

다층지반의 지진응답해석

Seismic Response Analysis at Multi-Layered Ground

*김용성 · 이달원(충남대)

*Kim, Yong-Seong · Lee, Dal-Won

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 verified that a cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive model can give a good description of the damping characteristics of clay accurately during large event which induces plastic deformation in large strain range.

I. 서론

최근 타이완, 일본 등 인접국가들에서 발생한 대형지진으로 많은 인적, 물적피해가 잇따르면서 우리나라에서도 지진대책 마련을 공고히 할 필요성이 요구되고 있다. 우리나라에서의 지진기록을 살펴보면 홍성지진(1978), 백령도지진(1995), 영월지진(1996), 경주지진(1997), 속초지진(1998), 울진지진(2001) 등 리히터 지진규모 4이상의 중규모 지진활동이 활발한 경향에 비추어 볼때 인명과 사회 인프라 시스템에 큰 피해를 초래할 수 있는 대규모 지진이 가까운 장래에 발생할 가능성도 있으므로 이에 대한 대비책이 시급히 요청되고 있다. 특히 농업기반시설들은 전반적으로 시설이 노후화 되어, 1999년 기준으로, 저수지의 경우 전체 17,956개소의 54%인 9,706개소가 55년 이상 경과되었으며, 방조제는 전체 1,587개소의 48%가 1945년 이전에 설치되어 대지진 발생시 심각한 위험을 초래할 가능성이 높은 실정이다.

본 연구는 농업용 구조물에 대한 내진성능평가의 최적기법을 개발하기 위한 기초적 연구로서 다층지반의 지진응답해석에 필요한 지반재료 각각의 구성모델을 지반모델에 적용하는 방식으로 지진파에 따른 지반의 동적 거동 특성을 검토하였다. 구체적으로는 Shibata 등(1991), Oka 등(1994)이 개발한 지진해석코드 LIQCA (Coupled Analysis of LIquefaction)에 점성토에 대한 점탄-점소성 구성모델(김, 2001)을 추가하여 확장한 지진해석 프로그램 LIQCA-2D(VE-VP)로서 대변형을 영역에서 지반의 소성변형이 예측되는 대형지진시 지진응답 및 액상화 해석을 실시하고 지진파가 다층지반의 거동특성에 미치는 영향에 대하여 규명하였다.

II. 재료 및 방법

사질토의 구성모델은 Oka 등(1999)의 탄소성 모델을 적용하였고 점성토의 구성모델은 각각 점탄-점소성 구성모델과 탄-점소성 구성모델을 적용하였다. 탄소성 및 점탄-점소성, 탄-점소성 구성모델의 전변형을 속도텐서는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}(ep) = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\alpha}{3(1+\nu)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \dot{\chi}_{ij}^*)}{\eta_x^*} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \widehat{M} - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \dot{\chi}_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}(vevp) = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vp}) + \frac{\alpha}{3(1+\nu)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \dot{\chi}_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \widehat{M} - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \dot{\chi}_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}(evp) = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\alpha}{3(1+\nu)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \dot{\chi}_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \widehat{M} - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \dot{\chi}_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

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. 모델 지반의 매립작업은 1969년에 완료되었으며 마사토라 불리는 화강풍화토가 매립 재료로서 이용되었다. Fig. 1~3은 각각 지진계측 장소의 지층도, 유한요소망 및 지층별 속도분포를 나타낸다. 모델 지반의 유한요소망은 깊이 83m, 118요소로 구성되었으며, 하단의 두 절점은 수평 및 수직 모두 고정조건, 그

