

# 대변형률이 발생한 콘크리트 재료의 다수준 해석

## Multi-level Analysis of Prefinitely Strained Concrete Materials

최재혁\*                      송하원\*\*                      김장호\*\*\*                      박상순\*\*\*\*                      변근주\*\*\*\*\*  
Choi, Jae Hyeok              Song, Ha-Won              Kim, Jang-Jay Ho              Park Sang-Soon              Byun, Keun-Joo

### ABSTRACT

Multi-level (macro-level, meso-level, and micro-level) mechanism of prefinately strained concrete materials is studied. The multi-level analysis explains the additional quasibrittle concrete material ductility that comes from lateral confinement and their multi-level interaction mechanisms. The so-called "upgraded tube-squash test" is used to achieve 50% axial strain and over 70 degrees of deviatoric strain of quasibrittle concrete materials under extremely high pressure without producing visible cracks. In the micro-level analysis, the variations of hydration rate, micropores, and hydrate phases are analyzed. In the meso-level analysis, mesocracks (the initial invisible cracks) at the interfaces between aggregates and cement paste matrices are studied. The high confining effect in the specimen on the meso-level cracks is also studied. In the macro-level analysis, the physical behavior of prefinately strained concrete materials is studied. The co-relationships of the results from the three distinct levels of analyses based on various prestraining (0%, 15%, 35%, and 50%) are studied.

For the extremely deformed or strained concrete problems, multi-level analysis will be used to explain the unclear and unstudied mechanism of concrete materials. The multi-level analysis can provide us with valuable insights that can explain the additional ductility and confining effects in concrete.

### 1. 서론

지진과 같은 극한 상황으로 인하여 대변형률이 발생되도록 구속된 콘크리트에 가능한 최대의 연성을 확보하는 것은 구조의 안정성 확보를 위하여 매우 중요하다. 그러나, 기존의 거시적(macro) 수준의 해석으로는 연성거동의 정확한 규명이 불가능하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 대변형률이 발생한 콘크리트 구조의 연성거동 규명시, 콘크리트 구조의 응력-변형을 관계의 거시적 수준, 골재-시멘트풀 계면(interface)의 중시적 수준(meso), 수화 및 미세구조 거동의 미시적(micro) 수준의 상호작용 메커니즘을 도입하여 구조의 연성기구를 해석할 수 있도록 다수준 해석(Multi-level Analysis)을 수행하였다. 이를 위해 대변형률이 발생한 콘크리트 구조에 도입하기 위해서 횡방향 구속을 가진 개선된 튜브압축실험(upgraded tube-squash test)이 수행된다.

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 연구조교

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수, 현재 동경대학교 토목공학과 객원연구원

\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 대학원 박사과정

\*\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

이 실험에 의해 변형된 시편의 다수준 통합해석을 위해 DTA/TG(Differential Thermal Analysis/Thermo-Gravity) 분석, XRD(X-Ray Diffractometer) 분석, FESEM(Field Emission Scanning Electronic Microscope) 분석, NMR(Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy) 분석, MIP(Mercury Intrusion Porosimetry) 분석 등을 도입한다.

이러한 다수준 해석을 통해 횡방향 구속하에 대변형률이 발생한 콘크리트의 추가적인 연성이 다수준 상호작용 메커니즘에 의하여 결정됨을 규명한다.

다수준 해석 결과는 지금까지의 거시적인 관점에서의 역학적 관계에 중심을 두었던 콘크리트 구조물의 수치해석 혹은 FEM 해석 등에 재료적인 특성을 중시하는 중시적, 미시적 관점을 결합시켜 통합적인 관점에서 구속된 콘크리트의 거동을 확실히 예측하고, 더욱 합리적인 설계를 도모하는 기반을 마련해준다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 개선된 튜브압축실험(upgraded tube-squash test)

