

수정 모드해석방법을 이용한  
비대칭 벽식 구조물의 내진성능평가  
Seismic Assessment of Plan-irregular Wall Structures using  
Adaptive Modal Analysis

하 태 휴\*  
Ha, Tae-Hyu

홍 성 결\*\*  
Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

Torsional behavior of eccentric structures under seismic loading may cause stress and/or strain concentration, which result in the failure of the structures in an unexpected manner. This study propose how to assess the seismic capacity of plan-irregular RC wall structures. The seismic capacities are expressed in terms of lateral displacement capacity of each wall. The seismic demands for displacement are assessed by so called displacement-based design approach. Those seismic capacity and demands are combined D-R coordinate, which is made up of lateral displacement and rotation angle. To expand these concepts to the inelastic region the adaptive modal analysis method is used. In addition, the failure mechanisms including torsional failure are defined on D-R coordinate. Finally, seismic assessments of two 3-story plan-irregular wall structures are presented.

1. 서론

편심이 큰 구조물이 지진하중에 노출되는 경우 특정 부재에 과도한 변형이 집중되어 예기치 못한 파괴모드를 유발하게 된다. 평면비대칭 구조물의 경우 지진거동을 예측하기가 힘들기 때문에 현재의 내진설계기준에서는 구조물의 편심을 고려하는 설계보다는 편심을 제한하는 설계전략을 제시하고 있다. 하지만 계획의 목적 혹은 실제 사용 중에 발생하는 구조체의 편심은 피할 수 없는 현상이므로 지금과 같은 소극적인 대처보다는 구조물의 비틀림 자체를 고려할 수 있는 적극적인 내진설계방법이 요구된다. 이에 본 연구에서는 구조물이 발휘할 수 있는 횡방향 및 비틀림의 최대 변형을 기준으로 하여 다층 비대칭 벽식 구조물의 내진성능평가를 수행하는 방법을 제시하고자 한다. 비탄성영역에서 구조물이 보이는 비틀림 거동을 표현하기 위하여 기존의 수정 모드해석방법을 응용하여 사용하였다.

\* 서울대학교 건축학과, 박사과정

\*\* 서울대학교 건축학과, 부교수

## 2. 변위기초 내진성능평가

본 연구에서 제시하고자 하는 내진성능평가의 방법은 기본적으로 구조물의 변형성능 및 요구변형도를 구해내고 이를 구조물의 횡변위(D)와 비틀림각(R)으로 표현되는 새로운 좌표계(D-R Coordinate)에 표현하는 방식으로 구현된다. 실질적인 내진성능평가는 다음과 같은 방법으로 이루어진다.

### 2.1 구조물의 변형성능

본 연구에서는 벽식 구조물의 변형 능력을 개별 벽체의 변형 능력으로 표현하였다. 벽체의 면의 방향 변위를 무시하고 슬래브 다이어프램의 강성이 충분히 크다고 가정하면 시스템에 발생하는 횡변위 및 비틀림각은 식(1)과 같이 개별 벽체의 변형성능으로 나타낼 수 있다.

$$-\mu_i \Delta_{sys} \leq \Delta_{yis} + d_i \varphi_{sys} \leq \mu_i \Delta_{sys} \quad (1)$$

식(1)  $\Delta_{sys}$  과  $\varphi_{sys}$  은 그림1과 같이 시스템에 발생하는 횡변위 및 비틀림각의 크기를 의미한다. 또한  $\Delta_{yi}$ ,  $\mu_i$  및  $d_i$  는 각각 개별벽체의 항복강도, 연성도 및 강성중심으로부터의 거리를 의미한다.

위와 같이 개별벽체에서 얻어지는 변위한계를 모든 벽체에 대해 구해내고 이를 중첩해서 D-R좌표계 상에 나타내면 그림2와 같은 하나의 폐곡선을 형성하게 되고 이는 구조물이 지니는 전체적인 변위성능이라고 생각할 수 있다.

