

## Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of pile subjected to flow of liquefied soils

<sup>1)</sup>, Jaek Hwang,

<sup>1)</sup>, ChangYeob Kim

<sup>2)</sup>, ChoongKi Chung,

<sup>3)</sup>, MyoungMo Kim

<sup>1)</sup> , Graduate Student, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

<sup>2)</sup> , Associate Professor, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

<sup>3)</sup> , Professor, School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

**SYNOPSIS** : The horizontal movement of sloping ground due to flow liquefaction has caused many pile foundations to fail, especially those in ports and harbor structures. In this study, a virtual case is assumed in which flow liquefaction is induced by earthquake loads in a fully saturated infinite sand slope with a single pile installation. Under the assumption that the movement of liquefied ground is viscous fluid flow, the influence of ground movement due to flow liquefaction on the pile behavior was analyzed. Since the liquefied soil is assumed as a viscous fluid, its viscosity must be evaluated, and the viscosity was estimated by the dropping ball method and the pulling bar method. Finally, the influence of the flow of liquefied soil on a single pile installed in an infinite slope was analyzed by a numerical method.

**Key words** : flow liquefaction, viscosity of liquefied soil, numerical analysis, infinite slope, pile

### 1. 서 론

건물과 교량, 그리고 항만구조물의 말뚝기초는 지반의 횡방향 이동에 의해 파괴된 사례가 많다. 지반의 횡방향 이동은 여러 가지 상황, 예를 들어 지진시에 액상화된 지반, 하중을 받는 성토체 하부에 존재하는 연약 점성토층, 그리고 불안정한 사면 등에서 일어날 수 있다. 지반의 횡방향 이동이 말뚝에 미치는 영향은 경험적 방법, 지반반력모델에 근거한 방법, 선형탄성이론에 근거한 방법, 극한평형 해석법, 점성유체흐름이론에 근거한 방법, 그리고 유한요소법을 근거로 한 수치해석방법 등 다양한 해석방법을 통해서 분석되어 왔다. 본 연구에서는 단말뚝이 설치된 완전 포화된 사질토 무한사면에서 지진하중에 의해 흐름액상화가 발생하는 상황을 가정하고, 액상화된 지반의 이동을 점성유체의 흐름으로 가정하여, 흐름액상화에 의해 유발되는 지반의 횡방향 이동이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 "공낙하시험방법 (dropping ball method)" 과 "봉끌기시험방법 (pulling bar method)"을 이용하여 액상화된 모래지반의 점성계수를 측정하였고, 수치해석방법을 통하여 액상화된 지반의 횡방향 이동이 무한사

면에 설치된 단말쪽에 미치는 영향을 알아보았다.

## 2. 액상화된 흙의 점성계수 측정

### 2.1 공낙하시험 (dropping ball method)

본 연구에서 사용한 모래는 세립질 성분이 적고, 입도분포가 균등한 주문진표준사이며, 주문진표준사의 입도 특성 및 물리적 특성은 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 주문진표준사의 입도 및 물리적 특성

유효입자크기, $D_{10}$	평균입자크기, $D_{50}$	균등계수, $C_u$	비중	최대건조밀도	최소건조밀도
0.37 mm	0.60 mm	1.77	2.64	1.66 Mg/m <sup>3</sup>	1.33 Mg/m <sup>3</sup>

그림 1은 액상화된 흙의 점성계수를 측정하기 위해 이용된 공낙하시험 장치의 개괄도이다. 본 실험에서는 Miyajima 등(1995)에 의해 수행된 실험방법을 수정하여 그림 1과 같이 해머를 이용하여 토조하부에 충격을 주어 모형지반 전 깊이에서 액상화를 발생시켰다. 모래지반이 완전히 액상화되면 모형지반의 지표면에 놓여있던 원형 공이 자중에 의해 액상화된 지반속으로 낙하하게 된다. 이 때, 식 (1)과 같이 원형 공에 작용하는 항력과 부력, 그리고 공의 자중에 대한 평형식으로부터 액상화된 지반의 점성계수를 산정할 수 있다.

$$\mu = \frac{4\pi a^3(\rho' - \rho)g}{18\pi V} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 공의 반지름,  $\rho$ 는 점성유체의 질량밀도,  $\rho'$ 는 공의 질량밀도,  $g$ 는 중력가속도, 그리고  $V$ 는 공의 낙하속도이다.

