



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0066622

(43) 공개일자 2015년06월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01B 11/16 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-0151240

(22) 출원일자 2013년12월06일

심사청구일자 2013년12월06일

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

박효선

서울 강남구 영동대로 230, 2동 302호 (대치동, 우성1차아파트)

최세운

서울 마포구 와우산로26길 9-16, 405호 (창전동)
(뒷면에 계속)

(74) 대리인

김인철

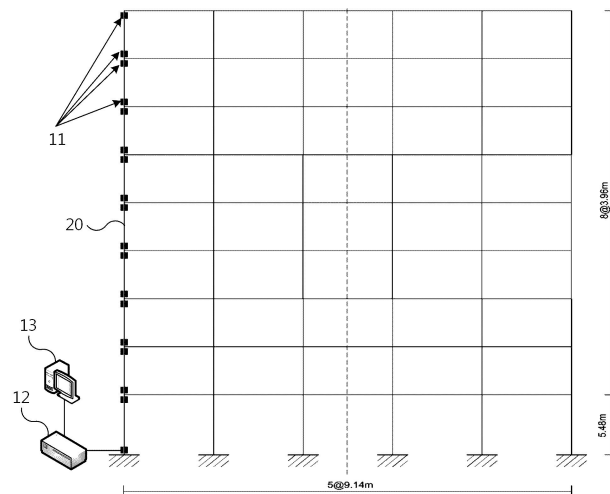
전체 청구항 수 : 총 19 항

(54) 발명의 명칭 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명의 실시예들에 따른 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치는 각 층별 기둥마다 최상단 및 최하단에 각각 설치되는 복수의 변형률 센서들, 이러한 변형률 센서들로부터 각각 변형률 값들을 수신하는 센서 데이터 수신부 및 각 층별 기둥마다 수신된 최상단 변형률 값과 최하단 변형률 값의 차이에 비례하여 추정된 각 층별 곡률 분포로부터 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정하는 횡방향 구조반응 추정부를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



(72) 발명자

박근형

서울 성북구 보국문로 183, 102동 1103호 (정릉동,
피오레아파트)

김유석

경기도 용인시 수지구 풍덕천1동 82-22번지 수지
푸르지오 월드마크 102동 1702호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1345146193

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 리더연구자지원

연구과제명 유전학적 건축구조 자가진단 및 노화방지 기술

기 여 율 1/1

주관기관 연세대학교 산학협력단

연구기간 2011.04.15 ~ 2014.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

각 층별 기둥마다 최상단 및 최하단에 각각 설치되는 복수의 변형률 센서들;

상기 변형률 센서들로부터 각각 변형률 값들을 수신하는 센서 데이터 수신부; 및

각 층별 기둥마다 수신된 최상단 변형률 값과 최하단 변형률 값의 차이에 비례하여 추정된 각 층별 기둥의 곡률 분포로부터 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정하는 횡방향 구조반응 추정부를 포함하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 각 층별 곡률 분포는 다음 수식

$$\kappa(x) = \frac{\varepsilon_b(x) - \varepsilon_t(x)}{h}$$

에 기초하여 추정되고, 여기서 κ 는 곡률이고, ε_b 와 ε_t 는 각각 기둥의 최하단(bottom)과 최상단(top)에 설치된 변형률 센서들에서 측정되는 변형률 값들이며, h 는 최하단에 설치된 변형률 센서를 기준으로 최상단에 설치된 변형률 센서까지의 거리, x 는 기둥 내에서 수직축 상의 임의의 위치를 의미하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 3

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은 다음 수식

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx$$

에 기초하여 추정되고, 여기서, κ 는 곡률이고, $y(x)$ 는 기둥 내의 임의의 수직축 상의 위치 x 에서 횡변위를 의미하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 4

청구항 3에 있어서, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은, 각 층별 기둥의 최하단의 횡변위가 바로 아래 층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고 최하층 기둥의 최하단의 횡변위는 0인 것을 경계조건으로 하여, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지 반복적으로 추정되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 5

청구항 1에 있어서, 상기 횡방향 구조반응 추정부는,

각 층별 기둥의 횡변위 값들을 시간에 따라 이중 미분하여 각 층별 기둥의 횡가속도 값들을 더 추정하도록 동작하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 6

청구항 5에 있어서, 상기 각 층별 횡가속도 값들은 다음 수식

$$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2}$$

에 기초하여 추정되며, 여기서, y 는 각 층별 기둥의 횡변위, y'' 는 각 층별 기둥의 횡가속도, x_i 는 수직축 상의 i 번째 위치이고 t 는 시간인 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 7

청구항 1 또는 청구항 5에 있어서, 각각의 값들은 각각 후속하는 연산에 적용되기 전에 필터링되어 노이즈를 제거한 후에 각각 후속하는 연산에 적용되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 8

청구항 1에 있어서, 상기 변형률 센서들은 광 브래그 격자 변형률 센서이고, 상기 센서 데이터 수신부는 복수의 광 브래그 격자 변형률 센서들이 형성된 적어도 하나의 광 케이블이 연결되는 인테로게이터를 포함하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 9

청구항 1에 있어서, 상기 변형률 센서들은 상기 각 층별 기둥의 최상단 및 최하단의 각각에 복수 개 설치되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치.

