

개선된 내진해석 및 내진설계를 통한 헤이워드 단층 인근 15층 빌딩의 수명연장

Advanced Seismic Analysis and Design Keep a Crucial 15-story Building Near the Hayward Fault from Becoming History



김 용 완^{1)*}

Kim, Yong Wan

본 기사는 Modern Steel Construction지의 2008년 6월 호에 실린 영문 기사를 번역한 것으로, 저자는 Degenkolb Engineers사(社)의 Senior Principal인 James O. Malley 이다. 원문기사는 Modern Steel Construction(MSC), June 2008, pp. 45-47에 수록되어 있다.

요약문

1994년 미국 서부지역을 강타한 Northridge 지진의 발생 이후로, 캘리포니아 주 정부는 꾸준히 기존 건축물의 내진보강 프로젝트를 발주해왔다. 특히, 지진에 대하여 안전하다고 여겨지던 철골모멘트골조의 내진 취약성이 Northridge 지진을 통해 드러남에 따라, 90년대 중후반부터 2000년대 초반 까지 강구조 접합부의 내진성능 검증 및 개선을 위한 연구가 활발히 진행되었다.

본 기사에서 다루고 있는 캘리포니아 교통국 제4구역 본청(Caltrans District 4) 건물 역시 철골모멘트골조로 지어졌으며, 150년 주기로 대규모 지진을 발생시키고 있는 헤이워드 단층(Hayward Fault)으로부터 불과 9km 떨어진 곳에 위치해있다. 따라서 캘리포니아 교통국에서는 본 건물의 내진보강설계 및 시공 프로젝트를 발주하였고, 샌프란시스코에 있는 건축구조설계사인 Degenkolb Engineers



Fig. 1 Caltrans District 4 건물 (출처: MSC)

에서 전반적인 보강설계 프로젝트를 수행하였다.

본 기사에서는 내진보강설계 대상건물의 개요 및 캘리포니아 내진기준에 대하여 간략하게 소개하고 있으며, Degenkolb Engineers에서 수행한 대상건물의 내진보강계획 수립과정 및 구체적인 내진해석방법에 대하여 설명하고 있다. 또한, 내진보강설계를 위해 수행한 실물대 실험에 대해서도 소개하고 있다.

1. 개요

캘리포니아 교통국(Caltrans)의 제4구역 본청(이하 Caltrans District 4)은 헤이워드 단층으로부터 불과 5마일(약 9km) 정도 떨어진 곳에 위치하고 있다. 철골모멘트골조로 세워

1) ㈜창민우구조건설파트 대리

* E-mail : ywkim@minwoo21.com

진 이 15층 높이 건물은 샌프란시스코의 베이 지역(Bay Area)의 교통을 운영/관리 본부가 자리하고 있으며, 비상 대책팀 또한 이 건물 내에 위치해있다.

본 건물은 1989년 Loma Prieta 지진이 발생한지 2년 뒤에 지어졌으며, 당시에는 본 건물 골조의 내진성능에 대해서 그 누구도 의심하지 않았다. 그러나 Caltrans가 입주한지 3년 뒤인 1994년 Northridge 지진이 LA 지역의 수많은 철골모멘트골조 빌딩에 피해를 입히자 본 건물에 대한 내진보강이 필요하다는 결론이 내려졌다. 이에 따라, The Crosby Group과 Degenkolb Engineers사(社)의 기획 및 관리 하에 본 건물의 내진보강을 위한 최선 해석 및 설계 기술이 적용되었다.

2. 기존 건물의 내진성능

헤이워드 단층은 약 150년에 한번 씩 대규모의 지진을 발생시켰다. 본 단층으로부터 발생한 가장 최근의 대규모 지진은 1868년에 발생하였으며, 이 때문에 Caltrans District 4 건물은 매우 위험한 지진재현주기 내에 속하게 되었다. 전문가들은 헤이워드 단층으로부터 발생할 다음 지진의 규모는 약 6.7 내지 7.2가 될 것이라고 예측하였다.

Caltrans District 4 건물의 골조는 1988 Uniform Building Code 기준에 따라 설계되었다. 본 건물은 1개의 지하층, 1층 로비, 주차시설 4개 층, 그리고 사무실 10개 층으로 구성되어 있으며, 주차시설 층 위에는 큰 규모의 아트리움이 있다. 건물 전 층 높이의 모멘트골조는 건물의 외주부를 따라 위치해있고, 아트리움 층 옆 양쪽으로 건물 내부에 가로놓인 모멘트골조가 계획되었다.

