

# 플라이애시 치환율 및 압축강도에 따른 콘크리트의 부착 거동

## Bond Behavior of Concrete According to Replacement Ratio of Fly Ash and Compressive Strength of Concrete

이형집<sup>1</sup> · 서정인<sup>1\*</sup> · 유성원<sup>1</sup>  
Hyung-Jib Lee<sup>1</sup> · Jeong-In Suh<sup>1\*</sup> · Sung-Won Yoo<sup>1</sup>

(Received March 8, 2016 / Revised March 18, 2016 / Accepted March 18, 2016)

Several researches on high volume fly ash concrete have been conducted to investigate its fundamental material properties such as slump, strength and durability and however, research on the structural behavior of bond strength is essential for the application of this high volume fly ash concrete to structural members because of the necessity of reinforcement. But the exact design code for application and researches on the bond behavior of high volume fly ash concrete lack yet. To achieve such a goal, this paper evaluates experimentally the bond behavior of high volume fly ash concretes by direct pull-out test and compares between the current test results and existing research results. By the test results, it is shown that the bond behavior of high volume fly ash concrete is similar to that of general concrete. And by the comparison between test and existing research, it is shown that bond stress of high volume fly ash concrete is underestimated, as the embedment length gets longer.

**키워드** : 하이볼륨, 플라이애시, 부착거동, 직접인발시험

**Keywords** : High volume, Fly ash, Bond behavior, Direct pull-out test

### 1. 서론

향후 지구 온난화 방지를 위해서는 CO<sub>2</sub>와 같은 온실가스의 감축이 매우 중요한 문제로 대두될 것이다. 특히 시멘트 제조과정에서 발생하는 온실가스의 양이 크기 때문에 이의 저감은 시멘트 및 콘크리트 업계의 가장 큰 현안으로 대두될 것으로 예상된다(Wang et al. 1995). 또한 화력발전소에서 발생하는 플라이애시는 콘크리트의 첨가재로 사용되는 것이 석탄회 재활용 방안 중 최선으로 알려져 있다. 이러한 석탄회는 최근 더 이상 매립이 불가능하여 콘크리트에 다량 첨가가 시도되고 있다(Jung 2010).

이러한 CO<sub>2</sub> 발생을 저감시키는 대책으로 시멘트의 사용량을 줄이며, 시멘트 대체재로 플라이애시를 다량 첨가하는 콘크리트 제조 기술이 주목받고 있다. 현재 국내의 경우, 약 25%까지의 플라이애시 첨가가 일반적이는데 반해서 하이볼륨 플라이애시의 개념은 30%~50%의 플라이애시 첨가를 의미한다(Mahdi et al. 2013; Mahdi

and Jeffery 2013). 하지만 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 철근의 사용이 필수적이므로 그 부착특성에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있으나, 아직까지는 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트를 구조부재에 적용하기 위한 정확한 기준이나 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 이 논문에서는 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트 243개의 시편을 제작하고 직접 인발 시험을 수행하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 실험에서 얻어진 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착강도와 현행 설계기준의 근간이 된 기존 연구결과를 비교하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착특성을 평가하였다.

\* Corresponding author E-mail: [offsuhji@woosuk.ac.kr](mailto:offsuhji@woosuk.ac.kr)

<sup>1</sup>우석대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woosuk University, Chungbuk 27841, Korea)

## 2. 실험 계획

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 국내 H사에서 제조된 1종 보통포틀랜드 시멘트와 밀도가 2.33g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3.78cm<sup>2</sup>/g로 KS 기준에 적합한 플라이애시를 사용하였다. 잔골재로는 밀도가 2.56g/cm<sup>3</sup>인 강모래를 사용하였고 굵은 골재로는 밀도가 2.65g/cm<sup>3</sup>인 쇄석을 사용하였다.

한편 철근은 국내 I사에서 제조된 SD400 제품으로 KS 기준에 적합한 것을 선정하여 사용하였다.

### 2.2 콘크리트 및 철근

콘크리트에 사용된 플라이애시의 치환율은 0, 35 및 50%, 콘크리트의 목표 압축강도는 25, 35 및 45MPa로 정하였으며, 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 PC계 고성능 감수제를 사용하였고, 배합비는 Table 1과 같다. 실험에 사용된 콘크리트의 28일 압축강도 실험 결과를 Table 2에 나타냈다.

실험에 사용된 철근은 SD400으로 직접인장시험 결과 평균 항복강도는 438.4MPa이었다.

