

층지진하중분포 예측을 위한 모드조합법

Modal Combination Method for Prediction of Story Earthquake Load Profiles

엄태성¹⁾ · 이혜린²⁾ · 박홍근³⁾

Eom, Tae-Sung · Lee, Hye-Lin · Park, Hong-Gun

국문 요약 >> 건물의 지진응답을 평가하기 위하여 비선형 푸시오버 해석을 수행한다. 구조물의 비탄성 지진응답을 정확히 예측하기 위해서는, 비선형해석에 사용되는 층하중분포가 구조물의 시간이력 지진응답 동안 실제로 발생하는 지진하중분포를 나타낼 수 있어야 한다. 본 연구에서는 건축물의 지진하중분포를 예측하기 위하여 새로운 모드조합법을 개발하였다. 개발된 모드조합법에서는 모드조합계수를 곱한 각 모드의 스펙트럼응답을 조합하여 다수의 지진하중분포를 예측한다. 모멘트 골조와 캔틸레버 벽체에 대한 변수연구를 수행하였다. 변수연구 결과를 토대로, 각 고유모드가 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 나타내는 모드조합계수를 정의하였다. 다양한 정형 및 수직 비정형 구조물에 대하여 제안된 계수모드조합법을 적용하였다. 그 결과 제안된 모드조합법은 시간이력 응답 동안 구조물에 실제로 발생하는 지진하중분포를 정확히 예측할 수 있었다.

주요어 모드조합법, 지진하중, 동적응답, 지진해석, 내진공학

ABSTRACT >> Nonlinear pushover analysis is used to evaluate the earthquake response of building structures. To accurately predict the inelastic response of a structure, the prescribed story load profile should be able to describe the earthquake force profile which actually occurs during the time-history response of the structure. In the present study, a new modal combination method was developed to predict the earthquake load profiles of building structures. In the proposed method, multiple story load profiles are predicted by combining the modal spectrum responses multiplied by the modal combination factors. Parametric studies were performed for moment-resisting frames and walls. Based on the results, the modal combination factors were determined according to the hierarchy of each mode affecting the dynamic responses of structures. The proposed modal combination method was applied to prototype buildings with and without vertical irregularity. The results showed that the proposed method predicts the actual story load profiles which occur during the time-history responses of the structures.

Key words modal superposition, earthquake loads, dynamic response, seismic analysis, earthquake engineering

1. 서론

최근 구조물의 비탄성 내진성능 평가 및 설계를 위하여 능력스펙트럼법(capacity spectrum method)⁽¹⁾, 직접변위기 초설계법(direct displacement-based design)⁽²⁾, 비선형모드 해석법(modal pushover analysis)⁽³⁾ 등 다양한 비선형정적 방법이 개발되었다. 이러한 비선형정적방법에서는 하나 이상의 가정한 지진하중분포에 대하여 푸시오버해석(pushover

analysis)을 수행하여 지진응답을 평가한다. 따라서 구조물의 비탄성 지진응답을 정확히 평가하기 위해서는, 푸시오버 해석시 사용하는 지진하중분포가 시간이력 지진응답 동안 구조물에 작용하여 층간변위, 층전단력, 부재력 등 지진설계 변수의 최대값을 발생시키는 실제 지진하중분포를 정확히 나타낼 수 있어야 한다. 그러나 지진 거동시 구조물에는 다양한 지진하중분포가 작용하므로, 그러한 층지진하중분포를 정확히 예측하는 것은 어렵다. 특히 고층 건물이나 질량 및 강성 비정형을 갖는 건물의 경우, 고차모드의 영향이 커지므로 복잡한 지진거동을 보인다.

그림 1은 16층 철근콘크리트 모멘트 골조의 탄성 시간이력 지진응답을 보여준다. 시간이력해석을 위한 지진데이터로 1940 El Centro 지진(최대지반가속도 = 0.319g)을 사용하였다. 건물의 형태와 부재 크기를 그림 1에 나타냈다. 밀

¹⁾ 정회원·포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원
(대표저자: tseom@rist.re.kr)

²⁾ 학생회원·서울대학교 공과대학 건축학과 대학원

³⁾ 정회원·서울대학교 공과대학 건축학과 부교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

면전단력, 6층 층간변위, 13층 내부 보의 전단력 등의 지진 설계변수가 최대응답을 보이는 시간과, 그때의 층지진하중 분포를 그림에 나타냈다. 그림 1에 나타난 바와 같이, 각 지진설계변수에 따라서 다른 시간 단계에서 다른 지진하중분포에 의하여 최대지진응답이 발생되었다. 따라서 구조물의 시간이력 지진응답 동안 발생하는 지진설계변수들의 최대 응답을 정확히 예측하기 위해서는 다양한 지진하중분포를 고려할 필요가 있다.⁽⁴⁾

비탄성 응답에 대한 층지진하중을 예측하는 것은 어려우므로, 일반적으로 지진하중분포의 예측을 위한 기존 연구는 탄성응답에 대하여 수행되었다. 구조물의 내진평가/설계를 위한 반응스펙트럼방법(response spectrum method)은 고차 모드의 영향을 고려하기 위하여 SRSS(square root of square sum)와 CQC(complete quadratic combination) 등의 전통적인 모드조합방법을 사용하고 있다. 이 모드조합방법을 사용하면 지진이력 거동 동안 발생하는 지진설계변수의 최대 응답을 비교적 정확히 평가할 수 있다. 그러나 각 지진설계 변수의 최대응답은 동일한 시간에 발생되지 않으므로, 이러한 모드조합방법은 시간이력 지진응답 동안 구조물에 실제로 작용할 수 있는 지진하중분포를 예측할 수 없다. 이러한 단점을 개선하기 위하여, 푸시오버 해석을 위한 다양한 층지진하중분포가 제안되었다. Requena⁽⁵⁾는 각 모드의 층지진하중을 SRSS로 중첩시켰고, 또한 Lee⁽⁶⁾는 모드별 층전단력을 중첩시켜 지진하중분포를 제안하였다. Chopra⁽³⁾는 비선형모드해석법(modal pushover analysis)를 개발하였다. 이 방법에서는 조합된 층하중분포를 사용하지 않고, 각 모드별로 푸시오버해석을 수행하여 구한 각 모드별 비탄성 응

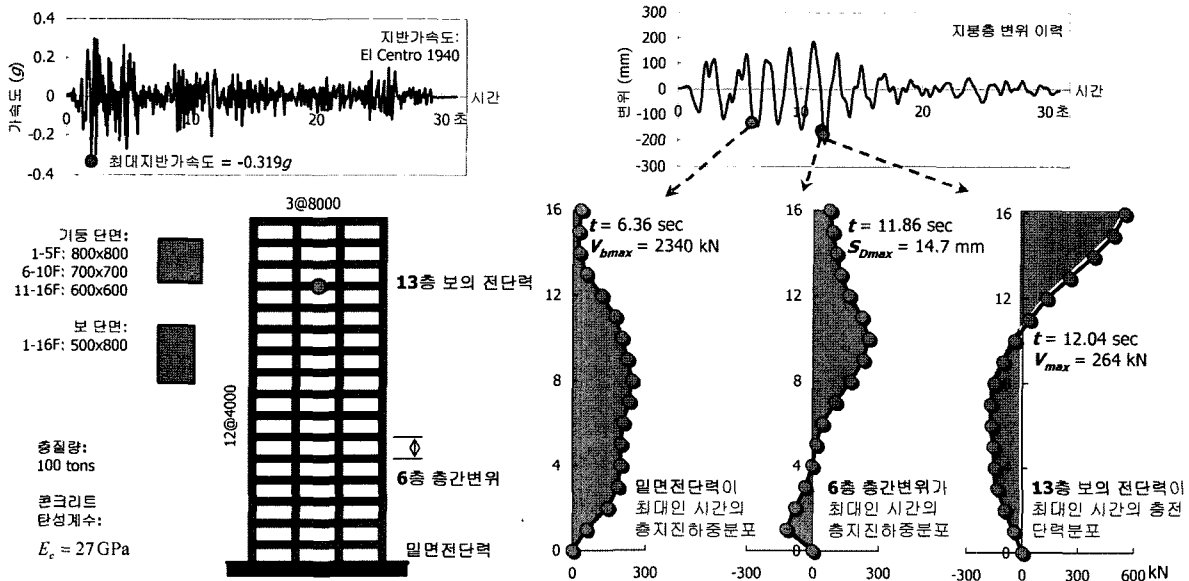
답을 SRSS로 중첩시켜 전체 구조물의 비탄성 지진응답을 평가한다.

