

Tunnelling Technology

국내 지중구조물 내진설계 정리



박인준
한서대학교 토목공학과
교수

1. 서론

원자력 발전소, 대담 그리고 가스터미널 등과 같이 붕괴시 엄청난 인명 및 재산 피해를 줄 수 있는 구조물들을 제외하고는 1980년대 말까지도 국내에서는 내진설계개념을 토목구조물 설계 시 사용하지 않았다. 그러나 1978년 규모 5.0의 홍성지진이 발생되어 지진에 대한 인식이 높아지기 시작하였으며, 특히 1995년 1월 17일 규모 7.2의 “Hyogoken Nanbu” 대지진이 일본 고베지역을 강타하고 난 후, 제반 구조물의 내진에 대한 연구가 국내에서도 활성화되고 있는 추세이다.

최근 한반도 주변의 지진활동이 증가하고 있으며 우리나라의 경우 강원도 영월 지진 등 실제적인 인명손실과 재산 피해를 일으킬 가능성이 있는 지진(지진규모 4.0이상)의 발생 빈도가 증가하고 있다(표 1). 이러한 지

진 빈도의 증가에 따라 사회 기간시설의 내진설계 요구가 높아지고 있다.

지진피해의 규모는 사회 전반의 지진에 관한 준비 태세와 내진 설계기술의 발달 정도에 많이 좌우되므로 국내의 실정에 맞는 시설물별 내진설계 기준의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 도로, 철도, 항만, 교량, 댐, 상수도시설물, 지중구조물(유류저장소, 지하공동구, 장대터널)등은 시민 생활과 필수불가결한 기본적인 시설로서 다른 사회 기반시설과의 상호 의존성이 높을 뿐 아니라 피해 복구가 빨리 이루어지지 않을 경우 사회 경제 시스템의 기능이 장시간 마비될 수 있다.

위에서 언급한 사회 기반시설물 중 내진설계 대상 지중구조물에는 매설관로처럼 작은 구조물로 부터 지하철역처럼 대규모 시설물까지 포함된다. 또한 터널처럼 구조형태가 선상(線狀)인 것도 있고, 주차장처럼 박스형인

표 1. 지진규모 4.0 이상의 우리나라 주요 계기관측 지진 목록(1905~2007)

지진명	발생일	규모(M)	진도(JMA) / 기사
쌍계사지진	1936. 7. 4	5.1	쌍계사(V)/부상 : 4명, 가옥파괴 : 113동
홍성지진	1978. 10. 7	5.0	홍성(V)/부상 : 2명, 건물파괴 : 118동, 성곽 파손 : 90m
영흥도지진(해역)	1985. 6. 25	4.0	인천 남서 약 30km/인천(Ⅲ)
울산지진(해역)	1994. 4. 22	4.6	경남 울산 남동쪽 약 175km해역/울산, 포항, 경주, 부산(Ⅲ)
백령도지진(해역)	1995. 7. 24	4.2	백령도 서쪽 약 70km해역/서울, 경기서부(Ⅲ)
영월지진	1996. 12. 13	4.5	영월 동쪽 약 80km해역/영월(Ⅳ), 전국감지(Ⅰ-Ⅲ)
경주지진	1997. 6. 26	4.2	경주 남동쪽 9km/경주(Ⅳ), 포항-대구-부산(Ⅲ)
속초지진(해역)	1999. 1. 11	4.2	속초 북동쪽 약 15km해역/속초-간성(Ⅳ), 양양-고성(Ⅲ)
울진지진(해역)	2004.5.29	5.3	울진군 동쪽 80km 해역
월정사지진	2007.1.20	4.9	강릉시 서남쪽 약 29km/전국감지(Ⅰ-Ⅲ)

것도 있다. 더 나아가서는 용도, 시공법, 단면형상까지도 포함하면 매우 세부적으로 분류해야한다. 본 기사에서는 국내 지중구조물 중 터널 및 지하공동구 시설물을 중심으로 내진설계 방법에 대해서 정리하도록 하였다. 또한 건설지점에 발생 가능한 액상화현상에 대해서 간이평가 및 상세평가방법을 정리함으로써 지하구조물 내진설계를 하고자 하는 현장 실무자들에게 폭넓은 이해를 제공하고자 한다.

2. 지중구조물 내진설계 개념

지중구조물 내진설계를 위해서는 대상지반에 동적특성값을 입력한 후 설계성능수준에 따른 내진성능목표에 적합한 인공 및 실지진하중을 외력으로 하여 구조물의 등급에 맞는 수치해석을 수행하여 구조물의 안정성을 검토를 먼저 수행한다. 내진해석 수행에 필수적인 사항은 아래와 같다.

- 내진성능 목표 및 내진등급
- 동적 지반정수산정
- 설계지반운동
- 내진해석방법(등가정적법, 응답변위법, 동적해석법)

