

지진하중에 의한 액화의 가능성과 간극수압의 발생에 관한 확률론적 연구

A Probabilistic Analysis of Liquefaction Potential
and Pore Water Pressure Build up due to Earthquake

김 영 수*¹

Kim, Young-Su

이 송*²

Lee, Song

조 우 철*³

Cho, Woo-Chul

Abstract

The probabilistic and statistical model is used to estimate the probability of liquefaction potential and pore water pressure build up due to earthquake in fully saturated sand deposit for each case of being structure(anisotropic) or not(isotropic). To execute this paper, dynamic shear strength parameters to show the relationship between shear strength and cyclic loading under isotropic or anisotropic condition in saturated sand deposit are presented. Using these parameters, the program which predicts pore water pressure build up due to earthquake is developed. Using the 3-dimensional Random Field Model considering uncertainty of resistance and strength parameter, the program which computes the probability of liquefaction potential is developed.

The developed program is applied to a case study, and then the result shows that the probability of liquefaction in isotropic condition is higher than in anisotropic condition. The ratio of pore water pressure tends to decrease as K_c increases.

요 지

지진하중을 받는 완전포화된 모래지반위에 구조물이 있을 경우(비등방상태) 또는 없을 경우(등방상태)에 대하여 액화의 가능성을 평가하고 간극수압의 발생을 예측하기 위하여 확률론적 그리고 통계적 방법을 사용하였다.

*¹ 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*³ 한국종합기술개발공사 감리단

본 연구를 수행하기 위하여 포화된 모래지반의 등방, 비등방상태하의 전단강도와 반복하중과의 관계를 나타내는 동적전단강도계수들이 제시되었다. 이 전단강도계수들을 사용하여 지진에 의하여 발생하는 간극수압을 예측하는 프로그램과 그리고 저항과 하중계수들에 내포되어 있는 불확실성을 고려하여 액화가 일어날 확률을 구하는 프로그램을 3차원 Random Field Model을 사용하여 개발 하였다.

개발된 프로그램을 하나의 예제에 적용하였다. 그결과 등방상태가 비등방상태보다도 액화의 가능성이 높았고 상재하중이 커질수록 액화의 가능성은 낮았다. 또한 간극수압비는 K_c 값이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

1. 서 론

지진에 의한 포화된 모래지반의 액화현상으로 인한 피해는 역사적으로 많은 증거가 있다. 즉 1964년 Niigata 지진은³⁾ 심각한 건물침하와 Tilting을 야기한 대표적인 예이고, 1957년 San Francisco 지진과 Alaska 지진은 엄청난 사면 붕괴를 일으켰다. 이는 모두 액화현상에 기인한 것이다. 과거 수년동안 액화의 원인과 포화된 모래지반의 액화의 가능성을 예측하는 연구가 많이 있었다. 그러나 액화에 의한 손상에 대하여는 별로 연구가 없었다. 우리나라에서는 한반도가 지진에 대한 안전지대로 인식되어 있고 장비와 자료의 부족 등으로 인하여 이 방면에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다. 하지만 그 동안 계측된 지진발생빈도로 보면 최근 20세기에 들어와서 남부와 서부지역에서 지진활동이 활발해지고 있음을 관측할 수 있다. 특히 1936년 지리산지진과 1978년 홍성지진은 강진에 속하는 것이었다. 이에 한반도의 지반특성을 고려한 인공지진하중을 사용하여 등방상태와 비등방상태에 대해서 제반 확률적인 여러가지 방법들을 사용하여 완전포화된 모래지반의 액화의 가능성을 평가 하고 간극수압 발생을 예측하고자 한다. 그리하여 앞으로 간극수압 분산에 따른 지반의 침하를 예측하므로써 우리나라의 모래 지반에서 액화로 인

한 구조물의 손상 현상을 평가하기 위한 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 포화된 모래지반의 동적전단저항

지진이 일어나는 동안 작용된 전단응력에 저항하기 위하여 발생된 전단저항의 평가는 액화, 사면안정 등의 해석에 매우 중요한 단계이다. 수학적 편의성을 이용하여 동적전단저항, τ_R 을 실내시험 조건 아래에서 Haldar와 Miller²⁾가 소개한 무차원 동적전단강도계수, R 와 R_e^* 의 항으로 추정하였다. 본 연구에서는 이 계수들을 사용하여 해석하였다. 동적전단강도계수에 영향을 미치는 중요한 인자들에는 많은 불확실성이 내포되어 있다. 이에 본 논문에서는 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 인자들의 평균과 분산을 FOSM(first order second moment) 방법으로 구하였다.

2.1 등방상태

동적전단강도계수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R = \frac{\tau_R}{\sigma'_m \times D_r} \quad (1)$$

여기에서 σ'_m 는 유효평균구속응력
 D_r 은 상대밀도이다.($D_r=0-1$)
 τ_R 의 평균가 변동 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

식(1)에서 $\tau_k = R \sigma_m' D_r$ 이다.

$$\tau_k = R \sigma_m' D_r \quad (2)$$

$$\Omega \tau \sigma^2 = \Omega R^2 + \Omega \sigma_m'^2 + \Omega D_r^2 \quad (3)$$

여기에서, R, σ_m' , D_r 은 모두 통계적으로 독립적인 것으로 가정 하였다.

2.1.1 동적전단강도계수

De Alba et al과 Mori et al에 의하여 Monterey 0 번모래에 대한 largescale shaking table test에서 얻어진 결과를 효과적으로 해석하여 Haldar와 Miller²⁾은 동적전단강도계수의 평균과 분산에 대하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$E(R: N_L = n_L) = 0.6871 - 0.08778 \ln(n_L); \quad (4)$$

$$2 \leq N_L \leq 63, D_{50} = 0.36\text{mm}$$

$$\text{Var}(R: N_L = n_L) = 0.000384 \quad (5)$$

이며 r^2 의 값은 0.939 이다.

여기에서 r 은 상관계수이다. 그리고, N_L 은 액화를 일으킬 등가응력회수이다.

이 전단강도계수에 영향을 미치는 요소들 즉, 시료의 준비방법^{5, 6)}, 평균입경⁷⁾, 다방향성 하중⁸⁾에 대하여 전단강도계수의 평균값을 수정하였다. 그리고 분산은 위에서 언급한 요소들과 지진하중 대신 사용된 균등반복하중^{11, 9, 10)}과 제2의 요인들 즉 균등반복하중의 빈도와 형상, 입경의 분포, 입자의 모양 그리고 다른 요인들의 분산성을 고려하여 구하였다.

$$E(R: N_L = n_L, D_{50} = d_{50}) = 0.9 \times (0.7309 - 0.8778 \times \ln(n_L)) \times (0.746 + 1.01 \times d_{50} - 0.875 \times d_{50}^2)$$

$$2 \leq N_L \leq 63 \text{ cycle}, 0.06\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.6\text{mm} \quad (6)$$

$$\text{Var}(R: N_L = n_L, D_{50} = d_{50}) = 0.00061 + (0.1^2 + 0.152^2) \times \{E(R_L: N_L = n_L, D_{50} = d_{50})\}^2 + 0.08778^2 \times \{\Omega(N_L: M = m)\}^2 \quad (7)$$

여기에서

$$\Omega(N_L: M = m) = 0.05^2 + \sqrt{\frac{29.05}{\{E(N_L: M = m)\}^2}}$$

$$E(N_L: M = m) = 106.08 - 36.42m + 3.33m^2: m \geq 5.0$$

M은 Richter 척도의 지진의 크기이다.

