

MIDAS SQUARE 공학 기술강연

교량의 내진설계 현황과 성능기반 내진설계로의 전환.

김익현 | 울산대학교

CONTENTS

01 지진환경과 내진설계 체계

- 해외지진
- 지진환경
- 내진체계

02 교량 내진설계기준(한계상태설계법)

- 기본개념
- 소성설계
- 연성도설계

03 성능기반 내진설계로의 전환

- 기본개념
- 신뢰도기반

04 맺음말

- 개선사항 및 제언

01. 지진환경과 내진설계 체계

해외지진

지진환경

내진체계

해외지진

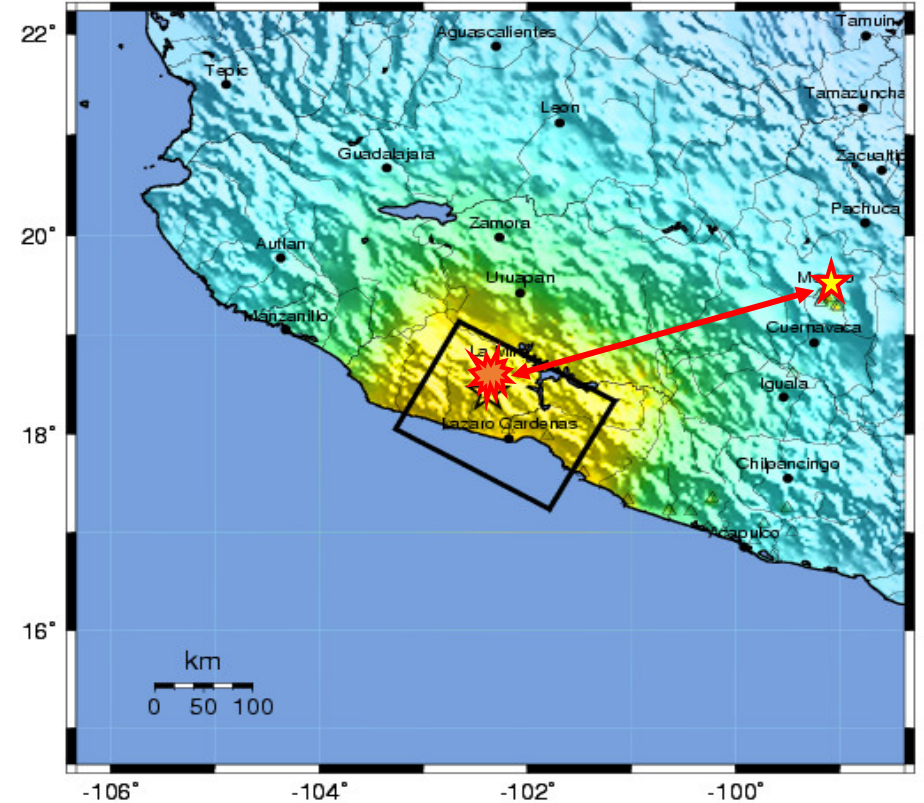
멕시코 지진(1985.9.19, M=8.0).

✓사망자 : 9,500여명

✓부상자 : 3만여명.



USGS ShakeMap : Michoacan, Mexico
Thu Sep 19, 1985 13:17:47 GMT M 8.0 N18.42 W102.38 Depth: 15.0km ID:198509191317



Map Version 1.1 Processed Sat Nov 8, 2008 11:44:37 AM MST

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

해외지진

일본 고오베지진(1995.1.17, M=7.2).

✓사망자 : 6,300명 이상

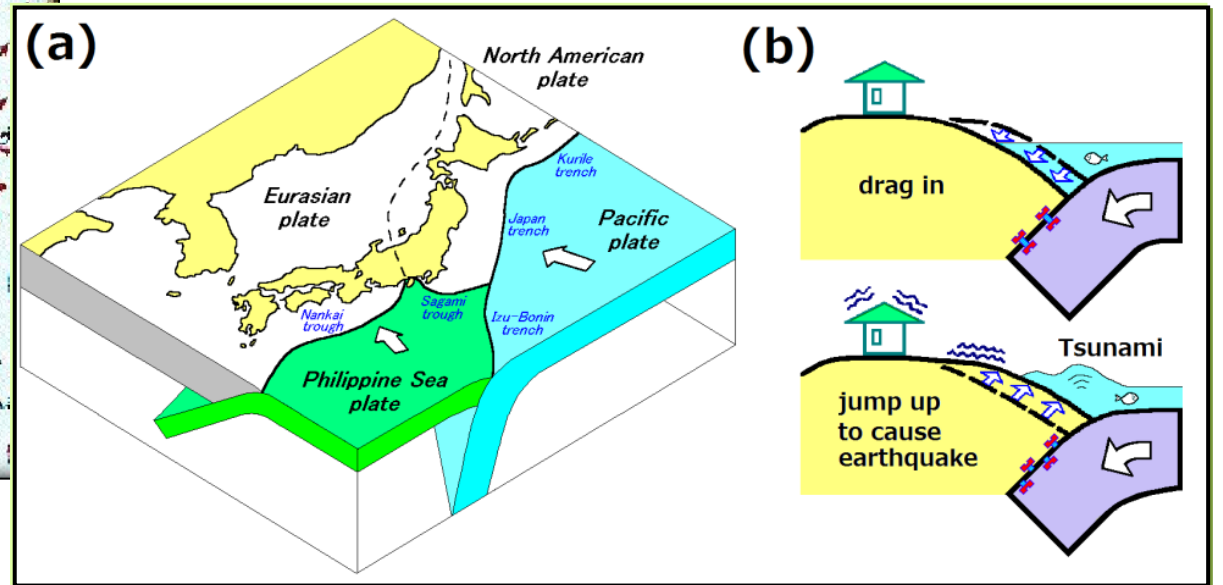
✓피해액 : 10조엔(Lifeline 파손, 대화재, 액상화)



지진환경

한반도 지진발생 메커니즘.

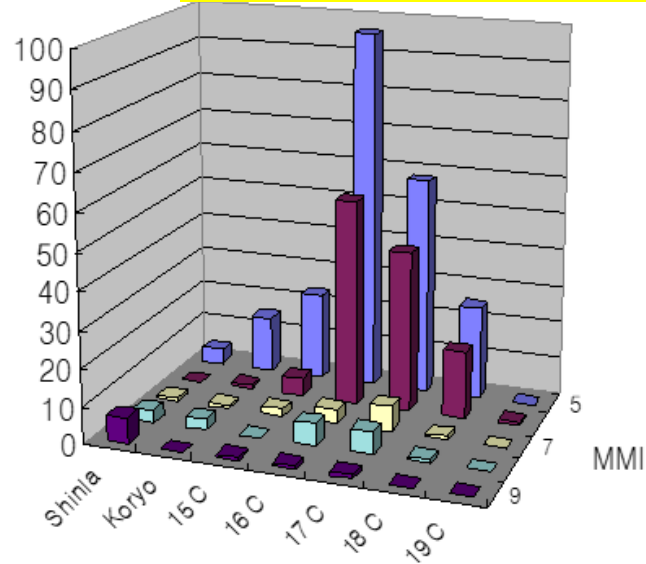
- ✓ 인도판과 유라시아판의 충돌의 영향
- ✓ 태평양판과 필리핀판의 유라시아판 밑으로 섭입의 영향



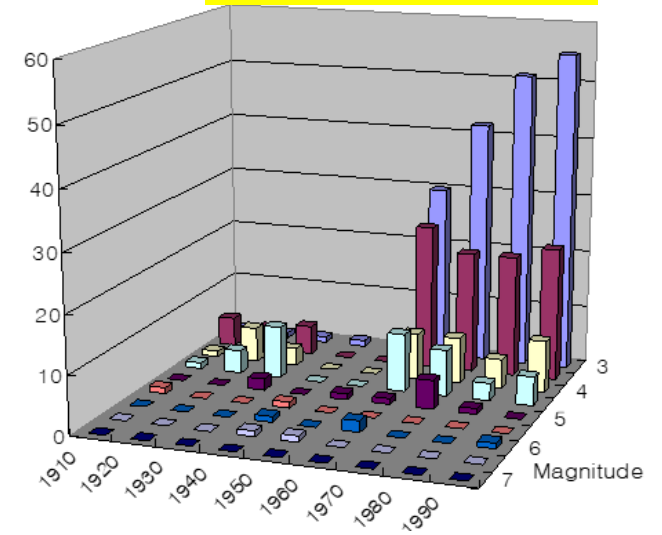
지진환경

지진발생 현황(역사지진 & 계기지진).

역사지진(AD2-1904)



계기지진(1905~)



경주지진(2016. 9. 12), $M=5.8$

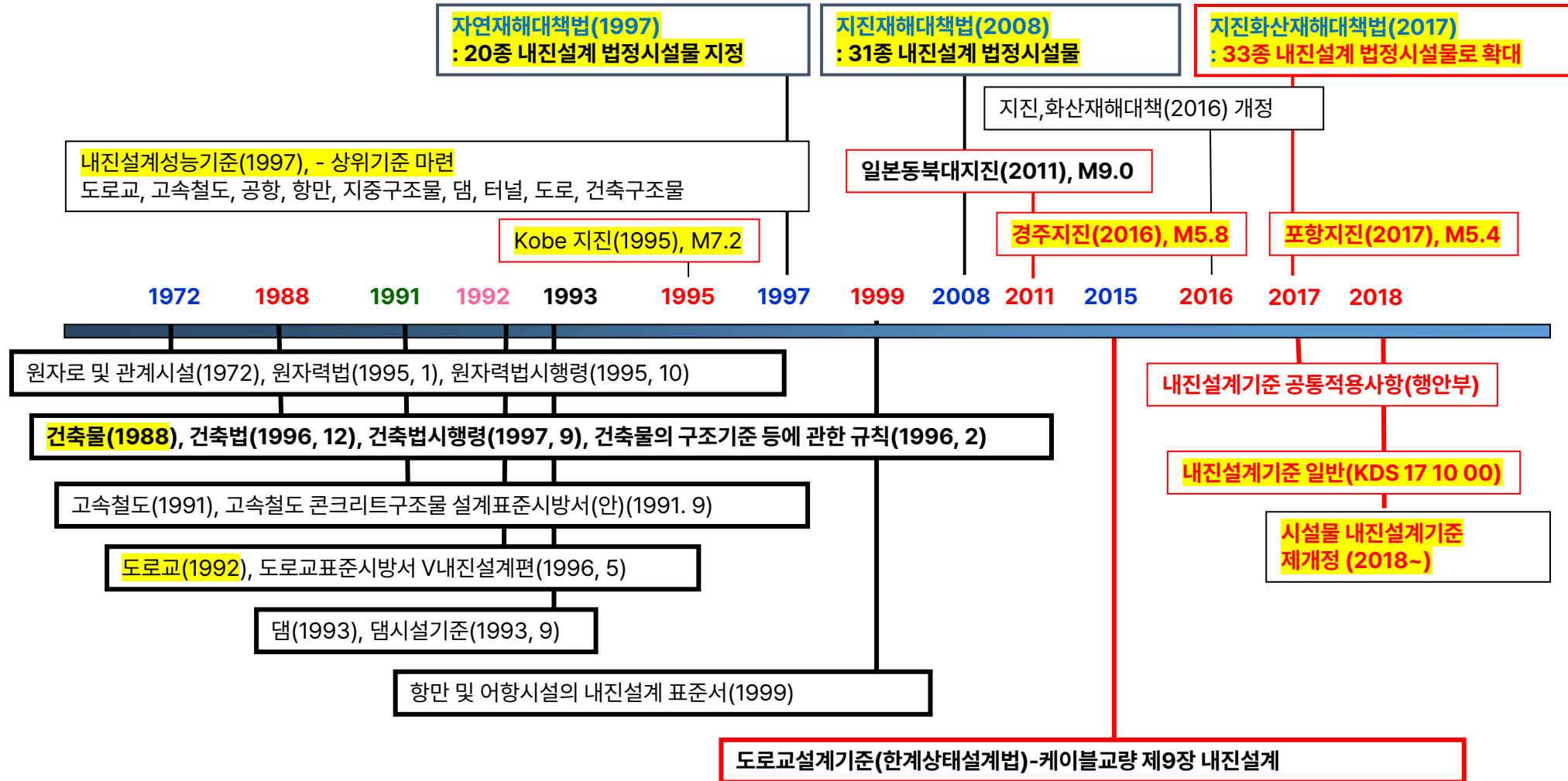


포항지진(2017. 11. 15), $M=5.4$



내진체계

내진체계 연혁.



