

# 기존 학교건물 골조와 내진보강요소 일체화를 위한 변형경화형 시멘트 복합체를 적용한 스티드 전단 접합부의 구조성능

## Structural Performance of Stud Shear Connections using SHCC between Existing School Building Frame and Seismic Retrofitting Elements

김 성 호\*      윤 현 도\*\*  
Kim, Sung-Ho      Yun, Hyun-Do

### Abstract

Some results of experimental investigation conducted to assess the effect of cement composite strength and ductility on the shear behavior and crack-damage mitigation of stud connections between existing reinforced concrete frame in school buildings and seismic strengthening elements from cyclically direct shear tests are described. The cement composite strengths include 50 for medium strength and 70 MPa for high strength. Two types of cement composites, strain-hardening cement composite (SHCC) and non-shrinkage mortar, are used for stud shear connection specimens. The special SHCCs are reinforced with hybrid 0.2% polyethylene (PE) and 1.3% polyvinyl alcohol (PVA) fibers at the volume fraction and exhibits tensile strain capacity ranging from 0.2 to 0.5%. Test result indicates that SHCC improves the seismic performance and crack-damage mitigation of stud shear connections compared with stud connections with non-shrinkage mortar. However, the performance enhancement in SHCC stud connections with transverse and longitudinal reinforcements is less notable for those without additional reinforcement.

키워드 : 내진보강, 스티드 전단 접합부, 변형경화형 시멘트 복합체, 전단거동, 균열

Keywords : Seismic Retrofitting, Stud Shear Connection, Strain-Hardening Cement Composite(SHCC), Shear behavior, Crack

### 1. 서론

최근 들어 우리나라에 인접한 국가에서 빈번히 발생하는 대규모 지진과 한반도에서 관측되는 지진 빈도가 급격히 증가됨에 따라 국내 공공시설물에 대한 보유내진성능 평가 및 내진보강기법에 대한 관심이 고조되고 있다. 2011년도 공공시설물의 내진성능보유실태조사<sup>1)</sup>에 따르면 공공시설물의 37.3%만이 내진성능을 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 특히 학교시설의 경우 2010년 10월 현재 내진설계 대상 총 18,329동 중 내진설계 적용 2,417동, 내진보강

완료 61동으로 내진성능보유 비율은 13.51%로 공공시설물 중 수도시설을 제외하고 가장 낮게 나타났다. 학교시설은 1988년 건축물의 내진설계기준이 제정된 이후에도 일정규모 이상에 이르지 않는 경우 내진설계대상에서 제외되어 왔으며 2009년 학교시설 내진설계기준이 제정되고 난 이후 모든 학교시설을 대상으로 내진설계가 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 교과부에서는 2011년도부터 2015년도까지 1단계로 매년 약 6,000억원을 투입하여 학교시설에 대한 내진보강을 실시할 계획이다. 또한, 2015년부터는 5년 단위로 18,000억원씩을 투입하여 2030년까지 내진설계 대상 기존 학교시설의 15,851동에 대하여 100% 내진보강을 실시할 계획을 수립하고 있다.

기존 학교시설에 대한 지진의 위험성이 증대됨에 따라 많은 연구자들은 기존 학교시설의 내진성능 평가<sup>2)</sup>, 내진

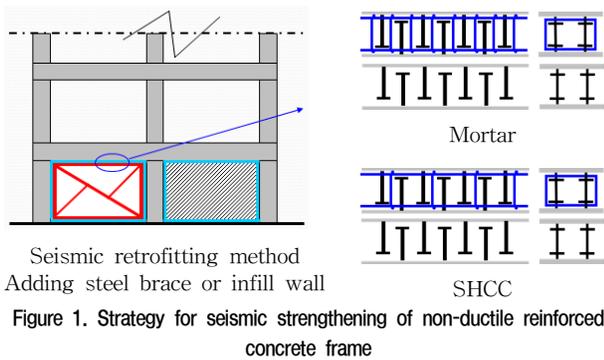
2) 이강석, "비선형요구내력스펙트럼을 이용한 저층 R/C 건물의 내진성능 평가법", 구조물진단학회지, 제15권 3호, 2011, pp.106-115

\* 정회원, 충남대 건축공학과 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 교신저자  
(wiseroad@cnu.ac.kr)

본 연구는 2012년 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(NRF-2012-0351)으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

1) 소방방재청, 2011년도 기존 공공시설물 내진보강대책 추진 결과 공시, 2012. (<http://www.nema.go.kr>)



Seismic retrofitting method  
Adding steel brace or infill wall  
Figure 1. Strategy for seismic strengthening of non-ductile reinforced concrete frame

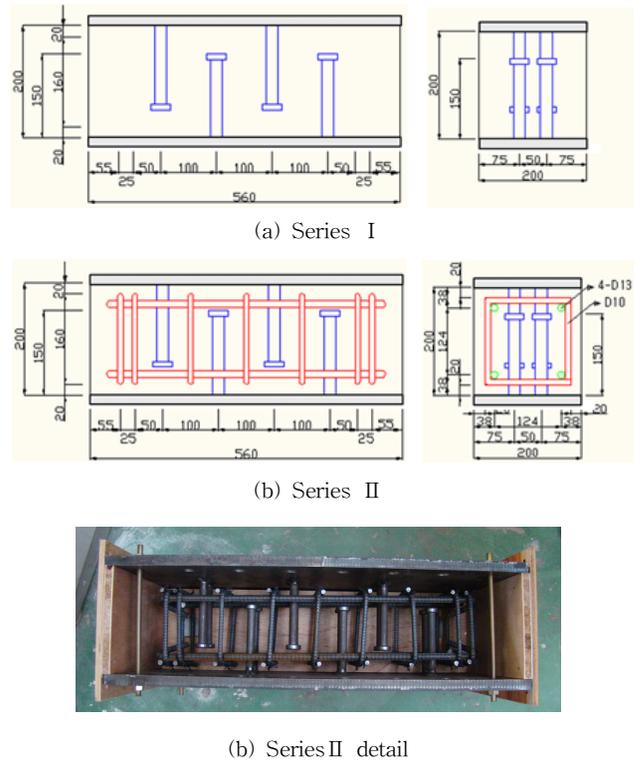


Anchor in the existing frame  
Setup of steel brace  
Stud connection  
Joint formwork for mortar  
Figure 2. Seismic retrofitting procedure of existing school building with steel brace

