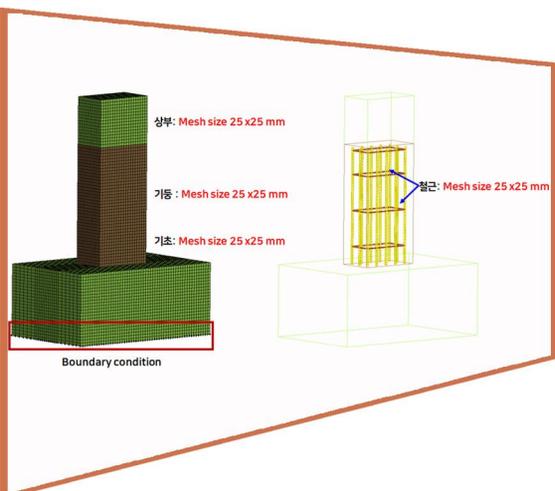


횡하중과 수직하중을 받는 아라미드계 섬유로 보강된 RC기둥의 연성과 강도 증진에 대한 실험과 해석연구

Experimental and Simulative Investigation of RC Columns with Ductility and Strength Increase with Aramid Sheets under Lateral and Vertical Loading



1. 서론

국내에서는 2016년에 발생한 경주지진과 2017년 발생한 포항지진과 수백차례의 여진은 건축물과 시설물에 큰 피해를 유발하였다. 특히 내진설계가 안된 건축물이나 비정형성을 보유한 필로티 건축물과 같은 구조물에서 많이 발생하였으며, 공학적 설계과정이나 판단없이 설치한 외장 조적벽이나 천장 마감재에서도 큰 피해가 발생하였다.

필로티 건축물은 1층의 기둥으로 이루어진 개방부와 그 상부에 설치된 RC 내력벽으로 인해 구조적으로 지진에 취약한 수직비정형을 보유하게 된다. 1층 계단실을 구성하는 내력벽이 건축 계획적인 이유에 따라 평면계획상에서 외곽이나 모서리에 위치하게 됨으로써 비대칭적인 평면배치가 발생하게 되고 이는 수평비정형을 유발하게 된다. 따라서 수직비정형과 수평비정형을 모두 포함할 가능성이 높은 필로티건축물에서 지진에 대한 큰 손상이나 피해사례는 기존 미국 등의 해외 지진피해 사례에서 많이 보고되었고, 이에 대한 대책 마련을 위해 지속적인 연구와 내진기준등의 개정이 이루어졌다[1].

국내에서도 2017년 포항지진 발생에서는 필로티 건축물이 가지고 있는 수평, 수직 비정형성으로 인해 1층 기둥에서 발생한 취성적 전단 파괴와 손상이 발생하였고, 국내에서도 필로티 건축물의 내진설계와 보강에 대한 많은 대책이 필요함을 일깨워주는 계기가 되었다.

내진보강에서는 현재 구조물이 보유하고 있는 강도, 강성, 연성의 성능을 향상시켜 목표성능을 만족하도록 보강해야 한다. 그 중 아라미드섬유를 사용한 보강공법은 강성에 큰 영향은 없지만 연성에 매우 효과적이며, 기존의 건축구조물을 철거할 필요없이 외부에 아라미드섬유를 접착하여 보강하기 때문에 손쉽게 사용할 수 있는 내진보강법이다[2-4].

본 연구는 비내진상세를 가진 기존 콘크리트 기둥에 내진보강을 위해 특성이 다른 아라미드 섬유의 보강공법을 제안하고 아라미드 섬유의 섬유보강공법을 통해 내진보강된 RC기둥의 복잡한 구조성능을 근사적으로 예측하고 평가할 수 있는 유한요소해석 모델을 개발하였다. 실물사이즈 구조실험과 검증된 유한요소해석모델을 통해서 보강전과 보강후의 기둥의 횡력 지지능에 대한 구조성능을 비교·검증하였다.



