

지압각 감소이론을 이용한 높은마디면적 철근의 부착강도 해석

Bond Strength Analysis of High Relative Rib Area Bars Using Decreasing Bearing Angle Theory

양승열* 서동민** 박영수** 홍건호*** 최완철****
Yang, Seung Yul Seo, Dong Min Park, Young Su Hong, Gun Ho Choi, Oan Chul

ABSTRACT

Bond between reinforcing bar and surrounding concrete is supposed to transfer load safely in the process of design of reinforced concrete structures. Bond strength of ribbed reinforcing bars tends to split concrete cover, by wedging action, or shear the concrete in front of the ribs.

In this study, using a reducing bearing angle theory, bond strengths of beam end specimen are predicted.

Values of bond strength obtained using the analytical model are in good agreement with the bond test results. The analytical model provides insight into bond mechanism and the effects of bearing angle on the bond strength of deformed bars to concrete.

1. 서론

부착은 철근과 콘크리트 경계면에 생기는 전단응력으로 철근표면 마찰력, 콘크리트 화학적 점착력, 철근 표면 마디에 의한 기계적 저항력에 의하여 발휘되어 철근과 콘크리트를 일체화한다.

철근에 인장력이 작용하여 철근과 콘크리트가 분리되는 부착파괴는 조깅파괴와 뿔힘파괴로 구분할 수 있다. 조깅파괴는 철근 마디의 썩기작용에 의해 피복 콘크리트 쪼개지며 발생하며, 뿔힘파괴는 횡구속이 크거나 마디간격이 좁을 때 마디사이의 콘크리트 전단면이 파괴되거나 마디위의 콘크리트가 압쇄되어 철근이 뿔혀지는 파괴형태로 알려지고 있으나 부착파괴에 대한 이론적 연구가 미진하다. 특히 조깅파괴와 뿔힘파괴에 대한 상호관계에 대하여 역학적 설명이 되지 못하고 있으며 단지 설계 기준에서 제한사항으로 제시 하고 있을 뿐이다.

이러한 배경에서 조깅파괴시의 부착저항력과 뿔힘파괴시의 부착저항력을 예측할 수 있는 이론적 연구가 중요하다. 최근 연구에서 힘의 평형조건에 의하여 부착강도를 해석하고 지압각의 변화에 의한 영향과 이들 상호 관계를 설명하고, 실험에서 관찰된 유효마디각의 감소 현상을 이론적으로 규명하고 있다.

*정회원, 숭실대학교 건축공학과 박사과정

**정회원, 숭실대학교 건축공학과 석사과정

***정회원, 호서대학교 건축공학과 교수, 공학박사

****정회원, 숭실대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구에서는 이러한 지압각 감소이론(decreasing bearing angle theory)을 이용하여 해석치를 구하고 실험 결과와 비교하고자 한다. 본 연구의 결과는 부착기구에 대한 이해를 높이고 부착 설계에 대한 신뢰도를 확보하며 나아가 콘크리트 구조물의 안전성 및 경제성 확보에 크게 기여 할 것으로 기대한다.

2. 지압각 감소 이론

철근에 인장력이 작용하면 철근 마디의 썩기작용으로 콘크리트 피복이 쪼개지고 마디 위의 콘크리트는 압쇄되어 파괴가 일어나며 이때 콘크리트가 압쇄되는 각도가 유효 마디각이다. 부착파괴는 쪼갬파괴와 뿔힘파괴 두현상으로 구분되나, 실제 부착 실험에서는 대체로 콘크리트 피복에서 쪼갬부착파괴가 일어나며, 동시에 철근 마디에서 부분적으로 콘크리트 키가 파쇄하는 전단 부착 파괴가 동시에 발생한다. 따라서 쪼갬파괴와 뿔힘파괴를 유효마디각에 대한 힘의 평형 조건으로 표현하고 이 두 식이 같을(유효마디각이 일치 할) 때 부착강도가 결정된다는 이론이 지압각 감소이론이다.

마디 경사면을 따라 밀어내는 썩기작용에 대하여 마디상부의 콘크리트와 횡방향 철근이 저항함으로써 부착력은 확보된다. Fig. 1과 같이 철근에 인장력 P 가 작용할 때, 철근 마디 위의 콘크리트에는 3축 응력이 발생되고, 주응력으로서 철근 축과 평행하게 지압응력 σ_q 와 이와 수직되게 방사응력 σ_r 가 발생된다. 철근에 작용되는 힘은 썩기의 경사면을 따라 수직응력 σ_n 과 접선응력 τ 으로 분해되어 계면 전단력으로 전달된다.

