

국내 콘크리트구조물의 지진대비책

과거 지진에 대한 철근 콘크리트 구조물의 일반적 거동 고찰

Observation on the Behavior of Reinforced Concrete Buildings During Earthquake



이 한 선*

많은 피해를 낸 1995년 1월 일본 고베 효고현 남부 지진을 계기로 하여 세계적으로 과거 발생한 주요지진들에 대한 철근콘크리트 구조물의 거동에 관하여 요약하고자 한다. 구조 개념, 설계 및 상세 등과 관련하여 바람직하지 않은 경우 뿐만 아니라 좋았던 구조 거동들에 대하여 서술하며 이 경험으로부터 구조 기술자들이 배워야 할 교훈들을 제시하고자 한다.

1. 서 언

과거 발생한 큰 지진에 대한 구조물의 거동 관찰은 내진 구조시스템의 적절성 여부에 대하여 건설 기술자들을 교육시키는 매우 중요한 수단이 될 수 있다. 지진이 자주 발생하며 많은 사람이 거주하고 있는 지역에서는 구조 설계 방법이 계속적으

로 발전하여 왔으며 기술적으로 고려된 건물의 경우에 있어서는 대체로 양호한 거동을 나타내고 있다. 구조 기술자들은 최근 발생한 지진에 대한 체계적인 거동 관찰에 의한 데이터 베이스로부터 교훈을 얻을 수 있을 것이다. 본 기사의 목적은 철근 콘크리트 구조물의 설계에 이러한 자료를 적용함에 있어서 체계적으로 중요한 사항에 따라 재조명하고자 하는 것이다.

일반적으로 강진에 의한 손상 가능성은 널리 인식되고 있으며 대부분의 설계기준도 이를 반영하고 있다. 즉, 일반 내진 설계 철학은, 빈도가 극히 희박한 큰 지진에 대해 구조적인 손상은 받아 들이되 어떠한 경우에도 붕괴가 발생하여서는 안된다는 것이다.⁽¹⁾ 따라서 어떤 기준에 의해 설계된 구조물도 강진에 대해서 구조적인 손상을 받는다는 것에는 별로 놀라울 것이 없다. 그러나, 붕괴의 가능성을 암시하는 거동들에 대해서는 특별히 주의할 필요가 있을 것이다.

* 정희원, 영남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

2. 구조 개념에 대한 고찰

하중 저항 구조시스템의 적절한 선택은 구조물의 양호한 거동에 필수적임은 거듭 밝혀진 바가 있다. 해석, 설계, 상세 및 시공상 약간의 잘못이 있더라도, 구조시스템 자체가 적절히 선택되었을 경우, 이를 어느 정도 용인해줄 수 있다. 그러나 반대로 아무리 해석과 상세 등에 특별한 배려를 기울인다고 할지라도 조악한 구조시스템의 거동을 크게 개선시킬 수는 없다. 이러한 관점은 특히 하중의 크기와 방향 등이 매우 불확실한 내진 설계에 있어서 무엇보다도 중요한 사항이 아닐 수 없다. 단순하고, 정형적이며 간결한 평면으로서 연속성과 여유성을 가진 횡력 저항 시스템을 보유한 구조물은 양호한 거동 양상을 보여주어 가장 바람직한 것이다. 해석상 불확실성을 내포하거나 하중 전달 경로에 여유성을 결여한 경우의 복잡한 구조시스템은 예기치 않은 바람직하지 못한 거동을 나타낼 수 있다.

2.1 연속성(continuity)

어떠한 횡력 저항 시스템에 있어서도 기본적으로 기초에 이르기까지의 연속적인 하중 경로가 제공되어야 한다. 각 부재에 작용하는 가속도에 의해 발생하는 관성력은 그 부재로부터 바닥 격막에, 또 횡력 저항 시스템의 수직 부재에, 그리고 기초 및 지반에 전달되어야 한다. 시스템에 있어서 각 부재에 적절한 강도와 인성(toughness)을 제공하지 못하거나 개별적인 부재를 결속시키지 못할 경우 그 시스템 전체의 붕괴를 초래할 수 있다.

지진에 대한 가장 오래된 교훈 중 하나는 구조재와 비구조재 공히 전체 구조시스템에 적절하게 연결되어 있어야 한다는 것이다⁽⁹⁾. 외장재^(10,11,12), 파라펫^(7,13,14) 또는 건물 내부의 여러 종류의 비구조 부재^(9,16)가 떨어져 나가는 것을 볼 수 있었다. 따라서 이러한 현상은 설계 기준^(1,17)에서 건물의 개별요소가 구조체에 적절히 연결되어야 한다는 것을 요구하게 하고 있다. 개별 부재에 작용하는 관성력은 수평 바닥 격막에 의해 횡하중 저항

시스템의 수직 부재에 전달되어야 한다. 적절한 스트럿, 타이 그리고 경계 요소를 갖춘 콘크리트 격막은 이러한 하중을 전달하기에 충분한 철근으로 보강되어야 할 것이다. 횡력 저항 시스템의 수직 부재의 불연속성에 의한 붕괴는 가장 두드러지면서도 결과가 엄청난 현상 중의 하나이다. 이러한 불연속성의 보편적인 형태 중의 하나는 상부층에 있던 전단벽이 하부 층에서 단절되는 것이다.

가장 잘 알려진 예로서 1972년 San Fernando지진 시 하부 2개 층의 과도한 변형에 의해 거의 붕괴에 도달하기까지한 Olive View병원 (그림 1)을 예로 들 수 있다^(6,18).

