

매립지반의 액상화 해석

Liquefaction Analysis at Man-Made Island

김 용 성* · 이 달 원(충남대) · 오카 후사오 · 고다카 다케시(교토대)

Kim, Yong-Seong* · Lee, Dal-Won · Oka, Fusao · Kodaka, Takeshi

Abstract

In order to apply a cyclic elasto-plastic and a viscoelastic-viscoplastic constitutive model to actual multi-layered ground conditions during large earthquake, numerical simulations were performed by a liquefaction analysis in the present study. From the liquefaction analysis, it was verified that the models can give a good description of the damping characteristics and liquefaction phenomena of ground accurately during large event which induces plastic deformation in large strain range.

I. 서론

올 들어 우리나라에 발생한 지진은 33회이고 지진규모 4 이상의 지진도 3회나 발생되어 건설 구조물의 엄격한 내진안정성 확보의 필요성이 전제되고 있으며, 우리나라 미래의 안정적인 식량자급과 미래농업의 국제 경쟁력을 확보하기 위한 대규모 간척사업에서 준설모래로 방조제를 성토하는 경우가 많아 사질토로 축조된 방조제에 대한 액상화 해석 등 지진시 지반 및 구조물의 거동특성 분석이 필수적으로 요구되고 있다.

본 연구는 농업용 구조물에 대한 내진성능평가의 최적기법을 개발하기 위한 기초적 연구로서 액상화해석에 필요한 지반재료 각각의 구성모델을 지반모델에 적용하는 방식으로 지진파에 따른 지반의 동적 거동 특성을 검토하였다. 구체적으로는 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 매립지반의 액상화 해석을 실시하고 대형 지진시 지반의 거동특성에 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 전변형률 속도편서는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}(ep) = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{x}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\dot{\eta}_{ij} - \dot{\chi}_{ij})}{\eta_x} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \bar{M} - \frac{\dot{\eta}_{mn}(\dot{\eta}_{mn} - \dot{\chi}_{mn})}{\eta_x} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (1)$$

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

$$\dot{\epsilon}_{ij}(evp) = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{x}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\dot{\eta}_{ij} - \dot{\chi}_{ij})}{\eta_x} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \bar{M} - \frac{\dot{\eta}_{mn}(\dot{\eta}_{mn} - \dot{\chi}_{mn})}{\eta_x} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

본 연구의 해석대상은 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 매립재료로서 이용되었다. Fig. 1~3은 각각 지진계측 장소의 지층도, 유한요소망 및 지층별 속도분포를 나타낸다.

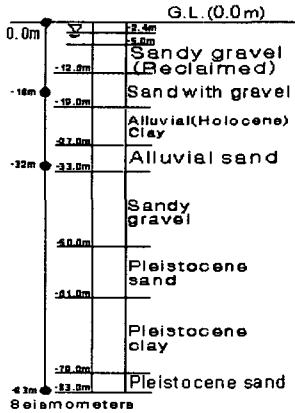


Fig. 1 Soil profile

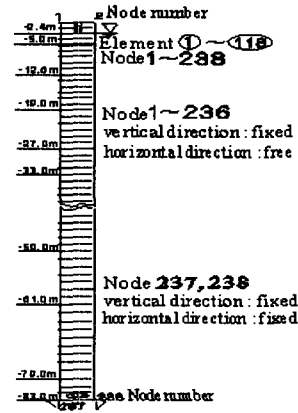


Fig. 2 FEM mesh

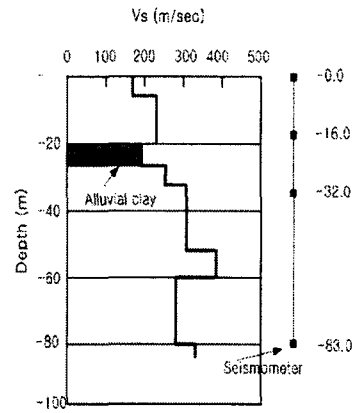


Fig. 3 Velocity structure

모델 지반의 유한요소망은 깊이 83m, 118요소로 구성되었으며, 하단의 두 절점은 수평 및 수직 모두 고정조건, 그 이외의 절점은 수직만 고정이고 수평은 자유조건으로 동일한 깊이의 두 절점에 대하여는 등변위가 발생하는 것으로 가정하였으며 지표면만 배수조건으로 설정되었다(Fig. 2참조). 지진계는 GL.0.0m와 -16.0m, -32.0m, -83.0m로 네 군데에 매설되어 계측되었다(Fig. 3참조).

