

Tri-Surface 콘크리트 모델을 이용한 수동 구속된 콘크리트의 비선형 해석

Non-linear Analysis of Passive Confined Concrete Structures using Tri-Surface Concrete Model

조병완^{*} 김장호^{**} 김영진^{***}
Jo, Byung Wan Kim, Young Ho Kim, Young Jin

ABSTRACT

Recently, hybrid concrete structures such as a concrete-filled steel tubular(CFT), a steel reinforced concrete(SRC) and a composite material are popular in structure applications. They also have merit of high strength, high ductility, and large energy absorption capacity. But the analysis of hybrid concrete structures is very difficult owing to the complex behavior of concrete under passive confinement. This paper has analyzed CFT, which receives passive confinement using Tri-Surface concrete model for three dimension finite element analysis. By the result of that, the proposed model was properly forecasted a concrete behavior that receives passive restraint as well as non-linear analysis of concrete which receive uniaxial stress and high active confinement of 400 MPa. If the model through the steady study is set up especially on the factor of concrete under passive confinement, the proposed concrete model will be surely useful for analysis of the hybrid concrete structures.

1. 서론

콘크리트는 하중이 증가할수록 콘크리트에 손상이 누적되어 콘크리트의 파괴가 팽창하게 된다. 합성형 콘크리트 구조물에서 콘크리트의 파괴팽창은 콘크리트와 이를 둘러싸고 있는 외부 재료간에 상호 구속응력을 발생시킨다. 이러한 상호 구속응력은 각 재료의 단점을 상호 보완하는 역할을 하게 되어 합성 구조물의 강도와 연성을 크게 증가시킨다.^{1,2)} 구조물의 강도와 연성의 증가는 합성형 콘크리트 구조물의 구조적 안정성 확보와 함께 단면을 감소시켜 경제성을 향상시킨다. 최근, 널리 사용되고 있는 합성 콘크리트 구조물인 콘크리트 충전 강관(Concrete filled steel tube, CFT), 매립형 철골 콘크리트(steel reinforced concrete, SRC), 강판과 복합재료 등으로 보강된 콘크리트 기둥 등은 콘크리트의 구속응력을 증가시켜 구조물의 강도와 연성을 향상시키는 좋은 예라 할 수 있다.

최근, 합성형 구조물의 사용 증가와 함께, 3축 압축셀(triaxial cell)을 이용한 능동구속(active confinement) 실험과 콘크리트 충전 강관 기둥 등을 이용한 수동구속(passive confinement)에 대한 많은 실험적 연구가 이루어 졌다. 수많은 실험적 연구와 함께, 콘크리트의 비선형 거동을 예측하기 위한 콘크리트 해석모델(elasticity-based model, plasticity-based model 및 fracture energy-based plasticity model 등)에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다^{3,4)}.

대부분의 콘크리트 모델들은 initial yield surface($\Delta\sigma_y$)와 maximum surface($\Delta\sigma_m$) 등, 2개의 failure surface를 지니며, flow rule를 이용하여 hardening과 softening 거동을 정의한다. 그러나, 2개의 failure surface를 지니는 콘크리트 모델은 응력경화(stress hardening) 구간에서는 $\Delta\sigma_y$ 와 $\Delta\sigma_m$ 을 이용하여 콘크리트의 거동을 적절히 나타내는 반면에 응력연화(stress softening) 구간에서는 $\Delta\sigma_m$ 만을 사용함으로써 콘크리트의 hardening 거동을 적절히 묘사하는데 많은 어려움이 있다⁵⁾.

