계면파괴인성과 콘크리트 역학적 성질의 상관관계

Corelationship between Interfacial Fracture Toughness and Mechanical Properties of Concrete

이 광 명* 안 기 석** 이 회 근*** 김 태 근***
Lee, Kwang-Myong Ahn, Ki-Seok Lee, Hoi-Keun Kim, Tae-Keun

ABSTRACT

The interfacial zone in concrete materials is extensive, geometrically complex, and constitutes inherently weak zones that limit the concrete performance. Mortar-aggregate interfaces play a major role in the fracture processing in concrete composites. Also, the interfacial bond considerably influence mechanical properties of concrete such as modulus of elasticity, strength, and fracture energy. Characterization of the interfacial properties is, therefore, essential to overcome the limitations associated with the interfaces. An objective of this paper is to investigate the corelationship between the fracture toughness of mortar-aggregate interface and the concrete properties such as strengths and elastic moduli. It is observed from the test results that interface fracture toughness is closely related with the compressive strength rather than other properties. At early ages, the development of both tensile strength and elastic modulus are much greater than that of both interface francture tounghness and compressive strength.

1. 서론

콘크리트를 구성하고 있는 모르타르와 골재의 계면역은 광범위하고 기하학적으로 복잡하며 본질적으로 취약한 부분으로서 콘크리트의 성능에 중요한 역할을 한다. 즉 모르타르-골재 계면의 부착은 콘크리트 복합체의 파괴양상과 강도, 탄성계수, 파괴에너지 등과 같은 콘크리트의 역학적 성질에 영향을 미친다[1]. 그러므로 재령의 증가에 따라 계면의 특성과 콘크리트의 역학적성질의 상관관계를 이해하는 것은 콘크리트의 성능향상을 위해 필수적이라 할 수 있다[2,3].

본 연구에서는 샌드위치 브라질리언 디스크 시편을 이용한 모르타르-계면의 파괴실험을 통해 얻은 계면파괴인성과 콘크리트의 역학적 성질, 즉 강도, 탄성계수와의 상관관계를 알아 보고자 한다.

2. 계면파괴인성

2.1 탄성계수 부조화 변수

콘크리트는 보통 모르타르 매트릭스와 골재로 이루어진 복합체로 간주된다. 이 때 모르타르 매트릭스와 골재의 탄성계수 차이가 중요하며, 탄성계수 부조화 변수 α와 β는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha=\frac{\overline{E_m}-\overline{E_a}}{\overline{E_m}+\overline{E_a}}\ ,\quad \beta=\frac{1}{2}\frac{\mu_m(1-2\nu_a)-\mu_a(1-2\nu_m)}{\mu_m(1-\nu_a)+\mu_a(1-\nu_m)} \tag{1}$$

여기서, $\overline{E}=E/(1-\nu^2)=2\mu/(1-\nu)$이고 E, μ와 ν은 각각 탄성계수, 전단계수 및 프아송비이며, 첨자 m과 a는 각각 모르타르 매트릭스와 골재를 나타낸다.

*정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수
**현대산업개발(주) 토목1팀 사원
***정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

2.2 샌드위치 브라질리안 디스크 시편

모르타르-골재 계면의 파괴인성은 샌드위치 브라질리안 디스크 시편을 사용하여 혼합 모우드 상태에서 구할 수 있다[4,5] 이 시편에서 에너지 해방률, G는 계면에서의 초기 균열길이(a), 하중(P), 시편반경(R)과 두께(t)로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$G = \frac{P^2 a}{E_m \pi R^2 t^2} (N_1^2 + N_2^2) \quad (2)$$

여기서, N_1과 N_2는 각각 상대적인 균열길이(a/R)와 경사각(θ)에 따라 모우드 I 과 모우드 II의 하중 재하조건과 관련된 무차원 계수이다. 균열선단에서의 위상각은 계면에 위치하고 있는 균열에서의 미끄럼 변위와 열린 변위의 상대적인 비로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{N_2}{N_1}\right) + \omega(\alpha, \beta) \quad (3)$$

여기서, ω는 탄성계수 부조화 변수인 α와 β에 의해서 결정되는 위상전이를 나타낸다. 샌드위치 브라질리언 디스크의 실험을 통해 균열하중(P_{cr})과 경사각(θ)을 측정함으로써 식 (2)에 주어진 G의 임계값인 계면파괴인성(Γ_i)을 위상각(ψ)의 함수로 얻을 수 있다.

