

철근콘크리트 구조물의 유사동적실험을 위한 Equivalent Three Phase Similitude Law

An Equivalent Three Phase Similitude Law for Pseudodynamic Test on Small-scale Reinforced Concrete Structures

김남식* 이지호** 장승필*** 郭 迅****
Kim, Nam Sik Lee, Ji Ho Chang, Sung Pil Guo, Xun

ABSTRACT

Small-scale models have been frequently used for experimental evaluation of seismic performance because of limited testing facilities and economic reasons. However, there are not enough studies on similitude law for analogizing prototype structures accurately with small-scale models, although conventional similitude law based on geometry is not well consistent in the inelastic seismic behavior. When fabricating prototype and small-scale model of reinforced concrete structures by using the same material, added mass is demanded from a volumetric change and scale factor could be limited due to size of aggregate. Therefore, it is desirable that different material is used for small-scale models. Thus, a modified similitude law could be derived depending on geometric scale factor and equivalent modulus ratio. In this study, compressive strength tests are conducted to analyze equivalent modulus ratio of micro-concrete to normal-concrete. Equivalent modulus ratios are divided into elastic, weak nonlinear and strong nonlinear phases, which are based on ultimate strain level. Therefore, an algorithm adaptable to the pseudodynamic test, considering equivalent three phase similitude law based on seismic damage levels, is developed. In addition, prior to the experiment, it is verified numerically if the algorithm is applicable to the pseudodynamic test.

1. 서론

대형구조물의 지진에 대한 안전성을 검증함으로써 내진설계기술을 확립하는 관련연구는 주로 실험적인 연구를 수반한다. 실험적 연구에서 구조물의 크기, 실험장비 및 실험실의 제약, 경제적인 이유 등으로 인하여 축소모형 (small-scale model)에 의한 실험이 활발히 이루어지고 있지만[1-3], 축소모형을 설계하고 축소모형의 비탄성거동 (inelastic behavior)으로부터 원형구조물(prototype structure)의 거동을 유추하기 위한 상사법칙(similitude law)의 연구는 충분하지 않은 실정이다. 현재까지 적용되고 있는 상사법칙[4,5] 또한 탄성범위 내에서 유도되었기 때문에, 지진하중 하에서 비탄성 거동특성을 갖는 구조물의 지진응답을 예측하는 경우에 많은 오차가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 철근콘크리트 구조물에 대하여 재료적 비선형을 고려한 상사법칙을 개발하고 축소모형실험을 위한 micro-concrete의 설계기술을 개발하는데 목적을 두고 있다. 따라서 실험적인 연구에 앞서, normal-concrete와

* 정회원 · 현대건설기술연구소, 책임연구원
** 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정
*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
**** 비회원 · Institute of Engineering Mechanics(China), Professor

micro-concrete에 대한 재료시험을 통한 재료의 비선형거동 파악과 수치해석을 통해 유사동적실험 (pseudodynamic test)에 적용될 알고리즘에 대한 검증은 수행하였다.

2. 상사법칙

축소모형을 설계하는 과정에는 필연적으로 상사법칙이 적용되는데, 각 실험의 목적이나 방법에 맞추어 적절한 상사법칙을 선정하여야 한다. 시간이력하중 문제에서 질량, 길이, 시간의 세 가지가 기본차원으로 선택되면 나머지는 이들로부터 유도되어 결정된다.[6] 원형구조물과 축소모형에 동일한 재료를 사용하지 않으면 등가탄성계수비 (equivalent modulus ratio) E_r 을 고려하여 상사법칙을 유도하여야 한다.[7] 원형구조물과 축소모형의 길이에 대한 상사율을 s , 등가탄성계수비를 $E_r(\epsilon)$, 사용된 재료의 변형률비(strain ratio)를 $\epsilon_r=1$ 이라 정의하면 원형구조물과 축소모형의 관계는 [표 1]과 같이 유도된다. 여기서, 상사율(scale factor)은 원형구조물과 축소모형사이의 각 물리적인 양의 비(ratio)와 동일한 의미를 갖는다.