2.1.2 유효평균구속응력

유효평균구속응력의 평균과 분산은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\bar{\sigma}_v' = \frac{1+2}{3} K_o \bar{\sigma}_v \quad (8)$$

$$\text{Var}(\sigma_v') = \left[\frac{1+2}{3} K_o \right]^2 \text{Var}(\sigma_v) \quad (9)$$

여기에서

σ_v' = 유효수직응력

K_o = 정지토압계수이다.

정규압밀된 모래의 정지토압계수는 0.4로 고려될 수 있다. 또한 유효수직응력의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_v' = \bar{\gamma}_s \times h - \gamma_w \times (h - \bar{h}_{wt}) \quad (10)$$

$$\text{Var}(\sigma_v') = \text{Var}(\gamma_s) \times h^2 + \text{Var}(h_{wt}) \times \gamma_w^2 \quad (11)$$

여기에서 γ_s 는 흙의 단위중량이고 h_{wt} 는 지하수위를 나타내며 $\bar{\gamma}_s$ 와 \bar{h}_{wt} 는 평균 값이고 γ_s 와 h_{wt} 의 변동계수를 0.01과 0.2로 고려하였다.

2.1.3 상대밀도¹⁸⁾

현장에서 상대밀도는 N-값과 현장건조밀도와 관계식을 사용하였다. 만약 최대건조밀도와 최소건조밀도를 알고 있고 N-값과 상응하는 σ_v' 값이 주어진다면 상대밀도의 평균은 식(12)으로 표현하였다.

$$E(D_r: N = n, \Gamma_{\max} = \gamma_{\max}, \Gamma_{\min} = \gamma_{\min}, \sum v' = \sigma_v') = \frac{\gamma_{\max}}{E(\Gamma)} \times \frac{[E(\Gamma) - \gamma_{\min}]}{[\gamma_{\max} - \gamma_{\min}]} \quad (12)$$

여기에서 $E(\Gamma)$ 는 현장건조밀도이고, N-값과 σ_v' 의 관계는 다음과 같다.

$$E(\Gamma: N = n, \Gamma_{\max} = \gamma_{\max}, \Gamma_{\min} = \gamma_{\min}, \sum v' = \sigma_v') = \frac{5.0116 + n^{1/2} + 0.32280 \gamma_{\min} - 0.06053}{0.36243 + 0.00278 \sigma_v'} \quad (13)$$

$$(\gamma_{\max} - \gamma_{\min})$$

여기에서 σ_v 는 Kip/ft²의 단위이고 γ , γ_{max} , γ_{min} 은 lb/ft³의 단위가 된다.

현장의 상대밀도를 측정함에 있어 불확실성의 인자들은 변동계수의 향으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Omega_{Dr}^2 = \delta Dr^2 + \Delta_{Dr}^2 \quad (14)$$

여기에서 δDr 은 현장건조밀도의 불확실성에 기인하고 Δ_{Dr} 은 식(12)의 불확실성에 기인한 것이다. 여기에서,

$$\Delta_{Dr} = 0.95393 - 1.62679Dr + 0.85357Dr^2 \quad (15)$$

$$\delta Dr^2 = E_3^2 \Omega_\gamma^2 \quad (16)$$

$$E_3 = \frac{[\gamma_{min}/(\gamma_{max}-\gamma_{min})+1]}{E(Dr)} - 1 \quad (17)$$

$$\text{Var}(\Gamma : N = n, \Gamma_{max} = \gamma_{max}, \Gamma_{min} = \gamma_{min}, \Sigma_v = \sigma_v) = \frac{0.183}{(0.36243 + 0.00278 \sigma_v^2)^2} \quad (18)$$

이고, Ω_γ 는 식(13), (18)로 부터 추정할 수 있다.

2.2 비등방상태

Chang et al⁽¹⁷⁾은 동적전단강도계수(R^*)를 상대밀도(Dre)가 0.5일때 다음과 같이 정의하였다.

$$R^* = \left(\frac{\Delta \sigma_{cy}}{2} \right) / \left(\frac{\sigma_{1c} + \sigma_{3c}}{2} \right) = \frac{\tau_R}{\sigma_{3c}} \frac{2}{1+Kc} = \frac{\tau_R}{P'} \quad (19)$$

그리고 식(19)를 다른 상대밀도에 대하여 적용할 수 있도록 다음과 같이 수정하였다.

$$R_e^* = R^* \left(\frac{Dre}{Dr} \right) = \frac{\tau_R}{\sigma_{3c}} \frac{2}{1+Kc} \frac{Dre}{Dr} = \frac{\tau_R}{P'} \frac{1}{2Dr} \quad (20)$$

$$\tau_R = 2P' Dr R_e^*$$

여기에서 Dr은 임의의 상대밀도, σ_{3c} 는 유효최소구속응력 · Kc는 압밀응력비, P'는 유효구속응력이다.

동적전단저항의 평균과 변동계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_R = 2P' Dr R_e^* \quad (21)$$

$$\Omega_{\tau_R}^2 = \Omega_{P'}^2 + \Omega_{Dr}^2 + \Omega_{R_e^*}^2 \quad (22)$$

2.2.1 동적전단강도계수

Hadge는 Osterchelde 모래에 대하여 동적배수, 비배수삼축실험을 행하였다. 그 실험에서 얻어진 결과를 사용하여 R_e^* 의 평균과 분산을 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$E(R_e^* : N_L = n_{50}^*) = 0.47083 - 0.044621n_{50}^* \quad (23)$$

$$\text{Var}(R_e^* : N_L) = 0.0005 \quad (24)$$

여기에서 N_{50}^* 는 50% 액화를 일으키는 하중의 cycle 수이다.

이 전단강도계수에 영향을 미치는 요소들은 등방상태와 같다. 단지 과압밀비(OCR)와 현장조건을 고려하여 R_e^* 의 평균과 분산을 구하였다.

$$E(R_e^* : N_L = n_{50}^*, D_{50} = d_{50}) = 0.9 \times Cr \times (OCR)^{0.5} \times (0.47083 - 0.04462 \times \ln(n_{50}^*)) \times (0.84165 + 1.00329 \times d_{50} - 0.874477 \times d_{50}^2) \quad (25)$$

$$\text{Var}(R_e^* : N_L = n_{50}^*, D_{50} = d_{50}) = 0.0007 + (0.09^2 + 0.1^2 + 0.152^2 + 0.056^2) \times E(R_e^* : N_L = n_{50}^*, D_{50} = d_{50}) + 0.04462^2 \times \Omega_{(N_L; M=m)}^2 \quad (26)$$

여기에서 Cr은 현장조건에 따른 수정계수이다.

