농업 기반시설의 내진성능 평가기법 - 동적 수치해석 중심으로 -

Evaluation Technique of Seismic Performance on Agricultural Infrastructure - Based on Dynamic Numerical Analysis -

김 용 성* · 이 달 원**

Kim, Yong Seong · Lee, Dal Won

Abstract

The evaluation technique of seismic performance on agricultural infrastructure based on dynamic numerical simulations, which included a cyclic elasto-plastic and a viscoelastic-viscoplastic constitutive model to actual multi-layered ground conditions during large earthquake 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.

Keywords : Liquefaction, reclaimed ground, FEM, constitutive model

I. 서 론

기상청의 지진계측 자료(2003)에 따르면 작년 한 해 동안 우리나라에 발생된 지진은 38회이고 지진규모 4 이상의 지진도 3회나 발생되어 건설 구조물의 엄격한 내진안전성 확보의 필요성이 전제 되고 있으며, 우리나라 미래의 안정적인 식량자급

과 미래농업의 국제 경쟁력을 확보하기 위한 대규모 간척사업에서 준설모래를 방조제 성토에 이용하는 하는 경우(사석·해사 성토공법)가 많아 사질토로 축조된 방조제에 대한 액상화해석 등 지진 발생 시 지반 및 구조물의 거동특성 분석이 필수적으로 요구되고 있다.

또한, 우리나라의 수리시설물의 기능상태를 살펴 보면 2003년 현재, 농업 수리시설물중 저수지는 전체 17,820개소의 60%인 10,698개소, 방조제는 전체 1,663개소의 57.7%인 960개소가 건설된 지 50년 이상 경과되어 수리 시설물의 노후화가 심각한 수준으로 종합적인 시설물 안전점검이 시급히

* 한국수자원공사 수자원연구원
** 충남대학교 농업생명과학대학
* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793
Fax: +82-42-823-8050
E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

요청되고 있다(농업기반공사, 2003).

한편 농업용 구조물에 대해서는 내진설계에 있어 서 결정되어야 할 극히 중요한 사항인 지진에 대하여 얼마나 안전하게 설계 건설할 것인가 하는 설계 수준 성능목표를 결정하는 기준이 명확하지 않아 농업용 구조물의 내진대책 수립에 문제점이 되고 있다. 우리나라의 농업 기반시설(방조제 및 저수지 등)은 노후화되어 내진안전성 검토의 필요성이 높아져 가고 있으며, 내진설계시 적용되는 농업용 구조물에 대한 내진성능평가 기법의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

이러한 현실적 인식에 부응하여 농업기반공사는 2000년부터 연차적으로 국내외의 내진설계, 평가 및 기준 등을 수집, 정리하여 실무에 쉽게 적용할 수 있도록 농업기반 내진성 평가 자료집을 발간 해 오고 있으나, 동적 수치해석(액상화, 지진응답) 등 보다 정밀한 해석방법이 요구되는 대형 구조물에 대한 내진대책은 보다 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

모래지반의 액상화 현상은 토립자 골격에 의한 다이레이탄시 특성과 간극유체 운동의 상호작용에 의해서 발생한다. 지금까지 액상화 현상의 메커니즘을 구명하기 위한 노력은 실험적 방법 및 수치해석적 방법의 두 부류로 나뉘어 진행되어져 왔다. 정교한 실내시험의 표현능력에도 불구하고 실내시험 조건은 현장에서 발생하는 모든 액상화 현상의 복잡한 메커니즘을 이해하기에는 제한적인 반면에 수치해석 방법은 복잡한 조건하의 액상화 현상을 재현하는데 획기적 방법이라 할 수 있다.

일반적으로 지반의 액상화 현상을 모사하는 수치 해석 방법에는 전응력 해석방법과 유효응력 해석방법이 있다. 유효응력 해석방법은 과잉간극수압의 상승, 소산에 의한 유효응력의 변화에 대응하여 응력-변형률 관계가 시시각각으로 변화되며 지진응답해석과 액상화해석이 포함되어 액상화에 따른 물성의 변화 등을 고려할 수 있으므로 전응력 해석방법에 비해 이론적으로 보다 엄밀하다.

Fig. 1 Schematic diagram of liquefaction in multi-layered ground

매립지반의 문제를 고려할 경우 구성모델에 있어서는, 사질토 지반은 탄소성 모델을, 점성토 지반의 경우는 탄-점소성 모델과 점탄-점소성 모델을 각각 적용하였다(Fig. 1 참조).

본 연구는 농업기반시설의 내진성능 평가기법 정립을 위한 기초적 연구로서 Shibata 등(1991), Oka 등(1994)이 개발한 액상화해석 프로그램 LIQCA에 점성토에 대한 구성모델을 추가한 LIQCA-2D(평면변형률 조건)를 이용하여 매립지반에 발생한 액상화 현상을 평가하여 지진파가 지반의 동적거동에 미치는 역할을 구명하도록 한다.