보강공법<sup>3)</sup>, 내진보강 후 내진성능평가<sup>4)</sup> 등에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이러한 연구에서는 소요내진성능을 확보하지 못한 학교시설물에 대한 내진보강방법으로 학교 시설에 요구되는 내진성능, 즉 강도, 강성 및 에너지소산 능력 등에 따라 내진보강요소로 전단벽, 철골가새 또는 제진장치를 선정하여 Figure 1에 나타난 바와 같이 기존 학교시설의 골조에 끼워 넣거나 외부 골조에 설치하여 보강하는 방안이 제안되고 있다. 이와 같이 내진보강요소를 설치함으로써 학교시설물이 목표내진성능을 확보하도록 하기 위해서는 기존 골조와 내진보강요소의 접합부가 충분한 강도를 보유하고 아울러 대변형 시 균열손상에 대한 저항능력도 보유하여야 한다.

Figure 2는 최근 충남지역에 위치한 고등학교 교사동을 철골가새로 내진보강하는 과정을 나타낸 것이다. 기존 골조와 내진보강요소의 접합부는 Figure 2에 나타난 바와

3) 안태상, 김형준, “기존 건물의 효율적인 내진 보강”, 대한건축학회지, 제52권 10호, 2008, pp.62-69  
4) 류승현, 윤현도, 김선후, 이강석, 김용철, “국내 기존 학교건축물의 내진보강 후 비선형 거동특성”, 구조물진단학회지, 제15권 1호, 2011, pp.243-253



(a) Series I  
(b) Series II  
(b) Series II detail  
Figure 3. Configuration and details of specimens (Unit : mm)

와 같이 기존골조와 내진보강요소 사이의 일체성을 확보하기 위해 스타드(Stud)를 매립하고 및 복잡한 전단 보강근에 의해 접합부에 전달되는 전단력에 저항하도록 설계되고 있다. 이러한 접합부는 일반적으로 거푸집을 기밀하게 설치한 후 고압으로 무수축 모르타르를 주입하여 시공되고 있다. 따라서 기존 구조체의 천공, 앵커(Anchor)볼트 매립, 거푸집 설치 및 고압 주입 모르타르의 유실 등으로 인하여 시공성이 낮고 보강공사의 공기를 연장하는 요인으로 인식되고 있다.<sup>5)</sup>

기존 무수축 모르타르의 취성적인 특성과 기존 골조와 내진보강요소의 복잡한 스타드 전단 접합부의 상세를 개선하기 위하여 시멘트 복합체에 합성 단섬유를 보강하여 취성적인 시멘트 복합체의 인장변형능력과 균열손상제어능력을 증진시킨 변형경화형 시멘트 복합체(Strain-Hardening Cement Composite, SHCC)의 적용이 모색될 수 있다. 본 논문에서는 기존 골조와 내진보강요소의 접합부에 현재 일반적으로 적용되는 무수축 모르타르를 SHCC로 대체하여 스타드 전단 접합부의 강도 및 균열손상을 제어 가능성을 평가하고자 하였다.

5) 윤길호, 김성호, 김용철, 윤현도, “현장타설 끼움전단벽 및 철골가새를 활용한 기존학교 건물의 내진보강”, 한국교육시설학회지, 제19권 4호, 2012, pp.21-28

이를 위하여 스테드 전단 접합부의 전단보강 유무, 접합부에 타설되는 시멘트 복합체의 종류 및 강도 등을 주요 변수로 총 6개의 실험규모 전단 접합부를 제작하여 성능을 평가하였다. 이러한 실험연구결과는 기존 시설물과 내진보강요소의 접합부 배근상세를 단순화 하고 접합부의 연성을 증진하기 위한 방안을 모색할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 스테드(Stud) 전단 접합부 실험

### 2.1 실험체 계획

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 스테드 전단 접합부에 축방향 및 전단보강근의 배근 유무에 따라 2개 시리즈로 나누어 접합부 실험체를 계획하였다. 각 실험체는 접합부에 타설된 무수축 모르타르 및 SHCC와 같은 시멘트 복합체의 종류 및 압축강도를 주요변수로 하였으며 이러한 변수에 따른 스테드 전단 접합부의 내진 및 균열제어성능을 평가하기 위하여 총 6개의 실험체를 계획하였다. 실험체명은 시멘트 복합체의 종류, 전단보강근의 유무와 간격 및 압축강도를 근거로 명명하였다.

Figure 3은 스테드 전단 접합부 실험체의 형상 및 배근상세를 나타내고 있으며 전단 접합부 양면은 스테드의 접합과 직접 전단력의 도입을 위하여 10mm두께의 강판을 사용하였다. 시리즈 I은 전단보강되지 않은 실험체로 Figure 3(a)와 같이 강판에 스테드 볼트를 200mm 간격으로 용접하여 접합부내에서 스테드 볼트가 100mm 간격이 되도록 하였다. 전단 접합부의 단면이 200×200mm가 되도록 양면에 강판을 설치하고 Figure 3(c)와 같이 개방된 부분은 목재 거푸

집을 설치하여 전단 접합부내 560mm 길이의 시멘트 복합체가 채워질 수 있도록 하였다. Figure 3(b)는 시리즈 II로 전단보강근 및 축방향 철근이 배근된 스테드 전단 접합부의 배근상세 및 형상을 나타낸 것이다. 공칭직경 13mm인 이형 축방향 철근 및 전단보강근이 배근된 것을 제외하고 시리즈 I 실험체와 동일하다. 전단보강근으로 공칭직경 10mm인 이형철근이 100mm간격으로 배근되었으며 단부의 응력집중에 따른 국부적인 파괴를 억제하기 위하여 전단 접합부에 전단보강근을 25mm 간격으로 2개씩 추가 배근하였다. 모든 보강근은 SD400이 사용되었다.

