

수평이축방향 내진역량시험과 내진성능평가 절차

Procedures of Biaxial Seismic Capacity Test and Seismic Performance Evaluation

김재관* 김익현** 이재호***
KIM, Jae Kwan KIM, Ick-Hyun LEE, Jae-Ho

ABSTRACT

The seismic capacity of columns usually has been tested in uniaxial loading condition. The seismic performance used to be evaluated under the same assumption. Since the real earthquake motion is multi-directional, the effects of multi-directional excitation on the seismic capacity of structures need to be carefully examined. In this paper, a frequency dependent alternate biaxial cyclic loading test is proposed as an evaluation method of seismic capacity under multi-directional excitation. Four test specimens were made and tested to study the degradation of strength, stiffness and ductility under biaxial loading condition. A multi-directional excitation. The capacity is obtained using frequency dependent alternate biaxial cyclic loading test. The orthogonal effect is taken into account by increasing the demand.

1. 서 론

교각은 강진이 발생했을 때 여러 방향으로 반복하중을 받게된다. 하지만 실제적으로 교각의 내진성능 평가에 대한 연구는 주로 일축방향에 대해서만 행해지고 있다. 기존에 행해진 연구결과는 다축방향으로 하중을 받는 교각이 일축방향으로 하중을 받는 교각에 비해서 강도가 저하되고 연성도가 감소함을 보여주고 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. 따라서 일축방향 재하시험결과만 이용하여 교각의 내진성능을 평가할 경우 그 성능이 과대평가될 가능성이 있다. 그리고, 현재의 푸시오버해석이나 역량스펙트럼 방법은 일축방향에의 적용으로 제한되어 있다.

이축방향으로 하중을 받는 구조물의 내진성능을 평가함에 있어서, 간편하면서도 신뢰성이 있는 방법은 아직까지 제시되지 않고 있다. 뿐만 아니라, 비선형 해석에서의 직교효과(Orthogonal Effect)까지 고려할 수 있는 신뢰성 있는 방법도 제시되어 있지 않다⁽⁴⁾. 이런 상황을 해결할 수 있는 방안으로 제시되는 다축방향 유사동적시험도 비용문제와 함께 그 적용이 쉽지 않은 형편이다. 즉 다축 방향 재하를 고려한 내진성능평가를 위해서 간편하면서도 신뢰성이 있으면서도 실용적인 방법이 필요하다.

* 서울대학교 토목공학과 부교수, 정회원

** 울산대학교 토목공학과 조교수, 정회원

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정

이런 배경에서 이 연구를 수행하게 되었는데, 이 연구의 목적은 수평 지진하중을 받는 구조물의 내진성능을 평가하기 위해서 이축방향으로 교번하중을 재하하는 방법을 제시하고, 또 이축방향 하중재하 상태에서의 내진성능평가 절차를 제시하는 것이다. 이를 위해서 4가지 다른 방식의 하중재하방법을 4기의 교각 시험체에 적용하여 실험을 수행하였다.

2. 다축방향 가진시의 내진성능 개념

다축방향으로 하중을 재하하게 되면 일축방향으로 하중을 재하하는 경우보다 구조물의 강도, 강성 및 연성도가 더 감소한다. 또한 직교효과로 인하여 그 정도는 더 심해진다. 다축방향 혹은 이축방향으로 가진을 하면 구조물의 복합 거동이 현저해지는데 탄성응답영역 내에서의 복합 거동 양상이 일축방향에 비해서 큰 것은 명확한 사실이다. 그러나, 비탄성응답영역 내에서는 강성저하와 직교효과를 분리해서 생각하기 힘들기 때문에 내진성능 평가시에도 이 점을 염두해 둘 필요가 있다.

다축방향으로 재하할 경우에는 하중을 재하하는 방법이 무수히 많기 때문에 간편하면서 믿을 수 있는 방법을 모색해야 할 필요성이 있다. 이러한 방법은 다음의 가정들에 의해서 제안될 수 있다.

