

연구논문

## 실측 파형과 수치 파형에 의한 진동주응력 비교

홍웅기\* · 송정언\*\* · 박영민\*\*\*

서남대학교 환경·화학공학과\*, 전북대학교 자원·에너지공학과\*\*, 한국환경정책·평가연구원\*\*\*  
(2012년 7월 11일 접수, 2012년 8월 13일 승인)

### Comparison of the Vibration Principal Stress by Experimental and Numerical Waveform

Woong-Ki Hong\* · Jeong-Un Song\*\* · Young-Min Park\*\*\*

Department of Environmental & Chemical Engineering, Seonam University\*  
Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Chonbuk National University\*\*  
Korea Environment Institute\*\*\*

(Manuscript received 11 July 2012; accepted 13 August 2012)

### Abstract

In recent years, the development of computer technique was possible to the simulation analysis of the structure caused by ground vibration. Generally, finite element method(FEM) has been used in these structural analysis. In this study, it was calculated to the vibration energy as measuring vibration waveform, and estimated about principal stress due to medium characteristics of the ground as processing dynamic analysis by the vibration energy. The results are as follows : Firstly, the principal stress distribution in all mediums was different due to a medium condition, and the principal stress at concrete medium was represented to difference due to physical characteristics. Secondly, the principal stress by time increasing was represented to maximum amplitude within 0.03 second. And also, the principal stress after maximum amplitude was very large at concrete medium, which was considered to be formed compression or tension range at a medium boundary. Thirdly, the variation of principal stress at concrete medium was represented in the order of RC medium, NC=H medium, NC=S medium. It was considered that the vibration energy propagated fast when a medium have a big elasticity and density.

Keywords : principal stress, vibration energy, finite element method, vibration waveform

## 1. 서론

최근에는 컴퓨터 프로그램 및 전산 기술의 발달로 복잡하고 대형화된 구조물들의 기초 및 지반에 발생하는 지진, 발파진동 및 기계진동, 교통 흐름에 따른 연속진동 등 다양한 진동에 대한 구조물의 거동 및 시뮬레이션 해석이 가능해졌다. 이러한 진동에 따른 구조물의 해석 방법 중 가장 보편적인 방법이 유한요소법(Finite Element Method)이다. 유한요소법은 편미분방정식의 일종으로 구조역학의 2차원 및 3차원, 선형 및 비선형, 정적해석 및 동적해석 등 다양하고 광범위한 문제들을 처리할 수 있으며, 구조해석 분야에서는 필수적인 방법이다. 특히, 도심지 내 건설 현장에서 발생하는 발파진동, 구조물 발파해체로 발생하는 충격진동과 건설 기계 등에서 발생하는 기계진동 및 향타진동은 인접한 구조물에 손상을 주게 된다. 그러나, 이들과 연관된 연구(주재성과 권숙문, 1993; 류창하 등, 1994; 김지연과 임홍철, 2001)는 대부분 진동응답특성이나 구조물의 층간 변위 문제들을 취급하였다. 또한, Krauthammer and Otani(1997), 유희룡(2007)은 다양한 변수에 따른 구조물의 시뮬레이션 및 거동 해석을 수행하였고, 손상도 개념을 도입하여 구조물의 주 부재(기둥, 보, 전단벽) 및 벽돌 구조체에서의 손상 정도를 평가하는 연구(Hao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005) 및 지반의 매질특성에 따른 진동평가(송정연 등, 2011)도 꾸준히 연구되고 있지만, 현재 구조물 기초의 매질에 따른 주응력 양상을 평가하기 위한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 구조물 기초의 매질특성에 따른 주응력 양상을 평가하기 위해 각 매질 위의 동일한 계측 지점에서 계측된 수직성분의 진동파형을 역산하였다. 역산된 진동파형과 시간증분에 따른 이격거리와의 관계식으로부터 진동원에서의 진동에너지를 유도하였고, 그에 따른 동적 해석으로 지반의 매질특성에 따른 주응력을 비교하였다.

