

지진시 옹벽의 수평변위 예측기법의 개발

이승현¹, 김병일^{2*}

¹선문대학교 건설시스템안전공학과, ²명지대학교 토목환경공학과

Development of Technique for Predicting Horizontal Displacement of Retaining Wall Induced by Earthquake

Seung-Hyun Lee¹, Byoung-Il Kim^{2*}

¹Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

²Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

요약 본 연구에서는 지진시 옹벽의 수평변위량을 예측하는 기법을 개발하고자 옹벽과 지반의 진동시스템에 대한 운동 방정식을 유도하고 그로부터 도출되는 미분방정식은 Runge-Kutta-Nyström 방법을 이용하여 해를 구하였다. 이러한 계산과정을 고려하여 지진시 옹벽의 수평변위를 얻는 해석과정을 프로그램화하였는데 해석기법의 핵심이 되는 변위-힘 관계를 탄성완전소성으로 모델링하는 계산 알고리즘을 제시하였다. 개발된 프로그램을 가정한 옹벽문제에 적용한 결과 해석을 통해 얻은 시간-변위관계와 시간-힘 관계 그리고 변위-힘 관계는 합리적인 결과를 보임을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 해석기법에 의하면 진동시간이 경과함에 따라 옹벽에는 전면방향으로 변위가 발생되게 되는데 사이클당 변위량은 시간이 경과됨에 따라 일정한 값에 수렴됨을 알 수 있었다. 자연 진동주기에 따른 옹벽의 변위를 계산해 보았는데 한 개의 스프링을 적용한 경우의 스프링상수로부터 유도되는 자연 진동주기가 지진 진동주기와 같을 때 보다는 약간의 차이를 보일 때 변위가 가장 크게 계산되었다. 이러한 이유는 옹벽-지반 진동시스템이 강성이 다른 두 개의 스프링으로 모사되었기 때문으로 볼 수 있다.

Abstract To develop the technique for predicting the horizontal displacement of a retaining wall induced by an earthquake, an equation of motion that depicts the retaining wall-soil vibrating system was derived. The resulting differential equation was solved using the Runge-Kutta-Nyström method. Considering the pre-mentioned derivation process, the analysis procedures for obtaining horizontal displacement induced by an earthquake were programmed. The core algorithm of the displacement-force relationship, which is the main engine of the developed program, was suggested. Considering the results obtained by adopting the developed program to the assumed retaining wall under an earthquake, the relationships between the time-displacement, time-force, and displacement-force were reasonable. According to the results computed by the program, the displacements to the front direction of the wall occurred, and the displacement per cycle converged after some cycles elapsed. Displacements with a natural period were calculated, which showed that the maximum displacement was observed when the natural frequency was slightly different from the excitation frequency rather than the same values of the two frequencies. This happens because the vibrating system was modeled by two springs with different stiffness.

Keywords : Vibrating System, Runge-Kutta-Nyström Method, Horizontal Displacement, Displacement-Force Relationship, Natural Period

*Corresponding Author : Byoung-Il Kim(Myongji Univ.)

email: bikim@mju.ac.kr

Received January 6, 2021

Accepted May 7, 2021

Revised March 31, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

최근 들어 국내에서도 포항지진, 경주지진 등 지진이 빈발하고 있으며 그에 따라 각종 구조물의 내진설계에 대한 중요성 또한 높게 인식되고 있다. 지진발생시 옹벽의 안정성과 관련된 세 가지 중요한 주제는 옹벽에 작용하는 토압의 크기와 토압분포, 토압력의 작용위치 그리고 옹벽의 동적변위라 할 수 있다[1]. 지반진동으로 인한 옹벽의 거동 예측을 위한 연구들[2,3]이 진행되어 왔으나 현재까지 지진시 옹벽의 거동을 쉽게 예측할 수 있는 방법은 거의 없다고 할 수 있다. Nandkumaran[4]은 지진시 옹벽의 동적변위를 예측하는 기법을 제안한 바 있는데 옹벽시스템을 단자유도(single degree of freedom) 스프링-질량-대쉬팟 으로 고려하였다. Nandkumaran이 제안한 방법에 의하면 스프링상수는 뒤채움흙과 옹벽 바닥에서 발생하는 변위에 의한 저항력을 반영하고 대쉬팟은 진동계의 에너지 소산을 반영하게 된다. 그러나 Nandkumaran이 제안한 방법과 관련된 문헌에는 지진하중을 받는 옹벽의 변위를 평가하는 구체적인 방법이 언급되어 있지는 않다. 본 연구에서는 Nandkumaran의 개념을 바탕으로 지진시 옹벽의 동적변위량을 평가하는 방법을 정립하고 프로그램화하였다. 또한 개발된 프로그램을 가정한 옹벽문제에 적용하여 신뢰성을 검증하고 계산과정을 통해 도출된 진동특성을 살펴보고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지진시의 토압

Fig. 1에는 지진력을 받고 있는 옹벽이 나타나 있는데 그림에서 *CDE*는 파괴 흩째기를 의미한다.

