

## 사질지반에서 액상화 저항에 대한 선행전단응력의 영향 Preshear Influence for Liquefaction Resistance in Sand

윤여원<sup>1)</sup>, Yeo-Won Yoon, 김한범<sup>2)</sup>, Han-Bum Kim, 김방식<sup>3)</sup>, Bang-Sik Kim

<sup>1)</sup> 인하대학교 환경토목공학부 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Inha University

<sup>2)</sup> 도담엔지니어링, Dodam Engineering

<sup>3)</sup> 인하대학교 토목공학과 박사과정, 충주산업대학교 교수(Graduate School, Inha University)

**SYNOPSIS** : Cyclic simple shear tests were performed to find out the effect of preshear on dynamic strength of the sandy soil. Tests were performed for the specimens with 40% and 60% of relative density, under three different effective vertical stress of 50, 100 and 200kPa. For 50 and 100kPa, preshear ratios 0.00, 0.08, 0.12 and 0.16 were given, respectively. For low and high relative densities, two different results are shown in dynamic tests. Under the dense conditions, the maximum shear stress ratio ( $\tau_{Max}/\sigma'_{vo}$ ) and the cyclic shear stress ratio ( $\tau_{cyc}/\sigma'_{vo}$ ) causing a certain shear strain increase with augmenting preshear ratio ( $\alpha$ ). However, the maximum shear stress ratio and the cyclic shear stress ratio increase or decrease with increasing preshear ratio under the loose conditions. Correction factor ( $K_\alpha$ ) for preshear increases at an early stage and then decreases with increasing preshear ratio at loose condition and increase with increasing preshear ratio at dense condition. Correction factor ( $K_{\alpha, Max}$ ) for preshear increases with the increasing preshear ratio irrespective of relative density, and the value of has same behavior as  $K_\alpha$ .

**Key words** : Preshear stress, Liquefaction, Cyclic stress ratio, Cyclic simple shear test

### 1. 서론

그 동안의 액상화에 대한 연구는 대부분이 전단응력을 받지 않는 상태에서의 반복하중에 대한 액상화 강도에 관한 연구가 대부분이다. 그러나 지반조건은 장소에 따라 평평한 지반면도 있을 뿐만 아니라 사면이나 댐, 구조물 등에서 경사면 혹은 수평지반면이라 할지라도 지점에 따라 전단응력을 받고 있는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분할 수 있다(Fig. 1). 지층이 경사진 경우 지층의 자중으로 인하여 구속압력을 받을 뿐만 아니라 정적인 경사하중(선행전단응력) 또한 동시에 받고 있다. 지진하중을 받게되면 이러한 곳은 선행전단응력과 같은 방향으로 대규모의 변형이 생긴다. 이러한 선행전단응력을 받고 있는 경우에 대한 액상화 거동을 평가하기 위해서는 선행전단응력을 받고 있는 있는 구속된 사질토에서 반복하중으로 인한 강도와 변형에 대한 연구가 필요하다. 선행전단응력이 액상화 저항에 미치는 영향에 대한 연구는 그 동안 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다 (Lee와 Seed, 1967; Yoshimi와 Oh-oka, 1975; Vaid와 Finn, 1979; Vaid와 Chern, 1983; 임철오, 2000).

일반적으로 등방과 이방상태의 사질토에 대한 액상화 연구는 비배수 전단시험이 용이한 삼축시험에 의한 연구가 주류를 이루며 삼축시험에 의한 반복재하는 지반의 한 요소가 받는 반복전단조건과 다를 뿐만 아니라 지반이 받고 있는 정지토압상태를 모사하는데 어려움이 따른다. NGI 형 반복단순전단시험기는 보강멤브레인(reinforced membrane)으로 시료를 구속하고 정적단순전단시험과 반복단순전단시험을  $K_0$  압밀조건에서 시행할 수 있다. 본 연구에서는 NGI 형 반복단순전단시험기를 이용하여 상대밀도와 압밀유효 구속압력의 크기에 대하여 선행전단