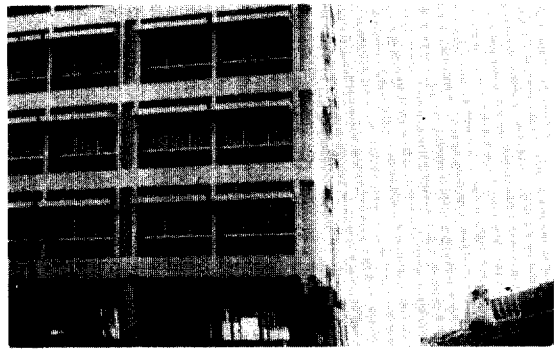


그림 1 1972년 San Fernando지진 후의 Olive View병원

미국 캘리포니아주의 또 하나의 다른 예는 1979년 EI Centro지진 시 거의 붕괴하게 된 Imperial County Service 빌딩이다^(3,4,19). 이 경우에는, 그

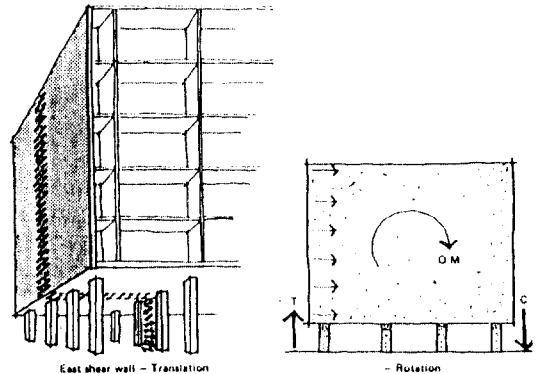


그림 2 Imperial County Service빌딩의 하중전달경로

림 2에서 보는 바와 같이 상부층 외벽에 모여진 횡력이 바닥 격막에 의한 전단으로 일층 내벽으로 전달되고 있다. 따라서 외벽의 단절된 이 부분에서 큰 전도 모멘트가 발생하게 되며 이것은 이 벽체를 지지하고 있는 기둥에 의해 전달되어야 하므로 기둥에 심각한 손상을 초래하게 되었다. 전단벽의 불연속성에 의한 파괴는 여러 다른 예에서 찾아 볼 수 있다^(20,21).

2.2 정형성(regularity)

건물의 수직 혹은 수평면에서 강성, 강도 혹은 질량의 갑작스러운 변화는 일정한 모양의 구조물에 예상되는 것과는 다른 횡력 및 변형 분포를 초래할 수 있다. 이 비정형성에 의한 영향을 설계에서 어느정도 반영할 수 있겠으나, 이러한 비정형성의 영향과 관련한 불확실성을 감안할 때 가능하면 피하는 것이 바람직하다. 인근층에서 갑자기 강성과 강도가 변화하는 것을 자주 볼 수 있다. 이러한 변화는 옥상의 펜트하우스 등에 의한 평면의 축소(setback), 불연속적인 전단벽과 같이 높이에 따른 구조 시스템의 변화, 층고의 변화, 재료의 변화 및 예기치 않은 비구조 요소의 간여 등에 의해 발생할 수 있다. 이러한 불연속성에 대한 공통적인 문제는 비탄성 변형이 이러한 불연속성을 보유한 부분에 집중되려는 경향이 있다는 것이다. 대다수의 지진 피해 보고서^(4,7,14,18,21,22,23,24,25,26)에서 불연속성이 심각한 손상이나 건물의 붕괴를 초래한 것으로 밝혀지고 있다.

수직방향의 불연속성에 대한 가장 보편적인 예는 바로 비구조 요소의 영향에 의해 발생하는 것이다. 이것은 특히 비교적 약한 횡 강성을 가진 구조물에 심각한 문제가 될 수 있는데 그 이유는 이 비구조 요소가 전체 강성의 많은 부분을 점유할 수 있기 때문이다. 이 붕괴의 대표적인 예는 채움 조적벽을 가진 골조시스템이다. 적절히만 설계된다면 채움 조적벽이 그의 강성 및 강도 증진 효과에 의해 골조전체의 거동을 개선할 수 있을 것이다⁽²⁷⁾. 그러나, 이 조적벽이 어떤 한 층에서 생략되어질 경우 그 층에 약층(soft story)을 초래하게 된다^(7,9,20,21,22). 구조물 전체에 걸쳐서 연속적으로

또 대칭적으로 조적 채움벽이 설치된다고 하더라도 1개 층 혹은 그 이상에서 채움 벽이 파괴될 경우 또한 약층을 형성할 수 있다^(7,13,22,28).

채움 조적벽이 층높이의 일부분에 그칠 경우도 많이 있다. 이러한 형태의 구조물에서는 채움 조적벽이 기둥 사이에서 바닥으로부터 창문하부까지 이르게 되고, 그 층의 상부에서 상대적으로 짧은 부분의 기둥이 노출되게 된다. 이렇게 짧아진 기둥에 휨 항복을 초래하기 위해 요구되는 전단력은 원래 높이의 기둥이 휨 항복을 할 경우 발생하는 전단력보다 훨씬 크다. 따라서 채움 조적벽의 이러한 영향을 사전에 고려하지 않았을 경우 휨 항복이 일어나기 이전에 전단 파괴가 발생하게 될 것이다. 또한 기둥에 횡철근이 설치되지 않을 경우, 기둥 또는 건물 전체의 완전한 붕괴에 도달할 수 있다. 이러한 형태의 파괴는 지진에 대한 구조물의 손상 및 붕괴의 대표적인 예라고 할 수 있다 (그림 3).^(7,14,21,22,26,29)

