

MIDAS SQUARE 공학 기술강연

비선형 응답이력해석을 통한 케이블교량의 내진성능 검증 방법

선창호 | 울산대학교 건설환경공학부

CONTENTS

01 일반교량 내진설계 기본 개념

- 내진설계기본개념
 - 내진설계방법
-

02 케이블교량 내진설계

- 케이블교량내진설계 절차
 - 케이블교량허용손상수준
 - 케이블교량내진설계 요약
 - 케이블교량내진설계(설계단계)
-

03 케이블교량 붕괴방지수준 내진성능 검증 방법

- 인공합성지반운동 생성
 - 비선형 해석모델
 - 비선형 응답이력해석
 - 구성요소내진성능검증
-

일반교량 내진설계 기본 개념

내진설계 기본 개념

내진설계 방법

내진설계 기본 개념

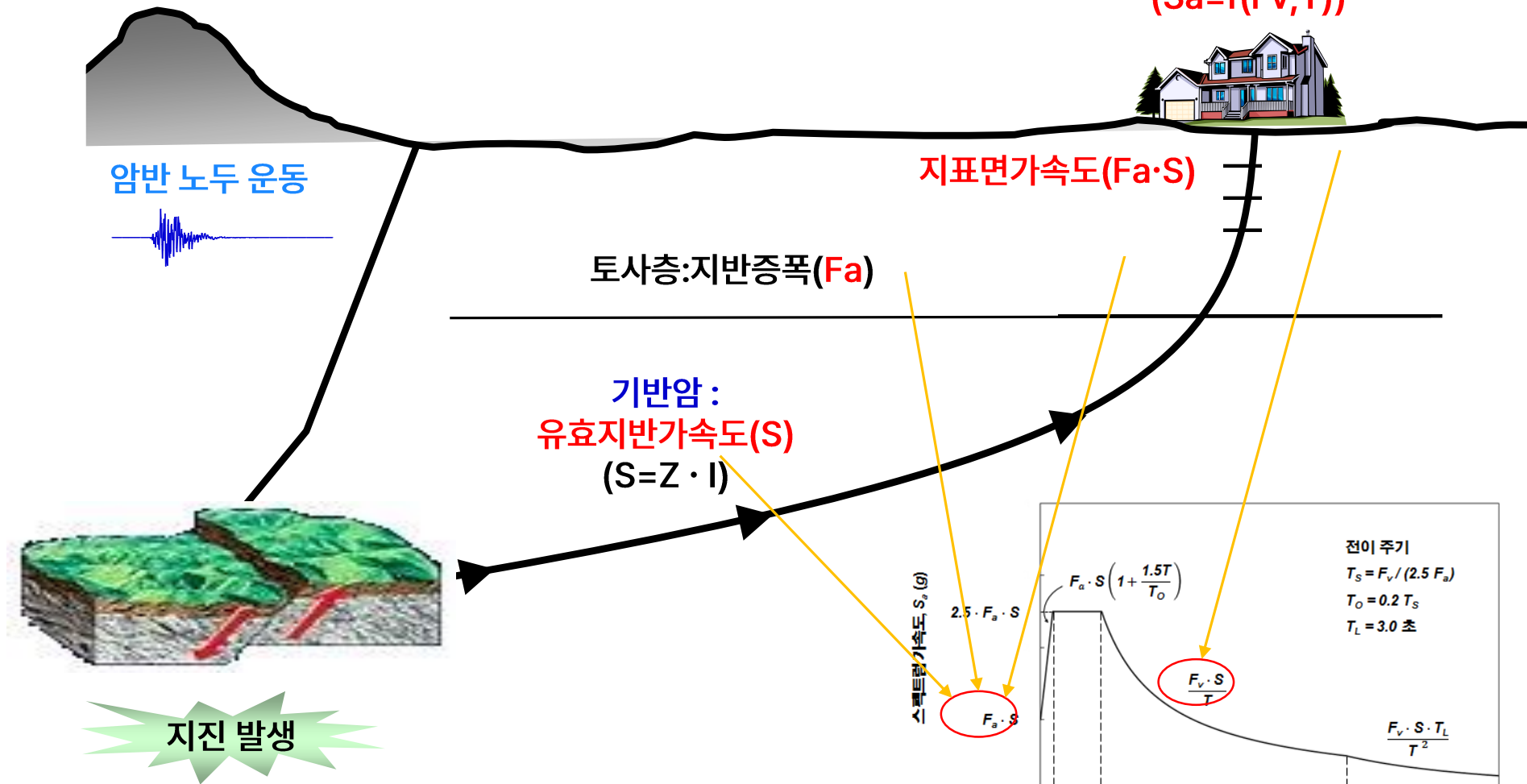
Capacity ↑ > Demand ↓

강도 및 연성도 확보

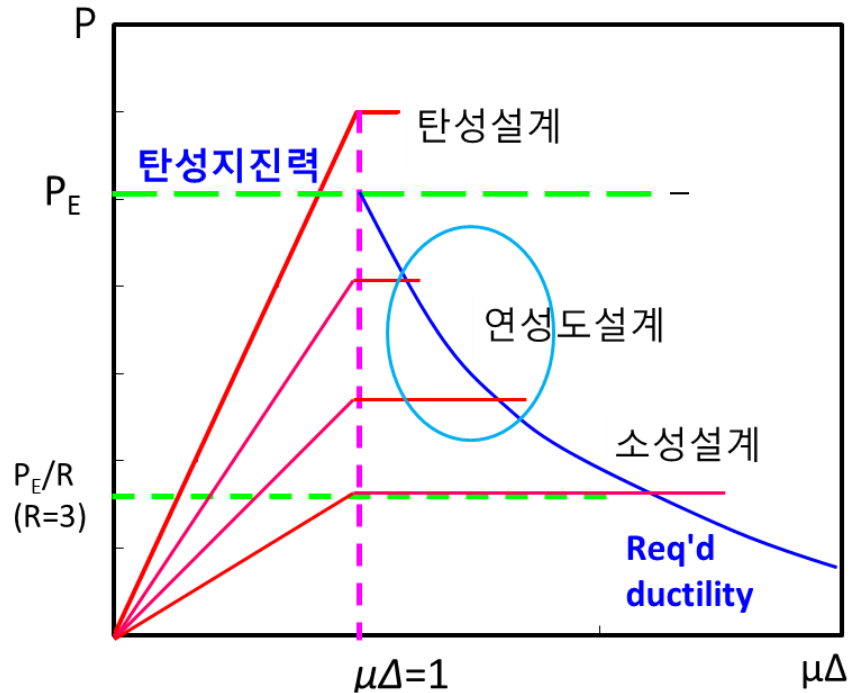
- 내진설계방법**
- R-factor
 - 내진상세
 - : 횡구속량
 - : 갈고리상세
 - : 접합부 등

Capacity > Demand

Demand ↓



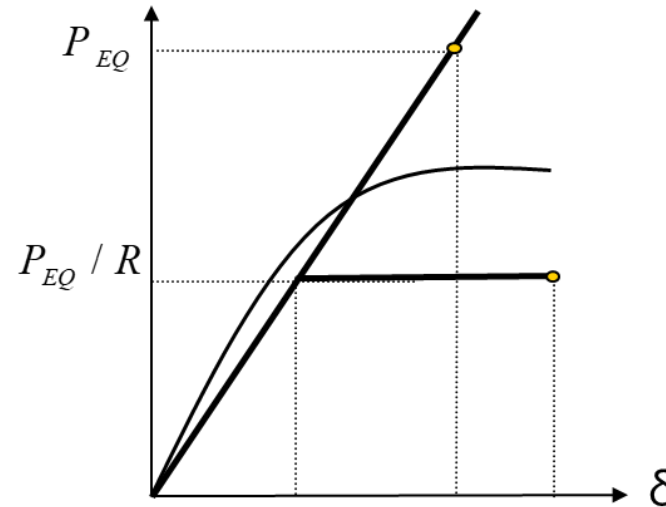
교량 내진설계 방법



탄성설계

- ▶ 강도 > 탄성지진력

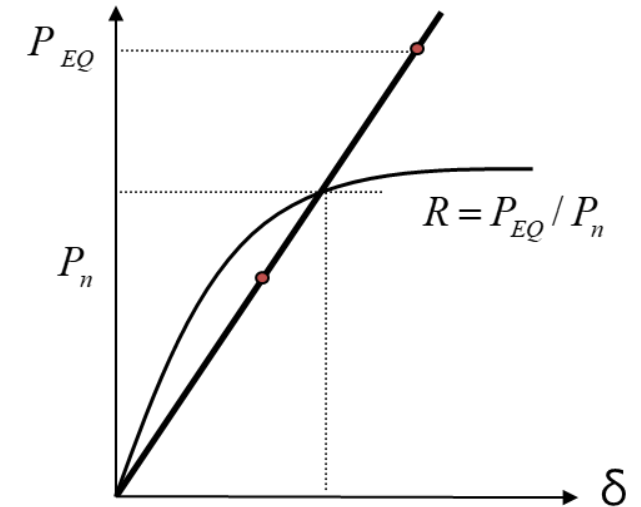
소성설계



- ▶ 강도 << 탄성지진력
: (R-factor 도입)

- ▶ 큰 공급변위연성도 확보
: 횡철근량 제시

연성도설계

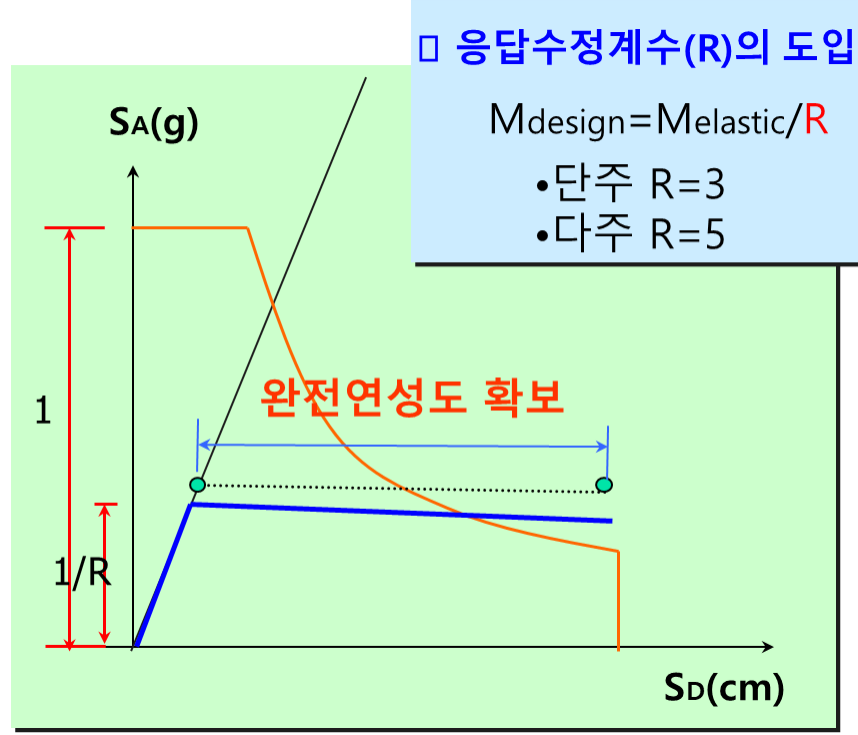


- ▶ 강도 < 탄성지진력
: 소요 Rrq 산정

- ▶ 작은 공급변위연성도 확보
: 소요횡철근량 산정식 제시

교량 내진설계 방법

소성설계



□ 큰 연성도의 확보가 필요

- 소요연성도의 크기는 명시되어 있지 않음
- 완전연성도(full ductility) 확보함

내진규정

□ 심부구속철근 규정

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

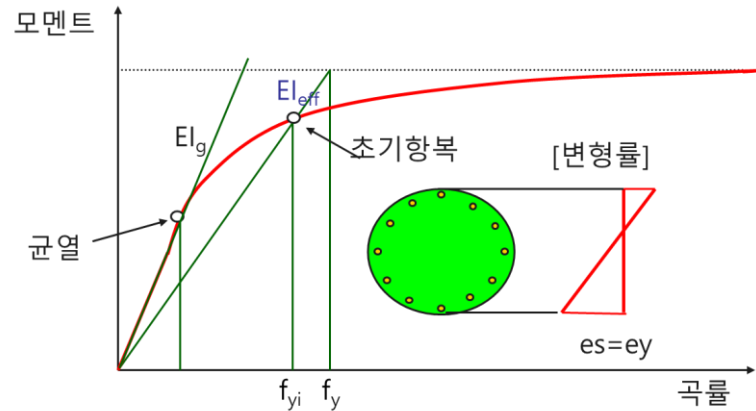
심부구속

$$A_{sh} = 0.30 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right]$$

$$A_{sh} = 0.12 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y}$$

항복유효강성

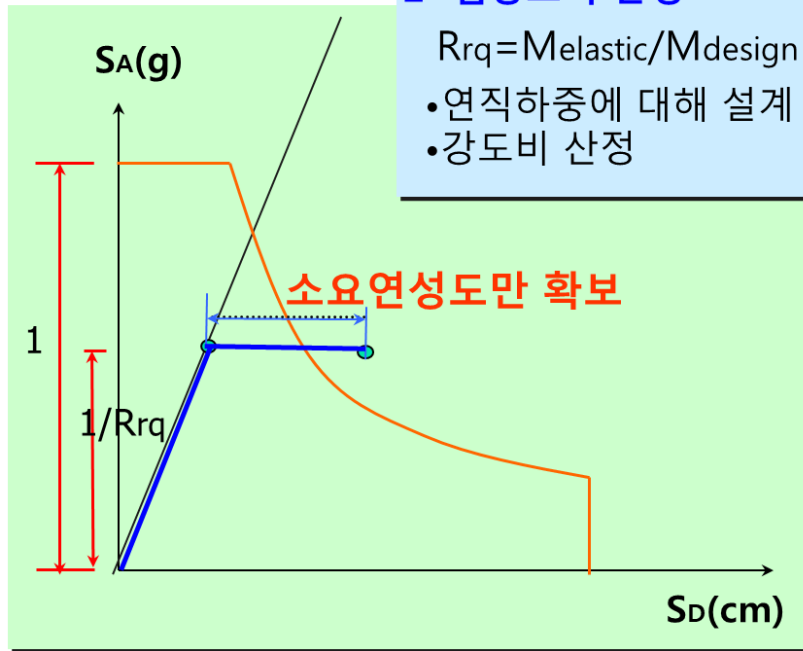
$$k = \frac{3EI_{y,eff}}{H^3} \rightarrow \text{캔틸레버 교각}$$



- ❖ 단부구역과 소성힌지구역의 설계(축방향, 횡방향철근)
- 횡방향철근 ;
 - D13 이상, 지름이 축방향철근 지름의 2/5 이상
 - 최대간격 ; Min[부재 최소 단면치수의 1/4, 6db]
- 소성힌지구역 ;
 - 축방향철근 겹침이음 불허. 완전기계적 이음 사용

교량 내진설계 방법

연성도설계



□ 휨강도비 산정

$$R_{rq} = M_{elastic} / M_{design}$$

- 연직하중에 대해 설계
- 강도비 산정

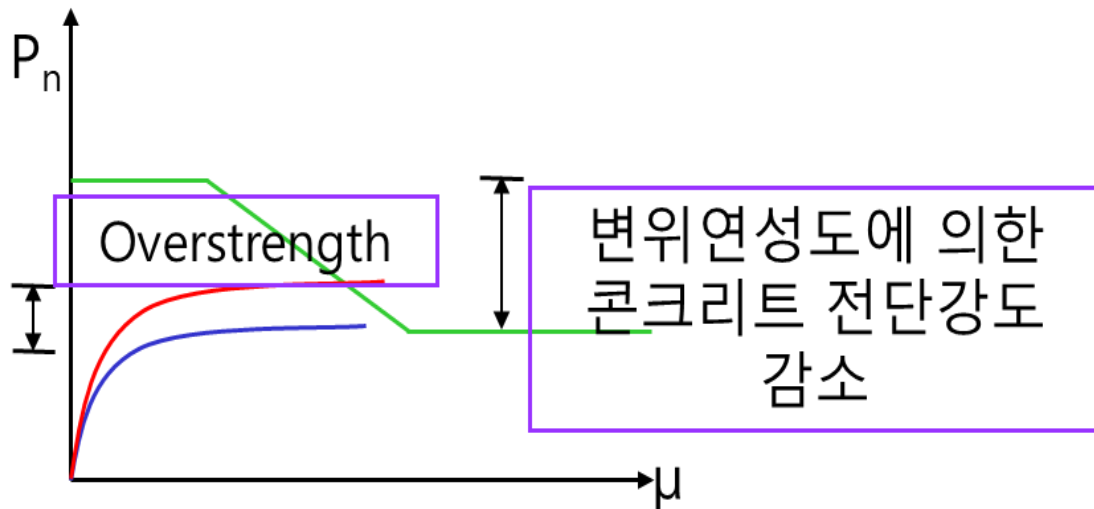
□ 소요연성도 산정 및 확보

- 소요연성도의 크기 산정
- 소요연성도 (required ductility) 확보함

내진규정

□ 심부구속철근 규정

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



$$\rho_s = 0.008 \alpha \cdot \beta \frac{f_{ck}}{f_{yh}} + \gamma$$

$$\alpha = 3(\mu_\phi + 1) \frac{P_u}{f_{ck} \cdot A_g} + 0.8(\mu_\phi) - 3.5$$

$$\beta = \frac{f_y}{350} - 0.12$$

$$\gamma = 0.1(\rho_l - 0.01)$$

케이블교량 내진설계

케이블교량 내진설계 절차

케이블교량 허용손상수준

케이블교량 내진설계 요약

케이블교량 내진설계(설계단계)

케이블교량 내진설계 절차

기본방침

- 지반운동의 세기는 낮으나 발생빈도가 높은 지진시
: 교량 구성요소에 피해가 발생하지 않음 → 기능수행수준
- 지반운동의 세기는 중간이면서 발생빈도가 낮은 지진시
: 최소한의 피해 허용, 신속한 복구 → 장기복구수준
- 지반운동의 세기는 매우 높으나 발생빈도가 매우 낮은 지진시
: 상당한 피해 허용, 붕괴가 발생하지 않음 → 붕괴방지수준

