

재래 및 비파괴검사를 이용한 고강도 콘크리트의 재료특성에 관한 연구

Material property evaluation of high strength concrete using conventional and nondestructive testing method

조 영 상*

Cho, Young Sang

ABSTRACT

This study is to characterize the material property of early age high performance concrete emphasizing compressive strength using nondestructive testing methods. Three high performance concrete slabs of 600, 850 and 1100kg/cm² compressive strengths were prepared together with cylinders from same batches. Cylinder tests were performed at the ages of 7, 14, 21 and 28 days after pouring. Using the impact echo method, the compression wave velocities were obtained based on different high performance concrete ages and compressive strengths. The equation to obtain the compressive strengths of high performance concrete has been developed using the obtained compression wave velocities. Using the SASW (spectral analysis of surface wave) method, the equation have also been developed to obtain the compressive strengths of high performance concrete based on the surface wave velocities.

1. 서론

그 동안 국내외에서 고강도콘크리트의 제작 및 실용화에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 고강도콘크리트의 성질에 관한 이론 및 실험적 연구가 여러 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있으나 비파괴검사를 이용한 연구는 국내외를 막론하고 미진한 실정이다. 본 연구는 고강도콘크리트 시험체를 세 가지 강도로 제작하여 재령에 따라 재래 방법인 Cylinder Test를 이용하여 압축강도를 실험 연구하고 비파괴 공법인 충격반향기법⁽¹⁾(Impact echo method) 및 표면파기법(Spectral analysis of surface wave)를 적용하여 압축파 속도 및 표면파 속도를 조사하여 재료특성과의 관계를 분석하고자 한다.

그림 1과 같이 SASW 기법⁽²⁾은 데이터 획득 장치, 2개의 신호 상태조절기, 두 개의 감지기 및 진원 기구로 철 구슬을 사용하여 진원에서 발생한 표면파를 감지기를 통하여 데이터 획득 장치에 수집하여 필요한 신호처리 과정을 거쳐 분산곡선을 구하여 표면파 속도 및 전단파 속도를 평가하는 비파괴검사 방법이며 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 시험체의 한쪽 면에서만 접근가능해도 실험이 가능하다.
- 2) 충격(impact)으로부터 생성되는 에너지의 대부분은 표면파의 형태로 전해지고, 나머지가 체적파(body wave)의 형태로 전해진다.
- 3) 표면파(원통형의)의 기하학적 분산에 의한 감쇠(Damping)는 체적파(구형)로 인한 감쇠보다 더 작다.
- 4) 시험체의 강성(예. young의 계수, 또는 전단 계수)을 층의 두께를 알지 못해도 얻을 수 있다.

* 정회원, 한양대학교 건축학부 조교수

그림2와 5에서 보는 바와 같이 충격 반향 기법은 데이터 획득 장치, 1개의 신호 상태조정기, 1개의 감지기, 진원용 철 구슬이 사용되며, 진원에서 발생한 압축파가 경계면을 통하여 반사된 후, 감지기를 통하여 데이터 획득 장치를 통하여 수집하여, 필요한 신호처리를 거쳐 압축파 속도나 실험체의 두께를 알아내는 기법이다. 진원으로 사용되는 12 mm 철구슬을 일정높이에서 떨어뜨린다. 경계면들로부터 반사되는 음파들을 제거하기 위해, 반사된 음파들은 제거하고, binlowpass 필터를 신호 처리과정에서 사용하였다. 안전분석 중 하나로, 조기 재령 고강도콘크리트의 압축강도와 표면파의 속도 사이의 상관관계를 SASW 법을 이용 개발하였다. 또한 충격반향기법을 사용하여 압축파속도와 압축파강도와와의 상관관계도 개발하였다.

