

# HPFRCC를 이용한 구조물 보수보강공법에 대한 JSCE의 구조안전성 평가 방법

Outlines of "Recommendations for Structural Design of ECC Retrofitted Structures" by JSCE



한병찬\*  
Byung-Chan Han



김재환\*  
Jae-Hwan Kim



김윤용\*\*  
Yun-Yong Kim



하기주\*\*\*  
Gee-Joo Ha



권영진\*\*\*\*  
Young-Jin Kwon

## 1. 서 언

최근 국내외적으로 휨 또는 인장력 작용 하에서 초기균열이 발생한 후에도 응력이 저하하지 않고, 변형 증가와 함께 응력이 지속적으로 증가하는 유사변형경화거동(pseudo-strain hardening behavior)을 보이면서 이 과정에서 균열폭이 일정하게 제어되는 복수(複數)의 미세균열인 멀티플크랙(multiple crack) 특성을 발휘하는 섬유보강 시멘트 복합재료가 개발되어 적용이 추진되고 있다. 외국에서는 이러한 재료를, HPFRCC(high performance fiber reinforced cementitious composites)라는 학술용어로 부르고 있고, 국내에서는 대표적 HPFRCC 재료의 일종인 ECC(engineered cementitious composites)로 널리 알려져 있으며, 보다 구체적으로 재료의 특성을 표현하여 DFRCC(ductile FRCC, 고인성 시멘트 복합재료)라는 용어가 쓰이기도 한다. 특히, RILEM에서는 HPFRCC 위원회(TC HFC, 위원장 : Victor C. Li 교수)를 두어 재료/부재의 성능 평가 지침을 제작하고 있는 상황이다. 이와 더불어 일본토목학회(이하 JSCE)에서는 이 재료를 「複數微細ひび割れ型纖維補強モルタル(복수미세균열형 섬유보강 모르타르)」라는 용어로 정의하여 「복수미세균열형 섬유보강 모르타르(HPFRCC)의 평가와 이용 연구(334) 소위원회(기간 : 2004. 09~2006. 09)」를 구성하여, 학회 차원에서 설계시공·구조설계 기준(안)을 작성<sup>1)</sup>하는 작업을 추진하고 있다.

국내에서도 최근 3년 사이에 HPFRCC에 대한 개발 및 활용 기술에 관한 연구가 본격적으로 추진되어 ECC 보수 모르타르의 개발<sup>2)</sup>과 더불어 이 재료를 이용하는 구조물의 보수보강 특허공법<sup>3)</sup>이 등록된 바 있다. 이외에도 재료의 높은 연성을 활용

하여 구조 부재에 적용하고자 하는 다양한 연구<sup>4-6)</sup>가 진행되고 있다. 그러나 HPFRCC의 설계·시공·성능 평가에 대한 기준(지침)을 정립하고자 하는 학회 차원의 논의는 이제 겨우 걸음마를 내디딘 단계에 있는 실정이다.

따라서 본고에서는 현재 JSCE가 추진하고 있는 HPFRCC재료의 구조설계 지침(안)에 있어, 본 재료가 보수·보강 재료로서 사용되는 경우의 설계지침 및 간단한 설계식을 소개하고, 기존 실험 결과와의 비교 분석을 통하여 이를 검증하고자 한다. 이를 위하여 JSCE가 제시하고 있는 HPFRCC의 재료 특성값(역학적 특성에 대한 설계값) 규정과 휨보강 및 전단보강에 대한 설계식을 살펴보고 향후 국내의 설계지침 제정을 위한 기초 자료로써 이를 활용하고자 한다.

## 2. JSCE에서 규정한 HPFRCC 재료 특성값

HPFRCC는 시멘트 매트릭스와 보강용 섬유의 조합에 의하여 강도 특성과 변형 특성이 기존의 콘크리트 및 시멘트 모르타르(폴리머시멘트 모르타르 포함)와 큰 차이를 보인다. 따라서 구조물이나 부재에 적용되는 경우 기존의 재료 특성값을 사용할 수 없다. 일반적으로 재료의 특성값은 식 (1)에 의해 평가될 수 있다.

$$C_v \leq C_{vm} - k\sigma \quad (1)$$

여기서,  $C_v$  : 특성치

$C_{vm}$  : 설계치의 평균치

$\sigma$  : 설계치의 표준편차

$k$  : 계수

계수  $k$ 는 특성값 보다 작은 값의 실험값을 얻을 확률로써 정규분포 하에서 5%인 경우에 계수  $k$ 는 1.64가 된다. 일반적으로 시멘트 복합체의 재료 특성값은 28일 재령 강도를 기준으로

\* 정회원, (주)AMS엔지니어링, 공학박사  
hbc@eng-ams.com

\*\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 경일대학교 건축공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 호서대학교 소방방재학과 교수

