원자로건물의 철근콘크리트 전단벽 비선형 지진응답 평가

김 대 희¹ · 이 경 구^{2†} · 구 지 모¹

¹단국대학교 건축공학과 박사과정, ²단국대학교 건축공학과 교수

Evaluation of Nonlinear Seismic Response of RC Shear Wall in Nuclear Reactor Containment Building

Dae Hee Kim¹, Kyung Koo Lee^{2†} and Ji Mo Koo¹

¹Ph.D. Candidate, Architectural Engineering, Dankook University, Yongin, 16890, Korea

²Professor, Architectural Engineering, Dankook University, Yongin, 16890, Korea

Abstract

Interest in the seismic performance of nuclear facilities under strong earthquakes has increased because their nonlinear response is important. In this paper, we proposed appropriate parameters for the nonlinear finite element analysis of a concrete material model, for a reinforced concrete (RC) shear wall in nuclear facilities: maximum tensile strength, dilation angle, and damage parameter. The study of the effects of the important parameters, on the nonlinear behavior and shear failure mode of the RC shear wall having low aspect ratio, was conducted using ABAQUS finite element analysis program. Based on the study results the nonlinear response of a nuclear reactor containment building (RCB) subjected to a strong earthquake was evaluated using nonlinear time-history analysis.

Keywords : shear wall, concrete material model, nuclear facilities, reactor containment building, nonlinear finite element analysis

1. 서 론

국내 경주와 포항에서 지진 발생 후, 건축물과 시설물의 내진성능에 대한 관심이 크게 증가하였다. 특히 원자력발전소는 높은 구조적 안전성이 요구되는 시설물로, 현재의 내진설계에서 적용하는 지진동을 초과하는 강진에 대하여도 안전할 필요가 있다. 현행 설계기준지진에 대하여 원자력발전소 시설물이 탄성거동을 하는 내진성능을 충분히 확보하고 있다. 다만, ASCE 43 (ASCE, 2021)에 따르면 설계초과지진에 대하여 원자력발전소 시설물 벽체 일부의 비탄성거동도 포함될 것으로 예상되는 경우 실험데이터에 기반한 구조물의 힘-변형 곡선 검토를 통해 부재의 비선형 거동을 파악하는 것을 요구하고 있다.

원자력발전소 시설물에 대한 보다 정확한 내진성능평가를 위해서는 유한요소해석 프로그램을 사용하여 지진파에 대한 동적해석인 시간이력해석을 수행할 필요가 있다. 설계기반지

진에 대하여 선형거동을 하도록 설계하므로 선형동적해석을 수행하여도 충분하지만, 설계초과지진에 대하여는 비선형동적해석을 수행하여야 한다. 이 때 정확한 비선형 거동을 평가하기 위하여 합리적인 재료비선형 모델과 세부 변수가 해석모델에 반영되어야 한다.

원자력발전소 시설물의 지진력 저항시스템은 철근콘크리트 전단벽 구조형식이 일반적이다. 취성적이고 비등방성의 복잡한 콘크리트의 재료 특성과 전단벽체의 전단 파괴모드를 해석적으로 구현하기는 매우 어렵다. 따라서 유한요소해석을 위한 콘크리트 재료모델에 적절한 변수를 반영하여 합리적인 비선형 해석결과를 도출한 후에, 원자력발전소 시설물의 비선형 내진성능을 평가하여야 한다.

