



고강도 전단철근을 사용한 철근콘크리트 전단벽체-기초계면에서의 전단마찰 거동특성에 대한 해석적 연구

천주현^{1)*} · 이기호²⁾ · 백장운³⁾ · 박홍근³⁾ · 신현목⁴⁾

¹⁾성균관대학교 건설환경연구소 ²⁾삼성물산 토목사업부 ³⁾서울대학교 건축학과 ⁴⁾성균관대학교 건축·토목공학부

Analytical Study on Behavior Characteristic of Shear Friction on Reinforced Concrete Shear Wall-Foundation Interface using High-Strength Reinforcing Bar

Ju-Hyun Cheon,^{1)*} Ki-Ho Lee,²⁾ Jang-Woon Baek,³⁾ Hong-Gun Park,³⁾ and Hyun-Mock Shin⁴⁾

¹⁾Construction and Environmental Lab., SungKyunKwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Civil, Samsung C&T Corporation, Seoul 13530, Rep. of Korea

³⁾Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

⁴⁾Dept. of Civil and Architecture Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to provide analytical method to reasonably evaluate the complicated failure behaviors of shear friction of reinforced concrete shear wall specimens using grade 500 MPa high-strength bars. A total of 16 test specimens with a variety of variables such as aspect ratio, friction coefficient of interface in construction joint, reinforcement details, reinforcement ratio in each direction, material properties were selected and the analysis was performed by using a non-linear finite element analysis program (RCAHEST) applying the modified shear friction constitutive equation in interface based on the concrete design code (KCI, 2012) and CEB-FIP Model code 2010. The mean and coefficient of variation for maximum load from the experiment and analysis results was predicted 1.04 and 17% respectively and properly evaluated failure mode and overall behavior characteristic until failure occur. Based on the results, the analysis program that was applied modified shear friction constitutive equation is judged as having a relatively high reliability for the analysis results.

Keywords : high-strength reinforcing bar, reinforced concrete shear wall, shear friction, nonlinear finite element analysis, RCAHEST

1. 서 론

원전구조물에는 매우 높은 수준의 구조안전성이 요구되고 있으며 이를 만족하기 위해 상대적으로 매우 많은 양의 철근이 소요되는 보수적인 설계가 이루어지고 있으며, 이로 인해 철근 과밀 배근에 의한 시공성 저하와 경제성이 큰 문제로 제기되고 있는 실정이다.

이러한 문제를 해결하고자 최근에는 기존의 420 MPa급 철근을 대신해 550 MPa급 고강도철근의 사용가능성과 적용을 위한 연구¹⁻³⁾가 수행되고 있으며, 특히 원전구조물에 많이 사용되는 낮은 형상비를 갖는 전단벽체는 지진

과 같은 반복하중을 경험할 경우 시공이음부에서의 미끄러짐 파괴로 인한 구조안전성에 큰 문제가 발생할 수 있다.

국내 원전은 KEPIC (Korea Electric Power Industry Code, 한국전력산업기술기준)에 의해서 설계되고 있으며, 벽체-기초 미끄러짐에 대한 설계는 Birkeland 등⁴⁾이 선행 연구자들의 실험 결과와 전단마찰유사론에 근거하여 제안한 식 (1)의 전단마찰강도식(KCI 2012⁵⁾, ACI 318⁶⁾ 및 ACI 349⁷⁾을 적용하고 있다.

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \quad (1)$$

여기서, μ 는 콘크리트 마찰계수이며 일부러 거칠게 하지 않은 굵은 콘크리트에 새로 친 콘크리트 경우 0.6, 전단 연결재에 의하거나 철근에 의해 구조용 강재에 정착된 콘크리트 경우 0.7, 표면을 거칠게 만든 굵은 콘크리트에

*Corresponding author E-mail : jhcheon@kci.re.kr

Received March 31, 2016, Revised July 1, 2016,

Accepted July 6, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

새로 친 콘크리트 경우 1.0, 일체로 친 콘크리트 경우 1.4 를 적용하도록 하고 있다.

식 (1)은 벽체-기초에서의 복잡한 전단전달 거동에 마찰이론을 적용함으로써 보다 단순한 방법으로 전단강도를 예측할 수 있는 장점이 있지만 휨철근은 벽체 미끄러짐에 저항하지 않는다고 가정하고 추가의 전단마찰철근을 사용하여 설계하중을 계산하고 있다. 또한, 전단마찰철근의 설계항복강도를 500 MPa 이하로 제한하고 있으며 반복하중과 휨모멘트에 대한 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

이러한 상황에서 고강도 철근이 적용된 낮은 형상비를 갖는 전단벽체의 시공이음부에서의 전단마찰성능에 대한 검증이 이루어져야 하며, 실험적 연구뿐만 아니라 구성관계식과 재료모델의 개발을 통한 신뢰성 있는 해석 방안 마련이 필수적으로 요구된다.

현재 국·내외적으로 전단마찰에 관한 연구⁸⁻¹⁰⁾는 일부 제한적으로 수행되어 오고 있지만 반복 가력하에서 고강도 철근이 적용된 경우의 전단마찰성능에 대한 연구결과는 알려지지 않고 있다.

Tassios 등⁸⁾은 실험을 수행하여 콘크리트 표면조건에 따라 단조하중과 반복 가력 조건에서의 전단응력-전단변형률의 관계를 분석하였고 이 결과 CEB-FIP Model code (1990)의 바탕이 되었다.