Kunnath⁽⁷⁾는 Matsumori⁽⁸⁾가 제안한 모드조합방법을 기초로 푸시오버해석을 위한 복수의 지진하중분포를 제안하였다. Kunnath와 Matsumori가 제안한 모드조합방법은 각 모드별 층지진하중을 더하거나 빼서 지진하중을 계산하므로, SRSS나 CQC등의 기존 조합법과 달리 각 모드의 방향성을 고려할 수 있다. 따라서 다양한 지진하중분포를 고려할 수 있다. 그러나 이러한 모드조합방법이 시간이력 지진응답 동안 구조물에 발생하는 실제 지진하중분포를 나타낼 수 있는지는 검증되지 못하였다.

본 연구에서는 구조물의 비탄성 지진하중분포를 예측하기 위한 기초연구로서, 고차 진동모드의 영향을 받는 구조물의 탄성지진응답 특성을 분석하기 위하여 변수연구를 수행하였다. 시간이력 지진응답 동안 구조물과 부재에 최대지진응답을 발생시키는 탄성 지진하중분포를 연구하였으며, 연구 결과를 토대로 다양한 지진하중분포를 예측할 수 있는 새로운 모드조합방법을 개발하였다.

2. 구조물의 동적거동에 대한 고차모드의 영향

단주기 및 장주기 구조물의 지진응답에 대한 고차모드의 영향을 분석하기 위하여 수치해석 변수연구를 수행하였다. 그림 2(a)는 횡방향 10개의 자유도를 갖는 일반적인 모멘트 저항 골조를 보여준다. 기둥의 강성은 건물의 높이에 따라 다르게 가정하였으며, 보와 기둥의 강성비는 $EI_b/EI_c = 0.475$ 이다. 변수 연구를 위하여 각 층의 질량은 동일한 것으로 가



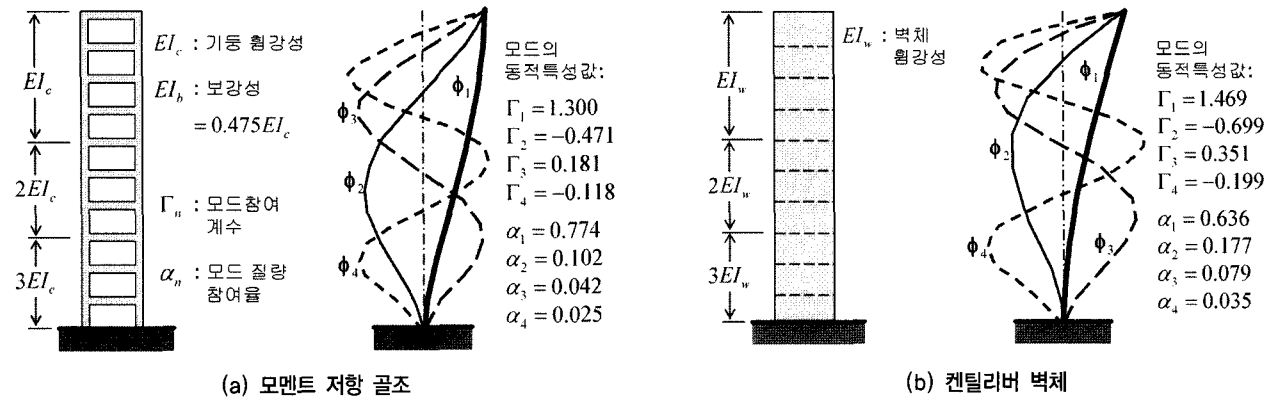
〈그림 1〉 최대 지진응답을 발생시키는 다양한 층지진하중분포

정하였고, 그 크기를 변경하여 모멘트 저항 골조의 기본 진동주기를 조정하였다.

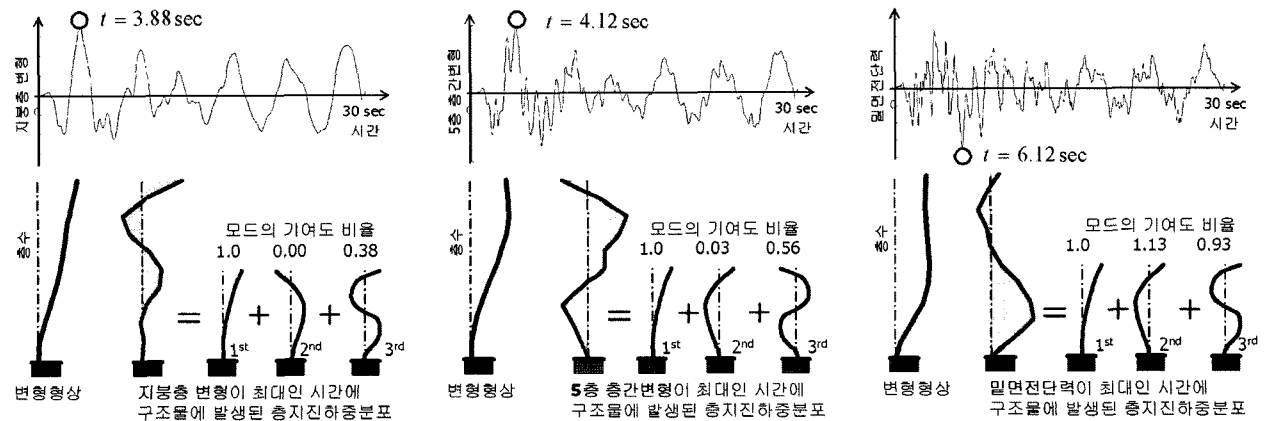
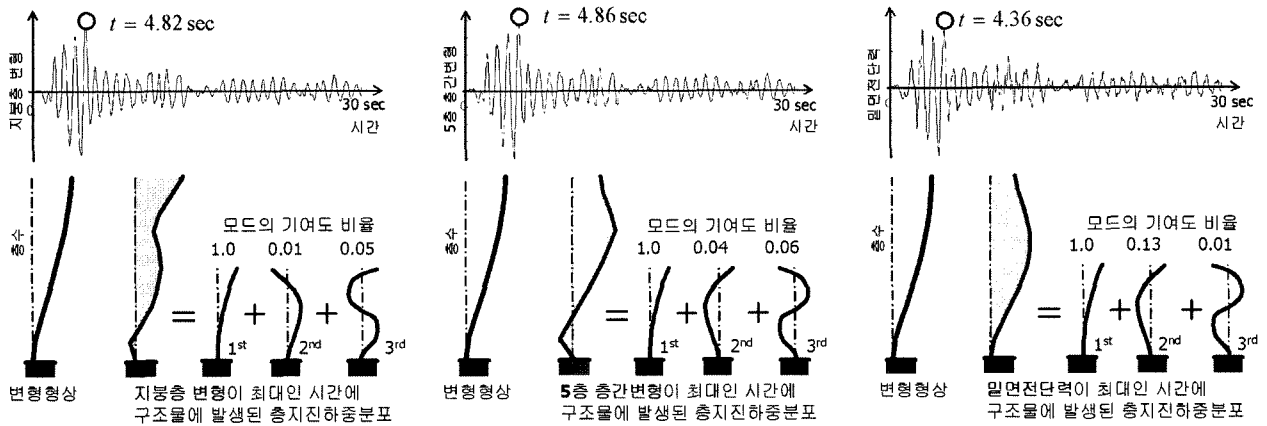
수치해석에 사용된 단주기 및 장주기 모멘트 골조의 기본 진동주기는 각각 $T_1 = 1.0, 5.0$ sec이다. 그림 2(a)는 모멘트 골조의 1~4차 모드형상과 동적 특성값을 보여준다. 단주기 및 장주기 모멘트 골조는 동일한 층강성 및 층질량 분포를 가지므로, 진동주기에 관계없이 모드참여계수(modal

participation factor)와 질량 참여율(modal mass coefficient)이 동일하다. 해석을 위한 지진데이터로 1940 El Centro 지진(최대지반가속도 = 0.319g)을 사용하였다.

