

지진시 지반의 반복경화/연화 현상에 의한 부지응답 특성 영향 연구

Cyclic Hardening and Degradation Effects on Site Response during an Earthquake

이진선¹⁾

Lee, Jin-Sun

국문 요약 >> 본 논문에서는 반복하중에 의한 반복 경화 및 연화 현상을 나타낼 수 있는 수정 IWAN 모델을 이용하여, 1차원 비선형 부지응답 해석프로그램(이하 KODSAP; Kaist One Dimensional Site-response Analysis Program)을 개발하였다. 개발된 프로그램은 지진하중 재하에 따른 지반의 반복경화 및 연화현상에 의한 부지응답 특성 변화를 재현할 수 있다. KODSAP을 이용하여 기반암 상부 40m 인 모형지반의 반복경화 및 연화 정도, 지진가속도의 크기에 따른 부지응답특성 변화를 살펴 보았으며, 현재 실무에서 널리 적용되고 있는 등가선형, 비선형해석과 KODSAP 해석결과(지반의 반복경화 및 연화현상을 고려한)과의 차이점을 살펴 보았다.

주요어 부지응답해석, 반복경화, 반복연화, IWAN 모델

ABSTRACT >> A one-dimensional site response analysis program (KODSAP) was developed using cyclic soil behavior model by using the modified parallel IWAN model. The model is able to predict the cyclic hardening and degradation of soil through the adjustment of the internal slip stresses of its elements beyond the cyclic threshold, and satisfies Bauschinger's effect and the Masing rule in terms of its own behavior characteristics. The program (KODSAP) used the direct integration method in the time domain. The elasticity of the base rock was considered as a viscous damper boundary condition. The effects of cyclic hardening or degradation of soil on site response analysis were evaluated through parametric studies. Three types of analyses were performed to compare the effect of analysis and cyclic parameter on site response. The first type was equivalent linear analysis, the second was nonlinear analysis, and a third was nonlinear analysis using the cyclic hardening or degradation model.

Key words site response analysis, cyclic hardening, cyclic degradation, IWAN model

1. 서론

지진발생시 암반에 도달한 지진파는 상부 토사층을 통과하여 전파가 이루어짐에 따라 지표면에서의 지반운동 크기가 변화하게 되는데 이를 정량적으로 평가하여 설계에 적용하기 위해서는 부지응답 해석(지진응답해석)을 수행하여야 한다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 지진응답 해석 기법은 등가선형해석기법으로 통상적으로 SHAKE해석⁽⁴⁾으로 지칭되고 있으며, 종종 비선형 해석 기법이 사용되기도 한다. 두 해석이 가지고 있는 특징은 표 1과 같다.

일반적으로 느슨한 건조사질토 지반 또는 포화점토 및 사질토 지반에서는 지진시 반복하중에 의한 반복경화 또는 반복연화 현상이 발생하며, 이에 따라 지표면 응답 스펙트럼의 크기 및 탁월 주파수 대역의 이동이 발생할 수 있다. 이러한 지진응답 특성은 기존 SHAKE해석 및 비선형 해석으로는 재현이 어려우며, 지반의 반복경화 및 반복연화 현상을 묘사할 수 있는 구성모델을 적용한 비선형 해석이 시행되어야 한다.

지반의 시간 의존적 거동특성을 모두 포함한 지진응답해석을 위해서는 다음과 같은 지반의 동적 거동특성을 재현할 수 있는 지반의 거동모델이 필요하다.⁽⁵⁾

(i) 비선형 응력-변형률 관계, (ii) 하중 역전에 따른 항복 응력의 감소 현상(Bauschinger Effect)⁽⁷⁾, (iii) 하중 반복에 따른 거동특성의 변화(반복 경/연화).

본 논문에서는 상기 서술된 지반의 반복하중에 대한 거동

¹⁾ 공학박사, 토질 및 기초기술사, 소방방재청 시설사무관
(대표저자: tycheon@paran.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 10. 9 / 수정일 : 2008. 12. 4 / 게재확정일 : 2008. 12. 4)

〈표 1〉 부지응답해석의 종류 및 특징

해석 기법	구성 모델	해석 영역	장 점	단 점
SHAKE해석 (등가선형)	Kelvin-Voight	주파수 영역	기존 해석 자료 방대	시간의존적 거동 변화 묘사 불능
비선형 해석 (시간영역)	Hyperbolic, R-O model 등	시간 영역	시간의존적 거동 변화 묘사 가능	모델 변수 결정의 어려움

특성을 엄밀히 묘사하기 위하여 병렬 IWAN모델을 이용한 1차원 부지응답 해석 프로그램(KODSAP)을 개발하여 지반의 반복경화 및 연화현상이 부지응답특성에 미치는 결과를 살펴 보았으며, KODSAP은 지반의 반복경화거동과 반복연화 거동을 나타낼 수 있도록 개발 및 검증된 수정 병렬 IWAN 모델⁽¹⁻³⁾을 사용하여 개발되었다.

