

콘크리트 손상 모델을 적용한 콘크리트 구조물 구조내력 해석

Numerical Analysis of Load Carrying Capacity of RC Structures Based on Concrete Damage Model

우 상 균¹⁾ 이 윤^{2)*} 이 성 태³⁾
Woo, Sang Kyun Lee, Yun Yi, Seong Tae

Abstract

In this paper, nonlinear analysis for reinforced concrete structure for power transmission line is performed by considering the characteristics of the failure, which are depend on loading conditions and concrete material models. On the numerical evaluation for the failure behavior, the finite element analysis is applied. For the concrete material model, microplane model based on concrete damage is introduced. However, to describe the crack bridging effect of long and short fiber of steel fiber reinforced concrete (SFRC), tensile softening model is suggested and applied for SFRC. An numerical results by finite element technique are compared with the experiment results for box culvert specimen. Comparing on the experimental and analytical results, validity and reliability of numerical analysis are investigated.

Keywords : Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), Concrete damage, Finite element analysis, Crack width, Box culvert

1. 서론

현행 전력구 구조물에 대한 구조건전성 평가시스템은 현재 운행중인 구조물의 건전성을 평가하여 그 결과를 바탕으로 구조물의 변형원인 추정과 대책공법의 선정을 실시하는 진단시스템과 과거의 조사 데이터, 구조제원, 개보수 이력 등의 각종 데이터를 관리하는 데이터시스템으로 구성된다. 구조물 변형에 의한 균열 발생시 구조상의 문제에 대한 구조건전성 평가 시스템은 강섬유보강콘크리트(양수터널 구조물)와 철근 콘크리트(전력구 구조물)를 대상으로 하고 있으며 구조내력을 추정함과 동시에 변형의 진행성, 하중중대의 가능성 등을 총체적으로 고려하여 구조건전성을 평가한다. 구조내력의 평가는 운행중인 구조물에 대한 균열탐사를 통한 균열발생 패턴을 분석하고 이를 구조물의 해석결과와 비교하여 향후 균열을 고려한 잔존 구조 내하력의 평가에 기반을 두고 있다. 실제 구조물의 균열탐사로부터 측정되는 균열패턴과 균열폭, 균열길이는 구조물의 크기와 형태, 상재하중에 따라 매우 다양한 형태를 나타내므로 다양한 인자를 고려한 실험을

통한 구조내력의 결정은 불가능한 실정이다. 따라서 이러한 다양한 영향인자를 고려할 수 있는 균열발생원인의 추정과 패턴 분석, 기존균열을 고려한 구조내력의 해석적 산정에 관한 방안이 절실한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 다양한 조건하에서 콘크리트 손상 모델을 적용하여 구조물의 구조내력 산정을 위한 유한요소해석을 수행하여 이를 실험결과와 비교, 검증하여 실제 구조물의 잔존 구조 내하력을 산정할 수 있는 수치해석모형을 개발하였다.

2. 콘크리트 구조물의 유한요소해석

2.1 양수터널 구조물

2.1.1 해석 개요

이 논문에서는 원형 양수터널 구조물의 내하력 예측을 위해 양수터널에 사용되는 강섬유보강콘크리트(SFRC)로 제작된 콘크리트구조물 모형 실험체를 대상으로 비선형 유한요소해석을 수행하였다. (한국남동발전, 2010)대

1) 정회원, 한국전력공사 전력연구원 파워시스템연구소 책임연구원

2) 정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수, 교신저자

3) 정회원, 인하공업전문대학 토목환경공학과 교수

* Corresponding author : yunis@dju.ac.kr 042-280-2525

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

상구조물로는 상재하중과 토압을 고려한 균열거동을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 3방향 하중을 받는 양수터널 모형 실험체를 대상으로 하였다. 하중재하 위치는 상부에는 단조 증가하중이 재하되며 측면의 토압 분포를 재현하기 위해 측면에 일정한 하중을 재하하였다. 해석에 사용된 재료특성은 Table 1과 같으며 양수터널 모형 실험체 해석모델은 Fig. 2와 같이 콘크리트는 8절점 솔리드요소를 이용하여 모델링하였다. 양수터널 모형 해석시 측면하중은 상부하중이 재하되기 전 일정한 사전하중으로 입력하여 해석을 수행하였으며, 변위제어를 통해 상부하중을 재하하였다.

