

II. 설계지반운동 및 토구조물

1. 서언

내진설계는 정적설계방법에 비하여 복잡하게 인식되고 있으나 설계방법의 기본적인 원리는 정적설계방법과 크게 다를 바가 없다. 모든 토목설계의 기본과정과 같이, 토구조물의 내진설계 또한 지진으로 인한 동적하중이 가해질 경우 토구조물에 발생하는 응력과 변형거동을 해석이론을 통하여 분석하고 이들이 토구조물의 강도(특히 전단강도)와 허용변위보다 작도록 구조물의 크기를 결정하는 과정이다. 위의 설계원리에 따르면 내진설계에서는 다음에 대한 사항이 고려되어야 한다.

- 1) 설계지진하중(설계지반운동)
- 2) 내진설계기준(구조물의 동적허용변위에 대한 기준)
- 3) 이론적인 동역학을 바탕으로 한 구조물에 발생하는 응력과 변형을 산정하고 파괴에 대한 안전율을 결정하는 방법

국내의 경우 1978년 규모 5.0의 홍성지진이 발생되어 내진설계에 대한 필요성이 인식되기 시작하였다. 내진설계의 개념은 건축물의 구조기준등에 관한 규칙, 고속철도 설계표준시방서, 도로교표준시방서

등에 도입되어 규정하였다. 그후 일본의 교베지진이 발생후 1997년 건설교통부가 한국지진공학회와 건설기술연구원에 의뢰하여 「내진설계기준연구(II)」를 제정하였으며 1998년 해양수산부와 한국지진공학회가 공동으로 「항만 및 어항시설의 내진설계표준서」를 제정하였다. 본 강좌는 설계지반운동과 토구조물에 대하여 국내에서 현재까지 적용할 수 있는 기준에 대하여 위의 두기준을 중심으로 다루고자 한다.

2. 설계지반운동

2.1 국내내진설계기준 (설계성능목표)

일반적으로 토구조물의 설계에 있어서 구조물의 허용변위는 설계의 기준이 된다. 허용변위는 토구조물의 안정과 구조물로서의 기능을 만족시키는 범위에서 결정되어 있다. 지진에 의한 토구조물의 허용변위를 정확히 결정하기는 대단히 어려우나 국내의 경우 두가지 형태로 분류하고 이를 설계성능수준이라 정의한다. 토구조물의 설계성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 분류한다. 기능수행수준은 구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진이나 지진 정파 후에도 구조물의 기능은 정상적으로 유지될 수 있는 성능수준을 의미한다. 붕괴방지수준은 구조물에 제한적인 구조적 피해는 발생하나 긴급보수를 통해 단시간에 구조물로서의 기능이 발휘될 수 있는 수준을 의미한다. 표 2.1은 토구조물의 설계성능수준에 따라 적용되는 지진의 평균재현주기를 나

*1 정희원, 연세대학교 토목공학과, 교수

*2 정희원, 서울산업대학교 토목공학과, 교수

*3 정희원, 연세대학교 토목공학과, BK21 박사후연구원

*4 정희원, (주)현대건설 기술연구소, 부장

타낸 것이다. 예로서 항만 벽체구조물의 경우 내진 1 등급 구조물에 대하여 기능수행수준의 허용변위는 10cm, 그리고 붕괴방지수준의 허용변위는 30cm로 설정하고 있다. 이러한 설계지반운동에 대한 기능수행수준 및 붕괴방지수준의 거동한계에 관한 규정은 다음과 같다.

(1) 기능수행수준

- ① 토구조물이나 벽체구조물은 구조물의 부분적인 항복과 영구변형을 허용할 수 있으나, 주변 구조물 및 부속시설들이 탄성 또는 탄성에 준하는 거동을 할 정도의 영구변형만이 허용되도록 하여야 한다.
- ② 말뚝구조물은 지진시 그 주변지반의 소성거동은 허용할 수 있으나 말뚝구조물 자체와 그 위에 놓여 있는 모든 구조물 및 부속시설이 탄성 또는 탄성에 준하는 거동을 하여야 한다.
- ③ 토구조물내의 지반에는 과도한 변형이 발생하여서는 안되며 액상화로 인하여 토구조물의 상부구조물이 기능수행에 지장이 초래되어서는 안된다.

(2) 붕괴방지수준

- ① 토구조물의 구조적 손상은 경미한 수준으로 제한되어야 하며, 토구조물의 영구변형으로 인하여 주변 구조물 및 부속시설들이 탄성한계를 초과하는 소성거동을하는 것은 허용되나 취성과 파괴나 좌굴이 발생하여서는 안된다.
- ② 말뚝구조물은 지진하중 작용시 탄성한계를 초과하는 소성거동을하는 것을 허용할 수 있으나 이로 인하여 말뚝구조물 자체나 상부 구조물에 취성과파괴가 유발되어서는 안된다.
- ③ 토구조물내의 지반에는 과도한 변형이 발생하여서는 안되며 액상화로 인하여 토구조물의 상부구조물이 수리불능의 피해를 입어서는 안된다.

표 21 지반운동 수준

성능목표	1등급	2등급
기능수행	평균재현주기 100년	평균재현주기 50년
붕괴방지	평균재현주기 1000년	평균재현주기 500년

2.2 국내설계지반운동 (설계지진하중)

기반암에서 발생된 지진이 지반에 전달되어 토구조물에 하중으로 작용하여 구조물에 응력과 변형을 발생시킨다. 내진설계에 있어서 설계에 사용될 지진 규모와 형태 그리고 지진이 구조물에 전달되는 과정에서 지반의 거동을 지역과 지반의 종류에 따라 결정하여야 하는데 이를 설계지반운동이라 정의한다. 실제로 지진의 발생규모와 형태를 예측하는 것은 불가능하므로 설계지반운동은 내진설계방법에 따라 적용한다. 내진설계방법은 크게 유사정적해석법과 동적해석법이 있으며 동적해석에는 응답스펙트럼법과 시간이력해석법이 있다. 설계지반운동은 각 해석 방법에 따라, 즉 유사정적해석법의 경우 설계지진계수, 응답스펙트럼법의 경우 설계응답 스펙트럼, 그리고 시간이력해석법의 경우 설계가속도 시간 이력을 적용한다.

