

주변암반과의 상호거동 해석을 통한 지하구조물의 진동특성에 관한 연구

김문겸*, 이재영**, 김용규***

A Study of Vibrational Characteristics of Underground Structures through Rock-Structure Interaction Analysis

Kim, Moon-Kyum, Lee, Jae-Yung, Kim, Yong-Kyu

ABSTRACT

The dynamic behavior of underground structures is complex due to the effects of vibrational characteristics of the structure and the rock. In this study, dynamic displacement responses at the structure surface by the elastic stress waves are considered as the vibrational characteristics, and evaluated by the form of the frequency spectrum. The variation of the vibrational characteristic is simulated by numerical analysis at the case of the structure has internal defections. The results reveals the possibility of the experimental detection of void existence and size. Furthermore, the verification of the dynamic response can be used for rating the stability of a tunnel.

제 1 장 서 론

지하구조물의 동적거동은 지하구조물 자체의 동적특성과 주변지반의 동적특성이 서로 영향을 미쳐 복합적인 거동을 일으키게 된다. 본 연구에서 고려한 구조물의 진동특성은 탄성응력파가 구조물 내부에서 전파되며 구조물 표면에 발생시킨 수직 변위의 형태로 나타나는 동적응답이다. 이와 같은 동적응답은 구조물 내에서 전파되는 탄성응력파에 의한 영향뿐 아니라 전체적인 구조물의 거동과 동시에 일어난다. 실제로 구조물전체의 동적거동에 의한 변위는 탄성응력파에 의하여 발생된 변위에 비하여 상대적으로 크고, 지배적인 영향을 미치게

된다. 하지만 지하구조물에서는 구조물 전체의 동적거동이 주변암반과 일체의 거동을 함에 따라 그 크기와 영향이 줄어들게 된다. 본 연구에서는 터널 라이닝에 대한 진동특성을 분석하기 위하여 주변암반과의 상호거동에 따른 동적응답의 변화에 대하여 알아보았다.

주변암반과의 상호거동에 따른 응력파의 전달특성을 통하여 지하구조물 내부 구성재료의 상태를 예측할 수 있다. 또한, 지하구조물의 진동에 대한 동적응답 분석을 통하여 지하구조물의 안정성검토에 대한 지표로 활용하고자 한다.

제 2 장 주변암반과의 상호작용

구조물의 진동특성은 구조물의 강성과 관련되어 있어 그 진동특성으로부터 구조물의 강성을 예측할 수 있다. 임의의 하중이 구조물에 가해진 경우

* 연세대학교 공과대학 산업환경시스템공학부 토목전공 교수

** 연세대학교 공과대학 산업환경시스템공학부 토목전공 박사과정

*** 연세대학교 공과대학 산업환경시스템공학부 토목전공 석사과정

그에 대한 동적응답을 얻을 수 있고, 구조물에 손상이 발생하여 강성이 저하된 경우 또는, 내부결함에 의하여 진동특성이 바뀌게 된 경우에는 수치해석 등을 통하여 예측했던 구조물의 동적응답과 차이가 발생하게 된다. 이러한 동적응답의 차이로부터 구조물 내부의 결함을 찾을 수 있다.

지하구조물에서 발생하는 결함은 육안으로 관측되지 않는 내부결함이 대부분을 차지한다. 본 연구에서는 라이닝, 슛크리트와 주변암반과의 이격에 따른 배면공동이 결함의 주체가 되며, 구조물의 표면에서 측정되는 동적응답에 변화를 주게 된다. 터널 라이닝에 대한 구조물의 손상부위 평가방법에는 고유진동수나 모드변수 등의 동특성산정이 불가능하여 일반구조물에서 사용되는 system identification 방법^[1]을 사용하기에 많은 어려움이 있다. 하지만 충격에 의하여 발생된 탄성응력파가 재료의 내부에서 전파되고, 반사되는 원리를 이용한 충격반향탐사법^[2]으로 재료 내부에 발생한 이질성을 탐지할 수 있다.

2.1 주변암반과의 상호거동에 따른 파전달 특성

주변 암반과의 상호거동을 해석하기 위하여 지하구조물의 터널 라이닝을 그림 1 과 같이 적층판 구조^[3]로 모형화하였다. 적층판구조의 파전달 특성을 통하여 콘크리트 라이닝과 주변암반이 복합매질로 구성된 지하구조물에서의 파전달 특성을 알 수 있다.

그림 1 은 횡방향으로 무한한 경계를 가지는 두 층으로 이루어진 판을 모형화한 것이다. 위층과 아래층은 서로 다른 매질로 구성되어 있으며 매질의 파전달 특성의 매개변수인 비음향임피던스는 각각 Z_1 과 Z_2 이다.

