

대각 보강된 HPFRCCs 커플링 보의 전단강도 및 설계

Shear Strength and Design of HPFRCCs Coupling Beam with Diagonal Reinforcement

박완신* 윤현도** 김선우*** 전에스터**** 김용철***
Park, Wan-Shin Yun, Hyun-Do Kim, Sun-Woo Jean, Esther Kim, Young-Chul

ABSTRACT

Coupled shear walls consist of two or more in-plane walls inter-connected with coupling beams. In order to effectively resist seismic loads, coupling beams must be sufficiently stiff, strong and possess a stable load-deflection hysteretic response. Much of requirements to the civil and building structures have recently been changed in accordance with the social and economic progress. Ductility of high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCCs), which exhibit strain hardening and multiple crackling characteristics under the uniaxial tensile stress is drastically improved. This paper provides background for design guidelines that include a design model to calculate the shear strength of pseudo strain hardening cementitious composite steel coupling beam.

1. 서론

병렬 전단벽은 효율적인 내진저항 시스템으로 널리 알려져 있으며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 병렬 전단벽의 거동은 커플링 보와 병렬전단벽의 상대강성비에 의존하며 내진설계 시 전단벽 하부에서 붕괴기구가 발생되기 전에 커플링 보의 순경간에서 소성현상이 발생되도록 유도하여 취성과파괴를 유발되도록 커플링 보 부재의 단면 크기 및 적정 배근상세를 갖도록 설계하고 있다.

Shiu¹⁾ 등은 경간깊이비가 2.5-3.5 범위인 전통적인 철근 콘크리트 커플링 보에 대한 실험적 연구를 수행하여 내진성능을 규명하였다. Paulay²⁾와 Galano 및 Vignoli³⁾ 등은 경간 깊이비(Span-to-depth ratio)에 따른 대각 보강상세를 갖는 철근 콘크리트 커플링 보에 실험적 연구를 수행하였으며 대각 보강된 커플링 보는 일반 배근 상세를 갖는 보에 비해 안정된 이력 응답, 높은 에너지 소산능력과 향상된 연성능력을 확보하는 것으로 나타났다. Park 및 Yun⁴⁾은 철골 커플링 보-벽체 접합부에 대한 접합부 강도식 제안 및 접합부에 대한 내진성능을 규명하였으며 병렬 전단벽이 우수한 성능을 확보하기 위해서는 철골 커플링 보를 전단항복형 시험체로 설계하도록 추천하고 있다. Shahrooz⁵⁾은 합성 커플링 보에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 철골 커플링 보 주위의 콘크리트는 철골 보의 횡좌굴을 억제하고 내진성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 수많은 연구자들은 전술한 바와 같이 다양한 배근상세를 갖는 커플링 보 및 접합부에 대한 내진성능을 규명하였으나, 내진성능을 보다 향상시키기 위해서는 커플링 보는 배근상세가 매우 복잡하여 배근 및 거푸집 공사의 복잡성에 의한 공기 증대가 야기되는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 콘크리트의 재료적 단점인 취성적 성질의 개선 및 균열에 대한 저항능력을 개선하여 배근상세를 단순화하고자 하는 목적으로 고인

* 정회원, 충남대 건축연구소 연구교수, 공학박사

** 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

*** 정회원, 동양구조(주) 소장, 공학박사

**** 정회원, 충남대 건축공학과 대학원, 박사과정

성 섬유보강 시멘트 복합체(HPFRCCs)에 관한 연구가 국내·외적으로 활발하게 진행되고 있다⁶⁻⁹⁾. 본 연구에서는 대각보강상세를 갖는 고인성 시멘트 복합체 커플링 보의 전단강도 특성 규명 및 기존의 ACI 표준식¹⁰⁾에 의한 전단강도식과 비교·분석함으로써 병렬전단벽 설계에 대한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 표준식과의 비교·분석

2.1 ACI 표준식

그림 1은 대각 보강된 커플링 보에 대한 배근상세를 나타낸 것이다. ACI 318-05 규준 21.7.7절 규정에서는 형상비(l_n/h)가 2이하이고 V_u 가 $1/3\sqrt{f_{cu}}A_{cw}$ 를 초과하는 커플링 보에 대하여 커플링 보의 중앙부에 2개가 교차하는 대각보강근을 배근하도록 규정하고 있다.

$$V_n = 2A_{vd}f_y \sin\alpha \leq \frac{5}{6}\sqrt{f_{cu}}A_{cw} \quad (1)$$

여기서, A_{vd} : 각 방향 대각보강근의 총 단면적(mm²)

f_y : 철근의 항복강도(N/mm²)

f_{cu} : 콘크리트 압축강도(N/mm²)

A_{cw} : 커플링 보의 단면적(mm²)

커플링 보에 배근된 대각보강근의 경사각은 전단내력에 현저한 영향을 미치며 커플링 보의 길이방향 축과 대각보강근 사이의 경사각 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h/2 - d'}{l_c/2}\right) \quad (2)$$

