

성능기반 내진설계 및 평가의 이해



성능기반 내진설계 및 평가의 이해

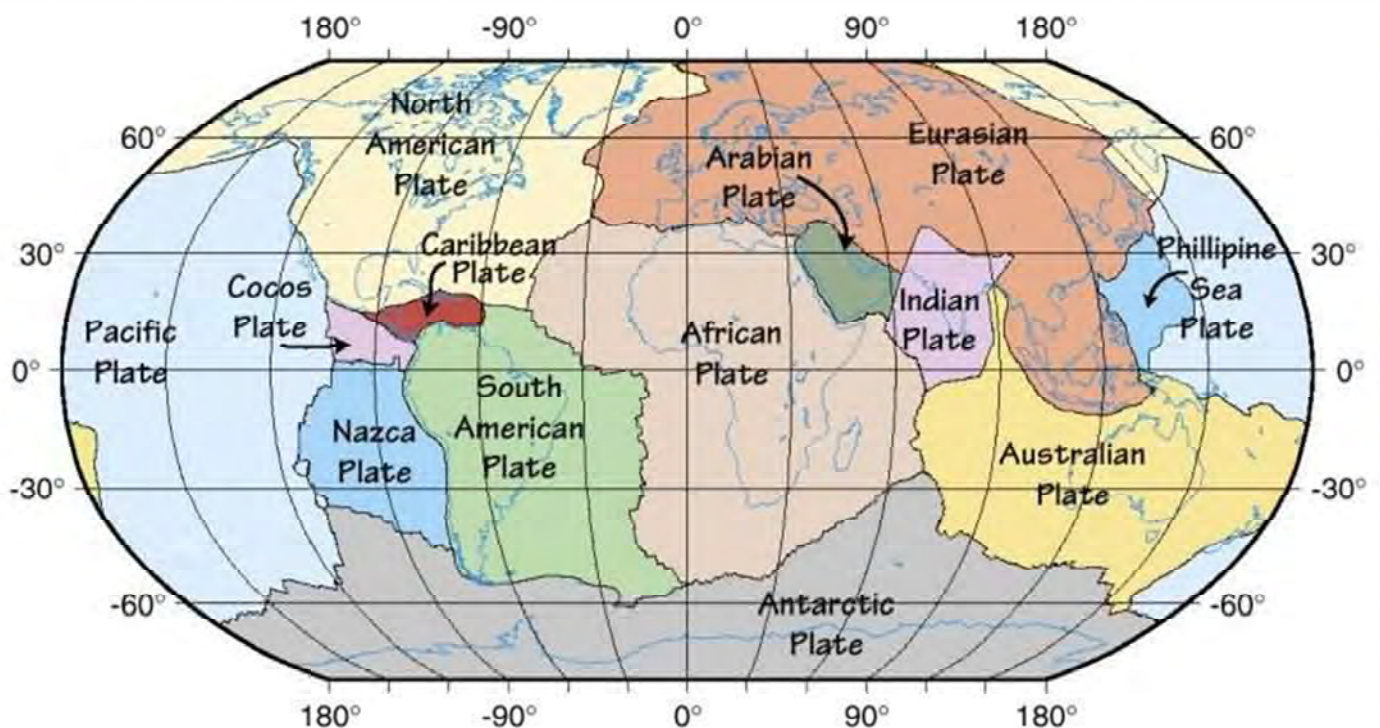


한반도는 과연 안전한가?



※ 불의 고리는 세계 주요 지진대와 화산대 활동이 겹치는 환태평양 조산대

한반도는 과연 안전한가?



13개의 대륙판

한반도는 과연 안전한가?

90% 이상의 지진은 판 경계에서 발생



한반도는 과연 안전한가?

- 2004년 5월 연구발표-최승찬 박사
독일 포츠담 지구물리연구소
“한반도의 대륙 충돌대 위치 추정”
- 과학인공위성을 이용한 자기장
분석을 통하여 한반도 지하 20-50km
지각 구조 분석
- 한반도 동서방향 새로운 대륙충돌대 발견
에클로자이트 암석 발견 증거 뒷받침

태풍의 눈-한반도는 4개 지각판의 중심
위성위치확인시스템(GPS)
- 4개의 지각판이 힘의 균형을 이루고 있는 상태



한반도는 과연 안전한가?

1) 지진의 규모(Magnitude)는 에너지와 관련이 있다.

$\log E = 11.8 + 1.5 M_s$: 1956년 Gutengerg 와 Richter 제안

- 규모 1.0이 변하면 지진에너지는 약 32배 차이
- 규모 2.0의 차이는 방출된 에너지는 약 1000배 차이
- 규모 0.2의 차이는 지진에너지가 2배 차이

(대만지진 : 규모 7.6 , 터키지진 : 규모 7.4 -> 0.2 차이 -> 에너지 2배 차이)

2) 지진의 규모(Magnitude)는 에너지와 관련이 있다.

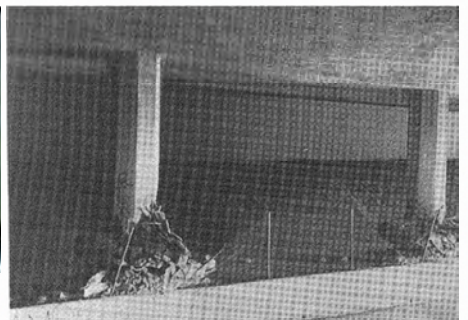
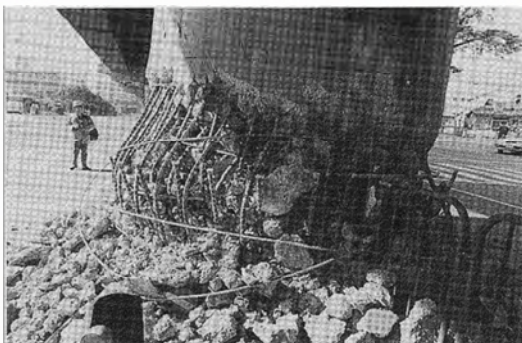
가) 1880년대 개발, 수십년간 사용 : 로씨-포렐(RF) 진도 I-X 등급

나) RF 진도 이후 각 나라에서는 각국의 실정에 맞게 수정

- 미국 : 12등급의 수정머켈리(Modified Mercalli , MM) 진도
- 중동부 유럽 : MSK (Medvedev Spoonheuer –Karnik) 진도
- 일본 : 8등급의 기상청(Japan Meteorological Agency , JMA) 진도
- 우리나라에서는 JMA 진도를 사용하다가 2001년부터 MMI로 변경함

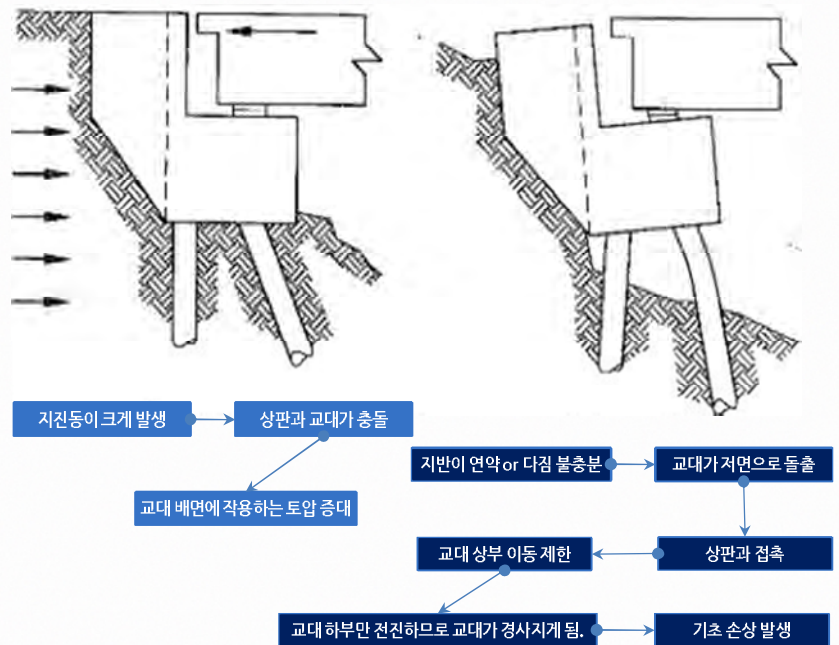
지진에 의한 피해

• 횡방향 철근 부족 및 겹침이음에 의한 파괴



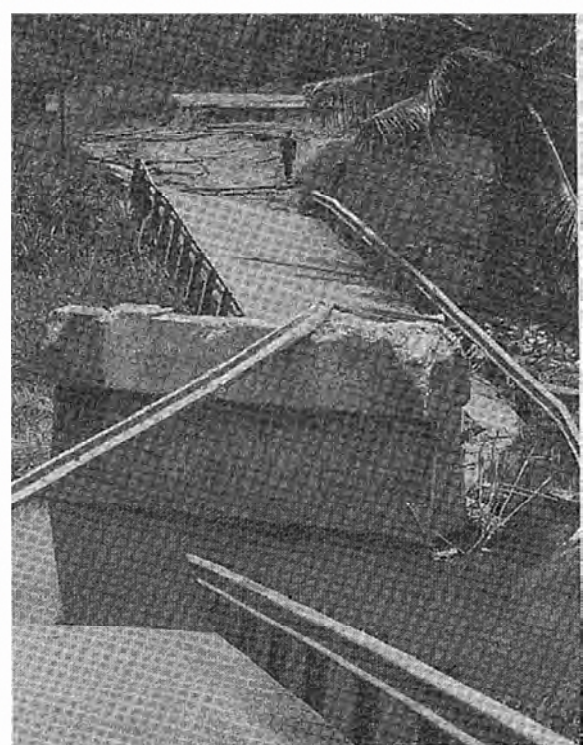
지진에 의한 피해

• 교대의 침하 및 경사에 의한 피해



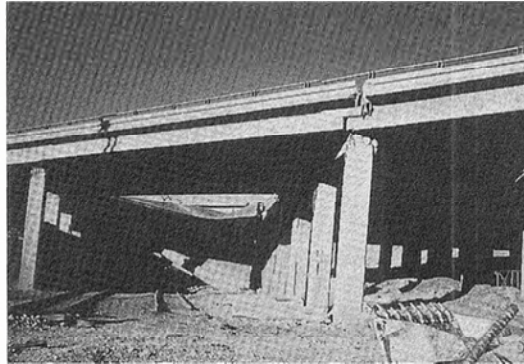
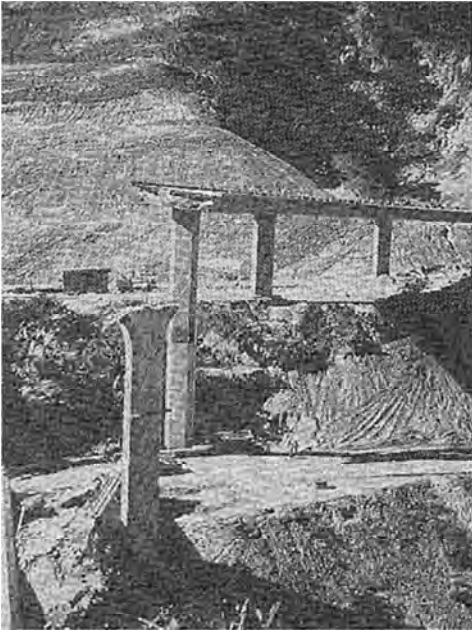
지진에 의한 피해

• 연약지반의 액상화에 의한 낙교



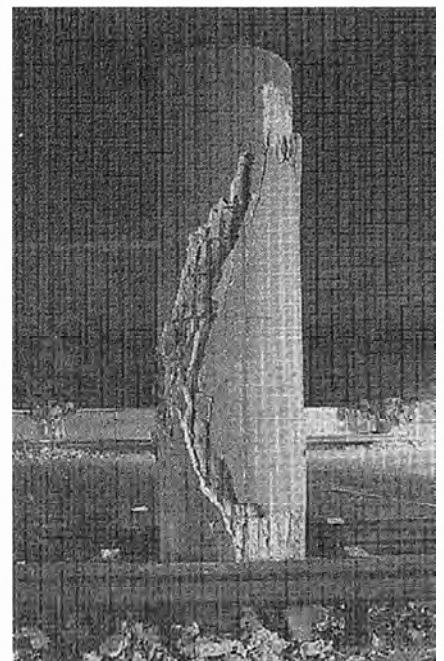
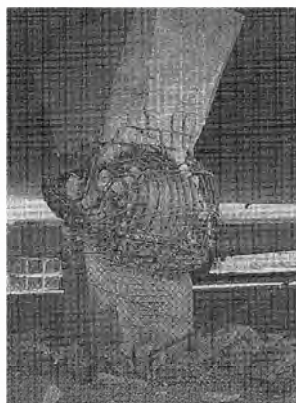
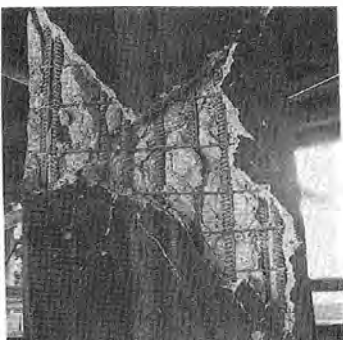
지진에 의한 피해

