

탄성지반상에 놓인 철근 콘크리트 축대칭 쉘의 정적 및 동적 해석(IV)

- 축대칭 쉘의 동적 응답에 대한 철근의 영향을 중심으로 -

Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Axisymmetric Shell on the Elastic Foundation

- Effect of Steel on the Dynamic Response -

조 진 구
Cho, Jin Goo

Summary

Dynamic loading of structures often causes excursions of stresses well into the inelastic range, and the influence of the geometric changes on the dynamic response is also significant in many cases. Therefore, both material and geometric nonlinearity effects should be considered in case that a dynamic load acts on the structure.

A structure in a nuclear power plant is a structure of importance which puts emphasis on safety. A nuclear container is a pressure vessel subject to internal pressure and this structure is constructed by a reinforced concrete or a pre-stressed concrete.

In this study, the material nonlinearity effect on the dynamic response is formulated by the elasto-viscoplastic model highly corresponding to the real behavior of the material. Also, the geometrically nonlinear behavior is taken into account using a total Lagrangian coordinate system, and the equilibrium equation of motion is numerically solved by a central difference scheme. The constitutive relation of concrete is modeled according to a Drucker-Prager yield criterion in compression. The reinforcing bars are modeled by a smeared layer at the location of reinforcements, and the steel layer model under Von Mises yield criteria is adopted to represent an elastic-plastic behavior. To investigate the dynamic response of a nuclear reinforced concrete containment structure, the steel-ratios of 0, 3, 5 and 10 percent, are considered.

The results obtained from the analysis of an example were summarized as follows :

1. As the steel-ratio increases, the amplitude and the period of the vertical displacements in apex of dome decreased. The Dynamic Magnification Factor(DMF) was some larger than that of the structure without steel. However, the regular trend was not found in the values of DMF.
2. The dynamic response of the vertical displacement and the radial displacement in the dome-wall junction were shown that the period of displacement in initial step decreased with the steel-ratio increases. Especially, the effect of the steel on the dynamic response of radial displacement disappeared almost. The values of DMF were 1.94, 2.5, 2.62 and 2.66, and the values increased with the steel-ratio.
3. The characteristics of the dynamic response of radial displacement in the mid-wall were similar to that of dome-wall junction. The values of DMF were 1.91, 2.11, 2.13 and 2.18, and the values increased with the steel-ratio.
4. The amplitude and the period of the hoop-stresses in the dome, the dome-wall junction, and the mid-wall were shown the decreased trend with the steel-ratio. The values of DMF were some larger than those of the structure without steel. However, the regular trend was not found in the values of DMF.

I. 서 론

축대칭 셸 구조물은 평면곡선을 동일 평면 내에 있는 회전축 주위로 회전시킴으로서 얻어지는 회전곡면을 중립면으로하는 곡면판 구조체이다. 이러한 축대칭 셸 구조물의 설계는 많은 산업 분야에서 빈번히 발생되고 있다. 따라서 그러한 구조물의 해석에 대한 신뢰성이있고 정도가 좋은 유한요소 해석 절차는 절실히 필요하게 되었다.⁸⁾ 예를 들면 저수지의 취수탑이나 정유공장을 비롯한 대규모 공장에 건설되는 액체저장탱크 또는 원자력 발전소의 격납건물등이 이에 속한다.¹²⁾ 특히 원자로 격납건물은 구조적으로 사고시에 내압을 받는 압력용기로서 사고시의 재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 안전성이 확보되어야하고 이를 위해서는 정하중은 물론 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야한다.^{14,15)} 이러한 격납건물은 1960년대 말까지는 강재 격납건

물이 주로 채택되었으나 건설비가 싸고 건설공기가 짧고 원자로 구조물의 내부설비의 시설과 기기 설치의 조기 착수가 가능하며 내압과 온도하중 이외에 배관 및 기기의 지지부 역할을 할 수 있는 잇점등으로 그후 철근 또는 PS 콘크리트 격납건물의 건설이 주종을 이루게 되었다.^{14,15)}

구조물에 동하중이 작용하면 응력이 탄성범위를 벗어나는 경우가 있고 이로 인한 기하학적 변화는 구조물의 동적 응답에 커다란 영향을 주게 된다. 따라서 동하중이 작용하는 경우 재료 및 기하학적 비선형 효과가 반드시 고려되어야 한다.^{2,13)}

본 연구의 목적은 철근 콘크리트 축대칭 셸의 동적 거동 특성을 규명하기 위하여 모델 케이스로 선정된 철근 콘크리트 원자로 격납건물을 중심으로하여 동적거동에 대한 철근의 영향을 구명하는 것이다. 이를 위하여 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 유한요

소 정식화에는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄·점소성 모델에 의해서 재료 비선형 효과를 고려하고 기하학적 비선형 동적거동은 변형전의 초기 형상과 일치하는 전체 라그랑지안 좌표계에 의해서 비선형 효과를 고려하였다. 또한 콘크리트의 거동은 Drucker-Prager 항복 기준에 의해 모델링 하였고 철근은 등가의 두께를 갖는 철근층으로서 이산화시킨후 Von Mises 항복 기준에 따라 모델링 하였다.

