콘크리트 구조물의 전단 안전성 평가를 위한 전단전달 실험 및 해석

김 광 수
현대건설 화명대교 건설현장
(2008. 1. 21. 접수 / 2008. 4. 21. 채택)

An Experimental and Analytical Study on Shear Transfer for Safety Evaluation of Concrete Structure

Kwang-Soo Kim
Hwamyung Grand Bridge Construction Project, Hyundai Engineering & Construction Co., LTD
(Received January 21, 2008 / Accepted April 21, 2008)

Abstract : In this study, push-off tests for the initially uncracked specimens were conducted to investigate shear transfer mechanism in reinforce concrete elements. Experimental programs for shear transfer were undertaken to investigate the effect of the concrete compressive strength, the presence of steel stirrups as shear reinforcement and the amount of steel stirrups. As the shear plane is loaded, several cracks form in a direction inclined to the shear plane, creating compression struts in the concrete. For this stage, shear is being transferred through a truss-like action produced by the combination of the compressive force in the concrete struts and the tensile force that the steel reinforcement crossing the shear plane develops. In the normal strength concrete specimens with steel stirrups, ultimate failure occurred when the compression struts crushed in concrete. In the high strength concrete specimens, on the other hand, ultimate failure occurred when the steel stirrups developed their yield strength.
Key Words : high strength concrete, push-off test, shear transfer, truss-like action

1. 서 론

콘크리트의 전단파괴는 취성적인 특성을 갖고 있어 구조물의 안전성 평가시에 매우 면밀하고 정확하게 다루어져야 한다. 이에 따라 전단거동에 대한 분석연구는 아직까지도 활발하게 수행되고 있으며 특히 그 거동의 복잡성으로 인해 다양한 방향으로 해석적 및 실험적 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 전단전달(Shear Transfer) 문제는 철근 콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 전단거동 해석을 위한 기본이 되는 것이라 할 수 있으며 이에 대한 해석적 및 실험적 연구는 정확한 전단설계를 위하여 중요한 의의를 갖는다고 할 수 있다.

이러한 전단전달에 대한 연구와 관련하여 Mattock[1-3]이 많은 결과들을 발표하고 있는데 그는 사전 균열을 발생시키지 않은 시험체를 대상으로 하였으며 주로 Push-off 타입의 실험체를 활용하여 연구를 수행하였다[5].

biocon@hdec.co.kr

이와 더불어 사전 균열을 발생시킨 시험체에 대한 전단전달은 전단마찰(Shear Friction), 골재 맞물림(Aggregate Interlock) 등과 관련하여 보다 다양하게 연구되어오고 있다. 특히 Delft의 Walraven[6,7]은 사전 균열을 발생시킨 다양한 형태의 Push-off 시험체에 대하여 실험을 수행하였으며 이와 함께 해석적인 접근에서도 큰 성과를 거두어 오고 있다. 이러한 사전 균열이 있는 시험체에 대한 실험은 여러 가지 재료적 특성은 물론 다양한 하중조건에 대하여도 해석적인 연구와 함께 수행되어 오고 있다[8,9]. 이와 함께 국내에서도 이러한 전달전달 문제와 관련된 분석적 연구들이 발표되어 오고 있다[10-12].

본 연구에서 다루는 이러한 전단전달 문제는 트러스 이론의 적용이 가능하도록 전단면을 따라 사전 균열을 발생시키지 않은 시험체를 대상으로 하고 있다. 몇 가지 실험변수들을 포함하여 Push-off 시험체를 제작하고 전단실험을 수행하는데 특히 전단 변형률의 측정은 전기 저항식 게이지를 이용한 Strain Rosette을 최종적으로 채택하지는 않는다. 대신에 콘크리트에 사인장응력으로 인한 균열이 발

생한 이후의 하중 단계에서도 계속적인 측정이 가능하고 특히 트러스 이론의 평균 변형률 개념에 부합하는 전단 변형률 측정을 위하여 DEMEC Gage와 콘크리트 표면에 설치된 변위계(Displacement Transducer)를 활용하였다. 이와 함께 전단전달 해석모델을 구축하였으며 전단균열로 인한 연화효과는 연화계수를 통하여 반영하였다. 최종적으로 실험 및 해석 결과의 비교분석을 통하여 각 강도 범위에 적합한 연화계수 모델을 검증하였다.

2. 철근 콘크리트 요소에 있어서의 전단전달

철근 콘크리트에 있어서의 전단전달에 대한 연구는 여러 연구자들에 의하여 해석적인 연구는 물론 실험적인 연구들이 다양하게 수행되어 왔다[13]. 특히 전단전달 분석을 위한 실험적인 연구들은 상당수가 Fig. 1과 같은 Push-off 시편에 대한 실험을 통하여 이루어져 왔으며 각각의 시험 시편에 따른 특징들도 보고되고 있다[3,4]. 다만 그림에서 Type B는 Pull-off test로 구분하여 분류될 수도 있다.

이러한 Push-off 시험체에 대한 전단전달 실험은 전단면(Shear Plane)에 대한 초기 균열을 발생시킨 경우와 발생시키지 않은 경우에 따라 그 거동이 크게 두가지로 구분된다. 전단면에 초기 균열을 발생시키지 않고 제작된 Push-off 시험체에 전단력을 가하는 경우 이의 거동은 초기 균열이 있는 경우에 비해 다르게 나타나게 된다. 전단면을 가로지르는 방향으로 전단보강 철근을 배근하고 시험체에 전단력을 가하면 일정 하중 단계에서 콘크리트에 균열이 발생하는데 이는 전단면에 경사진 방향으로 나타난다. 이에 따라 콘크리트에 압축 스트럿이 형성되고 전단보강 철근이 인장력을 부담하게 되면서 일종의 트러스 작용으로 전단력을 부담하게 된다. 따라서 이러한 시험체에 있어서의 최종 파괴는 콘크리트의 압축파괴나 전단철근의 항복에 의하여 일어나게 된다.

본 연구에서는 전단전달 거동을 분석하기 위하여 이러한 Push-off 시험체를 다양한 채택 변수에 따라 제작하고 전단전달 실험을 수행한다. 이러한 실험연구와 함께 트러스 모델을 이용한 해석적 연구의 수행을 위하여 전단면을 따라 초기 균열을 발생시키지 않은 시험체가 채택되었다.

3. 전단전달 실험

3.1. 시험체 설계 및 실험변수

시험체의 제원 및 배근 설계는 Fig. 2와 같다. 수직방향 철근은 이형철근 D16이 사용되었고 전단면을 가로지르는 방향으로 배치된 전단보강 철근은 D13이 사용되었다. 이러한 초기 균열이 없는 Push-off 시험체의 전단거동과 트러스 작용의 발생여부에 대한 분석을 위하여 Fig. 2와 같이 전단보강 철근이 배치되지 않은 시험체도 일부 제작되었다. Fig. 3은 철제 거푸집 속에 조립되어 배치된 철근을 나타내고 있다.