[표 1] 상사법칙의 유도

Quantity	Dimensions	Scale Factor	
		Acceleration-based, $E_r(\epsilon)=1$	Equivalent three phase, $E_r(\epsilon)\neq 1$
Length	L	s	s
Mass	M	s	$s^2 \cdot E_r(\epsilon)$
Time	T	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$
Stress	$ML^{-1}T^{-2}$	1	$E_r(\epsilon)$
Velocity	LT^{-1}	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$
Acceleration	LT^{-2}	1	1
Force	MLT^{-2}	s^2	$s^2 \cdot E_r(\epsilon)$
Stiffness	MT^{-2}	s	$s \cdot E_r(\epsilon)$
Damping	MT^{-1}	$s^{3/2}$	$s^{3/2} \cdot E_r(\epsilon)$
Natural frequency	T^{-1}	$1/s^{0.5}$	$1/s^{0.5}$
Added Mass	M	$s^2 \cdot m_p - m_m$	$s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot m_p - m_m$

* $s=L_m/L_p$, m_m 은 제작된 축소모형 자체의 질량

2.1 Acceleration-based Similitude Law

질량에 하중으로 가해지는 가속도는 조절이 가능하지만 중력가속도는 인위적으로 조절할 수 없는 요소이므로 구조물의 중력과 관성력을 정확하게 재현하려면 가속도비 $a_r=1$ 로 정의하여야 한다. 이 경우 질량 및 시간에 대한 상사율은 각각 s^2 , $s^{0.5}$ 에 비례하므로 동적실험을 위해서는 추가질량(added mass)이 필요하며, 시간에 대한 압축도 필요로 한다. 질량과 시간을 수치적으로 처리하는 유사동적실험에서는 가장 이상적인 방법이라고 판단된다.[4]

2.2 Equivalent Three Phase Similitude Law

가속도 기준 상사법칙으로부터 유도되는 이 상사법칙은 축소모형에 사용되는 재료가 원형구조물에 사용되는 재료와 다르기 때문에 발생하는 등가탄성계수비 $E_r(\epsilon)$ 을 고려하여 상사법칙을 유도하게 된다.[7] 재료의 손상정도에 따라 탄성구간(극한변형률의 50%이내), 약 비선형구간(극한변형률의 50~80%), 강 비선형구간(극한변형률의 80~100%)으로 구분한다고 가정하면, 변형률에 대해 변수인 등가탄성계수비를 각 구간에 E_{r1} , E_{r2} , E_{r3} 로 적용시켜

상사법칙을 완성하게 된다.

[표 1]에서 원형구조물과 축소모형의 등가탄성계수비를 1보다 작은 값을 사용할 경우, 축소모형의 추가질량 및 사하중에 의한 축력의 크기가 상당히 작아지기 때문에 축소모형을 이용한 실험에 매우 유리하다.

3. 재료시험

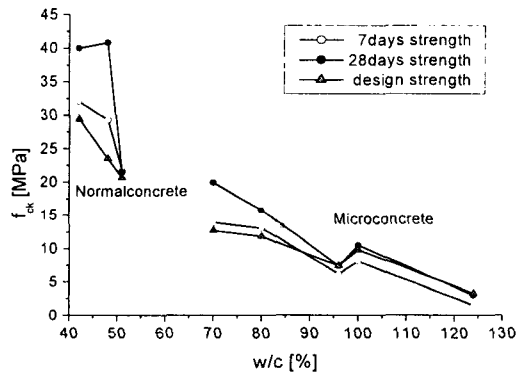
원형구조물을 위한 normal-concrete의 3가지 배합비와 축소모형을 위한 micro-concrete의 5가지 배합비에 대하여 압축강도시험을 수행하였다. N1, N2, N3와 M1, M2, M3, M4, M5는 normal-concrete와 micro-concrete 각각의 배합비에 따른 공시체의 명칭을 나타낸다. 여기서 M3는 압축강도가 3MPa 이하로 재료로서의 성질을 갖추지 못해 제외시켰다. [표 2]와 [표 3]에 각 콘크리트 재료의 배합비를 표시하였고, [그림 1]에 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 압축강도시험 결과를 나타내었다. 물-시멘트비가 커짐에 따라 강도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있고 물-시멘트비가 normal-concrete보다 2배 이상 큰 micro-concrete의 강도가 절반이상 작아짐을 알 수 있다.

