

콘크리트와 철근의 부착강도에 대한 횡구속 설계변수

Design Parameters of Confinement on Bond Strength of Reinforcing Steel to Concrete

김 상 준* 이 재 열** 이 웅 세** 최 완 철***
Kim, Sang Jun Lee, Jae Yul Lee, Woong Sae Choi, Oan Chul

ABSTRACT

Bond between reinforcing bars and the surrounding concrete is supposed to safely transfer load in the design process of reinforced concrete structures. Bond failure of reinforcing bars generally take place by splitting of concrete cover as bond force between concrete and reinforcing bars exceeds the resistance by the confinement of the concrete cover and transverse reinforcement.

Confinement, concrete cover and transverse reinforcement, on bond are the key factor of current provision to determine development length of reinforcing bars to concrete. In this study, previous available data are analyzed with respect to the current provisions for development and splice of reinforcement. From this study, the new provision for the design are proposed, which will be efficient and effective with some specific limit value.

1. 서론

콘크리트 구조물에 하중이 재하되어 내력이 증가됨에 따라 부착력이 증가한다. 하중이 더욱 증가하고 부착이 충분히 확보되지 못하여 부착력이 철근을 감싸 구속하는 저항력을 초과하면 콘크리트 피복이 급격히 쪼개지며 쪼갨부착과괴(splitting bond failure)가 발생한다. 철근 마디 돌기의 경사각으로부터 쪼개현상은 부착력을 수평 성분과 함께 수직 성분으로 발생시키며, 철근 둘레와 부착 길이 만큼의 합력에 의해 철근을 감싸고 있는 피복두께를 밀어내어 부착쪼갨과괴를 발생시킨다.

이러한 부착전달기구에 미치는 영향은 1)횡구속, 즉 피복두께와 보강근에 의한 구조적 특성 2)철근과 콘크리트의 계면상태에 의한 재료적 특성으로 대별될 수 있다. 철근을 감싸 구속하는 저항력, 즉 횡구속은 콘크리트의 피복두께와 보강근에 의해 발휘된다. 이러한 횡구속 효과로부터 피복두께와 보강근의 역할이 부착강도 발휘에 중요하여 현재 철근콘크리트 구조물의 설계시 정착길이 산정에 중요한 변수로 되어 있다.

본 연구에서는 부착강도에 대한 기존의 정적실험자료를 이용하여 횡구속 거동을 분석하여 횡구속의 영향을 밝히고자 한다. 이들 결과를 이용하여 현 부착 및 정착설계기준과 비교하여 개선된 설계방법을 제안하고자 한다

* 정회원, 숭실대학교 생산기술연구소
** 숭실대학교 대학원 석사과정
*** 상회원, 숭실대학교 건축학부 교수

2. 정착 및 부착 설계기준

우리 나라에서 부착 및 정착깊이의 설계기준(대한건축학회, 한국콘크리트학회)은 대체로 ACI 318 기준을 근거로 한다.

ACI 318-95⁴⁾에서는 콘크리트 부재의 각 단면에서 철근의 인장력 또는 압축력을 받는 철근의 정착길이, 갈고리, 기계적인 정착장치 또는 이들의 조합에 의하여 단면의 양측에 정착하여야 한다고 규정하고 있다. 인장을 받는 이형철근 및 이형철선의 정착길이 l_d 는 철근의 직경 d_b 항의 비로 나타내고 있으며 ACI 318-95의 12.2.2항을 따르는 간편한 방법과 12.2.3항을 따르는 정산식 설계법에 의해 결정될 수 있도록 하고 있다.

표 1에서 보듯이 12.2.2의 규정은 철근크기와 횡구속(간격 또는 피복두께, 스테럽) 정도에 따라 간편하게 선택하여 정착길이 l_d/d_b 를 설계하도록 규정하고 있다. 이 간편한 설계방법에서는 피복두께 치수 c 나 다음의 (1)식에서의 횡구속 철근지수 K_{tr} 을 계산할 필요가 없다.

표 1 ACI 318-95 12.2.2의 규정

철근직경 조 건	D19 이하의 철근과 이 형철선	D22 이상의 철근
이음 또는 정착철근의 순간격이 d_b 이상, 순피복두께가 d_b 이상, l_d 전체를 통하여 스테럽과 띠철근이 규정의 최소치 이상인 경우 또는 이음 또는 정착철근의 순간격이 $2d_b$ 이상, 순피복두께가 d_b 이상인 경우	$\frac{l_d}{d_b} = \frac{f_y \alpha \beta \lambda}{25 \sqrt{f'_c}}$	$\frac{l_d}{d_b} = \frac{f_y \alpha \beta \lambda}{20 \sqrt{f'_c}}$
위와 다른 경우	$\frac{l_d}{d_b} = \frac{3f_y \alpha \beta \lambda}{50 \sqrt{f'_c}}$	$\frac{l_d}{d_b} = \frac{3f_y \alpha \beta \lambda}{40 \sqrt{f'_c}}$

12.2.3 설계법은 최소 피복두께와 스테럽에 의한 횡구속 지수를 세밀하게 계산하는 정산법이다. 정착깊이에 대해서 재료의 강도, 철근위치, 표면처리, 철근크기, 경량골재콘크리트, 피복두께에 대해서 규정하고 있으며 그 규정식은 다음과 같다.