본 연구에서는 failure surface로서 $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_m$ 과 함께 residual surface($\Delta\sigma_r$)을 고려한 Tri-Failure 콘크리트 구성방정식을 제안하였다. 또한, 제안된 구성방정식을 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS의 UMAT을 이용하여 수동 구속된 합성형 콘크리트 구조물의 해석결과 실험결과 거의 일치하는 해석결과를 나타내었다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 세종대학교 토목공학과 교수
*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

2. Tri-Surface 콘크리트 모델

많은 연구자들이 콘크리트 비선형 거동을 예측하기 위한 연구를 진행하여 왔다. 그러나, 콘크리트의 복잡한 구조적 거동 특성으로 인해 아직도 많은 연구과제를 남겨두고 있다. 특히, 구속응력을 받는 콘크리트의 거동은 구속응력의 크기와 방법, 콘크리트와 이를 구속하는 재료의 특성 등에 따라 크게 달라진다. 구속응력을 받는 콘크리트의 구조적 거동은 유한요소법을 이용한 3차원 비선형 해석을 통해서 예측할 수 있다. 3축 응력상태에서의 콘크리트 해석 모델로서 Drucker-Prager 콘크리트 모델 등이 사용되어져 왔다. 그러나, 이러한 콘크리트 모델들은 낮은 구속응력 상태에서의 콘크리트 거동을 적절히 예측하는 반면에 높은 구속 응력에서는 실험결과와 다소 큰 차이를 나타낸다⁶⁾.

이에 본 연구에서 3개의 failure surface를 가지는 Tri-Surface 콘크리트 모델을 제안하였다. 제안된 콘크리트 모델에 대하여 간략하게 나타내면 다음과 같다.

2.1 Stress limits

Tri-Surface 콘크리트 모델은 선형영역과 응력 경화(hardening)와 연화(softening)영역을 구분하여 Fig. 1에 보여진 바와 같이 $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_m$, $\Delta\sigma_r$ 등 3개의 failure surface로 구성된다. 콘크리트는 손상의 정도에 따라 선형 \rightarrow 응력경화 \rightarrow 응력연화의 구간을 지나게 된다⁶⁾. 3개의 failure surface는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\sigma_y = k(\sigma_m, k_0)\Delta\sigma_m \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_m = \sqrt{3J_2} = \sqrt{3/2}r \quad (2)$$

$$r(\sigma_m, \theta) = \frac{2r_c(r_c^2 - r_i^2) \cos \theta + r_c(2r_i - r_c) \times \sqrt{4(r_c^2 - r_i^2) \cos^2 \theta + 5r_i^2 - 4r_i r_c}}{4(r_c^2 - r_i^2) \cos^2 \theta + (r_c - 2r_i)^2} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_r = \Delta\sigma_m - \Delta\sigma_{m_0} \frac{b_3 - p}{b_3} \quad (4)$$

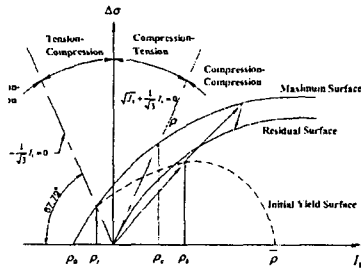


Fig. 1 Construction of yield surfaces

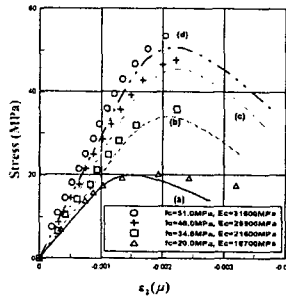


Fig. 2 Uni-Axial Test

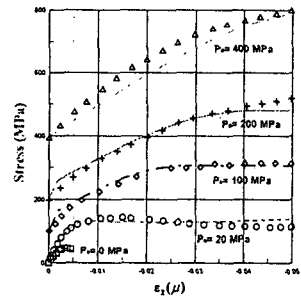


Fig. 3 Tri-Axial Test

2.2 Jacobian Tensor

각 iteration에서 증가하는 변형률 $d\epsilon_{ij}$ 는 Eq. (5)와 같이 탄성변형률 $d\epsilon_{ij}^e$ 과 소성변형률 $d\epsilon_{ij}^p$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (5)$$

Failure function f 를 Eq. (6)과 같이 정의할 때, $d\epsilon_{ij}^p$ 은 flow rule을 이용하여 정리하여 나타내면 Eq. (7)과 같다.

