

유한요소법에 의한 열화된 철근콘크리트 보의 보강성능평가

Evaluation of Strengthening Capacity of Deteriorated RC Beams using Finite Element Method

이 창 훈^{*}
Lee, Chang-Hoon

송 하 원^{**}
Song, Ha-Won

변 근 주^{***}
Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

The objective of this study is to develop finite element analysis technique to predict the strength reduction of deteriorated reinforced concrete beams and their strengthening capacity. In order to consider the effect of rebar corrosion, a tension stiffening model is proposed and area reduction of rebars due to corrosion is considered. For the analysis of strengthened deteriorated RC beams, one dimensional truss element and an interface element are introduced for models of the strengthening composite and the interface between concrete and composite to simulate delamination or discontinuous behavior at the interface. Then, analyses for deteriorated RC beams strengthened with glass fiber reinforced epoxy panel (GFREP) are carried out to predict both flexural failure and plate-end delamination failure. Finally, analysis results are verified with experimental results.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 여러가지 원인에 의하여 열화가 진행되어 기대했던 수명을 다하지 못하고 그 성능을 상실하는 경우가 많다. 철근콘크리트 구조물의 열화로 인한 내력성능저하를 보강하기 위해서는 먼저 열화를 정량적으로 평가하고 보강후의 성능을 평가하는 것이 필요하다. 열화된 철근콘크리트 보를 에폭시 접착에 의해 고강도, 고탄성의 복합재로 보강하는 경우 여러가지 이유에 의하여 예상된 휨파괴 하중에 못미쳐서 조기에 박리(delamination)에 의한 파괴가 발생하는 경우가 많지만, 적절하게 보강된 경우의 보강성능의 정량적 평가는 보강재의 설계에 유용하게 사용될 수 있다. 한편 보강성능을 발휘하지 못하고 박리등에 의해 조기파괴되는 현상을 규명하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 철근부식으로 열화된 철근콘크리트 보에 대해 부식률에 따른 철근의 단면적 및 인장경화효과를 반영하는 해석모델을 제안하여 해석한 내력성능저하 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 또한 트러스요소로 모델링된 탄성 복합재와 콘크리트 사이의 접촉면을 이중선형의 전단변형-전단변위의 관계를 가지는 계면요소로 모델링하여 신소재 복합재인 유리섬유보강 에폭시패널(Glass Fiber

*정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

**정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

***정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

Reinforced Epoxy Panel: GFREP)⁽²⁾로써 적절하게 열화가 진행된 철근콘크리트 보를 보강한 경우의 보강성능을 해석적으로 평가하였다.

2. 열화된 철근콘크리트 보의 해석모델

2.1 콘크리트의 인장경화모델

균열을 고려한 평균응력과 평균변형률로 표현된 콘크리트모델은 그림 1에서 보여주는 것처럼 크게 인장연화모델, 인장경화모델, 전단전달모델등으로 구성될 수 있다. 특히 철근의 부착효과가 영향을 미치는 철근주변의 콘크리트에서는 콘크리트가 균열후 철근과 콘크리트의 부착효과에 의한 인장경화 거동을 하며 그 외의 영역에서는 인장균열 후 골재의 브리징작용에 의한 인장연화 거동을 한다.⁽³⁾

철근콘크리트 구조물에서 중성화나 염해등에 의하여 철근이 부식되면 부식에 의한 덮개 콘크리트의 균열과 부식생성물로 인하여 철근과 콘크리트 사이의 부착성능이 저하된다. 이러한 부착성능의 저하는 균열후의 철근과 콘크리트 사이의 부착효과를 나타내는 인장경화거동에 영향을 미치게 된다. 송하원등⁽⁴⁾은 이러한 철근부식에 의한 콘크리트의 부착성능저하를 고려하기 위하여 그림 2에서의 인장경화곡선의 기울기를 수정하는 방법을 택하였다.