청구항 10

변형률 센서들, 센서 데이터 수신부 및 횡방향 구조반응 추정부를 포함하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 시스템을 이용한 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법으로서,

상기 센서 데이터 수신부가, 건물에서 하나의 연속한 기둥열을 구성하는 각 층별 기둥마다 기둥의 최상단 및 최하단에 각각 설치된 변형률 센서들로부터 변형률 값들을 수신하는 단계;

상기 횡방향 구조반응 추정부가, 각 층별 기둥의 최상단의 변형률 값과 최하단의 변형률 값의 차이에 비례하는 각 층별 기둥의 곡률 분포를 추정하는 단계; 및

상기 횡방향 구조반응 추정부가, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지, 각 층별 기둥의 곡률 분포를 반복적으로 이중 적분함으로써 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정하는 단계를 포함하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 11

청구항 10에 있어서, 상기 각 층별 곡률 분포는 다음 수식

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_b(x) - \epsilon_t(x)}{h}$$

에 기초하여 추정되고, 여기서 κ 는 곡률이고, ϵ_b 와 ϵ_t 는 각각 기둥의 최하단(bottom)과 최상단(top)에 설치된 변형률 센서들에서 계속되는 변형률 값들이며, h 는 최하단에 설치된 변형률 센서를 기준으로 최상단에 설치된 변형률 센서까지의 거리, x 는 기둥 내에서 수직축 상의 임의의 위치를 의미하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 12

청구항 10 또는 청구항 11에 있어서, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은 다음 수식

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx$$

에 기초하여 추정되고, 여기서, κ 는 곡률이고, $y(x)$ 는 기둥 내의 임의의 수직축 상의 위치 x 에서 횡변위를 의미하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 13

청구항 12에 있어서, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은, 각 층별 기둥의 최하단의 횡변위가 바로 아래 층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고 최하층 기둥의 최하단의 횡변위는 0인 것을 경계조건으로 하여, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지 반복적으로 추정되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 14

청구항 10에 있어서,

각 층별 기둥의 횡변위 값들을 시간에 따라 이중 미분하여 각 층별 기둥의 횡가속도 값들을 추정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 15

청구항 14에 있어서, 상기 각 층별 횡가속도 값들은 다음 수식

$$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2}$$

에 기초하여 추정되며, 여기서, y 는 각 층별 기둥의 횡변위, y'' 는 각 층별 기둥의 횡가속도, x_i 는 수직축상의 i 번째 위치이고 t 는 시간인 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 16

청구항 10 또는 청구항 14에 있어서, 각각의 값들은 각각 후속하는 연산에 적용되기 전에 필터링되어 노이즈를 제거한 후에 각각 후속하는 연산에 적용되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 17

청구항 10에 있어서, 상기 변형률 센서들은 광 브래그 격자 변형률 센서이고, 상기 센서 데이터 수신부는 복수의 광 브래그 격자 변형률 센서들이 형성된 적어도 하나의 광 케이블이 연결되는 인테로게이터로서 구현되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 18

청구항 10에 있어서, 상기 변형률 센서들은 상기 각 층별 기둥의 최상단 및 최하단의 각각에 복수 개 설치되는 것을 특징으로 하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법.

청구항 19

컴퓨터에서 청구항 10 내지 청구항 18 중의 어느 한 청구항에 따른 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법을 구현하는 프로그램이 수록된 컴퓨터로 독출가능한 기록 매체.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 건물 모니터링 기술에 관한 것으로, 더욱 상세하게는, 사용성 모니터링 기술에 관한 것이다.

배경 기술

건물의 구조 모니터링은 목적에 따라 안전도 모니터링과 사용성 모니터링으로 구분될 수 있다. 안전도 모니터링이 예를 들어 건물이 얼마나 기울어졌는지, 기둥이 얼마나 휘어졌는지에 관하여, 즉 구조물의 변형률(strain)을 모니터링하는 활동이라면, 사용성 모니터링은 건물이 바람에 흔들려서 불안감을 준다거나 하는 거주자들의 주거 감성에 관하여 구조물의 변위(displacement)를 모니터링하는 활동이다.

안전도 모니터링 활동에는 변형률계가 사용되고 사용성 모니터링 활동에서는 가속도계나 변위계가 사용된다.

- [0004] 사용성 모니터링이 가능한 변위계는 카메라나 레이저 스캐너, 라이더(LIDER) 등의 영상 또는 레이저 기반 센서에 기반하거나, GPS 기반의 정밀한 위치 센서, 자이로스코프 기반의 가속도계에 주로 기반할 수 있다.
- [0005] 그러나 영상 기반 센서는 시스템이 고가이고 시야를 확보하여야 하기 때문에 상시적으로 활용하기 어렵다. GPS 기반의 위치 센서는 외부 벽면 또는 옥상과 같이 설치 장소의 제약이 크고, 가속도계는 정적 변위를 예측하기에 부적합하고 이중 적분이 필요하므로 누적되는 수치 오차를 피할 수 없다.
- [0006] 이에 따라 변형률로부터 변위를 추정하려는 시도들이 있었으나 모두 보 구조물의 변위 응답을 추정하는 데에 한정되는 제한이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법을 제공하는 데에 있다.
- [0008] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 센서의 수가 적고 관리하기 편리하며 저렴한 변형률 센서들을 이용하는 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법을 제공하는 데에 있다.
- [0009] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 적분이 아닌 미분을 이용하여 오차가 누적되지 않는 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법을 제공하는 데에 있다.
- [0010] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확히 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0011] 본 발명의 일 측면에 따른 건물 횡방향 구조반응 모니터링 장치는,
- [0012] 각 층별 기둥마다 최상단 및 최하단에 각각 설치되는 복수의 변형률 센서들;
- [0013] 상기 변형률 센서들로부터 각각 변형률 값들을 수신하는 센서 데이터 수신부; 및
- [0014] 각 층별 기둥마다 수신된 최상단 변형률 값과 최하단 변형률 값의 차이에 비례하여 추정된 각 층별 기둥의 곡률 분포로부터 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정하는 횡방향 구조반응 추정부를 포함할 수 있다.
- [0015] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 곡률 분포는 다음 수식

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_b(x) - \epsilon_t(x)}{h}$$

- [0016]
- [0017] 에 기초하여 추정되고, 여기서 κ 는 곡률이고, ϵ_b 와 ϵ_t 는 각각 기둥의 최하단(bottom)과 최상단(top)에 설치된 변형률 센서들에서 계측되는 변형률 값들이며, h 는 최하단에 설치된 변형률 센서를 기준으로 최상단에 설치된 변형률 센서까지의 거리, x 는 기둥 내에서 수직축 상의 임의의 위치를 의미할 수 있다.

