

Carbon FRP Grid로 휨 보강한 철근콘크리트 슬래브의 파괴형태와 설계기준

박상열 ^{1)*} · 최 현 ¹⁾

¹⁾ 제주대학교 토목해양공학과

(2004년 6월 15일 원고접수, 2004년 9월 15일 심사완료)

Failure Mode and Design Guideline for Reinforced Concrete Slab Strengthened Using Carbon FRP Grid

Sang-Yeol Park ^{1)*} and Cui Xian ¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Cheju National University, Cheju, 630-756, Korea

(Received June 15, 2004, Accepted September 15, 2004)

ABSTRACT

This paper presents the failure mode and strengthening design of reinforced concrete slab strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) grid. Parameters involved in this experimental study are FRP grid reinforcement quantity, repair mortar thickness, the presence of anchor, and strengthening in compression. In this study, there are different failure types with increasing the CFRP grid strengthening reinforcement. On the low strengthening level, CFRP grid in repair mortar cover ruptures. On the moderate strengthening level, there is a debonding shear failure in the interface of carbon FRP grid because of the excessive shear deformation. On the high strengthening level, diagonal shear failure occurs. With the increasing of FRP grid reinforcement, the strengthening effect increased, but the ductility decreased. By limiting the strengthening level, it can be achieved to prevent shear failure which result in sudden loss in the resisting load capacity. CFRP rupture failure is desirable, because CFRP ruptured concrete slab keeps the same load capacity and ductility having before strengthening even after failure. Finally, design guideline and procedure are given for strengthening of concrete slab with CFRP grid.

Keywords : strengthening, carbon FRP grid, slab, ductility, anchor

1. 서 론

구조물의 보강은 실제 사용하중에 대한 안전성과 사용성, 그리고 구조물의 내구성을 증대시키기 위한 목적으로 현실 여건에 맞는 경제적인 보강재료의 선택과 효과적인 설계법이 요구된다. 현재 콘크리트 구조물의 보강에 사용되는 Fiber Reinforced Polymer(FRP) 재료는 주로 쉬트(sheet), 판(plate) 그리고 격자(grid) 등의 형태이다. 이중 FRP 쉬트나 판을 이용한 보강의 경우는 일정 수준의 내하력 증가효과를 가져오는 것으로 나타나고 있으나 파괴형태가 주로 보강재의 단부 박리파괴(rip-off failure), 부착파괴(debonding failure)등으로 이러한 파괴는 보강재가 재료의 역학적 성능을 최대한 발휘하지 못하고 조기 파괴

되는 형태로 경제적인 측면이나 구조역학적인 측면에서 바람직하지 못하다. 이러한 보강 구조체의 예기치 못한 취성적인 파괴는 신뢰성 있는 보강 내하력 예측을 어렵게 하고 있다. 특히, FRP 부착공법을 콘크리트 슬래브에 적용할 경우 FRP 쉬트 부착공법은 시공 소홀로 콘크리트와 섬유쉬트 혹은 쉬트와 쉬트 사이에서 함침 부실로 접착력이 현저히 떨어지는 결함을 가지고 있다. 또한, FRP 판 부착공법은 콘크리트 슬래브에 적용할 경우 띠(strip) 형태로 부착면적이 작아 콘크리트에 과도한 부착력을 발생시켜 조기 파괴를 유발하고 있다.

따라서, 최근에 기존의 부착공법 보강 재료인 쉬트나 판과는 다른 형태인 격자형태의 FRP를 이용한 콘크리트 구조물의 보강이 현장에 적용되고 있으며 이에 대한 연구도 일부 소개되고 있다.^{2-6,8)} 그러나 격자형 FRP 보강공법의 경우는 주로 일본과 유럽 등지에서 개발되어 사용되어진 공법으로 아직 국내에서는 이에 대한 연구가 충분하지 못

* Corresponding author
Tel : 011-9663-2058
E-mail : sympark@cheju.ac.kr

한 실정이다. 이에 본 연구에서는 격자형 FRP로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 역학적 거동과 파괴형태를 실험연구를 통하여 파악하고자 한다. 실험에서 사용한 시험편자는 FRP 격자보강재의 양, 보강 모르타르의 두께(유효 깊이), 앵커의 유무, 압축부 보강 등이다. 또한 실험연구에서 얻은 실험결과를 바탕으로 조기 파괴를 방지하면서 보강효과를 증대시키며 연성을 증가시킬 수 있는 보강설계 기준을 제시하고자 하였다.

2. 실험연구

2.1 실험계획

본 실험연구에서 사용된 시험체의 제원 및 하중 재하도는 Fig. 1에 나타내고 있다. 철근콘크리트 슬래브 기준 시험체의 단면치수 및 배근상세는 그림에서 보는 바와 같이 단면 크기는 450×150 mm이고, 순 지간길이는 1.8m이다. 철근배근의 경우 콘크리트구조설계기준⁶⁾에 따라 휨에 대하여는 저 보강 슬래브로 인장측에 최대 철근비의 약 40%인 SD40 D10 철근 5개를 배근하고 압축철근은 배근하지 않았다. 스테럽에 의한 전단보강은 일반적인 슬래브에 서처럼 실시하지 않았으며 콘크리트 만에 의해 전단을 저항하는 것으로 설계를 하였다.

Table 1에서는 사용된 재료의 역학적 성질을 나타내고 있다. 콘크리트는 레미콘(ready-mixed concrete)을 사용하여 제작하였는데 설계 압축강도는 24.0 MPa, 굽은골재의 최대치수는 25 mm이다. 시험체 제작 시 현장에서 측정된 슬럼프는 140 mm이었고 실험 시 측정된 원주형공시체의 평균압축강도는 28.5 MPa이었다.

Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) 격자¹⁾의 경우는 공칭인장강도가 1,400 MPa인 C4, C6, C8인 제품을 사용하였고 장방형 grid 한개의 크기는 각각 2.5 x 2.7 mm (6.6 mm²), 4.0 x 4.4 mm(17.5 mm²), 5.0 x 5.3 mm(26.4 mm²) 이고 격자의 간격은 50 x 50 mm 이다. 본 격자 탄소섬유 부착공법¹⁾에서 사용된 모르타르는 물과 접착 증강제를 혼

합하여 만든 폴리머모르타르로 일반 시멘트보다 압축강도와 인장강도, 부착강도가 월등한 특수시멘트를 사용하였다. 접착증강제로는 초미립자 타입의 아크릴 에멀션으로 보강부위의 콘크리트 표면에 도포하거나 마감 모르타르의 혼화제로 사용하여 신구콘크리트 접착력 증강 및 마감재의 부착강도, 압축강도의 개선효과가 우수한 재료인 리포텍스를 사용하였다.

2.2 시험변수

각 시험체의 변수는 CFRP grid 보강재의 보강량, 보강 모르타르의 두께(grid의 유효 깊이), 앵커의 유무, 그리고 보강위치(인장부 혹은 압축부)를 선택하여 전체 7개의 변수로 각각 2개씩 제작하여 총 14개의 시험체를 제작, 시험하였다. Table 2는 시험체의 변수 및 그 상세내용을 나타내고 있다. RS 시험체는 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체로서 다른 슬래브들과 비교될 수 있도록 하였다. 휨 부착 길이와 관련한 격자섬유의 길이는 동일하게 전지간의 0.9L로 보강을 하였고 폴리머모르타르의 두께는 각각 2T (20 mm), 4T(40 mm)로 선택하였다.

2.3 실험

하중재하는 앞의 Fig. 1에서 보인 바와 같이 4점 재하법으로 지간 중앙에 300 mm이 간격으로 2점에서 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압 하중기를 사용하여 파괴 시까지 정적하중으로 재하 하였다. 하중은 변위조절법으로 분당 약 1.5 mm의 속도로 재하 하였으며 10 KN마다 균열을 표시하고 사진을 촬영하였으며, 완전 파괴 시 까지 재하 하여 최종 파괴형태를 확인하였다. 시험 데이터 수집은 동적변형률측정기를 이용하여 컴퓨터 데이터 수집 프로그램을 이용하여 하중, 처짐, 철근의 변형률, 콘크리트의 변형률, 격자섬유의 변형률을 측정하였다.

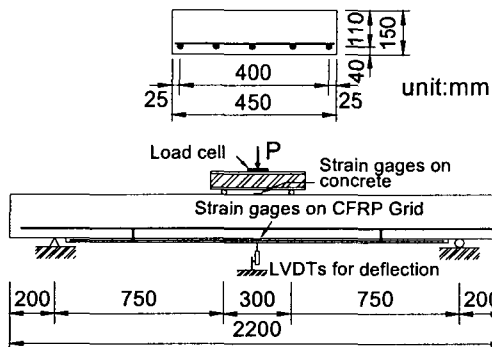


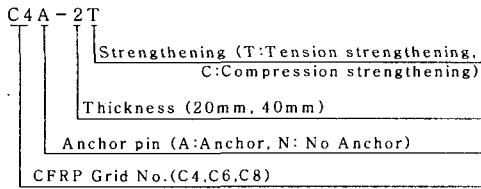
Fig. 1 Dimensions and loading arrangement of test slab

Table 1 Physical properties of material

Material	Property	
Concrete	Compressive strength(MPa)	28.5
	Reinforcing bar (D10)	
	Yield strength(MPa)	420
	Ultimate strength(MPa)	634
	Elastic modulus(MPa)	2.0×10^5
CFRP grid (C4, C6, C8)	Tensile strength(MPa)	1400
	Elastic modulus(MPa)	1.00×10^5
	Maximum tensile strain(%)	1.4
Repair mortar	Bond strength(MPa)	1.7
	Compressive strength(MPa)	37
	Bending strength(MPa)	6.9
	Tensile strength(MPa)	2.0

Table 2 Details of test slabs

Slab I.D	CFRP grid, mm ²	Anchor pin	Mortar depth(grid depth), mm	Location
R S	-	-	-	-
C4A-2T	52.8	Used	20(155)	Tension
C6A-2T	140.0	Used	20(155)	Tension
C8A-2T	211.2	Used	20(155)	Tension
C6N-2T	140.0	Unused	20(155)	Tension
C6N-4T	140.0	Unused	40(175)	Tension
C6N-2C	140.0	Unused	20(155)	Compression



3. 실험결과 및 분석

Table 3은 각 시험체의 실험결과를 정리한 것이다. 여기서 연성계수는 항복하중시의 처짐(δ_y)과 최대하중시의 처짐(δ_{max})과의 비로 나타내었다. 각 시험체의 파괴형태는 시험 시 콘크리트 균열의 발생과 진전, CFRP 격자섬유의 파단여부, 슬래브 콘크리트와 보강 모르타르의 분리, 그리고 콘크리트와 CFRP 격자섬유에 부착된 변형률게이지와 변위계의 값을 참고로 하여 각 시험체의 파괴 과정과 최종파괴 형태를 결정하였다.

3.1 시험변수의 영향

3.1.1 CFRP grid의 보강량

Fig. 2는 CFRP 격자 보강량을 달리하는 시험 슬래브 RS, C4A-2T, C6A-2T, C8A-2T의 하중과 처짐 관계를 나타낸 그래프이다. 하중-처짐도에 나타난 바와 같이 아무런 보강이 없는 기준 시험 슬래브 RS는 인장철근의

항복 이후 상당량의 처짐을 발생시킨 후 압축 부 콘크리트가 파괴되는 전형적인 인장파괴 형태를 보였다.