- (1) 구조물을 이축대칭으로 가정하여 비틀림에 의한 효과를 무시한다.
- (2) 강도저하, 강성저하 및 연성감소는 직교효과로부터 분리될 수 있다.
- (3) 단순한 이축재하방법을 통해서 다축방향 가진상태에서의 감소된 내진성능을 얻을 수 있다.
- (4) 소요역량은 강도 감소로부터 분리될 수 있다고 가정한다. 소요역량의 증가는 소요역량 곡선 내에서의 증가로 표시된다.
- (5) ADRS 스펙트럼 내에서 공급역량곡선과 소요역량곡선의 비교로 내진성능을 평가할 수 있다. 위의 개념을 도식화하면 그림 1과 같다.

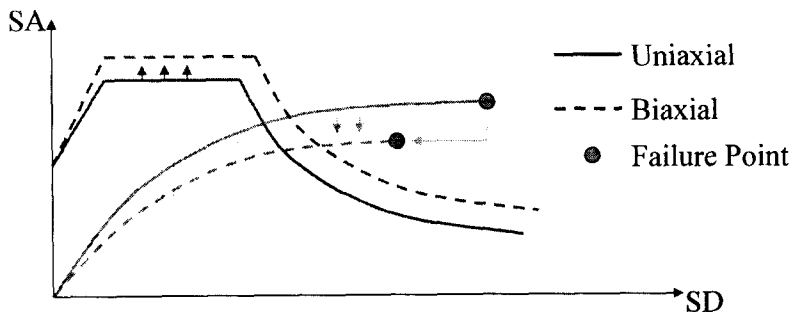


그림 1 일축재하 및 이축재하시의 역량곡선 스펙트럼

3. 진동특성을 고려한 이축방향 차등교변하중제하시험

3.1 다축방향 가진시의 구조물의 진동특성

구조물은 탄성영역 내에서는 고유주기에 따른 1차모드에 따라 진동하게 된다. 이축방향 가진시에도 각각의 주축방향에 대한 진동특성은 같은 모습을 보인다. 따라서 구조물이 각각의 방향에 대해서 경험하게 되는 재하횟수의 비율은 각 방향에 대한 고유진동수의 비율과 비례하게 된다. 하중-변위 관계가 비선형일지라도 적절히 설계된 구조물의 경우에는 탄성영역 내에서의 재하횟수 비율과 비탄성영역 내에서의 재하횟수 비율이 같다고 가정할 수 있다.

그림 2는 이축대칭이면서 탄성 특성을 나타내는 구조물을 나타내고 있다. 이 구조물은 단자유도 계로 모델링하였고, 각각의 방향에 대해서 하중-변위 관계가 완전탄소성 거동을 한다고 가정하고 있다. 탄성영역 내에서의 고유진동주기는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{ex}}} \quad (1)$$

$$T_y = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{ey}}} \quad (2)$$

따라서, 위의 식들의 관계를 이용해서 진동횟수비(RVC)를 구하면 다음과 같다.

$$RVC = \left(\frac{T_d}{T_y}\right) / \left(\frac{T_d}{T_x}\right) = \frac{T_x}{T_y} = \sqrt{\frac{K_{ey}}{K_{ex}}} \quad (3)$$

여기서, T_d 는 운동이 지속되는 시간을 나타낸다.

만일 변위가 커지면 응답은 소성영역으로 들어가게 된다. 이 경우 각 방향별 응답은 비례적으로 최대연성도에 도달한다고 가정할 수 있다. 이때, 방향별 진동횟수비는 다음과 같다.

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{ex}/\mu_x}} \quad (4)$$

$$T_y = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{ex}/\mu_y}} \quad (5)$$

$$RVC = \frac{2\pi\sqrt{\mu_x}}{2\pi\sqrt{\mu_y}} \cdot \sqrt{\frac{K_{ey}}{K_{ex}}} = \sqrt{\frac{\mu_x}{\mu_y}} \cdot \sqrt{\frac{K_{ey}}{K_{ex}}} \quad (6)$$

이때 x방향과 y방향의 연성도가 같으면 비탄성영역에서의 진동횟수비는 탄성영역에서의 진동횟수비와 같아진다.

