

상사법칙이 적용된 철근콘크리트 기둥 축소모형의 지진 취약도 분석

Fragility Analysis of A Scaled Model of Reinforced Concrete Column in Accordance with Similitude Law

박동욱¹⁾ · 전범규^{1)*} · 김남식²⁾ · 박자민³⁾ · 조재열³⁾

Park, Dong Uk¹⁾ · Jeon, Bub Gyu^{1)*} · Kim, Nam Sik²⁾ · Park, Jamin³⁾ · Cho, Jae-Yeol³⁾

¹⁾부산대학교 지진방재연구소, ²⁾부산대학교 건설융합학부, ³⁾서울대학교 건설환경공학부

¹⁾Seismic simulation test Center, Pusan National University, ²⁾School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University ³⁾Department of Civil and Environmental Engineering Seoul National University

/ A B S T R A C T /

Many studies are conducted in several fields for fragility analysis of structures or elements which is a probabilistic seismic safety analysis in consideration with uncertainty of seismic loading. It is hard to directly conduct fragility analysis for an infrastructure with social importance due to its size. Therefore, a fragility analysis for an infrastructure mainly conducted in element level or conducted with scaled model built in accordance with similarity law. In this article, fragility analysis for prototype and scaled model of reinforced concrete column was conducted with numerical models which had been updated by the results of shaking table test and pseudo dynamic test. As a result, response stress from the numerical analysis result of prototype model was higher than that from scaled model due to different stiffness ratios between steel and concrete. However, the probability of failure for scaled model was higher than that for prototype model because failure criteria for scaled model was down due to similarity law. Also it was evaluated that probability of failure by using log normal standard deviation of response stresses by spectrum matched accelerograms was more reliable than probability of failure by using existing coefficient of variation normally used.

Key words: Fragility analysis, Scaled model, Reinforced concrete column, Spectrum matched accelerograms, Similitude law

1. 서론

최근 아이티지진, 도호쿠 지방 태평양 해역 지진, 쓰촨성 대지진 등 세계적인 강진들과 경주 및 울산 앞바다에서의 규모 5.0이상의 지진과 같은 국내 지진으로 인하여 구조물의 내진성능평가에 대한 관심이 고조되고 있으나, 지진하중의 불확실성으로 인하여 지진재해를 정확히 예측하기는 어렵다. 이러한 지진하중의 불확실성을 고려하기 위하여 1980년대 초 원자력발전소 내진해석 분야에서 확률론적 지진안전성 분석방법으로 지진취약도 분석기법이 개발되었다. 지진취약도 분석은 지진입력파의 크기에 따른 손상발생의 확률을 계산하는 방법으로, 최근에는 미국, 일본, 유럽 등을 중심

으로 토목구조물에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 지진취약도 분석을 통한 콘크리트 교량 기둥의 수평변위한계 값의 제시[1], 면진구조의 응답특성에 관한 연구의 진행[2], 지진격리된 원전배관의 지진취약도 분석[3], 지진취약도 분석을 위한 철재배관 엘보의 반복하중 상태에서의 파괴기준에 관한 연구[4], 매설배관의 지진취약도 해석[5], 면진이 적용된 액체 저장탱크의 내진특성 평가[6] 등, 구조물 및 부재 단위의 지진취약도 분석에 관한 연구가 꾸준히 증가하는 추세이다.

한편, 이러한 연구들에서는 원형구조물(Prototype)이 사회기반시설물인 경우, 부재 단위의 실험이라 할지라도 그 크기가 크므로, 축소모형(Scaled model)을 사용한 실험을 실시하는 경우가 많으며, 상사법칙이 적용된 축소모형이라 할지라도 적용된 상사법칙에 따라 부재의 성능이나 해석 결과가 변할 수 있다.

본 연구에서는 건축 및 토목분야에서 널리 사용되는 사각형 철근콘크리트 기둥부재에 대하여 진동대실험과 유사동적실험을 통하여 원형구조물과 축소모형의 수치해석 모델을 정립하고, 상사법칙 적용 전·후의 수치해석

*Corresponding author: Jeon, Bub Gyu

E-mail: bkjeon79@pusan.ac.kr

(Received July 18, 2016; Revised September 19, 2016; Accepted December 28, 2016)

모델들에 대하여 각각의 인공지진파를 적용한 경우 지진취약도 분석 결과를 비교하여 상사법칙이 적용된 수치해석 모델의 지진취약도 분석결과와 활용성을 검증하고자 하였다. 원형구조물의 지진취약도 분석에는 하나의 스펙트럼에 적합한 서로 다른 10개의 지진파를 적용하였으며, 축소모형을 위한 입력지진파는 동일한 지진파에 상사법칙을 적용하여 시간 축에 대하여 압축한 파형을 적용하였다.

