

## 지반조건과 지진해석



김용석 교수  
목포대학교 건축공학전공

### 1. 서론

노출된 암반에서의 지진파 특성은 깊은 암반(Hard Rock)에서의 지진파 특성과 거의 유사하다고 할 수 있지만, 연약지반의 지표면이나 자유장(Free Field)에서의 지진파 특성은 지반 특성에 따라 크게 달라진다. 또, 구조물이 연약지반 위에 세워지면 구조물 기초지면에서의 지반특성과 입력지진파 특성이 기초형상과 구조물 특성에 따라 달라지기 때문에 연약지반 위에 세워진 구조물의 지진거동은 암반 위에 세워진 구조물의 지진거동과는 큰 차이를 보이는데, 이와 같이 구조물과 지반이 서로 영향을 미치는 현상을 구조물-지반 상호작용(Structure-Soil Interaction, SSI)이라 한다.

SSI를 고려한 내진설계는 60년대 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 연구를 수행하면서 발전하였는데, 70-80년대에는 구조와 토질 등 여러 분야에서도 연구가 활발히 진행되어 70년대에 초보적으로 고려되던 SSI에 의한 영향을 80년대에는 보다 체계적으로 내진설계 기준에서 고려하기 시작하였다. 그 후 90년대에도 다양한 지진과 지반을 고려한 내진설계 규준화에 대한 연구가 진행되었으나 아직도 지반의 비선형 특성이나 중·약진에 대한 고려가 합리적으로 반영되지 못하고 있다.

21세기에 새로이 제시된 건축물의 성능에 기준한 내진설계법을 기본으로 하는 IBC 2000, IBC 2003 등에서는 지반과 SSI 영향을 보다 세밀하게 성능에 따라 고려하도록 규정하고 있다.<sup>1)</sup>

### 2. 지반조건과 구조물 동적거동

과거 오랜 기간동안 구조물의 지진해석 시 지반의 특성에 대한 고려가 상당히 합리적이지 못하고 개략적으로 이루어졌는데, 1976년 미국 UBC에서 지반계수를 도입하여 지난 94년도 규준까지 사용되었지만 그 분류가 다양하지 못하고 내용이 너무 함축적이어서 복잡한 지반조건을 반영하는 데에는 부족함이 많아 구조물의 지진해석에 대한 신뢰성을 크게 떨어뜨렸다.<sup>3)</sup>

그러나, 구조물-지반 상호작용에 대한 관심이 높아지고 과거 수십 년 동안 쌓은 연구 성과로 UBC 1997에서는 지반조건 분류에 대해 상당히 수정하여, <표 1>에 나타난 것처럼 크게  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$ ,  $S_D$ ,  $S_E$ ,  $S_F$  6가지로 구분하였다.<sup>4)</sup>

<표 1> UBC 1997, IBC 2003 지반 분류

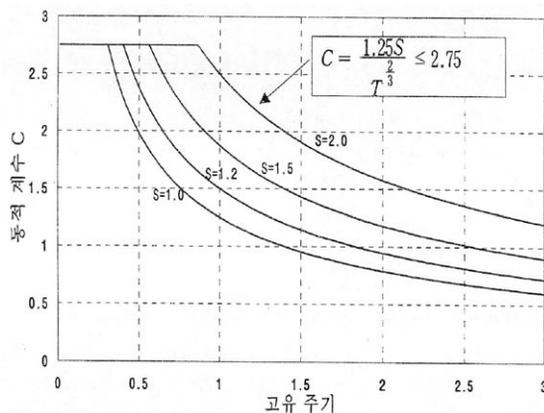
Soil Profile Type	Soil Profile Description	Average Soil Property for Top 30.48m		Soil Undrained Shear Strength ( $KPa$ )
		Shear Wave Velocity (m/sec)	SPT N-value (blows/foot)	
$S_A$	Hard Rock	>1500	N/A	N/A
$S_B$	Rock	760~1500		
$S_C$	Very Dense Soil and Soft Rock Stiff	360~760	> 50	>100
$S_D$	Soil Profile	180~360	15~50	50~100
$S_E$	Soft Soil Profile	< 180	< 15	< 50
$S_F$	Soils Requiring Site-Specific Evaluation			

또, 지반은 상부 30.48m 지반의 평균전단파속도로 분류하였는데, 상부 30.48m 지반이란 기초의 문힘이 없거나 적은 지표면 기초의 경우에 해당되며, 문힘이 큰 경우에는 기초 밑 30.48m 깊이를 고

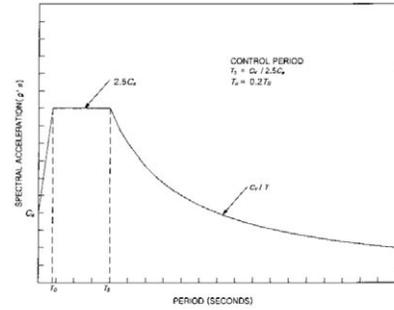
려하는 것이 합리적이고, 지반두께가 30.48m이상인 경우에는 지반에 따른 특성분석이 필요하다. 한편, 토질이 다른 여러 층으로 이루어진 지반에서 지진전단파 전달속도는 전체 지반두께를 지진전단파가 각 층을 통과하는 시간을 합한 전체시간으로 나누어서 평균적으로 구한다.