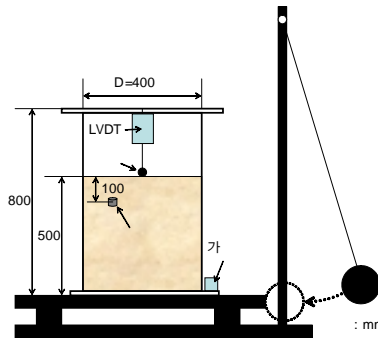


그림 1. 공낙하시험을 위한 시험장치 및 개괄도

그림 2는 충격하중에 의한 입력가속도의 시간이력을 보여주며, 이 때 입력가속도의 최대크기는 약 160g 이다. 그림 3은 초기상대밀도,  $Dr = 34\%$  일 때 공이 낙하할 때의 변위와 10cm 깊이에서의 과잉간극수압의 응답을 보여준다. 그림 3으로부터 공은 과잉간극수압이 최대값을 유지되는 동안에서만 변위를 일으키며, 본 연구에서는 과잉간극수압이 발생하는 시점부터 과잉간극수압이 소산되기 시작하는 시점사이의 시간을 “액상화 지속시간”으로 정의하였다. 공은 일정한 속도로 떨어지지 않기 때문에 액상화 지속시간 동안의 공의 평균낙하속도를 공낙하속도로 사용하였다.

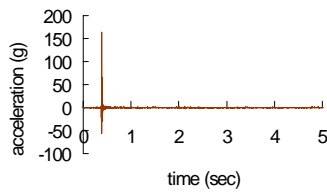


그림 2. 입력가속도 시간이력

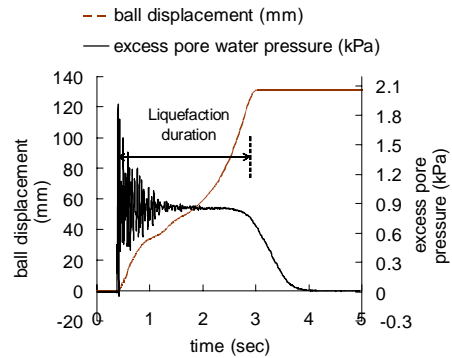


그림 3. 공의 변위와 과잉간극수압의 응답(상대밀도,  $Dr=34\%$ )

그림 4는 모형지반의 상대밀도에 따른 공낙하속도와 액상화 지속시간의 변화를 보여주며, 공낙하속도와 액상화지속시간은 지반의 초기상대밀도가 증가할 수록 감소하는 경향을 보인다. 그림 5는 지반의 초기상대밀도와 액상화된 주문진표준사의 점성계수의 관계를 보여준다. 초기상대밀도가 증가할수록 액상화된 지반의 점성계수 또한 증가하는 경향을 보임을 알 수 있으며 이러한 경향은 Vargas & Towhata (1995) 의 결과와 일치한다. 액상화된 주문진 표준사의 점성계수는 초기 상대밀도가 34 ~ 64% 일 때 6.3 ~ 11.6 kPa-sec 로 Hamada 등 (1993) 과 Zhang 등 (1994)이 제안한 값과 유사하지만 Miyajima 등 (1995)이 제안한 0.08 ~ 0.56 kPa-sec 과 Vargas 등 (1995)이 제안한 0.1 ~ 1.5 kPa-sec 와 비교할 때 작게는 4 배에서 크게는 150 배까지 큰 값이다.

