

철근콘크리트 무량판 구조시스템의 횡저항 성능 평가 Evaluation of Lateral Performance in RC Flat Plate System

송호범* 송진규**
Song, Ho-Bum Song, Jin-Gyu

ABSTRACT

Recently, as RC flat plate system is applied on high-rising building largely, necessity of all over research about lateral performance becomes a prominent. In this paper, It is estimated that performance of slab-column connection in flat plate system is inter-story drift index 3.6%. In addition, when R-factor is fixed in seismic design, it must be considered all system. Also Considering that plastic hinge propagation is not adjustable, R-factor should be applied bellow "5.5".

1. 서 론

철근콘크리트 무량판 구조는 보가 없이 슬래브를 기둥이 직접 지지하는 시스템으로 우리나라에서는 1995년 삼풍백화점 붕괴 사건 이후 기둥-슬래브 접합부의 취약성과 내진성능의 부족으로 인하여 건축물에 적극적으로 활용되지 못하였다. 그러나 미국에서는 우리나라와 유사한 내진설계 지역(중·약진지역)인 뉴욕과 시카고 등지에서 초고층 무량판 구조가 모멘트 연성 골조로 널리 활용되고 있으며 접합부 설계방법의 개선 및 전단보강 시스템의 개발을 통하여 점차로 강진지역에서도 이 시스템을 도입하고 있다. 무량판 구조는 몇 가지 단점에도 불구하고 기둥이 슬래브를 직접 지지하기 때문에 층고가 낮고 골조 및 설비 공사비를 절감할 수 있으며 단순한 거푸집 공사 및 공기 단축 등으로 매우 경제적인 시스템이다. 또한 내부 공간 구성이 자유로우므로 건축 계획에 있어 유통성을 확보할 수 있고 추후 가변에 대한 제약이 적기 때문에 주거용과 사무용에 매우 효과적이다. 이러한 점으로 인하여 최근 들어서는 우리나라에서도 무량판 구조에 대해 관심이 증가하고 있고 고층 주상복합 건물 등에 많이 적용되고 있다.

하지만 무량판 구조 건물의 내진설계 시 반응수정계수의 적용이나 시공 시 슬래브-기둥 접합부의 내진 상세 등에 있어서 대부분 미국 등지에서 적용하고 있는 사례를 기준으로 하고 있다. 물론 국내에서도 반응수정계수 등의 평가에 대한 부분적인 연구가 진행되고 있으나 무량판 구조시스템

* 학생회원, 전남대학교 건축공학과, 박사과정

** 정회원, 전남대학교 건축학부, 부교수

의 성능 평가에 대한 전반적인 연구가 미비한 것은 사실이다. 따라서 본 논문에서는 무량판 구조 시스템의 지니고 있는 슬래브-기둥 접합부의 성능을 실험을 통하여 평가하고 이 접합부의 성능이 구조시스템 전반에 어떤 성능을 부여하는지를 분석하고자 한다. 또한 무량판 구조시스템의 내진설계 시 필요한 반응수정계수 등의 설계계수를 얻기 위하여 무량판 구조시스템이 어느 지진력저항 시스템에 해당되는지를 알아보고자 한다.

2. 무량판 구조시스템의 슬래브-기둥 접합부 성능

2.1 선행실험 결과

보가 없는 무량판 구조에서 슬래브의 횡저항 능력은 대부분 슬래브-기둥 접합부의 실험을 통하여 수행되었다. 본 논문에서도 선행연구(건설교통부, 2001)에서 수행한 구조실험 결과를 이용하고자 한다. 선행된 구조실험에서 실험체 슬래브의 크기는 $2750\text{mm} \times 1650\text{mm} \times 90\text{mm}$ (가로×세로×두께)이고 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ 크기의 기둥을 갖는다. 실험체 슬래브에 작용하는 하중의 크기는 2107Pa (구체 슬래브 하중), 1960Pa (마감하중), 그리고 2940Pa (활하중)이다. 횡하중 실험체를 설치하고 사용하중을 묘사하기 위한 7007Pa (구체 슬래브 하중/2 + 마감하중 + 활하중)의 하중을 구체 슬래브 상부에 등분포로 재하하였다.

