大韓土木學會論文集
第14卷 第4號 · 1994年 7月
pp. 783~794

構 造 工 學

고성능 콘크리트의 유동성 및 강도에 대한 혼화재의 영향에 관한 실험연구

Experimental Study on the Effects of Mineral Admixtures on the Fluidity and Strength Characteristics of High-Performance Concrete

오병환* · 엄주용** · 임동환** · 박상현*** · 차수원***
Oh, Byung Hwan · Um, Joo Yong · Lim, Dong Hwan · Park, Sang Hyun · Cha, Soo Won

Abstract

Recently, several failure cases of concrete structures during construction have been reported. The main reason for these failures is attributed to the poor quality of concrete during construction. It is, therefore, necessary to develop and use high quality concrete. The purpose of the present study is to explore the characteristics of superplasticized concrete, especially the effects of mineral admixtures on the fluidity and strength characteristics of high performance concrete. The mineral admixtures considered in the present study are fly ash, blast furnace slag and silica fume, respectively. The major test variables include the amount of these mineral admixtures, cement contents and water-cement ratios. The compressive strengths for various cases were measured and reported. Optimum contents of mineral admixtures for strength development were derived. The corrosion phenomena of reinforcements embedded in various concrete specimens have been also studied. The present study provides useful basis to apply high-performance concrete to actual structures.

요 지

근래에 들어 대형 구조물의 시공실패사례가 보고되고 있어 이에 대한 개선이 시급하게 요청되고 있다. 이러한 실패사례의 주요원인은 콘크리트의 품질문제이며 따라서 고품질 콘크리트의 개발과 사용이 절실히 필요하다. 콘크리트의 품질향상을 위한 방안으로 현재 주목받고 있는 것은 유동성의 확보와 함께 각기 다른 독특한 특성을 보이는, 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카 흄 등 혼화재의 혼입이다. 따라서, 본 연구에서는 슬럼프를 17±1 cm로 제어하여 기본적인 유동성을 확보한 콘크리트 배합에 대하여, 위의 혼화재들의 혼입률에 따른 역학적 특성과 내구적 특성을 고찰하여 보았다. 본 연구에서 고려한 주요 실험변수들로는 혼화재의 종류와 혼입률, 두 종류의 단위시멘트량과 물/시멘트비의 조합 등이다. 이들 실험변수들을 고려하여 14개 시리즈에 대한 포괄적인 실험을 수행하였으며, 각 혼화재 혼입량에 따른 재령별 압축강도 증진양상과 콘크리트내에 매립된 철근의 부식특성을 분석, 고찰하였다. 본 실험연구로부터 각 경우별 최적의 혼화재 혼입량과 성능을 도출하였으며 이것은 앞으로 고성능 콘크리트의 활용에 토대가 될 것으로 사료된다.

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연구원
*** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사

1. 序 論

최근 들어 새로운 혼화제와 혼화재의 개발은 이전보다 더 좋은 역학적 성질과 내구성을 가지며 좋은 워커빌리티를 보이는 콘크리트의 생산을 가능하게 하였다. 이러한 콘크리트를 고성능(고품질) 콘크리트(High-performance Concrete ; HPC)라 하는데, 이 고성능 콘크리트는 재료분리 없는 용이한 타설과 다짐, 향상된 장기의 역학적 성질, 조기의 고강도, 높은 인성, 체적의 안정성, 극심한 환경하에서의 장기 내구년한 등의 특성을 총칭하는 새로운 개념으로 떠오르고 있다. 현재 고성능 콘크리트에 대한 연구는 국가적인 규모로 세계 여러나라에서 수행되어지고 있는 실정이다.[1-4]

고성능 콘크리트는 보통의 콘크리트에서 일반적으로 사용되는 구성물과 보통의 배합, 타설, 양생만으로는 반복적으로 얻어질 수 없는, 바람직한 물성과 균일성을 갖는 콘크리트로 정의된다.[1-4]

고성능 콘크리트의 특성은 재료분리없는 용이한 타설과 다짐, 향상된 장기의 역학적 성질, 조기의 고강도, 높은 인성, 체적의 안정성 및 극심한 환경하에서의 장기 내구년한 등으로 설명할 수 있다. 따라서, 고성능 콘크리트는 고강도, 고내구성 및 고유동성을 확보한 콘크리트라 할 수 있는데, 미국에서는 고유동성과 고내구성을 갖는 고강도 콘크리트로, 일본에서는 시공오차로 생기는 성능저하에 대처하기 위해 시공시 다짐이 필요없는 고유동성을 갖는 콘크리트로 정의하여 그 개발이 추진되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 이러한 고성능 콘크리트를 개발하기 위하여 고성능 콘크리트에 대한 여러 혼화재들의 영향을 실험을 통하여 고찰하였다.

본 연구는 고성능 콘크리트에 대한 기초 연구로서 고유동화제에 의해 기본적으로 17±1 cm로 슬럼프를 제어한 콘크리트 배합에 대한 여러 혼화재들의 혼입률에 따른 역학적 특성과 내구적 특성을 고찰하였다.

본 연구에서 고려한 주요 실험변수들은 혼화재의 종류와 혼입률, 단위 시멘트량과 물/시멘트비의 조합 등으로서 이들 실험변수들에 의한 14개의 배합에 의해 제작된 시편들로부터 재령별 압축강도시험과 콘크리트내에 매립된 철근의 부식실험을 수행하였다. 이들 결과들을 분석함으로써 각 혼화재별 영향을 검토하였다.

이들 혼화재들을 사용함으로써, 콘크리트의 품질 향상이라는 성과 뿐 아니라 혼화재들이 산업부산물이라는 본래의 특성에서도 알 수 있듯이 경제성과 함께 환경적인 측면에서 오는 공해방지 혜택을 동시에 얻을 수 있는 좋은 면을 가지고 있다.[5-16]

2. 高性能(高品質) 콘크리트에 대한 혼화재 影響 實驗

2.1 실험 변수

단위 시멘트량과 w/c비는 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 물성에 커다란 영향을 미치는 변수들이다. 일반적으로 단위 시멘트량이 높아지고 w/c비가 낮아지면, 이에 따라 굳지 않은 콘크리트의 유동성은 떨어지나, 굳은 콘크리트의 역학적 특성이나 내구적 특성은 향상되는 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 실험에서는 단위 시멘트량과 w/c비의 조합을 변수로 하여서, N-배합과 H-배합으로 구분하였다. 여기서, N-배합은 단위 시멘트량이 380 kg/m^3이고 w/c비가 0.45인 배합을 나타내며, H-배합은 단위 시멘트량이 490 kg/m^3이고 w/c비가 0.32인 배합을 나타낸다.

