

기존 국내 학교 건축물의 내진성능 평가법

A Methodology for Seismic Capacity Evaluation of Existing School Buildings in Korea



이 강 석^{1)*}

Lee, Kang Seok

1. 서론

대다수의 철근콘크리트(이하, RC) 학교 건물은 취성적인 파괴성상을 나타내는 전단벽(Shear Wall), 단주(Short Column) 등의 전단파괴형 부재 및 소성능력이 탁월한 기둥 등의 휨파괴형 부재로 이루어져 있으며, 이것들은 각기 다른 변위에서 파괴될 것으로 판단된다. 따라서, 전단 및 휨파괴형 부재와 같이 다른 성질의 역학적 특성을 가지는 내진 요소로 혼합된 RC 학교 건물의 내진성능을 평가하기 위해서는 각각의 부재의 내력과 소성 능력이 건물 전체의 내진성능에 어떻게 영향을 미치는가를 우선적으로 검토하여야 한다.

한편, 현존 RC 건물의 내진성능을 단시간 내에 약산적으로 평가하여 내진성능이 우수한 건물을 우선적으로 선별을 하는 대표적인 간이 내

진성능 평가법(Rapid- Screening Method)인 미국의 FEMA310의 Screening Phase(Federal Emergency Management Agency, 1998) 및 일본의 1차 내진진단법(Japan Building Disaster Prevention Association, 1990 and 2001) 등에서는 각각의 파괴형식에 대한 평가 기준을 토대로 경험적인 판단을 근거로 평가하는 등 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 건물의 내진성능에 관해서는 충분히 검토가 되어있지 않는 것이 현재의 실정이다.

상기의 배경 하에 문헌[3]에서 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 RC 학교 건물의 내진성능을 보다 적절하게 평가를 하는데 있어서 기본적인 자료를 얻고자, 각각 파괴형 부재의 강도와 연성 능력사이의 상관관계를 비선형 지진응답해석을 실시하여 파악하였으며, 이를 바탕으로 특정연성율을 위한 요구내력(Required Strength)을 산정하였다. 또한, 전단파괴형 부재의 피해정도와 휨파괴형 부재의 피해정도와의 상관관계를

1) 전남대학교 공과대학 건축학부 부교수

* E-mail : kslnist@jnu.ac.kr

파악하여, 이것이 건물 전체의 피해상황에 어떻게 영향을 미치는가를 검토 및 분석하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 필자는 국내 기존 RC 학교 건축물의 내진성능 평가법을 개발하여 2011년 5월 20일 (서울 강남 올림푸스 타워) 교육과학기술부, 한국교육개발원 및 한국구조기술사회 주관으로 그 연구결과를 공표하였다(공청회).

본 기사에서는 기존 학교 건축물의 내진성능 평가법 가운데 간이 내진성능 평가법의 이론적 배경, 평가법 절차, 평가법 타당성 검토 및 그 적용가능성을 소개한다.

2. 학교 건물의 간이 내진성능 평가법의 제안

우선적으로 Fig. 1의 지진피해가 예측 가능한

요구내력스펙트럼(0.1g, 0.15g, 0.2g 및 0.3g의 상한값)에 나타난 지진에 대한 건물의 피해도 영역을 구분하는 굴곡진 선들을 평활화하여, 전단(C_{su}) 및 휨과괴형 부재의 내력값(C_{fy})과의 상관관계를 특정 지진동 수준으로 나타낼 수 있는 수식(지진피해도 판정식)을 제안하였다. 또한, 학교 건물의 내진성능을 정량화하기 위해 평가점수를 도입하여, 내진성능 등급을 각각의 피해도 영역 내에서 평가점수 범위에 따라 3등급으로 구분하여 총 12등급으로 나타내었다. Fig. 2에는 상기 간이 내진성능 평가법의 흐름도를 나타내며, 이하에는 각 단계별(5단계) 상세를 나타낸다.

