

# 反復三軸壓縮試驗에 의한 砂質土의 液狀化 評價에 관한 研究

## A Study on the Evaluation of Liquefaction of Sandy Soils by the Cyclic Triaxial Compression Test

高 在 晚\* · 都 德 鉉\*\*  
Koh, Jae Man · Doh, Duk Hyun

### Summary

A comprehensive laboratory investigation of the liquefaction characteristics of Jumunjin standard sand, Seoul sand and Hongsung sand was performed by the undrained cyclic triaxial compression test under different relative densities, confining pressures and cyclic deviator stresses.

The results obtained are as follows :

1. Liquefaction potential was dominated by the stress ratio at a given number of cycle. That is, the number of cycle required to cause initial liquefaction became smaller as the stress ratio increased.
2. Liquefaction potential of a sand was influenced by initial relative density or void ratio. Under a given relative density, liquefaction potential of Jumunjin standard sand and Seoul sand was smaller than that of Hongsung sand.
3. The pore pressure ratio of Hongsung sand was the smallest among three under a given relative density and stress ratio, and it showed higher value when the cyclic stress and the shear strain were high.
4. An excessive pore pressure ratio was not found when initial shear strain was smaller than 0.01%, and the pore pressure ratio started to increase when initial shear became greater than 0.01%.
5. Soil texture is an important factor to cause liquefaction, and liquefaction potential decreased as the mean grain size decreased, however the sand having fine grain such as Hongsung sand

\* (株) 平原엔지니어링

\*\* 建國大學校 農科大學

키워드 : 砂質土, 反復三軸壓縮試驗, 反復軸差應力, 液狀化, 拘束壓, 應力比, 空隙水壓, 相對密度, 初期剪斷變形, 軸變形, 洪城地震

showed somewhat higher liquefaction potential.

6. Based on the analysis of the specimens whose number of the cycles to cause liquefaction was 8~12, it was found that the relationship between density and stress ratio was linear. The curves for Hongsung sand was steeper than the others.

7. From the above results and the method suggested by Seed-Idriss, it may be considered that the damages by Hongsung earthquake was not directly caused by liquefaction.

## I. 緒 論

飽和砂質土의 地盤上에 築造된 構造物이 어느 限界以上으로 큰 地震動을 받으면 地盤이 液狀化되어 構造物에 큰 피해를 주게 된다.

近年에는 세계적으로 強震이 빈번히 발생하여 人的 物的인 큰 피해를 주고 있으며, 따라서 耐震設計에 대한 관심이 날로 높아져 가고 있다.

특히 飽和砂質地盤에 規模(M) 5.0이상의 지진이 발생하면 地盤의 液狀化로 인하여 이 위에 건설한 아파트, 堤, 道路, 橋梁, 港灣施設등이 變形, 崩壞, 陷沒되어 피해를 주는 경우가 많으며, 防潮堤의 경우에는 地盤自體의 液狀化 뿐만 아니라 築堤材料에 따라서는 堤體의 液狀化 피해를 입은 事例도 있다.

따라서 우리나라에서도 1978년 洪城地震 이후 原子力 發電所, 고층아파트, 地下鐵, 대규모의 防潮堤 등 주요 구조물에 대하여 耐震設計를 검토하기에 이르렀다.

液狀化 발생의 메카니즘은 相對密度( $D_r$ )가 낮은 地盤은 非排水狀態에서 反復剪斷應力을 받으면 負의 다이러턴시로 體積이 감소하면서 空隙水壓이 상승하여 有效應力이 0으로 되면서 剪斷抵抗을 상실하는 현상이다.<sup>2, 4, 29, 35)</sup> 液狀化 현상이 일어나기 쉬운 地盤은 堆積된 砂質地盤은 물론이고 하천의 舊河道, 干拓地, 湖岸 등을 砂質土나 沖積土로 埋立한 地盤등도 液狀化 가능성이 있는 것으로 알려져 있다.

液狀化의 評價方法은 Seed,<sup>30)</sup> 紫田<sup>33)</sup>등에 의하여 基礎的 理論이 확립되어 왔으며 최근에는 地形, 地質 및 液狀化 履歷을 토대로 한 評價

方法, CPT<sup>24)</sup>, SPT<sup>31)</sup>의 現地 土質調査試驗結果를 이용한 簡易豫測法,<sup>27, 32, 34)</sup> 現地 地震波 探查와 室內試驗을 통하여 地震應答解析에 의한 嚴密判定法<sup>26)</sup> 등이 활용되고 있다.

이 중 室內試驗으로는 反復三軸壓縮試驗,<sup>19, 21, 22, 36)</sup> 反復單純剪斷試驗<sup>10, 19)</sup> 反復비틀림試驗과 靜的비틀림試驗,<sup>2, 17)</sup> centrifuge model,<sup>14)</sup> 振動臺試驗<sup>24)</sup> 등에 의한 液狀化 強度를 評價하는 方法이 많이 이용되고 있는데, 이들 시험결과는 粒度, 相對密度, 剪斷強度, 壓縮性, 過壓密比, 非等方性 등 試料自體의 物理的, 力學的 特性<sup>38)</sup>의 영향을 받는다.

특히 反復三軸壓縮試驗은 공시체의 設置 및 試驗條件의 문제점은 있으나 지진시 地반조건의 再現性이 他 시험방법에 비하여 용이하고 또한 시험시설이 간단하므로 본 연구에서는 이 시험방법을 사용하였다.

外國에서는 地震時 地盤의 液狀化舉動에 관한 연구가 많이 이루어져 耐震設計를 하고 있으나, 우리나라에서는 아직 暫定的으로 결정된 設計 地震規模와 地質特性에 부합되는 地盤의 液狀化에 대한 연구가 거의 이루어져 있지 않아 外國의 자료를 그대로 이용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 粒度와 粒形이 서로 다른 注文津表準砂, 서울砂(漢江砂) 및 洪城砂에 대하여 反復三軸壓縮試驗을 하여 이들 試料의 特性, 拘束壓과 反復軸差應力의 크기 등이 液狀化에 주는 영향을 究明하고 최근 우리나라에서 頻發하고 있는 地震規模가 이들 砂質地盤에 발생할 때, 液狀化 가능성을 평가하여 今後 耐震設計에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## II. 材料 및 方法

### 1. 使用試料

使用試料는 注文津標準砂(KS L 5001), 서울砂, 洪城砂이며, 이들 3가지 試料중에서 서울砂는 漢江의 올림픽大橋 南端지점에서, 그리고 洪城砂는 1978년 洪城地震時 主要 피해지역인 洪城邑내의 深度 6m에서 採取하였다.

