



동일 시멘트 페이스트 사용시 양생온도가 전단파 속도와 압축강도 상관관계에 미치는 영향

The Effect of Curing Temperature on the Relationship between Shear Wave Velocity and Concrete Compressive Strength Using the Same Cement Paste

안 지 환* 전 성 일** 권 수 안*** 남 정 희****
An, Ji-Hwan Jeon, Sung-IL Kwon, Soo-Ahn Nam, Jeong-Hee

Abstract

The strength of concrete is one of the most important parameters in evaluating the properties of concrete. Compressive strength of concrete has been widely used because of its convenience of experiments and generality. Compressive strength of concrete varies according to materials and curing conditions. Even with the same materials, the strength varies according to the curing conditions. Therefore, if we want to know the strength of concrete from the construction field, we have to put it in exactly the same curing condition with the construction field. But it is impossible to make the exactly same curing conditions in the laboratory. Also damages occur in order to measure the strength of concrete, because the core has to be made into the pavement. To overcome these limits, many studies of nondestructive method have already been researched. It was already proven that shear wave velocity was very closely related to the compressive strength. In this study, three different curing temperatures with the same mixture paste were used, and compressive strength and shear wave velocity, according to the aging were measured. The relationship between these two parameters was examined. As results, curing temperature affected the compressive strength and the shear wave velocity, but did not affect the relation between them.

Keywords : cement paste, compressive strength, temperature, shear wave, QC

요 지

콘크리트에서 강도는 콘크리트의 물리적 특성을 평가할 수 있는 중요한 인자중 하나이며 압축강도의 경우 실험의 편리함과 범용성으로 인해 널리 사용되고 있다. 콘크리트는 재료와 양생조건 등에 따라 압축강도가 달라지며, 특히 동일 재료라 하더라도 양생조건에 따라 강도는 변한다. 그러므로 현장에서 시공한 콘크리트의 강도를 알기 위해서는 현장과 동일한 양생조건에 놓여야만 정확하게 강도를 측정할 수 있다. 그러나 현실적으로 밤낮으로 변화하는 현장의 양생조건을 실내에서 묘사하기란 쉽지가 않다. 또한 실제 콘크리트 포장의 강도를 측정하기 위해 포장체에 코어를 뚫기 때문에 손상이 가해지는 걸 피할 수는 없다. 이러한 한계를 극복하기 위해 이미 비파괴 기법에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔으며 그중 탄성파를 이용해 이

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원(E-mail : jenix@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구원

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 책임연구원 · 공학박사

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구원 · 공학박사

미 콘크리트의 압축강도와 탄성과 속도와의 상관관계가 높음이 입증되었다. 본 연구에서는 양생조건에 따른 압축강도와 전단파 속도의 상관성을 분석하기 위해 동일 시멘트 페이스트를 3가지 서로 다른 양생온도에서 재령별 압축강도와 탄성과 속도의 변화를 측정했으며, 이 두 변수간의 상관관계를 파악하였다. 그 결과 양생온도는 재령별 압축강도증진과 탄성과 속도 증가에 각각 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 압축강도와 전단파 속도와의 상관관계에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 시멘트 페이스트, 압축강도, 양생온도, 전단파, 품질관리

1. 서론

콘크리트를 제작하고 양생하는 기간 동안의 온도 이력은 콘크리트의 강도에 영향을 미친다. 보통 5~46℃ 범위내에서 성형되고 지속적으로 양생된 콘크리트의 경우 온도가 높을수록 시멘트 수화반응이 더 빨리 일어나며 강도가 증가한다. 그러나 처음 2시간은 다양한 온도(5~46℃)에서 콘크리트를 성형하고 그 이후에 21℃에서 양생한 경우는 미시적인 구조를 관찰한 결과, 저온에서 성형한 콘크리트가 고온에서 성형된 콘크리트보다 장기적으로 갈수록 강도가 크게 나타났다. 이는 초기에 저온에서 성형할수록 수화반응한 시멘트 페이스트의 미세구조가 상대적으로 더 균일하고 치밀하게 형성되어 더 높은 강도를 나타내는 이유라고 보고 있다. 하지만, 21℃에서 콘크리트를 제작 후 다양한 온도에서 양생한 경우에는 일반적으로 양생온도가 낮을수록 콘크리트 강도 역시 작아진다(Neville 1995, Mehta 2006).

