

부순모래 콘크리트의 파괴역학적 특성에 관한 연구

An experimental study on fracture-mechanics behaviour of the crushed concretes

김진근* 이철성**
Kim, Jin-Keun Lee, Chil Sung

ABSTRACT

Recently, nonlinear fracture mechanics was applied to analyze concrete structures more accurately, and new materials property such as fracture energy(G_f) was used for its application.

The fracture energy was influenced by many parameters, especially the strength of concrete. Many researches on the relation between the strength of concrete and the fracture energy were performed. In spite of many researches on the relation between the strength of concrete and the fracture energy, there is no distinct conclusion.

This research includes various the strength levels from low-strength of concrete to high-strength, and then intends to estimate relation between the strength of concrete and the fracture energy. Concrete used crushed sand is also included, which is going to be used much.

In this research, the wedge splitting test method proposed by Prof. Linsbauer is adopted to investigate the fracture energy. Fracture behaviour of concrete used natural sand and crushed sand has the similar trend. In the strength range of 200~500 kg/cm², the fracture energy and the maximum splitting forces(F) increase as the strength of concrete increases. In the range of the higher strength, however, the maximum splitting forces(F) increases but the fracture energy decreases as the strength of concrete increases. Through this investigation the fracture energy of concrete was not proportional to the strength of concrete.

1. 서론

콘크리트가 균열현상에 의해 파괴가 일어난다 하더라도 선형파괴역학의 직접적인 적용에 의해 해석하면 많은 오차가 있음이 밝혀지고 있다. 이는 콘크리트의 균열선단에 파괴진행영역(fracture process zone)이라는 비선형 거동영역이 존재하기 때문이다. 이 비선형 거동영역은 주로 콘크리트의 균열선단에서의 미세균열 영역에 의해 발생되고 또 다른 비선형의 특성으로는 콘크리트가 골재와 시멘트로 구성된 비균질한 재료로 이루어져 비탄성적인 거동을 한다.

따라서 최근에는 콘크리트 구조물의 보다 정확한 해석을 위해 비선형 파괴역학을 적용하고 있으며, 이의 적용을 위해 콘크리트의 파괴에너지(G_f)라는 새로운 재료특성 상수를 사용하고 있다. 파괴에너지는 균열이 발생하는데 필요로 하는 에너지의 양으로 정의하고 있고 파괴에너지를 구하는 많은 방법들이 제시되었다.

파괴에너지는 여러가지 변수에 따라 영향을 받는다. 특히 콘크리트의 강도수준이 파괴에너지에 미치는 영향은 많은 연구가 이루어졌지만, 강도수준과 파괴에너지의 관계는 연구자에 따라 다른 결론을 내리고 있다. 그러나 기존의 연구에서는 강도수준이 고강도 콘크리트에 치우쳐 있거나, 강도수준이 다양하지 못하고 있다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수
* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

부순모래의 사용이 점점 증가하고 있는 상황에서 부순모래를 사용한 콘크리트의 파괴거동에 대한 연구는 전무한 실정이며 강모래를 사용한 콘크리트의 파괴거동과의 차이점에 대해서도 규명되지 않고 있기때문에 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 1986년에 Linsbauer 교수에 의해 제안된 썬기 쪼갬 시험(wedge splitting test)을 사용하여 파괴에너지를 구하고, 저강도에서 초고강도까지 다양한 강도수준으로 강도수준과 파괴에너지의 관계를 규명하고자 한다. 그리고 화강암 부순모래와 석회암 부순모래를 사용한 콘크리트의 파괴에너지와 파괴특성을 썬기 할렬시험(wedge splitting test)을 사용하여 규명하고, 이와 강모래를 사용한 콘크리트와의 차이점을 밝히고자 한다.

2. 파괴에너지(G_f) 실험

2.1 실험 변수

강도에 따른 파괴에너지의 관계를 분석하기 위하여 강모래와 화강암 부순자갈을 사용하였다. 저강도에서 고강도까지 다양한 강도 발현을 위하여 7종류의 물-시멘트비를 선택하였다. 강도는 압축강도와 인장강도를 측정하고 인장강도는 쪼갬 인장 실험을 수행하였다. 물-시멘트비가 30%, 25%, 20%에서는 고강도 발현에 유리한 실리카흙을 사용하였다.

