

집중하중을 받는 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브의 거동

Behaviour of Lightweight Concrete Slab Reinforced with GFRP Bars under Concentrated Load

손 병 락¹⁾ 김 충 호²⁾ 장 희 석^{3)*}
Byung-Lak Son Chung-Ho Kim Heui-Suk Jang

Abstract

This paper is a preliminary study to apply the lightweight concrete slabs reinforced with GFRP (glass fiber reinforced polymer) bars to the bridge deck slabs or some other concrete structures. So, some different behaviors between the conventional steel reinforced concrete slab and the lightweight concrete slab reinforced with GFRP bars were investigated. For this purpose, a number of slabs were constructed and then the three point bending test and numerical analysis for these slabs were performed. The flexural test results showed that the lightweight concrete slabs reinforced with GFRP bars were failed by the shear failure due to the over-reinforced design. The weight and failure load of the GFRP bar reinforced lightweight concrete slabs were 72% and 58% of the steel reinforced concrete slab with the same dimensions, respectively. Results of the numerical analysis for these slabs using a commercial program, midas FEA, showed that the load-deflection curve could be simulated well until the shear failure of the slabs, but the applied loads and the deflections continuously increased even beyond the shear failure loads.

Keywords : GFRP bar, Lightweight concrete, Slab specimen

1. 서 론

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 보강근은 재료 특성상 부식이 안 되며 또한 철근에 비하여 무게는 1/4 정도로 가벼운 반면에 강도는 3~5배 정도로 크기 때문에 앞으로 철근의 대체 재료로서 많은 활용이 기대되고 있다(ACI 440.1R-06, 2006; Ahmed et al., 2010; CSA standards S806-12, 2012; You et al., 2008). 한편 경량콘크리트는 자중이 17~20kN/m³ 정도로서 보통콘크리트에 비하여 작으므로 구조물의 자중감소 효과 및 지진발생 시 유리하게 작용하는 특성 등을 갖고 있다(Kwak and Jang, 1998; Shin and Choi, 1998). 이러한 점들을 고려해본다면 앞으로 FRP 보강근과 경량콘크리트를 함께 사용하는 다양한 콘크리트 구조물에 대하여 기초적이고 또한 실용적인 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

그러나 현재까지 보통콘크리트에 FRP 보강근을 휨 보강근으로 사용한 콘크리트 구조체에 대한 연구(El-sayed et al.,

2006; Hassan et al., 2000; Lee et al., 2007)는 활발히 진행되고 있으나, 경량콘크리트에 FRP 보강근을 휨보강근으로 사용하는 콘크리트 구조체에 대한 연구는 저자들의 조사에 따르면 많이 부족한 실정이다.

미국 해군에서는 경량콘크리트 부유 구조물에 FRP 보강근의 적용을 검토한 것으로 알려지고 있으며(Malvar et al., 2003), Pantelides 등은 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 보강근을 휨 보강근으로 사용한 경량콘크리트 패널의 전단 거동에 대하여 실험과 ACI 제안식(ACI 440.1R-06, 2006) 및 수정 압축장 이론을 기초로 하는 근사식들을 통하여 분석하였다(Pantelides et al., 2012). 국내에서는 전상훈 등이 GFRP 보강근을 사용한 경량콘크리트 슬래브에 대하여 4점 휨 실험과 수치해석을 통하여 기초적인 거동특성을 분석하였다(Jeon et al., 2012). 또한 김충호 등은 GFRP 보강근 경량콘크리트 보의 전단강도를 예측할 수 있는 수식은 GFRP 보강근을 사용한 보통콘크리트 보에 대하여 제안된 수식에 경량

1) 정회원, ㈜ 선익 대표이사
2) 정회원, 경성대학교 건설환경도시공학부 토목공학전공 교수
3) 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : janhs@pknu.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

콘크리트 사용 시 적용되는 보정계수를 곱하여 얻을 수 있는 실험을 통하여 확인하였다(Kim et al., 2014).

본 연구는 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브를 추후 내부식 및 경량화의 관점에서 볼 때 필요할 것으로 예상할 수 있는 교량 바닥판 등에 활용해보기 위한 사전 연구로서, 상기의 전상훈 등의 연구(Jeon et al., 2012)와 유사한 내용으로 구성되어 있다. 즉, 상기 슬래브의 중앙에 집중하중을 가력하는 휨 실험과 이와 관련된 수치해석을 통하여 그 기초적인 거동특성들을 분석하여 보았다. 그리고 본 연구에서의 결과와 전상훈 등의 연구결과를 서로 비교, 분석하여 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브의 일반적인 거동특성을 조사하였다.

2. 사용재료

2.1 GFRP 보강근

본 실험에 사용된 GFRP 보강근은 국내 D사에서 인발성형 공정으로 제작된 것이며, 보강용 유리섬유(E-glass)와 비닐에스터(Vinylester)수지로 구성되어 있다. Photo 1에 $\phi 13$ mm GFRP 보강근의 형상을 나타내었으며 제조사에서 제시한 재료 특성치를 Table 1에 나타내었다. 그리고 이 연구에서 비교를 위하여 함께 제작된 철근 콘크리트 슬래브에 사용되는 철근의 재료 특성치도 이 표에 같이 나타내었다.

