

학교건축물의 내진보강 사례

Seismic Reinforcement Example in School Buildings



조민주 / (주)와이즈구조연구소 소장
 Jo, Min-Joo / WISE Structural Engineering Co., Ltd
 wisejoana@nate.com

1. 서론

학교는 배움의 터전이지만 재난 시 대피소로서의 역할을 수행하기도 한다. 지진은 인류가 경험하는 대재앙중의 하나이며, 이러한 지진에 대해 학교건축물이 대피소로서의 역할을 제대로 수행해 내기 위해서는 지진에 대해 충분히 견딜 수 있도록 내진설계가 이루어져 있어야 한다. 우리나라의 경우, 건축물 설계 시 내진기준이 도입된 시기는 1980년 대 후반부이며 이에 따라 그 이전에 지어진 건축물들은 내진설계가 되어있지 않은 실정이고 학교건축물 또한 예외는 아니다.

따라서 내진기준 도입 이전에 지어진 학교건축물을 대상으로 내진성능을 평가하고 적절한 보강방안을 제안해 보고자 한다.

2. 내진설계 방법

지진하중에 대한 구조물의 내진설계 방식은 구조물의 강도를 높이거나 구조물의 일부가 손상되면서 지진하중의 에너지를 흡수하는 내진구조와 지진력을 흡수하는 별도의 장치를 이용하여 구조물이 부담해야 하는 지진력을 감소시키는 제진구조, 그리고 지진에너지가 면진층 상부의 구조물로 전달되는 것을 차단하는 면진구조로 구분할 수 있다. 내진구조는 강진 하에서 생명보전의 목표를 달성할 때 까지 붕괴되지 않는 것이 목적이기 때문에 구조물에 큰 손상이 발생되게 되며, 지진 후에는 손상된 구조물의 복구비용이 막대한 단점이 있는 반면, 제진구조는 구조물에 설치된 제진장치가 지진하중에 의해 손상(소성화)되면서 지진

에너지를 흡수하므로 거주성, 안정성, 경제성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 면진구조는 지진하중 작용 시 면진층이 수평으로 변형되면서 구조물의 고유주기가 장주기화되어 공진을 방지하고 안정되게 지진에너지를 흡수할 수 있는 시스템이나 리모델링 시 적용이 어렵다.

우리나라에서는 요구 연성도에 따라 밑면전단력과 배근 상세를 정하는 하중기반설계를 기반으로 하는 내진구조 방식을 주로 채택하고 있으나, 최근에는 구조물에 제진장치를 설치하여 지진에너지를 흡수하는 제진설계가 각광받는 추세이다.

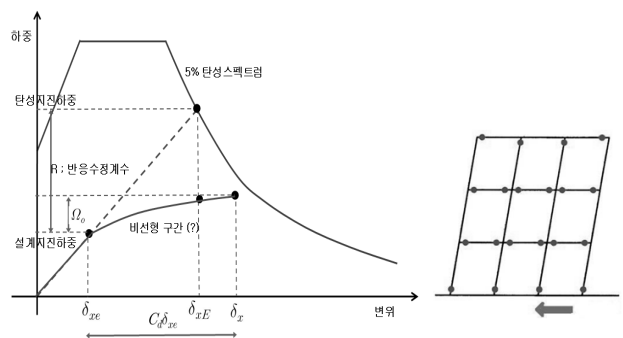


그림 1. 내진설계 기본개념

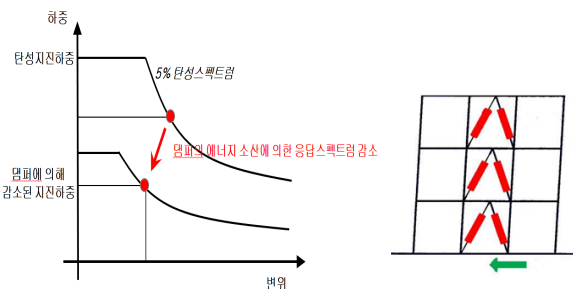


그림 2. 제진설계 기본개념

제진설계는 내진설계의 한 범주이며 KBC2009를 근간으로 하되, 구조물의 해석 시 기준에서 정의하는 지진력저항 시스템에 대한 설계계수 산정의 문제점과 비선형거동을 토대로 지진에너지를 소산시키는 제진댐퍼의 특성 때문에 비선형해석이 수반되어야 한다.