II. 유한요소 해석

축대칭 쉘의 동적 해석에 있어서 Fig. 1과 같은 8-절점 등대개변수요소를 대칭되는 축에 대해서 회전시킨 링 요소를 채용하였다.

이러한 8-절점 등대개변수요소에 대한 형상 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1+\xi\xi_i)(1+\eta\eta_i)(\xi\xi_i+\eta\eta_i-1) \quad (i = 1, 3, 5, 7) \quad \dots (1)$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{2}\xi_i^2(1+\xi\xi_i)(1-\eta^2) + \frac{1}{2}\eta_i^2(1+\eta\eta_i)(1-\xi^2) \quad (i = 2, 4, 6, 8)$$

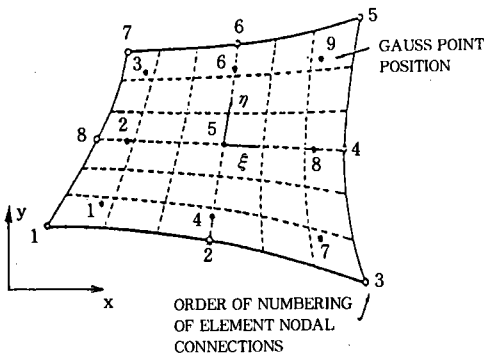


Fig. 1. Two dimensional parabolic isoparametric element

III. 동적해석

동하중을 받는 구조물의 임의시간 t_n 에서의 평형방정식은 다음과 같다.

$$[M] \{\ddot{\mathbf{d}}\}_n + [C] \{\dot{\mathbf{d}}\}_n + \{\mathbf{P}\}_n = \{\mathbf{F}\}_n \quad \dots (2)$$

- 여기서, $[M]$: 질량행렬
- $[C]$: 감쇠행렬
- $\{\mathbf{P}\}_n$: 저항절점력벡터
- $\{\mathbf{F}\}_n$: 절점외력벡터
- $\{\ddot{\mathbf{d}}\}_n$: 절점가속도벡터
- $\{\dot{\mathbf{d}}\}_n$: 절점 속도벡터

임의시간 t_n 에서의 속도 및 가속도는 중앙 차분법을 이용하면 다음과 같이 계산된다.

$$\{\dot{\mathbf{d}}\}_n \cong \{\mathbf{v}\}_n = \frac{1}{2\Delta t} [\{\mathbf{d}\}_{n+1} - \{\mathbf{d}\}_{n-1}] \quad \dots (3)$$

$$\{\ddot{\mathbf{d}}\}_n \cong \{\mathbf{a}\}_n = \frac{1}{(\Delta t)^2} [\{\mathbf{d}\}_{n+1} - 2\{\mathbf{d}\}_n + \{\mathbf{d}\}_{n-1}] \quad \dots (4)$$

여기서 Δt 는 시간간격이다.

식 (3) 및 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$[M] \left[\frac{\{\mathbf{d}\}_{n+1} - 2\{\mathbf{d}\}_n + \{\mathbf{d}\}_{n-1}}{(\Delta t)^2} \right] + [C] \left[\frac{\{\mathbf{d}\}_{n+1} - \{\mathbf{d}\}_{n-1}}{2\Delta t} \right] + \{\mathbf{P}\}_n = \{\mathbf{F}\}_n \quad \dots (5)$$

여기서 $\{\mathbf{d}\}_{n+1}$ 에 관해서 다시 정리하면

$$\{\mathbf{d}\}_{n+1} = \left[[M] + \frac{\Delta t}{2} [C] \right]^{-1} (\Delta t)^2 [-\{\mathbf{P}\}_n + \{\mathbf{F}\}_n] + 2[M] \{\mathbf{d}\}_n - \left[[M] - \frac{\Delta t}{2} [C] \right] \{\mathbf{d}\}_{n-1} \quad \dots (6)$$

간단히,

$$\{\mathbf{d}\}_{n+1} = \mathbf{g}(\{\mathbf{d}\}_n, \{\mathbf{d}\}_{n-1}) \quad \dots (7)$$

돔과 벽체의 접합부에서의 연직변위 및 반경방향 변위의 동적응답은 Fig. 4 및 5와 같다.

