

연구논문

실측파형과 유한요소해석을 통한 방진구의 위치별 진동 저감 연구

송정언* · 김승곤* · 박 훈* · 홍웅기**

전북대학교 자원·에너지공학과*, 서남대학교 환경·화학공학과**

(2013년 6월 13일 접수, 2013년 7월 30일 승인)

A Study on the Vibration Reduction by the Position of Borehole using Experimental Waveform and Finite Element Analysis

Jeong-Un Song* · Seung-Kon Kim* · Hoon Park* · Woong-Ki Hong**

Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Chonbuk National University*

Department of Environmental & Chemical Engineering, Seonam University**

(Manuscript received 13 June 2013; accepted 30 July 2013)

Abstract

In order to improve the environmental vibration, it is necessary to method for not only reduce the vibration source, but also control the vibration path. In this study, we used borehole for estimate the vibration reduction. And also, we analyzed displacement and vibration velocity caused by the position of borehole as well as the condition of borehole in ground structure. Visual FEA(Finite Element Analysis) program was used in this numerical analysis. The results are as follows : The displacement magnitude and X, Y direction displacement were represented to different results due to the condition and position of borehole, and were represented to the lowest values when the position of borehole is the most close condition from the vibration source. And also, the vibration velocity was decreased as using borehole in ground structure. The isolation efficiency of the vibration was calculated to maximum 18.40% when borehole was established to the most close position from the vibration source and the receive point.

Keywords : Borehole, finite element analysis, displacement, vibration velocity

I. 서론

1970년대 이후 국가의 고도 산업화로 인간의 생활 권은 윤택해지고 편리한 삶을 가지게 되었지만, 부차적으로 생활 환경에 있어 불편함을 떠안게 되었다. 특히, 도심지 개발로 인한 건설진동 및 장비의 연속 진동, 자동차 및 전철 등의 교통진동은 인간의 생활 권 내에서 다양한 문제들을 유발하고 있다. 이러한 환경진동을 개선하기 위해서는 진동원에서 발생하는 진동을 감소시키는 방법이 가장 효율적이지만, 진동원에서의 진동 감소가 불가능할 경우 수진점이나 진동의 전파경로 상에서의 진동감쇠 방법을 찾아야 한다. 그 방법으로 진동원과 수진점 사이에서의 진동 차단 방법이 있으며, 일반적으로 방진구 및 방진벽을 통해 진동의 전파경로 상에서 진동을 차단하게 된다. 그동안 방진구조의 방진효과에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 오고 있는데, Wood(1968)는 층상토사 지반에서 방진구의 형태를 다양하게 변화시켜 가며 지반에서의 진동 차단 연구를 수행하였고, Haupt(1977)는 방진구 및 방진벽, 드릴공에 대한 수치모형 실험을 하였으며, 손윤기(1998)는 방진벽에 의한 지반 내 표면파의 산란을 유한요소해석을 통해 보여 주었다. 또한, 전산프로그램을 이용하여 방진구 및 방진벽에 의한 진동 차단 효과를 수치해석한 연구(허영, 2000; 조상호 등, 2000)도 있었으며, 방진구의 재료별 방진효과(이강일, 2006) 및 방진벽의 진동 저감에 영향을 미치는 다양한 매개변수들의 연구(이강일 등, 2003)도 수행되었지만, 수진점에서 측정된 실측 진동파형을 이용한 방진구조의 위치에 따른 진동 저감 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 지반에 인위적인 충격진동을 유발시켜 진동원으로부터 이격된 수진점에서 수직성분 진동파형을 측정하여 방진구의 위치별 진동 저감을 위한 기준 진동데이터로 활용하였다. 실측 수직성분 진동파형을 진동에너지로 역산하여 유한요소 프로그램으로 모델링된 지반구조에서의 진동원으로 수치화하였으며, 유한요소 동해석으로 진동원과 수진점 사이에서 방진구의 유무 및 위치에 따라 변화하는 변위 및 수직성분 진동파형을 비교하여 진동저감효과 및

진동차단효율을 평가하였다.