- [0018] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은 다음 수식

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx$$

- [0019]
- [0020] 에 기초하여 추정되고, 여기서, κ 는 곡률이고, $y(x)$ 는 기둥 내의 임의의 수직축 상의 위치 x 에서 횡변위를 의미할 수 있다.

- [0021] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은, 각 층별 기둥의 최하단의 횡변위가 바로 아래층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고 최하층 기둥의 최하단의 횡변위는 0인 것을 경계조건으로 하여, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지 반복적으로 추정될 수 있다.

[0022] 일 실시예에 따라, 상기 횡방향 구조반응 추정부는,

[0023] 각 층별 기둥의 횡변위 값들을 시간에 따라 이중 미분하여 각 층별 기둥의 횡가속도 값들을 더 추정하도록 동작할 수 있다.

[0024] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 횡가속도 값들은 다음 수식

$$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2}$$

[0025] 에 기초하여 추정되며, 여기서, y 는 각 층별 기둥의 횡변위, y'' 는 각 층별 기둥의 횡가속도, x_i 는 수직축 상의 i 번째 위치이고 t 는 시간일 수 있다.

[0027] 일 실시예에 따라, 각각의 값들은 각각 후속하는 연산에 적용되기 전에 필터링되어 노이즈를 제거한 후에 각각 후속하는 연산에 적용될 수 있다.

[0028] 일 실시예에 따라, 상기 변형률 센서들은 광 브래그 격자 변형률 센서이고, 상기 센서 데이터 수신부는 복수의 광 브래그 격자 변형률 센서들이 형성된 적어도 하나의 광 케이블이 연결되는 인테로게이터를 포함할 수 있다.

[0029] 일 실시예에 따라, 상기 변형률 센서들은 상기 각 층별 기둥의 최상단 및 최하단의 각각에 복수 개 설치될 수 있다.

[0030] 본 발명의 다른 측면에 따른 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법은,

[0031] 변형률 센서들, 센서 데이터 수신부 및 횡방향 구조반응 추정부를 포함하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 시스템을 이용한 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법으로서,

[0032] 상기 센서 데이터 수신부가, 건물에서 하나의 연속한 기둥열을 구성하는 각 층별 기둥마다 기둥의 최상단 및 최하단에 각각 설치된 변형률 센서들로부터 변형률 값들을 수신하는 단계;

[0033] 상기 횡방향 구조반응 추정부가, 각 층별 기둥의 최상단의 변형률 값과 최하단의 변형률 값의 차이에 비례하는 각 층별 기둥의 곡률 분포를 추정하는 단계; 및

[0034] 상기 횡방향 구조반응 추정부가, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지, 각 층별 기둥의 곡률 분포를 반복적으로 이중 적분함으로써 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0035] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 곡률 분포는 다음 수식

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_b(x) - \epsilon_t(x)}{h}$$

[0037] 에 기초하여 추정되고, 여기서 κ 는 곡률이고, ϵ_b 와 ϵ_t 는 각각 기둥의 최하단(bottom)과 최상단(top)에 설치된 변형률 센서들에서 측정되는 변형률 값들이며, h 는 최하단에 설치된 변형률 센서를 기준으로 최상단에 설치된 변형률 센서까지의 거리, x 는 기둥 내에서 수직축 상의 임의의 위치를 의미할 수 있다.

[0038] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은 다음 수식

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx$$

[0040] 에 기초하여 추정되고, 여기서, κ 는 곡률이고, $y(x)$ 는 기둥 내의 임의의 수직축 상의 위치 x 에서 횡변위를 의미할 수 있다.

[0041] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들은, 각 층별 기둥의 최하단의 횡변위가 바로 아래층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고 최하층 기둥의 최하단의 횡변위는 0인 것을 경계조건으로 하여, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지 반복적으로 추정될 수 있다.

- [0042] 일 실시예에 따라, 상기 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법은,
- [0043] 각 층별 기둥의 횡변위 값들을 시간에 따라 이중 미분하여 각 층별 기둥의 횡가속도 값들을 추정하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0044] 일 실시예에 따라, 상기 각 층별 횡가속도 값들은 다음 수식
- $$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2}$$
- [0045] 에 기초하여 추정되며, 여기서, y 는 각 층별 기둥의 횡변위, y'' 는 각 층별 기둥의 횡가속도, x_i 는 수직축 상의 i 번째 위치이고 t 는 시간일 수 있다.
- [0047] 일 실시예에 따라, 각각의 값들은 각각 후속하는 연산에 적용되기 전에 필터링되어 노이즈를 제거한 후에 각각 후속하는 연산에 적용될 수 있다.
- [0048] 일 실시예에 따라, 상기 변형률 센서들은 광 브래그 격자 변형률 센서이고, 상기 센서 데이터 수신부는 복수의 광 브래그 격자 변형률 센서들이 형성된 적어도 하나의 광 케이블이 연결되는 인테로게이터로서 구현될 수 있다.
- [0049] 일 실시예에 따라, 상기 변형률 센서들은 상기 각 층별 기둥의 최상단 및 최하단의 각각에 복수 개 설치될 수 있다.

발명의 효과

- [0050] 본 발명의 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법에 따르면, 상대적으로 저렴하며 설치 및 관리하기 편한 변형률 센서를 이용하여 건물의 횡방향 구조반응 모니터링이 가능하다.
- [0051] 본 발명의 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 방법에 따르면, 실시간적으로 변위를 추정할 수 있어 실질적인 사용성 모니터링이 가능하다.
- [0052] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0053] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 이를 설치한 건물을 예시한 개념도이다.
- 도 2는 도 1의 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치의 변형률 센서들이 건물의 1개 층에 설치된 모습을 예시한 개념도이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 방법을 예시한 순서도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치를 도 1과 같이 설치하였을 경우에 지진과 인가 시에 측정되는 실시간적인 횡가속도 이력 응답을 예시한 그래프이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치를 도 1과 같이 설치하였을 경우에 지진과 인가 시에 구조물 시뮬레이션을 통해 추정되는 동특성과 본 발명의 변형률 기반 모니터링에 의해 추정되는 동특성을 예시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0054] 본문에 개시되어 있는 본 발명의 실시예들에 대해서, 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 실시예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본문에 설명된 실시예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.
- [0055] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 도면상의 동

일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.

