초고분자량 폴리에틸렌 섬유시트로 보강된 철근콘크리트 기둥의 실험적 내진성능평가

Experimental Investigation of the Seismic Performance of RC Column Retrofitted by Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Fiber Sheet

김승직* · 장준호** · 박동병*** · 최성훈***

Kim, Sung Jig · Chang, Chunho · Park, Dongbyoung · Choi, Sunghun

Abstract

The paper experimentally investigates the seismic performance of RC columns retrofitted by Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene(UHMWPE) fiber. A total of three specimens with a scale factor of 1/3 was constructed and experimentally investigated through static cyclic tests with a constant axial load in order to assess the structural behavior of the retrofitted RC columns. One specimen was a non-seismically designed column without any retrofitting method, while others were retrofitted with either Carbon fiber or UHMWPE fiber. It is concluded that the UHMWPE retrofitting method increases the strength and ductility of the RC column and can also impact on the failure mode of RC columns.

Key words : UHMWPE, Seismic Retrofit, RC columns

요 지

본 논문에서는 초고분자량 폴리에틸렌 섬유(Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene, UHMWPE)를 이용하여 보강된 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 실험적으로 평가하였다. 보강된 철근콘크리트 기둥의 구조거동을 평가하기 위하여 1/3크기로 축소된 총 3개의 기둥 실험체를 제작하였다. 1개의 실험체는 보강재가 적용되지 않은 비내진 상세의 기둥이며 다른 두 실험체의 경우 탄소섬유 또는 UHMWPE 섬유 시트로 보강하였다. 기둥의 전형적인 내진성능평가를 위하여 일정한 축하중하에서 정적반복가력실험을 수행하였다. 실험결과는 무보강 실험체와 비교하여 UHMWPE 섬유로 보강된 실험체의 최대내력, 연성 및 에너지 소산능력을 상당히 증가시켰으며 파괴모드에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 초고분자량 폴리에틸렌, 내진보강, 철근콘크리트 기둥

1. 서 론

최근 발생한 일본 도후쿠지진(2011), 고베지진(1995), 뉴질랜드 Christchurch 지진(2011), 미국 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994)등과 같은 중·대형지진들에 의하여 세계 여러 나라에서 막대한 인명피해와 많은 구조물들의 붕괴 및 손상으로 인한 상당한 경제적 손실을 초래하였다.

이러한 중·대형지진들에 의하여 많은 철근콘크리트 구조물들이 상당한 피해를 입었으며, 특히 비내진 상세를 가진 철근콘크리트 구조물의 피해가 지속적으로 보고되고 있다. 이러한 지진 피해의 중요한 원인들 중의 하나가 충분한 휨 연성 및 적절한 전단강도의 미확보로 인한 철근콘크리트 기둥

의 파괴이다. 따라서 비내진 설계된 기존 구조물의 경우 내진 보강을 통하여 지진 발생에서 충분한 에너지 소산능력을 구조물이 확보하도록 해야 한다.

또한 철근콘크리트 구조물은 우수한 내구성 및 시공성 등의 장점으로 건설 분야에서 많이 사용되고 있으나 시공, 각종 자연현상 또는 구조적인 요인들에 의해 시간이 경과하면서 노후화와 내력저하 등 여러 가지 구조적인 성능저하의 문제점이 발생하고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 국내·외에서는 기존의 철근콘크리트 구조물의 내구성을 증진시킬 수 있는 여러 가지 보수·보강공법에 대하여 많은 연구가 수행 중에 있다(Chung *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000; Chung *et al.*, 2002;

*정회원. 계명대학교 건축공학과 조교수(E-mail: sjkim4@kmu.ac.kr)

Member. Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Keimyung University

**교신저자. 정회원. 계명대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-53-580-5299 Fax: +82-53-586-1313, E-mail: chunho@kmu.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

***계명대학교 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Keimyung University

Fig. 1. UHMWPE Fiber Sheet

Park, 2004; Choi *et al.*, 2004; Ha *et al.*). 보수·보강공법에는 강판보강법, 섬유보강법등으로 크게 나누어지는데 강판보강법은 강판을 부착하여 구조물의 내력을 향상시키는 장점이 있지만 시공성의 단점과 재료의 자중의 증가로 사용이 미미한 실정이다(Shin *et al.*, 2003).

