

고강도 콘크리트의 인장강성효과에 대한 연구

Tension Stiffening Effect of High Strength Concrete

윤 성 호* 김 준 성** 엄 환 석*** 김 우****
Yun, Sung Ho Kim, Jun Seong Yum, Hwan Seok Kim, Woo

Abstract

This paper describes an experimental investigation on the effect of concrete strength on tension stiffening behavior. Total ten direct tension specimens were tested with concrete compressive strength range up to 900 kg/cm². From the experimental program, it was observed that higher strength concrete specimens provides smaller crack spacings and less stiffening effect.

1. 서 론

인장을 받는 철근 콘크리트 구조부재에 균열이 발생하면 일반적으로 구조계산이나 설계시 인장측 콘크리트는 무시된다. 그러나 실제로는 균열위치에서 모든 인장력이 철근에 의해서만 전달되지만 균열과 균열사이에서는 부착에 의해 인장력이 철근으로부터 콘크리트로 전달된다. 이러한 결과로 콘크리트가 철근의 인장강성을 증가시키는데 기여하는 효과를 인장강성효과(Tension stiffening effect)라 한다.^{1) 2)} 인장강성효과를 무시하면 부재의 강성은 상당히 과소평가 되므로 실제로 정확한 변형을 예측해야 할 구조물에서는 인장강성효과를 고려하여 해석하여야 한다.^{4)~7)}

인장강성효과에 영향을 미치는 변수들은 콘크리트강도, 철근비, 콘크리트 덮개와 철근직경비, 철근강도 등이 있다. 본 연구에서는 인장강성거동에 영향을 미치는 변수들 중 현실적인 변수라 판단되는 콘크리트의 강도를 선택하였고, 강도에 따른 철근 콘크리트 부재의 인장강성거동을 파악하고자 보통강도 250kg/cm², 중간강도 650kg/cm², 고강도 900kg/cm²로 나타난 세 가지 강도의 시험체를 10개 제작하여 직접 인장실험을 실시하였다. 철근 콘크리트 부재의 직접인장실험을 통하여 강도에 따른 인장강성효과와 균열간격 및 형상을 비교 분석하였으며, 균열 발생 후 반복하중에 의한 부재의 거동을 관찰하였다.

*전남대학교 토목공학과 석사과정

**정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

***정회원, 광주대학교 건축공학과 부교수

****정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 실험

2.1 시험체

본 연구에서는 콘크리트압축강도에 따른 인장강성효과와 해당 시험체에 발생한 균열의 형상을 파악하고, 균열발생 후 반복하중에 의한 철근과 콘크리트의 부착파괴, 콘크리트의 내부손상 정도의 차이를 비교하고자 한다.

시험체는 길이를 120cm, 단면을 10cm×10cm로 제작하였으며(그림 2.2), 활열균열(Splitting crack)의 발생을 방지하고 횡균열(Transverse crack)만을 유도하기 위하여 콘크리트 덮개와 철근 직경의 비가 2.62가 되도록 설계하였고,³⁾ 철근비는 0.02로 모든 시험체에 동일하게 하였다. 철근은 항복용력이 4450 kg/cm²인 D16 철근을 사용하였다.

2.2 측정

하중은 그림 2,1과 같이 변위제어식으로 가력하였으며, 시험체 양단사이의 길이방향 신장량 Δl 을 4개의 전기식 변위계(Displacement transducer)를 설치하여 측정하였다. 철근항복강도의 90%까지 재하한 후 하중을 제거하고 잔류변형을 측정하였다. 반복하중에 의한 콘크리트의 손상을 알아보기 위해 4~5회 반복하중을 가하였다.