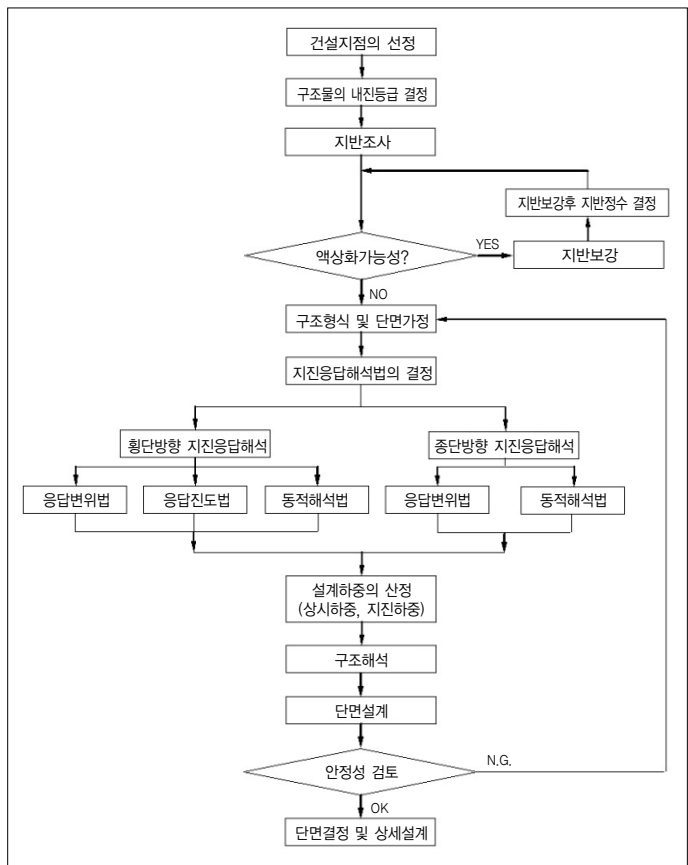


그림 1. 지중구조물 내진설계 절차

국내 지중구조물 내진설계 정리

본 기사에서 다룰 지중구조물 내진해석 및 설계방법은 국내·외에 이미 널리 소개된 보편적인 이론 및 방법이며, 본 기사에서 소개하고 있는 지중구조물 내진해석 방법이 유일한 방법이라고 말할 수 없다. 단지 여러 내진해석 방법 중의 하나라고 말할 수 있다. 지중구조물 내진설계 시 설계자의 이해를 돕기 위하여 「지하공동구 내진설계 기준」(건설교통부, 2004)의 내진설계 절차를 유용하여 그림 1과 같이 개념도를 정리하였다.

본 기사에서는 지중구조물(터널 및 지하공동구) 내진설계 중 다음 사항을 중심으로 정리하였다.

- ① 시설물별 내진등급
- ② 시설물별 내진성능목표
- ③ 내진해석 방법

내진해석 방법은 3장에 응답변위법과 동적해석법을 중심으로 정리하였으며, 액상화 평가방법에 대해서 간단하게 4장에 정리하였다. 좀 더 자세한 해석 방법은 참고문헌을 통해서 학습할 것을 권한다. 동적 지반정수산정 및 설계지반운동결정은 내진설계시 보편화 되어있기 때문에 본 기사에서는 다루지 않으며, 「내진설계기준연구 II」(건설교통부, 1997) 또는 여러 참고도서를 통해서 이 부분의 지식을 획득할 수 있을 것이다.

2.1 터널 내진설계

2.1.1 터널 내진설계기준의 기본개념

본 내진설계 기준은 다음의 기본개념에 기초를 두고 있다.

- (1) 지진시 터널의 기능이 마비됨으로 인한 사회적 간섭피해 및 재산피해를 최소화한다.
- (2) 지진시 터널의 부분적인 피해는 허용하나 내부시설물의 피해는 방지하여 터널의 기본 기능은 발휘할 수 있게 한다.

2.1.2 설계의 일반사항

터널은 지중구조물의 대표적인 구조물로서 지진에 의한 동적특성은 지반 속에서의 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하기 때문에 지상 구조물과는 상이한 내진설계를 실시하여야 한다.

- ① 내진설계는 일반하중에 대하여 기 설계된 시설물에 대해 내진 안전성을 검토하고, 필요한 경우 단면 및 세부 설계 내용을 수정, 보완하는 방법으로 수행한다.
- ② 터널의 내진에 대하여서는 각 공종 별 형태 및 지반의 특성, 지진파의 형태와 터널방향에 따른 터널의 변형 양상에 따라 지진의 영향이 클 것으로 예상되는 대표구조물 혹은 대표단면에 적용함으로써, 전 구간에 대한 내진안전성을 평가할 수 있다.

(1) 터널의 내진등급

터널 내진등급결정에 있어서 파괴시 심각한 인명피해를 유발할 가능성이 높은 것으로 판정되는 터널과 활성 단층대와 인접지역에 한하여 내진 1등급을 적용하도록 한다. 터널 내진설계는 표 2에 규정된 내진등급별 평균 재현주기를 갖는 설계 지진에 대하여 실시하여야 한다.

표 2. 터널의 내진등급과 재현 주기

내진등급	터널	평균재현주기
내진1등급	<ul style="list-style-type: none"> • 고속도로 및 지하철 터널 • 고속도로, 특별시도로, 광역시 도로 또는 일반국도(왕복4차로이상)상의 터널 • 지방도, 시도 및 군도 중 지역의 방재 및 국방계획상 필요한 도로상에 건설된 터널 • 내진1등급으로 건설되는 구조물에 영향을 줄 수 있는 터널 	1000년
내진2등급	<ul style="list-style-type: none"> • 내진 1등급에 속하지 않는 터널 	500년

표 3. 지진구역구분 및 지진구역계수(평균재현주기 500년 지진을 기준)

지진구역	지진구역 계수, Z	행정구역	
		시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주
I	0.11g	도	경기, 강원 남부, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남 북동부
II	0.07g	도	강원 북부, 전남 남서부, 제주

(2) 터널의 내진설계 거동한계

- ① 터널 내부의 구조적 손상은 경미한 수준으로 제한되어야 하며 터널 라이닝 변형이 탄성한계를 초과하는 소성거동은 허용되나 취성파괴나 좌굴이 발생하여서는 안된다.
- ② 터널내의 기초지반의 과도한 침하가 발생하여서는 안된다.
- ③ 액상화로 인하여 터널구조체가 수리불능의 피해를 입어서는 안된다.

(3) 터널의 내진설계 대상지역 및 구조물

- ① 지반이 취약한 터널의 갱구부 및 주요접속부
- ② 대규모 단층대 및 파쇄대 통과 구간
- ③ 개착식 천층터널 및 비대칭 지형구간
- ④ 액상화가 우려되는 연약지반 내 터널 구간 등

(4) 터널 내진설계방법

- 터널 내진설계 절차는 각호와 같은 주요 절차를 따른다.
 - ① 터널 설치구간의 중요도에 따른 내진등급결정
 - ② 건설지점의 지반조사 및 액상화가능성 평가
 - ③ 등급에 따른 내진안정성 해석법 결정
 - ④ 설계지진계수의 산정
 - ⑤ 내진 안정성 검토
 - ⑥ 단면설계
- 터널의 내진설계에 필요한 지반물성은 제반 동적 지반조사 및 실내시험 결과와 기존자료를 종합적으로 분석하여 선정한다.