### 2.2 사용재료

무수축 모르타르는 시중에서 일반적으로 판매되고 다양한 보수 및 보강재료로 사용되고 있는 S사의 프리믹(Premix)형 제품을 사용하였다. 또한 SHCC의 제조를 위하여 선행 연구결과에 근거하여 시멘트, 플라이애쉬, 실리카흄, 규사 등을 배합하여 제조된 분체를 사용하였다. SHCC의 보강섬유로 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 및 폴리비닐 알코올(Polyvinyl alcohol, PVA)섬유를 각각 시멘트 부피의 0.2 및 1.3%씩 하이브리드(Hybrid)하여 투입하였다. PE 및 PVA 섬유 하이브리드 조건은 선행 연구로부터 시멘트 복합체에 매크로(Macro) 및 마이크로(Micro) 균열을 폭 넓게 분산하며 SHCC의 제조 및 시공과정에서 섬유의 뭉침 및 분산이 우수한 것으로 결정하였다. 보강섬유의 특성은 Table 2에 나타내었다.

### 2.3 재료시험 결과

시멘트 복합체의 압축시험은 KS F 2405에 준하여 실시

Table 1. Summaries of stud shear connection specimens

Series	Specimen	fck (MPa)	Dist. of Studs (mm)	Dist. of Hoop Reinforcement (mm)	Fiber Volume Fraction (%)		Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	
					PE	PVA	Water	Binder
I	Mortar-HN-50	50	200	-	-	-	304	1,900
	PVAPE-HN-50				0.20	1.30	484	1,500
	PVAPE-HN-70				0.20	1.30	384	1,793
II	Mortar-H100-50	50		100	-	-	304	1,900
	PVAPE-H100-50				0.20	1.30	484	1,500
	PVAPE-H100-70				0.20	1.30	384	1,793

Table 2. Properties of Reinforcing Fibers

Fiber	Specific weight (kg/m <sup>3</sup> )	Length (mm)	Diameter (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
PVA	1,300	12	39	307	1,600	40
PE	970	15	12	1,250	2,500	75

Table 3. Compressive Test Result

Compressive Strength (MPa)	Mortar-50	PVAPE-50	PVAPE-70
fck	50	50	70
fcu	58	45	68

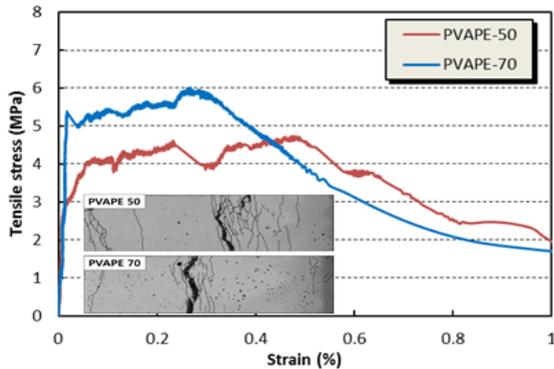


Figure 4. Typical direct tensile responses of SHCC materials

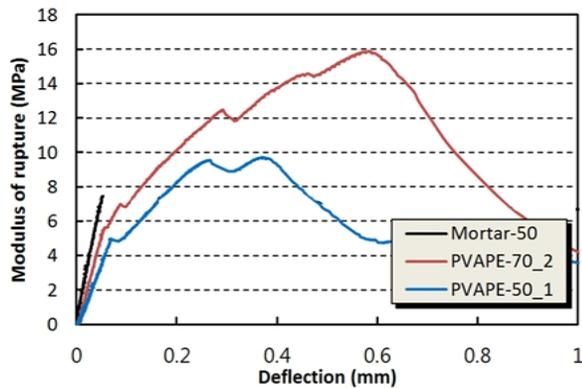


Figure 5. Typical flexural responses of cement composites

하였으며 압축강도 결과를 Table 3에 비교하여 나타내었다. 설계기준 압축강도 50MPa인 무수축 모르타르 및 SHCC는 재령 28일후 압축강도로 58 및 45MPa를 각각 보였다. 또한, 설계기준 압축강도 70MPa인 SHCC의 재령 28일 압축강도는 68MPa로 나타났다.

SHCC의 직접인장성능평가는 일본토목학회 지침서(6)의 직접인장시험방법에 준하여 실시되었으며, 덤벨(Dumbbell)형 인장 시험편에서는 단면 30×30mm인 중앙부 변형구간(100mm)에서 도입된 인장력에 따른 인장변형량과 균열 폭이 계측되었다. 인장력은 변위 제어 방식에 의해 0.5mm/min의 속도로 도입되었다.

압축강도에 따른 SHCC의 인장특성을 평가하기 각 배합에 대하여 각각 5개의 덤벨형 인장시험편을 제작하였으며 Figure 4는 이러한 5개 인장시험편에 대한 직접인장

6) 日本土木工學會, 複數微細ひび割れ型纖維補強セメント複合材料 設計. 施工指針(案), 2008, pp.16-18

시험결과를 근거로한 전형적인 직접인장응력-변형률 관계를 두 배합에 대하여 비교하여 나타낸 것이다. PVAPE 50 및 70 배합의 초기균열강도는 각각 3.0 및 5.3MPa로 나타났다으며 인장강도는 4.7 및 6.0MPa를 보였다. Figure 3으로부터 두 배합 모두 변형경화특성을 보이고 있으며 PVAPE50은 0.53%, PVAPE70은 0.32%의 인장변형능력을 보였다. 압축강도가 증가됨에 따라 초기균열 및 인장강도는 다소 증가되는 경향을 보이고 있으나 인장변형능력은 다소 감소되었다. 압축강도의 증가에 따른 직접인장 변형능력의 감소는 압축강도가 증가됨에 따라 시멘트 매트릭스(Matrix)의 파괴에너지가 증가되고 물결합재비의 변화에 따른 시멘트 복합체와 보강섬유의 계면 부착력 증가에 기인한 것으로 판단된다.

