기술기사

# 고인성 시멘트 복합체의 최신기술 : DFRCC의 구조적 성능과 적용

## - State-of-the-art of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites - Part 2 : Structural Performance and Application

윤현도*
*Yun, Hyun Do*

박완신**
*Park, Wan Shin*

양일승***
*Yang, Il Seung*

한병찬***
*Han, Byung Chan*

福山 洋****
*Fukuyama, Hiroshi*


## 1. 서 언

고인성 시멘트 복합체(DFRCC)는 일반적으로 시멘트계 재료의 취성적인 성질을 극복할 수 있으며 그 이용은 종래의 철근콘크리트(RC)조 구조물에 대해서 보다 높은 성능과 새로운 종류의 가치를 부여할 수 있는 가능성이 있다. 이것이 사회 요구와 합치되면 성능설계에 있어서 유용한 하나의 기술이 될 것이다. 이러한 DFRCC는 새로운 각종 용도의 기술 개발로 기대할 수 있으며, 토목, 건축의 콘크리트 공학 분야에 기술혁신을 가져올 가능성을 가지고 있다. DFRCC 적용을 위해서는 우선 그 재료특성을 어떻게 구조물의 특성 향상에 관련시킬 것인가를 명확하게 할 필요가 있으며, 구성재료의 특성을 구조재료과 구조시스템의 성능을 어떻게 효과적으로 적용할 것인가 라는 설계의 개념이 중요하다. 더욱이, 어떻게 해서 재료를 제조할 것인가 혹은 어떻게 시공할 것인가라는 정보도 빼놓을 수 없다.

1980년대 이후 고인성 시멘트 복합체에 대한 많은 연구[1,2]가 진행되어져 왔으며 이러한 연구성과를 근거로 신 재료를 구조물의 보수·보강 2차 제품, 내진요소 및 단일 부재[3~5] 등에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 여기의 일부는 실용화되어 있거나 현재 실용화 단계에 있다고 할 수 있다.

본고에서는 문헌상으로 보고된 고인성 시멘트 복합체가 건설 분야에 적용되었거나 적용을 위하여 연구단계에 있는 대표적인 사례를 소개함으로써 DFRCC를 적용 촉진을 유도하고자 한다. 또한, 앞으로 다양한 적용의 아이디어를 창출하고, 실제로 적용함으로써 실적을 쌓고 그에 따른 풍족한 사회의 실현에 기여하고자 한다.

## 2. 국외에서의 연구 및 적용현황

콘크리트 구조물의 유지, 관리라는 측면에서 내구성이 뛰어난 보수·보강 재료의 개발이 필요하다. 보수·보강 재료에는 강도와 균열의 대한 저항성분만 아니라, 모재 콘크리트와의 부착성능 등도 요구된다. 고인성 시멘트 복합체를 실제의 보수·보강 공사에 사용한 시공 사례는 거의 없다. 그 이유로서는 현 시점에서 다른 보수·보강법에 비교해서 비용이 비싸고, 제조방법을 포함한 대량공급의 시스템이 정비되어 있지 않으며, 시공상의 문제점들도 남아 있기 때문이다. 하지만 이런 문제들은 시행착오를 통해 개선되어지고 있으며 멀지 않은 미래에 해결할 수 있을 것으로 전망된다.

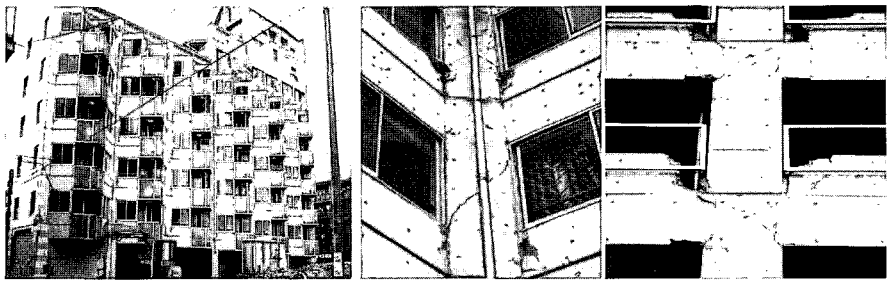
이번 절에서는 기둥, 보, 벽체, 제진부재 등의 고응력이 작용하는 건축부재를 대상으로 고인성 시멘트 복합체의 적용 아이디어를 사회의 요구 등과 관련해서 설명하며, 평가하는 방법은 부재의 휨강도, 전단강도 및 변형 능력의 평가법을 나타내고 있다. 적용 아이디어로는 변형경화도 특성과 그에 따른 다수균열 특성의 유용한 이용을 생각할 수 있으며, 인장력-인장변형도의 관계가 변화연화곡선의 경우도 있기 때문에 여기서는 재료종류로서 DFRCC가 아닌 HPFRCC을 대상으로 한다. 단, 인장응력 하에서 변형경화도 특성을 보이지 않은 DFRCC와 같은 재료도 그 인장강도가 높다면 전단내력의 증대를 기대할 수 있다.

### 2.1 적용의 개념

토목, 건축 구조물에 대한 사회적 요구는 사회와 경제의 발전과 함께 항상 변화하여 왔지만, 최근에 생활 패턴이나 사회적 활동의 급속한 다양화에 비례해서 그 항목이나 수준도 점점 다양화되고 있다. 사회적 성숙과 발전이 계속되는 한 그 경향은 장래에 있어서 지속될 것으로 사료되


* 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 일본 독립행정법인 건축연구소 객원연구원
** 정회원, 충남대 건축공학과 박사과정
*** 정회원, (주)AMS엔지니어링
**** 일본 독립행정법인 건축연구소 구조그룹 상석 연구원

며, 21세기 기술개발에 있어서 그것들의 요구를 어떻게 적절하게 충족시킬 것인가가 요구된다. 이것은 법이 규정한 최소한 항목 및 레벨을 크게 뛰어 넘는 성능을 실현하는 것을 의미하기 때문에 반드시 새로운 기술과 재료가 요구된다. 즉, 안전과 안심을 목적으로 한 사회의 새로운 요구로써, 건축물의 손상제어를 들 수가 있다. 이것은 수복성에 관련되어 손상에 기인하는 성능의 저하(일반적으로 안전성, 사용성, 내구성 등의 저하)가 발생하지 않도록 하고 있으며, 혹시 성능이 저하하더라도 용이하게 수복함으로써 원래의 레벨까지 회복할 수 있도록 하기 위해서 손상의 방지 혹은 제어할 수 있는 것을 말한다.