- 받침 연단거리 부족에 의한 낙교



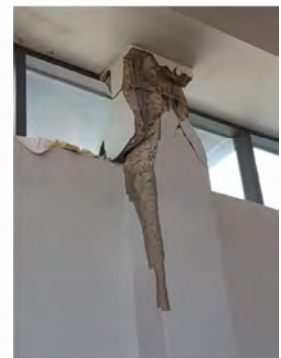
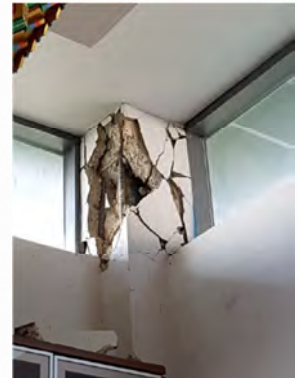
지진에 의한 피해

- 교각의 전단파괴

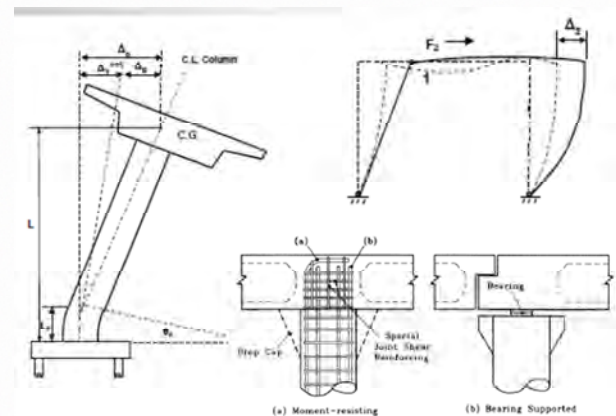
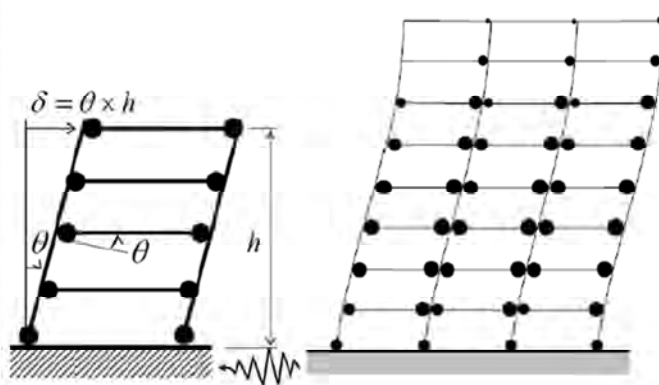


지진에 의한 피해

- 경주 지진 피해 (기둥 소성힌지부분 횡방향 철근 부족)



내진 구조시스템 기본개념



빌딩 구조물

- 강성이 큰 기둥과 강성이 상대적으로 약한 보로
- 보 양단에 소성힌지
- 구조 시스템 연성능력(Ductility)을
- 비선형 거동을 예측하기 어려움

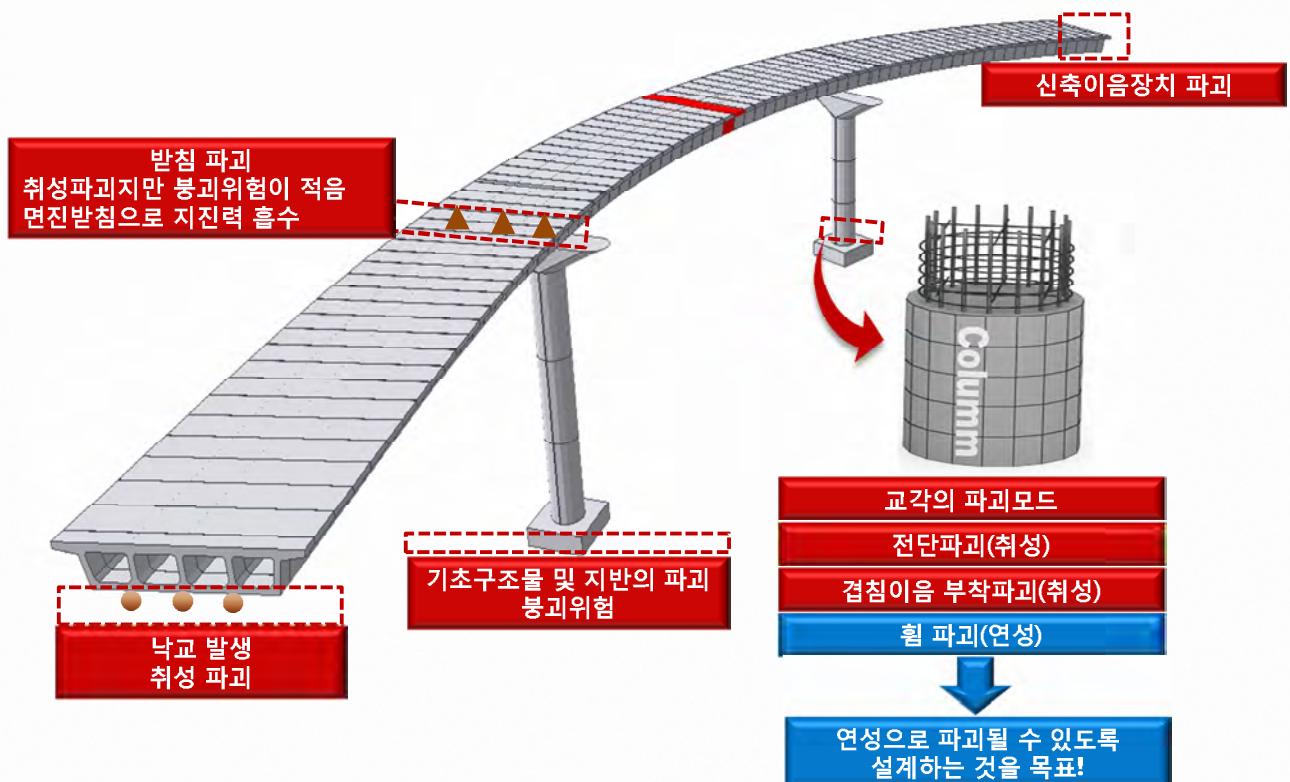
교량 구조물

- 강성이 약한 기둥과 강성이 상대적으로 큰 보로
- 기둥 단부에 소성힌지
- 교각에 대한 연성능력(Ductility)을
- 비선형 거동을 빌딩 구조물에 비해 비교적 예측하기 쉬움

건축 구조물의 특징

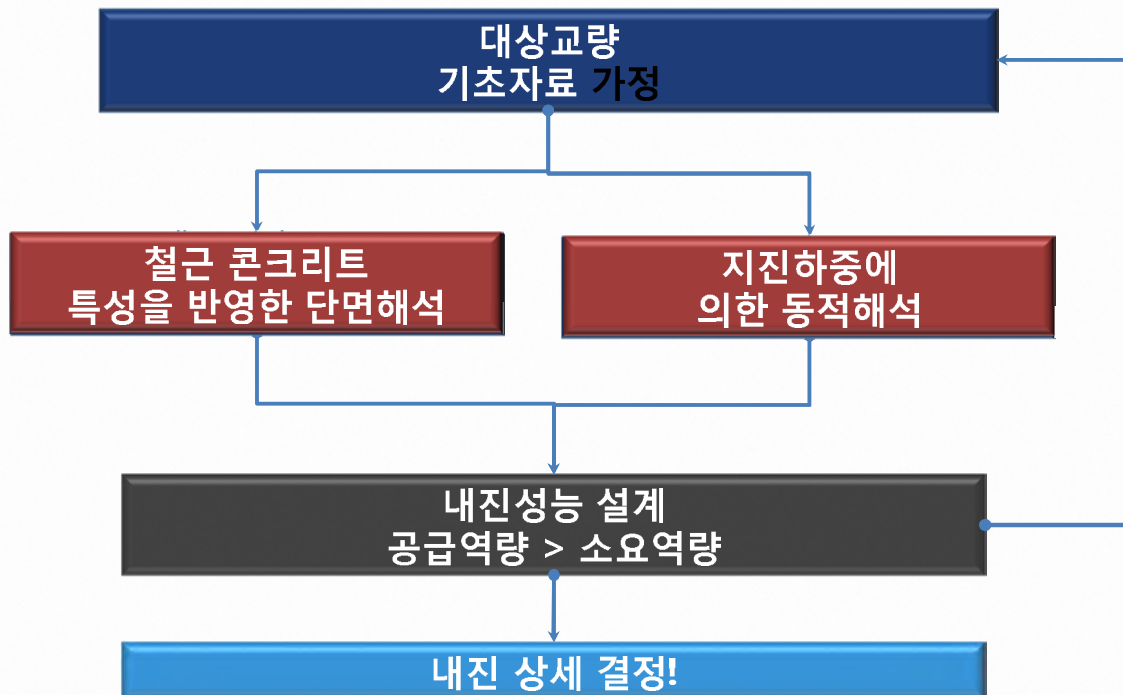


토목 구조물의 특징



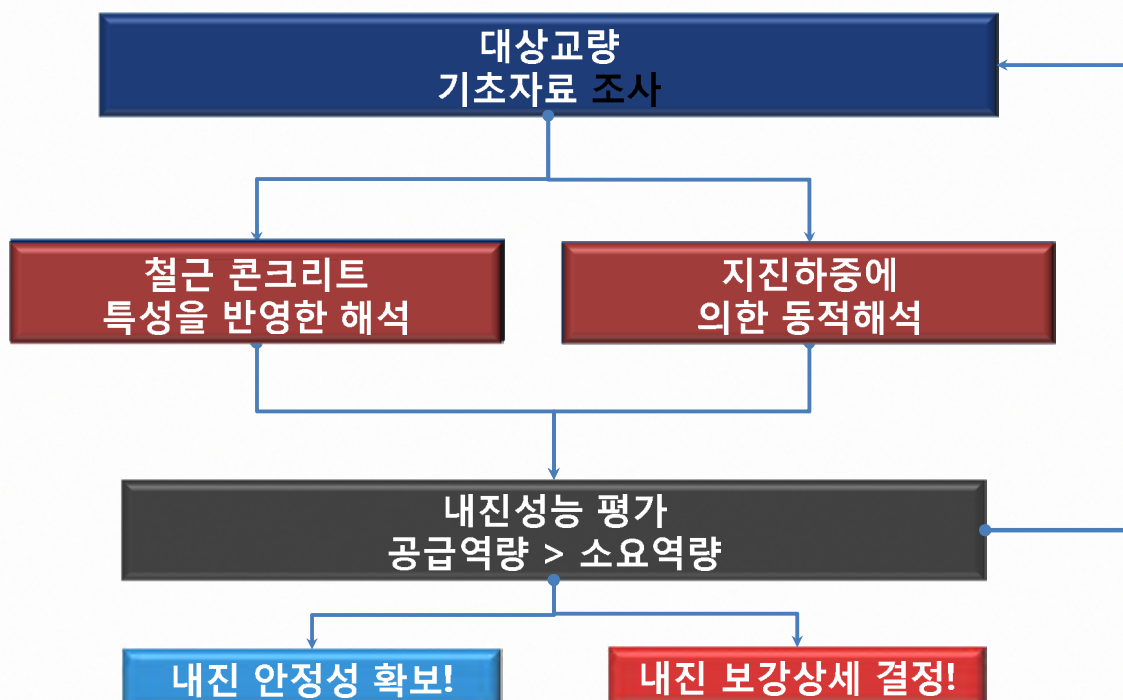
내진성능설계 흐름

• 내진성능 설계



내진성능평가 흐름

• 내진성능 평가



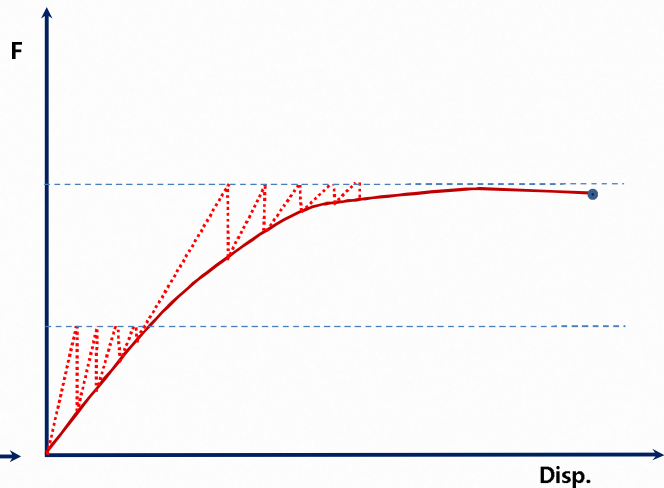
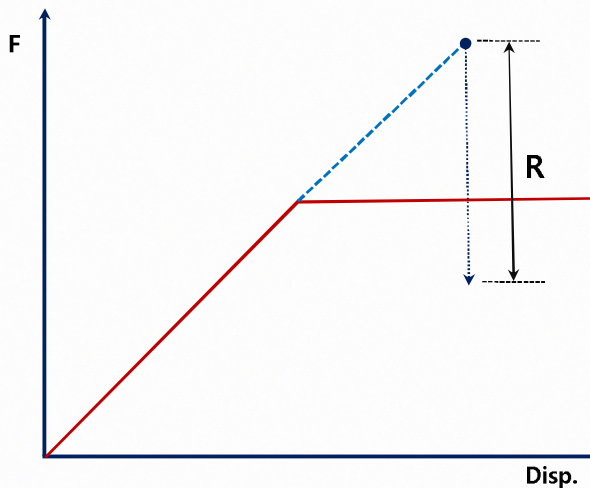
내진성능설계 및 평가 구분

힘 기반 설계 및 평가 (Force-Based Design)

- 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 설계
- 연성도를 간접적으로 고려하는 설계법
- 완전연성(Full Ductility) 설계법
- 상수 응답수정계수(Constant R) 적용