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\alpha \beta \lambda}{\left(\frac{c+K_{tr}}{d_b}\right)} \quad (1)$$

(단, $(c+K_{tr})/d_b$ 는 2.5이하로 한다.)

여기서, c = 철근의 중심에서 측정된 최소 피복두께 또는 정착된 철근의 중심간 거리의 1/2 중 작은 값을 사용(in),

d_b = 철근의 직경(in)

l_d = 정착깊이(in), f'_c = 콘크리트 압축강도(psi) 이다

이 식에서는 고강도 콘크리트에 대한 부착강도 실험자료가 충분하지 못하여 콘크리트 재료에 대해

서는 $\sqrt{f_c}$ 의 값을 100psi이하로 안전측으로 규정하고 있다. 최근 경량콘크리트 경우를 포함하여 인장강도(splitting tensile strength) 사용 경향을 보이고 있다.

피복이나 간격이 작은 경우 쪼갬파괴가 발생할 수 있다. 쪼개짐 면을 가로지르는 가로 철근을 첨가하여 쪼개짐 균열을 억제함으로 부착강도를 증가시킬 수 있다. 이 기준에서 K_{tr} 은 횡구속 철근지수로 다음 식으로 정의된다.

$$K_{tr} = \frac{A_{tr}f_{yt}}{1500sn} \quad (2)$$

여기서,

A_{tr} = 간격 s 이내에 있고 정착된 철근을 통해 예상되는 쪼개짐 평면을 가로지르는 가로철근의 총 단면적 (in^2)

f_{yt} = 가로철근의 기준항복강도 (psi)

s = l_d 이내의 가로철근의 최대 중심간 간격 (in)

n = 쪼개지는 평면을 따라 정착되어 있는 철근 또는 철선의 개수

가로철근이 있다 할지라도 설계를 간략하게 하기 위해서는 $K_{tr} = 0$ 으로 사용할 수 있다라고 규정하고 있다.

3. 콘크리트 피복두께의 영향

기존의 보단부 시험체의 피복두께별 실험결과¹¹⁾를 Orangun식(이하 OBJ식)¹²⁾과 ACI식¹¹⁾으로 비교하고자 한다. OBJ식 외에 ACI 기준에서 12.2.3의 정산식과 12.2.2의 약산식을 적용하였다.

OBJ식(3)과 ACI식(4)을 하중(kg)으로 변환하면 다음과 같다

$$\frac{A_b f_s}{\sqrt{f_c}} = 0.795\pi l_d (C + 0.4d_b + K_{tr}) + 53A_b \quad (3)$$

$$\frac{A_b f_s}{\sqrt{f_c}} = 0.877 \frac{\pi (c + K_{tr})}{\alpha\beta\gamma\lambda} l_d \quad (4)$$

표 1은 실험결과와 OBJ식과 ACI식에 의한 부착강도를 보여주고 있다.

그림 1은 피복두께와 부착하중의 관계의 그림으로 피복두께가 증가함에 따라 부착하중의 증가를 보여주고 있으며 정산식과 약산식에 비해 실험결과 OBJ식의 값들은 안전측에 있다. 실험치에서 피복두께가 $1d_b$ 와 $1.5d_b$ 사이에서 $2.0d_b$ 의 부착강도에 비해 크게 감소하지 않았으며 ACI식에서는 $1d_b$ 에서 부착하중은 $2.0d_b$ 에서보다 과소 평가되고 있으며 정산식에서 $2.0d_b$ 이상에서는 약산식에 비해 과대평가되고 있어 정착깊이가 과소하게 짧아질 수 있다. 그림 2에서 보듯이 정산식의 경우, 피복두께가 $2.0d_b$ 이상에서 부착강도비는 2.0이하로 안전율이 낮으며 과대 평가되고 있다. 또한 피복두께가 $1.0d_b$ 이하에서 부착강도비가 3.0이상으로 안전율이 높아 기준이 과소평가 되고 있다. 따라서 피복두께의 $b/c/d_b$ 하한치로서 1, 상한치로서 2가 적절하다고 판단된다.