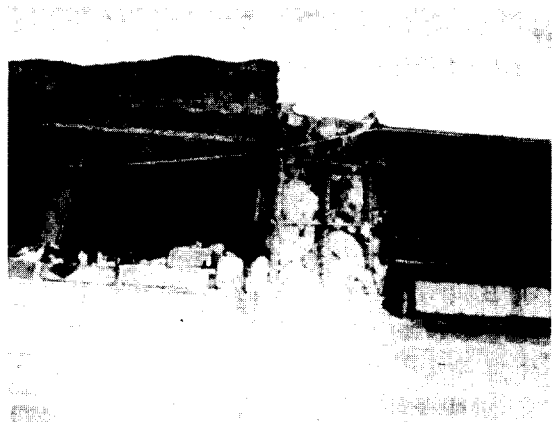


그림 3 1985년 멕시코지진에 의한 기둥상부의 손상

질량, 강성 및 강도의 평면내 비정형성은 심각한 비틀림 거동을 유발할 수 있다. 현재로서는 비탄성 비틀림 거동을 탄성해석으로 예측할 수는 없으며 비틀림을 고려한 전체 구조 시스템의 비탄성 해석 기술은 아직도 검증되지 않은 상태에 있다. 해석상의 불확실성과 어려움을 고려할 때 구조물이 대칭성을 가짐으로써 비틀림 저항이 크게 하고 평면을 간결하게 하도록 설계하는 것이 가장 바람직한 방향으로 여겨진다. L과 U형의 평면을 가짐

으로써 비틀림 효과에 의해 건물이 붕괴된 예가 있으며⁽²¹⁾, 횡력 저항 시스템의 배치에서의 비대칭적 배치는 많은 구조적인 파괴의 원인으로 분석되고 있다^(22,23). 대표적인 예로서 길모퉁이에 위치한 건물에서 가로변에 면한 벽면은 창문으로 개방되어 있는 반면 그렇지 않은 벽면은 채움 조적벽으로 되어 있는 것이 보통인데, 이러한 건물의 경우가 비틀림 파괴의 많은 부분을 차지하고 있다. 채움 조적벽의 비대칭적인 파괴에 의한 비틀림도 건물 붕괴에 기여한 것으로 나타나고 있다. 1985년 멕시코시티 지진에서 이러한 비틀림 거동이 건물 파괴의 가장 두드러진 원인 중의 하나였던 것으로 판명되고 있다⁽²²⁾.

2.3 강성(stiffness)

대부분의 설계기준에서 횡 변위의 조절을 내진 설계의 주요사항으로 다루고 있다. 지나친 횡변위는 과도한 변형과 구조 및 비구조 요소의 손상을 초래할 수 있다. 지진에 견디어 낸 구조물의 성공 측도는 보수 비용과 관련 지을 수 있으므로 손상의 제어는 필수적이라고 할 수 있다. 비구조 요소는 건물의 전체 가치의 큰 부분을 차지하고 있고 비구조요소의 추락은 거주자의 생명에 위협을 줄 수 있으므로 비구조요소의 손상을 제어하는 것은 중요하다.

구조시스템 중에서 비연성(non-ductile) 혹은 중간 정도의 연성(ductile)을 가진 요소가 과도한 변형에 의해 손상을 받지 않게 하기 위해서도 횡변위의 조절이 필요하다. 구조벽에 의한 횡변위의 제어는 보다 취약하고 낮은 연성을 보유한 골조에 대해 손상을 저감시키는 확실한 수단이 될 수 있을 것이다. 예로서 칠레에서는 횡변위 제어 고층 RC구조물에 강성이 크고 연속적인 구조벽 시스템을 횡변위 제어를 위해 사용하였다. 이 나라에서의 관습적인 상제는 미국의 지진지역에서 사용되는 연성 상제를 따르지 않고 ACI 318-89의 비 지진 지역의 상제를 따르고 있다⁽³⁵⁾. 그러나 1985년 칠레 지진에서 이러한 건물들이 매우 양호한 거동을 나타낸 사실은 구조벽에 의한 횡변위의 제어가 상대적으로 비연성적인 골조 요소를 보호할 수 있

었던 것을 증명해 주고 있다⁽⁸⁾. 마찬가지로 Managua 지진에 대해 멕시코의 Banco de America와 Banco Central 건물의 상대적인 거동이(전단벽대 골조 건물) 이러한 면에서 자주 인용되고 있다⁽¹⁴⁾.

횡변위의 제어는 구조시스템의 수직 안정성을 유지하는 데에도 중요하다. 구조시스템이 지나치게 강성이 낮고 특히 질량이 클 경우 P- δ 효과에 의해 붕괴가 발생할 수 있다. 1985년 멕시코 지진에서 플랫폼래브 구조물에 있어서 그의 상대적으로 낮은 횡강성에 의해 이 문제가 두드러졌던 것을 알 수 있다.⁽²²⁾

2.4 인접 건물에 대한 근접성

건물이 상호 인접해 건설되었을 경우, 건물 사이의 충돌에 의한 손상이 일어날 수 있다^(9,11,14,22,28,30,31). 이러한 충돌은 다른 높이의 건물에 대해 비정형적인 거동을 초래하게 되어 한 건물의 바닥이 다른 건물의 기둥과 충돌하므로써 기둥에 손상을 주거나 급기야는 전체 건물의 붕괴에 다다를 수 있다. 이러한 상호 충돌에 의한 손상은 횡변위 제어, 건물의 상호 격리, 또는 마지막 수단으로서 인접 건물의 바닥 높이를 일치하게 함으로써 기둥이 바닥 슬래브와 충돌하지 않게 하는 것이다.

