



철근콘크리트 보부재의 전단저항 메카니즘의 평가에 관한 연구

Evaluation of Shear Resisting Mechanism in Concrete Beams



김 형 기*



조 한 욱**

본 기사는 철근콘크리트 보부재의 전단저항 메카니즘을 규명하고자 二羽淳一郎, 崔益暢 등에 의해 개발된 격자모델에 관련된 논문^{1)~9)}을 발췌하여 요약, 정리한 것이다.

1. 서 론

콘크리트 구조부재에 대한 전단저항 메카니즘은 많은 인자에 의해 복잡하게 작용하기 때문에 지금까지도 정량적으로 명확히 밝혀지지지는 않았다.

철근콘크리트 구조부재의 전단저항 메카니즘은 사인장 균열발생전과 균열발생후로 구분할 수 있다. 사인장 균열발생전에는 콘크리트의 유효단면이 작용전단력에 저항하지만, 사인장 균열발생 후에는 전단저항 메카니즘은 매우 복잡하여진다.

즉 사인장 균열발생후 일반적으로 알려진 작용전단력에 대한 저항작용으로서는 사인장 균열면을 따라서 골재의 맞물림 작용(aggregate interlocking action), 압축부콘크리트의 저항, dowel 작용, arch작용과 전단보강근에 의한 저항 등을 들 수 있다.

철근콘크리트 보부재의 전단에 대한 평가방법으로 가장 널리 사용되는 것은 수정트러스 이론이다. 수정트러스 이론은 전단내력 V_u 를 콘크리트의 저항분 V_c 와 전단보강근의 저항분 V_s 의 합으로 나타낸다. 콘크리트의 저항분 V_c 는 전단보강을 하지않은 보부재의 전단내력을 나타내고, 전단보강근의 저항분 V_s 는 전단보강근의 항복에 대응하는 전단저항력을 의미한다.

그러나, 수정트러스 이론을 토대로 한 설계방

* 삼성물산 건설부문 기술연구소, 선임연구원

** 정희원·삼성물산 건설부문 기술연구소, 수석연구원, 본 학회 편집부위원장

법은 몇가지 문제점을 가지고 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 콘크리트의 특성은 균열이 발생하면 그 저항력은 저하된다. 그러나 수정트러스 이론에서는 사인장 균열발생시의 내력이 보가 파괴될 때까지 일정하게 유지된다고 가정하고 있다.

2) 많은 실험결과에서 철근콘크리트 보의 전단 내력은 전단보강근의 항복이후에도 그 저항력은 증가하며 특히 전단보강이 적은 경우는 현저하다.

3) 수정트러스 이론을 기초로 한 전단내력 평가식은 많은 실험 결과를 토대로 하고 있기 때문에 철근이 보강된 RC보에 대해서는 타당성이 인정된다. 그러나, 최근 활발히 연구가 진행중에 있는 신소재인 가볍고 내부식성이 강한 FRP (Fiber Reinforced Plastic) 보강 철근콘크리트 구조부재에 대해서는 전단 내력을 과대평가하고 있다.

상기와 같은 문제점들을 근본적으로 해결하기 위해서는 전단저항 메카니즘을 명확히 규명하는 것이 매우 중요하며, 무엇보다 선결되어야 한다. 최근 철근콘크리트의 전단저항 메카니즘을 규명하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있으며, 여기에 소개하고자 하는 논문도 전단저항 메카니즘을 규명하고자 개발한 수치해석 모델인 격자모델에 관한 것이다.

격자모델은 계산결과에 처리에 객관성이 있고 전단저항 메카니즘을 명확히 표현할 수 있는 요건을 만족하는 것으로, 철근콘크리트 부재를 격자상태의 트러스의 집합체로만 모델화한 수법으로 유한요소 해석법과 비교하면 절점변위의 총자유도가 상당히 적어서 간편하고 경제적인 해석 방법이다. 이것은 변형의 적합조건, 힘의 평형조건, 재료의 응력-변형관계를 고려하여 콘크리트의 사인장 균열발생, 전단보강근의 항복, 웨브 콘크리트의 파괴에 이르기까지 일련의 저항 메카니즘의 변화를 거의 타당한 정도로 예측할 수 있다.

