주거건물의 계측유지관리를 위한 전역적 손상에 따른 동적특성 예측

Estimation of Dynamic Properties Corresponding to Global Damage for Structural Health Monitoring of Residential Buildings

김 지 영* • 조 자 옥** • 박 재 근*** • 김 대 영****
Kim, Ji Young • Cho, Ja Ock • Park, Jae Keun • Kim, Dae Young

요 약

구조물의 건전도를 평가하기 위하여 계측된 데이터로부터 구조물의 동특성 변화를 분석하여 손상정도를 추정하는 방법이 많이 사용되고 있다. 최근, 다점 측정된 가속도 데이터로부터 구조물의 고유진동수 및 모드형상을 추출하고 이를 초기값과 비교하여 손상탐지를 실시함으로써 손상위치 및 손상정도를 추정하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 그러나 이러한 방법을 실제 적용하기 위해서는 계측시스템 구축에 많은 비용이 소요되며, 손상탐지를 위한 해석과정이 복잡하기 때문에 실시간에 가깝게 유용한 정보를 거주자에게 제공하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실용적인 계측유지관리 시스템을 구축할 수 있도록 구조물의 손상도에 따른 동적특성의 변화를 사전에 예측하여 실제 계측된 동적특성에 대한 관리 한계치를 제공하는 방안을 제시하고자 한다.

keywords : 고유진동수, 현장 가속도 계측, 유효보, Pushover 해석

1. 서 론

구조물의 계측 유지관리는 대상 구조물의 주요부위에 계측기기를 설치하고 측정된 응답으로부터 구조물의 손상정도를 파악하여 거주자에게 대처방안을 제공하는 것이다. 이러한 손상평가는 주요 부재의 변형을 측정하여 손상을 평가하는 국부적 손상탐지와 구조물의 전체응답을 계측하여 손상위치와 정도를 추정하는 전역적 손상탐지로 구분될 수 있다. 아웃리거가 설치된 초고층 건물의 경우에는 아웃리거 트러스의 국부적 계측을 통하여 횡하중 저항 시스템의 손상여부를 직접적으로 분석할 수 있다. 일반적인 모멘트 프레임 구조, 벽식 아파트 등과 같이 횡하중 저항시스템의 안정성에 영향을 미치는 주요 부재를 선택하기 어려운 경우에는 전역적 계측을 통해 구조물의 손상 정도를 추정하는 것이 효율적이다. 전역적 손상탐지의 방법으로는 최적화 기법을 이용한 손상평가기법이 개발되고 있으나 해석시간이 다소 많이 소요되며 구축비용도 높기 때문에 실무적으로 사용되기에 어려운 측면이 있다. 따라서 국부적 계측과 같이 전역적 계측 데이터에 대한 관리한계치를 제시하고 관리하는 것이 보다 현실적인 방법이 될 수 있다. 따라서 이 논문에서는 주거용 아파트에 대하여 해석적인 방법을 통해 지진과 같은 횡하중에 의한 손상정도별 고유진동수 예측방안을 제시하고자 한다.

* 정회원 • (주)대우건설 기술연구원, 책임연구원, kimjyoung@dwcosnt.co.kr
** 정회원 • (주)대우건설 기술연구원, 연구원, 0801287@dwconst.co.kr
*** (주)대우건설 기술연구원, 연구원, rootbe@dwconst.co.kr
**** (주)대우건설 기술연구원, 수석연구원, kimdy@dwconst.co.kr

2. 실측된 동특성에 따른 초기 FE 모델 작성

신뢰성 있는 계측유지관리를 위해서는 손상에 따른 아파트의 고유진동수를 보다 정확히 예측하는 것이 필요하며, 이를 위해 실제 구조물에 가까운 초기 FE 해석 모델을 작성하는 것이 중요하다. 2008년도 경기도내에 준공된 아파트 1개동에 대한 가속도 계측을 수행하고 동특성을 평가하였다. 대상건물은 높이 56.8m, 지상 18층의 벽식구조 아파트이다. 그리고 표 1과 같이 계측된 동특성과 FE 해석에 의한 결과가 일치하도록 구조설계를 위해 작성된 FE 해석모델을 수정하여 그림 1과 같이 실제 아파트와 유사한 초기 FE 해석모델을 작성하였다. FE 모델은 MIDAS-ADS로 작성되었으며, FE 모델의 수정을 위해 바닥슬래브, 현장타설 콘크리트 탄성계수 및 발코니 콘크리트 난간을 추가적으로 반영하였다. 수정과정을 통해 표 1과 같이 계측된 고유진동수와 해석된 고유진동수의 차이는 최대 6%로 나타났다.

