



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년07월27일
 (11) 등록번호 10-1642951
 (24) 등록일자 2016년07월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 G06Q 50/26 (2012.01)

(21) 출원번호 10-2014-0155438
 (22) 출원일자 2014년11월10일
 심사청구일자 2014년11월10일
 (65) 공개번호 10-2016-0056359
 (43) 공개일자 2016년05월20일
 (56) 선행기술조사문헌
 한국지반공학회논문집 제28권 제5호*
 한국시설안전공단 시설안전. VOL. 38*
 지구물리와 물리탐사 VOL. 16, NO. 4, 2013, P. 257~267*
 *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
 서울대학교산학협력단
 서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
 한국해양과학기술원
 경기도 안산시 상록구 해안로 787 (사동)

(72) 발명자
 정충기
 서울특별시 관악구 관악로 1 35동 건설환경공학부 (신림동, 서울대학교)
 김한샘
 서울특별시 관악구 관악로 1 35동 건설환경공학부 (신림동, 서울대학교)

박우선
 서울특별시 서초구 방배로 14, 5-601(방배동 임광아파트)

(74) 대리인
 조성광

전체 청구항 수 : 총 14 항

심사관 : 김일환

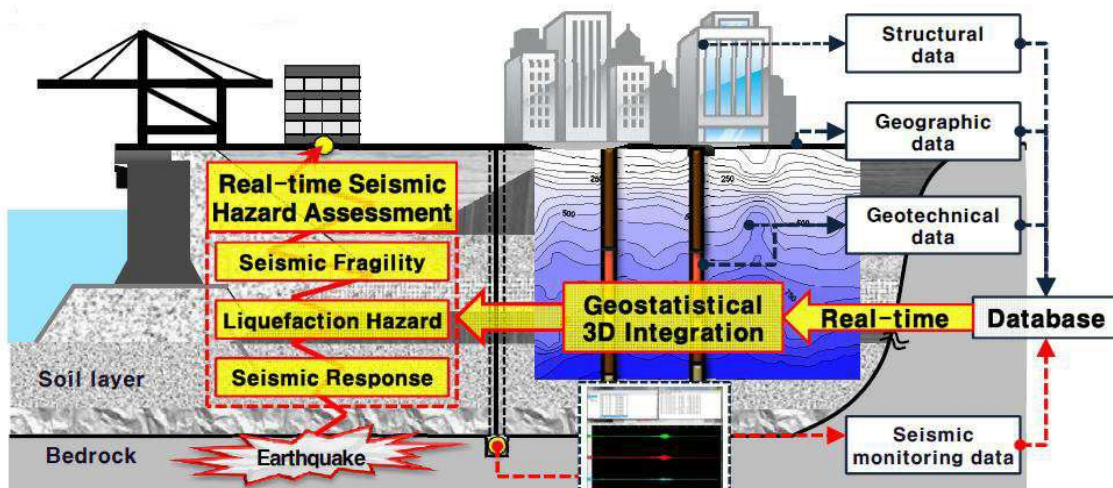
(54) 발명의 명칭 **G I S 기반 실시간 지진피해 예측 방법**

(57) 요약

본 발명은 GIS를 기반으로 지진 발생 시 평가 대상 지역의 지진파를 계측하도록 설치된 지진계측기로부터 수집된 계측 정보와 지반조사 정보 및 구조물 정보를 관리하고 이를 연계 평가하여 평가 대상 지역의 지진 피해를 실시간으로 예측하는 방법에 관한 것이다.

(뒷면에 계속)

대표도 - 도8



본 발명은 「평가 대상 지역의 시추정보 및 물리탐사 자료에 기초한 공간 보간을 통해, 3차원 공간 그리드(3D Spacial Grid)에 의해 영역화되어 개별적으로 지반특성이 정보화된 셀(Cell)의 집합으로 이루어진 3차원 공간 모델이 구축되어 있고, 지진계측부 및 연산처리부가 구비된 GIS(Geographic Information System)를 통한 지진 피해 예측 방법으로서, (A) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 부지응답해석을 통해 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계를 도출하는 단계; (B) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반특성 분석을 통해 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 액상화 평가 대상을 선별하는 단계; 및 (C) 상기 연산처리부가 상기 지진계측부로부터 지진파의 암반노두가속도 계측값을 수신하여 각 셀별로 지진파의 최대가속도를 도출하고, 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 산정하여, 각 셀별 액상화 안전율($FS_{\text{liquefaction}}$) 및 액상화 피해 등급을 도출하는 단계; 를 포함하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법」을 제공한다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	Q44
부처명	국토해양부
연구관리전문기관	한국해양과학기술진흥원
연구사업명	첨단항만기술개발사업
연구과제명	GIS 기반 지진계측 관리 및 지진피해 예측 시스템 구축
기여율	1/1
주관기관	한국해양과학기술원
연구기간	2008.12.01 ~ 2013.06.30

명세서

청구범위

청구항 1

평가 대상 지역의 시추정보 및 물리탐사 자료에 기초한 공간 보간을 통해, 3차원 공간 그리드(3D Spacial Grid)에 의해 영역화되어 개별적으로 지반특성이 정보화된 셀(Cell)의 집합으로 이루어진 3차원 공간 모델이 구축되어 있고, 지진계측부 및 연산처리부가 구비된 GIS(Geographic Information System)를 통한 지진 피해 예측 방법으로서,

상기 3차원 공간 모델은,

- (1) 평가 대상 지역 내 다수 시추공에 대한 이상치 분석(Outlier Analysis)을 통해 정보 수집 대상 시추공을 선별하는 단계;
- (2) 상기 (1)단계를 통한 선별 시추공의 시추정보 및 상기 평가 대상 지역에 대한 물리탐사 자료를 통합한 배리오그램(Variogram) 모델링을 통해 평가 대상 지역에 대한 3차원적 지반정보를 생성하는 단계; 및
- (3) 상기 지반정보를 고려하여 3차원 그리드 사이즈를 결정하고, 상기 3차원 그리드에 의해 영역화된 셀(Cell) 별로 대표 프로파일과 동적 특성을 분류한 공간정보 DB를 구축하고, 상기 공간정보 DB에 기초한 공간 보간을 통해 조사대상지역에 대한 3차원 모델을 생성하는 단계;에 따라 구축되며,

상기 (1)단계는,

- (1-1) 평가 대상 지역 내에서 선정된 n개 시추공 중 평가대상 시추공 하나를 제외한 나머지 시추공의 시추정보에 기초한 크리깅을 순차적으로 수행하여 n개의 평가 배리오그램을 도출하는 단계;
- (1-2) 상기 평가 배리오그램을 통해 도출된 특정 지층의 깊이 추정값을 상기 평가대상 시추공을 통해 측정된 특정 지층의 깊이 측정값과 비교하여 오차를 계산하는 과정을 n차례 수행하는 단계; 및
- (1-3) 상기 추정값과 측정값의 오차가 상대적으로 큰 평가대상 시추공을 이상치로 분류하여 정보 수집 대상 시추공에서 배제하는 단계;를 포함하여 실시되고,
- (A) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 부지응답해석을 통해 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계를 도출하는 단계;
- (B) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반특성 분석을 통해 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 액상화 평가 대상을 선별하는 단계; 및
- (C) 상기 연산처리부가 상기 지진계측부로부터 지진파의 암반노두가속도 측정값을 수신하여 각 셀별로 지진파의 최대가속도를 도출하고, 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 산정하여, 각 셀별 액상화 안전율(FS_{liquefaction}) 및 액상화 피해 등급을 도출하는 단계;를 포함하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

청구항 2

제1항에서,

상기 (A)단계는 상기 3차원 공간 모델의 셀별 정보로부터 추출된 심도별 SPT-N값을 이용하여 하기 [식 1]에 의해 도출되는 전단파속도 및 하기 [식 2]에 의해 도출되는 최대전단탄성계수를 부지응답해석의 지반조건으로 적용하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 1]

$$V_s = 65.64N^{0.407}$$

V_s : 전단파속도

N : SPT-N값

[식 2]

$$G_{\max} = \rho V_s^2$$

G_{\max} : 최대전단탄성계수

청구항 3

제1항에서,

상기 (A)단계 부지응답해석의 지진가속도 조건은 지진파의 종류에 따른 암반노두가속도로서,

상기 지진파의 종류는 암반암반계측지진파(Hachinohe wave), 토층계측지진파(Ofunato wave) 및 인공지진파(Artificial wave)로 구분하고,

상기 암반노두가속도는 0.04g, 0.06g, 0.08g, 0.11g, 0.15g, 0.22g, 0.3g, 0.4g 및 0.5g의 9단계로 구분하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

청구항 4

제1항에서,

상기 (A)단계는 상기 연산처리부가 하기 [식 3]을 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계 식으로 적용하여, 부지응답해석 결과를 통해 각 셀별로 하기 [식 3]의 상관관계식 계수를 도출하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 3]

$$a_{\max} = \alpha(1 - e^{-\beta \cdot a_{outcrop}})$$

a_{\max} : 지진파의 지층별 최대가속도

$a_{outcrop}$: 지진 발생시 계측된 지진파의 암반노두가속도

α, β : 상관관계식 계수

청구항 5

제1항에서,

상기 (B)단계는 상기 연산처리부의 지반특성 분석 시 심도 및 SPT-N값(표준관입저항값) 기준과 지하수위 기준을 함께 적용하여 액상화 평가 대상을 선별하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

청구항 6

제5항에서,

상기 심도 및 SPT-N값 기준은 하기 [조건 1] 및 [조건 2]를 모두 충족시키는 것으로 설정하는 것을 특징으로 하

는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[조건 1]