2. 격자모델

2.1 격자모델의 개요

Fig. 1은 사인장 균열이 발생한 철근콘크리트 보의 모식도이다. 그림에서 표시하는 사균열면에

서 전단응력을 무시하면 사인장 균열과 평행한 미소요소에는 2축의 압축-인장응력이 작용한다 (Fig. 2).

웨브 콘크리트에 Fig. 2와 같은 응력상태를 고려해서 Fig. 3과 같은 격자모델을 설정한다. 즉 연속체인 철근콘크리트 보를 트러스의 집합체로 모델링 한다.

콘크리트는 휨압축부재, 휨인장부재, 압축부재, 사인장부재, 아치부재로, 보강재는 수평부재, 수직부재로 모델링한다. 이 모델링에 의해 종전의 트러스 모델에서 표현되지 않는 사균열 전후의 전단거동을 정확하게 표현할 수 있다.

Fig. 3의 굵은 실선은 콘크리트의 아치부재를 나타내고 있다. 격자모델은 트러스의 사재각을 45°로 고정하고 있지만, 아치부재를 고려하는 것

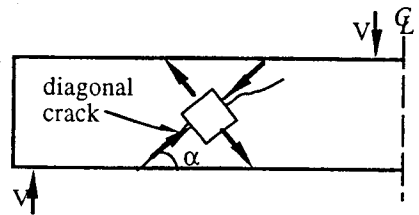


Fig. 1 Concrete beam with diagonal crack

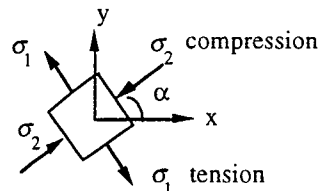


Fig. 2 Stress state in concrete element

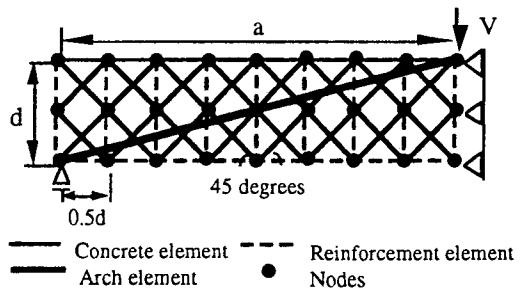


Fig. 3 Schematic diagram of the lattice model

에 의해서 전단보강근 항복이후의 각 부재에 있어서의 응력 재분배를 표현할 수 있다. 아치부재는 격자모델의 재하점과 지점을 양단으로 하는 세장한 부재로 한다.

2.2 각 부재의 모델화

Fig. 4는 격자모델에 있어서 보단면의 개념도이다. 웹 콘크리트를 Fig. 4에 나타낸 것처럼 콘크리트의 트러스부분과 아치부분으로 구분한다. 아치부재는 재하점에서 지점으로 직접 전달되는 힘의 경로를 모델링한 것이며, 아치부재의 변위는 그 양단에서 트러스부재의 변위와 적합하고 있지만 중앙에서는 독립되어 있다. 이것은 평면응력장을 가정하지 않은 것을 의미하며, 웹 콘크리트에서 스티럽의 영향범위를 고려한 것이다. 현실적으로 양자의 변위가 완전히 독립된다고는 생각할 수 없지만 보폭이 상대적으로 증가해 감에 따라서 평면응력장의 가정이 성립되지 않는 것도 충분히 예상된다. 후술하는 일련의 실험에서도 웹 콘크리트의 내부와 외부는 서로 다른 거동을 하고 있음이 확인되었다. 트러스부분과 아치부분의 결정은 포텐셜 최소 원리를 이용하여 구한다.