혼화재는 본 실험의 중요한 변수인데, 본 실험에서 사용한 혼화재는 플라이 애쉬, 고로 슬래그 및 실리카 흄 등으로서 혼입률을 달리하여 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 혼화재의 혼입률은 플라이 애쉬와 고로 슬래그의 경우는 0%, 15%, 30%로, 실리카 흄의 경우는 0%, 7.5%, 15%로 하였다. 여기서, 혼입률은 시멘트 및 혼화재 복합재료에 대한 상대 중량 백분율을 의미한다.

염화물은 철근의 부식에 관련된 주된 인자로, 본 실험에서는 요즘 문제가 되고 있는 해사 사용에 관한 영향도 고려하고자 그 함량을 실험변수로 채택하였다. 일반적으로 염화물의 함량이 높을수록 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식도 더욱 많이 발생하게 된다.

본 실험에서는 염화물의 함량을 잔골재 중량에 대해서 상대적인 중량백분율을 0%, 0.8%, 1.6%로 하여서 실험하였다.

위의 각 실험변수에 따라 시편을 분류하면 Table 1과 같다.

Table 1 Types of specimens

시편기호	혼화재의 종류	혼화재 함량 (% of Cementitious Content)	w/c비 (water/cementious materials)	단위시멘트 (kg/m^3)
N-0-0	–	0	0.45	380
N-FA-15	Fly Ash	15	0.45	380
N-FA-30	Fly Ash	30	0.45	380
N-BS-15	Blast Furnace Slag	15	0.45	380
N-BS-30	Blast Furnace Slag	30	0.45	380
N-SF-7.5	Silica Fume	7.5	0.45	380
N-SF-15	Silica Fume	15	0.45	380
H-0-0	–	0	0.32	490
H-FA-15	Fly Ash	15	0.32	490
H-FA-30	Fly Ash	30	0.32	490
H-BS-15	Blast Furnace Slag	15	0.32	490
H-BS-30	Blast Furnace Slag	30	0.32	490
H-SF-7.5	Silica Fume	7.5	0.32	490
H-SF-15	Silica Fume	15	0.32	490

2.2 실험 재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내 S사의 제1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 잔골재로는 조립률이 2.71인 서울근교의 하천에서 채취된 비중 2.59, 흡수율 1.48%인 잔골재를 사용하였다. 굵은골재로는 최대 골재치수가 19 mm이고, 비중이 2.59이며, 흡수율이 1.63%인 골재를 사용하였다.

이와 함께, 본 실험에서는 주요 변수로 혼화재를 사용하였는데, 플라이 애쉬는 충남 보령의 화력 발전소에서 생산된 것을 사용하였고, 고로 슬래그는 포항 제철소에서 생산된 것을 사용하였으며, 이 고로 슬래그의 비표면적은 Blaine 투과법에 의해 측정한 결과 3,800 cm^2/g이었다. 또한, 실리카 흄은 북미에서 생산된 것을 사용하였다.

본 실험에서는 고유동성을 확보하기 위하여 고유동화제로서 BS 5075 및 ASTM C 494 TYPE A & F의 요구조건을 충족시키는 미국 G사의 Super20을 사용하였고, 동결융해 작용에 대한 적절한 저항성을 위하여 공기연행제로서 ASTM C 260과 C 233의 요구조건을 충족시키는 미국 G사의 것을 시멘트 중량의 0.05% 투여하였다.

2.3 배합설계

실험이 수행된 N-배합은 보통강도로서 단위 시멘트량이 380 kg/m^3이고 w/c비가 0.45인 배합을 나타내는데, 그 배합설계 내용을 Table 2에 제시하였다. 여기서, w/c의 c는 시멘트와 혼화재를 포함한 "cementitious material"로 표시하였다.

실험이 수행된 H-배합은 어느 정도 고강도 콘크리트로서 단위 시멘트량이 490 kg/m^3이고 w/c비가 0.32인 배합을 나타내는데, 그 배합설계 내용을 Table 3에 제시하였다.

2.4 실험의 수행

앞 절에서 이미 제시한 실험변수들에 따른 배합에 의하여 시편을 제작하였다. 각 배합에서 압축강도 시험을 위한 시편을 재령별(7일, 28일, 56일 및 91일)로 3개씩 도합 12개씩 제작하였다. 시편의 제작, 양생, 탈형 및 압축강도 시험은 KS F 2405, KS F 2423 및 KS F 2408 규정에 따라 실험을 수행하였다.

시편 제작시 유동성 평가를 위하여 KS F 2402 및 ASTM C 143에 의거한 슬럼프 시험을 수행하여 슬럼프를 측정함으로써 각 배합에서의 작업성을 조

Table 2. Mix-designs for N-mixtures

시편기호	시멘트 (kg/m^3)	혼화재 (kg/m^3)	물 (kg/m^3)	잔골재 (kg/m^3)	굵은골재 (kg/m^3)	공기량 (percent)
N-0-0	380	0	171	718.3	1077.5	3.1
N-FA-15	323	57	171	710.6	1065.9	2.5
N-FA-30	266	114	171	702.8	1054.3	2.8
N-BS-15	323	57	171	716.7	1075.1	3.5
N-BS-30	266	114	171	715.1	1072.6	2.1
N-SF-7.5	351.5	28.5	171	714.3	1071.4	3.2
N-SF-15	323	57	171	710.2	1065.4	3.5

Note: (1) w/c비: 0.45
(2) AEA 투여량: 시멘트 중량의 0.05%
(3) 고유동화제(Super20)투여량: 슬럼프치가 17±1 cm이 되도록 투여