이처럼 콘크리트가 성형되고 양생되는 온도에 따라 콘크리트의 강도는 다양하게 변할 수 있으므로 콘크리트 포장처럼 외부환경에 노출되어 있는 현장에서는 온도변화에 따른 강도변화에 주의를 기울일 필요가 있다.

또한 콘크리트의 강도를 측정하기 위해 많은 공시체를 제작하여 재령별로 강도시험을 실시하는데 비파괴 기법을 이용하여 이러한 시간과 비용을 줄일 수 있으며 현장에서 구조물의 손상없이 강도 추정도 가능하다. 과거 초음파나 Impact-Echo를 이용하여 골재의 특성, 물-시멘트 비, 양생조건등의 다양한 환경

과 재료특성을 고려하여 압축강도와 속도간의 특성을 파악하고자 하였다.(Yuan et al., 2003, Lee et al., 2003, Pessiki et al 1996) 비파괴 기법 중에서도 특히 탄성과 속도를 이용한 압축강도추정은 다양한 연구자에 의해 그 상관성이 입증되고 있다(Kang 2003, Cho et al 2007, 안지환 2008).

본 연구는 첫째, 전단파와 압축강도의 상관관계를 검토하고 둘째, 양생조건에 따른 전단파와 압축강도의 상관관계에 대한 영향을 분석하며, 셋째, 골재특성에 따른 전단파와 압축강도의 상관성을 분석한다. 이를 통해서 전단파와 압축강도와의 상관여부 및 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하는 단계적 연구 중 하나로 동일 시멘트 페이스트를 사용하여 양생조건에 따른 재령별 공시체의 전단파 속도변화와 압축강도의 상관관계를 관찰하였다.

2. 전단파 기법 소개

탄성과 신호는 매질을 주행하다 경계면을 만나면 그 일부가 굴절 또는 반사를 하게 되는데 이렇게 굴절 또는 반사되어 되돌아오는 신호를 분석하여 구조를 조사하는 것이 탄성파를 이용한 측정법의 기본원리이다.

파의 속도란 어떤 매개체를 통과하는 속도로 정의할 수 있는데, 현장 또는 실내에서 원주형 공시체를 제작하거나 코어 시료로부터 공진 주파수를 얻게 되면 식 (1)을 이용해서 콘크리트 시료의 탄성계수를 추정할 수 있다. 실험 장비의 구성은 타격을 위한 햄

며(source), 파를 받아들이는 센서(receiver sensor) 그리고 센서에서 받아들이는 신호를 분석하는 분석기(analyzer) 등으로 구분된다. 파의 속도는 공시체의 stiffness를 직접적으로 추정할 수 있는 지수이며, 파의 속도가 빠르면 높은 stiffness를 나타내는 것이다.

$$V_{c,s} = f_{c,s} \times \lambda \quad (1)$$

여기서,

- $V_{c,s}$: 파의 속도(C : Rod 파, S : 전단파)
- $f_{c,s}$: frequency(C : Rod 파, S : 전단파)
- λ : 파의 길이(=2l)

파의 속도를 구하게 되면 식 (2)를 이용해서 해당 공시체의 탄성계수 값을 산정할 수 있다.

$$E \text{ or } G = \rho \times V_{c,s}^2 \quad (2)$$

여기서,

- E : young's modulus
- G : shear modulus
- ρ : mass density

여기서 사용되는 파는 2가지로 Rod 파(비구속 압축파)와 S파(전단파)가 있으며 Rod파를 통해서 영탄성계수(E)값을 추정하며, S파를 이용해서는 전단탄성계수(G)을 추정할 수 있다.

3. 양생조건 검토를 위한 예비실험

양생조건에 따른 전단파 속도와 압축강도의 상관관계를 살펴보기 위해서 우선 여러 양생조건에 따른 재령별 탄성과 속도를 관찰하였다. 이후 다양한 양생조건 중 중요한 차이가 나는 조건들을 대상으로 양생조건에 따른 압축강도와 탄성과 속도의 상관관계를 살펴보았다.