표 1 실험값, 부착강도 추정식, ACI식에 의한 부착강도

시험체 종류	d_b (cm)	A_b (cm ²)	c (cm)	c/d_b	l_d (cm)	test1* (cm)	test2** (cm)	OJB식 (cm)	정산식 (cm)	약산식 (cm)
보단부 시험체	1.6	1.99	1.6	1	12	213.8	203.6	148.6	66.1	66.1
			2.4	1.5	12	243.2	227.9	172.6	99.2	99.2
			4.0	2.5	12	309.3	239.3	220.6	165.4	99.2
			5.6	3.5	12	347.0	285.2	268.5	231.5	99.2

* test1: 보단부시험체 - 콘크리트 강도 375kg/cm².

** test2: 보단부시험체 - 콘크리트 강도 650kg/cm²

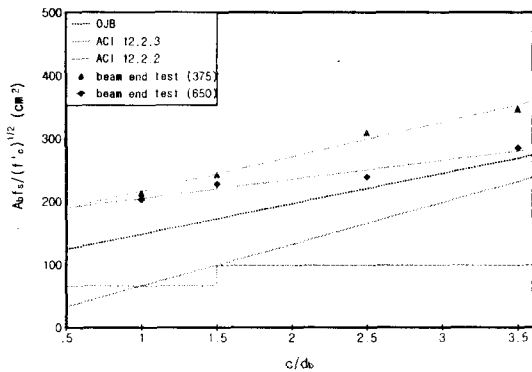


그림 1 보단부 시험체의 피복두께에 대한 부착하중

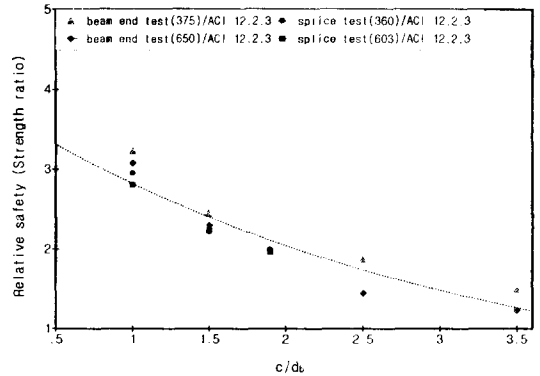


그림 2 실험결과와 ACI 12.2.3식과의 피복두께에 대한 부착강도비

4. 횡구속 철근의 영향

횡구속 철근의 영향을 연구하기 위하여 기존에 연구되었던 실험 결과 자료와 OJB식과 ACI 318-95 기준의 정산식을 비교하였다. Rezanoff et al.(1993)³⁾의 철근 이음에 대한 ACI 318 기준의 재분석을 위한 실험 자료 중 횡구속 철근이 있는 자료와 Darwin et al.(1996)³⁾의 철근의 상대 마디면적에 따른 이음강도의 관계를 평가하기 위한 논문에서 횡구속 철근이 있는 일반 철근의 대한 실험 자료를 이용하였다.

횡구속 철근의 효과를 알아보기 위해 실험 결과치에서 부착강도식에서의 피복두께에 대한 부분을 빼 줌으로서 횡구속 철근에 의한 부착강도를 얻어 분석하였다.

실험결과치에서 OJB식에서의 피복두께에 대한 부분을 빼주면 횡구속 철근에 의한 부착강도는 다음 식과 같다.

$$\frac{A_b f_s'}{\sqrt{f_c'}} = \frac{A_b f_c'}{\sqrt{f_c'}} - (0.795\pi l_d (C + 0.4d_b) + 53.4A_b) \quad (5)$$

여기서, C는 최소 순피복두께(cm)이다.

그리고 ACI식에서도 피복두께에 대한 부분을 빼주면 횡구속 철근에 의한 부착강도는 다음의 식과

같다.

$$\frac{A_{bf}'}{\sqrt{f_c'}} = \frac{A_{bf}}{\sqrt{f_c}} - 0.877 \frac{\pi c l_d}{\alpha \beta \gamma \lambda} \quad (6)$$

여기서, c 는 철근 중심에서의 피복두께 관련 치수(cm)이다.

다음 그림 5, 6은 철근직경에 대한 횡구속 철근치수와 부작하중에 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 횡구속 철근 증가에 따라 부작강도가 증가되고 있다. 실험값(피복두께와 횡구속 철근에 의한 부작강도) 부작강도에서 다시 실험 값으로부터 유도한 추정식(피복두께에 의한 부작강도)을 뺀 결과 값을 그림에 사용하였으므로 인해 분산도가 크며 일부 K_{tr} 이 높은 값에도 불구하고 부작강도 증가가 미소함을 보여주고 있다.