이 연구에서는 원자력발전소 철근콘크리트 전단벽 구조시스템의 비선형 유한요소해석을 위한 재료모델을 제시하고, 설계초과지진에 대한 원자로건물(RCB, Reactor Containment Building)

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3742; E-mail: kkleee@dankook.ac.kr

Received October 14 2021; Revised November 9 2021;

Accepted November 10 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 내진성능을 평가하였다. 이를 위해 원자력발전소 철근콘크리트 전단벽 상세와 형상비에 적합한 재료모델의 다양한 변수 효과를 분석하고 적절한 변수를 도출하였다. 이를 기반으로 원자로건물 전단벽을 상세히 모델링하고 모델에 설계초과지진을 적용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

2. 철근콘크리트 전단벽 모델

이 연구에서는 전형적인 원전건물에 해당하는 전단 거동이 지배적인 형상비가 낮은 철근콘크리트 전단벽의 해석적 검증을 위해서 Nuclear Power Engineering Corporation에서 진행한 전단벽 실험체(이하 NUPEC 실험체)를 선정하였다(Committee on the Safety Nuclear Installations, 1996). 실험은 동일 단면에 대해 2개의 실험체를 제작하여 Tadotsu Engineering Laboratory의 고성능 Shaking Table을 통해 지진파에 해당하는 가속도 시간이력 형태의 가력으로 진행되었다. 가력 방식은 상부슬래브 형태의 구조물에 추를 이용한 중력하중 1,196kN(122tonf)을 가한 상태로 횡방향으로 전단변형각의 크기를 기준으로 단계별로 지진입력이 작용되도록 가력하였다.

전단벽은 I형으로 플랜지와 웨브로 구성되었고, 벽체 높이는 2,020mm, 웨브방향 벽체 길이는 3,000mm, 플랜지방향 벽체 폭은 2,980mm로서 벽체 높이 대 폭의 비인 전단지간비가 1 미만인 전단벽이다. 벽체 두께는 75mm이고 수직철근 D6@70, 수평철근 D6@70으로 배근되었다. 실험체 형상은 Fig. 1과 같고, 실험체의 제원 및 특성은 Table 1에 기술하였다. 해석모델에는 이 재료 특성값을 적용하였다.

해석모델은 상용 정밀유한요소해석 프로그램인 Abaqus(2020)을 사용하여 구현하였다. NUPEC 실험체를 대상으로 I형 전단벽체와 상부슬래브 형태의 구조물을 모델링하였다. 전단벽의 거동에 영향을 주지 않는 하부슬래브 형태의 구조물은 생략하고 전단벽체 하부를 고정지점으로 설정하였다. 전단벽체 모델

Fig. 1 NUPEC specimen
(Committee on the Safety of Nuclear Installations, 1996)

Table 1 Specimen material properties

Concrete properties			
Compressive strength(MPa)	Modulus of elasticity (MPa) ^{*1)}	Poisson's ratio	Splitting tensile strength (MPa)
28.7	230	0.155	2.24
Rebar properties			
JIS designation	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
D6	384	486	184,428

*1) Secant modulus of stiffness at 1/3 value of compressive strength

Fig. 2 Finite element model and dimensions

을 위한 element type의 경우, solid 요소와 shell 요소의 해석결과가 큰 차이가 없음을 확인하여 이 논문에서는 shell 요소로 구성된 전단벽체 해석모델에 대한 내용만을 기술하였다. 전단벽의 철근은 shell 요소에 layer하는 방식으로 모델링하여, shell 요소 내부에 철근에 해당되는 강도와 강성을 분산하여 분포되도록 하였다. 상부슬래브 형태의 구조물은 solid 요소로 모델링하였다. 좌표계는 전단벽 웨브 방향을 X축, 중력방향을 Y축, 그리고 플랜지 방향을 Z축으로 설정하였다(Fig. 2 참고).

철근 재료모델은 Table 1의 항복강도와 인장강도를 적용하여 항복 후 비선형거동을 보이도록 piecewise linear 형태로 정의하였다. 콘크리트 재료모델은 3장에 별도로 기술하였다. 4장의 변수해석에서는 콘크리트 재료모델을 구성하는 주요 변수들에 대해 입력값을 달리하여 얻어진 해석결과를 전단벽 실험결과와 비교하였다.