현재 많이 사용되고 있는 섬유보강법에는 크게 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드 섬유가 있는데 이 공법들은 섬유시트를 접착제로 붙여 일체화시켜 구조물의 내구성 향상과 장기간의 강도 유지가 가능하며 경량성, 부식성, 방수성등의 장점들이 있다. 하지만 유리섬유는 탄소섬유 가격의 1/3정도의 경제성과 높은 연성도를 기대할 수 있지만 탄소섬유보다 낮은 인장강도로 인해 보강재료써의 사용비중이 미미한 실정이다(Lee *et al.*, 2007).

본 연구에서는 구조보강재로 새롭게 개발된 초고분자량 폴리에틸렌(Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene, UHMWPE) 섬유시트(Fig. 1)의 내진보강재 적용성과 활용성을 검증하기 위하여 기존 탄소섬유를 이용한 보강법과 비교 실험을 수행하였다. 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 위하여 이용되는 전형적인 반복가력실험을 통하여 새로운 섬유와 기존 보강섬유로 보강된 철근콘크리트 기둥의 구조 성능을 평가하여 초고분자량 폴리에틸렌 섬유 시트로 비내진 상재를 갖는 기존 구조물의 구조성능을 향상시키는 내진보강법을 개발하고자 한다.

2. UHMWPE 섬유 특성 및 공시체 실험

2.1 UHMWPE 섬유

초고분자량 폴리에틸렌은 선형 폴리에틸렌으로 높은 분자량 및 높은 얹힘 밀도를 가지므로 우수한 기계적 물성 및 마멸 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이 재료의 특성은 1) 매우 높은 충격 저항, 2) 마모 및 마멸에 대한 높은 저항, 3) 매우 우수한 화학적 저항, 4) 우수한 소리 차단 및 에너지 흡수 특성, 5) 전기적으로 절연 특성 등이 있다. 이러한 여러 우수한 특성을 동시에 나타내기 때문에 이 재료는 경량성이 요구되는 항공기의 내부구조나 해양 구조물 등의 여러 분야에서 이용되고 있다(Parra-Montesinos *et al.*, 2005). 특히 우수한 내충격성을 이용하여 고속충격에 대한 저항용 재료로서 방탄복합재료에 많이 이용되고 있으며, 바이오 재료로서 인공관절에 매우 넓게 활용되고 있다.

최근에 들어와 초고분자량 폴리에틸렌 섬유를 건축·토목

구조물에 적용하는 시도가 있었다. Park and Lee (2004)는 폴리에틸렌 섬유의 합성섬유로프로 외부 비부착 보강된 철근콘크리트보 실험을 통하여 보의 강도 및 변형 성능이 효과적으로 개선됨을 보고하였다. Parra-Montesinos *et al.* (2005)와 Canbolat *et al.* (2005)는 각각 보·기둥 접합부와 인방보에 초고분자량 폴리에틸렌 섬유를 혼합한 콘크리트를 타설한 후 실험을 수행한 결과 구조물의 전단 및 휨 성능을 향상시켜 전단철근의 상당한 양을 대체할 수 있음을 보고 하였다. 하지만 이러한 실험은 새로 지어질 구조물에 적용할 수 있는 방법으로 기존 내진설계가 되지 않은 구조물에 적용하는 데에는 무리가 있다.