설계지진 및 재현주기

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

케이블교량 내진설계 절차

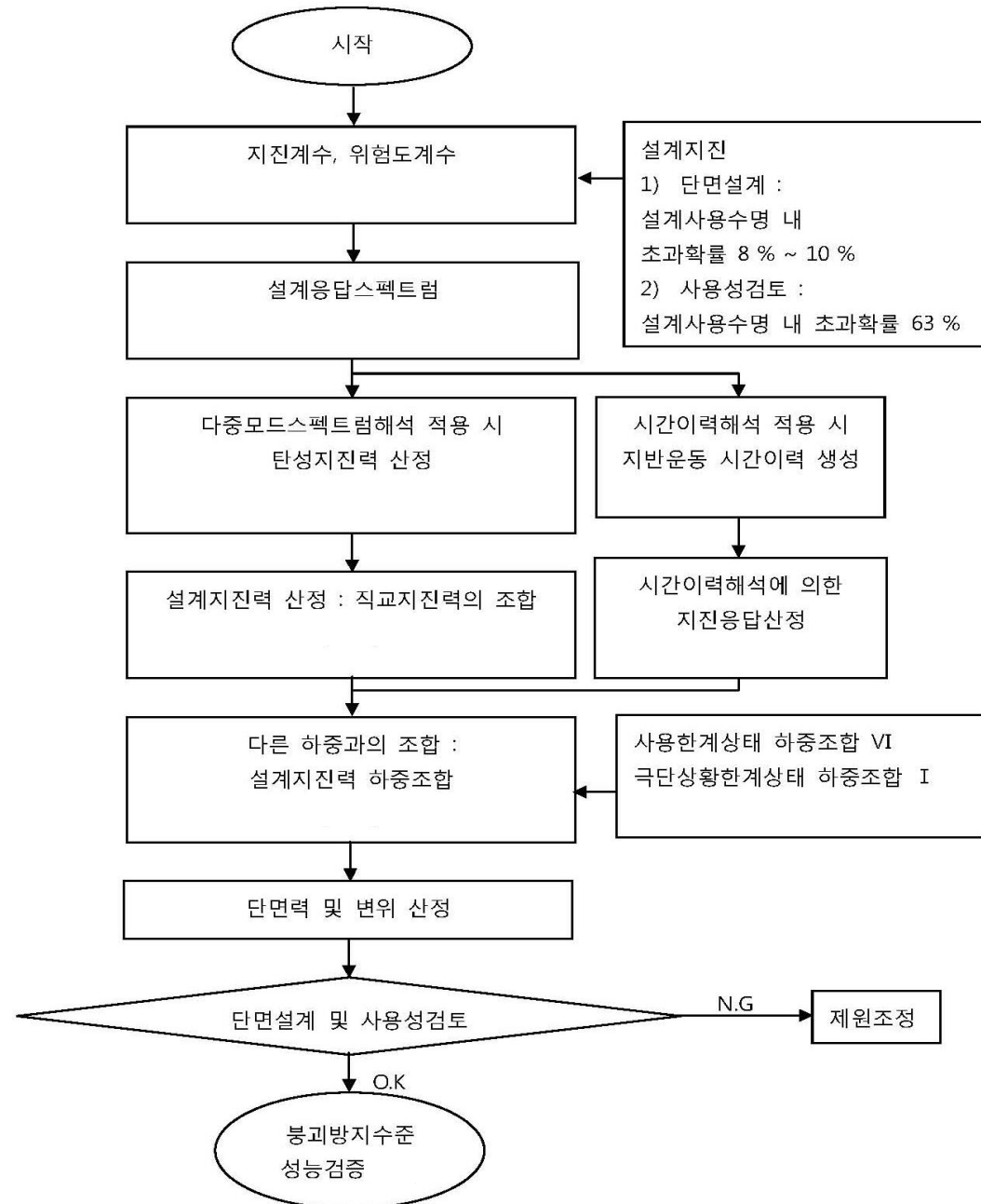
한계상태별 지진하중조합

- ❖ 사용한계상태 하중조합 VI
 - 1.0(DC,DD,...) +1.0WA+1.0FR+1.0EQ(63%)
- ❖ 극단상황한계상태 하중조합 I
 - (DC,DD,...) + (LL,IM,PL)+1.0EQ(8~10%)

한계상태 하중조합	재현주기		검토 내용	비고
	설계수명 100 yr	설계수명 200 yr		
사용한계상태 하중조합 VI	100 yr	200 yr	사용한계상태 하중조합 I~V에서 요구하는 <u>사용성 요구 조건을 모두 만족</u>	기능수행
극단상황한계상태 하중조합 I	1000 yr	2400 yr	극한한계상태 하중조합을 포함한 <u>단면 설계</u>	장기복구
-	2400 yr	4800 yr	설계수명 내 초과확률 4% 설계지진에 대한 교량 구성요소의 <u>허용손상수준 검증</u>	붕괴방지

케이블교량 내진설계 절차

설계단계

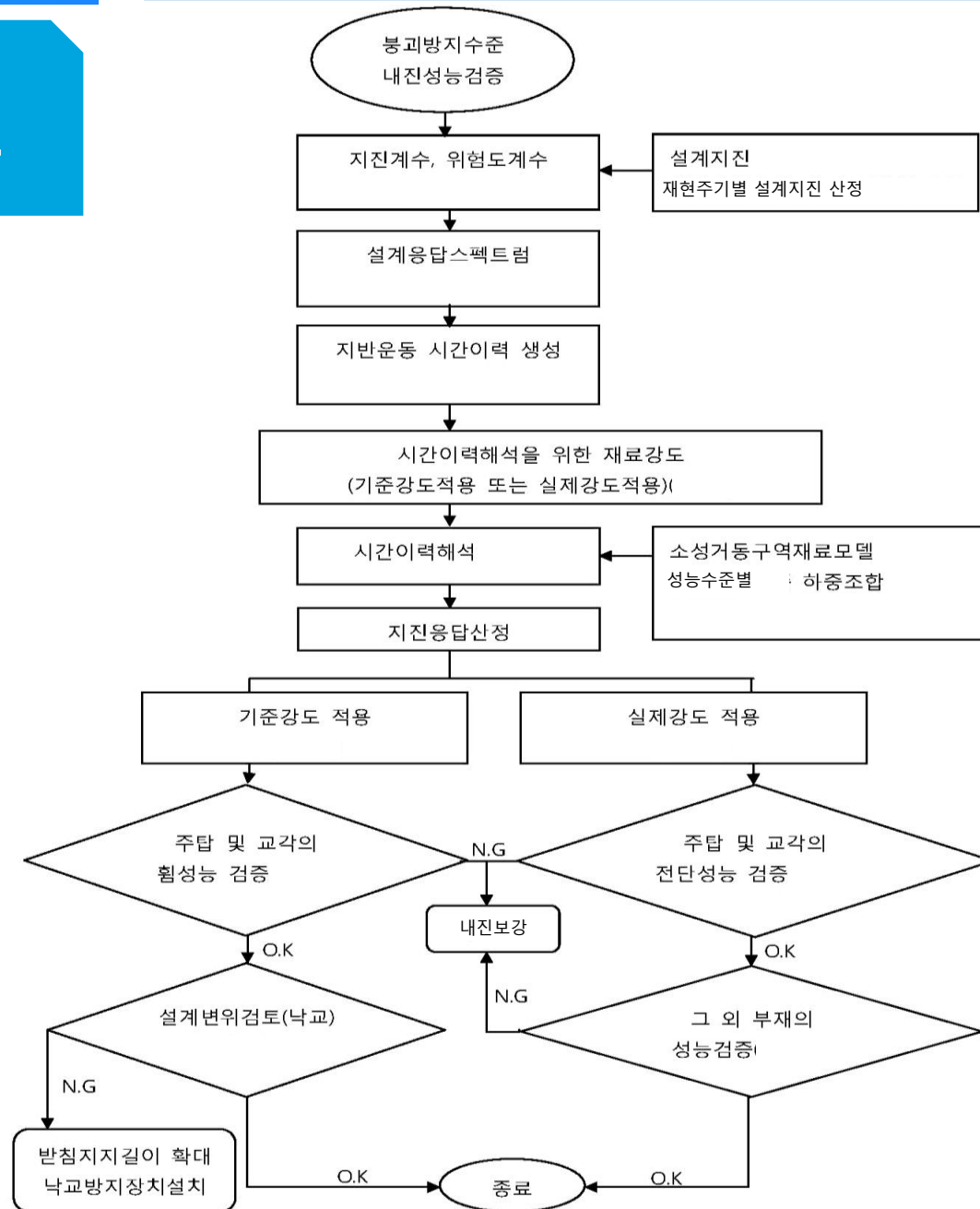


○ 다중모드스펙트럼 해석
: 구성요소 선형 모델링

○ 비선형 응답이력해석
: 구성요소 비선형 모델링

케이블교량 내진설계 절차

검증단계



- 비선형 응답이력 해석
: 비선형 재료모델 or 부재모델 설정
: 비선형 거동이 예측되는 부재 선정
- 지반 비선형성을 고려한 스프링계수 산정
: 지반해석을 통한 스프링계수 산정
- 지반운동 시간이력 생성
: 암반지반에 대한 지반운동 시간이력 생성
- 비선형 응답이력해석 수행
- 허용손상수준 검증

허용손상수준

붕괴방지수준

구성요소	P/S	기능수행	장기복구	붕괴방지	
		초과확률 63%	초과확률 8~10%	초과확률 4%	허용손상수준
주탑 및 측경간 교각	P	무손상	최소손상	복구가능손상	$\varepsilon_{c,max} \leq \varepsilon_{cu,c}$ $V_{max} \leq V_n$
파일 및 파일 캡	P	무손상	최소손상	최소손상	$\varepsilon_{c,max} \leq \varepsilon_{co}$ $V_{max} \leq V_n$
상부구조의 구조요소	P	무손상	최소손상	최소손상	$F \leq F_y$
상부구조의 비구조요소	S	무손상	최소손상 \geq	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% 오프셋강도)
케이블시스템 (비구조요소 포함)	S	무손상	최소손상	복구가능손상	$F \leq F_t$
		사용한계상태 하중조합 VI	극단상황한계상태 하중조합 I	교량 구성요소의 허용손상수준을 시간이 력해석을 통해 확인	
		위의 하중조합에 대해 안전하도록 단면이 결정 되었다면 기능수행, 인명보호를 만족하는 것으 로 간주			

케이블교량 내진설계 요약

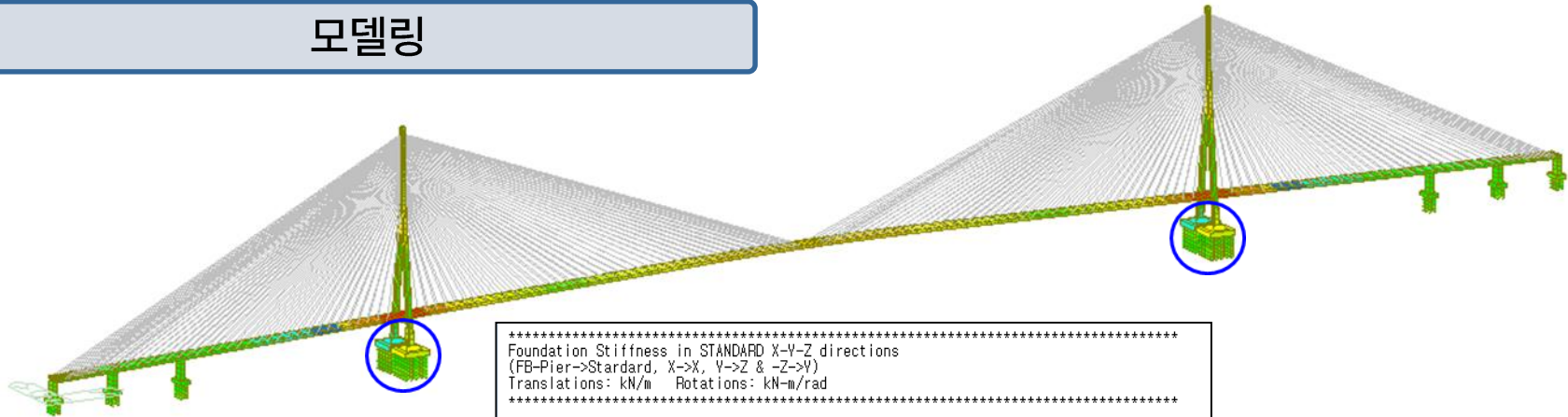
요약

구분	한계상태(설계단계)		붕괴방지 성능검증 (검증단계)	
	사용한계상태	극단상황한계상태		
내진성능수준	기능수행수준	장기복구수준	붕괴방지수준	
재현주기(설계수명 100yr)	200 yr	1000 yr	2400 yr	
재현주기(설계수명 200yr)	200 yr	2400 yr	4800 yr	
내진설계 검토 내용	사용성검토	단면설계	성능검증	
허용손상수준(주탑 및 교각)	무손상 (탄성거동)	최소손상 (항복)	복구가능손상 (콘크리트 변형률)	
위험도 계수 (I)	0.73	1.4 or 2.0	2.0 or 2.6	
해석방법	응답스펙트럼해석 시간이력해석	응답스펙트럼해석 시간이력해석	시간이력해석	
수직지반운동	암반지반 : 수평지반운동의 0.77, 토사지반 : 공학적 판단(1/2~2/3 등)			
주탑 및 교각 힘강성	EI_g	항복X	EI_g	재료모델 및 부재이력모델
		항복O 변위계산	EI_y (모멘트-곡률 해석)	
		재료모델 및 부재이력모델		
재료계수	기준강도 적용 콘크리트 : 1.0 철근 : 1.0		주탑 및 교각 힘 응답변위	기준강도 적용
			주탑 및 교각 전단 타 부재의 성능	실제강도 적용
감쇠고려 방법	적정한 값, 안전측 설계가 되도록 산정, 각 구성요소의 감쇠 기여도를 고려하여 산정			

케이블교량 내진설계

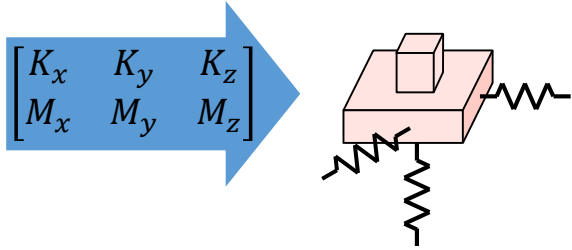
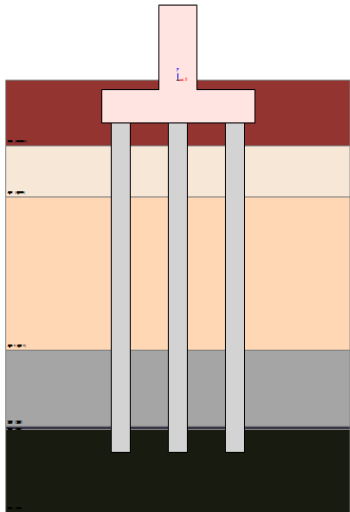
설계단계

모델링



 Foundation Stiffness in STANDARD X-Y-Z directions
 (FB-Pier->Standard, X->X, Y->Z & -Z->Y)
 Translations: kN/m Rotations: kN-m/rad

	DeltaX	DeltaY	DeltaZ	ThetaX	ThetaY	ThetaZ
Fx	0.1876E+08	-0.1820E+06	-0.1438E+05	0.8052E+05	-0.1981E+06	0.5000E+06
Fy	-0.1620E+06	0.1654E+08	-0.2166E+05	0.5520E+07	-0.1943E+05	0.9663E+07
Fz	-0.1438E+05	-0.2166E+05	0.1868E+08	0.4884E+07	-0.1458E+06	-0.5953E+04
Mx	0.8052E+05	0.5520E+07	0.4884E+07	0.2453E+10	0.6452E+07	-0.3225E+07
My	-0.1981E+06	-0.1943E+05	-0.1458E+06	-0.6452E+07	0.8804E+10	-0.2444E+07
Mz	0.5000E+06	0.9663E+07	-0.5953E+04	-0.3225E+07	-0.2444E+07	0.2401E+10



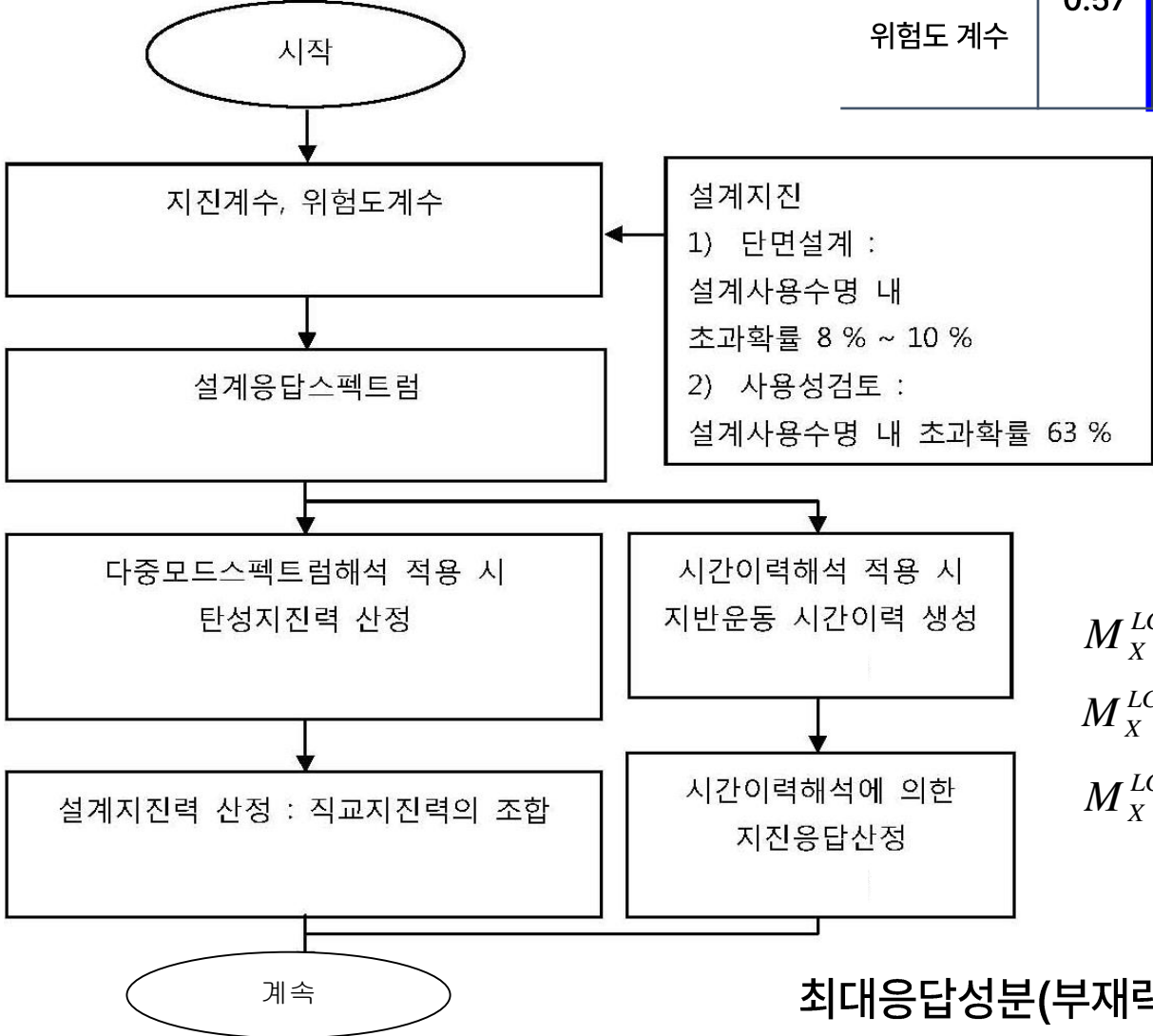
- ◆ 보수적 해석 : 고정단 모델링
- ◆ 지반 비선형을 고려한 등가스프링계수 산정

케이블교량 내진설계

설계단계

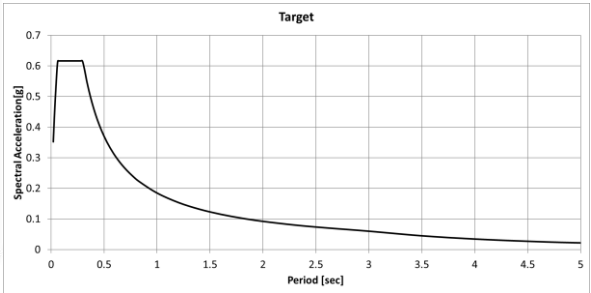
설계응답스펙트럼 산정

위험도 계수						
재현주기 (년)	100	200	500	1000	2400	4800
위험도 계수	0.57	0.73	1.0	1.4 (1.0)	2.0 (1.43) (1.0)	2.6 (1.3)



사용한계 상태

극단상황 한계상태



$$M_X^{LC1} = 1.0M_X^T + 0.3M_X^L + 0.3M_X^V$$

$$M_X^{LC2} = 0.3M_X^T + 1.0M_X^L + 0.3M_X^V$$

$$M_X^{LC3} = 0.3M_X^T + 0.3M_X^L + 1.0M_X^V$$

최대응답성분(부재력, 변위)은 CQC 방법으로 조합

케이블교량 내진설계

설계단계

구조감쇠

구성요소의 역학적 거동특성을 고려하여 산정

안전측 설계가 되도록 산정

구성요소의 감쇠 기여도를 고려

강주탑 및 케이블 : 0.02

보강형 : 0.02

기초 : 0.1

콘크리트 하부구조 : 0.05

Response Spectrum Load Cases

Spectrum Load Case

Load Case Name: 교축

Direction: X-Y

Excitation Angle: 0 [deg]

Scale Factor: 1

Period Modification Factor: 1

Modal Combination Control: ...

