

일본 효고현 남부 지진에 의한 철골구조 건축물의 피해

이 명 재

중앙대학교 건설대학 건축공학과 교수

1. 머리말

1995년 1월 17일에 일어난 일본 효고현 남부 지진(兵庫県 南部 地震)은 고베시(神戸市)를 중심으로 상당수의 인명 피해와 함께 건축물 및 토목구조물에 막대한 피해를 일으킨 대참사가 되었다. 이 날은 공교롭게도 1년전 미국 캘리포니아주의 Northridge에서 지진 규모 M6.8의 지진이 일어나 많은 피해를 발생시킨 날과 일치한다. 이번 지진의 규모는 Northridge 지진보다도 더 큰 M7.2이지만 규모면에서는 극단적으로 큰 것은 아니라고 볼 수 있다. 그렇지만 진원이 20km로 매우 얇고, 가까운 곳에 인구밀도가 높은 대도시가 있었기 때문에 그 피해는 더 컸다.

철골구조는 내진성능면에서 다른 구조에 비해서 우수하지만, 구조물과 지진하중은 서로 상대적인 만큼 오래된 철골구조 건축물을 중심으로 여러가지 형태의 지진 피해가 이번에 발생하였다. 문헌 2에 의하면 철골구조 건축물의 피해상황은 988건으로 그 중에 도피가 90건, 대규모 파괴가 332건, 중규모 파괴가 266건, 그리고 소규모 파괴가 300건으로 그 비율은 1:3:3:3 정도이다.

피해형태를 정리해 보면 오래된 철골건물에서 나타나는 여러가지의 파괴현상과 가새(Brace)의

파괴, 기둥·보 접합부의 파괴, 주각부의 파괴, 극후강재의 취성 파괴 등이 있으며 이러한 피해 형태 중에는 용접불량이 관여하고 있다.

지금 일본건축학회에서는 효고현 남부 지진 피해의 조사 속보[1]와 철골구조 건물의 피해조사 보고서[2]를 간행한 후 구조 종별로 약 1년간의 기간을 두고 조사하고 있다. 필자는 짧은 시간이나마 현지에 가서 철골구조에 대한 피해를 관찰할 수 있었다. 방대한 양과 지역에 걸친 피해였기 때문에 필자 혼자서 철골구조 건축물 전체의 피해상황을 기술하기에는 역부족이라 생각된다. 여기서는 주요 구조부분의 피해, 변형능력 부족으로 인한 피해, 저층 및 초고층 아파트의 피해를 중심으로 기술하기로 한다. 그리고 변형능력 부족으로 인한 피해 등 본 내용의 일부는 문헌 3의 내용을 발췌한 것임을 밝혀둔다.

2. 주요 구조부분의 피해

주요 구조부분의 지진에 의한 손상이 건축구조물의 도피에 이어지는 원인이 되는데 여기서는 손상 사례를 상세히 소개하기보다는 지면 제한관계로 대표적인 형태를 살펴보기로 한다. 철골건축물의 주요 구조부분으로는 기둥·보 접합부, 보, 기둥, 가새(brace), 주각 등으로 나누어

질 수 있다. 이 중에서도 이번 지진에 민감하였던 것은 응력 집중이 가장 큰 기둥-보 접합부라고 할 수 있다. 일본에서는 기둥재로서 H형강뿐만 아니라 강관을 많이 사용하고 있는데 양자를 사용한 기둥-보 접합부에서 모두 피해가 발생하였다. 강관기둥-H형강보의 접합부 손상은 보 단부에 현저한 소성변형을 동반한 균열, 파단이 생긴 것과 부재 단부는 전혀 소성변형하지 않거나 약간 소성변형한 정도로 접합부의 용접부분이 파단한 것으로 대별되어진다. 전자의 경우는 보 플랜지가 다수 파단되었어도 잔류층변형이 비교적 적고 내외장재의 손상이 외견상 경미한 것이 많고, 후자의 경우는 그 대부분이 용접치수가 작은 모살용접을 하고 있다는 점이다.