2.2 경량콘크리트

경량콘크리트 슬래브 실험체 제작에 사용된 골재는 팽창

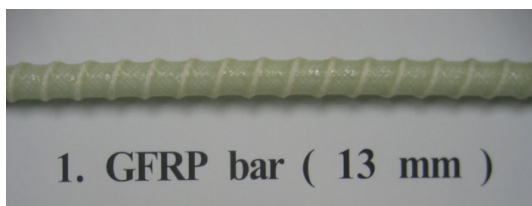


Photo 1 GFRP bar used in this study

Table 1 Mechanical properties of steels and GFRP bars

Bar type	Diameter	Modulus of elasticity (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate strain ($\times 10^{-6}$)
Steel	D10	200,000	512	649	
	D13				
GFRP bar	$\phi 9$	49,000	N.A.	1,120	22,800
	$\phi 13$	48,000	N.A.	1,088	22,600

성 혈암을 사용한 메사라이트 인공경량 굵은골재 및 잔골재로서 일본에서 생산되었으며 자세한 형상은 Photo 2에 나타내었다. 골재의 물리적 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 시방서 기준에 따라 실험을 수행하였으며 이에 따른 물리적 성질은 Table 2에 나타내었다.

슬래브 실험체 제작에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트이고 굵은골재 최대치수는 15mm이며 설계기준강도 27MPa에 대한 배합표는 Table 3과 같다. 한편, 비교 목적으로 보통콘크리트를 사용하여 제작된 슬래브 실험체는 설계기준강도 27MPa의 레미콘을 사용하였다.

28일 양생 후 측정된 보통콘크리트와 경량콘크리트의 단위용적질량은 각각 $2,241\text{kg/m}^3$, $1,790\text{kg/m}^3$ 이었다. 공시체들의 평균압축강도는 보통콘크리트에서 29.2MPa, 경량콘크리트에서 31.4MPa이었다. 보통콘크리트의 압축강도가 경량콘크리트에 비하여 낮게 나온 것은 사용된 레미콘의 품질관리의 문제점에 기인된 것으로 분석되었다.

콘크리트 탄성계수는 콘크리트구조기준(2012)에서 제시한 식(1)에 의하여 계산하였다. 식(1)의 적용 시, 재령 28일의 콘크리트 평균압축강도 f_{cu} 는 설계기준강도 f_{ck} 가 40MPa 이하인 경우에는 f_{ck} 에 4MPa를 더한 값을 사용하도록 되어



(a) coarse aggregate (b) fine aggregate

Photo 2 Shape of coarse and fine aggregates of lightweight concrete

Table 2 Physical properties of lightweight aggregates

Type	Fineness modulus	Bulk specific gravity in saturated surface dry
Fine aggregate	2.66	1.92
Coarse aggregate	6.77	1.68

Table 3 Mix proportion of lightweight concrete

Design strength (MPa)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m^3)				
					C	W	S	G	AE water reducer
27	12	5.5	38	44.6	680	259	914	994	4.7

있다. 그러나 본 연구에서 사용된 보통콘크리트의 경우에 측정된 평균압축강도 29.2MPa는 재령 28일의 평균압축강도 31MPa보다 적은 값이므로 보수적인 관점에서 압축강도 측정결과 값을 그대로 f_{cu} 로 사용하였다. 이에 따라 실험에서 측정된 콘크리트의 질량 m_c 와 f_{cu} 를 식(1)에 대입하여 구한 탄성계수는 보통콘크리트에서 25,200MPa, 경량콘크리트에서 18,300MPa이었다.

$$E_c = 0.077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (1)$$

실험결과와 수치해석에 필요한 콘크리트의 할렬인장강도를 구하기 위하여 KS F 2423 콘크리트의 할렬인장강도 시험방법에 따라 $\Phi 100 \times 200$ mm 콘크리트 공시체에 대하여 측정을 하였으며, 그 결과 할렬인장강도는 보통콘크리트에서 2.48MPa, 경량콘크리트에서 3.02MPa를 얻었다. 보통콘크리트에서의 할렬인장강도가 경량콘크리트보다 낮은 것은 보통콘크리트의 압축강도가 경량콘크리트보다 낮게 나온 것에 기인한 것으로 판단된다.

그리고 콘크리트의 파괴에너지를 구하기 위하여 RILEM 50-FMC 위원회의 제안식을 사용하였으며, 실험을 통하여 구한 파괴에너지의 값은 보통콘크리트에서 0.07N/mm, 경량콘크리트에서 0.05N/mm로서 경량콘크리트의 파괴에너지는 보통콘크리트에 비하여 17%정도 감소하였다(Jeon et al., 2012).

또한 수치해석에서 계면요소 사용 시 사용되는 GFRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 부착특성을 조사하기 위하여 일련의 인발실험체 제작 및 실험을 행하였다. 이 실험결과에 따라 보통콘크리트와 D13 철근을 사용한 실험체의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 보통콘크리트와 $\phi 13$ GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강도는 0.67, 경량콘크리트와 $\phi 13$ GFRP 보강근을 사용한 실험체는 0.49, 경량콘크리트와 $\phi 9$ GFRP 보강근을 사용한 실험체는 0.55로 나타났다(Son et al., 2013).

3. 슬래브 휨실험

3.1 슬래브 실험체 제작

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 길이×폭×두께가 2,400mm×1,200mm×150mm, 유효높이 120mm, 순지간 1,700mm인 슬래브 실험체를 4종류 제작하였다. 이들 실험체들은 일반적인 철근 콘크리트 슬래브와 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브의 거동 차이점 분석에 초점을 맞추기 위하여, 사용된 콘크리트와 휨 보강근의 종류에 따라 Table 4의 실험체 상세와 같이 제작되었다. 실험체 명에서 첫 번째 영문자는 사용된 콘크리트의 종류(N:보통콘크리트, L:경량콘크리트), 두 번째 영문자는 휨 보강근의 종류(S:철근, G:GFRP 보강근), 그리고 이어지는 숫자는 지간방향 하부 보강근으로 사용된 휨보강근의 직경을 나타낸다. 따라서 예를 들어 NS13실험체는 보통콘크리트와 D13 철근을 사용하여 제작된 실험체를 가리킨다.

