

# RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law : 검증실험

## An Equivalent Multi-Phase Similitude Law for Pseudodynamic Test on Small-scale RC Models : Verification Tests

김 남 식\* 이 지 호\*\* 장 승 필\*\*\*  
Kim, Nam-Sik Lee, Ji-Ho Chang, Sung-Pil

### 국문요약

대형 구조물의 지진응답을 실험적으로 연구할 경우, 실험장비의 용량과 실험모형의 크기 제약으로 인하여 축소모형이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 구조물의 지진응답은 비탄성 거동을 나타내기 때문에 거동예측이 복잡함에도 불구하고, 축소모형의 지진실험 결과로부터 원형구조물의 지진응답을 유추하기 위한 상사법칙의 연구는 미비한 실정이다. 철근콘크리트 구조물의 축소모형 제작 시 상사율이 커지면 상대적으로 부가질량이 증가하며, 또한 굵은 골재 크기의 영향으로 원형구조물과 축소모형의 제작에 동일한 재료를 사용하지 않는 것이 바람직하다. 따라서 동일한 재료를 사용하지 않을 경우, 상사법칙은 기하학적인 상사율과 재료적인 등가탄성계수비에 의존하게 된다. 본 연구에서는 원형구조물과 축소모형에 각각 적용되는 normal-concrete와 micro-concrete의 재료 비선형성을 파악하기 위해 압축강도시험을 수행하여, 재료의 거동구간을 극한 변형률을 기준으로 등가의 다단계로 나누어 등가탄성계수비를 적용시킴으로써 지진손상의 정도를 고려할 수 있는 equivalent multi-phase similitude law를 유도하였다. 유도된 상사법칙을 고려한 유사동적실험 알고리즘을 구성하였으며, 실험적인 검증을 위하여 철근콘크리트 column에 대하여 원형구조물과 1/5축소모형을 재료시험에서 정의한 등가탄성계수비를 고려하여 설계, 제작하였다. 검증실험에서는 constant modulus ratio와 variable modulus ratio를 적용하여 준정적실험과 유사동적실험을 수행한 결과, equivalent multi-phase similitude law를 고려한 유사동적실험 알고리즘에 의한 축소모형의 응답결과가 원형구조물의 거동을 비교적 정확히 재현함을 확인하였다.

**주요어** : 상사법칙, 등가탄성계수비, 축소모형, 유사동적실험, 마이크로콘크리트

### ABSTRACT

Small-scale models have been frequently used for seismic performance tests 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 aggregate size. 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, equivalent modulus ratio and ultimate strain ratio. In this study, compressive strength tests are conducted to analyze the equivalent modulus ratio of micro-concrete to normal-concrete. Then, equivalent modulus ratios are divided into multi-phase damage levels, which are basically dependent on ultimate strain level. Therefore, an algorithm adaptable to the pseudodynamic test, considering equivalent multi-phase similitude law based on seismic damage levels, is developed. Test specimens, consisted of prototype structures and 1/5 scaled models as a reinforced concrete column, were designed and fabricated based on the equivalent modulus ratios already defined. Finally quasistatic and pseudodynamic tests on the specimens are carried out using constant and variable modulus ratios, and correlation between prototype and small-scale model is investigated based on their test results. It is confirmed that the equivalent multi-phase similitude law proposed in this study could be suitable for seismic performance tests on small-scale models.

**Key words** : similitude law, equivalent modulus ratio, small-scale model, pseudodynamic test, micro-concrete

### 1. 서 론

대형구조물의 지진에 대한 안전성 검증을 위한 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<sup>(1)-(3)</sup>, 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<sup>(4),(5)</sup>은 탄성범위 내에서 유도되었기 때문에, 지진하중 하에서 비탄성 거동특성을 갖는 구조물의 지진응답을 예측하는 경우에 많은 오차가 발생할 수 있다. 또한 상사율(scale factor)이 큰 축소모형의 경우에는 동일한 재료를 사용함으로써 부가질량(added mass)이 상당히 증가하며, 제작에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 축소모형 제작에 micro-concrete<sup>(2),(6)</sup>가 적용되고 있으며, 이에 대한 새로운 상사법칙이 개발되었다. 본 논문의 선행연구<sup>(6)</sup>에서는 원형구조물과 축소모형에 각각 사용된 normal-concrete와 micro-concrete 사이의 재료적 비선형을 고려한 equivalent multi-phase

\* 정회원 · 부산대학교 토목공학과, 조교수(대표저자 : nskim@pusan.ac.kr)

\*\* 정회원 · 현대산업개발(주), 사원

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2004. 6. 23 / 심사종료일 : 2004. 8. 24)

similitude law를 유도하였고, 유도된 상사법칙을 적용하기 위한 개선된 유사동적실험(pseudodynamic test) 알고리즘을 구축하였다. 따라서 본 논문의 목적은 원형구조물과 축소모형에 대한 지진응답실험 결과로부터 재료적 비선형이 고려된 equivalent multi-phase similitude law의 타당성을 실험적으로 검증하고자 한다.

검증실험에 앞서 재료시험을 실시하여 두 재료간의 비선형성을 고려하기 위한 지표인 등가탄성계수비(equivalent modulus ratio)를 고려하여 실험모형을 설계, 제작하였다. 최종적으로 준정적실험(quasistatic test) 및 유사동적실험을 수행하여 새롭게 제안한 상사법칙과 개선된 유사동적실험 알고리즘의 타당성 및 가능성을 확인하였다.