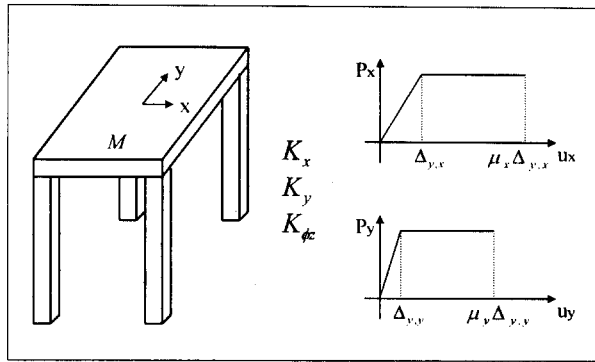


그림 2 이축대칭모델

위의 결과는 다음예제를 통해서 확인할 수 있다. 방향별 고유주기가 $T_x=0.96$, $T_y=0.32$ 인 이축대칭 구조물을 그림 3의 지진파를 이용해서 이축방향으로 가진한다. 이때 시간 이력에 따른 상대변위는 탄성적으로 거동하여 그림 4와 같이 표시된다. 이때 진동횟수비는 예상대로 고유진동수비와 같은 값이 나온다는 것을 알 수 있다. 이번에는 탄소성 거동을 하는 모델을 생각해보자. 각 축방향별로 최대 연성도가 5라고 가정하자. 이때 최대변위에서의 유효주기는 $T_x=1.82$, $T_y=0.6$ 이 된다. 이 모델을 그림 5에서 주어진 지진파로 이축방향 가진을 하면 응답이력은 그림 6과 같이 나타난다. 침두부분의 숫자를 세어보면 식 6에서 예상했던 것과 같이 대략 3정도의 값이 나와서 탄성거동을 할 때와 같은 값을 얻을 수 있다.

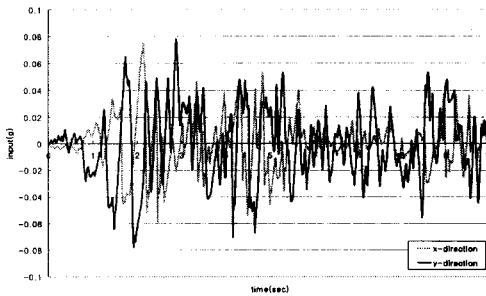


그림 3 탄성응답지진파 (El Centro)

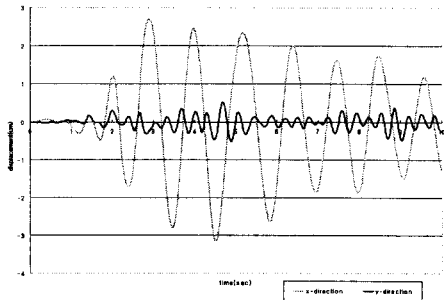


그림 4 탄성응답시의 상대변위

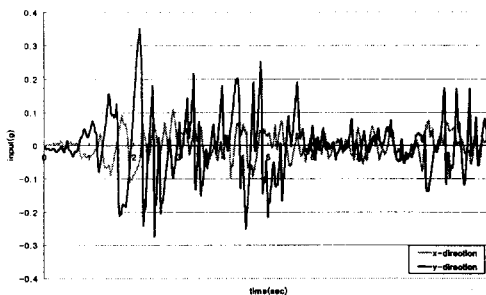


그림 5 비탄성응답지진파 (El Centro)

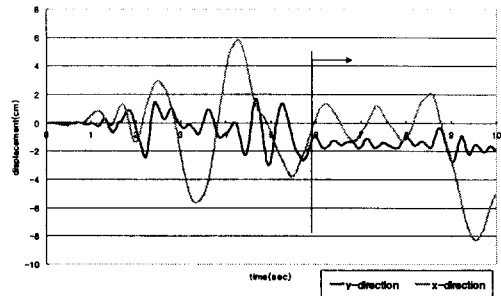


그림 6 비탄성응답시의 상대변위

3.2 차등교변하중 재하시험의 개념

3.1절에서의 결과를 이용하면 다축방향으로 지진하중을 받는 구조물의 내진성능을 평가하기 위한 방법으로 진동특성을 고려한 차등교변반복 하중재하의 개념이 사용될 수 있다. 구조물이 두 주축방향에 대한 진동수비를 유지하면서 진동하기 때문에 진동특성이 고려된 이축방향 재하시험에 의해서 강도저하, 강성저하 및 연성도 감소를 확인할 수 있다.

