

바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진거동에 미치는 영향

The Effect of the flexural stiffness of Floor Slabs on The Seismic Response of Multi-story Building Structures

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

이 동 근**
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Recently, many high-rise apartment buildings are constructed using the box system which is composed only of concrete walls and slabs.

Commercial softwares, such as ETABS, used for the analysis of high-rise apartment buildings are employing the rigid diaphragm assumption for simplicity in the analysis procedure. In general, the flexural stiffness of floor slabs are ignored in the analysis. This assumption may be reasonable for the estimation of seismic response of framed structures. But in the case of the box system used in the apartment buildings, floor slabs has major effects on the lateral stiffness of the structure. So, if the flexural stiffness of slabs in the box system is ignored, the lateral stiffness may be significantly underestimated. For these reasons, it is recommended to use plate elements to represent the floor slabs. In this study, A typical frame structure and a box system structure are chosen as the example structure. When a 20 story frame structure is subjected to the static lateral loads, the displacements of the roof are 15.33cm and 17.52cm for the cases with and without the flexural stiffness of the floor slabs. And in case of box system, the roof displacement was reduced from 16.18cm to 8.61cm. The model without the flexural stiffness of floor slabs turned out to elongate the natural periods of vibration accordingly.

1. 서론

현재 국내에서 많이 건설되고 있는 고층아파트는 콘크리트 벽과 바닥판만으로 구성되는 벽식 구조형태(Box System)를 주로 도입하고 있다. 벽식 구조형태는 벽과 바닥판의 합성작용으로 인하여 수평 및 수직하중에 효율적으로 저항하는 방식으로 알려져 있으며 시공시 터널 폼(tunnel form)을 사용함으로써 건물 내외면의 미려한 시공 효과와 함께 벽체의 미장을 생략, 상당한 공기의 절감을 가져오는 이점이 있다. 이러한 구조를 적용한 고층 아파트건물의 해석에는 일반적으로 ETABS와 같은 상용 프로그램이 많이 사용되고 있다. ETABS는 해석의 단순화를 위하여 바닥판의 면내강성을 무한대로 가정하는 강막가정을 사용한다. 이 경우에 바닥판의 휨강성은 일반적으로 무시한다. 그러나 벽식 구조에서는 바닥판의 휨강성이 구조물의 횡방향 강성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 벽식 구조물에서 바닥판의 휨강성을 무시하고 해석한다면, 전체 건물의 횡방향 강성이 과소평가될 수 있다. 본 논문에서는 프레임구조물과 벽식구조물의 지진 거동에 바닥판의 휨강성이 미치는 영향에 대해서 비교하고 보다 정확한 해석을 위한 모형화 방법을 제안하였다.

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 강막가정을 적용한 기존의 해석 방법

해석하고자하는 건물이 고층화, 대형화됨에 따라서 건물을 모형화하는데 필요한 절점 및 자유도가 기하급수적으로 늘어나게 되므로 해석시간이 상당히 많이 걸리게 된다. 따라서 현재 실무에서 많이 사용되고 있는 건축물 전용 해석 프로그램(ETABS, MIDAS/BDS 등)은 몇 가지 합리적인 가정을 통하여 해석시간을 줄이는 방법을 사용하고 있다.

대부분의 건축구조물에서는 바닥판을 무한히 큰 면내강성을 가지는 막이라고 가정하여도 무리가 없을 정도로 바닥판의 면내변형이 크지 않게 된다. 이에 비하여 바닥판의 연직방향으로는 유연한 거동을 하므로 바닥판의 면외강성은 무시할 수 있을 정도로 작게 된다. 따라서 건축물 전용 해석프로그램에서는 강막가정을 적용하여 바닥판을 면내에서 무한강성을 가지는 막이라고 가정하는 것이 일반적이다. 이러한 구조적 특징을 이용하여 각 층에서 수평방향으로 두 개의 변위 자유도와 하나의 연직방향에 대한 회전 자유도를 사용하여 모든 절점의 이동을 나타낼 수가 있게 된다. 이렇게 건물의 바닥판을 모형화 할 때 강막가정을 적용하면 해석시간을 단축할 수 있고, 바닥판이 전체 건물에 미치는 영향을 쉽게 고려할 수 있기 때문에 ETABS와 같은 상용프로그램에서 이러한 해석기법을 적용하고 있다.

