



직접인장시험에 의한 원형 비부착면이 삽입된 신 · 구 콘크리트의 부착강도 및 파괴에너지 산정

Determination of Bond Strength and Fracture Energy of a Bi-material Cylinder with Penny-shaped Interface Crack by Pull-off Test

양 성 철* · 김 진 철** · 박 종 원**
Yang, Sung Chul · Kim, Jin Chul · Park, Jong Won

Abstract

To determine the pure bond strength between substrate and its overlaid concrete material, a direct pull-off test method was introduced by using a bi-material cylinder with which a penny-shaped crack was mounted at its interface. First, to evaluate the stress magnification or concentration at the interface, the energy release rates of a penny-shaped interface crack in remote tension loading on a bi-material cylinder were determined in terms of different modulus ratios and unbonded area ratios (crack ratios) using a commercial finite element program. Then the energy release rates were calibrated as non-dimensional values in consideration of structural dimensions and applied forces. And to evaluate whether this new pull-off test method gives sound test results, three different sizes of unbonded area ratios were incorporated along their interface in bi-material cylinders (sulphur polymer concrete + old concrete). Test results showed that all specimens were broken off at their interfaces as intended. Also the FEM analyses and test results indicated that a bi-material specimen with unbonded area ratio of 0.4~0.6 is suitable for best accurate testing.

Keywords: pull-off test, penny-shaped crack, overlay, fracture mechanics

요 지

신 · 구 콘크리트의 부착강도 시험시 두 재료의 계면에서 파괴가 유도되어 순수한 부착강도를 측정할 수 있도록 계면에 원형의 비부착면을 삽입하여 직접인장시험에 의해 부착강도를 측정하는 실험방법을 제시하였다. 먼저, 새로 제안한 실험방법에 의해 계면에서 응력이 집중되는 정도를 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하여 두 재료의 탄성계수 비 및 비부착면의 면적 (균열률)에 따른 계면에서의 파괴에너지를 산정하였으며, 부재의 크기 및 하중에 대한 보정을 감안하여 무차원함수로 환산하였다. 그리고 본 연구에서 제시된 부착강도 시험방법의 신뢰성을 입증하기 위해, 3가지 크기의 원형 비부착면 (균열률 0.2, 0.4, 0.6)이 삽입된 신 · 구 콘크리트 복합시편 (유황 폴리머 콘크리트 + 보통 콘크리트)을 제작하여 시험하였다. 시험 결과 모든 시편이 의도된 계면에서 파괴되어 순수한 부착강도를 측정할 수 있었으며, FEM 분석 결과와 시험 결과로부터 0.4~0.6의 비부착면 면적 비를 가진 시편이 가장 정확한 시험을 위한 것으로 나타났다.

* 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 조교수
** 정회원 · 도로교통기술원 재료연구그룹 책임연구원
*** 홍익대학교 건축공학과 부교수



.....

리트)을 사용하여 부착강도를 측정하였고 앞서 전개된 무차원함수로부터 계면 파괴에너지를 역산하였다. 시험결과, 모든 시편이 계면에서 파괴가 유도되었다. 또한 실험 데이터 및 해석결과를 분석하여 균열률이 0.4~0.6인 경우에 부착강도의 오차가 가장 적게 발생될 수 있음을 파악하였다.

핵심용어: 부착강도시험, 원형 균열, 덧씌우기, 파괴역학

1. 서론

현재 구조물이 많이 노후화됨에 따라 보수 및 보강하여 사용하는 방법에 대한 관심이 건설 전반에 걸쳐 많이 대두되고 있는 실정이다. 그러나 현재 국내에서는 유지보수 단계에서 새로운 공법을 제시할 때, 공법 적용에 대한 기준 및 시스템이 체계적으로 갖춰있지 않은 상태이다. 그 결과, 새로운 공법을 개발한 회사나 기관에서 제시하는 시험결과들로 그 공법을 판단하게 되어 공법 적용시 문제점이 많이 발생하고 있는 실정이다. 특히 콘크리트포장의 덧씌우기 공법 적용시, 국가에서 지정된 평가 기준이 정립되어 있지 않은 관계로, 시험항목에 대한 기준이 모호하고 또 기준 값도 정량적으로 비교를 할 수 없는 상태이다.

일반적으로 콘크리트포장의 덧씌우기 또는 패칭 등의 보수공법에 대한 실내 평가시험으로는 크게 두 부분으로서, 역학적(mechanical properties) 시험과 내구성(durability) 시험으로 나뉜다. 그러나 국내에서는 대부분 실내에서 역학적 시험만 수행하여 얻은 결과를 바로 현장에 적용하다보니 보수재료가 오래 견디지 못하는 실정이다. 더욱이 역학적 시험 중에서도 초기 재령의 압축강도와 휨강도에만 의존하였고, 보수재료 및 공법을 구분해서 적용해야하는 데도 일률적으로 적용하다보니 좋은 재료 및 공법이 잘못 적용되어 그 후로는 현장기술자들이 회피하는 결과를 초래하였다.