변위 기반 설계 및 평가 (Displacement-Based Design)

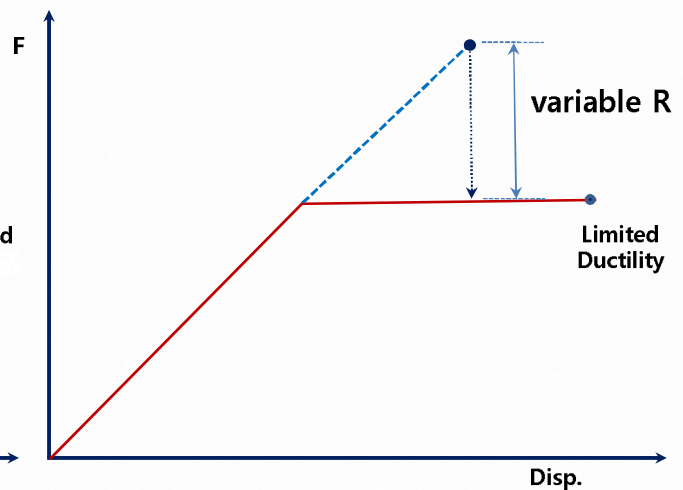
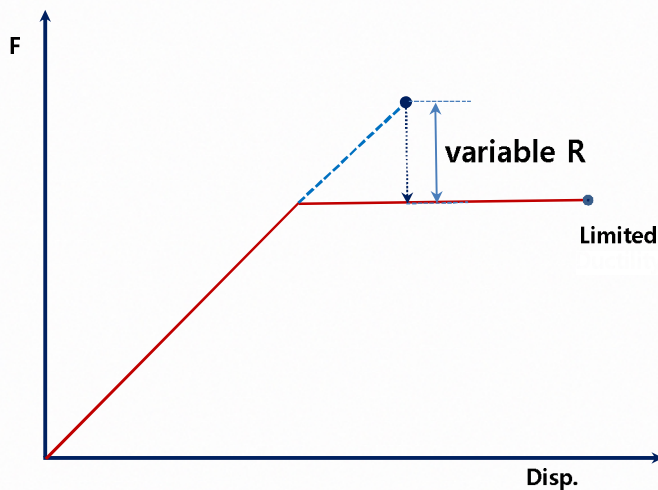
- 변위 응답스펙트럼을 기준으로 설계
- 가장 합리적이지만 설계기준에 완전 적용 어려움



내진성능설계 및 평가 구분

연성도 내진설계 및 평가 (Ductility-Based Design)

- 힘 기반과 변위 기반 복합 : 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 설계
- 연성도를 직접적으로 고려하는 설계법 : 수식 적용
- 한정 연성(Limited Ductility) 설계법
- 변수 R(Variable R) 적용 : 소요 응답수정계수



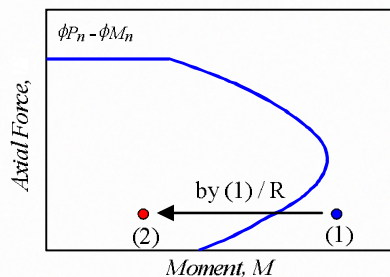
내진성능설계 및 평가의 구분

힘 기반 설계 및 평가 (Force-Based Design)	<ul style="list-style-type: none"> 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 설계 연성도를 간접적으로 고려하는 설계법 완전연성(Full Ductility) 설계법 상수 응답수정계수(Constant R) 적용
변위 기반 설계 및 평가 (Displacement-Based Design)	<ul style="list-style-type: none"> 변위 응답스펙트럼을 기준으로 설계 가장 합리적이지만 설계기준에 완전 적용 어려움
연성도 내진설계 및 평가 (Ductility-Based Design)	<ul style="list-style-type: none"> 힘 기반과 변위 기반 복합 : 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 설계 연성도를 직접적으로 고려하는 설계법 : 수식 적용 한정 연성(Limited Ductility) 설계법 변수 R(Variable R) 적용 : 소요 응답수정계수

Tip. 현재 기준상의 내진설계 방법

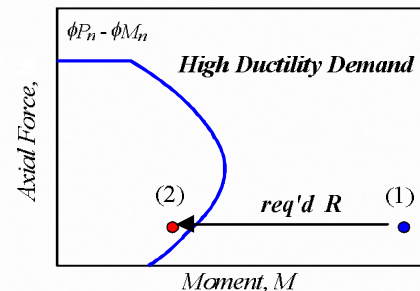
1) 응답수정계수 적용

- 입력된 상수 R을 단순 적용한 완전연성설계 수행 / 완전연성 심부구속 철근식 적용

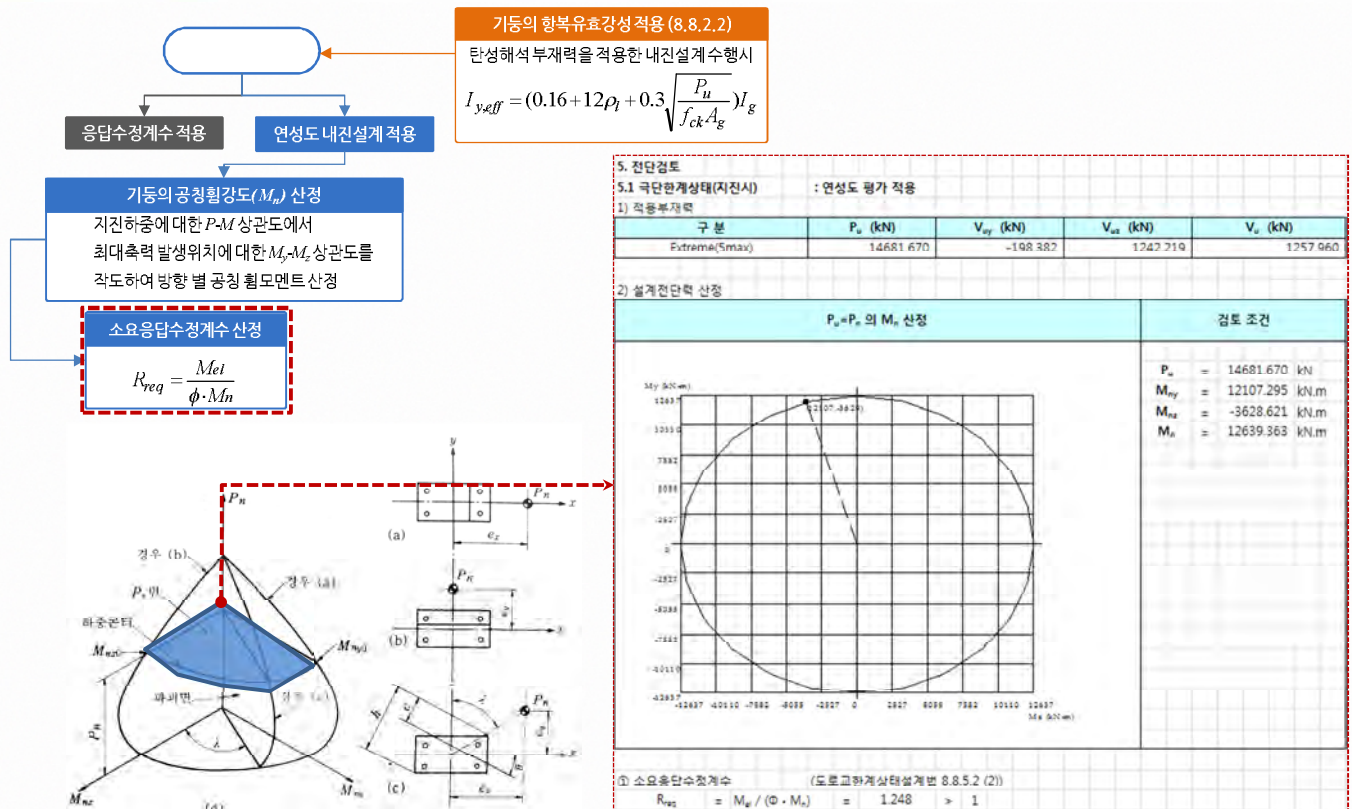


2) 연성도 내진설계 적용

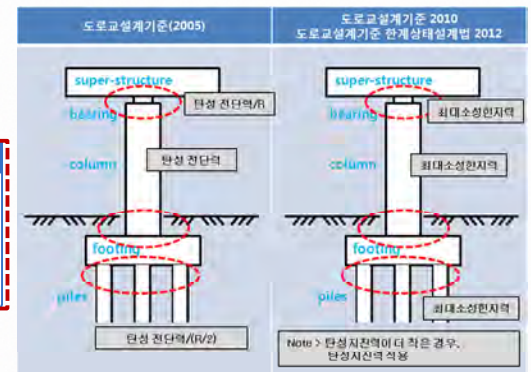
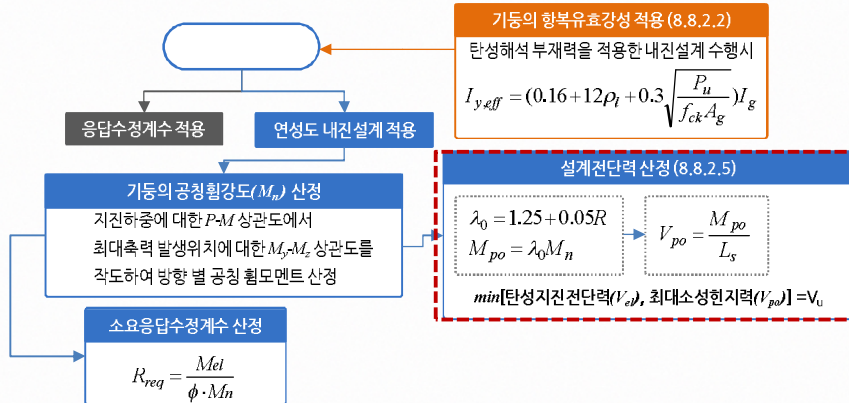
- R을 변수로 산정하여 한정연성설계 수행 / 합리적인 소요 심부구속 철근식 적용



콘크리트 내진성능설계



콘크리트 내진성능설계



② 설계전단력

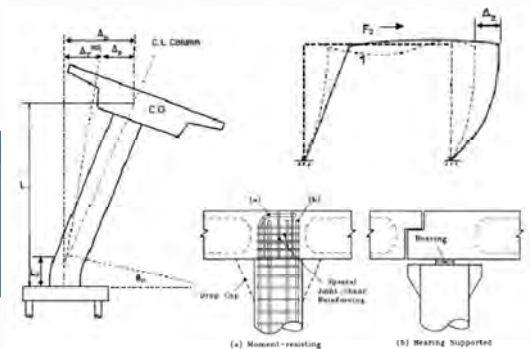
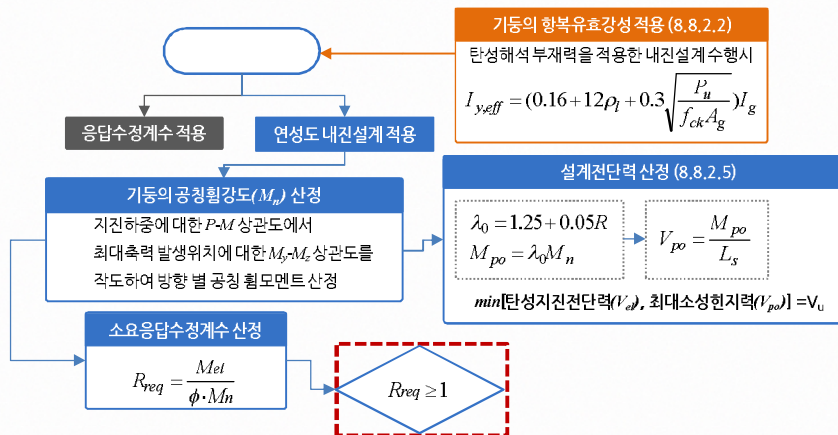
- 휨조과강도 계산 (도로교현재상태설계법 8.8.2.5 (5))

$f_{ck} =$	27.000 MPa	\leq	60.000 MPa OK
$P_u =$	14681.670 kN	\leq	$0.3 \cdot f_{ck} \cdot A_g = 20611.989$ kN OK
$\rho =$	0.01262	\leq	0.030 OK
$\lambda_0 =$	$1.25 + 0.05 R$	$=$	1.312	
$M_n =$	12639.363 kN.m	휨조과강도	$= \lambda_0 \cdot M_n = 16587.597$ kN.m	

- 설계 전단력 산정

교각의 최대소성현지력	$=$	휨조과강도 / 교각길이(L)	$=$	840.325 kN
$V_u =$	\min (탄성전단력($R=1.0$), 교각의 최대소성현지력)	$=$		840.325 kN