## 2. 상사법칙

축소모형을 설계하는 과정에는 필연적으로 상사법칙이 적용되는데, 각 실험의 목적이나 방법에 맞추어 적절한 상사법칙을 선정하여야 한다. 시간에 따른 일반적인 동역학 문제에서 길이(L), 질량(M), 시간(T)을 기본차원으로 선택하면 나머지 물리량들은 기본차원의 조합으로부터 유도되어 결정된다.<sup>(7)</sup>

\*여기서,  $s = L_m(\text{축소모형의 길이}) / L_p(\text{원형구조물의 길이})$ ,  $m_{mw} = \text{축소모형 자체의 질량}$

원형구조물과 축소모형에 각기 다른 물성치를 갖는 재료를 사용하는 경우에는 등가탄성계수비와 극한변형률비(ultimate strain ratio)를 고려하여 상사법칙을 유도하여야 한다.<sup>(6)</sup> 원형구조물과 축소모형의 길이에 대한 상사율을  $s$ , 등가탄성계수비를  $E_r(\varepsilon)$ , 사용된 재료의 극한변형률비를  $\varepsilon_{ur}$ 이라 정의하면 원형구조물과 축소모형의 상사관계는 표 1과 같이 유도된다. 여기서 상사율은 원형구조물과 축소모

형사이의 물리적인 양의 비와 동일한 의미를 갖는다.

### 2.1 Acceleration-based Similitude Law

질량에 하중으로 가해지는 가속도(입력지진파)는 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 부가질량이 필요하며, 시간에 대한 압축도 필요로 한다. 질량과 시간을 수치적으로 처리하는 유사동적실험에 가장 이상적인 방법으로 판단된다.<sup>(4)</sup>

### 2.2 Equivalent Multi-phase Similitude Law

가속도 기준 상사법칙으로부터 유도되는 이 상사법칙은 축소모형에 사용되는 재료가 원형구조물에 사용되는 재료와 다르기 때문에 발생하는 등가탄성계수비  $E_r(\varepsilon)$ 과 극한변형률의 비  $\varepsilon_{ur}$ 를 고려하여 상사법칙을 유도하게 된다.

재료의 손상진행에 따라 발생하는 재료의 비선형성을 재료시험에서 산정한 등가탄성계수비를 고려하여 상사법칙에 반영한다. 여기서, 등가탄성계수비는 두 재료간의 비선형성을 모사할 수 있도록 재료의 거동구간을 등가의 다단계로 나누어 각 구간에 해당하는 secant modulus의 비로 정의하였다. 등가탄성계수비를 1보다 작은 값을 사용할 경우, 필요한 축소모형의 부가질량 및 사하중에 의한 축력의 크기가 상당히 작아지기 때문에 축소모형을 이용한 실험에 매우 유리하다.

## 3. 재료시험

원형구조물을 위한 normal-concrete의 3가지 배합비와

표 1 Similitude laws derived

Quantity	Dimensions	Scale Factor		
		Acceleration based $E_r(\varepsilon)=1, \varepsilon_{ur}=1$	Equivalent multi-phase $E_r(\varepsilon) \neq 1, \varepsilon_{ur}=1$	Equivalent multi-phase $E_r(\varepsilon) \neq 1, \varepsilon_{ur} \neq 1$
Length	$L$	$s$	$s$	$s$
Mass	$M$	$s^2$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon)$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur}$
Time	$T$	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$
Stress	$ML^{-1}T^{-2}$	1	$E_r(\varepsilon)$	$E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur}$
Velocity	$LT^{-1}$	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$	$s^{0.5}$
Acceleration	$LT^{-2}$	1	1	1
Force	$MLT^{-2}$	$s^2$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon)$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur}$
Stiffness	$MT^{-2}$	$s$	$s \cdot E_r(\varepsilon)$	$s \cdot E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur}$
Damping	$MT^{-1}$	$s^{3/2}$	$s^{3/2} \cdot E_r(\varepsilon)$	$s^{3/2} \cdot E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur}$
Natural frequency	$T^{-1}$	$1/s^{0.5}$	$1/s^{0.5}$	$1/s^{0.5}$
Added Mass	-	$s^2 \cdot m_p - m_{m0}$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon) \cdot m_p - m_{m0}$	$s^2 \cdot E_r(\varepsilon) \cdot \varepsilon_{ur} \cdot m_p - m_{m0}$

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 2에 콘크리트의 배합비를 표시하였고, 그림 1에 물-시멘트비(w/c)에 따른 콘크리트의 압축강도시험 결과를 나타내었다.

표 2 Mixture ratios of normal-concrete & micro-concrete

Normal-concrete	Type	Mixture Ratio (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	
Micro-concrete	Type	Mixture Ratio (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

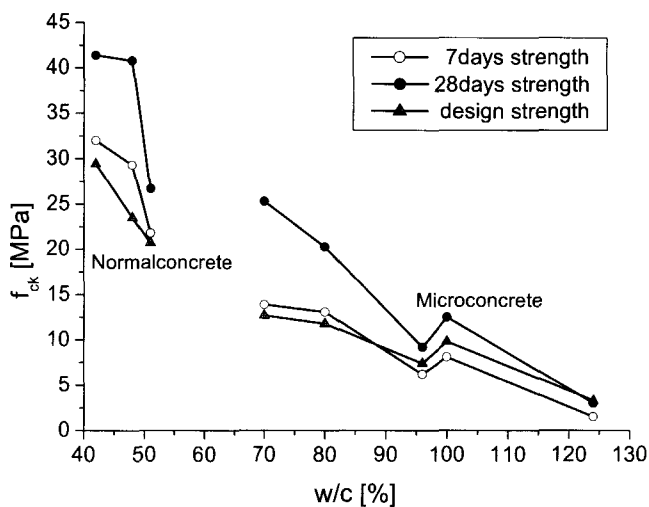


그림 1 Ultimate stresses depending on w/c

표 2에서 보는바와 같이 micro-concrete에 굵은 골재를 사용하지 않았고 normal-concrete에 비해 물-시멘트비를 크게 하여 축소모형의 재료가 원형구조물에 사용되는 재료보다 상대적으로 작은 강성을 갖도록 하였다. 그림 1에서 물-시멘트비가 커짐에 따라 콘크리트의 압축강도가 감소하

는 경향을 관찰할 수 있다.