사진 1은 7층 건물의 순수 라멘구조로 각형강관을 기둥으로 사용한 관통 다이아프램(diaphragm)을 사용한 것인데 보의 하플랜지의 국부좌굴과 함께 다이아프램측 열영향부가 파단되어진 상태이다. 기둥재로서 H형강을 사용한 기둥-보 접합부의 손상은 비교적 낮은 건축물에 많았고, 접합부에 수평스티프너를 사용하지 않은 것, 보의 웨브만을 볼트 접합시킨 것 등 여러 가지 형태들이 피해를 입었다. 어느 것이나 기둥과 보의 단부에 현저하게 소성화된 흔적이 보이

지 않고 기둥과 보 단부의 플랜지가 국부좌굴하여 접합부에 손상이 미치지 않은 것, 접합부 패널(panel)에 현저한 전단변형이 생긴 것 등이 관찰되어졌다. 사진 2는 3층 건물로 X형 가새(brace)가 있는 라멘 골조인데 1층이 도괴되고 2, 3층도 잔류층변형이 매우 크게 나타나고 있다. 1층 주두가 약축 방향으로 크게 휨변형을 일으켰다.

기둥이 손상을 입는 경우는 주두와 주각에서의 소성화, 부재의 휨변형, 국부좌굴, 이음부의 파단 등이다. 특히 H형 단면기둥의 건물에서 기둥의 약축방향으로의 휨변형과 기둥 단부의 국부좌굴이 많이 관찰되었다.

사진 3은 5층 건물로서 H형강 기둥-H형강 보로 되어 있고 노출 주각형식으로 되어 있는데 1층의 주두, 주각에서 기둥의 플랜지와 웨브에 국부좌굴이 생긴 것으로 사진은 주두 부분의 국부좌굴을 나타내고 있다. 가새 부재는 좌굴을 일으키는 경우와 접합부의 파단 등이 대표적인 피해 사례로 이것은 어떤 지진피해에 있어서도 공



사진 1



사진 2

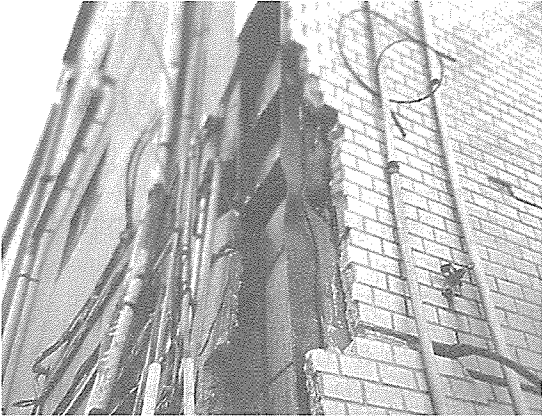


사진 3

통적인 사례이다. 그 이유는 지진력이라는 수평 하중에 대해서 가새의 역할이 매우 크고 그만큼 가새에 전달되는 응력이 큰 것임을 말해주는 것이다. 사진 4는 2층 건물의 X형 가새가 H형강 기둥과 H형강 보 사이에 있는 경우이다. 이 건물은 1층의 잔류층변형이 최대 1/13 정도로 가새가 면의 약축 휨 방향으로 좌굴하고 부재 단부의 모살용접부가 파단되어져 있다. 이 건물은 주각부에서의 콘크리트 균열도 보이고 있으며 베이스 플레이트가 떠올라진 것도 관찰되었다. 주각의 피해로서는 앵커 볼트의 파단이 많이 보였다. 이러한 건물에는 통상 1층에 현저한 잔류 변형이 생겼지만 피해 중에는 기둥이 수직인 상

