

GFRP 보강 다공성 콘크리트 블록의 내력 및 인성 평가

Evaluation of Load Capacity and Toughness of Porous Concrete Blocks Reinforced with GFRP Bars

정 승 배¹

양 근 혁^{2*}

Jung, Seung-Bae¹

Yang, Keun-Hyeok^{2*}

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul, 03746, Korea ¹

Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea ²

Abstract

In this study, mix proportioning of porous concrete with compressive strength and porosity exceeding 3MPa and 30%, respectively, was examined and then load capacity and flexural toughness of the porous concrete block were evaluated according to the different arrangements of the GFRP bars. To achieve the designed requirements of porous concrete, it can be recommended that water-to-cement ratio and cement-to-coarse aggregate ratio are 25% and 20%, respectively, under the aggregate particle distribution of 15~20mm. The failure mode of porous concrete blocks reinforced with GFRP bars was governed by shear cracks. As a result, very few flexural resistance of the GFRP was expected. However, the enhanced shear strength of porous concrete due to the dowel action of the GFRP bars increased the load capacity and toughness of the blocks. The porous concrete blocks reinforced with one GFRP bar at each compressive and tensile regions had 2.1 times higher load capacity than the companion non-reinforced block and exhibited a high ductile behavior with the ultimate toughness index (I_{30}) of 43.4.

Keywords : porous concrete, GFRP, strength, toughness

1. 서 론

우리나라 도로 포장의 경우 불투수성 재료인 시멘트 콘크리트 및 아스팔트 포장에 대부분을 차지하고 있다. 이로 인해 빗물이 배수되지 못하여 교통장애 및 사고의 원인이 되며, 지하수 고갈로 인한 도시의 사막화 등 여러 환경문제의 원인이 되고 있다[1]. 이에 따라 각 지자체에는 일반 블록에 대해 열섬저감, 오염물질 차단, 통한 수질 개선 및 생물서식 기능을 가지는 다공성 투수블럭으로 교체를 진행하고 있다[2].

도로포장의 투수성을 높이면서 여러 환경문제를 개선하기

위하여 연속공극 구조로 투수 및 투기 기능을 향상시키는 포러스 콘크리트(Porous concrete) 연구가 다양하게 진행되고 있다[3]. 포러스 콘크리트의 경우 시멘트 페이스트를 골재에 코팅하여 부착시킨 것으로 보통 콘크리트에 비해 단위 시멘트량이 적기 때문에 강도가 매우 저하된다[4]. 포러스 콘크리트 강도는 물-시멘트비(W/C)에 의한 영향보다는 주로 공극률 및 시멘트 페이스트 양에 따라 변화한다. 그러나 W/C 가 높을 경우 시멘트 페이스트의 두께 및 점도감소 등의 문제가 발생되며, 공극률이 감소되는 문제점이 있다 [5]. 또한, 골재의 입도에 따라 포러스 콘크리트의 강도에 큰 영향을 미친다[6]. 골재의 입도가 증가할수록 골재와 골재의 접촉수 감소로 인해 골재의 맞물림 작용이 저하되며, 이는 강도감소의 원인이 된다[7]. 이러한 강도감소는 다공성 콘크리트 블록에서 골재 탈락 및 균열을 유발하며, 장기적으로 인성저하와 함께 내구성능을 감소시킨다. 특히 다공성 블록의 낮은 휨 강도는 보·차도용 투수 블록의 기준인

Received : June 7, 2017

Revision received : June 30, 2017

Accepted : September 26, 2017

* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

[Tel: 82-31-249-9703, E-mail: yangkh@kgu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

4MPa 및 5MPa에 만족하지 못하며 침하 및 파괴 등의 주요 원인으로 지적되고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 다공성 블록에서 철근 및 섬유 등을 활용한 보강 연구가 시도되고 있다[8].