콘크리트 내진성능설계



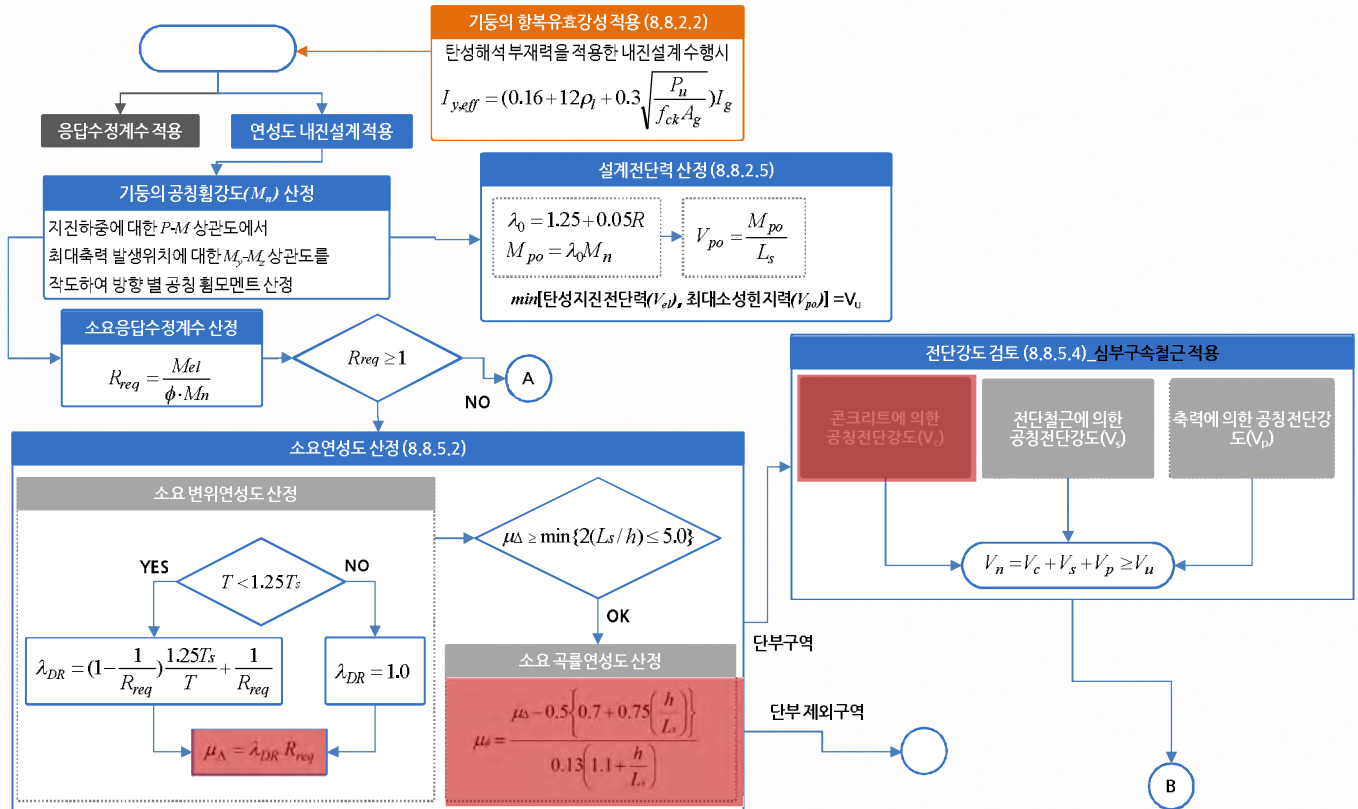
1) 소요 응답수정계수가 1.0이상인 경우 단부구역에 소성현지가 발생

- 소요 변위연성도와 소요 곡률연성도를 계산
- 소요 곡률연성도를 반영한 심부구속 휨방향 철근량 검토 수행
- 소요 변위연성도를 반영한 콘크리트의 공칭전단강도 계산
- 단부구역의 소성현지구역을 심부구속철근으로 전단설계 수행
- 단부 이외의 구역을 전단철근으로 전단설계 수행

2) 소요 응답수정계수가 1.0이하인 경우 단부구역에 소성현지가 미발생

- 8.8.2.6에 따라 콘크리트 및 전단철근의 공칭 전단강도 계산
- 단부구역과 단부구역 이외의 구역이 모두 전단 철근으로 전단설계 수행
- 휨방향 철근 검토 수행

콘크리트 내진성능설계



콘크리트 내진성능설계

B 프로세스

② 단부구역 검토

■ 단부구역 전단설계 (도로교한계상태설계법 8.8.5.4)

- 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)

$$V_c = k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot A_g = 3173.423 \text{ kN}$$

여기서, A_g : 전단 유효단면적, 원형단면과 사각형단면에 대하여 $0.8 \cdot A_g$

(원단면이나 사각형중공단면과 같이 복부가 구분되는 단면은 $b_w \cdot d$ (복부 폭 유효길이))

$$k = 0.3 \quad (\mu_\Delta \leq 2.0)$$

콘크리트 전단강도 (V_c)

- 전단철근에 의한 전단강도(V_s)

$$V_s = 0.5\pi \cdot A_{sp} \cdot f_{yk} \cdot D_z / s = 3107.872 \text{ kN} \quad (\text{원형단면의 나선철근 또는 원형후프띠철근})$$

여기서, A_{sp} : 나선철근 또는 원형 후프띠철근의 단면적 = 397.200 mm²

f_{yk} : 띠철근 또는 나선철근의 항복강도 = 300.000 MPa

D_z : 원형후프 띠철근이나 나선철근 중심간의 심부콘크리트 지름(mm) = 1660.400 mm

s : 띠철근 또는 나선철근의 수직간격 = 100.000 mm

심부구속 전단철근 전단강도 (V_s)

- 속력에 의한 전단강도(V_p)

$$V_p = 0.15 \cdot P_u \cdot h / L_s = 200.818 \text{ kN}$$

여기서, P_u : 교각의 최소 계수 축력 (N)

h : 고려하는 방향으로의 단면 최대 두께

L_s : 기동정상비의 기준이 되는 기동 길이

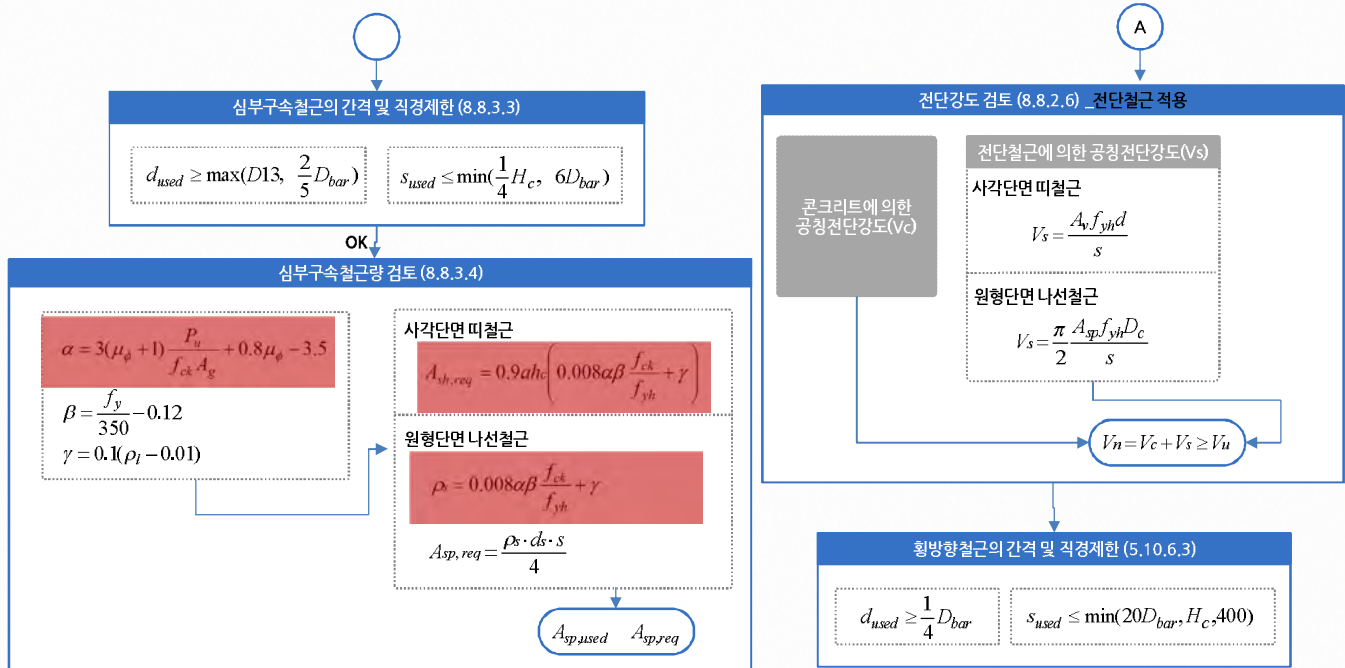
속력에 의한 전단강도 (V_p)

- 전단강도 검토

$$V_n = V_c + V_s + V_p = 6482.113 \text{ kN} \geq V_u = 840.325 \text{ kN}$$

..... OK

콘크리트 내진성능설계

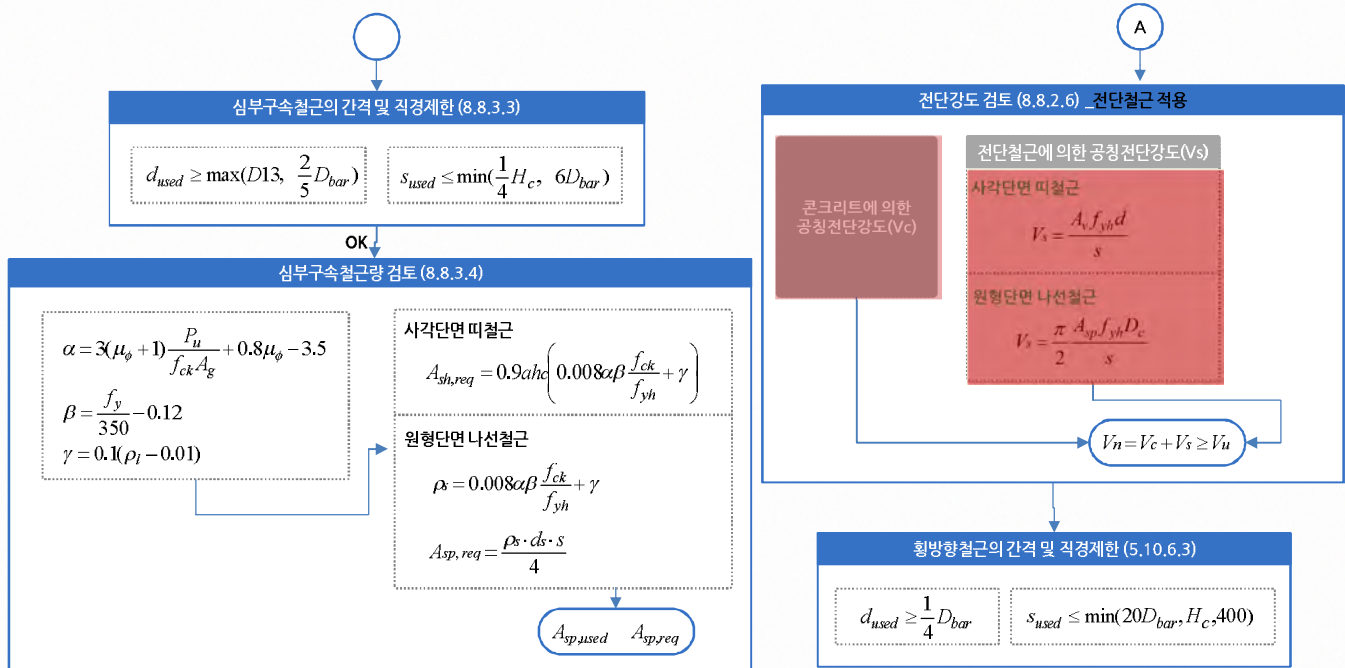


콘크리트 내진성능설계

B 프로세스

■ 심부구속철근 검토												
- 최소 철근직경 제한												
d_{lim}	=	$\max [D13, 0.4D_{bar}]$	=	12.700	mm	≤	d_{use}	=	15.900	mm OK	
- 철근 간격												
s_{lim}	=	$\min [0.25H_c, 0.258c, 6D_{bar}]$	=	171.600	mm	≥	s_{use}	=	100.000	mm OK	
- 원형기둥에서 심부구속 횡방향 철근의 총 소요 단면적										(도로교한계상태설계법 8.8.5.3)		
ρ_s	=	$0.008 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot (f_{ck} / f_{yh}) + \gamma$	=	0.00299								
α	=	$3 \cdot (\mu_\phi + 1) \cdot P_u / (f_{ck} \cdot A_g) + 0.8 \mu_\phi - 3.5$	=	5.17509								
β	=	$(f_y / 350) - 0.12$	=	0.73714								
γ	=	$0.1 (\rho_l - 0.01)$	=	0.00024								
$req A_{sp}$	=	$(\rho_s \cdot d_s \cdot s) / 4$	=	123.942	mm ²							
여기서, ρ_l : 기둥의 축방향 철근비												
d_s	:	나선철근(또는 원형 띠철근) 외측표면을 기준으로 한 콘크리트 심부의 단면 치수								=	1660.400	mm
s	:	나선철근(또는 원형 띠철근)의 수직간격 (mm)										
$use A_{sp}$	=	D16	@	2	legs	=	397.200	mm ²		≥	$req A_{sp}$ OK

콘크리트 내진성능설계



콘크리트 내진성능설계

A 프로세스

③ 단부이외구역 검토

■ 단부이외구역 전단설계 (도로교한계상태설계법 8.10.2.6)

원형단면이므로 합성전단력에 대해 검토함

$$V_{d, used} = (\Phi_s \cdot f_y \cdot A_v \cdot z) / s \cdot \cot\theta = 3248.236 \text{ kN}$$

$$V_{d, max, com} = \alpha_{cw} \cdot V_{d, max} = 19287.979 \text{ kN}$$

$$V_d = \min(V_{d, used}, V_{d, max, com}) = 3248.236 \text{ kN} \geq V_u = 836.450 \text{ kN} \quad \text{..... OK}$$

