

## 진동대 시험을 통한 액상화되는 지반의 수평지반반력계수에 대한 연구 Modulus of Horizontal Subgrade Reaction in Liquefying Sand by Shaking Table Test

박종관<sup>1)</sup>, Jong-Kwan Park, 한성길<sup>2)</sup>, Sung-Gil Han, 김상규<sup>3)</sup>, Sang-Kyu Kim, 이용도<sup>4)</sup>, Yong-Do Lee

<sup>1)</sup>서울산업대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat. Univ. of Tech.

<sup>2)</sup>새길엔지니어링 기술연구소 선임연구원, Researcher, Saegil Engineering, Research Center

<sup>3)</sup>동부산대학교 학장, Dean, Dong-Pusan College

<sup>4)</sup>서울산업대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat. Univ. of Tech.

**SYNOPSIS :** Shaking table tests were performed to evaluate the subgrade reaction of ground according to the build-up of pore water pressure. Model pile was installed in the sand ground. The acceleration of the model ground, the pore water pressure build-up and displacement of pile were recorded by measuring devices. Subgrade reaction approach based on Winkler soil model was applied to obtain the modulus of the horizontal subgrade reaction. The results of analysis show that the reduction factor of the subgrade reaction due to pore pressure increase is about 1 and the horizontal subgrade reaction of liquefied ground is not influenced by the stiffness of pile, a ground acceleration and the intial ground density.

**Key words :** liquefied ground, modulus of horizontal subgrade reaction, shaking table test, model pile

### 1. 서론

최근 지진에 대한 구조물의 내진설계가 수행되고 있으며 대표적인 내진기초 구조물로 말뚝기초가 사용되고 있다. 말뚝의 내진설계는 유사정적해석법(Pseudo-Static Analysis)과 동적 해석법(Dynamic Analysis)이 제안되고 있다. 그러나 지진 발생 시 액상화되는 사질토 지반과 말뚝기초간의 동적 거동에 대한 연구와 구조물에 미치는 영향에 대한 연구 역시 거의 없다. 또한, 기존의 말뚝 내진 설계법에서는 액상화 발생 시 과잉간극수압 발생에 따른 수평지반반력계수를 설계에 반영하지 않았다. 따라서, 국내의 경우에도 강도 높은 지진의 가능성성이 우려되고 있는 시점에서 지진 발생 시 지반-말뚝 시스템의 동적 거동과 액상화되는 사질토 지반의 수평지반반력계수에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 모형말뚝에 대한 수평재하시험과 진동대 시험을 실시하고 이 결과를 통하여 액상화되는 사질토 지반에서 간극수압비에 따른 수평지반반력계수의 변화를 연구하고자 한다. 수평하중을 받는 말뚝 주변 지반의 비선형 거동은  $p-y$ 곡선으로 나타내고 유사정적해석법인 지반반력해석법을 통하여 수평지반반력계수에 대한 해석을 실시하고자 한다. 이 역 해석 결과를 통하여 지진에 의해 과잉간극수압이 증가되는 지반의 수평지반반력계수에 대하여 내진설계시 고려할 수 있다.

### 2. 수평지반반력계수

수평하중을 받는 말뚝기초에 대하여 말뚝을 탄성 기초에 놓인 보(beam)로 그리고 지반을 일련의 독립

된 선형 탄성 스프링(Winkler soil model)으로 가정할 수 있다. Fig. 1은 Winkler soil model을 나타낸 것이며, 이를 지배방정식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + p = 0 \quad (1)$$

여기서,  $EI$ 는 말뚝의 강성,  $y$ 는 말뚝의 길이에 따른 지점  $x$ 에서의 수평 처짐,  $P_x$ 는 축하중 그리고  $p$ 는 지반의 반력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = k_h y \text{ 또는 } k_h = \frac{p}{y} \quad (2)$$

여기서,  $p$ 는 말뚝의 단위 길이 당 지반반력[FL<sup>1</sup>],  $k_h$ 는 수평지반반력계수[FL<sup>2</sup>] 그리고  $y$ 는 말뚝의 처짐[L]이다.

Reese와 Matlock(1956)은 사질토와 정규암밀점토의 경우 수평지반반력계수가 말뚝의 깊이  $x$ 에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하여 아래와 같이 정의하였다.

