

RC 부재 균열면에서의 전단력 전달에 관한 고찰

Shear Transfer across Cracks in Reinforced Concrete Members

홍성걸*

하태훈**

Hong, Sung Gul

Ha, Tae Hun

ABSTRACT

Cracks in reinforced concrete members are important element in structural analysis and design. It is clear from the test results that shear strength of cracked member is remarkably degraded compared with uncracked one. However, considerable amount of shear resistance by such mechanisms as aggregate interlock and dowel action is still active. There are various approaches to shear transfer estimation including finite element analysis, fracture mechanics, upper bound theory of plasticity, etc., but working out comprehensive and consistent models and manageable equations is rather difficult and remains to be improved. Shear transfer problems under cyclic loading and effective compressive strength of cracked concrete have not been adequately investigated and need further systematic research

1 서론

균열은 철근콘크리트 구조물에 있어서 빼놓을 수 없는 현상인 동시에 극복해야 할 대상이다. 콘크리트는 시멘트 모재 내부에 골재가 분포되어 있는 혼합재료이기 때문에, 콘크리트로 이루어진 구조 부재들은 하중을 받기 이전부터 모재와 골재 사이의 전이대(transition zone)에 미세한 균열들이 존재하고 있다¹ 콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 매우 작으므로 초기에 서로 떨어져 있던 이 균열들이 힘이나 전단력 등의 외력을 받으면 이들을 연결하는 새로운 균열이 생겨나고, 이로부터 부재를 가로지르는 관통균열(through crack)이 발생하기도 한다

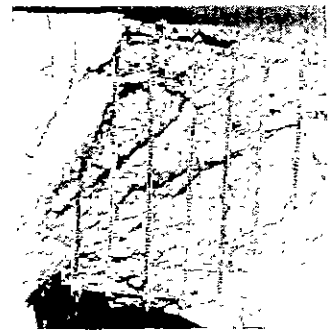


그림.1 RC 부재의 균열²

균열이 발생한 부재 내부의 응력분포는 균열 발생 이전과 달라진다. 인장력의 대부분은 균열 사이를

* 정희원, 서울대학교 건축학과 조교수

** 성희원, 서울대학교 건축학과 박사과정

가로지르는 철근에 의해 전달되지만 전단력은 그 전달 메커니즘이 좀더 복잡한 형태를 가지고 있다. 실험결과에 의하면 균열이 발생한 부재의 전단강도는 그 이전에 비해서 현저하게 감소한다는 사실이 입증되었다. 이러한 현상을 반영하여 십 여년 전까지만 해도 안전측 설계라는 가정 하에 균열 사이의 전단력 전달은 거의 무시되어 왔으나, 그간 컴퓨터의 보급에 따른 유한요소해석의 발달, 소성학과 파괴역학(fracture mechanics)을 이용한 접근방법으로 많은 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서는 현행 기준에서 제시하는 설계방법과 지금까지의 대표적인 연구들을 고찰해보고 앞으로의 과제를 조명해보도록 한다.

2 현행 기준의 고찰

1999년도 콘크리트구조설계기준의 7.6절은 전단마찰에 관해 다루고 있으며³ 이는 ACI 318-95의 R11.7⁴에 기술된 shear-friction의 지침을 그대로 반영한 것이다. ACI 318-99의 R11.7은 잠재적인 균열면, 이질적인 재료 간의 접촉면, 각기 다른 시기에 타설된 콘크리트 접합면 등을 통해 전단력이 전달될 수 있는 경우에 [식1]에 의하여 그 전단강도를 구하도록 하고 있다.⁵(그림.2)⁶

$$V_n = A_v f_y \mu \quad \text{[식1]}$$

여기서 A_v, f_y 는 각각 전단마찰철근의 단면적과 강도이고 μ 는 균열면의 마찰계수이다. [식1]은 균열면을 통과하는 전단마찰철근이 균열면에 수직으로 배근되어 있는 경우에 적용가능하고, 마찰계수의 값은 균열면의 생성 원인과 거친 정도에 따라서 그 크기를 정하였다. 또한 V_n 의 최대값 및 전단철근의 최대 강도를 두어 안전한 설계를 도모하고 있다.