各 試料의 物理的 性質과 粒度分布曲線은 Table-1 및 Fig. 1이다.

이들 試料의 粒度分布와 物理的性質은 서로 유사하나 注文津標準砂가 球形度면에서 他 試料에 比하여 둥근편이며 서울砂는  $D_{max}$ 이 3.0 mm내의 粗粒砂이며 洪城砂는 細粒土가 7.7% 함유되어 있다.

### 2. 試驗 裝置

反復三軸壓縮試驗裝置의 主要부분은 制御裝

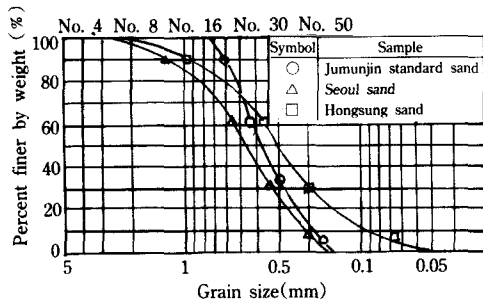


Fig. 1. Grain size distribution curves

置, 試驗機 本體, 油壓裝置, 計測裝置, 데이터 貯藏 및 處理裝置로 構成되어 있으며 그 기능을 요약하면 다음과 같다.

제어장치에 入力 가능한 波形은 三角波, 矩形波, sine波 등 3종류이며, 振動數는 正確度 1.5 % 이내에서 0.1~2Hz이다.

試驗機 本體는 전기신호로 주어진 入力이 제어밸브의 작용에 의해 油壓回路의 油量 變動으로 油壓실린더를 작동시켜 50mm(D)의 載荷로드 (rod)와 載荷피스톤을 통하여 三軸셀 내부의 공시체에 전달되어 供試體 상하단에 설치된 荷重檢出機에 의하여 所要荷重을 反復載荷한다.

유압장치는 軸壓 및 側壓載荷用的 油壓실린더에 高油壓을 공급하며 最大유압은  $70\text{kg/cm}^2$ 이다.

計測裝置는 공시체 상하단의 받침대에 설치한 荷重檢出機에 의하여 공시체 상하단면에 가해진 荷重의 크기를 항상 精確하게 檢出하며 側壓, 空隙水壓은 最大  $5\text{kg/cm}^2$ 의 小型壓力變換機에 의해 측정된다. 軸變位는 셀의 외부에 있는 載荷로드의 LVDT에 의하여 측정된다.

데이터貯藏 및 處理裝置에서는 이상의 構成 裝置를 통하여 出力되는 데이터를 貯藏, 處理하며 X-Y레코더 및 X-Y플로터 등이 있다.

### 3. 試驗方法

供試體 製作 및 試驗方法은 下部加壓盤의 多

Table-1. Physical properties of materials tested

Materials tested	$G_s$	$D_{max}$ (mm)	finer than No. 200 sieve (%)	k at $D_r=50\%$ (cm/sec)	$D_{50}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	$C_u$	$e_{max}$	$e_{min}$	Shear strength ( $D_r=50\%$ )		Sphericity	USCS	Shape
										$c(\text{kg/cm}^2)$	$\phi(^{\circ})$			
Jumunjin standard sand	2.66	0.8	-	$2.1 \cdot 10^{-2}$	0.39	0.18	2.00	1.25	0.72	-	34.2	0.81	SP	Subround to round
Seoul sand	2.65	3.0	-	$8.3 \cdot 10^{-2}$	0.48	0.20	3.30	1.48	0.81	-	38.9	0.78	SP	Subangular to angular
Hongsung sand	2.67	2.7	7.7	$3.5 \cdot 10^{-3}$	0.30	0.11	3.45	1.08	0.66	0.17	27.5	0.72	SW-SM	Angular

孔盤위에 여과지를 놓고 멤브레인(두께 : 0.25 mm)을 고무밴드로 묶고 외부에 50mm(D)×100 mm(H)의 분할몰드를 고정시킨다. 이때 멤브레인이 몰드벽에 밀착되도록 몰드의 흡입구에眞空튜브를 연결하여 공기를 흡입시킨다.

모든 공시체는 氣乾試料를 이용하여 空中落下法(air pluviation method)에 의하여 갈때기의 직경과 落下高를 조절하여 요구하는 相對密度( $D_r$ )를 맞추었으며, 만일 이에 미달되는 경우에는 몰드의 側壁을 고무망치로 충격을 가하면서 3층 棒다짐을 하여 이를 높이는 방법도 이용하였다.

이와 같이 제작한 供試體위에 여과지 및 上部加壓盤을 설치함과 동시에 멤브레인을 고무밴드로 上部加壓盤에 묶은 후 공시체의 붕괴를 방지하기 위하여 負壓으로 三軸셀에 液壓을 가하여 공시체가 안정된 상태에서 空隙水壓係數(B)가 0.96이상 되도록  $0.5\text{kg/cm}^2$  내외의 背壓을 가하여 2~3시간 飽和시켰으며 軸差應力( $\sigma_d$ ) 및 拘束壓( $\sigma_3'$ )은 시료의 粒度和  $D_r$ 에 따라 달리 하였으며 振動數는 0.2~1.0Hz의 범위로 하였다.

그리고 比重, 粒度, 相對密度, 球形度, 透水試驗 등 試料의 物理的 性質試驗과 三軸壓縮試驗 등은 韓國工業規格에 준하여 실시하였다.

### III. 結果 및 考察

#### 1. 壓力比와 液狀化와의 關係

注文津標準砂, 서울砂 및 洪城砂의 試料에 대하여  $\sigma_3'$ 과  $\sigma_d$ 을 변화시켜 실시한 試驗結果를 要約하면 Table-2와 같다.

