

비선형 파괴역학에 의한 콘크리트의 파괴거동과 균열성장에 관한 연구

(Fracture Behavior and Crack Growth of Concrete
by the Nonlinear Fracture Mechanics)

배 주 성* 나 의 균**

Bae, Ju Seong Na, Eui Gyun

요 약

콘크리트는 혼합물로서 비균질성, 이방성 및 비선형성 재료이기 때문에 그의 파괴해석에 있어서 대래의 강도 개념보다 파괴역학 개념을 적용하여 콘크리트의 파괴인성을 도입하여 평가하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있다.

지금까지 콘크리트에 적용되어 온 파괴역학 개념은 두가지로 대별될 수 있는데 하나는 선형탄성 파괴역학 개념이고 다른 하나는 비선형파괴역학 개념이다. 그러나 전자를 콘크리트에 적용하는데는 문제점과 불합리성이 지적되어 왔다.

본 연구에서는 비선형파괴역학에서 많이 이용되어온 J-적분법과 COD법을 도입하여 굽은골재의 최대치수와 노치깊이의 변화가 콘크리트의 파괴거동, 파괴에너지 및 균열성장에 미치는 영향, 균열 개구변위와 파괴에너지의 관계 등을 고찰하기 위하여 콘크리트 작사각형 보를 제작하여 3점 휨 파괴실험을 수행하였다.

그 결과 굽은골재의 최대치수와 노치깊이가 증가할 수록 하중-처짐거동의 비선형성이 더욱 두드러졌고, 굽은골재 최대치수의 증가는 콘크리트의 연성을 증가시켜 보다 안정된 파괴를 유도하였으며, 균열전파경로는 굽은골재의 최대치수가 증가할수록 점점 더 직선에서 벗어나 불규칙적이었으나 노치깊이의 변화에는 거의 영향을 받지 않았다. 또한 파괴에너지는 굽은골재의 최대치수가 증가하고 노치깊이가 감소할수록 증가하였으나, 균열개구변위는 노치깊이가 증가할수록 감소하였으며 굽은골재의 최대치수의 변화에는 거의 영향을 받지 않았다.

ABSTRACT

Concrete, a mixed material, has heterogeneity, anisotropy and nonlinearity. Therefore, in its fracture analysis, it is more reasonable to evaluate its fracture toughness by applying the concept of fracture mechanics rather than the strength concept.

Up to the present the concepts of fracture mechanics which were applied to concrete have been

* 정회원, 전북대학교 공과대학 부교수, 공학박사
** 군산수산전문대학 선박기계과 전임강사, 공학박사

● 1989. 10. 2. 접수 본 논문에 대한 토론을 1990. 6. 30
까지 본 학회에 보내주시면 1990. 9월호에 그 결과를
게재해 드리겠습니다.

divided into two main classes. The one is the concept of linear elastic fracture mechanics and the other is the concept of elastic-plastic fracture mechanics. But it has been pointed out that there are many problems and irrationalities in applying the concept of linear elastic fracture mechanics to concrete.

In this study, the J-integral method and the COD method mainly used in the analysis of nonlinear fracture mechanics, were introduced and the three point bending test was carried out for investigating the effects of the variation of the maximum aggregate size and notch depth on the fracture behavior and the crack growth of concrete, and the relationships of fracture energy and crack opening displacement.

According to the results of this study the more the maximum aggregate size and the notch depth increased, the more the nonlinearity of load-deflection behavior was remarkable. The increase of the coarse aggregate size created the more ductility of concrete. Thus concrete showed the more stable fracture.

As for the path of the crack growth, the more the coarse aggregate size increased, the more it was irregularly deviated from the straight line but it was not almost affected by the variation of the notch depth.

Also, the fracture energy increased according as the coarse aggregate size increased and the notch depth decreased.

1. 서론

금속등의 재료에 적용되어온 파괴역학이론을 처음으로 콘크리트에 적용한 연구는 1959년 Neville⁽¹⁾에 의해 이루어졌고, 실험적 연구는 1961년 Kaplan⁽²⁾이 처음 수행하였다.

그 이후 이 분야에 관한 수 많은 연구가 진행되어 왔는데 크게 두가지 범주로 나눌 수 있다.^(3,4)

그 중 하나는 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics : LEFM)이론에 의한 콘크리트의 파괴해석이고, 다른 하나는 탄소성파괴역학(elastic-plastic fracture mechanics : EPFM)이론에 의한 해석이다.

그러나 콘크리트는 금속 등과 같은 재료와는 달리 혼합물로서 비균질성(heterogeneity), 이방성(anisotropy) 및 비선형성(nonlinearity) 재료이기 때문에 LEFM을 적용하는데는 많은 문제점과 불합리성이 야기되어 왔다.

Kesler, et al.⁽⁵⁾은 LEFM이론은 직접 cement pastes, 몰타르 및 콘크리트에 적용할 수 없다고 결론지었고 다른 연구자들도 이와 유사한 결론을 내렸다.^(6, 7, 8, 9)

이러한 점들을 고려할 때 시멘트 재료의 파괴거동과 균열성장을 규명하는데는 LEFM보다

EPFM의 측면에서 해석하는 것이 타당하고 합리적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 EPFM이론을 바탕으로 한 J-적분법, COD법 및 compliance법을 도입하여 굽은골재의 최대치수와 노치깊이(notch depth)의 변화에 따른 몰타르와 콘크리트의 J-적분치와 COD의 평가 및 그들간의 관계, 굽은골재 최대치수와 노치깊이가 콘크리트의 파괴인성, 파괴하중, 파괴거동 및 균열진전거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 노치깊이를 각각 20, 60, 100mm로 하였고, 굽은 골재의 최대치수를 각각 25, 20, 15mm로 변화시켜 직사각형보를 제작하여 3점휨 파괴실험을 수행하였다.

