

기계적 정착된 철근의 인발거동에 대한 비선형 유한요소 해석

Nonlinear finite element analysis on the pullout behavior of the mechanical anchorage of reinforcement in concrete

천성철* 이성호** 오보환*** 박형철*** 나환선**** 김상구*****

Chun, Sung Chul Lee, Sung Ho Oh, Bo Hwan Park, Hyung Chul Nah, Hwan Seon Kim, Sang Koo

ABSTRACT

Mechanical anchorage can substitute a standard hook. To enhance the workability and economical benefit of mechanical anchorage, the size of anchor plate should be optimized. In this paper, the pull-out behaviors such as strength, failure mode, and crack patterns of mechanically anchored reinforcement in concrete are investigated using nonlinear finite element analysis. The nonlinear finite element analysis results are consistent with the experimental results. These results show that the optimal anchor plates can be designed using the nonlinear finite element analysis.

1. 서론

기계적 정착은 철근 단부에 정착판을 부착하여 기존의 갈고리를 사용한 정착을 대체하는 공법으로 과밀 배근의 해소, 배근의 간소화, 콘크리트의 충전성 향상 등의 장점을 지니고 있다. 이 공법의 적용에 있어서 가장 중요한 부분은 정착판의 형상과 매립깊이를 결정하는 것이다. 적용 부위별 매립 정착 깊이는 주로 표준 갈고리로 정착된 부재와의 비교실험을 통해 결정되며, 현재 국내외에서 연구가 진행되고 있다. 정착판의 형상은 명확한 설계기준이 정립되지 않은 상태로, 국외에서 상용화되어 있는 제품들은 직경별 형상을 제시하고 특허 등록을 통해 지적 재산을 보호 받고 있다. 그러나 형상결정에 대한 근거나 기준은 제시하고 있지 않으며, 일부제품은 과대설계로 인해 기계적 정착의 본 취지인 시공성 개선이 이루어지지 않거나 제작단가의 상승으로 실용화의 걸림돌이 되고 있다¹⁾. 따라서 시공성과 경제성을 만족하는 정착판 형상의 최적화가 요구된다. 이를 위해서는 적용 부위별 정착부의 요구성능을 명확히 하고, 철근 용도와 직경별 정착판 형상 결정이 이루어져야 하며, 기존 실험결과를 바탕으로 해석적 방법을 통해 정착판의 형상을 최적화하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이를 위한 선행 작업으로 기계적 정착된 철근의 인발거동에 대한 비선형 유한요소 해석을 통해서 인발특성과 매립 깊이별 정착내력 및 파괴 모드를 분석하였고, 정착부의 변형량과 정착판의 지압응력 분포에 대해서 고찰하였다. 또한 기 시행된 실험결과^{1),2)}와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

*정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원,

**정회원, 대우건설기술연구소 연구원

***정회원, 대우건설기술연구소 책임연구원,

****정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

*****정회원, 부원비엠에스 기술이사

2. 비선형 유한 요소 해석

2.1 해석모델

해석을 위한 모델은 기 실행된 인발실험에 사용되었던 D22 철근에 대한 상세를 적용하였다. 표 1과 같이 지압판 직경이 철근 직경의 2배로 지압면적비가 3이 되도록 하였고, 지압판의 두께는 12mm이다. 철근의 매립깊이는 90, 120, 150mm에 대해서, 철근 중심에서 지점부까지의 거리는 지점부의 반력이 파괴형상과 주응력 방향에 영향을 주지 않는 범위에서 결정하였다(매립깊이의 1.5배이상). 그림 1과 같이 축대칭요소(Axisymmetric)를 사용하였고, 유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS 6.3을 사용하였다³⁾. 콘크리트의 모델은 Damaged plasticity model을 적용하였으며, 콘크리트의 압축강도는 $f_{ck}=317\text{kgf/cm}^2$ 이다.

