

콘크리트 시공줄눈 면에서 점착력 및 마찰계수의 변화를 고려한 전단내력 평가

양근혁^{1*}, 권혁진², 박종범³

Estimation of Shear Strength Along Concrete Construction Joints Considering the Variation of Concrete Cohesion and Coefficient of Friction

Keun-Hyeok Yang^{1*}, Hyuck-Jin Kwon², Jong-Beom Park³

Abstract: This paper presents a mathematical model derived from the upper-bound theorem of concrete plasticity to rationally evaluate the shear friction strength of concrete interfaces with a construction joint. The upper limit of the shear friction strength was formulated from the limit state of concrete crushing failure on the strut-and-tie action along the construction joints to avoid overestimating the shear transfer capacity of a transverse reinforcement with a high clamping force. The present model approach proposed that the cohesion and coefficient of friction of concrete can be set to be $0.27(f_{ck})^{0.65}$ and 0.95, respectively, for rough construction joints and $0.11(f_{ck})^{0.65}$ and 0.64, respectively, for smooth ones, where f_{ck} is the compressive strength of concrete. From the comparisons with 155 data compiled from the available literature, the proposed model gave lower values of standard deviation and coefficient of variation of the ratios between predictions and experiments than AASHTO and *fib* 2010 equations, indicating that the proposed model has consistent trends with test results, unlike the significant underestimation results of such code equations in evaluating the shear friction strength.

Keywords: Code equation, Cohesion, Construction joint, Frictional coefficient, Shear friction

1. 서 론

부재간의 접합면, 시공줄눈(construction joint), 프리캐스트 부재(precast concrete, PC)와 현장타설 콘크리트(cast in place concrete) 경계면 등의 응력전달은 전단마찰(shear friction)에 의해 지배된다(AASHTO, 2014; ACI 318-14, 2014). 전단마찰에 의한 응력전달은 콘크리트 점착력 및 마찰계수, 전단마찰 보강근과 작용 축응력 등의 영향을 받는다. 콘크리트 시공줄눈의 경계면에서는 골재 맞물림(aggregate interlock) 작용에 의한 전단전달을 기대할 수 없고, 콘크리트의 인장저항성이 상당히 감소하기 때문에 일체 타설된 콘크리트(monolithic concrete)에 비해 전단마찰 내력이 현저하게 감소한다(Hwang and Yang, 2016). 하지만 전단마찰에 대한 기존 연구(Ali and White, 1999; Harries et al., 2012; Kahn and Mitchell, 2002; Mattock and Hawkins, 1972) 대부분은 일체 타설 전단면

(shear plane)에서 수행되었기 때문에, 시공줄눈 면에서 전단마찰에 의한 전단전달을 합리적으로 설명하는 모델은 매우 미흡하다.

설계기준들은 시공줄눈 면에서의 전단마찰내력에 대한 평가를 일체타설 면에서의 전단마찰저항 기구에 기반을 두고 마찰계수 및 콘크리트 점착력의 감소만을 고려하고 있다. ACI 318-14(2014)는 전단 마찰면에서 횡보강근의 마찰저항을 시공줄눈의 면 상태에 따라 마찰계수를 고려하고 있는데, 거친 면의 경우 1.0, 부드러운 면의 경우 0.6을 적용하고 있다. 이들 마찰계수의 저감은 결과적으로 일체타설 전단면의 전단마찰내력 대비 거친 면과 부드러운 면의 경우 각각 약 30%와 60%의 내력 감소 결과를 낳는다. AASHTO(2014)와 *fib* 2010(2013)은 ACI 318-14와 같이 전단 마찰면에서 횡보강근의 마찰저항과 함께 콘크리트의 점착력에 의한 전단저항을 고려하고 있다. AASHTO는 보통중량 콘크리트의 점착력에 의한 전단저항에 대해 일체타설 면에 대해 2.76 MPa, 시공줄눈 전단면에서는 거친 면과 부드러운 면에 대해 각각 1.66 MPa와 0.52 MPa를 제시하고 있다. 즉, 부드러운 면을 갖는 시공줄눈 전단면에서 콘크리트 점착력에 의한 전단전달은 일체타설에 비해 약 91%가 감소될 수 있음을 제시하고 있다. 하지만 이들 설계기준들은 시공줄눈 전단면에 대해 마찰계수 및 점착력에 대한 이론적·실험적 근거가 불명확하며 그 안전성

¹정회원, 경기대학교 플랜트·건축공학과 교수, 교신저자

²학생회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과 석사과정

³학생회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과 석사과정

*Corresponding author: yangkh@kgu.ac.kr

Department of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi, 16227, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

평가에 대한 자료도 매우 미흡하다.

