

화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 균열거동 특성

글 | 안종길 특목기술부 사원
02-3433-7764 | E-mail : maisan77@ssyenc.com

1. 머리말

기본적인 건설 재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 낮은 인장강도로 인하여 취성적 파괴를 일으키며 균열의 생성 및 성장을 억제하기 힘든 단점을 가지고 있다. 콘크리트와 모르타르에는 경화 및 건조수축, 수화열에 의한 온도응력 등으로 인하여 쉽게 균열이 발생할 수 있는데 이러한 균열은 콘크리트 구조물의 기능적인 면에서나 내구적인 측면에서 많은 문제를 일으킬 수 있고, 균열 발생 이후에는 복원이 어려우며 많은 비용이 소요된다. 따라서 콘크리트 부재의 역학적 거동을 좌우하는 균열을 방지하기 위한 방법에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.

콘크리트 부재의 균열을 방지하기 위한 방법 중에 하나로 콘크리트가 수축을 일으키는 만큼 팽창을 일으켜 주도록 팽창재를 첨가하는 방법이 사용되고 있다. 현재 팽창재의 이용에 대한 연구는 콘크리트의 경화 과정에서 팽창하여 콘크리트의 수축을 보상하는 것에만 그치지 않고, 콘크리트의 팽창을 강제 등으로 구속하여 콘크리트에 화학적 프리스트레스에 의한 압축응력을 도입시켜 콘크리트 인장강도의 부족을 개선하는 것에까지 확장되어 가고 있다.

화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트 부재는 균열 발생이 억제될 뿐만 아니라 균열 폭이 현저하게 작아지고 전단내력이 향상되며, 크리프로 인한 프리스트레스의 저감 현상이 거의 없기 때문에 팽창재를 사용함으로써 콘크리트 구조물의 구조 및 내구성능을 향상시킬 수 있다는 것이 가능

하다고 알려져 있다. 본 기사에서는 화학적 프리스트레스에 대한 이해와 함께 화학적 프리스트레스가 도입되었을 때 균열거동에 어떠한 특징이 있는지를 실험 내용을 통해 알아보았다.

2. 화학적 프리스트레스가 도입된 팽창 콘크리트

2.1 팽창 콘크리트

콘크리트는 압축강도에 비해 인장강도가 매우 작을 뿐만 아니라 인장 변형률도 작기 때문에 콘크리트에 인장력이 작용하게 되면 균열이 쉽게 발생한다는 결점을 가지고 있다. 콘크리트는 경화 및 건조에 의하여 수축하거나 크리프 변형 또는 수화열에 의한 온도응력으로 인하여 균열이 발생할 수 있다. 특히 철근콘크리트 구조물의 경우, 이러한 균열의 발생은 콘크리트 구조물의 붕괴까지는 이르게 하지 않더라도 철근을 보호하는 성능의 저하, 빗물 등의 누수 문제, 탄산화 및 염분 침투에 따른 철근의 부식환경 계공 등과 같이 좋지 않은 영향을 끼침으로서 장기적으로 볼 때 구조물 열화의 원인이 될 수 있다. 또한 앵커 그라우팅 및 교량의 받침부와 같은 부위에서 나타나는 콘크리트의 공극은 콘크리트를 타설할 때에는 제거하기 곤란하며, 경화된 후에 구조적인 결함을 유발시킬 수 있다. 이러한 재료적인 성질에 기인하는 균열은 본질적으로 콘크리트라는 재료의 특성과 관련이 있기 때문에 이 원인에 의한 균열을 저감시키기 위한 연구는 콘크리트의 역사와 함께

계속되어져 오늘날까지 이어지고 있다.

팽창재를 콘크리트에 이용한다는 생각은 이러한 콘크리트의 재료적인 성질에 기인하는 균열을 저감하는 것으로부터 발생한 것으로, 콘크리트가 건조되어 수축하는 것이 시멘트 수화물의 본질적인 구조로서 피할 수 없는 것이라고 한다면 반대로 팽창이라는 요소를 콘크리트에 도입한다는 착상으로부터 발생되어진 것이다. 팽창콘크리트를 사용하면 제적의 팽창에 의해 매트릭스에 압축응력을 유발시켜 인장응력의 감소 및 공극의 발생을 억제하는 효과를 얻을 수 있다. 팽창 효과는 콘크리트의 수화반응시 팽창재에 의해서 에트링가이트(ettringite, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), 모노설페이트(monosulfate, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$), $Ca(OH)_2$ 의 생성에 의해 일어나며 수화반응에 따라 팽창재를 Type K, M, S, O 등으로 분류한다.