NS13실험체(균형보강근비: 2.93%)는 휨보강근비가 0.53%로서 저 보강보로 설계되었고, NG13 및 LG13실험체(균형보강근비: 0.26%)는 휨 보강근비가 0.53%로서 압축파괴를

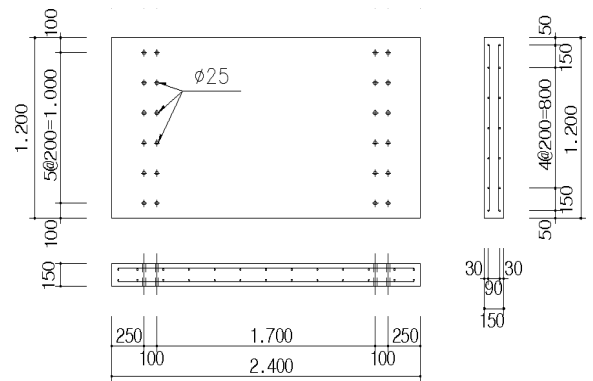


Fig. 1 Dimensions and reinforcement details of slab (unit: mm)

Table 4 Details of slabs

Specimen	Concrete type	Bar type	Bottom reinforcement in transverse direction	Top reinforcement in transverse direction	Bottom reinforcement in longitudinal direction	Top reinforcement in longitudinal direction
NS13	Normal	Steel	D13@200 (0.53%)	D10@200	D10@200	D10@200
NG13	Normal	GFRP bar	$\phi 13@200$ (0.53%)	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$
LG13	Lightweight	GFRP bar	$\phi 13@200$ (0.53%)	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$
LG9	Lightweight	GFRP bar	$\phi 9@200$ (0.27%)	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$	$\phi 9@200$

일으키도록 설계되었다. 또한 LG9 실험체(균형보강근비: 0.21%)도 휨 보강근비가 0.27%로서 압축파괴를 일으키도록 설계되었다.

앞에서 나타내었듯이 휨 보강근으로서 GFRP 보강근을 사용한 경우의 설계에서는 과 보강보의 개념이 적용되었다. 이는 FRP 보강근이 인장력을 받을 경우에는 재료 자체의 특성상 파괴 시까지 항복하는 과정이 없으며 오로지 탄성거동만을 하기 때문이다. 따라서 ACI에서는 휨 보강근으로 FRP 보강근을 사용하는 경우에 FRP 보강근의 파단으로 발생할 수 있는 취성파괴를 방지하고 또한 안전을 도모할 목적으로 RC 구조물에서 사용되는 저 보강보 개념을 적용하지 않고 반대로 과 보강보의 개념을 도입하여 상대적으로 덜 취성적인 콘크리트의 압축파괴를 유도하도록 하고 있다(ACI 440.1R-06, 2006).

3.2 휨 실험

슬래브는 일반적으로 주형과 일체로 연결되는 점을 고려하기 위하여 본 실험에서는 슬래브의 양쪽 단부를 받침으로 사용되는 I형 보의 상부플랜지와 볼트로서 체결하여 구축시켰으며, 받침으로 사용된 I형 보는 바닥(strong floor)에 고정시켰다. Fig. 2는 실험체의 설치와 관련된 규격이며 이에 따라 실험 시 설치된 형상은 Photo 3과 같다.

실험체의 변형에 따른 변형률을 측정하기 위하여 슬래브 제작 시 변형률 측정용 게이지(매립형 5mm)를 슬래브 중앙의 지간방향 휨 보강근 하면에 부착하였으며, 콘크리트 변형률 측정게이지는 콘크리트의 양생이 완료된 후 실험 직전에 콘크리트 상면 중앙부에 지간방향으로 부착하였다. 또한 슬래브 바닥판 하부 중앙점의 처짐을 측정하기 위하여 실험에 앞서 LVDT를 설치하였다.

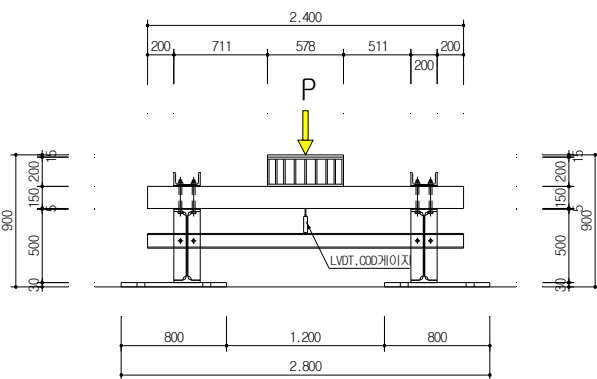


Fig. 2 Specimen setup dimensions (unit: mm)

