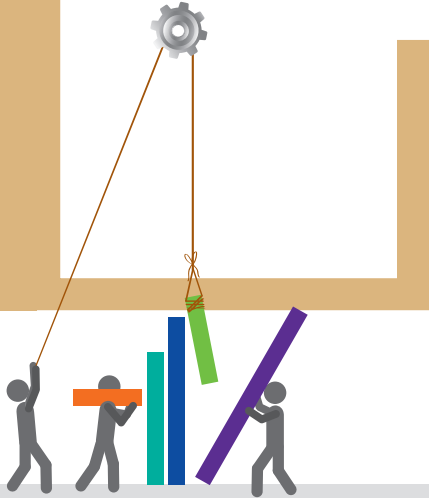


FRP를 활용한 기둥 구조물의 내진보강을 위한 해석 기술



SCIENTIFIC ARTICLE

1. 서론(Introduction)

2011년 3월 일본 동북부 지역에 규모 9.0의 강력한 지진이 발생했다. 또한 일본 대지진이후(3월 11일) 4월18일까지 규모 5.0이상의 여진이 437회 발생한 것으로 조사된 연구보고도 있다. 국내에서는 강원 평창군 도암면과 경계 지역에서 규모 4.8의 지진이 발생(2007)하였으며, 경남 거제 동남쪽 약 54km 해역에서 규모 4.0의 지진이 발생(2005)하였다. 2016년에 발생한 경주지진으로 한반도도 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 보다 더 강하게 인식하고 있다. 이러한 지진에 대한 발생빈도의 증가와 규모의 증가에 따라 시설물 전반의 내진보강에 관하여 사회적 관심도를 증대시키고 있다. 국내 지진 발생빈도가 증가함에 따라 비내진 기둥에 대한 내진성능평가 기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

최근에 건설되는 콘크리트 철골 구조물에는 내진설계법이 적용되고 있다. 하지만 과거 내진설계법을 도입하기 이전의 구조물은 내진설계가 적용되지 않아 내진에 대한 저항능력을 평가하여야 한다. 비내진 구조물에 대한 내진성능에 관한 많은 연구가 진행되고 있고 그에 따라 새로운 보강법과 보강재료에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

내진성능보강공법의 개발을 위하여 많이 활용되고 있는 섬유보강 복합재료는 재료가 경량이며, 시공이 용이하고 내부식성 등으로 인하여 내진보강재 또는 성능개선을 위한 연구개발에 선호되고 있다. 특히 탄소섬유와 유리섬유를 사용한 FRP(Fiber reinforced polymer)를 적용한 콘크리트 구조물의 보수·보강공법은 1990년대부터 많은 국내의 연구가 진행되어오고 있다. 섬유보강 복합재료의 경우 구조물의 구조재료로 활용되기 보다는 비 구조재료로서, 구조부재의 성능을 개선하기 위한 목적으로 많이 활용되고 있다.

복합재료를 활용한 내진보강기술의 향상을 위하여 해석기술의 발전이 우선 되어야 한다. 왜냐하면, 복합재료의 경우 재료의 획득 및 제작 등을 위

한 관련된 산업 인프라가 아직 기존의 건설재료인 철강이나 콘크리트보다 많이 부족하다. 유한요소법을 활용한 해석연구는 시간, 공간 및 비용적 측면에서 실험연구와 비교하여 많은 장점을 가지고 있다. 따라서, 복합재료의 경우 실제 대상구조물에 대한 시편을 제작하여 재료실험을 위한 표준화된 연구가 많이 필요하지만, 실험으로 검토하기 어려운 연구의 경우 유한요소해석기술을 활용한 내진성능 검토가 많이 활용되어야 할 것으로 생각된다. 본 기사에서는 복합재료를 활용한 내진보강재의 기동에 대한 내진성능검토 예를 통하여 유한요소 해석의 유한요소 해석 예를 살펴보고, 수정 및 보완점에 대하여 생각해보고자 한다.