(1) Step ①에서는 대상건물 1층의 전단 및 휨과괴형 부재의 내력값을 각각 산정한

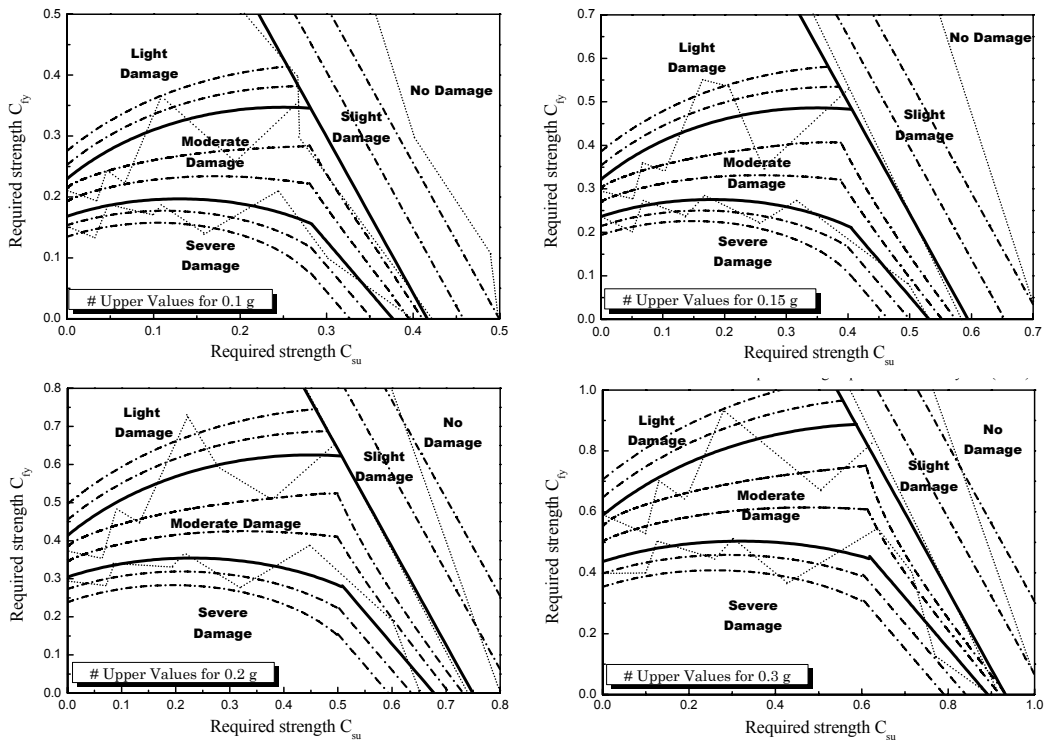


Fig. 1 Curves for earthquake damage prediction proposed in this study

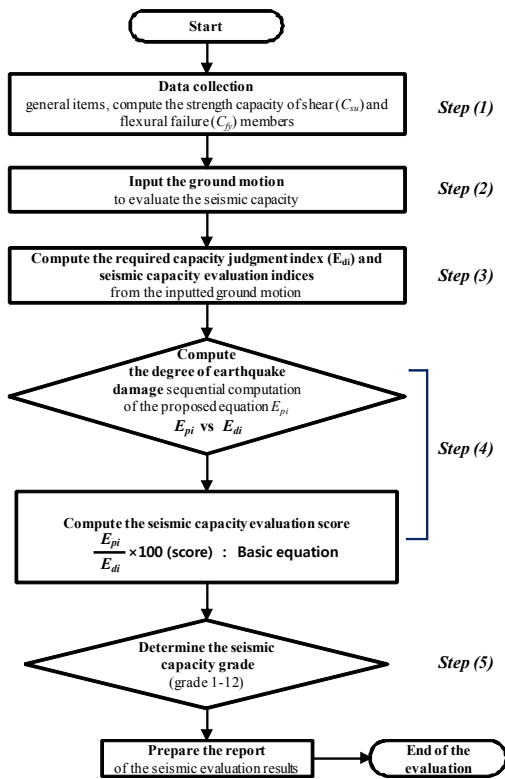


Fig. 2 Rapid screening method procedure for seismic capacity evaluation

다. 내력산정에는 장변(X방향) 및 단변방향(Y방향) 2방향에 대해서 각각 산정을 하며, 내진성능 평가도 2방향에 대해 독립적으로 평가한다. 여기서, 각 파괴형 부

재의 내력은 층 전체의 바닥면적에 대한 전단부재 및 휨부재의 비율 등을 바탕으로 산정하는 평균전단응력도법을 사용하였다.

