

쓰촨성지진과 면진건축



이 현 호
동양대학교 건축소방행정학과 교수

본고에서는 최근 중국에서 발생한 쓰촨성 지진에 대한 소개 및 이에 대한 내진대책으로서의 면진보강공법을 소개하고자 한다.

1. 쓰촨성 지진 개요

지진 위험도가 경시되었던 중국에, 경각심을 일으킨 지진이 2008년 5월 12일 중국 쓰촨성에서 발생하였고 중국 전역 10여개 성은 물론 베트남과 태국, 대만, 파키스탄에서도 진동이 감지되었다. 지진의 규모는 대만 중정(中正)대 지진연구소에서 발표하길 "원자탄 252개가 한꺼번에 폭발한 것과 맞먹는 충격"이라고 설명했다. 중국 쓰촨성지진의 상세한 내용은 아래와 같다.

- 발생일시 : 2008년 5월 12일 오후 2시 28분
- 발생지역 : 쓰촨성의 성도 청두(成都)에서 북서쪽으로 92km떨어진 원촨(汶川)지역

- 지진규모 : 7.9 (중국지진국 8.0)
- 여진규모 : 총 7000여 차례. 쓰촨성 일대에서 발생한 규모 4이상의 지진 159차례 (이중 규모5와 6이상은 각각 26차례와 4차례)
- 중국내 대지진 유사 사례 : 1976년 당산 대지진 (당시 27만여명 인명피해)

2. 피해 사례

(1) 인명피해(2008년 5월 31일 중국인민 정부 발표)

- 사망자 : 68,977명
- 실종자 : 17,974명
- 부상자 : 367,854명
- 구조 : 매몰자 6천 375명 포함, 36만 159명
- 이재민 : 5백만명

(2) 건물피해

- 건물피해 : 건물 5백 36만채 붕괴, 2천 100만채 파손
- 약 300여개 학교의 건물 파손되거나 붕괴
- 피해 면적 10만km²로 추정



<그림 1> Xingfu 초등학교 피해 상황

(3) 문화재 피해

- 쓰촨성은 중국 삼국시대 유비가 이끌었던 촉나라의 영토로 청두 인근 진샤 박물관과 산싱두이 박물관 외벽과 소장품에 일부 피해가 발생.
- 명나라 시대 12층 석탑 파손(그림 2참조)



(a) 피해전

(b) 지진발생 후

<그림 2> 명나라 12층 석탑 파손

(4) 도로 및 철로

54,000km 이상의 도로가 피해를 입었으며, 강우와 여진으로 인해 그 피해는 심해졌다. 또한 교각, 오버패스 그리고 터널의 심각한 파괴는 또 하나의 심각한 사태를 초래하였다. 약 4,500개 이상의 다리와 90개 이상의 터널이

피해를 입었다.

① 교량 피해 상황

지진이 발생한 지역에 있는 교량은 거의 다 파손된 것으로 밝혀졌다. 그림 3은 백화대교로 총 500m의 교량 본체 중 약 50m가 끊어졌다.

② 도로 피해 상황

지진이 발생한 지역에서는 70%이상의 도로가 파손되었다.



<그림 3> 백화대교의 피해 상황

(5) 쓰촨성지진의 교훈

지난 5월 발생한 중국 쓰촨성(四川省) 지진은 우리에게도 많은 교훈을 준다. 1995년 발생한 일본 고베지진도 그렇지만, 규모 7, 8 이상의 대규모 지진이 우리에게도 발생할 수 있다는 경각심을 주는 것이다. 환태평양을 둘러싼 지진대인 불의 고리에 속해 있는 일본 열도의 지진과, 인도판과 유라시아판의 경계에서 발생한 이번 쓰촨성 지진은 대륙판의 경계에 있지 않은 우리와는 무관하게 보인다. 그러나 1976년 중국 당산(唐山) 지진은 대륙 내부에서 발생한 심발 지진으로 지진에 대하여 안전한 지역은 우리 주변에 없다는 경각심을 주는 것이다.