2. 상사법칙적용 및 실험을 통한 수치해석 모델의 개선

본 연구에서는 토목, 건축에서 일반적으로 많이 사용되는 사각단면 철근 콘크리트 기둥을 원형구조물로 설정하였다. 원형구조물 기둥부의 높이는 2 m이며, 상·하부 기초 및 질량거치부가 각 0.5 m로 총 높이는 3 m이다. 내부 철근은 D25 이형철근 6본이 주철근으로 매립되어 있었으며, D13 이형철근이 띠철근으로 매설되어 있었다. 진동대실험 및 해석에서는 기둥의 상부에 20 ton의 질량을 추가하여 고정하중을 모사하였다. 원형구조물의 기둥 단면의 제원은 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

축소모형에 적용한 상사법칙은 주어진 길이 상사비(=축소율, S)에 대하여 실험의 목적 및 중점적인 관찰대상에 따라 가장 적합한 상사법칙을 적용해야 할 필요가 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 상사법칙으로 질량 기반 상사법칙, 시간기반 상사법칙, 가속도기반 상사법칙이 있다[7, 8]. Table 1은 각 물리량에 대한 상사비를 상사법칙의 종류에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

본 연구에서는 실험을 통한 원형구조물과 축소모형 실험결과와의 비교 및 수치해석 모델 개선자료로 사용하기 위하여 진동대 및 가력기를 이용한 실험을 수행하였고, 실험 시 중력가속도를 임의로 제어할 수 없으므로, 중력 가속도가 변하지 않는 가속도기반 상사법칙을 적용하였다. 축소모형 제작 시 길이 상사비는 1/4을 적용하였다.

이에 따라, 축소모형의 주철근은 D6 이형철근으로 배근하였으며, 띠철근은 직경 3 mm의 이형철근을 현실적으로 구하기 힘들고 원형구조물 및

모형 설계 시 힌 파괴가 발생하도록 유도하여 전단에 대한 보강이 충분하다고 판단하였으므로 D3 와이어로 대체하여 축소모형을 제작하였다. 또한, 가속도 기반의 상사법칙을 적용함에 따라 입력지진파의 가속도 시간이력을 1/2로 압축하여 진동대실험 및 유사동적실험을 수행하였고, 그 결과를 이용하여 수치해석 모델을 반영하였다.

원형구조물 및 모형 제작에 있어서 발생할 수 있는 제작오차와 실험 중 발생할 수 있는 경계조건들의 오차를 보정하기 위해서는 수치해석 모델의 개선이 필요하며, 이러한 수치해석 모델의 개선을 위하여 원형구조물과 축소모형에 대해 명지대학교 하이브리드 구조실험센터와 부산대학교 지진방재연구센터에서 각각 유사동적실험과 진동대실험을 실시하였고, 예측 결과를 바탕으로 수치해석 모델을 개선하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 원형구조물과 축소모형의 진동대실험 및 유사동적실험 전경을 나타내고 있다.

수치해석모델의 개선을 위하여 원형구조물 및 축소모형 실험체와 동일한 제원을 가지는 실험체를 이용하여 cyclic pushover 실험을 수행하였다.

Table 1. Similitude law

Quantity	Dimension	Scale Factor		
		Method I (Mass Based)	Method II (Time Based)	Method III (Acceleration Based)
Length	L	S	S	S
Mass	M	S ³	S	S ²
Time	T	S	1	S ^{1/2}
Stress	ML ⁻¹ T ⁻²	1	1	1
Velocity	LT ⁻¹	1	S	S ^{1/2}
Acceleration	LT ⁻²	1/S	S	1
Force	MLT ⁻²	S ²	S ²	S ²
Stiffness	MT ⁻²	S	S	S
Damping	MT ⁻¹	S ²	S	S ^{3/4}
Frequency	T ⁻¹	1/S	1	S ^{-1/2}