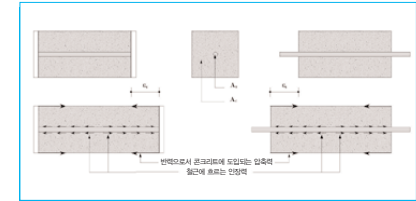
팽창시멘트에 의한 모르타르 또는 콘크리트는 철근, 거푸집 등과 같은 구속 조건이 존재할 경우 팽창력에 상응하는 압축력을 받게 되며, 이러한 압축력에 의해 콘크리트의 균열과 공극의 발생 감소를 기대할 수 있다. 또한 팽창콘크리트의 팽창력은 구속조건에 따라 프리스트레스의 도입과 같은 역학적 거동을 나타내며 콘크리트 구조물의 강도나 균열저항성을 개선시키는 효과를 얻을 수 있다.

일반적으로 팽창재를 포틀랜드 시멘트에 혼합한 팽창시멘트가 미국, 러시아 및 프랑스 등에서 시판되고 있으나, 일본의 경우 시멘트 공장에서 특별히 혼합하여 출하하는 경우를 제외하고는 혼화재료로서 팽창재가 제조·시판되고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 것은 CSA계 K형 팽창재이다.

2.2 화학적 프리스트레스 콘크리트

2.2.1 화학적 프리스트레스의 도입

일반적으로 화학적 프리스트레스는 팽창재로 인한 길이 방향의 팽창이 양단의 구속판에 의해 구속되거나 철근과 같은 구속봉에 의해서 콘크리트의 응결 후에 콘크리트의 팽창이 구속됨으로써 발생되게 된다. 팽창이 구속판 또는 구속봉에 의해 구속되어 구속봉에는 프리스트레인이 작용하고, 동시에 콘크리트에는 프리스트레스가 도입되는데 이것이 화학적 프리스트레스의 발생 메커니즘이다.



[그림 1] 화학적 프리스트레스의 도입 모델

부재에 도입되는 화학적 프리스트레스는 다음과 같이 계산된다.

$$f_{sp} = \epsilon_s \times E_s \times \frac{A_s}{A_c} \quad (1)$$

여기서, f_{sp} 는 화학적 프리스트레스, ϵ_s 는 프리스트레인이(철근의 변형률), E_s 는 철근의 탄성계수, A_s 와 A_c 는 철근과 콘크리트의 단면적을 나타낸다.

2.2.2 다양한 구속조건에 의한 화학적 프리스트레스의 도입

화학적 프리스트레스는 일반적으로 축방향 철근의 구속에 의해 도입되는 것으로 알려져 있으나 그 외에도 다양한 내부 구속조건을 통해서도 화학적 프리스트레스가 도입될 수 있다는 것이 밝혀지고 있다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 팽창재와 강섬유를 혼합하여 사용하였을 경우 섬유보강을 통한 팽창 작용의 구속으로 화학적 프리스트레스가 도입되어 균열 저항성능이 향상된다는 것이 알려지고 있으며, 팽창재와 섬유량의 상관관계를 밝혀내기 위한 연구가 수행되고 있다. 또한 부재 내부에 설치된 스티럽에 의해서도 다축구속효과를 기대할 수 있으며, 구조거동에 있어서 이에 따른 화학적 프리스트레스의 효과가 나타난다는 사실이 밝혀지고 있는 등 화학적 프리스트레스의 장점을 보다 유용하게 이용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

2.2.3 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 이용

화학적 프리스트레스를 도입한 콘크리트로는 홑관, 박스암거, 프리캐스트 슬래브, 강관 라이닝 등의 프리캐스트 콘크리트를 예로 들 수 있는데 화학적 프리스트레스 콘크리트는 현장에서 사용하는 재료에 따라 팽창량이 다르고, 기상조건

등의 외부 조건에 따라 필요한 팽창량을 관리하는 것이 어렵기 때문에 현장타설용으로는 거의 사용되지 않고 제조관리가 비교적 용이한 프리캐스트 콘크리트 제품에 많이 사용되고 있다.