- (2) Step ②에서는 내진성능평가용 입력지진동(α)을 결정한다. 입력지진동, 즉 최대 입력지진가속도의 산정에는 KBC 2009의 건축구조설계기준에 근거하여 2400년 재현주기 지진의 2/3수준의 유효지반가속도(S)로 정의하였으며, 식 (1)에 의해서 결정한다.

$$\alpha = \frac{S_{DS}}{2.5} \quad (1)$$

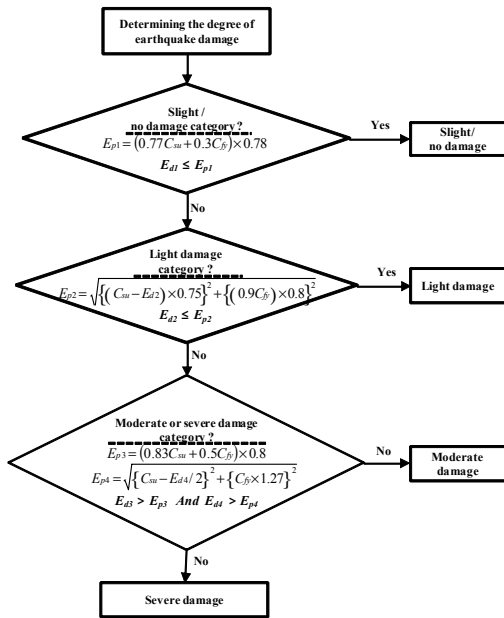
여기서, S_{DS} : KBC 2009 건축구조설계기준에서의 지진지역 단주기 설계스펙트럼 가속도 (g)

- (3) Step ③에서는 입력지진동(α)에 따라 Table 1에 나타난 산정용 식에 의해, 요구성능판정지표(E_{di}) 및 내진성능 평가용 지표(β , G , P)를 산정한다.
 (4) Step ④에서는 상기 Step①~③에서 산정된 각 부재의 내력값과 입력지진동에 따른 요구성능판정지표 및 내진성능 평가

Table 1 Equation for computing the required strength judgment indices (E_d) and seismic capacity evaluation indices(β , G , P) in response to the ground motion acceleration(α)

Indices	Ground motion acceleration (α)				
	$0.1g \leq \alpha \leq 0.2g$	$0.2g < \alpha \leq 0.3g$			
E_{di}^* ($i=1-4$)	$E_{d1}=E_{d2}=E_{d3}=E_{d4}$	For slight or no damage (E_{d1})	For light damage (E_{d2})	For moderate damage (E_{d3} , E_{d4})	For severe damage
	$2\alpha+0.05$	$1.1\alpha+0.23$	$2\alpha+0.05$	$E_{d3}:1.5\alpha+0.15$ $E_{d4}:2\alpha+0.05$	-
β^{**}	$2.1 - 6\alpha$	$1.42 + 2.6\alpha$			
G^{**}	$2.2\alpha+0.06$	$\alpha + 0.3$			
P^{**}	0.15	$0.31 - 0.8\alpha$			

* Required strength judgment indices ** Seismic capacity evaluation indices



Note: E_{pi} ($i=1$ to 4) indicates the required strengths for earthquake damage

Fig. 3 Details of determining the degree of earthquake damage

용 지표값을 바탕으로 Fig. 3의 지진피해도 영역 결정 상세에 의해 피해도를 결정하고, 다음과 같이 해당 지진 피해도에 따른 내진성능 평가점수를 구한다.

