



활성 황토 콘크리트 보의 전단 및 부착 강도

이남곤¹⁾ · 박홍근^{1)*} · 황혜주²⁾

¹⁾서울대학교 건축학과 ²⁾목포대학교 건축학과

Shear and Bond Strength of Activated Hwangtoh Concrete Beam

Nam-Kon Lee,¹⁾ Hong-Gun Park,^{1)*} and Hye-Zoo Hwang²⁾

¹⁾Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Dept. of Architecture, Mokpo University, Muan-gun 534-729 Korea

ABSTRACT As a eco-friendly material, Hwangtoh (red clay) has been studied for complete or partial replacement of portland cement. Most of existing studies focused on the material properties of the Hwangtoh concrete including the compressive strength, drying shrinkage, and creep. In the present study, the shear strength of the beams made with the Hwangtoh concrete was tested. Further, bond strength of tension re-bars embedded in the Hwangtoh concrete was tested. One of the concrete tested consisted of activated Hwangtoh replacing 20% of the cement. The other consisted 100% activated. Hwangtoh replacing all the cement. The beam specimens were tested under two point static loading. The test result showed that the shear strength of activated Hwangtoh concrete beams replacing 20% and 100% of cement was equivalent to that of the ordinary portland cement concrete beam. However, the bond strength of activated Hwangtoh concrete replacing 100% of the cement was less than that of the ordinary portland cement concrete.

Keywords : activated Hwangtoh, shear strength, bond strength

1. 서 론

전 세계적으로 지구 환경에 대한 관심이 점점 늘어나면서 건설 분야에서도 이러한 노력의 일환으로 친환경 재료의 개발 및 적용에 많은 연구가 진행되고 있다.

우리나라 서남부 지방에 많이 퇴적되어 있는 황토는 시멘트를 대체할 수 있는 친환경재료로서 연구되어 왔다. 황토를 이용한 연구에는 시멘트를 사용하지 않은 완전대체연구와 콘크리트 혼화재료로서 시멘트를 부분적으로 대체하여 황토를 활용한 부분대체연구가 있으며,¹⁾ 황토의 고온 소성과정 유무에 따라 활성 황토와 비활성 황토에 대한 연구가 있다.

황혜주 등^{2,3)}은 황토 결합재의 기초 물성에 관한 실험적 연구를 통하여, 일부의 석회가 첨가된 분말형 무기재료로서 시멘트가 전혀 첨가되지 않은 황토를 주성분으로 하는 황토결합재의 압축강도, 건조수축 등의 기초적인 재료 성능 및 내구성 실험을 하여 건축 재료로서의 가능성을 보여주었다. Table 1은 천연 황토 결합재와 활성 황토의 화학성분비를 나타낸다.

반면에 황토 콘크리트로 만들어진 부재에 대한 구조적인 성능에 대한 검증은 거의 없다. 최근에 구조 부재로

서 활성 황토 콘크리트의 휨 성능에 대한 국내 연구 보고^{5,6)}와 전단 및 부착 성능에 관한 연구⁷⁾가 있으나, 현행 설계 기준 적용에 대한 구체적인 적합성 여부는 검증되지 않았다. 따라서 본 연구는 활성 황토 콘크리트의 보 실험과 부착 실험을 통하여 전단강도와 부착강도를 일반 콘크리트와 비교하고, 현행 설계기준의 적용가능성을 알아보고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

이 실험에서는 황토의 함유량에 따라서 3가지의 재료를 사용하였다. OPC(Ordinary Portland Cement)는 황토가 들어가지 않은 일반 콘크리트이며, AHT(Activated Hwangtoh)는 총 시멘트량 중 활성 황토 시멘트가 20% 대체 되어 포함되었고, NC(Non Cement)는 시멘트 대신 무기물이 첨가된 활성 황토 결합재 시멘트가 100% 대체되어 사용되었다. Table 2는 실험에 사용된 황토 콘크리트의 배합비를 나타내었다. 실험체명에서 24, 35는 사용 재료의 목표설계 강도 24 MPa, 35 MPa을 의미한다.

철근은 SD400을 사용하였으며, D10, D19, D22의 항복 강도는 각각 524, 530, 510 MPa이 측정되었다. 공시체 압축강도 실험 방법은 KS F 2453 콘크리트 압축강도 시험방법에 준하여 실험하였다. Table 2에 콘크리트의 압

*Corresponding author E-mail : parkhg@snu.ac.kr

Received April 26, 2010, Revised July 14, 2010,

Accepted July 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

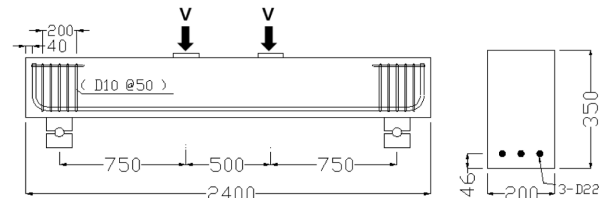
Table 1 Chemical compositions of Hwangtoh (%)^{1,4)}

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Activated Hwangtoh binder	37.39	14.9	1.29	37.78	3.01
Activated Hwangtoh	40.0	32.9	7.79	0.39	1.54

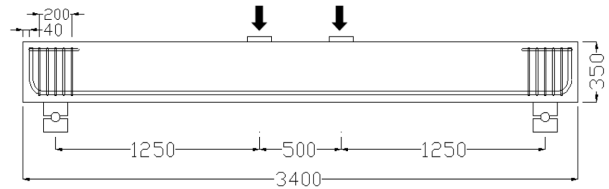
축강도(f_{ck})가 나타나있다. OPC(일반 콘크리트) 실험체는 설계 강도를 초과하여 측정되었으며, AHT(20% 활성 황토 콘크리트), NC(100% 활성 황토 콘크리트)는 설계 강도보다 작게 측정되었다. 이는 타설 당일 섭씨 5°C의 낮은 온도와 14일 동안 20°C에서 보온 습윤양생을 하였고, 그 후에는 실온양생을 하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기존 황토 관련 연구^{2,3)}에서도 황토 콘크리트의 양생 조건에 따른 강도 저하가 발생한다고 보고되고 있다.