심도 20m 이내의 지반일 것

[조건 2]

SPT-N값이 20 이하인 실트질 모래지반일 것

청구항 7

제5항에서,

상기 지하수위 기준은 하기 [조건 3] 내지 [조건 5]를 모두 충족시키는 것으로 설정하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[조건 3]

기반암 상부 20m 이상의 지반일 것

[조건 4]

지하수위 아래 20m 이내의 지반일 것

[조건 5]

매립토, 퇴적토, 풍화토 중 어느 하나 이상의 층상으로 구성된 지반일 것

청구항 8

제7항에서,

상기 지하수위는 하기 [식 4]에 따라 도출한 시추조사 지점의 지진발생일 지하수위에 기초한 공간보간을 통해 지점별로 결정하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 4]

$$h = \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \times h_2$$

h : 시추조사 지점의 지진발생일 지하수위

H_1 : 평가 대상 지역의 지진발생일 지하수위(관측기간 동안의 일평균)

H_2 : 평가 대상 지역의 시추조사일 지하수위(관측기간 동안의 일평균)

h_2 : 시추조사 지점의 시추조사일 지하수위

청구항 9

제7항에서,

상기 지하수위는 시추주상도상의 지하수위 보다 1~2m 더 깊은 보정값에 기초한 공간보간을 통해 지점별로 결정하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

청구항 10

제1항에서,

상기 (C)단계의 전단응력비는 하기 [식 5]에 따라 도출하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 5]

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) (\gamma_d) / MSF$$

a_{\max} : 지진파의 지층별 최대가속도

g : 중력가속도

σ_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효상재압

γ_d : 전단응력 감소 계수

$$\gamma_d = 1.0 - 0.00765z \quad \text{for } z \leq 9.15\text{m}$$

$$\gamma_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{for } 9.15\text{m} \leq z \leq 23\text{m}$$

z : 액상화 발생 심도(m)

MSF : 지진규모 보정계수

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

M : 지진규모

청구항 11

제1항에서,

상기 (C)단계의 전단저항강도비는 하기 [식 6]에 따라 도출하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 6]

$$CRR_M = CRR_{7.5} \times MSF$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

CRR_M : 지진규모에 따른 액상화 저항응력비

$CRR_{7.5}$: 지진규모 7.5인 경우에 대한 액상화 저항응력비

청구항 12

제1항에서,

상기 (C)단계는 하기 [식 7]에 따라 각 셀별 액상화 안전율을 도출하고 하기 [판정기준 1]에 따라 각 셀별 액상화 피해 등급을 결정하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 7]

$$FS_{liquefaction} = \frac{CRR_{6.5}}{CSR}$$

[판정기준 1]

- i) $FS_{liquefaction}$ 1.5이상일 때 「높음」 등급
- ii) $FS_{liquefaction}$ 1.5미만일 때 「낮음」 등급

청구항 13

제12항에서,

상기 (C)단계는 셀의 수직 적층으로 이루어진 그리드 칼럼(Grid Column)별 액상화 피해 등급을 결정하는 과정을 더 포함하되,

상기 그리드 칼럼별 액상화 피해 등급은 하기 [식 8]을 통해 도출된 LPI(Liquefaction Potential Index)값을 대상으로 하기 [판정기준 2]에 따라 결정하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 8]

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i(z) W_i(z) H_i$$

z : 지하수위로부터의 깊이

n : 지표면 아래 액상화 평가 대상지반심도까지의 지층 개수

$F_i(z)$: 각 깊이에서 액상화에 대한 안전율

$$F_i(z) = 1 - FS \quad \text{for } FS < 1.0$$

$$F_i(z) = 0 \quad \text{for } FS \geq 1.0$$

$W_i(z)$: 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치 함수

$$W_i(z) = 10 - 0.5z \quad \text{for } z < 20m$$

$$W_i(z) = 0 \quad \text{for } z > 20m$$

[판정기준 2]

- i) $LPI=0$ 일 때, 「매우 낮음」 등급
- ii) $0 < LPI \leq 5$ 일 때, 「낮음」 등급
- iii) $5 < LPI \leq 15$ 일 때, 「높음」 등급

iv) 15<LPI일 때, 「매우 높음」 등급

청구항 14

제1항 내지 제13항 중 어느 한 항에서,

(D) 상기 연산처리가 하기 [식 9]와 같은 지진취약도 함수에 따라 평가 대상 지역 내 구조물의 손상확률을 도출하는 단계; 를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법.

[식 9]

$$P_f(s) = \phi \left[\frac{\ln s - \ln \bar{s}}{\beta} \right]$$

$P_f(s)$: PGA가 s 인 지진 발생 시 구조물의 손상확률

$\phi[]$: Gaussian 정규누적확률분포함수,

\bar{s} : 손상을 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 중앙값

s : 확률변수로서 지표면에서 수평지진의 PGA 값

β : 파괴를 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 log 값에 대한 표준편차

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 GIS를 기반으로 지진 발생 시 평가 대상 지역의 지진파를 계측하도록 설치된 지진계측기로부터 수집된 계측 정보와 지반조사 정보 및 구조물 정보를 관리하고 이를 연계 평가하여 평가 대상 지역의 지진 피해를 실시간으로 예측하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 인도네시아(2004년, 규모 9.0), 아이티(2010년, 규모 7.0), 일본(2011년, 규모 9.0) 등에서 발생한 지진은 그 규모가 크고 진앙지가 연안 해안에 위치하고 있어 발생 지진에 의한 건물의 붕괴, 지진 해일 등의 직간접적인 대규모 피해를 유발하였다. 국내에서도 계기지진 관측을 시작한 이후에 해안 지역을 중심으로 규모 4.0 이상의 비교적 강한 규모의 지진이 관측되고 있다.

[0003] 예를 들어 항만 지역의 지진 피해는 파일(pile)손상, 지반침하, 호안이동, 구조물 비틀림, 안벽이동, 크레인 손상 및 건축물 손상 등의 양상으로 나타나며, 특히 컨테이너 터미널 안벽과 같은 중요 안벽, 인명사고와 직결되는 구조물, 2차 재해를 유발할 수 있는 항만구조물의 피해가 많았다. 지진 피해 사례를 분석한 결과 지진이 항만구조물에 미치는 영향은 지진으로 인해 유발되는 파랑(water wave)과 수위상승으로 인한 부가적인 동수압에 따른 항만구조물과의 상호작용, 그리고 지진 경험 구조물의 연이은 지진에 대한 성능 저하 등 복합적인 체계를 이루고 있다. 또한 진앙에서 동일한 거리에 있는 지역이라도 지진 세기 및 파형에 대한 지반 특성의 영향, 지반 위에 축조된 구조물의 진동 감쇠성에 대한 영향, 진동을 받을 때 지반강도 감소 영향 등에 의해 피해결과의 차이가 발생하게 된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 지진 발생시 평가 대상 지역의 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 지진 피해 정도를 예측함으로써, 지진으로 인한 불측의 피해를 방지하고, 지진에 대해 효율적으로 대비토록 할 수 있는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법을 제공함을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 발명은 전술한 과제 해결을 위해 실 지반과 유사한 3차원 공간 모델에 기초하여 지반조건 및 지반가속도 조건에 따른 부지응답해석을 수행하여 지진과의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도간의 상관관계를 도출하고, 상기 3차원 공간 모델의 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 평가 대상을 선별하여 각 셀별 액상화 안전율 및 액상화 피해 등급을 도출함으로써 지진에 따른 피해 정도를 각 지점별로 실시간으로 판단할 수 있도록 한 것이다.

[0006] 본 발명은 「평가 대상 지역의 시추정보 및 물리탐사 자료에 기초한 공간 보간을 통해, 3차원 공간 그리드(3D Spacial Grid)에 의해 영역화되어 개별적으로 지반특성이 정보화된 셀(Cell)의 집합으로 이루어진 3차원 공간 모델이 구축되어 있고, 지진계측부 및 연산처리부가 구비된 GIS(Geographic Information System)를 통한 지진 피해 예측 방법으로서, (A) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 부지응답해석을 통해 지진과의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계를 도출하는 단계; (B) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반특성 분석을 통해 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 액상화 평가 대상을 선별하는 단계; 및 (C) 상기 연산처리부가 상기 지진계측부로부터 지진과의 암반노두가속도 계측값을 수신하여 각 셀별로 지진과의 최대가속도를 도출하고, 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 산정하여, 각 셀별 액상화 안전율(FS_{liquefaction}) 및 액상화 피해 등급을 도출하는 단계; 를 포함하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법」을 제공한다.

발명의 효과

- [0007] 본 발명이 제공하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법은
- [0008] 본 발명에 따른 “GIS기반 실시간 지진피해 예측 방법”을 통해 평가 대상 지역에 대한 특정 사이즈를 갖는 단위 셀(Cell)별 액상화 안전율 및 액상화 피해등급을 도출함으로써 광범위한 지역의 전체적인 지진피해 정도를 예측할 수 있음은 물론 국소 지역의 개별 피해정도를 예측할 수 있다. 구체적인 효과는 다음과 같다.
- [0009] 1. 지진발생 시 지진에 따른 피해 상황을 실시간으로 파악하여 대상지역의 통제, 대피, 구조활동 등의 재난 대응을 신속히 실시할 수 있다.
- [0010] 2. 지역별 피해상황을 신속히 파악하여 효과적인 대응 및 피해 복구 방안 수립에 활용 가능하다.
- [0011] 3. 평가 대상 지역에 대해 지진의 등급별, 과형별 피해 발생 시물레이션을 통해 지진 취약 지점을 분석하고, 피해 예측 상황에 따라 적합한 대책을 사전에 세울 수 있다.
- [0012] 4. 지진 피해 예측 자료는 건축/토목 구조물의 설계에 반영되어 다양한 유형의 구조물과 지반 조건에 따라 지진을 고려한 설계 및 시공이 이루어지도록 할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0013] [도 1]은 본 발명이 제공하는 실시간 지진피해 평가방법을 개략적으로 정리하여 도시한 것이다.
- [도 2]는 본 발명 (A)단계의 실시 과정을 개략적으로 정리하여 도시한 것이다.
- [도 3]은 평가 대상 지역 내 시추공 분포를 도시한 것이다.
- [도 4]는 시추공의 교차검증을 통한 오차의 분포를 나타낸 그래프이다.

