



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년08월25일
(11) 등록번호 10-1547156
(24) 등록일자 2015년08월19일

- | | |
|--|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 19/00 (2011.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2014-0065249</p> <p>(22) 출원일자 2014년05월29일
심사청구일자 2014년05월29일</p> <p>(56) 선행기술조사문헌
JP2009300312 A
김민규 외 3인, '면진장치를 설치한 회전기기의 지진취약도 개선효과 분석', 한국지진공학회논문집 제11권 제6호 통권 제58호, 2007.12, pp.69-78
JP2011053069 A
임승현 외 3인, '지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 지진격리시스템이 적용된 원전 격납건물의 지진 취약도 평가', 한국지진공학회논문집 17(2), 2013.03, pp.53-59</p> | <p>(73) 특허권자
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)</p> <p>(72) 발명자
정형조
대전광역시 유성구 대학로 291 (구성동, 한국과학기술원)
임승현
대전광역시 유성구 대학로 291 (구성동, 한국과학기술원)</p> <p>(74) 대리인
황이남</p> |
|--|---|

전체 청구항 수 : 총 5 항

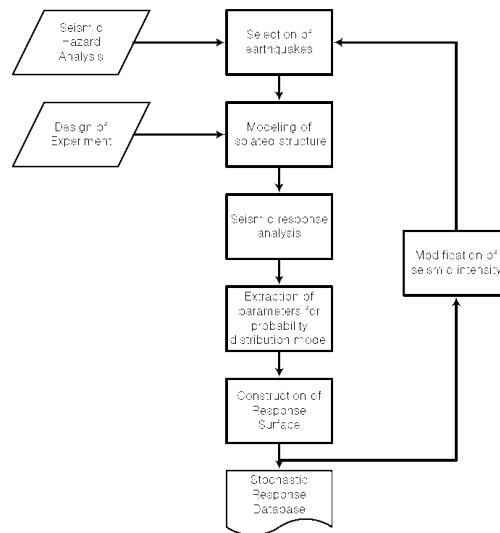
심사관 : 구대성

(54) 발명의 명칭 **면진구조물의 지진응답분포 추정방법**

(57) 요약

본 발명은 면진시스템이 적용된 구조물의 지진응답을 단순화된 방식으로 예측하고 몬트 카를로 시뮬레이션의 비용을 줄이고 면진시스템이 적용된 구조물의 내진성능 평가를 효율적으로 수행할 수 있는 면진구조물의 지진응답분포 추정방법에 관한 것이다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415125946

부처명 지식경제부

연구관리전문기관 한국에너지기술평가원

연구사업명 원자력융합원천기술개발

연구과제명 원전구조용 면진영향설비의 성능검증기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 한국원자력연구원

연구기간 2012.07.01 ~ 2013.06.30

특허청구의 범위

청구항 1

응답표면으로 구성된 확률응답 데이터베이스를 구축하는 단계와, 상기 응답표면으로부터 지진의 강도 및 면진구조물에 관련된 입력변수에 대응되는 면진구조물의 최대지진응답분포를 구하는 단계를 포함하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법에 있어서,

상기 확률응답 데이터베이스를 구축하는 단계는,

확률응답 데이터베이스에서 사용할 입력지진의 강도를 나타내는 변수를 선정하는 단계;

면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계;

면진구조물의 모델을 생성하는 단계;

면진구조물의 파괴기준을 선정한 후 이에 필요한 출력 변수를 결정하는 단계;

선정한 입력지진으로부터 면진구조물 모델에 대한 지진응답해석을 수행하는 단계;

면진구조물의 최대응답분포를 적합성 검토를 통해 확률분포모형을 선정하는 단계;

선정된 확률분포모형에서 지진응답해석 결과로부터 확률분포모형의 모양을 결정하는 파라미터를 추출하는 단계; 및

추출된 확률분포모형의 파라미터들로부터 회귀분석을 통해서 반응표면을 구축하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계에서 얻어지는 변수는, PGA(peak ground acceleration), SA (spectral acceleration), SD (spectral displacement), PGV (peak ground velocity), 및 PGD (peak ground displacement)을 포함하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계에서 얻어지는 파라미터는, 질량(Mass(M)), 회전반경(Radius of Gyration(R_m)), 질량중심(Center of Mass (CM)), 강성(Stiffness(K)), 배치반경(Radius of Disposition(R_k)), 및 강심(剛心,Center of Rigidity(CR))을 포함하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계 후에 파라미터의 범위를 결정하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 면진구조물의 모델을 생성하는 단계에서, 상기 면진구조물의 모델은 실험계획법을 이용하여 생성하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 면진구조물의 지진응답분포 추정방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 면진시스템이 적용된 구조물의 지진응답을 단순화된 방식으로 예측하고 몬트 카를로 시뮬레이션의 비용을 줄이고 면진시스템이 적용된 구조물의 내진성능 평가를 효율적으로 수행할 수 있는 면진구조물의 지진응답분포 추정방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 지진으로부터 교량이나 건물과 같은 대형 구조물을 보호하기 위해 일반적으로 가장 많이 활용 되고 있는 것은 면진시스템이다. 면진시스템은 구조물과 지반을 격리시킴으로써 구조물의 고유주기를 길게 하고 이로 인해 구조물의 진동을 저감하여 내진성능을 향상 시키는 시스템이다. 구조물에 작용하는 지진력을 감소시키기 위하여 적용하는 면진시스템은 지진력을 감소시키는데 크게 기여하지만, 구조물에 새로운 시스템이 추가되는 것이므로 구조물의 내진성능평가는 면진시스템에 맞게 재평가 되어야 한다.

[0003] 구조물의 내진성능평가를 하는 방법에는 결정론적 방법과 확률론적 방법이 있다. 결정론적 내진성능 평가방법은 구조물의 하중 또는 구조물의 파라미터를 설계값 또는 기대값을 이용하여 수행한 내진 해석 결과를 바탕으로 이루어진다. 그러나, 모든 측면에서 불확실성은 존재하며, 위의 설계값 또는 기대값 또한 실제값과 다를 수 있다. 지진에 의한 구조물의 응답의 불확실성은 지진 입력과 구조물에 의한 것이라 할 수 있다. 향후 지진 또는 지진의 특성을 정확히 예측하는 것은 불가능한 일이다. 구조물에 의한 불확실성은 시공재료 특성 자체가 불확실성을 야기 시킬 수 있으며 초기 설계와 다른 시공에 의해 불확실성이 발생할 수도 있다. 또한 구조물 모델링에 의해서도 에러가 발생하여 불확실성이 증가 될 수 있다. 수치해석을 위한 구조물의 모델은 실제 구조물의 특성 및 거동을 정확하게 나타낼 수 없다. 이러한 불확실성은 정확하고 세밀한 구조물의 모델링, 구조물 특성의 보정 및 실험을 통하여 줄일 수 있다. 결정론적 지진 응답 해석 방법에 의한 방법은 특정 구조물의 특정 지진에 대한 결과를 알려주며, 어떤 경우에는 잘못된 평가결과를 유도할 수 있다.

[0004] 반면에 확률론적 지진 응답 해석에 의한 방법은 구조물과 입력 지진의 불확실성을 고려하게 된다. 즉, 불확실성을 고려하기 위해서는 확률론적 내진성능 평가가 이루어져야 한다.