2.5 질량

과도한 질량은 횡 관성력의 불필요한 증가를 초래할 수 있으며 수직하중저항요소의 연성(ductility)을 감소시키고 P- δ 효과에 의한 붕괴의 경향을 증가시킨다^(6,21,22). 이러한 이유에 의해서 가능하면 경량의 구조 시스템을 이루도록 노력하여야 한다. 이것은 반드시 경량 콘크리트를 사용하여야 한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 그러나, 건축적인 용도의 콘크리트나 구조 슬래브 위에 조경용으로 흙을 사용할 경우 구조적으로 이득이 없이 불필요하게 질량만 증가시키게 된다. 1985년 멕시코시티 지진에서 과도한 수직 하중에 의해 많은 건물이 붕괴한 것으로 판명되었다⁽²²⁾.

2.6 여유성(redundancy)

여러 횡하중 저항 요소나 부시스템을 혼용하는 구조 시스템은 지진에 대해 양호한 거동을 나타내는 것으로 관찰되었다^(2,9,23). 구조시스템에 있어서 여유성은 주요 요소의 파괴시 내부 힘의 재분배가 가능하도록 한다. 만약 이러한 재분배의 능력이 없다면 개별 부재나 접합부의 파괴가 전체 구조물의 붕괴를 초래할 수 있을 것이다. 이 여유성은 여러 가지 방법으로 주어질 수 있다.: 이중 구조, 한 골조에 항복이 발생한 이후에 골조 사이에 힘의 재분배가 가능하도록 하는 상호 긴결된 골조시스템, 그리고 다수의 전단벽 등이다. 적절한 강도, 강성 및 연속성이 함께 조합될 경우 여유성은 연성상세에 대한 과도한 필요성을 완화하여 준다. 이러한 관점은 철재의 건물에 사용된 여유성을 보유한 전단벽 시스템과 관련하여 이미 언급된 바 있다⁽²⁾. 1988년 아르메니아 지진에서 인근 프리캐스트 골조 건물의 대체적으로 나쁜 거동 양상과 내력벽 건물의 성공적인 거동을 비교함으로써 여유성의 장점을 확실히 알 수 있다(그림. 4)⁽¹⁵⁾

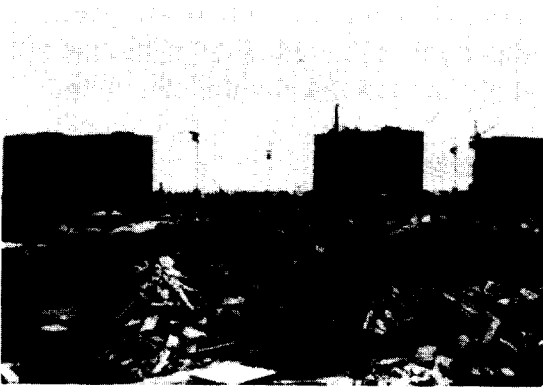


그림 4 1988년 아르메니아지진에서 붕괴된 P, C골조 건물 및 이와 대조적으로 견디어낸 내력벽 건물

2.7 과거 지진에 의한 손상

압축, 전단 및 정착에 의해 영향을 받는 조건하의 실험을 통해 철근 콘크리트 구조물은 주기 반복이 거듭됨에 따라 이력 거동에서 성능저하가 발

생되는 것을 자주 발견할 수 있다. 이러한 성능 저하는 후속 지진을 경험하게 되는 건물에서 또 다른 손상을 받게 되는 원인으로 여겨지고 있다^(2,21,22,33). 많은 경우, 지진을 당한 이후, 보수를 하지 않았거나 오직 외관상의 형식적인 보수만 행하였거나, 혹은 후속 지진에서 더욱 심한 손상을 유도하는 방식으로 보수되었을 수 있다. 따라서 손상상태의 상세한 평가와 적절한 보수대책의 수립이 중요하다.

3. 구조 부재 크기 결정 및 상세에 대한 고찰

구조물의 내진 설계는 내부 힘의 재분배와 하중의 저감 및 지진 에너지의 소산을 가능하게 하기 위해 구조 요소의 연성(ductility)에 주로 의존하고 있다. 따라서 비탄성 거동이 적절한 위치에서 발생하도록 부재 크기를 결정하여야 할 뿐만 아니라, 항복이 예상되는 이러한 위치에서 충분한 연성(ductility)을 보장할 수 있도록 상세가 설계되어야 한다.

3.1 비탄성 변형의 위치

비탄성 변형을 가장 잘 지탱할 수 있는 위치에 항복이 일어나도록 구조물이 설계되어야 한다. 철근콘크리트 골조 건물에 있어서는, 높은 축하중하에서 연성 거동을 보장하기 위한 상세의 어려움과 기둥의 항복은 층 횡 메커니즘(story sway mech-



그림 5 기둥의 파괴에 의한 건물 붕괴

anism)과 붕괴를 초래할 수 있다는 가능성 때문에, 기둥에서의 항복을 최소화하도록 노력하여야 한다. 기둥의 취약성과 제한된 연성에 의해 층이나 전체 건물이 붕괴된 예(그림 5)가 많은 지진피해에서 발견될 수 있다^(7,14,20,21,22,25,26).

보에서 보다 기둥에서 항복이 일어나는 문제는 중력하중의 영향이 부재 크기와 강도를 지배하는 구조물에서, 특히 보의 휨강성이 기둥의 휨강성을 훨씬 능가하는 구조물에서, 두드러지게 나타나고 있다. 이러한 상황은 보통 긴 스패의 보를 가진 건물이나 설계 지진 하중이 상대적으로 작은 건물의 상층 부분에서 일어날 수 있다. 그림 6에서와 같이 후자의 상황은 골조의 상층에서의 파괴에 대한 주요 원인의 하나라고 보여진다^(20,22,26).