- 경미 및 무피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산 : $E_{p1}/E_{d1} \times 100 = ()$ 점
- 소규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산 : $E_{p2}/E_{d2} \times 100 = ()$ 점
- 중규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산
 - $C_{su} < G$ 이면 : $E_{p4}/E_{d4} \times 100(1 - \sqrt{\beta C_{su}}) + 100\sqrt{\beta C_{su}} = ()$ 점
 - $C_{su} \geq G$ 이면 : $\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 \left(1 + \frac{C_{su} - G}{P}\right) - \frac{C_{su} - G}{P} \times 100 = ()$ 점

Table 2 Degree of earthquake damage and seismic capacity grade

Earthquake damage classification	Seismic capacity evaluation score	Seismic capacity grade
Slight/no damage	221-240	1
	201-220	2
	181-200	3
Light damage	161-180	4
	141-160	5
	121-140	6
Moderate damage	101-120	7
	81-100	8
	61-80	9
Severe damage	41-60	10
	21-40	11
	0-20	12

- 대규모 피해 판정 및 내진성능 평가점수 계산

• $C_{su} < G$ 이면 : $E_{p4}/E_{d4} \times 100 = ()$ 점

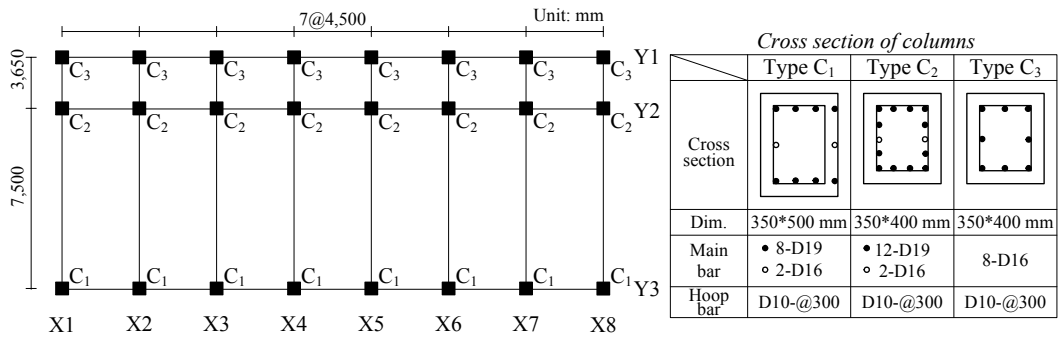
• $C_{su} \geq G$ 이면 :

$$\frac{E_{p3}}{E_{d3}} \times 100 + \frac{200(E_{p3} - E_{d3})}{3E_{d3}} = ()$$

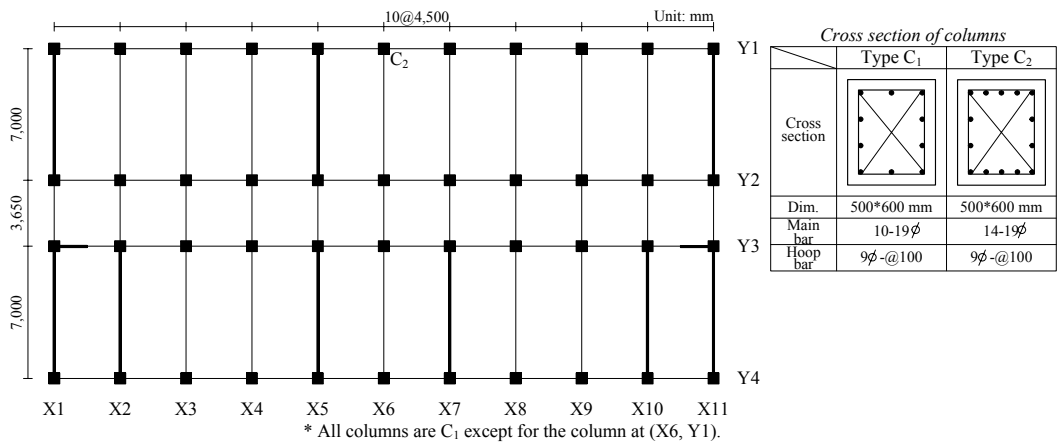
최종적으로, Step ⑤에서는 건물의 지진 피해도와 내진성능 평가점수에 따른 지진손상도 수준과의 관계를 바탕으로 Table 2와 같이 내진성능 등급을 결정하여 내진성능을 평가한다. 여기서, 내진성능 등급이 높을수록 해당 지진강도에 대한 내진성능이 취약하여 내진보강이 우선시 되는 건물로 분류된다.