[0005] 구조물의 확률론적 내진성능 평가(Risk assessment)는 임의의 지역에서 지진이 발생할 확률과 지진이 발생하였을 때 구조물에 손상이 발생할 확률을 결합하여 나타낼 수 있다. 임의의 지역에서 지진이 발생할 확률은 재해도 분석을 통해 알 수 있으며, 지진이 발생하였을 때 구조물에 손상이 발생할 확률은 취약도 분석을 통해 알 수 있다. 구조물의 확률론적 내진성능 평가는 분석(Analytical) 방법으로 구하기 힘들다. 그래서 보통 몬트칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 기법을 활용하여 결과의 확률론적 분포를 구하게 된다.

[0006] 몬트칼로 시뮬레이션 기법은 불확실성을 확률분포모형으로 구성하고 각각의 케이스(Case)를 해석하는 것으로, 개념적으로 명확하다. 그러나, 몬트칼로 시뮬레이션 기법을 사용해서 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해서는 확률분포모형에서 많은 샘플이 추출이 되어야 하며, 많은 수의 시뮬레이션이 수행되어야 한다.

[0007] 이는 면진시스템이 적용된 구조물의 내진성능 평가를 위해 많은 수의 비선형 동적 해석을 수행되어야함을 의미하며, 즉 비현실적인 방법이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국특허 제10-0595502호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 상기의 문제점을 해결하기 위해 안출된 본 발명의 목적은, 면진시스템이 적용된 구조물의 지진응답을 단순화된 방식으로 예측하고 몬트 카를로 시뮬레이션의 비용을 줄이고 면진시스템이 적용된 구조물의 내진성능 평가를 효율적으로 수행할 수 있는 면진구조물의 지진응답분포 추정방법을 제공하는 데에 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기의 목적을 달성하기 위한 본 발명은, 응답표면으로 구성된 확률응답 데이터베이스를 구축하는 단계와, 상기 응답표면으로부터 지진의 강도 및 면진구조물에 관련된 입력변수에 대응되는 면진구조물의 최대지진응답분포를 구하는 단계를 포함하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법에 있어서, 상기 확률응답 데이터베이스를 구축하는 단계는, 확률응답 데이터베이스에서 사용할 입력지진의 강도를 나타내는 변수를 선정하는 단계; 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계; 면진구조물의 모델을 생성하는 단계; 면진구조물의 파괴기준을 선정 후 이에 필요한 출력 변수를 결정하는 단계; 선정된 입력지진으로부터 면진구조물 모델에 대한 지진응답해석을 수행하는 단계; 면진구조물의 최대응답분포를 적합성 검토를 통해 확률론분포모형을 선정하는 단계; 선정된 확률론분포모형에서 지진응답해석 결과로부터 확률론분포모형의 모양을 결정하는 파라미터를 추출하는 단계; 및 추출된 확률론분포모형의 파라미터들로부터 회귀분석을 통해서 반응표면을 구축하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 면진구조물의 지진응답분포추정방법이다.

[0011] 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계에서 얻어지는 변수는, PGA(peak ground acceleration), SA (spectral acceleration), SD (spectral displacement), PGV (peak ground velocity), 및 PGD (peak ground displacement)을 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0012] 또, 상기 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계에서 얻어지는 파라미터는, 질량(Mass(M)), 회전반경(Radius of Gyration(R_g)), 질량중심(Center of Mass (CM)), 강성(Stiffness(K)), 배치반경(Radius of Disposition(R_k)), 및 강심(剛心, Center of Rigidity(CR))을 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0013] 또, 상기 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정하는 단계 후에 파라미터의 범위를 결정하는 것을 특징으로 한다.

[0014] 또, 면진구조물의 모델을 생성하는 단계에서, 상기 면진구조물의 모델은 실험계획법을 이용하여 생성하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0015] 본 발명을 통하여, 면진시스템이 적용된 구조물의 지진응답을 단순화된 방식으로 예측하고 몬트 카를로 시뮬레이션의 비용을 줄이고 면진시스템이 적용된 구조물의 내진성능 평가를 효율적으로 수행할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0016] 도 1은 확률응답 데이터베이스의 개념도이다.
- 도 2는 확률응답 데이터베이스의 구축과정의 플로우 차트이다.
- 도 3은 면진구조물을 간략화 모델로 생성하는 모습의 개략도이다.
- 도 4는 임의위치의 반응평가의 그래프이다.
- 도 5는 면진구조물의 간략화 모델이다.
- 도 6은 면진장치의 기계적 특성의 이중선형 모델이다.
- 도 7은 간략화된 등가모델의 일예이다.
- 도 8은 Imperial Valley earthquake의 시간이력 곡선이다.
- 도 9는 x와 y방향의 지진응답 해석 결과이다.

도 10은 질량을 수정 배치한 면진구조물의 모델을 도시한다.

도 11은 상세모델 질량중심에서의 지진응답과 간략화 및 등가 모델 질량중심에서의 지진응답을 도시한다.

도 12는 평가위치의 지진응답을 각 모델별로 비교하여 도시한다.

