

재료의 열화를 고려한 철근콘크리트 전단벽의 지진 취약도 분석

이명규* · 박장호**†

Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls Considering Material Deterioration

Myung Kue Lee* · Jang Ho Park**†

†Corresponding Author

Jang Ho Park

Tel : +82-31-219-2506

E-mail : jangho@ajou.ac.kr

Received : November 16, 2022

Revised : November 29, 2022

Accepted : December 1, 2022

Abstract : It is necessary to better understand the effect of age-related degradation on the performance of reinforced concrete shear walls in nuclear power plants in order to ensure their structural safety in the event of earthquakes. Therefore, this paper studies seismic fragility of the typical shear wall in nuclear power plants under earthquake excitation. Reinforced concrete shear wall is composed of wall, horizontal and vertical flanges. Due to characteristics of its geometry, it is difficult to predict the ultimate behavior of shear wall under earthquake excitation. In this study, for more realistic numerical simulation, the Latin Hyper-Cube (LHC) simulation technique was used to generate uncertain variables for the material properties of concrete shear walls. The effects of crack, characteristics of inelastic behavior of concrete, and loss of cross section were considered in the nonlinear finite element analysis. The effects of aging-related deterioration were investigated on the performance of reinforced concrete shear walls through analysis of undegraded concrete shear walls and degraded concrete shear walls. The resulting seismic fragility curves present the change of performance of concrete shear wall due to age-related degradation.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : shear wall, seismic fragility, material deterioration, Latin Hyper-Cube method

1. 서론

1970년대 이후 국내에는 다수의 원자력발전소가 건설되어 운영되고 있으며, 오랜 기간 사용된 원전 구조물의 경우 다양한 종류의 열화를 겪는 것으로 보고되고 있다. 원자력발전소에서는 원자로 격납구조물, 보조 건물, 터빈 건물, 취수 구조물 등에서 주요 건설재료로 콘크리트가 사용되고 있으며, 원자력발전소에서 콘크리트 구조물은 열화 리스트에서 높은 빈도를 보이는 것으로 보고되고 있다. Fig. 1은 미국의 원자력발전소 콘크리트 구조물에서의 열화 유형에 따른 발생 건수를 나타낸 것이다¹⁾. 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트 구조물에서의 열화 유형은 주로 균열, 할렬, 재료 손실이다. 철근콘크리트 구조물에 이러한 열화가 발생하게 되면

재료의 특성이 변화될 뿐만 아니라 철근의 부식과 콘크리트의 탈락이 발생하게 되고 이로 인하여 구조물의 성능이 저하되며 구조물의 기대수명도 줄어들게 된다.

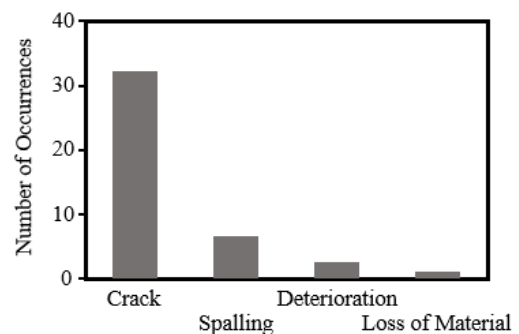


Fig. 1. Types of concrete structure deterioration.

*전주대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Jeonju University)

**아주대학교 건설시스템공학과 교수 (Department of Civil Systems Engineering, Ajou University)

콘크리트 구조물은 적절한 설계와 시공이 이루어진 건설 초기에는 적절한 성능을 가지고 있다. 그러나 경년열화가 진행되면 구조물의 성능 저하와 함께 구조물의 응답 특성도 변하게 된다. 특히 지진 발생시 열화된 구조물의 경우 구조물의 고유진동수, 감쇠 등의 동특성 변화로 인하여 극한강도 등의 저항성능이 감소할 뿐만 아니라 예상하지 못한 파괴모드가 발생하거나 파괴 시발 부위에 변화를 미치게 된다. 따라서 오랜 기간 사용된 원자력발전소의 콘크리트 구조물은 발생 가능한 구조물의 열화를 고려한 구조적 성능을 재평가할 필요가 있다.

철근콘크리트 부재의 열화에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다^{2,4)}. Naus⁵⁾는 염화물이 침투할 경우 대표적인 열화 유형으로 철근의 부식과 콘크리트의 균열 및 탈락을 보고하였다. 미국 Seabrook 원전에서 알칼리-실리카 반응이 보고된 이후 많은 연구들이 열화의 영향에 대해서 분석하고 조사를 수행하였다⁶⁾. Ferche 등⁷⁾은 구조실험을 통하여 일정 수준 이상의 알칼리-실리카 반응 발생 시 격납구조물의 성능이 저하될 수 있음을 보고하였다. 김찬영 등⁸⁾은 비선형 시간이력해석을 통하여 알칼리-실리카 반응을 고려한 원자로 격납구조물의 지진취약도 분석을 수행하였다.

