

고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용

- On Engineered Cementitious Composites(ECC)
a Review of the Material and Its Applications -



김윤용*
Kim, Yun Yong



김정수**
Kim, Jeong Su



김광련***
Kim, Kwang Ryeon

1990년대 초부터 지난 10년간 Engineered Cementitious Composites (이하 ECC)의 발전과 조사에 관한 내용이다. 재료 설계의 이론적인 배경이 되는 마이크로역학(micromechanics)을 비롯하여, 실험과 이론에 의하여 밝혀진 ECC만의 독특한 특성에 대하여 기술하고 있다. 특히 이 재료는 구조물의 보수/보강재료로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 이 외에도 지난 10년간에 걸친 ECC의 개발, 구조물로의 발전 과정 등을 고찰하여 향후 이 재료의 발전 방향을 제시하고자 한다.

1. 서론

ECC(Engineered Cementitious Composites)는 마이크로역학을 근거로 하여 개발된 일종의 고인성 섬유보강 모르타르이다. IPC 그룹¹⁾이 최초로 파괴역학의 개념을 섬유보강 콘크리트/모르타르에 적용한 이래 ECC는 지난 10년간 재료 개발과 구조물 적용 측면에서 괄목할 만한 발전을 거듭하여 왔으며, 특히 활발한 국제 협력 연구를 통하여 현재의 성과를 이룩하였다. 이 논문에서는 재료설계에서 상용화까지 ECC의 연구개발에 대한 내용을 다루고 있으며, 우선 재료설계 및 최적화, 구성성분 조합에서 있어 결정적 역할을 하는 마이크로역학(micromechanics)을 비롯하여 재료의 연성, 철근보강 ECC(R/ECC)

의 성능특성 및 비용에 대한 내용을 기술하였다. 후반부에는 ECC 기술 네트워크에 대한 내용을 다루어 재료의 성능 향상뿐만 아니라 구조물 적용성 확대, 정부의 참여, 설계/시공자의 기술적 관심 및 국제 협력/연계 등을 통하여 건설신소재 분야가 지속적으로 발전할 수 있음을 시사하고 있다. 본고에서 내용의 일부는 원저자가 저술한 내용을 요약하여 소개하였으며, 보다 상세한 내용은 원문 또는 이 기사에서 인용한 참고문헌을 참조할 수 있다.

2. 재료설계에서 상용화까지

ECC가 처음 소개된 후 학계, 산업계, 발주처 등의 끊임없는 노력과 협력을 통하여 단기간 내에 괄목할만한 발전을 이루었다. <그림 1>은 지금까지의 ECC 기술 개발에서 활용한 기본적인 재료설계이론으로부터 실제적인 상용화까지를 단계별 주요 흐름으로 보여주고 있다. 이 흐름에서 마이크로역학은 섬유복합체의 거시적 특성을 미세구조와 연계시키면서 재료설계의 기본틀을 형성하는 이론적 요체로서의 역할을 수행하여 왔다. 즉 마이크로역학을 근거로 하여 재료의 최적화뿐만 아니라 섬유복합재료의 체계화된 미세구조 연구가 이루어져 왔다. 이에 대해서는 다음 절에서 좀

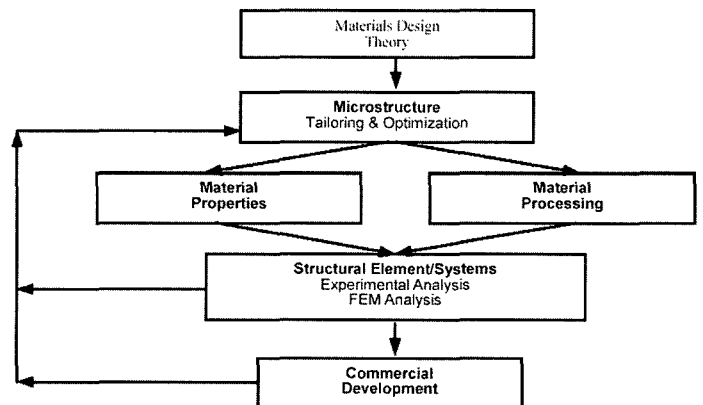


그림 1. ECC의 연구개발에 있어 중요 단계의 흐름도

* 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수
** 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
*** 정희원, KG케미칼(주) 연구개발센터 연구원

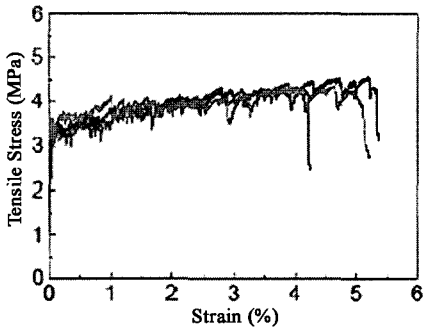


그림 2. PVA-ECC의 전형적인 1축인장 응력-변형률 곡선 (REC-15 섬유 2%)

더 상세히 기술할 것이다.

ECC의 가장 기본적인 특성은 기존의 섬유보강 시멘트복합체가 갖고 있지 않던 인장변형률 경화거동을 나타내는 것과 연신율이 수 % 수준에 달하는 매우 높은 연성을 보인다는 것이다. 일례로서 <그림 2>는 보통 콘크리트나 섬유보강 콘크리트(FRC) 보다 약 500배 큰 5%의 인장 변형성능을 갖고 있는 PVA(polyvinyl alcohol)-ECC의 1축인장 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다²⁾. 현재 이와 같은 ECC의 물리적 성질(수축이나 내동해성 등)과 역학적 성질(인장, 압축, 전단, 피로, 크리프 등)에 대한 자료 축적이 지속적으로 이루어지고 있으며 일반타설, 압출 성형, 슛크리트 타설 등의 다양한 시공 공정의 가능성도 다수 보고되고 있다^{3,4,5)}. 이와 같이 굳은 상태에서는 높은 연성을 나타내면서 굳지 않은 상태에서는 유연한 시공 공정을 활용할 수 있다는 장점으로 인하여 ECC의 적용범위는 더욱 확대될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한 ECC의 성능을 평가하기 위해 구조물 수준의 다양한 실험들이 수행되어 왔으며, 이를 통해 재료의 연성이 구조부재의 성능을 개선할 수 있음이 증명되고 있다^{6,7,8,9,10,11)} 이와 함께 ECC의 구성 방정식에 대한 모델이 일부 구현되었고 이를 이용하여 구조물의 거동을 예측할 수 있는 유한요소해석 프로그램이 개발된 바 있다^{12,13)}