본 연구에서는 다공성 블록의 투수 기능 및 내력 증진을 위해 배합설계비 제시 및 GFRP(Glass fiber reinforced plastics)를 활용한 보강 방법을 검토하였다. 습기에 노출되는 다공성 콘크리트 특성을 고려하여 부식저항성이 높은 GFRP 보강근을 보강재로 선택하였다[9]. 다공성 블록의 적절한 투수성과 GFRP 보강을 고려하여 목표를 휨 강도 3MPa 및 공극률 30%를 각각 설정하였다. 이를 달성하기 위한 배합변수는 골재입경, W/C 및 시멘트-골재비(C/G)를 변화하였으며, 최소한의 내구성 확보를 위해 압축강도가 3MPa 이상인 배합에서 공극률이 가장 높은 배합설계비를 선정하였다. 다공성 콘크리트의 압축강도는 공극률에 중요한 영향을 받으므로 가능하면 공극률을 높이면서 최대 압축 강도를 갖는 목표를 설정하였다. 선정된 최적의 배합에서 블록의 내력 및 인성 증대를 위해 GFRP 보강근을 배근하였다. GFRP 보강 방법에 따른 다공성 콘크리트 블록의 하중-변위 관계 및 인성을 평가하였다.

2. 실험상세

2.1 사용 재료

콘크리트 배합에서 사용된 시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재는 5mm 이상 25mm 이하의 부순골재를 사용하였다. 각 골재 직경에 따른 골재의 물리적 성질은 Table 1에 나타내었으며, Figure 1에 조립률 그래프를 나타내었다. 골재의 입도가 감소할수록 조립률은 감소하였으며, 밀도는 차이가 나타나지 않았다. 사용된 이형 GFRP 보강근의 직경은 9mm이며, 응력-변형률 관계는 Figure 2에 나타내었다. 이형 GFRP 보강근의 단면적, 인장 강도 및 탄성계수는 각각 63.59mm^2 , 918.4MPa 및 32,900MPa이며, 최대 응력 이후 급격히 파단하는 취성모드를 보였다.

2.2 배합상세

목표 압축강도 및 공극률을 만족하는 최적의 다공성 콘크리트 배합설계비 선정을 위한 배합상세는 Table 2에 나타내었다. 배합실험에서 다공성 콘크리트의 골재입도에 따른 변

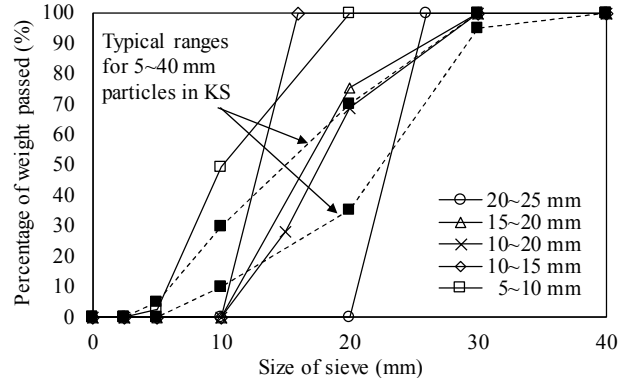


Figure 1. Particle size distribution curve of each aggregate

화를 평가하고자 입도를 10~15mm, 15~20mm 및 20~25mm로 변화하였으며, W/C 와 C/G 를 각각 25% 및 15%로 고정하였다. 반면 기존 배합[10,11]을 참고로 W/C 와 C/G 는 골재크기가 5~10mm일 때 각각 35% 및 13%로 하였으며, 골재크기가 10~20mm일 때 각각 30% 및 25%로 사용하였다.

Table 1. Physical properties of coarse aggregates

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Modulus of fineness	Unit weight (kg/m ³)
20 - 25	2.78	7.97	808.25
15 - 20	2.76	7.25	741.75
10 - 15	2.78	7	760.50
10 - 20	2.73	7	788.25
5 - 10	2.72	6.48	770.00

Table 2. Mix proportion of porous concrete

Particle size of aggregates (mm)	W/C (%)	C/G (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)
20 - 25	25	15	81.58	326.33	2175.5
15 - 20					
10 - 15					
10 - 20	30	25	141.8	472.65	1890.6
5 - 10	35	13	98.63	281.79	2167.6