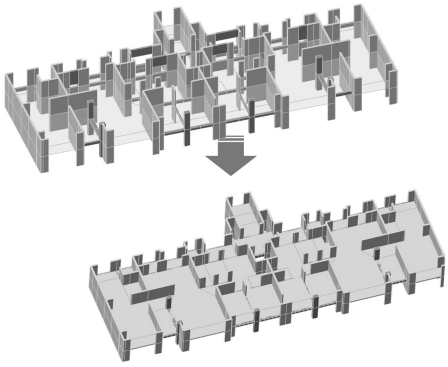


그림 1 초기 FE 해석 모델 (슬래브 Plate 모델링)

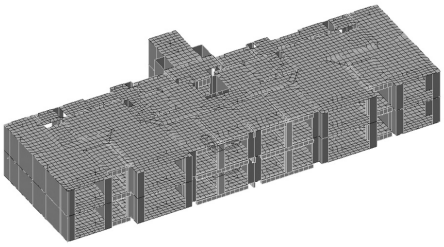
표 1 고유진동수 비교결과

축방향	x-축	y-축	z-회전
계측결과	1.1902	1.2036	1.9202
해석결과 (a) (Plate 요소 슬래브)	1.1925 (100%)	1.2525 (104%)	1.7965 (94%)
해석결과 (b) (슬래브 x-축 유효보 치환)	1.0655 (90%)	-	-

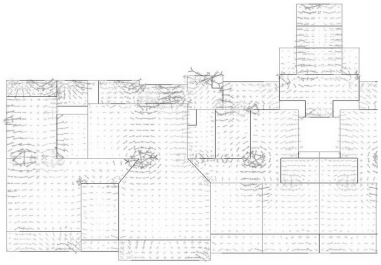
3. 지진하중 손상해석

지진하중에 대한 아파트의 손상을 평가하기 위하여 Pushover 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 x-축(장변방향)에 대해서만 Pushover 해석을 수행하고 손상발생과정을 분석하였다. 대상 아파트는 전단벽과 슬래브로 이루어진 구조이므로 횡하중 작용시 전단벽과 슬래브의 접합부에서 모멘트 저항이 발생한다. 따라서 보다 실제적인 Pushover 해석을 위해서는 전단벽뿐만 아니라 슬래브의 항복거동을 포함하여 해석을 실시하는 것이 필요하다. 이를 위해 MIDAS-GEN으로 대상 아파트를 다시 모델링하였으며, Pushover 해석이 가능하도록 슬래브를 유효보로 치환하였다.

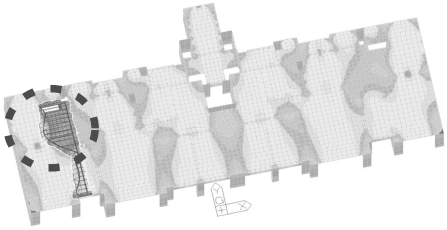
슬래브를 유효보로 치환하기 위해서는 유효보폭을 결정해야 하지만 Grossman과 같이 기존에 제시된 유효보폭은 플랫슬래브를 대상으로 하기 때문에 전단벽-슬래브 시스템에는 적합하지 않다. 따라서 대상아파트의 슬래브에 대한 유효보폭을 결정하기 위하여 그림 2 (a)와 같이 초기 FE 해석모델의 기준층에 대한 횡하중 해석을 통해 슬래브의 주응력 및 y-축 Rotation의 분포를 살펴보았다. 그림 2 (b)의 슬래브 주응력 분포에서 나타난 바와 같이 대부분의 주응력은 x-축(장변방향)으로 위치한 전단벽 근처에 분포하므로 y-축(단변방향)으로 위치한 전단벽은 x-축 방향의 횡하중을 저항하는데 기여도가 낮은 것으로 판단되었다. 따라서 x-축 방향으로 위치한 전단벽을 기준으로 슬래브를 유효보로 치환하였다. 그리고 그림 2 (c)와 같이 각각의 x-축 방향의 전단벽을 기준으로 y-축에 대한 슬래브의 Rotation을 구하고 그림 2 (d)와 같이 각 전단벽에서의 슬래브 Rotation이 등가의 Rotation으로 치환될 수 있는 슬래브폭으로 유효보폭을 산정하였다.



