

## 지진에 따른 지하공동의 붕괴로 인한 지표면 함몰에 대한 확률론적 연구

### Probabilistic Study of Surface Subsidence due to the Collapse of Underground Void during Earthquakes

김영수\* · 이 진\*\*

Kim, Young Soo · Lee, Chin

#### Abstract

This study is related to the surface subsidence due to the collapse of a underground void during earthquakes. The amount of the settlement due to the collapse of a underground void will depend on the depth of the void, the initial condition of unit weight of sand, the size and type of foundation, the strength of earthquake, the size of a void, etc.

The purpose of the paper is to estimate the amount of the subsidence, analyse the factors affecting the subsidence, and develop a program determining the probability of the damages to structures in terms of absolute and differential settlement and rotational settlement.

On the base of the results obtained in this study, when the depth of a void is constant and the width of the void increases, the change of the subsidence factor due to the angle of internal friction and the actual effective factor of the void become smaller than that due to the unit weight of sand deposits. In the same condition, the probabilities of damages due to the absolute and differential settlement increase, and those due to the rotational settlement decrease.

#### 요 지

이 연구는 지진시 지하공동의 붕괴로 인한 지표면 함몰에 관련된다.

지하공동의 붕괴로 인한 침하량은 공동의 깊이, 모래의 단위중량, 기초의 크기와 형태, 지진강도 그리고 공동의 크기에 따라 달라진다. 본 연구에서는 함몰의 정도의 추정, 함몰에 영향을 미치는 요소의 해석, 그리고 절대침하와 부등침하 그리고 회전성침하로 인한 구조물 손상에 대한 확률을 계산하는 프로그램을 개발하였다. 본 연구의 얻어진 결과에서 공동의 깊이가 일정하고 폭이 증가함에 따라 파괴면의 각과 공동의 유효계수는 모래의 단위중량보다 침하계수에 영향을 적게 미쳤다. 그리고 같은 조건에서 절대침하와 부등침하에 대한 구조물의 손상확률은 증가하였고 회전성침하에 대한 손상확률은 감소하였다.

\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

## 1. 서 론

포화된 모래지반에서 지진시 일어나는 침하를 발생된 간극수압이 분산됨에 따라 일어나는 침하가 대부분이다. 그러나 경우에 따라서는 지표면 아래 부분에서 지진으로 액화현상이 일어난다면 밀도의 증가와 액화된 흙의 유출로 공동이 생길수 있는데 이 공동의 붕괴로 인한 침하도 매우 크게 나타날 것이다. 그 침하의 정도는 지표에서 공동까지의 깊이, 초기 흙의 단위중량, 기초의 형태, 지진의 강도, 공동의 크기 등에 따라 좌우 될 것이다. 과거 수 년 동안 액화의 원인을 조사하고 포화된 모래지반의 지진으로 인한 액화의 가능성을 예측하는 연구가 많이 있었다. 그러나 액화와 공동의 붕괴로 인한 지반이나 구조물의 침하와 구조적 손상에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 지진 발생시 지하의 붕괴로 인한 침하량에 대하여만 다루었다. 침하에 영향을 미치는 각종인자들의 불확실성과 그 인자들을 추정하는데 많은 불확실성이 있다. 그 불확실성들을 합리적으로 고려하기 위하여 확률개념을 도입하였다. 먼저 공동의 붕괴로 인한 침하량을 산정하고 각 인자들의 분산성과 절대침하, 부등침하 그리고 회전성침하로 인한 구조물 손상에 대한 확률을 계산하기 위한 프로그램을 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램을 한 예에 적용하여 몇가지 결과를 얻었다.

## 2. 연구 연혁

지하 공동의 붕괴로 인한 침하 형상은 크게 경험적인 접근방법(empirical approach method)과 현상적인 접근방법(phenomenological approach method)으로 나누며, 경험적인 접근방법은 특별한 역학적인 원리가 없이 현장에서의 관찰과 경험을 토대로 침하 형상을 예상한 것으로 Voight & Parisseau<sup>(1)</sup>에 의해 제시 되었고, 여기에는 National Coal Board, profile functions, influence functions로 세분된다. 한편, National Coal Board<sup>(2)</sup>는 공동의 지하학적인 특성만을 고려한 것이며, profile functions는 침하 형상을 하나의 선으로 가정했으며, 그리고 influence functions는 중첩의 원리를 이용하였다.

현상적인 접근방법은 실험실과 현장에서 흙의 성질을 기초로한 것으로 연속체 역학의 원리로부터 공동 주변의 변형을 해석한 것으로 탄성적인 모델<sup>(3)</sup>, 점탄성적인 모델<sup>(4)</sup>, post-yield 모델<sup>(5)</sup> 등이 있다.

탄성해석의 결과는 현장 측정과 잘 부합되지 않으며, 점탄성 해석은 복잡한 수학의 배경이 요구된다. 그리고 post-yield 해석은 중력에 의한 소성 변형이 대부분이다. 이 방법들은 수학적으로 매우 복잡하며, 재료의 성질을 정확히 알아야 하는 어려움이 있다. 이와같이 지하공동의 붕괴로 인한 침하형상을 예측하는 방법들만 제시하였을 뿐 각종침하에 영향을 미치는 요소들의 정도와 분산성 그리고 구조물 손상에 대한 연구는 거의 없었다.