[표 2] normal-concrete의 배합비

종류	배합비(C:W:S:G)
N1	1 : 0.48 : 1.94 : 2.79
N2	1 : 0.42 : 1.66 : 2.38
N3	1 : 0.51 : 2.07 : 2.99

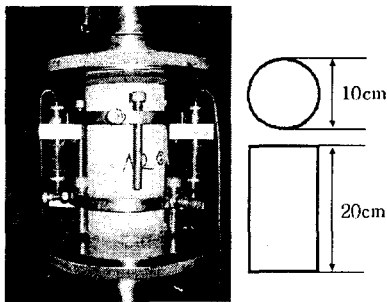
[표 3] micro-concrete의 배합비

종류	배합비(C:W:S)
M1	1 : 0.80 : 3.50
M2	1 : 0.96 : 5.50
M3	1 : 1.24 : 7.30
M4	1 : 1.00 : 4.00
M5	1 : 0.70 : 3.21



[그림 1] 물-시멘트비에 따른 압축강도변화

[그림 2]에 10cmX20cm 공시체를 사용한 압축강도 시험광경을 보이고 있으며, [표 4]에 압축강도시험으로부터 얻어진 극한변형률(ultimate strain)과 압축강도 결과를 정리하였다. 여기서 극한변형률이 동일한 재료인 N1과 M2를 각각 원형구조물과 축소모형의 재료로 선정하였으며, 이에 대한 응력-변형률 곡선을 이상화하여 수치해석을 수행하였다.



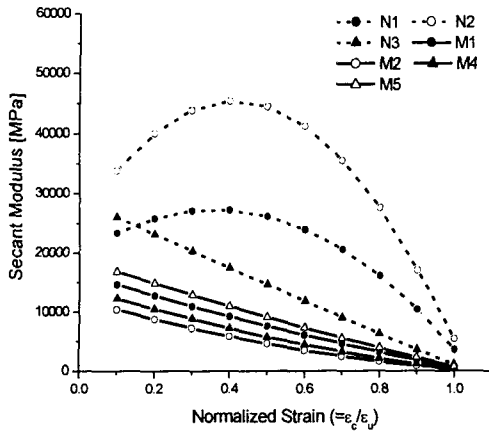
[그림 2] 재료 압축강도시험

[표 4] 재령 28일 압축강도시험 결과

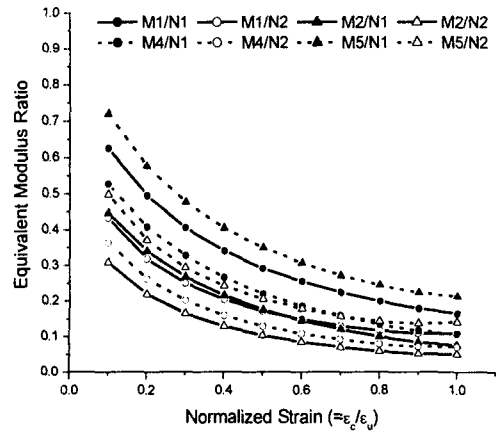
Specimens	Ultimate Strain [Millionths]	Ultimate Stress [MPa]
N1	2100	40.8
N2	2450	40.0
N3	1960	26.7
M1	2880	20.6
M2	2100	9.5
M4	2340	13.1
M5	2960	25.3

재료시험결과 재료의 강성(secant modulus)이 변화하는 과정과 등가탄성계수비의 변화과정을 [그림 3]과 [그림 4]에 각각 표시하였다. 여기서, ϵ_s 는 재료의 극한변형률을 기준으로 10등분으로 분할한 구간 내에서의 변형률, ϵ_u

는 극한변형률을 나타내고 있다. 등가탄성계수비는 각 구간에서 micro-concrete와 normal-concrete의 탄성계수 (secant modulus)의 비로서, [그림 4]와 같이 변형률에 대한 함수로 얻어질 수 있다.