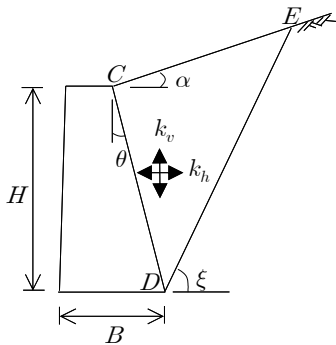


Fig. 1. Retaining wall under seismic forces

Fig. 1에서 α , θ , ξ 는 각각 옹벽 배면지반의 경사각, 옹벽배면의 경사각, 수평면에 대한 파괴흩째기의 경사각을 의미하고 k_v 와 k_h 는 각각 연직설계지진계수와 수평설계지진계수를 의미한다. 지진하중에 의한 주동파괴상태에서의 주동토압력(P_{ae})은 식 (1)과 같고 식 (1)에서 K_{ae} 는 지진시 주동토압계수를 의미하는데 식 (2)와 같이 표현된다[5-7].

$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{ae} \quad (1)$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos^2 \theta \cos \beta \cos(\delta + \theta + \beta) \left\{ 1 + \frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \alpha - \beta)}{\cos(\delta + \theta + \beta) \cos(\theta - \alpha)} \right\}^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 ϕ 와 δ 는 각각 옹벽 배면지반의 내부마찰각과 옹벽배면과 지반 사이의 마찰각을 의미하며 β 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (3)$$

지진하중에 의한 수동토압력과 수동토압계수는 각각 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

$$P_{pe} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{pe} \quad (4)$$

$$K_{pe} = \frac{\cos^2(\phi + \theta - \beta)}{\cos^2 \theta \cos \beta \cos(\delta - \theta + \beta) \left\{ 1 - \frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi + \alpha - \beta)}{\cos(\delta - \theta + \beta) \cos(\theta - \alpha)} \right\}^2} \quad (5)$$

Nandkumaran[8]은 지진에 의한 옹벽의 동적 변위 거동을 파악하기 위해 Fig. 2와 같은 하중-변위 관계를 고려하였다.

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 옹벽변위에 따른 토압력과 옹벽바닥에서의 마찰력을 의미하며 이들 두 힘의 합은 Fig. 2(c)에 나타나 있다. Nandkumaran은 Fig. 2(c)의 하중-변위관계를 Fig. 2(d)와 같이 두 개의 직선으로 이상화하였는데 Fig. 2(d)를 결정짓는 매개변수는 k_1, k_2 와 항복변위(yield displacement) z_y 이다. Fig. 2(b)에서의 최대 바닥마찰력은 옹벽바닥으로부터 깊이 $(B/2) \tan \phi$ 인 깊이에서의 수동토압이 고려한 깊이에 걸쳐 균등하게 작용하는 것으로 본다[9]. 지진시 옹벽의 변위해석을 위해 고려해야 할 다른 매개변수로는 옹벽의