3. 내진성능 평가 학교 예제

본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법을 이용하여 순수 골조로만 이루어진 RC 학교건물 (Fig. 4의 1번 건물, X방향) 과 거의 골조로 이루



(a) Planar view of the ground floor (1F) of the first building



(b) Planar view of the ground floor (1F) of the second building

Fig. 4 Plane view (1F) of example buildings

어진 RC 건물(Fig. 4의 2번 건물, X방향)의 내진성능을 각각 평가하였다.

대상건물 연직부재의 단면적의 크기는 다음과 같다. 1번 건물의 기둥은 C1은 350×500mm², C2와 C3는 350×400mm²이며, 2번 건물 기둥은 모두 500×600mm²이고, 벽체의 두께는 150mm이다. 한편, 1번 건물의 Y2방향 기둥은 조적벽체의 영향으로 기둥의 순 길이가 짧아져 ho/D(ho: 기둥순길이, D: 기둥폭)비가 2이하인 단주로서 내력값 계산 시에 전단파괴형 부재로 분류가 된다. 대상건물의 입력지진가속도(α)는 비교를 위하여 각각 0.2g로 가정을 하였다.

상기의 내력값과 지진가속도를 바탕으로 제안

한 평가법에 의해 평가한 결과, 1번 건물(X방향)의 지진피해 판정은 대규모 피해로 판정되었고, 내진성능 등급이 12등급으로써 해당 지진동에 대해 건물의 내진성능이 매우 취약한 것으로 나타났다. 한편, 2번 건물(X방향)의 경우는 입력지진가속도(α) 0.2g에서 중규모 지진피해로 판정되었으며, 내진성능 등급은 7등급으로 평가되었다.

4. 비선형 정적·동적해석에 의한 내진성능 평가결과와의 비교에 의한 타당성 검증

Fig. 4의 1번 및 2번 건물의 대상으로 부재수

준으로 비선형 정적 및 동적해석을 수행하여 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법의 적용 가능성과 타당성을 검증하였다. 또한, 일본 내진 진단법(2차 및 3차)에 의해서도 비교 및 검토를 수행하였다.

실제 구조물은 입체적으로 복잡하게 진동을 하지만, 기둥, 보 및 벽체를 선재로 치환하여, 수평방향의 지진력만 고려한 평면골조로 모델링한다. 구조물부분에서는 부재레벨에 입각하여 층 특성을 평가하며, 해석에 필요한 가정은 다음을 따른다.

- ① 각 부재의 항복힌지의 위치는 문헌[2]을 참고로 다음과 같이 가정을 하며, 기둥 및 보의 접합부 등, 각 부재의 중심으로부터의 항복힌지가 발생하는 부재단까지는 강역(Rigid)으로 가정한다.
 - 일반층의 보 : 날개벽이 없는 경우는 기둥단 위치로 하며, 날개벽이 있는 경우는 가장자리로부터 $D_G/2$ (D_G :보높이)들어온 위치로 한다.
 - 지중보 : $D_F' < (l_0/l_0' - 1) \cdot D_F$ 인 경우는 기둥단의 위치로 하고, $D_F' \geq (l_0/l_0' - 1) \cdot D_F$ 인 경우는 기초판단의 위치로 한다. (D_F : 지중보 높이, D_F' : 기초판의 저면으로부터 지중보까지의 거리, l_0 : 기둥간 거리, l_0' : 기둥판간 거리)
 - 기둥 : 수벽 및 징두리벽이 없는 기둥은 보단의 위치로 한다. 수벽 및 징두리벽이 있는 경우는 수벽 및 징두리벽의 가장자리로부터 $D_G/200$ (D_G :기둥폭)들어온 위치로 한다.
- ② 각 골조를 양단편의 강한보로 연결하여 구조물 전체를 하나의 평면골조로 해석하였다. 즉, 강막가정이 성립하는 것으로 한다.
- ③ 보의 내력은 보와 협력하는 범위의 슬래브의 유효폭내의 슬래브 철근의 영향도 고려하며, 보단의 장기하중에 의한 휨모멘트는

후술하는 부재의 휨스프링의 복원력특성에 초기치로서 부여하는 것으로 고려한다. 또한, 기둥의 내력계산용 축력은 장기축력으로 한다.

