

초음파 탐사법의 긴장 전 PC보에 대한 현장적용

Application of Ultrasonic Technique for Early-Aged PC Beams in Field

이 준 기* 박 성 우** 윤 정 섭*** 박 철 신****
Lee, Jun Ki Park, Sung Woo Yoon, Jung Sup Park, Chul Shin

ABSTRACT

Recently, as importance of quality control of the structure has been recognized, non-destructive testing, determining quality of the structure without damage, has been widely applied. However, its application has been primarily focused on laboratory development because variety of parameters in field has been not fully experienced and understood. This study aims to evaluate the field applicability of the ultrasonic testing method for PC beams. Material properties of 18 cylinders, cured in the same field condition, were measured up to 60 days and compared to those of the ultrasonic measurements from 34 PC beams in field before tensioning. Test results indicate that uni-axial strength and elastic modulus of PC beams can be predicted within reasonable range using the ultrasonic technique. However, it is also noted that considerations on field condition is required to increase the reliability of estimation.

요 약

최근 구조물 품질관리 중요성이 높아짐에 따라 구조물의 피해 없이 품질평가가 가능한 비파괴시험의 사용이 증가하고 있다. 하지만, 다양한 현장조건에 대한 경험 및 이해가 충분치 않아 아직 실내 연구개발에 중점을 두고 있는 경우가 많다. 본 연구는 초음파 탐사법의 현장 적용성을 평가하기 위하여 현장 제작 후 증기양생된 PC보에 본 기법을 적용하여 보았다. 현장 조건과 동일한 조건에서 양생된 18개의 실린더를 제작하여 재령 60일까지 재료특성 변화를 관찰한 후, 이를 제작 후 인장작업 전의 34개의 PC보에서 측정된 초음파속도와 비교하였다. 측정 결과 현장 타설된 PC보의 압축강도 및 탄성계수를 합리적 범위 내에서 초음파탐사법을 사용하여 추정할 수 있었다. 하지만, 초음파 탐사법의 신뢰도를 높이기 위해서는 현장 조건에 대한 고려가 선행되어야 할 것이다.

* 정회원, 삼성물산 기술연구소 선임연구원
** 정회원, 삼성물산 기술연구소 수석연구원
*** 정회원, 삼성물산 토목사업본부
**** 정회원, 유신코퍼레이션

1. 서 론

최근 구조물 품질에 대한 높은 관심으로 인해 구조물의 피해 없이 사용재료의 특성을 평가할 수 있는 비파괴 탐사방법의 적용에 대한 관심이 증가하고 있다. 초음파법을 사용한 품질 평가법은 주로 콘크리트의 압축강도와 연계하여 많은 연구가 이루어져 왔으며^{1,2}, 측정 방식에 대한 규정이 다수의 시방서에 명시되어 있다³. 하지만, 콘크리트의 음파속도는 재료의 배합비, 양생 정도 및 환경적 요인 등 다양한 요소에 의해 영향을 받기 때문에 현장 적용 시 그 사용이 제한될 수 있다.

본 논문에서는 초음파 탐사법을 현장 타설된 다수의 PC보에 적용한 결과를 서술하고자 한다. PC보는 높은 경제성으로 인하여 점차 사용이 증가하고 있는 교량 구조물의 부재로, 최근 다양한 콘크리트 배합비 사용 및 공기 단축을 위한 증기양생을 사용함으로써 품질관리의 어려움이 높아지고 있다. 본 시험에 적용된 PC보는 물-시멘트비 42%, 잔골재율 47%의 배합비로 타설되었으며, 타설 후 8시간의 증기 양생을 통해 강도를 조기에 발현시켰다. 재령에 따른 콘크리트의 재료성질의 변화를 관찰하기 위하여 재령별로 18개의 실린더에 대한 압축강도 시험을 실시하였으며, 현장 타설된 34개의 PC보의 초음파 속도를 양생 후 인장작업 수행 전 실시되는 압축강도 시험과 동일한 시점에서 측정하여, 그 결과를 비교하여 보았다.