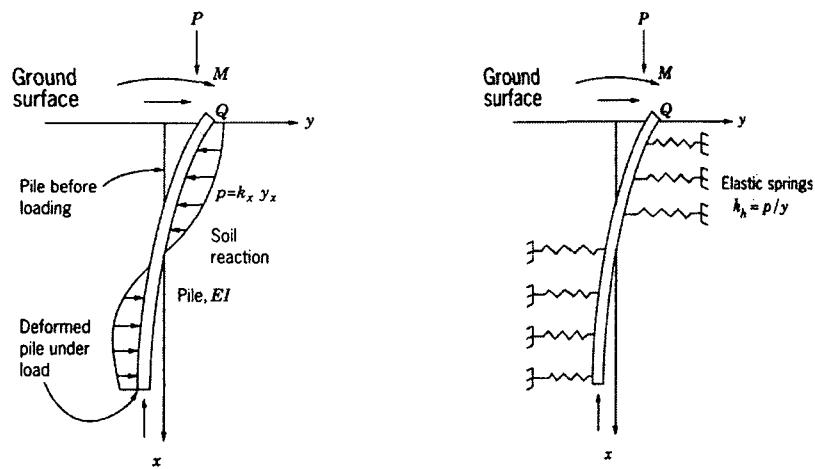
$$k_h = n_h \cdot x \quad (3)$$

여기서,  $n_h$ 는 수평지반반력상수[FL<sup>3</sup>]이다. 또한 Terzaghi(1955)는 사질토 지반의 경우, 실제의 수평지반반력계수는 깊이와 함께 선형적으로 증가하며 하중 재하 면적의 폭이 증가함에 따라 감소한다고 가정하고 식(4)와 같이 정의하였다.

$$k_s' = n_h \cdot \frac{x}{B} \quad (4)$$

여기서,  $k_s'$ 는 실제수평지반반력계수[FL<sup>3</sup>]이고  $B$ 는 말뚝의 직경(또는 폭) [L]이다. 사질토 지반에서 수평지반반력상수  $n_h$ 는 말뚝의 강성과 길이에 영향을 받지 않으나 유효상재압력과 상대밀도에 의존한다고 가정하였다.

실제로 수평하중을 받는 말뚝 주변 지반은 비선형 거동을 나타내고 있다, Reese(1974)는 지반의 비선형 거동 즉 말뚝에 작용하는 지반의 반력과 비선형의 처짐을 말뚝의 깊이에 따라  $p-y$  곡선으로 나타내었다. 또한 지배방정식 식(1)을 유한차분법과  $p-y$  곡선을 이용해 지반반력해석법(Subgrade Reaction Approach)으로 풀어 계산하여 지반의 소성변위를 고려하였다. 실제의 수평하중을 받는 말뚝 주변 지반의 특성은 변형률에 따라 일정하지 않으며 반복하중 작용 시 지반의 전단탄성계수, 수평지반반력계수, 전단강도 등은 연속적으로 변화한다. 그래서 수평하중을 받는 말뚝 주변 지반의 거동인  $p-y$  곡선은 반경험적인 절차(semi-empirical procedures)를 통하여 얻을 수 있다.



(a) Laterally loaded pile in soil      (b) Laterally loaded pile on springs

Fig. 1. Behavior of laterally loaded pile : subgrade reaction approach

### 3 진동대 모형시험

#### 3.1 모형지반

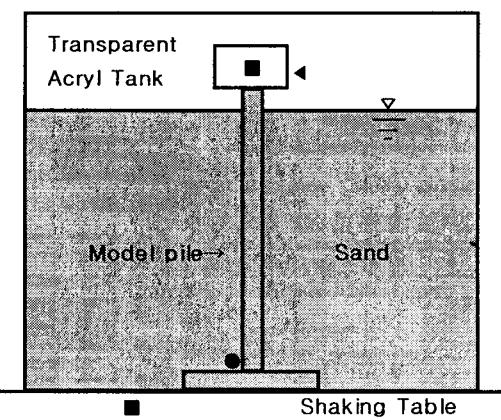
지진 발생 시 과잉간극수압의 발생에 따른 말뚝의 거동 및 지반의 수평지반반력상수를 역 해석하기 위해 진동대 모형시험을 실시하였다. 모형지반은 여러 밀도의 지반에 모형말뚝을 설치하여 지반 가속도를 변화시켜 지반 내에서 발생하는 과잉간극수압과 말뚝 두부에서의 수평변위 등을 측정하였다. Fig. 2는 토조와 모형지반을 나타낸 것이다. 진동대에 놓여지는 토조는 두께 15.6mm인 아크릴 판으로 제작하였으며 길이가 600mm, 높이가 400mm, 폭이 200mm이다. 모형지반은 상대밀도를 달리하여 한국표준사인 주문진 모래로 구성되었으며 모형말뚝은 직경은 8.0mm, 10.0mm와 12.0mm인 세 개의 아크릴 봉으로 제작하였다. 주문진 표준사의 토질특성은 Table 1 그리고 모형말뚝의 재질에 대한 특성은 Table 2와 같다. 진동대와 말뚝 머리에서의 가속도 측정을 위하여 가속도계, 토조 내 간극수압측정을 위하여 간극수압계 그리고 말뚝 두부의 수평변위를 측정하기 위하여 변위계를 설치하였다.

