

# 메타카올린을 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구

## A Study on the Strength Properties of Concrete Containing Meta-Kaolin

김진만<sup>\*</sup> 이상수<sup>\*\*</sup> 김동석<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Jin Man Lee, Sang Soo Kim, Dong Seok

### ABSTRACT

This study was performed to investigate the flow behavior of fresh concrete, strength properties, and durability properties on the chloride penetration resistance of hardened concrete containing Meta-Kaolin(MK) in the range from common strength to high strength to facilitate the use. The results are compared with properties of concrete containing Silca Fume(SF).

As a result, superplasticizer required in MK concrete was decreased by 8~28% compared to SF concrete with the same slump, but MK concrete became more sticky than SF concrete. It was also found that considering the strength, the optimal cement replacement ratio of MK was 15%, and MK had concrete durable and dense by decreasing the average pore diameter of concrete.

### 1. 서론

구조물이 고층화, 다양화되면서, 구조재료인 콘크리트에 대한 내구성 및 신뢰성 향상에 대한 요구가 증가하고 있어, 우수한 강도와 수밀성을 갖는 콘크리트가 더욱더 필요하게 되고 있다. 이에 따라, 콘크리트를 고품질화 하기 위한 방법의 하나로서 각종 혼화재의 사용에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다.

지금까지 연구된 대표적인 혼화재로는 플라이 애쉬, 고르 슬래그, 실리카 폼 등이 있고, 이러한 혼화재들은 각각의 특성이 요구되는 부위에 적용되어 왔다. 그러나, 콘크리트 성능에 우수한 효과를 가지면서도 경제적인 혼화재에 대한 요구가 증대함에 따라 새로이 주목받는 혼화재가 메타카올린이다. 메타카올린은 카올린을 고온에서 소성한 후, 급랭시키면 조직이 비정질화되면서 잠재수경성을 갖게 되며, 강도 및 내구성 개선에 우수한 효과를 발휘하기 때문에, 이미 외국에서는 이러한 메타카올린을 고 성능의 콘크리트를 제조하기 위한 실리카 폼의 대체재로 인식하여 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1),2)</sup>

이에, 본 연구에서는 일반강도에서 고강도범위에 걸쳐 실리카 폼과의 비교를 통하여, 국내산 메타카올린이 콘크리트의 유동성, 강도특성 및 염해에 대한 내구성 등에 미치는 효과에 대하여 검토하였다.

\* 정회원, 공주대학교 건축공학과 교수, 공박

\*\* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 선임연구원, 공박

\*\*\* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 선임연구원

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같이, 물-결합재비(W/B)를 일반적으로 일반강도 범위에서 고강도 범위에 이르는 4수준에서, 메타카올린(MK) 및 실리카 폼(SF)의 혼입률에 따른 굳지 않은 콘크리트의 유동특성, 경화 콘크리트의 강도특성 및 내구특성으로서 염소이온 확산계수를 비교 검토하였다. 시멘트에 대한 메타카올린의 혼입률은 0, 5, 10, 15, 20%이며, 실리카 폼의 혼입률은 그 동안 많은 연구가 수행된 결과에서 10% 이하가 많고, 특히 일본건축학회에서는 알칼리-플래크 반응을 고려해 15% 이하<sup>3)</sup>로 하고 있으므로, 본 연구에서는 5, 10, 15%를 대상으로 하였다.

표 1 실험계획

실험요인		수 준	측정항목	
혼화재	물-결합재비 (%wt)	40, 45, 50, 55	굳지 않은 콘크리트	슬럼프, 공기량
	종류	실리카 폼, 메타카올린		
	혼입률(%wt)	0, 5, 10, 15, (20)	경 화 콘크리트	압축/인장강도, 세공분포 염소이온 확산계수
목표 슬럼프치 (cm)		18±2.5		

굳지 않은 콘크리트의 유동특성은 목표 슬럼프치 18±2.5cm를 만족하기 위한 고성능감수제(SP)의 사용량으로 평가하였다. 굳은 콘크리트에서는 재령 7, 28, 56, 91(일)의 압축강도 및 재령 28일의 쪼갬 인장강도를 측정하여 혼화재 종류 및 W/B에 따른 콘크리트의 강도특성을 평가하였다. 또한, 염해에 대한 내구특성을 평가하기 위하여 재령 7, 28, 56, 91일의 염소이온 확산계수를 측정하였고, 물-결합재비 50%에 대하여 재령 7, 28일의 세공분포를 측정하여 공극구조를 검토하였다.

