

철근콘크리트 축소모형의 유사동적실험과 진동대 실험을 위한 상사법칙 연구

A Study on Similitude Law for Pseudodynamic Tests and Shaking Table Tests on Small-scale R/C Models

양희관* 서주원** 조남소*** 장승필****
Yang, Hui Gwan Seo, Ju Won Cho, Nam So Chang, Sung Pil

ABSTRACT

Small-scale models have been frequently used for seismic performance tests because of limited testing facilities and economic reasons. However, there are not also enough studies on similitude law for analogizing prototype structures accurately with small-scale models, although conventional similitude law based on geometry similitude is not well consistent in their inelastic seismic behaviors. 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 to use different materials for small-scale model. In our recent study, a modified similitude law was derived depending on geometric scale factor, equivalent modulus ratio and ultimate strain ratio. And quasi-static and pseudo-dynamic 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. In this study, tests on scaled model of different concrete compressive strength are carried out. In shaking table tests, added mass can not be varied. Thus, constant added mass on expected maximum displacement was applied and the validity was verified in shaking table tests. And shaking table tests on non-artificial mass model is carried out to settle a limitation of acceleration and the validity was verified in shanking table tests.

1. 서 론

대형구조물의 지진에 대한 안전성을 검증하고 내진설계기술을 확립하기 위한 실험적 연구에서 구조물의 크기, 실험장비 및 실험실의 제약, 경제적인 이유 등으로 인하여 축소모형(small-scale model)에 의한 실험이 활발히 이루어지고 있다⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾. 축소모형을 설계하고 축소모형의 비탄성거동(inelastic behavior)으로부터 원형구조물(prototype structure)의 거동을 유추하기 위해 상사법칙(similitude law)이 적용된다. 그러나 일반적인 상사법칙은 탄성범위 내에서 유도되어지고 비탄성을 고려한 상사법칙은 명확히 확립되어 있지 않아 지진하중에서와 같은 비탄성 거동을 예측하는 데에는 한계가 있다^{(3),(4)}.

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^{(5),(6),(8)}가 적용되고 있으며, 이에 대한 새로운 상사법칙이 개발되었다. 본 논문의 선행연구⁽¹⁾⁻⁽²⁾에서는 원형구조물과 축소모형에 각각 사용된 normal-concrete와 micro-concrete 사이의 재료적 비선형을 고려한 equivalent multi-phase

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정
** 정회원 · 현대건설기술연구소, 책임연구원
*** 비회원 · 현대건설기술연구소 선임연구원
**** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

similitude law를 유도하였고, 유도된 상사법칙을 적용하여 부가질량이 변화하는 유사동적실험(pseudodynamic test) 알고리즘을 구축하고 실험을 통해 검증한바 있다.

본 연구에서는 다른 강도를 갖는 micro-concrete에서의 적용성을 확인하고 이를 바탕으로 보다 개선된 축소 모형설계 방법을 제시했다. 유사동적 실험과 달리 진동대 실험(shaking table test)에서는 부가질량(added mass)의 변화를 모사하는 것이 불가능하여 등가탄성계수비(equivalent modulus ratio)의 변화를 반영할 수 없다. 따라서 예측되는 부재의 최대변형단계에 해당하는 등가탄성계수비를 적용하여 진동대 실험을 실시하고 그 적용성을 검증하였다. 또한 진동대 실험시 진동대 구형 가속도의 제한을 극복하기 위해 부가질량 증가를 통해 적용 가속도를 낮출 수 있는 비인공질량모델(Non-artificial mass model)을 활용한 실험을 실시하여 그 적용성을 확인하였다.

2. 등가탄성계수비와 극한변형률비를 고려한 상사법칙

상사법칙은 기본적으로 질량(M), 길이(L), 시간(T)이 기본차원으로 선택되면 나머지는 이들로부터 유도되어 결정된다. 이때, 원형구조물과 축소모형에 동일한 재료를 사용하지 않으면 등가탄성계수비와 극한변형률비(ultimate strain ratio)를 고려하여 상사법칙을 유도해야 한다. 원형구조물과 축소모형의 길이에 대한 상사율을 s , 등가탄성계수비를 $E_r(\epsilon)$, 사용된 재료의 극한변형률비를 ϵ_{ur} 이라 정의하면 원형구조물과 축소모형의 관계는 Table 1와 같이 유도된다. 상사율은 원형구조물과 축소모형사이의 각 물리적인 양의 비(ratio)와 동일한 의미를 갖는다.

