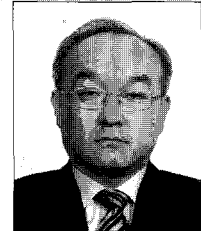


지중구조물의 지진해석을 위한 국내자료

Korean Materials for Earthquake Analyses of Underground Structures



김 두 기*



이 병 로**

* 군산대학교 토목공학과 부교수

** (주)청석엔지니어링 민자철도부 전무

1. 서론

대도시화가 진행되어감에 따라서 대도시에서는 개발방향을 도시내부로 전환하고 도시의 입체적인 개발을 계획하고 추진하게 되었으며, 이러한 도시의 입체적인 개발로 인해 대중교통수단 및 주거환경이 변화를 가져옴과 동시에 인간생활의 기반이 되는 전력, 통신, 상·하수도, 가스 등의 공익시설물이 지중에 설치되게 되었다. 근래에 들어 터널이나 도시철도, 매설관로, 전력구 및 통신구와 같은 지중구조물에 대한 내진해석 및 설계에 대한 관심이 고조되었으며, 이러한 지중구조물에 대한 내진설계기준은 지중구조물의 종류와 특성에 따라 별도로 제정되었다.

본 기사에서는 지중구조물의 내진해석 및 설계에 대한 국내자료를 요약하여 정리하였다.

2. 기본개념

지중구조물은 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하는 연유로 큰 증폭현상이 나타나지 않는다. 큰 증폭현상이 일어나지 않는 원인을 요약하면 다음과 같다.¹⁾

1. 대부분의 지반운동의 크기는 지반깊이에 따라 전반적으로 감소한다.

2. 지중구조물의 겉보기 단위중량은 주변지반의 단위중량보다 거의 같거나 작다. 즉, 주변지반보다 거의 같거나 작은 관성력을 갖는 지중구조물은 주변지반에 비해 새로운 거동을 하기보다는 주변지반과 거의 동일한 거동을 나타낸다. 참고로 이것은 응답변위법 개발의 근거가 되었다.
3. 주변지반으로 인해 지중구조물은 큰 발산감쇠를 가지므로, 지중구조물의 주변지반에 대한 상대적인 거동도 빨리 감소된다.

3. 내진등급 및 목표

지중구조물을 시설기능, 내진등급 그리고 설계성능목표에 따라 분류하면 다음과 같다.²⁾

1. 시설기능에 따라 주거·문화시설, 교통·수송시설, 산업시설, 에너지·저장시설 그리고 방어시설로 분류한다.
2. 내진등급은 구조물의 중요도, 인명피해 여부 및 피해 규모 정도를 기준으로 하여, 내진 특등급, 내진 1등급, 내진 2등급으로 구분한다.
3. 성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분한다.

4. 설계지반운동

설계지반운동의 고려사항과 수준은 내진설계의 일반기준을 따른다.²⁾

5. 내진해석법

구조물의 내진해석을 위한 계산법은 크게 응답변위법, 응답진도법 및 동적해석법으로 나눈다.³⁾

5.1 응답변위법

응답변위법(seismic deformation method)은 지중구조물에 발생하는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 구조물 주변지반의 상대적인 변위에 의해 크게 영향을 받는 사실에 근거하여, 지진시에 발생하는 지반의 변위를 구조물에 작용시켜서 지중구조물에 발생하는 응력을 정적으로 구하는 방법이다.^{3),4),7)-11)} 구조물과 지반의 구조해석모형(일반적으로 구조물은 프레임요소, 지반은 스프링요소로 모델링)에 구조물이 없는 자유장지반에서의 수평상대변위, 가속도, 응력을 입력으로 작용하여 구조해석을 수행한다. 이 방법은 특별히 지하구조물의 내진계산을 위하여 고안된 방법으로서 동적인 지중운동을 정적으로 전환하여 지진해석을 한다는 점은 진도법과 같으나, 관성력을 구하는 것이 아니라 지진운동으로 인한 주변지반의 변위를 먼저 구하고 주변지반의 변위에 의해 지하구조물에도 거의 같은 변위가 발생한다고 가정하여 이 변위에 의한 구조물의 응력 등을 구하는 방법으로서 (응답)진도법과는 근본적인 차이가 있다.