- [0056] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치 및 이를 설치한 건물을 예시한 개념도이다.
- [0057] 도 1을 참조하면, 횡방향 구조반응 모니터링 장치(10)는 복수의 변형률 센서들(11), 센서 데이터 수신부(12) 및 횡방향 구조반응 추정부(13)를 포함할 수 있다.
- [0058] 도 1에서, 변형률 센서들(11)은 예시적으로 9 개 층의 철골모멘트 골조 구조물에 설치된다. 각 층의 높이는 3.96 m이고, 최하층의 높이는 5.48 m이며, 기둥열 사이의 간격은 9.14 m이다.
- [0059] 구조물의 변형률 데이터를 얻기 위해 맨 왼쪽 첫 번째 기둥열에 변형률 센서들(11)이 층당 네 개씩, 총 36 개가 설치된다.
- [0060] 구체적으로 변형률 센서들(11)은 도 1의 예시와 같이 각 층의 기둥마다 최상단 및 최하단에 설치된다.
- [0061] 특히, 변형률 센서들(11)은 좀더 정확한 변형률 측정을 위해 도 2의 예시와 같이 특히 기둥(20)의 최상단의 복수의 위치, 예를 들어 H 빔의 맨 윗부분에서 마주하는 양면과 기둥 최하단의 복수의 위치, 예를 들어 H 빔의 맨 아랫부분에서 마주하는 양면에 각각 설치될 수 있다.
- [0062] 구조물의 변형률은 구조물의 수직축을 따라 분석되므로, 기둥의 특정 높이에 복수 개 서로 마주하게 설치되는 변형률 센서들(11)은 수직축 상에서는 동일한 위치에 설치된 센서들로 간주될 수 있다. 따라서, 동일한 수직축 상의 위치에 복수의 센서들로부터 변형률 값들을 수신하고 이들 데이터의 평균을 이용하면 해당 위치에서 변형률의 오차를 줄일 수 있다.
- [0063] 이러한 변형률 센서들(11)의 배치에 관하여 좀더 구체적으로 예시하기 위하여 도 2를 참조하면, 도 2는 도 1의 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치의 변형률 센서들이 건물의 1개 층에 설치된 모습을 예시한 개념도이다.
- [0064] 도 2에서, 건물 기둥(20)은 H 빔으로 시공되고, 기둥의 최상단 및 최하단에서, H 빔의 웹(web)과 플랜지(flange)가 만나는 부분에 변형률 센서들(11)이 설치된다.
- [0065] 평면은 휨 변형 후에도 평면을 형성한다는 베르누이(Bernoulli)의 가정에 근거하면, 센서가 설치된 기둥의 최상단 및 최하단에서 곡률은 다음 수식 1과 같이 계산될 수 있다.

수학식 1

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_b(x) - \epsilon_t(x)}{h}$$

[0066]

- [0067] 여기서, κ 는 곡률이고, ϵ_b 와 ϵ_t 는 각각 기둥의 최하단(bottom)과 최상단(top)에 설치된 변형률 센서들에서 측정되는 변형률 값들이며, h 는 최하단에 설치된 변형률 센서를 기준으로 최상단에 설치된 변형률 센서까지의 거리, x 는 기둥 내에서 수직축 상의 임의의 위치를 의미한다

- [0068] 한편, 건물이 기둥의 횡방향 변위를 일으키는 횡하중을 받고 있을 경우에, 기둥의 모멘트 분포는 각 층마다 도 2에서 점선으로 표시되는 1차 곡선, 즉 직선으로 표현될 수 있다. 이에 따라 수식 1은 다음 수식 2와 같이 모멘트의 함수로 표현될 수 있다.

수학식 2

$$\kappa(x) = \frac{M(x)}{E \cdot I}$$

[0069]

- [0070] 여기서, M은 모멘트, E는 탄성계수, I는 단면 2차 모멘트를 각각 의미한다.

[0071] 만약 기둥에서 전단 변형에 의한 횡변형 요소는 고려되지 않고 휨변형에 의한 횡변위 요소만 고려한다면, 다음 수식 3의 탄성곡선법을 이용하여, 기둥 내에서 변형률 ϵ 의 분포로부터 곡률 κ 의 분포를 얻고, 이어서 곡률 κ 분포로부터 횡변위 y 의 분포를 추정할 수 있다.

수학식 3

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx$$

[0072] 여기서, $y(x)$ 는 기둥 내의 임의의 수직축 상의 위치 x 에서 횡변위를 의미한다.

[0073] 한편, 수식 3을 이용하여 각 층의 기둥마다 횡변위 분포 $y(x)$ 를 구하려면, 소정의 경계 조건들(boundary conditions)을 이용하여 두 적분 상수의 값을 구하여야 한다.

[0074] 각 층 사이의 바닥 또는 천장에 보의 두께를 무시할 수 있다고 가정하면, 수직으로 연속한 기둥들 중의 각 층 기둥마다 횡변위 분포는 각 층 기둥의 최하단의 횡변위는 바로 아래 층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고, 최하층에 위치한 기둥의 최하단은 지반에 고정된 고정단이라는, 즉 횡변위가 0이라는 경계 조건을 이용하여 얻을 수 있다.