구체적인 적용방법은 다음 장에서 설명되며 본 장에서는 토구조물에 대한 내진설계에 적용되는 설계지진하중의 결정방법에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 설계지반운동 결정시 고려하여야 할 사항을 서술하고 설계지진계수를 정의한다. 지진하중은 지반의 성질에 따라 변하므로 지반을 분류하고, 그에 따른 설계응답스펙트럼을 결정한다. 최종적으로 설계응답스펙트럼에 준하는 가속도 시간이력을 기술한다.

2.2.1 설계지진하중의 결정시 고려사항

지진 발생시 구조물의 변형에 영향을 주는 지반거동의 주요 요소는 그림 2.1에서 보는 바와 같이 지진의 강도, 주파수 특성, 그리고 강진 지속시간 등이다. 기반암에 발생된 지진파는 지표면으로 전달되는 동안 단층의 진행, 진행경로 그리고 국부적인 지반상태에 따라 달라진다. 내진설계에 있어서 이러한 요소

들은 구조물의 거동을 결정짓는 중요한 역할을 한다.

실제로 복잡한 지반진동의 기록을 이용하여 구조물을 설계하기는 쉬운 일이 아니다. 그래서 많은 내진설계방법에서는 간략하게 지진의 강도인 최대가속도만을 이용하고 있다. 그러나 이러한 하나의 요소만으로는 구조물에 영향을 미치는 지반진동의 전체적인 에너지를 표현하기에는 불충분하다. 이러한 이유로 평균 (root-mean-square) 가속도 또는 주기범위에서의 스펙트럼 크기를 이용하여 지진의 진동에너지를 표현하게 된다. 지반진동의 주파수 특성은 Fourier 스펙트럼 또는 좀 더 일반적인 경우 응답스펙트럼을 이용하여 특징지을 수 있다. 강진시에 비탄성거동을 보이는 구조물의 경우 지반진동의 지속시간은 특히 중요한 요소로 작용한다.

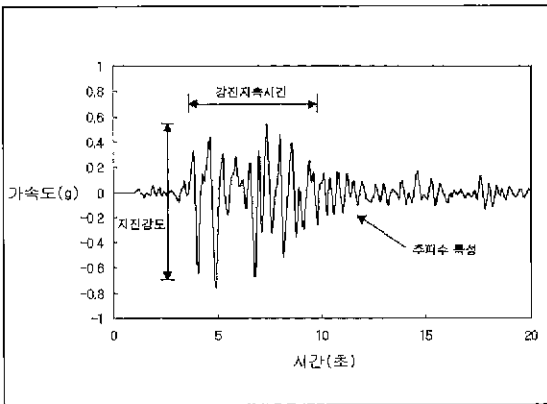


그림 2.1 구조물에 영향을 미치는 지반진동요소

전술한 바와 같은 지반운동의 특징을 반영하기 위하여 설계지반운동은 다음과 같은 사항을 고려하여 결정한다.

- (1) 설계지반운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- (2) 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다.
- (3) 기본적인 지진재해도는 보통암 지반을 기준으로 평가한다.

(4) 설계지반운동은 흔들림의 세기, 주파수 내용 및 지속시간의 세 가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다.

(5) 설계지반운동은 수평 2축 방향과, 수직방향 성분으로 정의된다.

(6) 설계지반운동의 수평 2축 방향 성분은 세기와 특성이 동일하다고 가정할 수 있다.

(7) 설계지반운동의 수직방향 성분의 세기는 수평 방향 성분의 3분의 2로 가정할 수 있고, 주파수 내용과 지속시간은 수평방향 성분과 동일하다고 가정할 수 있다.

2.2.2 설계지진계수

설계지진계수는 지진에 의한 지반진동의 강도를 나타낸 설계가속도를 의미한다. 건설교통부 발간의 「내진설계기준연구(Ⅱ)」에서는 내진설계를 위한 설계지진계수를 결정하는 방법을 2가지로 규정하고 있다.

(1) 지진재해도를 이용하는 방법

19세기까지 우리나라의 역사지진과 최근의 계기 지진기록에 대한 확률해석을 통해 평균재현주기별 지진재해도를 이용하여 설계지진계수를 결정할 수 있도록 하였다. 그러나 지진재해도 상의 지진계수는 보통암을 대상으로 한 것이므로 지표면의 지진계수로서 사용하기 위해서는 지진응답해석을 수행하여야 한다.

(2) 내진성능목표와 지진구역에 따라 결정하는 방법

지진발생지역을 분류하여 지역에 따른 적용가속도 값인 지진구역계수를 결정한다. 그리고 내진성능목표에 따라 우선적으로 구조물의 기능 및 중요도를 고려하여 내진성능수준과 시설물 등급을 정하고 지진의 재현주기에 따라 위험도계수를 규정한다. 결정된 지진구역계수(표2.3)에 위험도계수(표2.4)를 곱하여 기반암(보통암)에서의 지진가속도를 결정한다. 지반의 영향을 고려한 지표에서의 설계지진계수는 지진

계수(표2.6)에 위험도계수(표2.4)를 곱하여 구한다.

즉, 설계지진계수 = 지진구역계수(또는 지진계수)×위험도계수

2.2.3 지진구역계수

지진구역계수는 지진재해도에서 분류된 지역을 간편히 하여 남한지역을 지진의 발생빈도를 기준으로 하여 크게 두 구역으로 구분한다. 분류된 지진구역은 표2.2와 같으며 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수 Z는 표 2.3에 수록된 바와 같이 구역 I에서는 0.11, 구역 II에서는 0.07 이다.

표 2.2 지진구역의 구분

지진구역	
I	시 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도 경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	도 강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

- ※ 강원도 북부(군, 시): 홍천, 철원, 화천, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
- 강원도 남부(군, 시): 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
- 전라남도 북부(군, 시): 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
- 전라남도 남부(군, 시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포

표 2.3 지진 구역 계수 (재현주기 500년에 해당)

지진 구역	II	
구역 계수, Z(g<math>g</math>)	0.11	0.07

지진구역계수는 구분된 각 지진구역별로 평균재현

주기 500년을 기준으로 결정된 값이다.