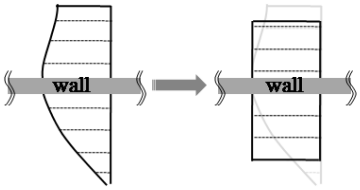
(a) 해석모델



(b) 주응력 분포

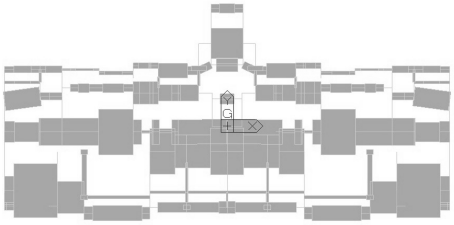


(c) y-축 Rotation 분포



(d) 등가 Rotation 치환

그림 2 기준층 슬래브 횡하중 해석결과



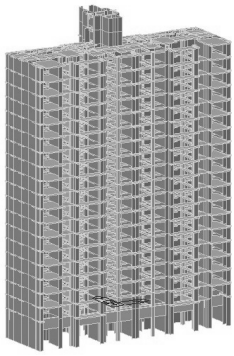


그림 3 슬래브가 유효보로 치환된 아파트 해석모델

산정된 유효보폭으로 슬래브를 유효보로 치환하여 그림 3과 같이 MIDAS-GEN으로 대상 아파트를 다시 모델링하였으며, 이 모델에 대한 고유진동수 해석결과와 실측결과와의 차이는 표 1의 (b)와 같이 10 %로 나타났다. 슬래브를 Plate 요소로 모델링한 결과(a)보다 유효보로 치환한 결과(b)의 오차가 더 크게 나타났지만 실제 거동을 해석하기에 충분한 것으로 판단되므로 이 모델을 이용하여 Pushover 해석을 수행하였다.

슬래브가 유효보로 치환된 해석모델을 이용하여 지진하중에 대한 Pushover해석을 수행하였으며, 전단벽은 MIDAS의 Wall요소로 모델링되었다. Pushover 해석을 위해 FEMA 273의 힌지모델을 적용하였으며, 지진하중의 Profile을 사용하여 하중제어 해석을 실시하였다. Pushover 해석에 의해 산정된 최상층변위-밑면전단력의 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 대상 아파트의 최대 보유내력은 15,200kN이며, 밑면전단력이 보유내력의 약 60%인 a점 부근에서 구조물의 항복이 시작된다. 그리고 밑면전단력이 최대내력의 90%인 b점을 거쳐 99%인 c점을 지나 최종 붕괴되는 손상과정을 보이고 있다.

구조물이 탄성거동하는 o-a 구간에서는 소성힌지가 발생하지 않았으며, 그림 4(a)의 a점에서부터 슬래브와 유효보의 항복이 시작하였다. 그러나 소성힌지의 대부분이 즉시 사용단계 범위 내에 있는 것으로 나타났다.

그리고 b점에서는 그림 5(b)와 같이 대부분의 슬래브와 벽체에 소성힌지가 발생하고 안전한계상태를 초과한 힌지도 다수 발견되었다. b 점에서 슬래브보다 벽체에 손상이 더 많이 진행된 부분이 관찰되는데 이는 층간소음을 방지하기 위하여 아파트 슬래브의 두께가 벽체보다 두껍게 설계되는 경향이 있다. 따라서 대상 아파트도 슬래브의 두께가 210mm로서 벽체 180mm보다 두껍게 설계됨으로써 가력하중의 수직방향인 y-축에 평행한 벽체의 손상진행이 슬래브보다 더 크게 나타난 것으로 추정된다. 그리고 그림 5 (c)와 같이 c 점에서는 다수의 전단벽과 유효보가 안전한계상태 이상의 힌지가 발생하였으며 붕괴방지한계상태를 초과한 힌지도 관찰되는 것으로 나타났다.

4. 손상단계별 고유진동수 산정

지진하중에 대한 아파트의 각 손상단계에서 힌지가 발생한 부재의 강성을 조절하여 고유치해석을 실시함으로써 각 손상단계별 고유진동수를 산정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 나타난 바와 같이 탄성구간인 o-a 구간에서는 고유진동수의 변화가 없으나, 항복이 시작되는 a점에서 약 2%의 고유진동수 변화가 발생하였다. 그리고 c점에서는 15%, d점에서는 19%의 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과를 근거로 거주자의 대응시나리오를 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 지진발생 후 고유진동수의 변화량이 2%이내일 경우에는 구조물의 손상이 미미하므로 약간의 보수를 수행하며, 고유진동수의 변화량이 2%~15%이내일 경우에

