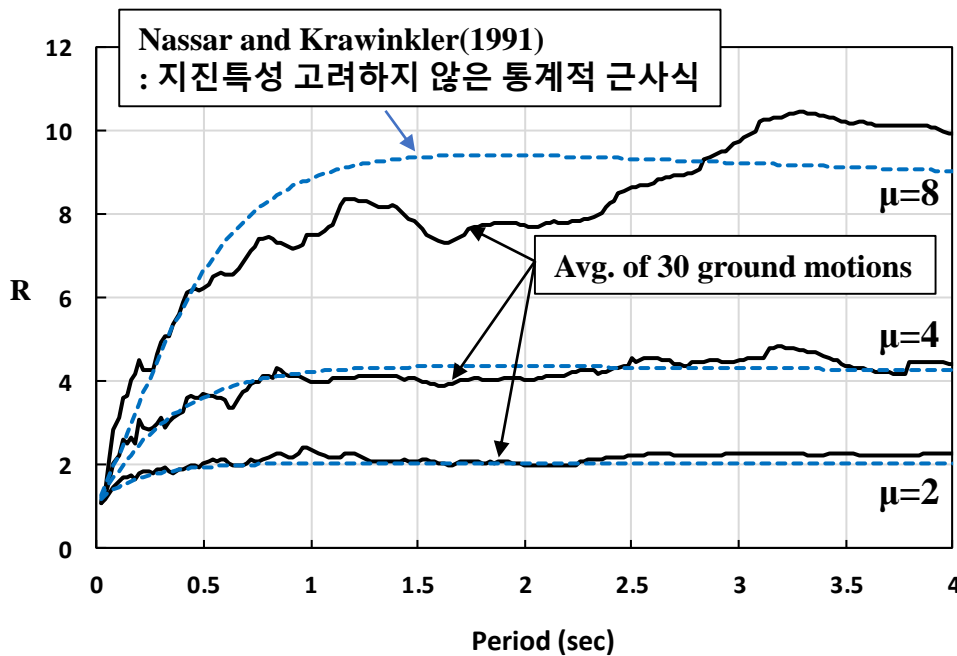
No.	Year	Earthquake	M	Station	Rjb(km)
1	1989	Loma Prieta	6.93	Gilroy Array #1	2.8
2	1971	San Fernando	6.61	Pacoima Dam	0
3	1978	Tabas	7.35	Tabas	1.79
4	1992	Landers	7.28	Lucerne	2.19
5	1999	Kocaeli	7.51	Gebze	7.57
6	1999	Kocaeli	7.51	Izmit	3.62
7	1989	Loma Prieta	6.93	Los Gatos	3.22
8	2000	Tottori	6.61	OKYH07	15.23
9	2000	Tottori	6.61	SMNH10	15.58
10	2004	Parkfield-02	6	Parkfield – Turkey flat	4.66
11	1976	Friuli	5.3	Tarcento	8
12	1977	Friuli	5.4	Somplago Centrale	9
13	1979	Montenegro	6.9	Ulcinj-Hotel Albatros	21
14	1979	Montenegro	5.1	Ulcinj-Hotel Albatros	8
15	2016	Gyeongju	5.8	DKJ	22

No.	Year	Earthquake	M	Station	Rjb(km)
1	1971	San Fernando	6.61	Cedar Springs	89.72
2	1987	Whittier Narrows	5.99	LA-Wonderland Ave	23.4
3	1989	Loma Prieta	6.93	Point Bonita	83.37
4	1999	Chi-Chi	7.62	ILA001	101.24
5	1999	Chi-Chi 02	5.9	CHY102	78.6
6	1987	Whittier Narrows	5.27	LA-Wonderland Ave	25.04
7	1999	Hector Mine	7.13	LA-Griffith Park Obs.	185.92
8	2004	Niigata	6.63	TCGH14	100.37
9	1979	Montenegro	6.9	Croatia	105
10	1979	Montenegro	6.9	Titograd	55
11	1979	Montenegro	5.8	Titograd	50
12	1990	Griva	6.1	Veria-Cultural center	51
13	1993	Near coast of Filiatra	5.2	Kyparrisia - OTE bldg.	27
14	1995	Kozani	6.5	Veria-Cultural Center	60
15	1997	Strofades	6.6	Koroni-Town hall	136

