

# 우리나라 飽和砂質地盤의 液狀化 포텐셜 評價 (構成關係 開發을 中心으로)

Evaluation of Liquefaction Potential on Saturated Sand Layers in Korea  
(on the Development of Constitutive Relationships)

都 德 鉉\*

Doh, Duk-Hyun

張 秉 郁\*<sup>2</sup>

Chang, Pyoung-Wuck

---

## Abstract

To investigate the liquefaction potential of sands, a series of undrained cyclic triaxial compression tests is carried out on the samples of Ottawa, Joomoonjin, Han river and Hongseung sands.

The constitutive equations of sands are derived to explain the mechanical behavior of sands under cyclic stresses, and are applicable to liquefaction analysis.

The following results are obtained in this study.

1. Sands with the lower confining pressure or relative density are to be easily liquefied, and when the amplitude of cyclic stress are large, liquefaction takes places over only a few cycles.
2. Stress ratio, porewater pressure ratio and cyclic shear strains are to be good criteria to evaluate liquefaction potential of sands.
3. Hongseung sands which contains some silty clay shows higher dynamic properties than other sands.
4. The dynamic behaviors of undisturbed Hongseung sand are about same as those of dense sands. It is noted that undisturbed Hongseung sand shows higher liquefaction potential than the samples made by pluviation under same relative density.
5. The constitutive equations of soils under cyclic loads are developed based on the theory of elasto-plasticity, logarithmic stress-strain relationship, non-associated flow rule and the concept of the boundary surface.

The derived equations is applicable to predict the behavior of sands under cyclic loads and liquefaction potential with a higher accuracy.

6. Based on results of the study it may be concluded that cracks of the foundations and dislocation of the structures at Hongseung earthquakes(Oct. 7, 1978, Richter scale 5.2) are not brought by the liquefaction process.

---

\* 正會員, 建國大學校 農科大學 農工學科 教授

\*<sup>2</sup> 正會員, 서울大學校 農科大學 農工學科 助教授

## I. 序 論

기계기초, 교통의 진동, 地震, 발파, 폭발등은 地盤의 動的 性質과 관련되며 특히 地震은 도로의 파손, 매설관의 浮上 및 變形, 흙담과 하천제방의 붕괴등으로 인하여 막대한 인적, 물적피해를 주는 데 이는 地震動에 의한 地반의 液狀化에 기인되는 경우가 많다.<sup>3, 19, 25, 27, 35, 41)</sup>

· 地震의 液狀化에 대한 연구는 1936년 Casagrande가 발표한 限界間隙比理論에서 비롯되며<sup>17)</sup> 그후 Seed<sup>30, 31)</sup> 등에 의해 기초적 이론이 확립되어 현재에 이르고 있다.

地盤의 액상화 평가방법으로는 室內反復荷重試驗成果를 이용하는 방법과 현지조사시험, 즉 SPT, CPT 시험 결과치에 의한 방법이 있으며<sup>17, 29)</sup> 이들은 대상토의 粒度, 相對密度<sup>3, 41)</sup>, 煎斷強度, 壓縮性<sup>49)</sup> 등 시료자체의 物理的, 力學的 性質과 공시체 양단의 구속상태,<sup>20)</sup> 고무막의 침투,<sup>16)</sup> 初期煎斷應力(비등방성조건),<sup>1)</sup> 응력지속시간,<sup>1)</sup> 波形,<sup>29)</sup> 진동수<sup>33)</sup> 등 시험조건의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.

최근에는 Computer Technology의 개발과 數值解析法의 발전으로 동적하중조건하에서 복잡한 흙에 대한 非線形 거동을 해결할 수 있게 되었고, 이러한 흙의 거동을 해석하기 위하여 여러가지 모델이 개발되었다.<sup>10)</sup> 그러나 이들은 彈-塑性 모델에 의하여 흙의 舉動을 예측하려는 연구가 주류를 이루고 있으며,<sup>19)</sup> 反復荷重條件에 대한 연구는 그리 많지 않다.

Mroz<sup>21)</sup>는 2曲面 모델(two-surface model)을 발표하였고, Ghaboussi 등<sup>11, 12)</sup>은 移動 및 等方加工硬化法則(kinematic and isotropic work hardening)을 일반화한 소성 모델을 발표하였다. Nishi와 Esashi<sup>22)</sup>는 다이러턴시 한계와 평형상태의 개념을 적용하여 반복하중을 받고 있는 포화된 모래에 대하여 모델을 발표하였다.

본 연구는 洪城試料를 비롯한 4종류의 사질토를 대상으로 反復三軸試驗에 의해 應力, 變形, 間隙水壓 등 흙의 동적성질을 구명하여 洪성에서 발생한 地震規模 5.0(JMA)와 50년 초과 확률 10% 이상인 최대지반가속도 0.12g(MM modified Mercalli

진도 7.0)를 모델로 하여 液狀化 평가에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

아울러 移動變形率 硬化法則(kinematic strain hardening rule)<sup>4)</sup> 즉, 非關聯 流動法則(nonassociated flow rule)을 적용하고, 硬化變數로서 代數的 應力-變形 關係를 적용하여 反復荷重을 받고 있는 흙에 대한 構成 모델을 설정하고 液狀化 現狀을 해석할 수 있는 構成方程式의 개발을 시도하였다.

## II. 洪城地震

홍성지역의 경우 1437년 이후의 기록만 보더라도 50여회의 지진이 발생하였으며 이중에는 진도가 미확인된 것도 있으나 규모(JMA Scale) 5.0 이상의 지진도 상당히 많다.<sup>40)</sup>

1978년 10월 7일 18시 21분에 발생한 홍성지진의 震央은 홍성읍(126°36' E, 36°36'36' N)이며 震度의 깊이는 10Km 미만의 천발지진이었고, 그 지속시간이 14sec(Main Shock), 지표면 가속도는 0.2g, 地震規模는 5.0이었다.<sup>38)</sup>

지질특성으로는 기반암이 편마암 또는 화강암으로서 斷層, 段丘, 節理, 葉理(Foliation)등이 많이 발달된 지역이고 기반암위에 10m 내외의 충적층을 이루고 있어 큰 지진의 발생시 액상화에 의한 구조물의 피해가 우려되는 조건을 갖추고 있다.

