

앵커 부착-미끄러짐 모형을 이용한 콘크리트-강재 구조물의 비선형 반복하중 해석

Nonlinear Analysis of Cyclically Loaded Concrete-Steel Structures Using an Anchor Bond-Slip Model

임주은* · 이지호**

Lim, Ju Eun · Lee, Jee Ho

Abstract

In this paper, a numerical anchor bond-slip model is proposed to improve the numerical simulation of concrete-steel structures connected with steel anchor bolts and subjected to extreme cyclic loading. The suggested bond-slip model is composed of a group of nonlinear uniaxial connector elements and its parameters can be determined by calibrating the model with pull-out test data. Numerical analysis results from simulating a concrete foundation-steel column structure using the proposed bond-slip anchor model, which is implemented based on Abaqus elements, and the perfect-bond anchor model are compared with the experimental results. It is concluded that a reasonable anchor bond-slip model is required to realistically simulate concrete-steel structures subjected to extreme cyclic loading, and the proposed anchor bond-slip model shows acceptable performance in the present numerical analysis.

Keywords : concrete-steel connection, anchor bolt, bond-slip model, finite element analysis, cyclic loading

요 지

본 논문에서는 앵커로 연결된 콘크리트-강재 구조물이 극한 반복주기하중을 받는 경우를 수치 시뮬레이션하기 위하여 필요한 콘크리트-앵커 부착모형에 대하여 논하였다. 제안되는 앵커의 부착-미끄러짐 수치모형은 비선형 일축 연결요소의 조합으로 이루어지며 인발실험 결과를 이용하여 부착-미끄러짐 모형의 인자를 결정할 수 있다. 제안된 앵커 부착-미끄러짐 모형을 Abaqus 요소의 조합으로 구성하고, 이를 사용한 해석 결과와 앵커의 완전부착모형을 사용한 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 이로부터 극한 반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물 수치해석에는 합리적인 앵커 부착-미끄러짐 모형이 반드시 사용되어야 한다는 것을 알 수 있었으며 본 연구에서 제안한 합성 연결모형을 이용하면 사실적으로 앵커의 부착-미끄러짐 현상을 모사할 수 있다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 콘크리트-강재 연결부, 앵커, 부착-미끄러짐 모형, 유한요소해석, 반복하중

1. 서 론

최근 합성구조형식의 증가로 토목, 건축, 플랜트 구조물에서 콘크리트-강재 기둥 연결부가 널리 사용되고 있다. 앵커로 연결된 콘크리트-강재 기둥 또는 보 구조물에서 가장 중요한 역할을 하는 것은 콘크리트와 강재의 연결 부분이다. 콘크리트-강재 연결부는 지진, 풍하중과 같은 극한 반복주기하중이 작용하는 경우 구조물의 연성 확보나 부분적 손상을 포함한 구조물의 응답에 중요한 영향을 미치며 구조물의 최종 파괴 형태를 결정하기도 한다.

이러한 이유로 콘크리트-강재 연결부의 극한 반복하중 거동과 손상 메커니즘을 규명하기 위한 실험과 해석적 연구들

이 다양하게 수행되어 왔다. 피로하중이 아닌 극한 반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물 연결부에 대한 대표적 실험연구 사례는 Astaneh 등(1992)과 Burda(1999)의 것이 있으며, 국내에서는 변원준 등(2002)이 유사한 연구를 수행하였다. 단조증가하중에 대한 연구를 포함한 해석적 연구로는, Krishnamurthy 등(1990)은 콘크리트와 앵커의 미끄러짐을 무시하고 완전 부착된 모형을 사용하여 수치해석을 수행하였으며 단순 거동을 모사하는데 그쳤다. Fahmy 등(2000)은 콘크리트를 비선형 스프링 요소로 모델링하고 앵커의 신장만을 고려하여 단조증가하중에 대한 응답만을 구하였다. 국내에서는 변원준 등(2002)에 의하여 반복하중 실험 연구와 함께 수치 해석모형 연구가 수행되었으나 Fahmy 등(2000)과 같이 콘크

*동국대학교 토목환경공학과 · 현 서울특별시 상수도사업본부 (E-mail : june0314@dgu.edu)

**정회원 · 교신저자 · 동국대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : jeeholee@dgu.edu)

리트에 매립된 앵커의 미끄러짐을 무시한 채 앵커의 신장만을 고려하여 여전히 실험결과와 차이를 보이고 있다.

본 논문에서는 앵커로 연결된 콘크리트-강재 구조물이 극한 반복주기하중을 받는 경우, 이를 합리적으로 수치 시뮬레이션하기 위하여 필요한 앵커부착모형을 제안한다. 먼저 비선형 일축 연결요소의 조합으로 이루어진 앵커의 부착-미끄러짐 모형을 제안하고 실험 결과를 이용하여 부착-미끄러짐 모형의 인자를 결정하는 방법을 제시한다. 제안된 앵커 부착-미끄러짐 모형을 사용하여 실제 실험을 시뮬레이션한다. 여기서 나온 결과를 콘크리트와 앵커 사이를 완전부착모형으로 모델링한 해석 결과, 그리고 실험 결과와 비교, 평가하여 앵커 부착-미끄러짐 모형의 필요성과 본 논문에서 제안하는 수치모형의 성능을 논한다.

2. 콘크리트와 앵커의 부착 모형

2.1 앵커의 부착 거동

앵커는 콘크리트 기초부와 강재 기둥 및 바닥판을 연결할 때 사용되는 연결 요소로서 상부의 하중을 콘크리트에 전달하는 중요한 역할을 한다(그림 1). 이 때 콘크리트에 매립된 앵커의 정착 방법이나 정착단 형태에 따라 앵커의 하중 전달 능력은 달라지고 콘크리트에 매립된 앵커가 콘크리트와 부착된 상태는 구조물 거동에도 큰 영향을 미치게 된다.