내진체계

내진설계 관계법령.

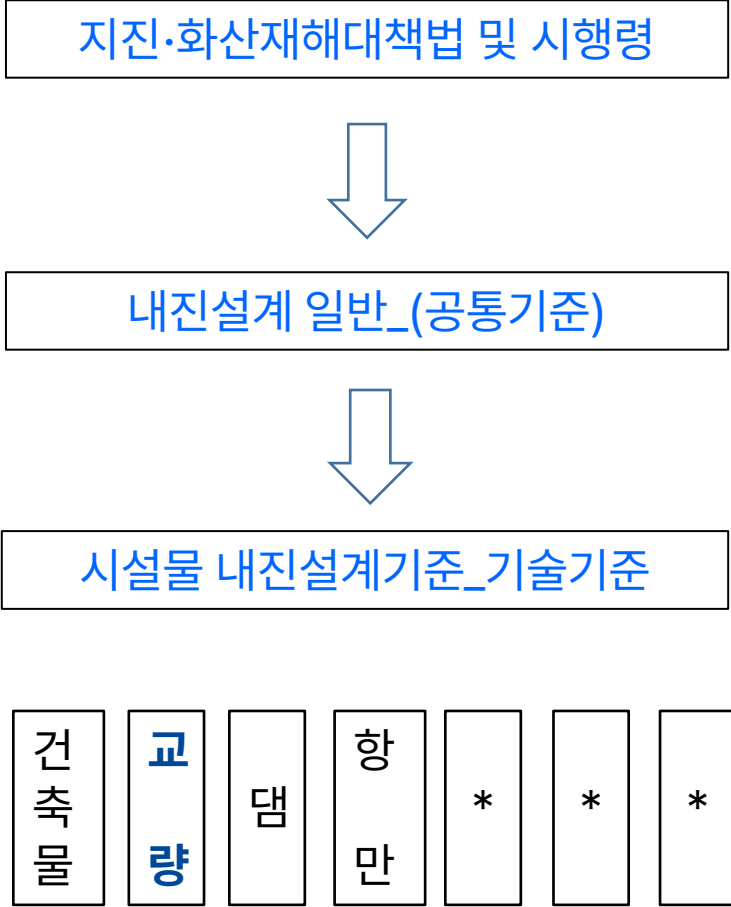
- ✓ 지진화산재해대책법 및 같은법 시행령

지진·화산재해대책법	지진·화산재해대책법 시행령
<p>제3조(국가와 재난관리책임기관의 책무) 2. 내진대책 가. <u>국가 내진성능의 목표 및 시설물별 허용 피해의 목표 설정</u> 나. 내진등급 분류 기준의 제정과 지진위험도를 나타내는 지도(이하 "지진위험지도" 라 한다)의 제작·활용</p>	<p>제10조의2(내진설계기준 공통적용사항) 1. <u>국가 내진성능의 목표</u> 2. <u>내진설계기준 공통적용사항</u> 가. 지역에 따른 <u>설계지진</u>의 세기 나. <u>지반분류</u> 다. <u>설계지반운동의 특성표현</u> 라. <u>내진성능수준</u> 분류체계 마. <u>설계지진</u> 분류체계 바. <u>내진등급</u> 분류체계</p>
<p>제14조(내진설계기준의 설정) ① ~ <u>다음 각 호의 시설</u> 중 대통령령으로 정하는 시설에 대하여 관계 법령 등에 <u>내진설계기준을 정하고</u> 그 이행에 필요한 조치를 취하여야 한다.</p>	<p>제10조(내진설계기준의 설정 대상 시설) ① 법 제14조제1항에서 "대통령령으로 정하는 시설"이란 다음 각 호의 시설을 말한다.</p>

내진체계

내진설계 관련 법적위계

- **지진·화산재해대책법 및 시행령**
 - ✓ 내진설계대상 시설물
 - ✓ 내진대책
 1. 국가내진성능목표
 2. 내진설계기준 공통적용사항
- **내진설계일반(KDS 17 10 00)**
 - ✓ 내진등급, 내진성능수준, 설계지반운동, 내진성능목표 등
 - ✓ 내진설계 기본 고려사항 등
- **시설물 내진설계기준_기술기준**
 - ✓ 각 시설물별 특성에 부합되도록 상세한 내진설계 기술사항을 규정



02. 교량 내진설계기준(한계상태설계법) (KDS 24 17 11)

기본개념

소성설계

연성도설계

기본개념

내진설계기준의 기본개념.

- (1) 인명피해를 최소화 한다.
- (2) 지진시 교량 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 **전체적인 붕괴는 방지한다.**
- (3) 지진시 가능한 한 교량의 기본기능은 발휘할 수 있게 한다.

❖내진성능목표

설계지진 (재현기간)	내진성능수준	
	기능수행	붕괴방지
50년	내진II등급 교량	
100년	내진등급 교량	
200년	내진특등급 교량	
500년		내진II등급 교량
1000년		내진등급 교량
2400년 (4800년)		내진특등급 교량

기본개념

교량 내진설계의 기본원리.

❖ 교량의 교각

- ✓ 상부구조를 지지
- ✓ 지진하중을 전달

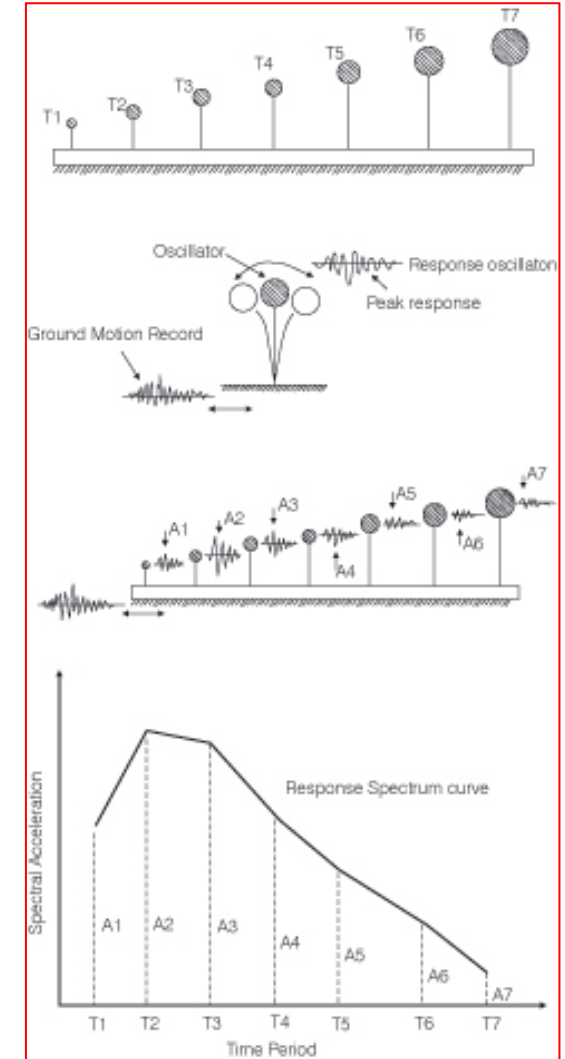
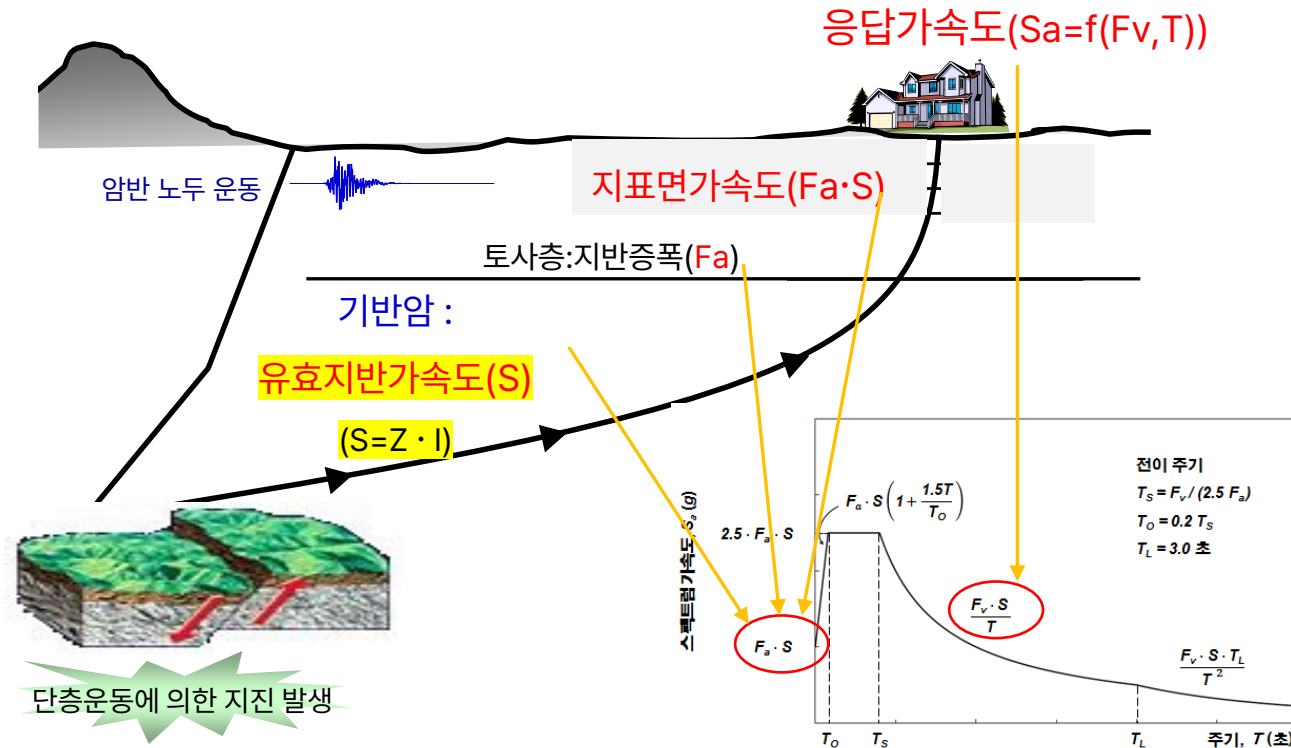
❖ 교량의 내진설계 기본원리

Capacity(보유성능) > Demand(소요성능)

- ✓ 탄성설계; 단면강도 > 탄성지진력 → 단면이 커져 비경제적 설계
- ✓ 소성설계, 연성도설계;
 - 변형성능 > 요구변형성능
 - 경제적 설계 가능

기본개념

탄성지진력_설계응답스펙트럼(설계지진의 특성 표현).