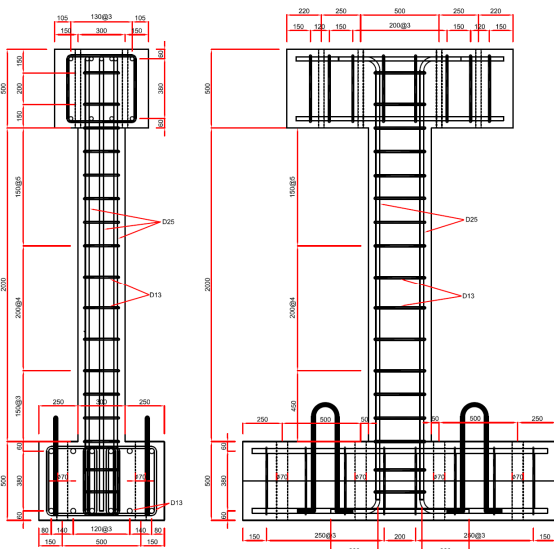
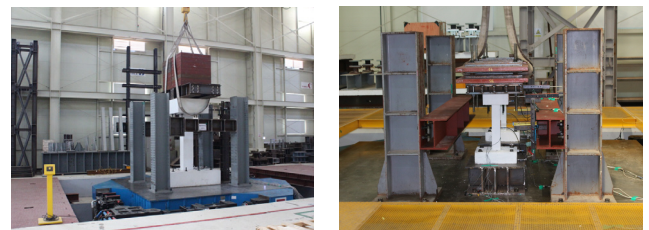


Fig. 1. Prototype rectangular reinforced concrete column



(a) Prototype test

(b) Scaled model test

Fig. 2. Shaking table test



(a) Prototype test

(b) Scaled model test

Fig. 3. Pseudo dynamic test

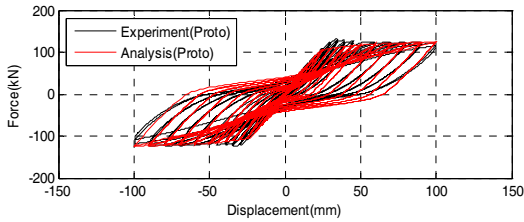


Fig. 4. Comparison of test result for cyclic pushover test of prototype with analysis result by finite element model

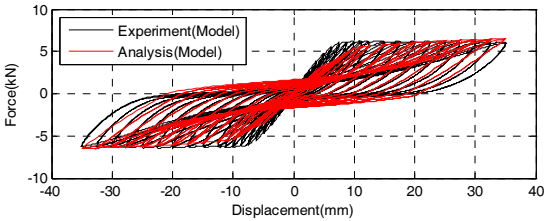


Fig. 5. Comparison of test result with for cyclic pushover test of model with analysis result by finite element model

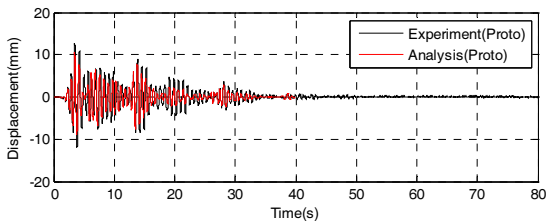


Fig. 6. Comparison of test result for shaking table test of prototype with analysis result by finite element model

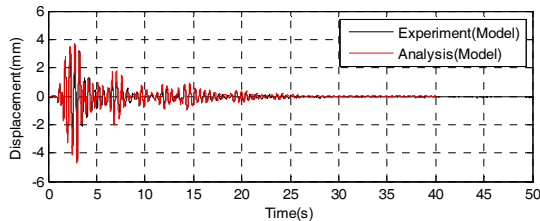


Fig. 7. Comparison of test result with for shaking table test of model with analysis result by finite element model

실험결과와 개선된 수치해석 모델에 따른 해석결과를 비교하면 Fig. 4 및 Fig. 5와 같으며 이 해석모델을 적용한 동적해석 결과와 원형구조물과 축소 모형의 진동대실험결과를 비교하면 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. Figs. 4-7을 통해서 개선된 수치해석모델이 실제 원형구조물과 축소모형의 거동을 충분히 정확하게 모사하고 있음을 확인하였으므로 이후 해석을 통한 분석에 이 수치해석모델을 적용하였다.

3. 파괴의 정의와 수치해석 조건

지진취약도 분석은 해석 대상물이 다양한 지진에 대하여 파괴가 일어날 확률을 분석하는 것이므로 파괴의 정의가 지진취약도 분석결과에 큰 영향

Table 2. Material properties of prototype and model

Reinforcement		
Properties	Prototype	Model
Yield strength (MPa)	520	425
Elastic Modulus (MPa)	200,000	200,000
Concrete		
Properties	Prototype	Model
Compressive strength (MPa)	37.3	23.2
Compressive strain	0.0023	0.00294