2.2 전단 실험 계획

Fig. 1과 Table 3은 전단 실험체 단면 형상 및 실험체 변수를 나타내고 있다. 그룹(group)에 따라 총 12개의 실험체를 제작하였다. 전단 실험 변수는 콘크리트 압축강도와 전단 경간비이며, 압축강도는 사용된 콘크리트의 배합에 따라 결정되었다. BSO3 실험체는 실험상의 오류로 인하여 다른 OPC24 실험체와는 달리 재제작 되었으며, 그 실험체의 압축강도는 Table 3에 나타나 있다. 실험체의 지점 간 길이는 3m와 2m로서 전단 경간비는 각각 4.1과 2.5이다. 단면 크기는 가로, 세로 200 × 350mm이



(a) Shear span to depth ratio(a/d): 2.5



(b) Shear span to depth ratio(a/d): 4.1

Fig. 1 Configurations of shear specimens

고, D22를 주인장철근으로 배근하여 모든 실험체에서 1.91%의 동일한 철근비를 갖도록 하였다. 20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트의 최대 전단내력을 알기 위하여 전단파괴 발생을 유도하도록 보 전체에 걸쳐 전단 철근은 배근하지 않았으나, 지점 부분의 국부파괴 방지를 위하여 D10 전단철근을 단부에 50mm 간격으로 배근하였다. 주인장철근의 부착성능을 위해 철근 단부에 90° 표준 갈고리를 사용하였다.

보 실험체는 단순지지 되었고, 하중 재하시 발생하는 편심을 방지하기 위하여 보 중앙으로부터 양쪽으로 각각

Table 2 Mix proportions of concrete

Material	Slump (mm)	Air content (%)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	Volume (l/m ³)			Weight (kg/m ³)			f_{ck} (MPa)
						C	S	G	C	S	G	
OPC24	220	4.9	49	48.0	168	110	333	360	342	882	976	41.7
OPC35	220	4.6	40	47.2	168	135	315	352	420	835	955	50.0
AHT24	180	5.0	47	48.0	169	120	327	354	360	867	960	31.3
AHT35	220	4.7	38	47.2	167	146	310	347	440	821	939	28.5
NC24	220	7	37	48.0	152	143	324	351	410	859	952	25.9
NC35	220	6.5	32	47.2	154	167	306	343	480	812	929	29.9

Table 3 Parameters and test results for shear specimens

Group	Specimens	Material	Compressive strength f_{ck} (MPa)	Cross-section (mm)	Shear span ratio	Tension re-bars (ratio)	Max. shear strength (kN)		(1) (2)
							V_{test} (1)	V_{KCI} (2)	
I	BSO1	OPC35	50	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	84.1	73.7	1.14
	BSA1	AHT35	28.5	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	77.2	56.9	1.36
	BSN1	NC35	29.9	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	65.4	58.2	1.12
II	BSO2	OPC35	50	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	84.5	77.1	1.10
	BSA2	AHT35	28.5	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	66.3	60.2	1.10
	BSN2	NC35	29.9	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	70.4	61.5	1.14
III	BSO3	OPC24	28.5	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	73.3	56.9	1.29
	BSA3	AHT24	31.3	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	77.4	59.4	1.30
	BSN3	NC24	25.9	200 × 350	4.1	3-D22(1.91%)	68.0	54.5	1.25
IV	BSO4	OPC24	41.7	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	92.7	71.1	1.30
	BSA4	AHT24	31.3	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	84.4	62.7	1.35
	BSN4	NC24	25.9	200 × 350	2.5	3-D22(1.91%)	62.2	57.8	1.08

250 mm 떨어진 곳에 2점 재하 하였다.

하중 재하는 1,000 kN 용량의 가력기를 사용하여 1 mm/min 로 변위 제어 하였으며, 하중의 증가에 따른 보의 처짐을 측정하기 위하여 LVDT(linear variable differential transformer) 설치하였으며, 그 위치는 전단 경간비 4.1인 실험체는 보의 중앙부와 중앙에서 양쪽으로 250 mm, 640 mm 떨어진 곳에 설치하였고, 전단 경간비 2.5인 실험체는 중앙부와 양쪽으로 250 mm, 500 mm 떨어진 곳에 대칭으로 각각 총 5곳에 걸쳐 설치하였다.

2.3 부착 실험 계획

Table 4는 20% 활성 황토와 100% 활성 황토 콘크리트의 부착 성능을 알아보기 위한 실험체 변수를 나타내고 있다. 실험 변수는 콘크리트 강도, 철근의 배근 방향(수직, 수평)으로 하였다.

실험체는 KS F 2441(철근의 부착에 의한 콘크리트 비교시험 방법)에 따라 150 × 150 × 150 mm인 콘크리트 입방체를 제작하였고, 콘크리트와 철근의 부착 응력을 측정하기 위하여 실험체 중심에 철근을 넣고, 콘크리트 양생 후 철근의 인발 실험(pullout test)을 하였다. KS F 2441 실험에 의해 측정된 부착 강도는 실제 구조 설계에서 정착 및 이음 길이 산정 시에는 사용될 수 없으나, 동일한 실험 조건하에서 황토 콘크리트와 일반 콘크리트의 부착 응력을 비교, 평가하기 위한 목적으로 사용되었다. 추후, 황토 콘크리트의 정착 및 이음 길이 산정을 위한 추가 실험이 필요하다.

실험체는 철근 배근방식에 따라 Fig. 2(a)의 수직철근 방식과 Fig. 2(b)의 수평철근 방식 2가지로 나누어 제작하였으며, 각 실험체 마다 3개씩 제작하여 실험의 정확성을 높였다. 수직철근 실험체는 철근과 20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트의 일반적인 부착력을 알아보기 위한 것이고, 수평철근 실험체는 두 개의 철근을 상·하부에 배근하여 철근 하부의 콘크리트 타설 깊이에 따

른 부착력의 차이를 알아보기 위한 것이다. 철근은 D19를 사용하였으며, 콘크리트에 묻히는 부착 길이는 사용된 D19 공칭직경의 4배($4d_b = 76 \text{ mm}$)로 하였다. 콘크리트에 묻히는 비부착 부분에는 PVC관으로 감싸도록 하여 부착 부분 이외에서 부착력이 발생하지 않도록 하였다.

부착 실험 방법은 KS F 2441 기준에 준하여 실시하였다. 하중은 1,000 kN 용량의 가력기를 사용하여 1 mm/min 변위제어로 가력 하였다. Fig. 3과 같이 철근과 콘크리트 사이의 미끄러짐은 철근의 매립단부에서 측정 가능하도록 실험체 자유단 끝에 LVDT(linear variable displacement transducer)를 설치하여 측정하였다. 또한 하중 가력시 매립된 철근에 편심하중이 작용하는 것을 방지하기 위하여 실험체 하부에 원형구좌(hinge)를 설치하였다.