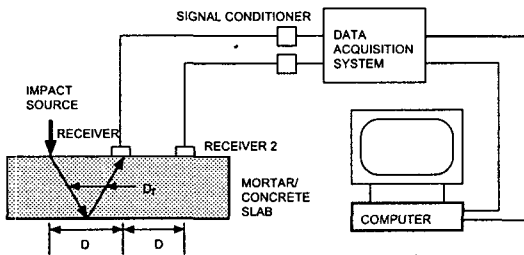


그림 1 표면파 기법의 실험 측정기구 배치



그림 2 표면파기법 및 충격반향기법 실험 모습

2. 고강도 콘크리트 공시체

공시체는 3개의 강도가 서로 다른 슬래브로 계획하였고, 계획배합강도는 600(공시체 A), 850(공시체 B), 1100(공시체 C) kg/cm³의 고강도 콘크리트를 사용하였다. 공시체의 치수는 각각 91.44 x 91.44 x 10.16 cm를 사용하였다. 공시체와 같은 배취(batch)에서 7, 14, 21, 28 일 압축강도를 실험 할수 있도록 고강도콘크리트 실린더를 제작하였다. 고강도 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트, 함수율 2%의 강모래, 25 mm 이하의 채석, 실리카 폼(silica fume), 고유동화제(super plasticizer), 물을 사용하여 실험실에서 제작 하였고 상온(5 - 10 °C)에서 기중 양생 하였다. 압축파속도의 측정을 위하여 충격반향기법을 이용 공시체상의 25곳에서 실험하였다. 표면파측정은 7.62 cm의 감지기 간격으로 공시체별 재령별로 표면파기법을 사용 실시하였다.

3. 압축파속도의 측정

그림2와 3에서 보는 바와 같이 각 슬래브 공시체의 압축파속도를 측정하기 위해 충격반향기법을 사용하였다. 충격반향기법⁽¹⁾의 계측기기는 데이터 획득 시스템, 감지기(가속도계), 신호상태 조정기, 진원용 구슬로 구성되었다. 이 계측기기를 사용하여 각 공시체 (공시체 A, B, C) 상의 25 지점에서 실험을 하였다. 진원 위치는 감지기로부터 25.4~50.8mm 내로 제한하였다.

충격반향기법에서는 시험체의 표면에 철구슬 등으로 기계적 충격을 가하여 응력파가 슬래브 공시체에 전달된다. 이 파는 압축, 전단, 혹은 표면을 따라 이동하는 Rayleigh파의 형태로 시험체 슬래브 내에서 이동한다. 압축 혹은 전단파는 공시체 슬래브 속으로 전달되고 내부 균열, 공동, 이질매질층, 혹은 시험체의 외부 경계면을 만나면 반사된다. 따라서, 공진상태는 표면과 내부 불연속층 혹은 외부 경계면 사이에서 일어나는 다중반사로 인하여 유발된다. 압축파는 충격반향기법의 기본이 되는 파이다. 만약 감지기가 충격 지점에 가까이 설치된다면 압축파 전단파의 방사패턴 때문에 파의 형식은 압축파가 전파될때 발생하는 변위 혹은 가속도에 의하여 결정된다⁽¹⁾. 감지기에 압축파가 도달할 때의 주파수 f 는 FFT (Fast Fourier Transform)를 사용하여 수집된 시간영역 (time-domain) 신호를 주파수영역 (Frequency-domain)으로 변환함으로 결정된다.

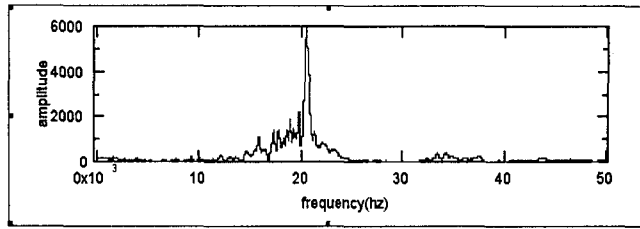


그림 3 충격반향기법 공진주파도

펄스(pulse)가 시험체 표면에 도달할 때마다 고유의 변위나 가속도를 만들어 낸다. 따라서 파 형식은 주기적이며, 그 주기 Δt 는 이동경로(2H)를 압축 파장속도 V_p 로 나눈 것과 같다. 주파수는 주기의 역수이기 때문에 주파수는 V_p 를 이동경로 (2H) 로 나눈 것이다. 주파수 영역에서의 최대 진폭에 상응하는 최대 주파수를 얻은 다음, 압축파속도는 $V_p = 2fH$ 공식을 사용하여 계산할 수 있었다. 여기서 H는 내부 결함이나 외부 경계면의 깊이이다. 압축파속도는 파전달공식을 사용하여 전단파속도로 변환할 수 있다. 각 위치마다 고강도 콘크리트 혼합의 질이 다양하기 때문에 각 실험 위치마다 속도에 다소 차이를 보였다. 또한 실험의 불확실성도 고려하였다.