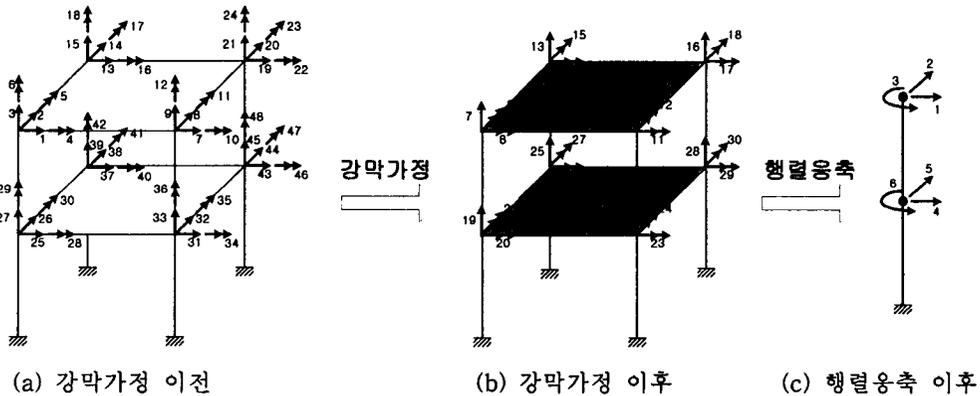


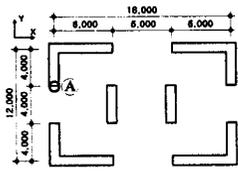
그림 1. 강막가정과 행렬응축에 의한 자유도의 변화

강막가정을 하게되면 그림 1에서 보는 바와 같이 한 층에서의 면내 자유도의 개수가 3개로 줄어들게 되므로 구조물이 커서 한 층에 많은 절점이 존재할수록 해석상의 효율성이 커진다. 한편 각 절점에 남아있는 면외 자유도는 행렬응축 기법(matrix condensation technique)을 통해서 소거할 수 있다. 그림 1은 강막가정과 행렬응축 기법을 사용해서 구조물을 막대 모델로 모형화하는 모습을 나타낸다. 이와 같이 전체 구조물을 막대모델로써 모형화하면 해석 시간 뿐 아니라 결과분석도 용이해지는 이점이 있다. 강막가정으로 바닥판을 모형화할 때는 바닥판이 면외 방향으로 유연한 거동을 한다고 가정하기 때문에 일반적으로 바닥판의 휨강성을 무시한다. 따라서 바닥판이 면외방향으로 큰 변형이 발생하는 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성을 무시하고 강막가정만으로 바닥판을 모형화하면 전체 구조물의 횡방향 강성을 과소평가하게되어 구조물의 거동을 정확히 예측하기가 어려워진다. 그러므로 바닥판의 휨강성이 구조물의 횡방향 강성에 미치는 영향을 건물의 구조 형태에 따라서 분석하여 보고 적절한 모형화 방법을 선택하는 것이 필요하다.