실험으로부터 하중-처짐곡선(load-deflection curve)과 하중증가에 따른 균열개구변위(crack opening displacement : COD) 및 재하점에서의 처짐을 얻었으며 하중-처짐곡선으로부터 파괴에너지(fracture energy)와 compliances를 구하여 그 결과들을 비교분석하였다.

2. 콘크리트의 파괴실험

2-1. 시편의 제작 및 종류

콘크리트의 파괴실험을 수행하기 위하여 크기가 150×200×700mm로 일정한 몰타르와 굽

은골재의 최대치수에 따른 3종류의 콘크리트의 직사각형 보를 각각 20개씩 총 80개의 시편을 제작하였다.

압축강도 측정을 위하여 몰타르는 50×100mm 실린더 몰드로 콘크리트는 150×300mm 실린더 몰드로 각각 10개와 15개씩 제작하였다.

이들 시편의 배합비 및 압축강도는 표 2-1, 종류 및 노치-보의 깊이비에 따른 갯수는 표 2-2와 같으며, 크기는 그림 2-1과 같다.

시편 제작을 위한 몰드는 목재로 제작하였으며 성형 후 탈형을 용이하게하기 위하여 몰드에 광유를 칠하였고, 타설 후 재료의 분리가 일어나지 않도록 진동기로 균일하게 다졌다.

모든 시편은 제작 48시간 후에 탈형하여 실험시까지 수중양생하였다.

실험 직전에 수중에서 꺼 낸 시편에 5mm 두께를 가진 콘크리트 절단기로 각 종류의 시편에 각각 20, 60 및 100mm의 노치를 주었다. 노치선단은 가공하지 않고 직사각형 형태를 그대로 유지시켰다.

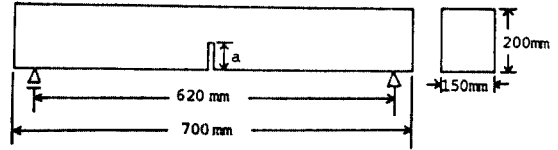


Fig. 2-1. The size of specimen

Table 2-1. Mix proportion, compressive strength of specimen

type	cement	sand	graval	water	compressive strength (kg/cm ²)
concrete I	1	1.34	2.10	0.35	230.13
concrete II	1	1.37	1.77	0.35	268.41
concrete III	1	1.36	1.56	0.35	306.73
mortar	1	2.52	--	0.52	245.33

concrete I : 굵은골재 최대치수 25mm concrete
 concrete II : 굵은골재 최대치수 20mm concrete
 concrete III : 굵은골재 최대치수 15mm concrete.

Table 2-2. Type and number of specimen

type	concrete I					concrece II					concrete III					mortar					
	$\frac{a}{H}$	0.0	0.1	0.3	0.5	TOT	0.0	0.1	0.3	0.5	TOT	0.0	0.1	0.3	0.5	TOT	0.0	0.1	0.3	0.5	TOT
number		5	5	5	5	20	5	5	5	5	20	5	5	5	5	20	5	5	5	5	20

2-2. 실험장치 및 방법

2-2-1. 실험 장치

본 연구에서는 3점 휨 실험을 수행하기 위하여 Instron 사의 UTM을 사용하였으며 실험장치 및 COD와 처짐측정장치는 각각 사진 2-1 및 사진 2-2와 같고 그 구성도는 그림 2-2와 같다.

load cell로부터 시편에 하중전달이 균일하게 전달되도록 spherical seat을 제작하여 load cell

과 재하판(loading plate) 사이에 설치하였다.

COD 측정을 위해서 clip gage를 제작하였고, 이를 노치 중앙의 양쪽에 고착시키기 위해서 knife edge를 제작하였다.

또한 재하점의 치짐을 정확히 측정하기 위하여 cantilever gage를 제작하여 측정점에 정확히 설치하였다.

clip gage와 cantilever gage는 실험전에 사진 2-2의 micrometer, X-Y recorder 및 zero balancer등 보조장치를 사용하여 충분하고 세심한

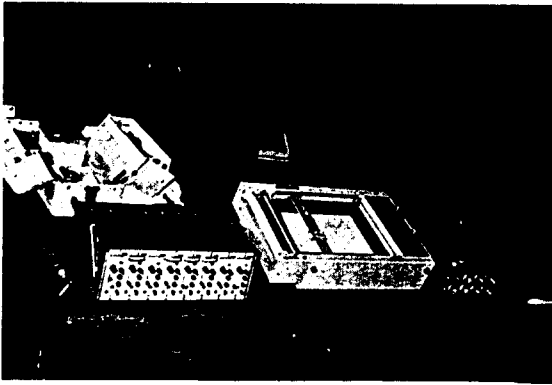


Photo. 2-2. The measuring apparatus of COD and deflection

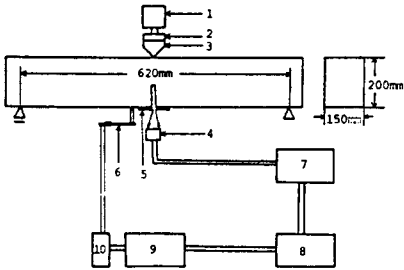
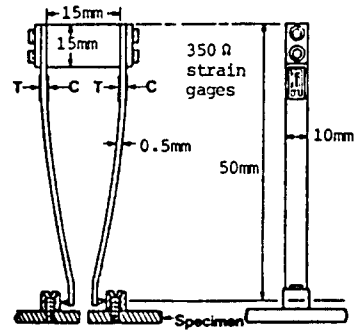


