

대형지진시 다층지반의 지진응답해석

Seismic Response Analysis at Multi-layered Ground During Large Earthquake

김 용 성* Kim, Yong-Seong

Abstract

In the present study, in order to apply a cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model to multi-layered ground conditions during large earthquake, the numerical simulations of the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake at Port Island, Kobe, Japan, were performed by the seismic response analysis. From the seismic response analysis, it was found that the acceleration calculated from the cyclic elasto-viscoplastic model and cyclic viscoelastic-viscoplastic models for clay was in close agreement with the recorded accelerations at the Port Island down-hole array, and the cyclic elastic-viscoplastic and viscoelastic-viscoplastic constitutive models showed little different behavior characteristics near clay layer. Thus, the propriety of viscoplastic model for clay was convinced. Therefore, it can be concluded that a cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model can give a good description of the amplification and also it showed accurate damping characteristics of clay during large event which induces plastic deformation in large strain range.

요 지

본 논문에서는 점탄-점소성 구성모델을 다층지반에서의 대형지진 발생시의 조건에 적용하기 위해 일본 고베 포트아일랜드에서 발생한 1995 Hyogoken Nanbu 지진에 대한 지진응답 해석을 수행하였다. 지진응답해석 결과 점성토의 탄-점소성 모델과 점탄-점소성 모델로 계산된 가속도 기록은 포트아일랜드에서 계측된 가속도 기록과 거의 일치함을 알 수 있었으며, 점성토 지반 부근에서 점탄-점소성 모델과 탄-점소성 모델은 미세하게 다른 거동 특성을 나타내어 점소성 모델의 타당성을 확인하였다. 따라서 동적 점탄-점소성 구성모델은 대변형률 영역에서 점성토의 소성변형을 유발하는 대형 지진 등의 발생시 점성토의 증폭 및 감쇠특성의 파악을 위해 적용가능한 모델임이 입증되었다.

Keywords : Coupled analysis, Constitutive model, FEM, Reclaimed ground, Seismic response

1. 서 론

최근 세계적으로 계속되는 대형지진(일본: 1995, 타이완: 1999, 터키, 1999, 엘살바도르: 2001, 인도: 2001)의 영향으로 우리나라에서도 액상화에 대한 관심이 높아져 많은 연구 결과들이 보고되고 있다(박인준 등, 2000; 박영호 등, 2000; 이병식 등, 2001; 김명모 등, 2001). 그러나 지금까지의 지반의 내진평가는 포화된

사질토 지반의 액상화 검토에 주안점을 두어왔다. 하지만 대부분의 지반이 사질토 뿐만이 아니라 점성토층을 포함한 다층지반인 경우가 많고, 특히 항만등 강 하구지역이나 해안매립지역은 해성점토 및 하성점토의 퇴적이 두드러져 다층지반을 형성하고 있다. 이러한 다층지반에 대한 대형지진시 내진평가에는 지반재료에 따른 적절한 구성모델을 적용하는 것은 내진대책에 있어서 중요한 검토사항 중에 하나이다. 1964년 일본

* 정회원, 다이나믹 지오테크 대표 (Member, President, Dynamic Geotech, dynamicgeotech@yahoo.co.kr)

에서 발생한 Niigata 지진으로 파악된 액상화현상은 1995년 일본 고베에서의 Hyogoken Nanbu 지진으로 그 피해의 심각성이 재삼 확인되었고 대형지진시 액상화에 대한 대책의 중요성을 경각시켜 주었다. 우리나라에서도 리히터 지진규모 4~5 정도의 지진이 기록되고 있어 대형지진 발생시의 내진대책 수립에 만전을 기할 필요가 있다.

일반적으로 지반의 액상화현상을 모사하는 유효응력 해석방법에는 연성해석 방법과 비연성해석 방법이 있다. 비연성 해석은 통상적으로 쓰이는 동적해석에 공극수압 축적모형을 결합한 해석수법으로 각 시간스텝에 대한 토립자골격의 변위 또는 변형률을 통상의 동적해석에서 계산한 후 그 값을 이용하여 공극수압의 축적모델로 계산하고 구하여지는 공극수압, 유효응력의 저하를 다음 스텝의 동적해석에 반영하는 해석방법이다. 이에 비하여 연성 해석은 공극수압이 토립자 골격의 변형과 동시에 주어지는 해석방법으로 주로 Biot(1962)의 2상 혼합체이론이 적용되어지며 혼합체의 각 상(액상과 고상)이 균질한 물질을 만족하는 다공질의 연속체로 가정하여 지배방정식을 조립한다.

한편, 연성해석의 정식화에 대해서는 미지수의 선택 방법에 따라 여러 가지 종류의 정식화가 고려될 수 있다. 토립자의 골격(고상)의 변위(u), 공극수압(p), 유체(액상)의 변위(U)를 미지수로 하여 지배방정식을 조립하는 full형식은 2상계의 문제를 충실히 풀어 낼 수 있다. 그러나 자유도가 많기 때문에 일반적으로는 여러 가정을 설정하여 자유도를 저감하는 방법이 도입된다. 액상의 압축성을 가정할 수 있는 경우, 공극수압(p)은 고상의 변위(u)와 액상의 변위(U)로 종속되어 p 는 미지수로부터 제거된다. 여기서 액상의 압축성이 가정될 수 없을 경우도 페널티 계수를 이용하여 p 를 미지수로부터 제거할 수 있다(Zienkiewicz and Taylor, 1991). 이 정식화는 u - U 형식이라 불리며, Prevost(1982), Zienkiewicz and Shiomi(1984) 등에 의해 보고되었다. 또한, 고상의 액상에 대한 상대변위를 $w (=n(U-u); n$ 은 공극률)로 하여 미지수로 설정하면, 액상의 변위를 종속변수로 하는 것이 가능하여 미지수는 u 와 w 로 된다. 이 정식화는 u - w 형식이라 불리며 Ghaboussi and Dikmen(1978), Kanatani et. al.(1988), Zienkiewicz and Shiomi(1984) 등에 의해서 이용되어져 왔다. 한편, 고상의 액상에 대한 상대가속도(\ddot{w})가 고상의 가속도(\ddot{u}), 또는 액상의 가속도(\ddot{U})에 비교하여 충분히 작다고 가정할 경우 상대

속도(\dot{w}), 상대변위(w)가 미지수에서 소거되어 미지수는 u 와 p 로 된다. 이 정식화는 u - p 형식이라 하며, Zienkiewicz and Bettles(1982), Shibata(1991) 등에 의해 검토되었다.