a. 건물 전체(구조는 RC조 강절 가구) b. 기둥의 전단파괴 및 손상 c. 기둥, 보 접합부의 손상

사진 1. 커다란 손상을 입은 건물

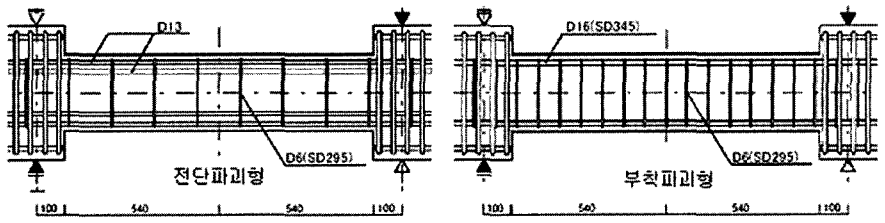



그림 1. 시험체 형상의 배근상세

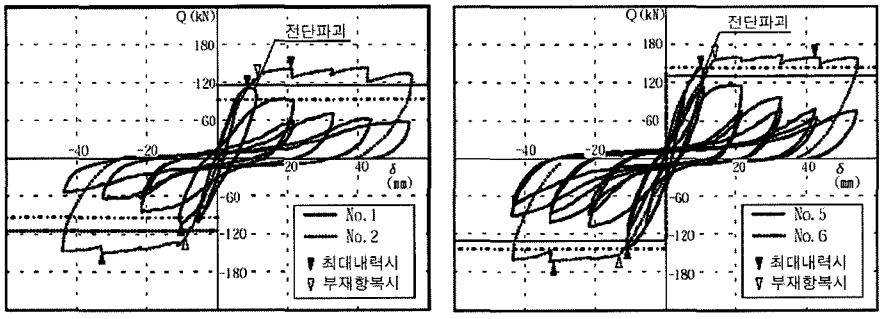
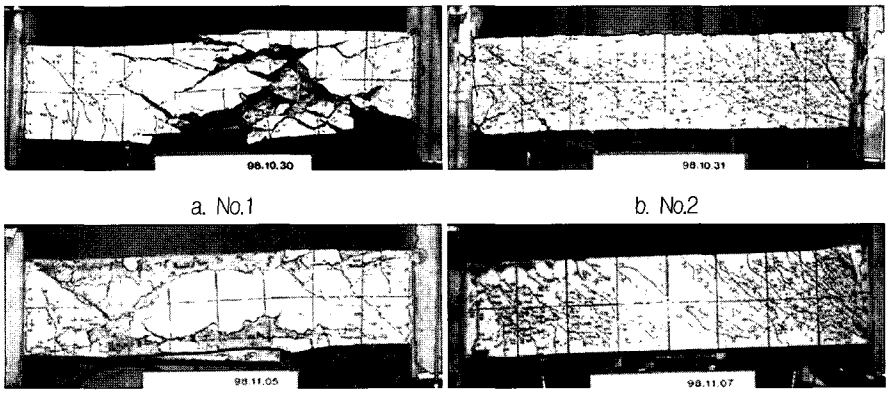



그림 2. RC보 및 DFRCC보의 전단력-변형률 관계 비교




a. No.1 b. No.2

c. No.3 d. No.4

사진 2. 최종 파괴 상황 비교

## 2.2 손상제어의 필요성

수명이 짧은 건축물의 장수명화는 에너지절약과 폐기물의 삭감이라는 지구환경 문제의 관점으로부터 볼 때 시급히 해결되어야 할 문제이다.

건축물의 장수명화를 실현하기 위해서는 공간적인 요구의 충족, 설비 등의 유지갱신의 용이함, 및 구조물로서 내구성의 향상이 불가피하지만, 더욱이 사용기간 중에 발생할 가능성이 있는 대지진 등에 대해 손상, 열화를 적절하게 억제, 방지하고 지진 후에도 간단하게 수복(가능하다면 수복이 불필요)함으로 건축물을 장수명화를 보증할 수 있는 기술개발이 요구된다. 또한, 〈사진 1〉과 같이 고베(Kobe) 대지진에서 완전히 건물이 붕괴되는 것을 막았지만, 건축물이 커다란 손상을 받은 건물이 많았다. 이것은 건물붕괴에 의한 인명피해는 줄일 수 있었으나, 건축물의 손상이 크고 수복 비용이 높기 때문에 결국은 건물을 다시 부수고 세워야 했다. 현재, 기존 건축물의 내진보강이 이루어지고 있지만, 그 목표는 인명의 보호에 있으며, 직접적으로 건물의 손상을 억제하고 있지는 않다. 그래서 재차 발생할지도 모르는 대지진에 대해 또다시 손상을 입을 가능성이 있으며, 그 손상에 대해 높은 비용으로 보수해야 하는 악순환이 되풀이 될 수 있다. 따라서 내진 보강에 있어서도 보수에 막대한 비용을 필요로 하는 건축물에 대해서는 건축물의 손상에 대해서 적절하게 제어하여야 한다.

## 2.3 보 부재에의 적용[6)]

보 부재를 대상으로 한 연구는 비교적 오래전부터 진행되어져 왔지만, 대부분이 균열폭의 제어와 휨강도의 증대를 목적으로 하고 있다. 이와 같은 부재에 대해서 松崎·福山 등은 철근 콘크리트 보부재의

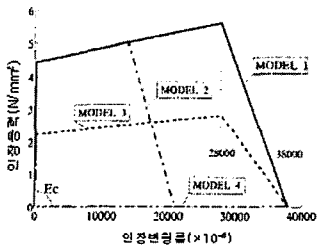



그림 3. DFRCC의 인장특성모델

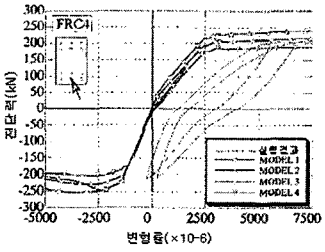



그림 4. 실험 및 해석의 비교

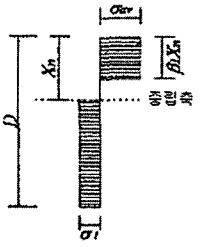
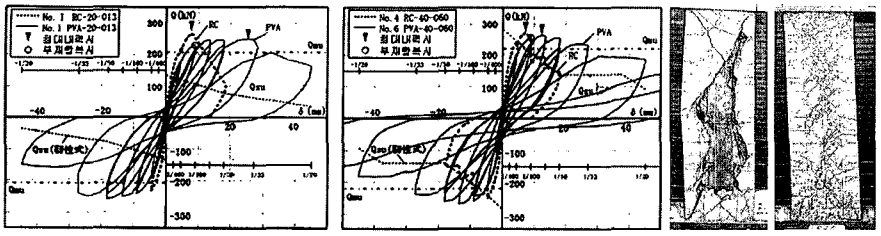