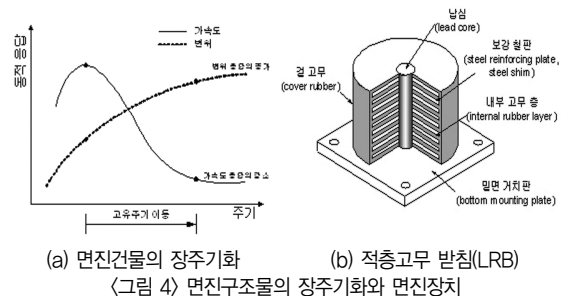
3. 면진보강 개념 및 장점

최근 중국의 지진 피해 사례로부터 한국도 지진 안전국이 아니라는 인식의 확대 및 구조물에 대한 내진설계를 적

절히 할 필요가 있는 것으로 판단된다. 지진 저항기술 중, 면진기술은 새로운 내진설계 기술의 하나로, 건물과 지반 사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 분리 (base isolation)시키는 방법이다. 면진이란 지진의 강한 지진력 대역을 피한다는 개념으로, 영어로는 seismic isolation이라 한다. 즉, 구조물의 고유주기를 장주기화하여 단주기 성분이 강한 입력 지진에너지를 줄이는 개념이다. 이러한 지반분리 기술은 지진지역에서 신축건물은 물론이고, 내진설계가 되지 않은 또는 내진성능이 부족한 기존 건물에 대해서도 효과적으로 적용시킬 수가 있다. 현재 세계 여러 나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 장수명화와 내진성능 향상을 도모하기 위한 실질적인 해결책으로서 받아들여지고 있다. 면진건물은 최근 30여 년 동안 일본, 미국, 뉴질랜드 등을 중심으로 실험과 해석적인 연구를 통한 다양한 면진장치가 개발되었으며, 다양한 건물에의 실무적용을 위한 설계기준 및 지침의 제정 및 개정됨에 기인하여 면진기술이 급속하게 발전하고 있는 추세이다. 지금까지 관측된 지진파를 통계적으로 분석한 결과, 대부분의 관측 지진이 단주기 성분은 강하고, 장주기의 성분은 약한 것으로 평가되었다. 따라서 구조물의 고유주기가 단주기인 경우 입력지진의 주기성분과 공진을 일으켜, 구조물의 큰 피해를 줄 수 있는 가능성이 증가되는 것이다. 면진구조물이란 이러한 입력 지진의 특성을 이용하여 구조물의 고유주기를 지진의 '탁월주기 (卓越週期, predominant period)' 대역과 어긋나게 하여, 지진과 구조물과의 공진을 피하고, 입력 지진에너지가 구조물에 상대적으로 적게 전달되도록 설계하는 것이다. 일반적으로 면진구조물이란 면진장치를 사용하여 구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 하여 지진의 탁월주기 대역을 벗어나도록 설계한 구조물을 일컫는다. 예를 들어 초고층건물이나 교각이 아주 높은 교량의 경우에, 구조물 자체의 고유주기가 충분히 길기 때문에 자동으로 면진구조물의 역할을 하게 되지만, 저층건물이나 교각의 강성이 큰 교량의 경우 지반과의 연결부에 적층고무 등을 삽입하여 구조물의 고유주기를 강제적으로 늘릴 수 있다. 면진 보강

은 그림 4에 나타난 것과 같이, 구조물 하부에 면진장치를 설치하여 구조물의 진동주기를 길게 하는 것이다. 이에 의해 구조물에 작용하는 지진력을 저감시켜 내진성능의 향상을 도모하는 것이다. 면진구조의 지진력 저감 효과는 조건에 따라 다르지만, 일반적으로 면진화에 의해 지진력이 1/3정도 이상으로 저감되므로, 내진 성능은 대개 3배 이상 향상된다고 판단된다.

기초 면진은 구조물 기초에 면진부재를 삽입하여 건물 전체를 면진화 하는 것이다. 따라서 기존 건물의 경우, 건물 내부 거주공간에 필요한 공사가 거의 없으므로 건물전체를 일상처럼 사용하면서 내진보강을 할 수 있는 장점이 있다. 반면 기초 면진은 건물의 주위에 면진이동을 고려한 면진피트를 구축할 필요가 있기 때문에 부지에 면진피트를 구축할 공간이 없는 경우에는 기초 면진의 사용이 곤란할 수 있다. 중간층 면진은 건물 중간층에 면진부재를 삽입함에 따라 면진 층으로부터 상부 층에서의 응답전달력이 감소하고, 면진 층 아래층에서도 면진 층 상부 층이 흔들리지 않게 되는 만큼의 응답전달력이 감소한다. 중간층 면진은 기초 면진과 달리 면진피트가 필요 없으며, 고층부만 면진화 할 수 있는 등의 특징이 있어 기초 면진보다 중간층 면진이 경제적으로 유리할 수 있다. 이러한 중간층 면진은 부지 경계의 클리어런스가 없어 용역을 만들 수 없는 경우와 경사지에 건물이 있는 경우, 저층부가 넓은 터미널역과 같이 궤도가 있는 경우 등에 적용될 수 있다. 다만, 중간층 면진의 경우 엘리베이터 샤프트와 계단 등의 수직 동선이 분단되는 등, 의장계획과 설비계획에 여러 가지 상제가 수반되어야 한다. 표 1에 기초 면진과 중간층 면진을 비교하였다.