본 연구의 지진응답해석에서는 Biot의 2상 혼합체이론을 이용한 지배방정식의 u (고상의 변위)- p (공극수압)형식(Shibata 등(1991), Oka 등(1994))을 기초로 한다. u - p 형식은 u - U (액상의 변위), u - w (상대변위= $n(U-u)$; n 은 공극률)형식과 비교하여 자유도가 적은 장점이 있다. u - p 형식의 자유도는 2차원에서 3, 3차원에서 4인데 비하여 u - U , u - w 형식의 자유도는 2차원에서 4, 3차원에서 6이다. 그 반면에 지배방정식을 정식화 할 경우의 계수 매트릭스는 u - U , u - w 형식의 경우 대칭매트릭스로 되는데 비하여 u - p 형식의 경우는 비대칭매트릭스로 된다. 비대칭매트릭스는 대칭매트릭스에 비교하여 연산시간의 면에서 불리하나 Shibata 등(1991)은 u - p 형식을 대칭매트릭스가 되도록 새롭게 정식화하여 실용면에서도 우수한 해석방법임을 보고하였다. 한편, u - p 형식의 정도는 Zienkiewicz와 Bettles(1982)에 의해 확인되었고 지반의 투수성이 낮을수록 또는 진동의 주파수 레벨이 낮을수록 정도가 탁월함을 보고하였다.

본 연구에서는 Shibata 등(1991), Oka 등(1994)이 개발한 액상화해석코드 LIQCA(Coupled Analysis of LIQuefaction)에 점성토에 대한 점탄-점소성 구성모델(김용성, 2001)을 추가하여 확장한 LIQCA-2D(VE-VP)로서 대변형률 영역에서의 소성변형이 예측되는 대형지진시의 지진응답해석을 실시하고 지진파가 다층지반의 거동특성에 미치는 영향에 대하여 규명하도록 한다.

2. 2상혼합체이론에 의한 지배방정식

Oka 등(1994)은 지배방정식에 있어 FEM(유한요소법)과 FDM(유한차분법)을 결합한 공간이산화 수법을 제안하였다. 기존의 방법에서 지배방정식은 FEM만을 이용하여 공간이산화를 수행하지만 전체의 자유도 저감을 위해 이와 같은 방법을 적용하였다. 이 해석방법의 정도에 대해서는 Shimon 등(1986)이 유도한 Biot의 2상 혼합체이론에 기초한 다공질재료의 간단한 동적문제의 이론해를 근거로 Shibata 등(1991)이 검증하였다. 또한 Kato(1995)는 고유치의 개념을 이용하여 동적문제에 대한 u - p 형식의 해석방법의 안전성에 대하여 검토하여 Newmark- β 법에 있어서의 계수 β , γ 및 투수계수(k)와의 사이에 존재하는 안정조건을 유도하였다. 본 연구

에서는 Biot의 2상 혼합체이론을 이용한 지배방정식의 u (고상의 변위)- p (공극수압)형식을 기초로 하며, Kato (1995)의 연구를 참고하여 Newmark- β 법의 β 와 γ 는 각각 0.3025와 0.6을 적용하였다.

2.1 공간이산화

유한요소법을 이용한 운동방정식의 공간이산화는 다음 (1)식으로 표현된다.

$$[M] \vec{\ddot{u}}_N + [C] \vec{\dot{u}}_N + [K] \vec{\Delta u}_N + \vec{K}_v p_E = \vec{F} - \vec{R}|_t \quad (1)$$

또한, 유한요소법과 유한차분법을 이용한 연속방정식의 공간이산화는 고상과 액상이 비압축성으로 고려될 경우에 (2)식으로 표현된다.

$$\rho^F \vec{\ddot{u}}_N - \frac{\gamma_w}{k} \vec{\dot{u}}_N - \alpha p_e + \sum_{i=1}^i \alpha_i \dot{p}_{ei} = 0 \quad (2)$$

여기서, $[M]$ 는 질량매트릭스, $[K]$ 는 강성매트릭스이며, γ_w 와 \dot{u}_N , \ddot{u}_N 은 각각 액상의 단위중량, 토립자 골격의 속도 및 가속도를 나타낸다.

$$[M] = \rho \int_V [M]^T [M] dV \quad (3)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (4)$$

$$\vec{K}_v = \int_V B_v dV \quad (5)$$

$$\vec{F} = \int_S [M]^T \vec{T} dS + \rho \int_V [M]^T \vec{b} dV \quad (6)$$

$$\vec{R}|_t = \int_V [B]^T \vec{\rho}|_t dV \quad (7)$$

$$[C] = a_0 [M] + a_1 [K] \quad (8)$$

또한, \vec{F} 는 절점외력벡터, \vec{T} 는 표면력벡터, $[M]$ 은 형상함수매트릭스, $[B]$ 는 변형률매트릭스이다. $[C]$ 는 Rayleigh 감쇠매트릭스이며 a_0 은 질량비례감쇠 정수, a_1 은 강성비례감쇠 정수이다. 한편, p_e 는 요소 중앙점에서의 공극수압을 나타내며 a 와 α_j 는 다음 식으로 표현된다.

$$a = \sum_{j=1}^i \left(\sum_{i=1}^N \frac{A_j n_i}{S_{ji}} \right) \quad (9)$$

$$a_j = \sum_{i=1}^N \frac{A_j n_i}{S_{ji}} \quad (10)$$

여기서 A 는 요소의 면적 S 는 주요소의 중앙점과 주변 요소의 중앙점까지의 거리이다.