Spectrum Functions

Function Name (Damping Ratio)

KS-Br(200)-사용한계 (0,05)

Apply Damping Method

Damping Method...

Strain Energy Proportional

Correction by Damping Ratio

Interpolation of Spectral Data

Linear Logarithm

Description:

LoadCase	Direction	Scale
교축	X-Y	1
교진	X-Y	1
연직	Z	1

Operations

Add Modify Delete

Eigenvalue Analysis Control...

Response Spectrum Functions...

Damping Method

Damping

Modal Mass & Stiff. Prop. Strain Energy Prop.

OK Cancel

Group Damping : Strain Energy Proportional

Default Values for Unspecified Elements and Boundaries

Damping Ratio: 0,05 (0,00 ~ 1,00)

Damping Ratio for Specified Elements and Boundaries

Type: Material Structure Boundary

Name of Material / Group: 주탑 및 교각

Use Material Data Direct Define

Damping Ratio: 0,05 (0,00 ~ 1,00)

Name	Type	Damping Ratio	Add
케이블	Structure	0,02	
보강형	Structure	0,02	
주탑 및 교각	Structure	0,05	
기초	Structure	0,1	

Calculate Only When Used

Damping Ratio Select Option OK Cancel

케이블교량 내진설계

설계단계

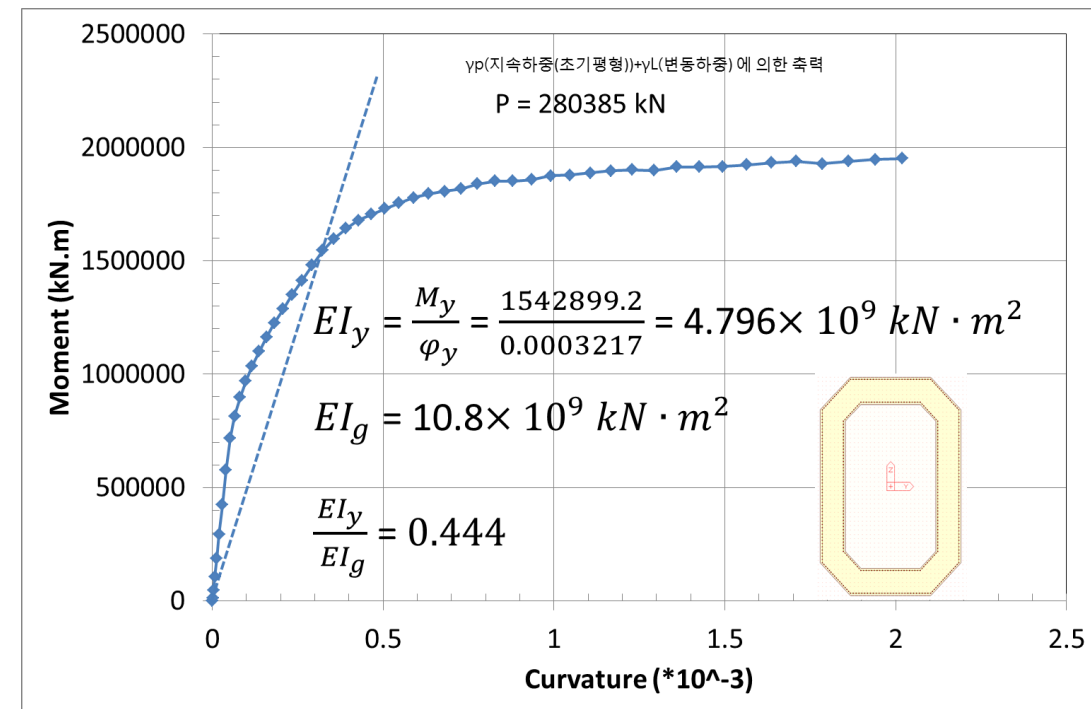
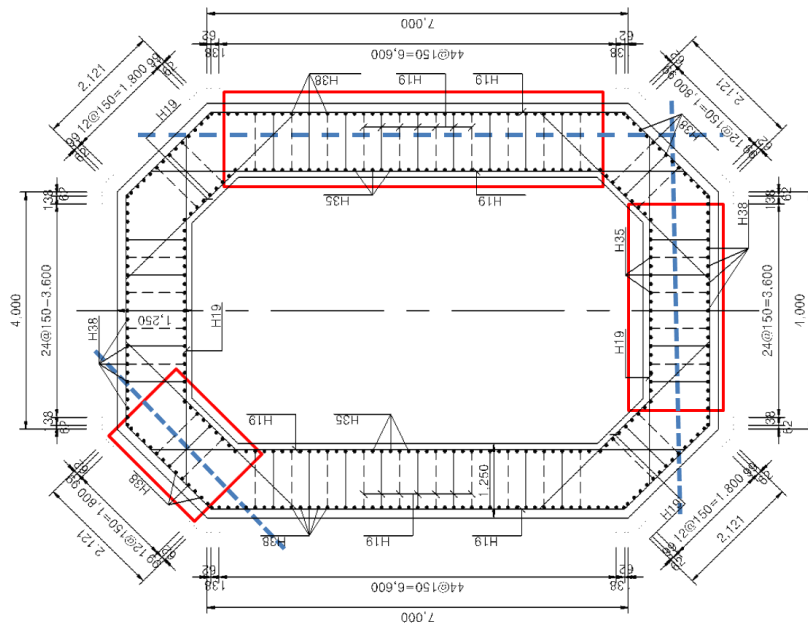
항복유효강성 산정

주탑 및 교각의 축방향철근이 항복할 것으로 예상되는 경우, 모멘트-곡률해석을 통한 항복강성을 적용

주탑 및 교각의 축방향철근이 항복하지 않을 것으로 예상되는 경우, 전단면 휨강성 적용

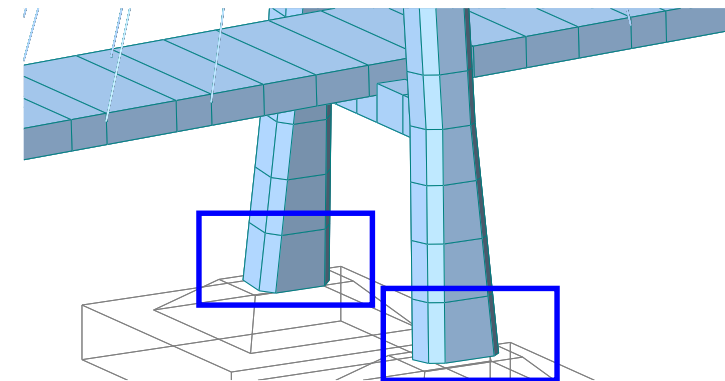
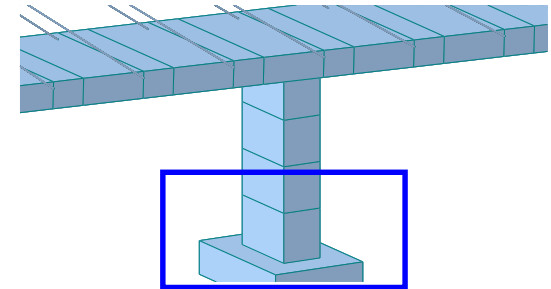
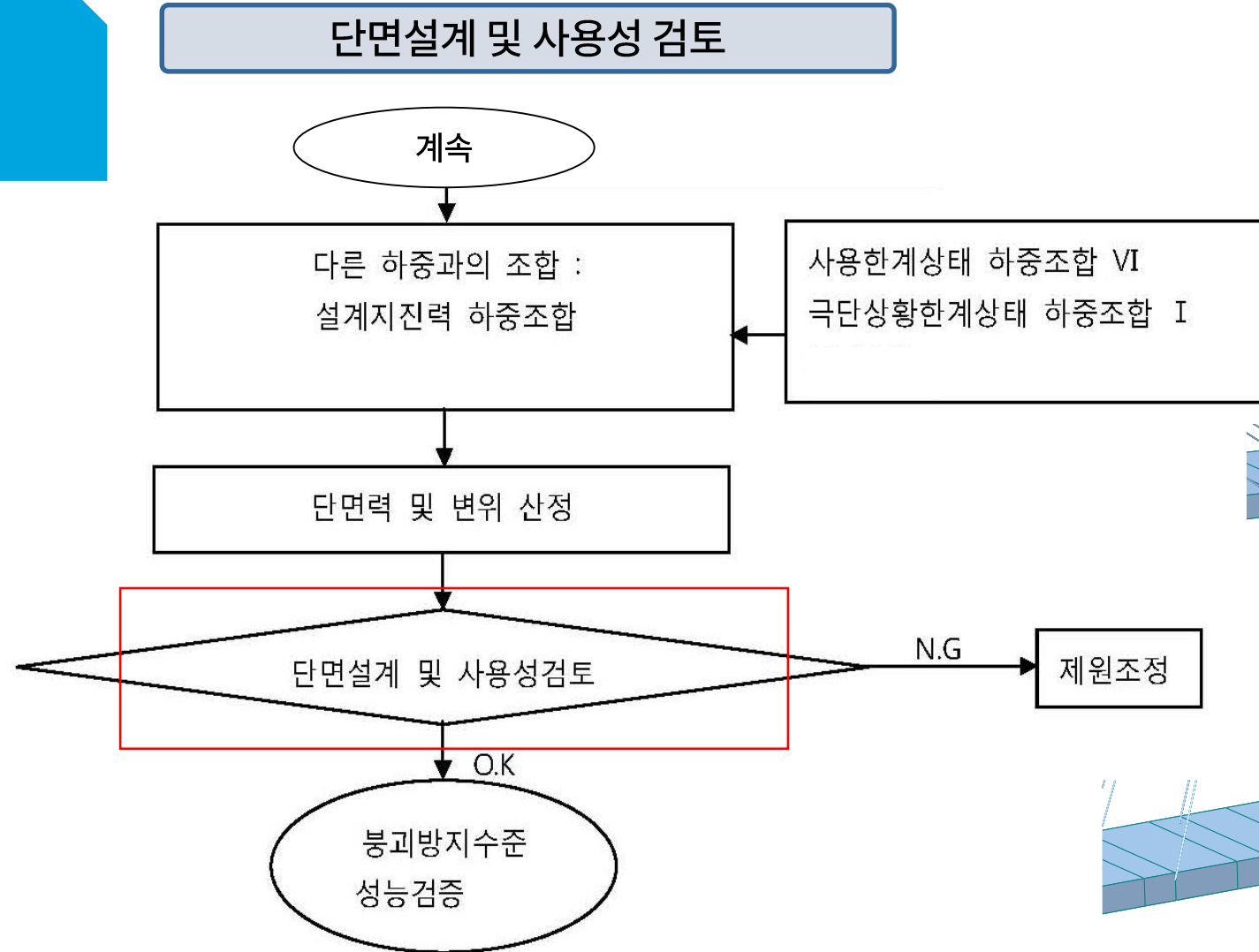
주탑 및 교각의 축방향철근이 항복하지 않을 경우라도 변위산정 시는 항복강성 적용

$$EI_y = \frac{M_y}{\varphi_y}$$



케이블교량 내진설계

설계단계



케이블교량 붕괴방지수준 내진성능 검증 방법

인공합성 지반운동 생성

비선형 해석모델

비선형 응답이력해석

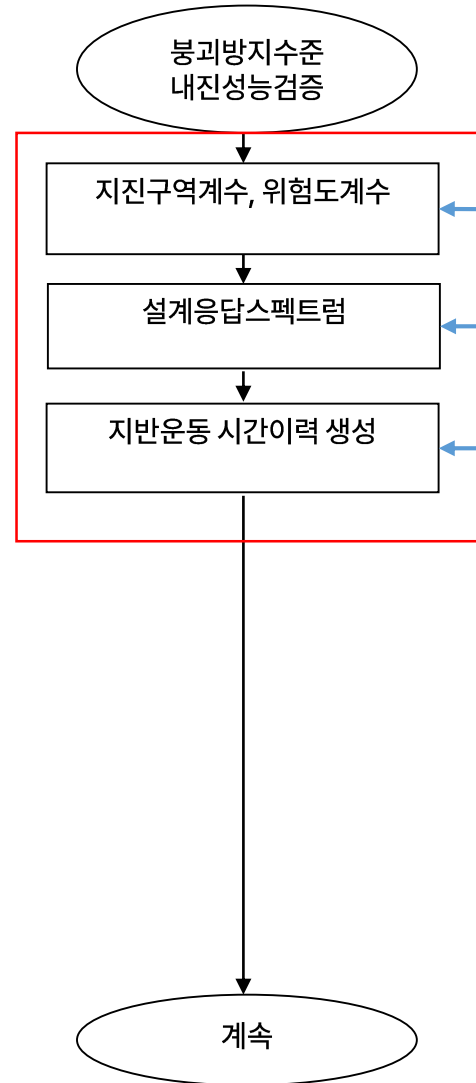
구성요소 내진성능 검증

인공합성 지반운동 생성

4set : 최대응답

7set : 평균응답

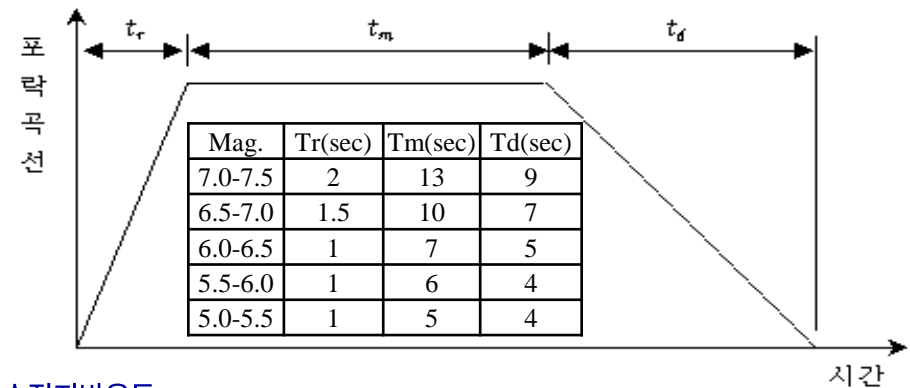
붕괴방지수준 내진성능 검증 절차



설계지진 수준

성능검증 : 설계사용수명 내 초과확률 4% 수준의 지진

- 응답스펙트럼에 적합한 시간이력 생성 ; 4개(응답의 최대값) or 7개(최대 응답의 평균값)
- 인공지진파 생성 포락선
- 두 개의 직교하는 지반운동은 독립적



수직지반운동

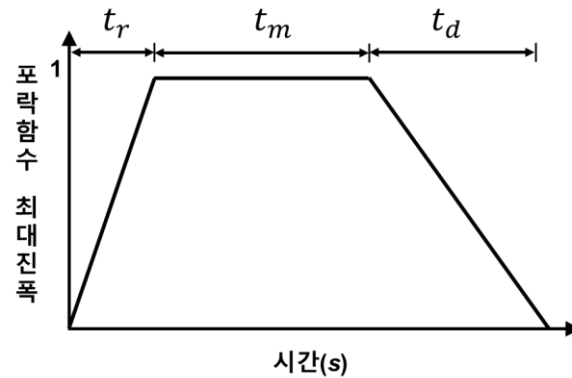
- 수평방향성분의 1/2~2/3
- 주파수 내용과 지속시간은 수평방향성분과 동일
- 활성단층과 50km 이내 위치 : 부지특성에 적합한 수직방향운동 고려

인공합성 지반운동 생성

4set : 최대응답

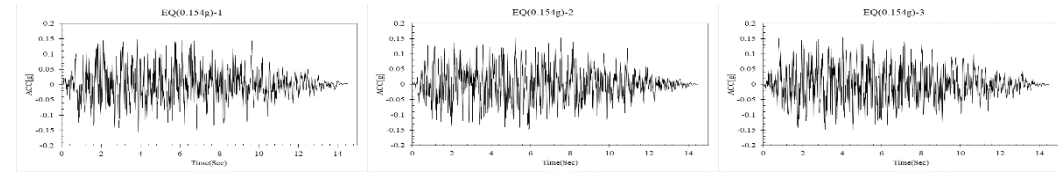
7set : 평균응답

내진설계 일반(암반지반 S₁) 지반운동 시간이력(4set)

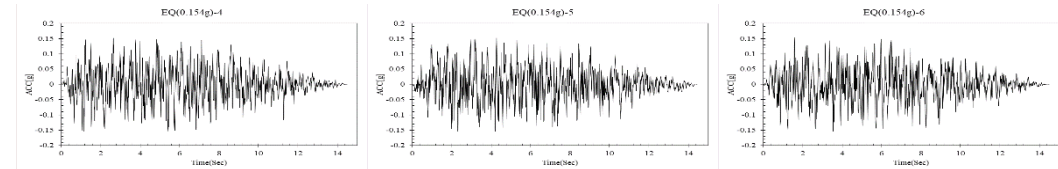


지진규모	상승시간 (t_r)	강진동지속시간 (t_m)	허강시간 (t_d)
7.0이상-7.5미만	2	12.5	13.5
6.5이상-7.0미만	1.5	9	10.5
6.0이상-6.5미만	1	7	9
5.5이상-6.0미만	1	5.5	8.0
5.0이상-5.5미만	1	5	7.5

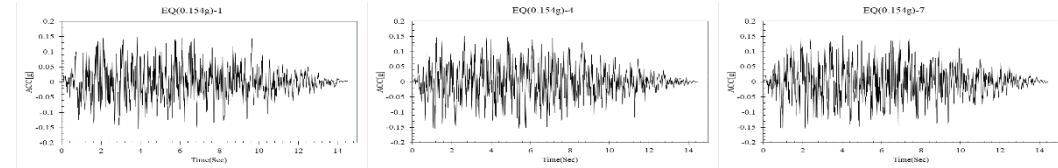
• 1SET



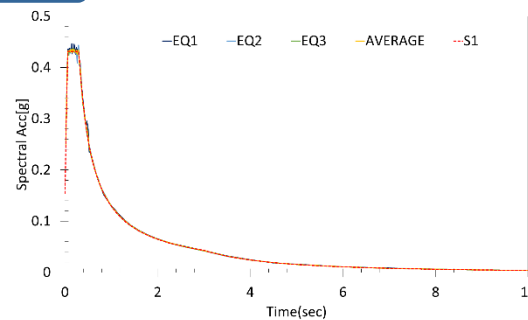
• 2SET



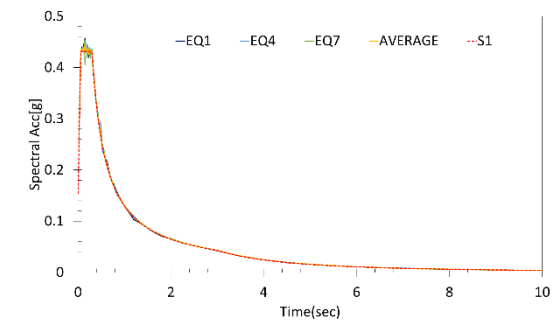
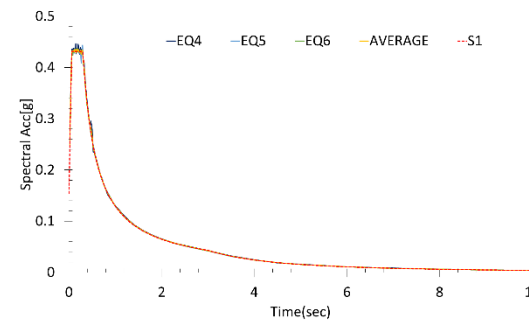
• 3SET