2.2.4 위험도 계수

위험도 계수는 평균재현주기 500년을 기준으로 한 지진구역계수를 표 2.1의 지반운동수준에 따라 보정하기 위한 계수이다, 즉 위험도계수는 평균재현주기 별 최대유효지반가속도의 비를 의미하며 표 2.4와 같다. 위험도 계수를 이용함으로써 다른 재현주기에 서의 설계지반운동수준을 결정할 수 있다.

표 2.4 위험도 계수

재현주기(년)	50년	100년	200년	500년	1000년	2400년
위험도 계수, I	0.4	0.57	0.73	1.00	1.40	2.0

전술한 바와 같은 기준에 의하여 설계지반운동수준은 각 지역의 구역계수와 재현주기에 따른 위험도 계수를 고려하여 결정하도록 한다. 다만 좀 더 정확한 설계지반운동수준을 원할 경우에는 「내진설계기준연구(II)」에서 제시하고 있는 지진재해도를 이용할 수 있다.

2.2.5 지반의 종류에 따른 지진계수

지진에 의한 지반운동은 지반의 특성에 따라 달라 지므로 지반의 특성을 반영할 수 있도록 하기 위하여 지반을 분류하여 그에 따른 지진계수를 정의한다. 국 지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 다음의 표 2.5와 같이 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F의 6종으로 분류한다. 여기서 지반종류 S_F는 부지의 특성 조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반에 해당한다.

- (1) 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay 와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- (2) 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반 (지층의 두께, H >3 m)

- (3) 매우 높은 소성을 가진 점토지반 ($H > 7$ m 이고 $PI > 75$)
- (4) 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토($H > 35$ m)

표 2.5 지반의 분류

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m 에 대한 평균 지반 특성		
		진단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N} (\bar{N}_{60})$ (blow/foot)	비배수점단강도 S_u
SA	경암지반	1500초과	-	-
Sb	보통암지반	760에서 1500	-	-
Sc	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
Sd	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
Se	연약한 토사지반	180미만	< 1	< 50
Sf	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

「항만 및 어항시설의 내진설계표준서」에 따르면 항만구조물인 경우 지반종류 S_E 와 S_F 의 경우에는 지진응답해석을 통하여 지진계수를 결정할 수 있음을 언급하고 있다.

각 지진구역별로 지반종류에 따른 지진계수는 표 2.6과 같으며 이에 내진등급과 성능수준에 따른 위험율을 곱한 지표면에서의 설계수평지진계수(k_h)를 구해보면 다음의 표 2.7과 같다. 결정된 설계수평지진계수는 동가정적해석시 수평력을 결정하는데 사용하며, 가속도 시간이력을 사용한 동적해석시 최대가속도로서 사용한다.

표 2.6 지반종류별 지진구역에 따른 지진계수

지반종류	지진구역	
	I	II
SA	0.09	0.05
Sb	0.11	0.07
Sc	0.13	0.08
Sd	0.16	0.11
Se	0.22	0.17

표 2.7 지반종류별 설계수평지진계수(k_h)

지반종류	지진구역	설계수평지진계수			
		1등급		2등급	
		가능수행	붕괴방지	가능수행	붕괴방지
SA	I	0.05	0.13	0.04	0.09
	II	0.03	0.07	0.02	0.05
Sb	I	0.06	0.15	0.04	0.11
	II	0.04	0.10	0.03	0.07
Sc	I	0.07	0.18	0.05	0.13
	II	0.05	0.11	0.03	0.08
Sd	I	0.09	0.22	0.06	0.16
	II	0.06	0.15	0.04	0.11
Se	I	0.13	0.31	0.09	0.22
	II	0.10	0.24	0.07	0.17

2.3 설계응답스펙트럼을 통한 스펙트럼가속도의 결정

지역적인 특성과 지반성질을 고려한 설계지반운동의 특성은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다. 기반암에서의 지진파가 지반을 통하여 증폭되어 구조물에 전달될 때 지반과 구조물의 운동을 단자유도계(Single Degree of Freedom System)로 가정할 수 있다. 응답스펙트럼이란 단자유도계 운동을 하는 지반과 구조물의 최대응답변위, 최대응답속도 및 최대응답가속도를 구조물의 고유주기와 감쇠비에 따라 해석하여 나타낸 것이다. 설계응답스펙트럼은 설계지진에 대한 시간과 가속도의 이력으로 1차 자유도 운동방정식으로부터 구할 수 있으나, 지반별로 표준화한 표준설계응답스펙트럼을 사용할 수 있다. 그림 2.2는 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼을 표시하고 있다. 표 2.8과 2.9는 지반종류별과 지진구역별 지진계수 C_a 와 C_v 를 나타내고 있다. 필요시 설계지진파를 통하여 구조물의 구조특성을 고려하여 작성된 설계응답스펙트럼으로 그림 2.2에 주어진 표준설계응답스펙트럼을 대신할 수 있다. 이때 설계응답스펙트럼은 그림 2.2에 주어진 표준설계응답스펙

트럼보다 안전측이어야 한다. 또한 대안으로 제시된 설계응답스펙트럼이 그림 2.2에 주어진 표준설계응답스펙트럼보다도 합리적임을 입증한다면, 표준설계응답스펙트럼보다도 비 안전측인 설계응답스펙트럼을 사용할 수 있다.