이 연구에서 수행된 수치해석에서는 해석시간을 단축하기 위해 양수터널 구조물의 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 전체 구조물을 1/2 모델링하였고, 종방향 터널을

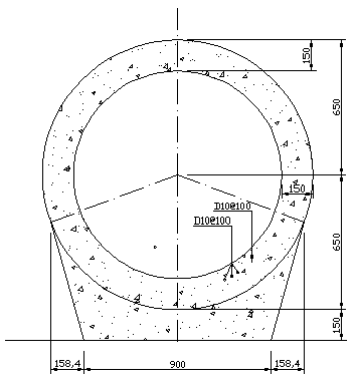


Fig. 1 Configuration of Tunnel (unit : mm)

Table 1 Material Property of SFRC

	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)
SFRC	2.50E+4	0.18	2.50	29

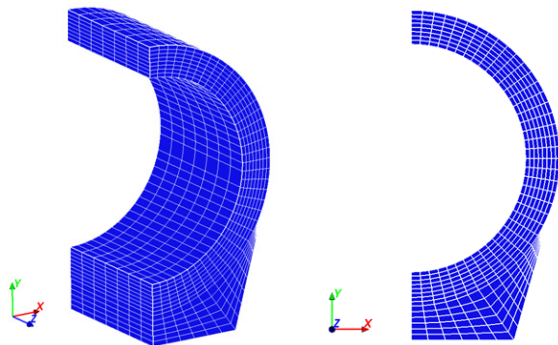


Fig. 2 Finite Element Mesh Modelling of SFRC

200mm로 분할하여 Z축 방향으로 200mm로 모델링하였다.

2.1.2 SFRC 인장강도-균열 모델

강섬유가 없는 휨실험체의 휨인장강도 결과를 보면, 휨인장강도의 평균값은 5.09 MPa이고 표준편차는 0.301 MPa를 나타내었다. 섬유혼입률이 증가할수록 초기균열 발생 강도 및 휨인장강도가 대체로 증가하는 경향을 보였다. SFRC의 휨강도는 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{3P_{max}L}{2b(h-a_0)^2} \quad (1)$$

P_{max} = 최대하중, L = 지간, b = 폭, a_0 = 노치길이이다.

일반적으로 SFRC에서 노치를 내지 않은 보 실험은 휨강도 또는 휨인성 평가 등에 주로 이용되는 방법이며, 노치 낸 보에 대한 실험은 파괴역학 개념을 이용하여 파괴에너지 또는 일축인장거동을 파악하고자 할 때 주로 이용되는 방법이다. 노치 낸 보의 실험에서도 유효단면 높이를 이용하여 휨인장강도를 계산할 수 있지만 노치를 내지 않은 보에서 구한 휨인장강도와 비교할 때 동일한 값을 나타내는지에 대해서는 아직 논쟁의 여지가 있다.

SFRC에서 섬유의 배열은 시험체의 표면에서는 경계면 효과(wall effect)에 의해 섬유가 표면에 나란하게 배열된다. 그러나 섬유보강 콘크리트에 노치를 낼 경우, 균열이 표면으로부터 얼마만큼 떨어진 위치에서부터 진행되기 때문에 섬유의 배열이 표면에서보다 임의방향으로 골고루 분포되어 있을 것이고, 경계효과를 제거함으로써 보다 실제에 가까운 섬유보강 콘크리트의 인장강도를 평가할 수 있다. 따라서 노치가 없는 실험체에서 구한 휨인장강도는 과대평가될 수 있다.

한편 노치가 있는 보에서는 노치로 인해 균열이 진행되는 경로가 미리 정해지게 되는데, 실제 섬유보강 콘크리트 구조물에서는 노치가 없는 상태로 균열의 진행이 인장저항력이 가장 약한 경로에 의해 이루어진다. 이것은 노치가 없는 보의 실험결과가 섬유보강 콘크리트의 거동을 보다 정확하게 나타냄을 의미한다.

Naaman et al.(2007)의 연구결과에 의하면, 단섬유와 장섬유를 혼합하여 사용한 하이브리드 SFRC에서 노치가 없는 보의 4점 재하 실험을 통해 얻은 휨강도가 노치 낸 보의 3점 재하 실험으로 구한 휨강도에 비해 약 40% 정도까지도 작게 나타난다고 보고하고 있다. 한편 Chanvillard et

al.(2003)과 Marković(2006)은 노치가 없는 경우에 직접 인장강도 및 휨인장강도가 약간 작은 정도라고 밝히고 있다. 그들의 연구결과에 따르면, 노치가 없는 실험체에서 구한 강도가 노치 낸 실험체에서 구한 값에 비해 약 5~10% 정도 작게 나타낸다. 한편 Habel et al.(2002)의 연구에서는 노치가 없는 실험체에서 구한 인장강도가 노치 낸 실험체의 결과보다 더 좋은 것으로 나타났다. Chanvillard et al.(2003)과 Habel et al.(2002)의 연구에서는 섬유 직경은 0.2mm, 섬유길이는 13mm의 높은 인장강도를 가진 장섬유를 사용하였으며, Marković(2006)의 연구는 l_f/d_f 가 각각 13/0.2와 60/0.7(mm/mm)인 장섬유와 단섬유를 혼합하여 사용한 하이브리드 장섬유 보강 콘크리트에 대한 결과이다.

