

대변형 이론을 이용한 액상화 해석에 관한 연구

A study on the liquefaction analysis using the large deformation theory

문 용¹⁾, Yong MOON, 이강일²⁾, Kang-il Lee, 김태훈³⁾, Tae-Hoon KIM,
임은상⁴⁾, Eun-Sang IM, 이용희⁵⁾, Yong-Hee LEE

¹⁾ 삼성물산 건설부문 토목기술팀 과장, Senior, Civil Eng. Tech. Team, SAMSUNG Corporation.

²⁾ 대진대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, DAEJIN University.

³⁾ 대우건설 기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Construction Technology, Daewoo E&C.

⁴⁾ 수자원공사 수자원연구원 연구원, Senior Researcher, KIWE, KOWACO.

⁵⁾ 한국전력공사 전주전력관리처 공학박사, Ph.D, JeonJu Power Transmission District Office, KEPCO.

SYNOPSIS : For the rational aseismatic design of a structure constructed on the ground which has weakness for liquefaction or flow, it is necessary to predict ground deformation as well as force acting on the ground. In general, the prediction of liquefaction is based on solid mechanics while the prediction of flow is basis of fluid mechanics. Since liquefaction and flow occur continuously, unified analysis methods have been developed. Among of them is Rue-elasto plastic model that is based on small deformation theory. This methods, however, is not adequate for such a large deformable ground condition. In this paper, a large deformaion theory using the finite deformation theory proposed by Di et al and the updated lagrangian method is presented. In addition, the applicability of the theory is verified by 1-d consolidation analysis and flow tests.

Key words : Liquefaction, Flow, Large deformation, Updated lagrangian

1. 서 론

액상화 및 유동현상의 발생 가능성이 있는 지반에 건설되는 구조물의 내진설계를 합리적으로 실시하기 위해서는, 지반의 변형량이나 구조물에 작용하는 유동력을 예측하는 수법이 필요하다. 액상화 현상에 있어서, 지반은 액상화 발생 전까지는 고체적인 거동을 나타내므로, 고체역학에 근거한 해석방법이 많이 제안되었다. 한편, 액상화 발생 후(유효응력이 0이 된 이 후)의 지반은 유동현상이 발생하여 유체적인 거동을 나타내며, 유체역학에 근거한 해석방법이 제안되고 있다.

여기서 주목할 점은, 액상화 및 유동현상은 상호 각각 독립적으로 발생하는 현상이 아니라 연속적으로 발생하는 현상이라는 점이다. 지반은 액상화 발생 전의 고체적인 거동으로부터, 액상화 발생 시의 유체적인 거동을 거쳐, 강성이 회복(과잉간극수압의 소산, 다이레이탄시 등)되면 다시 고체적인 거동을 나타낸다. 따라서 액상화·유동현상은 고체적인 거동에서 유체적인 거동으로 변하고, 다시 고체적인 거동으로 변하는 연속적인 상변화 과정이라고 생각할 수 있다. 또, 실제의 액상화 및 유동화 과정에서는 고체·

유체간의 상변화 과정이 공간적, 시간적으로도 불균일하게 발생한다고 생각할 수 있으며, 어떤 시점에서 고체적인 성질을 가지는 영역과 유체적인 성질을 가지는 영역이 혼재하게 된다. 이러한 문제에 대응하려면, 고체와 유체간의 천이 거동을 정확하게 표현할 수 있는 해석 방법을 개발할 필요가 있다. 즉, 초기 상태로부터 액상화 발생, 유동 현상 및 강성의 회복까지의 거동을 통일적으로 표현할 수 있는 구성식이 필요하며, 특히 액상화 지반의 유동에 대해서, 그 유동량이나 구조물에게 주는 영향을 합리적으로 예측하는 방법의 개발이 필요하다.

액상화의 고체적 거동 및 유동현상의 유체적 거동을 포함한 통일적 해석방법에 대해서는 文龍(2002), 佐藤 등(2002a, 2002b)에 의하여 연구가 진행되어 왔다. 이 연구 결과에 의하면, 액상화·유동현상의 상변화 현상을 고려해, 그 거동을 통일적으로 해석하기 위한 간편하고 다차원 해석에도 적용 가능한 모래의 구성모델을 제안하였다. 文龍(2002), 佐藤 등(2002a, 2002b)에 의한 연구에 따르면 그 구성방정식을 류·탄소성 구성방정식이라 하였으며, 이는 반복탄소성구성식(Oka et al., 1999)과 Newton 점성유체구성식을, 상대유효응력비(R.E.S.R.)로 정의한 상변화 제어함수를 도입해 조합한 것이다. 또한, 류·탄소성 구성방정식을 이용하여 유효응력해석법에 근거한 유한요소해석코드를 개발하여 그 적용성에 검토를 실시하였다. 하지만, 이 해석방법은 기본적으로 미소변형이론에 근거한 해석방법으로, 유동현상이 발생 가능한 지반 즉 매우 큰 변형이 발생하는 지반에 대하여 변형을 해석함에 있어서 이론적으로 접근하는데 한계점이 있다. 즉 매우 큰 지반 변형의 해석을 보다 합리적으로 하기 위해서는 대변형이론에 근거한 해석방법이 필요하게 된다.