[도 5]는 토모그래피를 이진 데이터로 변환하는 과정의 모식도이다.

[도 6]은 기준값에 따라 토모그래피를 변환한 이진데이터 및 시추정보를 기초로 지시자 크리깅(indicator kriging)을 하는 과정의 모식도이다.

[도 7]은 가정모델별 RMSE값의 분포를 나타낸 그래프이다.

[도 8]은 본 발명이 제공하는 실시간 지진피해 평가방법에 대한 모식도이다.

[도 9]는 평가 대상 지역 내 구조물별 지진취약도 함수와 연계한 손상등급 결정 과정의 모식도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 본 발명은 「평가 대상 지역의 시추정보 및 물리탐사 자료에 기초한 공간 보간을 통해, 3차원 공간 그리드(3D Spacial Grid)에 의해 영역화되어 개별적으로 지반특성이 정보화된 셀(Cell)의 집합으로 이루어진 3차원 공간 모델이 구축되어 있고, 지진계측부 및 연산처리부가 구비된 GIS(Geographic Information System)를 통한 지진 피해 예측 방법으로서, (A) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 부지응답해석을 통해 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계를 도출하는 단계; (B) 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반특성 분석을 통해 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 액상화 평가 대상을 선별하는 단계; 및 (C) 상기 연산처리부가 상기 지진계측부로부터 지진파의 암반노두가속도 계측값을 수신하여 각 셀별로 지진파의 최대가속도를 도출하고, 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 산정하여, 각 셀별 액상화 안전율($FS_{\text{liquefaction}}$) 및 액상화 피해 등급을 도출하는 단계; 를 포함하는 GIS 기반 실시간 지진피해 예측 방법」을 제공한다.
- [0015] [도 1]은 본 발명이 제공하는 실시간 지진피해 평가방법을 개략적으로 정리하여 도시한 것이다.
- [0016] 실시간 지진피해 평가를 위해서는 3차원 공간 그리드에 의해 구축된 셀(Cell) 단위별로 정보화된 3차원 공간 모델이 마련되어 있어야 하고, 지진파에 대한 부지응답 특성이 파악되어 있어야 하며, 평가 대상 지역 내의 구조물 정보가 있어야 하고, 지진계측 정보를 컴퓨터 시스템을 통해 자동으로 수령할 수 있어야 한다.
- [0017] 상기 3차원 공간 모델은 대상 지역의 지반 정보를 연계받아 지반조사(지반동적특성 정보 포함) 및 지반관련 설계시공 관련 정보에 대해 지구통계학적 공간보간 기법을 통해 3차원 공간 모델링을 수행함으로써 구축한다. 상기 3차원 공간 모델은 셀(Cell) 마다 지반 동적특성 정보 및 지반정수 정보가 기록되어 있으며, 이러한 정보들은 공간정보 DB로 마련해둘 수 있다.
- [0018] 다음으로 지진파에 대한 부지응답 특성 파악을 위해 상기 3차원 공간 모델에 다양한 지진파 조건을 반영하여 선형적인 부지응답해석을 수행해야 한다. 3차원 공간 모델을 기반으로 산정된 심도별 지진가속도 특성 정보를 바탕으로 지반의 비선형성을 고려한 최적화 모델에 따라 회귀분석을 통해 지진파의 암반노두가속도와 지층별(지표면 포함, 이하 생략) 최대가속도와의 상관관계식을 결정한다. 이에 따라 지진 발생 시에 계측된 지진파의 암반노두가속도를 위의 상관관계식과 연계하여 실시간으로 지표면 또는 지층별 최대가속도를 도출할 수 있다.
- [0019] 이와 함께 지진피해에 지배적인 영향을 미치는 지반의 액상화를 검토하여 지진피해 예측에 반영한다. 이 역시 선 구축된 3차원 공간 모델을 토대로 수행된다. 전술한 바와 같이 지진 발생 시 계측된 지진파의 암반노두가속도를 통해 지진파의 지층별 최대가속도를 도출하고, 이를 통해 액상화가 발생하는 세부 지층별로 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 기 결정된 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 연산하고, 액상화에 대한 안전율(FS)을 결정한다. 최종적으로 3차원 공간 모델을 기반으로 전체 지층의 액상화에 대한 안전율(FS)을 통합한 LPI(Liquefaction Potential Index)에 따라 액상화 피해 예측 등급을 판정할 수 있다.
- [0020] 앞서 도출된 지진파의 지층별 최대가속도와 액상화 피해 예측 등급은 다시 상기 3차원 공간 모델의 셀별로 기록되며, 이를 평가 대상 지역 내의 구조물 정보(지진취약도 함수)와 연동하여 구조물에 대한 지진피해 예측이 가능하다. 즉, 안벽구조물, 크레인 등의 구조물에 대한 지진취약도 함수를 연계받아 실시간으로 결정된 지표면 최대가속도와의 상관성을 고려하여 구조물 손상등급을 결정한다.
- [0021] 이에 따라 3차원 공간 모델을 기반으로 평가 대상 지역 내의 구조물(안벽구조물, 크레인, 일반건축물 등)의 손상등급과 구조물이 위치한 부지 조건에서의 액상화 피해 등급을 종합적으로 고려함으로써 지진 발생 시 실시간

으로 향만구조물에 대한 종합 지진피해 등급을 판정할 수 있다.

[0022] 이하에서는 본 발명을 구체적으로 설명한다.

[0023] **I. 3차원 공간 모델 구축**

[0024] 본 발명의 적용을 위해서는 3차원 공간 모델이 구축되어 있어야 한다. 상기 3차원 공간 모델은 평가 대상 지역의 시추정보 및 물리탐사 자료에 기초한 공간 보간을 통해, 3차원 공간 그리드(3D Spacial Grid)에 의해 영역화 되어 개별적으로 지반특성이 정보화된 셀(Cell)의 집합으로 이루어진 것이며, 이러한 3차원 공간 모델을 구축하는 방법은 대한민국 특허출원 제2014-0110813호(지반정보에 기초한 3차원 공간 모델링 방법)에 상술되어 있다.

[0025] 상기 3차원 공간 모델은 『평가 대상 지역 내 다수 시추공에 대한 이상치 분석(Outlier Analysis)을 통해 정보 수집 대상 시추공을 선별하는 단계(이하, '이상치 분석을 통한 시추공 선별 단계')』, 『선별 시추공의 시추정보 및 상기 평가 대상 지역에 대한 물리탐사 자료를 통합한 배리오그램(Variogram) 모델링을 통해 평가 대상 지역에 대한 3차원적 지반정보를 생성하는 단계(이하, '3차원적 지반정보 생성 단계')』 및 『상기 지반정보를 고려하여 3차원 그리드 사이즈를 결정하고, 상기 3차원 그리드에 의해 영역화된 셀(Cell)별로 대표 프로파일과 동적 특성을 분류한 공간정보 DB를 구축하고, 상기 공간정보 DB에 기초한 공간 보간을 통해 조사대상지역에 대한 3차원 모델을 생성하는 단계(이하, '공간 보간을 통한 3차원 모델링 단계')』를 통해 구축할 수 있으며, 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

[0026] **1. 이상치 분석을 통한 시추공 선별 단계**

[0027] 본 단계는 평가 대상 지역 내 다수 시추공에 대한 이상치 분석(Outlier Analysis)을 통해 정보 수집 대상 시추공을 선별하는 단계이다. 이상치(Outlier)란 나머지 데이터에서 수치적으로 큰 차이가 있는 데이터를 말하는 것으로서 시추공 데이터로부터 절대적인 이상치를 정의하기는 곤란하다. 그러나 통계적 도구를 이용하여 상대적인 이상치를 분류하는 것은 가능하다. 본 발명은 교차 검증 기반의 이상치 분석 방법을 제공한다. 다수의 시추공에 대한 교차 검증을 통한 이상치 분석은 아래의 각 단계를 세분 시행함으로써 구현할 수 있다. [도 2]는 본 (A)단계의 실시 과정을 개략적으로 정리하여 도시한 것이다.

[0028] (1) n개의 평가 배리오그램 도출

[0029] 평가 대상 지역 내에서 선정된 n개 시추공 중 평가대상 시추공 하나를 제외한 나머지 시추공의 시추정보에 기초한 크리깅을 순차적으로 수행하여 n개의 평가 배리오그램을 도출한다. 물론 [도 3]에 도시된 바와 같이 원래 존재하였던 시추공 이외에 추가적인 시추작업을 하여 생성된 시추공의 시추정보를 함께 이용할 수도 있다.

[0030] 본 단계에서는 n개 시추공 중 어느 하나를 제외한 나머지 시추공의 시추정보에 기초한 크리깅을 순차적으로 수행하여 n개의 평가 배리오그램을 도출한다.