2. 섬유강화 복합재료

섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)는 재료의 역학적 성질이 뛰어난 섬유(Fiber)와 섬유를 구속, 성형하고 응력을 전달하는 매트릭스(Matrix)의 복합체를 말한다. FRP는 최근 강재나 콘크리트를 대체할 수 있는 신소재 건설재료로 각광받으며, 건설 분야에서 이를 활용하고자 하는 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직까지 토목 및 건설 분야의 적용에 있어서 복합재료 전용 시방규정 및 지침의 부재, 재료의 성질에 관한 규격과 신뢰성 미비로 인하여 그 사용량은 기존의 건설재료와 비교하여 매우 적은 상태이다.

다양한 섬유소재를 활용하여 섬유보강 복합재료가 개발되고 있다. 현재 가장 활용도가 높은 섬유는 탄소섬유와 유리섬유이다. 탄소섬유로 구성된 FRP 복합재료는 높은 강성과 인장강도를 갖고 있어 구조물 보강에 많이 적용되고 있다. 하지만 높은 강성에 따른 취성파괴를 유도하여 내진보강에 대한 보강재로서의 활용은 안전성을 부여하지 못한다. 유리섬유로 구성된 FRP 복합재료는 취성적 거동보다는 연성적 거동을 하는 재료로 잘 알려져 있다. 하지만 유리섬유 복합체는 연성이 좋은 반면 강성이 적은 단점이 있다. 따라서, 유리섬유 복합재료의 연성파괴를 유도하는 유리섬유의 강성보강을 위하여 유리섬

유와 함께 알루미늄과 같은 금속재료를 함께 적층하여 적절한 강성을 확보할 수 있도록 강성재를 혼합하는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

3. 내진성능의 해석평가

3.1 재료구성모델

해석평가에서 가장 많이 사용되고 있는 일방향 가력 해석은 다양한 구조요소가 단계적 하중의 증가에 따라서 연속적으로 항복하는 구조물의 비선형 응답연구에 효과적으로 사용할 수 있는 방법으로 잘 알려져 있다. 가장 많이 사용되는 형태는, 해석 대상구조물의 고유치 해석을 통하여 지배모드를 결정하고, 지배모드에 따라 일정한 분포를 가지고 증가하는 정적하중 형태의 해석방법인 일방향 정적가력해석법이다. 이러한 정적가력해석은 변위 증가에 따른 구조물의 거동을 효과적으로 반영한다는 것이 일반적이다.

철근 콘크리트구조물의 주 사용재료인 콘크리트와 철근에 대한 재료 구성모델은, 해석의 정확도와 가장 밀접한 관계를 가지고 있다. 이러한 재료 구성모델의 선택과 재료물성치의 적용은 유한요소 해석의 핵심중의 핵심이다. 최근 콘크리트재료의 해석에 많이 사용되고 있는 재료구성 모델은 압축과 압축 상태의 콘크리트의 파괴 거동을 알 수 있는 콘크리트 손상소성모델이 있다. 이 모델은 콘크리트의 손상 거동을 예측하는데 적합한 모델로 구속압력상태의 인장강화, 압축연화, 강성손상과 소성 팽창의 특성을 포함하고 있다. 철근의 경우 콘크리트부재 내에서 일차원적인 인장력만을 고려함으로써, 철근에 의한 다른 영향을 배제하고자 트러스 모델을 적용하였다. 트러스 요소에 적용된 구성모델은 철근의 비선형을 고려하여 완전 소성 모델을 사용하였다. 섬유보강 복합재료의 경우 복합재료가 나타내는 선형거동과 취성적 거동을 모두 포함하는 재료 구성모델을 적용하였다.