여기서, h : 커플링 보의 전체 춤 (mm)

d' : 콘크리트 연단에서 압축 철근까지의 거리 (mm)

l_c : 커플링 보의 순경간 (mm)

또한, 대각 방향의 압축응력 f_{cd} 는 다음과 같다.

$$f_{cd} = V_u \left(\frac{l_d}{0.25bl_d(d-d')} \right) = \frac{4V_u}{b(d-d')} \quad (3)$$

여기서, V_u : 보의 극한 전단력 (kN)

d : 커플링 보의 유효깊이 (mm)

표1. 시험체 일람표

시험체명	B×D (mm)	커플링 보의 순경간 l_c (cm)	설계기준 압축강도 f_{ck} (N/mm ²)	주근의 항복강도 f_y (N/mm ²)	ρ_v (%)	ρ_s (%)
*PCB-DH	200×600	60	50	400	0.99	0.52

* PCB: Precast Coupling Beam, D: diagonal, H: HPFRCC

표2. 철근의 기계적 특성

철근의 종류	항복강도 f_y (N/mm ²)	항복변형률 ϵ_y (%)	탄성계수 E_s (kN/mm ²)	인장강도 f_u (N/mm ²)
D6	291.19	0.0019	167.01	375.01
D16	474.96	0.0024	185.15	568.59

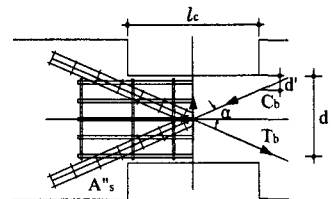


그림3. 대각 보강근 상세

표3. HPFRCC의 강도 특성

	28일 압축강도, f_{cu} (N/mm ²)	최대변형률, ϵ_{cu} (%)
HPFRCC	57	0.5405

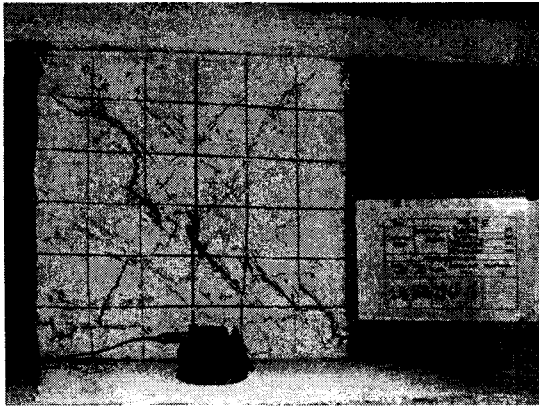


그림2. 파괴양상

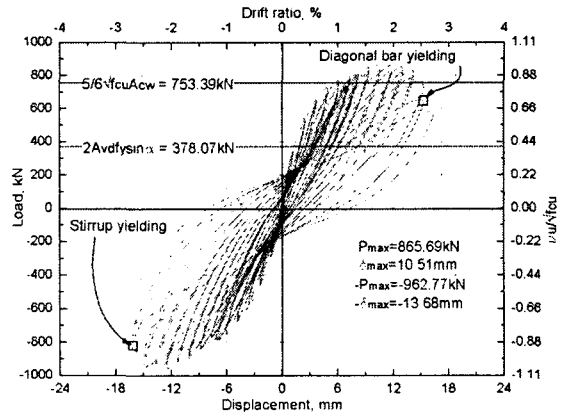


그림3. 하중-변위 관계 곡선

표 1, 표 2 및 표 3은 선행연구에서 수행된 커플링 보에 대한 실험체 일람표, 철근 및 HPFRCCs의 기계적인 특성을 나타낸 것이고 그림 2 및 3은 대각 보강된 HPFRCCs 커플링의 파괴양상 및 하중-변위 관계 곡선에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 2 및 3에서 나타난 바와 같이 HPFRCCs 커플링 보의 거동은 최대강도 이후 내력이 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으며 동일한 배근상세를 갖는 시험체는 최대강도 이후 내력이 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 극한 전단내력은 865.6 kN ($9.6\sqrt{f_{cu}b_wd}$)으로 동일배근상세를 갖는 RC 커플링 보에 비해 약 30% 크게 나타났으며 ACI 규준식에서 제시한 $1/3\sqrt{f_{cu}b_wd}$ 를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 대각 방향의 압축응력 f_{cd} 는 30.9 MPa로 $0.54f_{cu}$ 로 나타났다.