2.3 각부재의 응력-변형 관계

2.3.1 콘크리트 인장부재

콘크리트 인장부재는 전단력에서 생기는 주인

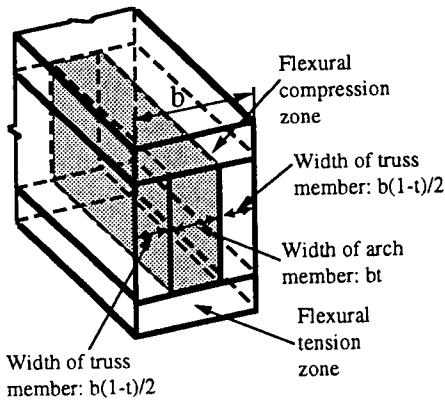


Fig. 4 Cross section of concrete beam in the lattice model

장응력에 저항한다. 인장강도의 도달이전은 탄성체이고 균열발생이후는 softening거동을 한다고 할 수 있다. 사용한 인장 softening곡선은 Fig. 5에 나타낸 1/4모델이다. 콘크리트의 파괴에너지 G_F 는 100N/m로 하고 있다.

2.3.2 콘크리트 압축부재 및 아치부재

콘크리트 압축부재와 아치부재는 사압축력에 저항한다. 사균열발생 이후의 콘크리트의 압축 softening 특성은 collins모델을 이용한다. softening계수 η 의 평가에 필요한 압축사재와 직교방향의 변형도 ϵ_c 에는 해당 압축사재와 직교하는 인장사재의 변형도를 이용한다. 또한 아치부재에 대해서는 스펀중앙에 위치한 인장사재의 변형도로부터 softening계수를 평가한다.

사용하는 콘크리트 압축응력-변형도관계는 다음식과 같다.

$$\sigma_c = -\eta f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \tag{1}$$

여기서, $\eta = \frac{1}{0.8 - 0.34 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)} \leq 1.0$

$$\epsilon_o = -0.02$$

2.3.3 수직 및 수평부재

수직 및 수평부재를 형성하는 보강재의 응력-

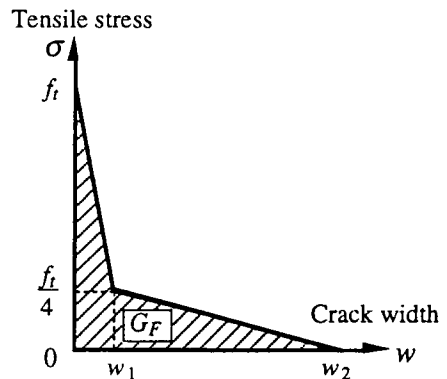


Fig. 5 One-fourth model of tension softening curve

변형도 관계는 완전탄소성으로 한다.

휨인장축의 수평부재에는 콘크리트와 보강재의 부착을 고려해서 okamura의 tension stiffening 모델을 이용한다. 또한, 휨압축축의 수평부재에는 휨 압축부 콘크리트의 효과를 고려하고 이 경우는 압축 softening은 고려하지 않는다. 즉, 콘크리트의 응력-변형도의 관계는 식 (1)에서 $\eta = 1$ 로 한다.

수직부재에 대해서는 콘크리트의 인장사재에 대한 웹 콘크리트의 인장저항을 고려하고 있기 때문에 콘크리트의 영향은 가산하지 않는다.

이상과 같이 구성되는 격자모델을 이용해서 변위제어에 의한 증분해석을 한다. 또한, 수렴계산에는 Newton-Raphson법을 이용한다.

3. 격자모델의 적용성 검토

격자모델의 적용성 검토를 위해 철근과 FRP rods를 휨 및 전단보강재로 각각 사용한 철근콘크리트 보의 작용전단력과 변위의 거동에 대한 수치해석결과와 실험결과를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6~Fig. 9에 나타내고 있다.

Fig. 6은 휨 및 전단 보강재로서 철근을 사용한 경우이며, Fig. 7은 휨 보강에는 철근, 전단 보강에는 FRP rods를 이용한 경우이며, Fig. 8는 휨 및 전단 보강에 FRP rods를 이용한 경우이며, Fig. 9은 휨에는 FRP rods, 전단 보강에는 철근을 이용한 경우이다. Fig. 6 ~Fig. 9에서 보이는 것처럼 격자모델은 어떠한 보강재를 이용한 부재에 대해서도 타당하게 전단 거동을 예측하고 있다.

