

지하 시설물의 내진성능 평가 방법

Evaluation of Seismic Performance of the Underground Structures



윤종구*
Jang-Ku Yoon

1. 서 론

근래에 들어 주요 지상 구조물에 대한 내진설계는 매우 체계적으로 수행되고 있으며, 이로 인하여 국내 내진설계 기술은 크게 발전하고 있다. 그러나 터널이나 도시철도, 매설관로, 전력구 및 통신구와 같은 지하 시설물에 대한 내진설계기준은 비교적 최근에 제정되어, 기존 시설물의 경우 내진설계가 반영되지 않았거나 외국의 기준을 준용하여 설계된 것이 대부분이다. 지하 시설물은 시민 생활과 도시 기능 유지 및 국가산업시설의 운영에 있어 필수불가결한 기본적인 시설로서, 다른 사회 기반 시설과의 상호 의존성이 높을 뿐만 아니라 피해 복구가 빨리 이루어지지 않을 경우 사회 경제 시스템의 기능이 장시간 마비될 수 있다. 따라서, 내진설계기준이 미비하여 내진설계가 반영되지 않은 기존 지하 시설물에 대한 내진성능을 평가하여 현재 상태의 내진성능을 구명하는 것은 의미가 있다.

최근 도시철도를 중심으로 기존 시설물에 대한 내진성능 평가 작업이 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 기존 시설물에 대한 내진성능 평가 작업은 전체 시설물에 대하여 예비 평가를 수행한 후 내진성능 상세 평가가 필요한 구조물을 파악하여 상세평가를 실시하는 방법이 바람직하다. 도시철도 구조물의 경우 대부분 터널이나 개착식 박스 구조물 및 지하 정거장이 주류를 이루고 있고, 이러한 시설물에 대한 대표적인 내진 해석 방법으로 응답변위법이 이용되고 있다.

“도시철도 내진설계기준¹⁾”이 제정되기 전에는 응답변위를 산정하기 위하여 해석 대상 부지의 전단파속도(V_s)를 일정한 것으로 가정하여 단일 코사인법을 이용하였다²⁻³⁾. 그러나 토층은 일반적으로 여러 개의 층으로 분류하는 것이 합리적이고, 이를 위하여 다중 코사인 함수를 사용하여 지반 변위를 산정하거나

부지 고유의 지진응답 해석 결과를 이용해야 한다. 국내 지반의 경우 풍화토층이 발달되어 있어 상부 토층보다는 하부 토층의 강성이 크다. 따라서, 단일 코사인법을 이용할 경우 하부 풍화토층에서 과다 변위를 산정할 가능성이 있고, 상대적으로 연약한 상부 토층에서는 변위를 작게 산정할 개연성이 있다.

본 기사에서는 응답변위법을 이용하여 지하 시설물의 주변 지반 변위를 산정할 경우 국내 지반 조건의 특수성을 고려하여 단일 코사인법과 이중 코사인법을 적절히 구분하여 적용하는 방법에 대하여 기술하였다. 이를 위하여 국내 대도시 지하철 건설 현장 지반의 시추주상도를 바탕으로 응답변위법의 적용성을 검토하였다.

2. 응답변위 산정 방법

개착식 박스 구조물이나 매설관로 등의 지하 시설물은 지상 구조물과는 달리 지반에 둘러싸여 있어 지진시 주변 지반의 변형에 종속되는 거동을 한다. 따라서, 지하 시설물의 내진설계시 구조물 주변 지반의 변위 산정이 가장 중요한 요소이다. 박스형 지하 시설물의 경우 겉보기 질량은 주변 지반과 비교하여 작거나 같은 정도이므로 관성력에 의한 하중 증가는 다른 하중의 증가에 비하여 상대적으로 작은 편이다. 관성력이 작으면 지하 구조물은 지반의 운동에 대하여 상대적인 새로운 거동을 할 수가 없으며, 지반과 같이 움직일 수밖에 없다. 즉, 대부분의 경우 지반의 변형량과 지하 구조물의 변형량은 거의 같다. 이 사실에 근거하여 지하 구조물의 내진 해석 방법으로 ‘응답변위법’이 개발되었다⁵⁾.