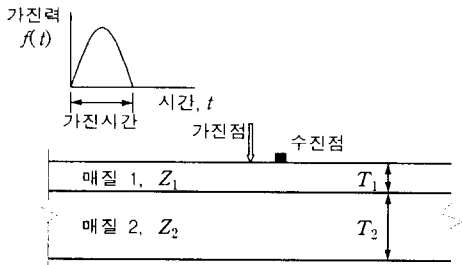


그림 1 적층판에 대한 충격반향탐사법

두 매질의 접합면에서 반사되는 충격에 의한 응력파의 응답은 균질판에 비해 상당히 복잡해진다. 표면변위는 접합면에서 반사되는 여러 파들에 의한 변위가 중첩되어 나타난다.

상층매질 1 과 하층매질 2 의 경계면에서 반사된 P 파의 부호는 상대적인 비음향임피던스에 의존한다. 그림 2 는 상층의 표면과 접합면 사이의 파전달을 나타낸 것으로 여기서 기호 C 는 압축파를, 기호 T 는 인장파를 표시한다. 그림 2(a) 는 상층의 임피던스가 하층보다 큰 경우의 파전달을 도시한 것이다. 이 경우 접합면에서 반사된 P 파의 위상은 바뀌게 되는데, 즉 압축파에서 인장파로 바뀌게 된다. 반사파가 상층의 표면에 도달하면 표면은 자유면이므로 파의 부호는 다시 바뀌게 된다. 그림 2 에 도시된 파형은 초기 표면파와 P 파에 의한 변위만으로 이루어진 가상적인 표면변위파형을 나타낸다. 2P, 4P 등으로 표시된 각각의 P 파는 표면에 도달하면서 (-) 방향의 표면변위를 일으킨다.

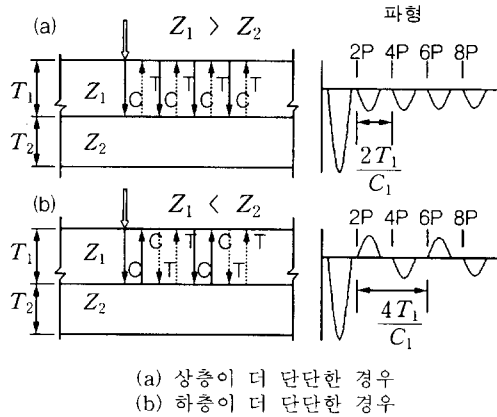


그림 2 적층판 내에서 파전달 특성

연속적으로 도달하는 파 사이의 시간간격은 식 (1) 에 의해 계산된다.

$$t = \frac{2T_1}{C_1} \quad (1)$$

여기서, C_1 은 상층내에서 전파되는 P 파의 속도이고, T_1 은 상층의 두께이다. 주파수는 주기의 역

수이므로 접합면에서 반사되는 P파의 주파수 f_i 는 식 (2) 와 같다.

$$f_i = \frac{C_1}{2T_1} \quad (2)$$

따라서 표면변위에 대한 주파수 스펙트럼이 구해지면 탁월주파수는 식 (2) 에 의하여 얻어진다.

그림 2(b) 는 반대로 상층의 임피던스가 하층보다 작은 경우이다. 입사된 P 파는 접합면에서 반사될 때 부호가 변하지 않으며, 따라서 처음으로 표면에 도달하는 파는 압축파가 된다. 표면에 도달한 파가 반사될 때는 부호가 바뀌어 인장파가 되고 이 파가 다시 접합면에서 반사될 때는 부호가 그대로이기 때문에 표면에 도달하는 P 파는 (-) 방향의 변위를 일으키게 된다. 결과적으로, 반사되는 P 파는 부호가 교대로 바뀌면서 표면에 도달한다. 그러므로 P 파의 도달시간은 상층의 임피던스가 하층보다 작은 경우와 동일하지만 동일 방향의 변위를 일으키는 파 사이의 주기는 2 배가 된다. 따라서 탁월주파수는 식 (3) 과 같이 바뀌게 된다.

$$f_i = \frac{C_1}{4T_1} \quad (3)$$

터널구조물과 같이 에너지소산이 큰 대상에 대하여 충격반향탐사법을 적용하는 경우, 주파수 스펙트럼에서는 하층의 두께에 대한 공진강도는 일반적으로 아주 작은 값을 지니게 된다.