응력이 액상화에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 선행전단응력에 대한 보정

선행전단응력비( $\alpha$ )는 수평면에 작용하는 선행전단응력과 유효수직응력비,  $\tau_{ps}/\sigma'_{vo}$ 로 정의 된다. 상재하중이 없는 수평지반의 경우 선행전단응력이 존재하지 않고 따라서 선행전단응력비는 0이 된다. 그러나 사면, 댐, 구조물 근처의 경우 수평면에 선행전단응력이 존재하게 되고 액상화 저항에 영향을 미치게 된다. 즉 선행전단응력이 작용하게 되면 초기상태는 유동액상화면에 그 만큼 가까이 접근해 있으므로 액상화 저항은 감소된다.

선행전단응력비,  $\alpha > 0$ 인 시료가 일정전단변형률이 발생하는데 필요한 반복응력비를 선행전단응력비  $\alpha=0$ 이고 일정전단변형률이 발생하는데 필요한 반복응력비에 대한 비를 보정계수,  $K_\alpha$ , 로 정의하였다.

$$K_\alpha = \frac{\text{Liquefaction resistance CSR}(\tau_{cyc}/\sigma'_{vo})(\alpha > 0)}{\text{Liquefaction resistance CSR}(\tau_{cyc}/\sigma'_{vo})(\alpha = 0)} \quad (1)$$

여기서,  $\tau_{cyc}$  : 반복전단응력  
 $\tau_{ps}$  : 선행전단응력  
 $\sigma'_{vo}$  : 유효수직응력  
 $\alpha$  : 선행전단응력비

선행전단응력비가  $\alpha$ 일때 일정전단변형률이 발생하는데 필요한 최대전단응력비를 선행전단응력비  $\alpha=0$ 이고 일정전단변형률이 발생하는데 필요한 최대전단응력비에 대한 비를 보정계수,  $K_{\alpha, Max}$ , 라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$K_{\alpha, Max} = \frac{\text{Liquefaction resistance CSR}(\tau_{Max}/\sigma'_{vo})(\alpha > 0)}{\text{Liquefaction resistance CSR}(\tau_{Max}/\sigma'_{vo})(\alpha = 0)} \quad (2)$$

여기서,  $\tau_{Max} (= \tau_{ps} + \tau_{cyc})$ : 최대전단응력,

선행전단응력이 액상화 저항에 미치는 영향에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행 되었다. Lee와 Seed(1969)는 반복삼축시험을 행한 결과 선행전단응력이 증가하면 저항은 증가한다고 하였으며, Yoshimi와 Oh-oka(1975)는 링비틀시험을 통해 선행전단응력이 증가하면 액상화 저항은 감소하거나 거의 변화가 없다고 하였다. Vaid와 Finn(1979)은 선행전단응력이 증가하면 액상화 저항이 증가한다는 연구결과가 유효하지 않으며 액상화 저항은 상대밀도, 선행전단응력의 크기, 액상화 저항의 정의에 따라 선행전단응력의 존재에 따라 증가 또는 감소 한다는 결과를 발표하였다. 느슨한 모래의 경우 액상화를 일으키는데 필요한 반복응력비는  $\alpha$ 가 증가함에 따라 감소함을 보이고 있으나(Vaid와 Chern, 1983; Yoshimi and Oh-oka, 1975) 낮은 구속응력에서는 반대되는 경향을 보인다(Lee and Seed, 1967). 모래지반에서  $\alpha$ 값에 따른 액상화 저항의 수정을 위해 Seed(1983)는  $K_\alpha$ 와  $\alpha$ 와의 상관관계를 나타낸 바 있으며, Rollins와 Seed(1990)는 Fig. 2와 같이 상관관계를 나타내었다. Fig. 2에서 조밀한 모래의 경우 선행전단응력이 없는 지반에 비해 선행전단응력이 작용하는 지반에서의 액상화 저항이 크게 나타났고, 느슨한 모래의 경우 선행전단응력에 따라 액상화 저항이 감소한다.

