

퍼포본드 FRP-콘크리트 합성부의 휨거동에 관한 매개변수 연구

유승운¹, 국무성^{2*}

¹관동대학교 토목공학과, ²(주)유일종합기술단

A Parametric Study for Bending Behavior of Perfobond FRP-Concrete Composite Beam

Yoo, Seung-Woon¹ and Kook, Moo-Sung^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Kwandong University

²Yuill Engineering Consultants Co., Ltd.

요약 최근 영구거푸집과 보강재 역할을 동시에 하는 FRP-콘크리트 합성부재에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며, 일부에서는 실제 교량바닥판에 적용되고 있다. 본 연구에서는 파괴실험으로 평가한 퍼포본드 FRP 콘크리트 합성부에 대해 비선형 유한요소해석 프로그램을 활용하여 검증해석을 실시하고, 이를 이용하여 FRP 보강재 형상에 따른 매개변수 해석을 수행하였다. 퍼포본드 FRP 보강재의 경우 다우웰 영향으로 내력이 증가하는 양상이 나타났고, 본 해석모델을 중심으로 판단하면 웨브의 높이를 고려하여 25~35mm 범위에서 구멍직경을 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Abstract In recent years, the use of hybrid fiber reinforced polymer(FRP)-concrete members with a dual purpose of both formwork and reinforcement, has been considered in some structures and has been applied in a small number of bridge decks. Numerical simulations of the beam failure tests were performed using nonlinear finite element program and a parametric study was performed with variables of perfobond shape. The ultimate strength was increased with perfobond shape because of dowel action. It was showed a good performance in case of approximately perforate diameter 25~35mm in this case.

Key Words : parametric study, perfobond FRP plank, permanent formwork, composite beam, composite action

1. 서론

국내외적으로 섬유강화 폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)가 건설재료로 인식되어 관심을 갖게 된 것은 비교적 최근의 일이다[1]. FRP는 다른 건설재료에 비해 상대적으로 고가이므로 주로 구조물의 보수보강 재료로 활용[2]되다가 최근 주 구조부재로서의 활용이 시도되고 있다[3]. 토목 및 건축구조물 공사에서 FRP 판의 이용은 처음 재래의 목재 및 강재 거푸집 보완재로서 사용하기 시작하였으나 상대적으로 내구성이 뛰어나고, 경량이며, 방식 성능이 뛰어난 FRP 판을 거푸집으로 적극 활용하게 되었다. 그 후 점차 시공성을 향상시키기 위해 콘크리트 양생

후에도 FRP 판을 제거하지 않는 영구 거푸집으로 활용하게 되면서, 이를 거푸집 역할 외에 구조부재로서 활용하고자 하는 연구가 최근에 많은 연구자에 의해 진행되고 있다[4,5,6]. FRP-콘크리트 합성구조의 설계 개념은 콘크리트 타설시 FRP 거푸집 부재만으로 자중과 시공 하중을 지지하고, 향후 콘크리트가 양생 된 후에는 FRP 보강재와 콘크리트가 일체적 합성거동으로 인한 합성단면으로 추가 고정하중과 활하중을 지탱하는 구조 형식이다[7,8].

본 시스템이 효과적으로 기능하기 위해서는 FRP 판과 현장타설 콘크리트의 합성작용이 매우 중요한 역할을 담당한다. 콘크리트와 FRP 판의 일체 거동을 증진시키기 위해 FRP 판에 에폭시를 이용하여 잔골재를 부착하거나,

*Corresponding Author : Kook, Moo-Sung

Tel: +82-10-8774-9922 email: kook98@lycos.co.kr

접수일 12년 03월 02일

수정일 (1차 12년 05월 02일, 2차 12년 05월 08일)

게재확정일 12년 05월 10일

FRP 판의 웨브(web)에 천공을 한 퍼포본드(perfobond) FRP를 활용하여 결합력을 증진시킨다[9,10]. 여기서, 퍼포본드는 합성구조에서 이종재간의 합성작용을 위한 전단연결재의 한 종류로서 1980년대 후반에 개발되어 최근 각종 구조물의 전단연결재로 사용되고 있다[11].

