



## 활성 황토 콘크리트 보의 휨 성능

이남곤<sup>1)</sup> · 황혜주<sup>2)</sup> · 박흥근<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 건축학과 <sup>2)</sup>목포대학교 건축학과

## Flexural Performance of Activated Hwangtoh Concrete Beam

Nam-Kon Lee,<sup>1)</sup> Hye-Zoo Hwang,<sup>2)</sup> and Hong-Gun Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture, Mokpo University, Muan-gun 534-729 Korea

**ABSTRACT** As a eco-friendly material, Hwangtoh(red clay) has been studied for a partial or complete replacement of portland cement. Most of existing studies focused on the mechanical properties of the Hwangtoh concrete including the compressive strength, drying shrinkage, creep. In the present study, the flexural capacity of the beams made with 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 simple beams were tested under two point static loading. The flexural strength, cracking moment, deflection, and ductility were compared with those of the beams made with ordinary portland cement concrete.

**Keywords :** activated Hwangtoh, flexural strength, cracking moment, deflection

### 1. 서 론

#### 1.1 배경 및 목적

전 세계적으로 지구 환경에 대한 관심이 커지면서 우리나라에서도 정부의 저탄소 녹색성장 정책에 발맞춰 지구온난화의 주원인인 이산화탄소 배출을 억제하기 위한 노력이 다각도로 이루어지고 있다. 건설 분야에서도 이러한 노력의 일환으로 친환경 재료의 개발 및 적용에 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

시멘트를 대체할 수 있는 친환경재료로서, 우리나라 서남부 지방에 많이 퇴적되어 있는 황토가 연구되어 왔다. 현재 국내에서는 황혜주<sup>1,2)</sup>등이 구조 재료적인 측면에서 압축강도, 건조수축, 크리프 등의 연구를 해오고 있으며, 최근에는 구조 부재로서의 활성 황토 콘크리트 휨 부재에 대한 국내 연구 보고<sup>3,4)</sup>도 있으나, 현행 설계 기준 적용에 대한 구체적인 적합성 여부는 검증되지 않았다.

따라서 이 연구는 활성 황토 콘크리트의 보 실험을 통하여 휨 부재로서의 강도 및 균열 모멘트, 처짐, 연성 능력 등을 일반 콘크리트 부재와 비교하고, 그 결과에 근거하여 현행 설계기준 적용 가능성을 알아보고자 한다.

#### 1.2 황토 콘크리트

황토는 우리나라 지표면의 10% 이상을 점하고 있는 풍부한 재료로 옛 선조 때부터 요업재료 및 건축 재료로 쓰인 전통재료이나, 큰 수축에 의한 균열, 낮은 강도 특성으로 현대적인 건축 재료로 자원화 되지 못한 실정이었다.<sup>5)</sup> 그러나 최근에는 황토를 활용한 건설재료 연구가 많이 이루어지고 있는데, 황토를 이용한 연구에는 시멘트를 사용하지 않은 완전대체연구와 콘크리트 혼화재료로서 시멘트를 부분적으로 대체하여 황토를 활용한 부분대체연구가 있으며,<sup>6)</sup> 황토의 고온 소성과정 유무에 따라 활성 황토와 비활성 황토에 대한 연구가 있다.

활성 황토란 천연 상태인 황토를 활성화시켜 황토의 고유한 성능을 유지하면서, 콘크리트 혼화 재료로서 사용하였을 때 혼화재의 기본적 역할인 콘크리트 품질향상을 꾀하여 현대적 건축 재료에 적합하게 만든 혼화재료이며, 이를 활용한 콘크리트를 활성 황토 콘크리트라 한다. 우리나라에 산출되는 황토는 광물학적 구분으로 고령토와 동일한 Kaolin족의 Halloysite계에 속하는 광물로서, 주요 성분은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등으로 일반적인 콘크리트 혼화재와 그 성분이 유사하여 포졸란 반응을 일으키는 천연 포졸란의 성질을 갖는 것으로 연구보고되고 있다.<sup>5,7)</sup> 최근에는 천연 황토를 550~1,000°C로 가열 후 급랭시켜 활성화시킨 활성 황토 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있으며, 시멘트를 대체하는 치환율에 따라 적절한 강도가 확보되어, 황토가 첨가된 결합재의 역학적 성능평가와 실험들이 구조물 적용 가능성에 긍정적

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

Received February 24, 2010, Revised April 12, 2010,

Accepted April 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

결과를 보이고 있다.<sup>8,9)</sup>

비활성 황토는 천연 상태의 흙을 별도의 가공 없이 건조시킨 후 미분말로 만들어 사용한 것으로서 기존 재료들에 비해 생산단계에서의 에너지 소비를 최소화할 수 있으며 원적외선 방사율, 탈취율 및 습도조절능력이 우수한 천연 흙의 장점을 그대로 가지고 있다. 황토 시멘트 제작을 위하여 높은 온도에서의 소성과정을 거치지 않으므로 활성 황토에 비하여 상대적으로 친환경적이다. 비활성 황토 결합재는 포졸란 반응에 의해 생성되는 C-S-H와 C-A-S-H 수화물에 의해 강도발현이 된다.<sup>6)</sup>

황혜주 등<sup>10)</sup>은 황토 결합재의 기초 물성에 관한 실험적 연구를 통하여, 일부의 석회가 첨가된 분말형 무기재료로써 시멘트가 전혀 첨가되지 않은 황토를 주성분으로 하는 황토결합재의 압축강도, 건조수축 등의 기초적인 재료 성능 및 내구성 실험을 하여 건축 재료로서의 가능성을 보여주었다. Table 1은 무기물이 첨가된 활성 황토 결합재와 활성 황토의 화학성분비를 나타낸다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

이 실험에서는 황토의 함유량에 따라서 3가지의 재료를 사용하였다. OPC(ordinary portland cement)는 황토가 들어가지 않은 일반 시멘트이며, AHT(activated Hwangtoh)는 총 시멘트량 중 활성 황토 시멘트가 20% 대체 되어 포함되었고, NC(no 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 목표설계강도 24 MPa, 35 MPa을 의미한다.