(붉은 글씨: 고주파 지진) (FFT: 10Hz ↑)
 (밑줄: 강진 지속시간 6초 이상의 지진) (Duration{Arias Intensity 5%~75%} > 6sec)
 모든 지진의 전단파속도 760m/s 이상

02. 연구 내용

R- μ -T Relationship



- 1) Pulse type of ground motion
: TR-103959, KEPIC 구분하지 않음
- 2) Frequency component
: TR-103959, KEPIC 구분하지 않음
- 3) Strong motion duration
: TR-103959, C_D factor

$$F_{\mu} = 1 + C_D(F'_{\mu} - 1)$$

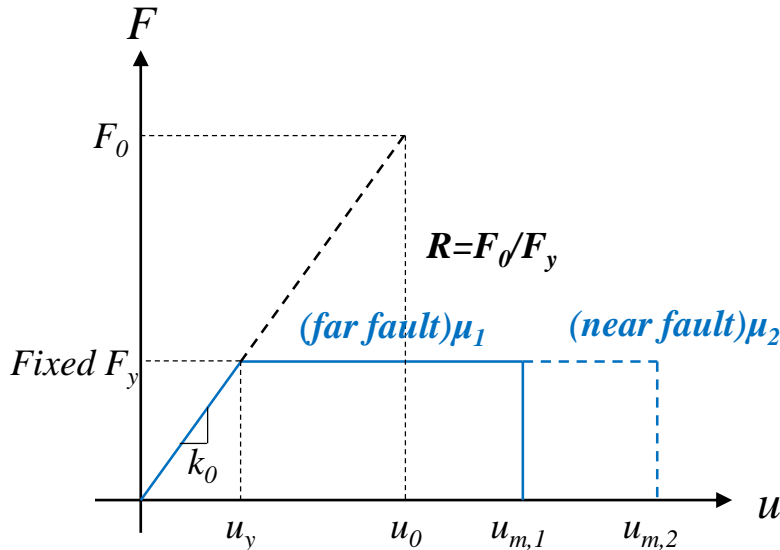
$$C_D = 0.6 \sim 1.0$$

02. 연구 내용

R- μ -T Relationship

Near-Fault EQ \leftrightarrow Far-Fault EQ

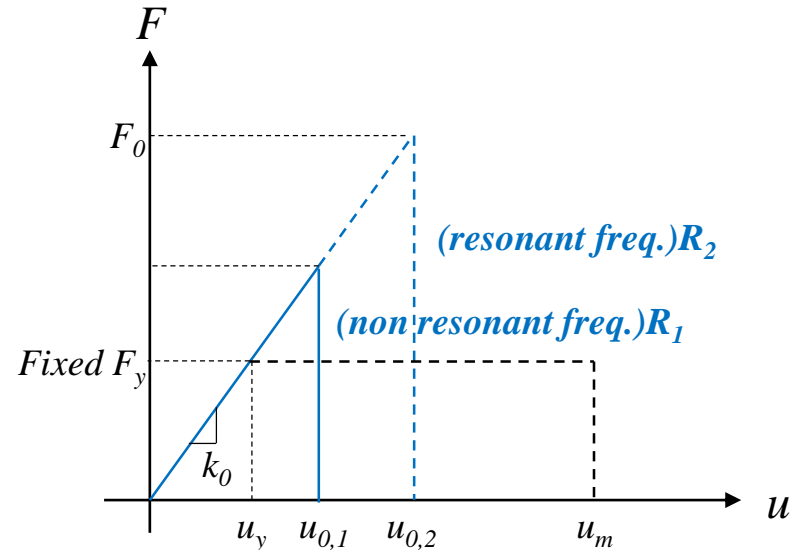
- *Inelastic Behavior*
- *Energy Dissipation*



- 동일한 항복 강도의 구조물 가정 (Fixed F_y)
- 근거리 지진 1cycle Energy demand \uparrow
- Ductility demand (μ) \uparrow
- (동일 R 에 대하여 더 큰 ductility demand (μ))
- 같은 ductility demand에 대하여 상대적으로 **R 감소**

