

고강도 콘크리트 구조부재의 폭렬 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Explosive Spalling Properties of High Strength Concrete Structure Member

김 흥 열* 전 현 규**
Kim, Heung-Youl Jeon, Hyun-Kyu

ABSTRACT

This study, in order for perceiving the mechanical attribute followed by the explosive spalling of high strength concrete material under high temperature and evaluating capacity of endurance of material, targets understanding capacity of endurance of material such as explosive spalling in high temperature, temperature by thickness of clothing, transformation extent, transformation speed and displacement, stocking the maximum load based on the Allowable Stress Design Method. As a result of experimenting the explosive spalling attribute of high strength concrete material, the one possibly causing serious damage is the 50 MPa concrete. In all aspects of 60 MPa concrete, explosive spalling happens. Especially, it is hazardous enough to reveal all the iron bar. All explosive spalling is intensively concentrated on the surface of concrete for the first 5~25 minutes, which urges for the explosive spalling protection action. As a result of evaluating the structural safety by the transformation of high strength concrete, while beam assures the fire safety meeting regulation, 60 MPa shows the dramatic increase of transformation, which only counts 84% of safety. In a column, both the concrete exclusion and excessive explosive spalling are concentrated upper part of column, which brings about the dramatic transformation, so it only meets the 50% of safety regulation. Likewise, in 80, 100 MPa concrete which was never experimented considering the condition of domestic structural endurance stocking devices, the faster collapse is expected.

Keywords : High Strength Concrete, Explosive Spalling, Loadbearing Capacity

1. 서론

고강도 콘크리트 구조부재는 보통강도 콘크리트 구조부재에 비하여 고온시 폭렬을 동반한 콘크리트 탈락 등으로 인하여 내화성능이 떨어지고 이는 콘크리트 부재를 구성하고 있는 철근이 화재시 고온에 빨리 도달하여 강도저하와 열응력의 발생을 야기시켜 구조기능을 상실하는 등 내화성능상의 치명적인 결함을 지니고 있다^{2,3)}. 따라서 고강도 콘크리트 구조부재는 보통강도 콘크리트 구조부재보다 화재시 구조적인 안전성을 확보에 유의하여야 한다¹⁾. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 구조부재의 고온시의 폭렬 등에 따른 역학적 특성 파악 및 부재의 내화성능 평가를 위해서 허용응력설계법에 의한 최대하중을 재하하여 고온시 폭렬, 변형량 및 균열 등 고강도 콘크리트 구조부재의 내화성능 파악을 목적으로 하였다.

2. 시험개요

본 연구에서는 KS F 2257-1(건축 부재의 내화시험 방법 - 일반 요구 사항), KS F 2257-6, 7(건축 부재의 내화시험 방법 - 보·기둥의 성능 조건)에 따라 보와 기둥에 대한 고온시 고강도 콘크리트 구조부재의 폭렬 특성 파악을 위하여 단면치수 260×480·270×270 mm, 철근에 대한 피복두께 40·50 mm인 압축강도 40, 50, 60 MPa 구조부재를 대상으로 시험을 실시하였다. 재하 가열시험 내역은 표 1과 같다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, GS건설 과장

표 1 Test item

Member	Section Size (mm)	Protection Thickness(mm)	Length(m)	Compressive Strength (MPa)	Load(ton)	Number of Times
Column	270×270	50	3	40	137	1
				50	158	1
				60	170	1
Beam	260×480	40	5	40	22.03	1
				50	21.04	1
				60	21.04	1

3. 시험결과 및 분석

3.1 40 MPa

3.1.1 기동

가열시작 5분에 수분이 발생하기 시작하여 25분까지 지속적으로 수분이 증발하고 있으며, 43분 표면에 수직으로 길게 균열이 발생하였으며, 67분에 표면 일부에 부분적으로 탈락이 발생하였다. 또한 75분에 표면 균열 발생량이 증가하였다. 그러나 시험체에 구조적 영향을 줄 수 있는 특별한 폭렬 현상은 발견되지 않았으며, 폭렬 최대 깊이는 15 mm, 평균 폭렬 깊이는 6 mm 정도로 나타났다. 변형량은 시험이 종료된 180분에 15.5 mm로 나타났으며, 변형률 또한 177분에 8.6mm로써 최고를 나타내고 있지만 허용 수축량과 허용 변형률 30, 9 mm에 도달되지 않아 내화성능 3시간을 만족하는 것으로 나타났다.