철근은 SD400을 사용하였으며, D10, D19, D22의 항복강도는 각각 524, 530, 510 MPa이 측정되었다. 공시체 압축강도 시험방법은 KS F 2453 콘크리트 압축강도 시험

**Table 1** Chemical compositions of Hwangtoh (%)<sup>8,9)</sup>

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

**Table 2** Mix proportions of concrete

Material	Slump (mm)	Air content (%)	W/B (%)	S/a (%)	W20 (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (l/m <sup>3</sup> )			Weight (kg/m <sup>3</sup> )			f <sub>ck</sub> (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

W/B : water/binder, S/a : sand/aggregate, W : water, C : cement, S : sand, G : gravel

방법에 준하여 실험하였다. Table 2에 콘크리트의 압축강도(f<sub>ck</sub>)가 나타나 있다. OPC 실험체는 설계 강도를 초과하여 측정되었으며, AHT, NC는 설계 강도보다 작게 측정되었다. 이는 당일 평균 섭씨 5°C의 낮은 온도에서 콘크리트를 타설하였고 14일 동안 20°C에서 보온 습윤 양생을 한 후 실온 양생을 하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기존 황토 관련 연구<sup>1,2)</sup>에서도 양생 온도가 저온인 경우 황토 콘크리트의 강도 저하가 발생한다고 보고되고 있다.

### 2.2 실험체 계획

Table 3과 Fig. 1은 휨 실험 변수 및 실험체 형상을 나타낸다. BFO 실험체는 일반 콘크리트(OPC)를 사용하였으며, BFA 실험체는 활성 황토 시멘트(AHT)가 20% 혼합된 실험체이고, BFN 실험체는 활성 황토 결합재 시멘트(NC)가 100% 사용된 실험체이다. 총 12개의 실험체를 제작하였으며, 실험체는 인장철근비와 사용 콘크리트 재료에 따라서 4개의 시리즈로 분류하였다. 실험 변수로는 콘크리트 강도와 주인장 철근의 철근비를 사용하였다. 콘크리트 강도는 Table 2의 사용 콘크리트의 배합에 따라 결정되었으며, 주인장 철근비는 1.17%(3-D19)와 1.68%(3-D22)를 사용하였다. 보 길이는 3.4 m로 모든 실험체가 동일하며, 단면 크기는 폭 200 mm, 높이 350 mm, 보의 유효높이는 주철근 D22 실험체는 304 mm, D19 실험체는 305.5 mm로 하였다.

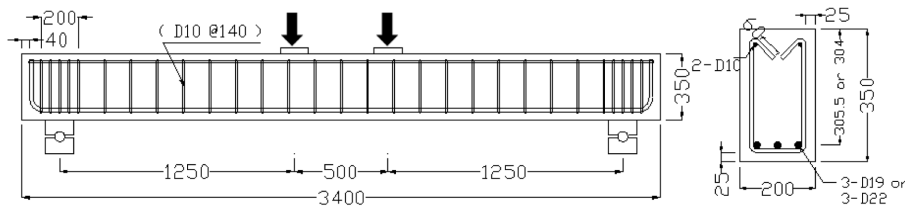
휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 전단철근을 150 mm 간격으로 보 전체에 걸쳐 배근하였으며, 지점부의 국부파괴를 방지하기 위하여 지점 부근에 D10 철근을 50 mm 간격으로 추가 배근하였다. 또한 주인장 철근의 부착응력 확보를 위하여 철근 단부에 90° 표준 갈고리를 사용하였다.

### 2.3 실험 방법

휨 실험을 위한 보 실험체는 Fig. 1과 같이 모두 순 간격 3 m에 양단 힌지로 단순지지 되었고, 하중 가력 시 발생하는 편심을 방지하기 위하여 보 중앙으로부터 각각 250 mm 떨어진 곳에 2점 가력하였다. 전단 경간비는 4.1이며, 하중 가력은 1,000 kN 용량의 가력기를 사용하여

**Table 3** Parameters for test specimens

Series	Specimens	Material	Compressive strength $f_{ck}$ (MPa)	Cross section (mm)	Compression re-bars	Tension re-bars	Ratio of tension re-bars (balanced ratio)	Shear reinforcement
I	BFO1	OPC35	50	200×350	2-D10	3-D19	1.17(2.93)%	D10@150
	BFA1	AHT35	28.5	200×350	2-D10	3-D19	1.17(2.00)%	D10@150
	BFN1	NC35	29.9	200×350	2-D10	3-D19	1.17(2.13)%	D10@150
II	BFO2	OPC35	50	200×350	2-D10	3-D22	1.68(3.20)%	D10@150
	BFA2	AHT35	28.5	200×350	2-D10	3-D22	1.68(2.13)%	D10@150
	BFN2	NC35	29.9	200×350	2-D10	3-D22	1.68(2.27)%	D10@150
III	BFO3	OPC24	41.7	200×350	2-D10	3-D19	1.17(2.67)%	D10@150
	BFA3	AHT24	31.3	200×350	2-D10	3-D19	1.17(2.27)%	D10@150
	BFN3	NC24	25.9	200×350	2-D10	3-D19	1.17(1.87)%	D10@150
IV	BFO4	OPC24	41.7	200×350	2-D10	3-D22	1.68(2.80)%	D10@150
	BFA4	AHT24	31.3	200×350	2-D10	3-D22	1.68(2.27)%	D10@150
	BFN4	NC24	25.9	200×350	2-D10	3-D22	1.68(2.00)%	D10@150