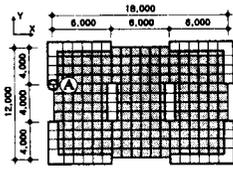
3. 바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진거동에 미치는 영향

3.1 프레임 구조물에서의 바닥판의 영향

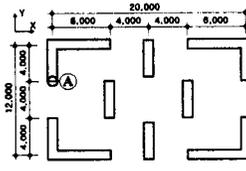
기둥과 보 그리고 바닥판으로 이루어진 프레임 구조물에 지진하중과 같은 횡하중이 가해졌을



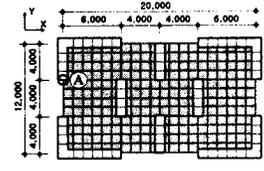
(a) 모델 WR-1



(b) 모델 WS-1

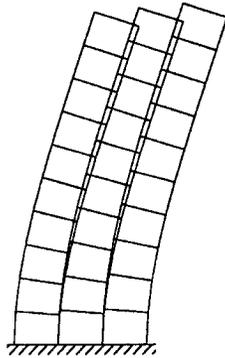


(c) 모델 WR-2

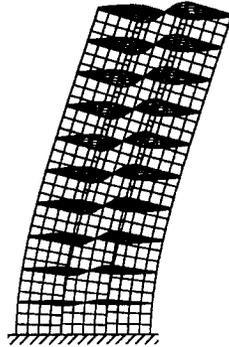


(d) 모델 WS-2

그림 5. 벽식 예제 구조물의 평면



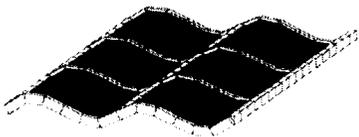
(a) 모델 WR-1



(b) 모델 WS-1

그림 6. 횡하중에 의한 벽식 구조물의 변형

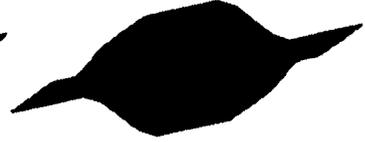
만 수직 변위는 구속되지 않아서 연직방향으로 변형이 생겼기 때문이다. 모델 WS의 경우에는 바닥판이 상하로 움직이면서 휘는 모습을 볼 수 있다. 그림을 보면 바닥판의 휨은 구조물의 상부로 갈수록 더욱 심하다는 것을 알 수 있다. 이는 구조물이 고층일수록 휨거동을 하므로 상층부의 횡방향 변위가 커지기 때문이다. 따라서 고층 아파트의 경우 크지 않은 지진이 발생할 경우에도 상층부의 바닥판에는 상당히 큰 변형이 발생할 수 있으므로 설계시에 주의해한다. 벽식 구조물의 경우에는 전단벽과 전단벽 사이가 바닥판만으로 연결되어 있고 또한 전단벽 사이의 거리가 일반적으로 프레임 구조물의 경간보다 짧기 때문에 그 만큼 변형시 바닥판에 축적되는 변형 에너지가 커지게 된다. 그림 7에 벽식 구조물과 프레임 구조물 바닥판의 변형형상을 나타내었다.



(a) 모델 FS



(b) 모델 WS-1



(c) 모델 WS-2

그림 7. 예제 구조물 바닥판의 변형

벽식 구조물 바닥판의 변형 형상을 보면 횡하중을 Y방향으로 가하였지만 바닥판은 Y방향 뿐만 아니라 X방향으로도 심하게 휘어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 지진하중과 같은 횡하중이 구조물에 가해졌을 때 바닥판의 휨강성이 구조물의 전체 거동에 미치는 영향을 더욱 크게 한다. 이에 반하여 프레임 구조물의 경우에는 바닥판이 하중을 가하는 방향으로만 휘어지고 또한 휨이 발생하더라도 대부분의 변형 에너지는 보에 축적이 되기 때문에 그만큼 바닥판이 구조물의 전체 거동에 미치는 영향은 작아지게 된다.

4. 예제 해석

본 논문에서는 바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 2에 나타난 평면을 가지는 프레임 구조물과 그림 5에 나타난 평면을 가지는 벽식 구조물을 예제 구조물로 선택하였다. 또한 층수의 변화에 따른 건물의 거동을 파악하기 위하여 각각의 평면에 대해서 10층과 20층으로 모형화하여 총 12개의 구조물에 대해서 정적 및 동적 해석을 수행하였다. 정적해석은 등가정적해석을 수행하였고 동적해석은 고유치해석과 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 MIDAS/GEN을 사용하였다.