Table 1. 등가탄성계수비와 극한변형률비를 고려한 상사법칙

| Quantity | Dimensions | Scale Factor | | |
|-------------------|-----------------|--|--|--|
| | | Acceleration based $E_r(\epsilon)=1, \epsilon_{ur}=1$ | Equivalent multi-phase (Artificial mass model) $E_r(\epsilon)\neq 1, \epsilon_{ur}\neq 1, a_r=1$ | Equivalent multi-phase (Non-artificial mass model) $E_r(\epsilon)\neq 1, \epsilon_{ur}\neq 1, a_r\neq 1$ |
| Length | L | s | s | s |
| Mass | M | s^2 | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} / a_r$ |
| Time | T | $s^{0.5}$ | $s^{0.5}$ | $(s/a_r)^{0.5}$ |
| Stress | $ML^{-1}T^{-2}$ | 1 | $E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ | $E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ |
| Acceleration | LT^{-2} | 1 | 1 | 1 |
| Force | MLT^{-2} | s^2 | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ |
| Stiffness | MT^{-2} | s | $s \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ | $s \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ |
| Natural frequency | T^{-1} | $1/s^{0.5}$ | $1/s^{0.5}$ | $(a_r/s)^{0.5}$ |
| Added Mass | - | $s^2 \cdot m_p - m_{mo}$ | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \cdot m_p - m_{mo}$ | $s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur} \cdot m_p / a_r - m_{mo}$ |

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

2.1 Equivalent Multi-phase Similitude Law - Artificial mass model

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 $s^2, s^2 \cdot E_r(\epsilon) \cdot \epsilon_{ur}$ 에 비례하므로 동적실험을 위해서는 부가질량이 필요하며, 시간에 대한 압축도 필요로 한다. 질량과 시간을 수치적으로 처리하는 유사동적실험에 가장 이상적인 방법으로 판단된다.

2.2 Equivalent Multi-phase Similitude Law - Non-artificial mass model

질량에 하중으로 가해지는 가속도는 조절이 가능하지만 중력가속도는 인위적으로 조절할 수 없는 요소이므로 구조물의 중력과 관성력을 정확하게 재현하려면 가속도비 $a_r = 1$ 로 정의하여야 한다. 그러나 축소모형 실험시 장비의 제약으로 $a_r = 1$ 로 할 경우 지진가속도 재현이 불가능한 경우가 있다. 이 때 중력가속도에 의한 축력의 영향이 작아 힘이 지배하거나 축력을 기계적으로 가할 수 있는 경우 $a_r \neq 1$ 로 상사법칙을 유도하여 적용할 수 있다.

3. 축소모형 설계 과정 및 개선된 축소모형 설계방법 제안

3.1 극한변형률비(ϵ_{ur})와 등가탄성계수비(E_r/E_c)를 고려한 단면설계

본 연구에서는 기존연구⁽¹⁾⁻⁽²⁾와의 비교를 위해 원형구조물의 기존 실험 결과를 사용하고 동일한 축소모형을 설계하였다. 기존 재료실험 결과⁽¹⁾⁻⁽²⁾를 바탕으로 재료 물성치를 결정하여 부재를 설계한다. Normal concrete와 micro-concrete는 기존 압축강도 시험 결과를 활용하였다.

기둥단면의 응력도에서 ϵ_{ur} 을 고려하면 축소모형 단면에서 철근의 위치를 결정할 수 있고, 식 (1)에 의해 계산된 원형구조물의 공칭모멘트(M_{np})와 축소모형의 공칭모멘트(M_{nm})를 식 (2)에 대하여 만족하도록 풀면 축소모형의 철근단면적을 구할 수 있다.

