

수직전력구 내진설계를 위한 응답변위 산정에 대한 사례 조사

Case Study of Estimate the Response Displacement for the Seismic Design of Shaft Cable Tunnel

김용민¹⁾, Yong-Min Kim, 정상섭²⁾, Sang-Seom Jeong, 김영호³⁾, Young-Ho Kim, 권영기⁴⁾, Young-Ki Kwon

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

⁴⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : The response displacement method is the most frequently used method for the seismic design of underground structures. Underground structures under seismic loading will tend to deform with the surrounding ground, and thus the structure is designed to accommodate the free-field deformation without loss of its structural integrity. This method is pseudo-static method, and response displacement of surrounding ground are most important steps. In this study, the single cosine method and the equivalent linear analysis are applied to estimate the response displacement of the real sites, and the results of the each method are compared. Response analysis was also performed with respect to bedrock depth. As a results, Equivalent linear analysis result was larger than single cosine method. And, the relative displacement becomes lager according to depth of the bedrock.

Keywords : Response displacement, Response displacement method, Underground structure, Shaft cable tunnel

1. 서론

지하공동구는 일반적으로 외관 단위체적중량이 주변지반에 비해 작으므로 지상구조물과는 동적 거동 특성 및 그 지배인자가 다르다. Okamoto(1973)등은 대부분의 지하구조물은 구조물의 질량에 의한 관성력보다 주변지반의 거동에 더 큰 영향을 받는다는 것을 검증하였다. 이에 따라 지하구조물의 지진해석 방법에 관한 연구는 구조물의 관성력에 중점을 둔 지상구조물의 지진해석방법과는 달리 지반의 거동 및 지반-구조물 상호작용의 영향에 대한 내용을 중심으로 진행되어왔다(Kuesel, 1969; Kuribayashi, 1974; Newmark, 1968; Wang, 1993; Sakurai and Takahashi, 1969;). 이러한 구조적 특성을 갖는 지하공동구의 내진설계를 위한 대표적인 지진해석방법으로는 등가정적해석법, 응답변위법, 시간영역 또는 주파수영역에서의 동적해석법을 들 수 있으며, 국내에서는 지진 시 발생하는 지반 변위를 구조물에 강제적으로 부과함으로써 지하구조물의 거동을 정적으로 계산하는 방법인 응답변위법을 가장 많이 사용하고 있다.

응답변위법의 핵심은 지진 시 지하구조물의 측벽에 작용하는 지반변위를 산정하는 것이다. 현재 국내에서 주로 이용되는 응답변위 산정방법은 지하공동구 내진설계기준 연구(건설교통부, 2004)에 제시되어 있는 단일코사인 함수법으로, 강진이 주를 이루는 일본으로부터 도입되어 중·약진 지역인 국내에서는 그 값이 과다하게 적용되어 비경제적인 설계가 이루어 질 수 있다. 이는 해석 대상 부지의 전단파속도를 일정한 것으로 가정하였기 때문에 국내의 다층지반의 특성을 고려하여 지반변위를 산정하기에는 한계가 있다. 특히, 수직전력구의 경우 상부연약토층과 하부 단단한 암반층을 통과하여 구축되는 것이 일반적이

기 때문에 깊이 방향의 경계면에 대한 지반변위 산정이 중요하다고 할 수 있다. 또한 지하공동구 내진 설계기준 연구(건설교통부, 2004)에 제시되어 있는 기반지반 분류법을 이용하여 수직전력구의 기반면을 선정할 경우, 해석하는 관점에 따라 서로 다른 기반면을 선정할 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 현재 수직전력구가 시공되고 있는 국내의 대도시 3개 부지를 선정하여 단일 코사인 함수법과 지진응답해석 이용한 지반의 상대변위를 비교하였고 기반면의 깊이를 달리하였을 때 지반의 상대변위를 비교 분석하였다.