2.2 터널구조물의 파전달 특성

터널구조체를 라이닝과 슛크리트 그리고 지반의 세 층으로 이루어진 것으로 보면, 충격파가 입사하는 방향으로 점차적으로 임피던스가 작아진다. 공동이 없는 부분에서 충격반향탐사법을 수행한 경우 지반은 무한영역이기 때문에 파가 터널지보체와 지반사이의 접합면에 입사할 때마다 가진에 의한 응력파의 에너지는 줄어들고 따라서 변위응답에서 P 파에 의한 강도 또한 급격하게 줄어든다. 이러한 경우 주파수 스펙트럼 상에서 공진주파수는 거의 나타나지 않는다.^[4] 따라서 충격반향탐사

법에 의하여 라이닝과 슛크리트의 두께를 구하는 것은 상당히 어려워진다.

하지만 공동이 있는 부분에서 충격반향탐사법이 수행된 경우, 이 공동에 의하여 거의 100 % 의 반사가 일어난다. 또한, 공동과 라이닝 표면 사이에서 다중반사되는 P 파에 의한 공진주파수는 주파수 스펙트럼에서 아주 큰 강도를 나타내게 된다. 그러므로 터널구조물과 같이 파의 입사방향으로 매질의 임피던스가 작아지는 경우에도 공동의 유무 및 공동위치의 판별은 가능한 것이다.

제 3 장 지하구조물의 진동특성

지하구조물의 진동특성을 나타내기 위하여 터널 라이닝에서의 충격 반향 응력파에 의한 동적거동을 측정하였다. 터널 라이닝은 주변암반과 일체의 거동을 하기 때문에 두 매체의 상호거동에 따른 동적거동의 변화를 알아보기 위하여 라이닝을 독립적인 구조물로 모형화한 경우와 주변암반과 일체로 모형화한 경우의 동적응답을 비교하였다.

모형화한 구조물은 2차원 범용구조해석프로그램인 FLAC 의 동적해석모듈을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 수행시 2차원 평면변형을 상태로 가정하였으며, 파전달시 3차원방향의 에너지소산을 고려하였다.

3.1 구조물의 고유진동수가 지배적인 응답으로 나타나는 경우

주변암반과의 상호작용을 고려하지 않은 독립적인 구조물로서의 터널 라이닝을 콘크리트 단순보 (simple beam)와 탄성지반위의 보로 모형화하였다.

단순보의 모형은 보의 깊이를 30 cm 로 하였고, 보의 길이는 보 깊이에 비하여 상대적으로 긴 4 m 로 하여 횡방향으로 전파되는 응력파인 전단파의 영향을 최소화하였다.

탄성지반위의 보 (beam on elastic foundation) 모형은 Winkler foundation^[5] 과 같이 보를 지지하는 지점을 탄성 스프링으로 간주하였으며, 스프링의 강성은 식 (4) 과 같이 가정하였다.

$$k_s = 4EI\lambda^4 \quad (4)$$

여기서 k_s 는 탄성 스프링의 강성이며, EI 는 탄성 스프링 위에 놓인 보의 휨강성을 나타낸다. λ 는 보의 휨에 저항하는 성질을 나타내는 상수로서 탄성지반 위의 콘크리트 라이닝을 휨에 대하여 유연한 보로 간주할 경우 $\lambda L > \pi$ 의 조건에 따라 탄성지반 위의 보 길이 $L = 4 \text{ m}$ 를 고려하여 λ 를 1로 가정하였다.

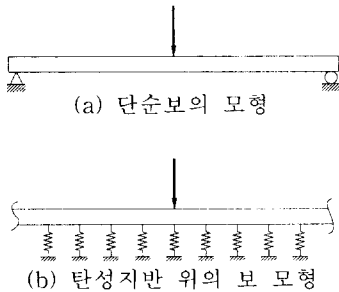


그림 3 구조물의 고유진동수가 지배적인 모형

탄성파의 전달특성에 따라 콘크리트 단순보 또는, 탄성지반 위의 보는 하나의 매질로 구성된 균질판으로 간주할 수 있다. 주어진 가진점에 대하여 전파되는 응력파는 균질판 내부, 즉 콘크리트 보내에서만 존재한다.

그림 4 는 단순보와 탄성지반 위의 보 중앙에서 일정한 가진력을 가한 후 수진점에서 수직변위의 응답을 얻고, 시간에 따른 변위의 응답을 Fourier 변환을 통하여 주파수 영역에서의 변위응답으로 나타낸 것이다. 즉, 단순보와 탄성지반 위의 보에서 측정된 주파수영역에서의 동적응답이다.