시멘트 복합체의 휨성능 평가는 KS F 2408에 준하여 실시하였으며 Figure 5에 변형경화형 시멘트 복합체(PVAPE50과 PVAPE70)의 전형적인 휨시험 결과를 비교하여 나타내었다. PVAPE50 및 70의 휨강도는 각각 9.6 및 14.8MPa로 나타났다.

## 2.4 실험방법

스터드 전단 접합부에 반복 면내 직접 전단력을 도입하기 위하여 본 연구에서 적용한 실험체의 설치방법은 Figure 6에 나타난 바와 같다. 전단 접합부 실험체에 면내 전단력을 도입하기 위하여 반력벽에 고정된 1,000kN의 액

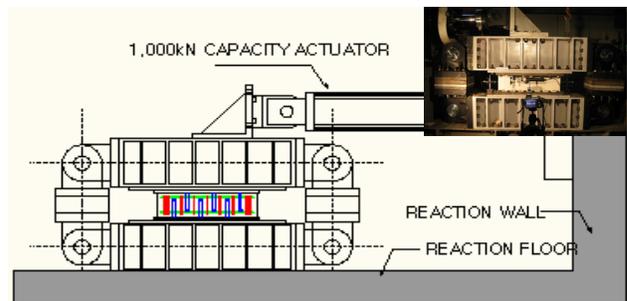


Figure 6. Test Setup

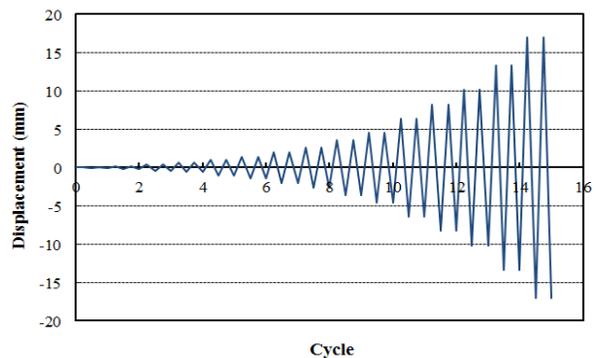


Figure 7. Loading History

츄에이터(Actuator)를 이용하였다. 액츄에이터는 실험체가 설치된 4개의 활절을 갖는 직접 전단가력용 골조와 연결하여 반복전단력을 실험체에 도입하였다. 직접 전단력에 따른 접합부 상하부 강관의 상대변위량을 측정하기 위하여 접합부 전후면에 두 개의 변위계를 설치하여 도입하중 단계별로 접합부 상하면을 이루는 두 강관의 상대변위량을 계측하였다. 접합부에 도입된 반복하중은 접합부의 상대변위량을 기준으로 Figure 7과 같이 변위제어되었으며 동일변위에서 2회씩 반복가력되었다.

### 3. 접합부의 실험 결과 및 분석

#### 3.1 최종파괴양상

Figure 8(a)~(c)는 스티드 전단 접합부에 길이방향 및 횡방향 전단보강근이 배근되지 않고 무수축 모르타르(Mortar-HN-50)와 SHCC(PVAPE-HN-50과 -70)를 사용한 실험체의 최종파괴양상을 비교하여 나타낸 것이다. Mortar-HN-50 실험체는 재하초기단계부터 전단 접합부의 단부에 사균열이 발생되었고 이후 하중이 증가됨에 따라 사균열은 접합부의 중앙부에 발생되며 급격하게 파괴되었다. 반면 PVAPE-50 및 -70 실험체는 접합부에 무수축 모르타르가 타설된 Mortar-HN-50 실험체와는 다르게 미세한 균열이 접합부 중앙부에 배치된 스티드 볼트 후면 인장력이 발생하는 부분에 집중되는 경향을 보였다. SHCC를 사용한 두 실험체는 접합부 중앙부에 발생한 미세한 균열중 하나가 국부적으로 그 폭이 급격하게 증가되며 최종파괴되었다. SHCC를 사용한 실험체에서는 접합부에 작용된 전단력에 의한 사균열이 시멘트 복합체 내에 보강된 섬유가 가교하며 효율적으로 사균열 폭의 증진을 제어하였던 것으로 판단된다. 그러나 접합부에 작용된 강제변위가 증가됨에 따라 스티드 볼트 후면에 발생한 직접 인장력에 의해 발생한 균열폭이 급격히 증가되며

하중지지능력을 상실하였다. 두 SHCC 배합을 사용하여 제작된 인장시험편에 대한 직접인장시험결과에서와 같이 균열분산능력이 PVAPE70에 비하여 우수한 PVAPE50을 사용한 PVAPE-NH-50 실험체에서 파괴시까지 미세한 균열 분산능력이 우수하게 나타났다.