본 연구는 오래전부터 사용한 재래방식의 철근콘크리트 구조형식을 대신할 FRP-콘크리트 합성보 구조에 관한 것으로 기존 실험 및 수치해석 결과[9,10]를 활용하여 FRP 보강재의 형상에 대한 영향을 규명하고자 형상크기 변수에 관한 매개변수 연구를 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[12]를 이용하여 수행하고자 한다. 연구에 고려된 매개변수로서는 기본 역T형과 리브(rib)형 역T형 간의 리브효과를 검토하고, 웨브에 설치한 구멍의 크기 효과에 대한 평가를 해석적으로 수행하고자 한다.

2. 실험 및 유한요소해석 개요

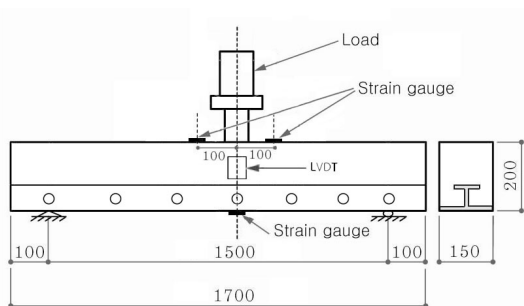
2.1 실험체 개요 및 형상

표 1은 실험 및 수치해석에 사용한 FRP 판 및 콘크리트 합성보의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 그림 1은 실험체 형상 및 실험장치를 나타내고 있다[9,10].

[표 1] 실험 및 수치해석 합성보 상세[9]

[Table 1] List of test specimens[9]

실험체 명	천공유무	부재길이 (mm)	비고
F1-1	No perfobond	1700	
F1-2	No perfobond	1700	
F1-3	Perfobond	1700	
F1-4	Perfobond	1700	
F1-5	-	1700	2-D16 steel reinforcement



[그림 1] 합성보의 형상 및 실험장치[9]

[Fig. 1] Installation and testing apparatus[9]

2.2 해석모델 및 경계조건

보통의 경우, 콘크리트 압축강도로 부터 응력-변형률 관계를 위한 제안식이 많이 제안되었으나, 본 연구에서는 Carreira and Chu[13]가 제안한 관계식을 이용하여 콘크리트 응력-변형률 관계를 결정하였으며, 그 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_c = \frac{f'_c \gamma (\epsilon_c / \epsilon'_c)}{\gamma - 1 + (\epsilon_c / \epsilon'_c)} \quad \gamma = \left| \frac{f'_c}{32.4} \right|^3 + 1.55 \quad (1)$$

여기서, σ_c ; 콘크리트 압축응력

ϵ_c ; 콘크리트 변형률

f'_c ; 콘크리트 공시체의 압축강도

ϵ'_c ; f'_c 에 대응하는 변형률(0.002)

상기의 관계식을 이용하여 콘크리트 재료의 응력-변형률 관계를 유도하였으며, $0.4f'_c$ 까지를 선형탄성한계로 가정하였고, 그 이상의 응력상태에 대해서 소성 변형률을 적용하였다. 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 $4,700\sqrt{f_{ck}}$ 를 적용하였고, 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 일축 압축응력에 대한 일축 인장응력의 비를 0.0836으로 가정하였다.

[표 2] FRP 재료 물성치[9]

[Table 2] Mechanical properties for FRP plank[9]

종류	인장강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
GFRP	427	355	33.4

유한요소해석은 범용구조 해석 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하였고, 3차원 구조해석 모델을 구성하여 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석과 관련하여 FRP 판 및 콘크리트의 변형에 따른 기하학적 비선형과 재료 비선형을 동시에 고려하였으며, 재료 물성은 재료실험을 통하여 얻어진 기본 물성을 바탕으로 하였다. FRP 판의 재료특성은 표 2의 재료 특성값을 적용하였다. 해석모델은 대칭성과 해석 효율성을 고려하여 1/4 대칭 모델로 하였고, 콘크리트와 FRP 보강재는 감차적분(reduced integration)을 적용한 8절점 3차원 솔리드요소(C3D8R)로 모델링하였고, 철근은 2절점 선형 3차원 트러스(2-node linear 3D truss, T3D2) 요소로 하였다[10].

