

# 1 차원 파전달 이론을 사용한 지층내의 지진파 전달 해석에서의 진동수영역해석법과 시간영역해석법의 비교

(Free-Field Investigation of Horizontally Layered Soil Deposits with Nonlinear Stress-Strain Characteristics: Using Time Domain Method and Frequency Domain Method)

裴 煥 哲\*  
鄭 永 雲\*\*

## 〈목 차〉

- 1. 서 론
- 2. 시간영역해석법
  - 2.1 이론설명
    - 가. 토양의 비선형 모델
    - 나. 운동방정식
    - 다. 감쇠행렬과 전달경계
  - 2.2 전산프로그램 "NSRESP"
- 3. 진동수영역해석법과 문제점
- 4. 해석결과의 비교
- 5. 결 론
- 6. 참고문헌

## 1. 서 론

1 차원 파전달 이론(One-Dimensional Wave Propagation Theory)은 지반-구조물 상호작용 해석(Soil-Structure Interaction Analysis)에 통용되는 전산프로그램인 "FLUSH", "SASSI", "SHAKE" 등에서 채택되고 있는 이론으로서 자유장(Free Field) 지반내에서의 파동 전파해석(자유장해석)을 위해 사용된다.

자유장해석은 일반적으로 자유장 지표면에서 정의된 입력운동을 해석모델의 기층(Base Layer)에서의 입력운동으로 재정의하는 것이므로 지반-구조물 상호작용 해석의 결과에 중대한

영향을 미친다. 따라서 자유장해석에 사용되는 해석방법의 실제에 대한 정확성 여부는 지반-구조물 상호작용 해석에서 매우 중요하게 취급되어야 한다.

현재, 앞에서 열거한 바와 같은 지반-구조물 상호작용 해석에 사용되는 대부분의 전산 프로그램은 복소수 응답법(Complex Response Method)에 의한 진동수영역(Frequency Domain) 1 차원 파전달 이론을 자유장해석에 적용하고 있다. 그러나 이 방법은 본 논문에서 논의하는 바와 같이, 해석결과에 중대한 영향을 미치는 유효전단변형율(Effective Shear Strain)을 변형율 시간이력(Strain Time History)중의 최대전단변형율의 몇 퍼센트로 정의하느냐 또는 어떤

\* 土木技術 1:(土木構造), 韓國電力技術(株) 課長  
 \*\* 韓國電力技術(株)

방법으로 정의하느냐에 따라 해석결과의 신뢰도에 큰 영향을 준다. 따라서 상이한 특성을 갖는 지층들로 구성된 지반구조에 대한 해석을 수행하는 경우 결과의 정확성을 보장하기가 어렵다.

한편 본 논문에서 강조하고자 하는 시간영역(Time Domain) 해석법은 현재까지 기고자가 아는 바로는 실용화된 전산 프로그램에서 사용되고 있지 아니한 방법으로서 제한된 학계 및 연구기관에서 그 해석법의 타당성 및 실용성에 대한 연구가 진행중에 있는 해석방법이다.

본 논문에서는 일본의 오사끼(大崎) 교수가 1982년도 발표한 연구보고서<sup>1)</sup>의 내용을 참고로 하여 기고자가 수정·보완 작성한 시간영역 1차원 파전달 해석 전산 프로그램인 "NSRESP"의 해석결과와 진동수영역 해석법으로 구한 결과를 실제 기록지진 자료와 비교하므로써 두 해석방법의 정확성을 비교·평가하고 장·단점을 기술한다.

본 논문에서는 1983년 8월 일본 신후지(新富士) 변전소 부지에서 관측된 기록지진 및 부지지반특성 관련자료를 사용하였다.

## 2. 시간영역 해석법

시간영역해석법(Time Domain Analysis Method)은 그림 2.1과 같이 수평층상지반구조(Horizontally Layered Soil Deposits)를 Discrete Mass System 모델로서 이상화하고 시간영역 직접적분법으로 각 지층의 상부에서의 응답을 계산하는 비선형 지반응답해석 방법이다.

이 해석법은 토양(Soils)의 비선형 특성을 고려하기 위해 적절한 비선형 모델을 사용하며 그림 2.1(b)에 보여진 바와 같이 기층(Base Layer)과 기층의 직상층 사이에 두께를 가지지 않는 가상층을 고려한 전달경계(Transmitting Boundary)가 사용된다.

### 2.1 이론 설명

가. 토양의 비선형 모델(Non-linear Model for Soils)

토양의 비선형 특성은 토양의 전단응력-전단변형률 관계의 비선형성을 의미하며, 실험적으로는 교란되지 않은 토양시료에 대하여 삼축 사이클릭 토오크시험(Triaxial Cyclic Torque Test)을 비배수상태에서 수행하므로써 얻어진다.