모형지반은 상대밀도 32%, 45%, 72%로 성형하였다. 먼저 시료의 공기를 배제하기 위해 물 속에 담가 두어 시료 성형 시 기포가 발생하지 않도록 한 후 모형말뚝을 토조의 바닥 중앙에 고정시키고 간극수압계를 부착하였다. 상대밀도 32%인 모형지반은 토조내 물을 1/3정도 채우고 원하는 높이까지 시료를 천천히 침강시킨 뒤 여분의 물은 스펀지로 제거하여 성형하였다. 상대밀도 45%인 모형지반은 미리 지반을 더 쌓아 놓고 원하는 밀도가 될 때까지 고무망치로 토조를 두들겨서 성형하였고 상대밀도 72%인 모형지반은 느린 지반가속도로 흔들어 주어 더 이상 모형지반의 침하가 일어나지 않을 때까지 진동을 통하여 성형하였다. 모형지반의 성형 후 가속도계와 변위계를 말뚝의 머리에, 진동대에는 가속도계를 각각 1개씩 설치하였다. 모형지반의 깊이는 35cm이다. Table 3은 본 시험에서 조성한 세 가지 종류의 지반별 상대밀도와 수중단위중량을 나타낸 것이다.

실제로 대부분의 말뚝은 긴 말뚝의 거동을 보이기 때문에 모형말뚝은 긴 말뚝 거동의 기준을 만족하도록 하였다. 즉, 최대깊이계수(maximum depth factor),  $Z_{\max}$  가 식(5)와 같이 되도록 말뚝의 길이를 결정하였다(Prakash, S and Sharma, H. D.(1990)).

$$Z_{\max} = \frac{L}{\sqrt[5]{EI/n_h}} \geq 4 \quad (5)$$

여기서,  $L$ 은 말뚝의 관입깊이,  $EI$ 은 말뚝의 강성 그리고  $n_h$ 는 수평지반반력계수이다.



■: Accelerometer, ●: Pore water pressure transducer, ▲: Potentiometer

Fig. 2. A configuration of a model ground

Table 1. Soil properties of Jumoonjin sand

$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_{60}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	$C_u$	USCS
2.65	1.04	0.63	0.49	0.31	1.58	SP

Table 2. Material properties of model piles

Pile No.	Length (mm)	Diameter (mm)	$EI$ (t · m <sup>2</sup> )
1	380	8.0	$5.51 \times 10^{-5}$
2	380	10.0	$1.41 \times 10^{-4}$
3	380	12.2	$2.76 \times 10^{-4}$

Table 3. Relative density and submerged unit weight of model grounds

Model ground	Relative Density (%)	Submerged unit Weight ( $t/m^3$ )
Loose	32	0.86
Medium	45	0.89
Dense	72	0.95

### 3.2 진동대 모형시험

우선 동적시험을 실시하기 전에 정적상태의 수평지반반력계수를 얻기 위하여 정적 수평말뚝재하 시험을 실시하였다. Fig. 3은 상대밀도 32%의 느슨한 지반에 설치된 모형말뚝에 대한 수평재하시험 결과 그리고 Fig. 4는 모형말뚝의 직경 8.0mm일 때 모형지반의 상대밀도에 대한 시험결과를 나타낸 것이다. 상대밀도 32%의 지반에서 말뚝에 비선형의 거동이 나타나고 있다.