설계한 원형구조물과 축소모형의 단면은 Fig. 1와 같고 구조물의 특성치는 Table 2와 같다.

$$M_n = 0.85f_{ck}ba\left(\bar{y} - \frac{a}{2}\right) + A_s'f_s'(\bar{y} - d') - A_s f_s(d - \bar{y}) \quad (1)$$

$$M_{nm} = s^3 \cdot E_r \cdot \epsilon_{ur} \cdot M_{np} \quad (2)$$

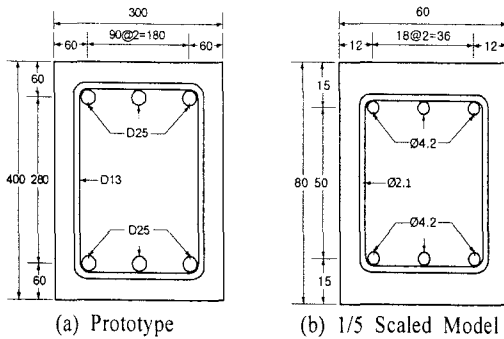


Fig. 1 원형구조물과 1/5 축소 시험체 단면

Table 2. 구조물 특성치

| Quantities | | Prototype | 1/5 Scaled Model |
|-------------------|---------------------------------|-----------|------------------|
| Concrete | Ultimate Strain(ϵ_u) | 0.00229 | 0.00265 |
| | Ultimate Stress [Mpa] | 44.4 | 21.1 |
| Steel | Yielding Strain(ϵ_y) | 0.0019 | 0.0019 |
| | Yielding Stress [Mpa] | 400 | 400 |
| Height [mm] | | 2000 | 400 |
| Stiffness [kN/mm] | | 20.773 | 2.152 |

3.2 철근(Reinforcement)의 Modeling

축소모형에서 일반 이형철근을 사용할 경우 원형구조물보다 연성이 부족하고, 나사산을 내어 제작한 철근 (threaded rod)을 사용할 경우 원형구조물을 보다 효과적으로 모사할 수 있음이 검증됨바 있다⁽⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 이형철근을 가공하여 나사산을 내어 제작한 Threaded rod를 축소모형 주철근으로 사용하였다.

3.3 구조물 초기 강성을 고려한 축소모형 설계방법

실제 구조물의 설계는 위의 방법으로 이루어졌다. 위의 방법의 경우 콘크리트의 등가탄성계수비를 사용하기 위해 구조물의 극한상태에서 상사는 설계시 철근단면적을 조절하여 적용가능하다. 그러나 탄성영역에서 철근을 무시하고 콘크리트의 등가탄성계수비만으로 상사법칙을 적용하는데 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 다음과 같이 초기 구조물 강성을 고려하여 등가탄성계수비를 적용한 설계 방법을 제안한다.

콘크리트의 초기 등가탄성계수비를 활용하여 탄성영역에서도 콘크리트의 등가탄성계수비가 적용 가능하도록 식(3),(4)에서 철근 단면적을 결정하는 구조물의 초기 강성을 고려한 설계를 한다. 기존 설계의 경우 약14%의 강성 오차를 갖는다.

$$K = \frac{3EI}{L^3} \text{ (환산단면적으로 계산)} \quad (3)$$

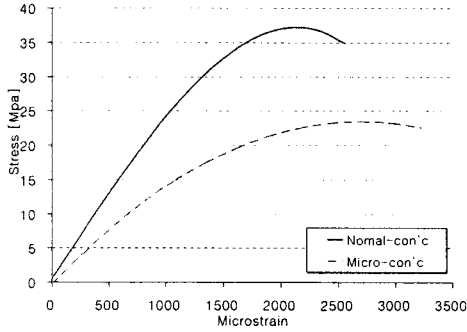
$$K_m = s \cdot E_r \cdot \epsilon_{ur} \cdot K \quad (4)$$

그리고 철근의 항복응력을 조절하여 구조물의 극한상태에서 콘크리트 탄성계수비 적용이 가능하도록 식 (1),(2)를 통해 설계한다. 이와 같은 설계과정을 거칠 경우 콘크리트의 탄성계수비만으로 구조물의 손상정도가 작은 경우부터 극한상태의 경우까지 전영역에 걸쳐 상사법칙 적용이 가능할 것으로 예측된다.