2. 수정 IWAN 모델

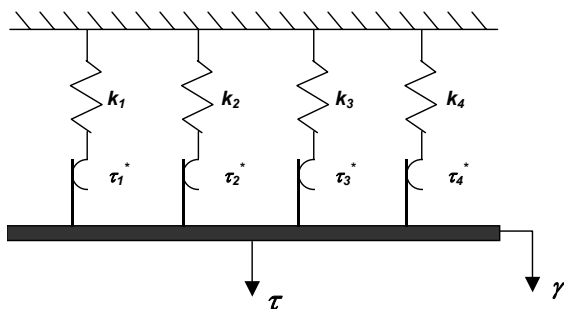
2.1 병렬 IWAN 모델

일반적으로 IWAN모델⁽⁶⁾은 완전 탄성 스프링과 완전 소성 슬라이더의 직렬 또는 병렬 조합으로 구성된다. 예를 들어 4개의 병렬요소 모델의 경우 그림 1과 같이 구성되며, 각 요소는 직렬 연결된 강성이 k_i 인 선형 스프링과 항복 응력이 τ_i^* 인 슬라이더로 구성된다. 초기 재하 거동에 대한 거동은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \sum_{i=1}^n k_i \gamma + \sum_{i=n+1}^4 \tau_i^* \tag{1}$$

식 (1)에서 첫째 항은 전단 변형(γ) 발생시 탄성거동을 하는 요소들의 전단저항력의 합이며, 두 번째 항은 항복이 발생한 요소들의 전단저항력의 합이다. 그림 1에 나타난 모델의 거동은 그림 2와 같다.

요소의 개수가 무한하다 생각하면, 슬라이더의 항복응력 (τ_i^*)과 스프링의 탄성계수(k_i)는 연속 분포함수로 가정할 수 있다. 따라서 항복응력(τ_i^*)이 분포함수 $\phi(\tau^*)$ 와 같다면,



〈그림 1〉 4개 요소를 가지는 병렬 IWAN 모델

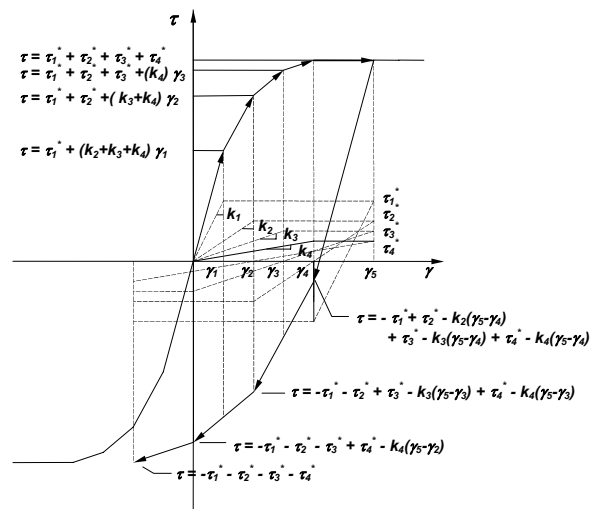
$\phi(\tau^*)d\tau^*$ 는 전체 요소 중 항복응력 τ^* 와 $\tau^* + d\tau^*$ 사이의 항복응력을 가지는 요소의 개수로 정의된다. 만약, 모든 요소의 탄성계수가 k 로 일정하다면, 식 (1)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\tau = k\gamma \int_{k\gamma}^{\infty} \phi(\tau^*)d\tau^* + \int_0^{k\gamma} \tau^* \phi(\tau^*)d\tau^* \tag{2}$$

역재하 곡선에 대한 응력-변형률 관계는 다음과 같은 세 가지 상태의 요소 조합으로 나타낼 수 있다. (i) 초기 재하에 항복이 일어나지 않아 탄성 상태인 요소, (ii) 초기 재하에 양의 방향으로 항복이 일어난 요소, (iii) 현재 탄성상태이나 초기 재하에 양의 방향으로 항복이 일어난 요소의 조합으로 표현이 가능하다. 따라서 병렬 IWAN모델의 경우 재재하 상태에 대한 응력-변형률 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau = & \int_0^{k(\gamma_m - \gamma)/2} \tau^* \phi(\tau^*)d\tau^* \\ & + \int_{k(\gamma_m - \gamma)/2}^{k\gamma_m} (k\gamma - k\gamma_m + \tau^*) \phi(\tau^*)d\tau^* \\ & + k\gamma \int_{k\gamma_m}^{\infty} \phi(\tau^*)d\tau^* \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)의 적분구간 $(\gamma_m - \gamma)/2$ 는 Masing Rule과 일치하며, 식 (3)에서 $\gamma' = (\gamma_m - \gamma)/2$ 를 γ' 으로 바꾸면 식 (2)의 초기 재하곡선과 정확히 일치한다. 이는 적분구간 $(\gamma_m - \gamma)/2$ 가 역