덧씌우기 및 패칭 등에 사용된 보수재료 및 공법에 대한 올바른 재료물성평가를 위해서는 기본적으로 두 재료 사이의 부착강도시험이 수행되어야 한다. 그러나 기존의 부착강도시험은 시험방법에 따른 편심

과 불균등한 2차 응력으로 인해 시험오차가 상당히 큰 것으로 알려져 있다. 또한 부착강도 시험결과 파괴되는 면이 신·구 콘크리트 계면에서 파괴가 되는 경우와 구 콘크리트를 일부 포함해서 파괴되는 경우 등 일관성이 없는 결과가 도출되고 있다. 따라서 본 연구에서는 신·구 콘크리트 계면에서 순수한 부착 파괴가 유도되도록 계면에 비부착면 또는 균열면을 만들어 시험하는 방법의 개발에 초점을 두었다.

본 연구에서는 균열면을 포함하고 있는 두 재료사이의 부착강도시험시 계면에서의 응력집중으로 인한 파괴를 유도하기 위해서 계면파괴역학의 원리를 도입하였다. 이상복합체 (bi-materials)의 계면에 내재하고 있는 균열에 대한 연구의 기원은 Williams로 거슬러 올라간다(1957). 균열선단 주변에서 응력 σ 는 실린더 좌표상의 균열선단으로부터의 거리 r , $\lambda = n - 1/2 + i\epsilon$, $n =$ 정수, $\epsilon =$ 두재료의 특성화계수를 사용하여 $\sigma \sim r^{-\lambda}$ 로 표현되며 λ 의 특성에 의해 압축응력과 인장응력이 변화되면서 존재함을 증명하였다. 또한 Lakshiminarayana(1992)등은 MCCI 방법(modified crack closure integral method)을 사용하여 이상복합체의 파괴에너지 또는 응력확대계수를 구하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 먼저, 새로 제안한 부착강도 실험 방법에 의해 계면에서 응력집중이 되는 정도를 파악하기 위해 상업용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(1994)를 사용하여 두 재료의 탄성계수비 및 균열률의 변화에 따른 모드 I과 모드 II 계면 파괴에너지인 G_I 및 G_{II} 를 산정하였다. 그리고 제안된 부착강도 실험방법에 따라서 유허 폴리머 콘크리트를 사용하여 덧씌우기한 시험체에 대해 인발시험

에 의한 부착강도실험을 수행하였다. 또한 부착강도 실험결과와 해석결과를 바탕으로 계면 파괴에너지를 역산하여 본 연구에서 제안한 실험결과에 대해 분석하였다.

2. 부착강도 시험방법

국내에서는 신·구 콘크리트의 부착강도 측정 시험방법에 직접인장시험, 경사전단시험 등 일부 사용되고 있으나, 명확한 평가 기준(값) 등 시험 규정이 확립되어 있지 않다. 그 중 현장에서의 신·구 콘크리트의 부착강도 시험방법으로 가장 많이 사용되고 있는 것이 현장용 인발시험기이다. 그러나 인발시험에서 가장 문제가 되는 부분이 편심부분과 그림 및 매입 볼트에 발생되는 불균등한 2차 응력이다.(홍건호, 2003; Zheng et al., 2001) 이를 해결하기 위한 노력이 콘크리트의 인장시험방법을 연구하는 연구진들에 의해 개진되었다.

불균등한 2차 응력을 제거하기 위한 노력의 일환으로 강판을 콘크리트 시편의 단부에 에폭시를 사용하여 부착함으로써, 인가된 순수한 인장력이 콘크리트 시편에 전달되도록 시험방법을 고안하게 되었다. 그러나 이 경우에도 그림 1(a)에서와 같이 콘크리트 시편의 단부에서는 중앙부분에 응력이 집중되게 된

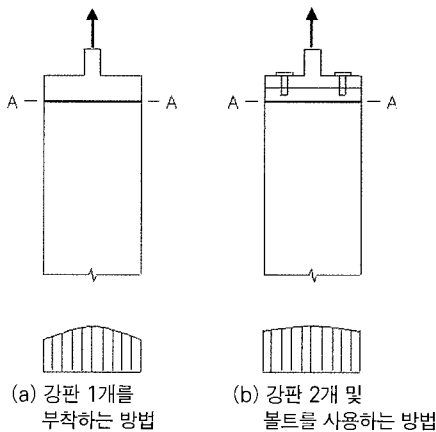


그림 1. 콘크리트 시편 단부의 응력분포

다. 이를 보완하기 위해서 1992년 U.S. Bureau of Reclamation에서는 그림 1(b)와 같이 2개의 강판으로 연결되면서 안쪽의 강판은 콘크리트 시편 단부에 에폭시로 붙이고 바깥쪽의 강판은 볼트를 사용하여 안쪽 강판에 연결하는 방법을 제안하고 있다. 이 경우에는 인장응력이 강판과 볼트를 통해 보다 균등하게 콘크리트 시편에 전달되도록 역할을 하고 있다.(홍건호, 2003; Zheng et al., 2001)

