

물리탐사법을 이용한 콘크리트 구조물 조사에 관한 연구

Investigation of Concrete Structure Using Geophysical Prospecting Method

서 백 수* 김 용 인**
Suh, Baek-Soo Kim, Yong-In

Abstract

Non-destructive method by tomography for safety diagnosis of civil engineering and building structures is tried. There are travelttime tomography that uses travelttime and fullwave tomography that uses the initial shock and seismic amplitude. But these methods have difficulty and weak points in accuracy and selection of initial value. In this study, corrected inversion method which is able to solve the two difficulty and this method is applied to theoretical pier model to calculate tomography.

키워드 보정된 역산법, 토모그래피, 초음파비파괴검사

Keywords *corrected inversion method, tomography, ultrasonic non-destructive method*

1. 서론

토목구조물에 콘크리트를 적용한 역사가 길어짐에 따라 우리나라를 비롯한 세계각지에서 기존구조물의 노후화가 심각해지고 있고, 또한 우리나라에서도 최근 신규 건설 중인 대형 구조물의 붕괴사고가 나타나면서 토목구조물의 안전진단 및 평가에 대한 필요성이 날로 증가하고 있다. 단시일 내에 많은 대형 구조물의 축조는 필연적으로 일부 구조물의 부실화를 야기 시켰으며, 각종 콘크리트 구조물이 노후화 됨에 따라 효과적인 보수·보강을 통한 안전관리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 본연구에서는 콘크리트 비파괴 검사법 중 탄성파를 이용하는 충격반향기법을 사용할 경우 이론적인 역산기법에 의한 토모그래피를 작성하였다 [1][2][3]

2. 이론적 배경

충격반향기법(impact-echo)은 콘크리트/석조구조물을 통해 전파하고 내부 결함과 외부 경계면으로부터 반사되는 충격생성응력(음)파(impact-generated stress(sound) waves)를 이용한 콘크리트와 석조 구조물의 비파괴 평가를 위한 방법이다. 충격반향기법은 콘크리트 표면에 작은 충격으로 생성된 응력(음)파에 기초를 둔 비파괴적 시험 방법이다. 충격은 세 종류의 응력과 형태로 생성된다. P-, S-파는 구형파면을 따라 고체 속으로 전파한다. 반면, 레일리파는 원통형의 형태로 표면을 가로질러 전파한다. 충격반향기법에 의한 평판 구조물의 평가는 주로 P파의 반사와 전파에 의해 이루어진다.

* 강원대학교 지구환경공학부 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 석사과정

2.1 충격파(source)

P파는 중심에 충격지점이 있는 반원의 형태로 나타나고, R파는 중심으로부터 멀어져 가는 두 개의 얇은 잔물결의 형태로 나타난다. R파는 P파의 절반이 약간 넘는 속도로 전파한다. P파는 압축파(입자 운동이 파면을 따라 외부로 움직이는 것)이거나 인장파(입자 운동이 파면을 따라 내부로 움직이는 것)일 수 있다. 초기의 충격생성 P파는 압축파이다.

Fig. 1에서와 같이 충격 표면에서의 인장파의 도달은 작은 하향변위를 발생한다. 충격표면부터 바닥표면까지의 P파의 전파와 다시 충격표면으로의 도달은 반사 P파의 한 주기를 나타낸다. 인장파는 다시 충격표면에서 압축파의 형태로 반사되면서 다시 주기가 시작된다.

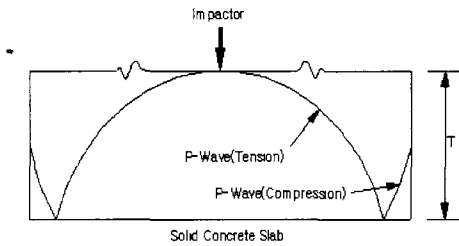


Fig. 1 Impact-generated stress waves in solid concrete slab

2.2 시간영역신호

Fig. 2에서와 같이 표면에 수직한 작은 변위를 탐지할 수 있는 감지기는 충격지점으로부터 불과 몇 cm 거리에 위치한다. 감지기는 상향변위의 양의 Voltage와 하향변위의 음의 Voltage를 생성하는 R파와 반사 P파에 반응한다.

초기 충격생성 P파가 감지기에 도달했을 때, 작은 상향 변위가 발생한다(양의 voltage).