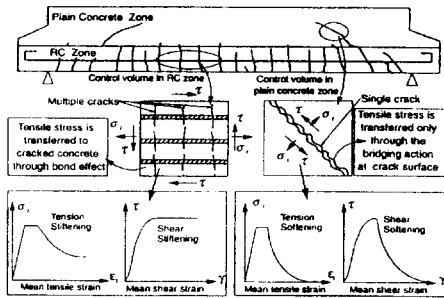


그림 1 철근과의 거리에 따른 콘크리트 모델

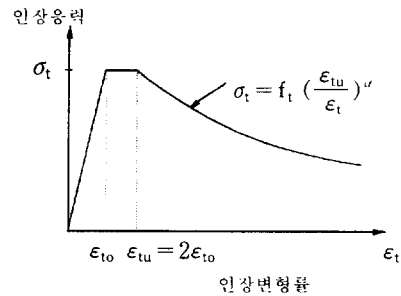


그림 2 수정된 인장경화모델

이전의 연구결과들에 의하면 부식생성물의 두께와 부식생성물로 인하여 덮개 콘크리트에 발생하는 균열폭은 부식률에 비례한다는 가정하에⁽⁵⁾ 본 연구에서는 인장경화계수를 부식률(x)의 함수로 표현되도록 식 (1)과 같이 가정하였다.

$$\alpha = 0.4 \left\{ 2.5 - 1.5 \left(1 - \frac{x}{x_u} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

여기서, x_u 는 극한부식률로서 철근과 콘크리트의 부착성능이 완전히 상실될 때의 부식률을 의미하지만 실제적으로 이러한 극한상태를 규정하기가 어려우므로 약 25%의 부식률을 극한부식률로 가정하였다. 또한, 부식률 x (%)와 부식후 철근의 단면적과는 식 (2)와 같이 가정하였다.

$$A_s' = A_s \frac{(100 - \beta x)}{100} \quad (2)$$

여기서, A_s' 은 부식후 철근의 단면적이고 부식에 의한 철근의 역학적 성능저하는 부식률보다 크게 나타나는 경향을 고려하기 위하여 수정계수 β 를 도입하여 그 값을 1.2로 가정하였다.⁽⁶⁾

2.2 계면 구성모델

콘크리트보와 탄성 보강재의 계면에서의 박리파괴나 불연속적인 거동은 식(3)과 같은 계면응력-계면변형의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} q_t \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_t & 0 \\ 0 & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, q_t, q_n 는 전단과 수직방향의 계면응력을 의미하고, v_t, v_n 는 전단과 수직방향의 상대변위를 나타낸다. 전단실험에서 계면전단응력이 최대값에 도달하게 되면 계면은 연화거동을 하게 되며 그림 3은 계면전단응력-계면전단변위간의 관계를 나타내고 있다.⁽⁷⁾

2.3 보강된 보의 유한요소모델링

그림 4는 보강재로 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능을 해석하기 위한 유한요소해석 모델로서 콘크리트는 8절점의 2차원 평면응력요소로서 9개의 가우스 적분점을 가지고, GFREP는 3절점 트러스요소로서 3개의 가우스 적분점을 가지며 콘크리트와 보강재사이의 접착면은 6절점의 계면요소로서 3개의 가우스 적분점을 가지도록 모델링하였다. 콘크리트는 다시 철근콘크리트영역(RC Zone)과 무근콘크리트영역(PL Zone)으로 나누어지는데, 이 영역의 크기는 철근직경, 철근의 항복강도, 콘크리트의 인장강도 및 덮개 콘크리트의 두께에 의하여 결정된다.⁽⁸⁾ 주철근과 스티럽은 철근을 포함하는 콘크리트 요소에서의 수평방향과 수직방향의 철근비로 모델링된다. 일반적인 탄성해석의 응력-변형률 관계와 같이 보강재의 응력변형률 관계는 $\sigma = E \cdot \epsilon$ 과 같이 나타낼 수 있고 보강재의 인장응력이 인장강도에 도달하면 파괴되는 것으로 간주하였다. 계면요소는 콘크리트 2차원 평면요소의 8개의 절점 중 하부의 3개의 절점과 트러스 요소의 3개의 절점으로 구성되며 보강재 단부의 계면에서 최대전단응력이 발생한 후 연화거동의 진전에 의해 박리파괴를 나타낼 수 있다.

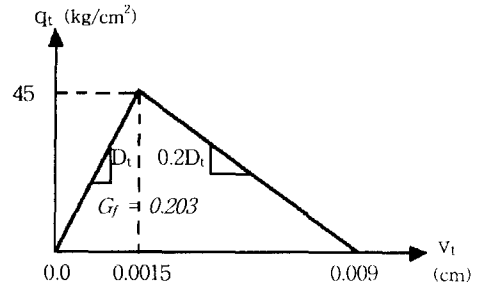


그림 3 계면에서의 전단응력-전단변위 관계

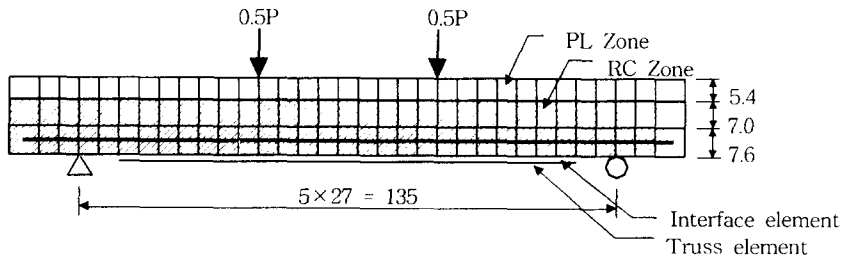


그림 4 유한요소해석모델 (단위: cm)