모든 예제구조물은 철근콘크리트조이고 프레임 구조물 보의 크기는 50cm×30cm, 기둥의 크기는 50cm×50cm로 하였다. 모든 구조물의 바닥판 두께는 13.5cm로 하였고 벽식 구조물에서 전단벽의 두께는 18cm로 하였다.

4.1 등가정적해석에 의한 층변위 및 부재력

앞에서 설명한 12개의 예제 구조물에 대하여 등가정적해석을 수행하였다. 지역계수는 0.12, 중요도 계수는 1, 지반계수는 1, 반응수정계수는 프레임 구조물일 경우에는 4.5, 벽식 구조물 일 경우에는 3.0으로 하였다. 계산된 지진하중은 Y축 방향으로 가하였다. 등가정적해석을 한 후 각 층의 횡방향 변위를 그림 8에서와 같이 바닥판의 휨강성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 비교하였다.

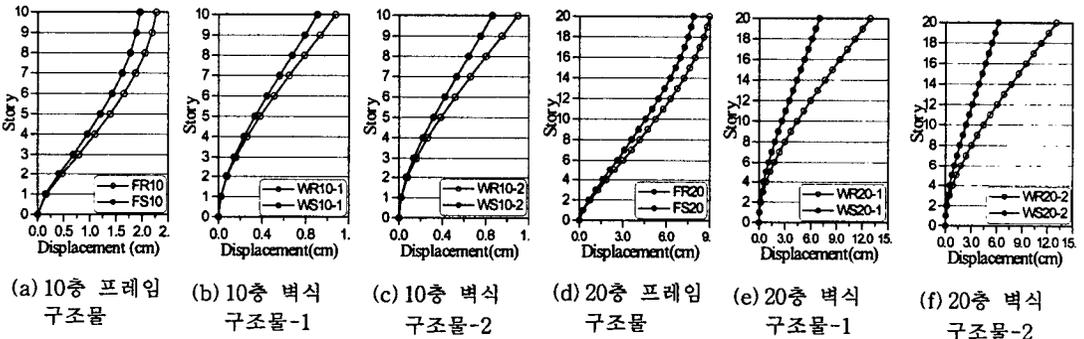


그림 8. 바닥판의 휨강성을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 정적 횡변위 비교

그림 8(a)는 10층 프레임 구조물의 횡변위를 비교한 그림이다. 최상층의 변위를 비교했을 때 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델이 휨강성을 고려한 모델보다 약 15%정도 변위가 더 발생하였다. 이는 바닥판의 휨강성을 고려하면 전체 구조물의 횡방향 강성이 커지기 때문이다. 프레임 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델 사이의 변위차가 별로 크지 않으므로 해석상의 효율성을 위하여 일반 상용프로그램에서는 바닥판의 휨강성을 고려하지 않고 강막으로만 바닥판을 모형화 하고 있다. 그림 8(b)와 8(c)는 벽식 구조물의 횡변위를 나타낸 그림이다. 이 벽식 예제 구조물에서는 최상층의 변위 차이가 각각 19%와 27%로 프레임 구조물 보다는 많은 차이가 발생하였다. 이 이유는 앞 절에서 설명한 바와 같이 벽식 구조물에서는 바닥판에 축적되는 변형 에너지가 프레임 구조물에 비해 크기 때문이다. 또 같은 전단식 구조물이라 하더라도 그림 8(b)와 8(c) 중에서 그림 8(c) 구조물 바닥판의 변형(그림 7)이 더 심하기 때문에 변위의 차이도 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 8(d)는 20층 프레임 구조물의 횡변위를 비교한 그림인데 최상층 변위의 차이가 약 14%정도가 발생했다. 즉 프레임 구조물의 경우에는 층수에 상관없이 바닥판의 휨강성을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델의 차이가 크지 않음을 알