부합성 검토



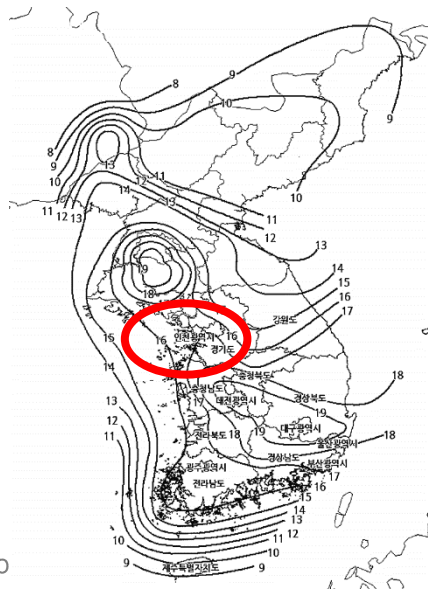
상관계수 < 0.16



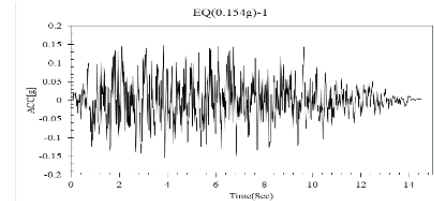
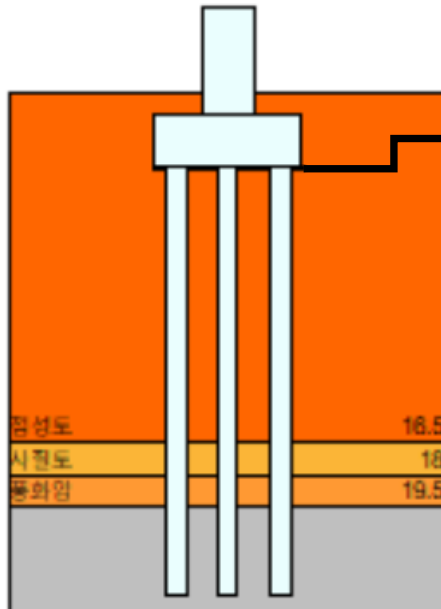
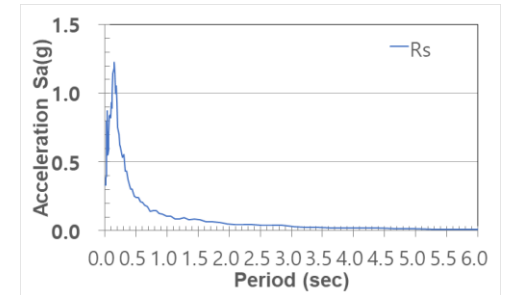
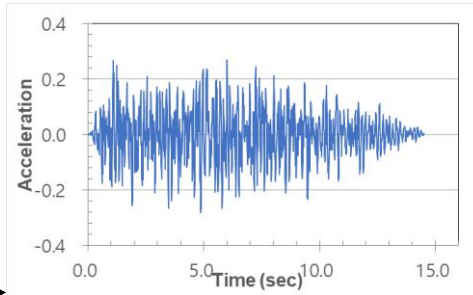
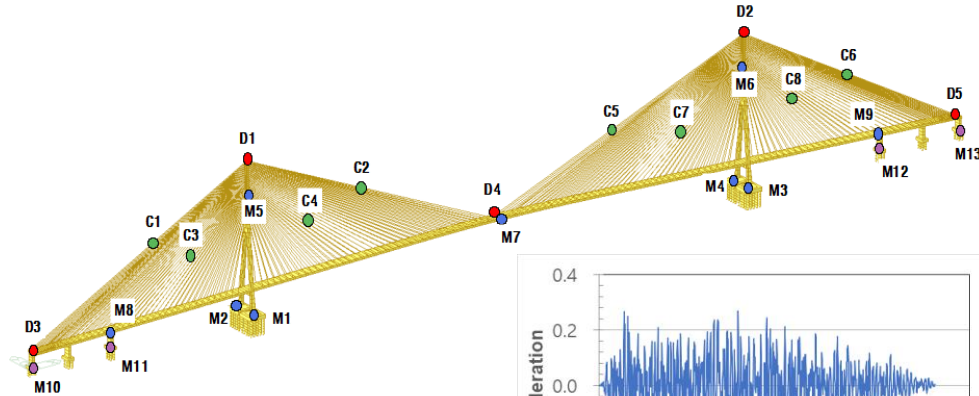
인공합성 지반운동 생성

4set : 최대응답

7set : 평균응답



부지응답해석 - 내진설계



Current Soil Properties

Layer Name

Basic Soil Properties

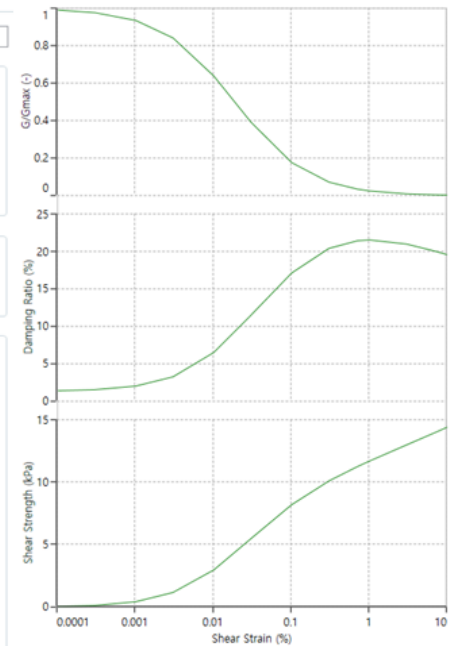
Parameter	Value
Thickness (m)	2.9
Unit Weight (kN/m ³)	17
Shear Wave Velocity (m/s)	164
Effective Vertical Stress (kPa)	24.65

Soil Model Properties

Parameter	Value
Dmin (%)	1.42664913264884

Discrete Points Data

Strain (%)	G/Gmax	Damping
0.0001	0.991893360500111	1.42664913264884
0.0003	0.978061028455963	1.56818891139744
0.001	0.936484945164243	2.04623554777982
0.003	0.843067571659716	3.28164529278566
0.01	0.639865582634116	6.53239152903156
0.03	0.392970245867093	11.5178241623975
0.1	0.17634711084865	17.1595560194305
0.3	0.0723647294359079	20.4483857732432
0.7	0.034570033388177	21.4760900451528
1	0.025151350932858	21.5751538530738
3	0.0093129267246894	21.0178622848873
7	0.00429644327636363	20.0585479544652

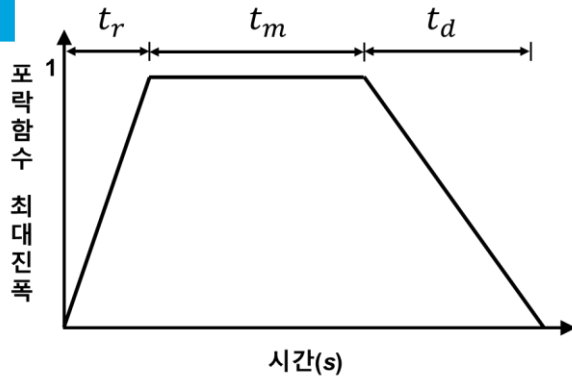


인공합성 지반운동 생성

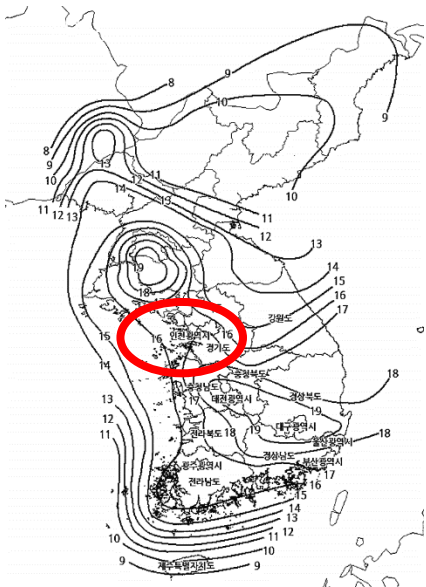
지반분류에 따른 설계응답스펙트럼에 부합되는 인공합성 지반운동 - 내진성능평가

4set : 최대응답

7set : 평균응답



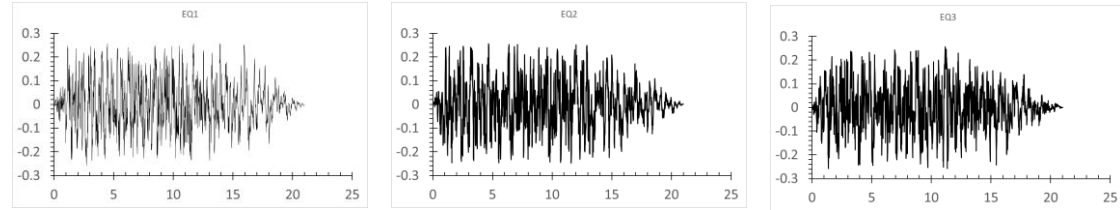
지진규모	상승시간 (t_r)	강진동지속시간 (t_m)	하강시간 (t_d)
7.0이상-7.5미만	2	12.5	13.5
6.5이상-7.0미만	1.5	9	10.5
6.0이상-6.5미만	1	7	9
5.5이상-6.0미만	1	5.5	8.0
5.0이상-5.5미만	1	5	7.5



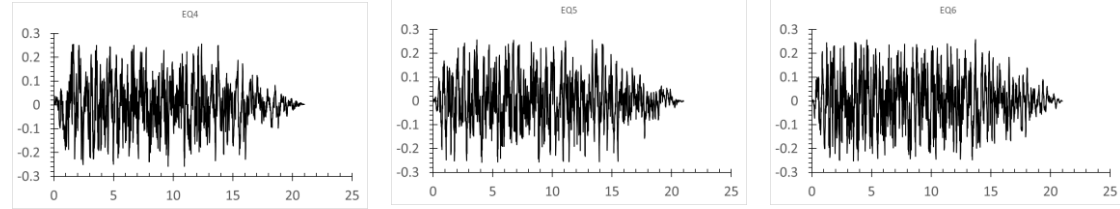
- 장기복구수준 : 재현주기 1000yr
- 붕괴방지수준 : 재현주기 2400yr

- S₃ 지반운동 80%
- S₃ 지반운동 100%

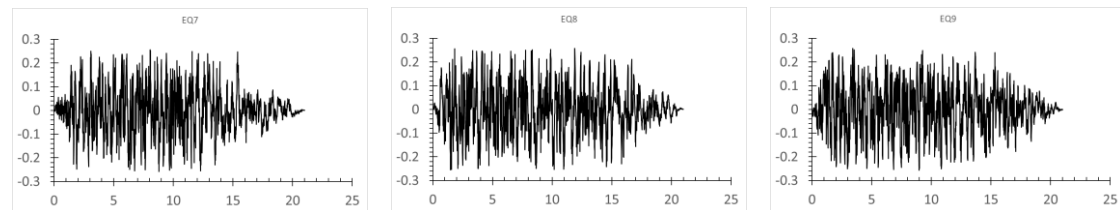
• 1SET



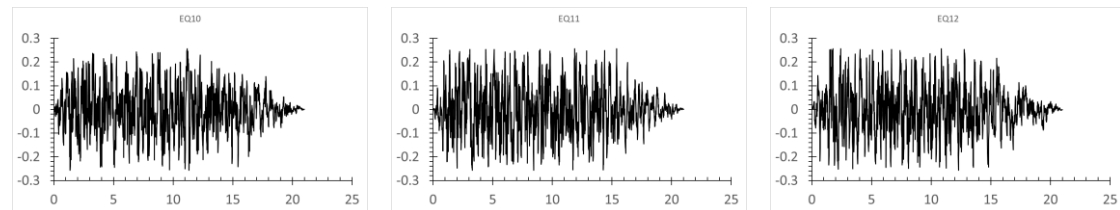
• 2SET



• 3SET



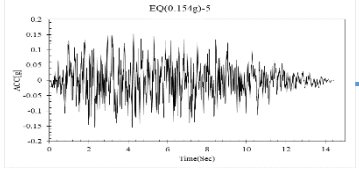
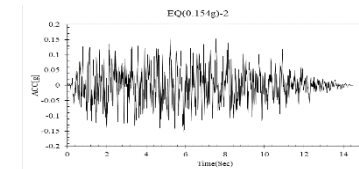
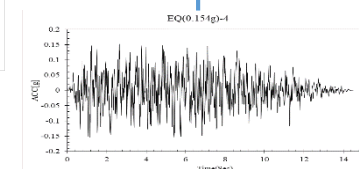
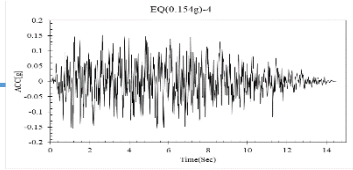
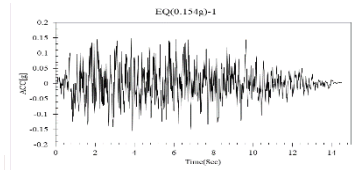
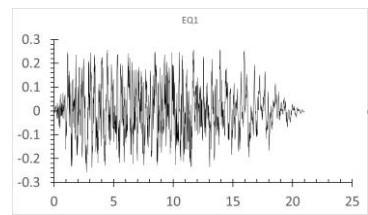
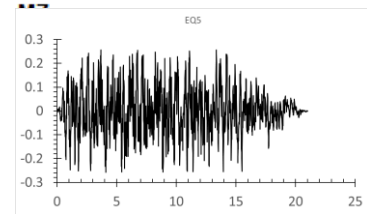
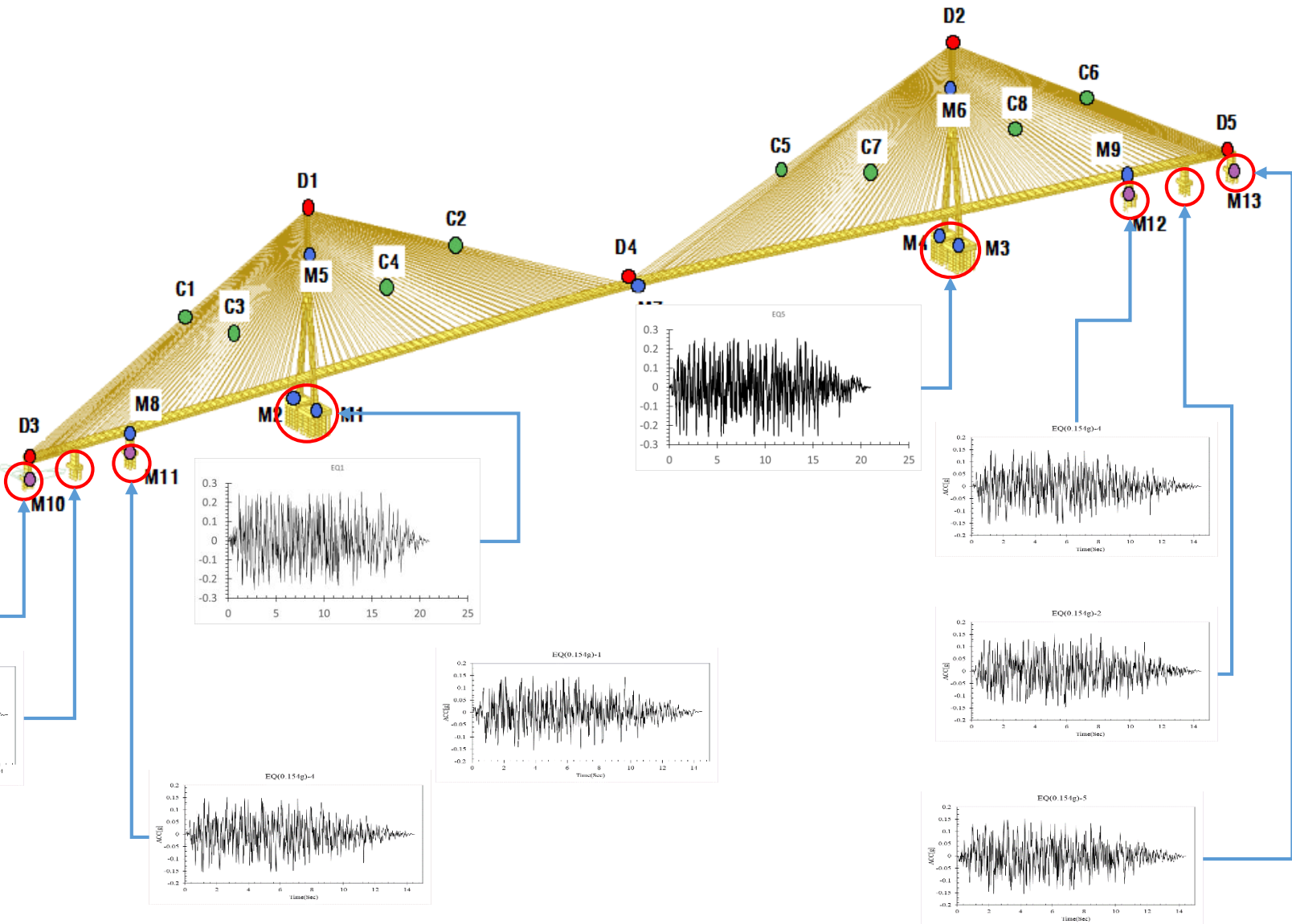
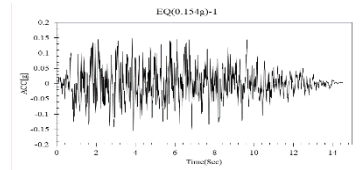
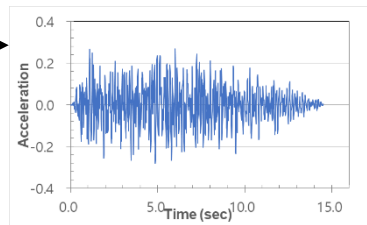
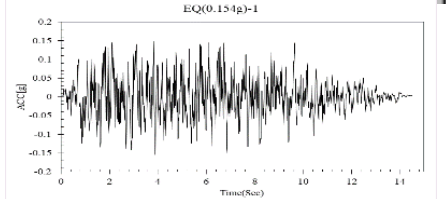
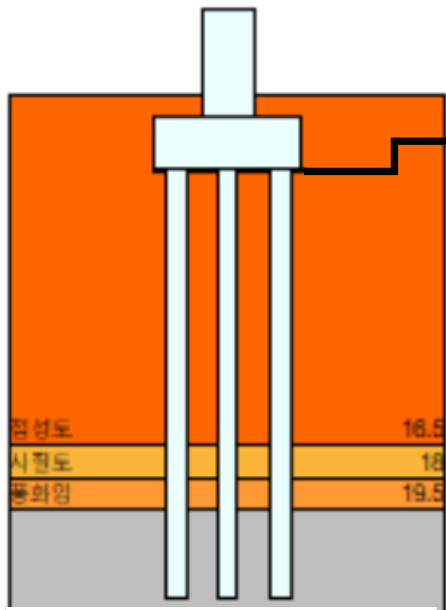
• 4SET