Table-2에서 同一 試料에서는  $D_r$ 가 클 수록 液狀化強度는 증가하였으며 또한, 拘束壓이 같은 경우는 反復軸差應力이 작을수록 初期液狀化가 발생되는 反復回數( $N_i$ )는 크게 나타났다. 그리고  $N_i$ 는 5% 兩振幅變形( $DA_5$ : double amplitude)을 일으키는 反復回數( $N_5$ )와 같거나 1~3회 정도 적었으며, 10% 兩振幅變形( $DA_{10}$ )을 일

으키는데 요하는 反復回數( $N_{10}$ )는  $N_5$ 보다 1~5회 많게 나타났다. 또한  $D_r$ 가 작은 試料일수록  $N_i$ ,  $N_5$ ,  $N_{10}$ 사이의 차이가 적었다.

한편  $\sigma_d$  및  $\sigma_3'$ 는 각각 독립적인 因子로 液狀化強度를 비교하는 것보다는 이를 無次元化하여  $\sigma_3'$ 의 영향을 배제한 應力比( $\sigma_d/2\sigma_3'$ )을 基準으로 評價하는 것이 합리적인 것으로 알려져 있다. (3.9.23)

Fig. 2는 試料別,  $D_r$ 에 대하여  $\sigma_d/2\sigma_3' \sim N_i$ 와의 關係를 나타낸 것으로, 이 중 實線은 Seed 등<sup>29)</sup>이 Sacramento河川砂를 대상으로 한 反復三軸壓縮試驗結果를, 나타낸 것이다. 또 點線 및 一點鎖線은 Finn<sup>11)</sup>이 Ottawa砂를 대상으로 한 反復單純剪斷試驗 및 反復三軸壓縮試驗 結果의  $\sigma_d/2\sigma_3' \sim N_i$ 와의 關係에서 平均을 나타낸 것이다.

Fig. 2에서  $D_r=45\%$  이하의 注文津標準砂는 埋立土이외의 現地地盤에서는 실제 거의 존재할 수 없는 느슨한 狀態이므로  $\sigma_d/2\sigma_3' \sim N_i$ 의 關係에서 일반적으로 나타나는 液狀化 範圍보다 더 용이한 것으로 나타났다.

그러나 應力比가 작고, 相對密度가 큰 조건에서는 液狀化強度가 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 Ottawa砂, Monterey砂, Banding砂 등의 동일조건에서의 反復三軸壓縮試驗과 反復單純剪斷試驗 結果와 유사한 경향을 나타냈다. (10.11.29.33.34) 그 이유는  $\sigma_3'$ 의 增加에 따른 모래의 剛性和 滑動의 증가와 關係가 있는 것으로 생각되며, 실제 現地地盤에서 有效土被壓이 클수록 液狀化 抵抗性이 크다는 것을 예측할 수 있다.

즉 1964년 Niigata地震시 周邊地盤은 대부분 液狀化를 일으켰으나 3m두께의 盛土層아래에 堆積된 모래층은 안전하였던 이유는 이에 기인한 것으로 알려져 있으며, 深度가 15~20m 이하인 약  $2.0\text{kg/cm}^2$  이상의 初期 鉛直有應力을 받는 砂質地盤은 液狀化 可能性이 희박하다고 하였다. (23.25.28.35)

또한 현지의  $\sigma_3'=0.5\text{kg/cm}^2$  이하인 地表附近의

Table-2. Summary of test result obtained from cyclic triaxial test on the sand

Sample	D <sub>r</sub> (%)	B value	σ <sub>v</sub> ' = σ <sub>3</sub> ' (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>n</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Stress ratio (Δσ <sub>n</sub> /2σ <sub>3</sub> ' )	Initial liquefaction (cycles)			
						5%	10%	15%	
Jumumjin standard sand	38	0.98	0.5	0.159	0.159	5	5	6	
			1.0	0.242	0.121	8	8	10	
			1.5	0.381	0.127	8	9	11	
			2.0	0.580	0.145	10	10	12	
	45	0.98	0.5	0.170	0.170	8	9	9	
			1.0	0.342	0.171	8	8	10	
			1.5	0.543	0.181	9	10	12	
			50	0.97	0.5	0.227	0.227	9	10
	58	0.97	1.0	0.414	0.207	11	12	14	
			1.5	0.652	0.217	13	14	17	
			0.5	0.244	0.244	15	17	20	
	72	0.96	1.0	0.474	0.237	16	17	21	
0.5			0.251	0.251	28	30	33		
84	0.96	1.0	0.660	0.330	26	28	30		
		0.5	0.281	0.281	42	45	48		
Seoul sand	50	0.98	1.0	0.652	0.326	36	37	40	
			0.5	0.201	0.201	10	12	14	
			1.0	0.402	0.211	12	12	15	
	63	0.97	1.5	0.645	0.215	11	12	14	
			0.5	0.221	0.221	17	19	22	
			1.0	0.474	0.237	16	17	22	
	76	0.96	0.5	0.241	0.241	31	32	35	
			1.0	0.534	0.267	30	33	36	
	Hongsung sand	50	0.97	1.5	0.615	0.205	21	23	26
				0.5	0.301	0.201	16	18	20
				1.0	0.446	0.223	20	21	24
		58	0.96	1.0	0.670	0.335	24	26	29
0.5				0.301	0.301	28	30	35	
1.5				0.615	0.205	21	23	26	
73		0.96	0.5	0.304	0.304	35	37	42	
			1.0	0.648	0.324	34	36	41	

土層에서는 過剩空隙水壓의 消散이 가능하므로 液狀化가 발생하지 않을 것으로 예측된다.