Pillai(1991)는 기존의 실험결과에 차이가 보이는 이유를 단지 상대밀도만 고려하고 변형 또는 파괴의 근본적인 현상을 고려하지 않았기 때문이라고 주장하고 흙의 초기상태를 결정지을 수 있는 상태정수(state parameter)를 이용하여 선행전단응력에 따른 보정계수의 변화를 나타내었다.

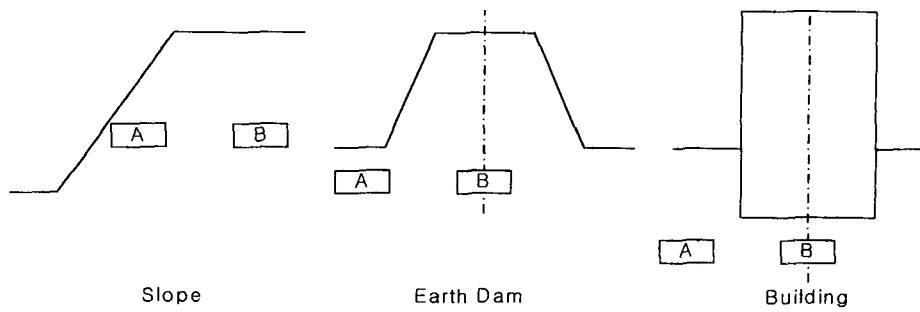


Fig. 1. Soil elements with initial shear stress(preshear) at element A

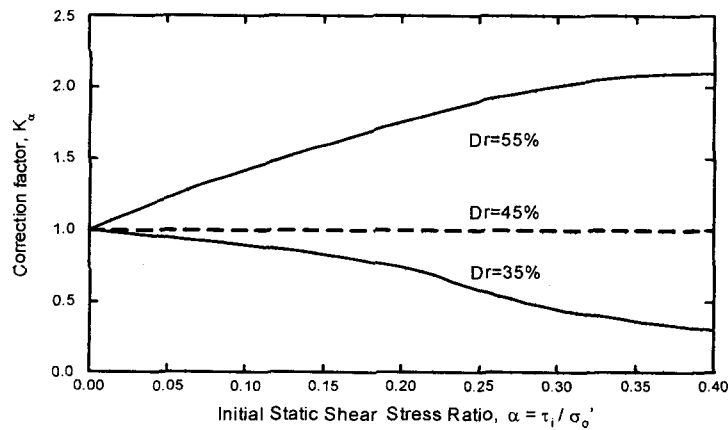


Fig. 2. Initial static shear stress ratio vs. correction factor for sands at various relative density(Rollins and Seed, 1990)

### 3. 실험

#### 3.1 시료 및 시험장치

본 연구에서는 인천 해안에서 채취된 모래를 #20체는 모두 통과하고 #200체 통과량이 약 5%가 되도록 한 시료를 가지고 실험에 사용하였다. 사용된 시료의 입도 분포 곡선은 Fig. 3과 같으며 입도분석과 기본 실험에 의한 시료의 물리적인 성질은 Table 1에 나타내었다. 연구에 사용된 시험장치는 흙의 단순전단시험 및 액상화 관련 시험을 시행할 목적으로 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 만들어진 NGI 형태의 DSSA(Direct Simple Shear Apparatus)를 1997년 개조한 장치이다(Fig. 4). 이 시험 장치는 실험 중에 변화하는 연직하중, 축변형, 전단하중, 전단변형을 각각의 트랜스듀서에 의해 측정된 자료가 컴퓨터에 저장된다. 연직하중과 수평하중은 속도 조절이 가능한 연직, 수평모터에 의해 가해지며 motor control box에 의해 조절된다. 정적전단시험(static shear test)은 일정연직응력시험과 일정체적시험이 있으며 이는 각각 배수와 비배수로 표현 될 수 있다. 동적전단시험(cyclic shear test)은 Function generator의 전압 변화를 E/P (Electro/Pneumatic) 트랜스듀서를 통해 컴프레서로 공급된 압축공기의 압력을 조절하여 원하는 크기의 반복하중을 작용시킬 수 있게 한다.