(표-1) 면진공법 비교

	기초 면진	중간층 면진
대상	기초	중간층, 최상층
특징	보강공사 중 전 건물 사용 가능	보강공사중 해당 층 사용이 어려움 기존건물의 증축이 가능
필요상세	건물 주변의 면진 피트 필요	계단, 엘리베이터 등과 같은 수직 이동 부위가 절단됨으로 인한 보완 상세 필요
적용대상	공동주택	사무실 빌딩

(표-2) 면진건물 목록

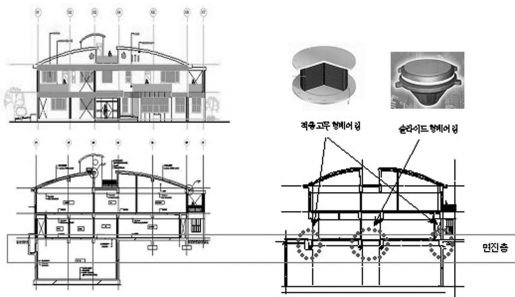
건물명	준공연도	면진주기	면진방법	면진장치
트라움 하우스 (13층)	2002	5.88초	기초면진	LRB, Sliding bearing
서산복지관 (2층)	2005	4.23초	기초면진	RB, Isolation bearing,BSL
Win & P 타워 (6층)	2007	2.83초	1층면진	LRB, RB
김포 고촌 현대아파트 (14층)	2008	3.85초	1층면진	LRB, RB

4. 한국의 면진건축 현황

우리나라는 1988년 내진기준이 제정된 이후, 1997년의 내진설계기준연구 II를 근거로 개정된 건축물하중기준이 2000년에 개정되었다. 그 후 UBC 97 및 IBC 2000을 근거로 한 건축구조설계기준(KBC 2005)이 2005년에 개정되었다. 그러나 아직까진 면진구조에 대한 기준 및 지침이 작성되지 못한 실정이다. 이러한 와중에 우리나라는 다수의 면진건축 시공실적을 보유하고 있는데, 그중 최초는 90년도 말에 준공된 유니슨 기술연구소의 연구동이다. 이 연구동은 면진을 통한 건축물 내진 성능 확보라는 측면보다, 납봉삽입적층고무(Laminated Lead Rubber Bearing, LLRB) 제품의 시범적용 측면에 그 의의가 더 크다고 할 수 있다. 이는 철골골조로 된 3층 건물에 ϕ 350의 LLRB 12개를 설치하여, 면진전 0.6초 주기를 면진후 1.77초 확보한 면진 건물이다. 2002년에는 서울 서초동에 준공된 트라움 하우스(Trum Haus) 및 2005년에 준공된 주공 서산 복지관의 면진을 적용한 건물이 있다. 주요 건설된 면진건물 목록은 표 2와 같다. 이 중 국산 기술로 최초 설계된 서산복지관에 대한 주요한 내용을 아래에 정리하였다.

대한주택공사에서 2005년 준공한 서산 복지관은 고성능 내진기술 및 건물의 장수명화 전략의 일환으로 현장 적용된 중·장기적인 프로젝트의 성과물이다. 복지관은 지상 2층 지하 1층 규모의 철근콘크리트조 건물로, 당초 비면진 건물로 설계되었으나, 프로젝트의 목적에 따라 면진구조로 설계 변경되어 2004년 5월 착공, 2005년 완공되었다. 복지관의 목표 내진성능은 강도 M8.0 이상의 강진에 대해서도 안전한 고성능 면진이 되도록 설계되었다. 일반적으로 복지관의 목표성능과 같은 고성능 면진을 확보하기 위해, 현재 널리 사용되고 있는 적층고무 베어링만을 사용한다는 것은 매우 어렵다. 이는 적층고무 베어링의 경우 전체 면진시스템의 고유주기를 신장시키는데 있어서 어느 정도 능력의 한계가 있기 때문이다. 하지만, 이러한 어려움을 저 마찰력을 지닌 슬라이딩형 면진장치를 혼용함으로써 해결하였으며, 적층고무베어링과 함께 건물 전체 무게의 57%를 지지하는 2종류의 슬라이딩베어링이 채용되었다. 그림 5에 서산 복지관의 면진전·후 단면도를 나타내었다. 면진을 적용하기 위한 복지관 상부구조의 형식은 면진장치의 비용을 최소화하기 위하여 기존 설계에서의 기둥간격을 5.4 m(3.9 m)에서 10.8 m(9.0 m)로 확장하여 2열의 기둥 열을 제거하였다. 상부구조의 주위에는 이격거리(clearance)를 설치하여 대지진 시에도 수평

