

디지털이미지를 이용한 폐기물 혼합 콘크리트의 강도 평가 Evaluation of strength of waste material mixed concrete using digital image

윤현석¹⁾, Hyun-Suk Yoon, 이기호²⁾, Ki-Ho Lee, 박준범³⁾, Jun-Boum Park

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 박사후과정, Post Doc., Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology,

²⁾ (주) KTS 대표이사, 공학박사, President of Korea Technology Science Co., LTD, Ph.D.

³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National University

SYNOPSIS : To analyze the effects of oyster shell particles, inserted in the self-hardening matrix such as cement paste, on strength, homogenization analysis using micro structure was used to estimate and assess the apparent elastic modulus of oyster shell particle. DIB modeling technique was used to represent of the micro structure of oyster shell mixed concrete. The results showed that the apparent elastic modulus of LOS (large oyster shell particle) was changed with the amount of LOS inserted. In particular, when the amount of LOS was 200% of the weight of cement, the apparent elastic modulus of LOS tended to decrease rapidly. This could mean that the strength of oyster shell mixed concrete is much affected by LOS inserted material in mixed ratio of 200%.

Key words : digital image, homogenization method, apparent elastic modulus, unconfined strength, oyster shells

1. 서 론

두 가지 이상의 상이한 재료로 구성된 혼합체의 역학특성은 구성 재료의 물성 및 골격구조에 영향을 받게 된다. 따라서 다양한 물성으로 구성된 혼합체의 특성을 이해하는데 있어 기존의 균질체에 적용했던 역학이론을 이용함에 있어서는 그 한계가 있다. 그 이유로 기존의 고전 역학은 물질을 균질한 탄성체 재료이며 평면적인 거동으로 주로 다루어 왔으나, 실제 혼합체는 구성 재료간의 미시구조의 변화 및 구성 요소간의 상호작용 등에 대한 평가가 이루어져야 하기 때문이다. 일반적으로 두 가지 이상의 상이한 재료로 구성되는 혼합체는 혼입재 (inserted material)와 매질 (matrix)로 구성 성분을 나눌 수 있다. 이러한 혼합체는 혼입재의 속성, 매질의 속성, 그리고 혼합비 등에 의해서 역학적 특성이 크게 달라진다. 혼입되는 재료의 강도가 매질의 강도보다 큰 경우와 작은 경우, 혼입재료가 균질한지 비균질한지, 그리고 구성 재료가 변형성 재료인지 비변형성 재료인지 등의 요인에 따라서도 혼합체의 역학적 특성은 다르게 나타날 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 혼합체인 폐기물 골패각이 혼합된 콘크리트에서는 파쇄 골패각 입자가 혼입재이고 시멘트페이스트(cement paste)를 매질로 볼 수 있다. 이는 일반 혼합토 (mixed soil)와는 다른 점이 있다. 즉, 일반적인 혼합토에서는 혼입재가 매질보다 강도가 크다. 반면 골패각 혼합콘크리트는 시멘트와 물이 반응하며 시간에 지남에 따라 고결됨으로 매질이 혼입재보다 더 큰 강도를 가질 수 있다. 또한 매질이 시간에 따라 강도 특성이 변함으로 인해 혼합체 특성이 시간에 따라

달라진다(Yoon 등 2004; 윤현석 등 2002; 양은익 등 2001). 따라서 거시적 역학특성에 혼입재가 미치는 영향과 매질 부분이 미치는 영향에 대해서도 주목하여 강도 및 변형 특성을 평가할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 일반적인 천연골재에 비해 강도가 작은 파쇄 굴패각 입자가 콘크리트 내에서 형성하고 있는 구조에 의해 전체 혼합체의 강도에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다. 굴패각 입자의 골격구조는 디지털이미지(DIB-; digital image based-)모델링 기법을 이용하여 얻었다. 또한 굴패각입자의 골격구조가 콘크리트 강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 균질화기법을 이용한 수치해석을 실시하여 혼입재의 굴패각의 겉보기 탄성계수(apparent elastic modulus)를 산정하였다. 이는 굴패각입자가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 수치적으로 정량화한 값을 의미한다.