표 4. 위험도계수 I(평균재현주기 500년 지진을 기준)

재현주기(년)	500	1000
위험도 계수, I	1.00	1.40

- 지진입력의 기준점이 되는 기반면은 건설지점에 대한 지반조사 결과를 이용하여 터널의 바닥면 보다 깊은 위치에 정한다.
- 기반면은 상부 30m에 대한 평균 전단파속도가 760m/sec(2,500ft/sec)이상인 견고한 암반으로 하는 것을 원칙으로 하되, 기반면이 터널위치보다 상당히 깊어 발달되어 있을 경우는 지반종류에 대한 표준설계 응답스펙트럼을 이용하여 사용할 수 있다.
- 터널건설지점의 지진재해도와 지진 재현주기에 따른 지진지역계수(Z)와 위험도계수(I)는 표 3 및 표 4를 따른다.

(5) 내진해석법

- ① 터널은 그 내공부를 포함한 단위체적중량이 주변 지반의 단위체적중량에 비교하여 일반적으로 가벼우므로 주변지반에 발생하는 변위, 변형 등이 중요하게 되어 응답변위법을 적용하는 것이 적절하다.
- ② 내진 1등급 동적해석법에서의 입력지진파는 건설지점, 지반특성, 구조물의 고유주기 등을 고려하여 유추한 인공 지진이력곡선을 적용한다.
- ③ 내진 1등급의 설계시 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석방법을 사용하여 설계한다.
- ④ 내진 2등급의 설계시에는 선형해석법을 이용하여 설계할 수 있다.

(6) 터널 내진설계시 주의사항

- ① 콘크리트 라이닝에 대하여 지진력에 저항하도록 두께를 증가시키는 것은 지진력을 증대시키는 역효과를 가져올 수 있으므로 콘크리트 라이닝의 두께를 증가시키는 대신에 철근을 넣어 인성을 증가시키도록 하여야 한다.
- ② 기둥단면의 내진설계는 지진에 의한 수평력에 의하여 기둥단면의 압축파괴나 전단파괴, 휨인장 파괴가 발생하지 않도록 보장하는 것으로, 압축파괴나 전단파괴보다 휨인장 파괴가 먼저 발생하도록 설계하여야 한다.
- ③ 갱구부에 대하여는 표토의 활동붕괴를 방지하기 위하여 입구부의 깎기면에 적절한 기울기를 확보하여 도류공을 설치하여야 한다.
- ④ 신축 이음부는 터널의 이음부에 강성이 작은 이음장치를 설치하여 구조물에 작용하는 지진력을 감소시킬 수 있도록 하여야 하며 강성이 작은 이음장

치의 설치에 따른 구조적인 약점에 대해서도 검토하여야 한다.

- ⑤ 액상화 방지에 대하여는 지반개량을 통하여 지반 액상화를 방지 및 억제시키도록 하여야 한다.

2.2 지하공동구 내진설계

2.2.1 지하공동구 내진설계기준의 기본개념

본 설계기준은 다음의 기본개념에 기초를 두고 있다.

- (1) 지진시 구조물의 기능이 마비됨으로 인한 사회적 간접피해 및 재산피해를 최소화한다.
- (2) 지진시 구조물의 부분적인 피해는 허용하나 내부 시설물의 피해는 방지한다.
- (3) 지진시 가능한 한 지하공동구의 기본 기능은 발휘할 수 있게 한다.
- (4) 인명 피해를 최소화한다.

2.2.2 설계일반사항

(1) 지하공동구의 내진등급

구조물의 중요도, 인명 피해 여부 및 피해규모 정도를 기준으로 하여 내진 1등급으로 규정한다. 다만, 폭발성 물질을 보관하는 건축물이나 시설물과 방송국 등과 같은 내진 특등급에 해당하는 건축물의 기능에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상되는 지하공동구의 경우에는 내

표 5. 지하공동구 내진성능목표

재현주기	성능수준	기능수행수준	붕괴방지수준
100년		내진1등급	
200년		내진특등급	
1000년			내진1등급
2400년			내진특등급

표 6. 지하공동구 설계거동한계

피해구분	피해 세부사항	
	기능수행수준	붕괴방지수준
허용되는 피해	<ul style="list-style-type: none"> • 시설물의 미세한 균열 • 미세한 지반침하 • 구조물의 미세한 변형 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설물의 미세한 균열 • 미세한 지반침하 • 구조물의 미세한 변형 • 전체 구조물의 안전에 관계없는 2차부재의 파괴
허용되지 않는 피해	<ul style="list-style-type: none"> • 허용변위를 초과하는 변위 • 과잉간극수압에 의한 액상화 • 편토압에 의한 시설물의 절대위치 변화 	<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 내부의 수용시설에 대한 피해 • 과잉간극 수압에 의한 액상화 • 지반침하에 의한 주변 시설물의 붕괴나 과도한 침하

진특등급으로 규정할 수 있다.

(2) 지하공동구의 내진성능목표

가스·석유, 상수도, 전력·통신 등의 수송기능을 유지하는 한도에서의 부분적인 피해를 허용하는 기능수행 수준과, 내부시설물이 그 기능을 상실하더라도 신속하고 경제적인 보수가 가능하도록 허용하는 붕괴방지수준의 두 가지 성능수준을 확보하도록 한다. 표 5는 재현주기에 따른 지하공동구의 내진등급 및 내진성능수준을 나타낸 것이다.

(3) 지하공동구의 설계거동한계

지하공동구가 보유해야하는 내진성능은 피해를 입은 지역의 사회적 경제적 영향 등을 종합적으로 감안하여 결정되어지며, 성능수준에 따른 지하공동구의 설계거동의 한계는 표 6과 같다.

(4) 내진 해석법

지하공동구의 내진해석은 설계단면의 횡단방향과 종단방향에 대해 각각 수행되어야 한다. 단면 방향별 적용 가능한 해석방법은 표 7과 같다.

박스단면인 경우 표 7의 해석방법 중 설계결과와 보수성과 설계자의 편리성을 고려하여 응답변위법을 적용함을 원칙으로 한다. 단, 설계자의 판단에 따라 응답변위법보다 정밀한 해석방법(응답진도법 또는 동적해석법)을 적용할 수 있다. 응답변위법을 적용할 경우 3장의 이론 및 참고도서를 참조한다.