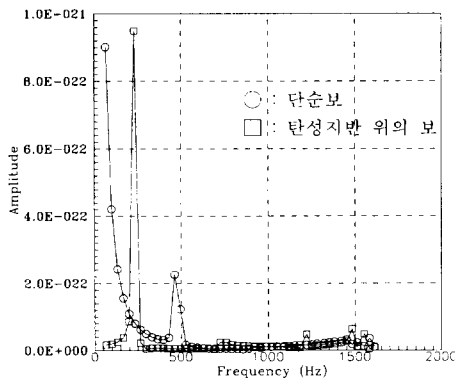


그림 4 구조물의 고유진동수가 지배적인 경우의 주파수응답

독립적인 구조물로 모형화한 두 가지의 경우에 있어서 구조물의 강성이 구조물의 고유진동수를 지배하는 인자로 작용된다. 집중하중이 보 중앙에 작용하는 경우의 단순보의 강성 $k=48EI/l^3$ 에 대한 구조물의 고유진동수^[6]에 해당하는 54.18 Hz 에서 peak 치를 나타내는 탁월주파수가 나타난다. 보 내에서 전파되는 응력파에 의한 동적응답은 식 (2)에 의하여 계산되어지며, 그 주파수 값은 2.356 kHz 이다. 하지만 내부에서 전파되는 응력파에 의한 응답은 탁월주파수에 해당하는 응답에 묻혀 noise 로 간주된다.

탄성지반 위의 보로 모형화한 경우에는 탄성지반으로 모형화한 스프링이 동적응답의 지배 매개변수가 되어 스프링의 강성과 보에 의한 구조물의 고유진동수 125~200 Hz에서 탁월주파수가 발생하게 된다. 이 경우에 있어서도 수진점에서 측정된 탄성파에 의한 동적응답은 구조물의 고유진동수에 해당하는 탁월주파수에 묻혀 noise 로 간주된다.

구조물의 고유진동수가 지배적인 두 경우에서와 같이 보내에서 전파되는 응력파의 공진진동수에 해당하는 2.356 kHz 에서는 상대적으로 미약한 반응을 일으킨다.

3.2 탄성응력파의 진동수가 지배적인 응답으로 나타나는 경우

구조물의 고유진동수응답 보다 탄성파의 공진현상에 따른 공진주파수응답이 크게 될 수 있도록 반무한의 압반과 일체를 이루고 있는 콘크리트 라이닝을 그림 5 와 같이 모형화하였다. 주변압반과의 상호거동에 따른 충격탄성파의 응답을 얻기 위하여 공동의 폭이 0 인 즉, 공동이 없는 건전한 단면과 공동이 발생한 단면의 두 가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

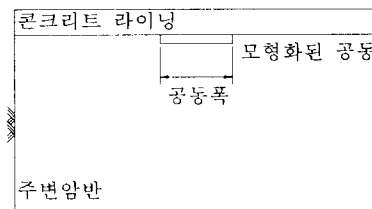


그림 5 콘크리트 라이닝과 주변암반의 모형

그림 6은 공동이 발생하지 않은 건전한 단면에서의 응답과 폭이 10 cm 인 작은 공동이 발생된 경우에 대한 주파수응답을 나타낸 것이다. 표면에서 발생된 응력파의 대부분은 비음향임피던스의 차이가 크게 나지 않는 암반으로 흡수되어 탁월주파수가 나타나지 않는다. 폭이 10 cm 일 경우 공동에서 반사되는 파에 의한 탁월주파수 응답으로서 2.356 kHz 에서 아주 미약한 응답이 검출되었다.

충격에 의하여 발생하는 응력파는 광범위한 주파수 성분을 포함한다. 콘크리트에서 고주파수 성분은 수 cm 의 파장을 가지는데, 작은 크기의 결함이나 공동은 바로 이 고주파 성분을 반사시키는 것이다. 그러므로, 이러한 작은 크기의 반사면을 가지는 결함이 표면에 가까운 위치에 존재할 때는 쉽게 탐지가 가능하다. 하지만 이러한 고주파수 성분은 콘크리트와 같이 복합매체로 이루어진 대상구조물에 대해서는 P 파의 전파거리가 길어짐에 따라 급격하게 소산되기 때문에 결함이 깊은 곳에 존재하는 경우에는 탐지가 어렵게 된다. Carino 등^[7]은 연구에서 결함 위치에 따라 충격반향탐사법에 의하여 탐지될 수 있는 결함 크기를 대략적으로 제시하였다. 즉, 결함의 횡방향 크기를 S, 가진표면으로부터 결함까지의 거리를 D 라고 할 때, S 가 1/3D 보다 큰 경우에만 탐지가 가능한 것이다.