Migeum 등⁹⁾은 균열의 미끄러짐과 분리사이의 관계를 이용한 새로운 전단마찰모델을 제안하고 해석프로그램에 이식하여 선행 연구자들의 실험결과와 비교·분석을 통한 검증연구를 수행하였다.

송진규 등¹⁰⁾은 Loov¹¹⁾가 제시한 보의 전단마찰모델을 이용하여 슬래브-기둥 접합부에서의 전단성능을 예측할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 저자 등에 의해 수행된 550 MPa급 고강도 철근이 사용된 철근콘크리트 전단벽체 실험체를 검증 대상으로 시공이음부에서의 복잡한 전단마찰 파괴거동 특성을 보다 합리적으로 예측할 수 있는 해석적 방안을 제시하는 것을 목표로 한다.

이를 위해, 저자 등¹²⁻¹³⁾에 의해 그 동안 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)에 CEB-FIP Model code¹⁴⁾을 근간으로 경계면에서의 콘크리트 전단마찰과 철근의 다웰 작용(dowel action)에 관한 구성관계식을 새로이 수정하여 실험결과와의 비교·분석을 통해 해석 결과에 대한 적용성과 타당성을 검증하였다.

2. 철근콘크리트 구성방정식

550 MPa급 고강도 철근이 적용된 낮은 형상비(h_w/l_w)를 갖는 철근콘크리트 전단벽체의 시공이음부에서의 전단마찰성능에 대한 해석적 평가를 위한 철근콘크리트 요소 구성방정식은 Fig. 1에서와 같이 저자 등¹²⁻¹³⁾에 의해 기존에 개발된 분산균열 개념에 근거한 콘크리트의 압축모델, 균

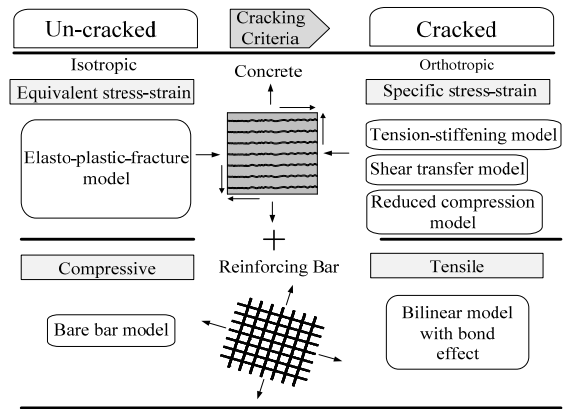


Fig. 1 Outline of analysis model for reinforced high-strength concrete

열 직각 방향의 인장모델 그리고 콘크리트에 포함된 철근모델로 각각 구성되어있다. 여기에, 서로 다른 시간에 타설된 기초와 벽체 콘크리트 경계면에서의 재하 및 재재하시 전단마찰 효과를 고려할 수 있도록 저자 등에 의해 새로이 수정된 전단전달모델을 적용하였다.

2.1 전단마찰 구성방정식

콘크리트 전단마찰 파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 현재까지 여러 연구자들^{4,8-9)}에 의해서 규명된 바가 있다.

본 연구에서는 콘크리트 경계면에서의 전단마찰 구성관계식은 단조증가하중뿐만 아니라 지진과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 파괴거동을 평가하기 위하여 식 (2)에서와 같이 각각 콘크리트 표면마찰 조건에 따른 전단저항 τ_f 와 철근의 다웰 작용으로 인한 전단저항 τ_d 로 구성하였다.

$$\tau = \tau_f + \tau_d \quad (2)$$

2.2 콘크리트의 전단마찰 구성방정식

반복하중의 경우에 균열의 폐합으로 인해 일반적으로 이 위치에서의 전단강성이 증가하게 된다. 따라서 철근 콘크리트 요소의 전단강성(shear stiffness)을 평가할 때에는 균열의 개폐로 인한 전단강성의 연속성을 보장하기 위해 균열사이의 콘크리트의 전단강성효과를 고려해야 한다.

본 연구에서 균열 면에서의 전단전달모델은 Li 등¹⁵⁾의 연구를 적용하였다. 다만, Li 등은 일체 타설된 콘크리트에 균열을 유발시켜 균열 폭과 미끄러짐의 관계를 모델링한 것으로 일체 타설되지 않은 콘크리트 표면 및 철근의 다웰효과가 고려되고 있지 않다. 이들의 영향을 고려하기 위해서 콘크리트 구조설계기준⁵⁾과 CEB-FIP Model code¹⁴⁾를 참고로 콘크리트 경계면에서의 표면조건을 고려하기

위한 전단마찰 파라미터 γ_{ts} 와 반복하중 효과(cyclic mixed effect) 파라미터 γ_{tc} 를 적용하여 식 (3)~(6)으로부터 철근 콘크리트 요소의 균열 평행방향으로의 전단응력과 전단 전달로 인한 압축응력을 각각 산정하였다.

$$f_{sk} = 3.83f_c^{\frac{1}{3}}(\gamma_{ts})(\gamma_{tc}) \quad (3)$$

$$S_D = f_{sk} \left(\frac{s_z^2}{s_z^2 + \omega^2} \right) \quad (4)$$

$$\tau_f = \frac{1}{\frac{1}{S_D} + \frac{1}{G_c}} (\gamma_{xy}) \quad (5)$$

$$\sigma_f = -\frac{f_{sk}}{2} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\beta_1} \right) - \frac{\beta_1}{1 + \beta_1^2} \right] \quad (6)$$

