

## 자갈-모래 혼합토의 액상화 거동

### Liquefaction Resistance of Gravel-Sand Mixtures

김 방 식<sup>1</sup> Kim, Bang-Sig  
강 병 희<sup>2</sup> Kang, Byung-Hee  
윤 여 원<sup>3</sup> Yoon, Yeo-Won

#### Abstract

In this research, the effects of the gravel content on the liquefaction behavior for both of the isotropically and  $K_0$ -anisotropically consolidated gravel-sand mixtures are investigated. For this purpose, the cyclic triaxial tests for the specimens with the same relative density ( $D_r=40\%$ ) and variations of gravel content were performed. On the other hand, a series of undrained cyclic triaxial tests were carried out on the isotropically consolidated gravel-sand mixtures with the same void ratio ( $e=0.7$ ) and from 0% to 30% gravel contents. Void ratios of gravel-sand mixtures with the same relative density ( $D_r=40\%$ ) are found to decrease significantly with the increase of the gravel content from 0% to about 70% and increase thereafter. But the void ratio of the sand matrix among the gravel skeleton increases with the increase of the gravel contents. Test results are as follows : for the isotropically consolidated specimen with 40% of relative density and low gravel contents ( $GC=0\%$ , 20%, 40%), pore water pressure development and axial strain behavior during undrained cyclic loading show similar behavior to those of the loose sand because of high void ratio, and the specimens with high gravel content (70%) both pore pressure and strain behaviors are similar to those of dense sand. And the isotropically consolidated specimens with the same void ratio ( $e=0.7$ ) and higher gravel contents show the same behavior of pore water pressure and axial strain as that of the loose sand, but for the lower gravel content this behavior shows similar behavior to that of dense sand. The liquefaction strength of the isotropically consolidated specimens with the same relative density increases with gravel content up to 70%, and the strength decreases with the increase of the gravel content at the same void ratio. Thus, it is confirmed that the liquefaction strength of the gravel-sand mixtures depends both on relative density and void ratio of the whole mixture rather than the relative density of the sand matrix filled among gravels. On the other hand, the behavior of pore water pressure and axial strain for the  $K_0$ -anisotropically consolidated gravel-sand mixtures shows almost the same cyclic behavior of the sand with no stress reversal even with some stress reversal of the cyclic loading. Namely, even the stress reversal of about 10% of cyclic stress amplitude, the permanent strain with small cyclic strain increases rapidly with the number of cycles, and the initial liquefaction does not occur always with less than maximum pore water pressure ratio of 1.0. The liquefaction resistance increases with the gravel contents between 0% and 40%, but tends to decrease beyond 40% of gravel content. In conclusion, the cyclic behavior of gravel-sand mixtures depends on factors such as gravel content, void ratio, relative density and consolidation condition.

1 정회원, 충주대학교 교수 (Member, Prof., Chungju National Univ., baskim@cjnu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 인하대학교 명예교수 (Member, Emeritus Prof., Inha Univ.)

3 정회원, 인하대학교 교수 (Member, Prof., Inha Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 요 지

본 연구에서는 자갈혼합물을 다르게 준비한 자갈-모래 혼합시료가 등방압밀 및  $K_0$ -이방압밀 상태에서 나타나는 액상화거동에 대해서 연구하였다. 이를 위하여 자갈혼합물이 다른 자갈-모래 혼합토 공시체를 100 kPa의 연직응력으로 상대밀도가 40% 되도록 등방압밀 및  $K_0$ -이방압밀 시킨 후 반복삼축시험을 수행하였다. 또한 자갈혼합물이 0%, 10%, 20%, 30%인 공시체에 100 kPa의 연직응력으로 간극비가 0.7이 되도록 등방압밀 후 반복시험도 실시하였다. 시험결과 동일한 상대밀도( $Dr=40\%$ )를 가지는 자갈-모래 혼합토 공시체의 간극비는 자갈혼합물이 증가할수록 감소하다가 약 70%를 저점으로해서 다시 증가한다. 그러나 이 경계혼합물 이하에서는 자갈입자 사이를 채우고 있는 모래의 간극비는 자갈혼합물이 증가할수록 증가한다. 상대밀도가 일정한 ( $Dr=40\%$ ) 등방압밀 공시체에 있어서 자갈혼합물이 비교적 낮은 경우( $GC=0\%$ ,  $20\%$ ,  $40\%$ )에는 반복하중에 의해서 일어나는 간극수압과 축변형률 거동이 비교적 높은 간극비로 인해서 느슨한 모래의 거동을 나타내나, 자갈혼합물이 높은 경우( $GC=70\%$ )에는 간극수압과 축변형률 거동이 조밀한 모래의 거동과 비슷한 경향을 보인다. 또한 간극비가 일정한( $e=0.7$ ) 등방압밀 공시체에 있어서 자갈혼합물이 높을수록 축변형률과 간극수압 거동은 느슨한 모래의 거동을 보이며 자갈혼합물이 낮을수록 축변형률 거동은 조밀한 모래의 거동을 나타낸다. 등방압밀 공시체의 액상화강도는 경계혼합물( $GC=70\%$ )이하의 범위에서는 상대밀도가 일정한 경우에는 자갈혼합물이 증가할수록 증가하며 간극비가 일정한 경우는 자갈혼합물이 증가할수록 감소한다. 따라서 자갈-모래 혼합토의 액상화강도는 예상과는 달리 자갈 입자 사이를 채우고 있는 모래의 상대밀도 보다는 혼합토의 전체적인 상대밀도 및 간극비에 의해서 결정된다는 사실이 확인되었다.  $K_0$ -이방압밀 공시체의 간극수압과 축변형률 거동은 반복응력이 어느 정도의 응력반전을 포함하고 있는데도 불구하고 응력반전이 없는 경우의 사질토의 거동을 나타낸다. 즉 응력반전량이 반복응력 진폭의 약 10%인데도 불구하고 반복변형률은 비슷하나 영구변형률이 크게 증가하며 또한 간극수압비는 1.0에 미달하여 초기액상화가 일어나지 않는다. 그리고 액상화강도는 자갈혼합물이 증가할수록 0%에서 40%까지의 범위에서는 증가하나 그 이상에서는 감소하는 경향을 보인다. 결론적으로, 자갈-모래 혼합토의 반복거동은 자갈혼합량, 간극비, 상대밀도 그리고 압밀상태와 같은 요인에 의해 결정된다.

