

# 성능기반 내진설계 및 평가의 이해



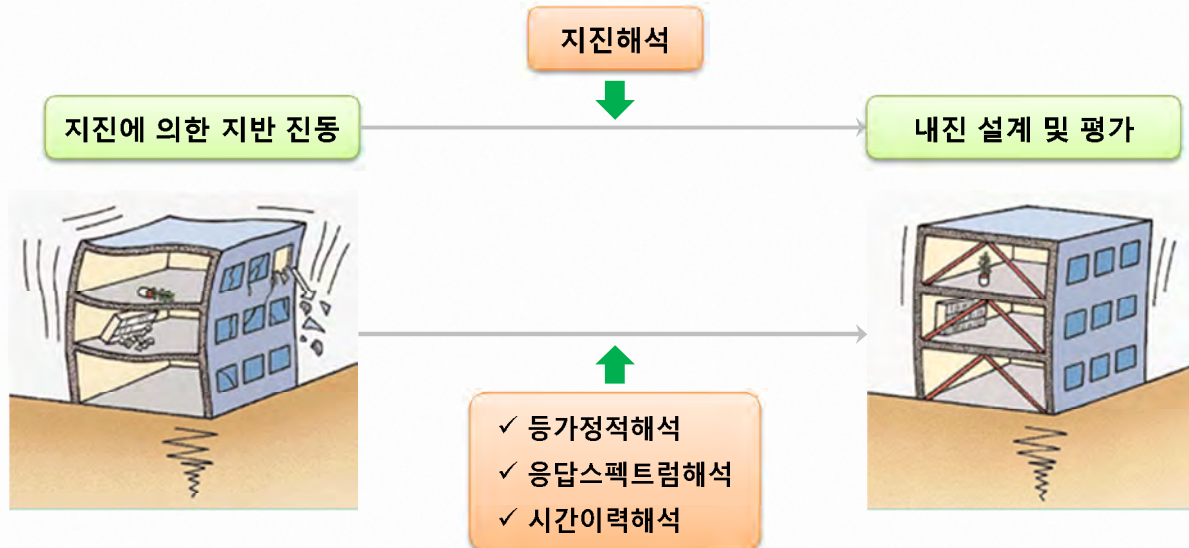
## 내진설계 및 평가에 활용되는 수치해석의 이해

---

# 지진에 대한 수치해석이란?

## 내진 설계 및 평가란?

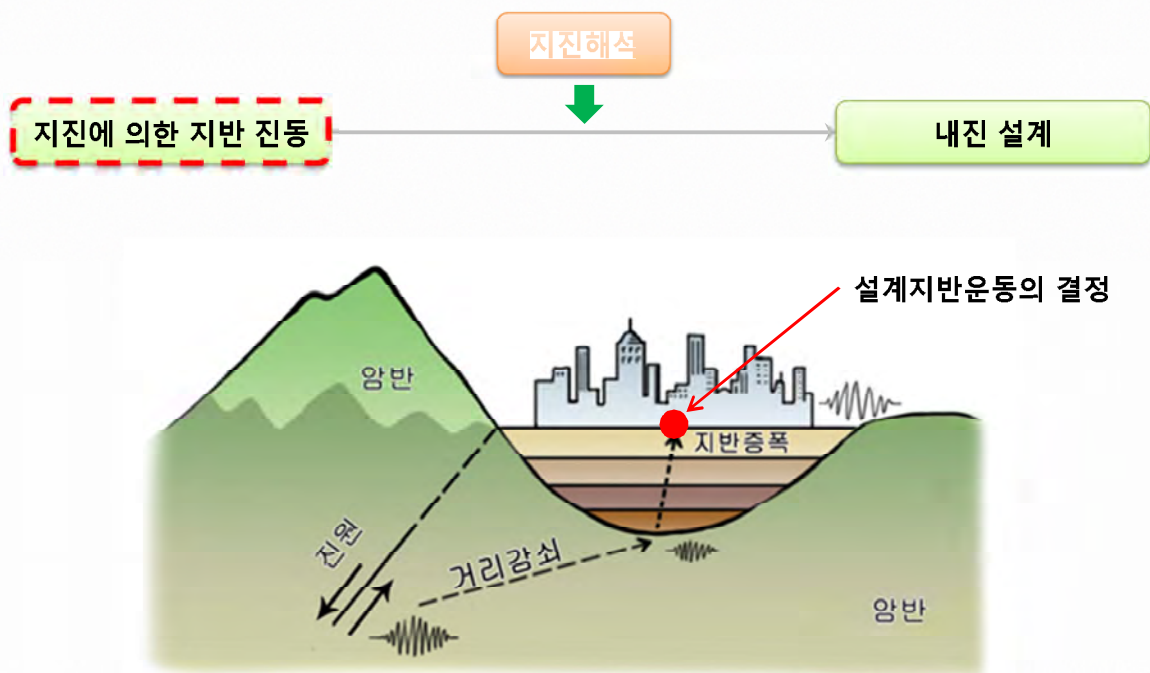
- 지진에 저항할 수 있도록 구조물을 설계하여, 지진이 발생해도 구조물이 파괴되지 않도록 설계하고 평가
- 지진해석을 통해서 가해지는 지진에 대한 구조물의 응답을 공학적으로 계산하여 내진 설계 및 평가를



응답 : 구조물이 지진하중을 받을 경우 나타나는 모든 현상

# 설계 지반운동

## → 지진의 이동경로

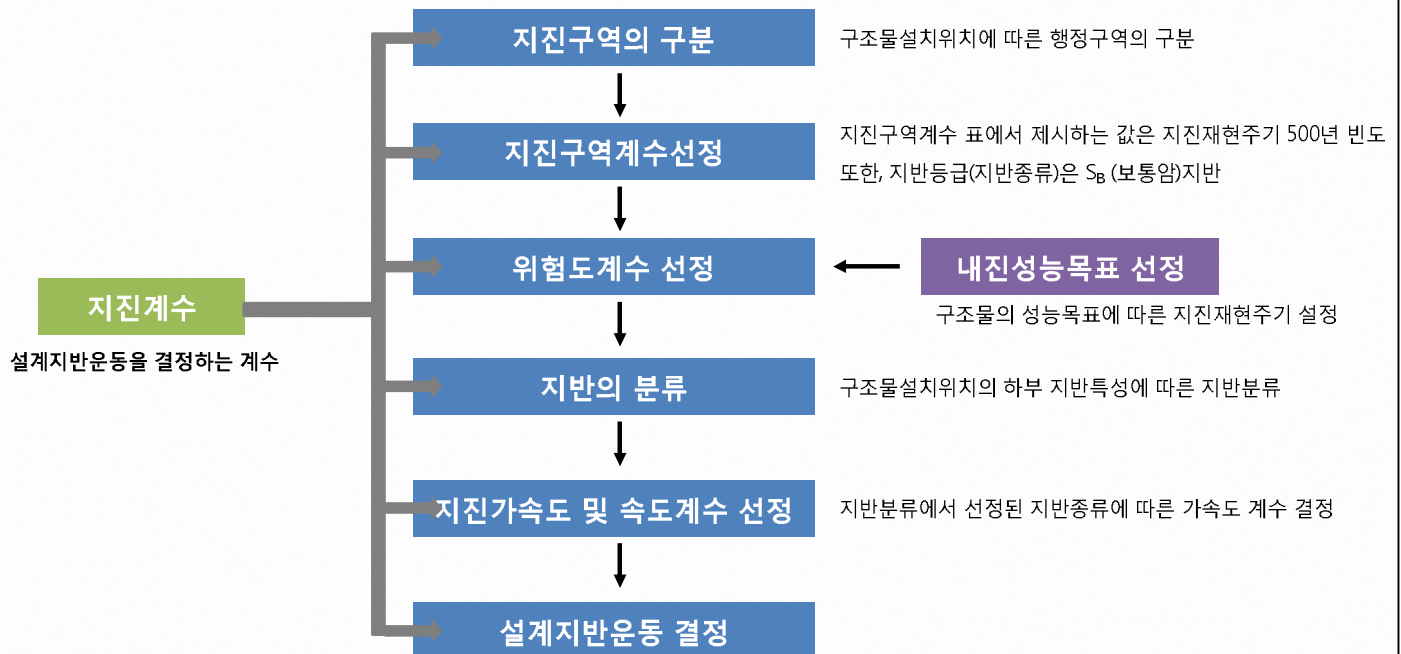


(지진의 거리감쇠와 지반증폭 효과)



# 설계 지반운동

## → 설계지반운동 결정 절차



# 설계 지반운동

## → 지진구역(Seismic zone)의 구분

- 구조물을 설계할 지역의 지진 위험에 노출되는 정도(Seismic hazard)를 구분하기 위한 목적
- 지진구역에 대한 위험도를 설계기준에서 미리 설정하여 구조물 설치위치에 대한 지진의 위험도 결정

(지진구역의 구분)

지진구역	행정구역 <sup>3)</sup>	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부 <sup>1)</sup> , 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도
II	도	강원도 북부 <sup>2)</sup> , 제주도

- 1) 강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
- 2) 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
- 3) 행정구역의 경계를 통과하는 교량의 경우에는 구역계수가 큰 값을 적용한다.



(국내 지진구역도)

# 설계 지반운동

## → 지진구역계수

- 지진구역의 구분에 대한 지진의 위험수준을 표현
- 지진구역에 대한 표시된 등급이 높을수록 지반운동 가속도와 지진의 위험수준이 높음을 뜻함
- 기본적으로 지진구역에서의 지반 등급은  $S_B$ (보통암)을 기준으로 선정

(지진구역계수 - 재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

## → 위험도계수

- 재현주기에 따른 지진의 위험도를 나타내는 계수

(위험도계수 I)

재현주기(년)	100	200	500	1000	2400	4800
위험도계수	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0	2.6

재현주기 : 어떤 크기나 특성을 가진 지진이 발생하는 시간간격

# 설계 지반운동

## → 구조물의 내진성능목표 산정

- 내진등급 및 설계지진의 크기를 결정하기 위해서는 교량의 내진성능목표 결정
- 케이블 교량의 경우에는 내진수준별로 규정된 재현주기를 갖는 설계지진에 대해 내진설계가 이루어져야 함

### ● 내진성능수준

- 기능수행수준 : 지진의 세기는 작지만 발생빈도가 높은 수준의 지진
- 인명보호수준 : 지진의 세기는 중간이면서 발생빈도가 높은 수준의 지진
- 붕괴방지수준 : 지진의 세기는 크지만 발생빈도가 매우 낮은 지진

(내진설계목표)

내진성능수준	설계지진수준	재현주기(년)	
		설계수명 100(년)	설계수명 200(년)
기능수행수준	설계수명 내 초과확률 63 % 수준	100	200
인명보호수준	설계수명 내 초과확률 8 ~ 10 % 수준	1,000	2,400
붕괴방지수준	설계수명 내 초과확률 4 % 수준	2,400	4,800



# 설계 지반운동

## → 지반의 분류

- 지진파가 구조물응답에 미치는 지반의 증폭영향을 고려하기 위함
- 정밀한 지반 층상을 고려한 증폭영향이 아닌 평균값을 이용한 개략적인 지반의 증폭영향만을 고려

(지반의 분류)