3. 콘크리트 재료모델

콘크리트 재료모델 작성을 위해 콘크리트 부재 비선형 해석 시 널리 사용되고 있는 CDP(Concrete Damaged Plasticity) 모델을 사용하였다(Abaqus, 2020a). 이 모델은 Flow potential, Yield surface 및 Viscosity parameters를 정의함으로써 콘크리트의 비탄성 거동을 구현하기 위한 “Isotropic tensile and compressive plasticity”와 결합된 “Isotropic damaged elasticity” 개념을 사용한다.

Fig. 3 Stress-strain relation in CDP model(Abaqus, 2020a)

CDP 재료모델에서는 콘크리트 압축과 인장 응력-변형을 관계를 Fig. 3과 같이 정의한다. 재료 물성치의 탄성영역은 탄성계수와 푸아송비로 결정되며, 해석모델에는 Table 1의 탄성계수 및 푸아송비를 적용하였다.

콘크리트 압축거동의 경우 응력-변형을 곡선에서 $0.4f_{cu}$ 까지를 탄성영역으로 정의하고, 이후 응력이 압축강도(f_{cu})에 도달할 때까지의 응력 증가구간의 곡선은 콘크리트구조 설계(강도설계법) KDS 14 20 20(Korea Construction Standards Center, 2021)에서 제시하는 식 (1)에 따라 정의하였다.

$$f_c = 0.85f_{cu} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^n \right] \quad (1)$$

여기서, ϵ_c : 콘크리트 압축변형률

ϵ_{co} : 압축강도 도달시 변형률

n : 상승 곡선부 형상 지수

압축강도(f_{cu}) 도달 이후 연화(softening) 구간에서의 응력-변형을 관계는 Kent와 Park(1971)에서 제안한 직선 관계식을 적용하였다. 최종적으로 Fig. 4와 같은 콘크리트 압축 응력-변형률 포락곡선을 적용하였다.

콘크리트 인장거동의 경우 인장연화를 실험식으로 제안한

Fig. 4 Concrete compressive stress-strain relation

Table 2 CDP model basic properties

Variable	Input
Eccentricity	0.1
The ratio of initial equi-biaxial compressive yield stress to initial uniaxial compressive yield stress(f_{bo}/f_{co})	1.16
The ratio of the second stress invariant on the tensile meridian to the compressive meridian(K_c)	0.667
Viscosity parameter	0

Okamura 등(1985)의 인장응력-변형률 포락곡선을 적용하였다. 이 재료모델은 콘크리트 인장력을 결정하는데 있어 철근 등의 영향은 고려하지 않는다. 인장강도(f_{t0}) 도달 이후 균열에 의한 응력 미전달을 최대한 구현하기 위하여 급속한 강성저하를 구현하였다.

CDP 재료모델은 콘크리트 압축강도(f_{cu}), 인장강도(f_{t0}) 외에 팽창각(Dilation angle), 편심률(Eccentricity), Kc(3축 압축 응력상태에 대한 3축 인장응력비), 손상계수(damage parameter, d) 등의 변수를 통해 소성거동과 반복이력거동을 제어한다. 각 변수들의 경우 기존연구(Yapar *et al.*, 2015)를 통해 제시된 값을 Table 2와 같이 적용하였다. 그러나 원전건물에 사용되는 벽체의 전단거동을 합리적으로 모사하기 위한 주요 변수의 적절성을 검토할 필요가 있다. 이 논문에서는 콘크리트 인장강도, 팽창각, 손상계수의 영향을 검토하였다.

4. 변수해석

4.1 콘크리트 인장강도 효과

인장강도는 압축강도의 10% 내외의 값을 적용하는 것이 일반적이다. 이 연구에서는 인장강도를 압축강도의 8%(TS-8%), 10%(TS-10%), 12%(TS-12%)로 설정하고, 이에 따른 영향을 평가하였다. 이 때 팽창각은 56°, 손상계수는 variable 1(4.3절 참조)로 고정하였다.