**Keywords** : Anisotropic consolidation, Gravel-sand mixture, Liquefaction, Relative density, Void ratio

## 1. 서 론

최근 들어 자갈질 흙이 퇴적한 지반과 록필 댐 기초부 문 그리고 항만과 부두구조물에 대한 액상화에 관한 평가 연구가 요구되고 있다. 자갈이나 자갈질 흙은 오랫동안 비액상화 지반이라고 생각하여 왔을 뿐만 아니라 자갈포설이나 자갈배수는 종종 지진하중이 작용하는 동안 발생된 높은 간극수압을 빨리 소산시킴으로서 액상화저항을 증가시킬 수 있는 대책공법으로서 종종 사용되어 왔다. 그러나 1999년 대만의 Chi-Chi 지진( $M_w=7.6$ )이 일어나는 동안 진앙지로부터 약 17.4km 떨어져 있는 교량 부근의 자갈지반에서 액상화가 일어났다(Ueng 등, 2002). 이 지역은 자갈퇴적 지반으로 구성되었으며, SPT값과 CPT값을 이용하는 기존방법에 의해서 액상화 가능성이 없는 것으로 사전에 평가되었었다. 이를 계기로 자갈이나 자갈질 흙 지반에 대한 액상화거동에 관한 연구가 더욱

더 활발하게 되었다. 최근에 자갈질 흙의 액상화거동에 관하여 Wong 등(1974), Banerjee 등(1979), Wang(1984), Siddiqi(1984), Haga(1984), Hynes(1988), Seed 등(1989), Evans 등(1992), Nicholson 등(1993)에 의해 실험실에서 연구된 바가 있다. Siddiqi(1984)는 50mm 직경의 최대입자와 12mm체를 통과한 세립질 흙 입자인 두 개의 시료를 동일한 상대밀도에서 실험을 한다면 유사한 액상화저항을 갖는다고 하였다. 한편 Wang(1984)과 Haga(1984)는 모래-자갈 혼합토의 액상화저항은 자갈 혼합량에 따라 증가된다고 하였다. 이와 같은 서로 다른 연구결과는 자갈-모래 혼합토의 액상화에 대한 우리의 이해가 불완전하다는 것을 지적하고 있다. 자갈질 지반 역시 모래질 지반과 같이 수평한 지반이나 경사진 지반에서 지진시 액상화가 발생하고 있다. 평평한 지반상에 축조된 제방이나 댐, 그리고 각종 대형 건설구조물 아래의 지반의 한 요소는 초기 전단응력을 받고 있는 이방상태로 상재

하중을 받고 있으며, 경사지반 역시 경사하중(선행 전단 응력)을 정적으로 받고 있는 상태이다. 이러한 지반은 이방상태의 정적하중을 받고 있는 지반이며 지진과 같은 반복하중을 받게 되면 대규모 변형을 일으켜서 돌이킬 수 없는 대형 참사를 수반하게 된다.

본 연구에서는 상기와 같은 연구결과를 바탕으로 해서 자갈-모래 혼합토의 액상화거동, 특히 등방압밀 상태 뿐만 아니라 현장조건인  $K_0$ -이방압밀 상태, 즉 초기정적 전단응력을 받고 있는 상태에서 자갈혼합률에 따른 액상화 거동에 관해서 상세하게 검토하는데 목적이 있다.

## 2. 자갈-모래 혼합토의 액상화

### 2.1 자갈-모래 혼합토의 반복 삼축 강도

자갈-모래 혼합토는 높은 투수계수 때문에 액상화가 발생되지 않는다는 것이 일반적으로 인식되어 오고 있다. 그러나 최근 Wang(1984)과 Haga(1984)는 모래-자갈 혼합시료의 액상화저항은 자갈혼합률에 따라 증가되었다는 것을 알았다. 이들은 일정한 상대밀도 하에서 자갈 혼합률에 따른 반복응력비-반복횟수, 간극수압비-반복 횟수, 축변형-반복횟수, 그리고 반복축차응력-체적변형률과의 관계에 대해서 반복삼축압축시험을 통하여 역학적 특성을 구명하였다

Kokusho 등(2004)의 연구에 의하면 반복삼축시험에 의한 비배수 반복강도는 입자의 균등계수에 크게 의존하지 않으며 양진폭변형 5%에 대한 반복강도는 입도분포가 나쁜 모래와 입도분포가 좋은 자갈 간에 거의 일치하며 상대밀도에 의해서 거의 결정된다. 그러나 5%보다 큰 변형에 대한 비배수 강도는 입자의 균등계수에 크게 의존하며 입도분포가 좋지 않은 모래보다 입도분포가 좋은 자갈이 훨씬 더 의존도가 높다. 입도분포가 좋은 자갈질 입자라 하더라도 화강풍화토와 같이 잘 파쇄 된다면, 비배수 정적강도는 현저하게 작으며 입도분포가 나쁜 모래보다 거의 같거나 낮게 나타난다. 또한 자갈질 흙이나 모래질 흙에서 조립자의 간극을 채우는 세립자의 최대혼합률을 한계 세립질 혼합량이라고 하였으며, 한계 세립질 혼합량까지는 혼합량 증가에 따라 비배수 반복강도는 감소한다고 하였다. 또한 그는 자갈질 흙에서 한계 세립질 혼합량은 10~20%이며, 모래질 흙에서는 한계 세립질 혼합량이 30~40%정도라고 하였다.

### 2.2 혼합시료의 단위중량

Evans와 Zhou(1995)는 자갈 함유량에 따른 자갈-모래 혼합토의 건조단위중량과 간극비를 나타내었으며, 최대 및 최소 건조 단위중량은 자갈혼합률 0%에서 60%까지 현저히 증가하였다. 이 범위에서 자갈혼합률이 증가하게 되면 자갈 입자간의 접촉은 서서히 증가하나 자갈 입자는 모래 입자 중에 부유 상태로 있게 된다. 자갈혼합률이 어떤 한계값, 즉 경계혼합률에 도달하게 되면 자갈입자는 거의 연속적으로 접촉하면서 자갈구조체를 형성하며 모래입자는 대부분의 자갈 간극을 채우게 된다. 자갈혼합률이 경계혼합률을 넘게 되면, 자갈과 자갈 끼리 접촉이 증가되고 모래는 자갈 간극을 완전히 채우지 않게 된다. 따라서 혼합시료의 단위중량은 이 경계혼합률을 정점으로 해서 자갈혼합률이 증가할수록 계속해서 감소한다. 간극비 측면에서 보면 혼합시료의 최대 및 최소간극비는 자갈혼합률이 증가함에 따라 감소하다가 이 경계혼합률을 저점으로 다시 증가한다.