가장 작은 보강량을 가진 시험체 슬래브 C4A-2T의 측면 균열양상과 분포는 RS 시험체와 유사하였으나 슬래브 하면의 균열의 모양은 상이하였다. 즉, 시험체 RS에서는 균열이 일직선으로 나타나지는 않았으나 시험체 C4A-2T에서는 CFRP 격자섬유의 영향으로 직선적으로 분포하였다. 철근 항복시의 하중은 RS 시험체 보다 오히려 작게 나타났지만 이는 국부적인 변형 증가나 시공 및 측정 오차에 의한 영향으로 추측되며 철근 항복 후에는 CFRP 격자섬유에 의한 저항력으로 하중이 증가하였다. 시험체 슬래브 C4A-2T는 최종적으로 CFRP 격자 보강재의 파단에 의해 파괴 되었는데 격자섬유의 파단은 1개의 섬유가 파단을 한 후 2차 격자섬유가 파단하고 이후 나머지의 격자섬유가 일시에 파단 되었다. CFRP 격자섬유의 파단에 의한 파괴형태를 갖는 시험체는 격자섬유 파단 후에도 최소한은 보강하지 않는 시험체의 극한저항강도와 극한처짐을 가졌다. Fig. 3은 C4A-2T 시험체의 CFRP 격자섬유의 파단에 의한 최종파괴 모습을 보여주고 있다.

시험체 C4A-2T 보다 증가된 CFRP 격자 보강량을 갖는 시험체 슬래브 C6A-2T는 철근 항복 전까지는 RS 시험체와 유사한 거동을 나타내었으나 철근 항복 후에는 격자섬유의 인장 저항력으로 인하여 하중 저항력이 보강량의 증가에 따라 증가되었다. 시험체 C6A-2T의 파괴는 철근 항복 후 하중이 증가하다 갑작스런 전단균열의 발생과 확대로 전단파괴 되었다. 즉, 전단균열의 갑작스런 확대로 전단균열이 CFRP 격자 보강재 면에서 수평으로 진전되어 분리되는 파괴를 보였다. Fig. 4는 C6A-2T 시험체의 계면 전단파괴의 모습을 보여주고 있다.

한편, 기존 콘크리트 슬래브 하면과 보강 모르타르의 접촉면에서는 어떠한 수평균열도 발생하지 않아 보강 모르타르와 기존 콘크리트와의 부착강도는 본 공법을 적용하는데 있어서는 문제가 없을 것으로 생각된다.

Table 3 Test results of test beams

Test slabs	Cracking load(KN)	Yield state		Ultimate state		Ductility index	Failure mode
		Load(KN)	Deflection(mm)	Load(KN)	Deflection(mm)		
RS	13.5	39.2	8.5	54.0	71.0	8.4	Yielding-Compression failure
C4A-2T	16.8	36.6	7.7	65.4	41.4	5.6	CFRP rupture
C6A-2T	18.0	55.2	10.0	94.5	33.0	3.3	Debonding shear failure
C8A-2T	18.8	59.0	8.6	95.6	28.9	3.4	Diagonal shear failure
C6N-2T	20.3	54.8	7.5	86.2	23.2	3.1	Debonding shear failure
C6N-4T	24.4	66.4	6.7	103.9	20.7	2.6	Diagonal shear failure
C6N-2C	17.7	42.3	8.0	53.0	100.0	12.5	Debonding-Compression failure