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30 m에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험( $N$ 치)	비배수전단강도(kPa)
$S_A$	경암지반	$> 1500$		-
$S_B$	보통암지반	$760 \sim 1500$		
$S_C$	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	$360 \sim 760$	$> 50$	$> 100$
$S_D$	단단한 토사지반	$180 \sim 360$	$15 \sim 50$	$50 \sim 100$
$S_E$	연약한 토사지반	$< 180$	$< 15$	$< 50$
$S_F$	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

# 설계 지반운동

## → 지진가속도 및 지진속도계수의 산정

- 지반의 분류표를 이용하여 구조물이 설치될 위치의 평균지반특성에 따른 지반증폭특성 산정
- 지반의 증폭 특성을 고려하기 위해 지반의 종류별 지진계수 산정

지반 종류	지진구역 I		지진구역 II	
	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$
$S_A$	0.09	0.09	0.05	0.05
$S_B$	0.11	0.11	0.07	0.07
$S_C$	0.13	0.18	0.08	0.11
$S_D$	0.16	0.23	0.11	0.16
$S_E$	0.22	0.37	0.17	0.23

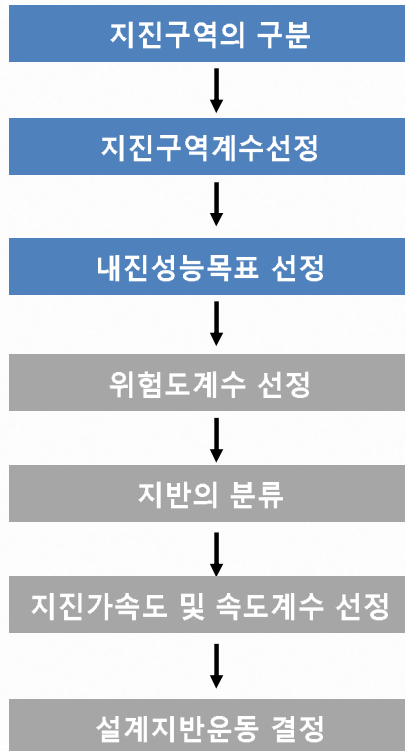
- 앞에서 제시한 지진구역계수는 기본적으로  $S_B$  지반에 대한 값

(지진구역계수- 재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

# 설계 지반운동

## → 설계지반운동 결정



강원도 북부와 제주도를 제외한 모든 지역은 지진구역 I 등급

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

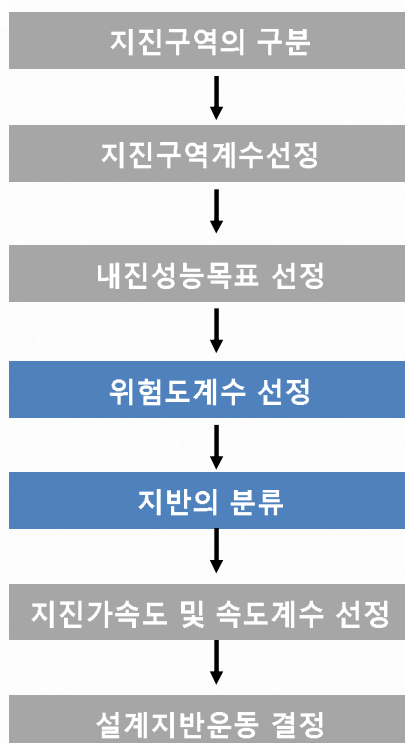
강원도 북부와 제주도를 제외한 모든 지역은 구역계수 0.11g

내진성능수준	설계지진수준	재현주기(년)	
		설계수명 100(년)	설계수명 200(년)
기능수행수준	설계수명 내 초과확률 63 % 수준	100	200
인명보호수준	설계수명 내 초과확률 8 ~ 10 % 수준	1,000	2,400
붕괴방지수준	설계수명 내 초과확률 4 % 수준	2,400	4,800

교량의 설계수명에 맞는 지진의 재현주기 선정

# 설계 지반운동

## → 설계지반운동 결정



재현주기(년)	100	200	500	1000	2400	4800
위험도계수	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0	2.6

성능수준 및 재현주기에 맞는 위험도 계수 선정

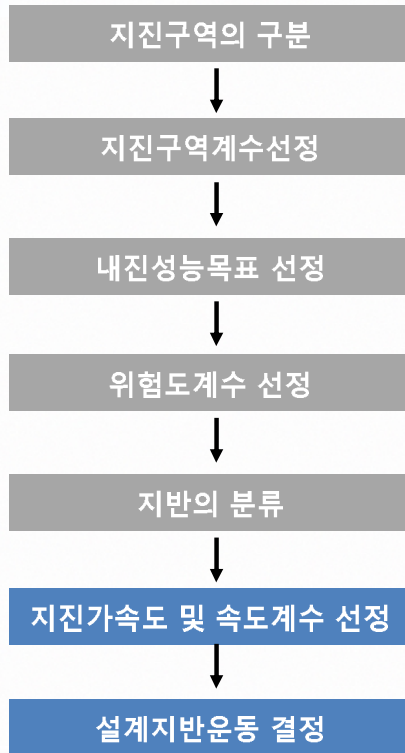
지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30 m에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치)	비배수전단강도(kPa)
$S_A$	경암지반	> 1500		-
$S_B$	보통암지반	760 ~ 1500		
$S_C$	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 ~ 760	> 50	> 100
$S_D$	단단한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100
$S_E$	연약한 토사지반	< 180	< 15	< 50
$S_F$	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

구조물 하부 지반특성에 따른 지반종류 선정



# 설계 지반운동

## → 설계지반운동 결정



지반 종류	지진구역 I		지진구역 II	
	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$
$S_A$	0.09	0.09	0.05	0.05
$S_B$	0.11	0.11	0.07	0.07
$S_C$	0.13	0.18	0.08	0.11
$S_D$	0.16	0.23	0.11	0.16
$S_E$	0.22	0.37	0.17	0.23

지반종류 선정에 따른 지진계수값 선정

이때, 초기에 설정한 지진구역계수값( $S_B$ 기준)의 수정

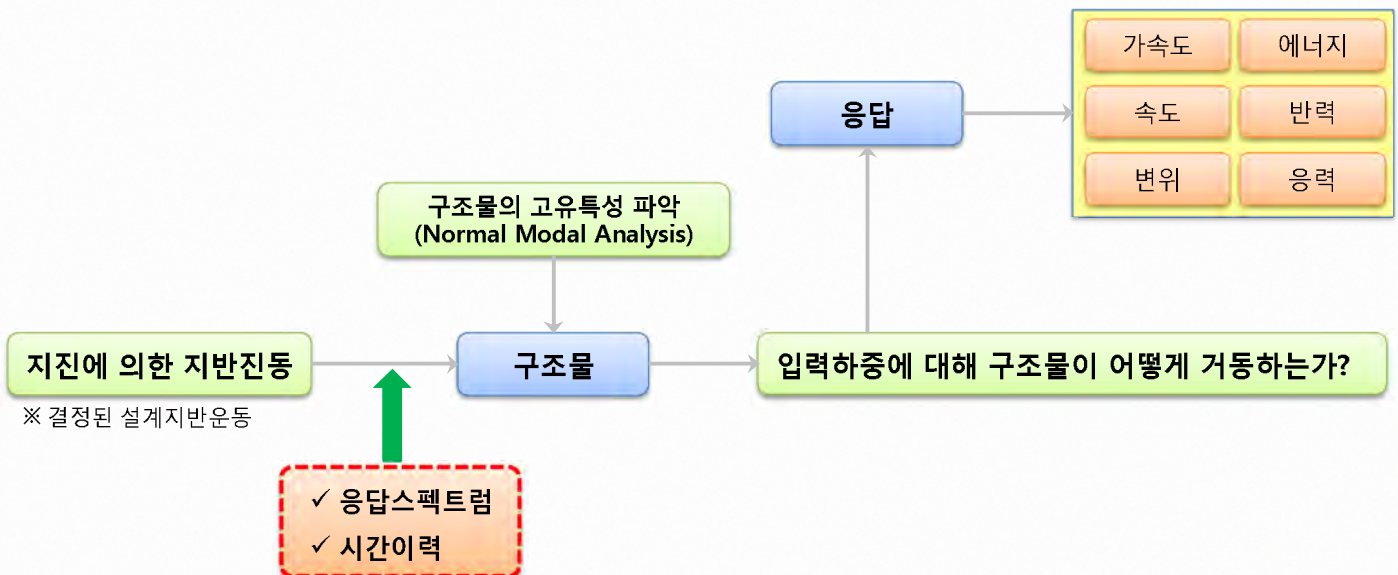
지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

→ 지반의 영향을 고려한 지진구역계수값 위험도계수

# 지진해석

## 지진해석이란?

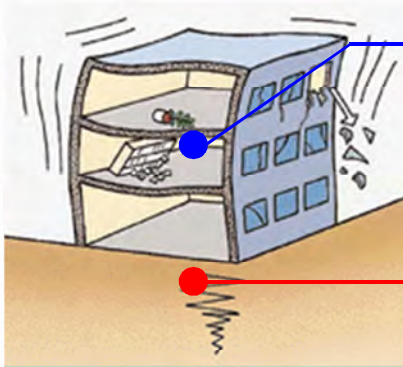
- 지진에 의한 지반진동이 작용하는 구조물에 대해 관성력과 댐핑을 고려하여 구조물의 동적거동을 해석
- 지반의 진동을 어떻게 정의하느냐에 따라서 지진해석의 종류가



# 지진해석

## 응답스펙트럼이란?

- 구조물의 동적특성에 따라 지진하중을 받을때 반응하는 응답의 량(변위, 속도, 가속도 등)들의 결과가 변화
- 설계지반운동에 대한 구조물의 진동특성과 감쇠비에 따른 변화하는 응답값중의 최대응답만을



응답스펙트럼 : 구조물에 후 상태의 지진동

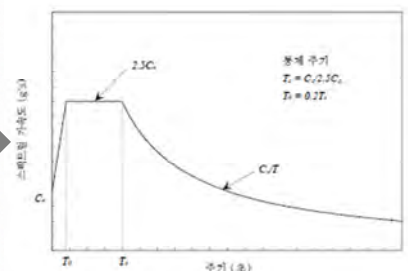
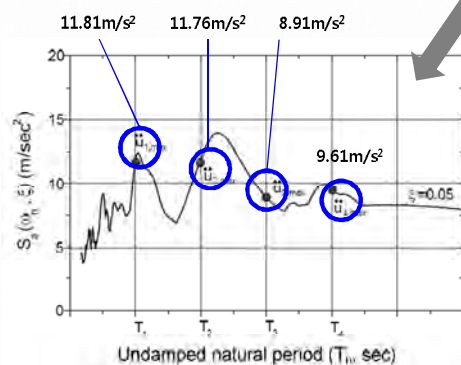
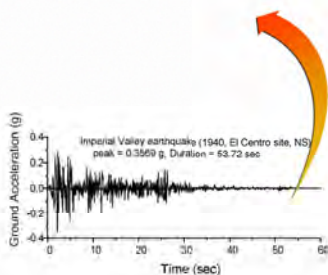
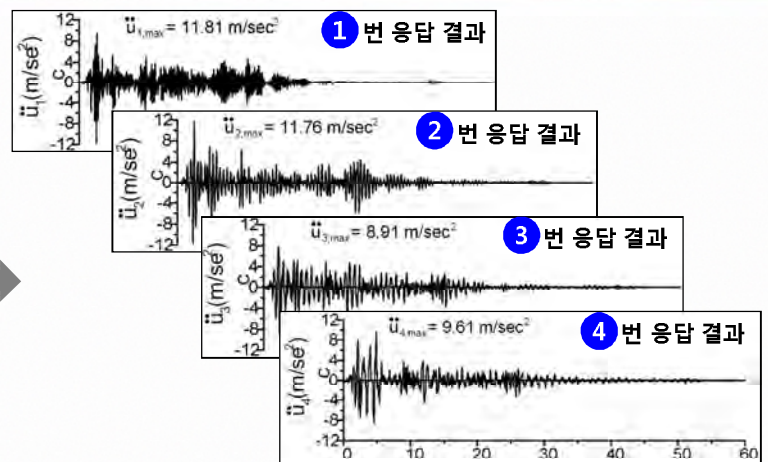
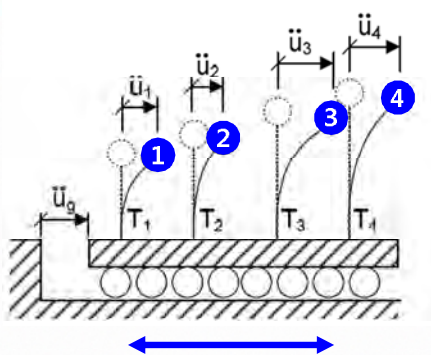
※ 구조물의 동적특성이 반영된 후 상태