〈그림 2〉 4개 요소를 가지는 병렬 IWAN모델의 응력 변형률 관계

재하 또는 재재하시 요소의 탄성구간을 두 배 확장시키는 역할을 함에 따라 하중 역전에 따른 항복응력의 감소 현상 (Bauschinger's Effect)을 재현할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 수정 IWAN 모델

기존 병렬 IWAN모델의 구성함수 식 (2)의 항복응력 분포함수 $\phi(\tau^*)$ 를 누적 전단변형률(γ_{acc})의 함수로 구성시, 기존 IWAN모델의 응력-변형률 관계는 누적전단변형률에 따라 변화하는 형태로 식 (4)와 같이 재구성이 가능하다.

$$\phi(\tau^*(\gamma_{acc})) = \phi(\tau^*(0) + H(\gamma_{acc})) \quad (4)$$

여기서, 누적전단변형률 γ_{acc} 는 반복한계변형률(Cyclic Threshold Strain)을 초과하는 변형률의 누적값으로 정의되며, Masing 법칙⁽⁸⁾에 의거하여 역재하 및 재재하시에는 그 크기를 초기 재하의 1/2의 변형률을 취하도록 정의하였다⁽¹⁾.

식 (4)를 식 (2)에 대입하면, 수정 IWAN모델의 구성함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = k\gamma \int_{k\gamma}^{\infty} \phi(\tau^*(\gamma_{acc})) d\tau^* + \int_0^{k\gamma} \tau^* \phi(\tau^*(\gamma_{acc})) d\tau^* \quad (5)$$

여기서, 항복응력 분포함수 $\phi(\tau^*)$ 를 누적전단변형률에 의한 지수함수의 형태로 식 (6)과 같이 정의할 경우, 누적전단변형률에 의한 경·연화 함수인 $H(\gamma_{acc})$ 는 식 (7)과 같이 유도 가능하며, 지반특성 상수인 α, β, κ 는 실험(반복전단실험 또는 비틀림전단시험)결과로부터 획득 가능하다.⁽¹⁾

$$\tau_i^*(\gamma_{acc}) = \alpha + \beta e^{-\kappa\gamma_{acc}} \quad (6)$$

$$H(\gamma_{acc}) = \tau^*(\gamma_{acc}) - \tau^*(0) = \beta(e^{-\kappa\gamma_{acc}} - 1) \quad (7)$$

식 (5)에 경·연화 함수인 $H(\gamma_{acc})$ 를 대입하면, 수정 IWAN 모델의 응력-변형률 관계를 다음과 같이 최종 유도 가능하다.

$$\begin{aligned} \tau &= k\gamma \int_{k\gamma}^{\infty} \phi(\tau^*(\gamma_{acc})) d\tau^* + \int_0^{k\gamma} \tau^* \phi(\tau^*(\gamma_{acc})) d\tau^* \\ &= k\gamma \int_{k\gamma}^{\infty} \phi(\tau^*(0) + H(\gamma_{acc})) d\tau^* + \int_0^{k\gamma} \tau^* \phi(\tau^*(0) + H(\gamma_{acc})) d\tau^* \\ &= k\gamma \int_{k\gamma}^{\infty} \phi(\tau^*(0) + \beta(e^{-\kappa\gamma_{acc}} - 1)) d\tau^* \\ &\quad + \int_0^{k\gamma} \tau^* \phi(\tau^*(0) + \beta(e^{-\kappa\gamma_{acc}} - 1)) d\tau^* \end{aligned} \quad (8)$$

지반특성에 따라 결정되는 상수 β 는 지반의 최종 반복경화 또는 연화량을 제어하는 상수이며, κ 는 반복하중에 따른 지반의 최종 반복경화 또는 연화 속도를 제어하는 상수이다. 여기서, 상수 β 는 양의 값을 가질 경우 지반의 반복경화현

상을 표현가능하며, 음의값을 가질 경우 반복연화현상을 표현할 수 있다. 모델상수값의 변화에 따른 거동에 영향은 상수 β 의 값이 커질수록 최종 반복경화와 연화의 총량이 증가하며, 상수 κ 의 값이 커질수록 반복경·연화의 수렴속도가 빨라진다⁽¹⁾. 또한, 두개의 상수는 서로 영향을 미치지 않는 독립상수이다.