4. 표면파 기법의 기본원리

그림1에서 표시된 데이터 획득 시스템이 감지기 1과 2에서 각각 얻은 출력결과인 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 를 획득하는데 쓰인다. 시간 영역 출력결과들은 FFT(Fast Fourier Transform)^(3,4)를 이용 주파수 영역인 $X(f)$ 와 $Y(f)$ 로 변환시킨다. 두 감지기 사이의 크로스 파워 스펙트럼⁽⁴⁾(Cross power spectrum) G_{XY} 는 $X(f) \cdot Y(f)$ ⁽²⁾로 정의할 수 있고, $X(f) \cdot$ 는 $X(f)$ 의 공액 복소수를 뜻한다.

실험과정은 최종평균 크로스 파워 스펙트럼(Cross power spectrum)을 얻기 위해 16번 반복하였다. 위상변화(phase shift), $\theta_{XY}(f)$ 는 두 감지기 사이의 거리 D 사이에 각 주파수가 갖는 물리적 사이클(cycle)의 수를 의미하고 다음과 같이 계산하였다.

$$\theta_{XY}(f) = \theta_X(f) - \theta_Y(f) = \tan^{-1} [\text{Im}(G_{XY}) / \text{Re}(G_{XY})] \quad (1)$$

이 식에서 $\theta_{XY}(f)$ 는 각 주파수마다의 각도(degrees)로 표시된 크로스 파워 스펙트럼 (Cross power spectrum)의 위상 변화이며, $\text{Im}(G_{XY})$ 와 $\text{Re}(G_{XY})$ 는 각 주파수마다의 크로스 파워 스펙트럼 (Cross power spectrum)의 허수 및 실수 부분의 값이며, f는 주파수이다. 주파수의 실제위상을 구하는 과정은 360° 사이클(cycle)의 수를 세어서 전체 도수를 구하고 주파수의 마지막 사이클의 도수를 더해 주었다. 이 과정을 위상 전개⁽²⁾라 부른다. 위상값의 부호는 늘 음의 부호임으로 이것을 양의 부호로 변경시켜 준다⁽³⁾.

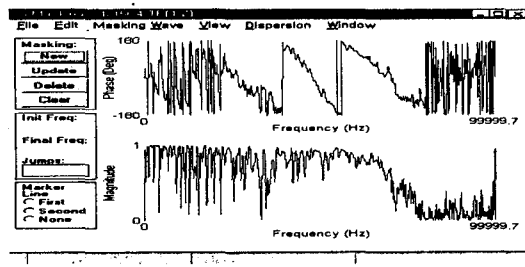


그림 4 SASW크로스파워스펙트럼 및 코히어런스함수

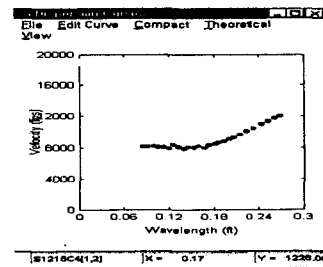


그림 5 SASW 분산곡선

그림4에서 크로스파워(cross power)와 코히어런스(coherence) 크기로부터 저질의 주파수요소는

위상정보가 잘못 해석되는 것을 막기 위하여 제거시켜 주는데, 이를 매스킹(masking)이라 부른다. 회전벡터(vector)의 원리를 이용하면 360°의 위상변화는 한 개의 주기⁽⁴⁾가 이동시간과 동일하다. 조화파(Harmonic wave)에서 주기, T는 파의 역수이다 (즉 T=1/f). 그러므로 감지기 1에서 감지기 2까지의 이동시간, t(f),는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$t(f) = \Theta_{XY}(f) \cdot T/360^\circ = \Theta_{XY}(f)/(360^\circ \cdot f) \quad (2)$$

표면파속도, $V_R(f)$, 와 파장, $\lambda_R(f)$ 은 다음 식으로 결정된다.

$$V_R(f) = D/t(f) \quad (3)$$

$$\lambda_R(f) = V_R(f)/f \quad (4)$$

위 식에서 t(f)는 주파수의 함수로서 두 감지기 사이의 이동시간이며, D는 두 감지기 사이의 거리이다. 그림 5와 같이 표면파속도, $V_R(f)$ 와 파장, $\lambda_R(f)$ 의 그래프를 분산곡선이라 부른다⁽⁴⁾. 실험분산곡선의 자료점(Data points)은 일정 실험자료들의 평균을 한 자료점(one data point)으로 간주하여 자료점(Data points)들을 적은 숫자로 압축하였다. 압축된 분산곡선을 밀집분산곡선이라고 부른다. 또한, 코히어런스함수(coherence functions)^(5,6,7)를 이 실험을 이용 계산하였다. 코히어런스함수는 전체 측정입력에 대한 측정출력의 비율이다. 시스템이 이상적이면(소음이 없는), 전체 주파수에 대하여 코히어런스는 1(unity)이다.