3. 학교건축물의 내진성능 평가

3.1 개요

내진기준 도입 이전의 학교건축물을 선정하여 현 국내 기준(KBC2009)을 토대로 지진하중에 대한 주요부재의 내력을 검토하고, 합리적인 보강방안을 제안해 보고자 한다.

대상건축물은 준공(1985년) 후 약 25년이 경과된 교육시설(H중학교)로서 강원도 춘천에 위치하고 있다. 지진하중에 대한 주요구조부재의 내력검토는 MIDAS GENw를 이용하였고 내진성능검토는 비선형해석 프로그램인 Perform-3D를 이용하여 수행하였다. 해석 시 적용된 지진하중은 표 1과 같다.

표 1. 지진하중(KBC2009)

구 분	지진하중산정계수
지진구역	2
지역계수	0.14
지반종류	Sc
단주기 지반증폭계수(Fa)	1.2
1초주기 지반증폭계수(Fv)	1.66
단주기설계스펙트럼가속도(S _{DS})	0.28
1초주기설계스펙트럼가속도(S _{DI})	0.15493
내진등급	특
중요도계수(Ie)	1.5
반응수정계수(R)	2.0

3.2 내진성능평가 결과

3.2.1 주요구조부재의 내력검토 결과

표 1의 지진하중을 토대로 구조해석을 실시한 결과, 대부분의 주요구조부재가 현 내진설계 기준에서 요구하는 내력을 만족시키지 못하여 지진하중에 대한 주요구조부재의 보강이 필요한 것으로 검토되었다.



그림 1. 대상건축물의 구조평면도(H중학교)

표 2. 기동검토결과(KBC2009)

구분	외 력		내 력		응력비
C1 (350×500)	P	183	ΦP	125	1.46
	M	149	ΦM	103	1.45
	V	73	ΦV	160	0.45
C2 (350×400)	P	196	ΦP	170	1.15
	M	109	ΦM	96	1.13
	V	50	ΦV	111	0.45
C3 (350×400)	P	77	ΦP	62	1.23
	M	63	ΦM	52	1.20
	V	38	ΦV	109	0.35

표 3. 보검토결과(KBC2009)

구 분	RG1(350×600)			RG2(350×450)		
	E1	C	E2	E1	C	E2
ΦMn	60	166	60	114	42	114
Mu	84	147	65	30	19	23
응력비	1.41	0.89	1.09	0.27	0.45	0.20
ΦVn	182	140	182	131	103	131
Vu	111	81	120	38	32	28
응력비	0.60	0.58	0.65	0.29	0.31	0.21
	RG3(250×500)			RG4(250×500)		
ΦMn	70	70	70	70	70	70
Mu	68	79	73	67	83	76
응력비	0.97	1.13	1.04	0.96	1.18	1.08
ΦVn	112	94	112	112	94	112
Vu	65	51	69	68	56	74
응력비	0.58	0.54	0.62	0.60	0.59	0.66
	NG1(350×600)			NG2(350×450)		
ΦMn	166	166	166	114	42	114
Mu	159	199	187	111	61	66
응력비	0.96	1.20	1.12	0.98	1.42	0.58
ΦVn	182	140	182	131	103	131
Vu	135	106	152	77	71	47
응력비	0.84	0.76	0.94	0.67	0.68	0.41
	NG3(250×500)			NG4(250×500)		
ΦMn	70	70	70	93	61	93
Mu	84	85	80	96	104	95
응력비	1.20	1.21	1.14	1.03	1.70	1.02
ΦVn	112	94	112	94	83	94
Vu	73	64	73	95	66	95
응력비	0.65	0.67	0.66	1.01	0.79	1.01

3.2.2 비선형 정적해석(Pushover) 결과

구조물의 내진성능을 평가하기 위해서는 지진발생 확률과 정도에 따른 성능수준을 정의해야 한다. 이 글에서는 각 기관(SEAOC, FEMA356, ICC)과 국내기준을 토대로 성능수준을 즉시거주수준(Immediate Occupancy_I.O)과 인명안전수준(Life Safety_L.S), 붕괴방지수준(Collapse Prevention_C.P)으로 정의하고 각 성능수준에 대한 설계스펙트럼을 사용하여 구조물의 성능과 안전성을 검토하였다. 대상건축물의 설