3. KODSAP(Kaist One Dimensional Site-response Analysis Program)

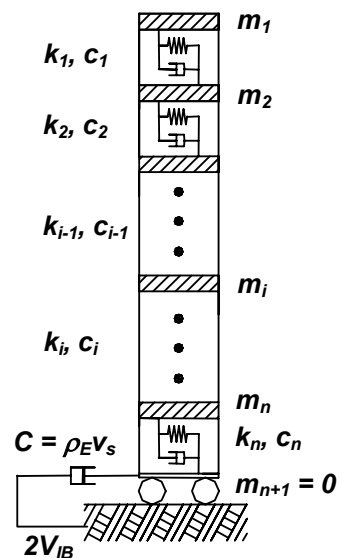
3.1 프로그램의 개발

앞 절에서 소개된 수정 IWAN모델을 적용하여 1차원 부지응답해석프로그램 KODSAP을 개발하였다. 프로그램은 Newmark의 β 기법을 토대로 직접 수치 적분법(Direct Numerical Integration Method)을 적용하였으며, 기반암은 반무한 탄성체로 정의되었다. 기반암 상부의 다층지반은 그림 3과 같이 집중질량(m)과, 수정 IWAN모델의 응력-변형률 관계를 적용 받는 비탄성 반복 경/연화 스프링(k), 그리고 점성감쇠기(Viscous Dashpot, c)로 구성되어 있다.

프로그램에 사용된 운동방정식은 식 (9)와 같으며, [M]은 질량 행렬, [C]는 점성감쇠 행렬이며, $\{\Delta\tau\}$ 는 $i, i-1$ 번째 지층의 전단응력치를 나타내는 벡터, 그리고 $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ 는 각각 집중질량[M]에 대한 가속도, 속도, 변위 벡터이다.

$$[M]\{\ddot{u}\} = [C]\{\dot{u}\} + \{\Delta\tau\} \quad (9)$$

식 (9)를 그림 3의 다층지반 모형으로 확장하면, 지층의 위치에 따라 다음과 같이 유도 가능하다.



〈그림 3〉 다층지반의 모형화

(1) 최상부층 질량, m_1

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k_1(u_{0,1} - u_{0,2}) - k_1(u_1 - u_2) = (\tau_{0,1}) \quad (10)$$

(2) i^{th} 번째 지층, 질량 m_i ; $2 \leq i \leq n$

$$m_i \ddot{u}_i + \begin{bmatrix} -c_i & & & & & \\ & c_i + c_{i+1} & & & & \\ & & -c_{i+1} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & c_n + \rho_B v_s & \\ & & & & & -c_{n+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{u}_{i-1} \\ \dot{u}_i \\ \dot{u}_{i+1} \\ \vdots \\ \dot{u}_n \\ \dot{u}_{n+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_i & & & & & \\ & k_i + k_{i+1} & & & & \\ & & -k_{i+1} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & k_n + \rho_B v_s & \\ & & & & & -k_{n+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_{0,i-1} \\ u_{0,i} \\ u_{0,i+1} \\ \vdots \\ u_{0,n} \\ u_{0,n+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -k_i & & & & & \\ & k_i + k_{i+1} & & & & \\ & & -k_{i+1} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & k_n + \rho_B v_s & \\ & & & & & -k_{n+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_{i-1} \\ u_i \\ u_{i+1} \\ \vdots \\ u_n \\ u_{n+1} \end{bmatrix} = (\tau_{0,i} - \tau_{0,i-1}) \quad (11)$$

(3) 기반면에서의 경계조건, 질량 $m_{n+1} = 0$

$$c_n(\dot{u}_b - \dot{u}_n) + k_n(u_b - u_n) - \tau_B = 0 \quad (12)$$

식 (12)에서, τ_B 는 기반암과 상부 지층면 사이로 전달되는 전단응력으로, 통제운동 기준점인 기반암은 지층 및 자유면에서 반사되어 되돌아 온 지진파가 기반암과 지층경계면에서 재차 반사되어 돌아가지 않는 반무한 탄성체로 모델링 되어야 한다. 따라서 Joyner와 Chen⁽⁹⁾은 기반암과 지층 경계면에서 전달되는 전단응력 τ_B 를 식 (13)과 같이 제안하였다.

$$\tau_B = \rho_B v_s (2V_{IB} - V_B) \quad (13)$$

여기서, V_B 는 기반암과 지층경계면에서의 입자속도, V_{IB} 는 입사파의 입자속도, V_{RB} 는 반사파의 입자속도이며, $V_B = V_{IB} + V_{RB}$ 이다. ρ_B 는 기반암의 밀도, v_s 는 기반암의 전단파 속도이다.