토양의 이러한 전단응력-전단변형률 관계의 비선형성은 적합한 모델을 사용하여 "Skeleton Curve"를 결정하고 이에 "Masing's Law"를 적용하여 "Hysteretic Curve"를 정의하므로써 해석적으로 나타낼 수 있다.

일반적으로 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)은 이 두 곡선을 지칭하며, "Hysteretic Curve"는 때때로 변형률속도값이 양수, 음수인

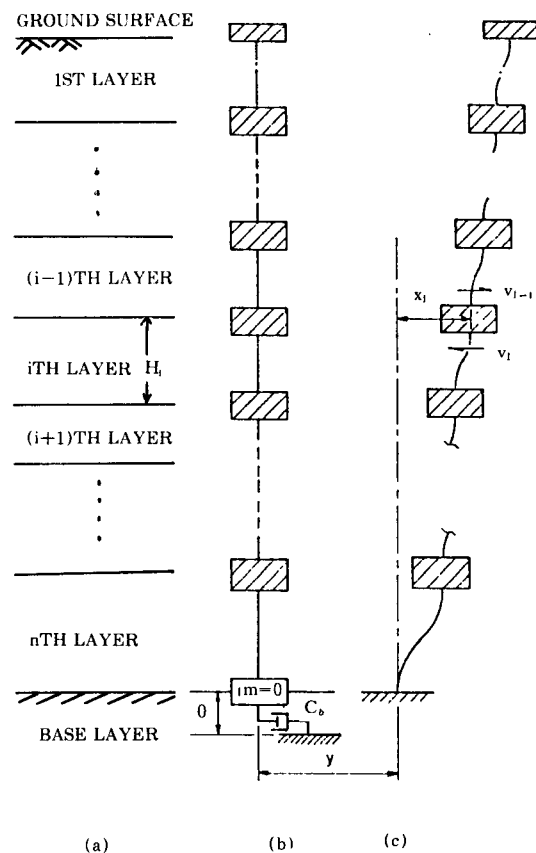


그림 2.1 Discrete Model of Horizontally Layered Soil Deposits

경우에 대해 "Loading Curve", "Unloading Curve" 라고 각각 불리운다.

그림 2.2는 "Masing's Law"에 의한 이 두 곡선의 기하학적 관계를 보여준다.

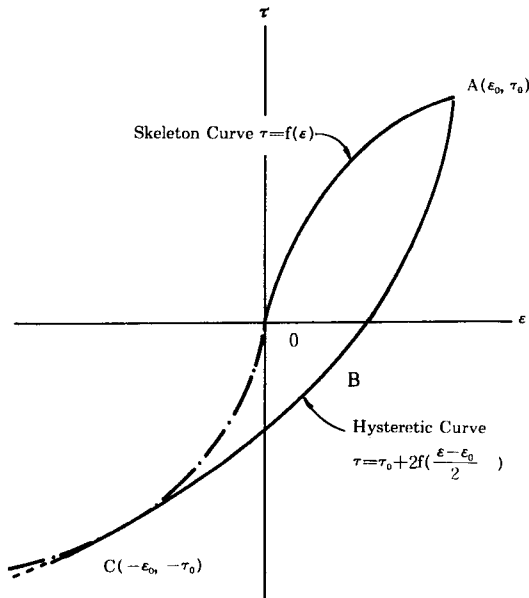


그림 2.2 Hysteretic Curve Originated from Skeleton Curve

비선형 지반응답해석의 경우 "Skeleton Curve" 를 정의하는 도양의 비선형 모델은 매우 중요한 수학적 의미를 가지며 이에 따라 전단탄성계수와 감쇠계수의 전단변형율에 대한 의존성이 각각 결정된다.

오사끼-하라(Ohsaki-Hara)는 그들의 연구논문<sup>6)</sup>에서 종래에 많이 사용되던 Hardin-Drnevich 모델<sup>5)</sup> 대신에 다음과 같은 비선형 모델을 제안하였다.

$$\epsilon = \frac{\tau}{G_0} \left\{ 1 + a \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b \right\} \quad (2.1)$$

여기서,  $\epsilon$ : Shear Strain

$\tau$ : Shear Stress

$G_0$ : Initial Shear Modulus

$a$ : Constant(=  $\frac{G_0}{S_u} \times 0.01 - 1.0$ )

$b$ : Constant(1.4 for clay  
1.6 for sand)

식 (2.1)로부터 전단탄성계수와 감쇠계수의 전단변형율에 대한 의존관계식은 다음과 같이 각각 구해진다.