High Freq. EQ \leftrightarrow Low Freq. EQ

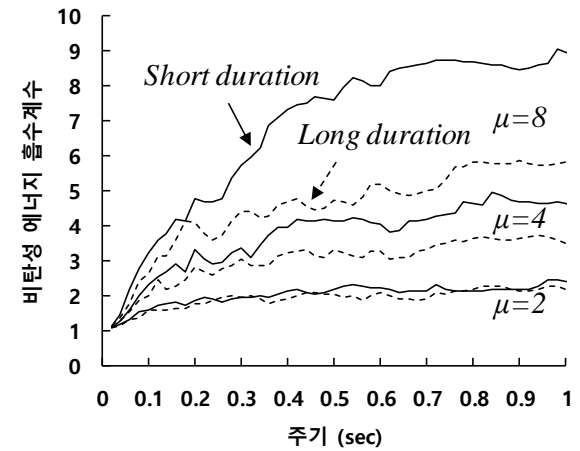
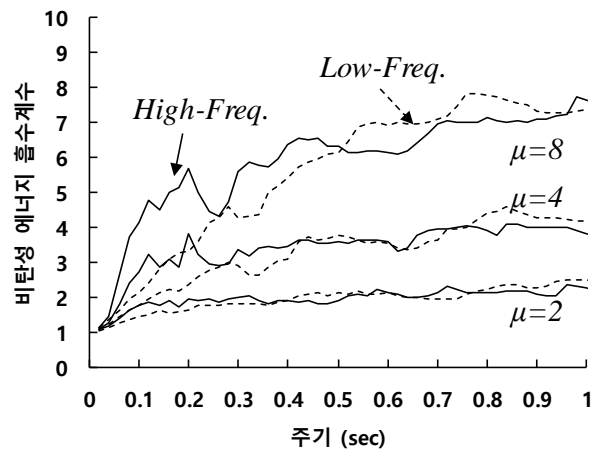
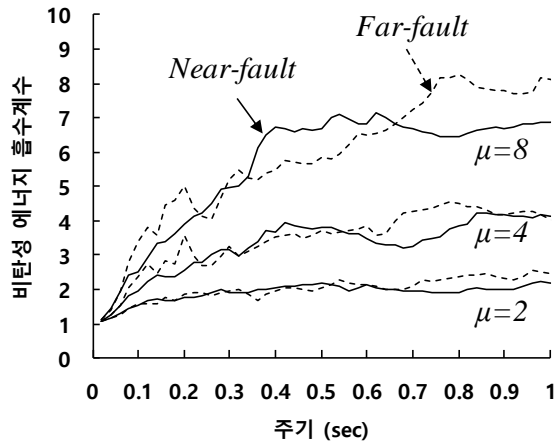
- *Elastic Behavior*
- *Resonant Frequency*



- 탄성 구조물 가정
- 구조물 고유 주기와 유사한 지진 발생하면 탄성 변위 \uparrow
- 비선형 거동이 동일한 경우 탄성구조물의 공진 현상에 의해 해당 진동수 영역에서 반응수정계수 **R 증가**

