

강모래 및 부순모래 콘크리트의 파괴특성에 관한 연구

A Study on the Fracture Characteristics of Crushed Sand Concrete and River Sand Concrete

김진근*

이철성**

Kim, Jin-Keun Lee, Chil-Sung

요 약

이 연구는 쐐기조갸시험법에 의하여 강모래 콘크리트의 파괴에너지와 부순모래 콘크리트의 파괴에너지 측정을 통하여 콘크리트 강도와 파괴에너지 관계에 대하여 규명하였다. 그리고 부순모래 콘크리트의 파괴에너지와 강모래 콘크리트의 파괴에너지를 비교 검토하였으며, 콘크리트의 특성길이도 구하였다.

이 연구의 실험결과에 의하면 부순모래 콘크리트는 파괴특성 관점에서 강모래 콘크리트와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그리고 압축강도가 20~60MPa에서는 압축강도가 증가함에 따라 파괴에너지가 증가하였지만, 60MPa이상의 범위에서는 압축강도가 증가하여도 파괴에너지는 증가하지 않았다.

Abstract

This research includes estimations of the relation between the strength of concrete and the fracture energy for river sand concrete and crushed sand concrete using the wedge splitting test method. Furthermore the fracture energy and the characteristic length of two types of concrete were compared and discussed.

Fracture behaviors of crushed sand concrete and natural sand concrete had the similar trend in fracture characteristics. The fracture energy was increased with the increase of compressive strength in the strength range of 20~60MPa, but was not increased for the concrete more than 60MPa of compressive strength.

Keywords : fracture energy, crushed sand concrete, characteristic length

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 1995년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 균열에 의하여 파괴가 일어나는 재료이고, 재료의 강도에 대한 에너지 흡수능력이 다른 구조 재료에 비하여 상대적으로 낮은 재료적 특성을 갖고 있다. 콘크리트의 에너지 흡수능력은 파괴인성실험(fracture toughness test)을 통하여 결정되고, 콘크리트의 파괴인성은 파괴에너지로도 표현될 수 있다. 따라서 새로운 콘크리트를 개발하고자 할 때에는 콘크리트의 파괴에너지를 구한 후 이를 기존에 사용되는 콘크리트의 파괴에너지와 비교 및 검토할 필요가 있다.

한편 최근 건설재료용 모래가 부족하여 강모래의 대체 골재로서 해사 이외에도 부순모래가 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾ 이와 같이 부순모래의 일반적인 사용을 위하여 먼저 부순모래 콘크리트에 대한 파괴에너지 실험과 같은 파괴인성실험을 통하여 강모래 콘크리트의 파괴기동과의 차이점에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 따라서 이 연구에서는 썬기쪼갬시험법(wedge splitting test)을 이용하여 화강암 부순모래와 석회암 부순모래를 사용한 콘크리트의 파괴에너지와 파괴특성을 규명하고, 이를 강모래 콘크리트의 경우와 비교 및 분석하였다.

콘크리트의 파괴인성을 나타낼 수 있는 대표적인 재료상수로서 콘크리트의 파괴에너지(fracture energy, G_f)가 있으며, 파괴에너지는 단위면적당 균열을 형성하는데 요구되는 에너지의 양으로 정의된다. 재료와 구조물의 시험 연구기관인 유럽의 RILEM에서는 파괴에너지를 측정하기 위하여 노치를 둔 보의 3점휨시험법을 제시하였다.⁽²⁾ 그 후 좀 더 새로운 방법들이 개발되었고, 1986년에 Linsbauer는 썬기쪼갬시험법(wedge splitting test, WST)을 제안하였다.⁽³⁾ 이 썬기쪼갬시험법은 파괴에너지를 구하는 방법 중 우수한 시험방법으로 평가되고 있다.⁽⁴⁾

한편 파괴에너지는 여러 가지 변수에 따라 영향을 받는다. 콘크리트의 강도 수준이 파괴에너지에 미치는 영향에 관하여서 이미 많은 연구가 이루어졌지만, 강도와 파괴에너지의 관계는 연구자에 따라 다른 결론을 내리고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ 그러나 기존의 연