이 가 윤
세종대학교 건축공학과 박사후연구원



도바오권
세종대학교 건축공학과 박사과정



이 기 학
세종대학교 건축공학과 교수

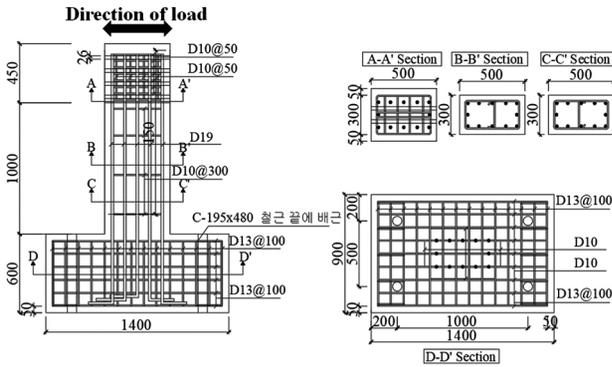


그림 1 실험체 상세 도면



그림 2 내진보강 기둥 실험체 제작 과정

2. 실험계획 및 결과

2.1 실험체 상세

실험체 단면은 300mm×500mm 직사각형 형태로 제작했다. 실험체의 높이는 층고 2,400mm의 기둥에 대해서 변곡점이 중앙에 발생하는 것으로 가정하고 기둥의 유효 높이를 1200mm로 결정하였다. ACI 318-19에서 제시하는 주철근비를 1%~8%로 규정하는데, 이에 맞춰서 주철근은 D19 철근을 사용하여 총 12개의 철근을 2.27%의 비율에 맞춰서 모서리부와 중간부에 배근되었다. 스트립 역할을 하는 D10철근을 300mm간격으로 배근하였다. 그림 1은 실험체의 상세도면을 보여준다.

실험체는 총 3개 제작되었으며 비내진상세를 갖는 기존 RC기둥 1개, 아라미드와 아라미드 계열의 섬유에서 방수 기능이 추가된 MLCP(고탄성 방향족 폴리에스터섬유소재) 섬유로 보강된 2개의 내진보강 실험체로 제작되었다. 보강재의 물성치는 표 1에서 정리하여 보여준다.

실험체의 보강범위는 기초부위와 상부의 하중 가력부위를 제외하고 기둥의 유효길이 부위에 부착하였다. 폭 300mm 시트를 상단과 하단에 2겹씩 부착하였으며, 접착제는 난연 접착제, 마감재는 시트위에 4mm 두께로 부착하였다. 마감재 유무에 따른 실험체의 성능을 비교하기 위해서 마감재는 상단 보강 부위에만 마감 작업을 실시하였다. 전체적인 실험체는 그림 2에서 나타난 바와 같이 구성되었다.

표 1 사용된 보강재의 물성치

분류	두께 (mm)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	신장율 (%)
DA630	0.433	2,900	163,000	2.4
MLCP	0.433	1,220	82,000	2.0

2.2 실험 계획

기둥의 보강성능평가 실험을 위한 세팅계획은 그림 3과 같다. 수직방향으로 압축력을 적용하기 위해 기둥 실험체 양 옆에 2개의 2,000kN 유압잭을 설치하였으며 주기하중 (Cyclic loadings)을 수평으로 적용하기 위해 2,000kN 유압 액추에이터를 설치하였다. 콘크리트 기초와 상부는 실험 중 움직이는 것을 방지하기 위해서 직경 260mm의 강봉으로 고정하였다.

무보강 실험체의 P-M 상관도를 통해서 구한 단면성능에 대해서 축하중 강도 10%에 해당하는 600kN을 기둥 실험체에 상시 축력으로 실험을 수행하는 동안 가력하였다. 횡하중은 반복가력으로 기둥의 순높이(h_0)에 대한 횡변위로 계산하였고 한 cycle당 3회씩을 가력하였다. 동일한 cycle에 대해서 1step씩 나누었으며, 0.25%를 1step부터 시작해서 변형률이 증가할 때마다 1step씩 추가해서 최대 9step까지 설정하였다. 그림 4는 본 연구에서 적용한 횡하중에 대한 하중 가력을 자세하게 보여준다.



