

3점 휨시험에 의한 저발열콘크리트의 파괴거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Fracture Behavior of Low-Heat Concrete, by Three-Point Bend Test

조병완*

Jo, Byung-Wan

박승국**

Park, Seung-Kook

Abstract

To analysis the failure character of Low-Heat concrete which is used to prevent the thermal crack caused by hydration heat, static loading test was performed by this test method, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beam" (suggested by RILEM 50-FMC Committe). This study compared and analysed the fracture energy of Mode I (opening mode), the most general pattern in the view of water-cement ratio(W/C), compressive strength and age of Ordinary Portland Concrete and Low-Heat Concrete under the same mixture. The test results show that the case of Ordinary Portland Concrete and Low-Heat Concrete, low Water-Cement ratio(W/C) cause the increase of fracture energy, and high failure-strength decrease failure-deflection, and the fracture energy of Low-Heat Concrete is similar to Ordinary Portland Concrete as the age increase.

1 서 론

최근 국내·외에서 토목 및 건축 구조물의 대형화 추세가 가속화됨에 따라서 거대한 해양구조물, 장대교량의 교각·교대 등의 하부구조물, 단면이 큰 라멘, 초고층 건축물의 기초 및 LNG 지하저장탱크 등의 지하구조물과 같은 부재크기가 큰 매스콘크리트 구조물이 많이 건설되고 있으며, 시공방법 등도 다양해 지고 있다. 그러나 매스콘크리트에서 발생하는 상당량의 수화열에 의하여 부재내부의 열응력을 증대시켜 균열을 발생시키는 주요 원인이 되므로 콘크리트의 열응력에 의한 온도균열 발생을 방지하기 위하여 수화열 저감의 방법으로 저발열 콘크리트의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 저발열 시멘트는 시멘트의 내부 조성물 및 성분을 조절하여 인위적으로 수화열이 적게 나오도록 한 시멘트로서 조 기강도는 낮지만 장기강도는 크며 또한 수화발열속도가 늦도록 제조한 시멘트로, 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 수화발열량이 적고 수화발열속도가 완만하여 시멘트 수화발열에 의한 콘크리트의 온도응력 발생을 대폭적으로 저감시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 연구는 저발열 콘크리트의 파괴역학적 특성을 분석하기 위하여 RILEM 50-FMC 위원회에서 제안한 "3점 휨시험을 이용한 무근 콘크리트의 파괴인자 결정"⁽¹⁾ 실험법을 이용하여 균열의 가장 일반적인 형태인 Mode I (opening mode)에

* 정회원, 한양대학교 토목공학과, 부교수

** 한양대학교 토목공학과, 석사과정

대해 정적재하 실험을 실시 하였으며, 동일하 배합아래에서 저발열 콘크리트(Low-Heat Concrete, 이하 : LHC)와 보통 포틀랜드 콘크리트(Ordinary Portland Concrete, 이하 : OPC)의 물-시멘트비(W/C), 압축강도 및 재령에 따른 파괴에너지를 비교 분석 함으로써 저발열 콘크리트의 파괴거동을 파악하였다.

2 실험 및 파괴에너지 계산식

2.1 실험재료 및 시편

본 실험에서 저발열 콘크리트의 파괴거동을 재령 및 강도별로 보통 포틀랜드 콘크리트와 비교 예측 하는데 필요한 파괴에너지를 결정하기위하여 초기 노치를 가진 3점 휨을 받는 보시편(Single-edge-notched three-point bend specimen)을 각 배합형태별로 12개씩 총 48개를 제작하였다. 또한 원주형 공시체(10×20cm)는 각 배합형태별로 9개씩, 총 36개를 제작하였고, 보통 포틀랜드 콘크리트의 배합별 요구강도는 350kg/cm², 450kg/cm²를 목표로 배합하였으며, 저발열 콘크리트는 보통 포틀랜드 콘크리트와 동일하게 배합하였다. 모든 보시편은 RILEM 50-FMC 위원회⁽¹⁾에서 제안한 폭(b)=100±5mm, 깊이(d)=100±5mm, 지간(S)=800±5mm, 시편길이(L)=840±10mm로 제작하였고, 초기 노치길이(Initial notch length, a₀)는 0.5d로 일정하게 주었다. 시편의 초기형상과 LVDT의 설치상태 및 지지조건은 그림1에 나타내었다.