2. 실험 재료

굴패각을 구성하고 있는 성분을 분석하기 위해 X선 형광분광분석(XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometry)시험을 실시하였다. X선 형광분광분석은 서울대학교 공동기기원에 보유하고 있는 장비를 활용하였다. 성분 분석을 위한 굴패각 시료는 다음의 방법에 의해 준비하였다. 굴패각을 햇볕에 일주일 이상 말려 수분을 충분히 없앤 후 솔로 불순물을 제거하고 파쇄하여 200번체를 통과할 정도의 분말을 10g 정도 준비하였다. 굴패각의 XRF 실험 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. Results of XRF Analysis of Oyster Shell (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	L.I.*	Total
Oyster shell	0.62	-	0.01	0.32	0.78	52.94	0.93	0.03	-	0.17	44.02	99.81

L.I.* : loss of ignition



(a) 원형 굴패각



(b) LOS

그림 1. 굴패각

콘크리트 골재로 사용하기 위해 먼저 원형 굴패각을 분쇄기로 파쇄한 후 불순물을 제거하고 건조시켜 잔골재와 유사한 입도의 굴패각 입자를 선별하였다. 파쇄 전 일반적인 원형 굴패각의 크기는 길이 80~130mm, 폭 30~80mm, 두께 20~50mm 이었다(그림 1a). 분쇄된 굴패각 입자 중 일정 크기 즉, 입경이 4.75mm-2mm인 파쇄 굴패각을 취해 콘크리트 골재로서 사용하였다. 파쇄된 굴패각 입자를 본 논문에서는 LOS (Large Oyster Shell particle)로 표기하였다(그림 1b). 일반적으로 파쇄 굴패각의 입자 형태는 타원형의 입자형태를 나타내고 박편화 되는 경향을 보이며, 비중은 2.38로 일반적인 토사의 비중에 비해 작기 때문에 일반적인 파쇄상태에서 굴패각은 경량 재료로 판정할 수 있다. 파쇄 굴패각은 앞에서 언급된 바와 같이 일반적인 흙입자와는 달리 박편의 타원체의 형태로 가정할 수 있으며, 이를 보다 구체적으로 기하학적인 모

델화를 위해 파쇄된 입자를 고해상도의 디지털 카메라를 이용하여 입자 형태를 구별하고자 하였다. LOS 골패각을 타원체로 가정하고 장축과 단축의 길이의 비를 구한 결과 단축과 장축의 비가 약 1.6정도가 가장 많이 나타났다.

본 연구에서 대상으로 한 골패각 혼합콘크리트는 다음과 같이 제작하였다. 먼저, 보통 포틀랜드시멘트, 와 물을 물-시멘트비를 1:1로 한 시멘트페이스트에 LOS 골패각 입자를 시멘트 무게의 100%, 150%, 200%로 혼합비율을 달리하여 콘크리트를 성형하였다. 이를 각각 기호로 W-LOS10, W-LOS15, W-LOS20으로 표기하였다. 콘크리트 공시체는 직경 50mm, 높이 100mm의 원형 기둥으로 제작하였다.

3. 혼합공시체의 파괴 메커니즘

그림 2는 LOS 골패각입자가 혼합된 공시체가 일축압축강도시험 중 단계별 파괴모드를 보여주는 것이다. 그림에서 보듯이 골패각 (LOS) 혼합공시체의 중앙부에서 균열이 시작되고 혼합되어 있는 골패각 입자를 중심으로 전이되며 파괴되는 양상을 보이는 것으로 판단된다. Lusche (1974)는 콘크리트 공시체의 경우 파괴 메커니즘은 혼합되는 골재의 특성에 영향을 받는다고 하였다. 그는 이러한 파괴 메커니즘을 일반적인 천연 골재와 상대적으로 가벼운 골재가 혼합된 경우 차이가 있으며 그림 3과 같이 나타내었다. 일반적인 천연 골재가 혼합된 경우, 즉 골재가 매트릭스의 강도보다 큰 경우에는 파괴 크랙은 골재의 둘레를 따라 발생한다(그림 3a). 반면 골재가 가볍고 강도가 작을 경우에는 골재를 따라 크랙이 발생한다고 보고하였다(그림 3b).