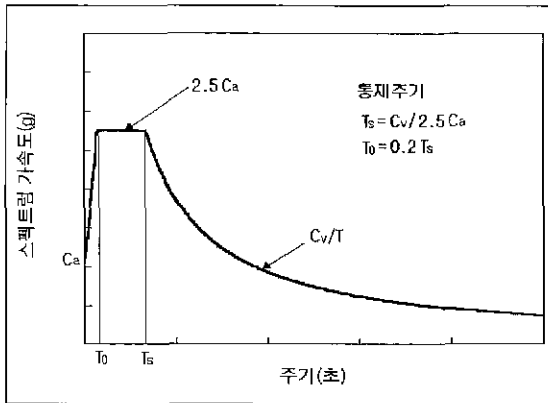


그림 2.2 표준 설계응답스펙트럼

표 2.8 지진계수Ca

지반종류	지진구역	
	I	II
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.13	0.08
SD	0.16	0.11
SE	0.22	0.17

표 2.9 지진계수Cv

지반종류	지진구역	
	I	II
SA	0.09	0.05
SB	0.11	0.07
SC	0.18	0.11
SD	0.23	0.16
SE	0.37	0.23

2.4 설계가속도 시간이력

동적해석을 위한 가속도 시간이력은 내진설계를

하고자 하는 지점부근에서 관측한 지진기록을 이용하는 것이 가장 적합하다. 그러나 국내의 경우는 사용할 수 있는 지진기록이 거의 없는 상태이므로 외국의 기록을 이용하여 해당 부지의 특성에 맞게 수정하여 사용할 수 밖에 없다. 이렇게 인공적으로 지진기록을 생성시키는 방법은 여러 가지가 있으나 크게 분류하여 보면 1) 실제의 지반거동기록을 수정하는 방법, 2) 시간영역에서 생성시키는 방법, 3) 주파수 영역에서 생성시키는 방법, 그리고 4) Green 함수를 이용하는 방법 등이 있다. 이들 중에서 널리 쓰이는 방법은 기존의 지진기록을 수정하는 방법과 시간영역에서 인공적으로 생성시키는 방법이다. 내진설계 기준연구(II)에서는 설계 가속도 시간이력과 인공 가속도 시간이력의 기본사항을 아래와 같이 정의하고 이에따라 결정하도록 하였다.

<설계 가속도 시간이력의 요건>

- 1) 지반가속도 또는 속도나 변위의 시간이력으로 지반운동이 표현될 수 있다.
- 2) 공간적인 모형이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분으로 구성되어야 한다.
- 3) 부지에서 계측된 시간이력이 사용되는 것이 원칙이나, 필요시에는 대상부지에서 기대되는 시간이력과 유사하다고 판단되는 다른 지역에서 계측된 가속도 시간이력 또는 인공 가속도 시간이력이 사용될 수 있다.

<인공 가속도 시간이력의 요건>

- 1) 인공가속도 시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다.
- 2) 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 중요하게 영향을 미친다고 판단될 경우에는 지진원의 발전기구 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다.
- 3) 인공가속도의 지속시간은 지진의 규모와 발전기구특성 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이

미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.

내진설계에 사용하기 위한 실 지진기록을 선택할 때에는 장주기 성분과 단주기 성분이 우세한 지진 모두를 고려할 수 있도록 선택하여야 한다. 설계자는 해당지역의 특성과 설계강도를 고려하여 여러 지진 기록중에서 필요로 하는 지진기록을 선택해야 한다. 실 지진기록의 예로써 향만의 내진설계시 사용할 수 있는 실제의 지진기록으로는 Tokachi-oki(1968)와 Miyagi-ken-oki(1978) 지진발생시 Hachinohe항과 Ofunato항에서 조사된 가속도 시간이력등을 들 수 있다. 상기의 지진기록은 일본에서 향만구조물의 내진설계에 가장 많이 이용되는 기록이다. 이들 각 지진의 제원 및 가속도 시간이력 곡선은 표 2.10, 그림 2.3 그리고 그림 2.4와 같다.

(지진기록은 서울대학교 지진공학연구센터의 홈페이지 (keerc.snu.ac.kr/keerc.html)와 websoil 홈페이지(www.websoil.co.kr)의 기술자료실을 통하여 지진기록을 구할 수 있음)

표 2.10 실 지진기록의 예

지진형태	제 원	지진규모	최대가속도
Hachinohe	1968년 3월 16일에 Tokachi 앞바다에서 발생	7.9	0.170 g
Ofunato	1978년 6월 12일에 Miyagi 현의 앞바다에서 발생	7.4	0.161 g

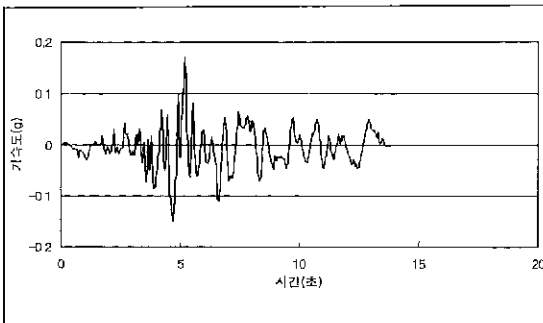


그림 2.3 Hachinohe 지진기록

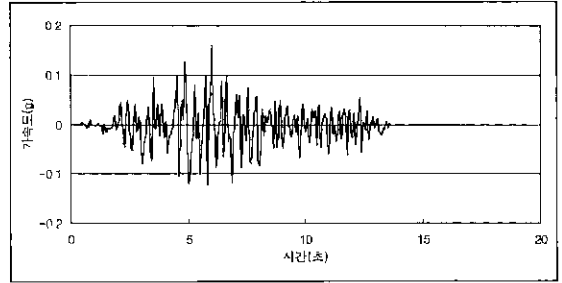


그림 2.4 Ofunato 지진기록

내진설계시 위에서 언급한 지진기록과 같은 실제의 기록을 이용하여 동적해석에 사용할 수 있다. 그러나 대부분의 토구조물 설계시 시공하고자 하는 지역의 실제 지진기록이 존재하지 않는 상황에서 타 지역에서의 지진기록만으로 설계를 하는 것은 무리가 있다. 따라서 해당 부지의 지역적인 특성을 반영하는 인공적인 지진기록을 작성하여 내진설계에 반영하는 것이 필요하다. 범용 인공지진 생성 프로그램을 이용