그림 1은 홍성지진에 의한 지반과 도로의 균열

표 1. Injure and damage of Hong-Seong earthquake (1978)<sup>38)</sup>

human life	injured	1	
house and building	half destroy	13	amount of damage
	small destroy	41	(Thousand Won)
	crack	64	112, 173
cultural assets	hong-ju castle wall	1	73,000
	chimney	15	150
miscellaneous damage	soyjar	32	216
	retaining wall	2	918
	house wall	219	9,250
	etc.	401	4,248
	total	669	14,782
	total	788	199,955

상태를 보인 것이며 주요한 피해내역은 표 1과 같다.

a) road



b) mountain

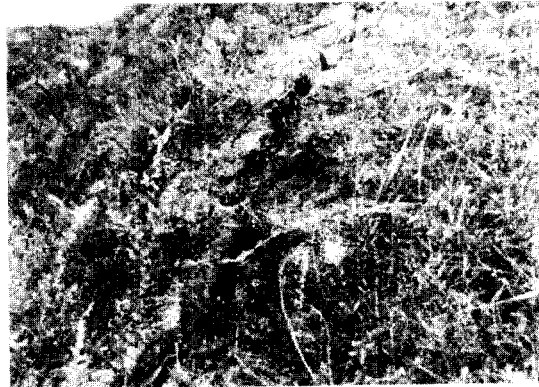


그림 1. Crack of mountain and road at Hong Seong Earthquake

표 2. Physical properties of soil used

soils used	specific gravity	Dmax (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	Cu	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	shpericity	USCS	remarks
Joomoonjin Standard sand	2.66	0.8	0.18	2.00	0.95	0.52	0.81	SP	subround to round
Ottawa sand (C-109)	2.67	0.8	0.19	2.10	0.82	0.54	0.82	SP	subround to round
Seou sand (Han River)	2.65	3.0	0.20	3.30	1.08	0.66	0.78	SP	subangular to angular
Hong-Seong sample	2.67	2.7	0.10	3.40	1.48	0.81	0.72	SW ~ SM	sngular

### III. 使用材料 및 試驗方法

#### 1. 使用材料

本 研究에 사용한 試料은 Ottawa 砂( ASTM C-109), 주문진 標準砂( KS L5001), 서울砂( 한강의 대표적인 모래), 洪城 地震의 주요피해지역인 홍성군청 동쪽 500M 지점 深度 6M의 沖積層에서 채취한 砂質土 등으로서 이들 試料의 物理的 性質은 표 2와 같으며 粒度分布曲線은 그림 2와 같다.

한편 최대 및 최소 상대밀도(Dr)는 KS 2345 비점성토의 상대밀도 시험방법에 준하여 시험하였으며 교란되지 않은 시료의 상대밀도는 간극비(e)를 사용하여 산출하였다.

이상 4가지 시료 중 Ottawa 砂와 주문진 標準砂의 粒度和 物理的 性質은 유사하나 구형도 면에서 Ottawa 砂가 주문진 標準砂보다 둥근 편이며 서울砂는 최대입경이 3.0mm 내외의 粗粒質이며 洪城 試料은 대체로 모가 난 입자형태를 이루고 細粒土가 약간 함유되어 있는데 이중 攪亂 및 攪亂되지 않은 試料을 採取하여 사용하였다.

#### 2. 試驗 方法

##### 1) 反復三軸壓縮試驗

本 연구에 사용된 시험장치는 전기유압방식의

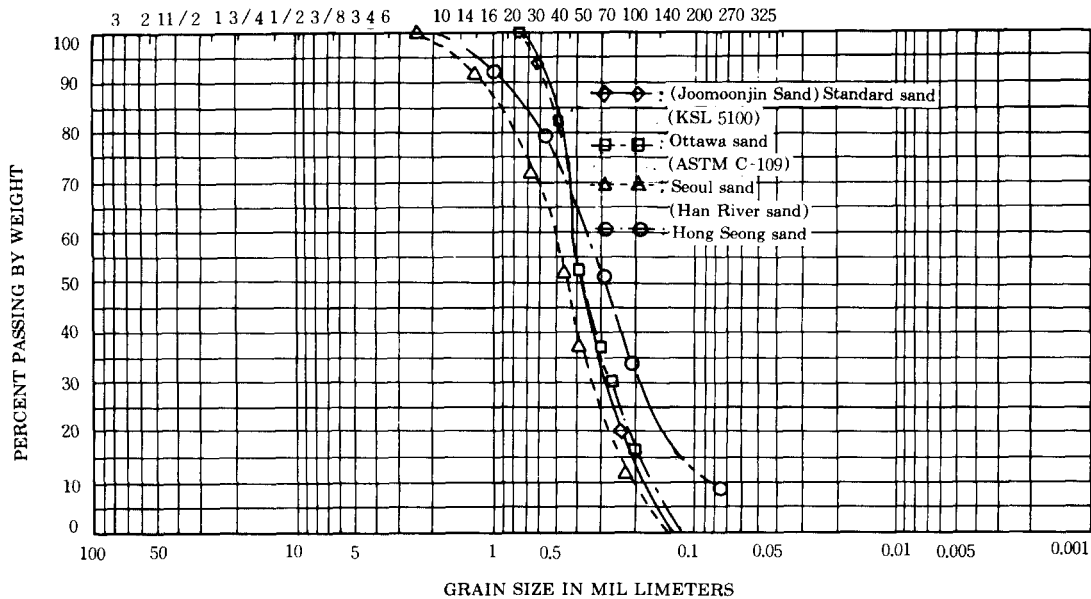


그림 2. Grain size distribution curve

反復三軸壓縮試驗機(日本 마루이(株)제작)이며 그림 3에서 보는 바와 같이 유압장치, 재하본체, 계측반, 제어반(I, II), 데이터집록 및 기록장치로 이루어져 있다.

