



점성토의 점탄성 특성을 고려한 층상지반의 지진응답특성

Seismic Response Characteristics of Layered Ground Considering Viscoelastic Effects of Clay

김용성*†

Kim, Yong Seong

ABSTRACT

In order to estimate the viscous effects of clay over a wide range of strain levels, we confirmed the performance of a viscoelastic-viscoplastic constitutive model by simulating cyclic undrained triaxial tests to determine the cyclic strength and deformation characteristics of natural marine clay. The viscoelastic-viscoplastic constitutive model was then incorporated into an effective stress-based seismic response analysis to estimate the effects of an intermediate clay layer on the behavior of sand layers. Seismic response was simulated by the cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model created with data recorded at Rokko Island, Kobe, Japan. The results show that a cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model can provide a good description of dynamic behavior including viscoelastic effects, within a small strain range.

Keywords: Constitutive model; seismic response; viscoelastic; viscoplastic; clay

1. 서 론

지난 3월 11일 일본 동북지방의 미야기현 인근 해상을 진원지로 발생한 대규모 지진(지진규모 9.0)으로 4월 2일 현재 사망 11,734 명, 실종 28,000 명이상의 인명피해와 경제적 손실 규모가 14~15조엔 정도로 추산되는 등 샌다이를 비롯한 동북지방 및 일부 관동지방에 막대한 피해가 발생하였다.

우리나라도 지진규모 5.0 이상의 지진(충북 속리산 5.2, 1978; 충남 홍성읍 5.0, 1978; 평안북도 서부 5.3, 1980; 인천광역시 백령도 5.0, 2003; 경북 울진 5.2, 2004)이 기록되고 있어 중규모급 이상의 지진 발생에 대비한 내진대책 수립에 만전을 기할 필요가 있다.

지진 발생 시 암반에 도달한 지진파는 상부 토사층을 통과하여 전파가 이루어짐에 따라 지표면에서의 지반운동 크기가 변하게 되는데 이를 정량적으로 평가하여 설계에 적용하기 위해서는 부지응답해석(지진응답해석)을 수행하여야 한다(Lee, 2008). 현재 가장 널리 사용되고 있는 지진응답해석 기법은 크게 등가선형해석기법과 비선형해석기법으로 대별된다. 등가선형해석

기법은 해석 영역이 주파수 영역이고, 통상적으로 SHAKE해석으로 지칭되고 있으며, 기존 해석자료가 방대한 장점이 있는 반면 시간의존적 거동 변화 묘사는 불가능한 단점이 있다. 비선형해석기법은 해석 영역이 시간 영역이고 시간의존적 거동 묘사가 가능한 반면 모델 변수의 결정이 어려운 단점이 있다.

최근 국내의 여러 연구자들이 지반의 비선형 거동 문제에 관하여 관심을 기울이고 있으나(Park and Park, 2005; You et al., 2006; Lee, 2008; Park et al., 2010; Kim, 2011) 아직도 복잡한 지반의 응답특성을 정확하게 해석하기에는 산적한 난제들이 많은 실정이다.

지금까지 지진응답해석을 위한 많은 구성모델이 제안되었는데 점성토의 경우 소변형률 영역에서 점탄성 거동을 나타내므로 소변형률 영역에서의 점성토의 거동해석에 있어 점탄성 모델을 사용하는 것이 일반적이다(Kondner and Ho, 1965; Murayama and Shibata, 1966; Hori, 1974; Benedetto and Tatsuoka, 1997). 반면에 파괴를 포함하는 중·대변형률 영역(10^{-3} 이상)에서의 시간의존성 거동을 모델링하기 위해서는 점소성 모델을 사용하게 된다(Chaboche, 1977; Oka, 1982, 1992). 지진 발생시 점성토 지반의 변형률 영역은 미소변형률 영역(10^{-5} 이하) 또는 소변형률 영역($10^{-3} \sim 10^{-5}$)이며, 지진응답해석을 위해서는 이러한 변형률 영역에서의 지반거동 특성을 표현할 수 있는 적절한 구성모델이 필요하게 된다.

본 연구에서는 점탄-점소성 구성모델 및 탄-점소성 구성모델

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

2011년 4월 4일 투고

2011년 4월 18일 심사완료

2011년 5월 2일 게재확정

을 이용하여 층상지반에서의 지진응답해석을 수행하고 이들 특성을 고려할 수 있는 점탄-점소성 구성모델의 타당성을 검증하고자 한다. 이를 통해 지진 발생 시 시간영역에서 점성토의 점탄성 특성이 고려된 지반 비선형 거동의 정확한 해석이 가능하게 함으로써 내진대책 수립에 기여할 수 있도록 하는 기초적 정보들을 제공하고자 한다.