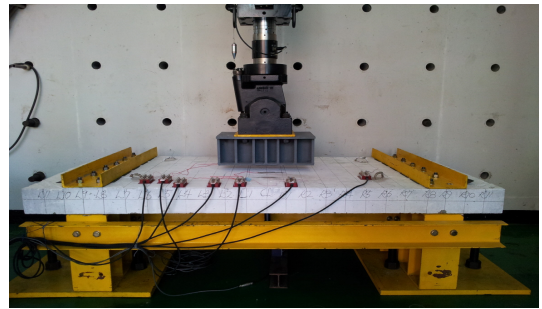


Photo 3 Test setup

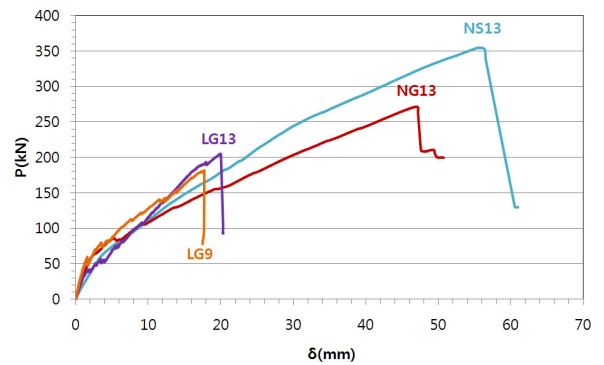


Fig. 3 Load-deflection behaviour at midspan

하중은 강제 재하판과 500kN 액츄에이터를 사용하여 3점 휨시험 재하형태로 가력하였으며, 재하판의 크기는 도로교 설계기준에서 사용하는 DB-24하중 후륜 1륜의 접지면적에 해당하는 231mm×578mm로 하였다. 하중은 1mm/min 속도의 변위제어로 가력하였으며, 첫 균열 발생 시까지 하중을 가력한 후 하중을 제거하고 첫 균열 발생점에 COD게이지를 부착한 후 다시 최종파괴 시까지 가력하였다.

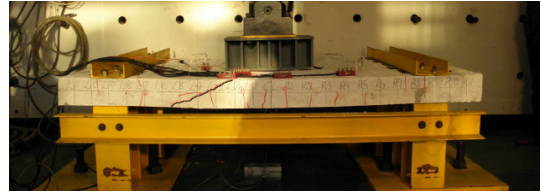
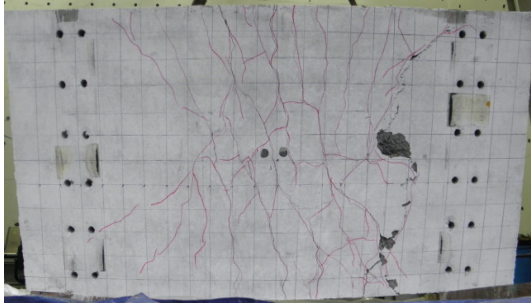
3.3 휨 실험 결과

실험결과 얻어진 실험체들의 하중-처짐 곡선을 Fig. 3에 나타내었으며, 실험체별로 최종파괴 시 실험체 측면과 하부면의 균열형상을 Photo 4에 나타내었다. 실험체 하부면의 사진들을 분석해보면, NS13, NG13, LG13 실험체들은 비슷한 균열 형상을 보여주고 있음을 볼 수 있다. 이에 반하여 LG9 실험체는 상대적으로 균열간격이 넓은데, 이는 LG9 실험체는 다른 실험체들에 비하여 낮은 휨 보강근비로 인하여 하중이 분산되어 작용하지 못하고 있음에 원인이 있다고 판단된다.

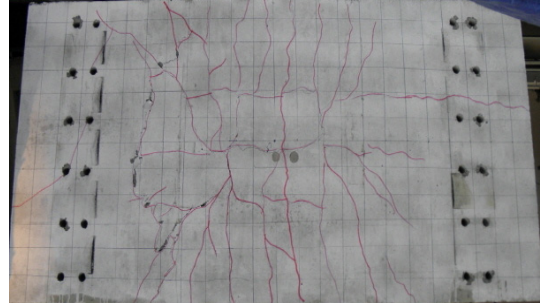
실험체들의 균열진행과정은 먼저 중앙점 부근의 하부에서 초기균열이 발생한 후, 약 10cm 간격으로 좌우로 추가 균열



(a) NS13



(b) NG13



(c) LG13



(d) LG9

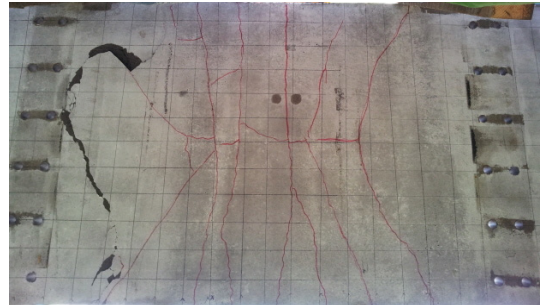


Photo 4 Crack patterns of lateral and bottom surfaces after failure

들이 발생하여 상부로 진행하였으며 이후 하중 증가에 따라 좌우 지점부에서 부모멘트에 의한 균열들이 발생하였다.

실험체들은 파괴 시 실험체의 좌, 우의 한쪽 편에서 전단 파괴되는 현상을 보여주었다. 이에 대한 원인으로서 먼저 철근을 휨 보강근으로 사용한 NS13 실험체에서는 저보강으로 설계를 하였지만 양단 지점부를 고정단으로 처리하였기에 휨 모멘트 재분배로 인하여 휨 모멘트보다는 전단에 더 큰 지배를 받아서 최종적으로 전단파괴가 발생한 것으로 판단된다. 그리고 GFRP 보강근을 휨 보강근으로 사용한 NG13, LG13, LG9 실험체들은 압축파괴를 유도하기 위하여 과보강으로 설계가 되었기 때문에 처짐과 균열 발생 후 지점부로부터 40~70cm 떨어진 곳에서의 초기균열이 하중 재하면의 콘

크리트 압축부까지 연결되면서 갑작스럽게 전단파괴된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 변형률게이지를 통해 측정된 콘크리트와 휨 보강근의 하중-변형률 곡선이다. 왼쪽은 슬래브 상부면의 콘크리트 압축변형률을, 오른쪽은 슬래브 하부의 지간방향 휨보강근의 인장변형률을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 NG13, LG13, LG9 실험체들의 경우 콘크리트 변형률이 콘크리트 파괴기준까지 도달하지 못하였으며, 휨보강근도 극한변형률까지 도달하지 못한 것을 볼 수 있다. 따라서 이들 실험체들은 실험체 하부에 발생한 초기균열이 하중 증가와 더불어 전단균열로 발전된 후 재하판 주위의 압축부까지 진전됨에 따라 최종적으로 전단파괴된 것으로 판단할 수 있다.