## 3. 지진시 지하공동의 붕괴로 인한 지표면 침하

### 3.1 침하형상

지진시 지하공동의 붕괴로 인한 지표면 침하이론의 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 기초 지반은 균질하고 포화된 사질토이다.
- 2) 압밀에 의한 침하를 전혀 고려치 않았다.
- 3) 지진의 충격에 의한 공동의 파괴는 전체가 동시에 일어난다.
- 4) 공동은 두께가 일정하고, 지표면과는 수평이다.
- 5) 수평변위는 무시한다.

본 논문에서는 경험적인 접근방법 중 Brauner<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 정규분포식을 응용한 influence functions으로 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f(x',x) = \frac{S_0}{B} \exp\left[-\left(\frac{x'-x}{B}\right)^2\right] : \quad (3-1)$$

$$|x'-x| \leq \frac{H}{\tan\alpha}$$

$$= 0 : |x'-x| > \frac{H}{\tan\alpha}$$

여기서,

$S_0$  :  $x=0$  인 지점의 침하량

$2B$  : 공동의 폭

$x$  : 지표면 중심으로부터 임의의 지점까지의 수평 거리

$x'$  : 공동의 중심으로부터 임의의 지점까지의 수평

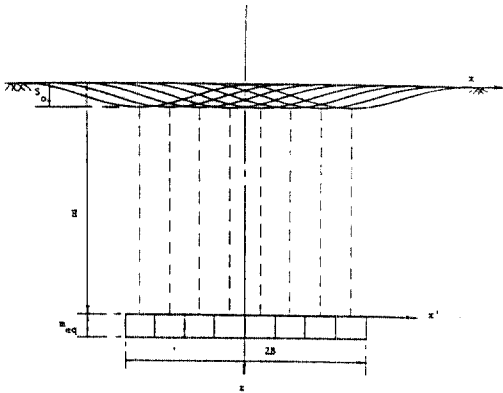


그림 3.1 공동 요소들의 중첩

거리

그림 3.1에서, 거리  $x$  에서의 침하량,  $S(x)$ 는 식 3-1의 influence functions을 중첩의 원리에 적용하면 다음과 같다.

$$S(x) = \int_{-B}^B f(x', x) dx' \quad (3-2)$$

그리고, 그림 3.2에서 파괴면의 각을 다음과 같이 가정하였다.

$$\alpha = 45 + \phi/2 \quad (3-3)$$

여기서,  $\alpha$  : 파괴면의 각

$\phi$  : 흙의 내부 마찰각

그림 3.2에서와 같이  $H$ 를 고정시켜 놓고  $B$ 를 증가시킬 때,  $S_0$ 가 증가하다가 어느 한계에 도달하면  $S_0$ 의 크기가 일정하게 된다. 이 때의 침하량이 최대 침하량,  $S_{max}$ 이다. 또한 경사면의 길이도 일정할 것이며,  $2(H/\tan\alpha)$ 이라 가정한다. 그리고 그 한계는 다음과 같이 정의한다.

즉,  $S_0 = S_{max}$ 이 존재하지 않으면 Subcritical,

$S_0 = S_{max}$ 이 한점에만 존재하면 Critical,

$S_0 = S_{max}$ 이 여러점에서 존재하면 Supercritical.

바꾸어 표시하면 다음과 같다.

Subcritical(Profile I) :  $B < H/\tan\alpha$ ,  $S_0 < S_{max}$

Critical(Profile II) :  $B = H/\tan\alpha$ ,  $S_0 = S_{max}$

Supercritical(Profile III) :  $B > H/\tan\alpha$ ,  $S_0 = S_{max}$

(1) Critical 상태

$S(x)$ 를 구하기 위하여 식 3-2을 바꾸어 쓰면 다

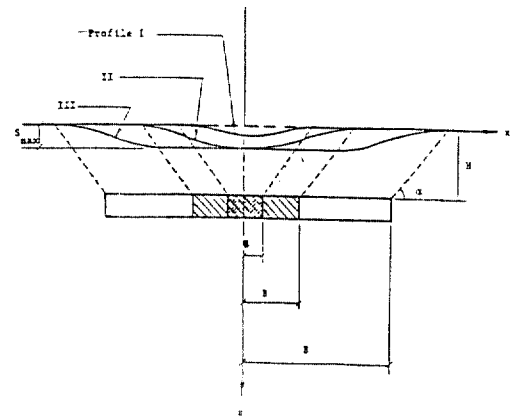


그림 3.2 Subcritical, Critical, and Supercritical의 단면도

표 3.1. 수정된  $S(x)$

x	Modified $S(x)$
0	1.0 $S_0$
B/2	.90591 $S_0$
B	.50617 $S_0$
(3/2)B	.10634 $S_0$
2B	.00617 $S_0$

음과 같다.

$$S(x) = S_0 \left[ \Phi\left(\frac{B-x}{B/\sqrt{2\pi}}\right) + \Phi\left(\frac{B+x}{B/\sqrt{2\pi}}\right) - 1 \right] \quad (3-4)$$

$$S(x=0) = S_0 \left[ \Phi(\sqrt{2\pi}) + \Phi(\sqrt{2\pi}) - 1 \right] = 0.98789 S_0$$