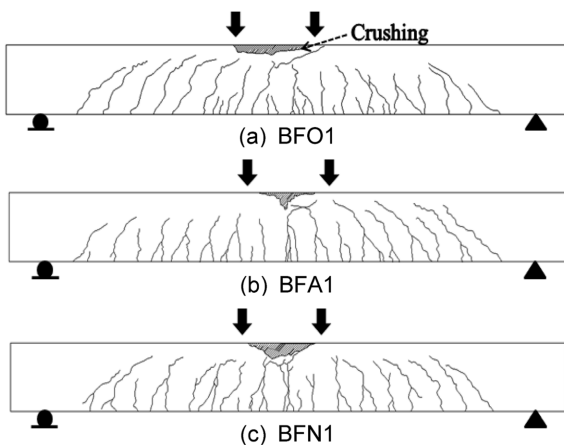
**Fig. 1** Specimen configuration

단순 가력 하였고, 1 mm/min로 변위제어(displacement control) 하였다. 하중의 변화에 따른 보의 처짐을 측정하기 위하여 LVDT(linear variable differential transformer)를 보의 중앙부와 하중 가력 지점 하부 및 중앙부에서 640 mm 떨어진 곳을 포함하여 대칭으로 총 5곳에 걸쳐 설치하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 균열 및 파괴 양상

Fig. 2는 황토 콘크리트 보 BFA1, BFN1과 일반 콘크리트 보 BFO1의 휨파괴 모습과 균열도이다. BFO1,



**Fig. 2** Crack patterns at the end of test

BFA1, BFN1 실험체 모두 비슷한 균열 양상을 나타내었다. 실험시작 후 최초로 보의 중앙 하부 부근에서 휨 균열이 발생하기 시작하였고, 하중이 점차 증가함에 따라 보의 전 구간에 걸쳐 휨 균열이 발생하면서, 휨-전단 균열로 발전하여 보 상부로 전진되는 모습을 나타내었다. 철근이 항복한 후에는 하중의 증가 없이 처짐만 증가하는 연성 거동을 나타내면서 균열의 폭이 점점 증가하다가 보의 중앙 상단부에서 콘크리트 압축파괴가 발생하였다. 압축파괴 발생 이후에는 하중이 감소하면서 최종 파괴에 이르는 모습을 나타내었다.

#### 3.2 하중-변위 관계

Fig. 3은 보 실험체의 하중-중앙부 처짐 관계를 나타내고 있다. 하중이 증가함에 따라 보 중앙에서의 최초 균열이 발생한 후, 휨 강성의 저하로 인하여 기울기가 감소하였으며, 철근 항복 이후 최대 하중에 도달한 이후에는 변위만 증가하는 연성거동이 나타났다. 이후 보 중앙부 콘크리트 압축축 연단의 압축파괴 발생으로 하중이 감소하였다. 20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트 보의 전체적인 거동 양상은 일반 콘크리트 보와 매우 비슷함을 알 수 있으며, 황토 콘크리트와 일반 콘크리트의 압축강도가 다르게 측정되었으므로, 압축 파괴 시 처짐이 다르게 나타났다.

그리고 주인장 철근비가 균형 철근비의 약 60~80%인 BFA2, BFN2, BFA4, BFN4 실험체에서는 철근 항복 이후의 연성구간이 짧게 나타난 것을 알 수 있다.