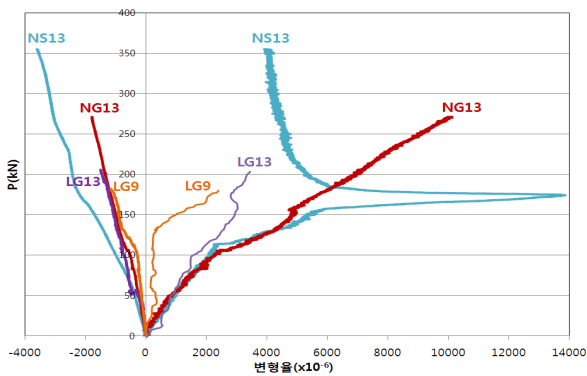


Fig. 4 Load-strain curve

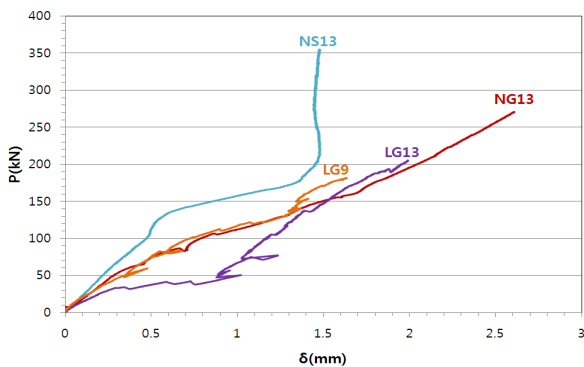


Fig. 5 Load-crack width curve

실험 시 슬래브 실험체 하부면의 첫 번째 균열발생 위치에 COD게이지를 설치하여 측정된 하중-균열폭 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 철근을 휨 보강근으로 사용한 보통콘크리트 슬래브 실험체에 비하여 다른 실험체들의 균열폭은 동일 하중에서 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 처짐이 크게 발생하는 것과도 관련되며 이러한 현상은 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수와 경량콘크리트의 낮은 부착특성에 기인한 것이라고 판단할 수 있다.

한편, 본 연구를 위한 4개의 슬래브 실험체 중에서 철근을 휨 보강근으로 사용한 NS13 실험체에서는 실험결과 측정치에 일부 오류가 있었다고 판단된다. 즉, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 하부철근의 변형률은 항복 이후에 오히려 감소하는 현상을 보여주었다. 또한 선행연구(Jeon et al., 2012)에서 NS13 실험체와 동일한 CONT 실험체에서는 하중-균열폭 곡선이 안정적으로 증가한 것에 반하여, 본 실험체는 Fig. 5에서와 같이 이 곡선이 중간에서 순간적으로 증가하는 현상을 나타내었다. 그러나 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 실험체 하부면에 부착된 LVDT는 실험체의 가력하중 변화에 따른 처짐을

파괴 시까지 안정적으로 측정하였으며, 또한 Fig. 4에서 실험체 상부면에 부착된 스트레인게이지도 콘크리트의 압축변형률을 대략 0.0035까지 측정하였다.

왜 다른 실험체들에 비하여 NS13 실험체에서만 철근의 인장변형률과 균열폭 측정에 이런 예상치 못한 실험결과가 나왔는가에 대하여 원인 규명은 힘들지만 다만 철근에 부착된 스트레인게이지와 균열면에 부착된 균열게이지의 부착에 오류가 있었을 것으로 유추된다. 그러나 Fig. 3에서와 같이 실험체의 가력하중 변화에 따른 처짐의 증가가 파괴 시까지 측정되었으므로 다른 실험체들과의 하중-처짐 비교에서는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

3.4 실험결과 분석

초기균열하중, 파괴하중 및 파괴형태 등의 실험결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 위의 Fig. 3 하중-처짐 곡선과 Table 5의 실험결과 표를 통하여 실험결과를 분석해보면 다음과 같다.

우선 NS13 실험체와 NG13 실험체를 비교해보면 지간방향 하부 휨 보강근으로 유사한 직경의 철근(D13)과 GFRP 보강근($\phi 13$)을 사용하였지만 NG13 실험체는 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수로 인하여 NS13 실험체보다 유효단면2차모멘트가 감소하고 또한 부착강도가 작아서 파괴하중은 감소한 반면 동일하중에 대하여 처짐이 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 경향을 4점 휨 실험을 수행한 선행연구(Jeon et al., 2012) 결과와 비교하기 위하여 선행연구결과를 Table 6에 제시하였다.

Table 6에서 CONT, N13, L13, L9 실험체는 본 연구의 NS13, NG13, LG13, LG9 실험체에 각각 해당된다. 4점 휨 실험결과와 서로 비교해보면 전반적으로 3점 휨 실험에서는 파괴하중이 감소한 반면 파괴 시 처짐이 더 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 동일 강성의 보에 대하여 3점 휨 및

Table 5 Test results

Specimen	Initial crack		Failure			Mode of failure
	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Crack width (mm)	
NS13	55.25	4.10	355.15	55.52	1.480	Flexure-shear failure
NG13	45.20	1.60	271.00	46.9	2.606	Shear failure
LG13	38.25	0.78	205.40	19.90	1.986	
LG9	37.15	0.48	181.80	17.72	1.638	

Table 6 Summary of previous study (Jeon et al., 2012)

Specimen	Initial crack		Failure			Mode of failure
	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Crack width (mm)	
CONT	94.20	1.72	428.65	31.42	3.508	Flexure-shear failure
N13	111.60	1.74	338.90	24.04	2.114	Shear failure
L13	89.35	1.32	272.85	19.18	1.222	
L9	30.50	0.70	236.6	24.24	1.6	

4점 휨으로 가력한 경우에 얻어질 수 있는 이론적인 결과와 잘 일치하고 있다.