2.2 시간이산화

Newmark- β 법을 이용한 운동방정식 및 질량보존법칙의 시간이산화는 각각 다음의 (11)식과 (12)식으로 표현된다.

$$[M] \vec{\ddot{u}}_N|_{t+\Delta t} + [C] \left\{ \vec{\dot{u}}_N|_t + \Delta t \vec{\ddot{u}}_N|_t + \gamma \Delta t k \left(\vec{\dot{u}}_N|_{t+\Delta t} - \vec{\dot{u}}_N|_t \right) \right\} + [K]|_{t+\Delta t} \left\{ \Delta t \vec{\dot{u}}_N|_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \vec{\ddot{u}}_N|_t + \beta (\Delta t)^2 \left(\vec{\ddot{u}}_N|_{t+\Delta t} - \vec{\ddot{u}}_N|_t \right) \right\} + \vec{K}_v p_{d,t+\Delta t} = \vec{F}|_{t+\Delta t} - \vec{R}'|_t \quad (11)$$

$$\vec{K}_v^T \vec{\ddot{u}}_N|_{t+\Delta t} - \alpha p_{d,t+\Delta t} + \sum_{i=1}^i \alpha_i p_{d,t+\Delta t} = \vec{K}_v^T \left\{ \vec{\dot{u}}_N|_t + (1-\gamma)\Delta t \vec{\ddot{u}}_N|_t \right\} \frac{1}{k \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k} \right)} \quad (12)$$

2.3 구성방정식

사질토의 구성모델은 Oka 등(1999)의 탄소성 모델을 적용하였고 점성토의 구성모델은 각각 탄-점소성 구성모델(Oka et al., 1987)과 점탄-점소성 구성모델을 적용하였다. 점탄-점소성 구성모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 나타낼 수 있다(김, 2001).

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev}) + \frac{\chi}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \bar{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (13)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 전변형률 속도텐서, G_1 은 제1 전단탄성계수, G_2 는 Voigt 요소의 제2 전단탄성계수이다. 또한, $\dot{\sigma}_m$ 는 평균유효응력 증분, μ 는 점성계수, S_{ij} 는 편차 응력 텐서이다. 응력비 η_{ij}^* 는 S_{ij}/σ_m 로 정의되며, χ_{ij}^* 는 비선형 이동경화텐서, e 는 공극비를 나타낸다. δ_{ij} 는 크로베키 델타이고 χ 는 팽창지수를 표시한다. 한편 C_{01} 과 C_{02} 는 각각 편차 점소성계수, 체적 점소성 계수이다.

2.3.1 정적항복함수 f_y

점탄-점소성 구성모델의 정적항복함수 f_y 는 비선형 이동경화칙을 고려하여 다음 식으로 가정된다.

$$f_y = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2} - R_D = 0 \quad (14)$$

여기서, χ_{ij}^* 는 비선형 이동경화텐서, R_D 는 경화계수이다. 이동경화텐서 χ_{ij}^* 의 발전식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp}) \quad (15)$$

여기서, de_{ij}^{vp} 는 점소성 편차변형률 증분텐서이고 $d\gamma^{vp}$ 는 점소성 편차변형률 증분텐서의 제2 불변량, 즉

$$d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}} \quad (16)$$

이다. A^*, B^* 는 재료상수로서 $A^* = M_f^*$ 이고 B^* 는

$$B^* = B_s + (B_0 - B_s) \exp(-B_t \gamma^{vp*}) \quad (17)$$

로 나타낸다. 여기서 B_0, B_s, B_t 는 점소성계수로서 이들 재료정수를 이용하여 B^* 를 등방경화를 고려한 비선형적인 형태로 부여함으로써 해서 전단 초기의 재료의 강도와 대변형률 영역에서의 재료의 강도의 차이를 표현하는 것이 가능하다.

2.3.2 소성포텐셜함수 f_p

소성포텐셜함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_p = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2} + \widetilde{M}^* \ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{ma}}\right) = 0 \quad (18)$$

여기서, \widetilde{M}^* 은 다음 식으로 정의된다.

$$\widetilde{M}^* = -\frac{\eta^*}{\ln(\sigma_m / \sigma_{mc})} \quad (19)$$

σ_{mc} 는 과압밀 경계면과 σ_m 축과의 교점으로 식 (20)에 의해 결정된다.

$$\sigma_{mc} = \sigma_{mb} \exp\left(\frac{\eta_{(0)}^*}{M_m^*}\right) \quad (20)$$

여기서, $\eta^* = \sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}$, $\eta_{(0)}^* = \sqrt{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij(0)}^*}$. 또한, $\eta_{ij(0)}^*$ 과 σ_{mb} 는 각각 등방압밀 종료시의 η_{ij}^* 와 σ_m 값이고 \widetilde{M}^* 는 현

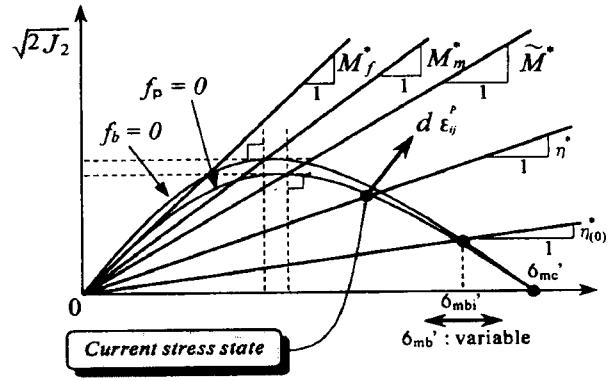


그림 1. 소성포텐셜함수 및 각종 응력비의 정의

재응력과 σ_{mc} 에 의해서 결정되는 변수이다. 한편, σ_{ma} 는 소성포텐셜면 $f_p=0$ 과 이방압밀 종료시 응력비 일정선과 교점에서의 평균유효응력이다. 소성포텐셜면 $f_p=0$ 은 과압밀 경계면 $f_b=0$ 내부를 이동해 간다.

본 연구에서는 점탄-점소성 구성모델에 대하여 수치 해석의 안정성을 확보하기 위해 속도의존성 구성모델을 위한 점선계수법으로 새롭게 확장하였으며 이를 정리하면 (22)식과 같이 나타내어진다.

$$\text{사질토; } \vec{\sigma} = [D]^{EP} \vec{\epsilon}_S \quad (21)$$

$$\text{점성토; } \vec{\sigma} = [D]^E \vec{\epsilon}_S - \vec{\sigma}_r \quad (22)$$

여기서, $[D]^E$ 는 탄성계수 매트릭스, $[D]^{EP}$ 는 탄소성계수 매트릭스, $\vec{\sigma}$ 는 유효응력벡터, $\vec{\epsilon}_S$ 는 토립자 골격의 변형률 벡터, $\vec{\sigma}_r$ 은 완화응력벡터($\vec{\sigma}_r = \vec{\sigma}_{r(ve)} + \vec{\sigma}_{r(vp)}$)이다.

