메타카올린 및 이산화규소를 활용한 콘크리트의 力學的 特性[†]

[‡]金南旭 · 金春浩*

全北大學校 工科大学 土木工學科, *中部大學校 工科大学 土木工學科

Mechanical Properties of Concrete Using Metakaolin and Silicon Dioxide[†]

[‡]Nam-wook Kim and *Chun-ho Kim

Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Assistant Professor

**Department of Civil Engineering, Joongbu University, Professor, Corresponding author*

요 약

콘크리트 구조물 형식의 다양화에 따라 요구되는 콘크리트의 품질 또한 고성능화가 필수적으로 되고 있다. 콘크리트의 고성능화는 혼화재료의 사용을 통하여 도달되고 있는데 일반적으로 고강도 콘크리트를 제작하기 위해서는 실리카 흙을 사용하고 있다. 실리카 흙은 역학적 성능은 우수하나 경제적 이지 못해 최근 이의 대체재로서 메타카올린의 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구는 실리카 흙의 대체재로 메타카올린을 사용하였으며 이에 따른 유동성의 저하를 방지하기 위해 이산화규소를 사용한 콘크리트를 제작하여 각 종 역학적 특성을 검토하였다.

주제어 : 메타카올린, 이산화규소, 실리카 흙, 고성능콘크리트

Abstract

According to the diversification of types of concrete structures, the quality of the concrete which is demanded also, is becoming high performance essentially. The high performance of the concrete leads using of admixtures, generally, in order to produce high strength, concrete has been used to silica fume. Silica fume is excellent mechanical properties, but unlikely to be economic. So, recently as a replacement for silica fume, metakaolin is a lot of research underway. In this study, it is used the metakaolin substitute for silica fume. For in order to prevent loss of liquidity when occurs using the admixtures, we used the silica dioxide. Therefore, concrete with the admixtures and silicon dioxide were examined the mechanical properties.

Key words : Metakaolin, silicon dioxide, silica fume, high performance concrete

1. 서 론

최근 들어 경제성장 및 사회기반시설물의 확충으로 인하여 콘크리트 사용량이 더욱 증가되고 있으며 특히, 도심부의 인구집중에 의한 고밀도화의 영향으로 콘크리트 구조물은 고층화, 대형화 및 다양화 되어 가고 있다. 따라서 콘크리트의 품질 또한 이러한 요구를 충족하기 위해서는 고성능화가 필수적이며 이를 위한 혼화재료의

개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 주로 활용되고 있는 혼화재료는 플라이애시, 고로슬래그 및 실리카 흙 등을 들 수 있는데 이 들 재료는 보통포틀랜드시멘트와 혼합하여 사용할 경우, 초기수화열의 저감, 압축강도의 증진, 유동성의 향상 등의 효과가 있어 내구성이 크게 향상된다. 특히, 실리콘이나 페로 실리콘 등의 규소합금을 전기아크식 노에서 제조할 때 배출되는 가스에 부유하여 발생하는 미세 분말로부터 제조되는 산업부산물인 실리카 흙을 사용한 콘크리트는 일반 콘크리트 보다 압축강도가 대폭으로 향상되어 콘크리트의 고강도화에 필수적으로 인식되고 있다. 그러나 실리카 흙은

[†] 2011년 12월 12일 접수, 2012년 2월 15일 1차수정

2012년 3월 27일 수리

*E-mail: asahi00@jbnu.ac.kr

고가이프로 경제성이 약점으로 지적되고 있다.^{1), 2)} 따라서 실리카 흙의 역학적 성능과 유사하면서 경제적인 혼화재의 필요성이 요구된 바 최근 들어 고령토에서 추출한 메타카올린에 대한 적용 및 연구가 주목을 받고 있다. 그러나 실리카 흙 및 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 대폭으로 증진되지만 이 둘 재료의 높은 분말도로 인하여 유동성이 저하되며 이를 개선하기 위해서는 플라이애시 등의 사용이 요구되는데 플라이애시를 사용할 경우 유동성은 향상되나 콘크리트의 응결 시간이 지연되고 초기강도의 발현이 늦어진다³⁾⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도 증진을 위하여 산업부산물인 실리카 흙 및 천연물질인 메타카올린을 사용하고 유동성의 증진을 위하여 국내 레미콘 제작 시에 많이 사용되는 이산화규소를 활용한 콘크리트를 제작하여 각 종 시험을 통해 이에 대한 특성을 규명하였다.