3. 전단 실험 결과

3.1 균열 및 파괴 양상

Fig. 4는 전단 실험체의 파괴 모습 및 균열을 나타낸다. 전단 실험체는 전단파괴가 일어나도록 설계하였기 때

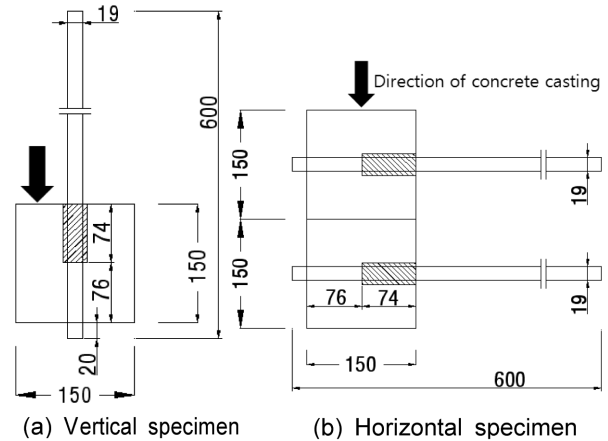


Fig. 2 Cross-sections of bond specimens

Table 4 Parameters for bond specimens 5

Group	Specimens	Material	Compressive strength f_{ck} (MPa)	Re-bars direction	Dimensions (mm)	Bond length (mm)
I	AVO24	OPC35	50.0	Vertical ¹⁾	150 × 150 × 150	76
	AVA24	AHT35	28.5	Vertical	150 × 150 × 150	76
	AVN24	NC35	29.9	Vertical	150 × 150 × 150	76
II	AHO24	OPC35	50.0	Horizontal ²⁾	150 × 150 × 300	76
	AHA24	AHT35	28.5	Horizontal	150 × 150 × 300	76
	AHN24	NC35	29.9	Horizontal	150 × 150 × 300	76
III	AVO35	OPC24	41.7	Vertical	150 × 150 × 150	76
	AVA35	AHT24	31.3	Vertical	150 × 150 × 150	76
	AVN35	NC24	25.9	Vertical	150 × 150 × 150	76
IV	AHO35	OPC24	41.7	Horizontal	150 × 150 × 300	76
	AHA35	AHT24	31.3	Horizontal	150 × 150 × 300	76
	AHN35	NC24	25.9	Horizontal	150 × 150 × 300	76

¹⁾parallel to casting direction, ²⁾perpendicular to casting direction

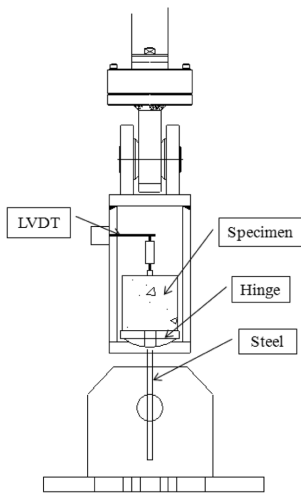


Fig. 3 Test set-up for bond specimen

문에 주인장 철근이 항복하기 전에 모든 실험체가 취성적인 전단파괴의 형태를 나타내었다. 초기 하중 단계에서는 보의 중앙 하부에서 휨 균열이 발생하기 시작하며, 점차 하중이 증가하면서 전 구간에 걸쳐 휨 균열이 발생하였다. 최대 하중 가까이에 이르자 지점 부근에서부터 발생하기 시작한 사인장 균열이 점차 보의 하중 재하 지점으로 진전되면서 사인장 균열이 뚜렷해지고, 균열폭이 증가하면서 보의 취성적인 전단파괴가 발생하였다.

3.2 하중-변위 관계

Fig. 5는 전단 실험에 의해 측정된 하중-변위 관계를 나타낸다. 최초 균열 발생 전까지는 탄성적인 거동을 나타내다가, 보의 최초 균열 발생 후, 보 강성의 감소가 나타나고 최종적인 파괴하중에서 급격한 전단파괴가 일어났다.

20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트와 일반 콘

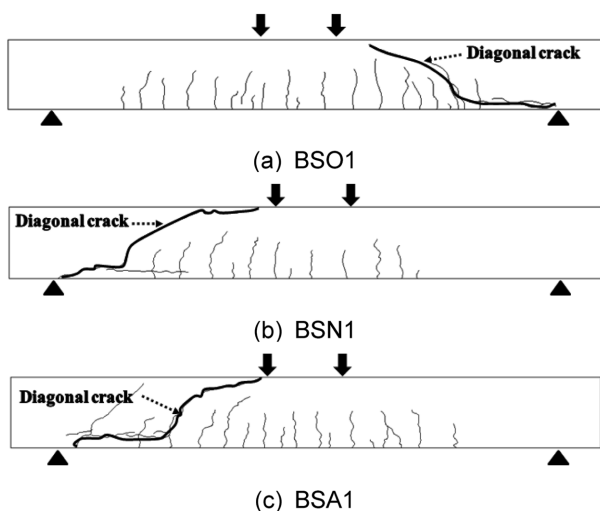


Fig. 4 Failure mode and crack patterns of group shear specimens after the end of test

크리트의 압축강도가 다르게 측정되었으므로, 전단강도의 비교를 위하여 실험에 의해 측정된 하중 V_{test} 를 콘크리트구조설계기준⁸⁾에 의해 계산된 하중 V_{KCI} 로 나누어서 황토 콘크리트와 일반 콘크리트의 전단강도를 비교하였다. 콘크리트구조설계기준에서는 전단강도를 다음과 같이 정의한다.

$$V_{KCI} = \left(0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (1)$$

Fig. 5에 나타난 바와 같이 모든 실험체에서 측정된 최대 강도는 콘크리트구조설계기준의 예측값을 상회하는 것을 알 수 있다.

Table 3과 Fig. 6에서 실험에 의한 최대 전단력과 현행 설계기준식으로 예측한 최대 전단력을 직접 비교하였다. 평균적으로 100% 활성 황토 콘크리트(BSN) 실험체의 전단강도는 설계기준에 의한 예측값보다 14.9% 컸고, 20% 활성 황토 콘크리트(BSA) 실험체는 27.7%, 일반 콘크리트 실험체는 20.7% 컸다. 위의 결과는 100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트 보의 전단 강도를 콘크리트구조설계기준 전단 강도식을 사용하여 안전측으로 평가할 수 있는 것을 나타낸다.