3.1.2 보

가열시작 5~10분만에 미비하지만 콘크리트 표면의 탈락과 함께 폭렬이 발생되었으며, 이후 폭렬의 현상은 나타나지 않았다. 폭렬은 콘크리트 좌우 측면에서 발생되었다. 폭렬 최대 깊이는 39.3 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 18.8 mm로 나타났고 철근의 노출은 발생되지 않았다. 또한 가열시작 20분부터 콘크리트 표면에서 수증기가 발생되었다. 변형량은 시험이 종료된 180분에 61.7 mm로 나타났으며, 변형률 또한 시험이 종료된 180분에 1.2 mm를 보여 내화성능 3시간을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 50 MPa 콘크리트

3.2.1 기동

가열시작 5분 만에 골재의 파열을 시작으로 폭렬이 발생되기 시작하였으며, 수분의 증발과 탈락이 동시에 진행되면서 15분 만에 가열된 콘크리트의 열팽창과 하중부담 증가 등으로 인하여 기동 상부 콘크리트 표면이 모두 탈락되고, 노출된 철근은 화열과 하중에 의해 큰 변형을 발생시킴으로서 시험이 종료되었다. 폭렬 최대 깊이는 62 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 51 mm로 나타났다. 시험체는 가열시점부터 열팽창과 콘크리트 피복의 탈락, 폭렬로 이어지는 철근의 노출로 인해 변형량은 20분에 98.7 mm를 나타내 허용 변형량 30 mm를 초과하였으며, 변형률 또한 20분에 97.8 mm를 나타내 허용 변형률 5.1 mm를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 50 MPa 콘크리트 기동 시험체는 40 MPa 콘크리트 기동 시험체와는 달리 법에서 요구하는 내화성능 시간을 만족하지 못하고 초기에 붕괴되었다.

3.2.2 보

가열시작 5분 만에 골재 파열을 시작으로 폭렬이 발생되기 시작하였으며, 이러한 현상은 25분 동안 지속되어 부분적으로 철근이 노출되기 시작하였다. 폭렬은 콘크리트 좌우 측면 및 하부면 모두에서 발생되었으며, 폭렬의 범위는 시험체 전 범위에 걸쳐 모두 발생되었다. 폭렬 최대 깊이는 47.9 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 36 mm로 나타났다. 또한 가열시작 23분부터 콘크리트 표면에서 수증기가 발생되었다. 변형량은 175분에 119.2 mm를 나타내 허용 변형량 115 mm를 초과하였으며, 변형률은 174분에 5.4 mm를 나타내 허용 변형률 5.1 mm를 초과하는 것으로 나타났다. 허용 변형량과 허용 변형속도 모두를 초과하는 시점이 175분으로서 50 MPa 콘크리트 보 시험체의 내화성능 시간은 174분으로 나타났다. 또한 50 MPa 콘크리트 보 시험체는 40 MPa 콘크리트 보 시험체와는 달리 법에서 요구하는 내화성능 시간을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

3.3 60 MPa 콘크리트

3.3.1 기둥

가열시작 5분 만에 기둥 상부에서부터 골재의 파열을 시작으로 폭렬이 발생되기 시작하였으며, 18분에는 콘크리트 탈락, 폭렬 등이 복합적으로 발생되었으며, 급격한 수분의 분출에 따른 물 흘러내림 현상도 발생하였다. 12분에는 화염을 받는 4면 모두에서 콘크리트 탈락, 골재의 파열을 동반한 폭렬 등이 발생되었으며, 이러한 현상은 25분까지 지속되어 4면 모두에서 철근이 거의 모두 노출되었다. 또한 폭렬 현상은 평음과 더불어 40 MPa 콘크리트 보에서 볼 수 없었던 심각한 수준으로 진행되었다. 폭렬은 콘크리트 모든 면에서 발생되었으며, 폭렬의 범위는 시험체 전 범위에 걸쳐 모두 발생되었다. 폭렬 최대 깊이는 73.5 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 59.9 mm로 나타났다. 변형량은 104분에 65 mm를 나타내 허용 변형량 30 mm를 초과하였으며, 변형률 또한 104분에 68 mm를 나타내 허용 변형률 3 mm를 초과하는 것으로 나타났다. 허용 변형량과 허용 변형속도 모두를 초과하는 시점이 104분으로서 60 MPa 콘크리트 기둥 시험체의 내화성능 시간은 103분으로 나타났다. 또한 60 MPa 콘크리트 기둥 시험체는 법에서 요구하는 내화성능 시간을 만족하지 못하는 것은 물론 40 MPa 콘크리트 기둥 시험체와 비교하여 80분 정도 낮은 내화성능을 나타내고 있다.