Figure 8(d)~(f)는 접합부에 길이방향 및 횡방향 전단보강근이 배근된 무수축 모르타르 및 SHCC를 사용한 세 실험체의 최종파괴양상을 비교하여 나타낸 것이다. 전단보강근이 배근된 접합부 실험체의 균열 및 파괴양상은 전단보강근이 배근되지 않은 접합부 실험체와 유사한 특성을 보이고 있다. 접합부에 배근된 길이방향 철근은 접합부에 작용된 전단력을 접합부 전면에 효율적으로 분산시키고 있어 균열이 접합부에 폭 넓게 나타났다. 무수축 모르타르를 사용한 접합부 실험체(Mortar-H100-50)에 배근된 전단보강용 횡보강근은 접합부에 작용된 전단력에 의해 유발된 사균열 폭을 효율적으로 제어하였으며 전단보강되지 않은 접합부 실험체(Mortar-NH-50)에 비하여 최종파괴시까지 사균열 폭이 급격하게 증가되지 않았다. SHCC를 사용한 접합부에서도 무수축 모르타르를 사용한 접합부 실험체와 같이 접합부 전면에 미세한 균열이 폭 넓게 확산되며 최종파괴되는 양상을 보였다.

기존 골조에 내진보강요소의 보강시, 골조와 내진보강요소의 경계부는 국부적으로 높은 전단응력이 작용되며 내진보강요소에 의한 기존 골조의 보강효과를 결정짓는 부위라 할 수 있다. 취성적인 시멘트 복합체에 단섬유를 보강하여 균열폭 및 균열분산능력을 개선한 SHCC를 전술한 두 요소의 경계면에 위치한 스티드 전단 접합부에 적용시 사균열 발생 및 균열폭 제어에 효과적인 것으로 나타났다. 스티드 전단 접합부의 균열분산 및 균열폭의 제어 수준은 재료적 수준에서 SHCC의 균열분산능력에 의해 지배되는 것으로 나타났다.

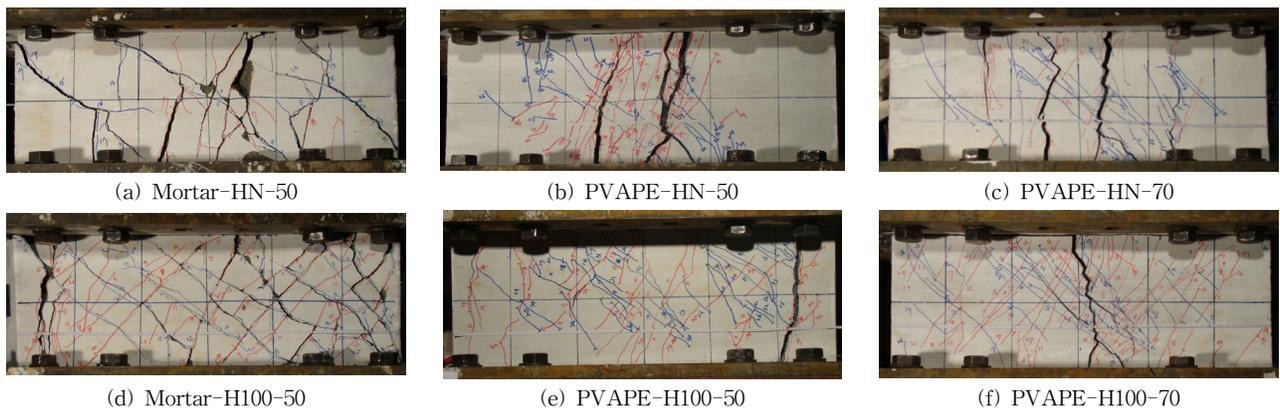


Figure 8. Final failure modes of stud shear connections

### 3.2 스티드 전단 접합부의 이력특성

Figure 9(a)~(c)는 길이방향 및 횡방향 전단보강근을 포함하지 않는 무수축 모르타르 및 SHCC를 타설한 스티드 전단 접합부의 전단거동을 비교하여 나타낸 것이다. 각 시멘트 복합체의 재령 28일 압축강도에 있어서 다소 차이를 보이고 있어 접합부의 전단거동에 대한 비교시 전단력은 시멘트 복합체의 압축강도 ( $\sqrt{f_{cu}}$ )로 무차원화 하여 비교하였다. 모든 실험체에서 정가력시 하중-변위 관계는 부가력시 하중-변위 관계에 비하여 높은 강도와 강성 특성을 보이고 있다. 부가력시 낮은 강도와 강성 특성은 정가력시 접합부내 시멘트 복합체에 발생된 균열과 같은 손상에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 정·부가력시 비대칭 거동은 단섬유가 보강된 SHCC에 비하여 무수축 모르타르에서 현저하게 나타났다. Figure 4와 Figure 8의 비교로

부터 시멘트 복합체의 직접인장 시 변형능력은 높은 전단 응력을 경험하게 되는 전단 접합부의 변형능력을 지배하는 것으로 판단된다. 무수축 모르타르가 사용된 접합부 실험체 Mortar-NH-50의 시멘트 복합체의 압축강도로 무차원화된 전단저항능력은  $0.38\sqrt{f_{cu}}$  MPa로 나타났으며 직접인장재하시 0.53%의 인장변형능력을 보인 PVAPE50, 0.32%의 인장변형능력을 보인 PVAPE70을 각각 사용한 스티드 전단 접합부(PVAPE-HN-50 및 -70)의 무차원화된 전단저항능력은  $0.48\sqrt{f_{cu}}$  및  $0.49\sqrt{f_{cu}}$  MPa로 각각 나타났다. 이와 같이 스티드 전단 접합부에 SHCC를 적용함으로써 무수축 모르타르의 전단강도에 비하여 평균 27.5%의 강도를 증진시킬 수 있으며 이는 SHCC에 혼입된 섬유에 의한 전단기여에 따른 것으로 판단된다.