4. 부착 실험 결과

4.1 파괴 양상

Fig. 7은 콘크리트의 부착실험에 의하여 정의되는 일반적인 응력-미끄러짐(stress-slip) 관계이다.⁹⁾ 부착 실험체의 일반적인 거동은 초기에 미소슬립 발생단계에서 콘크리트의 화학적 부착(chemical adhesion)에 의해 미끄러짐 없이 철근의 인장력에 저항한다. 화학적 부착이 상실된 후에는 철근의 마디와 콘크리트 맞물림에 의한 지압력(bearing)으로 저항한다. 이 때 하중이 증가함에 따라서 미세한 쪼갬 균열이 발생하며 미끄러짐이 증가한다.¹⁰⁾ 최대 하중 도달 후에 콘크리트 피복이나 횡보강근에 의한 충분한 구속을 확보하지 못할 경우에는 쪼갬 균열의 확장으로 갑작스런 쪼갬 파괴(splitting failure)가 발생한다. 반면, 충분한 구속효과를 확보한 경우에는 최대 하중 도달 이후에도 철근의 마디사이의 콘크리트가 전단 파괴되면서 미끄러짐이 증가하며, 부착력이 서서히 감소하는 뽑힘 파괴(pullout failure)의 거동을 보인다.¹¹⁾

Table 5는 수직 방향 철근 배근 실험체의 파괴 모드를 나타내고 있다. AVO(일반 콘크리트) 실험체는 대부분 쪼갬에 의한 파괴(splitting failure)가 발생했고, AVN(100% 활성 황토 콘크리트), AVA(20% 활성 황토 콘크리트) 실험체는 철근의 뽑힘에 의한 파괴(pullout failure)가 발생하였다. Table 6에 나타난 수평방향 철근 배근 실험체에서도 AHO(일반 콘크리트)는 대부분의 경우 콘크리트 쪼갬에 의한 파괴(splitting failure)가 발생하였고,

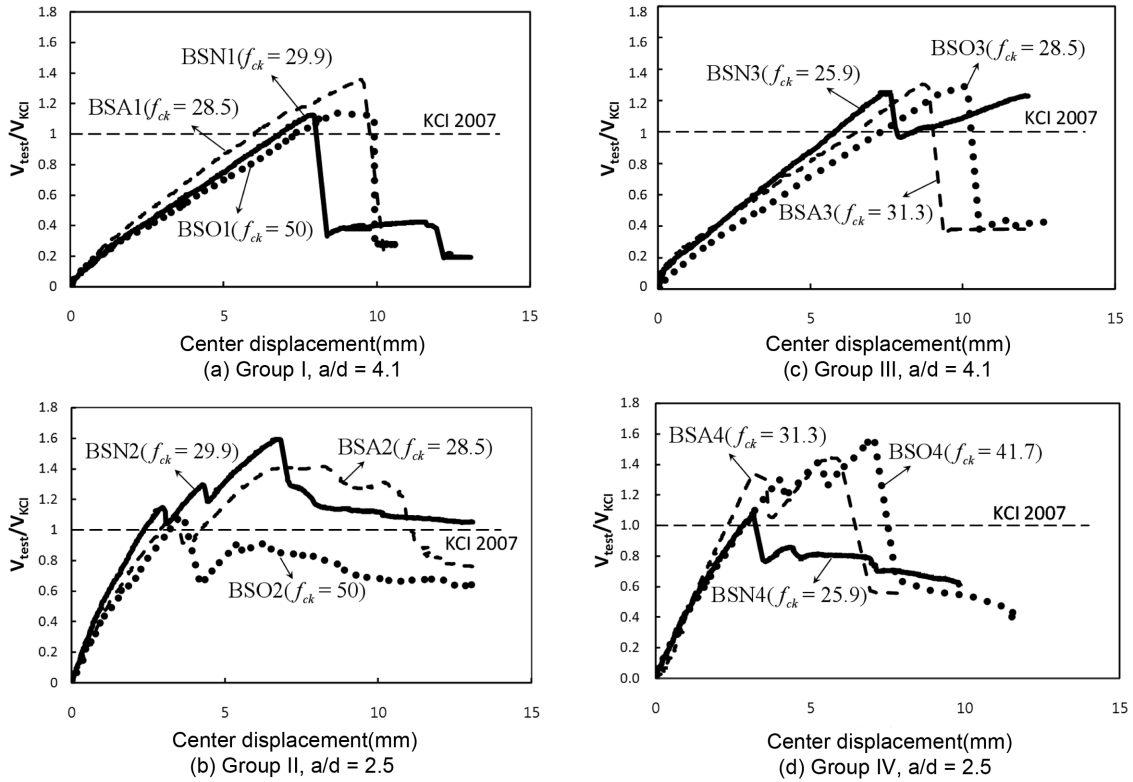


Fig. 5 Normalized load-displacement relationship of shear specimens

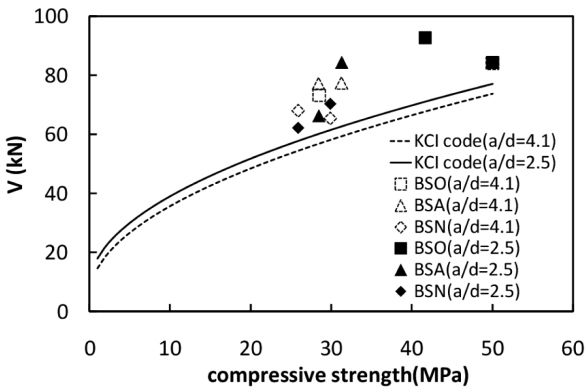


Fig. 6 Shear strength versus concrete compressive strength

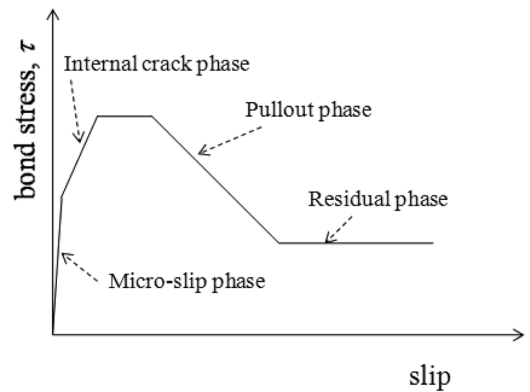


Fig. 7 Idealized bond-slip relationship

AHA(20% 활성 황토 콘크리트), AHN(100% 활성 황토 콘크리트) 실험체는 철근 뽑힘(Pullout failure)에 의한 파괴가 발생했다.

뽑힘 파괴와 쪼개짐 파괴는 실험체의 피복두께와 콘크리트 강도의 영향을 받아 파괴된다.¹¹⁾ 피복두께가 두껍고, 상대적으로 압축강도가 작으면 뽑힘 파괴가 발생한다. 반면, 피복두께가 얇고, 상대적으로 압축강도가 크면 쪼개짐 파괴가 발생한다. 이에 근거하여 이 실험에서 일반 콘크리트 실험체(AVO, AHO) 대부분에서 쪼개짐 파괴가 발생한 이유는 일반 콘크리트의 압축강도(41.7, 50 MPa)가 크게 측정되어 철근마디에 대한 콘크리트 지압강도가 증가하여 뽑힘 파괴의 저항력이 커지는 반면, 상대적으로 콘크리트 피복두께는 충분한 구속효과를 발휘하지 못하여 쪼개짐 파괴가 발생하였다. 한편, 100% 활

성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트의 실험체(AVA, AVN, AHA, AHN)는 상대적으로 압축강도(31.3, 28.5, 25.9, 29.9 MPa)가 작기 때문에, 대부분의 실험체에서 철근의 뽑힘 파괴(pullout failure)가 발생하였다.