구에서는 강도수준이 고강도 콘크리트에 치우쳐 있고, 또는 강도수준이 다양하지 못하였다. 이 연구에서는 콘크리트의 강도와 파괴에너지의 관계를 규명하였으며, 또한 특성길이(characteristic length)를 구하여 콘크리트 강도와 특성길이의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 파괴에너지 실험

2.1 실험 변수

부순모래 콘크리트의 파괴기동 특성을 분석하고, 강모래 콘크리트의 파괴기동과의 차이를 규명하기 위하여 잔골재로 강모래, 화강암 부순모래, 석회암 부순모래를 사용하였다. 강모래 콘크리트의 경우에는 저강도 콘크리트에서 고강도 콘크리트까지 다양한 강도발현을 위하여 7종류의 물-결합재비를 선택하였으며, 부순모래 콘크리트의 경우에는 3종류의 물-결합재비를 선정하였다. 원주형 공시체를 사용하여 압축강도를 측정하고, 인장강도는 쪼갬인장강도 실험에 의하여 결정하였다.

2.2 실험 재료

시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트(Type I)이고, 잔골재로는 강모래, 화강암 부순모래, 석회암 부순모래를 사용하였다. 강모래는 금강유역의 대평리산이고, 화강암 부순모래는 양산에서 습식으로, 석회암 부순모래는 동해에서 습식으로 생산된 모래로서, 각각의 물리적 성질은 Table 1에 나타나 있다. 굵은골재로는 최대크기가 10mm인 화강암

Table 1 Physical properties of fine aggregate

| Fine aggregate | Specific gravity | Absorption (%) | F.M. |
|------------------------|------------------|----------------|------|
| River sand | 2.59 | 0.78 | 2.92 |
| Crushed granite sand | 2.57 | 0.80 | 3.22 |
| Crushed limestone sand | 2.70 | 0.52 | 3.20 |

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

| Coarse aggregate | G_{max} (mm) | Specific gravity | Absorption (%) |
|------------------------|----------------|------------------|----------------|
| Crushed granite gravel | 10.0 | 2.60 | 1.25 |

부순자갈을 사용하였고, 굵은골재의 물리적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같다.

고강도 콘크리트에서는 적절한 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 type F의 규격을 만족하는 고성능감수제를 사용하였으며, 또한 고강도 발현을 위하여 노르웨이산 Elkem Microsilica 분말제품인 실리카흄을 사용하였다.

2.3 배합설계

부순모래를 잔골재로 사용한 경우에는 다양한 강도를 얻기 위하여 물-결합재비를 0.2, 0.4, 0.6으로 하였다. 그리고 강모래를 잔골재로 사용한 경우에는 물-결합재비로 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7을 선택하였으며, 물-결합재비가 0.2, 0.25, 0.3에서는 고강도 발현에 유리한 실리카흄을 사용하였다. 또한 물-결합재비가 0.2, 0.25, 0.3, 0.4에서는 작업성을 확보하기 위하여 고성능감수제를 사용하였다. Table 3은 실험에 사용한 배합비를 보여준다.

Table 3 Mix proportions

| Specimens | W/B | Unit weight (kg/m ³) | | | | | Admixture (%) |
|-----------|------|----------------------------------|-----|-----|------|------|---------------|
| | | C | W | S | G | S.F. | |
| R20 | 0.20 | 628 | 140 | 522 | 1059 | 70 | 3.5 |
| G20 | | | | | | | |
| L20 | | | | | | | |
| R25 | 0.25 | 529 | 147 | 545 | 1107 | 59 | 2.5 |
| R30 | 0.30 | 489 | 154 | 593 | 1100 | 26 | 2.0 |
| R40 | 0.40 | 423 | 169 | 601 | 1124 | - | 1.0 |
| G40 | | | | | | | |
| L40 | | | | | | | |
| R50 | 0.50 | 368 | 184 | 729 | 1007 | - | - |
| R60 | 0.60 | 331 | 199 | 726 | 1002 | - | - |
| G60 | | | | | | | |
| L60 | | | | | | | |
| R70 | 0.70 | 305 | 214 | 719 | 993 | - | - |

