

면진 구조물의 지진응답 해석 프로그램 개발

Development of Computer Program for Seismic Response Analysis of Base Isolated Structures

정정훈*
Chung, Jung-Hoon

허영철*
Huh, Young-Cheol

김병현**
Kim, Byung-Hyun

ABSTRACT

A computer program named "NLDA-BIS", which runs under the MATLAB environment, is developed for seismic response analysis of base isolated structures. This program can explicitly model the various nonlinear isolation elements such as elastomeric bearings, sliding bearings and general viscous dampers, and so on. Newmark's constant average acceleration method for calculating the responses in time domain and the iterative pseudo-force method for treating the nonlinear isolation forces are adopted. For capturing the hysteretic behavior of isolation elements, the modified Wen's equations are adopted and solved by the numerical differentiation formula method. To verify the validity of the developed program, the seismic responses of a six-story reinforced concrete base isolated structure are calculated and compared with results obtained by the program "3D-BASIS" developed at the State University of New York at Buffalo which is the most widely used code for analyzing isolated structures today.

1. 서 론

각종 isolator와 댐퍼를 이용한 면진 구조물(base isolated structures)의 내진 설계에 있어서 적용된 isolator와 댐퍼의 성능과 대상구조물의 구조안전성을 시간영역에서의 지진응답 해석을 통하여 검증하도록 관련규정(예로써, 미국의 Uniform Building Code : UBC-97)에서 요구하고 있다[1].

미국에서는 1980년대 후반부터 면진 구조물의 지진응답 해석기법에 관한 많은 연구가 현재까지 활발하게 이루어지고 있으며, 이를 통해 많은 해석프로그램들이 개발되어 활용되고 있다. 미국 State University of New York at Buffalo 부설 MCEER(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)에서 개발한 프로그램들인 3D-BASIS, 3D-BASIS-TABS, 3D-BASIS-ME와 미국 Computers and Structures 사의 SAP-2000 Nonlinear 프로그램 등이 현재 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 해석프로그램들이다[1]. 국내의 경우에도 1990년대 중반부터 면진 구조물의 지진응답 해석기법에 대한 연구와 관련 해석프로그램들이 부분적으로 개발, 활용되고 있으나 현재 사용되고 있는 각종 isolator와 댐퍼를 모두 고려할 수 있는 해석프로그램은 현재까지 개발되어 있지 않은 것으로 판단된다.

본 논문에서는 한국기계연구원에서 과학기술부의 국가지정연구실사업으로 수행 중인 "제진장치

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원, 정회원

** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 책임연구원, 정회원

를 활용한 제진 설계기술 개발"과제의 일환으로 고무형 isolator(고무적층베어링, 납삽입고무적층베어링, 고감쇠고무베어링 등), 마찰형 isolator(탄성-마찰베어링, 마찰진자 베어링 등)와 각종 댐퍼를 적용한 면진구조물의 3차원 지진응답 해석을 위해 개발된 프로그램인 "NLDA-BIS"(NonLinear Dynamic Analysis of Base Isolated Structures)의 개발 이론과 주요 특징을 기술하고, 6층 콘크리트 면진 구조물에 대한 지진응답해석을 수행하여 그 결과를 3D-BASIS를 사용하여 계산된 결과와 비교함으로써 개발프로그램의 정확도를 검증하였다.

2. 프로그램 "NLDA-BIS" 개발 이론 및 주요 특징

2.1 개발 이론

대상시스템은 Fig. 1에 보인 바와 같이 상부구조물(m_1, m_2, \dots, m_N)과 isolator와 damper를 설치하기 위한 base(m_b)로 이루어져 있으며, 상부구조물 각 층(floor)과 base는 평면 내에서는 무한강성을 갖으며 각 무게중심에서 3개의 자유도(2개의 수평방향 병진변위, 1개의 수직 축에 대한 회전변위)만을 갖는다고 가정한다.