Fig. 8은 실험체 파괴 모습이다. 쪼개짐에 의한 파괴는 Fig. 8(a)와 같이 철근이 뽑히기 전에 콘크리트에 균열이 발생하였으며, 뽑힘 파괴는 Fig. 8(b), (c)와 같이 콘크리트 쪼개짐 균열 없이 철근의 뽑힘이 발생하였다.

4.2 부착 응력-미끄러짐 관계

부착 응력은 일반적으로 철근에 균등하게 분포되지 않지만, 이 실험에서는 하중 재하에 따라 부착된 철근의 전 길이에 걸쳐 응력이 일정하다는 가정하에 부착강도를

Table 5 Test results of bond specimens with vertical rebars

Specimens	Re-bar direction	f_{ck} (MPa)	Max. bond stress τ_{test} (MPa)	Slip at max stress (mm)	$\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$	Failure modes
AVO_1	V ¹⁾	41.7	25.41	1.24	3.93	Pullout
AVO_2	V	41.7	26.13	1.08	4.05	4.11 Splitting
AVO_3	V	41.7	28.13	1.65	4.36	
AVO_4	V	50.0	24.33	1.05	3.44	
AVO_5	V	50.0	28.93	0.74	4.09	3.89 Splitting
AVO_6	V	50.0	29.25	0.84	4.14	
AVA_1	V	31.3	17.67	0.67	3.16	
AVA_2	V	31.3	18.06	0.74	3.23	3.18 Pullout
AVA_3	V	31.3	17.58	0.68	3.14	
AVA_4	V	28.5	17.98	1.28	3.37	
AVA_5	V	28.5	18.14	0.51	3.4	3.36 Pullout
AVA_6	V	28.5	17.71	1.19	3.32	
AVN_1	V	25.9	15.17	1.04	2.98	
AVN_2	V	25.9	13.42	1.04	2.63	2.80 Pullout
AVN_3	V	25.9	14.14	1.17	2.78	
AVN_4	V	29.9	12.51	1.33	2.29	
AVN_5	V	29.9	13.67	0.03	2.5	2.36 Splitting
AVN_6	V	29.9	12.51	1.23	2.29	

1)Vertical direction

산정하였다.

부착 실험에 의한 부착 응력 계산은 다음과 같다.

$$\tau_{test} = \frac{P}{\pi d_b l_d} \quad (2)$$

여기서 P 는 작용 하중, d_b 는 철근의 공칭지름, l_d 는 철근과 콘크리트의 부착 길이($4d_b$)이다.

부착 응력은 콘크리트의 피복두께 및 압축강도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 이 실험에서는 변수를 콘크리트 설계 강도 24 MPa와 35 MPa 두 가지로 하였으나, 재료별 강도가 각각 다르게 측정되었으므로, 실험에서 측정된 부착 응력을 압축강도의 제곱근($\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$)으로 나누어 100% 활성 황토와 20% 활성 황토 콘크리트의 부착 성능을 일반 콘크리트와 비교하였다.

Fig. 9(a), (b)는 수직방향 철근 배근 실험체의 부착 응력-미끄러짐 관계를 나타낸 것이다. 초기에 하중이 증가함에 따라 미소 미끄러짐이 발생하다가 최대 하중에 가까워지면서 미끄러짐이 증가하며, 최대 하중 이후에는 하중의 감소와 함께 미끄러짐이 크게 증가하였다. 활성 황토 콘크리트(AVA), 비활성 황토 콘크리트(AVN) 실험체는 철근의 뽑힘에 의한 파괴(pullout failure)가 발생하여 하중 감소 단계가 존재하였고, 반면에 일반 콘크리트(AVO) 실험체는 콘크리트 쪼개짐(splitting failure)에 의한 파괴가 발생하여, 최대 하중에 도달 후 취성파괴로 인하여 하중 감소 단계가 존재하지 않았다.

Figs. 10와 11은 수평철근 실험체에 측정된 상하부 철

근에 대한 부착응력 $\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$ -미끄러짐 관계를 나타내고 있다. 상하부 철근의 부착 거동은 수직 방향으로 배근된 철근의 거동과 유사하였다.

4.3 최대 부착 응력 비교

Table 5는 수직 방향 철근 배근 실험체의 최대 부착 응력과 미끄러짐을 나타낸다. 평균적으로 1 mm의 미끄러짐에서 최대 부착응력이 발생하였다. 최대 부착응력은 상대적으로 압축강도가 크게 측정된 AVO(일반 콘크리트) 실험체가 가장 컸으며, AVA(20% 활성 황토), AVN(100% 활성 황토) 순이었다. 압축강도의 영향을 무시하기 위하여 압축강도의 제곱근으로 나누어 비교한 상대적 부착응력($\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$) 결과에서 평균적으로 AVO(일반 콘크리트) 실험체는 4.11, 3.89이었고, AVA(20% 활성 황토)는 3.18, 3.36이었으며, AVN(100% 활성 황토) 2.80과 2.36으로서 가장 작은 값을 나타냈다.

Table 6은 수평 방향 철근배근 실험체의 상하부 철근의 최대 부착 응력과 미끄러짐을 나타낸다. 대부분 1.5~2.0 mm의 미끄러짐에서 최대 하중이 발생하였다. 상대적으로 압축 강도가 크게 측정되었던 AHO(일반 콘크리트)가 AHA(20% 활성 황토), AHN(100% 활성 황토)실험체 보다 큰 최대 부착 응력을 나타냈다.