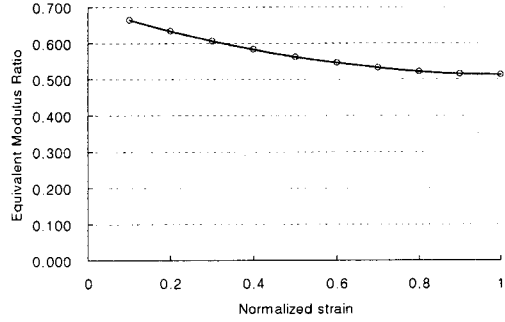
4. 시험체에 사용된 재료실험 결과

원형구조물은 기존 실험 결과⁽¹⁾⁻⁽²⁾를 활용하고 축소모형은 위의 설계를 바탕으로 제작하였다. 제작된 시험체의 재료실험 결과는 Fig. 2(a)와 같다. 등가탄성계수비는 각 구간에서 micro-concrete와 normal-concrete의 강성(secant modulus)의 비로, Fig. 2(b)와 같이 변형률에 대한 함수로 얻을 수 있다.

이는 설계 재료특성과 차이를 보이므로 단면에 대한 검토가 필요하다. 단면에 대한 검토는 단면 설계와 동일하게 식(1),(2)를 이용하여 검토했다. 제작된 구조물은 극한상태에서는 상사에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Stress-strain curve



(b) Equivalent modulus ratio

Fig. 2 변형률에 따른 일반콘크리트와 마이크로 콘크리트의 재료 특성

5. 실험적 연구 결과

5.1 원형구조물과 축소모형의 준정적실험결과 비교

변위제어방식으로 0.5 δ_s 에서 8.0 δ_s 까지 순차적으로 수평변위를 증가시켜가며 준정적실험을 수행하였다. 실험 전경은 Fig. 3와 같고, Fig. 4에서 기존 원형구조물⁽¹⁾⁻⁽²⁾과 본 연구의 축소모형 파괴형상을 관찰할 수 있다.

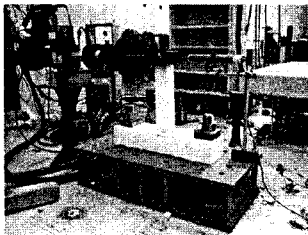


Fig. 3 실험 전경



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

Fig. 4 파괴 형상

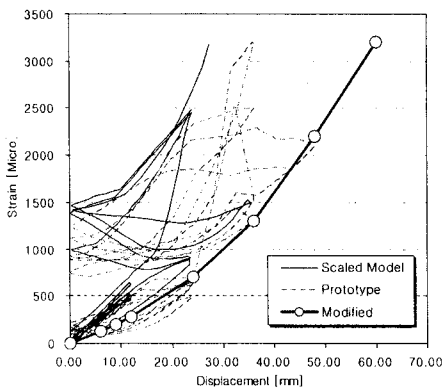


Fig. 5 변형률-변위 관계

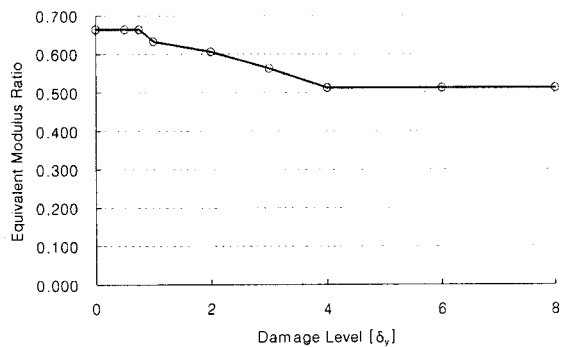
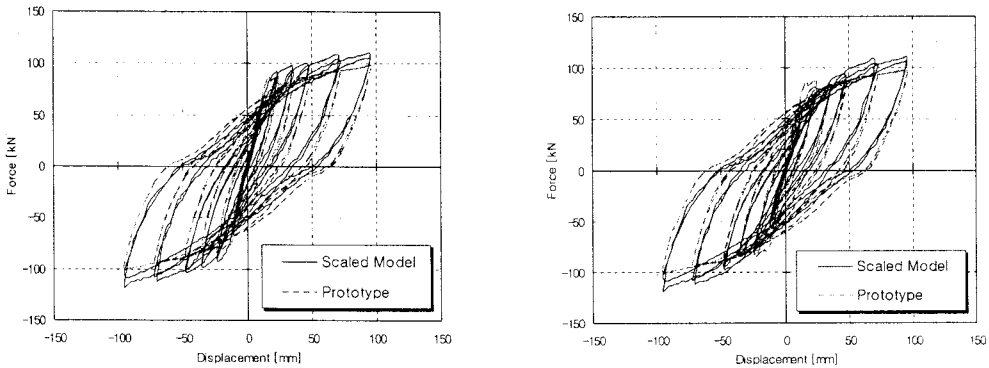