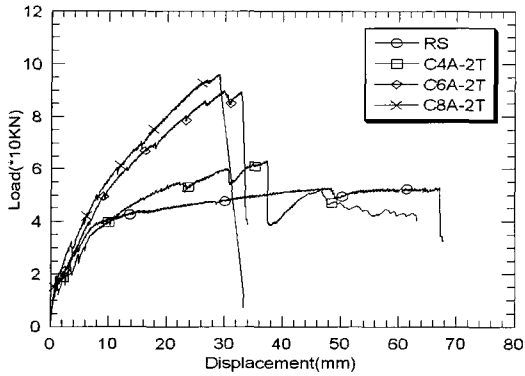


Fig. 2 Load-deflection curves with different CFRP grid reinforcement

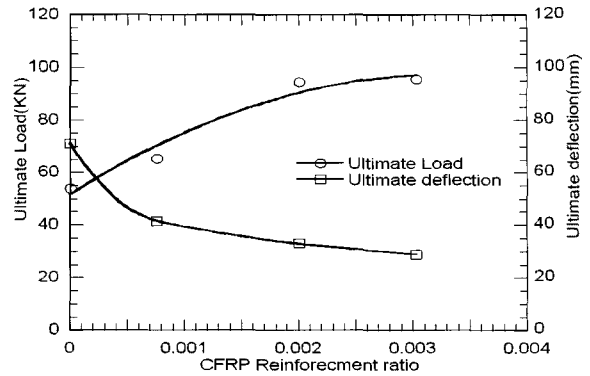


Fig. 6 Ultimate load and deflection with different CFRP reinforcement ratio

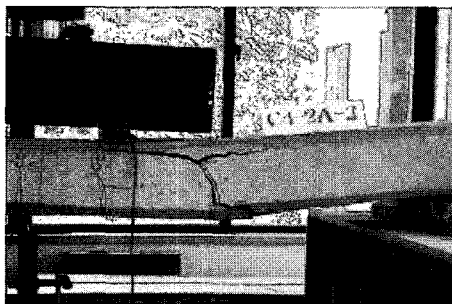


Fig. 3 CFRP grid rupture failure

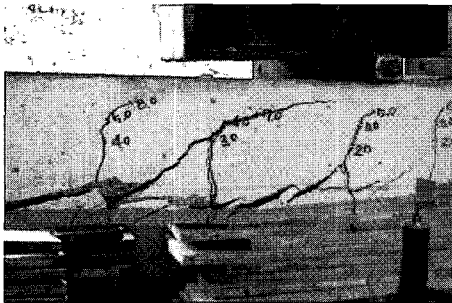


Fig. 4 Debonding shear failure



Fig. 5 Diagonal shear failure

CFRP 격자 보강량이 가장 많은 시험 슬래브 C8A-2T는 전술한 시험체들과 초기균열 발생은 비슷하였으며 다만 보강량이 큰 영향으로 균열 발생이 지점 쪽으로 확장되어 갔다. 철근 항복 후에는 시험체 C6A-2T와 비슷한 거동을 보이다가 갑작스런 사인장균열의 발생과 확대로 전단파괴 되었다. Fig. 5는 시험체 C8A-2T의 사인장전단 파괴를 보여주고 있다.

Fig. 6은 각 시험체의 보강량과 단면 상단에서부터 CFRP grid 위치까지의 근입 깊이를 이용하여 보강비를 계산하였다. CFRP 격자섬유의 보강량의 영향을 살펴보면 보강량의 증가에 따라 극한저항력은 증가되며 극한 처짐량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편, 보강량의 증가에 따라 파괴형태도 다르게 나타났는데 이는 휨보강에 따른 전단보강 효과가 미미하기 때문으로 인장파괴에서 계면 전단파괴, 사인장전단파괴 등으로 변화되었다.

3.1.2 보강 모르타르의 두께

Fig. 7은 폴리머보강모르타르의 두께를 달리한 시험체 RS, C6N-2T, C6N-4T를 비교한 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 여기서 보강 모르타르의 증가는 CFRP 격자 보강재의 유효높이의 증가를 의미한다.

시험 슬래브 C6N-4T는 시험체 C6A-2T와 동일한 CFRP 격자섬유 보강량을 가지고 보강두께만을 20mm에서 40mm로 증가시킨 경우로 이는 20mm의 CFRP 보강재의 유효높이의 증가를 가져오고 있다. 시험체 C6N-4T는 보강 모르타르의 두께 증가로 단면2차 모멘트의 증가로 인해 균열하중이 증가하고, 유효높이의 증가로 인해 단면저항력에 있어서 모멘트 팔의 증가를 가져와 항복하중과 극한하중이 증가하였다. 한편, 극한처짐에 있어서는 거의 비슷하여 20mm 정도의 유효높이 증가는 연성에는 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

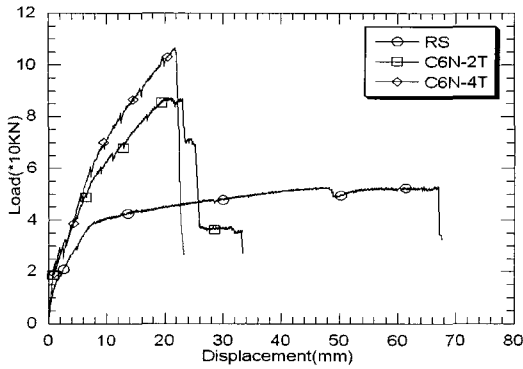


Fig. 7 Load-deflection curves with different mortar thickness

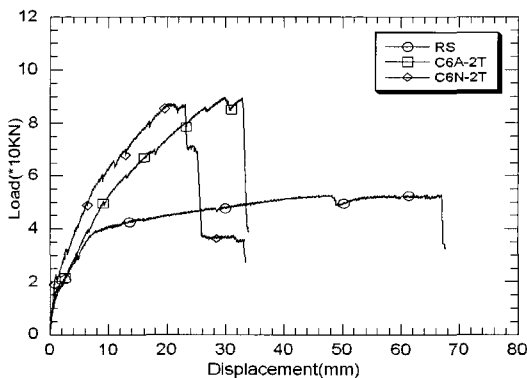


Fig. 8 Load-deflection curves with the presence of anchor pin

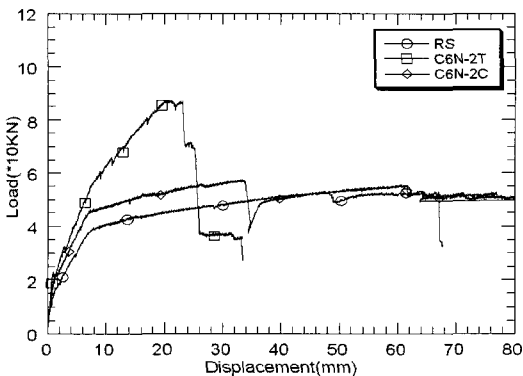


Fig. 9 Load-deflection curves with the strengthening of compression

시험체 C6N-2T의 최종 파괴형태는 C6A-2T와 같은 계면전단파괴를 나타냈으며 시험체 C6N-4T는 시험체 C8A-2T와 같은 사인장전단파괴를 보였다.

3.1.3 Anchor pin의 역할

원래 앵커핀은 CFRP 격자 보강재의 위치를 고정하기 위한 것이다. 그러나 부가적으로 보강모르타르 내에서 수평전단을 저항하는 역할을 하고 있다. 따라서 앵커핀의 수

평전단 저항효과를 알아보기 위하여 시험체 6CA-2T는 총 6개의 앵커핀로 1.6x0.4m의 CFRP 격자를 고정하여 단위 m^2 당 9.4 개를 배치하였고 시험체 C6N-2T는 앵커핀 없이 보강한 것이다. 파괴형태는 두 시험체 모두 CFRP 격자섬유 층에서의 박락으로 인하여 하중 저항강도를 잃는 계면박리 전단파괴였다. Fig. 8은 무보강 기준 시험체 RS와 앵커의 유무를 실험변수로 한 시험체 C6A-2T와 C6N-2T를 비교한 하중-처짐 곡선도이다. 그림에서 보는 바와 같이 앵커핀이 설치된 시험체 C6A-2T는 앵커핀이 없는 시험체 C6N-2T에 비하여 조금 높은 극한 저항강도와 비교적 큰 극한처짐을 나타내고 있다. 이는 앵커핀이 CFRP 격자 보강재의 계면에서 수평 전단력을 어느 정도 저항해 주는 역할을 한 것으로 생각되어진다. 따라서 적절한 갯수의 앵커핀을 사용한다면 계면 박리파괴를 높은 하중 저항강도까지 늦추거나, 피할 수 있을 것으로 예상된다.