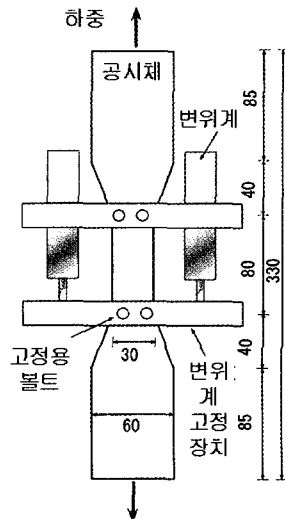


그림 1. 직접 인장 시험 방법

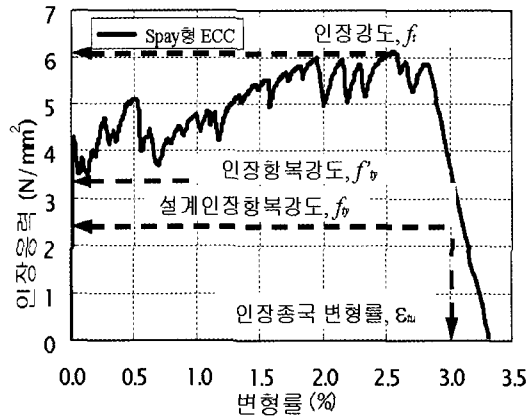


그림 2. 인장항복강도 및 인장극한변형률의 정의

로 하고 있으며, JSCE는 HPFRCC에 대하여도 이를 따르고 있다. JSCE에서 제안하고 있는 재료계수, 인장항복강도, 인장강도, 인장 극한변형률, 압축강도, 인장 응력-변형률 관계, 압축 응력-변형률 관계, 탄성계수, 포아송비 등을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 재료계수, $\gamma_c$

재료계수( $\gamma_c$ )는 주로 시공에 기인하는 것으로, 공시체와 구조물 사이의 재료의 오차, 경시변화 및 지속하중 영향 등을 고려한 계수로써, 극한한계상태의 검토에 있어서는  $1.3(f_{tk} \leq 80 \text{ N/mm}^2)$ 이며, 사용한계상태 검토에 있어서는 1.0으로 하고 있다.

### 2.2 설계인장항복강도, $f_{ty}$

기존의 시멘트복합체는 매우 취성적이어서 직접인장 시험 방법이 특별히 규정되어 있지 않아 왔다. 따라서 HPFRCC의 1축 인장강도 평가 방법은 많은 연구자들에 의하여 제시되어 왔는데 일반적으로 섬유 방향성, 시편의 크기, 시험 방법 등에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

JSCE는 인장강도  $f_t$ 를 구하기 위하여 <그림 1>과 같은 1축 직접인장 시험 방법을 이용하도록 하고 있으며 이 시험에 의하여 결정된 응력-변형률 관계 곡선에서 응력의 최대값을 인장강도로 정의하고 있다(그림 2 참조). 또한 인장항복강도  $f'_{ty}$ 는 응력-변형률 관계에서 균열발생 직후의 값을 특성값으로 정하고 있고, 설계인장항복강도  $f_{ty}$ 는 인장항복강도를 재료계수로 나눈 값( $f'_{ty}/\gamma_c$ )으로 정하고 있다. 또한 인장극한변형률  $\epsilon_{tu}$ 는 <그림 2>에 보인 바와 같이 응력-변형률 곡선의 하강 부분

에서  $f'_{ty}$ 에 해당되는 변형률로 정의하고 있다.

### 2.3 압축강도

HPFRCC의 압축 시험은 콘크리트의 압축 시험 방법과 동일한 방법을 이용할 수 있다. 즉, 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원통형공시체의 28일 재령강도를 압축강도로 한다. 다만 굵은 골재가 포함되어 있지 않은 경우에는 직경 50 mm, 높이 100 mm의 원통형 공시체를 이용할 수도 있다.

### 2.4 인장 응력-변형률 관계

전술한 바와 같이, 1축 인장 하에서의 응력-변형률 관계는 콘크리트를 포함한 취성적인 시멘트 복합체가 갖지 못하는 HPFRCC만의 고유한 특징 중 하나이다. 기존 연구<sup>7)</sup>에 의하면, HPFRCC의 인장 응력-변형률 관계를  $f'_{ty}$ 를 항복 기준으로 하는 완전 탄소성 구성방정식으로 가정해도 부재 설계에는 무방하다. 그러나 안전성 측면에서, 설계인장항복강도  $f_{ty}$ 를 항복의 기준으로 하는 완전 탄소성 구성방정식을 이용하도록 하고 있다(그림 3).

