

지진에 의한 두꺼운 성근모래지반의 진동특성

황정호, 김영복

지난 시기에는 지반의 자름탄성결수를 상수로 보고 지반의 진동특성을 해명하였다.[1]
토질지반에서는 깊이에 따라 자연압력이 증가한다.

자름탄성결수는 자연압력에 비례하기때문에 성근모래토질층의 두께가 20~30m나 되는 두꺼운 모래지반인 경우에 윗부분과 아래부분에서 차이나게 된다.[2]

본문에서는 성근모래지반에서 깊이에 따라 자름탄성결수가 증가한다는것을 고려하여 지반의 진동특성을 해명하고 새로운 방법과 종전의 방법을 대비하여 액상화피해의 차이를 밝혔다.

1. 깊이에 따르는 성근모래지반의 진동특성

모래토질의 자연압력 σ_v 와 자름탄성결수 G 와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$G(x) = G_0 \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^m$$

여기서 P_a 는 상수(100kPa), G_0 은 자연압력이 P_a 일 때의 자름탄성결수, $G(x)$ 는 깊이가 x 일 때의 자름탄성결수, m 은 성근 모래에서 실험에 의하여 결정한 상수($m \approx 1.0$)이다.

자연압력 σ_v 는 깊이 x 에 따라 변하는데 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_v = \gamma \cdot x$$

여기서 γ 는 용중인데 포수된 지반에서는 물속용중을 쓴다.

이와 같은 조건을 고려하면 자름탄성결수 $G(x)$ 는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$G(x) = \frac{G_0}{P_a} \cdot \gamma \cdot x = \lambda \cdot \gamma \cdot x \quad (1)$$

여기서 $\lambda = \frac{G_0}{P_a}$ 이다.

모래토질이 진동할 때 액상화현상이 나타나는데 이때의 점성결수 μ 와 자름탄성결수 G 의 비로서 감쇠비 D_0 을 리용한다.

$$D_0 = \frac{\mu}{G} \quad (2)$$

실험에 의하면 자연압력 σ_v 가 1.0MPa까지 커질 때 D_0 은 거의 변하지 않는데 건조모래에서 $D_0 = 0.35$, 포수모래에서 $D_0 = 0.25$ 정도이다.

토질에서 감쇠진동을 론할 때 점탄성모형보다 비점성감쇠모형이 실지특성을 더 잘 반영하므로 비점성감쇠모형을 리용한다.

비점성감쇠모형에서는 토질층이 수평자름운동을 할 때 동적자름응력 $\tau(x, t)$ 를 다음과

같이 표시한다.

$$\tau(x, t) = G(x)(1 + iD_0) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 $u(x, t)$ 는 깊이 x 에서 시간 t 일 때의 수평자름변위이다.

식 (1)과 (3)으로부터

$$\tau(x, t) = \lambda \cdot \gamma(1 + iD_0)x \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

2. 지진에 의한 모래지반의 가로진동

두께가 h 인 성근모래지반의 진동균형미분방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau(x, t)}{\partial x} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 공극수를 포함한 모래의 포수밀도이다.

식 (4)와 (5)로부터

$$\rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau(x, t)}{\partial x} = \lambda \gamma(1 + iD_0) \frac{\partial}{\partial x} \left[x \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right] \quad (6)$$

식 (6)의 일반풀이는 다음과 같다.

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_0(2\alpha_n \sqrt{x}) \sin(\omega_n t + \beta_n) \exp\left(-\frac{\omega_n D_0 t}{2}\right) \quad (7)$$

여기서 A_n 과 β_n 은 상수, α_n 은 경계조건에 의하여 결정되는 인자, ω_n 은 진동각속도이다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2}{h} \bar{V}_s} \alpha_n \quad (8)$$

$$\bar{V}_s = \sqrt{\frac{\lambda \gamma h}{2\rho}} \quad (9)$$

여기서 h 는 암반까지의 깊이, \bar{V}_s 는 $x = \frac{h}{2}$ 에서의 가로파속도이다.

α_n 을 결정할 때 모래토질의 가로변위에 비하여 암반의 변위가 작으므로 $x = h$ 에서 모래토질이 고정되어있다고 본다. 따라서 $u(h, t) = 0$ 이므로 $J_0(2\alpha_n \sqrt{h}) = 0$ 이다.

이제 $J_0(x)$ 함수의 뿌리를 a_n 이라고 하면

$$\alpha_n = \frac{a_n}{2\sqrt{h}} \quad (10)$$

진동차수 n 에 따르는 a_n 값은 표 1과 같다.