본 연구는 文龍(2002), 佐藤 등(2002a, 2002b)이 제안한 류·탄소성 구성방정식을 Di et al. (2002)가 전개한 유한변형이론을 적용하고, 수정 updated Lagrangian법을 이용하여 대변형 해석이 가능하도록 확장하였다. 본 연구에서 제안한 수정 updated Lagrangian법에 근거한 대변형 해석방법의 정식화에 대한 검증은 일차원 압밀 및 경사지반의 유동 실험을 수정 updated Lagrangian법으로 모델의 적용성에 대하여 검토하였다.

2. 수정 updated Lagrangian 방법

2.1 updated Lagrangian법의 개요

물체의 운동을 기술하려면 먼저 기준이 되는 좌표계를 설정할 필요가 있다. 그 방법로서는 연속체 내의 입자에 주목하는 Lagrangian방법과 공간에 주목하는 Eulerian방법이 있다. Lagrangian법은 입자에 주목하여, 입자의 위치 벡터에 의해 입자의 운동을 식별하기 위한 파라미터를 표시하는 방법이다. 한편, Eulerian법은 공간의 위치를 설정하는 좌표계를 고정하고, 그 위치를 통과하는 다른 입자의 속도 변화를 표시하는 방법이며, 유체역학에서 잘 사용되고 있다.

유한변형(대변형 해석)의 고체역학에서는 통상 Lagrangian 표시에 근거하여 이론을 전개하지만, 실제 해석에 있어서는 현 시각(t)까지의 배치를 기준으로 하여 일정 시간(Δt)이 경과한 후, 즉 시각($t + \Delta t$)에서의 배치를 구하는 증분 해석을 실시하는 경우가 많다. 그림 1은 시각(t)까지가 해석 완료 상태로, 그 후의 물체 상태를 해석하려고 하는 상황을 개념적으로 나타낸 것이다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 시각($t + \Delta t$)의 미지 상태를 해석하고자 할 때, 가상일의 원리를 적용하고, Lagrangian방법에 의해 표기함에 있어서, 시각 $t_0 = 0$ 의 초기 배치(변형 개시전의 자연 상태에 있어서의 배치)를 기준으로 하는 방법과, 증분을 시작하는 시각 $t_0 = t$ 의 배치를 기준으로 하는 방법이 있다. 전자를 total Lagrangian법, 후자를 updated Lagrangian법이라 불리고 있다(久田 ; 野口, 1995).

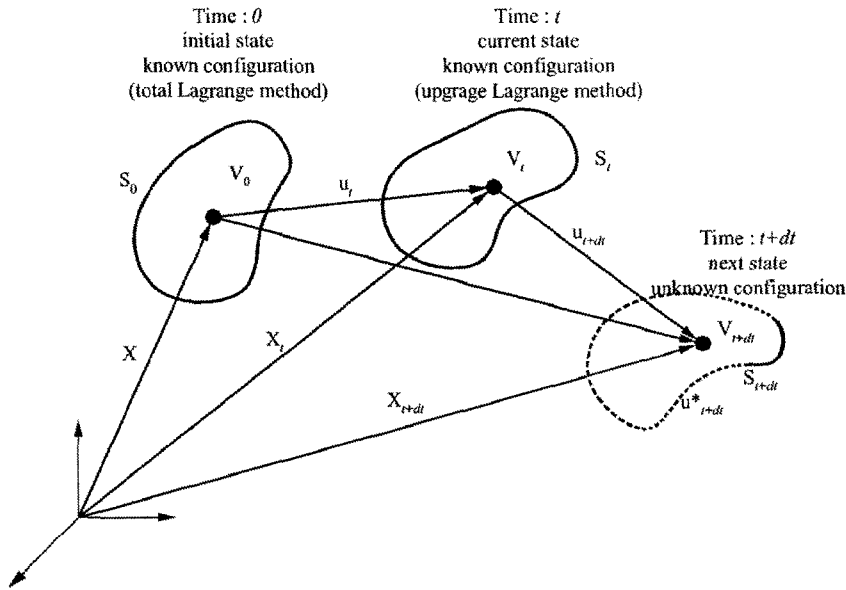


그림 1. 물체의 운동과 참조 배치(久田 ; 野口, 1995)