### 2.3 자갈-모래 혼합률에 따른 반복거동

Evans와 Rollins(1999)는 자갈혼합률이 0%, 20%, 40%, 60%인 자갈-모래 혼합시료를 상대밀도가 40%가 되도록 준비한 공시체에 대해서 5%의 양진폭변형률을 발생시키는 반복응력 횟수와 반복응력비와의 관계를 반복삼축시험을 하여 나타내었다. 이들의 연구 결과에 의하면 자갈-모래 혼합토의 액상화강도는 자갈혼합률이 증가할수록 현저히 증가하였다. 즉, 5%의 양진폭변형률이 발생하는 반복응력 횟수 10회에 대한 반복응력비는 자갈혼합률이 0%에서 60%로 증가함에 따라 0.15에서 0.32까지 크게 증가 하였다.

또한 이들 연구에서 자갈혼합률이 낮은 0%와 20%인 공시체는 서로 비슷한 간극수압, 축변형률거동을 보였으며 중간 정도의 느슨한 밀도를 갖는 모래의 전형적인 액상화거동을 나타내었다. 즉, 간극수압은 뚜렷한 변형이 일어나지 않는 상태에서 점차적으로 증가하여 간극수압비(  $R_u = \Delta u / \sigma'_3$  )가 거의 1.0에 도달하여 초기액상화가 발생하였다. 간극수압비는 약 0.7~1.0 범위의 비교적 좁은 범위 내에서 변하였다.

그러나 자갈혼합률이 높은 40%와 60%의 경우에는 간극수압과 축변형률 거동은 자갈혼합률이 낮은 경우와 큰 차이를 보였다. 이들 공시체는 반복횟수 초기단계

에서부터 간극수압과 축변형률이 더 빨리 발생하였다. 간극수압비는 초기단계의 반복횟수에서 최고간극수압비에 도달하였으나 이 최고간극수압비는 1.0에 도달하지 않을 뿐만 아니라 이 점에서의 양진폭변형률 역시 5%에 도달하지 않았다. 이 후 반복 횟수가 증가함에 따라 간극수압비는 거의 일정하게 유지되나 변형률은 갑자기 증가하지 않고 점차적으로 증가됨을 보여 주었다. 즉, 자갈혼합률이 40%와 60%인 공시체의 간극수압과 축변형률 거동은 마치 조밀한 모래의 전형적인 Cyclic mobility 거동을 나타내었다.

### 3. 실험

#### 3.1 시료

본 연구에서 사용한 모래는 #40 체를 통과하고 #200 체에 남는 크기의 시료이고 자갈은 6.7mm체를 통과하고 #4 체에 남는 크기의 시료이다. 자갈 입자의 크기는 삼축시험 공시체의 직경과 시료 최대입경과의 비가 6~8 범위내에 있는 시료를 사용함으로써 신뢰도가 높은 실험 결과를 얻을 수 있다는 연구결과(Evans와 Zhou, 1995)에 따라서 이 비가 7.5가 되는 최대 입경인 6.7mm로 하였다. 자갈 혼합률 0, 20, 40, 60, 70%인 자갈-모래

혼합토 시료의 입도분포곡선과 물리적 성질은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

혼합토 시료의 최소 건조단위중량은 직경 12mm인 깔대기에 시료를 넣고 몰드내에서 낙하높이가 거의 없도록 하여 자유낙하 시켜서 구하였다. 그리고 최대건조단위중량은 시료를 일정 높이로 5층으로 몰드 내에 넣고 고무망치를 매층당 25회 타격하는 방법(Bowles, 1970)에 의해서 구하였다. Fig. 2에 자갈혼합률에 따른 혼합토시료의 최대간극비와 최소간극비의 변화를 나타내었다. 최대 및 최소간극비는 자갈 혼합률이 0%에서 70%까지 증가함에 따라 감소한다. 이 범위에서는 자갈혼합률이 낮은 경우에는 자갈입자는 모래입자들 속에서 거의 대부분이 부유하게 되며 자갈입자간의 접촉은 자갈혼합률이 증가함에 따라 증가하고 어떤 경계 혼합률(본 시험시료는 70% 정도)에 이르게 되면 자갈입자간 연속적인 연결구조형태를 가지게 되고 모래입자는 자갈간극의 대부분을 채우는 자갈골격 구조가 된다. 그러나 자갈혼합률이 이 경계 혼합률을 넘어서게 되면 자갈입자간의 접촉량이 증가하여 거의 모든 자갈입자들은 서로 접촉하게 되고 모래는 자갈 간극을 완전하게 채우지 못하게 되어 단위중량은 감소하게 되어 간극비는 다시 증가하게 된다.

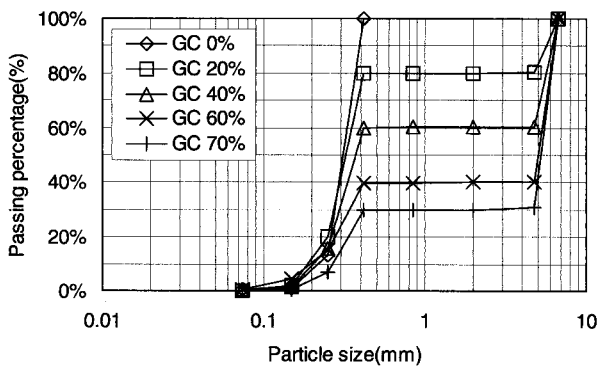


Fig. 1. Grain size distribution curves for gravel-sand mixtures

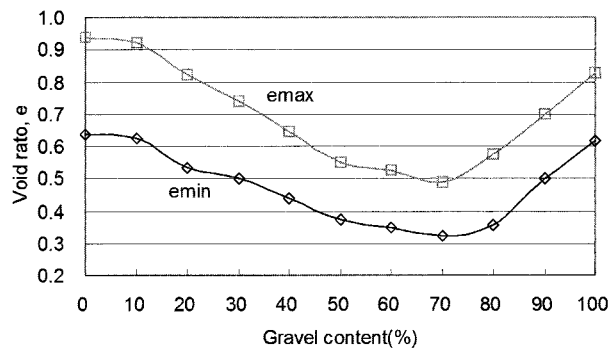


Fig. 2. Variation of maximum and minimum void ratio with variable gravel content

Table 1. Properties of gravel-sand mixtures

Gravel contents, GC (%)	0	10	20	30	40	50	60	70
Coefficient of uniformity, $C_u$	1.40	1.50	1.52	1.63	1.87	27.2	27.3	21.7
Max. void ratio, $e_{max}$	0.94	0.92	0.82	0.71	0.64	0.55	0.53	0.49
Min. void ratio, $e_{min}$	0.64	0.62	0.53	0.50	0.44	0.37	0.35	0.33
Void ratio at $D_r=40\%$	0.82	0.80	0.70	0.64	0.56	0.48	0.46	0.43
Specific gravity, $G_s$	2.64	2.74	2.73	2.74	2.73	2.73	2.75	2.73
USCS	SP	SP	SP	SP	SP	-	GP	GP