3. 매립지반의 지진응답 해석

3.1 지반조건

본 연구의 해석대상은 일본 고베의 포트아일랜드이며, 인공적으로 조성된 매립지반으로 1995년 Hyogoken Nanbu 지진(M=7.2)이 발생하였을 때 넓은 범위에 걸쳐 액상화현상이 관측되어 많은 지반공학자들의 관심의 초점이 되기도 한 지반이다. 포트아일랜드 지반의 매립 작업은 1969년에 완료되었으며 화강풍화토가 매립재료로서 이용되었다.

그림 2는 각각 지진계측 장소 및 액상화가 발생한 지역의 지층별 속도분포를 나타내며 지진계는 GL.0.0m와

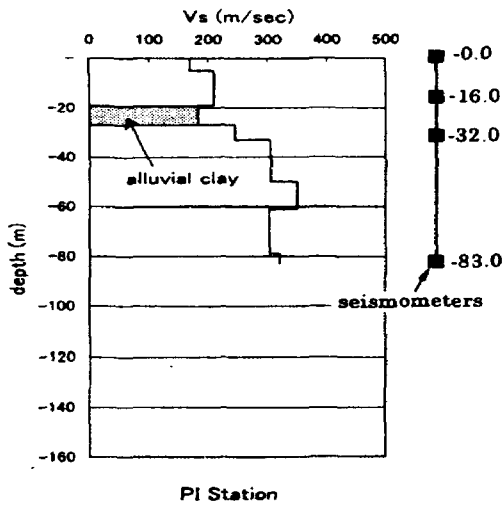


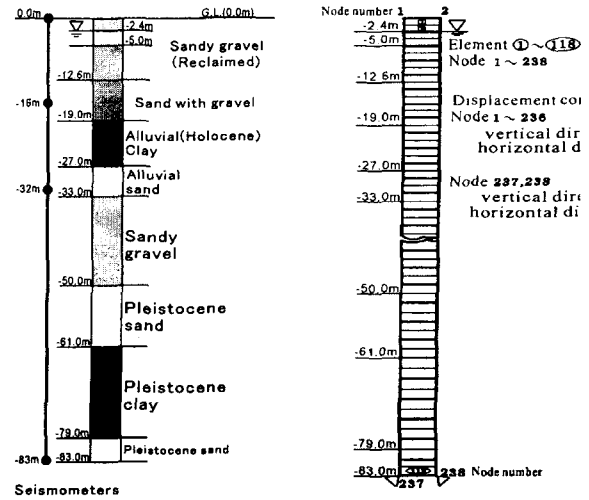
그림 2. 포트아일랜드의 전단파 속도 현황

-16.0m, -32.0m, -83.0m로 네 군데에 매설되어 계측되었다.

그림 3은 포트아일랜드의 지층도 및 본 연구에 이용된 지반모델의 유한요소망을 나타내며, 깊이는 83m이고 118요소로 구성되었다. 하단의 두 절점은 수평 수직 모두 고정조건, 그 이외의 절점은 수직만 고정이고 수평은 자유조건으로 동일한 깊이의 두 절점에 대하여는 등변위가 발생하는 것으로 가정하였으며 지표면만 배수조건으로 설정되었다. 동적해석에 있어서 하중의 입력은 정현파와 지진파 그리고 임의의 요소면상의 표면력 등으로 주어질 수 있으나 본 연구에서는 실제 계측된 지진파(GL.-83m, 고베 포트아일랜드)를 지반모델의 최하단 고정절점에 입력하였다.

3.2 매립지반의 지진응답 해석

본 연구에서는 비선형 액상화해석코드 LIQCA-2D를 점성토의 점탄-점소성 구성모델을 적용하여 새로이 확장·구축한 LIQCA-2D(VE-VP)로서 일본 고베 포트아일랜드의 계측지역에 대한 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 사질토 지반의 액상화해석에는 유효응력모델이 도입되어 정밀한 해석이 수행되지만, 점성토 지반에는 전응력에 의한 탄성해석으로 간단하게 처리하는 경우가 대부분이었다. 한편, Oka 등(1992)은 점성토의 동적 탄-점소성 구성모델을 제안하여 유효응력방법에 의한 수치해석으로 지진시 점성토의 동적 시간의존성 거



(a) Soil profile

(b) Finite element meshes

그림 3. 포트아일랜드의 지층도 및 지반모델의 유한요소망

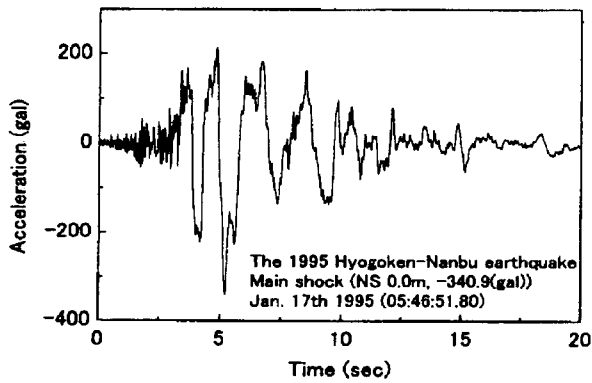
동을 입증하였다. 또한 미소변형률 영역에서의 점성토의 동적거동도 시간의존성임에 착안하여 동적 점탄-점소성 구성모델이 제안되었고(김용성, 2001), 소변형률이 예측되는 리히터 지진규모 4이하의 지진시 다층지반의 거동문제에 적용된 바 있다(김용성, 2002).

본 연구에서는 대변형률 영역에서의 지반 거동문제로서 대형지진이 발생하였을 경우의 지진응답특성을 지반재료에 따라 구성모델을 적용하며, 점성토의 점탄-점소성 구성모델이 미소변형률영역 및 대변형률영역을 포함한 넓은 변형률영역에서 적용될 수 있는지의 여부를 탄-점소성 구성모델과 비교·검토하였으며, 특히 점소성적 거동특성에 착안하였다. 한편 다층지반이므로 사질토의 구성모델로서는 탄소성 모델을 적용하였고 매립지반의 액상화문제는 추후 보고하도록 한다.