ECC의 실용화를 위해서는 지금까지 언급한 역학적/구조적 특성 외에도 비용대비

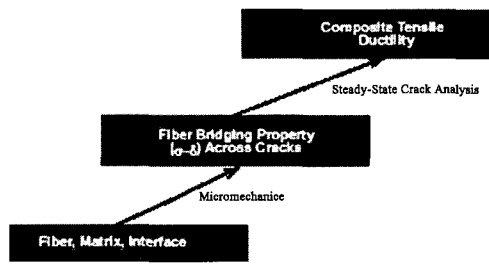


그림 3. 재료 개발 단계에서 나타나는 특성 및 상호관계 (마이크로 역학적 특성, 균열면 섬유가교 성능, ECC의 연성)

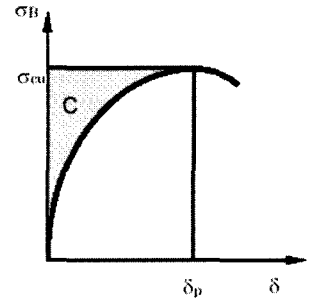
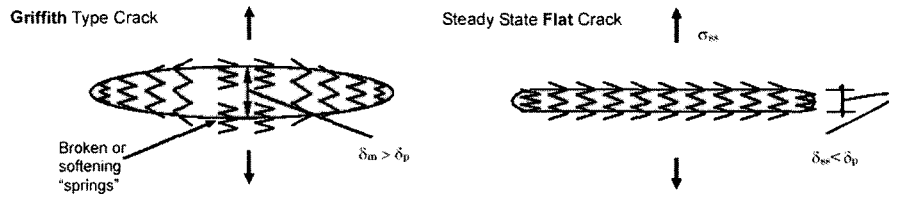


그림 4. $\sigma-\delta$ 곡선과 보상에너지 개념



a. Griffith 균열 거동(낮은 보상에너지) b. Flat 균열 거동(충분한 보상에너지)

그림 5. 안정된 상태의 균열 이론¹⁷⁾

이익률을 확보하여야만 한다. 비록 ECC의 원자재 비용이 일반 콘크리트에 비하여 높지만, 구조물의 장기적인 생애비용주기의 측면에서는 충분한 경쟁력을 갖고 있다고 판단하고 있다. 따라서 가까운 미래에 일본, 한국, 호주, 스위스, 미국 등 많은 나라에서 이 신소재를 상용화 단계로 끌어올릴 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 상용화를 이루기 위해서는 재료의 최적화를 통한 비용의 절감이 필수적이다. 또한 기본적인 재료의 우수성, 구조물의 성능 개선뿐만 아니라 경량화, 초기강도의 증진 등의 차별화된 재료 성능을 부여하는 것이

유리하다. 이를 위해서는 재료 개발자, 구조물 설계/시공자, 재료 공급자, 연구자의 전반적인 협력/연계를 통하여 서로의 정보를 교환하고 ECC 관련 전문시방서를 개발하는 등의 보다 현실적인 활동이 요구된다.

3. 마이크로역학(Micromechanics)

지금까지의 광범위한 연구를 통하여 섬유보강 콘크리트/모르타르의 가장 기본적인 성능은 균열 면에서 섬유의 가교(bridging) 특성을 나타내는 $\sigma-\delta$ 곡선으로 표현할 수 있음이 밝혀졌다^{14,15,16)}. 이

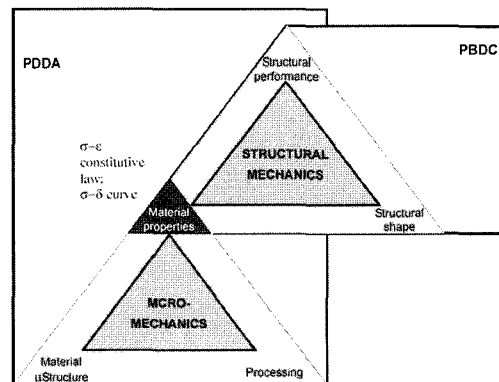
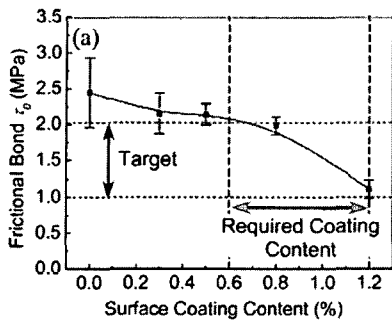
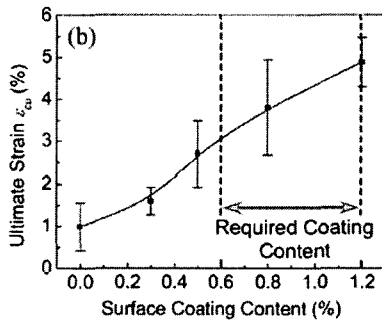


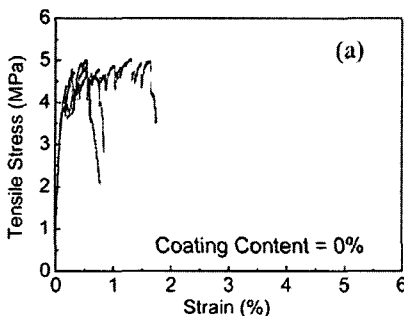
그림 6. 재료/구조의 통합 설계 개념(ISMD)



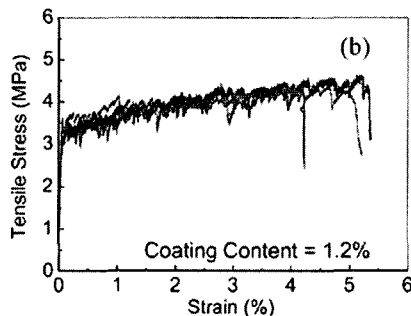
a. 최적으로 결정된 0.6~1.2%의 표면처리
 그림 7. 마이크로역학에 의하여 결정된 최적 코팅 량 (PVA 섬유 혼입률 2% 기준)¹⁹⁾