II. 점탄-점소성 구성모델

1. 점탄성 모델

지금까지 점탄성 구성모델은 폴리머, 콘크리트, 금속과 흙 등 공학적 재료의 모델링에 사용되어 왔으며 주로 Maxwell 모델, Voigt 모델, 3요소 모델 등의 선형 점탄성 모델이 점성토의 거동해석에 이용되어 왔다.

Kim (2006)은 편차성분을 고려한 점탄성 모델을 다음과 같이 제안하였다. 점탄성 요소로서 3요소 모델을 사용하는 것으로 하여 점탄성 변형을 속도텐서의 편차성분 \dot{e}_{ij}^{vev} 는 다음의 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}_{ij}^{vev} = \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev}) \quad (1)$$

여기서, μ 는 점성계수, G_2 는 Voigt 요소의 제2 전단탄성계수, S_{ij} 는 편차응력텐서이다.

탄성 및 점탄성을 고려한 3요소 모델의 편차변형을 속도텐서 \dot{e}_{ij}^{ve} 는 다음의 (2)식과 같이 된다.

$$\dot{e}_{ij}^{ve} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^{vev} = \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev}) \quad (2)$$

여기서, G_1 는 제1 전단탄성계수이다.

2. 점소성 모델

점소성 구성모델은 Chaboche and Rousselier (1983)에 의해 일반화된 비선형 이동경화이론을 기초로 한다 (Oka, 1992; Kim, 2001):

$$\dot{e}_{ij}^{vp} = C_{01} \langle \Phi_1(f_y) \rangle \frac{\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*}{\eta_x^*} + C_2 \langle \Phi_1(f_y) \rangle \left\{ \bar{M}^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\bar{\eta}_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\eta^* = \sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}, \quad \bar{\eta}^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)}, \quad \eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma_m} \quad (4)$$

여기서 C_{01} 및 C_{02} 는 점소성계수이며 Macaulay bracket $\langle \cdot \rangle$ 에서 $x > 0$ 이면 $\langle x \rangle = x$, $x \leq 0$ 이면 $\langle x \rangle = 0$ 을 나타낸다.

정적항복함수 f_y 와 점소성파라메타 Φ_1 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Adachi and Oka, 1982):

$$\Phi_1(f_y) = \exp\{m' f_y\}, \quad f_y = \bar{\eta}^* = 0 \quad (5)$$

Chaboche and Rousselier (1983)에 의하면, 비선형 이동경화 파라메타 χ_{ij}^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp}) \quad (6)$$

$$d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} \cdot de_{ij}^{vp}} \quad (7)$$

여기서 A^* 는 파괴시의 응력비, 즉 $A^* = M_f^*$ 이며 B^* 는 점소성 전단계수 (G^{vp})와 파괴응력비와의 비 즉 $B^* = G^{vp} / M_f^*$ 이며 다음과 같이 정의 된다.

$$B^* = B_s + (B_0 - B_s) \exp(-B_r \gamma^{vp}) \quad (8)$$

여기서 B_0 , B_s , B_r 는 점소성계수 파라메타이다.

점성토의 동적 점탄점소성 구성모델은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{ve}) + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m'}{\sigma_m} \delta_{ij} \quad (9) \\ & + C_1 \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_{ij}'} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\bar{\eta}_{ij}^*} \\ & + C_2 \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m'} \left\{ \bar{M}^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\bar{\eta}_{ij}^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \end{aligned}$$

III. 구성모델을 이용한 지진응답해석

1. 지반조건

모델지반은 1995년 Hyogoken Nanbu 지진이 발생한 일본 고베항 부근의 인공섬 록코아일랜드 (Rokko Island)로 하였다. Fig. 1은 각각 록코아일랜드의 지진계 설치 위치도와 지진파의 속도 분포도를 나타내며, 지진계가 설치된 지점이 각각 GL0.0 m,

- 35.0 m, - 98.0 m, - 154.5 m임을 알 수 있다. 한편 전단파 속도는 층적점토층에서 약 115 m/s를 나타내고 있다.

Fig. 2는 록코아일랜드의 지층도 및 지반모델의 유한요소도를 나타낸다. 유한요소의 구조는 록코아일랜드에서 GL. - 93.5 m 이하의 부분이 암반임으로 인해 깊이 - 93.5 m×넓이 0.5 m로서 1차원모델로 설정되었으며 배수조건은 상부의 지표부분만 배수이며 나머지는 모두 비배수로 하였다. 전체 128요소, 258절점으로 하부 두 절점은 수직·수평 모두 고정이며, 나머지 절점들은 모두 수직-고정, 수평-자유조건으로 진동시 동일깊이의 두 절점에서는 등변위로 가정하였다.