### 3.2 시험 방법

건조퇴적방법에 의하여 노건조로 수분을 제거한 시료를 보강 고무 멤브레인(reinforced rubber membrane)안에 잘 뿌려 넣어 평평하게 고른 후 일정한 높이가 되도록 다짐봉으로 다져 Top cap을 씌워 얇은 직경과 높이가 각각 6.675cm, 1.70cm의 공시체를 성형하고 압밀 후의 상대밀도를 40%와 60%가 되도록 초기 간극비를 시행착오 방법으로 결정하여 시료를 성형 하였다. 상재하중을 50kPa와 100kPa로 압밀하여 각각 느슨한 공시체와 조밀한 공시체에 대하여 압밀유효수직응력에 대한 선행전단응력비가 0.00, 0.08, 0.12, 0.16을 가하여 일정체적 반복단순전단시험을 실시하였다.

Fine content (<#200 sieve) (%)	5
Coefficient of uniformity, $C_u$	2.22
Coefficient of curvature, $C_c$	0.94
Effective size, $D_{10}(mm)$	0.090
Effective size, $D_{30}(mm)$	0.130
Effective size, $D_{50}(mm)$	0.180
Effective size, $D_{60}(mm)$	0.200
Max. void ratio, $e_{max}$	1.02
Min. void ratio, $e_{min}$	0.60
Specific gravity, $G_s$	2.65
Plasticity index, $PI$	N.P.
USCS	S.M.