수 있었다. 20층 벽식 구조물일 때의 변위 그래프는 그림 8(e)와 8(f)에 나타내었다. 이 경우에는 최상층의 변위 차이가 각각 85%와 111%에 달한다. 즉 벽식 구조물의 경우에는 층수가 높아 질수록 바닥판의 휨강성이 전체 구조물의 횡방향 강성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 구조물의 상부로 갈수록 바닥판의 변형이 커지기 때문이다. 그림 8을 보면 알 수 있듯이 벽식 구조물의 경우에 전단벽의 배치가 불규칙적일수록, 그리고 구조물이 고층이 될수록 바닥판의 휨강성이 전체 구조물의 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 반하여 프레임 구조물의 경우에는 층수에 관계없이 바닥판의 휨강성이 전체 구조물의 거동에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

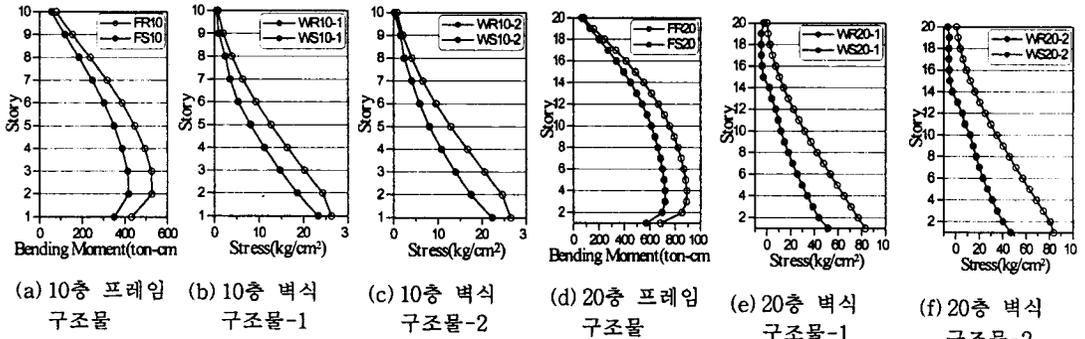


그림 9. 바닥판의 휨강성을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 부재력 비교

그림 9에는 등가정적해석 후 부재에 발생하는 휨모멘트와 응력을 비교한 그래프이다. 부재력은 그림 2와 그림 5에서 A로 표시한 부분의 부재의 값을 취하였다. 프레임 구조물에서는 보에서 발생하는 휨모멘트를 비교하였고 벽식 구조물에서는 전단벽에서 발생하는 수직방향의 응력을 비교하였다. 휨모멘트는 프레임 구조물의 저층부로 갈수록 커지게 되는데 바닥판의 휨강성을 고려했을 때가 고려하지 않았을 때보다 더 작은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 전단벽에서 발생하는 수직 응력도 바닥판의 휨강성을 고려했을 때가 더 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 바닥판의 휨강성을 고려함으로써 구조물의 횡방향강성이 커지게 됨으로 횡변위가 작아져서 전단벽에 발생하는 응력도 작아지는 것으로 판단된다. 또한 바닥판의 휨강성에 의한 전단벽의 응력차이는 고층 구조물일수록 더 크게 나는 것을 알 수 있다.

4.2 동적해석

앞 절에서 설명한 각각의 예제 구조물에 대하여 고유치 해석과 응답스펙트럼 해석을 수행하여 바닥판의 휨강성이 구조물의 동적 특성에 미치는 영향에 대하여 분석해 보았다.

