철근콘크리트 구조물의 염소이온 침투 모델 개발

Development of Chloride Ingress Model in Reinforced Concrete Structures

구 현 본* 이 광 명**
Koo, Hyun Bon Lee, Kwang Myong

ABSTRACT

The degradation of reinforced concrete (RC) structures due to physical and chemical attacks has been a major issue in construction engineering. Deterioration of RC structures due to chloride attack followed by reinforcement corrosion is one of the serious problems. The objective of this study is to develop a form of mathematical model of chloride ingress into concrete. In order to overcome some limits of the previous approaches, a mathematical model of chloride ingress into concrete consisting of chloride solution intrusion through the capillary pore and chloride ion diffusion through the pore water was proposed. Moreover, the variability of diffusivity of chloride ion due to degree of hydration of concrete, relative humidity in pore, exposure condition, and variation of chloride binding was considered in the chloride ingress model.

1. 서론

현재까지 수행된 여러 현장 조사 및 연구 결과, 대부분의 철근콘크리트 구조물은 완공 후 시간이 지남에 따라 다양한 요인의 단독 또는 복합적인 영향에 의해 지속적인 내구적 열화 현상을 겪는 것으로 보고되고 있다. 이러한 열화 현상은 장기적인 측면에서 구조물의 성능을 저하시켜 목표수명 이전에 안정성 및 사용성에 심각한 문제를 야기시키며, 최악의 경우 구조물의 붕괴까지 유발할 수 있다. 이에 따라 현재 건설 분야 전반에 걸쳐 각 단계별 특성과 적용성을 고려한 열화방지 및 성능향상 대책에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이를 위해서는 먼저 철근콘크리트 구조물의 발생 가능한 열화 현상을 규명하고, 그 진행 상황을 예측하여 해당 구조물의 사용수명을 정량적으로 평가할 수 있는 시스템이 구축되어야 한다. 일반적으로 지금까지 알려진 철근콘크리트 구조물의 여러 열화 요인 중에서도 염해는 그 열화 정도나 발생 빈도면에서 기타 다른 열화 요인에 비해 상대적으로 매우 심각 열화 현상으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이를 연구대상으로 하여 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 메카니즘과 이에 영향을 미치는 주요 인자들의 간섭효과를 모델링하고, 정립된 모델을 근거로 염소이온 침투 현상을 해석하기 위한 프로그램을 개발하였다.

2. 기존 연구 현황

연구 초기에 Tuutti[1]는 콘크리트 내로의 염소이온의 침투거동을 오직 재료 내부의 공극수를 통한 이온 확산만으로 정의한 모델을 제시하였다. 이 모델은 염해 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 염소이온 침투 거동을 근사적으로 모사하는 기본 모델로서, 이후 여러 연구자들은 이 모델을 기본으로한 다양한 형태의 수정 모델 및 평가 방법을 제안하였다. 그러나 실제로 염소이온의 침투 현상은 공극수를 통한 염소이온 확산뿐만 아니라 비포화된 공극을 통한 염수의 직접적인 침투에 의해서도 발생할 수 있다. 이러한 사실에 근거하여 Saetta et al.[2]와 Nagesh와 Bishwajit[3]는 염소이온의 침투 메카니즘을 공극수를 통한 염소이온의 확산과 더불어 이송 또는 확산 현상에 의한 염수 침투로 정의하여 고려한 수정 모델을 제안하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 연구원
** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

또한 염소이온 침투 거동에 영향을 미치는 주요 영향 인자는 재령, 온도, 상대습도인 것으로 알려져 있으며, 이들 영향인자의 간섭 효과와 관련하여, Saetta et al.[2]와 Nagesh와 Bishwajit[3]는 콘크리트의 재령과 상대습도의 영향을 Bazant[4]의 제안식으로, 온도의 영향을 Arrhenius Type의 식으로 주요 인자의 영향을 고려하였으며, Hansen과 Saouma[5]는 재령과 물-시멘트비가 콘크리트의 확산 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 국지적 일조량에 따른 노출 온도차가 염소이온의 확산 속도에 미치는 영향을 모델에 반영하였다. 이 외에도 Maage et al.[6]는 성숙도에 따른 콘크리트 확산 특성의 변동성을 확산계수와 재령과의 선형관계로 간주한 평가 방법을 제안하였으며, Amey et al.[7]는 구조물의 위치에 따라 달라지는 노출 환경 특성을 고려하여 이에 따른 사용수명 차이를 보여주었다.

