



RC기둥의 내진성능평가를 위한 재료비선형 상사법칙

이도근¹⁾ · 조재열^{1)*}

¹⁾서울대학교 공과대학 건설환경공학부

Similitude Law on Material Non-linearity for Seismic Performance Evaluation of RC Columns

Do-Keun Lee¹⁾ and Jae-Yeol Cho^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

ABSTRACT This paper discusses a series of experiments including material improvement in order to ensure quality of grouting for the post-tensioned structure. In prestressed concrete, grouting refers to the construction procedure of filling empty space of duct enclosing with strands using cementitious material. To date, adequate quality control of the grouting has not been established in Korea because the relationship between the grouting and durability of post-tensioned structure is not well-recognized. The Korean standard does not consider the important material characteristic, wick effect, which is caused by strands in the ducts and current standard testing method unlikely quantify reasonable material segregation. As a result, the grout material, which meets the current material standards, may exhibit excessive bleeding water or shrinkage during construction. In this study, international codes and standards related to grouting were surveyed. The ratio of constituents and novel admixtures were suggested to meet equivalently with these standards. Performance of this enhanced grout was compared to common domestic grout using the international standard testing method. A series of mock-up specimens considering geometry of PC beam was constructed and grout flow pattern was observed as the grout was injected. It was observed that the grouting performance was highly influenced by material properties and filling characteristic can be varied depending on geometry of ducts.

Keywords : seismic performance evaluation, column, pseudo-dynamic test, shaking table test, scaled model

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 위한 실험은 구조물의 대형화에 따라 실험크기의 구조물로 실험을 수행할 경우, 실험실의 공간제약과 실험기기의 가력성능 등의 한계로 인하여 현실적인 제약이 존재한다. 따라서 축소모형의 활용이 필연적이며, 이에 따라 정확한 상사법칙이 요구된다. 또한 크기효과(size effect)의 영향이 보고되어 있어 가용할 수 있는 기하학적인 상사비에 제한이 있으므로 실험의 최적화를 고려할 수 있는 방안이 필요하다. 이에 따라 축소모형에서는 원형구조물에 사용된 콘크리트의 굵은 골재 입도를 개략적인 기하학적 상사비에 맞추어 줄인 마이크로 콘크리트^{1,2)}를 사용하여 실험시의 제약을 극복하는 방법이 많이 시행되어왔다. 그러나 축소모형에서 사용되는 철근의 특성은 원형구조물의 특성과 상당히 유사하게 구현이 가능하지만, 콘크리트의 경우 마이크로 콘크리트의 재료적인 특성에 대하여 정량화가 되어

있지 않기 때문에 원형 구조물에서 사용된 재료특성을 상사법칙에 따른 설계값으로 정확히 구현하기 어렵다. 원형 구조물과 축소모형에서 사용된 재료의 차이로 인하여 원형구조물과 축소모형의 거동은 비선형적인 관계를 가지게 되지만, 현재까지 적용되고 있는 상사법칙은 탄성범위 내에서 유도되어 이러한 비선형적 관계를 효과적으로 모사하기 매우 어렵다.

최근 국외의 연구에서는 마이크로 콘크리트를 사용한 축소모형의 진동대실험에서 재료비선형에 따른 거동을 정확하게 모사하기 매우 어렵다고 보고한 바 있다.³⁾ 이에 따라 최근 국내에서 수행된 연구는 비선형 거동을 모사하기 위한 지표로서 재료의 변형률에 따라 변수로 적용되는 탄성계수비와, 사용된 재료의 극한변형률의 비교를 통하여 변형률비를 정의하여 유사동적실험을 수행하였다.^{4,6)} 또한 이를 보완하여 변형률비를 철근의 강성기여를 포함하여 분배한 연구가 수행된 바 있지만,⁷⁾ 역시 콘크리트만의 특성을 기준으로 탄성계수비를 정의함으로써 구조물의 거동에 대한 콘크리트의 영향을 과대 혹은 과소평가함에 따라 정확한 거동을 예측하기에는 다소 무리가 있다. 그러므로 이 연구에서는 콘크리트의 기준이 아닌 True Replica Model⁸⁾로 설계된 철근의 상사법칙을

*Corresponding author E-mail : jycho@snu.ac.kr
 Received December 30, 2009, Revised March 8, 2010,
 Accepted March 9, 2010
 ©2010 by Korea Concrete Institute

전개한 후 콘크리트의 변형률 왜곡으로 인한 영향을 고려하여 재료비선형에 따른 거동특성을 파악하고자 하였으며, 재료비선형 기준의 새로운 상사법칙을 제시하였다. 또한 수치해석적 방법을 통해 푸쉬오버(pushover) 시뮬레이션과 pseudo-dynamic 시뮬레이션을 이용하여 제안된 상사법칙의 적합성을 검증하였다.

2. 상사법칙

축소모형의 설계 시 적용할 기하학적인 축소율과 사용될 재료의 특성에 따라 필연적으로 상사법칙이 적용된다. 상사법칙의 전개 시에는 관찰 대상, 관찰 목적 등에 따라 각기 올바른 상사를 적용하여 상사법칙을 유도하여야 한다. 내진성능평가와 같은 동역학적인 요소가 포함되는 문제에 있어서는 시간의 차원에 대하여 필수적으로 상사를 고려하여야 하며, 재료비선형의 문제에 있어서는 원형구조물과 축소모형의 탄성계수비 $s_E (= E_m/E_p)$ 이외에 변형률비 $\varepsilon_r (= \varepsilon_m/\varepsilon_p)$ 를 고려하여 전개하여야 한다.

Table 1은 이미 잘 알려진 동역학적인 상사법칙⁸⁾으로부터 기하학적 상사비 $s_l (= l_m/l_p)$ 과 탄성계수비 s_E , 변형률비 ε_r 을 고려하여 유도된 상사법칙으로서, 상사비는 원형구조물과 축소모형 사이의 물리적인 비율의 의미를 가진다.