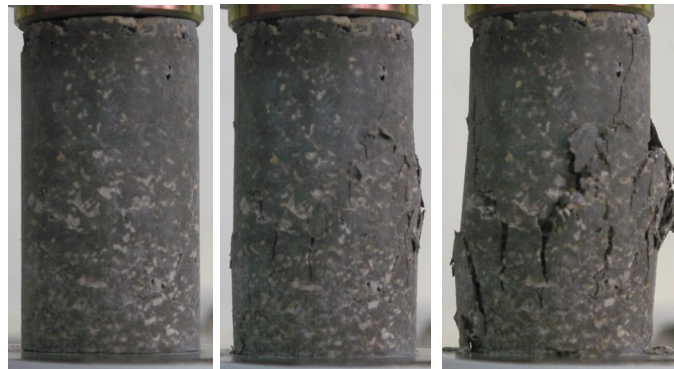
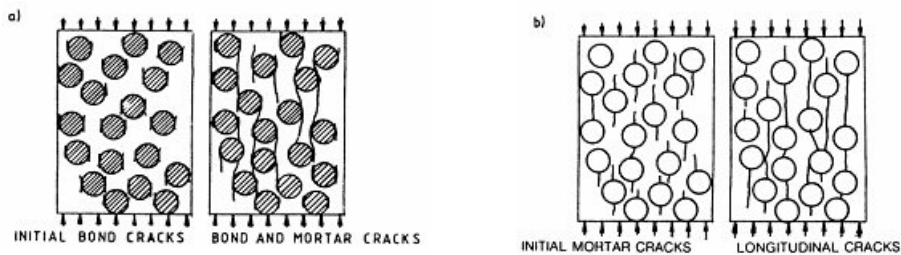


그림 2. 골패각 혼합 콘크리트의 파괴 모드



(a) 골재 강도가 클 경우

(b) 골재 강도가 작은 경우

그림 3. 골재의 강도에 따른 콘크리트 파괴 모드 (Lusche, 1974)

method)은 미시적인 구조특성을 반영할 수 있는 해석기법으로 미시적으로 비균질한 구조가 주기적 또는 규칙적으로 반복되는 물체에 대하여 그 구조를 고려한 거시적 재료의 특성치를 구하는 해석법이다. 이러한 연구는 Babuska(1976)에 의해 정립되기 시작하여 Bakhvalov 등(1984)에 의해 발전하였다. 수치적 해석에 의해 얻어진 굴폐각의 탄성계수를 겉보기 탄성계수로 정의하였다(이기호 등 2001).