3.2 해석대상 구조물의 유한요소 모델링

유한요소 해석연구를 위하여 실제 공용중인 지하철

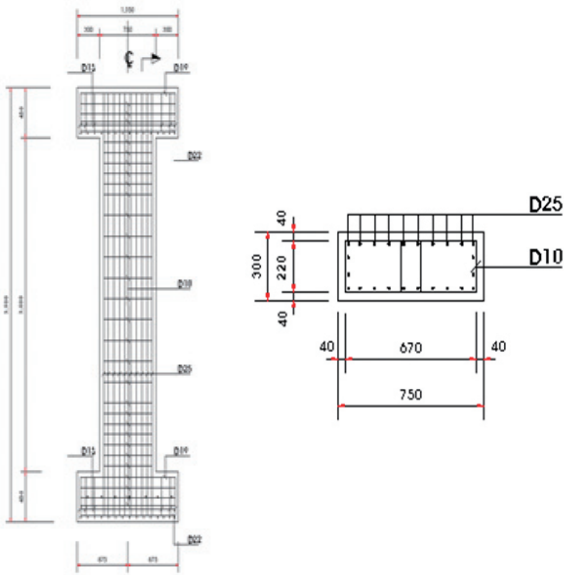


Fig. 1 해석대상 구조물의 제원

도 역사의 중요 기둥을 선정하였다. 구조물에서 기둥부재는 설계 시 휨모멘트와 전단력에 대하여 저항하는 부

재로 축방향 압축력에 대하여 저항하도록 설계되어 있다. 내진설계를 반영하지 않은 기둥은 지진에 의한 횡력에 저항하지 못하고 결국 구조물 전체의 파괴를 유도하게 된다. 선정된 기둥 단면의 제원은 가로세로의 크기가 750mm×300mm이다. 기둥부재의 일방향 가력해석을 수행하기 위해 콘크리트와 철근을 모델링 하였다. 콘크리트는 20절점 솔리드요소로 모델링하였고, 철근은 2절점 트러스요소로 모델링하였다. 콘크리트와 철근은 완전부착된 것으로 가정하였다. 이 기둥의 내진성능을 보강하기 위하여 기둥 단면의 상,하부에 복합재료를 사용하여 보강하는 것을 가정하였다. 복합재료 보강재의 폭은 260mm이고 두께는 6mm로 하였다. 복합재료 보강재는 20절점 솔리드 요소로 모델링하였고, 복합재료 보강재와 기둥은 완전부착된 것으로 가정하였다. 해석대상의 거동을 다양하게 검토하기 위하여 단곡률 및 복곡률이 발생 할 수 있도록 해석을 설계하였다. 복합재료보