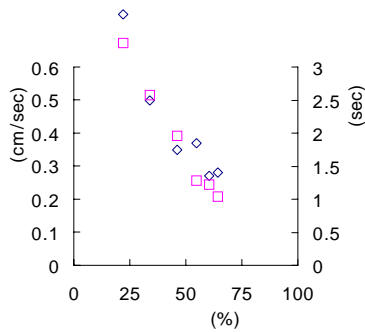


그림 4. 상대밀도와 공속도/액상화지속시간과의 관계

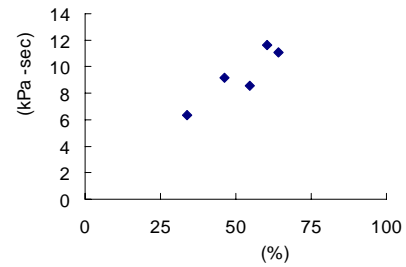


그림 5. 점성계수와 상대밀도와의 관계

## 2.2 봉끌기시험 (pulling bar method)

간극수압비와 흐름속도가 흙의 점성계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Miyajima 등 (1995) 과 Vargas & Towhata (1995) 에 의해 수행되었던 시험과 유사한 봉끌기시험을 수행하였다. 그림 6은 봉끌기시험을 위한 시험장치를 개괄적으로 보여준다. 모래지반 내의 과잉간극수압은 모래지반의 바닥에서 지표면으로 물의 흐름을 발생시켜서 증가시켰으며, 수조의 높이를 변화시킴으로써 흐르는 물의 양을 조절하여 과잉간극수압을 제어하였다. 본 시험에서 사용된 원형봉은 지름이 10mm 이고 길이가 150mm 이며, 이 원형봉은 지반깊이 175mm 에서 모터에 의해 일정한 속도로 수평하게 끌여지며, 봉을 끄는 속도를 2.03cm/s, 5.16cm/s, 그리고 8.61cm/s 으로 변화시키면서 시험을 수행하였다.

모형지반은 상대밀도 44% 로 조성하였으며, 간극수압비,  $r_u$  를 0.51, 0.69, 0.80, 0.93, 그리고 0.99로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 모터를 이용하여 일정한 속도로 원형봉을 끌 때 로드셀을 이용하여 원형봉에 작용하는 항력,  $F_D$  을 측정하였고, 지반내의 과잉간극수압은 깊이 125 mm 와 225 mm 에 설치한 간극수압계를 이용하여 측정하였다. 원형봉에 작용하는 항력을 측정하여 Newton의 2차 저항법칙(Newton's quadratic resistance law)과 레이놀즈수가 작은 층류에 대해 1911년

Lamb이 제안한 레이놀즈수,  $Re$  와 항력계수,  $C_D$  의 관계식으로부터 유도된 아래 식 (2)를 이용하여 액상화된 모래지반의 점성계수를 계산하였다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2 = \frac{4\pi\mu VL}{2.002226 - \ln Re} \quad (2)$$

여기서 항력계수,  $C_D$  는 레이놀즈수,  $Re (= \rho VD/\mu)$  의 함수이며,  $A$  는 붕이 움직이는 방향에 수직인 평면에 투영되는 붕의 저항영역의 넓이이고,  $\rho$  는 유체의 질량밀도,  $V$  는 붕을 끄는 속도,  $\mu$  는 유체의 점성계수, 그리고  $D$  와  $L$  은 각각 원형붕의 지름과 길이이다.

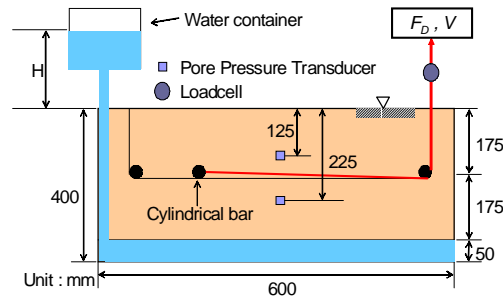


그림 6. 붕끌기시험의 개괄도

그림 7은 지반의 점성계수와 붕이 움직이는 속도와 관계를 보여주는데 식 (1)의 평형방정식에서도 예상할 수 있듯이 액상화된 지반의 점성계수는 붕의 속도가 증가할수록 감소하였다. 그림 8은 흙의 점성계수와 간극수압비의 관계를 보여준다. 흙의 점성계수는 간극수압비가 증가할수록 감소하였으며, 간극수압비가 0.99로 모형지반이 완전 액상화된 경우에 주문진표준사의 점성계수는 붕의 속도가 2.03 ~ 5.16 cm/sec 일 때 약 1.1 ~ 5.0 kPa-sec 이었다. 이러한 결과는 Hamada 등 (1992)이 구를 움직이면서 측정한 항력을 근거로 제안한 값과 유사하였다.