Tangential Shear Modulus :  $G_t$

$$G_t = d\tau / d\epsilon = \frac{G_0}{1 + a(b+1) \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b} \quad (2.2)$$

Secant Shear Modulus :  $G$

$$G = \tau / \epsilon = G_0 / \left\{ 1 + a \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b \right\} \quad (2.3)$$

Damping Factor :  $\beta$

Masing's Law에 의한 싸이클당의 에너지손실  $\psi$ 는:

$$\psi = 8 \left\{ \frac{2}{\pi \epsilon} \int_0^\epsilon f(\epsilon) d\epsilon - 1 \right\}$$

식 (2.1)의 특성에 의해

$\int_0^\epsilon f(\epsilon) d\epsilon = \tau \epsilon - \int_0^\tau \epsilon d\tau$ 의 관계가 성립하므로

$$\psi = 8 \left( 1 - \frac{2}{\pi \epsilon} \int_0^\tau \epsilon d\tau \right)$$

$$\int_0^\tau \epsilon d\tau = \int_0^\tau \frac{\tau}{G_0} \left\{ 1 + a \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b \right\} d\tau$$

$$= \frac{\tau^2}{2G_0} \left\{ 1 + \frac{2a}{b+2} \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b \right\}$$

감쇠계수  $\beta$ 는  $\psi / 4\pi$ 이므로

$$\beta = \psi / 4\pi = \frac{2}{\pi} \left\{ 1 - G / G_0 \left( 1 + \frac{2a}{b+2} \left| \frac{\tau}{S_u} \right|^b \right) \right\} \quad (2.4)$$

오사끼-하라는 그림 2.3~2.6에 나타난 바와 같은 시험결과를 근거로 하여 점토와 모래의 경우  $G_0 / S_u$ 의 값을 각각 600, 1100을 사용토록 추천하고 있다.

나. 운동방정식

그림 2.1(c)에 보여진 바와 같이, 지진하중 작용시 어떤 시각  $t$ 에서의 기층(Base Layer)의 변위량을  $Y$ 라고 하고 그 때의 각층 상부의 상대변위량을  $X$  그리고 각 층의 경계면에서의

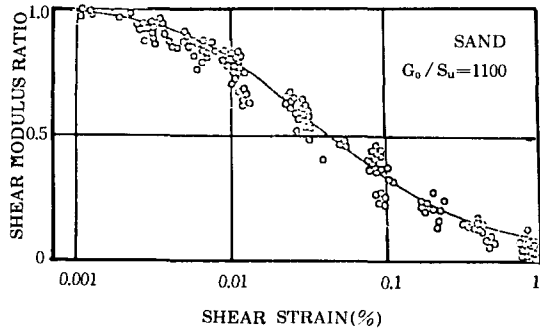


그림 2.3 Strain Dependency of Shear Modulus for Sand

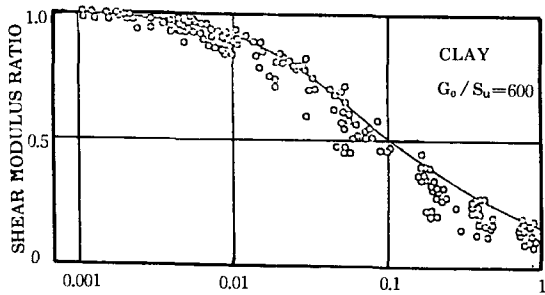


그림 2.4 Strain Dependency of Shear Modulus for Clay

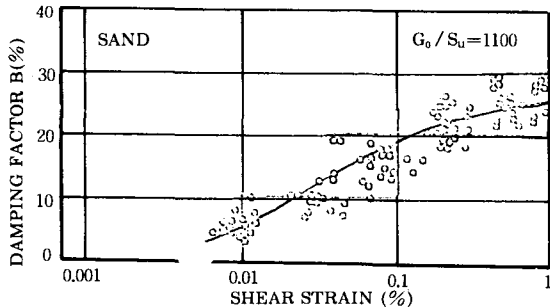


그림 2.5 Strain Dependency of Damping Factor for Sand

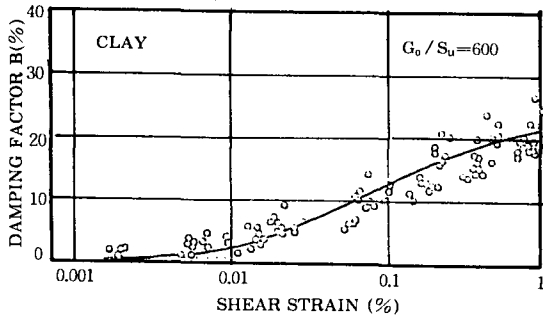


그림 2.6 Strain Dependency of Damping Factor for Clay

전단응력을  $V$ 라고 하면 시각  $t$ 에서의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$[M]\{\ddot{X}\}_t + [C]\{\dot{X}\}_t + [J]\{V\}_t = -Y_t[M]\{I\} \quad (2.5)$$