Fig. 5 Force-displacement relation from different tensile strength

Table 3 Comparison of force ratio between test and analysis result

Specimens	P_{max} (kN)	$\frac{P_{FEM}}{P_{Test}}$ (%)			
		at 1mm	at 5mm	at 8mm	at 15mm
TS-8%	1238	112.6	99.1	94.8	90.6
TS-10%	1820	132.8	110.4	116.7	89.3
TS-12%	1940	143.6	127.9	-	-

Fig. 6 Equivalent plastic strain distribution

Fig. 5에 하중-변위 관계를 나타내었으며, Table 3에 특정 변위에 대해 변위별 해석하중과 실험하중을 비교하였다. TS-8% 모델의 해석결과가 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 인장강도가 클수록 해석모델의 최대하중이 크게 평가되었으며, 초기 탄성구간을 지나 항복하는 시점 역시 더 크게 평가되었

다. 또한 인장강도를 크게 적용하면, 실제 파괴모드가 모사되지 않아 항복 이후의 소성구간 강성이 지나치게 크게 나타나며, 해석모델의 수렴성에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

또한, 기존연구를 참고하여 각 변수해석 모델에 대한 결과 분석으로 PEEQ의 등가소성변형률 분포를 통해 콘크리트 균열 분포를 간접적으로 관찰하였다(Ming *et al.*, 2019). Fig. 6에 TS-8%와 TS-12% 모델의 PEEQ 등가소성변형률 분포를 비교하였다. TS-12% 모델이 횡변위 6mm까지 해석이 진행된 점을 고려하여 횡변위 6mm일 때의 소성변형 분포를 나타내었다. TS-8% 모델에서는 소성변형률이 벽체 대각방향으로 최대 0.001까지 발생하였으나, TS-12% 모델에서는 훨씬 작은 소성변형률이 벽체 상하부에 분포하였다. 실험에서 나타난 전단벽의 대각방향 파괴모드를 해석모델에서 구현함에 있어 인장강도의 효과가 매우 큼을 알 수 있다. 이를 통해 낮은 형상비의 전단벽 거동에서 전단파괴를 합리적으로 구현하기 위해서는 인장강도를 압축강도의 8% 이하 정도로 설정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2 팽창각 효과

콘크리트에 압축력이 가해질 때 요소 내부의 변형과 위치이동 등이 발생하여 체적의 변화가 생기게 되는데, 이 때 팽창이 발생하게 되고 해당 각도인 팽창각을 변수로 하여 등가응력에 따른 파괴선도의 형태를 결정한다(Yoo and Yoo, 2019). 이에 팽창각이 파괴형상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 팽창각 40°, 45°, 50°, 56°를 적용한 변수해석을 수행하였다. 56°는 CDP 모델이 허용하는 가장 큰 팽창각이다. 이 때, 콘크리트 인장강도는 압축강도의 8%, 손상계수는 variable 1(4.3절 참조)로 고정하였다.

Fig. 7에 팽창각에 따른 하중-변위 관계를 나타내었고, Table 4에 변위별 해석하중과 실험하중을 비교하였다. 비교 결과 팽창각이 전단벽 초기 탄성강성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로

Fig. 7 Force-displacement relation from different dilation angle

Table 4 Comparison of force ratio between test and analysis result

Specimens	P_{max} (kN)	$\frac{P_{FEM}}{P_{Test}}$ (%)			
		at 1mm	at 5mm	at 8mm	at 15mm
Dilation angle-40°	1140	114.8	72.7	72.8	57.2
Dilation angle-45°	1200	110.5	79.4	77.1	65
Dilation angle-50°	1290	111.5	86.3	82.7	76.1
Dilation angle-56°	1450	112.6	99.1	94.8	90.6

Fig. 8 Equivalent plastic strain distribution

나타났다. 그러나 항복 후 소성거동에 있어서 팽창각이 작을수록 최대하중이 작게 증가하고 변형이 크게 발생하는 경향을 보였다. 전단벽이 최대하중에 도달 후에도 팽창각이 작을수록 급속한 강도저하가 발생하였다. 즉, 해석에서 팽창각 크기와 전단벽 최대하중이 비례하는 것으로 나타났다.