5. 해석 결과

혼합콘크리트를 28일 양생한 후 일축압축시험을 통해 구한 응력-변형률 관계를 그림 6에 나타내었다. 굴폐각을 골재로 한 콘크리트의 강도는 순수 시멘트풀에 비해 상대적으로 일축압축강도는 작게 나타났다. 또한 이러한 강도는 굴폐각의 혼합비율에 따라 차이는 있었으나 그 차이는 크게 나타나지 않았다. 시멘트페이스트의 경우 응력-변형률관계에서 뚜렷한 피크강도를 나타내고 파괴에 도달하였다. 반면 굴폐각이 골재로 혼입된 콘크리트의 경우 시멘트페이스트에 비하여 뚜렷한 피크점은 나타나지 않았으나 파괴이후 잔류강도는 비슷하게 나타났다. 일반적으로 천연골재를 사용하는 경우 순수 시멘트페이스트 보다는 콘크리트의 강도가 더 크게 나타나며 시멘트 페이스트에서 취성과파괴 형태가 뚜렷이 나타난다 (Brandt, 1995). 따라서 본 연구에서 대상으로 한 LOS 굴폐각은 콘크리트 골재로 사용할 경우 큰 강도를 요하는 구조물에서는 사용함에 있어 주의가 요구된다. 이러한 이유는 순수 재료적 특성에 기인하기도 하고 또한 혼입재료의 골격구조에 의해서도 파괴 양상이 달라지기 때문으로 판단된다. 혼입재료인 굴폐각의 골격구조가 혼합콘크리트의 강도에 미치는 영향을 탄성계수를 이용하여 분석하였다. 일반적으로 콘크리트의 일축압축시험시 재료의 탄성계수는 최대압축강도 크기의 절반에 해당하는 강도에서의 할선탄성계수인 E_{50} 을 이용한다. 산정된 탄성계수를 표 2에 정리하였다. 굴폐각이 혼입된 콘크리트의 탄성계수 (E_{50})는 혼합비율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 최대압축강도의 경우 시멘트페이스트가 LOS혼합콘크리트의 강도와 큰 차이가 있었던 반면 E_{50} 으로 구한 탄성계수는 차이가 상대적으로 적게 나타났다. 초기 응력-변형률 곡선의 변화 양상 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

표 2. 일축압축시험에 의한 LOS 혼합콘크리트의 탄성계수 (E_{50} , 28일강도)

MPa	Cement paste	W-LOS10	W-LOS15	W-LOS20
E_{50}	1033	1005	990	823

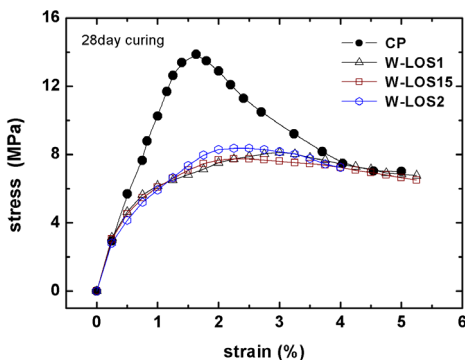


그림 6. 혼합콘크리트의 응력-변형률 관계

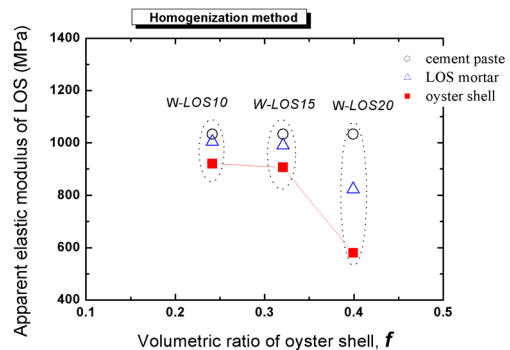


그림 7. LOS굴폐각의 혼합비에 따른 겉보기탄성계수

이렇게 구한 시멘트페이스트와 콘크리트의 탄성계수 그리고 그림 5에서의 각 혼합콘크리트의 디지털이

미지를 이용하여 균질화 해석을 실시하여 굴패각의 겉보기 탄성계수를 산정하였다. 그림 7에 LOS 혼합 비율이 다른 콘크리트 종류별로 굴패각의 겉보기 탄성계수를 나타내었다. 그림에서 굴패각의 혼합비(f)는 콘크리트 내의 굴패각이 차지하는 부피의 비를 의미하며 따라서 W-LOS20이 굴패각의 혼합비율이 가장 크게 표현되고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 굴패각의 겉보기 탄성계수란 단순히 굴패각 입자의 탄성계수가 아니라 굴패각 입자가 콘크리트의 탄성계수에 미치는 여러 인자를 하나의 수치로 표현한 것이라고 할 수 있다. 따라서 순수 재료적 측면에서 LOS 굴패각 입자의 재료적 탄성계수는 단일 값을 갖겠지만 반면 겉보기탄성계수는 이러한 재료적 측면과 입자의 구조적 배열 등을 고려한 것으로 혼합체의 혼합비 및 골격구조 등에 따라 달라진다. 굴패각의 겉보기탄성계수는 혼합비가 100%에서 150%로 증가할 경우에는 큰 차이가 없다가 200%로 증가하는 경우 급격히 감소하고 있다. 이는 굴패각의 혼합비율이 시멘트의 200%로 하는 경우 콘크리트의 강도감소에 굴패각이 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