응답변위법에 사용되는 지반의 설계 수평 변위량의 연직 방향 분포는 구조물 주변 지반의 특성을 고려하여 산정한다. <그림 1(a)>와 같이 지반의 깊이에 따른 전단파속도가 일정하다고 가정할 경우, 지표면 아래 깊이 x m 위치에서 설계 지진에 의하여 발생하는 변위 $U_b(x)$ 는 식 (1)과 같이 단일 코사인 함

* 정회원, 한국유지관리(주) 전략기획실 실장
hawaiiyoon@kmctech.co.kr

수를 이용한 식을 주로 사용한다⁴⁾.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s}x\right) \quad (1)$$

여기서, S_v = 지표층 지반의 고유주기에 해당되는 기반면 속도 응답스펙트럼(m/sec)
 T_G = 지반의 고유주기(sec)
 H_s = 지표층 지반의 두께(m)

또한, <그림 1(b)>에 나타난 바와 같이 지반을 두 개의 층으로 구분하여 응답변위를 산정할 경우 식 (2) ~ (4)와 같이 이중 코사인 함수를 이용하여 각 층에 대하여 지반 변위를 산정하고 이를 합산하여 전체 지반 변위를 산정할 수 있다⁴⁾.

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi x_1}{v_{s0d1}}\right) \quad (2)$$

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{v_{s0d1}}\right) \cdot \left(\cos \frac{\omega_0 x_2}{v_{s0d2}} - \frac{\sin \frac{\omega_0 x_2}{v_{s0d2}}}{\tan \frac{\omega_0 H_2}{v_{s0d2}}} \right) \quad (3)$$

$$(1 + \alpha) \cos \left\{ \omega_0 \left(\frac{H_1}{v_{s0d1}} + \frac{H_2}{v_{s0d2}} \right) \right\} + (1 - \alpha) \cos \left\{ \omega_0 \left(\frac{H_1}{v_{s0d1}} - \frac{H_2}{v_{s0d2}} \right) \right\} = 0 \quad (4)$$

여기서, $U_{h1}(x)$, $U_{h2}(x)$ = 제1층, 제2층의 지반 변위(m)
 T_G = 지반의 고유주기 (sec)
 H_s , H_1 , H_2 = 전체 토층 지반, 제1층, 제2층의 두께(m)

V_{s0d1} , V_{s0d2} = 제1층, 제2층의 평균 전단파속도 (m/sec)

ω_0 = 지반의 설계 고유 진동수, 식 (4)에서 시행착오법으로 계산

$$\alpha = \text{제1층과 제2층의 임피던스비}, \alpha = \frac{\gamma_1 v_{s0d1}}{\gamma_2 v_{s0d2}}$$

3. 단일 코사인 방법과 이중 코사인 방법

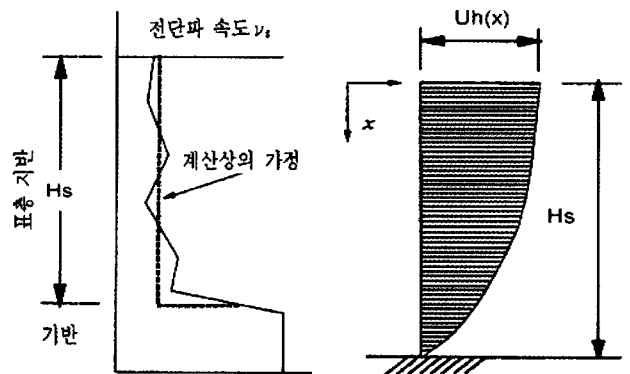
본 절에서는 서울, 부산, 대전 등 8곳의 도시철도 건설 현장 지반을 이용하여 단일 코사인법과 이중 코사인법의 적용성을

검토하였다. 검토 대상 지반의 층상 구조는 대부분 매립토, 충적토, 풍화토, 풍화암 또는 연암 등으로 구성되어 있고, 8개 부지의 전단파속도 주상도는 <그림 2>에 나타나 있다.

