

전달강성계수법에 의한 다층구조물의 지진응답해석

문덕홍* · 강현석** · 최명수* · 김성진**

Seismic Response Analysis of Multi-story Structures by the Transfer Stiffness Coefficient Method

D. H. Moon · H. S. Kang · M. S. Choi and S. J. Kim

Abstract

This paper is basic study of seismic response analysis for the large scaled structures subjected to seismic loading. The authors propose seismic response analysis algorithm for the multi-story structures, which are subjected to ground acceleration.

This analysis method is derived from an combination of the transfer stiffness coefficient method(TSCM) and Newmark method. Numerical computation is performed for simple multi-story structures acting on an arbitrary ground acceleration. Numerical results by the TSCM which is applied to the various strong ground motion are compared with results by central difference method and Runge-Kutta method.

1. 서론

최근에 전세계 곳곳에서 발생하는 지진으로 인해 많은 피해가 속출하고 있다는 것을 매스컴을 통해서 잘 알고 있다. 일반적으로 원자력발전소, 화학플랜트, 교량 등 중요한 대형구조물에 대한 내진설계가 잘 되어 있는 선진국에서 발생한 지진에 대한 피해는 그렇게 크지 않았던 반면에, 그렇지 못한 나라에서 발생한 지진의 피해는 엄청난 피해를 겪을 수 밖에 없었다.

우리나라와 가까운 일본의 경우도 과거 많은 지진이 발생하였다. 최근의 경우를 살펴보면, 1995년 1월에 발생한 고베지진으로 인해 많은 피해를 입었고, 2001년 3월에도 히로시마에 비교적 규모가 큰 지진이 발생하였다.

우리나라에서도 과거 홍성지진 등 크고 작은 많

은 지진이 관측이 되었고, 현재도 규모가 그렇게 크지는 않지만 작은 지진이 계속해서 관측이 된다는 사실을 미루어 보아 우리나라도 지진의 안전지대가 될 수 없다.

최근의 구조물은 기술의 발달에 따라 점점 복잡화 및 거대화되어 가는 추세와 다양한 형태로 발전되어 가고 있다. 따라서 지진 등의 비상시에도 구조물이 충분한 안정성을 가질 수 있도록 지진응답해석에 의한 내진설계가 요구되고 있다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 이런 설계는 주로 시험에 의한 방법⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾과 해석에 의한 방법^{(8), (9)}이 있다. 그러나 해석대상 자체가 대형이므로 시험에 의한 방법으로는 곤란하여 주로 이론에 의한 해석에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구는 대형구조물의 지진응답해석에 대한 기초연구로서, 진동해석기법으로는 전달강성계수법⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾과 Newmark 법을 이용하여 지반가속도를 받는 다층구조물의 지진응답해석 알고리즘을 정식화하고, 간단한 수치실험을 통해서 본 해석알고리즘의 유용성을 확인한다.

* 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원

2. 지진응답 해석

2.1 해석대상의 모델링

Fig. 1은 해석대상계를 나타내는 그림으로서 1층을 절점 0이라 하고, $n+1$ 층은 절점 n 이 되도록 하여 편의상 절점 0을 계의 좌단, 절점 n 을 계의 우단으로 하는 집중질량계로 모델링하였다. 그리고 1층은 스프링과 감쇠기로 이루어진 기초지지요소로 지지되고, 각 층은 각 층의 스프링에 의해 지지되고, 지반(Ground)에 가속도가 작용하도록 모델링하였다.

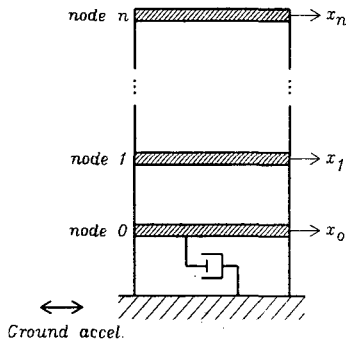


Fig. 1 Analysis Model

본 연구에서 사용하고 있는 기호는 다음과 같다.

(1) 「-」는 절점 좌측의 물리량, 붙어 있지 않은 기호는 절점 우측의 물리량을 나타낸다.

(2) 「 j 」는 절점 j 또는 j 번째 부재에 관한 물리량을 나타낸다.

일반적으로 지반가속도에 의한 각 절점에서의 운동방정식은 다음식과 같다(절점 j 및 시간간격 t_k 는 생략).

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -m \ddot{x}_g = q \quad (1)$$

여기서 \ddot{x}_g 는 지반가속도를 의미한다.

