

## 전단벽구조체에 대한 변위기반 내진성능법의 평가

### Evaluation of Displacement-based Approaches for a Shear Wall Structure

최 상 현\*      현 창 현\*\*      최 강 룡\*\*\*      김 문 수\*\*  
Choi, Sanghyun    Hyun, Chang-Hun    Kim, Moon-Soo    Choi, Kang-Ryong

---

#### ABSTRACT

In this paper, the displacement-based seismic design approaches are evaluated utilizing shaking-table test data of a 1:3 scaled reinforced concrete (RC) bearing wall structure provided by IAEA. The maximum responses of the structure are estimated using the two prominent displacement-based approaches, i.e., the capacity spectrum method and the displacement coefficient method, and compared with the measured responses. For comparison purpose, linear and nonlinear time history analyses and response spectrum analysis are also performed. The results indicate that the capacity spectrum method underestimates the response of the structure in inelastic range while the displacement coefficient method yields reasonable values in general.

---

#### 1. 서 론

1989년 Loma Prieta 지진, 1994년 Northridge 지진, 1995년 고베지진 등이 발생했을 때 코드 규정에 따라 잘 설계된 건물들도 심각한 손상을 입었다<sup>(1)</sup>. 이에 따라 더 효율적인 내진설계 기준을 개발할 필요성이 제기 되었으며 부재력이 아닌 변위를 제한하는 변위기반 내진설계법이 내진설계 기준에 반영되었다. 변위기반 내진설계법중 대표적인 방법으로는 능력스펙트럼법(CSM, Capacity Specum Method)<sup>(2)</sup>과 변위계수법(DCM, Displacement Coefficient Method)<sup>(3)</sup>을 들 수 있다. 이 방법들에서는 비선형 정적해석 절차(pushover)를 사용하여 그 결과 얻어진 pushover 곡선을 구조물의 전체 비탄성 응답을 구하는데 사용한다.

---

\* 한국원자력안전기술원 선임연구원

\*\* 정희원, 한국원자력안전기술원 책임연구원

\*\*\* 한국원자력안전기술원 구조부지실장

이 논문에서는 RC 전단벽 구조체에 대한 진동대 시험 결과를 이용하여 위에 설명한 변위기반 내진설계방법의 유효성을 평가하였다. 이 진동대 시험은 1/3 축척의 RC 전단벽 시험체를 근거리 지진과 원거리 지진을 대표하는 지진입력으로 가진하여 시험한 것으로서 프랑스 CEA(원자력청)에서 수행하였다<sup>(4)</sup>. 시험 자료는 IAEA(국제원자력기구)가 주관하는 국제공동연구의 일환으로 제공되었으며 이 국제공동연구는 변위기반 내진설계방법이 원자력 시설에 대한 근거리 지진의 영향을 평가하는데 어느 정도 활용될 수 있는지를 평가하기 위하여 수행되고 있다.

이 연구에서는 보요소를 사용한 선형해석 모델과 쉘요소를 사용한 비선형해석 모델의 두 가지 해석 모델을 구성하여 시험 구조물의 선형 및 비선형 응답을 평가하였다. 선형 해석에는 SAP2000<sup>(5)</sup>을 사용하였으며 비선형 해석에는 TNO DIANA<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 이 전산해석 프로그램을 이용한 해석결과와 변위기반 설계법에 의해 구한 시험체의 응답은 진동대 시험에서 측정된 응답 자료와 비교하였다. 비교분석 결과, 변위계수법은 지진응답을 비교적 잘 예측하였으나 능력스펙트럼법은 비선형 영역에서 지진응답을 과소평가하는 것을 알 수 있었다.

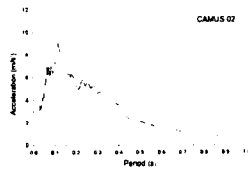
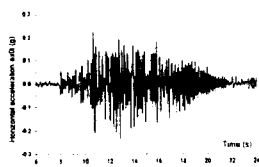
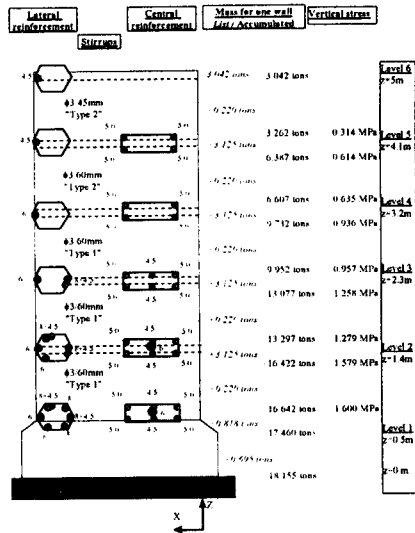
## 2. 진동대 시험