5.2 응답진도법

진도법은 교량 등의 일반적으로 지상에 존재하는 구조물의 경우에 간단히 사용되는 방법으로 동적인 지반운동을 정적 하중으로 변환하여 해석하는 방법이다.¹⁾ 이 방법은 지상구조물의 중량에 설계진도를 곱한 힘을 관성력으로 작용시켜 지진에 의해 구조물에 발생하는 응력 등을 구한다. 지중구조물의 경우 주변지반에 의한 발산감쇠가 크고 주변지반에 비해 질량이 거의 같거나 작으므로, 주변지반에 대한 지중구조물의 관성력을 구할 수가 없으므로, 지중구조물에 대해 지상구조물과 같은 방법으로 진도법을 사용하는 것은 거의 불가능하다.¹⁾ 참고로 이 방법은 기준에 따라 등가정적해석법으로 언급되기도 한다.⁵⁾

응답진도법(ground response seismic coefficient method)은 지진에 의해 발생하는 구조물(또는 지반)의 각 위치에서 최

대가속도가 주어질 때, 각 질점의 질량에 주어진 가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진응답해석을 수행하는 방법이다. 지중구조물시스템에 대해 구조물과 구조물 주변의 지반을 모두 모형화한 다음 깊이에 따라 부지응답해석을 통해 구한 최대지반가속도(절대가속도)를 지진방향으로 작용하여 적용한다.^{3),6)}

5.3 동적해석법

동적해석법(dynamic analysis method)은 시간에 따른 구조물(또는 지반)의 응답을 구하는 구조해석방법으로, 구조물에 작용되는 모든 힘(관성력, 감쇠력, 복원력, 외력)이 평형을 이룬다는 조건과 구조물이 진동을 하기 시작하는 시점에서의 초기조건을 이용하여 구조물의 시간에 따른 응답을 구한다.^{3),7),12)} 이 방법은 구조물 및 주변지반을 적절히 모델링하고, 해석대상의 내부 또는 경계면에 시간이력 지진운동을 입력하여 지반 및 구조물의 거동 그리고 지보재에 발생하는 단면력 등을 동적으로 구한다.

동적해석법의 경우 주로 구조물의 형상과 지반조건이 복잡한 경우에 대하여 응답변위법과 응답진도법에 의한 계산 결과를 확인하거나, 다층지반인 경우, 응답변위법의 적용에 필요한 지반의 자유장운동을 파악하기 위해서 사용되기도 한다. 동적해석법으로는 시간영역해석법과 진동수영역해석법(주파수영역해석법)이 있으며, 구조물 및 주변지반을 동역학 모델로 바꿔놓고 이것에 지진운동을 입력하여 구조물의 응력 등을 동적으로 구하는 것이므로, 상대적으로 해석이 어렵고, 많은 시간이 소요된다.

6. 관련 연구 및 기준

우리나라의 지중구조물과 관련된 내진설계기준들은 내진설계성능기준 작성준칙²⁾에서 제시된 설계기준에 근거하고, 시설물의 관리주체에 따라 내진설계기준이 별도로 수립되어 있다. 대표적인 연구와 기준을 요약하면 다음과 같다.

6.1 내진설계기준연구(II)²⁾

국내에서 사용하여 오던 이전 내진설계기준과는 달리, 이 연구에서 제시하는 내진설계성능기준 체계는 다단계 성능목표 및 이를 구성하는 다단계 성능수준과 다단계 설계지반운동수준으로 구성되었다.

6.2 대한주택공사 토목구조물 내진설계지침⁵⁾

이 기준은 지중구조물의 내진해석을 위해 등가정적해석

법, 응답변위법 및 동적해석법을 제시하였다. 여기서 지중구조물의 내진해석법으로 응답변위법을 원칙으로 하고, 주변지반에 비해 단위체적중량이 상당히 크다고 판단되는 구조물에 한해서 등가정적해석법을 적용토록 정하고 있으며, 지반급격부 등 지진시에 국소적으로 큰 응력이나 상대변위가 발생할 것으로 예상되는 지역에 대해서는 필요에 따라 동적해석을 수행할 수 있도록 하였다. 동적해석법으로 응답스펙트럼법과 시간이력응답 해석법을 제시하였으며, 1) 응답스펙트럼법은 설계응답스펙트럼에 근거한 특정 하중 및 구조물의 주기특성을 이용하여 최대응답을 구하는 방법이고, 2) 시간이력응답 해석법은 모드중첩법과 직접적분법으로 분류될 수 있으며, 구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 모드중첩법이 편리하게 적용되며, 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법을 적용되도록 하였다.