따라서 기반면에서의 경계조건을 나타내는 식 (13)은 다음과 같이 확장가능하며,

$$\begin{bmatrix} -c_n \\ c_n + \rho_B v_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{u}_n \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_n \\ k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_n \\ u_b \end{bmatrix} = \rho_B v_s 2V_I \quad (14)$$

식 (14)에 대해서, Newmark의 β 기법을 사용하여 수치적분을 시행하면 다음과 같이 $t + dt$ 시간에서의 변위 및 입자속도를 유도 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{u}(t + dt) &= \dot{u}(t) + (1 - \gamma) \cdot \ddot{u}(t) \cdot dt + \gamma \cdot \ddot{u}(t + dt) \cdot dt \\ u(t + dt) &= u(t) + \dot{u}(t)dt + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \cdot u(t) \cdot dt^2 \\ &\quad + \beta \cdot \ddot{u}(t + dt) \cdot dt^2 \end{aligned} \quad (15)$$

프로그램 KODSAP에서는 식 (15)에서의 γ 와 β 의 값을 각각 1/2와 1/4로 정의하고 있으며, 해석여건에 따라 변경 가능하도록 구성되었다. 또한, 각 지층의 가속도값은 다음식

으로 계산 가능하다.⁽¹⁰⁾

$$(\tau_i - \tau_{i-1}) + m_i \ddot{u}_i + \begin{bmatrix} -c_i & \\ c_i + c_{i+1} & \\ & -c_{i+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{u}_{i-1} \\ \dot{u}_i \\ \dot{u}_{i+1} \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

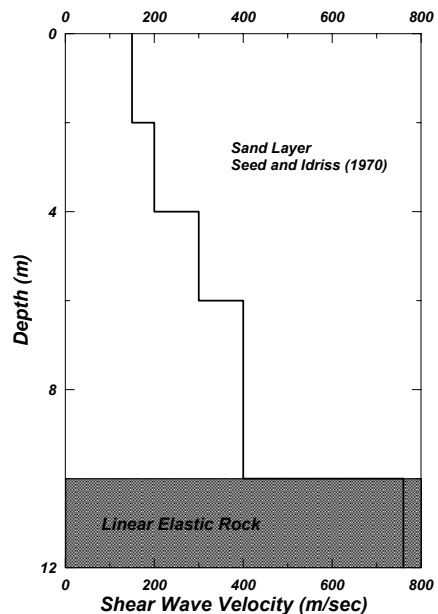
3.2 프로그램의 검증

프로그램 KODSAP에서 사용된 수정 IWAN모델은 거동 특성상 불연속적인 응력 변형을 관계를 보인다. 따라서, 사용된 모델요소의 개수가 많을수록 부드러운 응력 변형을 관계를 보이게 된다.

따라서 본 절에서는 모형지반에 대해서, 전단변형률 0~1% 범위내 수정 IWAN모델의 요소개수를 100개와 1000개로 구성하여 KODSAP 프로그램의 수치적 안정성을 평가하였다. 비교대상 프로그램은 쌍곡선 모델을 사용하는 YUSAYUSA 프로그램⁽¹⁰⁾을 사용하였다.

해석에 사용된 모형 지반은 그림 4와 같이 10m 두께의 사질토 지반이며, 통제운동은 Hachinohe형 지진을 사용하였다.(그림 6) 쌍곡선 모델과 수정 IWAN모델의 응력-변형률 관계는 그림 5와 같다.

해석결과로부터 전단변형률의 시간이력 변화를 살펴보면, 100개의 요소를 적용한 해석결과는 쌍곡선 모형을 사용한 YUSAYUSA의 해석결과와 큰 차이를 보였으나, 1000개 이상의 요소를 사용할 경우 두 프로그램 모두 동일한 결과를 볼 수 있었다.(그림 7)



〈그림 4〉 수치해석 안정성 평가를 위한 모형지반의 구성

4. 반복 경·연화 현상에 따른 지진 응답 거동 특성

일반적으로 상대밀도가 낮은 건조사질토 지반은 반복응력 재하시 강성이 증가하는 경화현상을 보이며, 포화점토 또는 상대밀도가 낮은 포화 사질토 지반은 간극수압의 증가에 따라 강성이 감소하는 반복 연화현상을 보인다.

이러한 현상은 지진발생시 응답스펙트럼의 변화를 야기할 수 있으며, 특히 탁월주파수의 변화는 상부구조물의 설계에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 장에서는 앞서 설

명된 KODSAP프로그램을 이용한 매개변수 해석을 실시하여 지반의 반복 경·연화현상이 응답 스펙트럼에 미치는 영향을 살펴보고, 그 차이를 등가선형해석 결과와 비교해 보았다.

