

수중 모래지반의 동수압 발현

Discussion of Dynamic Fluid Pressures of a Submerged Deposit of Sand

김하영, Ha-young Kim

삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원, Senior Research Engineer, R & D Team, Samsung Engineering & Construction

SYNOPSIS : This study is concerned with the dynamic behaviour of a fluid layer and a submerged deposit of sand in a rigid rectangular container when subjected to horizontal shaking. Detailed analyses are made of the interaction between the fluid pressure field and the excess pore pressure changes in the sand deposit, in terms of finite-element modelling as well as of two-layer fluid theory. It is shown that the predicted performance compares favourably with what has been observed in centrifugal shaking-table testing on submerged sand deposits.

Key words : Two-layer fluid theory, Centrifugal shaking-table testing, Excess pore pressure

1. 서 론

느슨한 포화 모래지반은 진동으로 인하여 액상화가 유발될 가능성이 매우 높다. 기존 연구들을 살펴보면 포화 모래지반에서의 액상화 유발 가능성과 액상화 후에 잔류하는 과잉수압의 거동에 대하여 국한되어 수행되었다. 따라서 매립된 벽체 또는 구조물에 인접한 액상화된 지반에서 유발되는 동적 거동 및 변동 간극수압의 특성에 관한 연구는 현재 미미한 상황이다. 특히, 유체층이 액상화 가능한 지반 위에 존재하는 경우 지반 및 구조물 간의 상호작용은 매우 복잡한 양상을 보일 것이다.

본 연구에서는 수평지진동에 따른 장방형 토조 내의 수중 포화 지반의 거동을 다루고 있으며, 다음과 같은 세 가지 접근방법에 따라 연구를 수행하였다. 첫째로, 유체-지반-구조물계의 유한요소 모델링을 하였으며, 둘째로, 액상화된 지반을 이상화한 비점성 이층 유체 이론을 적용하였고, 셋째로, 원심력장 진동대실험을 수행하였다.

본 연구로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다. 수중포화 지반에 대한 탄소성 유한요소 모델링을 적용함으로써 지반의 액상화에 따른 동수압의 발현 및 간극수압의 발달과정을 잘 모사할 수 있음을 확인하였다. 해석을 통하여 유체-지반의 인접면(인터페이스)에서의 동수압을 포함한 액상화된 지반과 지반 상부 유체와의 상호작용이 유발되는 것이 확인되었다. 이층 유체이론이 적용된 유한요소해석으로부터 얻어진 동수압변화 양상이 원심력장 진동대실험으로부터 도출된 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

2. 이층 유체계에 대한 동수압 이론

완전 액상화된 지반(평균유효응력 $p'=0$)을 고밀도의 완전유체로 가정하여, 사각용기내 이층유체계의 진동 문제로 생각하자. 고밀도유체(액상화지반)내에서 발생하는 동수압에 관한 표현을 사각용기내의 일층 유체의 액면동유이론을 참고하여 유도하였다(Graham and Rodriguez, 1952). 즉, 용기가 $A \cdot \sin \omega t$ 로 수평진동하는 경우 액상화토(영역 II)에 대한 동수압 p 는 다음의 식과 같이 유도할 수 있다.