2. 지반 상대변위 산정

개착터널이나 지하철구조물 등의 지하구조물은 지상구조물과는 달리 주변 지반에 둘러싸여 있기 때문에 지진 시 주변 지반 변형에 종속되는 거동을 한다. 따라서 지하구조물 내진 설계에서는 지반 내의 진동 및 변위 산정이 중요한 요소이다. 특히, 수직전력구의 경우 외관의 단위체적중량이 주변지반에 비해 상대적으로 작으므로 관성력에 의한 하중 증가는 다른 하중의 증가에 비하여 상대적으로 작은 편이다. 이러한 구조물의 내진설계를 위하여 국내에서는 대부분 응답변위법을 사용하고 있다.

응답변위법의 정확성을 결정하는 중요한 요인 중에 하나는 정확한 지반응답변위를 산정하는 일이다. 응답변위는 수계산으로 산정하는 방법과 지진응답해석을 이용하여 구하는 방법이 있다. 국내 내진설계 지침서에서 사용되는 지반의 설계 수평 변위량의 연직방향 분포는 구조물의 주변 지반의 특성을 고려하여 산정한다. 그림 1과 같이 지반의 깊이에 따라 전단파속도가 일정하다고 가정할 경우, 지표면 아래 깊이 $z(m)$ 위치에서 설계지진에 의하여 발생하는 변위 $U_h(z)$ 는 식 (1)과 같이 단일 코사인함수를 이용한 식을 주로 사용한다(건설교통부, 2004).

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

여기서, S_v = 지표층(기반암 상부 토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반면 속도응답스펙트럼(m/sec)

T_G = 지표층 설계 고유주기(sec)

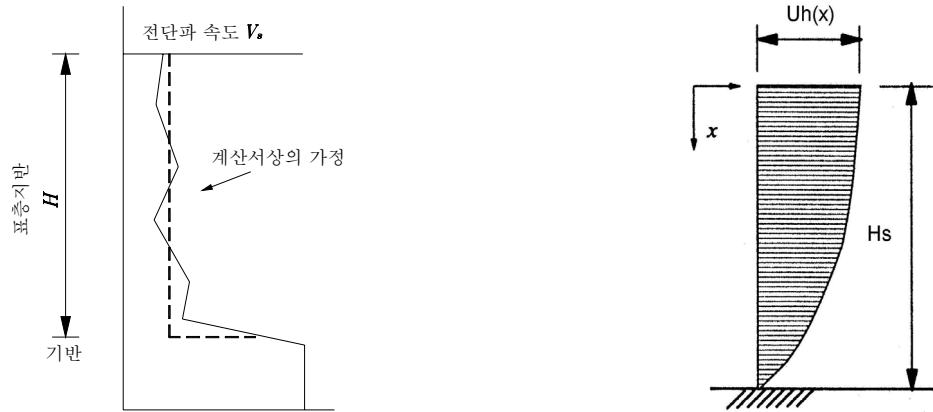
H_s = 지표층 지반의 두께(m)

한편, 지진응답해석은 지반구성이 복잡하고 성질이 다른 토질을 지닌 여러 개의 층이 존재하는 경우 Pro-Shake등과 같은 전용 해석프로그램을 이용하여 응답변위를 산정하게 된다. 이러한 프로그램은 구조물이 설치되지 않은 자유장지반(free-field soil layer)의 지진응답해석을 통해서 지반의 변위를 산정하게 된다. 지반과 구조물이 같이 존재할 경우, 구조물에 의해서 주변지반의 동적물성치 감소가 크지 않기 때문에 지반변위는 자유장지반 보다 작게 나타날 수 있지만(H. Huo et al, 2005) 본 연구에서는 자유장지반의 지진응답 해석 결과를 바탕으로 단일코사인 함수법과 비교하였다.