여기서,  $\Phi$  : 정규분포 함수

$S(x)$ 의 크기는 지표면에서 공동까지의 깊이, 지진발생 전과 후의 흙의 단위중량의 변화, 공동의 크기와 형상 등에 따라 다르겠지만,  $S_0$ 에 비례함을 보여준다.  $x=0$ 인 지점의 침하량이  $S_0$ 이어야 하기 때문에 0.98789로 나누어 계산하였다.

$$\text{수정된 } S(x=0) = \frac{S(x=0)}{0.98789} S_0 = \frac{0.98789}{0.98789} S_0 = S_0$$

같은 방법으로,  $x=B/2$ ,  $B$ ,  $(3/2)B$ ,  $2B$ 일 때의

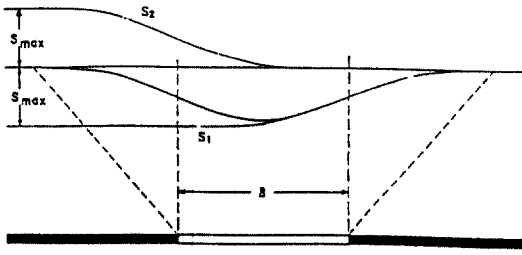


그림 3.3 Subcritical일 때의 침하형상

수정된  $S(x)$ 는 표 3.1과같이 나타나며 앞으로 침하량 계산에는 이 값을 사용하였다.

(2) Subcritical 상태

Haldar-Miller<sup>(7)</sup>는 이때의 침하 형상이 Critical과 같다고 가정했지만 침하 경사면의 길이,  $B+H/\tan\alpha$ 가 Subcritical 상태일 때는  $B$ 가  $H/\tan\alpha$ 보다 적으므로 Critical 상태일 때의 침하 경사면의 길이,  $2(H/\tan\alpha)$ 보다  $H/\tan\alpha - B$  만큼 적을 것이며, 중복된 부분의 침하도 영향을 받아 감소할 것이므로, 그림 3-3에서와 같이 본 논문에서는 중첩의 원리를 적용시켜 다음과 같이 계산했다.

$$S(x) = S_1 - (S_{max} - S_2) \quad (3-5)$$

(3) Supercritical 상태

$x$ 가  $B - H/\tan\alpha$ 보다 작은 영역에서의 침하는  $S_{max}$ 과 같고,  $x$ 가  $B - H/\tan\alpha$ 보다 큰 지점에서의 침하형상은 Critical 상태일 때와 동일하다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } x \leq B - H/\tan\alpha : S(x) &= S_{max} \\ x > B - H/\tan\alpha : S(x) &< S_{max} \end{aligned}$$

3.2 침하부분의 체적 계산

체적 계산을 하기 위하여 수정된  $S(x)$  값들을 이용했으며, 2차원, 3차원의 경우에 대해 각각 구했다.

Critical, Subcritical & Supercritical 상태의 침하부분의 체적계산은 동일한 방법으로 계산하였다.

(1) 2차원

그림 3.4와 같이 2차원의 체적을  $N$ 개로 절단하여 계산하였다.

$$V_s = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{B+H/\tan\alpha}{N} (S_{i+1} + S_i) \right] \quad (3-6)$$

여기서,

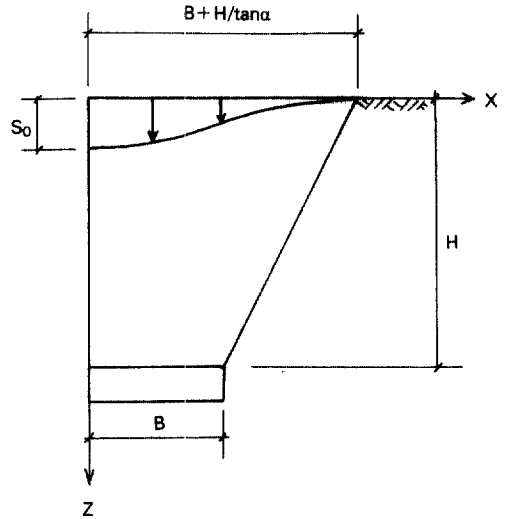


그림 3.4 침하부분의 체적

$V_s$ : 침하부분의 체적

$$S_i : X = \frac{i(B+H/\tan\alpha)}{N} \text{ 일 때의 침하량}$$

$$S_{i-1} : X = \frac{(i-1)(B+H/\tan\alpha)}{N} \text{ 일 때의 침하량}$$

(2) 3차원

3차원 체적 계산은 2차원일 때와 동일한 방법으로 하면 다음과 같다.

$$V_s = \sum_{i=1}^N \left[ \pi \left( \frac{B+H/\tan\alpha}{N} \right)^2 \{ (i-1/3)S_{i-1} + (i-1/3)S_i \} \right] \quad (3-7)$$

3.3 침하계수

$S(x)$ 가 표 3.1에서와 같이  $S_0$ 에 대한 비례치이므로  $S_0$ 를 알기 위해서는 침하계수,  $a$  를 구해야 한다.