b. 코팅 량에 따른 ECC의 1축인장 연신율

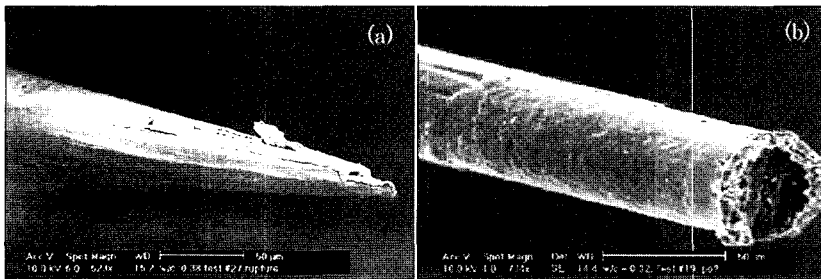


a. 코팅 량 0%: 과도한 부착에 의하여 낮은 연신율에서 파괴



b. 코팅 량 1.2%: 마이크로역학에 따른 섬유 표면 최적화로 높은 연신율에서 파괴

그림 8. 섬유의 표면처리에 따른 ECC의 1축인장 거동특성



a. 코팅되지 않은 섬유의 손상

b. 코팅된 섬유의 파단 형태

그림 9. 뿔침시험에서 섬유의 파괴 형태를 보여주는 SEM 사진

곡선은 1축 인장 시험체의 균열면에서 발생하는 균열개구변위와 이 균열을 가로지르며 전달되는 평균인장응력의 관계로 표현된다. $\sigma-\delta$ 곡선은 복합재료의 기본구성요소인 섬유, 매트릭스, 경계면의 특성과 연성으로 대표되는 복합재료(ECC)의 성능을 연결하는 링크 역할을 한다(그림 3).

ECC의 변형을 경화 특성 또는 일반적인 FRC의 변형을 연화 거동을 지배하는 기본적인 메커니즘의 차이를 이해하기 위해서는 섬유의 가교 응력과 에너지 흡수 특성을 파악하여야 한다. 이러한 특성은 <그림 4>와 같은 $\sigma-\delta$ 곡선에 의하여 평가

할 수 있다. 이 곡선은 균열면을 연결하는 비선형 스프링의 거동으로 묘사되며, 인장 하에서 균열개구에 저항하는 가교 섬유의 평균적인 지내력을 나타낸다. ECC와 같은 섬유복합재료가 변형을 경화 거동을 나타내기 위해서는 다수의 균열 발생(multiple cracking)이 필수적이며 이 때의 균열상태를 안정상태의 균열(steady-state cracking)이라고 한다. 섬유복합재료에서 다수의 균열이 발생할 수 있는 1번째 기준은 매트릭스 균열강도(초기균열과 관계된 초기균열강도)가 최대가교응력 σ_{cu} (균열강도는 매트릭스 결합크기에 의해 좌

우)을 초과해선 안 된다는 것이다. 이를 다수의 균열 발생에 대한 강도기준이라고 한다.

두 번째 기준은 균열진전 에너지론에 의해 지배되는 균열진전 모드와 관계가 있는데, 이를 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 2번째 조건(에너지 조건)이라고 한다. 이 조건은 <그림 4>에서 나타난 바와 같이 ECC의 가교 응력과 균열개구변위관계에 의하여 계산되는 보상에너지(complementary energy, 그림 좌측상단의 dashed area C)가 모르타르 매트릭스의 균열선단 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 항상 커야 한다는 것이다. 안정상태에서의 균열 해석¹⁷⁾에 따르면, 보상에너지가 충분하지 못한 경우 전형적인 Griffith 균열 거동<그림 5(a)>을 하게 되는 반면, 보상에너지가 충분할 때에는 안정상태의 Flat 균열<그림 5(b)>을 형성하는 것으로 나타났다. 이와 같은 2가지 기준(강도기준, 에너지기준)은 섬유, 매트릭스, 섬유-매트릭스 계면 등의 기본적인 구성요소를 선정하는 데에 결정적인 역할을 한다.

$\sigma-\delta$ 곡선의 형태는 섬유혼입률, 직경, 길이, 강도, 탄성계수와 계면의 화학적 결합과 마찰특성을 포함하는 섬유-매트릭스 계면 특성에 의하여 결정된다¹⁸⁾. 따라서 이러한 특성을 조절하여 최적의 $\sigma-\delta$ 곡선 형태를 설계할 수 있으며, 이러한 과정을 통하여 복합재료(ECC)의 인장 변형을 경화를 구현한다¹⁹⁾. ECC의 인장 변형을 경화 특성이 구조물의 전반적인 거동에 영향을 미치기 때문에 응력-변형을 곡선은 재료설계(<그림 6>의 아래 삼각형)와 구조설계(<그림 6>의 위쪽 삼각형) 사이의 중요한 연결고리가 된다.

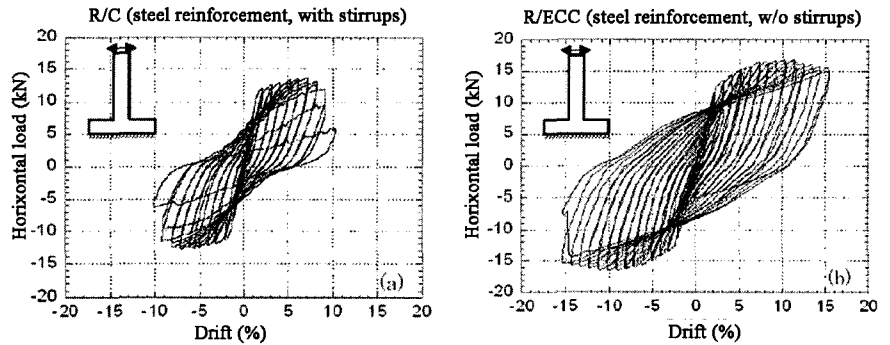
또한 마이크로역학은 재료를 최적화하기 위한 도구로 활용된다. 건설 산업은 가격에 매우 민감한 산업이다. 따라서 모든 재료는 반드시 비용에 대한 효과를 고려하여야 한다. 특히 섬유는 시멘트, 골재, 물에 비하여 비싸기 때문에 성능(변형을 경화 특성)을 만족시키는 섬유의 양을 최소

화할 필요가 있다. 마이크로역학에 의한 균열안정성 해석을 수행하면 변형률 경화 특성을 나타낼 수 있는 섬유혼입물의 임계값을 구할 수 있는데, 이를 이용하여 최소의 섬유량을 결정할 수 있다. 이 때 최적의 섬유혼입물은 섬유, 매트릭스, 계면 특성 등의 기본적인 역학적 특성을 바탕으로 결정된다^{17,18}. 이 임계값 이하의 섬유량을 혼입하면 일반적인 FRC에서 나타나는 인장 변형을 연화 거동이 나타나며, 임계값을 크게 넘어서면 재료의 가격이 상승할 뿐만 아니라 재료의 제조에도 어려움이 발생한다.