[0075] 이러한 경계 조건에 기초하여, 최하층인 1층 기둥의 최하단의 횡변위가 0일 때에 수식 3에 의해 1층 기둥의 최상단과 최하단에 각각 설치된 변형률 센서들에서 얻은 변형률 값들로부터 1층 기둥의 최상단의 횡변위가 얻어진다. 이어서, 2층 기둥의 최하단의 횡변위는 1층 기둥의 최상단의 횡변위와 같다는 경계 조건 하에서, 2층 기둥의 최상단과 최하단에 각각 설치된 변형률 센서들에서 얻은 변형률 값들로부터 2층 기둥의 최상단의 횡변위가 얻어진다. 이러한 횡변위의 추정이 각 층마다 반복되면서, 최상층의 최상단의 횡변위까지 얻어지며, 전체 건물의 기둥열의 횡변위 분포가 추정될 수 있다.

[0076] 나아가 다음 수식 4와 같이 추정된 각 층별 기둥의 횡변위 y 를 이중미분하면 각 층별 기둥의 횡가속도 y'' 를 추정할 수 있다.

수학식 4

$$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2}$$

[0077] 여기서, x_i 는 수직축 상의 i 번째 위치이고 t 는 시간이다.

[0078] 나아가, 수식 4와 같이 얻은 횡가속도 분포로부터 FDD(frequency domain decomposition) 기법을 이용하여 구조물의 고유주기 및 모드 형상을 추정할 수 있다.

[0079] 이렇듯 본 발명의 횡방향 구조반응 모니터링 기법은 변형률 센서들을 각 기둥의 최상단과 최하단에 설치함으로써 측정된 변형률 값들로부터 수직 기둥열의 횡변위와 횡가속도를 추정할 수 있다.

[0080] 이에 따라, 통상적으로 횡방향 변위를 모니터링하기 위해 사용되는 영상 기반, 레이저 기반, 내지 GPS 기반의 변위 모니터링 장치들을 대체할 수 있을 뿐 아니라, 종래의 변위 모니터링 장치들이 제공하기 어려운, 실시간적인 높은 시간 해상도의 횡방향 구조반응도 모니터링할 수 있다.

[0081] 이러한 본 발명의 횡방향 구조반응 모니터링 기법에 적합한 변형률 센서는 예를 들어 다음과 같은 FBG 변형률 센서를 예로 들 수 있다.

- [0084] 통상적으로 센서들은 데이터 수신부와 각 센서들 사이에 전원 및 데이터를 전송할 케이블이 센서마다 구비되어야 한다. 데이터 전송을 무선으로 하는 무선 센서의 경우에도 전원을 공급할 케이블링 구성은 필요하다.
- [0085] 반면에 FBG 변형률 센서는 하나의 광섬유 케이블에 복수의 센서들이 구비되며, 광섬유 코어를 통과하는 빛의 광학적 특성을 이용하기 때문에 각 센서들에 별도의 전원이 필요하지 않으므로 케이블링 구성이 매우 간결해진다.
- [0086] 일반적으로, 광 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg Gating) 센서는 브래그 법칙(Bragg's Law)에 따라 발생하는 반사 파장의 변이를 측정함으로써 격자가 고정되어 있는 구조물의 변형을 검출할 수 있는 센서이다.
- [0087] 브래그 법칙은, 결정 내의 원자들이 특정한 간격의 격자 구조를 가질 때, 입사되는 전자기파 또는 입사파의 파장, 입사각, 격자 간격에 따라 특정한 반사각에서 보강 간섭이 일어나는 현상인 브래그 회절에 따라, 입사파의 파장, 입사각 및 격자의 간격 사이의 관계를 정의하는 물리 법칙이다.
- [0088] 브래그 조건은 브래그 법칙에 따라 보강 간섭이 일어나기 위한 입사각, 입사각 및 격자 간격의 조건들을 의미한다.
- [0089] 한편, 광섬유 케이블은 굴절율이 높은 물질에서 굴절율이 낮은 물질로 빛이 진행할 때 그 경계면에서 전반사가 일어나는 원리를 이용한다. 광섬유 케이블은 구조적으로는 굴절율이 높은 코어(core)를 굴절율이 낮은 클래딩(cladding)으로 감싼 케이블로서, 광섬유 케이블의 코어에 입사된 빛은 코어와 클래딩 사이에서 전반사됨으로써 코어에서 벗어나지 못하고 코어를 따라 전송된다.
- [0090] 코어는 실리카 유리에 굴절율을 높이는 물질로 예를 들어 게르마늄(Ge)을 미량 첨가하여 제조하는데, 게르마늄이 실리카 유리에 안착하는 과정 중에 구조적 결함(defect)이 생길 수 있다. 이러한 결함에 강한 자외선을 조사하면 게르마늄의 결함 구조가 변형되면서 해당 지점에 광섬유의 굴절율이 변화한다.
- [0091] 광 브래그 격자 센서는 이러한 현상을 적극적으로 이용하여, 광섬유 케이블의 일부 구간의 코어에서 굴절율이 나머지 정상적인 지점과 다른 값을 가지는 적어도 하나의 격자 구간을 가지는 광섬유 기반의 센서이다.
- [0092] 광 브래그 격자 센서는 굴절율이 달라지는 경계 지점들, 즉 유전체 반사 미러(dielectric mirror)에서 광 브래그 격자의 브래그 조건을 만족하는 파장을 반사시키기 때문에, 결과적으로 광 브래그 격자 센서 케이블에 입사되는 소정 파장 범위의 빛 중에 반사되는 특정 파장의 빛을 제외한 나머지 파장의 빛만 광 브래그 격자 센서 케이블에서 출력된다.
- [0093] 광 브래그 격자 센서는 브래그 조건을 만족하는 파장을 좀더 확실하게 반사시키기 위해 일정한 길이 내에 다수의 광 브래그 격자들을, 예를 들어 10 mm 정도의 구간 내에 수 개의 격자 구간들을 가질 수 있고, 각 격자 구간마다 수 천 개의 격자를 가질 수 있다.
- [0094] 브래그 격자에서 반사되는 빛의 파장과 격자 구간 간격과의 관계는 다음 수식 5와 같다.