표 2 콘크리트 배합

표 2는 혼화재를 치환하지 않은 기준 콘크리트의 배합으로서, 수 차례의 시험배합 결과를 바탕으로 물-시멘트비 40~50%에서 단위수량 158kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 45.6~47.7%로 설정한 배합과 물-시멘트비 55%, 단위수량 164kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 47.8%인 배합을 선정하였다.

물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
		배합수	시멘트	잔 골재	굵은 골재
40	45.6	158	395	793	954
45	46.7	158	351	829	954
50	47.7	158	316	861	951
55	47.8	164	298	863	949

### 2.2 사용재료

실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 3에 나타난 바와 같다. 혼화재는 캐나다산의 실리카 폼 및 분말도 10,000cm<sup>2</sup>/g의 국내 A사의 메타카올린(MK)을 사용하였으며, 각각의 물리·화학적 성질은 표 4에 나타난 바와 같다.

사진 1, 2는 두 혼화재의 SEM(scanning electron microscopy) 촬영결과이다. 사진에서 보는 바와 같이 실리카 폼은 매끄러운 구형의 모양을 나타내는 반면, 국내산 메타카올린은 크기 및 표면형상이 상당히 불균질한 것으로 나타났다.

표 3 사용재료의 물리적 성질

시멘트	종류 : 보통포틀랜드 시멘트 (I 중) 비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm <sup>2</sup> /g	
골재	잔골재	종류 : 남양만산 세척사 비중 : 2.60, 조립률 : 2.60
	굵은골재	종류 : 용원산 부순골재, 최대치수 : 25mm 비중 : 2.63, 조립률 : 6.96
고성능AE 감수제	종류 : 나프탈렌계, 비중 : 1.20±0.02 (20℃) pH : 7.0±1.0 (20℃)	

표 4 혼화재의 물리·화학적 성질

구분	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	화학적성분(%)				
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
실리카 폼	2.20	200,000	2.10	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3
메타카올린	2.59	10,000	-	52.0	40.0	3.0	1.2	0.5

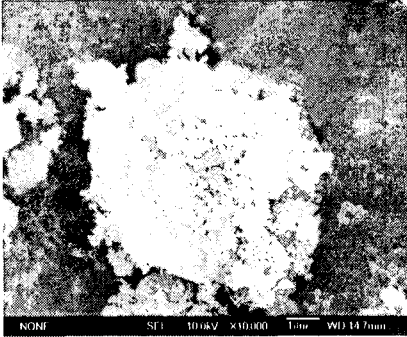


사진 1 메타카올린의 SEM 사진(×10000)

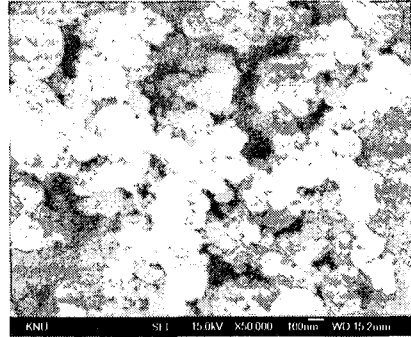


사진 2 실리카 폼의 SEM 사진(×50000)

### 2.3 실험항목 및 방법

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험은 KS F 2402 및 KS F 2421에 따라 실시하였고, 압축강도와 쪼갬인장강도는  $\phi 10 \times 20$ cm의 원주 공시체를 각각의 재령에서 UTM으로 측정하였다.