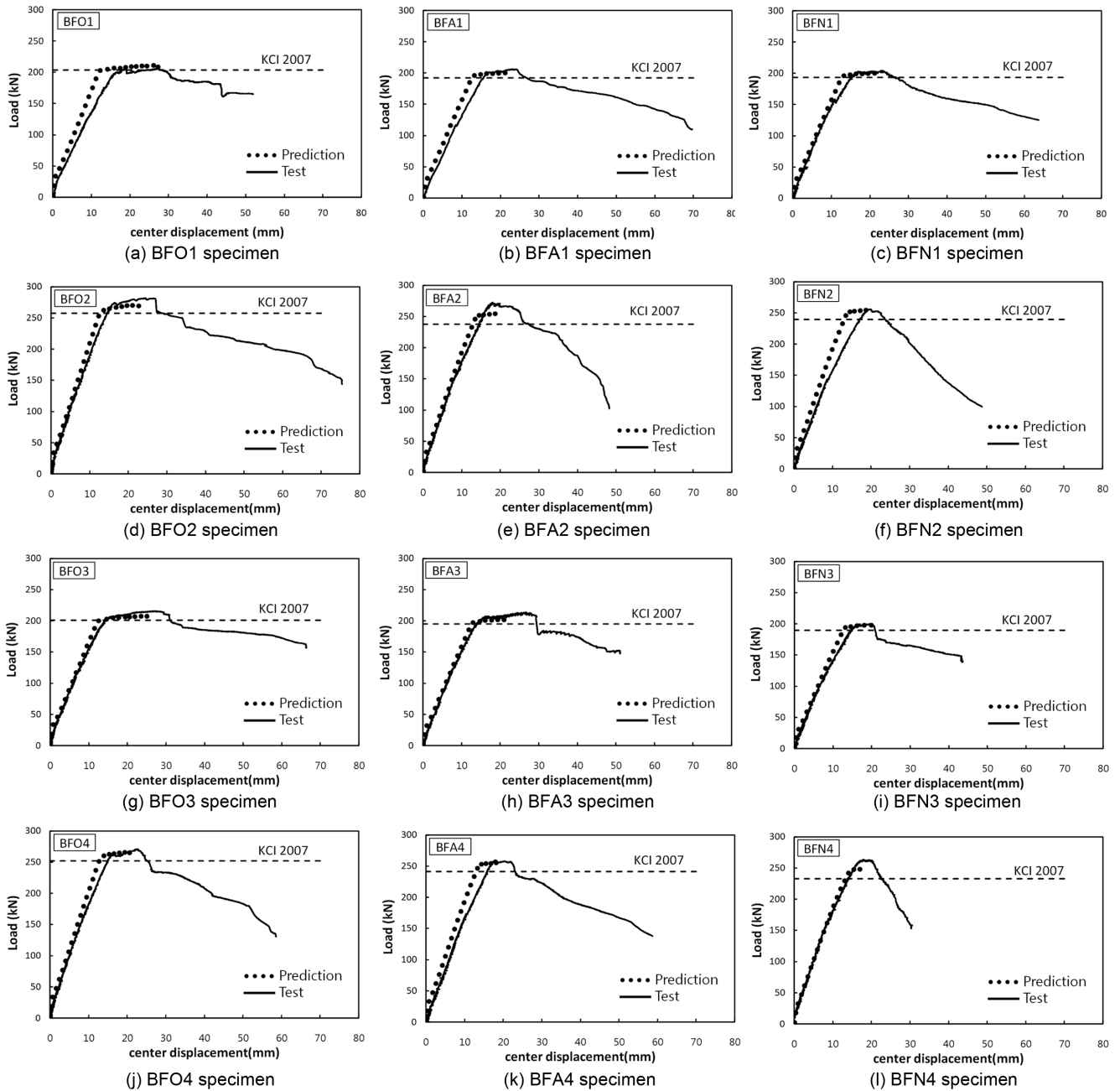


Fig. 3 Load-deflection relationships of test specimens

## 4. 결과 분석

### 4.1 휨 강도

Fig. 3은 휨 실험에 의해 측정된 최대 하중과 콘크리트 구조설계기준<sup>11)</sup>에서 제시된 등가 직사각형 응력블록 개념을 사용하여 계산한 공칭강도 모멘트에 의한 예측 강도(KCI2007)를 비교하고 있다.

Table 4는 실험 결과를 보다 자세히 나타내고 있는데, Series I 중 BFO1(일반 콘크리트)은 최대하중이 공칭강도보다 약 1.1% 컸으며, BFA1(20% 활성 황토)와 BFN1(100%활성 황토)은 각각 7.0, 5.5% 큰 값을 나타내었다. Series II에서는 BFA2가 14.8%로 가장 큰 차이를 나타냈으며, BFO2와 BFN2는 각각 9.5, 6.8% 컸다. Series III는

BFA3가 9.7%로 가장 컸고, BFO3와 BFN3는 7.3, 5.2% 컸으며, Series IV는 BFN4, BFO4, BFA4 순으로 각각 13.2, 7.4, 7.4% 만큼 공칭강도 보다 크게 나타났다. 전체적으로 최대공칭강도와 비교하였을 때, 제시한 강도보다 높은 결과를 나타내었으며, 비교 실험체인 일반 콘크리트 보(BFO)의 강도와 비슷하게 나타났다.

이러한 결과는 현행 콘크리트 구조설계기준에 따라서 20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트 보의 휨 강도를 안전측으로 평가할 수 있는 것을 나타낸다.