### 2.2 비대칭 거동의 예측

기존의 변위기초 내진설계방법에서 구조물의 요구변형도는 구조물의 기본주기에 따라 설계변위 스펙트럼으로부터 결정된다. 하지만 변위스펙트럼에서 얻어지는 설계변위의 값은 구조물의 횡변위만을 규정하므로 구조물에 발생하는 비틀림을 효과적으로 고려할 수 없었다. 본 연구에서는 구조물에 발생하는 비틀림을 실제적으로 고려하기 위하여 구조물의 횡변위 뿐만 아니라 구조물에 요구되는 요구비틀림량 또한 내진성능평가를 위한 요구변형도로 사용하고자 한다. 구조물의 요구비틀림량을 산정하는 과정은 다음과 같다.

일반적인 벽식 구조물에서 특정한 횡변위에 대한 비틀림각은 각 횡하중 저항 벽체의 강성 및 배치 형태를 통해 식(2)와 같이 구해낼 수 있다.

$$R_{req} = -\frac{\sum k_{vi} d_{yi}}{\sum k_i d_i^2} D_{req} \quad (2)$$

식(2)에서  $D_{req} (= S_d)$  는 기존 스펙트럼 방법과 동일하게 설계변위 스펙트럼으로부터 얻어지는 횡

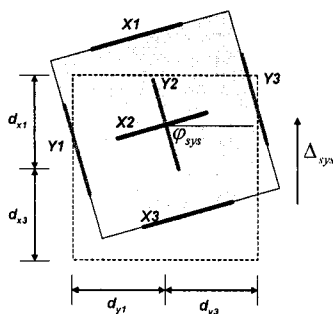


그림1 구조물의 변형형상

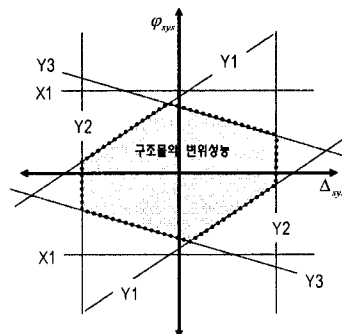


그림2 D-R 좌표상 구조물의 변형능력

방향 변위에 대한 요구변형도이고,  $R_{req}$  는 이를 기준으로 하여 계산되는 요구 비틀림각이다.  $k_i$  와  $d_i$  는 각각  $i$  번째 벽체의 횡저항 강성 및 질량중심까지의 거리를 의미한다. 위의 식(2)는 벽체의 탄성 상태의 강성 및 위치만으로 계산되는 값이다. 구조물의 일부 벽체가 항복하여 강성이 감소하게 되면 발생하는 비틀림각의 크기는 탄성 상태에 비하여 훨씬 커지게 된다. 이와 같이 일부 벽체가 항복한 후 나타나는 비틀림의 효과를 고려하기 위하여 각각의 변위상태에서 발생하는 비틀림각의 크기를 중첩하는 방법을 사용하였고 각각의 상태에서는 구조물의 비탄성상태에 해당하는 접선강성을 사용하였다. 이는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{req,i+1} = \delta D_{req,i} + D_{req,i}$$

$$R_{req,i+1} = \delta R_{req,i} + R_{req,i} = -\frac{\sum \bar{k}_{yi} d_{yi}}{\sum \bar{k}_i d_i^2} \delta D_{req,i} + R_{req,i} \quad (3)$$

식(3)에서  $\bar{k}_i$  는  $i$  번째 벽체의 접선강성을 의미한다.

식(3)과 같은 과정을 스펙트럼에서 구해낸 횡변위 요구량까지 반복해서 수행하면 횡변위 및 비틀림각에 대한 요구변형도를 구해낼 수 있다. 위와 같이 얻어지는 요구변형도는 D-R 좌표계상에서 그림3과 같이 표현할 수 있다.