2.2 시간적분법

본 연구에서 시간적분법으로는 Newmark 법을 사용하였다. 시간 t_k 에서의 가속도 $\ddot{x}_j(t_k)$ 및 속

도 $\dot{x}_j(t_k)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_j(t_k) &= \frac{1}{\beta \Delta t^2} x_j(t_k) - \frac{1}{\beta \Delta t^2} x_j(t_{k-1}) \\ &\quad - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{x}_j(t_{k-1}) - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{x}_j(t_{k-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_j(t_k) &= \frac{\gamma}{\beta \Delta t} x_j(t_k) - \frac{\gamma}{\beta \Delta t} x_j(t_{k-1}) \\ &\quad - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right) \dot{x}_j(t_{k-1}) - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) \Delta t \ddot{x}_j(t_{k-1}) \end{aligned}$$

식(2)에서 β , γ 는 차분상수, Δt 는 시간간격을 의미한다.

2.3 강성계수 및 보정힘의 전달식

k 번째 시간간격 t_k 에서 절점 j 의 변위 및 힘 사이의 관계는 다음식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \bar{f}_j(t_k) &= \bar{S}_j x_j(t_k) + \bar{e}_j(t_k) \\ f_j(t_k) &= S_j x_j(t_k) + e_j(t_k) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \bar{S}_j , S_j 및 $\bar{e}_j(t_k)$, $e_j(t_k)$ 는 시간 t_k 에서의 강성 및 보정힘을 나타낸다. 식(2)와 식(3)로부터

$$P_j d_j(t_k) = Q_j(t_k) + f_j(t_k) - \bar{f}_j(t_k) \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} P_j &= \frac{1}{\beta \Delta t^2} m_j + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \hat{c}_j + \hat{k}_j \\ Q_j(t_k) &= q_j(t_k) - m_j Ha_j(t_k) - \hat{c}_j H v_j(t_k) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서

$$\begin{aligned} Ha_j(t_k) &= -\frac{1}{\beta \Delta t^2} \cdot \{ x_j(t_{k-1}) \\ &\quad + \Delta t \dot{x}_j(t_{k-1}) + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{x}_j(t_{k-1}) \} \\ H v_j(t_k) &= \dot{x}_j(t_{k-1}) + \Delta t \cdot \{ (1 - \gamma) \ddot{x}_j(t_{k-1}) \\ &\quad + \gamma Ha_j(t_k) \} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 $Ha_j(t_k)$ 및 $Hv_j(t_k)$ 는 $k-1$ 번째 시간간격 t_{k-1} 에서의 변위, 속도 및 가속도에 의해 결정되는 물리량이고, k 번째 시간간격 t_k 에서는 알 수 있는 물리량이 된다.

절점 $j-1$ 과 절점 j 사이 즉, j 번째 부재 양단에서의 힘과 변위의 관계는 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_j(t_k) \\ f_{j-1}(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x_j(t_k) \\ x_{j-1}(t_k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_j &= k_j, & B_j &= -k_j \\ C_j &= k_j, & D_j &= -k_j \end{aligned} \quad (8)$$

식(3)과 식(7)의 관계로부터 절점 $j-1$ 의 우측에서 절점 j 의 좌측으로 강성 및 보정힘을 전달하는 필드 전달식을 구한다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_j &= A_j + B_j V_j \\ \bar{e}_j(t_k) &= -B_j G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) \\ (j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} G_j &= S_{j-1} - D_j \\ V_j &= G_j^{-1} C_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (10)$$

절점 j 의 좌측에서 절점 j 의 우측으로 강성 및 보정힘을 전달하는 포인트 전달식을 구하기 위해 식(3)과 식(4)의 관계로부터

$$\begin{aligned} S_j &= \bar{S}_j + P_j \\ e_j(t_k) &= \bar{e}_j(t_k) - Q_j(t_k) \\ (j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (11)$$

계산의 효율을 위하여 필드 전달식과 포인트 전달식을 통합한 필드·포인트 전달식은 식(9)과 식(11)의 관계에 의해

$$\begin{aligned} S_j &= A_j + B_j V_j + P_j \\ e_j(t_k) &= -B_j G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) - Q_j(t_k) \\ (j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (12)$$

강성 및 보정힘의 식은 전달식의 형태이므로, 계산을 시작하는 절점 0에서의 강성 및 보정힘 S_0 와 $e_0(t_k)$ 를 구해야 한다.