$$f = \sqrt{3J_2} - Y(\sigma, \eta(\lambda)) \quad (6)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \nabla_{\sigma} f d\bar{\mu} = \left\{ \frac{3S_{ij}}{2\sqrt{3J_2}} + \omega \frac{\bar{Y}_{,p} \delta_{ij}}{3} \right\} d\bar{\mu} = (S_{ij} + m\delta_{ij}) d\mu \quad (7)$$

증가하는 응력 $d\sigma_{ij}$ 과 equivalent jacobian tensor D_{ijkl}^{eq} 는 Eq. (8)의 관계를 나타낸다. 여기서 D_{ijkl}^{eq} 는 Eq. (9)와 같다.

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) = D_{ijkl}^{eq} d\epsilon_{kl} \quad (8)$$

$$D_{ijkl}^{eq} = D_{ijkl}^e - \frac{D_{ijmn}^e (S_{mn} + mI_{mn}) f_{, \sigma_{kl}} D_{pqkl}^e}{2G\sqrt{3J_2} \left(1 + \frac{\omega K \bar{Y}_{,p}^2}{3G} \right) + \bar{Y}_{, \lambda} g(\sigma_{ij})} \quad (9)$$

3. 콘크리트 비선형 해석

3.1 개요

제안된 Tri-Surface 콘크리트 모델은 사용성의 향상을 위하여 ABAQUS UMAT으로 작성되었다⁷⁾. Fig. 2와 Fig. 3에 보여진 바와 같이 1축 압축과 3축 압축 실험의 능동구속(active confinement)을 받는 콘크리트 시험체에 대한 해석을 통해서 제안된 콘크리트 구성방정식의 신뢰성을 입증한바 있다. 특히 제안된 콘크리트 모델은 낮은 구속응력 뿐만 아니라 400MPa의 높은 능동구속 응력에서도 콘크리트의 구조적 거동을 적절히 묘사하는 것으로 나타났다^{8,9)}.

본 연구에서는 Tri-Surface 콘크리트 모델을 이용한 1축 압축과 능동구속을 받는 콘크리트의 해석적 연구에 이어 콘크리트 충전 강관을 대상으로 수동구속을 받는 합성형 콘크리트 구조물에 대한 해석 예를 나타내었다.

콘크리트 충전 강관의 해석과정 및 결과를 나타내면 다음과 같다.

3.2 합성형 콘크리트의 구조적 특징

콘크리트 충전 강관과 같은 합성형 콘크리트는 재료간의 상호 작용력에 의해 발생하는 구속효과(confinement effect)로 강도와 연성이 향상되는 장점을 지닌 반면에 복잡한 구조적 거동을 나타내는 단점이 있다. 특히 콘크리트는 손상의 정도에 따라 부피가 변하게 되어 부피의 변화는 재료간의 구속응력을 변화시키는 요인이 되어 하중 상태에 따라 구속응력이 계속해서 변화하는 수동구속 상태에 놓이게 된다. 또한, 콘크리트는 최대강도 도달 후 응력연화 특성으로 합성형 콘크리트의 강도 예측과 연성평가 등은 많은 노력을 필요로 한다¹⁰⁾.

이러한 합성형 콘크리트의 비선형 해석을 위해서는 각 재료의 비선형 거동을 적절히 예측할 수 있는 구성방정식이 필요하다. 특히 콘크리트는 응력경화과 연화를 나타내며, 수동구속의 경우, 재료간의 상호작용력에 따라서 재료의 부피변화와 작용하중으로 인해 발생하는 재료간의 구속응력이 계속해서 변하는 점을 고려하여야 한다.