Fig. 8에 해석 종료 시점인 변위 15mm에서 팽창각 40도와 56도 모델의 PEEQ 등가소성변형률 분포를 비교하였다. 팽창각 40도 모델의 경우 등가소성변형률이 대각방향보다는 벽체 중간높이에서 수평방향으로 분포하고 최대 0.0065까지 발생하였다. 팽창각 56도 모델의 경우 실험결과와 유사한 대각방향으로 분포하고 최대 0.004까지 발생하였다. 따라서 팽창각이 등가소성변형률 분포 형상과 크기에 영향을 주어 항복 후

강도와 최대강도 도달 후 강도저하 양상이 달라진 것으로 판단된다. 이를 통해 낮은 형상비의 전단벽 거동에서 전단파괴를 합리적으로 구현하기 위해서는 팽창각을 56도로 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.3 손상계수

콘크리트 부재는 압축과 인장에 의해 손상과 균열이 발생하고, 제하(unloading)와 재재하(reloading)의 반복에 의해 강성이 저하된다. CDP 재료모델에서는 이러한 강성저하를 손상계수(damage parameter)를 통해 압축 손상과 인장 균열을 간접적으로 반영하고 있다. 손상계수가 파괴형상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압축측에 대해 변형률 증가에 따른 손상계수 변화를 Fig. 9에 도식화한 variable 1 값과 variable 2 값을 적용한 변수해석을 수행하였다. 이 때, 콘크리트 인장강도는 압축강도의 8%, 팽창각은 56도로 고정하였다.

Variable 1 값은 Abaqus Verification Guide(Abaqus, 2020b)에서 제시된 압축거동을 위한 손상계수 값이다. 한편, 일부 연구들(Jankowiak and Łodygowski, 2005)에서는 압축강도 도달 시까지는 손상계수를 0으로 하고, 이후 강도저하 구간에 손상계수를 적용하였다. 이를 variable 2 값으로 정의하였다. 인장거동

Fig. 9 Damage parameter(compressive)

Fig. 10 Force-displacement relation from different effects of damage parameter

Table 5 Comparison of force ratio between test and analysis result

Specimens	P_{max} (kN)	$\frac{P_{FEM}}{P_{Test}}$ (%)			
		at 1mm	at 5mm	at 8mm	at 15mm
Variable 1	1450	112.6	99.1	94.8	90.6
Variable 2	1750	112.7	122.2	115.4	86.1

Fig. 11 Equivalent plastic strain distribution

을 위한 손상계수는 두 모델에 동일하게 Abaqus Verification Guide (Abaqus, 2020b)에서 제시한 값을 적용하였다.

Fig. 10에 하중-변위 관계와 Table 5에 변위별 해석하중과 실험하중을 비교하였다. 손상계수가 전단벽 초기 탄성강성과 초기 소성거동에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 소성거동이 진행되면서 재료 압축강도에 도달하기 전에 손상계수가 적용되어야 실험결과와 유사함을 알 수 있다. 압축강도 도달 전까지 손상계수를 0으로 설정하여 손상을 고려하지 않으면, 실제보다 최대하중이 과다하게 산정됨을 볼 수 있다.