6.3 송·변전설비 내진설계기준 설정 연구¹⁰⁾

송·변전설비 중 대표적인 지중구조물인 전력구를 내진설계함에 있어, 전력구의 중요도 및 지진손상시 영향의 범위를 고려하여 전력구를 내진 I 등급으로 분류하였으며, 원칙적으로 전력구의 연성거동을 보장할 수 있도록 설계목표를 설정하였다. 전력구의 내진설계에 응답변위법을 적용할 경우, 전력구의 지반강성에 대한 상대적 유연도비가 거의 동일한 경우에는 이 기준에서 제시한 근사방법을 적용할 수 있도록 하였으나, 전력구의 지반강성에 대한 상대적 유연도비가 큰 차이가 보일 경우는 타당성 있는 방법으로 지진하중에 의한 전력구의 단면력을 구하도록 하였다.

6.4 기존 터널의 내진성능 평가 요령⁸⁾

지중에 건설된 정거장 구조물, 본선구조물, 지중과 지상의 경계부인 U-Type 구조물 및 용벽구조물에 대한 내진성능 평가를 위한 절차가 제시되어 있다. 1) 내진성능 평가방법은 응답변위법을 우선으로 하고 동적해석법은 제한된 경우에 한해서 적용하는 것을 원칙으로 하며, 2) 내진성능 평가기준지진은 사용목표수명을 고려하지 않은 지진과 사용목표수명을 고려한 지진을 선택적으로 사용할 수 있으며, 3) 관련된 규정으로는 도시철도 내진설계기준, 내진설계 기준 준칙(건설교통부, 2007), 콘크리트구조 설계기준, 기존시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가요령을 사용한다.

6.5 지하공동구 내진설계기준³⁾

지진대책의 일환으로 지하공동구의 안전성을 강화하여,

지진 발생시 공동구내에 수용하고 있는 전기, 수도, 통신시설의 피해를 방지하고, 도시 기능이 평시와 같이 정상적으로 작동하도록 하기 위하여 제정되었다. 이 기준에는 지하공동구의 내진등급, 내진성능목표, 설계저동한계 등의 기본개념과 지하공동구 건설지점의 액상화 간이평가 및 상세평가방법, 설계지반진동, 설계하중 및 하중조합법, 종·횡단방향의 지진응답해석방법 등의 구체적인 내진설계방법이 제시되었다.

지하공동구의 지진응답해석은 설계단면의 횡단방향과 종단방향에 대해 각각 수행되어야 하며, 단면 방향별 적용가능한 해석방법은 표 1과 같다. 박스단면인 경우 표에 제시된 해석방법 중 설계결과의 보수성과 설계자의 편리성을 고려하여 응답변위법을 적용함을 원칙으로 한다. 단, 설계자의 판단에 따라 응답변위법보다 정밀한 해석방법(응답진도법 또는 동적해석법)을 적용할 수 있다. 분기지점, 환기

표 1 지하공동구의 지진응답해석법³⁾

지진응답해석 단면	지진응답해석법	지진입력 성분
횡단방향	응답변위법	수평성분
	응답진도법	
	동적해석법	
종단방향	응답변위법	수평 및 수직성분
	동적해석법	