현재까지의 연구결과로 판단할 때에는 노치의 유무의 영향을 강도에 크게 영향을 주지 않는 것으로 보는 것이 타당하다.

따라서 섬유혼입률에 따른 휨강도는 회귀분석을 통해 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{cu} = 5.09 + 1.111 V_f \quad R^2 = 0.87 \quad (2)$$

$$\sigma_{cu} = 5.51 + 1.087 V_f \quad R^2 = 0.86 \quad (3)$$

$$\sigma_{cu} = 5.43 + 1.035 V_f \quad R^2 = 0.79 \quad (4)$$

여기서, V_f = 섬유혼입률(kg/m³, %)이다.

식 (2)는 장섬유(long fiber)의 경우이고, 식 (3)은 단

섬유(short fiber)의 경우이며, 식 (4)는 두 가지 모두를 고려한 회귀분석식이다. 다음 Fig. 3은 회귀분석 한 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 단섬유의 경우가 장섬유의 경우보다 약간 큰 휨강도 값을 나타내며 이는 균열면을 따른 섬유의 분포가 장섬유보다 고른 것에 원인이 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 SFRC의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida et al.(1995), Kitsutaka (1997)가 제안한 역해석 방법을 사용하였다. FEM 역해석에 사용된 유한요소 모델은 2020개의 절점과 1677개의 삼각형 평면응력요소로 구성하였으며, 실험체 중앙의 노치부는 균열진전 상태를 정확하게 평가하기 위해서 매우 작은 크기의 요소를 이용하여 모델링하였다. 본 연구에서 하중-CMOD 관계의 실험 결과를 해석의 입력값으로 사용하는 것을 검토했으며, Fig. 4와 Fig. 5는 유한요소해석 역해석을 통해서 얻어진 인장연화곡선과 이를 SFRC의 인장모델로 사용하여 하중-CMOD

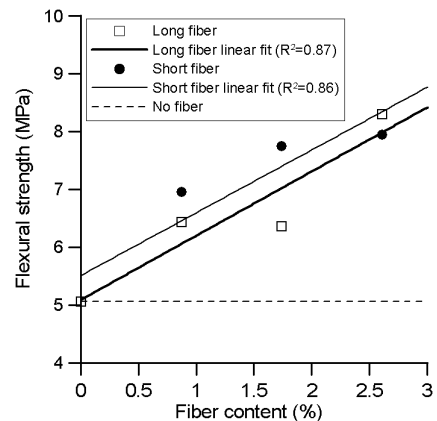


Fig. 3 Flexural Strength with Fiber Content

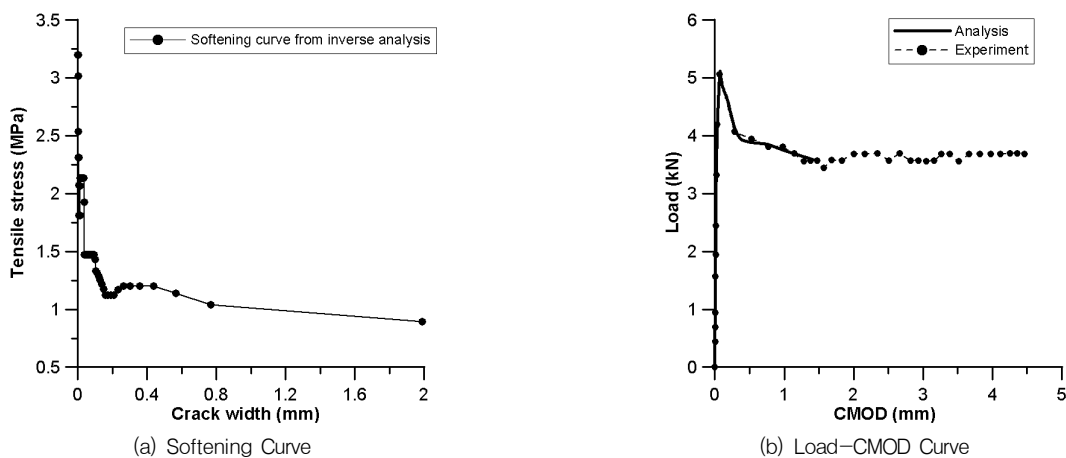


Fig. 4 Inverse Analysis Result (Long Fiber, $V_f=1.74\%$)

