

지반진동으로 인한 R/C 구조물의 손상에 관한 연구

Damage Prediction of Reinforced Concrete Structures due to Ground Motion

임 흥 철* 김 지 연**
Rhim, Hong-Chul Kim, Ji-Yeon

Abstract

Urbanization and development of industry makes people concerned about quality of circumstances. Problems of vibration are on the rise. Vibration makes inhabitants feel unpleasant and involves structural damage.

The purpose of this study is to assess damage of reinforced concrete structures due to ground motions as the parameters of frequency, duration time and aspect ratio of structures are changed. Ground motions were modeled as sine waves. To compare sine waves with real ground motions, two cases are selected; one is blast loading case and the other is earthquake loading.

It was intended to provide means to assess R/C structure damage due to ground motions.

keywords : Ground Motion, Reinforced Concrete Structure, Damage Index

1. 서 론

도시화와 산업의 발달로 환경의 질에 대한 관심이 증가하면서 진동에 대한 문제들이 대두되었고, 이를 해결하기 위한 필요성이 증가되었다. 진동은 건물의 거주자에게 불쾌함을 유발하며, 심한 경우에는 구조적 손상을 일으킬 수도 있다. 발파 등으로 인한 지반의

진동으로 주변의 압반에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구결과가 나와 있으나 구조물이 받는 영향에 대한 연구 결과는 실제 실험을 통한 대상 건물의 균열 측정이 대부분이다. 또한, 건물의 진동거동에 대한 연구가 있으나 해석대상 구조물이 매우 제한적이다.^{1),2),3),4),5),6)}

본 논문에서는 다양한 지반 진동으로 인한 건물의

* 정회원, 연세대 건축공학과 교수, 공학박사

** 학생회원, 연세대 건축공학과 석사과정

E-mail : jstyle77@orgio.net, 02-2123-2792

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

손상도를 추정할 때, 진동원의 진동수와 지속시간, 그리고, 해석대상 구조물의 진동수 등을 변수로 하여 연구하였다.

이 결과를 바탕으로 진동이 예상될 때 간단한 방법으로 구조물의 손상도를 예측할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

진동원을 사인파로 모델링하여 진동수와 지속시간을 변화시켜 진동원의 영향을 알아보았고, 해석대상 구조물을 5가지로 분류하여 구조물의 진동수에 의한 영향을 분석하였다. 구조해석 및 손상도 해석에는 IDARC-2D version 5.0을 사용하였다.⁷⁾

2. 지반 진동과 손상 지수

2.1 지반 진동

구조물에 영향을 미치는 지반진동의 원인은 크게 지진, 발파, 기계진동, 차량진동 및 말뚝의 항타등을 들 수 있다.

지진과 관련된 지반운동은 수직, 수평방향으로 모두 운동요소를 갖는 매우 복잡한 운동인데, 수평방향의 운동이 구조물의 응답에 특히 중요하다. 지진의 강도(진도)를 정하기 위해서 다양한 분류방법이 사용될 수 있다. 충격으로 여겨질 수 있는 약진은 중력 가속도 0.1 배의 지반 가속도(0.1 g)를 일으키는 반면에 강력한 불규칙 지진은 약 0.1 g에서 1.0 g 범위의 지반 가속도를 갖는다.

발파로 인한 피해로는 응력파에 의한 지반진동 및 발파풍압, 비석 등을 들 수 있으며, 폭원과 어느 정도 떨어져 위치한 구조물에 발생하는 피해는 주로 지반진동에 기인한다. 일반적으로 발파진동은 인위적으로 발생하는 진동 중에서 주변에 미치는 영향도가 가장 큰 것으로 평가된다. 발파진동의 주진동수는 수 10 ~ 수 100 Hz 사이로 다양하나 어떤 발파 형태는 진동수의 범위가 더욱 제한되는 경향도 있다. 주진동수는 발파가 적용되는 산업에 따라 다르다. 노천탄광에서는 다소 큰 발파가 이루어지는데 적당한 거리의 구조물에서 측정하면, 건설 발파의 주진동수보다 더 낮은 주진동수가 발생한다. 건설발파에서는 발파 규모가 더 작으

Table 1 발파진동과 지진진동

구 분	발파진동	지진진동
진원의 깊이	지표 또는 지표 가까운 내부	지하 10 km 이상
진동의 주파수	수 10 ~ 수 100 Hz	1 Hz 정도 또는 그 이하
진동지속시간	0.1 sec 정도 이내	10 sec 이상
진동의 파형	비교적 단순	복잡