이 운동방정식에서  $[M]$ 은 1차원 질량행렬,  $[C]$ 는 지반재료의 재료감쇠(Material Damping)를 나타내는 감쇠행렬이며  $\{I\}$ 는 단위벡터이다. 여기서  $[M]$ 과  $[J]$ 의 행렬구성은 다음과 같다.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{n-1,n-1} & m_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{n,n-1} & m_{n,n} \end{bmatrix}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

질량행렬  $[M]$ 에서 각 질량요소는 다음과 같이 정의된다.

$$\left. \begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{3g} \gamma_1 H_1 \\ m_{ii} &= \frac{1}{3g} (\gamma_{i-1} H_{i-1} + \gamma_i H_i) \\ m_{i-1,i} &= \frac{1}{6g} \gamma_{i-1} H_{i-1} = m_{i,i-1} \end{aligned} \right\} i=2,3,\dots,n$$

여기서  $\gamma_i$ 는  $i$ 번째 층의 단위중량을,  $g$ 는 중력 가속도를 의미한다.

운동방정식 (2.5)에서  $\Delta t$ 를 시간증분이라 하고 Wilson's  $\theta$ 법을 적용하여  $t=t+\tau$ 에서의 운동방정식을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} &(\tau = \theta \cdot \Delta t, \theta > 1.37) \\ &[M]\{\ddot{X}\}_{t+\tau} + [C]\{\dot{X}\}_{t+\tau} + [J]\{V\}_{t+\tau} \\ &= -\ddot{Y}_{t+\tau}[M]\{I\} \quad (2.6) \end{aligned}$$

여기서,

$$\ddot{Y}_{t+\tau} = \ddot{Y}_t + \theta(\ddot{Y}_{t+\Delta t} - \ddot{Y}_t) \quad (2.7)$$

그리고 각 층에서의 가속도, 속도, 변위 및 전단응력 벡터들을 다음과 같이 가정하면,

$$\{\ddot{X}\}_{t+\tau} = \{\ddot{X}\}_t + \{\Delta\ddot{X}\}_t$$

$$\{\dot{X}\}_{t+\tau} = \{\dot{X}\}_t + \{\Delta\dot{X}\}_t$$

$$\{X\}_{t+\tau} = \{X\}_t + \{\Delta X\}_t$$

$$\{V\}_{t+\tau} = \{V\}_t + \{\Delta V\}_t$$

운동방정식 (2.6)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$[M]\{\ddot{X}\}_t + \{\Delta\ddot{X}\}_t + [C]\{\dot{X}\}_t + \{\Delta\dot{X}\}_t + [J]\{\dot{V}\}_t + \{\Delta V\}_t = -\ddot{Y}_{t+\tau}[M]\{I\} \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서 식 (2.5)를 제하고 식 (2.7)을 대입하면 증분운동방정식(Incremental Equation of Motion)이 다음과 같이 얻어진다.

$$[M]\{\Delta\ddot{X}\}_t + [C]\{\Delta\dot{X}\}_t + [J]\{\Delta V\}_t = \Delta R_t[M]\{I\} \quad (2.9)$$

여기서,

$$\Delta R_t = -\theta(\ddot{Y}_{t+\Delta t} - \ddot{Y}_t)$$

전단변형률(U)과 전단변형률속도(Shear Strain Velocity) ( $\dot{U}$ )는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\{U\}_t = [H]^{-1}[J]^T\{X\}_t$$

$$\{\dot{U}\}_t = [H]^{-1}[J]^T\{\dot{X}\}_t$$

$$\{U\}_{t+\tau} = [H]^{-1}[J]^T\{X\}_{t+\tau}$$

$$\{\dot{U}\}_{t+\tau} = [H]^{-1}[J]^T\{\dot{X}\}_{t+\tau}$$

여기서 대각행렬 [H]는 각 층의 두께를 나타내는 행렬이다.

따라서,

$$\{\Delta U\}_t = \{U\}_{t+\tau} - \{U\}_t = [H]^{-1}[J]^T\{\Delta X\}_t$$

다음, 시각  $t=t$ 에서의 Tangential Shear Moduli 를  $[G]_t$ 를 하고(식 (2.2)참조) 전단응력 증분벡터를 다음과 같이 쓰면

$$\{\Delta V\}_t = [G]_t\{\Delta U\}_t = [G]_t[H]^{-1}[J]^T\{\Delta X\}_t \quad (2.10)$$

식 (2.10)의 양변에 행렬 [J]를 곱하면

$$[J]\{\Delta V\}_t = [J][G]_t[H]^{-1}[J]^T\{\Delta X\}_t \quad (2.11)$$

따라서, 식 (2.11)의 우변은  $[K]_t\{\Delta X\}_t$ 의 형태가 되어 강도행렬  $[K]_t$ 를 얻게 된다.

