

쪼갠파괴가 발생된 GFRP 보강근을 사용한 이음길이 산정식

Equation of the Development Length for the Pullout tests with GFRP Reinforcement having Splitting Failure

하상수* 최동욱**
Ha, Sang Su Choi, Dong Uk

ABSTRACT

The objective of this study offer the equation of the development length for GFRP reinforcement. Pullout test carried out to propose the development length for GFRP reinforcement. Test variables included embedment length ($L=15, 30$ and $45d_b$), pure cover thickness($C=0.5, 1.0, 1.5,$ and $2.0d_b$), diameter of reinforcement(D10, D13 and D16), and three types, (domestic : K2KR, K3KR, foreign : AsUS) of GFRP reinforcement. The method of test were introduced pure pullout and tests lasted until the GFRP reinforcements were reached final failure. Based on the results through the pullout test, the bond characteristics and average bond stress for GFRP reinforcement were investigated. The equation of development length was proposed based on the regression analysis selected specimens having splitting failure. The equation gained from this study compared with the design equation provided by ACI committee 440.1R-06. The results through this study are capable of the flexural member design with GFRP reinforcement having lab spliced.

요 약

본 연구는 GFRP 보강근의 정착길이 산정식을 제안하는 것이다. 정착길이 산정식을 제안하기 위해 인발실험을 실시하였다. 실험변수는 묻힘길이, 피복두께, 보강근 직경, 보강근 종류이다. 묻힘길이는 $15d_b, 30d_b, 45d_b$ 로 하고, 순 피복두께는 $0.5d_b, 1.0d_b, 1.5d_b,$ 및 $2.0d_b$ 로 계획하였다. 사용된 보강근은 모두 3종류(국내 2종, 국외 1종)이고 보강근 크기는 D10, D13, D16이다. 실험은 겹침이음된 GFRP 보강근 양 단부를 동시에 인발하여 최종파괴에 도달될 때까지 GFRP 보강근에 하중을 가력하였다. 인발실험을 통해 얻은 결과를 토대로 각 변수에 따른 GFRP 보강근의 부착특성 및 평균부착응력을 산정하였으며, 실험체중 쪼갠파괴된 실험체만을 선택하여 회귀분석을 통해 정착길이 산정식은 제안하였고 ACI 440.1R-06에 제안하고 있는 식과 비교하였다. 본 연구를 통해 제안된 회귀분석에 의한 제안식을 근거로 겹침이음된 GFRP 보강근을 이용한 휨 설계가 가능할 것으로 판단된다.

* 정회원, 환경대학교 건설공학연구소 연구교수

** 정회원 환경대학교 건축학부 교수

1. 서론

섬유 보강 폴리머(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP) 보강근은 내부식성, 비자기성 등 재료적 특성과 시공성이 우수하기 때문에 향후 철근을 대체할 수 있는 건설재료로 여겨지고 있다. 미국, 일본, 캐나다 등 선진 외국에서는 이미 GFRP 보강근을 현장에 적용하기 위한 설계 및 시공지침을 제안되어 있으나 국내에서는 GFRP 보강근에 대한 시공 및 설계 지침이 마련되어 있지 않아 현장적용에 많은 어려움이 있다. 국내 실정에 맞는 GFRP 보강근에 대한 시공 및 설계 지침이 마련되어야 하며, 이 일환으로 본 연구에서는 GFRP 보강근의 정착길이 산정식을 제안하고자 한다. 정착길이 산정식을 제안하기 위해 인발실험을 실시하였으며, 인발실험을 통해 얻은 결과를 토대로 각 변수에 따른 GFRP 보강근의 부착특성 및 평균부착응력을 산정하였다. 또한, 2변수 선형 회귀분석을 통하여 정착길이 산정식을 제안하였으며, ACI 440.1R-06¹⁾에서 제안하고 있는 기준식과 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 실험

본 연구에 사용된 GFRP 보강근의 형태는 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 K3KR과 K2KR은 국내에서 개발된 GFRP 보강근이며, AsUS는 국외에서 사용하고 있는 보강근이다. 각각의 보강근은 콘크리트와 보강근 사이의 부착을 향상시키기 위하여 표면을 개선하거나 나사선 형태로 제작한 것을 알 수 있다. 인발실험에 사용된 GFRP 보강근의 재료적 물성을 파악하기 위하여 인장시험을 실시하였으며, 재료시험 결과는 표 1과 같다. 콘크리트는 실험실 인근의 레미콘 공장으로부터 주문하여 실험체를 제작하였고, 압축강도 시험 결과 32.1 MPa로 나타났다. 실험은 그림 2에 나타난 바와 같이 보강근 양 단부에 설치한 그림에 일정축력을 가한 상태에서 인발하였다.