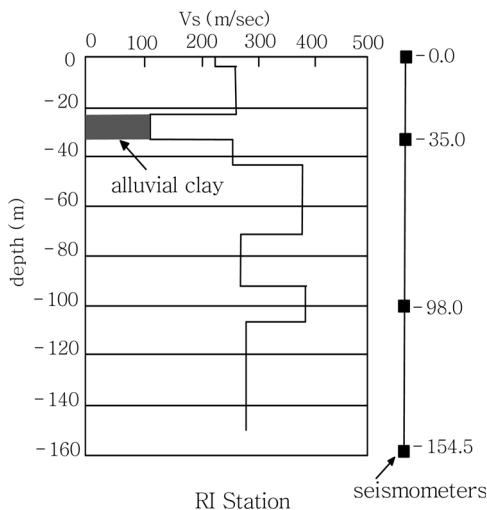


Fig. 1 Velocity structure and layout of seismometers

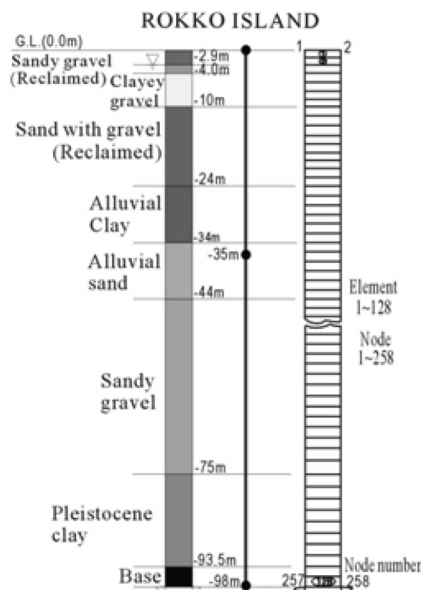


Fig. 2 Soil profile and finite-element meshes of the ground model

2. 지진파 증폭 특성

Table 1은 록코아일랜드에서 계측된 지진파 증폭비 (지반 깊이별 최대가속도의 피크치를 기반암의 최대가속도 기록으로 나누어 정규화 한 것) 현황을 나타낸 것으로 그룹을 A, B, C 등 3개 그룹으로 분류하였다.

그룹 A는 본진 이전의 기록이고 B와 C는 Hyogoken Nanbu 지진이 발생한 이후의 여진의 기록이다. Record data는 연·월·일·시·분의 조합으로 표시하였으며 a와 b는 10월과 11월을 의미한다. 가령, A 그룹의 4a241151은 1994년 10월 24일 11시 51분에 발생한 지진을 나타낸다. Hyogoken Nanbu 지진이 1월 17일 발생하였으므로 B그룹은 본진 발생 후 약 일주일 전후, C그룹은 9일 후에서 한 달 전후 사이의 여진으로 구성되어 있다.

Fig. 3~5는 Group A~C에 대하여 탄-점소성모델 (사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 탄-점소성모델 적용) 및 점탄-점소성모델 (사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 점탄-점소성모델 적용)로서 해석한 결과를 계측기록과 비교한 것이다.

본진 이전 발생된 Group A 및 Group B, C의 경우 거의 비슷한 결과를 나타내나 탄-점소성모델의 경우가 몇몇 해석 결과에서 좀 더 많이 증폭되는 것으로 나타났다. 이는 모델지반에 층적 점성토층 (GL. - 24 m ~ - 34 m)과 홍적 점성토층 (GL. - 75 m ~ - 93.5 m)이 존재하는 것과 관련된 것으로 판단된다.

Table 1 Seismic motion amplification ratio at Rokko Island

Group	Record data	Amplification ratio (0/98 m)	Amplification ratio (35/98 m)
A	46281309	0.957	0.757
	47281002	1.123	0.973
	4a241151	0.883	1.108
	4b092027	1.095	1.068
	4b100038	1.243	1.107
B	51201538	1.159	0.926
	51232144	1.281	1.163
	51252316	0.915	1.047
C	51260101	1.364	1.53
	51262308	1.437	0.852
	51290942	1.097	0.708
	51291603	1.058	1.064
	52030436	0.767	0.878
	52032037	1.274	0.934
	52182138	1.483	1.466
	52240804	1.227	1.000