3. 실험방법

3.1 실험시편 및 재료

3.1.1 계면파괴인성시편

계면파괴실험을 위해 반경(R)이 37.5 mm이고 두께(t)가 25.0 mm인 샌드위치 브라질리안 디스크 시편을 제작하였다. 시편에서의 상대적인 균열 크기(a/R)는 0.25이며 시편에 사용된 골재편은 두께(h)가 2.5 mm인 골재 표면이 거치른 화강암(Granite)을 사용하였다. 시편의 초기균열은 0.1 mm인 얇은 플라스틱을 골재편에 부착하여 타설 후 플라스틱을 제거하여 날카로운 초기균열을 만들었다.

3.1.2 재료 및 배합비

계면파괴인성 실험에서 사용한 골재와 같은 최대치수가 25.0 mm인 부순 화강암을 사용하여 원통형 공시체(Ø10㎝×20㎝)를 제작하였다. 고강도 콘크리트를 만들기 위하여 고성능 감수제와 실리카흄을 사용하였다. 시험체 타설 24시간 후 몰드에서 꺼내져 실험전까지 20±3℃의 수중에서 양생하였다. Table 1에 콘크리트의 역학적 성질 실험을 위한 콘크리트 배합비(C40G, C60G)를 나타내었으며, 이 배합비에서 굵은 골재를 제외한 것이 계면파괴인성시편 제작에 사용된 모르타르 배합비(M40, M60)이다.

Table 1. Mix proportion of two concrete mixtures (kg/m³)

Type	Cement	Silica Fume	Coarse Agg.	Fine Agg.	Water	HRWR/ (C+SF)(%)	S/a (%)	W/B (%)
C40G	400	0	988.3	702.2	200.0	0	42	0.50
C60G	475	25	1040.2	680.4	165.0	1.5	40	0.33

3.2 실험방법

3.2.1 계면파괴인성

각 재령별(3, 7, 14, 28일)로 브라질리언 디스크 시편의 재하 경사각(θ)을 10°로 하고 UTM 시험기로 하중조절하에서 압축시험하여 균열하중을 측정하였다. 이 때 위상각은 대략 43~44° 정도이었다. 하중재하 방법은 시편의 길이가 상대적으로 짧은 것을 제외하면 콘크리트의 할렬인장시험의 경우와 유사하다.

3.2.2 콘크리트의 역학적 성질

콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 정탄성계수(E_s) 실험은 각각 KS F 2405, KS F 2423, KS F 2438에 준하여 각 재령별로 실험을 수행하였으며, 동탄성계수(E_d) 실험은 충격 공진법을 이용하였다.

4. 실험결과 및 분석

각 재령에 따른 계면파괴인성과 역학적 성질의 평균값을 Table 2에 나타내었다. Fig. 1에 두 종류의 계면(M40/G, M60/G)에 대해 재령에 따른 파괴인성의 변화를 나타내었으며, Fig. 2에서 Fig. 5까지는 재령에 따른 계면파괴인성과 강도 및 탄성계수의 변화를, Fig. 6에는 계면파괴인성과 콘크리트의 역학적 성질의 상관관계를 알아보기 위해 계면파괴인성에 대하여 강도 및 탄성계수를 28일을 기준으로 하여 무차원으로 나타내었다. 화강암의 강도와 탄성계수는 각각 167.2 MPa, 50.3 GPa이었다.

4.1 계면파괴인성

재령에 따른 M40/G와 M60/G의 계면파괴인성 변화를 나타내는 Fig. 1을 보면, 계면파괴인성이 재령 초기에는 빠르게 증가하다가 재령이 경과함에 따라 그 증가율이 점차 감소함을 알 수 있다. 재령 1일과 3일에서, M60/G의 계면파괴인성이 M40/G의 계면파괴인성보다 약 3~4배 정도 크게 나타났는데, 이는 재령 초기에 고강도 모르타르-화강암 계면(M60/G)의 부착이 보통강도 모르타르-화강암 계면(M40/G)의 부착보다 훨씬 빨리 발현된 것을 의미한다. 이러한 현상은 고강도 모르타르 제조를 위하여 낮은 w/c비와 실리카흄을 사용하였기 때문으로 사료된다.