2.3 인성 향상을 위한 GFRP 보강근 배근

다공성 콘크리트의 경우 휨 내력을 확보하기 위해서는 콘크리트 전단전달 능력에 대한 검토도 필요하다. 이를 고려하여 GFRP의 장부작용에 의한 전단저항 향상을 통해 결과적으로 다공성 콘크리트의 휨 내력을 높이기 위하여 GFRP 보강근의 배근위치를 변화시켰다. GFRP 보강에 따른 다공성 콘크리트에서 배합은 압축강도 발현을 고려하여 최적배

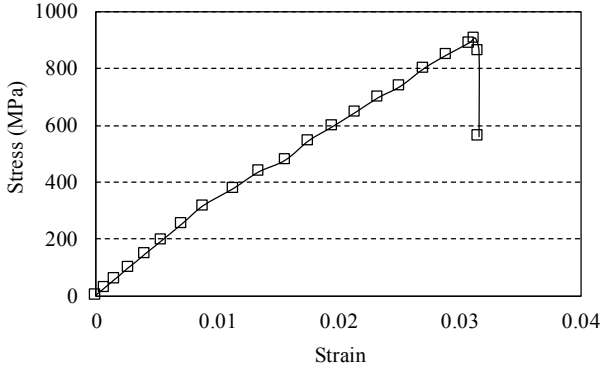


Figure 2. Tensile stress-strain curves for GFRP bars

합 설계에서 결정된 15~20mm의 골재를 사용한 배합을 이용하였다(3.3 참고). GFRP 보강위치는 Figure 3에 나타난 바와 같이 배근 하였다. 또한, 비교를 위해 무보강 시험체도 제작하였다. Figure 3에 나타난 바와 같이 B1 시험체는 인장 측에 GFRP를 1개 보강하였으며, B2 시험체는 인장 및 압축 측에 1개씩 보강하였다. B3 시험체의 경우 인장 및 압축 측에 GFRP를 2개씩 보강하였으며, B4 시험체의 GFRP를 압축, 인장 및 중립 측 위치에 각각 2개씩 보강하였다.

2.4 실험방법 및 측정항목

다공성 콘크리트의 압축강도 및 공극률 평가를 위해 KS F 2403[12]에 따라 원주형 공시체($\phi 100 \times 200\text{mm}$)를 제작하였다. 압축강도는 재령 1, 3, 7일 및 28일에서 KS F 2405[13]에 따라 측정하였다. 공극률(A_t) 측정은 일본 에코 콘크리트연구위원회에서 제안한 “포러스 콘크리트의 공극률 시험방법(안)”의 용적법[14]으로 측정하였는데, 그 평가식은 다음과 같다.

$$A_t(\%) = 1 - \frac{(W_2 - W_1)/\rho_w}{V_1} \times 100 \quad \text{----- (1)}$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도를, W_1 과 W_2 는 각각 공시체의 수중질량 및 24시간 자연방치 후의 기건질량을 의미한다.

GFRP 보강 방법에 따른 휨 강도 및 인성지수 평가를 위해 KS F 2403[12]에 따라 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 시험체를 제작하였으며, KS F 2408[15]에 의해 3등분점 재하 방법으로 28일에서 하중-변위 관계를 측정하였다. 보 중앙 경간에서 처짐은 KS F 2566[16]에 따라 측정하였다(Figure 4). 인성지수는 ASTM C 1018[17]에 따라 산정하였다. 인성지