여기서, f_{sk} 는 전단전달강도, f_c 는 콘크리트 압축강도, $\gamma_{ts} = \frac{\mu}{1.4}$, μ 는 표면에 대한 마찰계수로서 일체 타설의 경우 1.4, 표면을 거칠게 처리한 경우 1.0, 표면처리를 하지 않은 경우 0.6(콘크리트 구조설계기준⁵⁾), γ_{tc} 는 반복하중 효과 계수(단조증가하중일 경우 1.0, 반복하중의 경우 $0.9 - (1 - \gamma_{ts}) \frac{1.4}{1.6}$), s_z 는 전단 미끄러짐(sliding), ω 는 균열폭(opening), S_D 는 단조재하시 균열면에서의 secant 전단강성, G_c 는 전단탄성계수, γ_{xy} 는 균열면에서의 전단변형률, τ_f 는 콘크리트마찰로 인한 전단응력, σ_f 는 균열면에서 전단전달로 인한 압축응력, $\beta_1 = \sqrt{\frac{\tau_f}{f_{sk} - \tau_f}}$ 이다.

2.3 철근의 다웰 작용 구성방정식

철근콘크리트 벽체는 휨에 의한 전단변형 및 균열면에서의 전단미끄러짐이 발생할 경우, 콘크리트의 전단마찰 저항 이외에 철근의 다웰 효과로 인해 철근의 인장력으로 전단변형에 저항한다.

본 연구에서는 CEB-FIP Model code¹⁴⁾에 철근의 다웰 효과를 고려하기 위한 제안식을 수정하여 식 (7)과 같이 제안하였다. 하중 재하 및 재재하에 따른 철근의 피로저감효과를 고려하기 위해 단조증가하중의 경우 1.0, 반복하중의 경우 0.8을 적용하였으며, 휨 저항계수(γ_{td})는 Randl¹⁶⁾의 연구 결과와 비교·분석을 근거로 1.5를 적용하였다. 다웰 작용으로 인한 철근에 전단저항에 대한기여는 전단 미끄러짐(sliding) $s_z \leq s_{max}$ 또는 $s_z > s_{max}$ 인 경우 각각 식 (8)과 식 (9)을 적용하였다.

$$\tau_{d,max} = (\gamma_{td})(\gamma_{te})\rho\sqrt{f_c f_y} \quad (7)$$

$$\tau_d = \tau_{d,max} \left(\frac{s_z}{s_{max}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$\tau_d = \tau_{d,max} \quad (9)$$

여기서, γ_{td} 는 휨저항 계수, γ_{te} 는 피로저감계수, s_{max} 는 최대 전단 미끄러짐(sliding), τ_d 는 철근의 다웰 작용으로 인한 전단응력, $\tau_{d,max}$ 는 철근의 다웰 작용으로 인한 최대전단응력이다.

2.4 경계면에서의 파괴 이후의 효과

Fig. 2에서와 같이 경계면에서의 전단전달강도(f_{sk})가 90%에 도달했을 때 파괴가 발생하고 철근의 다웰 효과는 s_{max} 까지 작용한다고 가정한 후, 콘크리트 표면 마찰계수(μ)가 1 이상인 경우에 대하여 실험체 시공이음부의 파괴 이후 전단전달강도는 $0.8f_{sk}$ 로 취함으로써 전체 전단마찰저항에 있어서 콘크리트의 전단마찰저항이 더 큰 기여를 하도록 하였다. 또한, Fig. 3에서와 같이 콘크리트의 마찰계수(μ)가 1 미만인 경우, 파괴 이후 경계면에서의 전단전달강도는 $0.6f_{sk}$ 로 함으로써 철근의 다웰 효과가 전단저항에 보다 더 큰 기여를 하도록 하였다.

2.5 비선형유한요소해석 프로그램

본 연구에서는 저자 등¹²⁻¹³⁾에 의하여 그동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP에 이식하여 모듈화 된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.

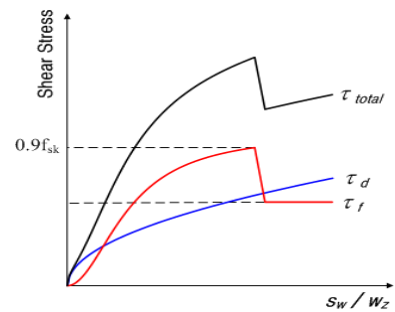


Fig. 2 Stress-strain relation when $\mu \geq 1$

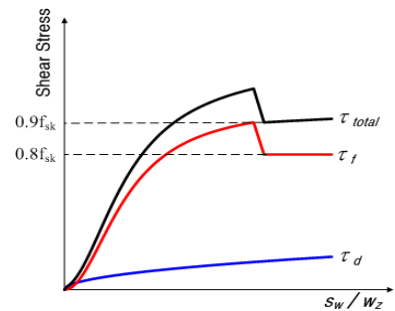


Fig. 3 Stress-strain relation when $\mu < 1$

3. 철근콘크리트 벽체 실험체

Fig. 4에서와 같이 저자 등³⁾에 의해 수행된 형상비($h_w/l_w=0.33, 0.5$ 및 1.0), 벽체-기초의 시공이음에서의 계면처리에 따른 경계면의 마찰계수, 수평·수직 철근비(ρ_h/ρ_v), 재료 물성 및 축력 재하 여부를 주요 변수로 갖는 철근콘크리트 전단벽체 총 16기를 대상으로 검증 실험을 수행하였으며, 각 실험체에 대한 단면 형상 및 배근 상세와 주요 실험변수에 따른 실제 재료 물성 값을 각각 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다. 실험체는 형상비($h_w/l_w=1.0$)를 갖는 일체 타

설된 전단벽체(HS1, NS1, HF1 및 NF1)와 Fig. 4(b)에서와 같이 계면의 미끄러짐을 방지하기 위해 의도적으로 시공 줄눈을 기초깊이 방향으로 약 50 mm 이동시켜 일체 타설된 콘크리트로 간주되는 형상비($h_w/l_w=0.5$)을 갖는 전단벽체(HS0.5, NS0.5, HF0.5 및 NF0.5)로 구분된다.