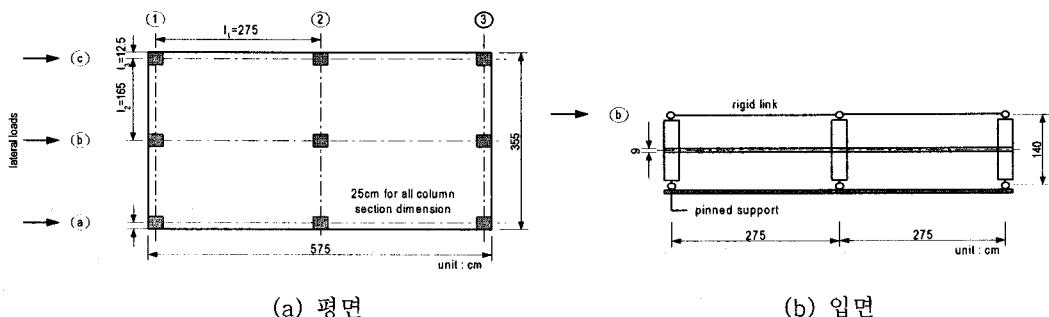


그림 1. 실험체 형상

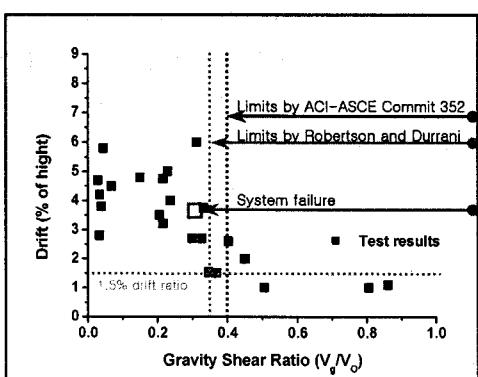


그림 2. 실험체의 변형성능

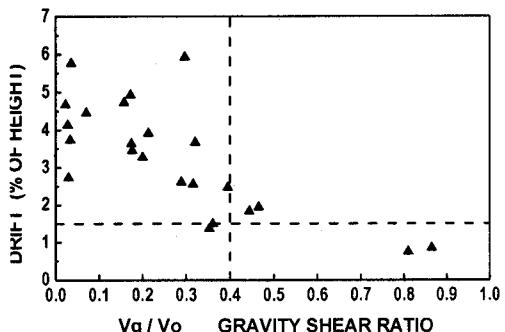


그림 3. 충간변위에 대한 중력하중의 효과

이 실험체에 횡변위 하중을 가력할 때 50mm 전·후에서 내부 접합부를 제외한 대부분의 접합부에 2방향 전단파괴가 일어났고(System failure zone) 최종 파괴는 횡변위비 약 110mm 정도에서 발생(Collapse zone)하였다. 그림 2는 횡하중-변위 관계에서 분석한 시스템 파괴시점을 정리한 것이다. 그림 2에서와 같이 실험 결과, 실험체 내력의 약 20% 정도 감소를 보인 시스템 파괴시점은 실험체 충간변위비의 약 3.6%(전단내력비 30%)이었다. 하지만 이 충간변위비 3.6%라는 것은 실험체의 전(full) 성능을 고려한 값이기에 내진설계 시 유효한 충간변위비에 대해서는 안전율을 고려하여 실험체 전 성능의 70% 수준인 2.5%를 슬래브-기둥 접합부의 성능점으로 보는 것이 합당할 것으로 사료된다. 그림 3는 ACI318-05에서 제한하고 있는 것으로 1989년에 발표된 Pan & Moehle의 연구 결과를 근거로 하여 슬래브-기둥 접합부가 1.5% 이상의 충간변형 능력을 보유하는 횡저항 요소가 되기 위해서는 뚫림전단내력에 대한 중력하중 비가 40% 이내가 되도록 해야 한다는 것을 나타내고 있으며 제시하고 있다.

2.2 실험결과의 적용

NEHRP 규정(BSSC, 1988)에 의하면, 반응수정계수(R)는 강도계수(R_s), 연성계수(R_u), 감쇠계수(R_d), 영여도계수(R_R)의 네 가지 구성요소의 곱으로 표현할 수 있다. 여기에서 감쇠계수의 경우는 면진 장치나 에너지 흡수장치가 달린 건물의 감쇠능력에 관한 것으로 이러한 외부 제진장치가 없는 경우에는 큰 의미가 없다. 또한, 영여도계수의 경우에도 부정정 차수가 높은 건물의 경우 대부분 1이 되어 반응수정계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 반응수정계수를 산정하는데 주로 영향을 미치는 강도계수와 연성계수만을 고려하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = R_s \times R_u$$