2.2 선정된 UHMWPE 섬유 및 공시체 실험

본 연구에서 적용한 UHMWPE 섬유는 구조보강재로서 개발된 첨단소재로서 본 연구에서 활용된 재료의 특성 및 기존 섬유와의 비교는 Table 1과 같다. Table 1에서 나타나 있듯이 UHMWPE 섬유는 인장강도는 탄소섬유와 유사하고 탄성계수는 아라미드 섬유와 유사함을 알 수 있다. 연신률의 경우 UHMWPE 섬유가 가장 우수하며 밀도 또한 가장 낮음을 알 수 있다.

선정된 보강재와 기존 보강재와의 구조물의 적용가능성을 알아보기 위하여 다양한 섬유시트로 보강된 콘크리트 공시체의 압축실험을 수행하였다. UHMWPE 섬유와 콘크리트의 부착을 위한 전용 접착제를 위하여 주제로 고성능 에폭시 레진(High performance epoxy resin)을 사용하고 경화제로는 폴리아미드 레진(Polyamide resin)을 사용하였다. 주제와 경화제의 배합비율에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 다양한 배합비율에 따라 공시체를 보강하여 실험하였다. 기존 보강재료는 탄소섬유와 유리섬유를 이용하였으며 콘크리트와의 접착제는 각각의 전용 접착제인 주제로(SK-CPA10)와 경화제(SK-CPA10)를 사용하였다.

Table 2에는 최종 선정된 주제와 경화제의 비율로 제조된 접착제를 사용한 UHMWPE 섬유로 보강된 공시체와 탄소섬유 및 유리섬유로 보강한 공시체 실험결과를 나타내고 있다. UHMWPE 섬유로 보강된 공시체는 무보강 공시체와 비교하여 압축강도가 32.6% 증가하여 유리섬유보다 보강효과가 크

Table 1. Material Properties of Selected Fibers

종류	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	연신률 (%)	밀도 (g/cm ³)
UHMWPE	3500	1.10×10^6	3.5	0.97
탄소섬유	3500	2.30×10^6	0.2~2.4	1.97
아라미드섬유	2800	1.09×10^6	2.4~4.4	1.45

Table 2. Compressive Strength of Cylinder Retrofitted with Various Fibers

종류	압축강도 (MPa)	압축강도 증가율
무보강	41.41	-
유리섬유	50.85	22.8%
탄소섬유	53.90	30.2%
UHMWPE	54.85	32.6%

며 탄소섬유와 유사한 보강효과를 나타내었다. 따라서 공시체 실험결과를 통하여 UHMWPE 섬유시트를 이용한 구조물의 보강의 가능성을 확인하였다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험체의 설계 및 사용 재료의 특성

본 연구에서는 앞에서 수행된 공시체 실험결과를 근거로 선정된 접착제와 섬유시트를 이용하여 철근콘크리트 기둥을 보강하고, 보강기둥의 내진성능 향상을 검증 및 비교하기 위하여 정적반복가력 실험(static cyclic testing)을 수행하였다. 전단 파괴 모드가 예상되는 비내진 상세의 철근콘크리트 기둥 실험체들을 제작한 후 먼저 무보강 실험체에 대하여 정적 반복가력실험을 수행하고 무보강 실험체를 기존 탄소섬유 보강재와 본 연구에서 활용한 UHMWPE 섬유시트로 보강한 실험체 대하여 정적반복가력실험을 수행하여 기둥거동의 변화특성을 비교·평가하였다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 축소기둥모델을 제작하였다. 콘크리트 설계압축강도는 27 MPa, 주철근 및 스티럽은 SD400 (항복강도 400 MPa)을 사용하며, 실험체는 실험실의 사용가능한 능력을 고려하여 원형모델의 1/3 축소모델로 설계되었다. Fig. 2(a)에서 보이듯이 축소모델의 기둥 단면 크기는 200 mm×200 mm이고 주근으로는 8-D13, 전단철근은 150 mm의 간격을 가진 D6를 사용하였다. 따라서 주근의 철

Fig. 2. Section and Elevation of Specimens

근비는 2.53%이고 전단철근의 체적비는 0.51%이다. 실험체의 입면도를 나타내는 Fig. 2(b)에서 보이듯이 기둥 상하부의 모멘트가 같다는 가정하에 실제 기둥 높이의 1/2만을 고려하여 기둥실험체를 제작하였고, 따라서 가력점은 기초상부에서 600 mm 떨어진 곳이다.