그림 5. 가정한 등가응력블럭 모델



a. 축력비 = 0.2, $p_w$ = 0.13 %　　b. 축력비 = 0.6, $p_w$ = 0.6 %

그림 6. RC기둥 및 DFRCC 기둥의 전단력-변형률 관계 비교



a. 콘크리트　b. DFRCC

사진 3. SRC 기둥의 최종파괴상황 비교

취성적파괴인 전단파괴 및 부착할렬파괴를 방지하기 위하여 실험 연구를 행하였다. 시험체의 형상을 〈그림 1〉에 나타내었다. 이 실험 연구에서는 일반 RC보로서 설계한 경우에 전단파괴(shear failure) 혹은 부착할렬파괴(bond split failure)되는 시험체(No.1시험체, No.5시험체)에 대해, 비닐론(PVA)섬유를 모르타르에 $V_f$ = 1.5 % 투입한 고인성 시멘트 복합체로 콘크리트를 치환한 경우(No.2 시험체, No.6 시험체)의 구조성능이 어떻게 변화하는지를 직접 비교하였다. 실험 결과의 비교를 〈그림 2〉에 나타내었으며, 최종파괴상황은 〈사진 2〉과 같다.

그림과 사진으로부터 고인성 시멘트 복합체의 취성파괴에 대한 효과가 명확히 나타남을 알 수 있다. 또한, RC보에 있어서 전단파괴 혹은 부착할렬파괴한 시험체와 동일한 배근의 실험체가 콘크리트를 고인성 시멘트 복합체로 치환함으로써 파괴모드가 연성인 휨항복으로 바뀌었다. 이 실험에서 전단보강근을 전혀 사용하지 않은 고인성 시멘트 복합체의 보의 휨전단실험를 실시한 결과, 전단파괴 이전에 휨 항복하는 거동을 보였다. 松崎·福山 등은 일련의 실험에서 고인성 시멘트 복합체를 사용함으로서 SD295급의 전단보강근 및 압축강도 40 MPa급의 콘크리트를 사용한 RC보로 환산할 경우, 전단보강근비 $P_w$ = 0.4 % 정도의 전단보강 효과가 있다고 보고하였다.

永井·Kanda 등은 고인성 시멘트 복합체를 보부재에 적용한 경우의 구조성능 중, 특히 휨항복 후에 전단파괴하는 경우의 강도, 변형 능력을 대해 휨전단 실험을 실시하였다. 여기서는, PVA 섬유를 $V_f$ = 0.2 % 투입한 모르타르를 상정하여 $P_w$를 인자로 한 실험을 행하여 전단내력, 휨내력의 평가에 대해 약간의 수정을 행하여 검토하였다. 휨 성능에 대한 검토에서는 〈그림 3〉에 나타낸 바와 같이, 고인성 시멘트 복합체의 인장성능을 고려한 파이버 모델에 의한 단면해석을 수행하여, 전단력-주근의 변형도 관계를 실험과 해석을 통하여 비교하였다. 해석에 있어서, 고인성 시멘트 복합체의 인장 특성 모델은 ①단벨형모시험편에 의한 인장 실험 결과를 치환모델로 한 경우(Model 1), ②모델 1에 대해서 종국인장변형도를 1/2로 한 경우(Model 2), ③모델 1에 대해, 응력도를 1/2로 한 모델(Model 3), ④인장응력도를 무시한 모델(Model 4)의 4가지 경우에 대하여 검토하였다.

그 결과〈그림 4〉, 단벨형시험편에 의한 재료실험 결과의 응력도를 1/2로 한 Model 3이 가장 타당하였으며, 단벨형시험편에 의한 고인성 시멘트 복합체의 인장특성 평가는 앞으로도 검토할 필요가 있다.

휨종국강도에 대해서는 휨해석에 ACI의 등가응력블록모델을 이용하여 평가하였다. 여기서도, 고인성 시멘트 복합체의 인장특성을 고려하여 〈그림 5〉에 나타낸바와 같이 인장항복응력도가 인장측에도 일정하게 분포하고 있다고 가정하였다. 또한 응력블록에 의한 경우도 고인성 시멘트 복합체의 인장항복응력도에 있어서, 재료실험결과를 사용 결과, 휨 해석을 위한 응력블록법은 단벨형 시험편을 이용한 재료실험결과에 대하여 응력도를 1/2로 한 경우가 실험 결과와 흡사한 결과를 얻었다.

전단종국강도에 대해서는 철근 콘크리트조 건물의 종국강도형 내진설계지침·동해설의 종국전단내력식의 전단보강효과($p_w$, $\sigma_{wy}$)에 직접 고인성 시멘트 복합체의 인장항복응력도를 가산한 식에 의해 평가하였다. 이 검토 결과에서도 σt의 값으로 재료실험결과의 1/2의 값을 사용할 경우 실험결과와 유사한 값을 얻었다. 이러한 검토결과 향후 고인성 시멘트 복합체의 일축 및 다축 응력 하의 역학적 특성을 보다 정확하게 파악해야 할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

$$V_{su} = b \cdot j_t (p_w \sigma_{wy} + \sigma_t) cot\phi + tan\phi (1-\beta) b D \nu \sigma_B / 2 \quad \text{식(1)}$$

여기서,

$\beta = (1 + cot^2\phi)(p_w \sigma_{wy} + \sigma_t)/\nu\sigma_B$

$\tan\theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$

$\sigma_t$ : 고인성 복합체의 인장항복 응력도, $b$, $D$ : 부재폭, 깊이(유효깊이), $j_t$ : 응력중심간 거리, $p_w$ : 전단보강근비, $\sigma_{wy}$ : 전단보강근 항복강도

이와 같은 일련의 연구 중에서 유한요소법(FEM)를 이용한 반복가력실험의 시뮬레이션 해석을 실시하고 있으며, 전단파괴된 실험체 이외에 대해서는 해석을 통해서도

그 성상을 파악하고 있는 것으로 보고 되고 있다. 단, 고인성 시멘트 복합체에 대한 기초 데이터가 부족하여 많은 가정 하에서 해석을 하였기 때문에 앞으로 검증되어야 할 필요가 있다. 또한, 보부재의 구조성능을 향상시키기 위한 연구에서는 Kanda 등에 의한 단스팬보를 대상으로 한 연구 등이 진행되었으며, 전단경간비가 1보다 작은 부재의 경우에도 고인성 시멘트 복합체를 사용함으로써 전단인장파괴가 지배적인 부재에 유효하다는 것을 검증되고 있다.