2. 사용재료 및 시험

2.1. 시험 개요

본 연구에서는 기존 연구결과를 참고하여 실리카 흙(SF) 및 메타카올린(MK)의 사용량을 시멘트 중량의 5%, 10%로 하였고 이산화규소(SD)의 경우 경제성 등을 고려하여 실제 현장 레미콘에서의 사용량인 5%로 일정

하게 하였다²⁾⁵⁾. 따라서 이러한 내용을 고려한 총 6종류의 콘크리트 시험체를 제작하여 슬럼프, 압축강도, XRD 분석, 건조수축 길이변화 및 동결융해저항성 시험 등을 실시하였다.

2.2. 주요 사용재료 및 배합

2.2.1 주요 사용재료

본 연구에서 사용한 혼화재는 실리카 흙, 메타카올린 및 이산화규소로서 이 둘 재료의 특성 및 형상을 다음의 Table 1 및 Fig. 1~3에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트이며 이 둘 혼화재들이 시멘트 보다 SiO_2 의 함량이 높았으며 특히 실리카 흙과 메타카올린의 경우 시멘트에 비해서 비표면적이 약 45배~60배 정도 높았는데 이로부터 콘크리트 조직을 치밀화 시켜 압축강도가 향상됨을 알 수 있다²⁾.

2.2.2 배합

다음의 Table 2에 본 연구에서 제작한 콘크리트의 배합을 나타내고 있으며 콘크리트의 설계강도(f_{ck})는 40 MPa로 하였다.

2.3. 시험

2.3.1 XRD 시험

본 시험에서 사용된 각 종 혼화재료가 시멘트와의 수

Table 1. Chemical compositions and properties of used materials

Kinds	Composition(%)						Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
Cement	21.4	5.1	2.99	64.0	1.6	3.0	3.15	3,360
Silica fume	90.0	1.5	3.0	2.0	0.3	3.0	2.33	204,700
Metakaolin	52.1	45.3	0.60	0.05	0.19	---	2.50	150,000
Silicon dioxide	96.0	2.0	1.0	1.0	1.0	---	2.65	3,500

Fig. 1. Silica fume.

Fig. 2. Metakaolin.

Fig. 3. Silicon dioxide.

Table 2. Mix design of used concrete

Specimen	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)						
			W	C	G	S	SF	MK	SD
SF5	37.3	44.6	178	427	914	751	23	-	-
SF10			178	405	914	751	45	-	-
MK5			178	427	914	751	-	23	-
MK10			178	405	914	751	-	45	-
MK5SD5			178	427	914	751	-	23	23
MK10SD5			178	405	914	751	-	45	23

*SF5 : containing of silica fume (5%)

**MK10 : containing of metakaolin (10%)

***MK5SD5 : containing of metakaolin (5%) and silicon dioxide (5%)

화반응에 미치는 영향을 검토하기 위하여 50 × 50 × 50 mm 시험체를 제작하여 21 ± 3°C 온도의 수중에서 양생한 후 재령 28일에 XRD 분석을 시행하였다.

2.3.2 압축강도 시험

KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법에 따라 $\Phi 100 \times 200$ mm의 원주형 시험체를 제작하여 수중 양생 후 재령 7일, 14일 및 28일에서 압축강도를 측정하였다.

2.3.3 건조수축 길이변화 시험

KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 건조수축 길이 변화 시험 방법에 따라 100 × 100 × 400 mm 시험체를 제작하여 1주간의 수중양생 후 8주간에 걸쳐 길이변화율을 측정하여 다음의 식 (1)을 이용하여 평가하였다.

$$\text{Variation ratio (\%)} = \frac{X_i - X_0}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, L_0 : 기준길이

X_0 : 기준으로 한 시점에서의 측정치

X_i : 계획 재령 시점에서의 측정치

2.3.4 동결융해 저항성 시험

KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법에 따라 기준동결 수중융해 방법으로 시험체의 동결융해 저항성을 평가하였다. 동결융해 사이클의 온도범위는 1사이클 기준으로 약 -18°C ~ 4°C의 범위이며 200사이클을 실시한 후 다음의 식 (2)와 같이 계산된 내구성지수를 이용하여 동결융해에 대한 저항성을

Fig. 4. Results of slump test.

실시하였다.

$$DF = \frac{P \times N}{M} \times 100 \quad (2)$$

여기서, DF : 시험체의 내구성 지수

M : 최종 사이클 수

P : 사이클에서의 상대 동탄성 계수

N : 소정의 최소값이 된 순간의 사이클 수

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 슬럼프 시험

본 연구에서 실시한 슬럼프 시험 결과를 Fig. 4에 나타내고 있다. 모든 시험체는 목표 슬럼프인 120 ± 20 mm를 만족하였으나 혼화재료인 실리카흄 및 메타카올린의

Fig. 5. Internal structure of silicon dioxide.