(a) K3KR



(b) K2KR



(c) AsUS

그림 1. 보강근 종류



그림 2. 실험 상황

표 1. GFRP 보강근 재료 물성

properties	this study				
	AsUS	K2KR	K3KR		
	D13	D13	D10	D13	D16
tensile strength (MPa)	690	989	1,000	992	1022
elastic modulus (GPa)	40.8	37.2	40.3	40.3	40.3
rupture strain (%)	1.69	2.66	2.48	2.46	2.54

2.2 실험결과

본 연구에서는 묻힘길이, 피복두께, 보강근 직경 및 보강근 종류를 변수로 하여 변수에 따른 파괴모드 및 부착특성을 파악하기 위해 총 53개의 인발 실험을 수행하였으며, 실험결과는 표 2와 같다.

표 2. 실험 및 회귀분석 결과

실험체 명	d _b	A	L	P _u (kN)	stress	u	f _{ck}	(u/f _{ck}) ^{0.5}	Analysis				Failure mode
									c/d _b	d _b /L	(u/f _{ck}) ^{0.5}	Error(%)	
K3(B)-D10-L15-c0.5	10	78.50	150	24.97	318.09	5.30	32.10	0.936	0.5	0.067	0.963	-2.85	S
K3(B)-D10-L15-c1.0	10	78.50	150	25.29	322.17	5.37	32.10	0.948	1	0.067	-	-	F
K3(B)-D10-L15-c1.5	10	78.50	150	27.59	351.46	5.86	32.10	1.034	1.5	0.067	-	-	F
K3(B)-D10-L15-c2.0	10	78.50	150	35.39	450.83	7.51	32.10	1.326	2	0.067	1.365	-2.97	S
K3(B)-D10-L30-c0.5	10	78.50	300	34.04	433.63	3.61	32.10	0.638	0.5	0.033	0.652	-2.24	S
K3(B)-D10-L30-c1.0	10	78.50	300	36.82	469.04	3.91	32.10	0.690	1	0.033	0.787	-14.00	S
K3(B)-D10-L30-c1.5	10	78.50	300	48.67	620.00	5.17	32.10	0.912	1.5	0.033	0.921	-0.97	S
K3(B)-D10-L30-c2.0	10	78.50	300	51.05	650.32	5.42	32.10	0.957	2	0.033	1.055	-10.25	S
K3(B)-D10-L45-c0.5	10	78.50	450	39.44	502.42	2.79	32.10	0.493	0.5	0.022	0.552	-11.95	S
K3(B)-D10-L45-c1.0	10	78.50	450	46.52	592.61	3.29	32.10	0.581	1	0.022	0.686	-18.10	S
K3(B)-D10-L45-c1.5	10	78.50	450	48.35	615.92	3.42	32.10	0.604	1.5	0.022	-	-	F
K3(B)-D10-L45-c2.0	10	78.50	450	56.62	721.27	4.01	32.10	0.707	2	0.022	-	-	F
AS(B)-D13-L15-c0.5	12.7	126.61	195	24.81	195.95	3.19	32.10	0.563	0.5	0.065	-	-	F
AS(B)-D13-L15-c1.0	12.7	126.61	195	35.63	281.41	4.58	32.10	0.809	1	0.065	-	-	F
AS(B)-D13-L30-c0.5	12.7	126.61	390	56.62	447.19	3.64	32.10	0.643	0.5	0.033	0.652	-1.45	S
AS(B)-D13-L30-c1.0	12.7	126.61	390	64.25	507.45	4.13	32.10	0.729	1	0.033	0.787	-7.90	S
AS(B)-D13-L45-c0.5	12.7	126.61	585	70.62	557.76	3.03	32.10	0.534	0.5	0.022	0.552	-3.36	S
K3(B)-D13-L15-c0.5	12.7	126.61	195	36.26	286.39	4.66	32.10	0.823	0.5	0.065	0.944	-14.75	S
K3(B)-D13-L15-c1.0	12.7	126.61	195	52.8	417.02	6.79	32.10	1.198	1	0.065	1.08	9.96	S
K3(B)-D13-L15-c1.5	12.7	126.61	195	61.836	488.39	7.95	32.10	1.404	1.5	0.065	1.213	13.61	S
K3(B)-D13-L15-c2.0	12.7	126.61	195	78.89	623.08	10.15	32.10	1.791	2	0.065	-	-	F
K3(B)-D13-L30-c0.5	12.7	126.61	390	59.16	467.25	3.80	32.10	0.671	0.5	0.033	0.652	2.78	S
K3(B)-D13-L30-c1.0	12.7	126.61	390	64.25	507.45	4.13	32.10	0.729	1	0.033	0.787	-7.90	S
K3(B)-D13-L30-c1.5	12.7	126.61	390	88.67	700.32	5.70	32.10	1.006	1.5	0.033	0.921	8.47	S
K3(B)-D13-L30-c2.0	12.7	126.61	390	91.77	724.81	5.90	32.10	1.041	2	0.033	1.055	-1.35	S