4.2.1 고유치해석

12개의 예제 구조물에 대해서 고유치 해석한 결과를 그림 10에 나타내었다. 모형화 방법에 상관 없이 각각의 구조물 질량은 일정하기 때문에 구조물의 고유진동주기는 강성에 의해서 차이가 나게 된다. 즉 대략적으로 바닥판의 휨강성을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 주기의 비는 정적변위비의 제곱근만큼 발생하게 된다. 그림 10를 보면 모든 예제 구조물에 대해서 바닥판의 휨강성을 고려하였을 때가 고려하지 않았을 때보다 주기가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 정적변위의 경우와 마찬가지로 그림 10(a)와 그림 10(d)의 프레임 구조물의 경우는 층수에 관계없이 바닥판의 휨강성을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 주기 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 벽식 구조물의 경우에는 10층 구조물보다 20층 구조물에서 주기 차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 정적해석

의 결과 바닥판의 휨강성을 고려하지 않으면 정적변위가 더 많이 발생하고 부재의 응력도 크게 계산이 되므로 바닥판의 휨강성을 고려하지 않는게 안전측이라고 생각할 수 있다. 그러나 고유치 해석 결과를 살펴보면 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델이 진동주기가 더 길어지게 되므로 응답스펙트럼을 사용해서 지진하중의 산정하게 될 때 지진하중을 작게 고려하게 된다. 즉 지진하중에 대해서는 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델이 더 안전측이라고 말할 수가 없다. 이에 대해서는 다음절에 더 자세히 설명하였다.

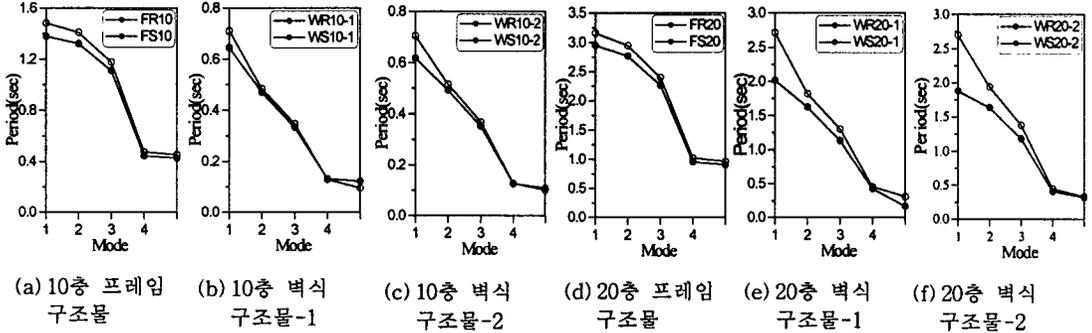


그림 10. 모드별 구조물의 고유진동주기

4.2.2 밀면 전단력

구조물의 고유진동주기가 차이가 나게되면 응답스펙트럼 해석을 수행할 때 응답스펙트럼에서 읽어오는 가속도 값이 차이가 나게된다. 일반적으로 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델이 고려한 모델보다 고유진동주기가 더 길어지게 된다. 즉 그림 11에서 보는 바와 같이 WR20-2가 WS20-2보다 진동주기가 더 길기 때문에 응답스펙트럼에서 읽어오는 가속도 값은 더 작아지게 된다. 이와같이 바닥판의 휨강성을 고려하지 않게 되면 응답스펙트럼에 의해서 계산되는 지진하중이 상대적으로 작게 계산되게 된다. 또한 주기의 차이가 별로 크지 않더라도 주기가 짧을 때에는 응답스펙트럼의 기울기가 급해지므로 가속도의 차이가 커지게 된다. 응답스펙트럼에 의해서 계산된 지진하중이 구조물에 가해졌을 때 구조물에 발생하는 밀면 전단력을 2에 나타내었고, 표 1에는 등가정적해석시의 밀면 전단력을 나타내었다.