4.1 반복 경화에 따른 지진응답 거동특성

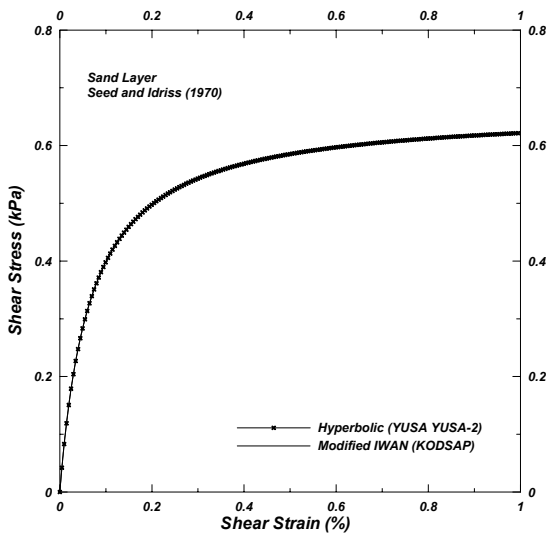
반복 경화에 따른 지진응답 거동특성을 살펴보기 위하여, 모형지반을 그림 7과 같이 40m 깊이의 건조 사질토 지반을 구성하였다. 전단파속도는 구속압 효과를 고려하여 깊이가 증가함에 따라 150m/sec에서 300m/sec까지 증가하도록 구성하였으며, 사질토 지반의 응력-변형률 관계는 Seed와 Idriss가 제안한 사질토의 전단탄성계수-전단변형률 곡선의 중간값을 사용하였다.⁽¹¹⁾

통제운동의 경우 Hachinohe형 지진파를 국내 내진설계 기준의 1구역 붕괴방지수준(CLE) 및 기능수행수준(OLE)에 해당하는 최대가속도 0.154g와 0.06g로 스케일링하여 사용하였다. 반복경화의 최종크기를 결정하는 β 의 값은 -0.02, 반복경화의 수렴속도를 좌우하는 κ 는 0.3으로 고정하여 평가를 시행하였다. 모델 상수에 따른 수정IWAN모델의 거동특성은 그림 8과 같다.

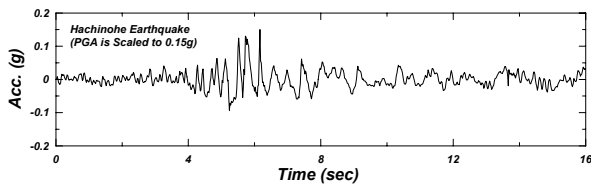
해석결과는 그림 9에 나타나 있다. 해석결과를 살펴보면, 반복경화현상으로 인하여 주기 0.03sec~0.5sec사이의 응답특성이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그 크기는 입력지진파의 최대가속도가 클수록 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 등가선형해석과 비선형해석 결과의 차이 역시 입력지진파의 최대가속도가 클수록 차이를 나타냄을 볼 수 있었다.

4.2 반복 연화에 따른 지진응답 거동특성

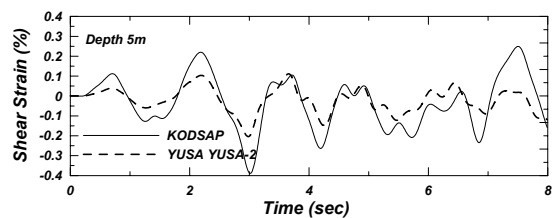
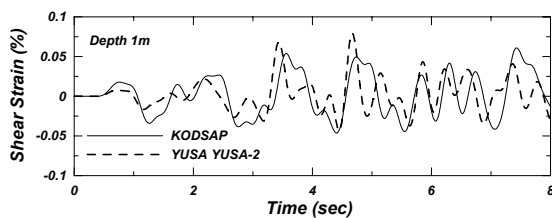
반복 연화에 따른 지진응답 거동특성을 살펴보기 위하여, 모형지반을 그림 10과 같이 깊이 40m포화점토 지반을 구성



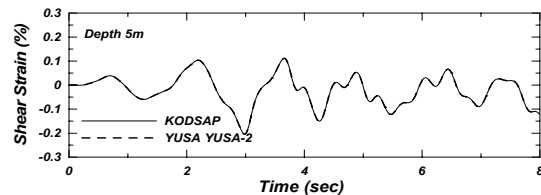
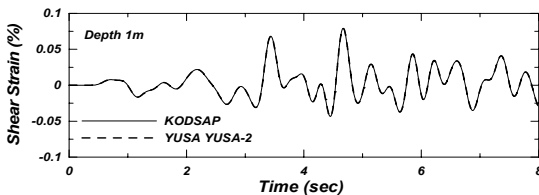
〈그림 5〉 수치해석 안정성 평가를 위해 사용된 지반모델의 응력변형률 관계