3.1.4 압축보강의 효과

CFRP 격자 보강재의 압축부 보강 효과를 알아보기 위하여 시험체 C6N-2C를 슬래브 상면에 CFRP 격자섬유와 보강 모르타르로 보강하였다. 파괴형태는 압축부 콘크리트 슬래브와 보강 모르타르의 계면에서 계면파괴가 발생하여 수평균열이 발생하고 기존 콘크리트 상부가 압축파괴 되었다. Fig. 9는 아무런 보강이 없는 기준 시험체 RS와 인장축에 보강한 시험체 C6N-2T와 압축 보강 슬래브 C6N-2C의 하중-처짐 곡선을 비교한 그래프이다. 시험체 C6N-2C의 압축 보강 효과는 인장축 보강을 한 시험체 C6N-2T에 비해 현저히 낮게 나타나고 있으나 철근의 유효깊이 증가로 항복하중은 시험체 RS에 비해 증가하고 있다. 압축보강 시험체 슬래브 C6N-2C는 항복하중 후 보강이 없는 RS 시험체와 비슷한 기울기로 하중이 증가되고 있는데 이는 상부의 기존 콘크리트와 보강 모르타르의 계면균열이 진행되며 보강 모르타르 단면의 압축저항 능력이 감소되고 있음을 시사하고 있다. 또한 완전 계면 파괴 후에는 아무런 보강이 없는 시험체 RS의 하중-처짐 곡선을 따라 거동한다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 CFRP 격자 보강재를 이용한 압축부 보강은 초기 균열하중, 휨 강성, 항복하중 등은 보강 전에 비해 증가하고 있으나 극한저항하중에서는 큰 보강효과를 보이지 못하고 있다. 따라서 CFRP 격자섬유를 이용한 압축부 보강은 상부 수평 계면파괴를 방지하는 방법을 쓰지 않는 한 저항하중 증대 효과보다는 슬래브의 사용성 향상을 위한 경우에 바람직할 것으로 생각되어진다.

3.2 파괴형태의 분석

CFRP 격자 보강재를 이용한 보강 슬래브 시험체의 파괴형태는 실험결과 항복-압축파괴, CFRP 파단파괴, 계면

전단파괴, 사인장전단파괴 등이다. 이들 파괴형태를 분석해 보면 우선 항복-압축 파괴는 무보강 기준 슬래브 RS에서 관찰된 파괴형태로 철근의 항복 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 경우이다.

CFRP 격자섬유의 인장 파단파괴는 비교적 보강량이 적은 시험체 C4A-2T에서 관찰되었는데 격자섬유의 변형률이 이 최대 변형률을 초과하여 인장 파단된 경우이다. 이 경우에는 CFRP 격자 섬유만 파단되어 최대 극한저항 하중은 상실하였으나 최후에도 최소한 무보강 시험체의 극한저항하중과 극한 처짐량을 갖는다.

CFRP 격자 보강재 층 계면 전단파괴는 비교적 보강량이 많은 시험체 C6A-2T와 C6N-2T에서 관찰된 파괴형태로 격자섬유의 보강량이 증가되어 격자섬유의 변형률이 파단 변형률에 이르기 전에 먼저 보강 모르타르가 격자섬유 층에서 박리되어 탈락하면서 발생하는 파괴이다.

사인장전단파괴의 경우는 보강량이 매우 큰 시험체 C8A-2T와 CFRP 격자 보강재의 유효높이가 증가한 C6N-4T에서 관찰되었는데 보강량이 증가하거나 유효높이가 증가하여 휨 저항강도가 높아짐으로 해서 슬래브가 휨 내력 지배에서 전단 내력 지배 상태로 되어 전단에 의해 파괴가 일어난 경우이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 CFRP 격자섬유로 휨 보강된 일방향 슬래브는 보강량이 증가함에 따라 그 파괴 형태가 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 격자섬유의 보강량이 증가함에 따라 계면전단파괴, 사인장전단파괴 등 취성적인 파괴형태를 나타내고 있다. 또한 보강 모르타르의 두께를 증가시켰을 경우에도 격자섬유의 보강량은 동일하나 CFRP 격자 보강재의 유효높이의 증가로 하중 증대효과를 보이고 있고, 최종 사인장전단파괴형태를 나타내고 있다. 이는 탄소섬유로 된 격자섬유를 이용하여 슬래브의 하면에 인장 보강하는 것은 휨 내력 향상 효과는 월등히 증가하나 이에 따른 전단저항 능력은 이에 상응하는 증가가 없어 파괴형태가 바뀌게 되는 것이다.