그 이외에 형상비(h_w/l_w) 0.5와 0.33을 갖는 전단벽체(SF0.5, SF0.5-L, SF0.5-LL, SF0.33, SF0.33D, SF0.33D-L, SF0.33-L 및 SF0.33-S) 8기에 대해서는 기초콘크리트 타설 후 거칠게 계면처리를 하지 않은 이중 타설된 실험체로 각각 설계·제작하였다. 특히, SF0.33-S의 경우 Fig. 4(c)에서와 같

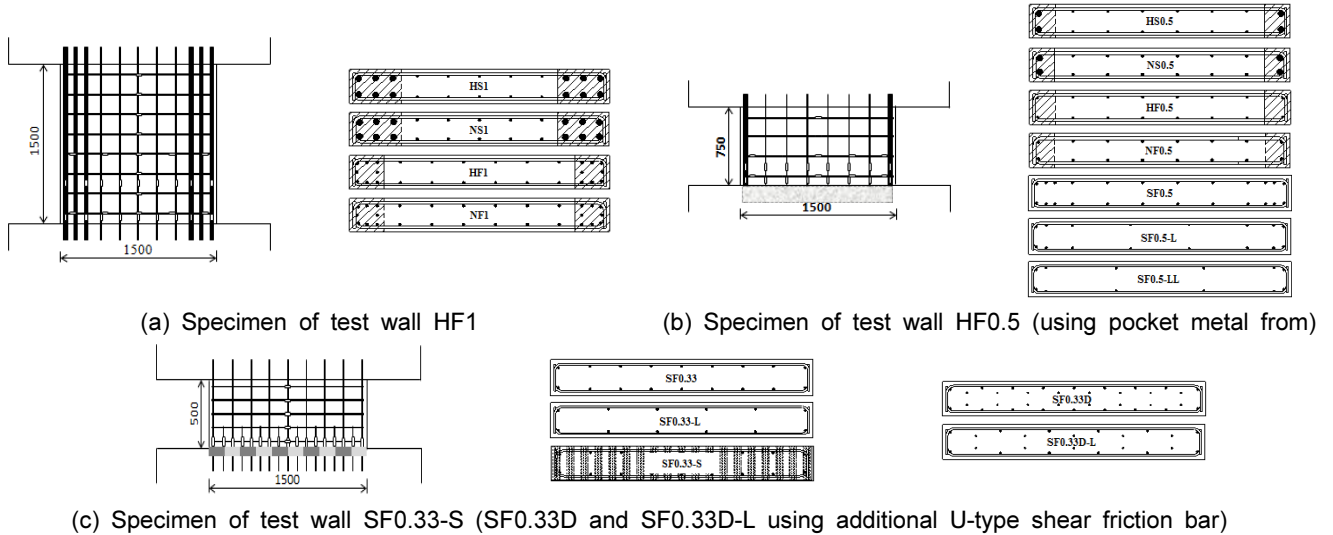


Fig. 4 Dimensions and reinforcement layout of specimens

Table 1 Test variables and material properties

Specimens	Aspect ratio (h_w/l_w)	Compression strength (MPa)	Axial Load (kN)	Web				Boundary		Interface	
				Longitudinal (%)		Transverse(%)		Flexural (%)		Shear friction bar (%)	
				ρ_v	f_{yv}	ρ_h	f_{yh}	ρ_f	f_{yf}	ρ_{sf}	f_{sf}
HS1	1.0	52.9	803	(10-D13)0.70	667	(D35@187)0.68	667	(6-D35)9.57	667	-	-
NS1		52.9	803	(10-D16)1.10	455	(D16@215)0.99	455	(6-D35)9.57	667	-	-
HF1		50.9	772	(12-D13)0.66	667	(D13@187)0.68	667	(8-D16)3.97	667	-	-
NF1		50.9	772	(12-D16)1.08	455	(D16@215)0.99	455	(8-D16)3.97	667	-	-
HS0.5	0.5	37.4	700	(12-D13)0.74	667	(D13@187)0.68	667	(2-D35)5.42	667	-	-
NS0.5		44.6	852	(12-D16)1.00	470	(D16@215)0.93	470	(2-D35)5.42	470	-	-
HF0.5		38.7	882	(12-D13)0.58	667	(D13@187)0.68	667	(2-D13)1.32	-	-	-
NF0.5		38.7	882	(12-D16)1.00	470	(D16@215)0.99	470	(2-D16)1.00	470	-	-
SF0.5	0.33	42.1	-	(12-D13)0.69	667	(D13@187)0.68	667	(6-D13)1.90	-	-	-
SF0.5-L		42.1	-	(8-D13)0.33	667/620	(D10@187)0.38	620	(4-D13)1.69	-	-	-
SF0.5-LL		42.1	-	(4-D13)0.21	667/620	(D10@375)0.19	620	(2-D13)1.32	-	-	-
SF0.33		42.1	-	(12-D13)0.68	667	(D10@100)0.71	620	(2-D13)1.27	-	-	-
SF0.33D	0.33	42.1	-	(12-D13)0.68	667	(D10@100)0.71	620	(2-D13)1.27	-	(16-D10)0.38	625
SF0.33D-L		42.1	-	(8-D13)0.39	667/620	(D10@167)0.43	620	(2-D13)1.27	-	(10-D10)0.24	625
SF0.33-L		42.1	-	(8-D13)0.39	667/620	(D10@167)0.43	620	(2-D13)1.27	-	-	-
SF0.33-S		44.0	-	(12-D13)0.68	667	(D10@100)0.71	625	(2-D13)1.27	-	-	-