02. 연구 내용

R- μ -T Relationship

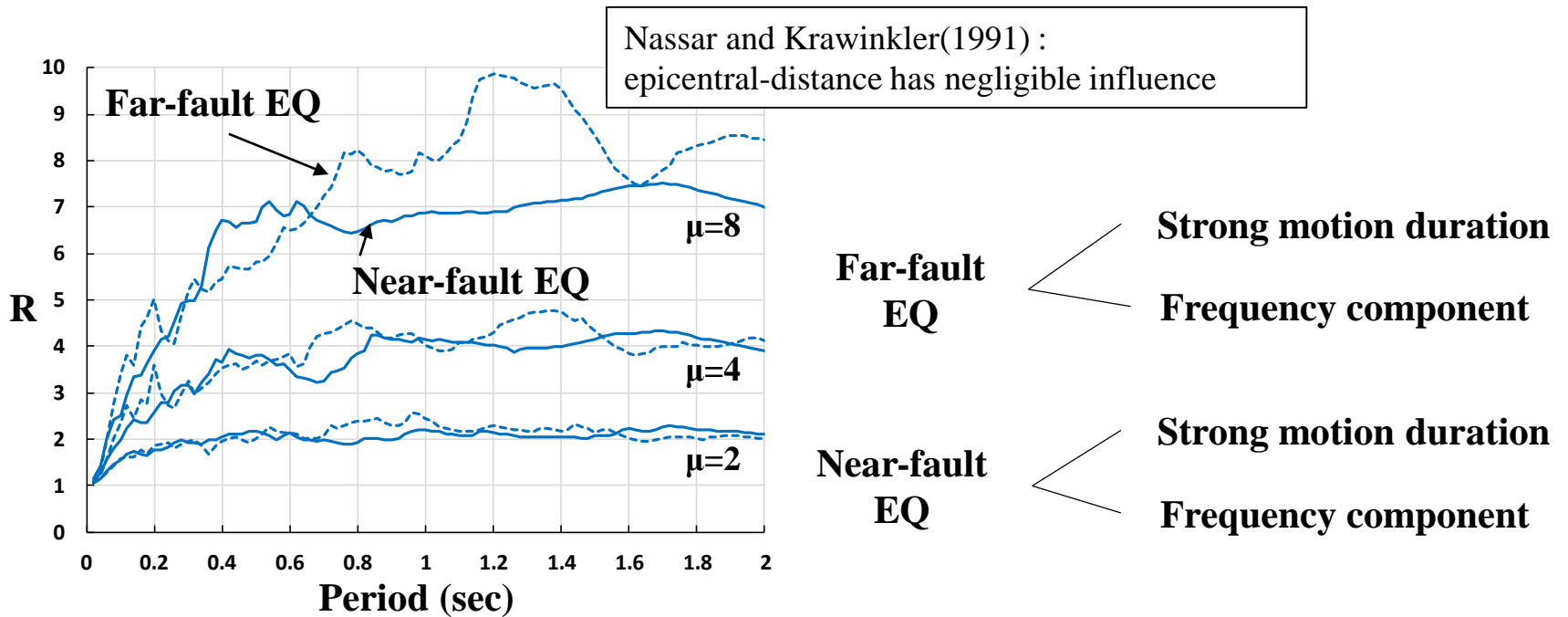


Near-fault, High-Freq, Short duration EQ → ?