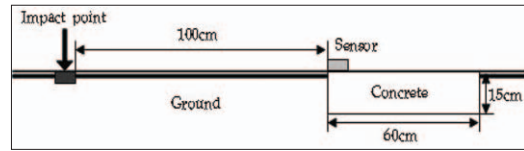


Figure 1. Description of measurement position and a medium position

## II. 연구 내용 및 방법

해석을 수행하기 위해 먼저 기초 매질로 사용된 15cm×15cm×60cm 콘크리트 부재의 물성을 산정하고, 충격 지점에 0.88kg의 구형 스틸 볼을 1.0m 높이에서 낙하하였을 때 충격진동 발생원으로부터 100cm 이격된 기초 매질의 계측 지점에서 계측된 충격진동의 수직성분 진동파형을 역산하여 진동에너지를 수치화하였다. 여기서, 지반 상태의 기초 매질은 Ground, 콘크리트 상태의 기초 매질은 물성에 따라 각각 NC=S, NC=H, RC로 표기하였으며, NC=S와 NC=H는 물성이 다른 무근콘크리트 부재, RC는 철근콘크리트 부재이다. 콘크리트 부재의 물성 산정을 위한 P파 속도는 E46(110V, 60Hz) 초음파 측정기를 사용하여 각 부재의 평균 P파 속도를 산출하였으며, 충격진동 계측은 Canada Instanetel사의 BlastMate II DS-477 진동 계측기기를 사용하여 수직성분의 충격진동 데이터 및 파형을 얻었다. 산출된 각각의 매질별 물성 값과 진동에너지를 구조체의 해석영역에 입력하여 Visual FEA 유한요소 프로그램으로 시뮬레이션을 실행하였다. Figure 1은 충격진동 발생원으로부터 100cm 이격된 지점에서의 계측 위치 및 기초 매질 위치를 나타내고 있다.

### 1. 해석 조건 및 해석 영역

해석 영역의 구조체 요소수는 676개였고, 요소형상은 2차원 평면 변형 요소인 사각형요소를 사용하였으며, 5cm 간격으로 절점을 나누어 각각의 요소를 형성하여 구조체를 완성하였다. 해석은 비선형 재료 상태를 동적 선형 해석으로 수행하였다. 동적 해석을 위한 시간증분은 0.000977초로 하였으며, 해석 시간은 0~0.15초까지 수행하였다. 시간 영역

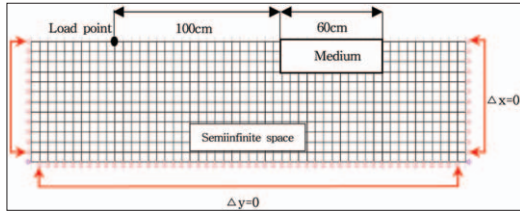


Figure 2. Description of boundary condition and analysis area

에서의 방정식의 해는 일반적으로 직접적분법이 사용되는데, 가장 보편적으로 사용되고 있는 Newmark 법(Newmark, 1959)으로 해석하였다. 경계 조건은 해석 영역의 좌우 측면부에서는  $\Delta x=0$ 로서 X축의 변위  $u, v$ , 하부에서는  $\Delta y=0$ 로서 Y축의 변위  $u, v$ 로 하였으며, 구조체는 반무한 등방체로 가정하여 해석 영역의 절점에서 해를 구하였다. Figure 2는 구조체의 경계 상태와 해석 영역을 나타내고 있다.

### 2. 매질별 물성 산정

매질별 물성 산정을 위하여 콘크리트 매질의 밀도는 부재의 단위중량( $\text{kg/m}^3$ )으로 하였고, 경험식 (1)에 의하여 P파 속도의 평균값으로부터 탄성계수를 산출하였다. 또한, 식 (2)에 의하여 포아송비도 산정되었다. 지반 매질의 물성 값들은 토양층에서 얻어진 기초 값(Soil medium-II)을 이용하였다 (Zaman *et al.*, 1984).

$$E = 735.13 V_p^{2.6675} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수( $\text{MN/m}^2$ ),  $V_p$ 는 P파 속도 ( $\text{km/s}$ )를 나타낸다.

$$E = \gamma V_p^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수( $\text{MN/m}^2$ ),  $\nu$ 는 포아송비,  $\gamma$ 는 부재의 단위중량( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_p$ 는 부재의 P파 속도 ( $\text{km/s}$ )이다. Table 1은 각각의 기초 매질에 따른 물성 값을 나타낸다.