CFRP 격자 섬유 보강량이 가장 적은 C4A-2T는 계면 전단파괴나 사인장전단파괴와 같은 갑작스런 취성파괴로 극한하중 저항강도를 일시에 상실함이 없이 CFRP 격자 섬유가 파단되어도 최소한 보강 전 슬래브의 극한하중 저항 강도와 연성을 가진다. 따라서 극한상태에서 최소한의 안전성과 연성 등을 고려해 볼 때 다른 파괴형태보다 가장 바람직하다고 볼 수 있다. 이를 위하여 적절한 정도로 보강량을 제한할 필요가 있는 것으로 판단된다. 이러한 보강량의 제한을 통해 CFRP 격자 섬유를 파단시킴으로써 계면전단파괴나 사인장전단파괴 등으로 하중저항강도를 일시에 상실함을 방지하고 최대한의 연성을 확보할 수 있는 것이다.

Fig. 10은 각 시험체의 극한하중과 파괴형태를 나타낸 것이다. 그림에서 P_b 는 슬래브의 공칭 휨 하중 저항강도

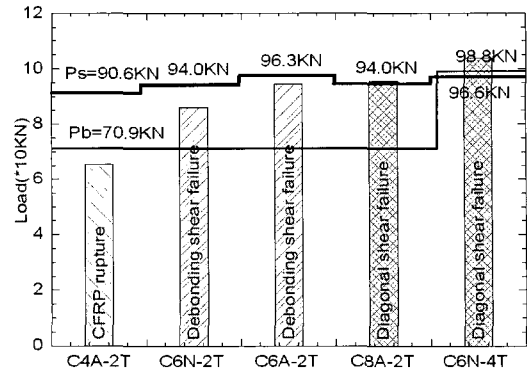


Fig. 10 Ultimate load and failure mode

로서, 콘크리트의 압축 변형률이 최대 압축 변형률일 때 CFRP 격자섬유도 최대 인장 변형률인 평형상태의 보강비를 가진 슬래브의 공칭휨하중저항강도이다. 또한 P_s 는 보강 슬래브 콘크리트의 공칭전단하중저항강도이다. 그림에서 보는 바와 같이 공칭전단하중저항강도와 공칭휨하중저항강도를 기준으로 3가지 파괴형태를 갖고 있다. CFRP 섬유 파단파괴는 평형 휨 하중강도 이하에서, 계면전단파괴는 평형 휨 하중강도와 전단저항하중 사이에서, 사인장전단파괴는 전단저항 하중 이상에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

본 실험에 사용된 슬래브 단면에서의 평형 보강량은 20mm 보강 모르타르의 경우 0.79cm^2 이고 40mm 보강 모르타르의 경우 1.02cm^2 이다. 이 평형 보강량으로 보강할 경우의 공칭하중저항강도는 각각 79.8 kN, 98.8 kN으로 이는 기준 슬래브 RS의 공칭극한하중강도 41.2 kN에 대하여 각각 94%, 140%의 보강효과에 해당 된다.

3.3 CFRP grid의 보강설계

Table 3과 Fig. 6에 보인 바와 같이 CFRP 격자섬유로 철근콘크리트 슬래브를 보강함으로써 균열하중, 항복하중, 극한하중이 증가하는 효과를 가져왔다. Fig. 2의 하중-처짐 선도로부터 알 수 있는 바와 같이 슬래브의 인장철근이 항복한 후에도 CFRP 격자 섬유의 인장 저항 효과로 저항하중이 계속 증가함을 알 수 있다.

그러나 앞서 살펴본 바와 같이 CFRP 보강량이 증가함에 따라 보강된 슬래브가 전단 지배 영역으로 이동하여 일시에 하중 지지력을 상실하는 계면전단파괴나 사인장전단파괴 형태를 보인다. 따라서 갑작스런 전단 취성파괴로 인하여 극한하중 저항강도를 일시에 상실함이 없이 CFRP 격자 섬유 파단 후에도 최소한 보강 전 슬래브의 극한하중 저항 강도와 보강 전 슬래브의 최대한 연성을 가지는 CFRP 파단파괴가 바람직하다. 즉, CFRP 섬유파단 파괴가 다른 파괴형태에 비해 하중 증대 효과는 최대가 되지

못하지만 극한 상태에서 안전성과 연성 등을 고려해 볼 때 오히려 다른 파괴형태보다 바람직하다고 볼 수 있다.

따라서 CFRP 파단파괴를 위해서는 격자 섬유 보강량을 제한하여야 한다. 이를 위하여 격자 섬유의 보강은 평형 보강비 이하로 제한을 둘 필요가 있다. 보강 슬래브의 평형 보강비는 압축부 콘크리트 변형률이 최대 압축 변형률 0.003에 도달할 때 인장측 CFRP 격자 섬유의 변형률도 파단 변형률 0.014에 동시에 이르는 상태의 보강비이다.

CFRP 격자 섬유로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 극한 상태에서의 해석은 일반적인 극한 휨 이론으로 구할 수 있으며 휨 이론의 기본가정들과 CFRP와 콘크리트간의 완전 부착 가정으로 성립될 수 있다. 평형 보강비에 대한 유도 과정은 Fig. 11로부터 다음과 같다.

$$\frac{0.003}{\epsilon_{fu}} = \frac{c_b}{d_f - c_b}, \quad c_b = \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_{fu}} d_f$$

평형방정식 $C = T$ 로부터 $0.85f_{ck}\beta_1c_b b = A_s f_y + A_{fb} f_{fu}$
 양변을 f_{fu} 로 나누어주면 $0.85\beta_1c_b b \frac{f_{ck}}{f_{fu}} = A_s \frac{f_y}{f_{fu}} + A_{fb}$
 c_b 의 값을 위 식에 대입하면

$$A_{fb} = 0.85\beta_1 b d_f \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_{fu}} - A_s \frac{f_y}{f_{fu}}$$

CFRP 격자 보강재는 탄성재료이므로 Hook's law로부터

$$\epsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f}$$

위 두식을 정리하면 보강량에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$A_{fb} = 0.85\beta_1 b d_f \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \frac{300}{300 + f_{fu}} - A_s \frac{f_y}{f_{fu}} \quad (1)$$

여기서, $E_f = 1.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 이고 $f_{fu} = 1400 \text{ MPa}$ 이다. 따라서, 평형 보강비는 아래와 같다.

$$\rho_{fb} = \frac{A_{fb}}{b h_f} \quad (2)$$

그러나 휨에 대한 CFRP 격자 보강량의 제한은 전단철근이 배근되지 않은 슬래브에서 극한 전단력이 콘크리트의 전단저항강도 보다 작도록 전단에 대한 제한이 우선되어야 할 것이다. 콘크리트 구조설계기준에 따르면 콘크리트의 전단저항강도는 다음과 같다.