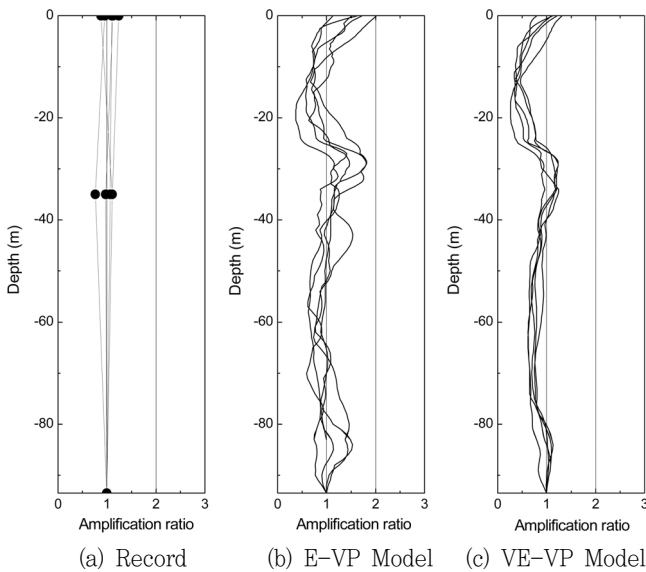


Fig. 3 Amplification ratio vs. depth in Group A

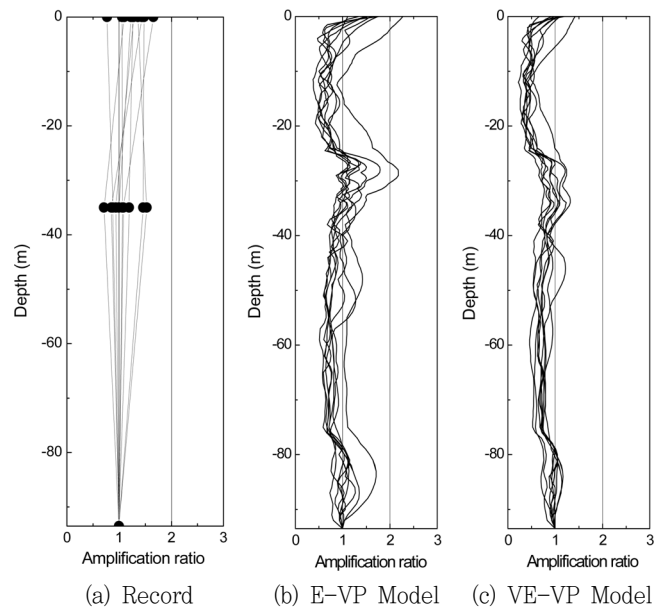


Fig. 5 Amplification ratio vs. depth in Group C

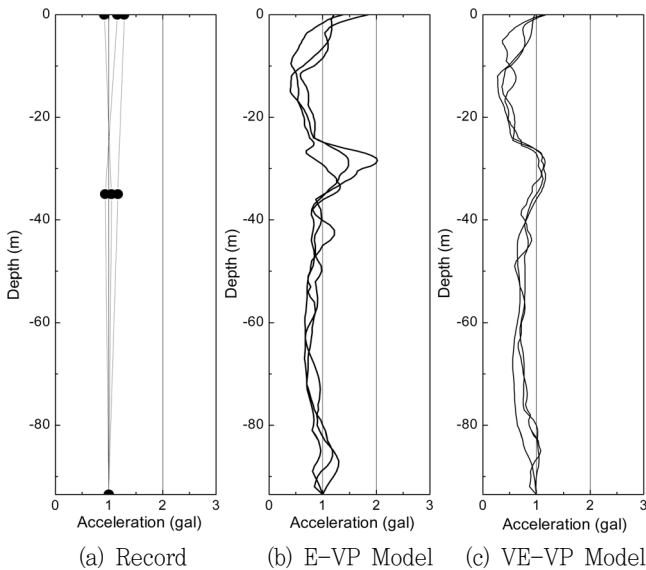


Fig. 4 Amplification ratio vs. depth in Group B

점탄-점소성 모델의 경우 점탄성 성분에서 데쉬포트 요소 (dashpot element)를 포함하고 있으므로 점성토의 지진파 감쇠 특성을 잘 설명할 수 있는데 반해 탄-점소성 모델은 감쇠 특성의 설명이 부족함에서 찾을 수 있다.

Fig. 3~5에서 이러한 부분을 확인할 수 있는데 점탄-점소성 모델이 GL. -44 m ~ -98 m에서 거의 일직선에 가까운 파형을 나타내는데 비해 탄-점소성모델은 지진규모 (최대가속도)에 따라 파형이 달라지는 양상을 나타내고 있다. 또한 지표면 부근에서의 파동 특성도 탄-점소성 모델의 경우가 기록치 보다 약간 높게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

3. 지진응답해석

본 연구에 이용된 지진응답해석코드 LIQCA-2D는 Biot (1962)의 2상혼합체이론에 기초한 토(土)-수(水) 연성의 동적인 지배방정식과 더불어, 사질토에 대해서는 탄소성모델과 점성토에 대해서는 점탄-점소성모델을 지반재료의 구성방정식으로 하고 있다.