을 미친다. 철근 콘크리트 부재의 파괴는 부재의 중요도와 구조물의 위치, 성능요구조건 등에 따라 다양하게 정의되므로, 철근 콘크리트의 모든 파괴를 포괄할 수 있는 정의를 내리기는 어렵다. 본 연구에서는 소성거동이력을 겪은 철근의 잔존 내하력은 철근의 종류, 크기에 따라 다를 수 있음을 감안하고, 발생하는 응력의 분산이 항복응력 잔후에 상이함을 고려하여, 주철근의 응력이 항복응력을 초과하는 경우로 정의하되, 소성거동 이후 발생하는 항복응력보다 큰 응력의 발생이 어려운 점을 고려하여 최대 변형률이 항복변형률을 초과하는 경우를 파괴로 정의하였다. 이에 따라, 원형구조물 및 모형의 주철근의 인장실험을 통해 확인된 항복응력 값인 520 MPa 및 425 MPa에 해당하는 항복변형률인 2.125×10^{-3} 및 2.600×10^{-3} 을 초과하는 경우를 파괴로 설정하였다. 본 연구에서의 목적은 대상 구조물의 파괴를 정확히 정의하는 것 보다는 상사법칙 적용 전·후의 지진취약도 분석결과의 비교를 통하여 상사법칙이 적용된 수치해석모델의 지진취약도 분석 결과의 차이점을 검토하는 것이 목적이므로 상사법칙에 따른 동일한 파괴기준이 적용된다면 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단하였다.

수치해석에는 Pacific Earthquake Engineering Center에서 지진해석용 유한요소프로그램으로 개발된 OpenSees를 이용하였다. 해석에서 사용한 철근과 콘크리트의 재료 모델의 경우 일반적으로 철근콘크리트 기둥의 해석시 널리 사용되는 모델 중 콘크리트의 압축거동은 Kent-Scott-Park model[7]을 인장은 Linear tension softening model을 적용하였고, 철근의 거동은 Menegotto-Pinto model을 적용하였다.

Fig. 4 및 5에서 제시된 하중-변위 관계로부터 원형구조물과 축소모형 모두 작지 않은 핀칭(Pinching)이 관찰되었으며 이는 Fig. 1의 원형구조물과 모형 철근의 배근도를 고려할 때 주철근의 뺄림에 의한 슬립(Slip)보다는 주철근과 주변 콘크리트 간의 Strain penetration에 의한 슬립으로 판단이 되어 이를 고려하기 위해 기둥 하부에 Zero length element[9]를 삽입하여 해석을 수행하였다. 원형구조물 및 모형에서 사용된 철근과 콘크리트의 물성을 정리하면 Table 2와 같다.

OpenSees에서는 Fiber element를 이용하여 해석을 수행하므로 축소 모형 해석 시 축소율을 고려하여 element의 크기를 원형구조물 해석 시 사용한 Element의 크기에 축소율을 곱한 값을 사용하였다. 요소의 종류로는 OpenSees에서 주어진 요소 중 Forced based element를 사용하였다. 이 경우 적은 수의 적분점(Integration point)과 요소절점을 사용하더라도 만족할만한 해석결과의 수렴이 가능한 것으로 확인되었다[10]. 이를 고려하여 본 연구에서 사용한 해석 모델의 경우 기둥의 길이방향으로 최소 7개의 요소절점을 사용하였고 각 Fiber element 내에서 최소 7개의 적분점을 사용하였다.

4. 취약도 분석을 위한 입력지진파의 결정

지진취약도 분석은 다양한 지진파에 대한 검토가 필요한 일이며, 적용되는 다양한 지진파들의 크기를 분류할 수 있어야만 입력지진파에 대한 파괴 확률을 계산할 수 있다. 지진취약도 분석에 적용되는 입력지진파는 실제 관측된 지진파를 단순 증폭하여 사용하는 경우가 있으나, 실제 관측 지진파는 모든 설계 주파수영역을 포괄하기 어려우므로, 본 연구에서는 설계스펙트럼에 맞는 인공지진 시간이력을 생성하여 증폭하여 사용하였다.

본 연구에서는 원형구조물의 지진응답 시간이력 해석을 위해 계측 지진을 기반으로 하여 목표 응답스펙트럼에 적합하도록 수정한 가속도 기반의 입력 지진파(spectrum matched accelerograms) 중 임의의 10개의 지진파를 선정하여 사용하였다[1]. 해당 지진파들은 seed 지진을 이용하여 목표 스펙트럼에 부족한 주파수 성분을 보정하기 위해 식 (1)과 같이 wavelet 함수를 시간영역에서 중첩하여 생성된 것이다.

$$f_j(t) = \cos(\omega_j(t-t_j + \Delta t_j)) e^{-((t-t_j + \Delta t_j)/\gamma_j)^2} \quad (1)$$

여기서, ω_j 는 특정 주파수이며, Δt_j 는 wavelet의 시간축 중심과 최대응답 발생시간 t_j 와의 위상차의 보정값이다. 식 (1)에서 감쇠를 정의하는 γ_j 는 가속도 시간이력의 최종 속도 및 변위값이 0이 되도록 식 (2)와 같이 정의되었다.

$$\gamma_f = 1.178 f^{-0.93} \quad (2)$$

이와 같이 주어진 지진파들은 목표스펙트럼의 ZPA(Zero Period Acceleration)가 0.5 g(= 4.9 m/s²)인 Reg. Guide 1.60 스펙트럼에 맞도록 변형(감쇠비 5%)한 것이며, Fig. 8은 해당 지진파들의 SDOF response spectrum을 64 Hz까지 나타낸 것이다.