2.3 수치해석 결과

각 실험체에 대해서 최대 파괴하중과 파괴 시 변위의 실험치와 해석치를 표 3에 비교하여 정리하였다. 파괴하중의 경우, 실험치에 대한 해석치의 오차율은 약 9%에서 15% 내외로 나타났고, 파괴시의 변위도 비교적 실험치에 근사한 값을 보임으로써 유한요소해석에 적용한 재료 모델 및 기하학적 모델은 비교적 실제 거동에 가까운 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다[10].

[표 3] 실험 및 해석결과 비교[10]

[Table 3] Comparison of experimental and numerical results[10]

실험체명	시편길이 (mm)	파괴하중 (kN)		파괴시 변위 (mm)		Fu(실험) ----- Fu(해석)	비고
		실험결과	해석결과	실험결과	해석결과		
F1-1	1700	58.9	52.0	6.49	9.8	1.13	Non-perfobond
F1-2	1700	60.8		7.98		1.17	
F1-3	1700	59.7	53.7	7.26	10.5	1.11	Perfobond
F1-4	1700	55.8		7.51		1.04	
F1-5	1700	39.4	36.0	4.85	5.9	1.09	reinforcement 2-D16

3. FRP 보강재의 매개변수 해석

3.1 매개변수 해석 개요

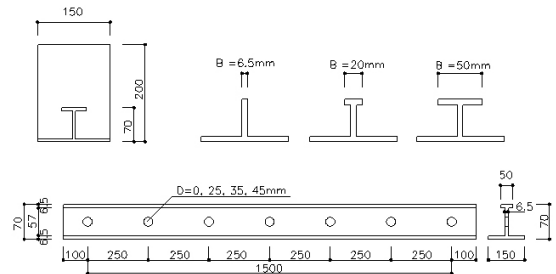
매개변수 해석은 파괴 구조실험 조건의 제약 사항에 구애 없이 보다 다양한 FRP 보강재 형상을 적용하여 수치해석을 수행하였고, 그 결과를 비교·분석하였다. FRP 보강재의 제원에 따른 콘크리트 보의 내력 특성을 평가하기 위하여, FRP 판의 상부 리브 폭과 웹 천공 지름을 매개변수로 하여 FRP 보강재로 인장 보강된 콘크리트 합성보의 극한내력을 비교 평가하였다.

해석모델 주요 제원은 상부 리브 요소의 폭(B)을 매개변수로 한 경우는 리브가 없는 경우(B_r=6.5mm)와 리브의 폭이 20 및 50 mm인 유형으로 구분하였고, 역T형 FRP 보강재 웹의 퍼포본드 구멍지름(D)을 매개변수로 한 경우는 지름을 0, 25, 35, 45 mm의 4가지 유형으로 구분하였다. 대상 해석모델은 그림 2과 같이 총 길이 1700mm인 해석모델을 대상으로 하였다.

[표 4] 매개변수연구 해석모델

[Table 4] Analysis models for parametric study

구분	리브 폭, B _r (mm)	구멍 지름, D (mm)
B00D00	6.5	0
B00D25	6.5	25
B00D35	6.5	35
B00D45	6.5	45
B20D00	20	0
B20D25	20	25
B20D35	20	35
B20D45	20	45
B50D00	50	0
B50D25	50	25
B50D35	50	35
B50D45	50	45



[그림 2] 퍼포본드 FRP 판의 제원

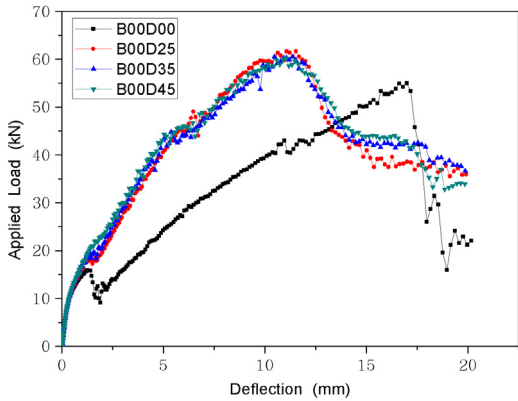
[Fig. 2] Dimensions of perfobond FRP plank