II. 연구 내용 및 방법

유한요소 동해석을 수행하기에 앞서 지반의 진동원에 0.88kg의 구형 스틸 볼을 1.0m 높이에서 낙하하였을 때의 충격진동을 진동원으로부터 110cm 이격된 수진점에서 측정하여 충격진동의 수직성분 진동파형을 획득하였다. 충격진동 측정은 Canada Instantel사의 BlastMate II DS-477 진동기기를 사용하였으며, 측정된 수직성분 진동파형은 시간증분에 따른 진동속도, 이격거리, 단위중량 보정비, 요소비 등의 관계(홍용기 등, 2012)에 따라 역산하여 진동원에서의 진동에너지로 산출하였다. 지반구조의 기본 물성(Zaman *et al.*, 1984)과 산출된 진동에너지를 모델링된 유한요소 지반구조의 해석 영역에 입력하여 Visual FEA 유한요소 상용프로그램으로 시뮬레이션을 실행하였다. 방진구의 크기는 가로 10cm×세로 30cm로 모델링하였으며, 방진구의 위치는 진동원으로부터 각각 10cm, 30cm, 50cm, 70cm, 90cm 이격된 지점으로 하였다.

1. 해석 조건 및 해석 영역

지반구조의 해석 영역 요소 수는 1,776개였고, 요소 형상은 2차원 평면 변형 요소인 사각형요소를 사용하였으며, 5cm 간격으로 절점을 나누어 각각의 요소를 형성하여 지반구조를 완성하였다. 지반구조의 해석 조건은 비선형재료 상태의 선형 동해석으로 수행되었다. 지반구조의 동해석을 위한 시간증분은 스텝 당 0.000977초로 하였으며, 해석 시간은 충격진동에 의한 수직성분 진동파형만을 구현하기 위해 0초에서 시작하여 0.15초까지 수행하였다. 시간 영역에서의 유한요소 방정식의 해는 일반적으로 직접적분법이 사용되는데, 가장 보편적으로 사용되고 있는 Newmark법(Newmark, 1959)으로 동해석을 하였다. 지반구조의 경계 조건은 해석 영역의 좌우 측면부에서는 $\Delta x=0$ 로서 X축의 변위 u 를 고정하고, 하부에서는 $\Delta y=0$ 로서 Y축의 변위 v 를 고정하였으며, 지반구조는 반무한 등방체로 가정하여 해석 영역의

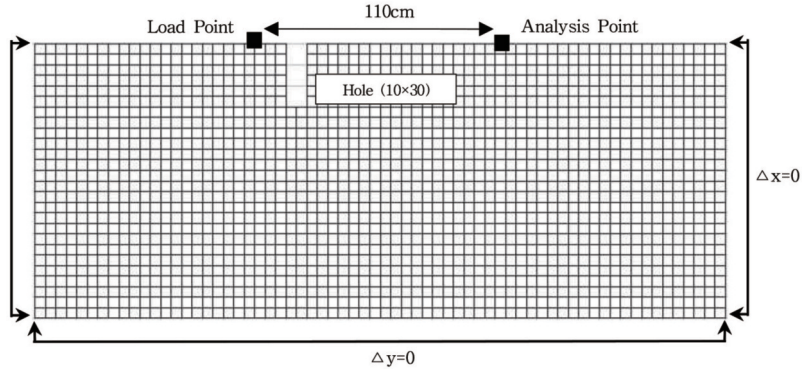


Figure 1. Boundary condition and analysis area

Table 1. Physical properties of Ground

Condition	Unit Weight (g/cm ³)	Elasticity modulus (kgf/cm ²)	Poisson's ratio
Ground	1.7	260	0.37

절점에서 해를 구하였다. Figure 1은 방진구가 있는 지반구조의 경계 상태와 해석 영역을 나타내고 있다.

2. 지반구조 물성 및 진동원

유한요소 동해석에 사용된 지반구조의 물성 값들은 일반적인 토양층에서 얻어진 기초 값(Soil medium-II)을 이용하였다(Zaman *et al.*, 1984). 또한, 진동원에 가해지는 충격 동하중은 실측 수직성분 진동파형을 역산하여 산출된 시간증분에 따른 진동 에너지로 하였다. Table 1은 모델링된 유한요소 지반 구조에 입력한 물성 값을 나타내고 있다.