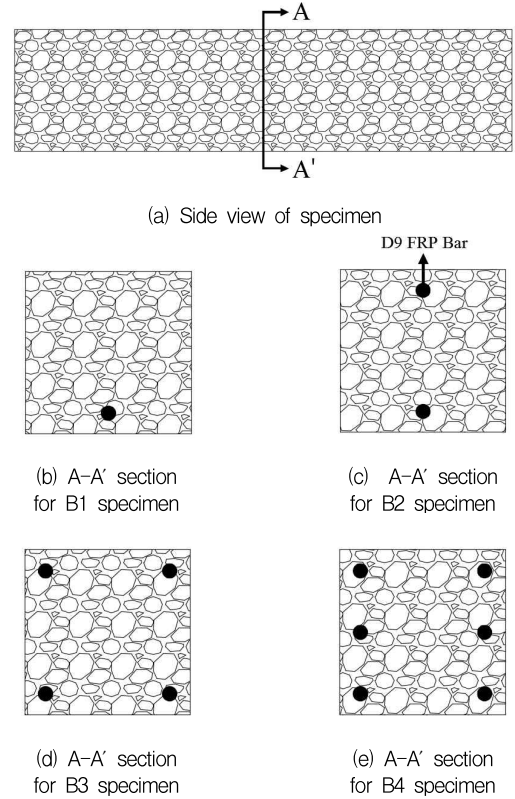


Figure 3. Arrangement of GFRP bars

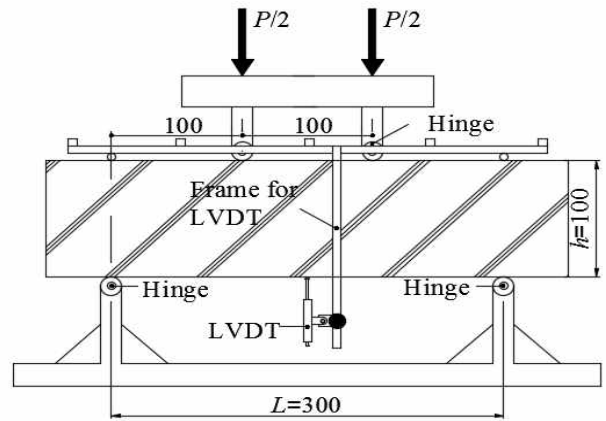


Figure 4. Test set-up for flexure (unit :mm)

수 I_5 , I_{10} , I_{20} 및 I_{30} 은 최초균열 발생 시 처짐(δ)의 3배, 5.5배, 10.5배 및 15.5배의 변위까지 소산되는 에너지의 비를 나타낸다(Figure 5). 즉, 하중-변위 곡선에서 δ 까지의 면적 대비 3δ , 5.5δ , 10.5δ 및 15.5δ 까지의 면적의 비로서 각 인성지수들이 산정된다.

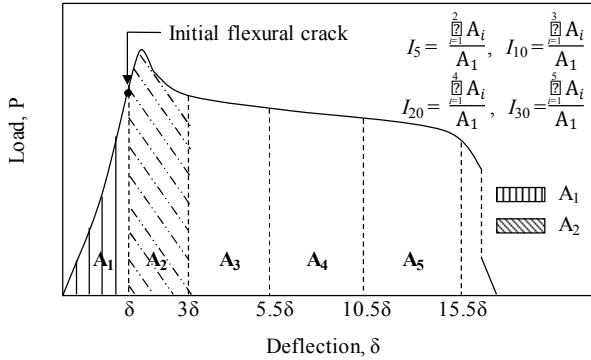


Figure 5. Definition of toughness index

3. 실험결과 및 분석

3.1 공극률

골재입도 변화에 따른 공극률 측정결과는 Table 3에 나타내었다. 측정결과 동일한 배합에서의 골재입도가 커질수록 공극률은 약 13~15% 증가하는 하였으며, W/C 및 C/G 가 증가할수록 공극률은 감소하는 경향을 나타내었다. 골재입도가 20~25mm인 배합이 재령 28일 기준 43.45%로 가장 높은 공극률을 나타내었으며, 골재입도가 10~20mm인 배합에서 20~25mm골재를 사용한 배합에 비해 약 40% 낮은 30.88%로 가장 낮은 공극률을 나타내었다. 이는 C/G 및 W/C 가 5%씩 증가하며 시멘트량 및 시멘트 페이스트의 유동성 증가로 인해 공극률이 감소하였다. 동일한 W/C 및 C/G 를 사용한 골재입도 10~15mm 및 15~20mm 배합의 경우 재령 28일 기준 37.07% 및 37.90%로 20~25mm 배합에 비해 약 17% 및 15% 감소한 결과를 나타내었다. 골재입도 5~10mm를 사용한 배합의 경우 재령 28일 기준 37.26%로 골재입도 20~25mm를 사용한 배합에 비해 약 17% 감소하였다. 5~10mm의 골재를 사용한 배합의 경우 C/G 가 13%로 가장 낮은 시멘트량이 사용되었지만, W/C 가 35%로 시멘트 페이스트 유동성이 증가 하면서 공극률이 감소하였다.