[그림 3] 압축력에 따른 콘크리트의 탄성계수 변화



[그림 4] 압축력에 따른 등가탄성계수비의 변화

4. 등가탄성계수비의 적용

재료의 비선형이 고려된 개선된 상사법칙으로서 equivalent three phase similitude law는 scale factor(s)와 equivalent modulus ratio(E_r)에 의존하게 된다. 따라서 [그림 4]와 같이 재료시험결과로부터 구한 $E_r(\epsilon)$ 을 사용하면 축소모형 설계를 위한 응력비(σ_r), 하중비(F_r), 질량비(M_r), 추가질량(m_a)이 각각 식 (1)에서 식 (4)와 같이 결정될 수 있다.

$$\sigma_r = E_r(\epsilon) \quad (1)$$

$$F_r = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \quad (2)$$

$$M_r = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \quad (3)$$

$$m_a = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot m_p - m_m \quad (4)$$

여기서, s 는 scale factor, m_a 는 축소모형에 가해지는 추가질량, m_p 는 원형구조물의 질량, m_m 은 제작된 축소모형 자체의 질량이다. 특히 재료의 선택에 따라 추가질량(m_a)을 충분히 줄일 수 있는데, E_r 이 0.1~0.4사이에 존재하는 N1과 M2를 사용하면 1/10 축소모형을 제작할 경우 추가질량을 70%이상 줄일 수 있다.

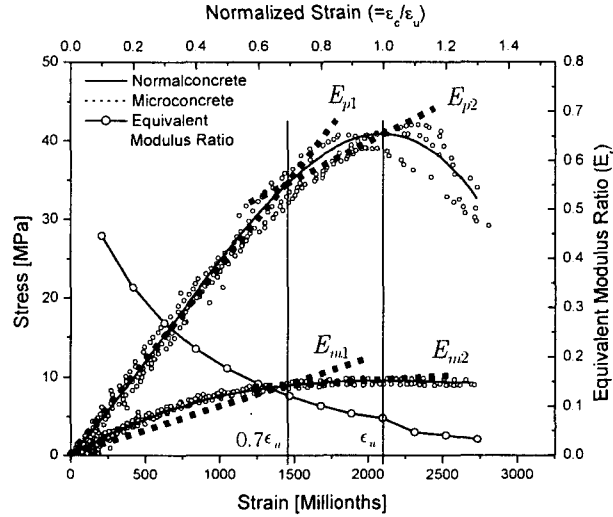
진동대실험에서는 추가질량의 크기가 축소모형 실험의 가능여부를 결정하는 경우가 많은데 축소모형의 재료를 결정할 때 원형구조물의 재료보다 작은 강성을 갖고 등가탄성계수비(E_r)가 일정한 재료를 찾아 진동대실험을 수행하면 보다 정확한 지진응답결과를 얻을 수 있다.

5. 수치해석에 의한 상사법칙의 검토

앞서 언급한 재료시험 결과로부터 극한변형률이 동일한 재료인 N1과 M2를 대상으로 응력-변형률 곡선으로부터 극한변형률의 0~70% 구간인 first phase, 70~100%구간인 second phase의 두 구간으로 나누어 bilinear model로 이상화하였으며, 이상화된 모델의 탄성계수 및 등가탄성계수비를 계산하여 수치해석을 수행하였다. [그림 5]에 normal-concrete와 micro-concrete 각각의 평균 응력-변형률 곡선과 등가탄성계수비를 표시하였고, 두 구간에서 각각의 탄성계수와 등가탄성계수비(E_r)는 [표 5]와 같다. 여기서 아래첨자 p 는 원형구조물, m 은 축소모형, 1은

first phase, 2는 second phase를 의미한다.

[그림 5]에서 보듯이, 선정된 재료에 대한 등가탄성계수비는 변형률이 증가함에 따라서 지수형태의 감소(exponential decay)를 나타내며, 극한변형률을 초과하는 위치에서 급격한 감소가 발생하고 있다. 이것은 극한상태 이후에 micro-concrete의 취성과파괴 특성이 normal-concrete보다 더욱 두드러진 것으로 판단된다.