양생조건에 따른 재령별 탄성과 속도의 변화를 측정하기 위하여 동일배합에 대해 초기 24, 32, 96시간에서 5가지의 양생조건을 비교하였다. 우선 표준양생온도로 국내 KS 기준과 ASTM 기준을 만족하기 위해 22℃를 표준온도로 정했으며 도로공사 표준시방서에서 사용하는 일반적으로 시공 가능한 최소 대기온도인 10℃와 최대온도인 38℃를 비교하였다.

또한 표준온도에서는 완전 수침상태인 양생습도 100%, 일반적으로 초기제작 공시체 및 장기 보관하는 상태인 60%, 그리고 현장을 묘사하는 Wet Mat Curing 이 세 가지 방법을 포함하였다(표 1).

공시체는 100×200mm를 사용하였으며 굵은골재 최대치수 19mm 골재를 사용하였다.

표 1. 양생조건

번호	양생온도	양생습도	양생방법
1	22℃	100%	항온수조
2	22℃	60%	항온항습실
3	22℃	Wet Mat Curing	항온항습실
4	38℃	100%	항온수조
5	10℃	100%	항온수조

표 2는 예비시험에 사용된 배합표로 현재 콘크리트 포장에 사용되는 배합비와 유사하게 적용하였다.

표 2. 배합표

굵은골재의 최대입경	단위 수량	단위 시멘트량	물 시멘트비	절대 잔골재율	단위 잔골재량	단위 굵은 골재량	단위 혼화제 량	
mm	kg/m ³	kg	%	%	kg/m ³	kg/m ³	감수계 g/m ³	AE 계 g/m ³
19	143.82	340.00	42.3	37.7	691.97	1150.07	1700	51

공시체 제작 후 탈형은 공시체 시편이 형태를 유지하는 최소한의 시간만 양생하여 최대한 빨리 탈형했으며, 약 제작 후 7시간 이후였다. 측정된 양생시간은 제작 후 24, 32, 96시간을 측정하였다. 초기 4일 동안의 거동을 살펴본 이유는 수화반응 후 초기 3~4일 이내가 강도발현 속도가 가장 크기 때문이다.

실험결과 ROD과 전단파 속도와의 차이는 있지만 경향은 같게 나왔다(그림 1, 그림 2).

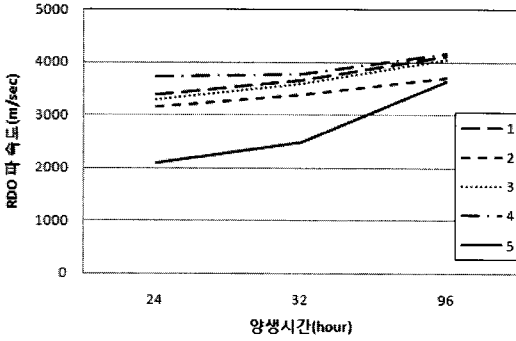


그림 1. 양생시간별 ROD파 속도변화

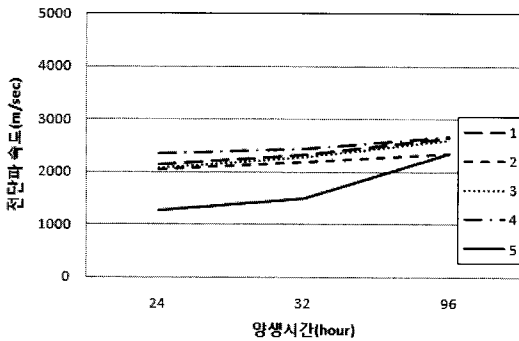


그림 2. 양생시간별 전단파 속도변화

양생온도가 38℃인 4번 조건이 속도가 가장 높았으며 양생온도가 10℃인 5번 조건이 가장 낮게 나타났다. 동일온도인 22℃에서 양생한 공시체의 경우 수침상태인 1번과 Wet Mat Curing 상태인 3번이 유사하게 나왔으며 60% 습도상태인 2번이 작게 나타났다. 이는 온도가 높고 습도가 충분히 공급될 경우에 강도증진이 큰 것을 알 수 있다.