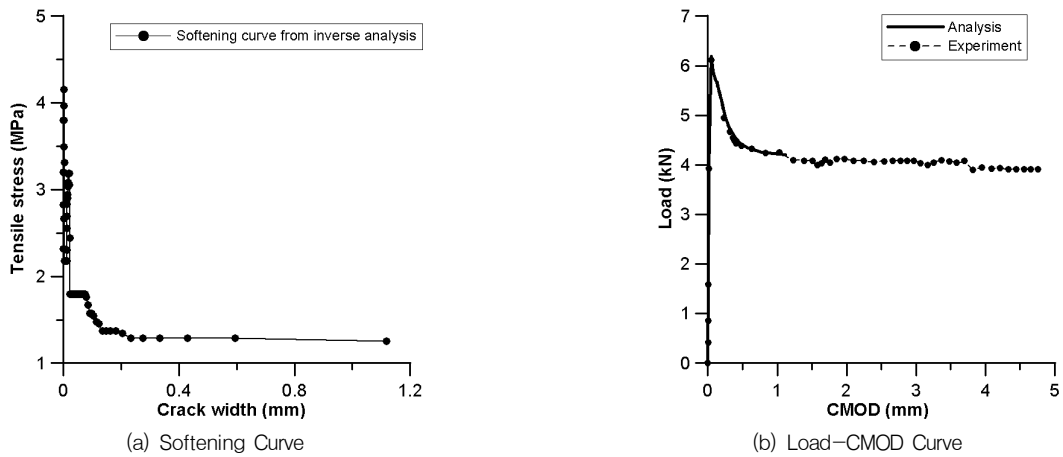


Fig. 5 Inverse Analysis Result (Short Fiber, $V_f=1.74\%$)

Table 2 Material Property of Box Culvert

	Elastic Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)
Concrete	2.50E+4	0.18	2.50	29
Reinforcement	1.90E+5	0.3	420	420

관계와 실험결과를 예측한 결과를 나타낸다. 장섬유 및 단섬유 SFRC에 대하여 모두 인장연화관계가 얻어진 범위까지 하중-CMOD관계를 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 역해석을 통해 도출한 인장연화곡선이 인장모델로서 실제 SFRC의 균열거동을 잘 나타냄을 알 수 있다.

2.2 박스형 전력구 구조물

2.2.1 해석 개요

박스형 전력구 구조물의 내하력 예측을 위해 대상구조물로는 상부하중과 토압을 고려한 균열거동을 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 권용길 등(2008)에 의해 수행된 3방향 하중을 받는 전력구 모형 실험체를 대상으로 하였다. 하중재하 위치는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 상부에는 단조 증가하중이 재하되며 측면의 토압 분포를 재현하기 위해 측면에 일정한 하중을 재하하였다. 또한 전력구 모형 실험체 해석모델은 Fig. 7과 같이 콘크리트는 8절점 솔리드요소를 이용하여 모델링하였고 철근의 경우 2절점 트러스요소를 사용하였다. 또한 구조물의 균열에 따른 철근과 콘크리트의 부착-슬립(bond-slip) 거동을 모사하기 위해 철근요소와 콘크리트 요소사이에 4절점 부착요

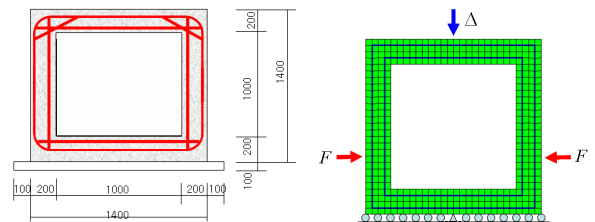


Fig. 6 Configuration of Box Culvert (Kwon et al., 2008)

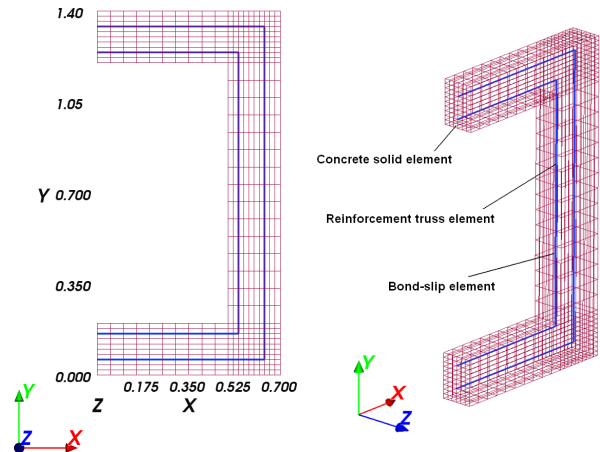


Fig. 7 Finite Element Mesh Modelling of Box Culvert

소(bond element)를 모델링하였다. 전력구 모형 실험 모델은 측면하중은 상부하중이 재하되기 전 일정한 사전하중으로 입력하여 해석을 수행하였으며, 변위제어를 통해 상부하중을 재하 하였다. (한국전력공사, 2009)

2.2.2 해석 개요

3차원 콘크리트 구성모델로는 현재 3차원 모델중 콘크리트의 다축압축, 인장균열을 효과적으로 모사하는 손상

균열모델 기반의 미소면 모델(Microplane model)을 재료모델로 사용하였으며, 철근의 경우는 Fig. 8과 같은 이선형 응력-변형률 관계를 사용하였다. 부착-슬립거동을 구현하기 위해 철근과 콘크리트 사이의 부착-슬립 관계는 식 (5) 및 Fig. 9와 같은 부착응력-슬립 관계를 사용하였다.

$$\tau_b = 981w_b - 57,361w_b^2 + 837,383w_b^3 \quad (5)$$

여기서, τ_b 는 부착응력(MPa) 이고, w_b 는 부착슬립량(mm)이다.