\bar{Cr} 의 평균값과 변동계수는 다음과 같다.

$$\bar{Cr} = 0.63 - 0.0179 \ln(N_L) \quad (27)$$

$$\Omega_{Cr}^2 = 0.056 \quad (28)$$

2.2.2 유효평균 구속응력

유효평균구속응력의 평균과 분산은 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

$$\bar{P}' = \frac{\bar{\sigma}_v(1+Kc)}{2} + \frac{\Delta \sigma_h + \Delta \sigma_v}{2} \quad (29)$$

$$\text{Var}(P') = \left(\frac{1+Kc}{2} \right)^2 \text{Var}(\sigma_v) \quad (30)$$

여기에서 $\Delta \sigma_h$ 와 $\Delta \sigma_v$ 는 각각 횡방향 수직방향의 유효응력증가분이다.

유효수직응력의 계산은 등방인 경우와 같고 γ_s 와 h_{wt} 의 변동계수도 같은 값으로 고려한다. 그리고 상재하중에 의한 수직 및 횡방향응력증가분은 Boussinesq의 지중응력공식을 사용하였다.

2.2.3 상대밀도

앞서 언급한 것처럼 비등방상태의 액화현상에는 과압밀비나 상재하중의 영향 등을 고려하기 위하여 Marcuson III와 Bieganousky¹³⁾가 제안한 OCR과 N값과 상대밀도와의 관계식을 사용하였다. 그리고 Dr 에 대한 평균은 다음과 같다.

$$Dr = 8.6 + 0.83$$

$$\left[\left| \frac{N + 10.4 - 3.2(OCR) - 0.24(\bar{\sigma}_v')}{0.045} \right| \right]^{1/2} \quad (31)$$

여기에서, σ_v' 는 $1b/in^2$ 단위를 가진다. 그리고 상대밀도에 대한 변동계수는 다음과 같다.

$$\Omega_{Dr}^2 = \Omega_{Dr'}^2 + (\Delta Dr)^2 \quad (32)$$

$$\text{Var}(Dr') = (0.83 \times \frac{1}{2}) \times$$

$$\left[\left| \frac{N + 10.4 - 3.2(OCR) - 0.24(\bar{\sigma}_v')}{0.045} \right| \right]^{1/2} \times$$

$$\frac{1}{0.0045^2} \times (\text{Var}(N) + (0.24)^2 \text{Var}(\bar{\sigma}_v')) \quad (33)$$

$$\Omega_{Dr} = \frac{\sqrt{\text{Var}(Dr')}}{Dr'} \quad (34)$$

그리고 ΔDr 에 관한 식은 등방상태에서와 동일한 것으로 간주한다.

2.2 지진하중에 의한 전단응력¹⁴⁾

지진이 일어나는 동안 지반의 어떤 위치에서 발생하는 전단응력은 주로 지반내에서 상향전파되는 전단파에 의해서 나타난다. 만약 강성체로 작용하는 깊이 h 에서 어떤 흙 기둥과 지표면 최대지반가속도 (a_{max})인 경우에 깊이 h 에서의 최대 전단응력은 다음과 같다.(그림 1)

$$\tau_{(max)r} = \frac{\gamma h}{g} a_{max} \quad (35)$$

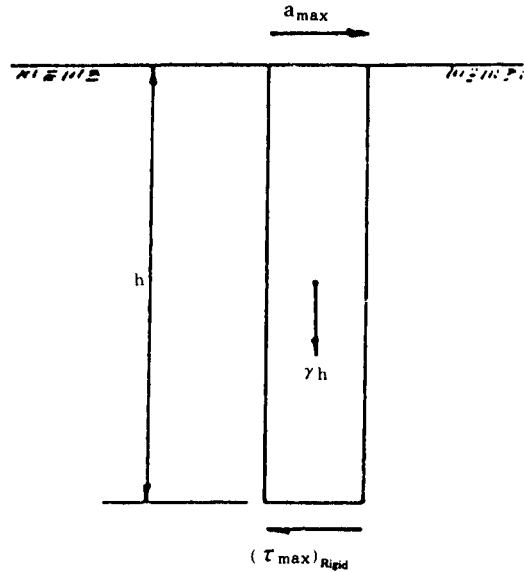


그림 1. 지진 가속도에 의한 전단 응력

여기에서 g 는 중력가속도이다.

흙은 강성체가 아니고 변형체이기 때문에 실제 작용하는 전단력 $\tau_{(max)d}$ 는 지반반응해석에 의해 얻어진 $\tau_{(max)r}$ 보다는 적게되어

$$\tau_{(max)r} = r_d \tau_{(max)d} \quad (36)$$

이 된다. 여기서, r_d 는 응력감소계수이고 1.0보다 적은 값을 가지며 깊이가 커질수록 감소한다.

그리고 지진이 일어나는 동안 지반의 어떤 위치에서의 실제 전단응력이력곡선은 매우 불규칙적이기 때문에 해석의 편의를 위해서 등가 평균전단응력으로 이를 변화시킬 응력의 크기가 필요하게 된다. 이 응력 크기의 백분율을 S_L 로 두면 최종적으로 지진하중에 의한 지반의 어떤 위치에 작용하는 실제전단응력은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\tau_{max} = S_L \gamma h \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (37)$$

Seed와 Idriss가 제안한 깊이에 따른 r_d 관계 곡선을 60ft 까지 회귀분석하여 r_d 의 평균과 표준편차를 다음과 같이 얻었다.

$$E(r_d) = 1.0 - 2.435416 \times 10^{-3}h + 2.8899016 \times 10^{-7}h^2 + 1.106743 \times 10^{-6}h^3 - 1.179675 \times 10^{-7}h^4 + 1.2743604 \times 10^{-9}h^5 \quad (38)$$

$$\sigma_{r_d} = 0 + 2.7639347 \times 10^{-3}h - 2.462981 \times 10^{-7}h^2 - 1.981504 \times 10^{-6}h^3 + 1.5341123 \times 10^{-7}h^4 - 1.607269 \times 10^{-9}h^5 \quad (39)$$

또한 등가반복하중을 도입한 S_L 의 값은 여러 연구에서 0.65~0.85의 범위를 지니는 무차원 변수로 해석 상에서는 독립변수로 작용한다.

본 논문에서는 Haldar와 Tang¹⁵⁾이 제시한 0.75를 사용하였으며 그들의 S_L 값의 변화에 따른 응력회수와 지진의 크기 관계에 대한 연구에서 이 값을 적용하는데 상당한 타당성이 있는 것으로 여겨진다.

3. 간극수압의 발생

본 논문에서는 지진이 일어나는 동안 간극수압의 분산이나 재분배가 일어나지 않는 Seed 등¹⁶⁾이 제시한 간극수압비에 대한 모델을 사용하였다. 이는 자료의 일관성을 위하여 확률론적인 해석과정에서 사용되었던 식을 재사용하기가 용이하기 때문이다.