II. 구성모델

1. 사질토 지반의 구성모델

사질토 지반의 구성모델은 동적 탄소성 모델을 적용하였으며 탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 표현된다 (Oka et al., 1999).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{x}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \bar{M} - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

2. 점성토 지반의 구성모델

탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 나타낼 수 있다 (Oka, 1992).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \bar{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

점탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 나타낼 수 있다 (김, 2001).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{rev}) + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \bar{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

Ⅲ. 매립지반의 액상화 해석

1. 매립지반의 요소 시뮬레이션

본 연구의 해석대상은 인공적으로 조성된 매립지반으로 화강풍화토가 매립재료로서 이용되었다. Fig. 2~4는 각각 지진계측 장소의 지층도, 유한요소망 및 지층별 속도분포를 나타낸다.

모델 지반의 유한요소망은 깊이 83 m, 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. 3 참조). 지진계는 GL, 0.0 m와 -16.0 m, -32.0 m, -83.0 m로 4개 지점에 매설되어 계측되었다 (Fig. 4 참조).

Fig. 2 Soil profile

Fig. 3 FEM mesh

Fig. 4 Velocity structure

Fig. 5 Observed acceleration record

Fig. 5는 각각 지표(GL. 0.0 m)와 지중 GL. -83 m에서 계측된 남북(NS)성분의 수평가속도 기록을 나타내며, GL. -83 m의 계측기록은 본 해석의 입력지진동으로 이용되었다. 모델지반의 GL. 0 m, -16 m, -32 m 등 세 지점에 대한 지진계 측기록을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였고 초기응력조건 및 구성모델에 필요한 상수들은 현장실험(PS검층), 실내실험 및 수치모사 등을 통하여 구해졌으며(Kim, 2002) 이를 정리하면 Table 1과

같다.

Fig. 6은 지진규모 7.2의 사질토 지반에 대한 요소시험 결과를 동적 탄소성 모델을 이용하여 시물레이션 한 것으로 13회 반복재하 후의 변상선 도달과정 및 24회의 반복 재하시험 후 과잉간극수압의 증가로 인해 유효응력이 거의 0에 가깝게 되어 액상화 현상이 발생하는 과정을 잘 나타내 주고 있다. 한편, 국내에서도 지반의 액상화 문제에 대한 관심이 높아져 액상화 상세예측법(김수일 등, 2000)

Table 1 Soil parameters 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	33.0-50.0	50.0-61.0	61.0-79.0	79.0-83.0
	Soil type	Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave V_p (m/s), Shear wave V_s (m/s)		260, 170	330, 170	780, 210	1480, 210	1180, 180	1330, 245	1530, 305	1610, 350	1610, 303	2000, 320
Viscous parameter μ (kPa · s)		0	0	0	0	5.0E+03	0	0	0	5.0E+03	0
Viscoplastic parameter C_{01} (1/s)		-	-	-	-	2.0E-07	-	-	-	2.0E-07	-
Viscoplastic parameter C_{02} (1/s)		-	-	-	-	2.0E-09	-	-	-	2.0E-07	-
Viscoplastic parameter m'		-	-	-	-	20	-	-	-	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	2000, 1, 1	3000, 1, 1	100, 1, 1	5000, 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

Fig. 6 Simulation results of sand by the cyclic elasto-plastic model

이 제안되었고 지반의 저항응력비를 진동 전단응력비가 0.15~0.35 범위에서 3회의 진동삼축시험 수행 후, 시험 결과 보정을 통해 도식된 액상화 발생 진동재하횟수-재하하중 전단응력비 곡선상의 재하 횟수 10회시의 값을 지진규모 6.5시의 액상화 전단응력비로 산정하도록 하고 있다.

2. 모델지반의 액상화 해석

액상화해석 프로그램 LIQCA-2D로서 모델지반에 대하여 매립재료로 이용된 사질토층에 대하여는 탄소성모델을, 충적점성토층에 대하여는 탄-점소성 모델 및 점탄-점소성 모델을 적용하여 GL. 0 m, -16 m, -32 m의 세 지점에 대한 지진기록을 바탕으로 액상화해석이 수행되었다. 액상화해석 프로그램 LIQCA-2D의 수치해석 흐름도는 Fig. 7과 같다.

Fig. 8~Fig. 11에서 점성토 지반에 대해 구성모델을 달리하여 액상화해석한 결과를 각각 E-VP (Elasto-Viscoplastic Model)와 VE-VP(Viscoelastic-Viscoplastic Model)로 구분하여 도시 하였다.