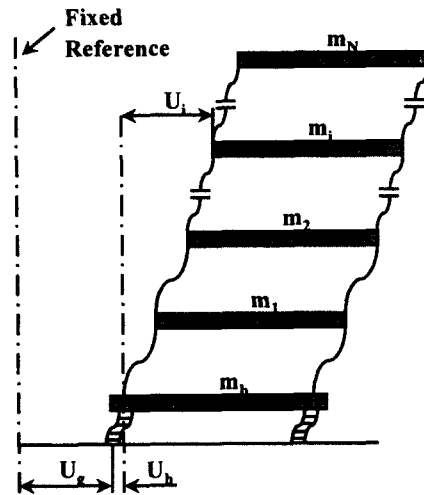


Fig. 1 A base isolated structure

상기 가정과 함께 상부구조물의 고정지지부(fixed-base) 고유모드와 이들의 직교관계식을 이용하면 대상시스템이 지반가속도(ground acceleration) \ddot{u}_g 를 받는 경우의 운동방정식을 다음과 같은 행렬형태로 얻을 수 있다.

$$\overline{M} \ddot{\overline{U}} + \overline{C} \dot{\overline{U}} + \overline{K} \overline{U} + \overline{F} = \overline{P} \quad (1)$$

여기서

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} [I]_{m \times m} & [\Phi^T MR]_{m \times 3} \\ [R^T M \Phi]_{3 \times m} & [R^T MR + M_b]_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\bar{C} &= \begin{bmatrix} [2\xi_i\omega_i]_{m \times m} & [0]_{m \times 3} \\ [0]_{3 \times m} & [C_b]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \\
\bar{K} &= \begin{bmatrix} [\omega_i^2]_{m \times m} & [0]_{m \times 3} \\ [0]_{3 \times m} & [K_b]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \\
\bar{U} &= \begin{pmatrix} \{u\}^*_{m \times 1} \\ \{u_b\}_{3 \times 1} \end{pmatrix} \\
F &= \begin{pmatrix} \{0\}_{m \times 1} \\ \{f\}_{3 \times 1} \end{pmatrix} \\
\bar{P} &= - \begin{bmatrix} [\Phi^T MR]_{m \times 3} \\ [R^T MR + M_b]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \{\ddot{u}_g\}_{3 \times 1} \quad (2)
\end{aligned}$$

이고, $[M]$ 은 상부구조물 관성행렬, $[R]$ 은 지진영향계수행렬 즉, base 자유도의 상부구조물 각 층의 자유도로의 변환행렬, $[\Phi]$, ω_i , ξ_i 는 각각 상부구조물의 고정지지부 고유모드행렬, i 차 고유진동수 및 모달감쇠비, $[m_b]$, $[C_b]$, $[K_b]$, $\{u_b\}$ 는 각각 base의 관성, 점성감쇠, 선형강성 행렬 및 지반에 대한 base의 상대변위벡터, $\{f\}$ 는 비선형 isolator 및 댐퍼에 의해 base의 무게중심에 작용하는 비선형력 벡터이고, $\{u\}^*$ 는 상부구조물의 base에 대한 모달 상대변위벡터로서 다음과 같이 주어진다.

$$\{u\}_{n \times 1} = [\Phi]_{n \times m} \{u\}^*_{m \times 1} \quad (3)$$

여기서 $\{u\}$ 는 상부구조물의 base에 대한 상대변위벡터이고, 하첨자 n, m 은 각각 상부구조물의 총 자유도 개수와 모드중첩을 위해 고려한 고정지지부 고유모드 개수이다.

식 (1)로 주어지는 운동방정식을 시간영역에서 풀기 위해 본 연구에서는 3D-BASIS의 개발이론 [2]와 마찬가지로 직접시간적분법의 하나인 Newmark의 일정평균가속도방법(constant average acceleration method)을 사용했으며, 비선형 solator 및 댐퍼에 의한 비선형력 벡터 F 를 효과적으로 처리하기 위해 이를 외력으로 취급하는 pseudo-force method를 사용하였다. Fig. 2에는 개발프로그램 "NLDA-BIS"의 흐름도를 도시하였다.

2.2 주요 특징

개발프로그램 "NLDA-BIS"에서는 2.1절에서 기술한 바와 같이 해석대상 면진 구조물을 2개의 부분구조 즉, 상부구조물과 isolator와 댐퍼를 설치하기 위한 base로 분리하여 각 부분구조에 대한 운동방정식으로부터 전체시스템에 대한 운동방정식을 유도하였으며, 해석 모델링의 대부분을 차지하는 3차원 상부구조물에 대해서는 상용 유한요소 구조해석 프로그램을 사용하여 고정지지부의 고유진동특성을 한 번만 계산하면 되고, 그 계산결과를 입력자료로 취급하기 때문에 어떠한 상용 유한요소 구조해석 프로그램과도 연계가 가능하며, 상부구조물과 isolator 및 댐퍼를 분리하여 취급하기 때문에 이들 isolator 및 댐퍼의 특성변경에 따른 응답 재해석도 매우 효과적으로 수행할 수 있다. 또한, 시간이력의 형태뿐만 아니라 응답스펙트럼의 형태로 주어지는 지지부 하중도 고려할 수 있다.