Table 5에서 NS13실험체의 파괴하중은 NG13실험체보다 31% 증가되어 있는데 Table 6에서도 CONT실험체는 N13 실험체보다 파괴하중이 26% 증가되어 있는 것을 볼 수 있다.

NG13실험체와 LG13실험체의 경우 파괴하중은 NG13 실험체가 LG13실험체에 비하여 32% 더 증가하였다. 이러한 현상은 보통콘크리트의 파괴에너지와 부착응력이 경량콘크리트의 파괴에너지와 부착응력보다 더 크다는 재료적 특성에 기인된 것으로 판단된다. Table 6에서도 N13실험체의 파괴하중은 L13실험체에 비하여 24% 증가하였다. 한편 콘크리트 구조물에서 전단강도를 계산할 때, 전경량 콘크리트를 사용하는 경우는 보통콘크리트를 사용하여 얻어진 값에 대하여 0.75배, 모래경량 콘크리트를 사용하는 경우는 0.85를 곱하도록 제시되어 있다. 이를 본 실험에 적용하여 NG13 실험체의 파괴하중 271.0kN에 0.75를 곱하면 203.25kN이 되고 이 값은 LG13실험체의 파괴하중 205.40kN과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서의 주 관심사인 LG13실험체는 NS13실험체에 비하여 파괴하중이 58%로 되어 42% 정도 감소하였는데, 이는 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수와 경량콘크리트의 낮은 부착강도 때문인 것으로 판단된다. 한편, LG13실험체의 무게는 NS13실험체의 72% 정도로 조사되었다. Table 6에 따르면 L13실험체의 파괴하중은 CONT실험체의 64%이다.

LG9실험체에 비하여 약 2배 정도의 지간방향 하부 휨 보강근비를 갖는 LG13실험체는 LG9실험체에 비하여 파괴하중이 13%정도 증가하였다. Table 6에서도 L13실험체의 파괴하중은 L9실험체에 비하여 15% 증가하고 있다.

4. 수치해석

3장에서 휨 실험된 슬래브들에 대하여 범용 비선형해석 프

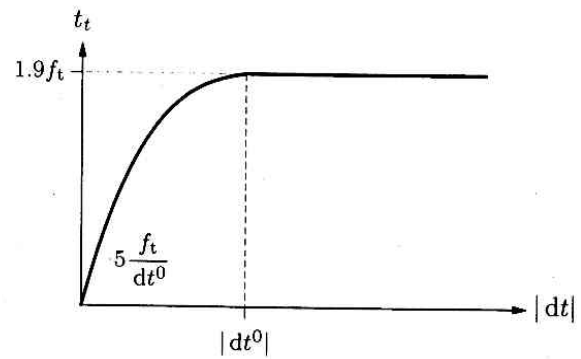


Fig. 6 Cubic function

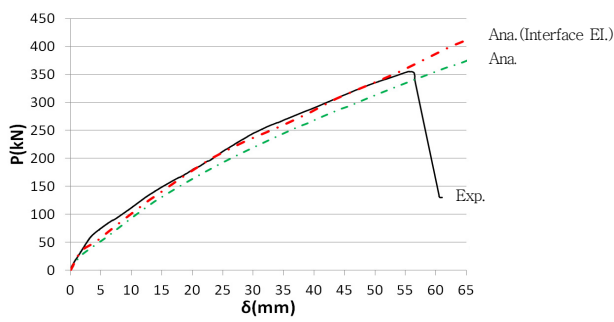
로그래프 midas FEA를 사용하여 수치해석을 행하였다. 수치 해석 과정의 상세한 내용은 선행연구(Jeon et al., 2012)에 기술되어 있으므로 여기서는 생략하였으며, 본 연구에서 행해진 실험결과와 수치해석결과를 서로 비교한 결과를 실험체 별로 Fig. 7에 나타내었다.

한편 본 연구와 관련된 선행연구(Jeon et al., 2012)의 3장 수치해석에서 압축측 콘크리트 모델링에 사용되었던 함수는 Constant 함수가 아니고 Thorenfeldt가 제안한 함수로서 문장 내용에 중대한 착오가 있어서 이를 정정하고자 한다.

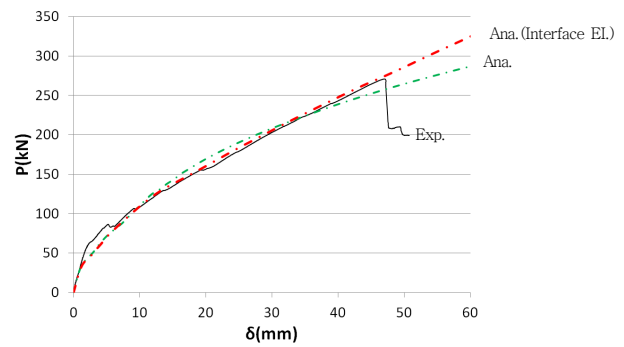
Fig. 7에서 수치해석결과는 보강근을 모델링할 때, 보강근을 포함하는 모재요소(mother element)에 보강근의 강성이 더해지는 내재요소(embedded element)를 사용하여 모델링한 해석결과(Ana.로 표시됨)와 콘크리트와 휨보강근의 부착 특성을 고려하기 위하여 콘크리트와 휨 보강근 사이에 계면 요소를 사용하여 모델링한 해석결과(Ana.(interface El.)로 표시됨)로 구분하여 나타내었다.