Fig. 2-2. The schematic diagram of test apparatus

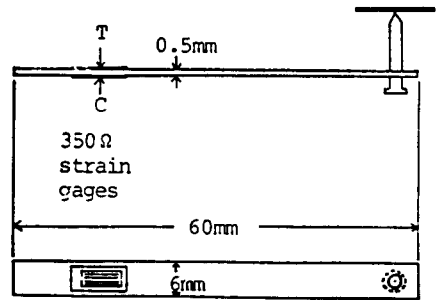
calibration작업을 한 후 실험을 수행하였다.

2-2-2. 실험 방법

실험 직전에 수중에서 꺼낸 시편에 콘크리트 절단기를 이용하여 노치(initial crack)를 주었으며 하중전달이 균일하도록 지점 및 재하점을 수평이 되게 연마기와 샌드페이퍼로 연마한 다음 knife edge를 부착하고 균열진전거동을 보기 위해서 균열진전이 예측되는 부분에 흰색 페인트를 칠한 후 다음과 같이 예비조작을 실시하였다.



(a) clip gage



(b) cantilever gage

Fig. 2-3. The clip and cantilever gages

- 1) 지지판에 시편을 수평이 되게 설치한다.
- 2) 시편의 중앙점이 하중전달지점과 일치하는지 점검한다.
- 3) COD측정을 위한 clip gage를 시편에 고착된 knife edge에 끼운다.
- 4) 처짐 측정용 cantilever gage를 측정점에 접지한다.

위의 조작이 끝난 후 본 실험에 사용된 UTM과 X-Y 기록계 및 보조장치를 동시에 조작하여 하중을 cross head speed가 0.5mm/min로 모든 시편에 일정하게 가하였다.

UTM에 부착된 plotter로부터 하중-처짐곡선과 X-Y기록계로부터 하중증가에 따른 COD 및 처짐곡선을 얻었다.

여기서 COD 측정은 하중증가에 따라 시편 → clip gage → X-Y recorder에 기록된 값들과 실험전 micro-meter에 의해 strain gage를 보

정한 값의 관계로부터 구하였다.

처짐 측정 또한 COD 측정방법과 동일하나 다만 cantilever gage를 사용하였으며 그 과정은 cantilever gage→bridge box→amplifier→X-Y recorder와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 실험결과

본 실험으로부터 얻은 각 경우의 5개 값들 중 합리적으로 선별한 3개의 값은 표 3-1과 같고, 시편 종류 및 노치-보의 깊이 비($\frac{a}{H}$)에 대한 대표적인 균열전파경로는 각각 사진 3-1, 3-2와 같으며, 그림 3-1은 각 시편에 대한 $\frac{a}{H}$ 의 하중-처짐 곡선이다.

각 시편의 하중-처짐곡선과 이에 대응하는 표 3-1의 결과값들을 입력자료로하여 Spline method에 의해 구한 하중-처짐곡선의 면적과 Mindess, et al.⁽¹⁰⁾의 방법으로 구한 파괴에너지 및 하중-처짐곡선의 기울기의 역수인 compliance는 표 3-2와 같다.

그림 3-1의 하중-처짐 곡선으로부터 Begley와 Landes⁽¹¹⁾가 제안한 절차에 따라 다음과 같이 J-적분값을 구하였다.

먼저 그림 3-1에서 임의로 택한 4개의 처짐에서 각 시편의 단위 두께당 흡수된 에너지를 노치깊이에 대한 함수로 나타내면 그림 3-2와 같고, 직선들은 최소자승법으로 얻었다.

그림 3-3는 그림 3-2에서 구한 J-적분치와 변위와의 관계를 4종류 시편에 대해 도식화 한 것이다. 곡선은 2차 다항식으로 구하였다.

마지막 단계로 Begley와 Landes는 그림 3-4와 같이 평균파괴처짐(mean failure deflection)을 구하여 그림 3-3으로부터 임계 J값(J_c)을 결정하였다. 그러나 본 연구에서는 전체적으로 처짐량이 커서 평균파괴처짐의 증가로 J_c 결정이 어려워 Mindess, et al.⁽¹⁰⁾이 제안한 방법으로 J_c 를 구하였는데 그 값들은 표 3-2

와 같다.

그림 3-5는 Mindess, et al.⁽¹⁰⁾이 제안한 방법으로 구한 J_c 와 본 실험에서 구한 COD를 각 시편별로 $\frac{a}{H}$ 에 대해서 나타냈으며 그림 3-6은 J_c 와 COD를 각 $\frac{a}{H}$ 에 대해서 시편의 함수로 도식화한 것이다.

표 3-2로부터 각 시편의 $\frac{a}{H}$ 에 대한 compliance는 그림 3-7과 같다.

3-2. 고찰

그림 3-1은 각 시편에 대한 하중-처짐곡선을 $\frac{a}{H}$ 에 대해서 나타낸 것으로 최대파괴 하중은 몰타르에서 가장 작고 굵은골재 최대 치수가 큰 콘크리트일수록 증가하였다.