(R : River sand, G : Crushed granite sand, L : Crushed limestone sand)

2.4 시험체 제작 및 양생 방법

Fig. 1과 같이 초기균열을 만들기 위하여 육면체 시험체 내부에 1mm 두께의 아크릴판을 넣고 탈형후에 제거하였으며, 이때 균열이 정해진 방향

으로 안정적으로 진행할 수 있도록 시험체의 양쪽 옆에 그루브(groove)를 두었다. 또한 로울러가 부착된 하중장치를 고정시키고, 클립게이지를 설치하기 위하여 시험체의 윗부분에 홈을 만들었다.

콘크리트 비빔을 위하여 공칭용량 80리터의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료를 굵은골재, 잔골재, 시멘트 및 혼화재료의 순으로 투입하여 1분간 견비빔한 다음 물과 고성능감수제를 동시에 투입하여 3분간 비벼 파괴에너지 시험체와 압축강도, 인장강도 시험을 위한 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하였다. 시험체의 형태와 크기는 Fig. 1과 같으며, 제작 후 24시간만에 탈형하여 $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도로 시험시까지 수중양생을 실시하였다.

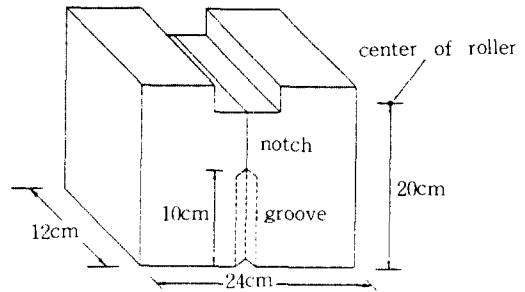


Fig. 1 Geometry of specimen

2.5 가력장치 및 실험방법

쐐기조임시험법의 가력장치는 쐐기와 로울러로 구성되어 있다. 실험을 수행할 때에는 로울러가 부착된 평판을 시험체의 윗부분에 고정시켜, 쐐기가 양쪽에 있는 로울러 사이를 움직이면서 시험체에 힘을 가하도록 되어 있다. 쐐기조임시험법의 가력방법은 Fig. 2와 같다.

실험하는 동안 작용하는 수직하중(F_v , vertical force)과 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정한다. 쐐개는 힘(F_s , splitting force)은 로울러에 작용하는 힘의 수평성분이고, 다음과 같이 계산된다.⁽⁴⁾

$$F_s = \frac{F_v}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (1)$$

여기서, α : 쐐기 각도이다.

균열개구변위는 클립게이지를 사용하여 측정되며, 클립게이지는 쪼개는 힘(F_s)이 작용하는 위치, 즉 로올러 축의 위치에 고정시킨다. 실험에 사용된 기기는 Instron사의 만능재료시험기(closed-loop servo-hydraulic testing machine)이며, 균열개구변위(CMOD)의 제어에 의하여 실험을 수행하였다. 제어 속도는 실험을 시작한 후 40에서 60초 사이에 최대하중에 도달할 수 있도록 0.002 mm/sec의 속도를 유지하였다. 파괴에너지 실험 직전에 KS F 2405에 의하여 압축강도 실험을 수행하였으며, 인장강도 실험은 KS F 2423에 의하여 쪼갠인장강도를 측정하였다. 또한 탄성계수도 측정하였다.