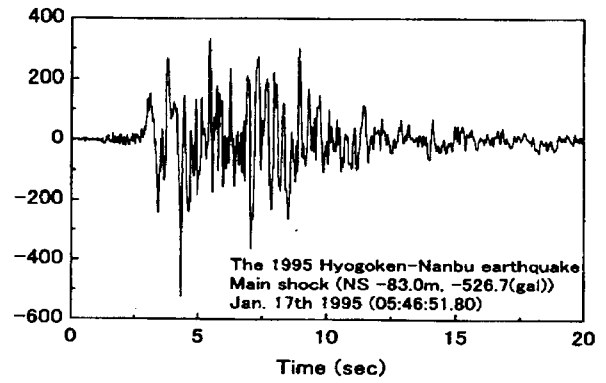
그림 4는 각각 지표(GL.0.0m)와 지중 GL.-83m에서 계측된 NS성분의 수평가속도 기록을 나타내며, 그림 4(b)는 본 해석의 입력지진동으로 이용되었다. 모델지반의 GL.0m, -16m, -32m 등 세 지점에 대한 지진계측기록을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였다.

모델지반의 초기응력조건 및 구성모델에 필요한 상수들은 현장실험(PS검층), 실내실험 및 수치모사 등을 통하여 구해진 기존의 연구문헌 등(Taguchi et. al. 1996; 김용성, 2001)을 참고하였으며 이를 정리하면 표 1과 같다.

그림 5는 포트아일랜드에서 1995년 1월 17일 발생한 Hyogoken Nanbu 지진의 계측기록 및 해석결과이다. 그림 5에서 계측기록을 원점으로 수치해석 결과를 실선과



(a) Observed acceleration record (GL.0.0m)



(b) Observed acceleration record (GL.-83m)

그림 4. GL.0.0m와 GL.-83m에서 계측된 수평 지진기록

점선으로 표현하였으며, 기반(GL.-83m)에서 지표까지의 계측기록은 증폭비가 0.715로서 감쇠특성이 완연함을 볼 수 있다. 이는 지중 GL.-8m내의 부근에서 발생한 액상화의 때문이며, 이러한 액상화의 원인으로 GL.-12m 부근에서 급격히 감소한 후, GL.-7m 부근에서부터 지표부근에서는 증폭되는 지진파의 일반적인 현상과 비슷하게 증폭되고 있다. 그림 3(a)에서 홍적점토층(GL.-61.0~GL.-83m)은 지진동의 증폭 또는 감쇠에 큰 영향은 미치지 않고 있으며 충적사질토 및 홍적사질토(GL.-33m~GL.-61m) 역시 작은 증폭 및 감쇠현상만을 나타내고 있다. 그림 6(a)~(c)에서는 지표와 GL.-16m, GL.-32m의 깊이에서 계측된 지진기록(점선)과 탄-점소성 모델의 지진응답 해석결과(상부 실선) 및 점탄-점소성 모델의 해석

결과(하부 실선)를 표현하고 있다. 먼저 그림 6(c)의 GL.-32m에서는 진동이 시작된 후 7초~10초 사이에서 약간 진폭의 차이를 보이기는 하지만 두 모델의 해석결과는 최대가속도응답 및 위상특성 등 계측기록과 잘 일치하고 있다. 최대가속도를 비교해 보면 계측기록이 약 -544gal 정도인데 비해 탄-점소성 모델의 응답결과는 -526gal, 점탄-점소성 모델은 -550gal을 나타내어 근접한 해석결과라 할 수 있으며, 특히 위상특성의 경우 전반적으로 잘 표현하고 있음을 볼 수 있다. 그림 6(b)의 경우도 두 모델 모두 계측기록을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

한편 Hyogoken Nanbu 지진 발생당시 GL.-16m에서 강진의 영향으로 계측 지진계의 이상이 발생되었으며,

표 1. 본 해석에 이용된 토질정수

Parameters	Depth(-m) Soil type	0-2.4	2.4-5	5-12.6	12.6-19	19-27	27-33	33-50	50-61	61-79	79-83
		Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave V_p (m/sec)		260	330	780	1480	1180	1330	1530	1610	1610	2000
Shear wave V_s (m/sec)		170	170	210	210	180	245	305	350	303	320
Viscous parameter μ (kPa · sec)		0	0	0	0	5.0E+03	0	0	0	5.0E+03	0
Viscoplastic parameter C_{01} (1/sec)		-	-	-	-	2.0E-07	-	-	-	1.0E-09	-
Viscoplastic parameter C_{02} (1/sec)		-	-	-	-	2.0E-09	-	-	-	1.0E-11	-
Viscoplastic parameter m'		-	-	-	-	20	-	-	-	20	-
Viscoplastic parameter B_0		100	100	70	500	50	1000	2000	3000	100	5000
Viscoplastic parameter B_s		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Viscoplastic parameter B_t		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stress ratio at maximum compression M_m^*		0.71	0.71	0.75	0.75	0.74	0.91	1.16	1.16	0.99	1.16
Stress ratio at failure state M_f^*		1.01	1.01	1.05	1.05	1.24	1.21	1.41	1.57	1.24	1.57
Compression index λ		0.03	0.3	0.03	0.3	0.39	0.02	0.02	0.02	0.34	0.03
Swelling index κ		0.00026	0.00027	0.00054	0.00072	0.05	0.00133	0.0011	0.00114	0.00261	0.00203
Poisson's ratio ν		0.25	0.25	0.25	0.25	0.488	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25
Initial void ratio e_0		0.6	0.6	0.6	0.6	1.75	0.6	0.5	0.5	1.2	0.5