콘크리트 재료(시멘트 풀, 시멘트 모르타르, 콘크리트)에 50%이상의 축방향 변형률이 얻어지도록 스테인레스 스틸 튜브에 의해 구속된 압축 실험을 수행하는 개선된 튜브압축실험의 순서는 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 재료와 스테인레스 스틸 튜브(65.0mm(외부지름) x 46.5mm(내부지름) x 93.0mm(높이))를 준비한다.
- (2) 스테인레스 스틸 튜브의 안쪽에 배합된 콘크리트 재료가 채워진다.
- (3) 콘크리트 재료가 채워진 튜브시편은 항온항습조(습도 60%, 온도 20℃)에서 28일간 양생되어진다.
- (4) 개선된 튜브압축실험이 표 1과 같이 배합설계된 콘크리트, 시멘트 모르타르, 시멘트 풀이 채워진 튜브와 빈 튜브에 대하여 수행되어진다. 하중은 변위제어 ( $2.0 \times 10^{-2}$  mm/sec)를 통해 재하한다. 실험준비가 완성된 상태는 그림 1과 같다.
- (5) 축방향 압축변형률 15%, 35%, 50%가 얻어지도록 실험을 모든 시편에 대하여 수행한다.

표 1 배합표

배합 콘크리트 재료	물시멘트비 (W/C(%))	굵은골재 최대치수 (mm)	공기량 (%)	단위수량 (kg)	단위 시멘트량 (kg)	잔골재 (FM=2.50)		
						잔골재율 (%)	단위 잔골재량 (kg)	단위 굵은골재량 (kg)
콘크리트	40	10	3	228	573	50	736	748
시멘트 모르타르	40	시멘트 : 잔골재 (무게 비율)=1 : 2.45		228	573		1403	
시멘트 풀	40			228	573			

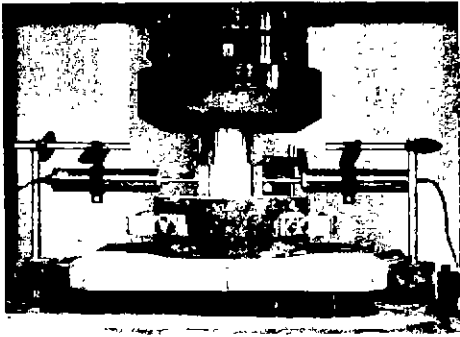


그림 1 실험준비 완료 후 모습

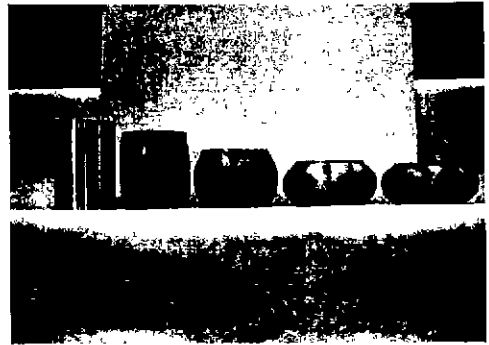


그림 2 0%, 15%, 35%, 50%, 50% 이상  
축방향 변형의 비교

## 2.2 미시적, 중시적 실험 수행을 위한 시료의 준비

- (1) 개선된 튜브압축실험이 끝난 직후, 변형이 일어난 튜브시편에서 콘크리트 재료 코어를 채취하여 아세톤-에탄올(1:1)용액에 곧바로 저장된다.
- (2) 48시간 후, 저장된 시료를 꺼내어, 60°C의 진공건조로에 2일동안 건조시킨다.
- (3) FESEM 분석을 위하여, 시료를 적당한 크기로 분리하여 충격이 가해지지 않은 면을 분석한다.
- (4) XRD, DTA/TG, NMR 분석을 위해 시료를 가루로 만든다.
- (5) MIP분석을 위하여 시료를 3~5mm의 크기로 분리한다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 거시적 분석

그림 2는 변형된 콘크리트 재료가 들어가 있는 튜브시편변형률(0%, 15%, 35%, 50%, 50% 이상)의 하중-변위 거동을 보여준다. 그림 3은 각각의 콘크리트 재료의 힘-변위관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 stage 1은 탄성영역(elastic stage)을, stage 2는 비탄성 경화영역(inelastic hardening stage), stage 3은 최대응력영역(peak stress stage), stage 4는 후경화 영역(post-hardening stage)으로 특히 후경화 영역은 하중의 증가에 따라 강성이 더욱 증가