실험체 제작에 있어서 채택된 주요 실험변수는 콘크리트의 압축강도이다. 이와 함께 전단면을 가로지르는 전단철근의 배치여부, 전단보강 철근비 등이 실험변수로 채택되었다. 사용된 굵은 골재는 쇄석이었으며 최대치수는 19mm를 기준으로 13mm와 25mm의 골재를 사용한 콘크리트도 각각 적용되었다. Table 1은 제작된 Push-off 실험체의 시험체명과 이에 대한 설명을 나타내고 있다. 이러한 동일

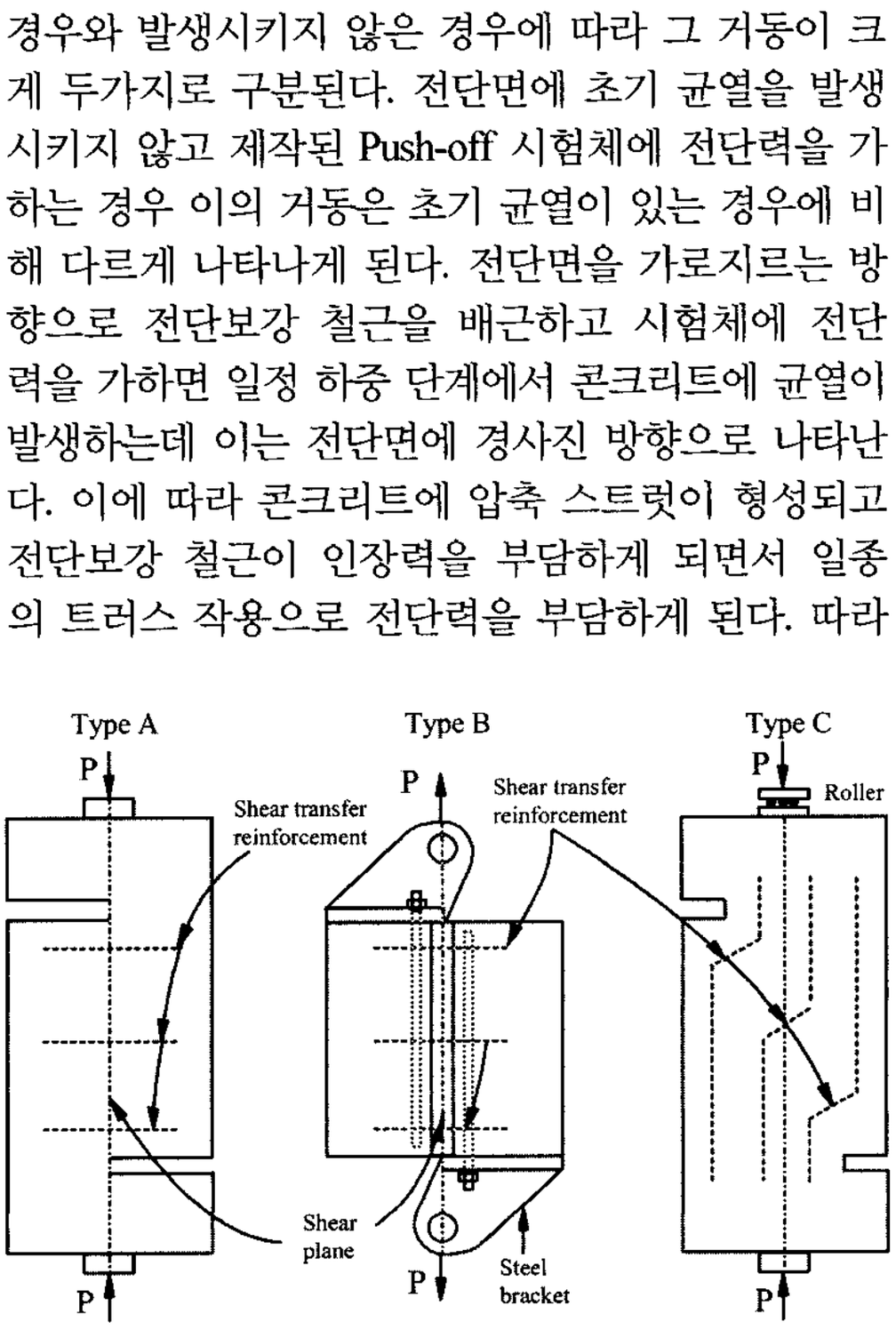


Fig. 1. Push-off test specimens.

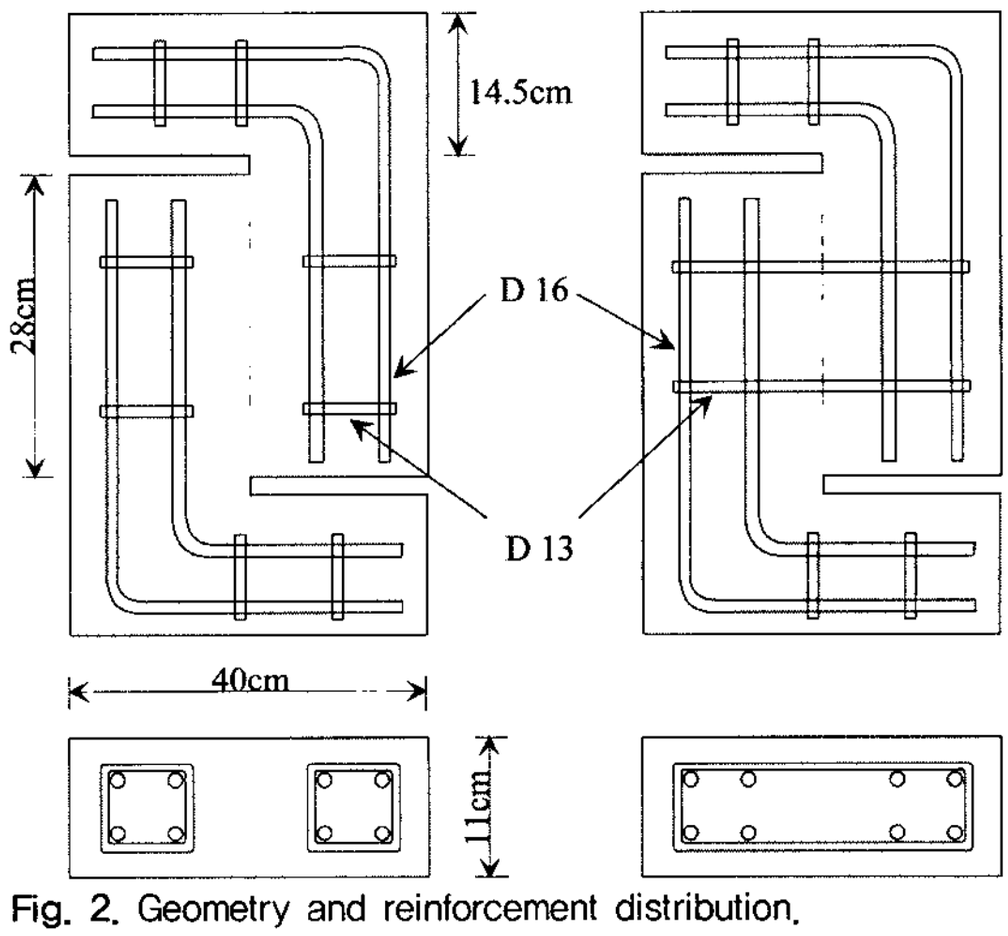
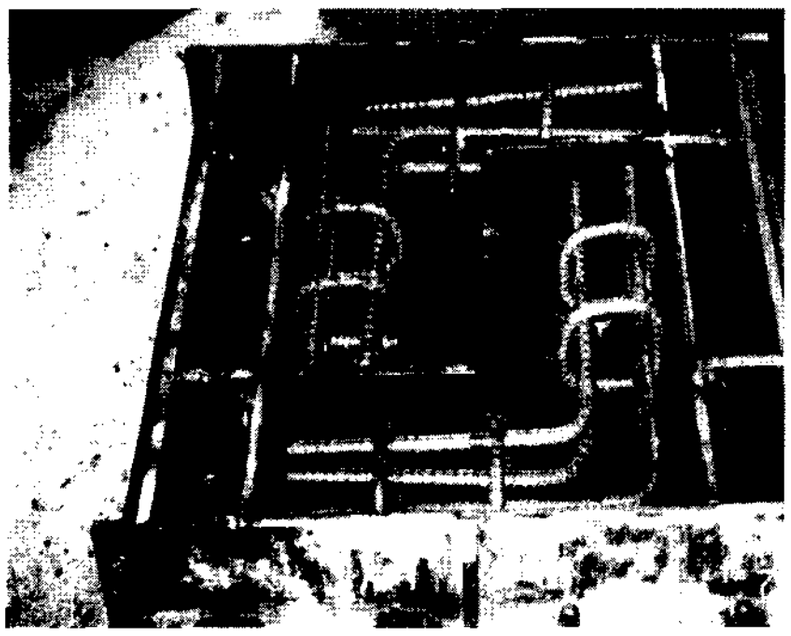
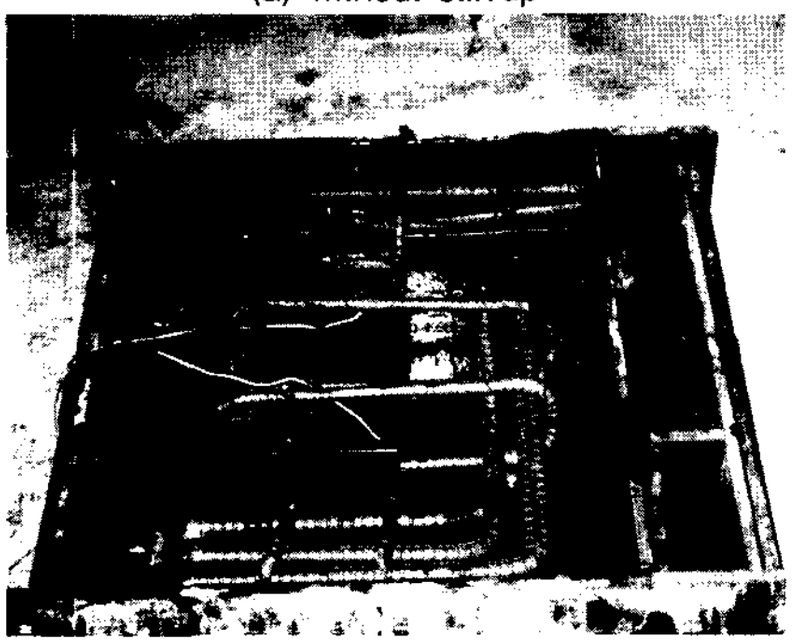