콘크리트에 매립된 앵커는 초기에는 콘크리트가 앵커를 아주 강한 힘으로 구속하고 있어 콘크리트와 완전 부착된 상태로 상부의 하중을 콘크리트로 전달한다. 그러나 최대 부착응력에 도달하게 되면 콘크리트와 앵커 사이에 약간의 미끄러짐이 발생하면서 부착력은 약화되기 시작하여 미끄러짐이 크게 발생하게 된다. 최종적으로 콘크리트와 앵커 사이의 부착력을 상실하게 되면 전체 구조물의 강성도는 크게 저하된다. 지금까지 콘크리트에 매립된 앵커의 부착 거동을 규명하기 위해 많은 실험적 연구가 진행되어 왔으나 콘크리트와 앵커 사이의 부착응력-미끄러짐을 직접 측정하는 것에 대한 기술적 어려움으로 실험을 통하여 거동 특성을 알아내는 일반적인 방법은 개발되지 못한 현실이다.

2.2 앵커의 부착-미끄러짐 모형

여러 실험 연구(Astaneh 등, 1992; Burda, 1999; 변원준 등, 2002)로부터 극한 반복하중의 최종 상태에서 앵커와 주위 콘크리트의 부착은 모두 파괴된 것을 확인하였으며 결국

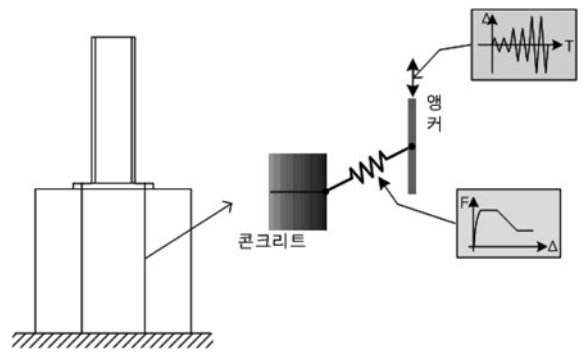


그림 2. 콘크리트와 앵커의 부착응력-미끄러짐 모형

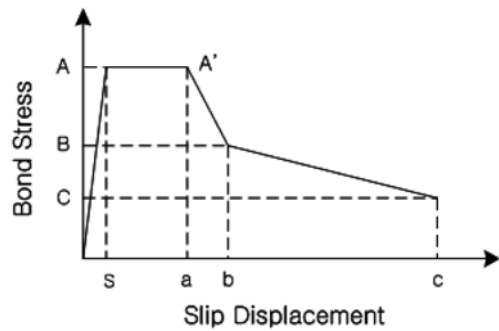


그림 3. 콘크리트와 앵커의 부착응력-미끄러짐 관계

수치해석 시 콘크리트와 앵커의 비선형 부착 특성을 고려한 수치모형에 대한 절대적 필요성이 부각되었다. 그러나 지금까지는 콘크리트에 앵커가 완전히 부착된 것으로 가정하고 수행한 연구들이 대부분이다. 특히 극한 반복하중 상태에서 콘크리트와 앵커의 미끄러짐을 무시하고 완전 부착된 상태로 가정하여 해석한 결과는 실제 실험결과와 큰 차이를 보인다. 본 논문의 연구에서는 그림 2와 같이 콘크리트와 앵커 사이에 비선형 연결모형을 배치하여 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 특성을 나타내는 수치 모형을 사용한다.

콘크리트와 앵커의 부착특성은 Filippou 등(1986)이 콘크리트에 매립된 철근의 인발실험(pull-out test)을 통하여 도출한 부착응력-미끄러짐 관계와 유사하다고 가정하였다. 그림 3은 본 연구에 사용된 콘크리트와 앵커의 부착응력-미끄러짐 관계를 나타낸 것이며 부착응력에 4개 인자(A, A', B, C), 미끄러짐 상태변위에 4개 인자(s, a, b, c), 총 8개의 인자를 통하여 특성이 결정된다. 반복하중에서는 그림 3의 식을 포락선으로 하여 탄성제하(elastic unloading) 후 부착력이 없는 상태에서 역방향으로 미끄러지는 관계를 사용한다(그림 12).