[0031] (2) 교차 검증

[0032] 상기 평가 배리오그램을 통해 도출된 특정 지층의 깊이 추정값을 상기 평가대상 시추공을 통해 측정된 특정 지층의 깊이 측정값과 비교하여 오차를 계산하는 과정을 n차례 수행하여, 추정값과 측정값의 오차가 상대적으로 큰 평가대상 시추공을 이상치로 분류하여 정보 수집 대상 시추공에서 배제한다.

[0033] [도 4]는 시추공의 교차검증을 통한 오차의 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 실선은 추정값과 측정값이 동일한 시추공의 분포 라인이고, 점선은 이상치를 구분하는 기준라인이다. 따라서 그래프 상의 백점이 곧 이상치로 분류되는 시추공을 나타내는 것이다.

[0034] 구체적으로는 상기 n개 시추공을 오차의 절대값이 큰 순으로 10%에 해당하는 개수만큼을 이상치로 분류하여 정보 수집 대상 시추공에서 배제시킬 수 있다.

[0035] 위 과정을 통해 3차원적 지반정보 생성을 위한 정보 수집 대상 시추공 선별이 이루어지게 된다.

[0036] **2. 3차원적 지반정보 생성 단계**

[0037] 본 단계는 전술한 과정을 통한 선별 시추공의 시추정보 및 상기 평가 대상 지역에 대한 물리탐사 자료를 통합한 배리오그램(Variogram) 모델링을 통해 평가 대상 지역에 대한 3차원적 지반정보를 생성하는 단계이다.

[0038] 특정 지역의 지반 상태를 전반적으로 이해하기 위해서는 지구통계학적(geotechnical) 방법이 요구된다. 지반 상태 파악을 위해 시추공 탐사가 이루어지지만, 시추공은 3차원적 지반 공간에 대해 1차원적 정보를 제공할 뿐이므로 그 정보 내용이 한정적일 수밖에 없다. 시추공 탐사 외에도 지반의 종단면 정보를 수반한 토모그래피(tomography)를 도출하는 여러 가지 물리탐사 방법이 이용되고 있는데, 이 역시 2차원적 정보를 제공할 뿐이므로 지반 상태를 전체적으로 파악하기는 어렵고 시추공에 의해 지반을 직접적으로 조사하는 경우보다는 조사결과의 신뢰성이 낮다.

[0039] 이에 본 단계에서는 1차원적 정보를 제공하는 시추공의 시추정보와 2차원적 정보를 제공하는 물리탐사 자료를 통합하여 조사대상지역에 대한 3차원적 지반정보를 생성한다. 시추정보와 물리탐사 자료 통합에 의한 3차원적 지반정보의 생성은 아래의 각 단계를 세분 시행함으로써 구현할 수 있다.

[0040] (1) 물리탐사 자료에 기초한 토모그래피(tomography) 생성

[0041] 본 단계는 상기 조사대상지역에 대한 물리탐사 자료에 기초하여 토모그래피(tomography)를 생성하는 단계이다. 상기 토모그래피는 물리탐사 라인으로 설정된 축선을 따라 절단된 가상의 지반 입면으로서 물리탐사 방법에 따라 해당 입면의 물성정보를 제공한다.

[0042] (2) 토모그래피를 이진 데이터(binary data)로 변환

[0043] 본 단계는 지반의 층상을 구분하기 위한 물성값을 각 층마다 m개의 기준값으로 설정하고, 상기 토모그래피로부터 해석되는 지점별 물성값을 상기 기준값과 비교하여, 상기 토모그래피를 층상별로 m개의 이진 데이터(binary data)로 변환하는 단계이다.

[0044] 지반의 층상은 통일분류법에 따라 모래층(S-), 점토층(C-), 모래자갈층(SW), 실트질모래(SM) 등으로 분류할 수 있으며, 지반의 층상을 구분하기 위한 근거 자료인 물성값으로는 물리탐사 방법에 따라 전단파 속도, 전기 비저항 등을 적용할 수 있다.

[0045] 물리탐사를 탄성과 시험으로 시행한 경우, 지반 층상 구분을 위한 물성값으로 전단파 속도를 이용할 수 있다. 다만, 층상과 전단파 속도의 관계가 일정-명확하지가 않다. 따라서 기존의 연구자료와 실험적, 경험적으로 취득한 데이터를 종합하여 층상 구분을 위한 전단파 속도의 기준값을 설정한다. 그러나 상기 기준값은 어디까지나 추정값이므로, 상기 기준값 전후 단계로 몇 가지의 기준값을 추가로 설정한다. 즉 경험적으로 설정한 중심값과 상기 중심값 전후의 비교값을 포함한 5-9개의 기준값을 설정한다(즉, m=5-9).

[0046] 아래의 [표 1]은 지반이 층상 구분을 위한 전단파 속도 기준값을 중심값((Vp)cr)과 상하 각각 3가지의 비교값(3/5(Vp)cr, 3/4(Vp)cr, 7/8(Vp)cr, 9/8(Vp)cr, 6/5(Vp)cr, 5/4(Vp)cr), 총 7가지 기준값으로 구분한 예를 정리한 것이다.

[0047] [표 1]

	$(V_p)_1^b$ (m/s)	$(V_p)_2^c$ (m/s)
$3/5 (V_p)_{cr}$	900	1200
$3/4 (V_p)_{cr}$	1125	1500
$7/8 (V_p)_{cr}$	1313	1750
$(V_p)_{cr}^a$	1500	2000
$9/8 (V_p)_{cr}$	1688	2250
$6/5 (V_p)_{cr}$	1800	2400
$5/4 (V_p)_{cr}$	1875	2500

^a Classification criteria of P-wave velocity (V_p) at the design specifications A and B listed in Table 4.2

^b V_p between the weathered soil and the weathered rock

^c V_p between the weathered rock and the soft rock

[0048]

[0049] 위와 같이 특정 층상을 결정하는 기준값을 m개 설정했으면, 상기 토모그래피로부터 해석되는 지점별 물성값을 상기 기준값과 비교하여, 상기 토모그래피를 층상별로 m개의 이진 데이터(binary data)로 변환한다. 즉, 인디케이터 크리깅(Indicator Kriging)을 위해 지반공학적 조사 자료를 [0,1]의 이진 데이터로 변환하는 것이다.

[0050] 이와 같이 토모그래피를 이진 데이터로 변환하는 과정은 [도 5]에 도시된 바와 같이 상기 토모그래피를 일정 사이즈의 그리드로 구획하고 상기 그리드에 의해 영역화된 각 지점별 물성값이 상기 기준값과 매칭되는 지점의 위치정보는 1로 변환하고, 상기 지점별 물성값이 상기 기준값과 매칭되지 않는 지점의 위치정보는 0으로 변환함으로써 간편하게 수행할 수 있다.

[0051] (3) 가정모델(assumed model) 생성

[0052] 본 단계는 [도 6]에 도시된 바와 같이 기준값에 따른 이진데이터 및 상기 선별 시추공의 시추정보를 기초로 지시자 크리깅(indicator kriging)을 하여 층상별로 m개의 가정모델(assumed model)을 생성하는 단계이다. 이에 따라 시추정보와 물리탐사 자료가 3차원적으로 통합화된다.

[0053] (4) 표준모델 선정 및 취합

[0054] 본 단계는 상기 선별 시추공 중의 p개 시추공을 대상으로 상기 가정모델마다 개별적 교차검증을 실시하여 도출한 RMSE(root mean squared errors)가 가장 작은 가정모델을 표준모델로 선정하여, 각 층상의 표준모델을 취합하는 단계이다.

[0055] 상기 교차검증은 상기 가정모델의 기초정보에서 p개(p는 상기 (A)단계에서 선별된 시추공의 개수와 동일하거나 이하의 수)의 시추공 중 어느 하나의 층상정보를 제외한 상태로 지시자 크리깅을 하여 검증모델을 도출하고, 상기 검증모델의 지층 위치를 상기 검증모델 도출시에 제외된 시추공의 층상정보와 비교하여 오차를 계산하는 과정을 p차례 반복함으로써 수행할 수 있다.

[0056] 즉, 하나의 층상을 구분하는 전단파 속도 기준값마다 각각 가정모델을 생성하고(층상별 가정모델 m개), 각각의 가정모델 당 p개의 검증모델을 생성하여, p개의 오차값이 도출된다. RMSE는 상기 오차값 제곱의 루트값의 평균값이고, 하나의 층상에 대해 7개의 RMSE가 도출되며, 최소의 RMSE가 도출된 가정모델을 해당 층상의 표준모델로 선정한다. 위의 과정을 각 층상별로 수행함으로써 도출된 각 층상별 표준모델을 축적한 지반 전체의 3D 모델이 생성된다.

[0057] [도 7]은 가정모델별 RMSE값의 분포를 나타낸 그래프로서, 토양퇴적층과 연암층을 구분하는 전단파속도의 기준값 7개에 대한 교차검증을 통해 RMSE가 가장 작은 기준값이 1400m/sec임을 도출해낸 그래프를 도시한 것이다.

[0058] 3. 공간 보간을 통한 3차원 모델링 단계

[0059] 본 단계는 상기 지반정보를 고려하여 3차원 그리드 사이즈를 결정하고, 상기 3차원 그리드에 의해 영역화된 셀 (Cell)별로 대표 프로파일과 동적 특성을 분류한 공간정보 DB를 구축하고, 상기 공간정보 DB에 기초한 공간을 통해 조사대상지역에 대한 3차원 모델을 생성하는 단계이다.

[0060] 본 단계에서도 배리오그램 모델링을 통해 상기 지반정보에서 추출한 공간좌표와 기준 속성정보의 유효거리를 도출하고, 상기 유효거리를 3차원 그리드의 격자 크기로 결정할 수 있다.