사질토의 탄소성 구성모델은 비선형이동경화칙에 의해서 비선형 이력특성을 표현하며 과압밀경계곡면을 이용하여 동적재하시의 다일레이탄시를 표현할 수 있다. 탄소성 구성모델은 이 방압밀과 초기전단응력이 작용할 때와 같은 다양한 초기응력상태에서의 사질토의 비배수 전단거동을 표현하는 것이 가능하다. 한편 점성토에 대해서는 점탄-점소성 구성모델을 적용하나 구성 모델의 검증을 위해 탄-점소성 구성모델도 병행하여 지진응답해석을 수행하였다.

점성토층을 포함하는 다층지반에서의 지진응답거동을 탄-점소성 모델과 점탄-점소성 모델 등 두 모델의 지진응답해석 결과를 실제 계측 기록된 지진파와 비교·분석하였다. 이용된 재료정수는 실내시험 및 수치시뮬레이션을 통해 구한 기존의 연구 (Kim, 2001)의 재료정수들을 참조하였으며 이를 정리하면 Table 2와 같다.

동적해석 있어서 하중입력은 정현파와 지진파 그리고 임의의 요소면상의 표면력 (step파형, 정현파형, 스파이크파형) 등으로 입력할 수 있으나 본 연구에서는 실제 계측된 지진파 (GL.-98 m, 고베)를 지반모델의 최하단 고정절점에 입력하였다. 여기서 지반모델이 1차원이고 경계부와 입사파가 직교하므로 반사파

Table 2 Material properties used in this study

Depth (- m)	0-2.9	2.9-4	4-10	10-24	24-34	34-44
Parameters	(sand)	(sand)	(sand)	(sand)	(clay)	(sand)
V_s (m/sec)	170	170	210	210	130	245
μ (kPa·sec)	0	0	0	0	4.0E+03	0
C_1 (1/sec)	-	-	-	-	2.5E-07	-
C_2 (1/sec)	-	-	-	-	2.5E-09	-
m'	-	-	-	-	20	-
M_m^*	0.71	0.71	0.75	0.75	0.74	0.91
M_f^*	1.01	1.01	1.05	1.05	1.24	1.21
B_0	50000	50000	50000	50000	500	50000
B_s	1	1	1	1	1	1
B_t	1	1	1	1	1	1
λ	0.03	0.3	0.03	0.3	0.39	0.02
κ	0.00026	0.00027	0.00054	0.00072	0.05	0.00013
ν	0.25	0.25	0.25	0.25	0.488	0.25
$e_{(0)}$	0.6	0.6	0.6	0.6	1.75	0.6

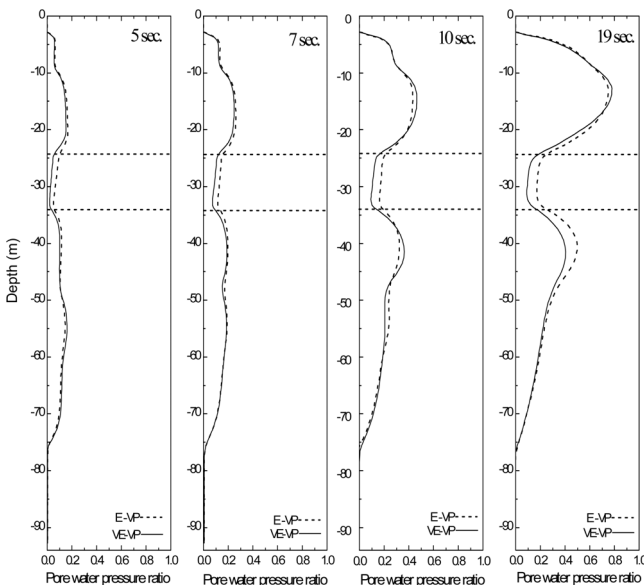


Fig. 6 Excess pore water pressure ratio vs. depth relations at Rokko Island

의 영향은 직접적으로 지진응답의 결과가 되게 된다.

일반적으로 토립자의 변위에 대해서는 단점구속과 간단한 다점구속을 취하는 것이 가능하며, 다점구속에 있어서는 임의의 2절점의 변위를 동일시하는 등변위 경계조건을 부여할 수 있다. 간극수의 이동에 대해서는 임의의 요소변을 배수 또는 비배수 경계로 한다. 또한 해석영역의 무한성을 재현하기 위해 점성경계를 측방 또는 저면에 설정할 수 있고, 해석코드는 Rayleigh 감쇠, 이력감쇠, 점성경계에 의한 에너지일산감쇠 등을 표현할