Table 3. Test results for different porous concrete mixtures

Size (mm)	Void ratio (%)	f_{cu} (MPa)
20 - 25	43.45	2.86
15 - 20	37.90	3.70
10 - 15	37.07	3.77
10 - 20	30.88	6.11
5 - 10	37.26	3.60

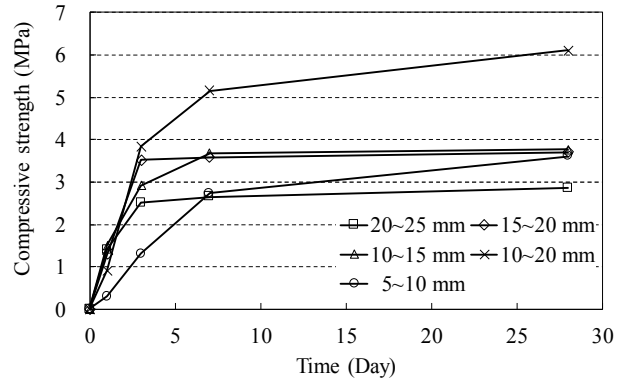


Figure 6. Compressive strength development of porous concrete

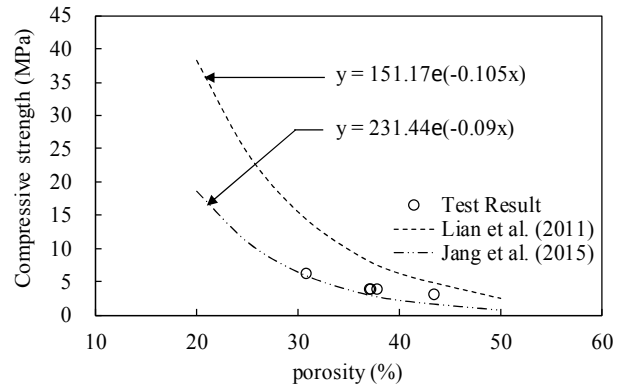


Figure 7. Relationship of porosity and compressive strength

3.2 압축강도 발현 및 공극률과의 관계

골재입도 변화에 따른 압축강도 측정결과는 Table 3과 Figure 6에 나타내었다. 동일한 W/C 와 C/G 를 사용한 배합의 경우 압축강도가 재령 3일까지 선형적으로 증가하였으며, 재령 3일에서의 압축강도는 28일 압축강도 대비 78~95% 수준으로 재령 3일에서 높은 압축강도발현 특성을 나타내었다. 반면, W/C 와 C/G 를 변화한 배합의 경우 압축강도가 재령 7일까지 선형적으로 증가하였으며, 재령 7일에서의 압축강도는 28일 압축강도 대비 75~84% 수준이었다. 다공성 콘크리트 배합에서 W/C 와 C/G 가 증가함에 따라 압축강도 발현이 지연되었다.

다공성 콘크리트의 압축강도와 공극률의 관계를 Figure 7에 나타내었다. 동일 그림에 Jang et al.[18] 및 Lian et al.[19] 모델을 함께 나타내었다. 다공성 콘크리트의 압축강도는 공극률의 증가와 함께 감소하는데, 그 기울기는 Jang et al.[18] 모델에 가까웠다.