상부 철근에 대한 상대적 부착응력($\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$)을 비교한 결과, 3개의 실험체 평균값이 AHO_U는 3.37, 3.00이며, AHA_U는 2.43, 3.50이었고, AHN_U는 2.43, 2.27를 나타내어 상부 철근에서 100% 활성 황토가 가장 작은 상

Table 6 Test results of bond specimens with horizontal rebars

Specimens	Re-bar direction	f_{ck} (MPa)	Max. bond stress τ_{Test} (MPa)	Slip at max stress (mm)	$\tau_{Test} \sqrt{f_{ck}}$	Failure modes	
AHO_U_1	H(U) ¹⁾	41.7	21.04	1.27	3.23	3.37	Splitting
AHO_U_2	H(U)	41.7	21.00	0.91	3.25		Splitting
AHO_U_3	H(U)	41.7	23.17	2.06	3.59		Splitting
AHO_U_4	H(U)	50.0	21.12	1.16	2.99	3.00	Pullout
AHO_U_5	H(U)	50.0	21.82	2.02	3.09		Splitting
AHO_U_6	H(U)	50.0	20.60	1.92	2.91		Pullout
AHA_U_1	H(U)	31.3	18.15	1.85	2.34	2.43	Pullout
AHA_U_2	H(U)	31.3	14.05	1.78	2.51		Pullout
AHA_U_3	H(U)	31.3	13.68	1.38	2.44		Pullout
AHA_U_4	H(U)	28.5	19.64	1.89	3.68	3.50	Pullout
AHA_U_5	H(U)	28.5	18.05	1.88	3.38		Pullout
AHA_U_6	H(U)	28.5	18.43	1.87	3.45		Pullout
AHN_U_1	H(U)	25.9	10.89	2.30	2.14	2.43	Pullout
AHN_U_2	H(U)	25.9	13.88	1.97	2.73		Pullout
AHN_U_3	H(U)	25.9	12.30	1.81	2.42		Pullout
AHN_U_4	H(U)	29.9	14.39	1.97	2.63	2.27	Pullout
AHN_U_5	H(U)	29.9	10.70	2.95	1.96		Pullout
AHN_U_6	H(U)	29.9	12.16	1.91	2.22		Pullout
AHO_L_1	H(L) ²⁾	41.7	23.78	0.91	3.68	3.56	Splitting
AHO_L_2	H(L)	41.7	24.04	1.23	3.72		Splitting
AHO_L_3	H(L)	41.7	21.26	0.70	3.29		Splitting
AHO_L_4	H(L)	50.0	26.58	1.47	3.76	3.67	Splitting
AHO_L_5	H(L)	50.0	26.14	1.62	3.70		Splitting
AHO_L_6	H(L)	50.0	25.12	1.41	3.55		Splitting
AHA_L_1	H(L)	31.3	19.99	1.34	3.57	3.60	Splitting
AHA_L_2	H(L)	31.3	20.07	2.78	3.59		Pullout
AHA_L_3	H(L)	31.3	20.35	1.80	3.64		Pullout
AHA_L_4	H(L)	28.5	20.83	1.38	3.90	3.71	Splitting
AHA_L_5	H(L)	28.5	20.73	1.70	3.88		Pullout
AHA_L_6	H(L)	28.5	17.88	2.13	3.35		Pullout
AHN_L_1	H(L)	25.9	13.94	1.63	2.74	2.96	Pullout
AHN_L_2	H(L)	25.9	16.83	1.86	3.31		Pullout
AHN_L_3	H(L)	25.9	14.43	1.61	2.84		Pullout
AHN_L_4	H(L)	29.9	13.37	2.07	2.44	2.67	Pullout
AHN_L_5	H(L)	29.9	15.84	1.93	2.89		Pullout
AHN_L_6	H(L)	29.9	-	-	-		-

1)Horizontal direction(Upper re-bars)

2)Horizontal direction(Lower re-bars)

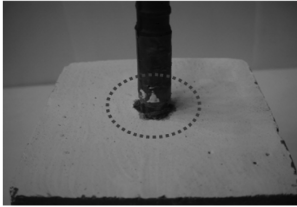
대적 부착응력을 나타내었다. 또한 하부철근 실험체 비교에서 AHO_L은 3.56, 3.67, AHA_L은 3.60, 3.71이었고, AHN_L은 2.96, 2.67을 나타냈다. 하부 철근에서도 100% 활성 황토가 가장 작은 상대적 부착 응력을 나타냈다.

Table 6에서 하부 철근의 부착응력이 상부 철근의 부착응력과 비교하였다. 하부 철근은 상부 철근의 부착 응

력보다 AHO(일반 콘크리트)에서는 1.3 MPa, 4.8 MPa 컸고, AHA(20% 활성 황토)는 4.8 MPa, 1.1 MPa, AHN(100% 활성 황토)는 2.7 MPa, 2.2 MPa 컸다. 이러한 차이는 콘크리트의 블리딩(bleeding) 및 내부 기포 상승으로 인하여 상부 철근의 부착 강도 감소가 발생한 것으로 판단되며, 이러한 결과는 일반 콘크리트에서 콘크리트 타설 깊이가 클수록 철근의 부착 응력 감소가 일어



(a) Splitting failure



(b) Pullout failure



(c) Pullout failure

Fig. 8 Failure modes of bond specimens

난다는 기존의 연구 결과¹²⁾와 일치한다.

황토 콘크리트의 부착 성능을 CEB-FIP¹³⁾에 따라서 평가하였다. CEB-FIP에서는 부착 응력과 콘크리트 피복두께에 따라 부착 조건을 Table 7과 같이 정의하고 있는데, 피복 두께가 철근 직경의 5배 이상인 구속된 콘크리트(confined concrete)에서 양호한 부착 조건(good bond conditions)은 최대 부착응력이 $2.5\sqrt{f_{ck}}$ 이상일 때로 규정하고 있다. 이에 따라 Fig. 12에서 이 기준과 100% 황토, 20% 황토 콘크리트의 최대 부착 응력을 비교하였다.

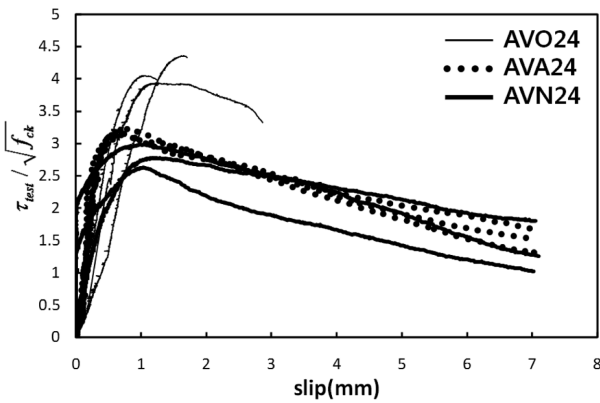
Fig. 12(a)에서 수직 철근 실험체중 AVA(20% 황토 황토 콘크리트), AVO(일반 콘크리트)실험체는 모두 상대적 부착 응력($\tau_{Test}/\sqrt{f_{ck}}$)이 CEB-FIP에서 제시한 양호한 부착 조건인 2.5 이상을 나타내었다. 하지만 AVN(100% 황토 콘크리트)실험체에서는 6개중 2개의 실험체가 상대적 부착응력($\tau_{Test}/\sqrt{f_{ck}}$)이 2.5보다 작았다.