서울砂는 注文津標準砂와 液狀化強度가 유사한 경향을 보였으나 洪城砂는 이상의 2가지 試料보다 液狀化強度가 큰 값을 나타내었다. 이것은 粒度와 粒形의 영향은 물론 粘着力을 갖는 試料는  $N_i \sim \sigma_d / 2\sigma_3'$ 와의 關係를 일률적으로 正할수 없다는 결과와 일치된다.<sup>37)</sup>

한편, 본 試驗에 사용된 시료는 注文津標準砂의  $D_r = 45\%$  이하의 試料를 제외하고는 他 試驗 結果와 유사한 경향을 나타냈다.<sup>10, 11, 28, 30)</sup>

## 2. 空隙水壓比와 液狀化와의 關係

現地地盤에서 地震動에 의하여 발생하는 空隙水壓(u)의 消散量은 소량이므로 이를 무시하는 경우가 많다. 따라서 液狀化 評價에서는 非

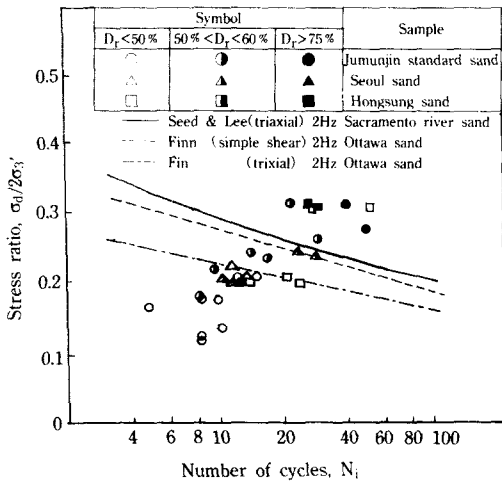


Fig. 2. Relationship between number of cycles required to cause initial liquefaction and cyclic stress ratio

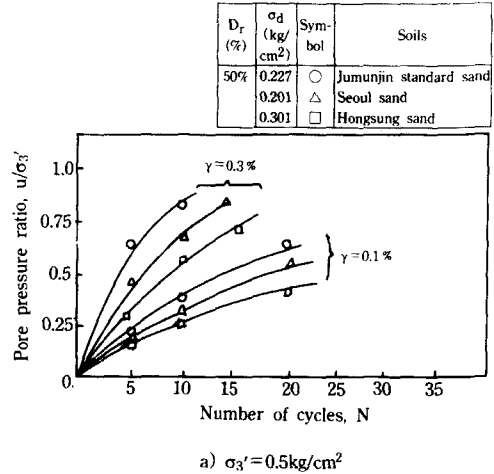
排水條件에서 試驗하는 경우가 일반화 되어 있다.

空隙水壓은 反復軸差應力振幅에 지배되므로 그 평가기준치로서 空隙水壓을 正規化한 空隙水壓比( $u/\sigma_3'$ )로 나타내는 것이 합리적이다. (1.4. 12. 15. 19)

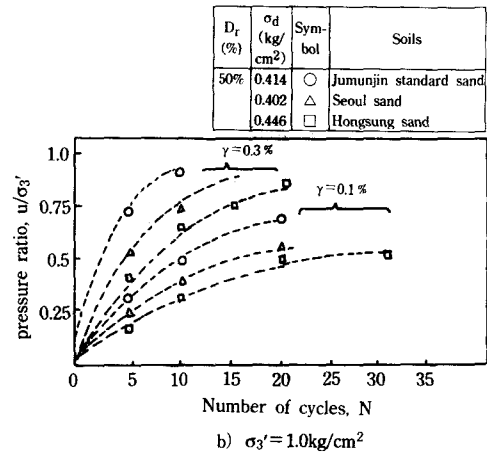
飽和砂에 대하여 非排水狀態에서 反復軸差應力을 가하면 空隙水를 포함한 전체적인 體積의 감소는 일어나지 않는 대신 有效應力이 감소한다.

즉 反復軸差應力에 의하여 供試體가 變形을 일으키게 되면 흙의 構造는 그의 體積을 감소시키려는 방향으로 변하며, 이에 작용한 應力은 空隙水壓으로 바뀌어진다.

Fig. 3은  $N \sim u/\sigma_3'$ 와의 관계를 剪斷變形( $\gamma$ ) 0.1% 및 0.3%에 대하여 나타낸 것으로 Fig. 3(a)는 試料別  $D_r=50\%$ ,  $\sigma_3'=0.5\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_d=0.227 \sim 0.301\text{kg/cm}^2$  조건에서의 試驗結果이며 Fig. 3(b)는 동일  $D_r$ 과  $\sigma_3'=1.0\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_d=0.414 \sim 0.446\text{kg/cm}^2$ 의 試驗條件에 대한 결과를 나타낸 것이다.  $u/\sigma_3'$ 는 동일한 반복회수에서는 應力比( $\sigma_d/2\sigma_3'$ )가 클수록 비례하여 큰 값을 보



a)  $\sigma_3' = 0.5\text{kg/cm}^2$



b)  $\sigma_3' = 1.0\text{kg/cm}^2$

Fig. 3. Relationship between number of cycles and pore pressure

였으며, 또한  $\gamma$ 이 클수록 비례하여 큰 값을 보였다. 한편 동일한  $\gamma$ 에서는 注文津標準砂, 서울砂, 洪城砂의 순으로  $u/\sigma_3'$ 가 작았다.

이는 拘束壓이 일정할 때의 동일한  $\gamma$ 에서는 서울砂, 注文津標準砂 등에서 空隙水壓의 발달이 용이하기 때문으로 생각된다.

다만 洪城砂는 細粒土의 舉動으로 인하여 液狀化 抵抗性이 큰 것으로 추측되며, 따라서 空隙水壓比가 他 試料에 비하여 작았는데 이는 Campanella<sup>6)</sup>가 보고한 稠密한 모래의 舉動과 유사한 경향을 보였다.

Fig. 4는 3가지 試料에 대하여  $\sigma_3' = 0.5 \sim 1.5$   $\text{kg/cm}^2$ ,  $N=5$ 에서의  $\gamma \sim u/\sigma_3'$ 와의 관계를 나타낸 것이다.

注文津標準砂, 서울砂는  $\gamma=0.01\%$  전까지는 空隙水壓을 거의 발생되지 않았으며 이보다 큰 剪斷變形에서는 空隙水壓比가 증가하기 시작하였다.

즉 過剩空隙水壓이 발생하기 시작할 때의  $\gamma$ 은 初期變形的 범위를 초과해야 한다. 이 初期剪斷變形은 空隙水壓比가 증가하기 시작하는데 필요한 變形과 일치하며, 이 점은 3가지 試料 모두 약 0.01% 정도의 變形點으로 나타났다.

따라서  $N=5$ 보다 작은 反復回數에서의  $\gamma=0.01\%$  이하의 變形率이며, 이때  $u/\sigma_3'=0$ 을 나타낸다.