UBC 1997이후 IBC 2000, IBC 2003에서도 사용하고 있는 <표 1>에 나타난 지반 분류체계는 아직도 보완이 필요하지만, 과거 기준에 비하면 상당히 정량적이며 합리적이라고 할 수 있다.<sup>2) 4)</sup>

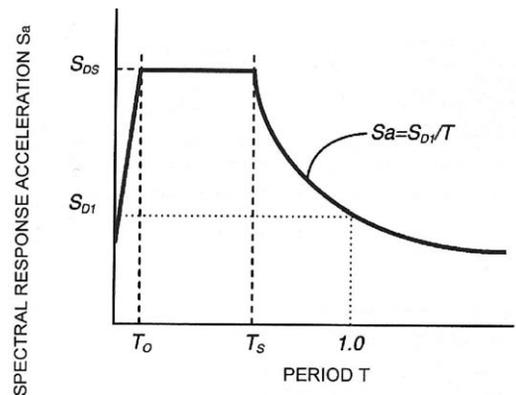
한편, UBC 1994에서는 탄성설계응답스펙트럼을 최대유효지반가속도에 대한 상대가속도로 나타내고 장주기 영역에서는 지반이 연약할수록 지진응답이 증폭되는 것으로 하였으나<그림 1>, UBC 1997에서는 최대유효지반가속도 결정방법상의 문제점을 해소하고 여러 종류의 연약지반 영향을 모든 주기에서 고려할 수 있도록 설계응답스펙트럼을 표준화하고 지역계수와 지반조건에 따른 가속도 값에 따라 스펙트럼을 작성할 수 있도록 개선하였다<그림 2>. IBC에서도 UBC 1997과 유사하게 설계응답스펙트럼은 <그림 3>처럼 표준화하였으나 설계응답스펙트럼 작성법을 변경하여 최대지반가속도나 지역계수를 사용하지 않고, <그림 4>에 나타난 지역의 재현주기 1000년 지진에 대한 고정지반의 0.2초, 1초에서의 응답스펙트럼 가속도, 지반등급 및 응답스펙트럼 가속도 값에 따른 지반증폭계수를 사용하여 응답스펙트럼을 작성하도록 하였다. 단주기영역에서 설계응답가속도는 지도에 나타난 고정지반에서의 0.2초 응답스펙트럼 값에 지반계수를 곱하여 최대응답가속도를 구한 후 붕괴까지의 여유를 고려하여 2/3를 곱하여 구하고, 설계응답가속도의 1/2.5을 강제의 응답가속도로 정하였다. 장주기영역에서 설계응답가속도는 주기 1초에서의 고정지반 응답스펙트럼 값을 각 고유주기로 나누어서 최대응답가속도를 구한 후 2/3를 곱하여 구하였다.<sup>9)</sup>



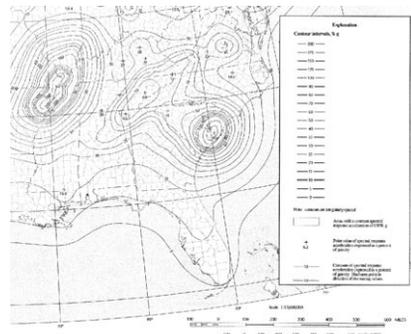
<그림 1> UBC 1994 동적계수



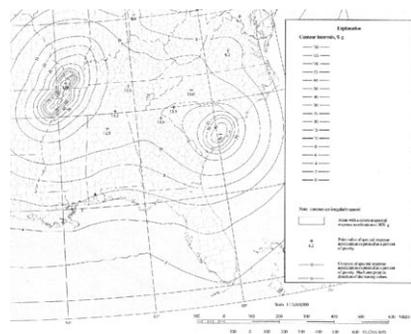
<그림 2> UBC-97 탄성 설계응답스펙트럼



<그림 3> IBC2000 설계응답스펙트럼



(a) At the period of 0.2 seconds

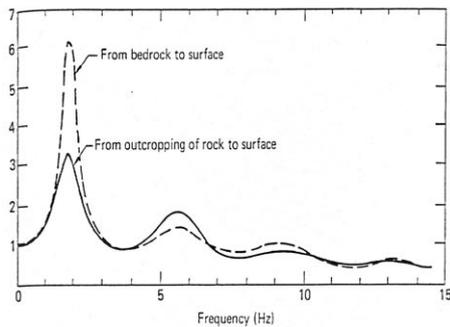


(b) At the period of 1 second

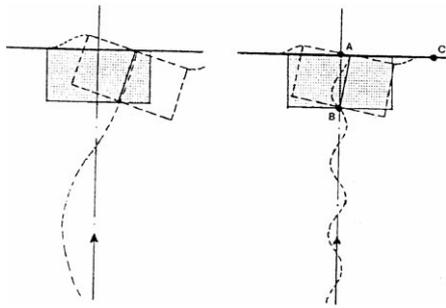
<그림 4> Max. Ground Motion of Spectral Resp. Acceleration, Site Class B

### 3. 구조물-지반 상호작용

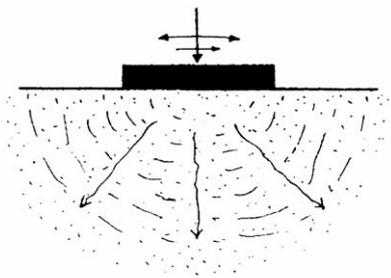
기초 및 지반이 구조물의 동적 지진거동에 미치는 영향에는 크게 세 가지 종류가 있는데, 지반에 의한 입력지진파의 증폭(Soil Amplification), 구조물 기초형상과 입력지진파의 종류에 따라 발생하는 운동학적 상호작용(Kinematic Interaction), 구조물과 기초의 관성력에 의해 유발되는 관성상호작용(Inertial Interaction)을 말한다(그림 5).<sup>8)</sup> 그런데, 통상 마지막 두 가지 영향 즉 운동학적 상호작용과 관성 상호작용 영향을 구조물-지반 상호작용 영향이라고 한다.



입력지진파증폭효과



운동학적 상호작용



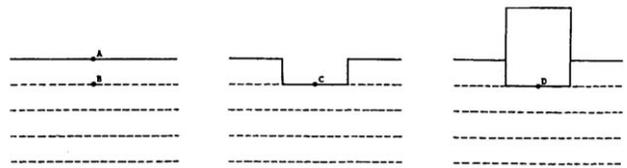
관성상호작용

〈그림 5〉 지반이 구조물 지진거동에 미치는 영향

전반적인 구조물-지반 상호작용 영향을 지반에 기초가 묻힌 구조물의 경우에 대해 살펴보면, 〈그림 6〉에 나타난 A점과 B점의 지반거동이 다른 것은 〈그림 5〉에 나타난 것처럼 입력지진파가 연약지반에 의해 지반의 고유주파수( $C_s/4H$ )에서 증폭되기 때문에 나타나는 현상으로 암반까지의 깊이가 깊은 A점에서 지반운동이 B점보다 크게 나

타나고, 암반까지 깊이가 같은 무질량 강체기초지반 밑 C점과 B점의 지반운동이 차이를 보이는 것은 C점의 지반운동은 운동학적 상호작용 영향으로 입력지진파의 고주파 성분이 제거되고 질량이 없는 강체기초의 회전운동이 발생하기 때문이다.