그림 6 Charaima 건물에서의 상부층 붕괴

기둥의 항복에 의한 파괴는 건물 전체의 도괴에 이를 수 있으므로, 기둥의 강도가 최소한 보의 강도보다 커야 한다는 약보-강기둥 설계 철학에 이르게 된다. 이 설계 철학에 의하면 기둥은 건물의

전 높이에 걸쳐서 강성이 크고 항복이 일어나지 않는 뼈대를 이루는 한편 비탄성 거동은 주로 이들 기둥을 연결하는 보에서 발생하도록 하는 것이다. 이러한 구조물에서도 1층 기둥의 항복이 고려되어야 하며 적절한 상세가 주어져야 할 것이다

(34). 건축적인 요구에 의해 큰 경간이 필요하고 따라서 강한 보를 사용하는 건물에 있어서는 이 강기둥-약보의 설계 철학을 지키기가 어려울 수 있다. 이러한 경우, 기둥은 비탄성 거동을 지탱할 수 있도록 상세가 주어져야 하거나, 혹은 보다 바람직한 것으로서 연속적인 구조벽을 제공함으로써 높이에 따른 변형의 연속성을 보장하여야 할 것이다.

연접한 벽 시스템(coupled wall system)은 대체로 상당히 큰 양의 비탄성 에너지 소산이 연접보(coupling beam)에서 일어나도록 설계된다. 이러한 시스템의 거동은 연접 보와 슬래브에 국한하여 손상이 발생하나 일반적으로 용인할 수 있는 손상이다.

3.2 부재 거동의 결정

구조물은 예상되는 비탄성 변형모드가 이루어질 수 있도록 부재의 크기를 결정하고 상세 설계되어야 한다. 선택된 부재에 비탄성 휨거동이 일어나도록 하고 싶으면 그 부재들이 요구되는 휨강도를 얻을 수 있도록 상응하는 거동과 적절한 부재크기가 선택되어야 할 것이다. 부재의 소성

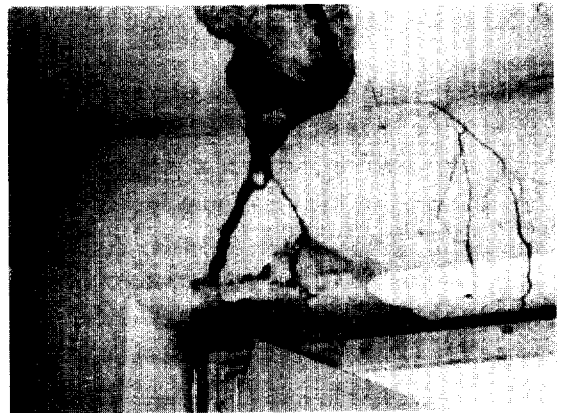


그림 7 부적절한 휨보강근에 의한 보의 전단파괴

모멘트에 상응하는 전단력보다 설계 휨하중에 근거하여 설계 전단력이 결정되었기 때문에 보나 기둥에 있어서 전단 파괴가 자주 일어났다^(6,7)(그림 7). 따라서, 대부분의 설계 기준은, 휨하중과 부재 강도에 적절한 안전률을 적용하고 가능한 소성힌지를 감안하여 설계 전단력을 결정하도록 하고 있다.

부재의 양단에 휨 강도가 도달되었을 때 일어나는 모멘트 분포에 실제 철근 절단 부위가 맞지 않음으로 인해 파괴가 자주 발생하였다^(14,20). 따라서 이 모멘트 분포에 관한 불확실성 때문에 모든 구조부재의 양면에 일정한 크기의 연속적인 철근을 배치하도록 추천하고 있다.

비구조요소가 전체 구조물의 거동을 근본적으로 바꿀 수 있다는 사실이 밝혀지고 있다. 기초 지반위 슬래브가 베이스의 가정된 고정도를 바꿀 수 있으며 골조에 있어서 계단이나 부분적인 조적 채움벽이 부재의 거동을 변화시킬 수 있다. 이러한 상호작용은 부재의 전단 내력의 증가를 요구할 뿐만 아니라 연성 거동이 일어나도록 계획된 부분과는 다른 부분에서 소성힌지가 발생하도록 할 수 있다. 이러한 형태의 손상에 대한 많은 예^(3,5,14,26)가 부재 거동에 대한 실제적인 평가의 필요성을 강조하고 있다. 모멘트-저항 골조에 있어서 코너 기둥은 다른 기둥들에 비해 통계적으로 더 큰 손상들을 나타내고 있다. 이것의 한 이유는 이 코너 기둥에 수직으로 연결된 주변 골조의 조합된 거동의 영향이다.

3.3 휨 철근 보강

철근 콘크리트 보, 기둥, 보-기둥 접합부 및 벽체 가능하면 충분한 휨 철근은 적절히 배치하는 것이 바람직하다. 이러한 철근은 콘크리트 구속효과, 전단에 대한 저항, 길이 방향 철근의 좌굴방지, 그리고 정착의 개선에 유용하다. 소성힌지가 예상되는 부재 단부에 휨 철근을 부족하게 배치할 경우 휨 강도와 연성이 감소할 뿐만 아니라 전단 저항력의 저하를 초래하게 된다. 특히, 비탄성 휨 거동이 높은 전단력과 조합되는 짧은 기둥의 전 길이에 대해서는 매우 촘촘한 간격의 보강 철근이

요구된다. 큰 양의 비탄성 거동이 예상되는 벽체의 경계부분은 축압력 아래에서 연성을 확보하기 위해서 구속 철근으로 잘 보강하여야 한다. 불연속 벽체를 지지하고 있는 기둥은 그 전 높이에 걸쳐서 휨 구속 철근이 설치되어야 한다⁽³⁵⁾.