다만 여기서는 非排水狀態에서 反復三軸壓縮試驗을 하였으므로 過剩空隙水壓의 발달과정에서의 透水係數( $k$ )와는 無關하나 過剩空隙水壓의 消散과정에서는  $k$ 가 空隙水壓에 영향을 준다고 하였다.<sup>16, 17)</sup>

이상의 試驗結果는 동일조건에서의 Dyvik<sup>8)</sup> NBS,<sup>24)</sup> 등의 Monterey O Sand, 그리고 NBS<sup>24)</sup>가 報告한 Crystal Sand의 시험결과와 거의 일치하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 初期液狀化시점에서 最大過剩空隙水壓( $u_{max}$ )의 拘束壓( $\sigma_3'$ )에 대한 비( $u_{max}/\sigma_3'$ )

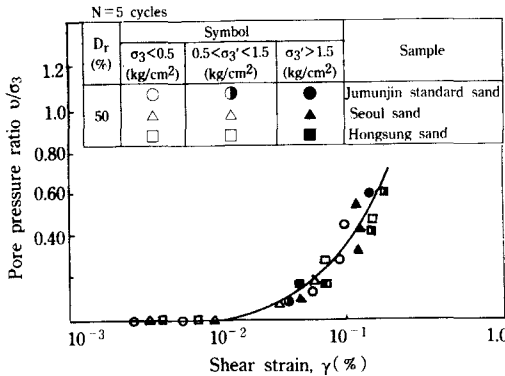


Fig. 4. Relationship between shear strain and pore pressure ratio

와  $D_r$ 와의 관계를 나타낸 것이며, 完全液狀化시점에서는  $u_{max}/\sigma_3'=1$ 이 된다.

그러나 모든 試料의  $u_{max}/\sigma_3'$ 는 대략 0.5~0.8 범위로 분포하였으며, 동일한  $D_r$ 에서는 洪城砂의  $u_{max}/\sigma_3'$ 가 가장 작았으며  $D_r$ 이 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였다.

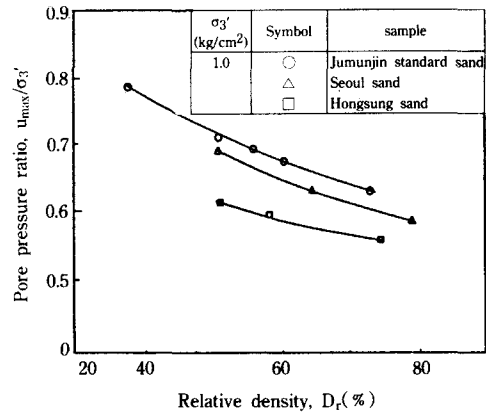


Fig. 5. Relationship between relative density and pore pressure ratio

### 3. 土性和 液狀化와의 관계

液狀化에 영향을 주는 因子는 粒度分布, 透水性 등 시료의 物理的 性質의 차이는 물론, 粒子的 表面形狀이나 粒子骨格構造의 차이에 기인하는 壓縮性, 摩擦抵抗 등의 力學的 성질도 들수 있다.

Table-2에서 注文津標準砂의 경우  $D_r=50\%$ ,  $\sigma_3'=0.5\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_d=0.227\text{kg/cm}^2$ 인 조건에서 반복회수가 증가됨에 따라 振幅變形이 漸增하여  $N_1=9$ 이었으며 5% 振幅變形  $N_5=10$ , 10% 振幅變形  $N_{10}=13$ 에서 나타났다. 한편 동일 조건하에서의 서울砂와 注文津標準砂를 비교하면 粒度分布는 비슷하나, 粒形이 약간 모가 나 있으므로 反復荷重이 계속될 때 應力, 變形, 空隙水壓의 時間依存性이 注文津標準砂에 비하여 液狀化 舉動이 다소 鈍感하였다. 그러나 粒度, 粒形, 相對密度 등을 고려하면 서울砂도 液狀化

를 일으키는데 용이한 시료로 판단된다.

한편 洪城砂의 경우  $D_r = 50\%$ ,  $\sigma_3' = 0.5\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_d = 0.201\text{kg/cm}^2$ 인 조건에서는 他 시료에 비하여 粒度分布가 양호하고 粒形이 모가 나 있으며 No. 200체를 통과한 細粒土含量이 7.7%로서, 이로 인한 粘着力의 작용으로<sup>5)</sup> 他 시료에 비하여 液狀化의 저항성이 큰 것으로 나타났다.

$D_{50} = 0.30\text{mm}$ 이고  $D_{10} = 0.10\text{mm}$ 인 洪城砂도  $\sigma_3'$ 과  $\sigma_d$ 조건에 따라 다르나 液狀化 가능성이 충분히 있는 試料로 판단된다. 洪城砂와는 달리 注文津標準砂, 서울砂의 初期液狀化 발생에 필요한 反復回數의 차이가 크게 나타나지 않는 이유는 적용한 反復軸差應力의 영향도 어느정도 받은 것으로 판단된다.

그러나 粒度分布 자체에 의한 液狀化 可能性을 定量的으로 평가하기는 곤란하므로  $D_{10}$ ,  $C_u$ 로부터 液狀化에 주는 영향을 검토하는 것이 일반적이다.

Fig. 6은  $D_r = 50\%$ ,  $N_f = 8 \sim 12$ 에서 液狀化를 일으키는 모래의  $D_{50}$ 과  $\sigma_d/2\sigma_3'$ 와의 관계를 나타낸 것이며 과거 地震發生地域에서 液狀化를 일으킨 경험 있거나 反復三軸壓縮試驗에서  $N_f = 10$ 에서의 液狀化를 일으킨 試驗자료를 함께 나타낸 것으로 平均粒徑이 1.0mm에서 0.1mm까지 점차 감소함에 따라 液狀化抵抗性이 감소하는 경향을 보였는데 Seed<sup>30)</sup>도 이와 유사한 결과를 보고한 바 있다.