$$a = \frac{S_0}{m} \quad (3-8)$$

$$S_0 = a \cdot m$$

여기서,  $a$ : 침하계수

$S_0$ :  $x=0$  인 지점의 침하량

$m$ : 공동의 두께

지진 전과 후의 토체의 질량은 불변하므로 식 3-9와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_0 \cdot \gamma_0 = (V_0 + V_v - V_s) \cdot \gamma_f \quad (3-9)$$

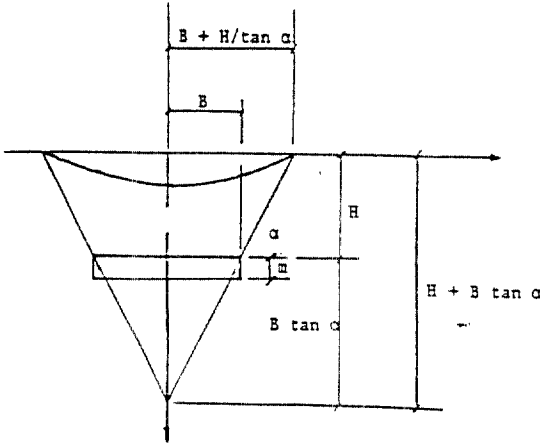


그림 3.5 토체의 중량

식 3-9를 변형하면 다음과 같다.

$$V_S = V_V + V_0(\gamma_f - \gamma_0)/\gamma_f \quad (3-10)$$

$V_S$ 를 달리 표현하면 다음과 같다.

$$V_S = K \cdot S_0$$

그러므로

$$a = \frac{S_0}{m} = \frac{V_S}{K \cdot m} \quad (3-11)$$

여기서,  $V_0$ : 침하전의 흙의 체적

$V_V$ : 공동의 체적

$\gamma_f$ : 액화 현상 전의 단위 중량

$\gamma_0$ : 액화 현상 후의 단위 중량

$K$ : 상수

공동의 유효두께,  $m_{eq}$ 는 그림 3.6에서와 같이 붕괴 후 공동에 채워진 흙의 단위 중량이 공동상부의 단위중량보다 적어지거나 공동이 완전히 차지 않을 때, 그것에 대한 보정치로써 다음과 같다.

$$m_{eq} = F_m \cdot m \quad (3-12)$$

그러므로

$$F_m = \frac{m_{eq}}{m} \quad (3-13)$$

여기서,  $m$ : 공동의 두께

$m_{eq}$ : 공동의 유효 두께

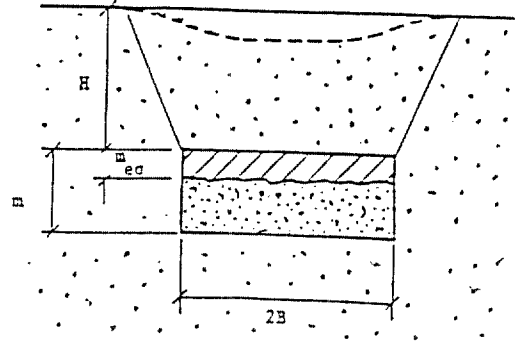


그림 3.6 공동의 유효계수

$F_m$ : 공동의 유효 계수(=0~1.0)

식 3-11로 부터  $a$ 를 2차원과 3차원에서 각각 구하여 보면 다음과 같다.

(1) 2차원

$$a = \frac{1}{K} \left[ 2B \cdot F_m + \frac{H}{m(2B + H/\tan\alpha)} \frac{(\gamma_f - \gamma_0)}{\gamma_f} \right] \quad (3-14)$$

(2) 3차원

$$a = \frac{1}{K} \left[ 2\pi B^2 \cdot F_m + \frac{\pi H}{3m} \{3B^2 + 3BH/\tan\alpha + (H/\tan\alpha)^2\} \frac{(\gamma_f - \gamma_0)}{\gamma_f} \right] \quad (3-15)$$

### 3.4 분산성

침하계수에 영향을 주는 인자들의 분산성을 파악하기 위해 F.O.S.M.(First Order Second Moment) 방법을 사용하였다. 불확실성 요소들 중 토질정수들  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_0$ 의 분산성을 고찰하기 위하여  $a$ 의 변동계수(COV)에 대한  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_0$  각각의 COV의 비로 나타냈다.

$$\text{Var}(a) = \left( \frac{\partial a}{\partial B} \right)^2 \text{Var}(B) + \left( \frac{\partial a}{\partial H} \right)^2 \text{Var}(H) \quad (3-16)$$

$$+ \left( \frac{\partial a}{\partial m} \right)^2 \text{Var}(m) + \left( \frac{\partial a}{\partial F_m} \right)^2 \text{Var}(F_m)$$

$$+ \left( \frac{\partial a}{\partial \gamma_f} \right)^2 \text{Var}(\gamma_f) + \left( \frac{\partial a}{\partial \gamma_0} \right)^2 \text{Var}(\gamma_0)$$

$$COV(a) = \frac{\sqrt{Var(a)}}{E(a)} + \left(\frac{\partial a}{\partial \alpha}\right)^2 Var(\alpha) \quad (3-17)$$

$$RCOV(F_m) = \frac{1}{COV(a)} \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial F_m}\right)^2 Var(F_m)}{E(a)} \quad (3-18)$$

$$RCOV(\gamma_f) = \frac{1}{COV(a)} \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial \gamma_f}\right)^2 Var(\gamma_f)}{E(a)} \quad (3-19)$$

$$RCOV(\gamma_o) = \frac{1}{COV(a)} \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial \gamma_o}\right)^2 Var(\gamma_o)}{E(a)} \quad (3-20)$$

$$RCOV(\alpha) = \frac{1}{COV(a)} \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial \alpha}\right)^2 Var(\alpha)}{E(a)} \quad (3-21)$$

여기서, RCOV는 a의 COV에 대한 토질정수들의 COV의 비이다.