사진 3-1은 $\frac{a}{H}$ 가 0.1로 일정한 경우 각 시편의 대표적인 균열전파경로를 보여주고 있다. 사진으로부터 몰타르는 균열전파경로가 직선적이고 파괴가 완전하였으나, 굵은골재 최대 치수가 증가할수록 균열전파경로는 점점 직선에서 벗어나 불균일한 거동을 보였으며 파괴도 완전치 않음을 알 수 있었다.

사진 3-2에서는 굵은골재 최대치수가 20mm로 일정한 경우, $\frac{a}{H}$ 가 증가함에 따라 모든 시편의 균열전파경로는 거의 직선적으로 균일하나 파괴는 점점 더 완전치 않음을 볼 수 있었다. 이는 노치의 깊이가 깊을수록 노치선단에서 파괴될 때까지 축적되는 한계파괴에너지가 감소하고 있음을 의미한다고 생각된다.

그림 3-2는 그림 3-1에서 임의로 택한 4개의 처짐에서 각 시편별로 시편의 단위두께당 흡수된 에너지를 노치깊이로 나타낸 것이다. 모든 경우 노치가 깊을수록 흡수에너지는 1차 함수로 감소하였고, 그 감소의 정도는 각 시편의 형태 및 처짐량에 따라 다르며 특히 몰타르의 경우는 노치깊이에 따른 흡수에너지의 변화가 거의 없었다.

그림 3-3는 그림 3-2로부터 구한 J-적분치와 변위와의 관계를 각 시편에 대해서 나타

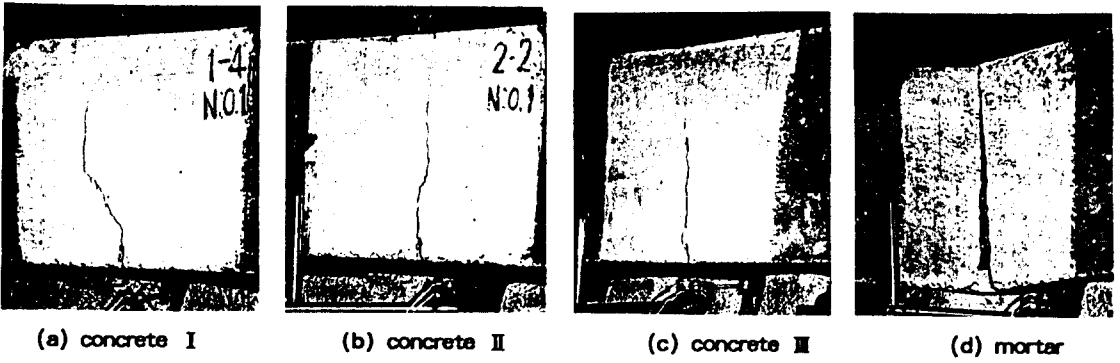


Photo. 3-1. The typical path of crack propagation for each specimen ($\frac{a}{H} = 0.1$)

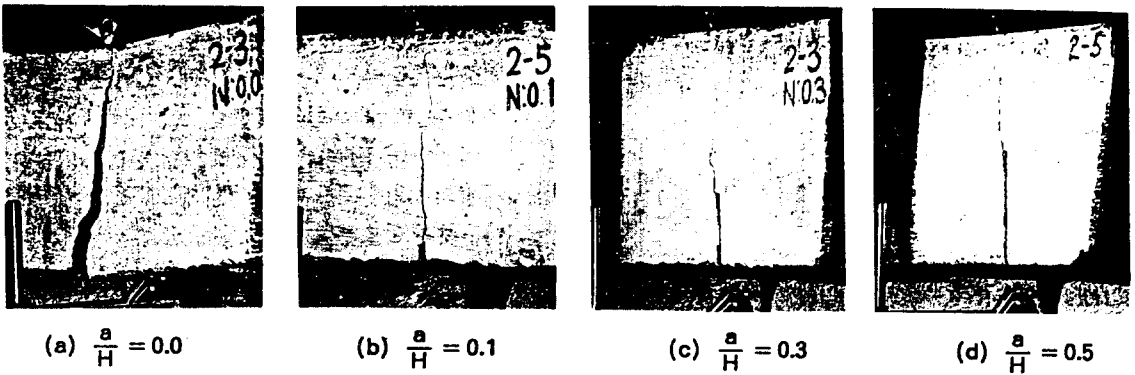
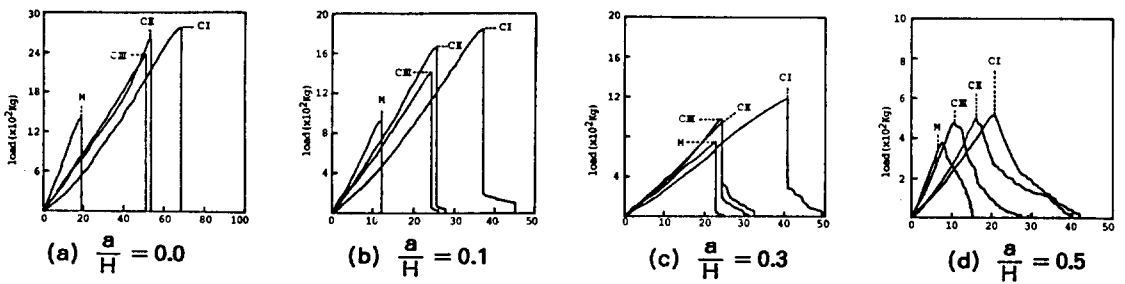


Photo. 3-2. The typical path of crack propagation for each ($\frac{a}{H}$) (concrete II)