### 4.2 균열 모멘트

Table 4는 보 실험체에 최초 균열이 일어났을 때 균열 모멘트( $M_{cr,Test}$ )와 현행 기준식에 의해 계산된 균열 모멘트

**Table 4** Test results of flexural specimens

Series	Specimens	$f_{ck}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$\rho_t$ (%)	$P_{max}$ (kN)		$\frac{(1)}{(2)} - 1$ (2) $\times 100(\%)$	$M_{cr}$ (kN-m)		$\frac{(3)}{(4)}$	$P_s$ (kN) $(= \frac{(1)}{15})$	$E_c^{(1)}$ (MPa)	$I_e^{(2)}$ ( $\times 10^8 \text{mm}^4$ )	$\delta_s^{(3)}$ (mm)		$\frac{(5)}{(6)}$
					Test (1)	KCI (2)		Test (3)	Calc. (4)					Test (5)	KCI (6)	
I	BFO1	50	530	1.17	206.1	203.8	1.1	18.38	18.19	1.01	139.5	31312	5.58	10.22	7.9	1.29
	BFA1	28.5	530	1.17	205.8	192.4	7.0	11.64	13.72	0.85	140.0	25951	6.89	10.41	8.38	1.24
	BFN1	29.9	530	1.17	204.3	193.6	5.5	15.93	14.06	1.13	139.0	26379	5.45	9.08	8.28	1.10
II	BFO2	50	510	1.68	281.5	257.1	9.5	14.70	18.19	0.81	190.7	31312	6.61	9.86	8.85	1.11
	BFA2	28.5	510	1.68	272.6	237.4	14.8	10.41	13.72	0.76	184.1	25951	8.07	10.22	9.03	1.13
	BFN2	29.9	510	1.68	255.8	239.5	6.8	20.21	14.06	1.44	174.0	26379	6.49	11.04	8.49	1.30
III	BFO3	41.7	530	1.17	215.3	200.7	7.3	15.31	16.60	0.92	146.5	29466	5.71	9.42	8.46	1.11
	BFA3	31.3	530	1.17	213.5	194.7	9.7	15.31	14.39	1.06	145.2	26787	5.94	9.32	8.62	1.08
	BFN3	25.9	530	1.17	199.6	189.8	5.2	12.25	13.09	0.94	135.8	25149	6.39	9.22	8.19	1.13
IV	BFO4	41.7	510	1.68	270.5	251.8	7.4	17.52	16.60	1.06	184.0	29466	6.77	9.92	8.69	1.14
	BFA4	31.3	510	1.68	259.2	241.4	7.4	17.76	14.39	1.23	174.4	26787	7.03	10.44	8.47	1.23
	BFN4	25.9	510	1.68	263.6	232.9	13.2	15.93	13.09	1.22	178.4	25149	7.53	9.52	8.84	1.08

<sup>1)</sup>elastic modulus  $c = 8,700 \sqrt[3]{f_{ck}}$ , <sup>2)</sup>effective moment of inertia, <sup>3)</sup>deflection at service load( $P_s$ )

트( $M_{cr,Test}$ )를 비교하고 있다. 콘크리트구조설계기준에는 균열모멘트를 다음과 같이 계산한다.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (\text{kN-m}) \quad (1)$$

여기서  $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$  (콘크리트파괴계수),  
 $I_g$  = 균열발생 전 단면2차모멘트,  
 $y_t$  = 중립축에서 인장 연단까지의 거리

Fig. 4는 실험에 의해 측정된 균열모멘트와 콘크리트 압축강도의 관계를 나타내고 있으며, 현행기준식과 비교한 것이다. 100% 활성 황토 콘크리트(BFN), 20% 활성 황토 콘크리트(BFA)와 일반 콘크리트(BFO) 모두 압축강도가 클수록 균열 모멘트가 증가하였으며, 전체적으로 비교적 계산에 의한 값과 실험값이 비슷함을 알 수 있다.

Table 4에서 균열 모멘트 실험값을 설계 기준값으로 나누어 비교한 결과, BFN(100% 활성 황토)실험체 4개중 BFN3 실험체를 제외하고는 모두 기준값보다 크게 나타났고, BFA(20% 활성 황토)실험체는 각 series별로 0.85,

0.76, 1.06, 1.23배로 기준값과 비슷한 분포를 나타내었다. 비교 실험체인 BFO(일반 콘크리트) 역시 1.01, 0.81, 0.92, 1.06배로 비슷한 분포를 나타내었다. 따라서 20% 활성 황토 콘크리트, 100% 활성 황토 콘크리트에 대하여 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 파괴계수 ( $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$ )를 이용하여 균열 모멘트를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 실험체의 개수가 제한적이므로 정확한 파괴계수의 정의를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

### 4.3 사용하중 상태에서의 처짐

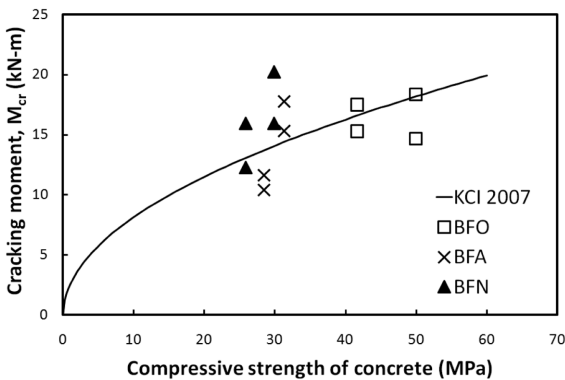
100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트 보의 사용성을 검토하기 위하여 사용하중 상태에서의 실험에 의한 처짐값과 현행 설계기준에서 규정하고 있는 유효단면2차모멘트를 사용한 처짐값을 비교하였다. 근사적 사용하중( $P_s$ )은 최대하중을 1.5로 나누어( $P_{max}/1.5$ ) 정하였다. 실험에 의한 처짐은 하중-처짐 관계에서 이 사용하중에 해당하는 처짐을 구하였으며, 현행 기준에서는 유효단면2차모멘트를 다음과 같이 정의한다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (2)$$

여기서  $M_a$  = 균열을 발생시키는 사용하중에서의 모멘트,  
 $I_{cr}$  = 균열단면의 단면 2차 모멘트

단순지지 보에서의 처짐은 주로 보 중앙의 유효강성에 영향을 받는다. 따라서 2점 하중에 대한 보의 중앙부 처짐은 다음과 같이 계산된다.

$$\delta_s = \frac{1}{E_c I_e} \left( \frac{(P_s/2)aL^2}{8} - \frac{(P_s/2)a^3}{6} \right) \quad (3)$$



**Fig. 4** Cracking moment vs compressive strength of concrete

여기서  $P_s$  = 보에 작용하는 사용하중(2점 하중의 합),  
 $L$  = 보의 순경간,  
 $a$  = 전단 경간,  
 $E_c$  = 콘크리트 탄성계수(=  $8700\sqrt[3]{f_{ck}}$  MPa)