Table 3. Mix-designs for H-mixtures

시편기호	시멘트 (kg/m^3)	혼화재 (kg/m^3)	물 (kg/m^3)	잔골재 (kg/m^3)	굵은골재 (kg/m^3)	공기량 (percent)
H-0-0	490	0	156.8	696.8	1045.3	2.4
H-FA-15	416.5	73.5	156.8	686.9	1030.3	3.3
H-FA-30	343	147	156.8	676.9	1015.4	2.4
H-BS-15	416.5	73.5	156.8	694.8	1042.1	2.1
H-BS-30	343	147	156.8	692.7	1039.0	3.1
H-SF-7.5	453.3	36.8	156.8	691.6	1037.4	2.4
H-SF-15	416.5	73.5	156.8	686.4	1029.7	2.9

Note: (1) w/c비: 0.32
(2) AEA 투여량: 시멘트 중량의 0.05%
(3) super20 투여량: 슬럼프 17±1 cm이 되도록 투여

사하였다. 다음으로 KS F 2421, ASTM C 231 및 ASTM C 457 규정에 따른 방법으로 공기량을 측정하여 동결융해 저항성을 평가하기 위한 기준으로 삼았다.

제작된 시편은 23℃로 유지한 수중에서 표준양생하였다. 수조에서 양생한 시편은 각 재령에 도달하게 되면, 미국 MTS(Material Test System)사의 자동제어 만능 재료 시험기에 의해 압축강도 시험을 수행하였다.

본 연구의 목적이 고성능 콘크리트를 제조하기 위한 기초적 실험을 수행하는 것이므로, 콘크리트의 내구성 평가에 대한 적절한 실험은 반드시 필요하다. 이에 따라, 내구성 평가 실험중 콘크리트 내구성에 막대한 영향을 미치는 철근의 부식에 대한 폴라이 애쉬, 고로 슬래그 및 실리카 흄 등 혼화재의 영향 및 해사 사용으로 인한 문제도 동시에 고려하고자 철근 부식의 주요인자 중 하나인 염화물의 함량에 따른 영향을 동시에 고려하여 실험하였다.

앞 절에서 이미 고려한 변수들에 따른 배합에 의해 크기 5 cm×5 cm×25 cm의 보 공시체를 제작하여, D19 철근을 시편의 중앙에 매립하였다. 각 배합에 대해 염화물 함량이 잔골재중량에 대한 상대적 백분률로 0%, 0.8%, 1.6%인 시편을 각 3개씩 제작하였다. 부식 실험용 시편의 제작 양상을 Fig. 1에 나타내었다. 제작 1일이 지난 후 탈형하여 재령 28일까지 23℃인 수중에서 표준 양생하였다. 재령

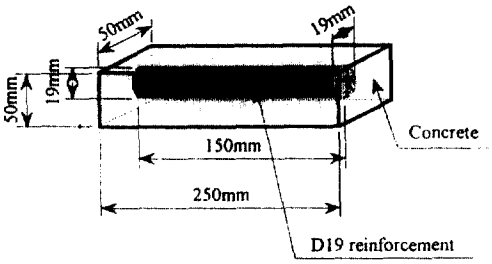

Fig. 1. Specimen of corrosion experiment.

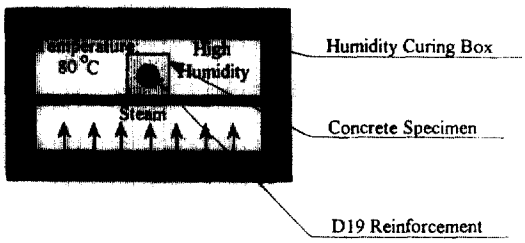

Fig. 2. Accelerating experiment of corrosion specimen

28일이 지난 후부터 공기중에 폭로시켰으며, 재령 56일까지는 습윤양생기(Humidity Curing Box)를 이용하여 매일 3시간씩 80℃의 온도로 고온고습을 가하여 부식에 위해한 환경을 조성하여, 철근의 부식을 촉진시켰다. 이러한 습윤양생기에 의한 모식도가 Fig. 2에 제시되었다. 재령 56일 이후부터는 촉진 시킴없이 재령 91일까지 자연폭로 시켰다. 재령 91일 경과후 시편에서 콘크리트를 제거하여 철근을 꺼낸후 묽은 황산으로 부식생성물을 녹여서 제거하였다. 이후 철근의 부식정도를 분석하였는데, 부식정도의 측정방법으로 부식면적율, 중량감소율, 부식도, 침식도 등이 있다. 이중 중량감소율에 의한 부식의 측정은 정량적인 분석이 가능하므로 본 연구에서는 이 방법을 채택하여 측정하였는데, 이 중량감소율(WLR ; Weight Loss Ratio)에 대한 식은 다음과 같다.

$$WLR(\%) = \frac{\text{부식전의 중량} - \text{부식생성물의 제거후 중량}}{\text{부식전의 중량}} \times 100$$

3. 實驗結果 및 分析

3.1 유동학적 특성에 대한 결과 및 분석

Table 4. Dosages of superplasticizer for 17± 1 cm slump control (% of Cementitious Content)

Specimen Type	Dosage (% of Cementitious Content)	Relative Dosage for Zero Mineral Admixture (%)
N-0-0	0.90	100.00
N-FA-15	0.85	94.44
N-FA-30	0.70	77.78
N-BS-15	0.75	83.33
N-BS-30	0.65	72.22
N-SF-7.5	1.10	122.22
N-SF-15	1.70	188.89
H-0-0	1.00	100.00
H-FA-15	0.90	90.00
H-FA-30	1.30	130.00
H-BS-15	1.10	110.00
H-BS-30	1.10	110.00
H-SF-7.5	1.40	140.00
H-SF-15	2.15	215.00

본 실험에서 제작된 시편은 기본적인 유동성을 발현시키고자 슬럼프를 17± 1 cm가 되도록 조절하여 배합하였다. 본 실험에서는 계획된 슬럼프를 얻기 위해 배합시 고유동화제를 사용하였으며 시편제작시에 목적한 슬럼프를 얻는데 소요된 고유동화제의 투여량을 조사하였다. 본 실험에서 측정된 슬럼프 17± 1 cm를 유지하는데 소요된 고유동화제의 투여량은 Table 4에 제시하였다. 이들의 분석결과를 그림으로 표시한 것이 Fig. 3(a)~3(f)와 같이 나타나 있다.