이 연구의 목적은 시공줄눈 전단면의 전단마찰에 대해 콘크리트 소성론의 상계치 이론 및 실험결과를 기반으로 마찰계수와 점착력을 제시하는데 있다. 시공줄눈 면의 전단내력식은 일체타설 면에 대해 제시된 모델(Kwon et al., 2017)에서 파괴 시 변위각은 마찰각과 같다는 것을 고려하여 수정하였다. 특히 시공줄눈 면에서 고강도 횡보강근의 전단전달에 대한 과대평가를 피하기 위하여 Nielsen and Hoang(2011)이 제안한 스트럿-타이 모델에서 콘크리트의 압괴내력을 기반으로 전단마찰 내력에 대한 상한 값을 제안하였다. 제안된 모델 및 설계기준식(ACI 318-14, AASHTO 및 fib 2010)들의 안전성은 기존 실험결과들과의 비교를 통하여 확인하였다.

2. 시공줄눈 면에서 전단마찰 내력 모델

2.1 시공줄눈 면의 전단 마찰내력

Kwon et al.(2017)은 콘크리트 소성론의 상계치 이론을 기반으로 일체 타설된 콘크리트의 전단마찰 내력 식을 제안하였다. 직접전단 하중을 받는 콘크리트 부재의 파괴는 주 균열면을 경계로 두 강체로 분리되는데, 파괴면은 평면 변형을 상태로 고려되었다(Fig. 1). 파괴면에서 콘크리트의 유효 압축강도 및 유효 인장강도 모델은 재료의 압축 및 인장 응력-변형을 관계로부터 유도되었다. 파괴면을 따른 콘크리트의 마찰각(ϕ)은 순 전단응력 상태에서 콘크리트의 쿨롱(Coulomb) 파괴 기준을 고려하여 콘크리트 유효 압축강도와 유효 인장강도 비의 함수로 제시하였다. 콘크리트 소성론에서 모든 재료는 완전 소성체로 간주한다. 따라서 비선형 취성모드의 응력-

변형을 관계를 갖는 콘크리트를 완전 소성체로 가정하기 위하여 유효강도계수를 도입하였다. 즉 콘크리트 유효압축강도는 콘크리트 압축강도와 유효 압축강도계수의 곱으로 나타낸다. 콘크리트 유효 압축강도계수는 비선형 압축 응력-변형을 관계를 등가의 완전 소성 응력-변형을 관계로 환산한 계수이다. 콘크리트 유효 인장강도계수는 비선형 인장 응력-변형을 관계를 등가의 완전 소성 인장 응력-변형을 관계로 환산한 계수이다.

상계치 이론으로부터 유도된 일체타설 콘크리트의 전단마찰 내력(τ_n)에 대한 Kwon et al.의 모델을 요약하면 다음과 같다.

$$\tau_n = \frac{1}{2} f_c^* \frac{1}{\cos \alpha} (l - m \sin \alpha) + \rho_{vf} f_y \frac{[\cos(\theta_s - \alpha)]}{\cos \alpha} + \sigma_x \tan \alpha \quad (1)$$

$$f_c^* = \nu_c f_c' = 0.79 \exp \left[-0.03 \left(\frac{f_c'}{f_{co}} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_o}{\rho_c} \right)^{1.6} \right] f_c' \quad (2)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{1}{l} \left\{ m - \frac{2(\rho_{vf} f_y \sin \theta_s + \sigma_x)}{f_c^*} \right\} \right] \quad (3)$$

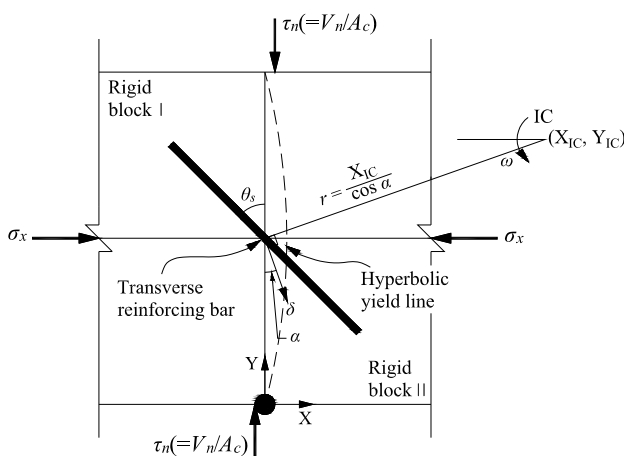
$$\phi = 20.65 \left(\frac{f_t^*}{f_c^*} \right)^{-0.21} \quad (4)$$

$$\frac{f_t^*}{f_c^*} = 0.064 \left[\left(\frac{f_c'}{f_{co}} \right) \left(\frac{c_o}{d_a} \right)^{1.7} \left(\frac{\rho_c}{\rho_o} \right)^{0.1} \right]^{-0.43} f_c^* \quad (5)$$