6. 결론

시멘트 페이스트, 즉 혼합체 내의 매질이 자경성을 나타내고 있을 경우에는 굴패각의 혼합이나 입경에 대한 영향보다는 매질의 강성에 더 큰 영향을 받을 수 있다. 이는 일반 천연 골재와는 달리 가볍고 강도가 약한 굴패각과 같은 재료가 혼입된 경우 고려될 수 있다. 굴패각을 골재로 한 콘크리트의 경우 일반 콘크리트와 다른 파괴 메커니즘이 발생한다. 그 이유는 혼입되는 골재의 재료적 특성 뿐 아니라 골재가 콘크리트 내에서 형성하는 구조에 의해서도 강도 특성은 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 특성을 고려하기 위하여 본 연구에서는 디지털이미지를 이용하여 골재의 골격구조를 구현하였고 이를 균질화 해석을 통해 굴패각 입자가 콘크리트 강도에 미치는 영향을 겉보기 탄성계수로서 정량화 하였다. 굴패각의 혼입량이 시멘트 중량의 200%가 혼입된 경우 LOS굴패각의 겉보기 탄성계수가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 혼합율 200%의 콘크리트에서 굴패각이 형성하는 골격구조가 콘크리트의 강도 저하에 미치는 영향이 급격히 커지고 있음을 의미한다. 즉 본 연구의 혼합 범위내의 결과로 보면 골재로서 LOS 굴패각은 혼합비율이 시멘트의 중량비 150% 이상일 경우 혼입되는 골재에 의해 강도의 저하가 발생한다고 추론할 수 있다.

참고문헌

1. 양은익, 윤길림, 심재설(2001), “굴패각을 혼합한 콘크리트의 역학적 특성조사” **대한토목학회논문집**, 제 21권, 제 6-A호, pp.773~784.
2. 윤현석, 이기호, 박준범(2002), “에틸벤젠에 의한 굴패각 혼합공시체의 압축강도 변화 특성”, **한국지반공학학회논문집**, 제 18권, 제 6호, pp.103~116.
3. 이기호, 박준범(2001), “굴패각을 포함한 혼합토의 전단·변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”, **한국지반공학학회논문집**, 제 17권, 제 4호, pp.183~190.
4. Babuska, I.(1976), “Homogenization approach in engineering”. *In Computing Methods in Applied Science Engineering, Lecture Note in Economics and Mathematical Systems*, Vol.134, Lions J-L, lowinski R. (eds). Springer: Berlin, pp.137~153.
5. Bakhvalov, N., and Panasenko, G.(1984), *Homogenization: Averaging processes in periodic media*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers.
6. Brandt, A.M.(1995), *Cement-based composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, E&FN SPON.
7. Lusche, M. (1974), "The fracture mechanism of ordinary and lightweight concrete under uniaxial compression." *Proc. Conf. Mechanical Properties and Sturcture of Composite Materials*, (ed. Brandt, A.M), Jablonna, 18-23, November 1974, Ossolineum, Wroclaw, pp.423~440.
8. Yoon, H.S, Park, S,K, Lee, K.H and Park J.B.(2004), "Oyster shell as substitute for aggregate in mortar", *Waste Management and Research*, Vol.22, No.3, pp.158~170.