각 계수들을 적절히 평가하기 위해서는 우선적으로 대상 구조물의 하중-변위 응답을 통해 비탄성 특성을 포함한 성능을 알아야 한다. 대부분의 경우 비선형 해석 프로그램을 사용, 해석적으로 접근하여 하중-변위 곡선(능력곡선)을 찾아낸다. 그림 4는 이렇게 해서 찾아진 일반적인 구조물의 능력곡선을 나타내는 것으로 V_D 는 설계강도, V_y 는 능력곡선을 이선형화 했을 때의 최대보유강도, Δy 는 항복변위, Δmax 는 지붕층의 최대 변위를 나타낸다. 여기서, 강도계수 $R_s = V_D / V_y$, 연성계수 R_u 는 N2 Method(Fajfar, 2000)를 이용하여 구할 수 있다. 또한 Δmax 은 앞서 언급

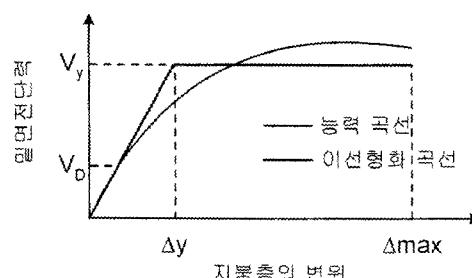


그림 4 일반적인 구조물의 하중-변위 곡선

한 2×2 경간을 갖는 무량판 실험체에서 얻어진 성능점인 특정층의 층간변위비가 2.5%에 도달했을 때 지붕층의 최대 층간변위를 나타낸 것이다. 만약 층간변위비 2.5% 이전에 건물이 붕괴된다면 붕괴직전의 지붕층의 최대 층간변위를 나타낸다.

3. 무량판 구조시스템의 반응수정계수

무량판 구조시스템의 반응수정계수를 산정하기 위하여 무량판 구조 판상형 아파트, 무량판 구조 타워형 초고층 건물 등의 예제 건물을 Midas-Genw v690을 이용하여 설계하였고 슬래브 유효보폭법(Choi & Song)을 적용하여 Canny-C02로 비선형 해석을 수행하였다.

3.1 무량판 구조 판상형 아파트

여기서는 2001년도 건설교통부 연구과제에서 제안된 판상형 아파트의 24평형 주동형식을 기본으로 해석을 수행하였다. 건물은 층에 관계없이 그림 5의 평면을 갖고, 슬래브의 두께는 $200mm$, 지진하중은 우리나라의 서울지역(지반조건: S_b)을 적용하였다. 구조물의 설계는 KCI-USD03에 근거하였으며, 콘크리트 압축강도는 $30MPa$, 철근의 항복강도는 $400MPa$ 로 가정하였다.

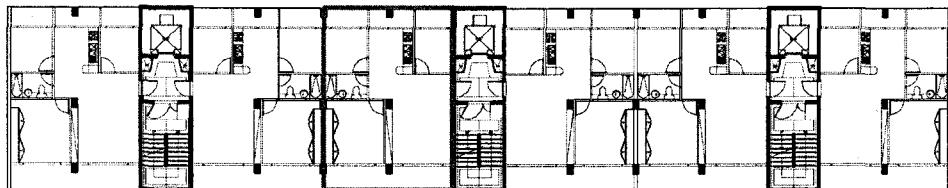


그림 6. 24평형 무량판 판상형 아파트 기준층 평면

무량판 판상형 아파트의 반응수정계수 산정 결과 5층 예제 건물은 "5.23", 10층 예제 건물은 "4.94"를 나타내었다. 이는 국내 건축구조설계기준(KBC 2005)에서 제시하고 있는 건물골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.0" 이상이거나 그에 근사한 값을 나타내었다. 그러나 중간 모멘트골조를 가진 이중골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.5"보다 5~11% 미만의 값을 나타내었다. Pushover 해석 결과를 분석해 보면 다음과 같다. 표 1에서와 같이 층이 높아질수록 연성계수(R_p)의 값은 커졌으나 강도계수(R_s)의 값은 작아졌다. 이는 고층으로 갈수록 횡변위가 커지고 이로 인하여 연성계수가 커지는 것으로 판단된다. 반면 강도계수는 저층 건물보다 고층 건물이 받는 횡방향의 하중(모멘트)이 커서 강도계수가 작아지는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 최소 벽두께 및 최소 철근비 규정에 의해서 저층 건물일수록 최적설계단면 보다 더 크게 단면설계가 이루어졌기 때문으로 판단된다.