설계지반운동 : 구조물에 전 상태의 지진동

※ 구조물의 동적특성이 반영되기 전 상태

# 지진해석

## → 응답스펙트럼의 개념도



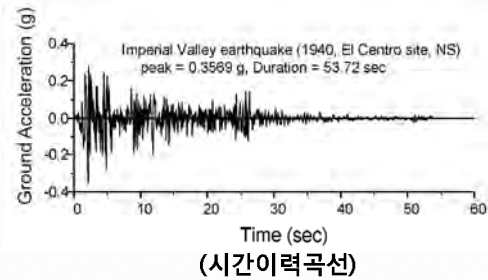
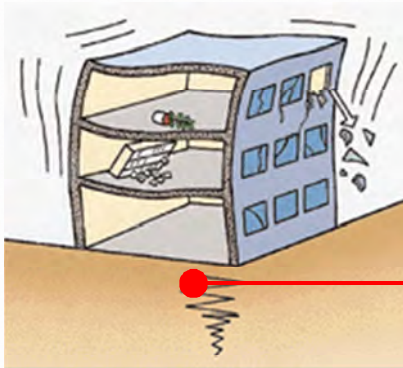
(표준설계응답스펙트럼)



# 지진해석

## 시간이력이란?

- 실제의 지진의 발생시간에 따른 진동의 특성을 그대로 표현
- 응답스펙트럼은 최대값만을 고려하였다면 시간이력은 지진의 지속시간대에 대한 전체의 응답을 고려
- 시간이력곡선은 구조물의 동적 특성이 적용되기 전 상태의



설계지반운동 : 구조물에 전 상태의 지진동  
※ 구조물의 동적특성이 반영되기 전 상태

# 지진해석

## → 시간이력곡선의 생성

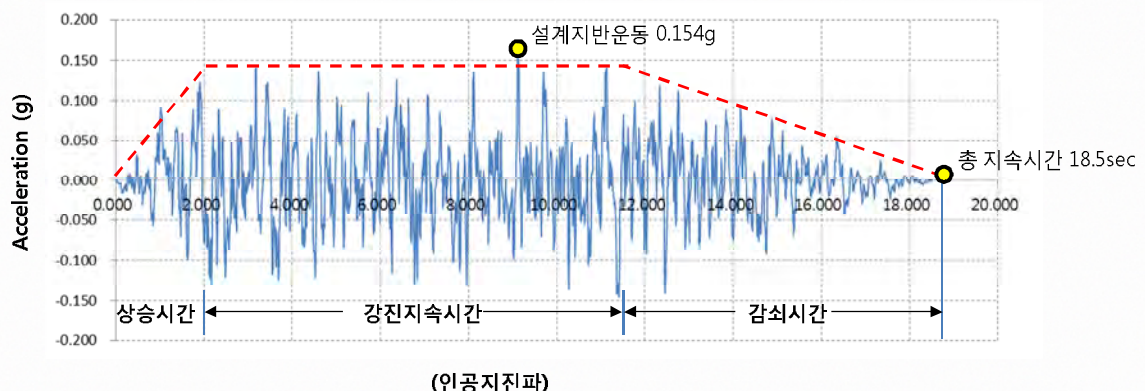
- 인공지진파는 설계응답스펙트럼을 이용하여 생성 (Simqke, Eq-maker 프로그램 적용)

## → 시간이력곡선의 생성시의 조건

- 시간이력가속도(인공지진)의 지속시간은 표 9.10.1을 만족하여야 함
- 지진의 규모가 특별히 정해지지 않은 경우 규모 6.5 - 7.0을 사용

표 9.10.1 지반운동 시간이력 포락곡선 지속시간(초)

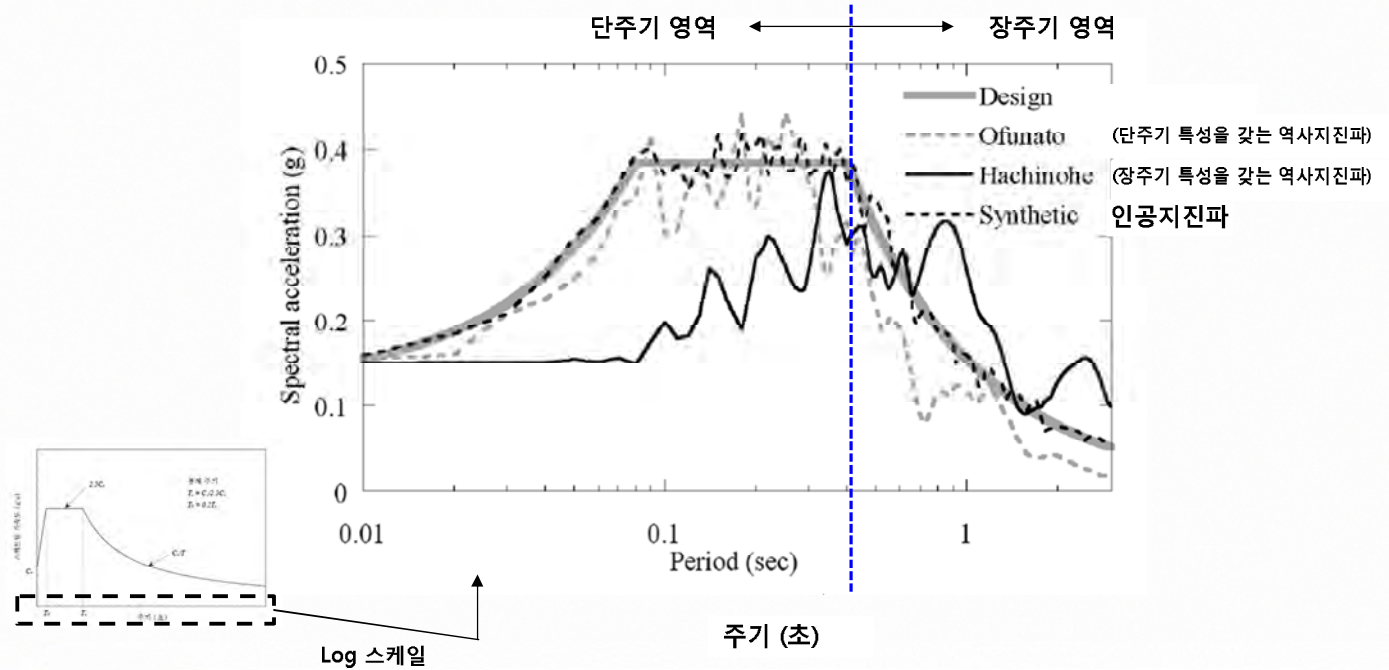
지진규모	상승시간( $t_r$ )	강진지속시간( $t_m$ )	감쇠시간( $t_d$ )
7.0 - 7.5	2	13	9
6.5 - 7.0	1.5	10	7
6.0 - 6.5	1	7	5
5.5 - 6.0	1	6	4
5.0 - 5.5	1	5	4



# 지진해석

## → 시간이력곡선 생성시 설계응답스펙트럼을 사용하는 이유

- 구조물의 단주기 및 장주기의 동적특성을 모두 반영하기 위함

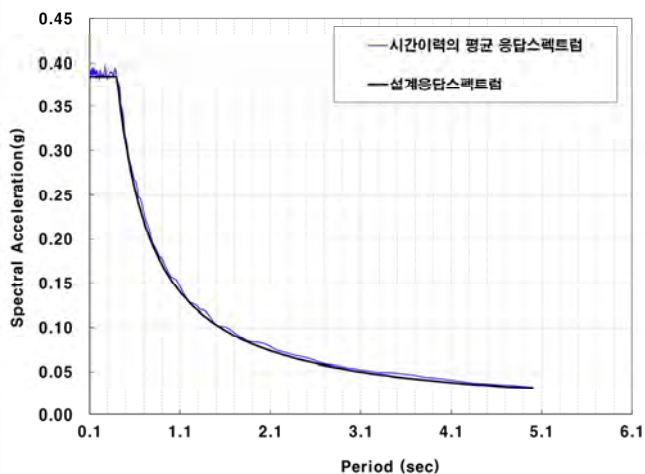


# 지진해석

## → 시간이력곡선의 부합성 검토

지반운동에 대한 시간이력곡선과 설계응답스펙트럼의 부합성 검토시 다음의 조건을 만족해야 됨

- 시간이력의 평균 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 낮은 주기의 수는 5쌍 이하이고 낮은 정도는 10% 이내
- 두 방향(수평 2성분)이상의 시간이력을 동시에 고려할 경우, 각 직교방향의 시간이력은 통계학적으로 독립



(시간이력의 평균 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼 비교)

생성된 각 방향의 시간이력(수평 2방향 운동)은 통계학적으로 서로 독립적이어야 한다. 만약 두 시간이력의 상관계수가 0.3을 넘지 않는다면 두 시간이력은 통계학적으로 독립적인 것으로 간주할 수 있다. 이 때 상관계수는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

여기서,

$$\text{Cov}(X, Y): \text{공분산}, \quad \text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

$x_i$ 와  $y_i$ 는 특성값,  $\mu$ 는 평균,  $n$ 은 데이터 개수이다.

$\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ : 표준편차

위에서 생성한 지진입력 시간이력의 상관계수를 구하면 다음과 같다.

(지진입력 시간이력의 상관관계 검토)



# 수치해석의 구분

지진하중에 대한  
소요역량(Demand) 산정

단면 자체의  
공급역량(Capacity) 산정

어떻게 소요역량을 구하는가?