Figure 9(d)~(f)는 반복하중하에서 전단보강된 스티드

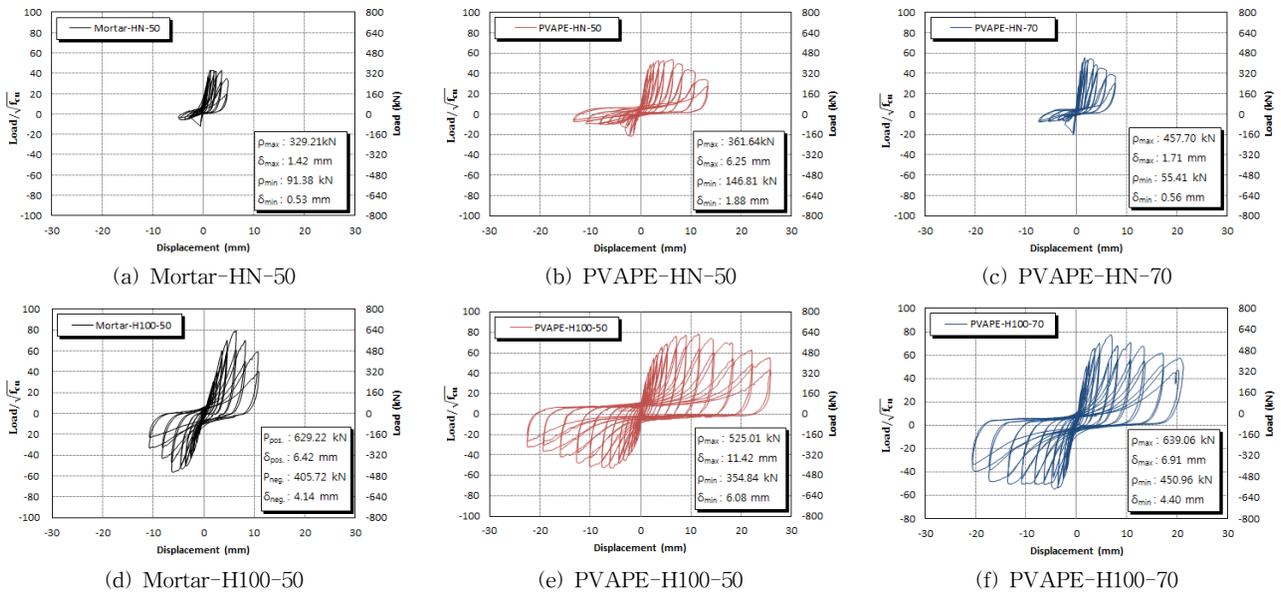


Figure 9. Hysteretic behaviors of stud shear connections under cyclic shear loading

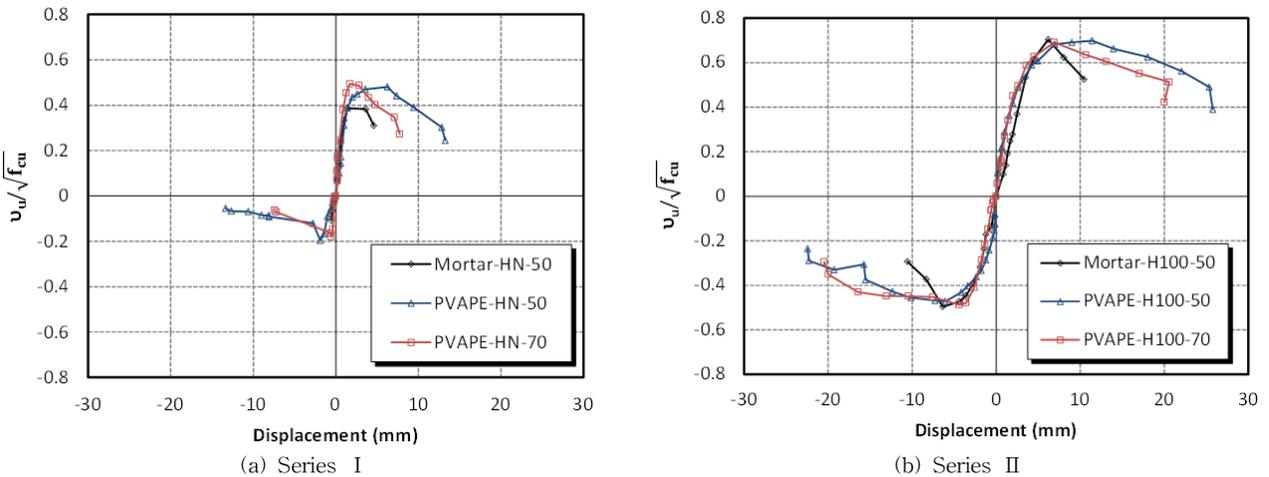


Figure 10. Envelop curves of stud shear connections

전단 접합부의 전단거동을 비교하여 나타낸 것이다. 정·부 가력시 하중-변위 관계 곡선의 비대칭 특성은 부가력시 전단강도가 정가력시 전단강도의 평균 67.5%로 나타났으나 전단보강되지 않은 실험체에서 부가력시 전단강도가 정가력시 전단강도의 평균 26.7%라는 것을 고려한다면 이러한 비대칭 특성은 현저하게 개선되었다할 수 있다. 전단보강된 무수축 모르타르를 사용한 접합부 실험체 Mortar-H100-50의 정가력시 무차원화한 전단강도는  $0.70\sqrt{f_{cu}}$  MPa로 나타난 바 전단보강에 따라 무보강된 실험체(Mortar-HN-50)에 비하여 68%의 전단강도가 증진되었다. PVAPE-H100-50 및 -70 접합부 실험체의 정가력시 전단강도는 각각  $0.67\sqrt{f_{cu}}$  및  $0.64\sqrt{f_{cu}}$  MPa로 무보강된 전단 접합부 실험체(PVAPE-HN-50 및 -70)에 비하여 각각 41 및 44%의 강도증진을 보였다.