### 2.3 실험계획 및 부재 형상

하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부차거동을 평가하기 위한 실험변수로는 플라이애시 첨가량 3수준(시멘트의 0, 35, 50% 치환), 콘크리트 목표 압축강도 3수준(25, 35, 45MPa), 철근 직

Table 1. Concrete mix proportion

ID	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	FA	S	G	Adm. (%)
0-25	0.58	0.47	185	319	0	812	946	0.5
0-35	0.45	0.42	170	380	0	719	1028	1.0
0-45	0.35	0.42	165	471	0	694	991	1.0
35-25	0.44	0.42	185	273	147	673	962	0.5
35-35	0.35	0.42	150	277	149	707	1012	1.0
35-45	0.27	0.42	133	320	172	701	1002	1.0
50-25	0.40	0.45	125	156	156	827	1047	0.5
50-35	0.29	0.45	125	216	216	776	983	1.0
50-45	0.17	0.45	125	368	368	645	816	1.5

ID : fly ash content - target compressive strength  
 W : water, C : cement, FA : fly ash, S : sand,  
 G : gravel, Adm. : super-plasticizer

경 3수준(13, 19, 25mm) 및 철근의 문힘길이 3수준(50, 100, 150 mm)이다. 이러한 실험변수를 가진 실험시편은 총 243개(3×3×3×3=81개, 3회 반복)이며, 실험 변수들은 Table 3에 정리되어 있으며, 실험시편들의 형상은 Fig. 1에, 하중 재하장치 형상은 Fig. 2에 나타냈다.

실험은 Fig. 2에 보인 것처럼 제작된 시편을 2000kN의 UTM에 배치한 후 철근과 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트에 LVDT를 설치하고 0.5mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 둘 사이의 상대변위를 측정하고 데이터 로거를 이용하여 재하 하중과 변위를 저장하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 부차강도, 파괴 형상

제작된 실험시편에 대해 재령 28일에 직접 인발실험을 수행하여 부차특성을 파악하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타냈다.

Table 2. Concrete properties

ID	Compressive strength at 28 days(MPa)	Slump (mm)	Air content(%)
0-25	24.9	83.1	3.2
0-35	32.6	83.4	3.1
0-45	41.9	84.2	3.4
35-25	27.1	77.4	3.2
35-35	36.7	78.2	3.3
35-45	45.8	77.9	3.0
50-25	24.5	80.3	3.4
50-35	31.2	79.8	3.1
50-45	46.4	77.1	3.2

Table 3. Test variables

ID	Fly ash replacement ratio(%)	Target strength (MPa)	Reinforcement diameter	Embedded length(mm)
0-25	0	25	D13, D19, D25	50, 100, 150
0-35		35	D13, D19, D25	50, 100, 150
0-45		45	D13, D19, D25	50, 100, 150
35-25	35	25	D13, D19, D25	50, 100, 150
35-35		35	D13, D19, D25	50, 100, 150
35-45		45	D13, D19, D25	50, 100, 150
50-25	50	25	D13, D19, D25	50, 100, 150
50-35		35	D13, D19, D25	50, 100, 150
50-45		45	D13, D19, D25	50, 100, 150

Table 4에 나타난 부착강도는 실험을 통해 얻은 파괴하중 값으로부터 식 (1)을 사용하여 산정되었다.

$$U = \frac{1}{l_d \pi} \frac{F_a}{d_b} \quad (1)$$

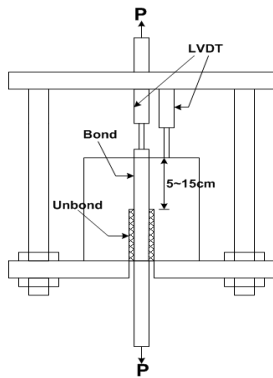


Fig. 1. Shape of specimen



Fig. 2. Test setup

여기서 U는 부착강도,  $F_a$ 는 파괴하중,  $d_b$ 는 철근의 직경,  $l_d$ 는 철근의 묻힘길이이다.

대부분의 실험 시편에서는 철근 직경, 콘크리트 압축강도 수준의 차이와 상관없이 철근이 시편에서 빠져나오는 slip 현상이 일어났다. 다만 철근의 직경 25mm이며, 콘크리트 압축강도가 45MPa 이상에서는 Fig. 3과 같이 시편의 대각선 방향으로 균열이 발생하며 파괴가 일어났다. 즉, 직경이 작은 철근의 경우 콘크리트의 압축강도에 상관없이 부착파괴에 의한 시편의 파괴가 일어났으며, 철근의 직경이 크고 압축강도가 큰 경우에는 철근과 콘크리트의 부착이 유지되며, 균열에 의한 파괴가 발생하였다. 이러한 현상은