3. 해석 조건

3.1 해석 부지의 지반조건

본 절에서는 지반의 응답변위를 결정하기 위해서 국내 대도시를 중심으로 수직전력구 공사가 진행 중인 3개의 대표 부지를 선정하여 지반응답해석을 수행하였다. 해석을 위하여 선정된 부지는 대부분 매립토, 퇴적토, 풍화토 풍화암 또는 연암등으로 구성되어져 있으며 대부분 지표층으로부터 10m정도 깊이에서 암반층이 발견된다.



(a) 전단파속도에 따른 지층의 분할 및 평균 전단파속도 (b) 변형형상(모드)

그림 1. 단일코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법

3.2 지반 분류 및 지반의 동적 물성치

지반은 표 1에 나타난 바와 같이 상부 토층 30m의 평균 전단파속도를 기준으로 분류하다. 평균전단파속도는 식 (2)를 이용하여 계산하였으며(건설교통부, 1997), 이를 통해서 지반을 분류하였다. 표 2에서와 같이 해석대상 지반 모두 S_B, S_C 지반에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$v_s = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad , \quad \text{sec} \quad (2)$$

여기서, d_i = 토층 i 의 두께(m)

v_{si} = 토층 i 의 전단파속도(m/sec)

n = 토층의 개수

지반의 고유주기는 식 (3)을 이용하여 계산하였으며(건설교통부, 1997), 해석대상 지반의 고유주기는 0.4초미만의 단주기에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{v_{si}} \quad , \quad \text{sec} \quad (3)$$

여기서, T_G = 토층 설계 고유주기(sec)

H_i = i 번째 토층의 두께(m)

n = 토층 개수

본 해석에서는 1차원 지진응답해석 프로그램인 Pro-Shake를 이용하였으며 해석대상 부지의 전단파속도와 지반응답해석에 필요한 물성은 해석대상부지의 지반조사 자료를 참조하였다. 전단변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선은 Seed et al.(1986), Seed and Sun(1989), Idriss(1990)에 의해 제안된 식을 사용하였다.

표 1. 지반의 분류(건설교통부, 2004)

지반종류	지반상태	상부 30.0m에 대한 평균 지반 특성 ¹⁾		
		평균전단파속도 V_{s30} (m/s)	평균표준관입시험 ²⁾ \bar{N} (타격수)	평균비배수전단강도 \bar{s}_u (kPa)
S_A	경암지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760초과 1500이하		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360초과 760이하	50초과	100초과
S_D	단단한 토사지반	180이상 360이하	15이상 50이하	50이상 100이하
S_E	연약한 토사지반	180미만	15미만	50미만
S_F	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 2. 해석대상 부지의 지반 분류 및 고유주기

	부지A	부지B	부지C
고유주기(sec)	0.212	0.315	0.205
평균 V_s (m/sec)	624.5	480.0	648.6
기반암 깊이(m)	-15.2	-22.5	-13.7
지반분류	Sc	Sc	Sc

3.3 설계지반운동 수준 결정 및 입력지진의 결정

수직전력구의 경우 내진 1등급에 해당하는 구조물이므로 내진 1등급 붕괴방지 수준에 대한 해석을 수행하였다. 설계지반운동 수준은 지진재해도를 이용하여 결정할 수 있지만 본 연구에서는 행정구역 기준을 이용하여 설계지반운동 수준을 결정하였다. 행정구역을 기준으로 지진구역 I 구역과 위험도계수는 재현주기 1,000년에 해당하는 1.4를 적용하여 보통암 노두 기준으로 0.154g를 설계지반운동 수준으로 결정하였다.

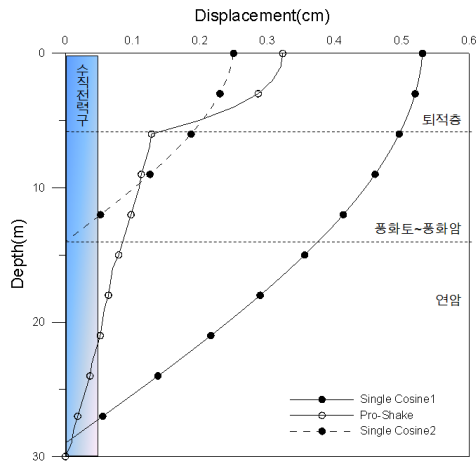
지진응답해석 시 사용한 지진파는 실지진 기록을 바탕으로 장주기 특성을 보이는 Hachinohe 지진파와 단주기 특성을 보이는 Ofunato지진파를 이용하였다.