Table 1. Physical properties of sand material

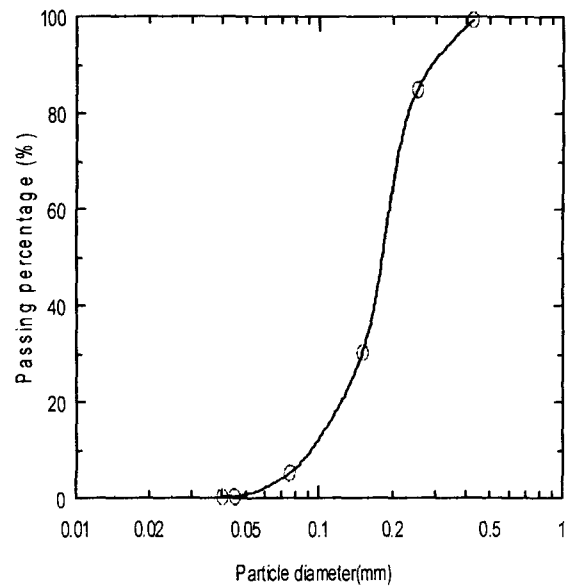


Fig. 3. Grain size distribution

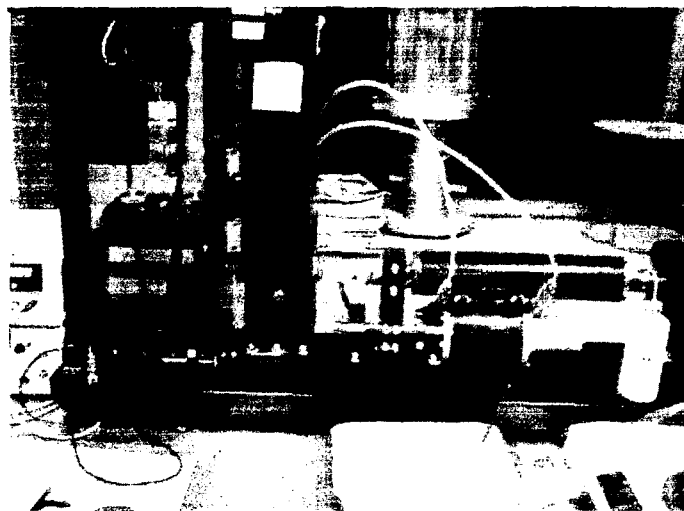


Fig. 4. Cyclic simple shear testing system

시료성형이 완료되면 Top cap에 거의 접촉하게 연직모터를 하강시키고 연직모터를 이용하여 연직하중을 가하고 가해진 하중은 모터 콘트롤 박스(control box)에 의하여 일정하게 유지된다. 일정한 연직하중이 가해져 유지되면 이 때의 연직변위트랜스듀서의 전압 읽음값과 압밀 전의 전압 읽음값과의 차가 압밀 동안의 연직변위가 된다. 압밀이 종료된 시점의 간극비를 기준으로 하여 정적 혹은 반복 단순전단시험을 시행하게 된다. 압밀이 종료되면 수평하중 트랜스듀서와 수평변위 트랜스듀서를 공시체 주변에 장치시키고 공시체 주변의 잠금 장치를 이용하여 공시체에 선행전단응력을 가한다. 일정체적시험(constant volume test)에서는 보강멤브레인이 공시체의 단면적을 일정하게 유지시켜주고 연직변위 트랜스듀서, 연직모터 콘트롤 시스템으로 공시체의 높이를 일정하게 유지하게 된다. 공시체에 가해지는 반복하중은 공기압을 전기적 시스템으로 제어한다. 반복하중이 가해지면서 해당 반복 회 내에서의 연직하중, 수평하중, 연직변위, 수평변위와 반복하중회수가 컴퓨터에 자동으로 기록된다. 시험 중에 일정체적을 유지하기 위해서 가해지는 연직응력의 변화는 간극수압의 변화와 같다(Bjerrum과 Landva, 1966).

### 3.3 선행전단응력이 있는 반복단순전단시험

공시체를 압밀하여 선행전단응력을 가하고 일정체적단순전단시험을 시행하여 연직하중, 수평하중과 연직변위, 수평변위를 각 해당 회수에 대하여 실험결과 데이터를 얻어내었다. 일정체적 반복단순전단시험에서 정의된 액상화는 일반적으로 7.5%의 전단변형률이 발생하였을 때로 정의하고 있으며 이는 반복삼축시험에서의 5%의 양진폭축변형률에 해당한다(Vaid와 Sivathayalan, 1966). 본 연구에서는 선행전단응력이 0인 경우는 양진폭반복전단변형률(cyclic shear strain)을 선행전단응력이 0이 아닌 경우는 최대 영구전단변형률(maximum permanent shear strain) 7.5%에 따른 액상화 강도를 산정하였다.

## 4. 시험 결과 및 고찰

상대밀도 40%의 느슨한 모래에서 선행전단응력에 대한 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비가 대략 0.08이내에서는 선행전단응력비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내며 0.08이상에서는 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5, CLL, CLH). Yoshimi와 Oh-oka(1975), Vaid와 Chern(1983)는 느슨한 모래에서 선행전단응력이 증가할수록 선행전단응력 보정계수,  $K_{\alpha}$ 가 감소한다는 결과와 유사하다. 그림에서 L은 느슨한 모래, D는 조밀한 모래, L은 유효수직응력 50 kPa, H는 유효수직응력 100kPa 을 의미한다.

압밀유효수직응력이 50kPa, 느슨한 모래의 경우 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수가 30회일 때 동일 선행전단응력에 대한 보정계수는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수 10회, 20회보다 더 크게 나타난다(Fig. 5, CLL). 압밀유효수직응력이 100kPa인 느슨한 모래의 경우 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수가 30회일 때 동일 선행전단응력에 대한 보정계수는 선행전단응력비 대략 0.08에서는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수 10회, 20회보다 더 크고 0.16에서는 더 작게 나타난다(Fig. 5, CLL). 그러나 선행전단응력에 대한 보정계수를 최대전단응력에 대한 압밀유효수직응력비에 대하여 나타내었을 때 선행전단응력비에 대한 보정계수,  $K_{\alpha, Max}$ 는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수가 클수록 크게 나타난다(Fig. 6, CLL, CLH).

