



쪼갬파괴에 의한 FRP 보강근의 정착길이와 이음길이

천성철^{1)*} · 최동욱¹⁾

¹⁾(주)대우건설기술연구원 ²⁾한경대학교 건축학부

Development and Splice Lengths of FRP Bars with Splitting Failures

Sung-Chul Chun^{1)*} and Dong-Uk Choi²⁾

¹⁾ Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon 440-210, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

ABSTRACT Data from beam-based bond tests for FRP bars in the literature were collected and regression analyses were conducted for the data of splitting failure. Average bond strengths obtained from splice tests were found to be lower and more affected by C/d_b values than average bond strengths from anchorage tests, indicating needs of new design equation for the splice length of FRP bars based on the data of splice tests only. In addition, the variation of bond strengths was greater than that of tensile strengths of FRP bars and, therefore, a new safety factor should be involved for the design equation. Five percent fractile coefficients were used to develop the design equations based on the assumption that load and resistance factors for FRP reinforced concrete structures are same to the factors for steel reinforced concrete structures. The proposed design equations give economical and reliable lengths for development and splice of FRP bars. The proposed equation for splice provides shorter lengths than the ACI 440 equation in case of C/d_b of 3.0 or greater. Because FRP bars are expected to be used in slabs and walls exposed to weather with thick cover and large spacing between bars, the proposed equation gives optimal splice lengths.

Keywords : FRP bars, splitting failure, development length, splice length

1. 서 론

철근 부식이 우려되는 구조물에 FRP 보강근을 사용한 설계가 미국, 캐나다, 일본 등에서 증가하고 있으며, 국내에서도 FRP 보강근이 생산되고 이에 대한 연구가^{1,4)} 진행되었다. 향후 구조물의 내구성 향상을 통한 생애주기비용 절감을 위해 FRP 보강근의 활용은 증대될 것으로 기대된다.

FRP 보강근의 적용을 위한 다양한 연구분야 중 정착과 이음길이 설계가 매우 중요한데, 이것은 FRP 보강근이 철근에 비해 탄성계수가 낮고 리브의 형성이 어려워 철근에 비해 부착강도가 낮기 때문이다.⁵⁾ 현행 설계기준에 규정된 정착과 이음길이 산정식들은⁶⁻⁸⁾ 실험에서 산정된 평균 부착강도를 이용하여 정착길이를 산정하고 여기에 특정 계수를 곱하여 이음길이를 산정하고 있다.

가장 최근에 발표된 ACI 440의 쪼갬파괴(splitting failure) 부착강도식은⁶⁾ 총 75개의 보형식 부착실험들에서 구한 평균 부착강도를 회귀분석하여 개발되었다.⁹⁾ 여

기에 사용된 보형식의 부착실험들은 Fig. 1(b)~(d)에 보여주고 있는데, 정착과 이음을 구분하지 않고 있으며, 동일한 설계변수를 갖더라도 각 실험방법에 따라 부착강도가 다르게 평가될 우려가 있다. Fig. 1(d)의 이음실험은 실제 이음 거동을 가장 정확하게 평가할 수 있는 방법임에도 불구하고, 실험 자료가 부족하여 정착실험(Fig. 1(b)와 (c)) 결과와 함께 부착강도 평가식 산정을 위한 회귀분석에 사용되었다. ACI 440에서 채택하고 있는 이음길이 산정식은 이음부의 거동 특성이 반영되지 않고, 정착길이에 1.3배를 곱하여 산정한다. 이러한 방법은 철근의 B급 이음길이 산정방법과 동일하다.

ACI 440의 쪼갬파괴에 의한 정착길이 설계식 개발에 사용된 안전율은, FRP 보강근의 설계인장강도에 대한 안전율과 동일하다.^{6,9)} 부착강도의 변동계수는 FRP 보강근의 인장강도 변동계수보다 크기 때문에, 정착/이음부가 먼저 파괴될 가능성이 매우 높다.

이 연구에서는 ACI 440 쪼갬파괴 설계식에 사용된 데이터에 국내외 실험결과를 추가하고, 정착과 이음실험을 분리한 회귀분석을 통해 정착길이 설계식과 이음길이 설계식을 각각 제안하고자 한다. 또한 5% 분위수 개념을 적용하여 정착/이음길이가 경제적이면서도 충분한 신뢰성을 갖도록 한다.