3.3 해석 모델링

콘크리트 충전 강관 기둥에서 강관의 좌굴을 해석적으로 묘사하기 위한 대부분의 연구들은 강관에 대한 고유진동해석을 통하여 좌굴 모드를 해석하고 그 결과를 바탕으로 콘크리트에 대한 강관의 초기 형상에 대한 결함(imperfection)을 가정하여 모델링하였다. 실제 콘크리트 충전 강관의 실험 결과들로부터 강관의 좌굴은 콘크리트의 부피팽창으로 인한 상호 작용력의 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 앞서 언급한 2단계로 나누어 인위적으로 좌굴 형태를 결정하는 해석방법은 장시간의 해석시간과 함께 실제 구조물에 적용하기에는 많은 한계를 나타낸다.

본 연구에서는 콘크리트 충전 강관의 구조적 거동 특성을 고려하여 콘크리트와 강관의 경계면을 ABAQUS에서 지원하는 gap element로 모델링 하였다. Gap element는 축방향 1자유도에서 1쪽 방향만을 구속할 수 있게끔 하여 Fig. 4에 보여진 바와 같이 강관과 콘크리트의 구속응력을 전달할 수 있으며, 좌굴 등으로 인해 강관이 콘크리트로부터 떨어지는 현상을 묘사할 수 있다. 각 해석 방법에 대한 간단한 해석결과를 나타낸 Table 1에서 알 수 있듯이 정해와 비교하여 gap element를 이용한 해석결과가 거의 일치하였다.

해석 모델링은 Fig.5와 Fig. 6에 보여진 바와 같이 원형 시험체의 대칭성을 이용하여 1/4로 모델링 하였다. 콘크리트는 3D stress element(C3D8)를 사용하였으며, 강관은 shell element(S4)를 사용하였다. 만능시험기(Universal Test Machine, UTM)를 이용한 전형적인 콘크리트 원주형 공시체의 하중 전달과정을 rigid body element(R3D4)를 이용하여 묘사하였다. 또한, rigid body에 reference point를 두어 변위에 의해 하중이 공시체에 전달되도록 하였다.

3.4 해석결과

콘크리트 충전 강관의 해석대상으로 Table 2에 나타낸 바와 같이 Tomii 등이 콘크리트의 강도, 강관의 두께, 시험체의 길이 등을 변수로 원형단면에 대하여 실험한 결과를 이용하였다¹¹⁾. Fig. 5와 Fig. 6의 콘크리트와 강관의 축방향 응력도에서 알 수 있듯이 제안된 모델이 콘크리트와 강관의 응력분포를 적절히 반영되고 있음을 알 수 있다. 또한 시험체의 변형상으로부터 콘크리트의 부피팽창에 의한 강관의 좌굴현상이 유발됨을 나타낸다.

실험결과(점선)와 해석결과(실선)를 나타낸 Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 콘크리트 강도, 강관의 두께, 시험체의 높이 등의 변수에 따라 최대강도뿐만 아니라 비선형 영역을 적절히 묘사하였다.

Table 1 Buckling load for the square thin plate

Critical Edge Load (kips/in.)		
F.E. Analysis (Geometric Imperfections)	F.E. Analysis (Plate & Concrete Block)	Exact Solution (Timoshenko)
90.52	90.79	90.28

Table 2 Details of tested columns in pure axial compression tests

Column	t (in.)	A_s (in. ²)	A_c (in. ²)	F_y (ksi)	f'_c (ksi)	E_c (ksi)	L (in.)
Circle	0.170	3.082	24.662	40.0	4.0	3500	24.0
	0.078	1.471	25.964	49.0	3.5	3280	24.0
D=6.0 in.	0.170	3.082	24.662	40.0	4.2	3600	18.0
	0.118	2.285	25.220	42.0	4.2	3600	18.0
	0.170	3.082	24.662	40.0	3.2	3160	18.0

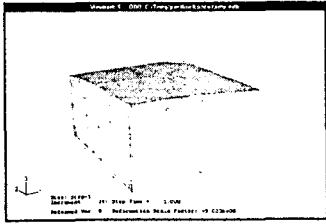


Fig. 4 Buckling of a thin plate

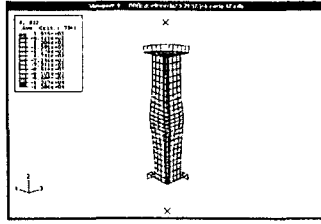


Fig. 5 Concrete Stress Contour (S22)