이 시험을 근거로 하여 동일한 습도상태에서 온도에 의한 강도증진과 전단파 속도의 변화를 살펴보기 위하여 온도는 10, 22, 38℃로 설정하고 습도는 모두 수중양생을 시켜 온도에 영향만을 살펴보기로 하였다. 일반적으로 28일 강도시험에서 완전 수침을 기준으로 양생시키고 있기 때문이다.

4. 실내 실험 계획 및 결과

양생조건에 따른 압축강도와 탄성과 속도의 상관관계 규명을 위하여 굵은골재 및 잔골재에 의한 영향을 배제하고 시멘트 페이스트만 이용하여 실험하였다.

1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 공시체 제작시 물-시멘트 비는 37.3%였다.

양생조건은 10, 22, 38℃의 양생온도이며 1, 3, 7, 14, 28일 양생 후 전단파 측정 시험과 압축강도 시험을 실시하였다. 또한 각 온도조건별로 I-Button을 이용하여 양생온도이력을 측정하였다.

양생온도를 살펴보면 제작 후 24시간은 동일조건으로 양생을 하였으며 공시체 탈형 후 각각 10, 22, 38℃의 양생수조에 수중 양생하였다. 그림 3에서 보면 22℃의 양생온도가 평균 25℃정도로 나타나고 있다. 이는 실험실의 양생수조가 오픈형이고 무더운 여름에 사용하다보니 일교차에 따른 시간별로 약간의 온도 변화가 있었다.

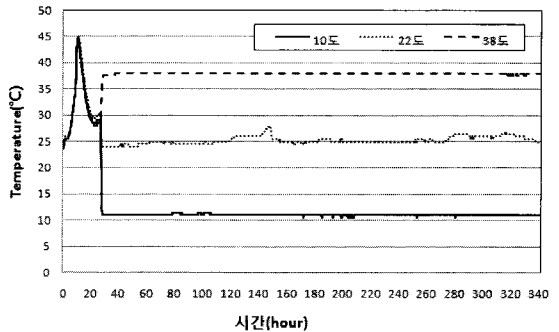


그림 3. 양생에 따른 온도기록

그림 4는 양생온도별 성속도변화를 나타낸 것으로 성속도 역시 양생일이 길어질수록 차이가 점점 크게 났으며 28일에는 양생온도별로 약 3~400℃/day 정도 차이가 났다.

실내시험은 재령별로 탄성파를 측정(Rod파, 전단파) 후 압축강도를 측정하였고 그림 5는 실험별 측정 방법을 보여주고 있다.

측정한 탄성과 중 전단파를 이용하여 압축강도와

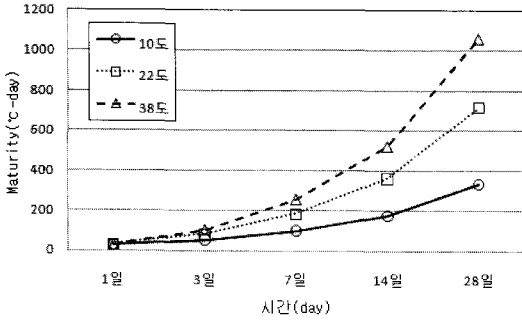
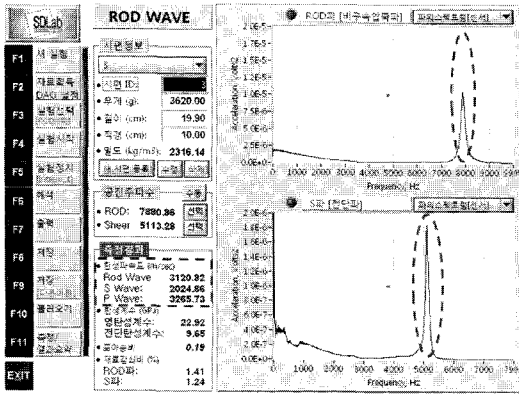