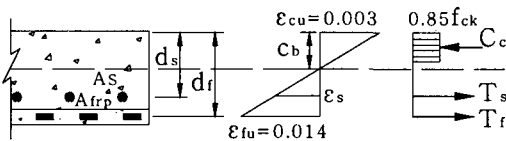


Fig. 11 Stress-strain distribution of cross section under balanced state

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d_e \quad (3)$$

여기서, b : 슬래브의 폭, d_e : 격자 섬유를 고려한 유효깊이

평형 보강비 제한과 전단력 제한 기준을 종합하여 파괴 형태 분류를 보강된 슬래브의 공칭 휨 하중강도 (P_{nb})와 평형 보강비를 갖는 슬래브의 휨하중강도 (P_b), 보강된 슬래브의 전단저항강도 (P_s)와의 관계로 정리하면 다음과 같다.

1) $P_b < P_s$ 일 경우

- ① $P_{nb} \leq P_b$: CFRP 파단파괴
- ② $P_b \leq P_{nb} \leq P_s$: 계면전단파괴
- ③ $P_s \leq P_{nb}$: 사인장전단파괴

2) $P_s < P_b$ 일 경우

- ① $P_{nb} \leq P_s$: CFRP 파단파괴
- ② $P_s \leq P_{nb} \leq P_b$: 사인장전단파괴
- ③ $P_b \leq P_{nb}$: 사인장전단파괴

이를 P_{nb}/P_b 과 P_{nb}/P_s 의 관계 그래프로 그려 파괴 형태에 관한 영역으로 구분하면 Fig. 12와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 세 가지 파괴영역으로 구분할 수 있는데 P_{nb}/P_s 를 기준으로 1.0 보다 클 경우, 즉, $P_{nb} \geq P_s$ 일 경우는 사인장전단파괴가 지배함을 알 수 있다. 한편 P_{nb}/P_s 를 기준으로 1.0 보다 작을 경우, 즉, $P_{nb} \leq P_s$ 일 경우는 P_{nb}/P_b 의 값에 따라 1.0 보다 작을 경우 CFRP 파단파괴가, 1.0 보다 클 경우에 계면전단파괴가 지배함을 알 수 있다.

3.4 CFRP grid 보강설계기준

계면전단파괴나 사인장전단파괴로 극한하중 저항강도를 일시에 상실함이 없이 최소한 보강 전 슬래브의 극한하중 저항강도와 보강 전 슬래브의 최대한 연성을 갖도록

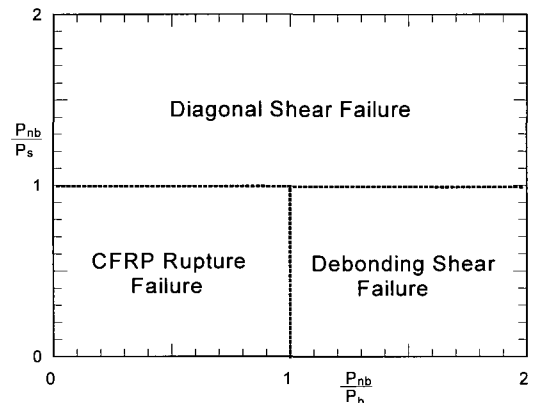


Fig. 12 Failure mode classification

CFRP 파단파괴를 유도하기 위해서는 CFRP 보강제를 평형 보강비 이하로 사용하여야 한다. 그러나 이러한 평형 보강비도 콘크리트의 전단저항 강도이하에서 사용되어야 한다. 왜냐하면 보강된 슬래브의 전단저항강도가 휨 저항강도보다 적을 시에는 취성적인 전단파괴로 인하여 갑자기 하중지지를 상실하기 때문이다.

따라서 다음과 같은 보강설계기준을 제시할 수 있는데, 휨에 대하여 CFRP 격자 섬유 보강비는 평형 보강비 이하여야 하므로 아래 식을 만족하여야 한다.

$$\rho_f \leq \phi \rho_{fb} = \phi \frac{A_{fb}}{bh_f} \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 확실한 CFRP 격자 파단파괴를 유도하기 위한 안전율이다.

한편, 사용된 CFRP 격자 섬유 보강량을 가지고 계산된 슬래브의 공칭 휨 하중 저항강도(P_{nb})에 의한 극한전단력(V_{nb})은 보강된 슬래브의 전단저항강도(V_c)보다 작아야 하므로 다음 식을 만족하여야 한다.

$$V_{nb} \leq \phi V_c \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 안전율로서 강도감소 계수이다.

Fig. 13은 전단철근에 의한 전단보강이 없는 콘크리트 슬래브가 전단파괴 없이 FRP 격자 섬유의 파단파괴가 일어나도록 하는 보강설계의 흐름도를 나타낸 것이다.