도 13은 면진구조물을 간략화 모델로 생성하는 또 다른 모습의 개략도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0017] 이하, 본 발명을 바람직한 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 설명하기로 한다. 하기의 각 도면의 구성 요소들에 참조 부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호를 가지도록 하며, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 공지 기능 및 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다.
- [0018] 확률응답 데이터베이스(Stochastic Response Database)는 면진구조물의 내진성능을 구하는 과정 중 취약도 곡선 작성을 위하여 지진응답 분포를 즉각적으로 구하기 위한 데이터베이스이다. 즉, 입력지진의 강도 및 면진구조물의 특성을 나타내는 입력변수인 파라미터가 결정되면 확률응답 데이터베이스로부터 면진구조물 최대응답분포의 파라미터가 결정되고, 결정된 파라미터로부터 면진구조물의 출력변수인 최대응답분포를 바로 파악 할 수 있다.
- [0019] 이를 위해서 면진구조물의 지진응답에 영향을 미치는 입력지진의 강도와 면진구조물 특성 파라미터들을 구축할 수 있다.
- [0020] 본 발명에서는 이러한 특성파라미터로 질량(Mass(M)), 회전반경(Radius of Gyration(R_g)), 질량중심(Center of Mass (CM)), 강성(Stiffness(K)), 배치반경(Radius of Disposition(R_k)), 강심(剛心, Center of Rigidity(CR))를 사용하였으며, 이 파라미터들을 기준으로 확률응답 데이터베이스를 구축한다. 여기서, 배치반경은 각각의 면진장치가 면진층에서 얼마나 분산되어 있는가를 나타낸다.
- [0021] 이때, 입력지진은 지진의 불확실성을 잘 반영할 수 있도록, 다양한 지진시나리오를 작성하여 면진구조물의 지진응답 해석에 사용한다. 따라서 확률응답 데이터베이스의 입력변수는 입력지진의 강도 및 면진구조물의 파라미터이며, 출력 변수는 면진구조물의 지진응답의 최대응답 분포가 된다.
- [0022] 확률응답 데이터베이스는 지진응답에 영향을 미치는 특성변수에 대해서 비선형 동적 해석 과정을 미리 수행하고 그 결과를 축적하여 생성된다. 비록 이 방법이 비선형 동적 해석으로부터 자유로운 것은 아니지만 면진구조물의 취약도 곡선을 도출하는 과정에 있어서 면진구조물의 등가 변환법을 이용하여 취약도 분석의 실용성과 적용성을 높일 수 있다. 한편 주어진 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 특성 변수가 확률응답 데이터베이스를 구축할 때 사용한 변수의 값들과 정확히 일치 하지 않고 그 사이에 있을 때, 확률응답 데이터베이스를 이용하여 주어진 값의 출력 변수를 추정한다. 도 1은 확률응답 데이터베이스의 개념도이다.
- [0023] 이러한 확률응답 데이터베이스는 다음과 같은 과정을 거쳐 구축될 수 있다.
- [0024] (1) 확률응답 데이터베이스에서 사용할 입력지진의 강도를 나타내는 변수를 선정한다. 보통 PGA(peak ground acceleration), SA (spectral acceleration), SD (spectral displacement), PGV (peak ground velocity), PGD (peak ground displacement) 등이 사용되며, PGA, PGV, PGD 는 지진 위험 해석(Seismic Hazard Analysis)를 통하여 제공이 된다.
- [0025] (2) 지진의 불확실성은 확률응답 데이터베이스 구축시 반영한다. 지진에 대한 불확실성을 확률응답 데이터베이스에 반영하기 위해 지진의 다양한 특성을 고려하여 지진 시간이력 곡선의 앙상블을 구성한다.
- [0026] (3) 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 파라미터를 선정한 다음 각 파라미터의 범위를 결정한다. 실험계획법을 이용하여 지진응답해석을 수행할 면진구조물의 모델들을 생성한다. 여기서, 실험계획법(Design of Experiment)이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적인 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다
- [0027] (4) 면진구조물의 파괴기준을 선정한 후 이에 필요한 출력 변수를 결정한다. 다음, 선정된 입력지진과 생성된 면진구조물 모델의 지진응답해석을 수행한다.

[0028] (5) 면진구조물의 최대응답분포를 적합성 검토(Goodness of fit test)를 통해 확률분포모형을 선정한다. 선정된 확률분포모형에서 지진응답해석 결과로부터 확률분포모형의 모양을 결정하는 파라미터를 추출한다.

[0029] (6) 추출된 확률분포모형의 파라미터들은 회귀분석을 통해서 반응표면(Response Surface)을 구축한다. 반응표면의 입력변수는 모델의 특성변수가 되며 출력변수는 확률분포모형의 파라미터가 된다.

[0030] (7) 지진의 강도를 변화시켜 위의 과정을 반복하여 반응표면을 구축한다.

[0031] 또, 본 발명에서는 본 연구에서는 확률응답 데이터베이스의 적용성을 높이기 위한 면진구조물 등가모델을 제시한다. 면진구조물 등가변환법은 등가모델의 지진응답과 기계적 특성이 다른 면진구조물의 지진응답이 같게 하는 모델을 생성하므로 면진구조물의 지진에 대한 확률론적 안전 평가시 확률응답 데이터베이스의 적용성을 높일 수 있다.

[0032] 여기서는 본 연구에서는 지진의 양방향 가진을 고려할 수 있으며 2축간 상호작용도 고려할 수 있는 간략화 모델을 제안한다. 제안된 간략화 모델은 면진장치의 배치 또한 고려가 가능하며 편심에 의한 면진구조물의 회전변위도 예측 가능케 한다.

[0033] 면진구조물의 상부구조물은 강체거동을 한다고 가정 할 수 있다. 그 이유는 면진구조물 특성상, 면진구조물의 변형은 첫번째 모드가 지배를 하기 때문이다. 따라서 본 발명에서는 면진구조물의 상부구조물은 강체거동을 한다고 가정을 하였다. 그리고 면진구조물의 지진응답에 영향을 주는 6개의 주요영향인자를 선정하였다. 선정된 주요영향인자는 상부구조물의 질량(M), 회전반경(R_m), 그리고 질량중심(CM)이며, 면진층의 강성(K), 배치반경(R_k) 그리고 강성중심(C_k)이다. 질량은 상부구조물의 총 질량이며 강성은 면진층의 총 강성이 된다. 수학식 1은 회전반경(R_m)을 나타내는 식이며, I는 관성 모멘트이다.

수학식 1

[0034]
$$R_m = \sqrt{\frac{I}{M}}$$

수학식 2

[0035]
$$R_k = \sqrt{\frac{\sum k(x^2 + y^2)}{\sum k}}$$

[0036] 면진층의 배치반경은 수학식 2에 의해 계산되며, k는 각 면진장치의 강성, x와 y는 강성중심으로부터 거리를 나타낸다.

[0037] 만약, 질량이 절점질량 형태로 분산되어 있다면, 수학식 3에 의해 질량중심을 계산 할 수 있다. 여기서, x와 y는 특정 기준점에서 절점질량의 위치를 나타낸다.

수학식 3

[0038]
$$CM_x = \frac{\sum m_x x}{\sum m_x}, CM_y = \frac{\sum m_x y}{\sum m_x}$$

[0039] 비슷하게 강성중심은 수학식 4와 같이 계산될 수 있으며, x와 y는 특정 기준점에서 면진장치의 위치를 나타낸다.

수학식 4

$$CR_x = \frac{\sum k_{z,x}}{\sum k_y} \cdot CR_y = \frac{\sum k_{x,z}}{\sum k_x}$$

[0040]

이러한 면진구조물의 간략화 방법은 면진구조물 모델과 간략화된 모델의 주요영향인자가 일치 하도록 하는 것이다. 간략화 방법은 표 1에 나타내었다.

[0041]

표 1

	Isolated Structure	=	Simplified Model
Mass	M	=	M'
Radius of Gyration	R _m	=	R _m '
Center of Mass	CM _x , CM _y	=	CM _x ', CM _y '
Stiffness	K	=	K'
Radius of Disposition	R _r	=	R _r '
Center of Rigidity	CR _x , CR _y	=	CR _x ', CR _y '

[0042]

이하에서는, 면진구조물을 간략화 모델로 생성하는 과정을 예시적으로 설명하고자 한다. 도 3의 좌측도면과 같이 면진구조물(10)은 4개의 절점 질량(14)과 36개의 면진장치(12)를 가지고 있다. 이 면진구조물(10)을 도 3의 우측도면에 도시된 바와 같이 절점 질량(24) 1개, 면진장치(22) 4개를 갖는 간략화 모델의 면진구조물(20)로 구성하고자 한다. 상기 면진장치(22)는 4개를 사용하였지만, 3개 이상이면 상기 절점질량(24)을 중심으로 안정적인 자세를 취할 수 있으므로, 면진장치(22)는 적어도 3개 이상으로 이루어진다.