한편, 물체의 운동방정식은 일반적으로 Cauchy의 제 1, 2의 운동법칙에 따라 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며, 시각 $t=0$ 의 초기상태, 시각 t 의 해석 완료 상태, 시각 $t+\Delta t$ 의 미지의 상태(그림 1 참조)에 대해서, 물체의 운동 방정식(식 (1))에 가상일의 원리를 적용하면, 식 (2a)~식 (2c)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\rho \ddot{u}_i - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho b_i = 0, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (1)$$

$$\int_{V|_{t=0}} \left(\rho|_{t=0} \ddot{u}_i^s|_{t=0} - \frac{\partial \sigma_{ij}|_{t=0}}{\partial x_j} - \rho|_{t=0} b_i|_{t=0} \right) \delta u_i^s|_{t=0} dV|_{t=0} = 0 \quad (2a)$$

$$\int_{V|_{t=t}} \left(\rho|_{t=t} \ddot{u}_i^s|_{t=t} - \frac{\partial \sigma_{ij}|_{t=t}}{\partial x_j} - \rho|_{t=t} b_i|_{t=t} \right) \delta u_i^s|_{t=t} dV|_{t=t} = 0 \quad (2b)$$

$$\int_{V|_{t=t+\Delta t}} \left(\rho|_{t=t+\Delta t} \ddot{u}_i^s|_{t=t+\Delta t} - \frac{\partial \sigma_{ij}|_{t=t+\Delta t}}{\partial x_j} - \rho|_{t=t+\Delta t} b_i|_{t=t+\Delta t} \right) \delta u_i^s|_{t=t+\Delta t} dV|_{t=t+\Delta t} = 0 \quad (2c)$$

여기에서, ρ 는 밀도, \ddot{u}_i 는 가속도, σ_{ij} 는 Cauchy의 응력, b_i 는 물체력을 나타낸다.

이와 같이 가상일의 원리를 적용하여 약형식(weak form)으로서 전개할 때에, 식 (2a)~식(2c)는 각 기준배치($t=0$, $t=t$, $t=t+\Delta t$)에 대해서 성립해야 한다. 실제의 해석에 있어서, 시각 $t=0$ 의 초기상태(식 (2a)), 시각 $t=t$ 의 해석 완료 상태(식 (2b))에 대해서는 모든 상태량(응력, 변형률 등)을 알 수 있기 때문에 운동 방정식이 성립하지만, 시각 $t=t+\Delta t$ 의 미지의 상태에서는 아직 그 시각에 있어서의 상태량을 알 수 없기 때문에 엄밀한 의미에서는 성립할 수 없다. 식 (2c)와 같은 상태의 운동방정식을 해석하려면, 이전 상태($t=0$, $t=t$)에 얻을 수 있는 정보를 바탕으로 $t=t+\Delta t$ 의 상태를 예측할 필요가 있다. 그 방법으로서 시각 $t=t+\Delta t$ 의 미지의 상태량을 초기의 배치($t=0$)로 표현하는 방법과 시각 $t=t$ (1 스텝 전)의 해석 완료의 상태로 표현하는 방법이 있는데, 이것들은 각각 total Lagrangian법, updated Lagrangian법이라고 한다. 이 때, 중요한 것이 $t=t+\Delta t$ 에 있어서의 응력 성분과 변형률 성분을 초기의 배치($t=0$) 또는 시각 $t=t$ (1 스텝 전)으로의 해석완료 상태의 배치로부터 어떻게 표현할 것

인가에 있다.

유한요소법으로 해석을 실시함에 있어, 기하학적인 비선형성과 더불어 탄소성적 거동 등의 재료의 비선형성이 더해지는 경우(유한변형문제)는, 각각의 현 위치 $t = t$ 를 기준으로 하는 updated Lagrangian 법을 이용하는 것이 일반적이고, 아주 작은 하중증분 또는 시간증분으로 스텝을 나누어서 해석을 실시하고 그 후 이것을 합쳐 최종적인 변형 상태를 얻는 증분 해석법(증분 경계치 문제)을 실시하는 경우가 많다. 본 연구에서는, 文龍(2002), 佐藤 등(2002a, 2002b)에 의해 제안된 류·탄소성 구성식에 대해서 Di et al. (2002)가 전개한 유한변형이론을 적용해, 운동 방정식을 수정 updated Lagrangian법에 근거해 정식화한다.