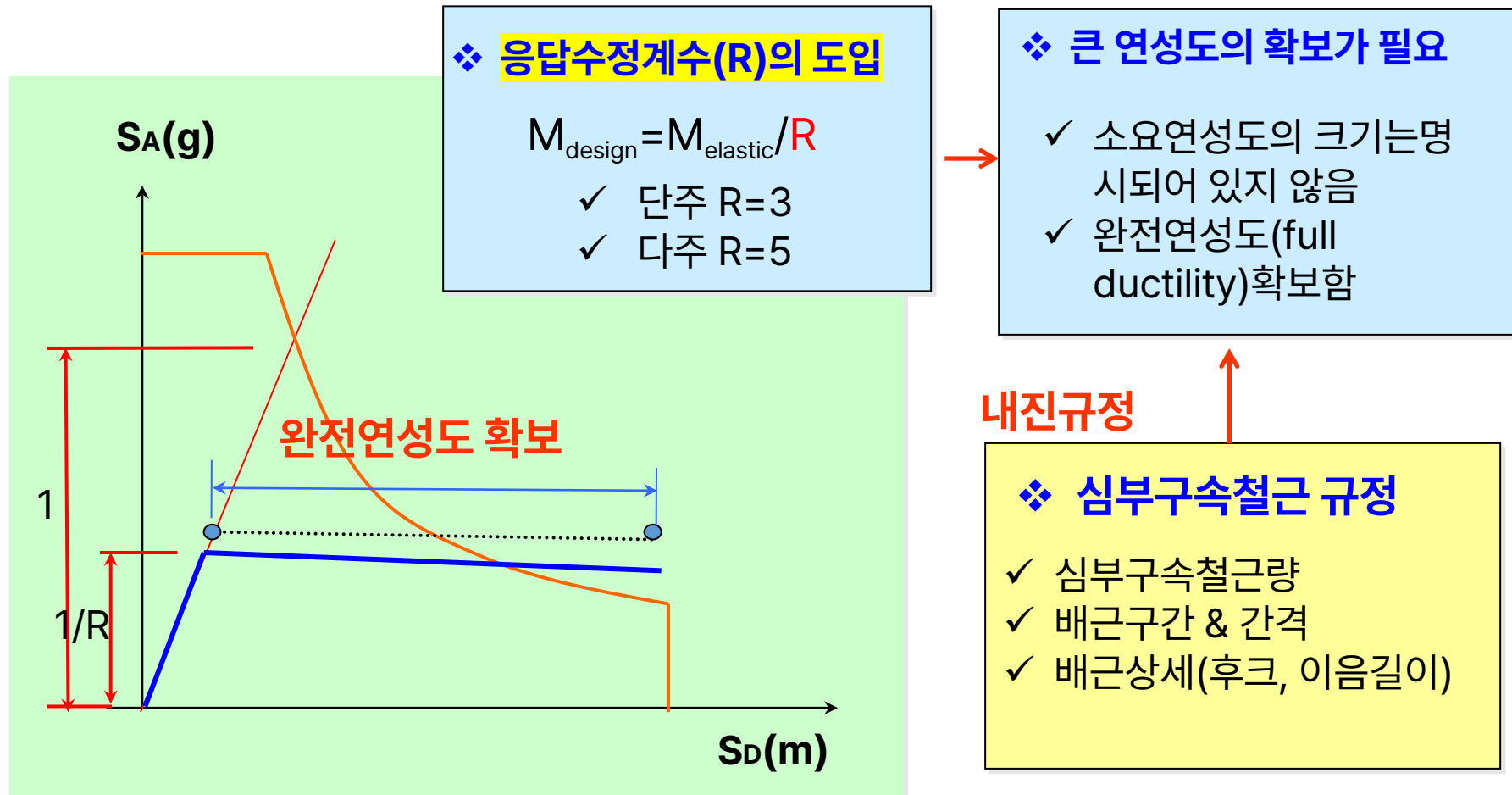


지진구역		행정구역	구역계수(Z)
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11
	도	경기, 강원 남부, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남	
II	시	강원 북부, 제주도	0.07

재현주기	50년	100년	200년	500년	1,000년	2,400년	4,800년
위험도계수(I)	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0	2.6

소성설계

소성설계의 기본개념.



소성설계

설계지진력.

탄성 지진력을 **응답수정계수 R**로 나누어 설계지진력으로 취함

→ **힘모멘트에만 적용**(전단에 의한 취성파괴 방지)

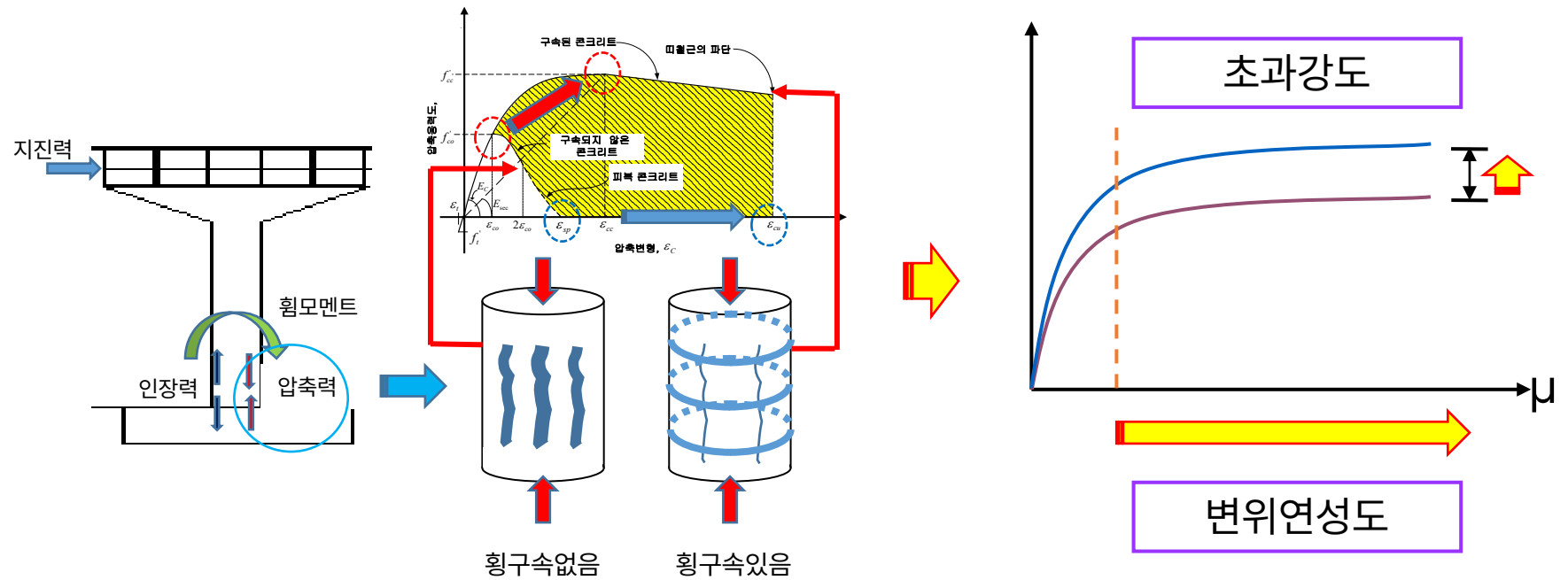
벽식교각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝 가구(Bent)			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3	상부구조의 한 지간내의 신축이음	0.8
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2		
단일기둥	3	기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구		기둥 또는 교각과 기초	1.0
1. 수직말뚝만 사용한 경우	5		
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3		
다주 가구	5		

※ 교각 하단으로 손상 유도, 에너지 흡수($R > 1.0$) & 연결부 파괴방지($R < 1.0$)

소성설계

R(Response Modification Factor) 적용 가능이유

- ✓ **초과강도(R_S)** : 실제 시스템 강도 > 설계 강도 (Strength Factor)
- ✓ **연성도(R_μ)** : 연성 거동 능력 (Ductility Factor)
- ∴ $R = R_S R_\mu$



소성설계

소성인지구역의 횡철근량(원형단면)

- ✓ 피복탈락으로 인한 단면이 감소되어도 동일한 하중지지능력을 확보하는데 필요한 횡구속량
- ✓ 아래 중 큰 값 사용

$$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$$

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$$



소성설계

소성설계의 문제점

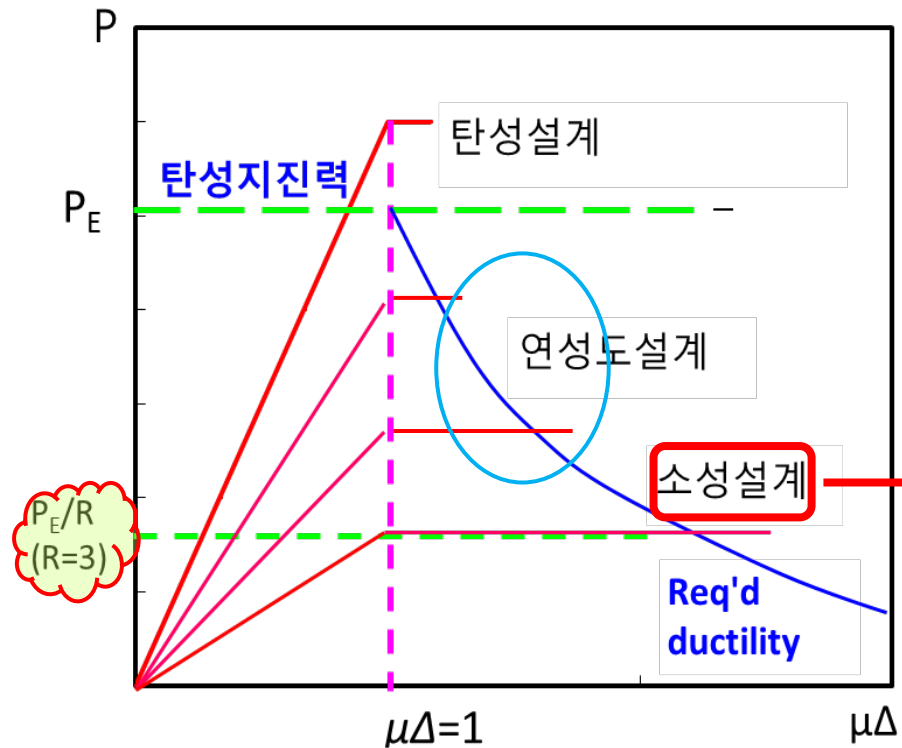


단일 R-factor → 강도특성 비교려

단면제원이 큼 → 횡철근 체적비 → 횡철근량 증가 → 시공 불가 → 2열 배근(횡구속효과?)