그러나 지금까지 해양 환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 염소이온 침투 현상 및 사용수명 예측을 위해 다양한 시도가 수행되고 왔으나 각 연구자에 따라 제안된 모델이 다소 상이하며, 많은 가정과 한계를 포함하고 있어 실제 구조물의 사용수명을 평가하는 데에 어려움이 따르고 있는 실정이다.

3. 염소이온 침투 모델의 제안

3.1 모델의 개요

지금까지 연구 결과, 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 현상은 실제로 포화된 공극을 통한 염소이온 확산뿐만 아니라 비포화된 공극을 통한 염수의 직접적인 침투에 의해서도 발생 가능하다.

또한 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 현상은 등방성 균질 재료인 재료 특성상에 따라 재료 내부의 조성에 따른 영향은 받지 않으나, Fig. 1에서 보는 바와 같이 재료의 미세 공극의 형상과 분포, 수분 상태와 같은 콘크리트 재료의 물리적 특성의 영향은 비교적 크게 받으며, 이러한 재료 특성은 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 재령, 재료 내·외부 온도 및 상대습도 등에 따라 크게 좌우되는 것으로 보고되고 있다.

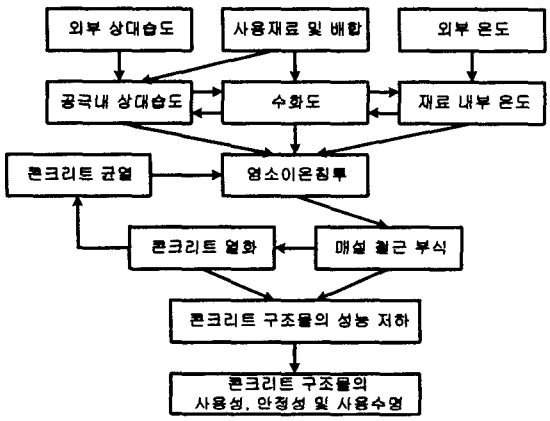

Fig. 1 염소이온 침투 모델의 흐름도

따라서 본 연구에서는 콘크리트로의 염소이온 침투 메카니즘을 공극수내로의 염소이온의 확산 현상과 모세관 공극을 통한 염수의 침투 현상으로 규정하여 염소이온 침투 모델을 정립하고, 이러한 콘크리트 재료의 물리적 변화가 염소이온 침투 현상에 미치는 영향을 콘크리트의 수화도 및 수분 침투 모델을 통해 모사하였다.

3.2 수화도 모델

본 연구에서는 콘크리트의 수화도 α_c를 모사하기 위하여 다음과 같이 Byfors[8]가 제안한 모델을 사용하였다.

$$\alpha_c = \exp\left(-\lambda_1\left(\ln\left(1+\frac{t_{eq}}{t_1}\right)\right)\right)^{-k_1} \tag{1}$$

단, $$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{W/C} \beta_W \, dt \tag{2}$$

$$\beta_T = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{273+T_o}-\frac{1}{273+T}\right)\right] \tag{3}$$

$$\beta_{W/C} = \left(\frac{\alpha_{c,\max}-\alpha_c}{\alpha_{c,\max}}\right)^r \tag{4}$$

$$\beta_W = \frac{A_{wat}(\alpha_c)}{A_{tot}(\alpha_c)} = \frac{\Phi_{wat}(\alpha_c) - \Phi_o}{\Phi_{\max}(\alpha_c) - \Phi_o} \frac{\Phi_{\max}(\alpha_c)}{\Phi_{wat}(\alpha_c)} \tag{5}$$

여기서, t_{eq}는 콘크리트의 등가 재령, $\beta_T, \beta_{W/C}, \beta_W$는 온도, 수분량, 수분 분포가 수화 반응에 미치는 영향을 고려한 계수, λ_1, t_1, k_1은 재료 상수이다. 또한 E는 활성화 에너지 (J/mol), R은 기체상수, T_o는 기준 온도 (23℃), T는 노출 온도 (℃)이며, $\alpha_{c,\max}$는 콘크리트의 최대 수화도, $A_{tot}(\alpha_c)$와 $A_{wat}(\alpha_c)$는 수화도 α_c에서 전체 및 수분으로 완전히 채워져 있는 모세관 공극벽의 면적, $\Phi_{\max}(\alpha_c)$는 모세관 공극의 최대 직경, $\Phi_{wat}(\alpha_c)$는 모세관 공극 중 물로 채워져 있는 공극의 최대 직경, Φ_o는 모세관 공극의 최소 직경(0.002μm)을 나타낸다.