원자력발전소의 원자로 격납구조물, 보조 건물, 터빈 건물, 복합 건물 등 원전에서의 많은 구조물은 충분한 내진성능과 차폐성을 확보하기 위하여 전단벽 구조를 사용하고 있다. 특히 형상비(높이/길이 비)가 1 내외인 전단벽은 격납구조물 이외의 안전 관련 구조물에서 볼 수 있는 전형적인 구조부재이다. 이러한 전단벽은 중요한 내진성능을 가지고 있는 구조부재이며, 종종 원자력발전소의 지진에 대한 확률론적 안전도 평가에서 사용하는 발전소 논리모델에서 가장 중요한 구조부재로 평가되기도 한다⁹⁾. 원전에서 기기나 설비들은 주기적 검사를 통한 수리 및 교체가 이루어지고 있어 시간이 경과하더라도 성능을 일정하게 유지할 수 있는 반면에 원자력발전소에서 전단벽 등의 구조물은 기기와 같이 교체할 수 없어 설계수명동안 열화에 대하여 충분한 내진성능을 확보해야 한다. 본 논문에서는 열화를 고려한 지진하중을 받는 전단벽에 대하여 비선형 수치해석을 통하여 성능평가와 취약도 해석을 수행하였다. Latin Hyper-Cube (LHC) 시뮬레이션 기법을 사용하여 콘크리트 재료의 불확실한 특성을 반영하였고, 균열, 콘크리트의 비탄성 거동 특성, 단면 손실 등의 영향도 고려하였다. 지진 취약도 분석을 통하여 열화에 따른 철근콘크리트 전단벽의 성능저하를 정량적으로 평가하였다.

2. 열화를 고려한 전단벽의 성능평가 방법

열화현상이 발생한 철근콘크리트 부재의 성능평가는 열화된 부재의 성능평가 실험자료의 부족, 열화상태를 반영한 해석 모델링의 어려움, 열화된 철근콘크리트 구조물의 한계상태에서의 극심한 비선형성 등으로 인하여 수치해석에 있어서 상당한 어려움이 있다. 본 논문에서는 경년열화된 철근콘크리트 전단벽의 구조 거동을 합리적으로 분석하고 성능 평가 및 취약도 분석을 정밀하게 수행하기 위해서 다음과 같은 절차로 모델링 및 해석을 수행하였다.

1. 철근콘크리트 구조물의 물성 및 형상에 대한 통계자료를 이용한 철근콘크리트 전단벽의 물성값 결정
2. LHC 기법에 의한 해석대상 구조물의 sampling을 통하여 가상의 철근콘크리트 전단벽 모델 19개 생성
3. 생성된 전단벽 모델 19개를 기반으로 건전한 상태에서의 지진하중을 받는 전단벽에 대한 동적해석 수행
4. 19개 건전한 전단벽의 성능 분포를 대수정규분포로 가정하여 분포의 중앙값(median)을 계산(SD) (주: 통계적으로 독립인 여러 확률변수의 곱으로 전단벽의 성능을 나타내는 경우 중앙극한정리(central limit theorem)에 의해 확률분포는 대수정규분포로 볼 수 있다.)
5. 생성된 전단벽 모델 19개를 기반으로 열화에 따른 콘크리트의 강도 감소 및 철근의 단면 손실을 고려한 열화된 상태에서의 지진하중을 받는 전단벽에 대한 동적해석 수행
6. 19개 열화된 전단벽의 성능 분포를 대수정규분포로 가정하여 분포의 중앙값(median)을 계산(DD)
7. 취약도 분석 및 지진하중을 받는 열화된 부재의 건전한 부재에 대한 성능비(Dynamic Capacity Ratio, $DCR = DD/SD$) 계산

2.1 철근콘크리트 전단벽의 물성 값 결정

철근콘크리트 전단벽의 재료에 대한 물성을 결정하기 위하여 Ellingwood 등의 논문¹⁰⁾에 대한 분석과 국내 원전으로부터 추가된 자료에 기초하여 국내 실정에 적합한 정적하중에 대한 콘크리트 및 철근의 물성값을 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1. Material properties of concrete and steel for static analysis

Material	Property	Mean	COV	SD	CDF
Concrete	Compressive strength	24.97MPa	0.16	3.99	N
	Tensile strength	2.51MPa	0.18	0.45	N
	Initial modulus of elasticity	26.72GPa	0.18	4.80	N
Steel	Yield strength	464.0MPa	0.1	46.4	LN
	Modulus of elasticity	203.9GPa	-	-	-

N = Normal Distribution; LN = Lognormal Distribution

구조부재나 시스템이 동적인 하중을 받는 경우에는 재료의 물성값들은 하중증가속도에 따라 수정되어야 하며, 이에 따라 증가된 동적하중에 대한 콘크리트 및 철근의 물성값을 Table 2와 같이 선정하였다.