반복삼축압축시험방법은 우선 여과지를 다공반 위에 놓고 下部加壓盤에 두께 0.25mm의 고무막을 묶고 그 외부에 50mm(D), 100mm(H)의 몰드를 고정시킨 후 건조시료를 깔데기의 로드(Rod) 구멍으로부터 공중투하(air pluviation)시켜 요구하는 相對密度( $D_r$ )가 되도록 供試體를 제작하였다.

$D_r$ 은 공중투하 깔데기 구멍의 직경과 낙하높이를 變化시킴으로써 조정이 가능하나 요구되는  $D_r$ 에 미달되는 경우에는 몰드측벽에 고무망치로 충격을 가해  $D_r$ 을 높이는 방법도 응용하였다.

몰드 위에 上部加壓盤을 설치하고 시료의 硃度 및  $D_r$ 에 따라 적당한 부압을 가하여 공시체가 자립할 수 있도록 한 다음 몰드를 제거하여 三軸 Cell을 고정한 후 側壓을 가한다. 이때 시료의 입경에 따라 背壓(Back Pressure)을  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$  내외로 가해 間隙水壓(B)가 0.96 이상이 되도록 포화시킨 다음 컴퓨터의 조작에 의해 자동으로 靜的, 動的試驗이 수행되며, 전자오실로 데이터

레코더에 의해 시험성과가 기록되고 필요한 그래프를 할 수 있도록 되어있다.

試驗 중 變形量은 공시체 상하단의 三軸試料의 외부에 부착되어 있는 LVDT에 의해 자동측정된다.

波形은 正弦波(sine)로서 振動數는 0.1-1Hz, 振幅은 시료의 종류에 따라 적절히 조절하여 壓縮變形이 1%, 2%, 5% 및 10% 될 때의 반복횟수와 初期液狀化가 발생하는 반복횟수를 구하였다.

이밖에 應力( $\sigma$ ), 變形( $r$ ), 間隙水壓( $u$ )관계, 剪斷係數( $G$ ), 감쇠계수( $h$ )등을 구할 수 있는 기능이 갖추어져 있다.

## 2) 기타시험

기타 필요한 시험은 韓國工業規格에 준하여 試驗하였다.

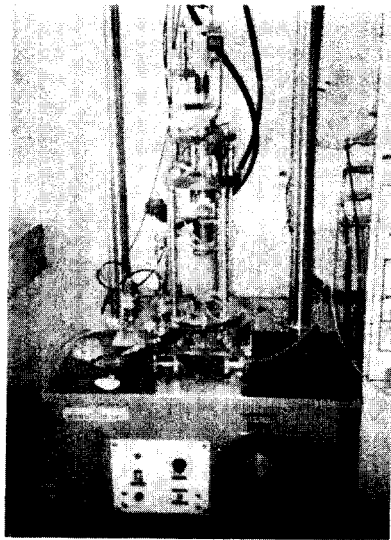
## III. 結果 및 考察

### 1. 使用試料의 動的性質과 液狀化 評價

사용시료 중 주문진 標準砂의 경우 反復三軸試驗 결과 軸荷重, 軸變形 과잉간극수압의 시간이력



a) General view



b) triaxial cell

그림 3. cyclic triaxial compression apparatus

관계는 그림 4와 같다.

상대밀도( $D_r$ ) 45%, 구속압( $\sigma'_0$ )은  $0.5\text{kg/cm}^2$  反復軸差應力片振幅( $\sigma_d$ )을  $0.5\text{kg/cm}^2$ 의 조건에서 공시체는 反復回數(N) 5회에서 變形振幅이 비교적 급격히 증가하고 간극수압이 구속壓에 거의 도달하여 有效應力이 0에 가까워졌다.

즉 반복회수  $N=5$ 에서 초기액상화를 의미하는 5% 變形振幅이 나타나고  $N=9$ 에서 10% 변형진폭이 나타났다.

위의 결과는 느슨한 砂質土에 대한 시험결과이며 일반적으로 間隙水壓이 구속壓에 도달하는데 요하는 N은, 축방향 변형이 양진폭 5% 또는 10%에 도달하는데 요하는 N은 거의 비슷하므로 9, 28, 30) 初期液狀化(initial liquefaction) 또는 5

% 兩振幅 변형을 액상화 파괴기준으로 간주하는 경우가 많다. 따라서 그림 4에서  $N=5$ 가 液狀化發生點으로 판단된다.

한편 初期液狀化는 拘束壓을 작게하거나 반복축차응력 진폭( $\sigma_d$ )을 크게할수록 쉽게 일어나며 N은  $\sigma'_0, \sigma_d$  등의 값보다는 應力比( $\sigma_d / 2\sigma'_0$ )와 관련이 깊으므로 이를 液狀化 난이의 상대적 크기의 지표로 삼는 경우가 많다. 15, 30, 36)

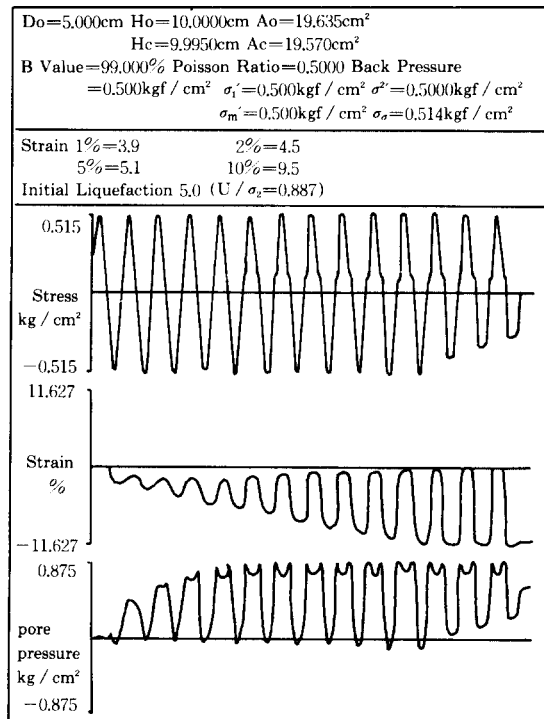


그림 4. Record load, deformation, and pore-pressure time history

그림 5는 試料別  $D_r=50\%$  및  $75\%$ 에서의 液狀化를 일으키는  $N$ 과 應力比( $\sigma_d/2\sigma'_m$ )와의 관계로서  $D_r$ 이 작을 수록 初期液狀化를 일으키는데 요하는  $N$ 이 작다. 그리고 동일한  $D_r$ 에서는 應力비가 클수록  $N$ 가 작을 때 初期液狀化가 일어나게 된다.<sup>7, 8, 34, 37, 42)</sup>