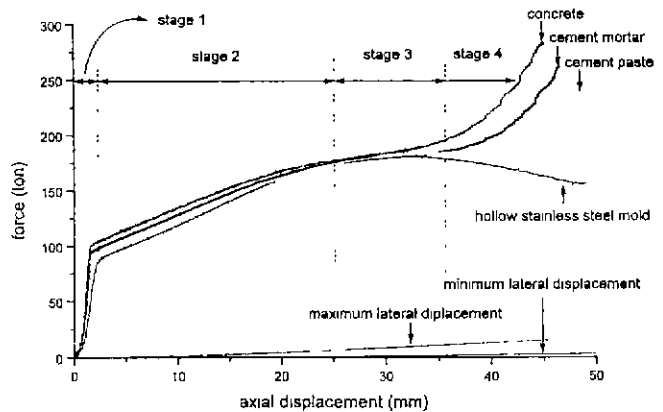


그림 3 개선된 튜브압축 실험의 콘크리트 재료별 하중-변위 곡선

되며 변위가 증가하는 최대 응력이후의 경화현상을 보여준다. Stage 1 ~ Stage 3은 Bongers<sup>1)</sup>의 설명과 유사하다. 또한, 개선된 튜브압축실험의 결과는 Rutland<sup>2)</sup>의 구속실험에서 보다 더 큰 변형과 힘을 가한 것이다. 튜브내의 콘크리트 재료를 분리하여 일축압축실험을 하면 그 강도는 7~3ton 정도(시멘트 풀 7ton, 시멘트 모르타르 및 콘크리트 3~4ton)에 불과하다.

### 3.2 중시적 분석

FESEM을 통한 각 단계에서의 변화를 보면 골재와 시멘트 풀 사이의 계면의 수화물이 0%의 축방향 변형률에서 50%의 축방향 변형률로 갈수록 파괴되고, 골재와 시멘트 풀 사이의 간격도 변화됨을 알 수 있다. 특히 35%와 50% 축방향 변형률에서는 계면에서의 수화물의 변화와 간격의 변화가 큼을 알 수 있다. 계면에서 시작되는 중시균열은 어느 정도 진행되는 것이 관찰되나, 주균열로 발전됨은 보이지 않는다.

### 3.3 미시적 분석

미시적 분석은 MIP 분석과 FESEM분석의 경우를 제외하고는 시멘트 풀에 대한 분석이 주를 이룬다. 그 이유는 시멘트 모르타르나 콘크리트의 경우 굵은 골재와 잔골재의 영향으로 실험결과와 신뢰성이 떨어지기 때문이다. 그리고 수화의 경우 거의 시멘트 풀 부분에서 일어나므로 이러한 분석이 가능하다. 이러한 분석은 Reinhardt<sup>3)</sup>가 연구한 바와 같은 수화와 미세구조의 내용을 기초로 하여 수행되어진다. 각 실험에서 개선된 튜브압축 실험의 시멘트 풀 가운데 부분에서 추출한 시료를 CCP(Center portion of Cement Paste), 가장자리에서 추출한 시료를 RCP(Round portion of Cement Paste)로 나타낸다.

DTA/TG 분석 결과 그림 4와 같이  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  수화물의 양(Degree of Intensity)은 축방향 변형률이 커질수록 많아짐을 나타낸다. 즉 CCP의 경우 그 수화도가 커짐이 확실하다. 이는 하중의 증가에 따른 수화의 계속적인 발생 즉, 재수화(rehydration)의 증거가 된다. RCP의 경우 축변형률 35%에서 수화율이 최고에 이르렀다가 50%에서 약간 줄어드나 수화율이 초기상태보다 커진 경향은 바뀌지 않는다.