여기서, $l = 1 - 2 \frac{f_t^*}{f_c^*} \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi}$, $m = 1 - 2 \frac{f_t^*}{f_c^*} \frac{1}{1 - \sin \phi}$ 이며,

α 는 파괴면을 따른 두 강체사이의 상대변위 각, $\rho_{vf} f_y$ 는 전단면에서 횡보강근에 의한 구속응력을, f_c^* 는 콘크리트 유효 압축강도, f_t^* 는 콘크리트 유효 인장강도, θ_s 는 전단면에 대한 횡보강근의 배근 각도, f_{co} (= 10 MPa)는 압축강도의 참고 값, ρ_o (= 2,300 kg/m³)는 콘크리트 단위용적중량(ρ_c)의 참고 값, c_o (= 25 mm)는 굵은 골재 최대크기(d_a)의 참고 값을 나타낸다.

콘크리트 시공줄눈 면을 따라 발생하는 직접전단 파괴모드도 일체타설 콘크리트의 경우와 동일하게 고려될 수 있다(Hwang and Yang, 2016). 하지만 시공줄눈 면의 경우 파괴 시 두 강체사이의 상대변위 각(α)는 Nielsen and Hoang(2011)에 의해 증명된 바와 같이 시공줄눈 면에서의 마찰각(ϕ')과 같다고 가정될 수 있다(Fig. 1). 더불어 시공줄눈 면에서 콘크리트의 인장강도는 무시되며, 점착력(c')만이 존재한다. 쿨롱 파괴 기준을 갖는 콘크리트의 미끄러짐 파괴조건 시 f_c^* 와 점착력



α is variable for monolithic interfaces
 $\alpha = \phi'$ for interfaces with construction joints

Fig. 1 Idealized failure mechanism of the concrete interfaces

(c')의 관계는 다음과 같다(Nielsen and Hoang, 2011).

$$f_c^* = 2c' \frac{\cos\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (6)$$

따라서 일체타설 콘크리트의 전단마찰 내력 식(1)에서 콘크리트 인장강도를 무시하고 $\alpha = \phi'$ 를 적용하면 시공줄눈 면의 전단마찰 내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_n = c' + \rho_{vf}f_y \frac{\cos(\theta_s - \phi')}{\cos\phi'} + \sigma_x \tan\phi' \quad (7)$$

시공줄눈 면에 대해 90도로 배근된 횡보강근($\theta_s = \pi/2$)인 경우 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_n = c' + (\rho_{vf}f_y + \sigma_x) \tan\phi' = c' + \sigma_{eq} \tan\phi' \quad (8)$$

식(8)은 횡보강근 및 작용 압축력이 없는 시공줄눈 면의 전단마찰 내력은 콘크리트 점착력에 의해 결정됨을 의미한다. AASHTO는 콘크리트의 점착력을 시공줄눈 면의 거칠기에 따라 일정한 값으로 제시하고 있다. 반면, Nielsen and Hoang은 점착력은 후타설 콘크리트의 압축강도(f_{ck}) 및 면의 거칠기 상태에 따라 중요한 영향을 받음을 보였다. 무보강 시공줄눈 면을 갖는 직접전단 실험(Choi et al., 1994; Hwang, 2016)에서 전단내력($\tau_n = c'$)과 f_{ck} 의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 부드러운 면과 거친 면에서 콘크리트 점착력을 제시하기 위한 회귀분석은 Choi et al.(1994) 및 Hwang(2016) 실험결과를 이용하였으며, c' 는 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$c' = A_1(f_{ck})^{0.65} \quad (9)$$

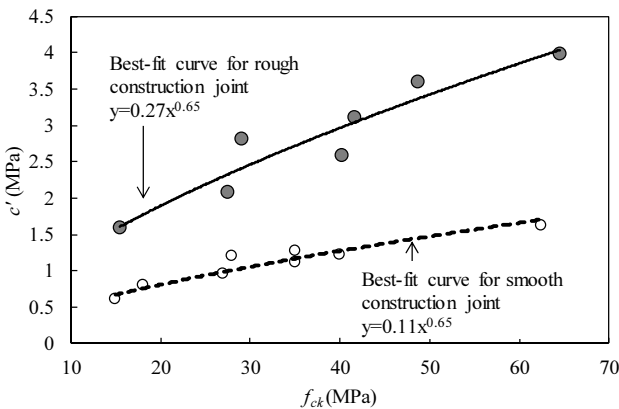


Fig. 2 Relationship of f_{ck} and c' along the construction joints

여기서, A_1 은 실험상수로서 거친 면의 경우 0.27, 부드러운 면의 경우 0.11이다.