Fig. 2. Geometry and reinforcement distribution.



(a) without stirrup



(b) with stirrups

Fig. 3. Assemblage of reinforcement for specimens.

Table 1. Specimen classification

Specimen Denomination	Concrete Strength (MPa)	Max. Size of Aggregate (mm)	Reinforcement Ratio
C24A19S0	24	19	-
C40A19S0	40	19	-
C60A19S0	60	19	-
C40A19S3	40	19	0.0247
C40A19S4	40	19	0.0329
C40A19S2	40	19	0.0165
C24A19S2	24	19	0.0165
C60A19S2	60	19	0.0165

한 변수에 따라 Push-off 실험체는 각각 2개씩 제작되어 전단전달 실험이 수행되었다.

3.2. 실험재료

채택된 3가지 강도의 콘크리트에 대한 배합설계는 Table 2에 제시되어 있는데 특히 고강도 콘크리트의 경우 실리카 흄과 함께 다량의 고성능 유동화제가 첨가된다.

이에 따라 이전의 연구자에 의하여 검증, 분석된 배합설계를 채택하였으며[14] 각각의 목표 압축강도는 24MPa, 40MPa, 60MPa이다. 전단전달 실험과 함께 수행된 압축강도 측정을 위하여는 10cm × 20cm의 원형 공시체가 사용되었으며 측정된 콘크리트 압축강도는 목표 강도에 비해 평균적으로 약 5~10%가량 높게 나타났다.

Table 2. Mix proportion of concrete (kg/m^3)

Target compressive strength	24MPa	40MPa	60MPa
Water	158	168	165
Cement	351	520	468
Fine aggregate	681	715	666
Coarse aggregate	1144	918	1010
Superplasticizer	-	5.2	8.3
Silica-fume	-	-	82.5

또한 모든 시험체에는 전단면에서의 파괴를 유도하기 위하여 KS D16(공칭직경: 15.9mm) 철근을 이용하여 L형으로 보강철근을 배치하였으며 전단면을 가로질러 배근되는 철근은 KS D13(공칭직경: 12.7mm)이 사용되었다. 전단보강 철근에 대한 재료물성 실험결과, 항복강도는 360MPa, 극한강도는 540MPa로 나타났다.

3.3. 하중재하 및 측정방법

먼저 콘크리트 타설전에 전단보강 철근의 변형률 측정을 위하여 전단면과 교차하는 곳에 전기저항식 변형률 게이지를 부착하였다. 전단보강 철근은 Hoop형으로 가공되었으므로 각 시험체별로 2개의 전단철근 변형률 게이지가 부착되었다.

또한 전단변형률의 측정을 위하여 Fig. 4와 같이 콘크리트 표면에 전기저항식 변형률 게이지와 변위

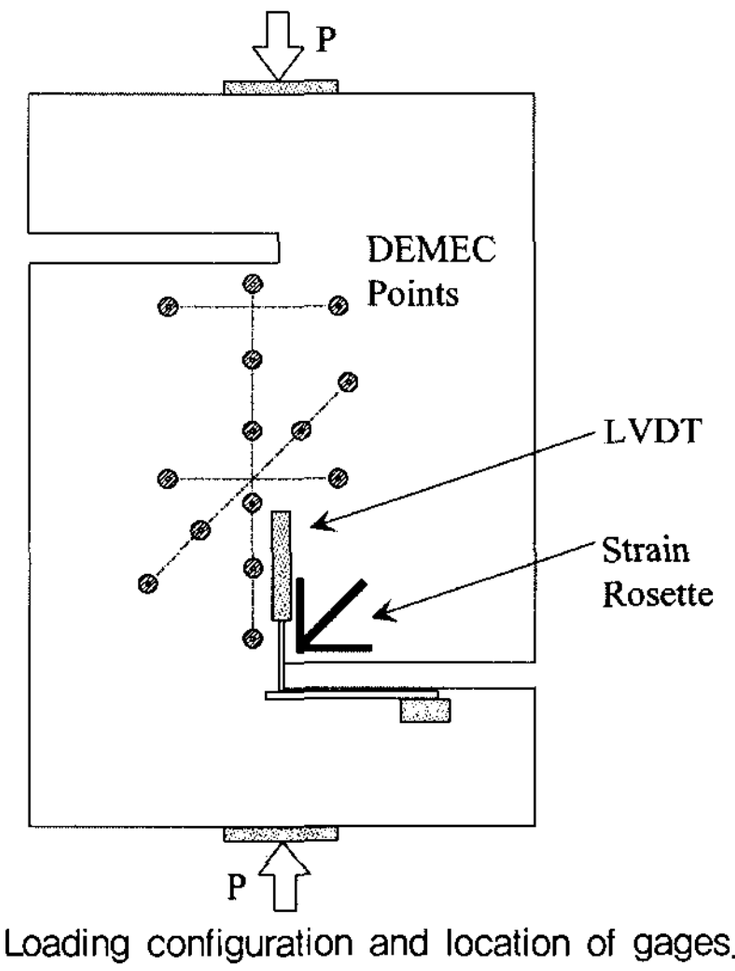


Fig. 4. Loading configuration and location of gages.

계, 그리고 DEMEC 게이지를 배치하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 3방향으로 배치된 전기저항식 게이지의 스트레인 로젯은 전단 변형률의 측정을 가능하게 한다. 그러나 콘크리트에 균열이 발생한 이후에는 이들에 의해 측정된 값들은 그 신뢰성이 크게 떨어지게 되며 국부적인 변형률만을 나타내게 되고 심지어는 균열의 통과에 따라 게이지가 손상될 가능성마저 매우 크다고 할 수 있다.

이에 따라 균열발생 이후에 있어서도 변형률 측정이 가능하도록 DEMEC 게이지의 측정점이 3방향으로 배치되었는데 전단면과 나란한 방향과 45° 방향, 그리고 전단면과 수직한 방향으로 배치되었다. DEMEC은 변형률을 기계적 방법에 의하여 측정하는 것으로 원뿔형의 두 측정점을 갖는 다이얼 게이지와 디스크로 구성된다. 표면에 부착된 디스크의 거리를 고정점과 가동점으로 구성된 게이지로 각 단계별로 측정하여 변형값을 얻게 된다. 게이지의 측정거리는 예상되는 경사균열 간격보다 크고, 또한 각각의 측정점들에 대하여 중첩하여 측정이 가능하므로 3방향의 평균변형률을 균열발생 이후에도 구할 수 있다.