이 연구에서 활용한 진동대 시험은 원래 프랑스의 CEA에서 철근콘크리트 전단벽에 대한 내진성능을 평가하여 기존 내진 설계코드의 적절성을 평가하고자 수행한 시험이다. 진동대 시험을 위한 1/3 축척의 모델 구조물은 5층 RC 전단벽 구조물로서 두 개의 전단벽이 6개의 정방향 층 슬라브로 연결되어 있다(그림 1 참조)<sup>(4)</sup>. 벽에 수직한 방향으로서는 횡방향 브레이싱으로 보강하여 벽에 수직한 방향으로 의도하지 않은 변형이 일어나지 않고 전단벽이 전체 연직방향 하중을 지탱할 수 있도록 하였다. 시험 구조물의 총 질량은 약 36 ton이고 각 층의 질량은 부가질량을 포함하여 약 6 ton이며, 높이는 5.1 m, 폭은 1.7 m, 전단벽의 두께는 6 cm이다. 그림 2는 부가 질량을 포함한 각 층의 질량분포 및 배근상태를 나타낸 것이다. 이 그림에서 각 층의 높이는 층 슬라브의 중간 위치를 나타내며, 이 그림에 나타낸 연직방향 응력은 사하중에 의해 벽체에 작용되는 응력이다.

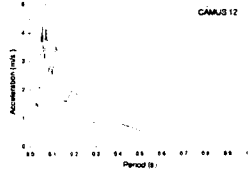
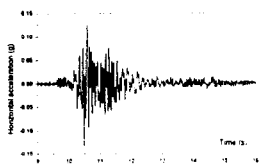
시험에 사용된 가진입력중 이 연구에서 사용한 3세트의 입력은 표 1 및 그림 3과 같다. 표 1에는 가진입력의 최대가속도를 나타냈다. 여기서 Run1은 원거리 지진을 나타내는 지진입력으로서 인공으로 작성한 지진이며 Run2와 Run3은 근거리 지진을 나타내는 지진입력으로서 샌프란시스코 지진을 조정한 것이다. 그림 3은 이 가진입력들에 대한 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼이다.

표 1. 이 연구에 사용한 진동대 시험 가진입력의 최대 가속도

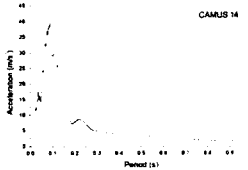
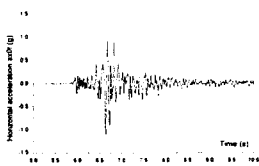
| 가진입력 구분     | Run 1  | Run 2  | Run 3  |
|-------------|--------|--------|--------|
| 수평방향 최대 가속도 | 0.25g  | 0.13g  | 1.11g  |
| 특징          | 원거리 지진 | 근거리 지진 | 근거리 지진 |



(a) Run 1



(b) Run 2



(c) Run 3

그림 3. 가진입력의 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼

### 3. 유한요소모델

#### 3.1. 선형해석모델

현재 흔히 사용되는 일반적인 지진입력에 대한 선형해석의 유용성을 검토하기 위해 상용구조해석 프로그램인 SAP2000<sup>(5)</sup>을 이용하여 선형해석을 수행하였다. 선형해석을 위한 유한요소 모델은 그림 4에 소개되어 있다. 선형해석모델은 6개의 보요소와 지점부에 병진 및 회전 스프링으로 구성되어 있으며 스프링은 진동대의 수직 구속봉(restraining rod)의 효과를 고려하기 위해 추가하였다. 보요소는 28,000 MPa의 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였으며 지점부 연직방향 병진 스프링 및 회전 스프링의 탄성계수값은 각각 800 MN/m 및 4,984 MN-m를 사용하였다.<sup>(4)</sup> 이 모델을 이용하여 가장 일반적인 선형해석법인 응답스펙트럼 해석을 수행하였다.