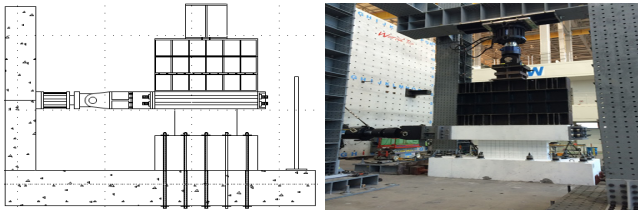


Fig. 5 Test setup

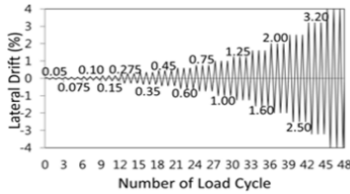


Fig. 6 Lateral loading protocol

이 기초부 표면 요철을 통해 표면을 거칠게 함으로써 마찰계수(μ) 1.0을 적용하도록 하였다. 일체 타설 및 이중 타설에 따른 계면처리 여부에 따라 철근의 항복강도(420 MPa 및 550 MPa)을 변수로 ACI 349⁷⁾ 기준을 만족하는 수평·수직 철근 비(ρ_h/ρ_v)를 각각 계산하여 적용하였다. SF0.5-L, SF0.5-LL, SF0.33D-L 및 SF0.33-L의 경우 철근비에 따른 거동특성을 검증하기 위해 최대수평철근비(ρ_h) 보다 작은 철근비로 설계하였으며, 이를 제외한 나머지 실험체는 최대수평철근비(ρ_h)를 적용하였다. SF0.33은 미끄러짐 파괴를 유도함으로써 보다 정확한 전단마찰강도를 계측하기 위해 전단마찰강도가 휨강도보다 작도록 설계하였다. SF0.33D와 SF0.33D-L은 전단마찰강도가 휨강도와 같도록 설계하기 위해 SF0.33과 SF0.33-L에 각각 8개와 5개의 U형의 추가 전단철근을 Fig. 4(d)와 같이 배근하였다. Fig. 5에서와 같이 실험체를 설치한 후 200 mm의 일정한 벽체 두께를 갖는 실험체에 압축력($A_f c_k$)의 약 7% 수준으로 일정하게 축력을 재하하면서 동시에 횡방향으로 반복가력을 통해 파괴시까지 실험을 수행하였다.

4. 비선형 유한요소해석

검증 대상 실험체에 대해 Fig. 7과 같이 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소와 하중이 작용하는 상부보에 콘크리트의 국부파괴를 방지하기 위한 탄소성 평면응력 요소를 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 여기에, 타설 방법 및 경계면에서의 계면처리에 따른 전단마찰 효과와 이에 따른 불연속 변위를 모사하기 위해 기초와 벽체 경계면에는 본 연구에서 저자 등이 새로이 수정한 구성관계식을 적용한 6절점 경계면요소(Interface element)를 사용하였다. 철근 및 콘크리트에 대한 재료 물성은 Table 1에 나타난 것과 같은 실제의 재료 물성 값을 그대로 적용하였으며, Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같이 실험과 같은 하중 가력 조건을 만족하도록 하중을 가하면서 해석을 수행하였다.

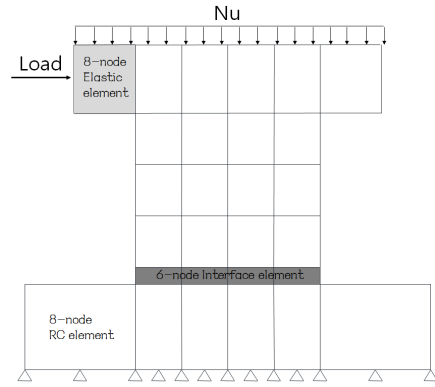


Fig. 7 Finite element mesh used analysis

대상 실험체의 경계면에서의 콘크리트마찰계수는 일체 타설한 실험체의 경우 1.4, SF0.33-S 실험체를 제외한 나머지 이중타설한 실험체에 대해서는 0.6 및 계면을 거칠게 처리한 SF0.33-S 실험체에 대해서는 1.0을 각각 적용함으로써 실험과 유사한 계면조건을 모사하도록 하였다.

