

# 황토와 슬래그를 첨가한 콘크리트의 강도 및 응력-변형률 관계

## The Stress-Strain Relationship and Compressive Strength of Concrete Containing Hwangtoh and Slag

강 홍 기\*      양 근 혁\*\*      이 영 호\*\*\*      황 혜 주\*\*\*\*      정 헌 수\*\*\*\*\*

Kang, Hong Ki      Yang, Keun Hyeok      Lee, Young Ho      Hwang, Hey Zoo      Chung, Heon Soo

### ABSTRACT

The objective of this study was to understand the effect of hwangtoh and slag on various properties of concrete. Main variables were replacement level of admixtures, hwangtoh and slag, and curing temperature. Test results indicated that the compressive strength of concrete replaced by either hwangtoh and slag was significantly influenced by curing temperature. The elasticity modulus and compressive peak strain of concrete showed a small increase with increasing hwangtoh replacement.

### 1. 서론

혼화제는 포졸란 반응을 일으켜 콘크리트의 성능을 개선, 향상시키기 위해 사용되는 재료이다. 최근 주로 사용되는 혼화제로는 플라이 애쉬, 고로슬래그, 실리카 폼 및 메타카올린 등을 들 수 있다. 메타카올린은 가격이 저렴하여 실리카 폼을 대체할 수 있는 혼화제로 각광을 받고 있다. 황토는 메타카올린의 일종으로서 국내에 매장량이 풍부하고 수급이 용이하여 향후 사용 빈도증가가 예상된다.

황토를 첨가한 콘크리트의 역학적 성질에 대한 연구는 소수 연구자들에 의해 수행되고 있다. 이들은 기본적으로 황토 첨가율에 따른 압축강도와 유동성 평가에 중점을 두고 진행되었으며 황토 첨가율이 10~20%까지는 강도증진의 효과가 있지만 유동성이 감소하는 단점을 지적하고 있다.

혼화제로서 황토의 활용성을 증대시키기 위해서는 압축강도와 더불어 응력-변형률 관계, 탄성계수 인장강도, 비탄성 변형 및 내구성 등의 역학적 성질에 대한 평가와 더불어 유동성 개선을 위한 지속적인 노력이 필요하다. 이를 위한 연구의 일환으로서 본 연구에서는 황토와 고로슬래그가 첨가된 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 응력-변형률 관계를 평가하는데 주요 목표를 두었다.

\* 정회원, 중앙대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 전임강사

\*\*\* 정회원, 동원대학 건축과 조교수

\*\*\*\* 정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 조교수

\*\*\*\*\* 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수

표 1. 실험 배합표

specimen	W/B	S/A	황토(MK) 치환율 (%)	슬래그(B) 치환율 (%)	양생온도 (℃)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )						
						W	C	MK	B	S	A	S.P
M0B0	55	45	0	0	10, 30	185	336	-	-	793.5	969.8	16.8
M10B0			10	0			303	33.6	-	789.4	964.9	
M20B0			20				269	67	-	786.0	960.7	
M30B0			30				235	101	783.1	957.3		
M12B25			12.5	25			210	42	84	784.7	959.1	
M18B36			18	36			153	61	122	780.5	954.2	

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

콘크리트의 압축강도와 유동성을 개선하기 위한 황토와 고로슬래그의 적정 치환율을 파악하기 위하여 1차적으로 모르타르 실험을 수행하였다. 모르타르 실험결과로부터 적정 콘크리트 배합표를 도출하였다. 표 1에 실험 배합표를 나타내었다. 주요 변수는 황토치환율, 고로슬래그 치환율 및 양생온도이다. 황토의 치환율은 0, 10, 20, 30%로 변화시켰다. 유동성 개선을 위해 사용된 고로슬래그는 전체 결합재의 25%와 36% 치환하였다. 포졸란 반응은 양생온도에 의해 영향을 받기 때문에 양생온도를 평균 25℃와 5℃로 하였다. 혼화제가 치환되지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프는 18cm로서 이를 위해 고성능 감수제 5%를 모든 시험체에 동일하게 첨가하였다.

### 2.2 사용재료 및 실험방법

시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,379cm<sup>2</sup>/g의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 황토는 천연황토를 850℃로 하소시켜 활성화 하였다. 비중은 2.72, 분말도 3,300cm<sup>2</sup>/g이었다. 고로슬래그는 비중 2.91, 분말도 4,379cm<sup>2</sup>/g인 광양산을 사용하였다. 잔골재와 굵은 골재의 비중은 2.6, 조립율은 각각 2.8과 6.54이었다. 굵은 골재의 최대직경은 25mm이었다.