XRD의 분석결과도 그림 5와 같이 DTA/TG의 분석과 비슷한 경향을 나타낸다. 그림 5에서  $P_1$ 은  $18^\circ$ 에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크를,

$P_2$ 는  $29^\circ$ 에서  $\text{C}_3\text{S}$ 의 피크를,  $P_3$ 는  $34^\circ$ 에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크를 나타낸다. 다만 축변형률 0%에서 15%로 축방향 변형률 진행시 수화율이 떨어지는 것은 XRD가 결정면의 회절을 이용하는 기기이므로 압축이 가해지면서 결정면이 깨지는 영향 때문인 것으로 판단된다.

NMR분석은 Si의 중합도를 이용하여 수화의 변화를 알 수 있는데, 표 2와 같이 50% 축방향 변형률에서 0% 보다  $Q^1$ (Si 결합 1개) 상태가 많아지고  $Q^0$ (Si 결합 0개) 상태와  $Q^2$ (Si 결합 2개) 상태가 적어짐을 알 수 있다. 이는 재수화(rehydration)와 미수화(dehydration)가 동시에 일어남을 알 수 있다.

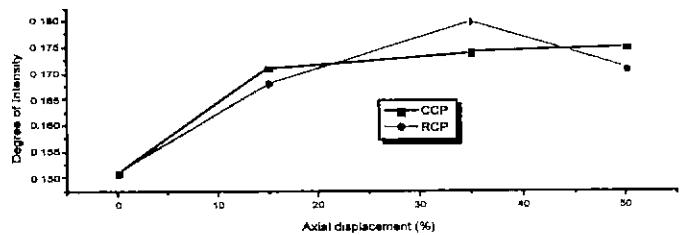


그림 4 DTA/TG 분석

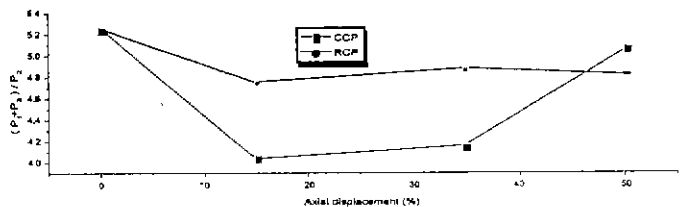


그림 5 XRD 분석

표 2 NMR 분석

영역	(Q <sup>1</sup> +Q <sup>2</sup> )영역 / 전체영역	Q <sup>1</sup> 영역 / (Q <sup>1</sup> +Q <sup>2</sup> ) 영역	Q <sup>2</sup> 영역 / (Q <sup>1</sup> +Q <sup>2</sup> ) 영역
Si 중합도			
0% 변형	0.67	1.40	0.68
50% 변형 CCP	0.64	1.78	0.56
50% 변형 RCP	0.58	0.81	0.56

MIP 분석결과 그림 6과 같이 평균 기공의 지름과, 기공의 차지비율도 0% 축방향 변형률에서 보다 50%에서 낮아짐을 알 수 있다. 여기서 CCM(Center portion of Cement Mortar)와 RCM(Round portion of Cement Mortar)는 CCP와 RCP에서 시멘트 풀이 시멘트 모르타르로 바뀐 것이다.

이러한 분석결과는 FESEM분석을 통하여 더욱 확실히 그 변화를 확인할 수 있다. 그림 7을 보면 0%에서는 다양하게 보이는 수화물들이 변형률이 커질수록 모양이 변하고, 재배치가 일어나며, 50%에 가서는 0%의 상태와는 전혀 다른 형태의 배치를 가지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 미시적 해석의 결과는 Song<sup>4)</sup>의 연구의 결과에서 예상되었던 것과 일치한다.