5. 실험 및 해석 결과의 비교·분석

Fig. 8에 총 16개의 검증 대상 전단벽체 실험체에 대한 실험 및 해석으로부터의 하중-변위 결과를 비교하여 각각 나타내었다. 콘크리트 표면 마찰계수 1.4를 적용한 일체타설 실험체 중 HS1, NS1, HS0.5 및 NS0.5의 경우 실험과 해석에서 모두 최대하중 이후 급격하게 파괴되는 전형적인 전단파괴양상을 보였으며 HF1, NF1, HF0.5 및 NF0.5의 경우 최대하중에 도달하였을 때 휨 파괴가 우선적으로 발생하여 휨에 대한 연성으로 변형 능력이 증가하고 전단파괴가 발생한 휨-전단파괴로 실험결과와 같은 파괴 거동을 비교적 정확히 예측하고 있음을 확인하였다.

콘크리트 표면 마찰계수 0.6 또는 1이 적용된 이중타설 실험체 중 경계면에 전단마찰 보강철근을 배근 또는 요철을 적용한 SF0.33D, SF0.33D-L 및 SF0.33-S와 같은 경우에는 최대하중과 최대하중이후 변형거동 특성 및 최대변위는 비교적 적절하게 예측하고 있으나 Table 2에서와 같이 SF0.33D-L 및 SF0.33-S의 파괴모드는 실험에서 경계면에서의 미끄러짐(sliding)에 의한 파괴와는 달리 이에 대해 예측하고 있지 못함을 알 수 있다. 이들 실험체를 제외한 나머지 이중타설 실험체들의 경우 실험 및 해석으로부터 결과는 모두 경계면에서의 미끄러짐(sliding) 파괴양상을 보였으며 최대하중과 그 이후 파괴시까지의 변형거동 특성을 비교적 적절히 추적하고 있음을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 8 및 Table 2에서와 같이 SF0.5, SF0.5-L, SF0.5-LL, SF0.33 및 SF0.33-L의 경우 해석으로부터의 최대하중이 실험결과에 비해 상대적으로 크게 예측하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 이중타설 실험체 경계면에서의 미끄러짐 파괴에 기인한 것으로 추측된다.

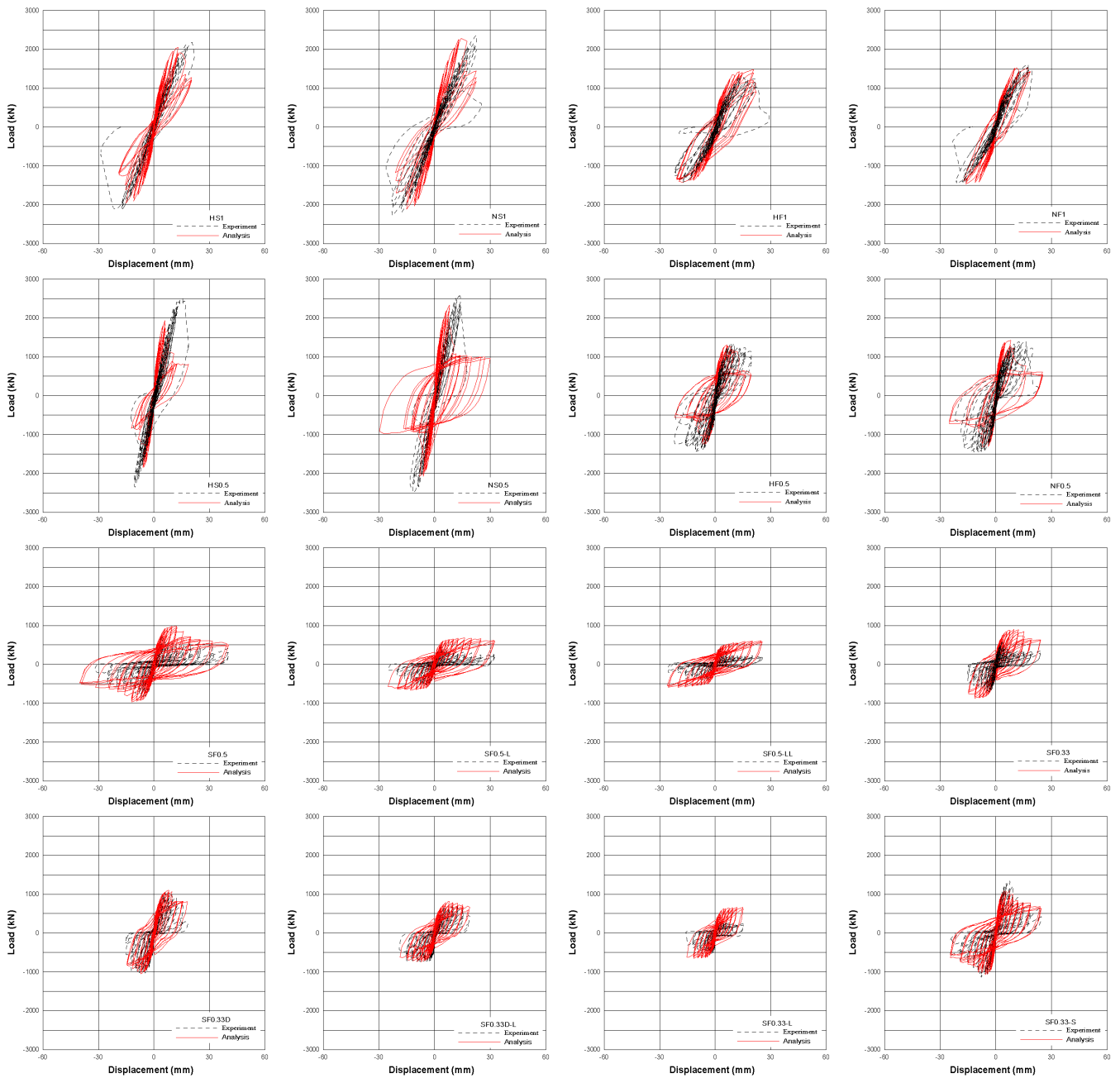


Fig. 8 Comparison of experimental and analytical results for load vs displacement