[0061] II. GIS(Geographic Information System)

[0062] 본 발명은 GIS에 기반하여 구현되는 것이다. 본 발명에 적용되는 GIS는 상기 3차원 공간 모델, 지진계측부 및 연산처리부로 구성된다.

[0063] 상기 지진계측부는 평가 대상 지역의 암반노두에 설치된 지진계측기로서, 지진발생시 암반노두가속도를 계측한다.

[0064] 상기 연산처리부는 상기 3차원 공간 모델과 함께 형성된 공간정보 및 상기 지진계측부의 계측정보를 수집하여, 기 설정된 단계별 연산식에 따라 셀별 지진하중(지진파의 최대가속도) 산출, 액상화 평가, 구조물의 손상확률 도출 등을 진행한다.

[0065] III. 부지응답해석 및 상관관계식 도출 - (A)단계

[0066] 본 단계는 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반조건 및 지진가속도 조건에 따른 부지응답해석을 통해 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계식을 도출하는 단계이다.

[0067] 지진 발생 시 지층을 통과하는 지진파의 증폭 현상이 발생한다([도 8] 참조). 지진파의 증폭특성을 고려하여 지반 상부구조물의 지진피해 정도를 결정하기 위해서는 우선 암반노두에 설치된 지진계측기를 통해 암반노두가속도를 관측해야 한다. 자유장 조건의 암반노두 지진계측을 통해 미래 지진발생시의 대표 지진거동을 예측하고, 지진특성 즉, 지진규모, 감지진동 지속시간, 국부적인 지질학상의 영향과 지반상태, 감쇠법칙과 파진달계수 등을 밝힌다. 이렇게 계측된 암반노두가속도를 토대로 평가 대상 지역의 지반의 지진파 증폭특성이 고려된 지층별 최대가속도를 결정할 수 있다.

[0068] 지층별 최대가속도 결정 시 지반 분류에 의한 증폭 계수(국립방재연구소, 2003)를 사용할 경우 지진하중의 크기에 따른 증폭 정도의 변화를 정확히 고려할 수 없어 피해 예측이 불가능하다. 따라서 지층별 최대가속도를 합리적으로 결정하기 위해 부지응답해석을 실시할 필요가 있다.

[0069] 부지응답이란 지진의 진원에서 시작된 지진동이 암반층과 토층을 통과해서 지표면에 도달된 탄성파의 파동을 말하는 것이며, 다양한 지층을 통과하여 지표면까지 전파되는 탄성파의 전파특성을 모델링하여 부지응답을 구하는 해석을 부지응답해석이라고 한다. 그러나 부지응답해석에는 다양한 지층 구조, 지반 물성과 지진의 시간 이력 등을 입력하고 결과를 해석하는 과정에서 많은 시간이 필요하므로 지진 발생 시 직접 부지응답해석을 수행하여 신속하게 대응하는 데에는 어려움이 있다.

[0070] 이에 본 발명에서는 미리 구축된 상기 3차원 공간 모델을 이용한 부지응답해석을 수행하여 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계식을 도출한다. 이에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

[0071] 1. 부지응답해석

- [0072] (1) 지반조건
- [0073] 부지응답해석에 사용되는 지반조건은 상기 3D 공간 모델의 셀별 공간정보 DB를 통해서 확보할 수 있다.
- [0074] 먼저, 기반암 심도를 살펴보면 주어진 지반조사 자료가 불완전함에 따라 조사된 풍화암 하부, 풍화암 시점, 그리고 풍화암 상부의 퇴적층 내부로 다양하게 가정될 수 있다. 뿐만 아니라 입력 지진파의 기반암 적용 조건에서는 현행 국내 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)에서 보통암 노두(rock outcrop)에 대한 지역별 지진계수 또는 지진재해도를 제시하고 있으며, 이에 따라 특수한 상황이 아닌 일반적인 지표면 부지응답예측의 경우 제시된 입력 지진파를 기반암 노두 조건에 대해 적용한다.
- [0075] 본 발명에서는 통합 암선(연암 상부)을 기준으로 기반암 심도 조건을 결정하였다. 세부 지층은 SPT-N값 획득 심도를 이용하여 구분하였으며, 간격은 SPT 시험 심도를 기준으로 1.5m 또는 1m로 세분화하였다. 지하수위는 시추 조사 및 현장조사 자료를 통해서 획득되는 지하수위 정보를 기준으로 주변 지하수위 관측정보로부터 계속되는 지하수위 연보를 보정하여 활용하였다. 이와 함께 지하수위를 함께 고려하여 다른 지반 정수의 결정에 중요한 기저 정수로서 이용되는 단위중량(γ_t)은 깊이에 따른 분포로 입력되어야 한다. 대상부지에 대한 단위중량에 대한 실험결과가 있을 경우, 이를 이용하였으며, 그렇지 않은 경우, 문헌조사를 통해 지반조사 보고서에 기술된 내용을 참조하여 특정 범위 또는 범위의 평균값을 활용하였다.
- [0076] 그 외에 전단파속도(V_s)는 기존의 선행연구자들에 의해서 제안된 경험적 상관식을 통해서 산출하며, 이 중에서 SPT-N값을 이용한 하기 [식 1]을 통해 결정하였다. 이와 연계하여 최대전단탄성계수(G_{max})는 전단파속도(V_s)와의 상관관계식인 하기 [식 2]를 통해 산출한다.
- [0077] [식 1]
- [0078] $V_s = 65.64N^{0.407}$
- [0079] V_s : 전단파속도
- [0080] N : SPT-N값
- [0081] [식 2]
- [0082] $G_{max} = \rho V_s^2$
- [0083] G_{max} : 최대전단탄성계수
- [0084] 또한 지층별 비선형 곡선인 전단계수(G)와 감쇠비(D)의 전단변형률에 따른 비선형적 변화 곡선은 V_s (또는 G_{max})와 함께 부지고유 지진 응답에 가장 큰 영향을 주는 지반 고유 특성이다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log \gamma$), 감쇠비 곡선($D-\log \gamma$)과 같은 비선형 동적 곡선은 시료의 교란, 하중주파수 등에 상관없이 일정하게 나타나며, 시료의 종류(자갈, 모래, 점토 등)에 따라 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다.
- [0085] 현장 및 실내시험 모두를 통해 결정할 수 있는 저변형률 영역에서의 지반 동적물성치와 달리, 비선형 동적 곡선은 현재까지 실내시험을 통해서만 결정이 가능하다. 또한 지반구조물의 특성상 시추가 허락되지 않아 시료를 획득할 수 없는 경우가 있고, 시료 채취가 이루어진다 하더라도 여러 가지 여건상 비선형 동적 곡선을 위한 시험이 어려운 상황이 발생할 수도 있다. 이를 위하여, 국내외 여러 연구자들에 의해 제안된 지반 종류별 대표곡선을 활용하는 방법을 주로 이용한다. 이에 본 발명에서는 시추조사 자료로부터 구분된 지층들에 대해서 적합한 비선형 곡선들을 기존 문헌을 토대로 선정 적용하였다([표 2] 참조).

[0086] [표 2]

지반특성	제안자	
	정규화전단계수(G/Gmax)	감쇠비(D)
자갈 또는 자갈질 토사	Seed et al.(1986)	Seed et al.(1986)
사질토	Seed and Idriss(average)	Seed and Idriss(average)
풍화(잔류)토	Sun et al.(2005)	Sun et al.(2005)
점성토	Seed & Sun(1989)	Idriss(1990)
암반	Schnabel(또는 Idriss)	Schnabel(또는 Idriss)
모래질 실트, 점토질 실트	사질토와 점성토의 비선형 곡선을 활용하여, 전단변형을 에 따라 토성이 우세한 것으로 판단되는 곡선을 적용함.	

[0087]

[0088] (2) 지진 가속도 조건

[0089] 부지응답해석에 사용되는 지진 가속도는 해석 조건에 따라 암반노두 가속도(rock outcrop motion)나 기반암 가속도(bedrock acceleration) 등이 사용되나, 본 발명에서는, 대부분의 지진계측이 자유장 암반노두(rock outcrop)에 설치된 지진계측기에서 실시되는 점을 고려해 암반노두 가속도를 부지응답해석을 위한 지진 가속도로 사용한다. 암반노두 가속도는 크기에 따른 지반 증폭의 비선형성을 모사하기 위해 지진 재현주기에 따라 0.04g에서 0.22g까지의 6단계의 암반노두 가속도와 동일본 지진(2011년 3월 11일, 규모 9.0)과 같은 대형 지진을 차별화해서 고려하기 위해 0.3, 0.4, 0.5g의 3단계의 암반노두 가속도를 추가로 사용하여, 총 9단계의 암반노두 가속도를 입력하였다([표 3] 참조). 또한 다양한 주기특성을 보이는 지진파의 영향을 고려하기 위해 현행 내진설계기준에서와 같이 단주기 특성을 보이는 암반계측지진파(Hachinohe Wave)와 장주기 특성을 보이는 토층계측지진파(Ofunato Wave)를 선정하였으며, 추가로 단주기, 장주기 특성을 모두 보이는 인공 지진파(Artificial Wave)를 이용하였다([표 4] 참조).