〈그림 6〉 Hachinohe형 지진파

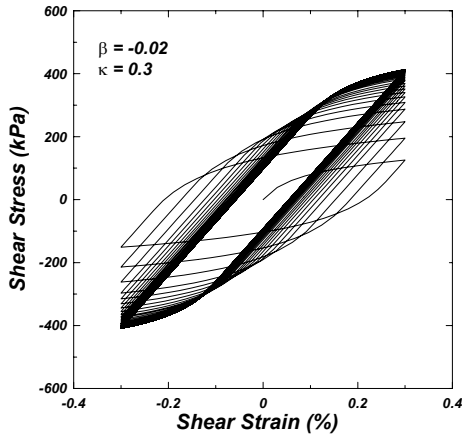


(a) 전단변형률 이력곡선(요소 개수 100개)

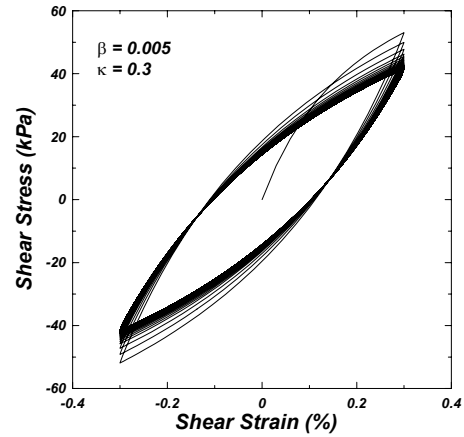


(b) 전단변형률 이력곡선(요소 개수 1000개)

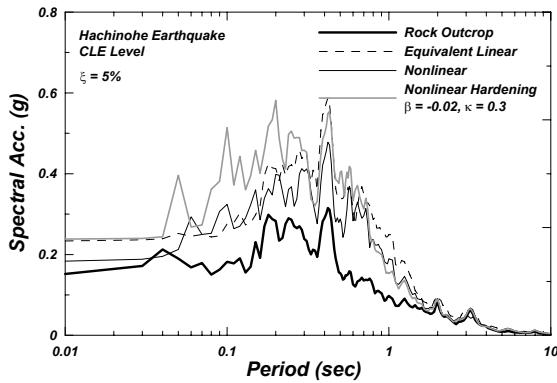
〈그림 7〉 프로그램 KODSAP의 수치해석 안정성 평가 결과



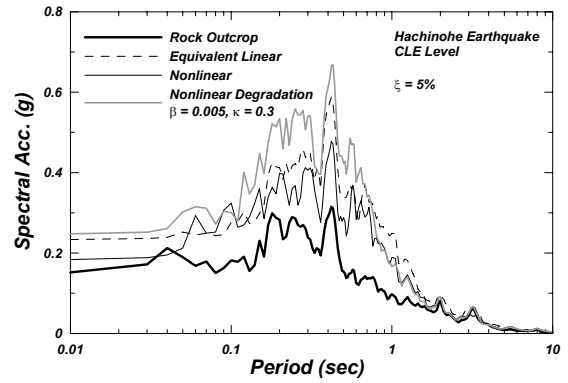
〈그림 8〉 해석에 사용된 수정 IWAN모델의 반복경화 거동특성($\beta = -0.02, \kappa = 0.3$)



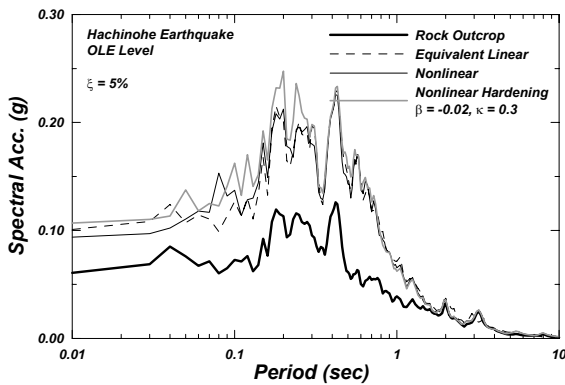
〈그림 10〉 해석에 사용된 수정 IWAN모델의 반복연화 거동특성($\beta = 0.005, \kappa = 0.3$)



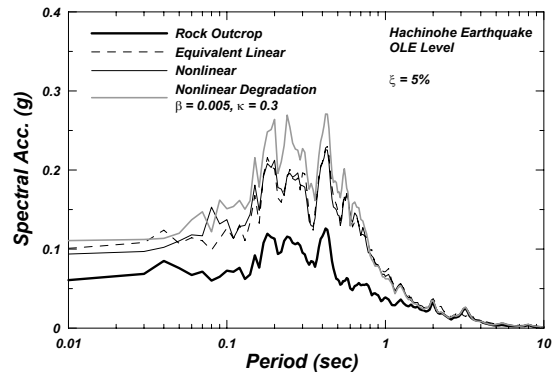
(a) 입력지진(붕괴방지수준, 0.154g)



(a) 입력지진(붕괴방지수준, 0.154g)