이러한 부착응력-미끄러짐 거동을 유한요소해석을 위한 수

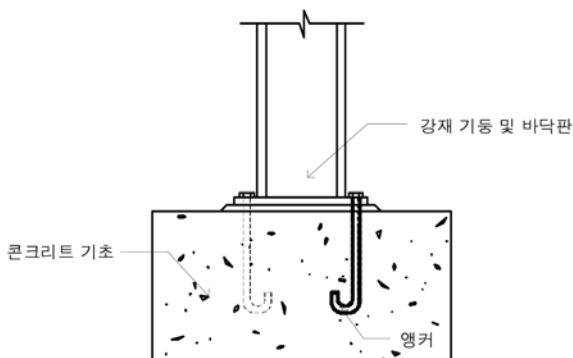


그림 1. 앵커로 연결된 콘크리트-강재 구조물

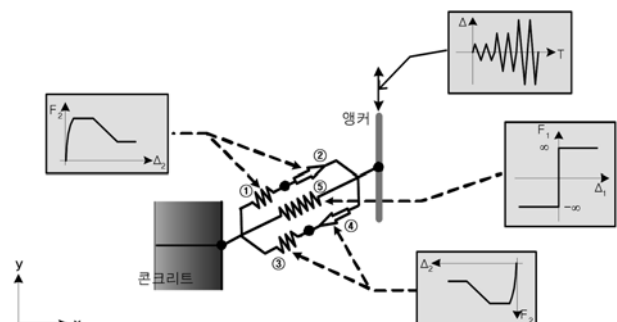


그림 4. 콘크리트-앵커의 부착응력-미끄러짐 합성 연결모형

치모형에서 구현하기 위하여 그림 4와 같이 직렬 및 병렬로 결합된 5개 비선형 연결요소의 조합을 사용한다. 각 연결요소는 간단한 비선형 거동을 나타내는 표준적인 일축요소이다. 그림 3의 부착응력-미끄러짐 관계는 앵커와 평행한 방향으로만 작용하고 앵커길이 직각방향으로는 콘크리트와 앵커가 강결점 연결(rigid connection)로 완전 부착된다. 그림 4의 합성 연결모형에서 각 연결요소는 다음과 같은 3종류 중 하나이다:

1) 비선형 비탄성 일축요소: 그림 3을 탄성영역 포락선으로 정의하고 탄소성요소와 같은 방식으로 탄소제하 거동을 나타낸다. 그림 4의 ①번과 ③번 연결요소이며 이 요소만으로는 미끄러짐 현상을 모사할 수 없다.

2) 일방향 미끄러짐 연결요소: 화살표 방향의 변위에 대해서는 무력 상태에서 미끄러지며, 반대 방향의 미끄러짐 변위에 대해서는 매우 크게 저항하여 강결점 연결 거동을 나타낸다. ②번과 ④번 연결요소이며 본 연구에서 제안하는 합성 연결모형에서는 그림 4와 같이 서로 반대방향을 향해서 작용한다.

3) 변 연결요소는 강결점 연결요소로 앵커의 길이 직각방향 하중을 콘크리트에 전달하는 역할을 한다.

그림 4의 합성 연결모형에서 ①번과 ②번 연결요소는 직렬로 연결되어 그림 5의 제1사분면과 같은 거동을 보여준다. ②번 연결요소는 제하상태에서 부착력이 0에 도달하면 제하방향으로 미끄러지는 거동을 제공한다. 이는 콘크리트와 앵커 사이의 부착이 파손된 상태에서 역방향 움직임에서 부착력 없이 원 위치로 미끄러지는 실제 상황을 모사하기 위하여 필요한 거동이다. 앵커부착-미끄러짐의 한쪽 방향 거동을 ①번과 ②번 연결요소의 직렬결합이 만들어낸다면 그 반대 방향의 거동은 ③번과 ④번 연결요소의 직렬결합으로 만들며, 그림 5의 제3사분면과 같은 부착-미끄러짐 거동을 보여준다. 두 직렬결합이 다시 병렬로 결합하여 그림 5의 전체 반복하중 응답을 형성하며 실제 인발실험에서 관찰되는 거동과 매우 유사하다. 설명을 위하여 그림 5의 예시에서는 그림 3의 부착응력 A' 를 20, A 를 8로 설정하여 일반적인 두 인자의 비율보다 과장하여 나타내었다.

2.3 앵커 부착-미끄러짐 모형 인자의 결정

콘크리트에 매립된 앵커의 비선형 거동에 중요한 역할을 하는 콘크리트와 앵커 사이의 부착-미끄러짐 관계를 직접 실험을 통하여 얻어내는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본

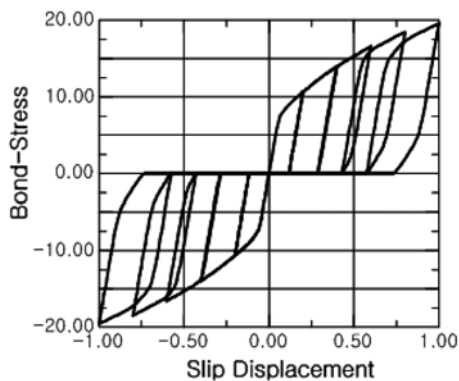


그림 5. 합성 연결모형의 거동 예시(단위생략)

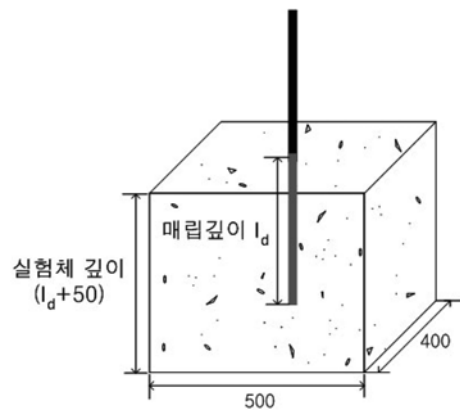


그림 6. 시험체의 제원 (단위: mm)

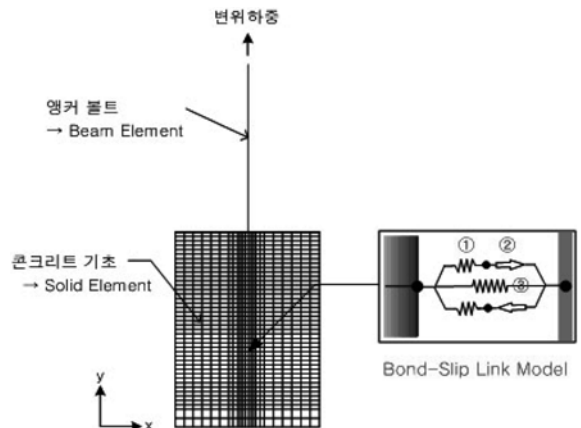


그림 7. 수치해석 유한요소 및 경계조건

연구에서는 앵커의 인발실험 결과와 이의 수치모형 해석결과를 비교하여 2.2절에서 제안된 부착-미끄러짐 관계의 인자를 구하는, 간단한 역해석 방법을 이용한다.