2.1 동적 특성을 고려한 상사법칙

2.1.1 Gravity force neglected model

상대적으로 중력의 영향이 구조물에 미치는 영향이 작

다고 판단되는 경우 같은 재료를 사용하여 단순 질량의 s_l^3 에 비례하도록 상사를 설정할 수 있다. 이 경우 동적 실험 시에 축소모형의 질량분포가 원형구조물과 동일하게 재현되어 추가적인 질량을 부과할 필요가 없다. 하지만 가속도의 차원이 원형구조물과 축소모형에서 동일하게 유지되지 않아 중력가속도도 역시 동일하게 유지되지 않기 때문에 중력의 영향을 정확히 모사할 수 없다. 따라서 중력의 영향이 무시될 경우 축력을 과소평가하여 구조물의 연성거동을 효과적으로 파악하지 못하게 된다. 그러나 콘크리트 벽에 의해 횡방향의 하중이 완벽하게 지지되는 경우의 구조물이나 중력의 영향이 내부 압력으로 인한 영향에 비해 훨씬 적은 원자 격납고 등의 구조물에 적용 가능하다.

2.1.2 Time based model

Gravity force neglected model과 마찬가지로 중력의 영향이 크게 중요하지 않을 때 적용이 가능하며 축소모형과 원형 구조물의 시간비를 1로 두고 전개한 상사법칙⁹⁾으로 이 경우 추가질량이 필요하다. 이 때 원형 구조물과 축소모형의 시간비가 동일하게 보존되므로 구조물의 내진성능에 대한 정량적인 정보를 직접 얻을 수 있는 장점이 있으며 주로 일본에서 유사동적실험을 통해 많이 적용되어 왔다. 하지만 역시 gravity force neglected model에서와 같이 가속도가 원형구조물과 축소모형에서 같은 차원으로 유지되지 않기 때문에 중력가속도를 정확히 모사할 수 없다. 또한 질량에 관한 압축률이 작기 때문에 추가적으로 적재하여야 할 부과질량은 크다.

Table 1 Similitude laws

	Quantities	Dimension	Scale factor					
			True replica model	Gravity force neglected model	Time based model	Artificial mass simulation model		
						w/o material nonlinearity	Considering material nonlinearity	
						Cho ⁷⁾	This study	
Loading	Force, P	F	$s_l^2 s_E$	s_l^2	$s_l^2 s_E$	$s_l^2 s_E$	$s_l^2 s_E$	$s_l^2 s_E \varepsilon_r$
	Pressure, q	FL^{-2}	s_E	1	s_E	s_E	$s_E s_r$	$s_E s_r$
	Acceleration, a	LT^{-2}	1	s_l^{-1}	s_l	1	1	1
	Gravitational accel. g	LT^{-2}	1	Neglected	s_l	1	1	1
	Velocity, v	LT^{-1}	$s_l^{1/2}$	1	s_l	$s_l^{1/2}$	$s_l^{1/2}$	$s_l^{1/2} \varepsilon_r^{-1/2}$
Geometry	Time, t	T	$s_l^{1/2}$	s_l	1	$s_l^{1/2}$	$s_l^{1/2}$	$s_l^{1/2} \varepsilon_r^{1/2}$
	Linear dimension, l	L	s_l	s_l	s_l	s_l	s_l	s_l
Material property	Displacement, Δ	L	s_l	s_l	s_l	s_l	$s_l \varepsilon_r$	$s_l \varepsilon_r$
	Frequency, ω	T^{-1}	$s_l^{-1/2}$	s_l^{-1}	1	$s_l^{-1/2}$	$s_l^{-1/2}$	$s_l^{-1/2} \varepsilon_r^{-1/2}$
	Modulus, E	FL^{-2}	s_E	1	s_E	s_E	s_E	s_E
	Stress, σ	FL^{-2}	s_E	1	s_E	s_E	$s_E \varepsilon_r$	$s_E \varepsilon_r$
	Strain, ε	-	1	1	1	1	ε_r	ε_r
	Poisson's ratio, ν	-	1	1	1	1	1	1
	Mass density, ρ	$FL^{-4}T^2$	s_E/s_l	1	s_E/s_l^2	-	-	-
	Stiffness, K	FL^{-1}	s_E	s_l	s_E	$s_E \varepsilon_r$	$s_l s_E \varepsilon_r$	$s_l s_E$
Energy, EN	FL	s_l^3	s_l^3	$s_l^3 s_E$	$s_l^3 s_E$	$s_l^3 s_E \varepsilon_r^2$	$s_l^3 s_E \varepsilon_r^2$	

2.1.3 Artificial mass simulation model

시간에 관해 관성력을 정확히 모사하고자 하는 경우 원형구조물의 가속도와 축소모형의 가속도를 동일차원으로 설정하여 상사법칙을 전개할 수 있다. 이 경우 실제 축소된 축소모델과 상사법칙에 따른 질량 차이만큼 추가적으로 질량을 적재하여야 하며,¹⁰⁾ 가속도의 차원이 원형 구조물과 축소모형에서 동일함에 따라 축소모형의 질량은 지반 가속도와 동일함을 통하여 관성력(하중)과 같은 차원을 지닌다. 또한 이 상사법칙에서는 시간은 s 로 표현되어 원형구조물과 축소모형사이에서 차이가 발생한다. 따라서 축소모형에서는 시간 압축이 필요하므로 질량과 시간을 수치적으로 다를 수 있는 유사동적실험에 가장 이상적인 방법이다.

따라서 이 연구에서는 유사동적실험을 기반으로 하여 재료의 비선형성을 고려한 상사법칙을 제안하였다.

2.2 축소모형 재료모델

이 장에서는 앞서 기술한 바와 같이 artificial mass simulation model에서 고려할 수 있는 축소모형 재료모델의 개발 필요성을 살펴보고자 한다. 상사법칙을 적용함에 있어 가장 이상적인 모델은 Fig. 1과 같이 콘크리트와 철근의 변형률에 따른 응력비가 동일하며 파괴에 이르기까지의 거동이 원형과 유사하며 변형률이 일치하는 true replica model이다. 첨자 c 는 콘크리트의 최대 압축강도에 해당하는 부분을 의미하며, 첨자 y 는 철근의 항복시를 표현하는 첨자이다. 첨자 p 와 m 은 각각 원형구조물과 축소모형을 의미한다. 그러나 각 재료의 탄성계수비가 변형률에 따라 선형적인 관계를 유지해야 하는 재료특성을 만족시키기 어렵다는 점에서 현실적으로 구현이 거의 불가능하다. 또한 모델 콘크리트(마이크로 콘크리트)의 변형률비와 모델 철근의 변형률비를 일정하게 줄인 왜곡모델이 제시된 바 있으나,¹¹⁾ 변형률의 절대값에 민감한 문제를 다루는 경우에는 적용이 제한된다.