또, C점과 D점의 기초지반 거동이 서로 다른 것은 입력지진파에 의해 유발된 구조물의 관성력에 의한 에너지가 지반을 통해 발산되어 지반의 특성이 변화하면서 기초지반의 동적강성과 입력지진파 특성이 달라지는 관성상호작용 영향 때문이다.



〈그림 6〉 지진파 제어점

지진해석 시 기초저면에서의 지반운동을 구해야 하는데 유한요소법을 이용할 경우 직접 기초저면에서 지반운동을 구할 수도 있지만, 기초를 거의 강체로 가정할 수 있기 때문에 기초상부에서 기초저면의 지반운동을 유추할 수 있다.

한편, 구조물-지반 상호작용이 구조물의 동적지진거동에 미치는 영향은 연약지반에 의한 영향으로 구조물-지반체계의 고유주파수가 작아지고, 유효감쇠비가 증가하는데, 구조물-지반 상호작용 영향을 획일적으로 예측하기는 어렵고 지반, 구조물 및 입력지진파의 주파수 특성에 따라 달라진다.

### 4. 지진해석 기준과 지반조건

국내 지진해석 기준은 기본적으로 UBC기준을 근간으로 국내 실정에 적합하게 수정하여 1988년에 최초로 제정되었고, 그 후 2000년 제정한 대한건축학회 기준(AIK 2000)에서도 지반에 관련된 기준들은 UBC 1994를 참조하여 지반분류 기준을 마련하였다.

그러나 1985년 Mexico City 지진과 1989년 Loma Prieta 지진 시 연약지반에서 지반의 비선형 거동 때문에 지진세기가 작은 약진에서도 지반 증폭현상이 발생하고 강진에서는 역으로 지반 감쇠현상이 발생하는 것이 관측되었고, 암반과 지반의 강성차가 입력지진파에 큰 영향을 미친다는 것이 알려져 UBC 1997에서는 지반을 6종류로 더 다양하게 분류하고(표 1), 지반종류와 진도에 따른 지반의

비선형을 고려한 설계응답스펙트럼을 제시하였다.

UBC 1997에 따른 기준이 국내에서는 제정되지는 않았으나 1997년 건설교통부에서 UBC 1997에 따라 수정한 내진설계기준연구(II)를 통해 제시하였다.<sup>5)</sup>

그런데 UBC 1997의 지반분류도 복잡 다양한 지반상태를 구조물의 지진해석을 위해 만족할 정도로 충분히 분류하지 못하고 있어 앞으로 많은 연구가 필요한 실정이다. 특히, 지반깊이가 다양하고 토층 분포가 복잡한 경우에도 지반특성을 평균적 의미에서 일률적으로 고려하는 것은 근본적인 문제점이고, 실무차원에서 가장 일반적인  $S_D$  지반의 경우에는 표준관입시험에 의한  $N$ 값이 15~50까지로 상당히 광범위한데 하나의 지반으로 분류하여  $N$ 값 15인 경우와  $N$ 값 50인 경우의 차이를 고려할 수 없어 실제적인 지반특성을 반영하기가 어렵게 되어 있다.

따라서 지반상태가 일반적이지 못한 경우에는 복잡하지만 유한요소법과 같은 방법으로 지진해석을 수행하고, 폭 넓고 심도 있는 연구를 통하여 지반분류를 좀 더 체계적으로 세분화하고 보다 효율적인 내진설계 기준을 마련해야 할 것이다. 특히, 현재 내진설계기준들에는 고려되어 있지 않지만 기초 문헌이 있는 경우에 대한 내진설계기준이 필요하다.

#### 4.1 대한건축학회 기준

국내 대한건축학회 기준인 AIK 2000에 의한 건축물의 지진해석은 UBC 1994 기준에 의한 등가정적해석법과 설계응답스펙트럼에 의한 모드중첩법(Modal Superposition Method)이 있다.

등가정적해석법에서는 지진 시 예상되는 구조물의 밑면전단력을 식 (1)로 구하고, 각 층에서의 층전단력으로 전환하여 구조물의 정적 지진해석을 수행한다.

$$V = \frac{A I_E C}{R} W \quad (1)$$

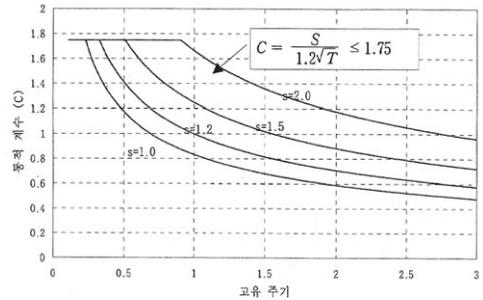
동적계수  $C$ 는 지반계수( $S$ )와 건축물 주기( $T$ )의 함수로 다음 식 (2)와 같고, 그림 7과 같이 그래프로 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} \leq 1.75 \quad (2)$$

한편, 지반계수  $S$ 는 <표 2>처럼 지반을 4개 종별 지반 1, 지반 2, 지반 3, 지반 4로 나누어 연약한 지반일수록 크게 하여 1.0~2.0까지 고려하였는데, 지반계수가 클수록 지반의 증폭효과가 커진다.

그러나 이러한 지반분류는 토질에 대한 상당히 주관적인 판단이 따르

기 때문에 기준이 명확하지 못하고, 일반적으로 국내 지반은 지반 1과 지반 3의 어느 중간 상태에 해당되는 경우가 많은데 지반 1과 지반 3 가운데 어느 하나를 선택해야 할 경우에는 지반계수 차이가 너무 커 비합리적임에도, 합리적인 보간 방안은 기준에 제시되어 있지 않다.