본 연구에서는 원형구조물의 동적거동을 파악하기 위하여 해당 지진파들의 가속도 레벨을 조절하여 대표 가속도 값을 0.1 g(20%)부터 0.025 g 간격으로 0.5 g(100%)까지 선형적으로 증가시키면서 비선형 동적 수치해

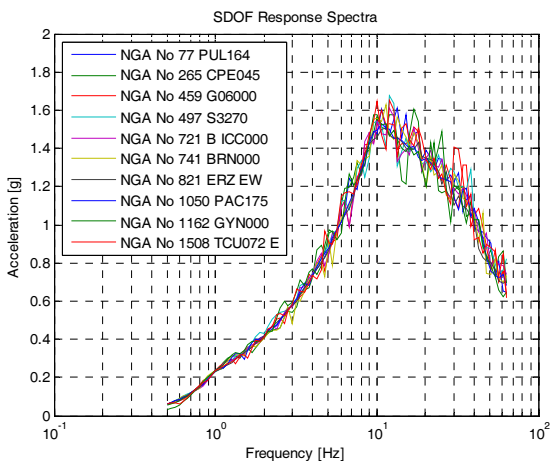
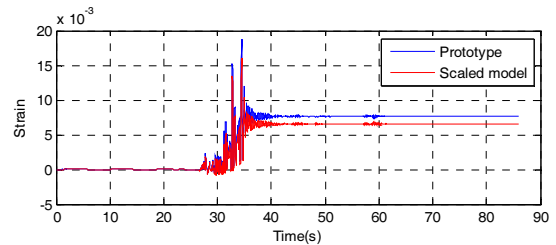


Fig. 8. Single degree of freedom response spectra of input motions

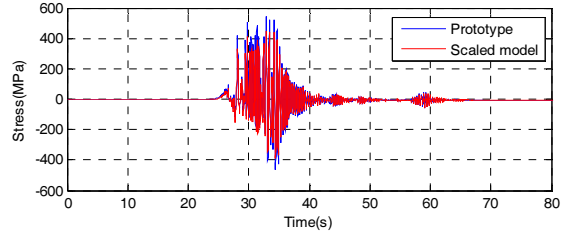
석을 실시하였다. 축소모형의 동적거동을 파악하기 위해서는 가속도 기반 상사법칙을 적용하여 원형구조물의 해석에 사용된 시간 이력을 1/2로 압축한 지진파를 입력지진파로 시간이력 해석을 실시하였으며 두 결과의 비교를 위하여 축소모형의 응답을 시간에 대하여 2배 확장하여 비교하였다.

5. 수치해석 결과

수치해석은 원형구조물과 축소모형의 재료실험 및 실물 실험 결과를 바탕으로 개선된 수치해석모델을 이용하여 수행되었다. 상사법칙의 적용으로 인하여 축소모형의 해석에는 입력지진파가 시간 축에 대하여 압축되었으므로 두 결과를 비교하기 위하여 축소모형의 실험결과를 시간 축에 대하여 보간하여 비교하였다. Fig. 9는 원형구조물과 축소모형의 수치해석 결과의 차이를 확인하기 위하여 다양한 입력지진파 중 NGA no 77 PUL164

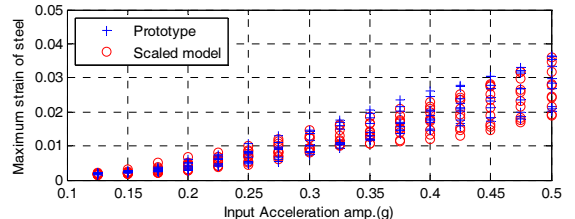


(a) Strain responses

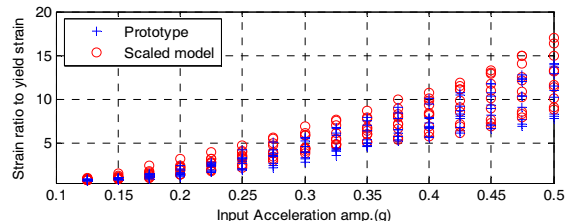


(b) Stress responses

Fig. 9. Strain and stress response comparison between prototype and scaled model



(a) Maximum strain



(b) Strain ratio to yield strain

Fig. 10. Maximum strain and strain ratio to yield strain from numerical analysis results