C I : 굵은골재 최대치수 25mm concrete
 C II : 굵은골재 최대치수 20mm concrete
 C III : 굵은골재 최대치수 15mm concrete
 M : mortar

Fig. 3-1. The load-deflection curves of each ($\frac{a}{H}$)

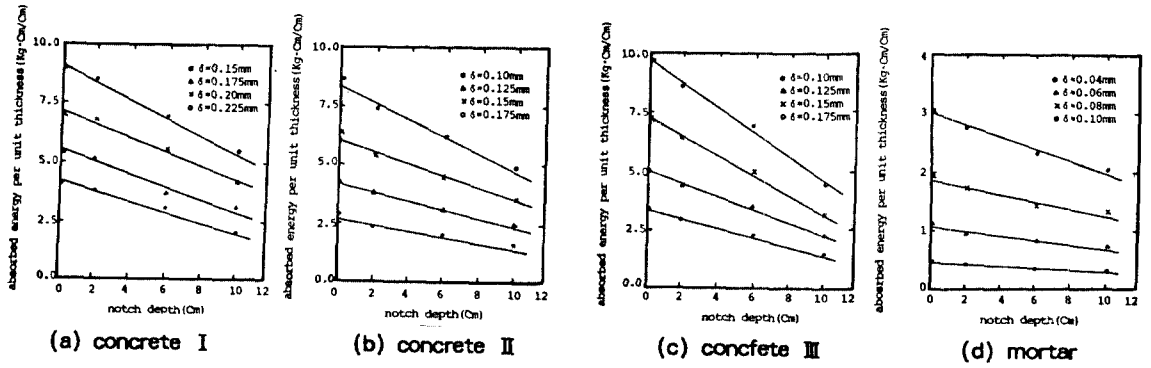


Fig. 3-2. The absorbed energy – notch depth of each specimen

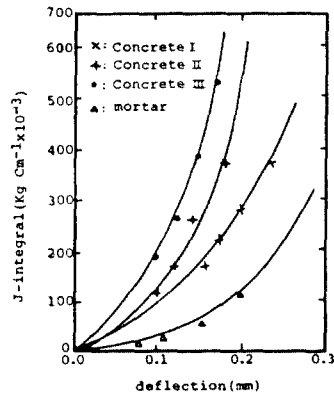


Fig. 3-3. The J values – deflection of each specimen

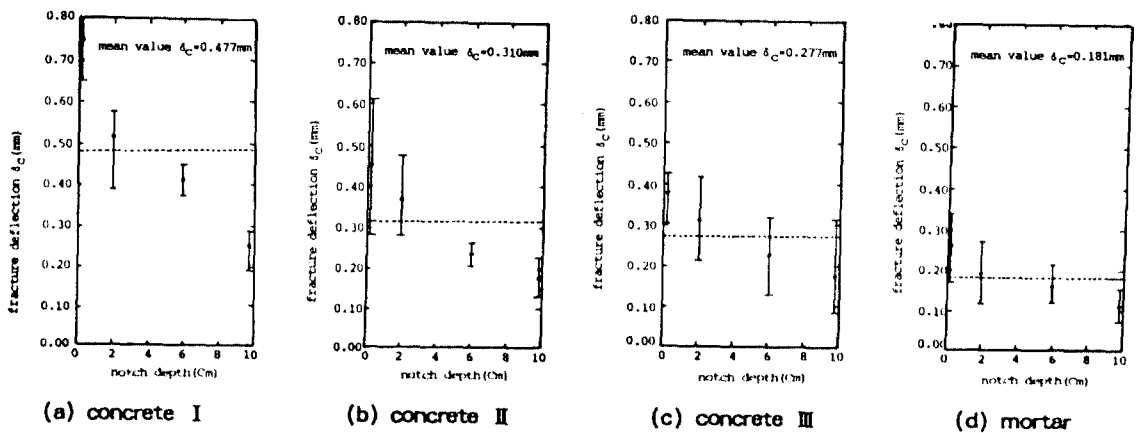


Fig. 3-4. The fracture deflection – notch depth of each specimen

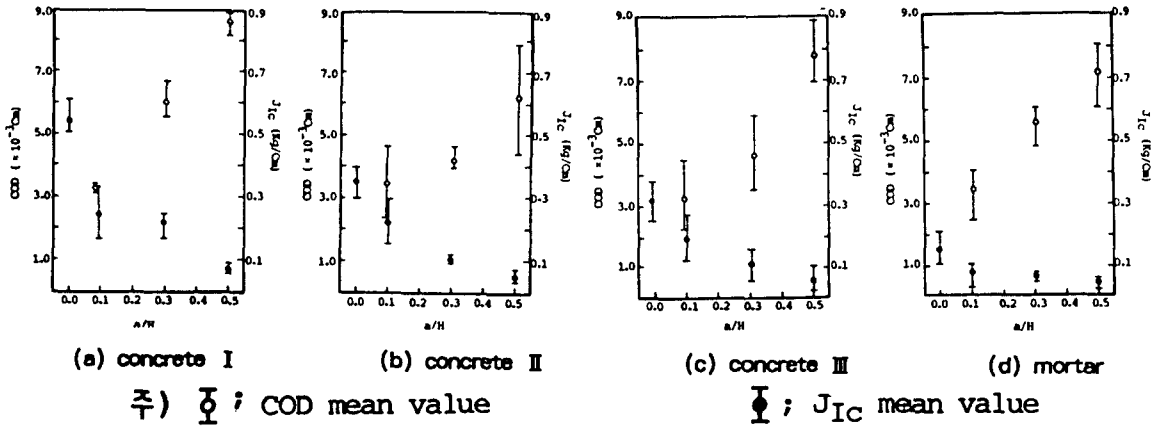


Fig. 3-5. The J_{IC} , COD - ($\frac{a}{H}$) of each specimen

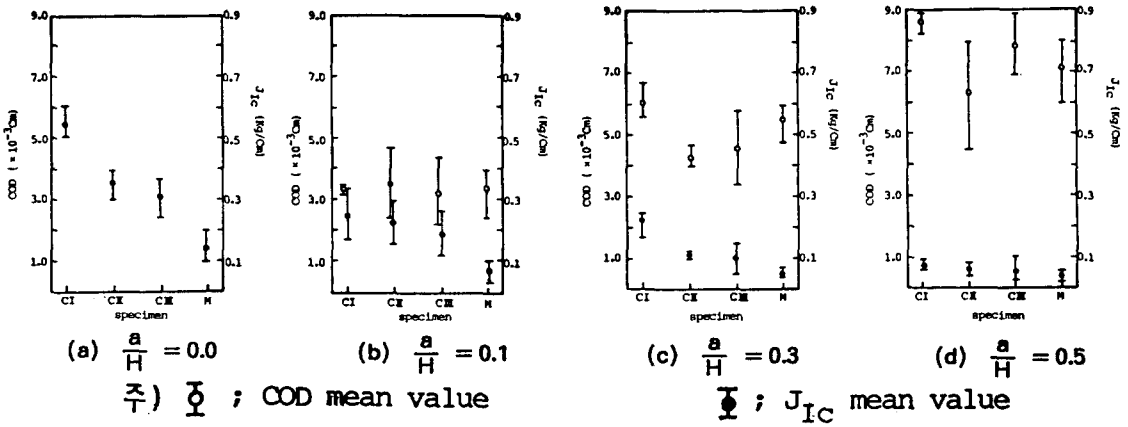


Fig. 3-6. The J_{IC} , COD - specimen of each ($\frac{a}{H}$)

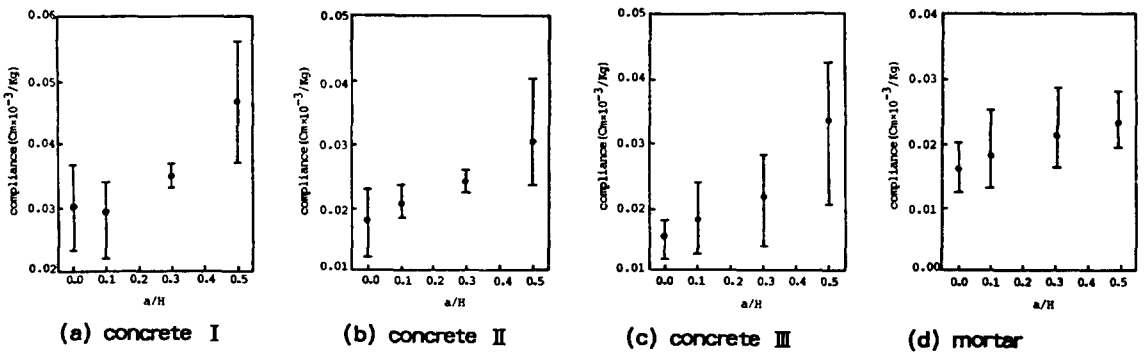


Fig. 3-7. The compliance - ($\frac{a}{H}$) of each specimen

