

일어나면 보통 정도로 조밀한 모래에도 액화현상이 일어날 수 있다는 것을 의미한다. 이는 매우 중요한 사실이지만 여기에 관하여서는 아직도 논란이 계속되고 있다. 참고문헌으로는 Casagrande (1975)와 Seed(1979)의 연구결과가 있다.

## 7.8 간극수압계수

점토는 투수성이 대단히 작으므로 하중을 받는 초기에는 비배수상태가 된다. 따라서 점토 공시체에 하중을 가하면 과잉간극수압이 발생하게 된다. 하중에 의하여 유발되는 과잉간극수압의 크기는 하중의 크기, 흙의 특성 및 하중의 형태 등에 따라 달라진다. 하중의 변화량, 즉 전응력의 변화량에 대한 과잉간극수압의 변화량  $\Delta u$ 의 비(比)를 간극수압계수(間隙水壓係數, pore pressure parameter)라 한다. 즉,

$$\text{간극수압계수} = \frac{\text{과잉간극수압의 변화량}}{\text{전응력의 변화량}} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (7.77)$$

**NOTE** : 하중작용으로 인한 과잉간극수압의 변화량  $\Delta u_e$ 는 전체 간극수압변화량  $\Delta u$ 와 같음. 이것은 정수압은 하중에 의하여 변화하지 않기 때문임 ( $\Delta u_{ss} = 0$ ). 즉  $\Delta u = \Delta u_{ss} + \Delta u_e$ 에서  $\Delta u_{ss} = 0$ 이므로 결국  $\Delta u = \Delta u_e$ 가 됨.

간극수압계수는 등방압축(isotropic compression), 일축압축(unconfined compression) 횡방향구속압축(confined compression) 등 하중의 형태에 따라 다른 기호를 사용하고 있다. 즉 등방압축 : B, 횡방향구속압축 : C, 일축압축 : D를 사용한다. 먼저 간극수압계수 B, C, D에 관하여 그 개념을 간략히 논의하고 삼축압축(triaxial compression) 시의 과잉간극수압에 대해서는 별도로 언급하기로 한다.

간극수압계수는 시험을 통해 작용하중과 과잉간극수압을 실측하여 결정한다. 비배수상태에서 흙의 부피변화는 간극 속의 물과 공기의 부피변화에 기인한다고 가정하고, 간극수압계수를 구하는 이론식이 발표되어 있으나(Lambe와 Whitman, 1969; 김상규, 2004 등) 이 방법으로 간극수압계수를 결정하는 일은 없다. 이들 이론식은 간극수압계수의 본질을 이해하는데 도움이 되지만 이것을 탐구하는데 너무 많은 노력을 집중할 필요는 없다.

### 7.8.1 등방압축, 일축압축 및 횡방향구속압축 시의 간극수압계수

#### (1) 등방압축 시의 간극수압계수 : B

그림 7.51에 보인 것처럼 점토 요소에 등방압축응력  $\Delta \sigma$ 가 작용하면(UU시험의 등방압축 과정

처럼) 이 요소는 물을 배출하면서 체적이 수축하려 할 것이다. 그러나 점토는 투수성이 극히 낮으므로 물은 배출되지 못하고(비배수상태) 대신 과잉간극수압( $\Delta u$ )이 발생하게 된다. 이 때 등방압축하중(전응력)  $\Delta\sigma$  에 대한 유발된 과잉간극수압  $\Delta u$  의 비를 등방압축 시의 간극수압계수 B (pore pressure parameter B; B-parameter)라 한다. 즉,

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma} \tag{7.78}$$

또는  $\Delta u = B\Delta\sigma$  (7.79)      그림 7.51 등방압축 시의 간극수압계수 B

여기서,  $\Delta\sigma$  : 등방압축하중(전응력)의 변화량

$\Delta u$  : 등방압축에 의하여 유발된 과잉간극수압 변화량

간극수압계수 B는 포화도에 따라 0~1사이의 값을 가지게 된다( $0 \leq B \leq 1$ ).

$$S=100\% \text{이면 } B=1 \tag{7.80a}$$

$$\therefore \Delta u = \Delta\sigma \tag{7.80b}$$

즉 완전 포화상태의 점토에 등방압축하중  $\Delta\sigma$  가 작용하면 물이 하중을 모두 감당하게 되어 작용하중이 그대로 과잉간극수압이 된다.