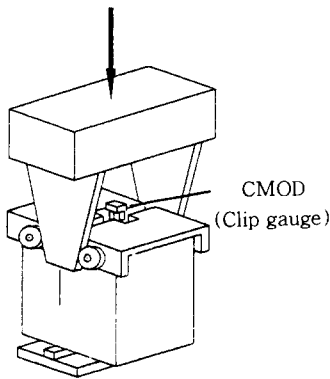


Fig. 2 Set-up of the wedge splitting test

3. 실험결과 및 분석

쪼개쪼갠시험법에 의한 콘크리트의 파괴에너지는 하중-균열개구변위 곡선으로 직접 구할 수 있다. 즉, 파괴에너지는 하중-균열개구변위 곡선의 면적을 시험체의 전체 파단부분(ligament) 면적으로 나눈 값이다.

쪼개쪼갠시험법으로 얻어진 하중-균열개구변위 곡선은 긴 꼬리(tail)부분이 나타나며, 저항도 콘크리트일수록 그 꼬리부분의 길이는 더욱 길어진다. 이것은 파괴진행 때문이 아니라 지지점에서 콘크리트의 지압에 의한 구속 때문인 것으로 알려져 있다. 그러므로 하중-균열개구변위 곡선의 기울기가 영인 점 이후의 곡선을 제거한 후에 면적

을 산정하여 구하였다. 그리고 각 변수마다 동일한 3개의 시험체에 대하여 실험을 수행하였다.

3.1 강모래 콘크리트의 파괴에너지 실험결과 분석

강모래 콘크리트의 실험에 의하여 얻어진 하중-균열개구변위 곡선은 Fig. 3에 나타나 있으며, 파괴에너지는 강도수준에 따라 Table 4에 나타난 바와 같다. Table 4에서 $F_{s,max}$ 는 최대 쪼갠하중이다.

압축강도가 20~60MPa의 범위에서는, 강도가 증가함에 따라 파괴에너지(G_f)는 증가하였다. 그러나 압축강도가 60MPa 이상일 경우, 파괴에너지는 오히려 감소하는 것을 알 수가 있다. 한편, 콘크리트의 파괴에너지는 시험체 크기에 따라 크게 차이가 나는데, 그 이유는 시험체의 파단부분(ligament) 크기가 파괴진행영역이 완전히 형성된 후 파괴가 일어날 수 있는 정도의 크기를 확보

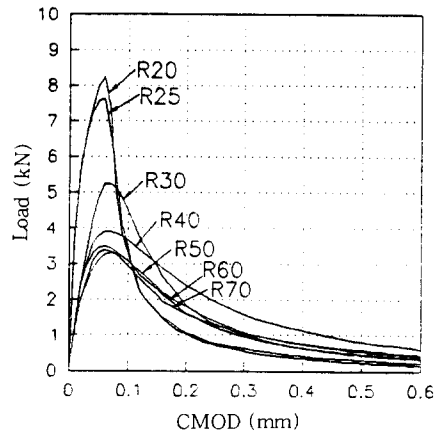


Fig. 3 Load-COD curve (river sand)

Table 4 Test results for the fracture energy (river sand)

| Specimen | f'_c (MPa) | f_{sp} (MPa) | E_c (GPa) | $F_{s,max}$ (kN) | G_f (N/m) | G_f' (N/m) | G_f'/G_f (%) |
|----------|-----------------|-------------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| R70 | 29.39 | 2.71 | 24.90 | 3.30 | 80.86 | 16.20 | 20.03 |
| R60 | 34.87 | 3.31 | 26.51 | 3.39 | 83.32 | 17.01 | 20.42 |
| R50 | 43.78 | 3.79 | 28.87 | 3.49 | 85.60 | 17.94 | 20.96 |
| R40 | 55.28 | 4.69 | 31.58 | 3.91 | 116.36 | 24.95 | 21.44 |
| R30 | 66.91 | 5.18 | 34.35 | 5.23 | 98.74 | 25.47 | 25.80 |
| R25 | 83.29 | 5.95 | 37.20 | 7.64 | 93.28 | 36.68 | 39.32 |
| R20 | 88.80 | 6.12 | 38.14 | 8.24 | 92.34 | 39.73 | 43.03 |