[0090] [표 3]

Occurrence Period(year)	50	100	200	500	1000	2400	-	-	-
Rock Outcrop Motion(g)	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.22	0.3	0.4	0.5

[0091]

[0092] [표 4]

Earthquake	Magnitude	Date	Location	Site Condition	Time History
Hachinohe	7.9	68/05/16	Tokachioki, Japan	SC	
Ofunato	7.4	78/12/06	Miyagikeno ki, Japan	SD	
Artificial	-	-	-	SB	

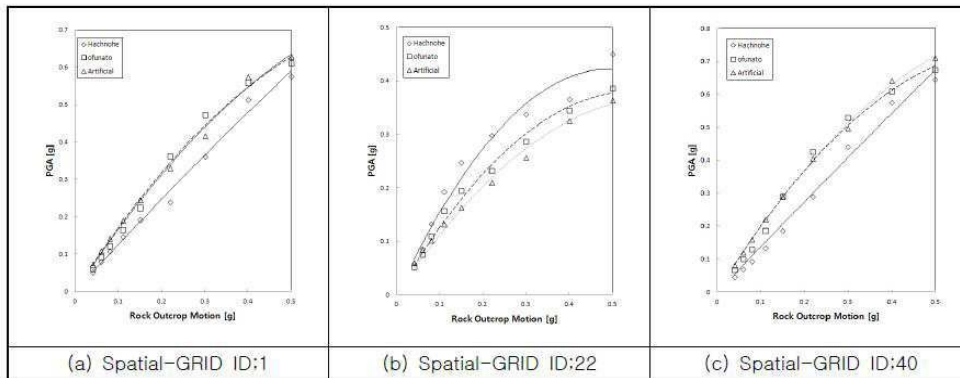
[0093]

[0094] 2. 상관관계식 도출 단계

[0095] 부지응답해석을 통해 [표 3] 및 [표 4]에 제시된 9단계의 암반노두 가속도와 3개의 지진파 시간이력을 입력하여 3차원 공간 모델의 그리드 칼럼(column) 마다 27회의 부지응답해석을 수행하여, 깊이별 가속도 분포를 결정하였다(즉, 셀(Cell)별 가속도 분포 결정).

[0096] 지진하중으로 사용되는 지표면 가속도와 암반노두가속도의 상관관계 설정에 앞서, 지진파의 종류 및 주기의 영향을 살펴보았다.

[0097] [표 5]



[0098]

[0099] [표 5]는 인천항만 연안부두 지역에 대한 3차원 공간 모델의 그리드 아이디(Spatial-GRID의 ID)가 1번, 22번과 40번인 지역의 부지응답해석 결과를 보여준다. 지점별로 지진파형에 따라 뚜렷한 증폭 정도의 차이는 없었으나, 22번 위치는 1번 위치와 44번 위치에 비해 상대적으로 부지 진동 특성이 저진동수에 가까운 것으로 파악되는 바, Hachinohe 지진이 Ofunato 지진에 비해 전반적으로 더 큰 증폭 경향을 보였다. 이는 지점별 부지 고유 진동 특성과 지진 진동특성과의 상응 정도에 따른 특성적 현상의 영향으로 판단된다. 그러나, 대부분의 해석 결과에서 지진파 특성에 따른 편차가 10% 이내로 나타나, 본 발명에서는 지진파 특성에 따른 영향은 고려하지 않았다.

[0100] 이에 따라 지진파의 파형을 고려하지 않고 비선형 최적화 모델에 따른 회귀분석을 수행하여 평가 대상 지역의 시추공별 27개의 암반노두 가속도와 지층별 최대가속도 간의 관계를 나타내는 상관관계식을 결정하였다. 부지응답해석 결과 암반노두 가속도가 0인 경우 지표면 최대가속도 역시 0이 되고, 일반적으로 발생 지진하중 증가 시 증폭 효과가 감소하는 점을 고려해 [식 3]과 같이 원점을 통과하는 지수모델(exponential model) 중 box Lucas model을 기반으로 상관관계식을 결정한 것이다.

[0101] 최종적으로 도출된 지진파의 암반노두가속도와 지층별 최대가속도 간의 상관관계식은 하기 [식 3]과 같으며, 부지응답해석 결과를 통해 각 셀별로 하기 [식 3]의 상관관계식 계수를 도출할 수 있다.

[0102] [식 3]

$$a_{\max} = \alpha(1 - e^{-\beta \cdot a_{\text{outcrop}}})$$

a_{\max} : 지진파의 지층별 최대가속도

a_{outcrop} : 지진 발생시 예측된 지진파의 암반노두가속도

α, β : 상관관계식 계수

[0103]

[0104] [식 3]을 인천항만 연안부두 지역에 시험적으로 적용한 결과 상관성 척도인 상관계수 R^2 가 대부분의 공간 그리드에 대해 90% 이상의 높은 신뢰도를 보였다.

[0105] **IV. 액상화 발생 가능 지반 선별 - (B)단계**

[0106] 본 단계는 상기 연산처리부가 상기 3차원 공간 모델에 기초한 지반특성 분석을 통해 셀 단위로 액상화 발생 가능성을 판단하여 액상화 평가 대상을 선별하는 단계이다.

[0107] 본 단계에서는, 상기 연산처리부의 지반특성 분석 시의 심도 및 SPT-N값(표준관입저항값) 기준과 지하수위 기준을 함께 적용하여 액상화 평가 대상을 선별할 수 있다. 액상화 평가 대상 선별 기준에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

[0108] **1. 심도 및 표준관입저항값에 따른 선별**

[0109] 액상화 평가 대상 선별을 위해 3차원 공간 모델의 지반정보 DB로부터 추출한 층상정보 및 표준관입시험 결과를 분석한다. 실내 역학시험 결과가 있으면 이를 함께 분석한다. 이에 따라 평가 대상 지역 중 심도 20m 이내에서 표준관입저항값(N값)이 20 이하인 실트질 모래지반 및 실내시험 결과 비소성(NP)으로 판단된 비소성 실트질 지반을 액상화 가능성이 있다고 판단한다.

[0110] 즉, 하기 [조건 1] 및 [조건 2]를 모두 충족시키는 셀을 액상화 평가 대상으로 선별한다.

[0111] [조건 1]

[0112] 심도 20m 이내의 지반일 것

[0113] [조건 2]

[0114] SPT-N값이 20 이하인 실트질 모래지반일 것

[0115] **2. 지하수위에 따른 선별**

[0116] 액상화는 포화된 지반에서 발생하는 것을 전제로 하므로, 액상화 발생 가능성에 대한 평가에 있어서 지하수위(최대 지하수위)의 분포는 상당히 중요한 요소이다.

[0117] 지하수위에 따라 액상화 평가 대상 셀을 선별할 때에는 하기 [조건 3] 내지 [조건 5]를 모두 충족시킬 것을 기준으로 한다.

[0118] [조건 3]

[0119] 기반암 상부 20m 이상의 지반일 것

[0120] [조건 4]

[0121] 지하수위 아래 20m 이내의 지반일 것

[0122] [조건 5]

[0123] 매립토, 퇴적토, 풍화토 중 어느 하나 이상의 층상으로 구성된 지반일 것

[0124] 평가 대상 지역의 지하수위 파악을 위해 시추조사자료상의 지하수위 자료를 이용할 경우, 시추조사 시험일을 이용하여 계절에 따른 기후의 영향을 고려하여 조수간만에 따른 지하수위의 변화를 고려해야 한다. 또한 평가 대상 지역의 시기별 조수간만에 따른 지하수위의 영향을 고려하기 위하여 관련 문헌자료를 이용하여야 한다.

[0125] 지하수위의 결정은 자연적인 영향요소(기압, 조석, 강수량, 하천수위 등)와 인위적인 영향요소(지하철, 건물, 공사장 등)의 조합에 따라 고려되며, 주기적인 지하수위 모니터링 자료를 이용할 수 있다.

[0126] 평가 대상 지역의 지하수위를 결정하기 위해서는 지진발생 시 피해예측 시점을 기준으로 해당 시기의 지하수위 모니터링 자료로 표준화한다. 우리나라의 경우는 한국수자원 공사에서 운용중인 국가지하수 관측망을 통해서 평가 대상 지역의 관측 연보(월/일)별 지하수위 관측 자료를 이용할 수 있다.

[0127] 액상화 평가 시 지하수위는 인위적인 영향(지하철, 건물, 공사장 등)을 배제한 상태에서 결정하며, 지하수 관측 연보 자료로부터 관측정 모니터링 기간 동안의 평균 일별 지하수위를 파악하여 이용할 수 있다.

[0128] 지하수위 결정 방법은 다음과 같다.

[0129] ① 평가 대상 지역의 각 시추조사 지점의 시추일자 별 지하수위 정리 → ② 지하수위 관측 연보로부터 시추일 지하수위(관측기간의 일평균)와 지진발생일 지하수위(관측기간의 일평균)의 상관관계식 결정 → ③ 상관관계식 으로부터 지진발생일(액상화 평가대상 일자)의 시추조사 지점별 상관 지하수위 결정

[0130] 지진발생 시점의 지하수위 결정을 위한 상관관계식은 아래의 [식 4]와 같으며, 상기 [조건 3] 내지 [조건 5]에 대입하는 지하수위는 하기 [식 4]에 따라 도출한 시추조사 지점의 지진발생일 지하수위에 기초한 공간보간을 통해 지점별로 결정할 수 있다.

[0131] [식 4]

$$h = \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \times h_2$$

h : 시추조사 지점의 지진발생일 지하수위

H_1 : 평가 대상 지역의 지진발생일 지하수위(관측기간 동안의 일평균)

H_2 : 평가 대상 지역의 시추조사일 지하수위(관측기간 동안의 일평균)

h_2 : 시추조사 지점의 시추조사일 지하수위

[0132]

[0133] 다만, 위와 같은 지하수위 모니터링 자료를 활용한 지하수위 결정 방법을 적용할 경우, 지하수위 관측정 자료에 대한 데이터베이스 구축이 필수적이다. 그러나 관측정 자료는 현재 '국가지하수관측망 관리 시스템'내에 구축되어 있으며, 자동화된 자료의 연계가 현실적으로 어렵기 때문에 지진발생 시 시점별 지하수위 정보를 확보하는데 한계가 있다.

