민감도해석을 이용한 철근콘크리트 전단벽 열화변수의 지진응답 영향

Effect of Aging Parameters on Seismic Response of RC Shear Wall by Sensitivity Analysis

박 준 희* • 전 영 선** • 최 인 길***
Park, Junhee • Choun, Young-Sun • Choi, In-Kil

요 약

철근콘크리트 구조물은 타설 후 시간이 경과함에 따라 물리적인 요인과 화학적인 요인으로 인하여 열화가 발생한다. 열화를 고려한 구조해석에서 모든 열화 관련 변수를 고려하는 것은 비효율적이다. 따라서 구조물의 거동과 밀접한 관련이 있는 중요열화변수를 정의하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 철근콘크리트 전단벽의 경년열화 해석시 중요변수를 고려하기 위하여 민감도해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 재료의 경화와 관련한 변수들이 열화와 관련한 변수들보다 지진응답이 민감하게 나타났다. 해석모델의 낮은 철근비로 인하여 콘크리트의 탈락에 의한 지진응답의 변화보다 철근의 단면손실에 의한 지진응답의 변화가 크게 나타났다. 만약 원전과 같이 철근비가 높은 전단벽에서는 철근의 단면손실도 지진응답에 대한 중요변수가 될 수 있을 것으로 사료된다.

keywords : 경년열화, 콘크리트의 경화, 민감도해석, 일계이차모멘트법(FOSM)

1. 서 론

구조물은 다양한 원인(염화물의 침투, 화재, 골재확장 등)에 의하여 열화가 발생한다. 해양과 근접한 원전에서 대부분의 열화는 콘크리트에 침투된 염화물같이 자연현상에 의하여 발생한다. 염화물의 함유량이 많을 경우 철근을 부식시키고 철근의 부식에 의한 콘크리트 내부응력의 증가는 콘크리트의 균열을 초래할 수 있다. 이와 같은 재료의 열화는 구조물의 거동과 관련이 있다. 지진해석의 관점에서 보면 열화는 구조물의 동특성, 응답, 저항성능, 파괴모드, 초기파괴위치에 영향을 미친다.

경년열화를 고려한 구조물의 거동을 분석하기 위하여 모든 열화변수를 사용하는 것은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 경년열화를 고려한 효율적인 구조해석을 위하여 열화와 관련된 중요변수를 정의하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 지진저항력과 차폐성이 우수하여 원전에서 많이 적용되고 있는 전단벽을 예제모델로 하여 열화의 정도에 따른 구조물의 지진응답을 분석하였다. 지진응답에 대한 확률적 평가는 일계이차모멘트법을 이용하였으며 시간의 경과에 따른 중요변수를 확인하기 위하여 전단벽의 사용기간을 증가시키면서 지진응답에 대한 변수들의 민감도해석을 수행하였다.

* 정회원 • 한국원자력연구원 종합안전평가부 박사후연구원 jhpark78@kaeri.re.kr
** 한국원자력연구원 종합안전평가부 책임기술원
*** 한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원

2. 해석모델 및 변수

2.1 해석모델

원전과 같이 중요구조물에서 지진에 대한 우수한 저항능력을 고려하여 형상비(aspect ratio)가 2이하의 철근콘크리트 전단벽이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 원전의 철근콘크리트 전단벽과 같이 형상비가 작은 전단벽을 예제모델로 설정하였다. 해석모델은 그림 1과 같은 높이 24', 폭 24', 두께 2'의 형상비가 "1"이며, 철근은 수직과 수평방향으로 #5@8.5'의 간격으로 배치된 철근비가 0.003인 철근콘크리트 전단벽이다. 재료의 비선형을 고려하기 위하여 콘크리트의 응력-변형률관계는 Mander모델을 사용하였으며, 철근은 이선형으로 모델링하였다. 지반의 경계조건은 완전고정으로 가정하였다. 전단벽의 비선형해석을 수행하기 위하여 SAP2000에 포함되어 있는 적층쉘요소(layered shell element)를 사용하여 전단벽을 모델링하였다.