그림 4. 양생시간별 성숙도(Maturity) 변화

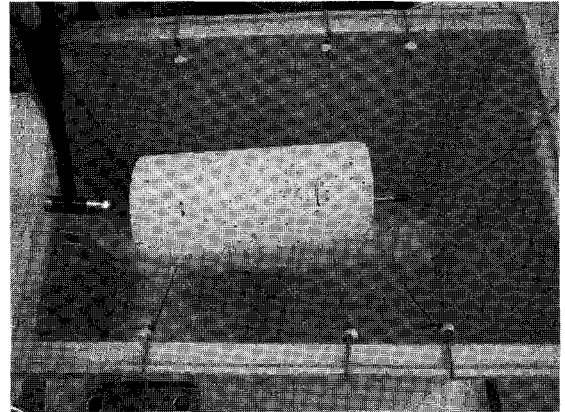
의 상관성을 보았는데 전단파를 사용한 이유는 구속조건에 영향을 받지 않기 때문이다. 이는 향후 현장에서 측정된 전단파와 실내에서 코어시편으로 측

정한 전단파의 비교를 가능하게 해주는 부분이기도 하다.

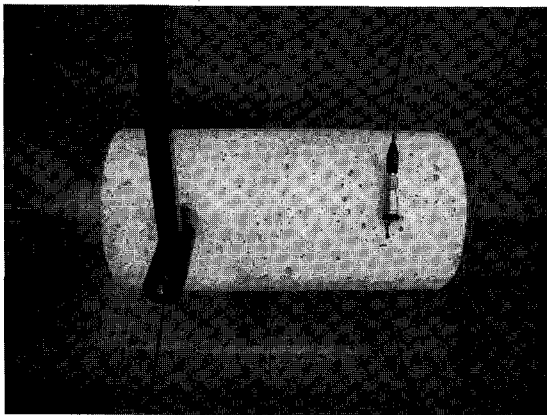
그림 6은 양생일별 압축강도 결과를 나타내었는데 압축강도 측정결과 양생온도가 높을수록 양생일별 압축강도역시 높은 것으로 나타났다. 이는 양생온도가 콘크리트의 강도에 영향을 미친다는 것을 보여주는 일반적인 내용이다. 여기서 주목할 부분은 양생일이 지날수록 22°C의 공시체와 38°C의 공시체간 강도 차이가 점점 줄어드는 것이고 거기에 비해 10°C의 공시체와 22°C의 공시체간 압축강도는 크게 줄어들지 않는 것을 알 수 있다. 실제 22°C 공시체의 온도측정 결과가 평균 25°C임을 감안하더라도 38°C와 25°C의 온도차이 13°C와 22°C와 10°C의 온도차이 12°C



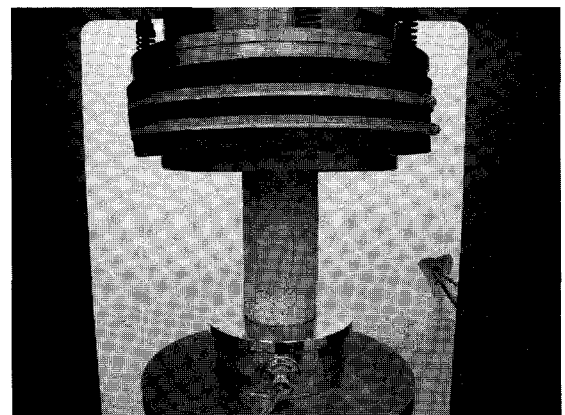
(a) 탄성파 측정결과 화면



(b) Rod 파 측정



(c) 전단파 측정



(d) 압축강도 실험

그림 5. 전단파 측정 및 압축강도 실험

이므로 각 공시체별 온도간격은 비슷하다.

일반적으로 콘크리트가 고온양생의 경우 초기에 급속한 화학반응으로 인하여 강도가 빨리 발현되며 시간이 지날수록 발현증가 속도가 늦어지기 때문이고 온도가 낮은 경우는 화학반응 속도가 저하되어 초기강도발현 뿐만 아니라 전반적인 강도발현 속도가 떨어지기 때문이다.