또 동일한  $D_r$ 에서는 洪城 試料의 液狀化 強度가 가장 크고 Ottawa 砂가 가장 작았는데 이는 細粒成分이 함유되어 있는 洪城 試料의 靜的 三軸試驗 결과 他 試료에 비해 非排水 內部摩擦角( $\phi_{uu}$ )은 약간 작으나 점착력( $c$ )이  $0.25\text{kg}$ 으로 粘着成分이 液狀化에 저항하는 요인으로 작용했기 때문으로 생각된다. 서울砂의 粒度分布는 주문진 標準砂보다 약간 조립이고, 모난 粒子가 많으므로 液狀化 抵抗性이 약간 큰 값으로 나타났다.<sup>42)</sup>

한편  $D_r=54\%$ 의 교란되지 않은 洪城試료의 액상화 강도는 공중투하에 의해 제작 시험한 공시체보다 약간 큰 값을 보였는데 이는 동일한  $D_r$ 이라 하여도 試료의 攪亂에 의한 土粒子의 구조배열이 다르기 때문으로 생각된다.

실제 地震에서 일어나는 景時적(time dependent) 변화는 불규칙과형을 이루므로 Seed-I driss<sup>31)</sup>는 지표면 最大加速度의 65%를 室內 反復荷重試驗에서의 等價振幅應力으로 작용시키고 地震規模( $M$ )가 6, 7, 8로 커짐에 따라  $N$ 을 각각 5, 10, 20회의에서의 液狀化 여부를 評價하는 방법을 제안하였는데, 地震地域 2(地盤最大加速度  $0.12g$ )로 잠정규정<sup>39)</sup>하고 있는 洪城지역의 경우 그림 5에서 교란되지 않은 試料( $D_r=54\%$ )는 地震規模 5.0에서는 液狀化가 발생하지 않으며 地震規模 7.0(반복횟수 10회)인 경우 反復應力比 0.24에서 初期液狀化가 발생함을 알 수 있었다.

그러나 이는 진원지 부근 標準試료에 대한 評價이며 실제지반은 보링지점에 따라 토심과 구성재료가 약간 다르므로 일률적으로 液狀化 가부를 판단하기에는 어려움이 있다.

## 2. 構成모델 開發

여기에서는 주로 Oka와 Washizu<sup>24)</sup>의 假定과 Pender<sup>26)</sup>의 假定을 修正補完하고 彈-塑性理論과 境界面理論을 적용하여 過壓密 粘土와 反復荷重

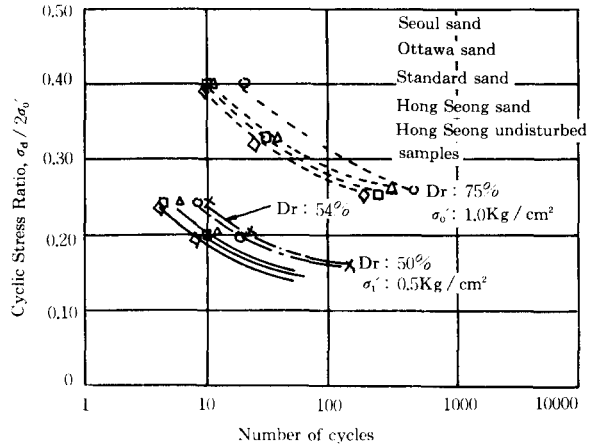


그림 5. Relationship between number of cycles required to cause initial liquefaction and cyclic stress ratio

을 받는 모래의 力學的 舉動을 나타낼 수 있는 構成 모델을 개발하고자 하였다.

Pender<sup>13)</sup>는 應力比  $\eta_{11}^* = S_{11}/\sigma'_m$ 는 境界面 내부에서 변화하고, 塑性 破壞가 발생하는 것으로 하며, 非排水 有效 應力經路는 拋物線으로 나타내고, 乾燥側에서는 陽의 다이러턴시, 濕潤側에서는 陰의 다이러턴시가 발생한다고 가정하였다. 正規 壓密狀態와 過壓密 狀態의 境界는  $f_b=0$ 로 표시할 수 있다. 여기서  $f_b$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_b = \bar{\eta}^*_{(0)} + M_m^* \ln\left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{me}}\right) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_m$  : 平均 有效 應力

$\sigma'_{me}$  : 先行 壓密 應力

$\eta^*$  : Sekiguchi 등에 의해 제시된 非等方壓力에 대한 應力 變수<sup>32)</sup>

$$\bar{\eta}^*_{(0)} = \sqrt{(\eta^*_{11} - \eta^*_{11(0)})(\eta^*_{11} - \eta^*_{11(0)})} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \eta^* = S_{11}/\sigma'_m \quad (3)$$

$$\eta^*_{11(0)}: (S_{11}/\sigma'_m)_{(0)} \quad (4)$$

$\eta^*_{11(0)}$ : 非等力 壓密 終了時의  $\eta^*_{11}$  값

$S_{11}$ : 軸差 應力 텐서

$M_m^*$ : 최대 壓縮點에서의  $\sqrt{\eta^*_{11} \eta^*_{11}}$

$\sigma'_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ : 平均 有效 應力

彈性域이 없는 경우, Hill<sup>14)</sup>의 非關聯流動法則을 적용하여

$$de_{11} = \lambda \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{11}} d\sigma_{11} \quad (5)$$