인공합성 지반운동 생성

교각 및 교대부 지반조건이 다른 경우, 위상차가 발생하는 경우

다지점 가진

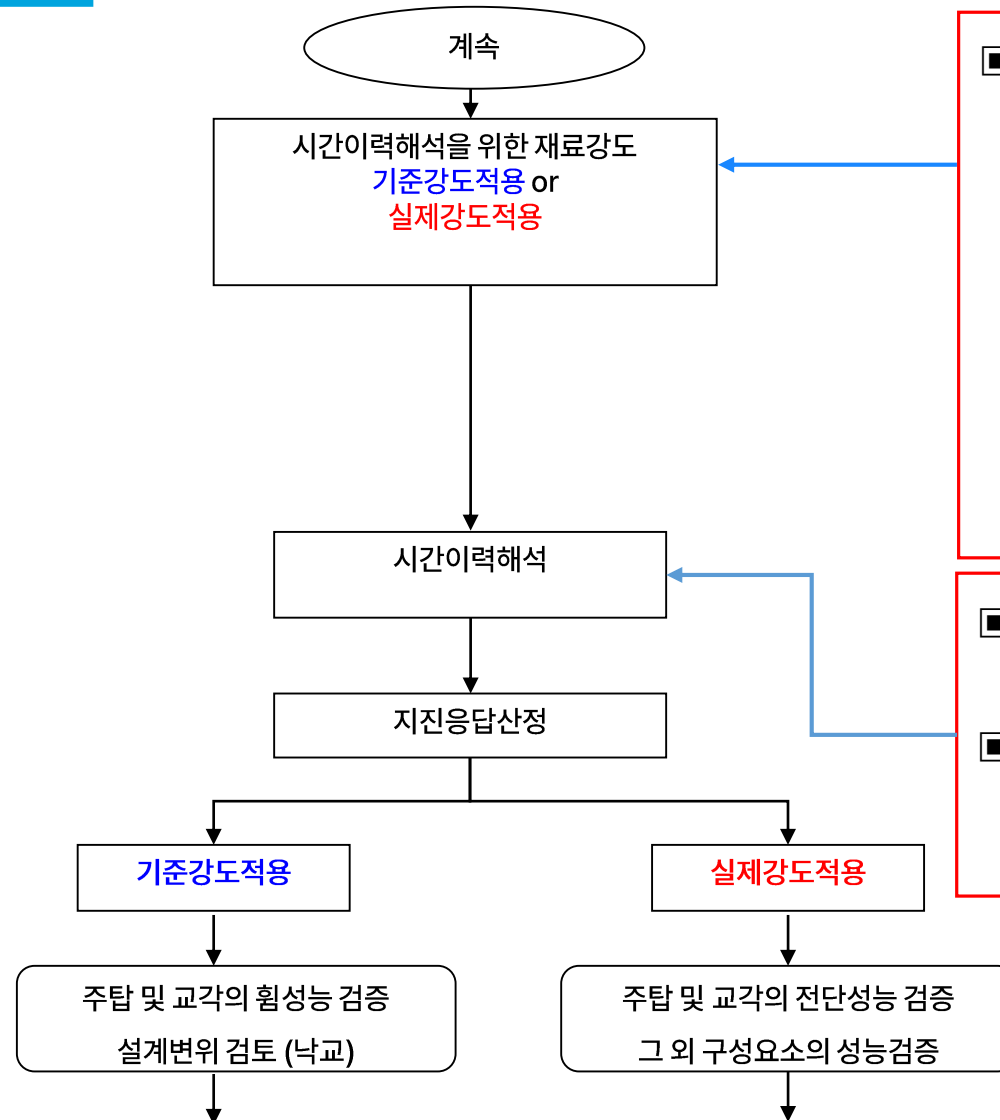


비선형 해석모델

재료이력모델

부재이력모델

붕괴방지수준 내진성능 검증 절차



■ 재료강도

주탑 및 교각의 휨성능, 상부구조의 응답변위

: 철근 재료강도 = **기준강도적용**

: 콘크리트 재료강도 = **기준강도적용**

주탑 및 교각의 전단성능, 그 외 부재의 성능 검증

: 철근 재료강도 = **실제강도적용**

: 콘크리트 재료강도 = **실제강도적용**

: 실제강도는 **통계자료**로 부터 산정

: 통계자료가 없는 경우, 철근 = 1.3, 콘크리트 = 1.7

■ 시간이력해석

소성거동구역 재료모델

■ 붕괴방지수준하중조합

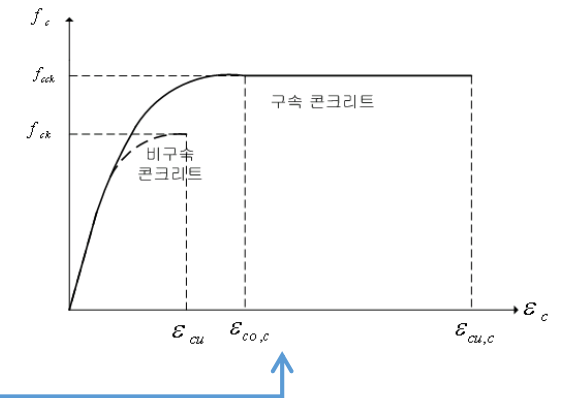
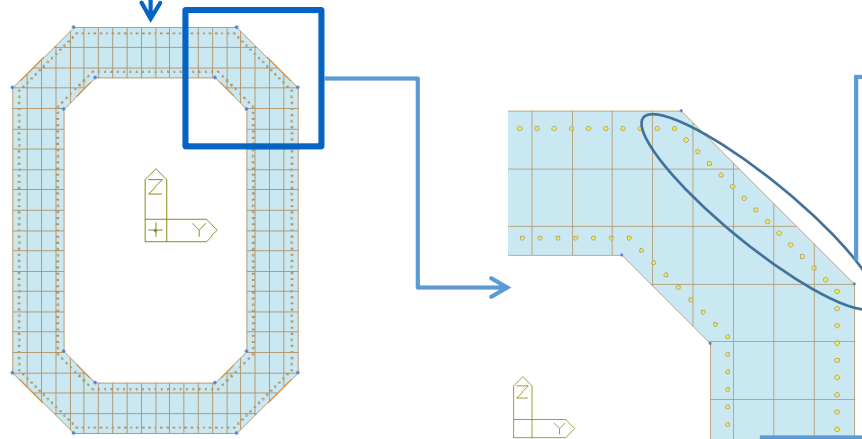
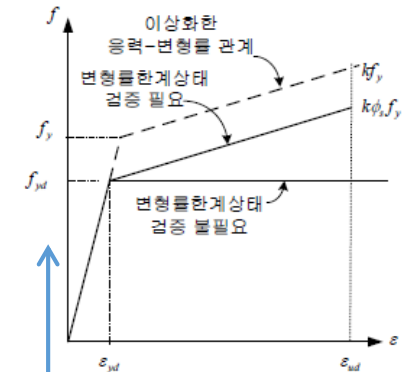
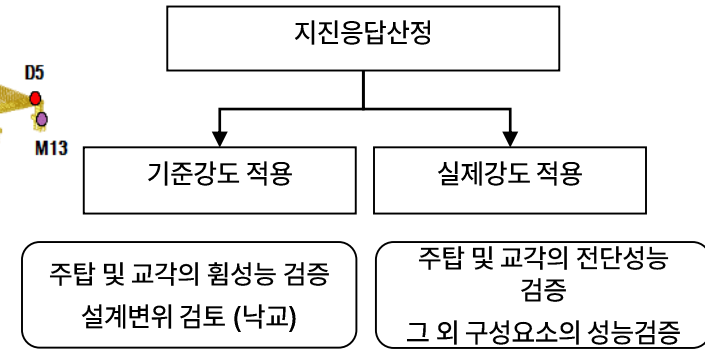
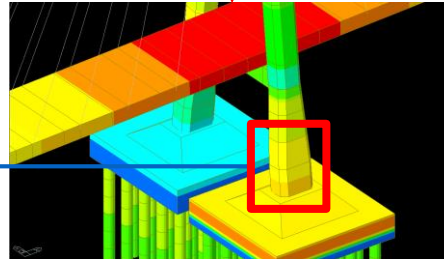
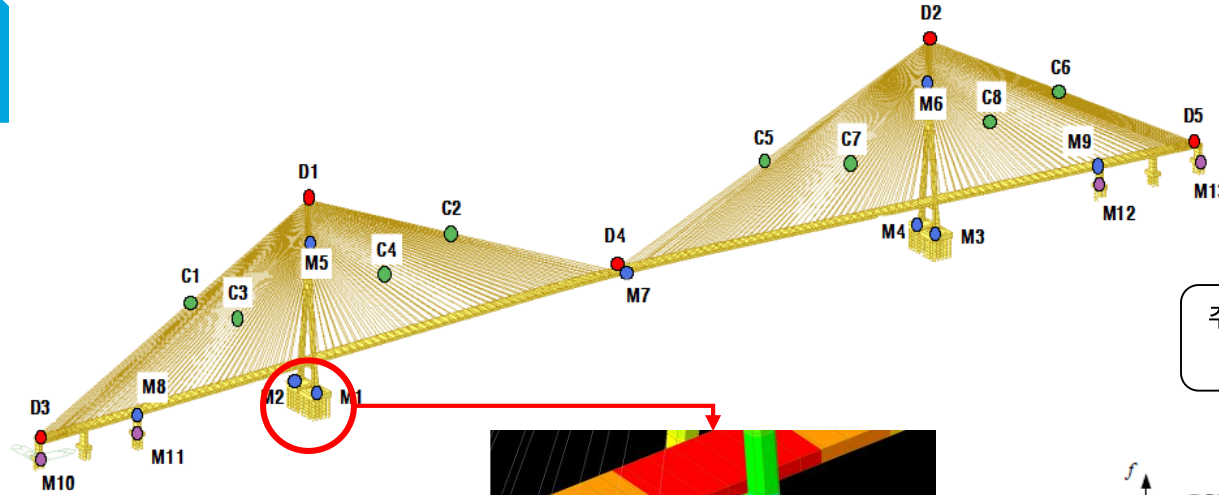
지속하중 승계 후 지진해석 수행

하중계수 = 1.0

비선형 해석모델

재료이력모델

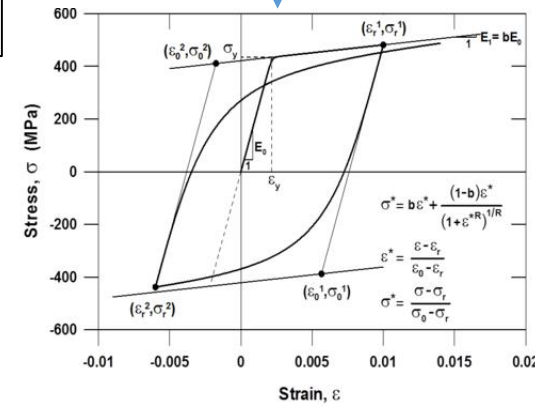
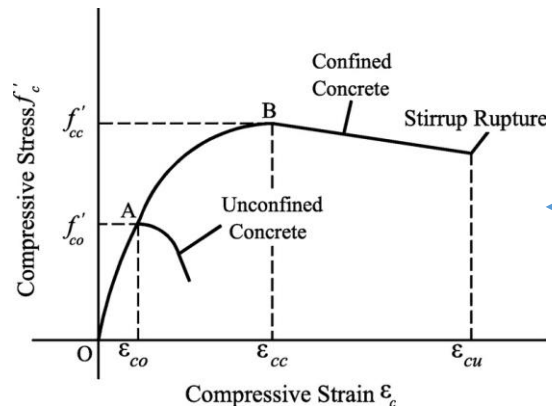
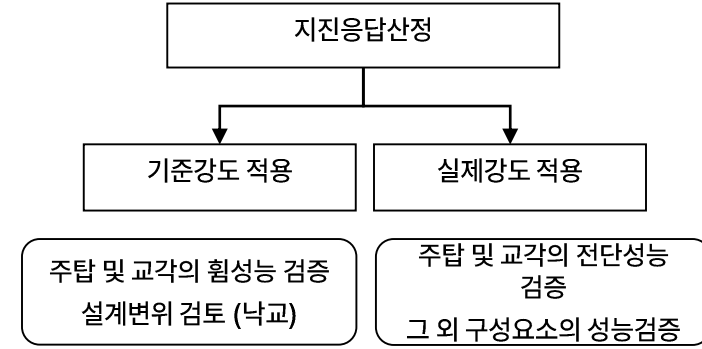
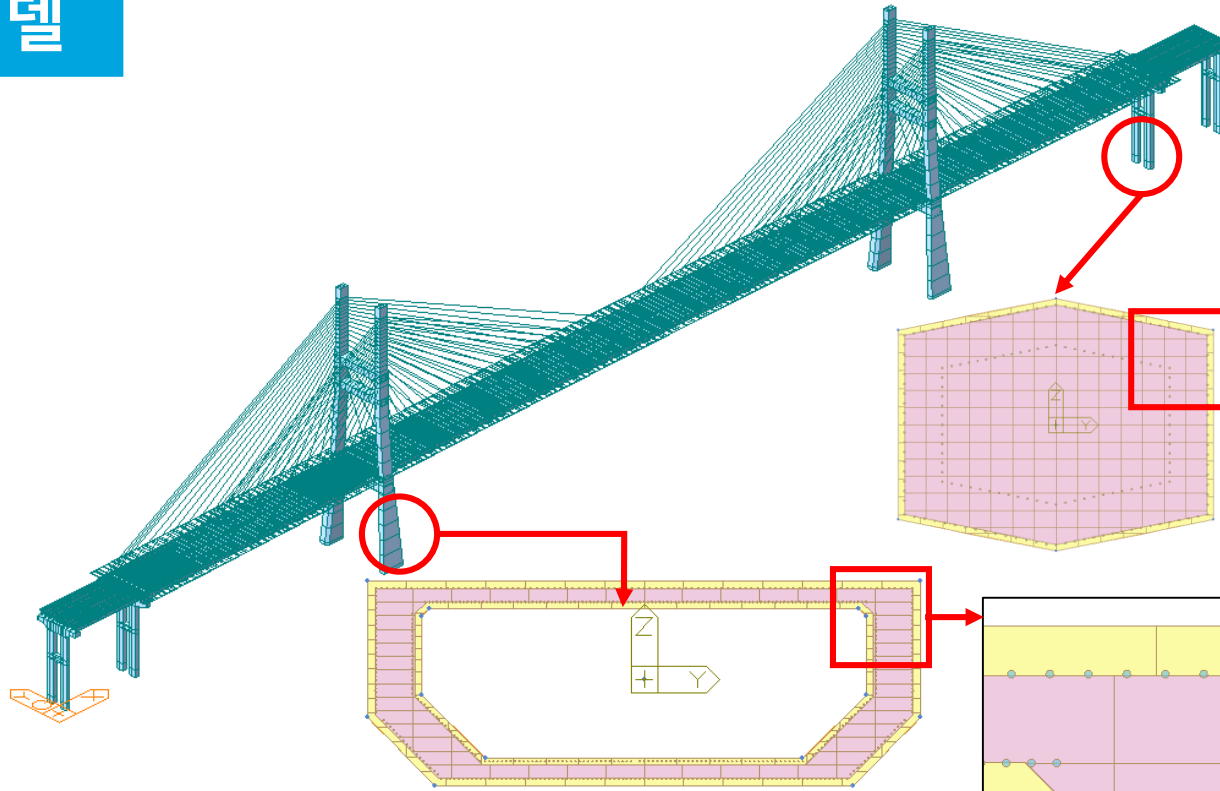
부재이력모델



비선형 해석모델

재료이력모델

부재이력모델



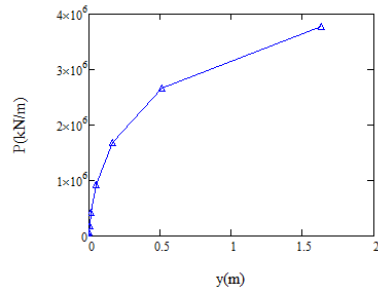
기초지반 모델링

말뚝기초의 등가스프링계수 산정

등가스프링계수

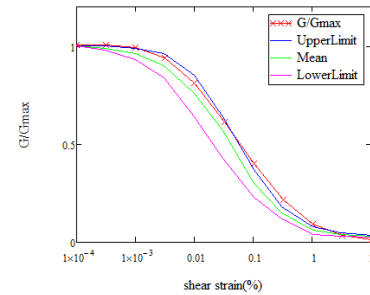
Dynamic p-y curve

p-y Curve



$$P = \int K_h d\delta$$

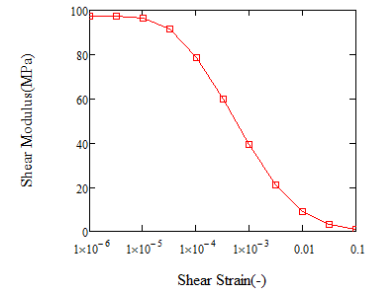
G/Gmax Curve



$$\frac{G}{G_{max}} \times G_{max} = G$$

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

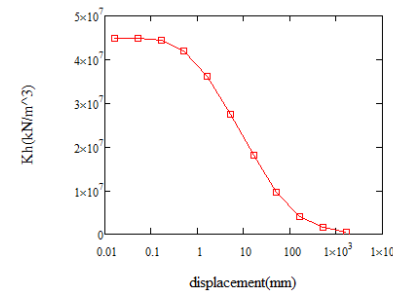
G-γ Curve



$$\delta = \gamma D$$

$$K = \frac{E}{2D} \text{ (where, } E = 2G(1 + \nu) \text{)}$$

Kh-δ Curve

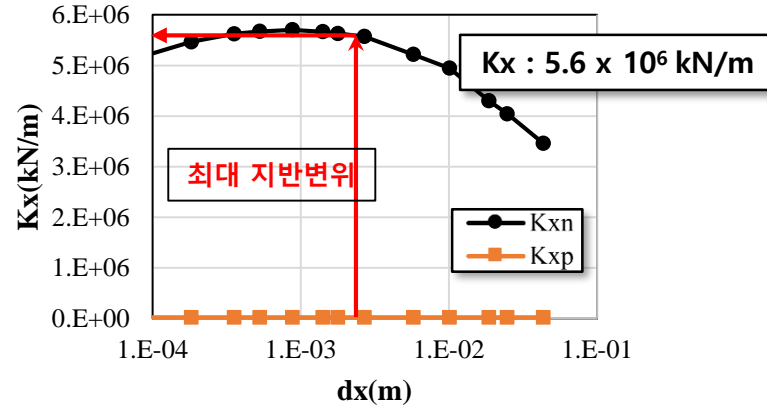


기초지반 모델링

등가스프링계수

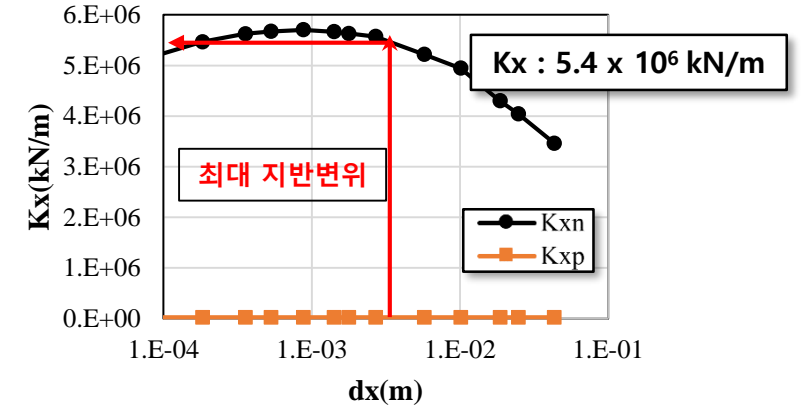
말뚝기초의 등가스프링계수 산정

① 수평방향 스프링계수 A=0.154



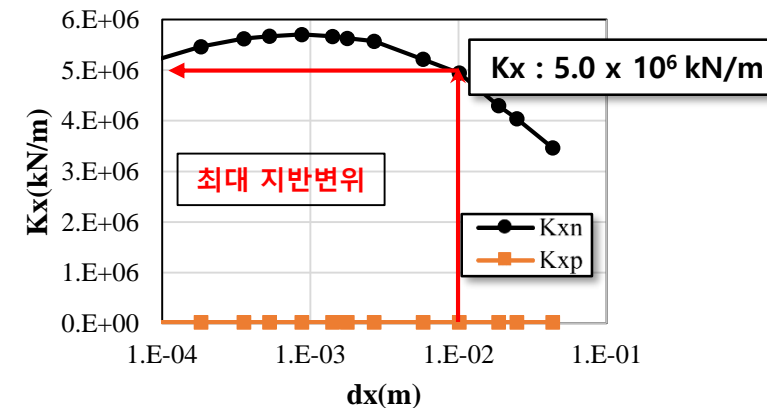
[수평방향변위(dx)에 대한 지반-말뚝의 강성(kx)]