그림 8 보-기둥 접합부의 파괴



그림 9 1985년 멕시코지진에서 접합부 파괴에 의한 건물의 붕괴

그림 8에서와 같이 보-기둥 접합부에서의 손상은 경우에 따라 그림 9과 같은 건물 전체의 붕괴를 초래할 수 있다(7,13,22,23). 1985년 멕시코시티 지진에서의 참혹한 붕괴사고 중 몇몇은, 나선형 또는 矩形 구속 철근이 접합부의 상하부 기둥에는 설치되었으나 그 접합부 내에서는 단절됨으로 발생된 이들 접합부 파괴에 기인한 것으로 여겨진다. 기둥에서의 구속 철근은 접합부내에서도 계속되어야 한다.

콘크리트 구속 철근으로 나선형 또는 矩形 철근을 사용할 수 있으나 일반적으로 나선형이 矩形에 비하여 보다 능률적이다(그림 10)(18). 이러한 횡구속 철근이 유효하기 위해서는 길이방향 철근과 적절히 연결되어야 한다. 기둥 철근이 잘 분포되지 않거나 뭉쳐져 있을 경우 좋지 않은 결과를 초래한 것으로 나타나고 있다(22). 또한 횡구속철근은 콘크리트 피복이 박리된 이후에도 견고히 남아 있어야 한다. 1985년 멕시코시티 지진(그림 11)에서 보는 바와 같이 코아 콘크리트에 후크 정착이 되지 않은 후프는 힘을 쓰지 못하는 것을 볼 수 있다.

3.4 정착과 접합

강도와 인성은 부재 자체뿐만 아니라 이들 사이의 접합부에서도 확보되어야 한다. 보-기둥 접합부가 부적절한 횡철근을 가짐으로써 파괴된 많은 예를 발견할 수 있다(22,25,29). 또 부재가 접합부에서 편심을 가지고 접합된 곳에서 문제가 발생하는 것을 관찰할 수 있다(25).

보가 없는 슬래브-기둥 접합부는 특히 지진에 대하여 취약한 것으로 드러나고 있다(21,22,28,36). 1985년 멕시코시티 지진에서 무거운 수직하중은 접합부에 과도한 전단력을 유발하고 따라서 접합부의 모멘트 용량 및 연성을 감소시키며 P- δ 모멘트를 증가시키게 되었다. 이것들이 슬래브-기둥으로 이루어진 골조의 상대적으로 낮은 강성과 결합하여 붕괴를 초래하게 되었다(그림 12)(22,26). 편칭 파괴의 경우 기둥을 가로질러 정착된 슬래브 하부 철근은 이러한 붕괴를 방지하거나 지연시키는데 효과적인 수단이 될 수 있다.

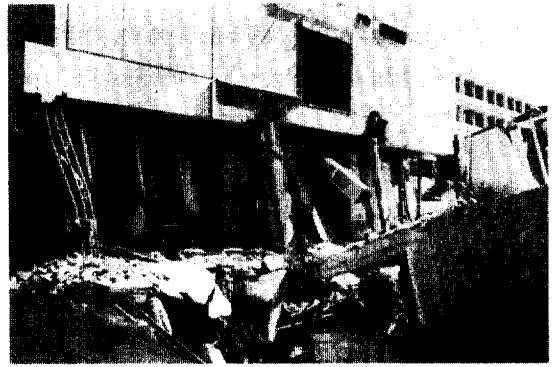


그림 10 Olive View병원에서 Tie철근과 나선철근에 의해 보강된 기둥의 거동 비교



그림 11 약하게 횡보강된 기둥의 손상. (이 Tie는 90°구부렸으며, 지진후 중앙부근의 없어진 Tie를 바닥에서 발견하였음)



그림 12 P- δ 효과에 의한 건물의 붕괴

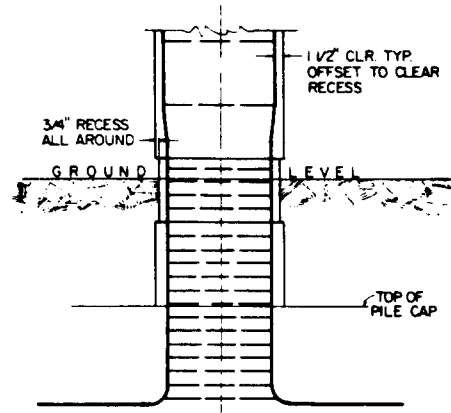
부재와 접합부 사이의 연속성도 또한 필수적이다(그림 9). 1985년 멕시코시티 지진에 의하면, 여러 붕괴된 건물의 기둥에서 길이 방향의 철근이 접합부를 관통하여 적절히 상호 연결되어 있지 않음을 알 수 있다. 또한 철근 이음에서 길이가 불충분하거나 그 위치가 부적절함으로써 파괴가 발생함을 발견할 수 있었다⁽²⁸⁾. 초기 전단 혹은 접합부 파괴 이후 하단 철근을 접합부에 관통하게 함으로써 현수작용에 의해 보와 슬래브를 지지할 수 있음이 1985년 멕시코 지진과 1987년 Whittier Narrow 지진에서 명확히 드러났다⁽¹⁰⁾. 이러한 관찰은 구조물 내에 연속적인 tie철근을 배근할 필요성을 나타낸다. 주기적으로 방향을 바꾸어 일어나는 비탄성 하중 아래서 철근을 적절히 정착시키기 위해서는 적절한 횡철근과 철근을 둘러싼 콘크리트가 있어야 한다. 특히, 다발 철근의 부적절한 부착은 1985년 멕시코시티 지진에서 다수 건물의 손상과 붕괴의 원인이 되었다고 믿어진다.