압축강도시험으로부터 얻어진 극한변형률과 압축강도 결과를 표 3에 정리하였으며, normal-concrete가 micro-concrete에 비해 상대적으로 큰 압축강도와 작은 극한변형률을 갖는 재료특성을 확인하였다.

그림 2는 각 배합비에 따른 응력-변형률 곡선이며, 여기서 normal-concrete가 micro-concrete보다 취성적인 파괴특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 두 재료간 파괴양상의 차이로 인하여 재료의 손상정도에 따라 등가탄성계수비가 변화하는 경향을 갖게 된다.

표 3 Cylinder test results after 28days

Specimens	Ultimate Strain [Microstrain]	Ultimate Stress [MPa]
N1	2100	40.8
N2	2290	41.4
N3	1960	26.7
M1	2650	20.3
M2	2100	9.5
M4	2340	13.1
M5	2960	25.3

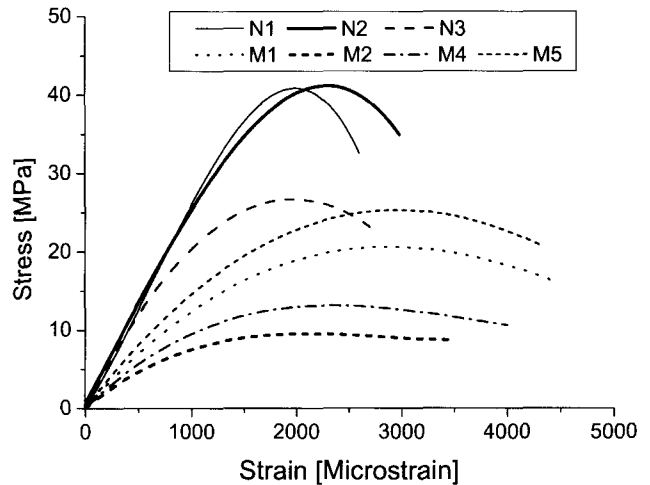
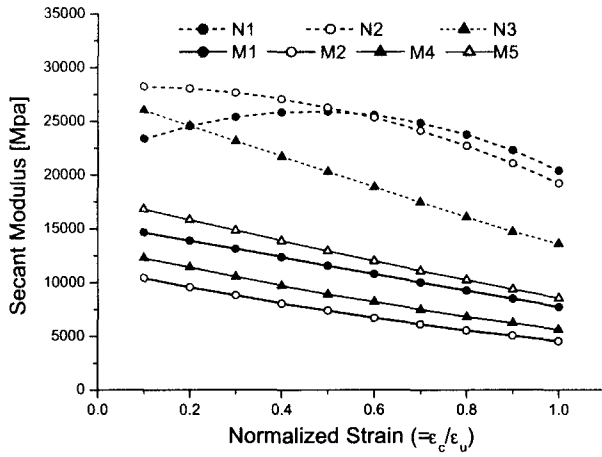
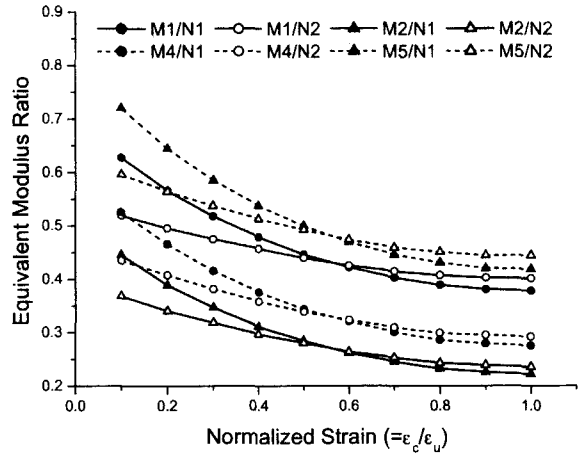


그림 2 Stress-strain curves

재료시험결과로부터 변형률에 따른 재료의 강성(secant modulus) 변화곡선과 등가탄성계수비의 변화곡선을 그림 3(a)와 그림 3(b)에 각각 나타내고 있다. 여기서  $\epsilon_c$ 는 극한 변형률을 기준으로 10등분으로 분할한 구간에서 각 분할구간까지의 변형률을 나타내고,  $\epsilon_{ci}$ 는 극한변형률을 의미한다. 등가탄성계수비는 각 구간에서 micro-concrete와 normal-concrete의 탄성계수(secant modulus)의 비로, 그림 3(b)와 같이 변형률에 대한 함수로 얻을 수 있으며 변형률이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다.



(a) Secant modulus



(b) Equivalent modulus ratio

그림 3 Material properties of normal-concrete & micro-concrete depending on strain level

4. 등가탄성계수비를 고려한 유사동적실험 알고리즘

재료의 비선형이 고려된 equivalent multi-phase similitude law는 상사율과 등가탄성계수비 및 극한변형률의 비에 의존하게 된다. 따라서 그림 3(b)와 같이 재료시험결과로부터 구한 등가탄성계수비( $E_r(\epsilon)$ )와 극한변형률비( $\epsilon_{ur}$ )를 사용하면 축소모형 설계를 위한 응력비( $\sigma_r$ ), 하중비( $F_r$ ), 질량비( $M_r$ ), 부가질량( $m_a$ )을 각각 식 (1)에서 식 (4)와 같이 결정할 수 있다.

$$\sigma_r = E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \quad (1)$$

$$F_r = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \quad (2)$$

$$M_r = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \quad (3)$$

$$m_a = s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \cdot m_p - m_{mo} \quad (4)$$

여기서  $s$  = scale factor,  $m_a$  = 축소모형에 가해지는 부가질량,  $m_p$  = 원형구조물의 질량,  $m_{mo}$  = 제작된 축소모형 자체의 질량이다.