#### 3.2. 비선형해석모델

콘크리트 벽체의 해석을 위한 비선형해석은 상용프로그램 TNO DIANA<sup>(6)</sup>를 이용하여 수행하였다. 벽체의 콘크리트부는 668개의 8절점 쉘 요소를 이용하였으며 철근은 21개의 Embedded Bar 요소를 이용하여 모델링하였다. 지점부는 선형모델과 같은 탄성계수를 갖는 스프링으로 모델링하였다 (그림 5). 콘크리트의 인장 및 압축의 균열 거동은 total strain 모델을 이용하여 해석하였다. 콘크리트의 압축거동은 파괴에너지 2,500 N/m를 갖는 포물선 형상으로 가정하였으며 콘크리트의 압축강도는 시험치<sup>(4)</sup>에 근거하여 35 MPa을 갖는 것으로 가정하였다. 콘크리트의 인장거동은 파괴에너지 180 N/m를 갖는 선형인장 연화(softening) 모델을 사용하였다. 콘크리트의 탄성계수는 시험치<sup>(4)</sup>에 근거하여 압축과 인장 동일하게 28,000 MPa을 사용하였다. 철근의 거동은 bi-linear 모델을 사용하였으며 Von Mises 항복 기준을 사용하였다. 전술된 철근과 콘크리트의 응력-변위 관계는 그림 6에 나타내었다. 이와 같은 유한요소모델을 이용하여 비선형 정적해석 및 비선형시간이력해석을 수행하였다.

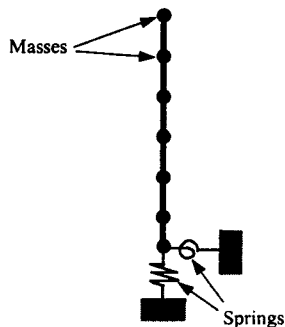


그림 4. 선형 해석 모델

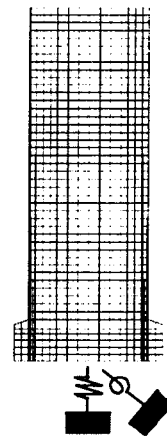


그림 5. 비선형 해석 모델

#### 4. 변위기반방법

구조물의 최대응답을 두 가지의 변위기반 비선형 정적 방법, 즉 변위계수법과 능력스펙트럼법을 이용하여 산정하였다. 이 방법들은 구조물의 비탄성 응답을 비선형 시간 이력 해석 없이 구할 수 있는 방법들이다. 첫 단계로 비선형 정적해석이 수행되었다. 구조물에 적용된 횡하중의 분포는 식(1)<sup>(2)</sup>을 이용하여 구하였으며 이 하중을 이용한 pushover 해석 결과는 그림 7과 같다.

$$F_i = V \frac{m_i \psi_{1i}}{\sum_j m_j \psi_{1j}} \quad (1)$$

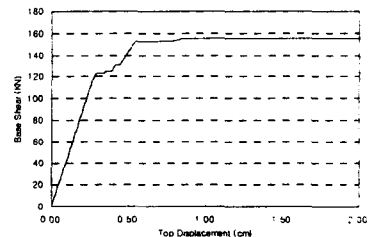
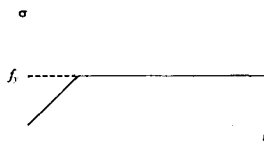
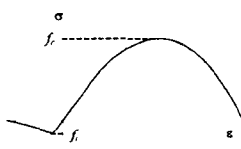
여기서  $F_i$ 는  $i$ 번째 층의 횡하중이며,  $V$ 는 밀면전단력,  $m_i$ 는  $i$ 번째 층의 질량, 그리고  $\psi_1$ 은 구조물의 탄성모델의 1차 모드형상이다.

##### 4.1. 변위계수법

지진 하중작용시 예상되는 최대변위인 목표변위(target displacement)는 변위계수법을 이용하여 아래 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a (T_e / 2\pi)^2 \quad (2)$$

여기서  $C_0$ 는 구조물 최상부 변위와 등가 단자유도 시스템의 스펙트럼 변위를 연계시켜주는 수정계수이며  $C_1$ 은 예상 최대 비탄성 변위와 선형탄성응답 변위를 연계시켜주는 수정계수,  $C_2$ 는 핀칭효과(pinching)와 강성 및 강도감소가 최대변위에 미치는 효과를 반영하기 위한 수정계수,  $C_3$ 는 동적  $P-\Delta$  효과에 의한 변위 증가를 반영하기 위한 수정계수이다.  $S_a$ 는 고려하는 방향에 대한 구조물의 유효 최대 고유주기 및 감쇠비에서의 응답 스펙트럼 가속도값이며  $T_e$ 는 고려하는 방향에 대한 구조물의 유효 최대 고유주기이다. 이 방법에 대한 자세한 설명은 FEMA 356<sup>(3)</sup>에서 찾을 수 있으며 본 연구에서는 FEMA 356을 참조하여  $C_0$ 값으로는 1.4 (5층 건물에 해당), 나머지 수정계수값은 모두 1을 사용하였다.