한편, 구 콘크리트에 새로운 보수재료로 덧씌운 바닥판 슬래브의 부착강도 측정시, 기존의 방법은 일반적으로 코어채취기(지름 75mm 또는 100mm)를 사용하여 상부로부터 구 콘크리트 슬래브 2-3mm까지만 절단한 후, 강판에 에폭시를 사용하여 접착을 시켜 5~24 시간 정도 양생 후에 부착강도시험을 수행하고 있는 실정이다. 이와 관련된 연구로는 김성환 등(2002)에 의해 신·구 콘크리트 부착 시험체의 형상과 경계조건에 따른 응력집중의 영향이 미소하게 작용하는 직접인장시험 기준에 대한 연구가 국내에서 진행되었다. 이 경우 코어 깊이와 덧씌우기 두께, 탄성계수비, 부착강판두께, 절삭면에서 모서리 경계까지의 거리 등에 대해 유한요소해석을 통하여, 적절한

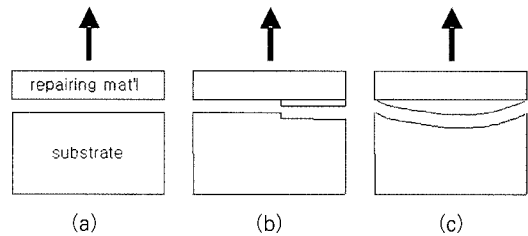


그림 2. 일반적인 부착강도 시험결과

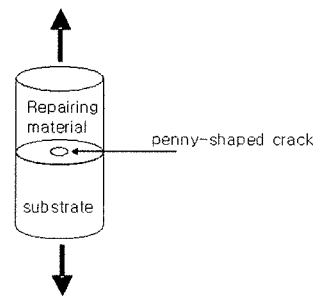


그림 3. 본 연구에서 제시하는 부착강도 시험방법



절삭 깊이와 절삭직경을 제시하였다.

그러나, 기존의 직접인장시험에 의한 부착강도 시험결과가 그림 2에서와 같이 3가지 형태로 나타나기 때문에 부착강도를 정확하게 측정하지 못하고 있다. 따라서 부착강도 시험시 이질재의 계면에서 파괴가 유도되기 위해서는 그림 3과 같이 신·구 콘크리트의 계면 사이에 원형의 비부착면을 만들어서 그 곳에 응력이 집중되도록 유도하면 된다.

3. 파괴에너지 산정방법

원형의 균열이 이상복합 실린더 계면에 존재하는 경우 수치해석에 의해 균열선단에서의 에너지 해방률을 구하는 방법을 이전 논문(양성철 등, 2002)에 발표하였으며, 여기에 간략히 정리하였다. 시편이 무한판인 경우에는 Kassir와 Sih에 의해 정해가 전개되었으며(1975), 제시된 결과를 이용하면 탄성계수비에 따라 모드 I 및 모드 II 별로 유한판의 경우와 약간 달라지나, 탄성계수비가 1~3의 경우에는 그 차이가 작게 나타난다.(양성철 등, 2002)

3.1 유한요소모델링

인장 시험에 대해 본 연구에서는 상업용 FEM 패키지인 ABAQUS(1994)를 사용하였다. 본 모델에서는 실린더 모양의 이상복합체를 평면변형 8절점으로 이루어진 축대칭 요소를 이용하였으며(그림 4), 모델이 대칭임을 고려하여 시편의 우측 반만을 고려하였다. 그러나 본 모델에서는 계면 두께의 영향은 고려하지 않았다. 균열선단의 응력에 대한 특이점을 확보하기 위해 그림 5와 같이 사변형 2차 요소의 나란한 두변이 하나로 합친 후 중간 절점을 균열선단으로 1/4 길이만큼 이동한 특이 요소를 사용하여 균열 주위의 세부 요소에 대해 방사형의 요소망을 구성하였다. 이 경우 특이 요소망과 주변의 기타 요소망을 각기 만든 후 각 요소망의 경계상의 절점에서 응력과