식 (4)에서 보듯이 축소모형에 사용되는 재료의 선택에 따라 부가질량을 충분히 줄일 수 있다. 한 예로서 등가탄성계수비가 0.1~0.4사이에 존재하는 N1과 M2를 사용하면 1/10 축소모형을 제작할 경우 부가질량을 70% 이상 줄일 수 있다. 특히 진동대실험에서는 부가질량의 크기가 축소모형 실험의 가능여부를 결정하는 경우가 많기 때문에 축소모형의 재료를 결정할 때 원형구조물의 재료보다 작은 강성을 갖고 등가탄성계수비가 변화하지 않는 재료를 찾아 진동대실험을 수행하면 보다 정확한 지진응답결과를 얻을 수 있다. 그림 4는 equivalent multi-phase similitude law를 구현하기 위해 등가탄성계수비를 적용한 유사동적실험의 알고리즘을 보이고 있다. 기존의 유사동적실험에서와 달리 구조물의 소성힌지 영역에서 strain level을 측정하여 재료시험으로부터 산정한 등가탄성계수비를 정의하고, 등가탄성계수비에 의해 계산된 구조물의 질량( $m_i$ )

을 실험 중에 실시간으로 바꾸어 줌으로써 재료의 비선형성을 고려한다.

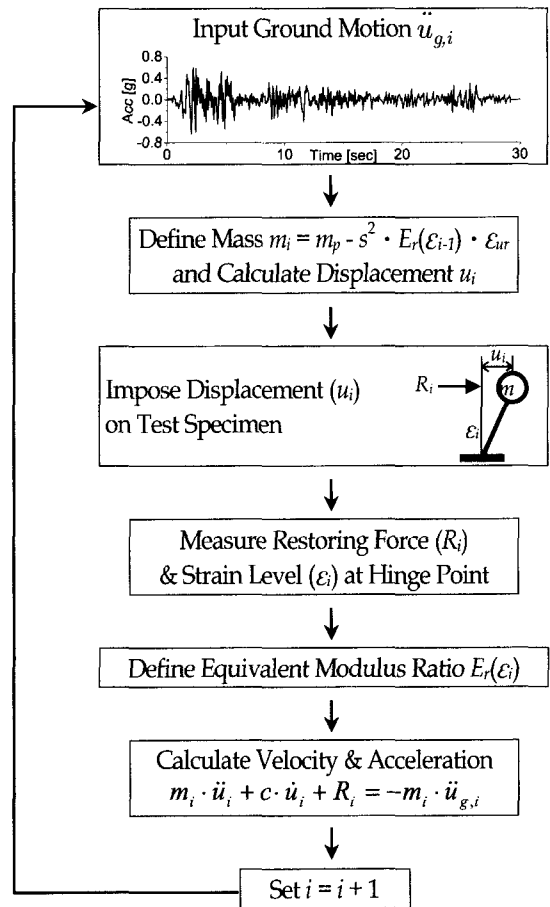


그림 4 Numerical integration procedure for pseudodynamic test

5. 모형설계

5.1 등가탄성계수비( $E_r(\epsilon)$ )와 극한변형률비( $\epsilon_{ur}$ )를 고려한 단면설계

내진실험을 위한 축소모형의 설계 시에는 상사율( $s$ )에 따

큰 기하학적인 축소모형설계와 동시에 설계단면에 대한 축력과 모멘트 및 콘크리트와 철근의 변형률에 대한 고려도 해주어야 한다. 이는 콘크리트와 철근의 등가탄성계수비와 극한변형률의 비가 다르기 때문이다. 즉, 철근은 원형구조물과 축소모형에 동일한 재료를 사용하므로  $E_r(\epsilon)=1, \epsilon_{ur}=1$ 인 반면, 콘크리트는  $E_r(\epsilon)\neq 1, \epsilon_{ur}\neq 1$ 이므로 등가탄성계수비와 극한변형률비가 다르기 때문에 생기는 차이를 축력, 모멘트, 극한변형률비를 고려하여 철근의 단면적과 모멘트 팔거리(moment arm)를 조정함으로써 보완해 주어야 한다. 그러나 축력, 모멘트와 극한변형률비를 동시에 만족시키는 것은 불가능하기 때문에 수평방향의 지진하중을 받는 구조물의 거동에 가장 적은 영향을 미치는 축력에 대한 상사를 포기하고 모멘트와 변형률에 대한 상사를 맞추었다. 축력에 대한 상사를 포기한다 하더라도 압축응력의 차이는 5~10% 사이로 축소모형의 응답을 평가할 때 큰 오차가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

기둥단면에서의 응력 및 변형률에 대한 diagram을 나타낸 그림 5에 의하여 scaled model에서 철근의 위치를 결정할 수 있다. 식 (5)에 공칭모멘트의 계산식을, 식 (6)에 원형구조물의 공칭모멘트( $M_{np}$ )와 축소모형의 공칭모멘트( $M_{nm}$ )에 대한 모멘트 상사관계를 표시하였다. 여기서  $\epsilon_s$ 는 철근의 변형률,  $\epsilon_{up}$ 는 normal-concrete의 극한변형률,  $\epsilon_{um}$ 은 micro-concrete의 극한변형률이다.

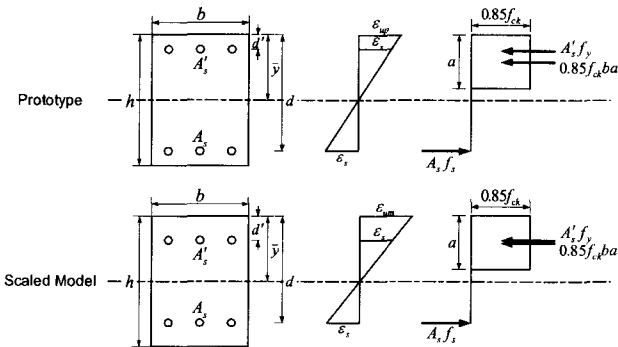


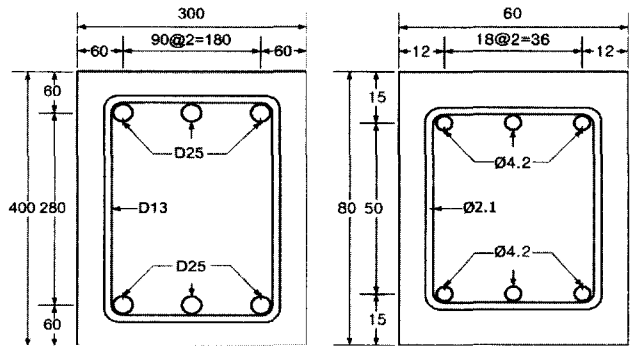
그림 5 Stress & strain diagrams in a RC column section