3.1.1 플라이 애쉬의 혼입률에 따른 고유동화제의 투여량 변화

본 실험결과에 따르면 플라이 애쉬는 N-배합에 대해서는 혼입률이 증가함에 따라 고유동화제의 투여량이 감소하는 경향을 보였다. H-배합에서 플라이 애쉬의 혼입률이 15%일 때는 플라이 애쉬를 혼입하지 않은 배합에 비하여 고유동화제의 투여량이 감소하였다. 그러나 같은 H-배합에서 플라이 애쉬의 혼입률이 30%일 경우에는 고유동화제의 투여량이 증가하였다.

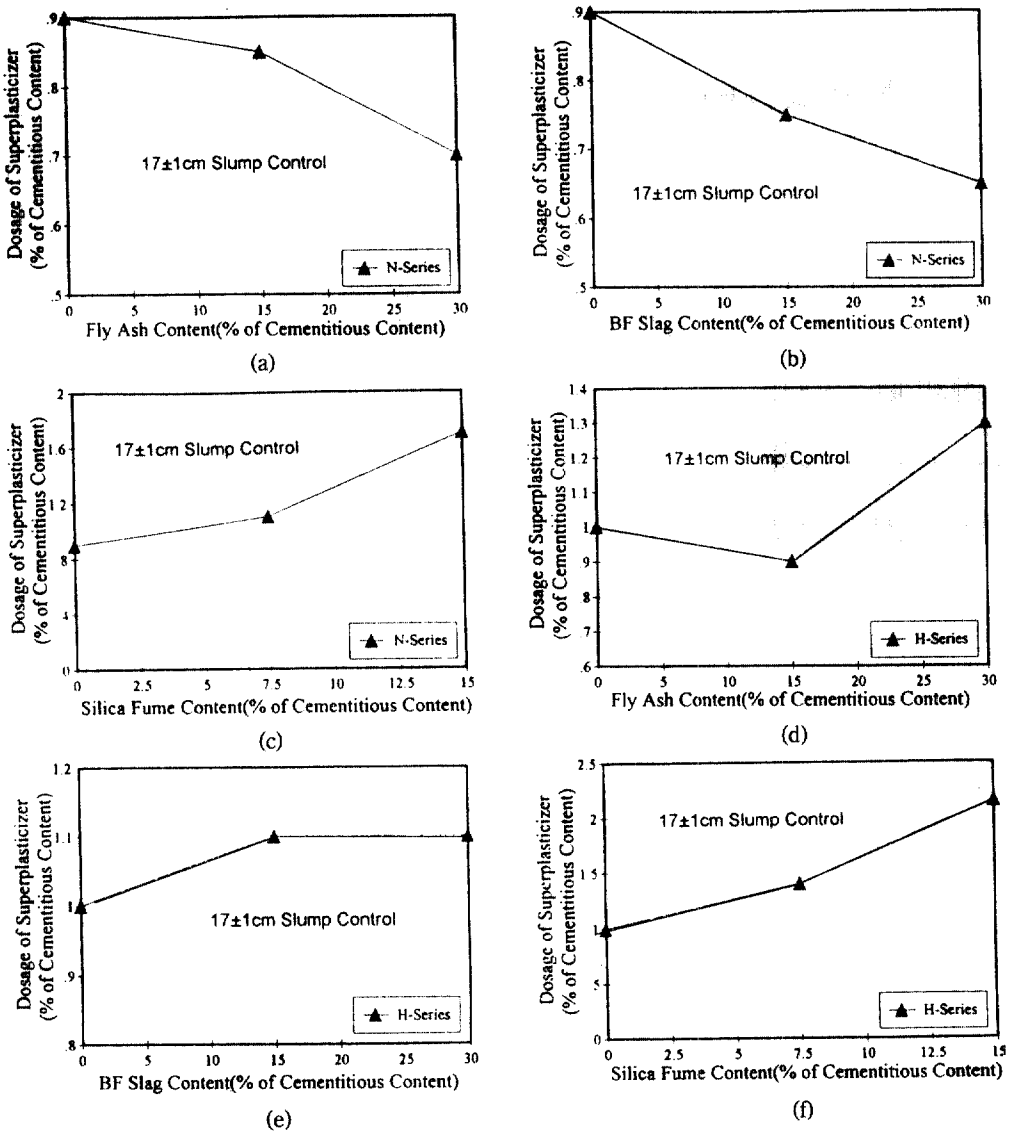

Fig. 3. (a) Dosages of superplasticizer according to fly ash contents(N-mixtures)
(b) Dosages of superplasticizer according to blast furnace slag contents(N-mixtures)
(c) Dosages of superplasticizer according to silica fume contents(N-mixtures)
(d) Dosages of superplasticizer according to fly ash contents(H-mixtures)
(e) Dosages of superplasticizer according to blast furnace slag contents(H-mixtures)
(f) Dosages of superplasticizer according to silica fume contents(H-mixtures)

본 실험결과에 의하면 N-배합에서는 플라이 애쉬의 혼입은 고유동화제의 투여량을 감소시킴으로써 결과적으로 플라이 애쉬의 혼입은 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 증진시키는 효과가 있다고 할 수 있다. 그리고 H-배합에서는 플라이 애쉬의 혼입률이 15%일 때는 플라이 애쉬가 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티, 즉 유동성을 향상시켜 준다는 기존의 연구결과와 일치하나 플라이 애쉬의 혼입률이 30%일 경우는 유동성이 더이상 좋아지지 않고 오히려 감소할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 기존의 연구

결과[7]와도 유사한 경향을 보이고 있다.

3.1.2 고로 슬래그의 혼입률에 따른 고유동화제의 투여량 변화

본 실험결과에 따르면 고로 슬래그는 N-배합에 대해서는 혼입률이 증가함에 따라 고유동화제의 투여량이 감소하는 경향을 보였다. H-배합에서는 고로 슬래그를 혼입하였을 경우 고유동화제의 투여량이 증가하였다. 그러나 고로 슬래그 혼입률이 15%일 때와 30%일 때의 고유동화제 투여량의 변화는 거의 없었다.