건조토( $S=0\%$ )의 경우 B는 물론 0이다. 물이 없으므로 과잉간극수압은 발생할 수 없다( $S=0\%$ 이면  $B=0, \therefore \Delta u = 0$ ). 일반적으로 B는 포화도 S의 함수이며 S가 클수록 B도 커진다.

$$B = f(S) \quad (0 \leq B \leq 1) \tag{7.81}$$

(2) 횡방향 구속 압축시의 간극수압계수 : C

그림 7.52와 같이 횡방향 변위가 구속된 상태( $K_0$  상태, 압밀시험 공시체 상태)에서 점토 요소에 축 하중  $\Delta\sigma$  가 작용하면 이 요소는 물을 배출하면서 일차원 압밀이 일어나려 할 것이지만 점토는 투수계수가 대단히 작아서 물은 배출되지 못하고(비배수상태) 그 대신 과잉간극수압  $\Delta u$  가 생성된다.

압축하중  $\Delta\sigma$  에 대한 유발된 과잉간극수압  $\Delta u$  의 비(比)를 횡방향구속압축 시의 간극수압계수 C(pore pressure parameter C; C-parameter)라 한다. 즉,

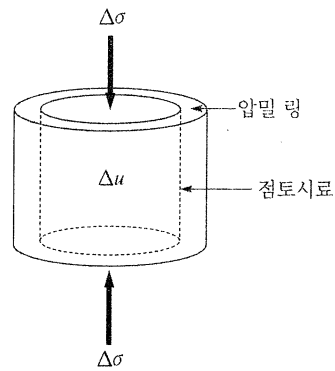


그림 7.52 횡방향 구속 압축 시의 간극수압계수 C

$$C = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \tag{7.82}$$

또는  $\Delta u = C\Delta\sigma$  (7.83)

간극수압계수 C는 포화도에 따라 0에서 1사이의 값을 가진다( $0 \leq C \leq 1$ ).

$$S=100\% \text{이면 } C=1 \tag{7.84a}$$

$$\therefore \Delta u = \Delta \sigma \tag{7.84b}$$

완전 포화상태( $S=100\%$ )의 점토가 횡방향구속상태(압밀 링 속의 상태, 또는 무한 등분포하중 작용상태 ;  $K_0$ -상태)에서 축 방향 하중을 받으면 초기과잉간극수압은 작용하중과 같음은 압밀론에서 이미 언급하였다. 즉 포화점토의 경우 횡방향구속상태에서 축 하중을 받게 되면 축 하중이 그대로 과잉간극수압이 된다. 건조토( $S=0\%$ )의 경우에는 물이 없으므로 C는 물론 0이 된다( $\Delta u_e = 0$ ).

(3) 일축압축 시의 간극수압계수 :  $D=BA$

그림 7.53과 같이 횡 방향 불구속 상태(unconfined)에서 일축압축(uniaxial compression) 하중이 작용하여 과잉간극수압  $\Delta u$ 가 발생하였을 때  $\Delta\sigma$ 에 대한  $\Delta u$ 의 비(比)를 일축압축 시의 간극수압계수 D(pore pressure parameter D; D-parameter)라 한다. 즉

$$D = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \tag{7.85a}$$

또는  $\Delta u = D\Delta\sigma$  (7.85b)