### 2.4 기둥부재에의 적용[7)]

기둥부재에는 축력이 작용하고 있으며, 지진시에는 전단력이 주로 작용하게 된다. 또한, 지진 등에 의해 기둥이 손상을 입은 경우에도 축력을 지지할 수 있는 필요가 있는 구조부재 중 가장 중요한 부재이다. 이러한 기둥부재는 충분한 축압축 내력뿐만 아니라 충분한 인성 확보를 통하여 구조물이 대지진 발생시에 보다 안전성을 확보해야 할 필요성이 있으며 이러한 의미에서 고인성 시멘트 복합체의 적용에 의한 효과가 기대된다고 할 수 있다. 기둥부재에 대한 고인성 시멘트 복합체의 적용에 관한 연구는 松崎·福山 등이 실시하였다. $\sigma_B$ = 27 MPa 정도의 보통 콘크리트를 사용한 경우, PVA 섬유를 $V_f$ = 1.5 %를 투입한 모르타르를 이용한 경우(이하, 고인성 시멘트 복합체 기둥으로 칭한다)와 직접비교를 행하였다. 실험결과 예를 〈그림 6〉에 나타내고 있다. 〈그림 6(a)〉는 축력비 0.2에 $P_w$ = 0.13 %의 시험체를 RC 및 RDPRCC와를 비교한 것으로 RC 기둥은 최대내력 직후에 전단파괴해 급격히 내력이 저하하여 취성적은 파괴를 보였지만, 고인성 시멘트 복합체기둥은 휨항복 후에 1/33 rad.까지 내력저하가 없이 안정된 이력거동을 보였다. 또한, 고축력인 축력비 0.4의 경우〈그림 6(b)〉, RC 기둥은 압축측 주근이 주근 항복 후 피복 콘크리트가 박리되어 주근 좌굴로 연성이 부족하였다. 한편, 고인성 시멘트 복합체 기둥은 고인성 시멘트 복합체의 탈락, 주근의 좌굴은 일어나지 않았으며, 인장철근의 항복에 의한 부재항복 후 고인성 시멘트 복합체의 압괴에 의해 완만하게 내력이 저하되었다. 이와 같은 결과에서 고인성 시멘트 복합체의 뛰어난 재료특성은 보부재와 같이 전단보강으로써 유효하며, 주근의 좌굴을 방지하는 등 시멘트 매트릭스의 구속에도 유효하다는 것을 실험에 의해 확인하였다. 기둥부재를 대상으로 한 연구는 그 이외에도 前田·倉本 등에 의해 철골철근 콘크리트(SRC) 기둥에의 적용을 대상으로 한 실험연구가 실시되었다. 이 연구는 철골철근 콘크리트 구조의 철근을 생략한 시공의 합리화를 시도하였다. 이와 같은 연구에서도 〈사진 3〉에서 보는 바와 같이 고인성 시멘트 복합체의 구속효과에 의해 손상을 대폭적으로 저감할 수 있다고 보고되어져 있다.

표 1. 시험체 일람

| | | | No.1 | No.2 | No.3 |
|---|---|---|---|---|---|
| 기둥 | 단면(mm) | | B × D = 240 × 240 | | |
| | 주근 | 종류 | SD345 | | |
| | | 배근 | 12-D13 | | |
| | | $P_g$(%) | 2.65 | | |
| | 띠근 | 종류 | SD295 | | |
| | | 배근 | 2-D6@50 | | |
| | | $P_w$(%) | 0.53 | | |
| 벽체 | 단면(mm) | | 60 × 1,760 | | |
| | 종횡근 | 종류 | SD295 | | 없음 |
| | | 배근 | D6@200 | | |
| | | $P_s$(%) | 0.27 | | |
| | 콘크리트 또는 모르타르 | | $\sigma_B$ = 30(MPa) 콘크리트 | $\sigma_B$ = 30(MPa) 정도 PVA섬유 15 mm, 4 % 혼입 모르타르 | |
| 벽 이외의 콘크리트 강도 | | | $\sigma_B$ = 30(MPa) | | |
| 축력 | | | 1/6BD$\sigma_B$ | | |

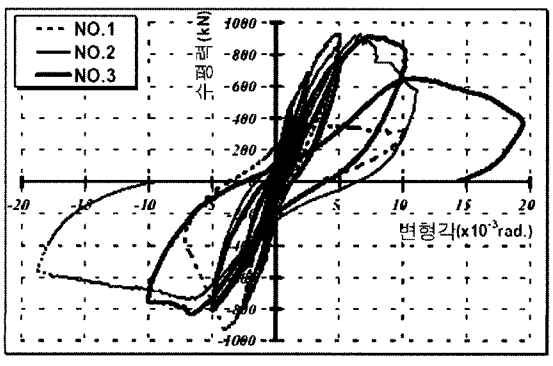
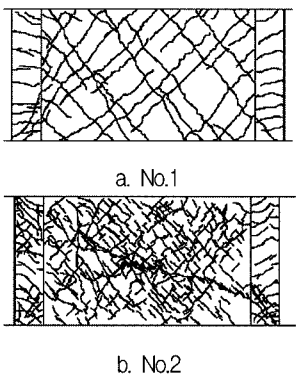



그림 7. 수평력-변형률 관계 비교



a. No.1

b. No.2

그림 8. 최종균열상황 비교

### 2.5 내진벽 부재에의 적용

벽부재를 대상으로 한 연구의 예로서 福山 등은 내진벽에 적용한 경우의 구조성능을 검토한 연구가 있다. 내진벽에의 적용을 목적으로 한 가력실험의 시험체 일람을 〈표 1〉에 나타내고 있다. 여기서는 보통의 RC 내력벽(No.1),에 대해 콘크리트를 대신하여 PVA를 $V_f$ = 4.0 %투입한 모르타르로 한 시험체(No.2)에서 벽의 종횡근을 배근하지 않은 시험체(No.3)에 대해서 직접 구조 성능을 비교하였다. No.1과 No.2의 수평력-변형각 관계를 〈그림 7〉에, 최종 균열도를 〈그림 8〉에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 콘크리트를 대신하여 고인성 시멘트 복합체를 이용한 경우, 균열의 분산, 취성파괴의 방지 효과가 뛰어났다.