사질토 지반에 액상화가 발생하는 동안 지반-말뚝 시스템의 동적 거동을 파악하기 위해 진동대 시험을 실시하였다. 시험은 모형 지반의 상대밀도 32%, 45%, 72%, 말뚝의 직경 8.0mm, 10.0mm 12.2mm, 지반가속도 0.1g, 0.17g, 0.22g, 그리고 진동에 대한 주기 3Hz에 대하여 총 32개 수행되었다. 시험을 실시하는 동안 토조 지반내의 과잉간극수압, 말뚝 두부에서의 가속도와 변위를 동시에 측정하여 간극수압의 증가에 대한 영향을 조사하였다.

Fig. 5는 상대밀도 32% 입력가속도 0.17g 말뚝직경 10mm의 모형지반에 대한 진동대 시험 결과인 입력가속도, 말뚝머리의 가속도, 말뚝머리의 변위와 간극수압증가에 대한 이력을 나타낸 것이다. Fig. 6은 상대밀도 32%, 지반가속도 0.17g시 말뚝직경 8.0mm, 10.0mm, 12.2mm에 대한 진동시험의 이력으로부터 간극수압비에 대한 수평변위를 정리하여 나타낸 것이다. 수평변위의 크기는 말뚝직경의 크기에 영향을 받고 있다. Fig. 7은 말뚝직경 8.0mm, 지반가속도 0.17g, 0.22g시 상대밀도 32%, 45%에 따른 간극수압비에 대한 수평변위를 나타낸 것이다. 가속도 0.17g와 0.22g에서 상대밀도 32%에 비해 45%에서의 수평변위가 감소하고 있다. 말뚝두부의 수평변위는 간극수압비가 0.2에 도달까지는 크게 발생하다가 간극수압비가 0.7과 0.9사이에서 최대수평변위가 발생하고 있다. 이는 수평변위가 액상화가 발생하기 시작하면서 크게 증폭되고 있다.

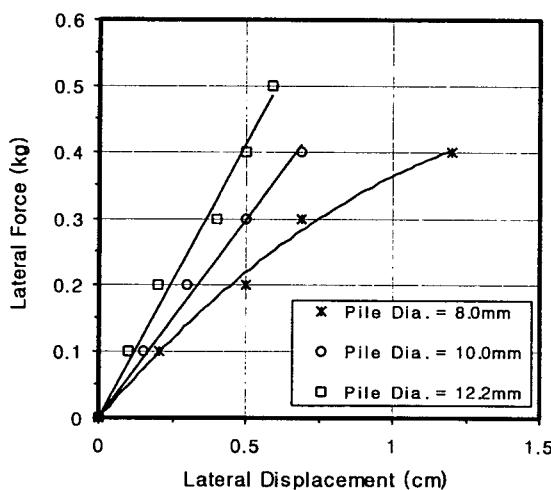


Fig. 3. Results of static pile load test(model ground Dr=32%)

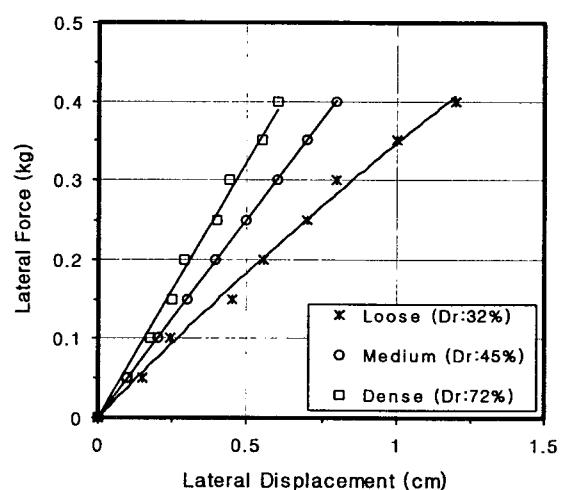


Fig. 4. Results of static pile load test(pile dia. =8.0mm)