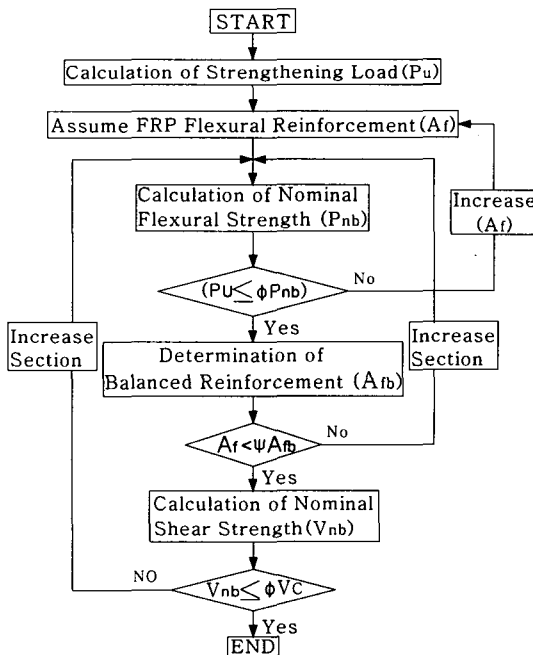


Fig. 13 Design procedure for concrete slab strengthening with CFRP grid

4. 결 론

CFRP 격자 섬유로 보강한 철근콘크리트 슬래브 시험체의 파괴형태와 보강효과에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) CFRP 격자 섬유를 이용하여 일방향 콘크리트 슬래브를 휨 보강할 경우 균열강도, 항복강도, 극한강도 등 휨 내력 향상효과가 우수하다.
- 2) CFRP 격자 섬유로 보강된 콘크리트 슬래브의 극한 휨 저항강도는 격자 섬유의 보강량이 증가할수록 증가하나 항복 후 변형정도를 나타내는 연성지수는 감소한다.
- 3) CFRP 격자로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 최종 파괴형태는 보강량에 따라 다른 파괴 형태를 나타내었는데 보강량의 증가에 따라 CFRP 격자 섬유 인장파괴, CFRP 격자 섬유층 계면전단파괴, 사인장전단파괴 등으로 나타났다.
- 4) CFRP 격자 섬유의 보강량이 과도할 경우 파괴형태가 계면전단파괴나 사인장전단파괴를 보임으로써 하중 지지력을 갑자기 상실한다. 따라서, CFRP 격자 섬유를 평형 보강비 이하로 사용하여 CFRP 격자의 파단파괴를 유도함으로써 파괴 후에도 보강 전 슬래브의 극한하중강도와 연성을 확보할 수 있다. 또한, 평형 보강비 이하의 사용도 전단파괴에 의한 갑작스런 하중지지력 상실을 막기 위해서 콘크리트 슬래브의 전단저항 강도가 확보되는 보강비 이하로 제한되어야 한다.
- 5) 제안된 보강설계 기준과 설계과정은 FRP 격자 섬유로 철근콘크리트 슬래브를 보강 설계할 때 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 제주대학교 BK21사업단의 지원으로 수행되어 이에 감사드리며 실험재료를 제공해 주신 MS Asia에도 감사드립니다.

참고문헌

1. MS Asia, "콘크리트 구조물의 보수-보강, New Fiber Grid-NEFMAC 공법", Ms-Asia, 2002, pp.3~24.
2. Yoon, S J., Shigeyama, M., Jeong, S. K., and Jung, J. H., "Retrofitting Method of Concrete Structures with FRP Grids, FRP Composites in Civil Engineering," Vol. II, CICE2001, 2001, ELSEVIER pp.1101~1108.
3. 심낙훈 외, "탄소섬유 그리드를 이용한 RC 보의 보강 효과에 관한 연구", 한국구조물진단학회지, 6권 4호, 2002, pp.107~118.

4. 안동준 외, “탄소섬유그리드를 사용한 콘크리트 구조물의 보수보강”, 한국터널협회, 1호, 2000, pp.13~22.
5. 윤순중 외, “탄소섬유그리드를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강공법 연구”, 홍익대학교 과학기술연구소, 연구보고서, 1999.
6. 조병완 외, “격자형탄소섬유로 보강된 R/C 보의 보강효과”, 콘크리트학회논문집, 15권 3호, 2003, pp.377~385.
7. 한국콘크리트학회, “건설교통부 제정-콘크리트구조설계기준”, 한국콘크리트학회, 2003.
8. 한양대학교, MS-Asia, “NEFMAC 보강공법을 적용한 콘크리트 교량 바닥판의 동적시험에 의한 성능향상 효과 분석” 연구보고서, MS-Asia, 2001.

요 약

본 논문은 CFRP 격자 보강재로 보강한 콘크리트 슬래브의 파괴형태와 보강설계기준에 대한 연구이다. 실험 연구에서 채택한 시험변수로는 CFRP 격자 보강재의 양, 보강 모르타르의 깊이, 앵커핀의 유무, 압축부 보강 등이다. 연구에 의하면 CFRP 격자 섬유 보강량에 따라 파괴형태가 다르게 나타났는데 낮은 보강수준에서는 FRP 격자의 인장 파단파괴를 보였고 보통의 보강정도에서는 격자층 계면전단파괴가 발생하였다. 높은 보강량을 가진 슬래브에서는 사인장전단파괴 형태를 나타냈다. 보강 효과는 FRP 격자 보강재의 양이 증가할수록 증대하였으나 취성 전단파괴에 의해 연성은 감소되었다. 따라서 FRP 격자 보강량을 제한함으로써 갑자기 하중 지지력을 상실하는 전단파괴를 피할 수 있다. 파괴형태 중 CFRP 파단파괴가 바람직한데 그 이유는 섬유 파단 후에도 극한상태에서 보강 전 슬래브의 하중지지력과 연성을 가지고 있기 때문이다. 마지막으로 본 논문은 CFRP 격자 섬유보강설계기준과 과정을 제시하고 있다.

핵심용어 : 보강, 탄소 FRP 격자, 콘크리트 슬래브, 연성, 앵커