### 2.3 다층 구조물의 고려

다층구조물의 내진해석에서 비틀림의 고려는 단층 구조물에 비해 훨씬 복잡한 과정을 필요로 한다. 본 연구에서는 비틀림이 발생할 수 있는 다층의 벽식 구조물을 그림4와 같이 2N개의 자유도를 지니는 모델로 설정하였다.

2N개의 자유도 중 횡변위에 대한  $N$  개의 자유도에 대한 모드는 기존의 모드해석방법을 통해서 식(4)와 같이 구해낼 수 있다.

$$\phi_D = [\phi_{D1} \quad \phi_{D2} \quad \dots \quad \phi_{DN}]^T \quad (4)$$

이렇게 얻어진 각 층의 횡변위로부터 식(3)과 같은 방법을 통해 각 층의 비틀림각에 대한 계산을 수행하게 된다. 다층구조물에 식(3)을 적용하기 위해서 구조물의 슬래브는 충분한 강성을 지닌다고 가정하였다 [rigid diaphragm action]. 최종적으로 2N 자유도의 해석모델에 대한 모드형상은 식(6)과 같이 얻어진다.

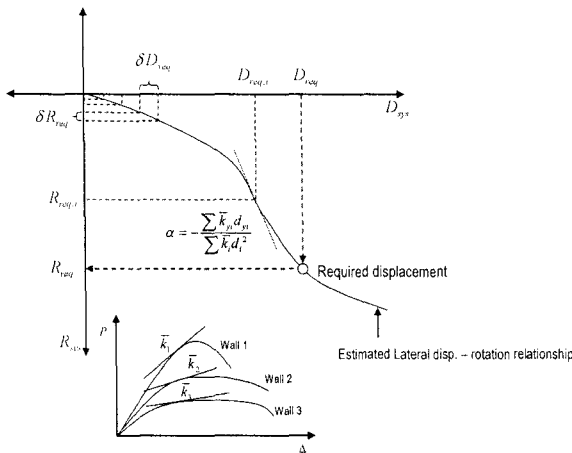


그림3 D-R 좌표계상 구조물의 요구변형도

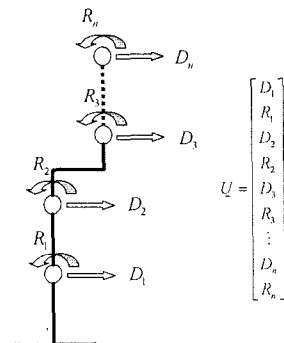


그림4 비틀림 해석을 위한 2N 자유도 모델

$$\phi_{R_i} = -\frac{\sum k_{y_i} d_{y_i}}{\sum k_i d_i^2} \phi_{D_i} \text{ for } i\text{-th story} \quad (5)$$

$$\phi = [\phi_{D1} \quad \phi_{R1} \quad \phi_{D2} \quad \phi_{R2} \quad \cdots \quad \phi_{DN} \quad \phi_{RN}]^T \quad (6)$$

구조물의 일부 부재가 함복하게 되면 2.2절에서 고려한 것처럼 각 층별 횡변위와 비틀림각 사이의 관계가 변할 뿐 아니라 식(4)와 같이 층별 횡변위에 대한 모드형상도 변화하게 된다. 기존 연구자들은 이와 같은 비탄성 영역의 모드형상을 표현하기 위하여 수정모드해석방법 등을 제안하였다. 본 연구에서도 내진성능평가의 과정에 이러한 수정모드해석방법을 응용하여 사용하고자 한다. 식(3)에서와 같이 매 단계마다 횡변위와 비틀림각 사이의 관계를 설정하는 것과 유사하게 매 변위 단계의 부재강성을 기준으로 식(4)~식(6)의 모드형상을 새롭게 구해내었다.

## 2.4 내진성능평가의 절차

본 연구에서 제안하고자 하는 내진성능평가의 절차는 크게 세 가지 단계로 구분해서 표현할 수 있다. 이는 구조물의 변위성능을 산정하는 과정과 해당지진에 대한 요구변형도를 결정하는 과정, 그리고 최종적으로 이를 하나의 D-R 좌표계상에 표현한 후 내진성능을 평가하는 과정이다. 내진성능평가 절차는 다음과 같다.