3. 진동감소계수 및 진동차단효율

전달율로 표현되는 진동감소계수는 지반구조 내의 한 수신점에서 방진구가 있는 경우의 진동속도와 방진구가 없는 경우의 진동속도의 비로 정의내릴 수 있으며, 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_v = \frac{V_{after}}{V_{before}} \quad (1)$$

여기서, D_v 는 진동감소계수, V_{before} 는 방진구가 없을 때의 진동속도, V_{after} 는 방진구가 있을 때의 진동속도이다. 지반 내에서 전파되는 진동속도가 방진구로 인해 완전히 차단된다면 전달율은 0이 되며, 방진구가

수진점의 변위 변화에 전혀 영향을 주지 못한다면 전달율은 1이 된다.(허영, 2000)

아울러, 진동차단효율은 수신점에서 진동속도 감소량의 방진구가 없는 경우의 진동속도에 대한 백분율로 표현될 수 있으며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_d(\%) = [1 - D_v] \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_d 는 진동차단효율, D_v 는 진동감소계수이다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 실측 진동파형과 수치 진동파형 비교

지반구조 내의 진동원에 역산된 진동에너지를 충격 하중으로 입력했을 때 수신점에서의 수치 수직성분 진동파형이 실측 수직성분 진동파형과 부합되는지를 비교하였다. 지반의 기초 물성 값과 실측 진동 데이터를 역산하여 산출한 진동에너지를 지반구조의 해석 영역에 입력하여 수신점에서의 수치 수직성분 진동파형을 산출한 결과, 진동원으로부터 110cm 이격된 수신점에서 얻어진 실측 진동파형과 수치 진동파형이 유사한 형태를 보였다. 하지만, 수신점에서 얻어진 실측 진동파형과 수치 진동파형의 진폭이 0.02초에서 0.04초 사이의 해석 시간에서 약간의 차이를 보였는데, 이는 지반구조를 구성하고 있는 각각의 요소가 최대 진폭이후에 압축과 인장이 병행되면서 진폭감쇠로 이어졌기 때문으로 판단된다. Figure 2는 지반구조의 수신점에서 얻어진 수치 진동파형과 실측 수직성분 진동파형을 비교한 것이다.