이러한 평균 변형률의 개념은 전단해석 모델에서 유용하게 활용되는 것으로 일반적인 국부 변형률에 비해 균열간격보다 더욱 넓은 범위를 기준으로 측정되어야 하는 것이며 실험적으로는 몇 개의 균열을 포함할 수 있는 측정길이를 가져야 한다고 할 수 있다[15]. 수평과 수직방향으로 측정된 평균 변형률을 각각 ε_a와 ε_c, 그리고 전단면에 45°방향으로 측정된 평균 변형률을 ε_b라고 할 때 전단변형률, γ는 다음의 관계를 통하여 간단히 계산된다.

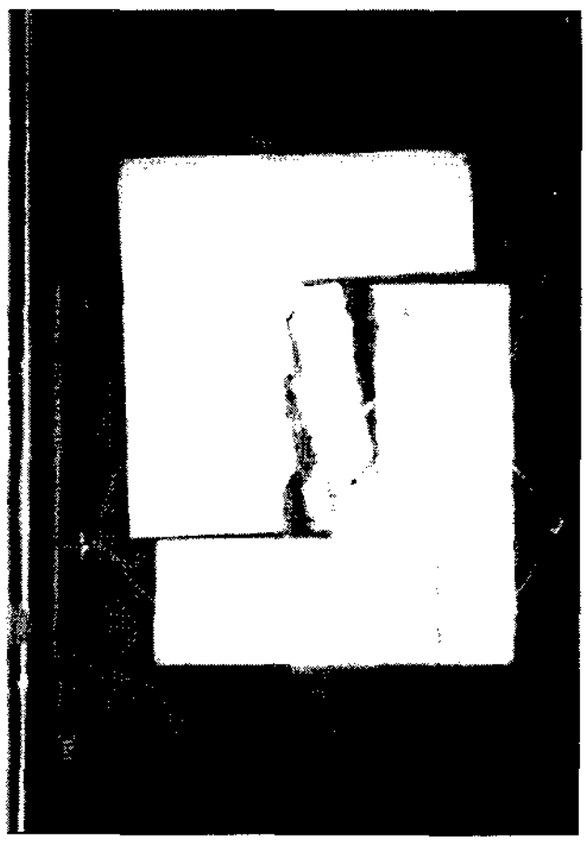
$$\gamma = 2\left[\varepsilon_b - \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c)\right] \quad (1)$$

또한 Push-off 시험체 표면에 수직방향으로 부착된 변위계에 대하여는 수평방향으로 일정한 Gage length를 주고 각각의 하중 단계에 따른 변위량을 직각방향에 대하여 측정하게 된다. 측정된 변위량과 Gage length의 비를 통하여 전단변형률을 나타낼 수 있다. 그러나 이는 DEMEC에 비하여 국부적인 전단변형률 값을 나타내는 것으로서 전체 시험체에 대한 평균 전단 변형률로 보기에는 무리가 있다. 따라서 변위계에 의한 측정값은 DEMEC Gage에 의한 전단변형률에 대한 보조 자료로서 활용되었는데 결과적으로는 전체적인 경향은 유사하게 나타났고 전단응답은 DEMEC Gage에 의한 값을 활용하여 분석되었다. 시험체는 MTS의 Loading Frame을 이용하여 1/500(mm/sec)의 비율로 변위제어 방식으로 재하되었다.

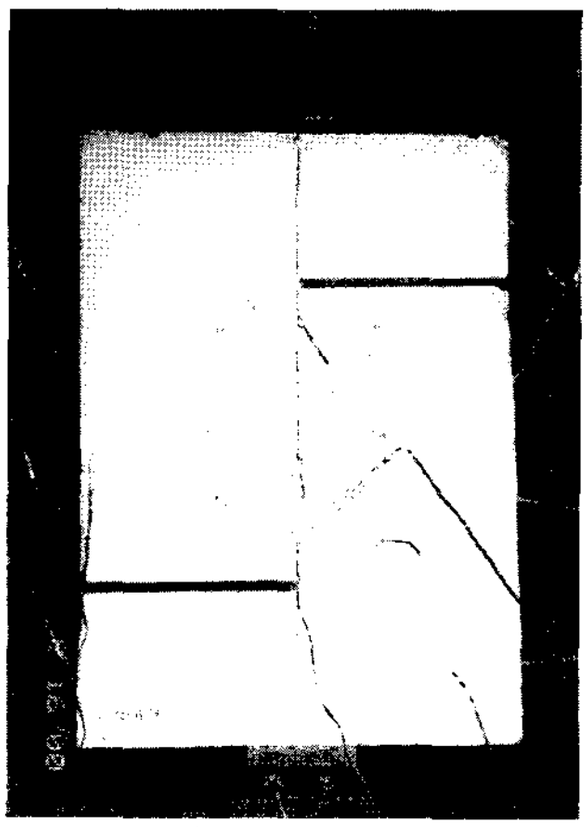
4. 실험결과 및 분석

4.1. 파괴형상

제작된 Push-off 시험체에 대한 전단시험 결과 전단면을 가로질러 보강철근이 배근되지 않은 경우와 보강된 경우에 따라 파괴모드가 크게 차이를 보이고 있다. 수직철근이 없는 C24A19S0, C40A19S0, 그리고 C60A19S0 등의 시험체는 약간의 경사균열이 발생한 직후 최대 하중에 도달하고 급작스럽게 파괴되었으며 Fig. 5(a)와 같이 완전히 두 개로 분리되었다. Fig. 6에는 이와 같이 전단보강 철근이 배근



(a) without stirrup



(b) with stirrups

Fig. 5. Specimens after failure.

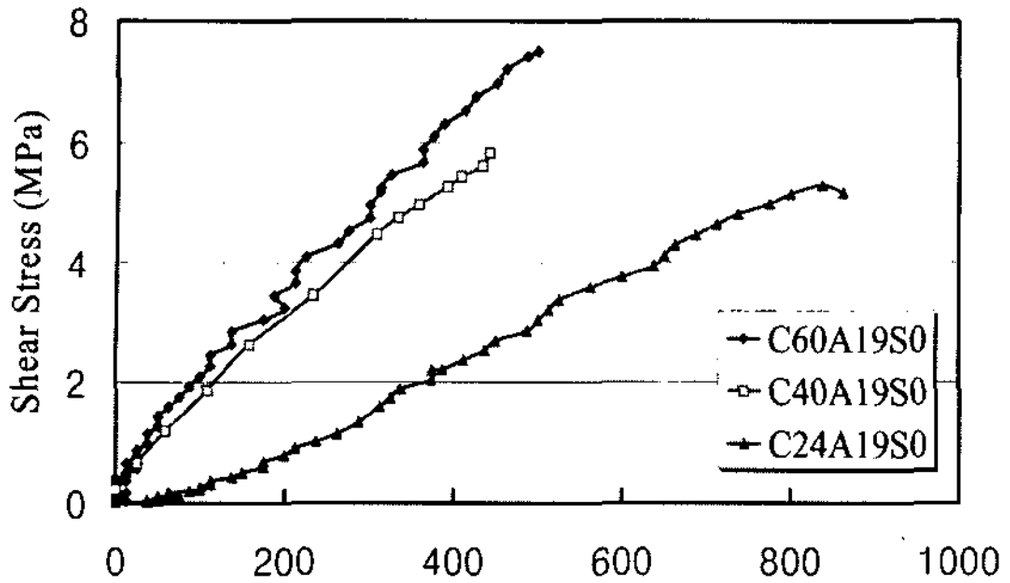


Fig. 6. Shear stress – shear strain curve(without stirrup).

되지 않은 시험체의 전단응력-전단 변형률 관계곡선이 제시되어 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중의 증가에 따라 선형적인 변형률 증가를 보이다가 최대 전단응력에 도달한 이후에는 하강영역을 보이지 않고 시험체는 완전히 파괴되었다.