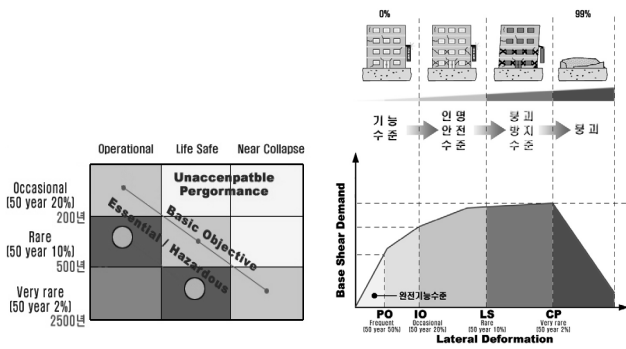


그림 3. 각 성능메트릭스에 따른 성능평가

계스펙트럼은 건물의 지반조건(S_c)에 대해 감쇠율 5%를 적용하였으며, 구조물의 성능과 안전성 검토는 현행기준의 설계수준인 L.S레벨에서 검토되었다.

검토결과, 그림 4에서와 같이 X방향(H1)의 성능곡선은 Y방향 대비 강도가 현저히 떨어지는 것으로 나타났으며, FEMA440을 토대로 한 성능점 산정결과도 X방향(H1)의 경우 C.P 레벨에서는 성능점을 형성하지 못하고 L.S 레벨의 구조물 붕괴직전에 성능점이 형성됨에 따라 구조물의 성능향상을 위한 보강이 필요한 것으로 검토되었다.

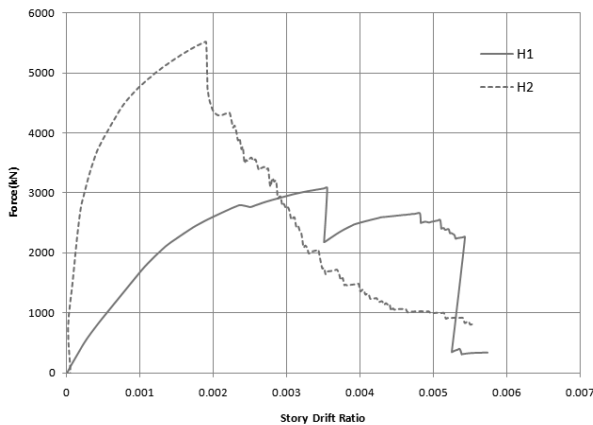


그림 4. Pushover해석에 의한 성능곡선(L.S)

표 4. FEMA-440(Linearization)에 의한 성능점 산정결과

구분		성능점			결과
		밀면전단력 (kN)	해석결과 (변형각)	목표성능 (변형각)	
X-	IO	2774	0.002316	0.005	성능만족
	LS	3079	0.003535	0.010	성능만족
	CP	-	-	0.015	불만족
Y-	IO	3107	0.000257	0.005	성능만족
	LS	3927	0.000515	0.010	성능만족
	CP	4802	0.001016	0.015	성능만족

4. 내진보강 방안

이상의 구조검토 결과로부터, 대상건축물은 지진하중에 대하여 보강이 필요하며 보강은 대상건축물의 기둥외부와 창문 프레임에 제진댐퍼를 설치하는 방안으로 제안하였다.

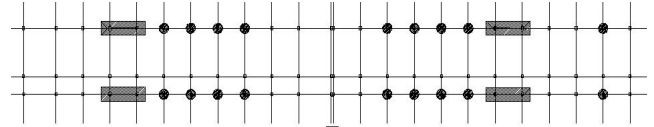


그림 5. 댐퍼보강 위치도

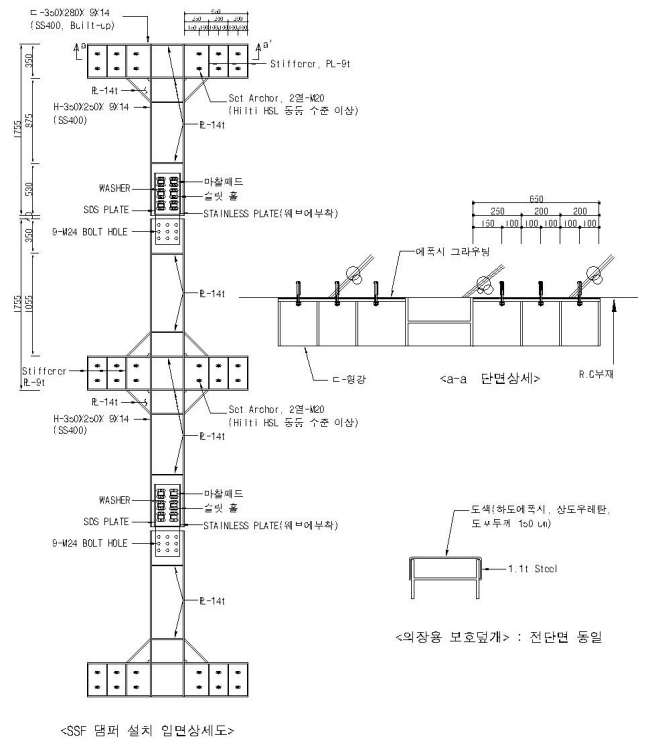


그림 6. 댐퍼상세도(기둥외부 설치)