횡방향이 구속되지 않은 상태이므로 일축압축(전단)하면 요소의 체적은 점토의 응력이력에 따라 팽창에서 수축에 이르기까지 다양한 잠재적 경향을 가지게 된다. 즉 심하게 과압밀된 점토는 팽창, 정규압밀점토는 수축되려는 잠재적 특성을 가지고 있다. 일축압축에 의하여 유발되는  $\Delta u$ 는 이러한 체적변화특성과 포화도에 따라 달라지면서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = BA$$

또는

$$\Delta u = D\Delta\sigma = BA\Delta\sigma$$

(7.86a)

(7.86b)

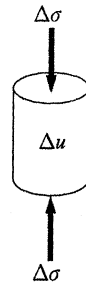


그림 7.53 일축압축 시의 간극수압계수 D

여기서 B는 포화도에 관계되는 간극수압계수이고 간극수압계수 A는 체적변화량에 관한 잠재적

특성을 나타내고 있다. 체적수축의 경우  $A > 0$  이고 체적팽창의 경우에는  $A < 0$  이 된다.

$S=100\%$ 인 경우에는  $B=1$ 이므로  $D=A$ 가 된다.

$$S = 100\% \text{ 이면 } D = A \tag{7.87}$$

간극수압계수  $A$ 에 관하여서는 다음 절(삼축압축 시의 간극수압계수)을 참고하기 바란다.

### 7.8.2 삼축압축 시의 간극수압

한 요소에 최대주응력  $\Delta\sigma_1$  과 최소주응력  $\Delta\sigma_3$  이 작용하여 ( $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$  로 가정) 삼축압축 상태가 되었을 때 이들 주응력에 의하여 유발되는 과잉간극수압  $\Delta u$  는 어떻게 나타낼 수 있을까 생각해 보자.

삼축압축상태는 등방압축과 일축압축의 합으로 볼 수 있다. 그림 7.54와 같이 최대주응력  $\Delta\sigma_1$ , 최소주응력  $\Delta\sigma_3$  으로 삼축압축 시킬 때 생성되는 과잉간극수압  $\Delta u$  는  $\Delta\sigma_3$  으로 등방압축했을 때의  $\Delta u_1$  과 축차응력  $\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$  에 의한 일축압축 시의  $\Delta u_2$  의 합으로 볼 수 있다.

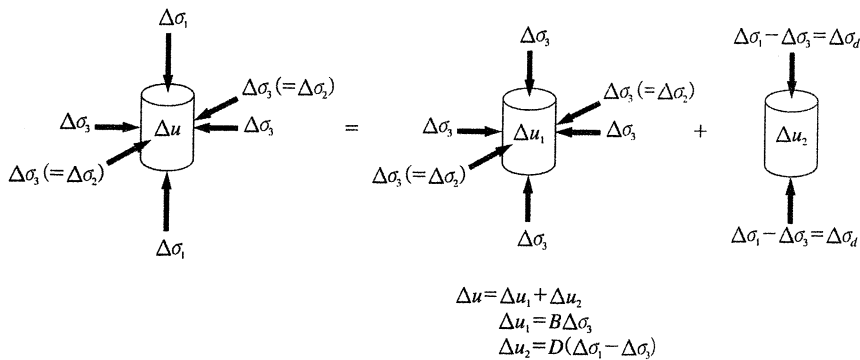


그림 7.54 삼축압축 시의 과잉간극수압

즉,  $\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2$ .

그런데,  $\Delta u_1 = B\Delta\sigma_3$ ,  $\Delta u_2 = D\Delta\sigma_d = D(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$  이므로

$$\Delta u = B\Delta\sigma_3 + D\Delta\sigma_d = B\Delta\sigma_3 + D(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \tag{7.88a}$$

$$= B\Delta\sigma_3 + BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \tag{7.88b}$$