그림 3은 지진설계변수(지붕층 변형, 5층 층간변위, 밀면 전단력)의 시간이력 지진응답을 보여준다. 그림에서 t 는 각 지진설계변수가 최대값을 보이는 시간을 가리키며, 시간 t 에서 구조물에 발생된 변형형상과 층지진하중분포를 그림에



〈그림 2〉 변수연구를 위한 모멘트 저항 골조 및 캔틸레버 벽체



〈그림 3〉 지진설계변수에 따른 단주기 및 장주기 모멘트 저항 골조의 시간이력 지진응답

나타냈다. 시간 t 에서 층진하중에 대하여 구한 1~3차 모드의 기여도 비율(contribution ratio) 또한 그림에 나타났다. 그림 3의 기여도 비율은 1차 모드의 밀면전단력에 대한 각 모드의 밀면전단력 크기 비율을 나타낸다.

그림 3(a)에 나타난 바와 같이 단주기 모멘트 골조의 경우($T_1 = 1.0$ sec), 세 지진설계변수의 최대값이 거의 동일한 시간에 발생되었다. 그 결과, 지진설계변수의 종류에 관계없이 유사한 변형분포 및 지진하중분포가 발생되었다. 이는 단주기 구조물의 지진응답이 기본진동모드에 의하여 지배되었음을 나타낸다. 그림 3(b)는 장주기 모멘트 골조($T_1 = 5.0$ sec)의 시간이력 지진응답을 보여준다. 단주기 모멘트 골조와 달리, 지붕층변형, 5층 층간변위, 밀면전단력 등 각 지진설계변수의 최대 지진응답이 서로 다른 시간 t 에서 발생되었고, 지진설계변수에 따라 최대값을 발생시키는 변형분포 및 지진하중분포가 크게 달랐다. 이러한 결과는 장주기 모멘트 골조의 지진응답에 2, 3차의 고차모드가 크게 영향을 준다는 사실을 나타낸다. 또한 그림 3(b)는 시간 t 에서 각 모드의 중첩방향과 기여도 비율을 보여주는데, 각 고유모드의 중첩방향과 기여도 비율이 지진설계변수에 따라 달랐다.

그림 3은 장주기 및 단주기 구조물의 동적거동 차이를 보여준다. 단주기 구조물의 경우 지붕층변형, 층간변위, 부재력 등 모든 지진설계변수의 최대응답이 기본진동모드에 의하여 결정된다. 그러므로 1차모드만을 고려한 지진하중분포를 사용하더라도 합리적인 내진평가/설계가 가능하다. 반면, 장주기 구조물의 경우 고차모드가 구조물과 부재의 지진응답에 큰 영향을 끼친다. 그 결과, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 지진설계변수에 따라 최대응답을 발생시키는 지진하중분포가 각각 다르다. 그러므로 고차모드의 영향이 큰 구조물의 내진평가/설계를 위해서는 구조물과 부재에 최대지진응답을 발생시키는 모든 가능한 지진하중분포를 고려하여야 한다.

3. 계수모드조합법

3.1 기본 개념

시간이력 지진응답 동안 구조물과 부재에 최대지진응답을 발생시키는 지진하중분포를 예측하기 위해서는, 먼저 각 모드가 지진하중분포에 기여하는 정도를 정확히 예측하여야 한다. 또한 그림 3에 나타난 바와 같이 지진하중분포에 대한 기여도 비율 뿐만 아니라 각 모드의 중첩방향도 고려할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 각 모드의 중첩방향과 기

여도 비율을 함께 고려할 수 있는 새로운 모드조합방법으로 계수모드조합법(factored modal combination)을 개발하였다. 계수모드조합법은 각 모드의 스펙트럼 지진응답을 중첩시켜 각 지진설계변수의 최대응답을 결정한다.

$$r_0 = R_{10}r_{10} \pm R_{20}r_{20} \pm R_{30}r_{30} + \dots \quad (1)$$

여기서, r_0 = 시간이력 지진응답 동안 구조물과 부재에 발생하는 최대지진응답, r_{n0} ($n = 1, 2, \dots$) = n 차모드의 최대지진응답으로 설계스펙트럼으로부터 구할 수 있다. $R_{n0} = n$ 차 모드 모드조합계수(modal combination factor). 각 모드의 최대지진응답 r_{n0} (스펙트럼 응답)는 동일한 시간에 발생하지 않으므로, 본 연구에서는 지진설계변수의 최대응답에 각 모드가 기여하는 비율을 나타내는 모드조합계수 R_{n0} 를 도입하였다. 계수모드조합법의 기본 개념은 Matsumori⁽⁸⁾와 Kunnath⁽⁷⁾가 제안한 모드조합방법과 비슷하다. 그러나 그들의 모드조합방법과 달리 계수모드조합법은 모드조합계수 R_{n0} 를 사용하여 각 모드의 기여도 비율을 조정할 수 있으며 ($0 \leq R_{n0} \leq 1.0$), 따라서 시간이력 지진응답 동안 구조물에 실제로 작용할 수 있는 다수의 지진하중분포를 만들어 낼 수 있다.

3.2 모드조합계수

식 (1)에서 각 모드의 최대응답 r_{n0} 는 설계응답스펙트럼으로부터 쉽게 결정될 수 있다. 따라서 구조물에 작용하는 정확한 지진하중분포를 예측하기 위해서는 모드조합계수 R_{n0} 를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 모드조합계수를 알아내기 위하여 탄성 시간이력해석을 사용한 변수연구를 수행하였다.

다자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = -\ddot{u}_g \mathbf{m} \mathbf{1} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{m} , \mathbf{c} , \mathbf{k} = 질량, 감쇠, 강성 행렬, \mathbf{u} = 변위벡터, $\mathbf{1}$ = 지진동의 작용방향을 나타내는 단위벡터, \ddot{u}_g = 지반가속도. 변위벡터 \mathbf{u} 는 다음과 같이 각 모드별 지진응답의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u} = \sum_{n=1}^N q_n(t) \phi_n \quad (3a)$$

여기서, ϕ_n ($n = 1, 2, \dots, N$) = n 차 모드형상, N = 고려하는 모드 개수, $q_n(t)$ = 시간 t 에서 각 모드의 변형응답. 모드 좌표계의 직교성으로부터 유도된 각 고유모드별 단자유도

운동방정식(식 (4))을 이용하여 $q_n(t)$ 를 구할 수 있다.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\omega_n\zeta_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2q_n(t) = -\ddot{u}_g\Gamma_n \quad (4)$$

여기서, $\omega_n, \zeta_n = n$ 차 모드의 각 진동수 및 감쇠비, $\Gamma_n =$ 모드참여계수.

계수모드조합법에서는 시간 t 에서 각 모드의 변형응답 $q_n(t)$ 를 최대응답(스펙트럼응답) r_{n0} 에 모드조합계수 $R_n(t)$ 를 곱하여 정의한다. 즉, $q_n(t) = r_{n0}R_n(t)$ ($0 \leq |R_n(t)| \leq 1.0$). 식 (4)로부터 결정되는 n 차 모드의 최대응답 r_{n0} 는 설계응답스펙트럼으로부터 결정된다. 즉, $r_{n0} = \Gamma_n S_{dn}$. $S_{dn} = n$ 차 모드의 스펙트럼 변형값. 그러므로 식 (3a)는 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \sum_{n=1}^N R_n(t) S_{dn} \Gamma_n \phi_n \quad (3b)$$

$$R_n(t) = \frac{q_n(t)}{\Gamma_n S_{dn}} \quad (5)$$

일반적으로 각 모드의 모드조합계수 $R_n(t)$ 는 구조물의 시간이력 지진응답 동안 시간에 따라 변화한다. 그러나 구조물의 내진평가/설계시에는 최대지진응답이 중요하므로, 구조물 및 부재에 최대지진응답이 발생하는 시간에 작용하는 $R_n(t)$ 의 절대값을 모드조합계수 R_{n0} 로 정의하였다.