Table 2. Material properties of concrete and steel for dynamic analysis

Material	Property	Mean	COV	SD	CDF
Concrete	Compressive strength	30.93MPa	0.16	4.94	N
	Tensile strength	3.33MPa	0.18	0.60	N
	Initial modulus of elasticity	26.96GPa	0.18	4.85	N
Steel	Yield strength	499.2MPa	0.1	49.9	LN
	Modulus of elasticity	203.9GPa	-	-	-

N = Normal Distribution; LN = Lognormal Distribution

2.2 Latin Hyper-Cube 기법에 의한 전단벽 모델 생성

전단벽과 같은 구조물의 조건부 한계상태 확률을 해석적인 식으로 표현하는 것은 이상화된 모델 이외에는 어려운 실정이다. 따라서 구조적 능력의 불확실성은 해석적인 식보다는 반복적인 유한요소해석을 포함한 몬테카를로 과정에 의해 주로 평가되고 있다.

한계상태의 평가를 위한 반복적인 비선형 유한요소 해석은 많은 시간과 비용 소요되기 때문에 불확정성 모델과 취약도를 평가하기 위해 요구되는 시뮬레이션 수는 최소로 유지되어야 한다. LHC 표본추출법은 복잡한 시스템을 포함한 시스템 신뢰성 문제에 매우 유용하게 이용되고 있으며¹¹⁾, LHC sampling에 의해 얻어진 추정치들은 편향되지 않고 추정치들의 표준오차는 동일한 수의 표본에 대하여 다른 방법에 비하여 작다¹²⁾. 본 논문에서는 LHC 표본추출법을 사용하고 Table 2의 동적하중에 대한 재료 물성치를 활용하여 Table 3과 같은 19개 재료 모델을 추출하였다. 4개의 확률변수를 동시에 고려하기 위해서는 모델의 개수가 기하급수적으로 증가하여 물리적으로 다루는데 한계가 있으므로

Table 3. Material properties of undegraded shear wall models

No.	Compressive strength of concrete (MPa)	Tensile strength of concrete (MPa)	Initial modulus of elasticity of concrete (GPa)	Yield strength of steel (MPa)
1	31.8	3.80	23.9	526
2	29.1	2.97	26.4	553
3	30.5	4.48	19.3	479
4	34.8	3.59	28.1	603
5	35.0	3.30	29.8	531
6	32.6	3.70	24.9	495
7	31.1	3.44	27.3	501
8	27.7	2.59	29.2	515
9	33.4	3.12	33.9	459
10	33.2	3.93	27.2	421
11	36.7	3.26	38.3	454
12	37.7	4.23	30.1	481
13	25.4	2.09	31.1	512
14	26.9	2.87	23.0	488
15	28.5	3.50	21.0	574
16	29.4	3.22	25.5	544
17	24.0	2.72	23.5	472
18	39.4	3.99	32.5	427
19	21.0	2.77	16.8	439
mean	31.0	3.34	26.9	499
sd	4.79	0.604	5.21	49.2

해석을 위한 시간 등의 제한을 고려하여 실용적인 개수로 볼 수 있는 19개의 모델을 사용하였다.

2.3 지진하중을 받는 전단벽에 비선형 동적 해석

해석대상 콘크리트 전단벽의 비선형 동적 해석을 위해서 ABAQUS 프로그램을 사용하였다. 콘크리트의 재료모델은 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 콘크리트 소성손상모델(concrete damage plasticity model)을 이용하였으며, 철근의 재료모델은 탄성-완전소성모델(elastic perfect plastic model)을 사용하였다.

일반적으로 콘크리트는 재료 특성상 인장강도가 압축강도의 1/10에 불과하며 인장균열이 발생하게 되면 인장응력은 급격하게 감소하게 된다. 그러나 철근콘크리트구조물에서 철근에 인접한 콘크리트는 철근과의 부착거동으로 인하여 균열이 발생하더라도 콘크리트의 인장응력이 급격하게 감소되지 않는 특징이 있다. 이러한 현상을 고려하기 위하여 철근에 인접한 콘크리트는 RC영역(Reinforced concrete zone)으로 모델링하고, 철근에서 어느 정도의 거리에 있는 콘크리트는 PC영역(Plain concrete zone)으로 모델링하게 되면 철근콘

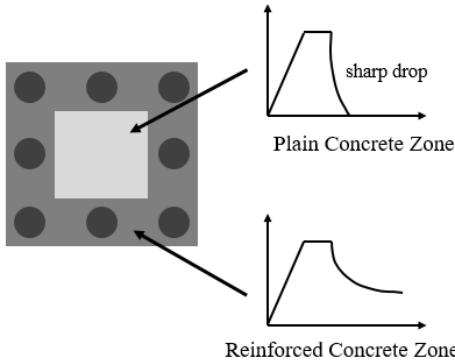


Fig. 2. Concrete modelling using plain concrete zone and reinforced concrete zone.