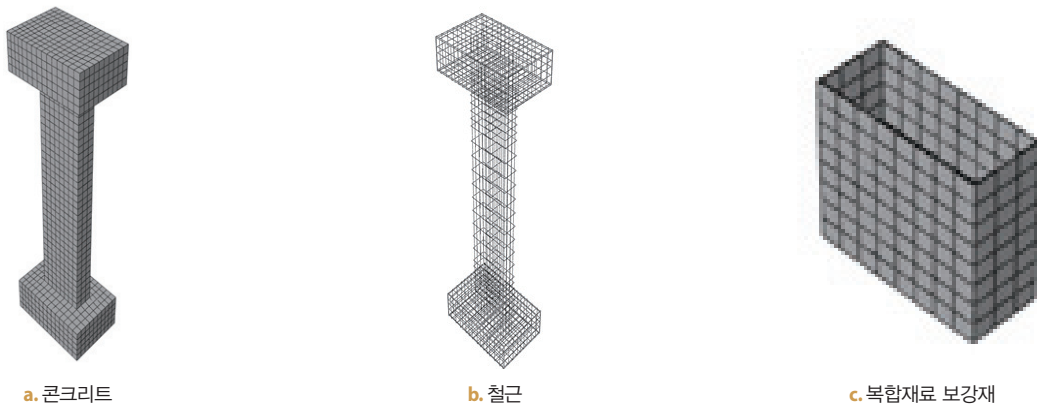


Fig. 2 유한요소 모델링

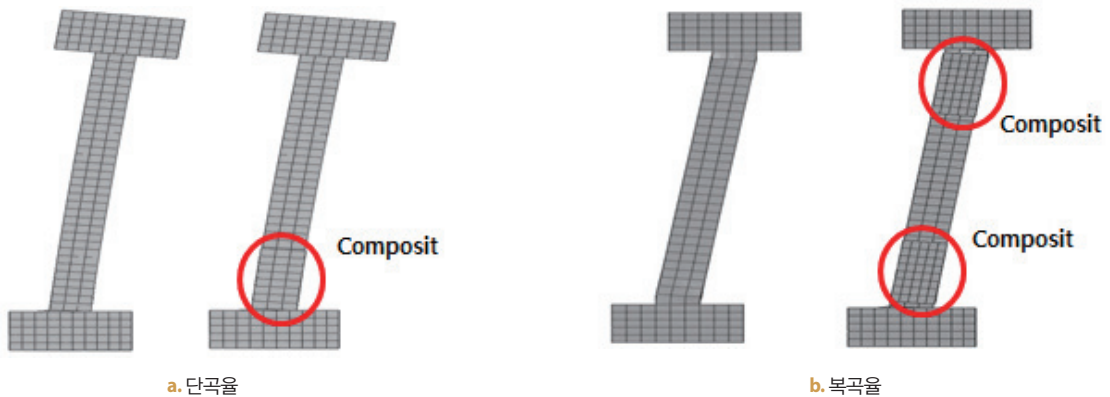


Fig. 3 해석방법에 따른 복합재료 보강재의 적용위치

강재의 보강위치는 단곡률 해석에서는 기둥과 기초 지지대 접합면부터 보강한 것으로 가정하였고, 복곡률 해석에서는 소성힌지가 이동함을 고려하여 기초와 상부 지지대에서 각각 5cm의 간격을 두고 기둥에 보강한 것으로 가정하였다.

3.3 유한요소 해석결과

복합재료 보강재의 내진성능 향상 성능을 평가하기 위하여 구조물의 상부에 수평하중을 점진적으로 증가시켜 구조물이 불안정해지거나 한계상태를 설정하여 한계상태에 도달할 때까지 해석을 수행하였다. 상부 수평하중의 형태에 따라 거동특성이 다르게 나타나게 된다. 일방향 가력해석을 통한 기둥의 내진성능을 평가하기 위하여 상단부 가력부의 변위와 기둥의 반력을 사용한 하중-변위 관계 그래프와 콘크리트균열과 철근의 응력 분포를 사용하였다.

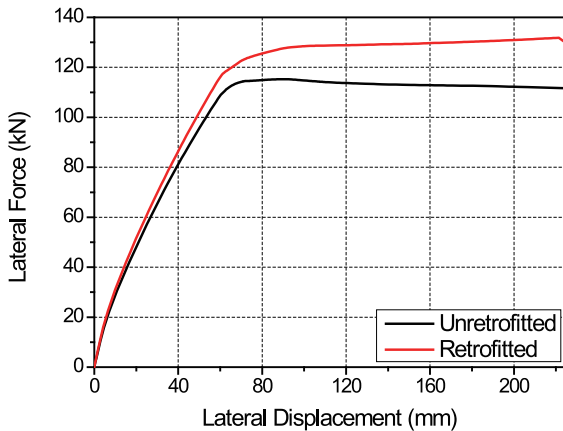


Fig. 4 하중-변위 곡선: 단곡률

단곡률 해석결과 보강전의 경우 변위 약53mm 부터 주철근의 항복이 진행되어 변위 약 96mm에서 전단철근이 항복함과 동시에 기둥의 항복이 발생하였다. 항복강도는 약115kN으로 나타났다. 주철근의 항복은 기둥의 위험단면 내에서 항복이 시작되어 상부로 진행되었다. 하지만 콘크리트의 균열은 기둥 위험단면이 아닌 기둥과 기초 지지대의 접합부에서부터 균열이 발생되어 전

단철근이 항복할수록 상부로 균열이 진행되었다. 기둥과 기초지지대 접합부의 균열이 지지대 내부로 파고드는 전단균열로 진행되어 응력이 기둥으로 전달되지 못하고 기둥과 지지대 접합부에서 응력이 집중되었다.

보강후의 단곡률 해석결과 변위 약50mm 부터 주철근의 항복이 진행되어 변위 약78mm에서 전단철근이 항복하기 시작하였다. 변위 약224mm에서 복합재료의 항복이 시작되었다. 보강후의 기둥부재는 항복이후의 강도 감소현상이 발생하지 않았다. 따라서 복합재가 항복하면 기둥의 콘크리트가 항복한 것으로 가정하고 항복강도를 약130kN으로 결정하였다. 그리고 주철근과 전단철근은 항복이후 응력이 크게 증가하지 않았다. 이것은 응력이 기둥과 기초 지지대 접합부에 집중되어 파괴됨으로써 기둥의 보강성능이 크게 증가 되지 않은 것으로 사료된다.