모드조합계수 R_{n0} 는 구조물에 대한 시간이력해석 결과를

사용하여 평가할 수 있다. 지붕층 변형, 밀면전단력, 전도모멘트 등의 지진설계변수가 최대응답을 보이는 시간에 발생된 구조물의 변형 \mathbf{u}_0 는 각 모드별 응답의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_0 = \sum_{n=1}^N q_n \phi_n = q_1\phi_1 + q_2\phi_2 + q_3\phi_3 + \dots \quad (6)$$

따라서 탄성 시간이력해석으로 구한 \mathbf{u}_0 로부터 n 차 모드의 지진응답 q_n 은 다음과 같이 계산된다.

$$q_n = \frac{\phi_n^T \mathbf{m} \mathbf{u}_0}{\phi_n^T \mathbf{m} \phi_n} \quad (7)$$

다음으로, 식 (7)을 식 (5)에 대입하여 모드조합계수 R_{n0} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{n0} = \left| \frac{q_n}{\Gamma_n S_{dn}} \right| = \left| \frac{\phi_n^T \mathbf{m} \phi_n}{\phi_n^T \mathbf{m} \mathbf{u}_0} \right| \frac{1}{\Gamma_n S_{dn}} \quad (8)$$

구조물과 부재에 발생된 최대지진응답으로부터 구한 일련의 모드조합계수 $R_{n0}(n = 1, 2, \dots, M)$ 를 모드조합계수분포 \mathbf{R}_0 로 정의하였다. 만약 \mathbf{R}_0 가 예측가능하다면, 복잡한 시간이력해석을 수행하지 않고 식 (1)을 사용하여 지진설계변수들의 최대응답을 발생시키는 지진하중분포를 쉽게 구할 수 있다.

〈표 1〉 변수연구에 사용된 지진데이터 목록

Event ¹⁾	M_w ²⁾	Station	PGA ³⁾	λ ⁴⁾	Event ¹⁾	M_w ²⁾	Station	PGA ³⁾	λ ⁴⁾			
Big Bear, 1992	6.5	Snow Creek	0.164	2.47	Northridge, 1994	6.7	Big Tujunga Station	0.265	0.96			
		Winchester, CA	0.076	6.96			LA, CA (USC)	0.163	1.36			
		Rancho Cucamonga, CA	0.051	3.18			Tarzana, CA	1.780	0.13			
		Pearblossom, CA	0.035	5.62			LA, CA (CSMIP)	0.474	0.63			
		LA, CA - LA - City Terrace	0.064	3.02			Newhall, CA	0.590	0.31			
Cape Mendocino, 1992	7.0	LA, CA Temple & Hope	0.033	6.88	LA, CA, Hollywood Storage	0.389	0.52	Parkfield, 1966	6.1	LA, CA Baldwin Hills	0.239	0.87
		Shelter Cove, CA	0.227	2.34	Parkfield, CA Cholame 2WA	0.489	0.15					
		El Centro, 1940	6.9	El Centro Array Sta 9	0.319	0.52	Parkfield, CA Cholame 5W			0.434	0.16	
		Landers, 1992		7.3	Joshua Tree, CA	0.284	0.80			Parkfield, CA Cholame 8W	0.275	0.28
					Desert Hot Springs, CA	0.171	1.02			Parkfield, 2004	6.0	Coalinga, CA
Palm Springs, CA	0.089				2.22	Petrolia, 1991	6.0	Cape Mendocino, CA	0.261	1.12		
Indio, CA	0.109				1.77	San Fernando, 1971	6.6	Castaic, CA	0.316	0.61		
Hemet Fire Station	0.097		2.37		Warm Springs, CA	0.122	2.19					
Livermore, 1980	5.8	Riverside Airport	0.043	6.57	Taupo, NZ 1999	6.0	Lower Hutt-Naenae Substation	0.027	2.04			
		Featherly Park	0.052	3.00	Whittier Narrows, 1987	6.1	El Monte, CA	0.237	0.65			
		APEEL Array Station 3E	0.057	3.88	Arcadia, CA	0.292	0.50					
		Morgan Hill, 1984	6.1	Gilroy Array Station 1	0.095	3.37	Altadena, CA	0.305	0.82			
		Santa Cruz, CA		0.076	2.04	Long Beach, CA	0.226	0.92				
N. Palm Springs 1986	6.2	Silent Valley		0.145	2.97	Carson, CA	0.111	0.45				
Northridge, 1994		6.7		LA, CA (CSMIP)	0.316	0.54						

1) All acceleration data are available in the web-site, '<http://db.cosmos-eq.org>' 2) Moment magnitude of earthquakes
 3) Unit: g 4) Scale factor for calibrating ground acceleration

3.3 변수 연구

모드조합계수분포 R_0 를 알아내기 위하여 수치해석 변수 연구를 수행하였다. 본 연구에서 지진설계변수(지붕층변형, 층간변위, 밀면전단력, 부재력 등), 구조방식, 진동주기, 지진파의 종류 등에 따른 모드조합계수분포의 차이를 분석하였다. 수치해석 대상 구조물로 그림 2의 모멘트 저항 골조와 캔틸레버 벽체를 사용하였다. 그림 2(a)의 모멘트 골조와 그림 2(b)의 캔틸레버 벽체는 각각 전형적인 전단지배 및 휨지배 변형형상을 보이는 구조물을 대표한다. 해석 구조물의 기본진동주기는 층질량을 조정하여 1초에서 9초 사이의 값으로 설정하였다. 각 구조물의 강성 및 질량 분포가 동일하므로, 그림 2에 나타난 바와 같이 모멘트 골조와 캔틸레버 벽체의 모드참여계수와 질량참여율은 구조물의 진동주기에 관계없이 동일하다.

연약지반부터 강암반에 이르는 다양한 지반상태로부터 얻은 40개의 지진동을 사용하여 모멘트 골조와 캔틸레버 벽체에 대하여 시간이력해석을 수행하였다. 각 지진데이터는 표 1에 나타났다. 지붕층변형, 밀면전단력, 밀면전도모멘트 등이 최대응답을 보이는 시간에 구조물에 발생된 변형형상 u_0 를 사용하여 모드조합계수 R_{n0} 를 구하였다. 식 (8)에서 모드조합계수는 7차 고유모드까지 고려하였다. ($N = 7$)

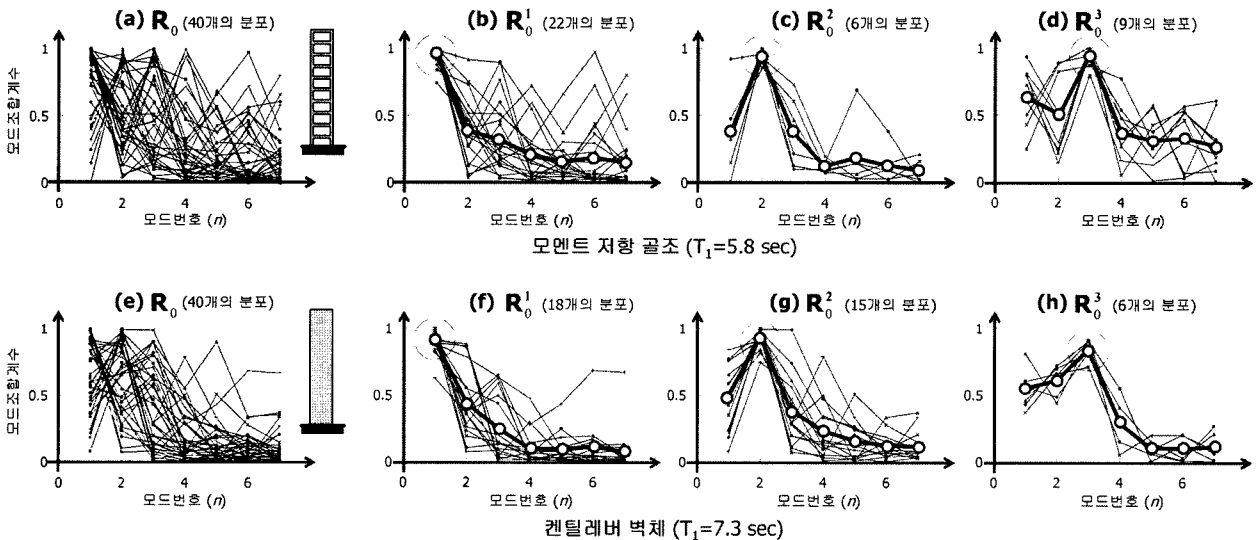
그림 4는 모멘트 저항 골조($T_1 = 5.8$ sec)와 캔틸레버 벽체($T_1 = 7.3$ sec)의 지붕층변형이 최대응답을 보이는 시간에 발생하는 모드조합계수분포 R_0 를 보여준다. 그림에서 가로축은 모드 번호 n 을, 세로축은 모드조합계수 R_{n0} 를 나타낸다. 그림 4(a)와 (e)는 각각 40개의 지진데이터에 대하여 구한 모든 모드조합계수분포를 보여준다. 모드조합계수분포를 R_0^m 로 분류하여 그림 4에 나타났다. 여기서, R_0^m 는 m 차

모드에서 최대의 모드조합계수를 갖는 모드조합계수분포이다. 그림 4(b)~(d)와 (f)~(h)는 각각 1차, 2차, 3차 모드가 최대계수를 갖는 모드조합계수분포 R_0^1, R_0^2, R_0^3 를 나타낸다.