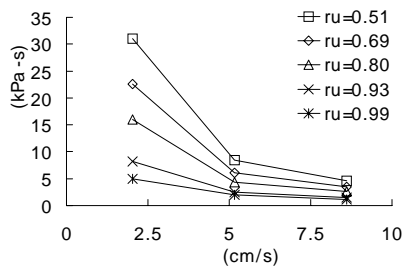


그림 7. 점성계수와 붕의 속도와의 관계

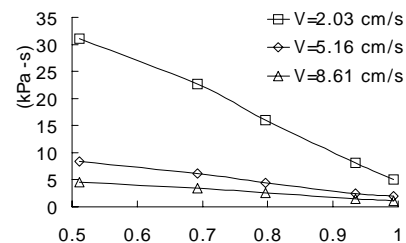


그림 8. 점성계수와 간극수압비의 관계

그림 9와 표 2에서 본 연구에서 구한 액상화된 주문진표준사의 점성계수를 다른 연구자들이 제안한 액상화된 흙의 점성계수와 비교하였다. 그림 9와 표 2에서 액상화된 모래지반의 점성계수는 모래종류와 산정방법에 따라 차이를 보였으며, Yen 등 (1968)이 제안한 2600 kPa-sec 은 액상화되기 전의 값으로 판명났기 때문에 논의에서 제외시켰다. 본 연구의 공낙하시험 결과는 Hamada 등 (1993) 과 Zhang 등 (1994) 이 제안한 값과 비슷하였고, 붕끌기시험 결과는 Hamada 등 (1992) 이 제안한 값과 비슷하였지만, 그 이외의 다른 연구자들 (Towhata 등, 1992, Kawakami 등, 1994, Miyajima 등, 1995, Vargas 등, 1995) 이 제안한 값과 비교할 때 큰 차이를 보였다. 액상화된 흙의 점성계수를 산정하기 위하여 Hamada 등 (1992, 1993), Miyajima 등 (1995), Vargas 등 (1995), 그리고 본 연구에서 사용한 원형 붕이나 구에 작용하는 항력을 이용하는 방법이 주로 사용되었으며, 이들 시험방법에 따른 경향성을 찾을 수

없었다.

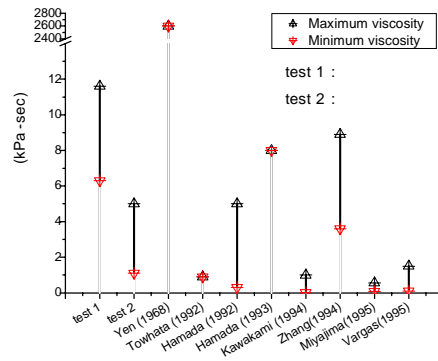


그림 9. 실험결과와 기준에 제안된 값과 비교

표 2. 기준에 제안된 액상화된 흙의 점성계수

연구자	모래종류	산정방법	제안한 점성계수(kPa-sec)
Hwang 등 (본 연구)	주문진표준사 ( $Dr = 34 \sim 64 \%$ )	공낙하시험법	6.3 ~ 11.6
Hwang 등 (본 연구)	주문진표준사 ( $Dr = 44 \%$ )	봉끌기시험법	1.1 ~ 5.0
Yen 등 (1968)	Nigata 모래	모래지반을 액상화시키는데 필요한 반복응력비	2600
Towhata 등 (1992)	Toyoura 모래 ( $Dr = 38 \%$ )	액상화된 사면의 횡방향 변형과정의 해석	0.9
Hamada 등 (1992)	모래	구를 움직이면서 계측된 항력	0.3 ~ 5.0
Hamada 등 (1993)	모래	파이프, 말뚝 그리고 구에 작용하는 항력	8.0
Kawakami 등 (1994)	Toyoura 모래	회전 점도계를 이용한 실험	0.003 ~ 0.04
Kawakami 등 (1994)	Toyoura 모래	진동대 시험	0.02 ~ 1
Zhang 등 (1994)	Fujian 모래	비배수 삼축실험	3.6 ~ 8.9
Miyajima 등 (1995)	모래	구를 이용한 진동대 모형실험	0.08 ~ 0.56
Vargas 등 (1995)	Toyoura 모래 ( $Dr = -30 \sim 30\%$ )	파이프에 작용하는 항력	0.2 ~ 1.5