### 3.2 시험기기

사용한 삼축시험기는 C. K. Chan에 의해 개발된 것으로 단일재하 및 반복재하시험이 가능하며 시험 중 축차응력, 축변형률, 구속응력, 간극수압, 체적변형률 등이 컴퓨터에 자동적으로 입력되고 연직하중과 구속응력을 제어 할 수 있는 자동화된 반복 삼축시험기이다. 이방압 밀응력을 가할 수 있을 뿐만 아니라 선행전단응력을 가할 수 있고 정현파를 포함한 몇가지 형태의 반복응력을 가할 수 있으며 최대 반복주기는 0.2Hz 이다.

### 3.3 시험종류

자갈혼합률이 0, 20, 40, 50, 60, 70%인 자갈-모래 혼

Table 2. List of cyclic loading triaxial tests

$G_c$ (%)	e	$D_r$ (%)	$\sigma_d/2\sigma_{vc}$	Consolidation
0	0.81	40	0.130, 0.162 0.145, 0.206	Isotropic
20	0.71		0.124, 0.178 0.140, 0.236	
40	0.57		0.175, 0.211 0.203, 0.261	
60	0.45		0.162, 0.221 0.195, 0.273	
70	0.42		0.178, 0.284 0.238, 0.309	
0	0.82	40	0.294, 0.373 0.364, 0.393	$K_0$ - Anisotropic
20	0.71		0.382, 0.417 0.340, 0.381	
40	0.56		0.292, 0.308 0.324, 0.392	
50	0.48		0.387, 0.429 0.394, 0.422	
60	0.45		0.352, 0.399 0.296, 0.318	
0	0.70	80	0.280, 0.372 0.273, 0.311	Isotropic
10		74	0.177, 0.223 0.127, 0.200	
20		42	0.315, 0.389 0.291, 0.343	
30		17	0.214, 0.255 0.187, 0.223	
40		85	0.343, 0.410 0.144, 0.211	
50		45	0.116, 0.179 0.372, 0.424	
60	0.47	32	0.189, 0.372 0.164, 0.214	

합시료로 준비한 삼축공시체에 100 kPa의 유효연직응력 하에서 등방압밀 및  $K_0$ -이방압밀 시킨 후 반복하중을 가하였다. 각 공시체의 압밀 후 상대밀도를 40%로 일정하게 하였으며 등방압밀공시체의 경우 상대밀도의 영향을 검토하기 위하여 압밀 후 공시체의 간극비를 0.7 및 0.47로 일정하게 준비한 시험을 추가로 시행하였다. 시험 일람표는 Table 2와 같다.

### 3.4 시험방법

함수비가 3~5% 되도록 준비한 혼합시료를 공시체 몰드 내에서 다짐봉을 이용하여 5층으로 다짐하여 직경 50mm, 높이 100mm인 공시체를 제작하였다. 공시체를 포화시키기 위하여 5kPa 압력으로 CO<sub>2</sub> 가스를 약 3시간 동안 서서히 주입시켜 탈기수를 순환시키고 100kPa의 배압을 가하여 Skempton B-계수가 0.97 이상이 되도록 하였다. 재하방법은 응력제어 방법으로서 정현파형의 반복 축차응력을 가하여 시험하였다. 반복재하주기는 ASTM(D 5311-92)규정에서 0.1Hz~2.0Hz 범위에서 실험하도록 권장하고 있으나 본 연구에서는 시험기의 능력제한으로 인하여 등방압밀시험 및  $K_0$ -이방압밀시험에서 각각 0.1Hz 및 0.05Hz 주기로 반복하중을 가하였다.

액상화 발생시점은 등방압밀시험인 경우 초기액상화 발생 시점이 양진폭변형률이 5%인 시점과 거의 일치하므로 이 변형률을 기준으로 하고  $K_0$ -이방압밀시험인 경우에는 반복 변형률이 작고 영구 변형률이 크게 발생하므로 영구 변형률이 5% 되는 시점을 기준으로 정하였다.

자갈 혼합률이 0~70% 범위에서는 자갈입자사이의 간극은 모래입자로서 거의 채워져 있으므로 구속응력에 의한 공시체주위의 멤브레인 관입량은 자갈보다는 주로 모래입자의 크기와 혼합토 공시체의 간극비에 좌우된다. 100kPa의 구속응력에 의한 멤브레인 관입량을 자갈혼합률이 80%이상일 때는 뚜렷하게 관찰되었으나 70% 이하에서는 거의 관찰되지 않았다. 100kPa의 구속응력하에서 등방압밀시킨 후의 상대밀도가 40% 공시체의 간극비와 멤브레인 관입으로 인한 체적변형률은 자갈혼합률이 0%인 경우 각각 0.82와 0.7%이었으나 자갈혼합률이 60%인 경우 각각 0.46과 0.45%로 감소하였다.

멤브레인 관입량이 감소한 이유는 자갈입자의 혼합률보다는 간극비의 감소에 의한 것으로 생각된다. 본 연구에서는 자갈혼합률이 70% 이하에서는 멤브레인 관입

량이 관찰되지 않을 뿐만 아니라 관입량이 대단히 적고 시료조성시 자갈이 시료내부에 놓이도록 조성하였기 때문에 자갈함유로 인한 멤브레인 관입영향을 고려하지 않았다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 등방압밀시험(CIU Cyclic Triaxial Test)

Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 일정한 상대밀도를 가지는 자갈-모래 혼합토의 액상화 강도는 간극비가 최소가 되는 자갈 혼합물 70% 이하에서는 자갈혼합률이 증가할수록 뚜렷하게 증가한다. 즉 혼합토의 상대밀도가 40%인 경우 반복재하횟수가 10일 때 양진폭 변형률 5%를 발생시키는 반복응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR= $\sigma_d/2\sigma'_{v0}$ )를 나타내는 CSR<sub>5%-10</sub>은 Fig. 4에서와 같이 자갈혼합률이 0%에서 70%로 증가함에 따라 0.184에서 0.272로 증가한다. 이는 압밀 후 공시체의 상대 밀도가 모두 40%로 동일하더라도 자갈 혼합에 의해서 혼합토의 밀도와 모래의 밀도가 달라지기 때문이라고 생각된다. 즉 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 자갈혼합률이 증가함에 따라 혼합토의 간극비는 감소하고 동시에

CSR<sub>5%-10</sub>은 증가한다. 이는 혼합토의 경우에도 일반 조립토와 마찬가지로 간극비가 감소함에 따라 조립토의 포장이 더 견고해 지기 때문에 강도가 증가된다고 판단된다.