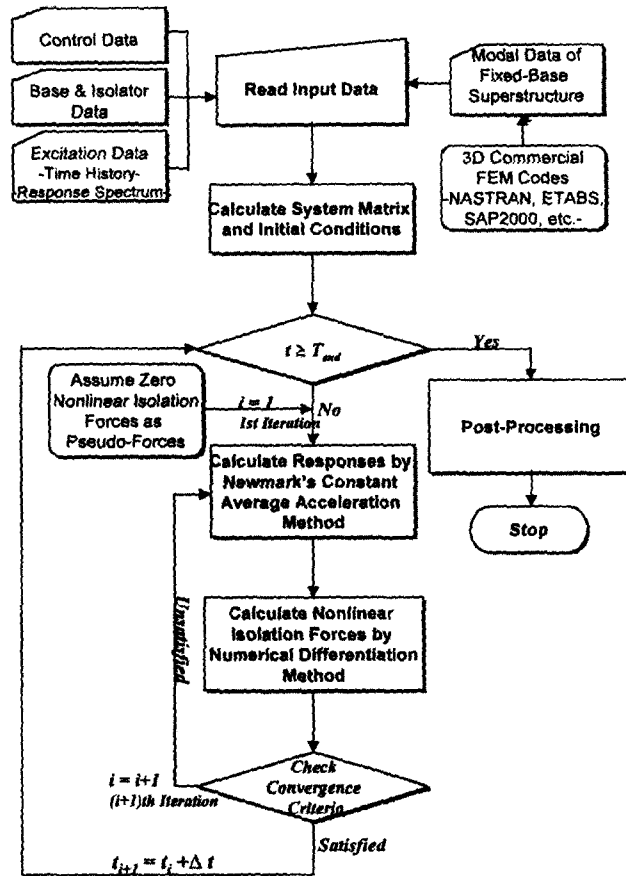


Fig. 2 Flow chart of the program "NLDA-BIS"

개발프로그램 "NLDA-BIS"에서는 현재 사용되고 있는 아래와 같은 대부분의 isolator 및 댐퍼를 모델링 할 수 있다. 즉,

- 고무적층베어링과 같은 선형 isolator
- 납삼입고무적층베어링, 금속댐퍼와 같은 단일 또는 양방향 비선형 hysteretic isolator 및 댐퍼
- 탄성-마찰베어링, 순수마찰베어링, 마찰진자베어링과 같은 단일 또는 양방향 비선형 hysteretic isolator
- 고감쇠고무베어링과 같은 비선형 stiffening hysteretic isolator
- 선형 및 비선형 댐퍼

양방향 비선형 hysteretic 거동을 보이는 isolator의 수학적 모델링을 위해 식 (4)로 주어지는 modified Wen's equation을 도입하였으며, 이를 풀기 위해 수치적분을 위한 시간중분의 크기에 상관 없이 안정적인 해를 보장하는 numerical differentiation formula method(MATLAB의 ode15 함수)를 사용하였다.

$$\begin{pmatrix} \dot{Z}_x Y \\ \dot{Z}_y Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \dot{u}_x \\ A \dot{u}_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_x^2 (\gamma \text{Sgn}(\dot{u}_x Z_x) + \beta) & Z_x Z_y (\gamma \text{Sgn}(\dot{u}_y Z_y) + \beta) \\ Z_x Z_y (\gamma \text{Sgn}(\dot{u}_x Z_x) + \beta) & Z_y^2 (\gamma \text{Sgn}(\dot{u}_y Z_y) + \beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 u , \dot{u} 는 각각 isolator 위치에서의 변위 및 속도, Y 는 isolator의 항복변위, A , γ , β 는 각각 isolator의 히스테리시스 곡선의 형상을 결정하는 무차원 상수로서 통상 $A=1$, $\gamma=0.9$, $\beta=0.1$ 의 값을 갖는다.