3.3.2 보

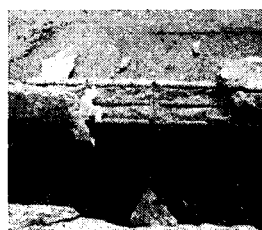
가열시작 8분 만에 보 하부에서 골재 파열을 시작으로 폭렬이 발생되기 시작하였으며, 10분에는 콘크리트 탈락, 폭렬 등이 복합적으로 발생되었으며, 급격한 수분의 분출에 따른 물 흘러내림 현상도 발생하였다. 14분에는 측면에서 콘크리트 탈락, 골재의 파열을 동반한 폭렬 등이 발생되었으며, 이러한 현상은 28분까지 지속되어 측면의 철근이 거의 모두 노출되었다. 또한 폭렬 현상은 평음과 더불어 40 MPa, 50 MPa 콘크리트 보에서 볼 수 없었던 심각한 수준으로 진행되었다. 폭렬은 콘크리트 좌우 측면 및 하부면 모두에서 발생되었으며, 폭렬의 범위는 시험체 전 범위에 걸쳐 모두 발생되었다. 폭렬 최대 깊이는 63.5 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 49.9 mm로 나타났다. 변형량은 152분에 115.2 mm를 나타내 허용 변형량 115 mm를 초과하였으며, 변형률은 153분에 7.1 mm를 나타내 허용 변형률 5.1 mm를 초과하는 것으로 나타났다. 허용 변형량과 허용 변형속도 모두를 초과하는 시점이 153분으로서 60 MPa 콘크리트 보 시험체의 내화성능 시간은 152분으로 나타났다. 또한 60 MPa 콘크리트 보 시험체는 법에서 요구하는 내화성능 시간을 만족하지 못하는 것은 물론 40 MPa, 50 MPa 콘크리트 보 시험체와 비교하여 가장 낮은 내화성능을 나타내고 있다.



(a) Column



(b) Beam



(a) Column



(b) Beam

그림. 1 Explosive spalling of 50 MPa concrete

그림. 2 Explosive spalling of 60 MPa concrete

3.4 시험결과 분석

3.4.1 기둥

고강도 콘크리트의 폭렬은 국내 표준시방서에서 고강도 콘크리트로 간주하고 있는 압축강도 40 MPa 콘크리트 기둥에서도 발생되었지만 구조부재의 화재안전성을 손상시킬 정도의 수준이 아니며, 거의 대부분 하중재해 및 화염에 따른 피복 콘크리트의 탈락 형태로 발생되어 있다. 50 MPa 콘크리트 기둥은 가열시작 5분 만에 골재의 파열을 시작으로 폭렬이 발생되고 있으며, 기둥의 열팽창에 의한 하중부담의 증가, 콘크리트 피복재의 균열 및 탈락 등이 복합적으로 작용하여 15분 만에 상부 콘크리트가 모두 탈락됨으로 붕괴되었다. 기둥 상부에 국한되지만 폭렬의 최대 깊이는 62 mm이며, 평균 폭렬 깊이는 51 mm로서 거의 모든 철근이 노출되어 졌다. 또한 60 MPa 콘크리트 기둥의 경우는 거의 모든 면에서 폭렬과 탈락이 동시에 발생되어 평균 폭렬 깊이가 59.9 mm로서 콘크리트 피복두께 50 mm를 초과함으로써 거의 모든 철근이 노출될 정도로 심각한 영향을 미치고 있다. 기둥의 폭렬 시작은 보와는 비슷한 시간대인 5분에서 시작하고 있지만 규모와 정도에 있어 더 큰 폭으로 진행되고 있으며, 보가 전체적인 면에서 고르게 폭렬이 분포되는 반면, 기둥은 국

부적으로 폭렬이 진행되다가 전체 부재로 확대되는 양상을 보이고 있다.