<그림 7> AIK 2000 동적계수

<표 2> 지반계수 S

지반종별	지반 상태	지반계수(S)
지반 1	1) 암반과 같은 재료로써 전단파의 속도가 700m/sec 이상인 지반 2) 암반의 상부에 분포된 보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 미만	1.0
지반 2	보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 이상	1.2
지반 3	보통 단단한 점토 이하의 지반이 6m 이상으로써 단단하기가 보통이하인 점토의 깊이가 12m 미만	1.5
지반 4	전단파의 속도가 150m/s 미만인 단단하기가 보통이하인 점토의 깊이가 12m 이상인 지반	2.0

한편, 설계응답스펙트럼에 의한 모드중첩법(Modal Superposition)은 상당히 많은 실제 지진기록으로 지반종류별로 지진해석을 수행하여 통계학적으로 작성한 <그림 2>와 같은 표준설계응답스펙트럼을 이용하여 지진해석을 수행하는데, 구조물의 모드별 주기를 먼저 구하고 설계응답스펙트럼에서 각 모드 주기별 응답을 구하여 SRSS법이나 절대값 합산법으로 지진응답을 구하는 방법이다. 그런데, 국내 AIK 2000 기준에서는 표준설계응답스펙트럼이 주어지지 않아 UBC 표준설계응답스펙트럼을 사용하고 있다.

#### 4.2 UBC 1997 기준과 건설교통부 기준

지반에 대해 UBC 1997 기준에서는 상부 토층 30.48m의 평균 전단파 전달속도를 기준으로 지반을 6개 종류로 나누고, 지진세기에 따른 지반의 비선형성을 고려하여 단주기와 장주기 영역에서의 지반 증폭계수를 지반종류 별로 제시하였다.<sup>4)</sup> 국내에서는 건설교통부에서 1997년에 UBC 1997 기준을 국내 기준에 적합하게 수정, 보완한

연구결과를 제시하였다.<sup>(5)</sup>

UBC 1997 기준에서 제시한 지진해석방법으로는 정역학적 방법과 탄성설계응답스펙트럼법이 있다.

(1) 정역학적 방법

UBC 1997의 정역학적 방법에서는 구조물 전체 설계밀면전단력의 범위를 다음 식 (3)과 같이 규정하였다.<sup>(4)</sup>

$$0.11C_a I W \leq V = \frac{C_v \cdot I}{R \cdot T} \leq \frac{2.5C_a \cdot I}{R} W \quad (3)$$

여기서  $C_a$ ,  $C_v$ 는 지진지역계수와 지반종류(표 1)에 따라 달라지는 지진계수로 <표 3>과 <표 4>에 나타난 것처럼 각각 25개의 지진계수를 규정하여, UBC 1994의 지역계수 4개에 비하면 훨씬 다양한 지반조건을 고려할 수 있도록 하였다.

그런데, 지진계수  $C_a$ ,  $C_v$ 를 살펴보면,  $S_A$ ,  $S_B$  지반에서는 지진계수가 지역계수에 비례하여 선형으로 변하지만,  $S_C$ ,  $S_D$ ,  $S_E$  지반에서는 비선형으로 변하는 것으로 추정하여 지반의 비선형성이 고려된 것으로 평가된다.<sup>(10)</sup>

한편, 1997년 건설교통부 내진설계기준연구 보고서에서는 지진계수  $C_a$ ,  $C_v$ 를 평균재현주기 500년 지진을 기준으로 지진구역을 2개로 나누어 지진계수를 <표 5>처럼 수정하여 제시하였다.

식 (3)에서 I는 위험도 계수로 <표 6>에 나타나 있는데, 지진의 평균재현주기에 따른 건물별 내진설계를 위한 지진크기를 결정하는 계수로서 앞으로 제정이 예상되는 성능에 기준한 내진설계 기준(IBC 2003, AIK 2004 등)에서도 고려하고 있는 항목이다.

건설교통부 상위개념 내진설계 기준에 의하면 일반적인 1등급 건축물의 경우 사용한계상태에서는 평균 100년 재현주기 지진을 고려하고, 붕괴방지수준상태에서는 평균 1000년 재현주기 지진을 고려하도록 규정하고 있다.

<표 3> 지진계수  $C_a$

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR Z				
	0.075	0.15	0.2	0.3	0.4
$S_A$	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_b$
$S_B$	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_b$
$S_C$	0.09	0.18	0.24	0.33	$0.40N_b$
$S_D$	0.12	0.22	0.28	0.36	$0.44N_b$
$S_E$	0.19	0.30	0.34	0.36	$0.36N_b$
$S_F$	See Footnote 1				

<sup>1</sup>Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type  $S_F$

<표 4> 지진계수  $C_v$

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR Z				
	0.075	0.15	0.2	0.3	0.4
$S_A$	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_v$
$S_B$	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_v$
$S_C$	0.13	0.25	0.32	0.45	$0.56N_v$
$S_D$	0.18	0.32	0.40	0.54	$0.64N_v$
$S_E$	0.26	0.50	0.64	0.84	$0.96N_v$
$S_F$	See Footnote 1				

<표 5> 건설교통부(1997) 지진계수  $C_a$ ,  $C_v$

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

<표 6> 위험도계수 I

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

(2) 탄성 설계응답스펙트럼

UBC 1997에서는 5% 감쇠비의 탄성설계응답스펙트럼(그림 2)을 구조물 주기에 따른 최대유효지반가속도로 나타내는 대신 응답스펙트럼 가속도로 나타냈다.