[0134] 이에 따라 본 발명에서는 실시간 지진피해 예측을 위해 시추주상도상의 지하수위 보다 1~2m 더 깊은 보정값에 기초한 공간보간을 통해 지점별로 지하수위를 결정할 수 있다.

[0135] **V. 액상화 피해 등급 도출 - (C)단계**

[0136] 본 단계는 상기 연산처리가 상기 지진계측부로부터 지진파의 암반노두가속도 계측값을 수신하여 각 셀별로 지진파의 최대가속도를 도출하고, 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR)와 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 산정하여, 각 셀별 액상화 안전율(FS_{liquefaction}) 및 액상화 피해 등급을 도출하는 단계이다.

[0137] 1. 지진파의 지층별 최대가속도 도출

[0138] 지진이벤트 발생시 평가 대상 지역에 설치된 지진계측기로부터 지진파의 암반가속도를 전송받아 실시간으로 지층별 최대가속도를 결정한다. 사전 부지응답해석(입력 지진파 : Hachinohe, Ofunato, 인공지진파)을 통해 정립된 상관관계식(식 3)을 적용하여, 해석 심도에 따른 층상별 평균 지반최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)의 도출이 가능하기 때문에 세부 층별 최대가속도를 결정할 수 있다.

[0139] 2. 전단응력비(Cyclic Shear Stress Ratios, CSR) 산정

[0140] 본 발명에서는 액상화 발생 가능 지반으로 선별된 셀들의 전단응력비를 산정하기 위해 SPT-N값 기준으로 세부층별로 산정되는 CRR을 활용할 수 있는 Youd et al.(2001)이 제안한 [식 5]와 같은 CSR 관계식을 이용하였다.

[0141] [식 5]

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) (\gamma_d) / MSF$$

a_{\max} : 지진파의 지층별 최대가속도

g : 중력가속도

σ_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효상재압

γ_d : 전단응력 감소 계수

$$\gamma_d = 1.0 - 0.00765z \quad \text{for } z \leq 9.15\text{m}$$

$$\gamma_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{for } 9.15\text{m} \leq z \leq 23\text{m}$$

z : 액상화 발생 심도(m)

MSF : 지진규모 보정계수

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

M : 지진규모

[0142]

[0143] 예를 들어, 지진규모(M) 6.5에 대한 보정계수는 약 1.44가 된다.

$$\frac{10^{2.24}}{6.5^{2.56}} \cong 1.44$$

[0144]

[0145] 위와 같은 전단응력비(CSR) 산정 과정에서, 상기 과정에서 3차원 공간 모델을 기반으로 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압 및 유효 상재압 분포의 도출이 가능하며, 지진이벤트 발생 시 3차원 공간 모델에 따라 액

상화 발생 가능 세부층별 CSR을 실시간으로 산정할 수 있다.

[0146] **3. 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR) 산정**

[0147] 전단저항강도비 산정을 위해서는 먼저 표준관입저항값(N)의 보정이 필요하다. 표준관입저항값(N)은 헤머의 에너지효율, 시험 심도에 의해 많은 영향을 받으므로 이에 대해 보정한다.

[0148] 이후 평가 대상 지역의 3차원 공간 모델의 공간 그리드별로 보정된 SPT-N값을 이용하여 CRR을 결정한다. 국내에서 사용하는 지진규모(M) 6.5의 경우에 대한 액상화 강도를 사용하므로 [식 6]에서와 같이 지진규모(M) 7.5의 경우에서의 액상화 강도를 보정계수(Magnitude Scaling Factor, MSF)로 보정하여 사용하였다.

[0149] [식 6]

$$CRR_M = CRR_{7.5} \times MSF$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

CRR_M : 지진규모에 따른 액상화 저항능력비

$CRR_{7.5}$: 지진규모 7.5인 경우에 대한 액상화 저항능력비

[0150]

[0151] **4. 액상화 안전율 및 액상화 피해 등급 도출**

[0152] 액상화 평가 대상으로 선별된 각 셀의 액상화 안전율($FS_{liquefaction}$)은 [식 7]과 같이 산정한다.

[0153] [식 7]

$$FS_{liquefaction} = \frac{CRR_{6.5}}{CSR}$$

[0154]

[0155] 위의 [식 7]에 따라 도출된 액상화 안전율을 하기 [판정기준 1]에 따라 각 셀별 액상화 피해 등급을 결정한다.

[0156] [판정기준 1]

[0157] i) $FS_{liquefaction}$ 1.5이상일 때 「높음」 등급

[0158] ii) $FS_{liquefaction}$ 1.5미만일 때 「낮음」 등급

[0159] 한편, 본 (C)단계에서는 셀의 수직 적층으로 이루어진 그리드 칼럼(Grid Column)별 액상화 피해 등급을 결정하는 과정을 더 포함하되, 상기 그리드 칼럼별 액상화 피해 등급은 하기 [식 8]을 통해 도출된 LPI(Liquefaction Potential Index)값을 대상으로 하기 [판정기준 2]에 따라 결정할 수 있다.

[0160] [식 8]

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i(z) W_i(z) H_i$$

z : 지하수위로부터의 깊이

n : 지표면 아래 액상화 평가 대상지반심도까지의 지층 개수

$F_i(z)$: 각 깊이에서 액상화에 대한 안전율

$$F_i(z) = 1 - FS \quad \text{for } FS < 1.0$$

$$F_i(z) = 0 \quad \text{for } FS \geq 1.0$$

$W_i(z)$: 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치 함수

$$W_i(z) = 10 - 0.5z \quad \text{for } z < 20m$$

$$W_i(z) = 0 \quad \text{for } z > 20m$$

[0161]

[0162] [판정기준 2]

[0163] i) LPI=0일 때, 「매우 낮음」 등급

[0164] ii) 0<LPI≤5일 때, 「낮음」 등급

[0165] iii) 5<LPI≤15일 때, 「높음」 등급

[0166] iv) 15<LPI일 때, 「매우 높음」 등급

[0167] VI. 구조물의 실시간 지진손상도 평가 - (D)단계

[0168] 본 발명은 상기 연산처리부가 지진취약도 함수에 따라 평가 대상 지역 내 구조물의 손상확률을 도출하는 (D)단계를 더 포함할 수 있다.

[0169] 구조물의 지진취약도 함수는 특정 지진강도에 의해 구조물이 소정의 손상 수준을 초과할 확률을 함수로 표현한 것이다. 구조물의 손상 확률을 나타내기 위해서는 지진강도를 나타내는 지진강도지수가 필요하며 구조물의 특성에 따라 스펙트럴 가속도(Spectral Acceleration, S_a), 스펙트럴 변위(Spectral Displacement, S_d) 및 지반최대 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)가 많이 사용되고 있다. 지진취약도는 통상 누적 대수정규 분포함수의 형식으로 아래의 [식 9]와 같이 표현될 수 있다.

[0170] [식 9]

$$P_f(s) = \phi \left[\frac{\ln s - \ln \bar{s}}{\beta} \right]$$

$P_f(s)$: PGA가 s 인 지진 발생 시 구조물의 손상확률

$\phi[]$: Gaussian 정규누적확률분포함수,

\bar{s} : 손상을 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 중앙값

s : 확률변수로서 지표면에서 수평지진의 PGA 값

β : 파괴를 일으킨 지진의 지표면에서 PGA의 log값에 대한 표준편차

[0171]

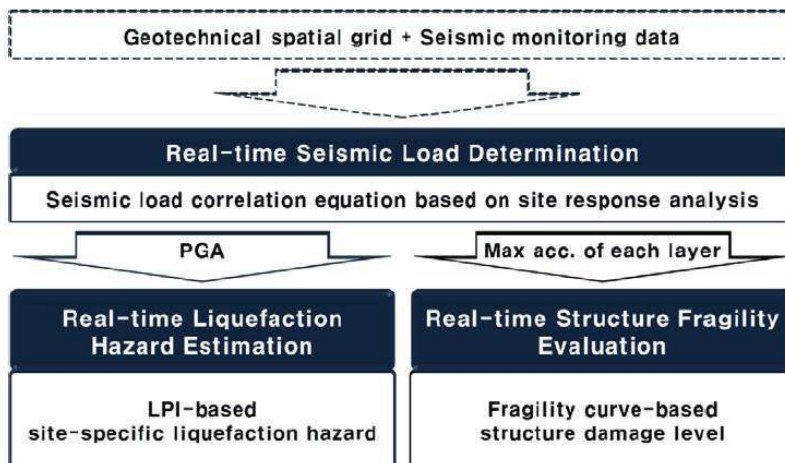
[0172] 지진 발생 시 상기 [식 3]에 의해 결정되는 지진파의 지표면 최대가속도는 구조물의 지진취약도 함수의 입력 변수로서 사용되고 피해 정도는 주어진 손상 등급에 대한 파괴 확률로서 표현된다. 본 발명에서는 구조물의 피해를 결정하기 위해 각 손상 등급의 파괴 확률을 바탕으로 하는 실시간 구조물 손상도 등급화 방법을 적용하였다 ([도 9] 참조).