반면에 축소모형에 사용되는 마이크로 콘크리트와 일반 철근의 재료특성은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 원형구조물과 축소모형의 콘크리트 응력-변형률은 비선형 관계를 가지며 변형률에 대한 변수로 작용한다. 또한 철근의 탄성계수는 임의로 조절이 어렵다는 점에서 원형 구조물에 사용된 철근과 동일한 것을 사용하여 축소모델을 설계하였다. 축소모형의 콘크리트는 원

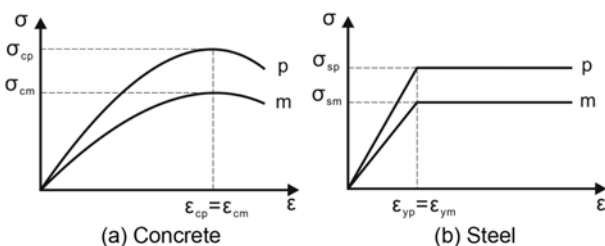


Fig. 1 True replica model

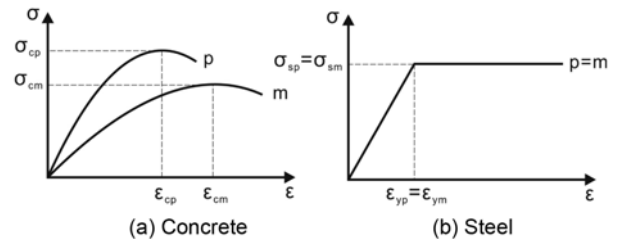


Fig. 2 Strain distortion model

형구조물에 비하여 더 작은 강도를 지니는 재료를 사용하였지만, 철근은 같은 재료를 사용함으로써 응력의 상사성을 만족시키지 못한다. 이를 위해서는 비선형적인 거동을 포함할 수 있는 상사법칙을 적용하여야 하고 콘크리트의 변형률 왜곡에 따른 영향을 고려하기 위한 변형률비의 인자가 추가적으로 고려되어야 한다.

3. 제안 상사법칙

상사법칙의 전개 시 사용되는 탄성계수비 s_E 와 변형률비 s_ϵ 은 하중-변위 관계에 일차적인 영향을 미치는 요소로서 구조물 전체 강성과 변형률을 고려해야 하는데, 그렇지 못할 경우 정적인 문제에서는 정확한 하중-변위 관계를 산정할 수 없으며, 동적인 문제에서는 부과질량의 크기에 영향을 주어 결과적으로 응답에 영향을 미치게 된다. 따라서 구조물의 거동에 미치는 사용재료의 기여도에 따라 영향비를 분배하여 구조물 전체를 대표할 수 있는 탄성계수비와 변형률비를 산정하여야 한다.

3.1 탄성계수비와 변형률비의 산정

3.1.1 탄성계수비 s_E 의 산정

탄성계수비를 정확히 산정하기 위해서는 철근의 강성기여와 콘크리트의 강성기여에 따른 영향관계를 포함하여야 한다. Fig. 3은 이 연구에서 대상으로 한 철근콘크리트 직사각형 단면에 대하여 각 재료의 휨강성 분담률을 나타내는데, (a)는 전구간에 대한 것이며, (b)는 철근 항복 이전 구간을 확대하여 나타낸 것이다. 여기서, ET 는 전체 구조물의 휨 강성을 나타내며 $(ET)_c$ 와 $(ET)_s$ 는 각각 콘크리트와 철근의 휨 강성을 의미한다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 콘크리트가 강성에 대해 지배적인 경우는 휨에 의한 초기균열 발생 이전 구간으로 한정되어 있으며, 균열 발생 이후 콘크리트의 강성기여도는 철근에 비해 급격히 줄어들어 철근의 항복 이후에는 무시할 정도가 됨을 알 수 있다. 따라서 탄성계수비의 산정 척도는 콘크리트가 아닌 철근이 기준이 되어야 하며, 이 연구에서는 true replica model로 가정된 철근의 상사법칙 전개 후 콘크리트의 응력-변형률 왜곡에 따른 영향을 고려하고자 하였다.

우선 후크의 법칙에 따른 응력-변형률 관계 식 (1)에 상사법칙을 적용한 후 탄성계수비에 대하여 정리하면 식

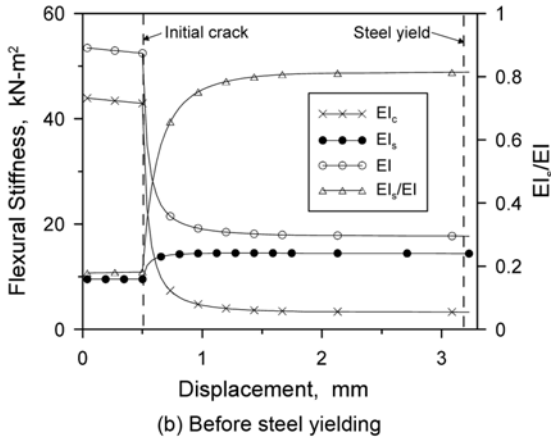
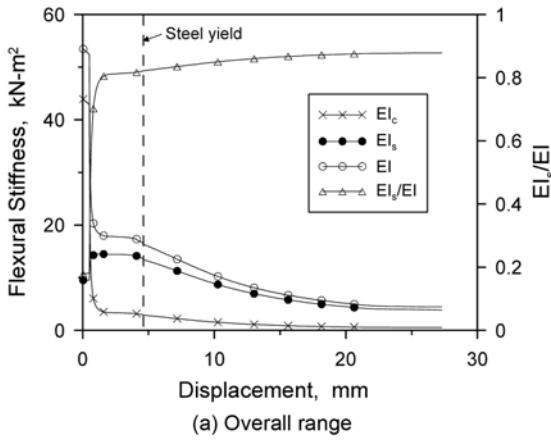


Fig. 3 Flexural stiffness contributions

(2)를 얻을 수 있다. 여기서, 첨자 r은 원형구조물에 대한 축소모형의 비를 의미한다.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

$$s_E = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} \quad (2)$$

3.1.2 변형률 왜곡의 영향

Fig. 2에서 $\varepsilon_{cm}/\varepsilon_{cp}$ 로 정의된 콘크리트 변형률 왜곡이 증가함에 따라 단면 내에 작용하는 압축력은 콘크리트에서 철근으로 점차 이양하게 된다. 따라서 축소모형에서의 중립축의 위치는 원형구조물과 기하학적인 상사비를 만족하지 못하게 되며, 결과적으로 강성의 상사성에 변동을 주게 된다. Fig. 4는 이 연구에서 대상으로 하는 축소모형 기둥에 대해서 콘크리트 변형률 왜곡에 따른 중립축과 강성의 변화를 조사한 것이다.