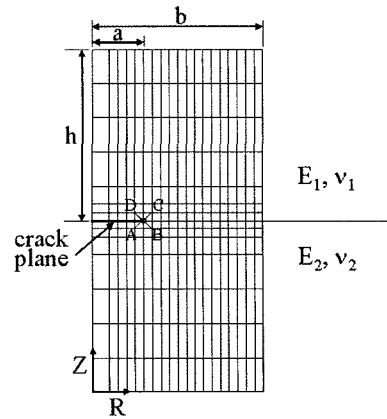


그림 4. 균열해석을 위한 유한 요소망

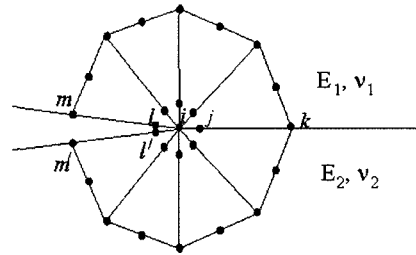
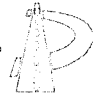


그림 5. 균열선단부의 세부 유한 요소망

변위가 같도록 구속해주는 MPC(multi-point constraint) 기능을 사용하였다. 해석 결과가 요소의 크기나 요소개수에 의해 영향을 받지 않도록 특이 요소의 크기 Δa 는 $0.0025a$ (여기서 a =전체 균열길이의 반) 이하가 되도록 하여 수렴된 결과를 도출하였다.(Lakshminarayana et al., 1992)

한쪽 재료의 탄성계수를 10 GPa로 고정하고 탄성계수비에 따라 다른 재료의 탄성계수를 증가시켰다. 수치해석시 균열률 a/b 는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8로 사용하였고(여기서 b 는 시편의 반지름), 두재료의 강성비 E_1/E_2 는 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50으로 변화시켰다.

균열길이가 a 에서 $a+\Delta a$ 로 미세하게 증가될 경우, 원형의 균열이 있는 이상복합체의 모드 I 및 모드 II에 대한 파괴에너지는 각각 다음과 같이 정리될 수 있다.(Lakshminarayana et al., 1992)



$$G_I = \frac{1}{2A} [f_{yi} \{t_{11}(v_m - v_{m'}) + t_{12}(v_l - v_{l'})\} + f_{yj} \{t_{21}(v_m - v_{m'}) + t_{22}(u_l - u_{l'})\}]$$

$$G_{II} = \frac{1}{2A} [f_{xi} \{t_{11}(u_m - u_{m'}) + t_{12}(u_l - u_{l'})\} + f_{yj} \{t_{21}(u_m - u_{m'}) + t_{22}(u_l - u_{l'})\}]$$

여기서,

$$t_{11} = 6 - \frac{3\pi}{2}, \quad t_{12} = 6\pi - 20$$

$$t_{21} = \frac{1}{2}, \quad t_{22} = 1$$

$$f_{yi} = \frac{F_{yi}}{2\pi R_i}, \quad f_{yj} = \frac{F_{yj}}{2\pi R_j}$$

$$f_{xi} = \frac{F_{xi}}{2\pi R_i}, \quad f_{xj} = \frac{F_{xj}}{2\pi R_j}$$

3.2 수치해석결과

응력확대계수와 공칭응력 및 균열길이와는 $K \propto p\sqrt{\pi a}$ 의 관계가 성립되고 $K = \sqrt{GE^*}$ 이기에 해석결과를 무차원함수인 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 로 표현하였다. 여기서, $p = P/(\pi b^2)$ 이며 E^* 는 두재료 강성의 평균값으로서 푸와송비 ν 를 고려하여 다음과 같이 병렬식의 형태로 표현된다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left(\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right)$$

균열률을 0.1에서 0.8까지 변화시키고 두재료의 탄성비를 1에서 50까지 변화시켜 해석된 계면 파괴에너지 결과를 MCCI방법에 의해 모드 I의 무차원함수인 $\sqrt{G_I E^*}/p\sqrt{\pi a}$ 및 모드 II의 무차원함수 $\sqrt{G_{II} E^*}/p\sqrt{\pi a}$ 로 표현하여 정리하였다. 한편, $G = G_I + G_{II}$ 이므로 혼합 모드의 계면 파괴에너지 결과는 무차원 함수 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 로 표현할 수 있다.

그림 6에는 무차원함수 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 를 균열률 a/b 의 함수로 도식화하였는데 균열률이 증가하면서 모든 경우의 E_1/E_2 에 대해 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 값이 기하급수적으로 증가함을 보여준다. 그림 7에서는 같은 결과를 E_1/E_2 에 대해 도식화하였는데 탄성비가 증

가함에 따라 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 의 값이 일정하게 감소함을 보여준다.

