

무량판 구조의 횡하중 저항시스템 및 설계 절차

Lateral Load Resisting System and Design Procedure of Flat Plate Structure



이현호*
Hyun-Ho Lee



김도현**
Do-Hyun Kim



김영식***
Young-Sik Kim



우성우****
Sung-Woo Woo

1. 머리말

협소한 거주공간에 비하여 높은 인구밀도(특히 대도시)를 가진 우리나라의 주거 형식은 주로 벽식 구조였다. 이 시스템은 슬래브에 작용하는 하중을 벽체를 통하여 기초에 전달하므로, 보-기둥 골조보다 경제적이란 장점 및 적은 평형에 적합한 특징을 가지고 있다. 하지만 경제수준 및 금융수준의 향상에 따른 개성적인 공간의 요구 및 주상복합 등과 같은 이중 구조형식의 결합 필요성 등으로 인하여 새로운 구조형식을 필요로 하고 있다. 또한 앞으로의 주거환경은 수요자의 다양한 주거평면 요구의 수용 및 리모델링 또는 장래의 증개축이 용이한 골조형 구조 형식으로의 전환이 불가피한 실정이다. 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 시스템으로 무량판 시스템이 각광받고 있으며, 이미 초고층 주상복합건물의 경우 층고절감이 가능한 무량판 시스템이 많이 적용되고 있다<그림 1>.

이러한 현실을 감안하여 벽식 구조의 장점을 최대한 활용하면서 골조와 접목 가능한 무량판(flat plate) 구조시스템의 개발이 적절한 것으로 판단되며, 국내에서도 최근 수년 간 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 이러한 무량판 구조는 다른 시스템에 대하여 슬래브-기둥 접합부의 거동 및 해석이 복잡하며, 기둥 주위의 뚫림전단(punching shear) 등과 같은 전단 성능 확보 또한 필요한 실정이다.

우리 학회 슬래브-벽체위원회는 2005년부터 무량판 구조시스템의 설계지침 작성을 진행하여, 2007년 5월 전문위원회 발표에서 초안을 발표하였다. 현재는 실무전문가들을 영입하여 2008년 상반기 전문도서 발간을 위한 원고를 작성하고 있다.

* 정회원, 동양대학교 건축소방행정학과 교수
hhlee@dyu.ac.kr

** 정회원, (주)동양구조안전기술 구조공학시스템연구소 실장

*** 정회원, (주)영구조엔지니어링 대표이사

**** 정회원, (주)한화건설 건축기술팀 차장, 공학박사

주요 내용은 무량판 구조의 횡하중 해석 모델, 슬래브 전단보강 및 휨보강 설계방법, 슬래브 개구부 보강, 무량판 주기 고찰 및 설계지침(안) 및 예제로 구성되어 있다. 자세한 내용은 특집 원고에 시리즈로 게재될 예정이며, 첫 번째로 본고에서는 무량판 구조의 횡하중 저항시스템 및 설계절차에 대하여 소개하고자 한다.

2. 무량판 구조의 수평력 저항 시스템

2.1 수평력 저항 시스템 선정

일반적인 라멘 구조물에 작용하는 중력하중은 슬래브, 작은 보, 큰 보, 기둥을 거쳐 기초로 전달된다. 그러나 무량판구조에서는 내부에 보가 없고, 슬래브에서 기둥으로 바로 하중이 전달된다는 특징이 있다. 따라서 기둥과 슬래브 사이의 하중전달에 특히 주의가 필요하다. 구조설계는 중력하중 이외에 풍하중, 지진하중 등의 횡하중을 포함하는 다양한 하중조합에 만족해야한다. 특히 수평력에 의한 저항은 무량판-기둥의 골조 기여도와 전단벽



그림 1. 무량판 구조물 적용 사례(서울 삼성동 소재, 46층)

의 기여도에 따라 다양한 지진력 저항 시스템 중 적절한 시스템이 결정되어야 한다.

2.1.1 지진력 저항 시스템

무량판 구조에 사용 가능한 지진력 저항 기본구조 시스템은 <그림 2>와 같이 모멘트 저항골조, 내력벽 시스템, 이중골조 시스템, 건물골조 시스템으로 분류할 수 있다.