인발실험에 사용된 시험체 제원은 그림 6과 같으며, 실험 과정 및 결과에 대한 자세한 사항은 임주는 등(2003)에 기술되어 있다. 본 연구의 부착모형 인자 결정에는 1형 정착단을 가진 콘크리트 강도 23.5 MPa, 매립 깊이 500 mm인 시험체 실험 결과를 사용하였다.

그림 7은 그림 6의 시험체를 모사하는 2차원 유한요소 모형을 나타낸 것으로 매립된 앵커는 빔 요소로 모델링하였고 콘크리트부에는 평면응력 요소를 사용하였다. 경계 조건으로는 콘크리트 기초부 바닥의 절점을 수직방향으로 구속시켰고 인발력은 앵커 최상단 절점에 변위하중으로 작용시켰다. 수치해석에 사용된 콘크리트와 앵커의 재료 물성은 실험 전 재료 물성 테스트를 통하여 얻어진 값(임주는 등, 2003)을 사용하였다. 그림 7과 같이 콘크리트와 앵커 절점 사이에 부착-미끄러짐 합성 연결요소를 사용하였으며, 비선형 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(Dassault Systems, 2008)의 비선형 일축 연결요소(Connector Element)를 2.2절에서 기술한 방식으로 조합하여 구현하였다.

먼저 부착응력-미끄러짐 관계의 A , B , C , a , b , c 인자(그림 3) 값을 가정하여 인발실험을 모사하는 수치해석을 수행하고, 이를 실험 결과와 비교한 후 수정된 인자 값으로 수치해석을 반복 수행하는 시행착오법을 사용하였다. 복잡성을 피하기 위하여 A 와 A' 은 동일한 값으로 가정하며 수치모형 특성으로 볼 수 있는 s 값은 0.1 mm로 설정한다. 이때

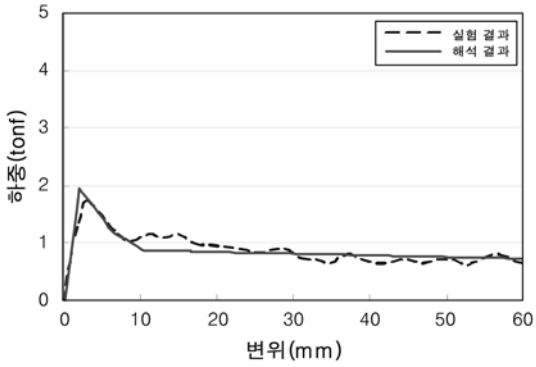


그림 8. 실험 및 수치해석에 의한 인발하중 변위 결과

모든 인자에 대하여 동시에 반복 수행하기보다 다음과 같이 미끄러짐 변위가 커지는 순서로 인자를 결정하는 것이 효율적이다.

- ① 최대 부착응력 A값 결정
- ② 부착응력 C값과 미끄러짐 c값 결정
- ③ 미끄러짐 a값 결정
- ④ 부착응력 B값과 미끄러짐 b값 결정

위의 반복 수치해석 과정을 통하여 부착응력-미끄러짐 관계의 각 인자들은 다음과 같이 결정되었다:

- A=0.01 MPa, a=2.0 mm
- B=0.0066 MPa, b=5.0 mm
- C=0.0028 MPa, c=60.0 mm

그림 8은 실험 및 수치해석에 의한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 최종 결정된 부착-미끄러짐 모형 인자를 사용한 수치해석 결과와 실험 결과가 부합되는 것을 보여주며 2.2절의 앵커 부착모형과 이 절에서 제안한 인자 결정과정이 합리적이라는 것을 확인할 수 있다.

3. 반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물의 해석

3.1 반복하중 실험 대상

본 논문에서 제안한 앵커 부착모형이 반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물의 수치해석에서 효과적인지 검증하기 위하여 변원준 등(2002)이 수행한 실제 실험을 대상으로 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8과 같은 제원의 실험 시험체 중 본 연구의 해석 대상은 강재 바닥판(평면 크기: 280×280 mm)의 두께가 각각 13 mm(L13 시험체)와 9 mm(L19 시험체)인 2개이다. 강재 기둥과 바닥판은 필렛 용접으로 연결되었다. 바닥판을 콘크리트 기초부에 고정시키기 위해 사용된 4 개의 앵커 볼트는 CIP(Cast In Place)형식으로 하단에서 90° 구부러진 L형이 사용되었다. 앵커 볼트의 직경은 17 mm, 콘크리트 기초 매립 깊이는 500 mm이며, 콘크리트 기초는 단면이 1400×1250 mm이고 높이는 936 mm이다. 강재 기둥 상단에 축하중과 그림 10과 같은 SAC-2000 Protocol의 반복 수평 변위하중이 가해졌다.