표 7. 지하공동구의 내진해석법

내진해석 단면	내진해석법	지진입력 성분
횡단방향	응답변위법	수평성분
	응답진도법	
	동적해석법	
종단방향	응답변위법	수평 및 수직성분
	동적해석법	

(5) 내부시설물별 내진설계기준

지하공동구의 내부시설물 종류에 따른 설계기준은 지하공동구의 구조물 특성상 지하공동구의 내진성능수준이 지하공동구 내부에 포함되어 있는 내부시설물의 내진성능수준을 만족시키므로 별도로 규정하지 않는다. 다만, 지하공동구 내부에 지하공동구보다 강화된 내진설계를 요하는 특수 시설이 포함될 경우에는 그 내부시설물에 준하는 설계기준을 따라야 한다.

3. 지중구조물 내진해석 방법

3.1 응답변위법

그림 2는 응답변위법의 개념을 보여주는 것으로 응답변위법에서 고려해야 하는 하중은 자연지반 변위에 의한 하중, 자연상태에서 구조물 주변 지반에 발생하는 전단력 및 구체의 관성력 등이 있다.

응답변위법에서는 그림 3과 같이 지반-구조물계를 구조물 주위의 지반반력계수로 지지되는 구조 모델로 치환하고 지반반력계수를 통하여 자연지반의 변위를 작용시키면서 자연지반의 구조물 위치에서 발생하는 전단력을 구조물에 작용시킨다. 여기서, K_H , K_V 는 수평 및 수직방향 지반반력계수이고, K_{SS} , K_{SB} 는 측벽 및 상하판의 전단 지반반력계수이다.

(1) 기반면의 결정

응답변위법을 사용한 내진해석에서 사용되는 기반면이란, 그 이상의 깊이에서 지반의 물성변화가 적고, 해석 대상 구조물의 하부에 걸쳐 넓게 존재하는 지반으로 강성이 충분히 높은 암반을 의미한다. 우리나라는 대부분의 지역특성을 고려하여 내진설계기준연구II(건설교통부, 1997)의 지반 종류 중에서 S_B 에 해당하는 전단파 속도 760m/sec인 지반으로 정한다. 그러나, 지하구조

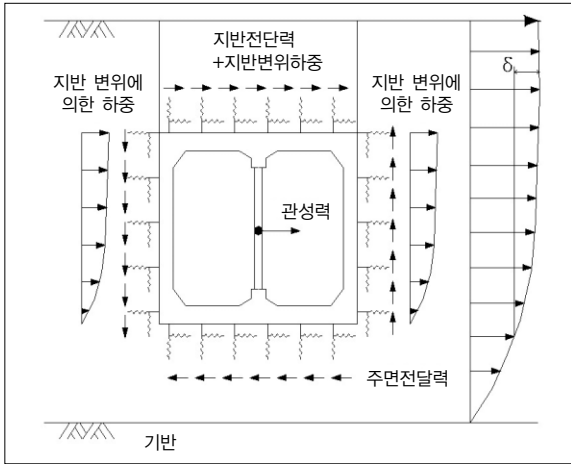


그림 2. 응답변위법의 개념도

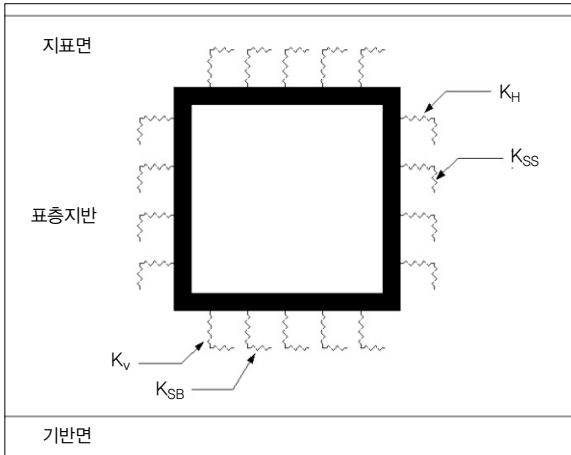


그림 3. 구조물의 모델링

물은 대부분 이와 같은 지반 중에 위치하게 되므로 물성 변화가 적고 해석대상 구조물의 아래면에 걸쳐 넓게 존재하는 지반으로 충분히 강성이 큰 암반과의 경계면을 기판면으로 간주하는 것이 바람직하다.

(2) 지반반력계수의 산정

응답변위법에 의한 내진해석에서는 지진시 지반반력계수를 정확히 산출할 필요가 있다. 지진시 지반반력계

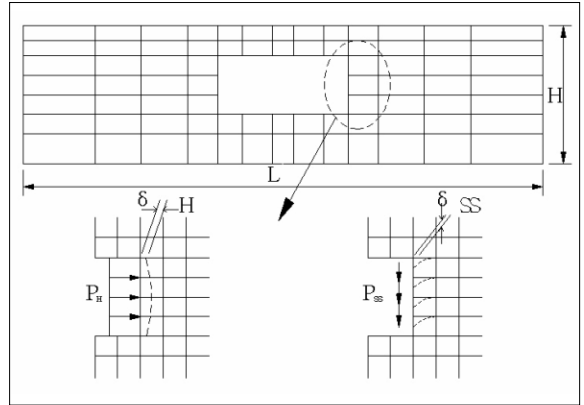


그림 4. 지반반력계수 산정을 위한 유한요소 모델

수를 작게 산정하여 사용할 경우에는 지진의 영향을 과소 평가하는 결과가 얻어지기 때문이다. 지진시 지반반력계수의 산출에는 몇가지 방법이 있는데, 지중 구조물의 경우에는 도로교 설계기준(하부구조편)을 이용하여 구하는 방법과 2차원 유한요소 모델을 작성하여 단위하중을 작용시켜 구하는 방법이 있다. 어느 경우이든 지반의 동역학적 성질이 지진의 세기에 영향을 받으므로 각 지반특성에 적합한 지반반력계수를 적용하는 것이 바람직하다. 도로교 설계기준(하부구조편)을 이용하여 지반반력계수를 산정하는 것은 해당 도서를 참고하길 바란다.

유한요소법을 이용하여 지반반력계수를 산정하는 것은 단위하중을 작용시켜 정적인 해석을 하는 것으로 도로교 설계기준보다 지반의 조건을 효율적으로 고려할 수 있는 장점이 있으나, 시간이 걸리는 단점이 있다. 지진시 지반반력계수를 구하기 위하여 그림 4와 같이 공동지반의 2차원 유한요소 모델을 작성하고 구하고자 하는 지반반력계수 방향으로 단위하중을 작용시켜 그 방향의 하중과 변위의 관계에서 지반반력계수 값을 산출한다.