수학식 5

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

- [0095] 여기서, λ_B 는 브래그 파장, n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률, Λ 는 브래그 격자 간격을 의미한다.
- [0096] 이러한 격자 구간들 각각의 브래그 조건은 모두 동일할 수도 있지만, 경우에 따라, 각각의 브래그 조건이 서로 다르도록 만든다면 반사되는 빛의 스펙트럼을 분석하기가 더 용이해질 수 있다.
- [0097] 이러한 광 브래그 격자 센서 케이블을 압축 또는 인장하거나 뒤틀리는 구조물에 장착하면, 구조물의 압축, 인장 또는 뒤틀림에 따라 광 브래그 격자 센서의 격자 구조에서 격자 간격에 미묘한 변화가 생기고, 그에 따라 광 브래그 격자에서 반사되는 빛의 파장도 변화한다. 따라서 광 브래그 격자 센서 케이블에서 반사되는 빛 또는 투과된 빛의 스펙트럼의 변화를 분석하면, 구조물의 미세한 변형을 정밀하게 검출할 수 있다.
- [0098] 광 브래그 격자 센서에 가해지는 응력(strain 또는 stress)에 의한 게르마늄 실리카 유리의 탄성적 변형과 반사되는 빛의 파장의 변화 사이의 관계는 다음 수식 6과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 6

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon$$

여기서 λ_B 는 브래그 파장, 즉 반사되는 빛의 파장이고, $\Delta\lambda_B$ 는 반사광의 파장 변화이며, P_e 는 광탄성 상수(Photo-elastic constant)로서 게르마늄 실리카 유리의 경우에 약 0.22의 값을 가지고, ϵ 은 광섬유 격자 구조에 가해진 응력(strain), 즉 변형률 값이다.

한편, 광 브래그 격자 센서의 반사광 파장은 온도에 따른 팽창에도 영향을 받으며, 비록 이 점에 관하여 본 발명의 명세서에서는 설명을 생략하나, 필요에 따라 용이하게 고려할 수 있다.

다시 도 1로 돌아가서, 센서 데이터 수신부(12)는 변형률 센서들(11)로부터 변형률 데이터를 수신하고 후처리한다.

변형률 센서들(11)이 FBG 센서인 실시예에서 센서 데이터 수신부(12)는 인터로게이터(interrogator)일 수 있다.

하나의 긴 광섬유 케이블마다 광 브래그 격자(FBG) 변형률 센서들(11)이 복수 개가 형성된다. 각자 복수 개의 FBG 변형률 센서들(11)이 형성된 하나 이상의 긴 광섬유 케이블들은 인터로게이터로 구현되는 센서 데이터 수신부(12)에 연결된다.

센서 데이터 수신부(12)는 복수의 FBG 변형률 센서들(11)이 형성된 적어도 하나의 광 섬유 케이블에 소정의 입사광 스펙트럼을 가지는 입사광을 입사시킨다.

센서 데이터 수신부(12)는 광 브래그 격자 변형률 센서들(11)의 격자 간격에 따라 반사된 반사광의 스펙트럼을 광섬유 케이블의 입력단에서 검출하거나 또는 광 브래그 격자 변형률 센서들(11)의 격자 간격에 따라 부분적으로 억제된 투과광의 스펙트럼을 광섬유 케이블의 출력단에서 검출할 수 있다.

센서 데이터 수신부(12)는 검출된 광 브래그 격자 변형률 센서들(11)의 반사광 또는 투과광 스펙트럼의 변화에 기초하여 광 브래그 격자 변형률 센서들(11)의 격자 간격의 변화를 측정함으로써, 결과적으로 기둥(20)의 변형 정도를 알 수 있다.

이때 광 브래그 격자 변형률 센서들(11)의 각각의 격자 구조가 반사하는 반사광의 중심 파장 값들은 서로 동일할 수도 있고, 실시예에 따라 다를 수도 있다.

다만, 기둥(20)은 선형 탄성 범위 내에서 변형이 이루어져야 하며, 탄성 범위 내에서 탄성 계수의 선형성도 유지되는 것이 바람직하다.

이어서, 횡방향 구조반응 추정부(13)는 변형률 데이터에 기초하여 수식 1 내지 4에 따라 횡방향 변위 및 횡방향 가속도를 추정할 수 있다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 방법을 예시한 순서도이다.

도 3을 참조하면, 변형률 센서들(11), 센서 데이터 수신부(12) 및 횡방향 구조반응 추정부(13)를 포함하는 건물 횡방향 구조반응 모니터링 시스템을 이용한 건물 횡방향 구조반응 모니터링 방법은, 먼저 단계(S31)에서, 센서 데이터 수신부(12)가 건물에서 하나의 연속한 기둥열을 구성하는 각 층별 기둥마다 기둥의 최상단 및 최하단에 각각 설치된 변형률 센서들로부터 변형률 값들을 수신하는 단계로부터 시작할 수 있다.

실시예에 따라, 변형률 센서는 광 브래그 격자(FBG) 센서이다.

실시예에 따라, 변형률 센서들은 기둥의 최상단 및 최하단의 각각에 복수 개 설치될 수 있다. 이 경우, 기둥의 최상단 및 최하단에서 변형률 값은 복수 개의 변형률 센서들의 출력들의 평균으로 산출될 수 있다.

단계(S32)에서, 횡방향 구조반응 추정부(13)가 각 층별 기둥의 최상단의 변형률 값과 최하단의 변형률 값의 차이에 비례하는 각 층별 기둥의 곡률 분포를 예를 들어 상술한 수식 1과 같이 1차 곡선의 형태로 추정한다.