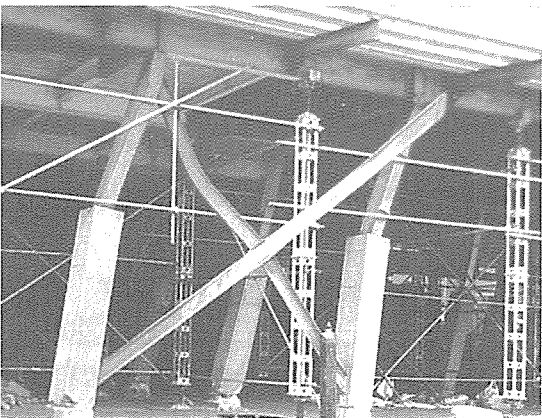


사진 4

태 그대로 건물이 수평방향으로 수십 센티미터 이동된 것도 있었다. 사진 5는 3층 건물로서 순수 라멘구조의 노출형 주각이 앵커볼트 4개가 모두 파단되어 베이스 플레이트가 약 20cm 이동한 경우이다. 또 다른 앵커볼트의 피해로서는 이와 같이 완전히 절단되지 않고 수 센티미터씩 늘어나는 경우를 들 수 있다. 이상으로 주요 구조부분이 피해 중에서 대표적인 것을 예로 들어 알아보았다. 이러한 주요 구조부분의 피해가 종합적으로 건물에 손상을 입히게 되고 그 정도의 차이에 따라서 심할 때는 건물이 도괴되고 인명피해가 커지게 되는 것이므로 구조설계자, 시공자의 책임은 막중한 것임을 다시 한번 느끼게 한다.

3. 변형능력 부족으로 인한 피해

건축물이 내진성을 확보하기 위해서는 부재 및 골조의 변형능력이 요구되어진다. 변형능력이란 부재 및 골조가 일정한 하중 아래에서도 지속적으로 변형을 기대할 수 있어서 구조의 안전성을 기대할 수 있는 능력을 말한다. 이번에는 이러한 변형능력이 부족한 것으로 보이는 사례를 소개한다.

사진 6은 6층 철골조 건물이 3층 부분에서 지진 에너지에 의한 손상 집중을 받아서 층간 변위



사진 5

각이 심하게 생겨서 일어난 피해이다. 즉 다른 층에 비해서 3층 기둥 부재들이 지진 에너지를 흡수할 수 있는 능력이 상대적으로 부족한 경우이다. 지진 에너지가 3층에 집중되어서 3층 부분만이 대파되고 다른 층에서는 눈에 띄는 커다란 변형이 외관적으로는 관찰되지 않았다. 이 건물은 천만다행으로 사상자를 낼 정도의 인명피해는 없었을 것으로 추정되는데 사실 이 사진에서 보면 이 건물은 4층 이상의 부분이 좌측 건물에 기대고 있는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 이 건물은 좌측 건물이 없었다면 3층의 매우 큰 층간변위와 4층 이상 부분의 하중에 의한 p-Δ 효과에 의해서 건물은 완전히 붕괴되고 상당한 인명피해를 낼 뻔한 경우이다. 사진 7은 7층 철골조인데 사진 6의 경우와 동일하게 층간 변위가 크게 생기고 그에 따른 p-Δ 효과가 기둥부재에서 일어나 3, 4층에서 상당한 파괴가 생긴 경우이다. 이 경우는 건물의 2면이 도로에 위치하고 있어서 사진 6과 같이 이웃하는 건물에 의지하여 더 이상의 p-Δ 효과가 증폭되지 않도록 하

는 변형억제수단이 없어서 더욱 치명적인 손상을 입게 되고 인명피해도 매우 컸을 것으로 판단된다. 이러한 경우 1개 또는 2개층의 전체가 내려앉는 붕괴형태가 예상되어지는데 이번 효고현 남부 지진의 경우에는 철근 콘크리트 구조의 건물에서 많이 나타났다. 이런 붕괴형태를 pancake 형태의 붕괴라고 부르는데 사진 7의 경우도 완전한 형태는 아니지만 그러한 형태를 나타내고 있다. 이러한 pancake 형태의 붕괴는 지금까지 일본의 지진피해에서 거의 볼 수 없었던 것으로 이번 효고현 남부 지진의 특징이라고 할 수 있다. 사진 8은 가새와 보 접합부의 파단에 의해서 매우 큰 소성변형을 일으킨 경우이다. 골조 자체가 크게 변형되었기 때문에 모르타 등의 외장재가 떨어져 나가고 ALC 한 외벽이 손상을 입는 사례이기도 하다. 골조 자체에는 그다지 큰 잔류 변형이 없는 경우에도 외장재가 전부 탈락해버린 경우도 많이 관찰되었다.