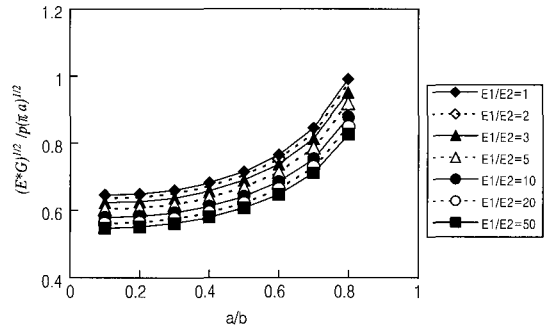


그림 6. 탄성계수에 따른 균열률-무차원함수 관계

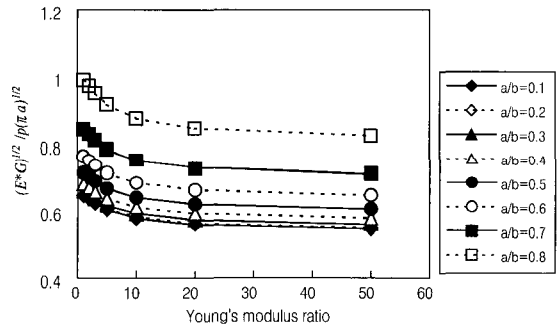


그림 7. 균열률에 따른 탄성계수비-무차원함수 관계

그림 8에는 모드 I의 무차원함수 $\sqrt{GE^*}/p\sqrt{\pi a}$ 로 도식화하였는데, $E_1/E_2 = 1$ 의 경우 균열률 a/b 가 증가하면서 무차원함수의 값이 증가함을 보여준다. 그림 8의 $E_1/E_2 = 1, a/b = 0$ 인 경우는 Kassier와 Sih(1975)로부터 구한 정해를 나타낸다. 한편, E_1/E_2 가 3 이상부터는 a/b 가 0.1에서 0.2로 증가되면서 그 값이 약간 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여준다. 그림 9에는 모드 II의 무차원함수 $\sqrt{G_{II} E^*}/p\sqrt{\pi a}$ 로 도식화하였는데, E_1/E_2 의 비가 증가되면서 a/b 의 변화에 따른 $\sqrt{G_{II} E^*}/p\sqrt{\pi a}$ 의 값이 급격하게 증가하는 경향을 보여준다.

위의 수치해석 결과로부터 본 연구에서 제시한 부착강도 실험방법에 응용할 수 있는 사항은 다음과 같다. 첫째, 두 재료의 탄성계수비에 상관없이 신·구

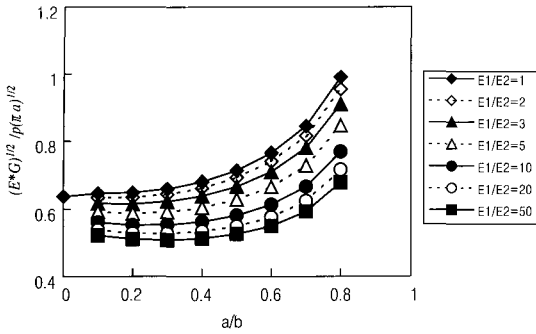


그림 8. 탄성계수비에 따른 균열률-모드 I 무차원 함수 관계

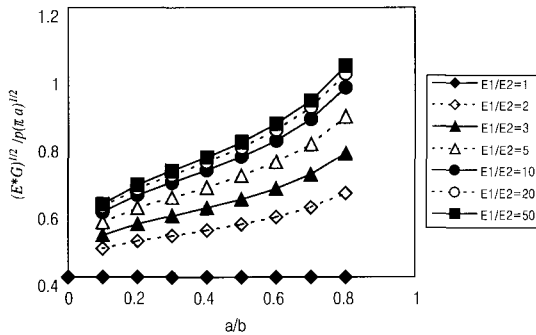


그림 9. 탄성계수비에 따른 균열률-모드 II 무차원 함수 관계

콘크리트 계면에서 응력집중이 유도되어 순수한 부착강도를 측정할 수 있다. 둘째, 두 재료의 탄성계수비가 차이가 나는 경우에는 모드 II에 의한 응력집중이 증가되면서 모드 I에 의한 응력집중이 상대적으로 작게 나타나기에, 보다 확실한 응력집중을 위해서는 비부착면 (또는 균열률)을 다소 크게 할 필요가 있다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험계획

본 연구에서 제시한 시험방법에 따른 부착강도 및 균열률에 따른 계면 파괴에너지의 영향을 알아보기 위하여 구 콘크리트 위에 보수재료로 덧씌운 시험체를 준비하였다. 덧씌우기 층 사이에서 부착파괴가 발생되도록 덧씌운 층 사이에 비부착면을 부착하여 직접인장시험을 실시하였다.

4.2 배합설계

덧씌우기 재료로서 유황 폴리머 콘크리트(sulphur polymer concrete, SPC)의 적용성을 검토하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 구 콘크리트와 유황 폴리머 콘크리트의 배합을 정리한 것이다.

유황 폴리머 콘크리트는 132~145℃로 예열된 믹서에 재료를 투입하여 혼합하였으며, 공시체는 콘크리트와 동일하게 붓다짐으로 제작하였다. 유황 폴리머 콘크리트 배합은 표 1과 같이 각 재료의 중량비로 하였으며, 충전재로서 플라이애시를 6% 사용하였다.