크리트구조물의 거동을 합리적으로 고려할 수 있으며 Chung 등¹³⁾은 이 방법을 콘크리트 전단벽의 정적 성능 평가에 사용하였다. 본 논문에서도 동일한 콘크리트 모델링 방법을 해석에 적용하였으며 Fig. 2에 개념을 개략적으로 도시하였다. 해석에서는 PC영역에서의 콘크리트의 극한인장변형을 0.001로, RC영역에서는 극한인장변형을 0.002로 가정하여 해석을 수행하였다.

예비해석 결과 구조물의 특성상 플랜지에는 큰 응력이 발생하지는 않았다. 또한 전단면을 비선형 모델로 하여 해석한 경우와 벽체는 비선형 모델로 플랜지는 선형탄성 모델로 하여 해석한 경우 해석결과에는 큰 차이가 없었으며 수렴성에서는 벽체는 비선형 모델로 플랜지는 선형탄성 모델로 하여 해석한 경우가 더 좋은 결과를 보였다. 이에 따라 해석결과에 큰 영향 없이 해석시간을 줄이고 수렴성이 좋은 모델인 벽체는 비선형 모델로 하고 플랜지는 선형탄성 모델로 하여 해석을 수행하였다.

2.4 열화에 따른 콘크리트의 강도 감소 및 철근의 단면 손실량

균열에 관련된 열화문제를 다루기 위해서는 한계균열폭을 정의해야 한다. 내구성한계 측면에서는 0.3 mm에서 0.4 mm가 적절한 한계균열폭이라고 할 수 있으며, 미적인 측면의 사용성 요구조건으로 0.8 mm의 한계균열폭이 적용되기도 한다. 연구자료들에 의하면 철근의 종방향에 따라 발생하는 균열폭은 0.3 mm에서 0.5 mm 범위로 알려져 있으며, 이 수준을 초과하는 균열을 보수하지 않으면 구조물의 사용수명이 상당히 단축되는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서 허용열화기준으로 우리나라 시방서를 비롯한 각국에서 내구성한계상태로 설정한 0.3 mm의 균열폭을 설정하였다.

본 연구에서는 전단벽의 특성을 고려하여 손상부분의 모델링에서 변형율의 영향은 작은 것으로 가정하여

0.3 mm의 균열이 발생한 경우의 콘크리트 압축강도는 원래 강도의 85%로 감소하는 것으로 하였다. 따라서 철근에 인접한 RC영역의 콘크리트 강도는 85%로 감소하는 것으로 가정하였고 심부의 PC영역 콘크리트는 원래 콘크리트 강도를 유지하는 것으로 하였다.

Coronelli 등의 모델링 지침¹⁴⁾에서는 철근의 경우 동일한 항복강도를 가지나 연성이 적어지는 것으로 모델링할 것을 추천하고 있다. 그러나 본 논문에서는 철근의 항복변형 및 파괴시의 변형값이 콘크리트의 인장변형 보다 훨씬 크다는 것과 부식이 전단면 부식에 의해 발생한다는 것을 고려하여 단면적만 20% 감소되는 것으로 모델링하였다.

3. 열화를 고려한 전단벽의 지진 취약도 평가

앞에서 설명한 해석방법들을 적용하여 지진하중을 받는 콘크리트 전단벽을 ABAQUS 프로그램을 사용하여 비선형 동적해석을 수행하고 열화가 철근콘크리트 전단벽의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

3.1 해석모델

원자력발전소에서 격납구조물 이외의 안전 관련 구조물에는 지진에 대한 우수한 저항능력을 가지는 형상비가 1 내외인 철근콘크리트 전단벽이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 Fig. 3과 같이 형상비가 1인 전단벽을 대상 구조물로 설정하였다. 해석모델은 그림과 같이 높이 6 m, 폭 6 m, 두께 0.6 m이며, 16 mm 이형철근이 수직, 수평방향으로 각각 20 cm 간격으로 배근되어 있는 철근비가 0.003인 철근콘크리트 전단벽이다¹³⁾. 재료의 물성은 앞에서 생성한 Table 3의 값을 가지는 것으로 하였으며, 별도의 감쇠는 고려하지 않았다.