이 연구에서 수행된 수치해석에서는 해석시간을 단축하기 위해 전력구 구조물의 대칭성을 고려하여 Fig. 7과

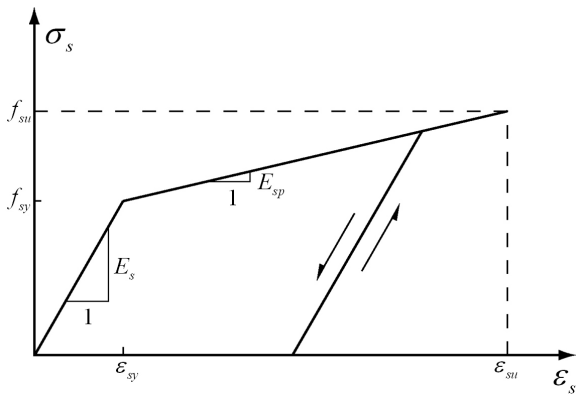


Fig. 8 Stress-Strain Curve of Reinforcement

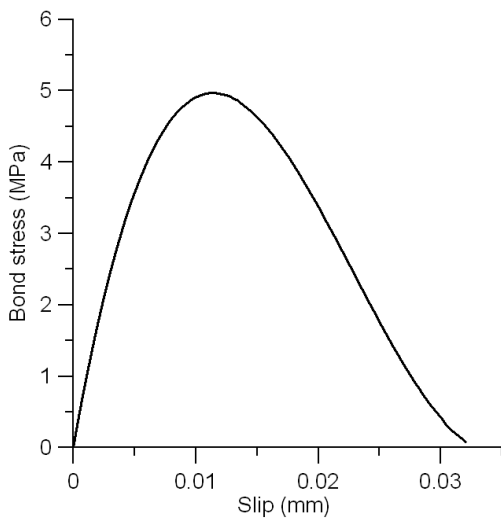


Fig. 9 Bond Stress-Slip Curve

같이 전체 구조물을 1/2 모델링하였고, 전력구 실험체의 종방향 철근간격이 200mm인 점을 고려하여 종방향 터널을 200mm로 분할하여 Z축 방향으로 200mm로 모델링하여, KAIST 콘크리트 연구실에서 개발한 콘크리트 전용해석프로그램 CONSA V1.1을 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 유한요소해석 결과

Fig. 10은 구조물의 파괴시 최대 주응력 분포를 나타낸다. 양수터널 상부슬래브의 하단은 균열발생 후 변형연화(strain softening) 현상에 따라 작은 인장응력을 나타내며 벽체 하단에 최대 인장응력이 나타남을 알 수 있다. Fig. 11은 최소 주응력 분포를 보이고 있으며, 슬래브 상단 중앙부에서 최대 압축응력을 받고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 수치해석으로 산정된 손상지수(damage index)의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 양수터널 슬래브 하단 중앙부에서 재료의 손상이 매우 크며 특히 인장철근이 지나지 않는 단면에서 최대 손상지수가 검출되는 것으로 나타났다. 또한 슬래브와 벽체의 접합부 상단과 벽체의 상단부에서 큰 손상지수값을 보이는 것으

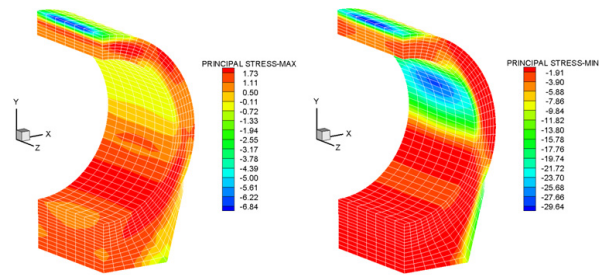


Fig. 10 Maximum Principal Stress Distribution (MPa) Fig. 11 Minimum Principal Stress Distribution (MPa)