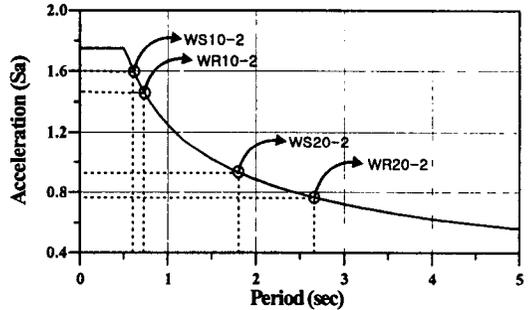


그림 11. 모형화 방법에 따른 가속도의 차이

표 1. 등가정적해석에 의한 예제구조물의 밀면 전단력 비교

(단위:ton)

모델	FR10	FS10	WR10-1	WS10-1	WR10-2	WS10-2	FR20	FS20	WR20-1	WS20-1	WR20-2	WS20-2
밀면 전단력	32.2	32.2	53.7	53.7	63.1	63.1	50.0	50.0	77.2	77.2	90.0	90.0

표 2. 응답스펙트럼해석에 의한 예제구조물의 밀면 전단력 비교

(단위:ton)

모델	FR10	FS10	WR10-1	WS10-1	WR10-2	WS10-2	FR20	FS20	WR20-1	WS20-1	WR20-2	WS20-2
밀면 전단력	19.0	19.8	36.8	38.4	41.8	47.8	25.8	26.8	42.0	47.8	47.8	54.7

표 1에서 보는 바와 같이 등가정적 해석을 할 때는 바닥판의 휨강성을 고려할 때나 고려하지 않을 때나 계산되는 지진하중의 값이 같기 때문에 밀면 전단력의 값도 같아지게 된다. 그러나 응답스펙트럼 해석시에는 표 2에서 보는 바와 같이 같은 구조물이라 할 지라도 바닥판 휨강성의 고려 여부에 따라서 고유진동주기가 달라지므로 바닥판의 휨강성을 고려하지 않고 강막가정으로만 바닥판을 모형화 한 모델은 바닥판의 휨강성을 고려한 모델보다 더 작은 지진하중을 받는 것으로 계산된다. 따라서 보다 정확한 해석결과를 위해서는 바닥판의 휨강성을 고려해서 모형화하는 것이 필요하다.

5. 결론 및 추후연구 과제

본 논문에서는 바닥판의 휨강성이 고층건물의 지진거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 프레임 구조물과 벽식 구조물에 대하여 바닥판의 휨강성을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델을 사용하여 건물의 거동을 분석하여 보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 프레임 구조물의 경우에는 층수에 관계없이 바닥판의 휨강성을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 거동에 큰 차이가 없으므로 바닥판을 모형화할 때 바닥판의 휨강성을 고려하지 않고 강막가정으로 모형화하는 것이 효율적이다.
- 2) 벽식 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성이 구조물의 횡방향 강성에 미치는 영향이 비교적 크다는 것을 확인할 수 있었고 특히 전단벽의 배치가 불규칙적이고, 건물이 고층일수록 이러한 경향은 더욱 크게 발생한다. 따라서 벽식 구조물의 경우에는 바닥판의 휨강성을 고려하지 않으면 구조물 전체의 횡방향 강성이 지나치게 과소평가되므로 바닥판의 휨강성을 고려하는 것이 필요하다.
- 3) 바닥판의 휨강성 고려 여부에 따라서 고유진동주기 역시 큰 차이가 나게되므로 응답스펙트럼 해석시에 계산되는 지진하중도 차이가 나게 된다. 이때는 바닥판의 휨강성을 고려하지 않은 모델의 지진하중이 더 작게 계산되므로 바닥판의 휨강성을 고려하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Timoshenko, S. P., Weaver, W., Jr., Young, D. H., *Vibration Problem in Engineering*, John Wiley & Sons, Fifth Edition, 1990
2. Weaver, W., Jr., Johnson, Paul R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, 1987
3. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures a Primer*, Earthquake Engineering Research Institute
4. Weaver, W., Jr., Gere, James M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, Van Nostrand Reinhold, Third Edition, 1990
5. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Second Edition, McGraw-Hill, 1993
6. 초고층건물의 구조계획 및 설계, 한국전산구조공학회 교재 17-1, 1998