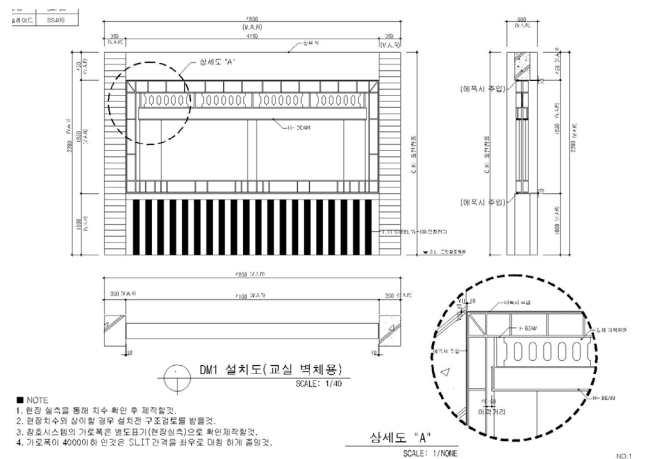


그림 7. 댐퍼 상세도(창문프레임 설치)

5. 내진성능 검증

구조물에 설치된 제진댐퍼는 비선형거동을 토대로 지진 에너지를 소산시키므로 비선형해석이 수반되어야 한다. 따라서 대상건축물에 제안된 제진댐퍼를 적용한 후 내진성능 검증을 위한 비선형 정적 및 동적해석을 수행하였다.

5.1 비선형정적해석(Pushover)결과

제진댐퍼가 설치된 대상건축물에 대해 비선형정적해석을 수행한 결과, 구조물의 강도와 연성이 모두 크게 향상되어 성능점이 형성되는 것으로 나타났다.

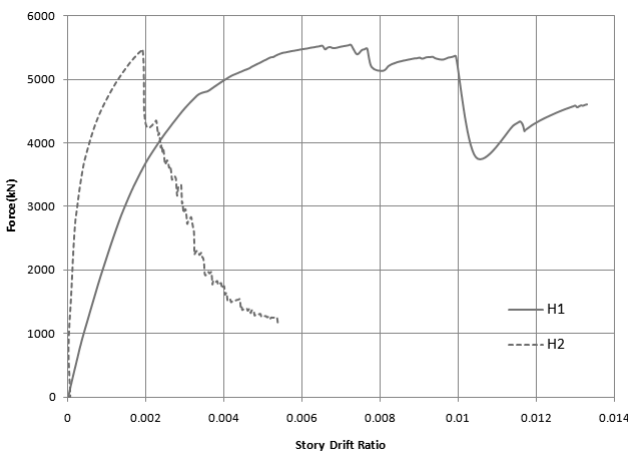


그림 8. Pushover해석에 의한 성능곡선

표 5. FEMA-440(Linearization) 방법에 의한 해석결과

구분	성능점			결과	
	밀면전단력 (kN)	해석결과 (변형각)	목표성능 (변형각)		
X-	IO	3604	0.001924	0.005	성능만족
	LS	4506	0.002949	0.010	성능만족
	CP	5113	0.004470	0.015	성능만족
Y-	IO	2925	0.000224	0.005	성능만족
	LS	3450	0.000339	0.010	성능만족
	CP	4154	0.000630	0.015	성능만족

5.2 비선형동적해석(Time History Analysis)결과

비선형동적해석 시 지진파는 주파수 성분이 서로 다른 고 지반성분이 비교적 안정된 지반에서 관측된 기록파 (ElCentro, Taft, Hachinohe) 3개와 설계스펙트럼에 준용되는 인공지진파 4개를 이용하였으며, 선정된 기록파는 KBC2009기준에 따라 대상건축물의 지반조건(Sc)에 적합하도록 스케일을 조정한 후 해석을 실시하였다.