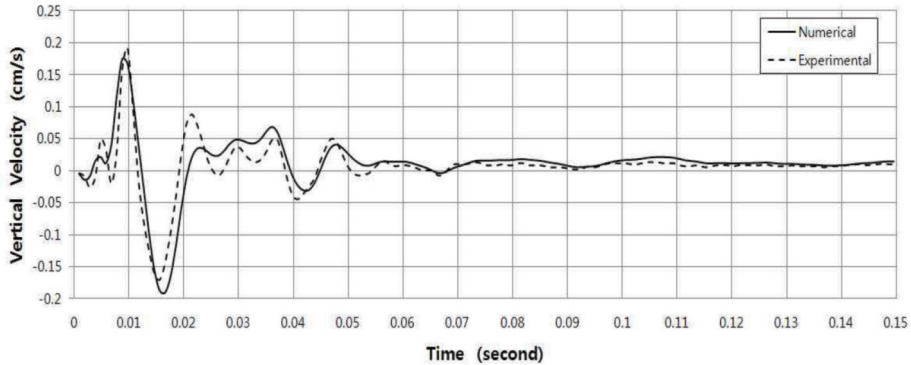


Figure 2. Comparison of experimental and numerical vibration waveform

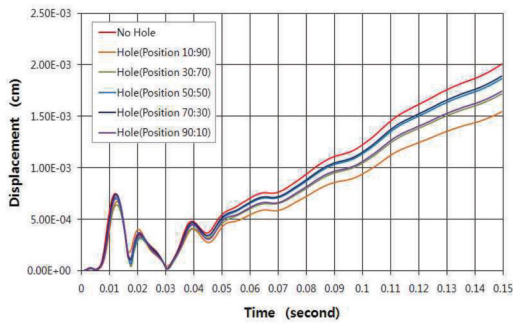


Figure 3. Comparison of displacement magnitude by the position of borehole

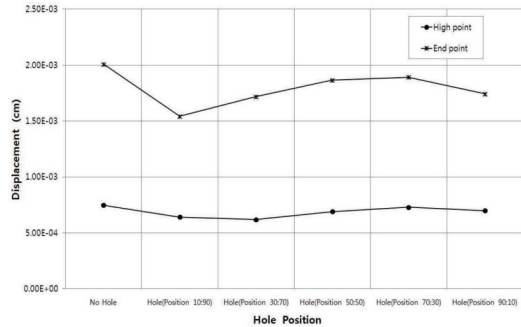


Figure 4. Comparison of displacement magnitude by the position of borehole at step point

2. 방진구 위치별 변위 비교

지반구조의 변위 해석은 진동원으로부터 발생하는 진동에너지가 진동 전과 경로를 통과할 때 방진구의 유무와 방진구의 위치에 따라 각각의 동일 수신점에서 수행되었다. Figure 3은 방진구의 유무 및 위치에 따른 변위 크기를 비교한 것으로 여기서, No hole은 지반구조 내의 진동 전과 경로 상에 방진구가 없을 때를 나타낸 것이고, Hole(Position 10:90)은 진동원으로부터 10cm 이격된 지점에 방진구가 있을 때, Hole(Position 30:70)은 진동원으로부터 30cm 이격된 지점에 방진구가 있을 때, Hole(Position 50:50)은 진동원으로부터 50cm 이격된 지점에 방진구가 있을 때, Hole(Position 70:30)은 진동원으로부터 70cm 이격된 지점에 방진구가 있을 때, Hole(Position 90:10)은 진동원으로부터 90cm 이격된 지점에 방진구가 있을 때를 나타낸 것이다. 먼저, 방진구의 유무에 따른 변위 크기를 보면 방진구의 위치에 상관없이

진동 전과 경로 상에 방진구가 있을 때 수신점에서의 변위 크기가 작게 나타났으며, 방진구의 위치에 따른 변위 크기를 비교한 결과, 시간 증분에 따른 스텝별 역전 현상이 존재하였지만 전반적으로 진동원으로부터 10cm 이격된 지점에 설치된 방진구가 수신점에서의 변위 변화를 최소화시킴을 알 수 있었다. Figure 4는 해석 시간 내의 동일 스텝 지점에서 방진구의 유무 및 위치에 따른 변위 크기를 비교한 것이다. 최대 진폭을 보이는 0.012초에서의 변위 크기는 방진구가 없을 때 7.5×10^{-4} cm, 방진구의 위치에 따라 각각 6.4×10^{-4} cm, 6.2×10^{-4} cm, 6.9×10^{-4} cm, 7.3×10^{-4} cm, 7.0×10^{-4} cm을 나타냈으며, 해석 종료 시간인 0.15초에서의 변위 크기는 방진구가 없을 때 20.1×10^{-4} cm, 방진구의 위치에 따라 각각 15.4×10^{-4} cm, 17.2×10^{-4} cm, 18.7×10^{-4} cm, 18.9×10^{-4} cm, 17.4×10^{-4} cm을 나타냈다.

Figure 5는 진동원에 가해지는 동하중에 따라 변

Table 2. The X and Y direction displacement by the position of borehole at step point

Step No.	Disp't	Hole Condition (×10 ⁻⁴ cm)					
		No Hole	Hole(10:90)	Hole(30:70)	Hole(50:50)	Hole(70:30)	Hole(90:10)
Max. Point	u	3.91	-2.76	1.19	3.20	4.03	3.91
	v	6.38	5.80	6.10	6.13	6.10	5.80
End. Point	u	10.71	-2.28	5.22	8.61	9.51	8.40
	v	16.98	15.27	16.37	16.56	16.37	15.27