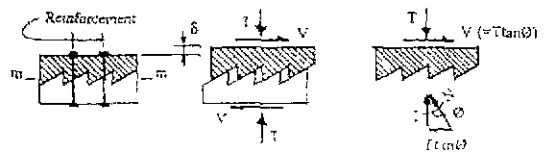


그림 2 ACI 318-99의 Shear Friction³

NZS 3101 역시 ACI 318-99와 비슷한 설계기준을 제시하고 있지만 균열면에 수직 방향으로 작용하는 압축력(N^*)을 고려하여 [식2]와 같이 전단마찰철근의 단면적을 구하도록 하고 있다.⁷

$$A_v = \left(\frac{V^*}{\phi \mu_r} - N^* \right) \frac{1}{f_y} \quad \text{[식2]}$$

위의 두 식들은 균열면에 평행한 외력이 가해졌을 때 균열의 확장이 균열을 가로지르는 철근에 의한 구속력(압축력)을 유발시키고, 결국 철근이 항복할 때의 구속력에 대한 일정 비만큼이 마찰력으로서 외력에 저항한다는 가정을 하고 있다.⁸ 그러나, 이와 같은 ACI나 NZS의 접근방법은 다음과 같은 근본적인 한계점들을 갖고 있다.

- 균열의 형태 및 재료학적인 고려 없이 단순히 마찰계수를 도입하여 실험결과에 근거한 안전측의 설

개만을 유도하고 있다. 실제로 균열면에서의 전단력 전달은 크게 골재맞물림(aggregate interlock)과 전단철근의 다우얼(dowel) 거동에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이들 메커니즘이 균열면의 전단강도에 기여하는 정도를 정확하게 산정하는 것이 필요하다.

- 균열면을 통과하는 철근 중에 전단마찰에 기여하는 성분만을 따로 결정하기는 힘들다. 또한 균열의 발생 여부와 그 위치를 모르는 상황에서는 부재의 주근이나 전단철근 이외에 추가적인 철근을 배근하는 것이 비경제적이거나 불가능할 수도 있다.
- 균열면에 평행한 방향으로 가해지는 외력에 대한 전단강도만을 구할 수 있다. 그러나 균열의 방향은 반드시 외력의 방향과 일치하지 않으며, 외력이 가해지는 방향에 따라 균열면의 전단력 전달은 여러 가지 양상을 가져올 수 있다

3 연구의 현황 및 앞으로의 연구방향 제시

3.1 연구 현황

균열 사이의 전단력 전달에 관한 연구는 1960년대 후반에 와서야 연구가 시작되었으나, 균열의 위치, 크기, 방향 등을 예측하기가 어려울 뿐만 아니라 균열모델을 해석할 수 있는 기법이 미비하여 많은 진전이 이루어지지 않았다. 이러한 이유 때문에 실험에 의한 연구가 주를 이루었는데, push-off 형태의 시험체(그림.3)⁹와 direct shear test가 균열면의 전단강도 측정에 많이 이용된다. 1980년대에 들어와 컴퓨터의 보급으로 유한요소법이 활성화되면서 균열 요소를 도입해 전단 거동을 연구하려는 시도가 많이 있어왔으며, 최근 들어서 다른 한편으로는 소성이론을 이용한 연구가 행해지고 있다. 여기서는 이들 가운데 대표적인 연구의 성과를 살펴 보도록 한다.

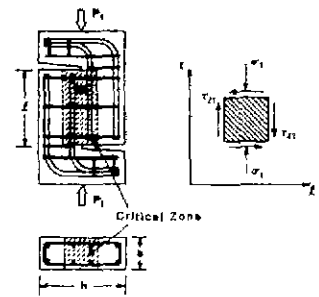


그림 3 Push-off 시험체⁹

대표적인 연구의 성과를 살펴 보도록 한다.