고속도로 강교량의 철근콘크리트 슬래브 대신에 팽창콘크리트를 사용하면 화학적 프리스트레스의 도입과 건조수축 저항 효과로 인해 균열 감소 효과를 가져올 수 있다는 것이 알려져 있고, 교량과 그밖에 구조물에 실제로 사용해본 연구와 측정 결과로부터 균열의 감소는 내구성능을 증가시킬 수 있다는 것이 입증되었다.

3. 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 균열 거동 특성

본 장에서는 콘크리트에 화학적 프리스트레스가 도입되었을 때 보통의 경우와 균열 거동에 있어 어떠한 차이를 보이는

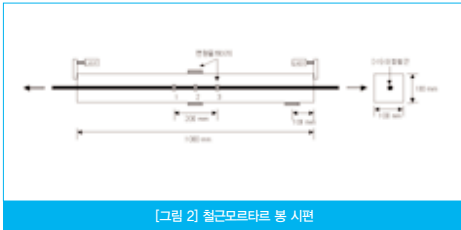
지에 대해서 다음과 같은 실험을 통해 알아보기로 하였다.

3.1 실험 재료

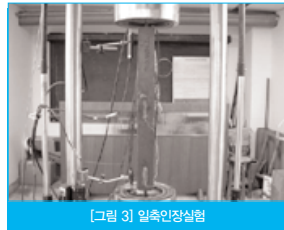
균열 거동에 있어서 골재의 영향을 최소화 하기 위해서 모르타르 시편으로 실험을 수행하였고, 팽창제는 일본에서 제조·시판되고 있는 CSA계 K형 팽창제를 사용하였다. 팽창제의 화학조성은 (표 1)과 같으며, 실험에 사용된 배합은 (표 2)에 나타내었다.

3.2 실험 방법

[그림 2]와 같이 100 × 100 × 1000mm의 형태의 철근 모르타르 붕 시편을 제작하였고 재령 2일째에 탈형 하였으며 재령 28일까지 습윤양생 시킨 후 일축인장실험을 수행하였다. 양생 온도는 20±2℃를 유지하였고 실험시에는 수분에 의한 영향을 최소화 하기 위한 목적으로 시편 전체에 구리스를 도포하였다. 가력 장비로는 변위 제어가 가능하며 50tonf의 하중 재하능력과 75mm의 변위량을 가지고 있는 Instron



[그림 2] 철근모르타르 붕 시편



[그림 3] 일축인장실험

[표 1] CSA계 K형 팽창제의 화학조성

물리적 특성			화학적 성분 (%)					
비중	비표면적	Ignition loss(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.00	2500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9

[표 2] 모르타르 배합표

시편종류	구분	W/(C+E)(%)	E/(E+C)(%)	단위량 (kg/m ³)				
				W	C	E	S	F
보통모르타르		40	0	356.0	891.0	0	891.0	0
팽창모르타르		40	10	356.4	801.9	89.1	891.0	0

model 1333을 사용하였고, 0.01mm/min의 속도로 하중을 재하하며 시편 양 단부에 설치된 LVDT를 이용하여 실험시 길이변화를 측정하여 평균변형률을 산출하였다.

3.3 실험 결과의 분석

3.3.1 화학적 프리스트레스의 추정

재령에 따른 변형률 측정을 통해 변형률의 절대값의 차이를 사용하여 팽창모르타르로 제작된 붕 시편에 작용하는 화학적 프리스트레스를 식(2)와 같이 추정하였다. $\bar{\epsilon}_s$ 는 철근의 평균단면적, \bar{A}_m 은 모르타르 부분의 평균단면적을 나타낸다.

3.3.2 화학적 프리스트레스가 도입된 모르타르의 균열 하중

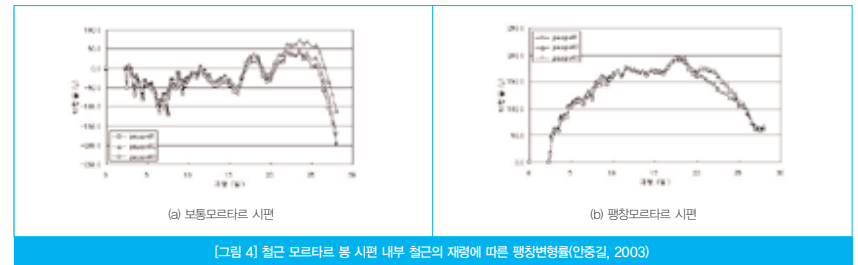
[그림 5]는 철근모르타르 붕 시편의 일축인장실험을 바탕

으로 철근이 부담하는 응력을 제외하고 모르타르부가 부담하는 응력-평균변형률 관계만을 나타낸 것이다.