중립축의 변동은 단면 내에 작용하는 모멘트에 영향을 미치게 되므로, 단면모멘트의 비교를 통하여 콘크리트의 변형률 왜곡으로 인한 영향을 변형률에 따른 함수 $\alpha(\varepsilon)$ 로 정의하여 상사비를 유도한 후, 향후 관찰하고자 하는 응답에 적용하였다. 이러한 과정을 통하여 유도한 휨모멘트비 M_r , 횡하중비 F_r , 변위비 Δ_r 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

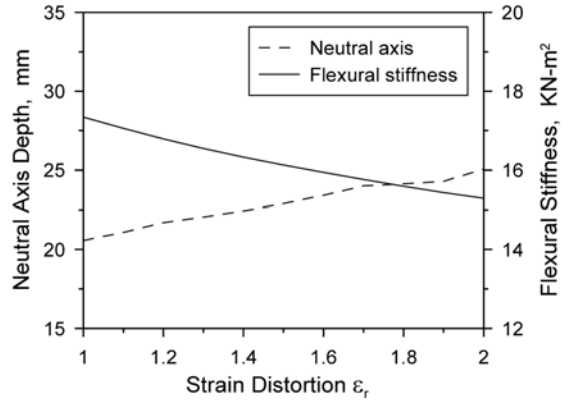


Fig. 4 Factors affected by concrete strain distortion

$$M_r = \frac{M_m}{M_p} = \alpha(\varepsilon)s_l^3 s_E \varepsilon_r \quad (3)$$

$$F_r = \frac{F_m}{F_p} = \alpha(\varepsilon)s_l^2 s_E \varepsilon_r \quad (4)$$

$$\Delta_r = \frac{\Delta_m}{\Delta_p} = \alpha(\varepsilon)s_l \varepsilon_r \quad (5)$$

3.1.3 변형률비 ε_r 의 산정

우선 축소모형 콘크리트의 왜곡된 변형률이 전체 구조물의 변형률에 미치는 영향을 파악하여 전체구조물을 대표하는 변형률비를 산정하여야 하는데, 이것은 강성의 분담식으로부터 이끌어 낼 수 있다. 부재의 강성은 콘크리트와 철근이 부담하는 각각의 강성의 합으로 식 (6) 및 (7)과 같이 표현할 수 있다. 아래첨자 c와 s는 각각 콘크리트와 철근을 의미한다.

$$EI = (EI)_c + (EI)_s \quad (6)$$

$$EI = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} I_c + \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} I_s \quad (7)$$

식 (7)의 우변에서 콘크리트의 왜곡된 변형률 ε_c 를 콘크리트의 항에 적용하면 단면내 콘크리트의 압축력은 Fig. 4와 같이 철근으로 이양되며, 중립축의 변동으로 인해 각 재료의 단면 2차 모멘트는 I_c' 와 I_s' 로 변화하게 된다. 이로 인해 전체구조물의 강성을 나타내는 식 (7)의 좌변도 변화하게 되어, 다음 식 (8)의 좌변과 같이 콘크리트의 변형률로 인한 전체 구조물에서의 변형률비를 산정할 수 있다.

$$\frac{1}{\varepsilon_r} EI = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{rc} \varepsilon_c} I_c' + \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} I_s' \quad (8)$$

따라서 식 (8)의 좌변에서 변형률의 인자를 제외한 항은 변형률 왜곡전의 true replica model의 휨 강성의 의

미하고 우변은 true replica model에서 콘크리트의 왜곡이 가해진 경우의 축소모델의 강성을 의미하게 된다. 따라서 원형구조물과 왜곡된 축소모형의 관계는 강성의 상사비를 적용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, 결과적으로 휨 강성의 비교를 통해 변형률비의 산정이 가능하다.

$$\varepsilon_r = \frac{(EI)_p s_l^4 s_E}{(EI)_m} \quad (9)$$

한편, 철근 항복 이후의 변형률비에 대해서는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 따라 콘크리트의 강성기여는 극히 미미하므로 true replica model로 가정된 철근의 변형률비인 1을 적용한다.

3.1.4 시간의 상사비 t_r 의 산정

동적 효과를 고려한 상사비를 적용하기 위해서는 시간에 대한 상사도 요구되는데 기하학적 길이가 아닌 변위를 고려하여 가속도로부터 시간의 상사비 t_r 을 다음과 같이 유도하였다. 식 (10)은 변형률 왜곡을 고려한 가속도의 상사비이고, 식 (11)은 이로부터 유도된 시간의 상사비이다.

$$a_r = \frac{a_m}{a_p} = \frac{l_m \varepsilon_m t_p^2}{l_p \varepsilon_p t_m^2} = s_l \varepsilon_r t_r^{-2} = 1 \quad (10)$$

$$t_r = s_l^{1/2} \varepsilon_r^{1/2} \quad (11)$$

4. 제안 상사법칙 검증

3절에서 제안한 상사법칙의 검증을 위하여 Fig. 5와 같이 수행된 실험⁷⁾에 사용된 원형구조물과 축소모형 단면에 대하여 수치적 푸쉬오버 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 원형구조물의 높이는 2 m 축소모형의 높이는 0.4 m 로써 1/5 축소모형을 사용하였다.