염소이온 확산시험 셀의 제작은 소요의 재령까지 수중 양생을 실시한  $\phi 10 \times 20$ cm 원주 공시체의 일정부위를 커터기를 사용하여 두께 50mm로 커팅한 후, 수분의 증발을 방지하기 위하여 랩으로 원주면을 보호하였다. 염소이온 확산시험은 Tang & Nilsson이 제안한 전기촉진시험방법<sup>4)</sup>을 참조하여 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, 3% NaCl 수용액을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때 0.2Ω의 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 8시간 동안 측정하였다.

염소이온의 침투깊이는 시험이 종료한 후 시험편을 할렬하여 0.1N AgNO<sub>3</sub>를 분무하였을 때 변색되는 부위를 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 식 1을 이용하여 염소이온 확산계수를 산출하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad \text{식 1)}$$

또한, 재령 7, 28일에서 W/B 50%, SF 혼입률 0, 10%, MK 혼입률 0, 10, 20%의 경화된 콘크리트 시험체에서 채취한 모르타르 시료에 대하여 Mercury Porosimeter(AUTOPORE II 9220, 미국 Micro Meripices사)를 사용하여 공극반경 0.002~1000μm 범위의 세공용적분포와 전세공용적을 측정하였다

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 굳지 않은 콘크리트의 유동특성

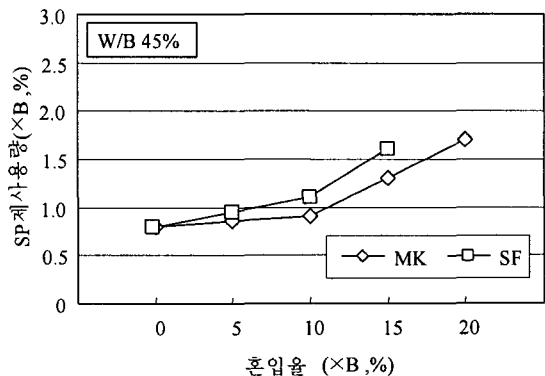


그림 1 혼화재 혼입률에 따른 SP제 사용량 (W/B 45%)

그림 1은 혼화재 혼입률에 따른 고성능AE감수제 사용량을 나타낸 것이다. 모든 물-결합재에 있어서 기준 콘크리트에 비해 두 종류의 혼화재 모두 혼입률이 증가할수록 목표슬럼프치를 만족시키기 위해 요구되는 고성능AE감수제의 사용량도 증가하는 것으로 나타났으며, 그 경향은 물-결합재비가 클수록 증가하였다.

또한, 고성능AE감수제의 사용량은 배합조건마다 약간 다르지만 혼입률이 동일한 경우, MK를 혼입한 콘크리트가 SF를 혼입한 콘크리트에 비해서 8~28% 적게 소요되었다. 이것은 실험에 사용된 MK의 분말도가 10,000cm<sup>2</sup>/g 정도로서 200,000cm<sup>2</sup>/g인 SF에 비하여 1/20 정도 낮아서 동일한 슬럼프를 갖기 위해 요구되는 단위수량이 적어지기 때문으로 생각된다.

그러나, 작업성 측면에서 관찰결과, SF를 혼입한 콘크리트는 혼입률이 증가하여도 양호한 작업성을 보였으나, MK를 혼입한 콘크리트는 혼입률 증가에 따라 점성이 크게 증가되어 작업성이 나쁘게 되었다. 이것은 사진 1, 2와 같은 입자의 형상에 기인하는 것으로 보인다. 따라서, MK의 혼입률이 증가하는 경우에는 유동성 향상을 위한 방법으로 고르 슬래그 등의 혼화재와 병용하는 삼성분계 배합을 검토해 볼 필요도 있을 것으로 사료된다. 공기량은 대부분의 배합에 있어서 목표값을 만족하고 있었다.