시공줄눈 면에서 ϕ' 는 식(7)과 (9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_n - A_1(f_{ck})^{0.65} - \rho_{vf}f_y \cos\theta_s}{\rho_{vf}f_y \sin\theta_s + \sigma_x} \right) \quad (10)$$

기존 실험결과들의 데이터베이스를 식(10)에 대입하여 ϕ' 를 산정하면 거친 시공줄눈 면의 경우 33.3~54.4°, 부드러운 시공줄눈 면의 경우 29.4~44.5°의 범위에 있다. 이들 값들의 평균값을 적용하면 시공줄눈 면에서 ϕ' 는 거친 면과 부드러운 면에 대해 각각 43.5°($\mu = 0.95$)와 32.8°($\mu = 0.64$)로 제시될 수 있다.

이 연구에서 제시된 시공줄눈 면의 c' 및 μ 값을 AASHTO 및 fib 2010과 비교하여 Table 1에 나타내었다. 거친 시공줄눈 면에 대한 c' 값은 동일 f_{ck} 를 갖는 부드러운 면 대비 높은 값을 제시하고 있는데, 그 비율은 제안모델은 약 2.45배, AASHTO는 3.2배, fib 2010은 2배이다. 거친 시공줄눈 면에 대해 설계기준 및 제안모델에 의해 평가된 c' 값을 f_{ck} 의 변화

Table 1 Comparison of cohesion and frictional coefficients of concrete in each model

Model	Cohesion(MPa)		Coefficient of friction	
	Rough joint	Smooth joint	Rough joint	Smooth joint
AASHTO	1.66	0.52	1.0	0.6
fib 2010	0.4 f_{ct} #	0.2 f_{ct} #	0.7~1.0	0.5~0.7
This study	0.27(f_{ck}) ^{0.65}	0.11(f_{ck}) ^{0.65}	0.95	0.64

$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{2/3}$ for $f_{ck} \leq 50$ MPa
 $f_{ct} = 2.12 \ln[1 + 0.1(f_{ck} + 8)]$ for $f_{ck} > 50$ MPa

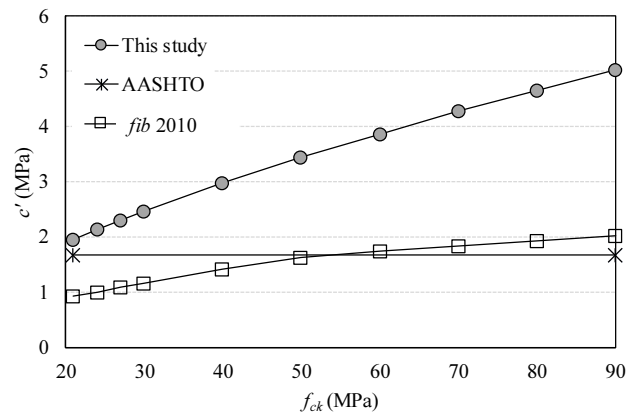


Fig. 3 Comparison of the values of c' predicted from different models (for rough construction joints)

에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 제안모델과 fib 2010에 의한 c' 값은 f_{ck} 의 증가와 함께 증가하는 반면, AASHTO는 f_{ck} 의 변화에 관계없이 일정한 c' 값을 고려하였다. 식 (9)에 의한 c' 값은 AASHTO 및 fib 2010보다 높았는데, 그 차이는 f_{ck} 가 증가할수록 컸다. fib 2010에 의한 c' 값은 f_{ck} 가 50 MPa 이하일 때 가장 낮았으며, f_{ck} 가 60 MPa 이상에서 AASHTO보다 약간 높았다. 제안된 마찰각으로부터 산정한 마찰계수 값은 AASHTO와 비슷한 값을 보였다. 또한 이 값들은 fib 2010에서 제시하는 범위에 있었다.