Fig. 6 손상 정도에 따른 등가탄성계수비

등가탄성계수비의 산정을 위해 실험모형의 소성힌지구간(plastic hinge zone)에 해당하는 주철근에 strain gage를 부착하여 damage level을 평가하였다. 준정적실험에서 얻어진 실험모형의 상부변위와 소성힌지구간에서의 strain level(damage level)의 상관곡선을 Fig. 5에서 볼 수 있으며, Fig. 6에서는 damage level에 따라 등가탄성계수비가 변화하는 경향을 그래프로 표현하였다.

유사동적실험 및 진동대 실험에 적용하고자 하는 등가탄성계수비의 확인을 위해 콘크리트의 극한응력에 해당하는 등가탄성계수비만을 사용하는 경우를 constant modulus ratio, Fig. 6과 같이 구조물의 damage level에 따라 등가탄성계수비가 재료시험 결과에 근거해 감소하는 경우를 variable modulus ratio로 정의하여 두 가지 경우에 대한 축소모형의 준정적실험 결과를 분석하였다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 원형구조물과 축소모형에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내었다.



(a) constant modulus ratio ($E(L)=0.512$) (b) variable modulus ratio
Fig. 7 준정적실험 결과 (하중-변위 곡선)

먼저 constant modulus ratio를 적용한 Fig. 7(a)의 경우 오히려 variable modulus ratio를 적용한 Fig. 7(b)와 비교하여 초기 탄성영역에서 원형구조물을 잘 모사하고 손상이 진행된 후에는 거의 동일한 수준의 오차를 나타낸다.

constant modulus ratio와 variable modulus ratio, 그리고 준정적 실험의 결과에서 역으로 유도한 structural modulus ratio를 비교하면 fig. 8과 같다. 콘크리트의 등가탄성계수비와 structural modulus ratio가 일치하지 않는다. variable modulus ratio를 사용하는 방법은 구조물의 거동특성이 전적으로 콘크리트에 의존할 경우 효과적일 것이다. 본 연구의 경우 철근을 포함한 RC기둥이므로 철근의 영향을 무시할 수 없다. 구조물 설계시 축소모형의 철근면적을 조절하여 구조물의 극한 상태에서 콘크리트 등가탄성계수비만으로 상사법칙이 적용될 수 있도록 설계 및 검토하였으나 이 경우 재료 특성에 따라 초기 탄성영역에서 variable modulus ratio를 사용하는 것이 오히려 효과적이지 않다.

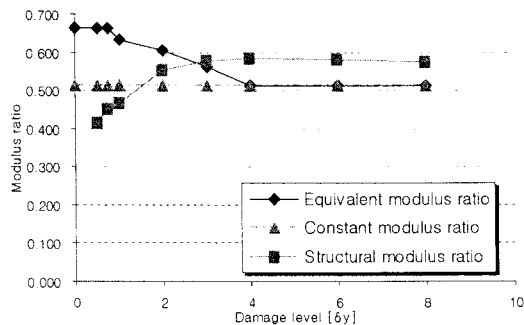


fig. 8 탄성계수비의 비교

따라서 설계시 앞서 제안한 것과 같이 구조물 초기강성을 고려하여 구조물을 설계하면 이 문제를 해결할 수

있을 것으로 기대된다. 기존 실험⁽¹⁾⁻⁽²⁾의 경우 설계시 초기강성을 고려하지 않았지만 14%정도의 오차로 상사에 비교적 적합하도록 제작된 경우로 생각할 수 있다. 초기강성을 고려하면 콘크리트의 등가탄성계수비로 기존 연구⁽¹⁾⁻⁽³⁾에서 제시한 상사법칙을 보다 효과적으로 적용할 수 있는 축소모형 제작이 가능할 것이다.