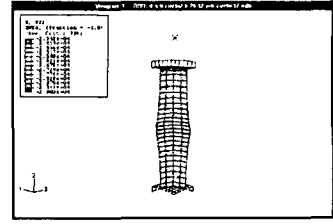


Fig. 6 Steel Stress Contour (S22)

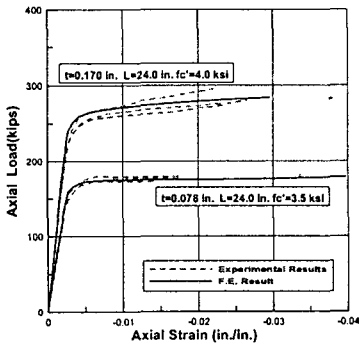


Fig. 7 Analysis and Test Results (L=24 in.)

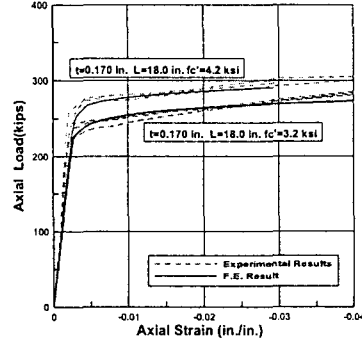


Fig. 8 Analysis and Test Results (L=18 in.)

4. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 위한 Tri-Surface 콘크리트 모델을 이용하여 콘크리트 충전 강관 등의 수동구속을 받는 합성형 콘크리트 구조물을 해석하였다. 해석결과, 제안된 모델은 앞서 입증된 1축응력과 400MPa의 높은 능동구속을 받는 콘크리트의 비선형 해석뿐만 아니라 대부분의 합성구조물에 해당하는 수동구속된 콘크리트의 거동 또한 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 따라서, 제안된 Tri-Surface 콘크리트 모델은 수동구속된 콘크리트의 구조적 거동에 영향을 미치는 구성인자에 대한 꾸준한 해석적 연구를 통하여 상대적으로 높은 능동구속과 수동구속된 다양한 합성형 콘크리트 구조물의 구조적 거동 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Chen, W. F., "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw-Hill, 1982.
2. Lan, Y. M., "Finite Element Study of Concrete Columns with Fiber Composite Jackets", Doctor of Philosophy, Purdue University, 1998.
3. Mohammad, S., "Non-Linear Evaluation of Concrete-Filled Steel Tubular Columns", Doctor of Philosophy, New Jersey Institute of Technology, January, 1997.
4. Bazant, Z. P., et al, "Plastic-Fracturing Theory for Concrete", J. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol. 105, June, 1979.
5. Bazant, Z. P., et al, "Microplane Model for Concrete: II: Data Delocalization and Verification", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No. 3, March, 1996.
6. Malvar, L. J., et al, "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D", Int. J. Impact, Vol. 19, Nos. 9-10, 1997.
7. "ABAQUS User's Manual", Hibbit, Karlsson & Sorensen, 2001.
8. 김영진, 김장호, 조병완, "K&C 모델을 이용한 콘크리트 비선형 해석", 한국콘크리트학회, 봄학술발표회는문집, 2003, 5.
9. 조병완, 김장호, 김영진, "ABAQUS User Material(UMAT)을 이용한 콘크리트 비선형 해석", 한국전산구조공학회, 봄학술발표회는문집, 2003, 4.
10. Mohammad, S., "Non-Linear Evaluation of Concrete-Filled Steel Tubular Columns", New Jersey Institute of Technology, Doctor of Philosophy, January, 1997.
11. Tomii, M., and Yoshimaro K., "Experimental Studies one Concrete Filled Steel Tubular columns Under Concentric Loading", International Colloquium on Stability of Structures Under State and Dynamic Loads, Washington, D. C., 17-19, May, 1997.