유동성을 평가하기 위한 슬럼프 실험은 KS F 2402에 의거하여 수행하였다. 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여  $\Phi 10 \times 20$ cm 몰드를 이용하였으며 진동다짐대를 이용하여 1분간 다졌다. 몰드탈형은 재령 1일에서 하였으며 대기양생 하였다. 압축강도 측정은 KS F 2405에 준하여 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일에서 측정하였다. 응력-변형률 관계는 콘크리트 타설 시 매립된 PML-60-2L을 이용하여 28일 재령에서 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 유동성 평가

그림 1에 각 시험체의 슬럼프 값을 나타내었다. 황토 혼화제의 치환율이 증가할수록 유동성이 감소하지만 황토대신 일정량의 고로슬래그를 치환하면 유동성은 개선되고 있다. 황토 혼화제의 단점인 유동성 개선을 위해 고로 슬래그 혼입 등 3성분계 콘크리트의 적극적인 검토가 필요하다고 판단된다.

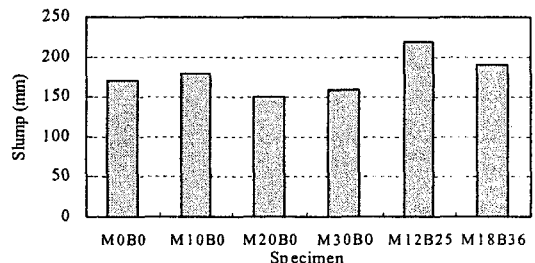
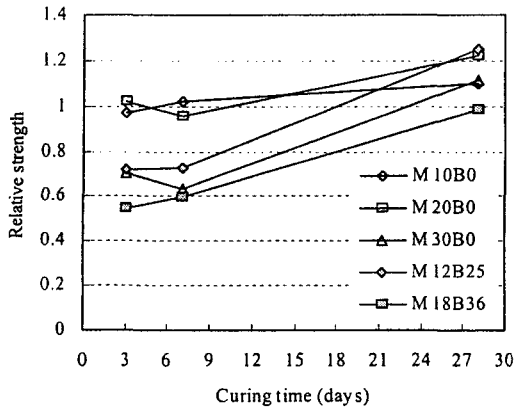
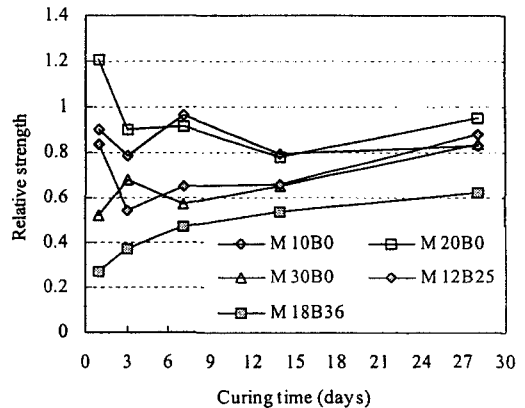


그림 1. 각 시험체의 슬럼프



(a) 평균 양생온도 30°C



(b) 평균 양생온도 10°C

그림 2. 재령과 상대강도의 관계

### 3.2 압축강도

그림 2에 양생온도에 따른 상대강도와 재령의 관계를 나타내었다. 상대강도는 각 재령에서 각 시험체의 강도를 MOB0 시험체의 강도로 무차원 한 값이다. 평균 양생온도가 30°C인 경우 황토가 10%와 25% 치환되었을 때 초기 강도와 28일 강도 모두 증가하였다. 하지만 황토가 30%치환 또는 고로슬래그가 함께 치환되면 초기 강도는 낮게 있으며 28일 강도에서 증가하고 있다. 28일 강도를 볼 때 황토 20% 치환 또는 황토 12.5%와 고로슬래그 25% 치환된 시험체에서 MOB0 시험체 강도보다 20% 이상의 우수한 압축강도 발현을 보였다. 평균 양생온도가 10°C인 경우의 초기강도 발현과 28일 강도발현은 양생온도 30°C일 때에 비해 낮았다. 특히 황토 치환율이 높을수록 또는 고로슬래그가 치환되었을 경우 상대강도는 현저하게 낮으며, 양생온도 30°C일 때와 달리 28일 강도에서도 MOB0 시험체의 강도보다 낮게 나타났다. 즉 포졸란 반응은 양생온도에 의해 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 혼화재로서 황토가 치환된 콘크리트의 품질확보를 위해서는 황토의 치환율 뿐만 아니라 양생온도를 적절히 고려해야 할 것이다.

### 3.3 응력-변형을 관계

그림 3에 평균 양생온도가 10°C일 때 각 시험체의 응력-변형률 관계를 나타내었다. 혼화재로서 황토 또는 황토와 고로슬래그가 치환된 콘크리트의 응력-변형률 관계 형상은 일반 콘크리트인 MOB0 시험체의 응력-변형률 관계와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 최대응력 이후의 기울기는 황토 또는 황토와 고로슬래그가 치환되었을 때 MOB0 시험체에 비해 약간 연성적인 경향을 보이고 있다.