설계응답스펙트럼은 지반의 특성과 지진지역을 고려한 지진계수  $C_a$  와  $C_v$ 로 지반종류와 지진구역에 따라 작성했는데, 응답스펙트럼 가속도를 단주기 구조물의 경우에도 연약지반에서 과거보다 증폭시켜 단주기 영역과 장주기 영역에서 모두 증폭시켰으며, 단단한 암반에서는 응답스펙트럼 가속도를 감소시켜 과거 기준보다 합리적으로 수정하였다. 또, 앞서도 언급하였듯이 지진계수  $C_a$ ,  $C_v$ 에서는 연약지반의 비선형성이 고려되었다.

한편, 국내 건설교통부안은 UBC 1997 설계응답스펙트럼을 국내 조건에 적합하게 지진계수들을 보간하여 제시한 것이다.

5. 구조물-지반 지진해석 모델링

5.1 구조물-지반 모델

구조물-지반 체계에 대한 지진해석은 시간영역이나 주파수영역에서 모두 수행할 수 있는데, 최근 디지털 컴퓨터의 성능 향상으로 시간영역 3-D 비선형 지진해석이 상당히 시도되고는 있지만 실무적으로 주파수영역 지진해석이 아직도 애용되고 있다. 특히 3차원 비선형

해석이 가능한 범용프로그램이 ABAQUS, NASTRAN 등 극히 소수에 한정되어 있어 아직도 범용프로그램을 이용하는 데는 어려움이 있다.

또, 구조물-지반 체계에 대한 모델링은 2-D나 3-D 모두 가능하지만 전체적인 3-D 모델링은 복잡하고 수치해석 시간도 많이 걸리기 때문에 아직도 2-D나 의사(Pseudo) 3-D 모델링이 많이 이용되고 있는데, 건축물과 같은 독립 구조물의 지진해석에서는 3-D 모델링이 적합하다. 한편, 의사 3차원 해석결과는 수직방향 해석일 경우는 3차원 해석결과와 똑 같고, 수평방향 해석일 경우는 실제 지층이 유한하고 지반강도가 거리에 따라 커지기 때문에 3차원 해석결과와 최대 10~20% 정도 밖에 차이가 나지 않아 해석결과에 큰 문제가 없는 것으로 평가되었다.

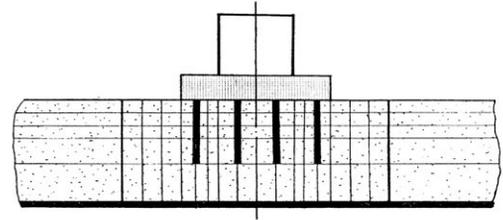
구조물-지반 상호작용을 고려한 구조물의 지진해석방법에는 직접해석법(Direct Method)과 부구조물해석법(Substructure Method)이 있다.

직접해석법에서는 <그림 8>에 나타난 것처럼 구조물과 지반을 동시에 유한요소로 모델링하고 지진기록을 지반 밑 암반에 직접 입력하여 지진해석을 실시하기 때문에 구조물-지반 상호작용 영향을 보다 정확하게 전반적으로 반영할 수 있고 비선형 해석도 가능한 장점이 있지만, 지반과 지반-구조물 상호작용의 각종 영향에 대한 개별적 평가가 어려운 단점이 있다.

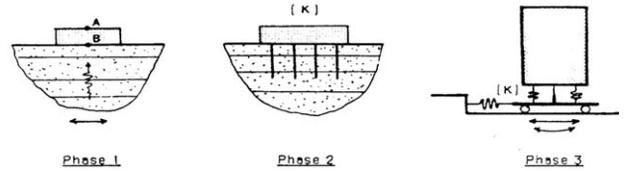
직접해석법에서 비선형 지진해석은 용이하지만, 3-D 비선형 지진해석을 위한 지반에 대한 복잡한 구성방정식이 필요하고 구조물-지반 체계의 3차원 모델링 시 경계조건 설정문제 등이 어려운데, 구조물을 단자유도계로 모델링하고 지반에 대한 모델링은 원통형좌표를 이용한 의사 3차원 유한요소법을 이용하면 매우 편리하다. 비선형 지진해석은 시간영역에서 실시하는 것이 합리적이지만 주파수영역에서 비선형 지반 특성 모델을 이용하여 반복 수치해석으로 구조물-지반 체계에 대한 비선형 해석을 수행하고 관성상호작용에 의한 지반의 비선형 영향도 고려할 수 있다.

한편, 부구조물해석법에서는 구조물과 지반을 분리하여 <그림 9>에서 처럼 지진해석을 3단계로 나눠서 수행하는데, 먼저 1단계에서 무질량 강체기초 저면에서의 지반거동을 파악하고, 2단계에서 기초-지반의 강성을 구한 후 3단계에서 구조물 저면에 등가강성스프링을 연결하여 강성을 부여하고 기초저면에서의 지반운동을 입력하여 지진해석을 수행하기 때문에 구조물-지반 상호작용 영향을 각 영향 요소별로 파악할 수 있고, 각 지진해석 단계에서 중간결과를 평가할 수 있는 장점이 있다. 하지만 구조물과 지반의 비선형성을 고려해야 하는 경우에는 등가강성스프링의 비선형 강성 부여와 입력지진에 지반

의 비선형성을 고려하기가 곤란하기 때문에 비선형 해석에는 어려움이 따른다.