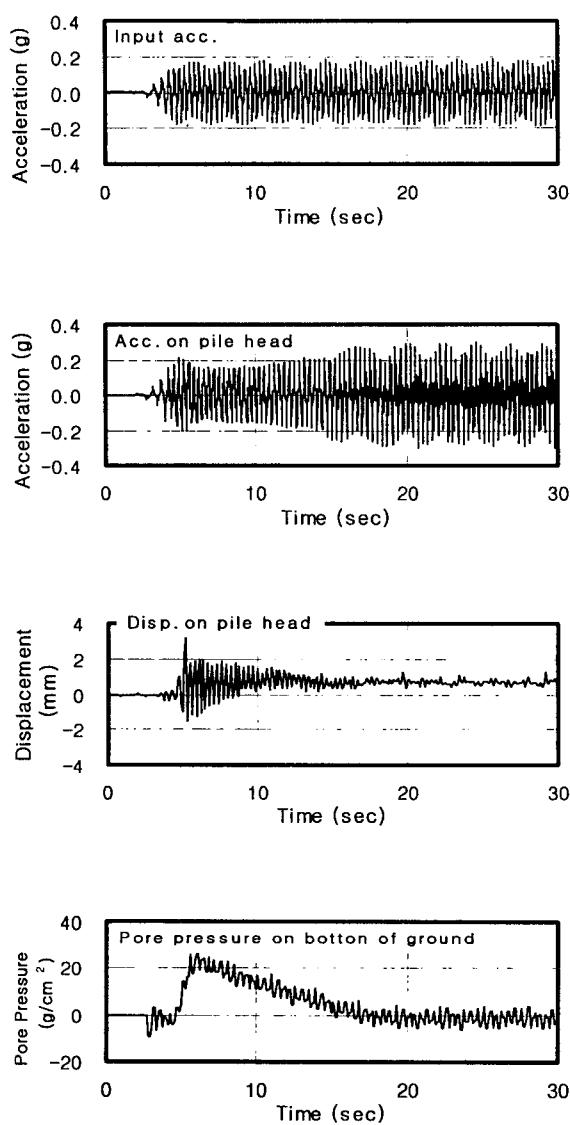


Fig. 5. Typical test results( $D_r=32\%$ , pile dia.=10.0mm, input acc.=0.17g)

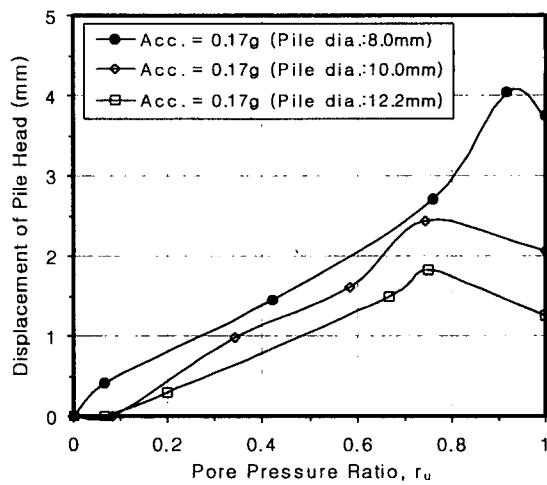


Fig. 6. Relationship between the pile displacement and the pore water pressure ratio(model ground  $D_r=32\%$ )

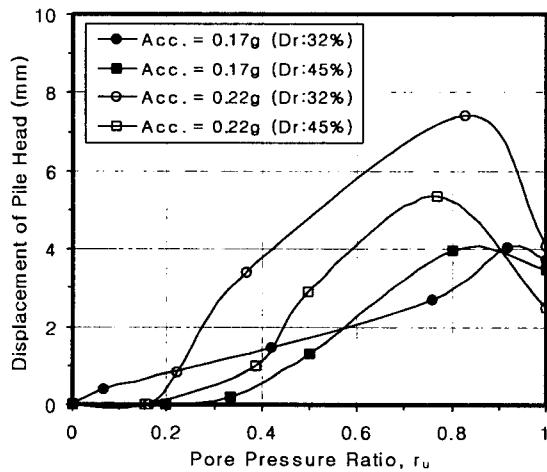


Fig. 7. Relationship between the pile displacement and the pore water pressure ratio(pile dia.=8.0mm)

#### 4. 지반반력해석법을 이용한 수평지반반력계수의 산정

##### 4.1 정적상태의 수평지반반력상수

액상화 발생 전 모형지반의 수평지반반력상수(static constant of horizontal subgrade reaction)  $n_h$ 는 모형말뚝에 대한 정적수평재하시험 결과인 하중-처짐 관계로부터 구할 수 있다. 본 역 해석에서는 지반반력해석법에 지반의 비선형 거동을  $p-y$ 곡선으로 고려한 F.D.M program “COM622” (Duncan, J. M and Wong, K. S.(1985))를 이용하였다. Fig. 8은 지반의 상대밀도와 말뚝직경에 따른 정적수평지반반력상수를 Fig. 3과 4로부터 해석한 결과이다. 수평지반반력상수는 말뚝직경과 지반의 상대밀도가

커짐에 따라 증가하고 있다. 수평하중을 받는 말뚝의 지반반력-처짐 곡선이 비선형(nonlinear)이기 때문에, 수평지반반력계수는 지반의 비선형적 변위에 영향을 받으므로 말뚝의 변위가 증가할수록 감소한다.