② 수평방향 스프링계수 A=0.22



[수평방향변위(dx)에 대한 지반-말뚝의 강성(kx)]

③ 수평방향 스프링계수 A=0.286



[수평방향변위(dx)에 대한 지반-말뚝의 강성(kx)]

지진가속도(g)	최대지반변위(rad)	Kx(kN/m)
0.154	0.0261	5.6×10^6
0.22	0.0370	5.4×10^6
0.286	0.0993	5.0×10^6

비선형 응답이력해석

3방향(x,y,z)
동시해석 수행

붕괴방지수준 내진성능 검증을 위한 비선형 응답이력해석

방향별 지진해석 후 30%rule 직교지진력 조합 불가

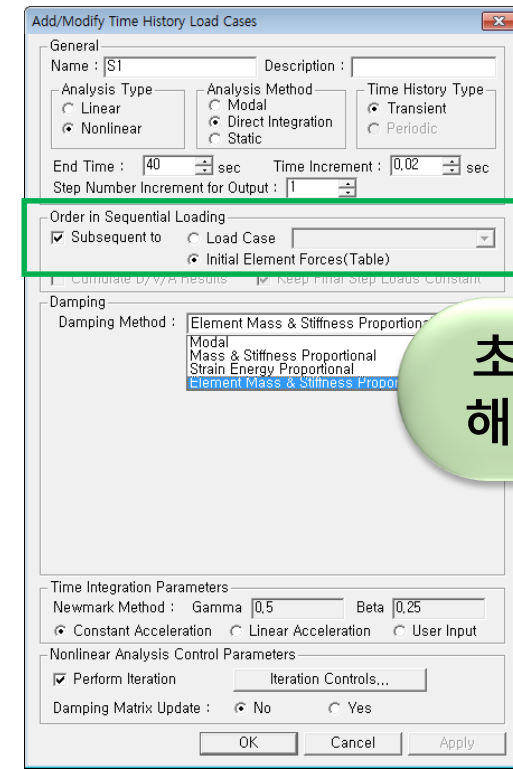
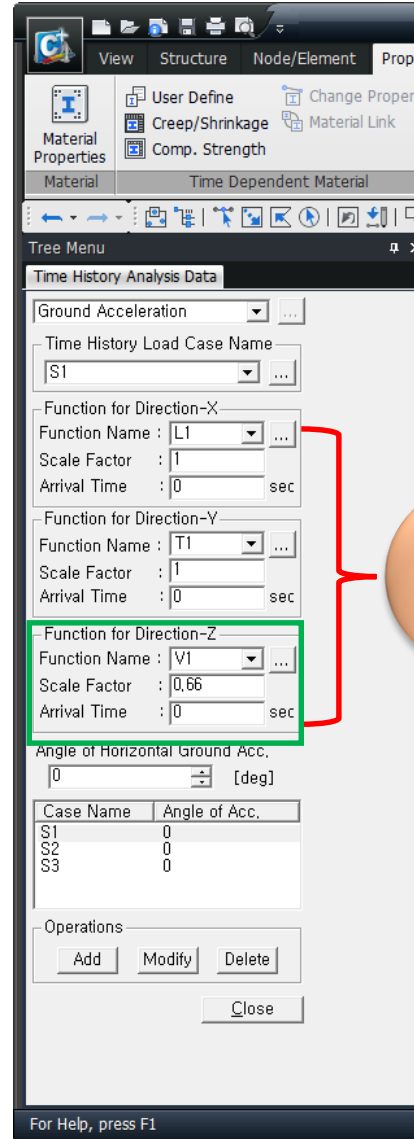
고정하중에 의한 해석 결과 승계 후 비선형응답이력해석 수행

고정하중 해석 + 비선형응답이력해석 결과 : 단순 조합 불가

3방향(x,y,z)
동시해석 수행

수직방향 입력지반운동
암반(S1)지반 : 0.77
토사(S2~S5)지반 : 공학적 판단

초기평형상태
해석결과 승계

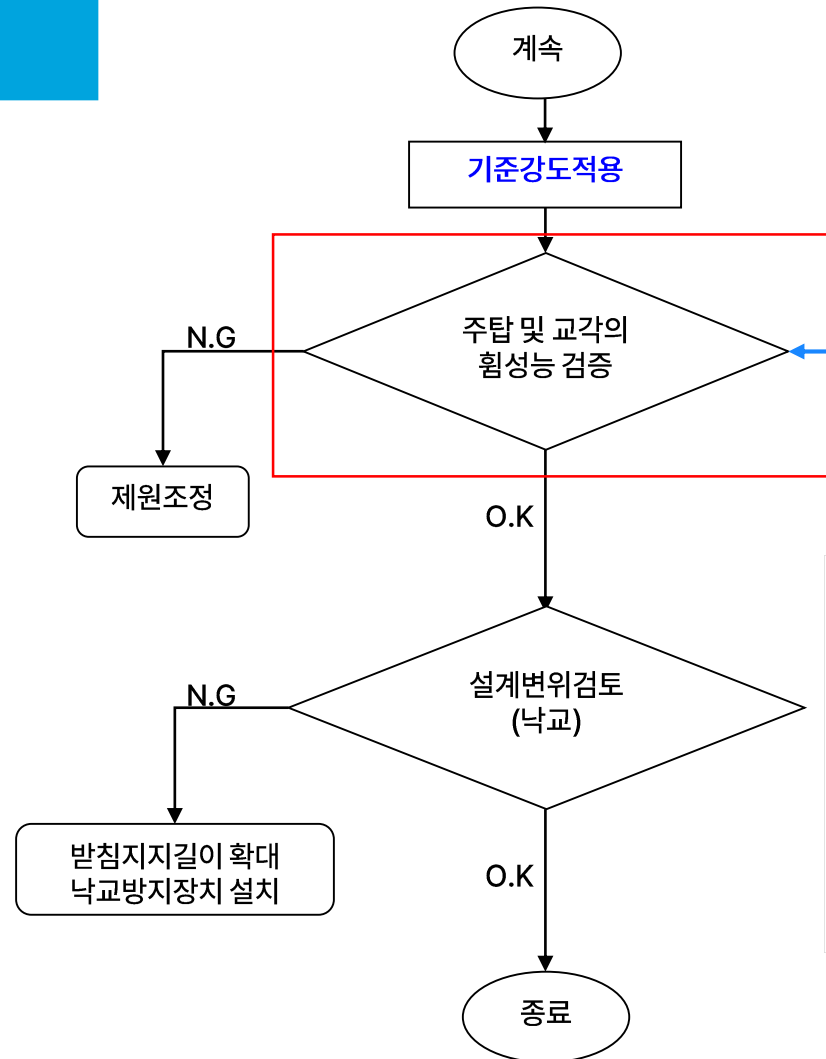


주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

붕괴방지수준 내진성능 검증 절차



■ 휨성능 검증

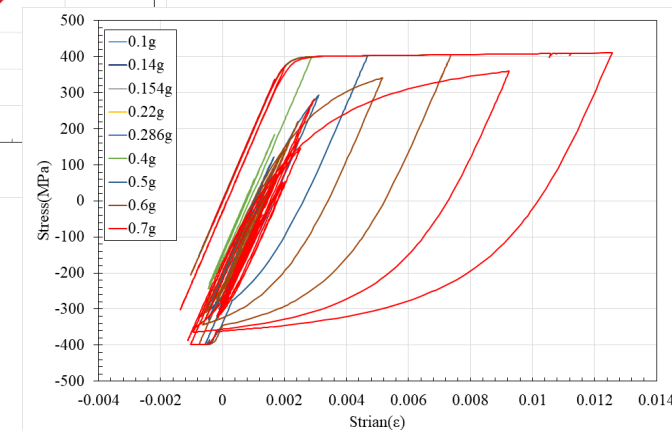
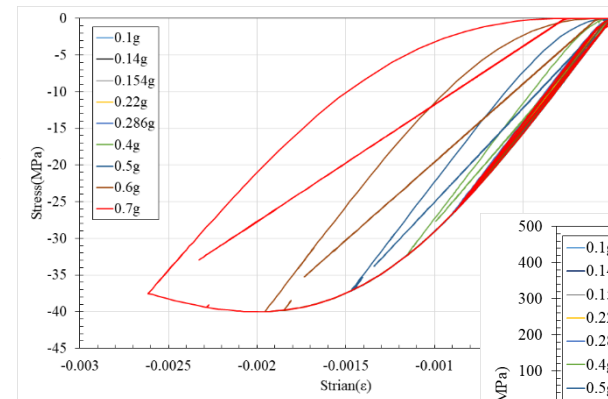
최대 압축변형률(시간이력해석) \leq 극한한계변형률

: 최소한의 횡방향 철근 배근-좌굴방지

최대 압축변형률(시간이력해석) $>$ 극한한계변형률

: 심부구속 횡방향철근량 배근

: 횡방향철근 상세

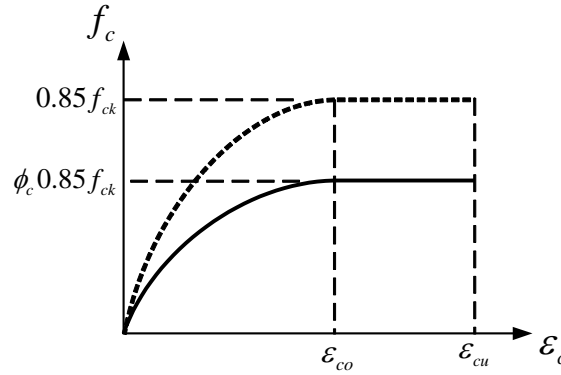


주탑 및 교각의 휨성능 검증

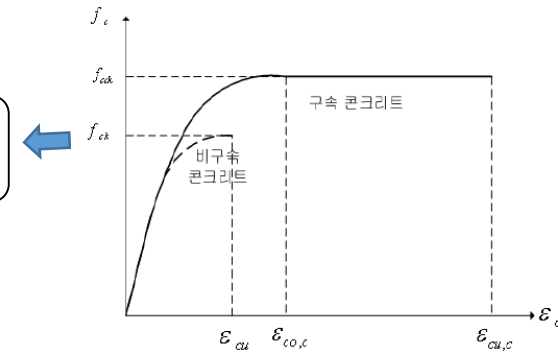
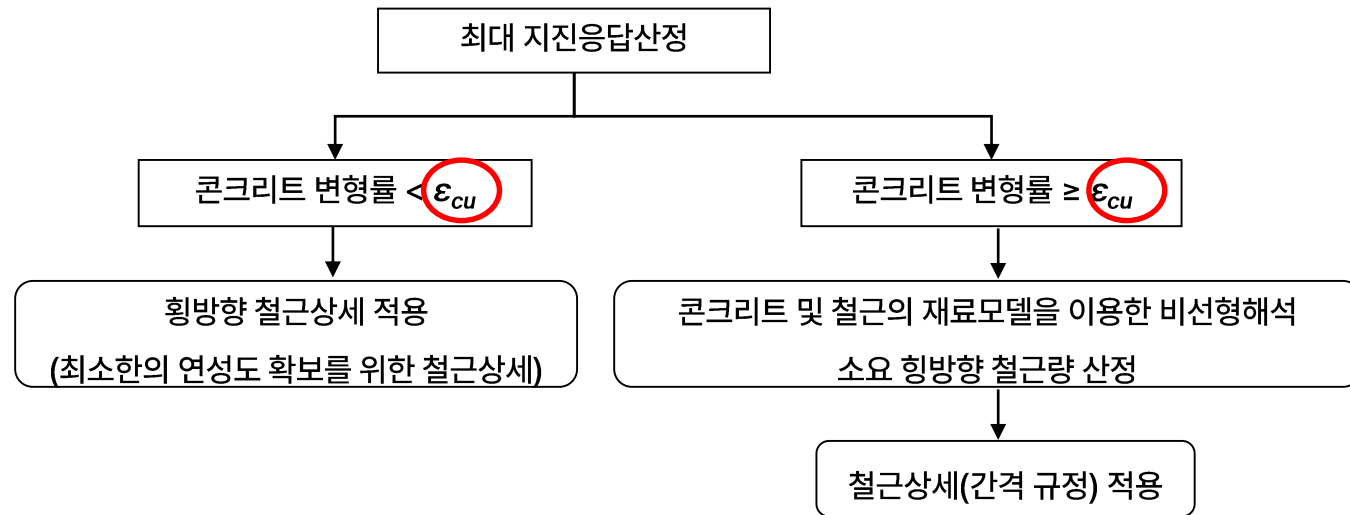
기준강도 적용

실제강도 적용

휨성능 검증 : 콘크리트 응력-변형률 검토



$f_{ck}(MPa)$	18	21	24	27	30	35	40	50	60	70
n				2.0				1.9	1.8	1.7
$\epsilon_{co}(\text{‰})$				2.0				2.1	2.2	2.3
$\epsilon_{cu}(\text{‰})$				3.3				3.2	3.1	3.0

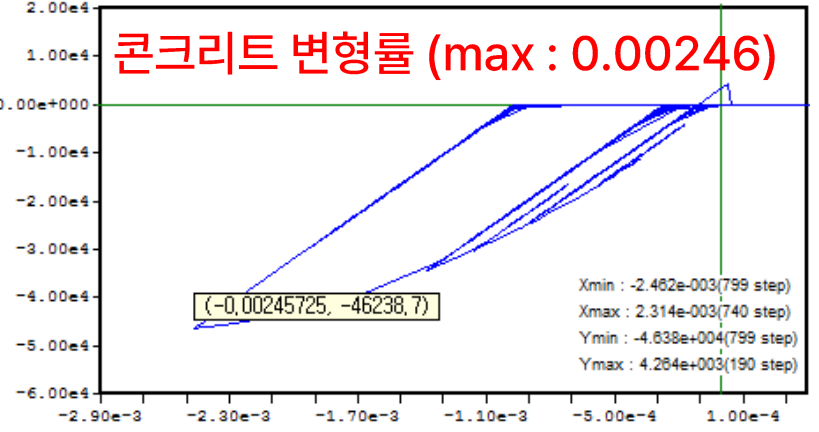
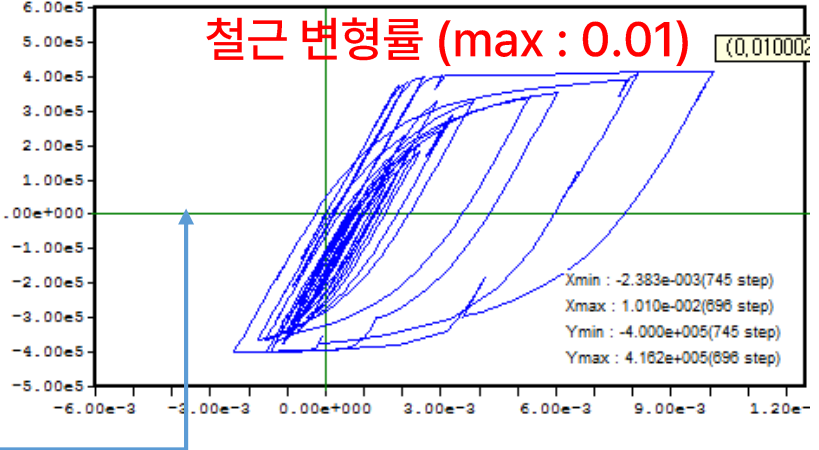
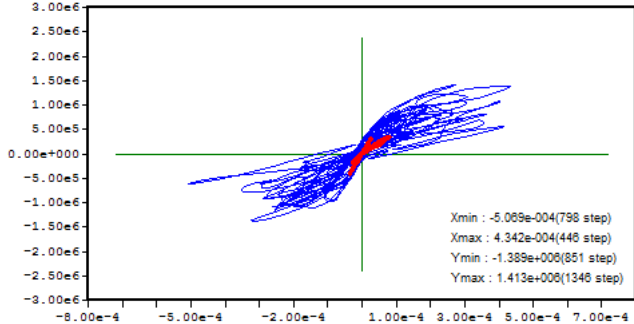
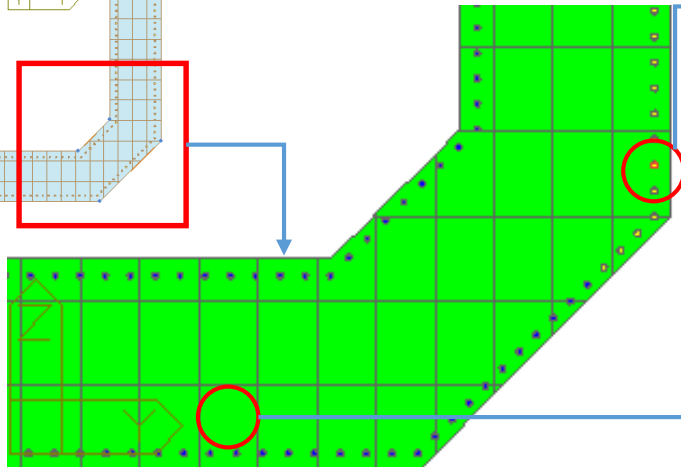
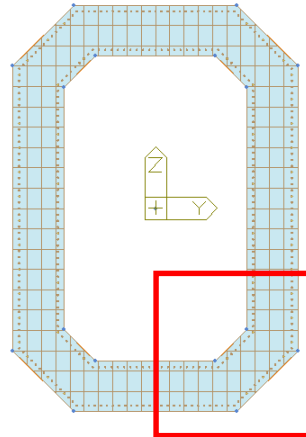
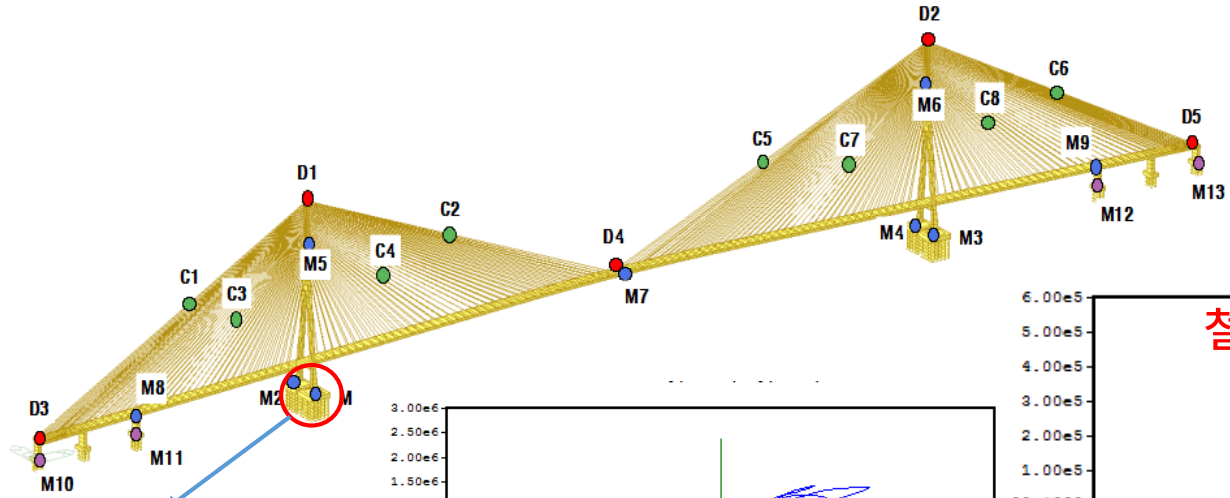