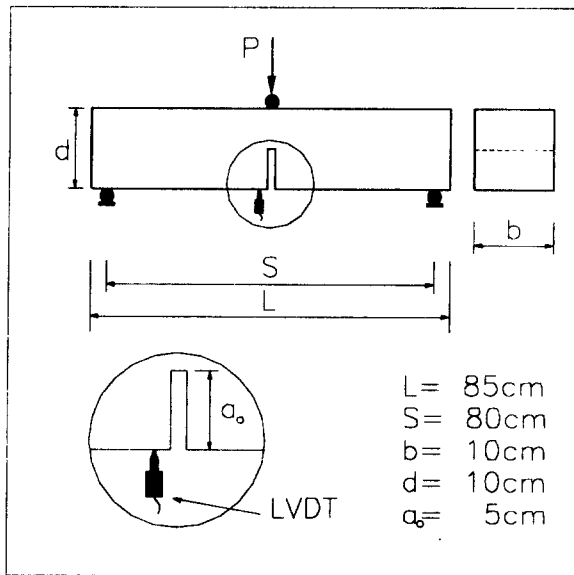


그림 1 시편의 초기형상 및 처짐기 설치상태와 지지조건

2.2 배합 및 양생

시편의 최대골재 치수는 13mm이고, 슬럼프는 8.5±1cm로 일정하며, 배합설계표는 표1, 2에, 사용된 혼합시멘트계의 저발열시멘트와 보통 포틀랜드시멘트의 화학성분은 표3에 비교하여 나타내었다.

모든 시편은 타설후 젖은 천으로 덮어두고, 거푸짚은 48시간 후에 탈형한뒤 일정 온도(20±2℃)의 수조에서 수중양생 하였다. 원주형 공시체의 양생은 시편과 동일한 방법으로 양생하였다.

표 1 LHC의 배합설계표

Type	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sp(kg)
A	320	878	950	160	3.2
B	400	764	991	160	4.0

표 2 OPC의 배합설계표

Type	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sp(kg)
A	320	942	970	160	3.2
B	400	970	970	160	4.0

표 3 저발열 및 보통 포틀랜드 시멘트의 화학성분
(단위: 중량백분율)

종류 항목	저발열시멘트(LHC)	보통 포틀랜드 시멘트(OPC)
SiO ₂	34.70	20.80
Al ₂ O ₃	12.90	5.88
Fe ₂ O ₃	2.40	3.33
CaO	38.50	62.71
MgO	4.20	2.76
SO ₃	2.40	2.23
K ₂ O	0.67	0.85
Na ₂ O	0.18	0.15
TiO ₂	0.81	0.131
Mn ₂ O ₃	0.22	0.21
P ₂ O ₅	0.17	0.81
lg. Loss	1.70	0.41

2.3 실험방법

실험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 UTM(Model CCH-300A)이었고, 안정적 실행을 위하여 0.5mm/min의 변위제어(Displacement Control Test)실험을 수행하였다. 보시편과 원주형 공시체의 시험은 28일, 56일, 90일의 재령별로 실시하였으며, 처짐은 보시편의 중앙에서 측정하였다. 각 배합 및 재령별 압축강도, 탄성계수와 파괴에너지(G_F)는 표4에 요약하였으며, RILEM 50-FMC 위원회⁽¹⁾의 제안식에 의거 파괴에너지를 결정하기 위하여 사용된식은 다음과 같다.