### 3. 매질별 진동에너지 역산

일반적인 지반 매질에서의 충격 지점 및 각각 기초 매질에서의 계측 지점을 가진 구조체의 해석은 지반 및 매질의 물성에 따른 변수들을 얼마나 실제

Table 1. Physical properties of each mediums

Medium	$V$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$V_p$ ( $\text{km/s}$ )	$E$ ( $\text{MN/m}^2$ )	$\nu$
Ground	1700	-	$2.60 \times 10^2$	0.370
NC=S	2080	3.00	$1.38 \times 10^4$	0.303
NC=H	2200	3.68	$2.38 \times 10^4$	0.272
RC	2230	3.83	$2.64 \times 10^4$	0.266

Table 2. Parameter of vibration energy

Parameter	$\gamma_c$	$D$ (cm)	$S_l$
Ground	1.0000	100	1/5
NC=S	1.2235	100	1/5
NC=H	1.2941	100	1/5
RC	1.3118	100	1/5

와 동일하게 하느냐에 따라 결과가 달라질 수 있다. 따라서, 충격진동에 따른 매질별 유한요소해석은 각 매질의 물성 변수와 입력 하중의 정확한 산정이 중요하다. 각각의 기초 매질의 물성 값은 Table 1의 값들을 입력하였고, 충격 하중은 실측된 수직성분 진동파형을 식 (3)으로 역산하여 산출된 진동에너지로 하였다.

$$P = \gamma_c \times \frac{V}{\Delta t} \times D \times S_l \quad (3)$$

여기서,  $P$ 는 실측 진동파형을 역산하여 산출한 진동에너지,  $\gamma_c$ 는 각 기초 매질에 따른 단위중량 보정비,  $\frac{V}{\Delta t}$ 는 시간증분에 따른 진동속도,  $D$ 는 충격 지점과 계측 지점간의 이격 거리,  $S_l$ 은 요소의 단위 길이 에 따른 축소비이다. Table 2는 진동에너지를 역산하기 위해 산정된 변수들의 값을 나타내고 있다.

## III. 연구 결과 및 고찰

### 1. 실측 파형과 수치 파형 비교

기초 매질에서의 주응력을 평가하기 위해 먼저 계측 지점에서의 수직성분 실측 파형과 수치 파형을 비교하여 동적 해석을 위한 동하중의 적용성을 확인하였다. 산정된 물성 값과 역산된 진동에너지를 해석영역에 입력하여 계측 지점에서의 수직성분 진동파형을 산출한 결과, 100cm 이격된 계측 지점에서 얻어진 실측 파형과 수치 파형은 모든 기초 매