그림 3 실험체 셋팅 모습

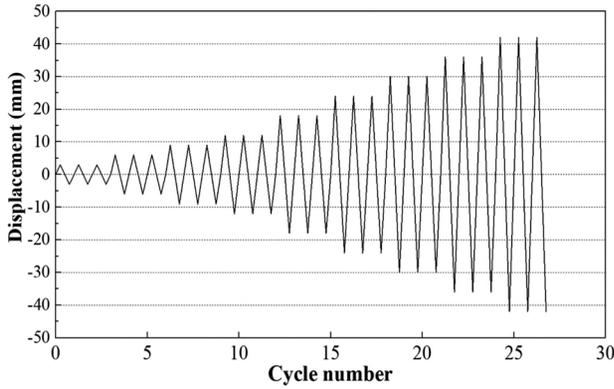


그림 4 변위와 하중가력 주기에 대한 그래프

2.3 실험 결과

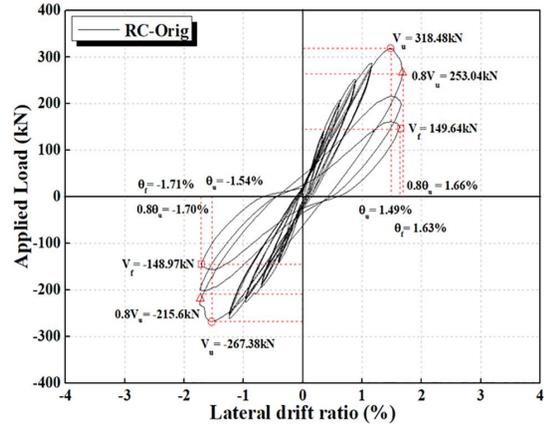
비보강 기둥 실험체는 1.49%에서 최대 하중, 318.4kN에 도달후 급격하게 하중지지성능을 잃어버리며 전단파괴가 발생했다. 2개의 보강 실험체들은 비보강실험체에 비해 강도의 증진 효과는 뚜렷하게 보이지 않았다. 보강된 기둥실험체는 비보강실험체에 비해 1.4~1.75%까지 변위가 증가하면서 최대 하중을 지지하였다. 연성적 거동 측면에서 최대 강도의 80% 측면에서 비보강 실험체에 비해 최소 1.86 배에서 1.95배까지 더 큰 횡변위를 받으면서 하중을 지지하는 연성거동을 보여주었다. 그림 5는 기둥실험체의 하중-변위 그래프를 보여준다.

3. 유한요소해석을 통한 성능검증

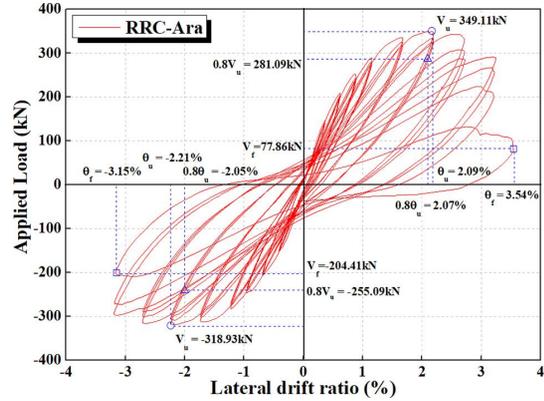
3.1 유한요소해석 모델링 절차

본 연구에서는 기존 RC기둥과 아라미드섬유와 MLCP의 섬유보강공법을 통해 내진보강된 RC기둥의 구조성능을 검증하기 위한 유한요소해석 모델을 개발하고, 이에 대한 해석을 수행하였다. 그림 6은 해석 모델링에 대한 절차를 그래픽적인 요소를 통해 순서도의 형태로 보여준다.

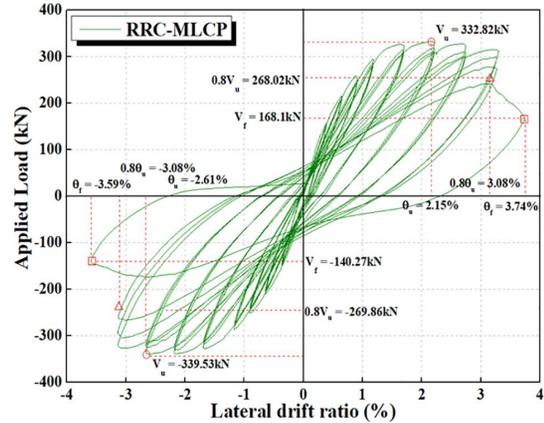
본 연구에서는 첫 번째로 콘크리트 재료모델에 따른 구속 효과와 모델의 거동을 살펴보고 결과에 따른 비교를 통해 철근 콘크리트 기둥에 적용된 재료모델을 결정하였다. LS-DYNA에서 제공하는 콘크리트 재료 모델 중 RC기둥 모델에서 중요한 요소인 콘크리트의 소성 특성과 철근에 의한 정착 효과를 반영할 수 있는 콘크리트 소성 재료 모델을 선택하였다. 이를 검토하기 위해서 원통형 콘크리트 재