그림 4(b)~(d)와 (f)~(h)에 나타난 바와 같이 모드조합계수분포 R_0^m 는 최대 모드조합계수를 갖는 모드 번호 m 에 관계없이 다음과 같은 규칙을 갖는다. 우선 최대값을 갖는 m 차모드의 모드조합계수 R_{m0}^m 는 대략 0.9의 값을 갖는다. 모드 번호 $n(n \neq m)$ 이 최대계수를 나타내는 모드 번호 m 로부터 멀어질수록, 모드조합계수 $R_{n0}^m(n \neq m)$ 가 감소된다. 다른 설계변수에 대해서도 그림 4와 동일한 방법으로 모드조합계수분포를 분류하였다. 그 결과, 모드조합계수분포는 지진설계변수, 구조방식, 진동주기, 최대계수를 갖는 모드번호 m 등에 관계없이 모두 동일한 분포 양상을 보였다.

〈표 2〉 모드조합계수의 평균 및 표준편차

Modal Combination Factors	R_{n0}^m							
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	
m=1	Mean	0.909	0.480	0.303	0.235	0.208	0.225	0.201
	S.D.	0.095	0.245	0.246	0.224	0.213	0.223	0.213
m=2	Mean	0.411	0.857	0.441	0.290	0.253	0.203	0.196
	S.D.	0.231	0.104	0.240	0.222	0.195	0.188	0.174
m=3	Mean	0.372	0.497	0.858	0.367	0.277	0.264	0.231
	S.D.	0.230	0.225	0.107	0.218	0.193	0.191	0.194
m=4	Mean	0.385	0.427	0.477	0.857	0.415	0.345	0.299
	S.D.	0.256	0.241	0.237	0.106	0.247	0.217	0.215
m=5	Mean	0.274	0.455	0.417	0.473	0.848	0.468	0.364
	S.D.	0.219	0.230	0.259	0.275	0.121	0.254	0.263
m=6	Mean	0.274	0.322	0.414	0.368	0.447	0.872	0.450
	S.D.	0.207	0.227	0.284	0.211	0.264	0.127	0.252
m=7	Mean	0.291	0.378	0.388	0.300	0.391	0.458	0.840
	S.D.	0.240	0.237	0.198	0.195	0.228	0.233	0.115



〈그림 4〉 모드조합계수의 분류

변수 연구로부터 구한 2400개 모드조합계수분포 R_0^m 의 평균과 표준편차를 표 2에 나타냈다. 이러한 변수 연구 결과를 토대로, 본 연구에서는 모드조합계수 분포 R_0^m 를 다음과 같이 단순화하였다.

$$R_{m0}^m = 0.9 \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (9a)$$

$$R_{(m\pm 1)0}^m = 0.5 \quad (m \pm 1 \geq 1)$$

$$R_{(m\pm 2)0}^m = 0.4 \quad (m \pm 2 \geq 1)$$

$$R_{(m\pm k)0}^m = 0.3 \quad (m \pm k \geq 1, k = 3, 4, \dots)$$

여기서, m = 최대 모드조합계수 값을 갖는 모드번호.

제안된 모드조합법의 검증을 위하여 계수모드조합법으로 평가한 구조물의 최대지진응답을 전통적인 응답스펙트럼방법과 시간이력해석법으로 예측한 결과와 비교하였다. 그림 2의 모멘트 저항 골조와 켄틸레버 벽체의 지진응답을 평가하였다. 계수모드조합법과 응답스펙트럼방법에서는 그림 2에 나타난 1~4차 진동모드를 고려하였다. 응답스펙트럼방법에서는 각 모드의 스펙트럼응답 r_{n0} 을 SRSS로 중첩하여 구조물의 최대 지진응답 r_0 을 구하였다. 계수모드조합법에서는 최대지진응답이 다음과 같이 계산된다. $r_0 = \max\{|R_{10}^m r_{10} \pm R_{20}^m r_{20} \pm R_{30}^m r_{30} \pm R_{40}^m r_{40}|\}$ ($m = 1, \dots, 4$). 여기서, $\max\{a, b, \dots\}$ 는 $\{ \}$ 안의 값 중 가장 큰 값. 모멘트 골조와 켄틸레버 벽체의 기본진동주기는 각각 1, 3, 5, 7 sec이다. 해석을 위한 지진데이터로 표 1의 40개의 지진을 사용하였다. 각 지진의 최대지반가속도 크기가 서로 다르므로, 유효최대지반가속도(effective peak ground acceleration)가 0.4g가 되도록 지반가속도의 크기를 보정하였다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 설계스펙트럼의 가속도 민감영역($0.1 \text{ sec} \leq T \leq 0.5 \text{ sec}$)에서 10개의 주기 T_i ($i = 1, 2, \dots, 10$)와 각 주기에 대응하는 스펙트럼 가속도 S_{ai} 를 구하였다. 그로부터 각 지진의 보정계수 λ 를 다음과 같이 계산하였다. $\lambda = \sum_{i=1}^{10} (0.4g/S_{ai})/10$. 표 1에 나타난 보정계수 λ 를 사용하여 각 지진가속도의 크기

를 보정하였다.

그림 6은 계수모드조합법(FMC), 응답스펙트럼방법(SRSS), 시간이력해석법(THA) 등에 의하여 예측된 각 층의 전단력 및 층간변위 최대값 분포(envelop curve)를 비교하여 보여준다. 그림 6의 해석 결과는 표 1에 나타난 40개의 지진에 대하여 각각 구한 40개 최대응답의 평균을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 진동주기가 비교적 짧은 모멘트 골조와 켄틸레버 벽체의 경우($T_1 = 1.0, 3.0 \text{ sec}$), FMC와 SRSS로 예측한 두 지진응답 모두 시간이력해석 결과와 잘 일치하였다. 반면, 고차모드의 영향이 커지는 장주기 구조물의 경우($T_1 = 5.0, 7.0 \text{ sec}$), FMC와 SRSS 모두 탄성지진응답을 저평가하였다.

장주기 구조물에 대한 계수모드조합법의 정확성을 향상시키기 위하여, 구조물의 진동주기의 영향을 고려할 수 있도록 모드조합계수분포 R_0^m 를 주기 T 의 함수로 재정의하였다.

$$R_{m0}^m = 0.9 + 0.125 T \sigma_1 \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (9b)$$

$$R_{(m\pm 1)0}^m = 0.5 + 0.125 T \sigma_2 \quad (m \pm 1 \geq 1)$$

$$R_{(m\pm 2)0}^m = 0.4 + 0.125 T \sigma_2 \quad (m \pm 2 \geq 1)$$

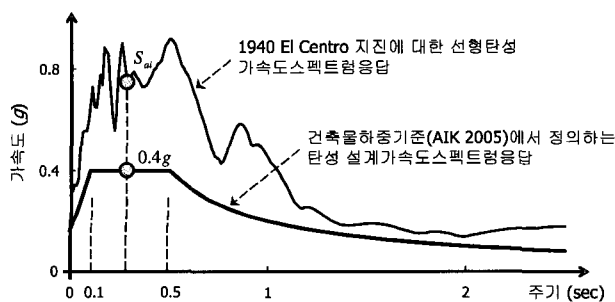
$$R_{(m\pm k)0}^m = 0.3 + 0.125 T \sigma_2 \quad (m \pm k \geq 1, k = 3, 4, \dots)$$

여기서, T = 구조물의 기본진동주기, σ_1, σ_2 = 각각 모드조합계수 R_{m0}^m 와 R_{n0}^m ($n \neq m$)의 표준편차. 변수 연구 결과, σ_1, σ_2 는 각각 0.11과 0.22로 결정되었다. (표 2) 식 (9b)의 모드조합계수는 1.0 보다 크지 않아야 한다. 식 (9b)의 수정된 모드조합계수를 사용하여 그림 2의 모멘트 골조와 켄틸레버 벽체의 최대 층간변위 및 층전단력 분포를 다시 평가하였다. 예측 결과를 그림 6에 나타냈다. 그림에 나타낸 바와 같이 수정된 모드조합계수를 사용한 FMC는 단주기 뿐만 아니라 장주기 구조물의 지진응답을 합리적으로 예측하였다.