주탑 및 교각의 휨성능 검증

휨성능 검증 : 콘크리트 응력-변형률 검토

기준강도 적용

실제강도 적용

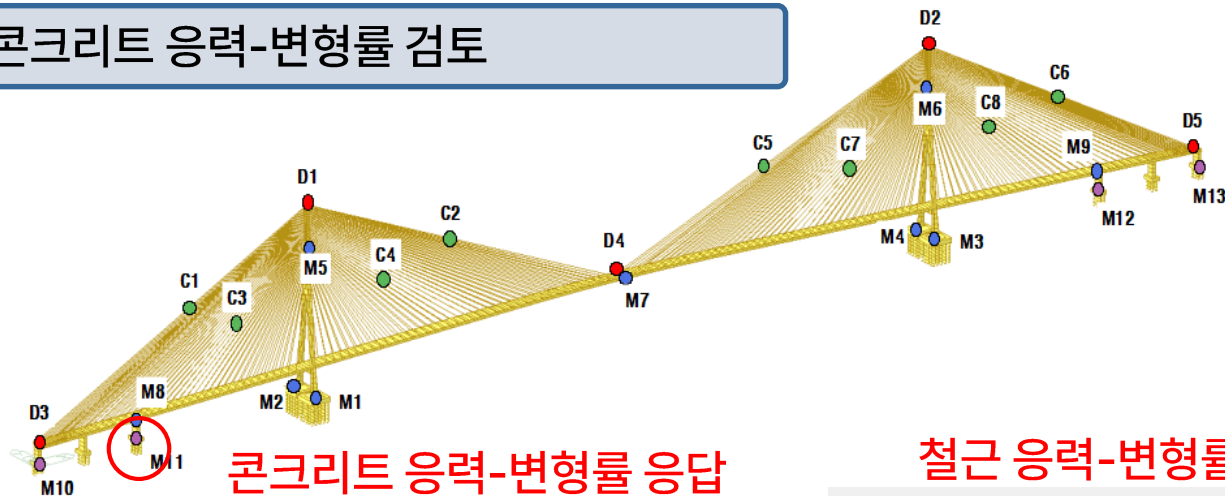


주탑 및 교각의 휨성능 검증

휨성능 검증 : 콘크리트 응력-변형률 검토

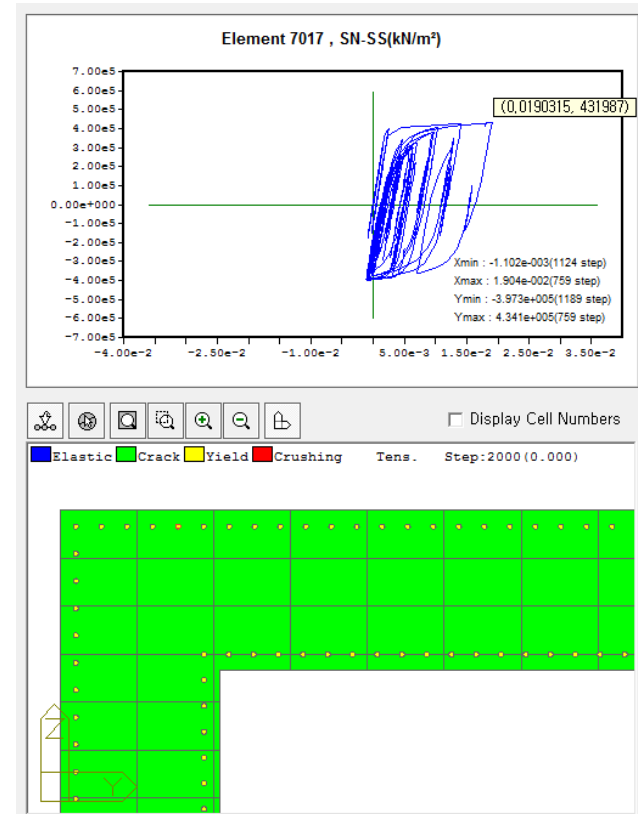
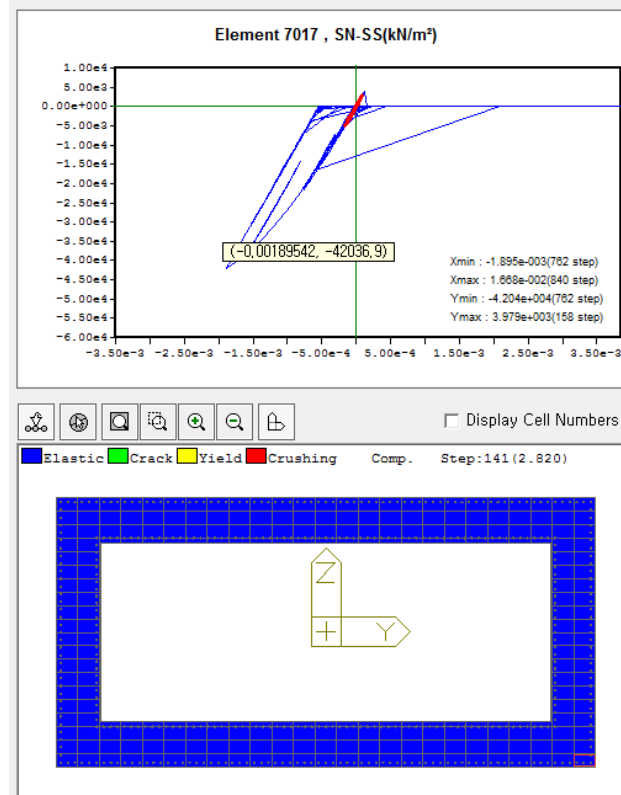
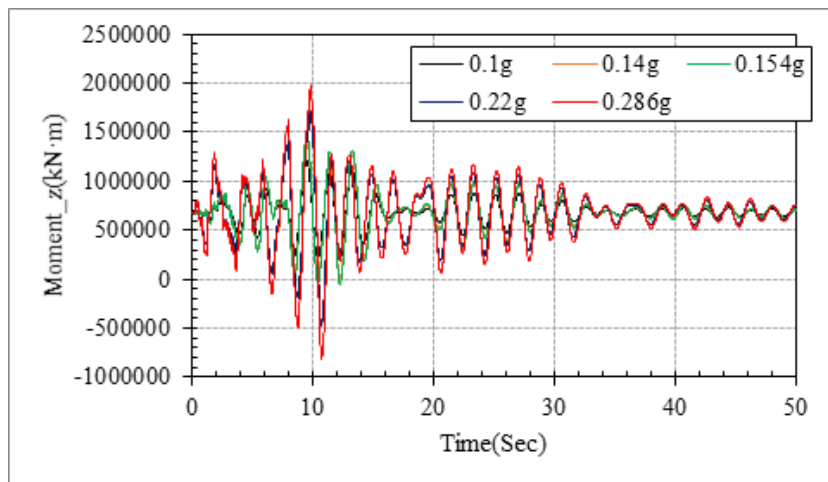
기준강도 적용

실제강도 적용



콘크리트 응력-변형률 응답

철근 응력-변형률 응답

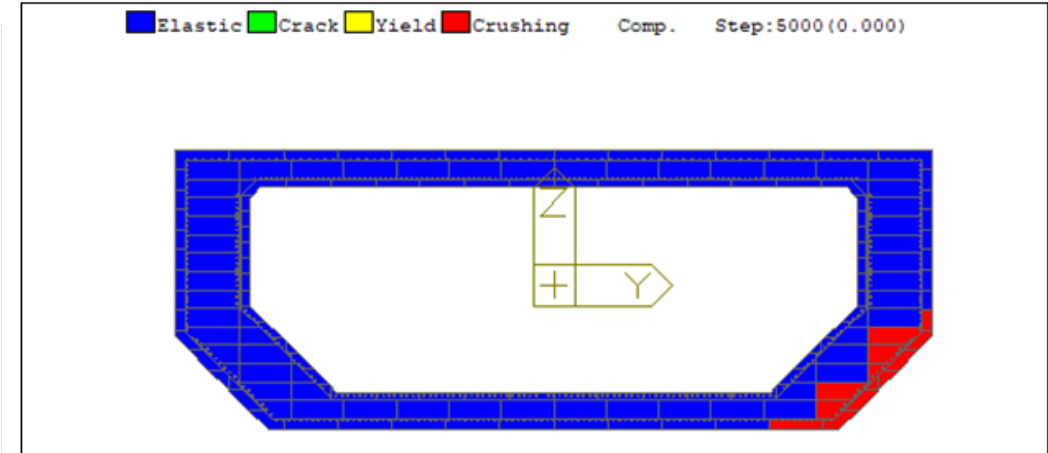
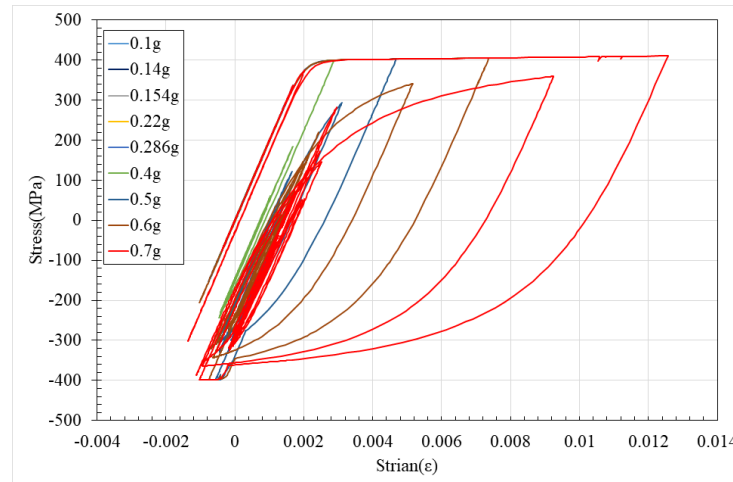
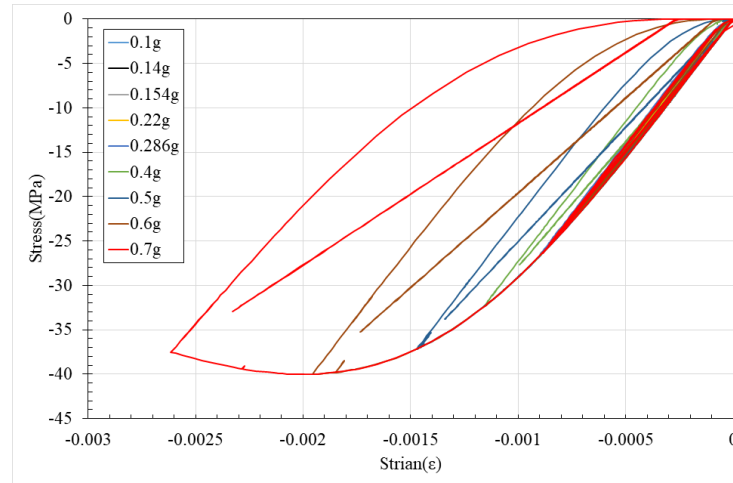


주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

휨성능 검증 : 콘크리트 응력-변형률 검토



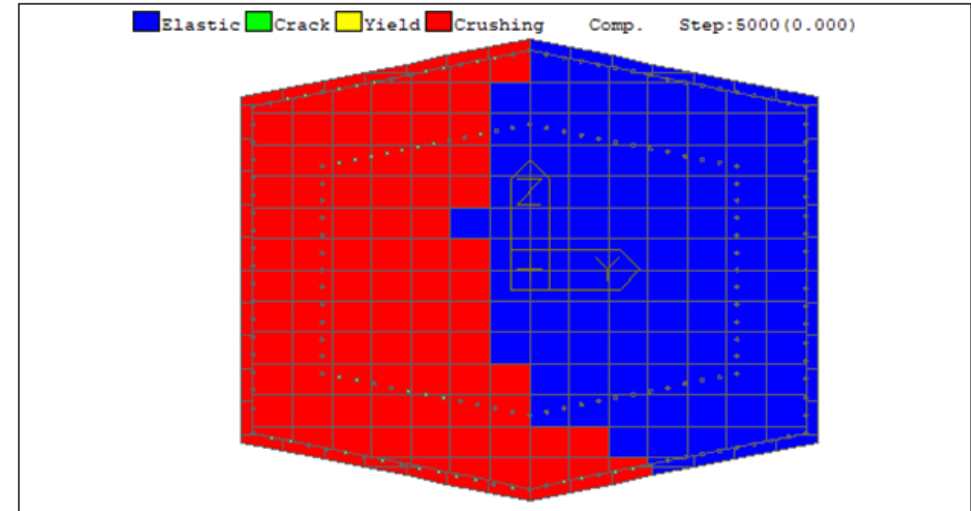
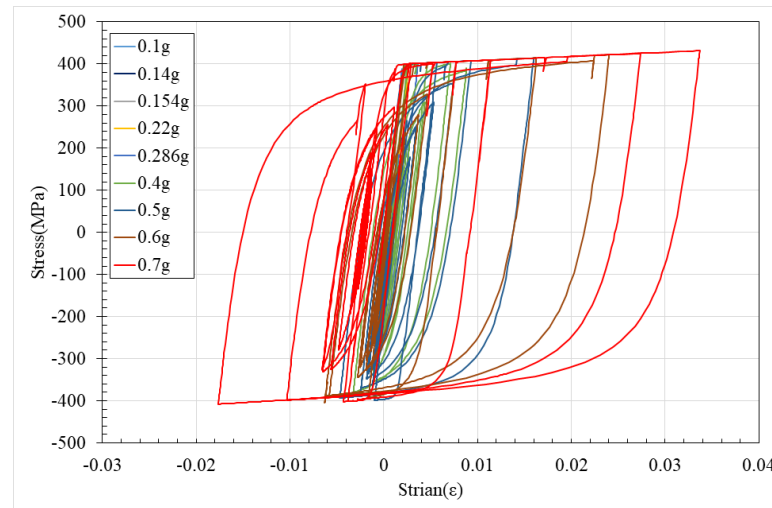
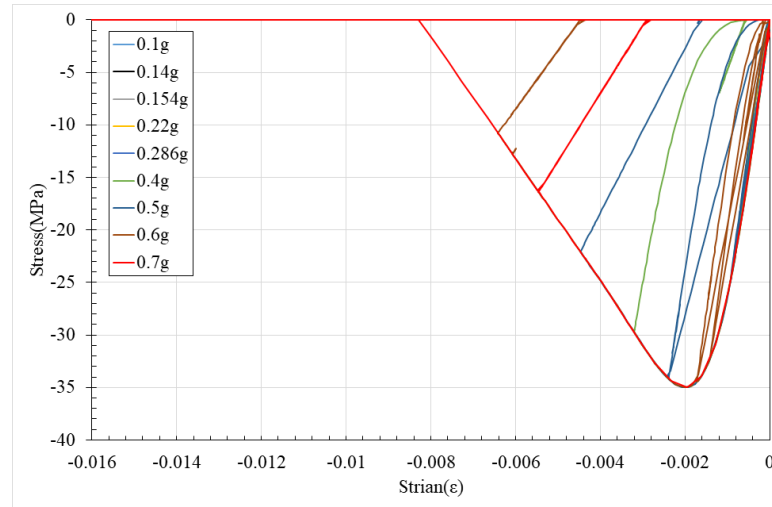
Concrete	Design Strength(f_{ck})	40MPa			
	Ultimate Strain(ϵ_{cu})	0.0033			
Reinforcement	Yield Strength(f_y)	400MPa			
	Yield Strain(ϵ_y)	0.002			
Acc(g)	Concrete		Reinforcement		Check
	Strain($\epsilon_{c,max}$)	Stress(MPa)	Strain($\epsilon_{c,max}$)	Stress(MPa)	
0.1	0.00050	15.54	0.00036	72.16	탄성
0.14	0.00059	18.39	0.00054	107.60	탄성
0.154	0.00063	19.35	0.00043	85.88	탄성
0.22	0.00078	23.48	0.00113	226.30	탄성
0.286	0.00091	27.00	0.00169	336.40	탄성
0.4	0.00116	32.44	0.00288	400.10	항복
0.5	0.00147	37.16	0.00468	402.70	항복
0.6	0.00196	39.98	0.00737	405.40	항복
0.7	0.00262	40.00	0.01257	410.60	Crushing

주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

휨성능 검증 : 콘크리트 응력-변형률 검토



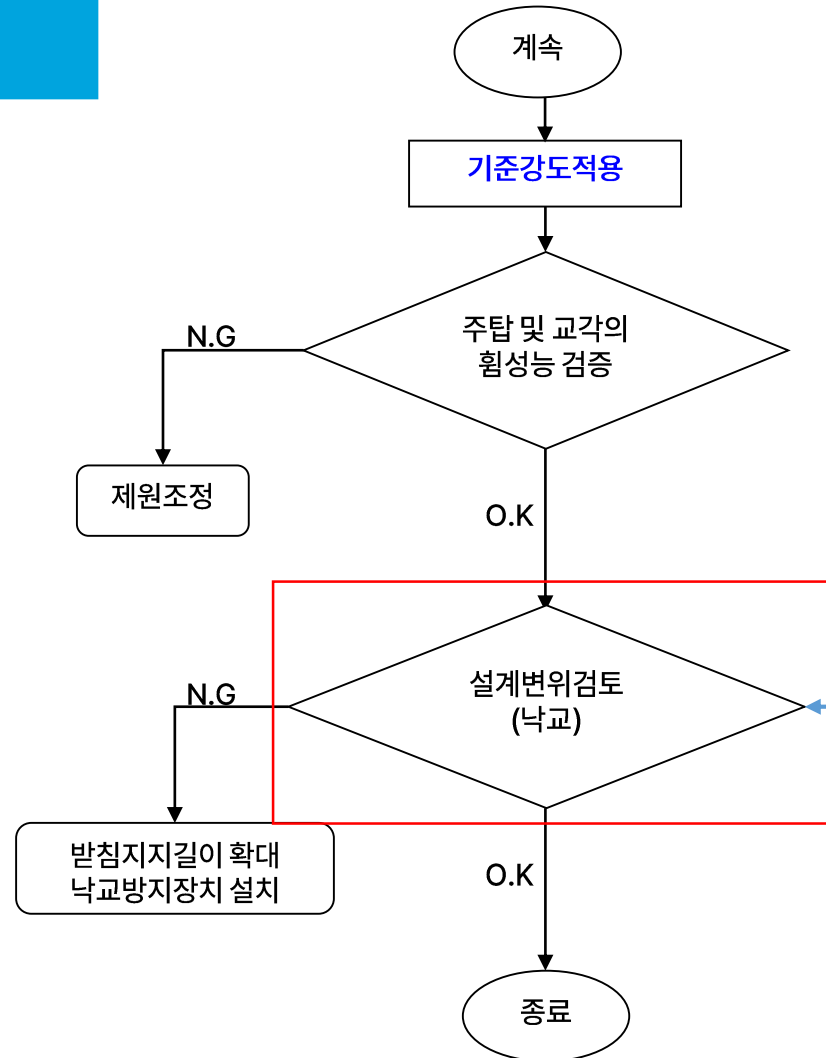
Concrete	Design Strength(f_{ck})	35MPa			
	Ultimate Strain(ϵ_{cu})	0.003			
Reinforcement	Yield Strength(f_y)	400MPa			
	Yield Strain(ϵ_y)	0.002			
Acc(g)	Concrete		Reinforcement		Check
	Strain($\epsilon_{c,max}$)	Stress(MPa)	Strain($\epsilon_{c,max}$)	Stress(MPa)	
0.1	0.00030	8.94	0.00056	112.80	탄성
0.14	0.00085	13.61	0.00090	180.50	탄성
0.154	0.00118	16.02	0.00128	256.70	탄성
0.22	0.00181	23.93	0.00269	399.00	항복
0.286	0.00260	24.25	0.00365	401.60	항복
0.4	0.00876	35.00	0.00883	402.60	Crushing
0.5	0.01585	35.00	0.01600	414.00	Crushing
0.6	0.02394	35.00	0.02402	422.00	Crushing
0.7	0.03372	34.99	0.03368	431.70	Crushing

