

변형률비와 시간상사비의 연관성을 고려한 철근콘크리트 기둥의 진동대를 이용한 축소모형실험

Scaled Model Test of RC Column with Shaking Table Considering the Relationship between Strain Ratio and Scale Factor of Time

박자민*, 조재열*[†]

Jamin Park*, Jae-Yeol Cho*[†]

Abstract In a dynamic scaled model test of RC column, from nonlinear material characteristics of concrete and difference between material similitude conditions for steel and concrete, strain ratio which denotes scale factor of strain becomes not constant but variable. Strain ratio is related to scale factor of time indicating the time of input ground acceleration for model tests should be different to that for prototype tests when variation of strain ratio is occurred. However many researches on dynamic test using RC model have not considered this similitude requirements. In this study, shaking table tests using RC scaled model considering the variation of strain ratio were conducted. The accuracy of prediction by developed method and the necessity of consideration of variable strain ratio was discussed and evaluated.

Keywords : Scaled Model Test, Similitude Law, Strain Ratio, RC Column, Shaking table test

초 록 철근콘크리트 구조물의 동적축소모형실험에서 콘크리트의 비선형성 및 서로 다른 두 재료의 재료상사적인 특성 차이에서 기인하여 변형률비가 계속적으로 변동하게 된다. 변형률비는 시간상사비와 연관되어 있으므로 이 값이 변동함에 따른 모형 실험에서의 가진파의 시간 특성을 적절히 조절해 주어야 하나 많은 경우 이러한 특성이 제대로 고려되지 않고 실험이 수행되고 있다. 본 연구에서는 먼저 변형률비의 변동에 따른 모형 가진파의 시간성분을 보정하는 방법을 제시하고 이의 검증을 위하여 실구조물 및 축소모형에 대한 축소모형실험을 수행하였다. 이를 통해 개발된 방법의 실구조물 응답에 대한 예측정확성을 확인하고 실험 시 변형률비 변동의 고려여부에 대한 중요성을 평가하였다.

주요어 : 축소모형실험, 상사법칙, 변형률비, 철근콘크리트 기둥, 진동대실험

1. 서론

실험 장비의 성능 및 실험 비용에 제약이 있을 경우 축소모형을 이용한 실험은 실구조물 실험의 합리적인 대안이 될 수 있다. 이에 따라 철근콘크리트 기둥의 축소모형실험에 대한 연구가 진행되었고 새로운 상사법칙 및 실험기법이 제안되었다[1,2]. 이들 연구에서는 주로 철근콘크리트 축소모형의 변형률비를 계산하는 방법에 중점을 두었다.

[†] 교신저자: 서울대학교 공과대학 건설환경공학부(jycho@snu.ac.kr)

* 서울대학교 공과대학 건설환경종합연구소

** 서울대학교 공과대학 건설환경공학부

변형률비는 재료의 변형률에 대한 상사비를 의미하는 것[3]으로 철근콘크리트 구조물의 경우 철근과 콘크리트라는 서로 상이한 재료가 사용이 되므로 일반적으로 철근과 콘크리트의 변형률비가 서로 다르게 된다. 이 경우 축소모형의 구조적인 특성을 고려하여 전체적인 거동을 대표할 수 있는 하나의 변형률비를 산정해야 할 필요가 있다[4]. 이에 대한 기존의 연구들에서는 실구조물의 응답 예측에 있어 만족스러운 정도의 정확도를 보여주지는 못하고 있다.

해당 연구들[1,2]에서는 변형률비와 시간상사비의 연관성을 고려하지 않았으며 이에 따라 실구조물과 모형에 동일한 시간성분을 가지는 가진파를 사용하여 실험을 수행하였는데 이들 연구에서 제시한 상사법칙을 유도하는데 있어 기본이 되는 Krawinkler[3]의 연구에서는 오히려 시간상사비와 변형률비 간의 관계를 상사법칙에서 명시하고 있다. 더불어 Krawinkler[3]의 상사법칙은 변형률비가 상수인 경우를 상정하고 유도된 상사법칙인데 변형률비가 변수로 취급되는 상황에서 이를 동일하게 적용할 수 있는지 여부에 대한 엄밀한 고려가 해당 연구들에서 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 변형률비의 변동을 고려할 수 있는 상사법칙을 제안하고 이의 실적용을 위한 변형률비의 산정방법을 제시하였다. 제안된 상사법칙과 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실구조물과 축소모형을 이용한 진동대실험을 수행하였으며 축소모형의 응답에 상사법칙을 적용하여 만족할 만한 예측정확성이 확보되는지를 확인함으로써 제안된 상사법칙의 효율성을 입증하고자 하였다.