[0043]

수학식 5

$$M_{full} (= \sum_{i=1}^4 m_i) = M_{simplified}$$

[0044]

수학식 6

$$(CM_{x,full} \cdot CM_{y,full}) = (CM_{x,simplified} \cdot CM_{y,simplified})$$

[0045]

수학식 7

$$R_{m,full} (= \sqrt{\sum_{i=1}^4 m_i (x_i^2 + y_i^2)} / \sum_{i=1}^4 m_i) = R_{m,simplified}$$

[0046]

수학식 8

$$K_{full} (= \sum_{i=1}^{36} k_i) = K_{simplified} (= \sum_{i=1}^4 k_i)$$

수학식 9

$$K_{full} (= \sum_{i=1}^{36} k_i) = K_{simplified} (= \sum_{i=1}^4 k_i)$$

수학식 10

$$(CR_{x_{full}} \cdot CR_{y_{full}}) = (CR_{x_{simplified}} \cdot CR_{y_{simplified}})$$

수학식 11

$$R_{k_{full}} (= \sqrt{\sum_{i=1}^{36} k_i (x_i^2 + y_i^2)} / \sum_{i=1}^{36} k_i) = R_{k_{simplified}} (= \sqrt{\sum_{i=1}^4 k_i (x_i^2 + y_i^2)} / \sum_{i=1}^4 k_i)$$

지진입력이 두 모델에 작용을 하면 두 모델의 지진응답은 정확히 일치하는 값을 갖게 된다.

또, 도 13에 도시되는 바와 같이, 간략화된 면진구조물(40)은 1개의 질량중심(42)과, 상기 질량중심(42)의 주위로 배치되는 복수의 면진장치(44)를 가진다. 이 때, 상기 면진장치(44)는 내측에 4개를 배치하고, 외측에 4개를 배치하는 것도 가능하다. 다시 말해, 면진장치(44)와 질량중심(42)의 거리의 종류가 2 이상으로 이루어질 수 있다. 일반적으로 면진구조물의 질량중심과 강성중심은 일치하도록 설계하여 지진에 인한 구조물의 회전변위가 크게 발생하지 않는다. 하지만 구조물의 질량중심과 강성중심의 거리 즉 편심이 큰 경우가 있으며(예, 비정형 구조물 등), 편심으로 인하여 지진에 인한 면진구조물의 회전변위가 크게 발생할 수 있다. 면진구조물의 제안한(등가 및 간략화)모델은 구조물의 회전변위가 크게 발생하게 된다면 실제 면진구조물의 회전변위와의 오차가 증가하게 된다. 그 이유는 실제모델과 제안한 모델의 모멘트(회전힘)-변위(회전각) 히스테리 곡선이 다르기 때문이다. 따라서 실제모델과 제안한 모델의 회전변위의 오차를 줄이기 위하여 도 13에 도시된 바와 같이 더 많은 면진장치를 적절한 위치에 배치하여 그 오차를 줄일 수 있다.

다음으로 임의위치에서의 응답평가에 대하여 설명한다. 면진구조물의 간략화된 모델을 구성하면 기하학적 정보를 잃게 되며, 질량중심의 지진응답만을 계산할 수 있게 된다. 하지만 질량중심이 아닌 임의의 위치의 지진응답이 필요하게 될 수 있다. 면진구조물의 상부구조물을 강체거동이라 가정하였으므로 기하학적 원리를 이용하여 질량중심의 지진응답으로부터 임의의 위치의 지진응답을 추정할 수 있다. 면진구조물의 회전운동으로 각 위치의 지진응답은 다르게 나타나지만, 질량중심의 X와 Y방향의 병진운동 정보와 회전운동 정보로부터 임의의 위치에서의 지진응답을 도 4처럼 추정할 수 있다. 수학식 12는 임의의 위치에서의 지진응답과 질량중심의 지진응답의 차이를 나타낸다.

수학식 12

$$dx = 2R \sin \frac{\theta}{2} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2} - \tan^{-1} \frac{a}{b} \right)$$

$$dy = 2R \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2} - \tan^{-1} \frac{a}{b} \right)$$

[0055] 그리고, 수학식 13을 이용하여 임의의 위치에서의 지진응답을 계산할 수 있게 된다.

수학식 13

$$x_{gc} = x_{cV} \pm dV$$

$$y_{gc} = y_{cM} \pm dM$$

[0056]

[0057] 다음으로, 등가의 면진구조물 모델의 구성방법에 대해 설명한다. 면진구조물의 등가 모델은 간략화 모델과 질량 및 회전반경은 다르지만 같은 지진응답을 갖는 면진구조물 모델을 의미한다. 도 5는 면진구조물의 간략화 모델을 나타내며, 간략화 모델의 운동방정식을 구성하고자 한다. K 는 면진장치의 강성을 나타내며, θ 는 질량중심과 강성중심의 편심을 나타낸다. 위 모델의 운동에너지(T)는 다음의 수학식 14와 같다.

수학식 14

$$T = \frac{1}{2} M \dot{u}_{Gx}^2 + \frac{1}{2} M \dot{u}_{Gy}^2 + \frac{1}{2} I_G \dot{\theta}^2$$

[0058]

[0059] 여기서, I_G 는 강성중심에서의 관성모멘트를 나타낸다. 위 모델의 위치에너지(V)는 수학식 15와 같이 표현할 수 있다.

수학식 15

$$V = 2K(u_{Gx}, u_{Gy})u_{Gx}^2 + 2K(u_{Gx}, u_{Gy})u_{Gy}^2 + \frac{1}{2} K(u_{Gx}, u_{Gy})R_k^2\theta^2(\theta^2 + 4)$$

[0060]

[0061] 위 모델의 운동방정식은, 수학식 16과 수학식 18로부터 라그랑지 방정식(Lagrange's equation)을 구성하면 수학식 16 내지 18과 같다.

수학식 16

$$M\ddot{u}_{Gx} + 4K(u_{Gx}, u_{Gy})u_{Gx} = -M\ddot{x}_g$$

[0062]

수학식 17

$$M\ddot{u}_{Gy} + 4K(u_{Gx}, u_{Gy})u_{Gy} = -M\ddot{y}_g$$

[0063]

수학식 18

$$M(R_m^2 + e_r^2)\ddot{\theta} + 2K(u_{Gx}, u_{Gy})R_k^2\theta(\theta^2 + 2) = -Me_x\ddot{y}_g - Me_y\ddot{x}_g$$

[0064]

[0065] 수학식 18에서 회전의 변위량이 작다고 가정하여($\theta^3 \approx 0$), 고차항을 제거 하면 수학식 19와 같이 된다.

수학식 19

$$M(R_m^2 + e_r^2)\ddot{\theta} + 4K(u_{Gx}, u_{Gy})R_k^2\theta = -Me_x\ddot{y}_g - Me_y\ddot{x}_g$$

[0066]

즉, 간략화 모델의 운동방정식은 수학식 16, 17, 19로 구성된다. 등가모델이 질량과 회전반경이 1을 가진다고 가정하기 위해, 수학식 16, 17, 19를 질량 및 회전반경으로 나누면 운동방정식은 수학식 20 내지 22와 같이 표현할 수 있다.