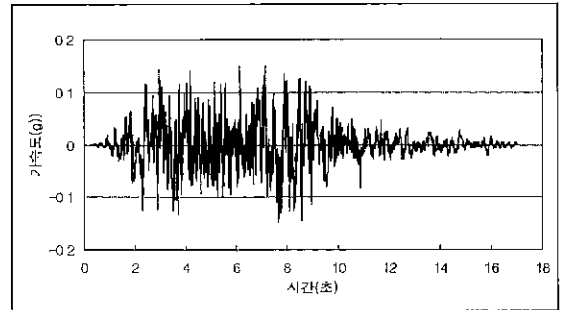


그림 2.5 인공지진의 가속도 시간이력 예(0.15g)

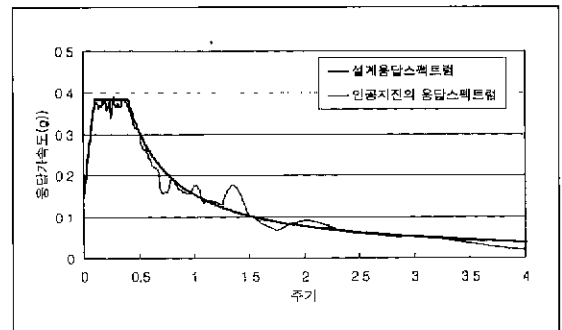


그림 2.6 인공지진의 응답스펙트럼과 실제응답스펙트럼과의 비교

하여 인공적으로 만들어진 지진의 가속도시간이력을 그림 2.5에 예시하였다. 그림 2.6은 인공지진의 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼과 비교한 것으로 두 개의 응답스펙트럼이 잘 부합함을 알 수 있다. 그의 설계가속도 시간이력의 상세기준은 해당 토목공사 내진설계기준에 따라 작성할 수 있다.

3. 토구조물 설계방법

일반적으로 내진 설계시 토구조물은 흙구조물(기초구조물 포함)과 벽체구조물(중력식 및 널말뚝식 구조물)로 나누어 볼 수 있다. 본 장에서는 토구조물의 내진해석에 사용되는 등가정적해석 및 동적해석법에 대하여 개념적차원에서 정리 하였다. 우선 흙구조물과 벽체구조물 내진설계시 요구사항은 다음과 같다.

표 3.1 흙구조물의 내진등급별, 성능수준별 내진설계방법

내진등급	내진성능수준	해석방법	설계기준
1등급	붕괴방지수준	등가정적방법	안전율
	기능수행수준	(필요시 동적해석방법)	
2등급	붕괴방지수준	등가정적방법	안전율

표 3.2 벽체구조물의 내진등급별, 성능수준별 내진설계방법

내진등급	내진성능수준	해석방법	설계기준
1등급	붕괴방지수준	등가정적해석법	안전율
		동적해석법	허용변위
	기능수행수준	동적해석법	허용변위
2등급	붕괴방지수준	등가정적해석법	안전율

흙구조물은 내진설계에서는 표 3.1과 같이 기본적으로 등가정적해석을 이용할 것을 국내외 시방기준에서 권장하고 있다. 일반적인 경우는 흙구조물의 내진성능수준 및 내진등급은 상부구조물의 기준을 따라가며, 흙구조물 자체의 내진설계 및 해석시에는 표 3.1의 기준을 참고 할 수 있다. 또한 「항만 및 어항시설의 내진설계표준서」의 기준을 정리하면, 벽체구조물에 대해서도 표 3.2에 정리된 구조물의 내진등급별 설계방법 및 설계기준을 적용할 수 있다.

3.1 등가정적해석

등가정적해석 방법은 지진에 의하여 발생하는 지진력을 수직 또는 수평하중으로 간주하여 구조물에 재하하여 정적해석을 수행하는 방법이다. 이러한 방법에서는 설계지진계수의 선정이 중요하다. 수평지진력은 지진계수를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_h = \alpha k_h mg \quad (3.1)$$

여기서 F_h 는 수평방향 지진력, α 는 구조물의 설계시 변위허용 여부에 따른 계수 (변위가 허용되지 않는 경우 $\alpha=1.5$ 그리고 변위를 허용하는 경우 $\alpha=0.5$), k_h 는 설계수평지진계수, m 은 질량 그리고 g 는 중력가속도이다. 설계수평지진계수 k_h 는 표2.7에서 제시한 값을 이용할 수 있다. 식 (3.1)에서 mg 는 이 질량이 갖는 중량이므로 지진력은 중량에 지진계수를 곱하여 구한다. 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 연직 방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다.

3.1.1 벽체구조물

벽체구조물의 등가정적해석에 있어서 가장 중요한 설계요소는 벽체에 작용하는 토압의 산정이다. Mononobe-Okabe는 지진발생시 벽체에 작용하는 전체토압을 Coulomb 토압에 지진에 의한 관성력을 고려하여 산정하였다. 구체적인 토압공식의 일반적으로 많이 알려져 있으므로 본 강좌에서는 간단한 식으로 정리하며, 벽체구조물의 내진설계시 고려해야 할 토압과 작용점, 수평지진계수 및 안전율에 대하여 주로 요약하고자 한다.

내진 1 2등급 벽체구조물에 대한 설계는 붕괴방지수준에 대한 등가정적해석법을 사용한다.

(1) 해석방법

지진에 의하여 벽체에 작용하는 주동토압을 Mononobe-Okabe의 개념도로 나타내면 그림 3.1과 같으며 전체주동토압 P_{AD} 은 아래와 같다.

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{AE} \quad (3.2)$$

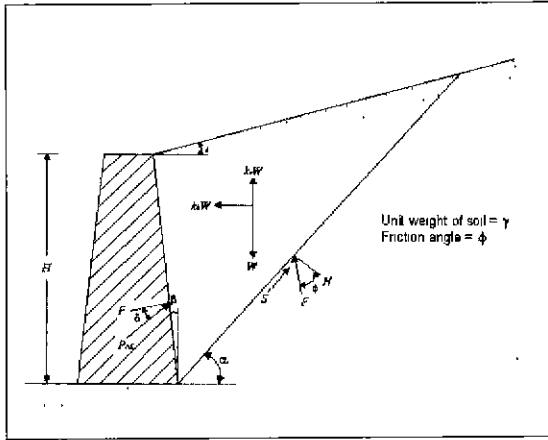


그림 3.1 Mononobe-Okabe방법의 개념도

위 식에서 K_{AE} 는 정하중과 지진의 영향을 고려한 주동토압계수로서 식(3.3)과 같다.