사용량이 증가함에 따라 유동성이 감소되고 있다. 이는 두 혼화재료의 비표면적의 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 시멘트에 비해 최대 60배 정도의 비표면적의 증가는 결합력의 강화를 유도하지만 초기 수화시의 물과의 접촉면적도 증가하며 이로부터 초기 유동성이 감소되는 것으로 판단된다. 한편, 이산화규소를 첨가한 경우, 유동성의 향상 효과가 나타났는데 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 이산화규소의 형상이 구형으로서 이로부터 볼베어링 효과가 나타난 것으로 판단된다.⁶⁾

3.2. XRD 분석

재령 28일에 측정된 각 시험체의 XRD 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 실리카 흙이나 메타카올린과 같은 포졸란계 재료의 메커니즘은 용출된 SiO_2 , Al_2O_3 와 같은 가용성분이 시멘트 구성 화합물인 C_3S , C_2S 등이 수화할 때 생성된 $Ca(OH)_2$ 와 서서히 반응하여 불용성 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이나 칼슘 알루미네이트 수화물(C-A-H)을 형성하여 콘크리트 내부 조직이 치밀하게 되는 것으로 그 반응식은 다음과 같다¹⁾.

결과로부터, 실리카 흙 및 메타카올린의 사용량이 증가할수록 수산화칼슘(C-H)의 결정피크는 감소하였으나 C-S-H 및 C-A-H의 결정피크는 증가하였다. 이러한 이유는 시멘트의 주요 성분인 CaO 를 구성하는 Ca^{2+} 가 H_2O 와 반응하여 C-H를 형성하고 생성된 C-H는 이 들 포졸란 재료의 성분 중 SiO_2 , Al_2O_3 와 포졸란 반응을 일으켜 C-S-H, C-A-H를 생성한 것으로 판단된다. 따라서 이렇게 다량 생성된 수화물질 등이 콘크리트 내부를 밀실하게 하여 콘크리트의 강도를 증가한 것으로 판단된다^{1),7)}.

Fig. 6. Results of XRD analysis.

3.3. 압축강도 시험

각 중 혼화재료를 혼입하여 제작한 콘크리트 시험체에 대하여 재령 7일, 14일 및 28일에 측정한 압축강도 시험결과를 다음의 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서 제작한 콘크리트의 설계강도는 38 MPa 이며, 시험결과, 압축강도는 $52 \sim 62 \text{ MPa}$ 정도로 나타나 모든 시험체에서 설계강도를 만족하였다. 압축강도는 재령의 증가에 따라 증진되었으며 초기재령인 7일에서는 메타카올린의 사용이, 표준재령인 28일에서는 실리카 흙의 사용이 좀 더 효과적이었는데 이는 메타카올린에 포함되어 있는 Al_2O_3 의 함유량이 실리카 흙 보다 높은 관계로 이로부터 초기에 생성된 C-A-H량의 증가가 초기강도를 향상시킨 것으로 판단된다⁷⁾.

한편, 이산화규소가 사용된 경우 약 9~12% 정도의 강도 향상이 나타났는데 이는 이산화규소의 충전성 및 포졸란 반응의 기여로 판단되며 이산화규소의 사용은 유동성의 증진 뿐만 아니라 강도 증진에 기여함을 알 수 있었다.

3.4. 건조수축 길이변화 시험

콘크리트는 습윤상태에서 팽창하고 건조하면 수축한다. 콘크리트를 수중에서 양생하면 $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 정도의 팽창성을 나타내고 물로 포화된 콘크리트 시험체를 완전히 건조시키면 $400 \sim 1000 \times 10^{-6}$ 정도 수축 하므로 콘크리트 시험체의 건조에 따른 길이 평가는 중요하다.⁷⁾

본 연구에서 실시한 건조수축 길이변화 시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 시험 결과, 모든 시험체는 수중 양생 후 측정한 경우 $126 \sim 202 \times 10^{-6}$ 정도의 팽창성을 나타내었고 건조한 후에는 $574 \sim 673 \times 10^{-6}$ 정도의 수축을 나타내었는데, 이는 정상적인 범위의 길이 변화율로서 혼화재의 사용에 따른 건조수축 길이변화 문제

는 없을 것으로 판단된다.