계면요소를 사용한 수치해석에서 접선방향 부착거동을 나타내는 전단강성계수(shear stiffness modulus) K_t 를 모사하기 위하여 midas FEA에서 제공하는 Fig. 6과 같은 Cubic function을 사용하였다. 여기서 f_t 는 공시체 인장강도를, 그리고 $|dt^0|$ 는 전단슬립(shear slip)을 나타내며 실험을 통하여 정해야 한다. 따라서 인장강도는 2.2절에서 제시된 값을 사용하였으며 전단슬립도 2.2절에서 제시된 부착강도를 사용하여 전단슬립은 부착강도에 단순하게 역 비례하는 것으로 가정하여 구하였다. 이에 따라 NS13실험체의 전단 슬립값은 DIANA 프로그램(TNO DIANA, 2005)에서 추천하는 값 0.06mm를 사용하였으며, 이 값과 부착강도에 따라 NG13실험체에 0.09mm, LG13실험체에 0.12mm, LG9실험체에 0.11mm를 각각 적용하였다.

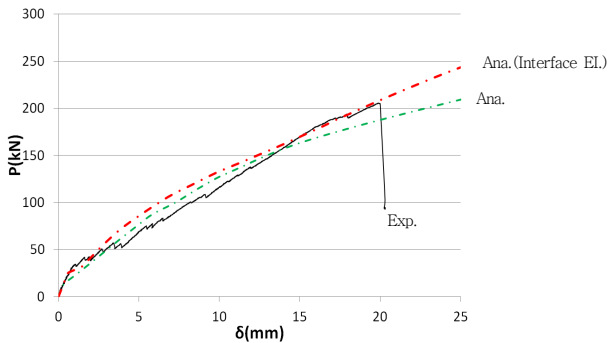
한편, 법선방향으로는 탄성거동을 하는 것으로 알려져 있



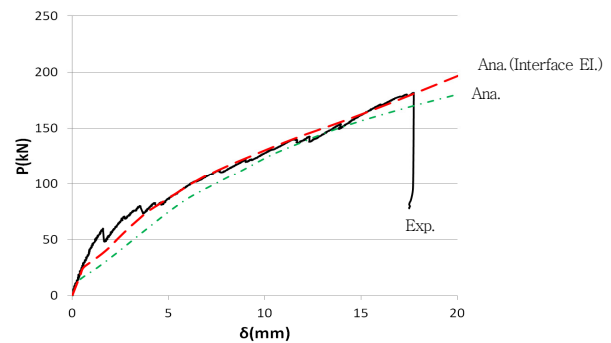
(a) NS13



(b) NG13



(c) LG13



(d) LG9

Fig. 7 Predicted and measured load–deflection curve

Table 7 Parameters used for interface element

Specimen	Normal stiffness modulus (K_n) (N/mm ³)	Cubic function	
		Tensile strength (MPa)	Shear slip (mm)
NS13	100	2.48	0.06
NG13	70	2.48	0.09
LG13	50	3.02	0.12
LG9	50	3.02	0.11

지만 법선방향 강성계수(normal stiffness modulus) K_n 은 아직 정확한 값을 구할 수 없었다. 따라서 본 연구와 유사한 문헌(midas FEA)을 수치해석한 내용과 실험체들의 휨강성을 고려하여 K_n 값을 정하였는데, 추후 계속 조사되어야 할 내용이다. 4종류의 슬래브실험체에 대하여 계면요소를 사용하여 수치해석할 때 적용된 매개변수 값들을 Table 7에 정리하여 나타내었다.

휨 실험결과와 수치해석결과들을 비교한 Fig. 7을 살펴보면 서로 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 콘크리트와 휨보강근 사이에 계면요소를 사용하여 모델링한 해석결과가 휨보강근을 단순히 내재요소를 사용하여 모델링한 해석결과보다 실험결과에 조금 더 근접한 결과를 주는 것을 알 수

있다. 그러나 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 수치해석 결과들은 가려지는 하중 증가에 따라 지속적인 처짐 증가를 나타내어 실험체의 전단파괴 상태를 모사하지 못하고 있다. 이는 midas FEA를 사용하여 수치해석을 행할 때, 구조물의 휨보강근이 파괴 시까지 탄성거동을 하는 경우에는 입력값으로서 휨보강근의 인장강도 또는 유효인장강도가 아니고 휨보강근의 탄성계수를 요구하고 있기 때문이다. 따라서 GFRP 보강근을 휨보강근으로 사용한 본 연구에서도 GFRP 보강근의 인장강도가 입력되지 않음으로 인하여 가려지는 하중과 이에 따른 처짐은 계속하여 증가하게 되어 실험에서 나타난 전단 파괴 거동을 모사하지 못하였다.

5. 결론

본 연구는 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브를 교량 바닥판 등에 활용해보기 위한 사전 연구로서, 콘크리트 종류와 휨보강근 종류를 달리하여 제작된 일련의 슬래브 실험체들에 대하여 3점 휨 실험을 하였으며, 또한 이 실험체들에 대하여 수치해석을 행하였다. 휨 실험 결과, 수치해석 결과, 그리고 선행연구 결과들을 비교 분석하였으며 이에 따라 얻어

진 결론들은 다음과 같다.