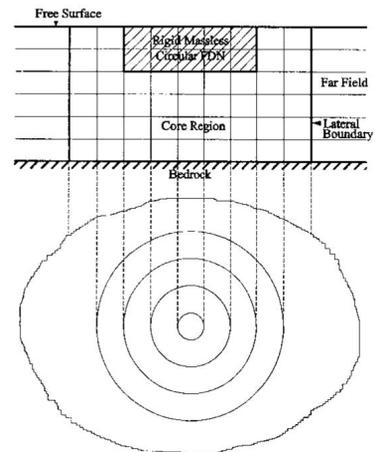


<그림 8> 직접해석법 모델링



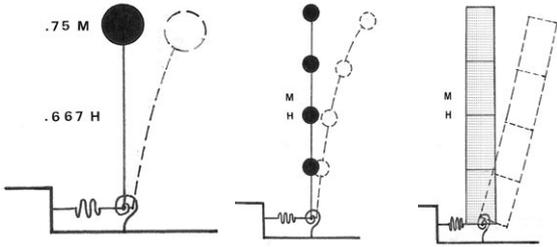
<그림 9> 부구조물해석법 모델링

그런데, 부구조물해석법을 주파수영역 지진해석에서 이용할 경우 지반을 <그림 10>과 같이 원통형좌표를 사용한 의사 3차원 유한요소법으로 모델링하고,<sup>6)</sup> 기초지반에 대한 지진해석으로 주파수에 따른 기초지반의 등가강성과 기초지반의 수평 및 회전 거동을 구하여 건축물의 지진해석을 수행할 수 있다. 따라서, 지반이 비선형인 경우에는 먼저 지반에 대한 비선형 지진해석으로 지반의 비선형 특성을 고려한 기초저면에서 입력지진을 결정하고, 기초에 작용하는 관성력의 크기에 따른 기초지반의 비선형 강성을 결정하여 구조물에 대한 반복적 수치해석을 수행하면 구조물-지반 체계에 대한 비선형 해석도 가능하다.



<그림 10> 의사 3차원 유한요소 모델링

또, 부구조물법에서 건축물은 <그림 11>에 나타난 것처럼 단자유도계, 다자유도계 및 전단보 모델로 모델링할 수 있는데, 단자유도 모델의 경우 질량을 전체 질량의 3/4로 가정하고 건물의 높이는 전체 높이의 2/3 정도로 가정하면 타당하다.<sup>(7)</sup>



<그림 11> 부구조물법 건물 모델링

한편, 구조물의 지진해석에 필요한 지반에 대한 물성치는 다양한 지반과 토질에 대한 시험을 통해서 구할 수 있는 동적 전단탄성계수, 감쇠비, 포인슨비 등이 있는데, 지반의 특성을 나타내는 전단탄성계수(G)는 변형률이 증가하면 점진적으로 감소하는 비선형 특성을 나타내고, 일반적으로 지반에 생기는 변형률은 1% 이하이고 선형 한계변형율은 0.01% 정도이다.<그림 12> 통상 선형 전단탄성계수는 현장에서 동적시험으로 측정하여 결정하고, 비선형 전단탄성계수는 삼축 압축시험으로 결정한다.

지반의 변형률에 따른 비선형 전단탄성계수는 <그림 12>처럼 초기 전단탄성계수( $G_0$ )로 정규화하여 나타내고, 그에 대응하는 감쇠비(D)도 나타낼 수 있다. 감쇠비는 변형률에 따라 점진적으로 증가하지만 저변형률 영역에서 지반의 감쇠비는 전단변형률( $\gamma$ )에 관계없이 최소의 값을 갖는데, 대개 지반의 감쇠비는 5% 정도를 가정한다.

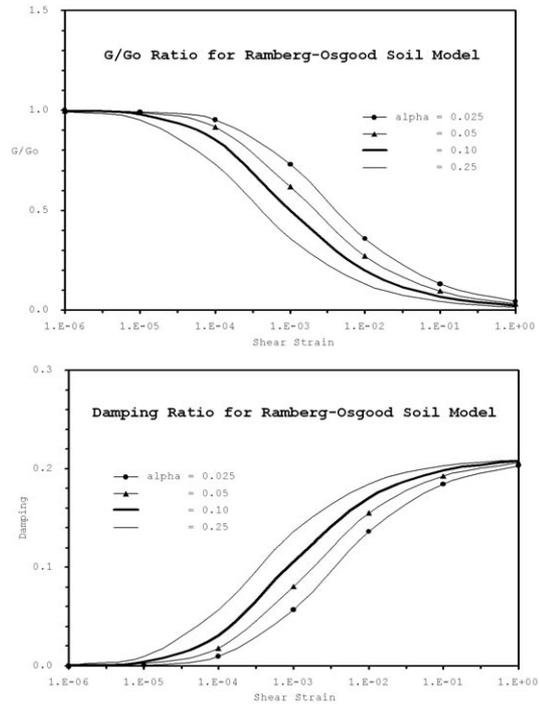
지반의 비선형 응력-변형률을 나타내는 구성방정식 모델로 많이 사용되는 Ramberg-Osgood 모델은 다음 식 (4)처럼 나타낼 수 있다.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{2}{\sqrt{1+4\alpha\frac{\gamma}{\gamma_y}+1}} \quad D = \frac{2}{3\pi} \sqrt{\frac{1+4\alpha\frac{\gamma}{\gamma_y}-1}{1+4\alpha\frac{\gamma}{\gamma_y}+1}} \quad (4)$$

여기서, 지반의 초기전단탄성계수  $G_0$ 는 표준관입시험으로 구한  $N_{60}$ 값으로  $C_s$ 를 계산하여  $G_0 = \rho C_s^2$  관계식으로부터 구할 수도 있다. 또,  $\alpha$ 는 지반 모델계수이고,  $\gamma_y$ 는 대개  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 이지만 지반의 특성에 따라 조금씩 차이가 있는데,  $\alpha$ 의 변화에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 보여주는 Ramberg-Osgood 모델이 <그림 12>에 나타나 있다.

또, 구조물-지반 상호작용 지진해석에서 지반의 층상화는 중요하고 고려 사항이고, 기초의 크기 및 두께와 함께 기초지반의 강성에 영향

을 미치는 중요한 요소이다.



<그림 12> Ramberg-Osgood 모델

### 5.2 기초지반 정적 및 동적 등가강성

기초지반의 정적 및 동적 등가선형강성을 복잡한 지반에 대해서는 유한요소 해석을 수행하여 구할 수도 있지만, 평균적 의미에서 단순화한 균질 지반에 대한 등가선형강성식을 이용하여 강성을 구하고, <그림 13>처럼 구조물의 하부에 등가강성스프링을 부착하여 구조물의 동적해석을 부구조물법으로 간편하게 수행한다.