4.3 시험체 제작 및 실험방법

직접인장에 의한 유황 폴리머 콘크리트와 보통 콘크리트의 부착강도 특성 실험을 수행하기 위해서 구 콘크리트 시편으로 사용할 $\phi 150 \times 150$ mm의 보통 콘크리트 공시체를 제작하여 수중에서 양생을 하였

표 1. 콘크리트 배합

종 류	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	단 위 중 량(kg/m ³)				
					W	C/SPC	S	G	플라이애쉬
구콘크리트	4	4.5±1.5	45.0	38.0	151	336	678	1162	-
유황 폴리머 콘크리트	8	-	-	-	-	415 (18%)*	714 (31%)	1,036 (45%)	138 (6%)

* 배합비

다. 28일 양생 후에 부착면이 될 구 콘크리트 시편의 표면을 연마기 및 슛돌을 이용하여 표면 거칠기 처리를 하였다. 이후 비부착면으로 사용할 두께 1mm, 직경 30, 60, 90mm 함석판을 구콘크리트 시편의 중심부에 얹고 유황폴리머 콘크리트를 넣어 각각 5개의 덧씌우기 시편을 제작하였다. 이때 원형 함석판은 아래면에 그리스를 발라 고정하였다.

유황 폴리머 콘크리트로 덧씌우기 시편을 제작하여 8일 후에 에폭시를 이용하여 부착강판을 시편에 부착하였고, 익일에 그림 1(b)에서 제시한 2개의 강판 및 볼트를 사용한 직접인발시험기구가 장착된 만능시험기를 사용하여 인장시험을 실시하였다 (그림 10 참조).

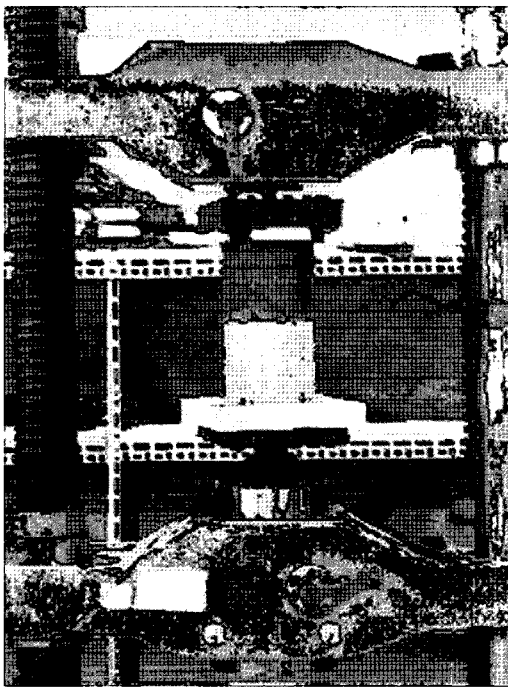


그림 10. 부착강도 시험사진

아울러, 추가적으로 보통 콘크리트와 유황 폴리머 콘크리트 시편에 대해 각각 5개의 150×300mm의 원주형 공시체를 만들었다. 그 중 3개는 탄성계수 및 압축강도를 측정하였고, 다른 2개의 시편은 보수재료의 판단기준 중에 주요한 시험요소로 생각되어지

는 열팽창계수를 측정하였다. 열팽창계수 시험은 미국 AASHTO(2000)에서 채택하여 사용하고 있는 LVDT를 이용하는 방식을 채택하여 측정했다.(김진철 등, 2003)

4.4 실험 결과 및 고찰

4.4.1 기본적인 재료특성

보통 콘크리트와 유황 폴리머 콘크리트 시편의 압축강도, 탄성계수 및 열팽창계수 시험을 수행하여 측정된 결과를 표 2에 정리하였다. 특히하게도 유황 폴리머 콘크리트의 압축강도는 보통 콘크리트와 유사했지만, 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수에 비해 0.48배 작게 나타났다. 유황 폴리머 콘크리트의 열팽창계수는 보통 콘크리트에 비해 약 1.3배 크게 측정되었다.

표 2. 콘크리트 시편의 탄성계수, 압축강도, 열팽창계수 값

시편 종류	탄성계수 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	압축강도 (kgf/cm ²)	열팽창계수 (μ / °C)
구콘크리트 ¹⁾	3.19	485	7.8~9.6 ³⁾
유황 폴리머 콘크리트 ²⁾	1.52	444	13.3