일축방향 반복하중 재하시험에서는 실제지진에 대한 내진성능을 정확히 나타내기 위해서 다음과 같은 요소들이 고려되어야 한다.

- 지반운동의 지속시간, 강도 및 진동수
- 구조물의 진동특성

하중재하 단계에서는 다음과 같은 요소들이 포함된다.

- 단계별 하중증가량
- 각 단계에서의 하중재하 반복횟수

이 논문에서는 그림 7과 같이 가장 단순한 하중재하방식을 제안하였다. 재하방식은 각각의 방향에 대해서 적용되지만, 교대로 번갈아가면서 교변반복하중을 재하한다. 각 하중단계별로 한 방향에 대해서는 재하를 한 후 다른 방향에 대해서는 미리 결정된 하중재하 횟수만큼 재하한다. 다음 하중단계에서 똑같은 과정이 되풀이된다.

3.3 교각 실험

이 연구를 위해서 4기의 증실구형교각 시험체를 제작하였다. 2기의 교각에 대해서 각각 교축방향 반복하중과 교축직각방향으로 반복하중을 재하하는 일축방향 재하실험을 수행하였다. 남은 2기의 교각 중 하나의 시험체에 대해서 동일한 횟수의 이축방향 균등교변반복하중을 재하하는 실험을 수행하고, 또다른 시험체에 대해서는 직교하는 두 방향에 대한 진동수비를 고려한 차등교변반복하중을 재하하는 실험을 수행하였다. 교각의 교축방향 주기 T_x 는 1.6초, 교축직각방향 주기 T_y 는 0.8초이며 재하횟수비는 2이다. 차등교변반복 하중재하 패턴은 그림 8와 같다. 교각 형상 및 시험체 설치모습은 그림 9, 10과 같다.

실험결과, 이축방향 교변반복 하중재하를 할 경우에는 축방향 하중재하를 할 경우보다 교각의 내하력 및 연성도가 저하되었다. 특히 진동수비를 고려한 차등교변반복 하중재하에 의한 저하정도가 더 컸다. 또한 차등교변반복하중의 재하에 의해서 에너지 흡수 능력 감소가 더 크게 일어났다. 교축방향과 교축직각방향에 대한 하중-변위 포락곡선은 그림 11, 12와 같다. 표 1에 정리된 실험 결과를 살펴보면 단순한 교변반복 하중재하보다는 진동특성을 고려한 차등교변반복 하중재하의 영향이 더 크다는 사실을 확인할 수 있다.