또한 참고문헌 1에서는 사인장 균열발생, 전단보강근의 항복, 웹 콘크리트의 파괴에 이르기까지의 일련의 전단저항 메카니즘의 변화, 즉 각 부재의 응력상태 변화를 명확하게 설명하고 있다.

4. 웹 콘크리트의 변위 거동

철근콘크리트 보에 대해서 웹 콘크리트 내부 및 표면의 변형을 검토하기 위해 실험³⁾을 실시

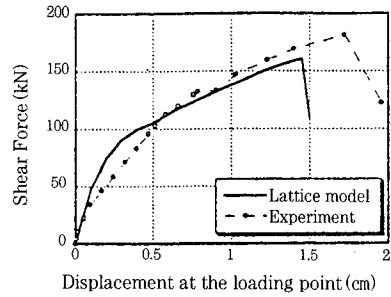


Fig. 6 Shear force-displacement

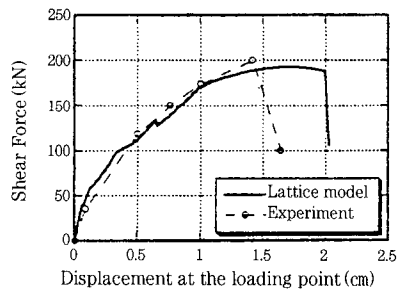


Fig. 7 Shear force-displacement

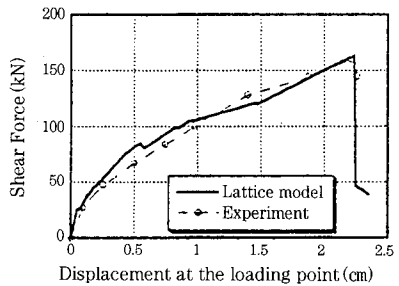


Fig. 8 Shear force-displacement

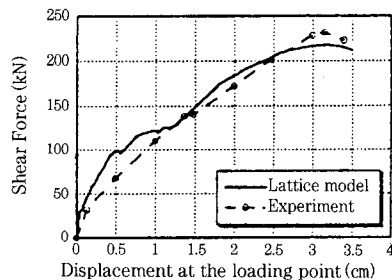


Fig. 9 Shear force-displacement

하였다. 실험에서는 Fig. 10과 같이 콘크리트 내부에 매설게이지를 설치하고 같은 위치의 표면부에는 부착게이지를 설치하였다.

Fig. 11은 실험결과와 격자모델에 의한 해석 결과를 나타낸 것이며, 매설게이지에 의해 측정된 내부 콘크리트 변형을 격자모델의 아치부재의 변형에, 표면부 콘크리트의 변형을 격자모델의 트러스부재의 변형에 대응하는 것으로 상정하여 비교하였다.

Fig. 11에 나타난 것처럼 사인장 균열발생전까지는 내부 및 표면부의 콘크리트의 변형 거동은 거의 일치하고 있으며, 전단력이 증가함에 따라 변형의 증가는 완만하다. 그러나 사인장 균열 발생 후에는 내부와 표면부의 콘크리트의 변형 거동은 상이하게 나타나고 있으며 변형율도 급격히 증가한다. 이러한 현상은 격자모델에서도 동일하게 나타나고 있다.

이와 같은 결과는 전단보강된 철근콘크리트 부재에서 평면응력장의 가정이 엄밀히 적용될 수 없다는 것을 시사하고 있다.