앞에서 언급한 바와 같이 마이크로역학을 이용하여 섬유의 혼입량을 최소화하면서 성능, 비용, 작업성 면에서 최적인 ECC를 제조할 수 있다. 이 때에 마이크로역학적 특성(섬유, 매트릭스, 계면)을 파악하는 것이 결정적인 열쇠가 되는데, 일례로서 섬유의 계면특성을 조절한 연구 결과를 <그림 7>과 <그림 8>에 나타내었다. 여기서 사용된 PVA 섬유는 친수성 섬유이기 때문에 섬유-매트릭스 계면에 과다한 화학적 부착과 마찰 부착이 형성된다. 이러한 과다한 부착은 섬유의 파단을 일으켜 ECC의 성능을 크게 떨어뜨리게 된다. 따라서 섬유의 뽑힘시험을 통하여 표면 코팅 량에 따른 계면 특성을 파악하였으며, 이러한 특성을 근거로 하여 마이크로역학 해석을 수행하였다. 그 결과 섬유의 코팅이 0.8 ~ 1.2%(무계비)인 경우에 섬유혼입률이 2%(부피비) 이내로 결정된다는 사실이 밝혀졌다¹⁹. <그림 9>는 뽑힘시험 이후에 촬영한 섬유 파단면을 코팅 량에 따라 비교한 것이다.

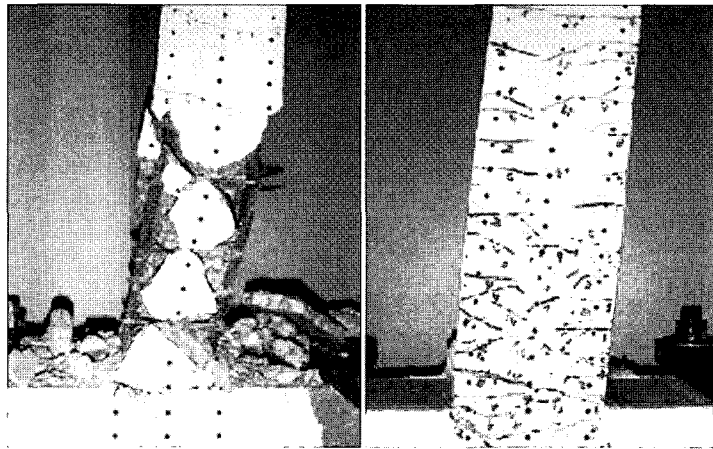
마이크로역학은 최적의 섬유복합재료(ECC)의 개발을 위하여 다음과 같은 경우에 보다 체계적이고 정량적인 수단으로서 활용될 수 있다.

- (1) 재료/구조설계의 연결고리
- (2) 섬유복합재료의 최적화 및 섬유혼입률 결정
- (3) 섬유의 최적화 또는 표면처리



a. 띠철근이 배근된 R/C 부재의 반복하중 이력곡선
b. 띠철근이 없는 R/ECC의 반복하중 이력곡선

그림 10. R/C부재와 R/ECC부재의 반복하중 이력곡선



a. 띠철근이 배근된 R/C 부재의 파괴형태
b. 띠철근이 없는 R/ECC의 파괴형태

그림 11. R/C부재와 R/ECC부재의 파괴형태

4. 강도와 연성

ECC의 독특한 특성은 매우 높은 연성을 보인다는 것이다. 이는 기존의 콘크리트 또는 FRC 구조물과는 달리 재료의 파괴에 의해서 구조물이 붕괴되는 경우가 거의 없다는 것을 의미한다. 전통적으로 철근 콘크리트(R/C) 구조물의 설계에서 콘크리트의 가장 중요한 재료 특성은 압축강도이다. 이로 인하여 구조강도(structural strength, 일반적으로 구조물의 성능)는 재료강도(material strength)에 의하여 크게 좌우되는 것으로 인식되어 왔다. 그러나 이러한 개념은 재료의 압축강도가 구조 부재의 파괴모드를 좌우할 경우에만 적용되며, 콘크리트의 인장에 의한 파괴 즉 취성적인 파괴(fracture)가 발생할 경우에는 고강도 재료를 사용하여 항상 구조 강도를 높일 수 있다는 논리가 성립되지 않

는다. 반면 ECC와 같은 고인성, 고연성 재료를 사용하면 균열이 파괴를 지배하는 부재의 구조강도를 크게 높일 수 있다. 이러한 현상은 다수의 실험적인 연구에 의하여 입증된 바 있다^{20,21,22}. 예를 들어 내진보강용 프리캐스트 벽체에 대한 반복전단시험에 따르면, 50 MPa의 콘크리트로 제작된 패널의 구조강도가 38 kN인 반면 압축강도가 41 MPa인 ECC로 제작된 패널은 구조강도는 56 kN인 것으로 나타났다. 이와 같이 ECC 벽체의 구조강도가 크게 개선되는 이유는 균열이 분산되면서 큰 전단변형을 허용할 수 있는 ECC의 연성 특성 때문이다.

5. 철근보강 ECC(R/ECC) 부재의 성능

실험 및 FEM 해석을 통해 ECC의 특

특한 거동 특성이 밝혀졌다. 이러한 특성은 사회기반 시설물의 안전성, 내구성, 시공성에 긍정적인 영향을 미친다. R/C 구조물에서 콘크리트 대신에 ECC가 사용된 경우가 R/ECC 부재인데, 이 절에서는 현재까지 밝혀진 이 부재의 성능과 앞으로의 적용방향에 대하여 기술하고자 한다.

5.1 R/ECC 구조거동의 일반적 특성

5.1.1 전단철근의 감소 및 제거

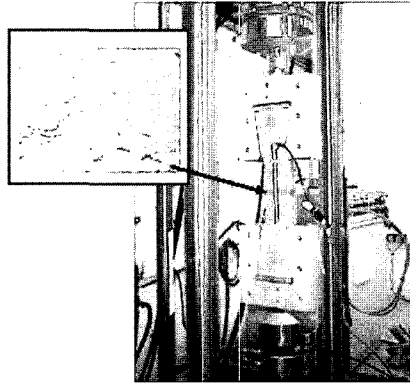
전단보 실험(Ohno 전단실험)을 통하여 ECC의 뛰어난 전단 능력이 입증된 바 있다²³⁾. 이는 ECC 재료가 인장 하에서 높은 연성을 갖고 있기 때문에 전단 하에서도 주인장 방향 수직으로 많은 균열을 분산시키면서 높은 연성 거동을 나타내기 때문이다. 또한 R/ECC 부재에는 전단철근이 거의 필요 없는 것으로 나타났다. 실제로 횡방향 반복하중이 작용하는 기둥부재(〈그림 10〉, 〈그림 11〉)의 실험을 통하여 띠철근이 없는 R/ECC 부재의 성능이 띠철근이 배근된 R/C 부재보다 월등히 우수한 것으로 나타난 바 있다²⁴⁾.

