

인텔리전트 콘크리트의 전망과 가능성

김 화 중

(경북대학교 건축공학과)

1. 서론

콘크리트재료는 압축강도가 높고 유지관리가 비교적 용이한 건설재료이며, 사회기반구조와 건축구조물을 만드는데 주요재료로써 사용되기 시작했고 백년이상 경과되었다

그 동안 여러 가지 새로운 사회적 요구에 대응하여, 종래에 콘크리트에 구비된 강도성능과 시공성은 더욱 향상시키고, 혹은 단점을 극복하고 여러 가지 기술이 개발되어 오늘날에 이르고 있다.

예를 들면 고강도, 고유동, 초경량, 고내구성, 저수축, 저발열 등의 각종 콘크리트가 사용되고 있고 이러한 고성능콘크리트가 실현되기 위해 화학 혼화제와 새로운 유형의 시멘트가 개발되어 실리카흙 등의 혼화제의 사용 등, 최근 기술의 급속한 발전을 알 수 있다.

그러나, 이러한 고성능 콘크리트를 포함하

는 기본적인 콘크리트 구조물이 완성되는 시기에 부여되는 것이 그 재료의 성능이고 시간 경과에 따라 열화하는 것은 있어도, 경화후보다 더 나은 방향으로 변하는 것은 거의 없다. 그 때문에 건설될 예정의 콘크리트 구조물은 사용되는 장기간의 환경조건(하중의 열화외력)을 미리 예상하고 이에 대처하기 위해 충분히 높은 성능을 부여하도록 재료 및 구조설계를 하도록 요구하고 있다.

이와 반해서, 만약 필요한 상황이 일어날 때만 콘크리트의 필요한 기능을 부여할 수 있다. 예를 들어서 당초의 콘크리트 구조물의 설계는 항시 작용하는 것을 생각하여 외력이나 환경에 대하여 행하면 충분하고, 비형상의 작용 외력이나 특수한 열화외력에 대해서는 결여기능을 부여하여 대처하는 것은 가능한 것은 아닐까. 그러한 꿈과 같이 말을 실현하기 위해 연구가 행해지고 있다. 즉 인텔리전트 콘크리트

의 개발 연구이다.

2. 인텔리전트 재료는 어떤 것인가?

인텔리전트 재료는 단지 강도나 내구성이 있는 물성적 성능이 보이지 않고, 이변이나 요구의 정보를 인식하여 그것에 대응하는 기능을 함께 가지고 있는 것이 특징이다. 또한, 외부의 환경이나 내부의 정보를 검토했던 [센서 기능], 그 정보의 기초를 판단하여 명령을 하달하는 [프로세서 기능], 그리하여 그 명령을 받는 실제의 행동을 실행하는 [실행 기능]이라고 말하는, 일련의 기능이 내장되고 있는 것을 정의하고 있다.

또한, 그러한 3가지를 재료 자체가 내장하지 않는 경우에도 각각의 구조나 재료 혹은 장치를 조합하여 구조물 혹은 시스템 전체로서 인텔리전트 기능을 발현시키고 있고, 이른바 "시스템 구조"의 연구도 활발히 행해지고 있다. 이와 같은 인텔리전트 재료나 시스템 구조에 관한 연구는 항공·우주·기계·금속·세라믹·바이오·생체·의료·토목·건축 등 여러 가지 분야에 활발하게 이루어지고 있다.

3. 인텔리전트 콘크리트는 꿈의 이야기인가

항공, 우주분야나 생체, 의료 분야 등, 코스트보다는 기능이 명확하게 중요시되는 분야와 비교하여 토목, 건축의 분야에서는 실용화를 고려하므로 비용을 무시할 수 없다.

그렇게 생각해 보면, 인텔리전트 콘크리트의 현실은 꿈의 이야기로 생각될지도 모른다. 그러나, 앞서 서술한 인텔리전트 재료에 가까운 아이디어가 목재로서도 1000년 이전의 선인의 지혜와 기술에서 나온 것이므로, 새로운 가능성에 도전해 볼 마음이 있지 않는가.