연직변위의 동적응답 특성은 돔 정부에서의 동적응답과 같이 진동 초기에는 변위의 진폭 및 주기는 철근비가 증가함에 따라서 약간 감소하는 경향을 보였지만 시간이 지남에 따라 진동현상이 소멸되었다. 한편 반경방향 변위의 진동 특성은 진동초기에는 철근층의 영향에 따라 변위의 진폭 및 주기가 약간씩 감소하였지만 어느정도의 시간이 지난후에는 진폭이 현저히 감소하면서 철근비에 따른 영향이

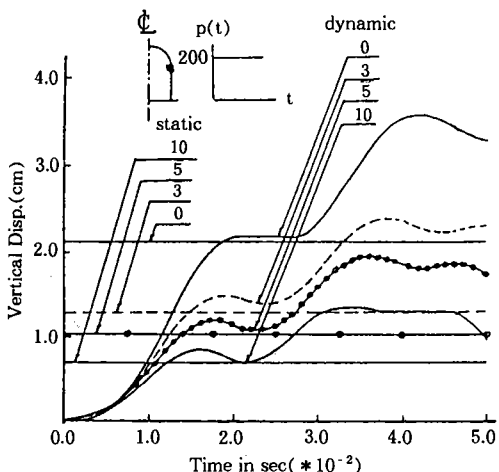


Fig. 4. Time Response of vertical displacements at dome-wall junction

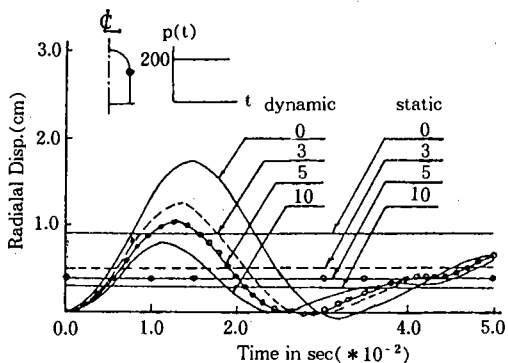


Fig. 5. Time Response of radial displacements at dome-wall junction

없어지고 거의 동일한 진폭을 나타냈다. 철근비 0, 3, 5 및 10%의 경우에 대해서 동적확대계수는 각각 1.94, 2.5, 2.62 및 2.66으로서 철근비가 증가할수록 증가되었다.

벽체 중앙에서의 연직방향 변위의 동적응답은 Fig. 6과 같다.

벽체 중앙에서도 앞서서와같이 철근비가 증가함에 따라 변위의 진폭 및 주기는 감소되었다. 한편 반경방향 변위의 동적응답은 Fig. 7과 같다.

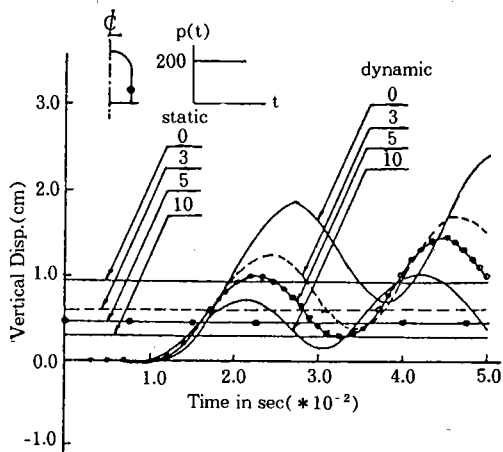


Fig. 6. Time Response of vertical displacements at mid-wall

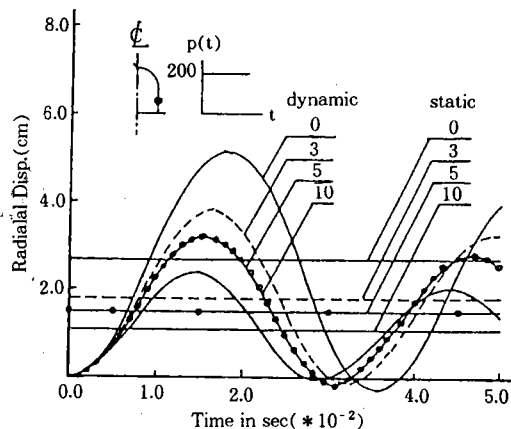


Fig. 7. Time Response of radial displacements at mid-wall

진동 특성은 돔과 벽체의 접합부에서의 반경방향 변위의 동적응답과 유사하였다. 즉 변위의 진폭 및 주기는 철근비가 증가함에 따라 약간 감소하였다.