(1) 모멘트 저항 골조 시스템

횡력은 주로 골조부재의 휨거동에 의해 저항한다. 완전한 3차원 골조나 일부 골조가 지진력 저항 시스템으로 설계될 수 있다. 이 시스템의 모든 부재는 관련 내진설계범주에 따라 설계해야 하며, 내진설계범주 'A', 'B'에 해당되는 구조물은 철근콘크리트 보통 모멘트 골조가 사용되며 콘크리트구조설계기준(1999)에 요구되는 상세규정의 적용은 필요 없다. IBC 2000¹⁾에서 중간 모멘트 골조와 특수 모멘트 골조는 내진설계범주 'C'에 해당하는 구조물에 사용된다. 콘크리트 중간 모멘트 골조의 경우 횡력저항 골조의 부재는 KBC 2005²⁾의 현행 연성 모멘트 골조에 관한 설계규정의 요구사항을 만족시키면 된다.

IBC 2000에서 특수 모멘트 골조는 내진설계범주 'D'에 해당된다. 특수 모멘트 골조는 큰 지진동 가속도가 예상되는 높은 진도지역에서 요구되므로, KBC 2005에서는 특수 모멘트 골조는 현재 정의되고 있지 않다. IBC 2000의 경우 특수 모멘트 골조는 ACI 21.2³⁾부터 ACI 21.5까지 특수 상세 요구사항을 만족시켜야 한다.

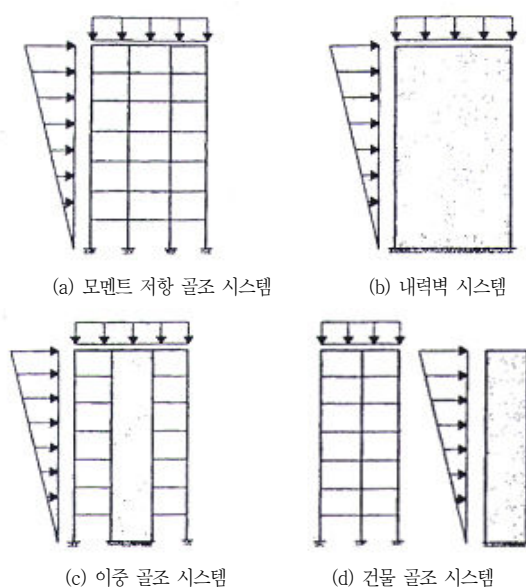


그림 2. 횡력 저항 시스템

(2) 내력벽 시스템

중력하중의 거의 전체를 지지하고 횡력에 대한 저항도 전단벽과 같이 거동하는 벽체를 갖는 시스템이다. IBC 2000에서는 철근콘크리트 보통 전단벽은 내진설계범주 'A', 'B'에 해당된 구조물에 사용된다. 철근콘크리트 보통 전단벽은 철근콘크리트 구조물을 위한 KBC 2005의 0507.9의 요구사항을 만족해야 한다. IBC 2000에서는 내진설계범주 'C'에 해당된 구조물에 대해서는 철근콘크리트 특수 전단벽과 철근콘크리트 보통 전단벽이 사용될 수 있다. 철근콘크리트 특수 전단벽은 IBC 2000의 경우 IBC 1910.2.4의 특수 철근콘크리트 구조 벽체를 위한 ACI 21.7의 요구 사항과 부합하는 벽체이다. IBC 2000에서는 철근콘크리트 특수 전단벽은 내진설계범주 'D'에 해당된 내력벽을 갖는 구조물에 요구된다. 그런 경우 건물의 높이는 50m로 제한된다. 그러나 다음을 만족할 경우 높이제한을 50m에서 75m로 증가시킬 수 있다.

- ① 고려하는 방향에서 가새 골조나 전단벽이 전체 지진력의 50%를 초과하여 저항하지 않는다.
- ② 가새 골조나 전단벽에서 비틀림 효과로 발생하는 지진력은 전체 지진력의 20%를 초과하지 않는다.

그러나 KBC 2005에서는 보통 전단벽 만이 사용되고 있어, 무량판 구조에서의 내력벽시스템 적용은 매우 제한적일 수밖에 없다.

(3) 이중 골조 시스템

다음과 같은 특징을 갖는 구조물이다.

- ① 반드시 완전한 공간 골조가 이루어져서, 중력하중을 저항하여야 한다.
- ② 최소 설계전단력의 25%를 모멘트 골조가 저항할 수 있어야 한다.
- ③ 두 개의 횡력저항 하위 시스템(모멘트 저항 골조, 전단벽)은 강성에 비례하여 설계전단력을 분할하여 저항하여야 한다.