Fig. 1에서와 같이 계의 좌단의 경계조건 $\{\bar{f}_0 = 0\}$ 과 식(3)과 식(4)의 관계로부터

$$\begin{aligned} S_0 &= P_0 \\ e_0(t_k) &= -Q_0(t_k) \end{aligned} \quad (13)$$

2.5 응답의 계산

강성 및 보정힘을 좌단에서 우단까지 연속적으로 전달 계산한 후, 계의 우단의 경계조건 $\{f_n(t_k) = 0\}$ 과 식(3)으로부터 우단의 변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_n(t_k) = -S_n^{-1} e_n(t_k) \quad (14)$$

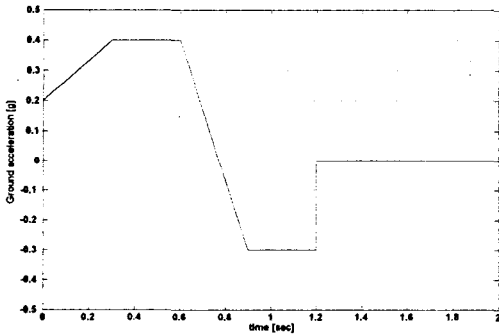
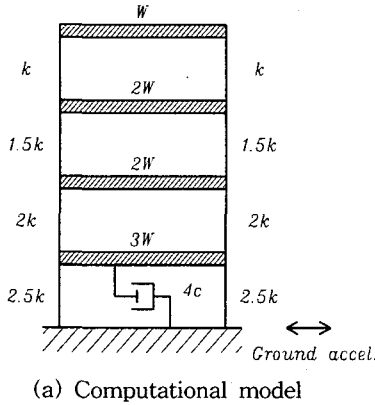
식(14)로부터 구한 $x_n(t_k)$ 과 식(3), 식(4), 식(7)로부터 다음식을 구한다.

$$\begin{aligned} x_{j-1}(t_k) &= V_j x_j(t_k) - G_j^{-1} e_{j-1}(t_k) \\ (j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (15)$$

식(14)에서 계의 우단에서의 변위를 계산한 후, 식(15)를 이용하게 되면 계의 우단에서 좌단으로, 전체 절점에서의 변위를 연속적으로 계산할 수 있다.

3. 수치실험

본 해석기법의 유용성을 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 간단한 구조물에 대한 수치실험을 행한다. Fig. 2 (a)에서 $W = 300$ [kips], $c = 0.5$ [kip·sec/in], $k = 60$ [kips/in] 로 구성이 되고, 지반가속도는 Fig. 2 (b)와 같이 작용하고 있다^{(13), (14)}.



(b) Ground acceleration
Fig. 2 Numerical model

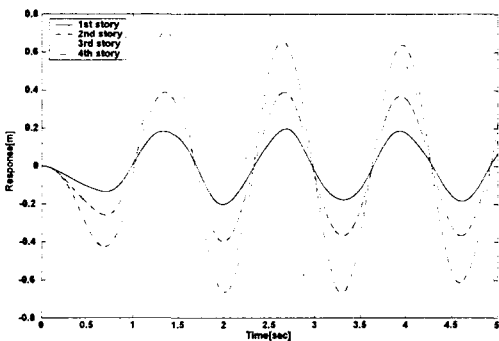


Fig. 3 Computation time

Fig. 2의 계산모델에 대해서 본 해석기법으로 계산시 설정한 상수는 $\beta = 1/4$, $\gamma = 1/2$ 을 사용하였고, 각 절점의 초기변위 및 초기속도는 모두 0으로 주어 계산한 결과와 직접적분법의 양해법으로 잘 알려진 중앙차분법 및 Runge Kutta법으로 계산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다($\Delta t = 0.001$ [sec]). 세 가지 기법에 의한 해석결과는 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

직접적분법을 이용한 해석기법에서 중요한 부분인 시간간격 Δt 의 증가에 대한 해석기법의 안정성 및 계산속도를 비교할 필요가 있다. 이 결과를 확인하기 위해 시간간격 Δt 의 증가에 대한 해석기법의 계산에 걸린 시간의 비교를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 x 축의 NDT는 초당 시간분할수를 의미한다. 그림에서 TSCM은 본 해석기법, CDM은 중앙차분법, RKM은 Runge-Kutta법에 의해 계산된 계산시간을 의미한다.