3.2 해석모델 결과

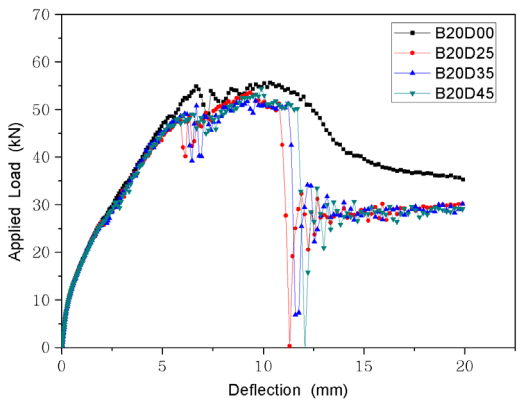
그림 3~5는 FRP 보강재의 다양한 형상에 따라 FRP 판과 콘크리트 사이의 마찰조건으로서 ABAQUS에서 제공하는 거친 마찰조건(rough condition)을 적용한 경우에 대한 하중-변위 관계 곡선을 나타 낸 것이다. 거친 마찰 조건은 요소 경계면에서의 전단거동을 허용하지만 마찰 계수가 매우 큰 값으로 적용되어 완전부착에 가까운 거동을 하는 경계조건으로서 그림 3의 B00D00 해석모델의 하중-변위 곡선에서 보는 바와 같이 1차 부착파괴 이후에도 경계면 마찰저항에 의해 2차 강성을 보이며 하중이 증가하는 거동을 보인다. 거친 마찰조건을 적용한 경우, 하중-변위곡선은 재하실험 결과와 유사한 경향을 보이지만, 전단변형에 의한 저항력 감소로 극한하중 값은 다소 감소하는 것으로써, 실제 거동에 비해 보수적인 결과를 얻는 것으로 판단된다.

그림 6~8은 최대 주응력방향의 변형률 분포를 보인 것으로서 B00D00 해석모델, 즉 비 퍼포본드 FRP 합성보는 웹 천공이 없으므로 콘크리트 다우웰에 의한 저항력이 발현되지 못하고 중앙부 균열에 의해 파괴에 도달하는 것으로 나타났고, 그 외의 해석모델에서는 콘크리트

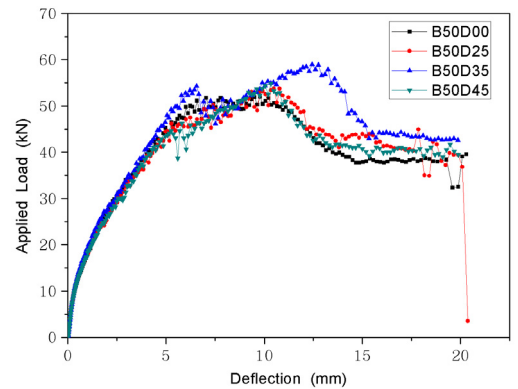
보의 인장부 수직균열과 사인장 균열 양상이 실험결과와 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.



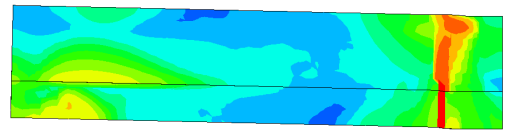
[그림 3] 리브가 없는 해석모델의 하중-변위 곡선
[Fig. 3] Load-displacement curve for analysis model of no rib



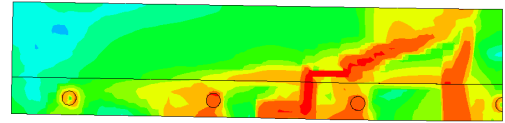
[그림 4] 리브 폭 20mm 해석모델의 하중-변위 곡선
[Fig. 4] Load-displacement curve for analysis model of rib width 20mm