여기서,  $f_p$ : 塑性 포텐셜 函數

$f$ : 塑性 降伏 函數

塑性 포텐셜 函數는 다음과 같이 정의된다.

$$f_p = \bar{\eta}^* + \bar{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{m(m)}) = 0 \quad (6)$$

여기서,  $\bar{\eta}^*$ 는 應力 變數이며, Sekiguchi와 Ohta<sup>3</sup>의 가정과 같다.  $\bar{\eta}^*$ 을 정의하면,

$$\bar{\eta}^* = \sqrt{(\eta^*_{1j} - \eta^*_{1k(n)})(\eta^*_{1j} - \eta^*_{1k(n)})} \quad (7)$$

여기서,  $\sigma'_{m(n)}$ 와  $\eta^*_{1k(n)}$ 는  $\sigma'_m$ 와  $\eta^*_{1j}$ 의  $n$  번째 荷重 方向의 轉換點의 값이다.

식 (6)의  $\bar{M}^*$ 는 變數로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{M}^* = \frac{\eta^*}{\ln(\sigma'_m / \sigma'_{me})} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \eta^* = \sqrt{\eta^*_{1j} \eta^*_{1j}} \text{이다.} \quad (9)$$

$\bar{M}^*$ 는 현재의 應力 狀態인 ( $S_{1j}$ ,  $\sigma'_m$ )이 결정되면 자동적으로 결정된다.

降伏 函數  $f$ 를 정의하면(여기서, 非關聯 流動법칙의 적용으로  $f_0 \neq f$ 이다.)

$$f = \eta^* = \sqrt{2J_2} / \sigma'_m \quad (10)$$

$$\text{또는 } f = \eta^* = \sqrt{2/3} q / \sigma'_m \quad (11)$$

$J_2 = S_{1j} S_{1j} / 2$ : 應力 増分 텐사의 2次 不變量

$J_3 = S_{1j} S_{1k} S_{1k} / 3$ : 應力 増分 텐사의 3次 不變量

量

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

그림 6은 塑性 포텐셜 曲線  $f_p=0$ 과 塑性 降伏 曲線  $f=\eta^*$ 인 경우의 模式圖(Schematic diagram)이다.

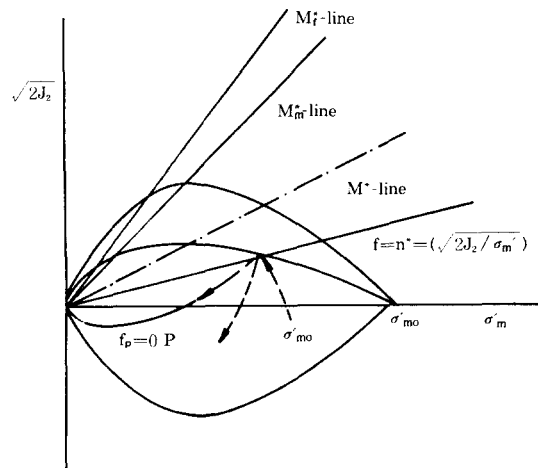


그림 6. Schematic diagram of the potential surfaces and yield line.

여기서,  $P_n$ 은 포텐셜 曲線  $f_p=0$ 과 降伏 曲線  $f=\eta^*$ 가 통과되는 현재의 應力 狀態인 점이다.

$M^*_f$ : 破壞線

$M^*_m$ : 等應力 比線

$M^*_m$ -선은 材料가 最大 壓縮을 일으키는 應力 狀態에 해당하는 等應力 比線(constant stress ratio line)이다.

경계면의 내부에서는 즉, 過壓密 狀態에서는  $M^*_f$ 가 等應力 比  $M^* = M^*_m$ 의 관계가 항상 유지되는 것으로 하면 이러한 條件下의 構成 모델은 Nishi와 Esashi 모델<sup>22, 23</sup>과 같은 경우가 된다. 荷重 方向이 바뀌는 점  $P_n$ 에서 塑性 포텐셜 面  $f_{p2}$ 는 현재의 降伏線  $f=\eta^*$ 에 對稱으로 가정한다.

$$\bar{\gamma}^* = \sqrt{(e^p_{1j} - e^p_{1k(n)})(e^p_{1j} - e^p_{1k(n)})} \quad (12)$$

여기서,  $e^p_{1j}$ : 塑性 軸差 變形 要素

$e^p_{1k(n)}$ :  $n$ 번째 反復이 일어났을 때  $e^p_{1j}$ 의 값

포물선 應力-變形 관계는 Duncan과 Chang<sup>5</sup>, Konder<sup>16</sup>, Hardin과 Drnevich<sup>13</sup> 등에 의하여 사용되어 왔으나, 實測 曲線과 포물선을 비교할 때 그림 7에서 보여주는 바와 같이 粘土의 경우 곡선의 아래 쪽에 나타나고, 모래의 경우 곡선의 위쪽에 나타나는 것으로 발표하였다.

이 연구에서는 흙이 舉動을 예측하기 위한 構成式을 개발하기 위하여 그림 7과 같이 應力-變形 관계를 代數 曲線으로 가정하고, 硬化 變數  $\bar{\gamma}^*$ 와  $\bar{\gamma}^*$ 의 관계를 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\gamma}^* = \frac{1}{G'} \ln \left( \frac{M^*_f + \eta^*_{(m)}}{M^*_f + \eta^*_{(m)} - \bar{\eta}^*} \right) \quad (13)$$

여기서,  $G'$ : 初期 彈性 係數

$M^*_f$ : 破壞 狀態에서의  $\bar{\gamma}^*$ 의 값

$\eta^*_{(m)}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta^*_{(m)} = \sqrt{\eta^*_{1k(n)} \eta^*_{1k(n)}} \quad (14)$$

식(5)의  $\lambda$ 를 구하기 위하여 식(13)을 一次 微分하면

$$\frac{d\bar{\gamma}^*}{d\eta^*} = \frac{1}{G'} \frac{1}{[M^*_f + \eta^*_{(m)} - \bar{\eta}^*]} \quad (15)$$