이 때 주의할 점은 측방의 경계와 구조물 측벽과의 거리를 충분히 확보하지 않으면 지반반력계수를 구할 때 경계의 영향을 받게 되므로 유한요소해석 모델의 경계

는 구조물 측벽에서 충분한 거리를 이격하여 모델링 하도록 한다. 또한 지반을 모델화 할때 적용하는 지반의 물성값은 동탄성계수와 동포아송비를 이용한다.

(3) 지반변위의 산정

응답변위법에서 사용되는 지반의 수평변위량의 연직방향 분포는 표층지반의 특성을 고려하여 산정할 필요가 있다. 지층구성이 복잡하고 지반의 증폭특성이 복잡한 지반이나 지진시에 지반의 특성이 크게 변화하는 지반의 경우와 같이 상세한 검토를 필요로 하는 지반에는 지진응답해석을 통하여 구하는 것이 좋다. 그러나 상세한 검토가 필요하지 않다고 판단되는 경우 즉, 표층지반의 지층구성이 크게 변화하지 않아서 전단탄성과 속도가 불규칙하게 변화하지 않는 경우에는 표층지반을 단일층 혹은 이중층으로 나누고 각각의 평균 전단탄성과 속도로부터 표층지반의 고유주기를 구하고 이를 이용하여 지반변위의 연직방향 분포를 구해도 된다. 지반을 단일층으로 가정하여 지중변위를 구하는 방법은 식(3.1)을 이용한다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi} \cdot S_V \cdot T_s \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (3.1)$$

여기서,

S_V = 지표층(기반암 상부토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반암 설계 속도응답스펙트럼(m/sec)

T_s = $\Sigma(4H_i / V_{si})$ 지반의 1차 고유주기(sec)

H = 표층지반의 두께(m)

H_i = i 번째 토층의 두께(m)

V_{si} = i 번째 토층의 전단파 속도(m)

z = 지표면으로부터 깊이(m)

(4) 구조물에 작용하는 지진하중

구조물에 작용하는 지진하중으로는 지반변위에 의한 하중으로 구조물 상판에 작용하는 하중 P_o 와 지진시 측

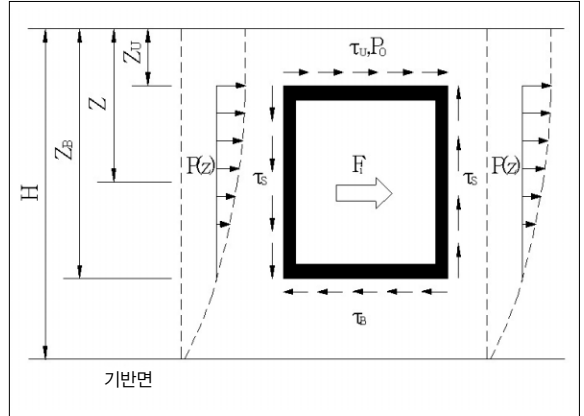


그림 5. 구조물에 작용하는 하중

벽토압 $P(z)$, 상하판 슬래브에 작용하는 주변전단력 τ_u 와 τ_b , 측벽에 작용하는 주변전단력 τ_s 및 관성력 f_i 가 있다. 그림 5는 각각의 하중과 이를 구하는 방법을 보여주고 있다.

여기서,

$$P_o = \text{상판지진토압} = K_{SB} \cdot u(z_u)$$

$$P(z) = \text{지진시 측벽토압} = K_H \cdot \{u(z) - u(z_B)\}$$

$$\tau(z) = \text{주변전단력} = \frac{G_D}{\pi H} \cdot S_V \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right)$$

$$G_D = \text{동적전단변형계수} = (\nu_t / g) \cdot V_{SD}^2$$

$$V_{SD} = \text{보정전단파속도} =$$

$$V_S = \text{현장 전단파 속도 } C \cdot V_S$$

c = 내진성능수준에 따른 보정계수(기능수행수준 : 0.8, 붕괴방지수준 : 0.5)

$$f_i = \text{관성력} = m_i \cdot a_i = \omega_i \cdot k_{hi}$$

z_u = 지표면으로부터 구조물 상단까지 깊이

z_B = 지표면으로부터 구조물 하단까지 깊이

K_{SB} = 상단에 대한 지반의 전단지반반력계수

K_H = 측벽에 대한 지반의 수평지반반력계수

K_{hi} = 해당깊이에 대해 보정한 지진계수 = $K_h \cdot C_u(z)$

K_h = 지표에서의 설계수평진도

ω_i = 구조물 요소의 단위중량

$C_u(z)$ = 깊이에 대한 보정계수 = $1 - 0.015z$

3.2 동적해석법

동적해석법은 크게 응답스펙트럼법과 시간이력해석법의 두 가지로 나누어 적용할 수 있다. 응답스펙트럼 해석방법은 단자유도계에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답을 구하는 방법이다. 응답스펙트럼 해석법은 시간이력해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 근사적인 방법이지만 대형구조물 이거나 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 동적특성을 비교적 잘 파악할 수 있다. 시간이력해석은 모드 중첩법과 직접적분법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 모드 중첩법이 편리하게 사용되며 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법이 사용된다.

• 모드 중첩법

모드 중첩법은 입력지진파에 대한 개별 모드의 시간 이력응답을 구하여 이들을 중첩하는 방법으로 진동모드의 수가 많은 경우에도 고유진동수가 낮은 몇 개의 진동모드의 응답중첩으로 비교적 근사한 해를 구할 수 있다.

모드 중첩법으로 응답의 시간이력을 구하려면 운동방정식을 서로 완전히 독립적인 모드별 방정식으로 분리하여 각 모드별로 구성되는 단자유도 방정식으로부터 응답의 시간이력을 구한 후 각 모드에서의 값을 조합해 전체 응답의 시간이력을 구한다. 이 방법에서 모든 모드에서의 응답을 전부 중첩시키면 이론상 정확한 응답의 시간이력을 구할 수 있다. 이 방법의 장점은 각 모드로부터 구성되는 단자유도계에 대한 독립적인 해석이 가능하다는 점으로써 동적거동을 지배하는 몇 개의 저차진동모드에 대한 해석만으로도 정확한 해에 근접한 해를 얻을 수 있다는 점이다. 그러므로 일반적으로는 전체 모드를 모두 중첩하여 거동을 해석하지 않고 기여도가 큰 몇 개의 저차 모드만을 중첩하여 정확한 해에 가까운

근사적 해를 구한다.