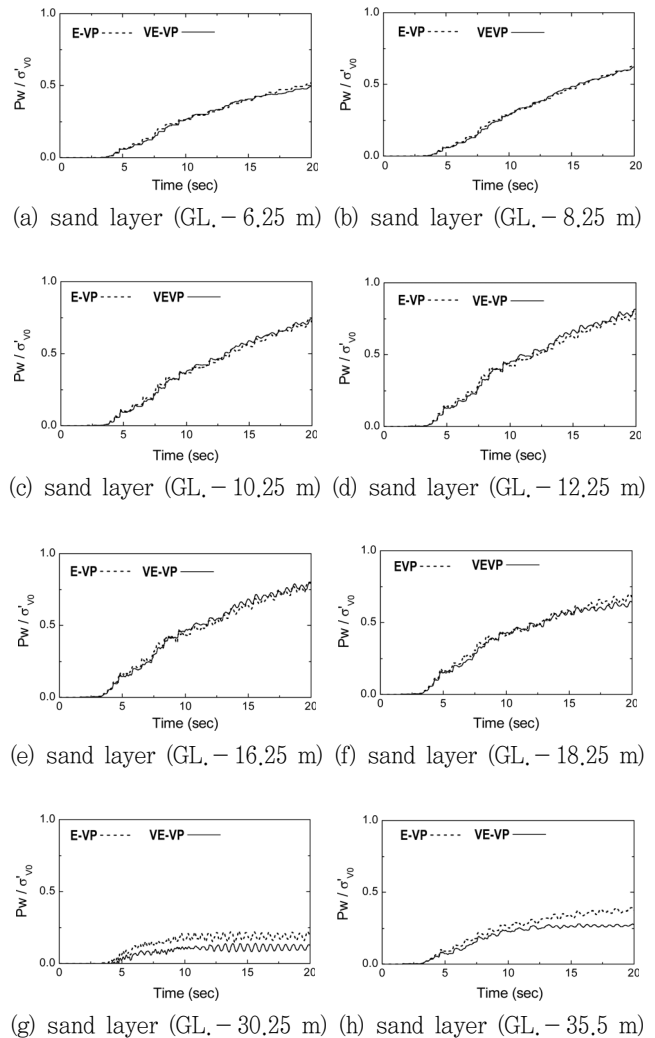


Fig. 7 Time histories of Excess pore water pressure ratio at Rokko Island

수 있으나 본 연구에서는 1차원 모델의 등변위 경계조건으로 점성경계는 사용하지 않았다.

Hyogoken Nanbu지진의 본진 시 측정된 가속도는 포트아일랜드 GL-83 m에서 526.7 (gal)로 대형지진이며 액상화 현상을 동반함으로써 수많은 인적 물적 피해를 야기하였다. Fig. 6은 본진 시 모델지반에서의 깊이에 따른 간극수압비의 변화를 나타낸다. 과잉 공극수압비는 액상화 가능성을 나타내는 척도로서 95 %에 이르면 액상화가 발생한 것으로 판단한다. 지진발생 19초 후 GL-12 m 부근에서 75 %의 높은 과잉 공극수압비를 나타내고 있으나, 95 %에 도달하지 못해 액상화 현상에는 이르지 않았다. 점성토층의 영향으로 점탄-점소성 모델 및 탄-점소성 모델의 해석결과는 점성토층을 중심으로 한 상·하부에서 공극수압비의 분포가 매우 다르게 나타나고 있는데,

탄-점소성 모델의 경우가 점탄-점소성 모델보다 과잉간극수압 비를 약간 높게 예측함을 알 수 있다.

Fig. 7은 모델지반에서의 공극수압비의 경시변화를 나타낸 것으로 점성토층이 위치한 GL. - 24 m ~ - 34 m 부근에서 두 모델의 예측 결과 값이 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 Fig. 3~6에서 살펴 본 바와 같이 점탄-점소성 모델의 경우 점탄성 성분에서 3요소 모델을 포함하고 있으므로 점성토의 지진파 감쇠 특성을 잘 설명할 수 있는데 반해 탄-점소성 모델은 감쇠 특성의 설명이 부족함에서 찾을 수 있다.

한편, 우리나라의 경우에는 중소규모의 지진이 대부분이므로 인해 다층지반일 경우 점성토의 감쇠특성에 민감한 구성모델의 적용이 중요한 고려사항으로 된다. 따라서 본 연구에서는 중소규모의 지진응답해석에 적합한 구성모델을 이용하여 우리나라의 지진규모와 유사한 지진규모 4.0정도의 실제현장의 지진응

답해석을 실시한 후, 그 결과의 분석을 통해 구성 모델의 타당성을 검토하였다.

Fig. 8은 본진 발생 약 9개월 후인 1995년 10월 14일 02시 04분에 발생한 여진을 지진응답 해석한 결과를 나타낸 것으로 지표에서의 지진기록과 탄-점소성 모델의 지진응답 해석결과(상부) 및 점탄-점소성 모델의 해석결과(하부)를 보여 준다.