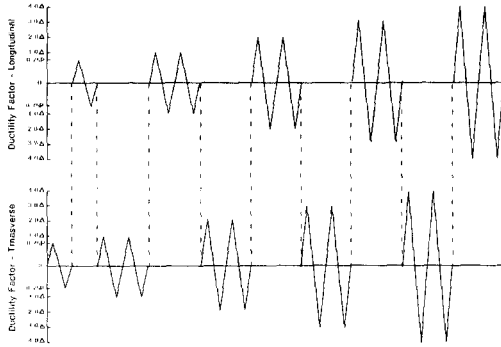


그림 7 이축방향 단순교번하중 재하방법

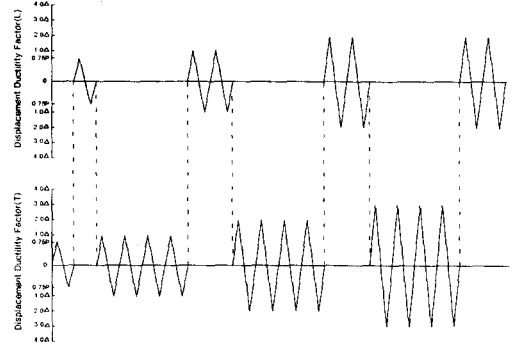


그림 8 이축방향 차등교번반복하중 재하방법

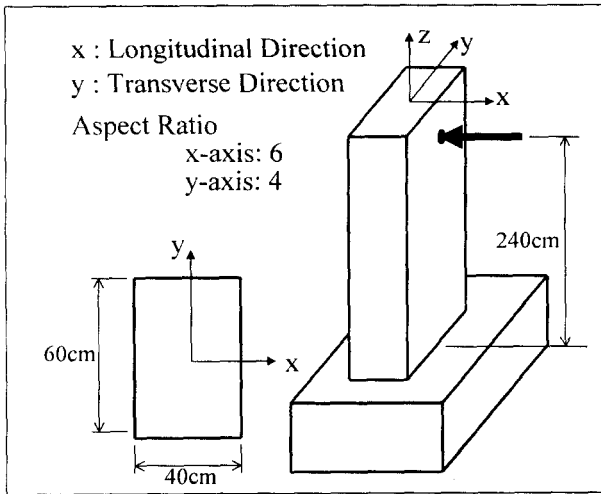


그림 9 교각 시험체 형상

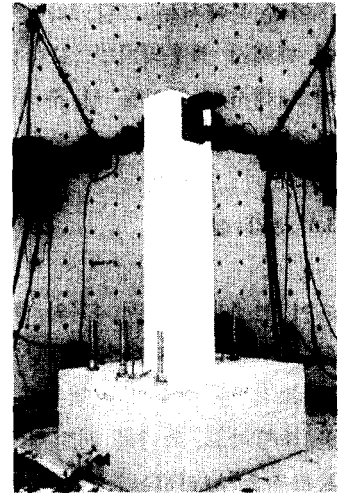


그림 10 시험체 설치모습

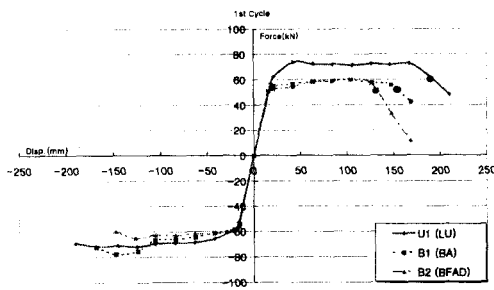


그림 11 하중-변위 포락곡선 (교축방향)

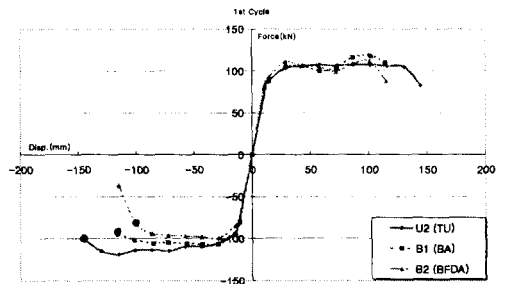


그림 12 하중-변위 포락곡선 (교축직각방향)

표 1 실험결과의 비교

Specimen		P_{max} (kN)	Normalized P_{max} (%)	Δ_y (mm)	μ_{max}	μ_f	Normalized Absorbed Energy at $\mu=7$
Longitudinal Direction	U1	72.3	100	21	6	9	1.00
	B1	66.8	92.4	21	7	7.5	0.79
	B2	61.5	85.1	21	5	6.5	0.56
Transverse Direction	U2	112.3	100	14.4	8	10	1.00
	B1	111.0	98.8	14.4	6	8	0.85
	B2	101.2	90.1	14.4	6	7	0.70

4. 이축방향 차등교번하중 재하시험을 통한 내진성능 평가

서론에서 말한바와 같이 역랑곡선 스펙트럼 방법을 이용해서 내진성능을 평가할 수가 있다. 공급역량은 이축방향 차등교번하중 재하시험을 통해서 얻을 수가 있다. 그러나 소요역량의 경우에는 단순한 접근이 쉽지 않다. 직교효과를 고려할 수 있는 가장 손쉬운 방법은 일정량만큼 소요역량을 증대시키는 것이다. 만일 응답이 탄성범위 내에서 이루어진다면 소요역량의 증가량은 SRSS 방법, 100% & 30% 방법에 의해서 결정된다. 하지만 응답이 탄성범위를 벗어나게 되는 경우에는 그 증가량이 더 작아져야 하는 것으로 보이나, 여기에 대해서는 더 연구해보아야 할 필요가 있다.