그림 7의 양생일에 따른 전단파 속도의 변화추이를 살펴보면 양생일이 지남에 따라 전단파 속도가 증가하며 양생온도가 높을수록 전단파속도가 크다. 전단파 속도가 크다는 것은 콘크리트내 조직이 치밀해짐에 따라 매질을 통해 전달하는 파의 이동 속도가 크기 때문이다.

그림 8은 압축강도와 전단파속도의 상관관계를 나타내었다. 양생온도는 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 식 (3)은 압축강도와 전단파 속도와의 일반적인 관계식

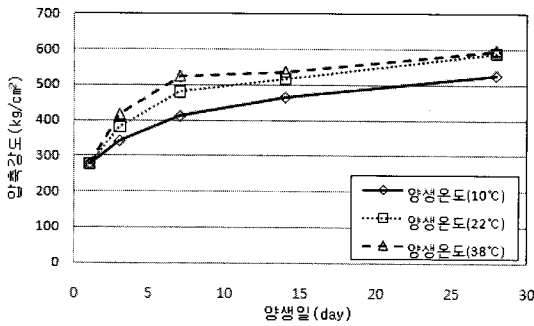


그림 6. 양생일별 압축강도

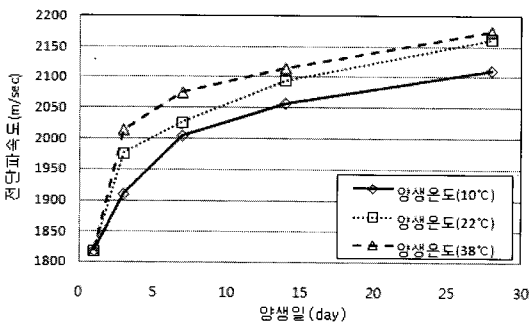


그림 7. 양생일별 전단파 속도

으로 보통 지수승이 적합한 것으로 알려져 있다.

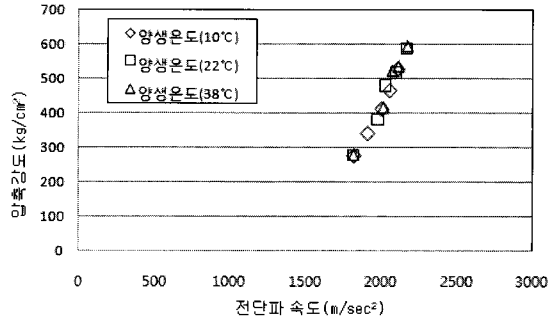


그림 8. 양생온도별 압축강도와 전단파 속도의 상관관계

$$S = ae^{bV_s} \quad (3)$$

여기서, S : = 압축강도(kg/cm²)

V_s : = 전단파 속도(m/sec)

a, b : = 상수

표 3은 양생조건별 압축강도와 전단파 속도의 추세선 수식과 결정계수를 나타낸 것이다. 표 3에서 나타났듯이 양생온도별 압축강도와 전단파 속도의 상관관계를 살펴보면 상수 b 값은 일정한 것으로 나왔으며 상수 a 값 역시 유사한 값을 보이고 있다.

표 3. 양생조건별 추세선 수식 및 결정계수(R^2)

양생조건	추세선 수식	R^2
10°C	$y = 5.4359e^{0.0022x}$	0.9992
22°C	$y = 4.8303e^{0.0022x}$	0.9766
38°C	$y = 5.0284e^{0.0022x}$	0.9841

그림 9는 모든 양생조건에 대한 압축강도와 전단파속도의 상관관계를 나타내었다. 추세선 수식은 개별적 양생온도에 따른 추세선 식의 상수 b 값은 일치하였으며 상수 a 값 역시 유사한 값을 보이고 있다.