선형해석

비선형 해석

응답스펙트럼해석  
(Response Spectrum  
Analysis)

등가정적해석법  
(Equivalent Static  
Analysis)

정적 해석  
(Pushover  
Analysis)

동적 해석  
(Inelastic Time  
History Analysis)

# 수치해석의 구분

지진하중에 대한  
소요역량(Demand) 산정

단면 자체의  
공급역량(Capacity) 산정

## 모멘트-곡률 곡선

- 콘크리트 횡구속 효과를 고려한 비선형 거동 (Mander Model)
- 철근의 연성거동을 고려한 비선형 거동 (Park Strain Hardening)
- 모멘트-곡률곡선을 힘-변위곡선으로 치환하여 변위연성도 계산

## 연성도 내진설계

- 힘기반-변위기반의 복합 설계 : 가속도 응답스펙트럼을 통한 해석 허용
- 연성도를 직접적으로 고려하는 설계법 : 기준 수식 제공
- 한정 연성 (Limited Ductility) 설계법
- 변수R : 소요응답수정계수

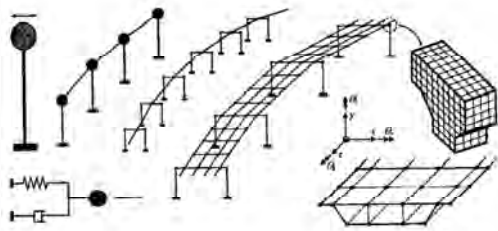
## Pushover Analysis

- CSM(Capacity Spectrum Method)를 통한 성능점 분석
- 소성힌지모델 (FEMA Type)을 통한 비선형 거동
- 정적하중 증분에 의한 극한하중에 따른 거동 분석

## 비선형 시간이력해석

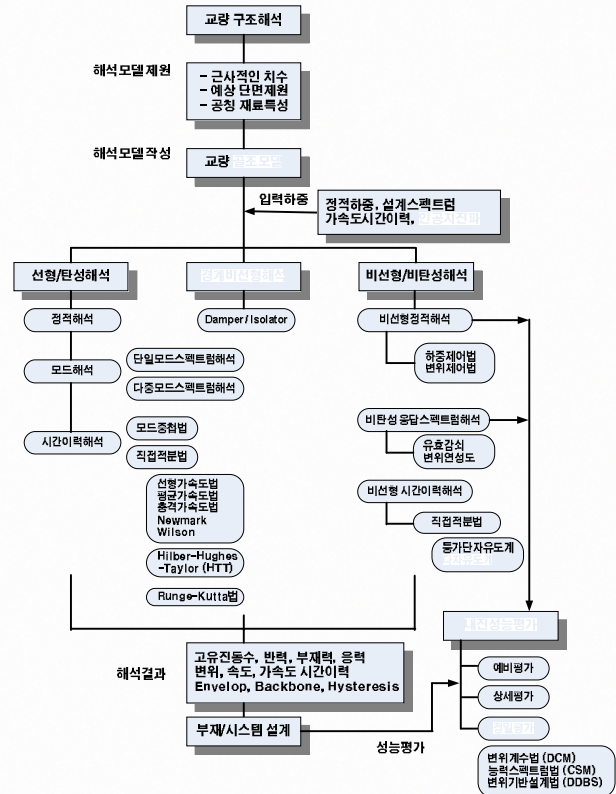
- 시간 별 동적하중에 의한 힌지요소 및 받침장치 비선형 거동 분석
- 힘-변위곡선을 직접 평가 가능한 가장 합리적인 방법
- 프로그램과 설계자의 능력에 따른 결과 편차가 크므로 기준 적용이 어려움

# 수치해석의 분류



LUMPED PARAMETER MODELS (LPM)    STRUCTURAL COMPONENT MODELS (SCM)    FINITE ELEMENT MODELS (FEM)

교량 구조해석 모델



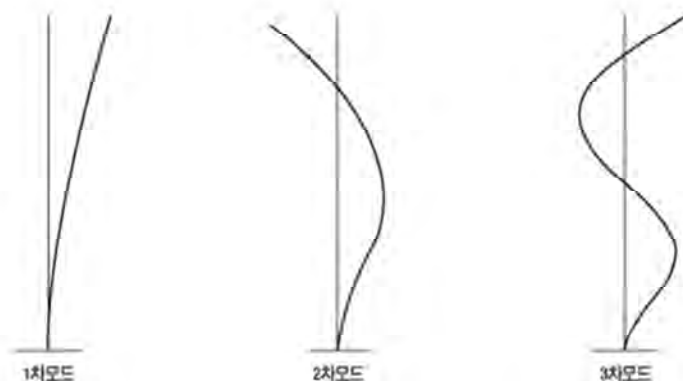
## 고유치 해석

### ● 고유치 해석

- 구조물 고유의 동적특성을 분석하는데 사용되면 자유진동해석(Free Vibration)이라 함

### ● 고유 모드 (모드 형상)

- 자유진동 할 수 있는 일종의 고유형상, 주어진 모양으로 변형시키기 위해 소요되는 에너지(힘)이 제일 적은 것부터 순차적으로 발생함



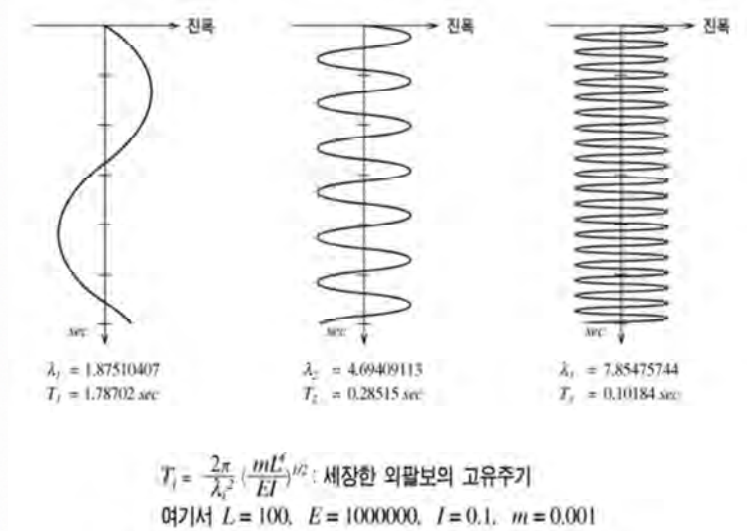


# 고유치 해석

## ● 고유 주기

- 고유모드와 일대일 대응되는 고유한 값으로 구조물이 자유진동상태에서 해당 모드형상으로 1회 진동하는데 소요되는 시간

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad T = \frac{1}{f}$$



# 고유치 해석

## ● 모드기여계수 (질량참여율)

- 해당 모드의 영향을 총 모드에 대한 비율로 나타낸 **모드별 유효질량의 합이 전체 질량의 90%이상**을 확보하도록 요구하고 있음

$$\Gamma_m = \frac{\sum M_i \varphi_{im}}{\sum M_i \varphi_{im}^2} \quad (8)$$

여기서

$\Gamma_m$ : 모드기여계수(Modal Participation Factor)

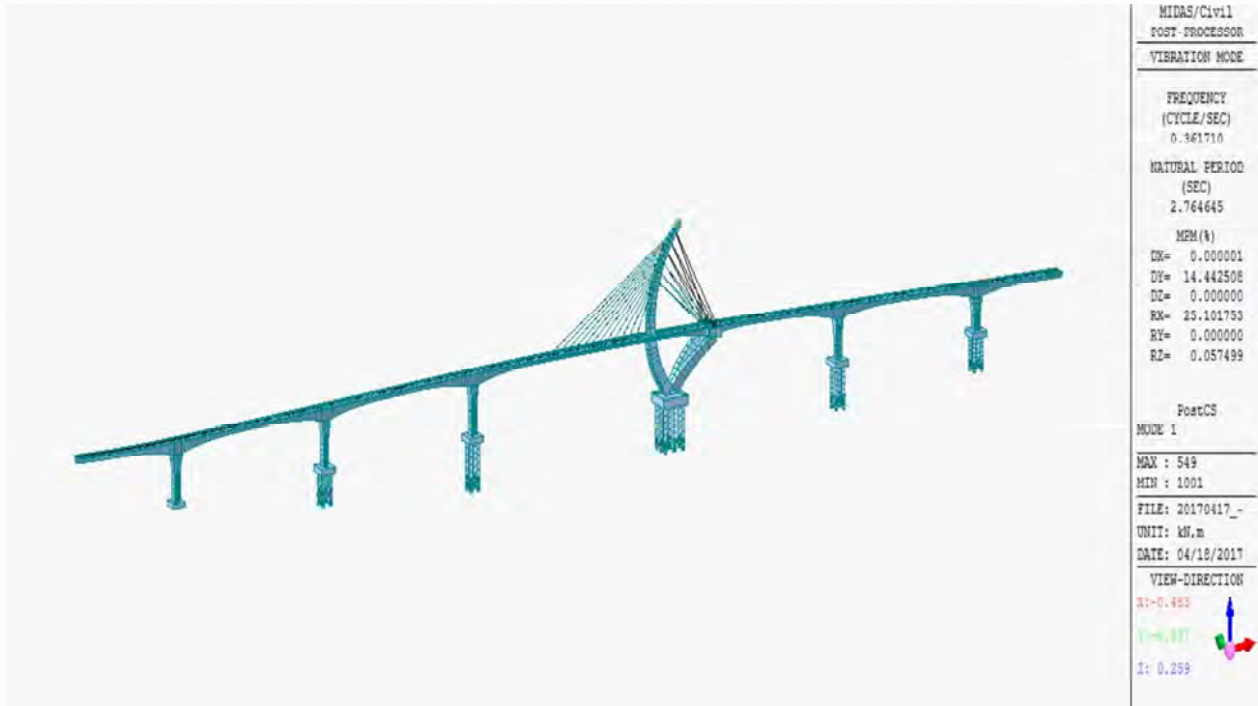
$m$ : 임의 모드차수 (Mode Number)

$M_i$ : 임의  $i$  위치의 질량 (Mass)

$\varphi_{im}$ : 임의  $i$  위치의  $m$ 차 모드벡터 (Mode Shape)