4. 지반 변위폭 산정 비교

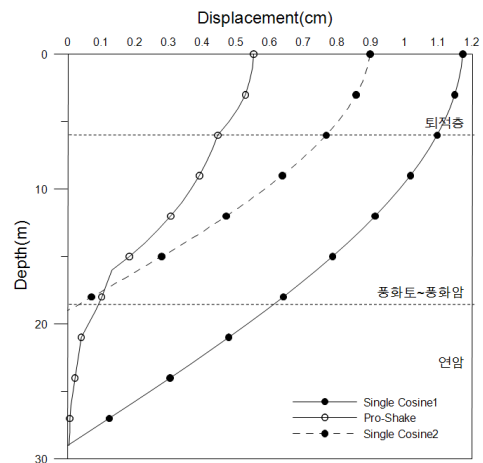
해석 대상 부지에 대한 지진응답해석과 단일코사인 이론을 이용하여 지반변위를 구하였고, 이를 바탕으로 심도별 지반의 상대변위를 구하였다. 상대변위를 구하는 것은 지하구조물에 실제적으로 영향을 미치는 것은 절대변위가 아니라 상대변위이기 때문이다. 그림 2에는 Pro-Shake를 이용한 해석 결과와 식(1)을 이용한 수계산 결과를 도시하였다. 또한 수직전력구의 경우 암반층까지 시공되는 것이 일반적이기 때문에 기반면의 깊이를 탄성파속도를 통하여 산정한 깊이와 구조물 저면을 기반면으로 선정 하였을 때의 결과를 함께 나타내었다.

그림 2의 결과를 살펴보면 단일코사인 방법은 지층이 변하는 경계면에서의 지반변위 증가를 파악할 수 없지만 지진응답해석 결과에 따르면 연약한 지층일수록 지반의 상대변위가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 지반 상부층과 암반층의 강성비가 클 경우 지반의 상대변위는 단일코사인 법과 큰 차이를 보이고 있다. 일반적으로 풍화토 경우 지표면에 가까이에 있는 토층보다 전단파속도가 크고 지반 구속압이 크게 작용하기 때문에 지진 시 지반의 상대변위가 크게 발생하지 않는다. 단일코사인 방법의 경우 기반암 위에서부터 지반변위가 급격히 증가하는 경향을 가지므로, 풍화토에서의 지반특성을 반영할 수 없다.

그리고 기반면의 깊이를 구조물 저면으로 일정하게 가정하여 단일코사인(Single Cosine1)방법으로 지반의 상대변위를 구한 결과값은 기반면의 심도를 전단파속도가 760m/sec를 초과하는 깊이로 가정하여 단일코사인(Single Cosine2)방법으로 구한 지반의 상대변위보다 큰 값을 나타내고 있다. 그림 3에는 해석 부지A에 대해 기반암 심도에 따라서 지진응답해석을 실시한 결과 값이다. 연암층을 기반암으로 선정할 경우 상부 연약한 지반에서의 변위 증가가 크게 나타나지 않지만 기반면이 깊어질수록 지반의 변위는 증가하며, 상부층에서의 상대변위 증가를 파악 할 수 있다.