2.2 전단마찰내력의 상한 값

전단면에서 횡보강근에 의한 구속응력이 클 경우 시공줄눈의 파괴는 횡보강근의 항복 전 횡보강근을 따라 발생하는 콘크리트 할렬에 의해 지배될 수 있다(Kahn and Mitchell, 2002). 콘크리트 할렬 또는 압괴에 의해 파괴가 지배될 경우 횡보강근의 항복을 가정한 식(7)에 의해 산정된 τ_n 은 실험결과를 과대평가할 수 있다. Fig. 4에는 시공줄눈 면을 따른 하중전달에 대해 이상화된 스트럿-타이 모델(Nielsen and Hoang, 2011)을 나타내었다. 작용 전단력 및 횡보강근의 구속력으로 인해 시공줄눈 면에서는 경사 압축응력이 발생한다. 따라서 시공줄눈 면에서 작용하중 및 응력들에 대해 힘의 평형조건을 고려하면 다음 관계가 유도된다.

$$(\tau_n)_{\max} \cdot A_c = \nu_c f_{2\max} A_c \sin\phi' \cos\phi' \quad (11)$$

여기서, A_c 는 시공줄눈의 단면적, ν_c 는 콘크리트 압축강도에 대한 유효계수, $f_{2\max}$ 는 2축응력 상태에서 균열 콘크리트의 압축강도이다. Kwon et al.(2017)은 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 완전 소성체로서의 응력-변형률 블록의 등가를 통하여 ν_c 를 다음과 같이 제안하였다.

$$\nu_c = 0.79 \text{Exp} \left[-0.03 \left(\frac{f_{ck}}{f_{co}} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_0}{\rho_c} \right)^{1.6} \right] \quad (12)$$

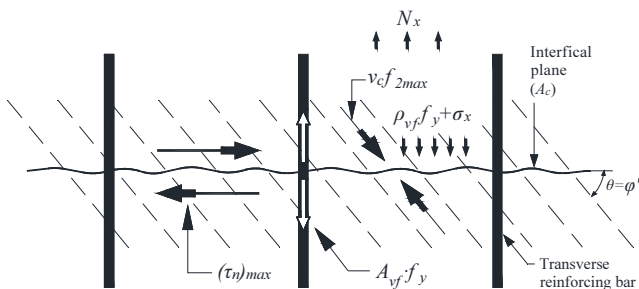


Fig. 4 Strut-and-tie model along the construction joint

2축 면내 전단력을 받는 판넬 실험에서 경사균열 콘크리트의 강도는 주 인장변형률(ϵ_1) 크기에 의해 영향을 받음이 보고되고 있다. Belarbi and Hsu(1995)는 실험결과를 바탕으로 $f_{2\max}$ 를 다음과 같이 제안하였다.

$$f_{2\max} = \frac{0.9}{\sqrt{1+400\epsilon_1}} f_{ck} \quad (13)$$

경사균열 면에서 콘크리트 파괴 시 ϵ_1 의 크기는 보강근 양 및 f_{ck} 에 의해 영향을 받는다. 하지만 시공줄눈 면에서 횡보강근을 따라 발생하는 콘크리트의 경사균열 파괴 시 ϵ_1 의 값에 대해 참고할 수 있는 유용한 자료는 없다. 이 연구에서는 횡보강근의 항복 전에 콘크리트 경사균열 파괴를 고려하고 있으므로 ϵ_1 의 최대 값을 횡보강근 항복 변형률(ϵ_y)로 가정하였다. 따라서, 시공줄눈 면에서 전단마찰 내력의 상한값은 식(11)과 (13)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\tau_n)_{\max} = \frac{0.9\nu_c}{\sqrt{1+400\epsilon_y}} f_{ck} \sin\phi' \cos\phi' \quad (14)$$

3. 제안모델과 실험결과의 비교

3.1 기존 실험결과 데이터베이스

전단마찰에 대한 직접전단(push-off) 실험은 대부분 일체 타설 콘크리트에 대해 수행하였기 때문에, 시공줄눈 면을 갖는 직접전단 실험 데이터는 Table 2에 나타낸바와 같이 많지 않다. 기존 실험결과들의 데이터베이스에서 시공줄눈 면의 상태는 AASHTO 및 fib 2010에 따라 인위적으로 약 3 mm 깊이 처리를 한 경우와 아무 처리도 하지 않은 경우를 각각 거친

Table 2 Distribution of different parameters in the 146 test data sets for the concrete interface with construction joints

Parameters	Distribution					
	Range(MPa)	15.4 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
f_{ck}	Rough joint	2	38	26	22	14
	Smooth joint	2	6	17	19	0
σ_x	Range(MPa)	-4 ~ -2	-2 ~ 0	0	0 ~ 2	2 ~ 9.38
	Rough joint	3	3	96	0	0
	Smooth joint	0	0	15	0	29
$\rho_v f_y$	Range(MPa)	0	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 12.29
	Rough joint	0	32	60	8	2
	Smooth joint	17	19	8	0	0