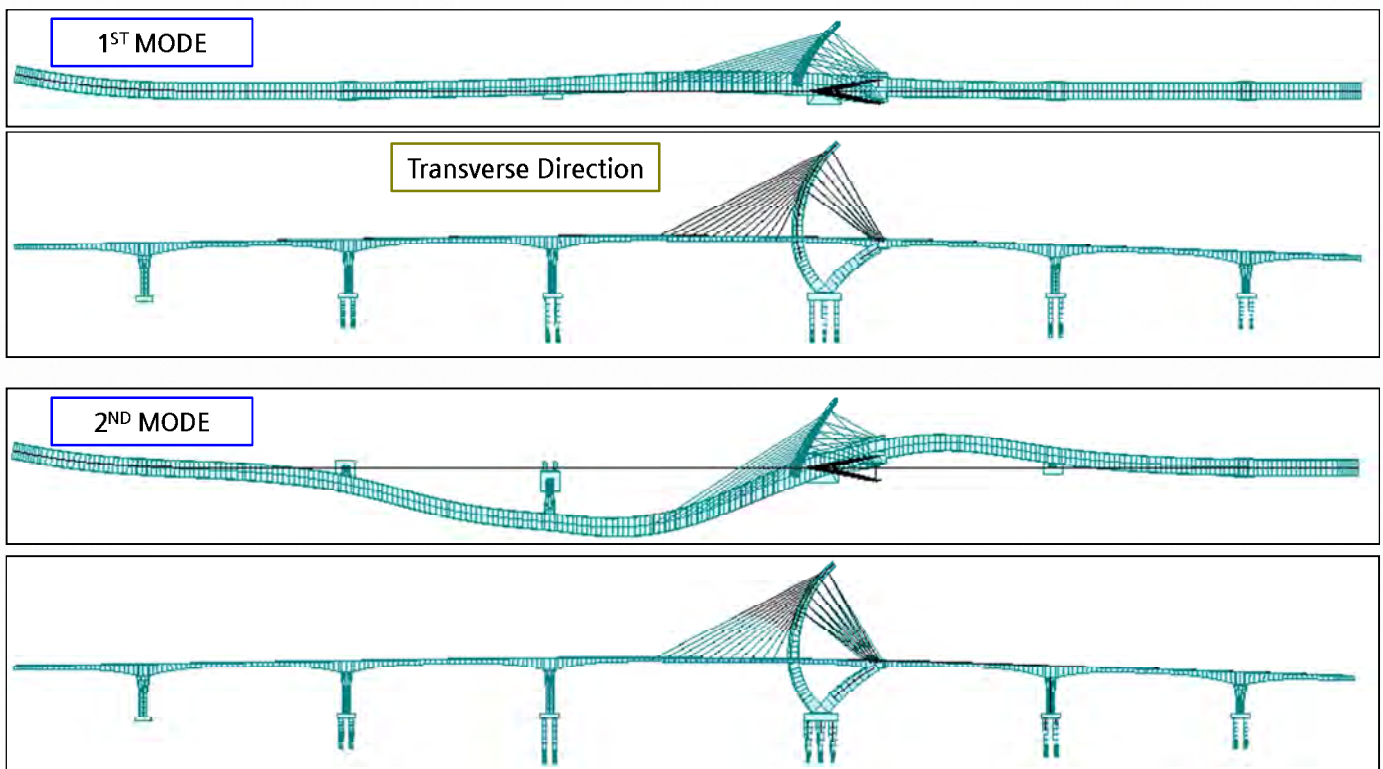
# 고유치 해석

## ● 고유진동 모드(Natural Vibration Mode)



# 고유치 해석

## ● 고유진동 모드(Natural Vibration Mode)





# 고유치 해석

## ● 고유진동 모드(Natural Vibration Mode)

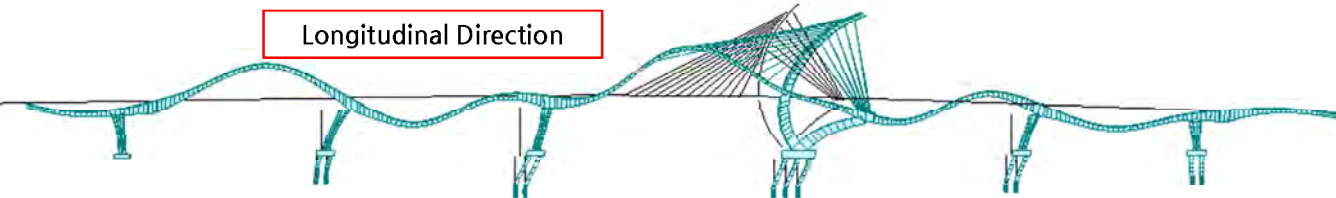
3<sup>TH</sup> MODE



4<sup>TH</sup> MODE



Longitudinal Direction



# 고유치 해석

## ● 고유진동 모드(Natural Vibration Mode)

5<sup>TH</sup> MODE



⋮

20<sup>TH</sup> MODE



Vertical Direction



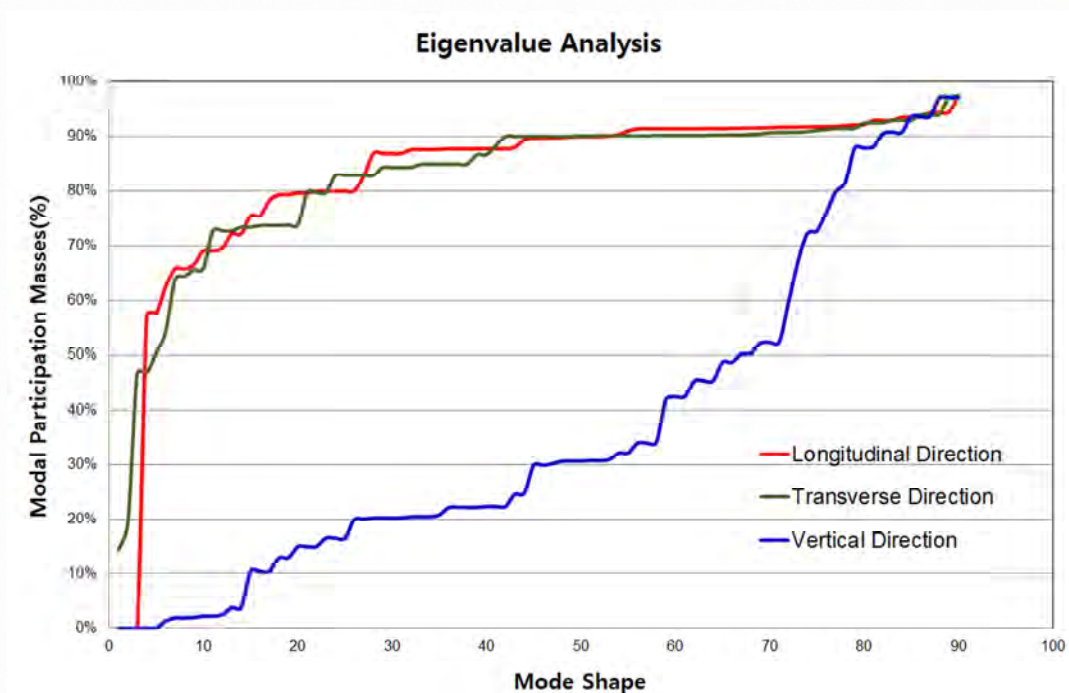
# 고유치 해석

## ● 고유진동수 및 질량 참여율

Mode No.	진동수		주기	질량참여율 (%)					
				Tran-X		Tran-Y		Tran-Z	
	(rad/sec)	(cycle/sec)		Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	2.27	0.36	2.76	0.00	0.00	14.44	14.44	0.00	0.00
2	2.67	0.42	2.35	0.00	0.00	4.73	19.18	0.00	0.00
3	3.26	0.52	1.92	0.30	0.30	27.60	46.78	0.00	0.00
4	3.34	0.53	1.88	57.11	57.41	0.09	46.87	0.07	0.07
5	3.56	0.57	1.76	0.21	57.62	3.51	50.38	0.00	0.07
6	4.07	0.65	1.54	4.98	62.60	3.89	54.28	1.28	1.34
7	4.09	0.65	1.53	3.19	65.80	9.67	63.95	0.54	1.88
8	4.18	0.67	1.50	0.01	65.81	0.58	64.53	0.00	1.88
9	5.27	0.84	1.19	0.77	66.58	1.10	65.63	0.07	1.95
10	5.35	0.85	1.17	2.50	69.08	0.23	65.87	0.25	2.20

# 고유치 해석

## ● 누적 질량 참여율





# 고유치 해석

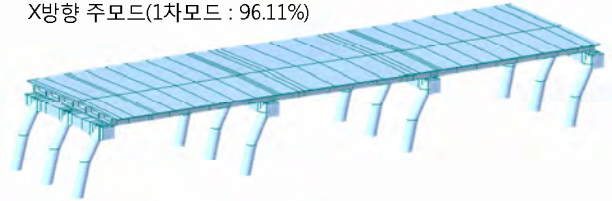
## 해석 특징

- 고유치 해석에 포함되는 Mass는 상시 고정하중을 치환하여야 함.
- 고유치 해석의 각 방향 별 질량 참여율이 설계스펙트럼 하중 재하 방향 별로 90%이상을 확보해야 동적 특성에 대한 신뢰도를 확보
- 구조물의 동적 특성인 고유모드형상, 고유주기 및 진동수를 구할 수 있음.
- 고유치 해석의 종류
  - Subspace Iteration : 요소수가 많은 대규모 모델에 적합
  - Lanczos : 저차모드에 질량이 집중되는 모델의 해석에 효율적인 방법
  - Ritz Vector : 다자유도 구조물의 모드형상을 가정하여 단자유도 구조물로 치환하여 해석하는 방법

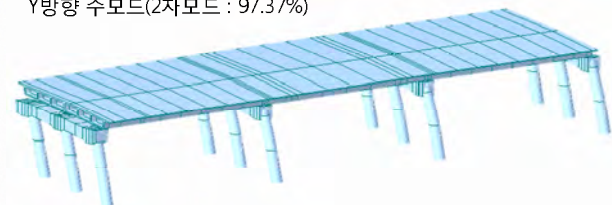
➢ Results > Mode Shapes > Vibration Mode Shapes...

MODAL PARTICIPATION MASS PERCENTAGE												
Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROT-X		ROT-Y		ROT-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	96.11	96.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.00	96.11	97.37	97.37	0.00	0.00	0.45	0.45	0.00	0.01	0.00	0.01
3	0.01	96.12	0.00	97.37	0.00	0.00	0.45	0.90	0.02	0.03	96.53	96.53
4	0.00	96.12	0.00	97.37	5.83	5.85	0.00	0.45	0.00	0.03	0.00	96.53
5	0.05	96.17	0.00	97.37	0.00	5.85	0.00	0.45	39.11	39.14	0.02	96.55
6	0.00	96.17	0.02	97.39	56.79	56.64	0.02	0.47	0.00	39.14	0.00	96.55
7	0.00	96.17	0.15	97.57	0.00	56.64	0.15	0.64	0.00	39.14	0.00	96.55
8	0.05	96.22	0.00	97.57	0.09	56.73	0.00	0.64	6.23	45.37	0.00	96.55
9	0.00	96.22	0.00	97.57	0.98	57.71	0.00	0.64	0.58	45.95	0.00	96.55
10	0.01	96.23	0.00	97.57	0.00	57.71	0.00	0.64	1.03	46.98	0.00	96.55

➢ X방향 주모드(1차모드 : 96.11%)

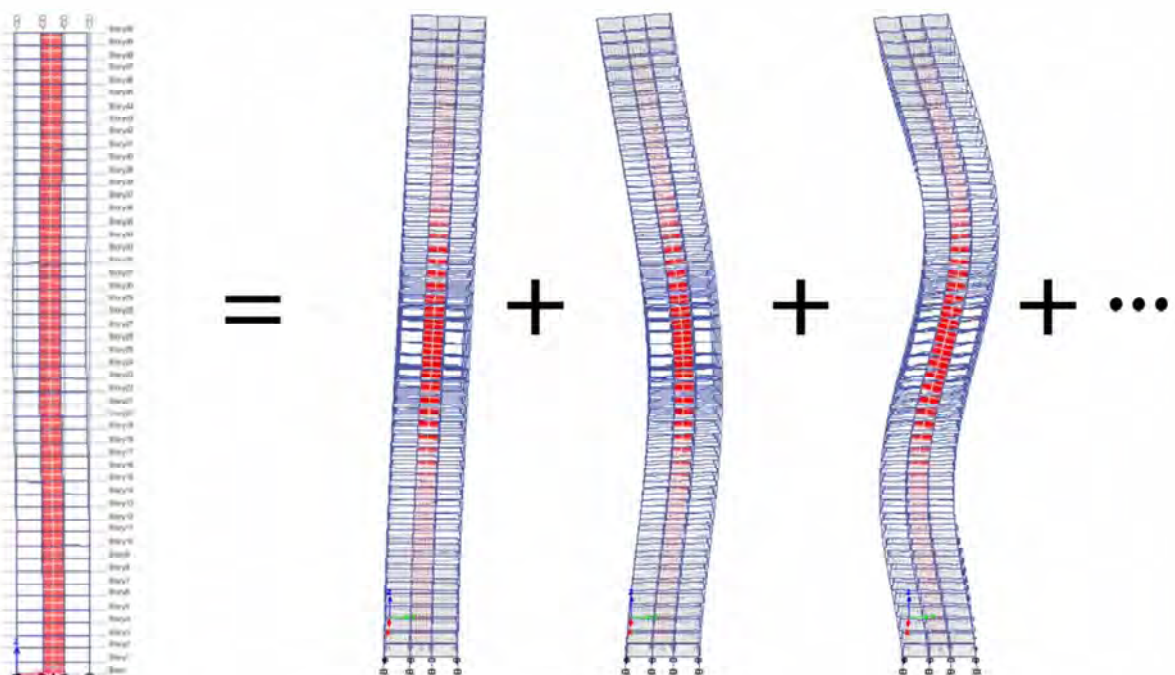


➢ Y방향 주모드(2차모드 : 97.37%)