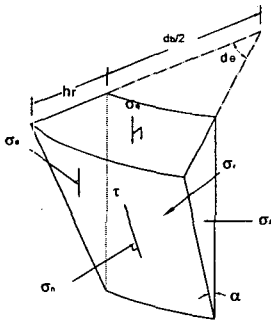


Fig. 1 Stresses acting on rib of bar

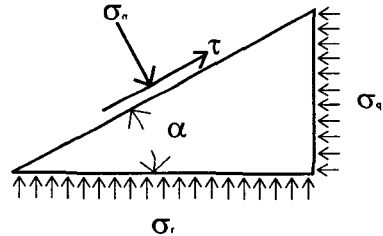
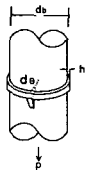


Fig. 2 Stresses along interface with angle of α

콘크리트 피복의 쪼갬 부착력 T_{split} 는 힘의 평형 조건으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$T_{split} = F_z \pi \tan(\alpha) \frac{(1 + \mu \cot(\alpha))}{(1 - \mu \tan(\alpha))} + A_r \frac{c}{\sin(\alpha)(\cos(\alpha) - \mu \sin(\alpha))} + \pi d_b l_d c \quad (1)$$

콘크리트 피복 두께나 스티럽 철근에 의한 횡구속력이 큰 경우에 발생하는 뿔힘 파괴는 철근 마디 사이의 콘크리트 키가 철근 마디에 의해 파쇄됨으로서 발생된다. 부착력은 철근 마디에 의해 지압력으로 콘크리트 키의 전단력으로 저항한다. 부착력이 콘크리트 키의 전단력으로 작용함으로 Fig. 3과 같이 전단 예상 균열을 가정할 수 있으며 전단 저항력은 콘크리트 강도와 전단 파괴면적의 곱으로 결정되며 식 (2)와 같이 전단부착력 T_{shear} 를 표현할 수 있다.

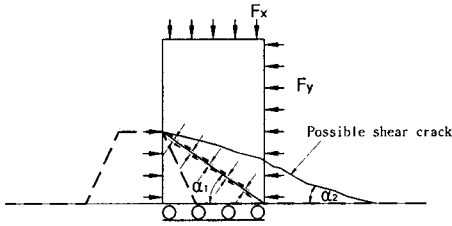


Fig. 3 Stresses along shear crack interface and force boundary conditions

$$T_{shear} = \chi_1 \chi_2 \frac{0.2 f_{ck} \pi d_b h_r}{\sin(\alpha)} \times \frac{l_d}{S_r} + \pi d_b l_d c \quad (2)$$

여기서 χ_1 는 3축 응력 매개변수, χ_2 는 압축강도 매개변수로서 황구속된 콘크리트는 높은 압축력을 받게 되고 이는 전단 강도를 높이는 해석 또는 실험과로부터 도입한 변수이다.

3. 지압각 감소 이론에 따른 부착력과 실험결과와의 비교

지압각 감소 이론을 적용하여 부착 강도를 평가할 시험체 변수와 부착 강도는 Table 1과 같다. 시험체 명에서 'BE'는 보 단부 시험체임을, '25'는 주근 직경이 25mm 임을 나타내며, CV~LS는 마디형태에 따른 변수명이다.

Table 1 Comparison of analysis results to test results

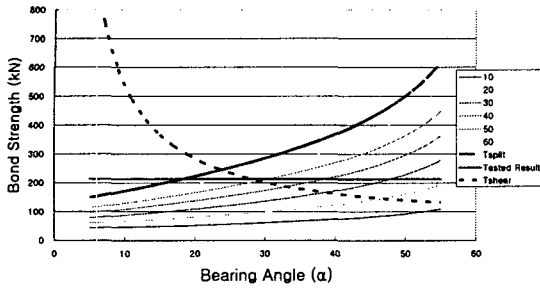
Specimen	Rib height (mm)	Rib spacing (mm)	Test results (kN)	α (Angle)	Analysis result (kN)	Ratio of analysis results to test results
BE25-CV	1.62	16.0	213.6	23.8	244.4	1.14
BE25-HR	2.28	17.3	255.3	24.5	250.9	0.98
BE25-MR	1.92	17.5	250.5	23.0	237.6	0.95
BE25-MS	1.89	12.8	272.1	27.7	280.4	1.03
BE25-LS	1.54	13.3	265.5	24.2	248.2	0.93

CV는 국내 기성품이며 HR은 마디 높이를 CV에 비해 40% 높임, MR은 20% 높임, MS는 높이를 20% 증가시키고 간격을 25% 줄임, LS는 간격을 25% 줄임을 의미한다.