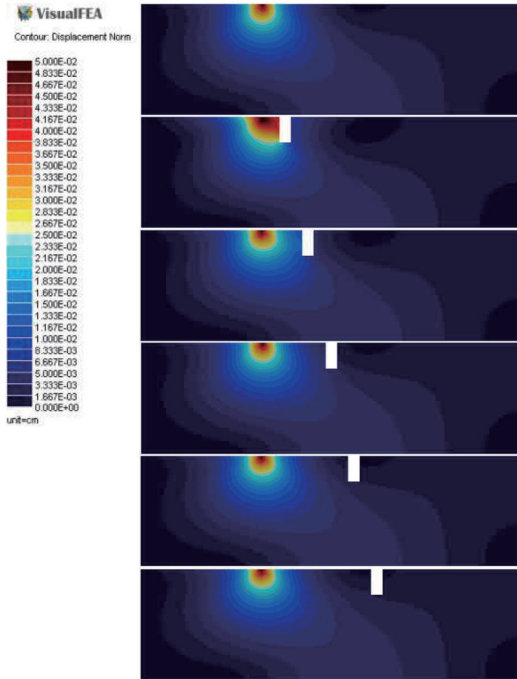


Figure 5. Displacement contour by the position of borehole

화하는 지반구조의 변위 양상을 방진구의 유무 및 위치에 따라 비교하여 나타내고 있다. 해석 종료 시간인 0.15초 후의 변위 양상을 확인한 결과, 방진구의 유무에 따라 지반구조의 표면인 수진점에서의 변위 양상이 변화하였다. 또한, 방진구의 위치에 따라 변위 크기가 달라짐을 확인할 수 있었으며, 이는 방진구가 지반구조의 진동 전파 경로 상에서 진동 에너지를 제어하고 있음을 의미한다. Table 2는 해석 시간 내의 동일 스텝에서 방진구의 유무 및 위치에 따라 수진점에서 산출된 방향별 변위를 나타내고 있다. 최대 진폭을 나타내는 해석 시간인 0.012초에서의 방향별 변위를 비교한 결과, X방향에서의 변위는 방진구의 유무 및 위치에 따라 뚜렷한 차이를 보이지는 않았지만 방진구의 위치가 진동원으로부터 10cm 이

격되었을 때 가장 작게 나타났으며, Y방향에서의 변위는 방진구의 유무에 따라 뚜렷한 변위 차이를 보였고 방진구의 위치가 진동원과 수진점으로부터 10cm 이격되었을 때 가장 작은 값을 나타냈다. 해석 종료 시간인 0.15초에서의 방향별 변위는 X, Y방향 모두 방진구가 없을 때 보다 방진구가 있을 때 작은 값을 나타냈으며, 방진구의 위치에 따른 X방향에서의 변위는 진동원으로부터 10cm 이격되었을 때, Y방향에서의 변위는 진동원과 수진점으로부터 10cm 이격되었을 때 가장 작은 값을 나타냈다.

3. 방진구 위치별 진동속도 평가

실측 진동파형과 비교하여 얻어진 수치 진동파형을 방진구가 없을 때의 기준 진동파형으로 설정하여 방진구의 위치에 따라 수진점에서 산출된 진동파형을 기준 진동파형과 비교하였다. Figure 6은 방진구의 위치에 따른 수직성분 진동파형을 방진구가 없을 때의 기준 진동파형과 비교하여 나타낸 것이다. 해석 시간 내에서 방진구의 유무 및 위치에 따라 수직성분 진동파형의 진폭 변화가 크게 나타나지 않았지만, 0초에서 0.02초 사이의 최대 진폭 구간에서 방진구의 유무에 따른 진동속도의 차이를 확인할 수 있었다. Figure 7은 해석 시간 내의 동일 스텝에서 방진구의 유무 및 위치에 따른 수직성분 진동속도를 비교한 것이다. 최대 진폭을 나타내는 0.009초와 0.017초에서의 수직성분 진동속도를 비교한 결과를 보면, 방진구가 없을 때의 진동속도는 각각 0.1739cm/sec와 -0.1901cm/sec로 나타났으며, 방진구의 위치에 따라 진동원으로부터 10cm 이격되었을 때의 진동속도는 각각 0.1419cm/sec와 -0.1858cm/sec, 진동원으로부터 30cm 이격되었을 때의 진동속도는 각각