면과 부드러운 면으로 분류하였다. 대부분의 기존연구는 주로 거친 시공줄눈 면을 갖는 실험체에 대한 직접전단 실험을 진행하였다(Frenay 1987; Harries et al. 2012; Kahn and Mitchell 2002; Mattock 1976; Mattock et al. 1975; Puijssers and Liqui 1985; Walraven and Stroband 1994). 반면 Hwang(2016)은 기존 콘크리트 표면에 아무런 처리를 하지 않고 콘크리트를 타설하여 부드러운 시공줄눈 면을 갖는 직접전단 실험체를 제작하였다. Mattock et al.(1975) 및 Hwang(2016)은 시공줄눈 면에 대해 수직으로 작용하는 축응력을 고려하여 전단내력을 평가하였다. 모든 직접전단 실험체들은 시공줄눈 면을 따라 균열이 발생하고 파괴에 도달하는 전단마찰 거동에 의해 지배되었다. 거친 시공줄눈 면을 갖는 경우 압축강도(f_{ck})는 주로 20~40 MPa 에 분포하였으며 작용 축응력(σ_x)이 있는 경우는 매우 적었다. 시공 줄눈 면에서 횡 보강근에 의한 구속응력 (clamping stress, $\rho_v f_y$)은 1.4~12.29 MPa 범위에 있었다. 부드러운 시공줄눈 면의 경우 f_{ck} 는 대부분 40~60 MPa에 분포하였으며, σ_x 는 0~9.38 MPa 범위에 있었다. 또한 횡 보강근의 구속응력은 대부분 0~4 MPa의 범위에 있었는데, 횡 보강근을 배근하지 않은 실험체는 17개이다.

3.2 제안모델과 실험결과의 비교

콘크리트 소성론에 기반하여 제시한 시공줄눈 면에서의 전단마찰 내력에 대한 제안모델과 데이터베이스의 실험결과 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 설계기준의 안전성 평가를 위해 AASHTO 및 *fib* 2010의 모델도 함께 비교하였다. Table 3에는 각 모델의 예측값과 실험값의 비교($\gamma = (\tau_n)_{pre} / (\tau_n)_{Exp}$)들로

Table 3 Statistical comparison of measured and predicted shear friction strengths

Interface type	Statistica value*	Proposer		
		AASHTO	<i>fib</i> 2010	This study
Smooth construction joint	γ_m	0.55	0.71	0.94
	γ_s	0.20	0.28	0.32
	γ_v	0.36	0.39	0.34
Rough construction joint	γ_m	0.82	0.48	1.04
	γ_s	0.30	0.15	0.30
	γ_v	0.37	0.32	0.29
Total	γ_m	0.75	0.55	1.01
	γ_s	0.30	0.23	0.31
	γ_v	0.40	0.41	0.31

* γ_m , γ_s , and γ_v indicates the mean, standard deviation, and coefficient of variation, respectively, of the ratios ($\gamma = (\tau_n)_{pre} / (\tau_n)_{Exp}$) between the predictions and experiments of shear friction strength (τ_n).

부터 얻은 통계 값들의 비교를 나타내었다. *fib* 2010에 의한 τ_n 의 산정 시 마찰계수는 제안 범위 값들의 평균값을 이용하였다. ACI 318-14의 전단마찰 내력식은 콘크리트 점착력 및 작용 축하중에 의한 하중전달을 고려하지 않으므로 이 비교에서는 포함하지 않았다.

AASHTO 식은 부드러운 시공줄눈 면에 대해 실험결과를 상당히 과소평가하였다. AASHTO 식의 안전측은 부드러운 시공줄눈 면에 비해 거친 시공줄눈 면에서 크게 감소하였다. AASHTO 식으로부터 결정된 γ 값들의 평균과 표준편차는 거친 면에서 각각 0.82와 0.30이며, 부드러운 면에서 각각 0.55