그러나 전단보강 철근이 배근된 시험체는 이와는 다른 양상을 보이고 있는데 먼저 일정한 하중단계에 도달하면 전단면에 대하여 경사방향으로 균열이 발생한다. 전단력이 더욱 증가하면 균열이 좀 더 증가하며 최대하중에 도달한다.

이러한 최대하중에 도달한 이후에도 Push-off 시험체는 더욱 큰 변형을 보이면서 전단력에 저항하게 되는데 전단철근이 없는 시험체와는 달리 Fig. 5(b)에서 나타난 것과 같이 완전한 파괴를 보이지는 않는다. 따라서 이러한 전단철근이 배근된 시험체에서는 경사균열의 발생 후에 압축 스트럿이 형성되고 전단보강 철근이 인장력을 부담함으로써 트러스 작용에 의해 가해진 전단력에 저항하게 된다. 결국 이러한 Push-off 실험을 통하여 전단거동을 분석하고 트러스 이론에 의한 전단해석이 적용될 수 있다.

4.2. 콘크리트 압축강도의 영향

전단전달 실험을 위하여 제작된 Push-off 시험체의 콘크리트 강도는 각각 24MPa, 40MPa, 60MPa 이며 Fig. 7은 이러한 콘크리트 강도에 따른 전단응력-전단 변형률 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 전단보강 철근량이 동일한 경우 콘크리트의 강도 증진에 따라서 최대 전단응력은 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 고강도 콘크리트가 적용된 C60A19S2 시험체의 경우 최대 전단응력에 도달한 후 급격하게 전단응력이 떨어지고 있으며 이러한 거동양상은 고강도 콘크리트의 취성적 특성에 기인한 것으로 사료된다.

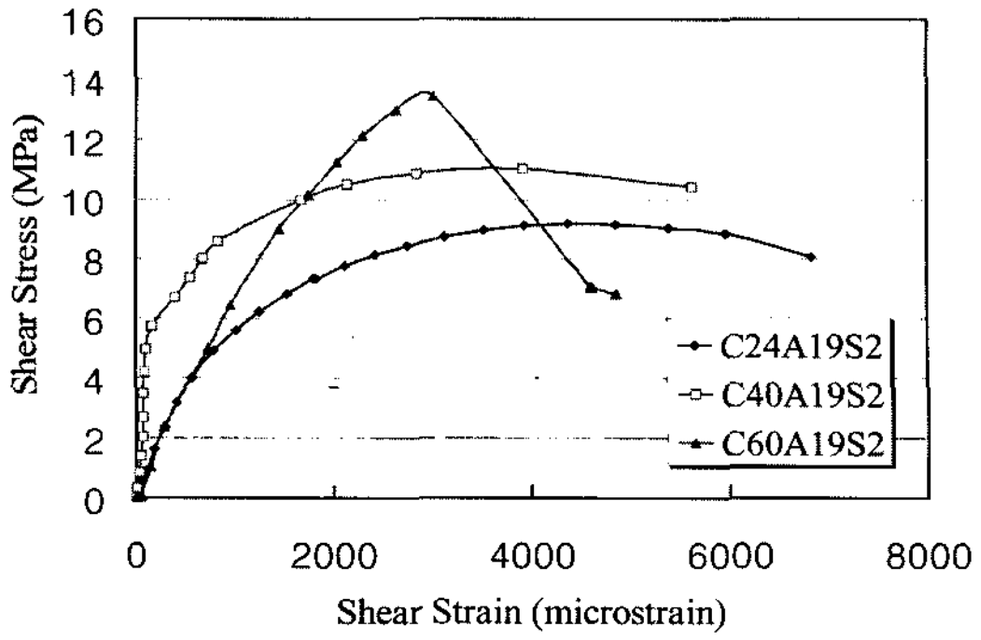


Fig. 7. Shear stress – shear strain according to concrete strength.

콘크리트의 압축강도에 따른 철근 콘크리트 요소의 전단거동 특성은 Fig. 8에 제시된 전단응력-스터럽 변형률 관계곡선에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 초기의 전단응력 단계에서는 전단보강 철근(스터럽)에 변형률이 거의 나타나지 않는다. 그러나 일정 단계의 전단응력에 도달하게 되면 전단응력-스터럽 관계 곡선의 기울기가 급격하게 변화하며 전단응력의 증가에 따른 전단 변형률의 증가율이 크게 증가하고 있음을 나타내고 있다. 즉 이러한 응력단계에서 전단면을 따라 경사균열이 발생하고 있으며 전단보강 철근이 부담하는 전단력이 커지고 있음을 알 수 있다.

그러나 콘크리트의 강도가 크다고 해서 스터럽의 변형률이 급격히 증가하는 전단응력 단계가 반드시 높은 것은 아니다. 즉 매립된 철근의 거동 특성상 균열의 위치에 따라서 그 변형률이 영향을 받을 수 있으며 비록 낮은 강도의 콘크리트에서 균열이 먼저 발생했더라도 스터럽 변형률의 변화단계는 늦게 나타날 수도 있다.

또한 이러한 전단응력-스터럽 변형률의 관계 곡선에 따르면 고강도 콘크리트를 적용한 C60A19S2

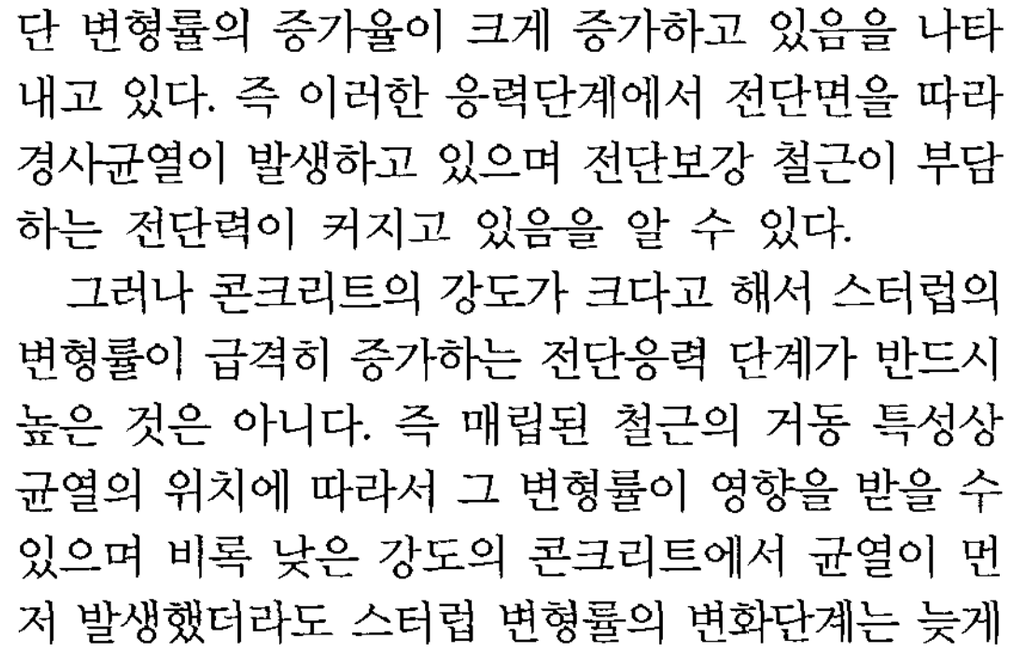


Fig. 8. Shear stress – stirrup strain according to concrete strength.

시험체의 경우 최종 응력단계에서 전단보강 철근이 이미 항복 변형률에 도달하였으며 이에 따라 시험은 종결되었다. 그러나 상대적으로 낮은 압축강도를 갖는 콘크리트를 적용한 시험체의 경우 최종 전단응력 단계에서 스터럽이 완전한 항복을 하지 않고 콘크리트의 압축파괴에 의하여 실험이 종결되었다.

4.3. 철근비의 영향

본 연구에서 분석된 Push-off 실험에서 경사균열의 발생과 함께 콘크리트가 압축 스트럿으로 작용하고 전단보강 철근이 인장을 부담하는 트러스 작용이 형성되는 것은 Fig. 9에서도 잘 나타나있다.