- Step 1: 구조물의 변형성능을 구한다.

2.2절에서 제시한 방법과 같이 각 개별 벽체의 변위성능을 조합하여 전체 구조물의 변형성능을 구해내고 이를 D-R 좌표계상에 표현한다.

- Step 2: 설계변위 스펙트럼에서 설계변위(요구변위)를 구하고 이를 각 층의 횡변위 및 비틀림각 요구량으로 분배한다.

다층 구조물에 대해 비탄성 구간의 비틀림까지를 고려하기 위해 각 변위 수준에서 접선강성을 사용하는 반복연산 과정을 수행하였다. 이는 다음과 같은 세부과정을 통해 이루어진다.

- (a) 최상층의 설계변위 ( $\delta_{top}$ )를 구하고, 초기값 ( $\delta_{i, top}$ ) 및 증분 ( $\Delta\delta_{i, top}$ )을 결정한다.
- (b) 변위수준에 따라 각 부재의 접선강성을 이용하여 각 층의 횡변위에 대한 N-자유도 모드형상을 식(4)와 같이 구해낸다.
- (c) 각 층별 부재배치 및 강성을 이용하여 식(6)과 같이 (b)에서 구해낸 모드형상을 비틀림각을 포함하는 2N-자유도 모드형상으로 확장한다.
- (d) (c)에서 얻어진 모드형상을 따라 식(7)과 같이 최상층 변위의 증분을 각 층의 횡변위 및 비틀림각으로 배분한다.

$$\Delta\delta_i = \frac{\Delta\delta_{top}}{\phi_{top}} \phi_i \quad (7)$$

- (e) 식(3)과 같이 현재단계에서 얻어낸 횡변위 및 비틀림각을 증첩한다.
- (f) 최상층변위의 요구량에 도달할 때 까지 (b)~(e)의 과정을 되풀이 한다.
- (g) 각 층별 횡변위 및 비틀림각의 요구량을 결정한다.

- Step 3: Step 1,2에서 얻어진 결과를 D-R 좌표계상에 표현하고 비교하여 구조물의 내진성능평가를 수행한다.

두 번째 단계에서 구해낸 구조물의 요구변형도가 첫 번째 단계에서 구해낸 구조물의 변형성능 내부에 존재하면 구조물은 충분한 내진성능을 지닌다고 평가할 수 있다. 반대로 구조물의 요구변형도가 변형성능을 넘어선다면 보수, 보강의 과정이 필요하다고 말할 수 있다.

- Step 4 (선택): 대상 구조물의 발생 가능한 파괴메커니즘을 찾아낸다.

Step3을 통해 대상 구조물의 내진성능이 충분하지 않다고 판단되는 경우 구조물에 발생하는 파괴 메커니즘을 예상할 수 있다. D-R 좌표계상의 변형능력 및 요구변형도는 각 부재를 기준으로 해석할 수 있으므로 요구변형도에 대한 파괴 부재를 결정할 수 있고, 이를 조합하면 평가대상 구조물의 파괴메커니즘을 찾을 수 있다.

### 3. 다층 구조물의 비틀림을 고려한 내진성능평가 예제

앞에서 제시한 다층 구조물의 내진성능평가방법을 이용하여 두 가지의 예제 구조물에 대하여 내진성능평가를 수행하고 발생 가능한 파괴메커니즘을 다음과 같이 찾아내었다.

#### 3.1 예제 구조물의 설정

내진성능평가를 위한 예제구조물은 그림5와 같다. 두 가지의 구조물은 모두 비틀림을 유발할 수 있는 평면 비정형을 지닌 3층의 벽식 구조물로 설정하였다. 첫 번째 예제구조물은 매 층에 대해서 동일한 벽체 배치를 지닌 경우이고 두 번째 구조물은 계획 혹은 사용의 목적으로 자주 발생하는 setback을 지니는 구조물로 설정하였다. 모든 층의 층고는 동일하게 5m로 가정하였다.