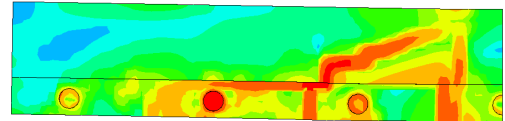
[그림 5] 리브 폭 50mm 해석모델의 하중-변위 곡선
[Fig. 5] Load-displacement curve for analysis model of rib width 50mm



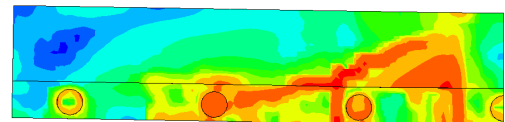
(a) B00D00



(b) B00D25

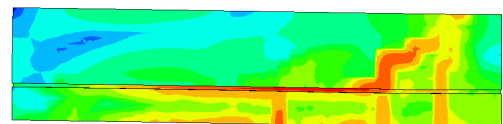


(c) B00D35

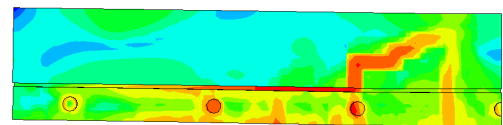


(d) B00D45

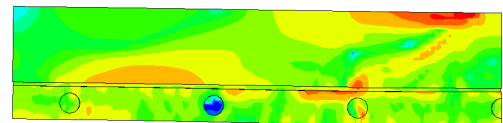
[그림 6] 리브가 없는 해석모델의 변형률 분포
[Fig. 6] Strain distribution for analysis model of no rib



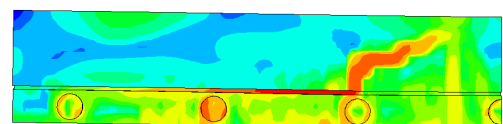
(a) B20D00



(b) B20D25

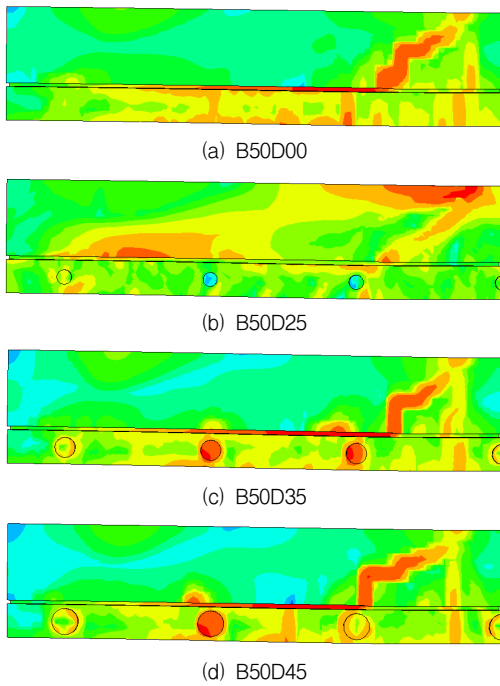


(c) B20D35



(d) B20D45

[그림 7] 리브 폭 20mm 해석모델의 변형률 분포
[Fig. 7] Strain distribution for analysis model of rib width 20mm

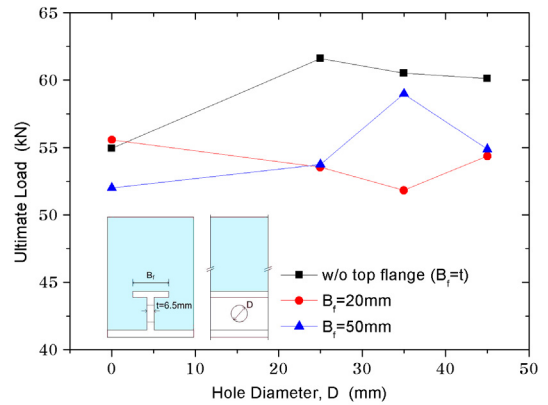


[그림 8] 리브 폭 50mm 해석모델의 변형률 분포
[Fig. 8] Strain distribution for analysis model of rib width 50mm