복합재료 보강재의 효과로 인하여 철근의 응력이 보강재 상부와 하부에 분산되어 집중되는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 균열도 보강재의 영향으로 인하여 보강재의 상부와 하부에 집중되는 것을 알 수 있다. 하지만 기초 지지대 부근의 균열이 진행됨에 따라 콘크리트의 균열은 기둥 위험단면이 아닌 기둥과 기초 지지대의 접합부에서부터 균열이 발생되었다. 보강전과 마찬가지로 기둥과 기초지지대 접합부의 균열이 지지대 내부로 파고드는 전단균열로 진행되어 응력이 기둥으로 전달되지 못하고 기둥과 지지대 접합부에서 응력이 집중되었다.

복곡률 해석결과 보강전의 경우 변위 약28mm 부터 주철근의 항복이 진행되어 변위 약56mm에서 전단철근이 항복함과 동시에 기둥의 항복이 발생하였다. 기둥의 항복강도는 약271kN으로 나타났다. 단곡률의 해석과 달리 복곡률 해석에서 철근의 응력집중지점은 상하부의 두 지점에서 발생하고 항복지점이 기둥의 중앙부로 이동함을 알 수 있다. 콘크리트의 균열도 기둥 상부와 하부의 양단부에서 균열이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 기둥과 기초와 상부의 지지대 접합부의 균열이 각각 발생한 지점의 지지대 내부로 파고드는 전단균열로 진행되어 응력이 기둥으로 전달되지 못하고 기둥과 지지대

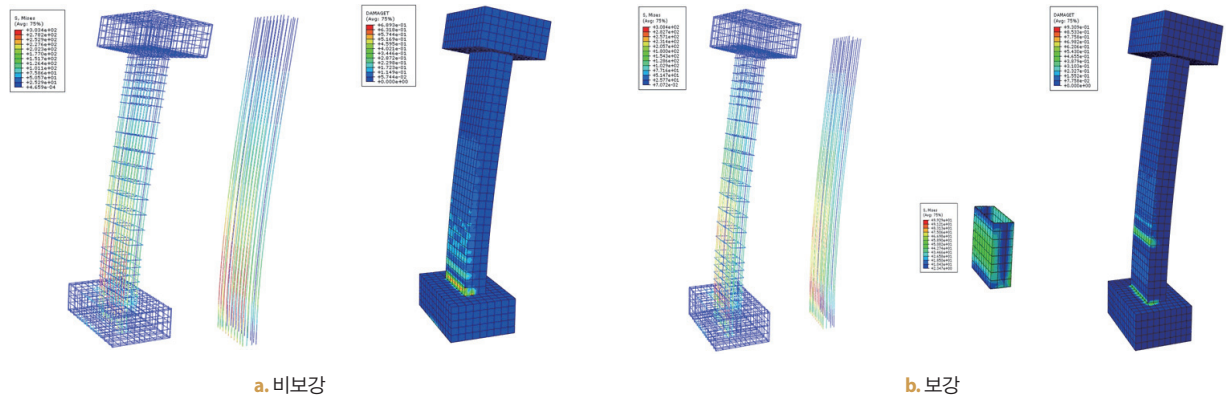


Fig. 5 철근 및 콘크리트의 응력분포 : 단곡을

접합부에서 응력이 집중되어 균열이 심하게 분포됨을 알 수 있다.

보강후의 복곡률 해석결과 변위 약25mm 부터 주철근의 항복이 진행되어 변위 약56mm에서 전단철근이 항복하기 시작하였다. 변위 약75mm부터는 압축측 주철근이

항복하기 시작하였다. 변위 약164mm에서 복합재료의 항복이 시작되었고 항복강도는 약291kN으로 나타났다. 복곡률 해석에서는 보강재의 설치높이를 단곡률의 해석의 보강높이와 달리 지지대에서 5cm간격을 두고 보강재를 설치함으로 보강전과 비교하여 기둥의 주철근 중 압축측 철근의 항복이 발생하고 복합재의 항복이 발생함을 알 수 있었다.

복합재료 보강재의 효과로 인하여 철근의 응력이 보강재 상부와 하부에 분산되어 집중되는 것을 알 수 있다. 콘크리트의 균열도 보강재의 영향으로 인하여 보강재의 상부와 하부에 집중되는 것을 알 수 있다. 하지만 기둥과 지지대 접합부 부근의 균열은 하중의 증가에 따라 기둥 위험단면이 아닌 기둥과 지지대 접합부의 균열이 지지대 내부로 파고드는 전단균열로 진행되어 응력이 기둥으로 전달되지 못하고 기둥과 지지대 접합부에서 응력이 집중되었다.