낸 것으로 변위가 증가함에 따라 J -적분치는 2차 함수로 증가하였으며, 굵은골재 최대치수가 큰 콘크리트일수록 J -적분치가 작게 나타났고, 몰타르의 경우 가장 작은 값을 보이고 있다.

그림 3-4는 각 시편의 파괴처짐과 노치깊이와의 관계를 보여준다. 그림에서 파괴처짐은 몰타르에서 가장 작고 굵은골재 최대치수가 증가할수록 증가하였으며, 모든 시편에 대해서 노치깊이가 증가함에 따라 감소하였는데 그 감소율은 몰타르에서 가장 작고 굵은골재 최대치수가 커질수록 증가하였다. 이러한 원인은 앞에서 언급된 균열전파경로와 더불어 생각할 수 있다. 즉 골재크기가 증가할수록 내부의 미세균열의 밀도가 높아질 것으로 추정되며 그 결과 노치시편에 하중이 가해질 때 노치선단에서 우선적으로 파괴에너지가 축적되는 과정 또는 미세균열의 전파 혹은 상호 결합과정에서 균열전파경로가 복잡해질 뿐만아니라 파괴에너지도 분산되어 처짐량도 증가하는 것으로 생각된다.

그림 3-5 Mindess, et al.⁽¹⁰⁾이 제안한 방법으로 구한 J_{IC} 와 본 실험장치로부터 구한 COD를 $\frac{a}{H}$ 에 따라 각 시편별로 나타낸 것이다. 모든 시편에 있어서 $\frac{a}{H}$ 가 증가함에 따라 J_{IC} 는 감소하고, COD는 증가하였다. COD의 경우 콘크리트가 몰타르보다 약간 큰 값을 가지는 것은 기존의 Saeki, et al.⁽¹⁴⁾의 연구와 비슷한 경향을 보여주었다. 그러나 탄소성 파괴역학에서는 일반적으로 J_{IC} 와 COD는 서로 비례관계에 있는데 반해 본 실험 결과는 서로 상반되는 결과가 얻어졌다. 이러한 점은 향후 규명되어야 할 과제라 생각된다.