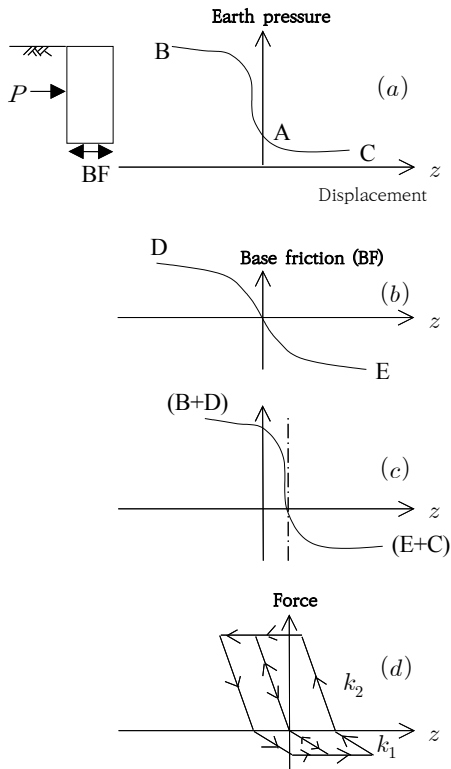


Fig. 2. Force vs. displacement in a retaining wall

질량, 진동주기, 댐핑계수 그리고 지반운동과 관련된 매개변수 등이 있다. 여기서 옹벽의 질량에는 옹벽과 함께 진동하는 흙이 포함되게 되는데 Nandkumaran의 진동 시험결과에 따르면 옹벽과 함께 진동하는 흙은 Rankine 파괴책기의 0.8배에 해당한다(Nandkumaran, 1973b, 1974). 지진시 옹벽의 변위를 구하기 위해서는 옹벽의 단면, 토질주상과 흙의 물성값 그리고 예상되는 지반운동(ground motion)을 알아야 하고 옹벽의 변위-힘 관계와 항복변위는 적절히 평가되어야 한다. 지진시 옹벽의 변위를 계산하는 과정을 나타내면 다음과 같다.

- 1) 옹벽-지반 시스템의 자연 진동주기(natural period)를 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$T_n = 2\pi \sqrt{m/k} \quad (6)$$

식 (6)에서의 k 는 Fig. 2(d)의 인장측의 값인 k_1 을 적용한다.

- 2) 예상되는 지반운동(ground motion)에 의한 사이클의 수를 평가한다.
- 3) 벽체의 자연 진동주기와 항복변위량(z_y) 그리고 지반운동특성(ground motion characteristics)에 대하여 한 사이클당 변위량(소성 변위량)을 계산한다. 전체 변위량은 한 사이클당 변위량과 사이클수를 곱하여 얻게 된다.
- 4) 계산된 변위량을 허용값과 비교한다.

2.2 지진시 옹벽의 수평변위

지진시 옹벽의 수평변위를 얻기 위해 Fig. 3과 같은 스프링-질량-대쉬풋(dashpot) 시스템을 고려한다. Fig. 3에서 m , k 그리고 c 는 각각 옹벽의 질량, 스프링상수 그리고 댐핑상수(damping coefficient)를 의미한다. 그리고 x 는 스프링과 대쉬풋에 의한 옹벽의 수평변위를 의미하고 y 는 지반진동(base excitation)에 의한 수평변위를 의미하며 z 는 x, y 에 의한 최종적인 옹벽의 수평변위를 의미한다. ω_b 와 t 는 각각 지반진동에 의한 진동수(frequency of base excitation)와 시간을 의미한다.

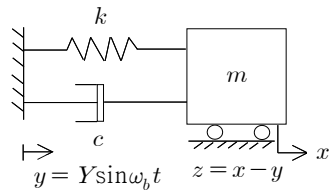


Fig. 3. Mathematical model of wall under earthquake

Fig. 3의 진동시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(t) &= -k\{x(t) - y(t)\} - c\{\dot{x}(t) - \dot{y}(t)\} \quad (7) \\ &= -kz(t) - c\{\dot{x}(t) - \dot{y}(t)\} \\ &= F - c\dot{x}(t) + c\omega_b Y \cos\omega_b t \end{aligned}$$

식 (7)에서 $F(= -kz(t))$ 는 Fig. 2(d)에서의 힘(force)을 의미한다. 식 (7)에서 $x_1(t) = x(t)$, $x_2(t) = \dot{x}(t)$ 로 나타내면 식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{x}(t) = f(t, x_1, x_2) = \frac{F}{m} - \frac{c}{m}x_2(t) + \frac{c\omega_b Y}{m}\cos\omega_b t \quad (8)$$

식 (8)은 2계비제차미분방정식(nonhomogeneous second order differential equation)이 되며 해를 구하기 위해 선형가속도법[11] 또는 Runge-Kutta 방법 그리고 Runge-Kutta-Nyström 방법[12,13]등을 적용할 수 있는데 본 연구에서는 Runge-Kutta-Nyström 방법을 적용하였다. Runge-Kutta-Nyström 방법에서 시간증분 Δt 에 대하여 해는 식 (9), (10)과 같이 표현된다. 식 (9), (10)과 관련하여 $k = 0.5\Delta t$ 인 관계에 있다.