3.2 수치모형

그림 11은 앵커로 연결된 콘크리트-강재 구조물의 2차원

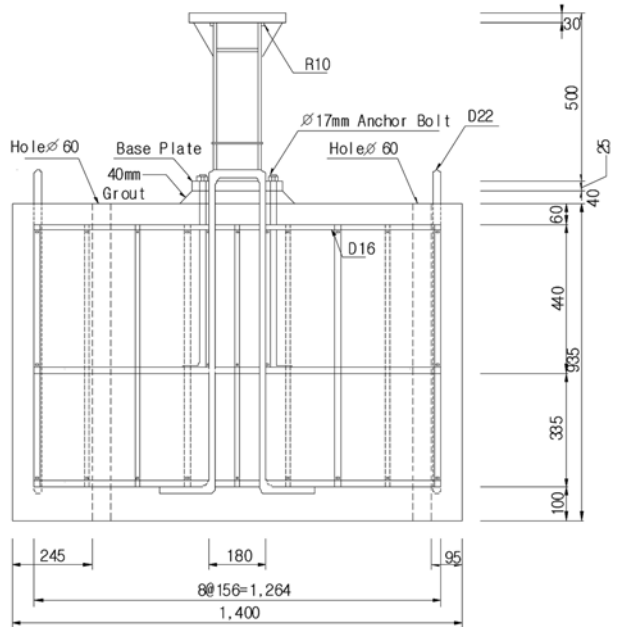


그림 9. 콘크리트-강재 구조 시험체(변원준 등, 2002)

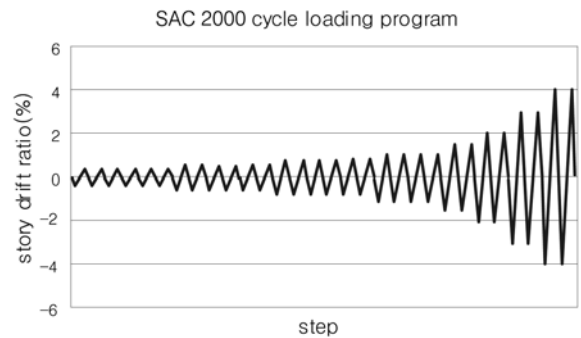


그림 10. 횡하중 이력

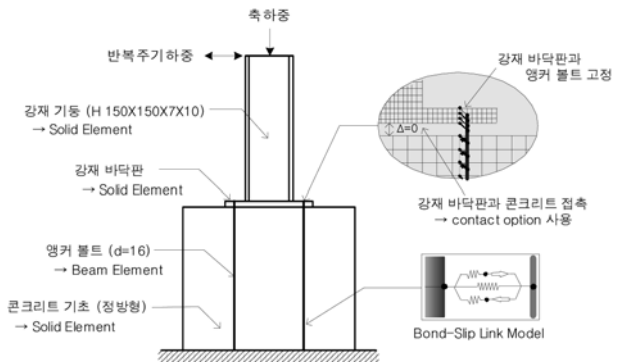


그림 11. 콘크리트와 앵커의 부착응력-미끄러짐 모형

수치해석 모형을 나타낸 것이다. 수치모형은 강재기둥, 콘크리트 기초부, 강재 바닥판과 콘크리트 상부의 접촉모형, 앵커볼트, 앵커-콘크리트 부착모형으로 나누어진다. 수치모형은 Abaqus(Dassault Systems, 2008)의 요소 또는 그들의 조합으로 구현하였다. 수치해석에 사용된 강재 기둥, 강재 바닥판, 그리고 콘크리트 기초부는 평면응력 요소로, 앵커볼트는 보 요소로 모델링하였으며 표 1의 물성을 가진 탄소성 재료로 가정하였다.

콘크리트-강재 연결 구조물에서 발생하는 여러 가지 접촉 중에서도 강재 바닥판과 콘크리트 기초 상부 표면과의 접촉거동은 콘크리트와 강재 바닥판을 각각 주표면(Master Surface)과

표 1. 시험체 물성

시험체 요소	재료의 물성
콘크리트 기초	$E_c = 30.0 \text{ GPa}$ $f_{ck} = 25.5 \text{ Mpa}$
앵커 볼트	$E_c = 206 \text{ GPa}$ $f_{ck} = 235 \text{ Mpa}$
강재 기둥 및 바닥판	$E_c = 206 \text{ GPa}$ $f_{ck} = 304 \text{ Mpa}$

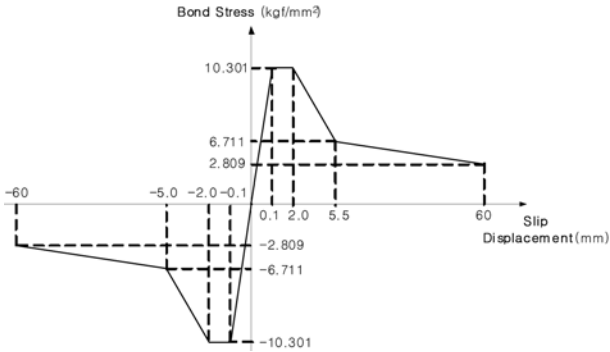


그림 12. 반복하중에 의한 부착응력-미끄러짐 관계

부표면(Slave Surface)으로 지정함으로써 서로 관통하지 못하도록 구속하여 구현하였다. 강재 바닥판과 앵커의 접촉은 무시하여 강재 바닥판과 앵커가 완전 부착된 상태로 거동하도록 강재 바닥판 절점과 앵커의 절점을 일치시켰다.

콘크리트와 앵커의 미끄러짐-부착 거동의 모델링에는 2.3절에서 실험을 통하여 인자를 결정한 그림 3의 부착응력-미끄러짐 관계를 사용하였으며 이를 반복하중을 위한 포락선 형태로 확장하면 그림 12와 같다. 제한거동은 탄성으로 가정하며 그림 5와 같이 제한시 부착응력이 0인 지점부터는 역방향 미끄러짐이 나타난다. 이러한 부착응력-미끄러짐 관계는 2.2절에서 제안한 바와 같이 Abaqus 비선형 연결요소의 조합으로 합성 연결모형을 만들어 구현하였다.