- (1) 보통콘크리트와 철근으로 제작된 슬래브 실험체(NS13)의 파괴하중은 보통콘크리트와 GFRP 보강근으로 제작된 슬래브 실험체(NG13)보다 31% 더 증가되었으며, 선행연구에서도 파괴하중이 26% 증가되었다.
- (2) 보통콘크리트와 GFRP 보강근으로 제작된 슬래브 실험체(NG13)의 파괴하중은 경량콘크리트와 GFRP 보강근으로 제작된 슬래브 실험체(LG13)보다 32% 더 증가하였으며, 선행연구에서도 파괴하중이 24% 증가하였다.
- (3) 본 연구에서의 주 관심사인 경량콘크리트와 GFRP 보강근으로 제작된 슬래브 실험체(LG13)는 철근 콘크리트로 제작된 슬래브 실험체(NS13)에 비하여 무게가 72% 정도로 가벼운 반면에 파괴하중은 58%되는 것으로 나타났다. 선행연구에서도 파괴하중이 64%로 계산되어 유사한 결과를 보여주었다고 판단된다.
- (4) midas FEA를 이용하여 행한 수치해석 과정은 실험에서 나타난 전단파괴 하중까지 잘 모사하였다. 그러나 GFRP 보강근의 인장강도 대신 탄성계수가 입력값으로 요구됨에 따라 가려지는 하중과 처짐은 실험에서 나타난 전단파괴 이후에도 계속하여 증가하는 경향을 보였다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

1. ACI 440.1R-06 (2006), Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
2. Ahmed, E. A., El-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B. (2010), Shear Performance of RC Bridge Girders Reinforced with Carbon FRP Stirrups, *Journal of Bridge Engineering*, 15(1), 44-54.
3. CSA standards S806-12 (2012), Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association.
4. El-sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., and Benomkrane, B. (2006), Shear strength of FRP reinforced concrete beam

- without transverse reinforcement, *ACI Structural Journal*, 103(2), 235-243.
5. Hassan, T., Abdelrahman, A., Tadros, G., and Rizkalla, S. (2000), Fiber reinforced polymer reinforcing bars for bridge decks, *Can. J. Civ. Eng.*, 27, 839-849.
6. Jeon, S. H., Shon, B. L., Kim, C. H., and Jang, H. S. (2012), A Fundamental Study for the Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Slab Reinforced with GFRP Bar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(3), 99-108.
7. Kim, C. H. and Jang, H. S. (2014), Concrete Shear Strength of Normal and Lightweight Concrete Beams Reinforced with FRP Bars, *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 04013038.
8. Kwak, Y. K. and Jang, I. Y. (1998), Research Trends of Structural Lightweight Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(4), 5-15.
9. Lee, J. H., Yang, J. M., and Yoon, Y. S. (2007), Application of Concentrated FRP Bars to Enhance the Capacity of Two-Way Slabs, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(6), 727-734.
10. Malvar, L. J., Cox, J. V., and Cochran, K. B. (2003), Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I : Experimental study, *Journal of composites for construction*, 7(2), 154-163.
11. midas FEA, Technical Paper ; Crack Analysis of PSC Box, MIDAS.
12. Pantelides, C. P., Besser, B. T., and Liu, R. (2012), One-Way Shear Behavior of Lightweight Concrete Panels Reinforced with GFRP Bars, *Journal of Composites for Construction*, 16(1), 2-9.
13. Sherif El-Gamal, Ehab El-Salakawy, and Brahim Benmokrane (2007), Influence of Reinforcement on the Behavior of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with FRP Bars, *Journal of Composites for Construction*, 11(5), 449-458.
14. Shin, S. W. and Choi, M. S. (1998), Application and Prospection of Structural Lightweight Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(4), 16-26.
15. Son, B. L., Kim, M. S., Kim, C. H., and Jang, H. S. (2013), Bond Characteristic between Lightweight Concrete and GFRP Bar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(6), 112-121.
16. TNO DIANA (2005), DIANA, User's manual, Material Library, Release 9.
17. You, Y. J., Park, Y. H., and Park, J. S. (2008), Service and Ultimate Load Behavior of Bridge Deck Reinforced with GFRP Rebars, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 28(5A), 719-727.

Received : 02/27/2015

Revised : 04/10/2015

Accepted : 04/17/2015

요 지

본 연구는 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 휨보강근으로 사용하여 제작되는 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브를 교량 슬래브 등에 활용해보기 위한 사전 연구로서, 기존의 철근 콘크리트 슬래브와 GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브의 휨 거동 차이점 분석에 초점을 두었다. 이를 위하여 일련의 슬래브 실험체들을 제작하고 3점 휨 실험 및 수치해석을 행하였다. 실험 결과, GFRP 보강근 경량콘크리트 슬래브 실험체는 GFRP 보강근의 과다보강으로 인하여 실험체 하부에 발생된 초기균열이 하중 재하면의 콘크리트 압축부까지 연결되면서 전단파괴되는 경향을 보였다. 그리고 철근 콘크리트로 제작된 슬래브 실험체에 비하여 무게는 72%이었으며 휨 실험에서의 파괴하중은 58%인 것으로 나타났다. 한편, midas FEA를 이용하여 행한 수치해석 과정은 실험에서 나타난 전단파괴 하중까지 잘 모사하였다. 그러나 GFRP 보강근의 인장강도 대신 탄성계수가 입력값으로 요구됨에 따라 가력되는 하중과 처짐은 실험에서 나타난 전단파괴 이후에도 계속하여 증가하는 경향을 보였다.

핵심 용어 : GFRP 보강근, 경량콘크리트, 슬래브 실험체