식(12)를  $e^p_{1j}$ 에 의하여 微分하면

$$\frac{d\bar{\gamma}^*}{de^p_{1j}} = \frac{e^p_{1j} - e^p_{1k(n)}}{\bar{\gamma}^*} \quad (16)$$

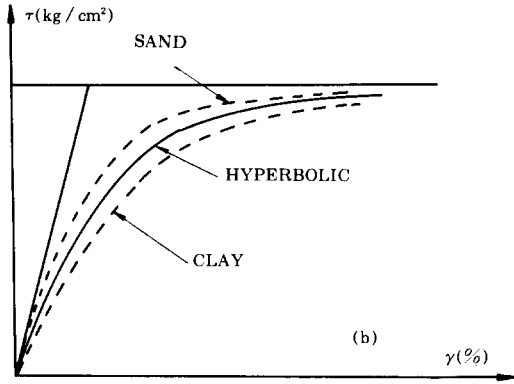


그림 7. Hyperbolic stress-strain relation

식(16)에 식(5)을 사용하여

$$d\bar{\gamma}^* = \frac{(e_{ij}^p - e_{ijk}^p)}{\bar{\gamma}^*} \lambda \frac{\partial f_p}{\partial S_{ij}} d\bar{\eta}^* \quad (17)$$

식(6)과 (7)로부터  $\frac{\partial f_p}{\partial S_{ij}}$  를 구하면

$$\frac{\partial f_p}{\partial S_{ij}} = \frac{1}{\bar{\eta}^*} (\eta_{ij}^* - \eta_{ijk}^*) \frac{1}{\sigma_m'} \quad (18)$$

식(18)을 식(17)에 대입하면

$$\frac{d\bar{\gamma}^*}{d\bar{\eta}^*} = \frac{(e_{ij}^p - e_{ijk}^p)}{\bar{\gamma}^*} \lambda \frac{1}{\bar{\eta}^*} (\eta_{ij}^* - \eta_{ijk}^*) \frac{1}{\sigma_m'} \quad (17')$$

변수  $\lambda$ 를 구하면 식(15)와 식(17')로부터

$$\lambda = \frac{\bar{\gamma}^* \bar{\eta}^*}{(e_{ij}^p - e_{ijk}^p)(\eta_{ij}^* - \eta_{ijk}^*)} \frac{1}{G'} \times \frac{1}{(M_f^* + \eta_{(n)}^* - \bar{\eta}^*) \sigma_m'} \quad (19)$$

이상의 결과로부터 과압밀粘土와 모래의 구성식은 식(5), (6), (7), (10), (19)로부터 얻을 수 있다.

탄성 요소  $de_{ij}^p$ 는

$$de_{ij}^p = \frac{dS_{ij}}{2G} + \frac{\kappa}{1+e} \frac{d\sigma_m'}{\sigma_m'} \quad (20)$$

塑性 요소와의 합이 구하고자 하는 구성식이 된다.

$$de_{ij} = \frac{dS_{ij}}{2G} + \frac{\kappa}{1+e} \frac{d\sigma_m'}{\sigma_m'} + \lambda \left[ \frac{\eta_{ij}^* - \eta_{ijk}^*}{\bar{\eta}^*} \frac{1}{\sigma_m'} + \frac{\bar{M}_m}{\sigma_m'} \delta_{ij} - \frac{S_{ij}}{2\eta^*} (\eta_{ki}^* - \eta_{k(i)}^*) \right]$$

$$\frac{\delta_{ij}}{\sigma_m'} |df \quad (21)$$

이 식은 6개의 변수 즉,  $G, \kappa, e, G', M_f$ 와  $M^*$ 로 구성되어 있다.  $M^*$ 는  $\lambda$ 와  $\sigma_{me}'$ (先行壓密壓力)와 현재의應力狀態와  $M^*$ 의 값에 의해 구할 수 있다.

그러므로, 구성方程式을 완성하기 위하여 다음 7개의 材料變數가 주어져야 한다.

여기서,  $G$ : 剪斷彈性係數

$\lambda$ : 等方壓密에서의 壓縮指數

$\kappa$ : 等方壓密에서의 膨脹指數

$e$ : 間隙比

$G'$ : 變形硬化變數  $\bar{\gamma}^*$ 에 대한係數

$M_m^*$ : 最大壓縮時的應力比( $\sqrt{2J_2} / \sigma_m'$ )의 값

$M_f^*$ : 破壞時的應力比( $\sqrt{2J_2} / \sigma_m'$ )의 값

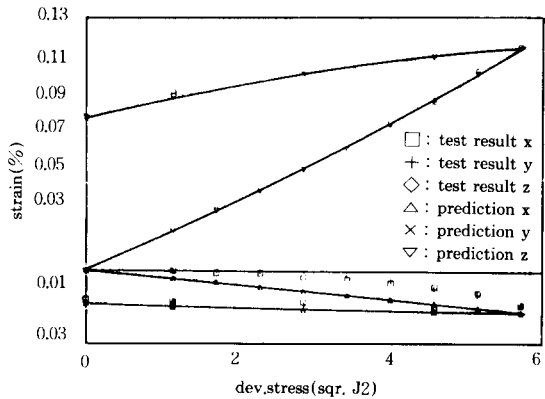


그림 8. Stress-strain relationships of prediction and test results for Ottawa sand.(Cycle No.1)

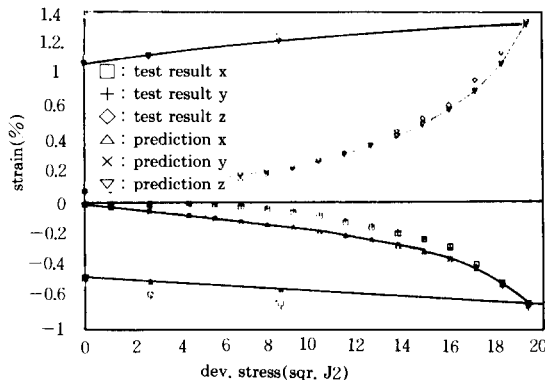


그림 9. Stress-strain relationships of prediction and test results for Joomoonjin sand.(Cycle No.2)



그림 8-그림 11은 홍城試料에 대하여 實驗한 데이터와 構成式에 의하여 계산한 값의 比較를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 初期値에서 보다 破壞荷重 또는 初期 液狀化에 가까울 때 正確한 豫測을 보이고 있다. 이 構成 모델에 사용된 變數 및 土質定數는 표 3과 같다.