나, 암석에서 암석으로 전달되는 경로와 마찬가지로 구조물과 폭원 사이의 거리가 짧을 때도 진동수가 아주 높아지는 경향이 있다.¹⁾

도로와 철도, 말뚝박기작업으로 인한 진동은 구조물과 진동원으로부터 인접한 지반도로교통과 철도에 의한 지반 진동의 크기와 진동수는 교통수단의 차량 현가장치, 도로나 트랙 표면의 거칠음, 그리고 진동이 전달되는 토질의 성질에 대한 함수이다. 대부분의 도로교통과 철도 진동수는 일반적으로 5 ~ 50 Hz의 범위에 속한다.

말뚝 해머의 일회 가격에 의해 발생된 진동은 진동의 사이클이 거의 없으며, 다시 수분 함유량이 높은 토질을 통해 전달되는 낮은 진동수를 만들어 내는 특성을 보여준다. 다시 말해, 전달된 진동수들은 구조물의 고유진동수의 일반적인 영역인 5 ~ 50 Hz의 범위에 있게 된다.⁸⁾

2.2 손상 지수

반복하중에 의한 콘크리트 구조물의 손상도를 손상도 계수로 나타내는 방법은 여러 가지가 있으나 그 중 Park & Ang 모델을 사용하였다.³⁾

이 방법은 반복하중에 의한 구조물의 손상도를 손상도 계수로 나타내는 것으로 부재의 최대변형과 소산된 이력 에너지의 선형결합으로 이루어진 방법이다.

$$D_i = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

D_i ; i 부재의 손상지수

δ_M ; 반복하중 하에서의 최대 변형도

δ_u ; 극한 변형도

Q_y ; 부재의 항복강도

$\int dE$; 소산된 이력에너지

β ; 소산된 에너지와 관련되는 강도저감 계수

이 방법은 주기적 하중을 받을 때의 철근 콘크리트의 물리적 특성을 고려할 때 식 (1)과 같이 각종 독립 변수들의 영향을 선형 결합으로 고려한다는 것은 논란의 여지가 있으나 지금까지의 기술적인 논문에서 가장 많이 다루어지고 있는 방법이므로 이 방법을 사용하였다.

구조물의 손상도는 부재들의 손상의 함수이다. 구조물 전체의 손상을 측정하는 어떤 방법도 건물의 가장 약한 부분의 가능한 손상 집중을 반영하므로, 손상의 분배는 흡수된 에너지의 분포와 가까운 관계가 있다. 그러므로 전체적인 손상도는 다음과 같이 표현된다.

$$D_T = \sum_i \lambda_i D_i \quad (2)$$

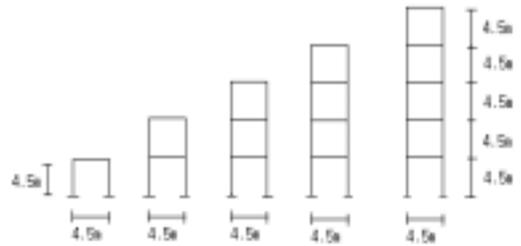
λ_i 는 소산된 이력 에너지의 비에 의한 가중치로 $\lambda_i = E_i / \sum E_i$ 이고 E_i 는 스프링 i 의 총 흡수된 에너지이고, D_T 는 구조물 전체의 손상도이다. 이 값이 0 이면, 손상이 전혀 없는 것을 의미하고, 0.4 이하이면 복구 가능한 손상이며, 1 이면 구조물의 파괴를 의미한다.

3. Parametric study

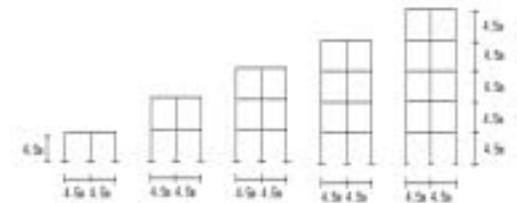
IDARC-2D는 한층 당 하나의 수평 자유도를 가정하여 전체적인 계산을 대폭 축소하였다. 각각의 프레임은 동일한 평면에 존재하며, 비틀림 효과는 고려되지 않는다. 지반진동은 지지단의 모든 절점에 동시에 작용하게 모델링하였다.