$$G_F = \frac{w_0 + mg\delta_0}{A_{lg}}$$

where

w₀ = 3점 휨시험에 의한 하중-처짐 곡선의 면적

m = 지점사이의 보의 질량[보의 총질량×(S/L)]

g = 중력가속도

δ₀ = 파괴순간의 보의 최종처짐

A_{lg} = projection of fracture zone on plane perpendicular to beam axis

표 4 배합 및 재령별 압축강도, 탄성계수와 파괴에너지

시편*	재령(일)	물-시멘트비 (W/C)	압축강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (E _c , kg/cm ²)	파괴에너지 (G _F , kg/m)
LHC-A-1	28	0.5	307.8	263249	7.34
LHC-A-2	56	0.5	378.6	291865	8.97
LHC-A-3	90	0.5	406.3	302353	9.61
LHC-B-1	28	0.4	387.5	295275	9.06
LHC-B-2	56	0.4	472.4	325883	10.74
LHC-B-3	90	0.4	503.8	336749	11.29
OPC-A-1	28	0.5	357.1	283417	8.51
OPC-A-2	56	0.5	396.7	298873	9.29
OPC-A-3	90	0.5	417.4	306309	9.79
OPC-B-1	28	0.4	461.3	322064	10.43
OPC-B-2	56	0.4	498.2	334739	11.41
OPC-B-3	90	0.4	507.4	337750	11.62

*시편코드 : X-Y-#

배합 Type 코드: Y= A(350); B(450)

재령 코드 : #= 1(28일); 2(56일); 3(90일)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중-변위 곡선의 고찰

하중-변위곡선의 변화는 LHC 와 OPC 모두 압축강도가 클수록 최대하중의 값(P_{max}) 또한 큰것으로 나타나고 있으며 높은 파괴강도를 갖는 시편 일수록 파괴시의 처짐은 LHC와 OPC 모두 감소 하는 것으로 나타났다. OPC와 LHC의 하중-변위곡선을 살펴보면 일정 슬럼프(8.5±1cm)의 동일한 물-시멘트비(w/c=0.5, 0.4)와 동일한 배합조건(A-Type, B-Type) 아래에서는 그림2~3에서 알 수 있듯이 배합 A-Type의 파괴에너지의 크기는 OPC-A-3 > LHC-A-3 > OPC-A-2 > LHC-A-2 > OPC-A-1 > LHC-A-1 순서로 결과값이 얻어졌음을 알 수 있으며, 배합 B-Type(그림4~5)의 파괴에너지의 크기는 OPC-B-3 > LHC-B-3 > OPC-B-2 > LHC-B-2 > OPC-B-1 > LHC-B-1 순서로 결과가 나타남을 알 수 있다. 또한 파괴에너지의 재령에 따른 증가에 있어서 재령의 영향이 OPC에 비하여 LHC에 더 크게 미치고 있는 것으로 결과가 나타나고 있다. OPC와 LHC의 하중-변위곡선을 각 배합형태의 재령별로 비교 아래 그림에 나타내었다(그림 2~5).

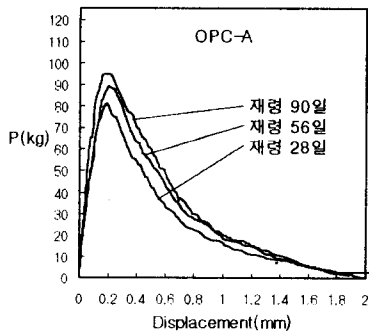


그림 2 하중-변위 곡선(OPC-A)

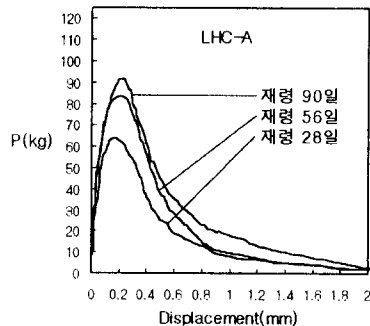


그림 3 하중-변위 곡선(LHC-A)