#### 3.2 내진성능평가

Step 1: 구조물의 변형성능을 구한다.

그림5의 예제 구조물의 개별 벽체가 지니는 항복변위 및 배치상태를 기준으로 하여 전체구조물의 변위성능을 구하여 이를 D-R 좌표계상에 표현한다. 본 연구에서는 모든 벽체의 변위 연성도( $\mu$ )를 3이라고 가정하고 구조물의 변형성능을 구해냈다. 다층구조물에 대해 얻어지는 변위성능은 각각의 층에 대해서 따로 얻어지게 되고 이는 층간변위의 개념으로 이해할 수 있다. 찾아낸 변위

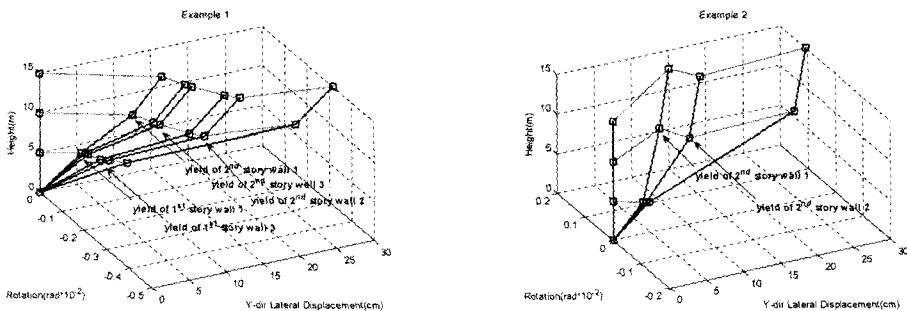
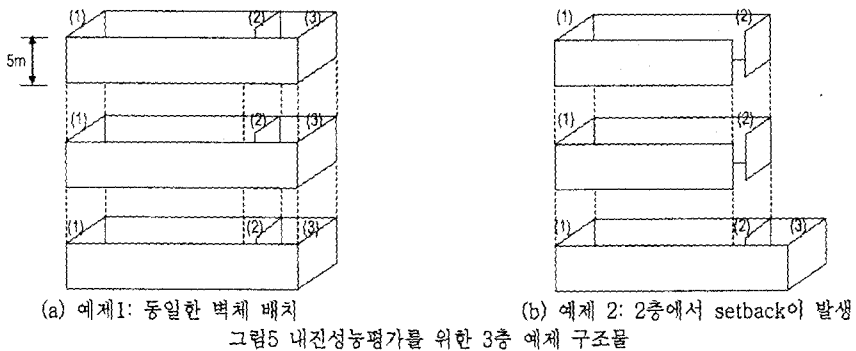


그림6 요구변위(최상층 30cm)까지의 push-over 해석 결과

표1 예제1의 push-over 결과

event	$\Delta_{top} (cm)$	$D_1 (cm)$	$R_1 (rad)$	$D_2 (cm)$	$R_2 (rad)$	$D_3 (cm)$	$R_3 (rad)$	항복
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	초기
2	12.734	4.534	-0.0361	5.237	-0.0555	2.963	-0.0314	S2, W1
3	14.290	4.972	-0.0396	6.064	-0.1008	3.253	-0.0345	S1, W1
4	14.662	5.124	-0.0485	6.228	-0.1097	3.310	-0.0351	S2, W3
5	17.068	5.706	-0.0826	7.825	-0.1378	3.537	-0.0375	S1, W3
6	18.532	6.450	-0.0934	8.457	-0.1490	3.625	-0.0385	S2, W2
최종	30.000	8.205	-0.1188	17.930	-0.1577	3.865	-0.0410	target