부순모래의 파괴거동 특성을 분석하고, 강모래의 파괴거동과의 차이를 규명하기 위하여 화강암 부순모래, 석회암 부순모래를 사용하여 실험을 수행하였다. 부순모래의 경우에도 강도와 파괴에너지의 관계를 규명하기 위하여, 3종류의 강도수준을 선정하였다.

2.2 실험 재료

2.2.1 잔골재

본 실험에서 사용한 잔골재는 강모래, 화강암 부순모래, 석회암 부순모래를 선정하였다. 강모래는 금강유역의 대평리산 이다. 화강암 부순모래는 양산에서 습식으로, 석회암 부순모래는 동해에서 습식으로 생산

된 부순모래이다. 각각의 물리적 성질은 표 [2.1]과 같다.

표 [2.1] 골재의 물리적 성질

종 류	표건비중	흡수율 (%)	조립율
강모래	2.587	0.78	2.92
화강암 부순모래	2.570	0.80	3.22
석회암 부순모래	2.701	0.52	3.20

2.2.2 굵은골재

본 실험에서 사용한 굵은골재는 최대크기가 10mm인 화강암 부순자갈을 사용하였다. 굵은골재의 물리적 성질은 표 [2.2]와 같다.

표 [2.2] 굵은골재의 물리적 성질

종 류	최대크기 (mm)	표건비중	흡수율 (%)
화강암 부순자갈	10.0	2.60	1.25

2.3 시험체 제작 및 양생 방법

시편제작은 실험의 성공과 실패에 직접적으로 관련이 있고, 주의깊게 고려해야 한다. 본 연구에서는 육면체 시편을 채택 하였다. 다른 실험 조건에 따르면, 다른 시편 형태도 또한 사용되어진다. 예를 들면, 암석이나 기존의 콘크리트 구조물의 파괴역학 파라메타가 암석이나 콘크리트 구조의 코어를 채취해서 결정해야 한다면 육면체시편보다는 원주형 시편을 사용하는 것이 실용적이다. 시편의 초기 균열은 콘크리트가 경화한 후에 시편을 다이아몬드 톱으로 쪼개서 만들거나, 콘크리트 시편을 만들때 시편 내부에 강철판이나 아크릴판을 넣고 양생기간 후에 평판을 제거함으로써 만들수 있다.

본 실험에서는 시편내부에 아크릴판을 넣고 탈형후에 아크릴판을 제거하였다. 그리고 균열이 정해진 방향으로 안정적으로 진행할수 있도록 그루브(groove)를 사용하였

다. 시편에 있는 흠은 시편에 하중을 가할 수 있도록 제작되었다.

시험체의 형태와 크기는 그림 [2.1]과 같으며, 제작 후 24시간만에 탈형하여 $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도로 시험시까지 수중양생을 실시하였다.

2.4 가력장치 및 실험 방법

썰기 할렬시험(wedge splitting test, WST)의 가력장치는 썰기(wedge)와 로울러(rollers)로 구성되어 있다. 썰기와 로울러의 사용으로 실험결과의 정확도를 향상시키고 안정적인 시험을 수행할 수 있다.

실험을 수행할 때에는 로울러 시험체의 윗부분에 고정시키고, 두개의 동일한 썰기를 가진 강성이 큰 강철판은 시험기계의 위판에 고정시킨다. 썰기는 양쪽에 있는 로울러 사이를 움직인다.

실험에 사용된 기기는 Instron사의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Testing Machine이며, 실험할 때 균열개구변위(crack opening displacement, COD)에 의하여 제어한다. 제어속도는 실험을 시작한 후 40~60 초 사이에 최고하중에 도달할 수 있도록 제어하였다.

실험하는 동안 작용하중 F_v (수직하중)과 균열개구변위(crack opening displacement, COD)를 X-Y Plotter를 사용하여 측정하였다. 썰개는 힘 F (splitting force)는 로울러에 작용하는 힘의 수평성분이고, 다음과 같이 계산된다.

$$F_s = \frac{F_v}{2 \cdot \tan \alpha}$$

균열개구변위(crack opening displacement, COD)는 transducer 또는 clip gauge를 사용하여 측정한다. transducer 또는 clip gauge는 F 가 시편에 작용하는 위치, 즉 로울러 축의 위치에 고정시킨다.