우선, 최첨단의 기술을 구사하는 스마트 구조의 예로서, 차세대의 고지능형 비행기를 거론할 수 있다. 즉, 반복 작용하는 하중에 의해 생기는 피로파괴에 의한 미소균열의 발생이나, 성장, 부식에 의한 재료 물성의 노화, 혹은 예기치 않은 돌발적 사고에 의한 재료 손상 등에 대해, 표면탄성과 발진기와 수신기를 기체 내에 매립하여 일체화함으로써 센서기능을 부여한다. 더욱이, 집중관리 컴퓨터라는 외부의 자동제어회로와 접선함으로써 프로세서기능과 실행기능이 부여되어, 시스템 전체로서 인텔리전트 기능이 발현하는 것이다.

4. 균열의 자기수복 기능을 가진 콘크리트

균열이 발생한 후, 콘크리트의 강도는 저하될 뿐만아니라, 공기중의 탄산가스, 산성비 혹은 염분 등이 구조체의 틈사이에 침투하여 중성화, 염해 등의 열화를 조기에 발생시키는 원인이 된다. 그러나, 이와 같은 조기 열화가 발생한다하여도 지중구조물, 위험물 처리시설 등에서는 사용기간중의 보수는 물론 조사마저 곤란을 수반하는 경우가 많다. 이와 같은 경우야말로 균열의 발생을 자동적으로 감지하여, 보수하여야 할지 어떨지를 판단해, 필요에 응하여 보수를 자동적으로 행하는 콘크리트가 필요하다.

이와 같은 기능을 콘크리트에 부여하기 위하여, 균열의 검지기능의 역할을 다하는 재료와 균열을 수복할 수 있는 보수제의 선택이 열쇠가 된다.

보수제를 봉입한 용기(캡셀)가 균열에 대해서 민감하게 반응하는 요소라면 균열의 발생과 함께 캡셀이 파괴하여, 어떤 균열의 폭에 도달했을 때에 캡셀속의 보수제가 흘러나와 균열을 채워, 수복이 실행되는 요소로 기대되어

진다.

다음에 제시되는 실험결과는 에폭시수지가 경화제를 함유하지 않아도 모르타르 중에 혼입하는 것으로 지수표면부의 경화에 의해 자기 캡셀화가 가능하다는 것을 보고하고 있다.

여기서는 아주 가는 유리관을 사용함과 동시에, 콘크리트의 균열에의 유출분을 보충가능하도록 유리관의 단부를 보수제 탱크에 연결하는 방법을 채용하고, 실험을 했다. X선 투

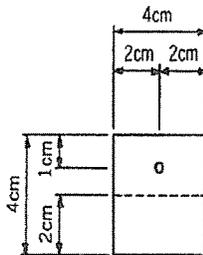
사법에 의해, 균열의 발생과 함께 유리관내의 액은 균열 내에 유출해서 충전하는 양자가 확인되었다.

강도의 수복에는 보수제의 성능도 중요한 점이고, 또 그 적용 균열 폭에 관해서도 검토가 필요하다. 보수제가 캡셀 내에서 물린 상태란 것은 장기간 화학적으로 안정된 상태에서 유지되고 있다는 것도 중요한 점이다.

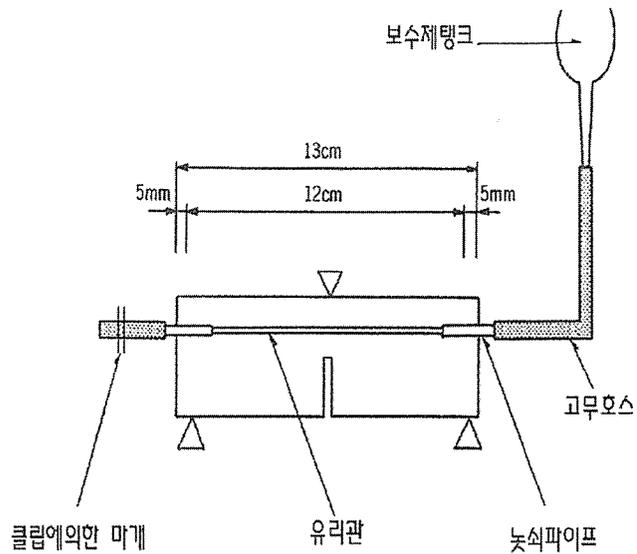
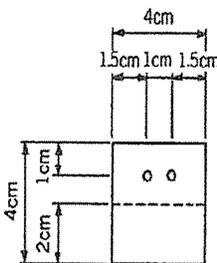
(표 1) 배합표