$$x_{1(n+1)} = x_{1(n)} + \Delta t \left\{ x_{2(n)} + \frac{1}{3} (A_n + B_n + C_n) \right\} \quad (9)$$

$$x_{2(n+1)} = x_{2(n)} + \frac{1}{3} \{A_n + 2B_n + 2C_n + D_n\} \quad (10)$$

$$A_n = kf(x_{1(n)}, x_{2(n)}, t_n) \quad (11)$$

$$= k \left\{ \frac{F_n}{m} - \frac{c}{m} x_{2(n)} + \frac{c\omega_b Y}{m} \cos\omega_b t_n \right\}$$

$$\beta_n = k(x_{2(n)} + 0.5A_n) \quad (12)$$

$$B_n = kf(x_{1(n)} + \beta_n, x_{2(n)} + A_n, t_n + 0.5\Delta t)$$

$$= k \left\{ \frac{F_n}{m} - \frac{c}{m} (x_{2(n)} + A_n) + \frac{c\omega_b Y}{m} \cos\omega_b (t_n + 0.5\Delta t) \right\} \quad (13)$$

$$C_n = kf(x_{1(n)} + \beta_n, x_{2(n)} + B_n, t_n + 0.5\Delta t)$$

$$= k \left\{ \frac{F_n}{m} - \frac{c}{m} (x_{2(n)} + B_n) + \frac{c\omega_b Y}{m} \cos\omega_b (t_n + 0.5\Delta t) \right\} \quad (14)$$