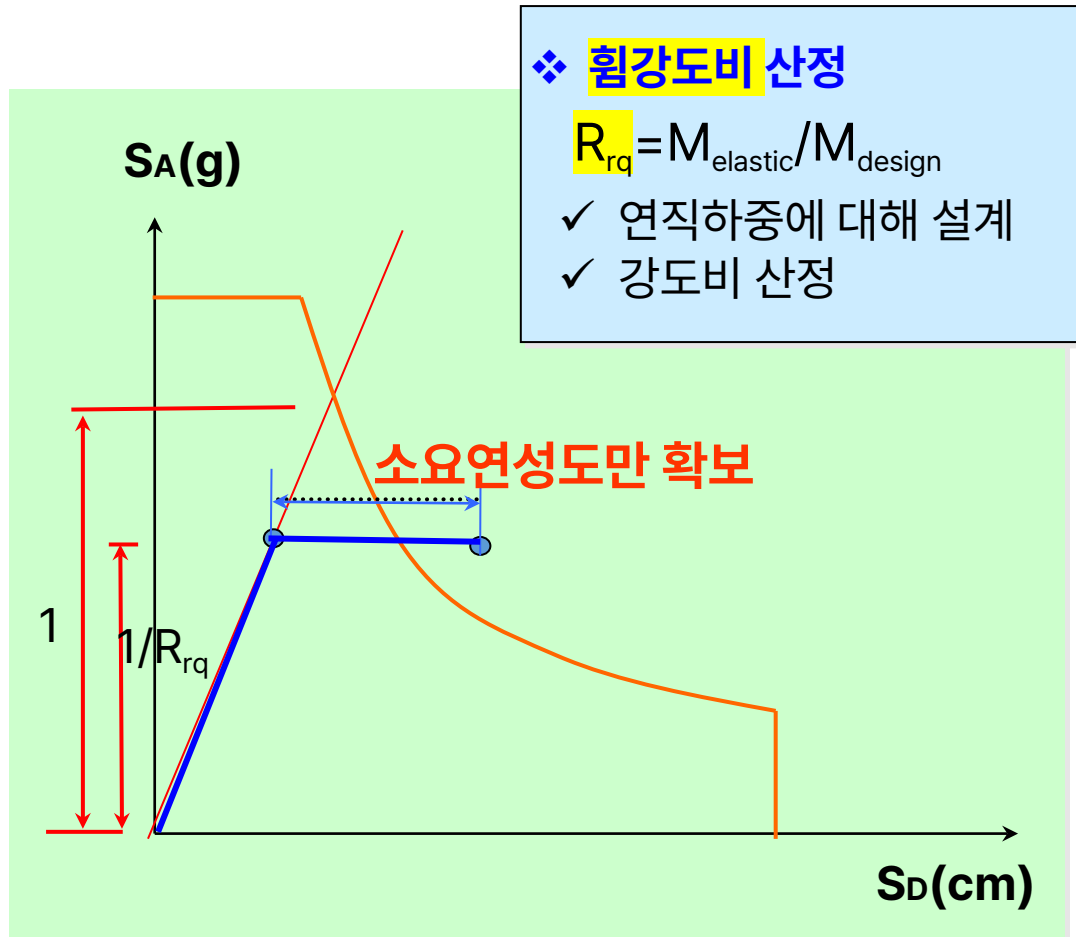


강도비에 따른 **소요연성도** 확보



연성도설계

연성도설계 기본개념



❖ 소요연성도 산정 및 확보

- ✓ 소요연성도(μ) 크기 산정
- ✓ 소요연성도(required ductility) 확보함

내진규정

❖ 심부구속철근 규정

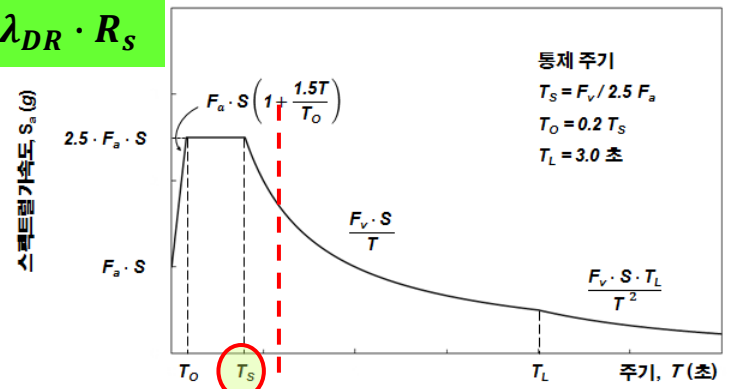
- ✓ 심부구속철근량
- ✓ 배근구간 & 간격
- ✓ 배근상세(후크, 이음길이)

연성도설계

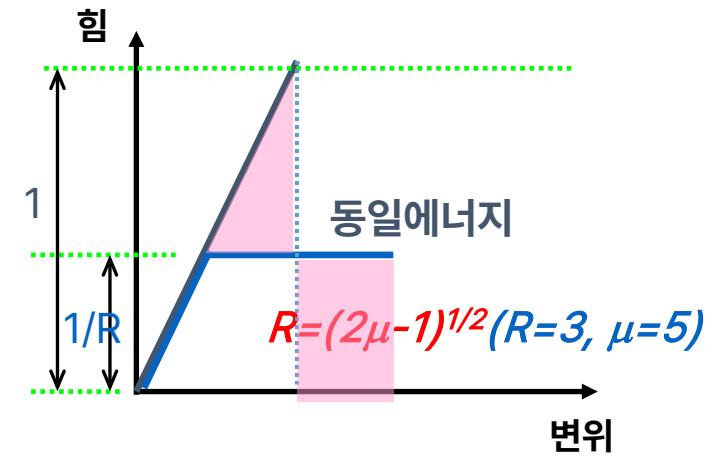
응답수정계수(R)-변위연성도(μ)-진동주기(T) 관계식

<ul style="list-style-type: none"> • Newmark 	$R = 1 \quad T \leq 0.003s$ $R = \sqrt{2\mu - 1} \quad 0.12s \leq T \leq 0.5s$ $R = \mu \quad T \geq 1s$
<ul style="list-style-type: none"> • Miranda & Bertero 	$R = 1 \quad T \leq 0.003s$ $R = \sqrt{2\mu - 1} \quad 0.12s \leq T \leq 0.5s$ $R = \mu \quad T \geq 1s$
<ul style="list-style-type: none"> • Nassar & Krawinkler 	$R_s = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1$ $\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} e^{-2(\ln(T) - 0.2)^2}$
<ul style="list-style-type: none"> • Eurocode8 	$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c}$ $c = fn(T)$
<ul style="list-style-type: none"> • New Zealand 	Nonlinear Spectrum
<ul style="list-style-type: none"> • ATC/MCEER → 설계기준 	$T < T_0 = 1.5T_c \quad , \quad \mu_d = (q - 1) \frac{T_0}{T} + 1$ $T \geq T_0 \quad , \quad \mu_d = q$

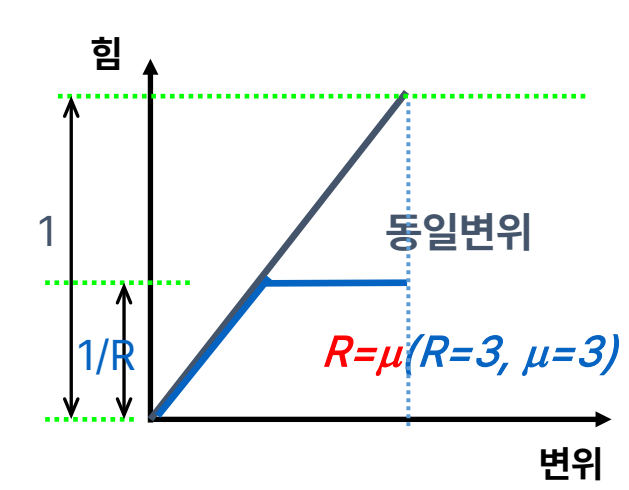
$\mu_{\Delta_d} = \lambda_{DR} \cdot R_s$



❖ Equal Energy (단주기구조)

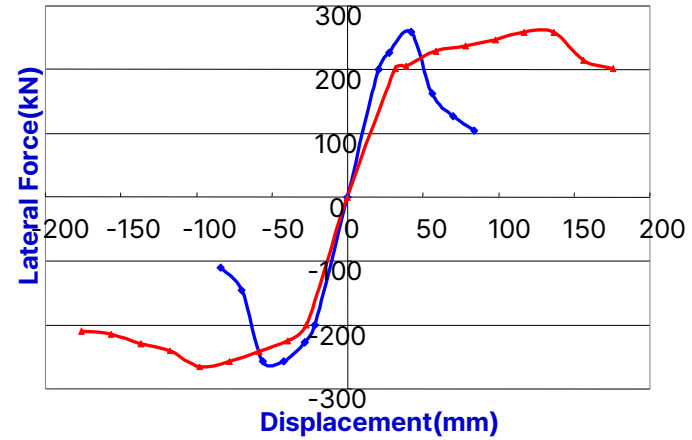
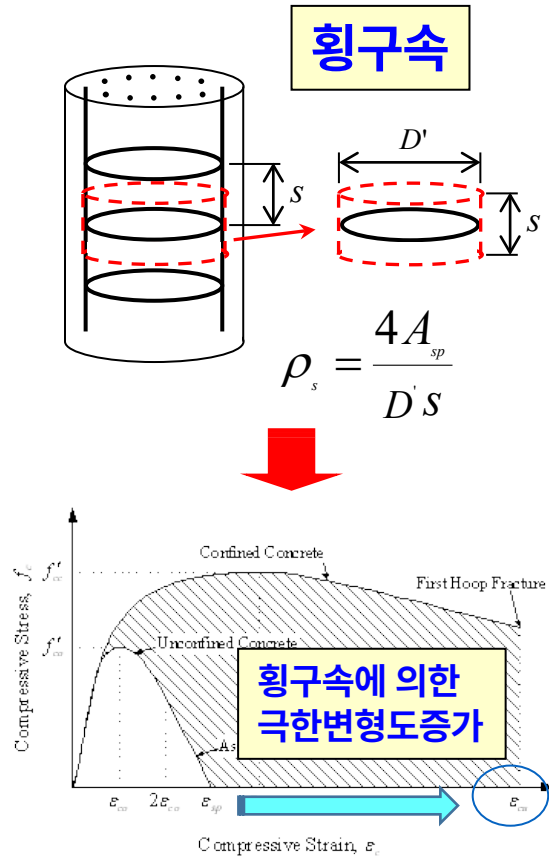


❖ Equal Displacement (장주기구조)