# 다중모드 스펙트럼해석

## ● 모드별 해석 결과의 조합



# 다중모드 스펙트럼해석

## ● 모드별 해석 결과의 조합

### ➤ ABS (Absolute Sum)

$$R_{\max} = |R_1| + |R_2| + \dots + |R_n|$$

### ➤ SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)

$$R_{\max} = [R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2]^{1/2}$$

### ➤ CQC (Complete Quadratic Combination)

$$R_{\max} = \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_i \rho_{ij} R_j \right]^{1/2}$$

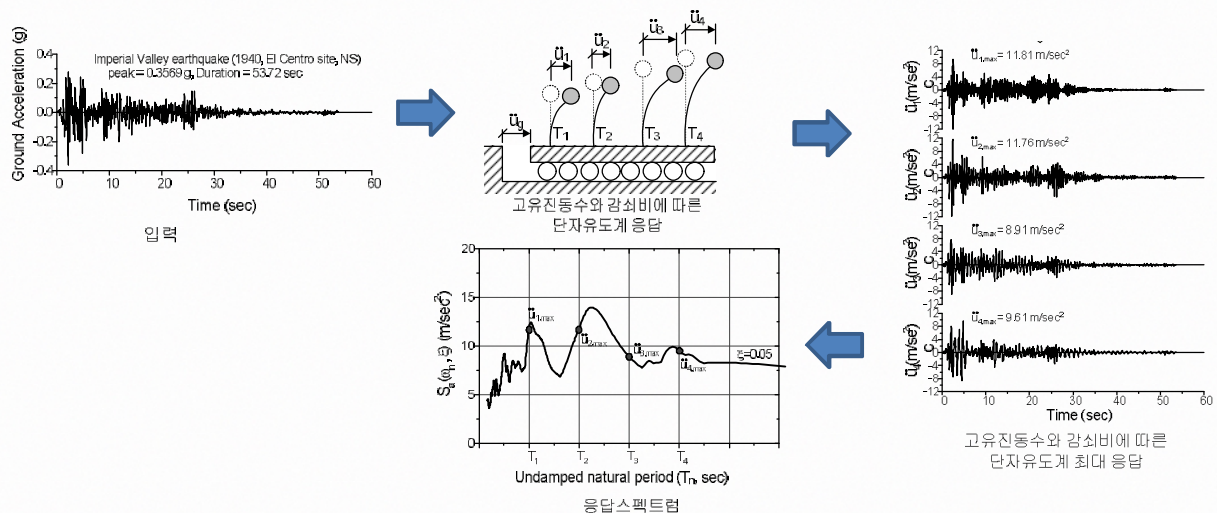
여기서

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2r(1+r)^2}, \quad r = \frac{\omega_j}{\omega_i}$$

# 다중모드 스펙트럼해석

## 해석특징

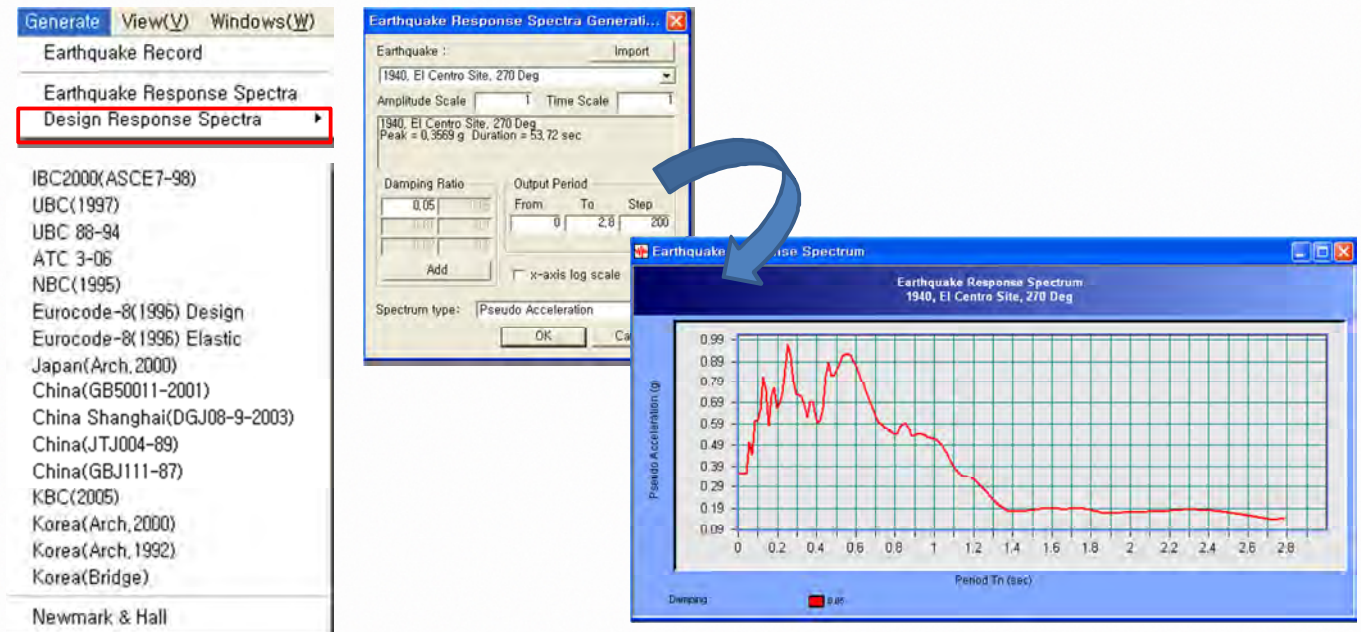
- 지진공학의 위대한 발견. 모드분리를 통하여 단자유도 시스템으로 해석
- 내진설계를 위한 최대응답을 효과적으로 찾을 수 있는 장점
- 설계응답스펙트럼을 사용하고 모드별 응답을 조합하여 최종 응답 평가
- 구조물의 진동주기와 진동모드 형상 등 동적 특성 고려 가능(반드시 고유치 해석이 수반되어야 함)
- 비정형 또는 고차모드의 영향을 받는 구조물에 적용 가능





# 다중모드 스펙트럼해석

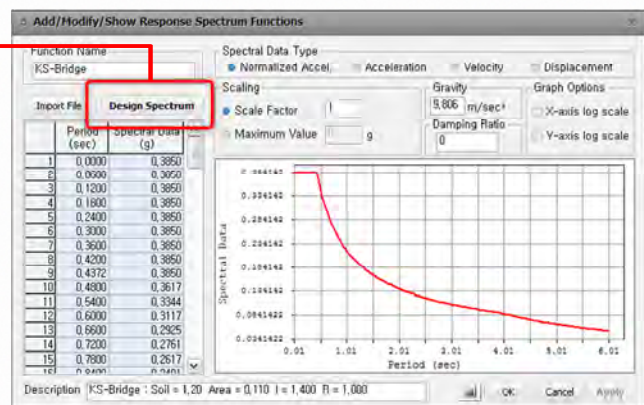
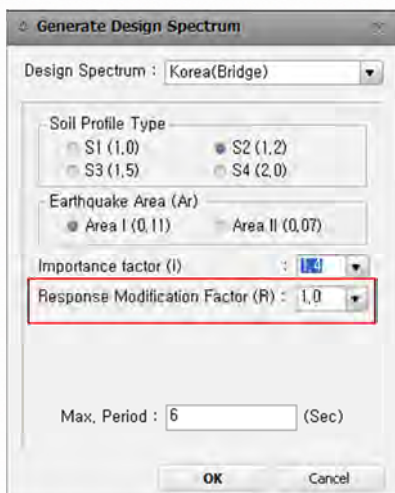
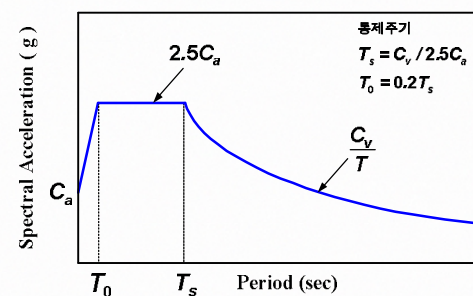
## 지진파에 의한 Design Spectrum 하중



# 다중모드 스펙트럼해석

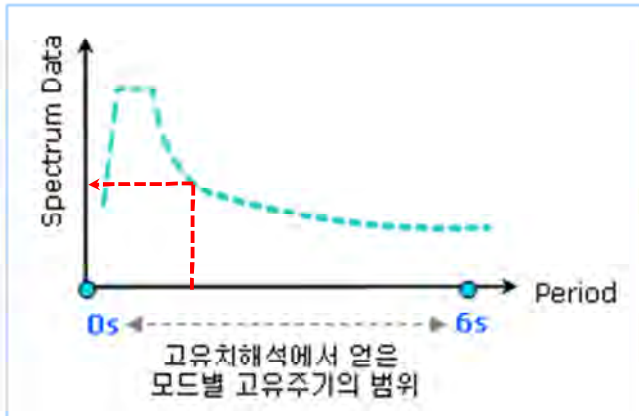
## 설계 스펙트럼(Design Spectrum) 하중

- 내진등급 1등급교 : 지진구역 I, 구역계수  $I = 0.11$ ,  
위험도계수( $I$ ) = 1.4 (재현주기 1000년)
- 내진조건 :  $S = 1.2$  (지반종류 II)



# 다중모드 스펙트럼해석

## 해석 흐름



각 방향에 대한 구조물의 동적 특성에 부합하는 모드별 가속도 Data 재하

모드별 구조물의 응답을 조합하여 결과 산출

## 모드 중첩 방법(Modal Combination Type)

### 1) SRSS (Square Root of Sum of the Squares)

$$R_{\max} = [R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2]^{1/2}$$

### 2) CQC (Complete Quadratic Combination)

$$R_{\max} = \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_i \rho_{ij} R_j \right]^{1/2}$$