- 1) 약 28일에 시험
- 2) 9일에 시험
- 3) 참고문헌 2 참조

4.4.2 부착강도

균열률(a/b)에 따른 유황 폴리머 콘크리트와 구콘크리트의 부착강도 시험결과는 표 3과 같다. 실험 결과 모든 시편에 대해서 그림 2(a)와 같이 계면파괴가 발생되었다. 부착강도는 비부착면의 균열면적을 제외한 나머지 부착면적에 대해 계산하였다. 그림 11에는 균열률 $a/b=0.2, 0.4, 0.6$ 에 따른 부착강도를 나타내었다. 각각의 균열률에 대한 부착강도의 평균값은 균열률이 0.4와 0.6일 경우에 유사하였다. 균열률이 0.2인 경우에는 부착강도 평균값이 SPC-1인 경우를 제외하고는 전체적인 평균값 이하로 나타났다. 이러한 결과는 작은 함석판의 경우 작업의 어

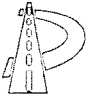


표 3. 유황 폴리머 콘크리트와 구콘크리트의 부착강도 및 계면 파괴에너지

시편	a/b	부착강도 (kgf/cm ²)		G_I (kgf/m)		G_{II} (kgf/m)	
SPC-1	0.2	26.88	17.4	5.53	2.5	0.098	0.04
SPC-2		18.22		2.54		0.045	
SPC-3		15.21		1.77		0.031	
SPC-4		13.50		1.40		0.025	
SPC-5		12.97		1.29		0.021	
SPC-6	0.4	19.67	23.0	4.96	6.9	0.137	0.19
SPC-7		26.54		9.03		0.249	
SPC-8		23.24		6.92		0.191	
SPC-9		23.17		6.88		0.190	
SPC-10		22.50		6.49		0.179	
SPC-11	0.6	24.85	22.5	8.60	7.4	0.313	0.27
SPC-12		27.76		10.74		0.391	
SPC-13		26.26		9.61		0.350	
SPC-14		15.47		3.34		0.121	
SPC-15		18.30		4.67		0.170	

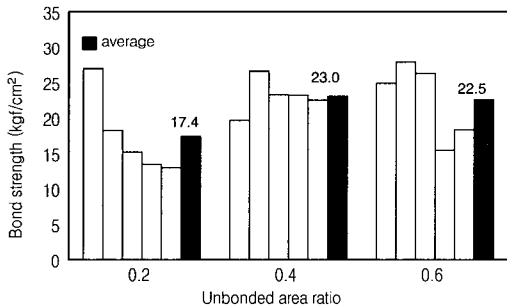


그림 11. 유황 폴리머 콘크리트-구콘크리트의 부착강도 시험결과



(a) 그리스가 부착면으로 스며드는 시편



(b) 온전한 시편

그림 12. 파괴결과

러움으로 인하여 그림 12(a)의 사진과 같이 합석판의 고정을 위해 사용한 아래면의 그리스가 부착면으로 스며들어 부착면적이 감소한 결과로 사료된다. 그림 12(b)의 경우는 온전하게 제작된 SPC-1 시편의 부착실험 후의 부착면을 보여준다.

4.4.3 계면 파괴에너지

각각의 균열률 $a/b = 0.2, 0.4, 0.6$ 인 경우에 대해 그림 8, 9에서 구한 무차원함수인 $\sqrt{G_I E^* / p \sqrt{\pi a}}$ 및 $\sqrt{G_{II} E^* / p \sqrt{\pi a}}$ 를 역계산한 후, 계면 파괴에너지, G_{IC} , G_{IIC} 를 구하여 표 3, 그림 13 및 14에 나타내었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 균열률에 따른 계면에서의 모드 I 파괴에너지 실험결과가 분산되어 있지만 균열률이 0.2에서 0.4~0.6으로 증가함에 따라 G_{IC} 가 증가됨을 보여주고 있다. 파괴에너지는 부착강도의 제곱에 비례하며, 값이 크게 분산된 주된 원인은 부착강도의 차이 때문이다. 모드 II 계면 파괴에너지 G_{IIC} 는 모드 I 계면 파괴에너지 G_{IC} 에 비해 약 1/20배 정도로 미미하지만 두 재료의 탄성계수비가 1이 아닌 경우에 G_{IIC} 의 값이 존재하여 파괴 메커니즘이 복잡되어 있음을 보여준다.

만약, 균열률의 크기에 관계없이 부착강도가 같다면 (부착강도는 부착면적에 대한 파괴하중의 비), 그림 8의 해석 데이터를 바탕으로 계산된 값을 균열률 0.1인 경우의 상대적인 비율로서 표현하여 그림 15와 같이 표현할 수 있다. 탄성계수비의 비율에 따라 차이가 나지만 전체적인 경향은 균열률이 0.1에서

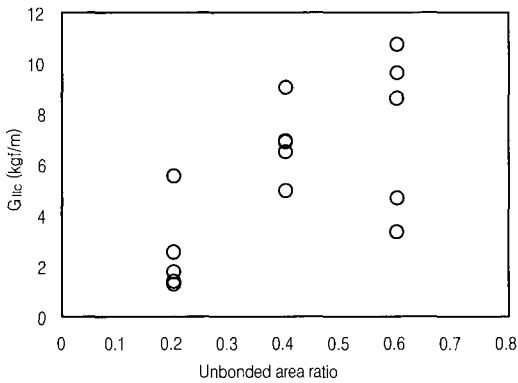
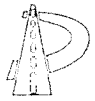