- ④ 콘크리트블록 등의 비내력벽은 무시한다. 한편, 부재는 휨스프링과 전단스프링이 직렬 결합한 모델로 가정한다. 즉, 양단의 모멘트로부터 휨에 대한 강성메트릭스를 평가하는 Gilbertson 모델 (Gilbertson, 1966, 재단 소성스프링법)로 가정한 것으로서, 부재의 재축방향의 변형은 무시를 하며, 부재의 휨은 탄성강성(k_B)을 가지는 탄성선재와 그 양단에 설정한 $(k_{BP})_A$ 및 $(k_{BP})_B$ 의 강성을 가지는 소성회전스프링에 의하여 평가를 하며, 변형은 그것들의 합으로 나타낸다. 또한 전단변형에 대해서는 재중양부에 설정한 비선형 전단스프링에 의하여 평가를 한다.

휨부재에 대한 이력모델은 Degrading Tri-Linear 형으로, 전단부재의 이력모델은 Origin-Oriented 형으로 한다. 또한, 각 기둥, 보, 벽체의 복원력 특성을 결정하는 초기강성, 휨균열모멘트, 전단균열내력, 휨항복모멘트, 전단중국내력 등의 변수들은 내진진단결과(Table 3의 일본 내진진단 2차 및 3차)와의 연관성을 고려하여 일본내진진단기준 등에서 사용하고 있는 식을 토대로 산정하였다. 비선형 동적해석 시의 입력지진동으로서는 Elcentro (EW/NS), Hachinohe (EW/NS)의 기존지진파를 사용하였고, 입력지진동 규모는 간이 내진성능평가 시 이용한 입력지진동(α)의 규모, 즉 0.2g로 각각 표준화하여 비선형 동적해석을 실시하였다.

Fig. 5 및 6에는 대상건물의 비선형 해석결과를 나타내었다. 1번 건물에 대한 비선형 정적해석의 경우, 일반적인 골조의 항복범위와 유사한 부재각(R) 1/150정도에서 항복을 하였으며 항복변위는 202mm, 항복내력은 1400kN로 나타났다. 비선형 동적해석의 경우, Hachinohe(EW)

Table 3 Comparison of seismic capacity evaluation results for the example buildings

Buildings		First building	Second building
Proposed method (seismic capacity rank)		severe damage (12)	moderate damage (7)
seismic evaluation using the Japanese standard	Second-level procedure (I_S)	0.34	0.65
	third-level procedure (I_S)	0.28	0.63
nonlinear static analysis	Q_y (kN) [C_B]	1400 [0.12]	5050 [0.21]
	d_y (mm)	20.0	19.0
nonlinear dynamic analysis	Q_{max} (kN) [C_{max}]	1680* (1592)** [0.145* (0.137)**]	5630* (4440)** [0.236* (0.186)**]
	u_{max} (mm)	79.4* (44.6)**	27.8* (11)**
	ductility ratio $\mu = \frac{u_{max}}{u_y}$	3.97* (2.23)**	1.46* (0.59)**

I_S is the structural seismic capacity index, Q_y is the shear strength that the yielding point, C_B is the shear strength coefficient at the yielding point, u_y is the displacement at the yielding point, Q_{max} is the shear strength that the maximum response, C_{max} is the shear strength coefficient at the maximum response, u_{max} is the displacement at the maximum response, and μ is the ductility ratio

* results of the Hachinohe (EW) earthquake with $\alpha=0.2g$

** results of the Elcentro (NS) earthquake with $\alpha=0.2g$

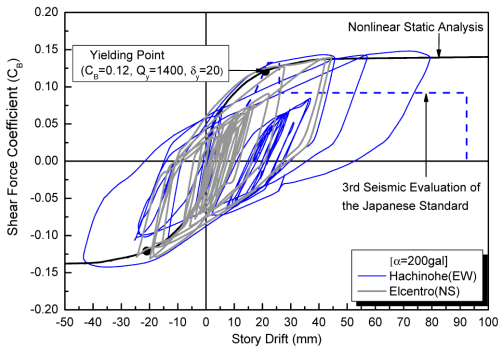


Fig. 5 Comparison of the results of the third-level procedure in the Japanese standard and the nonlinear analyses for the first building