Fig. 4는 각각 지표(GL.0.0m)와 지중 GL.-83m에서 계측된 NS성분의 수평가속도 기록을 나타내며, GL.-83m의 계측기록은 본 해석의 입력지진동으로 이용되었다. 모델지반의 GL.0.0m, -16m, -32m 등 세 지점에

대한 지진계측기록을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였으며 모델지반의 초기응력조건 및 구성모델에 필요한 상수들은 현장시험(PS검층), 실내시험 및 수치모사 등을 통하여 구해진 기존의 연구문헌 등 (Taguchi et al.(996), 김(2001))을 참고하였고 이를 정리하면 Table 1과 같다.

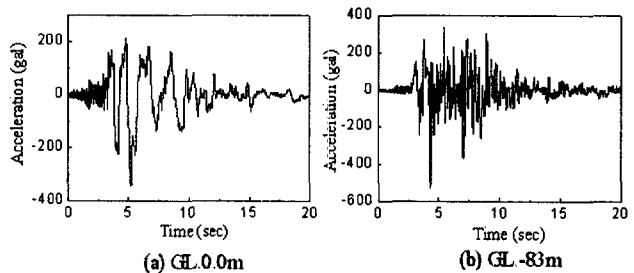


Fig. 4 Observed acceleration record

III. 결과 및 고찰

액상화해석 프로그램코드 LIQCA-2D로서 모델지역의 계측지역에 대한 수치해석을 수행

하였다. 매립재료로 이용된 사질토층에 대하여는 탄소성모델을, 충적점토층에 대하여는 탄-점소성모델 및 점탄-점소성모델을 적용하여 GL.0m, -16m, -32m의 세 지점에 대한 지진기록을 바탕으로 액상화해석을 수행하였다.

Table 1. Soil parameter used in the analysis

Parameters	Depth(-m)	0-2.4	2.4-5.0	5.0-12.6	12.6-19.0	19.0-27.0	27.0-33.0
	Soil type	Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave Vp (m/sec), Shear wave Vs (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_{01} (1/sec), $C_{\alpha 1}$ (1/sec), m'		-	-	-	-	2.0E-07, 2.0E-09, 20	-
Viscoplastic parameter B_0, B_3, 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

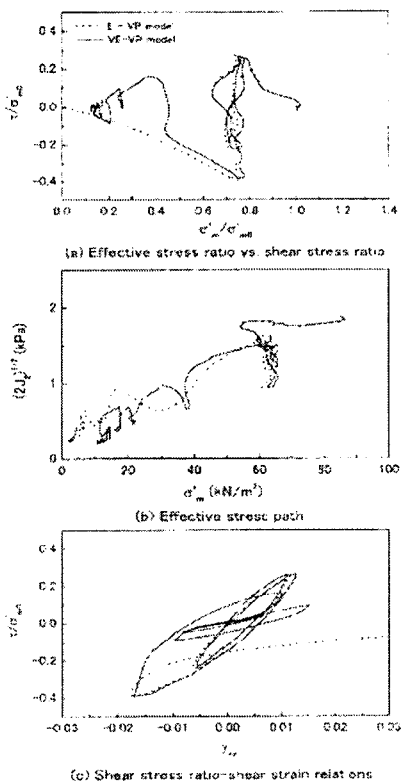


Fig. 5 Stress Path & Stress-Strain relations in sand layer

Taguchi 등(1996)은 동일 해석대상 지반에 몇 번의 강진동이 반복된 후 완전한 액상화가 발생하였으며 지진에 의해서 액상화가 발생하지 않으리라고 여겨졌던 깊이에 존재하는 사질토층(GL.-27~-33m)에서도 액상화 해석을 실시한 후 액상화가 발생하였음을 보고하였다. 또한 Sugito 등(2000)은 동일 모델 지반의 해수면 이하 매립지반 전체에 걸쳐 지진시 강진동에 의해 지진발생 약 8초후부터 액상화가 시작되었으며, 충적사질토층의 과잉공극의 최대값은 초기 유효상재하중의 약 80%임을 보고한 바 있다. 한편 Arulanandan 등(2000)은 모델지반의 지하 18m까지 그리고 30m깊이 부근에서 90%의 높은 공극수압비를 나타내며 예측된 수평변위는 NS방향에서 1.5m 임을 보고하였다.