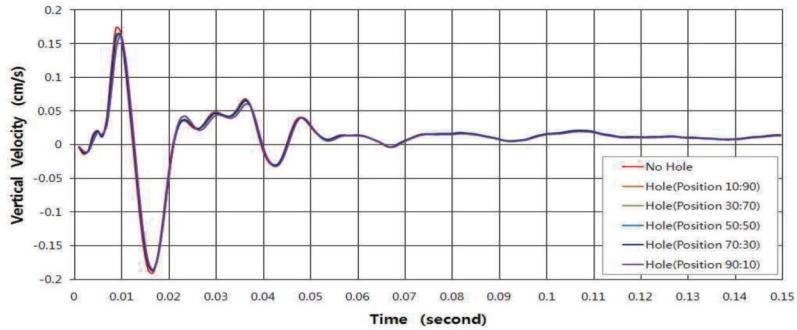


Figure 6. Comparison of vertical vibration waveform by the position of borehole

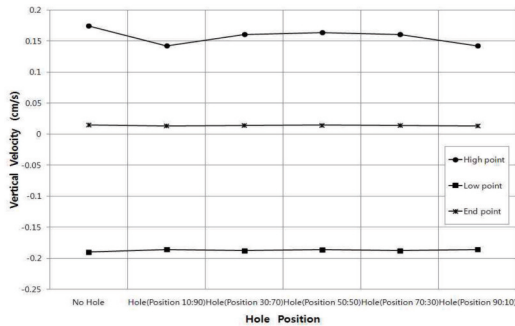


Figure 7. Comparison of vertical vibration velocity by the position of borehole at step point

0.1602cm/sec와 -0.1875cm/sec, 진동원으로부터 50cm 이격되었을 때의 진동속도는 각각 0.1636cm/sec와 -0.1863cm/sec, 진동원으로부터 70cm 이격되었을 때의 진동속도는 각각 0.1602cm/sec와 -0.1875cm/sec, 진동원으로부터 90cm 이격되었을 때의 진동속도는 각각 0.1419cm/sec와 -0.1858cm/sec로 나타났다. 또한, 해석 종료 시간인 0.15초에서 방진구가 없을 때의 진동속도는 0.0148cm/sec, 방진구가 있을 때 진동원으로부터의 이격 위치에 따른 진동속도는 각각 0.0138cm/sec, 0.0143cm/sec, 0.0144cm/sec, 0.0143cm/sec, 0.0138cm/sec로 나타났다. 수직성분 진동속도를 방진구의 유무 및 위치에 따라 비교한 결과를 보고 알 수 있듯이, 방진구가 진동 전파 경로

상에 있을 때 수진점에서의 진동속도가 감소하는 경향을 보였고 방진구의 위치에 따라 진동속도의 변동성을 확인할 수 있었다.

Table 3은 최대 진폭을 나타내는 해석 시간인 0.02초에서의 방진구 위치에 따른 진동감소계수 및 진동차단효율을 나타낸 결과이다. 방진구의 위치가 진동원으로부터 10cm와 90cm 이격되었을 때 수진점에서의 진동감소계수는 0.8160, 진동차단효율은 18.40%로 나타났으며, 진동원으로부터 30cm와 70cm 이격되었을 때 수진점에서의 진동감소계수는 0.9212, 진동차단효율은 7.88%, 진동원으로부터 50cm 이격되었을 때 수진점에서의 진동감소계수는 0.9408, 진동차단효율은 5.92%로 나타나 방진구의 위치가 진동원과 수진점에서 가깝게 설치되어 있을 때 진동차단효율이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 방진구를 활용하여 지반구조 내 진동원으로부터 이격된 수진점에서의 진동 저감에 관한 연구를 수치적으로 모델링한 것으로서, 실제 지반에서 측정된 수직성분 진동파형을 진동에너지로 역산하여

Table 3. Results of the vibration reduction by the position of borehole

Classification	Hole Position				
	Hole(10:90)	Hole(30:70)	Hole(50:50)	Hole(70:30)	Hole(90:10)
D_v	0.8160	0.9212	0.9408	0.9212	0.8160
W_v	18.40	7.88	5.92	7.88	18.40

유한요소로 모델링된 지반구조에서의 진동원으로 수치화하여 진동원과 수진점 사이 방진구의 유무 및 위치에 따라 변화하는 변위 크기와 방향별 변위 및 수직성분 진동파형을 비교하고, 그에 따른 진동저감효과 및 진동차단효율을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출했다.