즉,  $[K]_t = [J][G]_t[H]^{-1}[J]^T$ 로 정의되며 아래와 같은 행렬이 된다.

$$[K]_t = \begin{bmatrix} \frac{G_1}{H_1} & -\frac{G_1}{H_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\frac{G_1}{H_1} & \frac{G_1}{H_1} + \frac{G_2}{H_2} & -\frac{G_2}{H_2} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{G_2}{H_2} & \frac{G_2}{H_2} + \frac{G_3}{H_3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{G_{n-2}}{H_{n-2}} + \frac{G_{n-1}}{H_{n-1}} & -\frac{G_{n-1}}{H_{n-1}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{G_{n-1}}{H_{n-1}} & \frac{G_{n-1}}{H_{n-1}} + \frac{G_n}{H_n} \end{bmatrix} t$$

결국, 식 (2.9)와 (2.10)으로부터 결과적으로 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$[M]\{\Delta\ddot{X}\}_t + [C]\{\Delta\dot{X}\}_t + [K]_t\{\Delta X\}_t = \Delta R_t[M]\{I\} \quad (2.12)$$

상기 식 (2.12)의 기본 운동방정식에 대해 단계적 직접적분법을 사용함으로써 각 지층에서의 응답이 계산된다.

다. 감쇠행렬(Damping Matrix)과 전달경계

히스테릭 감쇠(Hysteretic Damping)는 식 (2.4)에 나타난 바와 같이 주어진 전단변형률값에 대한 전단응력을 비선형 모델을 사용하여 계산하는 과정에서 자동적으로 고려된다.

전술한 바와같이, 운동방정식 (2.12)식에서의 감쇠행렬 [C]는 히스테릭 감쇠가 아닌 재료감쇠이다.

지반재료의 재료감쇠는 일반적으로 변형률값이  $1.0 \times 10^{-5}$  이하일 때의 감쇠를 의미하며 점토와 사질토의 경우 재료감쇠계수는 최대 0.02이다.<sup>2)</sup>

오사키는 아래와 같은 Rayleigh Type의 재료감쇠를 운동방정식에서 사용하였다.

$$[C] = a_0[M] + b_0[K]$$

여기서,

$$a_0 = \frac{2\beta_0 W^1 W_2}{W^1 + W^2}$$

$$b_0 = \frac{2\beta_0}{W^1 + W^2}$$

$$\beta_0 = 0.02$$

감쇠계수  $\beta_0$ 는 모드(Mode)에 따라 각각 다른 값을 가진다. 그러나 재료감쇠는 그림 2.5와 그림 2.6에 나타난 바와 같이 히스테릭 감쇠에 비해 아주 작은 값이므로 실제적인 문제에 있어서는

큰 중요성을 갖지 않는다.

상기 식에서  $W^1$  과  $W^2$  는 지반 해석모델의 각각 첫번째 모드와 두번째 모드의 고유각진동수이다.

#### 전달경계

입력진동이 기층의 자유표면상에서 주어졌을 때 즉, 굴착등의 이유로 기층표면이 노출되었던 경우 기층상의 지반의 거동을 보다 정확히 나타내기 위해서는 기층과 기층의 직상층 사이에 전달경계를 두는 것이 필요하다. 이 전달경계는 두께, 질량 및 강성을 갖지 않으며 그림 2.1(b)에 보여진 바와같이 오직 감쇠계수만을 갖는다. 감쇠계수는 단위면적당  $C_b = \sqrt{\gamma_0 G_b / g}$  의 값을 가지며 이러한 감쇠계수로 표현되는 전달경계에 의해 해석모델의 자유도의 수는 1만큼 증가하게 된다.

## 2.2 전산프로그램 "NSRESP"

시간영역 해석법에 의해 지반 모델의 동적응답을 계산하는 전산프로그램 "NSRESP"는 기고자가 오사끼 교수의 연구논문에서 제시된 이론과 그의 부프로그램을 직접 사용 또는 수정·보완하여 1989년에 작성한 것으로 아직까지는 여러면에서 미흡한 부분이 상당하다. 그 중요한 이유로서 전단탄성계수비와 감쇠계수의 전단변형율에 대한 의존관계성을 동시에 실제 시험결과와 근접하게 일치시키는 토양의 비선형 모델을 개발하지 못하고 있는 점을 들 수 있다. 그러나 4장에서 언급하는 바와 같이 "NSRESP"를 사용하여 해석적으로 구한 지반응답은 매우 고무적인 결과를 보여준다.