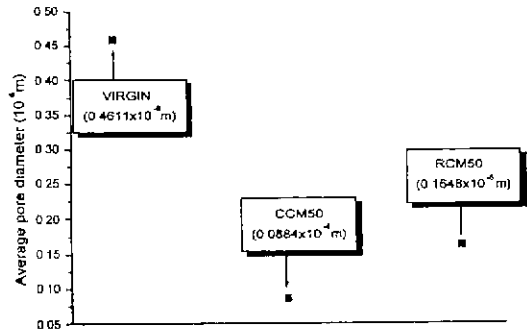
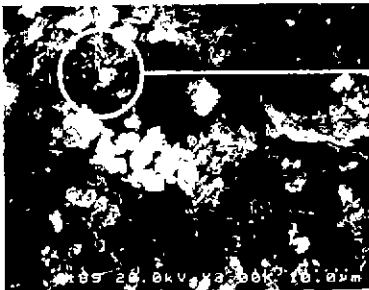


그림 6 MIP 분석



(a) 0% 변형, 3,000x 배율 (CCP)



(b) 0% 변형, 15,000x 배율 (CCP)



(c) 50% 변형, 3,000x 배율 (CCP)



(d) 50% 변형, 15,000x 배율 (CCP)

그림 7 FESEM 해석

#### 4. 결론

다수준 해석을 통한 상호작용 메커니즘을 통해서 콘크리트 재료의 대구속하의 거동을 규명한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 개선된 튜브압축실험은 콘크리트 재료(시멘트 풀, 시멘트 모르타르, 콘크리트)에 50%이상의 축방향 변형률이 발생한다. 이 실험으로 얻어진 거시적 수준에서의 하중-변위곡선의 형태는 탄성영역, 비탄성 경화영역, 최대 응력영역에서는 높아진 하중수준과 변위에도 불구하고 기존의 삼축압축 실험의 결과와 비슷한 경향을 나타낸다. 하지만 후경화 영역에서는 기존의 삼축압축실험과는 다르게 강성의 증가를 동반한 경화현상을 나타낸다.

(2) 거시적 수준에서의 후경화 영역이 축방향 변형률 35% 이상에서 가능한 것은, 충분한 횡방향 구속을 통하여 주균열이 일어나지 않는 상태에서, 대변형률이 일어나는 콘크리트 재료의 거동에 유리한 중시적, 미시적 변화가 축방향 변형률 35% 이전인 최대 응력영역 이전에서부터 일어나기 때문이다. 즉 축방향 변형이 커짐에 따라 중시적 수준에서는 골재와 시멘트 풀 사이의 계면의 수화물이 부서지고 주응력의 방향에 따라 골재가 대치할 수 있게 되며, 주균열로 발전하지 않는 중시균열이 계면, 시멘트 풀 그리고 골재 자체에도 생긴다. 미시적으로는 수화물의 재수화와 미수화가 일어나고, 각 미세구조 및 수화물이 부서진 후 재배치가 일어나게 되어 균질한 재료의 성격을 가지게 한다. 이러한 변화는 후경화 영역에 가까워 질수록, 불균질한 취성 재료인 콘크리트 재료가 추가적인 연성을 가진 균질한 재료와 비슷한 거동을 하게 한다.

(3) 결론적으로 강력한 구속효과는 콘크리트 재료의 강도와 연성에 응력-변형률 곡선의 전 영역에 걸쳐서 영향을 주나, 미시적 수준과 중시적 수준의 변화는 구속효과가 떨어지는 후경화 영역에 가까워 질수록 더 많은 영향을 주게 된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Bongers, J.P.W. (1998), Multilevel Analysis of Concrete in Multiaxial Compression, *Computational Modelling of Concrete Structures*, de Borst, R., Bicanic, N., Mang, H., and Meschke G. (eds), Vol. 1, pp. 347-354.
- (2) Rutland, C.A. and Wang, M.L. (1997), "The Effects of Confinement on the Failure Orientation in Cementitious Materials Experimental Observations", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 149-160.
- (3) Reinhardt, H.W. (1994), "Relation Between the Microstructure and Structural Performance of Concrete", A. Aguado, R. Gettu and S.P. Shah (eds.), *Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications*, E&FN Spon., London, pp. 19-30.
- (4) Song, H-W., Kim, J-H., Choi, J-H. and Byun, K-J. (1999), Microscopic Analysis of Prefinitely strained Cement Paste, *KCI Concrete Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 127-140.