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left(1 + \frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}{\cos(\delta + \beta) \cos(i + \beta)} \right)^2} \quad (3.3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{k_h}{1 - k_v} \quad (3.4)$$

여기서, k_h 는 설계수평지진계수 그리고 k_v 는 설계 수직지진계수이다.

전체주동토압 P_{AE} 와 작용점 \bar{H} 는 다음의 순서로 구할 수 있다.

- ① P_A (Coulomb의 정적주동토압) 및 그 작용점 $Y_A = \frac{1}{3}H$ 를 계산한다.
- ② P_{AE} 를 계산한다(식 3.2).
- ③ 동토압 $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_A$ 및 그 작용점 $Y_{\Delta AE} = 0.6H$ 를 계산한다.
- ④ P_{AE} 의 작용점 \bar{H} 를 아래식 (3.5)를 이용하여 산정한다.

$$\bar{H} = \frac{(P_A)(H/3) + (\Delta P_{AE})(0.6H)}{P_{AE}} \quad (3.5)$$

- ⑤ 벽체 뒤체움 부분의 지하수에 대한 정수압만을 고려한다(지하수에 대한 동수압은 고려하지 않음). 단 항만구조물의 경우 전면의 물에 대한 동수압은 고려한다.
- ⑥ 수평지진계수는 표 2.7의 값을 참고하거나, P_{AE} 가 작용하는 위치까지의 지진증폭해석을 통한 최대가속도값(a_{MAX})을 산정하여 사용할 수 있다. 중력식 벽체구조물일 경우는 $\alpha = 1$ 이며, 널말뚝식 벽체구조물은 $\alpha = 0.5$ 를 사용한다.

(2) 설계요구사항

우선, 정적 설계요구사항을 만족시켜야 하며, 각 내진설계 등급별로 다음의 설계기준을 만족시켜야 한다.

1) 내진 2등급

- 등가정적해석법을 이용한 설계방법을 적용하여 붕괴방지수준에 대하여 내진설계를 수행할 것을 권장한다.
- 벽체구조물은 활동과피, 전도과피, 지지력과피 및 전체활동과피에 대하여 안전하여야 하며 이때 허용안전율은 1.1로 한다.
- 특별한 경우, 벽체가 변위에 민감한 상부구조물을 지탱할 경우 상부구조물의 허용변위를 따른다. 이때, 벽체구조물은 활동에 대하여 불안정해도 전도, 지지력, 전체 활동에 대하여 안전하여야 하며 이때 허용안전율은 1.2로 한다.

2) 내진 1등급

- 내진 1등급 구조물의 경우에는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대하여 경제성을 기초로한 내진성능 수준을 정하여 내진설계를 할 수 있다.
- 동적해석시의 설계허용변위는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대하여 10cm와 30cm로 설정한다. 다만, 벽체가 변위에 민감한 상부구조물을 지탱할 경우 상부구조물의 허용변위를 따른다.

- 등가정적해석법시의 안전율은 1.1로 한다.
- 벽체구조물 주변의 지반에 대하여 액상화가능성 평가는 반드시 수행하며, 액상화 가능성이 있는 경우에는 벽체구조물의 안전성에 영향을 미치는 지반영역에서 액상화가 발생하지 않도록 지반개량을 실시하여야 한다.

3.1.2 사면

내진 1 2등급 사면구조물에 대한 설계는 등가정적 해석법을 사용한다. 또한 내진설계시 붕괴방지수준에 대한 설계만을 하여도 내진설계가 만족한다.

(1) 해석방법

사면안정에 대한 안전율 산정법은 원호파괴면에 적용할 수 있는 Bishop 간편법, 일반형상의 파괴면에 적용할 수 있는 Janbu 간편법, 원호와 일반형상의 파괴면에 적용할 수 있는 Spencer 절편법 등이 있다. 절편법에서의 등가해석방법은 절편에 식(3.1)과 같은 지진으로 인한 수평력을 첨가하여 저항모멘트와 활동모멘트를 계산하므로써 활동파괴에 대한 안전율 식(3.6)을 산정한다. 그림 3.2는 본 이론의 개념적 정리를 위하여 도식하였다.

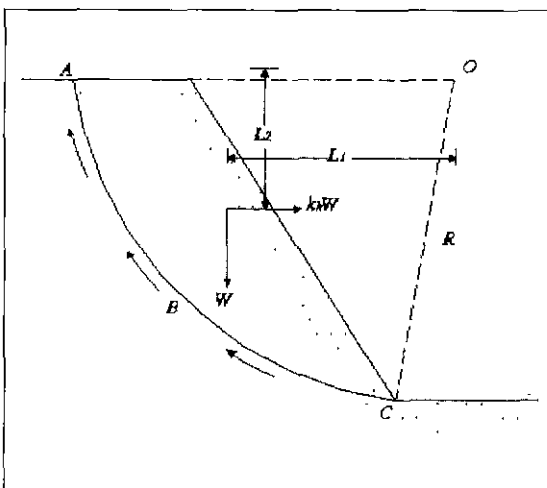


그림 3.2 등가정적 사면안정해석

$$F_s = \frac{\text{0점에 대한 저항모멘트}}{\text{0점에 대한 활동모멘트}} = \frac{s(ABC)R}{WL_1 + k_h WL_2} \quad (3.6)$$

상용프로그램 PCSTABL5M은 일반적으로 널리 사용되는 사면해석 프로그램으로 임의적인 가상파괴면에 대하여 안전율을 결정한다. PCSTABL5M의 입력자료 중 지진하중은 다음과 같이 고려한다. Equake 명령어를 사용하고, 그 아래 수평방향가속에 대한 지진계수, 수직방향가속에 대한 지진계수, 공동압력(cavitation pressure)을 차례로 작성한다. 단, 변위를 허용하는 경우, 설계 지진력은 설계 수평 지진계수의 50%(즉 $\alpha = 0.5$) 수준을 사용한다.