$$M_n = 0.85f_{ck}ba(\bar{y} - \frac{a}{2}) + A_s'f_s'(\bar{y} - d') - A_s f_s(d - \bar{y}) \quad (5)$$

$$M_{nm} = s^3 \cdot E_r \cdot \epsilon_{ur} \cdot M_{np} \quad (6)$$

직사각형 대칭단면을 갖는 2.0m 높이의 철근콘크리트 교각을 원형구조물로 결정하였으며, 수평하중에 대하여 휨과 괴(flexural failure)가 지배적인 단면을 설계하였다. 축소모형의 설계 시에 콘크리트단면은 상사율(s)에 의하여 정해지고, 철근의 위치( $d, d'$ )는 극한변형률비에 의하여 정해지므로 철근의 단면적( $A_s, A_s'$ )만 결정해야 할 미지수에 해당한다. 대칭단면으로 설계하였으므로  $A_s = A_s', d = h - d'$ 이 되어 식 (6)이 만족하도록 식 (5)에 대하여 풀면 축소모형의  $A_s'$ 을 계산할 수 있다. 식 (6)에 사용한 등가탄성계수비는 0.456으로 이는 micro-concrete와 normal-concrete의 접

선탄성계수(tangential modulus)에 의하여 계산하였다. 모멘트 평형에 근거하여 설계한 원형구조물과 1/5축소모형의 설계단면은 그림 6과 같고 실험모형의 구조적인 특성치는 표 4와 같다.



(a) Prototype (b) 1/5 Scaled Model

그림 6 Cross sections of prototype & 1/5 scaled model

표 4 Structural properties

Quantities		Prototype	1/5 Scaled Model
Concrete Type		N2	M1
Steel	Yielding Strain( $\epsilon_y$ )	0.0019	0.0019
	Yielding Stress [Mpa]	400	400
Moment of Inertia [mm <sup>4</sup> ]		2.067×10 <sup>9</sup>	3.455×10 <sup>6</sup>
Height [mm]		2000	400
Stiffness [kN/mm]		20.773	1.987

## 5.2 철근(Reinforcement)의 Modeling

그림 6(b)의 설계단면에서 보는바와 같이 축소모형의 주 철근지름이 4.2mm로 매우 가늘어 기존의 이형철근을 사용하기에 어려움이 있다. 따라서 축소모형에는 이형철근과 동일한 재료성질을 갖는 round bar의 표면에 나사산을 인위적으로 만들어 제작한 철근(threaded rod)을 사용하였다. Threaded rod는 기존의 연구<sup>(1)</sup>에서 축소모형에 적용하여 사용성 여부가 검증된 바 있다. 그림 7(a)와 그림 7(b)에서 원형구조물에 사용한 Standard deformed bar와 축소모형에 적용된 threaded rod의 형상을 나타내고 있다.



그림 7 Reinforcements of test specimens

## 6. 실험적 연구

### 6.1 준정적실험 및 등가탄성계수비의 결정

변위제어방식으로 0.5  $\delta_y$ 에서 8.0  $\delta_y$ 까지 순차적으로 수평변위를 증가시켜가며 준정적실험을 수행하였다. 실험광경을 그림 8에 나타내었고, 그림 9에서 원형구조물과 축소모형의 파괴형상을 관찰할 수 있다.

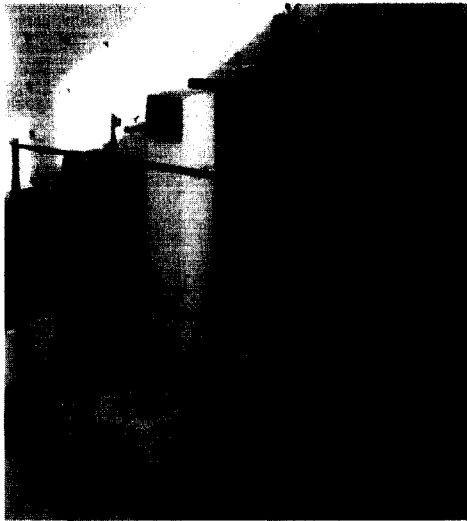


그림 8 Test setup

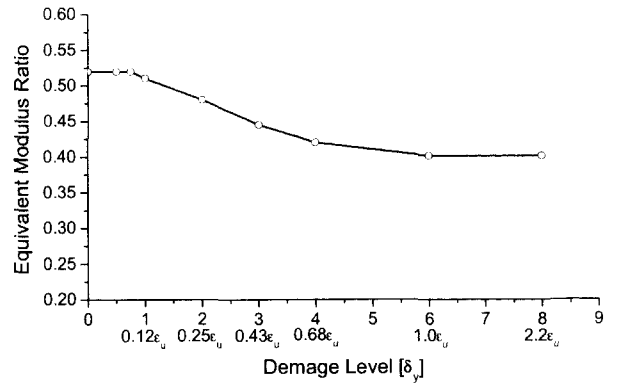
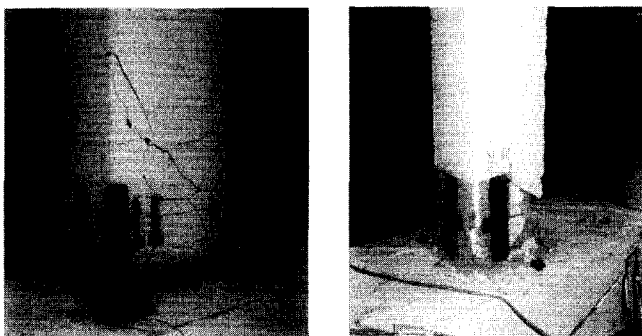


그림 11 Equivalent modulus ratio depending on damage level

유사동적실험에서 적용하고자 하는 등가탄성계수비의 확인을 위해 탄성구간에 해당하는 일정한 등가탄성계수비만을 사용하는 경우를 constant modulus ratio, 그림 11과 같이 구조물의 damage level에 따라 등가탄성계수비가 재료시험 결과에 근거해 감소하는 경우를 variable modulus ratio로 정의하여 두 가지 경우에 대한 축소모형의 준정적실험 결과를 분석하였다. 그림 12(a)와 그림 12(b)에 원형구조물과 축소모형에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내었다.