2.2 본 연구에 사용된 응력의 정의

유한변형문제에 있어서, 정식화를 실시할 때 정의되는 응력 텐서에 따라 그 정식화가 매우 다양하게 표현되어지고 있다. 또, 응력 텐서의 종류도 매우 다양한 형태로서 정의되므로, 어떠한 응력을 사용하고 정식화를 실시할까를 결정하지 않으면 안 된다. 여기에서, 본 연구에서 사용하는 응력 성분에 대해 기술한다.

2.2.1 제 2 Piola-Kirchhoff 응력 텐서

제 2 Piola-Kirchhoff 응력 텐서(S_{ij})는 물체내의 임의의 가상 표면상에 있는 미소면적(ds)에 순수하게 작용하는 힘(df_n)과 변형구배 텐서(F)를 이용하여, $F^{-1} \cdot df_n$ 로 변환해, 기준 배치에서의 미소면적에 적용시켰을 때의 응력 벡터를 이용해 정의되는 응력이며, Cauchy 응력과는 대칭을 이루며, 다음의 관계가 성립한다.

$$S_{ij} = J \frac{\partial X_i}{\partial x_k} \frac{\partial X_j}{\partial x_l} \sigma_{kl} \quad (3)$$

여기에서, $J = |\partial x_i / \partial X_j|$ 를 나타낸다.

2.2.2 Jaumann 응력 속도 텐서

좌표계의 변화에 따른 응력변화는 Jaumann 응력 속도($\dot{\sigma}_{ij}^J$)를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다 (Chen ; Mizuno, 1990).

$$\dot{\sigma}_{ij}^J = \frac{d}{dt} \sigma_{ij} - \sigma_{il}(t)W_{jl} - \sigma_{lj}(t)W_{ik} \quad (4)$$

여기에서, W_{jl} , W_{ik} 는 좌표계의 회전 시의 스핀 텐서(spin tensor)로, $W_{ij} = 1/2(\partial v_i / \partial x_j - \partial v_j / \partial x_i)$ 로 나타낸다.

일반적으로 Cauchy 응력의 물질 시간 미분은 강체 회전했을 때에 그 응력 변화율이 제로가 되지 않기 때문에 회전에 의한 응력의 불변성을 보존할 수 없다. 한편, 식 (4)의 Jaumann 응력 속도 텐서는 강체 회전과 같은 물체와 좌표계의 사이의 상대적인 운동이 생기는 경우에도 응력이 불변하다는 조건(유한변형이론에 있어서의 물질의 객관성)을 만족하고 있다. 또한, 식 (4)의 Jaumann 응력증분 텐서와 식 (3)의 제 2 Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 상호관계를 이용하면 미소변형이론으로 유도된 증분형 응력-변형률 관계를 updated Lagrangian방법으로 간단하게 정식화할 수 있다.

2.2.3 정식화(이산화)함에 있어서의 기본 가정

본 연구에서는 아래에 나타낸 바와 같은 가정에 근거하여 정식화하였으며, 이를 수정 updated Lagrangian법이라고 부르기로 한다.

1) 증분 시간은 충분히 작다.

변위와 변형구배가 충분히 작을 경우, 근사적으로 다음과 같은 관계가 성립한다(Chen ; Mizuno, 1990).

$$\partial x_i / \partial X_j \cong \delta_{ij} \quad , \quad J = |\partial x_i / \partial X_j| \cong 1 \quad (5)$$

2) 약형식(weak form)을 전개함에 있어, 가상 변형률 성분 $\delta E_{ij|t+\Delta t}$ 이나 가상 변위의 증분 $\delta u_{ij|t+\Delta t}$ 는, 근사적으로 다음과 같은 관계를 만족한다(Bathe et al., 1975).

$$\delta E_{ij|t+\Delta t} = \delta(E_{ij|t} + dE_{ij}) = \delta(dE_{ij}) \quad , \quad \delta u_{ij|t+\Delta t} = \delta(u_{ij|t} + du_{ij}) = \delta(du_{ij}) \quad (6)$$

여기서, E_{ij} 는 Lagrangian 변형률 텐서로서 다음과 같이 정의된다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \quad (7)$$

3) 미소 변형률 이론에 근거한 유효응력 증분과 변형률 증분의 관계는 Jaumann 응력 증분($d\sigma_{ij}^J$)과 스트레칭 텐서($d\epsilon_{kl}$)의 관계로서 이하와 같이 표현할 수 있다.(Bazant, 1971 ; Hibbitt et al., 1970 ; Gadala et al., 1984)

$$d\sigma_{ij}^J = D_{ijkl}^{ep} d\epsilon_{kl} \quad (8)$$

3. 수정 Updated Lagrangian법에 따른 운동방정식의 정식화

미지 상태인 $t + \Delta t$ 에 있어서, 운동방정식에 가상변위 δu_i^s 를 곱하고, 영역 V 에 대해서 적분하면 다음과 같은 약형식(weak form)을 얻을 수 있다.