4.1 해석을 위한 실험 시편

4.1.1 재료선택 및 축소모형 설계

Table 2와 Fig. 5에 원형구조물과 축소모형의 상사비에

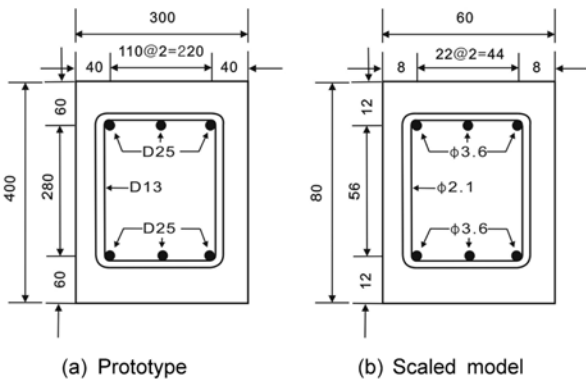


Fig. 5 Cross section of specimen (unit : mm)

Table 2 Material properties

		Prototype	Scaled mdl	Misc.
Concrete	f_{ck}	43.4 MPa	21.7 MPa	A_s is reduced according to strength similitude law
Steel	f_y	400 MPa	400 MPa	
	A_s	1,520 mm ²	30.4 mm ²	
	E_s	200 GPa	200 GPa	

다른 재료특성 및 단면제원을 제시하였다. 여기서 f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도를 나타내며 f_y , A_s , 그리고 E_s 는 각각 철근의 인장강도, 단면적 그리고 탄성계수이다.

4.2 푸쉬오버 시뮬레이션을 통한 s_E 와 ε_r 의 검증

4.2.1 시뮬레이션 방법 및 과정

기둥의 상단에 횡방향 하중이 작용하는 경우(Fig. 6), 최대변형이 발생하는 기둥의 하단과 기초부의 접합부에서 철근의 변형률을 기준으로 제안된 상사법칙을 적용한 축소모형과 원형구조물의 거동비교를 통해 제안 상사법칙의 타당성을 검증하였다. 이때 Fig. 6에서 보는 바와 같이 기둥의 수직방향에 따라 곡률을 적분하여 횡변위를 산출하였다. 이때 콘크리트와 철근의 부착은 완전합성거동을 가정하였다.

4.2.2 관찰 대상 및 변수

콘크리트의 변형률비 ε_r 를 0.1씩 증가시키면서 1~1.5 범위에서 축소모형의 횡하중과 횡변위를 산출 후 상사법칙을 적용한 결과와 원형 구조물과 비교를 수행하였다. 이때 철근의 항복 전후를 구분하여 각각 변형률 0.001과 0.01에 대하여 해석을 수행하였는데, 앞서도 기술한 바와 같이 항복이후에는 $\varepsilon_r = 1$ 로 고정하였다. 또한 기존의 연구 결과와 비교하여 이 연구 결과의 우수성을 확인하고자 하였다.

4.2.3 결과 분석

Tables 3과 4에 각각 횡하중과 횡변위에 대한 항복 전후의 상사법칙 적용 결과를 제시하였다. Tables 3과 4에서 (3)과 (4)열은 조남소의 연구⁷⁾에 의해 제안된 산정방법으로 계산된 변형률 왜곡비와 탄성계수비인데, 이에 대한 설명은 이 논문에서는 생략하기로 한다.

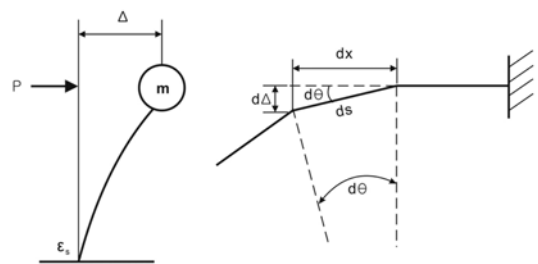


Fig. 6 Push-over analysis concept

Table 3 Lateral forces as per various concrete distortion ratios

	Calculated lateral force of prototype	Concrete strain distortion ratio, ϵ_{rc}	Previous study				This study				
			Strain distortion ratio, ϵ_r	Elasticity modulus ratio, s_E	Lateral force calculated by similitude law, $s_E s_E \epsilon_r$	Error (%) $\{(1)-(5)\}/(1)*100$	Strain distortion ratio, ϵ_r	Elasticity modulus ratio, s_E	Inertial moment coefficient α	Lateral force calculated by similitude law, $\alpha s_E s_E \epsilon_r$	Error (%) $\{(1)-(10)\}/(1)*100$
Before yielding ($\epsilon_s = 0.001$)	45.77	1.0	1.000	0.500	45.77	0	1.000	0.500	1.000	45.77	0
	45.77	1.1	1.024	0.455	48.98	-7.03	1.017	0.492	0.997	45.62	0.33
	45.77	1.2	1.048	0.417	52.06	-13.74	1.034	0.484	0.995	45.46	0.68
	45.77	1.3	1.072	0.385	52.87	-15.51	1.049	0.477	0.987	45.12	1.42
	45.77	1.4	1.096	0.357	57.76	-26.20	1.063	0.470	0.988	45.24	1.56
	45.77	1.5	1.120	0.334	59.88	-30.83	1.078	0.464	0.978	44.78	2.16
After yielding ($\epsilon_s = 0.01$)	95.84	1.0	1.000	0.500	95.84	0	1.000	0.500	1.000	95.84	0
	95.84	1.1	1.000	0.500	96.28	-0.59	1.000	0.500	0.997	96.13	-0.51
	95.84	1.2	1.000	0.500	96.82	-0.84	1.000	0.500	0.995	95.68	-0.82
	95.84	1.3	1.000	0.500	97.21	-1.41	1.000	0.500	0.987	96.69	-1.02
	95.84	1.4	1.000	0.500	97.02	-1.32	1.000	0.500	0.988	96.14	-0.84
	95.84	1.5	1.000	0.500	97.13	1.38	1.000	0.500	0.978	95.51	0.24