Table 4에 실험에 의해 측정된 중앙부 처짐( $\delta_{s, test}$ )과 현행 설계기준에 의한 처짐값( $\delta_{s, KCI}$ )을 비교하였다. 기준에 의한 처짐 계산에서 자중에 의한 처짐은 제외하였다. 비교 결과, BFA(20% 활성 황토 콘크리트)는 실험값이 계산값에 비해 약 1.08~1.24배, BFN(100% 활성 황토 콘크리트)는 1.08~1.3배, BFO(일반 콘크리트)는 1.11~1.29배를 나타내어, 전체적으로 실험값이 약간 큰 것을 알 수 있다. 그러나 Table 4의 기준식을 사용한 상대적 처짐량 비교에서 평균적으로 BFA(20% 활성 황토 콘크리트)는 1.17배, BFN(100% 활성 황토 콘크리트)는 1.15배를 나타내어, 기준 실험체인 BFO(일반 콘크리트)의 1.16배와 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 활성 황토 콘크리트 보의 처짐에 대한 사용성 측면에서 일반 콘크리트 보와 유사한 성능을 나타내며, 또한 현행 기준식에서 사용하는 유효강성과 탄성 계수식을 사용하여 황토 콘크리트 보의 처짐을 평가할 수 있다고 판단된다.

### 5. 하중-변위 곡선의 예측 및 연성도 평가

하중-변위 관계를 통한 황토 콘크리트와 일반 콘크리트의 연성도 비교를 위하여, 콘크리트의 압축응력-변형률 관계를 사용하여 단면 해석을 하고, 이를 통해 얻어진 하중-변위 관계와 황토 콘크리트 보 실험에 의해 측정된 하중-변위 관계를 비교하였다. 하중-변위 곡선 예측 방법은 다음과 같다.

콘크리트의 응력-변형률 관계로는 Fig. 5의 Hognestad model<sup>12)</sup>을 사용하였다. 단면 해석에서 콘크리트 응력 면적은 구간을 나누어 적분하여 구하였고, 압축철근과 인장철근의 압축력과 인장력을 고려하였다. 보의 단면에서 힘의 평형조건과 변형률의 선형분포를 이용하여 압축력

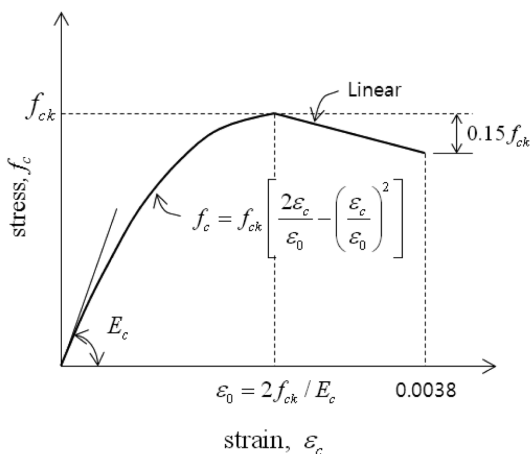


Fig. 5 Hognestad stress-strain model<sup>12)</sup>

과 인장력을 계산하였으며, 계산한 압축력과 인장력을 사용하여 모멘트를 구하고, 변형률 증가에 따른 곡률( $\phi$ )을 구하여 모멘트-곡률 관계를 구하였다. Fig. 6은 일반적인 모멘트-곡률 관계를 나타냈으며, 그림과 같이 휨 균열 이전, 휨 균열 이후, 휨 항복 이후 등의 3단계로 구간을 나누어 계산하였다.

이와 같이 얻어진 각 단계의 모멘트-곡률 관계를 이용하여 보의 전 길이에 걸쳐 곡률 분포를 구하였다. 이 곡률 분포를 이용하여 보의 미소 길이에 대한 처짐값과 처짐을 구하고, 각각의 미소 길이에서의 처짐을 합하여 보 중앙부의 최대 처짐을 계산하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

비교 결과, 초기 균열이 발생하기 전까지는 실험 결과와 예측값이 거의 비슷하였으며, 항복 후 연성 구간도 매우 비슷하게 나타나 전체적으로 일반 콘크리트와 100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트 모두 예측값과 비슷한 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 다만, 휨 균열 발생 후부터 항복점까지 보의 강성이 예측값보다 약간 작게 나타났다.

다음은 활성 황토 콘크리트 보와 일반 콘크리트 보의 연성 능력을 비교하였다. 연성도(ductility,  $\mu_d$ )는 최대 처짐( $\Delta_u$ )을 항복하중에서의 처짐( $\Delta_y$ )으로 나누어 계산하였다. 해석에서의 최대 처짐은 단면의 압축측 연단의 변형률이 앞서 제시한 콘크리트 응력-변형률 모델의 최대 변형률(0.0038)에 도달했을 때의 처짐으로 정의하였다. 일반적으로 실험결과에서 최대 처짐은 최대강도에 도달한 후 하중재하능력이 최대강도의 80~85%로 감소되는 시점으로 정의하지만, 여기서는 하중재하능력의 감소를 나타내지 못하는 해석 결과와의 비교를 위하여, 하중재하능력이 급격히 감소하는 시점을 실험 결과의 최대 처짐으로 정의하였다.