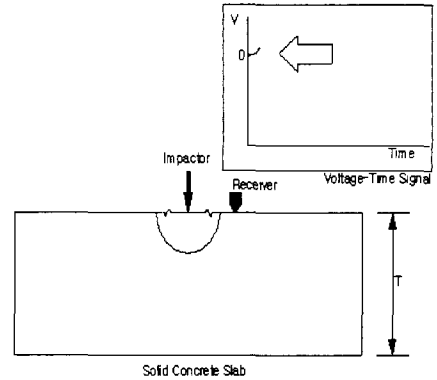


Fig. 2 Voltage-time signal response of a initial stress wave

R파가 감지기를 지날 때, 신호의 가장 높은 진폭을 나타내는 예리한 하향변위(음의 voltage)를 생성한다. R파는 충격생성응력파의 주파수 성분을 결정하는 충격지속시간에 관한 정보를 나타낸다.

최초의 반사 P파의 도달은(인장파) 하향변위와 음의 voltage 신호를 유발한다. 표면변위는 다시 원상태로 유지되고 voltage는 0으로 돌아온다. 이러한 과정은 각각의 연속적인 P파의 도달로 반복된다. P파 도달에 의해 생성된 파형은 Fig.3에서와 같이 연속적인 파의 도달 간격에 대응되는 주기를 가진다. 이 시간 간격은 단순히 주행거리-두께 T의 2배-를 P파 속도 Cp로 나누는 것이다 : 즉, 시간 간격, $t=2T/Cp$ 이다. P파 도달에 의해 생성된 신호의 진폭은 구형파면의 발산으로 시간에 따라 감쇠한다.

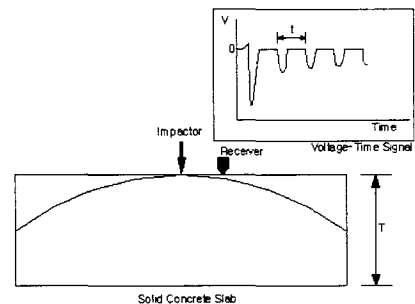


Fig. 3 Solid concrete slab : voltage-time signal response of a multiple

2.3 불연속층에서의 P파의 반사

Fig. 4에서와 같이 깊이 d 에서 crack을 가지는 슬래브를 고려해보자. crack에 입사한 응력파는 십분의 일 밀리(mm) 만큼의 좁은 crack일지라도 대부분의 반사가 이루어진다 그 반응은 균질한 고체 슬래브에서와 유사하지만 P파 도달의 시간간격은 더 짧아진다. 이런 경우 P파 도달의 시간간격은 주행거리($2d$) 를 P파 속도 C_p 로 나누어진다. 즉, $t=2d/C_p$ 이다. 파속도를 알고 주기를 측정할 수 있다면, 반사된 P파의 깊이를 계산할 수 있다.

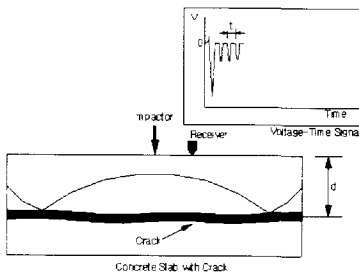


Fig 4 Concrete slab with crack voltage-time signal response of a multiple

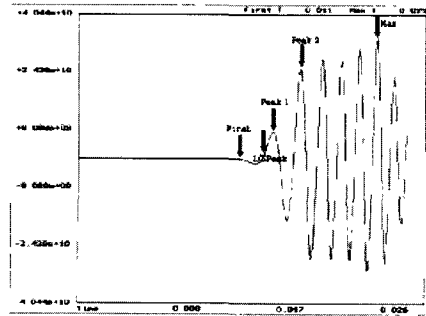


Fig. 5 Calculation of first arrival traveltimes by wave equation using Finite Element Method

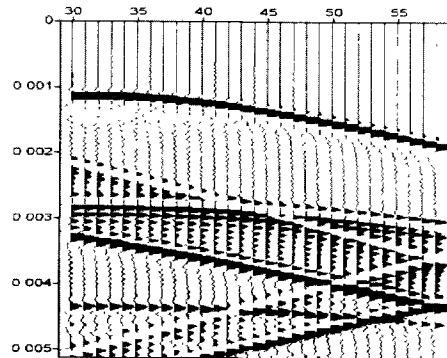


Fig 6 First arrival calculation by synthetic seismogram using Finite Difference Method

3. 연구 방법

3.1 예비모형 계산

가로 40cm×세로 130cm의 2차원 콘크리트 이론 모형을 만들었으며, 가로 40개, 세로 130개의 격자를 만들어 각각 격자의 크기를 1cm로 하였다. 구조물 모형의 좌측에는 파동원, 우측에는 수신기를 각각 41개씩 배열하였으며 구조물 모형의 탄성파속도는 4,000m/sec, 구조물 내부의 공동 탄성파속도는 400m/sec로 가정하였다