## 4.2. 능력스펙트럼법

능력스펙트럼법은 Freeman등<sup>(7)</sup>과 Freeman<sup>(8)</sup>의 연구에 의해 처음 소개되었다. 이 방법은 pushover 해석을 통해 구한 능력곡선과 지진 가속도 시간 이력을 이용해 구한 응답 스펙트럼 곡선을 이용하여 최대변위를 산정한다. 최대변위 산정 절차는 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

1. 밀면전단력,  $V_b$  와 최상부 변위,  $u$  와의 관계를 나타내는 pushover 곡선을 구한다
2. pushover 곡선을 아래 관계식들을 이용하여 능력곡선으로 변환한다.

$$A = \frac{V_b}{M_1^*} \quad (3)$$

$$D = \frac{u_N}{\Gamma_1 \psi_M} \quad (4)$$

위 식에서

$$M_1^* = \frac{(\sum_{j=0}^N m_j \psi_{j1})^2}{\sum_{j=0}^N m_j \psi_{j1}^2} \quad (5)$$

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{j=0}^N m_j \psi_{j1}}{\sum_{j=0}^N m_j \psi_{j1}^2} \quad (6)$$

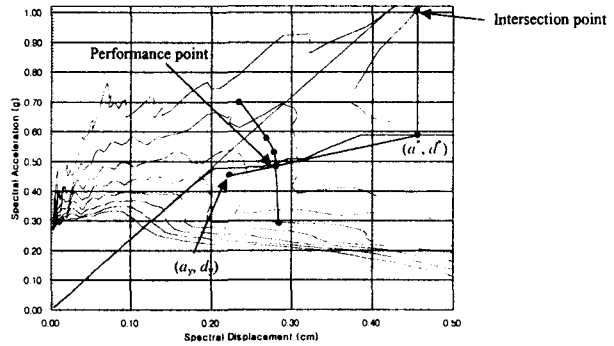


그림 8. Run1의 능력 및 요구 스펙트럼

$m_j$ 는  $j$ 번째 층의 집중질량;  $\psi_{j1}$ 은 1차모드  $\psi_1$ 의  $j$ 번째 층 요소;  $N$ 은 층수;  $M_1^*$ 은 1차모드의 유효모드질량이다.

3. 표준 유사가속도(standard pseudo-acceleration),  $A$  와 주기,  $T_n$  의 관계 곡선인 탄성응답스펙트럼을  $A-D$  형식을 가진 요구곡선(demand diagram)으로 변환한다. 여기서  $D$ 는 변위 스펙트럼을 의미한다.
4. 능력곡선과 요구곡선을 함께 그려 요구변위(displacement demand)를 결정한다 (그림 8). ATC-40<sup>(2)</sup>에는 요구변위를 산정하는 세가지 방법이 자세히 소개되어 있다.
5. 단계4에서 결정된 요구변위를 전체 최상부 및 각층의 변위로 변환하고 지정된 성능 목표의 제한치와 비교한다.

## 5. 결과 및 토론

시험 및 해석을 통해 구한 고유진동수를 표 2에 비교하였다. 첫 번째와 세 번째 모드는 각각 첫 번째와 두 번째 횡방향 모드이며 두 번째 모드는 첫 번째 연직방향 모드이다. 시험에서 측정된 최상층 변위 와 밀면 전단력은 표 3과 4에 해석을 통해 구한 변위와 비교하였다. Run2에서는 모든 방법들이 시험치보다 20%정도 큰 비슷한 변위값을 보였으나 밀면전단력은 측정치보다 40-70% 정도 크게 산정되었다. Run2에 의한 응답은 선형탄성구간에 있으므로 이러한 결과는 구조물의 탄성강성의 과대평가로 인한 것으로 사료된다. Run1에서는 능력스펙트럼법으로 구한 최대변위가 50%정도 낮은 값이 산정되었으며 변위계수법이 가장 근접한 값을