1. 지반구조 내 수진점에서 비교한 변위 크기와 방향별 변위는 진동 전파 경로 상에서 방진구의 유무 및 방진구의 위치에 따라 변화하였으며, 방진구가 없을 때보다 방진구가 있을 때 변위 값이 작게 나타났고 방진구의 위치가 진동원으로부터 가장 가까운 지점에 설치되어 있을 때 수진점에서의 변위 값이 가장 작게 나타났다.
2. 실측 수직성분 진동파형과 모델링된 지반구조 내 수진점에서의 수치 수직성분 진동파형은 유사한 양상을 나타냈으며, 방진구의 유무 및 방진구의 위치에 따라 진동속도의 감소를 확인할 수 있었다. 방진구가 없을 때보다 방진구가 있을 때 진동속도의 감소를 보였고 방진구의 위치가 진동원과 수진점으로부터 가장 가까운 지점에 설치되어 있을 때 가장 작은 진동속도를 나타냈다.
3. 수진점에서 산출된 수직성분 진동파형의 최대 진폭을 나타내는 시간 영역에서 방진구의 진동차단효율은 최대 18.40%에서 최소 5.92%를 나타냈으며, 방진구의 위치가 진동원과 수진점으로부터 가장 가까운 지점에 설치되어 있을 때 진동차단효율이 가장 양호하게 나타났다.

본 연구에서는 지반구조 내에서 발생하는 다양한 진동이 인접한 지점에 미치는 영향을 제어하기 위해 진동 전파 경로 상에 방진구를 설치하여 방진구의 유무 및 위치에 따른 변위 및 진동속도를 비교하고 진동차단효율을 확인하였다. 이번 연구는 단지 유한요소로 모델링된 지반구조에서의 방진구 유무 및 위치에 따른 진동 저감 연구로서, 추후 실제 지반에서 방진구의 폭, 깊이, 위치에 따른 진동차단효율을 평가하는 연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 손윤기, 1998, 방진벽에 의한 표면파 산란의 유한요소 해석, 한양대학교 석사학위 논문.
- 이강일, 2006, 진동차단공의 재료별 방진효과에 관한 해석적 연구, 한국토목섬유학회지 5(2), 23-30.
- 이강일, 日下部 治, 이진수, 김찬기, 정종범, 2003, 지반환경 진동의 저감효과에 영향을 미치는 매개변수 연구, 대한토목학회지 23(5C), 299-307.
- 조상호, 양형식, 2000, 방진공에 의한 발파진동차단효과의 실험 및 수치해석적 연구, 한국암반공학회지 10(4), 481-485.
- 허영, 2000, 방진벽에 의한 진동 환경 개선 연구, 한국지진공학회지 4(4), 63-71.
- 홍웅기, 송정언, 박영민, 2012, 실측파형과 수치파형에 의한 진동주응력 비교, 한국환경영향평가학회지 21(5), 609-615.
- Haupt, W.A., 1977, Isolation of vibrations by concrete core walls, International Conference of the Soil Mechanics and Foundations Engineering, in processing 9, 251-256
- Newmark, N.M., 1959, A method of computation for structural dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division 85, 67-94.
- Wood, R.D., 1968, Screening of surface waves in soils, Journal of the Soli Mechanics and Foundations Division 94, 951-979.
- Zaman, M.M., Desai, C.S., Drumm, E.C., 1984, Interface model for dynamic soil-structure interaction, Journal of Geotechnical Engineering 110, 1257-1273.

최종원고채택 13. 08. 20