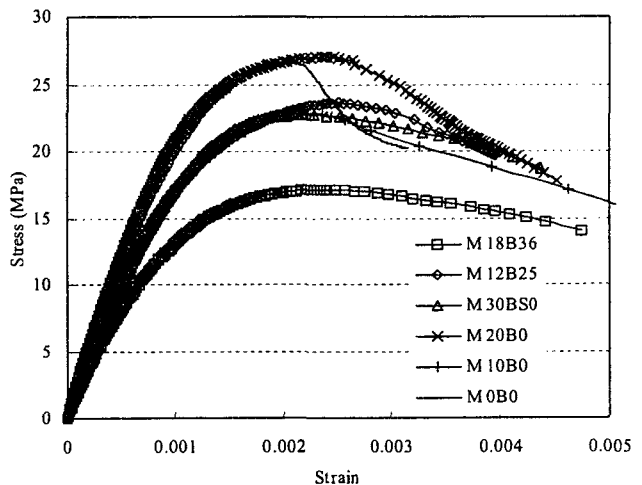


그림 3. 각 시험체의 응력-변형률 관계

### 3.4 탄성계수

그림 4에 평균 양생온도가 10°C일 때 각

시험체의 탄성계수를 나타내었다. 탄성계수는 응력-변형을 관계에서 원점과  $0.35f_{ck}$  점을 연결하는 직선의 기울기로 산정하였다. 황토 치환율이 20%까지는 탄성계수가 증가하는 경향을 보이며, ACI 318-02<sup>3)</sup> 기준에서 제시하는 탄성계수 계산 값과 거의 일치하였다. 하지만 황토치환율 30% 및 황토와 고로슬래그가 치환된 시험체의 탄성계수는 M0B0 시험체의 탄성계수 및 ACI 318-02에서 제시하는 값보다 낮았다.

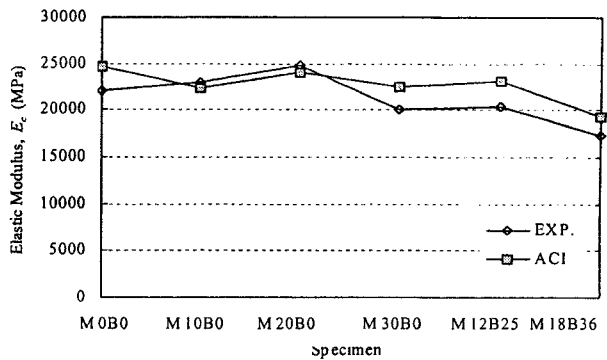


그림 4. 각 시험체의 탄성계수

### 3.5 최대응력 시 변형률( $\epsilon_0$ )

그림 5에 평균 양생온도가 10℃일 때 각 시험체의 최대응력 시 변형률을 나타내었다. 황토와 고로슬래그 치환율이 증가할수록 최대응력시 변형률은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 황토만 치환된 콘크리트의 변형률은 보통 콘크리트의 최대응력 시 변형률에 대한 정현수 모델<sup>1)</sup>과 비교적 일치하지만 고로슬래그가 황토와 함께 치환된 시험체에서는 조금 상회하는 경향을 보였다.

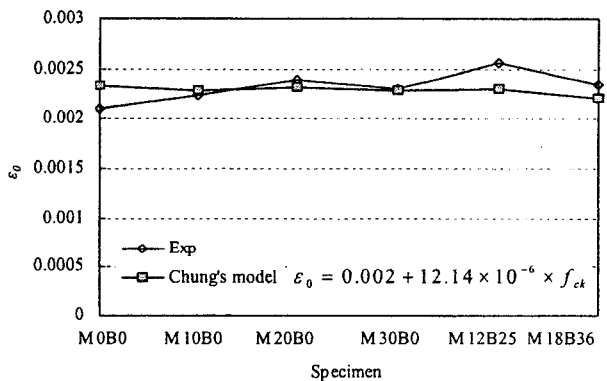


그림 5. 각 시험체의 최대응력 시 변형률

## 4. 결론

- 1) 황토 혼화재의 치환율이 증가할수록 유동성이 감소하지만 황토와 함께 약 25% 정도의 고로슬래그를 치환하면 유동성은 개선되며 압축강도도 더불어 향상되었다.
- 2) 평균 양생온도가 10℃인 경우의 상대강도는 황토와 고로슬래그 치환율이 높을수록 평균 양생온도가 30℃인 경우에 비해 현저하게 낮으며, 28일 강도에서도 M0B0 시험체의 강도보다 낮았다.
- 3) 황토 치환율이 20%까지는 탄성계수가 증가하며, ACI 기준에서 제시하는 탄성계수 계산 값과 거의 일치하였다. 하지만 황토 치환율 30% 및 황토와 고로슬래그가 치환된 시험체의 탄성계수는 M0B0 시험체의 탄성계수 및 ACI 318-02에서 제시하는 값보다 낮았다.

## 감사의 글

본 연구는 월드건설(주)의 지원으로 수행된 실험결과와 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 정현수, 고강도 철근콘크리트 구조, 태림문화사, 1994, 232 pp.
2. 최희용, 김무한, 김문한, 황혜주, 최성우, "혼화재 종류 및 활성황토 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회논문집, 제13권, 제2호, 2001, 4., pp. 129
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(318-02) and Commentary-(318R-02)", American Concrete Institute, 2002.
4. Qian, X., and Li, Z., "The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin," Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001, pp. 1607-1611