- [0117] 단계(S33)에서, 각 층별 기둥의 최하단의 횡변위와 바로 아래층 기둥의 최상단의 횡변위와 같고 최하층 기둥의 최하단의 횡변위는 0인 것을 경계조건으로 하여, 최하층 기둥부터 최상층 기둥까지, 각 층별 기둥의 곡률 분포를 예를 들어 상술한 수식 3과 같이 반복적으로 이중 적분함으로써 각 층별 기둥의 최상단 횡변위 값들을 추정한다.
- [0118] 선택적 단계인 단계(S34)에서는, 각 층별 기둥의 횡변위 값들을 시간에 따라 예를 들어 수식 4와 같이 이중 미분하여 각 층별 기둥의 횡가속도 값들을 추정한다.
- [0119] 수신된 변형률 값들, 추정된 횡변위 값들 또는 횡가속도 값들은 각각 획득된 후에, 또는 이후의 연산에 이용되기 전에, 예를 들어 칼만 필터, 저역 통과 필터 등의 소정의 필터를 거쳐 필터링될 수 있다.
- [0120] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치를 도 1과 같이 설치하였을 경우에 인가되는 지진파와, 지진파의 인가 시에 최상층에서 측정되는 변형률 값들, 횡변위 시간 응답 및 횡가속도 시간 응답을 예시한 그래프들이다.
- [0121] 도 4에서, 도 1과 같이 9층 건물의 왼쪽 첫 번째 기둥열에 각각 층당 4개씩의 변형률 센서들이 설치되고, 건물 기부에 지진파를 모방한 진동이 인가된다. 지진파의 해석 시에 다이어프램 효과와 P-delta 효과는 고려되고, 패널 존의 강성 및 강도 효과는 고려되지 않았다. 기둥과 보의 접합부는 강접으로 연결되었고 부재의 재료는 탄성 재료라고 가정한다.
- [0122] 이 구조물의 1차 및 2차 고유 주기는 예시적으로 약 2.08초 및 0.78초(즉, 1차 및 2차 고유 진동수는 각각 약 0.48 및 1.28)이며, 2차모드까지의 질량참여율은 92.85%이다.
- [0123] 도 4의 (a)는 시뮬레이션에 적용된 지진파의 시간상 진동 파형이다.
- [0124] 도 4의 (b)는 최상층인 9 층의 기둥의 최하단과 최상단에 각각 설치된 변형률 센서들로부터 수신된 변형률 값들이다. 최하단의 두 개의 변형률 센서들로부터 수신된 변형률 값들은 각각 검은 색과 빨간 색으로 표시되고, 최상단의 두 개의 변형률 센서들로부터 수신된 변형률 값들은 각각 파란색과 녹색으로 표시되었다.
- [0125] 도 4의 (b)의 변형률 값들의 시간상 파형은 비록 지진파가 인가된 직후에 진폭이 커지다가 점점 줄어드는 형태를 보이지만 이러한 파형 자체로부터 최상층 기둥의 횡방향 거동이 어떠한 지 직관적으로 알기는 어렵다.
- [0126] 도 4의 (c)는 9층 구조물의 수치 모델 기반 시뮬레이션에 따른 9 층 최상단의 횡변위 시간 응답 파형과 본 발명에 따라 추정된 횡변위 시간 응답 파형이다. 검은 색으로 표시된 구조 해석 결과 파형과 빨간 색의 본 발명에 따른 추정 결과 파형을 비교해보면 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 횡변위의 구조 해석 결과와 추정 결과는 최대 0.0041 cm, 최소 0.0038 cm의 오차를 보였다. 건물 9 층의 높이가 약 40 m인 점을 감안하면 본 발명의 횡방향 구조응답 모니터링 기법의 횡변위 추정에 따른 오차가 매우 작음을 알 수 있다.
- [0127] 또한 본 발명에 따른 횡변위의 추정 결과는 거의 실시간적으로 높은 시간 해상도를 가지고 획득될 수 있다.
- [0128] 도 4의 (d)는 9 층 최상단의 시뮬레이션된 횡가속도 시간 응답 파형과, 본 발명에 따라 추정된 횡가속도 시간 응답을 저역 통과 필터링하고 수식 4와 같이 이중 미분에 따른 노이즈를 제거한 횡가속도 시간 응답 파형을 중첩한 그래프이다.
- [0129] 횡가속도의 구조 해석 결과와 추정 결과는 거의 일치함을 알 수 있다.
- [0130] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 변형률 센서에 기초한 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 장치를 도 1과 같이 설치하였을 경우에 지진파 인가 시에 구조물 시뮬레이션을 통해 추정되는 동특성과 본 발명의 변형률 기반 모니터링에 의해 추정되는 동특성을 예시한 도면이다.
- [0131] 구조물의 손상 평가에서 일반적으로 고유 진동수 및 모드 형상과 같은 구조물의 동특성 값을 이용하는데, 본 발명의 횡방향 구조반응 모니터링 기법에 따른 층별 횡가속도 값을 이용하면 구조물의 동특성을 추정할 수 있다.
- [0132] 이를 위해 FDD(frequency domain decomposition) 기법을 사용하며, 모드 형상의 유사성을 파악하기 위해 다음 수식 7과 같은 MAC(modal assurance criteria)를 사용한다.

수학식 7

$$MAC_{ij} = \frac{[\{x_i\}^T \{\phi_j\}]^2}{[\{x_i\}^T \{x_j\}][\{\phi_i\}^T \{\phi_j\}]}$$

여기서 x_i 는 i 번째 기준 모드 형상을 의미하며, ϕ_j 는 j 번째 비교 모드 형상을 의미한다. MAC 값은 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 높은 상관관계를 의미한다.

도 5에 나타난 바와 같이, 도 5의 (a)는 구조 해석을 통해 얻은 모드 형상이고, 도 5의 (b)는 본 발명의 횡방향 구조반응 모니터링 기법에 따라 얻은 횡가속도 값들을 기초로 FDD 기법을 통해 얻은 모드 형상이다.

또한 다음의 표 1은 구조 해석과 본 발명의 기법에 따른 1차 내지 3차 고유 진동수를 비교한 표이다.

표 1

구분	구조 해석	본 발명 기법 및 FDD
1차 고유 진동수	0.48	0.48
2차 고유 진동수	1.28	1.28
3차 고유 진동수	2.20	2.29

도 5와 표 1에서 나타나는 1차 및 2차의 고유 진동수와 모드 형상에서, 구조 해석 결과와 본 발명의 기법에 기초한 결과는 거의 일치한다. 다만, 3차의 고유 진동수와 모드 형상에서 본 발명의 기법에 따른 결과는 구조 해석 결과에 비해 약간의 차이가 있는데, 앞서 설명하였듯이, 본 예제에서 2차 모드까지의 질량 참여율이 90% 이상이므로, 구조물의 동특성을 모니터링하는 데에는 부족함이 없다.