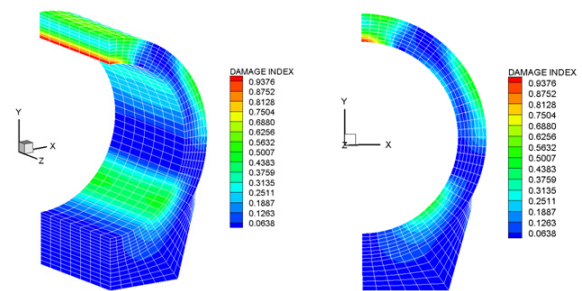


Fig. 12 Damage Index Distribution

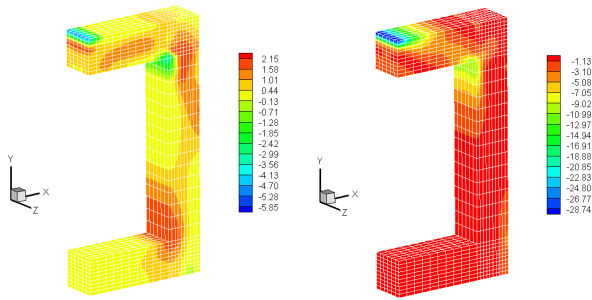


Fig. 13 Maximum Principal Stress Distribution (MPa) Fig. 14 Minimum Principal Stress Distribution (MPa)

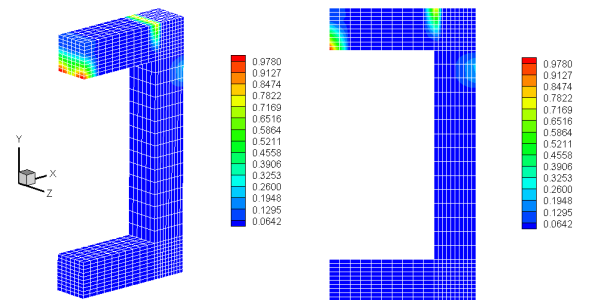


Fig. 15 Damage Index Distribution

로 나타났다. 이러한 손상지수의 분포로부터 구조물의 균열 및 파괴양상을 알 수 있으며, 파괴실험으로부터 관측된 균열양상과 해석으로부터 예측된 균열양상이 매우 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 13은 전력구 구조물의 파괴시 최대 주응력 분포를 나타낸다. 전력구 상부슬래브의 하단은 균열발생 후 변형연화(strain softening) 현상에 따라 작은 인장응력을 나타내며 벽체 하단에 최대 인장응력이 나타남을 알 수 있다. Fig. 14는 최소 주응력 분포를 보이고 있으며, 슬래브 상단 중앙부에서 최대 압축응력을 받고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 수치해석으로 산정된 손상지수(damage index)의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 전력구 슬래브 하단 중앙부에서 재료의 손상이 매우 크며 특히 인장철근이 지나지 않는 단면에서 최대 손상지수가 검출되는 것으로 나타났다. 또한 슬래브와 벽체의 접합부 상단과 벽체의 상단부에서 큰 손상지수 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 손상지수의 분포로부터 구조물의 균열 및 파괴양상을 알 수 있으며, 이를 토대로 구조물의 균열 형태를 예측하면 Fig. 16과 같다. 파괴실험으로부터 관측된 균열양상과 해석으로부터 예측된 균열양상이 매우 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 17에 수치해석에서 얻은 수직하중-변위관계를 권

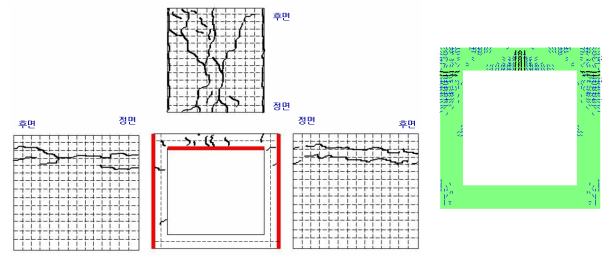


Fig. 16 Cracking Configuration from Experiment

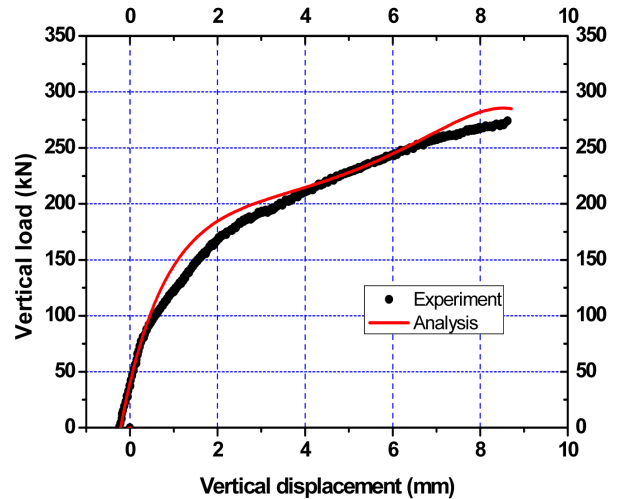


Fig. 17 Vertical Load - Displacement Curve

용길 등(2008)에 의해 수행된 실험결과와 비교하였다. 실험으로부터 측정된 최대하중은 270kN이며, 해석으로부터 얻은 최대하중은 277kN으로 나타났으며, 수치해석으로부터 계산된 초기균열시점 및 전체 구조물의 손상도 발현에 따른 변위의 증가를 적절히 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 기존 구조물의 잔존내하력 산출을 위한 균열-손상지수 모델의 제안