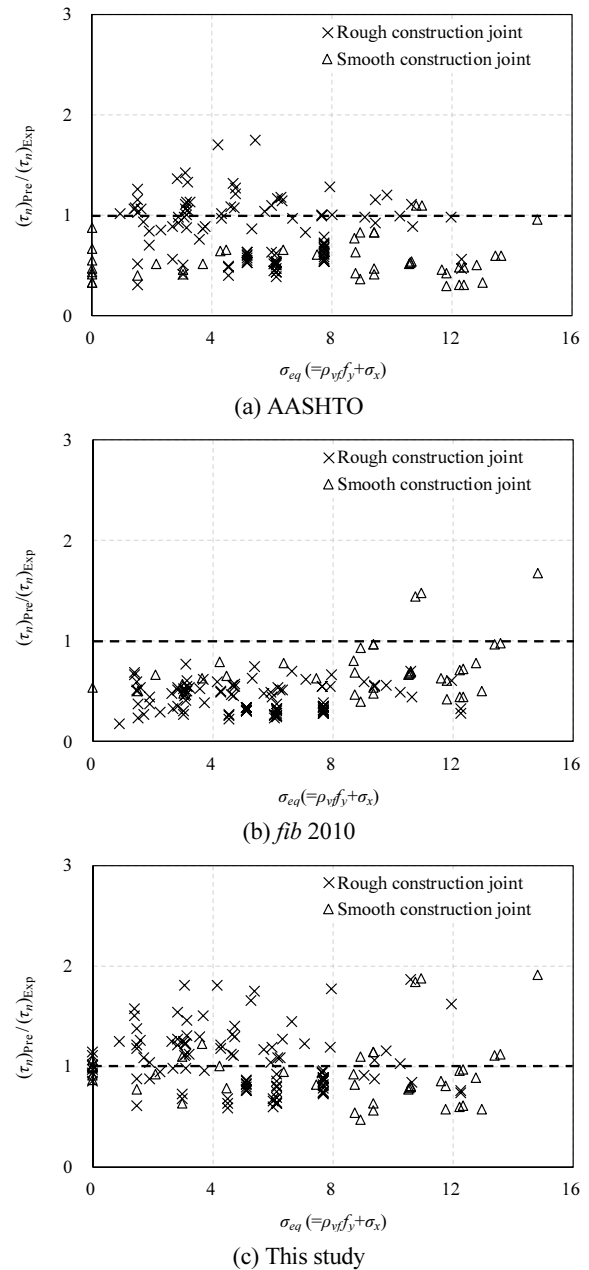


Fig. 5 Comparisons of predicted and measured shear friction strengths

와 0.20이다. *fib* 2010 식도 AASHTO 식과 같이 실험결과를 상당히 과소평가하였다. *fib* 2010 식으로부터 결정된 γ 값들의 평균과 표준편차는 거친 면에서 각각 0.48과 0.15이며, 부드러운 면에서 각각 0.71과 0.28이다. 제안모델에 의한 예측값은 실험결과와의 비교에서 실험결과와 가장 가까운 평균값과 가장 낮은 변동계수를 보였다. 전체 시공줄눈 면에 대해 제안모델로부터 결정된 γ 값들의 평균, 표준편차 및 변동계수는 각각 1.01, 0.31 및 0.31이다.

4. 결론

이 연구에서는 콘크리트 소성론에 기반하여 시공줄눈 면에서 전단마찰에 의한 하중전달 모델을 제시하였다. 시공줄눈 면에서 횡보강근에 의한 전단마찰 저항의 과대평가를 최소화하기 위하여 스트럿-타이 모델에 기반하여 전단마찰 내력에 대한 상한 값을 제안하였다. 제시된 모델은 146개의 기존 실험결과 및 AASHTO와 *fib* 2010과 비교하여 그 타당성을 확인하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시공줄눈 면에서 콘크리트 점착력(c')는 거친 면의 경우 $0.27(f_{ck})^{0.65}$, 부드러운 면의 경우 $0.11(f_{ck})^{0.65}$ 로 제시될 수 있었는데, 여기서 f_{ck} 는 후타설 콘크리트의 압축강도이다.
- 2) 거친 시공줄눈 면에 대한 c' 값은 동일 f_{ck} 를 갖는 부드러운 면 대비 높은 값들을 제시하고 있는데, 그 비율은 제안모델은 약 2.45배, AASHTO는 3.2배, *fib* 2010은 2배이다.
- 3) 시공줄눈 면에서 마찰계수는 거친 면과 부드러운 면에 대해 각각 0.95와 0.64로 제시되었는데, 이 값들은 AASHTO의 제안 값(각각 1.0과 0.6)과 비슷한 수준이다.
- 4) AASHTO 식 및 *fib* 2010 식은 전단마찰내력을 상당히 과소평가하였다. 반면 제안모델에 의한 예측값은 실험결과와의 비교에서 실험결과와 가장 가까운 평균값과 가장 낮은 변동계수를 보였다. 제안모델로부터 결정된 예측값과 실험값의 비들의 평균, 표준편차 및 변동계수는 각각 1.01, 0.31 및 0.31이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014R1A2A2A09054557).