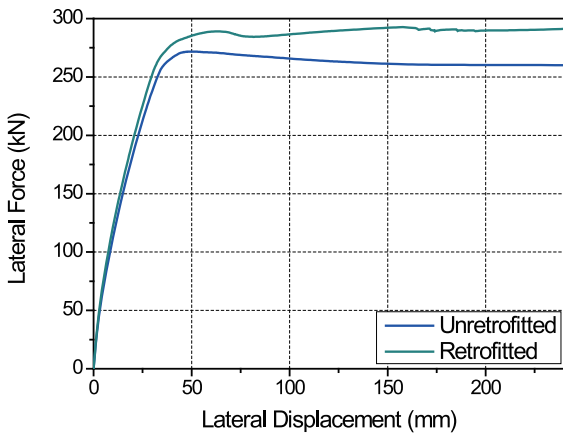


Fig. 6 하중-변위 곡선: 복곡률

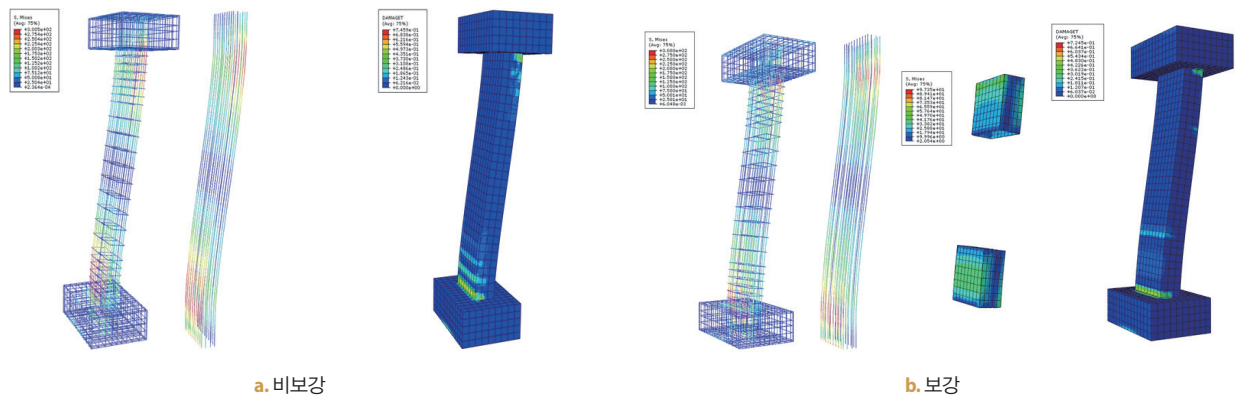


Fig. 7 철근 및 콘크리트의 응력분포 : 복곡률

3.4 해석결과 고찰

기둥 구조물에 대하여 복합재료 보강재의 내진 성능 향상효과를 평가하기 위하여 단곡률과 복곡률 상태에 대하여 해석을 수행하였다. 단곡률 해석에서의 최대강도는 약120kN이고 복곡률 해석에서 최대강도는 약 280kN 으로 나타났다. 이러한 강도차이는 가력방법에 따른 거동이 가정과 일치하는 결과로 복곡률 해석의 경우 단곡률 해석과는 다르게 두 지점에서 항복이 발생하기 때문이다. 해석결과 그래프에서 항복 후의 거동은 재료에 대한 수치모델의 경향을 잘나타내고 있어서 해석이 이론에 부합하는 결과임을 알 수 있다. 항복강도와 항복변위에 대한 이러한 수치적 결과는 구조물의 거동을 예측가능하게 할 수 있지만 실제적인 거동은 실험을 통하여 확인하여야 한다.

단곡률 해석에서 보강전후의 최대강도는 보강전 강도에서 약13%증가되었다. 또한 항복변위는 보강전과 비교하여 134%증가되었다. 복곡률 해석에서 보강전후의 최대강도는 보강전 강도에서 약7%증가되었다. 또한 항복 변위는 보강전과 비교하여 195%증가되었다. 이러한 결과는 유한요소법에 근거한 수치적 결과로 실제적인 거동실험전 실험의 주요 목적인 최대강도와 변위를 예측하는데 중요한 자료로 활용 될 수 있다.