여기서,

$$V_{d, max} = V \cdot \Phi_c \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot z / (\cot\theta + \tan\theta) = 15430.383 \text{ kN}$$

$$v = 0.6(1 - f_{ck}/250) = 0.535 \quad \text{: 콘크리트 압축강도 유효계수}$$

$$z = \text{단면내부 팔길이} = 1620.000 \text{ mm}$$

$$f_n = N_u/A_c = 5.774 \text{ MPa} \quad \text{: 계수축력에 의한 콘크리트의 평균압축응력}$$

$$0.25(\Phi_c \cdot f_{ck}) < f_n \leq 0.5(\Phi_c \cdot f_{ck}) \text{ 이므로 } \alpha_{cw} = 1.250$$

$$\theta = 29.750^\circ \quad \text{: 콘크리트 스트럿과 주인장 철근 사이의 경사각}$$

$$22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \text{ 의 범위에서 선정}$$

한계상태설계법 2015 해설편
전단강도 평가식 개정

기존 AASHTO 개념의
전단강도 평가

Eurocode 개념의
전단강도 평가로 개정

■ 전단철근 검토 (도로교한계상태설계법 5.12.6.3)

- 최소 철근직경 제한

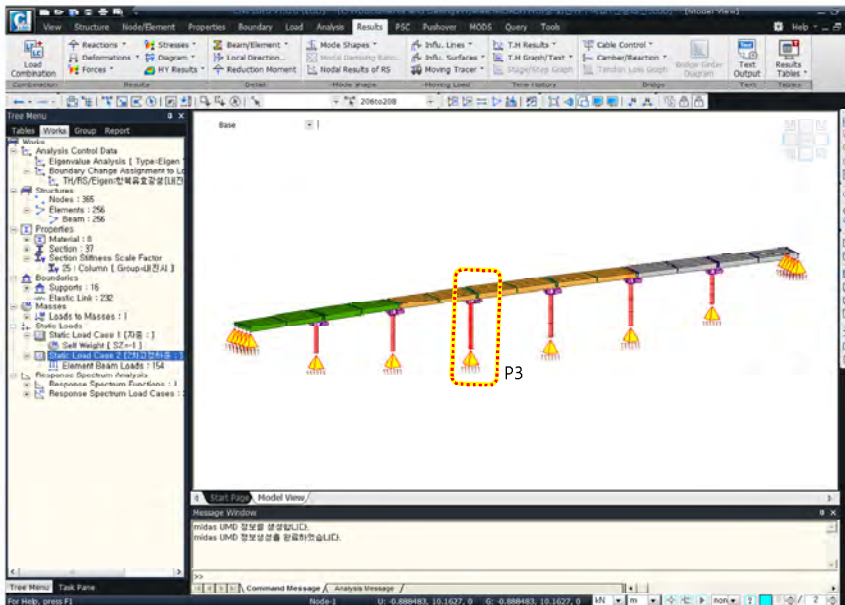
$$d_{lim} = 1/4 \cdot D_{bar} = 7.150 \text{ mm} \leq \text{철근직경 } d : 19.100 \text{ mm} \quad \text{..... OK}$$

- 최대 철근간격 제한

$$s_{lim} = \min[20 \cdot D_{bar}, H_c, B_c, 400\text{mm}] = 400.000 \text{ mm} \geq s_{used} = 150.000 \text{ mm} \quad \text{..... OK}$$

콘크리트 내진성능설계

연성도 내진설계법 VS 응답수정계수법



- 1) 상부구조 : 7경간 PSC Beam교
- 2) 지간 구성 : 7@35.0 m = 245.0 m
- 3) 하부구조 : T형 교각
- 4) 교폭 : 10.19 m
- 5) 고정하중
 - : 자중 및 2차고정하중 (20kN/m)
- 5) 질량
 - : 자중과 고정하중 Mass Sum = 7459.62 kN/g
- 6) 철근콘크리트 : PSC Beam $f_{ck} = 40$ MPa
 - 교각 기둥 $f_{ck} = 27$ MPa
- 7) 내진등급 1등급교
 - : 지진구역 I, 구역계수 $I = 0.11$, 위험도계수(I) = 1.4 (재현주기 1000년)
- 8) 내진조건 : S = 1.2 (지반종류 II)
- 9) 응답수정계수 : 모멘트 R=3 / 축력 및 전단력 R=1

콘크리트 내진성능설계

연성도 내진설계법 VS 응답수정계수법

Start Page midas UMD LSD RC/Column

검토단면 | Memb206-I | 단면 정보 | 부재력 | P-M 상관도 | 검토단면 정보 | 206-I-End

단면 정보

Solid Round

D 1800.000 mm

pmax 0.090

Dc 100.000 mm

Req.Rbar

Dmm

재료 정보

콘크리트

f_{ck} 27.000 N/mm²

E_c 27782.532 N/mm²

주철근

f_y 300.000 N/mm²

E_s 200000.000 N/mm²

전단철근

f_y 300.000 N/mm²

E_s 200000.000 N/mm²

기둥의 소성설계 고려

As,used : 32120 mm²

Layer	Num	Pos1	Size1	Size2	Dc	간격
1	25	D29			100.0	201.0
2	25	D29			200.0	175.9
3	0				0.00	0.00

단면정보 및(가) 계산 Excel Report

Message

Result View

Memb206-I (206_I)

-A = 2.5E+6mm²

-As = 32120mm²

1800

[철근비 검토]

$\rho_{use} = 0.01262 \leq 0.08000$ OK

$(A_s \cdot f_y) / (A \cdot f_{ck}) = 0.14025 \geq 0.13500$ OK

[극한한계상태 검토]

-축력 검토 [Ultimate(1)] (단위 : N)

$P_n = +4.1E+7 \geq P_u = +1.5E+7$ OK

$P_n/P_u = 2.75043$

-모멘트 검토 [Ultimate(1)] (단위 : Nmm)

$M_n = +4.2E+9 \geq M_u = +1.5E+9$ OK

$M_n/M_u = 2.75043$

-전단력 검토 [Ultimate(1)] (단위 : N)

$V_n = 3451597 \geq V_u = 102199$ OK

$V_n/V_u = 33.7734$

[극한한계상태 검토]

-축방향철근량 검토 (단위 : mm²)

$A_{s_min} = 0.01A_g = 25446.9$

$A_{s_max} = 0.06A_g = 152681$

$A_{s_min} \leq A_s \leq A_{s_max}$ OK

-축력 검토 [Extreme(5min)] (단위 : N)

$P_n = -1.1E+7 < P_u = -1.5E+7$ NG

$P_n/P_u = 0.72107$

-모멘트 검토 [Extreme(5min)] (단위 : Nmm)

$M_n = P_Value < M_u = P_Value$ NG

$M_n/M_u = 0.71430$

-전단력 검토 [Extreme(5max)] (단위 : N)

$V_n = 4513627 \geq V_u = 1280386$ OK

$V_n/V_u = 3.52501$

콘크리트 내진성능설계

연성도 내진설계법 VS 응답수정계수법

기동소성설계 Option

응답수정계수 적용 ☒ 연성도 내진설계 적용 ☒

1차모드 주기 5.014 sec
지반조건 지반 II (0.44 sec)

결과정보

구분	철근	단면적	심부구속철근
주철근	D16	2.000	100.000

As,used : 32120 mm²

Result View

As_max = 0.06Ag = 152681
As_min < As < As_maxOK

-축력 검토 [Extreme(5max)] (단위 : N)
Pn = +1.3E+7 < Pu = +1.5E+7
Pn/Pu = 0.85148OK

-모멘트 검토 [Extreme(5max)] (단위 : N)
Mn = P-Value < Mu = P-Value
Mn/Mu = 0.84841OK
연성도 내진설계로 검토

-전단력 검토 [Extreme(5max)]
검토과강도
fck = 27.0000 ≤ 60.0000 N/mm²OK
Pu = +1.5E+7 N
0.3FckAg = +2.1E+7 N
Pu ≤ 0.3FckAgOK
ρ = 0.01262 ≤ 0.03000OK

-소요연성도
μΔ = 1.13022 ≤ 5.00000OK

-단부구역 전단강도
Vn = 6482284 N ≥ Vu = 836450 N
Vn/Vu = 7.74976OK

-심부구속철근 검토
Dia_lim = 12.7000 mm ≤ Dia_use = 15.9000 mmOK
s_lim = 171.600 mm ≥ s_use = 100.000 mmOK
Ash_use = 397.200 mm² ≥ Ash_req = 89.674 mm²OK

-단부이외구역 전단강도
Vn = 4209381 N ≥ Vu = 836450 N
Vn/Vu = 5.03243OK

-전단철근 검토
Dia_lim = 7.15000 mm ≤ Dia_use = 15.9000 mmOK
s_lim = 400.000 mm ≥ s_use = 300.000 mmOK

콘크리트 내진성능설계

연성도 내진설계법 VS 응답수정계수법

기동소성설계 Option

응답수정계수 적용 ☒ 연성도 내진설계 적용 ☒

1차모드 주기 5.014 sec
지반조건 지반 II (0.44 sec)

결과정보

구분	철근	단면적	심부구속철근
주철근	D16	2.000	100.000

As,used : 32120 mm²

Result View

Vn = 3451597 ≥ Vu = 102199
Vn/Vu = 33.7734OK

[극단한계상태 검토]
축방향철근량 검토 (단위 : mm²)
As_min = 0.01Ag = 25446.9
As_max = 0.06Ag = 152681
As_min < As < As_maxOK

-축력 검토 [Extreme(5min)] (단위 : N)
Pn = +3.4E+7 ≥ Pu = +1.5E+7
Pn/Pu = 2.25349OK

-모멘트 검토 [Extreme(5min)] (단위 : N)
Mn = P-Value ≥ Mu = +5.4E+9
Mn/Mu = 2.26761OK

-전단력 검토 [Extreme(5max)]
검토과강도
fck = 27.0000 ≤ 60.0000 N/mm²OK
Pu = +1.5E+7 N
0.3FckAg = +2.1E+7 N
Pu ≤ 0.3FckAgOK
ρ = 0.01262 ≤ 0.03000OK

-단부구역 전단강도
Vn = 5598055 N ≥ Vu = 896303 N
Vn/Vu = 6.24571OK

-심부구속철근 검토
Dia_lim = 12.7000 mm ≤ Dia_use = 15.9000 mmOK
s_lim = 171.600 mm ≥ s_use = 100.000 mmOK
Ash_use = 397.200 mm² < Ash_req = 448.303 mm²NG

-단부이외구역 전단강도
Vn = 3526140 N ≥ Vu = 896303 N
Vn/Vu = 3.93409OK

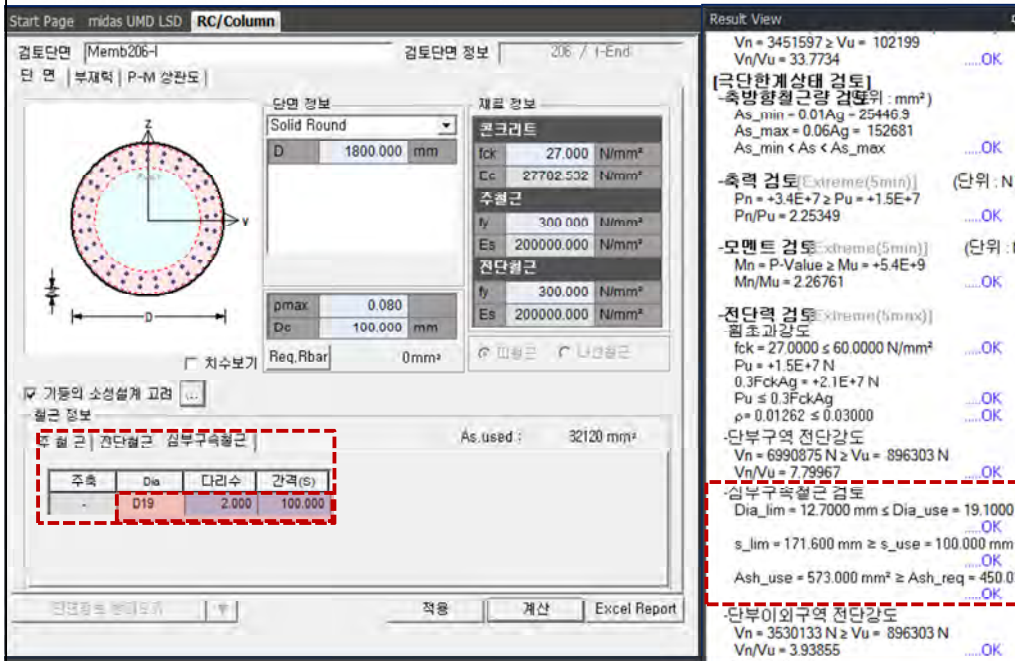
-전단철근 검토
Dia_lim = 7.15000 mm ≤ Dia_use = 15.9000 mmOK
s_lim = 400.000 mm ≥ s_use = 300.000 mmOK