IBC 2000에서는 모멘트 골조가 특수 모멘트 골조인 경우와 중간 모멘트 골조인 경우로 이중 골조로 분리해서 고려하고 있다. 내진설계범주 'D'로 할당된 건물에, 특수 모멘트 골조와 특수 철근콘크리트 전단벽을 갖는 이중 골조는 어떤 높이의 제한 없이 사용될 수 있다. 중간 모멘트 골조와 특수 철근콘크리트 전단벽을 갖는 이중 골조도 또한 사용될 수 있으나, 내진설계범주 'D'에서는 높이가 50m로 제한된다. 내진설계범주 'C'인 건물은 특수 또는 중간 모멘트 골조를 갖는 특수 또는 보통 철근콘크리트 전단벽을 갖는 이중 골조 시스템에는 어떤 제한 없이 사용될 수 있다. KBC 2005에서는 중간 모멘트 골조를 갖는 이중 골조 시

표 1. 무량판구조의 지진력 저항 시스템에 대한 설계계수

적용 기준	기본 지진력 저항시스템*	보강상세 해당규정	설계계수		
			반응 수정 계수(R)	시스템초과강도 계수(Ω_0)	변위증폭 계수(C_d)
KBC 2005	내력벽 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	0521	4.5	2.5	4
	건물 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	0521	5	2.5	4.5
	중간 모멘트 골조를 가진 이중 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	0521	5.5	2.5	4.5
IBC 2003	내력벽 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	1910.2.3	4.5	2.5	4
	건물 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	1910.2.3	5	2.5	4.5
	중간 모멘트 골조를 가진 이중 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	1910.2.3	5.5	2.5	4.5
NEHRP 2003	내력벽 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	9.2.1.4	4	2.5	4
	건물 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	9.2.1.4	5	2.5	4.5
	중간 모멘트 골조를 가진 이중 골조 시스템 - 보통 철근콘크리트 전단벽	3.2.1.3	5.5	2.5	4.5

* 시스템별 상세는 각 재료별 설계기준 및 또는 신뢰성 있는 연구기관에서 실시한 실험, 해석 등의 입증자료를 따른다.

시스템이 사용되고 있으며, 무량판 구조의 횡력 저항 시스템으로 적용 가능한 것으로 판단된다.

(4) 건물 골조 시스템

전단벽과 골조의 상호작용은 횡하중 해석 시 고려하지 않으며, 모든 횡하중은 전단벽과 같은 벽체에 부담한다. IBC 2000에서는 철근콘크리트 특수 전단벽은 내진설계범주 'D'에 사용되며, 50m까지 높이가 제한된다. 비록 벽체가 모든 지진력을 전달하도록 설계하여도, 보-기둥 골조는 지진에 의한 횡변위에 처해서도 중력하중을 안전하게 지탱하도록 해야 한다. KBC 2005 0306.6.4.2에서는 변형적합성 요구사항을 만족해야 하는 까다로움이 있지만, 구조물의 높이제한이나 이 시스템의 사용제한은 없는 장점이 있다.

2.1.2 설계기준의 지진력 저항 시스템

각국의 설계기준에서는 여러 가지 기본지진력 저항 시스템을 제시하고 있다. KBC 2005 기준을 근간으로, IBC 2003⁴⁾, NEHRP 2003⁵⁾의 무량판구조에 대한 지진력 저항시스템에 대한 반응수정계수 R , 시스템초과 강도계수 Ω_0 , 그리고 변위증폭계수 C_d 를 <표 1>과 같이 정리하였다. 일반적으로 판상형 무량판구조의 단변방향의 경우 전단벽의 기여도가 큰 반면, 장변 방향은 전단벽의 기여도가 단변방향만큼 크지 않다.

KBC 2005 해설 편에 따르면 연성 모멘트 골조를 사용한 건물골조시스템에 대하여 지진력에 대한 저항을 고려할 수 있게 하고 있다. 보통 모멘트 골조 및 보통 철근콘크리트 전단벽은 KBC 2005 0501~0520의 기준을 적용하여 설계하여야 하며, 중간 모멘트 골조는 KBC 2005 0501~0520 기준의 만족은 물론, 0521의 기준을 만족하도록 설계하여야 한다.

3. 무량판 구조설계시 고려 사항

무량판 구조 시스템의 수평력 저항 시스템을 선정하면 이에 따른 해석 방법, 모델링, 설계요구사항까지 종합적으로 고려하여야 한다. 이를 토대로 무량판 구조설계는 다음과 같이 세 단계로 구분할 수 있다.