### 2.5 압축 응력-변형률 관계

휨 부재 또는 휨과 축압축을 받는 부재에서 HPFRCC의 압축 응력-변형률 관계는 일반적으로 <그림 4>와 같이 나타낼 수 있으며 이 때 곡선부의 응력-변형률 관계는 식 (2)과 같다.

$$\sigma'_c = \frac{0.85f'_{ck}}{\gamma_c} \frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_m} \left( 2 - \frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_m} \right) \quad (2)$$

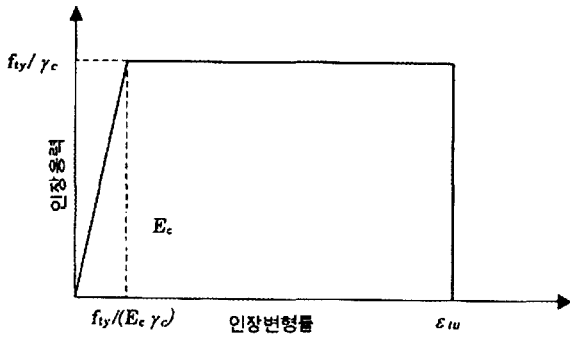


그림 3. 인장 응력-변형률 관계

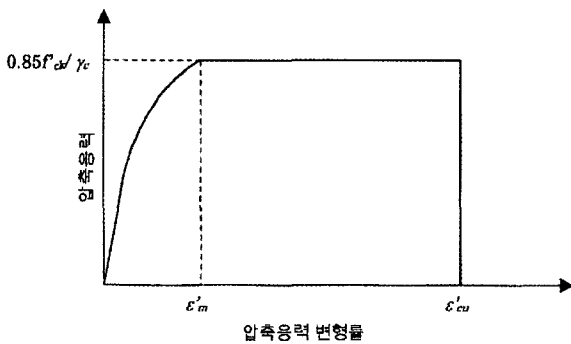


그림 4. 압축 응력-변형률 관계

〈그림 4〉에서  $\epsilon'_m$  과  $\epsilon_{cu}$  는 일반적인 콘크리트와 큰 차이를 보인다. 즉, 응력증가 곡선부의 최종점에 대한 변형률인  $\epsilon'_m$  의 경우, 일반적인 콘크리트의 값이 0.2% (0.002) 정도인데 반하여 HPRCC의 경우는 〈그림 5〉와 같이 0.4% (0.004) 값을 초과하는 것이 일반적이다.

〈그림 6〉은 인장 및 압축 하에서의 HPRCC와 보통콘크리트의 응력-변형률 관계를 비교하여 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 HPRCC는 인장부에서 소정의 인장강도와 변형능력을 보유하고 있으며, 압축부의 최대 변형률이 서로 큰 차이를 보인다.