3.1.1 유한요소해석

균열 사이에서의 전단력 전달을 설명할 수 있는 유한요소를 개발하는 것은 기존에 이미 개발된 컴퓨터 프로그램에 새로 개발된 요소를 추가시키는 것만으로 해석 결과를 알 수 있기 때문에 가장 많이 연구되어져 왔다¹⁰ 그 중에서도 단조하중을 받는 평면상의 모델이 지금까지 많이 사용되었는데, 이 경우 균열모델의 강성행렬을 다음과 같은 형태로 가정한다.

$$\begin{pmatrix} d\sigma_{nn}^c \\ d\sigma_{nt}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{nn} & B_{nt} \\ B_{tn} & B_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\delta_n \\ d\delta_t \end{pmatrix} \quad [식 3]$$

여기서 B_{nn} , B_{nt} , B_{tm} , B_{tt} 는 균열의 강성계수로서 균열의 변형 δ_n , δ_t 과 응력 σ_n , σ_t 에 의해 결정된다. 이 강성행렬은 소성학에서 사용되는 것과 유사한 형태를 가지고 있지만, 그 구조가 대칭형태도 아닐 뿐더러 균열요소의 불안정한 반응을 불러올 수가 있다. 그러나 이러한 불안정성은 균열면을 가로지르는 철근에 의해 구속되게 된다.

유한요소법에 사용되는 균열요소 중 대표적인 것들로는 Generalized roughness model, Rough crack model, Two-phase model (그림 4), Contact density model (그림 5) 등이 있다. 이들 접근방법은 대부분 불규칙한 균열면의 기하학적 형상을 고려하여 균열 사이의 수직·수평 응력을 균열의 미끄러짐(횡변형)과 여기에 수반하는 균열확장(수직변형)의 함수로서 표현하여 [식3]과 같은 강성행렬을 도출하는 데에 중점을 두고 있다. 한편으로 콘크리트 재료를 시멘트 모재와 골재, 그리고 전이대로 나누고 선형탄성과파괴이론 (LEFM)을 응용한 유한요소해석도 시도되고 있다 (그림 6)¹¹

위의 균열 모델들은 균열발생 부재의 전단강도가 뚜렷하게 감소한다는 기존의 실험 데이터들과 비교적 일치하고 있지만, 균열형상의 불규칙성 때문에 유도된 관계식들이 너무 복잡해지는 양상을 공통적으로 가지고 있다. 또한 각각의 연구가 골재맞물림 또는 철근의 다우얼 거동 중에 어느 하나에 중점적으로 치우치는 경향이 있어 두 메커니즘 사이의 관계가 서로의 역할을 약화시킬 수 있다.

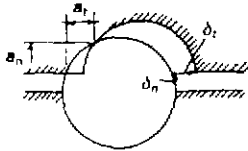


그림 4 Two-phase model⁶

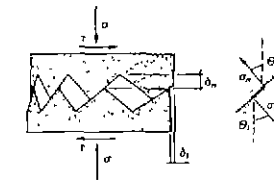
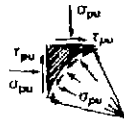


그림 5 Contact Density Model⁸

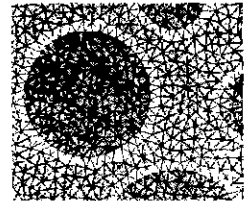


그림 6 Fracture Model¹¹

3.1.2 소성학의 상한계 이론

균열면의 전단강도 연구에 소성학의 상한계 이론을 접목시킨 연구는 가장 최근의 것이다. 여기서는 균열을 미끄러짐 저항이 적은 항복선 (yield line, discontinuous line)으로 간주하고, 이 선을 따라 미끄러짐이 발생하여 부재가 파괴된다는 가정 하에 전단강도의 상한계값을 구한다.¹² (그림 7)¹³ 이 때, 균열은 부재 내의 일반적인 항복선과 다르기 때문에 이를 구분하기 위하여 ν_s 라는 감소계수를 도입하여 콘크리트의 점착계수 c 를 $\frac{1}{2}$ 로 감소시켰다. 그러나 이와 같은 가정은 균열의 거친 정도와 균열폭 등에 따라 달라질 수 있으므로 후속 연구가 뒷받침 되어야 할 것으로 보인다. 즉, 재료학적 고려 없이 단순히 기

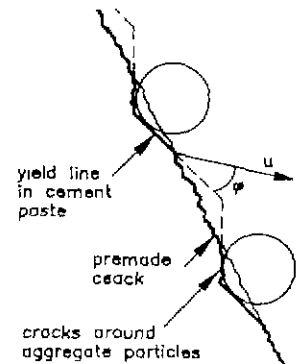


그림 7 균열 항복선¹³

존 물리량에 감소계수를 곱하여 균열의 영향을 설명하기에는 근본적인 한계가 있다고 할 수 있다

3.2 앞으로의 연구방향

지금까지 살펴본 바와 같이 균열면에서의 전단력 전달은 아직까지 제대로 정리되지 않은 분야로서, 실제 현장 기술자가 사용할 수 있거나 설계기준에 반영되기 위해서는 앞으로 다음과 같은 연구가 더 필요하다.