5.1.2 큰 변형에 대한 저항

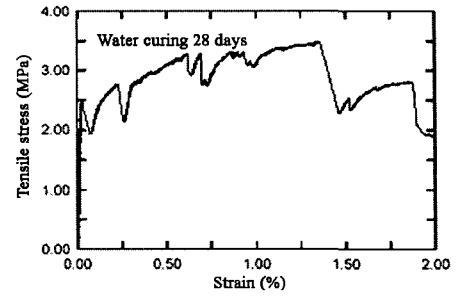
ECC는 인장 변형을 경화하고 더불어 우수한 인장 변형 성능으로 국부적인 파괴없이 큰 변형에 견딜 수 있다. 이러한 특성으로 콘크리트 바닥판의 연결부에 연결슬래브로 사용될 수 있는 것으로 나타났다. 또한 수축, 온도변화, 크리프, 활하중 등에 의한 바닥판의 이동을 충분히 수용할 수 있는 것으로 기대된다. 이 때에 모든 변형은 ECC로 제작된 연결 슬래브 또는 스트립으로 집중되었으며(그림 12), 실물 실험을 통하여 ECC 연결 슬래브의 실현 가능성이 검증된 바도 있다^{25,26)}.

5.1.3 ECC와 철근의 적합변형

R/ECC 부재에서 철근과 ECC는 수%의 변형률을 수용할 수 있는 탄소성 재료로 간주할 수 있다. 이러한 특성에 의하여 두 재료는 항복한 후에도 변형의 적합



a. 1축인장실험 장치



b. 실험 결과

그림 12. ECC 연결슬래브의 가능성을 검증하기 위한 콘크리트-ECC-콘크리트 실험체에 대한 1축인장실험

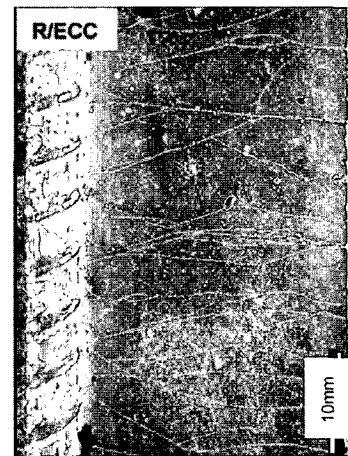
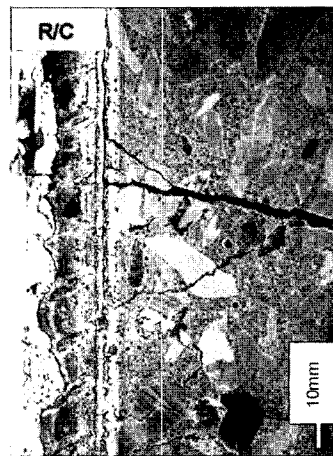


그림 13. 인장증강 실험에 의하여 나타난 R/C와 R/ECC 부재의 균열분포 특성

성을 유지하게 된다²⁷⁾. 그 결과 철근-ECC 경계면에는 매우 미소한 전단응력이 발생하므로 두 재료의 부착 성능이 R/C 부재처럼 결정적인 문제가 되지 않는다. 또한 철근 주변의 ECC에 미세균열이 발생한 후에도 섬유와 고강도 응력이 힘을 전달하기 때문에 균열면에 위치한 철근 부위에 응력이 집중하지 않는다. 이에 반해 R/C부재의 경우에는 균열이 발생한 위치의 철근으로 모든 힘이 전달되므로 응력이 집중된다. 〈그림 13〉은 인장증강(tension stiffening) 실험체의 절단면의 사진으로서 계면부근에서의 R/ECC와 R/C의 거동 차이를 보여주고 있다.

5.1.4 FRP 보강재의 활용성

R/C 부재에서는 균열이 발생한 후, FRP(fiber reinforced polymer) 보강재가 조기에 파괴되는 문제가 발생할 수 있

기 때문에 FRP 보강재의 사용이 제한되어 왔다⁶⁾. 반면 R/ECC 부재에서는 이러한 현상을 방지될 수 있는데, 이는 ECC가 집중되는 균열면을 형성하지 않고 비탄성영역에서도 피복을 지속적으로 유지할 수 있기 때문이다⁹⁾. 이러한 장점을 이용하면 R/ECC 부재의 보강재로서 FRP를 이용하여 큰 탄성변형과 부식 저항성을 갖는 특유의 장점을 활용할 수 있다. 기존의 다양한 실험에 의하여 FRP에 의하여 보강된 ECC 부재의 우수한 연성, 하중전달능력, 전단저항능력 등이 검증된 바 있다.

ECC의 높은 손상허용능력: 손상허용능력은 손상을 입은 재료 또는 구조물의 잔류강도를 나타내는 값으로서, ECC의 우수한 손상허용능력은 기존의 실험에 의하여 검증된 바 있다⁶⁾. 우선 Li는 노치가 있는 시험체를 인장 하에서 실험하여 ECC의 노치 민감도가 거의 없다는 결론