2. 변형률비 변동을 고려한 상사법칙 및 진동대실험 방법

2.1 변형률비 변동을 고려한 상사법칙의 개발 및 변형률비 산정 방법

변형률비에 의한 영향을 고려한 대표적인 상사법칙으로 Krawinkler[3]의 상사법칙이 있으나 이는 변형률비가 일정한 경우에만 적용이 가능하다. 변형률비는 시간상사비 이외에도 강성에 대한 상사비와 연관이 있다. 구조물의 강성은 할선(Secant)강성과 접선(Tangent)강성으로 구분할 수가 있는데 철근콘크리트 축소모형의 경우 콘크리트의 비선형성에 의하여 실구조물과 축소모형의 할선 및 접선강성에 대한 상사비가 변동하게 되고 두 값이 서로 달라지게 된다. 하지만 Krawinkler[3]에서는 강성에 대한 상사비가 하나로 정의되어 있어 위와 같은 현상을 제대로 고려하지 못한다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 두 종류의 강성 각각에 해당하는 변형률비를 구분하여 정의한 상사법칙을 Table 1과 같이 제시하였으며 새롭게 정의된 두 변형률비는 아래 식(1)과 같다.

$$\varepsilon_{r,kt} = \frac{k_{t,m}}{k_{t,p}}, \varepsilon_{r,ks} = \frac{k_{s,m}}{k_{s,p}} \quad (1)$$

위 식에서 $\varepsilon_{r,kt}$, $\varepsilon_{r,ks}$ 는 각각 접선 및 할선 강성과 연관되어 있는 변형률비를 의미하며 k_s 과 k_t 는 각각 할선, 접선 강성을 의미하고 p 와 m 은 실구조물과 모형을 의미한다.

Table 1 Scale factors of new similitude law

Quantity	Dimension	Scale factors	Quantity	Dimension	Scale factors
Force	F	$s_\sigma s_L^2$	Velocity	LT^{-1}	$s_L^{1/2} \varepsilon_{r,kt}^{1/2}(t)$
Mass	$FL^{-1}T^2$	$s_\sigma s_L^2$	Acceleration	LT^{-2}	1.0
Length	L	s_L	Increment of time	T	$s_L^{1/2} \varepsilon_{r,kt}^{1/2}(t)$
Displacement	L	$s_L \varepsilon_{r,ks}(t)$	Secant stiffness	FL^{-1}	$s_\sigma s_L \varepsilon_{r,kt}^{-1}(t)$
Increment of displacement	L	$s_L \varepsilon_{r,ks}(t)$	Tangent stiffness	FL^{-1}	$s_\sigma s_L \varepsilon_{r,ks}^{-1}(t)$

F, L, T : Dimension of force, length and time, s_r, s_σ : Scale factor of length and stress

제안된 상사법칙의 실적용을 위해서는 식(1)에서 정의된 두 종류의 변형률비를 계산하여야 하는데 두 변형률비가 모두 강성에 대한 상사비와 연관이 되어 있으므로 계산을 위해서는 실구조물과 모형의 강성을 알아야 한다. 이는 실험 전 실구조물과 모형에 대한 동적해석을 수행하고 이를 통해서 계산할 수 있다. 해석결과 철근의 항복 전후를 기점으로 하여 접선 변형률비가 크게 달라지고 항복 전에는 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 확인하였다. 여기서 항복 전의 변동이 크지 않은 구간에서의 접선 변형률비의 평균 값을 평균변형률비 ($\varepsilon_{r,kt}^{avg}$)로 설정하였다.

