

고성능 콘크리트의 폭렬특성 및 대책

Countermeasure and Spalling Property of High Performance Concrete

한 민 철*

한 천 구**

Han, Min Cheol

Han, Cheon Goo

ABSTRACT

This paper investigated measures of spalling prevention and mechanism to secure stability of subjected to a fire circumstance. The results were summarized as following.

1) There were 4 kinds of methods for spalling prevention, such as declining percentage of water content and cement water ratio, isolating from high temperature with fire proof covering, giving lateral resistance stress, and discharging vapor pressure using fibers.

2) It was confirmed that methods using fibers to a new construction and fire proof covering to a existing construction on the basis of investigation for the spalling mechanism through the existing theory of spalling and a new theory of WPB.

요 약

본 고에서는 화재 시 구조물 콘크리트의 안전성 확보를 목적으로, 폭렬방지대책 및 메커니즘에 대해 고찰·분석한 것으로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 국내·외에 알려져 있는 고성능 콘크리트의 폭렬방지 방법으로 함수율 및 C/W를 낮추는 방법, 내화피복을 실시하여 고온을 차단하는 방법, 횡구속 실시하여 내부에서 발생하는 횡변위에 저항하는 방법, 섬유를 혼입하여 수증기압을 외부로 배출시키는 방법 등 4가지 방안이 있다.

2) 기존의 폭렬관련 이론과 WPB이론에 의한 폭렬메커니즘 분석을 토대로 폭렬방지 방안을 제안 하면 기존 건축물에 한해서는 내화피복을 실시하는 방법이, 신축 건축물에 한해서는 섬유를 혼입하는 방법이 양호한 것으로 판단된다.

* 정회원, 청주대학교 건축공학부 전임강사, 공학박사

** 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

1. 서론

최근, 콘크리트 구조물은 고층화·대형화 등과 함께 고성능 콘크리트의 사용량이 증대되는 추세이다. 이러한 고성능 콘크리트는 조적이 치밀하여 강도가 크고, 유동성 및 내구성이 우수한 반면, 화재 시 폭렬에 취약하고, 내화성이 크게 저하되어 사회적인 이슈로 대두되고 있다. 이에 국내·외 많은 학자 및 기술진들은 이러한 화재 시 고강도 콘크리트의 폭렬문제를 해결하기 위하여 다양한 폭렬발생 메커니즘 제안, 폭렬방지공법 개발 및 내화공법 적용사례 등을 보고하고 있다.

그러나 이 중에서도 가장 중요하게 취급될 수 있는 폭렬 메커니즘에 대한 이론은 학자들마다 다른 견해¹⁾에서 접근하고 있는 상황으로 필자들의 연구과정에서 고찰해볼 때 부분적으로는 설명이 부족한 부분이 존재하였다.

그러므로 본 고에서는 폭렬의 정의 및 국내·외 연구동향에 대해 고찰하여 이를 토대로 폭렬방지대책에 대해 체계적으로 서술하고, 아울러 저자의 실험연구를 통해 새롭게 정립한 폭렬발생 및 방지 메커니즘을 제안하고자 한다.

2. 폭렬의 정의 및 연구동향

2.1 폭렬의 정의

폭렬이란 화재시 갑작스런 고온에 의해 콘크리트 구조체의 부재표면이 심한 팽음과 함께 박리·탈락하는 현상을 말한다. 이러한 폭렬현상은 피복 콘크리트의 결손으로 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 또한 철근이 노출되어 고온을 받게되면, 철근의 강도저하로 구조부재는 치명적인 내력저하를 초래하여 결국에는 붕괴를 일으킬 수 있는 원인이 되기도 한다.

2.2 폭렬에 관한 연구동향

1919년 ACI 전문위원회에서는 골재 종류, 피복두께, 횡구속 조건 등에 따른 고온시 콘크리트 구조체의 붕괴시간을 측정하였고, 1973년 Harmathy는 콘크리트 벽 구조물의 화재시 성상을 정의하였으며, 1983년 Copier는 경량골재 사용에 따른 폭렬특성을 분석하였다.

또한, 많은 학자들은 슬래브 콘크리트의 에폭시 사용을 통한 폭렬방지, 온도변화에 따른 콘크리트 공극구조 분석, 콘크리트의 폭렬발생 영향요인 분석, 수증기 압력예측 모델식 제안, 배합조건에 따른 폭렬특성 및 각각의 수열온도에서 나타나는 콘크리트의 색채변화 분석 등 이외에도 다양한 폭렬방지 대책에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.

이 중에서도 가장 중요하게 취급될 수 있는 폭렬발생 및 방지 메커니즘을 규명하고자 한 학자들 중에는 대표적으로 Consolazio, Pierre Kalifa 및 Long T. Phan, 등이 있으며, 최근에는 Y.F. Fu 등에 의한 균열 메커니즘에 관한 연구도 보고되고 있다.