- ① 구조 시스템 선정
- ② 구조 시스템 별 요구 사항
- ③ 구조설계

무량판 구조물 내진설계는 이하의 순서도를 통하여 검토 및 설계하는 것이 적절하다.

3.1 구조 시스템 선정

내진설계의 첫 단계는 구조시스템 선정 과정이다<그림 3>. 분류기준은 먼저 골조의 횡력기여도로 분류된다. 횡력기여도의

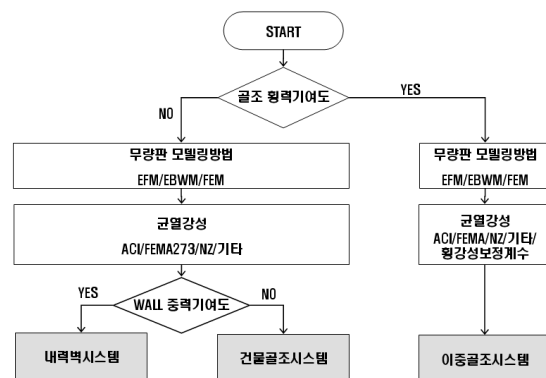


그림 3. 무량판 구조 시스템 선정 과정

유무에 따라 이중 골조 시스템 또는 내력벽, 건물 골조 시스템으로 구분된다. 두 번째 분류 기준은 벽체의 중력기여도로 중력기여도의 유무에 따라 내력벽 시스템과 건물 골조 시스템으로 구분된다. 따라서 무량판 구조물에는 골조와 벽체의 기여도에 따라 내력벽, 건물 골조, 이중 골조 시스템이 적용가능하다. 무량판 구조물의 경우 평면 형태에 따라 판상형과 타워형으로 구분되며, 이에 대한 고려가 필요하다.

<표 2>에 나타난 것과 같이 판상형 무량판 구조 시스템의 경우, 장변방향은 전단벽량이 부족하므로 지진에 의한 설계밀면 전단력을 모두 전단벽이 저항하는 것은 불가능하다. 따라서 골조의 기여도를 고려하는 이중 골조 시스템이나 연성 모멘트 골조를 사용한 건물 골조로 선정되어야 한다. 따라서 시스템 선정은 단변방향에 따라 위의 네 가지 경우로 분류되며, 각각의 요구조건을 따라야 한다. <표 2>의 ALT4는 변형적합성 검토에 대한 명확한 방법이 제시되어 있지 않은 상황에서 2006년에 발간된 “건축구조설계기준 및 해설”에 근거를 두고 있다. 이 해설에서는 “이중 골조 시스템의 요건에 적합하지 않은 경우, 즉 연성모멘트골조(중간모멘트골조)가 독립적으로 설계지진력의 25%를 받지 못하는 경우에는 건물골조시스템으로 설계할 수 있다”라고 하고 있다. 즉, 25% 미만의 지진력을 받는 중간모멘트골조가 사용되는 경우 골조와 전단벽이 각각의 강성비로 횡력을 분담하며, 반응수정계수로 건물골조시스템의 5.0을 사용할 수 있다는 의미이다. 이 경우 개념상 골조는 더 이상 지진력에 저항하지 않는 구조부재가 아니므로 변형적합성을 고려할 필요가 없다.

<표 3>에 나타난 타워형의 경우 장단변의 시스템이 대칭이므로 각 방향에 동일한 시스템이 적용가능하다. 타워형 무량판 구조시스템의 경우, 중앙 코어로 전단벽이 지진에 의한 밀면전단력의 상당부분을 저항하므로, 각 방향에 위의 네 가지 시스

표 2. 판상형 무량판 구조 시스템에서 고려가능한 시스템

		ALT 1	ALT 2	ALT 3	ALT 4
지진력 저항 시스템	장변	이중 골조 (R=5.5)	이중 골조 (R=5.5)	이중 골조 (R=4.5)	건물 골조 (R=5.0)
	단변	이중 골조 (R=5.5)	건물 골조 (R=5.0)	전단벽 (R=4.5)	건물 골조 (R=5.0)
무량판 상세	장변	중간모멘트골조	중간모멘트골조	중간모멘트골조	중간모멘트골조
	단변	중간모멘트골조	보통모멘트골조	보통모멘트골조	중간모멘트골조
해석시 고려사항*	장변	골조25% 횡력분담	골조25% 횡력분담	골조25% 횡력분담	-
	단변	골조25% 횡력분담	변형적합성 검토	변형적합성 검토	-

* 공통사항으로 벽체의 도입되는 축력이 10%를 초과하는지 검토하여야 한다.