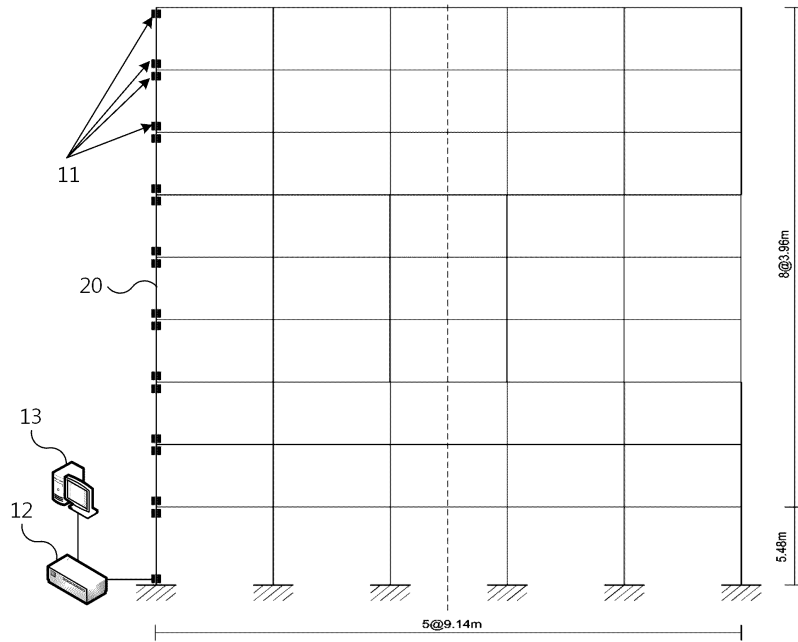
본 실시예 및 본 명세서에 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 명확하게 나타내고 있는 것에 불과하며, 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형예와 구체적인 실시예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것이 자명하다고 할 것이다.

부호의 설명

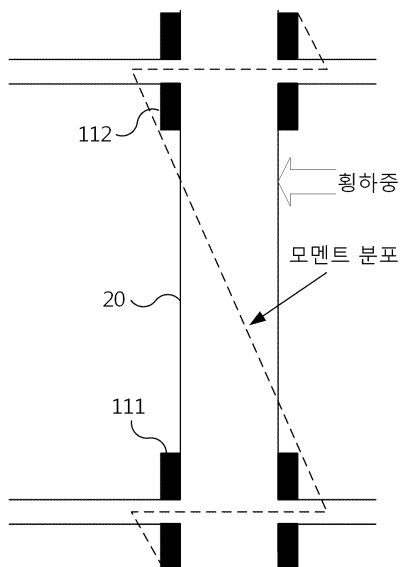
- 10 횡방향 구조반응 모니터링 장치
- 11 변형률 센서
- 12 센서 데이터 수신부
- 13 횡방향 구조반응 추정부
- 20 기둥

도면

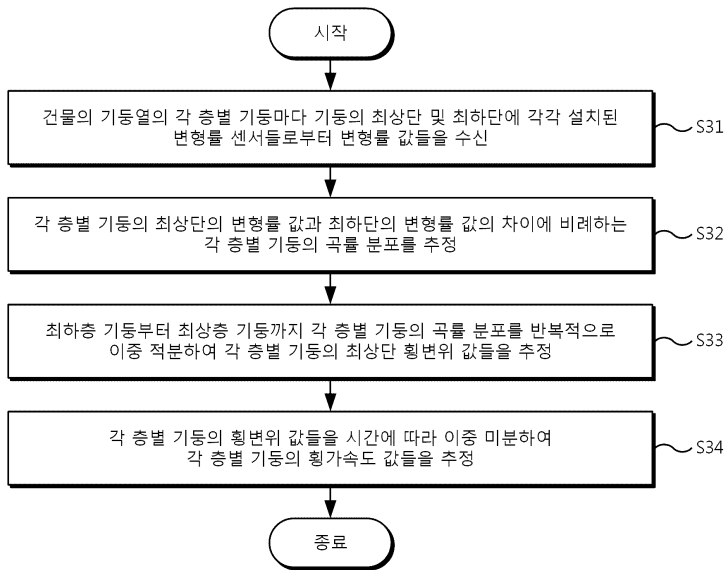
도면1



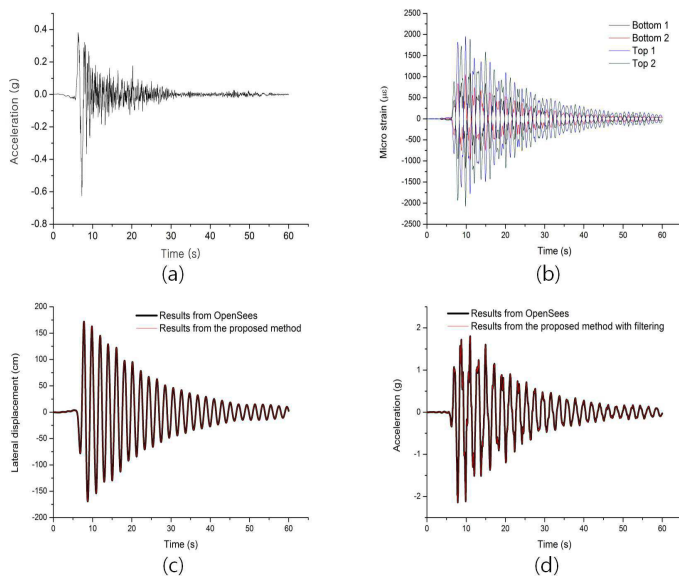
도면2



도면3



도면4



도면5