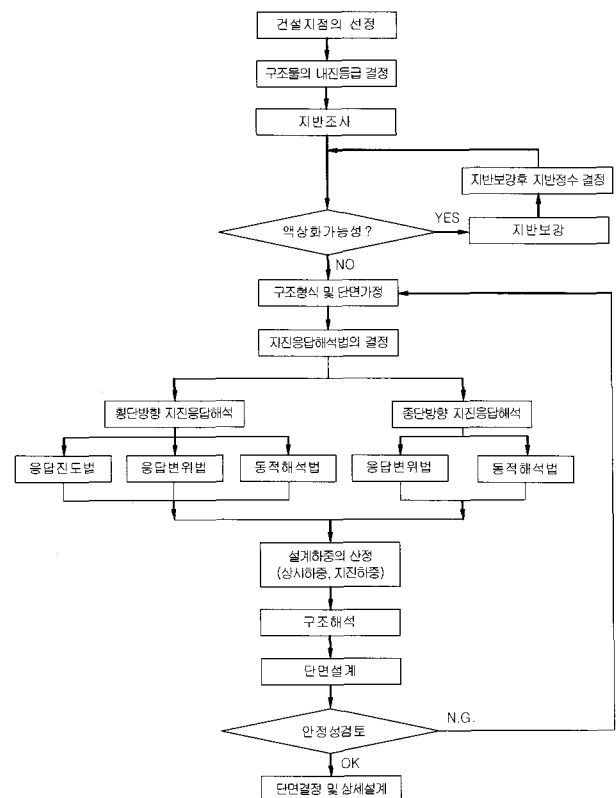


그림 1 지하공동구의 내진설계 절차³⁾

구, 작업구의 지진응답해석은 설계자의 판단에 따라 표에 제시된 방법 중 하나를 적용할 수 있다. 각 해석방법은 안전측 해석결과가 확보될 수 있는 범위에서 설계자의 판단에 따르며 구조물 거동의 3차원 효과를 고려하여야 한다.

지하공동구의 내진설계절차를 수행 순서에 따라 간략히 나타내면 그림 1과 같다.

6.6 도시철도 내진설계 기준⁷⁾

지반조건, 구조조건 등을 고려하여 응답변위법으로 또는 시간이력해석법을 사용하여 내진해석을 수행토록 하였으며, 응답변위법은 도시철도 구조물의 내진해석을 위한 표준해석법으로 사용하고, 시간이력해석법은 상세한 검토를 필요로 하는 경우나 구조조건, 지반조건이 복잡한 경우, 지반과 구조물의 상호작용을 고려하는 경우에 사용하도록 규정하고 있다. 도시철도구조물의 내진해석은 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하되 지반상태가 급격히 변화하는 구간 통과 등의 경우에는 종방향에 대한 내진구조해석을 추가로 수행하여야 한다.

6.7 상수도시설 내진설계^{9),11)}

상수도 시설의 내진설계기준은 상수도 시설중 상류에 위치하는 시설, 도수관로, 대체시설이 없는 송배수 간선시설 등 중요도가 높은 시설은 내진 I 등급으로 분류하고, 그 외는 내진 II 등급으로 분류하였다. 해석방법은 지반을 통한 파의 방사조건이 적절히 반영된 수평 2축방향 성분과 수직방향 성분이 고려되어야 하며, 구조물의 특성과 지반조건 및 중요도에 따라 등가정적하중법, 응답변위법으로 기본 평가를 하고, 필요시 응답스펙트럼방법, 동적해석법(시간이력해석법, 진동수영역해석) 등의 동적 내진안정성평가를 병행해야 한다. 여기서 응답변위법을 적용할 경우, 구조물의 지반강성에 대한 상대적 유연도비에 따라 상대변위량을 구조물에 작용시켜야 한다.

감사의 글

본 기사는 건설교통부 도시철도 표준화2단계 연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행된 연구의 일부입니다.

참고 문헌

1. 한국지반공학회, 지반구조물의 내진설계: 제7장 지하구조물의 내진설계, 구미서관, 2006. 2
2. 건설교통부, 내진설계기준연구(II): 제6절(지중구조물), 제8절(터널), 1997. 12
3. 건설교통부, 지하공동구 내진설계기준, 2004. 6
4. 이병로, 김두기, "응답변위법을 사용한 지중구조물의 내진 해석", 한국전산구조공학회지, 2009. 5
5. 대한주택공사, 대한주택공사 토목구조물 내진설계지침, 1999. 2
6. 김재민, 김두기, "응답진도법을 사용한 지중구조물의 지진 해석 소개", 한국전산구조공학회지, 2009. 5
7. 건설교통부, 도시철도 내진설계 기준, 2005. 6
8. 건설교통부, 기존 터널의 내진성능 평가 요령, 2004. 5
9. 한국수자원공사, 토목공사 설계기준: 제7편 제1장 상수도 시설 내진설계, 2006. 9
10. 한국전력연구원, 송·변전설비 내진설계기준 설정 연구, 2001. 9
11. 환경부, 상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구, 1999. 8
12. 김재민, 정우정, 김진원, 김동아, "지중구조물의 동적해석법", 한국전산구조공학회지, 2009. 5

[담당 : 김두기, 편집위원]