한편 상대밀도가 40%인 자갈-모래혼합토 내부의 모래입자만의 간극비는 Table 3에서와 같이 자갈 혼합률이 0%, 20%, 40%, 60%인 경우 각각 0.81, 0.82, 0.87, 1.05이고 이의 상대 밀도는 각각 40%, 39%, 23%, -36%로 계산되었다. 여기서 음으로 표시되는 모래만의 상대밀도는 자갈사이에 모래가 최대간극비, 즉 모래만의 가장 느슨한 상태보다 더 모래양이 적은 경우이다. 자갈 혼합률이 60% 미만인 경우 혼합토의 자갈 입자는 모래 입자

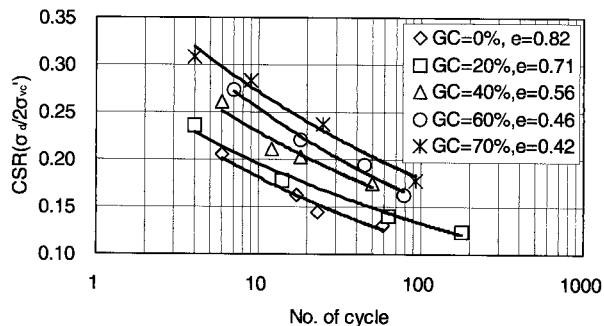


Fig. 3. Cyclic stress ratio at liquefaction of the isotropically consolidated specimens for various gravel contents

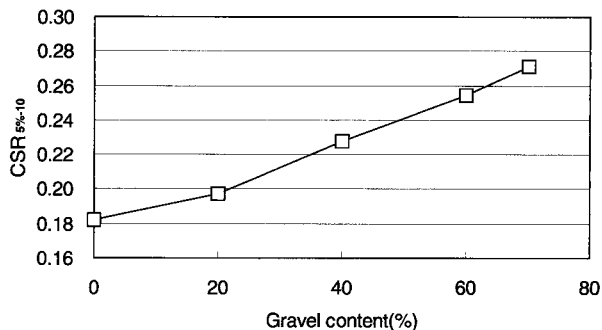


Fig. 4. Relationship between CSR<sub>5%-10</sub> and gravel content of specimens at a relative density of  $D_r=40\%$

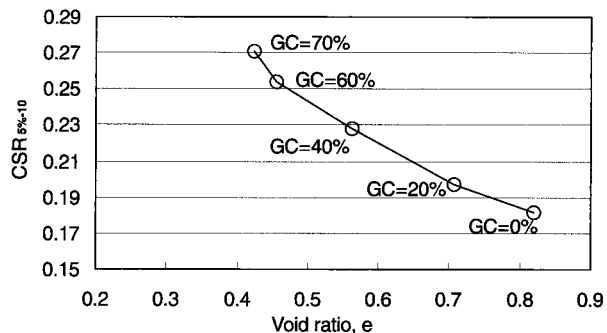


Fig. 5. Relationship among gravel content, CSR<sub>5%-10</sub> and void ratio of specimen at a relative density of  $D_r=40\%$

Table 3. Relative density and void ratio of sand matrix in the gravel-sand mixtures

GC (%)		0	10	20	30	40	50	60
$D_r=40\%$	e	0.82		0.70		0.56		0.46
	$D_r$ (sand)	40		39		23		(-)36
	e (gravel-sand)	0.81		0.82		0.87		1.05
e=0.7	$D_r$ (%)	80	74	42	17			
	$D_r$ (gravel-sand) (%)	80	77	43	10			
	e (sand)	0.70	0.71	0.81	0.91			
e=0.47	$D_r$ (%)					85	45	32
	$D_r$ (gravel-sand) (%)					80	33	(-)27
	e (sand)					0.70	0.84	1.02

중에 떠 있거나 자갈 입자 사이의 간극은 모래로서 거의 채워져 있으므로 혼합토의 액상화 거동은 모래만의 밀도에 의해서 크게 좌우될 것으로 예상할 수 있었다. 그러나 자갈 혼합물이 증가할수록 모래의 간극비는 증가하고 상대밀도는 크게 감소하는데 불구하고 혼합토의 액상화강도는 오히려 증가하였다. Evans와 Zhou(1995)는 자갈-모래 혼합토의 상대밀도가 40%(GC=0%)와 52%(GC=40%)이나 혼합토내 모래의 상대밀도가 모두 40%가 되도록 준비한 두 공시체의 액상화강도는 혼합토 공시체의 상대밀도가 40%인 공시체가 52% 보다 훨씬 낮았음을 보여 주었다.

따라서 본 연구에서 얻은 시험결과와 이들의 연구 결과를 미루어 보아 자갈-모래 혼합토의 액상화강도는 모래만에 의해서 결정되지 않고 혼합토 전체의 복합적인 요인에 의해서 결정된다고 판단된다.