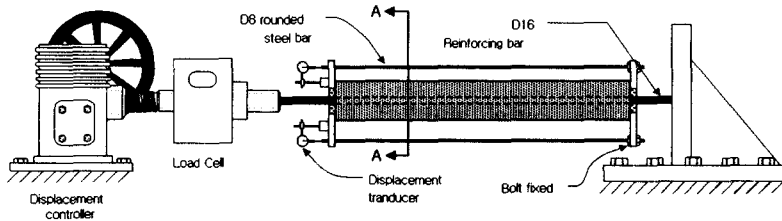


그림 2.1 인장강성실험 상세도

표 3.1 인장강성 실험의 균열형상

시험체명	콘크리트압축강도 (kg/cm ²)	초기균열 발생하중 (ton)	활열균열 발생하중 (ton)	균열 갯수	평균 균열간격 (cm)
TS-N-1	250	2.7	6.3	5	17.23
TS-N-2		2.6	7.6	7	15.17
TS-N-3		2.4	5.3	7	13.67
TS-M-1	655	4.2	6.3	6	18.00
TS-M-2		3.2	6.3	7	14.25
TS-M-3		2.9	6.0	8	13.29
TS-H-1	900	4.0	6.6	10	10.33
TS-H-2		2.4	5.9	7	15.08
TS-H-3		3.3	6.8	8	12.57
TS-H-4		3.2	5.1	9	12.63

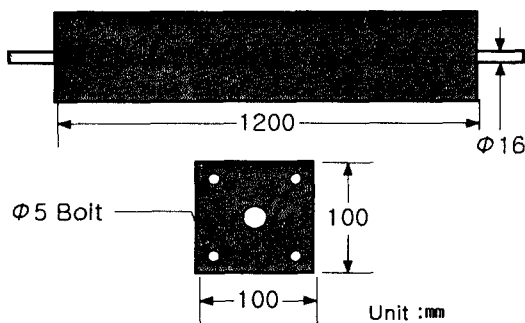
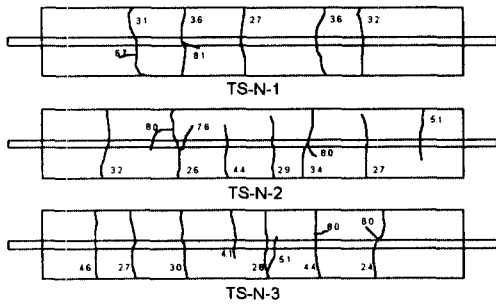


그림 2.2 인장강성 시험체 단면

3. 결과 및 고찰

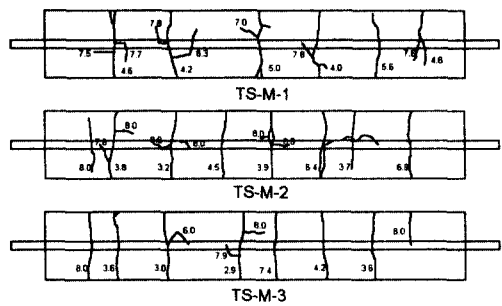
3.1 균열 형상

실험 결과에 의하면 초기 균열이 발생하는 하중은 보통강도에서 낮고 고강도에서 높게 나타나는 경향을 보이지만 압축강도에 정비례하여 증가하지는 않는다. 몇 개의 시험체는 고강도이지만 낮은 하중에서 균열이 관찰되었다. 그 이유는 콘크리트의 재료적 비균질성과 콘크리트 타설시 내부의 공극에 의한 요인과 편심하중이 작용한 결과로 여겨진다. 이러한 요인으로 균열발생하중이 낮게 평가될 수 있다. 오차를 보정하기 위해 균열 전체에 대한 평균균열하중을 구하면 TS-N(250kg/cm²)은 3.4ton, TS-M(650kg/cm²)은 4.3ton, TS-H(900kg/cm²)은 4.28ton으로 보통강도 보다 중간강도에서 균열하중이 높게 나타나지만 고강도는 중간강도와 비교하여 균열하중의 차이가 없었다. 시험체에 발생한 평균균열간격은 TS-N에서 15.36cm, TS-M에서 15.18cm, TS-H에서 12.65cm로 그림 3.2에 정리한 것처럼 보통강도 보다 고강도에서 균열간격이 좁게 나타났다. 이는 고강도일수록 철근력이 균열면에서 인접 콘크리트로 보다 효과적으로 전달되기 때문으로 판단되며, 이로 인하여 고강도일수록 인접 균열이 더 가까운 위치에 발생된다고 사료되었다. 실험에서 나타난 균열의 형상은 표 3.1과 그림 3.1에 정리하였다.