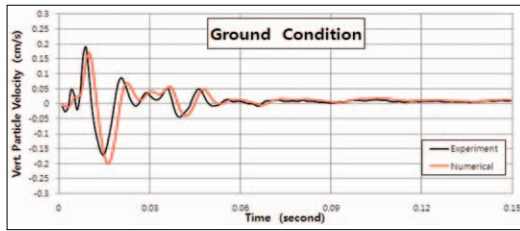


Figure 3. Comparison of experimental and numerical waveform at ground medium

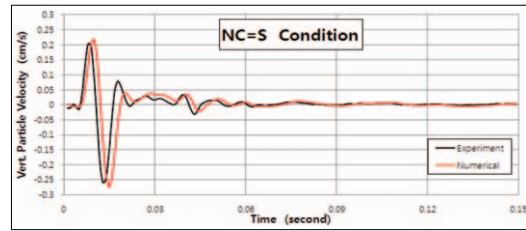


Figure 4. Comparison of experimental and numerical waveform at NC=S medium

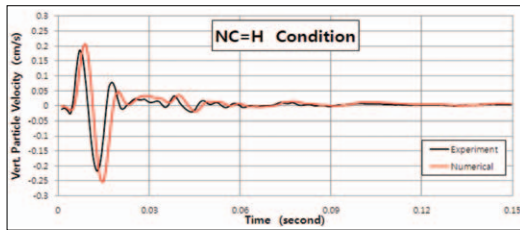


Figure 5. Comparison of experimental and numerical waveform at NC=H medium

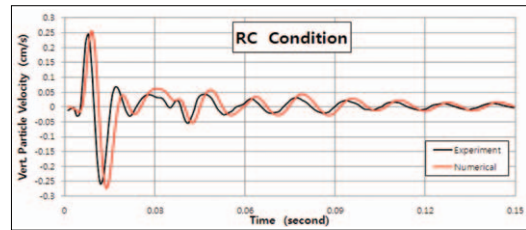


Figure 6. Comparison of experimental and numerical waveform at RC medium

질에서 유사한 진동파형을 나타냈다. 하지만, 각 기초 매질의 계측 지점에서 얻어진 실측 파형과 수치 파형의 진동 해석시간이 약간의 차이를 보였는데, 이는 역산된 진동에너지를 수치 파형으로 변환시키는 과정에서 0.001초의 스텝 오차가 발생되었기 때문으로 판단된다. Figure 3~Figure 6은 각 기초 매질의 해석영역 내에서 얻어진 수치 진동파형과 실제 계측된 수직성분 진동파형을 나타낸 것이다.

## 2. 파형별 변위 및 주응력 비교

각 기초 매질에서의 변위 및 주응력 해석은 매질 내부에서 수평방향 10cm 간격으로 7개의 해석 절점에서 분석하였다. Figure 7은 각 매질 내부에서의 해석 절점을 나타내고 있으며, Table 3은 0.15초의 해석 시간 후 해석 절점에서의 변위 값을 보여주고 있다.

계측 지점에서 계측된 수직성분 진동파형을 역산하여 충격 지점에서의 동하중을 진동에너지로 입력하여 해석을 실행하였을 때 지반 상태의 기초 매질과 콘크리트 상태의 기초 매질에서의 주응력 분포 양상과 주응력의 방향성을 확인할 수 있었다. Figure 8과 Figure 9는 해석 시간영역으로 0.15초 후 기초 매질이 지반 상태일 때와 콘크리트 상태일

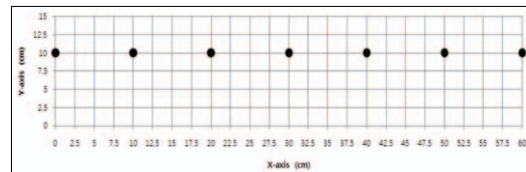


Figure 7. Description of analysis point in each mediums

Table 3. Displacement of vertical and horizontal point in each mediums

Coordinate (X, Y)	Displacement	Medium condition			
		Ground (cm) [ $\times 10^{-4}$ ]	NC=S (cm) [ $\times 10^{-4}$ ]	NC=H (cm) [ $\times 10^{-4}$ ]	RC (cm) [ $\times 10^{-4}$ ]
(0, 10)	u	33.79	10.60	15.66	17.76
	v	13.46	4.97	7.48	8.53
(10, 10)	u	31.57	10.57	15.63	17.73
	v	13.18	4.99	7.42	8.45
(20, 10)	u	28.99	10.52	15.60	17.69
	v	12.76	4.96	7.31	8.31
(30, 10)	u	26.13	10.48	15.55	17.65
	v	12.32	4.86	7.13	8.10
(40, 10)	u	23.09	10.42	15.51	17.60
	v	11.92	4.69	6.89	7.81
(50, 10)	u	19.83	10.37	15.46	17.56
	v	11.59	4.46	6.58	7.46
(60, 10)	u	16.68	10.33	15.43	17.52
	v	11.32	4.20	6.24	7.08