그림 3-6로부터 각 $\frac{a}{H}$ 에 대해서 J_{IC} 는 몰타르에서 가장 작고, 굵은골재 최대치수가 커질수록 증가하였으나, COD는 모든 시편에 있어서 비슷한 값을 알 수 있는데 이러한 원인은 굵은골재 최대치수가 클수록 균열성장에 대한 저항성을 높여주기 때문으로 생각된다. 또한 이러한 경향은 기존의 Strange, et al.⁽¹⁵⁾과

Cho, et al.⁽¹⁶⁾의 연구결과와 일치한다.

그림 3-7에서 compliance는 대체로 굵은골재 최대치수와 $\frac{a}{H}$ 가 증가할수록 증가하였다. 이러한 결과는 Kaplan⁽²⁾과 Swartz⁽⁸⁾의 연구와는 일치하였으나, Carpinteri⁽¹¹⁾의 연구에서는 compliance가 굵은골재 최대치수의 증가에 따라 감소하였다.

4. 결 론

본 연구는 굵은골재 최대치수와 노치깊이의 변화가 몰타르와 콘크리트의 파괴인성, 파괴거동 및 균열진전거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 3점 휨 파괴실험을 수행하였으며 실험결과와 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 파괴하중은 노치깊이가 증가할수록 크게 감소하였으나 굵은골재치수에는 거의 영향을 받지 않았다.
- 2) 콘크리트의 균열전파경로는 굵은골재치수가 증가할수록 점점 더 직선에서 벗어나 불균일하였으나 노치깊이의 변화에는 거의 영향을 받지않고 직선적이었다.
- 3) 굵은골재의 최대치수가 증가할수록 콘크리트는 보다 더 안정된 파괴를 하였다.
- 4) 몰타르와 콘크리트의 파괴에너지는 굵은골재치수가 증가하고 노치깊이가 감소할수록 증가하였다.
- 5) COD는 노치깊이가 증가할수록 증가하였지만, 굵은골재의 치수에는 거의 영향을 받지 않았다.
- 6) compliance는 대체로 굵은골재치수와 노치깊이가 증가할수록 증가하는 경향이 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 1989년도 기초연구과제 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사문을 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Neville, A. M., Some aspects of the

- strength of concrete, *Civil Engineering* (London), Part I : 54, 639, pp. 1153–1156(1969) ; Part II : 54, 641, pp. 1435–1439(1959)
- 2) Kaplan, M. F., Crack propagation and the fracture of concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 58, 5, pp.591–610(1961).
 - 3) Mindess, S., The application of fracture mechanics to cement and concrete : A historical review, *Fracture Mechanics of Concrete*, edited by F. H. Wittmann, Elsevier Scientific Publishing Company, in press (1983).
 - 4) Mindess, S., The fracture of fibre reinforced and polymer impregnated concretes : a review, *Fracture Mechanics of Concrete*, edited by F. H. Wittmann, Elsevier Scientific Publishing Company, in press(1983).
 - 5) Kesler, C. E., Naus, D. J. and Lott, J; L., Fracture mechanics—its applicability to concrete. Proceedings of the International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, 1971, The Society of Materials Science, Japan, Vol. IV, pp. 113–124(1972).
 - 6) Kim, M., Ko, H. Y. and Gerstle, K. H., Determination of fracture toughness of concrete, *Fracture in Concrete*, edited by W. F. Chen and E. C. Ting, American Society of Civil Engineers, New York, ppp. 1–14(1980).
 - 7) Evans, R. H. and Marathe, M. S., Stress distribution around holes in concrete, *Materiaux et Constructions*, 1,1, pp. 57–60(1968).
 - 8) Swartz, S. E., Hu, K.-K. and Jones, G. L., Compliance monitoring of crack growth in concrete, *Journal of the Engineering Nechaniss Division, ASCE*, 104, EM4, pp. 789–800(1978).
 - 9) Wecharatana, M. and Shah, S. P., Nonlinear fracture mechanics, *Fracture mechanics of concrete*, adited by F. H. Wittmann, Elsevier, pp. 463–480(1983).
 - 10) Mindess, S., Lawrence, F. V. and Kesler, C. E., The J–integral as a fracture criterion for fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 7, 9. pp. 731–742(1977).
 - 11) Carpinteri, A., Static and energetic fracture parameters for rocks and concretes, *Materiaux et Construction*, 14, 81, pp. 151–162(1981).
 - 12) Nallathambi, P., Karihaloo, B. L. and Heation, B. s., “Effect of specimen, and crack sizes, water/cement ratio and coarse aggregate texture upon fracture toughness of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No. 129, Dec. 1984, 00. 227–236.
 - 13) Ziegeldorf, S., “Fracture Mechanics Parameters of Hardened Cement Paste, Aggregates and Interfaes”, *Fracture Mechanics of concrete* edited by F. H. Wittmann, 1983, pp. 371–409.
 - 14) Saeki, N. and Takada, N., Crack propagation and COD of concrete, *The 35th Annual Meeting of the Civil Engineering Institute of Japan*, V. pp. 267–268(1980).
 - 15) Streange, P. C., and Bryant, A. H., “The role of aggregate in the fracture of concrete”, *Journal of the Material Scicnce* 14, 1979, pp. 1863–1868.
 - 16) Cho, K. Z., Kobayaghi, A. S. and Hawkins, N. M., “Fracture Preocess Zone of Concrete cracks”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 110, No. Aug. 1984, pp. 1174–1184.