그림 13. 모드 I 계면 파괴에너지 시험결과

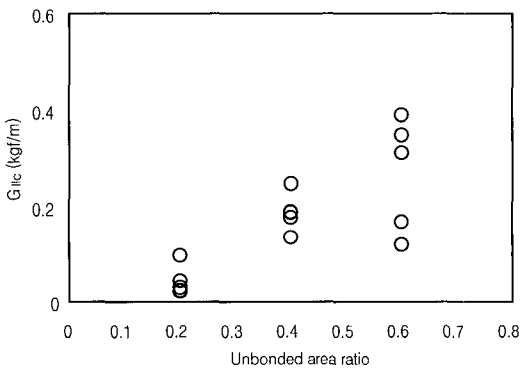


그림 14. 모드 II 계면 파괴에너지 시험결과

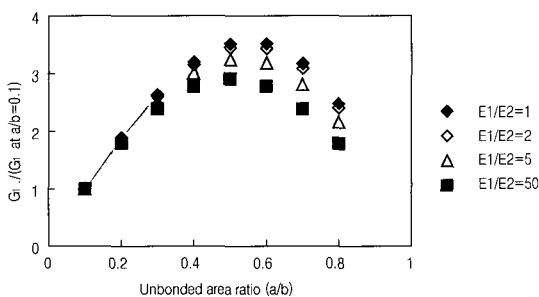


그림 15. 균열률 0.1 대비 균열률에 따른 G_c값의 상대적인 변화

0.5까지 증가하면서 상대적인 값이 증가하다가 이후 감소하는 추세를 보여준다. 즉, 균열률이 0.4~0.6인 경우에 계면 파괴에너지가 최대가 되며 또한 이 범위에서 곡선의 기울기가 완만해짐에 따라 부착강도의 오차가 작아지리라 사료된다.

5. 결론

- 1) 신·구 콘크리트의 부착강도 실험시 두 재료의 계면에서 파괴가 유도되어 순수한 부착강도를 측정할 수 있도록 계면에 원형의 비부착면을 삽입하여 부착강도 및 계면에서의 파괴에너지를 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 2) 보통 콘크리트 상부에 원형의 비 부착면을 모사하여 유황 폴리머 콘크리트로 덧씌운 시편의 부착강도 실험결과 모든 시편이 계면에서 파괴가 유도되었다.
- 3) 유한요소해석 및 실험 데이터를 분석한 결과, 신·구 콘크리트층 사이에 균열률 0.4~0.6의 비 부착면을 사용하는 경우에 계면 파괴에너지가 최대가 되며 이 범위에서 오차가 작게 나타나기 때문에 균열률 0.4~0.6으로 부착강도 실험을 수행하는 것이 가장 유리함을 알 수 있었다.

□ 참고문헌

1. 김성환 등(2002), "신·구 콘크리트 부착강도 측정을 위한 직접 인발시험 방법," 한국도로포장공학회 학술발표회논문집, 제4권 1호, pp.133~137.
2. 김진철, 양성철, 김남호(2003), "골재종류가 콘크리트의 열팽창계수에 미치는 영향," 콘크리트학회 논문집, 제15권 1호, pp.249~254.
3. 양성철, 서영찬, 박종원(2002), "동전모양 균열이 존재하는 이상복합체의 에너지해방률 산정," 한국전산구조공학회 논문집, 제15권 3호, pp.389~398.
4. 홍건호(2003), "콘크리트 직접인장강도의 세장비 효과," 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 2호, pp.246~253.
5. AASHTO TP60-00(2000), "Standard Test Method for the Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete," AASHTO



6. Hibbitt, H.D., Karlsson, B., and Sorensen, E.P.(1994), *ABAQUS User's Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.
7. Kassir, M.K. and Sih, G.C.(1975), *Mechanics of Fracture - Vol. 2 Three-dimensional Crack Problems*, Noordhoff International Publishing Co., pp.177~189.
8. Lakshminarayana, H.V., Bernard, M., and Bui-Quoc, T.(1992), "Finite Element Study of a Penny-shaped Crack along the Interface in a Bi-material Cylinder," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 43, No., 6, pp.981~991.
9. Williams, M.L.(1959) "The Stress around a Fault or Crack in Dissimilar Media," *Bulletin of the Seismological Society of America*," Vol. 49, No. 2, pp.199~204.
9. Zheng, W., Kwan, A.K.H., Lee, P.K.K.(2001), "Direct Tension Test of Concrete," *ACI Materials Journal*," Vol. 98, No. 1, pp. 63~71.

□ 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2001-002-E00293).

〈접수 : 2004. 1. 29〉