	W/B(%)	SF/B1(%)	Va:Vm	Vf(%)	보수제	제2회 양생기간	보수제 사용 방법
P1	40 (38+2)	10	1:1	0.5	-	7일	사용안함
P4						28일	
g-B1					보수제 B	7일	유리관의 사용
g-B4						28일	
g-B' 1					보수제 B'	7일	
g-B' 4						28일	
g-C1					보수제 C	7일	
g-C4						28일	

(a) 매설유리관 1본의 경우



(b) 매설유리관 2본의 경우



(그림 1) 시험체의 형상

실험에 사용된 실험체는 [그림 1]에 나타낸 4×4×13cm의 모르터 보이다. 조강포틀랜드 시멘트, 실리카흙(C/SF=10%)를 사용하고, W/B=40%로 하여, 폴리프로필렌섬유(12mm)를 Vf=0.5% 혼입했다. 재하는 최대하중을 넘어설 때까지 재하한 후, 일단 하중에 빠고 1주간 또는 4주간후에 다시 재하해서, 다시 재하시의 최대하중 Pr과 하중 제거시의 하중 P1의 비(Pr/P1 : 강도회복률)을 평가했다. 여기서, CMOD는 보 아래단 절단부의 개구변위를 의미한다.

사용한 보수제는, 규산알칼리를 주성분으로 한 수(水)글라스계 보수제의 27% 희석용액(타입B) 및 동보수제(타입 B'), 2액혼합형 에폭시 수지계보수제(타입C)이다. 타입C는, 2액을 혼합하였기 때문에, 유리관을 2본 사용하였다.

[표 1]은 실험한 시리즈의 각 조건을 나타내고 있다. P는 보수제를 사용하지 않은 것이고, 제2회 양생기간은 1회의 재하(즉, 균열발생시)에서 2회의 재하가 작용할 때까지의 기간이고, 보수제를 사용한 시리즈는 그 사이에 자기수복이 된다는 것을 의미하고 있다. [그림 2]에 재하시의 잔류CMOD와 강도회복율의 관계를 나타내었다.

[그림 2]에 표시된 *1의 범위내의 잔류 CMOD는, 더욱이 타입B 및 B'의 보수제가 충분히 반응한 시기에는 큰 강도회복율을 나타낸다. 균열의 발생은 누수의 원인이 되기 때

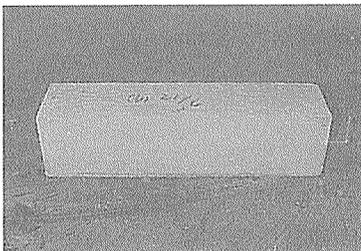
문에, 지수기능을 자기수복하는 것이 가능하면 그 장점이 크다고 할 수 있다.

5. 균열 발생을 나타내는 콘크리트를 위한 본 연구실의 기초적 연구

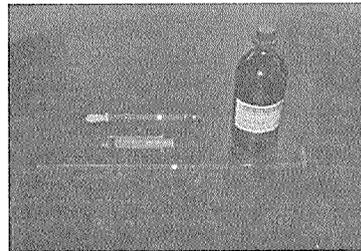
상술된 실험보고는 콘크리트가 균열발생시의 매입된 유리관의 파괴로 인해 보수제의 유입이 이루어져 자기수복성능을 제시하고 있다. 본 연구실에서는 이와 유사한 방법으로 콘크리트가 하중을 받아 균열이 어느 시점에서 발생하면 표면부에서 발생 위치 및 형상을 미리 파악할 수 있도록 실험하였다.