4.2 계면파괴인성과 강도

배합비와 재령에 따라 비례정도가 약간의 차이를 보이고는 있지만 계면파괴인성이 증가함에 따라 압축강도와 인장강도가 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 2로부터 28일의 압축강도를 기준으로 할 때 재령 초기에 M40/G 계면파괴인성의 발현이 C40G 압축강도보다 작게 나타난 반면, M60/G의 계면파괴인성은 C60G의 압축강도보다 발현정도가 큼을 알 수 있다. 즉 재령 초기에는 계면파괴인성의 발현정도와 압축강도의 발현정도와의 차이가 크게 나타났으나 재령이 경과함에 따라 그 차이는 점차 줄어들어 결국에는 계면파괴인성과 압축강도가 비슷한 경향으로 증가하였다. 이러한 실험결과를 보면 계면의 파괴인성이 압축강도의 발현과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 3으로부터 계면파괴인성의 발현정도와 인장강도의 발현정도가 다소 다른 경향을 나타냄을 알 수 있다. 재령 초기에는 인장강도가 빠르게 발현하지만 계면파괴인성은 그에 비해 늦게 발현되었다. 재령 3일에서 C40G와 C60G 경우 모두 계면파괴인성과 인장강도의 발현율 차이가 약 20~25% 정도로 나타났으며, 재령이 경과함에 따라 그 차이는 점차 줄어들고 있으나 압축강도의 경우에 비해서는 상당한 차이를 보였다.

4.3 계면파괴인성과 탄성계수

Fig. 4와 Fig. 5로부터 탄성계수는 재령 초기에 발현율이 큰 반면에 계면파괴인성은 정 · 동탄성계수에 비해 발현율이 작았으나, 재령이 경과함에 따라 그 차이가 점점 줄어듬을 알 수 있다. 특히 재령 초기에 동탄성계수의 발현정도가 정탄성계수보다 크게 나타났다. 재령에 따라 탄성계수는 인장강도와 비슷하게 증가하는 경향을 나타냈다.

4.4 계면파괴인성과 콘크리트의 역학적 성질의 상관관계

Fig. 6에서 보면 재령에 따라 정탄성계수와 압축강도는 계면파괴인성에 대하여 선형적으로 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 반면에 인장강도와 동탄성계수는 계면파괴인성에 대하여 재령이 증가할수록 약간 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 계면파괴인성이 큰 C60G시편의 파괴면은 골재가 쪼개지는 양상을 많이 나타냈으나, 계면파괴인성이 작은 C40G시편의 경우에는 골재와 모르타르의 부착이 떨어지는 파괴양상도 다수 관찰되었다. 이러한 파괴양상의 차이는 기존의 연구에서도 보고된 바 있으며 콘크리트의 강도가 증가할수록 취성적인 성질을 나타내는 주요인이라 알려져 있다. 따라서 계면파괴인성은 위에서 언급한 강도와 탄성계수뿐만 아니라 파괴양상과 관련이 있는 파괴에너지 및 취성계수 등과도 밀접한 상관관계를 보일 것으로 사료된다.

Table 2. Test Results

Age	C40G				M40/G	C60G				M60/G
	f_c' (MPa)	f_{sp}' (MPa)	E_s (GPa)	E_d (GPa)	Γ_i (J/m^2)	f_c' (MPa)	f_{sp}' (MPa)	E_s (GPa)	E_d (GPa)	Γ_i (J/m^2)
3	20.8	2.4	18.3	32.5	3.1	30.0	4.1	22.3	35.6	6.9
7	26.5	3.0	22.7	35.5	4.8	41.1	4.9	26.9	40.9	8.7
14	32.2	3.4	25.2	38.3	5.7	46.9	5.1	29.2	43.1	9.8
28	36.4	3.5	27.5	39.7	6.7	55.2	5.3	32.4	44.3	11.3