(a) RC-Orig 실험결과



(b) RC-Ara 실험결과



(c) RC-MLCP 실험결과

그림 5 기둥 실험체 하중-변위 그래프

표 2 각 실험체의 거동 분석

실험체	V _u (kN)		θ _u (%)		0.8V _u (kN)		0.8V _u at θ _u (%)	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
RC-Orig	318.4	1.49	253.0	1.66	253	216	1.66	1.7
RRC-Ara	349.11	2.09	277.75	3.23	278	260	3.23	3.09
RRC-MLCP	339.53	2.61	269.86	3.08	268	268	3.08	3.08

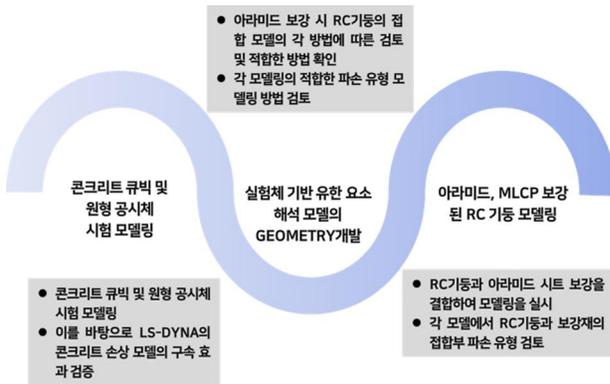


그림 6 RC기둥과 내진보강된 기둥의 FEM해석 모델링 절차

로 모델에 대한 정적해석을 통해 기존 실험 데이터와의 거동 일치를 검토하였다. 두 번째로는 검증된 콘크리트 모델을 기반으로 RC기둥의 기하학적 모델링을 진행하였으며, 콘크리트와 철근, 콘크리트와 아라미드 보강 모델 사이의 접촉면에 대한 적합한 모델링 방법을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 아라미드 보강이 RC기둥의 내진성능에 미치는 영향이 중요하므로 이에 따른 적합한 파손 유형 모델링 방법도 검토하였다. 마지막으로 실험에서의 결과와 해석에서 예측된 결과를 비교·분석하여 개발된 해석 모델링의 유효성을 확인하였다[5,6].

표 3 해석 실험체 모델 물성치

재료	LS-Dyna 재료 물성	물성치	
콘크리트	MAT CONCRETE DAMAGE PLASTIC_MODEL (MAT_273)	포아송비	0.2
		밀도 (kg/m ³)	2,400
		강도 (MPa)	30
철근	MAT_PLASTIC_KINEMATIC (003)	포아송비	0.3
		밀도 (kg/m ³)	7,800
		탄성계수 (GPa)	200
		인장강도 (MPa)	400
아라미드	MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (055)	포아송비	0.3
		밀도 (kg/m ³)	1600
		탄성계수 (GPa)	163/82
		인장강도 (GPa)	2.9/1.22

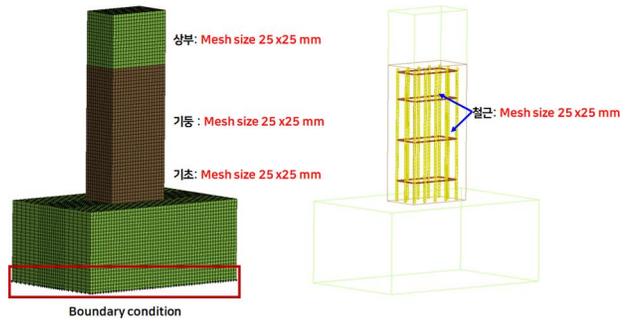


그림 7 아라미드 보강된 철근 콘크리트 기둥의 FEM 모델의 mesh 사이즈

표 3은 해석에 고려된 콘크리트, 철근 및 아라미드계 재료에 대한 물성치를 보여주고 있다. 이러한 물성치를 고려하여 LS-Dyna FEM 해석 모델에 반영되었다. 최종적으로 본 연구에서 연구된 아라미드계로 보강된 RC 기둥의 FEM 모델은 그림 7과 같이 개발되었다.