02. 연구 내용

R- μ -T Relationship

Near-fault EQ vs Far-fault EQ

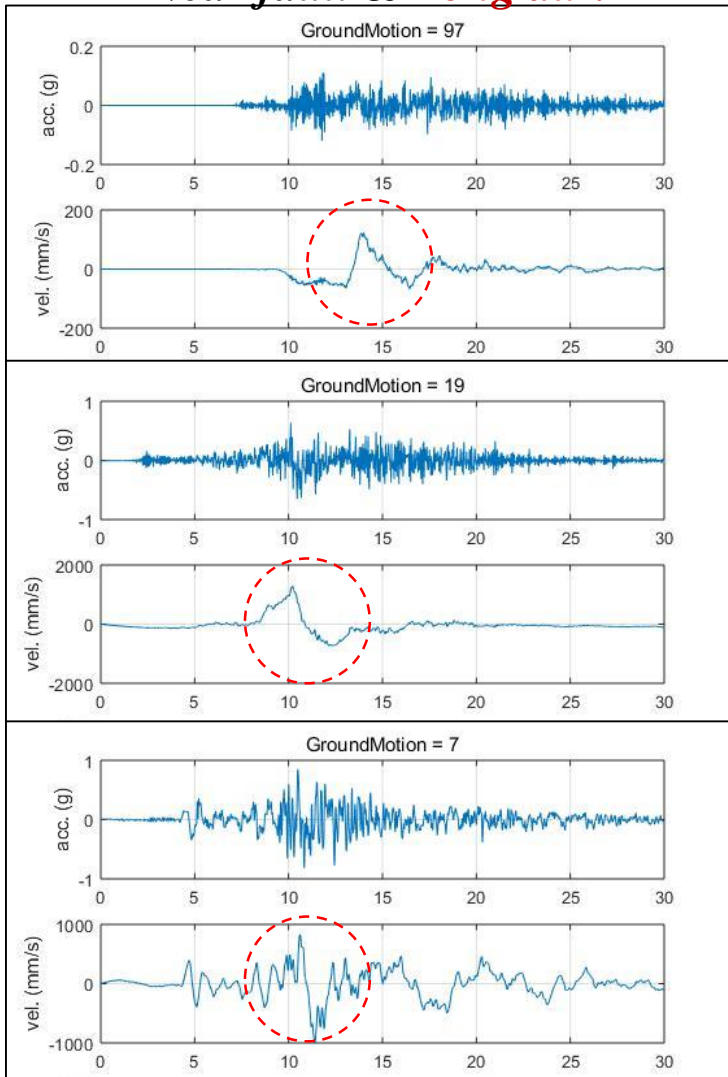


- 1) 근거리 지진의 R factor는 원거리 지진에 비해 전반적으로 유사하거나 조금 작은 경향
- 2) 근거리 지진은 strong motion duration에 따라 dominant pulse 의 형태 변화로 강진 지속시간에 대한 비탄성 에너지 흡수 계수의 변화가 원거리 지진에 비해 크게 나타날 것으로 예상

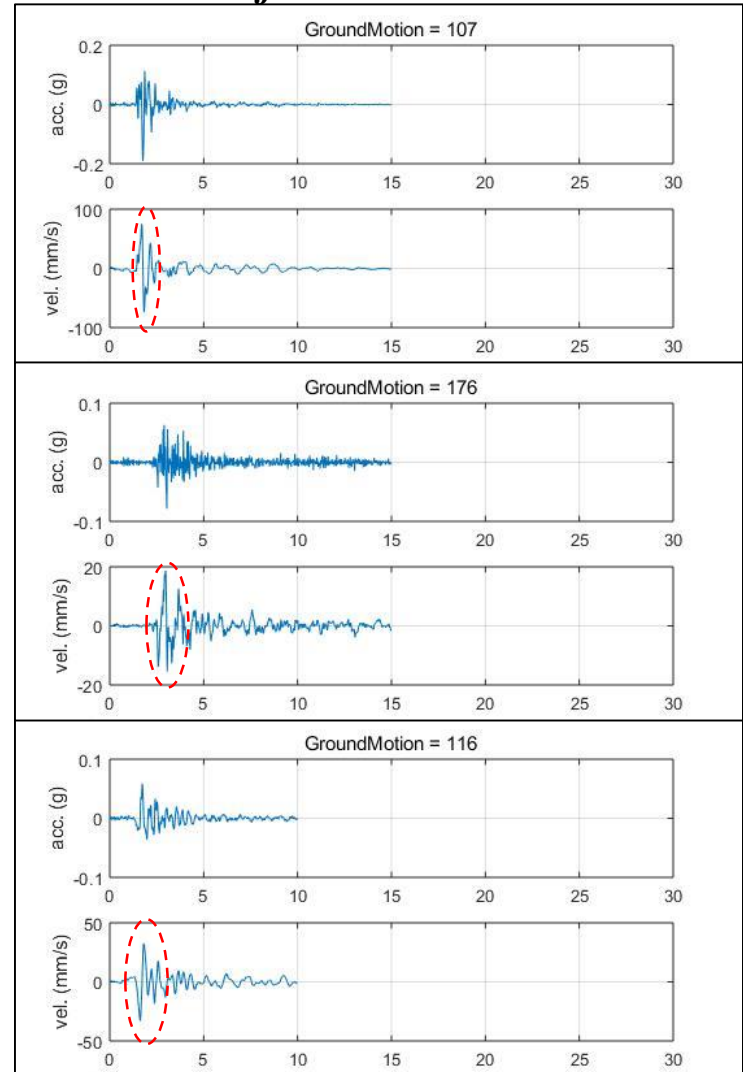
02. 연구 내용

근거리 지진의 강진 지속시간(Strong ground motion duration)의 영향

Near fault & Long dur.



Near fault & Short dur.