또한 자갈-모래 혼합토의 액상화강도는 혼합토의 간극비만에 의해서 결정되는지를 확인하기 위하여 간극비를 동일하게 하고 자갈 혼합물은 다르게 하여 시험을 시행하였다. 즉 자갈 혼합물이 0%, 10%, 20%, 30% 로 하여 100kPa의 응력으로 등방압밀시킨 후의 간극비가 0.7

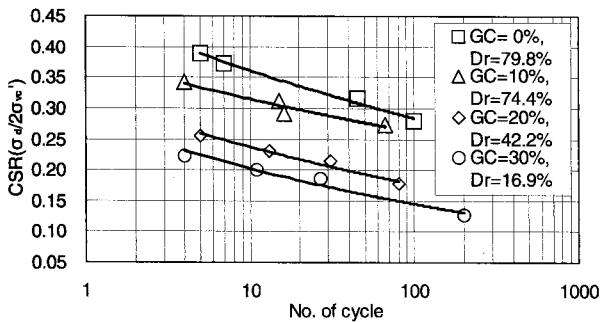


Fig. 6. Cyclic stress ratio at liquefaction of the isotropically consolidated specimen at a void ratio of  $e=0.7$  for various gravel contents

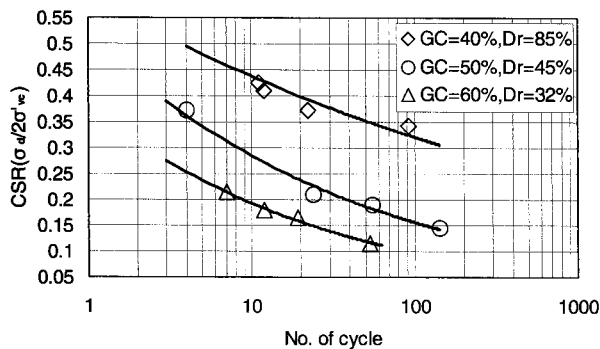


Fig. 7. Cyclic stress ratio at liquefaction of the isotropically consolidated specimen at a void ratio of  $e=0.47$  for various gravel contents

이 되도록 준비한 공시체와 자갈 혼합물이 40%, 50%, 60% 이고 100kPa의 응력으로 등방압밀 시킨 후의 간극비가 0.47이 되도록 준비한 공시체로부터 구한 반복응력비-반복횟수에 대한 곡선을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 또한 Table 3에서 압밀 후 공시체의 간극비가 일정한 혼합토 공시체의 상대밀도와 혼합토 내 모래의 상대밀도는 자갈혼합물이 증가할수록 모두 크게 감소함을 보여주고 있다.

Fig. 8에서 공시체의 간극비가 일정한 경우 자갈혼합물이 증가함에 따라 혼합물공시체의 상대밀도는 감소할 뿐만 아니라 모래의 상대밀도 또한 감소하여 혼합토의 액상화강도( $CSR_{5\%-10}$ )가 감소함을 보여준다.

결론적으로 자갈-모래혼합토의 액상화강도는 자갈혼합물이 경계혼합물(본 연구에서는 약 70%)이하에서는 혼합토 내 모래의 상대밀도나 간극비에 의해서 결정되지 않고 혼합토 전체의 상대밀도와 간극비에 의해서 결정된다. 즉 혼합토의 상대밀도가 일정한 경우 자갈혼합물의 증가에 따라 간극비가 감소되어 액상화강도는 증가하고 혼합토의 간극비가 일정한 경우 자갈혼합물이 증가함에 따라 상대밀도가 감소하여 액상화강도는 감소한다.

#### 4.2 $K_0$ -이방압밀시험(CKoU Cyclic triaxial test)

자갈 혼합물이 0%, 20%, 40%, 50%, 60%인 자갈-모래 혼합토 공시체에 100kPa의 연직응력으로  $K_0$ -이방압밀 시킨 후의 상대밀도가 40%가 되도록 준비한 공시체에 등방압밀시험에서와 같은 방법으로 반복응력을 가하였다. 혼합토 공시체의 정지토압계수는 상대밀도가 40%인 공시체로서 시행한 삼축압축시험에 의해서 구한 내부마찰각에 의해서 Jacky 식을 이용하여 구하였으며

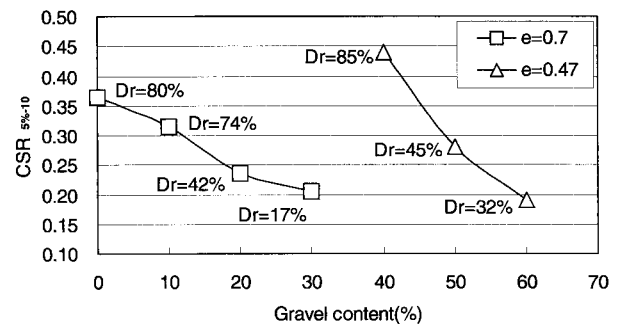


Fig. 8. Relationship among  $CSR_{5\%-10}$ , gravel content and relative density at constant void ratios

자갈 혼합률이 0%, 20%, 40%, 50%, 60%인 경우 각각 0.409, 0.358, 0.356, 0.343, 0.329이다. 따라서  $K_0$ -이방압 밀이 끝난 후 공시체 내의 초기정적전단응력비( $\tau_s/\sigma_{vo}'$ )는 자갈 혼합률이 0%, 20%, 40%, 50%, 60%인 경우 각각 0.296, 0.321, 0.322, 0.329, 0.336으로 계산되었다.

$K_0$ -이방압밀에서의 반복재하에 의한 축변형률과 간극수압 거동은 Fig. 9에 보이는 바와 같이 등방압밀 시험의 경우와는 전혀 다른 거동을 보인다. Fig. 9(c)에 나타난 바와 같이 반복재하가 시작되면 간극수압은 큰 진폭을 보이면서 크게 나타나다 반복횟수가 증가함에 따라 진폭의 증가와 함께 최대치는 서서히 증가한다. 동시에 서서히 증가하던 간극수압의 진폭도 일시에 약간 증가하나 이후에는 축변형률은 계속해서 증가하더라도 거의 일정한 값을 유지한다. 최종적으로 일정한 값을 유지하는 최대정점 간극수압비( $\Delta u/\sigma_{vc}'$ )는 1.0에 도달하