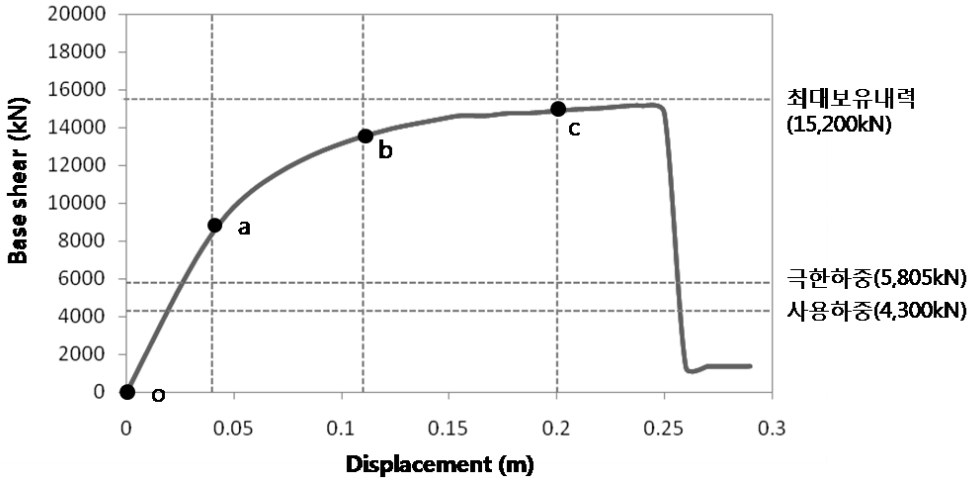
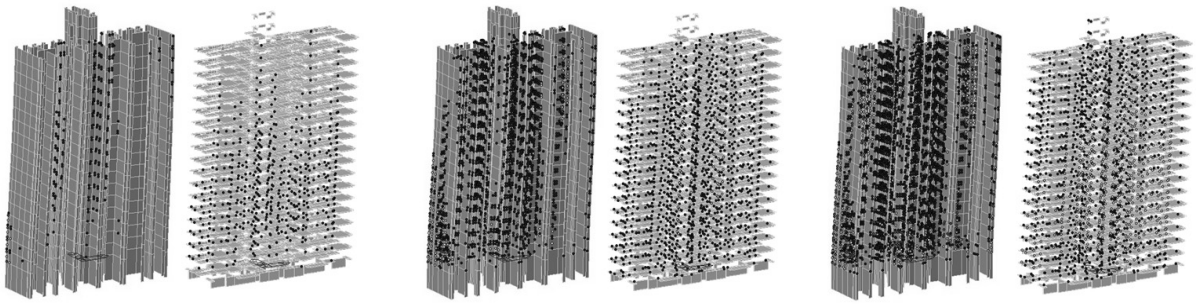


그림 4 Pushover 해석결과 (최상층변위-밑면전단력 그래프)

표 2. 손상단계별 고유진동수

	Diaphram+유효보 모델링			
	o-a	a	b	c
고유진동수(Hz)	1.0655	1.0305	0.8967	0.8568
밑면전단력/보유내력	-	약 60%	약 90%	약 99%



벽체 유효보 벽체 유효보 벽체 유효보

(a) a점 (b) b점 (c) c점

그림 5. Pushover 단계별 소성힌지 발생 상태('그림 4 최상층변위-밑면전단력 그래프' 참조)

는 상당한 손상이 예상되므로 대피 후 보수보강을 실시하는 것이 필요하다는 것과 같이 대응시나리오를 제시할 수 있게 된다.

5. 맺음말

이 논문에서는 전단벽식 아파트의 전역적 응답 계측을 통한 구조물의 손상평가를 위해 손상단계별 고유진동수의 변화량을 예측하는 방안에 대해 기술하였다. 먼저 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해 실제 대상건물에서 계측된 동특성을 기준으로 FE 해석모델에 대한 보정을 실시하였다. 초기 FE 해석모델로 구한 슬래브의 응력 및 회전각 분포를 근거로 슬래브를 유효보로 치환한 해석모델을 작성하고 지진하중에 대한 Pushover 해석을 실시하여 손상단계를 분석하였다. 그리고 각 손상단계별로 고유진동수를 산정하여 손상정도에 따른 고유진동수 변화를 제시하였다. 이러한 과정을 통해 향후 고유진동수의 변화량을 근거로 계측유지관리를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 보다 신뢰성있는 예측을 위해서는 전단벽식 건물에 대한 슬래브 유보보폭의 산정방법이 제시되어야 하며, 비선형 구간에서의 슬래브 유효보폭에 대한 검증이 필요하다. 또한 전단벽 및 슬래브에 대한 힌지모델이 별도로 개발되어야 하며 실제 구조실험을 통한 검증연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

대한건축학회 (2005), 건축구조설계기준, 대한건축학회

이영욱 (2004), 철근콘크리트 구조물의 pushover 해석, **한국지진공학회 workshop 발표집**

최정욱, 송진규, 최기봉 (2005), 사각형 단면을 갖는 수직부재와 접합되는 슬래브의 탄성 유효보폭, **대한건축학회논문집 구조계**, 21권, 1호