지진파가 100%(0.5 g) 입력되었을 때 원형구조물과 모형의 수치해석 결과 중 주철근의 변형률 및 응력을 시간이력으로 나타낸 것이다. 두 해석에서의 결과에서는 탄성영역에서의 응답은 거의 유사하게 나타나고 있으나 소성영역에서의 결과 및 최종 변형률은 상이한 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 축소모형 수치해석 모델의 주철근 항복응력이 원형구조물의 수치해석 모델과 상이하기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

Fig. 10(a)는 해석 결과 중 원형구조물과 축소모형의 주철근에 발생하는 변형률의 최대값을 입력 지진파의 크기별로 나타낸 것이며, Fig. 10(b)는 항복 변형률에 대한 최대변형률을 비율로 표시한 것이다. Fig. 9에서와 같이 동일한 지진파에 대하여 서로 다른 최대 변형률 값을 나타나는 것을 확인 되었으며, 항복 변형률에 대한 최대 변형률 비는 축소모형이 원형구조물 보다 약간 높게 나타나고 있음을 확인 할 수 있었다.

또한, 항복 변형률에 대한 최대 변형률 비의 근소한 차이는 원형구조물과 축소모형 각각의 철근과 콘크리트의 강성비가 서로 상이함에 따른 결과로 판단된다. 원형구조물과 축소모형의 철근과 콘크리트의 물성치가 서로 다른 경우 축소모형 주 철근의 단면적을 결정하기 위해서는 원형구조물 주 철근의 단면적에 면적에 대한 상사비인 길이상사비의 제곱을 적용한 이후 추가적으로 보정해주어 원형구조물과 축소모형 각각의 철근과 콘크리트 간 강성비를 동일하게 해주는 작업이 필요하다[8, 11]. 이를 위해서는 축소모형 철근과 콘크리트의 정확한 물성을 설계 단계에서 알고 있어야 하나, 많은 경우 축소모형 콘크리트의 경우 배합 및 양생조건에 따라 설계 시 계획한 물성과 제작 시 타설된 콘크리트의 실제물성에서 서로 차이가 발생할 수 있다. 이 경우 철근 단면적에 대한 상사비가 이론적인 상사비와 상이하게 되어 결과적으로 원형구조물과 축소모형의 주 철근 응력 및 변형률이 항복응력 또는 항복 변형률에 대한 응력 및 변형률비에서 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

6. 파괴확률과 지진취약도 분석

일반적으로 파괴(F)는 식 (3)과 같이 부재의 요구(D)가 부재의 성능(C)보다 클 경우로 정의할 수 있으며, 요구와 성능의 분포가 정규분포를 따르거나, 특정 확률분포를 따르며, 식(4)와 같이 파괴확률을 정의할 수 있다.

$$F = C < D \quad (3)$$

$$P_F = P[D - C < 0] \quad (4)$$

여기서 요구와 성능이 각각 대수정규분포(log-normal distribution)를 따를 경우, 신뢰도 지수 I_R 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 파괴확률은 신뢰도 지수를 이용하여 식(6)과 같이 구할 수 있다[12].

$$I_R = \frac{\ln(\bar{C}/\bar{D})}{\sqrt{(\sigma_{\ln D})^2 + (\sigma_{\ln C})^2}} \quad (5)$$

$$P_F = 1 - \phi(I_R) \quad (6)$$

여기서 \bar{C} 와 \bar{D} 은 각각 성능과 요구의 중앙값(median)을 의미하며, $\phi(I_R)$ 는 신뢰도 지수 I_R 에 대한 확률을 의미한다. $\sigma_{\ln D}$ 와 $\sigma_{\ln C}$ 는 각각 구와 성능의 대수표준편차를 의미하고, 이들은 요구와 성능에 영향을 미치는 인자들의 변동계수(β_k)를 이용하여 식 (7) 및 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\ln D} = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_m^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\ln C} = \sqrt{\beta_I^2 + \beta_{II}^2 + \dots + \beta_n^2} \quad (8)$$

본 연구에서는 철근콘크리트의 파괴를 주 철근의 소성변형의 시작으로 설정하였으므로, 요구는 주 철근의 최대 변형률로, 성능은 주 철근의 항복 변형률로 설정할 수 있다. 또한 최대 변형률에 영향을 미치는 인자들은 입력 하중, 재료물성, 수치해석의 모델링, 해석방법으로 정의하였으며, 항복 변형률에 영향을 미치는 인자들은 비선형거동에 의한 소성 능력과 응력집중에 의한 변형률의 변화로 정의하였다. 따라서 최대 변형률에 대한 변동계수는 입력하중의 불확실성(β_1), 재료물성의 불확실성(β_2), 수치해석 모델링의 불확실성(β_3), 해석방법의 불확실성(β_4)가 되며, 항복변형률에 대한 변동계수는 철근의 소성능력 불확실성(β_I), 손상집중의 불확실성(β_{II})이 된다. 기존의 타 연구에서 밝혀진 철근 콘크리트에 대한 대표적인 변동계수들은 Table 3과 같다[13, 14].