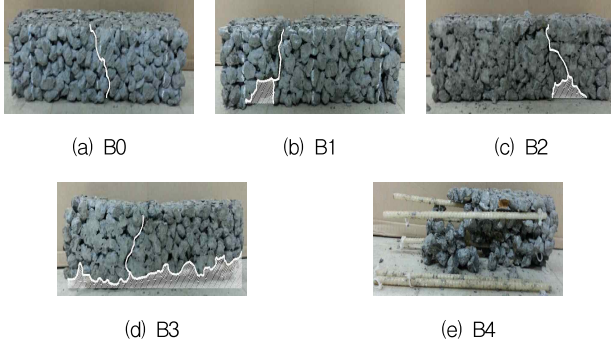


Figure 8. Failure mode of each beam specimen

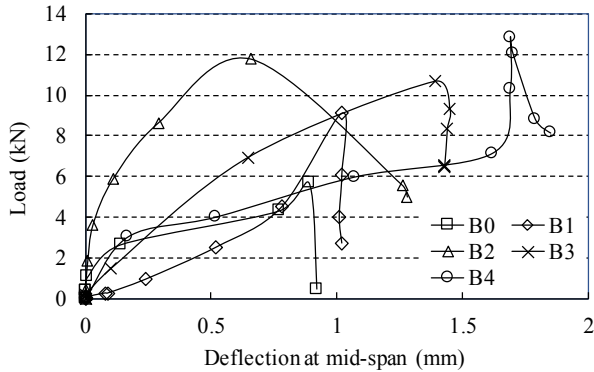


Figure 9. Load-deflection relationship of each beam specimen

3.3 하중-변위관계

각 시험체 파괴양상은 Figure 8과 같으며, GFRP 보강 방법에 따른 보의 하중-변위관계는 Figure 9에 나타내었다. 무보강 시험체인 B0의 경우 휨 구간에서 휨 균열에 의해 파괴가 지배되었다. 반면, GFRP 보강 시험체들은 최대 휨 내력에 도달하기 전에 전단파괴 양상을 나타내었다. 예를 들어 B2 시험체에서 콘크리트의 낮은 압축강도를 고려하여 GFRP 보강근의 항복강도(f_y)를 200MPa로 가정하여 산정한 휨 내력은 $0.88\text{kN} \cdot \text{m}$ 로서 실험 값인 $0.59\text{kN} \cdot \text{m}$ 보다 약 1.5배 높다. 이는 GFRP로 보강된 시험체들은 전단구간에서 콘크리트의 전단파괴에 의해 그 거동이 지배되고 있음을 의미한다. 이러한 파괴양상 및 균열진전은 Figure 8에서도 보여주고 있다. 결과적으로 전단파괴에 의해 지배되고 있는 다공성 콘크리트 보에서 GFRP 보강에 의한 내력상승은 GFRP의 휨 저항보다는 장부작용에 의한 영향 때문이다. 이와 같은 이유로 GFRP 보강 다공성 콘크리트 보의 하중-변위 관계는 전형적인 거동보다는 초기 강성 및 최대내력 이후의 하중저하 기울기도 상당한 편차를 보였다. 결과적으로 다공성 콘크리트 보의 하중-변위 관계는 공극분포, 균열

진전 및 파괴모드에 의해 중요한 영향을 받았다.

3.4 최대내력

각 시험체의 휨 강도는 Table 4에 나타내었다. GFRP 보강 다공성 콘크리트 보의 거동은 전단균열 및 전단파괴에 의해 지배되었다. 하지만 GFRP 보강근의 장부작용에 의한 전단내력 향상을 통하여 결과적으로 보의 내력은 향상되는 결과를 보였다. GFRP 보강근의 최대내력은 B4 시험체가 가장 높았는데, 무보강 보인 B0에 비해 약 2.25배 높았다. GFRP 보강근을 압축과 인장 측에 각각 1본씩 배근한 B2 시험체도 무보강 보에 비해 약 2배 높은 내력을 보였다. 비록 전단파괴에 의해 지배되었지만 파괴 시 내력에 대해 무보강 단면에 대한 휨 응력으로 산정한 결과도 ACI 318-14 [20]에서 제시하는 파괴계수 식을 이용한 예측값보다 높았다. 무보강 시험체 B0의 휨 응력은 ACI 318-14[20]의 예측값보다 약 1.4배 높았으며, GFRP 보강 시험체들에서 측정된 휨 응력도 기준 예측값보다 약 2.2~3.1배 높았다.