본 실험결과에 의하면 N-배합에서는 고로 슬래그의 혼입은 고유동화제의 투여량을 감소시킴으로써 결론적으로 고로 슬래그의 혼입은 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 증진시키는 효과가 있다고 할 수 있다. 그리고 H-배합에서는 고로 슬래그를 혼입하였을 경우 이를 혼입하지 않은 배합보다 유동성이 감소하였으며 고로 슬래그 혼입률의 변화는 고유동화제의 투여량에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고로 슬래그 입자의 비표면적이 3,800 cm^2/g으로 시멘트 입자의 비표면적과 비슷한 미분말이기 때문인 것으로 사료된다.

3.1.3 실리카 흄의 혼입률에 따른 고유동화제의 투여량 변화

실리카 흄의 혼입률에 따른 고유동화제의 투여량 실험 결과에 따르면 실리카 흄의 경우에는 실리카 흄의 혼입률이 증가함에 따라 N-배합과 H-배합에 대해서 모두 고유동화제의 투여량이 상당히 증가하는 경향을 보여주었다. 이것은 실리카 흄의 혼입으로 유동성이 저하됨을 의미하며, 그 이유는 실리카 흄의 입자가 비표면적 200,000 cm^2/g 정도의 아주 고운 미분말이기 때문이며 이로 인해 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티를 저하시킨다는 기존의 연구결과[12-14]와 부합하는 것이다.

3.2 압축강도 시험의 결과 및 분석

본 실험에서는 실험시편의 재령 7일, 재령 28일, 재령 56일 및 재령 91일 압축강도 시험을 수행하였으며 시험결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. 시험시편의 갯수는 각 배합당 3개씩으로 하였으며, 그 평균값으로 압축강도를 정하였다. 또한, 이들의 분석결과를 Fig. 4(a)~4(f)와 같이 제시하였다. 이들 결과에서 H 배합의 콘크리트 강도가 예상수준보다 적게 측정되었는데 이것은 시멘트의 품질과 배합 등 재료상 요인에 기인한 것이 아닌가 사료된다. 특히, 시멘트가 저장기간이 길어 풍화된 것이 아닌가 사료되며, 이것은 실제 현장에서 시멘트와 골재의 품질이 콘크리트 강도에도 큰 영향을 미치게 됨을 시사하고 있다.

3.2.1 플라이 애쉬를 혼입한 시편의 압축강도 특성

본 실험결과에 따르면 플라이 애쉬를 혼입한 N-배합에 대해서는 재령 28일까지는 혼입률 15%와 30% 모두 혼입하지 않은 배합보다 압축강도 발현이 적으나, 56일 이후의 재령에서는 혼입률 15%인 배합의 경우 강도의 향상을 나타내어 기준배합보다 더 큰 압축강도를 보이기 시작하였으며 재령91일 강도는 더욱 증가함을 보여주고 있다. 혼입률 30%인 경우에는 초기강도가 많이 떨어지나 91일 강도는 기준배합에 거의 접근하고 있음을 알 수 있었다.

H-배합에서는 재령 56일까지는 혼입률 15%와 30% 모두 혼입하지 않은 배합보다 더 작은 압축강도를 보였으나 재령이 증가함에 따라 강도가 회복되고 있음을 보여주고 있다.

이로써, 플라이 애쉬를 혼입할 경우 초기강도보다는 장기강도의 증진이 기대됨을 알 수 있으며 각 시멘트량에 따라 적정의 플라이 애쉬 함량이 있음을 알 수 있다.

3.2.2 고로 슬래그를 혼입한 시편의 압축강도 특성

본 실험결과에 따르면 고로 슬래그 혼입시 N-배합에 대해서는 고로 슬래그를 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우보다 각 재령에서 더 큰 압축강도를 보였으며, 재령 28일을 제외하고는 혼입률 30%인 배합이 가장 큰 강도를 보였으나, 혼입률의 15%와 30%의 압축강도 차이는 크지 않았다.

H-배합에서는 고로 슬래그 15% 혼입한 경우가 가장 좋은 강도 발현을 보이고 있음을 알 수 있었다. 고로 슬래그도 장기강도 증진에 효과가 큼을 보여주고 있다.

3.2.3 실리카 흄을 혼입한 시편의 압축강도 특성

본 연구에서 실리카 흄을 혼입한 시편의 압축강도 시험결과에 따르면 실리카 흄을 혼입한 N-배합의 경우 재령 7일, 재령 28일, 재령 56일 및 재령 91일 압축강도는 실리카 흄을 혼입하지 않은 시편보다