표 3. 타워형 무량판 구조 시스템에서 고려 가능한 시스템

	ALT 1	ALT 2	ALT 3	ALT 4
지진력 저항 시스템	이중 골조 (R=5.5)	건물 골조 (R=5.0)	전단벽 (R=4.5)	건물 골조 (R=5.0)
무량판 상세	중간 모멘트 골조	보통 모멘트 골조	보통 모멘트 골조	중간 모멘트 골조
해석시 고려사항*	골조25% 횡력분담	변형적합성 검토	변형적합성 검토	-

* 공통사항으로 벽체의 도입되는 축력이 10%를 초과하는지 검토하여야 한다.

템이 적용가능하다. 이중 골조 시스템의 경우에는 골조만으로 전체 밀면전단력의 25%를 저항하도록 설계하여야 하며, 벽체의 축력을 검토해야 한다. 반면 건물 골조 시스템의 경우 대부분 설계대상이 내진설계범주 'D'에 해당되므로 변형적합성을 검토하여야 하며, 벽체에 도입되는 축력을 검토해야 한다.

3.2 구조 시스템별 요구 사항

3.1절의 절차로 대상 구조물에 적절한 구조 시스템이 결정되면, 관련규준에 의거 해당되는 구조시스템별 요구사항을 충족하여야 한다. KBC 2005의 요구사항 중 시스템에 따라 결정되는 중요한 설계변수로 주기식 산정과 설계변수가 있다.

- ① 규준에서 정의된 주기식은 철근 모멘트 골조($C_t=0.073$)와 기타구조($C_t=0.049$)를 구분하고 있다. 내력벽과 건물골조시스템의 경우 전단벽이 주요 지진력 저항 요소이므로 $C_t=0.049$ 를 사용하여야 한다. 그러나 이중 골조의 경우는 전단벽과 골조의 구성비에 따라 $C_t=0.049$ 또는 0.073 이 가능하나 적절한 검토가 필요하다.
- ② 설계변수는 내진설계에 큰 영향을 미치는 변수로 그 중 반응수정계수(R)가 밀면전단력 산정에 직접 영향을 미치므로 중요하다. <그림 4>의 건물 골조와 이중 골조의 R 값 옆의 4.5는 내진설계범주 'D'에서 직교방향 시스템이 내력벽시스템인 경우에 적용되는 값을 나타낸 것이다.

3.3 구조설계

내력벽 시스템의 경우 모든 구조부재는 보통상세에 해당되는 철근콘크리트구조로 설계하여야 한다. 건물 골조가 내진설계범주 'D'인 경우 건물 골조 시스템은 변형적합성 조건을 만족하여야 하며, 골조 부분은 보통모멘트 골조를 이용한다. SEAOC Blue Book⁹⁾에 따르면 건물 골조 시스템의 벽체는 자중을 포함하여 벽체에 작용하는 축력이 공칭축강도의 10%를 초과하지 않게 설계되도록 규정하고 있다. 이중 골조 시스템의 경우 골조부분으로 중간 모멘트 골조를 사용하고, 벽체는 건물 골조와 같은

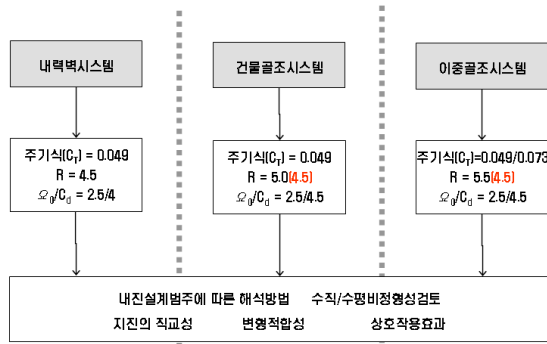


그림 4. 무량판 구조 시스템 요구사항

방법으로 설계한다(그림 5).