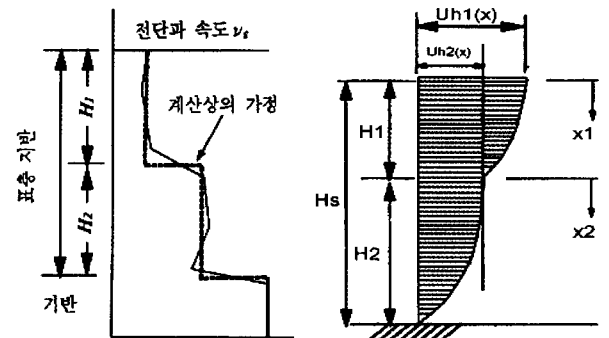
<그림 3>은 <그림 2>의 현장지반에 대하여 단일 코사인법과 이중 코사인법을 이용한 지반 변위 산정 결과와 부지 고유의 지진응답해석을 이용하여 산정된 지반 변위를 비교하였다.

부지 고유의 지진응답해석의 경우 등가 선형 해석 프로그램인 SHAKE91을 이용하였다⁶⁾. 지반을 두 개의 층으로 나누어 지반 변위를 계산할 때 가장 중요한 요소는 상부층과 하부층을 구분하는 깊이이다. 여기에서는 시추주상도와 전단파속도 주상도를 참조하여 지반의 전단파속도가 급격히 증가하는 풍화토 위치에서 두층을 구별하였다.

<그림 3>의 결과를 살펴보면 대부분의 지반에서 단일 코사인법으로 구한 방법보다 이중 코사인법으로 구한 지중 변위가 지진응답해석에서 얻은 지중 변위 형상과 더 비슷함을 알 수 있다. 일부 지반 상부층의 경우 지진응답해석에서 얻어진 지반 변위가 단일 코사인법 또는 이중 코사인법으로 얻어진 지반 변위보다 큰 값을 가지는 경우가 있으나, 하부층에서는 지진응답해석의 값이 작다. 또한, 풍화토에 해당하는 하부층의 경우 지



(a) 단일 코사인법의 지중 변위 산정



(b) 이중 코사인법의 지중 변위 산정

그림 1. 단일코사인, 이중 코사인 이론을 이용한 지중 변위 산정법³⁾

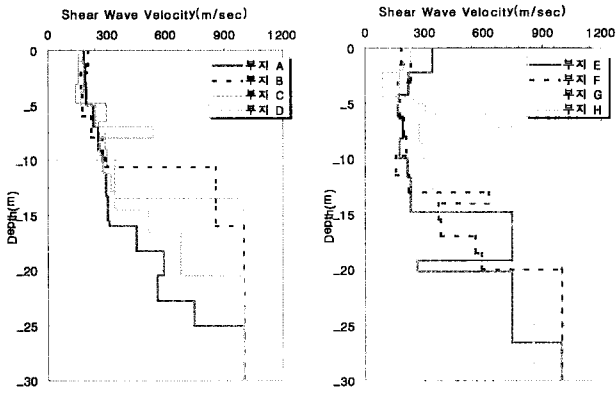


그림 2. 도시철도 건설 현장 지반의 전단파속도 추상도

진응답해석 결과와 이중 코사인법을 이용한 값이 매우 유사함을 알 수 있다.

〈그림 3〉의 결과에는 지하 시설물의 내진설계시 엔지니어가 고려해야 할 두 가지 중요한 사항이 있다.