실험은 10×10×40cm의 시험체 하단부에 유리관을 매입하고 철근의 의미로서 피아노선을 사용한 것과 사용하지 않은 시험체로 나누어 W/C=50%, S/A=43%, 슬럼프 15cm의 콘크리트를 투입하여 제작하였다.(사진 1) 또한 유리관속에는 콘크리트 중성화시험에 사용되는 페놀프탈레인 1% 용액을 투입하였다.(사진 2). 그리고 재하시험을 행하였다.(사진 3)

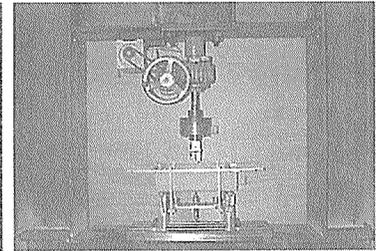
균열발생시 매입된 유리관의 파괴로 흘러나온 용액으로 인해 콘크리트 균열부 주변 색상이 붉은 색으로 변하는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 콘크리트의 파괴시 페놀프탈레인 용액이 흘러나와 균열부위의 색이 변하는 것을 파악할 수 있었다. 그러나, 사용재료에 있어서 유리관의 사용은 약간의 처짐 혹은 콘크리트의 건조수축에서도 파괴가 될 수 있어 유리관 이



[사진 1] 시험체



[사진 2]



[사진 3] 시험개요

의 적절한 대체재가 필요한 것을 판단할 수 있었다. 또한 파괴시 콘크리트에 침투하는 장기간 그 성능이 지속되는 용액의 개발이 필요하였다. 이는 물론 다른 화학분야의 연구자와의 연계된 연구가 필요하다고 판단되었다.

6. 기타 인텔리전트 콘크리트의 연구 사례

6.1 CFGFRP를 이용한 안전금고

탄소섬유(CF)와 유리섬유(GF)의 섬유속을 수지로 굳힌 복합재료(CFGFRP)를 이용하여, 콘크리트 구조물에 어느 정도의 손상이 발생하고있는지를 알려주는 헤르쯔 모니터링 시스템이 개발되고 있다. 다시 말하면, CFGFRP의 구성재료중의 탄소섬유속은 도전성재료이고, 그 탄소섬유의 한계 신장량은 유리섬유의 한계 신장량보다도 작으므로, 그 복합재료를 천천히 인장하면 그 신장량에 대응하고, 우선적으로 탄소섬유가 조금씩 파단한다. 그러므로, 예를 들자면 금고실의 콘크리트의 벽과 천장과 바닥 등에 매립한 복합재료의 전기저항치를 계측하고, 변형의 증대와 함께 저항치는 증가하고, 탄소섬유가 완전히 파단되었을 때는, 전기저항치는 무한대가 되었다. 이 전기 저항치가 무한대로한 때에 경비센터의 경보가 울리든지, 언제나 신호가 전해지도록 해두는 것에 의해 경비방법용의 인텔리전트 기능으로서 이용하는 것이 가능하다.

6.2 고강도 콘크리트의 화재시 폭열방지

콘크리트의 물 시멘트비를 낮게 제한하고, 실리카흙 등의 미분말 혼화재를 혼입함으로써 미세조직 구조를 치밀화하여, 고강도 콘크리트가 실현가능하다. 따라서, 이 미세조직 구조

가 치밀하게 되어 있으므로, 간단히 말해, 화재를 받는 경우에는 콘크리트의 내부에 포함하는 수분이 증기가 되어, 압력이 지극히 높게 되어도 콘크리트의 외부로 유출되는 것이 불가능하게된다. 이 결과, 콘크리트는 폭열 현상을 시작하여 파괴하는 것을 알 수 있다.

6.3 부식방지 콘크리트

염해, 중성화에 의한 철근콘크리트의 열화 방지 기능을 재료자체에 가지게 함으로서, 콘크리트의 고내구성을 나타내고 있다.