$$\int_{V|t+\Delta t} \left(\rho_{|t+\Delta t} \ddot{u}_i^s|_{t+\Delta t} - \frac{\partial \sigma_{ij|t+\Delta t}}{\partial x_j} - \rho_{|t+\Delta t} b_{i|t+\Delta t} \right) \delta u_i^s|_{t+\Delta t} dV_{|t+\Delta t} = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 좌변 두번째 항목을 부분적분하고, Cauchy의 정리에 의해 표면력 $T_{il|t+\Delta t} = \sigma_{ij|t+\Delta t} n_{j|t+\Delta t}$ 을 대입한 후, 이를 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{V|t+\Delta t} \rho_{|t+\Delta t} \ddot{u}_i^s|_{t+\Delta t} \delta u_i^s|_{t+\Delta t} dV_{|t+\Delta t} + \int_{V|t+\Delta t} \sigma_{ij|t+\Delta t} \delta \epsilon_{ij}^s|_{t+\Delta t} dV_{|t+\Delta t} \\ & = \int_{V|t+\Delta t} \rho_{|t+\Delta t} b_{i|t+\Delta t} \delta u_i^s|_{t+\Delta t} dV_{|t+\Delta t} + \int_{S|t+\Delta t} T_{il|t+\Delta t} \delta u_i^s|_{t+\Delta t} dS_{|t+\Delta t} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)이 시각 $t + \Delta t$ 에 있어서의 영역 V 에 대해서 얻을 수 있는 운동방정식의 약형식(weak form)이다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 모든 물리량은 시각 $t + \Delta t$ 의 미지상태에서 정의되어있다. 식(10)을 위에서 제시한 가정 및 응력 텐서를 적용하고, 미지 상태인 $t + \Delta t$ 의 물리량을 현재 시각 t 의 기준 배치로 변환시켜 증분형으로 전개하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{V_t} \rho_t \ddot{u}_{i|t+\Delta t} \delta(du_i^s) dV_t + \int_{V_t} \bar{\sigma}_{ij}^{ep} \delta(d\varepsilon_{ij}^s) dV_t + \int_{V_t} \bar{\sigma}_{ij}^{ep} \delta(d\eta_{ij}^s) dV_t \\ & + \int_{V_t} d\bar{S}_{ij}^{ep} \delta(d\varepsilon_{ij}^s) dV_t + \int_{V_t} \bar{\sigma}_{ij}^{vf} \delta(d\varepsilon_{ij}^s) dV_t + \int_{V_t} \bar{\sigma}_{ij}^{vf} \delta(d\eta_{ij}^s) dV_t \quad (11) \\ & + \int_{V_t} p_{i|t+\Delta t} \delta(d\varepsilon_{ii}^s) dV_t = \int_{V_t} \rho_t b_{i|t} \delta(du_i^s) dV_t + \int_{S_t} T_{i|t+\Delta t} \delta(du_i^s) dS_t \end{aligned}$$

단, 여기에서 $\ddot{u}_{i|t+\Delta t}$, $p_{i|t+\Delta t}$ 은 이 방정식에서 해석해야 할 미지수이기 때문에, 미지의 상태인 시각 $t + \Delta t$ 로 표현되어 있다. 한편 $T_{i|t+\Delta t}$ 는 외력으로서 알 수 있는 값이 된다. 즉 미지의 상태인 시각 $t + \Delta t$ 에서 외력 $T_{i|t+\Delta t}$ 가 주어지면, 기존의 시각 t 의 모든 물리량이 알려진 상태로 운동방정식을 전환 하여, 시각 $t + \Delta t$ 상태에서의 알고자 하는 미지의 값(가속도 $\ddot{u}_{i|t+\Delta t}$ 및 간극수압 $p_{i|t+\Delta t}$)을 구하는 것이다.