콘크리트의 공시체 실험결과와 제작된 실험체의 콘크리트 압축강도는 24.71 MPa로 측정되었다. 철근의 인장실험 결과 주근 D13의 항복강도 및 인장강도는 각각 470.9 MPa와 607.4 MPa이며 전단철근 D6의 항복강도 및 인장강도는 각각 342.3 MPa와 454.1 MPa로 측정되었다.

3.2 가력 및 계속 계획

축소모델의 재하실험은 일정한 축력 하에서 변위제어에 의한 반복 횡하중을 가력하는 정적반복실험으로 수행하였다. Fig. 3에 나타나 있듯이 본 실험에서 횡가력시 drift ratio(Δ/H) 1% 이전까지는 3사이클로 가력하고 1%이후에는 2사이클로 가력하여 수행하였다. 횡력은 500 kN 액추에이터를 이용하여 가력하였다.

실험체에 일정한 축력을 가하기 위하여 콘크리트 기둥 축력지지능력의 8% ($0.08A_g f_{ck}$)를 고려하여 Fig. 4에서 보이듯이 포스트 텐션을 가하여 축력을 가하였다. 이때 기둥 상부에 로드셀을 설치하여 압축력을 계측하였다. Fig. 4에 나타나 있듯이 횡변위는 가력점에 LVDT와 와이어 변위계를 설치하여 측정하였으며, 하부에 LVDT와 와이어 변위계를 설치하여 기초의 미끄러짐을 계측하여 기둥 순회변위를 계측하였다. 또한 주근과 전단철근에 각각 16개와 9개의 변형률 게이지를

Fig. 3. Loading Protocol

Fig. 4. Test Setting

설치하여 철근의 변형률을 측정하였다. 또한 기둥의 곡률을 측정하기 위하여 Fig. 4에 보이듯이 총 6개의 LVDT를 기둥의 하부로부터 중앙부까지 설치하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험체의 거동 및 파괴양상

Fig. 5에 각 기둥 실험체의 균열 및 파괴양상을 나타내었다. 무보강 실험체인 NRF의 경우 drift ratio 0.3%에서 기둥 하단부에 휨 균열이 발생하였고 이후 하중이 증가하면서 drift ratio 1.0%에서 기둥 중앙부로 사인장 균열이 발생하였다. 또한 drift ratio 0.77%에서 주근의 변형률이 항복변형률 0.0024를 넘어 주근이 항복하였음을 알 수 있었다. drift ratio가 증가함에 따라 사인장 균열폭이 증가하면서 Fig. 5(a)와 같이 콘크리트 박리 및 코어 콘크리트의 파괴가 발생하고 전단파괴가 발생하였다. Drift ratio 3.2%에서 최대 하중 100.9 kN에 도달한 후 하중이 급격하게 떨어져 실험을 종료하였다.

탄소 섬유시트로 보강한 CRF 실험체와 UHMWPE 섬유시트로 보강한 URF 실험체의 경우 섬유시트로 감아져 있어 균열을 검토할 수 없었으나 CRF와 URF 실험체의 주근 변형률이 각각 drift ratio 0.83%와 drift ratio 0.82%에서 항복 변형률을 넘어 주근이 항복하였음을 알 수 있었다. 두 실험

Fig. 5. Damage of Specimens After Testing

체 모두 섬유보강의 겹의 발생 및 부풀림 현상 등의 이상 징후는 발생하지 않았다. CRF와 URF 실험체의 최대하중은 각각 113.46 kN과 117.48 kN으로 측정되었으며, 하중은 떨어지지 않고 계속적으로 유지되었다. 두 실험체 모두 drift ratio 약 6%에서 실험을 종료하였고 보강실험체의 균열을 확인하기 위하여 실험 종료 후에 Fig. 5(b)와 (c)와 같이 섬유 보강을 제거하였다. 관찰한 결과 기둥 하단부에 휨균열을 관찰할 수 있었으나 균열로 인하여 기둥에 표면 박리현상은 일어나지 않았고 실험에 의한 균열폭과 기둥에 피해가 무보강 실험체인 NRF에 비해 현저히 작은 것을 알 수 있다.