파괴에너지 실험 직전에 KS F 2405에 의하여 압축강도 실험을 수행하였으며, 인장강도 실험은 KS F 2423에 의하여 쪼갠 인장강도(splitting tensile strength) 시험을 수행하였다. 또한 탄성계수도 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

강도는 압축강도와 인장강도를 측정하였고, 인장강도는 할렬인장 강도 실험을 수행하였다. 또한 각 강도수준에 따라 탄성계수를 측정하여 특성길이(characteristic length)를 계산하였다.

썰기 쪼갠 시험에 의한 콘크리트의 파괴에너지는 하중-균열개구변위 곡선으로 직접 구할 수 있다. 즉, 파괴에너지는 하중-균열개구변위의 면적을 시편의 전체 리가먼트(ligament) 면적으로 나눈 값이다.

썰기 쪼갠 시험으로 얻어진 하중-균열개구변위 곡선은 긴 꼬리 부분을 가진다. 저강도일수록 꼬리는 더 길어진다. 이것은 파괴진행때문이 아니라 로울러와 썰기 사이의 마찰력 등 다른 요인들 때문이다. 그러므로 하중-균열개구변위곡선에서 기울기가 영인 지점에서 곡선을 절단하여 면적을 구하였다.

3.1 강모래

강모래를 사용한 콘크리트의 경우, [그림 3.1]은 강도수준에 따른 하중-균열개구변위를 나타내고 있다. 그리고 표[3.1]과 그림 [3.2]는 강도 수준에 따른 파괴에너지의 관계를 나타내고 있다.

저강도, 중간강도까지는 강도가 증가함에 따라 최대하중과 파괴에너지가 증가하지만, 고강도에서는 최대하중은 증가하지만 파괴에너지는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

표 [3.1] 파괴에너지 실험결과 (강모래)

공시체 기 호	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	F (kN)	파괴에너지 G_f (N/m)
R70	29.4	2.71	24.90	3.30	80.9
R60	34.9	3.31	26.51	3.39	83.3
R50	43.8	3.79	28.87	3.49	85.6
R40	55.3	4.69	31.58	3.91	116.4
R30	66.9	5.67	34.35	5.23	98.7
R25	83.3	7.05	37.20	8.38	93.3
R20	88.8	7.42	38.18	8.82	92.3

3.2 화강암 부순모래

화강암 부순모래를 사용한 콘크리트의 경우, 그림 [3.3]은 강도수준에 따른 하중-균열

개구변위를 나타내고 있다. 그리고 표[3.2]는 강도수준에 따른 파괴에너지의 관계를 나타내고 있다.

강모래를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 저강도, 중간강도까지는 강도가 증가함에 따라 최대하중과 파괴에너지가 증가하지만, 고강도에서는 최대하중은 증가하지만 파괴에너지는 오히려 감소한다. 그리고 강모래를 사용한 콘크리트와 비교할 때 파괴에너지는 약간 더 크다.

표 [3.2] 파괴에너지 실험결과
(화강암 부순모래)

공시체 기 호	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	F (kN)	파괴에너지 G _f (N/m)
G60	32.6	3.24	28.79	3.64	88.3
G40	45.9	4.78	33.40	3.87	116.1
G20	85.7	6.60	39.57	7.40	113.1

3.3 석회암 부순모래

석회암 부순모래를 사용한 콘크리트의 경우, 그림 [3.4]는 강도수준에 따른 하중-균열 개구변위를 나타내고 있다. 그리고 표[3.3]은 강도수준에 따른 파괴에너지의 관계를 나타내고 있다.

강모래, 화강암 부순모래를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 저강도, 중간강도까지는 강도가 증가함에 따라 최대하중과 파괴에너지가 증가하지만, 고강도에서는 최대하중은 증가하지만 파괴에너지는 오히려 감소한다. 그리고 강모래를 사용한 콘크리트와 비교할 때 파괴에너지는 약간 더 크고, 저강도에서는 화강암 부순모래를 사용한 콘크리트 보다 약간 더 크지만 고강도에서는 화강암 부순모래를 사용한 콘크리트보다 더 작다.