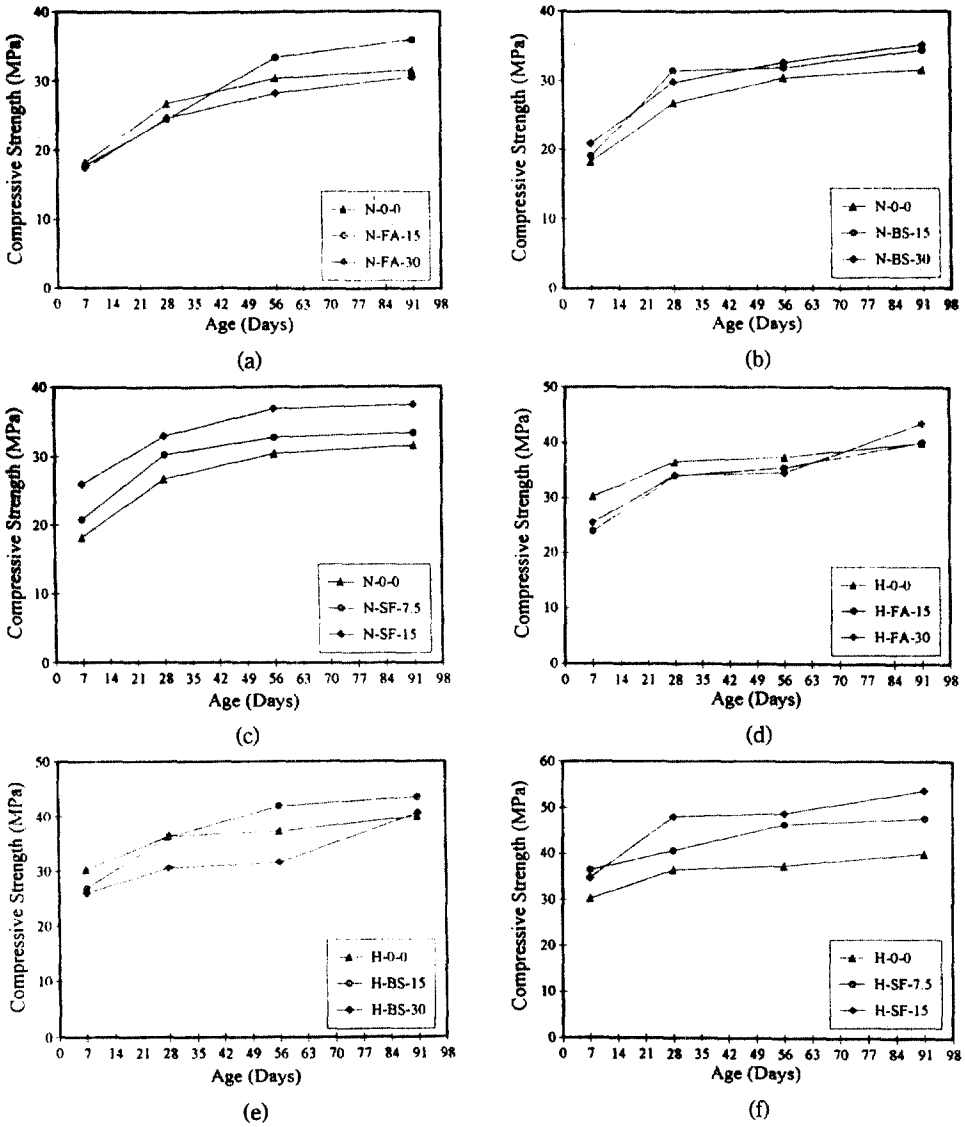

Fig. 4. (a) Compressive strengths according to age for fly ash mixtures(N-mixtures)
(b) Compressive strengths according to age for blast furnace slag mixtures(N-mixtures)
(c) Compressive strengths according to age for silica fume mixtures(N-mixtures)
(d) Compressive strengths according to age for fly ash mixtures(H-mixtures)
(e) Compressive strengths according to age for blast furnace slag mixtures(H-mixtures)
(f) Compressive strengths according to age for silica fume mixtures(H-mixtures)

훨씬 더 큰 압축강도를 보이고 있다.

H-배합의 경우도 재령 7일, 재령 28일, 재령 56일 및 재령 91일 압축강도에서 실리카 흄을 혼입한 배합이 실리카 흄을 혼입하지 않은 배합에 비하여 훨씬 더 큰 압축강도를 보인다.

따라서, 실리카 흄의 혼입은 압축강도 증진에 아주 큰 효과가 있음을 알 수 있으며 강도증진율도 15~35%로서 플라이 애쉬나 고로 슬래그를 혼입한 경우보다 강도증진율이 훨씬 좋음을 알 수 있다. 그리고, 실리카 흄 혼입률은 7.5%보다 15% 혼입한

Table 5. WLRs of reinforcements according to sodium chloride contents

염화물함량 / 시편기호	0%	0.8%	1.6%
N-0-0	0.000	0.726	0.862
N-FA-15	0.000	0.850	0.986
N-FA-30	0.000	0.766	1.034
N-BS-15	0.000	0.669	0.827
N-BS-30	0.000	0.736	0.992
N-SF-7.5	0.000	0.784	1.411
N-SF-15	0.000	0.890	1.394
H-0-0	0.000	0.645	0.935
H-FA-15	0.000	0.712	0.953
H-FA-30	0.000	0.674	0.726
H-BS-15	0.000	0.361	0.846
H-BS-30	0.000	0.635	0.798
H-SF-7.5	0.000	0.783	1.344
H-SF-15	0.000	0.751	1.418

Note: 염화물 함량은 잔골재의 중량에 대한 중량백분율

경우가 강도 발현이 더욱 좋게 나타났다. 실리카흄의 혼입으로 강도가 증진되는 이유는 실리카흄이 포졸란 활성반응을 활발히 일으키기 때문이며, 특히 입자가 시멘트보다 훨씬 적어 시멘트 입자 사이에 미세공극을 충진하기 때문이다.

3.3 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식 실험결과 및 분석

재령 91일이 경과한 후 촉진실험한 시편의 부식율을 중량감소율(WLR)로서 측정하였는데, 그 실험결과를 Table 5에 나타내었다. 실험시편의 갯수는 각 경우당 3개씩으로 하였으며, 그 평균값으로 부식율을 정하였다. 또한, 이들의 분석 결과를 Fig. 5 (a)~5(f)와 같이 그림으로 제시하였다.

3.3.1 플라이 애쉬를 혼입한 시편의 부식 특성

N-배합에 대한 본 연구에서 수행한 플라이 애쉬를 혼입한 시편의 부식실험 결과에 따르면 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우보다 더 부식이 많이 되었음을 알 수 있다. 염화물 함량 0.8%인 때에는 플라이 애쉬의 혼입률 15%인 배합이 가장 많이 부식되었으며, 염화물 함량 1.6%인 때에는 혼입률 30%인 배합이 가장 많이 부식되었다.

또한, H-배합에 대한 시편의 부식실험 결과에 따르면 염화물 함량 0.8%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 적게 부식되었으며, 플라이 애쉬의 혼입률 15%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. 이와 함께, 염화물 함량 1.6%인 때에는 플라이 애쉬의 혼입률 30%인 배합이 가장 적게 부식되었으며, 혼입률 15%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다.