3. 열화와 보강에 따른 성능해석

3.1 부식열화에 따른 성능저하

그림 5는 철근콘크리트 보의 주철근이 부식된 경우의 내력성능저하를 관찰하기 위하여 축진 전식방법으로 부식시킨 철근콘크리트 보 시험체의 형상 및 치수를 나타내고 있다.⁽⁶⁾

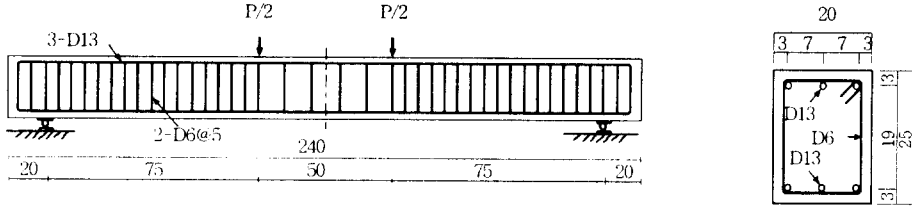


그림 5 부식된 보 시험체의 형상 및 치수 (단위: mm)

그림 6의 (a)~(c)는 보 시험체의 하중-처짐곡선으로서 실험과 해석결과를 비교하여 나타내고 있다. 해석은 단순히 철근의 단면적 감소만 고려하고 인장경화계수 α 를 0.4로 적용하여 해석한 경우와 철근의 단면적 감소에 더하여 열화를 고려하여 인장경화계수 α 를 식 1에 의해 부식률에 따라 계산한 값을 적용한 경우로 나누어 실시하였는데 부식률이 8%일때 α 는 0.72이고 부식률이 25%일때 α 는 1.0을 적용하였다. 그림 6(a)~(c)의 하중-처짐곡선에서 나타난 것과 같이 열화를 고려하여 수정된 인장경화계수를 적용한 것이 실험결과에 더 잘 일치함을 알 수 있다.

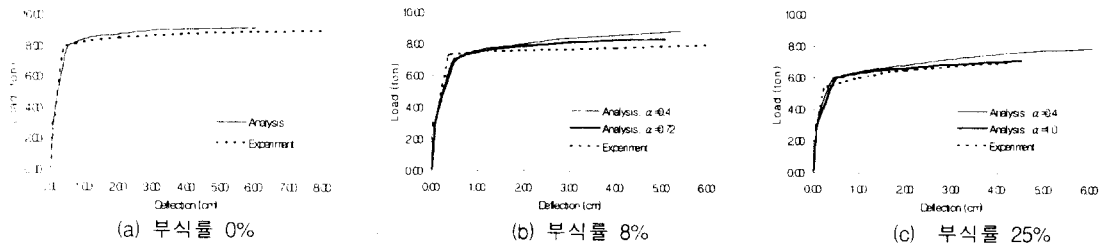


그림 6 부식률에 따른 하중-처짐곡선

3.2 GFREP 보강에 따른 내력성능향상

FRP의 일종인 GFREP는 에폭시 모르타와 유리섬유로 구성되는 복합재료로서 두께는 1cm이고 인장탄성계수는 $34,000\text{kgf/cm}^2$ 이며 인장강도는 340kgf/cm^2 의 값을 가진다. GFREP의 보강효과를 알아보기 위하여 일정한 제원 및 철근비를 가지는 철근콘크리트 보⁽³⁾를 이용하여 휨시험을 실시하였다. 시험에 사용된 철근콘크리트보의 규격과 철근을 배근한 모습은 그림 7과 같고, 그림 8은 부분보강보를 그림 9는 전면보강보를 보여주고 있다. 그림 10(a)~(c)는 무보강 철근콘크리트보와 GFREP로 보강한 철근콘크리트보에 대해서 실험에 의해 보 중앙에서 측정된 하