• 직접적분법

직접적분에 의한 수치해석법은 다자유도계의 운동방정식을 변화시키지 않고 점진적으로 계산하는 방법에 의하여 수치적으로 적분한다. 이 방법은 임의의 시간 t 에서의 거동을 구하는 것이 아니라, Δt 간격의 시점에서만 구조물의 응답을 점진적으로 구한다. 한 시점 t 에서 거동이 구해져 있을 때, 이것을 이용하여 다음 시점인 $t + \Delta t$ 에서 거동을 구하는 작업을 반복하여 전체 시간에 걸친 거동을 구한다.

(1) 지반-구조물 상호작용에 대한 고려

지반-구조물 상호작용의 문제점은 다음 그림 6과 그림 7에 의하여 설명될 수 있다. 그림과 같이 구조물이 놓인 경우 하부 암반 B에서 운동이 발생한 경우 다음의 3가지 다른 효과가 야기된다. 첫째, 지반의 응답거동으로서 구조물이 없을지라도 B점에서의 통제운동은 지표면을 향하여 전달되면서 변화한다. 이때 지표면 C 및 D점의 거동은 암반의 통제운동과 비교할 때 흙입자의 운동 크기는 증폭되는 반면 고주파 성분은 감소하는 현상이 발생한다. 이를 자유장(Free Field)운동이라고 한다. 둘째, 구조물 매입을 위한 굴착과 함께 무질량의 강제받침만 설치하였다면, 지표면의 자유장 운동은 구조물 저면에 있는 지점의 실제 유효입력운동(Effective Input Motion)으로 변화한다. 이 때 강제받침은 평균 수평방향운동과 함께 회전운동을 하게 된다. 이를 운동학적 상호작용(Kinematic Interaction)이라고 한다. 셋째, 강제받침을 통한 유효입력은 구조물의 응답 반응을 일으키고 이 응답운동은 다시 기초저면으로 전달되어 입력운동을 변화시킨다. 이를 관성상호작용(Inertial Interaction)이라 부른다.

관성상호작용에 의하여 지반-구조물은 하나의 합성된 구조계를 형성하는데, 구조물만의 강성도 보다는 작

국내 지중구조물 내진설계 정리

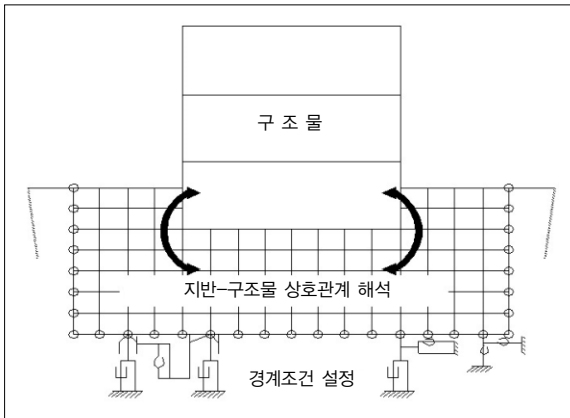


그림 6. 지반-구조물 상호작용 모식도

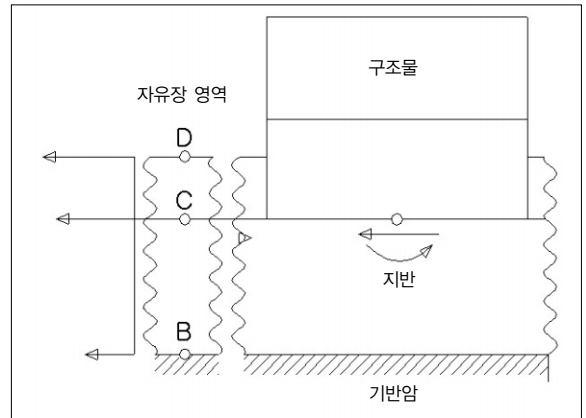


그림 7. 지진에 대한 구조물 응답

은 유연한 구조체가 되어 기본 고유 진동 주파수가 감소하고 또한 진동모드형상도 변화한다. 이 때 저면에서의 회전운동으로 높은 구조물 상층부의 운동량은 큰 폭으로 진폭 된다. 특히 상호작용에 의해 구조물로부터 역으로 지반으로 전달된 운동영향이 연속된 무한영역을 향하여 발산에 의해 에너지를 손실하게 되며, 결과적으로 감쇠의 영향이 증대된다. 이 때 상호작용의 해석을 위하여 인위적으로 유한경계를 부여한다면, 실제현상과 달리 경계면에서 파는 전파되지 않고 반사하게 되므로 정확한 해석결과를 얻을 수 없다. 이와 같이 연속되는 무한영역의 지반 영향을 어떻게 적합하게 고려하느냐가 상호작용 해석상의 주요 문제점으로 대두된다.

(2) 지반-구조물 상호작용 해석방법

① 부분구조법과 직접법

부분구조법은 구조물 저면에서 지반의 임피던스를 계산하고 그에 상응하는 주파수 종속 또는 독립된 탄성스프링과 감쇠를 가지는 집중 파라미터 모델로 환산하여 경계조건을 부여하는 방법이다.

직접법은 구조물 및 기초지반 인근지역을 연속체로 합성하여 모델링한 해석범위에 포함시키고, 무한영역의 경계부위를 무한요소 또는 경계요소로 모델링하여 해석

하는 방법이다.

② 주파수영역해석과 시간영역해석

주파수영역해석이란 시간영역자료인 경과시간별 지진기록을 FFT(Fast Fourier Transformation)에 의하여 주파수영역의 자료로 변환시켜 조화함수의 합성인 푸리에 급수로 나타내고 응답거동을 각각의 주파수 별로 독립적으로 계산하여 조합하는 방법이다. 이 방법은 정적해석과 같이 손쉽게 해석적 해답을 구할 수 있는 장점이 있으나, 선형해석만 가능하며, 일부 비선형 해석을 위한 혼합된 주파수-시간영역 해석이 있으나 비효율적이고 제한적으로만 사용되는 것으로 알려져 있다.