그래프의 거동을 확인했을 때 실험값과 해석값이 거의 비슷한 거동을 가지는 것을 볼 수 있다. 특히 정가력과 부가력 상태에서 최대값이 발생한 이후에 바로 하중이 감소하면서 취성적인 파괴가 발생하는 거동을 보여준다. 해석 결과의 손상 양상은 실험결과와 비슷하게 모멘트가 많이

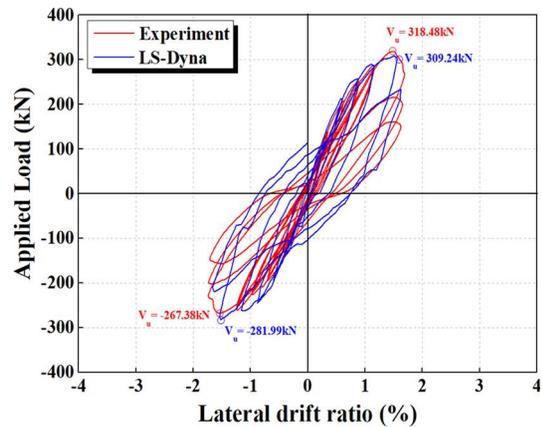


그림 8 RC-Orig의 실험과 유한요소해석 비교

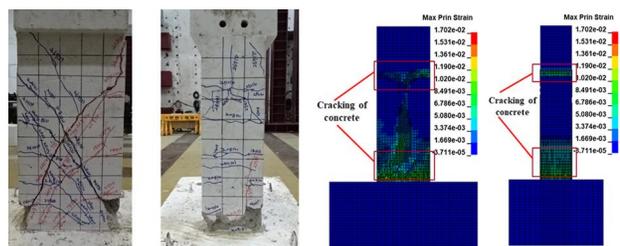


그림 9 RC-Orig의 균열양상 비교

발생하는 하부에서 넓은 범위로 나타나며 보강이 되지 않았으므로 전체적으로 손상에 기둥 하단부, 소성힌지가 발생하는 부분에 집중된 것을 볼 수 있다. 그림 8과 그림 9는 RC-Orig 실험과 유한요소해석 결과를 보여준다.

보강된 해석모델에서도 최대강도와 횡변위의 증가에 따라 횡하중지지 성능의 감소 범위를 매우 유사하게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 내진보강된 기둥 실험에서 관찰한 것처럼 FEM 해석 모델에서도 최대강도가 발생한 이후에도 바로 하중이 감소하지 않고 연성적인 거동을 한 이후에 강도가 감소하여 실험이 끝나는 것을 볼 수 있다.

해석결과 상부와 하부에 아라미드 시트로 내진 보강이 되어 있으므로 중앙부에 균열과 손상이 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 10과 그림 11은 RC-Ara 실험과 유한요소해석 결과를 보여준다. 그림 12와 그림 13은 RC-MLCP의 결과를 보여준다. 표 4는 실험결과와 해석결과를 비교해서 보여준다. 최대 강도의 오차율이 5.6%이하로 매우 미세한 것을 확인할 수 있다.

표 4 실험과 해석결과 비교

실험체		실험 (kN)	해석 (kN)	오차율 (%)
RC-Orig	정	318.48	309.42	2.8
	부	267.38	281.99	5.5
RRC-Ara	정	349.11	329.41	5.6
	부	318.93	322.12	1.0
RRC-MLCP	정	332.82	347.63	4.4
	부	339.53	345.82	1.8