먼저, 탄-점소성 모델의 경우 최대 가속도 기록이 28.1 (gal)로서 지표에서의 지진파의 최대가속도가 - 19.7 (gal)보다 크게 증폭되었음을 알 수 있으며 최대 가속도 이후의 지진파형도 상하로 계측기록보다 많이 증폭되고 있다. 점탄-점소성 모델의 경우는 최대 가속도가 - 16.7 (gal)로서 계측기록 보다 약간 작지만 전체적인 파형이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 탄-점소성 모델과 비교할 때 특히 소변형률이 예측되는 4초~10초 사이의 가속도 기록에서 보다 정도 높은 해석임을 보이고 있다.

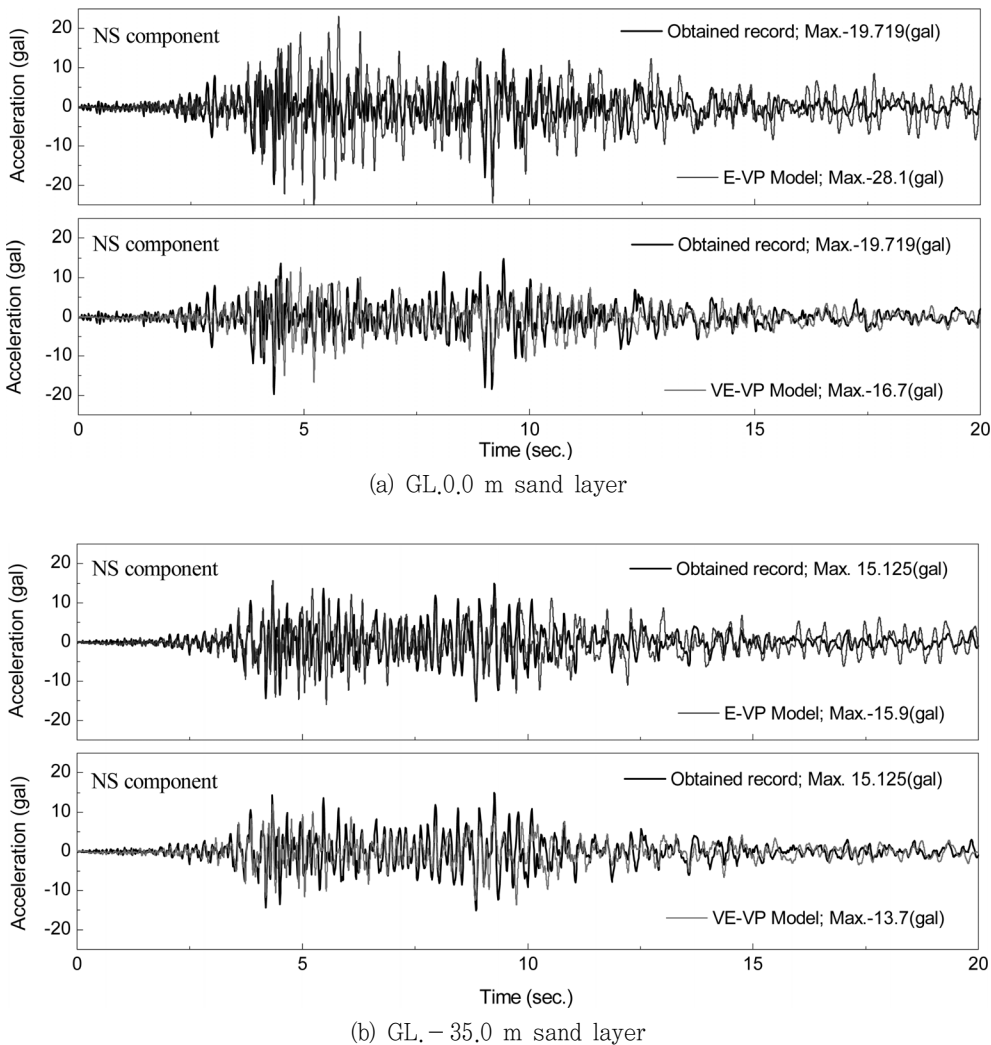


Fig. 8 Acceleration time histories at Rokko Island

Fig. 8 (b)에서도 동일한 결과를 얻었으며, 이는 점탄-점소성 모델의 경우 3요소 점탄성 모델 부분이 GL. - 24 m ~ - 34 m 에 존재하는 층적점토층의 감쇠 거동을 효과적으로 해석함으로써 이와 같은 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 8에서 가속도가 최대치를 기록하기 전에는 두 모델의 차이가 그리 크지 않지만 최대치 이후의 가속도 기록에서는 많이 차이를 나타내고 있다. 즉 점탄-점소성 모델은 소변형률 영역에서 작동하는 점성매퍼와 탄성스프링이 존재함으로 인해 효과적으로 점성토의 증폭 및 감쇠 특성을 설명할 수 있다. 하지만 탄-점소성의 모델의 경우 소변형률 영역에서는 탄성 스프링만 작동하므로 감쇠 특성을 설명하기에는 부족함이 있음을 알 수 있다.