Figure 10(a) 및 (b)는 전단 보강되지 않은 스티드 전단 접합부 실험체(시리즈 I) 및 전단 보강된 접합부 실험체(시리즈 II)에 대한 단면에 작용된 무차원화된 전단응력과 접합면의 상대변위 관계를 비교하여 나타낸 것이다. Figure 10(a)에서 접합부에 타설된 시멘트 복합체의 변형 능력에 따라 전단 접합부의 전단변형능력이 지배되고 있는 것으로 나타났다. 전체적인 거동특성은 큰 차이를 보이지 않았으나 전반적으로 SHCC를 사용한 접합부의 전단강도가 다소 높게 나타났다. 전단보강근으로 보강된 접합부의 포락선을 비교한 Figure 10(b)에 나타난 바와 같이 전단보강된 전단 접합부에 있어서도 시멘트 복합체의 변형 능력에 따라 접합부의 전단변형능력도 지배되고 있는 것으로 나타났다.

### 3.3 에너지 소산 능력

Figure 11에 하중-변위 관계 곡선으로 둘러싸인 누적 에너지 소산량을 시리즈 I과 시리즈 II를 비교하여 나타내었다. Figure 11의 누적 에너지 소산량은 하중-변위 곡선상의 정방향 곡선에 의해 싸인 면적만을 고려하였으며, 최대 하중 이후 80%까지 하중이 저하된 시점을 접합부 실험체의 최대 변형 능력으로 규정하고 이때까지의 누적 에너지 소산량을 산정하였다.

Figure 11(a)에서 나타난 바와 같이 시멘트 복합체와 압축강도에 따른 차이에 큰 영향 없이 변위 5mm까지는 유사한 형태의 에너지 소산 특성을 보였다. 그러나 변위가 5mm를 초과하며 Mortar-HN-50 실험체의 에너지 소산량은 SHCC 두 실험체에 비하여 낮게 나타났으며 이는 무수축 모르타르는 초기균열발생(변위 5mm)이후 균열폭이 증가되며 추가적인 응력재분배가 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 반면 SHCC를 사용한 PVAPE-NH-50 및 -70 실험체는 초기균열발생(변위 5mm)이후에도 섬유가 균열면을 가교하며 지속적으로 접합부내에서 응력재분배를 하며 도입된 에너지를 소산하였다. 재료적 수준에서 SHCC에 대한 직접인장시험시 상대적으로 높은 인장변형 능력을 발휘한 PVAPE50을 적용한 전단 접합부 실험체가 파괴시점까지 높은 에너지를 소산하며 접합부의 내진성능을 크게 향상시켰다.

Figure 11(b)에 나타난 바와 같이 전단보강근을 배근한 시리즈 II 실험체는 약 8mm의 변위까지는 모든 실험체의 에너지 소산량은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 시리즈 I 그룹 실험체에서와 같이 접합부의 상대변위가 8mm를 초과하며 무수축 모르타르를 사용한 Mortar -H100-50 실험

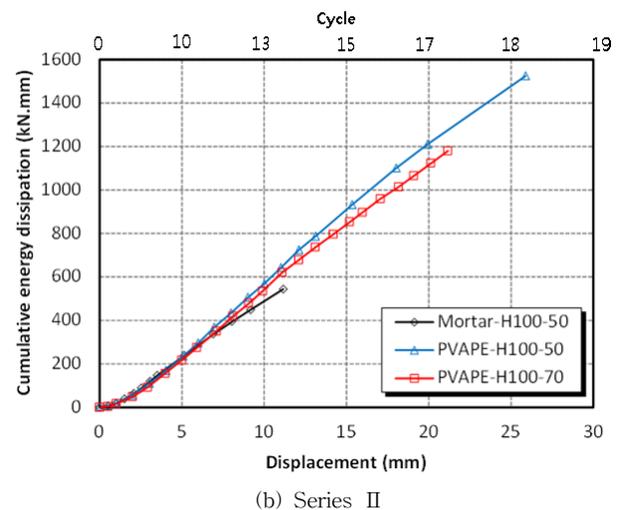
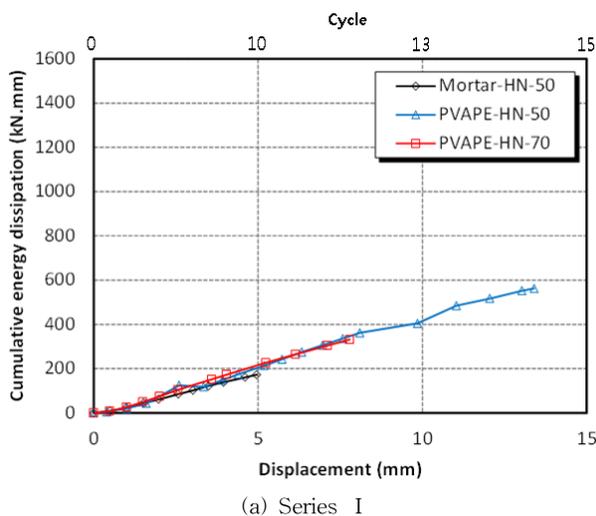


Figure 11. Energy dissipation capacities of stud shear connections

Table 4. Comparison between measured and calculated results

Series	Specimen	fcu (MPa)	Dist. of Hoop Reinforcement (mm)	Measured strength (kN)	Calculated strength (kN)	Calculated strength /Experimental strength
I	Mortar-HN-50	58	-	329.21	606.21	1.84
	PVAPE-HN-50	45		361.64	606.21	1.68
	PVAPE-HN-70	68		457.70	642.21	1.40
II	Mortar-H100-50	58	100	629.22	668.95	1.06
	PVAPE-H100-50	45		525.01	668.95	1.27
	PVAPE-H100-70	68		639.06	704.95	1.10

험체의 에너지 소산능력이 점진적으로 저하되었다. 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 PVAPE-H100-50 및 -70 실험체는 시리즈 I의 실험체들과 유사하게 대변형시까지 시멘트 복합체에 혼입된 단섬유가 균열면을 가로하며 에너지를 소산하였다. 특히 높은 변형능력을 보였던 PVAPE50 배합의 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 접합부 실험체가 파괴시까지 가장 큰 에너지 소산특성을 보였다.