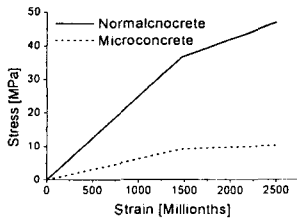


[그림 5] 응력-변형도 곡선과 등가탄성계수비

[표 5] 탄성계수 및 등가탄성계수비

Quantity	Phase	
	first	second
Normal-concrete Secant Modulus [GPa]	$E_{p1}=24.9$	$E_{p2}=10.1$
Micro-concrete Secant Modulus [GPa]	$E_{m1}=6.28$	$E_{m2}=1.03$
Equivalent Modulus Ratio	$E_{r1}=0.252$	$E_{r2}=0.102$

본 연구에서 수치해석은 [그림 6]과 같이 등가탄성계수비가 변화하는 bilinear model을 적용하여 수행하였으며, 예제로서 사용된 단자유도시스템에 대한 원형구조물 및 축소모형의 특성치는 [표 6]과 같다.



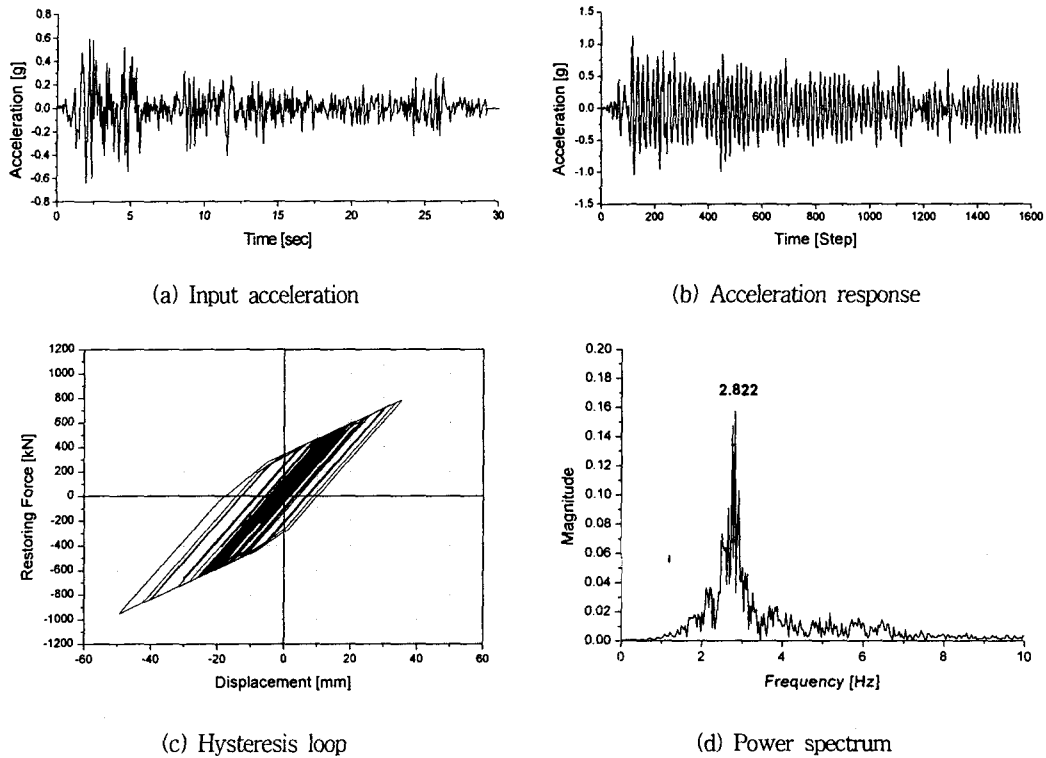
[그림 6] Bilinear Model

[표 6] 대상구조물의 특성치

Quantity	Prototype	Scaled Model
Mass[kg]	$m_p=100.7 \cdot 10^3$	$m_{m1}=253.9, m_{m2}=102.8$
Stiffness[kN/mm]	$k_{p1}=30.7, k_{p2}=12.4$	$k_{m1}=1.01, k_{m2}=0.17$
Horizontal yielding force[kN]	573.01	1.889

원형구조물 및 축소모형에 사용된 지진하중은 [그림 7(a)]와 같이 El Centro 1940 지진파를 2배로 증폭(PGA=0.638g)하여 수치해석에 사용하였으며, [그림 7(b)]와 [그림 7(c)]는 원형구조물의 지진응답 해석결과이다. 또한 [그림 7(d)]는 가속도 응답결과로부터 FFT를 수행하여 얻어진 원형구조물의 1차 고유진동수 2.822Hz를 나타내고 있

다. 비록 비탄성응답에서는 period shift가 발생하지만, 얻어진 고유진동수는 지배적인 고유진동수로서 축소모형에 대한 응답결과와 직접적으로 비교할 수 있다.