혼화재의 사용량이 증가함에 따라 건조수축은 다소 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 사용된 실리카 흙 및 메타카올린의 비표면적과 관계된 것으로 판단된다. 혼화재의 비표면적은 시멘트보다 크므로 접촉면적이 넓어 수화반응이 빠르므로 이로부터 건조수축량이 증가 되는 것으로 판단된다. 한편, 이산화규소를 첨가한 경우, 첨가하지 않은 경우보다 건조수축이 감소되었는데 이는 포졸란 반응을 활성화하여 경화체내에 모세관 공극을 막아 수분의 이동을 억제하므로 침투성이 감소한 것으로 판단된다⁸⁾.

3.5. 동결융해 저항성 시험

본 연구에서 제작된 콘크리트 시험체에 대한 동결융해 시험을 실시한 후 평가한 각 시험체의 내구성지수 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 결과에서 나타난바와 같이 모든 시험체에서 내구성지수는 200사이클을 실시한 결과, 70% 이상으로 나타내었는데 이는 KS 규정의 동결

Fig. 8. Results of drying shrinkage test.

Fig. 7. Results of compressive strength test.

Fig. 9. Results of freeze and thawing test.

용해에 대한 저항성의 기준인 60% 이상을 만족한 것으로, 혼화제의 첨가는 동결융해 저항성의 증진을 나타낼 수 있었다. 이는 혼화제의 첨가에 따른 포졸란 반응의 활성화 결과로부터 내부 공극이 충전되어 감소된 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. 실리카 흙 및 메타카올린을 사용한 경우 유동성이 감소하였으나 이산화규소를 첨가한 경우 유동성이 증진된 것으로 나타나 혼화제를 사용한 고강도 콘크리트의 유동성 증진에 효과적 일 것으로 판단된다.

2. 실리카 흙의 대체재로 메타카올린을 사용한 결과, 재령 28일의 압축강도 결과는 동등하였으며 초기강도는 오히려 높았다. 따라서 고강도 콘크리트의 혼화제로서 메타카올린의 사용은 효과적 일 것으로 판단된다.

3. 건조수축 길이변화 시험 결과, 혼화제의 사용량의 증가에 따라 건조수축 길이변화량은 증가하였으나 그 증가율이 일반 콘크리트의 허용범위내에 들어 혼화제의 사용이 건조수축 변화에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

4. 동결융해 저항성 시험 결과, 모든 시험체에서 내구성 지수가 KS 기준인 60% 이상으로 나타나 혼화제의 사용은 콘크리트의 동결융해에 대한 내구성 향상에 효과적임을 알았다.

5. 본 연구결과, 고강도 콘크리트의 제작에 실리카 흙을 대체한 메타카올린의 사용은 효과적 이었으며 유동성 증진 측면에서 사용한 이산화규소의 사용을 병용한다면 더욱 효과적 일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 2005 : *최신 콘크리트공학*.
2. 여동구, 2007 : *메타카올린을 사용한 고강도 콘크리트의 모세관 공극투성에 관한 연구*, 전북대학교 석사학위 논문.
3. J. Bai, S. Wild, J.A. Ware, B.B. Sabir, 2003 : *Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and flyash*, Advances in Engineering Software, Vol.34., No.1, pp.663-669.
4. 김용태, 안태호, 강범구, 이정률, 김병기, 2001 : *콘크리트 혼화제로서 메타카올린의 기초적인 특성 연구*, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp.281-286.
5. 김현권, 2009 : *이산화규소를 활용한 콘크리트 및 모르타르의 특성에 관한 연구*, 전북대학교 석사학위 논문.
6. S.Wild, J.M. Kaatib, A. Jones, 1996 : *Relative strength, pozzolanic activity, and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete*, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.10, pp.195-202.
7. 김남욱, 김학원, 배주성, 2010 : *메타카올린과 동슬래그를 활용한 콘크리트의 특성*, 한국자원리사이클링학회 논문집, 제19권 제1호, pp.13-20.
8. 한종원, 2010 : *메타카올린과 규사를 사용한 고성능 콘크리트 특성에 관한 연구*, 전북대학교 석사학위 논문.

金 南 旭

- 일본 북해도대학 대학원 토목공학과 공학박사
- 전북대학교 박사후 연구원 (Post Doc.)
- 청주대학교 토목공학과 전임강사
- 현재 전북대학교 공과대학 토목공학과 연구조교수

金 春 浩

- 경희대학교 대학원 토목공학과 공학박사
- 현재 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수