전단벽은 상부 플랜지, 하부 플랜지 및 측면 플랜지에 의하여 구속되어 있고, 경계조건으로 하부 플랜지 하단이 고정된 것으로 가정하였다. 상부에서 작용하는 상재하중은 전단벽과 좌우 측면의 수직방향 플랜지

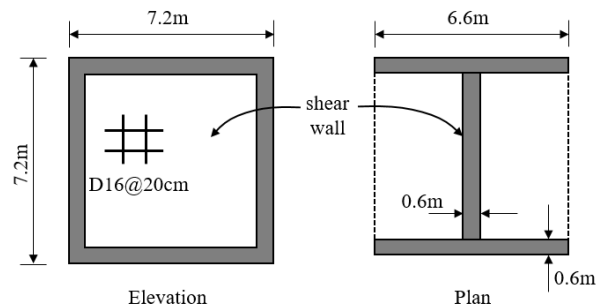


Fig. 3. Configuration of concrete shear wall.

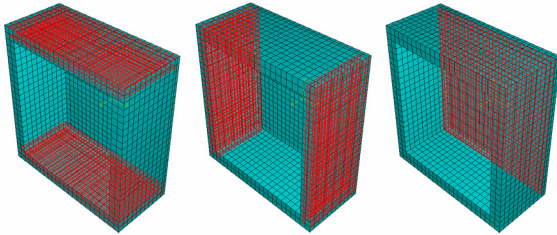


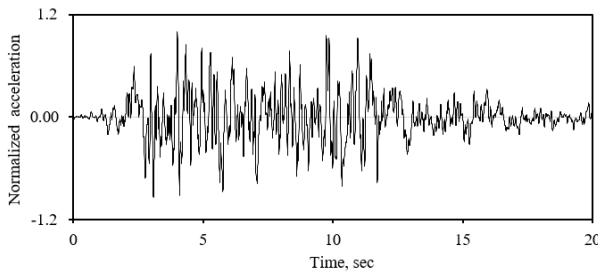
Fig. 4. FEM model for concrete shear wall.

상면에 작용하는 것으로 모델링하였다. 상부구조물로부터 받는 상재하중에 의한 축방향 하중을 2.07 MPa로 하였다.

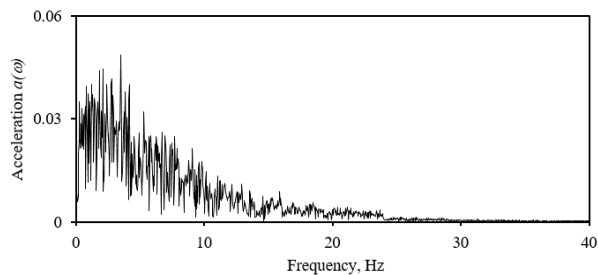
전단벽의 유한요소모델은 구조물의 대칭성을 고려하여 전단벽의 1/2 모델을 사용하였다. Fig. 4는 플랜지와 전단벽의 철근을 포함한 유한요소모델을 도시한 것이다.

해석에 사용한 입력지진가속도 시간이력은 울진 원자력발전소 설계에 사용된 지반가속도 시간이력으로 Fig. 5와 같다. 지진하중에 대한 동적해석에는 implicit dynamic analysis 방법을 사용하였다. 해석에 사용된 시간간격은 동적해석의 안정한계로 알려진 고유주기의 1/10을 기준으로 하였다. 주어진 전단벽의 고유진동수는 30.42 Hz으로 다음의 식에 의해 시간간격은 0.003초로 설정하였다.

$$\Delta T = \frac{T}{10} = \frac{1/30.42\text{Hz}}{10} \approx 0.003\text{sec} \quad (1)$$



(a) Time history of ground acceleration



(b) Fourier transform of ground acceleration

Fig. 5. Normalized input ground acceleration.

3.2 콘크리트 전단벽의 비선형 해석결과

콘크리트 전단벽에 대하여 입력지진가속도의 크기를 높여가며 비선형 동적해석을 수행하고 해의 수렴에 성공하는 최대의 지진가속도를 한계상태로 설정하였다. Fig. 6은 건전한 전단벽 해석모델 1번에 대한 동적해석의 결과로 지반가속도의 크기에 따른 단면 내의 인장손상형태를 나타낸 것이다. 단면분할 모델을 사용하고 해가 수렴하지 못한 경우의 철근 응력이력을 살펴보면 수평철근의 응력이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이는 전단벽 구조물 내의 균열 진전으로 인해 비선형 영역이 확대되는 것으로 볼 수 있으며 이러한 현상에 의해 구조물이 한계상태에 이르는 파괴양상을 보인다고 할 수 있다.