K3(B)-D13-L45-c0.5	12.7	126.61	585	64.81	511.88	2.78	32.10	0.490	0.5	0.022	0.552	-12.64	S
K3(B)-D13-L45-c1.0	12.7	126.61	585	57.41	453.43	2.46	32.10	0.434	1	0.022	-	-	F
K3(B)-D13-L45-c1.5	12.7	126.61	585	81.43	643.14	3.49	32.10	0.616	1.5	0.022	-	-	F
K3(B)-D13-L45-c2.0	12.7	126.61	585	89.06	703.41	3.82	32.10	0.674	2	0.022	-	-	F
K2(B)-D13-L15-c0.5	12.7	126.61	195	47.08	371.84	6.05	32.10	1.069	0.5	0.065	0.944	11.66	S
K2(B)-D13-L15-c1.0	12.7	126.61	195	59.16	467.25	7.61	32.10	1.343	1	0.065	-	-	F
K2(B)-D13-L15-c1.5	12.7	126.61	195	75.07	592.91	9.65	32.10	1.704	1.5	0.065	-	-	F
K2(B)-D13-L15-c2.0	12.7	126.61	195	78.89	623.08	10.15	32.10	1.791	2	0.065	-	-	F
K2(B)-D13-L30-c0.5	12.7	126.61	390	68.07	537.62	4.38	32.10	0.773	0.5	0.033	0.652	15.61	S
K2(B)-D13-L30-c1.0	12.7	126.61	390	79.52	628.06	5.11	32.10	0.902	1	0.033	0.787	12.80	S
K2(B)-D13-L30-c1.5	12.7	126.61	390	86.52	683.34	5.56	32.10	0.982	1.5	0.033	0.921	6.23	S
K2(B)-D13-L30-c2.0	12.7	126.61	390	87.79	693.37	5.64	32.10	0.996	2	0.033	-	-	F
K2(B)-D13-L45-c0.5	12.7	126.61	585	83.34	658.23	3.57	32.10	0.631	0.5	0.022	0.552	12.53	S
K2(B)-D13-L45-c1.0	12.7	126.61	585	96.06	758.69	4.12	32.10	0.727	1	0.022	0.686	5.62	S
K2(B)-D13-L45-c1.5	12.7	126.61	585	82.06	648.12	3.52	32.10	0.621	1.5	0.022	-	-	F
K2(B)-D13-L45-c2.0	12.7	126.61	585	83.98	663.28	3.60	32.10	0.635	2	0.022	-	-	F
K3(B)-D16-L15-c0.5	16	200.96	240	59.8	297.57	4.96	32.10	0.875	0.5	0.067	0.923	-10.01	S
K3(B)-D16-L15-c1.0	16	200.96	240	67.43	335.54	5.59	32.10	0.987	1	0.067	1.097	-11.13	S
K3(B)-D16-L15-c1.5	16	200.96	240	73.574	366.11	6.10	32.10	1.077	1.5	0.067	1.231	-14.31	S
K3(B)-D16-L15-c2.0	16	200.96	240	78.92	392.71	6.55	32.10	1.155	2	0.067	-	-	F
K3(B)-D16-L30-c0.5	16	200.96	480	92.25	459.05	3.83	32.10	0.675	0.5	0.033	0.652	3.36	S
K3(B)-D16-L30-c1.0	16	200.96	480	129.78	645.80	5.38	32.10	0.950	1	0.033	0.787	17.20	S
K3(B)-D16-L30-c1.5	16	200.96	480	146.23	727.66	6.06	32.10	1.070	1.5	0.033	0.921	13.94	S
K3(B)-D16-L30-c2.0	16	200.96	480	158.12	786.82	6.56	32.10	1.157	2	0.033	1.055	8.81	S
K3(B)-D16-L45-c0.5	16	200.96	720	110.22	548.47	3.05	32.10	0.538	0.5	0.022	0.552	-2.59	S
K3(B)-D16-L45-c1.0	16	200.96	720	126.44	629.18	3.50	32.10	0.617	1	0.022	0.686	-11.21	S
K3(B)-D16-L45-c1.5	16	200.96	720	153.56	764.13	4.25	32.10	0.749	1.5	0.022	0.820	-9.54	S
K3(B)-D16-L45-c2.0	16	200.96	720	175.19	871.77	4.84	32.10	0.855	2	0.022	0.955	-11.66	S

Note 1. specimen index: K2(B)-D13-L15-c0.5, K2 = old Kict bar, K3= new Kict bar, As = Aslan, (B) = Bottom bar, D13 = Diameter of GFRP bars, L15 = embedded length of 195 mm (15d_b), c0.5 = cover thickness of 0.5d_b, S = Splitting failure, F = Fracture or Slip of GFRP reinforcement.