Fig. 11는 원형구조물과 축소모형에 대하여 입력 지진파의 변동계수(β_1)를 기존의 연구에서 주어진 변동계수(0.49)로 적용하였을 때의 파괴확률과 스펙트럼 적합 지진파를 적용한 최대 변형률의 대수표준편차(log-normal standard deviation)를 적용하였을 때의 파괴확률을 비교한 것이다. 일반적으로 주어지는 입력 지진파의 변동계수는 스펙트럼이 정의되지 않은 다양한 지진의 특성을 반영하기 위하여 적용된다. 하지만 본 연구에서는 설계응답스펙트럼에 적합한 지진파를 입력하였으므로 입력지진파의 변동성이 더 적으며, 구조물 성능에 대한 검토를 위해서는 설계응답스펙트럼 적합 지진파를 이용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 또한, 응답의 분포는 대수정규분포를 따른다고 가정하였으므로 변동계수는 대수표준편차를 적용하였다.

다만, 입력지진파의 변동계수를 제외한 항목에 대해서는 항목의 대수표준편차와 변동계수가 크게 다르지 않고, 각 항목의 대수표준편차를 계산하기 위한 데이터의 부재로 인하여 변동계수들을 그대로 사용하였다.

Fig. 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 원형구조물과 축소모형의 파괴확률은 스펙트럼 적합 지진파를 적용하였을 때가 일반적인 입력지진파의 변

Table 3. Coefficient of variation

Symbol	Related uncertainty	Value
β_1	Input motion	0.49
β_2	Material property	0.3
β_3	Modeling	0.15
β_4	Analysis method	0.15
β_I	Energy absorbing	0.14
β_{II}	Damage concentration	0.1

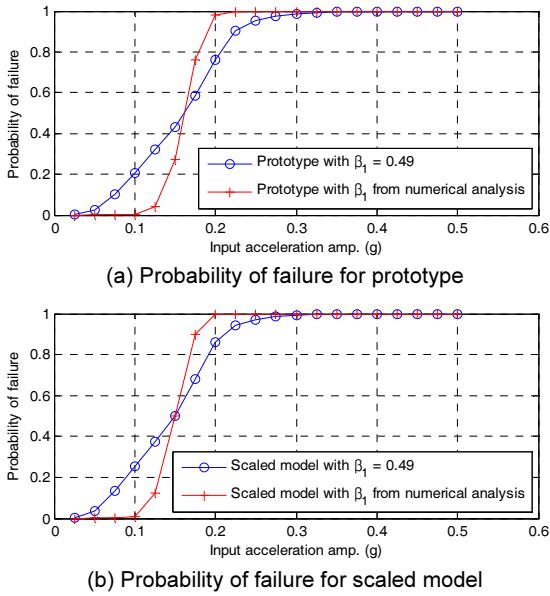


Fig. 11. Failure probability of prototype and scaled model

동계수를 적용하였을 때보다 더 정밀하게 나타났으며, 항복변형률에 대한 최대 변형률의 비에서 예측된 바와 같이 축소모형의 파괴확률이 원형구조물의 파괴확률보다 높게 나타났다.

7. 결론

본 연구에서는 건축 및 토목분야에서 많이 적용되는 사각 단면의 철근콘크리트 기둥에 대하여 원형구조물과 길이 상사비가 1/4인 축소모형의 수치 해석을 통한 파괴확률을 비교하였다. 수치해석모델은 진동대실험과 유사 동적실험의 결과를 바탕으로 각각 개선하였으며 개선된 수치해석모델에 ZPA(Zero Period Acceleration)가 0.5 g인 Reg. Guide 1.60 스펙트럼 적합 지진파와 이와 동일한 지진파를 1/2로 압축시킨 지진파를 원형구조물 및 축소모형 수치해석모델에 각각 입력하여 비선형 동적해석을 수행하였다. 원형구조물과 축소모형 모델의 주 철근의 항복응력 및 항복변형률을 재료 실험을 통해 확인하고, 각각의 주 철근의 최대변형률이 항복변형률에 도달하는 것을 파괴로 정의하여 원형구조물과 축소모형의 각 가속도 레벨에서의 파괴확률을 확인하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 해석결과 모든 구간에서 원형구조물과 축소모형의 거동 및 변형률은 모든 구간에서 유사 관측되었으나, 비선형 구간이 포함되는 해석에서는 항복변형률에 대한 최대 변형률비가 축소모형에서 약간 높게 나타났다. 항복변형률에 대한 최대 변형률비의 차이는 축소모형 설계단계에서의 콘크리트의 물성과 실제 타설된 콘크리트의 물성에서 차이가 발생함에 따라 원형구조물과 축소모형 각각의 철근과 콘크리트의 강성비가 달라짐에 따른 결과로 판단된다.
- 2) 축소모형의 파괴확률이 증가하는 구간에서 원형구조물의 파괴확률보다 높게 나타나고 있었으며, 이는 원형구조물과 축소모형의 항복변형률에 대한 최대 변형률의 비의 차이에서 기인한 결과로 판단된다. 따라서 축소모형을 이용하여 파괴확률을 유추할 경우에는 원형구조물과 축소