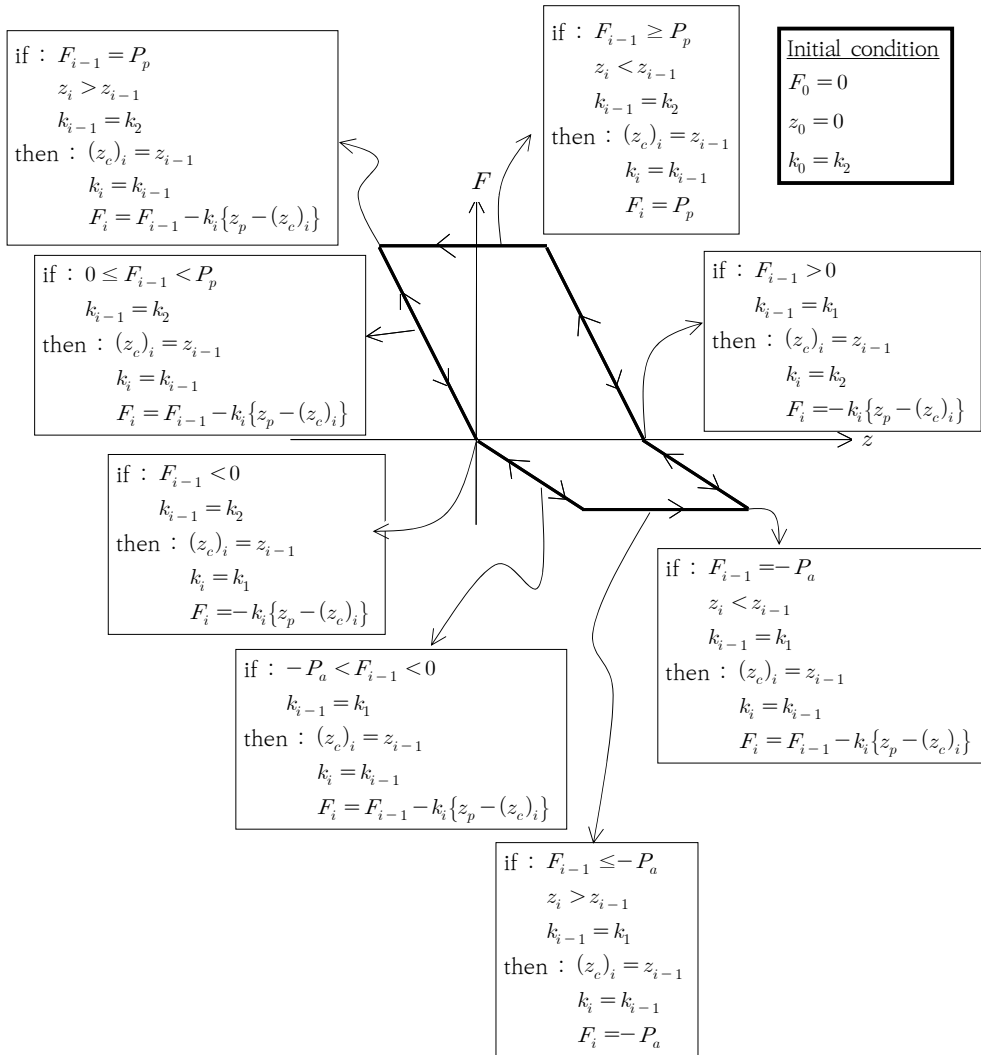


Fig. 4. Algorithm for calculating F_i

$$\delta_n = \Delta t(x_{2(n)} + C_n) \quad (15)$$

$$D_n = kf(x_{1(n)} + \delta_n, x_{2(n)} + 2C_n, t_n + \Delta t) = k \left\{ \frac{F_n}{m} - \frac{c}{m}(x_{2(n)} + 2C_n) + \frac{c\omega_b Y}{m} \cos\omega_b(t_n + \Delta t) \right\} \quad (16)$$

미분방정식 (8)의 해를 구하기 위해서는 Fig. 2(d)에서의 힘(force)인 F 를 계산단계별로 적절히 적용해야 하는데 Fig. 2(d)에 나타나 있는 바와 같이 변위(z)에 따라 힘이 달라지기 때문이다. 이전 계산결과로부터 식 (11), (13), (14), (16)에서의 $F_n (= F_i)$ 을 계산하기 위한 알고리즘을 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 또한 Fig. 4에는 $t=0$ 에서의 초기조건(initial condition)이 나타나 있다. Fig. 4에서 i 는 i 번째 계산단계를 의미하며 $z_p = z_i$ 를 의미한다. Fig. 4에서의 P_a 와 P_p 는 각각 변위-힘 곡선의 최소값(절대값으로 볼 때) 및 최대값을 의미한다.

3. 해석결과

앞서 나타낸 계산과정을 프로그램화하고 가정된 옹벽 문제에 적용해 보았다. 지진시 옹벽의 변위 계산을 위해 고려한 옹벽제원과 지반의 물성값은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 ϕ , γ 그리고 δ 는 각각 뒤채움흙의 내부 마찰각, 단위중량 그리고 벽마찰각을 의미한다.

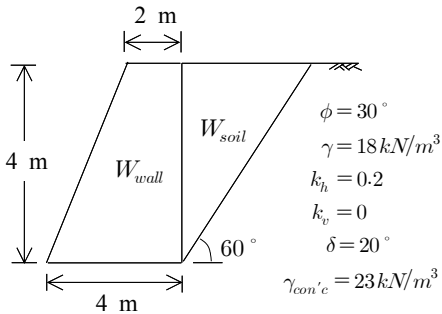


Fig. 5. Geometry of retaining wall and soil properties

Fig. 5에서 Rankine의 주동파괴면은 수평면과 60° 의 각도를 이루게 된다. 식 (1)과 식 (4)에 의한 지진시의 주동토압력(P_{ac})과 수동토압력(P_{pe})은 각각 $P_{ac}=64800 \text{ N/m}$ 과 $P_{pe}=730080 \text{ N/m}$ 로 계산된다. 따라서 토압력의 수평성분은 각각 $P_{ac(h)}=P_{ac}\cos\delta=60892 \text{ N/m}$, $P_{pe(h)}=P_{pe}\cos\delta=686051 \text{ N/m}$ 로 계산된다. 정지토압력

(P_0)은 $P_0=72000 \text{ N/m}$ 로 계산된다. 여기서 정지토압 계수의 계산에는 Jaky의 제안식($K_0 = 1 - \sin\phi$)을 적용하였다[14]. Fig. 2(b)에 나타나 있는 옹벽바닥마찰력(base friction)을 얻기 위해 $(B/2)\tan\phi=(4/2)\tan 30^\circ = 1.155 \text{ m}$ 깊이에서의 수동토압($p_{pe(base)}$)은 $p_{pe(base)}=105405 \text{ N/m}^2$ 로 계산되며 이로부터 $P_{pe(base)}$ 은 $P_{pe(base)}=105405(1.155)=121743 \text{ N/m}$ 가 되며 그 수평성분은 $P_{pe(base)(h)}=P_{pe(base)}\cos\phi=105433 \text{ N/m}$ 로 계산된다. 따라서 Fig. 2(c)에서의 $(B+D)=791484 \text{ N/m}$, $(E+C)=44541 \text{ N/m}$ 가 된다. Nandkumar[15]은 Fig. 2(d)에서의 힘-변위 직선의 강성(k_1, k_2)을 계산하기 위해 주동상태와 수동상태에 대