간극수압의 발생을 예측하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 지반의 어떤 깊이 에 있는 임의의 흙 층에 대한 지진으로 인해 발생하는 횡방향 전단 응력의 시간이력을 계산한다.
- 2) 적절한 가중법을 사용하여 실제의 응력이력을 등가응력회수(Neq)를 가진 등가 응력이력으로 변환 시킨다.
- 3) 주어진 조건 즉 과재하중, 밀도, 등가응력 등에 대하여 모래층이 최초로 액화를 일으키는 등가응력회수(N_{Lc})를 결정한다.
- 4) 주어진 모델에 따라 간극수압비를 계산한다.

Seed 등(1976)이 제시한 간극수압비에 대한 모델은 식(40)과 같고 등방 상태에서 α 는 0.7이

다.

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \times \sin^{-1} \left[2 \times \left[\frac{N}{N_{Lc}} \right]^{\alpha} - 1 \right] \quad (40)$$

여기에서 N은 임의의 응력회수이고 등가응력회수는 식(6)을 역산하여 구하였다.

또한 비등방상태에서도 등방상태와 같은 방법으로 구하였으며 α 대신 α^* 를 사용하였고 그 과정은 다음과 같다.

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \times \sin^{-1} \left[2 \times \left[\frac{N}{N_{50}^*} \right]^{\alpha^*} - 1 \right] \quad (41)$$

여기에서 등가응력회수는 식(25)를 역산하여 구하였고 그 과정은 다음과 같다.

$$N_{50}^* = \exp \left[\frac{0.9 \times 0.47083 \times (0.84165 + 1.00329d_{50} - 0.87447d_{50}^2) - R_c^*}{0.9 \times 0.04462 \times (0.84165 + 1.00329d_{50} - 0.87447d_{50}^2)} \right]$$

$$R_c^* = \frac{1}{1 + Kc} \times \frac{\tau_k}{Dr}$$

$$\tau_k = \left[\frac{\sigma_1}{P'} \right] \times \left[\frac{a_{max}}{g} \right] \times r_d$$

$$\alpha^* = \alpha_1 - \alpha_2 \times \frac{Dre}{(1 + Kc) \times Dr}$$

여기에서 α_1 과 α_2 는 2.25와 2.53의 값을 가지는 상수이고 Dre는 0.5이다.

그리고 Kc는 비등방 압밀응력비를 뜻한다.

4. 액화의 가능성 평가

액화현상을 이해하는 데에는 이미 언급한 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 일반적인 신뢰성해석에 사용되고 있는 여러 방법들에 대하여 평가, 비교하였다. 전통적인 신뢰성해석의 기본개념은 먼저 기본변수로 알려지는 적절한 하중과 저항계수들을 결정하고 수학적으로 이들의 관계식은 이러한 불확실성을 다루기 위하여 신뢰성 모델에 일반적으로 사용되고 있는 First Order Approximation(F.O.A), Advanced Second Order Method(A.S.O.M), Direct Simulation, Conditional Expectation

Variance Reduction Technique, Antithetic plusse Conditional Expectation Variance Reduction Technique을 등방상태와 상재하중의 영향을 고려한 비등방상태로 나누어 각기 액화의 가능성을 평가하였으며 상대밀도에 대한 3차원 Random Field Model을 적용하여 평가하였다.

5. 프로그램의 구성

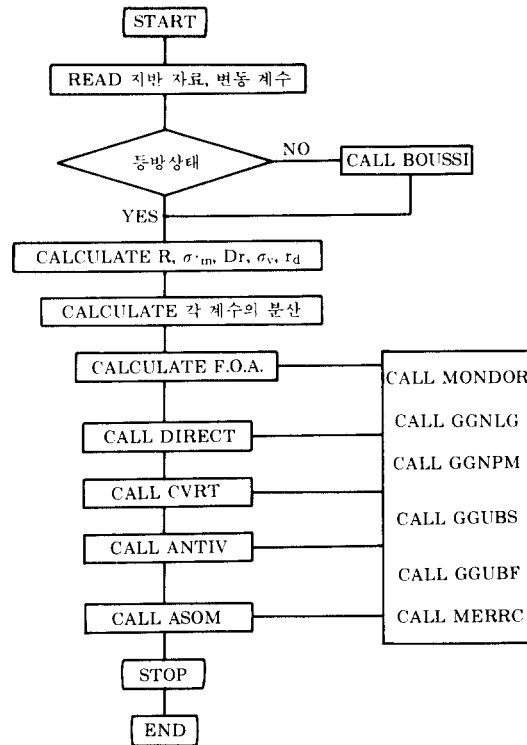
본 논문에서 개발된 프로그램은 크게 액화의 가능성을 평가하기 위한 프로그램과 간극수압비를 예측하기 위한 프로그램으로 나뉜다. 액화의 가능성 평가를 위한 확률해석에는 일반적으로 많이 사용되고 있는 IMSL에 있는 SUBROUTINE들, 즉 GGNLG, GGUBFS, GGNPM, GGUBS, MERRC, MDNOR을 사용하였으며 확률론적 해석방법에 따른 각각의 SUBROUTINE들 - 즉 ASOM, DIRECT, CVRT, AVRT - 을 만들어 오른쪽 흐름도와 같이 하나로 결합했다. 그리고 간극수압발생에 관한 프로그램은 'SHAKE'를 사용하여 입력지진에 대한 반응해석을 한 후 지진반응응력이력을 등가응력회수와 최초로 액화를 일으키는 응력회수를 구하여 주어진 간극수압 발생 모델에 따라 해석하였다.

6. 적용 예

6.1 입력자료

해석을 위해 Montrey 0번 모래와 유사한 균질한 지반을 가정하여, 상재하중으로 등분포 하중 2000psf를 받는 한변이 10ft인 정방형 독립기초 3개를 고려하여 비등방상태로 두었다. 한반도의 지반특성을 고려한 인공지진자료를 사용, "SHAKE"를 이용하여 지반반응을 해석하였다.

본 연구에서 이용된 입력지진은 우리나라의



(액화가능성 평가에 대한 흐름도)

지반특성과 역사지진 및 계측지진자료를 바탕으로 최대가속도포락함수, 유효지속시간, 지진파의 진동수성분 등을 분석하여 통계적 방법으로 작성된 인공지진파를 이용하였다. 이 인공지진파의 지표면최대가속도는 0.2G 이고 인공지진파에서 몇 개의 점을 선별하였다. 이 인공지진파는 M이 7.0인 중간 규모의 점토 또는 모래층에 대한 가속도이력으로 선별된 인공지진파는 그림 3과 같다. 또한 지반의 특성들은 그림 2와 표 1에 나타내었다.