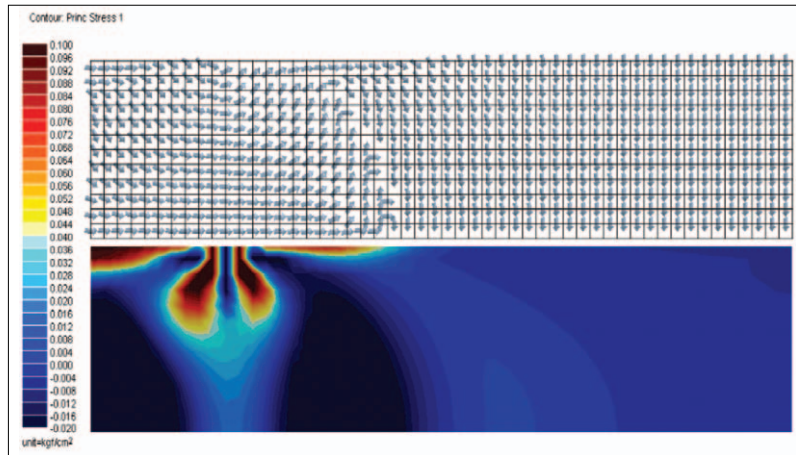


Figure 8. Description of maximum principal stress in ground medium

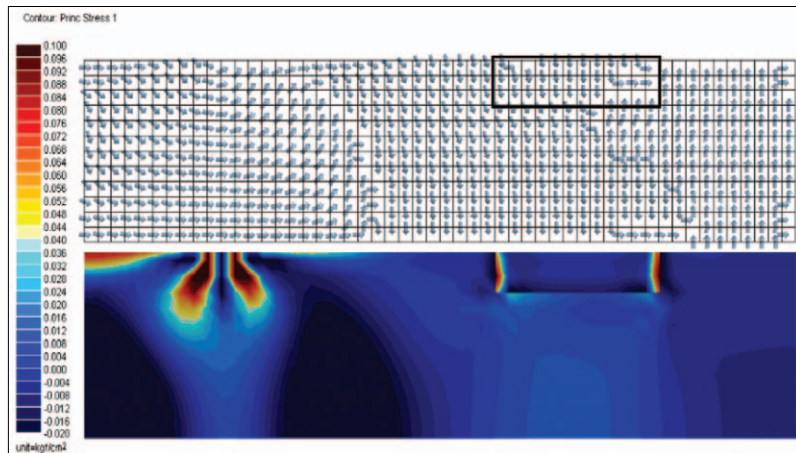


Figure 9. Description of maximum principal stress in concrete medium

때 충격 지점에 역산된 진동에너지를 입력하였을 때의 주응력 분포 양상과 방향성을 나타내고 있다. 충격 지점에 진동에너지가 가해질 때 지반 매질의 내부에서 요소들의 압축대 및 인장대가 형성되었다. 충격 지점과 100cm 이격된 지점에서는 기초 매질의 상이성 때문에 주응력의 압축 및 인장 변화가 크게 나타났다. 지반 상태의 기초 매질에서는 압축 주응력이 우세하게 작용한 반면에 콘크리트 상태의 기초 매질에서는 압축 및 인장 주응력이 공존하였고, 지반 매질과 콘크리트 매질의 경계 부분에서 큰 주응력 변화를 볼 수 있었다. 이는 지반 매질에서 발생된 충격진동에 의한 에너지가 다른 매질에 도달되었을 때 각 매질의 경계 부분에서 압축 반력이

작용함으로써 기초 매질 내부에서 인장대가 형성된 것으로 판단된다.