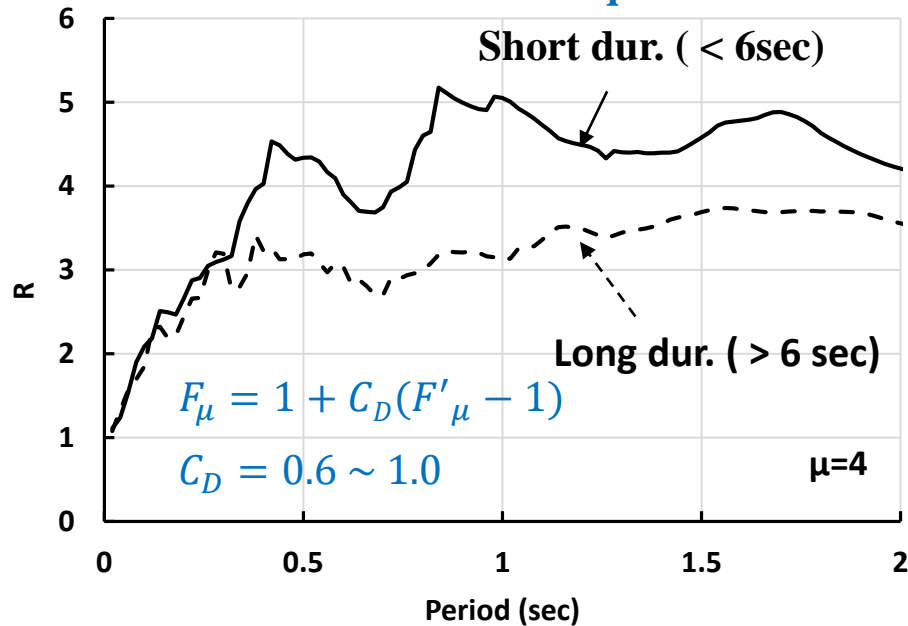


02. 연구 내용

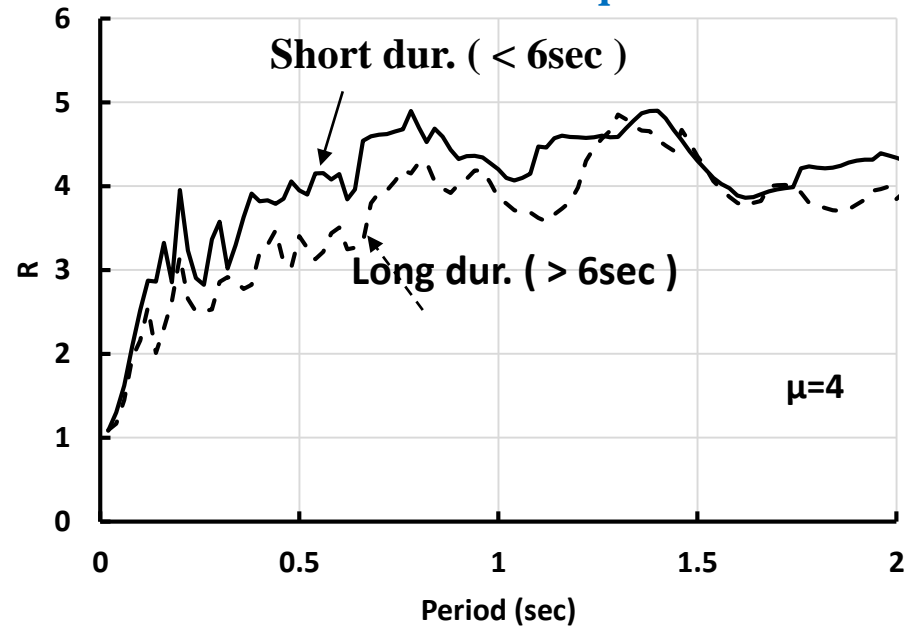
R- μ -T Relationship

강진 지속시간(Strong ground motion duration)의 영향

Near-fault Earthquake



Far-fault Earthquake

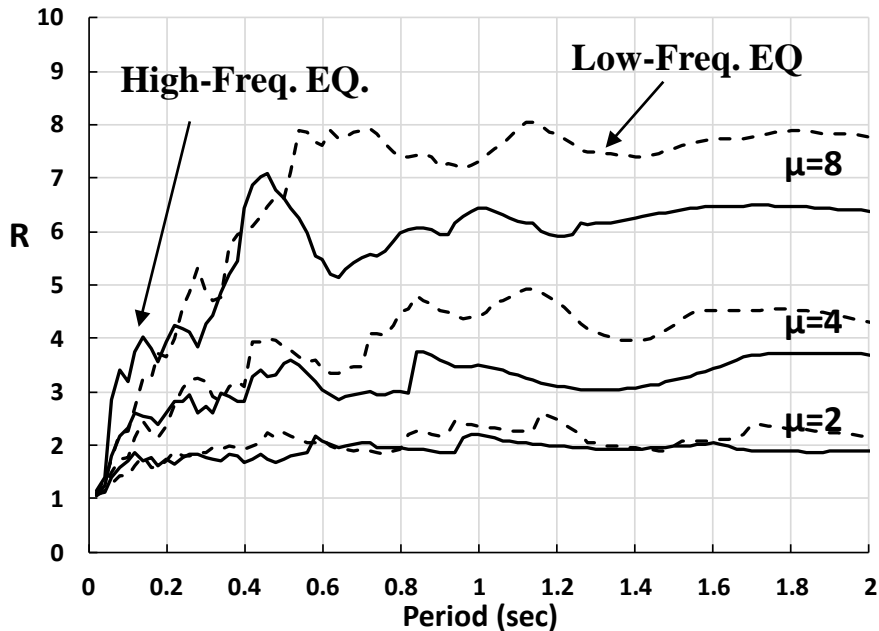


02. 연구 내용

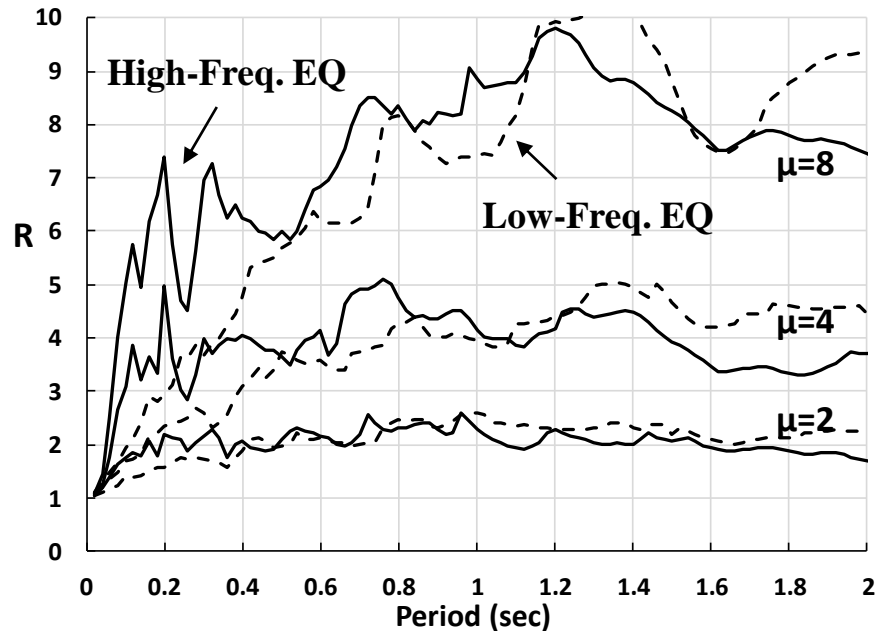
R- μ -T Relationship

진동수 성분의 영향

Near-fault EQ.



Far-fault EQ.



- 저주기 구조물에서는 고진동수 지진의 R값이 큰 경향 (탄성 구조물의 공진 응답)
- 원거리 고진동수 지진은 근거리 고진동수 지진보다 R값이 더 크게 나타남
(공진에 의한 응답 증폭은 resonant cycle이 많을수록 증가하므로)

Near-fault # of cycle: 1~2 / Far-fault # of cycle: over 4~

03. 결론

원전 구조물의 확률론적 지진 안전성 평가 절차(SPRA)에서 지진 취약도 평가 절차의 검토 및 개선 방향 설정

원전 구조물의 정확한 지진 취약도 평가를 위해
비탄성에너지 흡수 계수는 다음의 변수를 고려해야 함.

- 지진 발생 거리에 따른 지진 파형의 영향
- 강진 지속시간에 따른 영향
- 지진파의 진동수 성분의 영향

특히, 강진 지속시간이 짧은 근거리 고주파 지진의 경우 비탄성에너지 흡수 계수를 현행 식보다 큰 값으로 적용 가능할 것으로 판단

Near-fault E.Q.

Far-fault E.Q.

Pulse type force / Harmonic force에 대한 SDF system 응답을 반영한 평가 식 개발 중