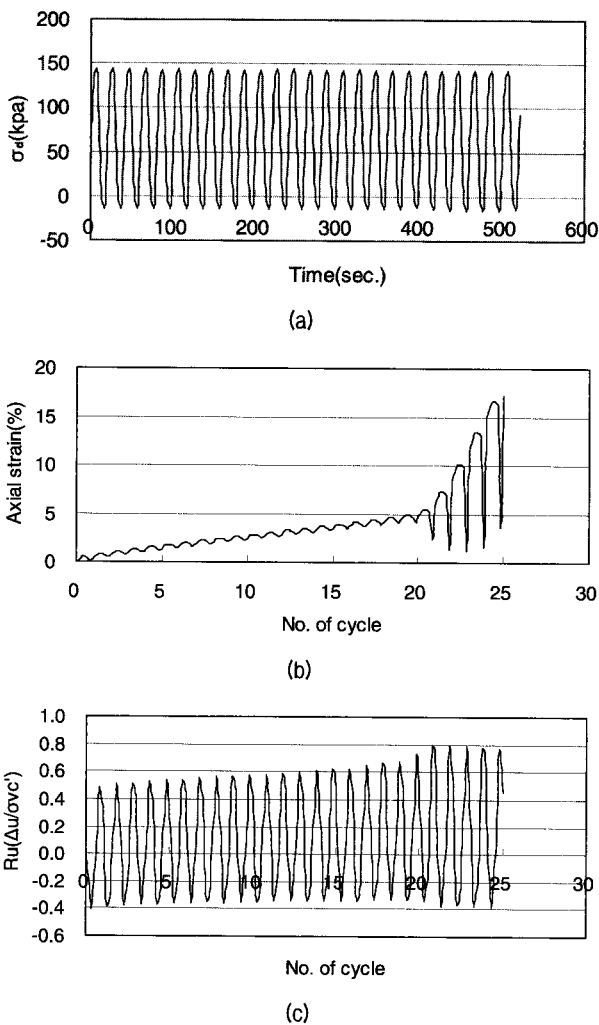


Fig. 9. Typical axial strain and pore water pressure development during cyclic loading for  $K_0$ -anisotropically consolidated specimen (GC=20%, CSR=0.393)

지 않고 거의 모든  $K_0$ -이방압밀시험에서 약 0.8을 나타내었다.

그러나 Fig. 9(b)는 반복재하에 따른 축변형률의 변화를 나타낸 것으로 반복재하가 시작하면 반복변형률의 진폭은 작으나 영구변형률은 서서히 계속해서 증가하다가 어느 반복횟수에 도달하면 갑자기 반복변형률 진폭이 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 간극수압과 축변형률거동은 반복재하시 전단응력 반전이 없는 경우의 사질토의 전형적인 거동으로서 본 연구에서는 Fig. 9(c)에 나타난 것과 같이 약간의 응력반전이 있음에도 전단응력의 반전이 없는 경우와 동일한 거동을 나타내었다.

Fig. 10에서 축변형률 5%가 발생하는 반복응력비( $\sigma_d/2\sigma_{vc}'$ )와 반복재하 횟수와 관계를 나타내었다. 본 연구에서는 초기 정적 전단응력으로 인해서 비교적 낮은 반복응력을 가해주었기 때문에 거의 대부분의 시험에서 10회 이상의 반복횟수에서 5%의 축 변형률이 발생하였다. 따라서 자갈혼합률에 따른 액상화강도를 비교하기 위해서 반복횟수 20회에서 5%의 축변형률이 발생하는 반복응력비,  $CSR_{5\%-20}$ 을 Fig. 11에 나타내었다. 자갈 혼합률이 약 40%이하의 범위에서는 자갈 혼합률이 증가할수록  $CSR_{5\%-20}$ 은 증가하나 40%를 정점으로 다시 감소한다. 압밀 후 공시체의 상대밀도가 40%로서 모두 동일하고 자갈 혼합률이 0%, 20%, 40%, 50%, 60%로 증가할수록 간극비는 각각 0.82, 0.70, 0.56, 0.48, 0.46으로 감소함에도 불구하고 자갈혼합률이 40%이상에서는  $CSR_{5\%-20}$ 은 등방압밀 공시체와는 달리 감소한다.

Vaid와 Chern(1983)의 연구에 의하면 상대밀도가 65% 정도로 조밀한 사질토의 경우에는 초기정적전단응력이 증가하게 되면  $CSR_{5\%-10}$ 은 계속해서 증가하나 상대밀도

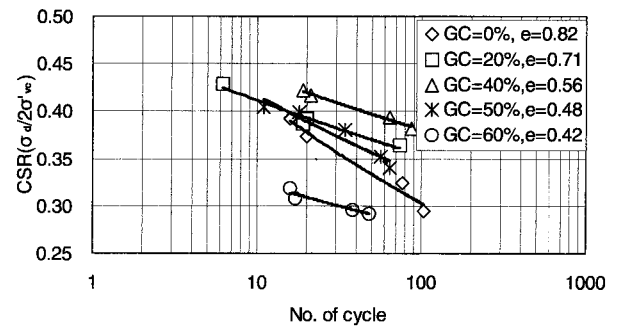


Fig. 10. Cyclic stress ratio at 5% of residual strain ( $\sigma_d/2\sigma_{vc}'$ ) versus number of cycle for the  $K_0$ -anisotropically consolidated specimens



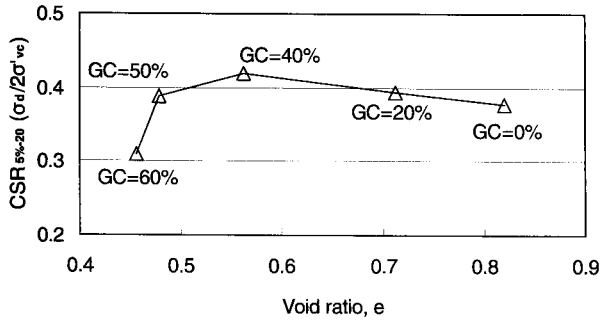


Fig. 11. Relationships among CSR<sub>5%-20</sub>, void ratio and gravel contents for  $K_0$ -anisotropically consolidated specimens of  $D_r=40\%$

가 45% 정도로 비교적 느슨한 경우에는 초기정적전단응력비가 증가하면 CSR<sub>5%-10</sub>은 초기에는 약간 증가하나 그 이후에는 계속해서 크게 감소한다고 하였다.

이들의 연구결과에 의해서 본 연구에서는 상대밀도가 40%로서 느슨하므로 자갈혼합률이 증가할수록 초기정적전단응력이 증가하므로 CSR<sub>5%-20</sub>은 초기정적전단응력이 비교적 낮은 초기에는 약간 증가하나 그 이후에는 계속해서 크게 감소할 것으로 예상된다.

따라서 자갈혼합률이 증가할수록 간극비는 감소하여 CSR<sub>5%-20</sub>은 증가하나 한편으로는 초기정적전단응력이 증가되므로 이에 따라 CSR<sub>5%-20</sub>은 자갈혼합률이 낮은 경우에는 약간 증가하나 높은 경우에는 크게 감소하는 것으로 생각된다. 본 연구에서 CSR<sub>5%-20</sub>은 자갈혼합률 40% 이하에서는 초기정적전단응력비의 증가로 인한 감소보다 간극비의 감소로 인한 증가원인이 더 크게 작용하고 40% 이상에서는 간극비의 감소로 인한 영향보다 초기정적전단응력의 증가로 인한 감소요인이 더 크게 작용했을 것으로 판단된다. Vaid와 Chem(1983)의 연구가 상대밀도 및 간극비가 일정한 상태에서 초기정적 전단응력의 변화에 따른 반복응력비(CSR)의 변화를 연구한 것과 달리 본 연구에서는 상대밀도는 일정하지만 자갈혼합률에 따라 간극비가 변하므로 이러한 경우에 대한 초기정적 전단응력, 반복응력비 관계는 보다 상세한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

- (1) 자갈-모래혼합토의 최대 및 최소 간극비는 자갈 혼합률이 증가할수록 감소하다가 어떤 경계 혼합률(여기서는 약 70%)을 저점으로 해서 다시 증가한다.