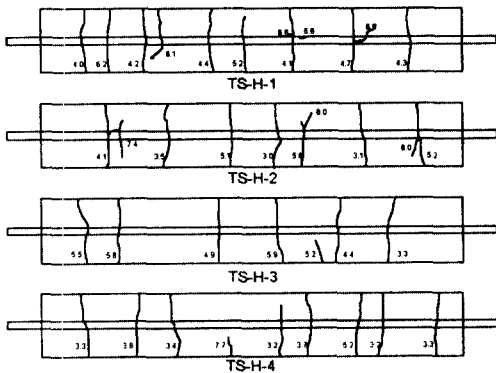
a) TS-N

그림 3.1 인장강성 시험체의 균열형상



b) TS-M

그림 3.1 인장강성 시험체의 균열형상



c) TS-H

그림 3.1 인장강성 시험체의 균열형상

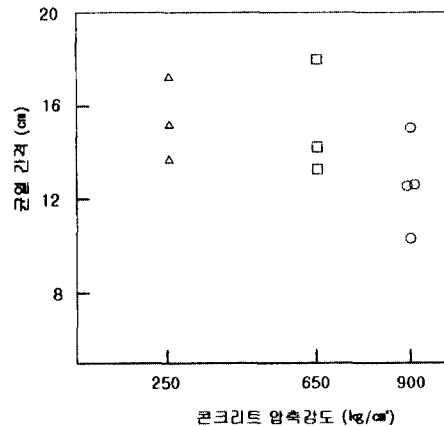


그림 3.2 콘크리트 압축강도에 따른 균열간격 비교

3.2 인장강성효과

인장강성실험의 하중-변위관계를 그림 3.3에 나타내었고, 그림 3.4에서 강도에 따른 콘크리트의 인장강성효과를 비교하였다. 시험체 전체적으로 균열이 발생한 후 비교적 큰 인장강성을 보였는데 이는 시험체에 활열균열이 적기 때문이며, 활열균열이 적으면 균열사이의 부착이 양호하게 유지된다고 사료되었다. 실험에서 나타난 인장강성 효과는 TS-M이 가장 크게 측정되었으나 TS-H는 TS-N에 비해 크지 않았다. 또한 초기균열 이후의 콘크리트의 연화거동을 살펴보면 고강도일수록 콘크리트의 연화율이 커서 하중이 증가하면 TS-H의 콘크리트 기여도가 TS-N보다 작아지는 현상이 발생하였다. 이것은 고강도일수록 균열의 수가 많고 균열면에서의 응력집중이 심하기 때문이라고 판단된다.