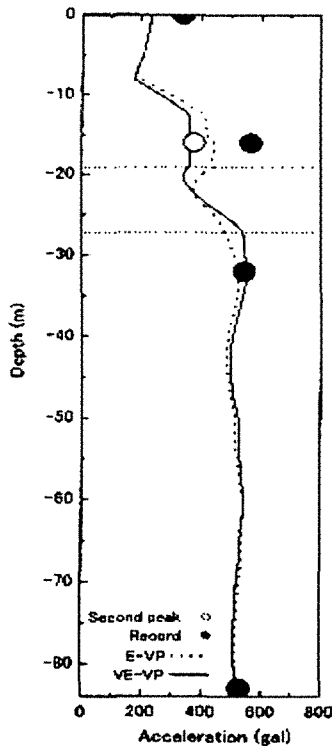


그림 5. 지진계측기록 및 지진응답해석 결과

이후에 계속되는 여진의 기록에서도 지속적으로 이상이 발생되고 있어 그림 6(b)에 'P로 표시된 부분은 기록 이상으로 판단된다(Kim, 2001). 이를 고려하여 GL.-16m에서 두 번째로 높은 가속도기록(Second peak) 376.8gal을 최대가속도로 놓고 검토해 보면 점탄-점소성 구성모델의 최대가속도 응답결과인 359gal은 그 정도가 매우 높다고 할 수 있다. 한편, 탄-점소성 구성모델은 443gal을 나타내고 있으며 진동이 시작된 후 7초~10초 사이에서 진폭이 크게 평가되고 있음을 볼 수 있다. 여기서 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 층적점성토가 GL.-19m~ -27m에 분포되어 있으며 이 층적점성토의 증폭 및 감쇠 특성을 표현하는 두 모델특성에 주목할 필요가 있다.

사질토 지반의 그림 6(a)에서는 두 모델이 거의 동일한 결과에 비하여 점성토 지반의 부근인 그림 6(b) GL.-16m에서는 서로 다른 거동을 표현하고 있다. 두 모델에 의한 최대가속도 응답해석 결과 층적점성토층 부근이외에서는 거의 같은 결과를 예측하였으므로 두 모델이 포함하고 있는 점소성 모델은 대변형률이 예측되는 대형지진시 점성토의 거동을 효과적으로 해석할 수 있음을 알 수 있다. 이상의 결과는 Taguchi 등(1996)이 동일장소에서 수행한 지진응답해석 결과(참고적으로 Taguchi 등(1996)의 응답결과는 GL.-16m에서의 지진파의 진폭

및 위상특성에서 계측결과에 비해 전반적으로 과소 평가되고 있다)와 다소 차이가 있는데, 이는 GL.-19m~ GL.-27m에 존재하는 층적점성토층에 대하여 탄소성 구성모델을 적용하였기 때문으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 Taguchi 등(1996)의 결과와 비교하여 특히 고진동수 성분이 더욱 잘 표현되고 있으며, 따라서 지반재료에 따른 적절한 구성모델 적용의 중요성을 잘 설명해주고 있다.

그림 7에서 점선 및 실선은 각각 지진계측기록 및 구성모델에 의한 가속도 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 7(d)는 GL.-83m에서 계측된 기록의 응답스펙트럼이고 그림 7(a), (b), (c) 등이 탄-점소성 모델(파선)과 점탄-점소성 모델(실선)을 적용한 응답스펙트럼 결과와 계측기록 응답스펙트럼을 비교한 것이다. GL.0m, -16m, -32m의 세 경우 모두 장주기 영역에서 응답스펙트럼이 계측결과를 잘 재현하고 있다. 특히 GL.-32m에서는 단주기 영역에서도 잘 일치함을 볼 수 있는데 이는 GL.-32m 이하의 층적사질토층 및 홍적점성토층에서 발생하는 증폭 및 감쇠 특성을 구성모델이 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 GL.-16m에서는 단주기 성분에서 약간의 차이가 있음을 알 수 있는데 이는 층적점성토층의 감쇠특성의 평가와 관련된 영향이라 판단된다. 한편 지표(GL.0m)에서의 응답스펙트럼의 결과를 보면 단주기에서 GL.-16m 및 GL.-32m와는 다소 다른 양상을 보이는데 이는 액상화가 발생하였기 때문에 액상화 발생 후 복잡하게 변하는 지진파의 진폭 및 위상특성 예측의 어려움과도 관련이 있다. 두 모델을 비교해 보면 점소성 모델의 영향으로 거의 비슷한 예측결과를 제시하였으나 GL.-16m에서의 탁월주기에서 가속도 응답치의 차이를 보였으며 단주기 영역에서도 약간의 차이를 나타냈다. 이상의 결과는 Arulanandan 등(2000)이 제시한 연구결과에 비해 계측기록의 재현이 장주기 및 단주기 영역 모두에서 보다 정도 높은 결과임을 알 수 있다.

이상의 연구결과를 정리하면 다층지반의 대형지진시 지진응답을 수행할 경우 사질토 지반에 대해서는 탄소성 구성모델을 적용하는 것을 기본으로 하여 점성토에 대해서는 탄-점소성 구성모델과 점탄-점소성 구성모델의 타당성을 검토한 결과 두 모델 모두 적용 가능함을 알 수 있었다. 하지만 Taguchi 등(1996)의 연구결과와의 비교에서 알 수 있듯이 점성토에 대하여 탄소성구성모델의 적용은 지진응답의 예측결과가 계측기록과 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 대변형률 영역의

