

고연성재를 이용한 철근콘크리트 기둥의 내진성능

Earthquake-Resistance Performance of RC Column with High-Ductility Fiber



이원철 (Weon-Cheol Lee) | (주)삼보기술단 구조부 | 전무이사 | struc4177@hanmail.net
 임성순 (Sung-Soon Yhim) | 서울시립대학교 토목공학과 | 교수

1. 서론

공공시설물의 지진안전성 확보를 위해 1990년대 하반기부터 기존 비내진설계 구조물에 대한 내진보강공사를 시행해오고 있으며 구조물의 특성, 중요도, 교통량 등 종합적 분석에 따라 단계별 보강공사를 진행하고 있다.

초기단계에는 단면증설, 강판보강 등의 습식공법이 사용되어 왔고 점진적으로 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등의 고강도-고탄성 연속섬유시트가 활발히 적용되고 있다. 그러나 연속섬유시트는 높은 강도로 보강 효과는 우수하지만 재료자체의 파단변형률이 작으므로 연성이 작고 파괴단계에 이르러서는 급격하게 취성거동이 지배하는 보강재료이다. 최근 들어 국내외 내진보강재 적용방향은 강도향상 못지않게 구조물 항복이후의 연성을 증진시키는 추세이다. 대규모지진의 발생빈도가 높은 일본에서는 지진에 효과적 대응을 위해 구조물의 변형을 억제하는 보강패턴보다는 변형이 발생한 이후에도 유연하게 균형을 유지하도록 하는 연성설계 개념으로 내진보강이 이루어지고 있다.

본고는 기존 연속섬유시트보다 강도는 작으나 파단 변형률이 큰 재료로서 고연성거동이 예측되는 폴리에스테르 섬유계통의 고연성재를 이용하여 비내진 RC기

둥의 내진성능 향상 및 연성증대효과를 평가하였다.

2. 고연성 재료특성 및 보강개념

일반적인 보강개념은 기존기둥의 외측에 또 다른 보강막을 형성하여 강하게 구속·고정하고 콘크리트의 다양한 변형에 대하여 저항력을 높이는 방법이다. 그러나 고연성재 보강은 보강막을 파괴하고자 하는 움직임에 대하여 어느 정도 수용하면서 역방향의 탄성력으로 저항하여 파괴거동을 최대한 지연시키는 보강법이다. 또한 보강재는 콘크리트보다 강성이 약하고 인성이 강한 소재로서, 전반적인 RC 보강구조는 고연성을 확보하게 된다.

고연성 보강재에 의한 보강효과는 3가지 효과 즉, 구속효과와 응력부담효과로 구분할 수 있다. 그림-1과 같이 외력에 의해 균열이 발생하던 발생하지 않던 피보강부재의 표면을 감싼 보강재는 3축 압축응력상태를 나타내므로 한 방향으로 작용하는 더 큰 외력에 저항할 수 있게 된다.

합성섬유 고분자재료인 폴리에스테르 섬유는 1차원 구조의 섬유이며 섬유를 직조하여 2차원 구조의 섬유 집합체 소재로 생산된다. 제조회사에서는 적용용도에 따라 고분자량 및 연신공정을 통하여 필요한 물리적 특

성을 확보하고 2차원 형태의 보강소재로 가공한다.

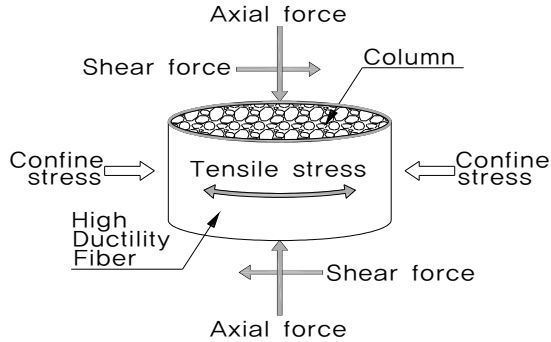
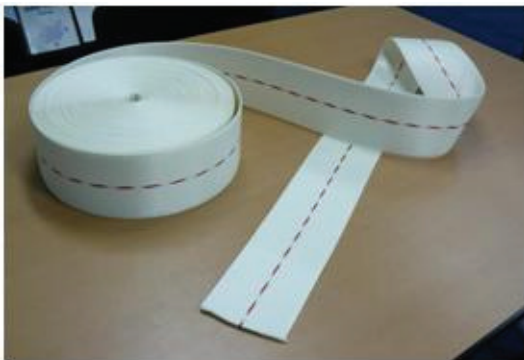