Table 5에서 실험 결과에 대한 연성도는 일반 콘크리트 보가 평균 1.93, 20% 활성 황토 콘크리트 보는 1.65, 100% 활성 황토 콘크리트 보는 1.51를 나타내었다. 전체적으로 일반 콘크리트가 약간 큰 것을 알 수 있는데, 이는 각 실험체가 동일한 철근비로 설계되었지만, Table 2에서 일반 콘크리트의 압축강도가 황토 콘크리트보다 더

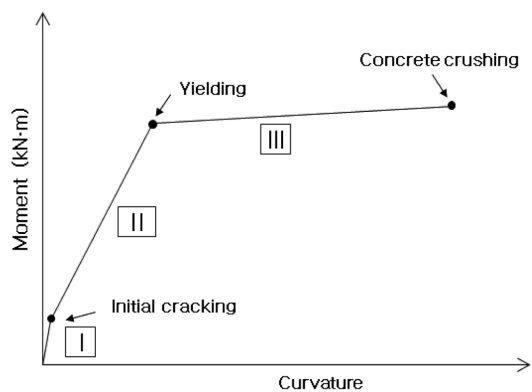


Fig. 6 Idealized moment-curvature relationship

**Table 5** Ductility of test specimens

Specimen	$\rho_a^{1)}$ (%)	$\rho_t^{2)}$ (%)	Test			Prediction			$\frac{(3)}{(6)}$
			$\Delta_y^{3)}$ (mm) (1)	$\Delta_u^{4)}$ (mm) (2)	$\mu_d$ (3) = $\frac{(2)}{(1)}$	$\Delta_y$ (mm) (4)	$\Delta_u$ (mm) (5)	$\mu_d$ (6) = $\frac{(5)}{(4)}$	
BFO1	2.02	1.17	14.5	28.9	1.99	14.0	25.6	2.51	0.80
BFA1	1.40	1.17	14.7	24.6	1.68	14.6	24.9	1.71	0.98
BFN1	1.45	1.17	13.9	24.4	1.75	13.4	25.6	1.91	0.92
BFO2	2.15	1.68	14.2	27.1	1.91	14.7	29.4	1.99	0.96
BFA2	1.49	1.68	15.2	19.9	1.31	15.3	21.0	1.38	0.95
BFN2	1.54	1.68	16.2	22.4	1.38	14.0	21.5	1.53	0.90
BFO3	1.82	1.17	13.5	29.4	2.18	13.9	26.0	1.87	1.16
BFA3	1.50	1.17	13.5	28.6	2.12	14.2	31.4	2.22	0.95
BFN3	1.28	1.17	13.6	20.5	1.51	14.1	23.2	1.64	0.92
BFO4	1.94	1.68	14.4	23.7	1.64	14.6	22.4	1.54	1.07
BFA4	1.60	1.68	15.1	22.4	1.48	14.8	25.8	1.74	0.85
BFN4	1.36	1.68	14.3	20.3	1.42	14.8	19.8	1.34	1.06

<sup>1)</sup>re-bar ratio at  $\epsilon_r(=0.0053(D19), 0.0051(D22))$ , <sup>2)</sup>tension re-bar ratio of each specimen, <sup>3)</sup>yield displacement, <sup>4)</sup>maximum displacement

켰기 때문이다.

다음은 연성도에 대한 실험 결과와 예측값을 Table 5에서 비교하였다. 100% 활성 황토(BFN), 20% 활성 황토(BFA) 실험체의 연성도는 예측값에 비해 전체적으로 약 0.85~1.06배를 나타내었다. Series I에서 BFA1, BFN1은 BFO1의 0.8배 보다 큰 0.98, 0.92배를 나타내었으며, Series II에서는 BFA2, BFN2가 각각 0.95, 0.90배를 나타내었다. Series III에서는 BFO3가 1.16로 예측모델보다 연성도가 크게 나타났으며, BFA3, BFN3은 0.95, 0.92를 나타내었다. Series IV에서는 BFA4가 0.85로 실험체중 가장 작았으며, BFN4는 1.06으로 큰 비율을 나타내었다.

이상의 결과에서 활성 황토 콘크리트 휨 부재의 연성도는 예측 모델과 비슷한 연성도를 나타내었으며, 비교 실험체인 일반 콘크리트(BFO) 휨 부재의 연성도에 비해서도 떨어지지 않는 연성 능력을 보여 주었다.

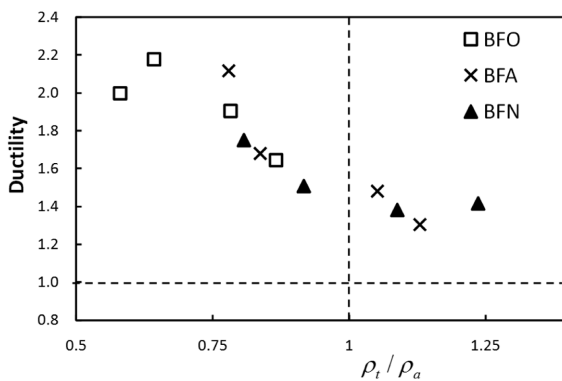
다음은 철근비에 따른 연성도를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 최대 허용 철근비( $\rho_0$ )란, 콘크리트 구조설계기준<sup>11)</sup>에서 제시한 휨 부재의 최소허용 변형률인 항복변형률의