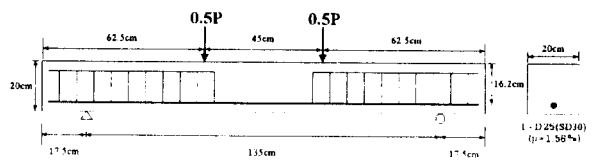


그림 7 무보강 철근콘크리트보

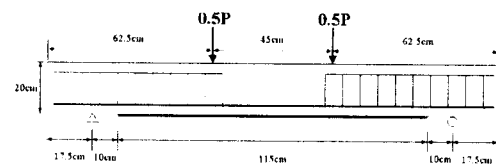


그림 8 부분보강 철근콘크리트보

중-치짐곡선과 제안된 해석모델을 이용하여 구한 하중-치짐곡선을 비교하여 나타내고 있다. 전면보강 철근콘크리트보의 실험결과 최대하중 16.8ton에서 보강재의 인장파단으로 파괴되었고 해석결과에서는 최대하중 18.0ton에서 보 중앙에서의 보강재의 인장응력이 GFREP의 인장강도인 340kgf/cm^2 에 도달하므로써 파괴되는 결과를 나타내었다. 부분보강

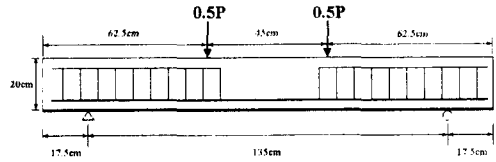


그림 9 전면보강 철근콘크리트보

철근콘크리트보의 실험결과 최대하중 17.3ton에서 보강재 단부의 계면에서 콘크리트와 보강재의 박리에 의해 파괴되었다. 이중선형으로 가정한 계면전단응력-계면전단변위의 관계를 부분보강 철근콘크리트보의 해석에 적용한 결과 최대하중 17.5ton에서 박리파괴를 나타내었는데 이는 전면보강 철근콘크리트의 최대하중인 18.0ton에 못미쳐서 조기에 파괴된 것이다. 이상과 같은 파괴형태는 그림 11(a)~(c)의 실험과 해석에서의 균열과 파괴형상을 통하여 확인할 수 있다.

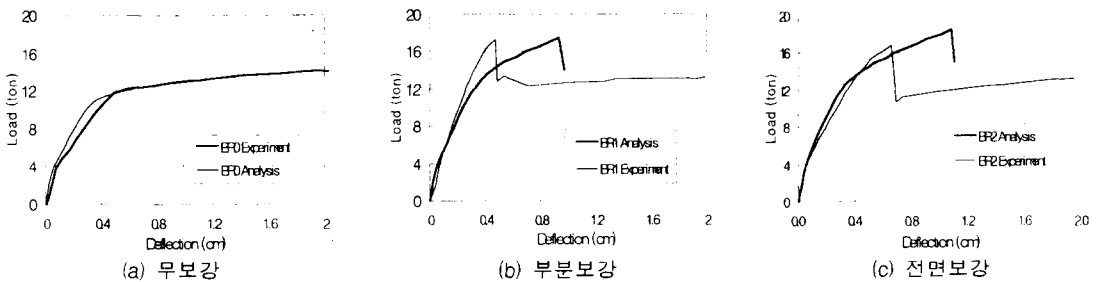


그림 10 GFREP로 보강된 철근콘크리트 보의 하중-치짐곡선

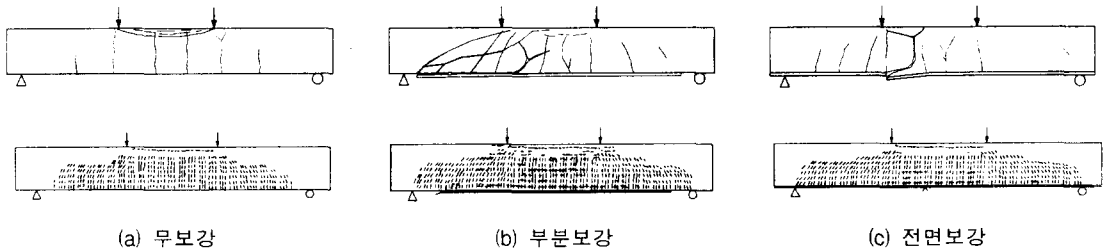


그림 11 GFREP로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴형상 (상 : 실험, 하 : 해석)

철근부식된 철근콘크리트 보의 보강성능을 해석하기 위하여 그림 5의 시험체⁽⁶⁾로서 철근이 8%부식된 경우에 있어서 GFREP를 이용하여 보강한 것으로 가정하였다. 보강길이는 전지간 200cm에 대하여 양쪽 지점에서 10cm 떨어진 지점으로부터 보강하여 180cm가 되도록 하였고, 보강폭은 시험체의 폭과 동일하게 20cm로 하였으며 GFREP의 두께는 보강길이의 1/20에 해당하는 1cm로 하였다. 그림 12는 부식되지 않은 보(부식률 0%)와 부식된 보(부식률 8%)에 대한 해석결과와 부식된 보를 GFREP로 보강한 경우의 해석결과를 비교하여 나타내고 있다.