(2) 설계요구사항

- 정적설계기준을 만족하여야 한다.
- 1등급의 구조물인 경우는 액상화에 대해서 안전하여야 한다.
- 구조물을 포함하여 가정된 파괴형상의 도심에 설계지진하중을 작용시킨다.
- 등가정적해석에 기초하여 내진설계를 수행한다.
- 설계지진하중 산정시 설계지진하중은 설계 수평지진계수의 50%(즉 $\alpha = 0.5$)수준으로 산정한다.
- 설계지진하중의 작용점은 구조물을 포함하여 가정된 파괴형상의 도심에 설계지진하중을 작용시킨다.
- 허용안전율은 활동에 대한 허용안전율 1.0으로 한다.

3.1.3 기타 구조물

기타 지중 BOX 구조물의 경우 벽체구조물에 준하여 설계할 수 있다. 또한 말뚝기초를 가진 구조물의 경우 지진에 의해 발생하는 설계수평하중은 상부 구조물의 중량에 수평지진계수를 곱하여 구한다. 이때 구조물의 수평방향 지진계수는 구조물의 주기에

따라 표준 설계응답스펙트럼 (그림 2.2)을 통하여 구할 수 있다.

3.2 동적해석방법

3.2.1 응답스펙트럼법

응답스펙트럼 해석방법은 단자유도계(Single Degree of Freedom System)에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답을 구하는 방법이다. 응답스펙트럼 해석법은 시간이력응답 해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 근사적인 방법이지만 대형구조물이거나 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 동적특성을 비교적 잘 파악할 수 있다. 현재 대부분의 구조물에 대한 지진해석은 응답스펙트럼 해석법에 의하여 수행되고 있다.

3.2.2 시간이력해석법

동적해석법은 해석시 모형이 복잡하고, 시간이 오래걸리는 단점이 있지만, 다양한 수치해석 모델의 적용이 가능하고 지진파의 시간이력 특성을 고려한 변형 해석이 가능하므로 중요구조물인 1등급 구조물에서는 동적해석이 수행되어야 한다. 입력지진으로 장주기 및 단주기 특성을 포함한 2개 이상의 실 지진기록과 인공가속도 시간이력을 사용하여야 한다. 인공가속도 시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합하는 가속도를 생성하여 사용하여야 하며, 상업용 프로그램을 이용할 것을 권장한다.

동적해석시 기반암 상부의 모든 지반과 구조물을 모델링하여 해석하거나 기반암에서 기초지반까지는 1차원 동적응답해석을 수행한 후 기초지반 상부를 모델링하여 해석할 수 있다. 지반의 모델은 지반재료의 투수성을 고려하여 적용한다. 투수성이 좋은 지반이라도, 지진시 지반내의 간극수압 증가와 액상화 현상이 예상되는 경우에는, 간극수압의 증가에 따른 유효응력 감소 및 액상화 이후의 거동을 평가할 수 있는 모델이 적용되어야 한다.

기초구조물에서 독자적인 동적해석이 필요한 경우는 말뚝기초에서 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려하는 경우이며 이때에는 동적해석방법중에서 지반가속도-시간이력관계 해석법을 이용한다. 그러나, 일반적인 경우에는 지반-말뚝 상호작용을 고려하지 않는 쪽이 더 보수적인 결과를 주기 때문에 특수한 상황에서에서만 동적해석이 필요하다.

지반-구조물 상호작용을 해석하는 동적해석방법에는 부분구조법(substructure method), 집중질량해석법(lumped mass method) 그리고 직접법(direct method)이 있다. 부분구조법은 전체해석영역을 구조물과 지반영역의 2가지 부분구조로 모델링하거나, 구조물 영역, 구조물에 인접한 영역 그리고 반무한 지반영역의 3가지 부분구조로 분리시켜 모델링한 후 영역의 경계 조건들을 만족시키도록 결합시켜 해석하는 방법이다. 2가지 부분구조로 모델링하는 대표적인 방법은 impedance해석법이 있으며, 3가지 부분구조로 모델링하는 대표적인 방법은 hybrid해석법이 있다. 이 방법은 중첩법을 적용해야 하므로, 선형해석 또는 등가선형해석에 한정되어 있다. 집중질량해석법은 비선형적으로 거동하는 말뚝기초에 대해 사용할 수 있는 방법으로 스프링(spring)과 감쇠기(dashpot)로 지반의 장성과 감쇠특성을 고려해주는 방법이다. 직접법은 지반-기초-구조물의 전체 시스템을 한꺼번에 모형화하여 해석을 수행하는 방법이다. 직접법으로 해석을 수행하기 위해서는 미리 산출한 자유장(free-field) 운동을 전체 시스템의 경계에 외부하중으로 입력해야 한다.

토구조물 및 말뚝기초의 내진해석에 현재 이용 가능한 상용 프로그램은 다음과 같다.

■FLAC Ver. 3.3

FLAC은 현재 널리 이용되고 있는 범용 유한차분 해석 프로그램으로서 보, 케이블, 말뚝 요소 그리고 셀 요소로 구조물을 모형화할 수 있으며, modified

cam-clay 모형, bilinear strain-hardening/softening 모형 등과 같은 기존의 구성모형뿐 아니라 액상화 거동예측을 위한 모형도 있다. FLAC Ver. 3.3 부터 동적해석이 추가되었으며, 여러가지 해석조건을 고려한 동적해석을 수행할 수 있다.

■Pentagon

Pentagon은 최근에 널리 사용되고 있는 유한요소 해석 프로그램으로서 윈도우 환경하에서 편리한 입·출력을 지원한다. 적용분야는 터널 해석, 침투류 해석, 토류벽 해석, 지하 가설 구조물 해석, 탄소성 유한 요소법을 적용하는 지반 해석, 범용 구조 해석, 그리고 이방성을 고려하는 슬래브 교량 해석 등이다

■SMAP

SMAP은 multi-phase 비선형 유한요소해석 프로그램으로 전응력해석과 유효응력해석을 수행할 수 있으며, 정해석, 압밀해석 그리고 동적해석이 가능하다. 동해석을 위하여 전달경계를 설정할 수 있으며, 동하중으로는 폭발하중, 초기속도, 그리고 속도, 가속도 시간이력 등을 고려할 수 있다. 동하중 해석기법으로는 implicit 방법이나 explicit 방법을 선택할 수 있다.