### 3) ABS (Absolute Sum)

$$R_{\max} = |R_1| + |R_2| + \dots + |R_n|$$

### 4) Linear (Linear Sum)

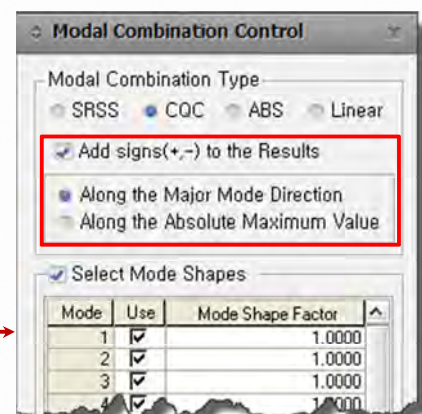
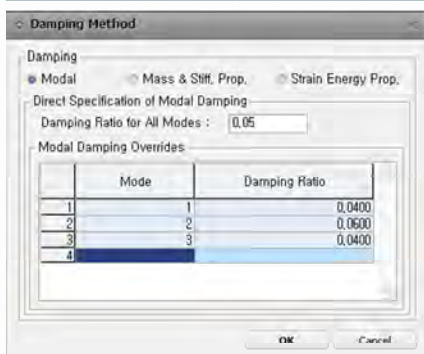
$$R_{\max} = \sum C_i R_i$$

# 다중모드 스펙트럼해석

## → 응답스펙트럼해석 (Response Spectrum Analysis)

### Response Spectrum Load Case

각 모드별 Damping 효과를 다르게 정의 가능



모드별 조합방법의 단점은 모드간 부호의 영향을 고려하지 못하는 것

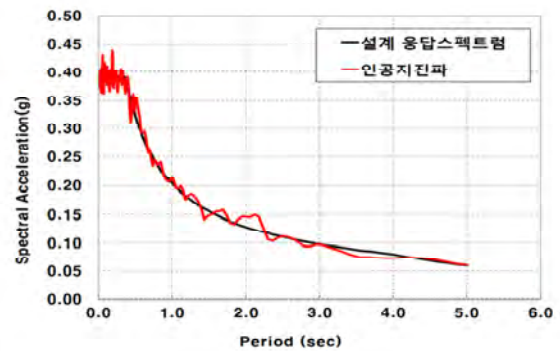
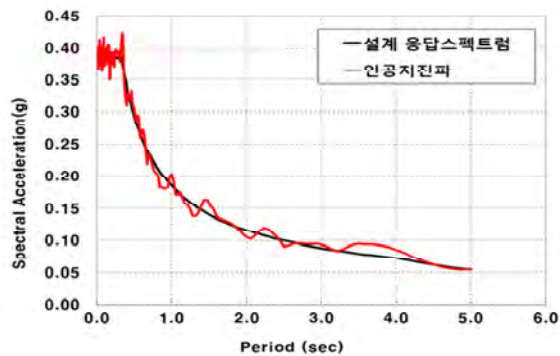
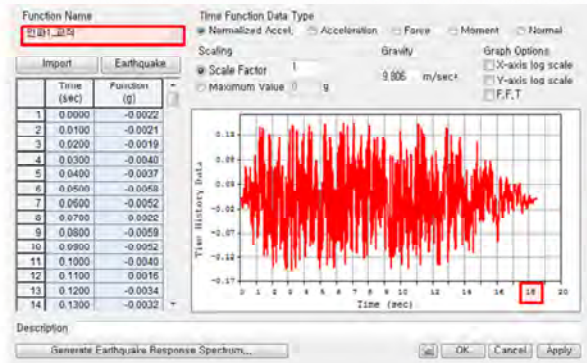
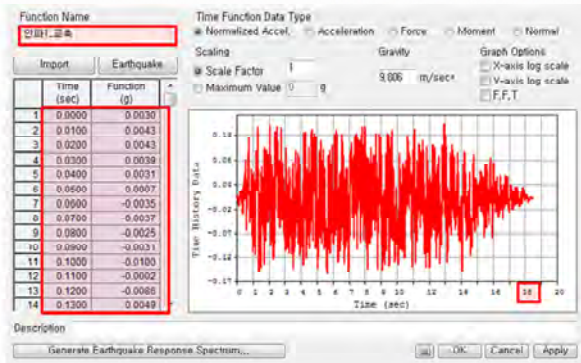
부재력의 부호에 영향을 미쳐 과대/과소 평가 되는 문제 발생

구조물의 가장 큰 기여를 하고 있는 주모드의 부호를 이용하여 결과 조합



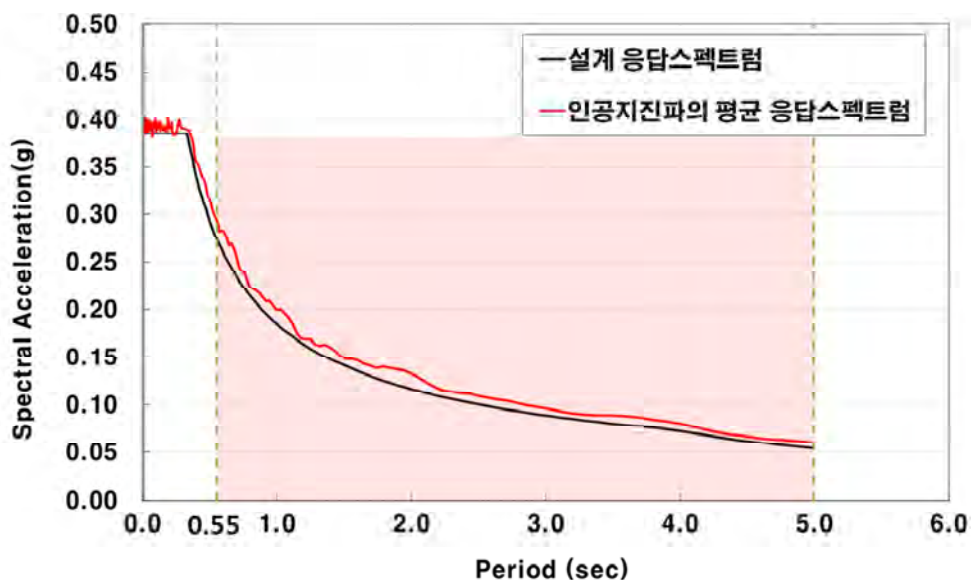
# 시간이력해석

## ● 인공지진파 생성 : 교축 및 교축직각방향 7쌍



# 시간이력해석

## ● 인공지진파 부합성 검토



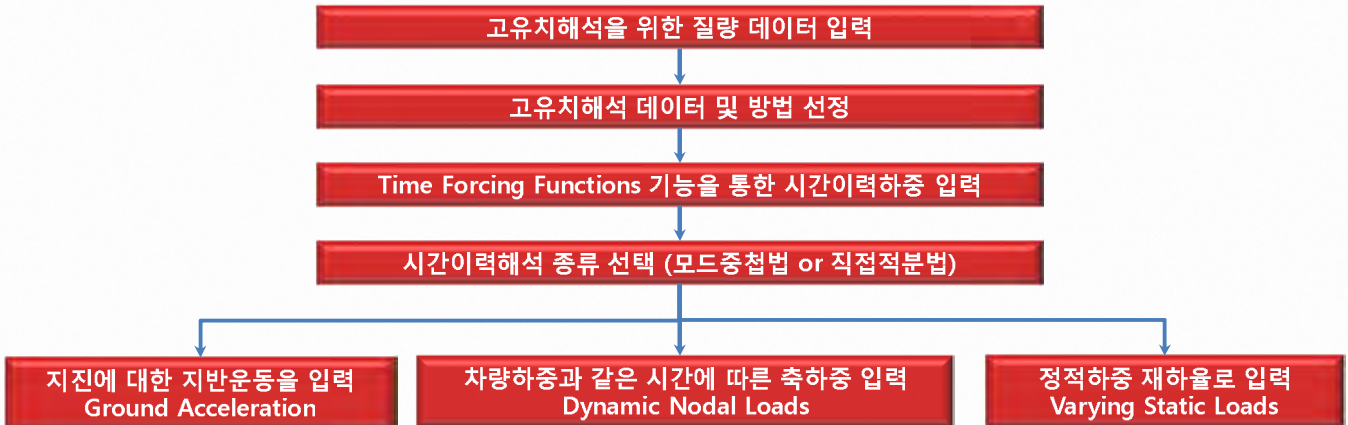
- 7쌍의 인공지진파의 평균응답스펙트럼이 설계표준 응답스펙트럼보다 낮은 주기는 5쌍 이하로 설계기준을 충족함
- 구조물의 기본 주기(2.7648초)의 0.2배~2.0배 사이의 주기구간은 평균 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼보다 커야함

# 시간이력해석

## 시간이력해석(Time History Analysis)의 특징

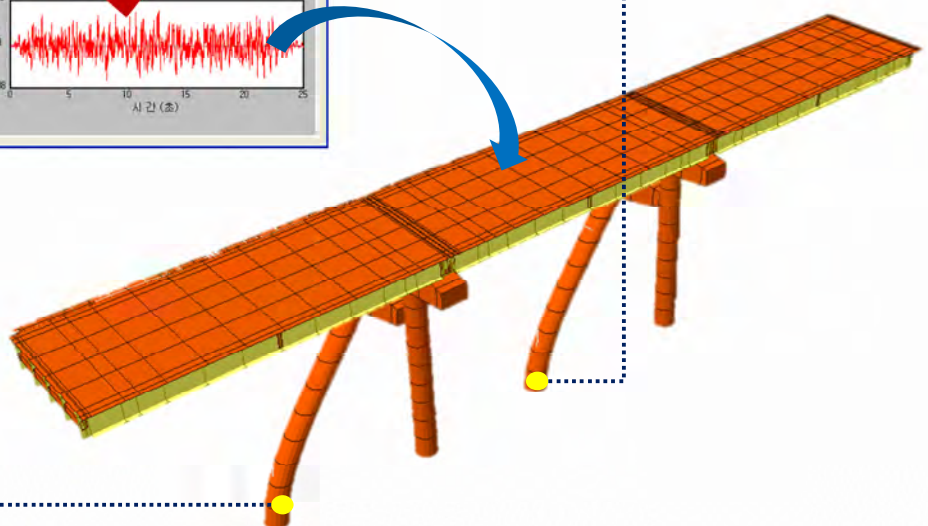
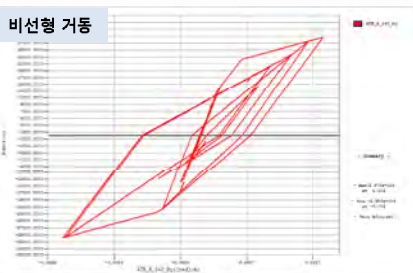
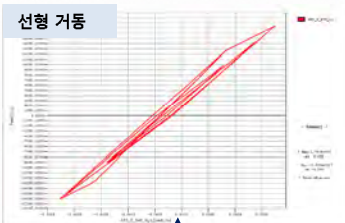
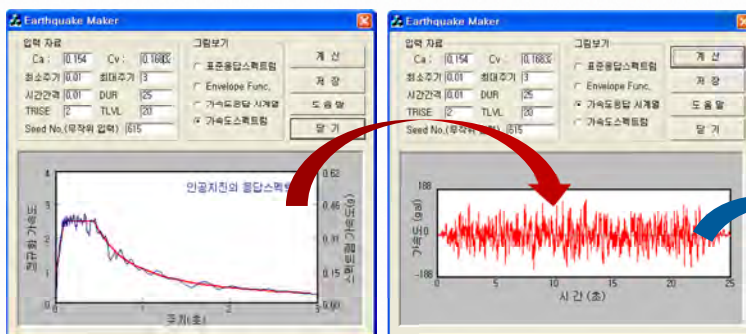
- 가장 정확한 결과를 주는 해석, 거동을 시간에 따라 어떻게 변하는지 상세 파악 가능
- 관성력, 감쇠력 그리고 지진하중과의 상호관계 고려 가능
- 계산량이 방대하고 해석시간이 지나치게 길어질 가능성 있음.
- 실질적인 지진에 대한 가속도 시간이력 데이터를 반영할 수 있음.