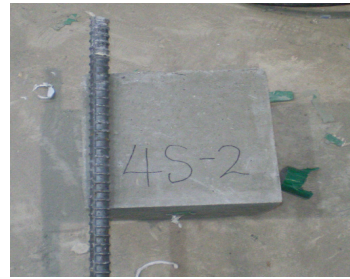


Fig. 3. Failure pattern of specimen

Table 4. Results of ultimate load and failure pattern

(unit : MPa)

ID	Embedded length(mm)									Remark
	50			100			150			
	Reinforcement			Reinforcement			Reinforcement			
	D13	D19	D25	D13	D19	D25	D13	D19	D25	
0-25	12.98	15.50	13.33	14.76	15.10	12.88	18.10	14.43	14.28	* Concrete failure and the others are reinforcement slip failure
0-35	20.25	16.67	15.66	18.05	14.87	10.90	20.44	14.75	12.39	
0-45	24.51	19.63	19.17	24.51	19.27	16.44	20.37	15.21	20.64	
35-25	15.04	13.13	13.23	12.78	10.47	9.10	17.38	13.25	14.11	
35-35	15.49	17.50	15.54	20.15	15.30	14.59	20.89	16.67	16.53	
35-45	28.27	19.90	19.70	22.63	22.07	20.25	22.01	19.94	<b>18.84*</b>	
50-25	14.24	10.80	10.78	12.21	9.55	8.67	14.54	11.47	9.08	
50-35	21.30	15.53	17.75	19.52	12.52	10.43	20.45	20.43	16.41	
50-45	26.57	19.43	18.77	21.86	23.43	20.58	22.84	21.03	<b>20.83*</b>	

기존 연구결과에서도 유사하게 나타났다(Orangun et al, 1977).

### 3.2 압축강도-부착강도 관계

하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 압축강도에 따른 28 일 재령에서의 부착강도는 Fig. 4(a)에 보인 것처럼 압축강도가 25MPa에서 45MPa로 증가함에 따라 부착강도가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 일반콘크리트의 거동과 유사하게 압축강도와 부착강도는 비례한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 압축강도가 증가함에 따라 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 인장강도가 증가하여 시험체에 횡방향 구속효과를 주어 균열의 발생을 억제한 것으로 판단된다.

한편 플라이애시 첨가량에 따른 압축강도와 부착강도 관계를 Fig. 4(b)에 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 플라이애시 첨가량과 부착강도간의 관계를 구분할 수 없는 것으로 나타나, 플라이애시 첨가량은 부착강도에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다.

### 3.3 철근 직경-부착강도 관계

하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 철근 직경에 따른 부착강도는 Fig. 5와 같다. 플라이애시 첨가량이 0%이며 압축강도가 35MPa인 경우, 철근 직경이 13mm일 때 평균 19.58MPa의 부착강도가 나타나며 철근 직경이 19mm일 때 15.43MPa, 철근 직경이 25mm의 부착강도의 평균은 12.98MPa이다.

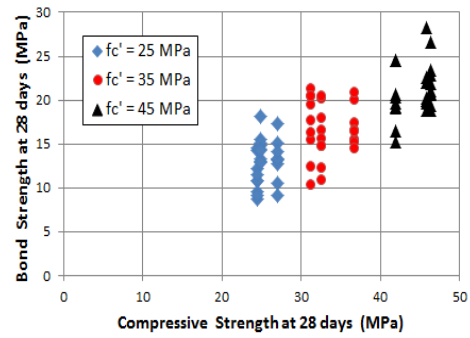
플라이애시 첨가량이 35%이며 압축강도가 35MPa인 경우, 철근 직경이 13mm일 때 평균 18.84MPa의 부착강도가 나타나며 철근 직경이 19mm일 때 16.49MPa, 철근 직경이 25mm의 부착강도의 평균은 15.55MPa이다.

플라이애시 첨가량이 50%이며 압축강도가 35MPa인 경우, 철근 직경이 13mm일 때 평균 20.42MPa의 부착강도가 나타나며 철근 직경이 19mm일 때 16.16MPa, 철근 직경이 25mm의 부착강도의 평균은 14.86MPa이다.

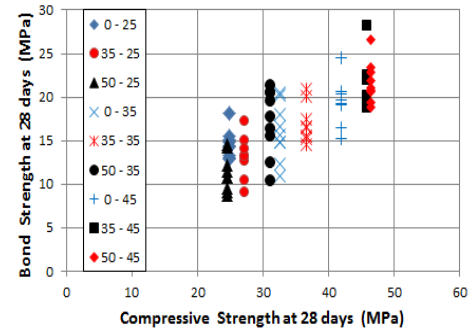
이러한 결과를 고찰해보면 플라이애시 첨가량은 철근직경과 부착강도에 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있었으며, 보통 콘크리트와 유사하게 철근의 직경이 커질수록 부착강도가 작아짐을 확인할 수 있었고 압축강도가 25MPa, 45MPa인 경우에도 동일한 현상을 확인하였다.