#### 4. 구조물 손상에 대한 확률

##### 4.1 기본 개념

지진은 종종 구조물에 파괴를 유발시키므로 공학자들의 관심을 고조시켜 왔으며, 또한 많은 연구가 있었다. 파괴의 주원인은 액화현상으로 인한 침하와 공동의 붕괴로 인한 침하이다. 후자는 통상 흙 자체의 압밀 침하보다 훨씬 클 것이다. 이런 침하에 대한 각종 구조물의 안정검토를 하는데 많은 불확실성이 있기 때문에 이들을 고려할 수 있는 확률 개념이 도입되었다.

지진 발생이 빈번한 지역에 대하여 손상확률을 예측할 수 있다면 구조물 안정 대책을 세울 수 있다. 이런 지역에 제한적으로 적용시킬 수 있으나, 지진 활동이 불확실하므로 정확히 예측하기는 매우 어렵다.

구조물 손상에 대한 확률개념은 다음과 같다.

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \quad (3-22)$$

여기서,

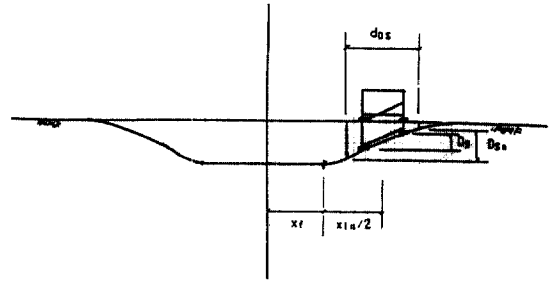


그림 4 부등침하

P = 구조물의 손상확률

$P_1$  = 어느 지역에 년 중 액화현상이 일어날 확률

$P_2$  = 공동으로 인한 침하 영역 내 기초가 존재할 확률 ( $P_1$ 에 대한 조건부 확률)

$P_3$  = 기초의 침하가 허용침하를 초과할 확률 ( $P_2$ 에 대한 조건부 확률)

본 논문에서는 절대 침하, 부등 침하 그리고 회전성 침하에 대한 구조물의 손상확률,  $P_3$ 만을 구하였다.

##### 4.2 구조물 손상확률

###### (1) 절대침하(absolute settlement)

절대침하, S는 공동의 중심으로 부터 거리, x에서의 침하량, S(x)가 되며, 침하가 허용 절대침하 이상일 확률은 전 침하영역에 대한 허용 절대침하,  $S_a$  이상인 부분의 비로써 나타났다.

$$P_{3AS} = \frac{x_f + x_e}{x_f + x_{in}} \quad (2차원의 경우) \quad (3-23)$$

$$P_{3AS} = \frac{(x_f + x_e)^2}{(x_f + x_{in})^2} \quad (3차원의 경우) \quad (3-24)$$

여기서,

$P_{3AS}$  : 침하가 허용 절대침하 이상일 확률

$x_e$  : 침하 중심에서 허용 침하까지의 수평거리

$x_f$  : 최대침하,  $S_{max}$ 인 영역의 수평거리(=  $B - H / \tan \alpha$ )

$x_{in}$  : 최대침하,  $S_{max}$ 가 아닌 부분의 수평거리(=  $2H / \tan \alpha$ )

###### (2) 부등침하(differential settlement)

부등침하,  $D_s$ 는 절대침하의 차를 말하며, 침하가 허용 부등침하,  $D_{s_a}$  이상일 확률은 그림 4와 같으며,

절대침하일 때와 동일한 방법으로 구하였다.

$$D_{Sa} = S(x_1) - S(x_2) \quad (3-25)$$

$$P_{3DS} = 1 - \frac{d_{DS}}{x_f + x_{in}} \quad (2차원의 경우) \quad (3-26)$$

$$P_{3DS} = 1 - d_{DS} \frac{2x_f + x_{in}}{(x_f + x_{in})^2} \quad (3차원의 경우) \quad (3-27)$$

여기서,

$D_{Sa}$  : 허용 부등침하

$P_{3DS}$  : 침하가 허용 부등침하 이상일 확률

$d_{DS}$  : 허용 부등침하가 발생하는 부분의 최소 수평 거리(=  $x_1 - x_2$ )

### (3) 회전성침하(rotational)

회전성 침하,  $\theta$ 는 부등 침하를 수평거리로 나누면 된다. 침하가 허용 회전성침하 이상인 확률은 전침하영역에 대한 허용 회전성 침하,  $\theta_a$  이상인 부분의 비로써 나타났다.