심부구속철근을 D16으로 배치

심부구속 철근량 검토 NG

콘크리트 내진성능설계

연성도 내진설계법 VS 응답수정계수법

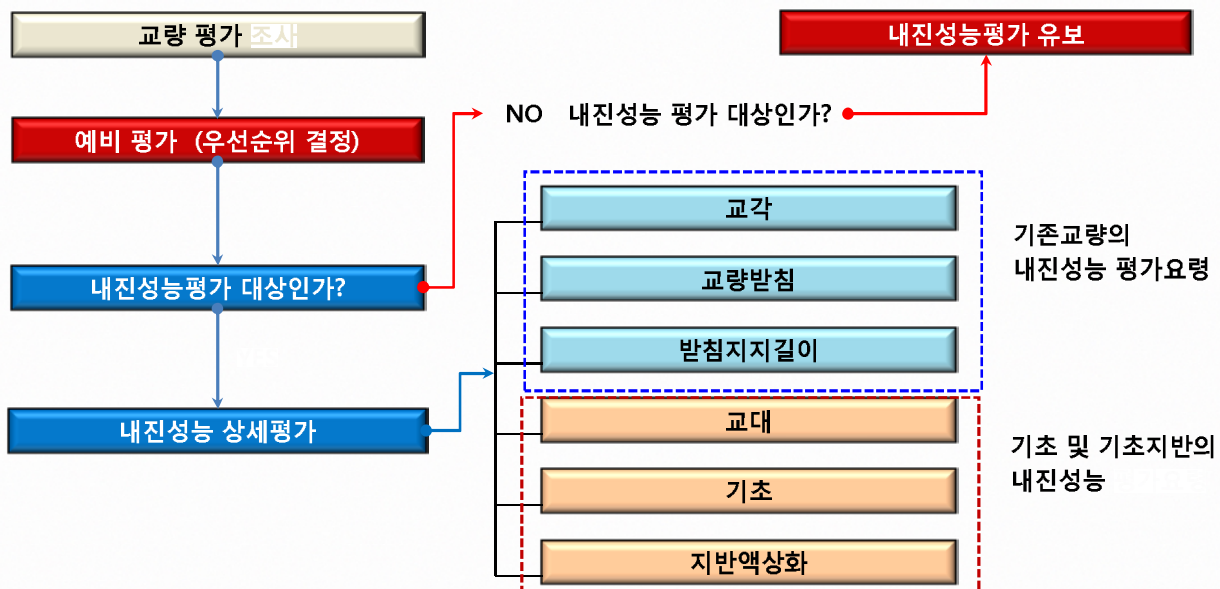


철근 콘크리트 연성도를 통한 효율적인 물량 절감 효과를 통한 경제적인 설계 가능!

콘크리트 내진성능평가

4.1 일반사항

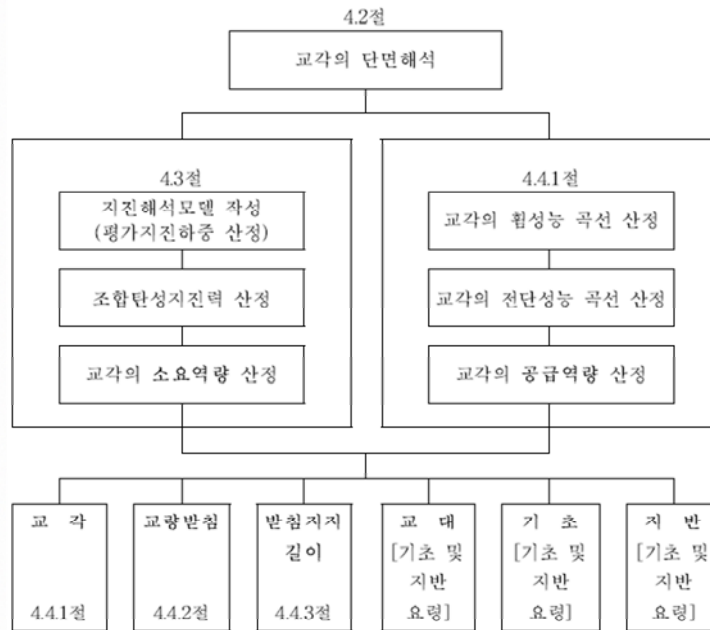
- 교량의 구성요소 중 교각, 교량 받침부, 받침지지길이, 교대, 기초 및 지반에 대해 내진성능상세평가를 수행한다.



콘크리트 내진성능평가

4.1 일반사항

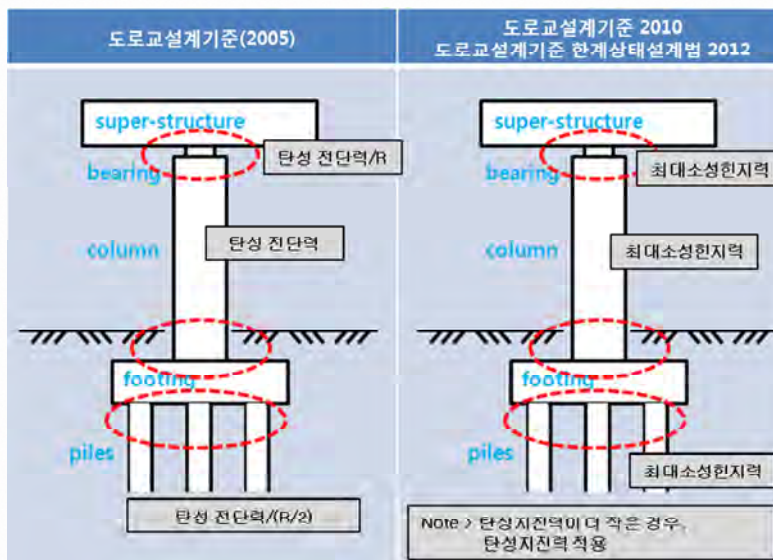
- 2) 내진성능 상세평가는 구성요소가 보유하고 있는 **공급역량**과 내진성능평가 기준지진에 대하여 각 구성요소에 요구되는 **소요역량**을 비교하여 평가한다.



콘크리트 내진성능평가

4.1 일반사항

- 3) 교량의 구성요소 중 교각의 평가지진하중은 교량 상부구조에서 교각으로 전달되는 **지진하중**으로 하며, 교량받침 및 기초의 평가지진하중은 **교각의 조합탄성 지진력과 단면강도 중 작은값**으로 한다.



콘크리트 내진성능평가

4.2 교각의 단면해석

4.2.1 일반사항

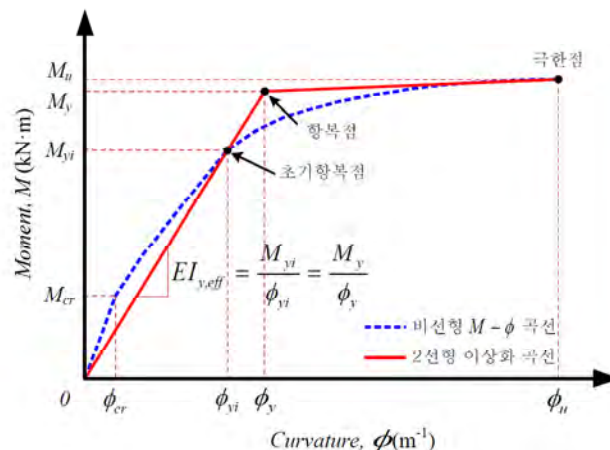
- 1) 교각의 단면강도는 교각이 갖는 휨성능 및 전단성능 곡선의 **극한상태에 해당되는 강도**를 말하며, 내진성능을 확보하기 위해서는 **휨강도와 전단강도가** 지진하중에 의해 발생하는 **교각의 단면력**보다 커야 한다.
- 2) 교각의 연성능력은 **휨성능 곡선의 항복변위와 극한변위의 비**에 의해 평가되며, 휨성능 곡선은 철근 콘크리트 부재의 비선형 구조거동 특성을 고려한 수치해석을 수행하여 얻을 수 있다.
일반적으로 사용되는 수치해석법은 **푸쉬오버(Push-over)해석**과 **모멘트-곡률 해석**이 있다.
- 3) 교각의 전단성능 곡선은 "도로교 설계기준"에 제시된 전단강도 산정식을 통해 구하는 것으로 기본으로 한다.
→ 도로교설계기준 2010 및 2012의 연성도 내진설계 제시

콘크리트 내진성능평가

4.2 교각의 단면해석

4.2.2 모멘트-곡률 해석

- 1) 고정하중이 작용하는 상태에서 수행
- 2) 축방향철근의 이음상세와 횡방향철근에 의한 횡구속 정도를 고려하여 콘크리트의 극한변형률과 최대공급변위 연성도로 극한상태를 정의
- 3) 2개의 직선으로 이상



<그림 4.2.1> 모멘트-곡률 관계곡선

콘크리트 내진성능평가

4.2 교각의 단면해석

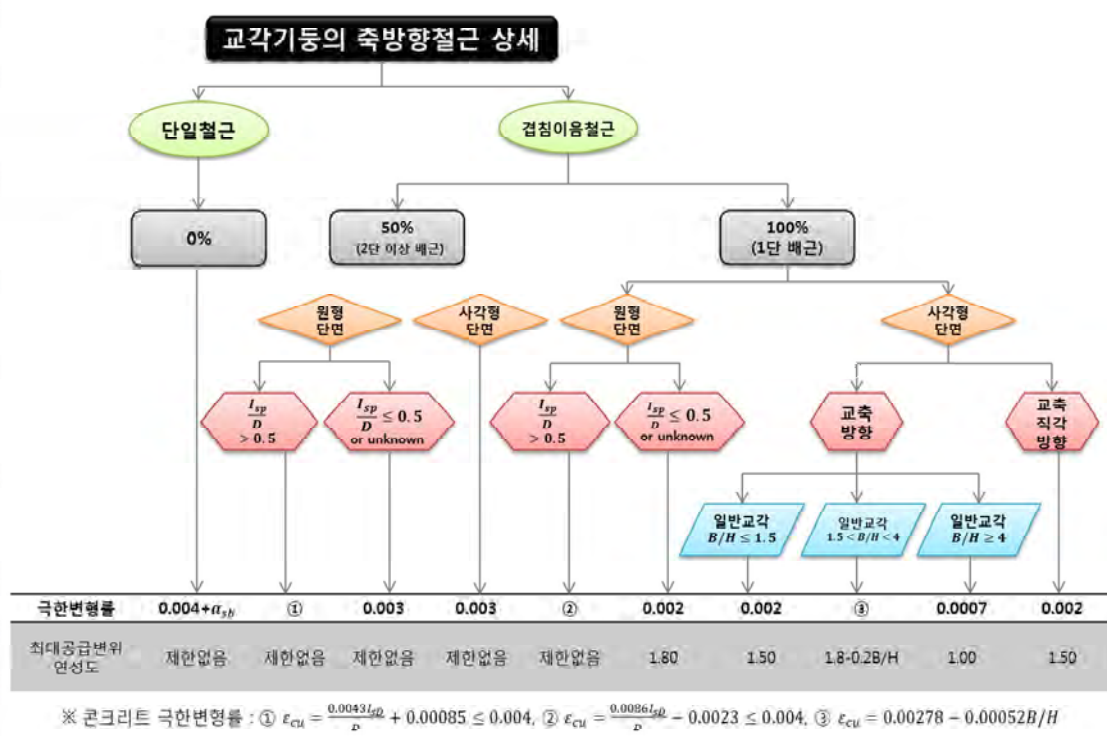
4.2.2 모멘트-곡률 해석

<표 4.2.1> 겹침이음 상세에 따른 극한변형률 및 최대공급변위연성도

축방향철근 상세			콘크리트 극한변형률				최대공급 변위연성도		
종류	배근 상태	비율	ϵ_{cu}				$\mu_{\Delta, max}$		
단일 철근	모두	0%	$0.004 + \alpha_{sh} \left(\alpha_{sh} = \frac{1.4\rho_{sh}f_{sh}\epsilon_{su}}{f_{cc}} \right)$						
겹침 이음 철근	2단 이상 배근	50%	원	$l_{sp}/D > 0.5$		$0.0043l_{sp}/D + 0.00085 \leq 0.004$		제한 없음	
			형	$l_{sp}/D \leq 0.5$ 또는 l_{sp} 모를 때		0.003			
				사각형					
	1단 배근	100%	원	$l_{sp}/D > 0.5$		$0.0086l_{sp}/D - 0.0023 \leq 0.004$		1.80	
			형	$l_{sp}/D \leq 0.5$ 또는 l_{sp} 모를 때		0.002			
				사각형	교축 방향	벽식	$4 \leq B/H$	0.0007	
			천이		$1.5 < B/H < 4$	$0.00278 - 0.00052B/H$		$1.8 - 0.2B/H$	
			일반	$B/H \leq 1.5$	0.002		1.50		
			교직방향						

콘크리트 내진성능평가

4.2.2 모멘트-곡률 해석

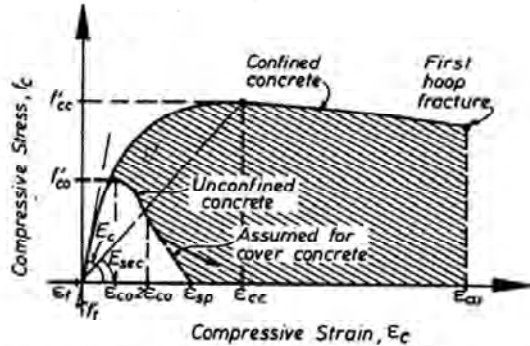


콘크리트 내진성능평가

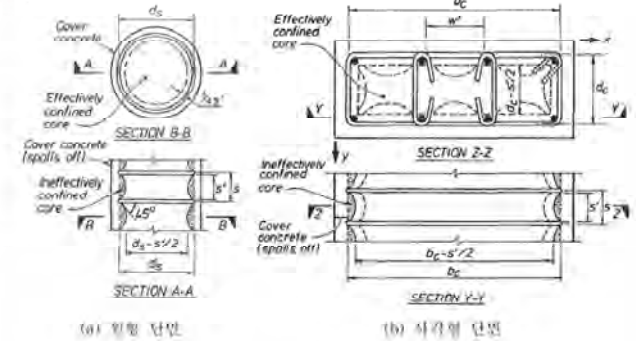
4.2.3 비선형 재료모델

1) 콘크리트 재료모델 : (예) Mander 등의 모델

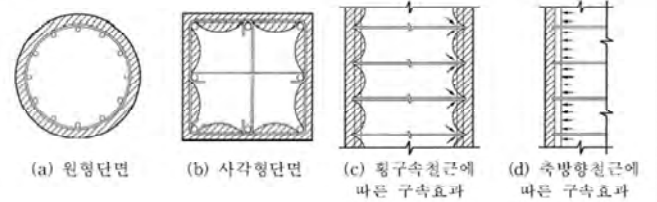
(횡방향 철근에 의한 구속을 모사할 수 있는 대표적인 모델)