### 3. 액상화된 지반의 흐름을 받는 단말뚝의 거동 분석

무한사면에 설치된 단말뚝 주위에 액상화된 지반의 흐름이 발생할 때 그 거동을 분석하기 위하여 범용유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 점성유체 흐름해석을 수행하였다. 그림 10은 완전히 포화된 무한사면에 단말뚝이 설치된 해석단면을 보여준다. 표 3은 해석단면의 지반조건으로, 지반흐름이 발생하는 깊이는 10 m, 사면의 경사각은 10, 15, 20, 25, 그리고 30° 로 변화시켰으며, 액상화된 흙의 점성계수는 본 연구에서 수행한 공낙하시험과 봉끌기시험 결과 중 최소값인 1.1 kPa-sec 와 최대값인 11.6 kPa-sec 이다. 표 4는 해석에 사용된 강관말뚝의 재원이며, 말뚝선단의 구속조건은 고정조건이다.

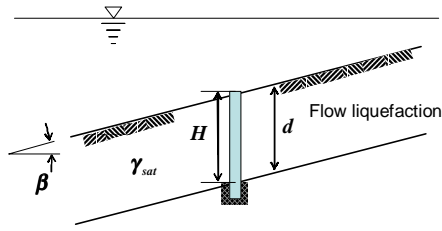


그림 10. 해석단면

표 3. 해석단면의 지반조건

상대밀도 (%)	간극비	습윤단위중량, $\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	사면토층두께, $d$ (m)	사면경사각, $\beta$ (도)	점성계수, $\mu$ (kPa-sec)
34	0.85	18.69	10	10 / 15 / 20 / 25 / 30	1.1 / 11.6

표 4. 강관말뚝의 재원

길이, $H$ (m)	직경, $D$ (mm)	두께, $t$ (mm)	탄성계수, $E$ (GPa)	포아송비, $\nu$
10	1000	10	200	0.29

그림 11과 같이 경사판 위를 흐르는 정상상태의 점성유체는 식 (3)과 같은 속도분포를 갖으며, 이러한 속도분포를 이용하여 액상화된 지반의 흐름 속도를 산정하였다.

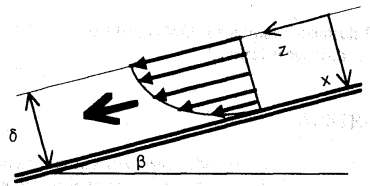


그림 11. 경사진 판위를 흐르는 점성유체의 속도분포

$$V_g(x) = \frac{\rho g \delta^2 \sin \beta}{2\mu} \left( 1 - \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right) \quad (3)$$

그림 12는 식 (3)으로부터 계산된 지표면에서의 흐름속도 (즉, 최대속도) 를 보여준다.

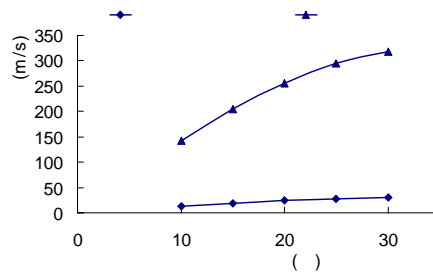


그림 12. 지표면 흐름속도( $d = 10m$ , 최대점성계수 = 11.6 kPa-sec, 최소점성계수 = 1.1 kPa-sec)

그림 13은 액상화된 지반의 흐름에 의해 말뚝에 발생되는 휨모멘트와 전단력을 보여준다. 그림 13에서 범례 max-20 은 점성계수가 최대값인 11.6 kPa-sec 이고, 사면의 경사각이 20° 인 경우를 의미한다.