전력구 구조물의 균열탐사를 통한 구조건전성 지수의 산출을 위해서는 구조물의 현재상태에서의 손상도를 기반으로 하여 최종적으로 구조물의 구조내력을 예측하는 것이 중요하다. 이 논문에서 수행된 비선형 수치해석은 실험결과의 최대하중과 변위, 균열양상을 효과적으로 모사하고 있으며, 이에 따라 향후 전력구 구조물의 구조내력 산정에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 수행된 수치해석은 최초에 구조물이 구조적으로 100% 건전한 상태를 가정하여 수행되었으므로, 이미 구조적으로 손

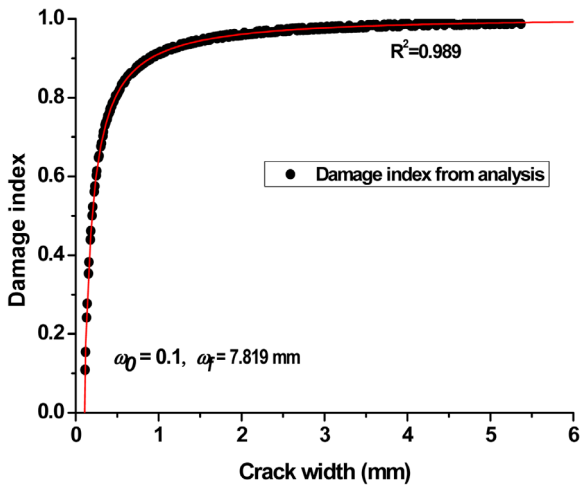


Fig. 18 Relationship of Damage Index and Crack Width

상을 입은 구조물에 직접 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 이미 구조적으로 손상을 입은 구조물의 현재의 손상 정도를 수치해석시 반영할 수 있도록 매개변수가 필요한데, 이 논문에서는 그 값을 구조물의 손상지수(damage index)로 정의하였다. 예를 들어 Fig. 15에서 보이고 있는 구조물 부위별 손상지수는 구조적 하중에 의한 손상지수를 의미한다. 실제 구조물에 대한 현장 균열탐사를 통해 얻을 수 있는 데이터는 균열의 형태, 길이, 폭이며 이중 가장 중요한 것은 균열폭이다. 따라서 구조적으로 손상을 받은 현재상태의 구조물의 구조내력을 예측하기 위해서는 이러한 균열폭과 관련한 데이터를 수치해석에 반영할 수 있어야 한다. 따라서 이 논문에서는 수치해석을 통한 손상지수와 실험으로부터 측정된 균열폭과의 관계를 도출하여 향후 구조물 탐사후 구조내력의 산정에 반영할 수 있도록 하였다. 가장 균열폭이 두드러진 상단슬래브 중앙 하단의 수치해석결과와 손상지수와 실험으로부터 측정된 균열폭과의 관계를 일정 수직하중상태를 기준으로 나타내면 Fig. 18과 같다. 이 논문에서는 정량적인 분석을 위해 식 (6)과 같은 일반적 형태의 균열폭과 손상지수의 관계를 이용해 비선형 회귀분석을 수행하면 Fig. 18에 보이는 바와 같이 $w_0 = 0.1\text{mm}$, $w_f = 7.819$ 와 같이 나타났으며, 변동계수는 0.989로 식 (6)이 매우 높은 신뢰성을 확보한 것으로 나타났다.

$$D = \begin{cases} 0 & \text{if } \omega \leq \omega_0 \\ 1 - \frac{\omega_0}{\omega} \exp\left(-\frac{\omega - \omega_0}{\omega_f - \omega_0}\right) & \text{if } \omega_0 \leq \omega \leq \omega_f \\ 1 & \text{if } \omega \geq \omega_f \end{cases} \quad (6)$$

4. 결론

이 논문에서는 다양한 조건하에서 구조물의 구조내력 산정을 위한 해석모델을 개발하여 이를 실험결과와 비교, 검증하여 향후 실제 구조물의 구조건전성 평가시스템의 개발을 위한 일환으로 구조내력산정 수치해석모델을 개발하였다.

SFRC는 강섬유의 혼입률에 관계없이 거의 일정한 값의 초기강성을 나타내었다. 또한 강섬유 혼입률이 증가할수록 SFRC의 휨강도는 향상된 반면, 실험값의 편차가 증가하고, 연화거동은 보다 취성적인 것으로 나타났다. SFRC의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida et al.(1995)이 제안한 역해석법을 사용하였으며, 역해석으로 구한 인장연화곡선이 실험결과와 아주 잘 일치함을 보였다. 하중-균열폭 관계를 입력값으로 사용한 역해석 결과와 하중-CMOD 관계를 사용한 역해석 결과는 서로 잘 일치하는 경향을 나타냈다. 최종적으로 이 논문에서는 섬유혼입률과 임계균열폭의 함수로서 SFRC의 인장연화모델을 제안하고 이를 해석에 적용하였다.