4. 저층 및 초고층 아파트의 피해

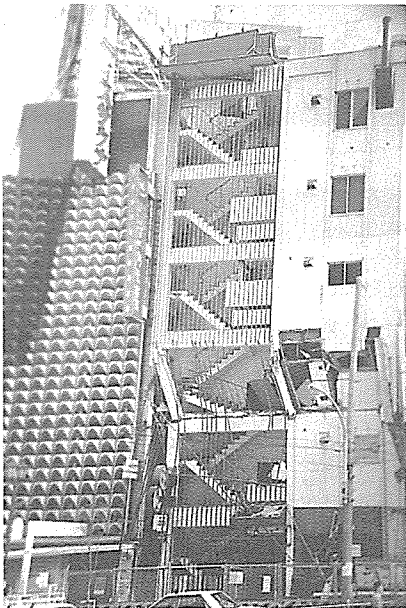


사진 6



사진 7

해외정보 1

일본에서는 저층 아파트를 철골구조로 할 경우에는 두께 6mm 이하의 경량 철골구조로 많이 하고 있다. 사진 9는 니시노미야(西宮) 부근의 5층 아파트의 피해상황이다. 이 아파트 구조는 1층이 RC구조로서 주차장으로 이용되고 있고 2층부터는 철골조로 되어 있다. 이 경우의 피해 상황도 구조도면과 함께 면밀한 검토 후에 판단되어야만 할 것이지만, 결과적으로는 1층과 2층의 이질구조에 결합되어져 있는 주각부에서 베이스 플레이트가 왜소하여 앵커볼트가 한계능력을 벗어나 파괴됨으로써 2층이 거의 완전히 내려앉은 막대한 피해를 입게 되었다. 필자가 현지조사를 갔을 때 건물 해체 작업이 진행되고 있어서 피해 당시보다도 철골조의 상태를 잘 파악할 수 있었다. 1층의 RC조는 비교적 둔탁한 모습으로 거의 피해를 입지 않았다고 말할 수 있을 정도였다. 또한 철골조 역시 골조 자체는 시공상태, 유지 보존상태가 그다지 열악하지 않았다고 판단되었다. 즉 이러한 경우도 건물 골조가 아무리 탁월한 내진성을 가지고 있다고 하여도 골조를 구성하고 있는 접합부 요소가 요구되는 중국

내력 및 변형능력을 가지고 있지 못할 때에는 내진설계가 성공적으로 되지 못한다는 것을 일깨워 주는 예라고 하겠다. 철골기둥과 RC기둥과를 연결시키는 앵커볼트의 상황을 사진 10에서 알 수 있다. 내진 설계에서는 변형능력이 상당히 강조되는 것도 사실이지만 그 이전에 내력적으로 우선 저항할 수 있어야 한다는 기본적인 사항이 만족되어야만 한다. 이 피해는 주각이 설계상의 내력부족, 변형능력 부족 그리고 시공불량의 어느 것에 해당되는지 판단하기 매우 어려운 경우이다. 그렇지만 아무래도 앵커볼트 직경의 왜소함과 베이스 플레이트의 왜소함 등이 관찰될 수 있었다.