(a) Prototype (b) 1/5 Scaled Model

그림 9 Failure patterns

등가탄성계수비의 산정을 위해 실험모형의 소성힌지구간 (plastic hinge zone)에 해당하는 주철근의 위치에 strain gage를 부착하여 damage level을 평가하였다. 준정적실험에서 얻어진 실험모형의 상부변위와 소성힌지구간에서의 strain level(damage level)의 상관곡선을 그림 10에서 볼 수 있으며, 그림 11에서는 damage level에 따라 등가탄성계수비가 변화하는 경향을 그래프로 표현하였다.

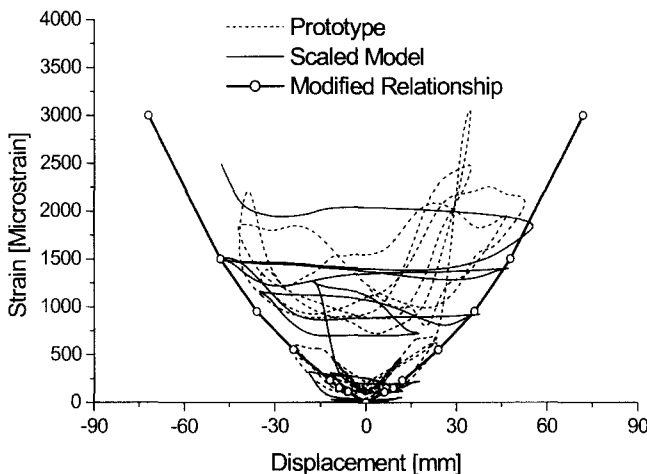
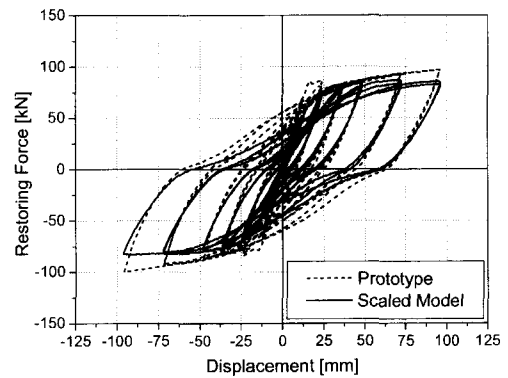
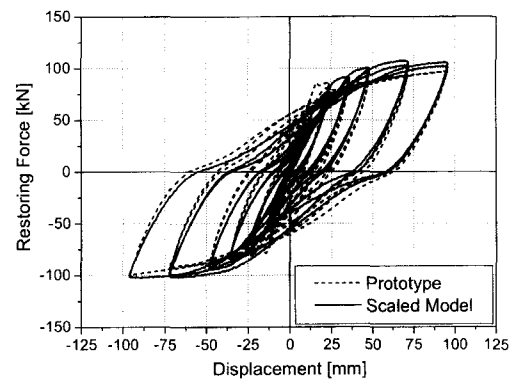


그림 10 Strain-displacement relationship



(a) constant modulus ratio ( $E_r(\epsilon)=0.519$ )



(b) variable modulus ratio

그림 12 Force-displacement relationships resulted from quasistatic tests

먼저 constant modulus ratio를 적용한 그림 12(a)의 경우 축소모형의 손상이 증가함에 따라 원형구조물과의 오차가

점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 variable modulus ratio를 적용한 그림 12(b)의 경우 축소모형의 응답이 손상진전에 따라 점차 감소하는 등가탄성계수비에 의해 보정되므로 원형구조물과 비교적 일치하는 결과를 가져온다. 특히 variable modulus ratio를 사용한 경우 축소모형이 항복이후 갖는 유효강성(effective stiffness)이 원형구조물과 상당히 일치하므로 그림 11과 같이 재료시험으로부터 초기에 산정한 등가탄성계수비를 축소모형 설계에 직접 적용하여도 어느 정도 타당함을 확인하였다.

### 6.2 유사동적실험

실험에 사용된 입력지진파는 3배로 증폭한 1940 El Centro (NS Component) 지진파로 그림 13에서 볼 수 있고, 준정적 실험에서와 마찬가지로 축소모형의 유사동적실험을 각각 constant modulus ratio와 variable modulus ratio를 적용하여 수행하였다.