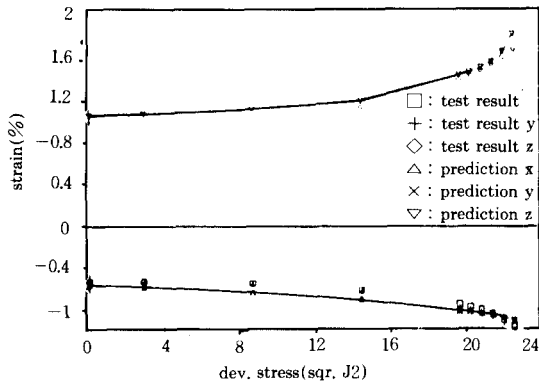


그림 10. Stress-strain relationships of prediction and test results for Joomoonjin sand. (Cycle No.3)

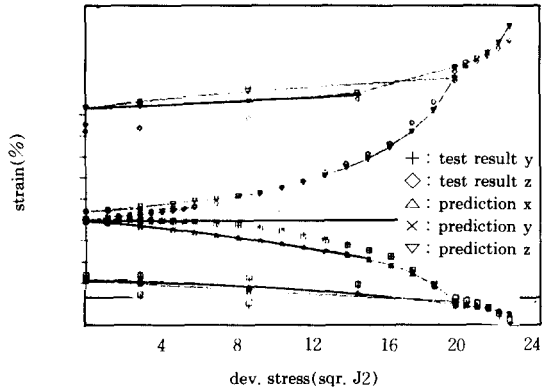


그림 11. Stress-strain relationships of prediction and test results for Joomoonjin sand. (Cycle No.1,2 and 3)

표 3. Soil parameters of Hong-seong samples

$e_0$	$\kappa$	$\lambda$	G	$G'$	$M_r^*$	$M_m^*$
0.52	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-3}$	5260	300	1.750	0.955

## V. 結 論

非排水 反復三軸試驗에 의하여 주문진 標準砂,

Ottawa砂, 서울砂, 洪城試料 등에 대한 液狀化 포텐셜을 研究한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 相對密度가 낮을수록, 拘束壓力이 낮을수록 液狀化는 용이하며 反復應力振幅이 클수록 液狀化를 일으키는 데 필요한 반복하중의 작용횟수가 작았다.

2. 應力比, 間隙水壓比, 反復剪斷變形 등은 液狀化 強度의 평가기준으로서 적합한 因子이다.

3. 洪城試料의 動的 強度는 細粒土 含量으로 인하여 他 試料에 비하여 약간 컸다.

4. 교란되지 않은 洪城試料는 조밀한 모래와 같은 動的 舉動을 하였으며 相對密度가 동일한 경우에는 公중투하에 의하여 제작한 供試體에 비하여 液狀化 抵抗이 약간 큰 경향을 보였다.

5. 본 연구에서는 單純荷重 또는 反復荷重을 받는 粘土와 모래에 대한 數學的 模型을 세우고 彈-塑性 이론과 境界面 개념에 의해 構成 方程式을 개발하였다. 특히 새로운 應力-變形 關係式으로 代數曲線을 사용하여 개발된 식은 粘土 및 모래 지반의 舉動을 豫測할 수 있으며 또한 이 模型을 이용하여 보다 정밀한 모래지반의 液狀化 포텐셜 해석이 가능하다.

6. 이상의 연구결과를 종합하면 1978년 10월에 발생한 震度規模(MM) 7의 洪城地震에 의한 지반의 龜裂과 구조물 파괴등의 피해는 液狀化로 기인한 것이 아니라고 판단된다.

※이 논문은 1988년도 문교부 학술연구조성비에 의한 자유공모과제로 선정되어 연구되었음.

## 參 考 文 獻

1. Bhatia, S.K.,(1971), "The Verification of Relationship for Effective Stress Method to Evaluate Liquefaction Potential of Saturated Sands," Ph.D. Thesis, from the Dept. of Civil Engr., Univ. of Roorkee, India, pp.1-175.
2. Castro, G.,(1986), "On the Behavior of Soils during Earthquakes-Liquefaction," *Soil Dynamics and Liquefaction, Geotechnical Engineering*, Vol. 42, pp.169-204.
3. Campanella, R.G., Lin, B.S.,(1981). Liquefaction Characteristics of Undisturbed Soils, "International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil

- Dynamics, *St. Louis, Mo.*, Vol.1, pp.277-230.
4. Drucker, D.C.(1959), "A Definition of Stable Inelastic Material" *J. of Appl. Mech, Trans. ASME*, Vol.26, pp.101-106.
  5. Duncan, J.M. & Chang, C.Y.,(1970), "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils" *J. of SMFD* Vol.96, SM5, pp.1629-1657.
  6. Dyvik, R., D.R. Dorby, G.E. Thomas, and W.G. Prerce(1984), Influence of Stress and Relative Density on Threshold Strain and Pore Pressure during Cyclic Strianing of Saturated Sand," Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, Paper No. GL-84-15, pp.1-34.
  7. Ferrito, J.M., Forrest, J.B., and Wu.G.,(1979), "A Compliation of Cyclic Liquefaction Test Data," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.2, No. 2, pp.106-113.
  8. Finn, W.D.L., Pickering, D.J., and Bransby, P.L., (1969), "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Test," Soil Mechanic Series from the Dept. of Civil Engr. University of British Columbia, No.11, pp.1 : 42.
  9. Finn, W.D.L.,(1981), "Liquefaction Potential Developments since 1976, International Conference on Recent Engineering and Soil Dyamics," Vol.11, pp.655-677.
  10. Fukutake, K. and Ohtsukl, A.(1988), "Two-Dimensional Effective Stress Analysis Using Constitutive Model of Soil Under Arbitrary Stress Condition." Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, JAPAN, Vol.III, pp.315-320.
  11. Ghaboussi, J. & Momen, H.(1982), "Modeling and Analysis of Cyclic Behavior of Sand" in Ref. 12 pp.313-342.
  12. Guettler, U., Thiel, G. and Jessberger, H.L.(1987), "Cyclic Hardening of Sand During Earthquake Events," *Soil Dynamics and Liquefaction, Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 42, pp.87-96.
  13. Hardin, B.O. & Drneivich, J.P.(1972) "Shear Modulus and Damping in Soils : Sesign Equation and Curves," *J. of SMFD, ASCE*, Vol.98, SM7 , pp.667-692.
  14. Hill, R.(1950) "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford Univ. Press.
  15. Ihu, R., and Law, K.T.,(1988), "Liquefaction Potential of Silt," *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.3, pp.238-242.*
  16. Ishibashi, I., Kawamura, M., Bhatia, SK.K.,(1985), "Effect of Initial Shear on Cyclic Behavior of Sand," *Journal of Geotechnial Engineering, Vol.III, No.12, pp.1395-1410.*
  17. Iwasaki, T.,(1986), *Soil Liquefaction Studies in Japan: State-of-theart, Soil Dynamics and Earthquake Eng.* Vol.5, No.1, pp.1-52.
  18. Konder, R.L.(1963) "Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils," *J. of SMFD, ASCE*, Vol.89, SM1, pp.115-143.
  19. Lade, P.V. & Duncan J.M.(1975) "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil," *ASCE, GT10, Vol.101, pp.1037-1053.*
  20. Lee, K.L., and Vernese, F.J.,(1978), End Restraint Effects on Cyclic Triaxial Strength of Sand," *Journal of the Gootechnical Englieneering Division, ASCE*, Vol.104, No.GT6 pp.705-710.
  21. Mroz, Z.(1967) "On the Description of Anisotropic Work Hardening" *J. of Mech. Phys. Soilds*, Vol.15, pp.163-175.
  22. Nishi, K. & Esashi, Y.(1978) "Stress-Strain Relationships of Sannd based on Elasto-Plasticity Theory" *Proc. JSCE* No.280 pp.111-122.
  23. Nishi, K. & Kanatani, M.(1988) "Constitutive Relations with General Masin Rule under Multi-dimensional Stress Condition" *Numerical Meth. in Geomechanics*,
  24. Oka, F, & Washizu, H.(1981) "Constitutive Equation for Sand and Overconsolidated Clay under Dynamic Loads based on Elasto Plasticity" *Int. Conf. on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering in Soil Dynamics*, St. Louis, U.S.A.
  25. Pande, G.N. & Zienkiewicz, O.C.(1982) "Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads," John Wiley & Sons.
  26. Pender, M.J.(1978) "A Model for the Behavior of Overconsolidated Clay" *Geotechnique*, Vol.28 , No.1, pp.1-25.
  27. Qiu, Y., Fan, W. and Fan, S.(1988), "Some Aspect on the Liquefaction Potential of Dynamically Compacted Loesslike Sandy Loam," *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, JAPAN, Vol.III, pp.225-230.*
  28. Rinne, E.E.(1987), "Assessing the Effects of Potential Liquefaction-A Practising Engineering's Perspective," *Soil Dynamics and Liquefaction, Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 42, pp.245-251.
  29. Rinne, E.E., Shields, C.C., and Nardi, C.R.,(1988), "Mitigation of Liquefaction Potential," *Proceedings of Ninth World Conference on Earth-*

- quake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.3, pp.243-248.
30. Seed, B.H.,(1976), "Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground Earthquakes," Liquefaction Problem in Geotechnical Engineering, ASCE, Annual Convention and Exposition Philadelphia, Pa, pp.1-104.
  31. Seed, B.H., Lee, K.L.,(1966), "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.92, No. SM6, pp.105-134.
  32. Sekiguchi, H & Ohta, H.(1977) "Induced Anisotropic and Time Dependency in Clays" Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp. 229-238.
  33. Silver, M.L., Chan, C.K., and Ladd, R.S.,(1976), "Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE*, Vol.102, No. GT5, pp.511-523.
  34. Silver, M.L., Tatsuoka, F., Phukunhan, A., and Avramidis, A.S., (1980), "Cyclic undrained Strength of Sand by Triaxial Test and Simple Shear Test," (World Conference on Earthquake Engineering of 7th), Istanbul, Turkey, *Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp.281-288.
  35. Tani, S. and Yasunaka, M.(1988), Effect of Sampling Methods on Liquefaction Resistance of Loose Sand," *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering Tokyo-Kyoto, JAPAN*, Vol.III, pp.219-224.
  36. Veyera, G. E. and Charlie, W.A.(1987)," Liquefaction of Shock Loaded Saturated Sand" *Soil Dynamics and Liquefaction, Developments in Geotechnical Engineering*, Vol.42, pp.2p5-219.
  37. Zhu, R. and Law, K.T.(1988), "Liquefaction Potential of Silt.," *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, JAPAN*, Vol.III, pp.237-242.
  38. 科學技術處(1980), 洪城地震의 現況調査研究.
  39. 건설부(1987), 건축물의 내진구조 및 방지 기준에 관한 연구, 제 1권, pp.1-174.
  40. 金昭九(1978), 한반도의 地震活動, 資源開發研究所.
  41. 都德鉉(1988), 地震工學의 研究動向, 韓國農工學會誌 Vol.30, No.4, pp.15-20.
  42. 도덕현, 김시원, 고재만(1990), 반복단순전단 시험에 의한 포화사의 액상화 포텐셜 평가, 농자원개발논집제 15집, 전국대학교 농자원개발연구소 pp.87-109.

(접수일자 1990. 6. 18)