그림 7 은 공동의 크기가 각각 50 cm 와 100 cm 인 경우 공동에서 반사되는 응력파에 의한 탁월주파수 응답이 2.356 kHz에서 공히 나타나는 것을 알 수 있다.

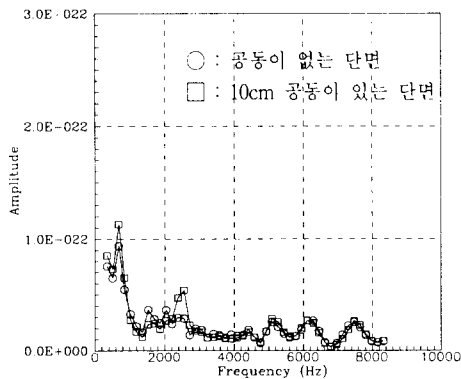


그림 6 공동이 탐지되지 않은 단면의 주파수응답

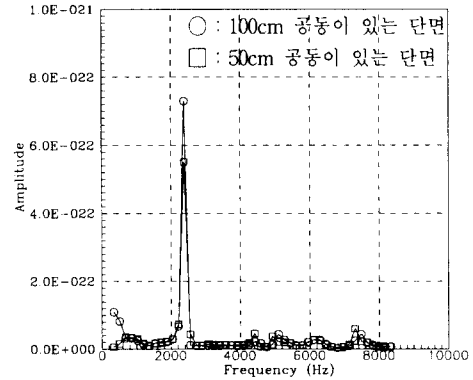


그림 7 공동이 탐지되는 단면의 주파수응답

콘크리트 라이닝에서 배면공동이 형성된 경우의 동적응답은 배면의 공동이 없는 경우에 비하여 반사면에서의 반사파의 강도가 급격히 증가하여 탁월주파수의 형태로 쉽게 나타나게 된다.

또한, 재료의 내부에 형성된 공동의 크기에 따라 주어진 가진함수에 대한 동적응답의 강도가 변화하게 된다. 본 연구에서 수행한 수치해석에서는 가진에 대한 함수를 짧은 시간 동안 구조물에 가해지는 충격함수로 가정하였으며, 이러한 가진함수에 대하여 공동의 크기가 클수록 반사된 응력파의 동적응답이 큰 것을 알 수 있다.

제 4 장 결 론

- (1) 지하구조물 내에서 전파되는 탄성응력파의 전달특성은 주변암반과의 상호거동에 의하여 변화됨을 알 수 있다.
- (2) 지하구조물의 내부에 구조적인 결함, 또는 공동을 가지고 있는 경우, 구조물 표면에서의 동적응답의 분석을 통하여 구조적 결함의 존재와 위치를 알 수 있다.
- (3) 주어진 입력가진력의 강도에 따른 주파수응답의 특성으로부터 터널배면에 발생된 공동의 크기를 예측할 수 있다.
- (4) 주파수영역에서는 측정된 응답의 산술연산이 가능하다. 따라서 배면공동이 있는 경우의 응답으로부터 건전한 단면에서의 주파수응답을 산술적으로 감하면 특정한 단면으로 고려된 배면공동의 영향만을 추출할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문과제연구의 일부이며, 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Cawley, P. and Adams, R.D., "The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies," *Journal of Strain Analysis*, Vol.14, 1979, pp.49-57.
- (2) Carino, N.J. and Sansalone, M., "Impact-Echo Method: Detecting Honeycombing, the Depth of Surface-Opening Cracks, and UngROUTED Ducts," *Concrete International : Design & Construction*, Vol.10, No.4, 1988, pp.38-46.
- (3) Tsai, W.H. and Yang, J.C.S., "Nondestructive Evaluation of Composite Structures Using System Identification Technique," *Transaction of the ASME*, Vol.110, 1988, pp.134-139.
- (4) Carino, N.J. and Sansalone, M., "Finite Element Studies of the Impact-Echo Response of the Layered Plates Containing Flaws," *International Advances in Nondestructive Testing*, 15th Editions, McGonnagle, W.J., Ed., Gordon & Breach Publishers, New York, 1990, pp.313-336.
- (5) Joseph, E.B., *Foundation Analysis and Design*, McGraw Hill, 1985, pp.326-339.
- (6) Severn, R.T., Brownjohn, J.M.W., Dumanoglu, A.A., and Taylor, C.A., "A Review of Dynamic Testing Methods for Civil Engineering Structures," *Proceeding of the Conference of the Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics*, 1988, pp.1-23.
- (7) Carino, N.J., Sansalone, M., and Hsu, N.N., "A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete", *ACI Journal, Proceedings* Vol.83, No.2, 1986, pp.199-208.