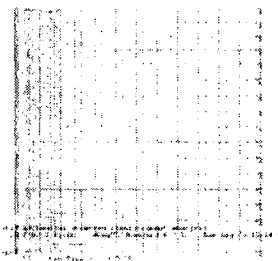


그림 1 해석모델의 Mesh

표 1 부재의 치수 및 재료물성

구분		철근	정착판	이음부
치수	외경(mm)	22	44	33
	두께(mm)	-	12	25
재료물성	강도	$f_y = 4.0 \text{ tf/cm}^2$ $f_t = 6.0 \text{ tf/cm}^2$	$F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$	$F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$
	탄성계수	$2.0 \times 10^3 \text{ tf/cm}^2$	$2.1 \times 10^3 \text{ tf/cm}^2$	$2.1 \times 10^3 \text{ tf/cm}^2$

2.2 부착력 모델링

기계적 정착의 정착 메커니즘은 사용하중 상태에서는 철근의 표면 부착력과 단부 정착판의 지압력에 의해 철근의 설계내력이 확보 된다. 이 부착력의 모델링을 위해서 축방향 강성만을 가지는 스프링을 사용하여 철근 표면과 콘크리트의 접촉면을 연결하였고, 부착거동은 그림 2와 같이 CEB-FIP model code⁴⁾를 적용하였다.

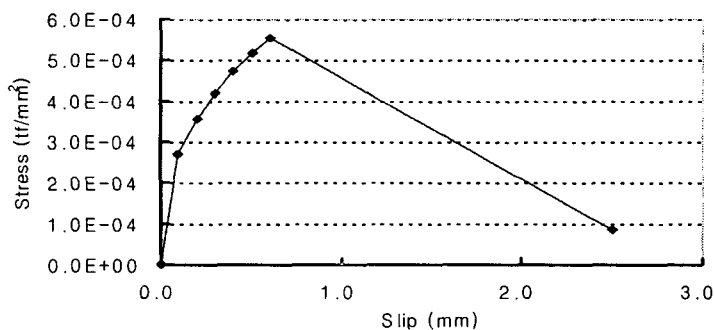


그림 2 부착력 거동

2.3 해석

단부 구속조건은 대칭축에 대해서는 X방향으로 구속하였고, 우측 끝단은 모든 자유도를 구속하였다. 하중은 철근의 끝단에 부가하였고, 초과강도 (over strength)를 고려하여 항복하중의 125%까지 가력 하였다.

3. 해석결과

3.1 정착내력

그림 3에 매립깊이별 정착부의 하중-변위 관계를 나타내었다. 정착부 변위 0.1mm 이하의 초기 거동은 매립깊이 90, 120mm에서 실험과 해석의 결과가 잘 일치하고 있으나, 매립깊이 150mm에서는 실험결과가 상대적으로 큰 강성을 가지는 것으로 나타났다. 정착판의 최대 변형은 0.3mm 이내로 나타났다. 정착내력은 매립깊이가 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타내어 실험결과와 기존의 내력평가식^{5),6)}과 같은 경향을 보임을 알 수 있다.

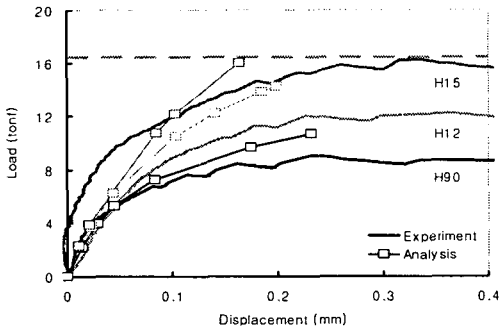


그림 3 정착부 하중-변위

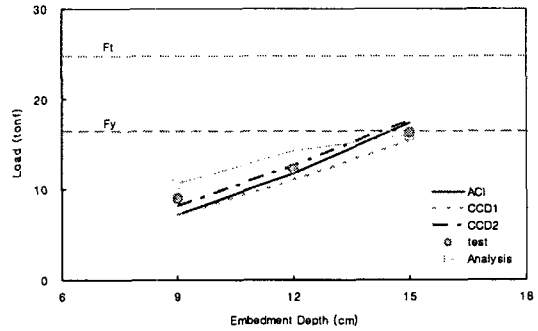


그림 4 매립깊이별 정착내력

3.2 균열 양상

철근의 항복 전에 콘크리트가 파괴된 매립깊이 (90, 120mm)의 모델에서는 균열이 정착판에서 콘크리트 표면까지 대각방향으로 분포되어 원추형 파괴 형상을 나타냈고, 철근이 항복한 매립깊이가 깊은 모델(150 mm)은 철근과 정착판 주위에 균열이 집중되었다.