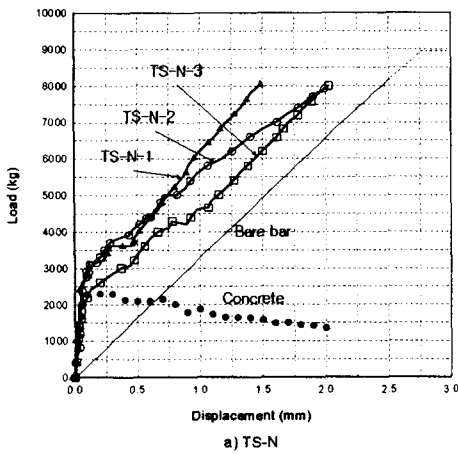


그림 3.3 인장강성실험의 하중-변위 관계

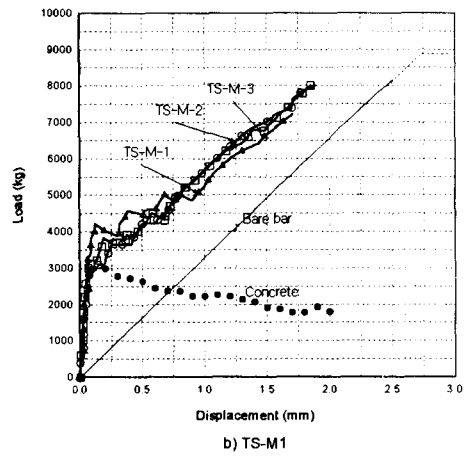


그림 3.3 인장강성실험의 하중-변위 관계

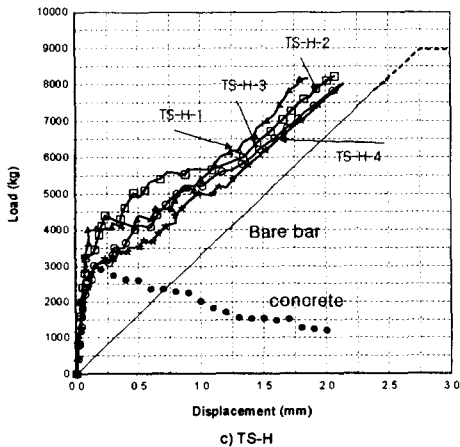


그림 3.3 인장강성실험의 하중-변위 관계

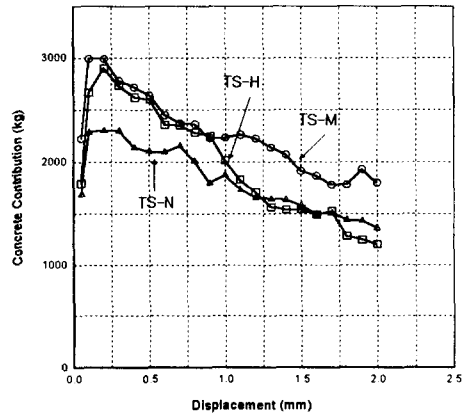


그림 3.4 강도에 따른 콘크리트의 인장강성 비교

3.3 반복하중에 의한 콘크리트의 인장강성효과 감소

그림 3.5는 균열이 발생한 이후 하중을 제거하였을 때 잔류변형을 강도별로 비교하였다. 콘크리트 강도가 증가할수록 잔류변형량은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 3.2절의 인장강성효과에서도 확인되었듯이 고강도일수록 균열면에 응력집중이 커서 그로 인한 철근과 콘크리트 부착면의 손상이 크기 때문이라고 판단되었다.

그림 3.6은 반복하중에 의한 하중-변위곡선이고, 그림 3.7은 반복하중 횟수에 따른 변위량의 차를 나타낸 것이다. 구조물에 균열이 발생하면 균열에서는 하중단에서와 같이 부착에 의한 응력 집중이 나타나고, 반복하중이 가해지면 콘크리트의 손상이 점차적으로 발생하여 부재의 거동이 순수 철근의 거동으로 접근한다. 실험결과에 의하면 고강도일수록 첫 번째 반복하중시 변위량의 차가 크게 나타났고 반복하중의 횟수가 증가할수록 변위량의 차는 감소하였다. 이는 반복하중 초기에는 고강도일수록 인장강성효과 감소가 크게 나타나나 반복하중의 횟수가 증가하면 강도에 따른 인장강성효과 감소가 큰 차이가 없음을 의미한다고 사료되었다.