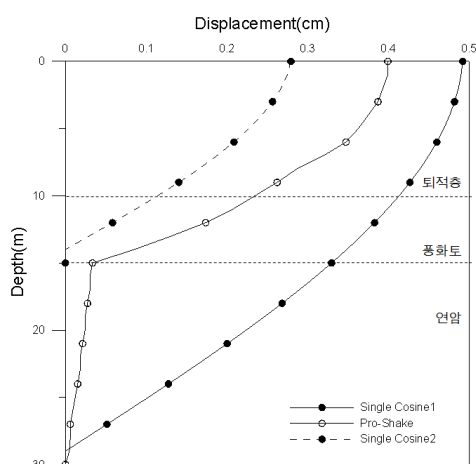


(a) 부지 A



(b) 부지 B

그림 2. 지진응답해석결과 및 변위산정식으로 구한 지반응답 상대변위 비교



(c) 부지 C

그림 2. 지진응답해석결과 및 변위산정식으로 구한 지반응답 상대변위 비교 (계속)

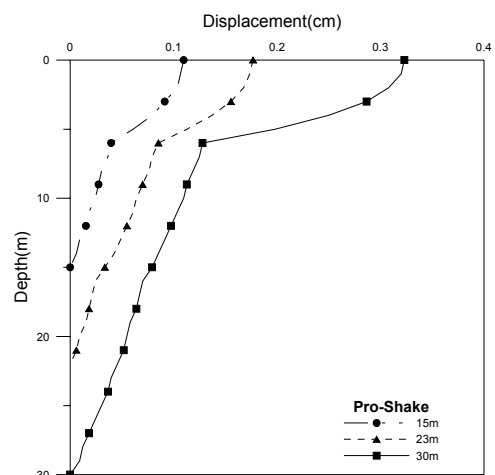


그림 3. 부지 A의 기반암 심도에 따른 지반응답 상대변위

4. 결론

본 연구에서는 수직전력구 내진설계 시 국내의 다층지반 특성을 고려하여 응답변위를 산정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 지반의 상대변위 산정 시 지진응답해석으로 산정한 지반변위보다 단일코사인 방법으로 산정한 지반변위가 최대 2배정도 크게 나타났으며, 지진응답해석 결과가 지층변화에 따른 지반변위를 적절하게 나타내고 있다. 수직전력구의 안전한 설계와 국내 다층지반의 특성을 고려한 내진설계를 위해 두 가지 지반변위 산정방법에 대해 추가적인 연구가 필요할 것이다.
- (2) 연암층을 기반면으로 선정하여 지반의 응답변위를 구할 경우 상부 연약한 지층의 경계부에서 지반변위 증가가 크게 나타나지 않았으며, 기반암의 심도가 깊어질수록 상대변위가 크게 발생하기 때문에 수직전력구 저면을 기반면으로 하여 지반변위를 구하는 것이 안전한 설계를 할 수 있고 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1997) 내진설계기준연구(Ⅱ)
2. 건설교통부 (2004) 지하공동구 내진설계기준 연구
3. Huo, H., Bobet, A., Fernandez, G., and Ramirez, J. (1995) Load Transfer Mechanisms between Underground Structure and Surrounding Ground: Evaluation of the Failure of the Daikai Station, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 131, No. 12, pp.1522-1533
4. Kuesel, T.R. (1969) Earthquake Design Criteria for Subway, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol 6, pp.1213-1231
5. Kuribayashi, E., Iwasaki, T., and Kawashima, K. (1974) Dynamic Behaviour of a SubSurface Tubular Structure, *Proceedings of the Fifth Symposium on Earthquake Engineering*, India.
6. Newmark, N.M. (1986) Problem in Wave Propagation in Soil and Rock, *Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*.
7. Okamoto, S. (1984) Introduction to Earthquake Engineering, Wiley, New York.
8. Sakurai, A. and Takahashi, T. (1969), Dynamic Stresses of Underground Pipeline During Earthquakes, *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*.
9. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982) Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquake, *Earthquake Engineering Research Institute monograph*, Oakland, Calif.
10. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986) Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*.
11. Wang, J.N. (1993) Seismic Design of Tunnels: *A State of the Art Approach, Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc*, New York.