5. 실험결과에 대한 분석

실린더 실험은 만능 재료시험기(Daeyeong material test system, 200 Ton)를 이용하여 재령 7, 14, 21, 28일에 각각 실시하였다. 그림6과 같이 배합설계강도 600kg/cm²의 고강도 콘크리트는 실린더 실험결과 재령28일 압축강도가 665kg/cm²로 평가되었고, 배합설계강도 850kg/cm²의 고강도 콘크리트는 실린더 실험결과 재령28일 압축강도가 914kg/cm²로 평가 되었으며, 배합설계강도 1100kg/cm²의 고강도 콘크리트는 실린더 실험결과 재령28일 압축강도가 976kg/cm²로 평가 되었다. 배합설계강도 1100kg/cm²가 실제실험 압축강도가 976kg/cm²로 감소된 것은 실제로 실린더 실험한 공시체의 파괴 성상을 관찰한 결과 최대치수 19mm~25mm의 쇄석을 조골재로 사용하여 먼저 쇄석에서 파괴(Fracture)가 일어난 것으로 판단되었다. 조골재의 치수를 13mm이하로 줄임으로써 강도가 증가될것으로 판단되었다. 포아송비는 배합설계강도 600kg/cm²의 재령28일의 실린더에서 0.220, 배합설계 1100kg/cm²로부터 0.182를 각각 구하였다.

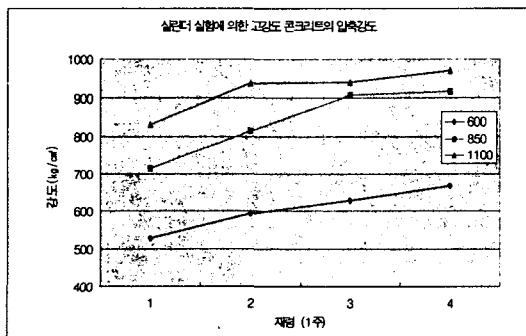


그림 6 실린더실험에 의한 고강도 콘크리트의 압축강도

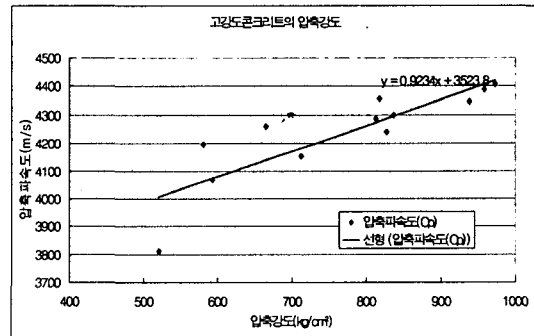


그림 7 압축파괴속도에 따른 고강도콘크리트 압축강도제안식

충격 반향기법을 이용하여 압축파괴속도를 조사하기 위하여 각 공시체A,B,C(91.44*91.44*10.16cm)상에서

재령 7, 14, 21, 28일에 25군데에서 실험을 실시하였다. 25곳의 압축파 속도의 평균값을 구하였고 이에 상응하는 실제 실린더 실험값과의 상관관계를 그림7과 같이 개발하였고 그 공식은