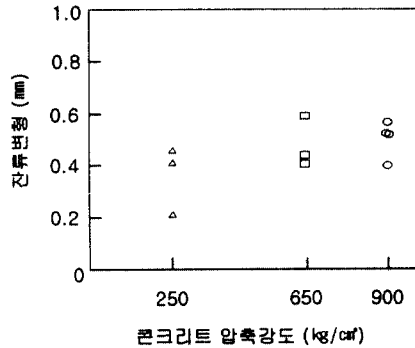


그림 3.5 콘크리트 압축강도에 따른 잔류변형 비교

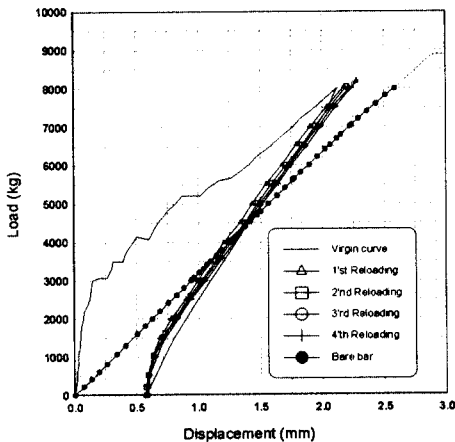


그림 3.6 반복하중에 의한 하중-변위 관계

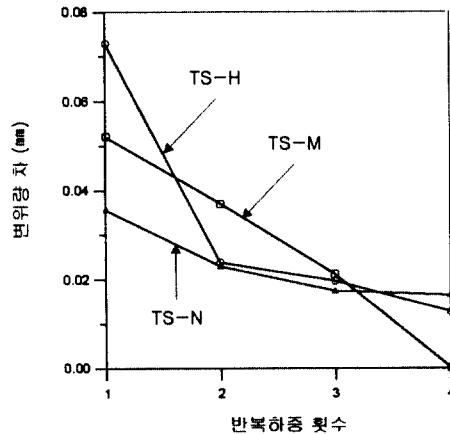


그림 3.7 반복하중에 의한 인장강성효과

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 덮개와 철근 직경의 비가 2.62인 경우에 대해서 직접인장실험을 하였고, 콘크리트 강도에 따른 인장강성효과와 균열간격 및 형상을 비교 분석하였으며, 균열발생 후 반복하중에 의한 부재의 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균열간격은 저장도 보다 고강도에서 좁게 나타났다. 이는 고강도일수록 철근력이 균열면에서 인접 콘크리트로 보다 효과적으로 전달되기 때문이며 이로 인하여 고강도일수록 인접 균열이 더 가까운 위치에 발생한다.

2) 고강도일수록 콘크리트의 연화율이 크고 심지어 하중이 증가하면 고강도 콘크리트 기여도가 보통 강도 콘크리트 보다 작아지는 현상이 발생하였다. 또한 콘크리트 강도가 증가할수록 잔류변형량은 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 고강도일수록 균열의 수가 많고, 균열면에서의 응력집중이 심하여 철근과 콘크리트 부착면의 손상이 크기 때문이다.

3) 고강도일수록 첫 번째 반복하중에 의한 변위량의 차가 크게 나타났고 반복하중의 횟수가 증가할수록 변위량의 차는 감소하였다. 이는 반복하중 초기에는 고강도일수록 인장강성효과의 감소가 크게 나타나나 반복하중의 횟수가 증가하면 강도에 따른 인장강성효과의 감소가 큰차이가 없음을 의미한다.

● 참고문헌 ●

1. CEB-FIP Model Code 90. "Tension Stiffening Effect", pp 37-38
2. ACI Commitee 224. "Cracking of Concrete Members in Direct Tension". ACI 224.2R-86, ACI Journal, January-February 1986. pp. 3-13.
3. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell. "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffining". ACI Structural Journal. November-December 1996. pp.703-710.
4. Ajaya K. Gupta, and Sergio R. Maestrini, "Tension-Stiffness Model for Reinforced Concrete Bars", Journal of Structural Engineering, 1990. pp. 769-790.
5. Domingo J. Carreira and Kuang-Han Chu. "Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension" ACI Journal , January-February 1986. pp. 21-28.
6. Yukimasa Goto. "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars" ACI Journal April, 1971. pp. 244-251
7. 이봉학, 홍창우, 장동일, "철근콘크리트 인장부재의 파괴거동과 인장강성". 대한토목학회 논문집 1998년 7월, pp. 483-494.