상대밀도 60%의 조밀한 모래에서 선행전단응력에 대한 보정계수는 선행전단응력비가 증가할수록 압밀유효수직응력의 크기에 상관없이 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 증가하는 경향을 보인다(Fig. 5, CDL, CDH). 압밀유효수직응력이 50kPa인 경우 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수에 상관없이 동일 선행전단응력에 대한 보정계수는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수 10회, 20회, 30회일 때 유사하게 증가함을 보인다(Fig. 6, CDL). 압밀유효수직응력이 100kPa(CDH)인 경우 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수가 30회일 때 동일 선행전단응력에 대한 보정계수는 선행전단응력비 0.08에서는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수 10회, 20회보다 더 작고 0.16에서는 더 크게 나타난다(Fig. 6). 그러나 선행전단응력에 대한 보정계수를 최대전단응력에 대한 압밀유효수직응력비에 대해 나타내었을 때 선행전단응력비에 대한 보정계수,  $K_{\alpha, Max}$ 는 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수가 클수록 크게 나타난다(Fig. 6, CDL, CDH).

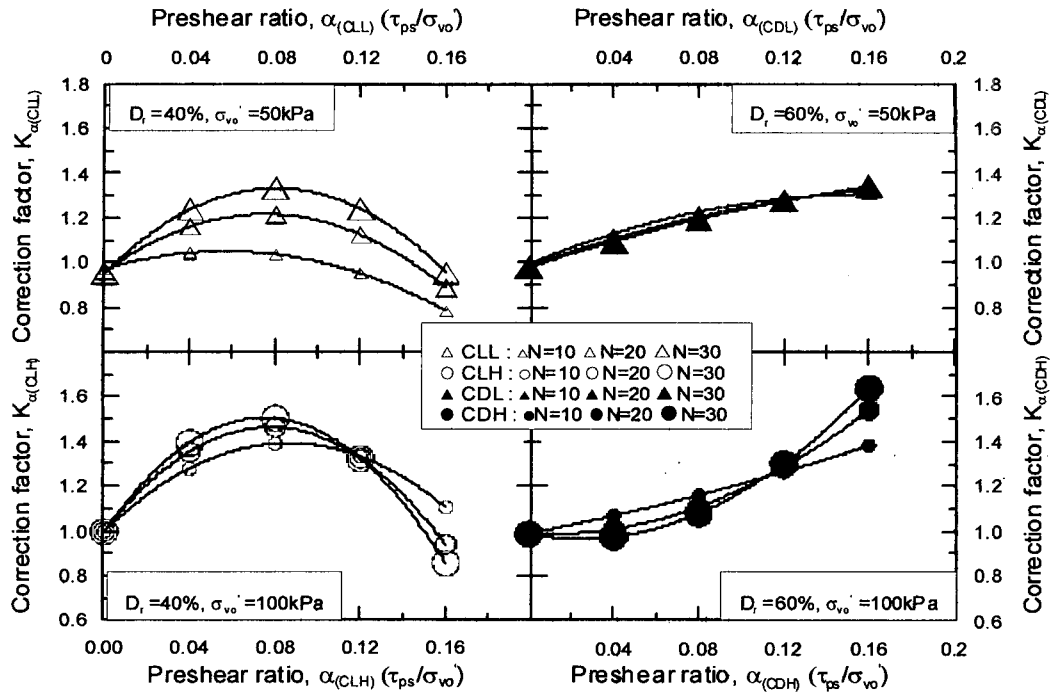


Fig. 5. The relation of the correction factor,  $K_{\alpha}$ , with preshear ratio in loose or dense sand with the different consolidation pressure