3. 폭렬방지대책 및 메커니즘분석

3.1 폭렬방지대책 및 폭렬발생 메커니즘

고강도 콘크리트에서 화재시 발생하는 폭렬현상의 원인은 급격한 고온, 높은 함수율, 낮은 물시멘트 비로 보고되고 있다. 그렇다면 폭렬을 방지하기 위해서는 이러한 원인요소를 없애야 하는데, 시공 여건상 근본적으로 불가능하다. 현재 초고층 건축물 시공에 대한 건축주의 욕구가 높아지고, 건축재료의 다기능화, 고성능화가 요구됨에 따라 고강도 및 초고강도 콘크리트의 사용은 불가피하다. 이에 많은 학자들은 고강도 및 초고강도 콘크리트의 폭렬방지 기술을 개발하였는데, 콘크리트에 고온을 차단하는 방법으로 다음과 같은 4가지 방안이 있다.

- ① 함수율 및 C/W를 낮추는 방법
- ② 내화피복을 실시하여 고온을 차단하는 방법
- ③ 횡구속을 실시하여 내부에서 발생하는 횡변위에 저항하는 방법

④ 섬유를 혼입하여 수증기압을 외부로 배출시키는 방법

먼저, ①은 앞서 설명한 바와 같이 시공여건상 실현이 불가능하지만 이론적으로 메커니즘을 분석하는 것은 상식수준에서 가능하다. 또한, ②는 내화뿔질, 내화페인트, 내화판 등을 부재의 외부에 부착시켜 외부의 고열을 차단함으로써 구조체의 내부 온도를 폭렬 발생 가능온도 범위 이하로 유지시키는 방법으로 역시 상식수준에서 이해가 가능하며, ③은 내부 수증기에 의해 발생하는 고압을 견디기 위해 메탈라스 등을 이용하여 외부에 횡구속 실시하여 콘크리트의 인장력을 높임으로써 폭렬을 방지하는 방법이다.(사진 1 참조)

④의 경우는 섬유가 녹아 생긴 공극과 콘크리트 조직 내에 존재하는 다양한 공극과의 복잡한 관계로부터 수증기 배출을 이해할 수 있는데(사진 2 참조), 이 방법은 어느 방법보다 저렴하고 손쉽게 접근이 가능하다. 이에 대한 폭렬 발생 메커니즘은 다음과 같이 블리딩 공극(이하 WPB) 이론으로 설명될 수 있다.

그림 1은 저자가 새롭게 제안하고자 하는 폭렬 발생 메커니즘의 가설을 온도변화를 고려하여 단계별로 모식화한 것이다.

1 단계의 경우 고온의 환경에 노출된 콘크리트는 가열 면과 가까운 영역에서부터 수증기가 발생하기 시작하는데, 최초 발생 시기는 콘크리트의 수열온도가 100°C에 도달할 경우로써 그림 1의 (a)-2에서와 같이 모세관 공극속 잉여수가 수증기로 증발하여 콘크리트 외부로 배출되지만, 내부로도 이동하기 시작한다.

2 단계에서는 콘크리트의 수열온도가 180°C를 초과할 때 나타나는 현상으로써, 본 단계에서는 잉여수 뿐만 아니라 겔속에 존재하는 대부분의 화학적 결합수 등이 기화하기 시작한다. 이후 수증기는 모세관 공극과 기타 미세공극으로 이동되어, 대부분 WPB를 따라 그림 1 (b)-2와 같이 수직상승한 후, 최종적으로는 골재 밑의 공기포에 갇히거나 골재의 계면을 따라 존재하여 WPB에 연속적으로 쌓이게 된다.

마지막으로 3 단계에서는 골재 밑과 계면 사이의 수증기가 고열에 의해 계속적으로 축적됨에 따라 높은 수증기 압력이 작용하여 콘크리트의 인장강도 보다 커질 때 나타난다. 즉, 수증기가 가장 많이 집중되어 있는 WPB의 주위를 중심으로 서서히 균열이 발생되기 시작하다가 급격한 폭음과 함께 콘크리트의 폭렬현상이 일어나게 된다. 이때, 콘크리트 조직 내의 수증기 압력을 증대시키는데 주요한 원인으로서는 다량의 수증기를 함유하고 있는 WPB, 즉 타설시 블리딩수 및 갇힌 공극 등 공극구조에 의해 생성된 물길공극이고, WPB의 최종적 이동경로는 폭렬발생의 도화점이라는 점에서 기존 이론을 제안한 학자들과 의견을 달리 하는 부분이다.

PP섬유 (%)	플레인			횡구속제											
				메탈라스M ₁			메탈라스M ₂			유리섬유			탄소섬유		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0															
0.05															
0.10															

사진 1 횡구속 조건별 섬유혼입율 변화에 따른 폭렬성상

	PP섬유 0.05%	PP섬유 0.10%	PP섬유 0.15%
	CL+PP섬유 0.05%	CL+PP섬유 0.10%	CL+PP섬유 0.15%
	PVA+PP섬유 0.05%	PVA+PP섬유 0.10%	PVA+PP섬유 0.15%
섬유 무혼입	NY+PP섬유 0.05%	NY+PP섬유 0.10%	NY+PP섬유 0.15%

사진 2 복합유기섬유의 조합별 섬유혼입율 변화에 따른 공시체의 폭렬모습

3.2 섬유에 의한 폭렬방지 메커니즘

콘크리트의 폭렬방지를 위해 혼입되는 유기 섬유는 여러 종류의 마이크로 공극들과 네트워크를 형성하여 상호 연결되어 존재한다. 이러한 섬유가 고온에 노출된 콘크리트 조직 내에서 녹을 경우, 이때 생기는 공극은 매우 큰 거대 공극으로 존재한다. 섬유가 녹아 생긴 공극은 수많은 모세관 공극, 젤 공극, 열공극 등과 네트워크를 형성하여 콘크리트 조직 내에서 발생되는 수증기 압력에 대해 완충작용을 하고, 수증기를 외부로 배출 시키는 통로 역할을 수행하게 된다.