[0173] **부호의 설명**

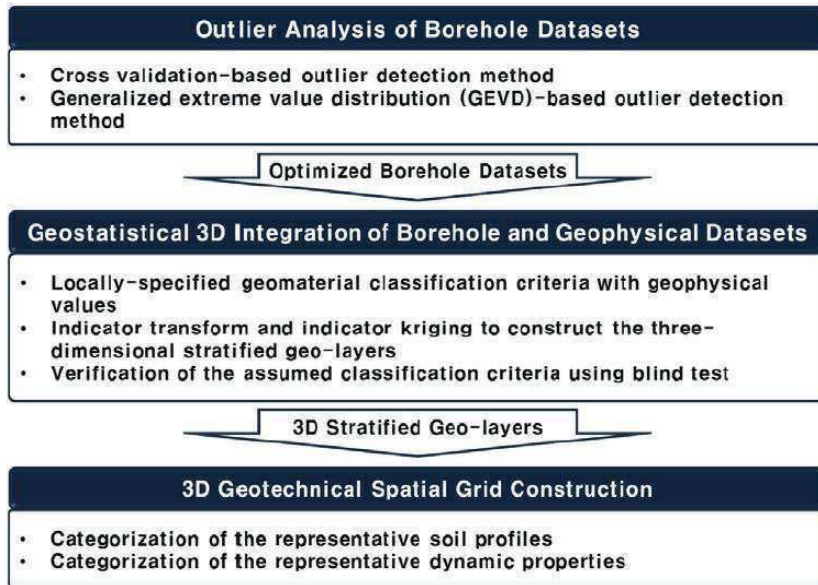
없음

도면

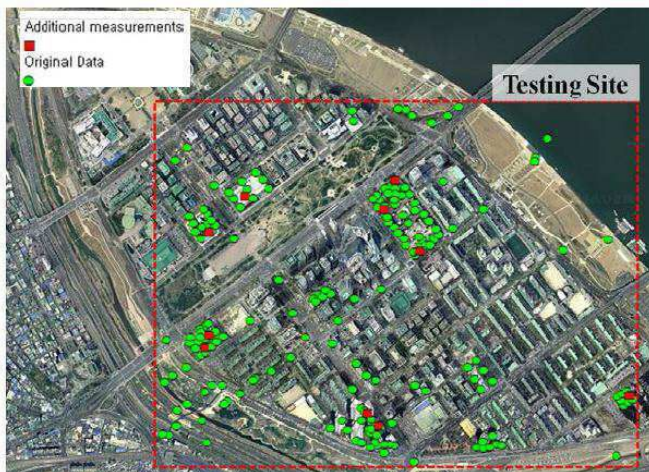
도면1



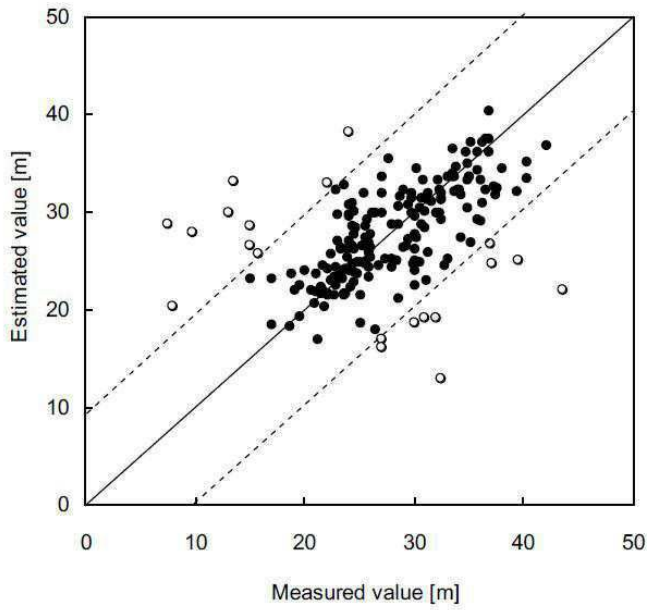
도면2



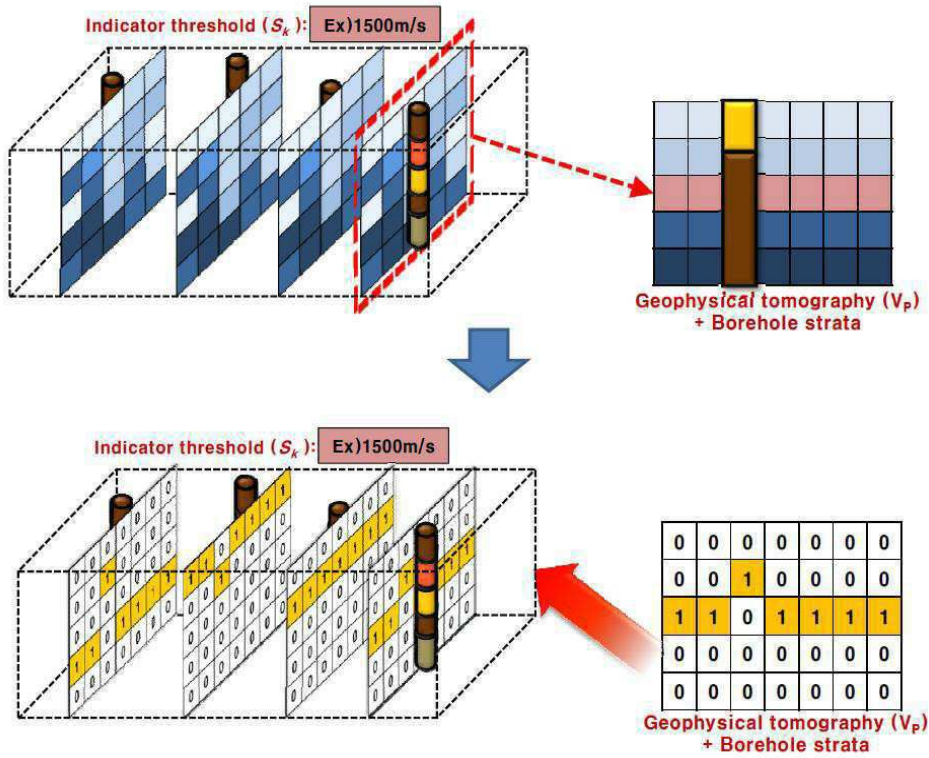
도면3



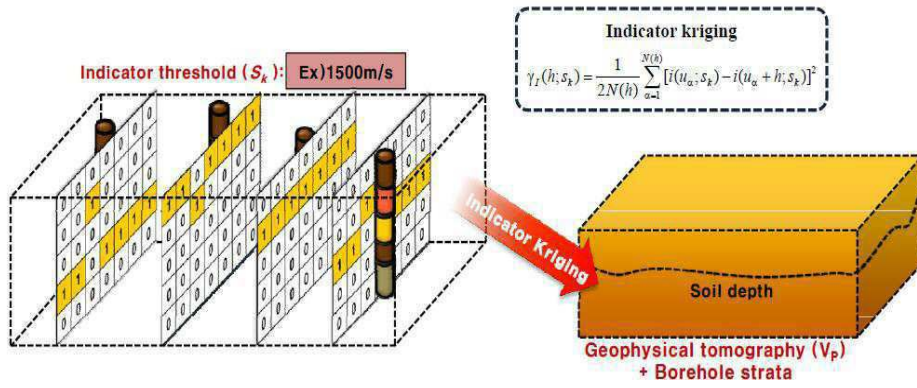
도면4



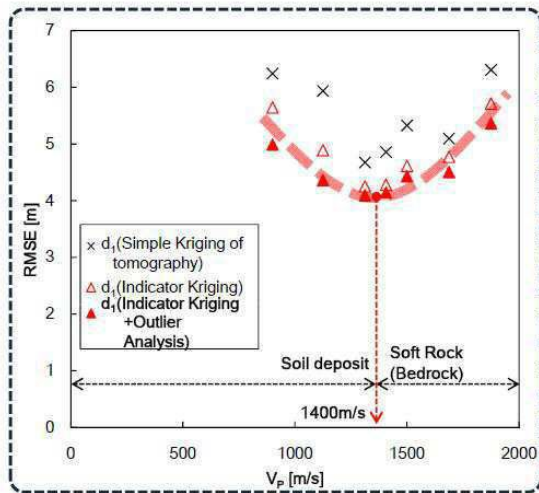
도면5



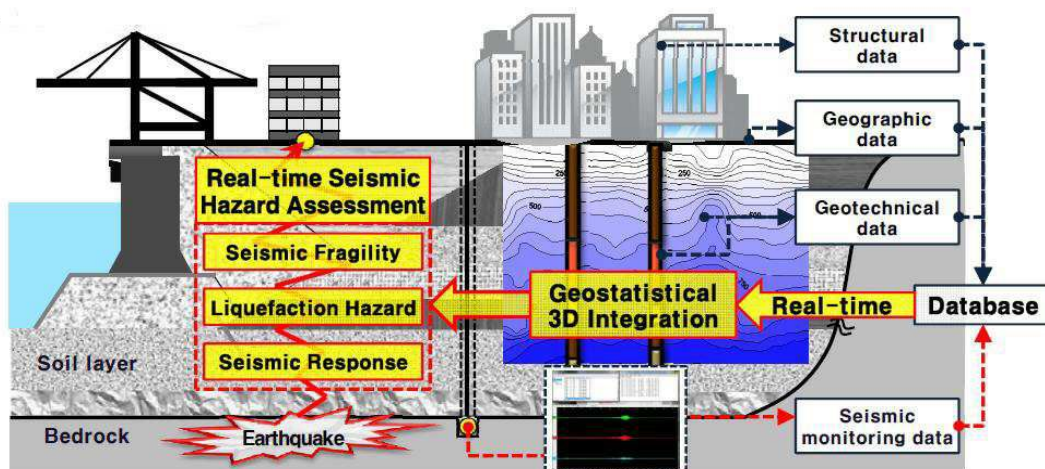
도면6



도면7



도면8



도면9