6.2 해석방법 및 결과

6.2.1 등방상태

등방상태일때 주어진 자료를 사용한 해석결과는 표 2에 상대밀도의 변화에 따른 액화의

표 1. 입력 지반 자료

	평	균	변동계수(COV)
모래의 포화 단위중량 γ_s	120	pct	0.01
물의 단위 중량 γ_w	62.5	pct	
최대 건조 단위중량 γ_{max}	102.7	pct	
최소 건조 단위중량 γ_{min}	81.5	pct	
유효 입경 D_{50}	0.26	mm	
지하수위 h_{wt}	0.0	ft	0.2
과압밀비 OCR	1		
지진강도 M	7.0		
최대 지반 가속도 a_{max}	0.2	G	0.6
표준 편입 타격 횟수 N-Value			0.25

가능성과 함께 나타내었다. 20ft, 50ft에서의 지반반응응력이력곡선은 그림 4와 같다. 또한 모래지반의 체적을(200FT×200FT×각 층의 두께로)두고 횡방향의 scale of fluctuation 180ft에서 60ft까지 변화시켰으며 두께 방향의 영향은 고려하지 않고 상대밀도에 대한 3차원 Random Field Model을 적용한 해석결과는 표 3과 같다. 그리고 깊이에 따른 간극수압비는 그림 5와 같고 그림 6은 상대밀도의 변화를 고려한 간극수압비의 변화를 나타낸 것이다.

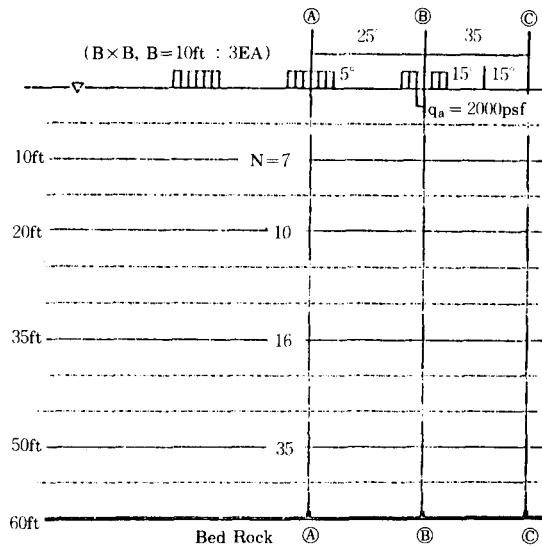


그림 2. 입력 지반상태

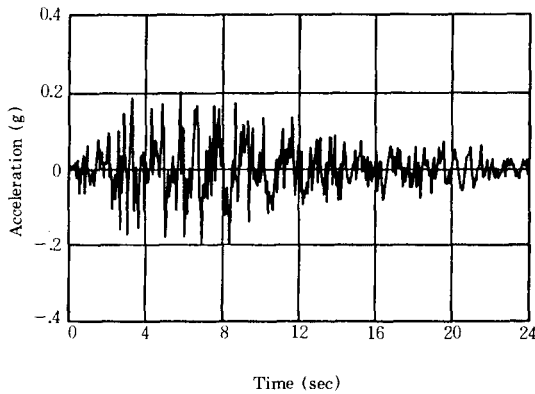
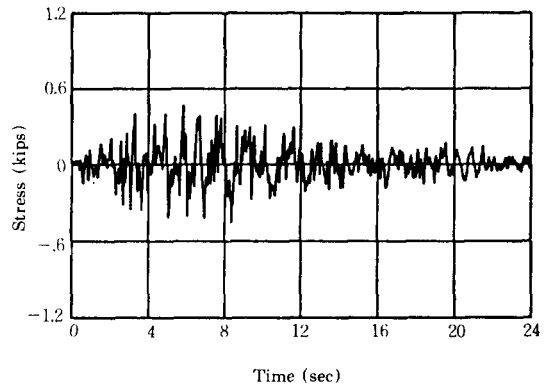
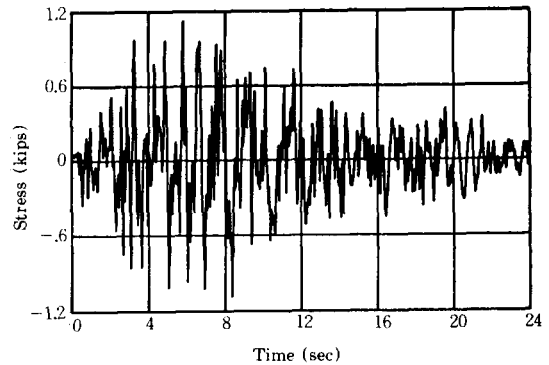


그림 3. 인공지진 가속도 이력곡선



(a) 20ft의 지반응력이력



(b) 50ft의 지반응력이력

그림 4. 지반반응응력 이력곡선(등방상태)

표 2. 상대 밀도의 변화에 따른 액화 가능성 평가<등방상태>

깊이(ft)	N-값	Dr	Ks	a _{max}	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
5	4	0.4353	0.580	0.19829	0.844430	0.895	0.8888314	0.915588	0.889585
20	7	0.4926	0.657	0.18856	0.807153	0.845	0.8310028	0.848920	0.831014
35	13	0.5873	0.783	0.17686	0.719222	0.719	0.6944612	0.693805	0.693574
50	32	0.8024	1.070	0.17207	0.487391	0.419	0.3858891	0.366730	0.384164
5	7	0.5212	0.695	0.19858	0.814819	0.858	0.8416389	0.859605	0.842742
20	10	0.5593	0.746	0.19006	0.781254	0.804	0.7882355	0.797654	0.788421
35	16	0.6359	0.848	0.17931	0.697378	0.688	0.6599087	0.654315	0.659213
50	35	0.8312	1.108	0.17227	0.469340	0.397	0.3680187	0.345583	0.366493
5	10	0.5874	0.783	0.19874	0.789955	0.818	0.8002250	0.810665	0.801604
20	13	0.6150	0.820	0.19100	0.785159	0.772	0.7500161	0.752824	0.750395
35	19	0.6792	0.906	0.18096	0.676639	0.658	0.6284184	0.618856	0.627912
50	38	0.8584	1.145	0.17235	0.452159	0.374	0.3517584	0.326325	0.350396
5	15	0.6754	0.901	0.19890	0.754212	0.766	0.7407513	0.741881	0.742487
20	18	0.6925	0.923	0.19203	0.723850	0.726	0.6947255	0.689554	0.695397
35	24	0.7427	0.990	0.18287	0.644673	0.611	0.5825605	0.567893	0.582400
50	43	0.9006	1.201	0.17433	0.431902	0.355	0.3332970	0.304636	0.332128