식(11)에서의 각 성분을 유한요소법에 의해 각 성분별 벡터 및 매트릭스 표시하고, Rayleigh감쇄 매트릭스 $[C^{ep}]$ 을 도입하고, 위의 관계식을 정리하면, 최종적인 해석 가능한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M] \ddot{\bar{u}}_N + [C^{ep} + C^{vf}] \dot{\bar{u}}_N + [K_L + K_{NL} + K_{CNL}] \Delta \bar{u}_N + \bar{K}_V p_{dE} = \bar{F}_d - \bar{R}_t \quad (12)$$

여기에서, 각 매트릭스 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M] = \int_V \rho [N]^T [N] dV \quad (13a)$$

$$[K_{NL}] = \int_V [B_{NL}]^T \bar{\sigma}_{ij}^{ep} [B_{NL}] dV \quad (13b)$$

$$[K_L] = \int_V [B]^T [(1-\alpha)D^{ep} + \psi] [B] dV \quad (13c)$$

$$[C^{vf}] = \int_V \alpha [B]^T [D^{vf}] [B] dV \quad (13d)$$

$$[K_{CNL}] = \int_V \alpha [B_{NL}]^T \bar{\sigma}^{vf} [B_{NL}] dV \quad (13e)$$

$$\bar{K}_V = \int_V \bar{B}_V dV \quad (13f)$$

$$\bar{F}_d = \int_V \rho [N]^T \bar{b} dV + \int_S [N]^T \bar{T} dS \quad (13g)$$

$$\bar{R}_t = \int_V [B]^T \bar{\sigma}^{ep} dV \quad (13h)$$

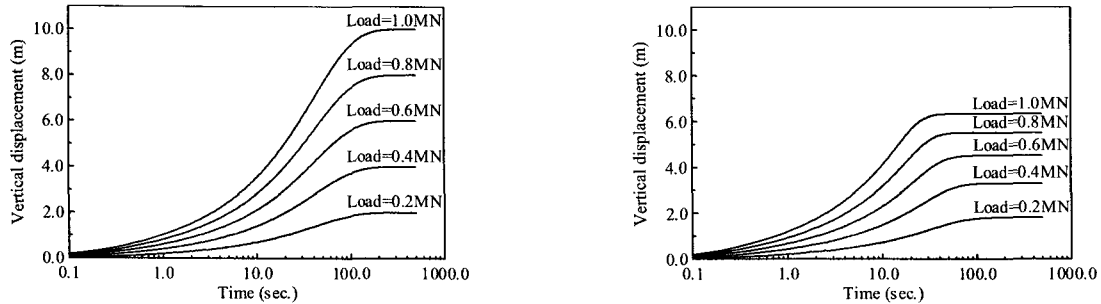
4. 제안된 수정 updated Lagrangian 방법에 대한 검증

4.1 탄성 구성식을 이용한 일차원 압축에 관한 검증

위에서 제안한 수정 updated Lagrangian법의 적용성을 검토하기 위하여 일차원 압축(압밀)에 대한 해석을 실시하였다. 해석 모델은 포화지반을 가정하여 폭 1.0m, 높이 10.0m로 하여, 10개의 요소로 분할하였다. 해석 모델의 경계조건은 일차원 압축을 고려하기 위해, 각 요소의 수평방향은 고정으로 하고, 연직방향을 자유로 하였고, 표면부분은 배수경계로 하였다. 지반재료정수는, 간격을 0.3, 투수계수

0.001 m/s, 탄성계수 1.0 MPa, 포아송비 0.0으로 하였다. 하중은 지표면에 작용하는 연직력으로 최대 1.0MN까지 일정하중을 500초간 적용시켰다.

그림 2는 유한요소 모델 중, 최상부(지표면)에 대해서 미소변형이론 및 수정 updated Lagrangian법의 해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 미소변형이론에 근거한 해석에서는 수정 updated Lagrangian법에 근거한 해석보다 큰 변위가 발생하고 있다.



(a) 미소변형이론 (b) 수정 updated Lagrangian법

그림 2. 해석 결과(연직 변위의 시각력)

그림 3은 하중이 종료한 시점에서의 지표면의 최종 연직 변위와 하중의 관계를 나타내고 있다. 그림 3에는 Gibson et al.(1967)에 의한 이론값도 함께 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 수정 updated Lagrangian법으로 해석한 결과는 이론치와 잘 일치하고 있지만, 미소 변형 이론으로 해석한 결과는 연직변위를 과대하게 평가하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 수정 updated Lagrangian법에 근거한 해석이 미소 변형 이론에 근거한 해석보다 실제의 지반의 변형을 적절히 표현하고 있다.

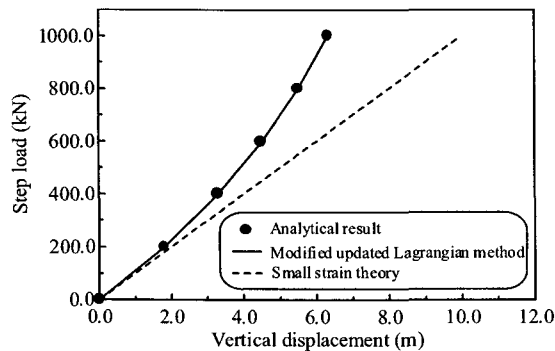


그림 3. 지표면의 최종 연직 변위와 하중과의 관계

4.2 진동대 실험을 통한 모델의 적합성을 검토

액상화 및 유동현상이 발생 가능성이 있는 지반에 대하여 강제 경사 토조를 이용한 진동대 실험의 시뮬레이션을 통하여 모델의 적합성을 검토하였다.