2.3 해석모델

선행 연구결과에 의하면 대각보강된 HPFRCCs 커플링 보의 유효강성은 전통적인 철근 콘크리트 커플링 보에 비하여 강성이 크게 나타났다. 캐나다 규준(CSA)¹¹⁾에서는 대각 보강된 커플링 보의 강성을 전통적인 배근 상세를 갖는 커플링 보의 강성의 2배로 제안하였으며 유효강성은 다음과 같다.

$$I_e = \frac{0.4I_g}{1 + 3(h/l_c)^2} \quad (4)$$

한편, 뉴질랜드 규준(NZS)¹²⁾에서는 캐나다 규준에서 제시한 유효 강성보다 다소 작게 제안하고 있으며 다음과 같다.

$$I_e = \frac{0.4I_g}{1.7 + 2.7(h/l_c)^2} \quad (5)$$

여기서, I_g : 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면 2차 모멘트 (mm^4)이다. 그러므로 선행연구에서 수행된 대각보강 상세를 갖는 HPFRCCs 커플링 보에 대하여 CSA 및 NZS 규준식에 의한 유효 단면 2차 모멘트 각각 다음과 같다.

$$\text{CSA에 의한 } I_e = \frac{0.4I_g}{1 + 3(h/l_c)^2} = \frac{0.4 \left(\frac{20 \times 60^3}{12} \right)}{1 + 3(60/60)^2} = 36,000 \text{cm}^4$$

$$\text{NZS에 의한 } I_e = \frac{0.4I_g}{1.7 + 2.7(h/\lambda_c)^2} = \frac{0.4 \left(\frac{20 \times 60^3}{12} \right)}{1.7 + 2.7(60/60)^2} = 32,727 \text{ cm}^4$$

상기의 식에서 나타난 바와 같이 CSA 및 NZS 기준식에 의한 유효단면 2차 모멘트 값이 각각 $0.1I_g$ 및 $0.09I_g$ 로 CSA에 의한 값이 ZNS에 의한 값보다 다소 크게 나타났다. 또한, CSA 및 NZS 기준식에 의한 예측값과 실험값을 비교한 결과, 기준식에 의한 강성값은 실험값을 지나치게 작게 예측하고 있으며 설계를 이를 반영해야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대각보강상세를 갖는 고인성 시멘트 복합체 커플링 보의 전단강도 특성 규명 및 ACI 기준식에 의한 전단강도식과 비교·분석한 결과 다음과 같다.

- (1) 대각보강된 HPFCRRs 커플링 보의 극한 전단내력은 865.6 kN ($9.6 \sqrt{f_{cu}} b_w d$)으로 동일배근상세를 갖는 RC 커플링 보에 비해 약 30% 크게 나타났으며 ACI 기준식에서 제시한 $1/3 \sqrt{f_{cu}} b_w d$ 를 초과하는 것으로 나타났다.
- (2) 대각 보강된 HPFRCCs 커플링 보는 일반배근상세를 갖는 커플링 보에 비해 상대적으로 큰 전단내력을 지지할 수 있지만, 극한 변형률은 일반 배근상세를 갖는 경우에 비해 작게 나타났으며 설계를 이를 고려해야 할 것으로 사료된다.
- (3) 각국 기준식에 의한 예측값과 실험값을 비교한 결과, 기준식에 의한 강성값은 실험값을 지나치게 작게 예측하고 있으며 설계를 이를 반영해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Shiu, N. K., Barney, G. B., Fiorato, A. E., and Corley, W. G., "Reversed load tests of reinforced concrete coupling beams," Proceedings of the Central American Conference on Earthquake Engineering, EI Salvador, 1978, pp. 239-249.
- 2) Paulay, T. and Binney, J.R.(1974), "Diagonally reinforced coupling beams of shear walls." ACI Special Publication SP42-Shear in Reinforced Concrete, pp.579-598.
- 3) Galano, L., and Vignoli. A., "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts," ACI Structural journal, V.97, No.6, 2000, pp.876-885.
- 4) Park, W. S., and Yun, H. D.(2005),"Seismic behaviour of steel coupling beams linking reinforced concrete shear wall," Engineering Structure, 27(7), pp. 1024-1039
- 5) Bahram M. Shahrooz, Partick J. Fortney(2005), "The next generation of coupling beams", Univ. of Cincinnati
- 6) Victor C. Li, Cynthia Wu, Shuxin Wang, Atsuhisa Ogawa, and Tadashi Saito, Interface Tailoring Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite(PVA-ECC).
- 7) Renee M. Bagwell, Robert C. Wetherhold, Fiber pullout behavior and impact toughness of short shaped copper fibers in thermoset matrices.
- 8) 양일승, 윤현도, 김선우, 박완신, 한병찬, 문연준(2005), "고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 사용한 내진요소의 이력특성," 대한건축학회 논문집, pp.51-58
- 9) 社団法人 日本コンクリート工學協會(2004), "高靱性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會", pp.195.
- 10) ACI Committee 318(2005), "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05)", American Concrete Institut.
- 11) Canadian Standards Association (CSA), 1994, CSA A23.3-94 Design of Concrete Structures, Rexdale, Canada.
- 12) New Zealand Standards Association (NZS), 1995, NZS 3101:1995 Concrete Structures Standard.