이 논문에서는 대표적 수치해석에의 균열처리 방법으로 분산균열모델 기반의 손상모델을 채택하여 구조내력을 산정하였다. 또한 전력구 구조물의 실구조 모델링을 위해 3차원 해석방법을 택하였으며 3차원 콘크리트 구성 모델로는 현재 3차원 모델 중 콘크리트의 다축압축, 인장균열을 효과적으로 모사하는 손상모델 기반의 미소면 모델(Microplane model)을 재료모델로 사용하여 비선형 유한요소해석 프로그램을 개발하여 수치해석에 적용하였다.

전력구 실험체에 대한 수치해석결과 균열양상, 최대하중, 변위, 하중-변위 관계에 있어서 해석결과가 실험결과를 전반적으로 효과적으로 모사하고 있음을 확인하였으며, 향후 구조적 손상을 입은 전력구 구조물의 구조내력 산정을 위해 수치해석결과와 실험결과를 비교하여 해석 프로그램의 신뢰성을 확보하였다. 또한 실험으로부터 측정된 균열폭 데이터와 수치해석시의 손상지수와의 관계를 도출하였으며, 이와 같은 결과는 향후 균열탐사를 통한 구조물의 잔존 구조내력 산정에 적용할 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 한국에너지기술평가원 연구비 지원

에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. (과제번호 : 20101620100140)

참고문헌

1. 권용길, 이상근, 한상훈, 송영철, "미국소 손상모델을 이용한 전력구 모형 실험체의 파괴거동 해석", 한국콘크리트학회 2008년도 가을 학술발표회 논문집, 제20권 2호, 2008, pp.225-228.
2. 양수발전소 터널 구조건전성 평가기법 개발, 한국남동발전, 최종보고서, 2010.
3. 전력구 구조건전성 평가시스템 개발, 한국전력공사 전력연구원, 최종보고서, 2009.
4. Chanvillard, G. and Rigaud, S., "Complete characterisation of tensile properties of Ductal UHPFRC according to the French recommendations", Proceeding of the 4th International RILEM Workshop-High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4), 2003, pp.21-34.
5. Habel, K., Gysler, R., Denari, E., Bruhwiler, E., "A Uniaxial Tensile Test for Advanced Cementitious Materials", Submitted for publication in Materials and Structures, 2002.
6. Kitsutaka, Y., "Fracture parameters by poly-linear tension softening analysis", Journal of Engineering Mechanics vol. 123, No. 5, 1997, pp.444-450.
7. Marković Ivan, "High-Performance Hybrid-Fibre Concrete-Development and Utilization", Doctorial thesis, Universiteit van Belgrado, Servi, DUP Science, 2006, pp.90-92,
8. Naaman, A. E., Fisher, G. and Krstulovic-Opara, N., "Measurement of Tensile Properties of Fiber Reinforced Concrete: Draft Submitted to ACI Committee 544", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5), 2007, pp.3-12.
9. Uchida, Y. and Kurihara, N., "Determination of tension softening diagrams of various kinds of concrete by means of numerical analysis", FRAMCOS-2, Germany, AEDIFICATION, 1995.

(접수일자 : 2012년 6월 7일)

(수정일자 : 2012년 8월 1일)

(심사완료일자 : 2012년 8월 3일)

요 지

이 논문에서는 대표적 수치해석에의 균열처리 방법으로 손상모델 기반의 분산균열모델을 채택하여 구조내력을 산정하였다. 또한 전력구 구조물의 실구조 모델링을 위해 3차원 해석방법을 택하였으며 3차원 콘크리트 구성모델로는 현재 3차원 모델중 콘크리트의 다축압축, 인장균열을 효과적으로 모사하는 미소면 모델(Microplane model)을 재료모델로 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. SFRC의 인장연화곡선을 얻기 위해 역해석법을 사용하였으며, 역해석으로 구한 인장연화곡선이 실험결과와 아주 잘 일치함을 보였다. 하중-균열폭 관계를 입력값으로 사용한 역해석 결과와 하중-CMOD 관계를 사용한 역해석 결과는 서로 잘 일치하는 경향을 나타냈다. 이 논문에서는 실험으로부터 측정된 균열폭 데이터와 수치해석시의 손상지수와의 관계를 도출하였으며, 이와 같은 결과는 향후 균열탐사를 통한 구조물의 잔존 구조내력 산정에 적용할 수 있으리라 판단된다.

핵심 용어 : 강섬유보강콘크리트, 손상지수, 유한요소해석, 균열폭, 박스형 전력구