#### 4.2 간극수압증가에 따른 수평지반반력상수

사실상 작은 모형말뚝을 통하여 얻어진 결과를 말뚝의 동적해석을 통하여 수평지반반력계수를 얻기는 대단히 어려운 실정이므로 본 해석은 유사정적해석(Pseudo-Static Analysis)을 통하여 간극수압의 증가에 따른 수평지반반력상수를 구하였다. 이를 위해서 과잉간극수압의 증가에 따른 수평지반반력상수는 모형지반에 대한 진동대시험 결과를 정리한 간극수압에 따른 말뚝머리의 변위를 나타낸 Fig. 6과 7을 이용하였다. 유사정적해석 시 등가정적 수평하중(Equivalent-Static Lateral Load)은 진동대 시험 시 측정된 말뚝두부의 가속도에 말뚝두부에서의 질량을 곱한 값으로 결정하였다. 이 해석 역시 지반반력해석법에 지반의 비선형 거동을  $p-y$ 곡선으로 고려한 F.D.M program “COM622”를 이용하여 수평지반반력상수를 구하였다.

Fig. 9는 지반의 상대밀도 32%, 말뚝직경 8mm, 10mm, 12mm와 입력가속도 0.17g에 대한 수평지반반력상수를 나누낸 것이다. 간극수압비 0.5 이전의 비액상화 지반에서는 모형말뚝의 직경에 따라 수평지반반력상수의 감소가 다소 차이를 보이나 간극수압비가 0.5이상 증가하면 수평지반반력상수는 모형말뚝의 직경(또는 강성)에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 직경 8.0mm인 모형 말뚝에 대하여 상대밀도 32%와 45%와 입력 지반가속도 0.17g, 0.22g의 수평지반반력상수를 해석한 결과이다. 해석 결과 간극수압비가 0.6 이전에는 지반의 상대밀도에 따라 간극수압발생에 따른 수평지반반력상수는 큰 차이를 보이나 그 이후인 간극수압이 증가하면서 액상화가 시작되면 지반의 초기상대밀도와 관계없이 수평지반반력상수가 급격히 감소하고 있다. 또한 모형지반의 수평지반반력상수는 간극수압이 증가하면서 지반의 초기상대밀도와 입력 가속도의 거의 영향을 받지 않고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 11은 지반 가속도 0.17g와 상대밀도 32%시 모형 말뚝의 직경에 따른 수평지반계수비를 나타낸 것이다. 수평지반계수비,  $k_{hd}/k_h$ 는 간극수압에 따른 동적상태의 반력계수를 정적상태의 반력계수로 나눈 값으로 정의한다. 모형 말뚝의 직경 8.0mm에 비해 직경 10.0mm와 12.2mm에서의 간극수압비에 따른 수평지반계수비의 감소가 크며, 직경 10.0mm와 12.2mm는 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 말뚝 직경 8.0mm에서 입력 지반 가속도 0.17g, 0.22g와 상대밀도 32%, 45%시 간극수압비-수평지반계수비를 해석한 결과이다. 해석 결과 간극수압비에 따른 수평지반계수비는 동일한 말뚝 직경과 초기 상대밀도를 가진 지반의 경우 입력 지반가속도(0.17g, 0.22g)의 영향을 거의 받지 않고 있다. 그러나 지반의 상대밀도에 따라서는 다소 차이를 보이고 있다.

Yao 와 Kobayashi(1992)는 간극수압증가에 따른 수평지반반력계수,  $k_{hd}$ 를 간단하게 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$k_{hd} = \alpha k_h \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 감소계수( $= \sqrt{\sigma'/\sigma_0'}$ ),  $\sigma'$ 는 감소되는 지반의 유효수직응력이며,  $\sigma_0'$ 는 초기유효응력이다. Fig. 13은 모든 모형시험의 해석결과와 식(6)의 수평지반계수비를 나타낸 것이다. 모형시험 결