콘크리트 바닥 절점과 앵커 바닥 절점은 모든 방향의 변위와 회전을 구속시켰다. 강재 바닥판과 앵커 볼트의 미끄러짐은 무시할 정도로 작다고 가정하여 강재 바닥판 상부와 앵커 볼트의 상단이 완전 부착된 상태로 거동하도록 절점을 일치시켰다. 이러한 단순화는 접촉거동 모형을 여러 부분에 과도하게 사용되어 수치해석 상의 수렴성을 저하시키는 현상을 막기 위한 것이다. 수치 시뮬레이션에서도 실험(변원준 등, 2002)과 동일한 축하중과 수평변위하중을 그림 12에서 나타낸 위치에 가하였다.

3.3 해석 결과

반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물의 수치해석 결과에서 콘크리트-앵커 부착모형의 영향을 평가하기 위해 콘크리트와 앵커가 완전 부착된 경우와 콘크리트와 앵커 사이에 부착-미끄러짐 거동이 있는 경우에 대하여 3.2절의 수치모형을 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 콘크리트와 앵커의 부착응력-미끄러짐 거동을 모사하기 위해 2.2절과 그림 12에서 기술한 콘크리트-앵커 합성 연결모형을 사용하였다.

콘크리트와 매립된 앵커가 완전 부착된 경우, 즉 앵커의 완전부착모형을 사용하여 해석한 결과가 그림 13~16에 나타

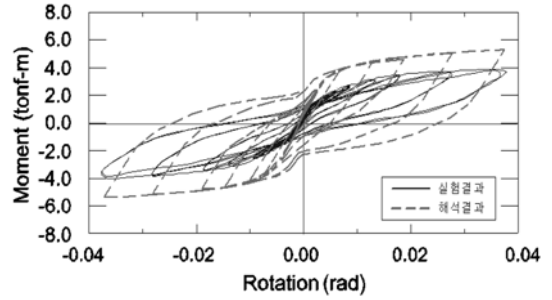


그림 13. 콘크리트와 앵커의 완전부착모형을 사용한 L13의 모멘트-회전 곡선

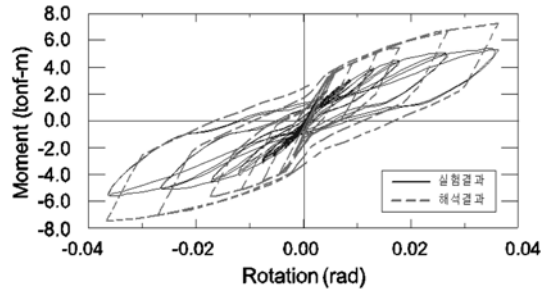


그림 14. 콘크리트와 앵커의 완전부착모형을 사용한 L19의 모멘트-회전 곡선

나 있다. 그림 13은 강재 바닥판의 두께가 13 mm인 시험체(L13)의 해석 및 실험 모멘트-회전 곡선을 비교한 것이다. 해석에 의한 모멘트-회전 곡선의 기울기는 실험결과의 기울기보다 가파르며 수치해석에 의한 최대 모멘트 값과 실험에 의한 최대 모멘트 값의 비가 약 1.36으로 수치해석 결과가 강재-콘크리트 연결부의 초기강성도 및 강도를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 그림 14는 강재 바닥판의 두께가 19 mm인 시험체(L19)의 모멘트-회전 곡선 비교를 보여 준다. 바닥판 두께가 13 mm인 시험체와 마찬가지로 해석에 의한 초기강성도가 실험 결과보다 가파르며, 최대 모멘트 값의 비도 1.37 정도로 수치해석 결과가 강재-콘크리트 연결부의 강도를 과대평가하고 있음을 알 수 있다.

그림 15는 최대 변위 시 L13 시험체의 변형 형상 및 von Mises 응력 분포를 보여주고 있다. 콘크리트와 앵커의 완전 부착으로 인하여 강재 바닥판 전체가 크게 변형되면서