즉 전단면에 수직한 방향으로 배근한 전단보강 철근의 양은 다르게 한 반면(전단철근비 0.0165, 0.0247, 0.0329) 콘크리트의 배합은 동일하게 적용하였다. 이러한 강도의 콘크리트를 적용한 시험체의 경우, 전단철근의 항복보다는 콘크리트 스트럿의 압축파괴에 의하여 지배되므로 최대 전단응력의 값은 전단철근량에 관계없이 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

상대적으로 낮은 전단 철근비를 적용한 C40A19S2 시험체가 최종 단계까지 가장 큰 전단 변형률을 보이고 있으며 이러한 경향은 전단응력-스터럽 변형률 관계 곡선에서도 잘 나타나고 있다. 특히 동일한 강도의 콘크리트를 적용하였으므로 경사 균열이 발생하여 스터럽의 변형률이 급격히 증가하는 단계는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 거의 동일한 응력 단계에서 나타나고 있다.

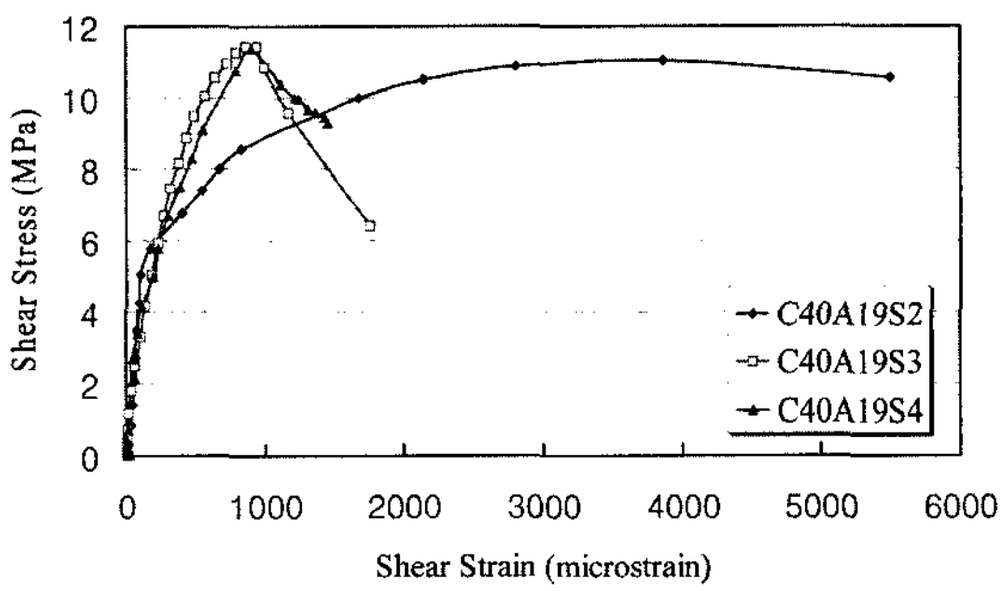


Fig. 9. *Shear stress – shear strain according to reinforcement ratio.*

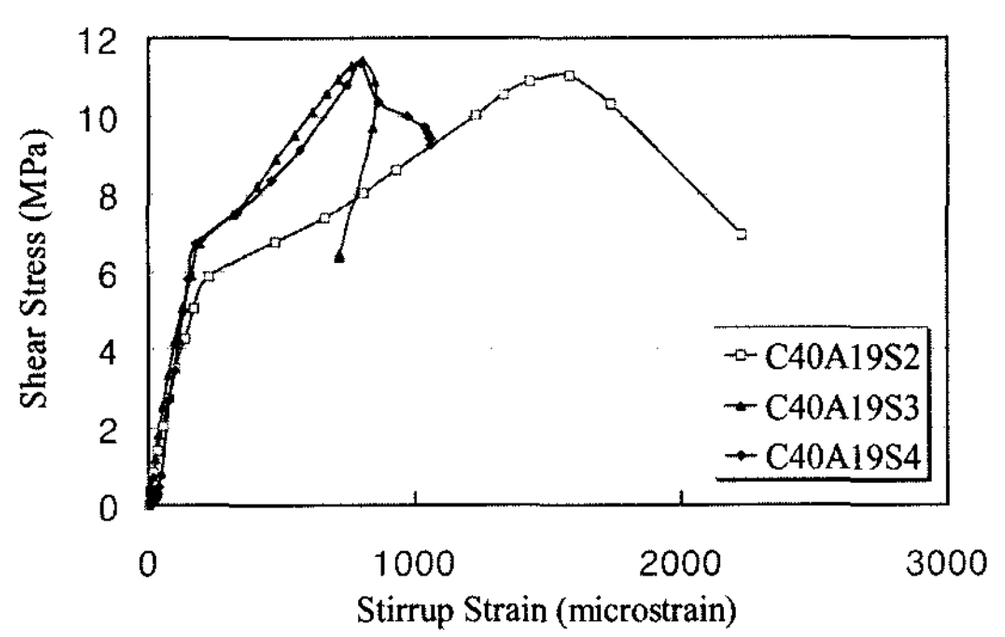


Fig. 10. Shear stress – stirrup strain according to reinforcement ratio.

ACI318에서는 최대 전단력에 대한 규정을 두고 있는데 이를 통하여 다음과 같이 최대 전단철근비를 산정할 수 있다.

$$\rho = \frac{A_v}{b_w s} \leq \frac{0.7\sqrt{f_c'}}{f_y} \tag{2}$$

위식에서 콘크리트의 압축강도 40.5MPa, 그리고 철근의 항복강도 345MPa에 대한 최대 철근비는 1.29%로 산정된다. 본 연구에서 철근비에 따른 영향을 분석하기 위하여 제작된 시험체 중에서 철근비가 2.47%, 3.29%인 C40A19S3와 C40A19S4 시험체들은 그림에서 나타난 바와 같이 철근이 항복변형률에 도달하기 전에 최대 하중에 도달하였으며 콘크리트 스트럿의 압축에 의한 파괴 양상을 나타내었다.

그러나 C40A19S2시험체의 경우에는 철근비가 1.65%로서 최대 철근비를 상회하지만 전단철근이 큰 변형률을 나타내면서 보다 완만한 파괴 양상을 나타내었다. 따라서 전단 철근에 의한 최대 전단강도의 규정은 파괴 양상의 차원에서는 추가적인 실험 및 해석연구를 통해 분석되어야 할 것이며 특히 고강도 콘크리트 구조물의 경우에는 이러한 측면에서의 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

5. 전단전달 해석

5.1. 해석모델 구성

콘크리트의 전단전달 해석모델은 트러스 이론을 이용하여 구성되었는데[10] 평형조건식과 적합조건식, 그리고 구성방정식을 만족하는 해를 찾아가는 반복연산의 과정을 거치게 된다. 이러한 해석방식은 기본적으로 수정압축장이론[6,16,17]의 방법론을 따르고 있지만, 균열이 발생한 이후의 거동 예측을 위하여 도입되는 다양한 연화계수를 도입함으로써 파괴거동 해석의 정확성을 확인하고자 하였다.