사진 8

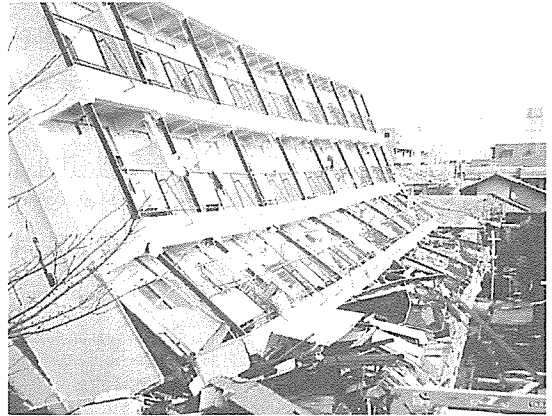


사진 9



사진 10



사진 11

이번 효고현 남부 지진 피해 중에서 또 하나의 괄목할 만한 철골구조의 피해로 초고층 아파트를 들 수 있다. 고층주택단지인 아시아하마(芦屋浜)seaside town(사진 11)은 1979년에 준공된 29층까지 있는 극후강재로 된 철골구조의 아파트이다. 50cm×50cm의 기둥이 용접조립 각형강관으로 최대 판 두께는 55mm로서 강접합 트러스 기둥과 조립보로 구성되어진 이른바 super structure로 되어 있는데 이번에 심각한 피해가 발생하였다.

사진 12는 그 대표적인 예로서 기둥 부재가 완전한 수평방향으로 절단되어 있다. 그리고 그 영향이 트러스 기둥의 웨브재까지 연성파괴가 전파되어진 상황이다. 이와 같이 수평방향의 절단이 1층에서 13층까지의 범위에서 골고루 나타났다.

이러한 현상은 29층 아파트 트러스 기둥의 현재에서는 나타나지 않고 또한 가장 낮은 층수인 14층 아파트에서는 그 현상이 비교적 적게 나타났다. 이 아파트는 현재 절단되고 파괴된 부위를 용접하고 리브(rib) 등으로 보강, 보수하여 사용되고 있다.

5. 맺는 말

현재 일본의 내진설계는 1981년에 새로 개정

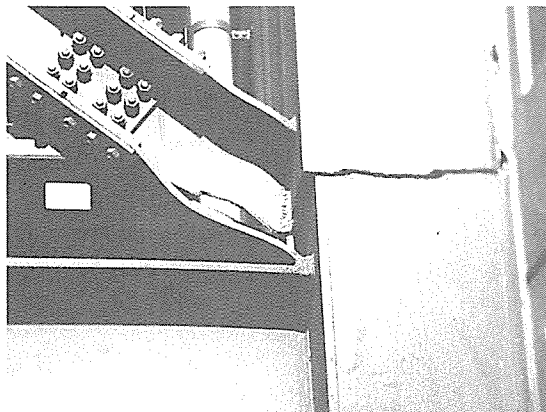


사진 12

되어 세계에서 가장 엄격한 기준 중의 하나이지만, 이번에 피해를 입은 것들의 대부분이 그 이전에 준공되어진 건물들이라고 볼 수 있다. 피해 사례들을 소개하면서 우리가 분명히 짚고 넘어가야 할 것은 설계하중 이상의 지진 하중이 왔을 때는 불가항력이라고 하더라도 구조설계만으로 철골 건축물의 안전성을 확보할 수 없다는 점이다. 이번 효고현 남부 지진은 합리적인 구조설계와 철저한 현장시공관리가 종합적으로 이루어질 때 안전성이 확보될 수 있음을 새삼 일깨워 주는 좋은 사례가 되었다고 하겠다.

참고문헌

1. 日本建築學會, 1995年 兵庫県南部地震 災害調査速報, 1995年 3月
2. 日本建築學會近畿支部鐵骨構造部會, 1995年 兵庫県南部地震鐵骨建造物被害調査報告書, 1995年 5月
3. 李明宰, 효고현 남부 지진피해와 철골구조 건축물의 변형능력, 강구조학회지 7권 2호, 1995년 6월
4. Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Incede Newsletter of International Center for Disaster-Mitigation Engineering, January, 1995
5. 日經アーキテクチャ, 阪神大震災の教訓, 日經BP社, 1995年 3月