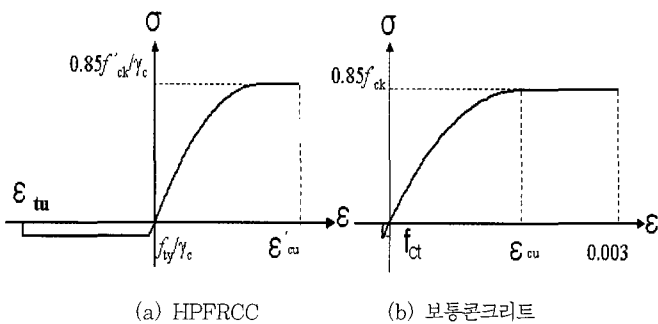


그림 6. 1축 응력-변형률 곡선의 비교

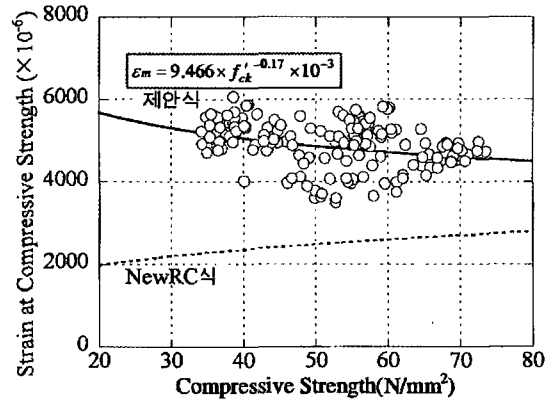


그림 5.  $\epsilon'_m$  의 실험 데이터<sup>8)</sup>

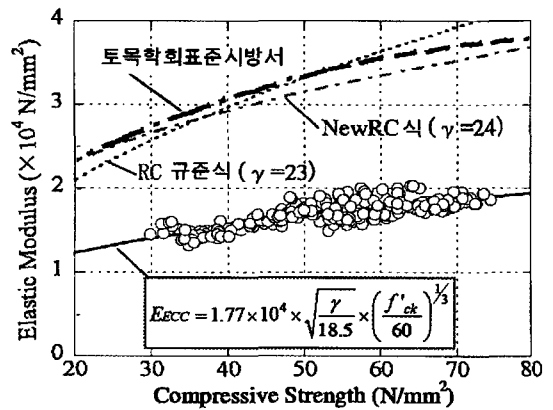


그림 7. 탄성계수의 실험 데이터<sup>8)</sup>

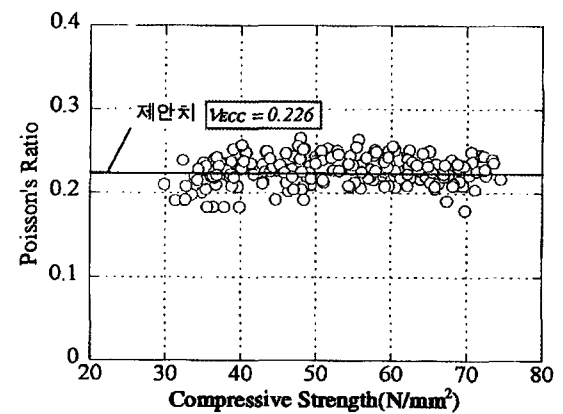


그림 8. 푸아송비의 실험 데이터<sup>8)</sup>

### 2.6 탄성계수, $E_{ECC}$

HPFRCC의 탄성계수는 콘크리트와 동일한 시험 방법에 의해 얻을 수 있으며, 얻어진 탄성계수는 일반 콘크리트에 비하여 대략 1/2~2/3 정도의 값을 갖는다. 〈그림 7〉은 탄성계수에 관한 실험값과 각종 기준에서 제시하는 기준값을 비교하여 나타내었다.

### 2.7 푸이송비, $\nu_{ECC}$

HPFRCC의 푸이송비에 대한 실험값을 <그림 8>에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 HPFRCC의 푸이송비는 일반 콘크리트가 갖는 값을 약간 상회하는 평균 0.226이다.

### 3. JSCE에서 규정한 HPFRCC의 구조안전성 평가 방법

현재 HPFRCC의 활용은 크게, 토목 구조물의 보수보강재, 건축 구조물의 내진보강을 목적으로 한 끼움 벽 또는 내진디바이스, 내피로성을 갖는 교량 상판 보호재, 내화성을 필요로 하는 구조물의 보수 또는 보수·보강재 등으로, 향후 재료의 고성능을 고려한 폭넓은 구조부재의 적용이 기대된다. 여기서는 이러한 재료가 구조부재에 적용되는 경우 부재의 구조설계시 재료 특성을 반영할 수 있는 설계방법 및 구조안전성 평가 방법을 소개하였다. 이를 위하여 압축부재, 휨부재, 철근콘크리트 부재에의 휨보강, 전단보강 등에 관하여 살펴보고자 하였다.

#### 3.1 축력에 대한 안전성 검토 방법

축압축을 받는 부재의 축압축 내력 상한값  $N'_{oud}$ 는 식 (3)에 의하여 산정한다.

$$N'_{oud} = (k_1 f'_{cd} A_c + f'_{yd}) / \gamma_b \quad (3)$$

여기서,

- $A_c$ : HPFRCC의 단면적
- $f'_{cd}$ : HPFRCC의 설계압축강도
- $A_{st}$ : 축방향 철근의 전단면적
- $f'_{yd}$ : 축방향 철근의 설계압축 항복강도
- $k_1$ : 강도의 저감계수 ( $1 - 0.003f'_{ck} \leq 0.85$ ), 여기서,  $f'_{ck}$ 는 콘크리트의 설계기준강도 (MPa)
- $\gamma_b$ : 부재계수, 일반적으로 1.3

축방향력을 받는 부재의  $M_d/N'_d$ 가 작은 경우에도 부재 축선 양단의 휨모멘트 차가 일부 발생하면 내하력이 상당히 저감될 수 있다. 이러한 영역에 대한 안전성을 고려하기 위하여 설계 축방향 압축내력의 상한값에 부재계수 1.3을 적용한다.