2.2 변형률비 변동에 따른 모형실험 가진파의 시간 조정

해석적인 방법을 통해 계산된 평균변형률비에 시간상사비와 변형률비 간 관계를 적용하여 모형실험 가진파의 시간증분(Time step length)의 크기를 아래 식(2)와 같이 보정할 수 있다.

$$\Delta t_m = \sqrt{s_L \varepsilon_{r,kt}(t)} \Delta t_p, \varepsilon_{r,kt}(t) = \begin{cases} \varepsilon_{r,kt}^{avg} & t \leq t_{yielding} \\ 1.0 & t > t_{yielding} \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 Δt_p 와 Δt_m 는 각각 실구조물과 모형실험의 가진파의 시간증분을 의미하며 $t_{yielding}$ 은 기둥 내 주철근의 항복이 발생하는 시점을 의미한다. 식(2)에서 철근의 항복이 발생하면 변형률비를 1.0으로 간주하는데 이는 일반적으로 축소모형실험 시 철근의 변형률비가 1.0이고 철근의 항복이 발생하면 철근콘크리트 기둥의 단면 강성에서 철근에 의한 강성이 차지하는 비율이 높아짐을 감안한 것이다. 실제 해석적인 방법을 통하여 변형률비의 변동을 예측하면 철근 항복 이후 변형률비가 1.0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

3. 진동대실험을 통한 검증

3.1 실험체 제원 및 설계

진동대실험은 실구조물 및 축소모형 실험체를 모두 사용하여 수행되었으며 축소모형실험의 경우 기존 연구의 상사법칙[2]과 본 연구의 상사법칙을 모두 적용하여 실험을 수행하고

Table 2 Material properties of prototype and model

Reinforcement			Concrete		
Property	Prototype	Model	Property	Prototype	Model
Yield strength	525 MPa	425 MPa	Compressive strength	43.0 MPa	30.4 MPa
Elastic Modulus	200,000 MPa	200,000 MPa	Strain at compressive strength	0.00277	0.00328

Table 2 Test information on each specimen and summarized tests results

No. of model specimen	Peak ground acceleration (g)	Similitude law	Mass (kg)	Test results								
				$\epsilon_{r,kt}^{avg}$	$\epsilon_{r,kt}^{sup}$	$\epsilon_{r,kt}^{cal}$	Similarity measure					
1	0.139g	Kim 등 [2]	1,026				-	1.000	1.152	0.238	0.159	0.172
	0.139g			1.000	1.152	0.228		0.158	0.164			
	0.830g			1.000	-	0.466		0.419	0.664			
2	0.139g		Kim 등 [2]	1,026	-	1.000	1.188	0.223	0.182	0.136		
	0.139g					1.000	1.188	0.222	0.166	0.134		
	0.830g					1.000	-	0.528	0.155	0.490		
3	0.139g			Kim 등 [2]	851	-	1.000	0.995	0.317	0.245	0.234	
	0.830g						1.000	-	0.766	0.643	0.886	
4	0.139g				This study	1,000	1.267	1.400	1.394	0.947	0.697	0.952
	0.139g	1.500						1.394	0.862	0.630	0.829	
	0.139g	1.600						1.338	0.548	0.372	0.630	
	0.139g	1.700						1.413	0.560	0.355	0.591	
	0.139g	1.800	1.454					0.581	0.357	0.563		
	0.830g	1.600	-					0.759	0.599	0.826		
5	0.139g	This study	1,000			1.267	1.400	1.219	0.551	0.402	0.592	
	0.139g			1.500			1.225	0.552	0.412	0.583		
	0.139g			1.600			1.168	0.457	0.318	0.428		
	0.139g			1.700			1.229	0.437	0.305	0.394		
	0.139g			1.800			1.273	0.389	0.262	0.310		
	0.830g			1.600			-	0.844	0.679	0.894		
6	0.139g		This study	1,000		1.235	1.400	1.158	0.574	0.418	0.608	
	0.139g						1.500	1.129	0.558	0.401	0.573	
	0.830g						1.400	-	0.841	0.674	0.868	
7	0.139g			This study		1,000	1.222	1.400	1.176	0.554	0.398	0.579
	0.139g							1.500	1.129	0.560	0.401	0.563
	0.830g							1.400	-	0.784	0.659	0.844
8	0.139g				This study	1,000	1.269	1.300	1.188	0.908	0.717	0.883
	0.139g							1.400	1.219	0.716	0.497	0.731
0.830g	1.300					-	0.850	0.650	0.884			