이상의 결과를 통하여 플라이 애쉬를 혼입하게 되면 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식에 더 불리한 영향을 미치게 될 것으로 사료된다. 그러나, 본 연구는 인공염수로 배합한 콘크리트의 실험결과이므로 보통 배합수로 배합하여 양생한뒤 인공염수에 침지시킨 경우와는 다를수 있다.[5]

3.3.2 고로 슬래그를 혼입한 시편의 부식 특성

N-배합에 대한 본 연구에서 수행한 고로 슬래그를 혼입한 시편의 부식실험 결과에 따르면, 염화물 함량 0.8%인 때에는 고로 슬래그의 혼입률 15%인 배합이 가장 적게 부식되었으며, 혼입률 30%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. 또한, 염화물 함량 1.6%인 때에도 역시 같은 결과를 보이고 있다. 이와 함께, 고로 슬래그의 혼입률 15%인 배합은 혼입하지 않은 배합보다 더 적게 부식되었으며, 혼입률 30%인 배합은 더 많이 부식되었음을 알 수 있다.

또한, H-배합에 대한 시편의 부식실험 결과에 따르면 염화물 함량 0.8%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 많이 부식되었으며, 고로 슬래그의 혼입률 15%인 배합이 가장 적게 부식되었음을 알 수 있다. 이와 함께, 염화물 함량 1.6%인 때에는 고로 슬래그의 혼입률 30%인 배합이 가장 적게 부식되었으며, 혼입하지 않은 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. H-배합의 경우는 고로 슬래그를 혼입한 배합이 혼입하지 않은 배합보다 모든 염화물 함량에 대해서 더 적게 부식되었음을 알 수 있다.

전반적인 경향을 살펴보면, 고로 슬래그의 혼입률 15%인 배합이 혼입률 30%인 배합보다 더 적게 부식되었음을 알 수 있으며, 고로 슬래그를 혼입하게 되면 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식에 더 유리한 영향을 미치게 될 것으로 사료된다(다른 연구와의 비교).

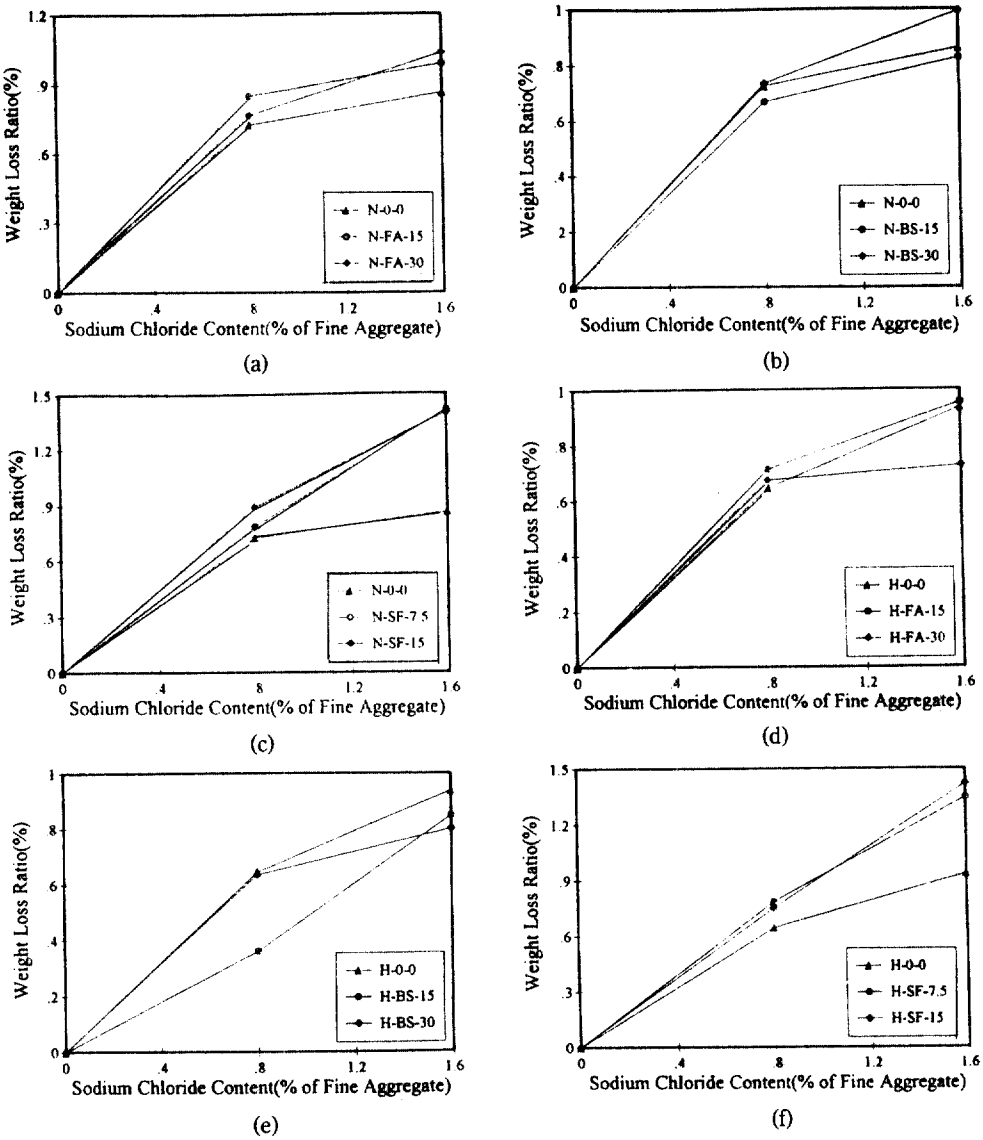

Fig. 5. (a) WLRs according to sodium chloride contents for fly ash mixtures(N-mixtures)
(b) WLRs according to sodium chloride contents for blast furnace slag mixtures(N-mixtures)
(c) WLRs according to sodium chloride contents for silica fume mixtures(N-mixtures)
(d) WLRs according to sodium chloride contents for fly ash mixtures(H-mixtures)
(e) WLRs according to sodium chloride contents for blast furnace slag mixtures(H-mixtures)
(f) WLRs according to sodium chloride contents for silica fume mixtures(H-mixtures)

3.3.3 실리카 흄을 혼입한 시편의 부식 특성

N-배합에 대한 본 연구에서 수행한 실리카 흄을 혼입한 시편의 부식실험 결과에 따르면, 염화물 함량 0.8%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 적게 부식되었으며, 실리카 흄의 혼입률 15%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. 또한, 염화물 함량 1.6%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 적게 부식되었으며, 실리카 흄의 혼입률 7.5%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. 이와 함께, 전반적으로 실리카 흄을 혼입한 배합이 혼입하지

않은 배합보다 훨씬 더 많이 부식되었음을 알 수 있다.