산정하였다. 밀면전단력의 경우 두 변위기반 방법 즉 능력스펙트럼법 및 변위계수법이 가장 근접한 값을 예측하였으며 선형해석에 근거한 응답스펙트럼법은 약 80%정도 큰 값을 예측하였다. 이러한 밀면전단력의 과다산정은 보다 강한 지진 입력시에 보다 확실히 나타났다. Run3의 경우 응답스펙트럼법은 약 150%정도 큰 전단력을 산정하였다. 비선형 해석을 근거한 방법의 경우 응답스펙트럼법보다 근접한 값을 예측하였다. 이는 Run1과 Run3에서 구조물의 비탄성거동으로 인한 것으로 사료된다. Run3의 경우 능력스펙트럼법은 44%정도 낮은 응답을 예측하였다. 모든 세가지 경우에서 변위계수법은 응답스펙트럼법이나 능력스펙트럼법보다 근접한 값을 예측하였다. 선형 거동을 보인 Run2에서 비선형시간이력해석은 측정값보다 큰 값을 산정하였으나 비선형 거동을 보인 Run1 과 Run3 에서는 측정된 변위보다 작은 값을 예측하였다.

## 6. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 선형해석에 근거한 응답스펙트럼법은 최대변위를 비교적 근접하게 산정하였으나 밀면전단력은 과대평가하였다.
2. 능력스펙트럼법은 비선형거동시 측정된 최대변위보다 훨씬 작은 값을 주는 것으로 나타났다.
3. 대부분의 경우 변위계수법은 측정된 값에 가장 근접한 값을 주는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 연구는 IAEA(과제 번호 12145/R0) 및 과학기술부, 한국원자력안전기술원의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. Gioncu, V., "Recent development in ductility design of steel structures," Seminar on Improving Building Structural Quality by New Technologies, Lisbon, Portugal, 2002.
2. Applied Technology Council (ATC), *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, SSC96-01: ATC-40, Redwood City, CA, USA, 1996.
3. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA-356, Washington, D.C., USA, 2000.
4. Combescure, D., *IAEA CRP-NFE Camus benchmark: experimental results and specifications to the participants*, IAEA, 2002.
5. SAP2000, *Users Manual*, Computers and Structures, USA, 1998.
6. DIANA, *Users Manual*, TNO Building and Construction Research, Netherlands, 1998.
7. Freeman, S.A., Nicoletti, J.P., and Tyrell, J.V., "Evaluations of exiting buildings for seismic risk - a case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington," Proceedings of 1st US National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Berkeley, USA, 1975, pp. 113-122.
8. Freeman, S.A., *Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion*,

Publication SP-55, ACI, Detroit, USA, 1978, pp. 589-605.

9. Chopra, A.K. and Goel, R.K., *Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems*, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, USA, 1999.

표 2. 측정 및 해석으로 구한 고유진동수의 비교

| 고유진동수   | 모드 1 | 모드 2 | 모드 3 |
|---------|------|------|------|
| 시험      | 7.2  | 28.1 | 31.1 |
| 선형해석모델  | 7.4  | 23.3 | 37.4 |
| 비선형해석모델 | 7.6  | 27.2 | 37.1 |

표 3. 최상부 변위 비교

|       |         | 최상부 변위 (mm) |       |       |
|-------|---------|-------------|-------|-------|
|       |         | Run 1       | Run 2 | Run 3 |
| 시험    |         | 7.00        | 1.54  | 13.20 |
| 선형해석  | 응답 스펙트럼 | 4.62        | 1.81  | 13.37 |
| 비선형해석 | 변위계수법   | 6.18        | 1.86  | 14.78 |
|       | 능력스펙트럼법 | 3.40        | 1.87  | 7.45  |
|       | 시간이력해석  | 5.57        | 1.90  | 10.50 |

표 4. 밀면전단력 비교

|       |         | 밀면 전단력 (KN) |       |       |
|-------|---------|-------------|-------|-------|
|       |         | Run 1       | Run 2 | Run 3 |
| 시험    |         | 69.4        | 24.5  | 112.0 |
| 선형해석  | 응답 스펙트럼 | 132.8       | 37.2  | 293.7 |
| 비선형해석 | 변위계수법   | 75.2        | 40.2  | 75.5  |
|       | 능력스펙트럼법 | 61.0        | 40.4  | 75.3  |
|       | 시간이력해석  | 101.0       | 34.2  | 141.0 |