5.2 원형구조물과 축소모형의 유사동적실험 결과 비교

실험에 사용된 입력지진파는 3배로 증폭한 1940 El Centro NS 지진파이고, 구조물의 응답을 Fig. 9에 나타내었다. 축소모형에 적용한 유사동적실험 알고리즘은 선행연구⁽¹⁾⁻⁽²⁾에서 검증된 variable modulus ratio 유사동적 알고리즘을 사용하였고, 따라서 구조물의 손상이 진행함에 따라 축소모형의 mass를 변화시켰다.

기존실험 결과⁽¹⁾⁻⁽²⁾와 비교하여 원형구조물을 보다 효과적으로 모사하지 못한다. 이는 위에서 밝혔듯이 본 축소모형 제작에 사용된 콘크리트의 등가탄성계수비는 탄성영역에서 variable modulus ratio를 적용하는 것이 효과적이지 않았다. 특히 탄성영역에서 콘크리트의 등가탄성계수비 적용시 Fig. 8에서와 같이 상사법칙을 위해 필요한 값보다 큰 값이 적용된다. 즉 질량이 크게 입력되어 실험결과에서도 응답에 저주파성분이 보다 많이 나타난다.

기존실험⁽¹⁾⁻⁽²⁾의 경우 설계에서 초기강성을 고려하지 않았음에도 불구하고 구조물의 등가탄성계수비가 초기 탄성영역에서도 적용될 수 있도록 설계되어 variable modulus ratio를 사용한 경우 축소모형이 원형구조물의 응답과 상당히 일치 하였다고 분석할 수 있다.

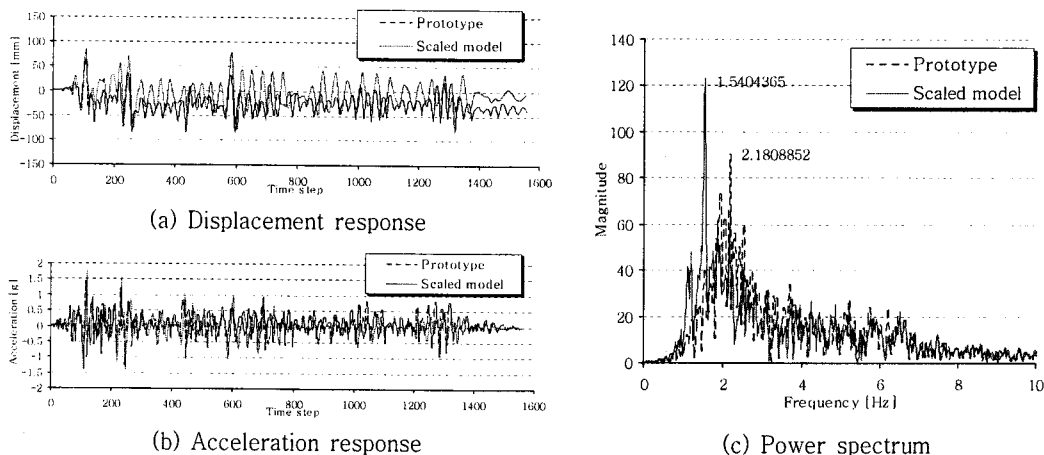
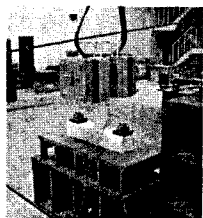
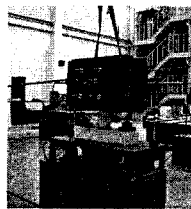


Fig. 9 원형구조물과 축소모형의 유사동적 실험결과 비교 (Variable modulus ratio, 2005)

5.3 Artificial mass model 과 Non-Artificial mass model 진동대 실험 결과



(a) Artificial mass model



(b) Non-artificial mass model

Fig. 10 진동대 실험 전경

진동대 실험은 진동대가 구현할 수 있는 지진가속도에 한계가 있어 1.5배로 증폭한 1940 El Centro NS 지진파를 사용하여 실시하였다. 진동대에 부가질량은 Fig. 10와 같이 설치하였다. 진동대의 경우 실험도중 질량을 변화시킬 수 없으므로 variable modulus ratio의 적용이 불가능 하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 극한응력에서의 등가탄성계수비를 적용하여 진동대 실험을 실시하였다. Fig. 11에서와 같이 축소모형의 응답이

원형구조물의 응답과 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있다.