Fig. 11에 손상계수를 달리한 모델의 PEEQ 등가소성변형을 분포를 비교하였다. 최대하중의 차이가 가장 많은 두 모델에 대해 횡변위 6mm일 때의 등가소성변형을 분포를 나타내었다. 두 모델 모두 동일한 팽창각 56도를 적용했고 대각방향으로의 등가소성변형을 분포는 유사하게 나타났다. 이러한 분포가 초기 탄성강성과 초기 소성거동이 동일하게 한 이유로 판단된다. 그러나 등가소성변형률 최대값이 약 0.0008인 붉은 색의

분포를 보면, variable 1 모델은 대각방향으로 넓게 고르게 분포한 반면, variable 2 모델은 대각방향의 양단에 집중되고 중앙부의 소성변형률이 작게 분포하고 있다. 손상계수가 소성변형 정도와 크기에 영향을 미치며, 이로 인해 해석결과의 최대하중이 지나치게 크게 나타날 수 있음을 보여준다. 따라서 손상계수는 압축강도 도달 이전에도 소성구간 초기시점부터 반영하여야 한다.

5. 원자로건물 비선형 동적해석

앞에서 선정한 콘크리트 재료모델을 적용하여 설계초과지진에 대한 원자로건물(RCB)의 비선형거동을 평가하였다. 본 연구에서는 현재 가동 중인 원전 중 한국 표준형 원전인 OPR1000을 대상으로 하였다.

원자로건물은 프리스트레스트 콘크리트 외벽과 철근콘크리트 내부구조물로 이루어져 있다. 본 연구에서는 원자로건물의 외벽과 1차 차폐벽을 Solid 요소로 2차 차폐벽의 경우 Shell 요소를 활용하여 모델링하였다(Fig. 12 참고).

원자로건물의 해석모델에 적용한 콘크리트의 재료특성값으로 압축강도는 37.9MPa, 인장강도는 압축강도의 8%의 값을 적용하였다. 또한 철근은 Grade520으로 각 부재의 해당위치에 #9 ~ #11로 적용하였다. 또한 tendon은 OPR 1000의 시공도면을 참고하여 해당 위치에 배근하였으며 설계초과지진의 시간이력해석 이전에 수평 tendon에 925MPa, 수직 tendon에 1040MPa의 초기 긴장력을 부여하였다.

모델링된 원자로건물에 설계초과지진으로 최대지반가속도 0.4g 수준의 지진파에 해당하는 가속도 시간이력(Fig. 13 참조)을 Z방향으로 가하여 파를 통해 시간이력해석을 수행하였다.

해석 결과 원자로건물 돔 정점부에서의 변위 시간이력곡선과 가속도 시간이력곡선을 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 돔 정점부의 최대변위가 (+)방향 22.5mm와 (-)방향 26.6mm로 산출되었고, 최대가속도는 (+)방향 20.2m/s²와 (-)방향 18.6m/s²로 산출되었다.

Fig. 12 FEM 3D modeling of RCB

Fig. 13 Earthquake acceleration time history(0.4g)

Fig. 14 RCB dome apex displacement time history

Fig. 15 RCB dome apex acceleration time history

Fig. 16 Maximum principal stress and strain

돔 정점부 변위가 (+)방향으로 최대값에 도달하였을 때의 주 인장응력(maximum principal stress)과 주인장소성변형률(maximum principal plastic strain)을 Fig. 16에 나타내었다. 주인장응

력 및 소성변형을 확인한 결과 응력 집중이 발생하는 벽체 하단부에서 소성변형이 국부적으로 발생하는 것으로 나타났다.

6. 결론

이 연구에서는 원자력발전소의 철근콘크리트 전단벽 비선형 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 수립하고, 원자로건물의 비선형 내진성능을 평가하였다. 이를 위해 콘크리트 재료모델의 주요 변수에 대한 효과를 분석하고, 원자력발전소 철근콘크리트 전단벽 상세와 형상비를 반영한 전단거동이 지배적인 기존 실험결과와 비교하였다. 분석 결과, 다음의 결과를 도출하였다.