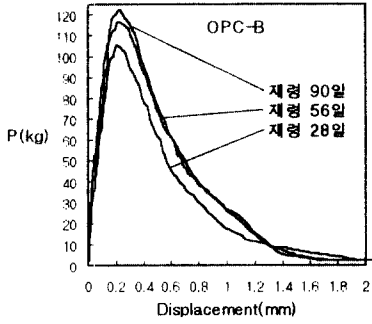


그림 4 하중-변위 곡선(OPC-A)

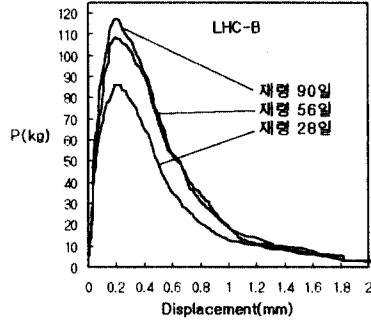


그림 5 하중-변위 곡선(LHC-B)

3.2 물-시멘트비의 영향

콘크리트 파괴에너지에 대한 물-시멘트비의 영향은 표4와 그림2~5로 부터 얻을 수 있으며 물-시멘트비(W/C)가 감소(0.5→0.4) 할수록 파괴에너지는 OPC와 LHC 모두 증가함을 볼 수 있다. 또한 물-시멘트비(W/C)에 따른 파괴양상을 살펴보면 OPC와 LHC 모두 물-시멘트비(W/C)가 감소 할수록 최대 하중 이후의 A-Type과 B-Type 하중-변위곡선의 기울기의 변화에서 관찰 할수있듯이 상대적으로 취성적임을 알수 있었다. 이는 파괴에너지가 일정 물-시멘트비 아래에서의 시멘트량, 사용되어진 최대골재치수등 기타 다른 요인들과 마찬가지로 콘크리트의 파괴에너지에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 이는 일반적으로 물-시멘트비가 감소함에 따라 콘크리트의 압축강도가 증가함에 기인하는 것으로 사료된다.

3.3 LHC와 OPC의 파괴에너지의 비교

저발열 콘크리트(LHC)와 보통 포틀랜드 콘크리트(OPC)의 파괴에너지를 비교하기 위하여 각 배합형태와 재령별로 파괴에너지의 변화 추세를 그림6,7에 나타내었다.

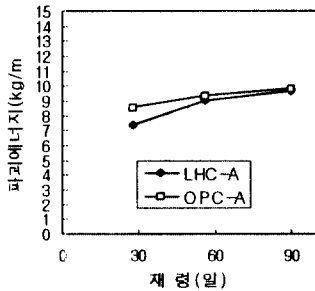


그림 6 OPC-A 와 LHC-A의 재령별 파괴에너지

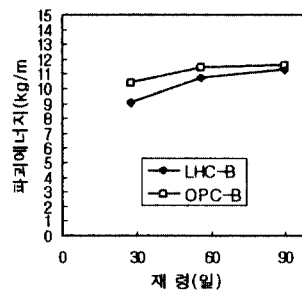


그림 7 OPC-B 와 LHC-B의 재령별 파괴에너지

LHC와 OPC의 파괴에너지를 먼저 각 배합별로 표4에서 살펴보면 OPC의 배합A 경우가 배합B의 약 82.4% 수준이며, LHC의 배합A 경우가 배합B의 약 83.2% 수준으로 나타나고 있다. 이는 일정한 골재치수 아래서 파괴에너지는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 증가함을 보여주고 있다. 또한 OPC-A 와 LHC-A의 재령별 파괴에너지의 증가 추세를 살펴보면 LHC-A의 파괴에너지는 재령 28일에서는 OPC-A의 파괴에너지의 86.3%, 재령 56일에서는 96.6%, 재령 90일에서는 98.2%의 수준이며,