Fig. 8(a)와 8(b)는 각각 깊이에 따른 가속도와 변위 분포를 나타내고 있다. GL. -10 m 부근의 사질토층에서는 최대가속도가 크게 줄어들어 액상화가 발생했음을 예측할 수 있으며 이로 인해 변위

도 점점 커짐을 Fig. 8(b)에서 확인할 수 있다. 액상화 해석결과 최대변위는 지표부근에서 73.1 cm로 예상되었고, 실제 계측된 수평변위는 약 30~40 cm(Kobe City Development Bureau, 1995)였으며, 따라서 Arulanandan 등(2000)이 예측한 1.5m 보다는 대략적으로 근접한 해석결과를 예측하였다. Fig. 8(c)와 8(d)는 각각 깊이에 따른 전단응력과 전단변형을 분포를 나타낸 것으로 GL. -5 m~14 m의 사질토층에서는 액상화의 이유로 큰 전단변형을 나타내지만 사질토층 위와 아래의 충적층에서는 점성토의 영향으로 1% 정도의 전단변형을 나타내고 있다.

Fig. 9는 모델지반에서 본진시의 과잉간극수압비(과잉간극수압과 초기 유효응력과의 비)의 경시변화의 해석결과를 나타내며 Fig. 10은 깊이에 따른 과잉 간극수압비의 변화를 나타낸다. 과잉 간극수압비는 액상화 가능성을 나타내며 척도(0.95 이상일 경우 액상화)로서 지진발생 10초 후 GL. -7 m~-11 m에서는 0.95의 높은 과잉 간극수압비를 나타내어 액상화현상이 발생했음을 알 수 있다. 한편, 매립지에서는 액상화가 발생하였으나 충적점성토층의 바로 밑의 사질토층(-27 m~-65 m)에서는 과잉간극수압비가 0.4 정도에 머물러 액상화가 발생하지 않았다. 또한 GL. -16.25 m에서도 과잉 간극수압비가 0.6 정도로서 액상화가 발생하는 과

Fig. 7 Flow chart of LIQCA-2D

Fig. 8 Maximum value distribution of seismic response analysis

잉간극수압비 0.95에는 미치지 않았다. 점성토층의 영향으로 점탄-점소성 모델 및 탄-점소성 모델의 해석결과는 점성토층을 중심으로 상·하부에서 간극수압비의 분포가 매우 다르게 나타나고 있다. 이는 미소변형을 영역에서 점성토의 거동특성을 점탄-점소성 구성모델이 보다 정도 높은 예측으로 인해 결과적으로 두 모델이 다른 해석 결과를 보이는 것으로 판단된다.

Taguchi 등(1996)은 동일 해석대상 지반에 대하여 동적 거동 해석을 실시한 후 몇 번의 강진동

이 반복된 후 완전한 액상화가 발생하였으며 지진에 의해서 액상화가 발생하지 않으리라고 여겨졌던 깊이에 존재하는 사질토층(GL. -27~-33 m)에서도 액상화가 발생하였음을 예측하였다.

또한 Sugito 등(2000)은 동일 해석 대상 지반의 해수면 이하 매립지반 전체에 걸쳐 지진시 강진동에 의해 지진발생 약 8초 후부터 액상화가 시작됨을 고찰하였으며, 충격사질토층(GL. -30 m)의 과잉간극수압의 최대값은 초기 유효상재하중의 약 80%를 나타낸다고 하였다.

Fig. 9 Excess pore water pressure ratio vs. depth relations

(a) sand layer (GL, -2.7m)

(b) sand layer (GL, -10.25m)

(c) sand layer (GL, -24.25m)

(d) sand layer (GL, -33.25m)

Fig. 10 Time histories of excess pore water pressure ratio

(a) Effective stress ratio vs. shear stress ratio

(b) Effective stress path

(c) Shear stress ratio-shear strain relations

Fig. 11 Stress paths and stress-strain relations in sand layer

한편, Arulanandan 등(2000)은 모델지반의 GL. -18 m 까지 그리고 GL. -30 m 깊이 부근에서 90%의 높은 간극수압비를 나타내며 예측된 수평 변위는 남북(NS)방향에서 1.5 m 임을 예측하였다.

본 해석결과는 이들 연구 결과와는 약간 다른 양상을 나타내며, 단지 GL. -7 m~-11 m 사이의 매립지에서만 액상화가 발생한 것으로 예측되었고

약 GL. -30 m에서는 0.4 정도의 과잉간극수압비를 예측하였으며 이는 Kobe시 개발국에서 측정한 과잉간극수압 기록(약 GL. -30 m 지점에서 과잉간극수압비 0.49)과도 거의 일치하고 있어 다른 연구결과에 비해 타당성을 갖는 예측결과라 할 수 있다.