<해설그림 4.2.3> 압축콘크리트의 응력-변형률 관계(Mander 등, 1988)



<해설그림 4.2.4> 횡방향철근에 따른 위치별 구속콘크리트 산정(Mander 등, 1988)



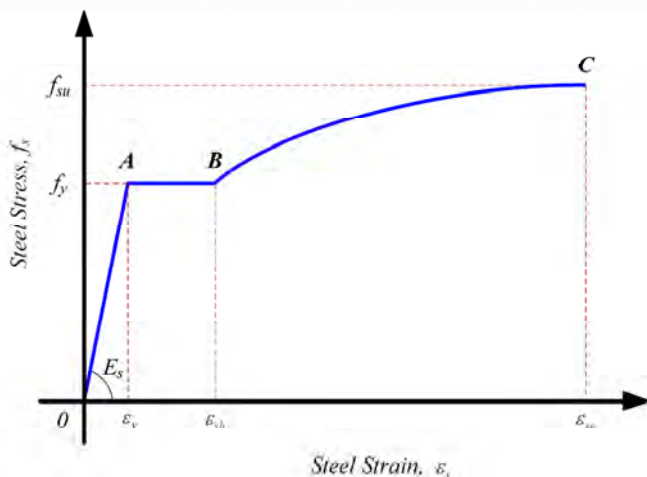
<해설그림 4.2.2> 철근상세에 따른 구속효과(□: 비구속 영역, Priestley 등, 1996)

콘크리트 내진성능평가

4.2.3 비선형 재료모델

2) 철근 재료모델 : Park Strain Model

Note> 철근의 강도와 변형률에 대한 정확한 값을 알 수 없는 경우에는 KS D 3504(2011)에 제시된 최소강도와 CALTRANS SDC(2013)와 한국도로공사(2012) 지침에 제시된 변형률을 적용 가능



<해설그림 4.2.5> 철근의 응력-변형률 관계(Park 등, 1975)

<해설표 4.2.1> 철근의 강도 및 변형률(최소값)

철근 종류	f_y	f_{su}	$\epsilon_y = f_y / E_s^{[2]}$	ϵ_{sh}	ϵ_{su}
SD240 ^[1]	240 MPa	390 MPa	0.0012	0.0115	0.128
SD300	300 MPa	440 MPa	0.0015	0.0115	0.125
SD350	350 MPa	490 MPa	0.00175	0.0115	0.122
SD400	400 MPa	560 MPa	0.002	0.0115	0.120

- 1) 2011년에 개정된 KS D 3504에는 항복강도가 300MPa 이상(SD300)인 이형봉강에 대해서만 최소강도를 규정하고 있으나 기존교량 중에는 SD240으로 시공된 경우가 종종 있으므로 SD240에 대한 최소강도는 개정 이전의 규정에 제시된 값을 적용
- 2) 철근의 탄성계수 $E_s = 200,000 \text{ MPa}$ 적용

콘크리트 내진성능평가

4.3 지진해석

4.3.1 해석방법

교량의 지진해석방법은 “도로교설계기준”에서 제시한 방법을 따른다.

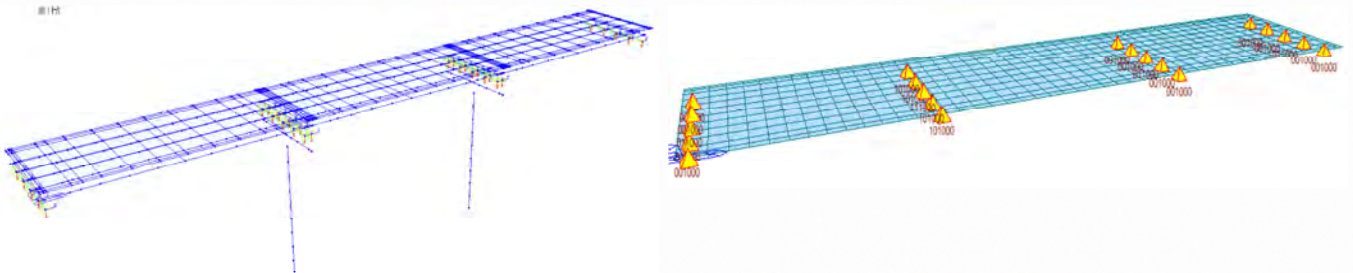
- 1) 교량의 지진해석방법은 **단일모드 스펙트럼해석법**을 기본으로 한다.
- 2) 정밀해석을 요한다고 판단되는 교량에 대해서는 **다중모드 스펙트럼해석법** 또는 발주자가 인정하는 검증된 정밀해석법(시간이력해석법 등)을 사용할 수 있다.
- 3) 단경간교 및 지진구역 II에 위치하는 내진 II 등급교는 상세한 지진해석을 수행할 필요가 없다.
- 4) 지진해석 시 모든 고정된 교각 또는 교대 지점들은 동일 시점에 있어서 동일한 지반운동을 한다고 가정한다.

콘크리트 내진성능평가

4.3 지진해석

4.3.3 지진해석모델

- 1) 교량의 지진해석모델은 가능한 지진에 따른 실제 거동과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 구조물의 강성 및 관성효과를 고려하여 절점과 부재, 연결부(경계조건)로 구성된 3차원 뼈대구조로 모형화하여야 한다. 다만, RC 슬래브교의 상부구조는 평면요소로 모형화하여도 무방하다.



- 2) 교량은 지진시 함께 진동하는 진동모드가 충분히 포함될 수 있도록 모형화

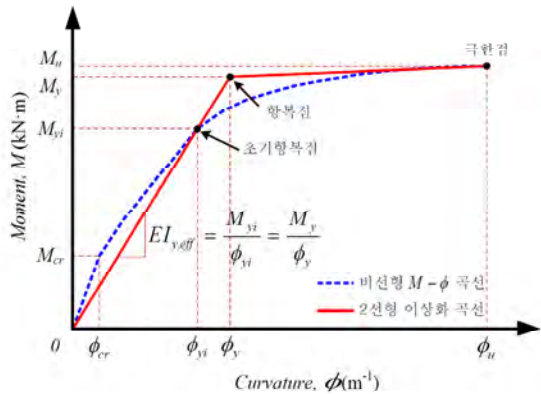
고유치해석(Eigenvalue Analysis)를 통해 지진방향의 **질량참여율이 90% 이상**이 되는 동적특성을 확보할 수 있도록 모델링

콘크리트 내진성능평가

4.3 지진해석

4.3.3 지진해석모델

- 교량의 상부구조는 지진시 일반적으로 탄성거동을 하므로 탄성체로 모형화한다.
다만, 케이블 등과 같이 비선형거동이 예측되는 상부구조에 대해서는 비선형성을 적절히 고려하여 모형화하여야 한다.
- 교각의 강성은 모멘트-곡률곡선 관계로 구한 **항복유�효강성**을 적용



<그림 4.2.1> 모멘트-곡률 관계곡선

$$EI_{y,eff} = \frac{M_y}{\phi_y} = \frac{M_{yi}}{\phi_{yi}}$$

도로교 설계기준 연성도 내진설계편
근사식 적용 가능(전강성의 30~50%정도)

$$I_{y,eff} = \left(0.16 + 12 \sqrt{\frac{P_u}{f_{ck} A_g}} \right) I_g$$

콘크리트 내진성능평가

4.3 지진해석

4.3.3 지진해석모델

- 교량 받침부는 교축방향과 교축직각방향에 대하여 가동단과 고정단을 구분하여 모형화
다만, 탄성받침과 같이 고무형식의 받침은 고정단과 가동단을 구분하지 않고 받침의 전단강성을 적용하여 모형화
→ Link로 받침 모형화 (강재받침과 탄성받침은 Elastic Link, 면진받침은 비선형 General Link)
- 교량의 기초 및 지반이 구조거동에 미치는 영향이 클 것으로 예상되는 경우에는
"기존 시설물의 기초 및 지반 내진성능 평가요령"에서 제시하는 기초의 등가강성을 교각 끝단에 적용하여 구조해석 모델을 작성

4.3.4 조합 탄성지진력

탄성지진력의 조합은 30% 규정에 따라 조합한다.

$$COM1 \quad [F_E^L]_{COM1} = 1.0 \times [F_E^L]_L + 0.3 \times [F_E^L]_T$$

$$[F_E^T]_{COM1} = 1.0 \times [F_E^T]_L + 0.3 \times [F_E^T]_T$$

$$COM2 \quad [F_E^L]_{COM2} = 0.3 \times [F_E^L]_L + 1.0 \times [F_E^L]_T$$

$$[F_E^T]_{COM2} = 0.3 \times [F_E^T]_L + 1.0 \times [F_E^T]_T$$

$$[F_E^L]_{COMB} = \max \langle [F_E^L]_{COM1}, [F_E^L]_{COM2} \rangle$$

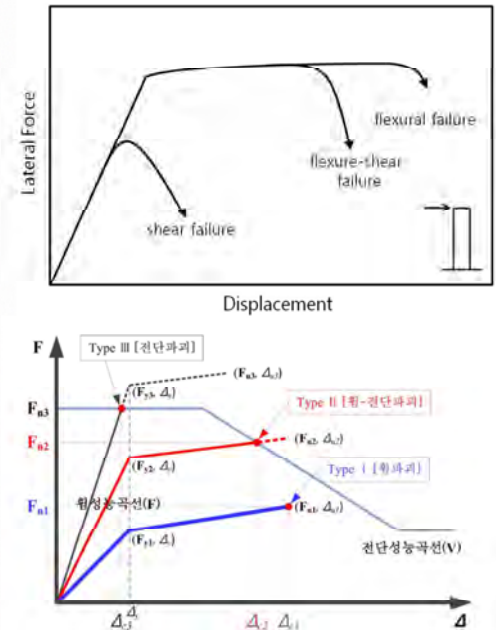
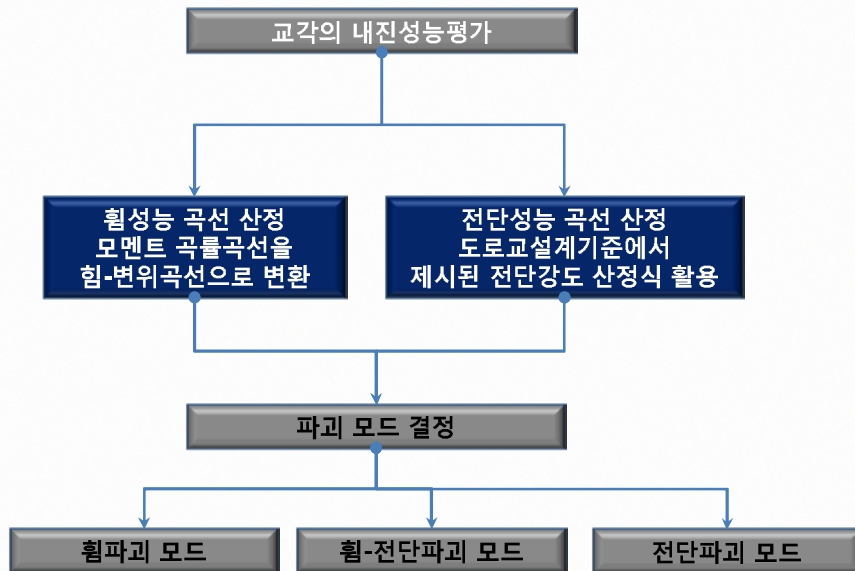
$$[F_E^T]_{COMB} = \max \langle [F_E^T]_{COM1}, [F_E^T]_{COM2} \rangle$$

콘크리트 내진성능평가

4.4 구성요소의 내진성능평가

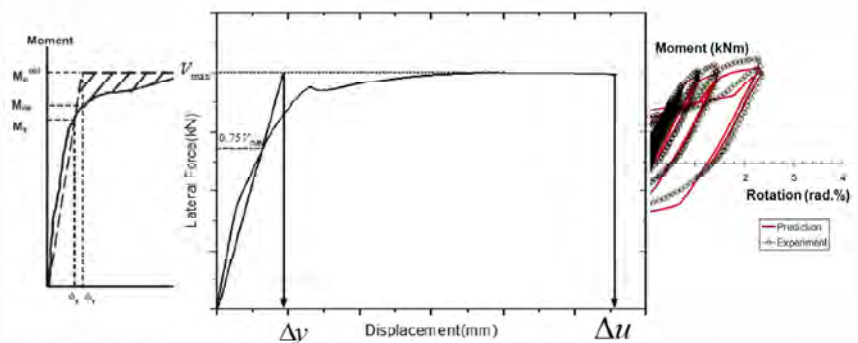
4.4.1 교각

4.4.1.1 교각의 파괴모드

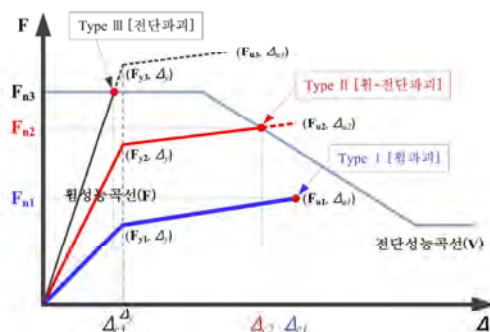
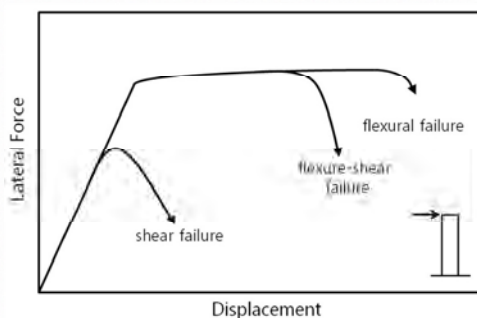