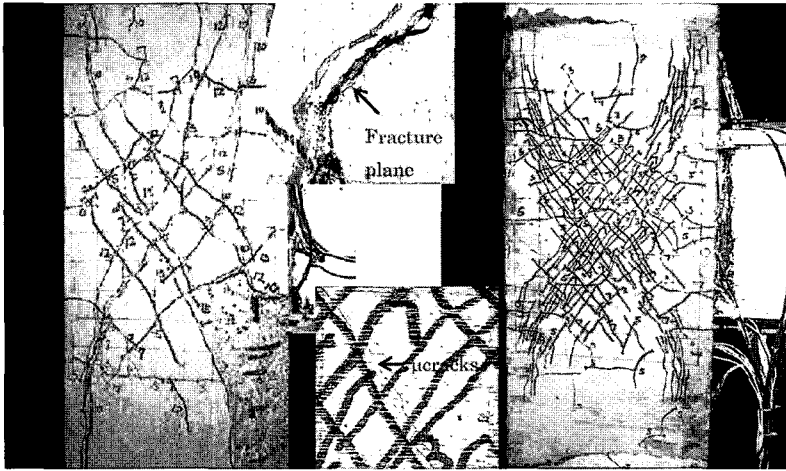


그림 14. 보-기둥 접합부의 손상거동, 좌측은 피복 탈락과 균열 집중이 나타난 R/C 부재, 우측은 높은 손상저항능력을 보여준 R/ECC 부재

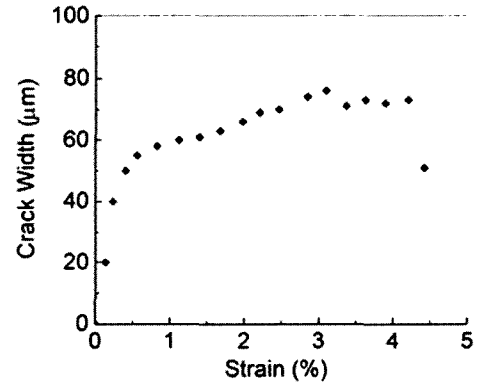


그림 15. 1축인장 하에서 ECC의 균열폭 변화 (PVA-ECC, 섬유혼입률 2%)

을 얻은 바 있다. Kanda 등은 indentation 실험을 통하여 높은 응력집중이 발생하도록 하였는데, ECC 실험체는 응력 집중과 상관없는 연성적인 형태로 파괴에 도달하였다²¹⁾. 따라서 ECC 재료는 높은 응력집중이 발생하는 부위에 사용할 수 있는데, 일례로서 <그림 14>와 같은 보-기둥 접합부에 콘크리트의 대체재로 ECC를 적용하여 반복하중에 대한 거동을 연구한 바 있다⁷⁾. 이 연구에서 ECC 실험체는 균열 집중, 피복 탈락 등의 파괴(fracture) 형태나 나타나지 않는 높은 손상저항능력을 보여 주었다. 반면, 콘크리트 실험체는 피복의 탈락과 함께 큰 폭의 집중 균열이 발생하였다.

5.1.5 균열폭 제어능력

ECC 부재에 탄성범위를 넘어선 하중이 가해지면, 미세균열이 분포하면서 하중에 저항하는 비탄성 변형이 나타난다. 이러한 미세균열은 지속적으로 하중을 전달할 수 있는데, 이 때에 균열의 폭은 섬유와 계면 특성에 의하여 결정된다. 일례로서 그림 15는 PVA-ECC 1축인장 시험체에서 발생한 균열의 폭을 나타내고 있다. 균열의 폭은 초기에 증가하다가 1% 변형률을 초과하면서 일정한 폭으로 유지되는 특성을 나타낸다. 이와 같이 균열 폭이 일정하게 제어되는 특성은 구조물의 내구성 확보에 유리할 뿐만 아니라 극한 하중에 노출된

후에 요구되는 보수/보강의 필요성을 최소화시킬 수 있는 장점이 된다.

5.2 적용분야의 분류

R/ECC 구조부재의 특성을 근거로 크게 3가지로 적용분야를 구분할 수 있다.

5.2.1 극심한 하중을 받는 구조부재의 ECC

내진부재에 관련된 분야로서 보, 기둥, 하이브리드 보-기둥 부재, 보-기둥 접합부가 이에 해당된다. ECC 부재의 내진성능에 대해서는 다양한 내용의 연구 결과^{7,8,9,21,28,29,30,31,32)}가 축적되어 있으며, 상세한 내용은 참고문헌을 참조할 수 있다. R/ECC 부재는 뛰어난 내진성능을 발휘하기 때문에 지진 이후에 구조물 복구 비용을 최소화할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 우수한 내진성능은 ECC 고유의 연성과 앞 절에서 언급한 철근-ECC의 적합 변형에 기인한다.

5.2.2 내구적인 구조부재를 위한 ECC

보수재로서 ECC를 활용하는 것이 이 분야에 해당된다. ECC가 갖고 있는 보수재로서 장점은 무엇보다 ECC/콘크리트 보수시스템의 경계면에서 나타나는 우수한 성능(delamination resistance)이다. 이 성능은 경계면 초기균열이 kink-crack

trapping 균열발생기구에 의하여 ECC의 변형으로 완화되기 때문에 나타난다²⁰⁾. 한편 Suthiwarapirak 등³³⁾은 ECC의 피로 저항이 폴리머 모르타르에 비하여 매우 뛰어난 것으로 보고하고 있으며, Li 등³⁴⁾에 의하여 ECC의 우수한 동결융해 저항성과 수축 균열 저항성도 검증된 바 있다.

균열폭이 100 micron 이하일 경우에는 콘크리트의 투수성이 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다^{35,36,37)}. ECC의 균열폭은 이 값 이하로 유지되기 때문에 부재 내부로 침투하는 유해물질의 양을 최소화할 수 있는 뛰어난 피복의 역할을 하게 될 것으로 기대된다. 이러한 성능은 유해물질에 노출되어 있는 구조물의 내구성 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다.

5.2.3 ECC의 우수한 시공성

ECC의 시공성은 몇 가지 방법으로 크게 개선될 수 있다. 예를 들면 일반 R/C 내진부재에는 많은 전단철근이 필요하며, 이 철근을 배근하기 위하여 많은 비용이 소요된다. 5.1절에 기술한 바와 같이 R/ECC 부재는 탁월한 전단저항 성능을 갖고 있기 때문에 전단철근을 배근할 필요가 없으며, 이로 인하여 시공성을 향상시키는 효과를 얻을 수 있다.

또한 ECC는 다양한 타설공정을 구현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 슛크리트 공법을 적용할 수 있고, 압출성형, 고유동

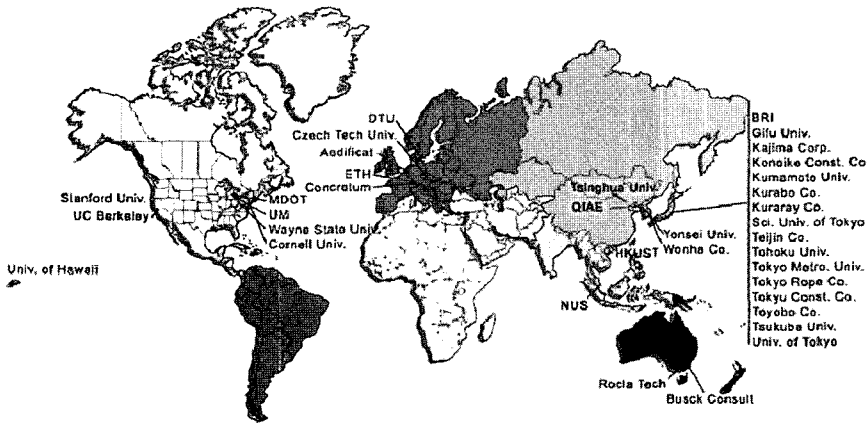


그림 16. ECC 기술의 Network.