4.2 하중과 변위 관계

Fig. 6는 실험체들의 drift ratio와 하중의 관계를 보여주고

Fig. 6. Drift ratio vs. Force

Table 3. Measured Forces

Specimen	Measured force(kN)*			Maximum	
	1%	2%	3%	Force(kN)	Ratio**
NRF	76.68	91.93	99.43	100.90	-
CRF	75.80	90.22	103.45	113.46	12.4%
URF	81.49	101.79	107.47	117.48	16.4%

*Measured force at the selected drift ratio in the direction of either a pull or a push

**Ratio of maximum force compared to NRF

있으며 Table 3는 각 실험체에 대하여 선택된 drift ratio에서의 측정된 하중과 실험 중 측정된 최대하중을 나타내고 있다. Fig 6(a)에 보이는 무보강 기둥의 이력곡선은 전단거동 특성인 강도 및 강성의 저하와 Pinching 효과를 보여주고 있다. Table 3에 나타나 있듯이 무보강 실험체의 최대하중은 drift ratio 3.2%에서 100.90 kN으로 측정되었고 그 다음 사이클에서는 하중이 60.21 kN으로 최대하중에 비하여 40.33% 저감되었고 실험 종료할 때의 사이클에서는 24.81 kN으로 최대하중과 비교하여 75.41%저감되어 휨력에 대한 저항능력을 상당히 상실했음을 알 수 있다.

탄소 섬유시트로 보강한 CRF 실험체와 UHMWPE 섬유시트로 보강한 URF 실험체의 경우 Fig. 6(b)와 (c)의 힘-drift ratio관계에서 보여지는 바와 같이 휨과괴 형태를 보여주고 있다. 다만 하중이 증가함에 따라 pinching 효과가 나타나고 있는 것으로 전반적으로 NRF 실험체와 비교하여 에너지를 소산할 수 있는 휨거동을 보이고 있다. CRF와 URF 실험체의 최대하중은 각각 113.46 kN과 117.48 kN으로 NRF 실험체의 최대하중과 비교하여 각각 12.4%와 16.4%가 증가하였다. 따라서 CRF 실험체와 비교하여 URF 실험체의 최대하중이 약 4% 더 증가했음을 알 수 있다.

위에서 상술한 내용은 Fig. 7에서 보이는 포락곡선에서 명확히 나타난다. Fig. 7에서 보이듯이 초기강성의 차이는 크지 않으나 drift ratio가 증가함에 따라 섬유보강 기둥의 하중은 계속적으로 증가한 반면에 무보강의 경우 drift ratio 3.2% 이후 하중이 급격히 떨어지고 있다.