돔의 정부, 돔과 벽체의 접합부 및 벽체 중앙에서의 원주방향 응력의 동적 응답을 도시하면 Fig. 8, 9 및 10과 같다. 전반적으로 철근비가 증가함에 따라 응력의 진폭 및 주기는 감소되었다. 그러나 철근비 0, 3, 5 및 10%에 대한 동적 확대계수는 돔에서 1.9, 2.07,

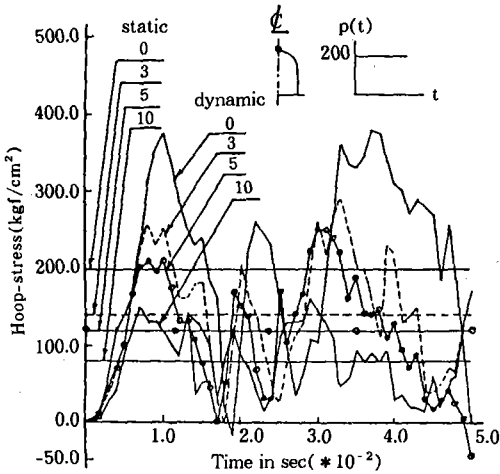


Fig. 8. Time Response of hoop-stress at interior surface of crown

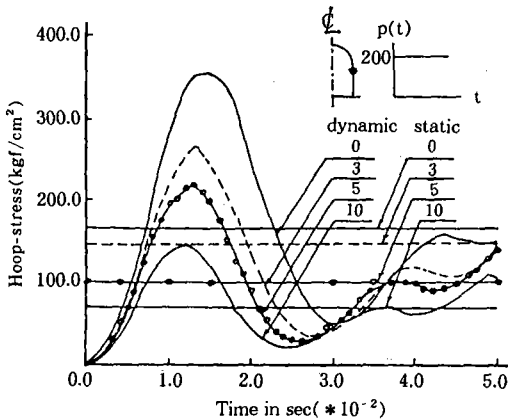


Fig. 9. Time Response of hoop-stress at interior surface of dome-wall junction

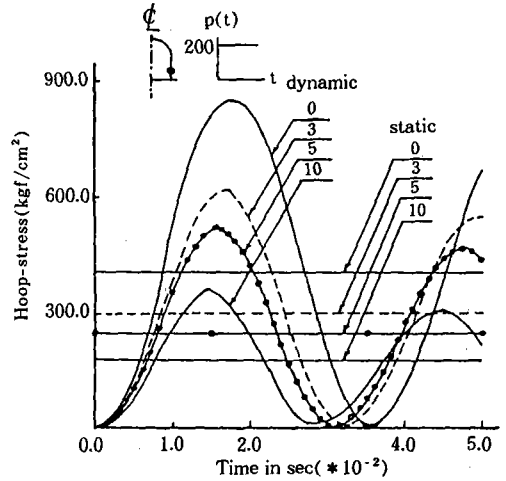


Fig. 10. Time Response of hoop-stress at mid-wall

2.08 및 2.0이었고 돔-벽체 접합부에서는 2.15, 1.82, 2.4 및 2.07이었으며 벽체 중앙에서의 값은 2.07, 2.08, 2.08 및 1.94로서 일정한 경향을 찾을수 없었다.

V. 결 론

구조물에 동하중이 작용하면 응력이 탄성범위를 벗어나는 경우가 있고 이로 인한 기하학적 변화는 구조물의 동적응답에 커다란 영향을 주게 된다. 따라서 동하중이 작용하는 경우에는 재료 및 기하학적 비선형 효과가 반드시 고려되어야 한다.

또한 원자력 발전소 구조물은 일반 토목 구조물보다 안전성이 훨씬 강조되는 중요한 구조물이다. 이중에서도 격납건물은 구조적으로 사고시에 내압을 받는 용기로서 철근 콘크리트 또는 PS 콘크리트로서 건설된다.