ECC의 적용 등을 통하여 효율적인 시공과 공사비 절감을 꾀할 수 있다^{38,39)}.

6. ECC의 비용

일반 콘크리트보다 추가되는 ECC의 비용은 대부분 섬유와 많은 시멘트량에 기인한다. 따라서 섬유의 양을 최소화하는 방향으로 재료의 배합을 최적화하는 것이 중요하다. PVA와 같은 합성섬유는 강섬유에 비하여 단위중량당 가격이 비싸지만, 합성섬유의 비중이 강섬유에 비해 6~7배 정도 작고, 섬유복합재료의 거동이 섬유의 파괴 혼합물에 좌우되기 때문에 실제적인 비용은 강섬유에 비하여 크게 증가하지 않는다. 또한 플라이 애쉬와 같은 산업부산물로 시멘트를 대체하는 것도 ECC의 비용을 줄일 수 있는 하나의 방안이다. 현재 ECC의 가격은 구조물 보수에 사용되는 폴리머 모르타르와 같은 고성능 재료에 비하여 낮게 형성된다. 향후 ECC의 경제성은 비용 대비 이익률로 평가되어야 하며, ECC를 사용함으로써 얻어지는 직접적인 이익(철근 사용량 감소, 현장 노동력 감소, 건설기간 단축 및 유지비 절감 등)뿐만 아니라 사회, 환경적으로 얻어지는 간접적인 이익도 충분히 검토해야 한다.

7. ECC 기술의 네트워크

ECC는 다른 건설재료에 비하여 최근에 개발된 재료이며, 현재에도 지속적인 진화

를 거듭하면서 그 특성과 적용에 관련된 내용이 끊임없이 밝혀지고 있다. 이러한 연구의 내용을 현업에 접목하기 위해서는 학교-산업체-정부의 긴밀한 협조 체계가 요구된다. 이러한 체계를 구축하기 위하여 2001년에 ECC 기술 네트워크를 발족하였다. ECC 기술 네트워크는 ECC 기술의 개발과 증진에 관심있는 구성원으로 이루어진 비공식 조직으로서 미시간대학(www.engineerdcomposites.com)을 비롯한 다양한 기관이 참여하고 있다(그림 16) 참조.

8. 향후의 전망과 결론

지난 10년 동안 ECC는 빠른 속도로 발전하였으며, 앞으로도 끊임없이 발전할 것으로 예상된다. 또한 ECC의 장점이 새로이 밝혀져 다양한 구조물에 적용될 수 있을 것으로 예측되며, 강재와 콘크리트의 장점을 고루 갖춘 신개념의 ECC도 개발될 것으로 기대하고 있다. 앞으로 ECC가 발전하면서 다음과 같은 성능이 요구될 것으로 판단한다.

- 구조물의 목표성능을 만족하도록 설계 가능
- 사회, 경제, 환경적인 측면에서 만족하는 성능 확보(sustainable)
- 손상되었을 때 자가 치료 가능
- 구조성능 이외의 요구사항을 만족하는 성능 확보

이러한 ECC를 바탕으로 다음의 특성을 갖는 새로운 구조물이 출현할 것이다.

- 극심한 하중조건에 노출된 후에도 최소한의 보수로 안전을 확보하는 구조물
- 자가 적응능력(self-adapting)을 갖는 스마트 구조물
- 크기효과가 없는 대형 구조물
- 극심한 환경에 노출되어도 유지관리가 필요 없는 구조물
- 폐기물량이 적고 급속시공이 가능한 구조물

한편, 다음의 10가지 항목에 대한 R&D가 향후 발전되어야 할 사항이다.

- (1) ECC 배합비의 표준화
- (2) 프리믹스 제품화된 ECC
- (3) 기본 재료의 공급체계
- (4) ECC 재료 성능에 대한 시방서
- (5) ECC 실험방법의 표준화
- (6) ECC 구조물의 수치해석 기법 확립
- (7) 응용분야의 확립 및 확대
- (8) ECC 구조물의 Sustainability 연구
- (9) ECC 구조물에 대한 연구
- (10) 재료/구조성능 설계개념(ISMD)의 적용 확대

현재 ECC는 개발자, 사용자, 재료 공급자, 설계자, 연구기관, 기업체 등 많은 지지기반을 확보해 가고 있다. 그러나 보다 활발한 연구 활동과 현장적용을 위해서는 다양한 형태의 사회적 지지와 건설 분야의 환경변화가 요구된다. 끝으로 ECC의 발전은 건설재료와 구조분야의 혁신을 통하여 현대인의 삶을 증진시키는 데에 일조를 할 수 있을 것으로 기대한다. □

이 기사는 Journal of Advanced Concrete Technology 1권 3호에 실린 University of Michigan의 Victor C. Li 교수 논문을 번역한 것이다.