구조 요소들의 이력 거동 모델링은 강성감소, 강도저감, 그리고 철근의 미끌림 특성을 고려한 Three Parameter Park Model을 사용하였으며, 손상지수 모델링은 Park and Ang Damage Model을 사용하였다.⁷⁾

다양한 구조물을 모두 해석대상으로 선정하면 연구의 결과가 더욱 정확하겠지만, 실질적으로 그렇게 하기 힘들기 때문에, 해석대상 구조물의 진동수가 바뀔 때의 전체적인 분포를 보기 위하여 해석대상 구조물을 Fig. 1과 같이 선정하였다. 해석대상 구조물은 철근콘크리트 구조로 보와 기둥으로 구성되어 있으며, 슬래브는 질점별 질량으로 고려한다. 각 층별 질량은 4.50 t 이고, 적재하중은 일반 사무실일 때의 등분포 적재하중으로 모든 층이 250 kgf/m²으로 동일하게 한다. 해석대상 구조물의 모든 보는 300 mm (Depth) × 150 mm (Width) 이고, 기둥은 250 mm × 250 mm이다. 구조물의 폭과 높이는 1.5 m 를 모듈로 하여 층고 4.5 m, 폭 4.5 m로 하였다. 콘크리트의 강도는 $f'_c=300$ kgf/cm² 을 사용하였으며, 구조물은 이 차원으로 모델링 하였다.



(a) 1경간 구조물



(b) 2경간 구조물

Fig. 1 구조 해석 모델

Table 2 해석대상 구조물의 1차 고유 진동수 (Hz)

경간 \ 층수	층수				
	1	2	3	4	5
1경간	3.19	1.66	1.11	0.83	0.66
2경간	3.39	1.82	1.23	0.92	0.74

3.1 진동수

구조물에 영향을 미치는 지반진동 중 지진은 대략 주파수가 1 Hz 정도나 그 이하로 알려져 있고, 도로교통이나 철도교통에 의한 지반의 진동수는 대략 5 Hz~50 Hz 범위에 속하며, 발파진동은 수 10 Hz~수 100 Hz 범위에 속한다. 따라서 지반 진동의 진동수를 1~10 Hz사이를 1 Hz 간격으로 나눠서 결과를 살펴보았다.(Fig. 2)

위의 Fig. 2의 결과를 구조물의 진동수와 진동원의 진동수의 비에 관해서 나타내면 다음 Fig. 3과 같다. 위의 Fig. 3을 보면 진동원의 진동수와 구조물의 1차 고유진동수가 같은 지점에서는 손상도 값이 큰 것을 알 수 있으며, 진동원의 진동수가 구조물의 1차 고유진동수의 7배 정도를 넘게 되면 손상도의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

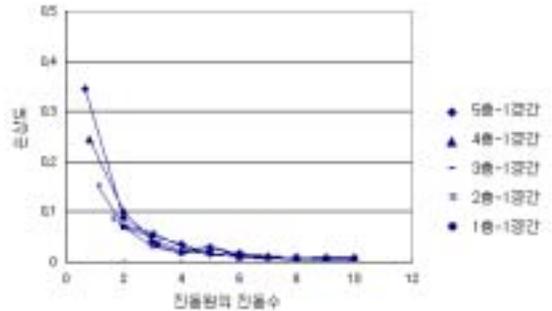
3.2 진동의 지속시간

진동의 지속시간은 지진의 경우 수 10초 이상이고, 발파는 0.1초 이내이다. 따라서 지속시간을 0.1초, 1초, 5초, 10초로 변화시켜 지속시간의 변화가 구조물에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과, 지속시간이 0.1초와 1초일 때의 결과가 차이가 많이 나기 때문에 0.1초와 1초 사이에 0.3초와 0.5초 일 때를 추가하여서 시간에 따른 변화를 알아보았다.