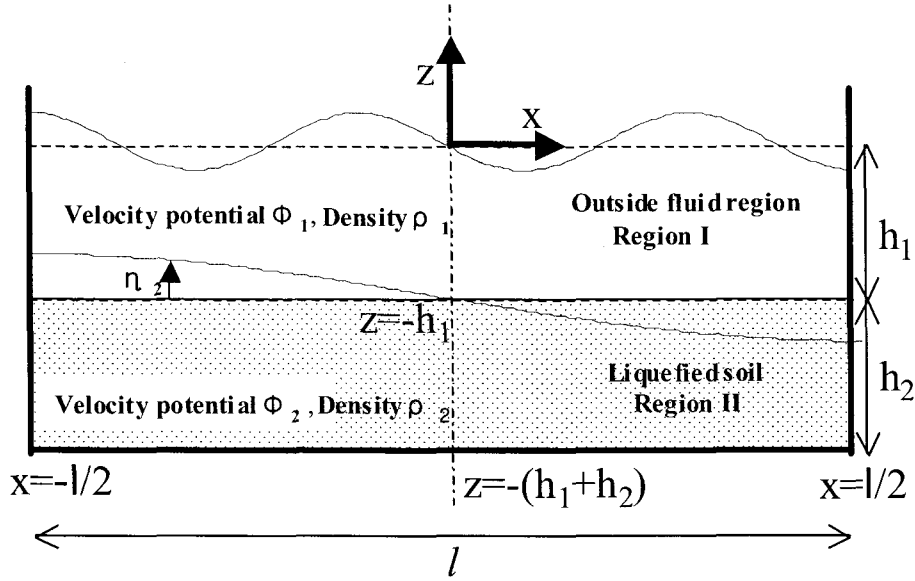


그림 1. 수평진동을 받는 사각용기내의 이층 유체계

$$\begin{aligned}
 p &= \rho_2 \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \\
 &= \rho_2 \cdot A w^2 (\sin \omega t) \cdot \left[x - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{4l}{\pi^2 (2n+1)^2} \left(\frac{w^2}{B_n w^2 - N g \frac{(2n+1)\pi}{l}} \right) \cdot \right. \\
 &\quad \left. \left(\frac{\left(-B_n \sinh \left(\frac{(2n+1)\pi h_1}{l} \right) + \cosh \left(\frac{(2n+1)\pi h_1}{l} \right) \right)}{\sinh \left(\frac{(2n+1)\pi h_2}{l} \right)} \right) \cdot \right. \\
 &\quad \left. \left(\cosh \left(\frac{(2n+1)\pi (z + h_1 + h_2)}{l} \right) \cdot \sin \left(\frac{(2n+1)\pi x}{l} \right) \right) \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기에서 A: 용기의 수평변위진폭, w : 진동각주파수, Ng : 원심가속도, ρ_1 : 외부유체의 밀도, ρ_2 : 액상화토의 밀도, h_1 : 외부유체의 높이, h_2 : 액상화토의 높이, l : 사각용기폭, B_n 은 상부유체와 하부유체의 밀도비에 관계하는 계수로 $B_n = f(\rho_2/\rho_1, w, l, h_1, h_2)$ 이다.

액상화토에 대한 동수압 p 에 관한 식(1)에 의한 사각용기내의 이층유체에서 발생하는 동수압진폭은 지반의 얇은 부분으로부터 깊은 부분으로 갈수록 커진다. 또한 토조 중앙으로부터 토조 벽면에 가까워질수록 동수압 진폭이 크게 되는 경향이 있다.

3. 탄소성 연성 진동해석

저자는 二相系탄소성지반의 지진시 거동예측이 가능한 비선형 연성 진동해석 프로그램을 개발하였다 (Kim and Sekiguchi, 2000). 구체적으로는 유한요소방정식은 다음과 같다.

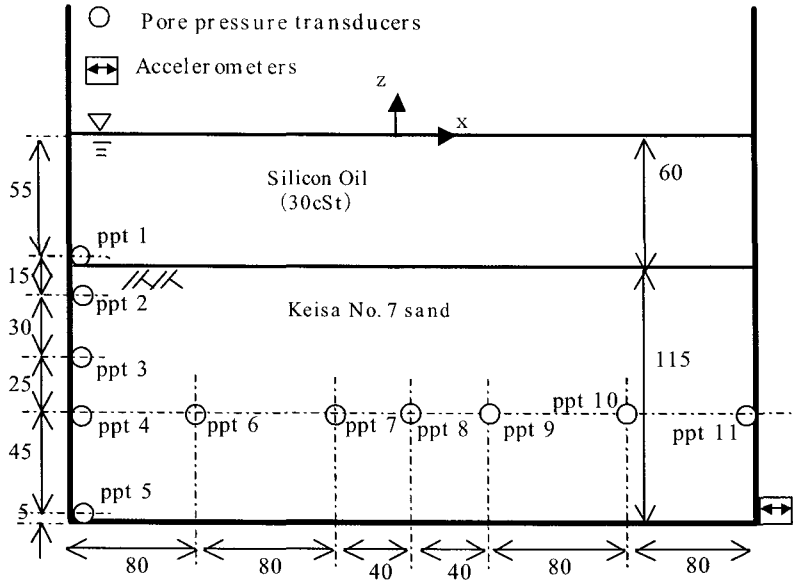


그림 2. 원심력장 진동실험에 사용된 모형 (30G장)