과의 수평지반계수비에 대한 감소계수는 간극수압비가 0.4이내에서는 식 (6)과 대체로 비슷하나, 간극수압비가 0.4보다 증가할 경우에 해석결과의 감소계수는 급격히 감소되고 있다. 이는 모형지반이 scale effect로 인하여 초기 액상화 현상이 간극수압비의 발생에 비하여 급격히 진행되었기 때문으로 생각된다. Scale effect를 고려할 때 모형시험의 해석결과 수평지반반력계수에 대한 감소계수는 대체로 1로 나타낼 수 있다. 또한 해석결과로부터 간극수압비가 0.9일 때 액상화된 모형 지반의 잔류수평지반반력계수  $k_{hr}$ 는 대략  $0.07 k_h$ 로 나타낼 수 있다. 이 결과는 Fujii et al.(1998)이 1995년 고베 지진으로 액상화된 지반에서 말뚝기초에 대한 수치해석 결과인 잔류수평지반반력계수  $k_{hr} = 0.05 k_h$ 와 유사하게 나타났다.

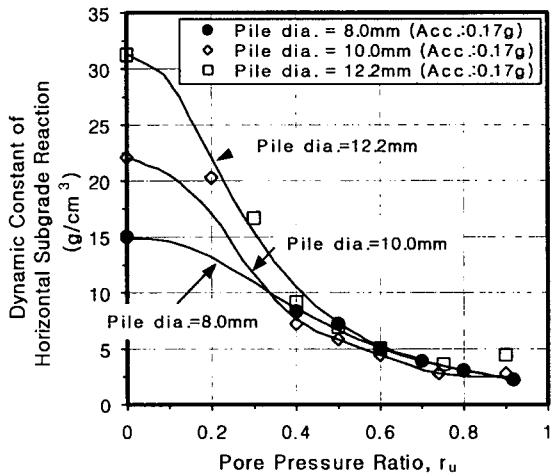


Fig. 9. Dynamic constant of horizontal subgrade reaction( $D_r=32\%$ , pile dia.=8.0mm, 10.0mm, 12.2mm, input acc.=0.17g)

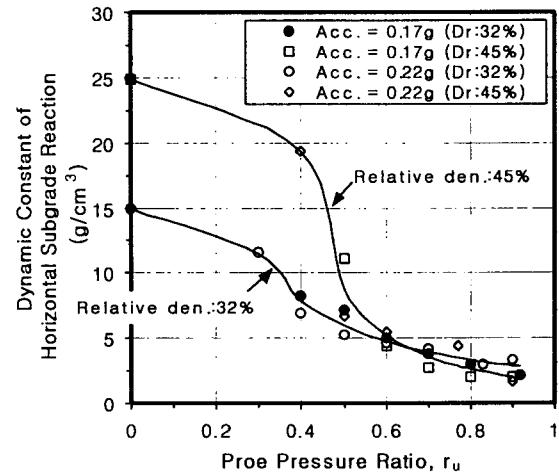


Fig. 10. Dynamic constant of horizontal subgrade reaction( $D_r=32\%, 45\%$ , pile dia.=8.0mm, input acc.=0.17g, 0.22g)

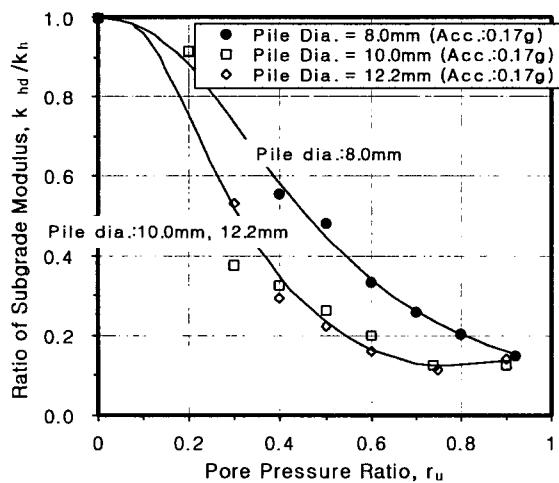


Fig. 11. Ratio of subgrade modulus( $D_r=32\%$ , input acc.=0.17g, pile dia.=8.0mm, 10.0mm, 12.2mm)