결과에서 분명하게 알 수 있듯이 시간분할수가 작은 경우에는 계산에 걸린 시간이 세 기법의 경우에 별 차이를 보이지 않지만, 시간분할수가 증가할수록 계산속도는 점점 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

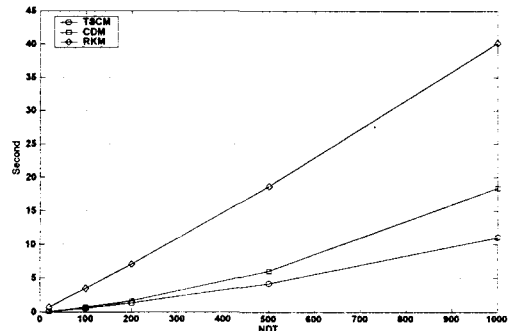


Fig. 4 Computational time

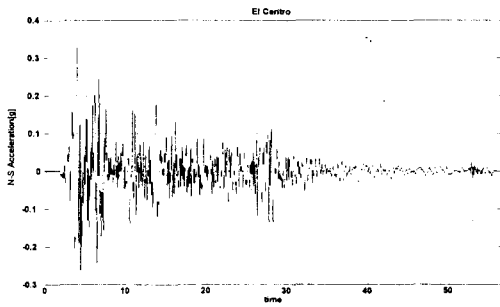
지진응답해석에서 주로 사용되는 입력가속도는 El Centro(1940, NS 0.3495g), Takochi-oki(1968, NS 0.2294g), Northridge(1994, NS 0.8428g), Hyogo-ken Nanbu(1995, NS 0.8337g) 등이 사용된다.

Fig. 5와 6은 Fig. 2 (a)의 계산모델에 El Centro 및 Northridge 지진파를 지반가속도로 하여 본 해

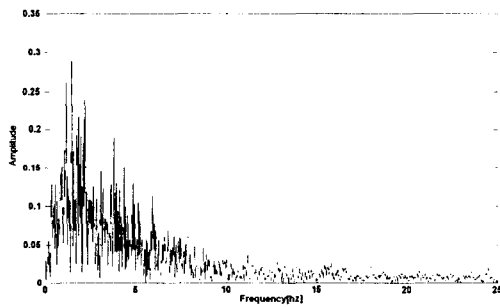
석기법으로 계산한 결과를 나타낸다.

우선 Fig. 5 (a)는 El Centro 가속도파형 (Sampling time : 0.02[sec])을 나타내며, (b)는 FFT한 결과를 나타낸다.

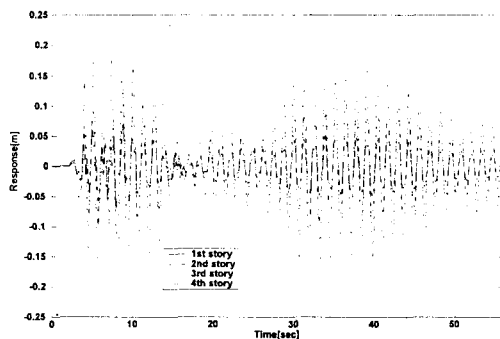
계산에 적용한 시간간격 Δt 는 0.001 [sec]로 하였고, 지진파의 샘플링 시간과 Δt 의 차이는 지진파를 선형1차보간한 지진파를 사용하였다.



(a) Seismic wave



(b) Fourier spectrum

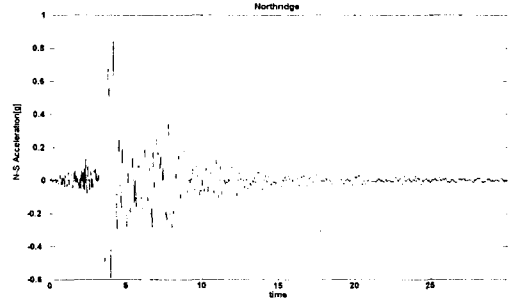


(c) Displacement response

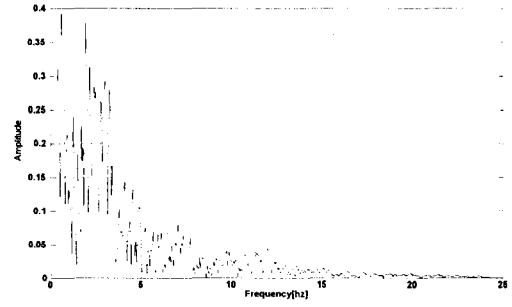
Fig. 5 El Centro earthquake(NS)

응답이 발생하는 것을 알 수 있다.