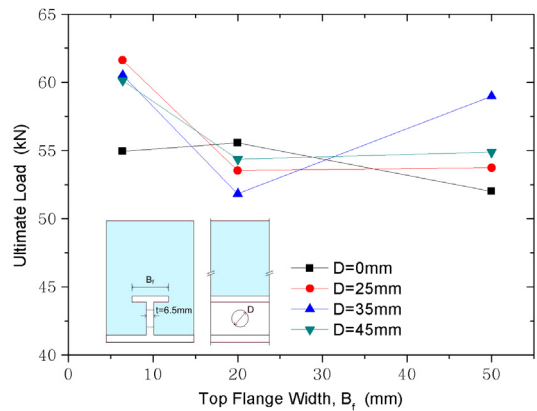
3.3 FRP 보강재 매개변수의 영향 분석

그림 9는 퍼포본드 FRP 판에서 웨브에 구멍 지름 변화에 대한 극한하중 변화를 보인 것이다. 구멍 지름의 영향은 상부 리브를 두지 않는 해석모델(⊥)의 경우에는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만, 상부 리브 폭이 20mm 및 50mm인 경우에는 상반된 결과를 보이는데, 이는 상부 리브가 없는 역T형 보강재(⊥)의 경우에는 합성보의 거동에 대한 저항력 메커니즘에 콘크리트 다우웰이 매우 큰 영향인자로 작용하여 직경 변화에 따른 경향이 뚜렷이 나타나는 반면에, 상부 리브를 갖는 역T형 보강재(⊥)의 경우에는 상부 리브를 따라 발생하는 콘크리트 파괴면의 형성과 콘크리트 다우웰의 파괴에 따른 내력 감소의 영향이 복합적으로 나타남에 따라 구멍 직경 변화에 대한 영향을 파악하기 어려운 것으로 판단된다.

그러나, 대체적으로 웨브 천공한 퍼포본드 FRP에 의한 콘크리트 다우웰의 영향으로 내력이 증가하는 양상이 나타난다고 볼 수 있으며, 웨브 판의 높이를 고려하여 25~35mm 범위에서 구멍지름을 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.



[그림 9] 웨브에 천공 지름에 대한 극한하중 변화
[Fig. 9] Variation of ultimate load for perforate diameter



[그림 10] 리브 폭(⊥)에 대한 극한하중 변화
[Fig. 10] Variation of ultimate load for rib width

그림 10은 상부 리브 폭의 변화에 대한 극한하중 변화를 보인 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 상부 리브의 폭이 증가함에 따라 내력의 변화는 천공지름에 따라 다소 상이한 결과를 보여주고 있으며, 상부 리브를 두지 않는 역T형 보강재(⊥)를 적용한 경우에 천공지름에 따라 큰 내력의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 이는 각 해석 모델에서 보인 변형률 분포에서 나타난 바와 같이 상부 리브를 갖는 역T형 보강재(⊥)의 경우에는 중앙부 인장 균열과 함께 상부 리브 면을 따라 발생하는 균열이 파괴 모드를 지배함으로써 오히려 내력이 변화하는 것으로 판단되며, 상부 리브 면(⊥)에서의 균열 진전에 따른 파괴 모드를 제거하기 위해서는 역T형 보강재를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 단, 역T형 보강재를 적용 할 경우 충분한 마찰저항을 얻어내고 슬립거동을 방지하기

위하여 웹 천공을 통해 콘크리트 다우웰에 의한 저항력을 확보하는 것이 바람직하다. 그림 10에서도 역T형 보강재에 대해서 웹 천공을 하는 경우에는 천공하지 않은 경우에 비해 내력이 약 10% 증가함을 알 수 있다. 상기의 분석 결과로부터 FRP 판으로 콘크리트 합성보를 인장 보강하는 경우에는 상부 리브를 둔 역T형 보강재를 적용하고, 웹판 구멍 직경을 웹 높이 대비 35%, 즉 FRP 보강재 높이 70mm의 경우에 직경 25mm로 하는 것이 가장 보강효과가 높을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 FRP 판을 보강재로 활용한 콘크리트 합성보 실험체를 대상으로 파괴 실험결과를 모사할 수 있는 유한요소모형을 결정하고, 이를 활용한 FRP 판의 기하학적 형상을 매개변수로 하여 콘크리트 보의 보강효과를 해석적으로 검토하였다.