앞에서도 밝혔듯이 축소모형 제작에 사용된 콘크리트의 경우 constant modulus ratio를 사용하는 것이 보다 효과적임을 밝혔다. fig. 2(b)에서와 같이 일반적인 콘크리트의 등가탄성계수비는 초기에 감소하고 손상이 진행됨에 따라 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다.⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 따라서 유사동적실험 결과에서 언급했듯이 초기 구조물 강성을 콘크리트의 초기 등가탄성계수비를 적용할 수 있도록 설계하고 콘크리트의 등가탄성계수비를 적용하는 것이 가장 효과적일 것이다. 그러나 진동대 실험에서는 variable modulus ratio의 적용이 불가능하다. 본 실험에서 fig. 8에서 볼 수 있듯이 정확한 상사를 위해 필요한 탄성계수비는 손상이 진행됨에 따라 증가하나 콘크리트의 극한응력에서의 등가탄성계수비를 중심으로 비교적 일정한 값을 갖는다. 따라서 초기 강성 및 구조물의 극한상태 모두에서 콘크리트의 극한 응력에서의 등가탄성계수비가 적용되도록 설계하고 constant modulus ratio를 적용하여 부가질량을 결정하는 것이 효과적임을 본 실험 결과로부터 확인할 수 있다.

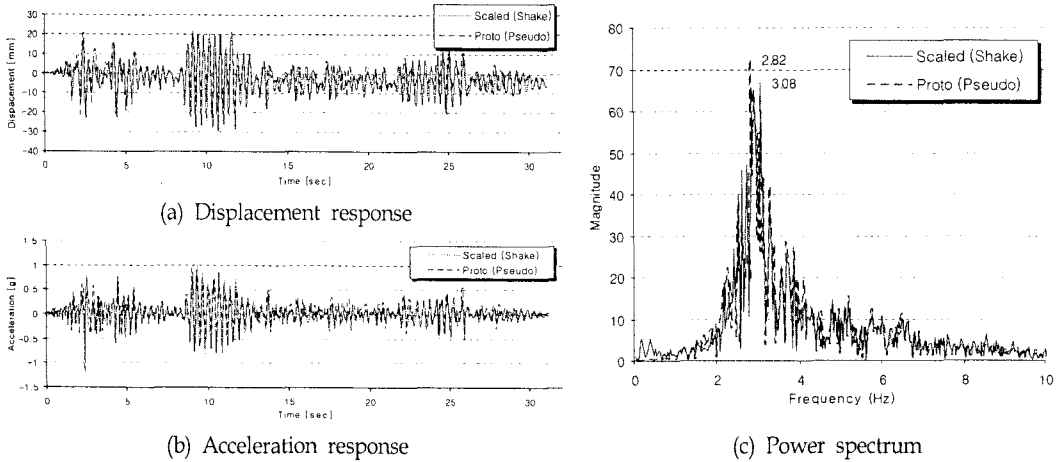


Fig. 11 원형구조물과 축소모형의 진동대 실험결과 비교 (Artificial mass model)

그러나 위의 진동대 실험 결과는 구조물의 손상정도가 작아 강진시 구조물의 성능을 충분히 확인할 수 없다. 이와 같이 축소모형 실험을 실시 할 경우 진동대의 중량이나 변위 제한은 상사비를 크게 하여 극복할 수 있으나 진동대가 구현할 수 있는 가속도가 제한되는 경우는 기존에 사용한 상사법칙을 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 앞서 제안된 비인공질량모델(Non-artificial mass model)을 사용하여 부가질량을 증가시켜 상사법칙 적용시 지진가속도가 2배로(EI centro 3배) 상사되도록 축소모형의 부가질량을 설계하여 실험을 실시하였다.