Table 4 Displacement as per various concrete distortion ratios

	Calculated displacement of prototype	Concrete strain distortion ratio ϵ_{rc}	Previous study ⁷⁾			This study				
			Strain distortion ratio ϵ_r	Displacement calculated by similitude law $s_l \epsilon_r$	Error (%) $\{(1)-(5)\}/(1)*100$	Strain distortion ratio ϵ_r	Inertial moment coefficient α	Displacement calculated by similitude law $\alpha s_l \epsilon_r$	Error (%) $\{(1)-(10)\}/(1)*100$	
										(1)
Before yielding ($\epsilon_s = 0.001$)	10.96	1.0	1.000	10.96	0	1.000	1.000	10.96	0	
	10.96	1.1	1.024	11.22	-2.37	1.017	0.997	11.11	-1.37	
	10.96	1.2	1.048	11.49	-4.84	1.034	0.995	11.26	-2.73	
	10.96	1.3	1.072	11.75	-7.21	1.049	0.987	11.33	-3.38	
	10.96	1.4	1.096	12.01	-9.58	1.063	0.988	11.51	-5.02	
	10.96	1.5	1.120	12.28	-12.04	1.078	0.978	11.54	-5.29	
After yielding ($\epsilon_s = 0.01$)	54.80	1.0	1.000	54.80	0	1.000	1.000	54.80	0	
	54.80	1.1	1.000	55.56	-1.39	1.000	0.997	55.39	-1.07	
	54.80	1.2	1.000	56.31	-2.74	1.000	0.995	56.03	-2.25	
	54.80	1.3	1.000	56.76	-3.47	1.000	0.987	56.47	-3.05	
	54.80	1.4	1.000	56.56	-5.02	1.000	0.988	56.02	-2.23	
	54.80	1.5	1.000	56.75	-5.38	1.000	0.978	55.50	-1.28	

Table 3의 (6)과 (11)열에서 보는 바와 같이, 횡하중에 대한 오차(원형구조물과 상사법칙을 적용한 축소모형의 응답차이)의 폭은 기존의 상사법칙보다 이 연구의 제안식에서 작았으며, 특히 항복 이전의 구간에서 크게 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 이는 기존의 제안식에서는 항복 이전의 구간에 대한 콘크리트의 영향을 과대평가한 결과이며, 항복 이후 구간에 대해서는 두 제안방법 모두 철근의 상사법칙을 적용하였기 때문에 서로 큰 차이를 보이지 않으며 작은 오차율을 유지함을 알 수 있다.

Table 4에서 보는 바와 같이 변위응답의 경우 조남소

의 연구⁷⁾에 의해 제안된 방법과 큰 차이를 보이지는 않으며 작은 오차율을 보이고 있지만, 이 연구에서 제안된 방법에 의해 조금이나마 오차율을 낮추는 효과가 있음을 알 수 있다.

한편 Tables 3과 4를 비교하면 기존 연구 결과에서 탄성계수비의 영향이 포함되지 않는 횡변위에 비하여 탄성계수비의 영향이 포함된 횡하중의 오차율이 큰 것으로 보아, 이 연구에서 제안하였듯이 변형률비뿐만 아니라 탄성계수비의 산정 시에도 철근의 강성기여를 포함하여야 함을 확인할 수 있었다.

4.3 Pseudo-dynamic 시뮬레이션을 통한 상사비의 검증

앞 절에서 푸쉬오버 시뮬레이션을 통하여, 제안된 변형률비와 탄성계수비를 고려한 상사법칙의 유효성을 검증하였다. 이 절에서는 pseudo-dynamic 시뮬레이션을 이용하여 이 연구에서 제안한 탄성계수비, 변형률비에 따른 부과질량과 변형률비를 포함하는 시간의 상사법칙의 유효성을 검증하고자 한다.

4.3.1 시뮬레이션 방법 및 과정

부과질량은 구조물의 변형률 단계마다 구조물의 강성에 의존하여 매 단계 변화하게 된다. 원형구조물과 축소 모형의 가속도비 a_r 을 1로 둔 이 연구의 경우 식 (12)에 따라 횡하중비 F_r 과 질량의 비 m_r 은 같은 상사비를 가지게 되며, 부과질량의 크기는 식 (13)에 따라 결정된다.

$$F_r = m_r a_r \quad (12)$$

$$m_r = \alpha s_l^2 s_E \varepsilon_r \quad (13)$$

Fig. 7은 이 연구에서 적용한 pseudo-dynamic 시뮬레이션의 절차를 설명한 것인데, 푸쉬오버 시뮬레이션에서와 마찬가지로 축소모형의 시뮬레이션 수행 시 기동 및 기초접합부에서 발생하는 철근의 변형률을 기준으로 하여 원형구조물과의 비교를 통해 탄성계수비와 변형률비를 산정하였고, 이에 따라 부과질량의 크기가 철근의 변형률에 따라 결정되어 다음 단계의 응답 예측에 활용된다.

실제 유사동적실험에서 축소모형의 변형률비는 거동단계에 따라 달라지지만, 이 연구에서는 단지 변형률비를 포함한 시간의 상사비 적합성을 살펴보고자 거동단계에 따른 변형률비의 평균을 취하여 적용하였다.

4.3.2 관찰 대상 및 변수

기 수행된 실험⁷⁾에서 사용된 원형구조물과 축소모형의 콘크리트 변형률비 1.156에 대해, 동일 연구에서 제안한

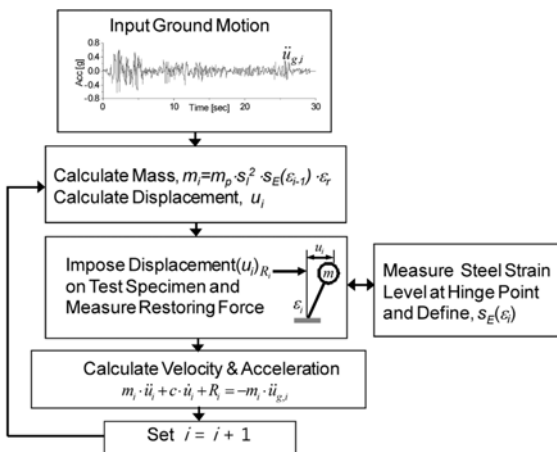


Fig. 7 Numerical integration procedure for pseudo-dynamic simulation

부과질량 산정방식과, 이 연구에서 제안한 부과질량의 산정방식과 시간상사비의 적용 결과를 비교함으로써 이 연구 결과의 타당성을 검토하고자 하였다. 대상 구조물은 4.2절의 푸쉬오버 시뮬레이션에서 사용한 것과 동일하며 입력지반운동은 Elcentro 지진파를 3배 증폭시킨 값을 사용하였다.