연성도설계

연성도 확보 메커니즘

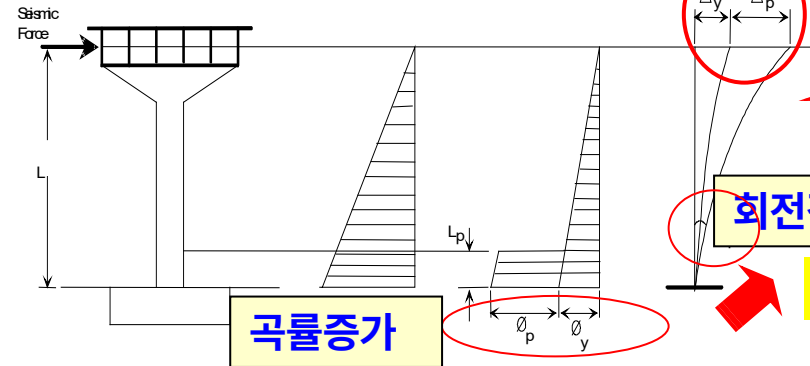


$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_y + \Delta_p}{\Delta_y}$$

연성도증가

$$\Delta_p = \theta_p \left(H - \frac{L_p}{2} \right)$$

소성변위증가



회전각증가

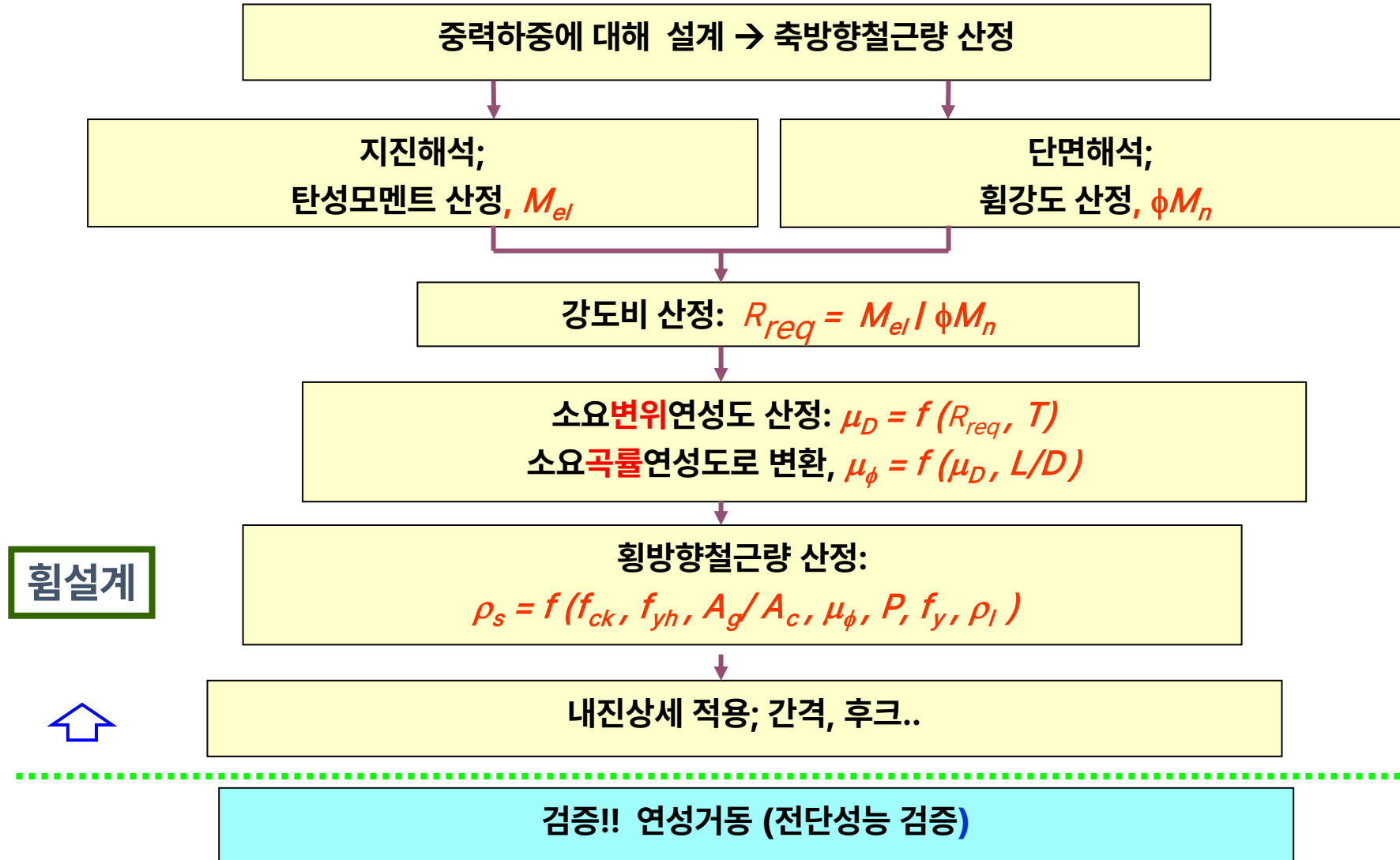
$$\theta_p = \phi_p L_p = (\phi_u - \phi_y) L_p$$

곡률증가

$$\phi_u = \varepsilon_{cu} / c_u$$

연성도설계

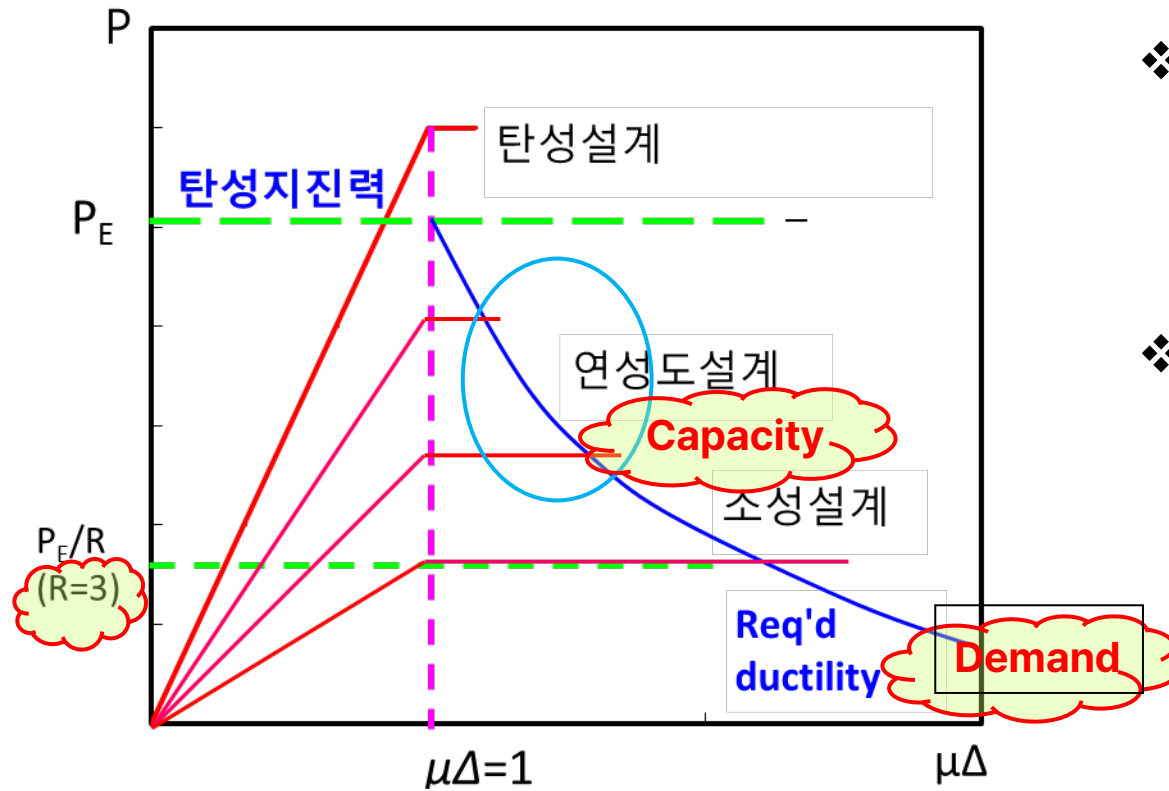
연성도 설계절차



연성도설계

내진설계법 요약.

- ✓ 붕괴방지를 위한 내진설계 개념



❖ 소성설계

- ✓ 강도 \ll 탄성지진력

(R-factor 도입)

- ✓ 큰 보유변위연성도 확보 \rightarrow **횡철근량** 제시

❖ 연성도설계;

- ✓ 강도 $<$ 탄성지진력

(**소요 R_{rq}** 산정)

- ✓ 작은 보유변위연성도 확보

\rightarrow **소요횡철근량** 산정식 제시

03. 성능기반 내진설계로의 전환

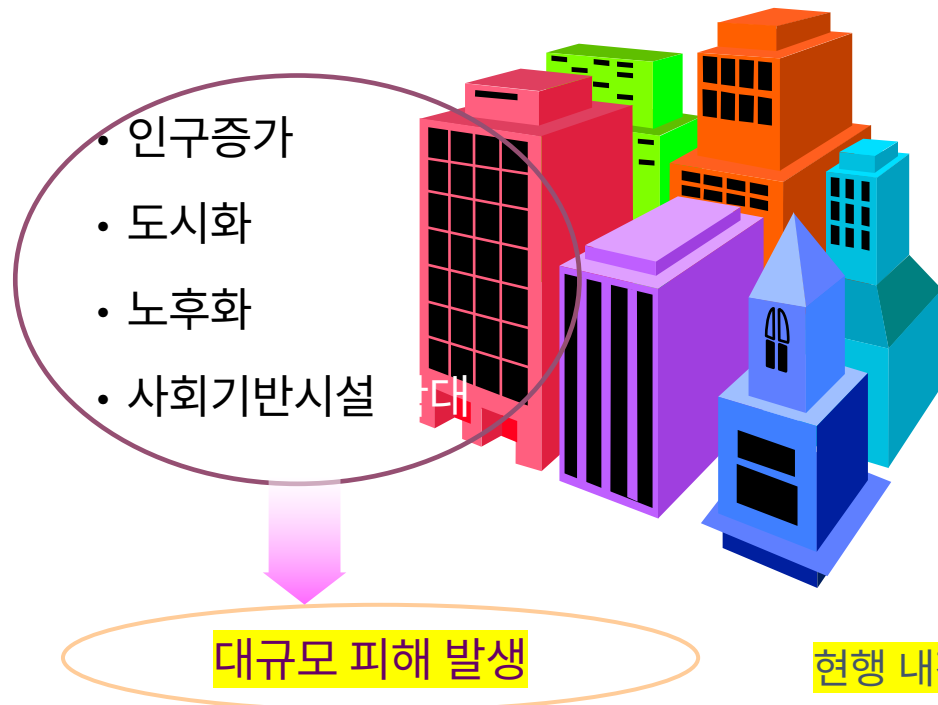
기본개념

신뢰도기반

기본개념

붕괴방지 설계 문제점.

기존시설물의 불확실한 내진성능



예) 대형지진에 의한 경제적 손실

지진	Residential	Non-Residential	Total
1989 Loma Prieta	\$ 3.8B	\$4.7B	\$8.5B
1994 NorthRidge	\$19.5B	\$20.1B	\$39.6B
지진	Building	Life Line	Total
1995 Kobe	\$60B	\$20B	\$80B