모형의 철근-콘크리트 강성 비의 차이를 최소화 하는 것이 필요하며 현실적으로 이를 최소화 하는 것이 어려운 경우 계산된 축소모형의 응답을 통한 파괴여부를 판정하는데 있어 산정된 파괴확률이 원형구조물의 파괴확률에 비하여 과대 혹은 과소평가 될 수 있음을 감안하여야 한다.

- 3) 설계응답스펙트럼에 관계없이 입력지진파의 변동계수를 고려할 경우의 파괴확률보다 설계응답스펙트럼 적합 지진파를 고려한 파괴확률이 정밀한 예측결과를 나타내는 것으로 판단되며, 구조물의 설계를 고려한 파괴확률을 확인하고자 하는 경우에는 일반적인 지진의 변동계수를 적용하는 것보다 설계응답에 적합한 지진파를 적용한 응답들의 대수표준 편차를 변동계수로 적용하는 것이 타당할 것이라 판단된다.
- 4) 철근콘크리트 구조물과 같이 변동성이 큰 구조물의 파괴확률의 예측은 파괴의 정의와 변동계수들의 영향이 크므로, 정밀한 파괴확률의 예측을 위하여 철근콘크리트 부재의 파괴에 대한 정의에 관한 연구 및 변동계수를 최소화 할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술혁신연구사업(15CTAP-C077408-02)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사합니다.

/ REFERENCES /

1. Jeon JM, Shin JK, Shim JY, Lee DH, Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridge Piers According to Damage State, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2014;34(6): 1695-1705.
2. Kim JG, Kim MK, Choi IK, Response of Base Isolation System Subjected to Spectrum Matched Input Ground Motions, EESK J Earthquake Eng. 2013;17(2):89-95.
3. Jeon BG, Choi HS, Hahm DG, Kim NS, Seismic Fragility Analysis of Base Isolated NPP Piping System, EESK J Earthquake Eng. 2015;19(1):29-36.
4. Firoozabad ES, Jeon BG, Choi HS, Kim NS, Failure criterion for steel pipe elbows under cyclic loading, Engineering Failure Analysis, 2016;66:515-525.
5. Lee DH, Jeon JM, Oh JK, Lee DH, Earthquake Fragility Analysis of a Buried Gas Pipeline, EESK J Earthquake Eng. 2010;14(5):65-76.
6. Kim NS, Lee DG, Pseudodynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks, International Journal of Engineering Structures, 1995;17(3):198-208.
7. Scott BD, Park R, Priestley MJN, Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, ACI Journal proceedings, 1982;79(1):13-27.
8. Harris HG, Sabnis GM, Structural modeling and experimental techniques, CRC Press, c1999.
9. Zhao CJ, Sritharan S, Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforce Concrete Structures, ACI Structural Journal, 2007;104(2):133-141.
10. Neuenhofer A, Filippou FC, Evaluation of Nonlinear Frame Finite-

- Element Models, *Journal of Structural Engineering*, 1997;123(7): 958-966.
11. Kim NS, Kwak YH, Chang SP. A Study on Similitude Law for Evaluation of Seismic Performance, Proceedings of Annual Spring conference of EESK in 2003, c2003.
 12. Bolotin VV. Seismic Risk Assessment for structures with the Monte Carlo Simulation, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1993;3(4): 169-177.
 13. Naqvi T, Datta TK, Ramana GV. Fragility Analysis of Concrete Building Structures, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2010;3(5):729-743.
 14. Takeda M, Kai Y, Mizutani M. Seismic PRA procedure in Japan and its application to a building performance safety estimation, Part 2, Fragility analysis, Proc ICOSAR 89 5th Int Conf Structural Safety and Reliability. Publ by ASCE, New York, USA, 1989:629-636.