내진벽 등의 얇은 벽체에 대해서 연성을 향상시키기 위하여 철근 등에 의한 보강은 곤란하기 때문에 고인성 시멘트 복합체에 의한 보강은 유효하리라 사료된다. 또한, FEM를 사용하여 재료의 특성의 변화가 어느 정도 구조성능에 영향을 미치는지 해석을 한 결과 내진벽과 같은 경우, 내진벽과 같은 부재의 경우는 재료의 인장특성을 향상시키기 보다는 압축연성을 향상시키는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

## 2.6 손상제어를 목적으로 한 적용

고인성 시멘트 복합체의 구조물에의 이용방법은 내력과 변형성능과 같은 부재의 종국상태를 개선함으로써 안전성에 관한 구조성능을 향상을 도모하는 방법과 인장에 취성적인 시멘트계부재의 약점을 보완 혹은 개선하여 손상의 저감, 수복성의 향상을 목적으로 하는 적용방법이 있다. 후자에 대해서는 구조성능을 구조부재 혹은 비구조 부재에 적용함으로써 부재자체의 손상을 저감하는 방법과 제진부재(에너지 흡수요소)에 적용하는 방법으로 구조물 전체의 응답변위를 저감시켜 각 구성요소의 손상을 저감시키는 방법이 있다.

### 2.6.1 손상제어의 필요성

건축물의 장수명화는 에너지 절약 혹은 산업폐기물의 삭감 등에 의한 지구 환경문제의 관점에서도 해결해야할 문제이다. 건축물의 장수명화를 실현하기 위해서는 내구성의 근본적인 개선이 불가피하며, 대지진에 대해서도 손상, 열화를 적절히 억제, 방지해서 지진 후에도 용이하게 보수가 가능하며, 건물을 장기간 유지, 사용가능 하도록 기술을 개발해야 한다.

### 2.6.2 손상저감을 위한 구조부재 및 비구조 부재에 적용[8)]

여기서는 부재에 적용함에 따른 균열분산과 균열폭의 저감에 대해서 소개하고자 한다. 〈그림 9〉은 보, 기둥에 역대칭 모멘트 형식의 정부반복재하실험에서 관찰한, 최대전단 균열폭과 부재변형각의 관계를 나타내고 있다. 또한, RC 보와 고인성 시멘트 복합체 보 및 RC 기둥과 고인성 시멘트 복합체 기둥에서 사용되어진 시멘트계 재료만 다르고 나머지 조건은 같다. RC 보와 고인성 시멘트 복합체보의 변형각 5%에서의 균열상황을 〈그림 10〉에 나타내었다. 전단균열폭은 RC 정도의 변형각에서 1% rad. 정도의 변형각에서 급격히 증가해 1 mm보다 커졌지만, 고인성 시멘트 복합체 실험체에서는 2% rad.의 변형각까지 균열이 0.2 ~ 0.3 mm 정도였다. 더욱이 그 이후에도 일부의 전단균열이 커졌지만, 대부분의 전단균열은 5% rad. 까지 0.2 mm 이하였다. 이 정도의 균열은 일반 RC 구조에 있어서 내구성과 사용성의 관점에서 허용되어지는 균열폭의 한계치로 생각된다. 이상의 결과는 대지진 후에도 구조물의 사용성과 내구성을 확보할 수 있을 것으로 생각되며, 수복이 필요없을 가능성도 있다.

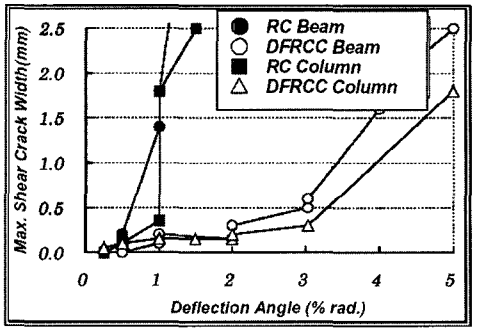
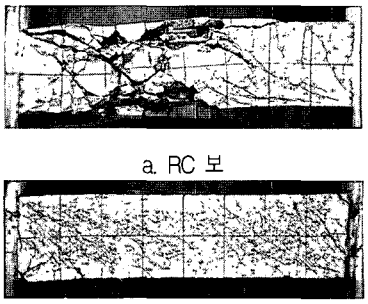


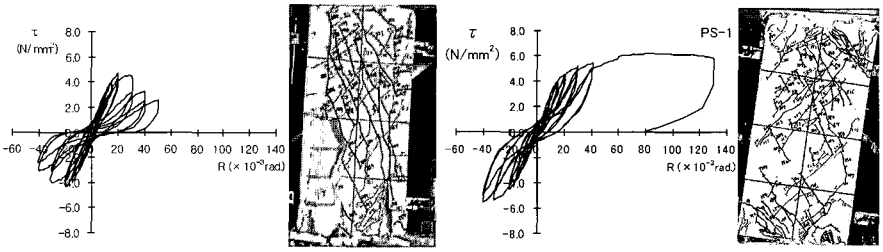

그림 9. 보 및 기둥의 휨 전단 가력실험 최대 전단균열 폭 추이



a. RC 보

b. DFRCC 보

그림 10. RC 보 및 DFRCC 보의 변형각 5%시 균열상황




a. 모르타르의 경우 (손상이 크고 변형 능력이 작음)

b. HPFRCC의 경우 (12% rad.까지 내력저하가 없음)

그림 11. HPFRCC의 응답제어 요소의 수평가력 실험결과

### 2.6.3 손상제어를 위한 제진부재

구조물 전체의 응답변위를 저감시켜서 각 건물 구성부재의 손상을 저감시키기 위한 응답제어요소로써 〈그림 11〉에 나타낸 단-스팬의 기둥부재를 상정하고 있으며, 높은 강성과 강도 그리고 변형 능력을 갖춘 구조요소이며, 작은 변형으로 높은 응력을 부담하는 효율적인 응답제어을 할 수가 있기 때문에 강구조 이외에 비교적 강성이 큰 콘크리트계 구조물의 응답제어에 적합하다.