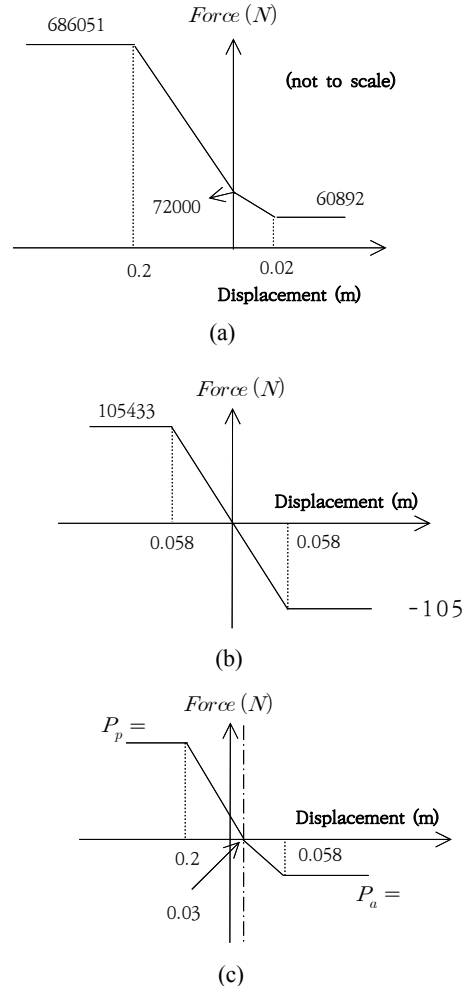


Fig. 6. Idealized force-displacement relationship

응하는 변위를 각각 옹벽높이의 0.5%와 5%로 보도록 제안하고 있다. 따라서 힘-변위 관계를 두 개의 직선으로 이상화하여 나타내면 Fig. 6과 같다[16].

Fig. 6으로부터 주동상태 및 수동상태에 대응하는 힘-변위 직선의 강성은 각각 다음과 같이 계산된다.

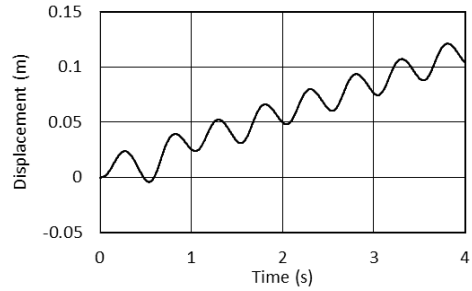
$$k_1 = k_a = \frac{44541}{0.028} = 1590750 \text{ N/m}$$

$$k_2 = k_p = \frac{791484}{0.23} = 3441235 \text{ N/m}$$

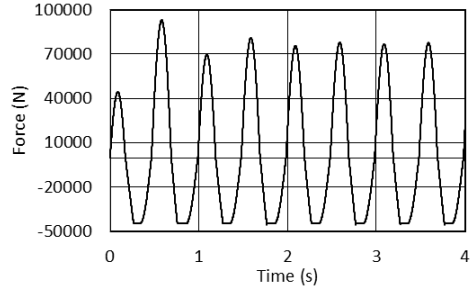
옹벽의 무게, W_{wall} 와 파괴찌기의 무게, W_{soil} 은 각각 276 kN/m 와 83.14 kN/m 로 계산된다. 따라서 진동 질량(m)은 34914.6 kg으로 계산된다. 자연진동주기 $T_n = 0.5 \text{ s}$, 댐핑계수 $\zeta = 10\%$, 가속도진폭 $a_h = 300 \text{ gal}$, 항복변위량 $z_y = 0.005 \text{ m}$ 인 경우 해석에 필요한 계산결과를 나타내면 다음과 같다. 자연진동수 (ω_n)는 $\omega_n = 2\pi/T_n = 12.566 \text{ rad/s}$ 로 계산되며 댐핑 상수(c)는 $c = 2m\omega_n\zeta = 52395 \text{ kg/s}$ 로 계산된다. Fig. 3에 나타나 있는 지반진동의 진폭(amplitude of the ground motion, Y) 은 $\omega_b = \omega_n$ 인 경우 $Y = a_h/\omega_b^2 = 3/12.566^2 = 0.019 \text{ m}$ 로 계산된다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 힘-변위 관계곡선을 적용하여 Runge-Kutta-Nyström 방법을 이용하는 계산과정을 프로그램하여 해를 구할 수 있도록 하였다. 해석 프로그램에 의한 계산을 통해 얻은 시간-변위곡선과 시간-힘 곡선 그리고 변위-힘 곡선은 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 계산결과는 $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ 로 하여 얻어진 결과이다.