[표 3] 초기 균열 발생시 모르타르 부분이 부담하는 응력 (단위: kgf/cm²)

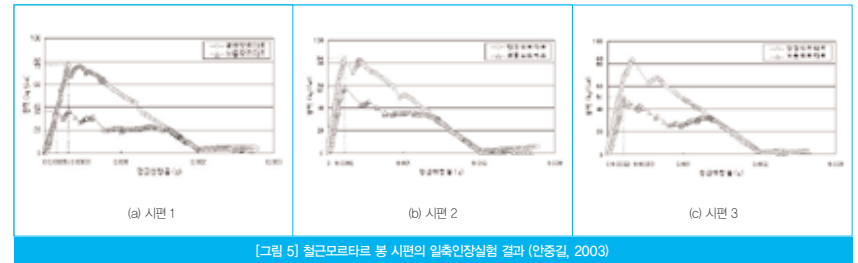
시편	구분	보통모르타르	팽창모르타르
1	1	36.92	77.41
	2	58.01	83.89
	3	50.76	83.54
평균		48.56	81.61

실험 결과 팽창모르타르 붕 시편은 화학적 프리스트레스의 영향으로 보통모르타르 붕 시편에 비해 초기균열 발생 응력이 약 33kg/cm² 증가하는 것으로 나타났다. 이 크기는 시편 양생시 팽창률 측정을 바탕으로 산정한 값인 10kgf/cm²



[그림 4] 철근 모르타르 붕 시편 내부 철근의 재령에 따른 팽창변형률(안중길, 2003)

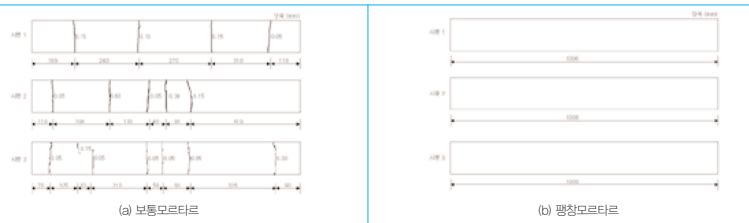
$$\bar{\epsilon}_{cp} = \epsilon_s \times E_s \times \frac{\bar{A}_s}{\bar{A}_m} = (169 \times 10^{-4}) \times (2.03 \times 10^4) \times 0.028 \approx 10 \text{ kgf/cm}^2 \quad (2)$$



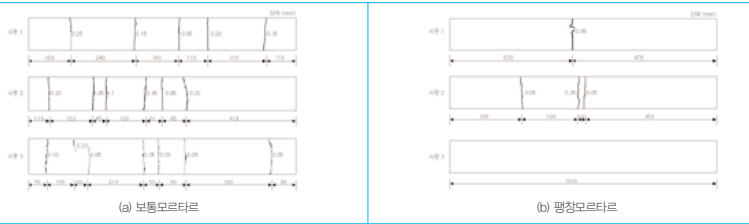
[그림 5] 철근모르타르 붕 시편의 일축인장실험 결과 (안중길, 2003)



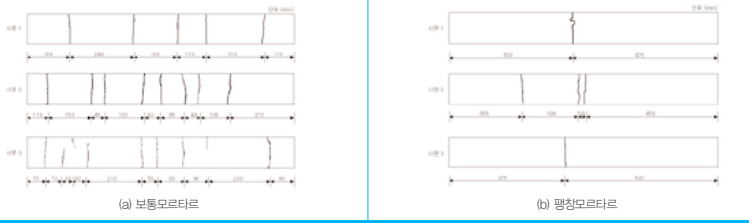
[그림 6] 철근모르타르 봉 시편의 균열 성상



[그림 7] 하중단계 8ton에서 철근모르타르 봉 시편의 균열 성상 (안중길, 2003)