*Corresponding author E-mail: bluebird@dwconst.co.kr

Received February 1, 2010, Revised March 11, 2010,

Accepted April 7, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

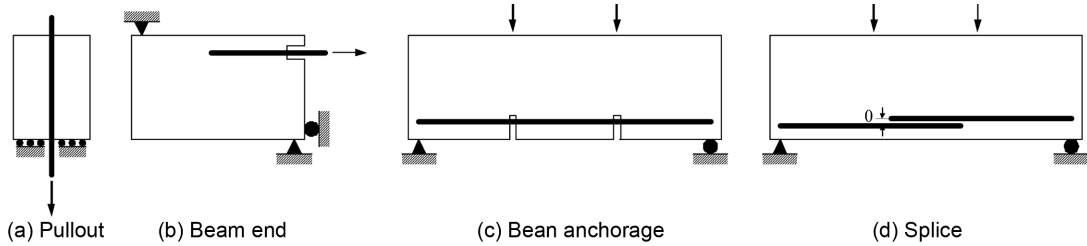


Fig. 1 Schematic of tests for bond behavior

2. 데이터베이스의 구성

ACI 440에서 총 240개의 보형식 부착실험 결과를 조사한 결과, 뽑힘파괴(pullout failure) 94개, 쪼갬파괴 75개 그리고 FRP 보강근의 인장파괴 71개로 구분되었다. 실험방법은 Fig. 1에서 인발실험을 제외하고, 보단부 실험 (beam end test), 보정착 실험 (beam anchorage test) 그리고 이음실험(splice test)으로만 구성하였다. 인발실험은 반력에 의한 횡구속력이 정착구간에 직접 작용하기 때문에 실제 거동을 모사할 수 없으므로 제외하였고, ACI 318과 ACI 408에서도 같은 이유로 인발실험을 제외하고 있다.¹⁰⁻¹²⁾

Fig. 1(b)의 보단부 실험은 실제 거동을 가장 손쉽게 묘사할 수 있는 방법으로 많은 연구에 사용되었다. 그러나 실제 이음에서는 보 휨에 의해 보강근에 인장력이 가해지기 때문에 인장력에 의한 부착응력 발생 외에도 휨 변형에 따른 프라이 거동(prying action)¹³⁾에 의한 인장응력도 발생하게 된다. 따라서 보단부 실험은 실제 현상에 비해 높은 부착강도를 제공할 우려가 있다. 보정착 실험은 정착구간에서 보강근에 작용되는 인장력이 변화하고 지지점 반력에 의해 끝단이 구속되어 프라이 거동이 제대로 발생되지 않아 이음실험에 비해 부착강도를 높게 평가하게 된다. 이음실험은 실험체가 크고 제작과 실험 비용이 많이 들지만, 실제 이음 거동을 가장 정확하게 재현할 수 있다. 그리고 실제 이음과 같이 2가닥의 보강근에서 횡방향 인장응력이 발생되므로 정착실험에 비해 낮은 부착강도가 발현된다.

ACI 440에서 사용한 75개의 쪼갬파괴 실험¹⁴⁻²⁰⁾ 중, 기본 부착강도 평가식에는 67개가 사용되었으며, 이중 79%인 53개가 정착실험으로 구성되었다. 그러나 보정착 실험에서는 뽑힘파괴 또는 보강근의 인장파괴만 발생되었으므로, 정착실험은 보단부 실험만으로 구성된다. 이음실험은 21%인 14개로 상대적으로 적다.

이 연구에서 이용한 실험 자료는 ACI 440에서 사용한 데이터에 저자들의 이음실험 연구 결과와¹⁾ 일본²¹⁾ 및 미국의²²⁾ 실험 결과를 추가하여 Table 1과 같이 총 114개로 ACI 440 자료에 비해 57% 증가하였다. 이음실험 결과를 많이 보충하였으며, ACI 440식에 사용된 이음실험 중 이음길이가 순수 휨구간을 벗어나는 실험체 6개를¹⁹⁾ 제외하였다. 부착강도 평가를 위해 정착실험 58개와 이음실험 47개를 각각 사용하였다.

Table 1 Classification of test types

Test types	ACI 440.1R-06		This study	
	Anchorage test	Splice test	Anchorage test	Splice test
Unconfined bottom bars	48		48 + 2	0 + 33
Confined bottom bars	5	14	5 + 3	14 - 6 + 6
Total	53	14	58	47

3. 정착실험에 의한 부착강도 평가

정착실험에 의한 부착강도 평가를 위해 전체 정착길이에 대한 평균 부착강도를 산정하였다. 부착응력은 정착길이에 비선형적 분포를 갖지만, 정확한 분포를 구하기 힘들기 때문에 평균 부착강도를 이용한다. 이러한 방법은 ACI 318 정착/이음식의 기본이 되는 Orangun 등의 연구를¹²⁾ 비롯해 ACI 440과 ACI 408에서도¹⁰⁾ 이용되고 있다.