건전한 전단벽 모델들과 열화가 진행된 전단벽 모델들에 대하여 비선형 동적해석을 수행하고 이로부터 각각의 모델에서 해가 수렴하는 최대 지진가속도를 구하였으며, 이를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. Comparison of accelerations at failure of undegraded and degraded shear walls according model number

No.	Undegraded shear wall	Degraded shear wall
1	3.3 g	2.8 g
2	2.5 g	2.2 g
3	3.2 g	3.1 g
4	3.2 g	2.7 g
5	2.7 g	2.5 g
6	2.8 g	2.4 g
7	2.8 g	2.5 g
8	2.4 g	2.2 g
9	2.9 g	2.6 g
10	3.1 g	2.7 g
11	3.2 g	2.8 g
12	4.0 g	3.5 g
13	2.2 g	2.0 g
14	1.7 g	1.5 g
15	2.1 g	1.8 g
16	2.6 g	2.3 g
17	2.2 g	2.0 g
18	3.4 g	3.4 g
19	1.4 g	1.2 g
mean	2.72 g	2.43 g
sd	0.632	0.590
cov	0.232	0.243

3.3 취약도 분석

취약도 개념은 원자력 산업에서 널리 사용되어 왔다.

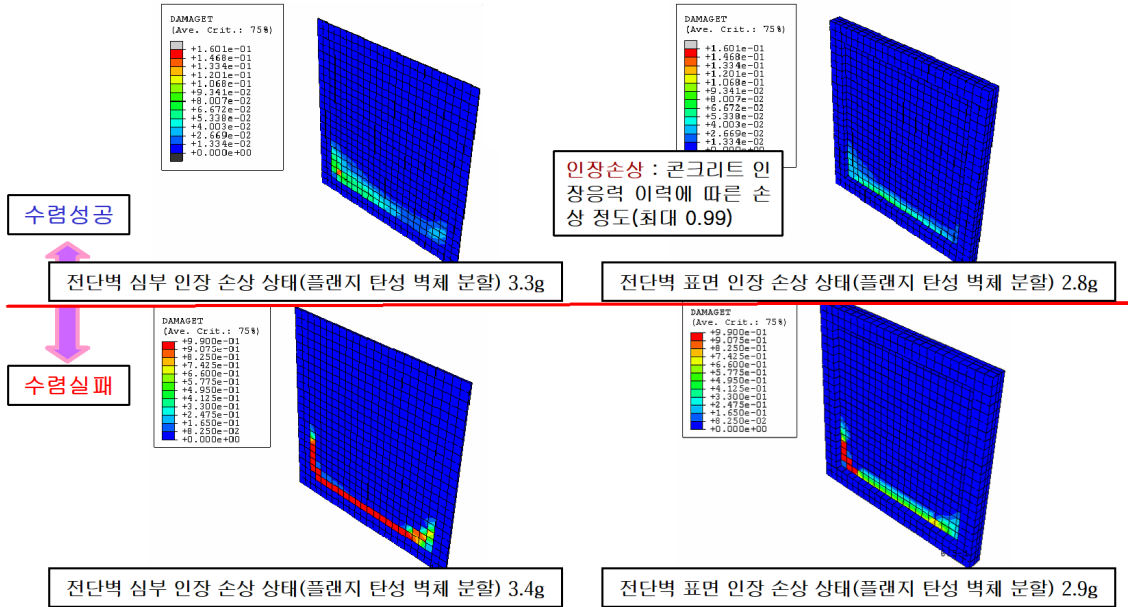


Fig. 6. Determination of ultimate acceleration for undegraded model 1.

그 중에 원자력발전소의 안전계통의 확률론적 지진 안전도나 여유도의 평가에 사용된 바 있으며^{15,16)}, 지진여유도 연구에서 기준변수는 유효 최대지반가속도 혹은 구조물 고유진동수에서의 스펙트럼 가속도를 사용한다.

취약도 곡선은 일반적으로 다양한 하중 수준, 특히 지진 지반 운동으로 인한 구조물의 파괴 가능성을 표현하기 위해 사용된다. 즉, 취약도 분석은 확률론적 관점에서 특정 하중을 견딜 수 있는 구조 구성 요소의 성능을 평가한다.

구조물의 취약도는 일반적으로 대수정규 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)에 의해 표현된다. 대수정규 누적확률분포는 다음과 같이 구해진다.

$$F_R(x) = \Phi[\ln(x/m_R)/\beta_R] \quad (2)$$

여기서, $F_R(x)$ 는 작용하중이 x 인 경우의 파괴확률을 의미하며, $\Phi[]$ 는 표준 정규확률의 누적값(표준정규분포의 CDF)을, m_R 은 성능의 중앙값을, β_R 은 대수정규 분포의 표준편차를 의미한다.