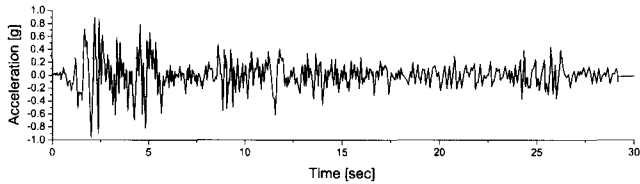
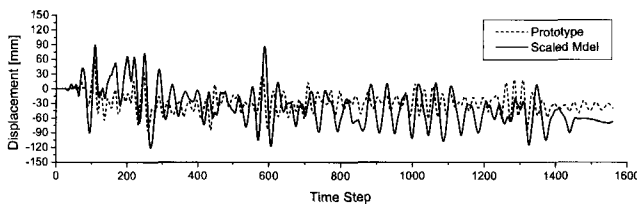


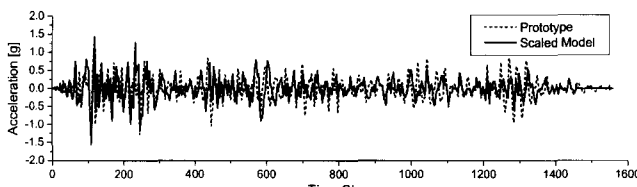
그림 13 Input acceleration

축소모형에 constant modulus ratio를 적용한 유사동적 실험 응답과 원형구조물의 응답을 그림 14(a-e)에서와 같이 비교하였다. 그림 14(a)에서 보는바와 같이 축소모형의 변위 응답이 입력지진파의 peak 이후 실험모형에 손상이 진행됨에 따라 상당한 오차를 보이고 있는데, 이는 원형구조물과 축소모형이 손상진행에 따른 강성의 감소율이 다르기 때문이다. 즉 normal-concrete와 micro-concrete 사이에 존재하는 재료의 비선형성을 고려하지 못했기 때문인데 그림 14(d)에서도 축소모형의 복원력은 작게 나타나고 변위는 크게 나타남을 볼 수 있다. 가속도 응답을 FFT하여 얻어진 peak값 또한 2.18Hz와 1.19Hz로 상당한 차이를 보이고, 축소모형에서는 peak가 뚜렷하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 축소모형의 누적이력에너지(cumulative hysteretic energy)를 이용한 지진에너지 소산능력도 최대 30%이상의 오차를 나타내고 있다.

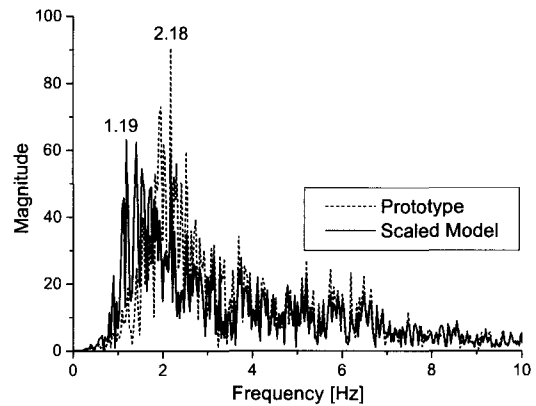
축소모형에 variable modulus ratio를 사용한 경우 손상이 진행됨에 따라 등가탄성계수비가 점차 감소하면서 축소모형의 질량이 실시간으로 감소하는 과정을 모사하여 수행되었다. 재료시험과 준정적실험으로부터 얻어진 그림 10과 그림 11에 의해 정의한 damage level과 등가탄성계수비의 관계를 이용하여 질량을 보정해주었고, 그림 4에서 보이는 유사동적실험 알고리즘이 적용되었다. 그림 15(a)에서 보는바와 같이 변위응답이 실험모형의 손상이 상당히 진행된 이후에도 커



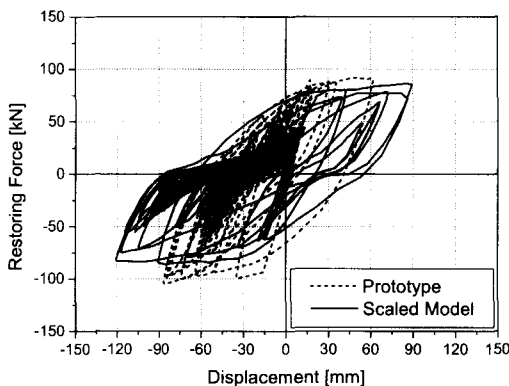
(a) Displacement response



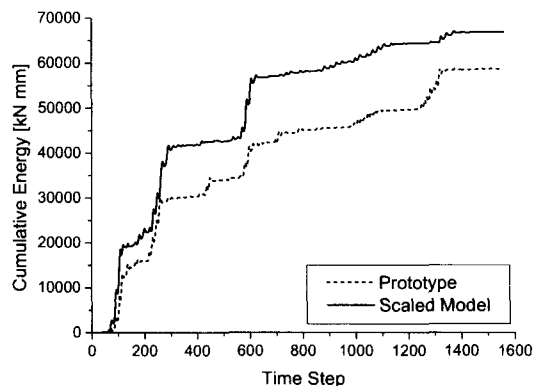
(b) Acceleration response



(c) Power spectrum



(d) Hysteresis loop



(e) Energy evaluation

그림 14 Comparison of seismic responses of prototype & 1/5 scaled model (Constant modulus ratio)