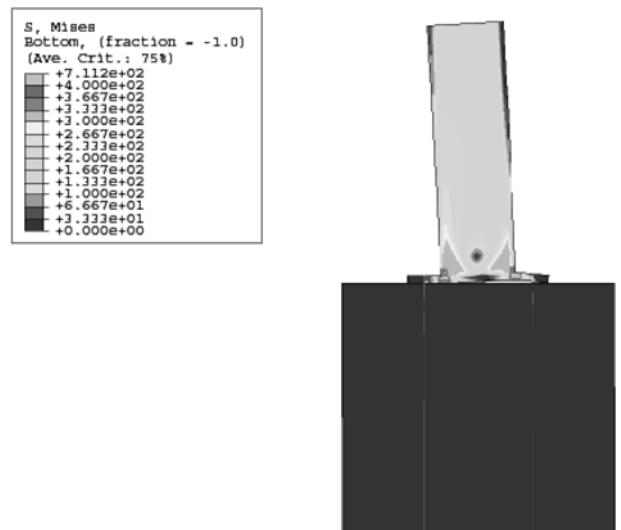


그림 15. 완전부착모형을 사용한 L13의 응력 분포

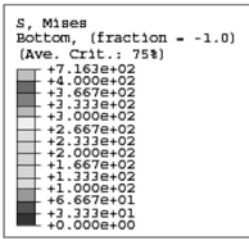


그림 16. 완전부착모형을 사용한 L19의 응력 분포

표 2. 완전부착모형을 사용한 해석 및 실험 최대 모멘트(kN·m) 비교

시험체 종류	해석 결과 (A)	실험 결과 (B)	A/B
L13	52.66	38.86	1.36
L19	71.57	52.11	1.37

외부 하중에 저항하는 것으로 나타난다. 또한 강제 기둥과 바닥판의 용접부에서 과도한 응력 집중 현상이 발생하는 결과를 관찰할 수 있다. 그림 16은 최대 변위 시 L19 시험체의 변형 형상 및 응력 분포를 보여주고 있다. 바닥판 두께가 L13 시험체보다 얇아 바닥판 자체의 강성도가 커지며, 결국 바닥판의 변형이 적게 일어나서 강제 바닥판에 연결된 앵커 돌출부의 변형이 과도하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 변형 분포 양상은 그림 14에서 볼 수 있듯이 최대 모멘트 값이 크게 과다 평가되는 이유이다.

표 2에 완전부착모형을 사용한 수치해석의 최대 모멘트와 실험에 의한 최대 모멘트 값을 비교하였다. L13과 L19 시험체 모두에서 콘크리트와 앵커가 완전 부착된 상태로 거동한다고 가정한 경우 실제보다 36~37% 과대 평가됨을 알 수 있다.

그림 17~20은 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 거동을 고려하기 위하여 콘크리트-앵커 합성 연결모형을 사용한 해석 결과이다. 먼저 그림 17에 L13 시험체의 해석 및 실험 모멘트-회전 곡선이 비교되어 있다. 해석에 의한 모멘트-회전 곡선의 기울기는 실험결과와 일치하며 반복하중이 진행됨에 따라 계산되는 모멘트 값도 실험결과와 유사하다. 수치해석에 의한 최대 모멘트 값과 실험에 의한 최대 모멘트 값의 비는 약 1.04로 근사한 값을 보이고 있으며 그림 13의 완전부착모형의 경우에 나타내지 못한 핀칭(pinching) 현상도 적절하게 모사되고 있다. 그림 18은 L19 시험체의 모멘트-회전 곡선 비교를 나타낸다. 수치해석에 의한 최대 모멘트 값과 실험에 의한 최대 모멘트 값의 비는 약 0.89로 바닥판이 얇은 L13 시험체보다는 해석결과의 정확성이 떨어지나 완전부착모형이 사용된 그림 14의 결과와 비교하면 모멘트

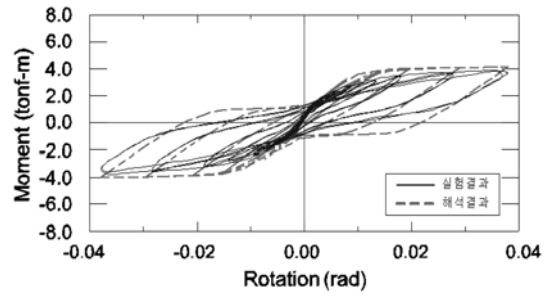


그림 17. 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 모형을 사용한 L13의 모멘트-회전 곡선

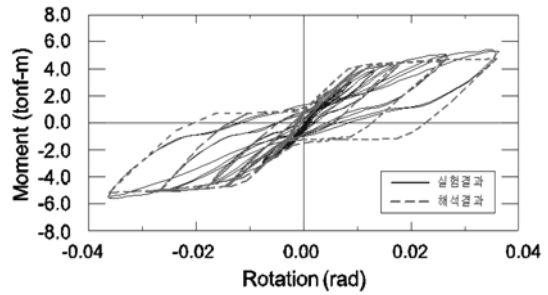


그림 18. 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 모형을 사용한 L19의 모멘트-회전 곡선

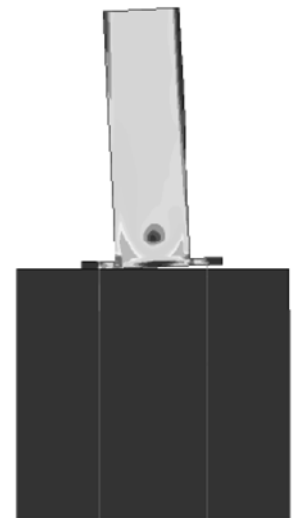
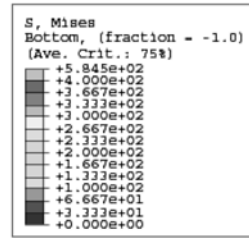


그림 19. 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 모형을 사용한 L13의 응력 분포

값과 핀칭 현상에서의 일치도가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

그림 19는 최대 변위 시 L13 시험체의 변형 형상 및 von Mises 응력 분포를 보여주고 있다. 그림 15와 비교하여 앵커가 콘크리트에 완전 부착되어 거동하는 모형보다 강제 기둥과 바닥판의 연결 부분에서의 응력 집중이 작아짐을 보여준다. 이것은 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 거동으로 인해 앵커가 초기에는 콘크리트와 완전 부착되어 거동하다가 반복주기하중이 진행됨에 따라 미끄러짐이 발생하여 바닥판의 변형이 감소하기 때문이다.