복합재료 보강재료를 사용함으로써 단곡률과 복곡률거동에서 항복강도와 항복변위가 증가되었다. 철근의 응력분포특성도 보강전에는 위험단면부근에서 최대 응력이 발생하였으나 보강 후 복합재료 보강재의 상·하단으로 응력이 분산되어 위험단면의 파괴위험이 감소되었다.

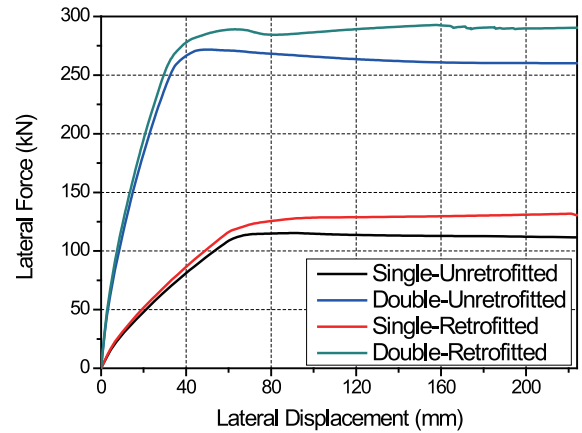


Fig. 8 하중-변위 곡선

4. 결론

이상으로 유한요소 해석법을 통한 섬유보강 복합재료 보강재의 내진성능 개선효과에 대한 해석적 연구를 살펴 보았다. 가정된 보강재의 내진성능 평가를 위한 해석적인 평가를 위하여 기둥구조물에 대한 유한요소 모델링을 개발하였다. 유한요소 해석을 위한 구조물을 3차원으로 모델링하였고, 철근 및 콘크리트의 재료비선형을 고려하여 해석을 수행하였다. 유한요소 해석결과를 바탕으로 복합재료 보강재의 내진성능평가에 대한 결론을 도출하였다. 가정된 섬유보강 복합재료 보강재를 사용한 기둥에 대한 내진성능 보강효과를 평가하기 위하여 유한요소 해석결과 섬유보강 복합재료 보강재를 사용하여 기둥을 보강할 경우 기둥 구조물의 내진성능이 향상되는 것으로 나타났다. 하지만, 섬유보강 복합재료 보강재를 개발하고, 개발된 보강재의 내진성능 향상 및 개선

| Specimen | | Yield Strength (kN) | Yield Displacement (mm) | Strength Ratio | Displacement Ratio |
|------------------|---------------|---------------------|-------------------------|----------------|--------------------|
| Single Curvature | Unretrofitted | 115.05 | 96 | 1 | 1 |
| | Retrofitted | 130.36 | 224 | 1.13 | 2.34 |
| Double Curvature | Unretrofitted | 271.29 | 56 | 1 | 1 |
| | Retrofitted | 291.39 | 165 | 1.07 | 2.95 |

Table. 1 Double Curvature Result

효과에 대한 해석적 결과는 실험을 통하여 그 효과를 검증할 필요가 있다. 하지만, 이러한 유한요소 해석기법을 사용함으로써, 실험연구 및 보강재 제작을 위한 가이드라인의 설정 시 유용하게 사용 가능할 것으로 판단된다.



● 참고문헌 references ●

- 1 심종성, 김규선, “건설 분야에서의 FRP활용”, 콘크리트학회지, 12권, 6호, pp.37-43, 2000
- 2 유영찬, 최기선, 강인석, 김공환, “구조보강용 FRP 복합체의 역학적 특성치 분석을 위한 인장시험방법 평가 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 12권, 1호, pp.73-80, 2008
- 3 장준호, 권민호, 김진섭, 주치홍, “기둥의 내진성능 향상을 위한 섬유보강 복합체의 적용성에 대한 해석적 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 16권, 3호, pp.117-127, 2012
- 4 김진섭, 권민호, 서현수, 임정희, 김동영, “긴급시공이 가능한 FRP 내진보강재 개발 및 최적 보강량 산정을 위한 해석적 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 17권, 5호, pp.136-145, 2013
- 5 김진섭, 서현수, 임정희, 권민호, “긴급시공이 가능한 FRP 복합재료 보강재로 보강된 기둥의 내진성능평가”, 콘크리트학회 논문집, 26권, 1호, pp.47-55, 2014