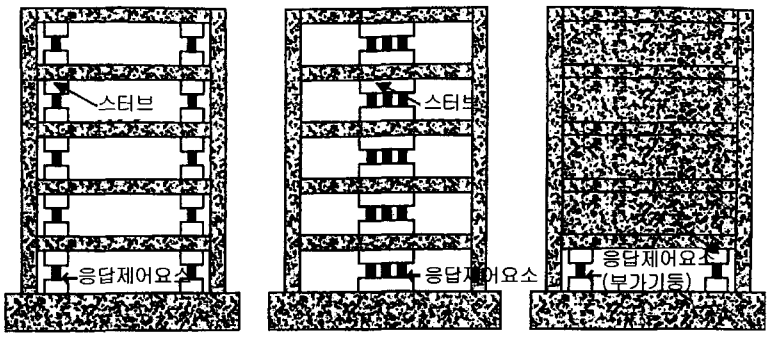
더욱이 요소의 강성과 내력은 그 형상과 배근, 그리고 HPFRCC의 종류에 따라 용이하게 바꿀 수 있으며, 자유로운 성형성을 가지고 있는 시멘트 재료이기 때문에 특성과 형태가 각각의 구조물에 가장 적합한 응답제어 요소를 얻을 수 있다. 〈그림 12〉에서는 스터브를 설치하여 단스팬의 응답제어요소로 하여 비교적 적은 요소에서 커다란 강성과 강도(수평저항력)를 얻을 수 있다. 또한, 스터브의 역할은 응답제어 요소의 스팬 조절뿐만 아니라, 주근의 정착과 요소를 가구에 정착시키는 것이다.

이와 같은 응답제어 요소의 구조성능을 정적가력실험을 통해 조사한 결과, 〈그림

11(a)〉에 나타낸 바와 같이 종래의 모르타르와 콘크리트는 손상이 크고, 최종적으로 커다란 전단과 압축력으로 파괴되어 충분한 변형 능력을 얻지 못했지만, HPFRCC를 이용함으로써 12% rad. 이상의 커다란 변형 능력과 손상의 저감효과를 확인할 수 있었다. 또한, 구조설계상 무시하고 있는 부위에 적용함으로서 평면계획에 영향을 미치지 않으면서 성능을 향상시킬 수 있으며, 저항복점 강, 마찰, 점탄성체, 점성유체 등을 이용한 기존의 제진 댐퍼에 비교해서 저렴하다. 또한, HPFRCC의 응답제어요소의 에너지 흡수는 주로 철근에 의한 효과에 기대하고 있으며, HPFRCC 재료의 에너지 흡수에는 그다지 기대하고 있지 않다. HPFRCC의 역할은 응답제어요소의 대변형까지 효과적으로 에너지 흡수능력과 높은 응력부담 능력을 발휘할 수 있도록 철근과 매트릭스의 부착성을 최대한 확보하는 것이다. 구체적으로 말하면 철근항복 후에 전단파괴, 부착할렬파괴, 정착파괴 등의 취성적인 파괴를 방지하는 것이다. 또한 응답제어요소는 단부의 휨변형에 의해 〈그림 11(b)〉의 사진과 같이 회전변형이 발생하여 그에 따른 수직변위가 가구에 의해 구속되기 때문에 응답제어요소에는 커다란 압축력이 발생한다. 따라서 HPFRCC에는 취성적인 압축파괴를 방지하는 역할도 기대된다.

(1) 기존 필로티 건축물의 손상제어

〈그림 12〉은 필로티 건축물의 대표적인 피해 예를 나타내고 있다. 〈사진 4(a)〉는 과거지진 피해에서 나타난 기둥의 전단파괴를 수반한 1층의 붕괴를 보여주고 있다. 이런 파괴는 현행기준법에 의해 설계된 필로티 건축물에서는 거의 방지되었지만, 고베지진에서 필로티 건물에 있어서 새로운 형태의 피해가 발생하였다. 그 피해는 1층의 수평전단력이 부족하여 1층의 수평변형이 집중하여 발생하는 층 붕괴〈사진 4(b)〉와 전도 모멘트에 의한 커다란 변동축력이 작용함으로써 1층 기둥의 파괴〈사진 4(c)〉가 있다. 〈사진 4(c)〉에 있어서 기둥의 좌굴은 인장응력 하에서 주근이 항복한 후에 커다란 압축응력에 의한 것으로 판단된다. 반대로, 주근의 좌굴 후에 다시 커다란 인장응력이 기둥에 작용한 경우에는 주근의 파단이 발생할 가능성이 있다. 이와 같이, 필로티 건축물의 안전성을 고려하여 기둥의 전단파괴뿐만 아니라, 1층의 응답변위를 작게 함으로써 기둥에 발생하는 축력을 가능한 한 작게 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.




a. 가구 기둥주위에 적용 b. 가구중앙에 집중적 적용 c. 필로티에 적용

그림 12. 응답제어요소의 이미지

a. 기둥의 전단파괴에 의한 붕괴 b. 1층에 과도한 변형집중에 의한 층붕괴 c. 전도모멘트에 의해 커다란 변동축력이 기둥에 작용에 의한 붕괴

사진 4. 필로티 건축물의 붕괴형식의 분류

(2) 필로티 보강에 대한 조건

필로티 건축물에 있어서 필로티 층의 응답을 저감시키기 위한 방법으로는 일반적으로 필로티층에 내진벽을 설치하여 1층에서부터 연속하는 연속 내진벽으로써 이 부분에 많은 수평력을 부담시키는 방법들이 일반적이다. 그러나 필로티 구조는 하층에 넓은 공간을 만들어서 주차장 및 점포로 이용하는 구조로써 공간을 계획하였기 때문에 내진벽을 설치할 경우, 필로티 공간의 기능을 제한하게 된다. 건축물의 기능적 관점으로부터 내진벽을 설치하는 것이 허용되어질 경우, 그와 같은 응답제어 방법은 구조적으로 신뢰할 수 있는 방법으로 생각되지만, 필로티 층의 넓은 공간의 확보가 요구되어진 경우는 내력벽뿐만 아니라, 공간을 막는 가새나 제진장치 등을 이용할 수 없다.