$$\left[\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K^*] \right] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta Q \\ 0 \end{Bmatrix} + \left[\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C] \right] \begin{Bmatrix} \hat{u}_i \\ 0 \end{Bmatrix} + \left[\frac{1}{2\beta} [M] + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t [C] \right] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 Δu 는 변위 증분, Δp 는 과잉 간극 수압 증분이며 $\{\Delta Q\} = -[M]\{\Delta \ddot{u}_a\}$ 이다. 또한 $[M]$ 은 질량 매트릭스, $\{\Delta \ddot{u}_a\}$ 는 입력 지진가속도 증분 벡터이다. 본 프로그램의 정식화에 있어서 토입자와 간극 유체는 비압축성을 가정하고 있다. 액상의 운동방정식에는 Darcy법칙을 사용하였고 이산화에는 차분법을 도입하였다. 과잉간극수압은 요소내에서 일정하다고 가정하였다. 시계열해석에서는 선형가속도법의 하나인 Newmark's β 법을 사용하였다.

토의 구성식은 입상토의 현실적인 연속 소성을 표현할 수 있는 2D-Pastor모텔(Pastor et al., 1990)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 구성모델 파라미터를 표-1에 나타낸다.

유한요소해석의 대상은 사각형토조내에 조성된 포화 수평 모래지반이다. 즉, 그림-2에 나타난 원심력장 진동실험 모형을 실물환산하여 유한요소해석에 사용하였다. 지반은 폭 12m, 높이 3.45m이고, 요소수는 320개로 분할하였다.

입력지진동의 수평가속도는 원심력장 진동실험의 실가속도를 실물환산하여 사용하였다. 구체적으로는, 입력지진동의 수평가속도는 sin파로 진폭은 0.1G, 주파수는 1Hz이다.

4. 원심력장 진동실험

표 1. 구성모델 파라미터

Mg	Mf	α	β_0	β_1	H_0^*	H _{u0}	γ_u	γ_D	K ₀	k
						(kPa)				m/s
1.2	0.44	0.35	20	0.04	1500	8000	4	3	0.56	0.0001

수평진동실험을 30g의 원심가속도장에서 실시하였다. 실험에 사용된 모형과 가속도의 배치를 그림-2에 나타낸다.

지반재료는 Silica sand 7호($G_s=2.69$, $D_{50}=0.14\text{mm}$)를 사용하여 액중낙하법에 의해 느슨한 지반을 작성하였다. 유체는 진동에 관한 시간상사칙과 지반 압밀에 관한 시간상사칙을 함께 만족시키기 위해,