4.2.1 강제 경사 토조를 이용한 진동대 실험(Hamada et al , 1994)

진동대와 모형 지반 및 계측 장치의 배치도를 그림 4에 나타낸다. 실험 순서는 (1)필요한 상대 밀도를 가지는 수평 모형 지반을 작성한 후 (2)최대 진폭 약 100 gal의 정현파를 이용해 토조를 가진해, 지반을 액상화 시킨 후, 신속하게 가진을 정지한다. (3) 그 후, 잭업에 의해 토조 오른쪽 부분을 단시간에 필요한 경사각(4.2%)까지 기울여 액상화한 지반을 유동시켜, 지반 변위나 지반내의 과잉간극수압의 계

측을 실시하는 것이다. 모형 지반은 Enshunada 모래를 사용하였으며, 상대 밀도는 약 40%이다. Enshunada 모래는 평균 입경 : 0.24 mm, 균등 계수 : 1.92, 최대간극비 : 1.251, 최소간극비 : 0.706의 깨끗한 모래이다.

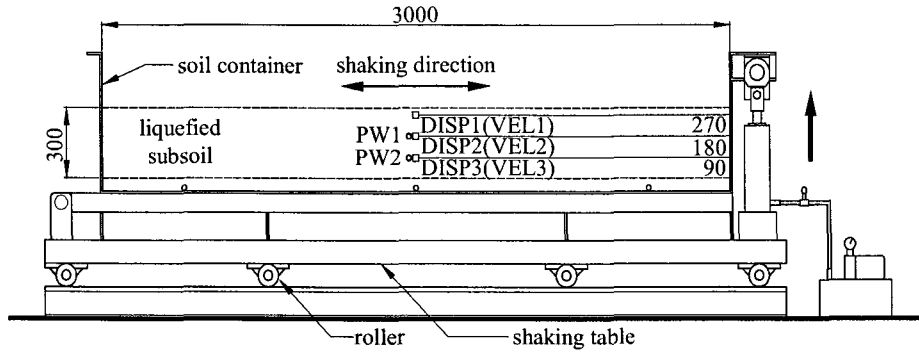


그림 4. 진동대, 모형지반 및 계측 장치의 배치도

4.2.2 실험 결과

그림 5는 실험 종료 시(20초)의 최종 지표면의 형상으로, 실험 결과와 동시에 여러가지 해석 수법에 근거해 얻을 수 있던 해석 결과를 나타내고 있다. 먼저, 유체 역학에 근거한 방법(Newton 점성 유체 구성식, Bingham 유체 구성식)에 따르는 해석 결과(Uzuoka et al., 1998)는 지표면의 경사를 과대하게 평가하고 있다. 다음으로 탄소성 구성식에 의한 해석 결과는 토조의 중앙부에 경사가 남아 있지만, 토조의 양단부에 있는 실험 결과와는 경향이 차이가 난다. 한편 류·탄소성 구성식을 이용한 해석에는, 미소변형이론에 근거한 방법보다 본 연구에서 제안한 수정 updated Lagrangian법에 따르는 해석이 실험에 보다 근사적인 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