첫째는 단일 코사인법 보다 이중 코사인법으로 산정된 지반 변위가 지진응답해석 결과와 더 유사한 결과를 얻는 점이다. 일반적으로 풍화토의 경우 표층 지반보다 전단파속도와 구속압이 크고 지진시 지반변위가 크게 발생하지 않는다. 그러나 단일 코

사인법의 경우 기반암 바로 위에서부터 지반 변위가 급격히 증가하는 모드 형상을 가지고 있어 풍화토에서의 지반 특성을 효과적으로 반영할 수 없다. 단일 코사인법을 이용할 경우 상부와 하부층의 강성 차이가 분명할 경우 하부층의 응답 변위를 크게 산정할 개연성이 있다. 따라서, 지반 조사 결과를 검토하여 상부층과 하부층의 강성 차이가 클 경우 이중 코사인법을 이용하여 설계를 하는 것이 타당하다. 또한, 기존 시설물에 대한 내진 성능 평가 시 이중 코사인법을 이용하거나 지진응답해석 결과를 적용하는 것이 타당하다.

둘째로, 지하 시설물이 지표면 근처의 표층에 건설될 경우 단일 코사인법을 이용할 경우 지중 변위를 과소 평가할 개연성이 있다. 국내 지반의 경우 지반 깊이가 깊어질수록 강성이 증가하는 형태를 보이고 있고, 이러한 지반의 경우 지진 시 지표면 근처에서 상당한 증폭이 발생하고 지반 변위가 커지는 것이 일반적이다. 지진 시 지하 시설물에 작용하는 토압은 지반 변위의 절대적인 크기 보다는 구조물의 저판과 상판 사이의 상대 변위의 크기에 지배받는다. 즉, 지하 구조물 측벽에 작용하는 지반 변위가 중요하다. 따라서 지표면 근처의 표층에 건설될 경우 지반 변위가 크게 발생하게 되는데, 이 경우 이중 코사인법을 이용하여 지반 변위를 산정하는 것이 합리적이다.