- 유한요소해석의 경우에 골재맞물림과 철근의 다우얼 거동을 반영하는 모델들을 제대로 조화시킬 수 있는 방법을 개발해야 한다.
- 지진과 같은 반복적인 횡하중을 받으면 균열면의 기하학적 형상과 응력분포가 달라지게 되는데 이를 반영한 동적모델도 앞으로 개발되어야 할 것이다.
- 부재 균열면에서의 전단력 전달과 연관시켜 고찰해볼 수 있는 연구분야로서 콘크리트의 유효압축강도를 생각할 수 있다. 철근콘크리트 구조의 강도해석 시에 재료의 항복강도를 넘는 범위까지를 포괄하는 강도개념으로 유효압축강도가 사용되는데, 지금까지는 이를 콘크리트 강도의 함수로 나타내거나¹³ 압축스트럿의 응력상태에 따라서 분류²되는 것이 일반적이었다. 그러나 부재 내부에서의 균열 방향 및 균열면의 전단강도를 알 수 있다면 균열발생으로 인해 압축강도가 감소되는 현상을 체계적으로 설명할 수 있을 것이다.

4 요약

철근콘크리트 부재에 발생하는 균열은 구조해석이나 설계에 있어서 중요한 요소이다. 균열이 발생한 부재의 전단강도가 그 이전에 비해 현저히 감소하는 것은 사실이나, 골재맞물림과 철근의 다우얼 거동에 의해 무시할 수 없는 크기의 전단저항이 여전히 존재하고 있다. 최근에 유한요소해석, 파괴역학, 소성학 등의 접근방법으로 균열면의 전단강도에 대한 연구가 이루어져 왔지만 여전히 개선되어야 할 부분들이 있으며, 반복 횡하중에 대한 균열의 동적거동, 균열 발생으로 인한 부재 압축강도의 감소 등 앞으로 연구되어야 할 주제가 많이 남아있다.

감사의 글

본 연구는 교육부가 지원한 “두뇌한국21 - 건물성능향상을 위한 건축기술개발” 연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며 지원에 감사 드립니다

참고문헌

[1] Mchta, P. K. & Monteiro, P. J. M., “Concrete – Structure, Properties, and Materials,” Second Edition, Prentice

- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [2] MacGregor, J. G. "Reinforced Concrete – Mechanics and Design," Third Edition, Prentice Hall International, Inc., 1997.
- [3] "콘크리트구조설계기준," 건설교통부, 1999.
- [4] ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)," American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 1995.
- [5] ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 1999.
- [6] ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion, "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, No.12, Dec., pp.1375-1417, 1998.
- [7] NZS 3101, "Concrete Structures Standard. Part 1 – The Design of Concrete Structures," New Zealand Standard, 1995.
- [8] Valluvan, R., Kreger, M. E. & Jirsa, J. O., "Evaluation of ACI 318-95 Shear-Friction Provisions," ACI Structural Journal, Vol 96, No 4, pp.473-481, 1999.
- [9] Hsu, T. T. C., "Unified Approach to Shear Analysis and Design," Cement & Concrete Composites, Vol.20, pp 419-435, 1998.
- [10] CEB (Comite Euro-International du Beton), "RC Element under Cyclic Loading," Thomas Telford Services Ltd., London, 1996
- [11] Mohamed, A R & Hansen, W, "Micromechanical Modeling of Crack-Aggregate Interaction in Concrete Materials," Cement & Concrete Composites, Vol.21, pp 349-359, 1999.
- [12] Hoang, L C & Nielsen, M. P, "Plasticity Approach to Shear Design," Cement & Concrete Composites, Vol.20, pp.437-453, 1998.
- [13] Zhang, J. P. "Strength of Cracked Concrete: Part 2 – Micromechanical Modeling of Shear Failure in Cement Paste and in Concrete." Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, Report R No.17. Lyngby, 1997.