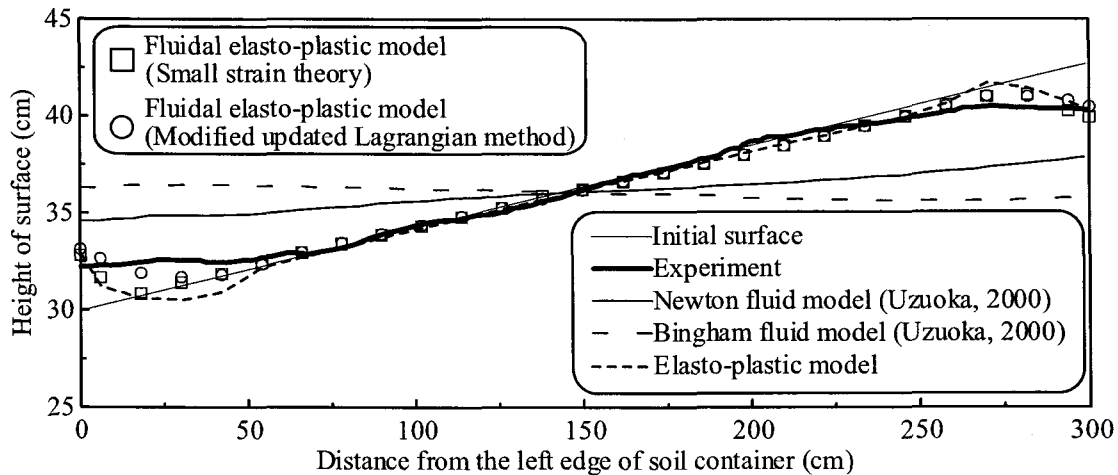


그림 5. 실험 및 해석결과 - 모형지반의 지표면의 형상

6. 결 론

본 연구는 액상화 및 지반의 대변형 해석이 가능한 방법으로 수정 updated Lagrangian법을 제안하였으며, 이에 대하여 일차원 압밀 및 경사지반의 유동 실험을 통하여 모델의 적용성에 대하여 검토한 결

과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 제안한 수정 updated Lagrangian법은 현재의 해석 완료상태($t = t$)를 기준 배치로서 하고 있으며, 비선형 변형률 성분 및 요소의 회전성분(스핀텐서)을 고려하고 있다.
- 2) 일차원 압축에 관한 해석 결과, 미소변형이론에 의한 해석에서는 발생하는 변위량을 과대하게 평가했지만, 수정 updated Lagrangian법에 따르는 해석은 이론치와 거의 일치한 결과를 나타내고 있으며, 지반의 일차원 압축을 적절히 표현할 수 있었다.
- 3) 강제 경사토조를 이용한 진동대 실험을 대상으로 해, 수정 updated Lagrangian법으로 실험 결과를 해석한 결과, 최종 지표면의 형상은 수정 updated Lagrangian법에 의한 해석이 실험에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 한편, 미소변형이론과 수정 updated Lagrangian법의 차이를 보다 명확하게 검토하기 위해서는, 보다 큰 변형률 레벨까지 검토할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 久田俊明, 野口裕久(1995), "비선형 유한요소법의 기초와 응용", 丸善, (일본어).
2. 文龍(2002), "지반의 액상화·유동화 현상의 통일적 해석법에 관한 연구", Kyoto대학 박사학위 논문, (일본어).
3. 佐藤忠信, 文龍, 渦岡良介(2002a), "모래의 류·탄소성 구성식에 의한 액상화·유동과정의 통일적 해석", 일본토목학회 논문집(I), No.717, pp.53~64, (일본어).
4. 佐藤忠信, 文龍, 渦岡良介(2002b), "경사지반의 액상화·유동과정의 시뮬레이션", 일본토목학회 논문집(III), No.722, pp.109~119, (일본어).
5. Bathe, K.J., Ramm, E. and Wilson, E.L.(1975), "Finite element formulations for large deformation dynamic analysis", International journal for numerical methods in engineering, Vol.9, pp.353~386.
6. Bazant, Z.P.(1971), "A correlational study of formulations of incremental deformation and stability of continuous bodies", J.Appl.Mech. ASME, 38, pp.919~928.
7. Chen, W.F and Mizuno, E.(1990), "Nonlinear analysis in soil mechanics ; Theory and Implementation", Developments in geotechnical engineering 53, Elsevier Science Publishers, N.Y.
8. Gadala, M.S., Dokainish, M.A. and Oravas, G.AE.(1984), "Formulation methods of geometric and material nonlinearity problems", International journal for numerical methods in engineering, Vol.20, pp.887~914.
9. Gibson, G.L., Rngland, G.L. and Hussey, M.J.L.(1967), "The theory of one dimensional consolidation of clays", Geotechnique, Vol.17, pp.261~273.
10. Hamada, M., Sato, H. and Kawakami, T.(1994), "A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement", Proceedings from the Fifth U.S-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026, pp.217~232.
11. Hibbitt, H.D., Marcal, P.V. and Rice, J.R.(1970) "A finite element formulation for problems of large strain and large displacement", International journal of Solids Structures, Vol.6, pp.1069~1086.
12. 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, pp.661~680.

13. Uzuoka, R., Yashima. A., Kawakami, T. and Konrad, J.-M.(1998), "Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading", Computers and Geotechnics, Vol.22, No.3/4, pp.243~282.
14. Yuan Di, Tadanobu Sato, Yong Moon(2002), "A New Simulation Method for Liquefaction and induced ground flow" The 2nd Canadian Specialty Conference on Computing in Geotechnique, pp.197~204, Winnipeg, Manitoba, CANADA.