현행 내진설계개념:붕괴방지/인명보호에 초점

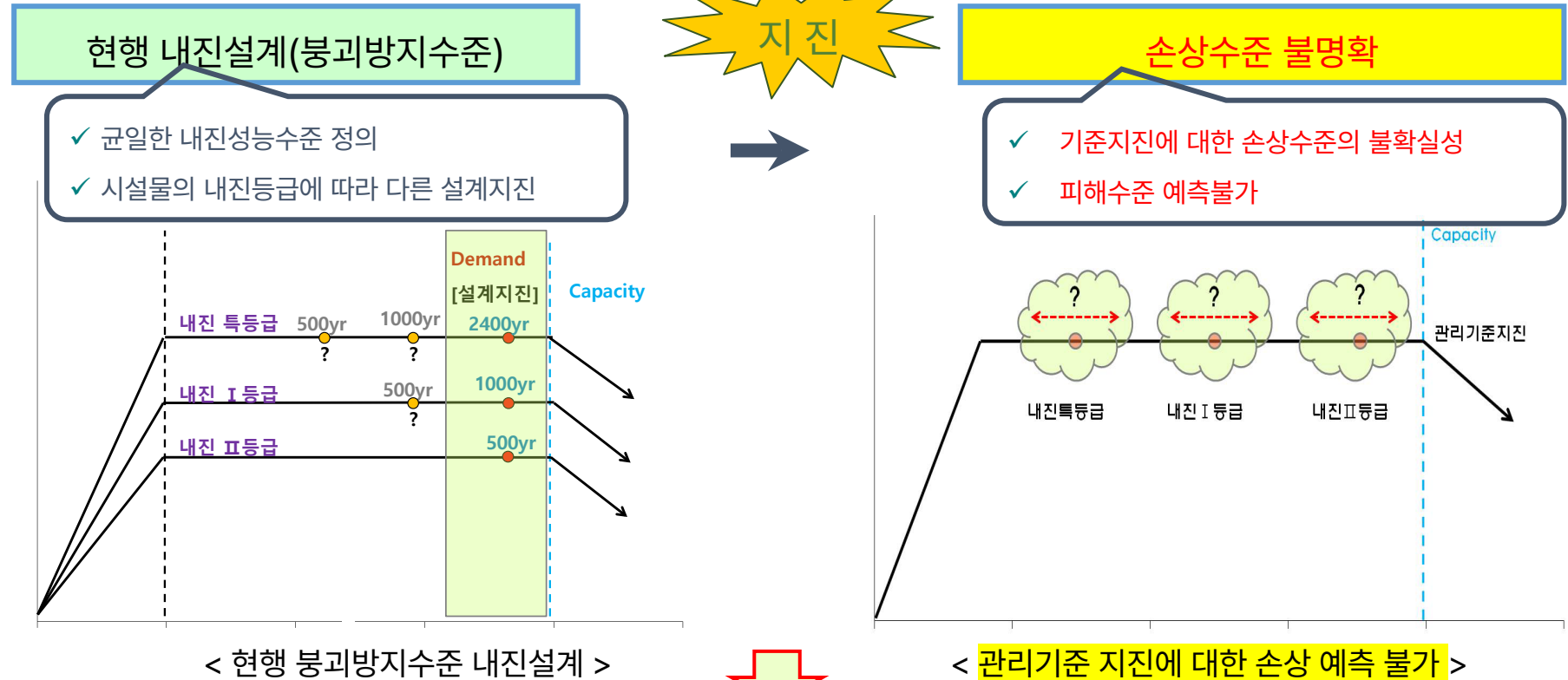
⇒ 피해수준 예측 불가능

⇒ 대규모 경제적 손실 발생

⇒ 국가적 차원의 지진재난 관리 애로

기본개념

성능기반(손상제어) 설계의 필요성.



지진재난관리가 어려움

관리기준지진에 대한 손상(성능)수준의 정량화가 필요

기본개념

성능기반 내진설계의 기본개념.

❖ **성능기반 vs 사양기반** 내진설계

❖ 성능기반 내진설계란 ??

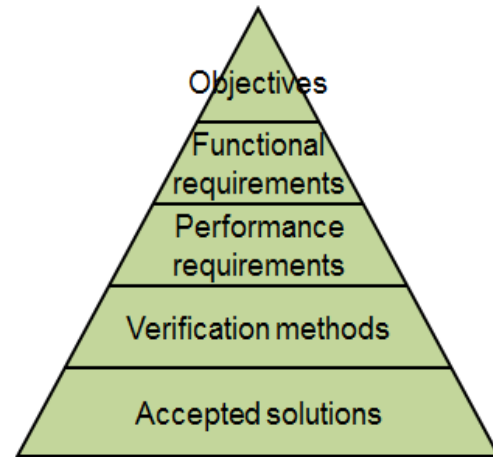
- ✓ **다단계 성능 규정**(시스템 레벨에서 정의)
- ✓ 부재 **설계거동한계** 규정 (허용손상) → 손상추정 가능
- ✓ **성능검증 방법**
 - 성능을 구현하는 다양한 방법이 허용 → 설계의 유연성 확보
 - 재료레벨의 모델 이용

❖ **현행 기준(사양기반)**

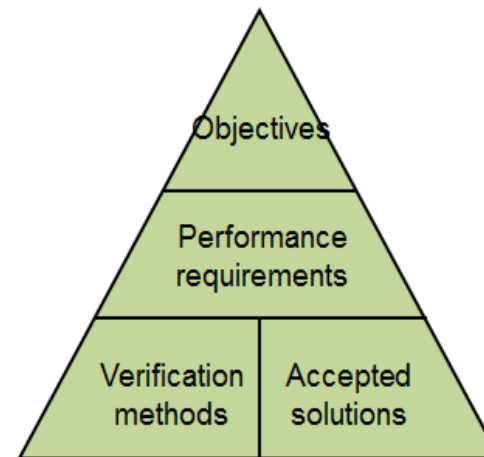
- ✓ 성능구현을 위한 (하나의) 방법(절차)을 상세하게 규정
→ 대안을 불허
- ✓ 주로 부재레벨의 모델을 이용

기본개념

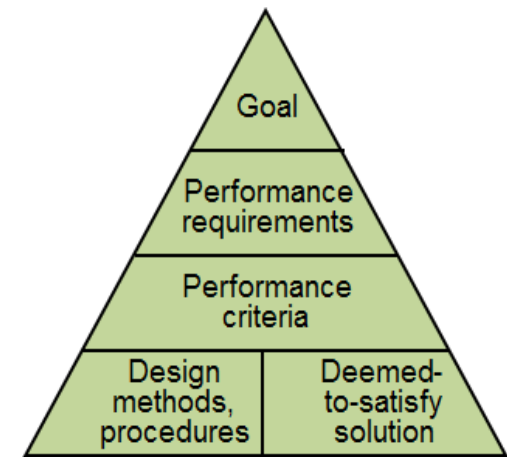
성능기반 설계의 기본체계



(a) Norway model



(b) Spain model



(c) Japan model

- ① 내진성능목표의 설정
- ② 내진성능목표 달성을 위한 필요 요구조건 제시
- ③ 특정한 검증방법 또는 허용되는 방법을 이용한 내진성능검증

기본개념

성능기반 내진설계의 예(케이블교량_KDS 14 17 21)

✓ 내진성능 목표

설계지진 (설계수명 내 초과확률)	재현주기		성능수준	한계상태	내진설계 단계	
	설계수명 100 년	설계수명 200 년				
초과확률 63% (63.4 %)	100 yr	200 yr	기능수행	사용한계상태	사용성검토	설계단계
초과확률 8~10% (8~9.5 %)	1000 yr	2400 yr	장기복구	극단상황한계 상태	단면설계	
초과확률 4% (4.1 %)	2400 yr	4800 yr	붕괴방지	-	성능검증	검증단계

기본개념

성능기반 내진설계의 예(케이블교량_KDS 14 17 21)

✓ 설계거동한계

손상도	설계거동한계
무손상 (No Damage)	수리 및 보수없이 구조부재의 사용성 이 완벽하게 확보
최소손상 (Minimal Damage)	약간의 비탄성거동, 전체적으로는 탄성거동 콘크리트부재의 아주 작은 균열 강재로 만든 부부재 일부 항복 허용 케이블시스템의 비구조적 부재의 손상 허용
복구가능손상 (Repairable Damage)	비탄성 응답이 발생하나 부재의 교체가 필요하지 않는 수준 지진발생 이전의 상태로 복구할 수 있는 정도의 손상 철근의 항복 콘크리트 피복의 탈락 강부재의 미세한 항복
중대손상 (Significant Damage)	2차 부재의 상당한 변형으로 보수를 위해 폐쇄가 요구되는 수준

기본개념

성능기반 내진설계의 예(케이블교량_KDS 14 17 21)

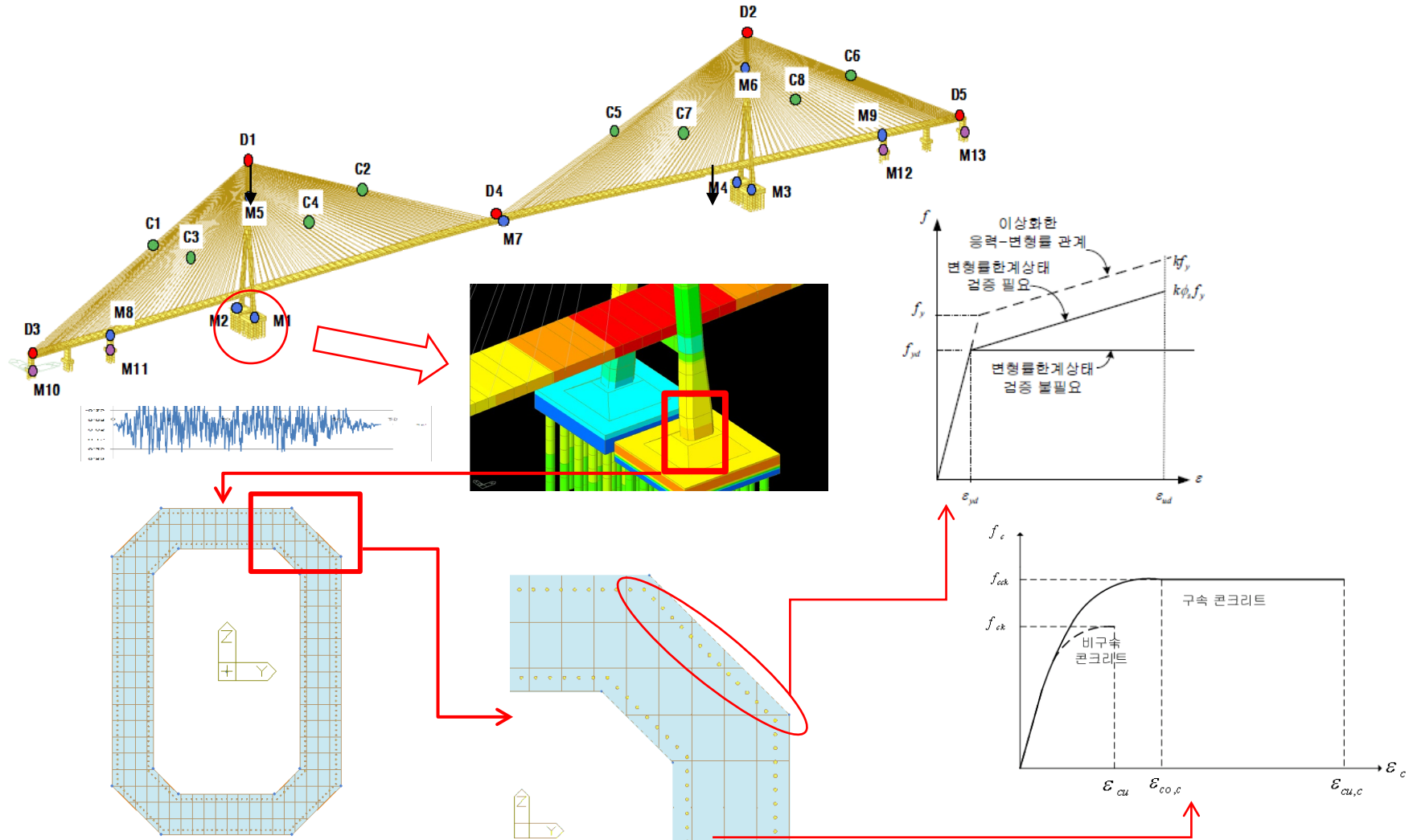
✓ 허용손상수준

구성요소	P/S	기능수행	장기복구	붕괴방지	
		초과확률 63%	초과확률 8~10%	초과확률 4%	허용손상수준
주탑 및 측경간 교각	P	무손상	최소손상	복구가능손상	$\epsilon_{c,max} \leq \epsilon_{cu,c}$ $V_{max} \leq V_n$
파일 및 파일 캡	P	무손상	최소손상	최소손상	$\epsilon_{c,max} \leq 0.002$ $V_{max} \leq V_n$
상부구조의 구조요소	P	무손상	최소손상	최소손상	$F \leq F_y$
상부구조의 비구조요소	S	무손상	최소손상	중대손상	-
버퍼	내진기능 有	P	무손상	무손상	제품사양서(spec) 허용값 이하
	내진기능 無	S	무손상	중대손상	-
받침 및 전단키	S	무손상	최소손상	복구가능손상	받침부 : - 앵커부 : 앵커강도 이하
신축이음장치	S	무손상	복구가능손상	중대손상	-
케이블시스템 (앵커부 및 구조요소 포함)	P	무손상	무손상	최소손상	$F \leq F_{p0.2k}$ (0.2% 윽셋강도)
케이블시스템 (비구조요소 포함)	S	무손상	최소손상	복구가능손상	$F \leq F_t$
		사용한계상태 하중조합 VI	극단상황한계상태 하중조합 I	교량 구성요소의 허용손상수준을 응답(시간)이력해석을 통해 확인	