### 3. 시간증분에 따른 매질별 주응력 평가

Figure 10~Figure 13은 기초 매질에 따라 각각의 수평방향 해석 절점에서 산출된 시간영역에서의 주응력 양상을 나타내고 있다. 모든 기초 매질에서 주응력 값은 수직성분 진동파형의 최대 진폭이 발생하는 0.03초 이내 시간영역에서 크게 나타났다. 또한, 지반 상태의 기초 매질에서는 최대 진폭 이후에 주응력의 변화가 크지 않았지만, 콘크리트 상태의 기초 매질에서는 최대 진폭 이후에 주응력의 변화가 더욱 커지는 지점을 알 수 있었다. Figure 10

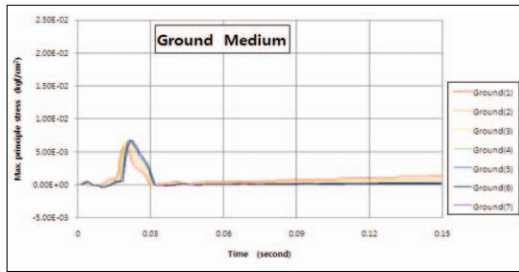


Figure 10. Comparison of maximum principal stress by time increasing at ground medium

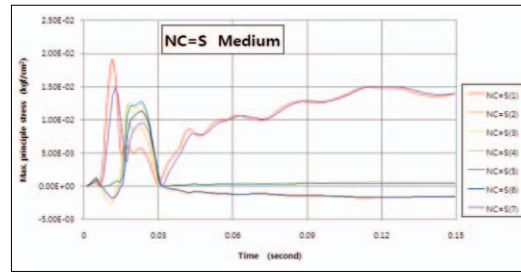


Figure 11. Comparison of maximum principal stress by time increasing at NC=S medium

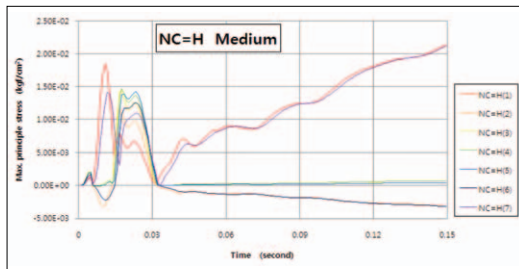


Figure 12. Comparison of maximum principal stress by time increasing at NC=H medium

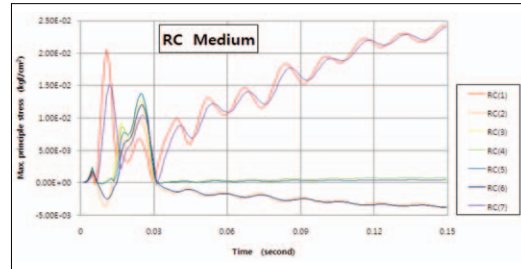


Figure 13. Comparison of maximum principal stress by time increasing at RC medium

에서는 지반 상태의 기초 매질일 때 수직성분 진동 파형의 최대 진폭 이후 0.15초에서의 주응력 값은 각각  $0.00135 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00092 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00064 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00044 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00030 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00020 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00012 \text{ kgf/cm}^2$ 로 충격 지점과 멀어질수록 작게 나타났고, Figure 11~Figure 13에서는 콘크리트 상태의 기초 매질인 NC=S 매질에서의 주응력 값은 각각  $0.01394 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00166 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00039 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00057 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00036 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00160 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.01398 \text{ kgf/cm}^2$ , NC=H 매질에서의 주응력 값은 각각  $0.02145 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00316 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00044 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00075 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00043 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00320 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.02118 \text{ kgf/cm}^2$ , RC 매질에서의 주응력 값은 각각  $0.02442 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00367 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00048 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00084 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.00048 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $-0.00379 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0.02409 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났다. 콘크리트 상태의 기초 매질에서는 지반과 콘크리트 상태의 매질 경계 부분에서 압축 반력에 의한 인장력이 형성되었고, 경계 부분에서의 인장력이 경계 부분과 가장 인접한 지점에서 압축력으로 작용하였으며, 각 매질의 중간 부분에서는 주응