#### 3.2 휨 부재 또는 휨과 축력을 받는 부재에 HPFRCC를 적용하는 경우의 안전성 검토 방법

휨 부재 또는 휨과 축력을 받는 부재의 설계단면력, 또는 1방향 슬래브의 단위 폭 공칭휨내력은 다음 (i)~(iii)의 가정에

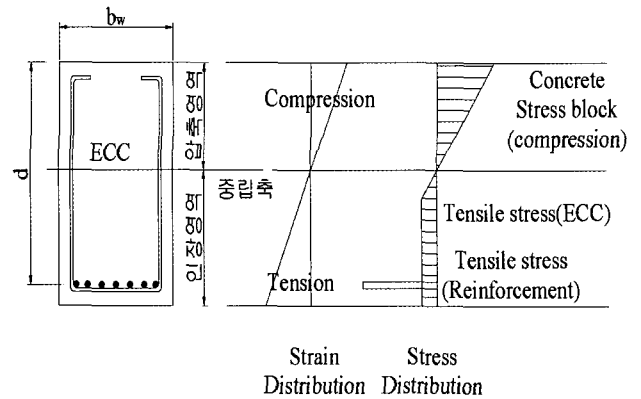


그림 9. 변형률 및 응력 분포의 개념도

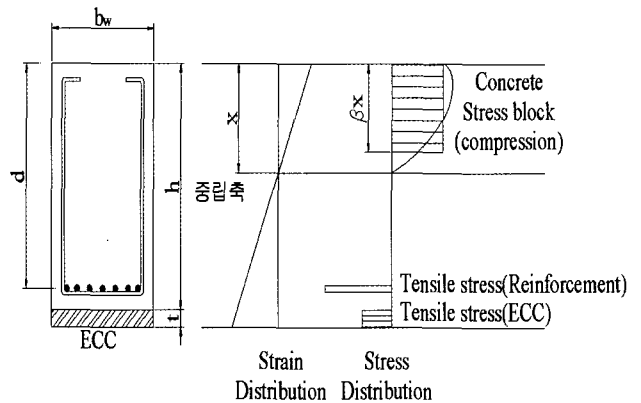


그림 10. 등가응력블록

근거하여 계산한다. 이러한 경우, 부재 계수  $\gamma_b$ 는 1.1로 한다. 여기서는 부재 내에 HPFRCC가 전면적으로 사용된 경우를 대상으로 한다.

- (i) 변형률은 단면의 중립축으로부터 거리에 비례한다.
- (ii) HPFRCC의 응력-변형률 곡선은 HPFRCC의 설계값을 근거로 결정한다.
- (iii) 강재의 응력-변형률 곡선은 일반적인 콘크리트 구조설계 기준에 따른다.

HPFRCC는 1축 인장 변형률 경화 거동(Pseudo strain hardening) 특성을 나타내는 고인성 재료로써 안정적으로 인장응력을 전달할 수 있다.

따라서 일반 철근콘크리트 휨 부재에서 인장 영역의 콘크리트와 달리 인장 영역에 놓인 HPFRCC에서 발생하는 인장응력을 고려하여 부재의 극한한계상태를 검토한다. HPFRCC 휨 부재 단면의 변형률 및 응력의 분포를 개념적으로 나타내면 <그림 9>와 같다.

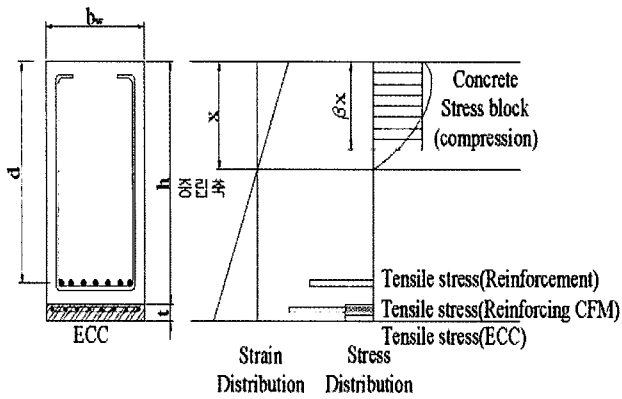


그림 11. HPFRCC와 탄소섬유 메쉬(CFM)로 보강한 경우의 등가응력블록

### 3.3 축력이 없는 휨 부재의 인장 측에 HPFRCC를 보강한 경우의 안전성 검토 방법

이 절에서는 HPFRCC를 이용하여 기존 철근콘크리트 휨 부재의 단면을 보강한 경우에 대한 안전성 검토 방법을 소개하고자 한다. 축방향력이 작용하지 않는 철근콘크리트 부재(단순보 등)의 인장 측에 HPFRCC를 타설(보강)하여, HPFRCC 전체가 인장을 부담하는 경우에는 콘크리트의 압축응력의 분포 및 HPFRCC의 인장응력의 분포를 <그림 10>에 나타난 직사각형 응력분포(등가응력블록)로 가정하고, 식 (4) 및 (5)에 의하여 휨 내력을 계산할 수 있다. 단 HPFRCC와 콘크리트는 적절한 방법으로 일체성이 확보되어 있어야 한다.

$$x = \frac{\rho_w d f_{yd} + t f_{ty}}{k_1 \beta f'_{cd}} \quad (4)$$

$$M_u = k_1 \beta \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) b_w f'_{cd} x^2 + A_s f_{yd} (d - x) + f_{ty} b_w t \left(h - x + \frac{t}{2}\right) \quad (5)$$

여기서,

$$\rho_w : A_s / (b_w d)$$

$A_s$  : 인장측 철근의 단면적

$f_{yd}$  : 인장측 철근의 설계항복강도

$f_{ty}$  : HPFRCC의 설계인장항복강도

$k_1$  : 강도저감계수 일반적으로 0.85

$$\beta : 0.52 + 80 \epsilon'_{cu}$$

$$\epsilon'_{cu} : \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \leq 0.0035$$