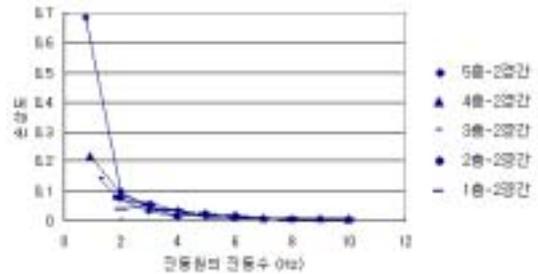
진동원의 진동수가 2 Hz인 경우에는 지속시간이 5초 정도 이상이면 손상도의 변화가 작고, 진동원의 진동수가 10 Hz인 경우에는 지속시간이 1초 정도 이상이면 손상도 값의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 진동원의 진동수가 2 Hz인 경우에 주기가 0.5초이므로 5초의 지속시간 동안 10 cycle이 반복이 되고, 진동원의 진동수가 10 Hz인 경우에는 주기가 0.1초이므로 1초 동안 10 cycle이 반복이 된다. 즉, 최대 가속도 값이 같고 일정한 진동수의 진동이 10 번 정도 반복적으로 작용한 후에는 손상도의 증가폭이 작은 것을 알 수 있다.

이는 식 (1)에서 오른쪽 항을 살펴보면, δ_M/δ_u 은 동하중하에서의 변형이 부재의 극한 변형의 몇 배인

가를 나타내는 값으로 시간의 누적과는 관계가 적고, $(\beta/Q_y \delta_u) \int dE$ 이 소산된 이력에너지의 총합이 반영되어서 시간의 누적과 관계되는 항이다. 그런데 손상도 값에서 이 항의 비중이 그리 크지 않아서 시간의 변화에 따른 손상도 값의 변화가 적은 것으로 판단된다.



(a) 1경간 구조물의 경우



(b) 2경간 구조물의 경우

Fig. 2 진동원의 진동수와 손상도 관계

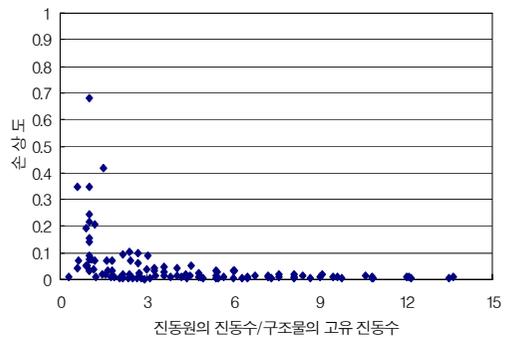
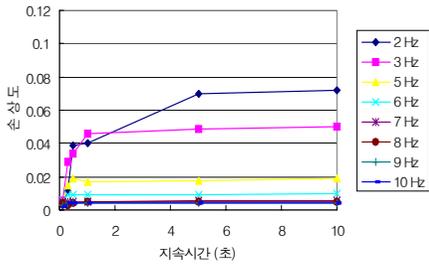
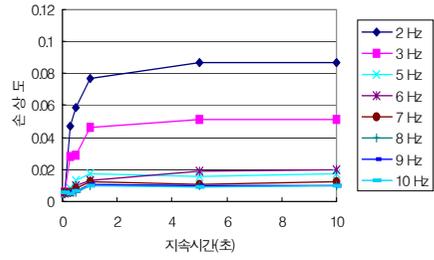


Fig. 3 진동원의 진동수/구조물의 진동수와 손상도 관계

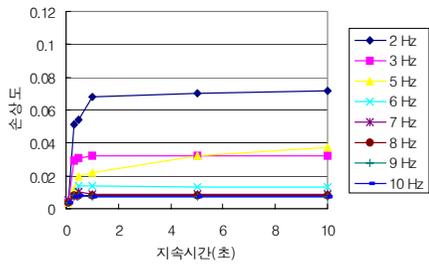


(a) 1층-1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계

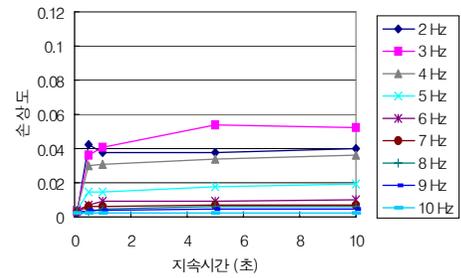


(e) 5층-1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계

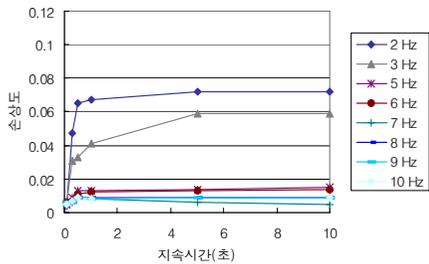
Fig. 4 1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