보단부 실험에서 계측된 최대하중을 보강근의 공칭 표면적(=둘레길이 × 정착길이 = $\pi d_b l_d$)으로 나눠서 평균 부착강도 $u_{d,test}$ 를 산정하였다. 횡보강근 배치에 따른 부착강도의 증가가 명확하지 않아,⁹⁾ 횡보강근의 유무에 관계없이 모든 데이터를 함께 분석하였다. Fig. 2는 산정된 평균 부착강도를 동일한 정착길이를 갖는 실험군으로 분류하여 c/d_b 에 따라 나타낸 그래프이다. 여기서 c 는 순 피복두께와 순간격의 1/2 중 작은 값(mm)이다. 철근의 부착강도에는 c/d_b 가 큰 영향을 주는 설계인자이지만, FRP 보강근의 정착실험에서는 그 효과가 크지 않는 것

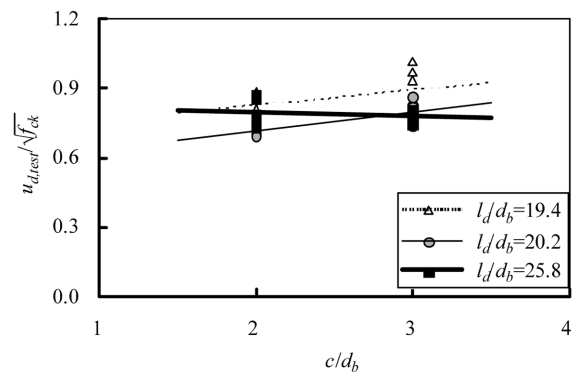


Fig. 2 Bond strength vs. clear cover/spacing relations with different development lengths of beam tests

으로 나타났다. FRP 보강근의 정착강도를 향상시키기 위해서는 피복/순간격을 크게 하는 것보다 정착길이를 길게 하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

정착실험에 의한 58개 부착강도에 대해 ACI 440식과 동일한 방법으로 2변수 비선형 회귀분석을 실시하여 식 (1)을 도출하였다. 식 (1)은 ACI 440식과 거의 유사하며, 특히 c/d_b 항은 ACI 440식과 같이 계수값이 작아 부착강도 예측에는 큰 영향을 주지 않는다. ACI 440식은 정착 거동만을 반영하고 있음을 알 수 있다.

식 (1)에 의한 실험체별 예측값과 실험값의 비는 평균 1.00, 변동계수(COV, coefficient of variation) 13.7%이다. Fig. 3은 c/d_b 값이 2 또는 3인 정착실험에서 구한 부착강도와 식 (1)로 구한 값을 비교한 것으로, 식 (1)이 부착강도의 변화를 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다. Fig. 4에서 예측값과 실험값을 비교한 결과 식 (1)이 연구자별 실험그룹에 특별한 편향 없이 양호하게 부착강도를 예측하는 것으로 나타났다.

$$\frac{u_{d,calc}}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.333 + 0.0405 \frac{c}{d_b} + 8.276 \frac{d_b}{l_d} (R^2 = 0.87) \quad (1)$$

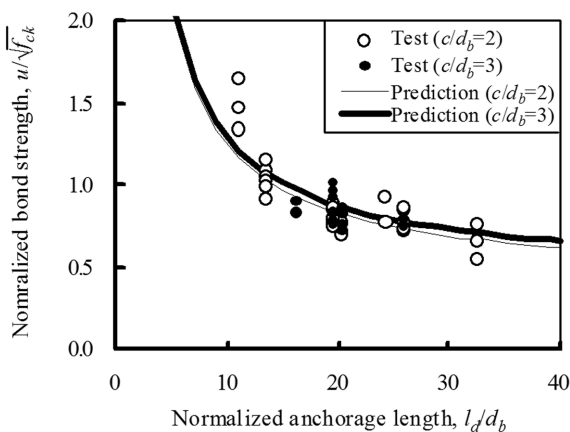


Fig. 3 Normalized bond stress versus normalized anchorage length for beam tests ($c/d_b = 2$ or 3)

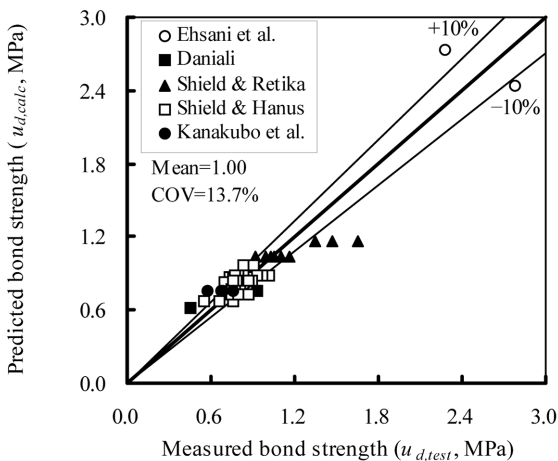


Fig. 4 Comparison of measured and predicted strengths of beam tests

여기서 $u_{d,calc}$ = 정착실험에 의한 예측 평균 부착강도(MPa), d_b = 보강근 지름(mm), l_d = 정착길이(mm)이다.