Table 2 Comparison of experiment with analysis

Specimens	Aspect ratio	Coefficient of friction (μ)	Maximum Load (kN)		Displacement at maximum load (mm)		Failure mode		②/①	④/③
			Exp. ①	Ana. ②	Exp. ③	Ana. ④	Exp.	Ana.		
HS1	1.0	1.4(without construction joint)	2176.3	2046.4	-20.8	-15.0	Shear	Shear	0.94	0.72
NS1			2360.2	2277.5	-22.7	-15.1	Shear	Shear	0.96	0.67
HF1			-1427.7	1473.7	-17.3	-17.7	Flexure-Shear	Flexure-Shear	1.03	1.03
NF1			1603.0	1530.5	-21.2	-16.1	Flexure-Shear	Flexure-Shear	0.95	0.76
HS0.5	0.5		2504.4	1933.6	15.2	6.1	Shear	Shear	0.77	0.4
NS0.5			2571.7	2327.7	13.6	8.0	Shear	Shear	0.91	0.59
HF0.5			-1440.1	1304.3	-10.3	-7.3	Flexure-Shear	Flexure-Shear	0.91	0.7
NF0.5			-1446.0	1426.6	15.9	8.0	Flexure-Shear	Flexure-Shear	0.99	0.5

Table 2 Comparison of experiment with analysis (Continue)

Specimens	Aspect ratio	Coefficient of friction (μ)	Maximum Load (kN)		Displacement at maximum load (mm)		Failure mode		②/①	④/③
			Exp. ①	Ana. ②	Exp. ③	Ana. ④	Exp.	Ana.		
SF0.5	0.5	0.6(with construction joint)	-831.5	988.2	-6.3	-12.0	Sliding	Sliding	1.19	1.92
SF0.5-L			-544.3	685.9	-6.3	-13.0	Sliding	Sliding	1.26	2.07
SF0.5-LL			441.6	606.2	-6.2	-25.2	Sliding	Sliding	1.37	4.1
SF0.33	0.33	0.6(with construction joint)	-718.3	897.26	-3.6	-11.4	Sliding	Sliding	1.25	3.16
SF0.33D			1060.2	1101.6	8.1	8.0	Sliding	Sliding	1.04	0.99
SF0.33D-L			-743.3	812.7	7.7	7.9	Sliding	Flexure-Shear	1.09	1.02
SF0.33-L			-534.7	662.8	-1.7	-11.5	Sliding	Sliding	1.24	6.93
SF0.33-S		1.0(Rough interface)	1351.0	1089.6	7.5	7.5	Sliding	Flexure-Shear	0.81	0.99
Mean									1.04	1.66
S.T.D									0.17	1.74
C.O.V									0.17	1.05

Table 2에는 실험과 해석으로부터 일체타설 및 이중타설 철근콘크리트 전단벽체 실험체에 대한 파괴모드 및 최대하중과 이에 대응되는 변위를 각각 비교하여 나타내었다. 모든 대상 실험체들에 대한 최대하중 예측은 실험결과와 비교하여 평균 및 변동계수는 각각 1.04와 0.17로써 해석결과는 실험결과를 비교적 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다. 일체타설 실험체들의 최대하중에 대한 예측은 실험결과와 비교하여 평균 및 변동계수는 각각 0.93과 0.08인데 반하여 이중타설 실험체들에 대한 예측은 각각 1.16과 0.15로써 일체타설 실험체보다 약간 큰 변동성을 보이고 있으며 이는 이중타설 실험체의 경계면에서의 불확실성에 기인한 것으로 판단된다.

최대하중에 대응되는 변위에 대한 예측은 실험의 계측결과와 비교하여 평균 및 변동계수는 각각 1.66과 1.05로서 최대하중 예측결과에 비해 상당히 큰 오차를 보이고 있다. 이는 앞서의 설명에서와 같이 이중타설 실험체들의 경우 경계면에서의 불확실성으로 인한 미끄러짐 발생과 강도저하에 기인한 것으로써 이에 대한 추가적인 원인 분석 연구가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

550 MPa급 고강도 철근이 배근된 철근콘크리트 전단벽체 실험체를 검증 대상으로 시공이음부에서의 전단마찰 파괴거동 특성을 보다 합리적으로 예측할 수 있는 해석적 방안을 제시하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 저자 등³⁾에 의해 수행된 총 16개의 대상 실험체를 대상으로 새로이 수정된 전단마찰 구성관계식을 적용한 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 적용성과 타당성에 대