3.3 수분 침투 모델

일반적으로 콘크리트내의 수분은 수화 반응이 진행됨에 따라 재료 내에서 다음과 같은 형태로 존재하게 된다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial t} + \frac{\partial W_n}{\partial t} \tag{6}$$

여기서, W는 콘크리트 단위 체적당 총수분량, W_e와 W_n은 각각 콘크리트 단위 체적당 증발 가능한 수분량과 수화 반응에 의해 화학적으로 구속된 수분량을 나타낸다.

대기압 상태에서 콘크리트의 수분 침투 현상은 포화 점성 흐름 현상을 제외한 증기 상태 수분의 확산 메카니즘과 모세관 공극을 통한 액체 상태 수분의 이송 메카니즘의 복합 작용에 의한 것으로 간주하며 이에 따라 재료내부의 증발 가능한 수분의 플럭스는 다음과 같이 상대습도의 함수로 나타낼 수 있다.[9,10,11]

$$J_m = -D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad \text{단, } D_\varphi = D_{60\%} + (D_{100\%} - D_{60\%}) \left(\frac{\varphi - 0.6}{0.4} \right)^k \tag{7}$$

여기서, J_m은 수분의 플럭스, x는 콘크리트 표면으로부터의 임의 깊이, φ는 콘크리트의 공극내 상대습도이며, D_φ는 상대습도에 의해 결정되는 수분 전달 계수, $D_{60\%}$와 $D_{100\%}$는 각각 상대습도 60%와 100%에서의 수분 전달 계수이며, k는 물-시멘트비에 따라 결정되는 상수를 나타낸다.

결국 콘크리트로의 수분 침투 모델은 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial \varphi_s}{\partial t} \tag{8}$$

여기서, k는 $\partial \varphi / \partial W_e$로서 상대습도에 따른 콘크리트 desorption isotherm 기울기의 역수이며, $\partial \varphi_s / \partial t$는 수화도에 따른 콘크리트의 자가 건조 속도, t는 시간(재령)을 나타낸다.

3.4 염소이온 침투 모델

지금까지의 연구 결과, 공극수를 통한 염소이온의 확산 현상의 수학적 모델은 일반적으로 Fick의 법칙에 근거하고 있으며, 본 연구에서도 이에 따라 공극수를 통한 염소이온의 확산 현상을 다음과 같이 정의하였다

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_{Cl} \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} \tag{9}$$

여기서, C_f는 용액의 단위 체적당 자유 염소이온량(kgf/m^3), D_{Cl}은 콘크리트의 확산계수(m^2/sec)로서 염소이온에 대한 확산도를 나타낸다.

또한 본 연구에서는 모세관 공극을 통한 염수의 유입에 따른 염소이온의 침투 현상을 콘크리트로의 염수 침투 현상은 언급된 수분 침투 현상과 동일한 메카니즘으로 발생한다고 가정하고 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = C_f \frac{\partial \varphi_{cs}}{\partial t} \tag{10}$$

여기서 $\partial \varphi_{cs} / \partial t$는 염수 침투에 의한 상대습도의 변화를 나타낸다.

따라서 본 연구에서 염소이온의 침투 모델은 식 (9), 식 (10), 식 (11)을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \left(\frac{D_{Cl}}{\alpha} \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} + \frac{w}{\alpha} C_t \frac{\partial \varphi_{cs}}{\partial t} \right) \tag{11}$$

여기서, C_t는 콘크리트의 단위 체적당 총 염소이온 농도(kgf/m^3)를 나타내며 α는 콘크리트 내부에서의 화학적, 물리적인 구속 현상에 따라 정량적으로 변화하는 자유 염소이온 농도를 모사하기 위한 계수로서, 그 정량적인 값은 콘크리트의 포화도와 염소이온의 구속 능력에 따라 결정된다.[2]

3.5 염소이온 침투의 주요 영향 인자

지금까지의 연구 결과, 염소이온의 확산 현상에 영향을 미치는 대표적인 인자로는 콘크리트의 수화도, 온도, 상대습도인 것으로 보고되고 있으며, 모델 내에서 다음과 같은 형태로 고려되고 있다.

$$D_{Cl} = D_{28} \cdot f_1(t_{eq}) \cdot f_2(T) \cdot f_3(\varphi) \tag{12}$$

여기서, D_{Cl}은 유효확산계수이며, D_{28}은 재령 28일에서의 콘크리트 확산계수, $f_1(t_{eq})$, $f_2(T)$, $f_3(\varphi)$는 각각 재령(수화도), 온도, 상대습도가 콘크리트에서의 확산계수에 미치는 영향을 고려한 항이다.