2. 시험 방법 및 결과

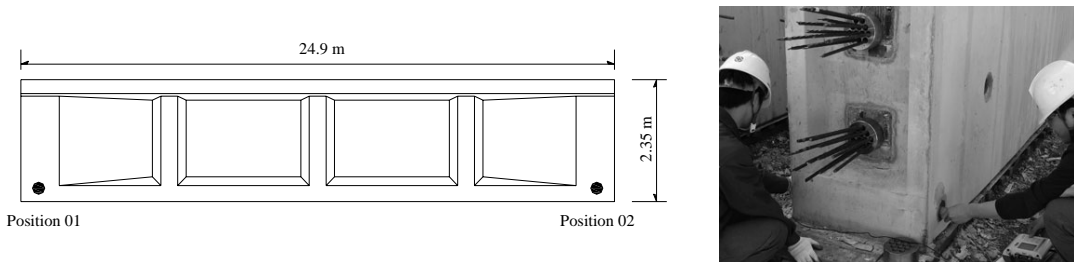
2.1 초음파탐사법

초음파 탐사법은 발신자에서 50 kHz 이상의 탄성에너지를 부재에 통과시켜 수신자에 도착하는 시간을 측정하는 방식으로 음파속도를 측정한다. 부재의 음파속도는 아래 식과 같이 정의되며⁴, 대부분의 경우 콘크리트의 밀도와 포아종비를 상수로 가정 후, 탄성계수를 추정하여 이에 관한 재료 특성과의 관계를 정의하는 것이 일반적이다. 다수의 구조설계 기준은 탄성계수가 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례한다고 규정하고 있다.

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \dots \text{(Eq.1)}$$

여기서, E: 콘크리트 탄성계수, μ : 포아종비, ρ : 밀도

본 시험에 적용된 PC보는 전체 길이 24.9 m의 구조물로 현지에서 제작된 레미콘 5대 분량을 타설하여 제작되었다. 음파속도의 측정은 아래의 그림과 같이 배근된 철근의 영향을 받지 않는 2개의 지점을 선정하여 수행되었다.



(a) PC보 개략도 및 측정 위치

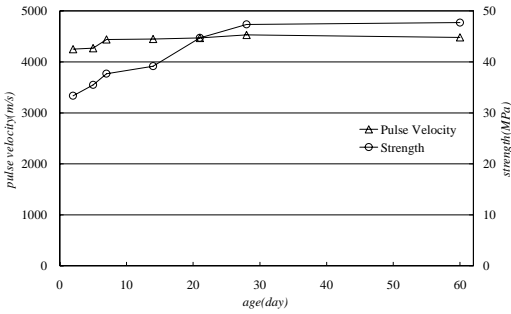
(b) 음파속도 측정

그림 1. 초음파 측정 위치 및 측정조건

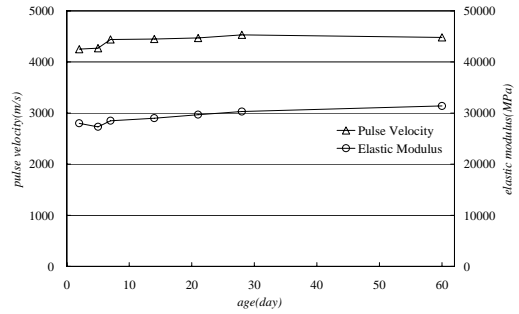
2.2 일축압축강도 시험

재령에 따른 콘크리트 특성변화를 관찰하기 위하여 총 18개의 $\phi 10 \times 20$ 실린더를 제작하여 재령별로 60일 동안 압축강도, 탄성계수 및 음파속도를 측정하였다. 실린더는 PC보와 동일한 배합비의 콘크리트를 사용하여 8시간의 증기양생을 통하여 강도를 발현하였다. 양생 후 음파속도는 실린더의

길이방향의 초음파 통과 시간을 3회 측정하여 평균값을 대표 값으로 기록하였다. 그 후, 실린더에 대칭으로 2개의 변형률계를 설치하여 만능시험기를 사용하여 압축응력을 재하한 후 변형률을 측정하여 탄성계수를 결정하였다. 탄성계수 측정 후, 실린더 파괴시의 강도를 측정하여 압축강도를 결정하였다. 측정된 결과는 그림 2.에 요약되어 있다.