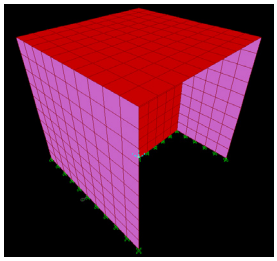
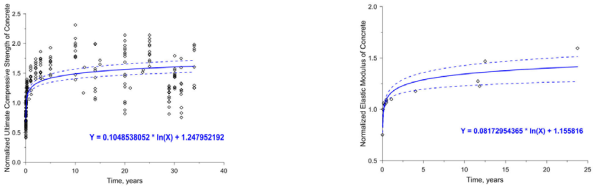


그림 1. 해석모델



(a) 정규화된 압축강도 (b) 정규화된 탄성계수

그림 2. 시간의 경과에 따른 콘크리트의 특성

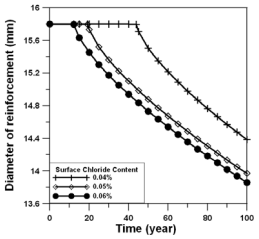


그림 3. 철근의 단면손실

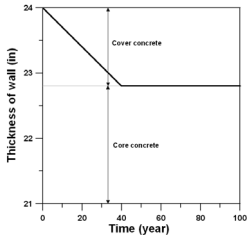


그림 4. 벽체의 탈락

2.2 변수특성

시간이 경과함에 따라 전단벽은 열화와 콘크리트의 경화현상이 발생한다. 경년열화를 고려한 전단벽의 현실적인 구조해석을 수행하기 위하여 본 연구에서는 두 가지 현상을 함께 고려하였다. 콘크리트의 경화현상을 고려하기 위하여 시간에 따른 발전소의 콘크리트특성을 분석한 Oland 등(2009)에 의하여 조사된 자료를 이용하였다(그림 2). 그림 2에서 나타나듯이 콘크리트의 초기강도와 탄성계수는 타설 후 5년까지 약 50%와 약 20%씩 증가하며 이후의 증가폭은 작게 나타났다. 전단벽의 열화를 고려하기 위하여 철근의 항복강도, 철근의 단면적, 콘크리트의 두께를 열화변수로 설정하고 기존의 논문과 가정을 통하여 변수들을 시간에 관한 함수로 표현하였다. 전영선 등(2010)이 제시한 염화물의 함유량과 철근의 관계를 이용하여 그림 3과 같은 관계를 얻었으며, 본 연구에서는 표면에서의 염화물 함유량을 0.06%로 가정하였다. 철근의 부식으로 인한 콘크리트의 한쪽벽체(외부와 접한 면)가 0.03in/year씩 감소하고 탈락된 벽체가 코어콘크리트에 도달시 철근의 구속효과로 인하여 더 이상 벽체에서 단면의 감소가 발생하지 않는 것으로 가정하였다(그림 4). 철근의 단면 손실에 의한 철근의 항복강도에 변화는 Du(2001)가 제시한 식을 이용하여 산정하였다. 변수들의 변동계수는 문헌(Lee et. al., 2006; Sobani et. al., 2007)을 통하여 표 1과 같이 가정하였다.

표 1. 시간의 경과에 따른 변수의 특성

해석변수	평균값					변동계수(%)
	0년	20년	40년	60년	100년	
콘크리트의 압축강도(ksi)	3.55	5.55	5.80	5.95	6.14	16
콘크리트의 탄성계수(ksi)	3800	5322	5537	5663	5822	8
철근의 항복강도(ksi)	66	63.8	60.7	58.1	53.9	9
철근의 탄성계수(ksi)	29000	29000	29000	29000	29000	3.3
철근의 단면적(in2)	0.3	0.29	0.27	0.25	0.23	1.6
벽체의 두께(in)	24	23.4	22.8	22.8	22.8	1