[그림 8] 하중단계 10ton에서 철근모르타르 봉 시편의 균열 성상 (안중길, 2003)



[그림 9] 평균변형률 0.0027일 때 철근모르타르 봉 시편의 균열 성상 (안중길, 2003)

보다도 훨씬 크게 나타나고 있는데 Sahamitmongkol 등 (2002)은 이러한 현상에 대해 화학적 프리스트레스가 도입된 부재는 단지 프리스트레스의 효과 이외에도 부재 자체가 높은 변형능력을 가지기 때문에 균열 발생 시기를 늦출 수 있고, 균열 발생 하중 또한 크게 나타나는 것이라고 설명하고 있으며, 현재 이와 관련된 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

3.3.3 화학적 프리스트레스가 도입된 모르타르의 균열 성상

[그림 6]-[그림 9]는 일축인장시험 시편에 발생하는 균열 성상을 비교한 것이다. 인장하중 재하시 하중단계가 8tonf, 10tonf에 이르렀을 때 부재에 발생하는 균열 폭과 균열 간격을 각각 측정하였고, 최종적인 균열 성상은 보다 명확한 관찰을 위해 철근이 항복을 시작한 이후까지 인장력을 충분히 가한 후 평균 변형률이 0.0027에 도달하였을 때 관찰하였다.

실험 결과를 통해 보통모르타르 시편의 경우 부재 전체에 걸쳐 많은 균열이 발생하고 있지만 팽창재를 사용하여 화학적 프리스트레스를 도입시킨 시편의 경우에는 인장강도가 커지는 것 뿐만 아니라 동일 하중 단계에서 발생하는 균열 폭이 작아지고, 균열 간격이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 石村 등 (2001)의 연구에 의하면 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트 부재는 보통 콘크리트 부재와 비교하였을 때 부착 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다. 또한 부착력이 클 때 균열 폭이 작아지기 위해서는 발생하는 균열 수가 증가해야 하는 것이 당연하다. 따라서 화학적 프리스트레스가 도입된 부재는 균열 폭이 작음과 동시에 큰 균열 간격을 가진다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이것 역시 앞서 언급한 것과 같이 화학적 프리스트레스가 도입된 부재가 높은 변형 능력을 가지고 있으며 균열의 분산성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4. 맺음말

지금까지 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 균열 거동 특성에 대해 살펴보았다. 화학적 프리스트레스가 도입

된 부재는 프리스트레싱 효과와 부재가 가지고 있는 높은 변형능력에 의해 보통의 경우보다 균열 하중이 크고, 균열 폭이 작아짐과 동시에 균열 간격이 커지는 특징이 있다는 것을 실험 내용을 통해 확인할 수 있었다. 비록 팽창량의 관리가 어렵다는 점이 큰 단점으로 지적되고 있으나 재료적인 특성만 가지고도 구조적·내구적으로 향상된 성능을 가지는 콘크리트 구조물을 만들 수 있다는 것은 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트에 대한 연구 가치가 충분하다는 것을 시사하는 것이다. 따라서 앞으로 지속적인 연구를 통해 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 균열 거동 메커니즘을 명확하게 규명하고 또한 이러한 특징들이 앞으로 실제 설계식에도 반영이 될 수 있다면 보다 효과적인 화학적 프리스트레스의 이용이 가능해질 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 안중길 (2003), 화학적 프리스트레스가 도입된 모르타르의 균열저항성능 평가에 대한 연구, 석사학위논문, 연세대학교
2. Nagataki, S. and Gomi, H. (1998), "Expansive Admixtures (Mainly Ettringite)", Cement and Concrete Composites, pp.163-170
3. Sahamitmongkol, R. and Kishi, T. (2003), "Crack-Controlling Properties of Chemically Prestressed Reinforced Concrete", ICUS/INCEDE Second International Symposium, Tokyo, JAPAN
4. Sahamitmongkol, R., Tanaka, Y., and Kishi, T. (2002), "Cracking Behavior of Chemical Prestressed Reinforced Concrete Members", JSCE Fourth International Summer Symposium, Kyoto, JAPAN, 5-3
5. 石村隆敏, 丸山豊史, 細田 暁, 岸利治 (2001), "膨張コンクリートのデンションステイフニング効果に関する実験的研究", コンクリート工學年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 583-588