[그림 7] 입력지진과 및 원형구조물의 지진응답 해석결과

축소모형에 적용된 bilinear model에는 원형구조물과 동일하게 Newmark method와 Newton-Raphson iteration[8]을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 여기서 구조물이 k_{m1} 의 강성을 갖는 범위에서는 질량 m_{m1} 이 적용되며, k_{m2} 의 강성 범위에서는 질량 m_{m2} 가 구조물에 작용한다. 본 연구에서는 유사동적실험을 위한 알고리즘을 만족하는 식 (5) 및 식 (6)의 운동방정식을 이용하여 축소모형에 대한 수치해석을 수행하였다.

$$\text{if } \varepsilon_c < 0.7\varepsilon_u, R_m(\varepsilon, k) = k_{m1} \cdot u$$

$$m_{m1} \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + R_m(\varepsilon, k) = -m_{m1} \cdot \ddot{u}_g \quad (5)$$

$$\text{else } R_m(\varepsilon, k) = k_{m2} \cdot u$$

$$m_{m2} \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + R_m(\varepsilon, k) = -m_{m2} \cdot \ddot{u}_g \quad (6)$$

여기서, $R_m(\varepsilon, k)$ 는 변형률과 강성에 의존하는 축소모형의 복원력(restoring force)을 의미한다. 또한 상사법칙에 의해 축소모형의 질량은 $s^2 \cdot E_r(\varepsilon)$ 에 비례하므로 질량 m_{m1} 과 m_{m2} 는 각각 식 (7) 및 식 (8)과 같이 계산된다.

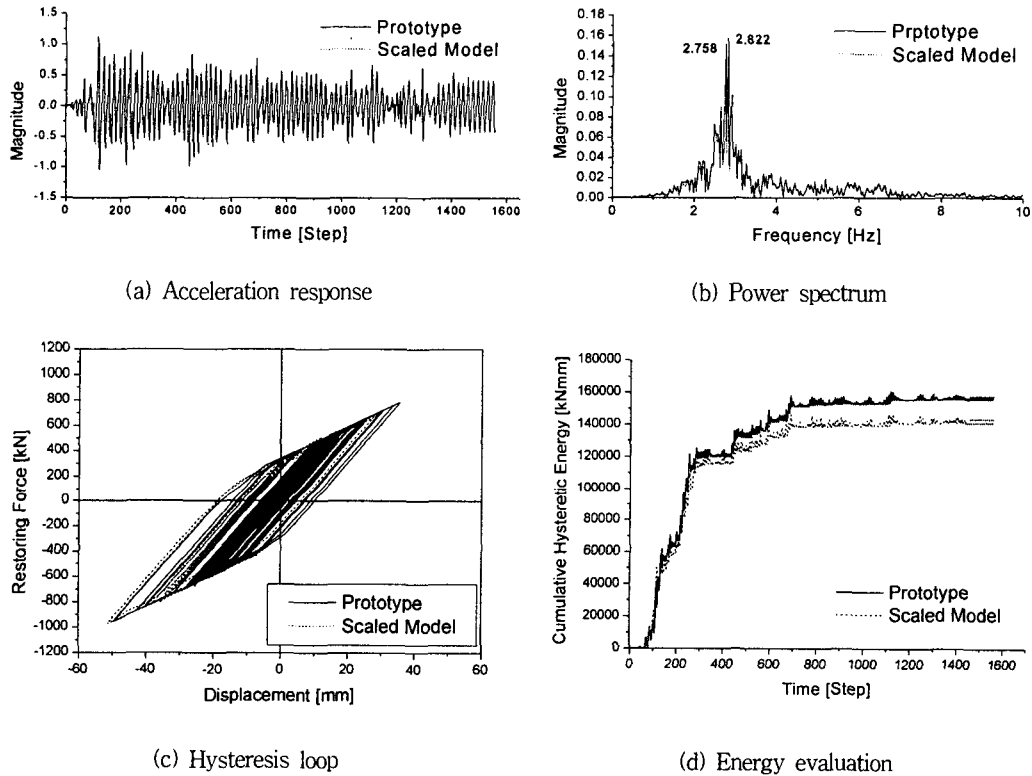
$$m_{m1} = s^2 \cdot E_{r1} \cdot m_p = 0.1^2 \cdot 0.252 \cdot 100.7 \cdot 10^3 = 253.94(\text{kg}) \quad (7)$$