지진하중이 작용하는 건전한 전단벽 모델들과 열화가 진행된 전단벽 모델들에 대한 비선형 동적해석으로부터 Figs. 7~8과 같이 건전한 상태와 열화된 상태의 전단벽에 대한 취약도곡선을 구하기 위한 통계모수를 결정하였다. 이로부터 Fig. 9와 같이 건전한 전단벽과 열화된 전단벽에 대한 취약도곡선을 구하였다. 여기서 가로축은 구조물에 가해지는 지진가속도의 크기를 나

타내고, 세로축은 주어진 지진가속도에서의 조건부 파괴확률을 나타낸다.

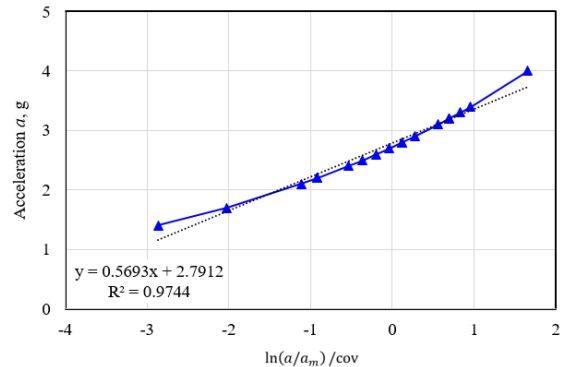


Fig. 7. Determination of fragility parameters for undegraded shear wall.

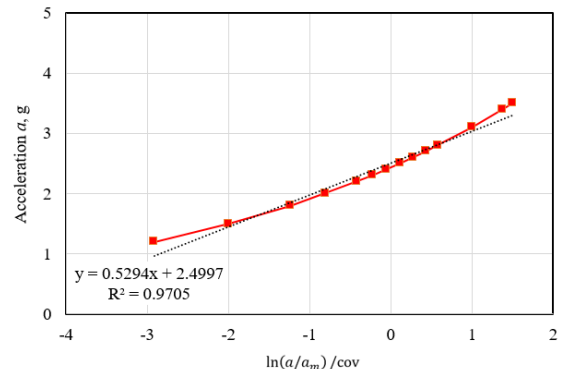


Fig. 8. Determination of fragility parameters for degraded shear wall.

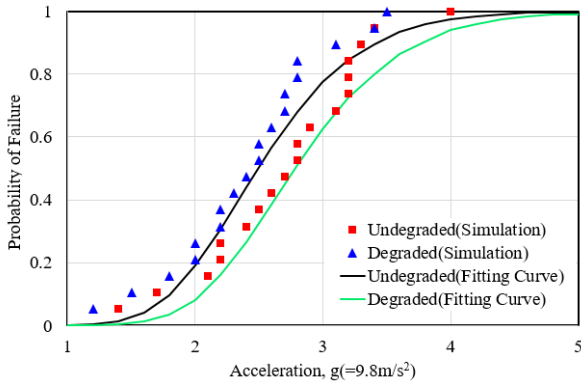


Fig. 9. Seismic fragility curves for undegraded shear wall and degraded shear wall.

취약도해석 결과를 살펴보면 19개 건전한 전단벽의 성능 분포를 대수정규분포로 가정하여 조건부 파괴확률 0.5인 분포의 중앙값(median)은 2.8 g이며(SD), 19개 열화된 전단벽의 성능 분포에서 조건부 파괴확률 0.5인 분포의 중앙값(median)은 2.5 g로 나타났다(DD). 따라서 본 논문에서 고려한 지진하중을 받는 균열폭이 0.3 mm인 열화된 전단벽의 건전한 전단벽에 대한 성능비(Dynamic Capacity Ratio, $DCR = DD/SD$)는 89.3%로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 지진하중을 받는 전단벽에서 콘크리트와 철근이 열화되면 부재성능이 일정 부분 감소되는 것을 확인하였다.

4. 결론

염화물이 침투한 철근콘크리트 전단벽에서는 시간이 경과함에 따라 철근의 부식, 콘크리트 균열, 할렬 및 탈락 등과 같은 열화가 발생한다. 이러한 열화가 진행되면 구조물의 성능 저하와 함께 구조물의 응답 특성도 변하게 된다. 특히 지진 발생시 열화된 구조물의 경우 구조물의 고유진동수, 감쇠 등의 동특성 변화로 인하여 극한강도 등의 저항성능 감소 뿐만 아니라 예상하지 못한 파괴모드의 발생이나 초기 파괴 발생위치가 심부에서 표면으로 변하는 등 영향을 미치게 된다. 따라서 오랜 기간 사용된 원자력발전소의 콘크리트 구조물은 발생 가능한 구조물의 열화를 고려한 구조적 성능에 대한 합리적인 재평가가 필요하다.