본 실험결과를 통해서 양생온도는 압축강도와 탄성과 속도에 영향을 미치는 인자이나 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 영향을 미치지 않는다. 다

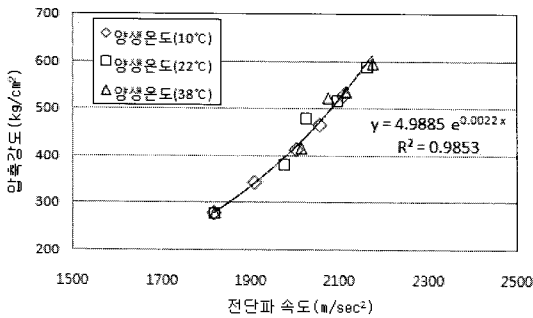


그림 9. 양생온도별 압축강도와 재령별 전단파 속도의 상관식

시 말하면 동일 배합에서 하나의 콘크리트 재료의 압축강도와 전단파 속도의 상관관계 이력을 알고 있으면 양생온도 조건에 상관없이 탄성파를 알고 있거나 압축강도추정을 쉽게 할 수 있다는 것이다.

5. 결론

비파괴 실험중 하나인 Resonance Analyzer 실험을 이용하여 양생온도에 따른 재령별 전단파 속도측정과 압축강도 시험을 실시하였으며 그 상관성을 분석하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 양생온도는 콘크리트 페이스트의 압축강도증진 및 전단파 속도변화에 영향을 미치는 인자중 하나이다.
2. 동일 페이스트 배합일 경우 양생온도와 상관없이 압축강도와 전단파 속도의 상관관계는 일정하다.
3. 그러므로 동일 페이스트 배합의 경우 시공시 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 대한 Master Curve를 알 수 있다면 양생온도나 재령일을 고려하지 않고도 전단파를 이용하여 현시점의 압축강도를 추정할 수 있다.

본 연구를 통하여 시멘트 페이스트의 배합에서 양생온도는 압축강도와 전단파 속도의 상관관계에 영향

을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 양생온도를 고려하지 않아도 동일 배합일 경우 압축강도와 전단파 속도의 상관관계는 일정하다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 현장에서의 전단파를 이용한 콘크리트 포장의 압축강도 추정시 온도조건에 대한 고려를 배제시킬 수 있는 근거를 마련할 수 있는 연구결과이다.

물론 실제 콘크리트 포장의 경우 물, 시멘트, 굵은 골재, 잔골재 및 혼화제(재)가 포함되어 있는 복합재료이다. 그러므로 추가연구에서는 콘크리트에서 많은 부분을 차지하는 골재에 대한 영향을 고려하여 양생온도별 압축강도와 탄성과 속도에 대한 상관관계를 규명할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 “장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발”의 세부과제입니다. 본 연구를 지원하여준 장수명·친환경 연구단에 감사드립니다.

참고 문헌

- 안지환 외 3인(2008), “전단파 속도를 이용한 콘크리트 압축강도 추정연구”, 한국도로학회 논문집 제 10권 3호.
- A. M. Neville (1995), “*Properties of Concrete*, 4th”, Longman
- D. Yuan, S. Nazarian and A. Medichetti (2003), “*A Methodology for Opening of PCC Pavements to Traffic*”, TX-01 4188-2, TxDOT.
- Hoi-keun Lee, Hyunjune Yim and Kwang-Myong Lee (2003), “Velocity-Strength Relationship of Concrete by Impact-Echo Method,” *ACI Material Journal*, V.100, No. 1, January-February, 2003.
- Kang, T.-H., Joh, S.-H. and Cho, M.-R. (2006), “Structural Integrity Assessment of Tunnel Concrete Lining by the Resonance Search



- Technique”, *Key Engineering Materials*, Vols. 321~323
- Mi-Ra Cho, Sung-Ho Joh. etc.,(2007), “Nondestructive In-Place Strength Profiling of Concrete Pavements by Resonance Search Technique” *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D.C.*
- P. Kumar Mehta and Paulo J.M.Monteiro (2006), “Concrete microstructure, properties, and Materials”, Mc Graw Hill
- Pessiki, S... and Johnson, M. R.(1996), “Nondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by Impact-Echo Method.”, *ACI Material Journal*, V. 93, No. 3, May-June 1996.
- V.M. Malhotra, N. J. Carino (2004), “Nondestructive Testing of Concrete”, *CRC Press*.
- 접 수 일 : 2008. 12. 8
심 사 일 : 2009. 1. 15
심사완료일 : 2009. 4. 27