4.3.3 결과 분석

Pseudo-dynamic 시뮬레이션의 결과는 Fig. 8과 같이 변위와 가속도 응답, 그리고 누적에너지의 관점에서 기존의 연구와 비교를 통해 이 연구의 유효성을 검증하였다. 변형률비를 포함시켜 시간의 상사비를 전개한 이 연구의 경우 지진파의 입력속도는 Table 1에 따라 산정되는데, 변형률비를 포함하지 않은 기존의 상사법칙보다 더 짧은 주기로 가력하였다. Elcentro 지진파를 3배 증폭시켜 가력했음에도 불구하고 철근의 항복은 발생하지 않았으며, 결국 관찰구간은 철근의 항복 이전구간으로 제한되었다.

Fig. 8은 기존의 방식⁷⁾에 따른 결과와 이 연구 결과를 동시에 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 상사법칙을 적용하기 전의 변위응답이며 Fig. 8(b)는 상사법칙을 적용한 후의 변위응답인데, 결과의 차이를 확인하기 위하여 10초까지의 구간만을 확대하여 나타낸 것이다. 이들 그래프에서 볼 수 있듯이 상사법칙을 적용한 경우 기존의 연구 결과와 이 연구의 결과 모두 원형구조물의 변위응답을 잘 묘사함을 알 수 있다.

또한 Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 기존의 연구와 비교하여 이 연구 결과가 보다 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 그러나 기존 연구 결과와 큰 차이가 보이지 않는 것은 기존의 연구⁷⁾에서 비교적 작은 콘크리트의 변형률비 1.156을 적용하였기 때문에 전체 구조물의 변형률비는 1에 아주 근접하게 되어 콘크리트 변형률비의 고려효과가 부각되지 않았기 때문이다. 다시 말해서, 콘크리트의 변형률비가 증가할수록 구조물 전체의 변형률비는 증가하기 때문에 기존 상사법칙에 따른 응답과 이 연구 결과 응답의 차이는 클 것이다.

Fig. 8(c)는 상사법칙 적용 전 후의 가속도 응답을 보이고 있는데, 가속도비는 1로 정의되므로 원형구조물과 축소모형의 응답이 일치함으로 확인할 수 있다. Fig. 8(d)는 누적에너지를 보여주고 있는데, 여기서도 기존의 연구결과에 비하여 좋은 결과를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 artificial mass simulation model을 기반으로 재료의 왜곡과 비탄성 거동을 고려하여 새로운 상사법칙을 제시하였다. 이것은 기존의 상사법칙에 현실성을 더욱 반영한 것으로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존의 상사법칙에서는 콘크리트만의 특성을 기준으로 탄성계수비를 정의함으로써 구조물의 거동에 미치는 콘크리트의 영향을 과대평가하고 있는데 반

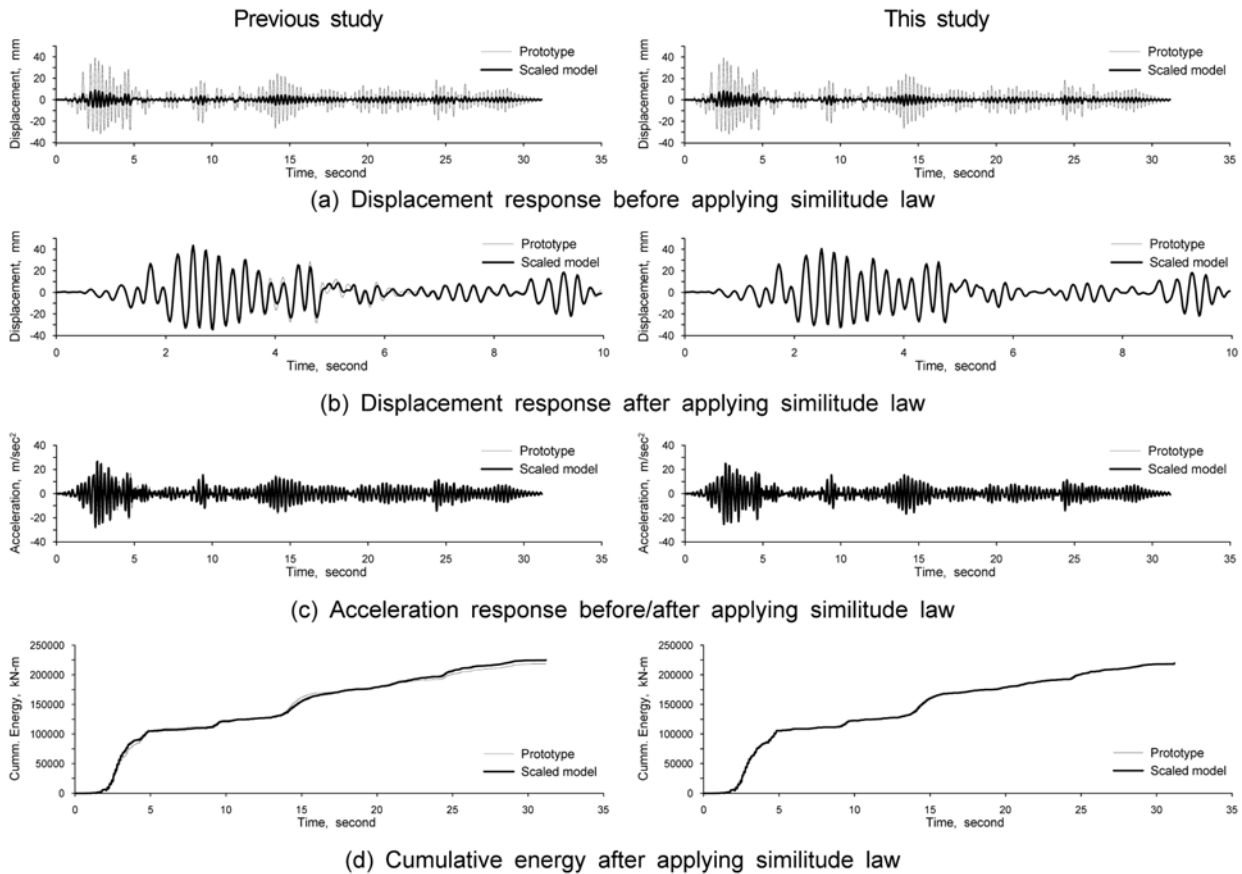


Fig. 8 Prototype versus scaled model responses

하여, 이 연구에서는 철근의 휨강성 고려하여 탄성 계수비를 산정하였다. 또한 원형구조물과 축소모형의 강성의 상사비로부터 변형률비를 산정하였다.