그림 1. 고연성재 구속효과에 의한 기둥 보강개념도

구조보강재 형태는 벨트형, 시트형, 테이프형으로 분류

되며 벨트형 보강재는 모두 1방향 재료로서 유효탄성계수는 4,500MPa, 인장응력은 450MPa, 파단변형률이 10%이상으로서 기존 연속섬유시트에 비해 5배 이상 크고 인장력이 작용하게 되면 절단되지 않고 늘어나는 성질이 우수하다. 보강재와 RC기둥의 접착은 일반적으로 우레탄계 1액형 접착제를 사용하고 있다. 접착제는 접착계면에서 박리하여 바탕면의 콘크리트를 물고 있는 것이 거의 없기 때문에 박리하더라도 구조계가 크게 바뀌는 현상이 없고 주위에 아직 박리하지 않는 부분들이 접착력을 발휘하며 큰 변형까지 무리 없이 안정된 보강효과를 나타낸다.

그림-2는 벨트형의 폴리에스테르 섬유를 사용하여 인력작업에 의해 손쉽게 기둥을 보강하는 사례를 보여주고 있다.

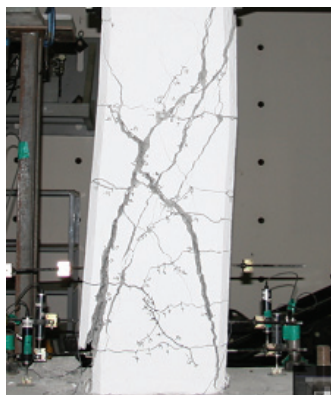


(a) 폴리에스테르 섬유 재료의 고연성재



(b) 고연성재 시공전경

그림 2. 고연성재 재료 형상 및 시공사례



(a) 무보강 실험체



(b) 보강 실험체 (하단부 보강재 제거)

그림 3. 하중재하 완료후 실험체의 균열패턴 비교

3. 고연성재 보강효과 분석

3.1 축소모형 실험 및 해석

축소모형 실험체의 반복 횡하중 실험에서 변위하중이 증가함에 따라 무보강 실험체는 그림-3(a)와 같이 전단균열이 지배하면서 극한하중이 발생한 이후 급격한 취성파괴가 진행되었으며 수평변위는 드리프트 비 2.5까지 재하하였다. 고연성 내진공법으로 보강된 실험체는 그림-3(b)와 같이 고연성 보강재가 철근콘크리트의 응력을 부분적으로 분담하게 되어 전단철근에 항복이 발생하지 않고 기둥 하부에서 휨균열이 주로 발생하였으며 수평변위는 5.0까지 재하하였다.

그림-4에서 무보강 실험체와 보강 실험체에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 변위연성도는 무보강 실험체에서 실험값이 2.17, 해석값이 2.46이며 보강 실험체에서는 실험값이 4.05, 해석값이 4.32로서 거의 일치된 값을 보여주고 있다. 보강 실험체는 극한하중 이후에도 하중감소가 완만히 이루어지고 전형적인 고연성거동을 나타낸다.

3.2 실구조물 해석

실구조물은 지하철의 지상정거장 기둥을 대상으로 선정하였다. 실구조물 수치해석 대상인 D정거장은

길이 170m, 폭 19m이며 실구조물 수치해석 부재선정은 수평의 지진하중 영향을 크게 받는 1층의 외측기둥으로 하였다. 수치해석 대상기둥의 단면은 1.0m×1.0m의 정사각형이며, 순높이는 5.1m이다.

실구조물에서 연성증대 효과를 확인하기 위하여 고연성 보강재의 두께를 1, 2, 3, 4mm로 변화시키면서 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 철근콘크리트 기둥의 실제 치수와 동일하게 모델링하고 콘크리트와 철근의 비선형 거동을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 사용 프로그램은 철근콘크리트의 비선형 거동분석, 콘크리트의 균열 분석에 널리 활용되는 ABAQUS를 이용하여 검증하였다.