Fig. 7(a)를 통해 알 수 있듯이 진동이 지속됨에 따라 옹벽전면방향으로 변위가 발생함을 알 수 있는데 이의 근본적 원인은 옹벽배면과 전면으로의 변위에 대응하는 스프링강성의 차이 때문이라 할 수 있다. 또한 Fig. 7(a)의 해석결과를 통해 시간경과에 따라 진동주기당 변위량이 일정한 값에 수렴됨을 알 수 있다. Fig. 7(b), (c)를 통해서도 시간이 지남에 따라 일정한 진동이 반복적으로 일어남을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 경우 Fig. 4에서와 같이 폐합된 형태의 변위-힘 관계를 보이지 않는데 그 이유는 진동에 따라 계산되는 힘이 Fig. 6(c)에서의 P_p 의 값 (=791484 N)에 도달되지 않았기 때문인데 Fig. 7(d)에는 비교를 위해 $P_p = 70000 \text{ N}$ 인 경우의 변위-힘 곡선을 나타내었다. Fig. 7은 자연진동수와 가진진동수가 같은 경우의 계산결과를 의미하며 Fig. 7(a)를 통해 한 주기당

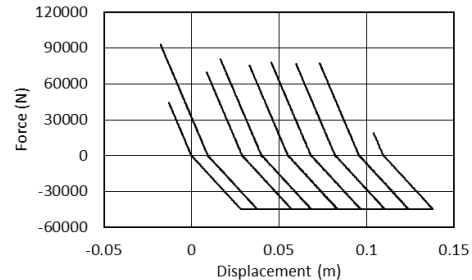
(또는 하나의 사이클당) 동적변위를 알 수 있는데 0.0133 m 가 된다. 자연 진동주기의 변화에 따른 한 사이클당 변위량을 계산하기 위해 자연 진동주기를 0.3 s ~ 1.0 s 까지 0.1 s 까지 변화시켜가며 한 사이클당 변위량을 계산해 보았는데 계산결과는 Fig. 8과 같다. 이때 가진 진동주기는 0.5 s로 일정하게 하였다.



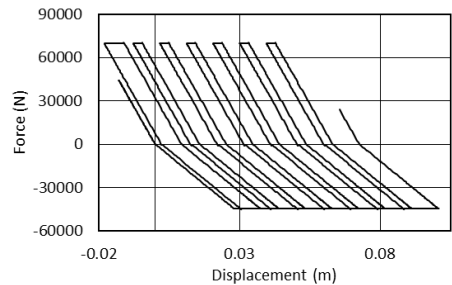
(a) Time vs. Displacement



(b) Time vs. Force



(c) Displacement vs. Force



(d) Displacement vs. Force ($P_p = 70000 \text{ N}$)

Fig. 7. Analysis results

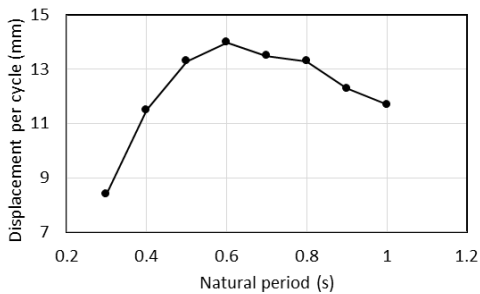


Fig. 8. Natural period vs. displacement per cycle

Fig. 8에서 자연 진동주기가 공진주기인 0.5 s 가 아니라 0.6 s 일 때 변위량이 최대임을 알 수 있는데 이는 다음과 같은 이유 때문으로 생각된다. 즉 고려하는 진동 시스템의 스프링상수가 $k = m\omega_n^2$ 의 값을 갖지 않고 이 값과는 다른 두 개의 스프링상수(k_1, k_2)를 적용했기 때문으로 생각된다.