표2 예제2의 push-over 결과

event	$\Delta_{top} (cm)$	$D_1 (cm)$	$R_1 (rad)$	$D_2 (cm)$	$R_2 (rad)$	$D_3 (cm)$	$R_3 (rad)$	항복
1	0.000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	초기
2	12.582	3.055	-0.0243	6.027	0.1015	3.500	0.0589	S2, W1
3	15.075	3.399	-0.0271	7.786	0.0499	3.891	0.0655	S2, W2
최종	30.000	3.719	-0.0296	22.030	0.0669	4.251	0.0716	target

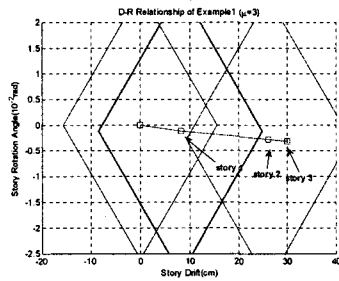
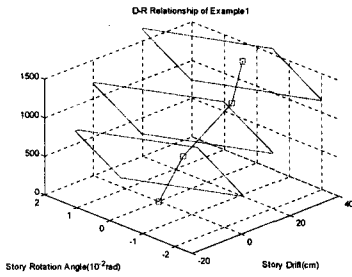


그림7 D-R 좌표계를 이용한 내진성능평가 결과 [예제 1]

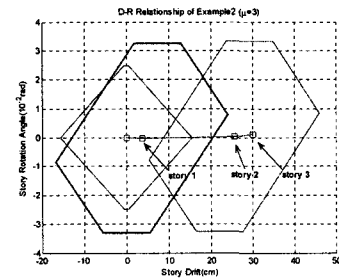
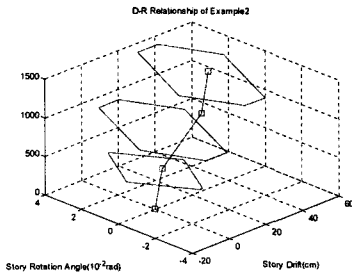


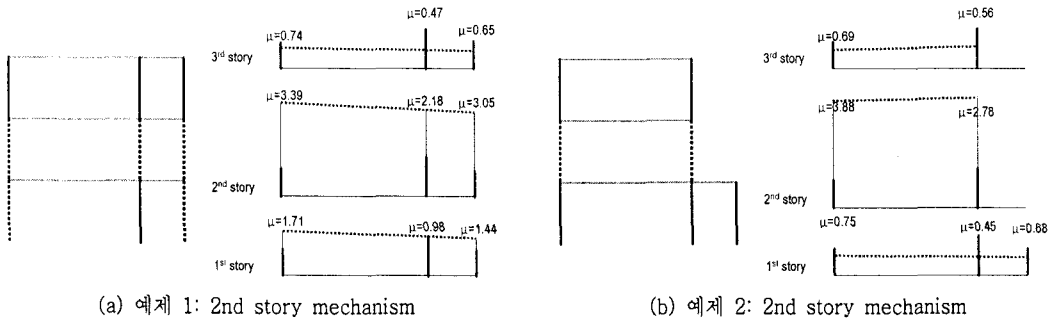
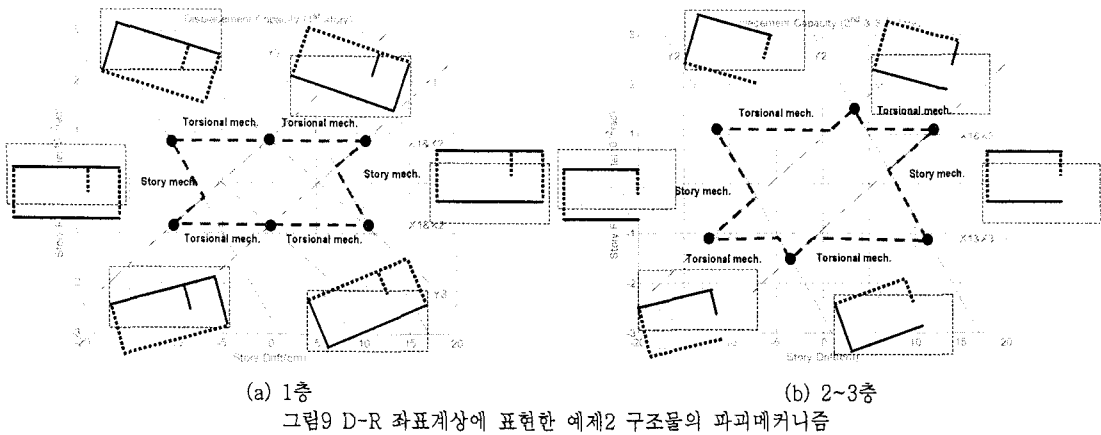
그림8 D-R 좌표계를 이용한 내진성능평가 결과 [예제 2]