### 3.4 부착강도 산정식 검토

Orangun(1977)은 현행 설계기준으로 사용되고 있는 ACI-408R(2003)



(a) Without considering fly ash content



(b) With considering fly ash content

Fig. 4. Compressive strength-bond stress relationship

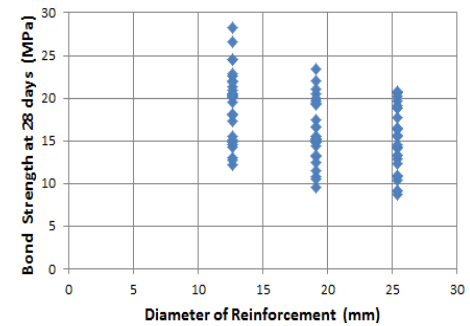


Fig. 5. Reinforcement diameter-bond stress relationship

의 콘크리트의 부착강도 산정식이 과소평가 된다고 판단하여 부착강도에 영향을 미치는 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 철근의 직경, 부착 길이 등을 고려한 인발 실험을 통해서 식 (2)와 같은 부착강도 산정식을 제안하였다.

$$\frac{U}{\sqrt{f_c}} = 0.1 + 0.25 \frac{C_{\min}}{d_b} + 4.15 \frac{d_b}{l_d} \quad (2)$$

여기서,  $U/\sqrt{f_c}$ 는 부착강도계수, U는 부착강도(MPa),  $f_c$ 는 콘

크리트의 측정된 압축강도(MPa),  $C_{min}$ 은 최소 피복두께(mm),  $d_b$ 는 철근의 직경(mm) 및  $l_d$ 는 묻힘길이(mm)이다.

Fig. 6과 Table 5에서 나타낸 바와 같이 실험결과와 Orangun (1977)이 제안한 식 (2)를 비교하면, 묻힘길이가 작을수록 실험결과가 식 (2)에 의한 예측값보다 작게 나타났다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 향후 장기강도가 우수한 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 특성을 고려하여, 장기강도에서의 부착강도를 재평가하는 추가 연구가 필요가 있을 것으로 사료된다.

한편 Fig. 6(a)의 경우처럼 묻힘길이가 작은 경우, Orangun et al.(1977)이 제안한 식은 식 (2)의 마지막 항의 값이 커지는 이유로 철근 직경이 증가할 때, 초기에는 부착강도계수가 감소하나, 직경이 20mm를 초과할 때는 반대의 결과가 나타나는 문제점이 나타나고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 직접 인발 시험을 수행하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 실험결과와 기존 연구결과를 비교하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착 특성을 평가하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착거동은 일반콘크리트의 거동과 유사하게 압축강도와 부착강도는 비례하는 것으로 나타났다.
2. 플라이애시 첨가량과 부착강도간의 관계를 구분할 수 없는 것

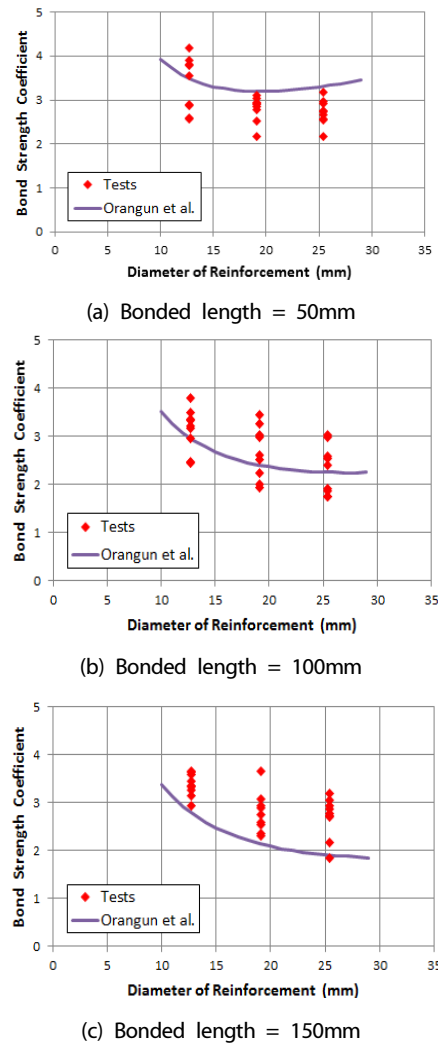


Fig. 6. Comparison between tests and results by Orangun

Table 5. Comparison between tests and existing research results by Orangun et al. (unit : MPa)