$$\therefore \Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \tag{7.89}$$

이 식을 Skempton의 간극수압방정식이라 한다. 만약 포화상태( $S=100\%$ )이면  $B=1$ 이므로

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (7.90)$$

따라서 간극수압계수 A는

$$A = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3} \quad (7.91)$$

간극수압계수 A는 일축압축(전단) 시 흙의 체적변화 특성에 관계된다는 것을 이미 언급하였다. 표준삼축압축시험 가운데 전단과정에서 간극수압을 측정하는 압밀비배수(CU) 시험결과에서 간극수압계수 A를 구할 수 있다. 이 시험에서는 구속응력을 작용시킨 후 등방압축을 실시하여 압밀을 완료시키므로 등방압축 종료 시에는 과잉간극수압이 완전히 소산된 상태이다. 과잉간극수압은 비배수 조건에서 실시하는 일축압축(전단) 과정에서 발생하게 된다.

축차응력  $\Delta \sigma_d$ 를 증가시켜 가면서 과잉간극수압  $\Delta u$ 를 측정한다. 이 과정에서 구속응력  $\sigma_c = \sigma_3$ 의 변화는 없으므로  $\Delta \sigma_3 = 0$ 이다. 공시체가 포화상태에 있으면  $B=1$ 이고 따라서  $D=BA=A$ 이므로 간극수압계수 A는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_d} \quad (7.92)$$

여기서 축차응력  $\Delta \sigma_d$ 는 피스톤에 의하여 전달되는 축응력이다. A값은 전단과정에서 일정하지 않고 축차응력의 크기에 따라 달라진다.

압밀비배수 시험에서  $\Delta \sigma_d - \varepsilon_a$  및  $\Delta u - \varepsilon_a$  관계가 모두 선형이 아님은 앞에서 논의하였다. 이것은  $\Delta u - \Delta \sigma_d$  관계도 비선형임을 의미한다. 따라서 간극수압계수  $A = \Delta u / \Delta \sigma_d$  값은  $\Delta \sigma_d$  (또는  $\varepsilon_a$ )의 크기에 따라 다른 값이 된다. 파괴상태에서의 A값을 특히  $A_f$ 로 표기하는데 이것은 자주 사용되는 특성치이다.

$$A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{df}} \quad (7.93)$$

여기서,  $\Delta \sigma_{df}$  : 파괴 시의 축차응력

$\Delta u_f$  : 파괴 시 간극수압

점토의 경우 A값은 응력이력(stress history)에 따라 그 값이 다르다. A값은 예민한 점토에서 가장 크고 정규압밀점토는 과압밀점토보다 큰 값을 나타낸다. 특히 심하게 과압밀된(heavily overconsolidated) 점토의  $A_f$ 는 음(-)의 값이 되는데( $A_f < 0$ ) 이것은 전단파괴 시 공시체가 팽창하려고 하기 때문에

(인장) 음의 과잉간극수압이 발생한다는 의미이다. 대단히 느슨한 모래의 경우에 있어서도  $A_f$  값은 대단히 크다. 표 7.8에는 포화된 흙의 종류와 상태에 따른 파괴 시의 간극수압계수  $A_f$ 의 대표치가 제시되어 있다.

표 7.8  $A_f$  값의 대표치(S=100%인 경우)

흙의 종류(S=100%)	$A_f$ 의 대표치(파괴 시)
대단히 느슨한 고운 모래	2~3
예민한 점토	1.5~2.5
정규압밀(正規壓密) 점토	0.7~1.3
약간 과압밀(過壓密)된 점토	0.3~0.7
심히 과압밀(過壓密)된 점토	-0.5~0

비압밀비배수(UU) 시험에서는 간극수압을 측정하지 않으므로 A값을 구할 수 없다. 실용성은 없지만 간극수압을 측정하였다면 식 (7.92)에 의하여 A를 산정할 수 있다. 압밀배수(CD) 시험에서는 전단과정이 배수상태이므로 과잉간극수압의 생성은 없고 따라서 A=0이 되는 셈이다.