### 3.2 굳은 콘크리트의 강도특성

#### 3.2.1 압축강도

각 재령별 MK 및 SF의 혼입률에 따른 경화콘크리트의 강도발현성상은 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림에서 보듯이, 동일 물-결합재비에서 압축강도발현성상은 혼화재 종류에 상관없이 혼화재를 혼입함으로써, 모든 재령에서 기준 콘크리트에 비해 높은 강도발현을 나타내었다.

혼화재 혼입률에 상관없이 재령 7일의 강도는 모든 물-결합재비에서 MK를 혼입한 콘크리트가 SF를 혼입한 콘크리트와 유사한 발현성상을 보이고 있으나, 재령 7일에서 재령 28일 사이에서 SF를 혼입한 콘크리트가 급격한 강도발현을 보였다. 반면, MK를 혼입한 콘크리트는 강도발현이 기준 콘크리트보다는 크지만, SF를 혼입한 콘크리트보다는 상대적으로 낮았다. 그러나, 그 이후 재령에서의 발현정도는 두 혼화재를 혼입한 콘크리트 모두 유사하였다. 이러한 경향은 MK를 혼입한 콘크리트의 포졸란 반응은 재령 7일 정도에 활발한 반면, SF를 혼입한 콘크리트의 포졸란 반응은 재령 28일까지 활발히 진행된 결과로 생각된다.

한편, 혼입률에 따른 경향을 보면, MK를 혼입한 콘크리트는 모든 W/B 및 재령에서 혼입률 15%인

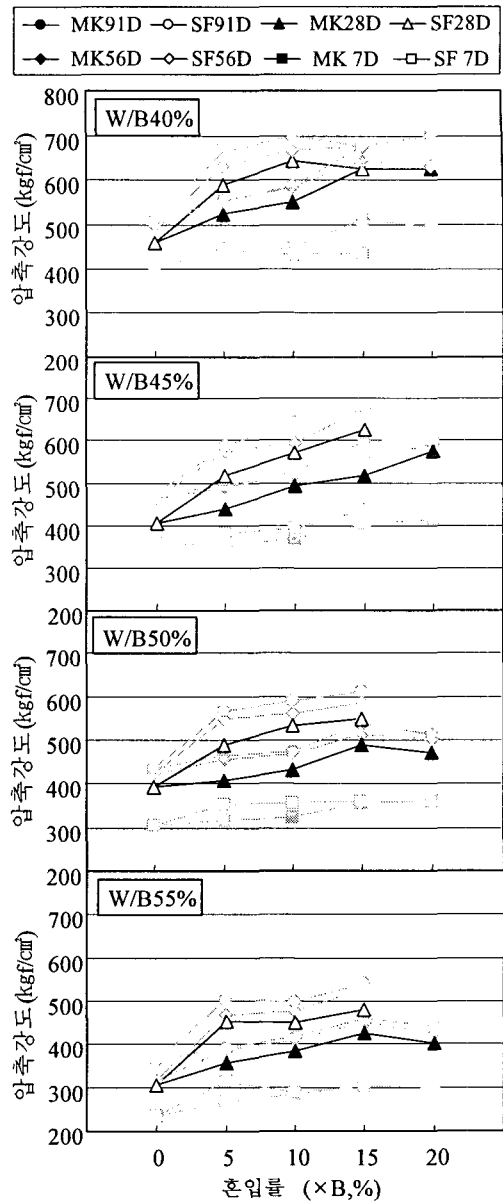


그림 2 W/B별 혼화재 혼입률에 따른 압축강도

경우가 가장 우수한 강도발현을 보이고 있어, 본 연구의 범위에서 강도측면만을 고려한 국내산 MK의 혼입률은 15%가 최적이라고 할 수 있다. 특히, 상대적으로 부배합인 물-결합재비 40%에서 MK 혼입률이 15%인 경우의 재령 28일 압축강도가 SF 혼입률 10%인 경우의 압축강도와 유사한 값을 보이고 있어, 부배합에서 MK의 SF 대체재로서의 가능성을 시사하는 것으로서, 향후 SF 대체재로서 MK의 폭넓은 활용성 검토를 위해서는 W/B 40% 미만의 부배합에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3.2.2 쪼갬인장강도