4. 이음실험에 의한 부착강도 평가

이음실험에서는 보강근에 작용되는 인장력이 직접 측정되지 않고, 이음부 단면에 작용되는 모멘트로 표현된다. 이 모멘트와 재료 및 기하학적 물성을 이용한 단면 해석을 통해 보강근에 작용되는 인장력을 산정한 후 공칭 표면적으로 나눠서 평균 부착강도를 구하였다. 단면 해석에서 콘크리트 응력-변형을 관계는 Hognestad의 비선형 모델을²³⁾ 사용하였으며, 보강근의 탄성계수는 실제 재료실험 결과를 이용하였다. 정착실험에 의한 부착강도와 마찬가지로, 횡보강근에 따른 부착강도의 증가가 명확하지 않아, 횡보강근의 유무에 무관하게 모든 데이터를 함께 분석하였다.

Fig. 5는 산정된 평균 부착강도를 동일한 이음길이를 갖는 실험군으로 분류하여 c/d_b 에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 2의 정착실험 결과와 달리, c/d_b 값이 증가할수록 부착강도가 명확히 증가되었다. 특히 이음길이가 길수록 부착강도가 c/d_b 에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 일반적으로 부착실험에서 이음길이가 증가할수록 평균 부착강도는 저하되지만, c/d_b 를 증가시켜서 부착강도를 향상시킬 수 있다. FRP 보강근이 주로 적용되는 부위가 외기에 노출된 슬래브나 벽체와 같이 피복두께가 두껍고 순간격이 넓은 부재이므로, 이러한 특성을 활용하여 FRP 보강근의 이음길이를 축소할 수 있을 것으로 기대된다.

실험에서 산정된 평균 부착강도를 ACI 440의 부착강도 예측식 식 (2)와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. [예측값]/[실험값] 비의 평균은 1.14, 변동계수는 17.1%으로 비교적 크게 나타났다. ACI 440식은 정착실험 결과를 위주로 한 데이터에서 유도된 것으로, 이음실험에 의한 부착강도에 대해서는 과대평가하고 있다. 그러나 c/d_b 값이 큰 경우와 이음길이가 충분한 경우(Fig. 6의 타원형 점선) ACI 440식은 부착강도를 낮게 평가하는 것으로 나타났다. ACI 440식 개발에 사용된 데이터는 l_s/d_b 가 30 미만의 짧은 정착길이를 갖는 실험체가 주를 이루고 있

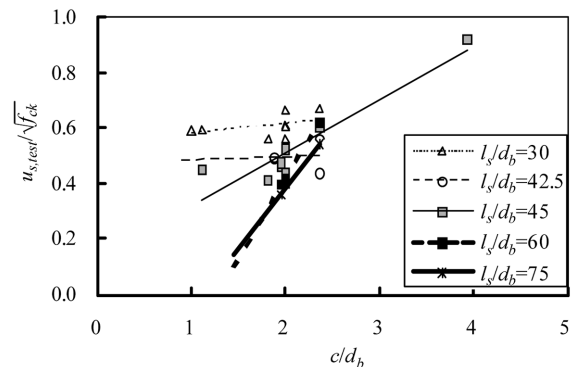


Fig. 5 Bond strength vs. clear cover/spacing relations with different splice lengths of splice tests

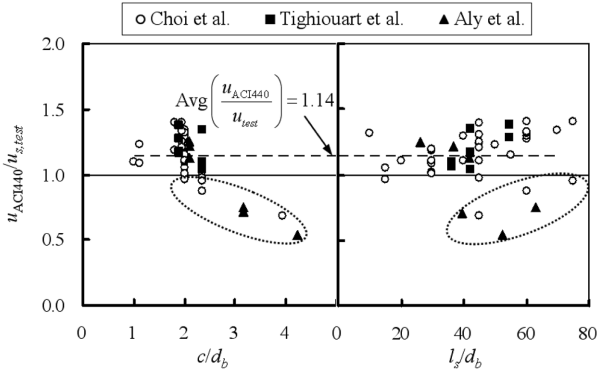


Fig. 6 Comparison of measured bond strengths with predictions by ACI440 equation for splice tests

어,⁹⁾ 이음길이가 긴 경우 부착강도 예측의 정확도가 저하됨을 알 수 있다.

$$\frac{u_{AC1440}}{\sqrt{f_{ck}}} = 0.332 + 0.0249 \frac{c}{d_b} + 8.3 \frac{d_b}{l_s} \quad (2)$$

여기서 u_{AC1440} = ACI 440의 평균 부착강도(MPa), l_s = 이음길이(mm)이다.

정착실험과 이음실험 결과를 동일한 ACI 440식으로 평가하면, 이음실험의 부착강도가 정착실험에 비해 낮음을 알 수 있다. 이것은 이음실험의 경우 2가닥의 보강근에 의해 콘크리트에 횡방향 인장응력이 크게 유발되고, Fig. 7과 같은 휨 변형에 의한 프라이 거동에 의해 피복 콘크리트 탈락 가능성이 높기 때문이다. 따라서 이음거동에 의한 부착강도는 정착에 의한 부착강도와 구분하여 평가되는 것이 필요하다.