$$m_{m2} = s^2 \cdot E_{r2} \cdot m_p = 0.1^2 \cdot 0.102 \cdot 100.7 \cdot 10^3 = 102.78(\text{kg}) \quad (8)$$

[그림 8(a-c)]에서는 원형구조물과 축소모형의 지진응답결과를 비교하였으며, [그림 8(d)]에서 누적이력에너지

(cumulative hysteretic energy)를 이용한 지진에너지 소산능력을 평가하였다. 응답의 비교결과, 가속도응답과 고유진동수에서 3%이내의 오차를 보이고 있으며, 누적이력에너지 평가에서는 약 9% 이내의 오차를 나타내고 있다.

축소모형에 대한 유사동적실험에 앞서 수행된 수치해석 결과로부터, 원형구조물의 지진응답을 비교적 유사하게 재현하는 것을 확인하였다. 따라서 향후 유사동적실험 알고리즘에서 적용하고자 하는 등가탄성계수비가 실시간으로 적용되는 equivalent three phase similitude law의 타당성을 수치적으로 검증하였다.



[그림 8] 원형구조물과 축소모형의 응답 비교

6. 결론

이 연구는 기존의 가속도응답을 기준으로 기하학적인 상사법칙을 보완하여 재료비선형이 고려된 equivalent three phase similitude law를 제안하였으며, 실험에 앞서 재료시험과 수치해석을 수행하였다.

재료시험결과 극한변형률이 동일한 normal-concrete와 micro-concrete의 배합비를 선정하여 재료의 비선형거동을 파악하였고, 그 거동구간을 변형률 기준으로 탄성거동구간, 약 비선형거동구간, 강 비선형거동구간으로 나누어 상사법칙에 적용하게 될 등가탄성계수비를 계산하였다. 또한 원형구조물의 재료인 normal-concrete보다 축소모형의 재료인 micro-concrete의 탄성계수를 상대적으로 작게 설계하여 굵은 골재 크기에 의한 축소모형 제작의 어려움을 해결함은 물론 추가질량의 크기도 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다.

수치해석에서는 bilinear model을 적용한 단자유도시스템을 대상으로 지진손상정도에 따라 질량이 변화하는 과정을 모사하여 수행하였으며, 해석결과로부터 축소모형의 응답이 원형구조물의 응답과 거의 일치함을 확인하여 유사동적실험에 적용하게 될 알고리즘의 타당성을 수치적으로 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)의 2003년도 단독19과제의 일부로서 KEERC를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, W., El-Attar, A. and White, R.N., "Small-scale modeling techniques for reinforced concrete structures subjected to seismic loads", Technical report NCEER-88-0041, State University of New York at Buffalo, New York, 1988.
2. Zhang, M. Z., Guo, X. and Dai, J. W., "Shaking table tests of a high-rise building model", *Proc. of the Fifth International Conference on Tall Buildings*, Hong Kong, 1998.
3. Kumar, S., Itoh, Y., Saizuka, K. and Usami, T., "Pseudodynamic testing of scaled models", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.4, 1997, pp.524-52.
4. 김남식, 박영학, 장승필, "A Study on Similitude Law for Evaluation of Seismic Performance", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.208-215, 2003.
5. 박영학, "내진성능평가를 위한 상사법칙 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 2002.
6. Harris, H. G. and Sabnis, G. M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, CRC Press, 1999.
7. Meng, Q. L., "The dynamic simulation of nonlinear performance of R/C structures in the earthquake simulation shaking table test", Master dissertation of Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin, 2001.
8. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.