표 3. 3차원 Random Field의 영향에 따른 액화 가능성<등방상태>

깊이(ft)	유동계수	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
5 ft	180	0.816212	0.859	0.8431196	0.859605	0.844277
	160	0.817474	0.865	0.8445904	0.859605	0.845825
	140	0.818600	0.862	0.8460054	0.859605	0.847340
	120	0.865000	0.865	0.8473198	0.859605	0.848775
	100	0.820424	0.866	0.8484852	0.859605	0.850061
	80	0.821116	0.869	0.8494545	0.859605	0.851200
	60	0.821658	0.872	0.8501865	0.859605	0.852126
20 ft	180	0.782736	0.806	0.7886716	0.797654	0.788913
	160	0.784081	0.804	0.7891311	0.797654	0.789462
	140	0.785283	0.806	0.7895804	0.797654	0.790010
	120	0.786337	0.805	0.7899942	0.797654	0.790586
	100	0.787238	0.804	0.7903398	0.797654	0.797654
	80	0.787982	0.806	0.7905886	0.797654	0.791563
	60	0.788564	0.805	0.7907201	0.797654	0.791965
35 ft	180	0.698694	0.686	0.6581970	0.654315	0.657599
	160	0.699895	0.689	0.6566046	0.654315	0.656128
	140	0.700972	0.686	0.6551330	0.654315	0.654839
	120	0.701920	0.680	0.6537854	0.654315	0.653733
	100	0.702733	0.678	0.6525676	0.654315	0.652774
	80	0.703405	0.632	0.6514825	0.654315	0.651961
	60	0.703932	0.674	0.6505371	0.654315	0.651369
50 ft	180	0.469124	0.400	0.3652406	0.345583	0.363786
	160	0.468927	0.400	0.3627193	0.345583	0.361387
	140	0.468750	0.398	0.3604643	0.345583	0.359216
	120	0.468594	0.391	0.3584865	0.345583	0.357349
	100	0.468461	0.390	0.3567931	0.345583	0.355746
	80	0.468350	0.389	0.3553917	0.345583	0.354406
	60	0.468263	0.383	0.3542891	0.345583	0.353365

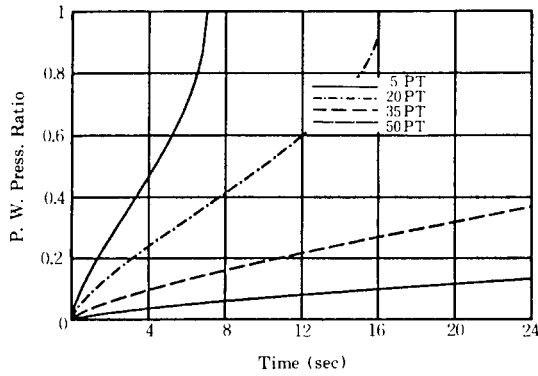
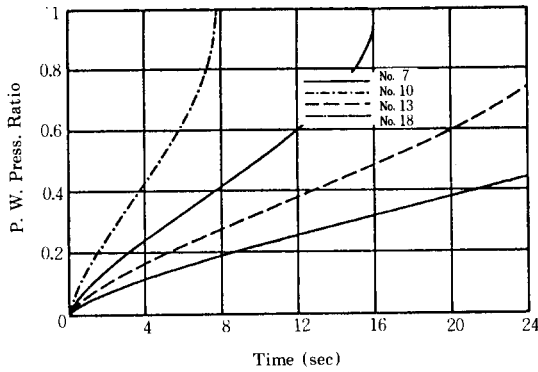


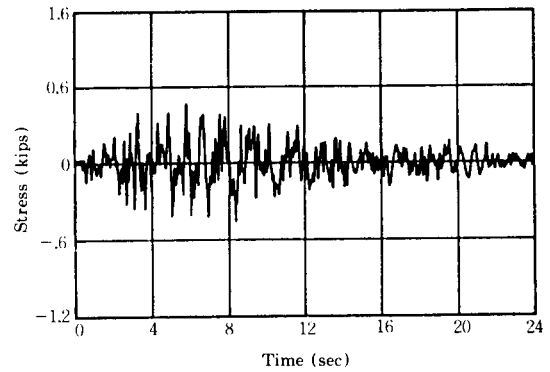
그림 5. 깊이에 따른 간극수압비 이력곡선(등방상태)

6.2.2 비등방상태

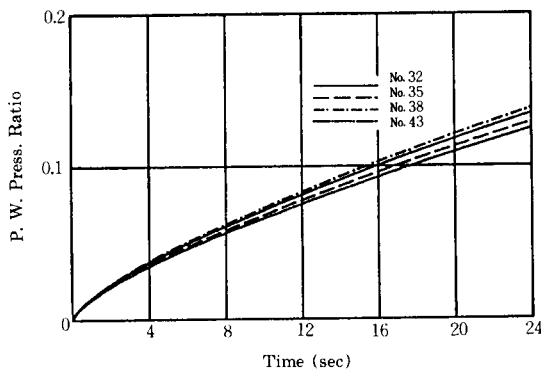
그림 2에서 A-A 단면에서의 상대밀도의 변화에 따른 해석결과를 표 4에 나타내었고 A-A 단면의 깊이 20ft와 50ft에서의 전단응력이력곡선은 그림 7과 같다. 그리고 기초폭의 크기변화에 따른 해석결과는 표 6에 나타내었으며 압밀응력비의 변화와 단면의 변화에 따른 해석결과는 표 5와 7에 나타내었다. 또한 깊이에 따른 간극수압비를 그림 8에 나타내었고, 입밀응력비의 변화와 상대밀도의 변화를 고려하기 위한 단면의 변화에 따른 해석결과를 각각 그림 9와 10에 나타내었다.



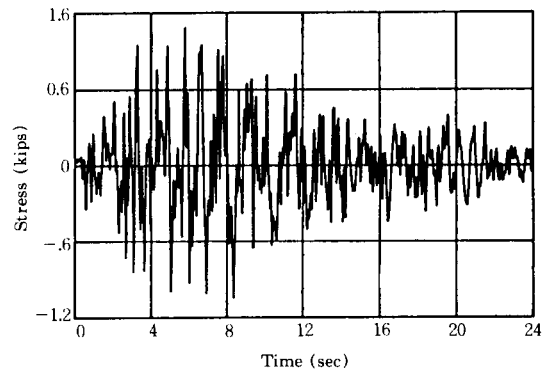
(a) 20ft의 지반응력이력



(a) 20ft의 지반응력이력



(b) 50ft의 지반응력이력



(b) 50ft의 지반응력이력

그림 6. 상대밀도에 따른 간극수압비 이력곡선

그림 7. 지반반응열 이력곡선(비등방상태)