본 연구에서 사용된 프로그램은 재료의 비선형성은 탄·점소성 모델에 의해서 정식화 되었으며 또한 기하학적 비선형 거동은 전체 라그랑지안 좌표계를 사용하였으며 운동 평형 방정식은 중앙차분법을 이용하여 수치적분을

하도록 구성되었다. 또한 콘크리트의 압축거동은 Drucker-Prager 항복규준에 의해 모델링 하였고 철근은 등가의 두께를 갖는 철근층으로서 이산화 시킨후 Von-Mises 항복 규준에 따라 모델링 하였다.

격납건물의 철근비에 따른 동적응답을 알아보기 위하여 철근비를 0, 3, 5 및 10%로 변화시키면서 동적 해석을 한 결과 다음과 같은 몇가지 결론을 얻을수 있었다.

1. 격납건물 돔 정부에서의 연직변위의 진폭 및 주기는 철근비가 증가함에 따라 감소하였고 철근비에 따른 동적 확대계수의 값은 일정한 경향을 찾을수는 없었지만 철근층이 없는 경우에 비해서 약간 크게 나타났다.

2. 돔과 벽체의 접합부에서의 연직변위 및 반경방향 변위의 진폭 및 주기는 진동 초기에는 철근비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 시간이 어느정도 지난후에는 반경방향 변위의 동적응답에 대한 철근비의 영향은 거의 소멸 되었다. 동적 확대계수의 값은 1.94, 2.5, 2.62 및 2.66으로서 철근비가 증가함에 따라 약간씩 증가 되었다.

3. 벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적응답 특성은 돔-벽체 접합부에서의 반경방향 변위의 동적응답과 유사하였고 동적 확대계수는 1.91, 2.11, 2.13 및 2.18로서 철근비가 증가함에 따라 약간 증가 되었다.

4. 돔, 돔-벽체 접합부 및 벽체 중앙에서의 원주방향응력의 진폭 및 주기는 철근비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 동적 확대계수의 값은 철근층이 없는 경우에 비해서 약간 큰 값을 나타냈지만 철근비에 따른 일정한 경향을 찾을수 없었다.

끝으로 본 연구는 1995년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의해서 수행되었으며 이번에 발표된 부분은 연구과제 수행의 마지막 결과임을 밝히며 연구비를 지원하여 준 재단 당국에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. D. P. Mondkar and G. H. Powell : Evaluation of solution schemes for nonlinear structures, computers and structures, Vol. 9 pp. 223-236, 1978
2. D. R. J. Owen and E. Hinton : Finite elements in plasticity, 1980
3. Gergely, P., and White, N. : Research Needs for Design of Concrete Containment Structures, Nuclear Engineering and Design, Vol. 69, 1982, pp. 183-186
4. Nagarajan S. and Popov E. P. : Elastic-plastic dynamic analysis of axisymmetric solid, Computers and structures, Vol. 4, pp. 1117-1134, 1974
5. O. C. Zienkiewicz : The finite element method(3/e), pp. 450-606, 1977
6. Oyamada, O. et al., : Experimental Study of the Structural Behavior of the Reinforced Concrete Containment Vessel beyond Design Pressure, Nuclear Engineering and Design, Vol. 120, 1990, pp. 1-13
7. R. Bukowski and W. Wojewodzki : Dynamic buckling of Visco-plastic spherical shell, Int. J. Solids structures, Vol. 20 NO. 8, pp. 761-776, 1984
8. Robert Kao : Dynamic buckling of axisymmetric spherical caps with initial imperfections, Pergamon, Computers & Structures, Vol. 12, pp. 49-63, 1980

탄성지반상에 놓인 철근 콘크리트 축대칭 셀의 정적 및 동적 해석(Ⅳ)

9. 山田嘉昭 : 塑性·粘彈性, 培風館, 1980
 10. 오병환, 이명규 : 온도 및 내압을 받는 원자로 철근콘크리트 격납구조물의 비선형 해석 대한토목학회지 제14권 제3호 pp. 403-414, 1994
 11. 조진구, 조현영 : 지반과 구조물사이의 상호작용을 고려한 농업용 사이로의 해석에 관한 연구(I-Ⅳ), 한국농공학회지
 12. 조진구 : 탄성지반상에 놓인 철근 콘크리트 축대칭 셀의 정적 및 동적 해석(I), 한국농공학회지 제38권 제3호 pp.82-91, 1996
 13. 조진구 : 탄성지반상에 놓인 철근 콘크리트 축대칭 셀의 정적 및 동적 해석(Ⅱ), 한국농공학회지 제38권 제5호 pp. 74-84, 1996
 14. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발, 1989
 15. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발 (부록), 1989
- (접수일자 : 1997년 5월 26일)