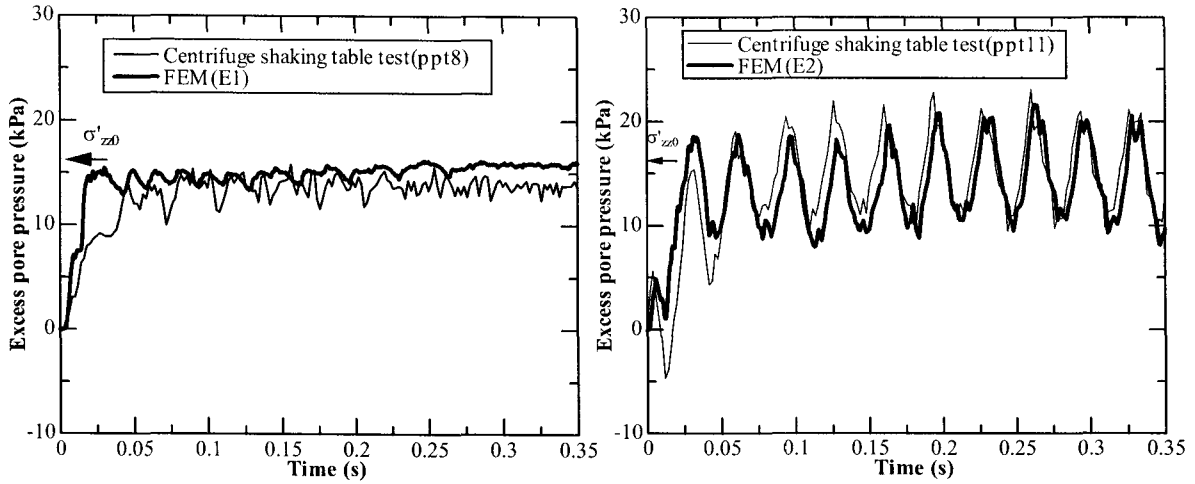


그림 3. 지반중심부 및 벽면 근방에 대한 과잉 간극압의 시계열

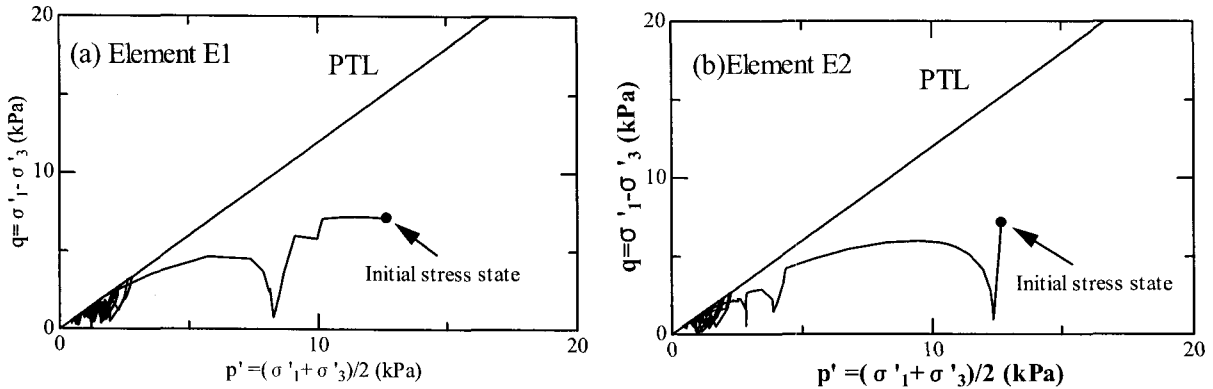


그림 4. 지반중심부 및 벽면 근방에 대한 응력경로

고점성(30cSt)의 실리콘 오일을 사용하였다 (Viscous scaling). 본 실험에서는 외부유체역의 높이는 60mm이다.

지반내의 과잉간극압응답은 지반내에 설치한 계 9개의 간극압계(ppt)를 사용하여 측정하였다.

5. 외부유체/지반계의 지진시 거동예측과 원심력장 진동실험결과와의 비교

그림-2을 참조하여, 지반중심부 (ppt8) 및 벽면근방 (ppt11)에 대한 과잉간극압의 시계열을 그림-3에 나타낸다. FEM에서는 지반중심부는 요소 E1이며, 벽면근방은 요소 E2이다. 원심력장 진동실험결과와 유한요소해석결과 (FEM)의 양자에 있어서 진동 1과제에 급격히 과잉간극압이 발달하여 그후 진동에 의한 잔류간극압의 축적에 따라 액상화에 이른다. 지반중심부에서는 이론식(1)로부터 예상되는 것 같이 액상화후에는 과잉간극압의 진동성분은 보이지 않는다. 벽면근방에서는 과잉 간극압 변동이 명확하다. 원심진동실험에 대한 잔류간극압의 축적과 진동의 경향은 위에 설명한 유한요소해석결과와 일치하고 있다.

진동중의 과잉간극압의 축적과정을 상세히 조사하기위해 유한요소해석결과에 바탕을 두고 지반중심과

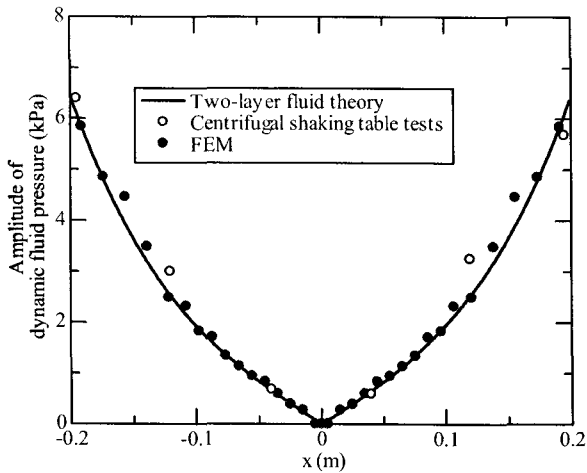


그림 5. 동수압진폭의 수평분포 ($z=0.11\text{m}$)