(3) 기존 필로티 건축물의 응답제어 방법

필로티 건축물은 손상이 필로티 층에 집중하기 싶지만, 그 필로티 층의 응답이나 손상을 적절하게 제어한다면, 건축물 전체의 손상을 용이하게 실현할 수 있으며, 손상제어에 용이한 방법이라 할 수 있다. 제어한 결과, 손상이 상부구조로 옮겨간다면 이 또한 피해야하기 때문에 단순하게 필로티 층을 강하게 하면 좋다는 것은 아니다. 여기서는 필로티 건축물의 응답변

위를 저감시켜서 건물 전체의 손상을 저감할 수 있는 응답제어요소로써, 〈그림 12(c)〉에 나타낸 부가 기둥을 제안한다. 이 부가기둥의 특징은 비교적 작은 요소에서 필로티 층의 강성과 강도를 대폭으로 증가시킬 수 있으며, 축력을 부담할 수 있다. 더욱이 상층이 내진벽이기 때문에 보-기둥 강접가구의 경우에는 보의 조기항복을 막을 수 있는 특별한 보강을 하지 않아도 응답제어변위에 유효하게 사용할 수 있다. 즉, 부가기둥은 〈사진 4(b) 및 (c)〉에 나타낸 필로티 건축물의 붕괴 요인의 두 가지 경우에 대해 효과가 있다고 생각된다.

## 3. 국내의 동향

최근 국내에서도 장수명 건설기술에 대한 사회적 요구와 국외 건설기술 연구동향에 힘입어 2003년도 건설교통부 건설핵심기술연구개발 사업 연구비 지원으로 DFRCC 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 가운데 한국구조물진단학회, 한국콘크리트학회, 충남대학교 주관으로 한·일 양국간 건축 분야의 공동관심사에 관한 연구발표 및 건설생산현장에서의 신기술·신공법을 소개, 토론하고 한·일 양국간의 건설 생산성 향상 및 기술개발뿐만 아니라 상호협력과 이해증진을 목적으로 하는 '고인성 시멘트 복합체의 구조적인 적용방안에 관한 한일 공동 국제 심포지엄'[9]이 개최되었다. 이하에서는 국내에서 연구, 개발된 섬유복합모르타르 보수·보강공법에 대하여 소개하고자 한다. 이 공법은 섬유복합 몰탈 만을 사용하여 보수 및 보강효과를 동시에 달성할 수 있는 공법으로, 탁월한 변형성능과 에너지 흡수 능력으로 구조재의 거동을 연성으로 변화시켜주는 차세대 기술이다. 건조수축 및 진동에 의한 양생 중 균열이 발생하지 않으며, 스프레이는 물론 수작업으로도 시공이 가능한 콘크리트 구조물용 다기능을 가지고 있다. 〈사진 5〉는 스프레이를 통한 시공에 대한 예이다.

### 3.1 사용방법

사용 물량의 85 %를 먼저 믹서에 넣은 후 섬유 복합 모르타르를 혼합하고 워커빌리티는 잔여물량으로 조절한다〈그림 13〉. 그 다음 구체 콘크리트 면을 습윤 상태로 하여 시공을 하고, 균일하게 비빈 섬유복합 모르타르를 스프레이 또는 미장으로 시공하고, 마무리 작업은 흙손으로 하고, 현장 여건에 따라 피막 양생제 또는 도막제를 도포한다.

### 3.2 효과 및 성능

①무기질 시멘트를 기초로 한 재료로 간편하게 스프레이 시공이 가능하다. ②점도가 우수하고 흘러내리거나 처지지 않으며 구체와의 접착강도가 매우 우수하다. ③기존 보수재료보다 인성이 우수하여 구조물의 보수보강에 적합하다. ④섬유복합구조로 뛰어난 연성특성을 발휘한다. ⑤구조물의 사용 중에 발생하는 충격이나 진동 및 건조수축에 의한 균열저항성이 우수하다. ⑥탁월한 변형성능으로 계면부착이 우수하다.

### 3.3 시공순서 및 적용범위

시공순서는 〈사진 6〉에 나타낸 것과 같이 바탕면 처리→믹싱→섬유복합몰탈 타설→마감의 순서로 진행된다. 적용범위는 〈사진 7〉에 나타낸 것과 같이 교량의 상부