력의 변화가 크지 않았다. 또한, 콘크리트 상태의 기초 매질 중 RC 매질이 NC=H 매질과 NC=S 매질보다 주응력 변화가 크게 나타났는데, 이는 매질의 탄성계수와 밀도가 클수록 매질 내부에 전파되는 충격파가 더욱 빠르게 통과하기 때문으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구는 지반에서 발생하는 진동이 인접한 구조물의 기초에 영향을 미치는 주응력의 변화 정도를 평가하기 위해 수행되었다. 그 평가의 일환으로 인위적인 충격진동을 발생시켜 동일한 계측 지점에서 계측하여 얻어진 수직성분 진동파형을 수치적으로 역산하여 산출된 진동에너지를 바탕으로 다양한 기초 매질 내부에서의 주응력 양상을 해석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실측된 수직성분 진동파형을 역산하여 산출한 진동에너지를 해석 구조체의 충격 지점에 가했을 때 기초 매질의 조건에 따라 다른 주응력 분포를 나타냈고, 콘크리트 상태의 기초 매질에서는 매질의 물성에 따라 주응력 값의 차이를 보였다.

2. 시간영역에서의 주응력 값은 모든 기초 매질에서 수직성분 진동파형의 최대 진폭이 발생하는 0.03초 이전에 크게 나타났다. 또한, 지반 상태의 기초 매질보다 콘크리트 상태의 기초 매질에서 최대 진폭 이후 시간증분에 따른 주응력 값의 변화가 크게 나타났는데, 이는 지반 매질과 콘크리트 매질의 경계 부분에서 진동에너지가 흡수 또는 반사되어 매질 내부에서 압축 및 인장대가 형성되었기 때문으로 판단된다.

3. 콘크리트 상태의 기초 매질에서 주응력 변화는 RC 매질이 가장 크게 나타났고, NC=H 매질, NC=S 매질 순으로 주응력의 변화를 나타냈다. 이는 매질의 탄성계수와 밀도가 클수록 진동에너지가 빠르게 전파되기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 지반에서 발생하는 진동이 인접한 구조물의 기초에 미치는 영향을 평가하기 위해 기초 내부에서의 주응력 분포를 도식화하고, 주응력 값의 변화를 정량적으로 도출하였다. 이로서, 사전 진동영향 평가 시 단지 구조물 기초에서 측정한 진동속도 값에 의한 평가뿐만 아니라 기초 내부에서의 주응력 양상을 평가 요소로 활용한다면 더욱 정확한 평가가 이루어질 것으로 사료되며, 추후 실규모의 구조물 지반 매질 및 복합적 매질에서의 진동 전파특성에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 김지연, 임홍철, 2001, 지반진동으로 인한 철근콘크리트 구조물의 손상도 추정, 대한건축학회 학술발표논문집 21(2), 225-228.
- 류창하, 선우춘, 정소걸, 이종립, 주광호, 이대수, 1994, 안전관련 구조물 근접 시공시 발파진동 허용기준의 적 용성에 관하여, 한국암반 공학회지 4(3), 287-297.
- 송정연, 홍웅기, 김승곤, 2011, 매질 특성에 따른 충격진동 평가에 관한 연구, 한국환경영향평가학회지 20(5), 641-649.
- 유희룡, 2007, 구조물-유체-지반의 동적 상호작용 해석을 위한 유한요소 모델링, 전북대학교 박사학위 논문.
- 주재성, 권숙문, 1993, 근접 발파에 대한 시멘트 블록조 건물의 진동응답 특성, 한국자원공학 회지 30(3), 259-264.
- Hao, H., Ma, G.W., Lu, Y., 2002, Damage assessment of masonry infilled RC frames subjected to blasting induced ground excitations, Engineering Structures 24, 799-809.
- Krauthammer, T., Otani, R.K., 1997, Mesh, gravity and load effects on finite element simulations of blast loaded reinforced concrete structures, Computers and Structures 63, 1113-1120.
- Newmark, N.M., 1959, A method of computation for structural dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division 85, 67-94.
- Wu, C., Hao, H., Lu, Y., 2005, Dynamic response and damage analysis of masonry structures and masonry infilled RC frames to blast ground motion, Engineering Structures 27, 323-333.
- 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 12. 08. 24