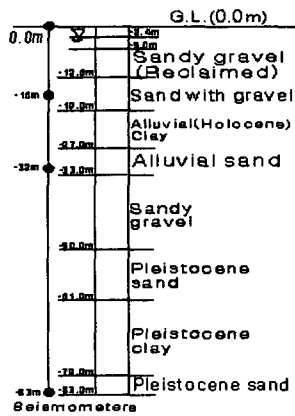


Fig. 1 Soil profile

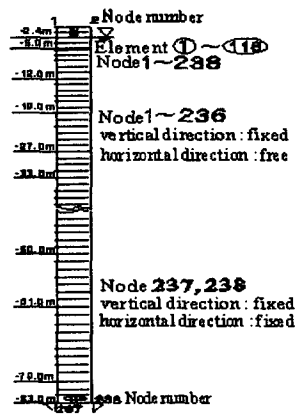


Fig. 2 FEM mesh

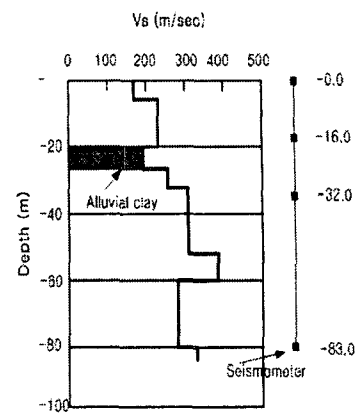


Fig. 3 Velocity structure

이외의 절점은 수직만 고정이고 수평은 자유조건으로 동일한 깊이의 두 절점에 대하여는 등변위가 발생하는 것으로 가정하였으며 지표면만 배수조건으로 설정되었다(Fig. 2 참조). 지진계는 GL.0.0m와 -16.0m, -32.0m, -83.0m로 네 군데에 매설되어 계측되었다(Fig. 3 참조).

일반적으로 사질토 지반의 액상화 해석에는 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 거동을 입증하였다. 또한 미소변형률 영역에서의 점성토의 동적거동도 시간의존성임에 착안하여 동적 점탄-점소성 구성모델이 제안되었고(김, 2001), 소변형률이 예측되는 지진규모 4이하의 지진시 다층지반의 거동문제에 적용된 바 있다(Kim, 2001).

Fig. 4는 각각 지표(GL.0.0m)와 지중 GL.-83m에서 계측된 NS성분의 수평가속도 기록을 나타내며, GL.-83m의 계측 기록은 본 해석의 입력지진동으로 이용되었다. 모델지반의 GL.0m, -16m, -32m 등 세 지점에 대한 지진계기록을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였으며 모델지반의 초기응력조건 및 구성모델에 필요한 상수들은 현장실험(PS검층), 실내실험 및 수치모사 등을 통하여 구해진 기존의 연구문헌 등(Taguchi et al.(1996), 김(2001))을 참고하였고 이를 정리하면 Table 1과 같다.

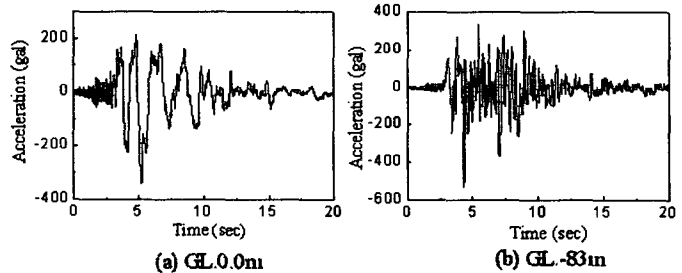


Fig. 4 Observed acceleration record

Table 1. Soil parameter used in the analysis

Parameters	Depth(-m) Soil type	0-2.4	2.4-5.0	5.0-12.6	12.6-19.0	19.0-27.0	27.0-33.0
		Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave V_p (m/sec), Shear wave V_s (m/sec)		260, 170	330, 170	780, 210	1480, 210	1180, 180	1330, 245
Viscous parameter μ (kPa · sec)		0	0	0	0	5.0E+03	0
Viscoplastic parameter C_0 (1/sec), $C_{0\lambda}$ (1/sec), m'		-	-	-	-	2.0E-07, 2.0E-09, 20	-
Viscoplastic parameter B_0, B_s, B_t		100, 1, 1	100, 1, 1	70, 1, 1	500, 1, 1	50, 1, 1	1000, 1, 1
Stress ratio at maximum compression M_m'		0.71	0.71	0.75	0.75	0.74	0.91
Stress ratio at failure state M_f'		1.01	1.01	1.05	1.05	1.24	1.21
Compression index λ		0.03	0.3	0.03	0.3	0.39	0.02
Swelling index κ		0.00026	0.00027	0.00054	0.00072	0.05	0.00133
Poisson's ratio ν		0.25	0.25	0.25	0.25	0.488	0.25
Initial void ratio e_0		0.6	0.6	0.6	0.6	1.75	0.6