기본개념

성능기반 내진설계의 예(케이블교량_KDS 14 17 21)

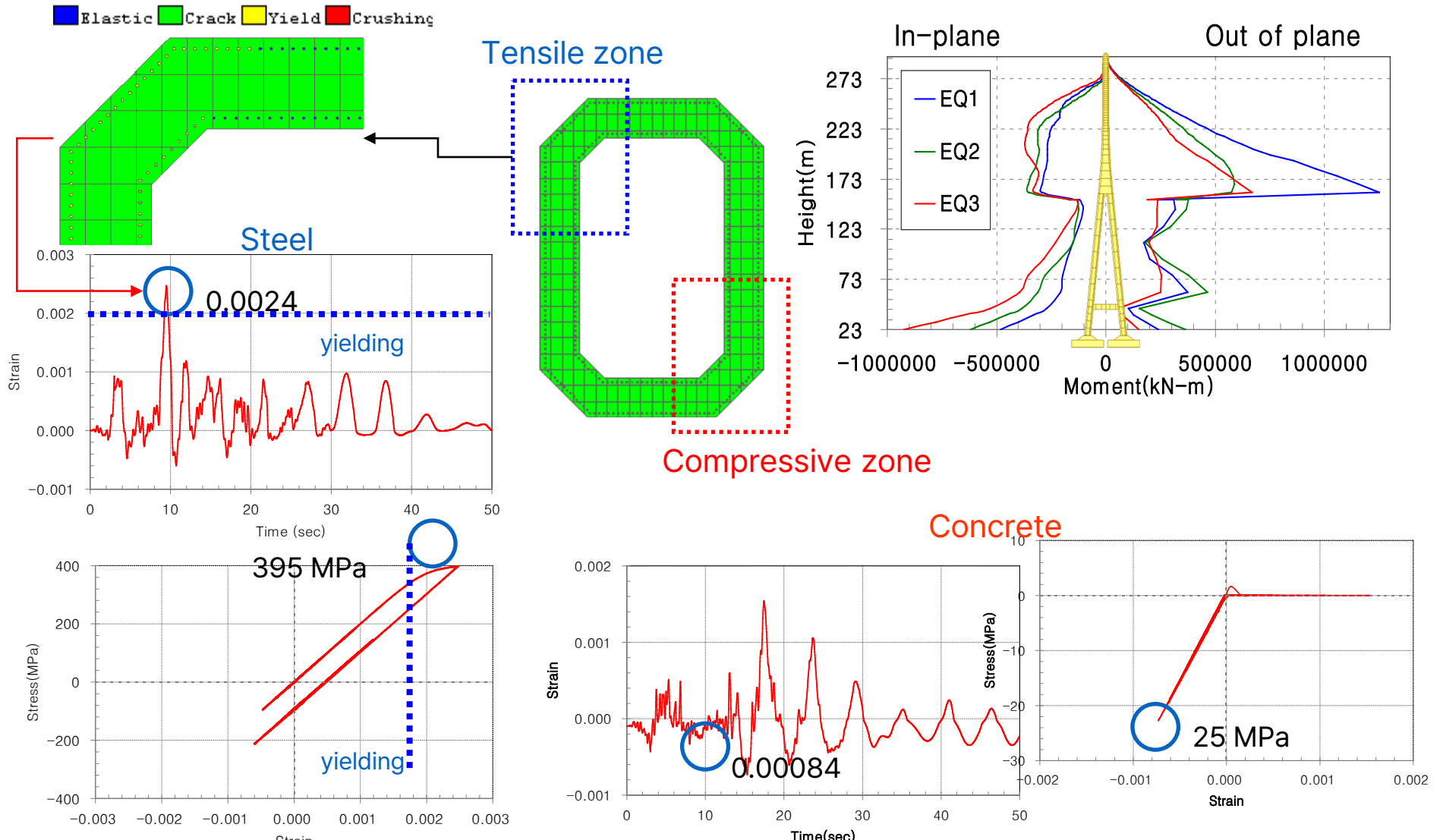
✓ 검증 예_해석모델



기본개념

성능기반 내진설계의 예(케이블교량_KDS 14 17 21)

✓ 검증 예_주탑의 휨성능



신뢰도기반

내진성능수준 설정

✓ 다단계 내진성능수준

(현행)붕괴방지 내진설계

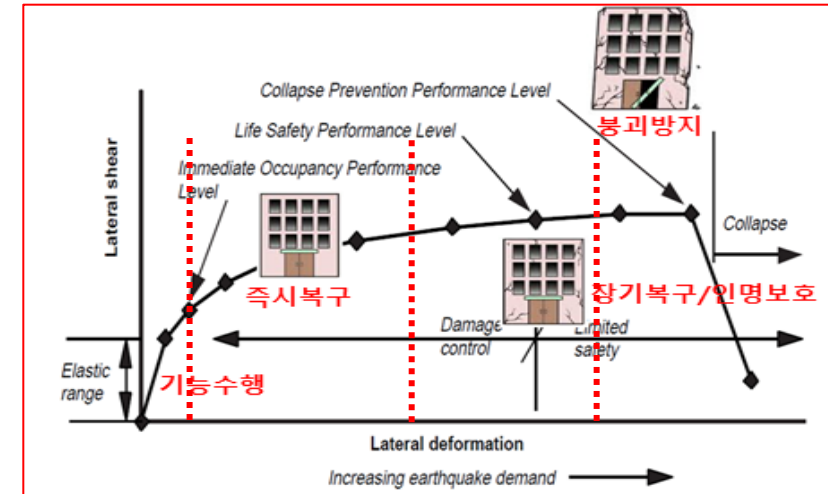
설계지진	50	100	200	500	1000	2400
기능수행	II 등급	I 등급	특등급			
즉시복구						
장기복구						
붕괴방지				II 등급	I 등급	특등급

KDS 17 10 00 내진설계 일반

재현 주기	성능수준			
	기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
50년	II 등급			
100년	I 등급	II 등급		
200년	특등급	I 등급	II 등급	
500년		특등급	I 등급	II 등급
1000년			특등급	I 등급
2400년				특등급
4800년				특등급

(개선) 손상제어 내진설계

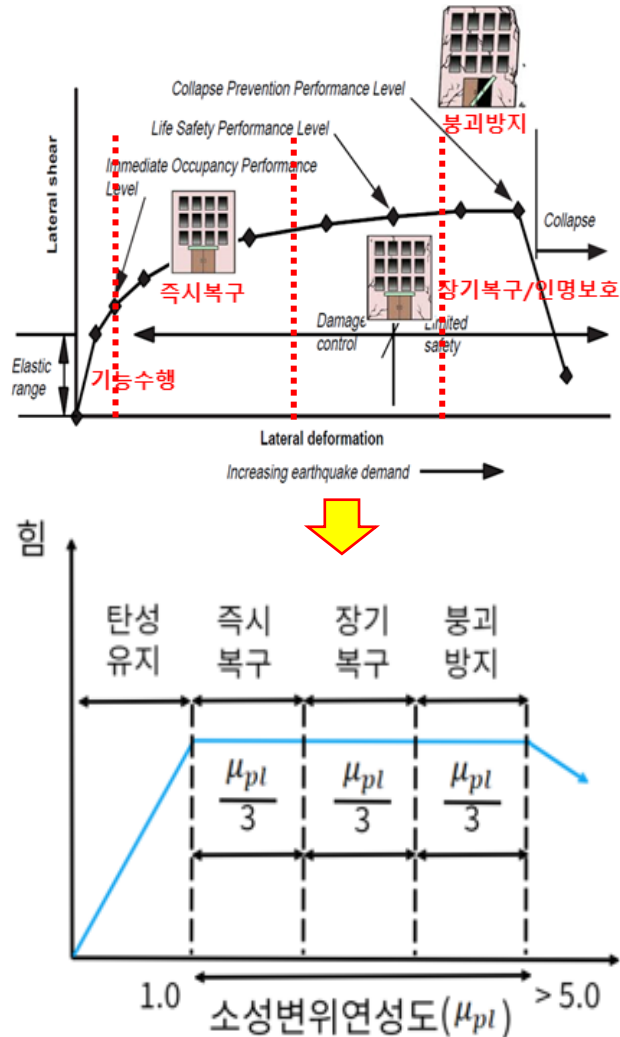
설계지진	50	100	200	기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
				II 등급	I 등급	특등급	II 등급
***					특등급	I 등급	II 등급



신뢰도기반

내진성능수준별 설계거동 범위

✓ 보유연성도별 연성거동 범위

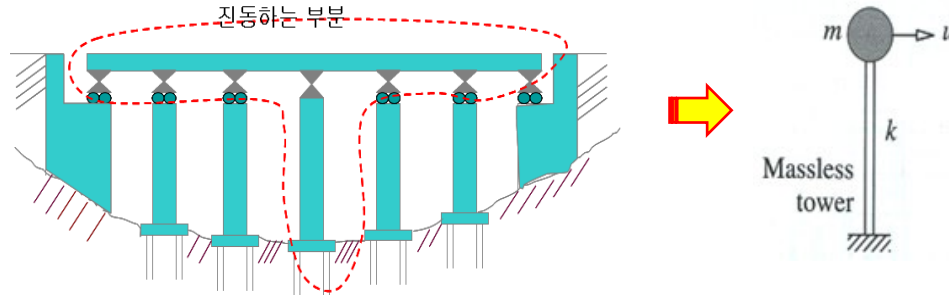


보유변위연성도	기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
1	0~1	×	×	×
2	0~1	×	×	×
3	0~1	×	×	1.00~3
4	0~1	×	1.00~2.50	2.50~4
5	0~1	1~2.33	2.33~3.66	3.66~5
6	0~1	1~2.67	2.67~4.33	4.33~6
7	0~1	1~3.00	3.00~5.00	5.00~7
8	0~1	1~3.33	3.33~5.67	5.67~8