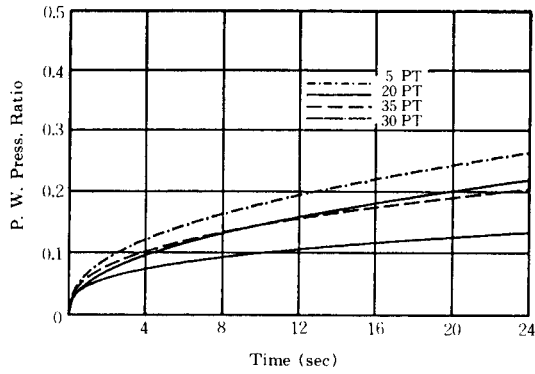
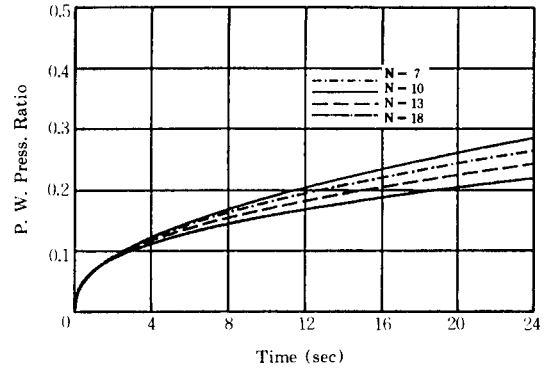
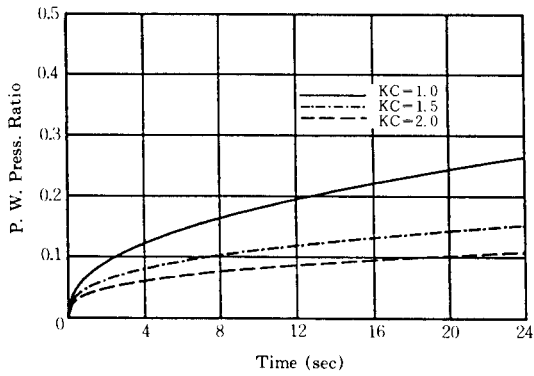


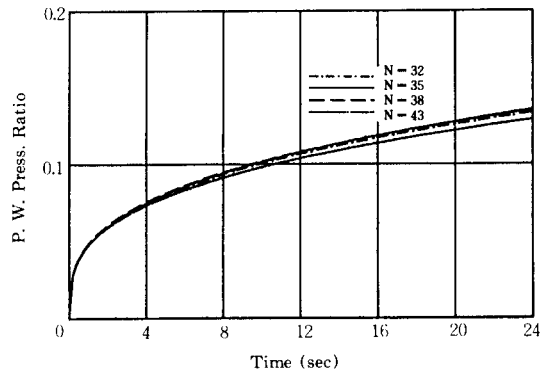
그림 8. 깊이에 따른 간극수압비 이력곡선(비등방상태)



(a) 20ft의 간극수압비 이력곡선

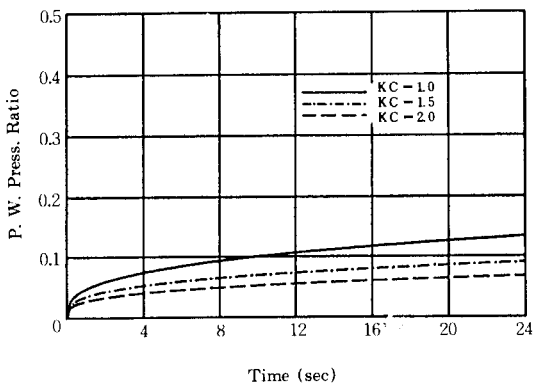


(a) 20ft의 간극수압비 이력곡선



(b) 50ft의 간극수압비 이력곡선

그림 10. 상대밀도에 따른 간극수압비 이력곡선 (비등방상태)



(b) 50ft의 간극수압비 이력곡선

그림 9. 압밀응력비에 따른 간극수압비 이력곡선 (비등방상태)

7. 결 론

인공지진에 의한 가정된 지반의 액화가 일어날 확률해석과 간극수압발생에 관한 고찰을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 액화가 일어날 확률은 등방상태가 비등방상태보다 더 크게 나타났고, 이것은 비등방상태에서의 상재하중의 영향으로 인한 구속압력의 증가에 기인한 것으로 여겨진다.
2. 등방상태에서는 깊이가 깊어질수록 액화의 가능성이 낮아졌으나, 비등방상태에서는 깊

표 4. 상대 밀도의 변화에 따른 액화 가능성 평가<비등방>

깊이(ft)	N-값	Dr	Ks	a _{max}	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
5	4	0.5001	0.667	0.19962	0.616606	0.626	0.5966412	0.542175	0.600225
20	7	0.5522	0.736	0.19647	0.639957	0.639	0.6474996	0.575113	0.619940
35	13	0.6420	0.856	0.19149	0.529635	0.529	0.4875998	0.419676	0.490207
50	32	0.8606	1.147	0.18658	0.294317	0.261	0.2407262	0.156368	0.243950
5	7	0.5522	0.736	0.19965	0.571925	0.577	0.5424957	0.476381	0.546589
20	10	0.5991	0.799	0.19677	0.605413	0.608	0.5774488	0.522370	0.577475
35	16	0.6819	0.909	0.19212	0.500723	0.499	0.4553590	0.382975	0.458446
50	35	0.8897	1.186	0.18738	0.281179	0.247	0.2294926	0.145094	0.232861
5	10	0.5991	0.799	0.19968	0.532304	0.539	0.4964805	0.422767	0.500978
20	13	0.6421	0.856	0.19699	0.573724	0.574	0.5366004	0.477104	0.540045
35	19	0.7193	0.959	0.19262	0.474220	0.476	0.4268728	0.351138	0.430323
50	38	0.9178	1.224	0.18803	0.269037	0.234	0.2192214	0.134856	0.222683
5	15	0.6690	0.892	0.19971	0.475241	0.475	0.4335995	0.325260	0.438548
20	18	0.7071	0.943	0.19728	0.526405	0.524	0.4828332	0.414582	0.486858
35	24	0.7771	1.036	0.19326	0.434777	0.425	0.3862421	0.306596	0.390219
50	43	0.9626	1.283	0.18889	0.250932	0.221	0.2040467	0.119883	0.207630

표 5. Kc 값의 변화에 따른 액화 가능성 평가<비등방>

Kc	깊이(ft)	a _{max}	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
1.0	5	0.19965	0.571923	0.577	0.5424957	0.476381	0.546589
	20	0.19677	0.605413	0.608	0.5774488	0.522370	0.577475
	35	0.19212	0.500723	0.499	0.4553590	0.382975	0.458446
	50	0.18738	0.281179	0.247	0.2294926	0.145094	0.232861
1.5	5	0.19966	0.543414	0.552	0.5127926	0.437904	0.517044
	20	0.19706	0.508148	0.512	0.4723353	0.392209	0.476131
	35	0.19289	0.390393	0.385	0.3484305	0.257449	0.352399
	50	0.18861	0.196977	0.176	0.1585113	0.078697	0.162330
2.0	5	0.19966	0.515812	0.523	0.4846485	0.402041	0.489044
	20	0.19729	0.422890	0.430	0.3883830	0.291689	0.392555
	35	0.19347	0.304921	0.303	0.2684042	0.173030	0.272705
	50	0.18953	0.144018	0.122	0.1123628	0.043965	0.116112
0.4	5	0.19965	0.607144	0.611	0.5802760	0.526055	0.584116
	20	0.19622	0.727397	0.741	0.7204776	0.713541	0.721921
	35	0.19072	0.658046	0.654	0.6276312	0.602531	0.628741
	50	0.18515	0.443471	0.399	0.3711952	0.310822	0.372726