이상과 같은 결과로 판단하여볼 때, 스티드 전단 접합부의 에너지 소산능력은 접합부에 타설된 시멘트 복합체의 직접인장특성 즉 인장변형능력과 균열제어성능에 따라 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

#### 4. 기존 설계식의 적용성 검토

일본건축종합시험소<sup>7)</sup>에서 제시된 접합부 종곡내력 산정식은 다음과 같다.

- (1) 보통강도 모르타르와 횡보강근이 사용된 경우

$$sQ_{ju} = 0.7\sigma_{su} \sum \alpha_s + (0.2p_w\sigma_{wy} - 0.45) W_j l_o' \quad (1)$$

- (2) 고강도 모르타르와 횡보강근이 사용된 경우

$$sQ_{ju} = 0.7\sigma_{su} \sum \alpha_s + 0.2p_w\sigma_{wy} W_j l_o' \quad (2)$$

여기서,  $sQ_{ju}$ 는 접합부의 강도,  $\sum \alpha_s$ 는 수평방향으로 배치된 스티드의 전단면적(mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{su}$ 는 스티드의 설계용 인장강도(MPa),  $\sigma_{wy}$ 는 횡보강근의 설계용 항복강도(MPa),  $p_w$ 는 횡보강근의 철근비,  $W_j$ 는 접합부의 폭,  $l_o'$ 는 기존 기둥의 폭 이다.

Table 4에 접합부 실험 결과와 위의 산정식에 근거하여 예측된 식을 비교하여 나타내었다. 시리즈 I 실험체들은 대체적으로 실험값에 비하여 예측식이 40~84% 가량 상향 평가되는 경향이 나타났는데, 이는 횡보강근의 유무에 따른 차이를 명확하게 평가하고 있지 못한 것으로 판단된다. 시리즈II의 실험체들은 시리즈 I 실험체에 비해 대체적

으로 실험값과 예측값이 유사한 경향을 나타냈으며, 특히 Mortar-H100-50 실험체는 예측값과 실험값의 차이가 약 6% 정도 차이로 유사한 값을 나타내었다. 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 실험체들은 대체적으로 실험값에 비하여 예측 값이 10~27% 가량 과평가 되는 경향을 보였다.

#### 5. 결론

시멘트 복합체의 변형능력이 반복하중을 받는 스티드 전단 접합부의 전단 및 균열제어성능에 끼치는 영향을 평가하기 위하여 총 6개의 실험규모 전단 접합부 실험체가 제작·파괴시까지 가력실험을 실시하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내진보강요소와 기존 시설물의 접합부 주입재로 주로 사용되고 있는 무수축 모르타르는 보강근 유무에 관계 없이 높은 강성을 보이고 있으나 초기균열발생이후 급격히 파괴되어 반복하중하에서 충분한 내진성능을 기대하기는 어려운 것으로 판단된다.
- (2) 전단보강되지 않은 접합부에서 직접인장변형능력이 0.3 및 0.5%인 변형경화형 시멘트 복합체는 스티드 전단 접합부의 강도를 기존 무수축 모르타르를 사용한 접합부에 비하여 약 27% 증가되었으며 변형능력 및 균열손상제어 능력에 있어서도 우수하게 나타났다.
- (3) 스티드 전단 접합부에 배근된 길이방향 및 횡방향 보강근은 접합부의 전단내력 및 균열제어능력을 향상시키는 것으로 나타났다. 무수축 모르타르를 사용한 접합부는 최대강도이후 급격한 파괴양상을 보인 반면 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 접합부는 최대하중이후에도 연성적인 거동 특성을 보였으며 SHCC의 인장변형능력은 이러한 연성적 거동을 지배하는 것으로 나타났다.

7) (財) 日本建築総合試験所構造部, “鐵筋コンクリート増設壁耐震補強設計及び施工指針”, 2001

(4) 적용성 검토를 위한 설계식이 현재 국내에는 존재하지 않아 일본 설계식으로 비교를 실시한 결과 약간 과평가되는 경향을 보였으나 설계식을 변형하고 추가적인 해석과 실험이 진행됨에 따라 실무에 적용 가능할 것으로 판단된다.

### References

1. National Emergency Management Agency, 'Result notice of the promotion of public facilities seismic strengthening existing measures in 2011', 2012. (<http://www.nema.go.kr>)
2. Lee, Kang Seok, A New Methodology for Seismic Capacity Evaluation of Low-rise R/C Buildings, Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 15(3), pp.106-115, 2011.
3. Ahn, Tae-Sang, Kim, Hyung-Joon, Efficient Seismic Retrofit of Existing Structures, Journal of the Architectural Institute of Korea, 52(10), pp.62-69, 2008.
4. Ryu, Seung-Hyun, Yun, Hyun-Do, Kim, Sun-Woo, Lee Kang-Seok, Kim, Yong-Cheol, Nonlinear Behavior of Seismic-Strengthened Domestic School Building, Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection,, 15(1), pp.243-253, 2011.
5. Youn, Gil-Ho, Kim, Sung-Ho, Kim, Youn-Cheol, Yun, Hyun-do, Seismic Retrofit of an Existing School Building using CIP-Infilled Shear Walls and Steel Braces, Journal of the Korean Institute of Educational Facilities, 19(4), pp. 21-28, 2012.
6. Japan civil Manabu Concert, Multiple Fine Cracks Type Fiber Reinforced Cement Composite Material Design. Construction Guidelines (draft), 2008, pp.16-18
7. (財) Japan General Building Research Laboratory structural part, "Seismic strengthening design and construction guidelines of the wall of the sim concrete", 2001.

접수 2013. 3. 18  
1차 심사완료 2013. 5. 20  
계재확정 2013. 7. 19