이때 섬유의 형상비(Aspect ratio)는 이러한 폭렬 방지에 중요한 역할을 하게 된다. P.B. Dale은 형상비가 클수록 작은 섬유 혼입률에서 폭렬이 방지된다고 주장하였는데, 형상비가 50인 섬유의 경우 1.5vol.%의 섬유 혼입률에서 폭렬이 방지 되었다면, 형상비가 100, 200인 섬유를 사용할 경우에는 각각 0.7, 0.3vol.%에서도 폭렬을 방지할 수 있다고 보고하였다. 하지만 형상비가 클수록 항상 폭렬방지에 효과적인 것만은 아니다. 본 논문에서는 다루지 않았지만, 본 연구팀의 연구결과에 의하면 같은 직경에서 형상비가 약 1580이상으로 크게 되면 섬유의 분산성이 좋지 않아 오히려 폭렬이 발생하는 것을 확인하였다.

따라서 ‘섬유의 직경 및 길이가 일정한 범위 이내일 때, 형상비가 클수록 고강도 콘크리트의 폭렬방지에 우수한 성능을 나타낸다.’는 것이 보다 정확한 표현일 것으로 생각한다.

4. 결론

본 고에서는 화재시 구조물 콘크리트의 안전성 확보를 목적으로, 폭렬방지대책 및 메커니즘에 대해 고찰·분석한 것으로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 국내·외에 알려져 있는 고성능 콘크리트의 폭렬방지 방법으로 함수율 및 C/W를 낮추는 방법, 내화피복을 실시하여 고온을 차단하는 방법, 횡구속 실시하여 내부에서 발생하는 횡변위에 저항하는 방법, 섬유를 혼입하여 수증기압을 외부로 배출시키는 방법 등 4가지 방안이 있다.

2) 기존의 폭렬관련 이론과 WPB이론에 의한 폭렬메커니즘 분석을 토대로 폭렬방지 방안을 제안하면 기존 건축물에 한해서는 내화피복을 실시하는 방법이, 신축 건축물에 한해서는 섬유를 혼입하는 방법이 양호한 것으로 판단된다.

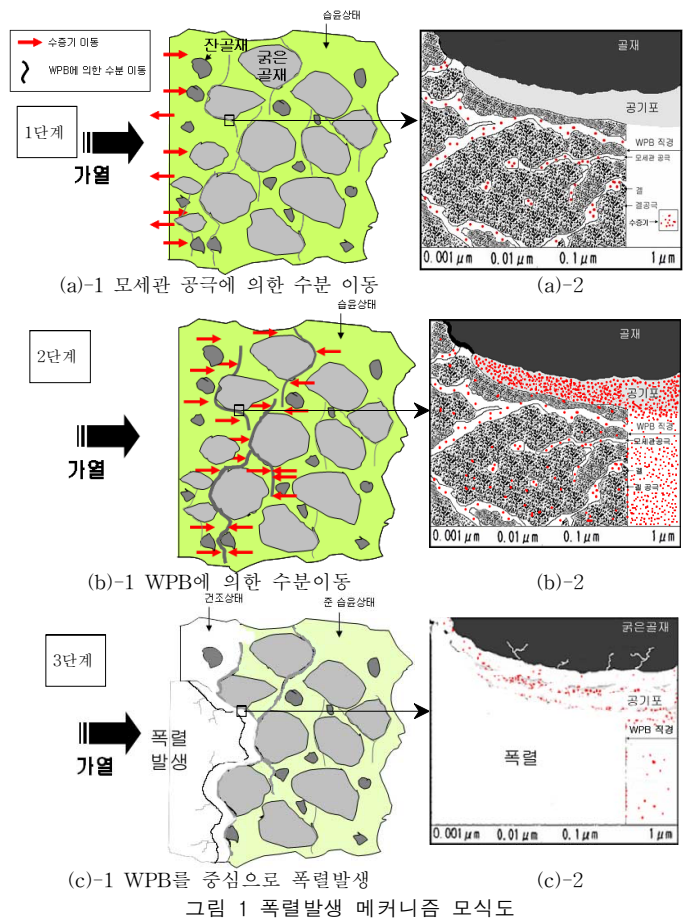


그림 1 폭렬발생 메커니즘 모식도

참고문헌

- 1) 한천구, 한민철, 허영선, “고강도 콘크리트의 폭렬발생 및 방지 메커니즘,” 한국콘크리트학회지, Vol.19, No.1, 2007, pp.94 ~100