3.4.2 보

고강도 콘크리트의 폭렬은 압축강도 40 MPa 콘크리트 보에서도 발생되었지만 구조부재의 화재안전성을 손상시킬 정도의 수준이 아니며, 고강도 콘크리트의 화재시 구조적 안전성에 심각한 영향을 줄 수 있는 폭렬은 50 MPa 콘크리트 보에서부터 나타나고 있다. 50 MPa, 60 MPa 콘크리트 보는 화재에 노출된 모든 면에서 폭렬이 발생되고 있으며, 폭렬은 콘크리트 탈락 및 골재 파열을 동반하여 동시에 발생되고 있다. 특히 60 MPa 콘크리트 보의 경우는 평균 폭렬 깊이가 49.9 mm로서 콘크리트 피복두께 40 mm를 초과함으로써 거의 모든 철근이 노출될 정도로 심각한 영향을 미치고 있다. 또한 모든 부재에서 폭렬은 초기 5~25분 동안 콘크리트 표면에서 집중적으로 발생하고 있는 것으로 나타났다.

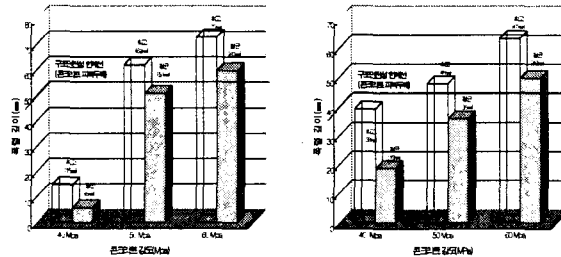


그림. 3 Explosive spalling depth and loadbearing capacity

4. 결론

화재에 노출되는 동안의 40~60 MPa 고강도 콘크리트 보 구조부재의 폭렬 특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고강도 콘크리트의 구조부재 폭렬 특성 실험결과, 압축강도 40 MPa 콘크리트에서도 발생되었지만 구조부재의 화재 안전성을 손상시킬 정도의 수준이 아니며, 고강도 콘크리트의 화재시 구조적 안전성에 심각한 영향을 줄 수 있는 폭렬은 50 MPa 콘크리트에서부터 나타나고 있다. 60 MPa 콘크리트는 화재에 노출된 모든 면에서 폭렬이 발생되고 있으며, 폭렬은 콘크리트 탈락 및 골재의 파열을 동반하여 동시에 발생되고 있다. 또한 모든 부재에서 폭렬은 초기 5~25분 동안 콘크리트 표면에서 집중적으로 발생하고 있는 것으로 나타나고 있어 표면에서의 폭렬 방지 대책이 요구된다.
- 2) 고강도 콘크리트의 변형에 따른 구조안전성 평가 결과, 보의 경우는 40, 50 MPa 콘크리트 보는 법에서 정하는 화재 안전성을 확보하고 있지만 60 MPa의 경우에는 변형이 급격히 증가하여 법적 성능의 84% 정도만이 확보되는 것으로 나타났다. 기둥의 경우는 40 MPa 콘크리트는 화재안전성을 확보하고 있으며, 50, 60 MPa 콘크리트는 가열시작 초기에 열에 의한 콘크리트의 팽창 및 하중부담 등으로 인하여 기둥 상부에서 집중적으로 콘크리트 탈락과 폭렬이 동시에 발생되면서 철근에 급격한 변형이 발생하여 법적 성능의 50% 정도만이 확보되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 실험에서 국내 내화구조 재하장비의 제조건 등을 고려해 시험이 이루어지지 않은 80, 100 MPa 이상의 고강도 콘크리트에서는 더욱 빠르게 구조적 붕괴시점에 도달될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김홍열, "고온 가열시 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 제18권 제 118호, 2002
2. Schneider, U., "Properties of Materials at High Temperatures - Concrete", RILEM - Committee 44 - PHT, Department of Civil Engineering, University of Kassel, 1985
3. American Concrete Institute, State-of-Art Report on High-Strength Concrete, ACI 363R-92, Michigan, 1992