Table 4. Test results for flexural strength and toughness index

Specimen	f_r			Toughness indices			
	Exp* (MPa)	Pre** (MPa)	Exp/Pre	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
B0	1.71		1.41	-	-	-	-
B1	2.73		2.25	4.6	8.6	26.6	-
B2	3.53	1.21	2.91	4.8	11.2	27.4	43.4
B3	3.2		2.64	5.5	12.3	28.8	-
B4	3.79		3.13	5.7	13.8	38.4	-

* The measured $f_r (=6M/(bh^2))$ was calculated from the flexural stress equation of a non-reinforced rectangular section, where M is the ultimate moment and b and h are the width and overall depth of section, respectively.

** The predictions are calculated using ACI 318-14 equation $(0.63 \sqrt{f_{ck}})$.

3.5 인성 지수

GFRP 보강방법에 따른 인성지수는 Table 4에 나타내었다. 측정결과 B2를 제외한 모든 시험체에서 15.5δ 에 도달하기 이전에 파괴되어 I_{30} 은 측정하지 못하였다. GFRP 보강근을 압축과 인장 측에 각각 1본씩 배근한 B2 시험체의 I_5 , I_{10} , I_{20} 및 I_{30} 은 각각 4.8, 11.2, 27.4, 43.4로 산정되었다. I_{20} 을 기준으로 평가하면, GFRP 보강근의 증가와 함께 인성지수는 다소 증가하였다. 시험체 B4는 B2에 비해 인성지수 I_{20} 이 약 1.4배 높았다.

4. 결 론

다공성 콘크리트의 내력 및 인성 증대를 위해 GFRP 보강 방법을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 골재입도가 15~20mm인 다공성 콘크리트에서 압축 강도 3MPa, 공극률 30%를 달성하기 위해서는 W/C 와 C/G 가 각각 25% 및 15%를 추천될 수 있었다.
- 2) GFRP 보강 보의 최대 내력은 무보강 시험체에 비해 약 10~55% 증가 하였다. 비록 GFRP 보강 다공성 콘크리트 보들은 전단파괴에 의해 지배되었지만 GFRP 보강근의 장부작용에 의한 전단내력 향상을 통하여 내력이 다소 향상되는 결과를 나타내었다.
- 3) GFRP 보강 다공성 콘크리트 보의 하중-변위 관계는 전형적인 거동보다는 초기 강성 및 최대내력 이후의 하중저하 기울기도 상당한 편차를 보였다. 결과적으로 다공성 콘크리트 보의 하중-변위 관계는 공극분포, 균열진전 및 파괴모드에 의해 중요한 영향을 받았다.
- 4) GFRP 보강 콘크리트 보들은 비록 전단파괴에 의해 지배되었지만 인성지수도 다소 향상되었다. I_{20} 을 기준으로 평가하면, GFRP 보강근의 증가와 함께 인성지수는 다소 증가하였다. 시험체 B4는 B2에 비해 인성지수는 I_{20} 이 약 1.4배 높았다.

요 약

본 연구에서는 다공성 블록의 내구성 향상을 위해 압축강도 3MPa 및 공극률 30%를 만족하는 배합설계를 확인하였으며, 선정된 배합에서 GFRP 보강 방법에 따른 보의 내력 및 인성 증가를 평가하였다. 다공성 콘크리트의 목표성능 만족을 위해서는 골재입도 15~20mm에서 물-시멘트 비 및 시멘트-골재 비가 각각 25% 및 15%로 추천될 수 있었다. GFRP로 보강된 다공성 콘크리트 보의 거동은 전단파괴에 의해 지배되었다. 이에 따라 GFRP의 휨 저항 발휘는 매우 적었으며, GFRP 보강근의 장부작용에 의한 전단내력상승은 결과적으로 다공성 콘크리트 보의 하중 저항성과 인성을 향상시켰다. GFRP 보강근을 압축과 인장측에 각각 1본(D9)씩 배근한 경우 내력은 무보강 보에 비해 약 2.1배 증가하였으며, 인성지수 I_{30} 값은 43.4를 보임으로서 인성지수 값

을 측정할 수 없었던 무보강 보에 비해 상당히 향상되었다.