그리고 기둥의 간격이 침하의 경사면보다 크면 회전성 침하에 대한 확률을 0 이라 하였다.

$$\theta_a = \frac{S(x_1) - S(x_2)}{x_1 - x_2} \quad (3-28)$$

$$x_1 = \frac{x_{in}}{2} - \frac{d_{RO}}{2}$$

$$x_2 = \frac{x_{in}}{2} + \frac{d_{RO}}{2}$$

여기서,

$\theta_a$  : 허용 회전성 침하

$d_{RO}$  : 허용 회전성침하가 발생하는 영역의 수평거리

$$P_{3RO} = \frac{d_{RO}}{x_{in} + x_f} \quad (2차원의 경우) \quad (3-29)$$

$$P_{3RO} = d_{RO} \frac{(2x_f + x_{in})}{(x_{in} + x_f)^2} \quad (3차원의 경우) \quad (3-30)$$

여기서,  $P_{3RO}$  : 침하가 허용 회전성침하 이상일 확률

## 5. 한 예저 적용 및 고찰

본 연구에서 그림 3.6에서  $H=10$  m,  $F_m=0.8$ ,  $m=$

$1$  m,  $\alpha=60^\circ$ ,  $\gamma_f=18$  kN/m<sup>3</sup>,  $\gamma_o=16$  kN/m<sup>3</sup>를 기본으로 하고  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_f$ , 그리고  $\gamma_o$ 를 변화시키면서 B의 증가에 따른 침하계수, a의 변화와 구조물의 손상 확률을 3차원인 경우만 기술하였다.

### 5.1 침하계수에 영향을 주는 요소

#### (1) 민감도

침하계수에 영향을 주는 인자로  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_o$ 에 따른 a의 변화를 B의 증가에 따라 살펴 보았다.

#### 1) $\alpha$ 에 따른 a의 변화

$\alpha$ 값  $55.0^\circ$ ,  $60.0^\circ$ ,  $65.0^\circ$ 에 대하여 B의 증가에 따라 a의 변화를 그림 5.1에 나타냈다. 여기서  $B=4.0-5.0$  m까지는 증가하다가 그 이상에서는 감소하였다. 특히  $B=4.3$  m에서는 모든  $\alpha$ 값에 대하여  $a=2.9$ 의 일정한 값으로 나타났다.