한편, Fig. 12(b)의 수평 철근 실험체에서 하부 철근의 경우는 AVN-L(100% 황토 콘크리트)실험체 중 1개만 제외하고 모든 실험체에서 양호한 부착 조건인 2.5보다 컸고, Fig. 12(b)의 상부 철근의 경우에는 AHA-U(20% 황토 콘크리트)실험체 중 2개, AHN-U(100% 황토 콘크리트)실험체 중 4개에서 상대적 부착 응력($\tau_{Test}/\sqrt{f_{ck}}$)이 2.0~2.5 사이에 나타났다.

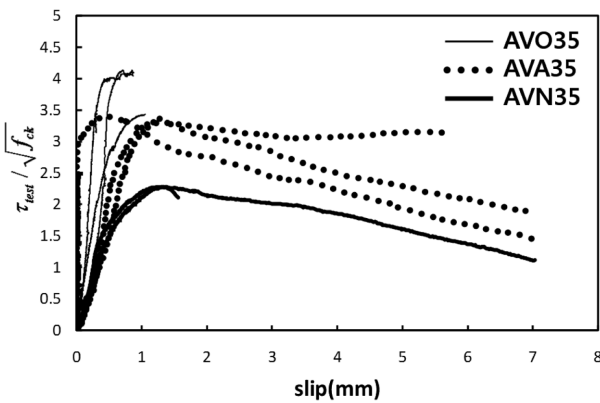
이와 같은 결과를 통하여 20% 황토 콘크리트는 일반 콘크리트와 비슷한 부착 응력을 나타내는 것을 알 수 있으나, 100% 황토 콘크리트는 상대적으로 부착 응력이 취약하며, CEB-FIP 기준의 양호한 부착 조건을 만족하지 못했다. 따라서 황토 콘크리트의 부착 강도의 검증을 위하여 추가적인 실험 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 황토 콘크리트의 전단 및 부착 성능을 알아보기 위하여 최대 전단 강도 및 전단파괴 형

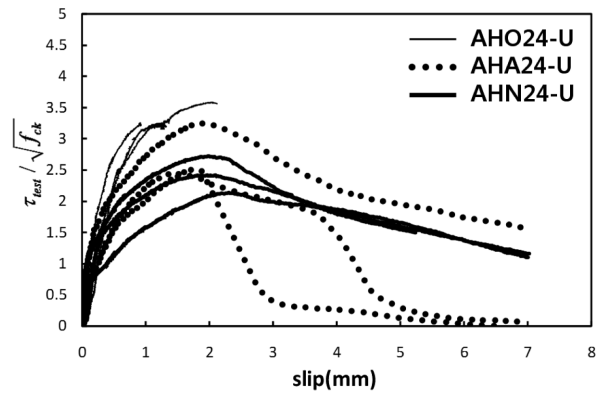


(a) AVO24, AVA24, AVN24 specimens

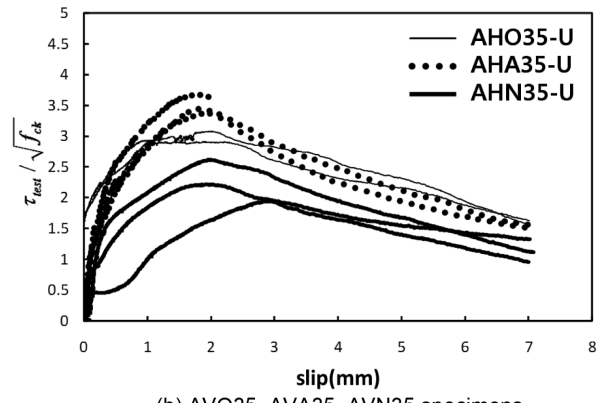


(b) AVO35, AVA35, AVN35 specimens

Fig. 9 $\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$ -slip relationship for vertical bars

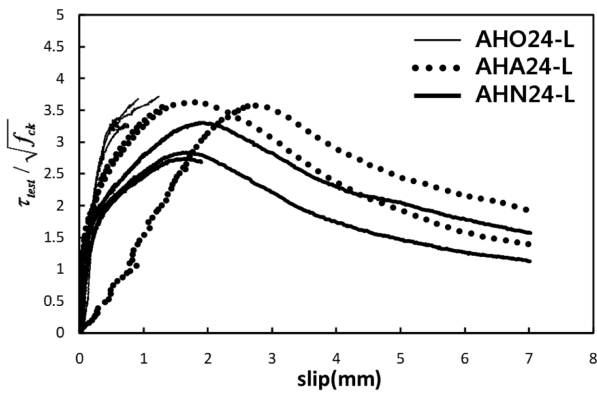


(a) AVO24, AVA24, AVN24 specimens

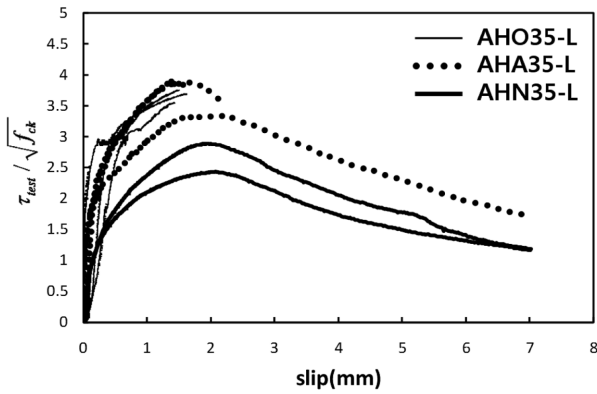


(b) AVO35, AVA35, AVN35 specimens

Fig. 10 $\tau_{test}/\sqrt{f_{ck}}$ -slip relationship for the upper horizontal bars