Fig. 6에서 點線은 初期液狀化를 일으키는  $N_f = 30$ 에서의 Lee<sup>18)</sup> 등에 의한 統計的 實驗結果이며, 一點鎖線과 實線은 Seed<sup>30)</sup> 등의 미국의 모래에 대한 實驗結果를 정리한 것이며, 일본의 모래는 二點鎖線으로 나타내었다. 특히 Lee<sup>18)</sup>의 결과는 反復三軸壓縮試驗에 의한 것으로서 粒徑의 차이가 液狀化強度에 주는 영향에 관한 여러가지 모래의 相對的 關係를 이해하는데 도움이 되고 있다. 이중에서 Seed<sup>29)</sup> 등이 제안한 實線은 다른 연구자의 성과를 종합한 것이며 試驗裝置, 粒子의 形狀, 粒子構造등의 차이에

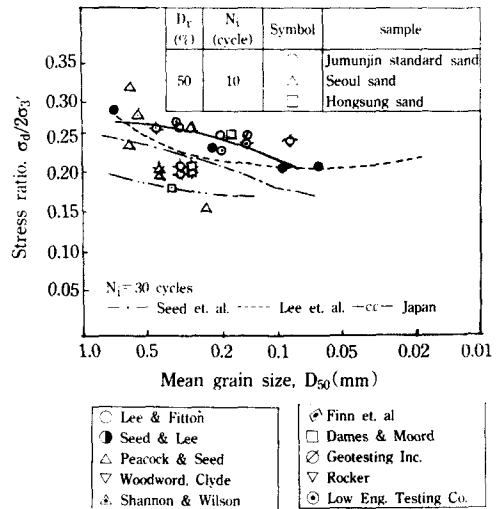


Fig. 6. Stress condition causing liquefaction

대한 영향도 잠재적으로 포함되어 있는 것인데 본 시험자료도 이들 데이터와 어느 정도의 分散 범위내에 들었다. 따라서 실용적인 면에서 동일  $D_r$ 에 대하여서는  $D_{50}$ 을 기준으로 液狀化의 가능성을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나  $D_{50}$ 은 液狀化評價를 위한 하나의 因子로 생각할 수 있으나 독립된 요소로 생각하기에는 어려움이 있다.

만약 相對密度가 다른 경우  $D_r = 80\%$ 까지는 初期液狀化를 일으키는데 요구되는  $\sigma_d$ 이 대략  $D_r$ 에 비례하므로<sup>29)</sup> 이로부터 간접적으로 液狀化特性을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

한편  $D_{50} = 0.30\text{mm}$ ,  $D_{10} = 0.10\text{mm}$ 인 洪城砂는 동일시험조건에서 他 試料에 비하여 液狀化 強度가 가장 크게 나타났으나 洪城 沖積地盤의 深度 6~8m에서의  $D_r = 54\%$ 인 것을 고려하면<sup>7)</sup> 地震의 규모가 클 경우 液狀化 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 注文津標準砂, 서울砂, 洪城砂의 初期液狀化 발생에 필요한 反復回數의 차이가 크게 나타나지 않는 이유는 적용한  $\sigma_d$ 의 차이 및 供試體 製作方法의 영향도 받은 것으로 생각된다. 즉 본 試驗에 사용한 空中落下法은 同一試驗條件下에서 他 製作方法에 비해 液狀



化強度가 낮게 나타난다고 하였다.<sup>20,22)</sup>

이상을 종합하면 동일한  $D_r$ 에서 注文津標準砂는 地震時 液狀化可能性이 가장 높고, 서울砂는 主문진표준사보다는 液狀化 強度가 약간 크게 나타나 역시 液狀化를 일으킬 수 있는 시료라고 판단된다.

#### 4. 홍성지진의 液狀化 評價

洪城砂에 대하여 粒度,  $\sigma_d/2\sigma_3'$ ,  $u/\sigma_3'$  등을 기준하여 液狀化可能性을 評價한 바에 의하면 液狀化強度가 비교적 컸으며 또한 낮은  $\sigma_d/2\sigma_3'$  조건에서는 液狀化可能性이 희박함을 指摘한 바 있다.

최근 韓半島에 발생한 最大地震規模(M)는 5.0~5.3 범위였으며 이와같은 地震規模를 기준으로 反復三軸壓縮試驗에 의하여 液狀化可能性의 판정시  $N_i=8\sim 12$ 를 적용하는 것이 안전하다고 하였다.<sup>13)</sup>

따라서 Fig. 7은  $N_i=8\sim 12$ 에서 液狀化를 일으키는 데 요하는  $\sigma_d/2\sigma_3'$ 와  $D_r$ 와의 關係를 나타낸 것으로 粒度和 粒形이 비슷한 注文津標準砂와 서울砂의 相關關係는 式(1)과 같으며 洪城砂는 式(2)로 나타났다.

$$(\sigma_d/2\sigma_3')_{N_i=8-12} = 0.9 D_r \dots\dots\dots(1)$$

$$(\sigma_d/2\sigma_3')_{N_i=8-12} = 1.10 D_r \dots\dots\dots(2)$$

式(2)에서 洪城砂의 경우는 서울砂보다 기울기가 급한 값을 나타내고 있는데 이는 液狀化強度가 크다는 것을 의미한다.

Seed<sup>28)</sup> 등은  $D_r$ 와  $\sigma_d/2\sigma_3'$  사이는 直線關係가 성립한다고 하였고, 梅原<sup>37)</sup>도  $D_r=30\sim 70\%$  범위에서는 비례關係를 나타내며 日本 豊浦標準砂에 대해서  $(\sigma_d/2\sigma_3')_{N_i=20}=0.0035D_r$ 의 式이 성립되었다고 하였는데 이는 본 試驗結果에 비해 약간 낮은 값을 나타내었다.

地震時 현지地盤의 液狀化 可能性을 豫測하는 解析方法은 反復荷重強度와 外力의 크기를 비교하여 평가한다.<sup>29)</sup> 즉 不規則한 外力을 等價 振幅波形으로 바꾸거나 동일한 振幅荷重을 취하여 구한 強度를 不規則荷重에 대한 強度로 바꾸는 방법이 이용되고 있다. 前者의 경우 地震規模(M)가 6, 7, 8로 증가됨에 따라 等價振幅應力의 反復回數를 각각 10, 20, 30회로 증가시켜 液狀化 발생여부를 評價하고 있다. 그리고 後者は 變形制御 反復剪斷試驗에서 여러가지 不規則波를 이용하여 그 결과를 等價振幅에서의 시험결과와 비교하여 換算倍率을 결정하는 방법이다.

室内反復三軸壓縮試驗에 의한 液狀化의 評價에 있어서는 일반적으로 sine波를 적용하고 있으나 地震波는 不規則波形을 이루므로 NBS<sup>24)</sup>, Seed-Idriss<sup>30)</sup> 등은 不規則荷重중에서 最大應力에 대한 65%를 室内反復荷重試驗에서의 等價剪斷應力振幅으로 적용시키는 것이 합리적이라고 하였다.