초동주시발체(first arrival picking)는 주시역해결과(tomogram)에 대한 신뢰도와 직결되어 있는 매우 중요한 문제이다. Fig 5는 유한요소법에 의한 초동주시발체이며, Fig. 6은 유한차분법에 의한 합성탄성그램(synthetic seismo gram)에 의한 초동주시발체를 보여준다

초동주시발체를 다각적으로 검증하고 정성적으로 해석하기 위하여 Fig. 5에서는 다섯 부분으로 초동주시를 분류하여 Fig. 7과 같이 ART, SIRT LSQR을 이용한 역산을 수행하였으며 peak 1 지점에서 가장 작은 RMS오차를 보여주었다[4][5][6][7]

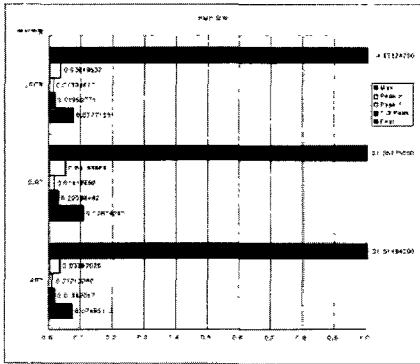
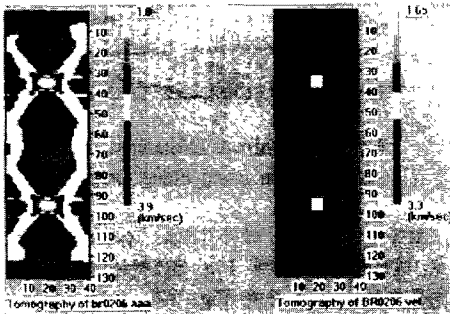


Fig. 7 Comparative analysis of RMS error by inversion

Fig. 8은 콘크리트 모형에 2개의 공동이 존재한다고 가정할 때의 파선법과 ART 역산법에 의한 토모그래피이다. 대각선 방향에 약간의 잡음이 존재하지만 2개의 공동은 정확하게 나타남을 볼 수 있다.



(a) two cavity (b) model
 Fig. 8 The result of travelttime tomography using ray method and ART

Fig. 9는 동일한 모형에 대하여 유한요소법에 의한 초동주시와 LSQR 역산법에 의한 토모그래피이다. 2개의 공동은 나타나지 않고 중앙에 커다란 공동이 존재하는 것으로 나타났다.

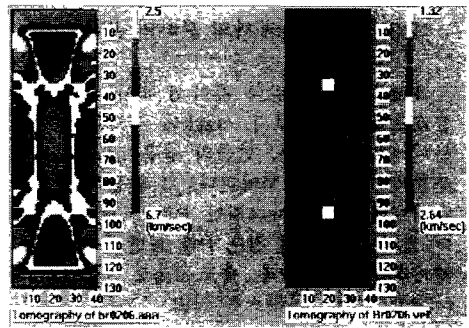


Fig. 9 The result of travel time tomography using Finite Element Method and LSQR

4. 모형계산

Fig. 10과 같은 모형에 대하여 보정형 역산법을 계산하였다 그림과 같이 2개의 공동이 존재하고, 콘크리트 모형의 탄성파속도를 3,700m/sec, 공동의 탄성과 속도를 370m/sec로 하였다.

Fig. 11의 경우는 동일한 모형에 대하여 유한차분법에 의한 초동주시와 SIRT 역산법에 의한 토모그래피이다. Fig. 9와 마찬가지로 2개의 공동은 나타나지 않고 중앙에 1개의 공동이 존재한다.

Fig. 12는 동일한 모형에 대하여 보정형 역산법의 결과를 보여주며 2개의 공동이 정확히 나타남을 볼 수 있다.

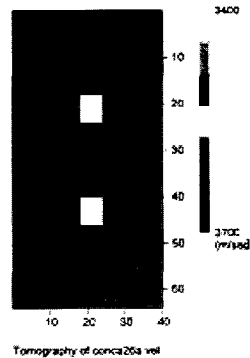


Fig 10 Theoretical calculation model

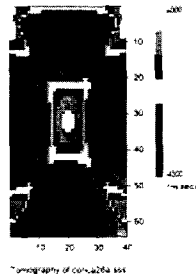
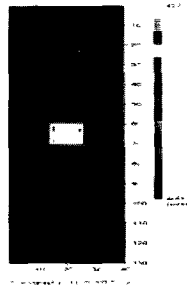


Fig. 11 The result of travelttime tomography using Finite Difference Method and LSQR