키워드 : 다공성 콘크리트, GFRP, 내력, 인성

Acknowledgement

This study was funded by the Ministry of Industry and Commerce in 2016 and supported by the leap Technology Development Project (C 0443351) of the Small and Medium Business Administration.

References

1. Park SB, Cho YS, Kim JH, An experimental study on physical mechanical properties and application of porous concrete using fly ash and silica fume, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2002 Nov;22(6):1391-400.
2. Seoul metropolitan government [Internet]. Seoul wiki [updated 2016 July 15]. Available from: http://yesan.seoul.go.kr/wk/wkSelect.do?itemId=86349&tr_code=sweb.
3. Park JS, Kim BK, Kim WS, Seo DS, Kim WJ. Investigation on water purification effect through long-term continuous flow test of porous concrete using effective microorganisms, Journal of the Korea Concrete Institute, 2014 Apr;26(2):219-27.
4. Kim MH, Kim GY, Baik YK, Kim, JH, Influence of mix factors and mixing ratio of aggregate on the strength and water permeability of porous concrete, Journal of the Korean Concrete Institute, 2000 Dec;12(6):91-8.
5. Takahisa O, Naoki M, Jung YU. Preparation of porous concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2000 Sep;12(5):29-32.
6. Lim SH, Kang HS, Jee NY. Study on the properties of porous concrete according to the aggregate shape and size, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2005 Jul;9(3):93-100.
7. Jung YS. Properties and applications porous concrete, Journal of the Korea Ready Mixed Concrete Industry Association, 1998 Oct;10(57):23-31.
8. Sung CY, Kim TH, Engineering properties of permeable polymer concrete for pavement using powdered waste glass and recycled coarse aggregate, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 2011 Nov;53(6):59-65.
9. Son BL, Kim MS, Kim CH, Jang HS. Bond characteristic between lightweight concrete and GFRP bar, Journal of Korean Institute

-
- for Structural Maintenance and Inspection, 2013 Nov;17(6): 112–21.
10. Alireza J, Ali AR, Mohammad J. Mechanical characteristic of pervious concrete considering the gradation and size of coarse aggregates, *Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2014 Sep;6(9):437–42.
 11. Joshi T, Dave U. Evaluation of strength, permeability and void Ratio of pervious concrete with changing W/C ratio and aggregate size, *Journal of Civil Engineering and Technology*, 2016 Jul;7(4):276–84.
 12. Korean Industrial Standards, Standard test methoda for making and curing concrete specimens, Eumseong (Korea): Korean Standards Association; 2005, 18 p.
 13. Korean Industrial Standards, Standard test method for compressive strength of concrete, Eumseong (Korea): Korean Standards Association; 2010, 12 p.
 14. Tarnai M, Mizuguchi H, Hatanaka S, Katahira H, Nakazawa T, Yanagibashi K, Kunieda M, Design, construction and recent applications of porous concrete in japan, In : Ken Day, Hoe peng Lim, Teng Hooi Tan, Desmond King, *Our World in Concrete & Structures*; 2003 Aug 28–29; Singapore, Orchard Plaza: Cl–premier;2003, p. 121–30.
 15. Korean Industrial Standards, Standard test methoda for flexural strength of concrete, Eumseong (Korea): Korean Standards Association; 2016, 17 p.
 16. Korean Industrial Standards, Standard test methoda for flexural performance of fiber reinforced concrete, Eumseong (Korea): Korean Standards Association; 2014, 16 p.
 17. American Society for Testing and Materials, Standard method first crack strength of fiber reinforced concrete, West Conshohocken(US): ASTM; 1997, 8 p.
 18. Jang JG, Ahn YB, Souri H, Lee HK, A novel eco–friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: heavy metal leaching characteristics and compressive strength, *Journal of the Construction and Building Materials*, 2015 Mar;79:173–81.
 19. Lian C, Zhuge Y, Beecham S, The relationship between porosity and strength for porous concrete, *Journal of Construction and Building Materials*, 2011 Nov;25(11):4294–8.
 20. American Concrete Institute, Building code requirements for structural concrete, Michigan(US): ACI; 2014, Chapter 22, Sectional strength p. 347–84.