본 해석결과는 이들 연구 결과와는 약간 다른 양상을 나타내며, 단지 GL.-7m~-11m사이의 매립지에서만 액상화가 발생한 것으로 예측되었다. 그림 5는 사질토 지반(GL.-11.75m)의 응력경로 및 응력-변형을 관계를 나타낸다. 유효응력비가 1에서 시작되어 0으로 근접해 가고 있어 액상화가 발생했음을 알 수 있다.

본 해석 결과의 타당성을 뒷받침하는 근거로는 지반의 가속도기록(GL.-32m와 GL.-83m)에서 지진파의 증폭 및 위상특성을 들 수 있는데(Fig. 6 참조),

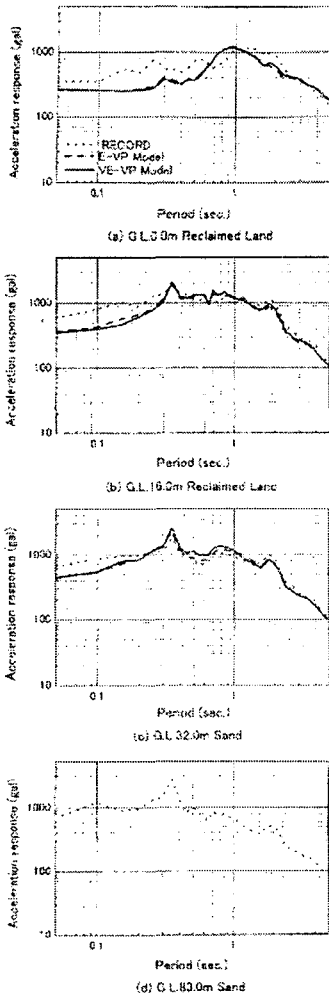


Fig. 6 Acceleration response spectrum at model ground

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. 김용성, 2002, 대형지진시 다층지반의 지진응답해석, *한국지반공학학회논문집*, 제18권, 제4호, pp.55-64.
5. 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.
6. Oka, F., T. Kodaka, Y.-S. Kim., 2003, Dynamic Analysis of Sand-Clay Layered Ground Considering a Viscous Effect of Clay, *Proc. 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Singapore, World Scientific. Vol.1, pp.319-322.
7. Oka, F., T. Kodaka, Y.-S. Kim., 2001, A Viscoelastic-Viscoplastic Constitutive Model for Clay, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, Vol.4, pp.269-276.
8. 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.

2003년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (2003년 11월 1일)

일반적으로 지진파의 특성은 과잉공극수압의 발생 및 지반의 이력특성과 관련된다.

본 연구 결과, 매립지반의 GL.-7m와 -12m 사이에서 액상화가 발생하였으며 GL.-16m에서는 과잉공극수압이 0.5부근을 나타내어 액상화에 이르지 않았고, GL-32.25m부근에서도 역시 과잉공극수압비 0.4를 나타내어 액상화에는 이르지 않음을 예측하였다. 실제 계측기록(GL.-35m)에서는 과잉공극수압비가 0.49로서 액상화에 이르지 않음을 나타내었다.

이상의 연구결과를 정리하면 매립지반의 액상화해석시 사질토는 탄소성 모델, 점성토는 탄-점소성 모델 또는 점탄-점소성 모델을 적용함이 타당함을 확인할 수 있었다. 또한 이들 모델을 적용한 액상화해석코드 LIQCA-2D(VE-VP)는 지진응답해석 및 액상화해석에 정밀한 해석이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 2차원해석코드 LIQCA-2D(VE-VP)를 이용하여 매립지반의 액상화해석을 실시하고 지진파가 지반의 동적거동에 미치는 역할을 구명한 연구로서, 본 연구를 통해 제시된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 사질토의 탄소성 모델 및 점성토의 점탄-점소성 모델과 탄-점소성 모델을 이용하여 모델지반의 액상화해석을 실시한 결과 실제 계측기록과 부합되는 결과를 얻어 추후 건설 구조물 등의 설계시 지반의 액상화 해석 등 지반의 동적거동 분석에 적용 가능함을 확인하였다.
- 2) LIQCA-2D를 이용한 수치 시뮬레이션으로 액상화 발생시 지진동의 감쇠 현상이 두드러짐을 확인하였다.