#### 2) $F_m$ 에 따른 a의 변화

B의 증가에 따라  $F_m$ 값 0.1, 0.5, 1.0인 경우에 대하여 a의 변화를 그림 5.2에 나타냈다. 그림에서 보는

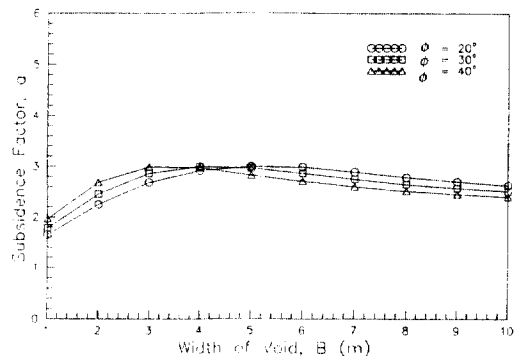


그림 5.1 파괴면의 각에 따른 침하계수의 변화

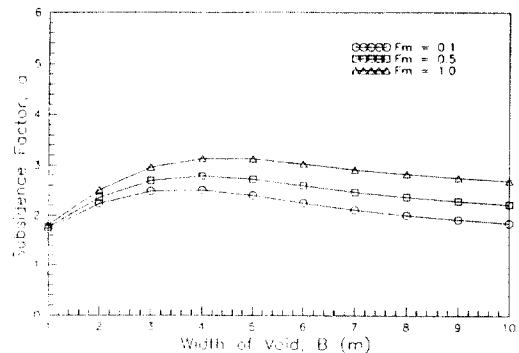


그림 5.2 공동의 유효계수에 따른 침하계수의 변화

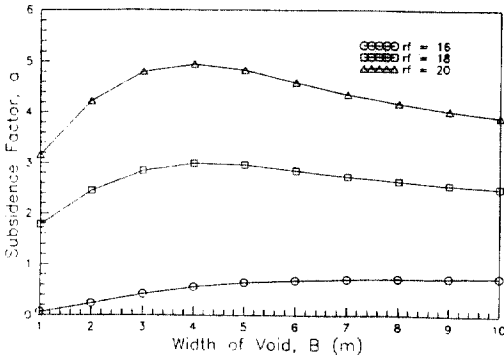


그림 5.3 붕괴 후의 단위중량에 따른 침하계수의 변화

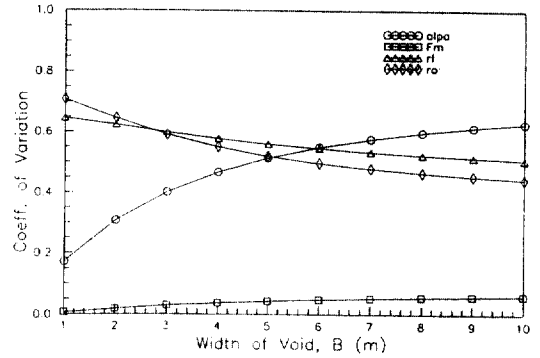


그림 5.5 각종 계수들의 공동의 폭에 따른 변동계수에 따른 변화

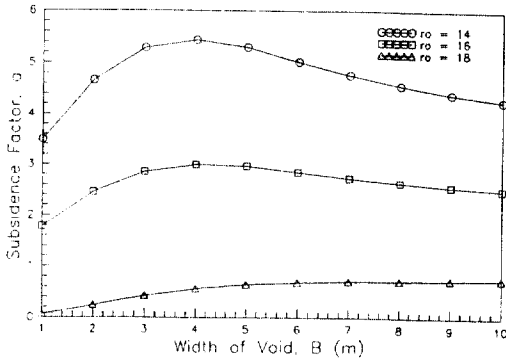


그림 5.4 붕괴 전의 단위중량에 따른 침하계수의 변화

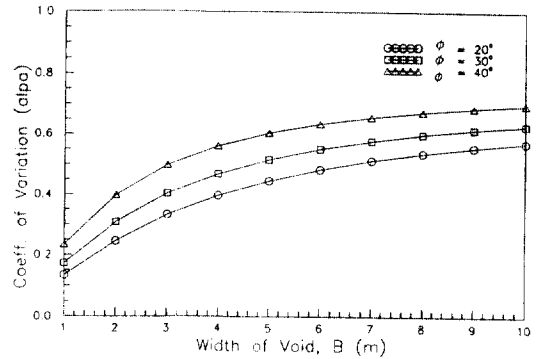


그림 5.6 공동의 폭에 따른 흙의 내부마찰각의 변동계수에 따른 변화

바와 같이 모든  $F_m$  값에 대하여  $B=4.0\text{m}$ 까지는  $F_m$ 이 클수록  $a$ 는 증가하였으나, 그 이상에서는 감소하였고  $a$ 의 최대값은 2.5, 2.8, 3.1로 나타났다.

### 3) $\alpha$ 에 따른 $a$ 의 변화

$\gamma_1$ 를 16, 18, 20  $\text{kN/m}^3$ 인 경우에 대하여  $B$ 의 증가에 따라  $a$ 의 변화를 그림 5.3에 나타냈다. 여기에서  $\gamma_1$ 가 16  $\text{kN/m}^3$ 인 경우는  $B$ 가 커짐에 따라  $a$ 의 값이 완만히 계속 증가하였고,  $\gamma_1$ 가 18과 20  $\text{kN/m}^3$ 인 경우는  $B=4.0\text{m}$ 까지는  $a$ 가 증가하였으나 그 이상에서는 감소하였다.  $B=4.0\text{m}$ 일 때  $a$ 의 값이 3.9로 나타났다.

$\gamma_0$ 인 경우에 대하여는 그림 5.4에 나타났다. 여기에서  $\gamma_1$ 인 경우와 마찬가지로 경향을 보이나 대체적으로  $\alpha$  값이  $\gamma_1$ 보다 크게 나타났다.

### (2) 분산성

$a$ 에 영향을 주는 인자들에는 많은 불확실성이

내포되어 있다. 그래서 이들의 분산성을 검토하기 위하여 확률론적 방법인 F.O.S.M.(First Order Second Moment)방법을 사용하였다. 특히 본 연구에서는  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_0$  각각의 COV를 전체 COV로 나누어 생각하였고, 이 때  $B$ ,  $H$ ,  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_0$  각각의 Variance를 0.1로 가정하였다.  $B$ 의 증가에 따라  $\alpha$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_1$  그리고  $\gamma_0$ 의 COV를 그림 5.5에서 나타냈다. 여기서  $B$ 가 증가할수록  $\alpha$ 의 COV는 현저하게 증가하였고  $F_m$ 의 COV는 조금씩 증가하였으며,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_0$ 의 COV는 일정하게 조금씩 감소하였다. 그리고 내부마찰각과  $\gamma_0$ 값의 변화에 따라  $B$ 의 증가에 따른 그들의 COV 값의 변화는 그림 5.6에 나타났다. 여기서  $B$ 가 증가함에 따라 내부마찰각이 클수록  $\alpha$ 의 COV는 더 작게 나타났고 그림 5.7에서 보는 바와 같이  $B$ 가 증가함에 따라  $\gamma_0$ 값이 작을수록  $\gamma_0$ 의 COV는 현저하게 감소함을 보였다.