3.5 시공성

이상의 지진 거동 고찰을 통해 설계, 상세 및 시공에 대한 세심한 주의가 필요하다는 것을 명확히 그리고 반복적으로 보여주었다. 특히 연성 거동에 주로 의지하되, 기초까지에 이르는 하중 전달 경로가 다양하지 않은 구조물에 대해서는 요구되는 연성 상세가 적절히 시행되고 있는지 확인하는 것은 매우 중요하고 필수적인 일이다. 설계자는 시공 도면과 시방서가 분명하고 애매하지 않도록 하여야 하며, 실제 시공상황이 설계에서 의도된 거동이 일어나기에 지장을 초래하지 않도록 하여야 한다.

시공의 중요성에 대한 예로서, Imperial County Service 빌딩에서 기둥의 베이스에서의 부적절한 상세가 기둥 파괴의 원인이었던 것을 들 수 있다(그림 13)⁽³⁾. 또한 횡구속 철근의 부적절한 정착이 1985년 멕시코 지진에서 기둥의 구속효과의 실패를 초래하였으며 전단벽에서의 부적절하게 시행된 시공 조인트가 접합부의 이동과 손상을 유발시킨 것을 들 수 있다^(23,28).

주목할 것은 연성 상세와 이의 철저한 시공 강



(a) 기둥상세(지면 바로위의 약하게 횡보강된 부분에서 파괴발생)



(b) 기둥의 파괴

그림 13 Imperial County Service 건물의 기둥상세와 파괴양상

독을 요구하는 대신에 신뢰할 만한 강도, 여유성 및 연속성을 제공하는 방법이다. 칠레에서 사용되는 이 방법은 최근의 지진에 고층 철근 콘크리트 건물이 매우 양호한 거동을 나타내었다는 점에서 괄목할 만하다⁽²⁾. 이러한 방법은 우리나라와 같이 지진이 자주 발생하지 않는 나라에서 연성상세의 복잡함을 피할 수 있는 좋은 대안으로서 좀 더 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결 언

강진하에서 건물에 비탄성 거동이 발생하는 것

은 확실하다. 그러나 우리가 주의하여야 할 것은 이러한 비탄성 거동이 설계자가 의도한 또는 예측한 것에 따르지 않을 수 있다는 점이다. 비탄성 설계를 수행할 경우, 해석하는 기술자가 이 비탄성 거동의 가능한 양상을 알고 있지 않다면, 별 의미가 없다. 따라서 이러한 비탄성 거동의 예측 능력이 부족한 일반의 구조 설계자의 경우, 설계상의 단순성, 연속성, 여유성 및 상세를 보다 중요시 하여야 하며 이러한 사항들이 개입되지 않은 수치적인 예측에 맹목적으로 의존하여서는 안될 것이다.

더욱이, 접합부의 변형, 전단과 정착의 파괴, 비틀림을 포함한 3차원 비탄성 해석등 많은 형태의 비탄성 거동의 현상을 현재로서는 신뢰성 있는 모델로 예측할 수 없다는 점을 유의해야 한다. 따라서, 이러한 예측할 수 없는 비탄성 거동의 영향은 구조 시스템의 배치 계획, 그 요소의 크기 결정 및 상세 설계에 의해 최소화시켜야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 보통 단순한 설계 방법만으로도 충분하다. 즉, 비탄성 설계시 위에서 언급한 불확실한 형태를 포함하는 거동을 피하도록 노력하는 것이다.

본 기사는 참고문헌(39)를 근간으로 하여 편집하였음을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

1. "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary," Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, San Francisco, California, 1989.
2. Wood, S. L., Wight, J. K., and Moehle, J. P., "The 1985 Chile Earthquake : Observations on Earthquake-Resistant Construction in Vina del Mar," Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 532, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, February 1987, 176 pp.
3. Zeris, C., Mahin, S. A., and Bertero, V. V., "Analysis of the Seismic Performance of the Imperial County Service Building." Proceedings, Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, 1984.
4. Kreger, M. E., and Sozen, M. A., "A study of the Causes of Column Failures in the Imperial County Services Building During the 15 October 1979 Imperial Valley Earthquake," Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 509, University of Illinois, Urbana, Illinois, August, 1983.
5. Bertero, V. V., et. al., "Seismic Response of the Charaima Building," Report No. EERC-70/4, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1970.
6. Mahin, S. A., et. al., "Response of the Olive View Hospital Main Building during the San Fernando Earthquake," Report No. EERC-76/22, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1976.
7. Leeds, A., ed., "El-Asnam, Algeria Earthquake, October 10, 1980," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, January 1983.
8. Wallace, J. S., and Moehle, J. P., "The 1985 Chile Earthquake : A Study of Requirements for Bearing Wall Buildings," Report No. UCB/EERC-89/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 1985.
9. "Reducing Earthquake Hazards : Lessons Learned From Earthquakes," Publication No. 86-02, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, November 1986, 208 pp.
10. The Shittier Narrows Earthquake, October 1, 1987, H. J. Degenkolb Associates, Engineers, San Francisco, 1988, 65 pp.
11. Berg, G. V., and Stratta, J. L., "Anchorage and the Alaskan Earthquake of March 27, 1964," American Iron and Steel Institute, Washington, D. C., 1964.
12. Degenkolb, H. J. and Wyllie, L. A., "Foothill Medical Center," San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, Vol. I, Part A, U.S. Department of Commerce, Washington, D. C.,