물수신기	41 개
모탐속도	4 000 m/sec
음탐속도	400 m/sec
초기치	5 000 m/sec 500 m/sec
계산시간	0.02 sec
계산기종	타이7454E-5 sec
스폰지	50 개

Fig. 14 The result of full-wave inversion tomography when initial value is given like above table

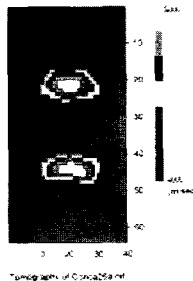


Fig. 12 The result of full-wave inversion tomography

Fig. 13은 그림 10의 모형에 대한 전파형 토모그래피의 결과이다. 초기치를 정확하게 설정하지 못하였을 경우 계산결과가 만족스럽게 나타나지 않음을 볼 수 있다 그러나 초기치를 Fig. 14와 같이 주었을 경우 전파형 토모그래피도 정확하게 나타남을 알 수 있다[7]

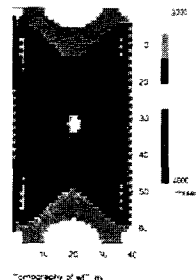


Fig. 13 The result of full-wave inversion tomography when initial value is not given exactly

Fig. 15는 그림 10의 모형에 대한 전파형 보정 토모그래피이며 2개의 공동이 정확하게 나타남을 볼 수 있다.

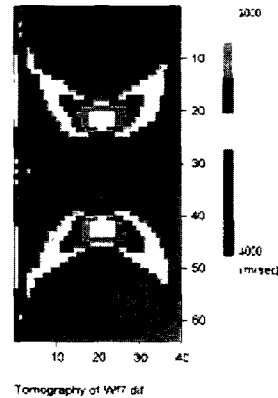


Fig. 15 The result of corrected full-wave inversion tomography when two cavities are located like Fig. 10

5. 결론

이상과 같은 연구결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유한요소법에 의해서 계산된 탄성과 해석자료의 초동 선정을 다섯 개로 분류하여 역산한 결과 다섯 부분 중에서 1/3 peak 지점, first 지점, peak 1 지점은 중앙에 위치하고 있는 공동의 위치를 속도 영상화 단면상에서 실제 모형과 가까운 형태로 나타내었다 세 부분 중에서도 peak 1 지점에서의 역

산이 구조물 모형과 가장 유사한 형태를 나타내었으며 그 결과는 RMS오차에서도 확인 할 수 있었다.

2) 2개의 공동이 존재하는 모형계산에서 파선법의 경우 2개의 공동이 선명하게 나타났지만, 유한요소법이나 유한차분법을 이용한 초동주시계산에서는 중앙에 1개의 공동으로 나타남을 볼 수 있었다. 그러나 보정형 토모그래피에서는 파선법과 같이 2개의 공동이 정확하게 나타남을 볼 수 있었다.

3) 전파형 역산법에서는 초기치를 정확하게 설정치 못하였을 경우 2개의 공동을 찾지 못하였지만 보정형 역산법에서는 정확하게 계산할 수 있었다.

6. 감사의 글

본연구는 2002년 연구년교수지원사업 (2002년부터 2003년까지)으로 수행되었으며 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김중렬, 김유성, 현혜자, 김기석, 갯내 지오토모그래피에 의한 탄층 연속성 조사, 한국자원공학회지, 제 31권, 413-418. 1994.
- [2] 현병구, 임해룡, 이호영, 지하단면의 영상 재구성을 위한 탄성과 직선 파선 토모그래피의 적용성, 한국자원공학회지, 제29권, 245-254. 1992.
- [3] Dines, k.,and Lytle, R., Computerized geophysical tomography, *Proc. IEEE*, Vol. 67, 1065-1072. 1979.
- [4] Gauthier, O., Verieux, J., and Tarantola, A., Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: numerical results: *Geophysics*, Vol. 51, 1387-1403. 1986.
- [5] Lou, Y., and Schuster, G., Wave equation travelttime + waveform inversion: 60th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophysics., Expanded Abstracts, 141-1044. 1989.
- [6] Lou, Y., and Schuster, G., Wave equation travelttime inversion: *Geophysics*, Vol. 56, 645-653. 1991.
- [7] Uesaka, S., Watanabe, T., and Sassa, K., Acomputational study on full-wave inversion based on the acoustic

wave-equation (2): *Butsuritansa*, Vol. 50, 219-228. 1997.

- [8] Zhou, C., Cai, W., Lou, Y., Schuster, G. T., and Hassanzadeh, S., Acoustic wave-equation travelttime and waveform inversion of crosshole seismic data, *Geophysics*, Vol. 60, 765-773. 1995.