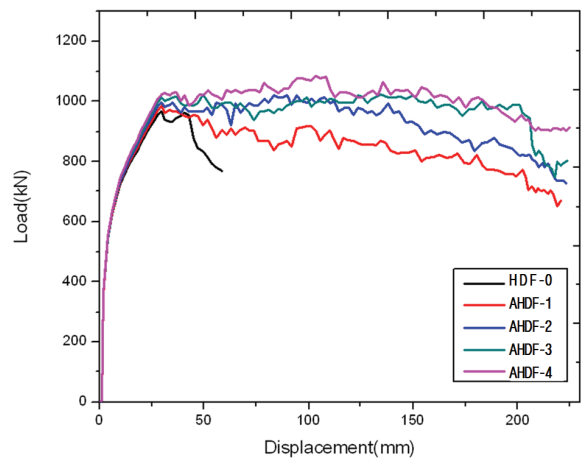


그림 5. 고연성재 두께변화에 따른 하중-변위 비교

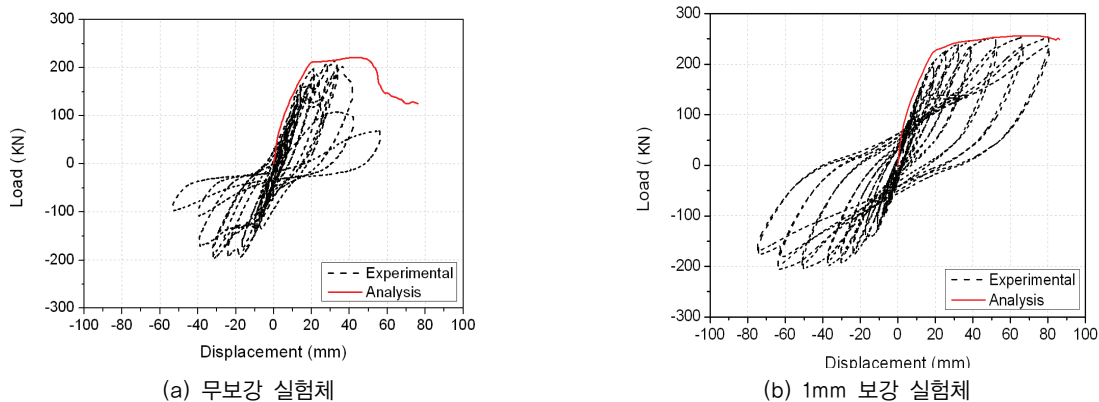


그림 4. 축소모형 실험체에 대한 실험 및 해석결과 비교

표 1. 고연성재 두께변화에 따른 변위연성도 비교

Specimen	Yield Displacement (Δy , mm)	Ultimate Displacement (Δu , mm)	Yield Load (kN)	Ultimate Load (kN)	Displacement Ductility ($\mu = \Delta u / \Delta y$)	Ratio
1mm (AHDF-1)	29.6	181.0	787.5	984.4	6.11	1.0
2mm (AHDF-2)	29.6	206.0	818.0	1022.5	6.96	1.1
3mm (AHDF-3)	29.6	211.0	820.9	1026.1	7.13	1.2
4mm (AHDF-4)	29.6	224.0	866.7	1083.4	7.56	1.2

그림-5는 보강재 두께변화에 따른 하중-변위곡선이고 표-1은 변위연성도를 산출하여 보강재 두께가 증가할 때 연성도 변화를 비교하였다. 보강 기둥은 무보강 기둥에 비해 확연히 다른 연성거동을 발휘하며 두께가 증가할수록 최대하중 이후 하중감소가 작은 것으로 나타난다.

표-1에서 항복변위는 29.6mm로 동일하나 최대변위는 181~224mm로서 항복변위에 비해 6.1~7.6배로 대폭 증가되어 재료고유의 고연성 효과가 발휘된 것을 알 수 있다. 항복하중은 1mm 보강에서 787.5kN, 4mm 보강에서 866.7kN으로서 약 10% 증가하고 있으며 최대하중은 1mm에서 984.4kN, 4mm에서 1083.4kN으로서 약 10% 증가된 값을 보이고 있다. 이러한 것은 상대적으로 변위량 증가에 비해 하중증가는 그리 크지 않다는 것을 보여주고 있다. 최종적으로 변위연성도는 1mm 보강에서 6.11, 2mm 보강에서 6.96, 3mm 보강에서 7.13, 4mm 보강에서 7.56으로서 보강재 두께증가에 따라 연성효과가 지속적으로 향상되고 있음을 확인하였다.

작은 수평변위에도 급격한 취성파괴를 보이는 반면, 보강실험체는 지진에너지를 많이 흡수할 수 있는 안정적 형태로서 큰 수평변위에도 연성효과가 탁월함을 확인하였다.

고연성재에 대한 금번 연구결과들은 비내진 RC 기둥이나 교각구조의 구조성능이나 내진성능 향상방안으로 고연성 보강재를 적용할 때 기초적인 설계 자료로 활용할 수 있을 것이다.

4. 결론

저강도·고연성 재료인 폴리에스테르 섬유를 이용하여 비내진기둥을 보강함으로써 콘크리트의 균열 및 파괴 등의 손상을 지연시키는 효과가 나타났고 변위연성도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 무보강 실험체는