하:나에 따라 파괴에너지가 다르게 나타나기 때문이다. 즉 시험체의 크기가 작으면 파괴진행영역이 완전하게 형성되지 못하고 파괴가 일어나기 때문에 이 때의 파괴에너지는 완전한 파괴에너지보다 작은 값을 나타내게 된다. 일반적으로 저강도 콘크리트는 파괴진행영역이 고강도 콘크리트보다 더 크기 때문에 더 큰 시험체가 요구되므로, 같은 크기의 시험체로 실험한 경우 실제 파괴에너지 값은 저강도 콘크리트의 경우 실제값보다 작을 수 있는 확률이 높다.^[7]

따라서 이 연구의 실험결과를 통하여 추론하여 보았을 때, 사용한 시험체의 크기보다 더 큰 시험체를 사용하여 파괴에너지를 결정한다고 하더라도 저강도 콘크리트가 고강도 콘크리트보다 시험체 크기의 영향을 더 많이 받기 때문에 콘크리트의 강도수준과 파괴에너지의 관계는 비례하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 강모래 콘크리트의 파괴에너지는 콘크리트 강도에 따라 약 80~120N/m 범위에 있는 것으로 나타났다.

3.2 부순모래 콘크리트의 파괴에너지 실험결과 분석

부순모래 콘크리트의 실험에 의하여 얻어진 하중-균열개구변위 곡선은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있으며, 파괴에너지는 강도수준에 따라 Table 5에 나타난 바와 같다.

부순모래 콘크리트의 파괴에너지는 강모래 콘

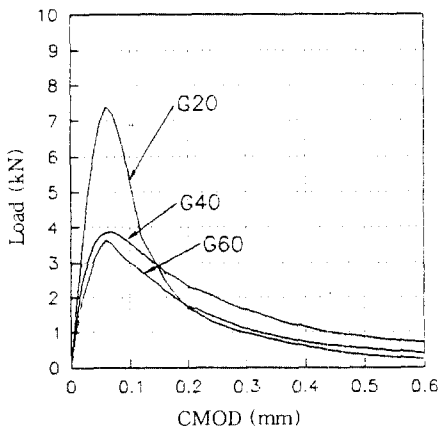


Fig. 4 Load-COD curve (crushed granite sand)

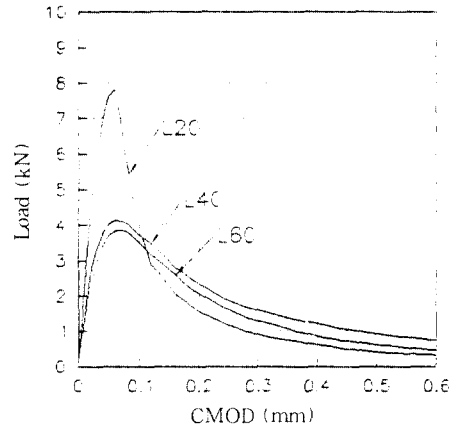


Fig. 5 Load-COD curve (crushed limestone sand)

크리트의 파괴에너지와 비교할 때 약간 크게 나타났으나, 그 경향은 유사하였다. 부순모래의 경우 미분말을 함유하고 있는데 미분말 함유량이 약 7% 이상으로 높으면 단위수량의 증대, 응결축진, 건조수축의 증대, 강도 저하 등 좋지 않은 영향을 초래하지만 이 연구에서 사용한 부순모래처럼 2~3%의 미분을 함유하고 있는 경우에는 오히려 이 미분말이 결합작용에 좋은 영향을 주어서 부순모래 콘크리트의 파괴에너지가 강모래 콘크리트의 파괴에너지보다 약간 크게 나타난 것으로 보인다.