지진에 대한 지진응답 최대변위가 79.4mm로 응답 연성률 $\mu = 3.97$ 을 보였으며 이는 지진피해도 판정법에 의하면 Damage Class IV 이상에 해당하는 대규모 지진 피해를 입을 가능성이 있다고 판단된다. 2번 건물의 경우, 비선형 정적해석에 의한 항복내력이 5050kN이며, 이때의 항복변위는 약 19mm를 나타내었다. 동적해석의

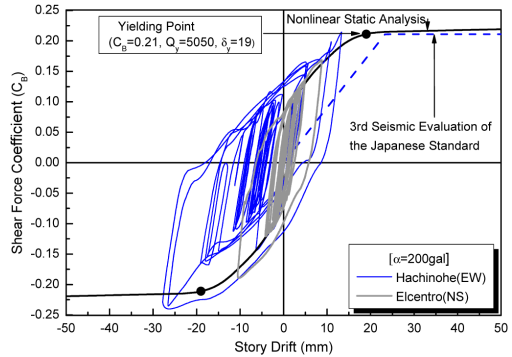


Fig. 6 Comparison of the results of the nonlinear analyses for the second building

경우, Hachinohe(EW) 지진에 대한 응답이 가장 크게 나타났으며 이때의 지진응답 최대변위가 27.8mm로 응답연성률 $\mu = 1.46$ 로서 지진피해도 판정법에 의하면 Damage Class III에 해당하는 중규모 지진 피해를 입을 가능성이 있다고 판단된다.

Table 3에는 간이 내진성능 평가법을 토대로

현존 학교 건물 2개동을 대상으로 내진성능을 평가한 결과와 보다 정밀하게 내진성능을 평가한 결과(비선형 해석 및 진단법)를 각각 비교·검토하여 요약하였다. 1번 건물의 경우 제안된 평가법에 의한 평가결과는 대규모피해(내진등급 -12)로 나타났으며, 일본내진진단 및 비선형 동적해석에서는 대규모이상의 지진피해를 입을 것으로 평가되었다. 반면, 2번 건물의 경우 본 연구에서 제안한 평가법 뿐만 아니라, 일본내진진단 및 비선형 동적해석에서도 소/중규모 정도 피해를 입을 것으로 평가되었다.

상기의 결과는 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법은 FEMA 310의 Screening Phase 및 일본 1차 내진진단법과 유사한 성능평가 개념, 즉 상세한 내진성능법(FEMA: Evaluation Phase 및 비선형 해석, 일본진단법: 2차 및 3차 진단)을 실시하기 전에 1차적으로 다수의 기존 건물이 보유하는 내진성능을 신속하게 평가하는 것으로써, 본 연구에서 제안한 간이 내진성능 평가법은 기존 RC 학교 건물에 적용하여도 간단하면서도 효율적으로 그 내진성능을 신뢰성이 높게 평가가 가능하다는 사실을 나타낸다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서 제안한 평가법은 효율적이며 비교적 간단하게 학교 건물의 내진성능평가가 가능하며, 내진성능 평가점수를 토대로 어떤 특정

지진강도에 대한 건물의 구조손상정도를 효과적으로 평가할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 또한, 특정 성능수준에 만족하기 위한 학교 건물의 진단 및 휨과괴형 부재의 요구내력이 산정 가능하여 향후 국내 학교 건물의 내진보강 등의 내진대책을 위한 기본 자료로서 활용이 가능하다고 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 고시, 「건축구조설계기준(2009)」, 대한건축학회.
2. Federal Emergency Management Agency, "FEMA 310. 1998. Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard", Washington D.C.
3. Gilbertson, M. F., Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility, Proceedings of ASCE, vol. 95, No. ST2, 1966.
4. Japan Building Disaster Prevention Association, "Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings", Tokyo, Japan(in Japanese, revised in 1990 and 2001).
5. Kang Seok Lee, "Seismic Capacity Requirements for Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Controlled by both Shear and Flexure", Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 8. No. 1, February 2010, pp.75-91.

담당 편집위원: 이강석
(전남대학교 건축학부 부교수)
kslnist@jnu.ac.kr