## 시간이력해석(Time History Analysis)의 절차



# 시간이력해석

## 가속도 시간이력 하중 재하 및 거동 분석



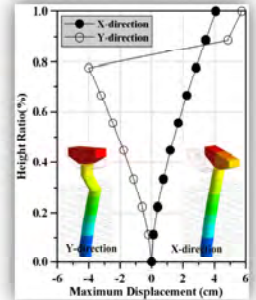
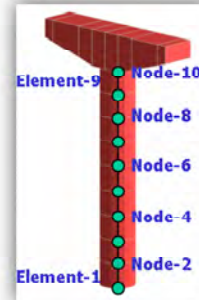
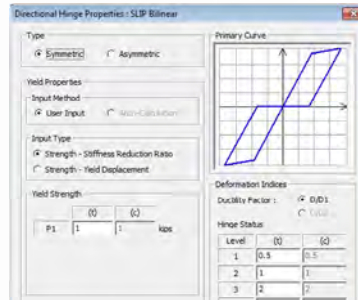


# 시간이력해석

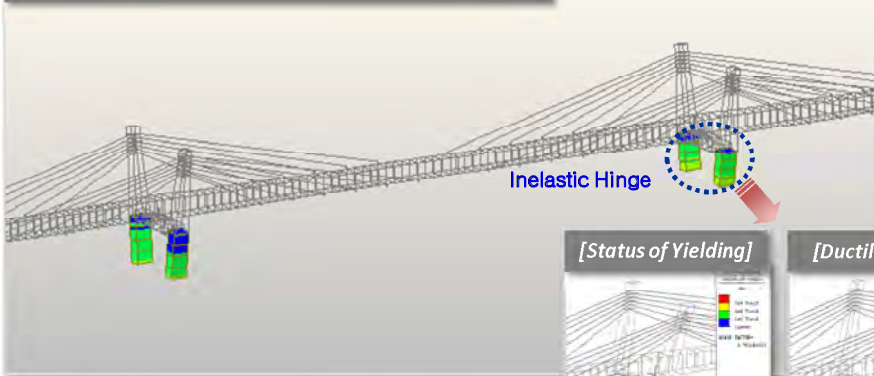
## → 비선형 동적해석의 이해

### 요소의 비선형 힌지특성 부여

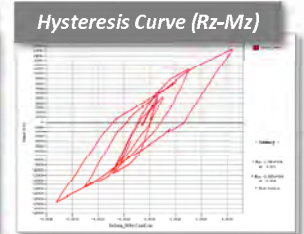
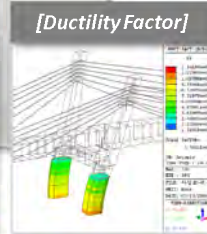
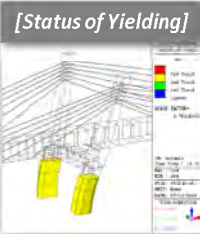
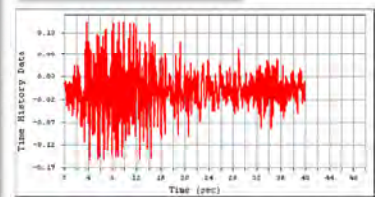
- ✓ Kinematic Hardening
- ✓ Takeda
- ✓ Slip Model
- ✓ Multi-linear Model



### Inelastic Time History Analysis of Extradosed Bridge



### Ground Acceleration



# 시간이력해석

## → 비선형 지진해석의 고민

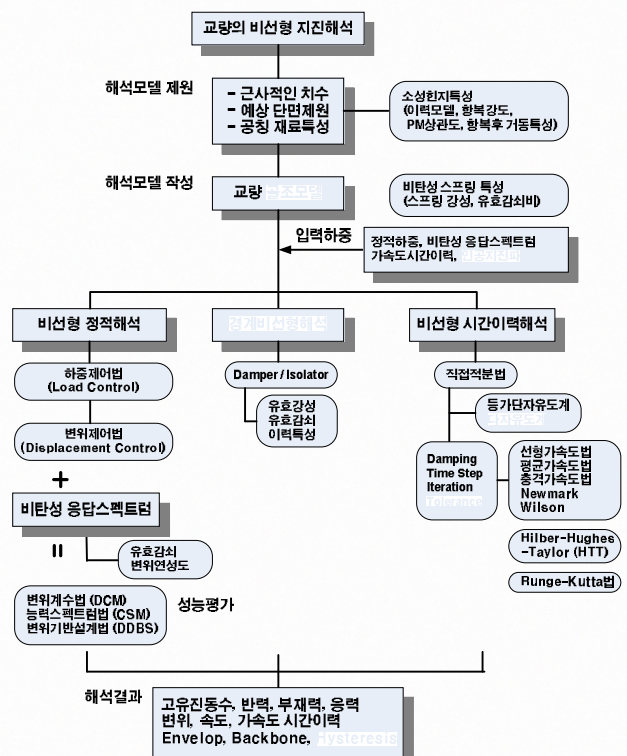
### 일반적인 인식

- 비선형해석은 어렵다!
- 실무와 상관없다. 연구자들만 하는 것이다.
- 설계에 적용하는 구체적인 방법이 제시되지 않았다.
- 해석시간이 매우 길다던데....
- 가이드 라인이 없다.

VS.

### 설계자의 고민

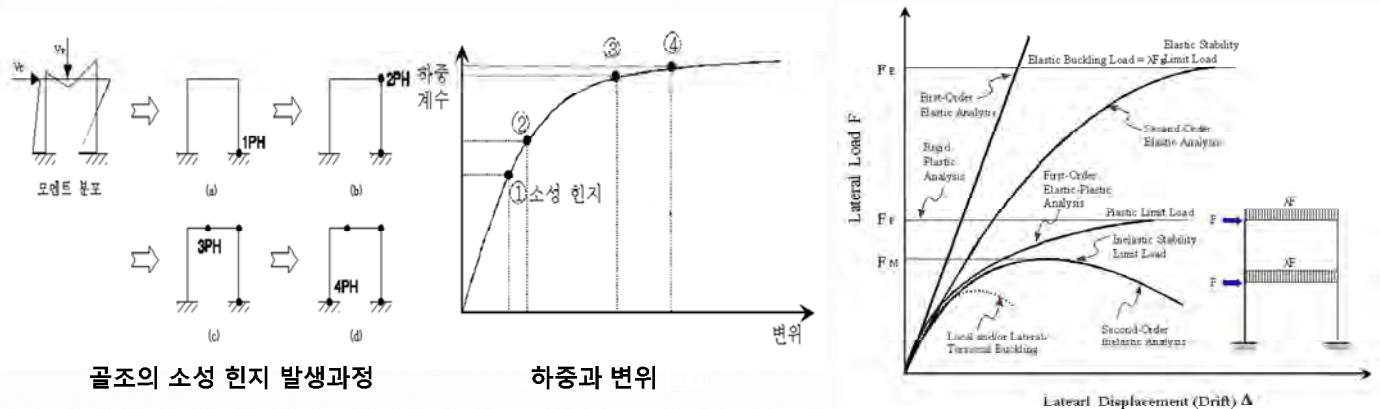
- 성능기초설계개념이라고 하는데...
- 내진성능평가를 하기 위해서는...
- 보다 정확한 지진거동분석을 위해서는...
- 구조물의 보유능력평가, 요구내력평가...
- 설계품질을 높이기 위해서는...
- 보다 단면이나 물량을 줄여서 실제거동에 부합할 수는 없을가?



# 비선형 정적해석(Pushover Analysis)

## → 비선형 정적해석의 이해 (Pushover Analysis)

- 좀 더 간편하고 실무적이고 실용적인 비선형 해석방법은 없을까?
- 비선형 정적해석은 시간과 무관하지만 부재의 비선형 이력특성을 고려할 수 있다.
- 일명 Pushover (소성힌지법), 재료의 인성과 구조물의 부정정성을 고려할 수 있다.
- 부재는 항복할 때까지 하중을 받고 이후는 재분배시킨다.
- 응력의 재분배에 의하여 구조물이 불안정 상태에 도달할 때까지 거동 파악
- 소성이론의 3대 조건 : 평형조건, 항복조건, 파괴조건



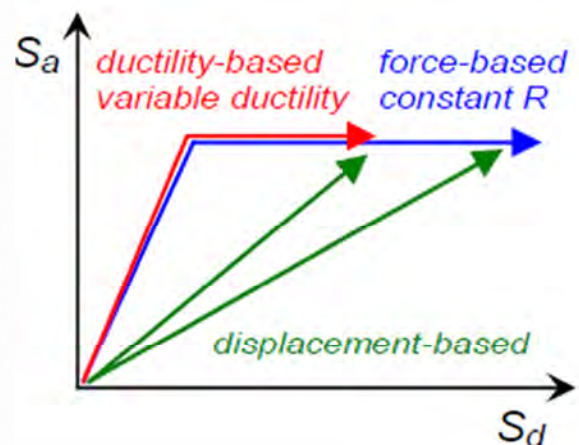
# 내진성능설계 및 평가 구분

## 하중 기반 설계 (Force-based Design)

- 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 설계 : 응답스펙트럼해석 가능
- 연성도를 간접적으로 고려하는 설계법
- 완전 (Full Ductility) 설계법
- 상수 R (Constant R) 적용

## 변위기반 설계 (Displacement-based Design)

- 변위 응답스펙트럼을 기준으로 설계 : 비선형 반복해석으로 가능
- 가장 합리적이고 효율적인 방법
- 설계기준으로 아직 정립되지 못함.



## 복합 : 연성도 내진설계 (Ductility-based Design) : 도로교 설계기준 한계상태설계법부터 의무적용

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



# 내진성능설계 및 평가의 수치해석 정리

- 1) 평가 단계에서 비탄성 거동의 잠재적인 발생위치를 결정해야 한다.
- 2) 변형특성의 분석으로부터 부재의 휨강도와 소성힌지 회전의 관계를 정립한다. 모멘트와 회전관계를 이용하면 연성능력 평가를 가능하게 하여 소성힌지 부분에 대한 휨강도와 소요철근량을 결정할 수 있다.
- 3) 지진하중에 의해 예상되는 요구 연성도에 대하여 소성힌지 부분의 최대 휨강도를 평가하고 휨거동의 초과강도를 반영하는 단면력을 산정한다.
- 4) 부재에 대한 강도설계와 비탄성 변형에 대한 안전성을 확보하는 보강방안 수립하고 설계에서 예상했던 거동이 실제에서 달성되도록 하기 위한 상세설계에 주의를 기울여야 한다.
- 5) 상세설계는 연성능력 확보를 위한 횡방향 철근 설계, 정착부의 설계 및 위치, 철근의 겹이음, 부재간의 연결부 상세설계 등을 포함한다

## 지진하중에 대한 소요역량(Demand) 산정

- 유효강성 적용한 동적해석
- 고유치 해석
- 내진해석의 단면력 산정



## 단면 자체의 공급역량(Capacity) 산정

- Moment-Curvature Curve or Pushover Analysis
- 단면강도, 변위 연성도 산정
- 휨성능 및 전단성능 곡선 산정



내진성능 목표 달성