Fig. 8은 實測資料를 토대로 Seed-Idriss<sup>30)</sup>가 제시한 地震規模와 等價剪斷應力과의 關係를 나타낸 것으로  $D_r=54\%$ 의 地盤條件<sup>8)</sup>에서 발생한 洪城地震 規模에 대하여 Seed-Idriss의 座標에 나타내어 본 결과 洪城地震의 경우는 液狀化 발생가능성이 희박한 것으로 나타났다.

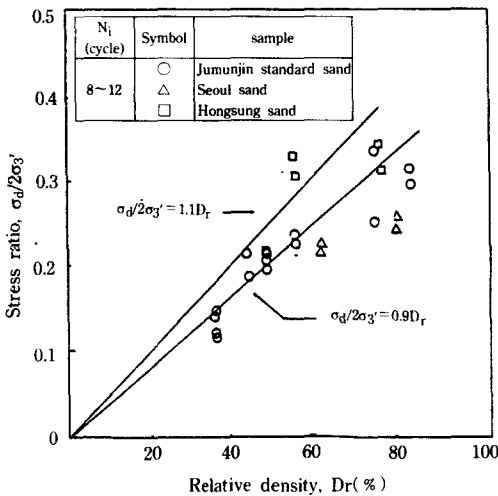


Fig. 7. Relationship between relative density and cyclic stress ratio

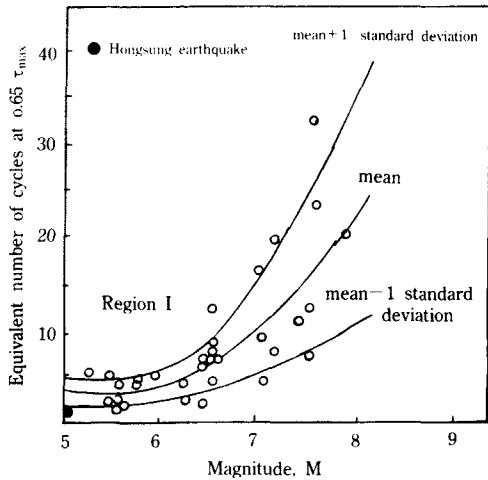


Fig. 8. Equivalent numbers of uniform stress cycles based on strongest components of ground motion

Fig. 8에서 液狀化強度는 洪城砂가 가장 크게 나타났다.

梅原<sup>37)</sup>은 液狀化에 대한 危險度를 나타내는 방법으로  $D_r$ 를 媒介變數로 하여 深度別로 제시하였는데 느슨한 모래層이나 未壓密된 粘土層의 경우는 4~15m 深度에서 특히 液狀化가 용이한 것으로 판명되었다고 하며 이 지점에서는 지진 규모  $M=5$ 이상에서 液狀化가 가능하다고 하였다.

이상의 결과를 종합하면 1978年 10月 7일에 발생한 洪城地震時의 被害는 地盤의 液狀化로 인한 것이 아니고,  $M=5.0$ 의 地震動에 의한 地盤의 變形 즉 龜裂, 陷沒 등에 따른 地盤과 構造物의 相互作用에 의하여 부분적으로 構造物의 損傷을 招來한 것으로 판단된다.

다만 본 試驗의 사용 試料는 空中落下法에 의하여 소정의 相對密度로 조절하여 試驗評價한 것이므로 실제 地盤의 흙의 構造와는 다소 차이가 있을 것으로 판단되므로 室內試驗에 의한 液狀化 판정시에는 이 점을 고려해야 할 것으로 생각된다.

#### IV. 結 論

非排水 反復三軸壓縮試驗에 의하여 土性이 다른 注文津標準砂 서울砂 및 洪城砂에 대하여 相對密度, 拘束壓, 反復軸差應力등을 변화시키면서 液狀化 특성을 調査한 결과를 要約하면 다음과 같다.

1. 液狀化 強度는 反復回數가 동일한 경우 應力比의 크기에 좌우되었으며 應力比가 클수록 初期液狀化를 나타내는 反復回數는 적었다.

2. 液狀化強度는 相對密度에 좌우되며 동일한 相對密度에서는 注文津標準砂와 서울砂가 洪城砂에 비하여 작은 경향을 나타내었다.

3. 空隙水壓比는 反復軸差應力이 클수록, 그리고 剪斷變形이 클수록 큰 값을 나타내었고 동일한 相對密度와 應力比에서는 洪城砂가 가장 작게 나타내었다.

4. 3종류의 시료에서는 初期剪斷變形이 0.01%보다 작을 때는 過剩空隙水壓比가 나타나지 않았으나 이보다 큰 變形에서는 空隙水壓比가 증가하기 시작하였다.

5. 土性은 液狀化에 영향을 주는 중요한 因子이며 모래의 平均粒徑이 감소함에 따라 液狀化強度는 감소하는 경향을 나타내었고 洪城砂와 같이 細粒土를 함유한 경우는 오히려 큰 값을 나타내었다.

6. 初期液狀化를 일으키는 反復回數가 8~12인 供試體를 대상으로 相對密度와 應力比와의 相互關係를 분석한 결과 洪城砂는 注文津標準砂, 서울砂에 비하여 직선의 기울기가 급하게 나타났다.

7. 이상의 研究結果와 Seed-Idriss가 제시한 방법으로 洪城地震의 液狀化 문제를 檢討한 바에 의하면 洪城地震에의 피해는 液狀化에 기인한 것이 아니라고 판단된다.