5.2. 연화계수에 따른 해석결과

균열이 발생한 콘크리트의 강도와 변형률은 1축 압축을 받는 콘크리트의 강도 및 변형률과 차이를

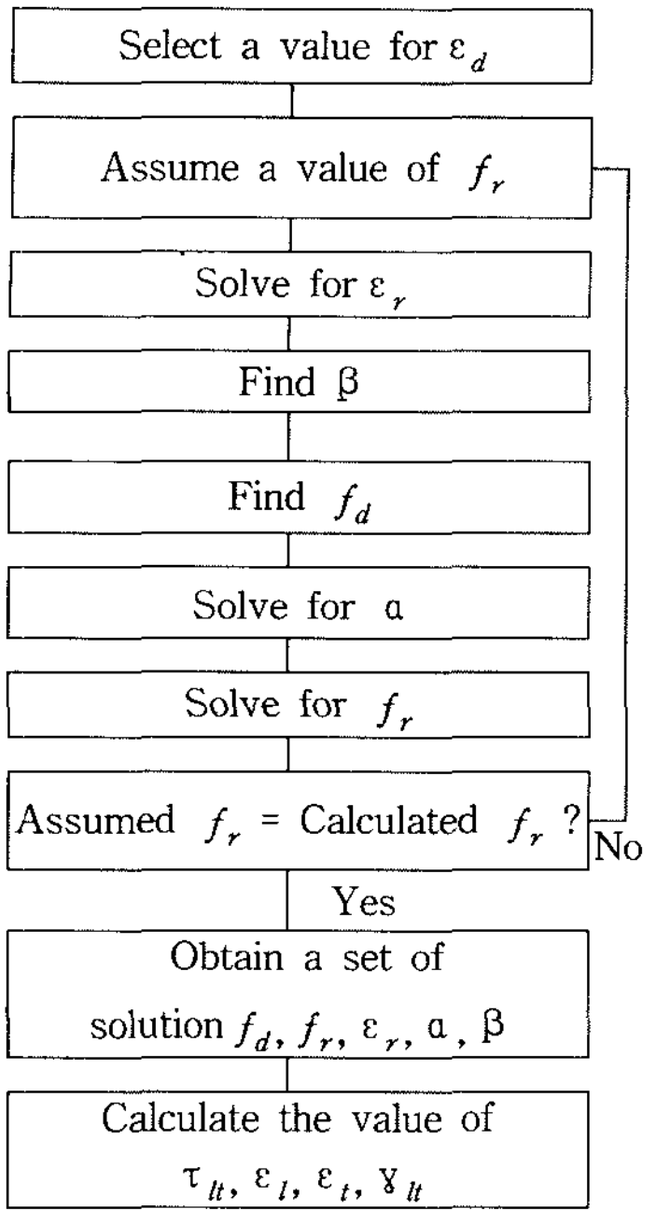


Fig. 11. Procedure to solve simultaneous equations.

여기서, ε_l, ε_t, ε_d, ε_r : normal strains
f_l and f_t : in-plane normal stresses
f_d, f_r : Compressive and tension stress
τ_{lt}, γ_{lt} : shear stress and shear strain
α : angle of inclination of strut
β : softening coefficient

보이게 된다. 이는 발생된 균열이 그 수직방향의 콘크리트 강도 및 변형률과 갖는 상관관계 때문이며 이는 연화효과(Softening Effect)로 표현된다. 이를 정량적으로 평가하는 것이 연화계수의 개념이며 전단균열 발생에 따른 연화계수는 실험과 분석을 통하여 많은 학자들이 제시하고 있는데 해석과정에 반영한 모델은 다음과 같다.

Vecchio and Collins Model A

$$\beta = \frac{1}{0.85 + 0.27\varepsilon_1/\varepsilon_2} \quad (3)$$

Vecchio and Collins Model B

$$\beta = \frac{1}{0.80 + 0.34\varepsilon_1/\varepsilon_o} \quad (4)$$

Hsu and Zhang

$$\beta = \frac{0.9}{\sqrt{1 + K_\sigma \varepsilon_1}} \quad (5)$$

where K_σ = 400 for proportional loading
K_σ = 250 for sequential loading

Gambarova et. al,

$$f_c = 0.75 f_c' \quad (6)$$

여기서 ε_1, ε_2는 각각의 Principal strain을 나타내며 ε_0는 콘크리트의 peak strain이다. 이상의 제안된

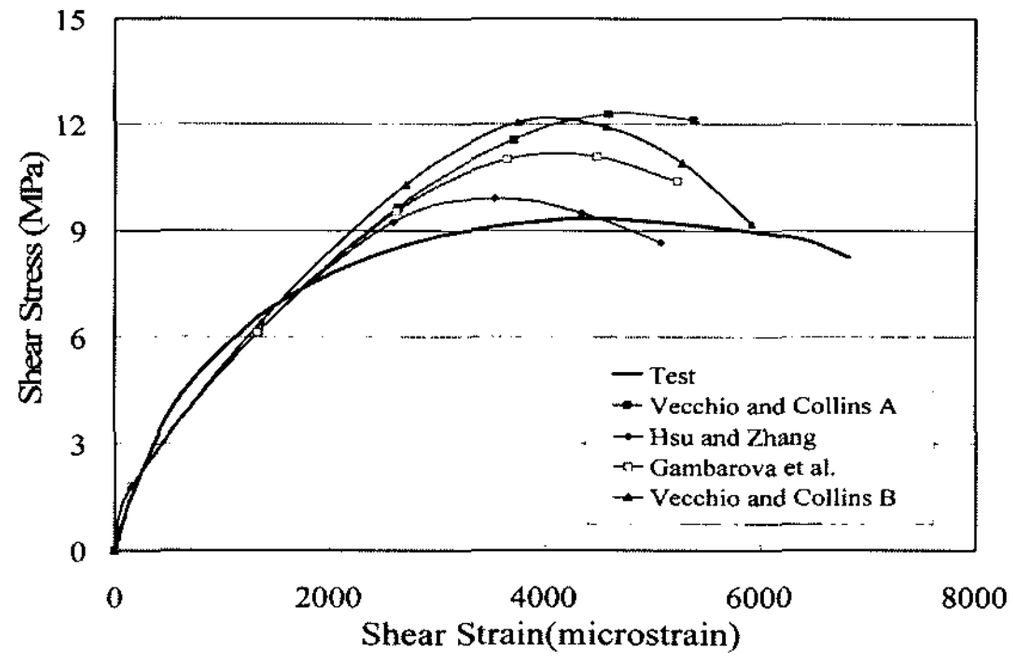


Fig. 12. Effect of softening parameters on shear behavior (C24A19S2).

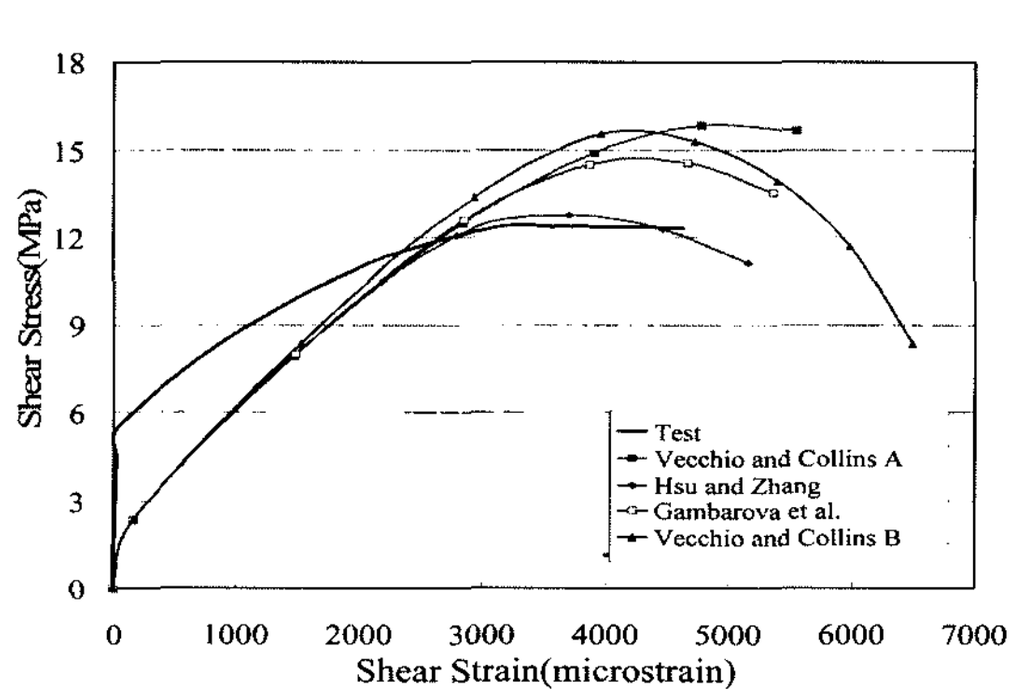


Fig. 13. Effect of softening parameters on shear behavior (C40A19S2).