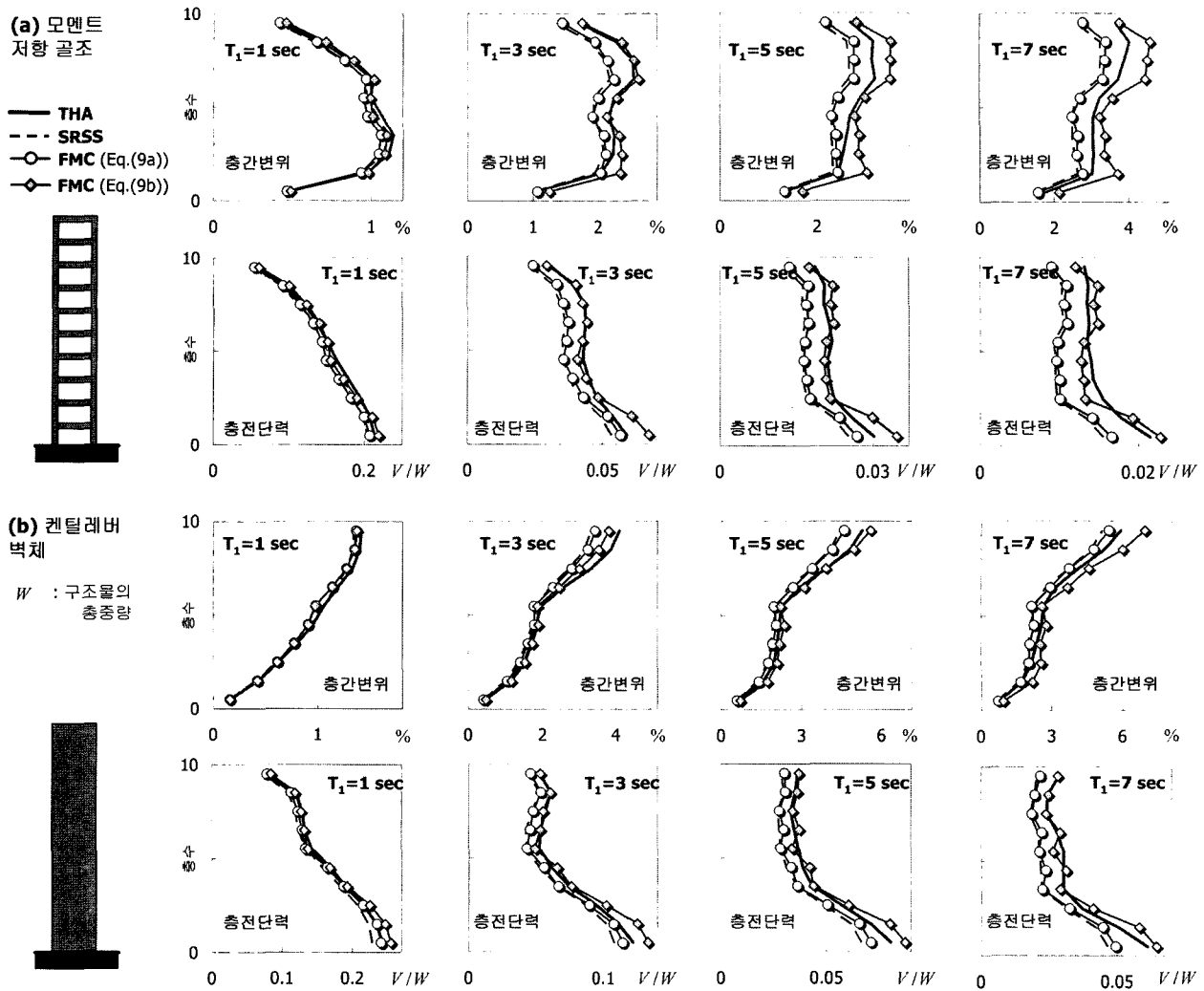
4. 비선형해석을 위한 지진하중분포

계수모드조합법을 사용하여 설계변수들의 최대지진응답을 발생시키는 지진하중분포 \mathbf{p} 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= R_{10}^m S_{a1} \bar{\mathbf{p}}_1 \pm R_{20}^m S_{a2} \bar{\mathbf{p}}_2 \pm R_{30}^m S_{a3} \bar{\mathbf{p}}_3 \pm \dots \quad (10) \\ &= R_{10}^m S_{a1} \Gamma_1 \mathbf{m} \phi_1 \pm R_{20}^m S_{a2} \Gamma_2 \mathbf{m} \phi_2 \\ &\pm R_{30}^m S_{a3} \Gamma_3 \mathbf{m} \phi_3 \pm \dots \end{aligned}$$