H-배합에 대한 시편의 부식실험 결과에 따르면, 염화물 함량 0.8%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 적게 부식되었으며, 실리카 흄의 혼입률 7.5%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다. 또한, 염화물 함량 1.6%인 때에는 혼입하지 않은 배합이 가장 적게 부식되었으며, 실리카 흄의 혼입률 15%인 배합이 가장 많이 부식되었음을 알 수 있다.

전반적으로 실리카 흄을 혼입한 배합이 혼입하지 않은 배합보다 더 많이 부식되었음을 알 수 있다. 그러나, 해수나 해사를 사용하지 않고 보통물로 배합하여 양생한 실리카 흄 콘크리트는 조직이 치밀하므로 인공염수에 침지하여도 부식 상황이 다를 것으로 예상된다. 종합적으로 검토할 때 인공염수로 배합한 콘크리트는 보통 배합수로 배합하여 양생한 후 인공염수에 침지한 시편의 부식상황과 다른 것으로 사료되며 이에 대한 좀더 면밀한 계속적인 연구가 필요하다.

4. 結 論

본 연구에서는 최근 들어 커다란 관심이 되고 있는 콘크리트의 고품질화와 고성능 콘크리트, 특히 유동성과 강도의 확보 그리고 내구성 확보를 위하여 필요한 혼화재의 혼입효과와 그 영향에 대하여 포괄적으로 실험연구를 수행하였다. 고려된 혼화재는 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카 흄 등이며 이들의 함량을 변화시켜 실험을 수행하였다. 또한, 단위 시멘트량과 물-시멘트비도 변화시켜 실험하였다. 본 연구결과 유동성에 있어서는 플라이 애쉬와 슬래그 혼입은 유동성을 증진시키나 실리카 흄의 혼입은 유동성을 저해하는 것으로 나타났으며 이것은 입자 크기와 모양에 따라 영향을 주기 때문으로 사료된다. 본 연구에서는 또한 각 혼화재의 혼입률별로 각 재령에 따른 강도 증진현상을 측정하였고, 내구성 제고 방안을 강구하기 위하여 각 혼화제별로 촉진 부식 실험을 수행하였다.

결론적으로 실리카 흄의 혼입은 유동성은 감소시키나 강도는 크게 증진시키는 효과가 있었으며, 유동성 감소는 고성능 유동화제의 사용으로 해결할수 있음을 보여주고 있다. 또한, 플라이 애쉬나 고로 슬래그 콘크리트는 초기 재령에서 강도 발현이 적으나 장기 재령에서 큰 강도 발현을 보여 적정량을 사용하는 경우 강도 증진에 효과가 있음을 알 수 있다. 부식특성으로는 이미 배합초기부터 콘크리트 내에 염화물이 존재하는 경우 슬래그는 부식억제효과가 있으나 플라이 애쉬나 실리카 흄은 부식억제에 도움을 주지 못함을 알 수 있다. 그러나, 염화물이 콘크리트 양생후에 침투하는 경우 양상이 매우 다를 것으로 사료된다. 왜냐하면, 실리카 흄 콘크리트는 조직이 치밀하여 수분과 염분 침투가 어렵기 때문이다. 따라서, 유동성, 강도, 내구성을 모두 만족하는 고성능 콘크리트를 만들기 위해서는 앞으로 계속적인 연구가 요망된다.

参考文献

1. 박상현, "고성능 콘크리트의 유동성 및 강도에 대한 혼화재의 영향에 관한 실험연구", 서울대학교 공학석사 학위논문, 61pages, 1994.
2. 오병환, 엄주용, "실리카 흄을 사용한 고강도 콘크리트의 역학적 특성과 최적배합연구", **콘크리트학회 논문집**, 제 1권 1호, 1989. 9, pp. 75-86.
3. Mehta, P.K. and Aitcin, P.C., "Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High-Strength Concrete", SP121-14, High-Strength Concrete, Second International Symposium, Berkeley, 1990, pp. 265-286.
4. Hanna, E., Luke, K., Perraton, D., and Aitcin, P.C., "Rheological Behavior of Portland Cement Pastes in the Presence of a Superplasticizer", *ACI SP-119*, 1989, pp. 171-188.
5. Mays, G., Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair, Protection, E & FN SPON, 270pages, 1992.
6. Neville, A.M., Properties of Concrete, 3rd Edition, Longman Scientific, London, 779pages, 1981.
7. Haque, M.N., Langan, B.W., and Ward, M.A., "High Fly Ash Concretes", *ACI Journal*, Jan.-Feb. 1984, pp. 54-60.
8. Roy, D.M., and Idorn, G.M., "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete", *ACI Journal*, Nov.-Dec. 1982, pp. 444-457.
9. Rasheeduzzafar, Al-Saadoun, S.S., and Al-Gahtani, A.S., "Reinforcement Corrosion-Resisting Characteristics of Silica Fume Blended-Cement Concrete", *ACI Materials Journal*, Jul.-Aug. 1992, pp.

337-344.
10. Tognon, G., and Cangiano, S., "Air Contained in Superplasticized Concretes", *ACI Journal,* Sep.-Oct. 1982, pp. 350-354.
11. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", *ACI Journal,* Jul.-Aug. 1984, pp. 364-411.
12. ACI Committee 212, "Guide for Use of Admixtures in Concrete", *ACI Journal,* Sep. 1991, pp. 646-676.
13. Detwiler, R.J., and Metha, P.K., " Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete." *ACI Material Journal,* Nov.-Dec. 1989, pp. 609-614.
14. Cong, X., Gong, S., Darwin, D., and McCabe, S.L., "Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar, and Concrete", *ACI Materials Journal,* Jul.-Aug. 1992, pp. 375-387.
15. ASTM, 1986. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" (ASTM C 39-86), 1990 Annual Book for ASTM Standards, V.4.02, pp. 20-24.
16. Metha, P.K., *Concrete:Structure, Properties,and Materials,* Prentice Hall, Inc., 450 pages.

(接受 : 1994. 3. 16)