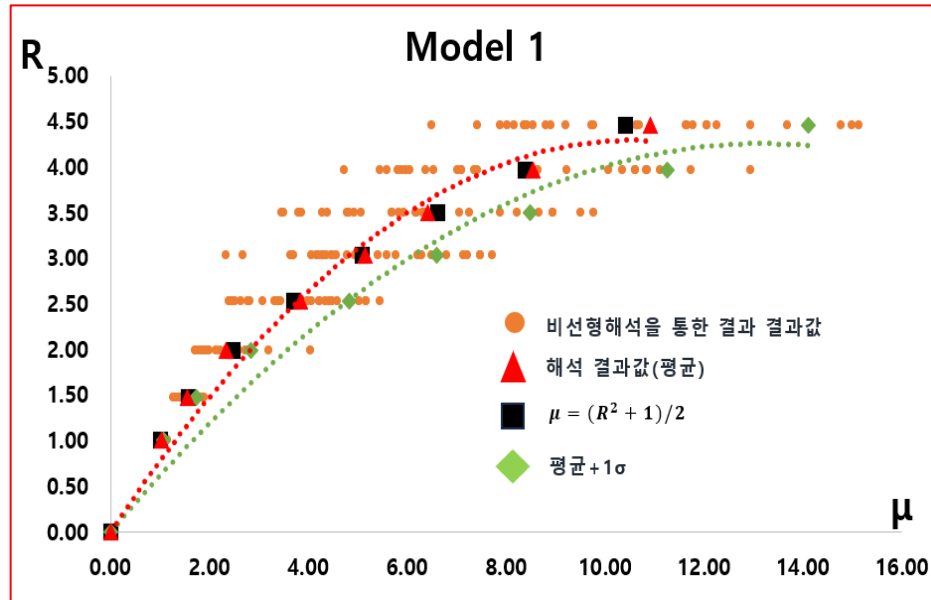
신뢰도기반

비선형거동 특성_소요변위연성도 특성

✓ 신뢰도 기반 → **소요변위연성도의 통계적 특성(평균 및 표준편차) 예**



Newmark의
Equal energy
 $R = \sqrt{2\mu - 1}$

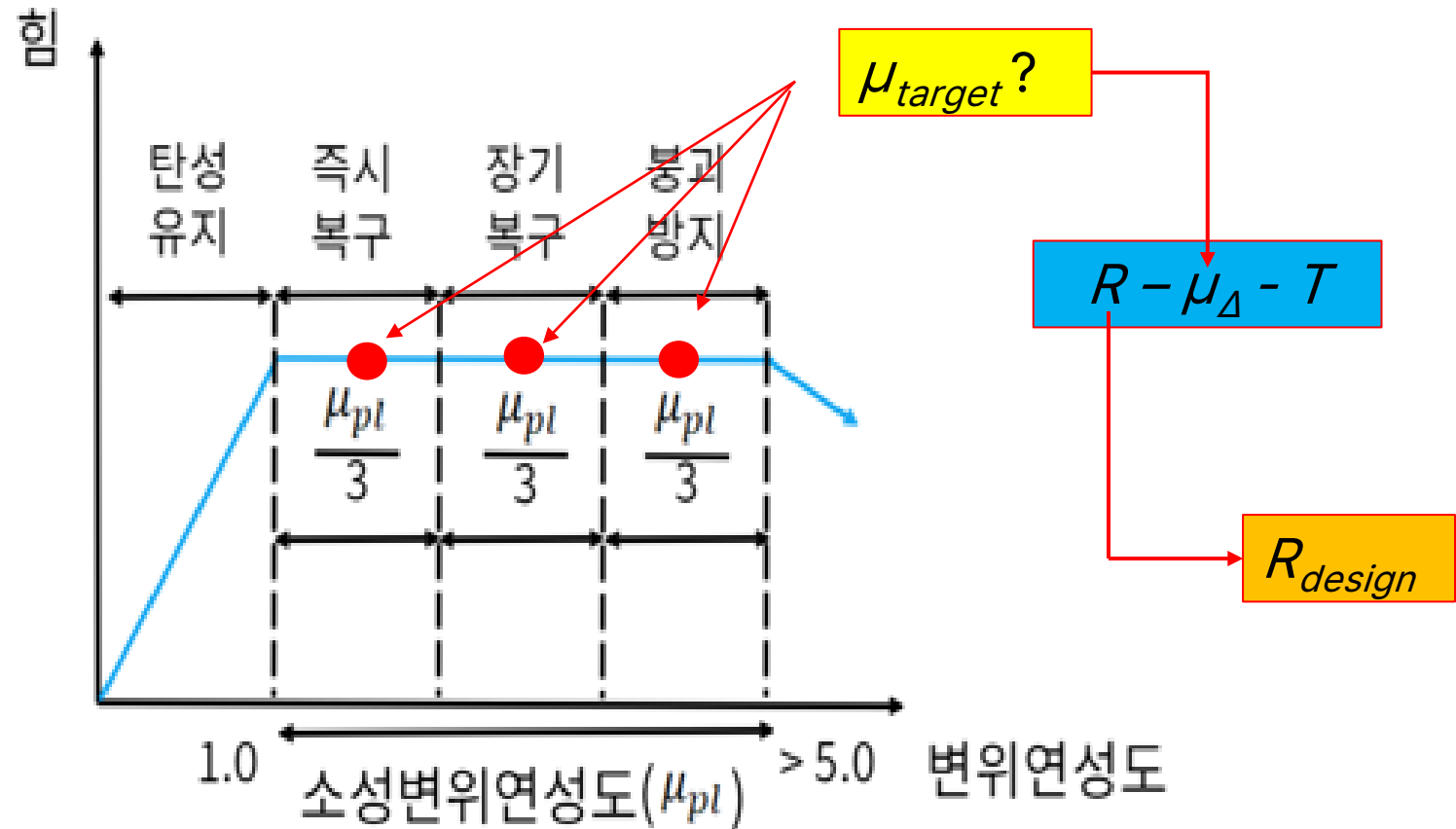


R	평균		표준편차 & 변동계수		변위연성도(μ) 비교		
	m^{THA}	σ^{THA}	$\frac{\sigma^{THA}}{m^{THA}}$	μ_m^{THA}	μ^{NM}	$\frac{\mu_m^{THA}}{\mu^{NM}}$	
4.5	0.051	0.014	0.27	10.9	10.4	1.05	
4.0	0.045	0.014	0.31	8.5	8.4	1.01	
3.5	0.038	0.012	0.32	6.4	6.6	0.97	
3.0	0.035	0.009	0.26	5.2	5.1	1.02	
2.5	0.031	0.007	0.23	3.9	3.7	1.05	
2.0	0.024	0.005	0.21	2.4	2.5	0.96	
1.5	0.022	0.002	0.09	1.6	1.6	1.00	
1.0	0.021	0.0008	0.04	1.0	1.0	1.00	
	평균		0.22	평균		1.01	

신뢰도기반

설계응답수정계수(R_{design})

- ✓ 목표변위연성도(μ_{target})에 따른 설계응답수정계수의 산정

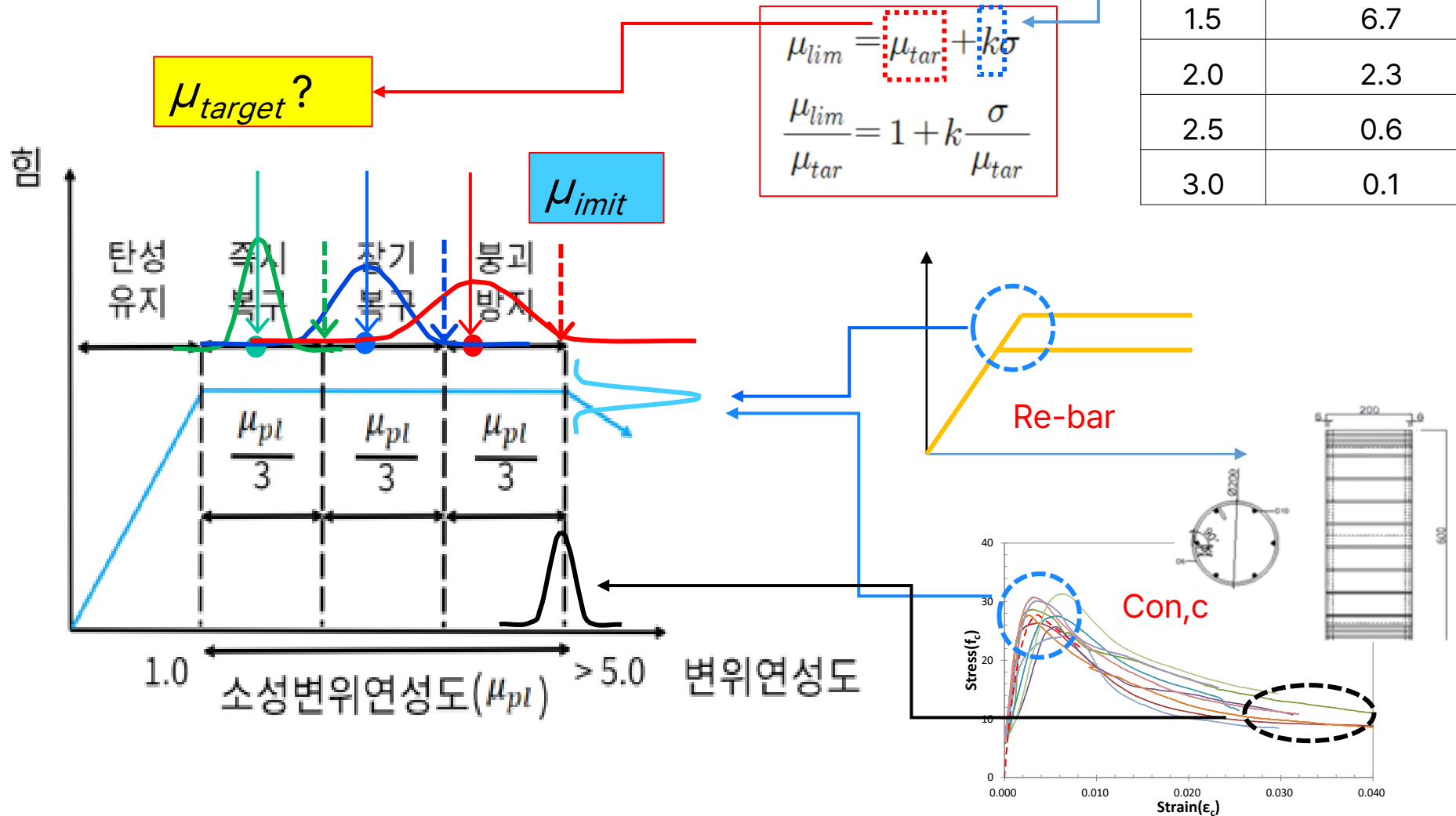


신뢰도기반

목표변위연성도의 결정(μ_{target})

✓ 목표 초과확률에 따른 목표변위연성도의 결정

k	초과확률(%)
1.0	15.9
1.5	6.7
2.0	2.3
2.5	0.6
3.0	0.1



04. 맺음말

개선사항 및 제언 포함

내진설계기준 개선 사항 및 성능기반 내진설계로의 전환.

- ❖ **지진재해도 재평가**: 추가 단층정보 적용
- ❖ **설계응답스펙트럼** 개선:
 - ✓ (현행) 기반암 기반(지진재해 지도)
 - ✓ (개선) 구조물 진동 특성 기반(스펙트럼 가속도(1초주기, 단주기 응답가속도 지도))
- ❖ **현행 내진설계(기능수행+붕괴방지) → 성능기반(다단계 성능수준)**
 - ✓ 다단계 성능수준
 - 기능수행, 즉시복구, 장기복구(인명보호, 붕괴방지), 붕괴방지
 - ✓ 성능수준별 설계거동한계 설정
 - ✓ 성능검증 방법 확립(비선형 해석)
 - ✓ **대안 설계 제시**:
 - **신뢰도 기반**(Capacity, Demand 통계적 특성 기반)
 - 내진성능수준별 내진상세 확립