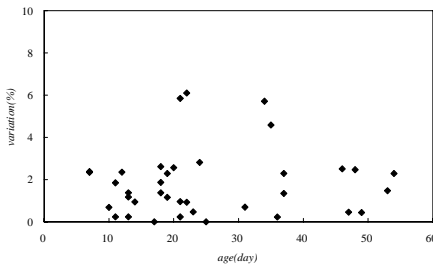
(a) 음파속도와 강도관계



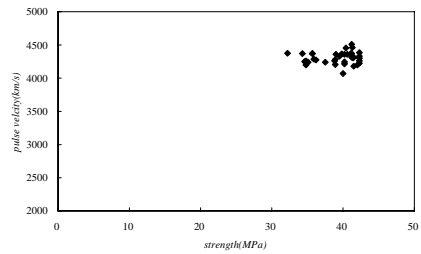
(b) 음파속도와 탄성계수 관계

그림2. 재령에 따른 물성치 변화

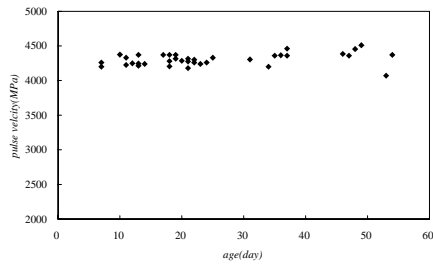
실린더는 증기양생 후에도 재령이 증가함에 따라 강도가 계속 증가하여 약 47 MPa에서 수렴하였다. 하지만, 같은 기간 중 실린더의 음파속도와 탄성계수는 재령 7일 까지는 증가하는 추세를 보였으나, 이후 음파속도는 약 4,500 m/s에서 탄성계수는 약 30,000 MPa 수렴되었음을 알 수 있다. 이는 콘크리트 수화작용에 의한 강도 발현 시 압축 강도와 탄성 계수는 증가하는 경향을 보이나, 그 관계는 높은 비선형적이라는 기존의 연구결과와 일치한다⁵. 따라서 측정된 탄성계수와 높은 연관관계를 가지는 음파속도 역시 압축강도와 비선형적인 관계를 나타내었다. 하지만, 음파 속도는 탄성계수와 같은 경향으로 증가하였는데, 이는 Eq 1. 에서 나타낸 것과 같이 음파속도는 탄성계수의 제곱근에 비례하기 때문이다.