"NSRESP"는 주프로그램과 25개의 부프로그램으로 구성되며 이 중 중요한 부프로그램들과 그 기능을 요약하면 다음과 같다.

SDIN—주부프로그램으로서 직접적분법에 의해 동적지반응답을 계산한다.

OHYS—오사끼-하라의 비선형모델에 의해 M 번째 단계와 M-1 번째 단계의 전단변형율과 전단변형율속도가 주어졌을 때 전단응력과 Tangential Shear

Modulus를 계산한다.

MASG—Modified Hardin-Drnevich 모델에 의해 OHYS와 동일한 계산을 수행한다.

EIGN—지반모델의 제 1, 제 2 고유치를 계산한다.

OHCRVF—오사끼-하라의 비선형 모델에 따라 각 지층의 전단탄성계수비와 전단변형율의 시험자료가 주어졌던 경우 최소자승법에 의해 식 (2.1)의  $S_u$ ,  $a$ ,  $b$ 를 구한다.

JCRVF—수정 Hardin-Drnevich 모델에 따라 OHCRVF와 동일한 Curve Fitting 작업을 수행한다.

INTP—주어진 입력지진 시간이력에 대해 선형보간작업(Linear Interpolation)을 수행한다.

FLTBL—입력, 출력 시간이력에 대해 Frequency Filtering 및 Baseline Correction 작업을 수행한다.

SUBD—주어진 입력 Soil Profile에 대해 오사끼 방법에 따른 층분할(Subdivision) 작업을 수행한다.

TFUNC—각 지층의 응답 시간이력에 대해 Transfer Function을 계산한다.

FFT—고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 수행한다.

## 3. 진동수영역 해석법과 문제점

진동수영역(Frequency Domain) 해석법은 본 논단의 서론에서 언급하였듯이 현재 사용되고 있는 지반-구조물 상호작용을 해석하는 대부분의 전산 프로그램에서 채택하고 있는 방법으로서 일명 등가선형해석법 또는 복소수응답 1차원 증폭해석법이라고 불리우는 방법이다.

본 논단에서는 그 해석이론은 이미 잘 알려져 있으므로 상세한 이론에 대한 설명은 피하고 해석이론에 대한 개략적인 설명 및 해석이론의 실제에 대한 문제점을 중점적으로 논의한다.

진동수영역 해석이론(해석법)을 간단히 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- STEP 1: 주어진 지반모델에 대해 각 지층의 지반특성치(단위중량, 전단탄성계수, 점성계수)를 사용하여 진동수응답함수(Frequency Response Function)를 계산한다. 여기서, 토양의 Hysteretic Damping 특성은 Maxwell's Model 또는 Voight's Model을 사용하여 나타낸다.
- STEP 2: 주어진 입력시간이력(가속도이력)을 푸리에 변환시켜 입력지진 시간이력의 진동수 특성치를 계산한다.
- STEP 3: 구한 진동수응답함수와 입력지진의 진동수특성치를 곱하여 각 지층의 전단변형을 시간이력(Shear Strain Time History)을 계산한다.
- STEP 4: 각 지층의 Shear Strain Time History 들로부터 "Factor Method" 또는 "Root Mean Square Method"를 사용하여 각 지층의 유효전단변형률(Effective Shear Strains)을 구한다.(그림 3.1 참조)

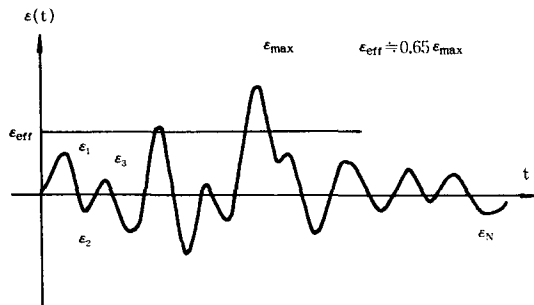


그림 3.1 Effective Shear Strain in Strain Time History

STEP 5: Input Data에서 읽은  $G/G_0-r$  곡선,  $H-r$ ( $H$ : Damping Factor) 곡선으로부터 STEP 4에서 구한 유효전단변형률에 해당하는  $G/G_0$  값과  $H$  값을 읽는다. 여기서 전단탄

성계수와 감쇠계수의 전단변형률에 대한 의존성이 결정된다.