표 [3.3] 파괴에너지 실험결과
(석회암 부순모래)

공시체 기 호	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	F (kN)	파괴에너지 G _f (N/m)
L60	31.3	3.483	29.9417	3.847	100.146
L40	47.4	4.609	33.7217	4.142	120.449
L20	82.8	6.054	40.5660	7.838	104.088

3.4 콘크리트 강도와 파괴에너지의 관계

그림[3.5]는 콘크리트의 강도(압축강도)와 파괴에너지의 관계이고, 본 실험의 결과와 다른 연구자의 실험결과를 통해서 콘크리트의 강도와 파괴에너지의 관계는 비례하지 않는 것을 알 수 있다.

3.5 특성길이(characteristic length)

콘크리트 재료 및 부재의 파괴 취성도를 나타내는 지표로서 파괴에너지 G_f, 인장강도 f_t, 탄성계수 E 를 포함한 특성길이 (characteristic length)를 사용한다. 특성길이는 다음 식으로 나타낸다.

$$l_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2}$$

특성길이는 취성적인 파괴를 일으키는 재료일수록 작은값이 된다. 특성길이 l_{ch}는 순수한 재료 특성을 나타내는 상수이고, 어떤 물리적인 의미를 가지는 것은 아니다. 단지 길이의 차원을 가지기 때문에 특성길이라고 한다. 균열 선단에 있는 파괴진행 영역의 크기는 특성길이 l_{ch}에 근사적으로 비례하며 균열이 성장할때 파괴진행영역의 크기는 일반적으로 0.3~0.5 l_{ch} 정도 이다.

그림[3.6]은 실험에서 구한 강모래, 화강암 부순모래, 석회암 부순모래의 특성길이를 나타내고 있다. 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 특성길이 l_{ch}는 감소한다. 즉, 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 더 취성적 (brittle)이라는 사실을 입증하고 있다. 그리고 여기에서 사용한 인장강도는 쪼갬인장강도를 사용 하였다.

4. 결론

쪼개기 쪼갬 시험(wedge splitting test)을 수행하여 강모래, 화강암 부순모래, 석회암부순모래의 강도에 따른 파괴에너지(G_f)의 관계를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강모래와 부순모래를 사용한 경우, 파괴 거동은 유사한 경향을 나타낸다.

- (2) 콘크리트의 강도수준에 따른 파괴거동은 저강도, 중간강도까지는 강도가 증가함에 따라 최대하중과 파괴에너지가 증가하지만, 고강도에서는 강도가 증가함에 따라 최대하중은 증가하지만 파괴에너지는 오히려 감소한다.
- (3) 부순모래의 파괴에너지는 강모래의 파괴에너지보다 약간 크다.
- (4) 강모래, 화강암 부순모래, 석회암 부순모래를 사용한 콘크리트는 모든 경우에, 특성길이(characteristic length)는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 감소한다. 즉, 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 더 취성적(brittle)이라는 사실을 입증하고 있다.

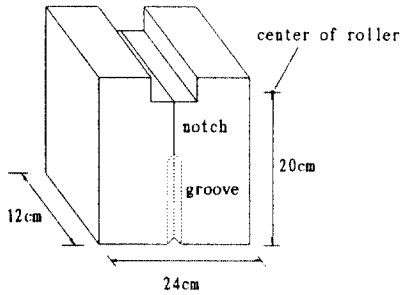


그림 [2.1] 시험체의 형태와 크기

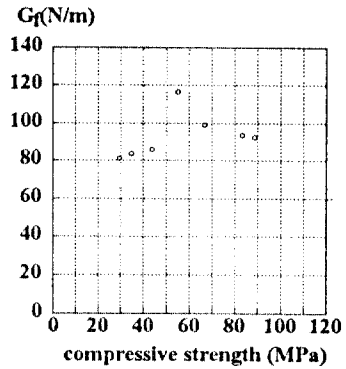


그림 [3.2] 압축강도와 파괴에너지의 관계 (강모래)

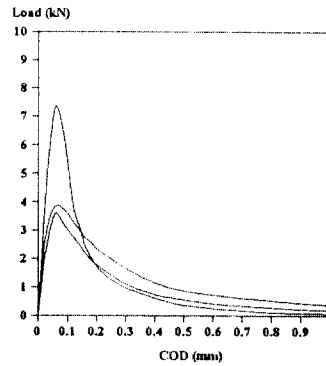


그림 [3.3] 하중-균열개구변위 곡선 (화강암 부순모래)