해석결과, 대상건축물의 층간변형각이 설계기준에서 설정하고 있는 0.01을 크게 하회하는 것으로 검토되어 구조

적으로 충분히 안정적이며, 각 지진파에 의한 댐퍼의 이력 루프도 안정적인 이력거동을 하여 입력되는 지진에너지가 댐퍼를 통해 충분히 소산됨을 확인할 수 있었다.

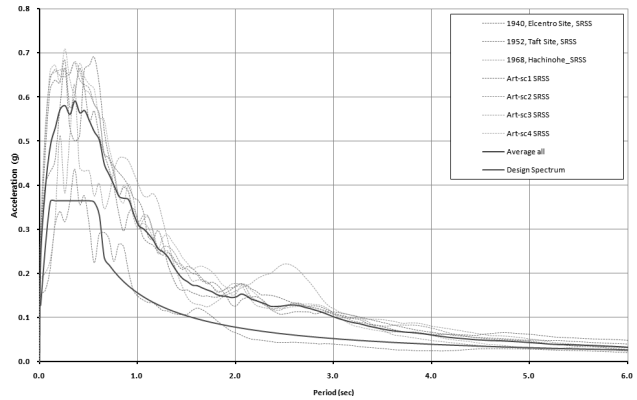


그림 9. 설계응답스펙트럼

표 6. 최대응답 변위(C.P)

구분	EL	Taft	Ha	Art1	Art2	Art3	Art4	Ave.		
X-	1F	X-	0.0028	0.0014	0.0025	0.0026	0.0023	0.0025	0.0024	0.0025
		Y-	0.0036	0.0014	0.0023	0.0027	0.0028	0.0022	0.0032	
	2F	X-	0.0032	0.0015	0.0026	0.0024	0.0027	0.0025	0.0029	0.0026
		Y-	0.0043	0.0015	0.0020	0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	
	3F	X-	0.0018	0.0012	0.0017	0.0015	0.0018	0.0023	0.0019	0.0018
		Y-	0.0025	0.0012	0.0016	0.0020	0.0021	0.0018	0.0016	
Y-	1F	X-	0.0032	0.0010	0.0022	0.0017	0.0021	0.0021	0.0015	0.0018
		Y-	0.0015	0.0011	0.0011	0.0013	0.0020	0.0022	0.0022	
	2F	X-	0.0009	0.0003	0.0007	0.0006	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006
		Y-	0.0006	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007	0.0007	0.0008	
	3F	X-	0.0004	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004
		Y-	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	

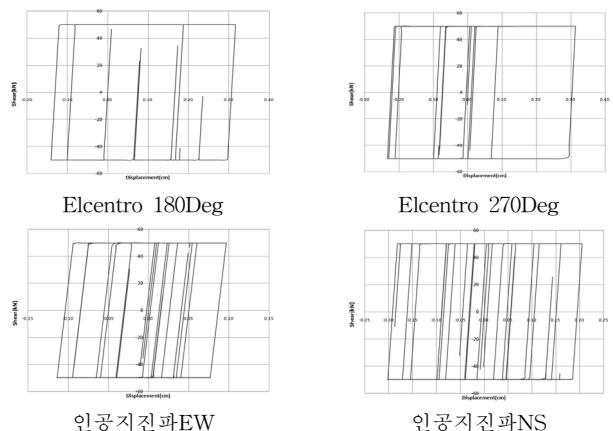


그림 10. 댐퍼의 시간이력결과

6. 결론

이상과 같이 내진기준 도입 이전의 학교건축물은 현 내진설계 기준에서 요구하는 내진성능을 만족하지 못하는

경우가 대부분이다. 우리나라 상당수의 학교건축물은 내진 기준 도입 이전에 지어졌으며, 이럴 경우 학교는 지진발생 시 대피소로서의 역할은 고사하고 건물자체의 붕괴를 걱정해야하는 상황이다.

따라서 학교가 대피소로서 뿐만 아니라 제 기능을 수행해 내기 위해서는 지진에 대한 보강대책이 시급하며, 이에 대한 해결방안도 단순히 재료를 덧대거나 단면을 증가시키는 고정관념에서 벗어나 제진시스템과 같은 선진시스템으로 방향을 전환하여, 내진시스템에서 해결할 수 없는 부재크기나 공간확보, 가변성문제 등에 유연하게 대처하는 것이 바람직하지 않은가 생각해본다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축구조설계기준, 2009
2. ASCE STANDARD, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE 7-05)", 2005
3. International Code Council, "ICC Performance Code for Buildings and Facilities", 2009
4. FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure", 2005