Fig. 7. Envelope Curve

4.3 연성비

구조물의 연성능력을 나타내는 연성비(Ductility ratio, μ)는 항복변위와 극한변위의 비율로 정의된다. 일반적으로 구조물의 뚜렷한 항복점을 알 수 없기 때문에 본 연구에서는 초기강성이 최대하중에 도달하였을 때의 변위를 항복변위로 설정하였으며, NRF 실험체의 경우 최대하중 이후 연속된 사이클에서 하중이 40%이상 저감되는 전단파괴 거동을 보이고 CRF와 URF 실험체의 경우 하중이 지속적으로 증가하는 휨거동 특성을 보이기 때문에 휨-변위 이력곡선에서 최대하중에 도달하였을 때의 변위를 극한 변위로 설정하였다(Elnashai and Sarno, 2008). Table 4에서 보이는 바와 같이 NRF, CRF 및 URF 실험체들의 연성비는 각각 3.82, 6.05와 7.00으로 계산되었다. 따라서 NRF 실험체의 연성비와 비교하여 탄소섬유시트로 보강한 CRF 실험체의 연성비는 58.33%증가하였고 UHMWPE 섬유시트로 보강한 URF 실험체의 연성비는 83.36%가 증가하였다. 또한 CRF 실험체의 연성비와 비교하였을 때 URF 실험체의 연성비가 15.7%증가하였다. 따라서 연성비 측면에서 보았을 때 URF 실험체가 CRF 실험체보다 우수한 성능을 나타낸다고 판단할 수 있다.

4.4 에너지 소산능력

소산된 에너지는 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의하고 누적 에너지 소산량은 각 사이클 내부면적의 합으로 계산하였다. 최대하중 후 하중이 저감된 NRF 실험체의 경우 최대하중의 60%까지 저하된 내력사이클의 누적 에너지 소산량으로 평가하였다. Fig. 8은 각 drift ratio 수준에서의 첫 번째 사이클의 소산된 에너지량을 나타내고 있다. Fig. 8에서 보이듯이 NRF 실험체의 경우 최대하중이 측정된 drift ratio 3.2%이후 에너지 소산량이 줄어든 반면 섬유보강 기둥의 경우 drift ratio가 커짐에 따라 지속적으로 첫 번째 사이클의 에너지량이 증가하였다. 섬유보강 실험체인 CRF와 URF 실험체의 소산된 에너지량은 거의 유사하게 나타났다. 누적 소산에너지량을 나타내는 Fig. 9에서 보이듯이 NRF 실험체와 비교하여 CRF 실험체의 누적에너지 소산량은 100.27% 증가하였고, URF 실험체의 누적에너지 소산량은 105.28%증가하였다. 즉 URF 실험체의 에너지 소산능력이 CRF 실험체와 비교하여 약 5%정도 더 증가했음을 알 수 있다. 따라서 무보강 실험체와 비교하여 섬유보강 실험체의 에너지 소산량은 우수하며 또한 새로운 보강재인 UHMWPE 섬유시트로 보강한 실험체는 기존 보강재인 탄소섬유시트로 보강한 실험체와 비교하여 약간 우수한 에너지 소산량을 나타내고 있다.

Table 4. Ductility Ratio

Specimen	Yield displ.	Ultimate displ.	Ductility ratio	Compared to NRF
NRF	5.05mm	19.27mm	3.82	-
CRF	5.75mm	34.76mm	6.05	58.33%
URF	4.97mm	34.81mm	7.00	83.37%

Fig. 8. Dissipated Energy Per the First Cycle of Each Drift Ratio Level

Fig. 9 Cumulative Dissipated Energy Monitored at the Last Cycle of Each Drift Ratio

5. 결 론

본 연구에서는 높은 분자량 및 높은 얹힘 밀도를 가져 우수한 기계적 물성을 가지는 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE) 섬유시트를 활용한 내진보강공법을 개발하는 것을 목적으로 무보강 실험체 및 기존보강재인 탄소섬유시트로 보강된 실험체와 함께 UHMWPE 섬유시트로 보강된 실험체를 정적반복 가력실험 통한 내진보강효과를 비교·분석하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 무보강 기둥(NRF)의 힘-drift ratio 이력곡선은 전단거동의 특성인 강도 및 강성의 저하와 Pinching 효과를 보여주고 있으며 중국에는 실험수행 중 심한 사인장균열이 발생하여 전단파괴가 발생했다.
- 2) 탄소 섬유시트로 보강된 기둥(CRF)과 UHMWPE 섬유시트로 보강된 기둥(URF)의 경우에는 휨 파괴가 유도되어, 섬유보강재를 이용하여 구조물의 파괴모드가 바뀔 수 있음을 확인하였다. 또한 NRF 실험체와 비교하여 CRF와 URF 실험체의 최대하중은 각각 12.4%와 16.4%가 증가하였다.
- 3) 연성비의 경우 NRF 실험체의 연성비와 비교하여 CRF와 URF 실험체의 연성비는 각각 58.33%와 83.36%가 증가하였다. 또한 NRF 실험체와 비교하여 CRF와 URF 실험체의 누적에너지 소산량은 각각 100.27%와 105.28%

가 증가하였다.