표 1. 층별 무량판 구조 판상형 아파트 결과치

	R_p	R_s	R
5층	3.82	1.37	5.23
10층	3.98	1.24	4.94

3.2 무량판 구조 타워형 초고층건물

여기서는 P건설사에서 부산광역시에 건설할 주상복합 건물을 대상으로 해석을 수행하였다. 건물은 MIDAS-IT에서 설계를 하였고 건물의 높이는 $194,000\text{mm}$, 기준층의 높이는 3030mm , 슬래브의 두께는 270mm 이다. 그림 7의 (a)는 예제 건물의 저층부 평면을, (b)는 고층부 평면을 나타낸다. 지진하중은 우리나라의 부산지역(지반조건: S_b)을 적용하였으며 KCI-USD03에 근거하였다. 콘크리트 압축강도는 수직부재는 $35\sim 50\text{MPa}$, 수평부재는 $30\sim 35\text{MPa}$, 철근의 항복강도는 400MPa 로 가정하였다.

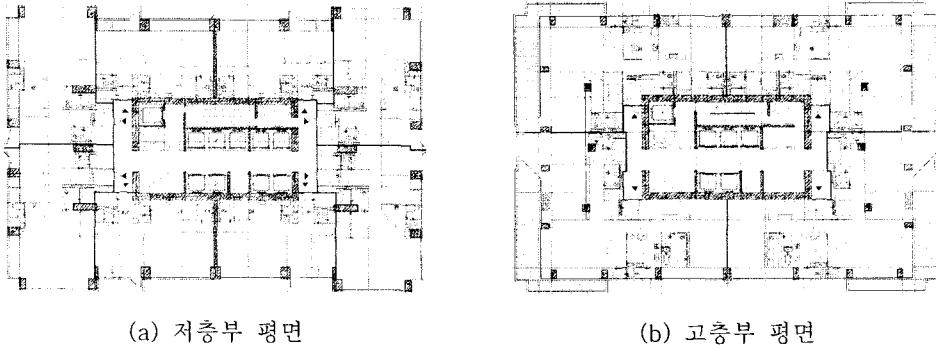


그림 7. 초고층 건물의 평면

무량판 구조 타워형 초고층 건물의 반응수정계수 산정 결과 "6.62"를 나타내었다. 이는 국내 건축구조설계기준(KBC 2005)에서 제시하고 있는 건물골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.0"과 중간 모멘트골조를 가진 이중골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.5"를 모두 초과한 값이다. Pushover 해석 결과를 분석해 보면 표 2에서와 같이 강도계수(R_s)에 비하여 연성계수(R_u)의 값이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 초고층 건물의 횡변위를 제어하기 위하여 32층과 53층에 아웃리거가 설치되어 있어 연성계수가 작은 값을 갖게 되고 또한 저층부에 코어 부분에 설치된 벽 이외에 추가적인 벽이 설치되어 있어 강도계수가 큰 값을 갖는 것으로 판단된다.

표 2. 무량판 구조 초고층 건물 결과치

	R_u	R_s	R
59층	2.38	2.78	6.62

4. 무량판 구조시스템의 횡력저항시스템

고층 건물에 적용되는 무량판 구조시스템은 전단벽 등의 별도의 횡저항 시스템을 필요로 한다. 이에 따라 무량판 구조시스템의 내진설계 시 엔지니어의 판단이 중요한 요소로 작용하게 되며 일반적으로 코드(건축구조설계기준, KBCS 2005) 상에 나와 있는 '건물골조 시스템의 철근콘크리트 전단벽(반응수정계수 5)'이나 '중간 모멘트골조를 가진 이중골조 시스템의 철근콘크리트 전단벽(반응수정계수 5.5)'이 적용된다.

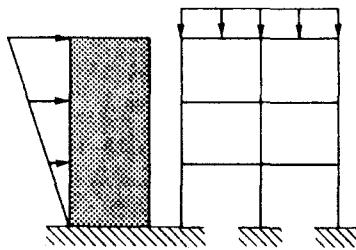


그림 8. 건물골조 시스템

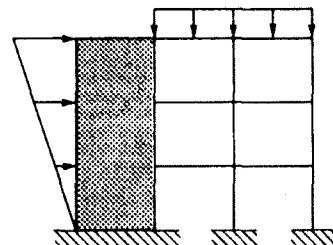
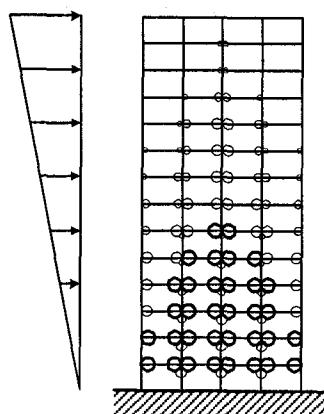