- 2) 푸쉬오버 시뮬레이션을 통하여 제안된 탄성계수비와 변형률비의 타당성을 검증하였는데, 횡하중과 변위응답 모두 축소모형으로부터 원형구조물의 응답을 예측하는데 있어 기존연구에 비하여 개선된 결과를 보였다.
- 3) 이 연구에서 제안한 탄성계수비와 변형률비를 고려하여 부과질량의 크기를 새롭게 산정하였으며, 변형률비를 고려하여 시간상사비를 전개하였다. 또한, pseudo-dynamic 시뮬레이션을 통하여 제안된 부과질량 산정방법 및 시간상사비의 타당성을 검증하였다.
- 4) 축소모형의 진동대실험에서도 pseudo-dynamic 시뮬레이션으로부터 검증된 시간의 상사비를 적용하여 가진을 하여야만 신뢰도 있는 응답을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 지원과 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Farrar, C. R., Baker, W. E., and Dove, R. C., "Dynamic Parameter Similitude for Concrete Models," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 1, 1994, pp. 90-99.
2. 배성용, 이한선, 신영식, "철근콘크리트구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 6권, 2호, 1994, pp. 249-254.
3. Zhang, M. Z., Guo, X., and Meng, Q., "Study on Shaking Table Tests of Building Models," *China-US Millennium Symposium on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2000, pp. 411-414.
4. 김남식, 이지호, 장승필, Guo, X., "RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law," 한국지진공학회 논문집, 7권, 6호, 2003, pp. 101-108.
5. Lee, J. H., "Equivalent Multi-phase Similitude Law for Pseudodynamic Tests on Small-scale RC Models," Master's thesis, Seoul National University, Korea, 2004, 56 pp.
6. Yang, H. K., "Study on Similitude Law for Pseudodynamic Tests and Shaking Table Tests on Small Scale RC Models," Master's Thesis, Seoul National University, Korea, 2006, 67 pp.
7. 조남소, "콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 재료비선형 상사법칙," 박사학위논문, 서울대학교, 2008, 116 pp.
8. Harris, H. G. and Sabnis, G. M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, CRC Press, 1999, 789 pp.
9. Kumar, S., Itoh, Y., Saizuka, K., and Usami, T., "Pseudo-dynamic Testing of Scaled Models," *Journal of Structural*

- Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp. 524~526.
10. Krawinkler, H. and Moncarz, P. D., "Similitude Requirements for Dynamic Models," *ACI SP-73*, 1982, pp. 1~22.
11. Zia, P., White, R. N., and Vanhorn, D. A., "Principles of Model Analysis," *ACI SP-24*, 1970, pp. 19~39.

부 록

변형률비를 고려한 artificial mass simulation model의 유도과정은 다음과 같다.

$$\text{Displacement } \Delta_r = \frac{l_m \varepsilon_m}{l_p \varepsilon_p} = s_l \varepsilon_r$$

$$\text{Force } F_r = \frac{F_m}{F_p} = \frac{\sigma_m A_m}{\sigma_p A_p} = s_E s_l^2 \varepsilon_r$$

$$\text{Time } a_r = \frac{a_m}{a_p} = \frac{\Delta_m / t_m}{\Delta_p / t_p} = 1 \text{ 로부터}$$

$$t_r = s_l^{1/2} \varepsilon_r^{1/2}$$

$$\text{Velocity } v_r = \frac{v_m}{v_p} = \frac{\Delta_m / t_m}{\Delta_p / t_p} = s_l^{1/2} \varepsilon_r^{-1/2}$$

$$\text{Frequency } \omega_r = \frac{\omega_m}{\omega_p} = \frac{1/t_m}{1/t_p} = s_l^{-1/2} \varepsilon_r^{-1/2}$$

$$\text{Mass } m_r = F_r / a_r \text{로부터 } a_r = 1 \text{ 이므로}$$

$$m_r = F_r = s_E s_l^2$$

$$\text{Stiffness } K_r = \frac{K_m}{K_p} = \frac{F_m / \Delta_m}{F_p / \Delta_p} = s_E \varepsilon_r$$

$$\text{Energy } EN_r = \frac{EN_m}{EN_p} = \frac{F_m \Delta_m}{F_p \Delta_p} = s_E s_l^3 \varepsilon_r^3$$

요 약 지진에 의한 사회기반 구조물의 손상은 대형참사를 유발할 가능성이 크므로, 적절한 내진성능평가가 이루어져야 한다. 특히 지진하중 하에서 구조물의 거동은 상부 하중을 지탱하는 기둥의 거동에 지배되므로 기둥에 대한 해석 및 실험을 통한 내진성능평가는 가장 핵심적인 요소이다. 현재 내진성능평가 실험의 일환으로 준정적실험, 유사동적실험, 진동대실험 등이 대표적으로 수행되고 있으며 이러한 실험을 수행 시 시험체의 크기, 실험장비 성능의 한계, 경제적인 이유 등으로 원형 구조물을 대신하여 축소모형을 통해 실험을 수행하고 있다. 이러한 축소모형실험을 위해서는 적절한 상사법칙을 적용해야 하는데, 현재 일반적으로 적용되고 있는 상사법칙은 탄성범위 내에서 유도가 되어 있기 때문에 지진하중하 구조물의 비탄성 거동을 예측하는데 무리가 있다. 또한 마이크로콘크리트를 사용한 축소모형에 대해서는 필연적으로 재료특성에 있어서 원형재료와 축소모형재료 사이에 왜곡이 발생하여 결과의 신뢰성에 영향을 주게 된다. 따라서 이 연구에서는 재료의 왜곡과 비탄성 거동을 고려하여 새로운 상사법칙을 제시하였다.

핵심용어 : 내진성능평가, 기둥, 유사동적실험, 진동대실험, 축소모형