사진 5. 스프레이를 통한 시공 전경

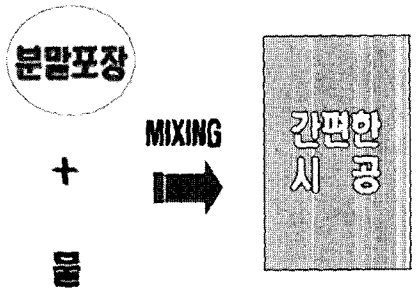



그림 13. 시공과정 개요

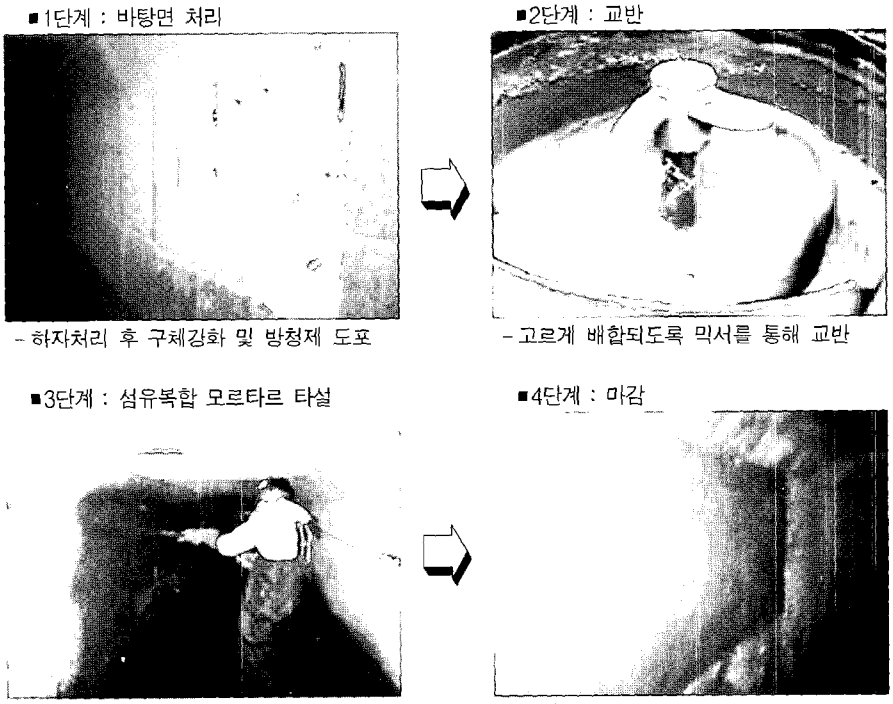



사진 6. 섬유복합 모르타르 시공순서

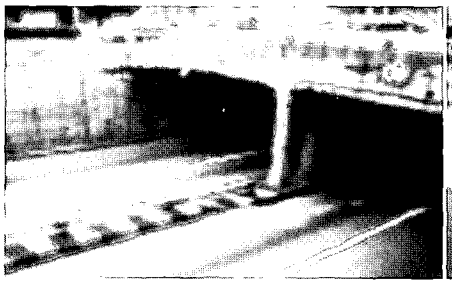
■교량

-교량 상부 구조 및 하부구조

■항만 및 공항

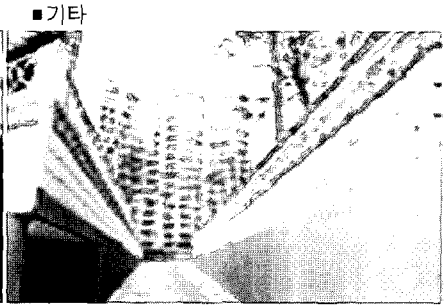
-접안시설, 컨테이너 부두, 활주로

■터널 및 지하차도



-터널라이닝, 지하철 및 지하차도, 지하 Box 및 공동구의 슬래브 및 벽체

■기타



-옹벽 등의 토류구조, 충격 및 진동에 취약한 콘크리트 구조물

사진 7. 섬유복합 모르타르의 적용범위

구조 및 하부고조, 항만 및 공항의 접안시설, 컨테이너 부두, 활주로 등에 사용가능하다. 또한, 터널 및 지하차도에서는 터널라이닝, 지하철 및 지하차도 그리고 지하박스 및 공동구의 슬래브 및 벽체에 사용한다. 그 이외에도 옹벽 등의 토류구조, 충격 및 진동에 취약한 콘크리트 구조물 등에도 사용가능하다.

## 4. 향후 연구 및 활용방향

21세기에 접어들면서 모든 기술 분야에 있어서 자원절약, 에너지 절감, 지구환경 부하 저감 등의 키워드가 전재조건이 되어 토목·건축 구조물에 있어서도 요구되는 새로운 기술에 대하여는 안전하고, 안심할 수 있는 성능을 보유하며, 지구환경에 친화적인 구조물이 개발 목표가 될 것으로 사료된다. 즉, 보다 높은 안전성(인명의 보존), 구조물 자체 손상(훼손)의 자기제어, 사용성(기능유지) 등의 확보와 장기 내구성을 가지는 구조물을 최적으로 실현시키는 기술이 요구될 것이다. 다양화, 고도화하는 사회의 요구에 부응할 수 있는 콘크리트계 재료의 한 가지로써 높은 인성과 자기손상저감성(自己損傷低減性)을 갖추고, 구조물의 안전성, 수복성 그리고 내구성 등을 크게 향상시킬 수 있는 고인성 시멘트 복합체(DFRCC)가 주목을 받고 있다. 본문에 소개한 적용분야 이외에도 현재 강섬유에 의해서 보강된 셀프 레벨링(self-leveling) DFRCC, 단일섬유가 아닌 직물로 보강된 시멘트계 복합체, 단섬유로 보강된 반응성 분체 콘크리트의 지속적인 연구개발, 형상기억합금(形狀記憶合金)과 같은 자기회복성능을 가진 섬유재료를 매크로 수준에 있어서 프리스트레스 소재료서 이용한 자기(自己)프리스트레스트 섬유보강 시멘트 복합체(스마트 재료), 차세대의 초고성능 콘크리트 등의 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 그러므로 국내에서도 취성적인 시멘트계 복합체의 성능을 획기적으로 개선한 DFRCC에 대한 보다 적극적인 관심과 연구가 필요할 것으로 판단되며, 특히 시멘트 복합체의 특성이용 방법에 대한 개발뿐만 아니라 재료, 구조 및 시공에 관한 전반적인 검토와 데이터의 축적이 시급하다는 작은 연구방향을 언급하며 본고를 마감한다. ◙

## 참고문헌


1. Lim, Y. M. and Li, V. C., "Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composite," J. of Cement and Concrete Composites, Vol.19, No.4, 1997, pp.375~385.
2. Li. V. C., "Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites(ECC)," Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Co mposites (DFRCC)-Application and Eval uation, JCI 2002. 10.
3. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H., "Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements, Composite and Hybrid structures," Proceeding of 6th ASCCS Conference, ASCCS-6 Secretari at, 2000. 3, pp.969~976.
4. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H., "Structural Performance of Engineered Cementitious Composites Elements, Composite and Hybrid Structures," Proceedings of 6th ASCCS-6 Secretariat, 2003. 3, pp.585~660.
5. 蓼谷武可, 谷口倭哉, 國枝捻, 諫田敏郎, 六鄕惠哲, "ECCを用いた鐵筋コンクリート部材の力學擧動の評價", 土木學會第56回年次學術講演會講演概要集, Vol.555, 2001, pp.1110~1111.
6. 蒼谷 幸憲, 福山 洋, 中野 克彦, 松崎 育弘, "高靭性セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能", コンクリート工學年次論文集, Vol.21, No.3, 1999. 7, pp.511~516.
7. 笠原美幸, 松崎 育弘, 中野 克彦, 福山 洋, "高靭性型セメント系複合材料を用いた柱部材の構造性能に關する實驗硏究", コンクリート工學年次論文集, Vol.22, No.3, 2000. 6, pp.385~390.
8. 岩渕一德, 福山洋, 外1人 "高靭性セメント複合材料を用いた付加柱によるピロティ建築物の応答制御", コンクリート工學年次論文集, Vol.25, 2003, pp.1327~1332.
9. 충남대 구조공학 연구실, "고인성시멘트 복합체의 구조적인 적용방안에 관한 한일 국제심포지움", 2004.10.