표 6. 기초 폭의 변화에 따른 액화 가능성 평가<비등방>

깊이	기초폭	a _{max}	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
5ft	10	0.19965	0.571952	0.577	0.5424957	0.476381	0.546589
	12	0.19968	0.542070	0.552	0.5113536	0.436127	0.515655
	14	0.19969	0.515348	0.523	0.4840530	0.401456	0.488532
	16	0.19970	0.491943	0.501	0.4605802	0.372078	0.465117

20 ft	10	0.19677	0.605413	0.608	0.5774488	0.522370	0.577475
	12	0.19690	0.601321	0.603	0.5699545	0.516512	0.573008
	14	0.19701	0.596393	0.600	0.5645273	0.509516	0.567629
	16	0.19710	0.590700	0.587	0.5583018	0.501493	0.561488
35 ft	10	0.19212	0.500723	0.499	0.4553590	0.382975	0.458446
	12	0.19250	0.500666	0.499	0.4552889	0.382906	0.458366
	14	0.19281	0.500229	0.499	0.4548375	0.382375	0.457930
	16	0.19306	0.499447	0.498	0.4540368	0.381409	0.457137
50 ft	10	0.18738	0.281179	0.247	0.2294926	0.145094	0.232861
	12	0.18800	0.282405	0.250	0.2305192	0.146155	0.233871
	14	0.18851	0.283326	0.250	0.2312899	0.146957	0.234638
	16	0.18894	0.284011	0.250	0.2318620	0.147553	0.235191

표 7. 단면의 변화에 따른 액화 가능성<비등방>

깊이	단면	a_{max}	F O A	Direct	Conditional VRT	Antithetic VRT	A S O M
5 ft	A	0.19965	0.571925	0.577	0.5424957	0.476381	0.546589
	B	0.19965	0.574183	0.578	0.5448823	0.479494	0.548965
	C	0.19892	0.669454	0.669	0.6515637	0.610142	0.654763
20 ft	A	0.19677	0.605413	0.608	0.5774488	0.522370	0.577475
	B	0.19675	0.608935	0.613	0.5783899	0.527436	0.581306
	C	0.19272	0.601249	0.604	0.5699982	0.516420	0.572969
35 ft	A	0.19212	0.500723	0.499	0.4553590	0.382957	0.458446
	B	0.19208	0.501006	0.499	0.4556483	0.383331	0.458723
	C	0.18475	0.480370	0.481	0.4350843	0.358276	0.438351
50 ft	A	0.18738	0.281179	0.247	0.2294926	0.145094	0.232861
	B	0.18729	0.280861	0.247	0.2294926	0.144818	0.232586
	C	0.17776	0.258115	0.226	0.2101365	0.125627	0.213665

이 20ft에서 액화가 일어날 확률은 가장 크게 나타났다. 이것은 깊이 20ft에서 상재하중에 의한 구속응력이 다른 깊이에서보다도 상대적으로 더 작은 값을 지니기 때문이다.

3. 깊이 20ft에서는 기초외부가 내부보다도 액화가 일어날 확률이 크게 나타났다.

4. 기초의 크기가 커짐에 따라서 액화가 일어날 확률은 줄어들었다.

5. Scale of Fluctuation에 따른 액화가 일어날 확률은 20ft에서 상대밀도의 분산이 감소함에 따라 증가하였고 50ft에서는 액화가 일어날 확률이 감소하였다.

6. 등방상태인 경우 깊이 5ft에서는 지진발

생 후 5.5초만에 그리고 20ft에서는 약 16초만에 간극수압비는 1이 되었고 깊이 50ft에서는 지진이 끝날때 약 0.13 정도였다.

7. 비등방상태인 경우에는 등방상태와 같이 깊이가 증가함에 따라 간극수압비는 감소하였으며 지진이 끝날때 0.13-0.27 정도였다.

8. 비등방상태에서 압밀응력비의 값이 증가함에 따라 간극수압비는 감소하였으며 압밀응력비에 대한 영향은 깊이가 증가할수록 적게 나타내었다.

9. 등방상태나 비등방상태에서 상대밀도에 따른 간극수압비는 20ft에서 상대밀도가 커질수록 감소하였으나 50ft에서는 거의 영향을 받

지 않았다.

앞으로 간극수압분산과 그에 따른 구조물의 기초침하에 대한 해석을 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1990년도 목적 기초 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김원배, (1987년), '구조물의 동적 해석을 위한 한반도의 인공 지진파 작성', 고려대학교 박사 학위 논문.
2. Haldar and Miller, (1984), 'Statistical Evaluation of cyclic strength of sand' Journal of Geotechnical Engineering division, ASCE, Vol 110, No. GT12, December. pp.1785-1802.
3. Seed and Idriss, (1967), 'Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake' Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 93, SM3, May, pp.83-108.
4. Schnabel, Lysmer, Seed, (1972), 'SHAKE-A Computer program for Earthquake response of Horizontally Layered Sites', Earthquake Engineering Research Center, Report, No. EERC 72-12, December.
5. Seed, Chan, Mitchell, and Arulanadaw, (1977), 'Effects of Sample preparation on Sand Liquefaction, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT2, Feb., pp.91-108.
6. Ladd, (1977), 'Specimen Preparation and Cyclic Stability of Sand', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT6, June, pp.535-547.
7. Haldar and Tang, (1979), 'Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 105, No. GT2, Feb., pp.145-163.
8. Martin, Finn, and Seed, (1978), 'Effects of System Compliance on Liquefaction Test', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 104, No. GT4, Apr., pp.463-179.
9. Ishihara and Yasuda, (1972), 'Sand Liquefaction Due to Irregular Excitation', Soil and Foundations, Vol 102, No. 4, Dec., pp.65-78.
10. Annaki, and Lee, (1977), 'Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT6, June., pp.549-564.
11. Haldar and Tang, (1981), 'Statistical Study of Uniform Cycles in Earthquake Motions', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 107, No. GT5, May, pp.577-589.
12. Finn, Brarisby and Pickering, (1970), 'Effect of Strain History on Liquefaction of Sands', Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 96, No. SM6, Jun, pp. 1917-1934.
13. Marcuson and Bieganousky, (1977), 'Laboratory Standard Penetration Tests on Fine Sands', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT6, June., pp. 565-588.
14. Seed and Idriss, (1971), 'Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential', Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 97, No. SM9, September, pp.1249-1273.
15. Haldar and Tang, (1981), 'Statistical Study of Uniform Cycles in Earthquakes', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 107, No. GT5, May, pp.577-589.
16. Seed, Martin and Lysmer, (1976), 'Pore Water Pressure Change during Soil Liquefaction', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 102, No. GT4, April., 323-345.
17. Ching S. Chang, Ching L. Kuo, and Ernest T. Seliig, (1983), 'Pore Pressure Development during Cyclic Loading', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Technical Notes Proc. Paper 17601, Vol 109, pp.103-107.
18. Haldar and Tang, (1979), 'Uncertainty Analysis of Relative Density', Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 105, No. GT7, July., pp.899-904.

(접수일자 1991.11.15)