소요역량의 증가량이 주어지게 되면 각 주축방향에 대해서 내진성능을 평가할 수 있게 된다(그림 13). 이 경우 더 낮은 소요역량을 가지는 방향에서 내진성능을 결정하게 된다.

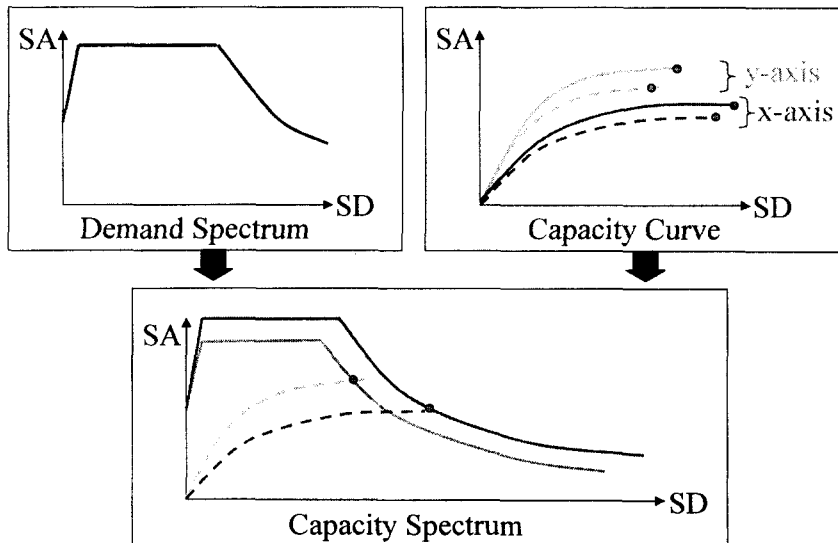


그림 13 이축방향에 대한 내진성능평가

5. 결론

이 연구에서는 이축방향 차등교번반복하중을 재하하는 방법을 제시하였다. 이 재하방법은 다축방향 하중재하 상태에 있는 구조물의 강성저하, 강도저하 및 연성도 감소를 반영할 수 있도록 두 주축방향에 대한 진동특성을 고려했다.

또한 이 연구에서는 다축방향 재하상태에 있는 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 내진성능 평가절차를 제시하였다. 먼저 이축방향 차등교번반복하중을 재하하는 실험을 수행하여 공급역량 곡선을 얻고 이것을 ADRS로부터 제시된 소요역량과 비교하는 역량곡선 스펙트럼 방법을 이용해서 내진성능을 평가할 수 있다. 소요역량의 증가에 대해서는 앞으로 더 많은 연구가 시행되어야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 2001년도 두뇌한국21사업의 지원금에 의한 것입니다. 또한 연구비의 일부분은 대림산업 주식회사로부터 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Low, S.S. and Moehle, J.P., *Experimental Study of Reinforced Concrete Columns Subjected to Multi-Axial Cyclic Loading*, Earthquake Engineering Research Center, UCB/EERC-87/14, California, Berkeley, Sep. 1987.
2. Wong, Y., Paulay, T. and Priestley, M.J.N., "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Directional Seismic Attack", *ACI Structural Journal*, Vol. 90 No. 2, Mar-Apr, 1993, pp. 180-191.
3. Bousias, S.N., Verzeletti, G. and Fardis, M.N., "Load-Path Effects in Column Biaxial Bending with Axial Force", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.121, No.5, May, 1995, pp. 596-605.
4. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol. 1, ATC-40, Applied Technology Council and California Seismic Safety Commission, California, Nov. 1996.