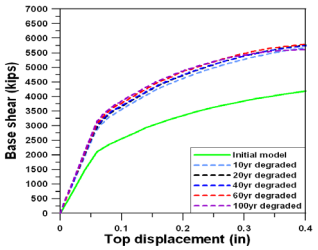


그림 5 해석모델의 힘-변위 관계

표 2. 해석모델의 고유진동수

시간(년)	고유진동수 (Hz)
0	10.67
10	12.29
20	12.49
40	12.63
60	12.76
100	12.92

3. 민감도해석

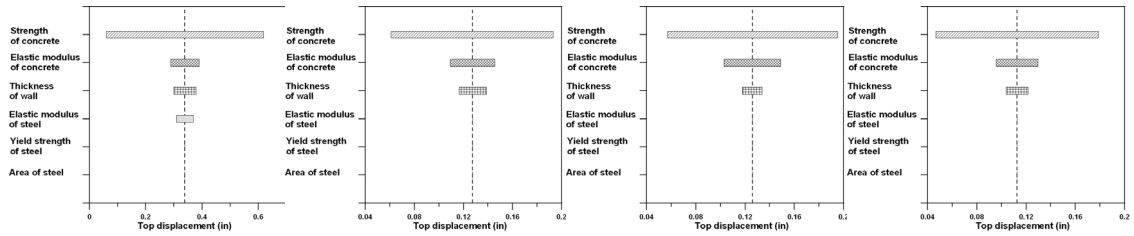
3.1. 민감도해석방법

지진응답에 대한 열화변수들의 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 일계이차모멘트법을 적용한 민감도 해석을 수행하였다. 일계이차모멘트법을 이용하면 지진하중에 대한 응답의 평균과 표준편차를 손쉽게 구할 수 있다. 각각의 해석변수들에 대한 응답의 평균(μ)과 표준편차(σ)를 산정하여 응답의 변동폭($\mu \pm 2\sigma$)이 큰 변수에서 작은 변수 순으로 나타내면 그림 6과 같은 다이어그램을 얻을 수 있다. 전단벽에 부착된 기기들의 기능적 파괴를 기준으로 하여 한계상태를 정의할 때 전단벽의 변형이 손상지표로 사용된다. 본 연구에서는 Braverman 등(2001)의 연구결과를 바탕으로 항복변위의 4배를 한계상태로 정의하였다. 초기모델이 한계상태에 도달할 때 하중을 기준으로 시간의 경과에 따른 변수들의 민감도를 분석하였다.

3.2. 민감도분석 결과

구조물의 열화와 콘크리트의 경화현상은 철근콘크리트 구조물의 사용기간이 증가함에 따라 발생한다. 시간이 경과함에 따라 적용된 단면감소율이 경화현상에 의한 강도와 강성의 증가율보다 작기 때문에 표 2와 그림 5에서 나타나듯이 고유진동수와 초기강성이 증가하는 것으로 나타났다.

콘크리트의 경화현상이 열화현상보다 구조물의 거동을 지배하는 것은 해석변수들의 민감도분석결과에서도 나타났다. 그림 6과 같이 전단벽의 수명이 40년에 도달시 전단벽의 평균변위(세로점선)와 변동폭이 초기상태보다 각각 약 63%, 약 75%로 감소하는 것을 알 수 있었다. 민감도분석에 의하면 그림 6과 같이 콘크리트의 압축강도, 콘크리트의 탄성계수, 벽체의 두께 그리고 철근의 탄성계수가 횡변위에 대한 영향변수로 나타났지만 철근의 항복강도와 철근의 단면적은 지진응답에 영향이 없는 것으로 나타났다. 전단벽의 횡변위가 증가할수록 콘크리트에서 균열이 발생하고 이후 전단벽은 철근에 의하여 횡력을 저항하게 된다. 따라서 비선형변형이 많이 발생한 초기모델의 경우 철근의 탄성계수도 횡변위에 영향을 주는 것으로 나타났다. 초기모델은 횡력에 대하여 비선형변형이 많이 발생하기 때문에 지진응답의 변동폭이 다른 모델보다 크게 나타났다.



(a) 초기 모델 (b) 20년 (c) 40년 (d) 100년

그림 6. 해석모델의 토네이도 다이어그램

4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 전단벽이 경년열화될 경우 열화변수들의 지진응답에 대한 영향을 민감도해석을 통하여 분석하였다. 전단벽의 수명이 증가함에 따라 전단벽의 거동은 경화현상에 지배되므로 콘크리트의 압축강도, 탄성계수가 지진하중에 대하여 가장 민감한 변수로 나타났다. 본 연구의 결과에 의하면 콘크리트의 경화는 구조물의 경년열화를 고려한 지진해석에서 중요변수이므로 고려되어야한다. 또한 열화에 의한 재료의 손상이 국부적으로 집중되면 단면손실이 해석모델보다 클 수 있으므로 열화변수는 콘크리트의 경화와 관련한 변수보다 지진응답에 민감하게 반응할 수 있을 것으로 사료된다. 원전의 격납건물과 같이 철근비가 높은 구조물의 경우 철근의 단면손실도 지진응답에 중요변수로 나타날 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 가능케한 교육과학기술부에 감사드립니다.

참고문헌

Choun Y.S. and Choi, I.K. (2010) Probabilistic Models for Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in NPP Plant Concrete Structures, Korea Nuclear Society spring meeting.

Braverman, J.I., Miller, C.A., Ellingwood, B.R, Naus, D. J. Hofmayer, C.H., Shteyngart, S., and Bezler, P. (2001) Probability Based Evaluation of Degraded Reinforced Components in Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6715, Brookhaven National Laboratory, April, 2001.

Du, Y. (2001) Effect of Reinforcement Corrosion on Structural Concrete Ductility, *PhD thesis*, University of Birmingham, UK.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1984) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering. ASCE 114(3), pp.1804-1826.

Lee, T.H. and Mosalam, K.M., (2006) Probabilistic Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Structural Components and Systems, PEER Report 2006/04.

Sobhani, J., and Ramezanianpour, A.A., (2007) Chloride-induced Corrosion of RC Structures, AJCE, 8(5), pp. 531-547.

Oland, C.B., Naus, D.J., (2009) Structural Materials Handbooks, Oak Ridge National Laboratory.