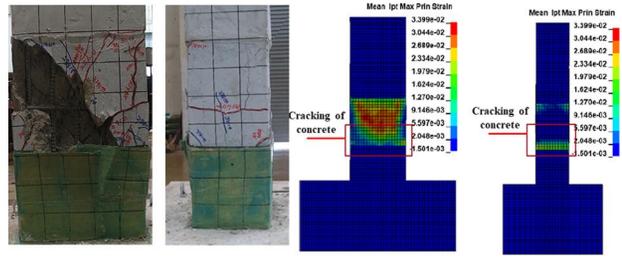


그림 11 RRC-Ara의 균열영상 비교

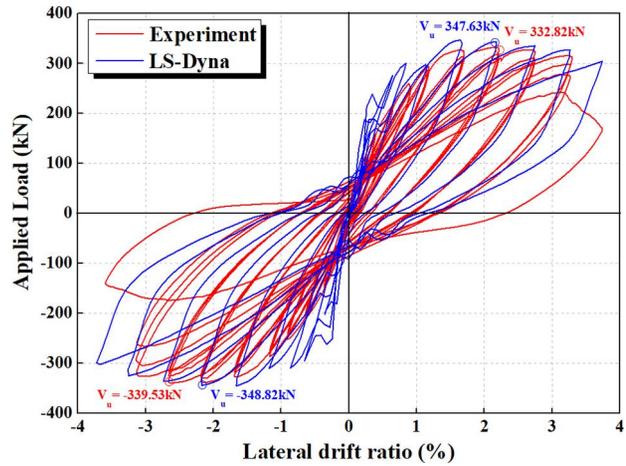


그림 12 RRC-MLCP의 실험과 해석결과 비교

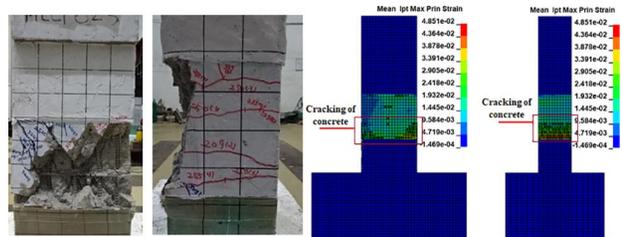


그림 13 RRC-MLCP의 균열영상 비교

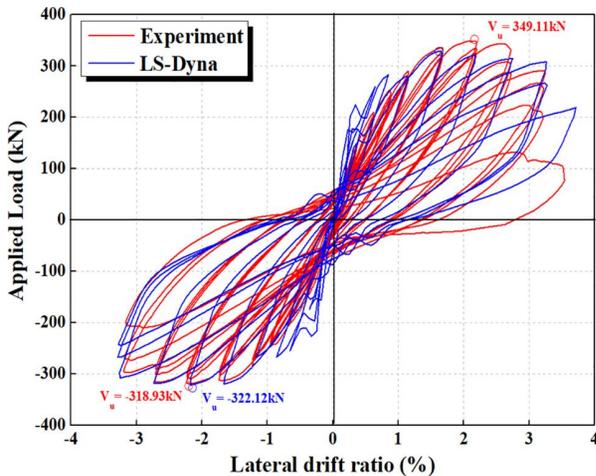


그림 10 RRC-Ara의 실험과 유한요소해석 비교

4. 결론

본 실험은 비보강 RC기둥과 아라미드 섬유로 보강된 RC기둥에 대한 특성을 실험 결과와 해석결과를 비교 및 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 보강된 RRC-Ara는 RC-Orig보다 강도의 증진 효과가 뚜렷하게 보이지 않았다. 연성적 거동 측면에서 최대 강도의 80% 측면에서 비보강 실험체에 비해서 최대 1.95배까지 더 큰 횡변위를 받으면서 하중을 지지하는 연성적인 거동을 보여줬다.

2) 최대강도의 측면에서 매우 근접하게 비보강 기둥과

내진보강 기둥의 FEM 해석모델은 매우 유사하게 구조 성능을 예측하였으며, 전체적인 이력곡선의 형태에서도 최대 강도와 횡변위의 증가에 따라 점차 감소하는 강도의 감소도 매우 근접하게 예측된다. 이는 향후 아라미드 계열의 시트부착형 보강재를 사용했을 때 재료적 특성을 변경시에도 본 연구에서 개발된 FEM해석 모델을 통해 합리적으로 그에 따른 구조 성능을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 행정안전부 극한재난대응 기반기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-ND641021).

참고문헌

1. Tomorrow, A. H. T. H. The Road to Earthquake Resilience in San Francisco, Community Action Plan for Seismic Safety. ATC-52-2 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 2010.
2. 이현호, 구은숙. (1999). 아라미드섬유시트로 전단보강한 RC 기둥의 성능평가에 관한 실험적 연구 (A Experimental Study on the Capacity Evaluation of the Shear-Strengthened RC Column with Aramid Fiber Sheet). 대한건축학회 논문집-구조계, 15(6), 29-36.
3. 최정진, 이태훈, 류재용, 노광근, & 최성모. (2018). 포항지진 피해로 예상되는 필로티건물 기둥의 FRP 내진보강 공법. 복합신소재구조학회지, 9(3), 14-21.
4. 고희규 외. (2018). 난연 아라미드 시트로 보강된 개착식 철도구조물 기둥의 내진성능에 대한 고찰. J. Korean Soc. Hazard Mitig, 18 (7), 39-46.
5. Riedel W. 10 years RHT: (2009). A review of concrete modelling and hydrocode applications. Predictive modeling of dynamic processes, 143-165.
6. Xu J, Lu Y. (2013) A comparative study of modelling RC slab response to blast loading with two typical concrete material models. International Journal of Protective Structures, 4(3), 415-432. 