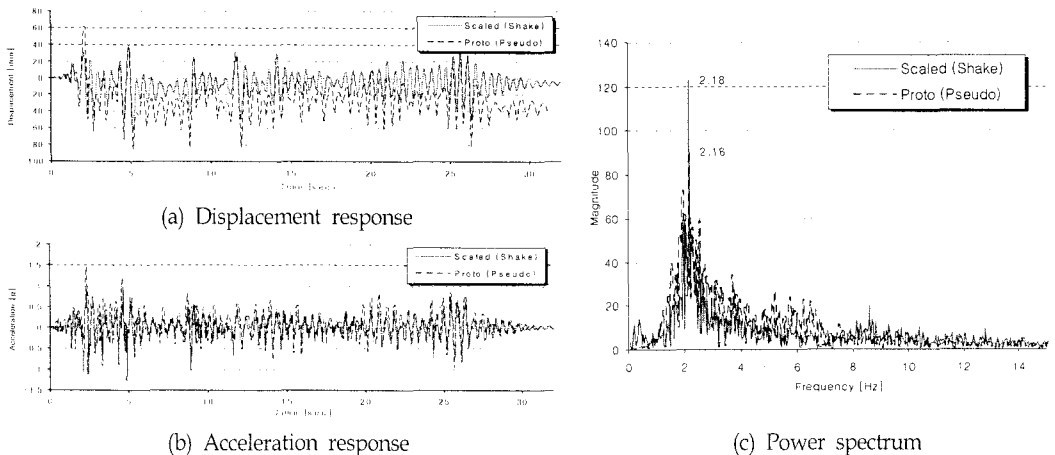


Fig. 12 원형구조물과 축소모형의 진동대 실험결과 비교 (Non-artificial mass model)

실험결과 Fig. 12와 같이 구조물의 응답은 소성변형량의 차이는 있지만 비교적 유사한 응답을 나타내고 구조물의 주요 주파수대역이 일치함을 확인할 수 있다. FFT결과 응답의 주 주파수 영역대는 일치하나 Band의 크기가 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 원형 구조물의 경우 축력을 가력하지 않았고 축소모형의 경우 비인공질량모델을 사용하여 축력의 크기가 실제 상부질량보다 2배로 작용한 결과로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 선행연구에서 실험을 통해 증명된 equivalent multi-phase similitude law를 다른 강도를 갖는 콘크리트 기둥에 적용하여 실험을 수행하였다. 실험수행결과 variable modulus ratio 적용시 오히려 초기 탄성영역에서 더 큰 오차를 발생시켰는데 이는 설계 및 검토시 구조물 초기 강성을 고려하지 않을 경우 철근의 영향으로 variable modulus ratio를 적용하는 것이 비효과적임을 확인하였고, 보완을 위해 초기 강성을 고려한 축소모형 설계방법을 제안하였다.

진동대 실험은 부가질량의 변화가 불가능하기 때문에 예상되는 최대변형단계의 탄성계수비를 적용하여 실험을 실시하였다. 실험결과 진동대 실험을 위한 축소모형 설계시 고정된 탄성계수비가 적용되도록 설계된 시험체의 경우 원형구조물의 거동을 보다 효과적으로 모사할 수 있음을 확인하였다.

축소모형 진동대 실험시 진동대의 가속도 구현능력의 제한을 극복할 수 있는 비인공질량모델을 활용한 축소모형 실험 방법을 제안하고 실험을 수행하였다. 그 결과 축력 수준이 낮은 휨이 지배하는 기둥의 경우 충분히 축소모형실험에 활용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)의 2005년도 단독19과제의 일부로서 KEERC를 통한 한국 과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남식, 이지호, 장승필, "RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law:검증실험", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제5호, 2004, pp.35-43.
2. 김남식, 이지호, 장승필, Xun Guo, "RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003, pp.101-108.
3. 김남식, 박영학, 장승필, "A Study on Similitude Law for Evaluation of Seismic Performance", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003, pp.49-57.
4. Harris, H. G. and Sabnis, G. M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, CRC Press, 1999.
5. 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, 1988.
6. 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.
7. 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.
8. Meng, Q. L., "The dynamic simulation of nonlinear performance of R/C structures in the earthquake simulation shaking table test", Master dissertation of IEM, China Seismological Bureau, Harbin, 2001.