그림 9. 이중골조 시스템

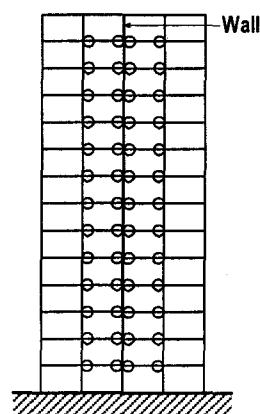
건물골조 시스템은 그림 8과 같이 수직하중은 입체 골조가 저항하고, 지진하중은 전단벽이나 가세골조가 저항하는 구조방식이다. 이중골조 시스템은 그림 9와 같이 모멘트골조와 전단벽 또는 가세골조로 이루어진 이중골조 시스템에 있어서 전체 지진력은 각 골조의 횡강성비에 비례하여 분배되며, 모멘트골조가 설계지진력의 최소한 25%를 부담하는 구조방식이다.

두 지진력 저항시스템에서 내진설계 시 가장 큰 차이점은 모멘트골조가 횡력을 분담하느냐에 따라 반응수정계수가 달라진다는 것이다. 그러나 반응수정계수 “0.5”의 차이는 실제 철근 배근량의 변화에 영향이 크지 않을 수 있다. 그리고 반응수정계수는 단일 접합부의 성능이 아닌 구조물 전체 시스템에 관련된 계수이기에 접합부에 연성상세를 적용하는 것과 R 의 결정은 별개의 문제가 된다. 다시 말하면 엔지니어가 무량판 구조시스템을 연성상세를 적용한 이중골조 시스템으로 간주하였다고 하여도 실제 철근 배근량이나 시공 상의 안전측을 고려하여야 한다.

일반적으로 구조물에 횡방향 하중이 작용하였을 때 그림 10과 같이 보-기둥 시스템에서는 보에서 기둥으로의 소성힌지 분포가 잘 이루어진 반면, 슬래브-기둥 시스템에서는 슬래브의 소성힌지가 기둥으로 전달되기 전에 슬래브가 전반적으로 파괴되는 특성이 있다. 이것은 무량판 구조시스템이 슬래브 두께가 고정되어 있고 보-기둥 접합부에 비해 슬래브-기둥 접합부의 강성이 작다는 특성으로 인하여 원활한 소성분배 메커니즘 발현이 곤란하기 때문이다. 이것은 결국 시스템의 보유 성능을 떨어뜨리는 작용을하게 된다.



(a) 보-기둥 시스템



(b) 슬래브-기둥 시스템

그림 10 일반적인 소성분배 메커니즘

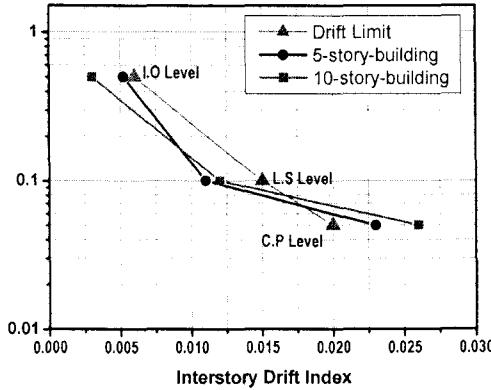


그림 11. 무량판 구조 판상형 아파트의 성능목표에 따른 최대 층간변위비

그림 11은 무량판 구조 판상형 아파트의 성능목표에 대한 최대 층간변위비를 주기에 따라 나타낸 것이다. 여기에 나타난 바와 같이 5층과 10층 건물 모두 즉시거주 단계(I.O Level)와 인명안전 단계(L.S Level)에서 사용성 기준을 초과하는 과다한 변형이 발생하지 않았다. 하지만 붕괴방지 단계(C.P Level)에서 급격히 층간변위비 한계를 초과하였으며, 이는 소성분배 메카니즘이 원활히 이루어지지 않은 것에 기인하는 것으로 보여 진다. 따라서 시스템의 보유성능 향상을 위해서는 소성힌지 메카니즘의 원활한 분배가 이루어져야 한다. 슬래브-기둥 접합부의 모멘트, 전단강도, 연성의 관계를 파악하여 취약한 부분의 성능 개선을 고려하여야 한다. 그림 12는 전단보강 형태에 따른 슬래브-기둥 접합부의 이력곡선을 나타낸 것이다.