- 1) 콘크리트 인장강도가 크면 전단벽 대각방향 소성변형이 발생하지 않고, 소성거동에서 지나친 강성과 강도를 나타내었다.
- 2) 팽창각은 전단벽 초기 탄성강성에 영향을 미치지 않으나, 팽창각이 작을수록 소성후 강도가 작고 전단벽 중앙 높이에서 과도한 수평방향 소성변형이 발생하였다.
- 3) 손상계수는 전단벽 대각방향 소성변형의 정도와 크기에 영향을 미쳐 소성후 강도에 크게 영향을 미친다.

따라서 철근콘크리트 전단벽이 전단거동이 지배적인 경우, 콘크리트 재료모델에 인장강도는 압축강도의 8%, 팽창각 56도, 소성구간 초기시점부터의 손상계수를 적용할 때, 합리적인 해석결과를 얻을 수 있다.

제한한 재료모델을 기반으로 원자로건물 전단벽을 상세히 모델링하고, 최대 0.4g 가속도를 가진 설계초과지진을 작용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과, 원자로건물의 돔 정점부 변위가 27mm 이내로 작으며 건물 외벽 하단부에 소성변형이 매우 국부적으로 발생하였다.

이 연구에서 제시한 재료모델 변수를 적용하여 전단거동이 지배적인 원자력발전소 철근콘크리트 전단벽 구조시스템의 비선형 내진성능을 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20193110100020, 해외 내진분석 기술기준을 적용한 표준형원전 설계초과지진 대응 기술개발).

References

- Abaqus** (2020a) Abaqus Analysis User's Guide, Dassault Systems Simulia Corp.
- Abaqus** (2020b) Abaqus Verification Guide, Dassault Systems Simulia Corp.
- American Society of Civil Engineers (ASCE)** (2021) Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, *American Society of Civil Engineers*.
- Committee on the Safety of Nuclear Installation** (1996) Seismic Shear Wall ISP NUPEC's Seismic Ultimate Dynamic Response Test: Comparison Report(OCDE/GD(96)188), Paris, France; Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), NEA/CSNI/R(96)10.
- Jankowiak, T., Łodygowski, T.** (2005) Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, *Found. Civil & Eng.*, 6(1), pp.53~69.
- Kent, D.C., Park, R.** (1971) Flexural Members with Confined Concrete, *J. Struct. Div.*, 97(7), pp.1969~1990.
- Korea Construction Standards Center** (2021) Korea Design Standard: Bending and Compression Design Criteria for Concrete Structure(KDS 14 20 20), The Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Ming, L., Shiping, Y., Wenjie, C.** (2019) Seismic Behaviour of TRC-Strengthened RC Columns under Different Constraint Conditions, *Sci. & Eng. Compos. Mater.*, 26(1), pp.360~378.
- Okamura, H., Maekawa, K., Sicasubramaniyam, S.** (1985) Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element, *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, pp.528~543.
- Yaper, O., Basu, P.K., Nordendale, N.** (2015) Accurate Finite Element Modeling of Pretensioned Prestressed Concrete Beams, *Eng. Struct.*, 101, pp.163~178.
- Yoo, S.W., Yoo, J.S.** (2019) Influence of Various Parameter for Bending/Shear Behavior Analysis of FRP Composite Beam Using Concrete Damaged Plasticity Model, *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, 10(4), pp.1~7.

요 지

강진 시 원자력발전시설의 비선형 응답이 중요하기 때문에 이 시설의 내진성능에 대한 관심이 증가하였다. 이 연구에서는 원자력 발전소 철근콘크리트 전단벽의 유한요소해석을 위한 재료모델의 적절한 변수를 제시하였다: 최대인장강도, 팽창각, 손상계수. 이를 위해 상용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 낮은 형상비를 가진 철근콘크리트 전단벽의 비선형 거동과 전단 파괴모드에 대한 이 주요 변수의 효과에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과에 기반하여 비선형 시간이력해석을 통해 강진 하의 원자로건물의 비선형 응답을 평가하였다.

핵심용어 : 전단벽, 콘크리트 재료모델, 원자력발전시설, 원자로건물, 비선형 유한요소해석