콘크리트 내진성능평가

• 휨 성능 곡선



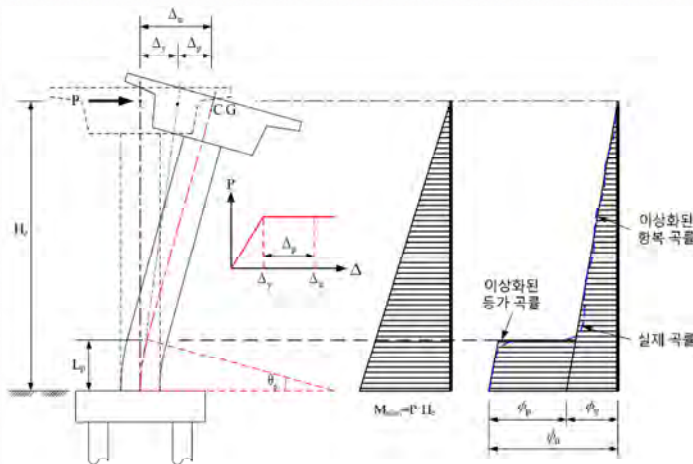
• 휨성능-전단성능 곡선을 통한 파괴모드 결정



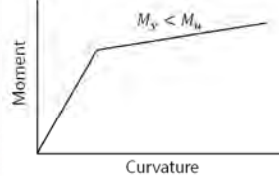
콘크리트 내진성능평가

4.4.1.2 교각의 휨성능 곡선

1) 캔틸레버 거동 교각



(a) 캔틸레버 거동



$$\Delta_y = \frac{\phi_y H_e^2}{3}$$

$$L_p = 0.08H_e + 0.022f_y d_{bl} \geq 0.044f_y d_{bl}$$

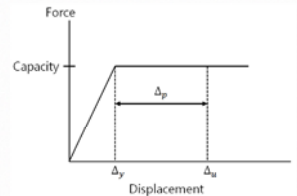
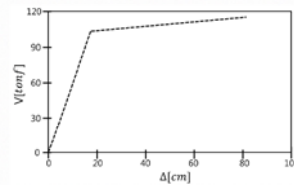
$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y)L_p$$

$$\Delta_p = \left(\frac{M_u}{M_y} - 1 \right) \Delta_y + \theta_p \left(H_e - \frac{L_p}{2} \right)$$

$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p$$

$$F_y = \frac{M_y}{H_e} \quad F_u = \frac{M_u}{H_e}$$

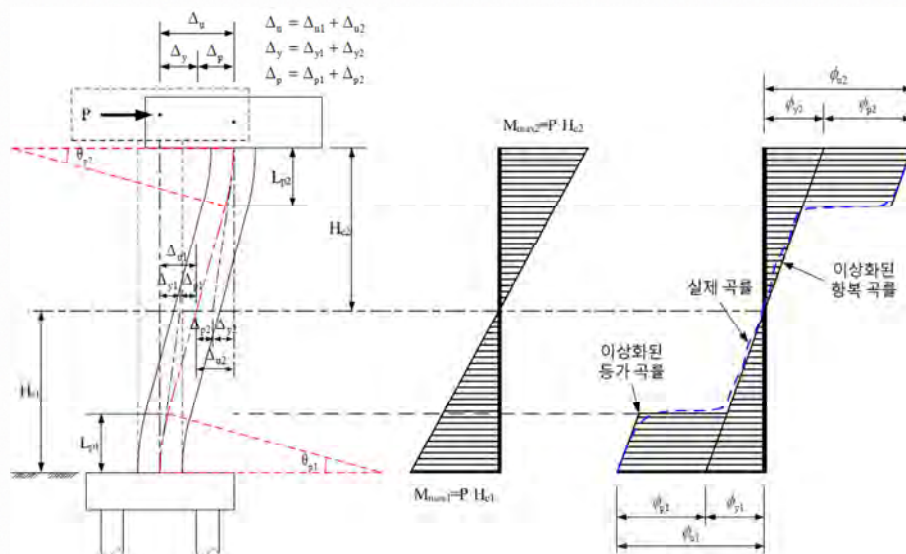
$$\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$



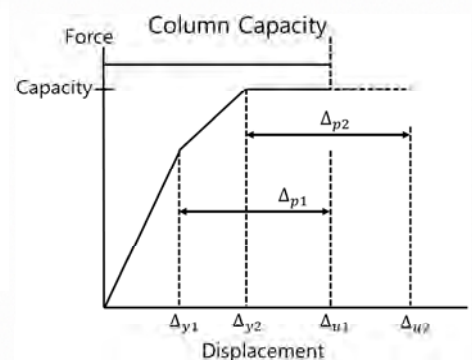
콘크리트 내진성능평가

4.4.1.2 교각의 휨성능 곡선

2) 라멘(골조) 거동시



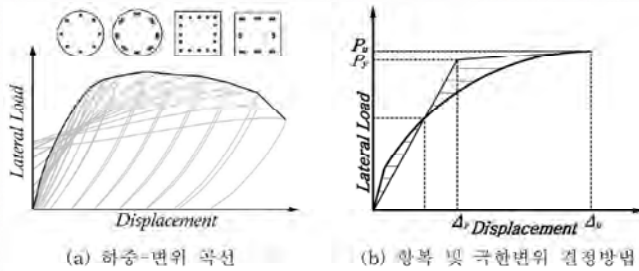
(b) 라멘(골조) 거동



콘크리트 내진성능평가

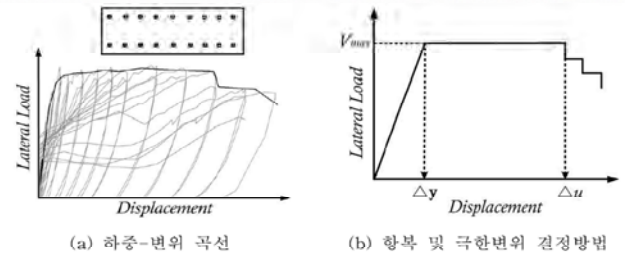
4.4.1.2 교각의 휨성능 곡선

- 원형과 사각형 일반교각



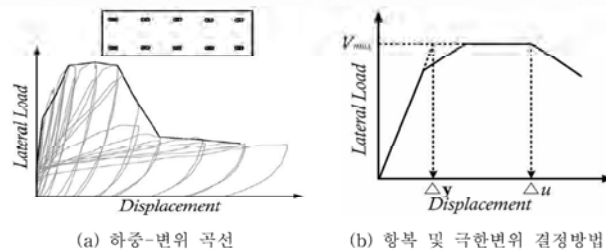
<해설그림 4.4.1> 일반 교각의 항복 및 극한변위 결정방법

- 무이음 주철근 벽식 교각 약축 거동



<해설그림 4.4.2> 단일 축방향철근을 갖는 벽식 교각의 항복 및 극한변위 결정방법

- 겹침이음 주철근 벽식 교각 약축 거동



<해설그림 4.4.3> 축방향철근이 겹침이음된 벽식 교각의 항복 및 극한변위 결정방법

콘크리트 내진성능평가

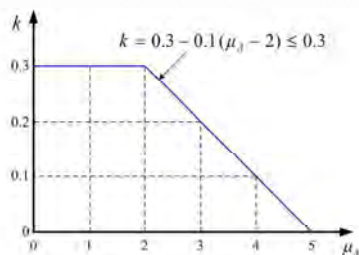
4.4.1.3 교각의 전단성능 곡선

- 일반 교각(원형과 사각형 교각)

- 콘크리트, 전단철근, 축력에 의한 전단강도의 합 $V_n = V_c + V_s + V_p$

콘크리트에 의한 전단강도

$$V_c = k \sqrt{f_{ck}} A_e$$



<그림 4.4.3> 공극비와연성도에 따른 콘크리트 전단강도 감소계수 k

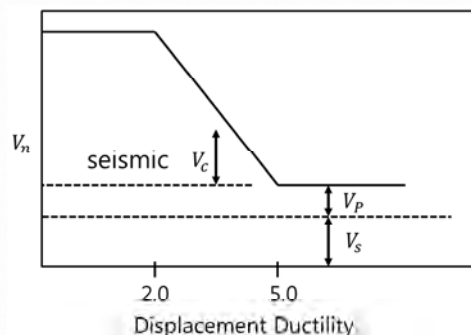
전단철근에 의한 전단강도

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} D'}{s} \quad (\text{사각형}) \quad V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sp} f_{yh} D'}{s} \quad (\text{원형})$$

$$V_s = \frac{\sum A_{ct} f_{yh} l_{ct}}{s} \quad (\text{보강띠철근이 배치된 원형교각})$$

축력에 의한 전단강도

$$V_p = 0.15 \frac{Ph}{L_s}$$



콘크리트 내진성능평가

4.4.1.4 교각의 내진성능평가

1) 교각의 공급역량

가) 휨파괴 모드 (Type I)

- 단면강도

$$F'_n = F'_u < V_n$$

- 공급 변위

$$\Delta_c = \Delta_u$$

($\mu_{\Delta, \max}$ 로 제한되는 경우: $\Delta_c = \Delta_y \times \mu_{\Delta, \max}$ 적용)

- 공급 역량

$$F'_{P,C} = \mu_{\Delta c} = \frac{\Delta_c}{\Delta_y}$$

($\mu_{\Delta, \max}$ 로 제한되는 경우: $\mu_{\Delta c} = \min \left[\frac{\Delta_u}{\Delta_y}, \mu_{\Delta, \max} \right]$ 적용)

다) 전단파괴 모드 (Type III)

- 공급 변위 - 공급역량

$$c < \Delta_y \quad F'_{P,C} = F_n = V_n < F_y$$

나) 휨-전단 파괴모드 (Type II)

- 단면강도

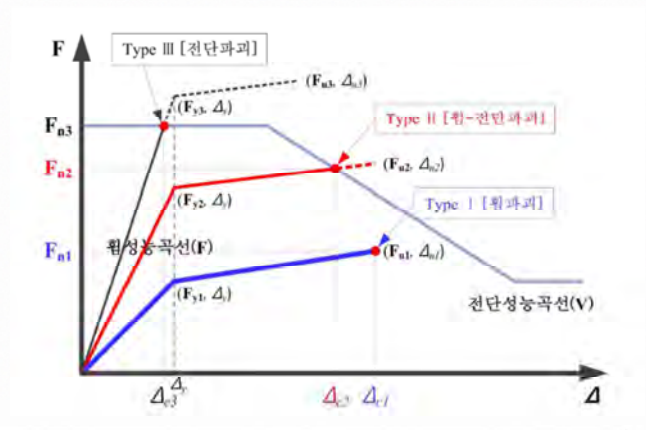
$$F_y \quad F'_n < V_n \text{ and } F'_n = V_n$$

- 공급 변위

$$y \leq \Delta_c < \Delta_u$$

- 공급역량

$$F'_{P,C} = \mu_{\Delta c} = \frac{\Delta_c}{\Delta_y}$$



콘크리트 내진성능평가

4.4.1.4 교각의 내진성능평가

2) 교각의 소요역량

가) 휨파괴 및 휨-전단 파괴모드 (Type I & II)

- 단면강도비

탄성: $M_y \geq [M_E]_{COMB, pd}$ 일 경우

$$R_s = 1.0$$

소성: $M_y < [M_E]_{COMB, pd}$ 일 경우

$$R_s = \frac{[M_E]_{COMB, pd}}{M_y}$$

$$[M_E]_{COMB, pd} = [M_E]_{COMB} + P_{TOP} [\Delta_E]_{COMB}$$

- 소요 변위연성도-단면강도비 상관계수 적용

$T \geq 1.25T_s$ (장주기)인 경우

$$\lambda_{DR} = 1.0$$

$T < 1.25T_s$ (단주기)인 경우

$$\lambda_{DR} = \left(1 - \frac{1}{R_s} \right) \frac{1.25T'_s}{T} + \frac{1}{R_s}$$

- 소요역량

$$F'_{P,D} = \mu_{\Delta_d} = \lambda_{DR} \times R_s$$

나) 전단 파괴모드 (Type III)

$$F'_{P,D} = [V_E]_{COMB}$$

3) 내진성능평가

$$\frac{F'_{P,C}}{F'_{P,D}} \geq 1.0 \text{ and } \frac{F'_{P,C}}{F'_{P,D}} \geq 1.0 \quad \text{만족!!}$$

$$\frac{F'_{P,C}}{F'_{P,D}} < 1.0 \text{ or } \frac{F'_{P,C}}{F'_{P,D}} < 1.0 \quad \text{불만족!!}$$