- STEP 6: 새로이 구해진 전단탄성계수와 감쇠계수를 사용하여 STEP 1 및 STEP 3의 과정을 반복한다. 여기서, 최초 STEP 1에서 전단탄성계수와 감쇠계수는 Input Data에서 읽은 초기 전단성계수( $G_0$ )와 재료감쇠계수(통상 0.02)가 사용된다.
- STEP 7: STEP 6에서 새로이 구한 유효전단변형률을 전단계에서 구한 유효전단변형률값과 비교한다. 만약 STEP 6에서 구한 유효전단변형률값이 전체 층에 대해 동시에 전단계에서 구한 변형률값에 수렴(Convergence) 할 경우 Iteration은 중지된다. 여기서, 수렴의 한계는 일반적으로  $\pm 5\%$  이내로 정한다.(그림 3.2 참조)

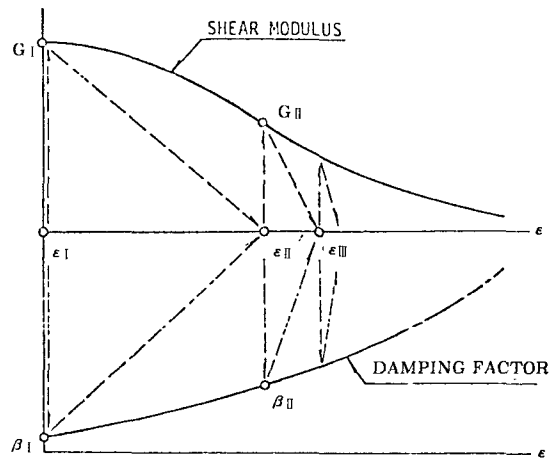


그림 3.2 Iterative Procedure in Equivalent Linear Analysis—Frequency Domain

STEP 8: 수렴할 경우 그 때의 진동수응답함수와 입력지진의 진동수 특성치를 곱하여 Strain Time History 또는 Acceleration Time History를 각 층에 대해 계산하므로써 최종적인

응답을 얻는다.

일반적으로 Iteration 은 4~5 회에서 중지되거나 기고자의 경험에 의하면 Large Strain 이 발생할 경우 수렴이 되지 않는 경우도 발생한다.

#### 문제점

전술한 바와같이 진동수영역 해석법에서 가장 중요하게 논의되어야 할 사항은 유효전단 변형율을 어떻게 실제와 근접하게 정의하느냐 하는 점이다. 이 점에 대해서는 Seed, Idriss, Lysmer 등 여러 사람들에 의해 많은 연구와 논의가 있어 왔다. 현재 대부분의 관련 전산프로그램에서는 Factor Method 의 경우 0.65 를 사용하고 있으며 통상 0.5~0.7 의 값이 추천되고 있다. 그러나 실제 지반의 특성은 매우 다양하며 일률적으로 계수를 정하는 것은 거의 무리에 가깝다고 해도 과언이 아니다. 기고자의 경험에 의하면 일본 신후지 부지의 경우 지반토양의 특성은 화산재가 변성된 토질로서 일반 사질토 또는 점성토의 특성과는 상당히 다른 면을 보여주었으며, 신후지 부지 지반의 경우 계수값은 오히려 0.3~0.4 에 가깝다는 것을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

Root Mean Square (R.M.S) 방법은 현재 관련 전산 프로그램에서는 잘 사용되고 있지 않으나 계수법(Factor Method)과 동등하게 그 신뢰성이 인정되어야 한다고 기고자는 생각한다.

전체 지진지속시간에 걸쳐 가속도 분포가 그다지 심한 변동을 보이지 않을 경우는 R.M.S 법이 계수법보다 오히려 유효하다. 그러나 지진지속시간에 걸쳐 Strong Motion 시간대가 매우 작은 지진동의 경우 R.M.S 법의 사용은 피해야 하며 이 때 계수법으로는 상대적으로 작은 계수값 (<0.65)이 추천된다.

진동수영역 해석법의 경우 유효전단변형율이 갖는 해석결과에 대한 중요성은 매우 깊이있게 인식되어야 하며 이러한 불확실성이 있는 한 해석결과에 대한 신뢰여부는 항상 재고의 필요가 있다.

#### 4. 해석결과의 비교

#### 기록지진 및 지반특성

본 논문에서는 1 장 서론에서 언급한 바와 같이 진동수영역 해석법과 시간영역 해석법으로 구한 결과의 실제와의 일치성 및 상호비교를 위하여 1983년 8월 8일 일본 신후지 변전소에서 관측된 지진 및 지반특성 자료를 사용하였다.

그림 4.1~4.4는 북-남, 동-서의 두 수평방향에서 관측된 기록지진 시간이력들을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 지진계는 지하 28m 지점과 지표에 각각 설치되었다.

지표면에서 관측된 두 수평방향 시간이력의 최대가속도(PGA)는 북-남 방향에서 439 GAL (=0.45g), 동-서방향에서 574 GAL (=0.59g)로 지하 28m 지점에서 관측된 최대가속도와 비교할 때 북-남과 동-서 방향에서 각각 3.5배, 4.3배의 높은 증폭현상을 보이고 있다. 시간이력의 기록시간 간격은 0.01 초이다.