유한한 깊이의 지반 위에 묻혀 있는 원형기초에 대한 등가정적강성식은 각종 기초지반에 대한 유한요소 수치해석 결과를 최적화한 다음 식 (5)와 같다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} K_b &= \frac{8GR}{2-\nu} \left[ 1 + \frac{2}{3} \frac{E}{R} \right] \left[ 1 + \frac{5}{4} \frac{E}{H} \right] \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H} \right] \\ K_{br} &= K_b R \left[ 0.4 \frac{E}{R} - 0.03 \right] \\ K_r &= \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left[ 1 + 2 \frac{E}{R} \right] \left[ 1 + 0.7 \frac{E}{H} \right] \left[ 1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H} \right] \\ K_v &= \frac{4GR}{1-\nu} \left[ 1 + 1.28 \frac{R}{H} \right] \left[ 1 + 0.47 \frac{E}{R} \right] \left[ 1 + \left( 0.85 - 0.28 \frac{E}{R} \right) \frac{E/H}{1-E/H} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $R$ 은 원형기초 반경,  $E$ 는 기초 근입깊이,  $H$ 는 기초지반 두께,  $G$ 는 지반 전단탄성계수,  $\nu$ 는 지반 Poisson 비이다.

한편, 주파수 영역에서 구조물-지반 체계에 대한 동적해석을 위한 강제원형기초의 기초-지반 상호작용을 고려한 등가동적강성( $K_{dyn}$ )은 등가정적강성( $K_{st}$ )을 이용하여 다음 식 (6)으로 구한다.

$$K_{dyn} = K_{st} [k + i a_0 c] [1 + i 2D] \quad (6)$$

여기서  $a_0$ 는 무차원주파수 ( $= \frac{\omega R}{C_s}$ ),  $\omega$ 는 회전각속도,  $C_s$ 는 전단파속도,  $k$ 는  $k_1, k_2, k_3, k_4$  등가동적강성계수,  $c$ 는  $c_1, c_2, c_3, c_4$  등가동적감쇠계수,  $D$ 는 지반의 재료감쇠비이다.

또, 기초지반의 비선형등가강성도 지반의 비선형 특성모델을 구하면 유사하게 계산할 수 있다.

그리고, 기초지반 강성에 미치는 무리말뚝의 영향에 관한 유한요소 해석 결과에 의하면 수평방향운동의 경우 기초 강성에 비해 무리말뚝 강성이 상대적으로 작기 때문에 구조물 내진거동에 큰 영향이 없는 것으로 나타났고, 수직방향 운동의 경우에는 선단지 지 말뚝 위에 놓인 온통기초가 깊게 문혔을 때는 말뚝이 기초지반강성에 별 영향을 미치지 않지만, 지표면기초일 경우에는 무리말뚝기초 강성이 연약지반 강성에 비해 상대적으로 커 무리말뚝의 영향이 상당한 것으로 나타났다.

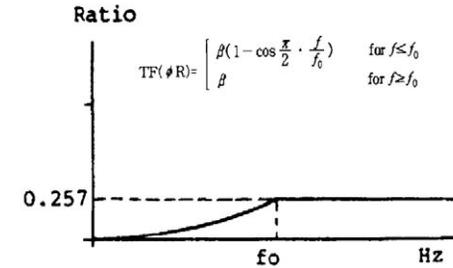
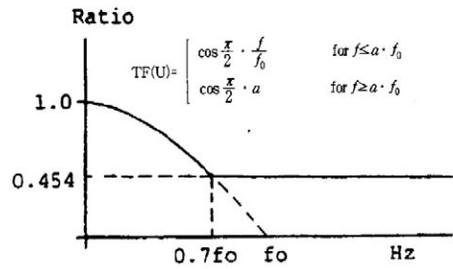
### 5.3 지진해석 입력지반운동

부구조물법에 의한 구조물의 지진해석 시 기초저면에서의 입력지반 운동이 필요한데, 정확한 기초지반거동을 예측하기는 지반과 지진파의 불확실성 때문에 상당히 어렵지만 기초지반에 대한 유한요소해석으로 개략적인 기초지반거동은 구할 수 있다.

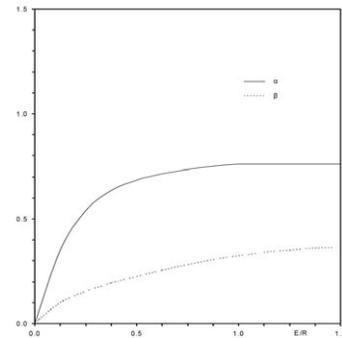
그런데, 기초의 근입깊이가 기초반경의 10%이하인 지표면기초의 경우에는 운동학적 상호작용 영향이 적기 때문에 자유지표면에서의 지반운동을 입력지반운동으로 사용하여도 큰 문제가 없지만, 근입깊이가 큰 문힌 기초의 경우에는 기초저면과 자유지표면에서의 지반운동 차이가 크기 때문에 구조물의 동적거동에도 영향이 크다.

따라서 문힌기초 저면에서 입력지반운동을 자유지표면에서의 지반 운동에 대한 일반적인 변환함수(TF)로 정확한 해석적 방법에 의해 나타내면, 여러 가지 불확실한 문제점들을 일괄적으로 고려할 수 있어 실무적인 측면에서 부구조물법에 의한 지진해석을 매우 용이하게 수행할 수 있다.

매우 단단한 암반 위에 놓인 연약지반에서 수직방향으로 전파되는 지진파의 경우, 기초저면에서의 수평방향 및 회전방향 지반운동 변환함수는 <그림 14>처럼 나타낼 수 있다. 여기서  $\alpha, \beta$ 는 기초반경에 대한 기초 관입깊이비(B/R)에 따른 계수들로 <그림 15>에 나타나 있다.



<그림 14> 수평 및 수직 지반운동 변환함수



<그림 15>  $\alpha, \beta$  계수

또, 비선형 지반의 경우에 지반 깊이에 비해 기초문힘이 매우 큰 경우를 제외하고는 자유지표면에 대한 기초저면에서 지반운동 변환함수가 지반의 비선형 영향을 크게 받지 않는 것으로 계속자료에서 나타났다.