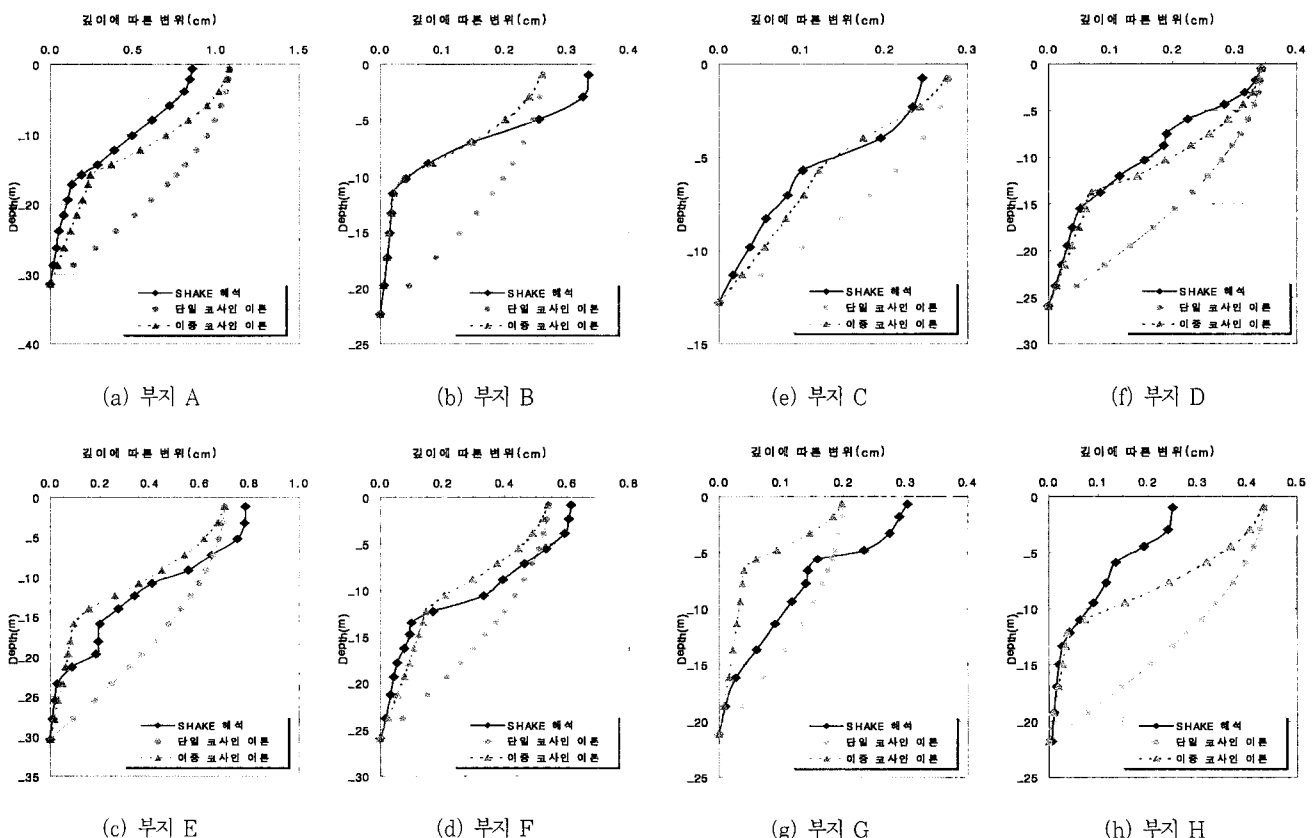


그림 3. 지진응답해석 결과와 단일·이중코사인법으로 구한 지중 변위 비교(내진 1등급 지진재해도 재현주기 1,000년 이용)

일반적으로 도시철도의 정거장이나 지상에서 지하로 진입하는 본선 구간의 경우 지표면 근처 표층에 건설된다. 따라서, 연약층이 존재하는 지중 얇은 곳에 설치되는 중요 매설관로 등의 지하 시설물의 경우 지진응답해석을 수행하거나 이중 코사인법을 적용하는 것이 적절하리라 판단된다.

4. 결 론

현재 국내 내진설계기준의 경우 2005년에 제정된 “도시철도 내진설계기준”을 제외하면 지진 시 지중 변위를 산정하기 위하여 단일 코사인법만 제시되어 있다. 따라서, 기존 시설물 및 새로 건설되는 지하 시설물의 경우 국내 지반 특성이 제대로 반영되지 못할 수 있다. 현업의 엔지니어가 지하 시설물에 대한 내진설계 및 기존 시설물에 대한 내진성능을 평가할 경우 단일 코사인법 적용시 본문의 내용과 같이 지반 변위의 과소 또는 과대 평가할 수 있는 문제점에 직면할 수 있으므로, 중요 구조물의 경우 이중 코사인법을 이용하거나 부지 고유의 지진응답 해석을 이용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. 건설교통부, “도시철도 내진설계기준”, 건설교통부, 2005.
2. 한국전력연구원, “송·변전설비 내진설계기준 설정 연구”, 한국전력연구원, Sep. 2001.
3. 환경부, “상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구”, 환경부, 1999.
4. 일본운수성, “지중구조물 내진설계 표준 및 동해설”, 일본운수성, 1999.
5. 윤종구, 김동수, 유제남, “지중구조물 내진설계를 위한 기반면 속도 응답스펙트럼 및 응답변위 산정기법에 대한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 19권 4호, 2003, pp.211~221.
6. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B, “SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.

학회지 광고 게재 안내

콘크리트학회지는 격월간으로 발행되어 6,000여 회원을 비롯한 콘크리트 관련 업계, 학계, 유관 기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 귀사의 미래를 위한 광고가 저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 활용될 수 있도록 광고를 모집합니다.

1. 광고게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표 2	80만원	간지	70만원
표 3	70만원	내지(전면)	50만원
표 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택

: 본 학회의 특별회원이거나 게재하는 광고 또는 연간 6회 이상 게재 시 상기 협찬금을 아래와 같이 할인하여 들입니다. 단, 일시불로 납부하여야 적용 가능합니다.

- 1년 계약 : 10% 할인 2년 계약 : 20% 할인 회원사 : 추가 5% 할인