Table 5 Test results for the fracture energy (crushed sand)

| Specimen | f'_c (MPa) | f_{sp} (MPa) | E_c (GPa) | $F_{s,max}$ (kN) | G_f (N/m) | G'_f (N/m) | G'_f/G_f (%) |
|----------|-----------------|-------------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| G60 | 32.57 | 3.24 | 28.79 | 3.64 | 88.29 | 17.26 | 19.55 |
| G40 | 45.85 | 4.78 | 33.40 | 3.87 | 116.14 | 23.70 | 20.41 |
| G20 | 85.68 | 6.60 | 39.57 | 7.40 | 113.06 | 42.26 | 37.38 |
| L60 | 31.27 | 3.48 | 29.94 | 3.85 | 100.15 | 18.32 | 18.29 |
| L40 | 47.41 | 4.61 | 33.72 | 4.14 | 120.45 | 26.78 | 22.23 |
| L20 | 82.80 | 6.05 | 40.57 | 7.84 | 104.09 | 40.20 | 38.62 |

3.3 특성길이

특성길이(characteristic length, l_{ch})란 콘크리트 재료 및 부재의 파괴 취성도를 나타내는 지표로서 파괴에너지 G_f , 인장강도 f_t , 탄성계수 E_c 의 함수로 주어진다. 특성길이는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 취성적인(brittle) 파괴를 일으키는 재

표일수록 작은 값이 된다.

$$l_{ch} = \frac{E_c G_i}{f_c^2} \quad (2)$$

특성길이는 순수한 재료 특성을 나타내는 상수이며, 균열 선단에 있는 파괴진행영역의 크기는 특성길이에 근사적으로 비례하고 균열이 성장할 때 파괴진행영역의 크기는 일반적으로 $0.3 \sim 0.5 l_{ch}$ 정도이다.⁽¹⁹⁾

Table 6은 실험에서 구한 강모래 콘크리트와 부순모래 콘크리트의 특성길이를 나타내고 있다. 비록 직접인장강도 대신에 쪼갬인장강도를 사용하여 계산하였지만, Table 6에서 보는 바와 같이 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 특성길이는 감소하였다.

Fig. 6은 크기에 따라 파괴에너지 실험을 한 다른 연구자의 실험결과와 이 연구의 실험결과를 토대로 특성길이를 나타낸 것이다. 두 실험결과는 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 사용한 골재의 성질, 양생조건 등의 차이로 인한 것으로 사료된다. Fig. 6(a)에서 보면 강모래 콘크리트나 부순모래 콘크리트는 강도에 따라 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, 강도가 증가함에 따라 특성길이는 비선형적으로 감소함을 알 수 있으며, 따라서 특성길이를 압축강도의 함수로 나타내면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{ch} = \alpha f_c^n \quad (\alpha=4.94, n=-0.87) \quad (3)$$

여기서, l_{ch} : 특성길이(m),

f_c : 압축강도(MPa)이다.

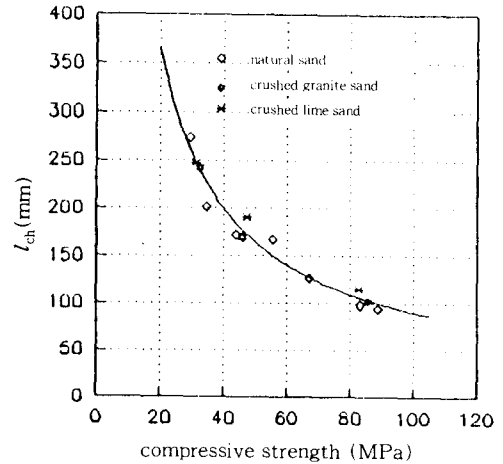
한편, Fig. 6(b)에서 특성길이의 경우 저강도 콘크리트는 시험체의 크기에 따라 값이 많이 분산되는 경향을 보이고 있다. 그러나 고강도 콘크리트에서는 시험체의 크기에 거의 영향을 받지 않고 일정한 값에 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 저강도 콘크리트의 경우, 시편 크기의 영향을 많이 받지만, 고강도 콘크리트의 경우에는, 시편 크기의 영향을 작게 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 정확한 파괴에너지를 결정하기 위하여 저강도 콘크리트에서의 시험체는 고강도 콘크리트에서의 시험체보다 더 커져야 할 것으로 판단된다.