본 논문에서는 원자력발전소의 격납구조물 이외의 안전 관련 구조물에서 충분한 내진성능과 차폐성을 확보하기 위하여 사용되는 전형적인 구조부재인 형상비가 1인 전단벽에 대하여 건전한 상태와 열화된 상태(시방서상에 규정된 0.3 mm 허용균열)에 대하여 지진하중을 받는 경우에 대한 구조물의 동적 성능을 분석

하였다. 이로부터 균열폭이 0.3 mm인 열화된 전단벽의 성능이 건전한 전단벽에 비하여 10.7% 저하됨을 확인하였다. 이를 통하여 지진하중을 받는 전단벽에서 콘크리트와 철근이 열화되면 부재의 성능이 일정 부분 감소되는 것을 확인하였으며, 열화에 따른 표면에서의 파괴 양상이 구조물의 저항성능 저하에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 분석할 수 있다. 추가적으로 균열의 존재나 철근단면의 손실 이외에도 균열의 크기, 철근비, 철근의 탄성계수 변화, 철근의 부착능력 변화 등을 포함한 다양한 열화와 관련된 인자에 따른 전단벽의 부재 성능 감소에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 원자력발전소 구조물에서 발생하는 경년열화에 따른 구조물의 보수 및 보강을 합리적으로 판단하기 위해서도 구조물의 경년열화에 의한 정밀한 해석과 성능저하에 대한 평가가 적절히 이루어져야 할 것이다.

References

- 1) M. Kim, M. Lee and Y. Chung, "Fragility Analysis of Deteriorated Reinforced Concrete Beam in NPP Facilities", Proceeding of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 2004.
- 2) J. G. Cabrera, "Deterioration of Concrete due to Reinforcement Steel Corrosion", Cement & Concrete Composites, Vol. 18, pp. 47-59, 1996.
- 3) Y. Auyeung, P. Balaguru and L. Chung, "Bond Behavior of Corroded Reinforcement Bars", ACI Materials Journal, Vol. 97, pp. 214-220, 2000.
- 4) Y. Chae, I. Choi and I. Min, "An Experimental Study on Steel Bar Corrosion of Reinforced Concrete Structure", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 6, pp. 29-35, 2013.
- 5) D. J. Naus, "Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures - A Review of Pertinent Factors", NUREG/CR-6927 by Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- 6) V. E. Saouma and M. A. Hariri-Ardebili, "A Proposed Aging Management Program for Alkali Silica Reactions in a Nuclear Power Plant", Nuclear Engineering and Design, Vol. 277, pp. 248-264, 2014.
- 7) A. C. Ferche, B. Gautam, F. Habibi, D. K. Panesar, S. A. Sheikh, F. J. Vecchio and N. Orbovic, "Material, Structural and Modelling Aspects of Alkali Aggregate Reaction in Concrete", Nuclear Engineering and Design, Vol. 351, pp. 87-93, 2019.

- 8) C. Kim and M. Shin, "Seismic Fragility Analysis on Nuclear Containment Structure considering the Material Degradation", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 34, No. 3, pp. 291-298, 2022.
- 9) B. Ellingwood, R. Song and JHU, "Impact of Structural Aging on Seismic Risk Assessment of Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Plants", NUREG/CR-6425 by The John Hopkins University / Oak Ridge National Laboratory, 1996.
- 10) B. Ellingwood and H. Hwang, "Probabilistic Descriptions of Resistance of Safety-related Structures in Nuclear Plants", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 88, Issue 2, pp. 169-178, 1985.
- 11) R. L. Iman and W. J. Conover, "A Distribution Free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables", *Communications in Statistics, Part B-Simulation and Computations*, Vol. 11, pp. 311-333, 1982.
- 12) E. J. Pebesma and G. B. M. Heuvelink, "Latin Hypercube Sampling of Gaussian Random Fields", *Technometrics*, Vol. 41, No. 4, pp. 303-312, 1999.
- 13) Y. Chung and M. Lee, "Ultimate Load Analysis of Degraded Reinforced Concrete Shear Walls", *Transactions of SMiRT 19*, August 2007.
- 14) D. Coronelli and P. G. Gambarova, "Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams : Modeling Guidelines", *J. Struct. Eng.*, Vol. 130, No. 8, 2004.
- 15) R. J. Budnitz, P. J. Amico, C. A. Cornell, W. J. Hall, J. W. Reed, R. P. Kennedy and M. Shinozuka, "An Approach to the Qualification of Seismic Margins in Nuclear Power Plants", NUREG/CR-4334 by Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- 16) J. H. Park, J. B. Lee and Y. H. Choi, "Analysis of Failure Probabilities of Pipes in Nuclear Power Plants due to Stress Corrosion Cracking", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 26, No. 6, pp. 6-12, 2011.