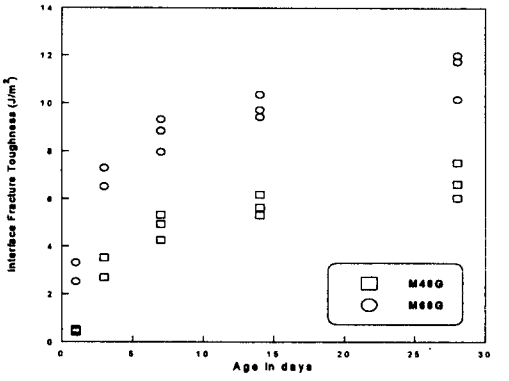

Fig. 1 Interface Fracture Toughness with Mortar Age

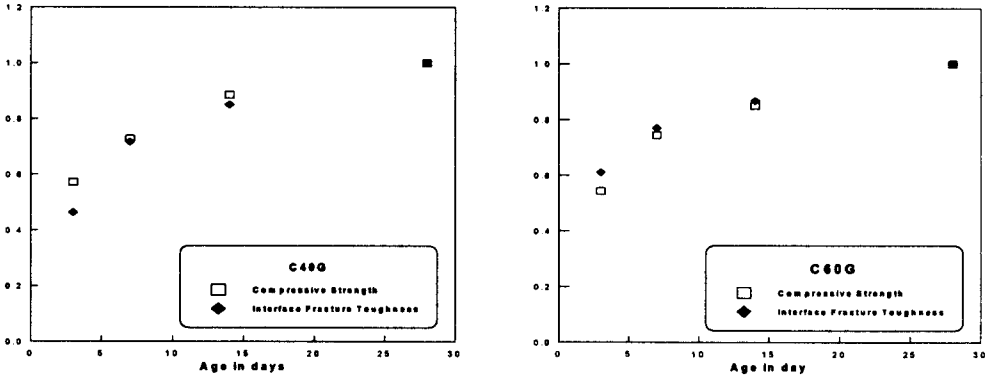

Fig. 2 Interface Fracture Toughness vs. Compressive Strength

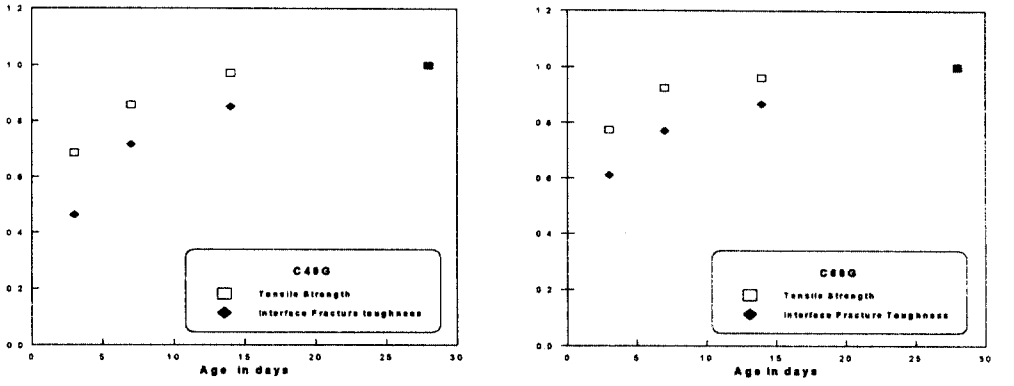

Fig. 3 Interface Fracture Toughness vs. Tensile Strength

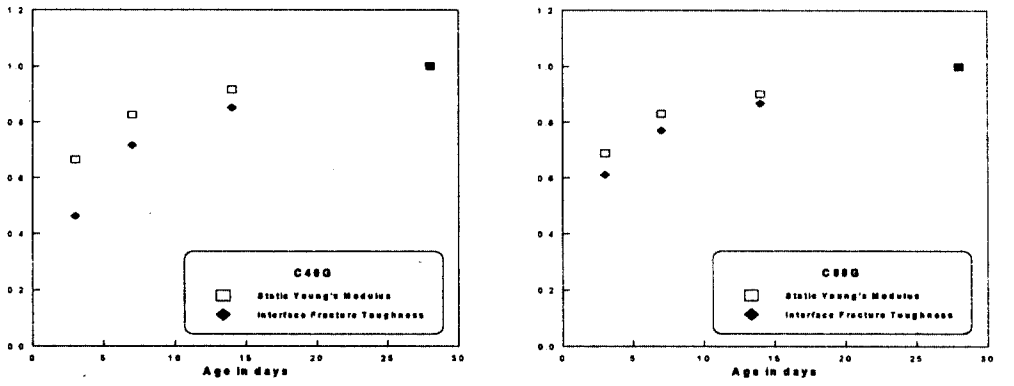

Fig. 4 Interface Fracture Toughness vs. Static Young's Modulus

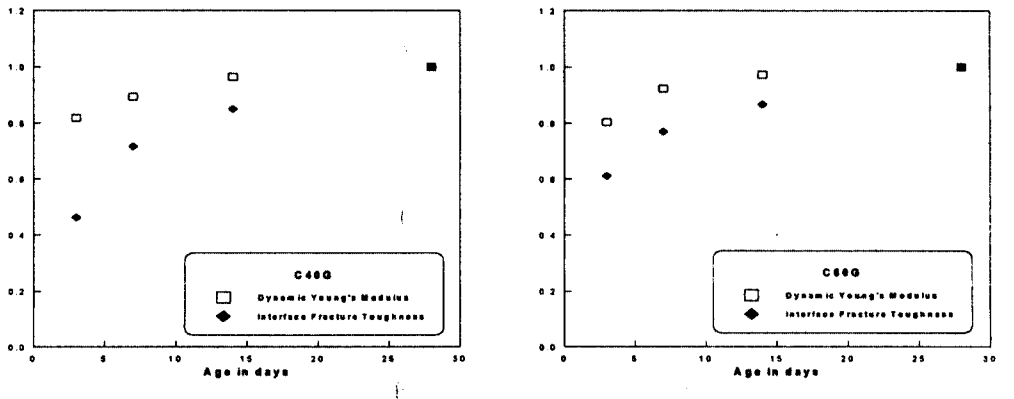

Fig. 5 Interface Fracture Toughness vs. Dynamic Young's Modulus

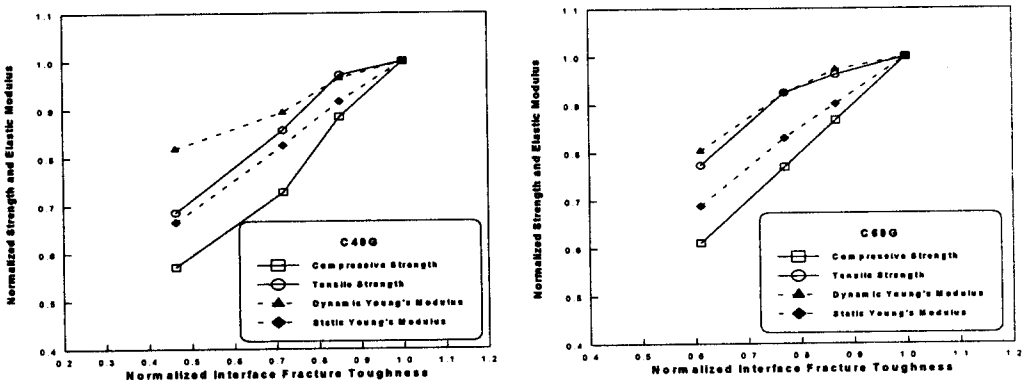

Fig. 6 Corelationship between Interfacial Fracture Toughness and Mechanical Properties of Concrete

5. 결론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 계면파괴인성은 재령의 경과와 더불어 증가하며, 초기 재령에서는 증가율이 크게 나타난 반면에 재령이 경과하면서 그 증가율은 점차 감소하였다. 고강도 모르타르-화강암 계면의 파괴인성이 저강도-모르타르 계면의 파괴인성 보다 상당히 큰 경향을 보였다. 특히 초기재령시에는 그 차이가 크게 나타났다.

(2) 콘크리트의 역학적 성질 중에서 압축강도는 인장강도, 탄성계수와 비교하여 초기재령에서의 발현 정도에서 차이를 보였다. 초기 재령시 인장강도의 발현율은 정탄성계수, 동탄성계수의 발현율과 비슷한 경향을 나타내었다.

(3) 재령에 따라 계면파괴인성은 압축강도와 가장 밀접한 상관관계를 나타내었으며, 인장강도와 탄성계수와도 어느 정도 상관성을 나타냈다. 따라서 계면의 특성은 알려진 바와 같이 콘크리트의 균열 발생 및 진전에 주된 영향을 미칠 뿐만 아니라 강도와 탄성계수 등의 콘크리트의 역학적성질과도 관련이 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 핵심연구과제 연구비 지원으로 이루진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Mehta, P. K., and Monteriro, P. J. M., *Concrete : Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
2. Neville, A. M., "Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 71-74.
3. Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Deatherage, J. H., "Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Reationship at Early Ages," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 3-10.
4. 이광명, "모르타르-골재 계면의 파괴인성에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제15권 제2호, 1995, pp. 357-365.
5. Lee, K. M., and Buyukozturk, O., "Fracture Toughness of Mortar-Aggregate Interface in High-Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, 1995, pp. 634-642.