Table 3-1. The COD, deflection and maximum load of each specimen

구분 시편종류	0.0			0.1			0.3			0.5		
	COD ($\times 10^{-3}$ cm)	δ ($\times 10^{-3}$ cm)	Pmax (kg)	COD ($\times 10^{-3}$ cm)	δ ($\times 10^{-3}$ cm)	Pmax (kg)	COD ($\times 10^{-3}$ cm)	δ ($\times 10^{-3}$ cm)	Pmax (kg)	COD ($\times 10^{-3}$ cm)	δ ($\times 10^{-3}$ cm)	Pmax (kg)
concrete I	--	82.46	2,250	3.55	57.09	1,680	6.67	37.00	1,000	8.89	28.54	505
	--	65.17	2,850	3.56	38.96	1,783	5.78	44.63	1,280	8.89	19.83	530
mean value	--	75.81	2,400	3.33	57.58	1,780	5.60	41.26	1,250	8.22	23.99	520
		74.48	2,500	3.48	51.21	1,748	6.02	40.96	1,177	8.67	24.12	518
concrete II	--	60.52	2,650	2.44	47.60	2,030	4.67	26.00	1,010	6.67	19.60	660
	--	28.57	2,450	4.67	33.17	1,880	4.22	21.39	970	4.44	12.71	540
mean value	--	46.55	2,550	3.56	28.86	1,450	4.00	23.31	960	8.00	22.94	570
		45.21	2,550	3.50	36.54	1,787	4.30	23.57	980	6.37	18.42	590
concrete III	--	42.90	2,400	2.89	42.08	1,750	5.78	31.28	1,100	6.89	30.54	580
	--	42.04	2,450	2.22	29.43	1,710	3.40	23.65	1,010	7.78	16.29	560
mean value	--	30.03	2,600	4.44	21.34	1,700	4.89	13.19	940	8.89	9.37	460
		38.32	2,483	3.18	30.95	1,720	4.69	22.71	1,017	7.85	18.73	533
mortar	--	17.16	1,450	3.75	11.82	930	5.95	12.11	745	8.00	7.50	380
	--	28.60	1,450	2.38	27.16	1,100	4.76	21.57	750	7.78	15.45	540
mean value	--	32.89	2,050	4.05	19.27	1,180	5.95	14.40	760	6.07	8.82	390
		26.22	1,650	3.39	19.42	1,070	5.55	16.03	752	7.28	10.59	437

Table 3-2. The integral area, fracture energy and compliance of each specimen

구분 시편종류	0.0				0.1				0.3				0.5											
	A (kg·cm)	J=2A/Bb (kg/cm)	compliance (cm×10 ⁻⁷ /kg)	A (kg·cm)	J=2A/Bb (kg/cm)	compliance (cm×10 ⁻⁷ /kg)	A (kg·cm)	J=2A/Bb (kg/cm)	compliance (cm×10 ⁻⁷ /kg)	A (kg·cm)	J=2A/Bb (kg/cm)	compliance (cm×10 ⁻⁷ /kg)	A (kg·cm)	J=2A/Bb (kg/cm)	compliance (cm×10 ⁻⁷ /kg)									
concrete I	79.4820	0.5299	0.0366	22.8762	0.1695	0.0339	18.5102	0.1763	0.0370	7.0497	0.940	0.0565	76.0373	0.5069	0.0229	32.4848	0.2406	0.0219	25.9236	0.2469	0.0349	4.9984	0.0666	0.0374
mean value	82.3739	0.5492	0.0304	33.7866	0.2503	0.0294	23.4906	0.2252	0.0349	5.9735	0.0796	0.0467	91.6023	0.6107	0.0316	45.9989	0.3407	0.0323	26.0379	0.2525	0.0330	5.8725	0.0783	0.0461
concrete II	60.4798	0.4032	0.0228	41.4532	0.3071	0.0234	13.2509	0.1262	0.0257	6.6013	0.0880	0.0267	44.9687	0.2998	0.0117	28.2535	0.2093	0.0176	10.5570	0.1005	0.0221	3.3502	0.0447	0.0235
mean value	55.4271	0.3695	0.0183	21.0482	0.1559	0.0199	11.1132	0.1058	0.0243	6.4802	0.0854	0.0402	53.6252	0.3575	0.0176	30.2516	0.2241	0.0203	11.6404	0.1108	0.0240	5.4532	0.0727	0.0301
concrete III	55.5343	0.3702	0.0179	36.1698	0.2679	0.0240	15.8881	0.1513	0.0284	8.6566	0.1154	0.0527	50.5666	0.3371	0.0172	23.4110	0.1734	0.0172	10.3366	0.0984	0.0234	4.5157	0.0602	0.0291
mean value	36.7631	0.2451	0.016	16.4048	0.1215	0.0125	5.5483	0.0528	0.0140	2.1122	0.0282	0.0204	47.6213	0.3175	0.0155	25.3285	0.1876	0.0179	10.5777	0.1008	0.0219	5.0948	0.0679	0.0341
mortar	15.1069	0.1007	0.0118	5.0388	0.0373	0.0127	4.3793	0.0417	0.0163	1.4872	0.0198	0.0197	20.1860	0.1346	0.0197	13.6520	0.1012	0.0247	7.6577	0.0729	0.0288	4.7664	0.0636	0.0286
mean value	30.9265	0.2062	0.0160	10.5841	0.0784	0.0163	5.9057	0.0562	0.0189	1.9206	0.0256	0.0226	20.0731	0.1472	0.0158	9.7583	0.0723	0.0179	5.9809	0.0569	0.0213	2.7247	0.0363	0.0236