따라서 자갈 혼합률이 경계 혼합률 이하에서는 혼합토 공시체의 상대밀도가 일정한 경우 자갈 혼합률이 증가할수록 간극비는 감소하고 간극비가 일정한 경우 상대밀도는 감소한다.

- (2) 등방압밀시료에서 혼합토 시료의 상대밀도가 일정한 경우( $D_r=40\%$ ) 혼합토 시료내의 모래만의 간극비는 자갈 혼합률이 증가할수록 증가한다. 그리고 혼합토의 간극비가 일정한 경우( $e=0.7, 0.47$ ) 자갈 혼합률이 증가할수록 모래만의 간극비는 증가한다.
- (3) 자갈-모래 혼합토의 상대밀도가 일정한 경우 액상화 강도는 경계 혼합률 이하에서는 자갈 혼합률이 증가할수록 뚜렷하게 증가한다. 즉, 혼합토의 상대밀도가 40%인 경우 반복횟수가 10회째 양진폭 변형률 5%를 발생시키는 반복응력비 ( $\sigma_d/2\sigma'_{vc}$ ) 인 CSR<sub>5%-10</sub>은 자갈 혼합률이 0%에서 70%로 증가함에 따라 0.184에서 0.272로 크게 증가한다. 이는 혼합토내 모래의 간극비는 자갈 혼합률이 증가할수록 증가하는데도 불구하고 자갈-모래 혼합토의 간극비가 감소하기 때문이다.
- (4) 자갈-모래 혼합토의 간극비가 일정한 경우 자갈 혼합률이 증가할수록 혼합토의 상대밀도는 감소하고 또한 혼합토 내의 모래의 상대밀도도 감소하여 액상화 강도 CSR<sub>5%-10</sub>은 감소한다.
- (5) 따라서 자갈-모래 혼합토의 액상화 강도는 자갈 혼합률이 경계 혼합률 이하에서는 혼합토 내의 모래의 상대밀도나 간극비에 의해서 결정되지 않고 혼합토 전체의 상대밀도나 간극비에 의해서 결정된다.
- (6)  $K_0$ -이방압밀의 경우 자갈-모래 혼합토의 상대밀도가 일정한 경우 자갈 혼합률이 증가할수록 정지토 압계수는 감소하므로 일정한 연직 유효 응력 하에서 압밀된 공시체내의 초기정적전단응력은 증가하고 또한 간극비는 감소한다. 이로 인해 혼합토의 상대밀도가 비교적 낮은( $D_r=40\%$ ) 경우 액상화 강도 (CSR<sub>5%-20</sub>)는 자갈 혼합률이 40%이하에서는 자갈 혼합률이 증가함에 따라 증가하나 40%이상에서는 오히려 감소한다.

## 감사의 글

본 연구의 수행에 있어 실험을 적극적으로 도와준 대학원생 백준우, 이승훈 군에게 감사를 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. Banerjee, N.G., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1979), "Cyclic Behavior of Dense Coarse-Grained Material in Relation to the Seismic Stability of Dams", *EERC Report No. UCB/EERC-79/13*, Univ. of California, Berkeley, Calif.
2. Bowles, J.E. (1970), *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*, McGraw-Hill Book Company, Univ. of California, Berkeley.
3. Evans, M. D., Seed, H. B. and Seed, R. B. (1992), "Membrane compliance and Liquefaction of Sluiced Gravel Specimens", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.118, No.6, pp.856-872.
4. Evans, M. D. and Rollins, K. M. (1999), "Development in gravelly soil liquefaction and dynamic behavior", *Proceedings of the International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil*, pp.91-102.
5. Evans, M. D. and Zhou, S. (1995), "Liquefaction behavior of sand-gravel composition", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.3, pp.287-298.
6. Haga, K. (1984), "Shaking Table Tests For Liquefaction Of Gravel-Containing Sand", *Bachelor Thesis*, Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo, (in Japanese).
7. Hynes, M. E. (1988), *Pore pressure generation characteristics of gravel under undrained cyclic loading*, PhD Dissertation, Univ. of California, Berkeley, Calif.
8. Kokusho, T. and Hiraoka, R. (2004), "Undrained shear strength of granular soils with different particle gradation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.6, pp. 621-629.
9. Nicholson P. G., Seed, R. B. and Anwar, H. A. (1993), "Elimination of Membrane Compliance in Undrained Triaxial Testing, Measurement and Evaluation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, No.5, pp.727-738.
10. Seed, R. B., Anwar, H. A. and Nicholson, P. G. (1989), "Elimination of membrane compliance effects in undrained testing of gravelly soils", *Proc., 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.111-114.
11. Siddiqi, F. H. (1984), *Strength evaluation of cohesionless soils with oversized particles*, PhD Dissertation, University of California, Davis, Calif.
12. Ueng, T. S., Lin, M. L., Chu, C. M. and Lin J. S. (2002), "Dynamic characteristics of soils in yuan-lin liquefaction area", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol.25, No.5, pp.555-565.
13. Vaid, Y. P. and Chern J. D. (1983), "Effect of static shear on resistance to liquefaction", *Soil and Foundation Engineering*, Vol.23, No.1, pp.47-60.
14. Wang, W. (1984), "Earthquake damage to earth and Levees in relation to soil liquefaction", *Proc. of the Int. Conf. on Case Histories on Geotech. Engrg.*, Vol.1, Univ. of Missouri-Rolla, Rolla, pp.511-521.
15. Wong, R. T., Seed, H. B. and Chan, C. K. (1974), *Liquefaction of gravelly soils under cyclic loading conditions*, Rep. No. UCB/EERC-7411, Earthquake Engineering Research Center, Coll. of Engrg., Univ. of California, Berkeley, Calif.

(접수일자 2007. 3. 8, 심사완료일 2007. 9. 5)