시간영역해석이란 입력지진하중을 짧은 시간당 운동량인 펄스(Pulse)로 나누어 수치해석적으로 직접 적분하여 해석하는 방법으로 반복순환에 의하여 수렴해를 구하게 된다. 시간경과에 따른 응답거동 해석시에 다음해를 구할 때마다 변형도에 따른 재료특성의 비선형성을 고려하여 강성도 행렬을 수정할 수 있으므로 비선형 해석이 가능한 방법이다.

③ 선형해석과 비선형해석

입력지진하중의 크기가 미소하면, 지반-구조물의 구

국내 지중구조물 내진설계 정리

조계는 선형거동을 할 것이나, 입력지진하중이 과대하게 되면 구조계는 비선형거동으로 발전한다. 비선형거동의 요인으로는 구조물의 비선형성 거동, 구조물과 지반의 경계면에서 미끄러짐 및 분리에 의한 비선형 거동, 그리고 지반의 강성 및 감쇠의 비선형성에 의한 지반매질의 비선형성 등이 있다.

본 수치해석의 이론은 「암반공학수치해석」(한국암반공학회, 2005)의 내용을 준용하였다.

4. 액상화 평가법

4.1 액상화 현상의 정의

액상화 현상(Liquefaction)은 지진과 같은 급속한 진동하중 발생시, 순간적으로 배수가 허용되지 않음에 따라 느슨한 사질토 또는 매립지반에서 유발되는 과잉간극수압으로 지반의 전단저항력이 저하되거나 전단저항력을 상실하게 되는 상태를 표현하는 것으로 그 발생 정도에 따라 직접적인 지반파괴가 일어날 뿐만 아니라 이로 인해 야기되는 지반침하 또는 횡방향 변위가 구조물의 안정에 큰 영향을 미치게 된다. 지중구조물 내진설계를 위한 액상화 평가는 액상화 저항능력비와 지진에 의해 발생하는 전단응력비로서 정의되는 안전율을 사용하여 평가한다.

4.2 국내 액상화 평가법

지중구조물 내진설계를 위한 액상화 평가는 간이평가와 상세평가 2단계로 이루어져 있으며 그림 8과 같은 과정에 따라 실시한다.

4.2.1 액상화 평가 자료

액상화 검토에 필요한 기본적인 자료는 다음과 같다.

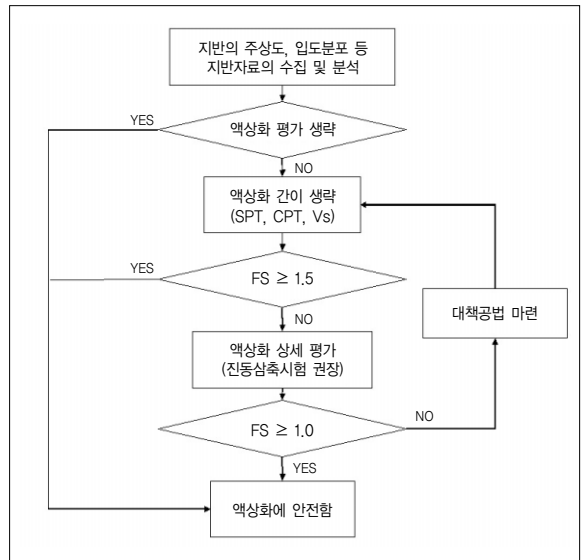


그림 8. 국내에 적합한 액상화 평가방법의 흐름도

- ① 지질 및 지형에 대한 자료
- ② 현장의 지반 물리량(단위중량, 입도분포, 밀도, 지하수위 등)
- ③ 실내시험자료(변형률수준에 따른 각 지층의 전단탄성계수와 감쇠비)
- ④ 현장시험자료(전단파속도, N치, 및 CPT값)
- ⑤ 설계 지진규모(최대 지반가속도와 지속시간)
- ⑥ 지반증폭 해석 결과

4.2.2 액상화 평가 생략 여부 판단

다음의 경우에는 액상화 평가를 생략한다.

- ① 지하수위 위의 지반
- ② 주상도상의 표준관입 저항치(N)가 20이상인 지반
- ③ 대상지반 심도가 20m 이상인 지반
- ④ 소성지수(PI)가 10이상이고 점토성분이 20%이상인 지반
- ⑤ 세립토 함유량이 35%이상인 경우
- ⑥ 상대밀도가 80%이상인 지반
- ⑦ 지반분류가 $S_A \sim S_p$ 인 지반

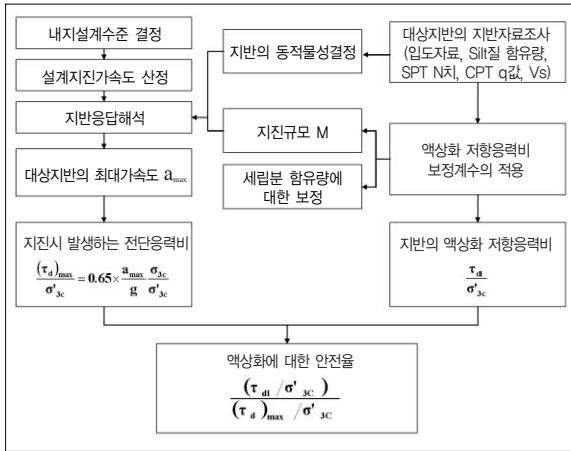


그림 9. 액상화 간이평가 흐름도(수정 Seed와 Idriss 방법)

- ⑧ 대상 지반의 입도분포곡선을 작성하였을 때, 액상화가 발생 가능한 입도분포영역 외에 분포할 때

4.2.3 액상화 간이평가

지중구조물 내진설계를 위한 액상화 간이평가는 수정 Seed와 Idriss방법을 사용하며 지반응답해석을 이용한 전단응력비와 액상화 저항능력비에 대한 안전율을 기준으로 한다. 액상화 간이평가의 과정은 그림 9와 같다.

액상화 평가시 언급되는 보정과 관련된 자세한 내용은 「폐기물 매립시설의 내진설계 기준연구」(환경부, 2001)를 참조하기 바란다.

(1) 지반의 동적물성 결정

지반의 동적 물성에 대해 보유하고 있는 자료가 없을 경우, 경험적 상관관계에 의해 추정된 변형률 수준별 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 감쇠비(D)를 결정한다.