표3 개별벽체의 요구변형도 [예제 1]

	1층			2층			3층		
	$D_{1,req} (cm)$	$R_{1,req} (rad)$	$\mu_{req}$	$D_{2,req} (cm)$	$R_{2,req} (rad)$	$\mu_{req}$	$D_{3,req} (cm)$	$R_{3,req} (rad)$	$\mu_{req}$
CM	8.2048	-0.1188		17.9304	-0.1577		3.8648	-0.0410	
	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$
Wall 1	8.92	5.21	1.71	18.88	5.57	3.39	4.11	5.57	0.74
Wall 2	7.85	8.01	0.98	17.46	8.01	2.18	3.74	8.01	0.47
Wall 3	7.49	5.21	1.44	16.98	5.57	3.05	3.62	5.57	0.65

표4 개별벽체의 요구변형도 [예제 2]

	1층			2층			3층		
	$D_{1,req} (cm)$	$R_{1,req} (rad)$	$\mu_{req}$	$D_{2,req} (cm)$	$R_{2,req} (rad)$	$\mu_{req}$	$D_{3,req} (cm)$	$R_{3,req} (rad)$	$\mu_{req}$
CM	3.1789	-0.0296		22.0301	0.0669		4.2510	0.0716	
	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$	$u_{req} (cm)$	$u_y (cm)$	$\mu_{req}$
Wall 1	3.90	5.21	0.75	21.63	5.57	3.88	3.82	5.57	0.69
Wall 2	3.63	8.01	0.45	22.23	8.01	2.78	4.47	8.01	0.56
Wall 3	3.54	5.21	0.68	-	-	-	-	-	-



성능은 그림7과 8에 표현되었다.

Step 2: 설계변위(요구변위)를 각 층의 횡변위 및 비틀림각으로 분배한다.

변위기초 내진설계 및 평가의 과정에서 요구변위의 산정은 설계변위스펙트럼에서 구조물의 기본 주기에 해당하는 값을 읽어서 사용할 수 있다. 본 예제에서는 이와 같은 과정을 생략하고 최상층 변위 30cm를 요구변위로 설정하였다. 최상층 변위를 30cm까지 증가시켜 가면서 각각의 상태에서 요구되는 층별 요구횡변위 및 요구비틀림각을 그림6과 같이 산정하였다. 그림6에서 나타나는 횡변위 및 비틀림각의 관계는 Push-over해석을 통해서 얻어지는 결과와 동일하다고 생각할 수 있다.

Step 3: D-R 좌표계 상의 내진성능평가

1. 2단계에서 구해진 예제구조물의 변위성능 및 요구변형도를 D-R 좌표계상에 동시에 표현한 결과는 그림7, 8과 같다. 그림에서 각 층별 변형 능력은 폐곡선으로 표현되었고 요구변형도 및 요구 비틀림각은 하나의 점으로 표현되었다. 직관적인 이해를 위해 그림7, 그림8에서 각 층별 변형능력 및 요구변형도는 아래층의 요구변형도를 기준으로 이동하여 표현하였다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 두 가지의 구조물의 모두 2층에서의 요구변형도가 변형성능을 넘어섰다. 즉 두 구조물 모두 2층에서의 내진성능이 충분하지 않다고 말할 수 있다. 각 층별로 나타난 요구횡변위 및 요구 비틀림각을 개별 벽체의 요구 변위량으로 표현한 결과는 표3 및 4와 같다.