MK 및 SF를 혼입한 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도의 관계는 그림 3에 나타난 바와 같다. 그림에서 보듯이, 본 실험에서의 인장강도 측정치는 혼화재 종류에 관계없이 20.0~38.3kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로 나타났다. MK를 혼입한 콘크리트의 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비율은 1/13~1/20 범위인 반면, SF를 혼입한 콘크리트는 1/14~1/22의 범위로

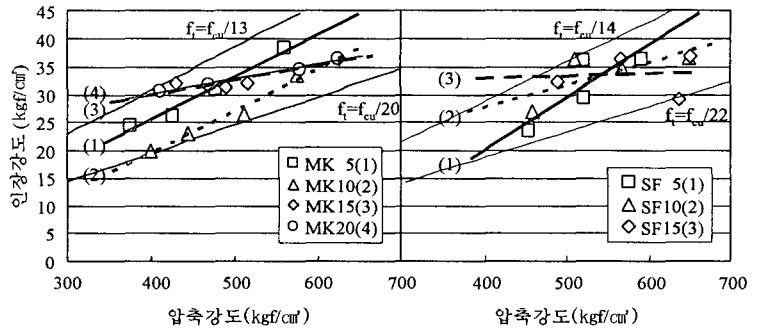


그림 3 혼화재 종류별 혼입률에 따른 압축강도와 인장강도의 관계

나타나고 있어, SF를 혼입한 콘크리트는 압축강도가 증가하여도 인장강도 증진은 MK에 비해 상대적으로 작은 경향으로 나타났다. 또한, 각 혼입률별 압축강도에 대한 인장강도 증진율을 나타내는 추세선의 기울기를 보면, MK 및 SF의 혼입률이 증가함에 따라 기울기가 완만하게 되고 있어 쪼갬인장강도의 증진율이 적게 되고 있는 경향이였다. 이것으로부터 혼화재 혼입률이 증가할수록 압축강도는 증진되지만, 인장강도의 증진에 미치는 영향은 적은 것을 알 수 있다.

### 3.3 압축강도와 염소이온 확산계수 및 세공분포

#### 3.3.1 압축강도와 염소이온 확산계수

그림 4는 압축강도와 염소이온 확산계수의 상관관계를 나타낸 것으로서, 측정재령, 혼화재 종류 및 혼입률에 따른 압축강도는 234~699kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 나타났으며, 동일재령에서 전기축진시험에 의해 구해진 염소이온 확산계수는  $4.50 \times 10^{-9}$  ~  $3.57 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sec의 범위로 나타났다.

그림에서 보듯이, 압축강도와 염소이온 확산계수 사이에는 반비례적으로 높은 선형의 상관성이 있었으며, 혼화재 종류에 따라서는 동일 압축강도에서 OPC < SF < MK의 순으로 염화물 침투저항성이 양호한 것으로 나타나, MK가 염해에 대한 내구성 증진에 효과적임을 보여주고 있다.

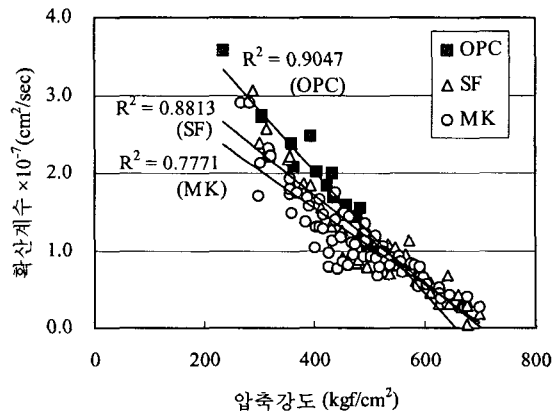


그림 4 압축강도와 염소이온 확산계수의 관계

#### 3.3.2 압축강도와 세공분포

그림 5는 혼화재 종류에 따른 재령 7일, 28일의  $1/\sqrt{\text{압축강도}}$ 와 평균 세공경의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 혼화재를 혼입한 콘크리트는 모두 기준콘크리트보다 평균 세공경이 작게 되