References

AASHTO (2014), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: Seventh Edition. American Association of State Highway and Transportation Official(AASHTO), Washington, DC, USA.

ACI Committee 318 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 382.

Ali, M. A. and White, R. N. (1999), Enhanced Contact Model for Shear Friction of Normal and High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 96(3), 348-360.

Belarbi, A. and Hsu, T. T. C. (1995), Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-Compression. *ACI Structural Journal*, 92(5), 562-573.

Choi, O. C., Cho, S. S., Hong, G. S., Chung, I. Y., and Shin, Y. S. (1994), Interfacial Shear Transfer Characteristics of Concrete Joints, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 10(8), 89-96.

Fib (2013). Model Code for Concrete Structures 2010, Special Activity Group 5. Lausanne, CH: *fédération internationale de béton*.

Frenay, J. (1985), Shear Transfer across a Single Crack in Reinforced Concrete under Sustained Loading, Stevin Laboratory, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Report No. 5-85-5.

Harries, K. A., Zeno, G., and Shahrooz, B. (2012), Toward an Improved Understanding of Shear Friction Behavior, *ACI Structural Journal*, 109(6), 835-844.

Harries, K. A., Zeno, G., and Shahrooz, B. (2012), toward an Improved Understanding of Shear-Friction Behaviour, *ACI Structural Journal*, 109(6), 835-844.

Hwang, Y. H. (2016), Evaluation of Concrete Shear Friction Strength Considering its Unit Weight, MSc Thesis, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Korea.

Hwang, Y. H. and Yang, K. H. (2016), Effect of Transverse Reinforcement on the Shear Friction Capacity of Concrete Interfaces with Construction Joint. *Journal of Korea concrete Institute*, 28(5), 555-562.

Kahn, L. F. and Mitchell, A. D. (2002), Shear Friction Tests with High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 99(1), 98-103.

Kahn, L. F. and Mitchell, A. D. (2002), Shear Friction Tests with High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 99(1), 98-103.

Kwon, S. J., Yang, K. H., Hwang, Y. H., and Ashour, A. F. (2017), Shear Friction Strength of Monolithic Concrete Interfaces, *Magazine of Concrete Research*, 69(5), 230-244.

Mattock, A. H. (1976), Shear Transfer under Monotonic Loading: A Cross an Interface between Concrete Cast at Different Times, University of Washington, Report No. SM76-3.

Mattock, A. H. and Hawkins, N. M. (1972), Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research, *PCI Journal*, 71(2), 76-93.

Mattock, A. H., Johal, L., and Chow, H. C. (1975), Shear Transfer in Reinforced Concrete with Moment or Tension Acting across the Shear Plane, *PCI Journal*, 20(4), 76-93.

Nielsen, M. P. and Hoang, L. C. (2011), Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice-Hall, England.

Prujssers, A. and Liqui, L. G. (1985), Shear Transfer Across a Crack in Concrete Subjected to Repeated Loading. Stevin Laboratory, Department

요 지 : 본 연구에서는 콘크리트 시공줄눈 면의 전단마찰 내력을 합리적으로 평가하기 위하여 콘크리트 소성론의 상계치 이론에 기반한 수학적 모델을 제시하였다. 전단면에서 횡보강근의 전단전달에 대한 과대평가를 피하기 위하여 시공줄눈 면에서의 하중전달에 대한 스트럿-타이 모델에서 콘크리트 할렐 및 압괴의 한계상태로부터 전단마찰 내력의 상한값을 유도하였다. 제시된 모델은 시공줄눈 면에서 콘크리트 점착력과 마찰계수를 거친 면의 경우 각각 $0.27(f_{ck})^{0.65}$ 와 0.95 를, 부드러운 면의 경우 각각 $0.11(f_{ck})^{0.65}$ 와 0.64 로 결정하였는데, 여기서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도이다. 직접전단에 대한 기존 문헌으로부터 수집한 146 실험데이터와의 비교로부터, 제시된 모델은 AASHTO 및 fib 2010 식에 비해 예측 값과 실험 값들의 비의 표준편차 및 변동계수에 대해 더 낮은 값을 보였다. 특히 전단마찰 내력 평가에서 기존식들의 상당한 과소평가 경향과 달리 제시된 모델은 실험결과와 잘 예측하였다.

핵심용어 : 설계기준 식, 점착력, 시공줄눈, 마찰계수, 전단마찰