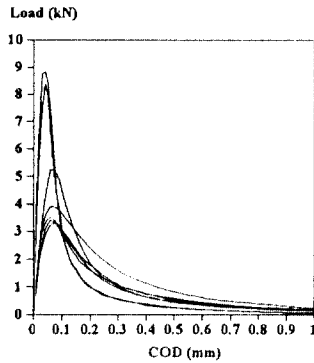


그림 [3.1] 하중-균열개구변위 곡선 (강모래)

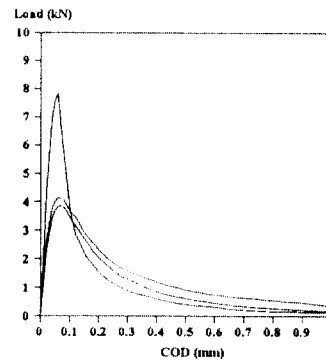


그림 [3.4] 하중-균열개구변위 곡선 (석회암 부순모래)

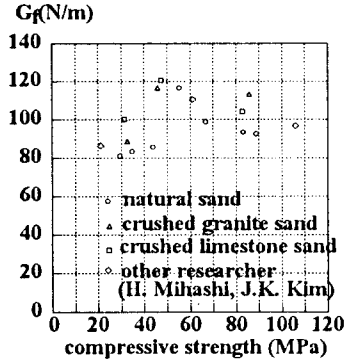


그림 [3.5] 콘크리트 압축강도와 파괴에너지의 관계

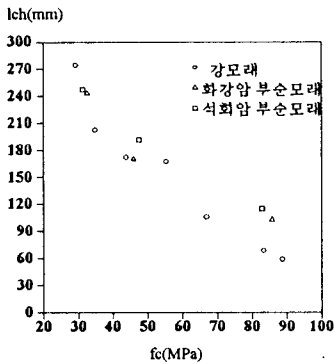


그림 [3.6] 콘크리트 압축강도와 특성길이의 관계

감사의 글

본 연구는 1994년도 ERC 연구의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Giaccio, G., Rocco, C., and Zerbino, R., "The Fracture Energy (G_f) of High-Strength Concrete," *Materials and Structure*, Vol. 26, No. 155, Jan.-Feb. 1993, pp. 381-386
- 2) Eugen Bruhwiler and Wittmann, F. H., "The Wedge Splitting Test, A Method of performing Stable Fracture Mechanics Tests," *Recent Publications*, ed. by Wittmann, F. H, 1988, pp. 147-162
- 3) Bruhwiler, E., Wittmann, F. H., and Rokugo, K., "Influence of Rate of

- Loading on Fracture Energy and Strain Softening of Concrete," *Recent Publications*, ed. by Wittmann, F. H, 1988, pp. 57-65
- 4) Zhao Guofan, Jiao Hui, and Xu Shilang, "Study of Fracture Behaviour with Wedge Splitting Test Method," *Fracture Process in Concrete, Rock and Ceramics*, ed. van Mier, J. G. M., and Bakker, A., 1991, pp. 789-798
- 5) Rokugo, K., Bruhwiler, E., Wittmann, F. H., and Mihashi, H., "Methods to Determine Fracture Energy and Strain Softening of Concrete," *Recent Publications*, ed. by Wittmann, F. H, 1988, pp. 103-111
- 6) Shah, S. P., "Fracture Toughness for High-Strength Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 87, No. 3, May-June 1990, pp. 260-265
- 7) Kaplan, M. F., "Crack Propagation and the Fracture of Concrete," *Journal of ACI*, Vol. 58, Nov. 1961, pp. 591-610
- 8) 장정수, "콘크리트의 파괴에너지 결정에 관한 연구," 박사학위논문, 전남대학교, 1988, 117pp.
- 9) Mihashi, H., Kim, J. K., Kirikoshi, K., and Narita, T., "Experimenatal Study on Fracture Mechanics Property and Size Effect of Concrete," *Concrete Research and Technology JCI*, Vol. 4, No. 2, 1993, pp. 57-66
- 10) Kim, J. K., Mihashi, H., Kirikoshi, K., and Narita, T., "Fracture Energy of Concrete with Different Specimen Size and Strength by Wedge Splitting Test," *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ed. by Bazant, Z. P., Elsevier, 1992, pp. 561-566
- 11) Wang, X., and Wu K., "Fracture Parameters of Concrete as Determined by means of Wedge Splitting Test," *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ed. by Bazant, Z. P., Elsevier, 1992, pp. 461-464