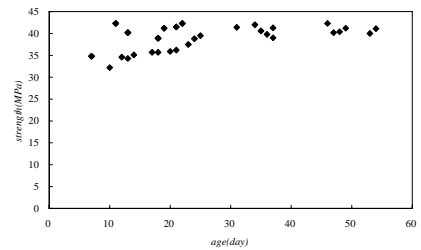
(a) 음파속도 편차



(b) 초음파속도와 일축압축강도 비교



(c) 재령별 음파속도 변화량



(d) 재령별 압축강도 변화량

그림3. 재령에 따른 물성치 변화

2.3 현장 PC보의 초음파 측정

초음파 탐사법의 현장적용을 위하여 34개의 PC보 양끝단에서 측정된 음파속도가 그림 3에 나타나 있다. 각 PC보에 대하여 타설 시 3개의 실린더를 제작하여 인장작업 실시 전 강도 평가를 위하여 강도시험을 시행하였으며, 동시에 현장에 제작된 PC보에 대한 음파속도를 측정하였다. 본 시험의 경우 다수의 PC보를 순차적으로 타설한 후 동시에 인장작업을 수행하였기 때문에 측정된 PC보의 재령은 최소 7일부터 최대 54일까지 분포되어 있다. 초음파 속도는 각 지점에서 3회 측정하여 평균하여 기록되었으며, 각 보에 대하여 양단에서 측정된 결과의 평균값을 대표값으로 사용하였다. 그림 3(a)에는 양 끝단에서 측정된 음파속도의 분포가 나타나 있다. 이는 PC보가 다수 차량에 의해 운반된 레미콘을 타설하여 제작되었기 때문이며 그 차이는 평균 1.8 %로 차이가 높지 않음을 알 수 있다. 이는 음파속도가 탄성계수의 제곱근에 비례한다고 가정할 때, 탄성계수의 분포 3.6 %에 해당하는 수치이다.

음파속도 측정 당시 PC보는 콘크리트의 수화작용이 증기양생을 통하여 가속화 되었기 때문에 강도가 조기에 발현되어 있었다. 따라서 PC보의 음파 속도와 압축강도는 모두 32~42 MPa 와 4070~4510 m/s로 이내에서 수렴하였다 (그림 3(b)). 그림 3(c)과 3(d)에는 PC보의 재령별 음파속도와 압축 강도의 변화량이 나타나 있다. PC보의 음파속도의 경우 재령에 따라 큰 변화량을 보이지 않았으나, 실린더의 압축강도의 경우 재령별로 편차를 보였으나 전반적으로 증가하는 추세를 나타내었다. 이는 2절에서 논의된 일축압축강도 시험 결과와 유사하다.

3. 결론

일축압축 강도 실험은 PC보의 콘크리트가 증기양생을 통하여 강도를 조기에 발현시켰으나 배합시 플라이애쉬의 사용에 따라 압축강도가 지속적으로 증가한 것으로 보인다. 상대적으로 탄성계수의 증가량은 낮았으며, 이에 따라 음파속도의 증가량 또한 큰 변화를 보이지 않았다. PC보의 초기 재령의 경우 초음파 탐사법은 콘크리트의 탄성계수를 추정하는데 적합한 것으로 보이며, 압축강도를 추정하는 경우 보수적으로 사용하여야 하며, 이 경우 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 합리적인 수준에서 추정이 가능하다. 이 경우 초음파 탐사법은 타설된 부재의 균일성에 대한 검증 방법으로도 효과적으로 적용될 수 있다.

현재까지의 초음파 탐사법은 대부분 콘크리트의 압축강도를 추정하는데 사용되어왔다. 하지만, 이와 같이 콘크리트의 강도 발현이 지속되는 과정에서의 초음파 탐사법의 사용은 음파속도의 증가량과 강도의 증가량이 비례하지 않음으로 인해 탐사 결과의 신뢰성을 떨어트리게 된다. 따라서 위의 결과는 초음파 탐사법을 현장에 적용할 시에는 측정 부재의 특성과 현장 조건에 대한 이해가 선행되어야 한다는 것을 의미한다.

참고문헌

1. 원종필, 박성기, 안태송, 초음파 속도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정식의 제안, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집(I), 대한 토목학회, pp. 391~394, 2000
2. 김화중, 이도현, 윤상천, 박정민, 최신희, 초음파 시험에 의한 콘크리트 초기강도 판정에 관한 연구, 한국콘크리트학회 95 봄 학술발표회 논문집, 136-141(6), 한국콘크리트학회, 1995
3. K., Komlos, S. Popovics, T. Nungberg-erova, B.Babal and J. S. Popovics, Ultraonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards, Cement and Concrete Composites, 18, pp357-364, Mar.-Jun. 1996
4. ASTM, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM C 597-02, American Society of Testing and Materials, 2002
5. ACI Committee 228, In-Place Methods to Estimate Concrete Strength, ACI 228.1R-03, American Concrete Institute, 2003