프로그램 개발에 있어서는 수치해석을 위한 다양한 함수, 해석결과를 가시화를 위한 편리한 기능 등을 제공하는 미국 Mathworks 사의 MATLAB[3]를 이용하였으며, Fig. 3에 보인 바와 같은 그래픽 사용자 인터페이스 기능을 구현하여 사용자 편의를 도모하였다.

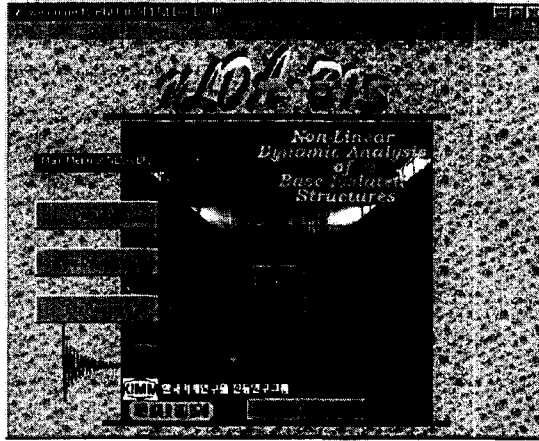


Fig. 3 Main window of the program "NLDA-BIS"

3. 프로그램 "NLDA-BIS" 정확도 검증

개발프로그램 "NLDA-BIS"의 정확도를 검증하기 위해 Table 1의 특성을 갖는 22개의 납삼입고무 적층베어링 또는 마찰진자베어링을 적용하여 내진 설계된 Fig. 4에 보인 바와 같은 6층 콘크리트 면진 구조물[2]에 대해 지진응답 해석을 수행하였다. 해석에 있어서는 Fig. 5와 같은 지반가속도가 y 방향으로 작용하는 경우를 택하였으며, 계산된 결과를 3D-BASIS를 이용하여 계산된 결과와 비교하였다. 마찰진자베어링을 적용한 경우 3D-BASIS에서는 이를 직접 모델링 할 수 없기 때문에 복원력 성분은 선형스프링으로, 마찰력성분은 순수마찰베어링으로 모델링하여 해석을 수행하였다. Fig. 6 및 Fig. 7에는 비교결과 예로서 base의 무게중심에서의 y 방향 변위 시간이력을 도시하였다. 이들 그림에서 보듯이 개발프로그램 "NLDA-BIS"를 사용하여 계산된 결과와 3D-BASIS를 이용하여 계산된 결과는 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 맺음말

본 논문에서는 각종 isolator 및 댐퍼를 적용한 면진 구조물의 효율적인 3차원 지진응답해석을 위해 개발된 프로그램 "NLDA-BIS"의 개발 이론 및 주요 특징을 기술하고, 수치계산 예를 통해

Table 1 Parameters for modeling the base isolators of numerical model

| | | |
|---------------------------|---|--|
| Lead Rubber Bearing | S15-9-2.75 | <ul style="list-style-type: none"> • Postyielding to Preyielding Stiffness Ratio : 0.1465 • Yield Force(ton) : 3.64 • Yield Displacement(mm) : 5.23 |
| | S18-9-4 | <ul style="list-style-type: none"> • Postyielding to Preyielding Stiffness Ratio : 0.1538 • Yield Force(ton) : 7.732 • Yield Displacement(mm) : 7.06 |
| | S21-9-3.5 | <ul style="list-style-type: none"> • Postyielding to Preyielding Stiffness Ratio : 0.1441 • Yield Force(ton) : 5.909 • Yield Displacement(mm) : 4.35 |
| Friction Pendulum Bearing | <ul style="list-style-type: none"> • Maximum and Minimum Friction Coeff. : 0.095/0.05 • Yield Displacement(mm) : 0.254 • Velocity Dependent Parameter of Friction Coeff.(sec/m) : 35.4 | |