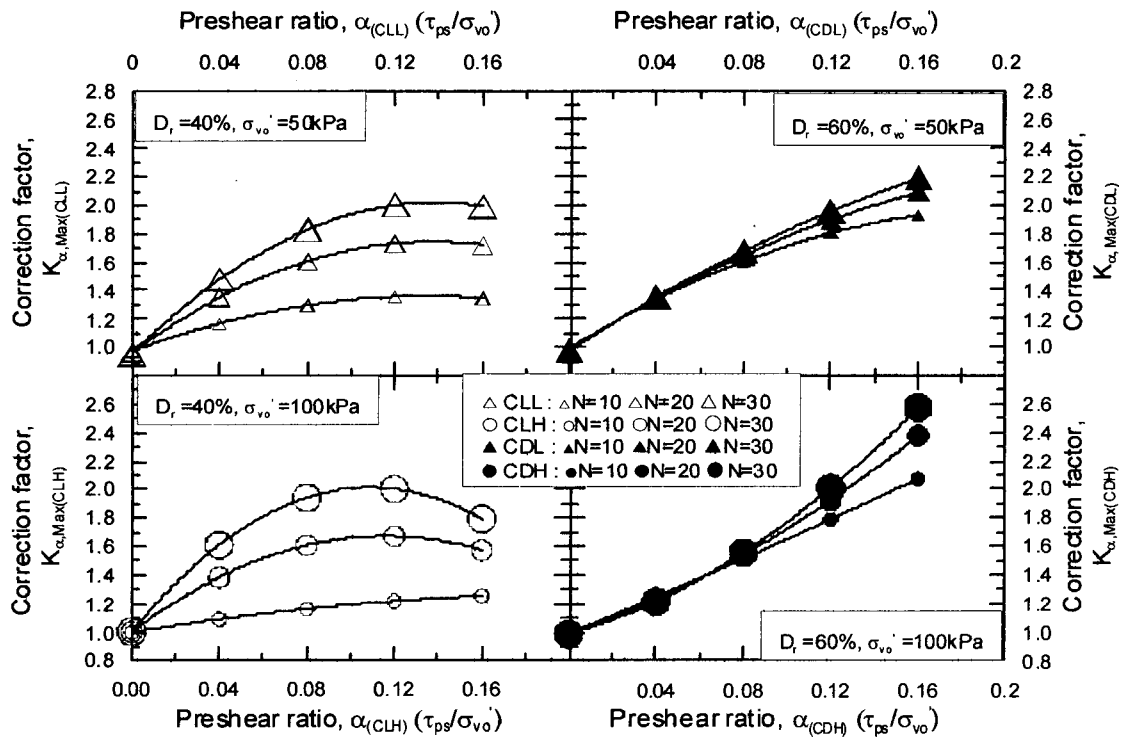


Fig. 6. The relation of the correction factor,  $K_{\alpha,Max}$ , with preshear ratio in loose or dense sand with the different consolidation pressure

느슨한 모래에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.08일 때 구속압력이 클수록 더 크게 나타나고

$K_{\alpha, Max}$ 는 구속압력의 영향이 거의 없다. 조밀한 모래에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.12이하일 때는 구속압력이 클수록 더 작게, 선행전단응력비 0.12이상일 때는 구속압력이 클수록 더 크게 나타나고,  $K_{\alpha, Max}$ 는 구속압력의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

낮은 구속압력에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.08까지 느슨한 모래와 조밀한 모래 모두 유사하지만, 선행전단응력비 0.08이상일 때 조밀한 모래가 느슨한 모래보다 더 크다.  $K_{\alpha, Max}$ 도 이 경우와 유사하다. 높은 구속압력에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.12이하일 때 느슨한 모래가 조밀한 모래보다 더 크지만, 선행전단응력비 0.12이상일 때 조밀한 모래가 느슨한 모래보다 더 크다.  $K_{\alpha, Max}$ 도 이 경우와 유사하다.