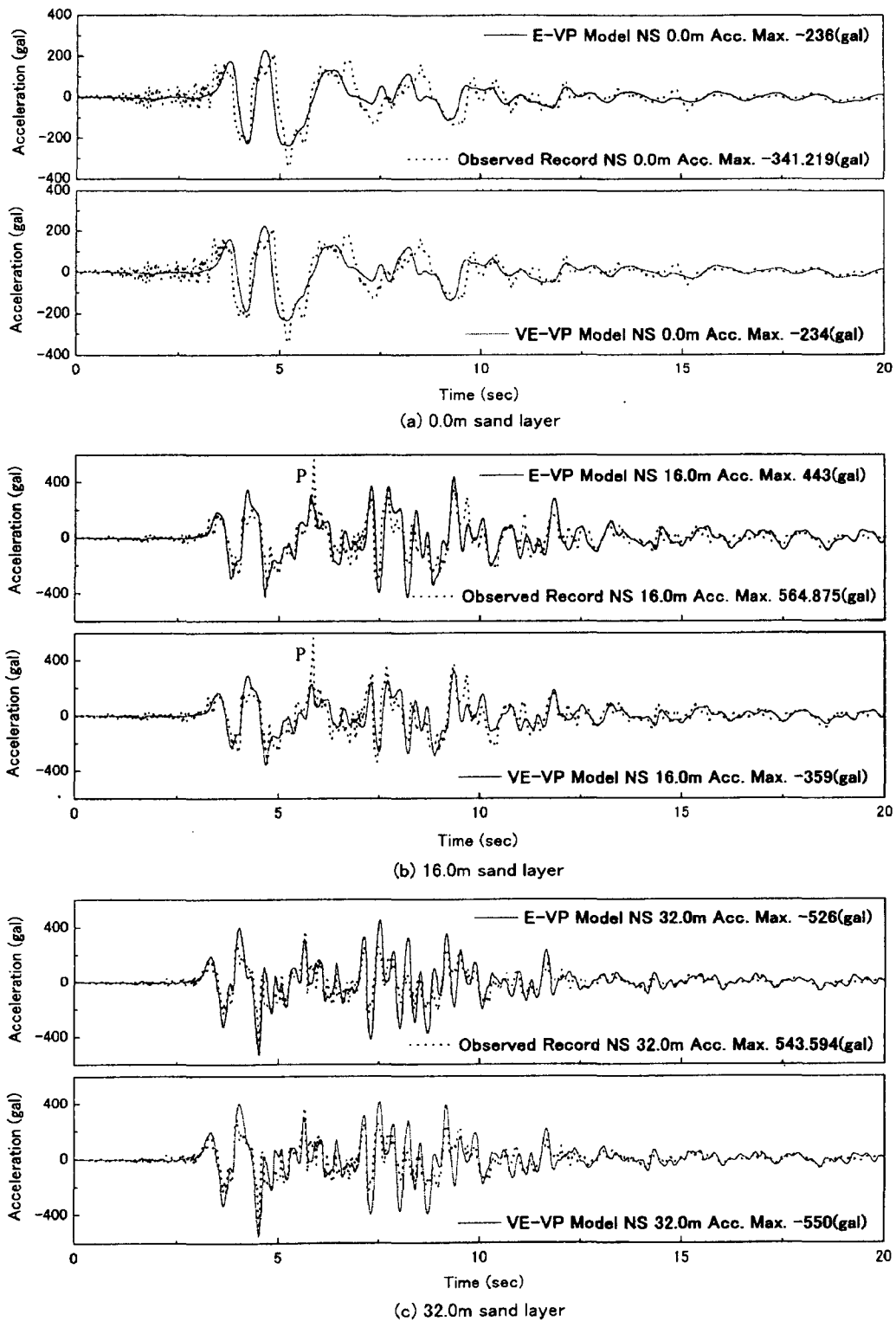


그림 6. 지층에 따른 최대가속도 응답해석 결과

점성토의 동적거동의 해석에는 점소성 거동특성이 지배적이므로 점소성모델의 적용이 중요함을 알 수 있다. 한편 저자는 점탄-점소성 구성모델을 이용하여 소변형률 영역의 예측되는 Hyogoken Nanbu 지진의 여진 등에 대하여 다층지반에서의 동적거동을 검토하고 그 모델

적용의 타당성을 확인한 바 있다(김용성, 2002). 또한 본 연구에서는 점탄-점소성 구성모델을 대변형률이 예측되는 대지진이 발생한 현장에 대하여 그 모델의 타당성을 검토하고 적용성을 확인하였다. 그러므로 점탄-점소성 구성모델은 미소변형률 및 대변형률영역, 즉 넓은 변형률

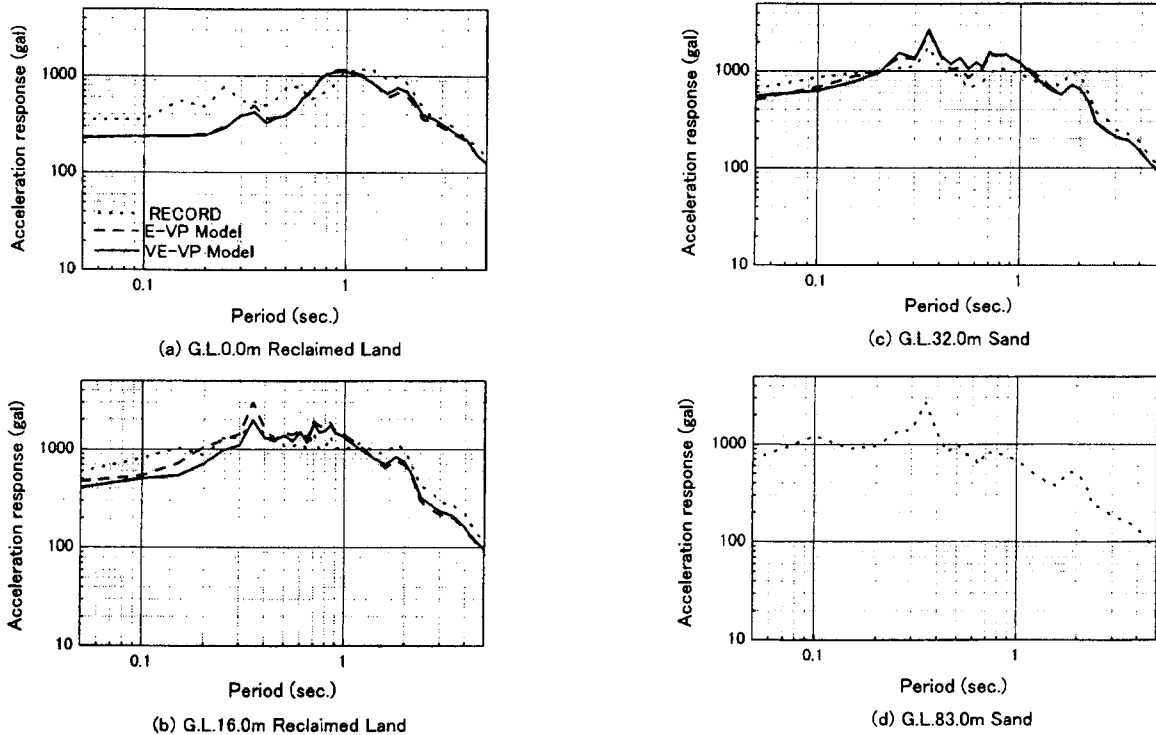


그림 7. 지진계측기록 및 구성모델에 의한 가속도응답스펙트럼

영역에서의 지진응답해석에 적용 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사질토의 탄소성 구성모델 및 점성토의 점탄-점소성 구성모델을 적용한 2차원 유효응력해석 코드(평면변형률 조건) LIQCA-2D(VE-VP)를 이용하여 다층지반상의 대형지진에 대한 지진응답해석을 실시하고 지진파가 다층지반의 거동에 미치는 역할을 규명한 연구로서, 본 연구를 통해 제시된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 점탄-점소성 모델과 탄-점소성 모델을 이용하여 다층지반의 지진응답해석을 실시한 결과 대변형률 영역에서는 점소성 거동특성이 지배적이므로 두 모델은 해석 결과에 있어서 큰 차이를 나타내지 않았다.
- (2) 대변형률이 예측되는 대형지진일 경우의 지진응답 해석시 점성토에 대해서는 점소성 거동특성이 점탄성 거동특성 보다 더 지배적이므로 탄-점소성 모델과 점탄-점소성 모델은 적절한 해석방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 동적 점탄-점소성 구성모델은 미소변형률에서의 점