47개의 이음실험에 의한 부착강도를 정착실험에 의한 부착강도와 동일한 방법으로 2변수 비선형 회귀분석을 실시하여, 이음거동에 의한 부착강도 평가식 식 (3)을 유도하였다. 식 (3)의 c/d_b 항 계수는 식 (1)의 계수에 비해 5배 이상 증가하여 c/d_b 값이 부착강도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 식 (3)에 의한 실험체별 예측값과 실험값의 비는 평균 1.00, 변동계수 15.9%로 정착실험에 비해 변동 폭이 커졌다(Fig. 8). 이음에서는 정착에 비해 프라이 거동의 영향이 추가되어 부착강도의 분산이 커지는 것으로 판단된다.

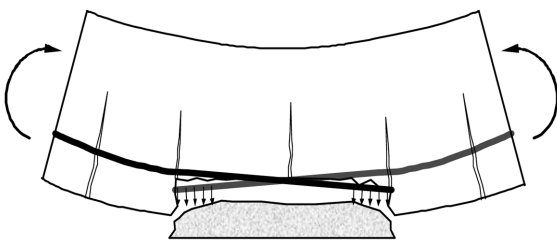


Fig. 7 Cover spalling in lap zone due to prying action caused by beam curvature

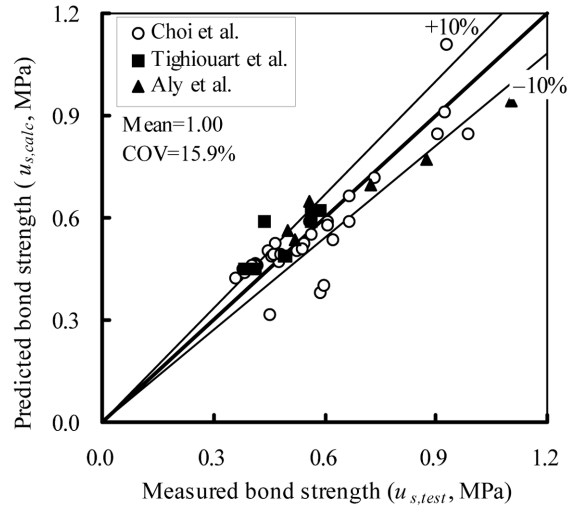


Fig. 8 Comparison of measured and predicted strengths of splice tests

$$\frac{u_{s,calc}}{\sqrt{f_{ck}}} = -0.088 + 0.210 \frac{c}{d_b} + 7.768 \frac{d_b}{l_s} (R^2 = 0.80) \quad (3)$$

여기서 $u_{s,calc}$ = 이음실험에 의한 예측 평균 부착강도(MPa)이다.

5. 정착길이와 이음길이 설계식

부착강도 예측식보다는 정착길이/이음길이 산정식이 실용적인 설계측면에서 편리하다. 앞장에서 산정된 평균 부착강도 예측식에 합리적인 설계 안전율을 고려한 후 정착길이와 이음길이 산정식을 유도할 수 있다.

5.1 설계식의 안전율

Wambeke¹⁴⁾는 300개의 인장실험결과 FRP 보강근의 설계인장강도와 실제 강도의 비가 0.85임을 확인하였고, 이 결과를 이용하여 부착에 의한 정착강도(또는 이음강도)는 설계인장강도의 1/0.85배가 발현되어야 한다고 제안하였다.

ACI 440에서 FRP 보강근의 설계인장강도는 식 (4)를 만족하도록 요구하고 있다. 식 (4)와 Wambeke의 실험 결과를 비교하면, Wambeke가 실험한 300개 FRP 보강근 인장강도의 변동계수는 5%임을 알 수 있다.

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma \quad (4)$$

여기서 f_{fu}^* = 보증 설계 인장강도, $f_{u,ave}$ = 실제 인장강도의 평균, σ = 실제 인장강도의 표준편차이다.

ACI 440의 부착강도 평가식 개발에 사용된 실험값을 ACI 440식으로 평가하면, [실험값]/[예측값] 비의 평균은 0.984이며 변동계수는 15%이었다.⁹⁾ FRP 보강근의 인장강도에 비해 부착강도의 분산이 3배로 매우 크다. FRP

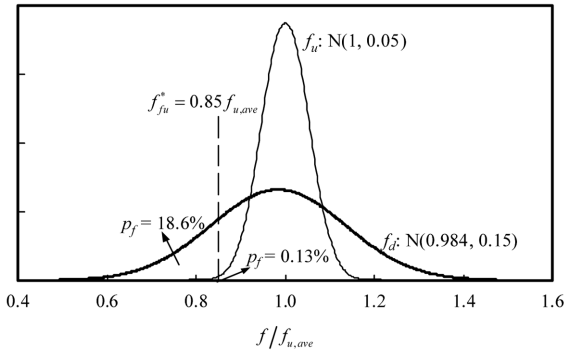


Fig. 9 Distribution and failure probability of tensile and splice/anchorage strengths (f_u is a tensile strength of FRP bars and f_d is a developed strength by bond.)