휨모멘트와 전단력은 말뚝선단으로 갈수록 증가하며, 지반의 점성계수가 최소값 (1.1 kPa-sec) 인 경우 최대값 (11.6 kPa-sec) 인 경우보다 더 큰 부재력이 발생하였다. 따라서 그림 5와 그림 13의 결과로부터 상대밀도가 작은 느슨한 모래지반인 경우 상대밀도가 큰 조밀한 모래지반인 경우와 비교할 때 액상화된 지반의 점성계수는 더 작은 값을 가지며, 말뚝에 더 큰 전단력과 휨모멘트를 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

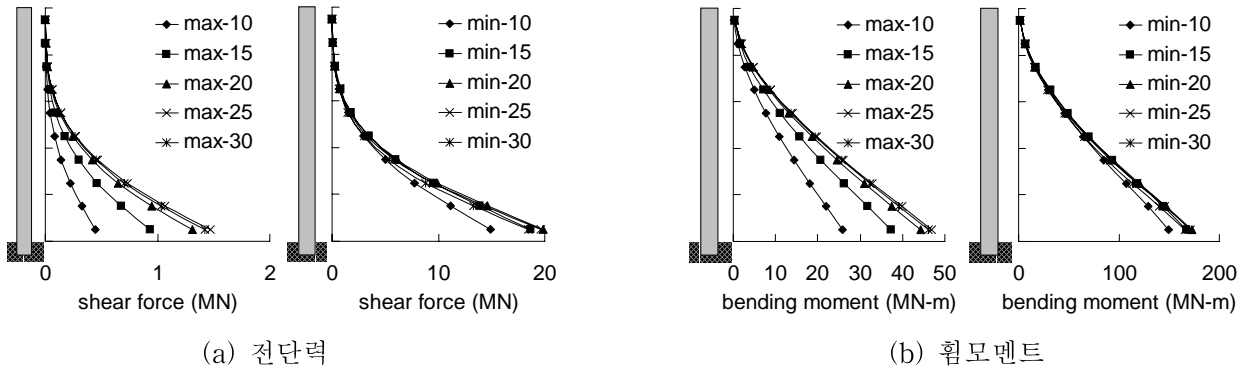


그림 13. 액상화된 지반의 흐름에 의해 말뚝에 발생하는 부재력

액상화된 지반이 말뚝 주위를 흐를 때 이에 의해 말뚝에 가해지는 하중을 정량적으로 평가하기 위하여 액상화된 지반의 흐름에 의해 말뚝에 발생하는 최대모멘트와 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중에 의해 말뚝에 발생하는 최대모멘트를 비교하였다. 말뚝해석전용프로그램인 LPILE을 이용하여 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중에 의해 말뚝에 발생하는 최대모멘트를 계산하였다. LPILE의 해석조건은 그림 18의 점성유체흐름해석 조건과 비슷하며, 단지 지반이 수평이고, 말뚝에 작용하는 하중이 액상화된 지반의 흐름이 아니라 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중이라는 조건만 다르다. 수평모래지반을 고려하기 위하여 API (American Petroleum Institute) 에 의해 제안된 p-y 곡선을 이용하였다.

그림 14는 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중에 의해 말뚝에 발생하는 최대휨모멘트와 액상화된 지반의 흐름에 의해 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트를 보여준다. 본 해석에 사용된 강관말뚝의 항복응력을 일반적인 강관말뚝의 항복응력인 200 MPa 이라고 가정할 때 본 해석말뚝은 약 0.65 MN 크기의 횡방향하중이 말뚝머리에 작용할 때 항복하게 되며, 이 때의 횡방향 하중을 횡방향 항복하중이라고 정의한다. 그림 14에서 알 수 있듯이 액상화된 흙의 흐름에 의해 말뚝에 가해지는 하중 크기는 점성계수가 11.6 kPa-sec 일 때 사면경사각에 따라 횡방향 항복하중의 7 배에서 크기는 14 배 이었으며, 점성계수가 1.1 kPa-sec 일 때에는 비교할 수도 없을 만큼 큰 값이다.