수학식 20

$$\ddot{u}_{Gx} + 4\frac{K(u_{Gx}, u_{Gy})}{M}u_{Gx} = -\ddot{x}_g$$

[0068]

수학식 21

$$\ddot{u}_{Gy} + 4\frac{K(u_{Gx}, u_{Gy})}{M}u_{Gy} = -\ddot{y}_g$$

[0069]

수학식 22

$$\ddot{\theta} + 4\frac{K(u_{Gx}, u_{Gy})}{M}\frac{R_k^2}{R_m^2 + e_r^2}\theta = -\frac{e_x}{R_m^2 + e_r^2}\ddot{y}_g - \frac{e_y}{R_m^2 + e_r^2}\ddot{x}_g$$

[0070]

즉, 등가 모델의 주요영향인자는 간략화된 모델로부터 표 2와 같이 표현할 수 있게 된다.

표 2

	Equivalent isolated structure model		Value
Mass	M'	=	1
Radius of gyration	R_m'	=	1
Center of mass	(CM_x', CM_y')	=	$(e_x/(R_m^2 + e_r^2), e_y/(R_m^2 + e_r^2))$
Stiffness	$K(u_{Gx}, u_{Gy})'$	=	$K(u_{Gx}, u_{Gy})/M$
Radius of disposition	R_k'	=	$\sqrt{R_k^2/(R_m^2 + e_r^2)}$
Center of rigidity	(CR_x', CR_y')	=	(0, 0)

[0072]

보통 면진장치의 기계적 특성은 도 6과 같이 이중선형 모델로 나타낸다. 면진장치의 기계적인 특성을 등가 모델로 변환할 경우 1차강성(K_u), 2차강성(K_d) 및 특성강도(Q_d)는 수학식 23과 같이 변환하면 된다.

수학식 23

$$K_u' = K_u / M, \quad K_d' = K_d / M, \quad Q_d' = Q_d / M$$

[0074]

[0075] 면진구조물의 간략화 모델 및 등가 모델의 검증을 위하여 면진구조물의 지진응답해석이 이루어졌다. 면진구조물 상세모델의 지진응답과 간략화 및 등가모델의 지진응답을 비교하여 제안한 방법을 검증하고자 한다. 검증예제로 선정된 면진구조물은 Farzad Naeim et al. (1999) 과 FEMA451 (2006)에 있는 Los Angeles County의 EOC 건물이다. 선정된 구조물의 형식은 철근콘크리트-전단-건물이며 도 7과 같다.

[0076] 선정된 구조물의 면진시스템은 납면진받침(LRB: Lead Rubber Bearing) 타입의 면진장치를 사용하였다. 설계 고유주기 2.5초 및 15%의 감쇠비를 갖는 면진시스템을 설계하였으며, 자세한 사항은 표 3에 기재하였다.

표 3

Parameter	Value
K_{eff}	10.1 MN/m
K_a	78.49 MN/m
K_d	7.72 MN/m
Q	0.637 MN

[0077]

[0078] 검증을 위하여 사용된 지진은 Imperial Valley earthquake이다. Imperial Valley earthquake의 시간이력 곡선은 도 8에 나타내었으며, 자세한 정보는 표 4에 나타내었다. 또한 지진응답 해석 시 2축간 상호작용 효과를 고려하여 해석을 수행하였다.

표 4

Earthquake	Station	Year	Component	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
Imperial Valley, CA	Array #6	1979	230°	0.436	100.709	55.165
		1979	140°	0.376	63.130	26.942

[0079]

[0080] 상세 모델의 지진응답과 제안한 모델의 지진응답이 어느 정도 일치하는지를 표현하기 위해 Fitness value를 제안하며 수학적식 24와 같다.

수학적식 24

$$fitness (\%) = \left[1 - \frac{norm(D_F - D_E)}{norm(D_F - mean(D_F))} \right]$$

[0081]

[0082] 여기서, D_F 는 상세 모델의 지진응답이며 D_E 는 제안한 모델의 지진응답이다.

[0083] 그리고, 구조물의 질량중심과 강성중심이 일치하면, 지진이 발생해도 구조물은 회전거동을 보이지 않는 것을 확인한다. 즉 구조물의 모든 위치에서의 지진응답은 질량중심에서의 지진응답과 일치한다. 간략화 및 등가의 면진구조물 모델은 절점질량 1개와 면진장치 4개로 구성 되었다. 등가 모델의 경우 목표질량은 100톤이며 목표회전반경은 10m이다. 각 모델의 정보는 표 5에 나타내었다.

표 5

Parameter	Simplified Model	Equivalent Model
M	1600 ton	100 ton
R _m	14.1421 m	10 m
CM	(0.0)	(0.0)
K _c	78.49 MN/m	4.91 MN/m
K _s	7.72 MN/m	0.48 MN/m
Q	0.637 MN	0.040 MN
R _t	16.3299 m	11.547 m
CR	(0.0)	(0.0)

[0084]

[0085]

도 9은 x와 y방향의 지진응답 해석 결과를 나타내었다. 제안한 방법 모두 상세 모델의 지진응답과 비교시 잘 일치함을 확인 수 있다. 또한 Fitness value를 표 6에 나타내었으며 그 값은 100%에 가까운 것을 알 수 있다. 이로써 간략화 모델 및 등가 모델 모두 면진구조물 상세모델의 지진응답을 효과적으로 잘 나타냄을 알 수 있다.

표 6

		Simplified model	Equivalent model
Full model	X	99.955 %	99.967 %
	Y	99.951 %	99.966 %

[0086]

[0087]

다음으로, 면진구조물이 회전거동을 보일 경우에도 제안한 모델의 지진응답이 상세모델의 지진응답과 일치하는 지 알아보고자 한다. 질량중심과 강성중심의 편심을 유발하기 위하여 인위적으로 질량을 배치 하였다. 질량을 수정 배치한 면진구조물은 도 10에 나타내었으며, 각 제안한 모델의 파라미터는 표 7에 나타내었다.

표 7

Parameter	Simplified Model	Equivalent Model
M	1600 ton	100 ton
R _m	14.3614 m	10 m
CM	(1.5,-1.25)	(0.72,-0.60)
K _s	78.49 MN/m	4.91 MN/m
K _d	7.72 MN/m	0.48 MN/m
Q	0.637 MN	0.040 MN
R _t	16.3299 m	11.316 m
CR	(0.0)	(0.0)

[0088]

[0089]

도 11는 상세모델 질량중심에서의 지진응답과 간략화 및 등가 모델 질량중심에서의 지진응답을 나타내었다. 면진구조물은 편심에 의해 회전거동을 하게 된다. 하지만 간략화 및 등가 모델의 지진응답은 상세모델의 지진응답과 잘 일치함을 알 수 있다. Fitness value는 표 8에 나타내었으며 그 값 또한 매우 높은 것을 확인할 수 있다.

표 8

		Simplified model	Equivalent model
Full model	X	98.753 %	98.590 %
	Y	97.185 %	96.130 %
	Rotation	89.274 %	83.778 %

[0090]

[0091]

면진구조물은 회전거동을 보이게 되므로 모든 위치에서의 지진응답이 다르게 된다. 따라서 도 10에 나타낸 평가 위치(Estimation point)의 지진거동을 질량중심의 지진응답으로부터 그 거동을 수학적 13을 활용하여 추정하고자 한다. 도 12는 평가위치의 지진응답을 각 모델별로 비교 하였으며 Fitness value는 표 9에 나타내었다. 그 결과 질량중심의 지진응답으로부터 평가위치의 지진응답을 간략화 및 등가 모델 모두 잘 추정함을 알 수 있다.