Table 6 Characteristic length
(a) river sand

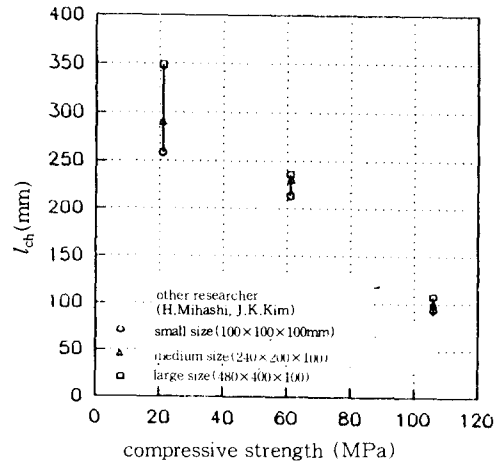
| | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_c' (MPa) | 29.39 | 34.87 | 43.78 | 55.28 | 66.91 | 83.29 | 88.80 |
| l_{ch} (mm) | 274.2 | 201.6 | 172.0 | 167.1 | 126.4 | 98.0 | 94.0 |

(b) crushed sand

| | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_c' (MPa) | 32.57 | 45.85 | 85.68 | 31.27 | 47.41 | 82.80 |
| l_{ch} (mm) | 242.1 | 169.8 | 102.7 | 247.6 | 191.1 | 115.4 |



(a)



(b)

Fig. 6 l_{ch} - f_c' relationship

3.4 콘크리트 강도와 파괴에너지의 관계

CEB-FIP에서는 콘크리트의 압축강도와 파괴 에너지의 관계를 다음과 같은 식으로 나타내고 있다.⁽¹⁰⁾

$$G_f = G_{fo}(f_{cm}/f_{cmo})^{0.7} \quad (4)$$

여기서, $f_{cmo}=10\text{MPa}$,

f_{cm} =압축강도(MPa), G_{fo} =골재크기에 의한 계수를 나타낸다.

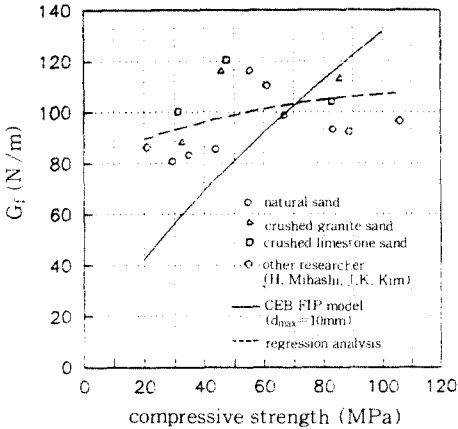


Fig. 7 G_f - f_c' relationship

CEB-FIP에서 제시한 예측식에서처럼 파괴 에너지는 최대골재 크기와 강도의 함수인데, 이 연구에서는 최대골재 크기는 일정하게 하고 콘크리트 강도를 변수로 하였다. 그래서 식(2)로부터 $G_f=l_{ch}f_t^2/E_c$ 로 나타낼 수 있고, l_{ch} , f_t , E_c 는 모두 f_c' 의 함수로 표현될 수 있으므로 결국 파괴 에너지는 f_c' 의 함수로 표현될 수 있고, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_f = \beta f_c'^m \quad (\beta=64.67, m=0.11) \quad (5)$$

여기서, G_f : 파괴에너지(N/m),

f_c' : 압축강도(MPa)이다.

또한 실험결과와 회귀분석결과는 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 CEB-FIP에서는 파괴에너지에 대한 콘크리트 압축강도의 효과를 너무 강하게 나타내고 있다.