#### 參 考 文 獻

1. Ansel, A. M., and A. Erken, 1989, Undrained

- behavior of clay under cyclic shear stresses, ASCE, Vol. 115, No. 7, pp. 968-983.
2. Arakawa, T., Iwasaki, T., and T. KenIchi, 1982, Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquakes Engineering Conference, pp. 925-939.
  3. 安田進, 山田眞一, 1985, 地震應答解析のため土の動的性質, 土と基礎, 33-8(331), pp. 47-54.
  4. Bhatia, S. K., 1971, The verification of relationship for effective stress method to evaluate liquefaction of saturated sands, Ph. D., Thesis, Univ. of Roorkee, India, pp. 1-138.
  5. Chung, K. Y. C., and J. H. Wong, 1982, Liquefaction potential of soils with plastic fines, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference, pp. 887-897.
  6. Campanella, R. G., 1981, Liquefaction characteristics of undisturbed soils, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquakes Engineering and Soil Dynamics, Vol. 1, pp. 227-230.
  7. 都德鉉, 長秉郁, 1990, 우리나라 砂質地盤의 液狀化포텐셜 評價, 大韓土質工學會誌, 제6권, 제3호, pp. 41-52.
  8. Dyvik, R., Dorbry, R., Thomas, G. E., and W. G. Pierce, 1984, Influence of consolidation shear stresses and relative density on threshold strain and pore pressure during cyclic straining of saturated sand, US Army Corps of Eng., pp. 1-36.
  9. Ferrito, J. M., Forrest, J. B., and G. Wu, 1979, A compilation of cyclic triaxial liquefaction test data, GTJODJ, Vol. 2, No. 2, pp. 106-113.
  10. Finn, W. D. L., Pickering, D. J., and P. L. Bransby, 1969, Sand liquefaction in triaxial and simple shear test, The Univ. of British Columbia, Dept of Civil Engineering, Soil Mechanic Serie, No. 11, pp. 1-23.
  11. Finn, W. D. L., 1981, Liquefaction potential : Developments since 1976, Int'l conf. on recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 2, pp. 655-677.
  12. Finn, W. D. L., and S. K. Bhatia, 1977, Prediction of seismic porewater pressures, ICS-FME, pp. 201-206.
  13. 韓國動力資源研究所, 1980, 韓半島의 地震危險圖, pp. 1-53.
  14. Hushmand, B., Scott, R. F., and C. B. Crouse, 1988, Centrifuge liquefaction tests in a laminar box, Geotechnique, Vol. 38, No. 2, pp. 253-262.
  15. Ishibashi, I., Kawamura, M., and S. K. Bhatia, 1985, Effect of initial shear on cyclic behavior of sand, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, pp. 1395-1410.
  16. Ishihara, K., and T. Watanabe, 1976, Sand liquefaction through volume decrease potential, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 4, pp. 61-69.
  17. Ishihara, K., Yamazaki, A., and K. Haga, 1985, Liquefaction of  $K_0$ -consolidated sand under cyclic rotation of principal stress direction with lateral constraint, Soils and Foundation, Vol. 25, No. 4, pp. 63-74.
  18. Lee, K. L., and F. J. Verness, 1978, End restraint effect on cyclic triaxial strength of sand, ASCE, Vol. 104, No. GT6, pp. 705-719.
  19. Martin, G. R., Finn, W. D. L., and H. B. Seed, 1975, Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, ASCE, Vol. 101, No. GT5, pp. 423-437.
  20. Mitchell, J. K., Chatoican J. M., and G. C. Carpenter, 1976, The influence of sand fabric

- on liquefaction behavior, Univ. of California, Berkeley, pp. 1-51.
21. Mohamad, R., and R. Dobry, 1986, Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 112, No. 10, pp. 1-7.
  22. Mulilis, J. P., Townsend, F. C., and R. C. Horz, 1978, *Triaxial Testing Techniques and Sand Liquefaction Dynamic Geotech. Testing*, ASTM. STP 654, pp. 365-379.
  23. National Academy Press, Washington DC., 1985, *Committee on Earthquake Eng. Commission on Eng. and Technical Systems National Research Council, Liquefaction of Soils during earthquakes*, pp. 1-48.
  24. National Bureau of Standard, 1981, *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method* Dept. of Commerce, NBS Building Science Series 138, pp. 1-113.
  25. 日本土質工學會, 1987, 東京低地の液狀化豫測, pp. 1-25.
  26. Okamoto, S., 1984, *Introduction to earthquake Eng.*, Univ. of Tokyo press, Second edition, pp. 1-50.
  27. Poulos, S. J., 1985, *Liquefaction evaluation procedure*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 772-791.
  28. Seed, H. B. and I. M. Idriss, 1971, *Simplified procedure for evaluating, Soil-Liquefaction Potential*, ASCE, Vol. 97, No. SM. 9, pp. 1249-1273.
  29. \_\_\_\_\_, and K. L. Lee, 1966, *Liquefaction of saturated sand during cyclic loading*, ASCE, Vol. 92, No. SM6. pp. 105-134.
  30. \_\_\_\_\_, Lee, K. L. Idriss, I. M., and F. I. Makdisi, 1971, *Analysis of the slides in the san Fernando dams during the earthquake of Feb. 9*, *Earthquake Engineering Research Center, No. EERC, 73-2*, College of Eng. Univ. of California, pp. 1-62.
  31. \_\_\_\_\_, Tokimatsu, K., Harder, L. F., and R. M. Chung, 1984, *The Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations* *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERL-84/15*, pp. 1-48.
  32. Shencong, F., and F. Tatsuoka, 1984, *Soil Liquefaction during Haicheng and Tanshan Earthquake in China : a Review*, *Soils and Foundations*. Vol. 24, No. 4, pp. 11-29.
  33. 紫田徹, 岡二 三生, 1984, 地盤の液狀化, 3. 液狀化のメカニズム, 日本土質工學會, pp. 10-18.
  34. Townsend, F. C., Valera, J. E., and J. H. Wilson, 1976, *Cyclic triaxial strength of standard test sand.*, pp. 1-18.
  35. Silver, M. J., Tatsuoka, F., Phukunhan, A., and A. S. Avramidis., 1980, *undrained strength of sand by triaxial and shear test*, *Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp. 281-288.
  36. Tatsuoka, F., Meada, S. Ochi, K., and S. Fujii, 1986, *Prediction of Cyclic undrained strength of sand subjected to irregular loadings*. *Soils and foundation*, Vol. 26, No. 2, pp. 73-90.
  37. 梅原靖文, 藤功企, 浜田浩二, 1976, 振動三軸試験による飽和砂の液狀化特性, 港灣技術研究報告, 第15巻 4號, pp. 49-67.
  38. 山下聡, 土岐祥介, 三浦清一, 1988, 飽和砂の液狀化特性に及ぼす異方壓密履歴の影響, 土質工學會論文報告書, Vol. 28, No. 3, pp. 185-196.

(接受日字 : 1991. 3. 14)