성토의 점탄성적 거동특성 및 대변형률영역에서의 점소성적 거동특성의 평가에 적절하므로 점성토를 포함하는 다층지반의 지진응답해석에 적용성을 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구논문은 저자의 박사과정 지도교수이자 현 교토대학에 재직중이신 오카 후사오(OKA Fusao) 교수님의 지도가 없었다면 힘들었을 것으로 판단됩니다. 이 자리를 빌어서 다시 한번 감사의 글을 올립니다.

참고 문헌

1. 김명모, 박영호(2001), "액상화 발생후 과잉공극수압 소산 모델링", 한국지반공학회논문집, 제17권, 제4호, pp.39-48.
2. 김용성(2001), "점성토의 점탄성 및 점소성 거동 특성", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5-C호, pp.513-523.
3. 김용성(2002), "동적 점탄-점소성 구성모델을 이용한 다층지반의 지진응답해석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-C호, pp.33-44.
4. 이병식, 정경순(2001) 변형률제어 진동삼축시험법을 이용한 석탄회가 혼입된 모래시료의 액상화 평가, 한국지반공학회논문집, 제17권 제5호, pp.129-136.
5. Arulanandan, K., Li, X.S., and Sivathanan, K.(2000), "Numerical

- Simulation of Liquefaction Induced Deformations," *Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.7, pp.657-666.
6. Biot, M.A.(1962), "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media," *J. of Applied Physics*, Vol.33, No.4, pp.1482-1498.
 7. Ghaboussi, J. and Dikmen, S.U.(1978), "Liquefaction Analysis of Horizontally Layered Sands," *J. of Geotech. Engineering*, ASCE, Vol.104, No.GT3, pp.341-356.
 8. Kanatani, M., Nishi, K., Kawakami, M., and Ohmachi, M.(1988), "Two-Dimensional Nonlinear Response Analysis During Earthquakes Based on the Effective Stress Method," *Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Rotterdam, Balkema*, Vol.3, pp.1749-1754.
 9. Kato, M.(1995), *Multi-Dimensional Liquefaction Analysis Method and Its Application*, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Gifu Univ., Gifu, Japan.
 10. Kim, Y.-S.(2001), *A Cyclic Viscoelastic-Viscoplastic Constitutive Model for Clay and Its Application to Liquefaction Analysis*, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engrg., Kyoto Univ., Kyoto, Japan.
 11. Mendoza, M. and Auvonet, G.(1988), "The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Behavior of Building of Foundations in Mexico City", *Earthquake Spectra*, Vol.4, No.4, pp.753-770.
 12. Oka, F.(1992), "A Cyclic Elasto-Viscoplastic Constitutive Model for Clay Based on the Non-Linear Hardening Rule", *Proc. 4th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Balkema*, Vol.1, pp.105-114.
 13. Oka, F., T. Kodaka, and Y.-S. Kim.(2001), "A Cyclic Viscoelastic-Viscoplastic Model for Clay and Its Application to Liquefaction Analysis of Ground", *Proc. 10th Int. Symp. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Arizona, Balkema*, Vol.2, pp. 1025-1031.
 14. Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., and Uzuoka, R.(1994), "FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Porous Soil Using an Elasto-Plastic Model", *Applied Scientific Research*, Vol. 52, pp.209-245.
 15. Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., and Yamashita, S.(1999), "A Cyclic Elasto-Plastic Constitutive Model for Sand Considering a Plastic-Strain Dependence of the Shear Modulus", *Geotechnique*, Vol.49, No.5, Oct., pp.661-680.
 16. Park, I-J., Yoo, J-H., and Kim, S-I.(2001), "Disturbed State Modeling for Dynamic Analysis of Soil-Structure Interface", *Jour. of the KGS*, Vol.16, No.3, pp.5-13.
 17. Park, Y-H, Kim, S-R, Kim, S-H, and Kim, M-M.(2000) "Liquefaction of Embankments on Sandy Soils and the Optimum Countermeasure against the Liquefaction", *Jour. of KGS*, Vol.16, No.3, pp.15-21.
 18. Prevost, J.H.(1982), "Nonlinear Transient Phenomena in Saturated Porous Media", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.30, No.1, pp.3-18.
 19. Shibata, T., Sato, T., Uzuoka, R., Oka, F., Yashima, A., and Kato, M.(1991), "FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a fluid-saturated ground", *Proc. 7th Int. Symp. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Balkema*, Vol.2, pp.869-874.
 20. Sugito, M., Oka, F., Yashima, A., Furumoto, Y., and Yamada, K. (2000), "Time-dependent ground motion amplification characteristics at reclaimed land after the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake", *Engineering Geology*, Vol.56, pp.137-150.
 21. Taguchi, Y., Tateishi, A., Oka, F., and Yashima, A.(1996), "Three-Dimensional Liquefaction Analysis Method and Array Record Simulation in Great Hanshin Earthquake", *Proc. 11th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema(CD-ROM)*, Paper No.1042.
 22. Zienkiewicz, O.C. and Bettles, P.(1982), "Soils and Other Saturated Media Under Transient, Dynamic Conditions, General Formulation and the Validity of Various Simplifying Assumptions", *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads*, New York: John Wiley & Sons, pp.1-16.
 23. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T.(1984), "Dynamic Behavior of Saturated Porous Media; The Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution", *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.8, pp.71-96.
 24. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L.(1991), *The Finite Element Method (4th Edition)*, Vol.2, McGraw-Hill, pp.518-522.

(접수일자 2001. 12. 22, 심사완료일 2002. 5. 23)