$f'_{ck}$  : 콘크리트의 설계기준 강도 ( $f'_{ck} \leq 80 \text{MPa}$ )

또한, <그림 11>과 같이 기존의 단면보강공법과 조합을 하는 경우(예를 들어 휨 부재의 하부 인장 측에 탄소섬유 봉, 아라미

드섬유 봉, 탄소섬유 메쉬, 아라미드섬유 메쉬, 보강철근, 또는 기타 보강물을 배치하고, HPFRCC를 타설(보강)하여 보강 재료 전체가 인장을 부담하는 경우에는 <그림 10>과 같은 기존 철근콘크리트 응력분포에 인장측 하부의 HPFRCC와 보강물의 응력분포를 고려하고, 각각의 변형을 및 응력요소에 대한 적합조건(compatibility)과 평형조건(equilibrium)을 만족하는 휨 내력 산정식을 유도하여 이를 이용할 수 있다. 한편, HPFRCC를 단순히 구 콘크리트에 보강물을 일체시키기 위한 수단으로 간주하여 내력의 계산에는 포함하지 않더라도 사용성과 내구성 측면에서 기존의 보강방법에 비하여 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단한다.

### 3.4 전단력에 대한 안전성 검토 방법

이 절에서는 HPFRCC와 보강물로 구성되는 부재 또는 철근 콘크리트 부재의 일부분을 HPFRCC로 보강한 경우의 전단력에 대한 안전성 검토 방법을 소개하고자 한다. HPFRCC의 전단력 부담이 비교적 큰 경우에는 실험 등과 같은 합리적인 방법을 근거로 평가할 수 있다.

HPFRCC와 보강물로 구성되는 부재의 설계전단력  $V_{yd}$ 는 식 (6)에 의해 구할 수 있다. 설계전단력  $V_{yd}$ 는 HPFRCC의 매트릭스가 부담하는 전단력  $V_{cd}$ , HPFRCC의 보강용 섬유가 부담하는 전단력  $V_{fd}$ , 전단철근이 부담하는 전단력  $V_{sd}$ 의 합으로 표현할 수 있다. HPFRCC의 보강용 섬유가 저항하는 전단력이 크기 때문에 이러한 효과를 고려함으로써 합리적으로 전단 설계를 할 수 있다.

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} + V_{ped} \quad (6)$$

여기서,  $V_{cd}$ 는 보강용 섬유가 부담하는 전단력을 제외한 HPFRCC 매트릭스의 설계전단력으로 식 (7)과 같다.

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b \quad (7)$$

여기서,

$$f_{vcd} : 0.7 \times 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \text{ (MPa)}$$

여기서,  $f_{vcd} \leq 0.50 \text{ (MPa)}$

$$\beta_d : \sqrt[3]{1/d} \text{ (m)}$$

단  $\beta_d > 1.5$ 의 경우는 1.5로 한다

$$\beta_p : \sqrt[3]{100\rho_w}$$

단  $\beta_p > 1.5$ 의 경우는 1.5로 한다

$$\beta_n : 1 + M_0 / M_d \text{ (} n'_d \geq 0 \text{의 경우)}$$

단  $\beta_n > 2$ 의 경우는 2로 한다

$\beta_n : 1 + 2M_0/M_d$  ( $n'_d < 0$ 의 경우)

단  $\beta_n < 2$ 의 경우는 0로 한다

$N'_d$ : 설계축방향압축력

$M_d$ : 설계휨모멘트

$M_0$ : 설계휨모멘트  $M_d$ 에 대한 인장연단에 있어, 축방향력에 의해 발생하는 응력을 소거하는데 필요한 휨모멘트

$b_w$ : 부재의 폭

$d$ : 유효깊이

$\rho_w : A_s/(b_w d)$

$A_s$ : 인장철근의 단면적

$f'_{cd}$ : 콘크리트의 설계압축강도 (MPa)

$V_{sd}$ 는 전단철근이 부담하는 설계전단력으로 식 (8)과 같다.

$$V_{sd} = [A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] z / \gamma_b \quad (8)$$

여기서,

$A_w$ : 구간  $s_s$ 에 있어 전단보강철근의 총단면적

$f_{wyd}$ : 전단철근의 설계항복강도 (400MPa이하)

$\alpha_s$ : 전단철근이 부재의 축과 이루는 각도

$s_s$ : 전단철근의 배치간격

$z$ : 압축응력 합력의 작용위치에서 인장철근 도심까지의 거리, 일반적으로  $d/1.15$

$\gamma_b$ : 일반적으로 1.1

$V_{fd}$ 는 보강용 섬유가 부담하는 설계전단력으로 식 (9)와 같다.