보강근의 인장강도와 부착에 의한 정착강도(또는 이음강도)의 분포를 Fig. 9에서 비교하였다. 정착강도(또는 이음강도)의 평균이 FRP 보강근의 인장강도 평균과 동일하다 하더라도, 정착강도(또는 이음강도)가 설계인장강도보다 낮을 확률이 매우 높다. 즉, FRP 보강근 모재에 비해 정착(또는 이음)이 설계강도를 하회할 확률이 143배(=18.6%/0.13%) 크다. 따라서 부착강도에 0.85의 안전율을 적용하는 ACI 440 설계식은 안전하지 않은 결과를 초래할 수 있으므로 개선될 필요가 있다.

정착과 이음부는 FRP 보강근과 동일한 수준의 강도와 이에 대한 신뢰성을 갖는 것이 FRP 보강 콘크리트 구조물의 설계개념에 적합하다. 이를 위해서 부착강도에 FRP 보강근과 동일한 수준의 안전율(3σ)을 고려하면, 정착강도가 설계인장강도의 1/0.55배를 발현해야 한다. 이 경우 정착길이와 이음길이가 과도하게 길어져서 실용성을 크게 저해한다.

철근 규격을 규정하는 KS D 3504²⁴⁾에서는 ISO 6935-2²⁵⁾에 따라 5% 분위수(fractile, 실제 강도가 설계기준강도를 초과할 확률이 95%이며 이에 대한 신뢰성이 90%)²⁶⁾에 근거하여 철근의 품질관리를 실시하고 있다. 또한 콘크리트용 앵커의 정착강도¹¹⁾와 확대머리철근의 정착강도²⁷⁾ 평가에도 5% 분위수가 적용되고 있다. FRP 보강 콘크리트 구조물의 설계에 철근콘크리트구조물에 적용하는 하중계수와 강도감소계수를 사용한다면, FRP 보강근의 설계 인장강도도 철근과 동일한 수준의 신뢰성을 갖는 것이 타당하다.

5.2 정착길이와 이음길이 설계식

ACI 440의 FRP 보강 구조물의 설계에서,⁶⁾ 보증 설계 인장강도 f_{fu}^* 에 환경영향계수 C_E 를 곱하여 설계인장강도 f_{fu} 를 산정한다. FRP 보강근이 설계인장강도 f_{fu} 를 발현하기 위해 필요한 평균 부착강도는 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$u_{req} = \frac{f_{fu} A_f}{l_d \pi d_b} = \frac{f_{fu} d_b}{4 l_d} \quad (5)$$

여기서 u_{req} = 설계 인장강도 f_{fu} 발현을 위해 필요한 평균 부착강도, A_f = FRP 보강근의 단면적이다.

정착실험에서 유도된 평균 부착강도를 설계부착강도로 저감하기 위한 5% 분위수계수(5% fractile coefficient, $n_{5\%}$)는 실험체 수와 변동계수를 이용하여 아래 식 (6)과 같이 산정한다.

$$n_{5\%} = m - k\sigma \quad (6)$$

여기서 m = [예측값]/[실험값]의 평균, k = 데이터 수와 목표 위험률 및 신뢰성에 따른 계수로 [참고문헌 26]에 따라 산정, σ = [예측값]/[실험값]의 표준편차이다.

5% 분위수계수 $n_{5\%} = 0.733$ 을 식 (1)에 곱한 후 식 (5)와 함께 l_d/d_b 에 대해 정리하면 정착길이 산정식을 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{\frac{8.42 f_{fu}}{\sqrt{f_{ck}}} - 205}{\frac{C}{d_b} + 7.72} \quad (7)$$

여기서 $C = c + 0.5d_b$ = 보강근의 중심에서 산정된 피복두께와 보강근 중심 간격의 1/2 중 작은 값(mm)으로, 콘크리트구조설계기준의 철근 정착길이 산정식의 변수와 일치시키기 위해 c 대신 사용하였다. 또한, 쪼갬파괴가 발생된 실험들의 C/d_b 값 범위는 $1.5 \leq C/d_b \leq 3.5$ 이다.

이음길이 설계식 또한 동일한 방법으로 5% 분위수계수 $n_{5\%} = 0.688$ 과 식 (3), (5)를 이용하여 다음 식 (8)과 같이 유도된다.

$$\frac{l_s}{d_b} = \frac{\frac{1.74 f_{fu}}{\sqrt{f_{ck}}} - 37.1}{\frac{C}{d_b} - 0.922} \geq \frac{l_d}{d_b} \quad (8)$$

여기서 이음길이의 하한은 정착길이를 설정하였으며, 쪼갬파괴가 발생된 실험들의 C/d_b 값 범위는 $1.3 \leq C/d_b \leq 4.7$ 이다.