$$f_{ck} = 1.083 V_p - 3816.1143 \quad (5)$$

여기서 f_{ck} 는 고강도 콘크리트의 압축강도(kg/cm²)이고 V_p 는 압축파속도(m/s)이다. 그림2 와 같이

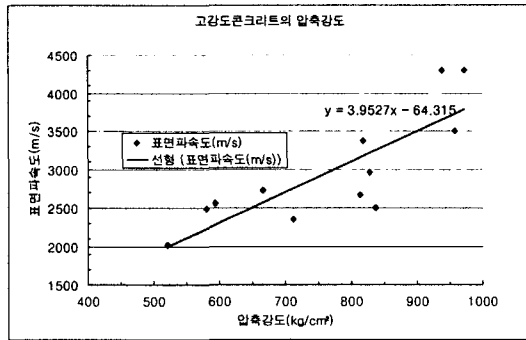


그림8 표면파속도에 따른 고강도콘크리트 압축강도제안식

표면파 기법(SASW)을 이용 공시체 A,B,C에서 재령 7, 14, 21, 28 일에 표면파 탐사에 대한 실험을 실시하였다. 진원과 첫째 감지기, 첫째 감지기와 두 번째 감지기 사이는 7.62cm 간격으로 실험 하였고, 시간 영역신호를 실험당 16번 수집하여 평균을 구하고 Fast Fourier Transform을 이용하여 주파수 영역으로 변환하여 크로스 파워스펙트럼(cross power spectrum) 및 코히어런스 함수를 그림4와 같이 구할 수 있었다. 크로스 파워 스펙트럼(cross power spectrum)을 이용 공식(2),(3),(4)를 이용 분산곡선을 구하여 표면파 속도를 분석할 수 있었다. 이 표면파 속도를 이용 고강도 콘크리트 실린더 실험 결과를 연계하여 고강도 콘크리트의 압축강도를 구할수 있었고 상관관계는 그림8과 같고 제안된 공식은 다음과 같다.

$$f_{ck} = 0.253V_R + 16.271 \quad (6)$$

여기서 f_{ck} 는 고강도 콘크리트이 압축강도 (kg/cm²)이고, V_p 는 압축파 속도 (m/s)이다.

6. 결론

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 초기재령의 물성중 압축강도를 조사하기 위한 식을 제안하기 위하여 재래방법인 실린더 실험(cylinder Test)을 재령별, 배합설계, 강도별로 실시평가하고 비파괴검사방법중 충격반향기법(Impact echo method) 및 표면파 기법(SASw method)을 이용 실린더 실험에 상응하는 재령별, 강도별로 실험 분석한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고강도콘크리트의 실린더 및 공시체를 제작하기 위하여 보통포틀랜드시멘트, 함수율 약 2%의 강모래, 최대치수 25mm이하의 썬석, 실리카흄(Silica fume), 고성능유동화제(Super placitizier)를 사용한 결과 배합설계 강도 600, 850kg/cm²에 대하여는 배합설계강도 이상의 실제 28일 압축강도를 구할 수 있었으나 배합강도 1100kg/cm²의 고강도 콘크리트의 실제 28일 강도는 976kg/cm²으로 평가된 것은 사용 썬석 골재 의 최대치수가 25mm로 과대한 것으로 평가되어 최대치수 13mm이내의 골재를 써야 되는 것으로 판단되 었다.
2. 충격반향기법을 이용 초기재령의 고강도 콘크리트의 압축파 속도를 구할 수 있었고 압축강도를 구하기 위한 제안식은 $f_{ck} = 1.083 V_p - 3816.1143$ 이다.
3. 표면파 기법을 이용 초기재령의 고강도 콘크리트의 표면파 속도를 구할 수 있었고 압축강도를 구하기 위한 $f_{ck} = 0.253 V_R + 16.271$ 이다.
4. 본 연구를 통하여 초기 재령 고강도 콘크리트의 압축강도를 구하는 제안식을 이용 고강도 콘크리트를 사용하는 고층 건축의 품질관리 및 고강도 콘크리트를 사용한 기존건물의 안전도 평가에 기여할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1 . Sansalone, M. and Carino, N. J., Detecting Honeycombing, the Depth of Surface-opening Cracks, and Ungrouted Ducts, ACI Annual Convention, San Antonio, 1987. 1.
- 2 . Nazarian, S., In Situ Determination of Elastic Moduli of soil Deposits and Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 1984.
- 3 . Sheu, J. C., Application and Limitations of the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 1987.
- 4 . Aouad, M. F., Stoke II, K. H. And Briggs, R. C., Stiffness of Asphalt Concrete Surface Layer from Stress Wave Measurements, Transportation Research Record 1384, 1993.
- 5 . Sanchez-Salinerio, I., Analytical Investigation of Seismic Methods Used for Engineering Applications, Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987.
- 6 . Gucunski, M., Generation of Low Frequency Rayleigh Waves for the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 1991.
- 7 . Krstulovic-Opara, N., Woods, R. D., and Al-Shayea, N., Nondestructive Testing of Concrete Structures Using the Rayleigh Wave Dispersion Method, ACI Materials Journal, V.93, No. 1, Jan. 1996.