■SASSI

등가선형 유한요소해석법을 이용한 3차원 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램으로서 등가선형 물성치를 가진 수평한 지층에서 임의의 입력지진 하중을 받는 구조물의 지반-구조물 상호작용을 해석할 수 있다. 부분 구조법을 적용하여 구조물 영역과 구조물이 제거된 지반영역을 모형화하여 결합한다.

■FLUSH

지반-구조물 상호작용 해석시 널리 사용되어온 2차원 등가선형 유한요소해석 프로그램으로서 평면변형률 4각형 요소를 사용하여 지반과 구조물을 모형화하며, 등가선형해석방법을 이용하므로 각 요소별로 다른 감쇠특성을 지정할 수 있다. 그리고 자유장

운동을 구현하기 위해 전달경계(transmitting boundaries)를 적용하여 필요한 요소의 수를 감소시켰으며, 프로그램 내부에 지반응답해석 루틴이 포함되어 있다.

■HASSI

구조물과 인접 지반은 3차원 유한요소로 모형화하고, 자유장 지반의 거동은 해석적 방법으로 구하는 hybrid 방법을 사용한 프로그램이다. 임의의 입력지진 하중을 자유장에서 작용하는 기초의 입력운동으로 고려하고, 다층의 등가선형적인 특성을 지닌 지반에서의 파의 분산 효과를 고려할 수 있다.

■CLASSI

경계요소방법을 사용하여 지반-구조물 상호작용을 해석하는 프로그램이다. 일반적인 3차원 구조물 모형의 경우에는 부분 구조법을 사용하고, 수평 지반의 기초-지반의 저항 계산에는 경계요소방법을 사용한다. 그러나, 현재로서는 지표면 위에 놓이거나 지반에 얇게 근입된 강성기초와 연성기초에만 적용할 수 있으며 말뚝기초는 해석할 수 없다.

위에 언급한 프로그램이외에도 아래의 인터넷주소를 통하여 다양한 동해석 프로그램의 정보를 알아보고 구매할 수 있다.

(http://www.eerc.berkeley.edu/software_and_data/eng_soft/index.html)

4. 참고사항

본 강좌의 내용 중 참고할 사항들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 지진력에 의한 동수압은 고려하지 않는다.
- (2) 정적 설계시 고려하는 모든 사항은 등가정적해석시에도 그대로 적용된다.
- (3) 실제 토구조물은 연약지반 위에 대규모 치환을 통해 축조되는 경우가 많으므로 이 면을 중심으로 한 비원호활동파괴 여부도 검토하기를 권장한다.
- (4) 본 강좌에 언급한 안전율은 모든 내진해석에

적용되는 안전율이 아니며, 각 내진 시방기준에 준하여 적용하도록 한다.

참고문헌

1. 건설부, (1988), "건축물의 구조기준등에 관한 규칙".
2. 고속철도 사업기획단, (1991), "고속철도 설계표준시방서"
3. 건설교통부, (1992), "도로표준시방서".
4. 건설교통부, (1997), "내진설계기준연구(Ⅱ)"
5. 해양수산부, (1999), "항만 및 어항시설의 내진설계표준서".
6. 해운항만청, (1993), "항만시설물설계기준서".
7. 건설교통부, (1996), "도로표준시방서".
8. 사단법인 한국지반공학회, (1997), "진동 및 내진설계", 도서출판 구미서관.
9. EUROCODE8, (1996), "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structure", CEN, .
10. American Society of Civil Engineers, (1998), "Seismic Guidelines for Ports, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12".
11. Port and Harbour Research Institute, (1997), "Handbook Liquefaction Remediation of Reclaimed Land", A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.
12. Itasca Consulting Group, (1995), "Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 3.3", Minesota, USA.
13. Lysmer, J. et al, SASSI. (1981), "A System for Analysis of Soil-Structure Interaction," Report UCB/GT81-02, University of California, Berkeley.
14. Lysmer, J. et al, (1975), "FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," EERC-UCB Report 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
15. Das, B. M., (1984), "Principial of Foundation Engineering". PWS-KENT, Boston.
16. Gasparini, D. A., and Vanmarke, E. H., (1976), "SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation," Dept. of Civil Engineering, Messachusetts Institute of Technology, 1976.
17. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B., (1972), "SHAKE: A Computer Program for Earthquake response of horizontally Layered Sites," Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, p.88.

도서 판매 안내

1. '94 봄 학술발표회 논문집 / 5,000원
2. '94 가을 학술발표회 논문집 / 10,000원
3. 지반공학시리즈 2 - 얇은 기초(구) / 5,000원
4. '94 발표 폴리스티렌(BPS) 이용 성토공법 / 10,000원
5. 한 일 합동 세미나 논문집 / 5,000원
6. '97 가을 학술발표회 논문집 / 10,000원
7. 제11차 ARC 개최전 초청강연 논문집 :
Dr. R.H.G Parry, Prof. A.S. Bala / 10,000원
8. 단기강좌Ⅱ : Ground Improvement Using
Prefabricated Vertical Drains / 10,000원
9. '98 가을 학술발표회 논문집 / 15,000원
10. '98 토목섬유(위) 학술발표회 논문집 / 10,000원
11. 광관말뚝의 설계와 시공가이드 / 5,000원
12. '99 지반조사(위) 학술발표회 논문집 / 5,000원
13. 김상규 교수 퇴임기념 심포지엄 논문집 / 10,000원
14. '99 토목섬유(위) 학술발표회 논문집 / 10,000원
15. '00 정보화 시공(위) 학술세미나 / 10,000원
16. '00지반조사(위) 물리탐사 특별세미나 논문집 / 15,000원

**** 무료로 드립니다. ****

● 지반공학 관련업체 소개서

● '98가을학술발표회Ⅱ

※ 우편 발송시 우송료는 본인 부담입니다.

한국주택은행 (예금주 : 한국지반공학회)

534637-01-000160