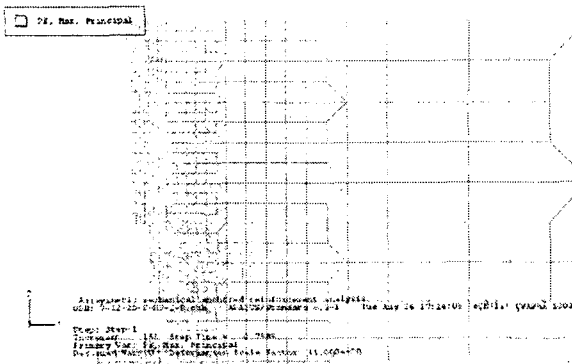


그림 5 매립깊이 90mm 주인장 변형도

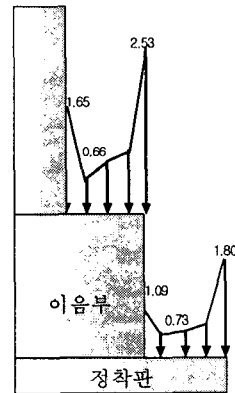


그림 6 지압력 분포 (단위: tonf/cm²)

3.3 지압응력 분포

그림 6에 매립 깊이 120mm에 대한 지압응력 분포를 나타내었다. 지압응력의 분포는 해석결과 중앙부 보다는 양 단부에 크게 작용하였다. 이음부의 지압응력 분포도 정착판과 동일하게 양단부가 크게 나타났으며, 그 크기는 정착판 보다 크게 작용하였다. 이는 이음부에서도 상당부분의 지압응력을 분담하는 것으로 향후 정착판 최적 설계시 고려되어야 할 사항이다.

4. 결론

본 연구에서는 기계적 정착된 철근의 인발거동에 대한 비선형 유한요소 해석을 통해서 인발특성과 매립 깊이별 정착내력 및 파괴 모드를 분석하였고, 정착부의 변형량과 정착판의 지압응력분포에 대해서 고찰하였다. 또한 기 시행된 실험결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정착판 변위 0.1mm 이하의 초기 거동은 매립깊이 90, 120mm에서 실험과 해석의 결과가 잘 일치하고 있으나, 매립깊이 150mm에서는 실험결과가 상대적으로 큰 강성을 가지는 것으로 나타났다. 최대 하중에서 정착판의 최대 변형은 0.3mm 이내로 실험값과 큰 차이를 나타내지 않았다.
- (2) 정착내력은 매립깊이가 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타내어 실험결과와 기존의 내력평가식과 같은 경향을 보임을 알 수 있다.
- (3) 철근의 항복 전에 콘크리트가 파괴를 나타냈던 매립깊이 (90, 120mm)의 모델에서는 균열이 정착판에서부터 콘크리트 표면까지 대각방향으로 분포되어 원추형 파괴 형상을 나타냈고, 철근이 항복한 매립깊이가 깊은 모델(150mm)은 철근과 정착판 주위에 균열이 집중되었다.
- (4) 정착판에 작용되는 지압응력의 분포는 해석결과 중앙부 보다는 양 단부에 크게 작용하였다. 이음부의 지압력 분포도 정착판과 동일한 양상으로 양단부가 크게 나타났으며, 그 크기는 정착판 보다 크게 작용하였다. 이는 이음부에서도 상당부분 응력을 분담하는 것으로 향후 정착판의 최적 설계시 반영되어야 할 것으로 판단된다.
- (5) 기계적 정착된 철근의 인발거동은 정착내력과 변형 및 균열양상 측면에서 비선형 유한요소 해석을 통해서 그 특성을 잘 나타낼 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 천성철, 김대영, "철근 기계적 정착장치의 설계 고려사항과 인발특성", 한국콘크리트 학회 논문집 제13권 6호, pp.593-601, 2001년 12월.
2. 대우건설기술연구소, "철근이음의 성능평가 및 기계적 정착공법의 개발", 기술보고서, 2001.6.
3. Abaqus/Standard User's Manual ver. 6.3.
4. CEB-FIP model code, 1990.
5. Werner Fuchs, Rolf Eligehausen, and John E. Breen, "Concrete Capacity Design approach for Fastening to concrete", ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 1, Jan.-Feb. 1995.
6. ACI 349-97 " Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures" Appendix B.