한 검증을 수행하였다. 실험체는 형상비($h_w/l_w=0.33, 0.5$ 및 1.0), 벽체-기초 시공이음에서의 계면처리에 따른 경계면 마찰계수, 수평·수직 철근비(ρ_h/ρ_v), 재료물성 및 축력 재하 여부를 주요 변수로 실험을 수행하였으며 실제 실험과 같은 조건하에서 해석을 수행하였다. 연구 수행을 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 검증대상 실험체는 일체타설 및 이중타설에 따른 경계면에서의 콘크리트 표면 처리에 따라 전단, 전단-휨 및 미끄러짐 파괴양상을 나타내었으며, 일부 실험체를 제외하고는 해석 결과 역시 주요 실험변수에 따른 파괴모드 예측과 최대하중 이후의 파괴시까지의 비탄성영역에 대한 전반적인 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 확인할 수 있다.
- 2) 이중타설 실험체들에 대한 최대하중 예측은 실험결과와 비교하여 평균 및 변동계수는 각각 1.16과 0.15로서 일체타설 실험체보다 약간 큰 변동성을 보이고 있으나 모든 대상 실험체들에 대한 평균 및 변동계수는 각각 1.04와 0.17로서 최대하중 예측에 대한 해석결과는 비교적 높은 신뢰도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 3) 최대하중에 대응되는 변위에 대한 예측은 일부 이중타설 실험체들의 경우 경계면에서의 불확실성으로 인해 실험결과와 비교하여 평균 및 변동계수는 최대하중 예측결과에 비해 상당히 큰 오차를 보이고 있으나 전반적으로 볼 때, 본 연구에서 적용한 해석프로그램을 통한 해석 결과는 주요 실험변수에 대한 영향을 비교적 적절히 예측하고 있는 것으로 판단된다.

4) 추가적인 실험체의 확보와 함께 연구 수행을 통해 보다 명확한 전단마찰 구성관계식의 마련이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 연구 수행 결과들은 향후, 고강도 철근의 적용과 관련된 설계기준 마련과 함께 원전 격납조물의 시공성과 경제성 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 한국수력원자력(주)의 원자력융합 핵심기술개발사업의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. (과제명 : 원전구조물의 고강도 철근 적용 기술개발, 과제번호: 2014151010169B)

References

1. Park, H. G., Baek, J. W., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Cyclic Loading Test for Shear Strength of Low-rise Reinforced Concrete Walls With Grade 550 MPa Bars", *ACI Structural Journal*, Vol.112, No.3, 2015, pp.299-310.
2. Cheon, J. H., Seong, D. J., Cho, H. J., Cho, J. Y., and Shin, H. M., "Nonlinear Finite Element Analysis of the Reinforced Concrete Panel using High-Strength Reinforcing Bar", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.5, 2015, pp. 481-488.
3. Baek, J. W., and Park, H. G., "Shear-Friction Strength of RC Walls With Grade 550 MPa Bars", Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Building an Earthquake-Resilient Pacific, Sydney, Australia, 2015, pp.180-188.
4. Birkeland, P. W., and Birkeland, H. W., "Connections in Precast Concrete Constructions", *ACI Structural Journal*, Vol.63, No.3, 1966, pp.345-368.
5. Korea Concrete Institute, Concrete Structure Design Code and Commentary, Kimoondang, 2012.
6. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2014, p.520.
7. ACI Committee 349, Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-13) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2014, p. 200.
8. Tassios, T. P., and Vintzeleou, E. N., "Concrete to Concrete Friction", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.113, No.4, 1987, pp.832-849.
9. Migeum, C., Kim, Y. J., Yun, G. J., Thomas, G. H., and Shirley, D., "Cyclic Shear-Friction Constitutive Model for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membrane Elements", *ACI Structural Journal*, Vol.108, No.3, 2011, pp.324-331.
10. Song, J. G., Choi, J. Y., and Kim, J. H., "The Shear Friction Mode of Slab-Column Connections", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.16, No.2, 2004, pp.79-82.
11. Loov, R. E., "Review of A23.3-94 simplified method of shear design and comparison with results using shear friction", *Canadian Journal of civil Engineering*, Vol.25, No.3, 1998, pp.437-450.
12. Seong, D. J., Kim, T. H., Oh, M. S., and Shin, H. M., "Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake Loads", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.9, No.2, 2011, pp.205-220.
13. Cheon, J. H., Kim, T. H., Lee, B. J., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Circular Hollow Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake", *Magazine of Concrete Research*, Vol.64, No.10, 2012, pp. 919-930.
14. Comit  Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 2010, Thomas Telford, London, 2013, pp.176-183.
15. Li, B., Maekawa, K., and Okamura, H., "Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete", *Journal of the Faculty of Engineering*, Vol.40, No.1, 1989, pp.9-52.
16. Randl, N., "Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010", *The Fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Vol.14, No.3, 2013, pp.230-241.

요약 본 연구에서는 550 MPa급 고강도 철근을 사용한 낮은 형상비를 갖는 철근콘크리트 전단벽체의 벽체-기초 접합부에서의 전단마찰 파괴거동을 평가하기 위한 해석적 방안을 마련하는 것을 목표로 한다. 형상비, 경계면에서의 마찰계수, 배근상세, 각 방향으로의 철근비, 재료물성 등의 다양한 변수를 갖는 총 16개의 실험체를 검증 대상으로 선정하여 저자 등에 의해 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)에 콘크리트 구조설계기준(2012)과 CEB-FIP Model code 2010을 바탕으로 경계면에서 수정된 전단마찰 구성관계식을 적용하여 해석을 수행하였다. 최대 하중에 대한 실험과 해석으로부터의 결과는 평균과 변동계수가 각각 1.04와 17% 정도로 예측하였고 일부 실험체를 제외하고 파괴모드와 파괴시까지의 전반적인 거동 특성을 적절히 평가하였다. 결과를 종합해 볼 때, 수정된 전단마찰 구성관계식을 적용한 해석프로그램은 해석 결과에 비교적 높은 신뢰도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고강도 철근, 철근콘크리트 전단벽체, 전단마찰, 비선형 유한요소해석, RCAHEST