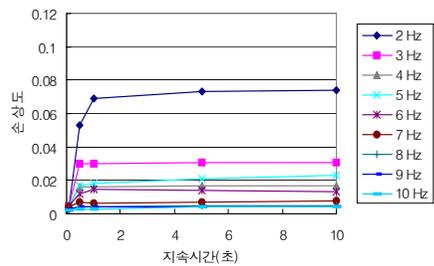
(b) 2층-1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



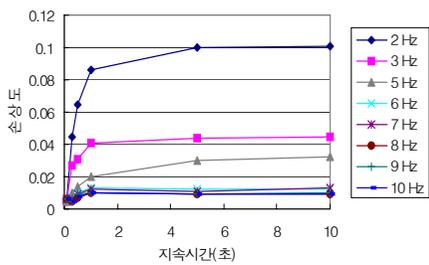
a) 1층-2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



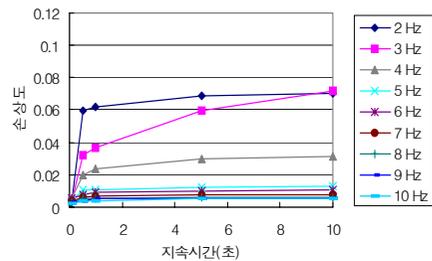
(c) 3층-1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



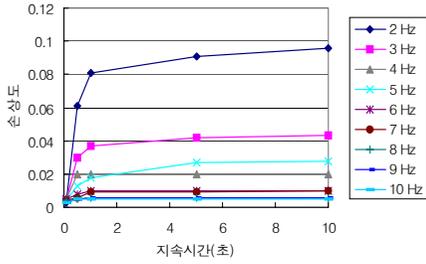
(b) 2층-2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



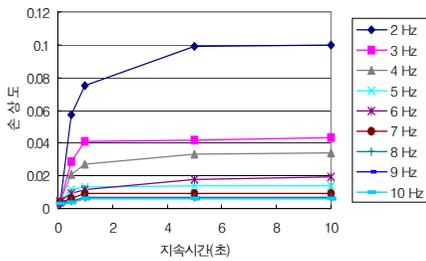
(d) 4층-1경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



(c) 3층-2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



(d) 4층-2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계



(e) 5층-2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계

Fig. 5 2경간 구조물의 지속시간-손상도 관계

예를들면, 1층-1경간 구조물의 진동원의 진동수가 3.19 Hz인 동하중에 의한 손상해석 결과에서 전체 구조물의 손상도 값에서 이 $(\beta/Q_y \delta_u) \int dE$ 항이 차지하는 비율을 살펴보면 다음과 같다.

$D_T = 0.22 \times 0.004 + 0.20 \times 0.004 + 0.58 \times 0.057 = 0.034$ 여기서, 보 1의 경우 $(0.047 + 0.011) \times 0.67 + (0.046 + 0.009) \times 0.333 = 0.057$ 이므로 이중 소산된 에너지에 의한 값은 $0.011 \times 0.67 + 0.009 \times 0.333 = 0.010$ 이므로 $0.010 / 0.057 = 0.175$ 이다.

보1의 손상도 값이 구조물 전체에 미치는 비율이 0.58 이므로 이 구조물의 경우 시간의 변화에 영향을 받는 에너지 항이 전체 손상도에서 차지하는 비율은 10.17 %이다. 다른 경우에도 10 %를 넘지 않는 결과가 나왔다. 따라서 전체 구조물의 손상도에서 시간의 누적 영향에 미치는 항의 비중이 크지 않기 때문에 진동의 지속시간의 변화에 손상도 값의 변화가 둔감한 것을 알 수 있다.

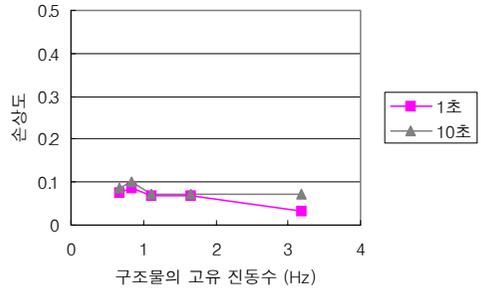
Table 3 1층-1경간 구조물의 손상해석 결과

	δ_M / δ_u		$(\beta/Q_y \delta_u) \int dE$		$\int dE$	에너지 비율	부재의 손상도
	bottom	top	bottom	top			
기둥 1	0.004	0.00	0.000	0.00	896.4	0.22	0.004
기둥 2	0.004	0.00	0.000	0.00	833.8	0.20	0.004
보1	0.047	0.046	0.011	0.009	2370	0.58	0.057