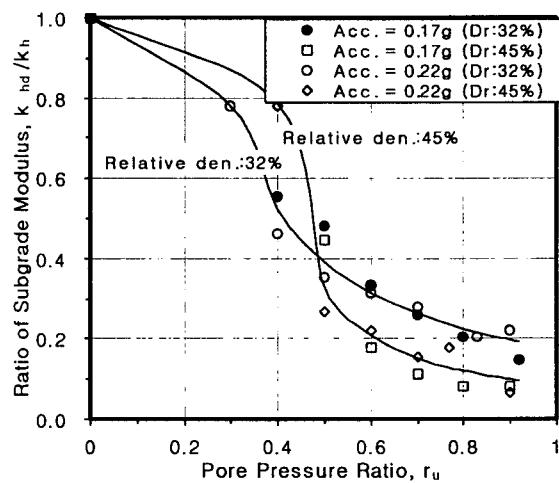


Fig. 12. Ratio of subgrade modulus( $D_r=32\%, 45\%$ , input acc.=0.17g, 0.22g, pile dia.=8.0mm)

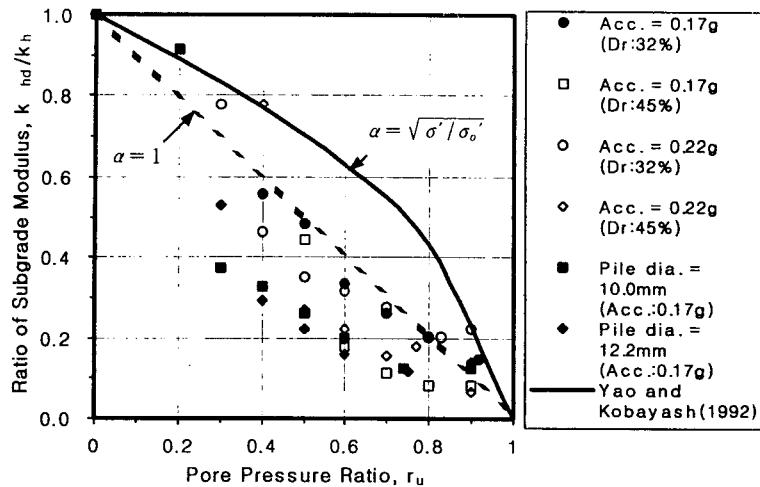


Fig. 13. Reduction factor of subgrade modulus

## 5. 결론

본 연구에서는 지진 발생 시 액상화되는 사질토 지반의 과잉간극수압 발생에 따른 수평지반반력계수의 변화를 역 해석하였다. 이를 위해 모형말뚝의 수평재하시험과 진동대 시험 결과를 이용하였다. 본 연구의 범위 내에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 액상화되는 지반에서 수평지반반력계수는 가속도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 동일한 가속도와 상대밀도에서 수평지반반력계수는 간극수압비 0.5 이전인 비 액상화 지반에서 말뚝 강성에 따라 변화를 보이며, 간극수압비 0.5 이후에서는 말뚝 강성에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.
- 동일한 직경의 말뚝의 경우 수평지반반력계수는 간극수압비 0.6 이전에서 상대밀도에 따라 변화를 보였으나 초기 액상화가 발생되는 간극수압비 0.6 이후에서는 상대밀도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.
- 액상화된 지반에서 간극수압비에 따른 수평지반계수비는 동일한 말뚝 직경과 상대밀도에서 가속도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.
- 간극수압증가에 따른 수평지반 반력에 대한 감소계수는 대략 1 정도로 나타났다.
- 액상화된 지반의 잔류수평지반반력계수는 정적상태의 수평지반반력계수의 약 0.07로 나타났다.

## 참고문헌

- Duncan, J. M and Wong, K. S.(1985), "A Computer Program for Analysis of Laterally Loaded Piles", Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil Engineering.
- Fujii, S., Cubrinovsk, M., Tokimatsu, K. and Hayashi, T.(1998), "Analyses of Damaged and Undamaged Pile Foundations in Liquefied Soils during The 1995 Kobe Earthquake", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Vol.2, ASCE, pp.1187-1200.
- Prakash, S and Sharma, H. D.(1990), "Pile Foundations in Engineering Practice", John Wiley & Sons. Inc.
- Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D.(1974), "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," Proc. Offshore Technology Conference, Houston Texas No. OTC 2080, pp. 473-483.
- Reese, L. C. and Matlock, H.(1956), "Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportionally with Depth," Proc. 8th Texas Conference of SMFE, Austin Texas, pp. 1-4.
- Terzaghi, K.(1955), "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", Geotechnique, Vol.5, No.4, pp.297-326.
- Yao, S. and Kobayashi, K.(1992), "Soil-Pile-Superstructure System in Liquefaction", Geotechnical Special Publication No.34, ASCE, pp.241-256.