염화물 이온이 진행되어 콘크리트내부의 pH가 변하게 되어, 수지로 코팅된 중공 다공질 섬유가 감지되어, 섬유내에 봉입된 방청제가 방출된다. 이 섬유의 배치방법으로서, 매트릭스전체에 균등하게 분산시키는 것, 보강근 부근에 집중된 상태로 배치된 것, 보강근에 감는 것이 있다. 이것들을 ASTM 표준시험에 의한 각 시리즈의 철근의 전위차를 측정하여 비교한다. 섬유내부에 방청제를 봉입한 것의 전위차는 낮게 되고, 방청제 그대로의 상태로 혼입된 것, 방청제를 혼입하지 않은 것에 대해서 전위차가 높게 되는 결과를 얻게된다.

7. 인텔리전트 콘크리트 설계의 고려 방법

콘크리트의 인텔리전트화에 관해서는 그 재료를 설계할 때에 고려해 둘만한 점이 다수 존재한다. 이하에 그 요점에 관해서 서술한다.

(1) 대상을 좁힌 개발

콘크리트의 인텔리전트화라고 말해도, 그 대상으로 한 노후나 파괴 등의 현상과 그것에 대한 인텔리전트화의 수법은 여러 가지 가르칠 수 있다. 이 현상 전부에 대해서, 어떤 것에

도 대응할 수 있는 수법의 개발은 극히 곤란하다고 생각된다. 따라서, 인텔리전트 기능의 발현대상을 좁혀서, 그것에 대해 최적이라고 생각되는 수법을 사용한 개발이 바람직하다.

(2)간편한 수법

콘크리트의 타설은 현장시공이 되는 경우가 많다. 따라서, 인텔리전트화를 행하는 방법은 각별히 고도의 기술을 요하는 것이 아니라 종래의 콘크리트 시공기술에 준하는 정도의 간편한 방법이 바람직하다.

(3)저(低)비용

콘크리트가 이 만큼 대량으로 사용되고 있는 요인의 하나는 비교적 낮은 비용에 있다. 따라서, 인텔리전트화를 떠맡는 기능성재료도 또한, 저가격으로 대량생산이 가능한 것이 바람직하다.

(4)재료의 안정성

인텔리전트화라 하여도, 예를 들어 자극성이 있는 기능성 재료를 이용하거나, 취급방법에 민감한 재료 등을 이용한 경우 그 구조물의 시공시에 사고가 일어날 가능성도 생각할 수 있다. 따라서, 자극성 재료 등의 이용은 피하고, 재료자체는 여러가지 측면에서 안전한 것을 사용할 수 있게 충분히 배려해야만 한다.

(5)장·단점의 종합판단

인텔리전트화에 의한 재료의 내구성 향상이 역으로 해체시의 사고를 초래하는 위험성으로 이어지지 않을까? 혹은 어떤 기능성 재료의 사

용에 의해 대상화 한 열화현상은 억제가능하다 하여도 그 결과 강도 등 그 밖의 성능이 손상되지 않을까? …… 등 인텔리전트화의 장점뿐만 아니라 단점도 빠짐없이 정확히 배려한 재료설계가 필요하다.

8. 결론

인텔리전트 콘크리트는 아직 그 연구방법을 실현하는 여러가지 시도가 행해지고 있는 단계이다. 여러가지 인텔리전트화 콘크리트가 실용화되기까지는 아직 극복해야만 하는 과제는 산적해 있다. 그러나, 금후 이 기술의 개발 과정에 있어서, 콘크리트재료 전체를 고강도화, 고내구성화 하는 것만이 아니라 필요한 부분에 적절한 장치를 가하는 것에 의해 보다 고성능의 콘크리트 구조물의 실현이 가능하게 되는 갖가지의 아이디어가 생겨날 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 三橋博三, インテリジエントコンクリート-その展開と可能性, セメント・コンクリート-No641, Jul, 2000
2. 三橋博三 外 1人, 止水性能の自己修復機能を有する高耐久性インテリジエントコンクリートの開発に關する研究, 日本建築學會技術報告集, No10, 2000.6
3. 三橋博三 外 3人, 強度の自己修復機能を有するインテリジエントコンクリートの開発に關する基礎的研究, コンクリート工學論文集, Vol 11, No2, pp21-28, 2000.5