(b) 입력지진(기능수행수준, 0.06g)



(b) 입력지진(기능수행수준, 0.06g)

〈그림 9〉 지표면 의사 가속도 스펙트럼(Pseudo Acceleration Spectrum)

〈그림 11〉 지표면 의사 가속도 스펙트럼(Pseudo Acceleration Spectrum)

하였다. 전단파속도는 층적점토층의 특성을 반영하여 상부 연약점토층은 150m/sec, 중간층은 250m/sec, 하부점토층은 350m/sec로 구성하였다. 포화점토 지반의 응력-변형률 관계는 Vucetic이 제안한 소성지수 30에 해당하는 점토의 대표 전단탄성계수-전단변형률 곡선을 사용하였다.⁽¹²⁾

통계운동의 경우 Hachinohe형 지진파를 국내 내진설계 기준의 1구역 붕괴방지수준 및 기능수행수준에 해당하는 최대가속도 0.154g와 0.06g로 스케일링하여 사용하였다. 반복연화의 최종크기를 결정하는 β 의 값은 0.005, 반복경화의

수렴속도를 좌우하는 κ 는 0.3으로 고정하여 평가를 시행하였다. 모델 상수에 따른 수정 IWAN모델의 거동특성은 그림 10과 같다.

해석결과는 그림 11에 나타나 있다. 해석결과를 살펴보면, 반복연화현상으로 인하여 주기 0.06sec~0.8sec사이의 응답특성이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그 크기는 입력지진파의 최대가속도가 클수록 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 등가선형해석과 비선형해석 결과의 차이 역시 입력지진파의 최대가속도가 클수록 차이를 나타냄을 볼 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 반복하중을 겪는 지반의 거동특성(비선형 거동, Bauschinger 효과, 반복 경화/연화)현상을 재현가능한 수정 IWAN모형을 기반으로 비선형 부지응답해석 프로그램 (KODSAP)을 개발하였다.

개발된 부지응답해석 프로그램은 기존 비선형 해석프로그램을 사용하여 수치적 안정성을 검증하였으며, 그 결과를 바탕으로 모형지반에 대해서 반복경화 및 연화현상이 부지응답특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

해석결과로부터 반복경화현상이 발생하는 느슨한 건조사질토 지반의 경우 단주기 영역에서 응답스펙트럼의 증폭현상을 보였으며, 반복연화현상이 발생하는 포화점토 또는 포화사질토 지반에서는 중-단주기 영역에서 응답스펙트럼의 증폭현상이 나타나 무시할 수 없는 현상임을 알 수 있었다. 이는 지반이 반복하중을 받음에 따라 전단탄성계수가 전체적으로 증가 또는 감소하게 되고, 이는 지층의 강성 변화를 유도하여 그 결과는 전체 지층의 공진주파수의 변화로 나타난다고 할 수 있다.

또한, 입력지진의 최대가속도가 증가함에 따라 그 정도는 심화됨을 알 수 있었으며, 널리 사용되고 있는 등가선형해석과의 비교시 입력지진의 최대가속도가 증가함에 따라 비선형해석과 큰 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Lee, J.S, Choo, Y.W., and Kim, D.S, "A modified parallel IWAN model for cyclic hardening behavior of sand," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, doi:10.1016/j.soildyn.2008.06.008.
2. 이진선, 김동수, "수정 IWAN 모델을 이용한 사질토의 반복경화거동에 대한 연구 - Part I. 모델 개발," 한국지진공학회 논문집, Vol 7, No. 5, 2003, pp. 47-56.
3. 이진선, 김동수, 추연욱, 윤종구, "수정 IWAN 모델을 이용한 사질토의 반복경화거동에 대한 연구 - Part II. 모델 검증," 한국지진공학회 논문집, Vol 7, No. 5, 2003, pp. 57-66.
4. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*, Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, 1972.
5. Ishihara, K., *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press. Inc., New York, 1996.
6. Iwan, W.D., "On a Class of Models for the Yielding Behavior of Continuous and Composite Systems", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 34, 1967, pp. 612-617.
7. Fung, Y.C., *Foundations of soild mechanics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1965.
8. Masing, G., "Eigenspannungen und verfestigung beim messing", *Proceedings of the Second International Congress of Applied Mechanics*, 1926, pp. 332-335.
9. Joyner, W.B. and Chen, A.T.F., "Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquakes", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 65. No. 5, 1975, pp. 1315-1336.
10. Yoshida, N. and Towhata, I. *YusaYusa-2/Simmdl-2 Theory and Practice*, Sato Kogyo Co. Ltd., 1997.
11. Seed, H. B. and Idriss, I.M., *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 1970, pp. 48.
12. Vucetic, M. and Dobry, R., "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. GT1, 1991, pp. 89-107.