〈그림 5〉 지반가속도 크기의 보정

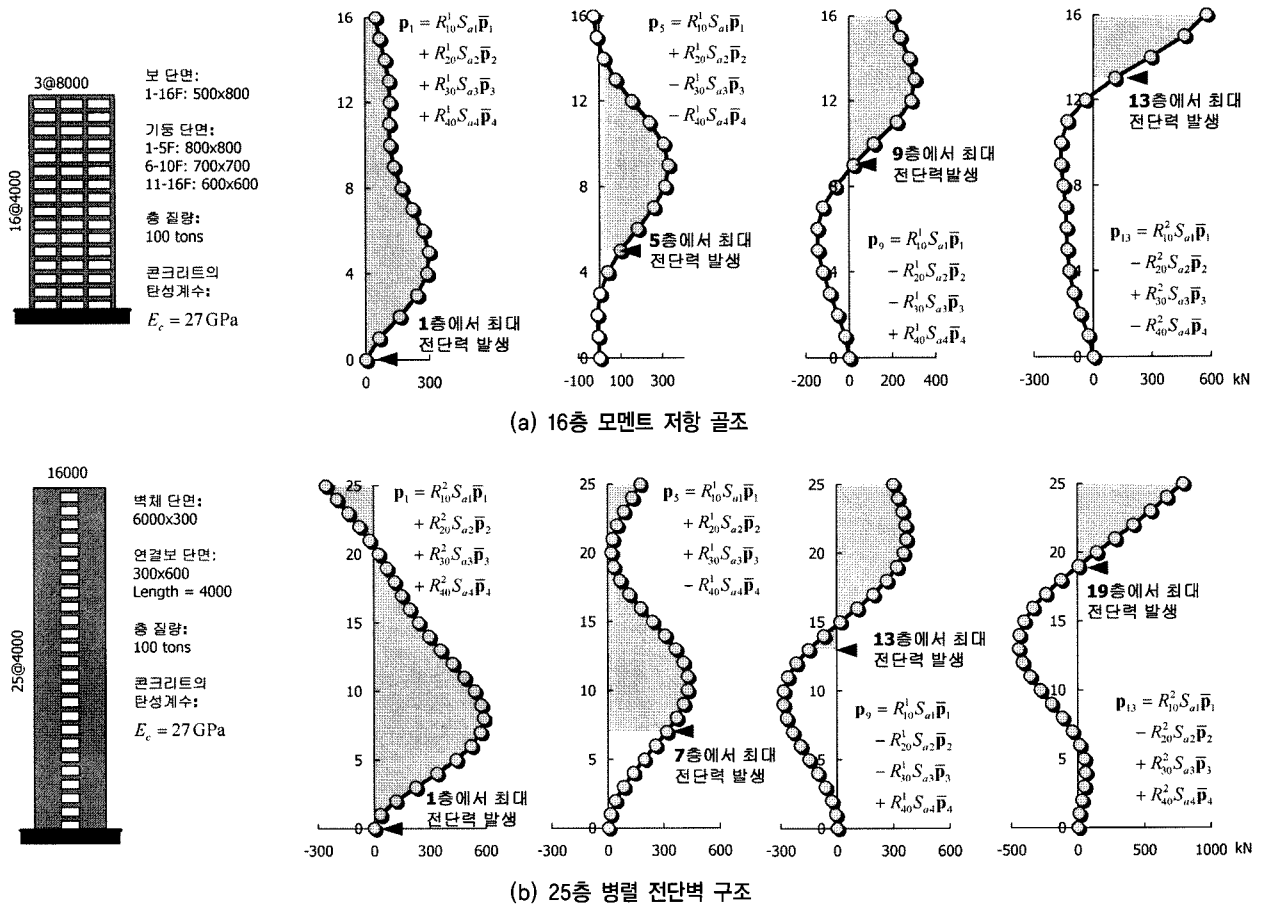


(그림 6) 계수모드조합법(FMC), 응답스펙트럼방법(SRSS), 시간이력해석(THA) 등으로 예측한 층전단력 및 층간변위의 비교

여기서, S_{am} = 각 모드의 스펙트럼 가속도, \bar{p}_n = 각 모드별 지진하중분포. SRSS와 CQC 등 기존의 모드조합방법과 달리, 계수모드조합법은 시간이력 응답 중 구조물에 실제로 발생할 수 있는 다양한 지진하중분포를 예측할 수 있다. 만약 k 개의 고유모드를 고려한다면, 이론적으로 고려하여야 하는 모드조합계수 분포 R_0^m ($m = 1, 2, \dots, k$)는 k 가지이다. 또한 식 (10)에 나타난 바와 같이 각 모드조합계수 분포 R_0^m 당 복호의 조합으로 인하여 2^{k-1} 가지의 조합이 나타날 수 있다. 따라서 고려하여야 하는 총 지진하중분포의 개수는 $k \cdot 2^{k-1}$ 이다. 원칙적으로 식 (10)의 모든 지진하중분포를 고려한다면 많은 수치계산이 필요하다.

그러나 몇 가지 주요지진하중분포(critical story force profile)를 사용하여 최대지진응답을 예측할 수 있다. 대다수 지진설계변수의 최대지진응답을 평가하는데 있어 가장 중요한 지표는 층전단력이다. 그런데 저층부 및 고층부에 최대 층전단력을 발생시키는 지진하중분포가 서로 다르므

로, 본 연구에서는 고층부 및 저층부에 각각 최대 층전단력을 발생시키는 몇 가지 주요지진하중분포를 다음과 같이 정의하였다. 만약 N 층 건물에 대하여 M ($M < N$)개의 주요지진하중분포를 고려하고자 한다면, 식 (10)의 $k \cdot 2^{k-1}$ 개의 지진하중분포 중 $[(j-1)N/M] + 1$ ($j = 1, 2, \dots, M$)층에 최대의 층전단력을 발생시키는 지진하중분포를 주요지진하중분포로 정의한다. 여기서, $[x]$ 는 x 를 넘지 않는 최대의 정수로 정의된다. 주요지진하중분포는 식 (10)의 지진하중분포들을 비교하여 쉽게 결정할 수 있다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 16층 모멘트 저항 골조($N = 16, M = 4; p_1, p_5, p_9, p_{13}$)와 25층 병렬 전단력 구조($N = 25, M = 4; p_1, p_7, p_{13}, p_{19}$)에 작용하는 4개의 주요지진하중분포($M = 4$)를 보여준다. 그림에서 j 층에 최대 층전단력을 발생시키는 주요지진하중분포를 p_j 로 표기하였다. 계수모드조합법으로 계산한 각 주요지진하중분포는 저층부 또는 고층부에 가장 큰 영향을 미치는 지진하중분포를 대표한다. 예를 들어, 16층 모멘트 골



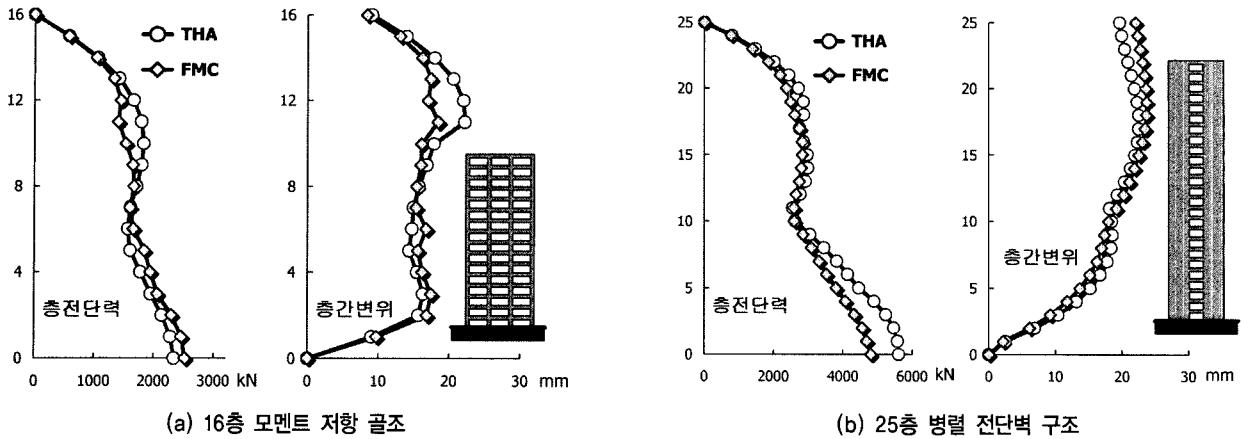
〈그림 7〉 계수모드조합법으로 예측한 주요지진하중분포

조의 경우 주요지진하중분포 P_1 는 저층부인 1~4층에서 층 전단력, 층간변위, 부재력 등을 최대로 발생시킨다. 반면 P_{13} 는 고층부인 13~16층에 최대 지진응답을 발생시킨다.

검증하기 위하여, 그림 7의 모멘트저항 골조($T_1 = 1.93 \text{ sec}$)와 병렬 전단벽 구조($T_1 = 2.51 \text{ sec}$)에 대하여 주요지진하중분포를 사용하여 탄성 최대 층전단력 및 층간변위 분포를 예측하였다. 1~4차 모드를 고려하여 그림 7(a)와 (b)에 나타난 4개의 주요지진하중분포를 만들었다. ($M = 4$) 지진데이터로서 1940 El Centro 지진(최대지반가속도 = 0.319g)을 사용하였다. 4개의 주요지진하중분포에 대하여 각각 탄성해석을 수행하여 각 층의 층간변위와 층전단력을 구한 다음, 4개의 지진응답 중 최대값을 연결하여 층전단력 및 층간변위 포락곡선(envelope profile)을 구하였다. 주요지진하중분포를 사용한 계수모드조합법(FMC)과 시간이력해석(THA)으로 예측한 결과를 비교하여 그림 8에 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이, 제한된 수($M = 4$)의 주요지진하중분포를 사용하여 고차모드의 영향이 포함된 탄성 지진응답을 정확히 예측할 수 있었다. 그림 7(a)의 주요지진하중분포는 그림 1의 시간이력 응답으로부터 구한 지진하중분포와 유사하다. 이러

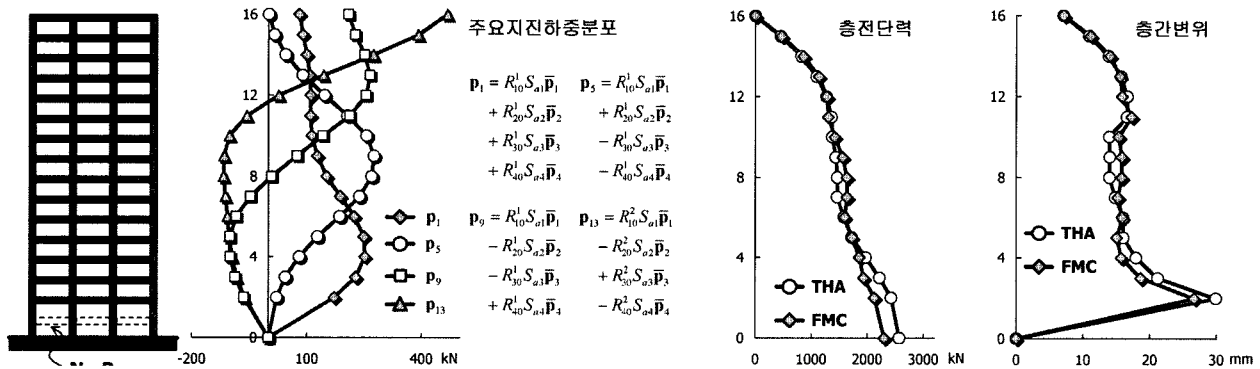
한 결과는 계수모드조합법을 사용하여 예측된 지진하중분포가 시간이력 지진응답 동안 구조물에 실제로 발생하는 지진하중분포를 정확히 예측할 수 있다는 사실을 보여준다.