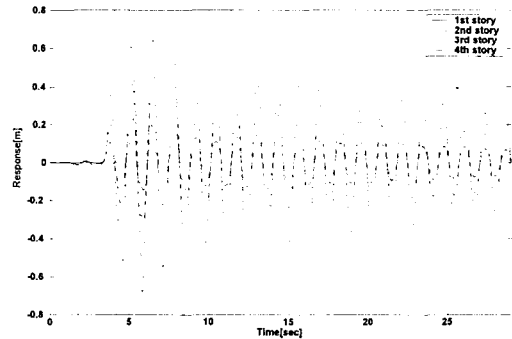
Fig. 6의 (a)는 Northridge 가속도파형 (Sampling time : 0.02[sec])을 나타내며 (b)는 FFT한 결과를 나타낸다. (c)는 (a)의 지진파를 입력으로 해서 구한 변위응답이다. 이 경우도 Fig. 5에서와 동일한 Δt 를 사용하였고, 샘플링 시간의 차는 선형1차보간하는 것으로 해결하였다.



(a) Seismic wave



(b) Fourier spectrum



(c) Displacement response

Fig. 6 Northridge earthquake(NS)

Fig. 5의 (c)는 입력가속도 (a)에 의한 각 층의 변위응답으로서, 결과에서 알 수 있듯이 상층으로 갈수록 변위가 크고, 초기가진 후, 여진에 의해 큰

4. 결 론

본 연구는 지진을 받는 대형구조물의 지진응답 해석의 기초적인 연구로서 임의의 지반가속도를 입력가속도로 하는 다층구조물의 지진응답해석을 전달강성계수법이라는 진동해석기법에 직접적분법 중의 하나인 Newmark 법을 적용하여 해석 알고리즘을 정식화한 후, 간단한 구조물에 적용하여 중앙차분법 및 Runge Kutta 법과의 계산정도 및 계산속도를 비교하여, 본 해석기법의 유용성을 확인할 수 있었고, 실제 과거 유명 지진정보를 입력가속도로 하는 해석을 통해서 본 해석기법이 지진응답해석에서도 유용한 해석기법임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 유철수, “강교의 내진설계”, 한국강구조학회지, 제 3권 제 2호, pp. 99 ~ 104, 1991
2. 양보석외 1인, “증기터빈·발전기축계의 지진응답해석(제1보 : 로터·베어링시스템만을 고려한 경우)”, 한국소음진동공학회지, 제9권 제3호, pp. 554 ~ 564, 1999
3. 양보석외 2인, “증기터빈·발전기축계의 지진응답해석(제2보: 웨이블렛 해석의 적용)”, 한국소음진동공학회지, 제9권 제4호, pp. 813 ~ 821, 1999
4. 浪田方郎, 川畑淳一, 市橋一郎, 福田俊彦, “彈塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発”, 日本機械學會論文集(C編), 61卷, 590号, pp. 3881~3888, 1995
5. 김대곤외 3인, “유사동적 실험법을 이용한 구조물의 내진 성능 평가”, 한국지진공학회논문집, 제1권 제2호, pp.49 ~ 57, 1997
6. 조양희외 1인, “Hualien 대형지진시험 모델의 지진응답해석”, 한국지진공학회논문집, 제1권 제2호, pp. 59 ~ 68, 1997
7. 윤정방외 3인, “기초격리된 구조물의 내진성능 평가를 위한 실험기법”, 한국지진공학회논문집, 제1권 제4호, pp. 45 ~ 58, 1997
8. 전대한, “응답스펙트럼법에 의한 고층 건축물의 탄소성 지진응답해석법”, 한국지진공학회논문집, 제1권 제4호, pp. 1 ~ 9, 1997.
9. 박문호외 3인, “최적내진설계에 의한 강뼈대구조물의 브레이싱 효과”, 대한토목학회논문집, 제18권 제I-6호, pp. 829 ~ 839, 1998
10. 문덕홍외 2인, “전달강성계수법에 의한 분기형 구조물의 시간이력응답해석”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 426~431, 1998
11. 문덕홍외 2인, “전달강성계수법에 의한 직선형구조물의 시간이력응답 해석알고리즘에 관한 연구”, 한국동력기계공학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 74~79, 1999
12. D. H. Moon, M. S. Choi, “Vibration Analysis for Frame Structures using Transfer of Dynamic Stiffness Coefficient”, Journal of Sound & Vibration, Vol. 234, No. 5, pp.725 ~ 736. 2000
13. Mario Paz, “Structural Dynamics Theory and Computation 4th ed.”, Chapman & Hall, pp. 310~365, 1997
14. Joseph W. Tedesco, William G. McDougal, C. Allen Ross, “Structural Dynamics Theory and Application”, Addison-Wesley, 1999