표 9

		Simplified model	Equivalent model
Full model	X	99.057 %	97.633 %
	Y	94.917 %	91.387 %

[0092]

[0093]

다음으로 확률응답 데이터베이스를 사용한 면진구조물의 확률론적 내진성능평가(Seismic performance assessment)에 대하여 설명한다. 면진구조물의 확률론적 안전성 평가를 수행하기 위해서는 지진의 불확실성과 면진구조물의 불확실성(강도, 탄성, 재료물성치 등)이 고려되어야 하며, 면진구조물의 내진성능(Risk)은 면진구조물의 취약도 곡선과 재해도 곡선 조합하여 구할 수 있게 된다. 면진구조물의 부지가 결정되어 있는 경우 재해도 분석으로부터 지진에 의한 불확실성이 고려된 지진의 강도별 연초과확률과 그 부지에서 발생 할 수 있는 지진 시간이력곡선을 다양하게 선정해야 한다. 면진구조물의 불확실성이 고려된 특정 지진강도에 대한 구조물의 파괴 확률을 나타내는 지진취약도 곡선이 작성되어야 한다. 즉, 높은 신뢰성을 갖는 면진구조물의 확률론적 안전성 평가를 수행하기 위해서는 많은 비선형 동적 해석이 수행되어야 한다.

[0094]

확률응답 데이터베이스를 활용한 면진구조물의 내진성능(Risk)을 구하는 전반적인 과정은 일반적인 방법과 동일하나, 다른 부분은 취약도 곡선을 도출 과정이 상이하다. 일반적인 방법은 면진구조물의 지진 응답분포를 구하기 위하여, 많은 지진과 해석 모델을 여러 개 선정 후 비선형 동적 해석을 수행한 결과를 바탕으로 취약도 곡선을 도출한다. 하지만 면진구조물의 지진 응답분포를 구하기 위해 확률응답 데이터베이스를 활용하면 비선형 동적 해석 수행과정이 생략되고 면진구조물의 지진응답의 분포를 바로 구할 수 있게 된다. 확률응답 데이터베이스로부터 구해진 지진 응답분포를 바탕으로 취약도 곡선을 도출하게 된다.

[0095]

확률응답 데이터베이스가 구축 되어있다는 가정하에, 먼저 면진구조물의 어떤 특성의 불확실성을 고려할지 결정되어야 한다. 또한 설정된 특성 및 파라미터는 시험 및 문헌조사를 통해 설정된 파라미터들의 확률분포 모형을 구축한다. 파라미터들의 확률분포 모형에서 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 통해서 필요한 만큼 면진구조물 특성값을 추출하고 추출한 값을 이용하여 면진구조물의 모델을 생성한다. 생성된 모델들은 간략화 방법(Simplification Method)을 이용하여 생성된 모델들을 간략화 모델로 변환하고, 또 간략화 모델들은 등가모델 변환법을 이용하여 확률응답 데이터베이스에서 구축된 모델의 질량과 회전반지름을 목표로 하는 등가 모델로 변환을 한다. 변환된 등가모델들로부터 확률응답 데이터베이스에 필요한 입력변수들을 구한다. 지진강도와 입력변수를 확률응답 데이터베이스에 입력하고 응답표면(Response Surface)으로부터 지진응답분포를 나타내는 파라미터(output variable)를 구한다. 파라미터로부터 확률분포모형을 구성하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해서 최대응답을 추출한다. 추출된 최대응답으로부터 필요에 따라 조합 및 수정을 하고 정해진 파괴기준과 Fault Tree를 고려하여 파괴 확률을 계산한다. 구해진 파괴 확률로부터 취약도 곡선을 작성한다.

[0096]

보통 취약도 곡선을 대수정규분포함수(log-normal distribution function)의 누적 확률분포로 수학적 25와 같이 표현 하며, 대수정규분포의 두 가지 주요 계수인 중앙값(median)과 대수 표준편차(log-standard deviation)는 최우도 추정법(MLE, Maximum Likelihood Estimate)으로 구한다.

수학식 25

$$F_k(a) = \Phi\left(\frac{\ln(a/c_k)}{\zeta_k}\right)$$

[0097]

[0098]

여기서 a 는 지진의 강도 즉, PGA를 나타내며, c_k , ζ_k 는 각각 손상상태 k 를 나타내는 대수정규분포함수의 중앙값과 대수 표준편차이고, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포 함수의 누적확률 분포이다. 수학식 26과 같이 가정된 확률분포에 대한 계수 중앙값과 대수 표준편차는 최우도 추정법을 이용하여 산정한다. 이때, 쓰일 우도 함수(Likelihood)는 각각 지진에 대해 적용시켜, 손상이 발생 했을 때에는 $F(a)$ 를 증가 시키고, 손상이 발생하지 않았을 때에는 손상 발생하지 않은 확률 $(1-F(a))$ 를 증가 시키도록 수학식 26과 같이 정의 할 수 있다. 수학식 27과 같이 정의된 우도 함수를 최대화 하는 계수 중앙값과 대수 표준편차를 찾는다.

수학식 26

$$L = \prod_{i=1}^{N_e} [F_k(a_i)]^{a_i} [1 - F_k(a_i)]^{1-a_i}$$

[0099]

수학식 27

$$\frac{\partial L}{\partial c_k} = \frac{\partial L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad k = 1, \dots, N$$

[0100]

[0101]

여기서, N 은 총 지진의 개수이며, $F(a)$ 는 손상상태 k 에 대한 취약도이고, a_i 는 구조물에 가해지는 지진하중의 최대지반가속도이며, x_i 는 구조물의 손상상태에 대한 해당여부를 나타내는 Bernoulli 확률변수로 손상이 없으면 0, 손상이 있으면 1의 값을 갖는다. 지진위험도(Seismic Risk)는 일정기간 동안 지진으로 인하여 발생하는 일련의 손상 또는 손실 및 이러한 사건이 발생할 수 있는 초과확률로서 정의된다. 정량적인 지진위험도평가는 최대 지반가속도인 PGA로 표현되는 지진재해도와 지진취약도 곡선을 이용하여 수행할 수 있으며 수학식 28과 같이 표현할 수 있다.

수학식 28

$$P_F \approx \int_0^{\infty} r(a) F_k(a) da$$

[0102]

[0103]

여기서, P_F 는 손상확률이며, $r(a)$ 는 최대지반가속도(a)에 대한 연초과확률을 의미하는 재해도 곡선을 나타내며, $F_k(a)$ 는 주어진 최대지반가속도에서의 파괴확률인 지진취약도를 의미한다. 즉, 면진구조물의 내진성능(Risk)는 면진구조물의 취약도 곡선과 재해도 곡선을 조합하여 구할 수 있게 된다.