한편, 변환함수를 이용하여 기초저면 지반운동을 구하기 위해서는 지진에 의한 자유지표면에서 지반운동을 알아야 하는데, 지반이 복잡하고 불균질한 경우에는 유한요소법으로 보다 정확하게 구해야 하지만, 지반이 균질한 경우에는 복잡한 유한요소해석 대신에 주파수 영역에서 암반에서 기록된 지진기록을 Fourier변환하여 구한 지진스펙트럼에 식 (7)에서 구한 증폭계수(AF)를 곱하여 자유지표면에서 지반운동스펙트럼을 구한 후 역 Fourier 변환하여 용이하게 구할 수 있다.

$$AF = \frac{2}{e^{\frac{j\omega H}{C_s(1+i2D)}} + e^{-\frac{j\omega H}{C_s(1+i2D)}}} \quad (7)$$

그리고, 지반의 비선형 특성을 고려해야 하는 경우에는 지반에 대한 1차원 다자유도 비선형 지진해석으로 자유지표면에서 지반운동을 구할 수 있고, 평균적 의미에서 지반의 비선형 특성을 알 수 있는 경우에는 식 (7)을 이용할 수도 있다.

## 6. 구조물-지반 상호작용을 고려한 지진해석

구조물-지반 상호작용을 고려한 구조물 지진해석은 앞에서 언급한 것처럼 직접해석법과 부구조물해석법에 의한 방법이 있는데, 직접해석법은 시간영역이나 주파수영역에서 수행할 수 있고, 부구조물해석법은 대개 주파수영역에서 수행한다.

### 6.1 직접해석법에 의한 지진해석

시간 영역 직접해석법은 범용 프로그램을 이용하면 직교좌표계 3-D 지진해석을 수행할 수 있는데, 범용 프로그램을 사용하기 위해서는 지반 특성에 대한 구성방정식이 필요하고 경계조건에 대한 특별한 고려가 필요하며, 비선형 해석 시에는 상당한 수치해석을 위한 계산 시간도 필요하다.

주파수영역 직접해석법은 독립 구조물의 지진해석의 경우 원통형좌표계 의사 3-D 유한요소법을 이용한 프로그램을 이용하는데, 지반 위에 놓인 원통형 기초에 세워진 1자유도에 대한 선형 및 비선형 지진해석을 지반의 선형 및 비선형 특성을 고려하여 한 단계(One-step)에 수행할 수 있으며, 말뚝기초인 경우에도 선형 무리말뚝에 대한 지진해석이 가능하다.

### 6.2 부구조물법에 의한 지진해석

부구조물해석법에 의한 지진해석은 주파수영역에서 유한요소법이나 등가동적강성법으로 수행할 수 있는데, 등가동적강성식이 유한요소법으로 구한 선형 해를 최적화한 식이므로 등가동적강성법은 개략적인 방법이라 할 수 있다.

주파수영역에서 부구조물법에 의한 지진해석은 시간영역 입력지진 하중을 FFT(Fast Fourier Transform)하여 주파수영역 지진하중으로 변환한 후 주파수영역에서 구조물의 지진해석을 수행하고 주파수영역 응답스펙트럼을 IFFT(Inverse FFT)하여 시간영역 응답스펙트럼으로 변환한다.

부구조물법에 의한 구조물에 대한 동적해석은 유한요소법으로 구한 기초-지반 동적강성이나 식 (5)로 구한 동적강성을 사용하여 수행한다. 그런데, 구조물의 지진해석을 3차원 유한요소법으로 수행할 경우에는 수치해석상 지반강성을 기초판 각 절점에 입력해야 하는데 지반의 수평, 수직 강성을 각 절점에 균등하게 분포시키는 것이 합리

적이고 회전강성도 만족시키는 것으로 나타났다.

또, 입력지진이 지반저면이나 지표상 암반에서 기록된 것일 때는 FFT한 입력지진을 식 (7)로 자유 지표면에서 지반거동으로 1차 변환한 후 다시 <그림 14>로 2차 변환하여 기초저면에서 입력지반거동을 구해서 사용해야 한다. 만약 유한요소법으로 기초-지반에 대한 동적해석을 수행할 때는 기초-지반 강성과 함께 암반에 대한 기초저면에서 지반운동의 변환함수를 직접 구할 수도 있다.

주파수영역 지진해석에서는 주파수분석 자체가 선형으로 이루어지기 때문에 실제적인 비선형 지진해석을 수행할 수 없지만, 기초-지반의 강성과 감쇠비에 대한 비선형 특성 모델식이 마련된 경우에는 반복적인 선형해석을 수행하여 유사 비선형 지진해석을 수행할 수 있다.

### 참고문헌

1. X. Yuan, Study on performance-based seismic design of foundations and geotechnical structures, Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium, ISBN 90 2651 852 8, Swets & Zeitlinger, 2001.
2. International Code Council, Inc., International Building Code 2003, 2002.
3. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, California, USA, 1994, pp156-195.
4. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, California, USA, 1997, pp2-9 ~ 2-38.
5. 건설교통부, 내진설계기준 연구(II), 1997.
6. Tyson, T. R. and Kausel, E., "Dynamic Analysis of Axisymmetric Pile Groups," Research Report R80-07, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., 1983, pp67.
7. Felipe Tarquis, "Structural Response and Design Spectra for the 1985 Mexico City Earthquake", Geotechnical Engineering Dissertation GD89-1, Civil Engineering Dept., University of Texas at Austin, pp207, 1988.
8. Roesset, J. M., "A Review of Soil-Structure Interaction," Lawrence Livermore Laboratory, June 1980, pp125.
9. Edgar V. Leyendecker, R. Joe Hunt, Arthur D. Frankel, Kenneth S. Rukstales, Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motions Maps, Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 1, Feb. 2000, pp21-40.
10. R. Dobry, R. D. Borcherdt, C. B. Crouse, I. M. Idriss, W. B. Joyner, G. R. Martin, M. S. Power, E. E. Rinne, R. B. Seed, New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions, Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 1, Feb. 2000, pp41-67.