구속압력이 50kPa인 낮은 구속응력에서는 선행전단응력의 비에 따른 보정계수의 변화율은 일정변형률을 일으키는데 필요한 반복회수의 크기에 따라 큰 변화를 보이지 않지만, 구속응력이 100kPa인 구속응력이 상대적으로 큰 경우 선행전단응력의 비에 따른 보정계수의 변화율은 선행전단응력의 비가 약 10%이내의 경우 느슨한 모래의 경우 반복회수가 더 클 때 보정계수의 값이 더 큼을 보이고 조밀한 모래의 경우 보정계수는 더 작게 나타난다. 그러나 선행전단응력의 비가 10%이상일 경우 위의 경우와 반대가 된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 선행전단응력을 받고 있는 모래의 동적 강도변화를 연구하기 위하여 NGI형 단순전단시험기를 이용하여 상대밀도 40%와 60%인 공시체에 대해 압밀유효구속응력 50kPa, 100kPa 및 200kPa에서 정적시험을 하였고, 각 상대밀도에 대해 두 구속압력, 즉, 50kPa, 100kPa하에서 선행전단응력의 비가 0.00, 0.08, 0.12, 0.16이 되도록 하여 동적시험을 시행하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 상대밀도 40%의 느슨한 모래에서 선행전단응력에 대한 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비가 대략 0.08이내에서는 선행전단응력비가 증가할수록 증가하고, 0.08이상에서는 감소하는 경향을 보이며, 상대밀도 60%의 조밀한 모래에서 선행전단응력에 대한 보정계수는 선행전단응력비가 증가할수록 압밀유효구속응력의 크기에 상관없이 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 증가하는 경향을 보인다.
2. 느슨한 모래에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.08일 때 구속압력이 클수록 더 크게 나타나고,  $K_{\alpha, Max}$ 는 구속압력의 영향이 거의 없는 것으로 나타났으며, 조밀한 모래에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.12이하일 때 구속압력이 클수록 더 작게, 선행전단응력비 0.12이상일 때 구속압력이 클수록 더 크게 나타나고,  $K_{\alpha, Max}$ 는 구속압력의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.
3. 낮은 구속압력에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.08까지는 느슨한 모래와 조밀한 모래 모두 유사하지만, 선행전단응력비 0.08이상일 때는 조밀한 모래가 느슨한 모래보다 더 크게 나타났다.  $K_{\alpha, Max}$ 도 이 경우와 유사하게 나타났다. 또한 높은 구속압력에서 선행전단응력의 보정계수,  $K_{\alpha}$ 는 선행전단응력비 0.12이하일 때 느슨한 모래가 조밀한 모래보다 더 크지만, 선행전단응력비 0.12이상일 때 조밀한 모래가 느슨한 모래보다 더 큰 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 임철오(2000), "초기정적전단응력이 실트질 모래의 동적강도에 미치는 영향", 인하대학교 석사논문, pp.70~71
2. Bjerrum, L. and Landva, A.(1966), "Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay", *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp.1~20.
3. Ishibashi, I., Kawamura, M. and Bhatia, S.K.(1985), "Effect of initial shear on cyclic behavior of sand", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1395~1410.
4. Lee, K.L. and Seed, H.B.(1967), "Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand", *J. of SMFE*

- , ASCE, Vol. 93, No. SM 1, Proc. paper pp. 47~70.
5. Pillai, V.S.(1991), "Liquefaction analysis of sands: some interpretation of seed's K(sloping ground) and K(depth) correction factors using steady state concepts", *Proc.2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Mo., pp.579~587
  6. Rollins, K. M. and Seed, H.B., "Influence of buildings on potential liquefaction damage", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol. 116, 1990, pp. 165~183.
  7. Seed, H.B. and Lee, K.L.(1969) "Porewater pressure in earth slopes under seismic loading conditions," *Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, A-5, pp. 1~11.
  8. Vaid, Y. P. and Finn, W.D.L.(1979), "Static shear and liquefaction potential", *J. of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, GT 10, pp. 1233~1246.
  9. Vaid, Y. P. and Chern, J. C.(1983), "Effects of static on resistance to liquefaction", *Soil and Foundations*, Vol. 23, No. 1, pp. 47~60.
  10. Vaid, Y. P. and Chern, J. C.(1985), "Cyclic and monotonic undrained response of saturated sand", *In Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, Edited by Vijay Khosla, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 120~147.
  11. Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1975) "Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 3, pp.27~40.