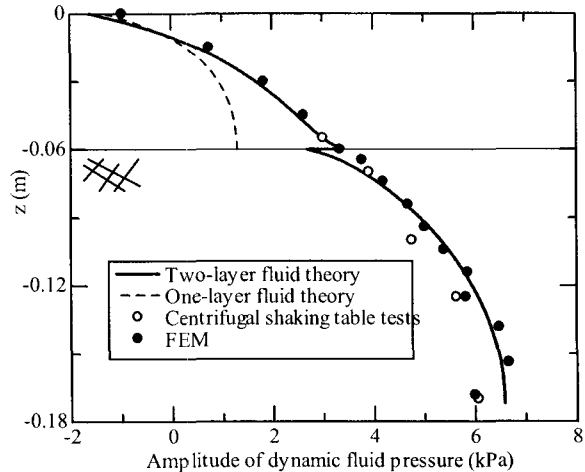


그림 6. 동수압진폭의 심도분포 ($x=0.15\text{m}$)

벽면 근방에 대한 유효응력 경로를 그림-4에 나타낸다. 지반중양부의 요소에서는 진동 2과제에 변상선(PTL)에 이르며 그후 팽창 및 압축을 반영하여 평균유효응력은 증감을 연속하여 결과적으로 유효응력 경로는 원점을 향한다. 이러한 평균유효응력의 변화특성은 그림-3(a)에 나타난 잔류간극압의 축적 및 변동간극압의 특성과 잘 대응한다.

벽면근방요소에서는 진동 3과제에 변상선에 이르고 있지만 그 후에는 지반중양의 요소와 동일하게 평균유효응력은 증감을 계속하면서 평균유효응력 수준은 저하하여 가며 액상화에 이른다(그림-5(b)참조).

이층유체이론, 탄소성유한요소해석 및 원심력장 진동실험에 의한 동수압진폭의 수평분포 ($z=0.11\text{m}$)를 그림-5에 나타낸다. 여기에서 유한요소해석과 원심력장 진동실험의 결과는 지반의 액상화가 생긴 상태에서의 동수압 진폭의 평균치에 착목하였다. 그림-5의 결과로부터 이층유체이론해, 유한요소해석결과 및 원심력장 진동실험 결과의 모든 것은 동수압진폭은 지반 중앙부 ($x=0\text{m}$)로부터 벽면 ($x=0.2\text{m}$)에 가까울수록 증폭하는 경향이 나타난다.

수평좌표 $x=0.15\text{m}$ 에 대한 이층유체이론, 탄소성유한요소해석 및 원심력장 진동실험에 의한 동수압진폭의 심도 방향 분포를 그림-6에 나타낸다. 이 그림에서 동수압 진폭은 지반 표면으로부터 깊어질수록 큰 경향이 있다. 여기에서 일층 유체 이론에 비해 이층 유체 이론 및 실험, FEM의 동수압의 진폭이 증폭된 경향을 알 수 있다. 이는 액상화로 인하여 동수압이 증폭된 결과이다.

6. 결론

수평진동을 받는 사각형토조내의 느슨한 사질지반-유체계의 동적응답, 특히 사질지반내의 과잉 간극압 응답을 이론적, 실험적으로 상세히 검토하였다.

- (1) 액상화토를 고밀도 완전유체로 본 이층유체계 이론을 전개하여 액상화토중의 동수압응답을 나타내는 식(1)을 유도하였다.
- (2) 탄소성유한요소해석에 의하면 지반중양부 ($x=0$)에서는 진동후, 수 사이클 사이는 팽창과 압축을 반영하여 간극압변동이 있지만 액상화에 이르러서는 변동간극압성분은 실질적으로 나타나지 않는다.
- (3) 이층유체이론, 유한요소해석 및 원심력장 진동실험에 의한 액상화 지반중의 동수압진폭의 수평분포는 일치한다.

참 고 문 헌

1. Graham, E. W. and Rodriguez, A. M. (1952): Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics, Jour. Applied Mechanics, Vol. 19, No. 3, pp. 381-388.
2. Kim, H. and Sekiguchi, H. (2000): Analysis of Partially Drained Behaviour of Saturated Soil Deposits Subjected to Earthquake Shaking, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., No. 43, B-2, pp. 449-462.
3. Pastor, M., Zienkiewicz, O.C. and Chan, A.H.C. (1990): Generalized plasticity and the modeling of soil behaviour, Int. Jour. Numer. Anal. Methods Geomech, Vol. 14, pp. 151-190.