3. 정착길이 산정식 제안 및 비교

3.1 정착길이 산정식 제안

표 1에 나타난 53개 실험체 중 조깅과괴된 36개의 실험체를 대상으로 2변수 선형 회귀분석을 실시하였다. 참값에 대한 최대 및 최소 오차는 각각 17.2%, -18.1%이며, 결정계수 R²은 0.74로 나타났으며,

2변수 선형 회귀분석 결과식은 식 (1)과 같다. 또한, 평균전단응력(u)는 식 (2)와 같이 표현되므로 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정착길이 L 로 정리하면 식 (3)을 얻는다.

$$\frac{u}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.217 + 0.269\left(\frac{c}{d_b}\right) + 9.127\left(\frac{d_b}{L}\right) \quad \text{---(1)} \quad u = \frac{f_s A_b}{\pi d_b L} = \frac{f_s d_b}{4L} \quad \text{---(2)} \quad L = \frac{\left(\frac{f_s}{1.08\sqrt{f_{ck}}} - 33.9\right)d_b}{0.81 + \frac{c}{d_b}} \quad \text{---(3)}$$

실험과 회귀분석에 의한 $u/\sqrt{f_{ck}}$ 의 평균과 변동계수를 이용하여 안전율을 제안하였다. 안전율은 ACI 355.2-07에 제시되어 있는 5% 분위수($F_{5\%}$, 5% fractile)를 적용($F_{5\%} = 0.79$)하여 식 (4)를 얻었다.

$$L = \left[\frac{\frac{f_s}{0.85\sqrt{f_{ck}}} - 34.2}{0.80 + \frac{c}{d_b}} \right] d_b \quad \text{-----(4)}$$

3.2 정착길이 산정식 비교

식 (4)를 이용하여 실험에서 얻은 값($f_s = 871.7\text{MPa}$, $f_{ck} = 32.1\text{MPa}$, $C/d_b = 0.5 \sim 2.0$)을 적용하면 쪼갬 파괴가 발생되지 않게 되는 정착길이(L)를 구할 수 있다. 표 3는 정착길이를 제안식과 ACI 440.1R-06¹⁾에 제안된 기준식을 비교한 것이다. 표 3에서 보는 바와 같이 C/d_b 의 값이 0.5, 1.0, 1.5, 2.0으로 증가할수록 ACI 440.1R-06 기준식에 의한 정착길이가 제안식에 의한 정착길이보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 제안식은 보강근이 순수 인장실험인 반면, ACI 440.1R-06 기준식은 휨을 받는 보를 대상으로 했기 때문에 휨에 의한 균열 등으로 콘크리트와 보강근 사이의 부착성능이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 정착길이 비교

제안식에 의한 정착길이				ACI 기준식에 의한 정착길이			
c/d_b				C/d_b			
0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
$113d_b$	$82d_b$	$64d_b$	$53d_b$	$108d_b$	$104d_b$	$100d_b$	$97d_b$
$L = \left[\frac{\frac{f_s}{0.85\sqrt{f_{ck}}} - 34.2}{0.80 + \frac{c}{d_b}} \right] d_b$		$f_{ck} = 32.1\text{MPa}$, $f_s = 871.7\text{MPa}$		$L = \left[\frac{\frac{a f_{fr}}{0.083\sqrt{f_{ck}}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} \right] d_b$		$f_{ck} = 32.1\text{MPa}$, $f_{fr} = 871.7\text{MPa}$, $a = 1.0$	

4. 결론

인발실험을 통해 쪼갬파괴가 발생되지 않을 정착길이 산정식을 식 (4)로 제안하였으며, 휨을 받는 부재를 대상으로 한 ACI 440.1R-06의 기준식과 단순비교가 가능하며, 이를 근거로 인발 및 휨을 받는 부재의 정착길이 산정이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI 440 Committee, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2006.
2. Eshani M. R., Saadatmanesh H., and Tao S., "Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete," ASCE J. of Structural Engineering, Vol. 122, No. 3, Mar. 1996, pp. 247-254.
3. ACI Committee 355, "Qualification of Post - Installed Mechanical Anchors in Concrete (ACI 355.2-04)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2004.