시스템 선정되면 다음으로 무량판 모델링에 대한 기본 방향을 설정하여야 한다. 선정기준은 무량판의 횡강성 고려 여부에 따라 균열강성 및 무량판 모델링 방법이 결정된다. 무량판 구조의 기본진동주기는 KBC 2005 0306.5.4 기본진동주기의 약산법에 따라 산정하거나 저항요소의 변형특성과 구조적 특성을 고려한 기타 적절한 방법으로 구할 수 있다. 기준 산정식은 25층 정도의 철근콘크리트 구조물로서 최소한의 전단벽이나 가새구조를 포함한 경우에 대한 자료를 근거로 설정된 것이다. 따라서 건축물의 동적거동에 큰 영향을 미치지 않을 정도의 최소한의 전단벽이나 가새 골조를 포함한 이중 골조 방식에서 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 단변방향에 있어 일반구조물보다 전단벽이 적어 보다 유연한 거동을 보이는 판상형 무량판 구조의 경우, 철근 콘크리트 모멘트 골조는 물론 선택적으로 그 외 다른 모든 건물에 관한 약산식으로도 기본진동주기를 산정할 수도 있다.

무량판 구조 시스템 선정은 설계자가 선택한 반응수정계수 R 값을 만족시켜주는 상세를 적용하는 것으로 이루어져야 한다. 전 단벽과 모멘트 골조의 횡력기여도에 따라 내력벽시스템(4.5),

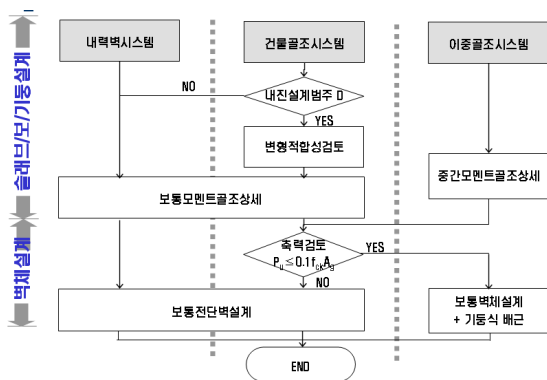


그림 5. 무량판 구조 시스템의 구조설계 절차

건물 골조 시스템(5.0), 이중 골조 시스템(5.5) 중 한 시스템을 선택할 수 있다. UBC 97에는 강진지역에 내력벽 시스템과 직교 방향에 보다 연성이 높은(R값이 큰) 시스템이 사용되는 경우, 내력벽 면외방향의 과도한 변형에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 직교방향 시스템의 반응수정계수를 내력벽 시스템의 반응수정계수(4.5)로 제한하고 있다. UBC 97과 유사한 개념으로 IBC 2000에서는 내진설계범주 'D' 이상인 경우, 어느 방향에 5 미만의 반응수정계수를 갖는 지진력 저항 시스템이 적용되는 경우에 가장 낮은 R값을 사용하도록 규정하고 있다.

4. 맺음말

본고에서는 무량판 구조의 횡하중 저항 시스템 및 구조설계 절차를 관련 설계기준에 의거하여 기술하였다. 2005년 대한건축학회에서 건축구조설계기준이 발표된 이후, 무량판 구조 시스템에 적절한 횡하중 저항 시스템은 무엇일까?란 의문으로 고찰이 시작되었다. 특히 판상형 무량판구조의 경우 장변과 단변의 횡하중 저항 시스템이 다르게 평가되므로, 실무에서의 적용이 다소 복잡하게 되었다. 이러한 현실을 감안하여 본고에서는 무량판 구조에 적용될 수 있는 횡하중 저항 시스템을 체계적으로 정리하였으며, 이러한 내용이 구조 엔지니어와 연구개발에 종사하는 전문가들에게 많은 도움이 되기를 바란다. □

참고문헌

1. International Code Council(ICC), *Internal Building Code*, ICC, 2000.
2. 대한건축학회, 건축구조설계기준, 대한건축학회, 2005.
3. American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI318-02) and Commentary (ACI318-R02)*, ACI, 2002.
4. International Code Council(ICC), *Internal Building Code*, ICC, 2003.
5. Building Seismic Safety Council, *2003 Edition NEHRP Recommended Provisions or Seismic Regulations for Buildings and Other Structures(FEMA 450)*, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, 2004.
6. Structural Engineers Association of California(SEAOC), *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, SEAOC, 1996.
7. Ghosh, S. K. and Fanella, David A., *Seismic and Wind Design of Concrete Buildings*(2000 IBC, ASCE 7-98, ACI 318-99), International Code Council, 2003.
8. Structural Engineers Association of California(SEAOC), *Seismic Design Manual Volume I*, SEAOC, 2000.