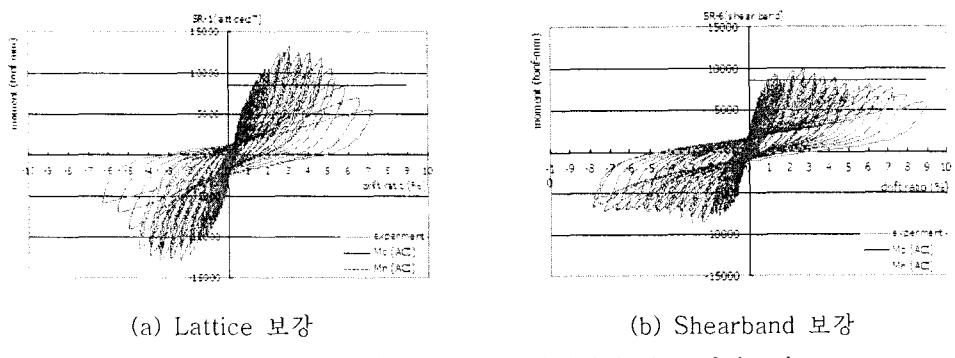


그림 12. 슬래브-기둥 접합부 보강방법에 따른 이력곡선

5. 결 론

본 연구에서는 무량판 구조시스템의 횡저항에 대한 전반적인 성능을 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2×2 경간을 갖는 무량판 실험체의 얻어진 성능점인 특정측의 층간변위비가 2.5%에 도달하였을 때를 슬래브-기둥 접합부의 성능점으로 간주하였다. 즉 비선형 해석 시 Δ_{max} 를 특정측의 층간변위비가 2.5%에 도달했을 때의 자봉층의 변위로 본다.

- (2) 무량판 구조 판상형 아파트 5층/10층과 초고층(59층) 건물의 반응수정계수를 산정하였다. 무량판 구조 판상형 아파트 예제 건물의 경우 5층은 "5.23", 10층은 "4.94"를 나타냈다. 이 값은 국내 기준(KBC 2005)에서 제시하고 있는 건물골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5"보다 크거나 근사한 값을 나타낸 반면에 중간 모멘트골조를 가진 이중골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.5"보다 5~11% 미만의 값을 나타냈다. 또한 무량판 구조 초고층 예제 건물의 경우는 "6.62"를 나타내어 건물골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.0"과 중간 모멘트골조를 가진 이중골조 방식의 철근콘크리트 전단벽에 적용되는 "5.5"를 초과한 값을 나타냈다.
- (3) 무량판 구조시스템의 내진설계 시 지진력 저항시스템의 선택은 엔지니어의 공학적 판단이 중요하지만 반응수정계수를 정함에 있어서 단일 접합부의 성능이 아닌 전체 시스템을 고려하여야 하며 또한 소성분배 메카니즘이 원활하지 못하다는 특성을 이해하여 접합부 전단보강을 통한 성능 향상을 고려하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발 사업(C105A1010001-05A0501-00110)에 의한 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 송진규 외, "리노베이션을 고려한 가변형 아파트의 구조시스템 개발", 건설교통부, 2001.
2. 박홍근, 송진규 외, "무량판 구조시스템의 시공성 및 품질 향상을 위한 요소기술 개발", 포스코 건설, 2005.
3. ATC , "Structural response modification factors", ATC-19, Applied Technology Council, 1995.
4. Peter Fajfar, "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design", M.EERI, 2000, pp. 573-592.
5. 김건우, 송호범, 송진규, "무량판 구조시스템의 반응수정계수 산정 및 내진성능 평가", 대한건축학회추계학술발표대회, 23권 2호, 2003년 10월, pp. 99-102.
6. 최정욱, 송진규, "하중 특성에 기초한 무량판 슬래브의 강성감소 계수", 대한건축학회, 21권 10호, 2005년 1월, pp. 41-49.
7. 대한건축학회, "건축구조설계기준(KBCS 2005)", 기문당, 2005.
8. MIDAS IT, "MIDAS GENw Analysis and Design", MIDAS IT.
9. Canny Structural Analysis, "3-Dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program-CANNY(veraion C02)", Kangning Li, 2002.