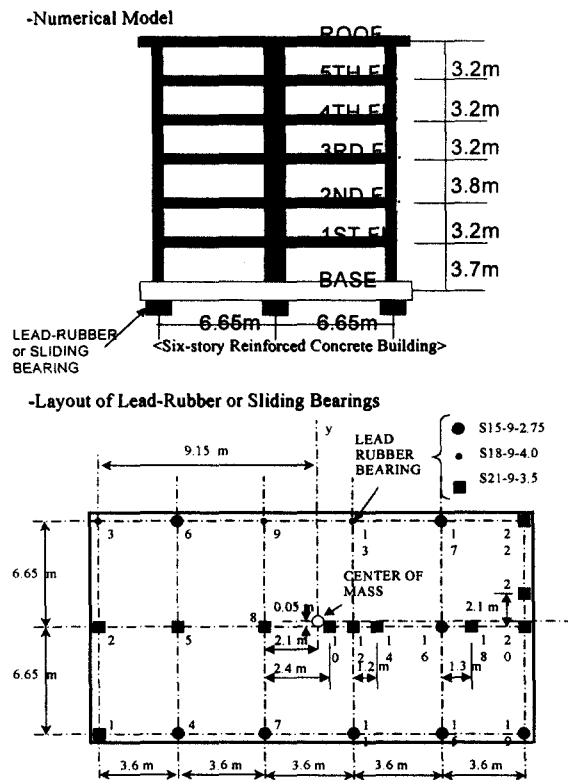


Fig. 4 Numerical model for verification of the program "NLDA-BIS"

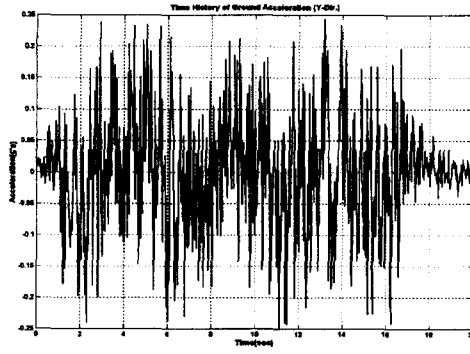


Fig. 5 Ground acceleration in the y direction

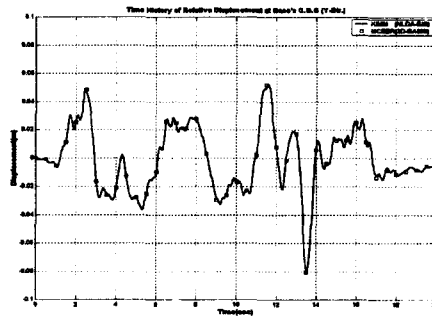


Fig. 6 Comparison of relative displacement at base's C.O.G. in the y direction-LRB Case

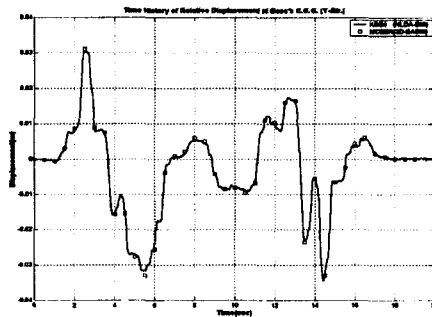


Fig. 7 Comparison of relative displacement at base's C.O.G. in the y direction-FPS Case

개발프로그램의 정확도를 검증하였다. 개발프로그램 “NLDA-BIS”는 현재 마찰형 isolator의 경우 isolator에 작용하는 normal force의 변화를 고려할 수 없다는 점, 상부구조물의 완벽한 3차원 모델링 기능의 부족 등 다소 제약성을 가지고 있지만, 각종 isolator 및 댐퍼의 모델링 기능, 사용자 편의성, 해석결과의 가시화 기능 등 여러 가지 측면에서 프로그램 3D-BASIS 보다는 향상된 프로그램이라 사료되며, 국내에서 개발되고 있는 각종 isolator 및 댐퍼의 성능검증 및 이를 적용한 면진 구조물의 내진 안전성 평가에 폭 넓은 활용이 기대된다. 이를 위해 한국기계연구원에서는 관련 학계 및 산업계에 개발프로그램을 배포하여 활용을 유도하고, 이를 통해 사용에 따른 요구사항을 피드백 받아 기능을 보완, 향상시켜 나갈 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 국가지정연구실사업으로 수행 중인 “제진장치를 활용한 계진 설계기술 개발”과제의 일환으로서 수행되었다.

참고문헌

1. Naeim F. and Kelly J.M, *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, Hohn Wiley & Sons, Inc., 1999.
2. Nagarajaiah S., Reinhorn A.M and Constantinou M.C., “Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D Base-Isolated Structures”, *Journal of Structure Engineering*, Vol.117, No.7, pp.2035-2054, July, 1991.
3. The MathWorks Inc., *MATLAB: High Performance Numerical Computation and Visualization Software User's Guide*, The MathWorks Inc., 1992.