일반적으로 콘크리트의 확산계수는 재령에 따른 수화도의 증가로 인해 공극 구조가 더욱 치밀해짐에 따라 감소하게 되며, 이러한 양상은 콘크리트의 수화도가 최종값에 도달하여 수화반응이 종료될 때까지 지속된다. 본 연구에서는 이와 같이 수화도의 영향을 고려하기 위하여 Saetta[2]의 제안식을 수정한 식을 이용하였으며, 콘크리트 내부 온도와 공극내 상대습도[4]에 따른 확산계수의 변동성은 아래에 제시된 식을 이용하여 고려하였다.

$$f_1(t_{eq}) = \xi + (1-\xi)\left(\frac{t_{eq}^{28}}{t_{eq}} \right)^{1/2} \tag{13}$$

$$f_2(T) = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{273+T_o} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \tag{14}$$

$$f_3(\varphi) = \left[1 + \frac{(1-\varphi)^4}{(1-\varphi_c)^4} \right]^{-1} \tag{15}$$

여기서, t_{eq}^{28}은 재령 28일에서의 등가 재령, t_{eq}는 임의 재령에서의 등가 재령이며, ξ는 재령에 따른 확산계수의 감소 경향을 나타내는 재료 상수($0 \le \xi \le 1$), φ_c는 임계상대습도(일반적으로 75%)이다.

4. 염소이온 침투 현상의 해석

4.1 해석 방법

본 연구에서는 콘크리트에 발생하는 염수 침투 현상을 노출 시점 t^*에서 상대습도 $\varphi_i^{t^*}$와 온도 $T_i^{t^*}$를 초기 조건으로 하여 발생하는 수분 침투 현상으로 간주하였다. 따라서 콘크리트 내부로 침투된 염수에 의한 상대습도 φ_{cs}의 정량적인 값은 노출 시점 t^*이후, 경계조건이 실제 외부 상대습도인 경우와 외부로부터 추가적인 수분의 공급이 없는 경우에 대한 재료 내부의 수분 상태를 해석한 후, 두 해석 결과의 차이로부터 결정하였다. 제안된 염소이온 침투 모델의 해석하기 위하여 확산 방정식의 수치해석 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 Crank-Nicolson 방법을 이용하였으며, FDM 해석과정에서 matrix의 계산은 Thomas 알고리즘을 이용하였다.

4.2 해석 사례

본 절에서는 제안한 모델의 적용성을 검토하기 위하여 가상 구조물의 부식 개시 시기에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 재령과 노출 조건에 따른 콘크리트의 수화도, 공극내 상대습도를 해석하였고 이를 근거로 재료 내부의 염소이온 농도의 추이를 해석하였다. 대상 구조물은 7일 표준 양생 후, 6개월 시점까지 대기 양생하였으며, 이후 해수에 수침된 것으로 가정하였다.

해석 결과, 재령에 따른 콘크리트의 수화도는 콘크리트의 수화도는 깊이에 따른 절대값의 차이없이 재령이 경과함에 따라 반응 속도 감소하다가 최종적으로 최대 수화도에 수렴하는 경향을 보였다. 또한 콘크리트의 공극내 상대습도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 표면에 가까울수록 건습의 양상이 급격한 것으로 나타났으며, 깊이에 따른 절대값의 차이가 분명하데 반해 재령에 따른 변화 양상은 초기 재령에서 급격한 감소 이후, 임의 시점부터 증가하는 동일한 양상을 나타내었다. 이는 초기 재령에서는 수화 반응에 소모되는 수분량이 유입되는 수분량보다 상대적으로 많다가 재령이 경과할수록 그 양상이 역전되기 때문인 것으로 판단된다. 재령에 따른 콘크리트 확산계수의 변화는 초기 재령에서는 공극 구조 및 상대습도의 변화에 따라 감소 및 증가 경향이 뚜렷하게 나타나지만, 임의 시점부터 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 이는 재령이 경과하여 최대 수화도에 도달하게 되면 재령의 영향을 제외한 공극내 상대습도와 온도의 영향만을 받게 되는데, 이 경우 상대습도와 온도를 일정한 값으로 가정함에 따라 나타난 결과인 것으로 판단된다.

이에 따라 재령에 따른 깊이별 염소이온 농도의 추이는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 임계 부식 농도[12]를 1.48 kgf/m^{3}이라 가정하면 피복두께가 50mm인 경우, 해수에 수침된 해당 구조물의 부식 개시 시기는 시공 후 대략 8년 정도 경과한 시점인 것으로 예측된다.