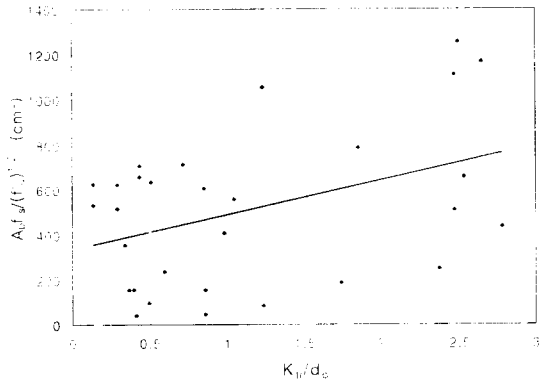
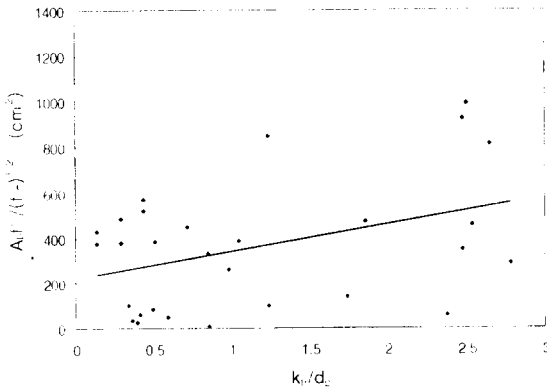


그림 5 OJB식에 의한 횡구속 부작강도와 K_{tr}/d_s 의 비교 그림 6 ACI 122.3식에 의한 횡구속 부작강도와 K_{tr}/d_s 의 비교

그림 5, 6에서 보듯이 OJB식에 비해 ACI식은 안전치를 고려하여 상수항 ($53A_{tr}$)을 포함하지 않았기 때문에 K_{tr} 에 의한 부작강도 부분이 높게 나타나고 있다.

현 기준에서는 $(c+K_{tr})/d_b$ 의 상한치를 2.5로 두고 있으며 하한치는 없다. 3장에서 c/d_b 의 하한치와 상한치는 각각 1.0과 2.0으로 제시되었다. 이들을 함께 고려하여 c/d_b , K_{tr}/d_b , $(c+K_{tr})/d_b$ 의 하한치, 상한치를 각각 다음과 같이 제시할 수 있겠다.

$$1.0 \leq \frac{c}{d_b} \leq 2.0 \quad (7)$$

$$0.5 \leq \frac{K_{tr}}{d_b} \leq 1.0 \quad (8)$$

$$1.0 \leq \frac{(c+K_{tr})}{d_b} \leq 2.5 \quad (9)$$

5. 결론

철근과 콘크리트의 부착강도에 대한 횡구속 효과에 대해 기존 실험자료를 분석 연구하였고 설계기준에 대해 개선된 안을 제안하고자 하였다.

연구 결과, 피복두께 증가에 따라 부착강도가 증가되며, 작은 피복두께에서 상대적으로 부착강도가 컸으며 이는 파괴역학의 크기효과로 볼 수 있겠다. ACI 기준식은 피복두께 관련치수와 횡구속 철근의 효과에 대해 경우에 따라 과대, 과소하게 평가하고 있는 것으로 분석되었다. 현 정착길이 산정식에 대한 새로운 설계안을 제시하였으며 제안된 설계식으로 보다 효율적으로 설계할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학 연구센터의 1998년도 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 대해 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. 김상준, 조필규, 허준, 최완철, "고성능 Belite 시멘트 콘크리트의 철근 부착성능," 콘크리트학회지, 제 10권 6호, 1998.
2. 조필규, 김상준, 강지훈, 김영식, 최완철, "belite 시멘트를 이용한 고성능 콘크리트의 철근부착성능 실험연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표, 1997, pp. 408-415.
3. 최완철 외 "고강도, 고유동 belite콘크리트 부착성능 평가시험," 송실대학교 생산기술연구소, 1998. 2. 14, page 62.
4. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95) and Commentary(ACI 318R-95). American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 1995, 369 pp.
5. Choi O. C., "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete," Ph. D. Dissertation, University of Kansas, 1990.
6. David Darwin, Michael L. Tholen, Emmanuel K. Idun, and Jun Zuo, "Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars," ACI Structural Journal, Jan.-Feb., 1996, pp. 95-107.
7. Oan C. Choi, David Darwin, Steven L. McCabe, "Interface Characteristics for Bond of Reinforcing Steel to Concrete," The Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Seoul, Korea, Sep., 1993, pp. 751-756.
8. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," ACI Journal, Vol.74, No.3, Mar., 1977, pp. 114-122.
9. Tel Rezansoff, Adeniyi Akanni, and Bruce Sparling, "Tensile Lap Splices under Static Loading: A Review of the Proposed ACI 318 Code Provisions," ACI Structural Journal, July-Aug., 1993, pp. 374-384.