5.3 ACI 440 설계식과의 비교

이 연구에서 제안한 설계식으로 산정된 정착길이와 이음길이를 ACI 440식으로 계산된 길이와 Fig. 10에서 콘크리트 강도에 따라 비교하였다. 제안된 정착길이 설계식을 유도하는 과정에 안전율로 사용된 5% 분위수계수가 0.733으로 ACI 440식에서 사용한 0.85보다 14%정도 낮기 때문에, Fig. 10과 같이 ACI 440보다 긴 정착길이가 산정되었다.

이음실험에 의한 부착강도는 4장에서 설명한 것처럼 피복두께와 보강근간격의 영향이 정착보다 크기 때문에, C/d_b 값에 따라 이음길이의 변화가 매우 크게 나타났다. C/d_b 값에 따라 이음길이의 변화가 매우 크게 나타났다. C/d_b 값에 따라 이음길이의 변화가 매우 크게 나타났다.

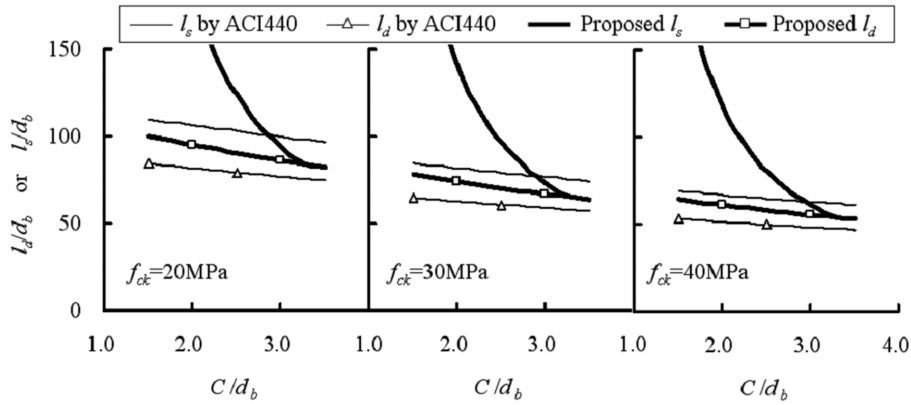


Fig. 10 Comparisons of development and splice lengths for $f_{tk} = 600$ MPa by ACI 440 and proposed equations

d_b 값이 2.0보다 작은 경우 40 MPa 콘크리트강도에서도 보강근 지름의 100배 이상의 이음길이가 요구되므로 실용적 측면에서 적용이 불가능하다. 그러나 C/d_b 값이 3.0보다 큰 경우는 현행 ACI 440보다 짧은 이음길이가 산정된다. FRP 보강근이 적용되는 부재가 주로 외기에 노출된 슬래브와 벽체이므로 보강근 순간격과 피복두께 확보가 용이하므로 $C/d_b = 3.0$ 이상은 어렵지 않게 확보될 수 있으리라 기대된다.

6. 결 론

향후 활용이 증대될 것으로 기대되는 FRP 보강근의 정착과 이음에 대한 국내외 실험을 수집하고, 정착과 이음실험을 분리한 회귀분석을 통해 쪼갬파괴에 의한 정착길이 설계식과 이음길이 설계식을 제안하였다. 이 연구를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 이음실험에 의한 평균 부착강도는 정착실험에 의한 평균 부착강도에 비해 낮으며, C/d_b 에 크게 영향을 받는 것으로 평가되었다. 따라서 합리적인 이음길이 설계를 위해 이음실험만으로 구성된 데이터에 근거한 이음길이 설계식을 개발할 필요가 있다.
- 2) 정착 또는 이음실험에 의한 부착강도의 분산(分散)이 FRP 보강근의 인장강도 분산에 비해 크므로, 정착길이와 이음길이 설계식에 이를 반영한 안전율이 요구된다. FRP 보강 콘크리트 구조물의 하중계수와 강도감소계수가 철근콘크리트구조와 동일하다는 조건에서, 철근 품질관리에 적용되는 5% 분위수를 이용하여 경제적이면서 신뢰성 높은 정착길이와 이음길이 설계식을 개발하였다.
- 3) 순수한 이음실험에 의해 제안된 이음길이 설계식은 정착실험을 중심으로 개발된 ACI 440 설계식보다 C/d_b 의 영향을 정확하게 반영하여, C/d_b 가 3.0 이상인 경우 ACI 440보다 짧은 이음길이가 산정된다. FRP 보강근이 주로 활용될 것으로 기대되는 외기에 노출된 슬래브와 벽체의 배근 특성을 고려하면 이 연구에서 제안된 설계식은 매우 합리적인 이음길이 설계를 가능하게 한다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원에서 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호: 07도시재생B03)의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 최동욱, 천성철, 하상수, "RC부재 휨 실험에 의한 GFRP 보강근의 이음길이 제안," 콘크리트학회 논문집, 21권, 1호, 2009년 2월, pp. 65~74.
2. 최동욱, 하상수, 이창호 "인발실험에 의한 GFRP 보강근의 정착길이 제안," 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007년 6월, pp. 323~331.
3. 한국건설기술연구원, "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발," 1차년도 최종 보고서, 2004, 19 pp.
4. 한국건설기술연구원, "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발," 2차년도 최종 보고서, 2005, 784 pp.
5. fib, "FRP Reinforcement in RC Structures," *Bulletin 40*, 2007, 147 pp.
6. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., USA, 2006, 44 pp.
7. CAN/CSA S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2002, 177 pp.
8. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), "Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," *Concrete Engineering Series 23*, Japan, 1997, 311 pp.
9. Wambeke B. W. and Shield C. K., "Development Length of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol. 103, No. 1, 2006, pp. 11~17.
10. ACI Committee 408, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., USA, 2003, 49 pp.

11. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., USA, 2008, 465 pp.
12. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 74, No. 3, 1977, pp. 114~122.
13. 천성철, 최동욱, 하상수, 오보환, "인장 겹침이음에서 프 라이 거동의 영향," 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 2008, pp. 1085~1088.
14. Wambeke, B. W., "Development Length of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in Concrete," MS thesis, University of Minnesota, Minneapolis, Minn., USA, 2003, 85 pp.
15. Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S., "Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 3, 1996, pp. 247~254.
16. Daniali, S., "Development Length for Fiber-Reinforced Plastic Bars," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, K. W. Neale and P. Labossiere, Eds., Sherbrooke, Canada, 1992, pp. 179~188.
17. Shield, C. K., French, C., and Retika, A., "Thermal and Mechanical Fatigue Effects on GFRP Rebar-Concrete Bond," *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan, 1997, pp. 381~388.
18. Shield, C., French, C., and Hanus, J., "Bond of GFRP Rebar for Consideration in Bridge Decks," *Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, Fourth International Symposium*, SP-188, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., USA 1999, pp. 393~406.
19. Tighiouart, B., Benmokrane, B., and Mukhopadhyaya, P., "Bond Strength of Glass FRP Rebar Splices in Beam under Static Loading," *Construction and Building Material*, Vol. 13, No. 7, 1999, pp. 383~92.
20. Mosley, C. P., Tureyen, A. K., and Frosch, R. J., "Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 5, 2008, pp. 634~642.
21. 園部 泰寿, 藤沢 正視, 金久保利之, 米丸 啓介, "連続纖維による補強コンクリート部材の付着性状(その4: 片持ばり部材の主筋鉄筋の場合の付着強度)," *日本建築学会 学術講演梗概集, 構造II*, 1991, pp. 843~844.
22. Aly, R., Benmokrane, B., and Ebead, U., "Tensile Lap Splicing of Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 6, 2006, pp. 857~864.
23. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," *Bulletin Series No. 399*, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill, USA, 1951, 128 pp.
24. KS D 3504 : 2007, 철근 콘크리트용 봉강, 산업자원부 기술표준원, 2009, 30 pp.
25. ISO 6935-2 Steel for the Reinforcement of Concrete - Part 2: Ribbed Bars-Second Edition, International Organization for Standardization, 2007, 20 pp.
26. Natrella, M. G., *Experimental Statistics*, National Bureau of Standards Handbook 91. 1966.
27. Thompson, M. K., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "Behavior and Capacity of Headed Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 4, 2006, pp. 522~530.

요 약 FRP 보강근의 정착과 이음에 대한 국내외 실험을 수집하고, 정착과 이음실험을 분리한 회귀분석을 통해 쪼갬파괴에 의한 정착길이 설계식과 이음길이 설계식을 제안하였다. 이음실험에 의한 평균 부착강도는 정착실험에 의한 평균 부착강도에 비해 낮으며, C/d_b 에 크게 영향을 받는 것으로 평가되었다. 따라서 합리적인 이음길이 설계를 위해 이음실험만으로 구성된 데이터에 근거한 이음길이 설계식을 개발할 필요가 있다. 또한 부착강도의 분산(分散)이 FRP 보강근의 인장강도 분산에 비해 크므로, 정착길이와 이음길이 설계식에 이를 반영한 안전율이 요구된다. 이 연구에서는 FRP 보강 콘크리트 구조물의 하중계수와 강도감소계수가 철근콘크리트구조와 동일하다는 조건에서, 철근 품질관리에 적용되는 5% 분위수를 이용하여 경제적이면서 신뢰성 높은 정착길이와 이음길이 설계식을 개발하였다. 제안된 이음길이 설계식은 정착실험을 중심으로 개발된 ACI 440 설계식보다 C/d_b 의 영향을 정확하게 반영하여, C/d_b 가 3.0 이상인 경우 ACI 440보다 짧은 이음길이 산정된다. FRP 보강근이 주로 활용될 것으로 기대되는 외기에 노출된 슬래브와 벽체의 배근 특성을 고려하면 이 연구에서 제안된 설계식은 매우 경제적인 이음길이 설계를 가능하게 한다.

핵심용어 : FRP 보강근, 쪼갬파괴, 정착길이, 이음길이