2배로 정의하였다. 휨 인장철근인 D19, D22의 항복강도는 각각 530, 510 MPa이다. Fig. 7에서 인장 철근비가 최대 허용 철근비에 가까워질수록 연성도가 줄어드는 경향을 보였다. 이는 균형 철근비에 가까울수록 연성도가 작아져 취성파괴의 경향을 나타내는 일반 포트랜드 시멘트 콘크리트의 경우와 비슷한 결과임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 활성 황토 콘크리트의 휨 부재로서의 성능과 현행 기준의 적용 가능성을 알아보기 위하여 12개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 20% 활성 황토, 100% 활성 황토 콘크리트 보의 균열 모멘트 및 최대 휨 강도, 처짐, 연성도 등을 기존 기준식 및 비교 실험체인 일반 콘크리트 보와 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트 보의 단순가력 실험을 통한 파괴 및 균열 양상은 일반 콘크리트 보와 매우 유사하였으며, 하중-변위 관계 또한 일반 콘크리트 보와 유사한 결과를 나타내었다.
- 2) 100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트 보의 휨 실험에 의해 측정된 휨 강도는 콘크리트구조설계기준 등가응력블록 개념에 근거한 휨 강도보다 평균 8% 큰 값을 나타내었다.
- 3) 실험에 의해 측정된 균열 모멘트와 콘크리트구조설계기준에 제시된 파괴계수( $f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}}$ )를 이용한 균열 모멘트를 비교한 결과, 실험 결과와 기준식이 비슷한 값을 나타내었다.
- 4) 사용성 검토를 위하여 사용하중 상태에서의 처짐을 확인한 결과, 콘크리트구조설계기준 유효2차모멘트와 콘크리트 탄성계수 식을 사용한 처짐에 비해



**Fig. 7** Ductility-reinforcement ratio relationship

1.08~1.30배를 나타내었다. 또한 기준 실험체인 일반 콘크리트의 처짐량과 상대적인 비교를 하였을 때, 20% 활성 황토와 100% 활성 황토 콘크리트 보 모두 일반 콘크리트 보의 처짐량과 비슷하였다.

- 5) 100% 활성 황토, 20% 활성 황토 콘크리트의 휨 부재의 연성도는 예측한 하중-변위곡선의 연성도와 유사하였으며, 또한 황토 콘크리트 휨 부재에서 주인장 철근의 철근비가 순인장 철근 최소허용변형률 0.004일 때의 최대 허용 철근비에 가까워질수록 연성 능력이 줄어드는 경향을 나타내었다.

위의 실험 결과를 통하여, 이 연구에서 수행된 활성 황토 콘크리트 보는 건축물의 휨 부재에 적용이 가능한 것으로 판단되며, 기존 콘크리트구조설계기준 2007을 사용하여 휨 설계 가능하다고 판단된다. 추후 활성 황토 콘크리트 보의 전단 강도 및 철근과의 부착 강도 등의 구조성능에 대한 연구와 황토 콘크리트의 FRESH특성과 철근부식, 동결융해, 내후성 등의 내구성에 대한 물성평가 연구가 추가로 수행되어야 한다.

### 감사의 글

이 연구는 (주)클레이맥스(Dlaymax)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 깊은 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 정연백, 양근혁, 황혜주, 정헌수, “황토와 고로슬래그 미분말을 첨가한 콘크리트의 역학적 성능평가,” 대한건축학회 논문집, 22권, 5호, 2006, pp. 13~20.
2. 강홍기, 양근혁, 이영호, 황혜주, 정헌수, “황토와 고로슬

- 래그를 첨가한 콘크리트의 건조수축 및 크리프 특성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, 16권, 1호, 2004, pp. 612~615.
3. 김성배, 남진원, 이나현, 김장호, 최홍식, “재생PET섬유가 혼입된 황토 콘크리트 보의 휨 거동,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 619~626.
  4. 강홍기, 양근혁, 황혜주, 정헌수, “황토와 슬래그를 첨가한 철근콘크리트 보의 휨 거동,” 한국콘크리트학회 학술대회논문집, 16권, 2호, 2004, pp. 149~152.
  5. 최희용, 황혜주, 김무한, 김문한, “시멘트 모르타르의 적용을 위한 황토 혼화재 개발에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 16권, 6호, 2000, 95 pp.
  6. 강성수, 이성로, 황혜주, 조민철, “황토결합재를 이용한 콘크리트의 수화열과 수축특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, 549 pp.
  7. Friasa, M., Sanchez de Rojas, M. I., and Cabrerab, J., “The Effect That the Pozzolanic Reaction of Metakaolin Has on the Heat Evolution in Metakaolin-Cement Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, 2000, pp. 209~216.
  8. 최희용, 김무한, 황혜주, “혼화재 종류 및 활성황토 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 2호, 2001, pp. 123~129.
  9. 양근혁, 황혜주, 김선영, 송진규, “혼화재 · 무시멘트 황토 모르타르의 유동성 및 압축강도 발현에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 6호, 2006, pp. 793~800.
  10. 황혜주, 이종국, 양준혁, “황토 결합재의 기초물성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 24권, 1호, 2008, 79 pp.
  11. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2008, pp. 118, 121.
  12. E. Hognestad, “A Study of combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members,” University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin Series No. 399, November 1951, 128 pp.

**요약** 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 휨 성능을 실험하였다. 이번 실험에서는 시멘트를 20% 대체하는 활성 황토를 사용한 콘크리트와 시멘트를 100% 대체하는 활성 황토 콘크리트가 사용되었다. 단순보 실험은 2점 정적 재하 하중으로 실험하였다. 휨 강도, 균열 모멘트, 처짐, 연성도 등의 결과를 일반 포틀랜드 시멘트 콘크리트로 제작된 보의 실험 결과와 비교하였다.

**핵심용어** : 활성 황토, 휨 강도, 균열 모멘트, 처짐