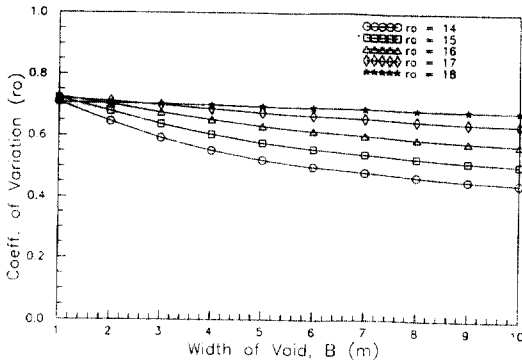


그림 5.7 공동의 폭에 대한 붕괴전의 단위중량에 대한 변화

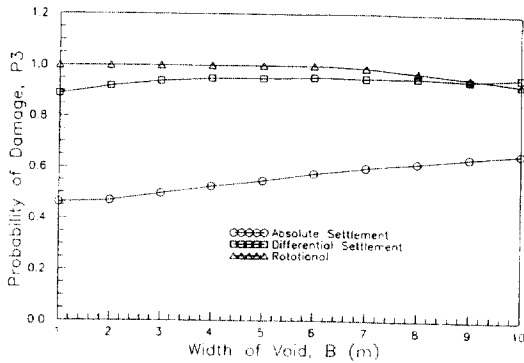


그림 5.8 공동의 폭에 따른 각종 침하에 대한 구조물 손상확률

## 5.2 구조물의 손상에 대한 확률

본 연구에서 구조물의 손상에 대한 확률,  $P_3$ , 절대 침하, 부등 침하 그리고 회전성에 대하여 검토하였다. 이 때 허용절대침하,  $S_a=0.3\text{ m}$ , 허용 부등 침하,  $D_{sa}=0.3\text{ m}$ , 허용 회전,  $\Theta_a=1/5$ , 그리고 그림 4에서  $X_{str}=5\text{ m}$ 로 가정하였다. 각종 침하에 대한 파괴확률을 B의 증가에 따라 그림 5.8에 나타냈다. 그림에서와 같이 절대침하에 대한 파괴확률은 공동의 한계폭( $B=5.8\text{ m}$ )까지는 파괴확률이 1.0이었으나 그 이상에서는 점점 감소하였다. 또 부등침하에 대한 파괴확률은 공동의 한계폭까지는 점점 증가하다가 그 이상에서는 점점 감소하였다. 그리고 회전에 대한 파괴확률은 B가 증가함에 따라 점점 증가하였다.

공동의 폭 B를 달리하여  $\phi$ ,  $F_m$ ,  $\gamma_i$ ,  $\gamma_o$ 를 각각 증가시키면서 절대침하와 부등침하 그리고 회전에 대한 파괴확률을 구하였으나, 여기서는 지면 관계상

생략하였다.

## 6. 결 론

본 논문은 지진시 지하공동의 붕괴로 인한 지표면 침하의 산정과 구조물 손상에 대한 확률을 구하는 프로그램을 개발하였다. 그리고 그 프로그램을 한 예제에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 공동의 깊이가 일정할 때 폭이 증가함에 따라 파괴면의 각과 공동의 유효계수는 침하계수에 영향을 적게 미쳤고, 모래의 단위중량은 크게 미쳤다.

특히 파괴면의 각과 공동의 유효계수는 공동의 폭이 일정한 깊이( $B=4\text{ m}$ ) 이하에서는 증가하다가 그 이상에서는 감소함을 보였다.

2) 공동의 폭이 증가함에 따라 공동의 유효계수와 흙의 내부마찰각의 불확실성은 점점 증가를 하였고 모래의 단위중량의 불확실성은 단위중량이 작을수록 현저히 감소하였다. 특히 흙의 내부마찰각의 증가는 일률적으로 매우 크게 나타났다.

3) 구조물의 손상확률에 대한 해석결과, 공동의 폭이 증가함에 따라 절대침하와 부등침하에 대한 구조물의 손상확률은 증가하였으며, 회전성 침하에 대한 손상확률은 감소하였다.

4) 절대침하와 부등침하에 대한 구조물 손상확률은 파괴면의 각과 공동의 유효계수의 크기에는 별 영향을 미치지 않았고 붕괴 전후의 모래의 단위중량 크기에는 큰 영향을 미쳤다. 특히 붕괴 전후의 공동의 폭에 대한 영향은 반대의 양상을 보였다. 그러나 회전성침하에 대한 구조물 손상 확률은 붕괴 전후의 단위중량이  $17\text{ kN/m}^3$ 일 때 공동의 폭에 대한 변화가 크게 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 1991년 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대 육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음.

## 參 考 文 獻

1. Voight, A.M. and Pariseau, W., "State of Predictive Art in Subsidence Engineering", *Journal of the Soil*

- Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM2, March 1970, pp. 721-750.
2. National Coal Board, "Subsidence Engineers' Handbook", London, U.K., 1975.
  3. Salamon, M., "Elastic Analysis of Displacements and Stresses by Mining Seam on Reef Deposit", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Parts 1-3, Vol. 64, 1964, Parts 4-5, Vol. 65, 1965.
  4. Ting, C-S., "Elastic & Plastic Strain Properties of Sand", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, May 1982, pp. 787-793.
  5. Sweet, A.L., "Validity of a Stochastic Model for Predicting Subsidence", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 91, No. SM6, Proc. Paper 4573, 1965, pp. 111-128.
  6. Brauner, G., "Subsidence Due to Underground Mining", Information Circular 8571, United States Department of the Interior, 1973.
  7. Haldar, A. and Miller, F.J., "Probabilistic Evaluation of Damage Potential in Earthquake Induced Liquefaction in a 3-D Soil Deposit", NSF Report No. SCEGIT-101-82, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1982.
  8. Ang, A.H-S. and Tang, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. I, John Wiley Sons, Inc., New York, N.Y., 1975.

(接受：1993. 4. 15)