그림 20은 최대 변위 시 L19 시험체의 변형 형상 및 응력 분포를 보여준다. L13 시험체 경우와 유사하게 콘크리트에 매립된 앵커의 신장과 더불어 미끄러짐이 발생하여 그림

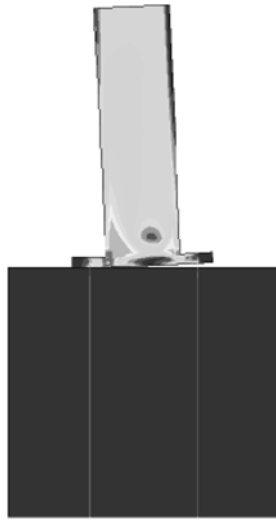
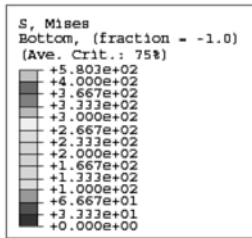


그림 20. 콘크리트와 앵커의 부착-미끄러짐 모형을 사용한 L19의 응력 분포

표 3. 부착-미끄러짐 모형을 사용한 해석 및 실험 최대 모멘트 (kN·m) 비교

시험체 종류	해석 결과 (A)	실험 결과 (B)	A/B
L13	40.34	38.86	1.04
L19	46.62	52.11	0.89

16과 비교하면 바닥판의 변형이 감소함을 관찰할 수 있다. 이 단계에서 L19 시험체는 바닥판이 두꺼운 관계로 원편을 지렛대로 강체 회전에 가까운 운동을 보이며, 이는 바닥판이 비교적 얇은 L13 시험체의 바닥판이 회전과 변형을 함께 일으키는 그림 19의 결과와 대비된다.

표 3에 앵커 부착-미끄러짐 모형을 사용한 수치해석의 최대 모멘트와 실험에 의한 최대 모멘트 값을 비교하였다. L13 시험체의 경우 4%의 오차로 매우 근접한 결과를 보이며 표 2의 콘크리트와 앵커가 완전 부착된 모형의 해석결과 (36%)와 비교하여 정확도가 크게 향상됨을 알 수 있다. L19 시험체의 경우에 -11%의 오차로 L13의 경우보다는 오차가 크나 완전부착모형의 L19 시험체 경우(37%)보다는 향상된 결과를 보여준다. L19 시험체의 해석결과가 실험치보다 작게 나오는 원인은 강재 바닥판이 두꺼울수록 평면응력 모형에서 강성도가 실제보다 크게 모사되어 오히려 바닥판 강성도가 작을 때보다 앵커의 미끄러짐을 크게 유발하기 때문이다. 이와 같은 사실은 미끄러짐이 없는 완전부착모형을 사용한 경우에는 L19의 최대 모멘트가 37% 과대 계산되어 L13의 과대 계산치(36%)보다 작지 않다는 점에서도 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 반복주기하중 또는 지진하중을 받는, 앵커

로 연결된 콘크리트-강재 기둥 또는 보 구조물을 정확하게 수치 시뮬레이션하기 위하여 필요한 앵커 부착모형에 대하여 논하였다. 먼저 콘크리트 기초에 매립된 앵커가 주변 콘크리트에 완전 부착된 모형을 사용하여 강재 바닥판 두께가 각각 13 mm와 19 mm인 시험체에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석과 실험의 모멘트-회전 반복 곡선 결과를 비교한 결과 전반적으로 수치모형이 강성도를 크게 과대 평가하며 최대 모멘트 값도 36~37%의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 반면에 본 논문에서 제안한 합성 연결모형을 사용하여 콘크리트-앵커의 부착-미끄러짐을 모사하는 수치모형을 구성하고 같은 수치해석을 수행한 결과, 13 mm와 19 mm인 시험체 각각에 대하여 각각 4%와 11%의 실험치 대비 오차를 나타내어 크게 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 이로부터 극한 반복하중을 받는 콘크리트-강재 구조물 수치해석에는 합리적인 앵커 부착-미끄러짐 모형이 반드시 사용되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 아울러 본 연구에서 제안한 비선형 일축 합성 연결모형을 이용하면 사실적으로 앵커의 부착-미끄러짐 현상을 모사할 수 있다는 것을 보여주었다.

본 연구에서 사용된 2차원 수치모형에서는 앵커가 연결된 바닥판 모서리 부분의 국부 변형이 반영되지 못하여 특히 바닥판이 두꺼운 경우 강성도가 과대 평가되는 단점이 있으며 이를 개선하기 위해서는 보다 정밀한 3차원 수치모형을 사용하여야 할 것으로 사료된다. 아울러 앵커 볼트와 강재 바닥판 체결부의 3차원 접촉모형도 해석 정확도 향상에 기여할 것으로 예상된다.

참고문헌

변원준, 이두성, 이지호, 이성철(2002) 반복하중을 받는 강재기둥 베이스 판 연결부의 거동에 관한 실험적 연구, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회.

임주은, 이두성, 이지호, 이성철(2003) 콘크리트 속에 매립된 앵커의 실험적 연구, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회.

Astaneh, A., Bergsma, G., and Shen, J.H. (1992) Behavior and design of base plates for gravity, wind and seismic loads, *Proceedings of the AISC, National Steel Construction Conference*, Las Vegas, USA.

Burda, J.J. (1999) Studies of seismic of steel base plates, *Master of Science Thesis*, University of Nevada at Reno, Nevada, USA.

Dassault Systems (2008) Abaqus Analysis User's Manual, Dassault Systems, RI., USA.

Fahmy, M. (2000) Seismic behavior of moment resisting steel column bases, *Ph.D. Dissertation*, University of Michigan, USA.

Filippou, F.C. (1986) A simple model for reinforcing bar anchorages under cyclic excitations, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 7, pp. 1639-1659.

Krishnamurthy, N. and Thambiratham, D.P. (1990) Finite element analysis of column base plates, *Computers & Structures*, Vol. 34, No. 2, pp. 215-223.

(접수일: 2009.7.7/심사일: 2009.8.26/심사완료일: 2009.9.3)