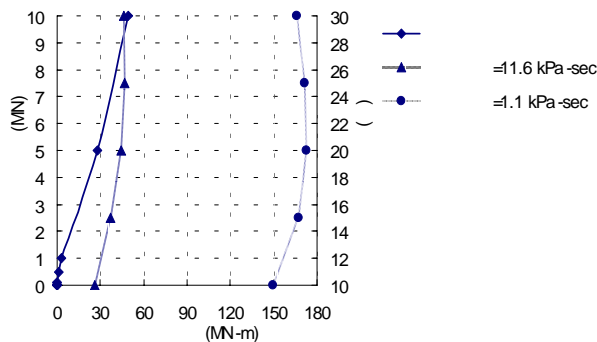


그림 14. 액상화된 지반의 흐름과 횡방향하중에 의해 발생하는 최대 휨모멘트 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 액상화된 모래지반의 점성 유체 특성과 그 흐름이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 살펴 보았다. 먼저 공낙하시험방법과 붓글기시험방법을 이용해 액상화된 주문진표준사의 점성계수를 직접 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

액상화된 모래지반의 점성계수는 초기상대밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 Vargas & Towhata 의 결과 (1995) 와 일치하였다. 또한 속도가 증가할수록 액상화된 모래지반의 점성계수는 감소하는 경향을 보였다.

액상화된 주문진 표준사의 점성계수는 공낙하시험의 경우 초기 상대밀도가 34 ~ 64% 일 때 6.3 ~ 11.6 kPa-sec 로 Hamada 등 (1993) 과 Zhang 등 (1994) 이 제안한 값과 비슷하였고, 붓글기시험의 경우 원형봉의 속도가 2.03 ~ 5.16 cm/sec 일 때 약 1.1 ~ 5.0 kPa-sec 로 Hamada 등 (1992) 이 제안한 값과 유사하였다. 하지만 위 결과는 다른 연구자들 (Towhata 등, 1992, Kawakami 등, 1994, Miyajima 등, 1995, Vargas 등, 1995) 이 제안한 값과 비교할 때 큰 차이를 보였다.

액상화된 지반의 흐름이 말뚝에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수치해석을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

상대밀도가 작은 느슨한 모래지반인 경우 상대밀도가 큰 조밀한 모래지반인 경우와 비교할 때 액상화된 지반의 점성계수는 더 작은 값을 가지며, 말뚝에 더 큰 전단력과 휨모멘트를 발생시켰다.

액상화된 지반의 흐름에 의해 말뚝에 가해지는 하중 크기는 점성계수가 11.6 kPa-sec 일 때 사면경사 각에 따라 말뚝을 항복시킬 수 있는 말뚝머리에 작용하는 횡방향 하중의 7 배에서 크게는 14 배 이었으며, 점성계수가 1.1 kPa-sec 일 때에는 비교할 수도 없을 만큼 큰 값으로, 흐름액상화에 의한 지반의 횡방향 이동이 말뚝의 안정성에 미치는 영향은 치명적이라 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] W. Vargas, I. Towhata "Measurement of drag exerted by liquefied sand on buried pipe", in Proc. 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, vol. 2, pp. 975-980, 1995.
- [2] M. Miyajima, M. Kitaura, T. Koike, and M Hasegawa "Experimental study on characteristics of liquefied ground flow", in Proc. 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, vol. 2, pp. 969-975, 1995.
- [3] J. C. Horne, "Effects of liquefaction-induced lateral spreading on pile foundations", Ph.D. dissertation, Civil Engineering, University of Washington. 1996.
- [4] D. Chaudhuri, "Liquefaction and lateral soil movement effects on piles", Ph.D. dissertation, Civil Engineering, Cornell University. 1998.
- [5] R. L. Street, G. Z. Watters, and J. K. Vennard, Elementary Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, 1996.
- [6] S. L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, pp. 348-422, 1996.
- [7] S. Hadush, A. Yashima, R. Uzuoka, "Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis", Computers and Geotechnics, vol 27, pp 199-224, 2000.
- [8] S. Hadush, A. Yashima, R. Uzuoka, S. Moriguchi, K. Sawada "Liquefaction induced lateral spread analysis using the CIP method", Computers and Geotechnics, vol 28, pp 549-574, 2001.
- [9] ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- [10] LPILE PLUS 4.0 for Windows User's Manual, ENSOFT, Inc., 2000.