ID	Embedded length(mm)																	
	50						100						150					
	D13		D19		D25		D13		D19		D25		D13		D19		D25	
	Test	Eq.(2)	Test	Eq.(2)	Test	Eq.(2)	Test	Eq.(2)	D19	Eq.(2)	D25	Eq.(2)	D13	Eq.(2)	D19	Eq.(2)	D25	Eq.(2)
0-25	12.98	17.41	15.50	15.95	13.33	16.53	14.76	14.78	15.10	11.99	12.88	11.27	18.10	13.91	14.43	10.68	14.28	9.52
0-35	20.25	19.93	16.67	18.25	15.66	18.92	18.05	16.92	14.87	13.72	10.90	12.90	20.44	15.91	14.75	12.22	12.39	10.89
0-45	24.51	22.59	19.63	20.69	19.17	21.45	24.51	19.18	19.27	15.56	16.44	14.63	20.37	18.04	15.21	13.85	20.64	12.35
35-25	15.04	18.17	13.13	16.64	13.23	17.25	12.78	15.42	10.47	12.51	9.10	11.76	17.38	14.51	13.25	11.14	14.11	9.93
35-35	15.49	21.14	17.50	19.36	15.54	20.07	20.15	17.95	15.30	14.56	14.59	13.69	20.89	16.88	16.67	12.96	16.53	11.56
35-45	28.27	23.62	19.90	21.63	19.70	22.42	22.63	20.05	22.07	16.27	20.25	15.29	22.01	18.86	19.94	14.48	18.84	12.91
50-25	14.24	17.27	10.80	15.82	10.78	16.40	12.21	14.66	9.55	11.90	8.67	11.18	14.54	13.79	11.47	10.59	9.08	9.44
50-35	21.30	19.49	15.53	17.85	17.75	18.51	19.52	16.55	12.52	13.43	10.43	12.62	20.45	15.57	20.43	11.95	16.41	10.66
50-45	26.57	23.77	19.43	21.77	18.77	22.57	21.86	20.18	23.43	16.37	20.58	15.39	22.84	18.98	21.03	14.57	20.83	13.00

로 나타나, 플라이애시 첨가량은 부착강도에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다.

- 3. 플라이애시 첨가량은 철근직경과 부착강도에 영향을 거의 미치지 않으며, 보통 콘크리트와 유사하게 철근의 직경이 커질수록 부착강도가 작아짐을 확인할 수 있었다.
- 4. 기존 연구의 예측식과 실험결과를 비교하면, 문힘길이가 작을수록 실험결과가 예측값보다 작게 나타났다. 따라서 향후 장기강도가 우수한 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 특성을 고려하여, 장기강도에서의 부착강도를 재평가하는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011010100030).

### References

ACI 408R-03. (2003). Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, ACI Committee 408, 49.

Jung, S.W. (2010). Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash Technical Report, R-2007-2-151, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 1-15 [in Korean].

Mahdi, A., Jeffery, V. (2013). Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high volume fly ash concrete beams, *Journal of Cleaner Production*, **59(2)**, 120-130.

Mahdi, A., Michael, W., Jeffery, V. (2013). A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high volume fly ash concrete and conventional concrete, *Construction and Building Materials*, **40(6)**, 919-924.

Orangun, C., Jirsa, J., Breen, J. (1977). A reevaluation of test data on development length and splices, *ACI Structural Journal*, **74(3)**, 114-122.

Wang, S., Pu, X., Scrivener, K., Pratt, P. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems, *Advances in Cement Research*, **27**, 93-102.

#### 플라이애시 치환율 및 압축강도에 따른 콘크리트의 부착 거동

현재까지 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 연구는 슬럼프, 강도 및 내구성 등 기본적인 재료성질에 대해서 주로 수행되어 왔다. 그러나 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 구조부재에의 적용을 위해서는 철근의 사용이 필수적이므로 그 부착특성에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있으나, 현재까지는 하이볼륨 플라이애시 콘크리트를 구조부재에 적용하기 위한 정확한 기준이나 콘크리트와 철근의 부착 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다. 이 논문에서는 직접 인발 시험을 수행하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착특성을 파악하고, 실험결과와 기존 연구결과를 비교하여 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착특성을 평가하였다. 실험결과에 의하면, 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부착거동은 일반콘크리트와 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 또한 기존 연구결과와 비교하면, 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 부착강도는 문힘길이가 클수록 부착강도를 과소평가하는 것으로 나타났다.