$$V_{fd} = (f_{ty} / \tan \beta_u) b_w z / \gamma_b \quad (9)$$

여기서,

$f_{ty}$ : HPFRCC의 경사균열에 직각방향의 설계인장항복강도

$\beta_u$ : 축방향과 경사균열면의 각도, 단  $\beta_u$ 는 45°

$\gamma_b$ : 일반적으로 1.3

$V_{ped}$ 는 축방향 긴장재에 발생한 유효 인장력의 수평분력으로 식 (10)과 같다.

$$V_{ped} = P_{ed} \sin \alpha_p / \gamma_b \quad (10)$$

여기서,

$P_{ed}$ : 축방향 긴장재의 유효인장력

$\alpha_p$ : 축방향 긴장재가 부재축과 이루는 각도

$\gamma_b$ : 일반적으로 1.1

보강용 섬유의 효과를 설계식에 반영하는 방법은 「초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)」의 방법에 준한다. 매트

릭스가 부담하는 전단력은 JSCE가 제정한 콘크리트표준시방서 (구조성능 조사편)에 준할 수 있다.

단 HPFRCC는 골재가 매우 작으므로, 경량 골재 콘크리트와 동등하게 사용하도록 한다.

#### 4. JSCE에서 제안한 설계방법의 검증

##### 4.1 휨 보강하였을 때 구조안전성 검증

3.3절과 같이 축력이 없는 휨 부재의 인장 측에 HPFRCC를 보강하는 경우, 휨 내력 산정방법의 타당성을 검증하기 위한 실험 개요는 <그림 12>와 같다. 실험체는 높이 180 mm의 인장 측 70 mm를 HPFRCC로 타설하여 트러스 철근과 일체시켰고 실험 결과와 해석 결과를 <그림 13>과 같이 비교하였다. <그림 13>에 나타난 바와 같이 해석값과 실험값이 매우 근사하게 나타나 JSCE 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다. <그림 14>는 기존의 콘크리트를 제거하고 HPFRCC로 단면을 수복한 실험체로서 실험 결과<그림 15>에서 알 수 있듯이 JSCE 설계 방법에 근거한 해석값이 실험값을 매우 근사하게 예측하고 있어 이 방법의 타당성을 검증한 또 다른 사례이다.

##### 4.2 전단 보강하였을 때 구조안전성 검증

<그림 16>에 나타나 있는 실험체를 이용하여 전단력 설계 방법에 대한 검증을 수행하였다. 실험체의 HPFRCC는 섬유혼 입량을 1.5~2.0%, 전단철근비를 0, 0.05 및 0.3%로 하였다.

<그림 17>에 나타난 바와 같이 3.5절의 전단력 산정식 (6)을 이용하여 예측한 값이 실험값을 안전 측으로 평가하는 것을 알 수 있다. 그러나 매우 제한적인 실험 데이터를 갖고 검증하였기 때문에 보다 단면이 크거나 철근비가 높은 경우 등과 같이 다양한 조건에 대한 검증이 필요하다.

#### 5. 맺음말

본고에서는 현재 JSCE가 추진하고 있는 HPFRCC재료의 구조설계 지침(안) 중에서 보수·보강재로 사용되는 경우의 설계지침 및 간단한 설계식을 소개하였다. 본문에서 언급한 바와 같이 미국, 유럽, 일본 등지에서는 HPFRCC를 구조 부재에 적용하기 위한 작업으로서 학회 차원의 설계기준(안)을 제정하기 위하여 노력하고 있다. 이러한 국제적인 추세에 발맞추어 국내의 HPFRCC 연구 범위도 현재의 산발적 연구 단계를 넘어서 하루 빨리 현장 적용을 위한 준비 단계로 확대되기를 기대하면서 본고를 마치고자 한다. ☐