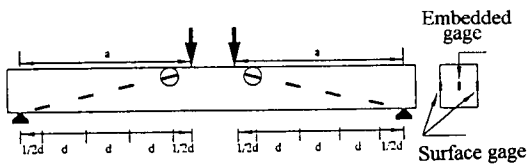


Fig. 10 Measured position of concrete strain

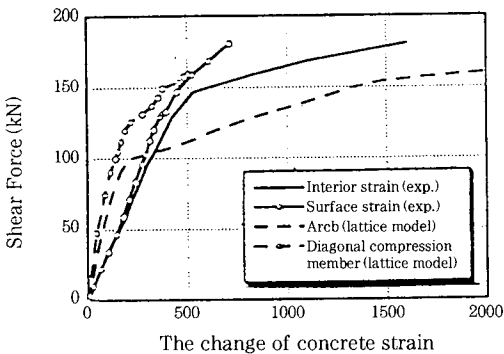


Fig. 11 The change of concrete strain

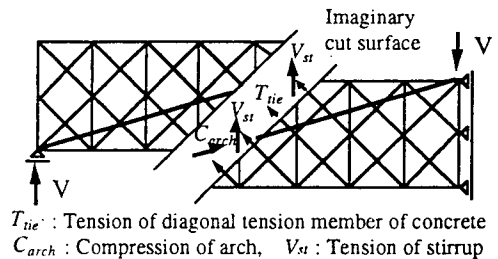
5. 각 부재의 전단력 분담

수정트러스 이론에서 작용전단력에 대한 콘크리트의 저항분은 오로지 콘크리트의 인장저항에 의한 것이기 때문에 사인장균열 발생 후 균열의 진전, 균열폭의 확대 및 변형의 증대에 따라서 저하된다는 것이 당연한 논리이다. 그러나 수정트러스 이론에서 콘크리트의 저항분은 사인장 발생시점에서 부재의 파괴에 이르기까지 일정하게 유지된다고 가정하고 있다.

전단력에 대한 콘크리트의 저항분을 평가하기 위하여 격자모델을 이용하여 수치해석을 행하였다. 격자모델에서 각 부재의 응력상태를 고려하면 보의 전단저항 메카니즘을 지배하는 것은 콘크리트의 사인장부재, 콘크리트의 아치부재 및 스테럽의 저항력이라고 판단된다. 따라서 Fig. 12에 나타나고 있는 것처럼 전단스팬 중앙에서 격자모델의 free body를 가정하여 가상단면에서 각 부재력에 의한 전단력의 분담정도를 평가한다.

Fig. 13는 철근보강 콘크리트 보에 대한 해석 결과이며, Fig. 14은 FRP rods 보강 콘크리트 보에 대한 해석결과이다

콘크리트 저항분 V_c 는 격자모델에서 콘크리트의 인장사재에 의한 저항분과 아치부재에 의한 저항분으로 구성되어 있다. Fig. 13에서 나타나고 있는 것처럼 스테럽의 평균응력이 영근처에서는 콘크리트의 인장사재의 저항력 비율이 높지만, 스테럽의 평균응력이 증가함에 따라서 인장사재의 저항력은 감소해 간다. 그러나 이것에 보완해서 아치부재의 저항력이 증가하기 때문에 결과적으로 V_c 에 상당하는 콘크리트 저항분이 유



T_{ie} : Tension of diagonal tension member of concrete
 C_{arch} : Compression of arch, V_{st} : Tension of stirrup

Fig. 12 Shear force-displacement

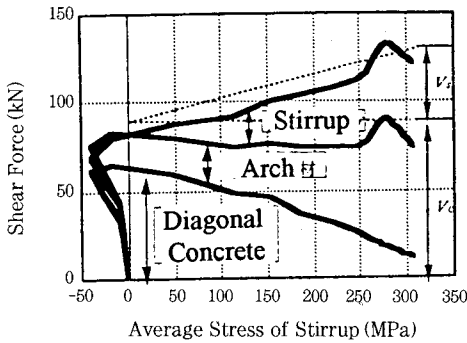


Fig. 13 Estimation of the contribution for shear for beam reinforced with steel

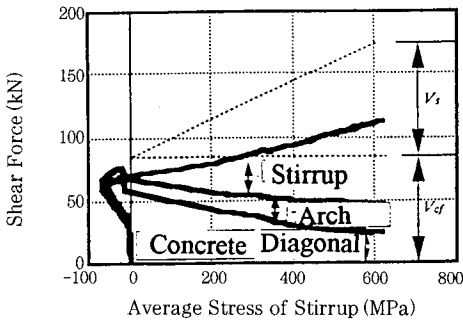


Fig. 14 Estimation of the contribution for shear for beam reinforced with FRP rods

지되고 있는 것을 알 수 있다.