III. 결과 및 고찰

Fig. 5는 포트아일랜드에서 1995년 1월 17일 발생한 Hyogoken Nanbu 지진의 계측기록 및 해석결과이다. Fig. 5(a)~(c)에서는 지표와 GL.-16m, GL.-32m의 깊이에서 계측된 지진기록(점선)과 탄-점소성 모델의 지진응답 해석결과(상부 실선) 및 점탄-점소성 모델의 해석결과(하부 실선)를 표현하고 있다. 먼저 Fig. 5(c)의 GL.-32m에서는 진동이 시작된 후 7초~10초 사이에서 약간 진폭의 차이를 보이는 하지만 두 모델의 해석결과는 최대가속도 응답 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. Fig. 5(b)의 경우도 두 모델 모두 계측기록을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

한편 Hyogoken Nanbu 지진 발생 당시 GL.-16m에서 강진의 영향으로 계측 지진계의 이상이 발생되었으며, 이후에 계속되는 여진의 기록에서도 지속적으로 이상이 발생되고 있어 Fig. 5(b)에 'P'로 표시된 부분은 기록이상(error)으로 판단된다(Kim, 2001). 이를 고려하여 GL.-16m에서 두 번째로 높은 가속도기록(Second peak) 376.8gal을 최대가속도로 놓고 검토해 보면 점탄-점소성 구성 모델의 최대가속도 응답결과인 359gal은 그 정도가 매우 높다고 할 수 있다. 사질토 지반의 Fig. 5(a)에서는 두 모델이 거의 동일한 거동을 표현하고 있다.

Fig. 6은 깊이에 따른 최대가속도와 최대전단변형률과의 관계를 도식한 것으로 Fig. 6(a)에서 계측기록을 원점으로 수치해석 결과를 실선과 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 마찬가지로 증폭되고 있다. 이러한 현상은 Fig. 6(b)에서도 확인 가능한데 GL.-8m내의 부근에서 발생한 액상화의 원인으로 최대전단변형