제한된 방법을 강성 및 질량 수직비정형을 갖는 구조물에 적용하였다. 그림 9(a)와 (b)는 각각 강성 및 질량 수직비정형을 갖는 16층 모멘트 저항 골조를 보여준다. 두 골조 모두 그림 1의 골조와 형상 및 부재의 크기가 같다. 그러나 그림 9(a)의 골조는 2층 보를 제거하였다. (강성 비정형) 그림 9(b)의 골조는 지붕층의 질량을 3배로 증가시켰다. (질량 비정형) 주요지진하중분포를 사용하는 계수모드조합법(FMC)과 시간이력해석법(THA)을 사용하여 수직비정형 골조의 층전단력과 층간변위의 분포를 평가하였다. 지진데이터로 1940 El Centro 지진(최대지반가속도 = 0.319g)을 사용하였다. 1~4차 모드를 고려하여 구한 각 골조의 주요지진하중분포를 그림 9에 나타냈다. ($M = 4$) 수직비정형 골조의 층전단력 및 층간변위의 분포는 정형 골조(그림 7(a))와 크게 달랐으나, 그림 9에 나타난 바와 같이 계수모드조합법은 강성 및 질량 수직비정형 구조물의 탄성 최대지진응답을 합리적으로 예측하였다.

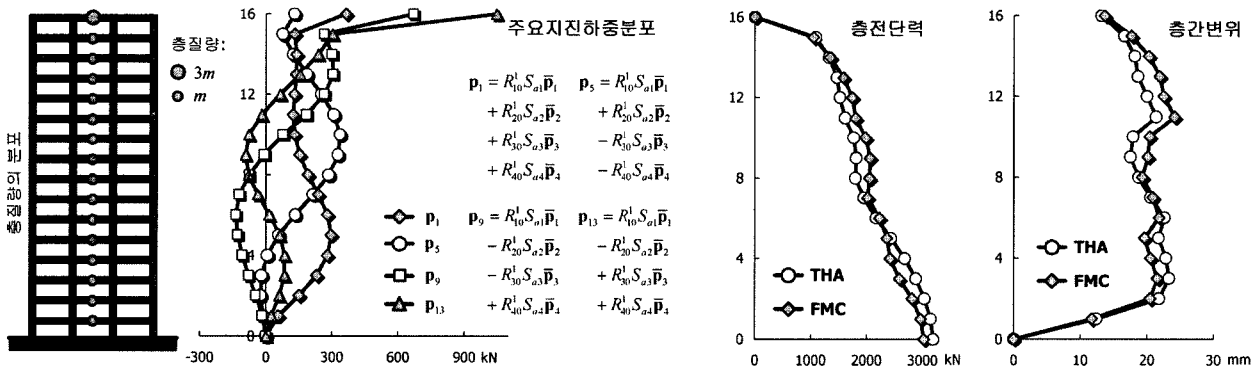


(a) 16층 모멘트 저항 골조 (b) 25층 병렬 전단벽 구조

〈그림 8〉 주요지진하중분포를 사용하는 계수모드조합법의 검증



(a) 강성 비정형을 갖는 16층 모멘트 저항 골조



(b) 질량 비정형을 갖는 16층 모멘트 저항 골조

〈그림 9〉 강성 및 질량 수직비정형을 갖는 구조물에 대한 계수모드조합법의 적용

5. 검토 및 추후 연구

본 연구에서는 2차원 평면구조물에 적용 가능한 계수모드조합법을 개발하였다. 계수모드조합법의 적용성을 확대하기 위해서는 3차원 구조물에 대한 변수 연구가 필요하다. 또한 직교 양방향으로 지진이 작용하는 경우와 비틀림의 영향이 큰 경우에 지진하중분포의 변화에 대하여 정밀한 검증이 필요하다.

엄밀하게 말하면, SRSS와 CQC 등 기존의 모드조합법을

사용하더라도 고차모드의 영향이 큰 구조물의 탄성 지진응답을 합리적으로 예측할 수 있으므로, 구조물의 탄성 평가/설계시에는 계수모드조합법은 기존의 모드조합법에 비하여 장점을 갖지 않는다. 그러나 구조물의 비선형정적해석을 위해서는 층지진하중분포를 예측하여야 한다. 기존의 모드조합법과 달리, 계수모드조합법은 시간이력 지진응답 동안 구조물에 실제로 발생할 수 있는 지진하중분포를 예측할 수 있다. 계수모드조합법은 탄성 지진응답을 토대로 개발되었으므로, 추후에 비선형해석에 대한 계수모드조합법의 적용

성이 검증되어야 한다.

6. 결론

층간변위, 층전단력 등 지진설계변수가 최대값을 갖는 시간에 구조물에 실제로 발생하는 지진하중분포를 파악하기 위하여, 단주기 및 장주기 모멘트 골조의 시간이력 지진응답을 분석하였다. 분석 결과를 토대로, 새로운 모드조합방법인 계수모드조합법을 개발하였다. 계수모드조합법에서는 모드조합계수를 곱한 각 모드의 스펙트럼 응답을 중첩시켜 다양한 층지진하중분포를 만들어 낼 수 있다. 모드조합계수는 변수연구 결과로부터 결정되었다. SRSS, CQC 등 기존의 모드조합법과 달리, 계수모드조합법은 실제 지진응답 동안 구조물과 부재에 최대응답을 발생시키는 복수의 지진하중분포를 예측할 수 있다. 따라서 계수모드조합법은 구조물의 비선형 정적해석을 위한 지진하중분포를 예측하는데 사용될 수 있다. 검증을 위하여, 계수모드조합법을 사용하여 정형 및 수직비정형 구조물의 탄성 지진응답과 지진하중분포를 예측하여 그 결과를 시간이력해석 결과와 비교하였다. 비교 결과, 계수모드조합법은 탄성 구조물의 지진응답과 실제 작용하는 지진하중분포를 정확히 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 건교부가 지원하고 건설교통기술평가원이 위탁시행한 초고층연구과제(03 산학연 C04-01)와 한국과학재단이 지원하는 지진공학연구센터(KEERC)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. Priestley, M.J.N, "Performance Based Seismic Design," Paper No. 2831, *12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, 2000.
3. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings," *Earthquake Engineering and Struct. Dyn.*, Vol. 3, pp. 561-582.
4. American Society of Civil Engineers (ASCE), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2000.
5. Requena, M. and Ayala, A. G., "Evaluation of a simplified method for the determination of the nonlinear seismic response of RC frames," *Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
6. Lee, D. G., Choi, W. H. and Ahn, J. H., "Improved Distribution of Seismic Forces for Evaluation of Nonlinear Seismic Response of Building Structures," *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 5, No. 2, 2002, pp. 33-47.
7. Kunnath, S. K., "Identification of Modal Combinations for Nonlinear Static Analysis of Building Structures," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 19, 2004, pp. 246-259.
8. Matsumori, T., Otani, S., Shiohara, H. and Kabeyasawa, T., "Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures," *Proceedings of the US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for RC Building Structures*, PEER Center Report, UC Berkeley, 1999, pp. 79-94.
9. 건축물 하중기준, 대한건축학회, 2005.