이를 통해 본 연구에서 제안된 상사법칙의 효율성을 입증하고자 하였다. 실구조물은 총 높이 3.0m(기둥부 높이 2.0m)인 철근콘크리트 기둥으로 기둥 상부에는 20ton의 질량을 설치하였다. 축소모형은 실구조물을 1/4로 축소한 실험체로 총 높이가 0.75m(기둥부 높이 0.5m)이다. 모형 상부질량은 적용되는 상사법칙에 맞추어 다르게 설정되었으며 본 연구의 상사법칙을 사용할 경우 모형 상부질량은 1.0ton이 된다.

Table 2는 사용된 철근과 콘크리트의 재료 물성을 비교하여 나타낸 것으로 기둥의 주철근의 경우 실구조물은 D25 이형철근, 모형은 D6 이형철근이 사용되었으며 전단철근으로는 실



Fig. 1 Test setups for prototype (left) and model (right)

구조물은 D13 이형철근, 모형은 D3 wire가 사용되었다.

3.2 실험 변수 및 실험 방법

실험 시 가진파로 El-Centro 지진파를 이용하였으며 철근 항복 여부에 따른 상사법칙의 타당성을 확인하기 위하여 원래 가진파의 가속도 크기를 45%로 축소시킨 지진파(철근항복 미 발생)와 250%로 확대시킨 가진파(철근항복 발생), 총 2 종류의 가진파를 이용하였다. 모형 실험 시 축소된 지진파를 이용한 1회 가진 이후 콘크리트 균열 등과 같은 실험체의 강성을 저하시킬 수 있는 요인이 발견되지 않았다. 이에 따라 식(2)에서의 구한 변형률비($\epsilon_{r,kt}^{avg}$)가 아닌 다른 값을 가지는 변형률비($\epsilon_{r,kt}^{sup}$)를 이용하여 가진파의 시간을 보정하여 추가적인 가진을 수행하여 가진파의 시간에 대한 보정이 잘 되지 않았을 경우 어떠한 오차가 발생할 것인지도 분석하였다.

3.3 결과 분석 및 논의

Fig. 2는 실구조물의 응답과 모형의 응답으로부터 기존 연구[2]의 상사법칙과 제안된 상사법칙을 적용하여 예측된 결과를 비교하여 나타낸 것으로 제안된 상사법칙을 적용한 경우 보다 정확하게 실구조물의 응답을 예측하는 것을 확인할 수 있다. 좀 더 정량적인 분석을 위해서 전체 실험 결과에 대하여 실구조물 응답과 예측된 응답 간의 상관계수(Correlation coefficient) 및 FRAC(Frequency Response Assurance Criteria)를 계산하였다. 여기서 FRAC는 주파수영역에서 상관계수에 해당하는 척도이다. Table 2의 결과로부터 제안된 상사법칙을 적용한 경우 기존 연구의 상사법칙을 적용한 경우에 비해서 정량척도의 크기가 1.0에 가까운 값을 주는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 제안 상사법칙의 예측정확성이 기존에 비하여 향상되었음을 확인할 수 있다.