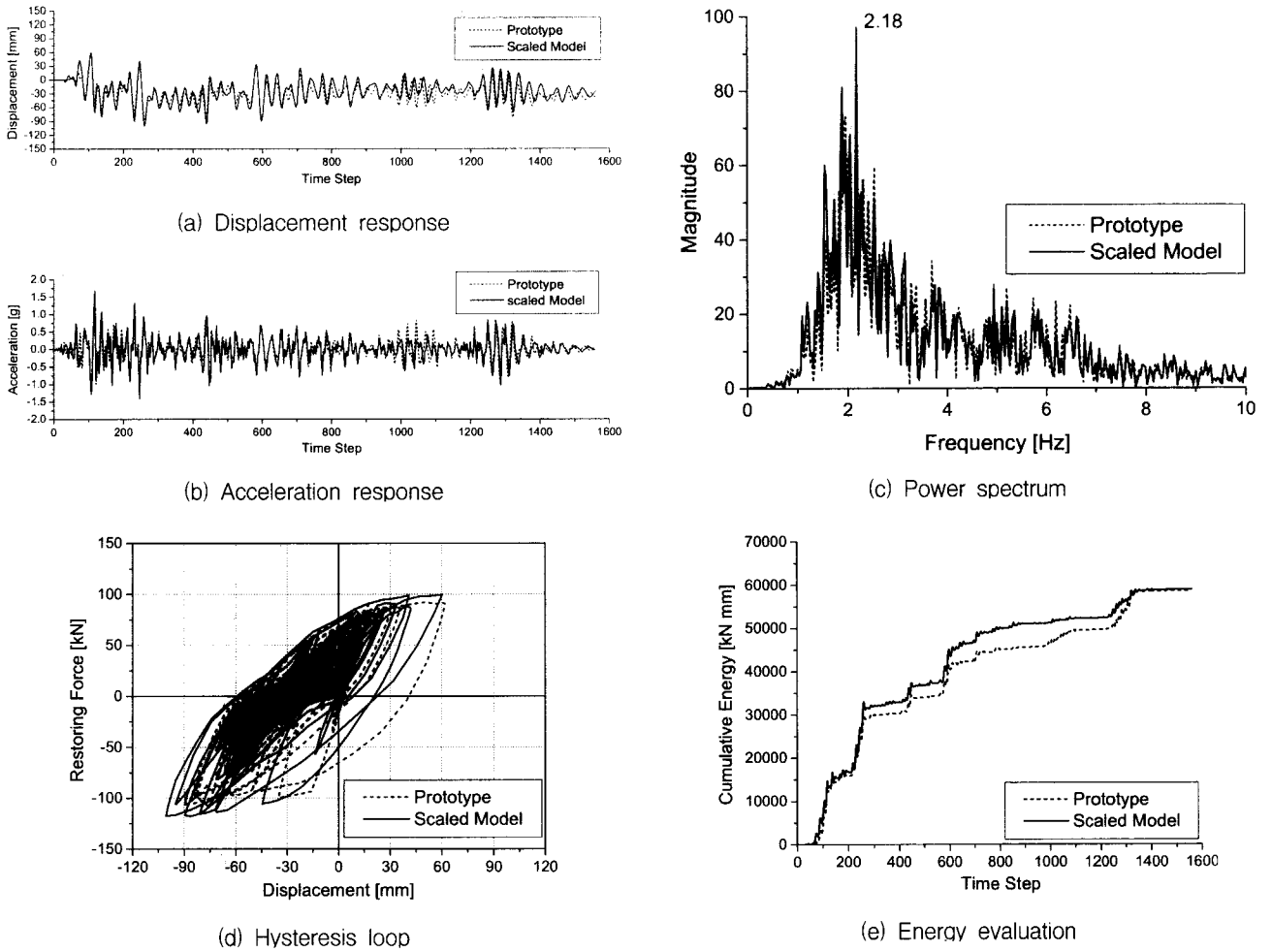


그림 15 Comparison of seismic responses of prototype & 1/5 scaled model (Variable modulus ratio)

다란 오차가 발생하지 않음을 볼 수 있고, 그림 15(b)의 가속도 응답 역시 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그림 15(c)의 가속도 응답을 FFT한 결과에서 constant modulus ratio를 사용한 경우와는 달리 뚜렷한 peak 값이 2.18Hz로 원형구조물과 일치함을 볼 수 있다. 그림 15(d)에서 보이는 시간이력곡선의 형상에서는 약간의 차이를 보이고 있지만 이력곡선의 궤적이 차지하는 면적을 합산한 누적에너지 평가에서는 그림 15(e)와 같이 최대 10%미만의 오차로 상당히 일치함을 확인할 수 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 기존의 가속도를 기준으로 한 기하학적인 상사법칙을 보완하여 재료비선형이 고려된 equivalent multi-phase similitude law를 제안하였으며, 제안된 상사법칙을 지진응답실험에서 실현하기위한 개선된 유사동적실험알고리즘을 구축 하였다.

실험에 앞서 재료시험을 수행하여 normal-concrete와 micro-concrete의 재료비선형을 파악하였고, 그 거동 구간을 콘크리트의 극한변형률을 기준으로 재료의 비선형성을 모사할 수 있도록 등가의 여러 구간으로 나누어 상사법칙에 적용하게 될 등가탄성계수비를 산정하였다. 또한 원형구조물의 재

료인 normal-concrete보다 축소모형의 재료인 micro-concrete의 탄성계수를 상대적으로 작게 설계하여 굵은 골재 크기에 의한 축소모형 제작의 어려움을 해결함은 물론 부가질량의 크기도 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다.

실험적인 연구에서는 먼저 준정적실험을 수행하여 재료시험으로부터 결정된 등가탄성계수비를 damage level에 따라 구간을 나누고 그 값을 축소모형의 응답에 고려하였다. 여기서 등가탄성계수비가 적절히 산정되었는지 확인하여 재료시험으로부터 산정한 등가탄성계수비를 실험모형에 직접 적용할 수 있는지를 검증하였다.

유사동적실험에서는 각각 constant modulus ratio와 variable modulus ratio를 적용한 경우에 대해 축소모형의 응답을 평가해 원형구조물의 응답과 비교하였다. 축소모형에 constant modulus ratio를 사용한 경우 손상정도를 고려할 수 없으므로 응답의 오차가 상당히 증폭되는 것을 관찰할 수 있으나, variable modulus ratio를 사용한 경우 손상정도에 따라 변화하는 등가탄성계수비에 의해 축소모형의 질량을 보정해 줌으로써 축소모형의 응답이 원형구조물의 응답을 비교적 정확하게 모사함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 normal-concrete와 micro-concrete 두 재료간의 재료비선형이 고려된 equivalent multi-phase similitude law와 축소모형의 damage level에 따라 질량을 실시간으로 보정해



주는 개선된 유사동적실험 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

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, 곽영학, 장승필, "A Study on Similitude Law for Evaluation of Seismic Performance", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003, pp. 49-57.
5. 곽영학, "내진성능평가를 위한 상사법칙 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 2002.
6. 김남식, 이지호, 장승필, Xun Guo, "RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003, pp. 101-108.
7. Harris, H. G. and Sabnis, G. M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, CRC Press, 1999.
8. 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.