력이 상부로 전달되지 않도록 계획하였다. 지하층의 구조 형식은 상부 구조의 기둥배치와 동일하게 하되, 비틀림의 영향을 최소화하기 위하여 기존 설계와는 다르게 1열의 기둥을 추가로 배치하였으며, 면진 층에서는 2종류의 면진장치를 사용하였으며, 특히 NRB(Natural Rubber Bearing)의 전단탄성계수를 서로 다르게 조정함으로써 상부 층에서의 비틀림으로 인한 영향을 최소화 하였다. 서산 복지관은 면진으로 인한 고성능 장수명화 주거를 실현 하는데 그 목적이 있으므로 다음과 같은 2단계의면진층



(a) 면진설계 전 (b) 면진설계 후
〈그림 5〉 서산 복지관

목표성능을 설정하였다. 사용성능에 있어서는 설계용 풍하중에 대한 전단력계수(V/W)가 0.01을 넘지 않도록 계획하였으며, 장치 전체의 항복전단력 계수는 0.024, 설계용 입력지진동은 20 Kine(레벨 1, 일본건축학회 면진구조설계지침)을 목표로 설계하였다. 또한, 본 건물의 최대 안전도를 검토할 목적으로 본 건물의 내구년한 중에 일어날 수 있는 최대 설계용지진동으로 40 kine(레벨 2)의 지진동을 설정하여 상기의 제약조건 하에서 이에 대하여 안전한지의 여부를 검토하였다.

사용된 면진장치는 마찰에 의한 감쇠가 있으면서 회전이 가능한 슬라이딩형 면진장치(B-Slider, BSL)와 마찰이 거의 없는 로울러베어링형 면진장치(Isolating Roller Bearing, IRB), 그리고 천연고무를 사용한 적층고무면진장치(Natural Rubber Bearing, NRB)의 3종류이다. NRB는 ϕ 500의 전단탄성계수 4.0 kg/cm² 타입 4개, 및

전단탄성계수 6.0 kg/cm² 타입 3개를 사용하였다. BSL 면진장치는 연직하중을 지지하고 작은 저항력으로 큰 변위를 감당하기 위한 미끄럼판으로 수평진동에 의한 지진 입력 에너지를 탄성변형 에너지로 흡수하는 역할을 한다. 적용된 BSL은 지지하중에 따라 크기를 달리하여 작은 하중에서부터 큰 하중에 이르기까지 대응할 수 있고, 마찰계수를 조절하여($\mu \leq 0.033, 0.080$) 감쇠기능을 발휘할 수 있는 장치로 총 9개를 사용하였다. 미끄러짐 운동을 하는 면진장치로서 BSL과 거의 같은 기능을 하는 장치로서 IRB를 사용하였다. 이 IRB는 로울러베어링 형식의 면진장치로서 트라움 하우스에서 사용된 SBB와 거의 동일한 역할을 한다. 이 장치는 순수 국내 기술에 의해 제작된 장치로, 대상건물의 규모가 적어 1개의 IRB만 시범적으로 적용하였다.

5. 마치며

일본에서는 지진에 대한 건물의 지진대책을 지진에 대한 보험이라고 설명하고 있다. 지진이란 자연 현상은 예측할 수 없고, 단지 과거의 역사 기록 그리고 확률론적인 방법에 의하여 미래의 발생 가능성을 예측할 수 밖에 없는 자연현상이다. 즉 이는 불확실성에 대한 예측인 것이다. 국가나 단체나 개인의 소득이 증가하면, 불확실성에 대한 대비를 시작한다. 지진, 홍수 등과 같은 자연 재해에 대한 대비책을 준비하는 한국도 어느 정도 경제 수준이 올라갔다는 의미를 주는 것이다. 따라서 주변국의 지진재해로부터 우리는 많은 교훈을 배워, 미래에 있을 자연재해에 대한 준비를 하여야 하는 것이다.

본고는 쓰촨성 지진에 대한 피해사례 및 지진에 대한 대책으로서의 면진건축에 대한 기본 개념 및 국내 적용사례를 정리하였다. 주변국의 지진피해로부터 우리는 지진에 대한 철저한 대비를 하여야 하며, 그 대책의 일환으로 면진건축이 신축 및 기존 건물에 널리 적용되기를 기원하면서 본고를 마친다.

참고문헌

1. 이현호외 1인, “한국 면진건축의 적용과 미래”, 한국방재학회 2006년 학술발표대회 논문집, 446-451
2. 일본면진구조협회저, 한국면진제진협회역, 처음배우는 면진 건축, 구미서관, 2004.9
3. 대한주택공사, “면진기법 시험적용 및 성과분석”, 대한주택공사 주택도시연구원, 2005.10
4. 日本建築學會, 免震構造設計指針, 2001
5. ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05), 2005
6. 중국지진국, 쓰촨성 원참대지진 자료, 2008
7. 중국지질조사국 지진연구센터, 쓰촨성 원참대지진 자료, 2008