해석결과 GFREP로 보강한 경우 하중이 11.0ton에 이르렀을 때 보 중앙부에서 GFREP의 인장응력이 인장강도에 도달하므로써 파괴되었으며, 계면에서의 박리파괴는 발생하지 않았다. 주철근이 8% 부식

된 보의 최대하중은 8.04ton으로서 부식되지 않은 보의 최대하중 9.04(ton)에 비하여 11%의 내력성능이 감소되었으나 GFREP의 보강으로 인하여 37%의 내력향상을 나타내었다. 이는 부식되지 않은 보의 최대하중 9.07(ton)에 비해서도 21%의 내력이 향상된 값이다.

4. 결론

본 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 철근부식에 의해 열화된 철근콘크리트 보의 내력성은 부식량에 비례하게 철근단면을 감소시키고 부작 열화를 고려하여 수정된 인장경화모델을 적용하여 해석할 수 있음을 보였다.
- (2) GFREP로 보강된 철근콘크리트보에 대해서 보강재를 트리스요소로 모델링하고 콘크리트와 보강재의 접착을 계면요소를 이용하여 모델링하는 유한요소해석을 통하여 박리파괴를 포함하는 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능을 해석할 수 있으나, 단부박리(rip-off)나 휨균열에서 시작되는 계면박리등 다양한 형태로 나타나는 조기파괴를 해석적으로 재현하기 위한 모델링기법의 개선이 필요하다.
- (3) GFREP로 보강된 철근콘크리트 보의 해석을 통하여 철근부식률 8%로서 내력성능이 11% 감소하는 철근콘크리트 보에 보강이의 1/20 두께의 GFREP로 보강한 경우 열화된 보의 내력에 비하여 37%의 내력이 향상됨을 규명하였으며 해석결과를 통하여 철근콘크리트 보에 부식이 발생한 경우에도 조기파괴등이 일어나지 않도록 잘 보강되는 경우 보강성능을 확보할 수 있음을 밝혔다.

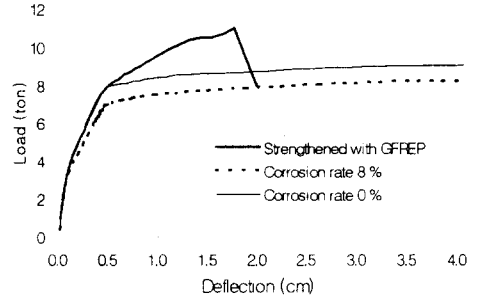


그림 12 열화된 보의 GFREP 보강해석

참 고 문 헌

1. Büyüköztürk, O., Leung, C., Hearing, B., and Gunes, O., "Delamination Criterion for Concrete Beam Retrofitted with FRP Laminates", Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3, 1998, pp. 1771-1782.
2. 이창훈, 송하원, 변근주, "유리섬유 Epoxy-Panel로 보강된 철근콘크리트보의 거동해석", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집, Vol. 10, No. 2, 1998. 11, pp. 444-449.
3. Okamura, H. and Maekawa, K., "Nonlinear Analysis and Constitutive Model of Reinforced Concrete", Gihodo-Shuppan, Tokyo, Japan, 1991.
4. 송하원, 유동우, 변근주, "정적 반복하중을 받는 노후된 철근콘크리트 T형교의 파괴해석", 콘크리트학회논문집, Vol. 10, No. 10, 1998. 12, pp. 291-301.
5. 梶 知明, 安田 登, 松島 學, 大賀 宏行, "腐食生成物によるひびわれ幅のモデル化に関する研究", 日本土木學會論文集, Vol. 38, No. 585, 1998, pp. 69-77.
6. 이한승, "인장주근이 부식한 RC보의 내력성능 평가에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 10권, 1호, 1998, pp. 665-670.
7. Brosens, K. and Van Gemert, D., "Plate End Shear Design For External CFRP Laminates", Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3, 1998, pp. 1793-1804.
8. An, X., Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear, Ph.D. Thesis, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, 1996.