- 4) 본 논문에서 수행한 실험을 근거로 할 때, 본 연구에서 제시한 초고분자량 폴리에틸렌 섬유를 이용한 내진보강법은 기존 탄소섬유의 보강법과 비교하여 강도 및 에너지 소산능력에서도 유사한 우수한 성능을 보였으며, 연성능력에서는 기존 보강법 보다 우수한 성능을 보여 향후 비내진 구조물의 강도와 연성을 개선시킬 수 있는 공법으로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년 중소기업청 산학연공동기술개발 지역사업(C0033791)과 2012년 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(54936)의 연구지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다. 또한 (주)로셈 박근호 대표, (주)동양제강 차재혁 연구소장 및 한국신발과학연구원 신종섭 선임연구원의 도움에 감사드립니다.

References

- Canbolat, B.A., Parra-Montesinos, G.J., and Wight, J.K. (2005) Experimental study on seismic behavior of high-Performance fiber-reinforced cement composite coupling beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, pp. 159-166.
- Choi, Y.M., Hwang, Y.K., Kwon, T.G., and Kim J.H. (2004) Study of Seismic Strengthening Effect of Existing Circular Bridge Pier Concerning FRP Retrofit Method, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 6, pp. 1167-1172.
- Chung, Y., Park, J., and Park, H. (2002) Seismic Performance Evaluation and Enhancement of Circular Reinforced Concrete Bridge Piers by Pseudo Dynamic Test, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 499-509.
- Chung, Y.S., Han, G.H., Lee, K.K., and Lee, D.H. (1999) Quasi-Static Test for Seismic Performance of Circular Hollow RC Bridge Pier, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 3, No. 2, pp. 41-53.
- Elnashai, A.S. and Sarno, L.D. (2008) Fundamentals of earthquake engineering, A John Wiley & Sons, Ltd.
- Ha, G., Shin, J., Yi, D., Hong, G., Ha, M.S., and Ha, J. (2007) Improvement of Earthquake-Resistant Performance of the Reinforced Concrete Beam-Column Joints using High Ductile Fiber Composites Mortar and Advanced Reinforcing Detailing, *Conference of The Regional Association of Architectural Institute of Korea*, No. 1, pp. 466-469.
- Lee, J.H., Son H.S., Bae, S.Y., and Park, C.M. (2000) Seismic Performance of Piers in Seohae Grand Bridge, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 4, No. 3, pp. 67-81.
- Lee, K.S., Byeon, I.H., and Lee, M.S. (2007) Performance of Reinforced Concrete Shear Columns Strengthened with Sprayed Fiber Reinforced Polymers, *Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection*, Vol. 11, No. 3, pp. 167-170.
- Park, C.K. (2004) Design and application of ductile hybrid FRP reinforcement for concrete structure, *Ph.D. thesis*, Konkuk university.
- Park, S. and Lee, S. (2004) Flexural behavior of RC beams strength-

- ened with external unbonded composite fiber rope tendons, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 20, No. 8, pp. 19-26.
- Parra-Montesinos, G.J., Peterfreund, S.W., and Chao, S. (2005) Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 3, pp. 487-495.
- Sin, Gw. H. (2003) A Comparative study on FRP and steel plate strengthening methods, *Master's Thesis*, Dongguk University.
-
- © Received June 24, 2013
© Revised June 24, 2013
© Accepted July 1, 2013