OPC-B 와 LHC-B의 재령별 파괴에너지 증가 추세는 재령 28일에서는 LHC-B의 파괴에너지는 OPC-B의 86.9%, 56일에서는 94.1%, 재령 90일에서는 97.2%로 두 경우 모두 재령이 증가함에 따라 LHC와 OPC의 파괴에너지가 거의 근사함을 보이고 있다. 본 실험에서 사용된 혼합시멘트계의 저발열 시멘트는 포졸란 반응에 의하여 강도의 발현이 늦은 특성을 지닌것으로 28일 압축강도를 100%라 할 경우 3일에서 약 20~30%, 7일에서 약 40~60%의 강도를 발휘하며 이는 보통 포트랜드 시멘트가 3일에서 약 50%, 7일에서 75% 이상의 강도발현을 나타내는데 비해 초기강도의 발현율은 낮은 것으로 나타나고 있으나 28일 이후의 장기강도는 높은것으로 나타나고 있다.⁽²⁾ 이에 비추어 OPC의 재령에 따른 파괴에너지의 증가율보다 LHC 파괴에너지의 증가율이 큰 것은 재령에 따른 압축강도의 발현과 관계가 있는것으로 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구는 파괴에너지를 구하기 위한 3점 휨 시험중 균열의 가장 일반적인 형태인 Mode I (Opening mode)에 대해 동일한 배합아래에서 LHC 와 OPC의 물-시멘트비(W/C), 압축강도 및 재령에 따른 파괴 에너지를 구함으로써 LHC의 파괴거동특성을 관찰 할 수 있었으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 하중-변위 곡선의 형태는 LHC 와 OPC 모두 비슷한 형태를 띠고 있었으며, 파괴강도가 클수록 파괴시의 처짐은 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 일정 슬럼프(8.5±1cm) 아래에서 콘크리트 파괴에너지에 대한 물-시멘트비의 영향으로는 물-시멘트비의 감소(0.5→0.4)가 OPC와 LHC의 파괴에너지를 증가시키는 원인이 됨을 알 수 있었고, 물-시멘트비가 감소 할수록 파괴양상은 OPC와 LHC 모두 상대적으로 취성적임을 알 수 있었다. 이는 물-시멘트비가 감소함에 따라 콘크리트의 압축강도가 증가함에 기인하는 것으로 판단된다.
- (3) LHC와 OPC의 파괴에너지를 각 배합별 및 재령별로 살펴본 결과 배합강도가 큰 B-Type의 경우가 A-Type보다 파괴에너지가 큰 것으로(LHC : 약 1.22배, OPC : 약 1.20배)나타 났고, 또한 OPC-A 와 LHC-A, OPC-B 와 LHC-B의 재령별 파괴에너지의 증가 추세는 재령이 증가 할수록 LHC의 파괴에너지가 OPC의 파괴에너지와 근사해졌다. 이러한 결과로부터 LHC의 재령에 따른 파괴에너지의 증가에 있어서 OPC에 비하여 LHC가 재령에 더 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 이러한 특성에 비추어 90일 이후의 LHC의 파괴에너지 증가는 LHC의 장기강도발현이 큰 특성에 따라 OPC의 파괴에너지 증가보다 더 클것으로 판단된다.

참고 문헌

1. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods, "Determination of Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams," *Materials and Structures*, Vol. 18, No.106, 1985, pp. 285-290.
2. 노재호, 박연동, 송용순, 김훈, 강석화, "저발열 시멘트 및 콘크리트의 특성," 한국 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제8권 2호(통권 제15집), 1996, pp345-351
3. Philip C. Perdikaris and Alberto Romeo, "Size Effect on Fracture Energy of Concrete and Stability Issues in Three-Point Bending Fracture Toughness Testing," *ACI Materials Journal*, V.92, No.5, September-October 1995.
4. Ravindra Gettu, Zdenek P. Banzant, and Martha E. karr, "Fracture Properties and Brittleness of High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, V.87, No.6, November-December 1990.
5. Bhushan L. Karihaloo, "Fracture Mechanics & Structural Concrete," *Concrete Design & Construction Series*, pp59-135