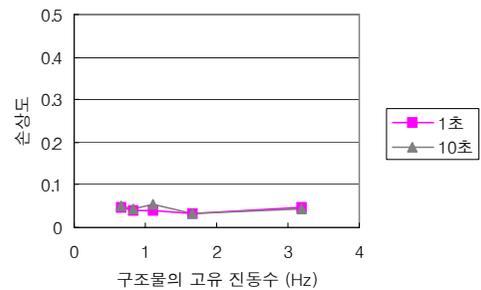
3.3 해석대상 구조물의 진동수

구조물의 동적인 응답 특성에 직접적인 관련이 있는 구조물의 고유 진동수와 구조물의 손상도 간의 관계를 알아보았다.

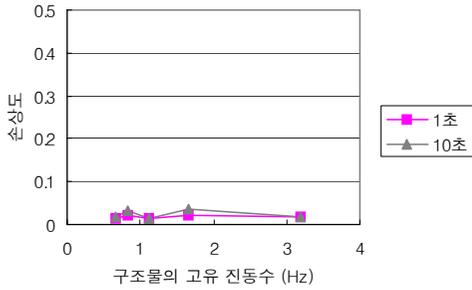
공진이 발생하지 않는 경우에 한해서는 구조물의 손상도는 해석대상 구조물의 진동수의 변화에 그다지 민감하지 않은 것을 알 수 있다. (Fig. 6 ~7)



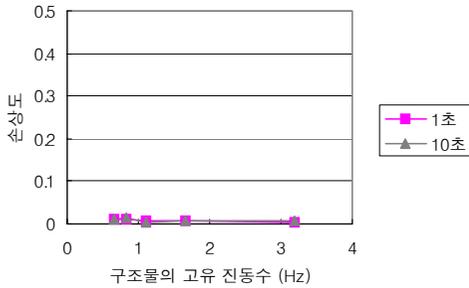
(a) 진동원의 진동수가 2 Hz일 때



(b) 진동원의 진동수가 3 Hz일 때



(c) 진동원의 진동수가 5 Hz일 때



(d) 진동원의 진동수가 7 Hz일 때

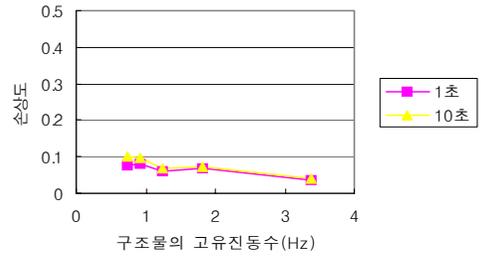
Fig. 6 1경간 구조물의 1차 고유 진동수와 손상도 관계

3.4 결과 및 제안

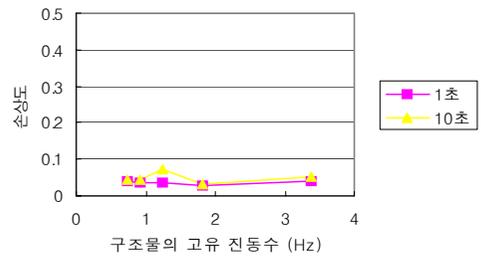
진동원의 진동수와 진동의 지속시간, 그리고 구조물의 진동수에 대해서 손상해석을 한 결과, 진동원의 진동수가 구조물의 1차 고유 진동수의 7배정도 이상이면 구조물의 손상이 거의 없는 것을 알 수 있었다.

그리고 진동원의 지속시간은 진동원의 진동수와 관련되어서 진동이 10 cycle 정도 반복되면 반복횟수가 더 증가해도 손상도 값의 변화가 크지 않았다.