13. Stratta, J. L., et. al., "Earthquake in Campania-Basilicata, Italy, November 23, 1980," National Research Council and Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1981, 100 pp.
14. Wyllie, L. A., et. al., "Effects on Structures of the Managua Earthquake of December 23, 1972," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, No. 4, 1974.
15. "Armenia Earthquake Reconnaissance Report," L. Wyllie and J. Filson, eds., Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, August 1989, 175 pp.
16. "Nonstructural Issues of Seismic Design and Construction," (selected papers from a workshop), Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, June 1984, 122 pp.
17. "Uniform Building Code," International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1988.
18. Johnston, R. G., and Strand, D. R., "Olive View Hospital," San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, Vol. 1, Part A, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1973.
19. Leeds, D. J., ed., "Imperial County, California, Earthquake of October 15, 1979," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1980.
20. Hanson, R. D., and Degenkolb, H. J., "The Venezuela Earthquake of July 29, 1967," American Iron and Steel Institute, Washington, D. C., 1969.
21. Shepherd, R., ed., "The San Salvador Earthquake of October 10, 1986," Earthquake Spectra, Vol. 3, August 1987.
22. Rosenblueth, E., and Meli, R., "The 1985 Earthquake : Causes and Effects in Mexico City," Concrete International, Vol. 8, No. 5, May 1986, pp. 23-34
23. Wyllie, L. A., de., "The Chile Earthquake of March 3, 1985," Earthquake Spectra, Vol. 2, No. 2, February 1986.
24. Lagorio, H. L., and Mader, G. G., "Earthquake in Campania-Basilicata, Italy, November 23, 1980, - Architectural and Planning Aspects," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, July, 1981, 88 pp.
25. Carydis, P. G., et. al., "The central Greece Earthquakes of February-March 1981," Earthquake Engineering Research Institute and the National Research Council, El Cerrito, California, 1982.
26. Mitchell, D., et. al., "Lessons from the 1985 Mexican Earthquake," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 13, No. 5, 1986, pp. 535-557
27. Bertero, V. V., and Brokken, S., "Infills in Seismic Resistant Building," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 6, June 1983, pp. 1337-1361.
28. Forell, N. F., and Nicoletti, J. P., "Mexico Earthquakes, Oaxaca- November 29, 1978, and Guerrero - March 14, 1979," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, October 1980, 89 pp.
29. Yanev, P. I., ed., "Miyagi-Ken-Oki, Japan, Earthquake, June 12, 1978," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1978.
30. "Earthquake in Romania, March 4, 1977," EERI Newsletter, Vol. 11 : 3B, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1977.
31. Berg, G. V., et. al., "earthquake in Romania, March 4, 1977," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1980, 39 pp.
32. Soleimani, D., Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 76, No. 11, November 1979, pp. 1159-1178.
33. Stratta, J. L., and Wyllie, L. A., "Friuli, Italy, Earthquake of 1976," Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, California, 1979.
34. Park, R., and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, Inc.,

- New York, 1975, 769 pp.
35. "Building Code Requirements for Reinforced Concretes", John Wiley and Sons, inc., New York, 1975, 769 pp.
 36. Rosenblueth, E., "The Earthquake of 28 July 1957 in Mexico City," Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, July, 1960, pp. 359-378
 37. Housner, G. W., and Jennings, P. C., Earthquake Design Spectra, EERI Monograph, II Cerrito, CA.
 38. Arnold, C., and Reitherman, R., Building Configuration and Seismic Design, Wiley-Interscience, New York, 1982.
 39. Moehle, J. P., and Mahin, S. A. "Observation on the Behavior of Reinforced Concrete Buildings During Earthquake," in Earthquake-Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, America Concrete Institute SP-127, 1991 □

콘크리트학회 전문서적 보급안내

콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단(신간)

—제2회 기술강좌 교재 보정판—

■ 한국콘크리트학회 편

이 책은 건설현장 기술자들이 유용하게 활용할 수 있는 비파괴시험의 관련 원리 및 적용방법에 대한 최신 기술은 물론, 건축·토목공사용 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리·보수방법과 콘크리트의 내구성 향상과 관련 시험방법에 관한 내용을 이해하기 쉽게 상세히 기술하고 있다.

- B5·408면/定價 17,000원(회원 10% 할인),
우송시 송료 1,800원 별도 부담

최신 콘크리트공학

■ 한국콘크리트학회 편

이 책은 콘크리트 기본 구성재료의 특성 및 요건 등을 분석하고, 이들 구성재료를 이용한 배합설계, 굳지 않은 콘크리트의 기본성질, 혼합, 운반 및 타설과정의 특기사항, 양생, 콘크리트의 시험, 품질관리, 내구성 뿐만 아니라 최근에 개발되고 있는 새로운 콘크리트의 제조 및 제반 특성에 이르기까지 포괄적인 내용을 실고 있다.

- B5·682면/定價 15,000원(회원 10% 할인),
우송시 송료 1,800원 별도 부담

콘크리트 구조물의 진단, 보강 및 유지관리

—제4회 기술강좌 교재—

- 집필진 : 윤우현 · Hasegawa Gaoru · 정광량 · 오병환 · 심중성 · 서치호 · 연규석 · 방명석 · 김상식 · 이강희 · 박승범
- B5·368면
- 보급가 : 회 원 18,000원(우송시 송료 2,000원 별도 부담) 비회원 20,000원

에폭시 도막 철근콘크리트의 설계 및 시공지침

- 집필진 : 오병환 · 최완철 · 엄주용
- B5·194면
- 보급가 : 10,000원
- 구입방법 : 상기 서적이 필요하신 분은 학회사무국에서 구입하시기 바람직하며 직접 오시기 어려운 분은 밑에 기재된 은행계좌로 송금하시면 우송해 드립니다.(송금자명 필기 기재요망)
- 은행계좌 : 한일은행(096-132587-01-501)
(예금주 : 한국콘크리트학회)