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구를 통해 옹벽-지반의 진동시스템에 대한 운동방정식을 유도하고 그로부터 도출되는 미분방정식은 Runge-Kutta-Nyström 방법을 이용하여 해를 구하도록 하였다.
- 2) 지진시 옹벽의 변위를 얻는 해석과정을 프로그램화 하였는데 해석기법의 핵심이 되는 변위-힘 관계를 탄성완전소성으로 모델링하는 계산 알고리즘을 제시하였다.
- 3) 개발된 프로그램을 가정한 옹벽문제에 적용하여 얻은 시간-변위관계와 시간-힘 관계 그리고 변위-힘 관계는 해석에서 가정한 힘-변위관계를 반영한 주기적 특성을 보임을 알 수 있었다.
- 4) 본 연구를 통해 개발된 해석기법에 의하면 진동시간이 경과함에 따라 옹벽에는 전면방향으로 변위가 발생되게 되는데 사이클당 변위량은 시간경과에 따라 일정한 값에 수렴됨을 알 수 있었다.
- 5) 자연 진동주기에 따른 옹벽의 수평변위를 계산해 보았는데 한 개의 스프링을 적용한 경우의 스프링상수로부터 유도되는 자연 진동주기가 지진 진동주기와 같을 때 보다는 약간의 차이를 보일 때 변위가 가장 컸다. 이러한 이유는 옹벽-지반 진동시

스템이 강성이 다른 두 개의 스프링으로 모사되었기 때문으로 볼 수 있다.

- 6) 본 연구를 통해 개발된 기법에 대해서는 실제적 적용을 위해 다양한 매개변수 연구와 실측치와의 비교 검증이 필요하다.

References

- [1] H. N. Nazarian and A. H. Hadjian, "Earthquake-Induced Lateral Soil Pressures on Structures", *Journal, Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. GT9, pp. 1049-1066, 1979.
DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000852>
- [2] A. Pain, D. Choudhury, S. K. Bhattacharyya, "Seismic stability of retaining wall-soil sliding interaction using modified pseudo-dynamic method", *Géotechnique Letters*, Vol. 5, Issue 1, pp. 56-61, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geolett.14.00116>
- [3] Bellezza, I, "A new pseudo-dynamic approach for seismic active soil thrust", *Geotech. Geol. Engng.*, 32, No. 2, pp. 561-576, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9734-y>
- [4] P. Nandkumaran and V. H. Joshi, "Static and Dynamic Active Earth Pressures Behind Retaining Walls", *Bull. Indian Society of Earthquake Technology*, Sept., Vol. 10, No. 3, 1973a.
- [5] Mononobe, N. and Matsuo, H., "On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes", *Proceedings, World Engg. Conference*, Vol. 9, pp.176, 1929.
- [6] S. Okabe, "General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Walls and Dams", *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 6, pp. 1277-1323, 1924.
- [7] Okabe, S., "General Theory of Earth Pressure", *J. of the Japanese Society of Civil Engineers*, Tokyo, Japan, 12(1), 1926.
- [8] P. Nandkumaran, "Behavior of Retaining Walls During Earthquakes", Chapter 17 in "Earthquake Engineering", Jai Krishna 60th Anniversary Volume, Sarita Prakashan, Meerut, U.P., 1974.
- [9] E. A. Rafnsson, S. Prakash, "Stiffness and Damping Parameters for Dynamic Analysis of Retaining Walls", *Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, March 11-15, St. Louis, Missouri, No. 1.67, pp. 1943-1951, 1991.
- [10] D. J. Inman, *Engineering Vibration*, Prentice-Hall, Inc., pp. 112-120, 2001.
- [11] J. M. Biggs, *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 45-56, 1963.
- [12] E. Kreyszig, *Advanced engineering mathematics*, John

Wiley and Sons, pp. 842-847, 1984.

- [13] T. E. Simos, E. Dimas, A. B. Sideridis, "A Runge—Kutta—Nyström method for the numerical integration of special second-order periodic initial-value problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 51, Issue 3, pp. 317-326, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(92\)00114-O](https://doi.org/10.1016/0377-0427(92)00114-O)
- [14] Jaky, J., "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*, October, pp. 355-358, 1944.
- [15] P. Nandkumaran, "Behavior of Retaining Walls Under Dynamic Loads", Ph.D. Thesis, Roorkee University, Roorkee, India, 1973b.
- [16] S. Prakash, "Analysis of Rigid Retaining Walls During Earthquakes", *Proceedings: First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, pp. 993-1020, 1981.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[종신회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학