(2) 액상화 저항능력비 산정시 보정계수의 적용

SPT, CPT, 탄성파시험 등의 결과는 유효상재압, 작업자의 숙련도, 시험장비의 효율, 현장상태 등과 같이 여러 조건에 따라서 값의 차이가 발생하므로, 이에 대한

보정을 수행한다.

(3) 세립분 함유량에 대한 보정

세립분 함유량에 따라 액상화 저항능력비가 증가하므로 그에 대한 보정을 한다.

(4) 지진규모 고려

지진의 규모는 지진에너지를 표현하는 정량적인 양이므로 국내 기준 지진규모를 6.5로 적용하여 보정한다.

(5) 지반응답해석을 통한 대상지반의 최대 가속도 산정

일반적으로 실지진기록 및 인공지진 시간이력을 이용하여 지반응답해석을 수행한다. 이때 외국의 실지진기록을 수정하여 이용할 수 있으며, 여기에 안전한 내진성능평가를 위해서 해당지역의 특성을 반영하는 인공적인 지진기록을 사용한다.

(6) 지진시 발생하는 전단응력비 산정

지진시 발생하는 전단응력비는 대상 지반의 지반응답 해석으로 산정한 최대가속도와 유효상재압 등을 고려한 식(4.1)을 이용한다.

$$\frac{(\tau_d)_{max}}{\sigma'_{3c}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{3c}}{\sigma'_{3c}} \quad (4.1)$$

여기서,

a_{max} : 대상지층 최대가속도

g : 중력가속도

σ_{3c} : 액상화를 평가하고자 하는 지점에서의 총 상재압

σ'_{3c} : 액상화를 평가하고자 하는 지점에서의 유효 상재압

(7) 지반의 액상화 저항능력비 산정

현장시험을 통해 산정한 SPT의 N_{60} , CPT의 q_{60} 또는 탄성파시험의 전단파속도 V_{s1} 를 이용하여 액상화 저

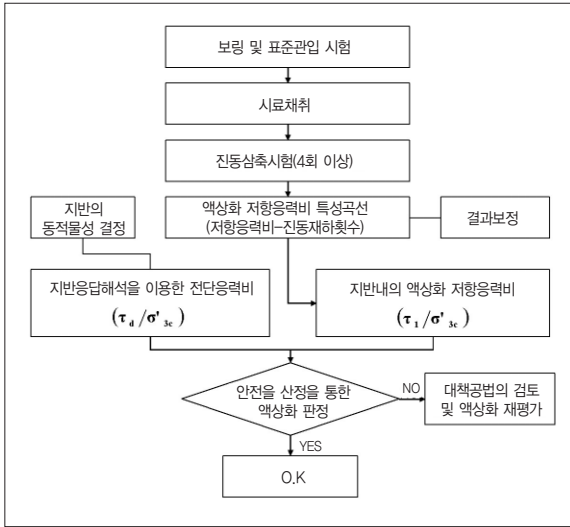


그림 10. 지반의 액상화 상세평가 흐름도

항응력비(τ_{dl} / σ'_{3c})를 산정한다.

(8) 액상화 안전율 평가

액상화 안전율은 식(4.2)와 같이 지반의 액상화 저항응력비(τ_{dl} / σ'_{3c})와 지진시 발생하는 전단응력비($(\tau_d)_{max} / \sigma'_{3c}$)의 비를 통해 산정한다. 안전율 산정을 통한 액상화 평가는 다음과 같다.

- ① 액상화 간이평가의 기준 안전율은 1.5이다. 안전율이 1.5이상인 경우, 액상화에 대해 안전한 것으로 판정한다.
- ② 액상화 간이평가의 기준 안전율 1.5 미만인 경우, 액상화 상세평가를 수행한다.

$$F_s = \frac{\tau_{dl} / \sigma'_{3c}}{(\tau_d)_{max} / \sigma'_{3c}} \quad (4.2)$$

여기서,

τ_{dl} / σ'_{3c} : 액상화 저항응력비

$(\tau_d)_{max} / \sigma'_{3c}$: 지진력을 표현한 전단응력비

σ'_{3c} : 액상화를 평가하고자 하는 지점의 유효 상재압

4.2.4 액상화 상세평가

액상화 간이 평가를 실시하여 안전율이 1.5미만일 경우 그림 10과 같이 액상화 상세평가를 실시한다. 지중구조물 내진설계를 위한 액상화 상세평가는 지반응답해석을 이용한 전단응력비와 실내 진동삼축시험을 이용한 액상화 저항응력비에 대한 안전율($F_s=1.0$)을 기준으로 한다. 자세한 내용은 「항만 및 어항시설의 내진설계 표준서」(해양수산부, 1999)를 참조하기 바란다.

5. 결론

최근 전 세계적으로 지진에 대한 공포가 가중되면서 국내에서도 사회기반 시설물의 내진설계에 관심이 집중되고 있는 실정이다. 본 기술기사에서 최신의 학문 분야인 지중구조물 내진설계 방법에 대해서 국내에 소개된 내용을 정리하였다. 여러 지중구조물 중에서도 지진시 인명피해 및 국가기간시설의 피해가 심각할 수 있는 터널 및 지하공동구의 내진설계 방법에 대해서 현장 내진설계자들이 이해하기 용이하도록 간략하면서도 명확하게 정리 분석하였다. 본 내진설계 기법은 향후에 관심 있는 연구자들과 기술자들에 의해 수정 보완되어야 할 것이다. 이런 발전적인 연구를 통해 국내에 적합한 지중구조물 내진설계가 완성될 것으로 믿는다.

참고문헌

1. 건설교통부, “내진설계기준연구 II”, 1997.
2. 건설교통부, “지하공동구 내진설계기준”, 2004
3. 한국암반공학회, “암반공학수치해석”, 2005
4. 한국지반공학회, “구조물기초 설계기준”, 2003.
5. 한국지반공학회, “지반조사결과와 해석 및 이용”, 2003.
6. 한국지반공학회, “진동 및 내진설계”, 1997.
7. 환경부, “폐기물 매립시설의 내진설계 기준연구”, 2001
8. 해양수산부, “항만 및 어항시설의 내진설계 표준서”, 1999.