FRP 보강재의 웹를 천공한 경우, 콘크리트 다우웰의 영향으로 내력이 증가하는 양상이 나타난다고 볼 수 있으며, 본 해석모형을 중심으로 판단하면 웹의 높이를 고려하여 25~35mm 범위에서 구멍직경을 결정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

역T형 FRP 보강재에서 상부 리브가 없는 역T형 FRP 보강재(⊥)의 경우에는 합성보 거동에 대한 저항력 메커니즘에 콘크리트 다우웰이 큰 영향인자로 작용하여 구멍 직경의 변화에 따른 경향이 뚜렷이 나타나지만, 상부에 리브가 있는 역T형 FRP 보강재(⊥)의 경우에는 상부 리브 면을 따라 발생하는 콘크리트 파괴면의 형성과 콘크리트 다우웰의 파괴에 따른 내력 감소의 영향이 복합적으로 나타남에 따라 구멍 직경의 변화에 대한 영향을 파악하기 어려운 것으로 판단된다.

References

[1] Bank, L.C., "Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials", John Wiley & Sons, USA, 2006.

[2] Teng, T.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L. "FRP-strengthened RC Structures", John Wiley & Sons, England, 2002.

[3] Hulatt, J., Holloway, L. and Thorne, A., "The Use of Advanced Polymer Composites to Form an Economic Structural Unit", Construction and Building Materials,

Vol.17, No.1, pp.55-68, 2003.

[4] Dieter, D.A., Dietsche, J.S., Bank, L.C., Oliva, M.G. and Russell, J.S., "Concrete Bridge Decks Constructed With FRP Stay-In-Place Forms and FRP Grid Reinforcing", Transportation Research Record No.1814, Journal of the Transportation Research Board, pp.219-226, 2002.

[5] Yoo, S.W. and Bae, H.U., "Bond Slip Behavior Cast-In-Place Concrete and FRP Plank Used as Permanent Formwork and Tensile Reinforcement ", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.27 No.1, pp.69-77, 2007.

[6] Yoo, S.W., "A Proposal of Simplified Bond Stress-Slip Model between FRP Plank and Cast-In-Place Concrete", Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Vol.12 No.1, pp.65-72, 2008.

[7] Yoo, S.W., Bae, H.U., Oliva, M.G. and Bank, L.C., "Experimental Study of Concrete Beam with FRP Plank as Formwork and Reinforcement", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.19 No.1, pp.67-74, 2007.

[8] Bank, L.C., Oliva, M.G., Bae, H.U., Barker, J. and Yoo, S.W., "Pultruded FRP Plank as Formwork and Reinforcement for Concrete Members", Advances in Structural Engineering, Vol.10, No.5, pp.1-11, 2007.

[9] Yoo, S.W. and Kook, M.S., "An Experimental Study of Perfobond FRP-Concrete Composite Beam", Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Vol.14 No.2, pp.121-127, 2010.

[10] Kook, M.S. and Yoo, S.W., "Finite Element Analysis for Bending Behavior of Composite Beam with Perfobond FRP Used as a Permanent Formwork", Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.12 No.7, pp.3280-3286, 2011.

[11] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. "A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.121, pp.614-625, 1994.

[12] HKS Inc., "ABAQUS User's manual", USA, 2008.

[13] Carreira, D.J. and Chu, K.H., "Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension", ACI Journal, Vol.83, NO.1, pp.21-28, 1985.

유 승 운(Seung-Woon Yoo)

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : KAIST 토목환경공학과 (공학석사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학과 (공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수

- 1995년 3월 ~ 현재 : 관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 신소재 토목구조응용

국 무 성(Moo-Sung Kook)

[정회원]



- 1996년 2월 : 관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 관동대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2011년 1월 : (주)경원엔지니어링

- 2011년 8월 ~ 현재 : (주)유일종합기술단

<관심분야>

구조공학, 토목구조, 안전진단 및 설계