이상의 탄-점소성 모델과 점탄-점소성 모델의 여진기록에 대한 가속도응답해석의 고찰로부터 점탄-점소성 모델은 소변형률을 포함한 넓은 변형률 영역의 점성토의 거동 특성을 재현하는 것이 가능하나 탄-점소성 모델의 경우 소변형률 영역에서의 감쇠특성을 설명하기에는 부족함이 있음을 알 수 있었다. 이는 점탄-점소성 모델의 경우 탄-점소성 모델에 비해 Voigt 요소를 포함함으로써 점성토의 감쇠특성을 보다 정도 높게 설명할 수 있기 때문이다. 따라서 우리나라에서 발생하는 지진이 대부분 중소규모 지진이므로 특히 층상지반에 발생한 지진의 응답해석 시 점성토의 감쇠특성을 정도 높게 해석할 수 있는 동적 점탄-점소성 구성모델을 적용하는 바람직하다고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 점탄-점소성 구성모델 및 탄-점소성 구성모델을 이용하여 층상지반에서의 지진응답해석을 수행하고 점성토 점탄성 특성을 고려할 수 있는 점탄-점소성 구성모델의 타당성을 구명하고자 한 연구로서, 본 연구를 통해 제시된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 점탄-점소성 모델과 탄-점소성 모델을 이용하여 일본 고베지역의 인공매립지 록코아일랜드의 여진해석을 실시한 결과 점탄-점소성 모델은 탄-점소성 모델에 비하여 지진기록의 정도 높은 재현이 가능함을 확인하였다.

2. 점탄-점소성 모델의 경우 Voigt요소를 포함함으로써 점성토의 감쇠특성을 고려하였기 때문에 점성토를 포함한 층상지반에서 탄-점소성 모델에 비해 보다 정도 높게 설명할 수 있다.

3. 우리나라에서 발생하는 지진이 대부분 중소규모 지진이므로 특히 층상지반에 발생한 지진의 응답해석시 점성토의 적용 모델로서는 점성토의 감쇠특성을 정도 높게 해석할 수 있는 동적 점탄-점소성 모델을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

이 논문은 2010년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2010-0022456) 및 강원대학교 농업생명과학연구소의 기자재 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Adachi, T., and F. Oka, 1982. Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity. *Soils and Foundations* 22(4): 57-70.
2. Biot, M. A., 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics* 33(4): 1482-1498.
3. Chaboche, J. L., and G. Rousselier, 1983. On the plastic and viscoplastic constitutive equations. *Journal of Pressure Vessel Technology* 105: 153-164.
4. Di Benedetto, H., and F. Tatsuoka, 1997. Small strain behavior of geomaterials: modelling of strain rate effects. *Soils and Foundations* 37(2): 127-138.
5. Hori, M., 1974. Fundamental studies on wave propagation characteristics through soils. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan.
6. Kim, Y. S., 2001. A cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model for clay and Its application to liquefaction analysis. Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan.
7. Kim, Y. S., 2006. Dynamic behavior characteristics of clay in wide strain range based on viscoelastic-viscoplastic constitutive model. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 16(2): 153-160.
8. Kim, J. K., 2011. Characteristics of vertical/horizontal ratio of response spectrum from domestic ground motions. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 12(1): 81-87 (in Korean).
9. Kondner, R. L., and M. M. K. Ho, 1965. Viscoelastic response of a cohesive soil in the frequency domain. *Transaction of the Society of Rheology* 9(2): 329-342.
10. Lee, J. S., 2008. Cyclic hardening and degradation effects on site response during an earthquake. *Journal*

- of the Earthquake Engineering Society of Korea* 12(6): 65-71 (in Korean).
11. Murayama, S., and T. Shibata, 1966. Flow and stress relaxation of clays. *Proc. IUTAM Symp. on Rheology and Soil Mechanics*, 99-129. Grenoble, Kravchenko and Sirieys eds.: Springer-Verlag.
 12. Oka, F., 1982. Elasto-viscoplastic constitutive equation for overconsolidated clay. *Proceedings International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, 47-156. Zurich,: Balkema.
 13. Oka F., 1992. A cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule. *Proceedings 4th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, 105-114. Balkema.
 14. Park, J. H., and J. G. Park, 2005. Earthquake response analysis considering irregular soil layers. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 9(6): 67-73 (in Korean).
 15. Park, H. G., D. K. Kim, K. K. Lee, and D. S. Kim, 2010. Nonlinear seismic response analysis for shallow soft soil deposits. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 14(5): 1-12 (in Korean).
 16. You, H. Y., J. Y. Lee, and Y. T. Park, 2006. Site response analysis in time domain using finite element. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(6): 45-56 (in Korean).