었다. 또한, 평균 세공경과 압축강도의 상관성이 높아서, 평균 세공경이 작게 되는 것이 수밀성이나 염소이온 침투저항성을 개선하는 하나의 요인이라고 할 수 있다. 그러나, 그림 6에서 보듯이 전세공 용적은 재령에 따라 감소하고 있어 양생기간에 크게 의존함을 보여주고 있지만, 혼화제 혼입에 따른 경향은 보이지 않았다.

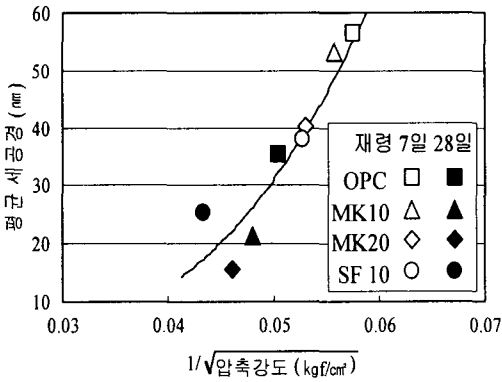


그림 5 재령별 혼화제 종류에 따른  $1/\sqrt{(\text{압축강도})}$ 와 평균 세공경의 관계

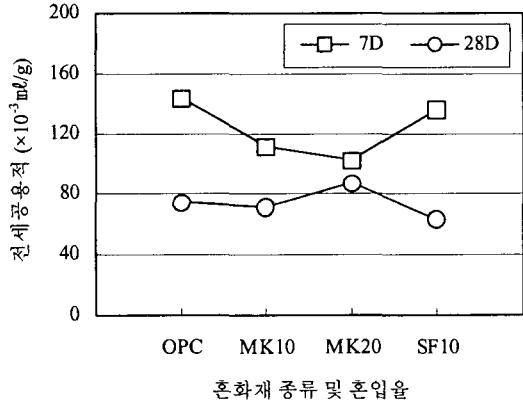


그림 6 재령별 혼화제 종류에 따른 전세공용적

#### 4. 결론

1. 모든 W/B에 있어서 기준 콘크리트에 비해 MK 및 SF 모두 혼입률이 증가할수록 동일 슬럼프를 만족시키기 위한 SP제의 사용량은 증가하였고, 혼입률이 동일한 경우, SF 혼입 콘크리트에 비해 MK 혼입 콘크리트가 8~28% 적게 소요되었으나, 혼입률 증가에 따라 점성이 크게 증가하였다.

2. 본 연구범위에서 MK 혼입률 15%인 경우가 가장 우수한 강도발현을 보였고, 특히 물-결합재비 40%에서는 재령 28일 압축강도가 SF 혼입률 10%인 경우의 압축강도와 유사한 값을 보이고 있어, 부배합에서 MK의 SF 대체재로서의 가능성을 보였으나, 쪼갬인장강도에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다.

3. 압축강도와 염소이온 확산계수 및 평균세공경 사이에는 높은 상관성이 있었으며, MK는 염화물 침투저항성이 우수하여 염해에 대한 내구성 증진에 효과적이었고, 콘크리트의 평균세공경을 작게하여 콘크리트의 수밀성을 개선하는 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

1. Caldarone M.A., Gruber K.A. and Burg R.G., "High-Reactivity MetaKaolin : A New Generation Mineral Admixture", Concrete International, Vol.16, No.11, 1994, pp.37~40.
2. D.M. Roy, P. Arjunan and M.R. Silsbee, "Effect of Silica Fume, Metakaolin, and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.31 Issue.12, 2001. 12, pp.1809~1813.
3. 日本建築学会, "シリカフェームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン", 1996.
4. L.Tang and L.-O.Nilsson, Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal, Jan.-Feb., 1992, pp.49~53.