▶ **예제 7.9** 포화된 점토지반 표면에 원형 등분포하중이 작용한다. 하중면의 중심점 아래에 있는 한 요소에서 하중에 의하여 생긴 응력은  $\Delta\sigma_v = \Delta\sigma_1 = 6t/m^2$ ,  $\Delta\sigma_h = \Delta\sigma_3 = 2t/m^2$  이다. 하중에 의하여 이 요소에 발생한 과잉간극수압  $\Delta u_e = 3t/m^2$  이 이면 간극수압계수 A는 얼마인가?

풀이 : S=100%이므로 B=1

$$A = \frac{\Delta u - \Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3} = \frac{3-2}{6-2} = \frac{1}{4} = 0.25$$

▶ **예제 7.10** 포화된 점토시료로 압밀비배수( $\overline{CU}$ ) 표준삼축압축시험을 실시 하였다. 먼저 구속응력  $\sigma_c = 2kg/cm^2$  으로 등방압축한 후 축차응력  $\Delta\sigma_{yf} = 4kg/cm^2$  을 작용시켜 파괴에 도달하였다. 파괴 시 과잉간극수압을 측정한 결과  $\Delta u_f = 3kg/cm^2$  이었다. 파괴시의 간극수압계수  $A_f$  는 얼마인가? 또한 이 흙은 정규압밀점토인가, 과압밀점토인가?

풀이 : 포화상태이므로  $A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{df}} = \frac{3}{4} = 0.75$

이 점토는 정규압밀점토임을 알 수 있다(표 7.8).

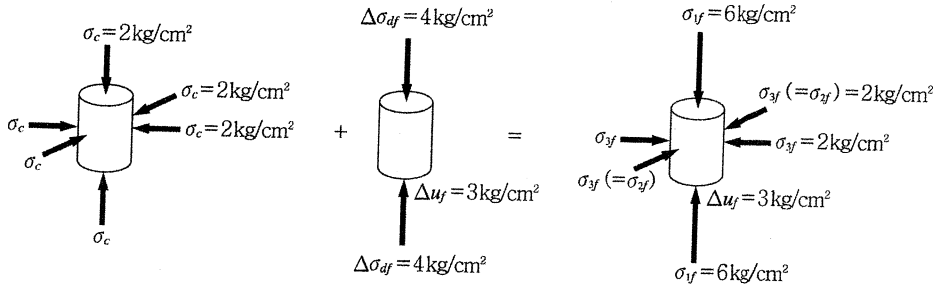


그림 예제 7.10 해답도

▶ 예제 7.11 물을 뿌려가면서 흙을 다져 제방을 축조한다. 공사 중 간극수압의 소산은 없다고 가정할 수 있다. 제방을 두께 5m만큼 축조하였을 때 바닥면에 생기는 간극수압은 얼마인가? 단 흙의 단위중량은  $1.8t/m^3$ , 간극수압계수  $A=0.75$ ,  $B=0.8$ 이고 토압비(연직토압에 대한 수평토압의 비)는 0.5로 한다.

풀이 : Skempton의 간극수압 방정식에서  $\Delta u = u$  를 산정한다.

$$u = \Delta u = B[\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

$$\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_v = \gamma \Delta z = (1.80)(5.0) = 9.0t/m^2$$

$$\Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_h = 0.5 \Delta \sigma_v = 0.5(9.0) = 4.50t/m^2$$

$$\therefore u = \Delta u = 0.8[4.5 + 0.75(9.0 - 4.5)] = 6.3t/m^2$$

## 7.9 점성토의 전단강도와 전단특성

점성토는 투수계수가 대단히 작으므로 비배수상태(예: 완공 직후)와 배수상태(예: 완공 후 장기간 경과 시)의 강도가 모두 중요하다. 따라서 배수조건에 대응하는 강도정수를 사용하여 안정해석이나 설계를 실시하여야 한다. 배수조건을 상대적으로 가장 잘 조절할 수 있는 시험이 삼축압축시험이므로 이 시험 결과를 이용하여 점토의 전단특성을 논의하기로 한다. 이미 논의한 것처럼 표준