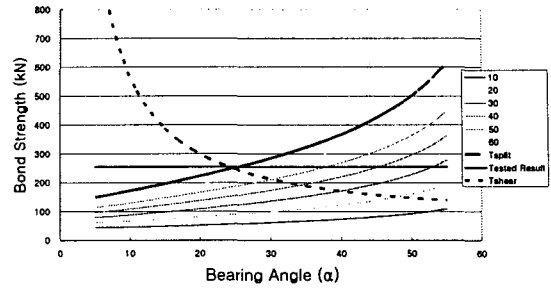
해석 시 적용한 값은 식(1)에서 χ_1 은 3축 응력 매개변수로서 2.0, χ_2 는 압축강도 매개변수로서 4.0, h_r 은 마디 높이로서 각 해석 변수별로 Table 1의 rib height열에 해당하는 값, l_d 는 묻힘길이를 실험체 형상에 의해 200mm, S_r 은 마디 간격으로 각 해석 변수별로 Table 1의 rib spacing열에 해당하는 값, c 는 점착력으로 1.5MPa를 적용하였다.

식 (1)에서 F_x 는 유한요소 해석을 통한 콘크리트 피복에 의한 횡속력 40kN과 철근에 의한 구속력 30kN을 합산하여 70kN을 적용, α 는 유효 지압각으로써 식(1)과 식(2)의 유일한 변수이다.

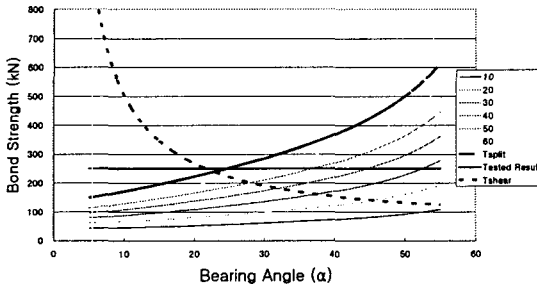
Fig. 4는 각 시험체의 유효 지압각에 따른 조깅 및 뿔힘 부착력의 변화를 보여주고 있으며 부착강도를 구하는 과정을 도식화한 것이다. 유효 지압각이 증가함에 따라 조깅 부착강도는 증가하고 뿔힘 부착강도는 감소한다. 따라서, 두 저항력을 최대로 발휘할 수 있는 지압각이 결정된 후 이로부터 부착강도가 결정된다.



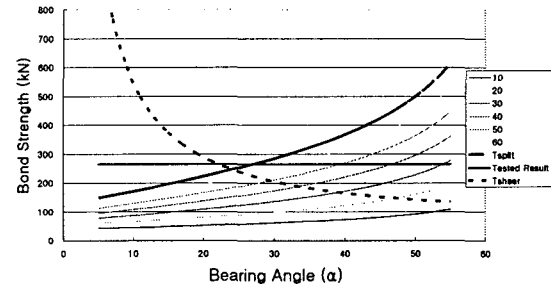
(a) CV



(b) HR



(c) MR



(d) LS

Fig. 4 Analysis procedure using reducing bearing angle theory

지압각 감소이론을 적용하여 해석한 결과, 유효 지압각은 22도 ~ 28도 사이에 분포하고 있으며, 부착 강도 예측치에 대한 실험값의 결과는 0.93에서 1.14 범위에 있어 대체적으로 근접한 결과를 얻었으며 이런 연구 결과가 실험값을 근사하게 추정하고 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

부착의 두가지 파괴모드에 대한 지난 연구는 쪼갬파괴와 뿔힘파괴를 구분하여 연구되어 왔다. 본 연구에서 쪼갬파괴와 뿔힘파괴를 동시에 고려하는 지압각 감소이론을 적용하여 해석을 수행하여 해석치와 실험치를 비교 검토한 결과, 그 값이 대체로 일치하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쪼갬부착 저항력과 뿔힘부착 저항력은 지압각을 주요 변수로 하여 결정된다.
2. 지압각이 감소함에 따라 쪼갬부착 저항력은 감소하며 뿔힘부착 저항력은 증가한다.
3. 부착 강도는 최대 저항력을 발휘하는 지압각이 결정된 후 이에따라 부착강도가 결정된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호:R01-2003-000-10606-0) 연구비 지원으로 수행되었으며 이 지원에 깊은 감사를 드립니다.