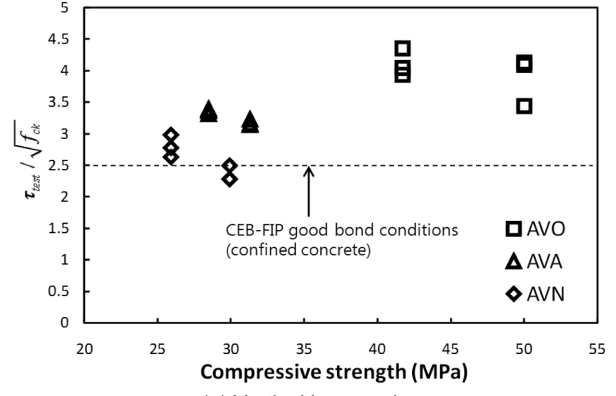


(a) AVO24, AVA24, AVN24 specimens

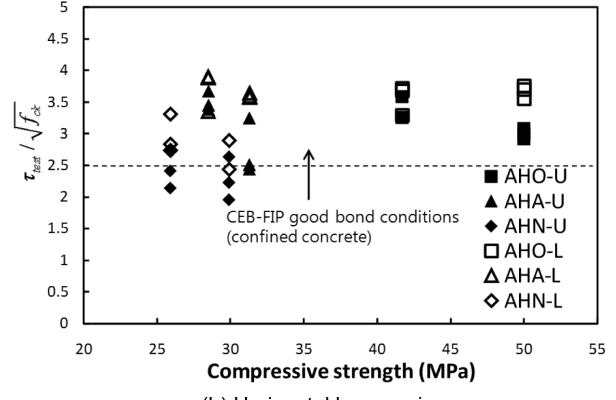


(b) AVO35, AVA35, AVN35 specimens

Fig. 11 $\tau_{test} / \sqrt{f_{ck}}$ -slip relationship for the lower horizontal bars



(a) Vertical bar specimens



(b) Horizontal bar specimens

Fig. 12 Evaluation of maximum bond stress by CEB-FIP

Table 7 Bond model parameters in CEB-FIP code

	Unconfined concrete ¹⁾		Confined concrete ²⁾	
	Good bond conditions	All other bond conditions	Good bond conditions	All other bond conditions
τ_{max}	$2.0 \sqrt{f_{ck}}$	$1.0 \sqrt{f_{ck}}$	$2.5 \sqrt{f_{ck}}$	$1.25 \sqrt{f_{ck}}$

¹⁾Failure by splitting of concrete

²⁾Failure by shearing of concrete between the ribs of re-bars

태, 전단 균열 분포, 최대 부착 강도, 부착 파괴 형태 등을 기존 기준식 및 비교 실험체인 일반 콘크리트와 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전단 실험에서 100% 황토, 20% 황토 콘크리트는 일반 콘크리트의 전단파괴와 동일한 사인장 균열 발생에 의한 취성 파괴를 나타내었다.
- 2) 전단 실험에 의해 측정된 황토 콘크리트 보의 최대 전단 강도는 콘크리트구조설계기준에 의하여 계산된 전단 강도보다 최소 약 10% 이상 큰 값을 나타내었다. 이 결과는 콘크리트구조설계기준 전단 강도식을 사용하여 황토 콘크리트 보의 전단 강도를 안전측으로 예측할 수 있음을 나타낸다.
- 3) 황토 콘크리트의, 비황토 콘크리트의 부착 실험에 의한 실험체의 파괴 형태는 대부분의 실험체에서 뽑힘에 의한 파괴(pullout failure)를 나타내었다.
- 4) 부착 실험에 의해 측정된 부착 강도를 콘크리트 압축 강도의 제곱근으로 나누어 상대적 부착 강도를

비교한 결과, 일반 콘크리트와 20% 황토 콘크리트는 비슷하였으나, 100% 황토 콘크리트는 다소 떨어지는 결과를 나타내었으며, CEB-FIP의 양호한 부착 조건을 만족하지 못하여 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 (주)클레이맥스의 연구비 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 깊은 감사드립니다.

참고문헌

1. 강성수, 이성로, 황혜주, 조민철, “황토결합재를 이용한 콘크리트의 수화열과 수축특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, 549 pp.
2. 정연백, 양근혁, 황혜주, 정현수, “황토와 고로슬래그 미분말을 첨가한 콘크리트의 역학적 성능평가,” 대한건축

- 학회 논문집, 22권, 5호, 2006, pp. 13~20.
3. 강홍기, 양근혁, 이영호, 황혜주, 정현수, “황토와 고로슬래그를 첨가한 콘크리트의 건조수축 및 크리프 특성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, 16권, 1호, 2004, pp. 612~615.
 4. 최희용, 김무한, 황혜주, “혼화재 종류 및 활성황토 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 2호, 2001, pp. 123~129.
 5. 김성배, 남진원, 이나현, 김장호, 최홍식, “재생PET섬유가 혼입된 황토 콘크리트 보의 휨 거동,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 619~626.
 6. 강홍기, 양근혁, 황혜주, 정현수, “황토와 슬래그를 첨가한 철근콘크리트 보의 휨 거동,” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, 16권, 2호, 2004, pp. 149~152.
 7. 정연백, 양근혁, 황혜주, 정현수, “황토를 첨가한 콘크리트의 부착 성능 및 전단 거동 평가,” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, 17권, 1호, 2008, pp. 83~86.
 8. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2008. 155 pp.
 9. 원종필, 박찬기, 장창일, 이상우, 김완영, “강섬유 보강 고강도콘크리트와 고장력 철근의 부착 특성,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 5호, 2007, 631~637.
 10. Tassios, T. P., “Properties of Bond between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions,” *Proc. AICAP-CEB Symposium*, Rome, CEB Bulletin, No. 131, 1979, pp. 67~122.
 11. 정재형, 강훈, 안종문, 신성우, “피복두께에 따른 초고강도 콘크리트에 매립된 철근의 부착특성,” 대한건축학회 논문집, 24권, 10호, 2008, pp. 45~52.
 12. 진수만, 윤현도, 최기선, 유영찬, 김궁환, “순환골재 콘크리트와 이형철근의 부착 특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 165~173.
 13. Comite Euro-International Du Betom, *CEB-FIP Model Code 1990*, Thomas Telford, 1990, 83 pp.

요 약 지금까지 환경 친화적 재료로서 황토에 관한 연구는 포틀랜드 시멘트를 부분적 대체하거나, 완전 대체하는 연구로 진행되어 왔다. 기존의 대부분의 연구에서는 압축강도, 건조수축, 크리프 등 황토 콘크리트의 역학적 성질에 초점이 맞춰졌다. 이 연구에서는 황토 콘크리트로 제작된 보 실험체의 전단강도를 실험하였다. 또한 황토 콘크리트에 정착된 인장 철근의 부착강도를 실험하였다. 이번 실험에서 시멘트를 20% 대체하는 활성 황토와 시멘트를 100% 대체하는 활성 황토를 사용한 콘크리트가 사용되었다. 실험 결과, 시멘트 20% 대체 활성 황토와 무시멘트 활성 황토 콘크리트 보의 전단 강도는 일반 포틀랜드 시멘트 콘크리트 보와 동등하였다. 반면에, 무시멘트 활성 황토 콘크리트의 부착 강도는 일반 포틀랜드 시멘트 콘크리트보다 작았다.

핵심용어 : 활성 황토, 전단 강도, 부착 강도