참고문헌

1. Aveston, J., Cooper, G. A. and Kelly, A. "Single and multiple fracture. in : The Properties of Fiber Composites." IPC Science and Technology Press, Guildford, U.K., 1971, pp.15~26.
2. Li, V. C., Wang, S. and Wu, C. "Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC." *ACI Materials J.*, 98 (6), 2001, pp.483~492.
3. Kong, H. J., Bike, S. and Li, V. C. "Constitutive rheological control to develop a self-consolidating engineered cementitious composite reinforced with hydrophilic poly(vinyl alcohol) fibers." *J. Cement and Concrete Composites*, 25(3), 2003, pp.333~341.
4. Kanda, T., Saito, T., Sakata, N. and Hiraishi, M. "Fundamental properties of directed sprayed retrofit material utilizing fiber reinforced pseudo strain hardening cementitious composites." *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 223(1), 2001, pp.475~480.
5. Kim, Y. Y., Kong, H. J. and Li, V. C. "Design of an engineered cementitious composite(ECC) suitable for wet-mix shotcreting." Accepted, *ACI Materials J.* 2003.
6. Fukuyama, H., Masuda, Y., Sonobe, Y. and Tanigaki, M. "Structural performances of concrete frame reinforced with FRP reinforcement." *Non-metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Proceedings of the Second International RILEM Symposium(FRPRCS-2), E&FN Spon, London, 1995, pp.275~286.
7. Parra-Montesinos, G. and Wight, J. K. "Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126(10), 2000, pp.1113~1121.
8. Yoon, J. K. and Billington, S. L. "Cyclic response of unbonded post-tensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete." Submitted for publication in *ASCE J. Bridge Engrg.*, 2002.
9. Fischer, G. and Li, V. C., "Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite(ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions." *ACI Structures J.*, 100(1), 2003, pp.25~35.
10. Fischer, G. and Li, V. C. "Intrinsic response control of moment resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements." *ACI Structures J.*, 100(2), 2003, pp.166~176.
11. Li, V. C. and Fischer, G. "Reinforced ECC-An evolution from materials to structures." in : *Proceedings on CD, Session 5, Paper K-13, Fib 2002, Osaka, Japan.*
12. Kabele, P. "Assessment of structural performance of engineered cementitious composites by computer simulation." *CTU Reports* 4(5), Czech Technical University, Prague, 2001.
13. Han, T. S., Feenstra, P. H. and Billington, S. L. "Simulation of ductile fiber-reinforced cement-based composites." *ACI Structures J.*, 100(6), 2003, pp.749~757.
14. Li, V. C., "Post-crack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites." *ASCE J. of Materials in Civil Engineering*, 4(1), 1992, pp.41~57.
15. Li, V. C. and Hashida, T. "Engineering ductile fracture in brittle matrix composites." *J. of Materials Science Letters*, 12, 1993, pp.898~901.
16. Li, V. C. "Damage tolerance of engineered cementitious composites." in : *Advances in Fracture Research, Proc. 9th ICF Conference on Fracture, Sydney, Australia, Ed. B. L. Karihaloo, Y. W. Mai, M. I. Ripley and R. O. Ritchie, Pub. Pergamon, UK, 1997, pp.619~630.*
17. Li, V. C. and Leung, C. K. Y. "Steady state and multiple cracking of short random fiber composites." *ASCE J. of Engineering Mechanics*, 118(11), 1992, pp.2246~2264.
18. Lin, Z., Kanda, T. and Li, V. C. "On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites." *RILEM J. Concrete Science and Engineering*, 1, 1999, pp.173~184.
19. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A. and Saito, T. "Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC." *ACI Materials J.*, 99(5), 2002, pp.463~472.
20. Lim, Y. M. and Li, V. C. "Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites." *J. Cement and Concrete Composites*, 19(4), 1997, pp.373~385.
21. Kanda, T., Watanabe, S. and Li, V. C. "Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements." in : *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, Germany, 1998, pp.1477~1490.*
22. Kesner, K. and Billington, S. L. "Experimental response of precast infill panels made with DFRCC." in *Proceedings, DFRCC Int'l Workshop, Takayama, Japan, 2002, pp.289~298.*
23. Li, V. C., Mishra, D. K., Naaman, A. E., Wight, J. K., LaFave, J. M., Wu, H. C. and Inada, Y. "On the shear behavior of engineered cementitious composites." *J. of Advanced Cement Based Materials*, 1(3), 1994, pp.142~149.
24. Fischer, G. and Li, V. C. "Effect of matrix ductility on deformation

- behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions." *ACI Structures J.*, 99(6), 2002, pp.781~790.
25. Zhang, J., Li, V. C., Nowak, A. and Wang, S. "Introducing ductile strip for durability enhancement of concrete slabs." *ASCE J. of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 2002, pp. 253~261.
26. Kim, Y. Y., Fischer, G. and Li, V. C. "Performance of bridge deck link slabs designed with ductile ECC." Submitted for publication in *ACI Structures J.* 2003
27. Fischer, G. and Li, V. C. "Influence of matrix ductility on the tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites(ECC)." *ACI Structures J.*, 99(1), 2002, pp.104~111.
28. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Nakano, K. and Sato, Y. "Structural performance of beam elements with PVA-ECC." in: *Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3(HPFRCC 3)*, Ed. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, 1999, pp.531~ 542.
29. Fischer, G., Fukuyama, H. and Li, V. C. "Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions." in: *Proceedings, DFRCC Int'l Workshop, Takayama, Japan, 2002*, pp.269~278.
30. Horii, H., Matsuoka, S., Kabele, P., Takeuchi, S., Li, V. C. and Kanda, T. "On the prediction method for the structural performance of repaired/retrofitted structures." in: *Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, Germany, 1998*, pp.1739~1750.
31. Kesner, K. E., Billington, S. L. and Douglas, K. S. "Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composites." *ACI Materials J.*, 100(5), 2003, pp.381~390.
32. Fukuyama, H., Suwada, H. and Ilseung, Y. "HPFRCC damper for structural control." in: *Proceedings, DFRCC Int'l Workshop, Takayama, Japan, 2002*, pp.219~228.
33. Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T. and Kanda, T. "Flexural fatigue failure characteristics of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars." *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Japan Society of Civil Engineers, No.718/V-57, 2002*, pp. 121~134.
34. Li, V. C., Fischer, G., Kim, Y., Lepech, M., Qian, S., Weimann, M. and Wang, S. "Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites." *MDOT Research Progress Report*, 2002.
35. Tsukamoto, M. "Tightness of fiber concrete." *Darmstadt Concrete*, 5, 1990, pp.15~225.
36. Wang, K, Jansen, D. C., Shah, S. and Karr, A. F., "Permeability study of cracked concrete." *Cement and Concrete Research*, 27(3), 1997, pp.381~393.
37. Lawler, J. S., Zampini, D. and Shah, S. P. "Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load." *ACI Materials J.*, 99(4), 2002, pp.379~385.
38. Stang, H. and Li, V. C. "Extrusion of ECC-material." in: *Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3)*, Ed. H. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, 1999, pp.203~212.
39. Takashima, H., Miyagai, K., Hashida, T. and Li, V. C. "A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding." *J. of Engineering Fracture Mechanics*, 70 (7~8), 2003, pp.853~870.

도서소개 - "콘크리트진단 및 유지관리"

◆ 소개

:이 책은 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리에 관하여 이해하기 쉽고, 현장적용에 도움이 되도록 노력했으며, 이는 관련 분야에 종사하고 있는 실무기술자들의 참고서로 뿐만 아니라 관련자격시험 등에 필요한 필독서로도 유용할 것이다.

• 저 자 : (사)한국콘크리트학회
• 정 가 : 25,000원

• 출판사 : 기문당
• 페이지 : 670쪽

• 출판일 : 2004년 2월
• ISBN : 89-7086-490-3

콘크리트진단 및 유지관리

한국콘크리트학회

한국콘크리트학회