주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

붕괴방지수준 내진성능 검증 절차



■ 설계변위

: 설계수명 내 **초과확률 4%** 수준의 지진 시 상부구조의 **낙교 방지**
받침지지길이 확보 (식 9.6.1)

: 설계수명 내 **초과확률 8~10%** 수준의 지진 시 **충돌방지** 여유 간
격 확보

충돌방지 여유간격 확보

$$\Delta l_i = d + \Delta l_s + \Delta l_c + 0.4l_t$$

설계변위 검토 - 낙교

기준강도 적용

실제강도 적용

한계상태 하중조합 (2.4.1.5)	재현주기		검토 내용	비고
	설계수명 100 yr	설계수명 200 yr		
극단상황한계상태 하중조합 I	1000 yr	2400 yr	설계수명 내 초과확률 8~10% 수준의 지진 상부 구성요소 충돌 방지	장기복구
붕괴방지 내진성능 검증	2400 yr	4800 yr	설계수명 내 초과확률 4% 설계지진 상부 구성요소의 낙교방지	붕괴방지

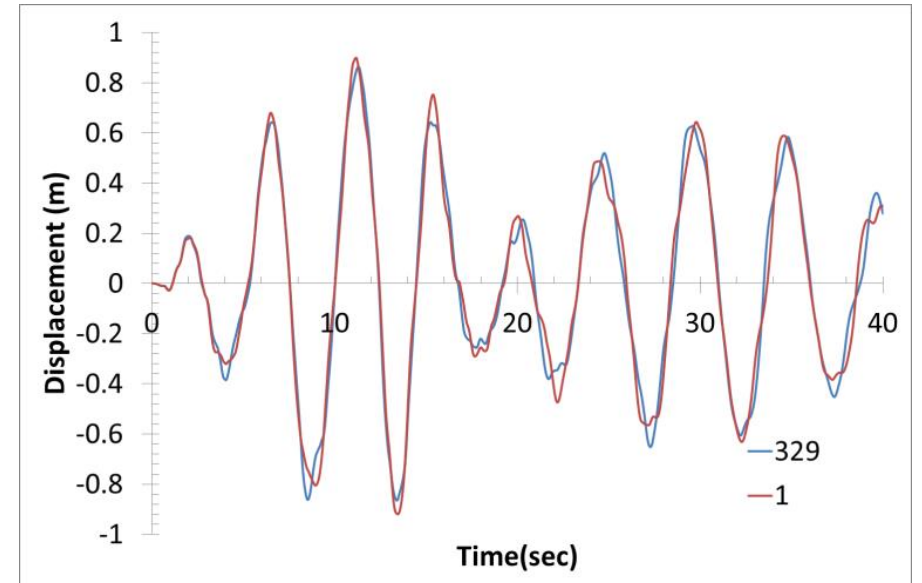
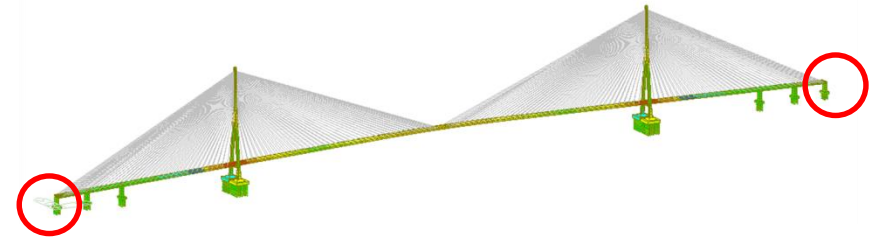
$$\Delta l_i = d + \Delta l_s + \Delta l_c + 0.4\Delta l_t$$

d 설계지진 시 거더의 총 변위

Δl_s 건조수축에 의한 이동량

Δl_c 크리프에 의한 이동량

Δl_t 온도변화에 의한 이동량

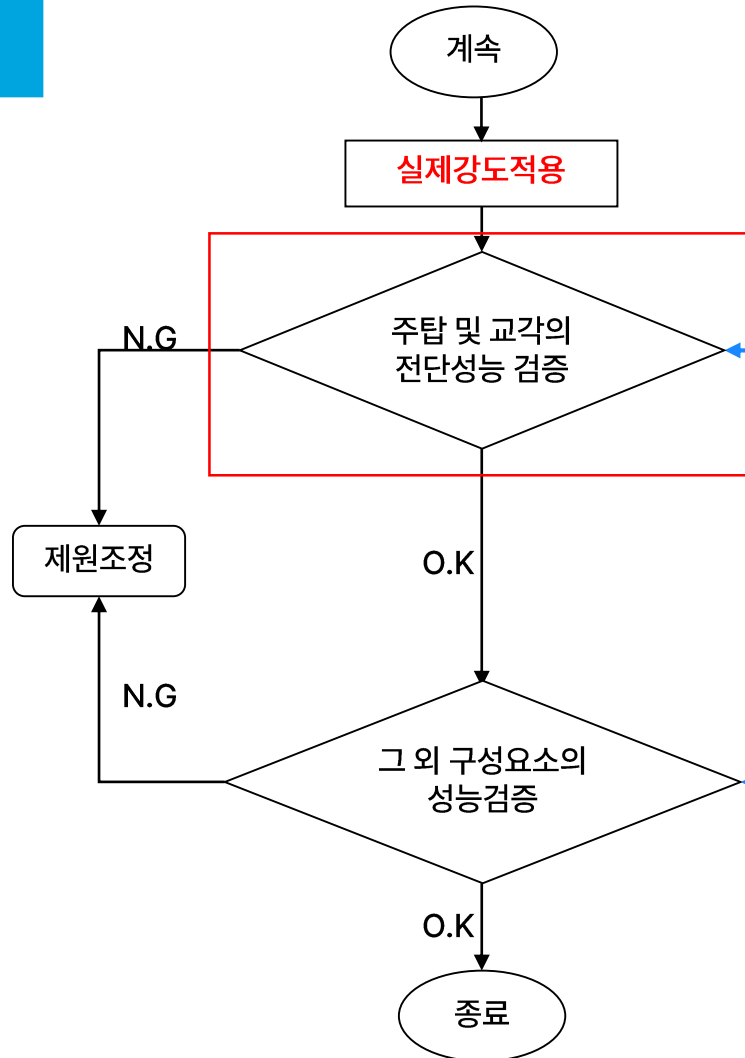


주탑 및 교각의 전단성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

붕괴방지수준 내진성능 검증 절차



전단성능 검증

연성거동을 하는 콘크리트 부재(중공단면)의 전단강도

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = 0.5 \sqrt{f_{ck}} \alpha \beta \gamma \sqrt{1 + \frac{P}{f_{ck} A_g}} A_e$$

$$\alpha = 1.0 - 0.22 \frac{a}{d}$$

$$\beta = 0.6 + 22 \rho_t$$

$$0 \leq \gamma = \frac{6 - \mu}{4} \leq 1$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

구성요소의 성능검증

: 설계수명 내 초과확률 4% 수준의 지진하중

: 교량 구성요소의 허용손상수준 검토 (9.5.2)

주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

전단성능 검증

- 콘크리트 주탑 및 교각의 연성도를 고려한 **전단검토**
- 공급연성도 이전에 **전단파괴를 방지하기 위한 검증**

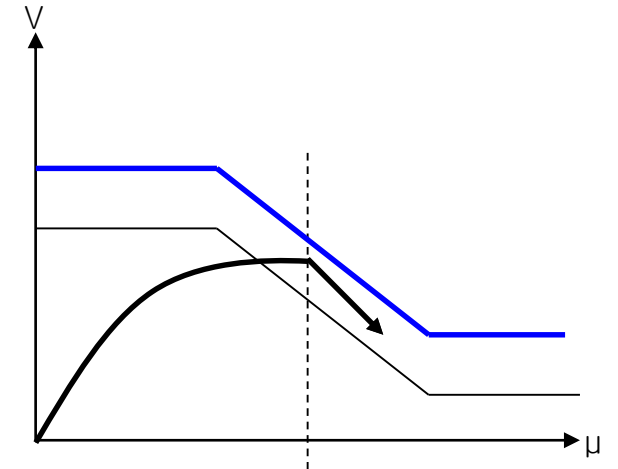
$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = 0.5 \sqrt{f_{ck}} \alpha \beta \gamma \sqrt{1 + \frac{P}{f_{ck} A_g}} A_e \quad \alpha = 1.0 - 0.22 \frac{a}{d}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad \beta = 0.6 + 22 \rho_t$$

$$0 \leq \gamma = \frac{6 - \mu}{4} \leq 1$$

: 주탑 $\mu \geq 4$, 교각 $\mu \geq 4$ or 해석값 적용



$$\text{➤ } V_n \geq V_{\max} \quad \text{--- O.K}$$

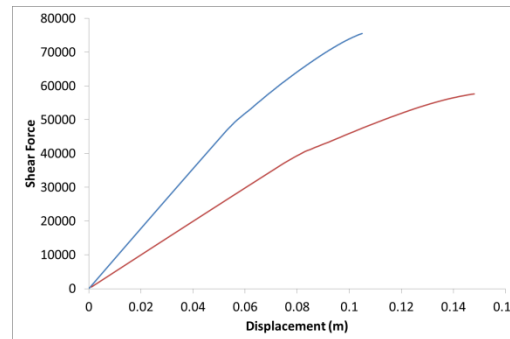
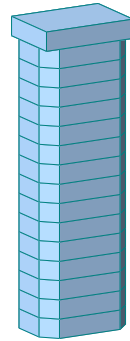
주탑 및 교각의 힘성능 검증

기준강도 적용

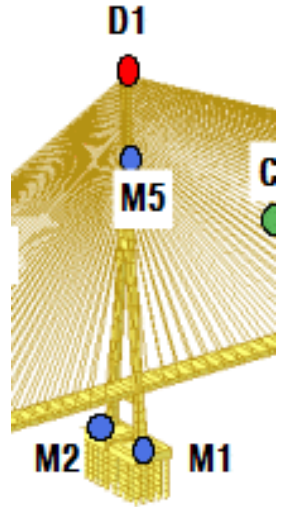
실제강도 적용

전단성능 검증

- 주탑을 전단경간비($a = \frac{M}{V}$)를 갖는 캔틸레버 교각으로 가정
- 푸시오버해석을 수행 : 밑면전단력이 주탑 전단력이 될 때까지
- 가상점(상단)의 변위를 산정
- 가상점의 변위를 항복변위로 나누어 소요변위 연성도를 산정



$$0 \leq \gamma = \frac{6 - \mu}{4} \leq 1$$



- 위의 절차를 적용하지 않는 경우

주탑의 변위연성도를 4.0 이상으로 적용할 수 있다.

극단상황한계상태 하중조합 I을 만족하도록 설계된 교량이 설계수명 내 초과확률 4%의 지진에서는 큰 변형을 하지 않을 것으로 판단하여 안전측의 검증이 되도록 하기 위함

주탑 및 교각의 휨성능 검증

전단성능 검증

$$V_c = 0.5 \sqrt{f_{ck}} \alpha \beta \gamma \sqrt{1 + \frac{P}{f_{ck} A_g}} A_e$$

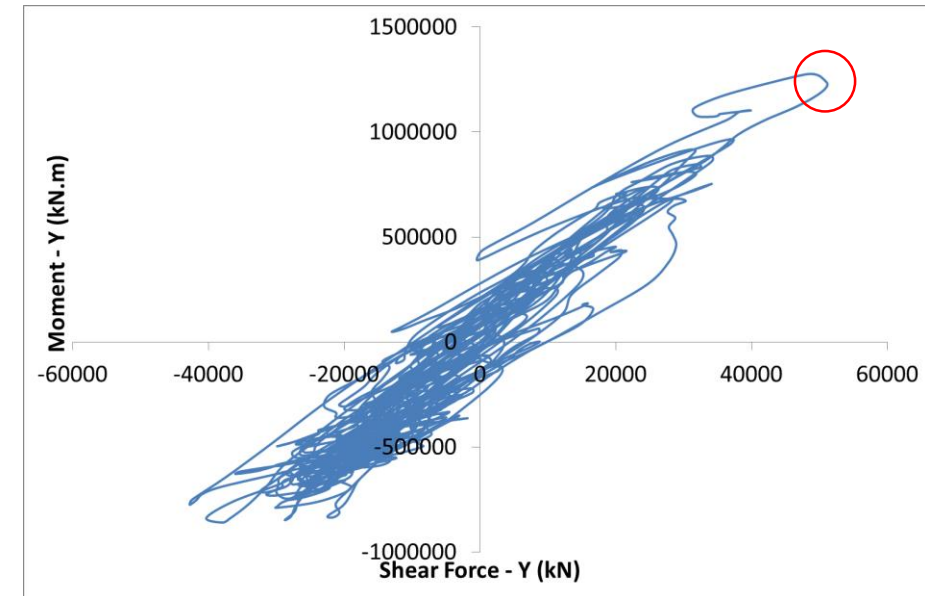
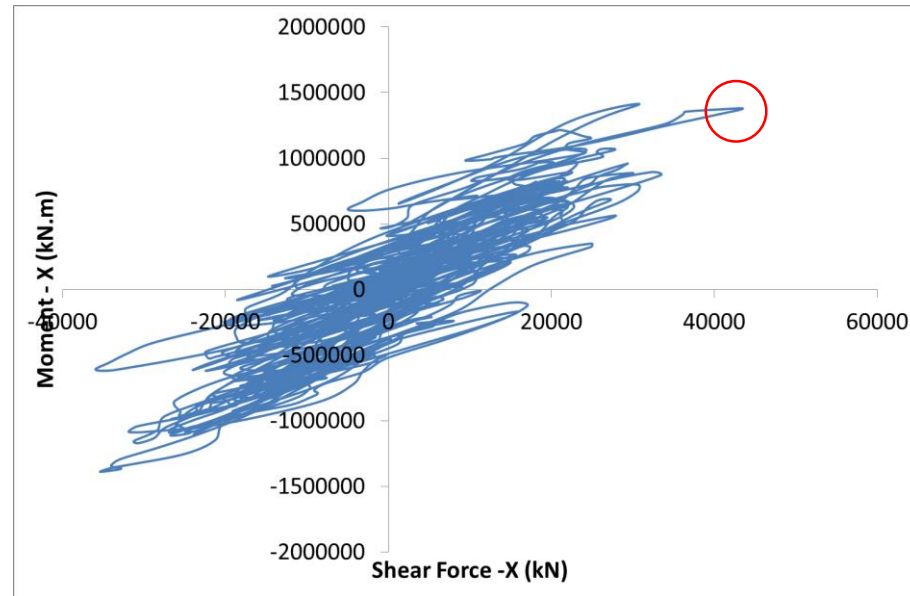
$$\alpha = 1.0 - 0.22 \frac{a}{h} = 0.34$$

$$\text{교축: } a = \frac{M}{V} = 31.68$$

$$\text{교직: } a = \frac{M}{V} = 23.84$$

기준강도 적용

실제강도 적용



$$\beta = 0.6 + 22 \rho_t = 0.731$$

$$0 \leq \gamma = \frac{6 - \mu}{4} \leq 1$$

$$\gamma = 1$$

주탑 및 교각의 휨성능 검증

기준강도 적용

실제강도 적용

전단성능 검증

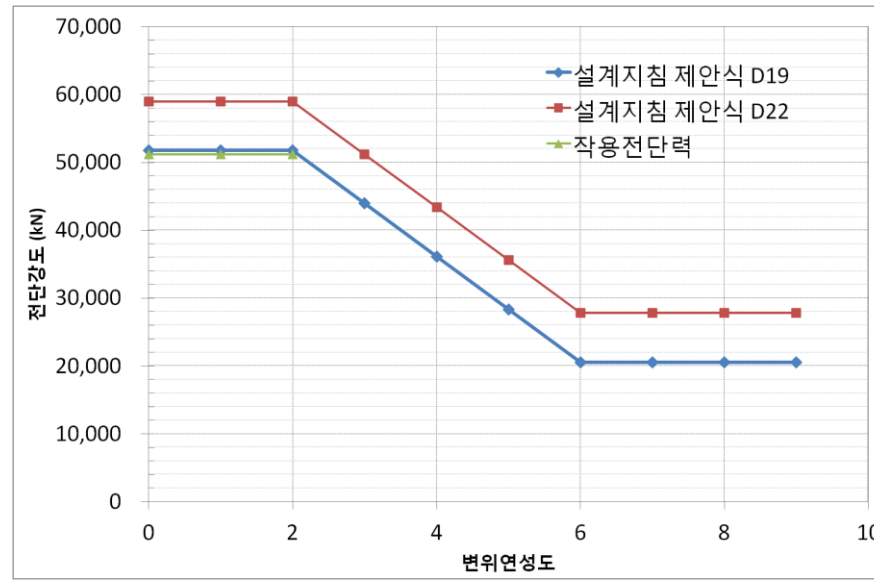
$$V_c = 0.5\sqrt{f_{ck}} \alpha\beta\gamma \sqrt{1 + \frac{P}{f_{ck} A_g}} A_e$$

$$V_c = 31194 \text{ kN}$$

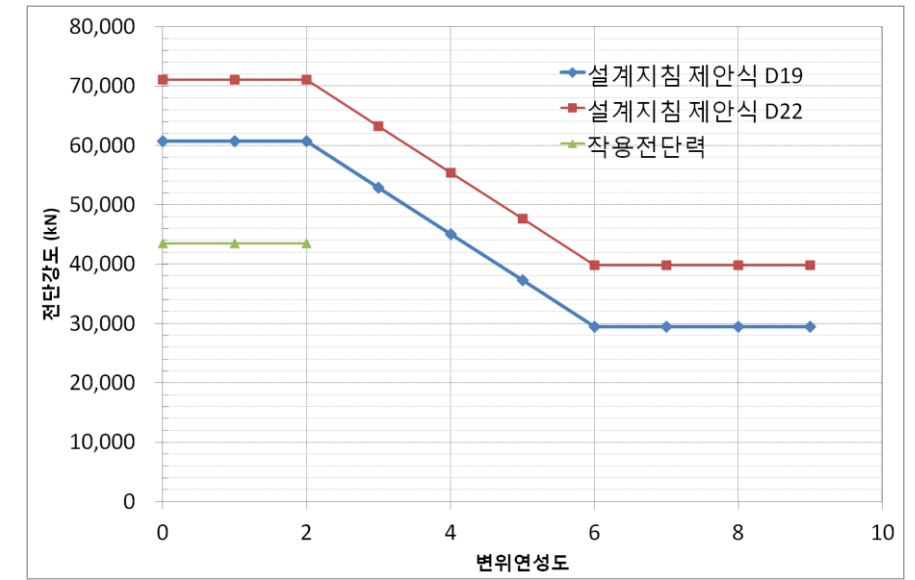
$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

$$V_s = 29498 \text{ kN}$$

$$V_s = 20559 \text{ kN}$$



교축직각방향



교축방향

감사합니다.