Northridge 지진 피해를 보면서 철골모멘트골조의 지진에 대한 취약성을 인식하게 된 캘리포니아 주 정부는 기존 빌딩에 대하여 구조시스템의 예비평가와 모멘트 접합부의 실험을 포함한 연구를 발주하였다. 이러한 연구는 University of California, Berkely 내에 있는 Pacific Earthquake Engineering Research Center에서 수행되었다. 본 연구의 결과에 따르면, 기존 철골모멘트 접합부들은 지진 발생 시 파단 가능성이 높고, 또한 FEMA에서 후원한 SAC Steel Program에서 실험을 수행한 작은 크기의 시험체들보다 회전성능이 떨어진다. 따라서 내진성능의 개선이 요구됨이 밝혀졌다. 캘리포니아 주 정부에서 제시한 빌딩 설계 가이드라인에 따르면, 보수 가능한 크기의 미약한(minor) 손상, 광범위한 보수/보강이 필요한 비구조체의 중간 크기

(moderate) 손상, 인간 생명에 대한 미약한 위험도, 그리고 지진이 발생하는 주 중에 다시 빌딩의 기능을 회복할 수 있는 수준에 이르도록 빌딩 성능이 보강되어야 한다.

3. 내진보강계획 개발 및 내진해석

지역 조건을 고려한 응답스펙트럼은 설계기반지진(DBE, BSE-1) 및 최대고려지진(MCE, BSE-2)을 나타내기 위하여 내진보강기준의 근간인 FEMA 356에 따라 개발되었다. 이러한 스펙트럼은 리히터 규모 7.0과 7.25로 예측된 지진을 나타내며, DBE 수준에서는 약 0.4g의 1차모드 스펙트럼 가속도를 유발한다. 또한, 비선형응답이력해석에 필요한 7쌍의 지진파들이 FEMA에서 요구하는 사항에 따라 선정 및 보정되었다.

내진성능평가의 초기에는 Degenkolb사가 이끄는 프로젝트팀에서 여러 모드를 고려한 2차원 push-over 해석을 수행하였고, 단자유도 비선형동적시간이력해석 또한 수행하여 내진보강이 필요한 부분을 판단하였다.

본 프로젝트에서는 네 가지의 내진보강안이 개발되었다: (1) 모든 접합부의 보강, (2) 접합부 보강 plus-damper의 적용, (3) 비좌굴가새의 적용, (4) 바닥면진의 적용. 각 안은 설계기준을 만족시키도록 기획되었으며, 공사비와 공사단계, 그리고 이에 따른 직원의 파견, 시설 비사용시간 등에 대한 지출이 비교되었다. 이의 결과로, 점성댐퍼를 적용하여 접합부를 보강하는 안이 선정되었다.

선정된 보강안에 따르면, 가장 큰 댐퍼의 크기를 선정한 후 보강이 필요한 접합부에 배치함으로써 작업지점을 최소화할 수 있었다. 댐퍼의 레이아웃은 건물의 주요 진입지점과 내부의 동선에 대한 간섭을 피하도록 계획되었으며, 총

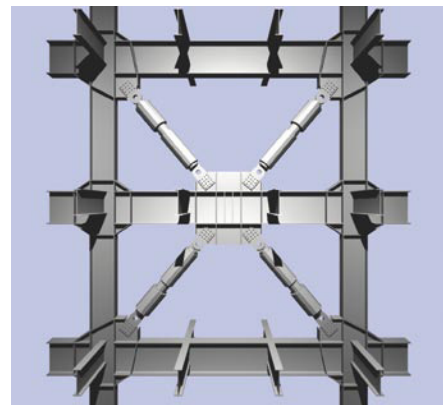


Fig. 2 접합부 내진보강 작업지점을 최소화하기 위한 댐퍼의 배치 (출처: MSC)

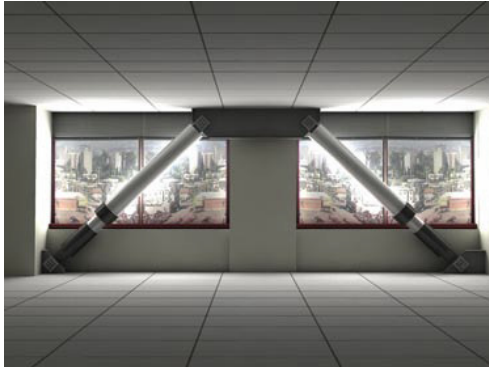


Fig. 3 건물 실내에서 본 댐퍼 (출처: MSC)

228개의 댐퍼가 건물의 외주부에 설치되도록 설계되었다. 본 건물의 1,218개의 모멘트 접합부 중 746개의 접합부가 보강되었다. 접합부의 보강이 수행된 지점에서는 기둥 이음부의 보강작업 또한 이루어지도록 계획되었다.