[0104]

상기와 같이, 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만 해당 기술 분야의 숙련된 당업자라면 하기의 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

[0105]

10, 20, 30, 40: 면진구조물

12, 22, 34, 44: 면진장치

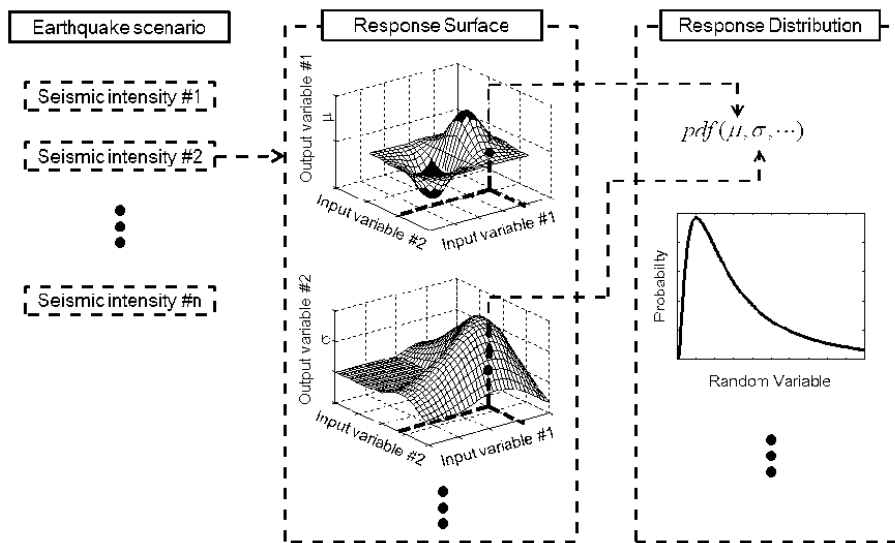
14, 24, 32, 42: 질량

32: 질량중심

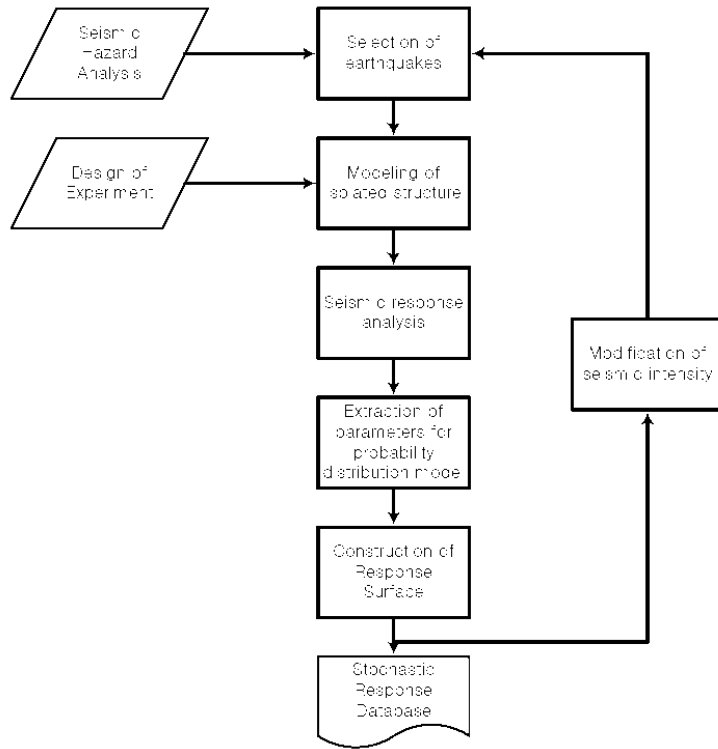
34: 강성

도면

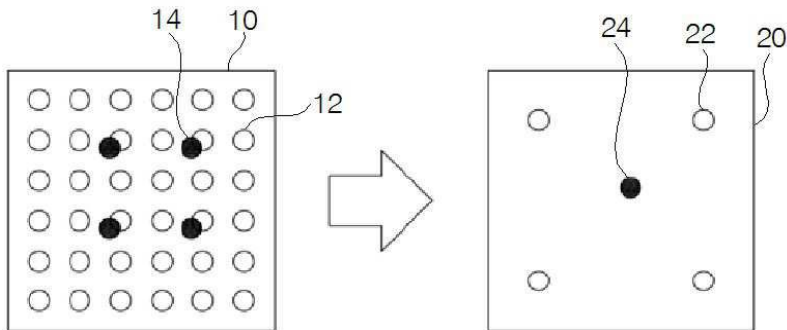
도면1



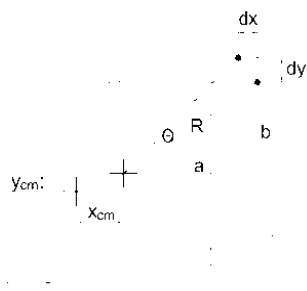
도면2



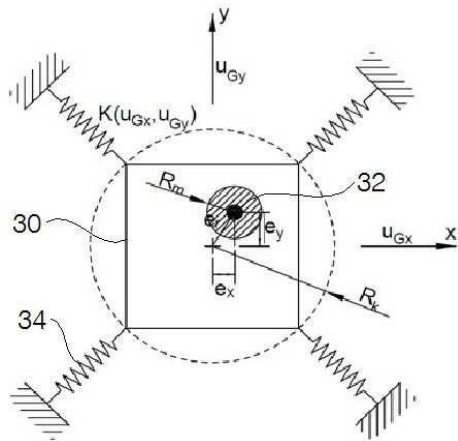
도면3



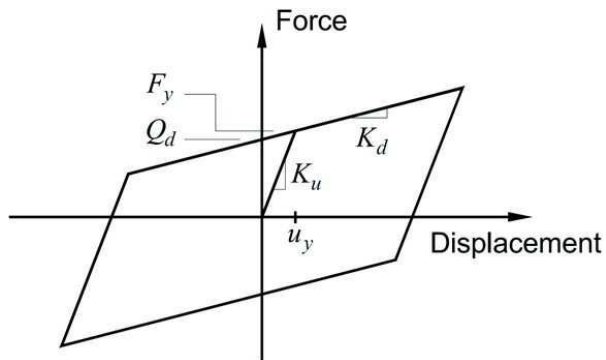
도면4



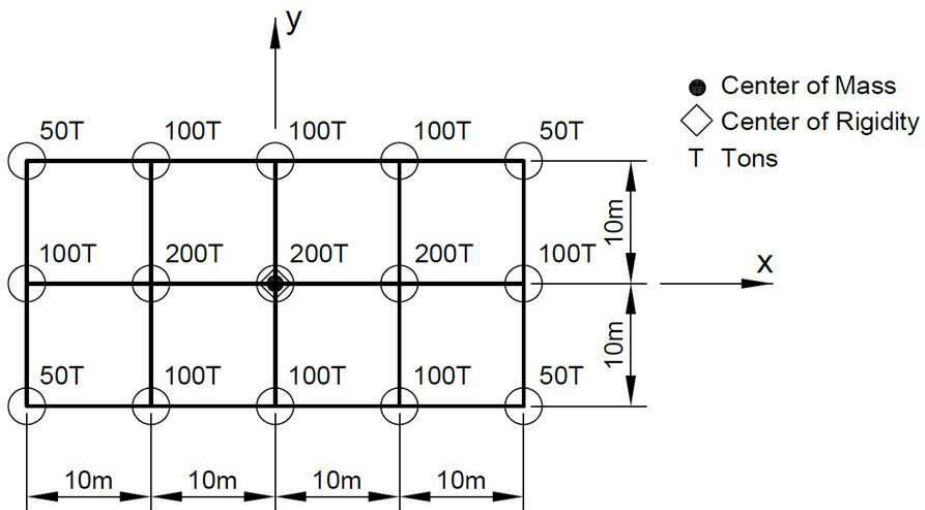