Fig. 11은 사질토 지반(GL. -11.75 m)의 탄소성 모델에 의한 유효응력경로 및 응력-변형을 관계를 나타낸 것으로 충적점성토층의 영향으로 사질토지반의 하부에 존재하는 점성토층의 동적 거동해석에 탄-점소성 모델을 적용한 해석 결과를 점성으로, 점탄-점소성 모델을 적용한 해석결과를 실선으로 표시하였다. 충적점성토층의 영향으로 인하여, 점탄-점소성 모델을 점성토층에 적용하였을 경우 사질토 지반에서의 유효응력 거동은 지진 발생후 유효응력비가 0.75 정도인 지점에서 1차적인 전단저항을 수차례 반복한 후 0.1의 유효응력비를 갖는 지점에서 파괴에 이르렀으나, 탄-점소성 모델을 적용한 해석결과에서는 유효응력비가 0.05 정도까지 이르러 액상화 하였음을 나타내었다. 두 모델의 해석결과는 다소 차이는 있지만 미미하며 지반모델에 입력파로 적용한 지진파가 500gal 이상의 대형지진으로 변형 발생시 소성영역이고 거의 동일한 해석결과를 나타내므로 두 모델이 공통적으로 포함한 점소성 모델은 타당성을 갖는다 할 수 있다.

이상의 연구결과에서 매립지반의 액상화해석시 사질토에 적용되는 동적 탄소성 모델, 점성토에 적용되는 동적 탄-점소성 모델 또는 동적 점탄-점소성 모델의 타당성이 검증되었다. 또한 이들 모델을 적용한 액상화해석코드 LIQCA-2D(VE-VP)는 지진응답해석 및 액상화해석에 있어서 정밀한 예측 결과의 도출이 가능함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 농업 기반시설에 대한 내진성능 평가 기법을 개발하기 위한 기초적 연구로서 2차원해석 코드 LIQCA-2D(VE-VP)를 이용하여 매립지반

의 액상화해석을 실시하고, 지진파가 지반의 동적 거동에 미치는 역할을 구명한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 액상화가 발생한 지반을 통과하는 지진파는 감쇠특성을 나타내며 이때 변위 및 전단변형률은 크게 증가하였다.
2. 사질토의 탄소성 모델 및 점성토의 점탄-점소성 모델과 탄-점소성 모델을 이용하여 모델지반의 액상화해석을 실시한 결과, 실제 측측기록과 부합되는 결과를 얻어 앞으로 농업기반시설 등의 설계시 지반의 액상화 해석 등 지반의 동적거동 분석에 적용 가능함을 확인하였다.
3. 다층지반에 발생한 지진의 응답해석시 점성토의 구성모델은 점성토의 감쇠특성을 정도 높게 해석할 수 있는 동적 점탄-점소성 모델을 적용하는 것이 신뢰성이 높게 나타났다.

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-037-D00018).

References

1. Arulanandan, K., X.S. Li and K. Sivathanan, K. 2000. Numerical Simulation of Liquefaction Induced Deformations. *Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7) : 657-666.
2. Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, . 2003. Agricultural Land and Water Development Statistics. 1-679.(in Korean)
3. Kim, S.I., I. J, Park and J. S. Choi. 2000. A Study on the Assesment of Liquefaction Potential in Korea, *Journal of the Korean Society of Civel Engineers*, 20(2-C) : 129-139.(in Korean)
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. Kim, Y. S., 2002. Seismic Response Analysis of Layered Ground Based on a Cyclic Viscoelastic-Viscoplastic Constitutive Model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 22(1-C) : 33-44. (in Korean)
6. Kobe City Development Bureau. 1995. Report on the Ground Deformation at Reclaimed Land During the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake : 1-119. (in Japanese)
7. Korea Meteorological Administration. 2003. Earthquake Information
8. 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. 1 : 105-114.
9. Oka, F., A. Yashima, T. Shibata, M. Kato and R. Uzuoka. 1994. FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Porous Soil Using an Elasto-Plastic Model. *Applied Scientific Research*. 52 : 209-245.
10. Oka, F., A. Yashima, A. Tateishi, Y. Taguchi and S. Yamashita, 1999. A Cyclic Elasto-Plastic Constitutive Model for Sand Considering a Plastic-Strain Dependence of the Shear Modulus. *Geotechnique*. 49(5) : 661-680.
11. Shibata, T., T. Sato, R. Uzuoka, F. Oka, A. Yashima and M. Kato. 1991. FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Fluid-Saturated Ground. *Proc. 7th Int. Symp. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Cairns. Balkema. 2 : 869-874.
12. Sugito, M., F. Oka, A. Yashima, Y. Furumoto and K. Yamada. 2000. Time-dependent Ground Motion Amplification Characteristics at Reclaimed Land After the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake. *Engineering Geology*. 56 : 137-150.
13. Taguchi, Y., A. Tateishi, F. Oka, A. Yashima. 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.