작업도면 작성단계에서는 두 개의 주(primary) 변위방향에 따른 2차원 모델이 RAM Perform 프로그램(현재의 Perform3D)을 통해 제작되었다. 각 모델에서는 모멘트골조가 완전히 모델링되었고, 중력기둥 및 직각방향 모멘트골조 기둥들은 2차적인 효과를 고려하여 모델링 되었다. 각 모델은 강막가정을 통해 다이아프램을 설정하였다.

모멘트골조 모델은 탄성 및 비탄성 특성을 갖는 복합요소(compound element)들로 구성되었다. 보 요소는 보강 접합부 지점에 탄성 보 단면을 적용함과 동시에 비선형 모멘트-회전 힌지를 적용하였고, 기존 접합부 지점에 비선형 섬유(fiber) 단면을 적용하였다. 모든 기존 접합부들이 (경제적 이유로) 보강이 되는 것은 아니었기 때문에, 기존 접합부에 대하여 파단 거동을 예측할 수 있는 해석모델을 개발해야 할 필요가 있었다. 기존 접합부에는 상부 플랜지, 하부 플랜지, 그리고 전단 탭(shear tab) 볼트들을 표현할 수 있는 섬유단면 모델링 기술을 적용하였다. 섬유단면을 적용한 기존 접합부의 거동은 실험을 통해 얻은 결과와 매우 유사하였다.

섬유단면 모델은 상부 및 하부 플랜지의 파단이 각각 다른 크기의 모멘트에서 발생하는 것으로 나타났으며, 두 경우 모두 예상했던 보 모멘트강도보다 낮은 수준의 모멘트 크기에서 파단이 발생했다. 섬유단면 모델은 전단력을 받는 전단 탭의 볼트와 파손된 플랜지의 커플링에 의해 접합부의 휨 성능이 발휘되는 '플랜지 파단 후 거동'을 예측하였고, 볼트의 기대인장강도(expected ultimate strength)에 도달한 각 전단 탭 볼트의 파단 또한 예측하였다.

4. 내진보강설계를 위한 실물대실험

대상 건물의 깊은 기둥단면과 대형 보의 크기는 기존에 있던 접합부 보강 관련 실험체보다 컸기 때문에, 제시된 접합부 보강안을 검증하기 위해서 깊은 기둥과 대형 보를 대상으로 한 실험이 수행되었다.

네 개의 양면 철골모멘트 접합부 실물대 실험이 수행되었으며, 이로써 제안된 접합부 보강안의 성능을 적절하게 검증할 수 있었다. 각 실험체에는 합성 데크와 콘크리트 슬라브가 포함되었다. 기존의 연구결과와 보강설계 사례를 참고하여 다양한 보강안이 고려되었으며, 단일 용접 헌치(WBH), 양면 용접 헌치(WTBH), 더블 헌치와 더블 거셋 플레이트가 함께 적용된 상세, 볼트 브라켓(BB) 등이 실험되었다. BB 형태는 용접 없이도 시공이 가능하다는 이유로 고려되었다. 이를 적용할 시에는 공기를 단축시킬 수 있고 용접으로 인한 공해를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 실험은 University of California at San Diego에서 Chia-Ming Uang 교수의 감독 하에 진행되었다. 각 실험체의 성능은 기존 WBH 및 BB 실험 결과보다 개선된 것으로 밝혀졌으며, 결과적으로 WTBH 보강안이 가장 적합한 안으로 선정되었다. 또한, 댐퍼 거셋 플레이트를 모멘트 접합부에 적용한 상세는 프로젝트에서 요구된 층간변위비를 만족함을 최종 실험에서 증명하였다. (실험에 관련된 자세한 설명은 Uang과 Newell의 2006년 보고서: Cyclic Testing of Steel Moment Connections for the Caltrans District 4 Office Building Seismic Upgrade, Report No. SSRP-05/03, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, Calif.를 참고 바람)

5. 과제로부터 얻은 교훈

제시된 보강안의 성능을 예측하기 위해 적용된 간략해석 방법을 통하여 대상 건물의 성능을 개선하기 위해 필요한 전체적인 보강작업의 양을 효과적으로 산정하였다. 그러나 본 해석의 결과는 건물 저층부의 층간변위비를 과소평가하였고, 상층부의 층간변위비는 과대평가하였다. 따라서 댐퍼와 접합부 보강안의 배치 계획의 대대적인 수정이 필요했다.

설계기준지진에 대한 성능목표를 확실히 보장하기 위하여, 전형적인 엔지니어링 실무 관례의 범위를 넘어선 별도

의 해석 기술 및 실물대 실험이 수행되었다. 이러한 시도로 인하여 공사기간 중에도 건물을 사용할 수 있도록 하는 경제적인(1제곱피트당 50달러) 보강안이 제시되었다.

담당 편집위원: 김태진
(주)창민우구조컨선타트 사장
taejin@minwoo21.com