Table 2에서는 또한 변형률비 계산결과를 나타내었는데 해석을 통해 구한 평균변형률비($\epsilon_{r,kt}^{avg}$)와 실제로 가진파의 시간보정에 사용된 변형률비($\epsilon_{r,kt}^{sup}$), 그리고 실험결과로부터 구한 응답을 통해 역으로 계산된 모형의 변형률비($\epsilon_{r,kt}^{cal}$)를 비교하였다. 세 종류의 변형률비의 값이

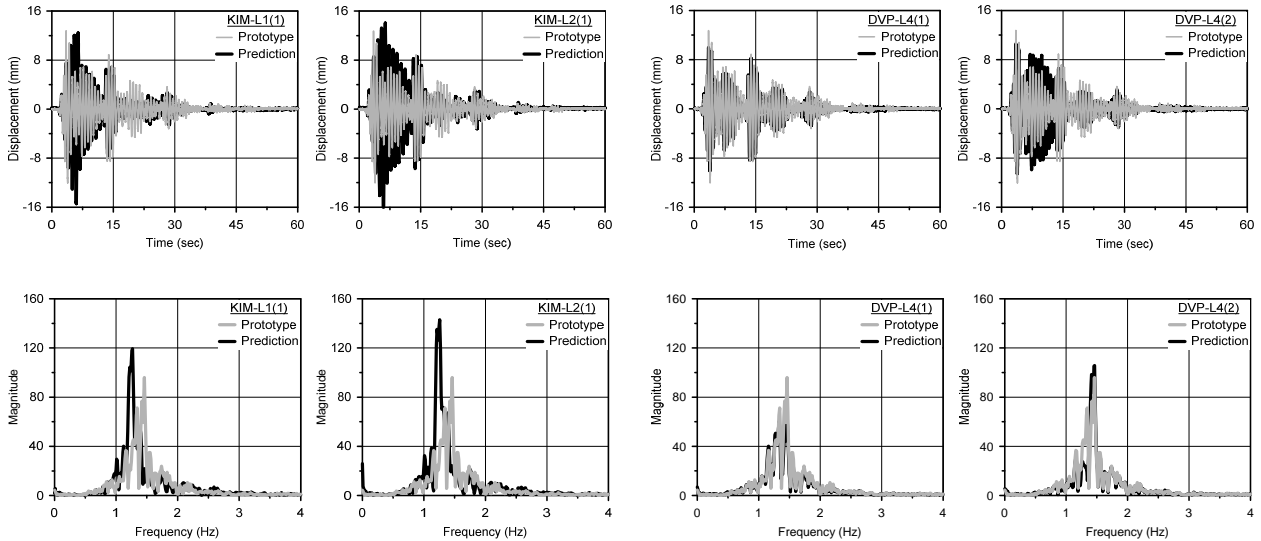


Fig. 2 Test results for prototype and predictions by similitude law of previous study[2](left) and this study(right) for non-yielding case

서로 비슷할수록 앞서의 정량척도의 크기가 1.0에 가까워져 예측정확성이 향상되는 것을 확인하였으며 이를 통해서 변형률비에 따른 가진과의 시간보정이 필수적임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 변형률비 변동을 고려하는데 적합한 상사법칙과 변형률비를 산정하는 방법을 제시하였으며 실구조물 및 축소모형 실험을 수행하여 이의 타당성을 검증하였다. 실험 결과 적절한 변형률비의 값을 제대로 예측하지 못하였거나 변형률비와 시간상사비 간의 관계를 고려하지 않은 경우 모형의 응답으로부터 실구조물의 응답을 정확히 예측하는데 있어 명백한 한계가 존재한다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Meng, Q. L., (2001) The Dynamic Simulation of Nonlinear Performance of R/C Structures in the Earthquake Simulation Shaking Table Test, Master Thesis, *Institute of Engineering Mechanics*.
- [2] Kim, N. S., Lee, J. H., and Chang, S. P. (2009) Equivalent Multi-Phase Similitude Law for Pseudodynamic Test on Small Scale Reinforced Concrete Models, *Engineering Structures*, 31, pp. 834-846.
- [3] Krawinkler, H., and Moncarz, P. D. (1982) Similitude Requirements for Dynamic Models, *ACI Structural Journal*, SP-73, pp. 1-22.
- [4] Harris, H. G., and Sabnis, G. M. (1999) Structural Modeling and Experimental Techniques. *CRC Press*
- [5] Allemang, R. J. (2003) The Model Assurance Criterion- Twenty Years of Use and Abuse, *Sound and Vibration*, pp. 14-21.