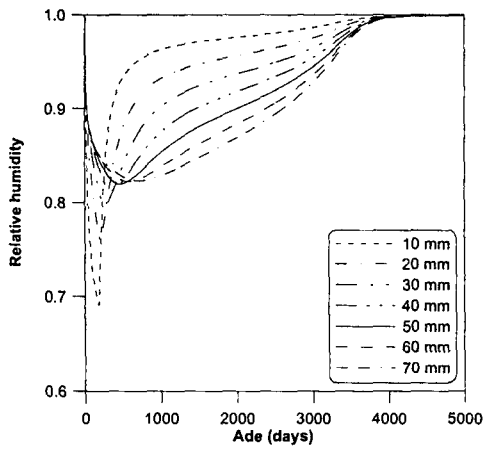

Fig. 2 콘크리트 공극내 상대습도

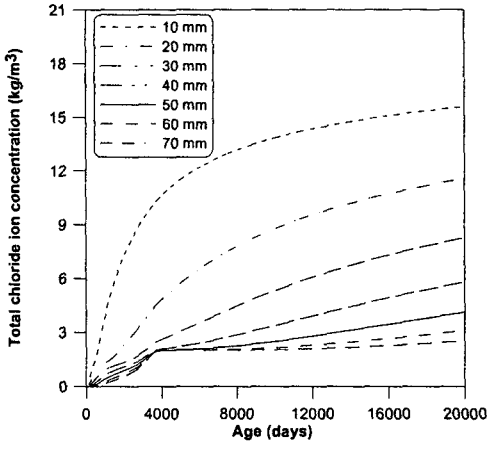

Fig. 3 재령 및 깊이에 따른 염소이온 농도

5. 결론

(1) 본 연구에서는 염소이온의 침투 메카니즘을 공극수를 통한 염소이온의 확산 현상과 공극내 상대습도차에 의해 발생하는 모세관 공극을 통한 염수 침투 현상으로 정의하고 이를 근거로 새로운 개념의 염소이온 침투 모델을 제안하였다.

(2) 본 연구에서는 제시된 모델에 수화도, 온도, 상대습도 등과 같은 재료의 미세 공극의 형상과 분포, 수분 상태와 같은 재료의 물리적 특성의 변화가 염소이온의 침투에 미치는 영향을 모델링함으로써 보다 정밀하고 신뢰성 높은 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 모델식은 다양한 환경 조건에 따라 임의로 콘크리트 표면의 염소이온 농도와 염소이온 확산계수의 변화를 고려할 수 있는 특징을 갖고 있어 그 활용성이 뛰어나다고 판단된다.

(4) 제안된 모델에서 콘크리트의 열전달 특성에 따른 내부 온도의 변화를 고려하지 않고 있어 향후 이에 대한 연구가 필요하며, 모델의 검증을 위해 철근콘크리트 구조물로의 염소이온 침투 거동을 측정에 관한 실험 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP의 인위재해기술개발사업의 지원하에 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 아울러 본 연구 수행함에 있어 많은 도움을 주신 차수원 박사께도 감사드립니다.

참고 문헌

1. Tuutti, K. *Corrosion of Steel in Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research institute, Stockolm, 1982.
2. Saetta, A. V., Scotta, R. V. and Vitaliani, R. V. "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.5, 1993, pp.441~451.
3. Nagesh, M. and Bishwajit, B. "Modelling of Chloride Diffusion in concrete in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients," *ACI Materials Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.113~120.
4. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Non-Saturated Concrete," Materials and Structures, Research and Testing, V. 5, No. 25, 1972, pp. 3~20.
5. Hansen, E. J. and Saouma, V. E. "Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deterioration - Part 1 : chloride diffusion," *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.2, 1999, pp.173~180.
6. Maage, M., Helland. S., Poulsen, E., Vennesland, Φ. and Carlsen, J. E. "Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment," *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.902~608.
7. Amey, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A. and Farzam, H. "Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures : An Environmental Methodology," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, 1998, pp. 205~214.
8. Byfors, J. Plain concrete at early ages, *CBI report FO 3:8*, Sweden, 1980.
9. Marten, J. *Method of Measuring the Moisture Diffusivity at High Moisture Levels*, Licentiate thesis, University of Lund, Sweden, 1997.
10. Hedenblad, G. "Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste." PhD dissertation, *Report TVBM-1014, Lund Institute of Technology*, Sweden, 1993.
11. Hedenblad, G. "The Use of Mercury Intrusion Porosity or Helium Porosity to Predict the Moisture Transport Properties of Hardened Cement Paste." *Advanced Cement Based Materials*, No.6, 1997, pp.123~129.
12. Hussain, S. E., Al-Gahtani, A. S. and Rasheeduzzafar., "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 534~538.