이 연구의 실험결과와 비교할 때, CEB-FIP에

서 제시한 예측식은 압축강도가 65MPa 이하에서는 파괴에너지를 과소평가하고 있고, 그 이상의 범위에서는 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 또한, Table 4와 Table 5에서 최대골재크기가 일정한 경우 최대하중까지 흡수된 에너지(G_f')와 파괴에너지(G_f)의 비는 압축강도가 증가함에 따라 증가한다. Fig. 8은 G_f'/G_f 와 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 따라서 G_f'/G_f 는 다음과 같이 압축강도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{G_f'}{G_f} = a + b f_c'^r$$

$$(a=19.23, b=0.21 \times 10^{-6}, r=4.14) \quad (6)$$

여기서 G_f' 와 G_f 는 콘크리트의 강도뿐만 아니라 많은 변수에 영향을 받으므로 이들 변수에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 G_f' 는 파괴 이전의 변형에너지이며 G_f 는 파괴에너지이므로 G_f' 보다 G_f 가 파괴거동에 많은 영향을 받을 것이다. 특히 골재의 크기 등 배합에 따른 영향이 많을 것이나 이 연구에서는 골재의 크기를 같게 했으므로 Fig. 8에서와 같은 일정한 경향을 얻을 수 있었다고 판단된다.

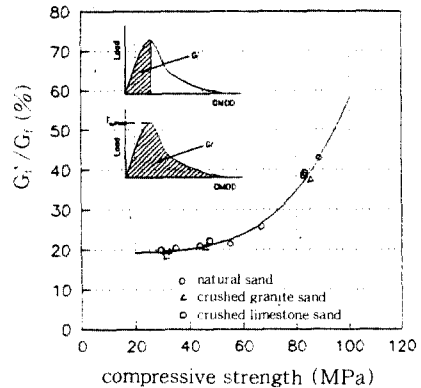


Fig. 8 G_f'/G_f - f_c' relationship

4. 결 론

췌기췌갸시험법으로 부순모래 콘크리트와 강모래 콘크리트의 강도수준에 따른 파괴에너지 및 특성길이에 관한 실험을 수행한 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

(1) 강모래 콘크리트의 경우 압축강도가 20~60MPa의 범위에서는 강도가 증가함에 따라 파괴에너지는 증가하였으나, 압축강도가 60MPa 이상일 경우 파괴에너지는 오히려 감소하는 경향을 보였다.

(2) 부순모래 콘크리트의 파괴에너지는 강모래 콘크리트의 파괴에너지와 비교할 때 약간 크게 나타났다으나 그 경향은 유사하게 나타났다.

(3) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 특성길이 l_{ch} 는 비선형적으로 감소하였으며, 압축강도의 함수식으로 제시되었다.

참 고 문 헌

1. 김진근, 이철성, 김운용, "석회암 부순모래의 실용화 연구", (주)쌍용양회, 1994. 10., pp.109
2. RILEM Draft recommendation (TC89-FMT), "Determination of the Fracture Parameters (KIC and CTODc) of Plain Concrete Using Three-Point Bend Tests", Materials and Structures, Vol. 18, No. 106, 1985, pp.285-290
3. Tschegg, E. K., Linsbauer, H. N., "Test Method for the Determination of Fracture Mechanics Properties", Patent Specification No A-233/86(01.02.1986), Austrian Patent Office
4. Bruhwiler, E., Wittmann, F. H., "The Wedge Splitting Test, A Method of Performing Stable Fracture Mechanics Tests", International Conference on Fracture And Damage of Concrete and Rock, July 1988, Vienna, Austria
5. Giaccio, G., Rocco, C., and Zerbino, R., "The Fracture Energy of High-Strength Concrete", Materials and Structure, Vol. 26, No. 155, Jan.-Feb. 1993, pp.381-386
6. Mihashi, H., Nomura, N., "How to Predict Size Effect in Concrete Structures", Size Effect in Concrete Structures, ed. by Mihashi, H., Okamura, H., Bazant, Z. P., E&FN SPON, 1994, pp.269-280
7. 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
8. Wang, X., 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
9. Hillerborg, A., "Analysis of One Single Crack Fracture Mechanics of Concrete" ed. by Wittmann, F. H., Elsevier, 1983, pp.223-249
10. Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990 Final Draft, Bulletin d'Information, 1991, pp.33-37

(접수일자 : 1995. 4. 28)