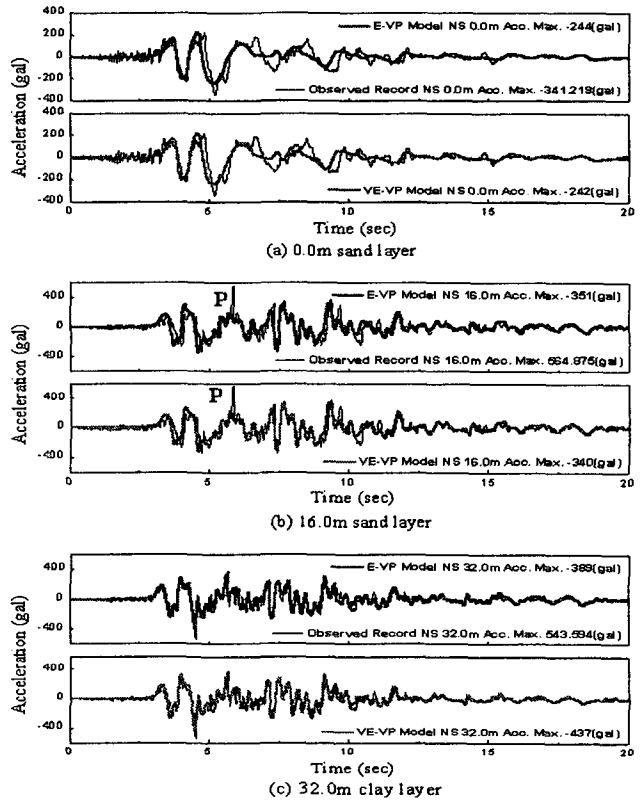


Fig. 5 Observed record and simulation results

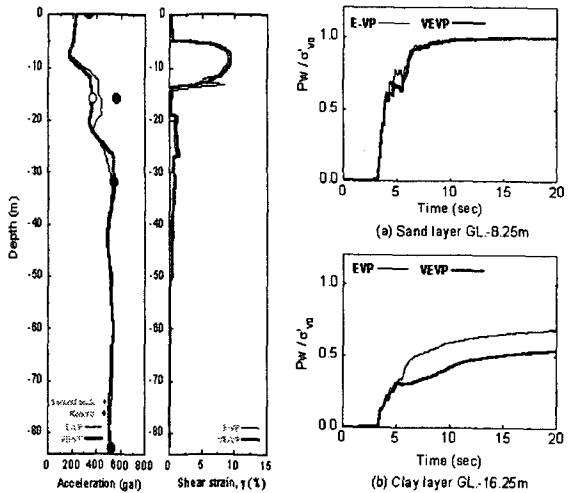


Fig. 6 Max. value distribution Fig. 7 Time vs. P_w/σ'_{vm}

률이 10%에 이르고 있다.

Fig. 7은 과잉공극수압/초기유효응력의 시간이력을 나타낸 것으로 Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 GL-8.25m지점 및 GL-16.25m지점에서의 값을 도시한 것으로 사질토와 점성토에서의 지진파에 따른 과잉공극수압의 발생 과정이 확연히 대비됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 8은 지반깊이에 대한 과잉공극수압의 분포를 지진 발생 5초, 7초, 10초, 20초로 나누어 나타낸 것으로 매립층의 사질토의 경우 급격히 증가하여 액상화 상태에 이르지만 상대적으로 밀도가 높은 GL-30m이하의 사질토에서는 어느정도까지만 상승하고 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. 또한 점탄-점소성 구성모델은 미소변형을 및 넓은 변형률영역에서의 지진응답해석에 적용 가능함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 2차원 유효응력 해석코드를 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 지진응답해석을 실시한 결과 대변형률 영역에서는 점소성모델이 주요한 역할을 담당하게 되므로 두 모델은 해석 결과에 있어서 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 2) 대변형률이 예측되는 대형지진일 경우의 지진응답해석시 점성토에 대해서는 점소성모델의 적용이 지배적이다.
- 3) 점탄-점소성 구성모델은 미소변형을 및 넓은 변형률영역에서의 지진응답해석에 적용 가능하다.

V. 참고문헌

1. 김용성(2001) 점성토의 점탄성 및 점소성 거동 특성, *대한토목학회논문집*, 제21권, 제5-C호, pp.513-523.
2. 김용성(2002) 동적 점탄-점소성 구성모델을 이용한 다층지반의 지진응답해석, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제1-C호, pp.33-44.
3. 김용성(2002) 비선형 이동경화법칙에 기초한 점성토의 거동 특성, *한국농공학회지*, 제44권, 제4호, pp.114-122.
4. 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.
5. 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.
6. Oka, F., T. Kodaka, 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Taguchi, Y., Tateishi, A., Oka, F., 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.

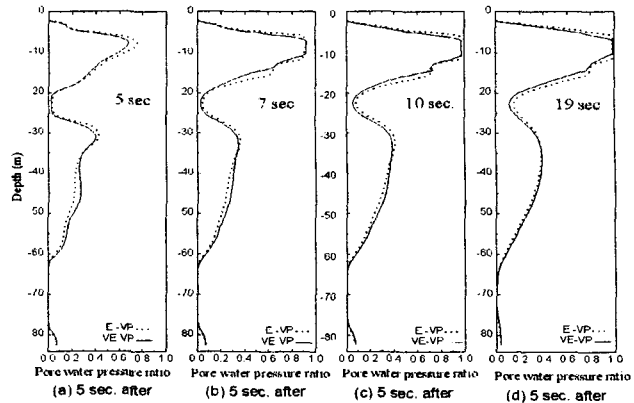


Fig. 8 Excess pore water pressure ratio vs. depth relations