표 1. 진동차수 n 에 따르는 a_n 값

n	0	1	2	3	4	5
a_n	2.404 8	5.520 0	8.653 7	11.741 5	14.930 9	18.071 1

3. 깊이에 따르는 성근모래지반의 진폭변화

$t=0$ 인 초기순간에 진폭은 자름탄성결수의 변화를 고려한 경우 식 (7)과 (10)으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\max\{u_n\} = A_n J_0 \left(a_n \sqrt{\frac{x}{h}} \right)$$

자름탄성결수를 상수로 놓는 경우 다음과 같다.

$$\max\{\bar{u}_n\} = \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2h}$$

깊이에 따르는 $\max\{u_n\}$ 과 $\max\{\bar{u}_n\}$ 의 비 $\delta_n = \frac{\max\{\bar{u}_n\}}{\max\{u_n\}}$ 는 표 2와 같다.

표 2. 깊이에 따르는 $\max\{u_n\}$ 과 $\max\{\bar{u}_n\}$ 의 비

x/h	0	0.2	0.4	0.6	0.8
δ_n	1.000	1.303	1.558	1.927	1.883

표 2에서 보는바와 같이 자름탄성결수의 변화를 고려할 때의 진동진폭은 상수로 보았을 때보다 깊이에 따라 1.3~1.9배 즉 평균 1.5배까지 작아진다.

4. 자름탄성결수의 변화를 고려할 때와 상수로 볼 때 모래지반의 진동주파수대비

식 (8), (10)으로부터 자름탄성결수가 변할 때 진동주파수는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega_n = \frac{a_n \bar{V}_s}{\sqrt{2h}} \quad (11)$$

자름탄성결수를 상수로 볼 때 진동주파수는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega'_n = \frac{\pi}{2} (2n+1) \frac{V_s}{h}$$

ω_n 과 ω'_n 의 비를 θ_n 이라고 놓고 $\theta_n = \frac{\omega'_n}{\omega_n}$ 를 $\bar{V}_s = V_s$ 조건에서 보기로 하자.

진동차수 n 에 따르는 ω_n 과 ω'_n 의 비는 표 3과 같다.

표 3. 진동차수 n 에 따르는 ω_n 과 ω'_n 의 비

n	0	1	2	3	4	5
θ_n	0.924	1.208	1.284	1.325	1.339	1.351

$n=0$ 인 경우를 제외하고 자름탄성결수가 변할 때의 주파수는 자름탄성결수가 상수일 때보다 작아진다. 즉 진동주기가 길어진다.

지반에서 수직으로 가로파를 내려보내고 수직으로 반사되는 가로파를 입수하여 가로파속도를 구하고 그 결과로 두께가 h 인 등질지반의 령차고유진동주기 T'_0 (자름탄성결수를

상수로 볼 때)를 다음과 같이 결정한다.

$$T'_0 = 4 \frac{h}{\bar{V}_s}$$

그러나 자름탄성결수의 변화를 고려한 성근 모래에서는 식 (11)로부터 다음식이 얻어진다.

$$\omega_0 = \frac{a_0 \bar{V}_s}{\sqrt{2}h}$$

따라서

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\sqrt{2}\pi h}{a_0 \bar{V}_s} = 3.7 \frac{h}{\bar{V}_s}$$

인 경우에 \bar{V}_s 는 $x=h/2$ 점에서의 가로파속도로써 성근 모래층의 평균가로파속도로 볼수 있으므로 결국 자름탄성결수를 상수로 볼 때보다 T_0 값은 0.92배 작아진다는것을 알수 있다.

맺 는 말

두꺼운 성근모래지반의 윗부분에서 진동진폭과 진동가속도가 크지만 깊이에 따라 급속히 감소된다. 그러므로 성근 모래의 액상화현상은 주로 지반의 윗부분에서 생기며 액상화피해방지를 위한 차단물은 자름탄성결수를 상수로 볼 때의 계산값보다 약 1.5배 작게 결정할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Li Wei et al.; Journal of Central South University of Technology, 20, 2840, 2013.
- [2] 黄雨 等; 水利学报, 42, 6, 700, 2011.

주체107(2018)년 10월 5일 원고접수

The Vibration Characteristics of Thick Ground Base Composed of Loose Sands Caused by Earthquake

Hwang Jong Ho, Kim Yong Bok

We clarified the vibrating characteristics of the ground base composed of loose sand by considering the change of shear modulus according to the depth.

Key words: earthquake, loose sand