Step 4: 대상구조물의 파괴메커니즘

앞에서 설정한 두 예제 구조물 중 예제2 구조물의 각 층에서 발생할 수 있는 파괴메커니즘은 그림9와 같다. 그림9에서 점선으로 표현된 부재는 항복한 벽체를 의미한다. 그림9와 같이 D-R 관계도상에서 파괴메커니즘이 발생하는 영역을 정의할 수 있으며, 그림 7 및 8과 같이 내진성능평

가를 수행한 결과를 이용하면 구조물에 예상되는 파괴메커니즘을 추정할 수 있다. 내진성능평가의 결과로 얻어지는 각 예제 구조물의 부재별 요구연성도 및 파괴메커니즘을 그림10과 같이 나타낼 수 있다. 두 가지 예제 구조물 모두 2층에서 횡력 저항 부재가 모두 항복하는 층 메커니즘을 보여주고 있으며 향후 보수보강전략의 수립에는 이와 같은 점이 반영되어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 평면비정형을 지니는 다층 벽식 구조물에 대한 내진성능평가의 방법을 제안하였다. 제안된 내진성능평가 방법은 개별부재의 변위를 기준으로 하여 각 층의 변위성능 및 요구변형도를 하나의 D-R 좌표계에 표현하고 그를 통해 평가를 수행한다. 또한 각 층별 요구변형도를 산정하기 위해 횡변위와 비틀림각의 관계 및 모드해석을 통한 전체구조물의 변형 형상을 이용하였다. 구조물에 발생하는 비탄성 영역의 지진거동을 예측하기 위해서 기존의 수정모드해석법을 응용하여 이용하였다.

제안하는 내진성능평가 방법은 전체 구조물의 거동 및 요구변형도, 파괴메커니즘을 하나의 평면 혹은 공간에 표현함으로써 직관적인 이해를 돕는데 가장 큰 장점을 지닌다고 할 수 있다. 하지만 제안된 방법은 벽체의 면의 방향 변위를 무시하고 강성이 무한한 슬래브를 가정하고 수립된 방법이기에 골조 구조물에의 적용에는 한계를 지닌다. 또한 대부분의 내진설계방법에 이용되는 등가정적 치환으로 얻어진 방법이므로 비틀림을 보인 실제 구조물의 동적 거동자료를 통한 검증이 요구된다고 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 한국학술진흥재단의 지원으로 연구되었습니다. [KRF-2004-041-D00751]

#### 참고문헌

1. De La Llera, J., Chopra, A. K., 1995, Understanding of inelastic seismic behavior of asymmetric-plan buildings, Earthquake engineering and structural dynamics, 24, 549-572
2. Hong, S. G., Ha, T. H., 2005, Seismic Assessment and Retrofit of Torsionally Irregular RC Wall Structures, KEERC International Seminar on Innovative Concepts and Technologies in Seismic Analysis and Design of Building Structures, 55-72
3. Kan, C. L., Chopra A. K., 1981, Torsional coupling and earthquake response of elastic and inelastic systems, Journal of Structural Engineering, ASCE, 107, 1569-1588
4. Paulay, T., 1997, Displacement-based design approach to earthquake-induced torsion in ductile buildings, Engineering Structures, 19(9), 699-707
5. Paulay, T., 1998, Torsional mechanisms in ductile building systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1101-1121
6. Paulay, T., 2001, Some Design principles relevant to torsional phenomena in ductile buildings, Journal of Earthquake Engineering, 5(3), 273-308
7. 하태휴, 홍성걸, 2005, 평면 비대칭 벽식 구조물의 변위기초 내진성능평가 및 보강, 한국지진 공학회논문집, 9(3), 23-32
8. 하태휴, 홍성걸, 김남희, 2004, Adaptive Pushover를 이용한 비대칭 벽식 구조의 내진성능평가, 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 8(1), 245-252