도면5



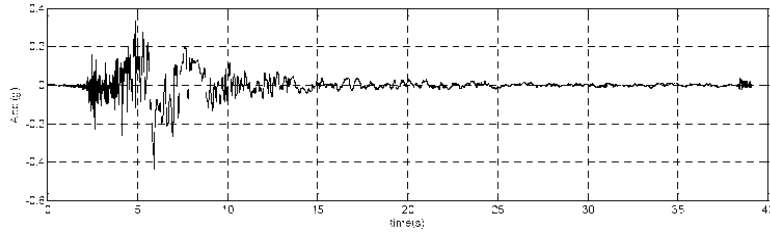
도면6



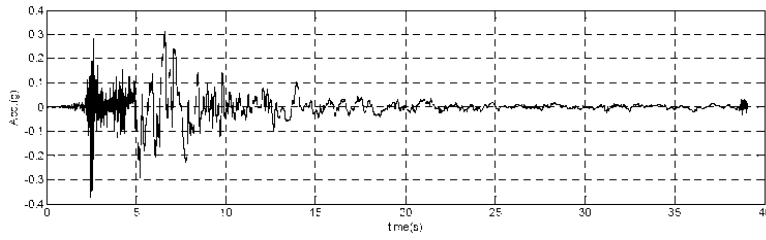
도면7



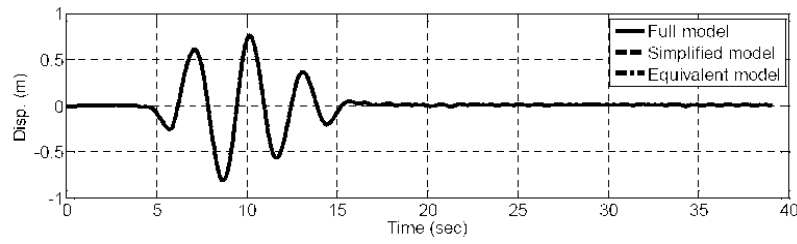
도면8a



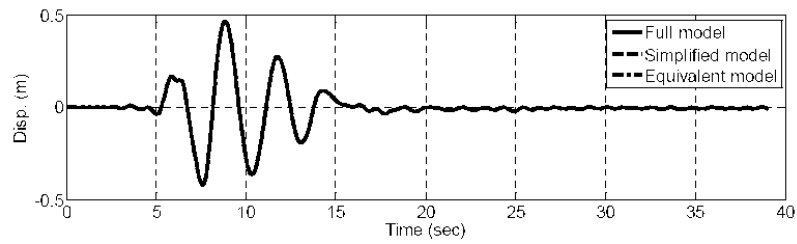
도면8b



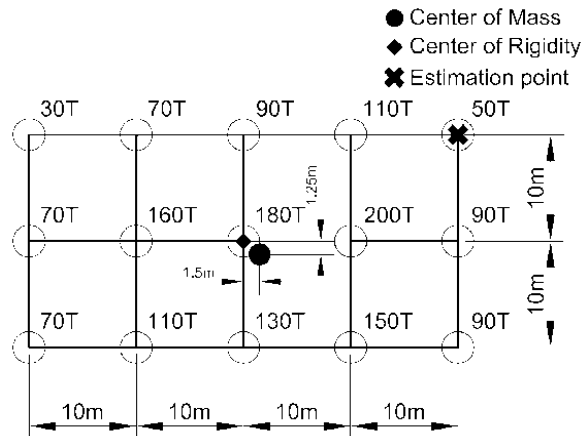
도면9a



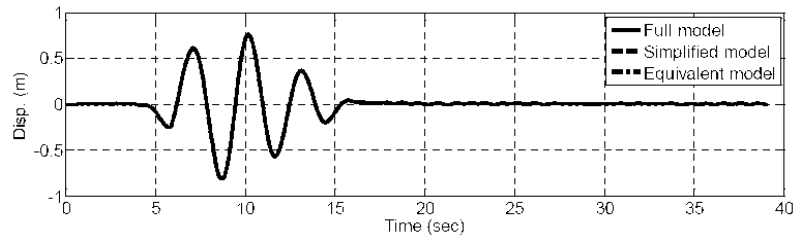
도면9b



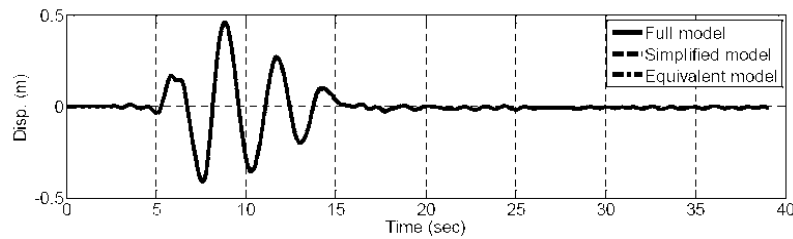
도면10



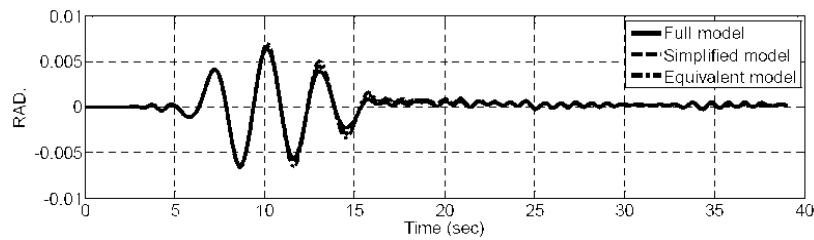
도면11a



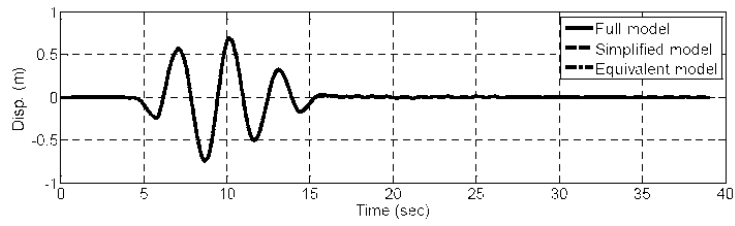
도면11b



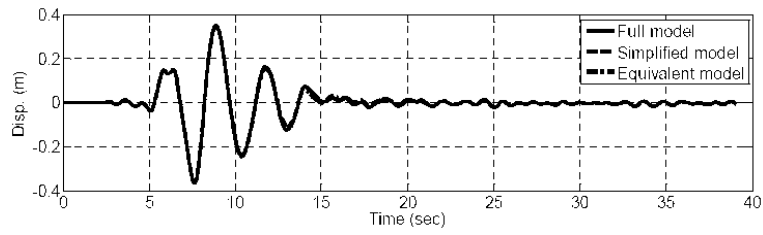
도면11c



도면12a



도면12b



도면13