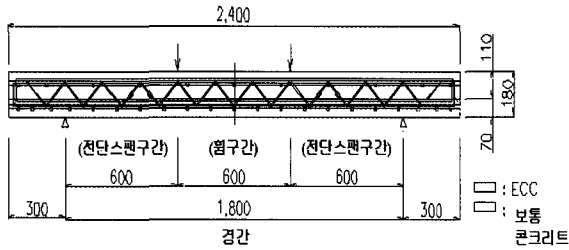


그림 12. 휨시험체 개요

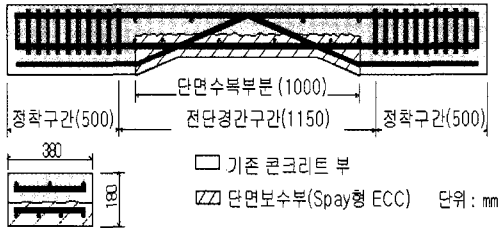


그림 14. HPRFRC로 일부 단면을 수복한 시험체<sup>7)</sup>

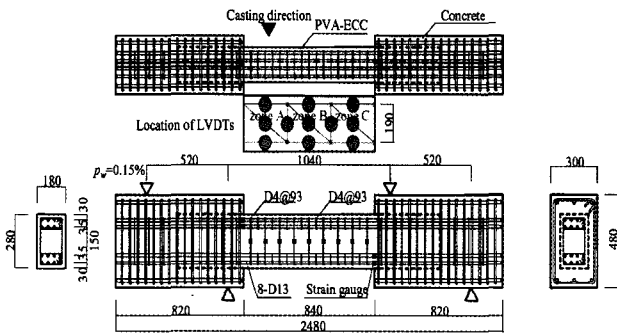


그림 16. 전단시험체 개요<sup>1)</sup>

참고문헌

1. 콘크리트 기술 시리즈, 複數微細ひび割れ型纖維補強モルタル의 評價と利用, 土木學會, 2005. 07.
2. Kim, Yun Yong, Fischer, G., Lim, Yun Mook, and Li, V.C., "Mechanical Performance of Sprayed ECC Using Wet-mix Shotcreting Process for Repair Applications", *ACI Materials Journal*, Vol.101, No.1, Jan.-Feb., 2004, pp.42~49.
3. 특허, 변형경화형 시멘트복합체를 사용한 RC 구조물의 보수보강공법, (주)AMS엔지니어링 (<http://www.eng-ams.com>).
4. 신승교, 임윤목, 김장호, "고인성 복합재료로 휨 보강된 구조물의 거동에 관한 수치해석적 연구", 한국콘크리트학회 2005년도 봄학술발표회 논문집, 2005, pp.151~154.
5. 이혜연, 김선우, 박완신, 이갑원, 최창식, 윤현도, "고인성 시멘트 복합재료를 사용한 현장타설 기움벽 골조의 구조성능", 한국콘크리트학회 2005년도 봄학술발표회 논문집, 2005, pp.275~278.
6. 하기주, 신종학, 김윤용, 김정수, 김진근, "ECC의 연성이 전단벽의

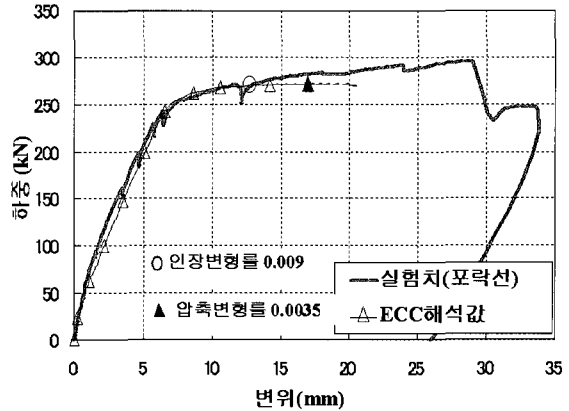


그림 13. 실험값과 해석값의 비교<sup>7)</sup>

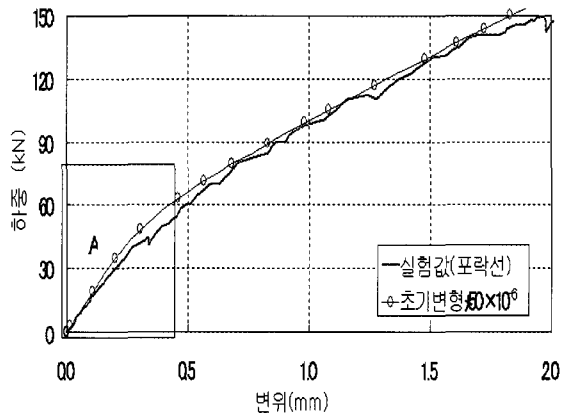


그림 15. 실험값과 해석값의 비교<sup>7)</sup>

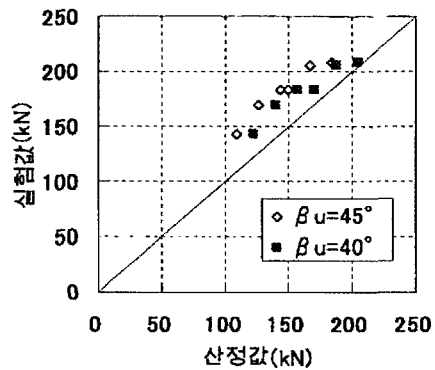


그림 17. 실험값과 해석값의 비교<sup>1)</sup>

사인장 거동에 미치는 영향", 한국콘크리트학회 2005년도 봄학술발표회 논문집, 2005, pp.321~324.

7. 福田一郎, 高靱性セメント複合材料の引張力を考慮した曲げ部材の設計法, 콘크리트 구조물의 보수, 보강 업그레이드 심포지움 논문보고서, Vol.3, 2003, pp.65~72.
8. 永井賞, 高靱性纖維補強セメント複合材料の基礎力學性に関する研究 その1-軸壓縮性狀と附着性狀, 日本建築學會大槪集A-1, 2002, pp.143~144.