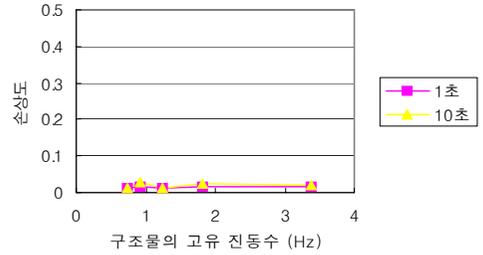
이 결과를 바탕으로 다음과 같은 Table 4를 제안한다. 이는 진동원의 진동수와 해석대상 구조물의 진동수를 알고, 예상되는 진동의 최대 지반 가속도를 알면 이를 바탕으로 구조물의 손상도를 추정하는 표이다. 이 Table 4를 보고 그 숫자를 Table 5에서 찾으면 대략적인 구조물의 손상상태를 파악할 수 있다.



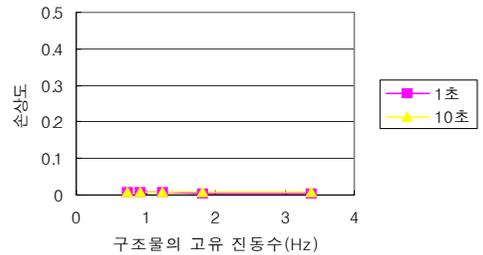
(a) 진동원의 진동수가 2 Hz일 때



(b) 진동원의 진동수가 3 Hz일 때



(c) 진동원의 진동수가 5 Hz일 때



(d) 진동원의 진동수가 7 Hz일 때

Fig. 7 2경간 구조물의 1차 고유 진동수와 손상도 관계

Table 4 구조물의 손상도 추정표

진동수비 \ 최대지반가속도	-	0.35 g	-
0	.	0	.
1	.	0.7	.
3	.	0.12	.
5	.	0.08 이하	.

Table 5 손상도 값에 따른 구조물의 상태 (Park et al., 1985)

손상도	물리적인 상태	구조물의 상태
	드문드문한 균열의 발생	.
	미약한 균열, 기동 콘크리트의 부분적인 뭉개짐	.
< 0.4	광범위한 균열, 약한 부재의 쪼개짐	수리 가능
0.4 ~ 1.0	콘크리트의 광범위한 붕괴, 보강재의 기능 상실	수리 불가능
> 1.0	구조물의 부분적이거나 전체적인 붕괴	건물의 손실

4. 결 론

진동원의 진동수가 구조물의 1차 고유 진동수의 7 배 정도를 넘게 되면 구조물의 손상도가 작으며, 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 진동의 지속시간이 진동원의 주기의 10배 정도 이상이면, 지속시간이 늘어나도 손상도의 변화가 미미하다.

공진이 발생하지 않는 경우에 한하여, 구조물의 손상도는 해석 대상 구조물의 고유 진동수의 변화에 그다지 민감한 반응을 보이지 않는다.

본 논문에서 제안한 방법으로 발생이 예상 가능한 진동일 경우에 간단하게 사전에 구조물의 대략적인 손상도를 추정하여 건물의 피해를 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단에서 설립한 서울대학교 지진공학연구센터로부터 연구비를 일부 지원 받았습니다.

참 고 문 헌

- 고영선, 김종우, “발파조건이 지반진동에 미치는 영향에 관한 사례 연구,” 터널과 지하공간, Vol. 9, No. 1, 1999, pp. 12~19.
- 김선훈, 김진용, 김광진, “폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 동적 유한요소해석,” 전산구조공학 Vol. 10, No. 2, 1997, pp. 171~178.
- 양명석, 박종남, 이영대, “지반진동이 건물의 균열에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국 소음진동공학회지, Vol. 9, No. 6, 1999, pp. 1173~1179.
- 양형식, 김남수, 전양수, 정지문, 김재철, 문승백, 조상호, 진연호, “발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준 평가,” 터널과 지하공간, Vol. 9, No. 1, 1999, pp. 72~77.
- 조병윤, 문현구, “지중발파에 의한 건물의 진동 거동에 관한 연구,” 터널과 지하공간, Vol. 6, No. 2, 1996, pp. 157~165.
- Dowding, C.H., “발파진동학”, 구미서관, 1992.
- Ma, G.W., Hao, H. and Zhou, Y.X., “Assessment of Structure Damage to Blast Loading Induced Ground Motions”, Engineering Structures, Vol. 22, 2000, pp. 1378~1389
- Park, Y.J., Ang, A.H.S., and Wen, Y.K., “Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings”, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 740~757.
- Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., and Madan, A. “IDARC-2D Version 5.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings”, Technical Report NCEER-96-0010, NCEER, 1996.

(접수일자 : 2001년 10월 22일)