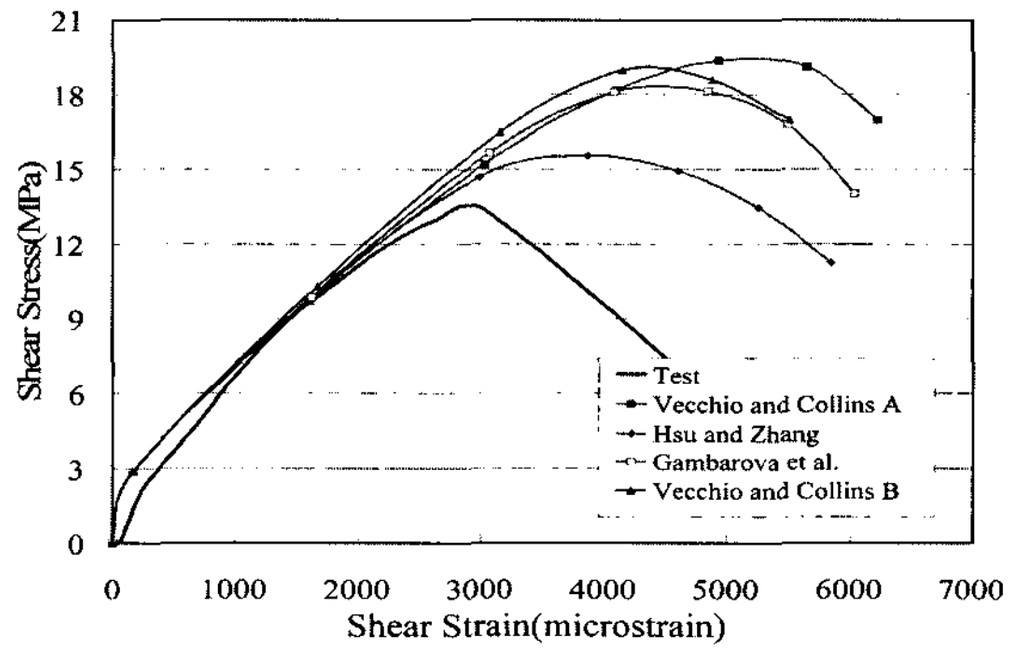


Fig. 14. Effect of softening parameters on shear behavior (C60A19S2).

연화계수를 토대로 해석모델을 구축하여 전단전달 해석을 수행한 결과는 Fig. 12~14에 각각 제시되어 있다.

특히 연화거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 예상되는 콘크리트 강도를 중심으로 해석결과를 분석한 결과 Hsu and Zhang의 모델이 비교적 정확하게 보통강도와 고강도의 전단거동을 예측하고 있는 것으로 판단된다. 연화계수의 도출과 검증은 매우 번거롭고 복잡한 실험과정을 필요로 하지만 본 연구에서 수행한 바와 같이 전단전달 실험과 해석을 통해서 분석이 가능하다.

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 전단거동 해석을 위한 기초 연구로서 전단전달에 대한 실험적인 분석을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도와 전단철근비 등이 실험변수로서 채택되었으며 트러스 이론의 적용이 가능하도록 Push-off 시험체를 제작하여 전단거동 실험을 수행하였다. 특히 기존의 전기 저항식 게이지는 국부적인 변형률을 측정함으로써 균열 이후에 있어서의 응답이 신뢰성을 갖지 못하므로 트러스 이론의 평균 변형률을 실험적으로 측정하였다.

3방향으로 배치된 DEMEC 게이지의 측정점들은 평균 개념의 전단변형률 측정이 균열발생 이후에도 가능하도록 하였으며 그 신뢰성은 표면에 부착된 변위계를 통하여도 검증되었다. 이를 통하여 전단실험의 결과는 전체적으로 전단응력과 전단변형률 관계를 통하여 직접적으로 분석되었다.

전단면을 따라 보강철근이 배치된 Push-off 시험체의 경우 경사균열의 발생과 함께 콘크리트 압축스트럿이 형성되고 철근이 인장을 부담하는 트러스 작용이 나타났으며 철근은 경사균열의 발생 이전과 이후에 있어서 전단응력을 부담하는 비율이 크게 변화되었다. 전단 철근비가 동일한 경우에 있어서 고강도 콘크리트를 적용한 시험체의 경우 전단철근의 항복에 의하여 최종 파괴에 도달하였지만 보통강도 콘크리트를 적용한 경우에는 전단 철근의 항복이 관찰되지 않고 콘크리트 압축스트럿의 파괴에 의해 최종 응력단계에 도달하였다. 이는 콘크리트 스트럿에 의한 압축저항과 전단철근의 타이에 의한 인장저항에 따른 트러스 거동의 파괴 모드를 나타내는 것이다.

이와 함께 수정압축장이론을 토대로 전단전달 해석 모델을 구축하였으며 콘크리트 균열거동의 핵심적 요소인 연화계수를 주된 해석변수로 수치해석을 수행하였다. 전단전달에 대한 해석 결과는 콘크리트의 강도를 비롯한 연화계수의 적용범위와 정확성을 분석하는데 유용한 수단이 될 수 있다.

참고문헌

1) Mattock, A. H., Alan, H., Johal, L. and Chow, H. C., "Shear Transfer in Reinforced Concrete with Moment or Tension Acting Across the Shear Plane", PCI Journal, Vol. 20 No. 4, pp. 76~93, 1975.
2) Mattock, A. H., Alan, H., Li, W. K. and Wang, T. C., "Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete", PCI Journal, Vol. 21 No. 1, pp. 20~39, 1975.
3) Mattock, A. H. and Hawkins, N. M., "Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research", PCI Journal, March-April, pp. 55~75, 1972.
4) Mattock, A. H. and Wang, Z., "Shear Strength of Reinforced Concrete Members Subjected to High Axial Compressive Stress", ACI Journal May-June, pp. 287~298, 1984.
5) Valle, M. and Buyukozturk, O., Shear Transfer in Fiber Reinforced Concrete Research Report R91- 07 Massachussetts Institute of Technology, pp. 124, 1991.
6) Walraven, J. C., "Fundamental Analysis of Aggregate Interlock", ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 107, No. ST11, pp. 2245~2270, 1981.
7) Walraven, J.C., "Shear Friction in High-Strength Concrete", Progress in Concrete, Vol. 4, pp. 57~65, 1995.
8) Pruijssers, A. F., "Theoretical and Experimental Analysis of the Behaviour of Cracked Concrete under Monotonic and Cyclic Shear Loading", Heron Vol. 33 No. 4, pp. 72, 1988.
9) Frenay, J. W., "Theory and Experiments on the Behaviour of Cracks in Concrete Subjected to Sustained Shear Loading", Heron Vol. 35 No. 1, pp. 80, 1990.
10) 김광수, 오병환, 이종훈, 한승환, "보통강도 및 고강도 콘크리트의 전단전달", 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 585~590, 2001.
11) 홍성걸, 하태훈, "RC 부재 균열면에서의 전단력 전달에 관한 고찰", 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 527~532, 2000.

12) 홍성걸, 하태훈, "철근 콘크리트 보의 전단마찰 모델", 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 873~878, 2000.
13) Park, R. and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, 1975.
14) Hong, K. O., Shear Strength and Shear Fatigue Analysis of Reinforced Concrete Beams according to Shear Reinforcement Ratio and Concrete Compressive Strength Ph.D. Dissertation, Seoul National University, pp. 217, 1999.
15) Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory", ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 4, May-June, pp. 258~268, 1988.
16) Collins, M. P. and Mitchell, D., Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, 1991.
17) Collins, M. P., Mitchell, D., Adebar, P. and Vecchio, F. J., "A General Shear Design Method", ACI Structural Journal, Vol. 93 No. 1, Jan.-Feb., pp. 36~45, 1996.