수정트러스 이론에서 V_c 의 근거를 콘크리트의 인장저항만이 아니고 아치의 저항력과 합해서 생각함으로써 사인장균열 발생 이후에도 콘크리트의 저항분이 일정하게 유지된다는 것을 설명할 수 있다.

FRP의 재료적 특성은 철근에 비해서 탄성계수가 작고 인장응력은 매우 크다. 이러한 재료적 특성때문에 기존의 수정트러스 이론에 의한 전단 내력의 평가식은 과대평가되고 있다는 사실은 많은 연구결과에서 보고되고 있다.

Fig. 14는 격자모델을 이용한 수치해석에 의한 FRP rods 보강 콘크리트 보의 전단력 분담을 나타낸 것이다. 사인장균열 발생시의 전단력은 같

은 양의 철근보강 보에 비하여 작게 나타나고 있으며, 이것은 dowel 작용의 효과분에 상응하며, 철근과 FRP rods의 탄성계수를 고려하여 예측이 가능하다. 사인장균열 발생 후 전단보강근의 평균응력이 증가함에 따라 인장사재의 저항력은 감소한다. 이것에 보완하여 아치부재의 저항력이 약간 증가하지만 그것을 가산하여도 콘크리트의 저항분은 저하해감을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 FRP 보강 콘크리트 보에서는 보강재의 탄성계수가 작기 때문에 사인장 균열 발생이후 동일 전단력 레벨에서의 변형이 철근 콘크리트 보에 비해서 증가하여 콘크리트의 압축 softening도 진전되기 때문이다.

또한 전단보강근에 의한 전단력의 저항분도 트러스 이론에 의해 철근 항복강도 대신에 FRP rods의 파단강도를 대입하여 구한 값보다는 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 FRP rods는 항복을 나타내지 않고 파단에 이르기 때문에 어느 하나의 전단보강근이 파단강도에 이르면 콘크리트 보가 파괴에 이르게 되어 철근보강의 경우와 같은 전단보강근의 항복 후에 응력재분배가 일어나지 않기 때문이라고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 二羽淳一郎, 崔 益暢, 田邊忠顯 "鐵筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究", 日本土木學會 論文集, 26卷, 508, pp.79~88, 1995年 2月.
2. 二羽淳一郎, 崔 益暢, 三島徹也, 鈴木顯彰, "格子モデルによるFRP補強コンクリートはりのせん断耐荷力の定量的評價", 日本土木學會 論文集, 31卷 538, pp.105~114, 1996年 5月.
3. 崔 益暢, 鈴木顯彰, 三島徹也, 二羽淳一郎, "鐵筋およびFRPロッドを補強筋としたコンクリートはりのせん断耐荷性狀に関する研究", 日本土木學會 論文集, 34卷 557, pp.23~33, 1997. 2.
4. J.Niwa, I.C. Choi, T.Tanabe, "Analytical Study for Shear Resisting Mechanism Using Lattice Model", Proceeding of JSCE, Con-

- crete Library, Vol. 26, pp.95-109, 1995. 12
5. 崔 益暢, 二羽淳一郎, 三島徹也, 鈴木顯彰, "鐵筋およびFRPロッドを補強材としたコンクリートはりのせん断耐荷力の定量的評價", 日本コンクリート工學年次論文報告集, 18卷 2, pp.683~688, 1996. 6.
 6. I.C. Choi, J.Niwa, T.Tanabe, "Estimation of Shear Resisting Mechanism of Concrete Beams by Lattice Model", Proceeding of the Fifth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-5), Gold Coast, Australia, Vol.1, pp.615~620, 1995. 7
 7. I.C. Choi, J.Niwa, T.Tanabe, "A Study of Shear Resisting Mechanism of Concrete Beams by Lattice Model", Proceeding of the Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM'96), Seoul, Korea, Vol.2, pp.1383~1388, 1996. 9
 8. I. C. Choi 외 2인, "Predicted Shear Resisting Mechanism of FRP Reinforced Concrete Beams by Lattice Model", Proceeding of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Sapporo, Japan, Vol. 2, pp.301~308, 1997. 10 