신후지 변전소 부지의 지반단면 및 각 지층의 물성치는 표 4.1에 나타나 있으며, 각 지층에 대해 시험을 통해서 구한 전단탄성계수 및 감쇠계수의 전단변형율에 대한 의존성은 표 4.2에 나타나 있다.

#### 진동수영역 해석결과

본 논단을 위하여 기고자는 진동수영역 1 차원 파전달 해석 전산프로그램인 "QWAVE1"을 작성하였다.

"QWAVE1"은 "FLUSH" 등에서 사용되고 있는 1 차원 파전달 해석방법과 동일한 것으로 해석 결과의 신뢰성에 대한 검증은 본 논문에서는 보이지 않았으나 기완료 되었다.

"QWAVE1"의 입력자료는 표 4.3에 나타나 있으며, 표 4.3에 나타난 바와같이 표 4.1의 각 지층들은 해석을 위해 더 작은 두께의 층으로 세분하였다.

이와같은 지층에 대한 Subdivision 작업은 진동수영역 해석의 경우 필수적인 것이며 잘 알려진 바와 같이 그 이론적 근거는

$$H < \frac{V_s}{4f_{max}} \text{ 이다.}$$

그림 4.5~4.8은 "QWAVE1"으로 구한 부지



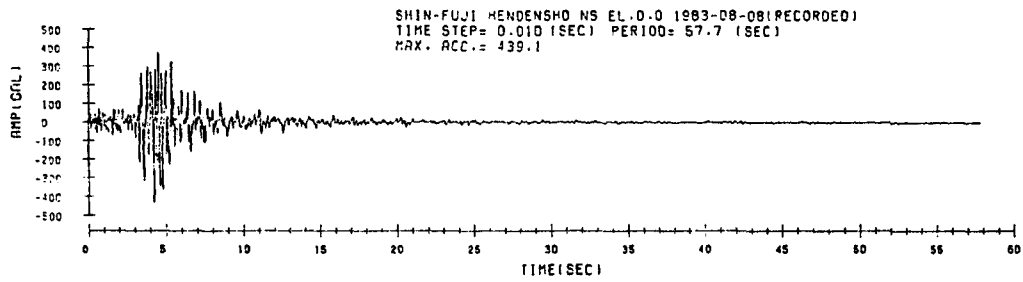


그림 4.1 Observed Earthquake at Ground Surface—N-S Dir., SHIN FUJI Site

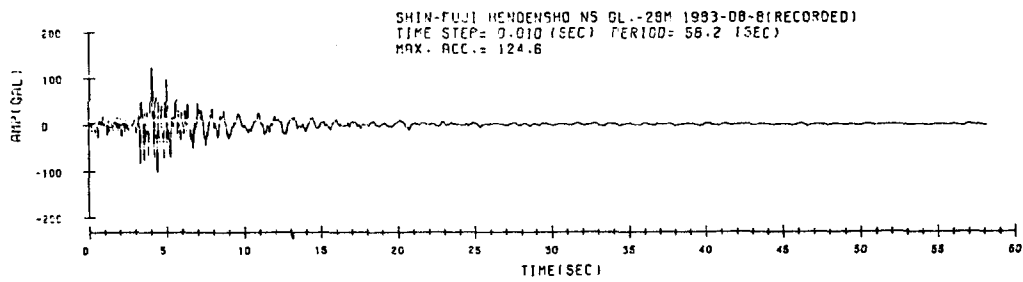


그림 4.2 Observed Earthquake at G.L.-28.0m—N-S Dir. SHIN FUJI Site

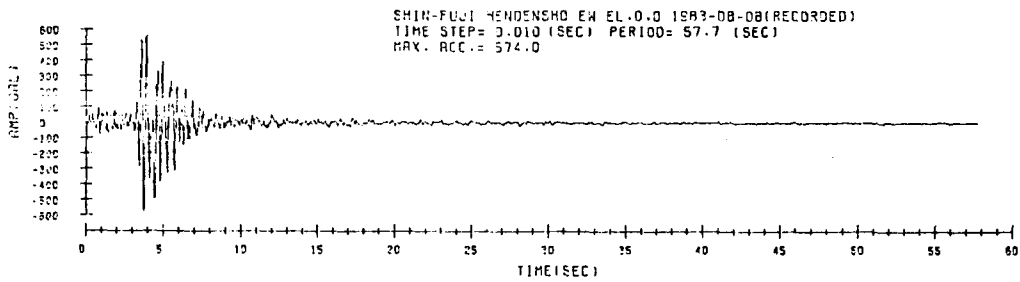


그림 4.3 Observed Earthquake at Ground Surface—E-W Dir., SHIN FUJI Site

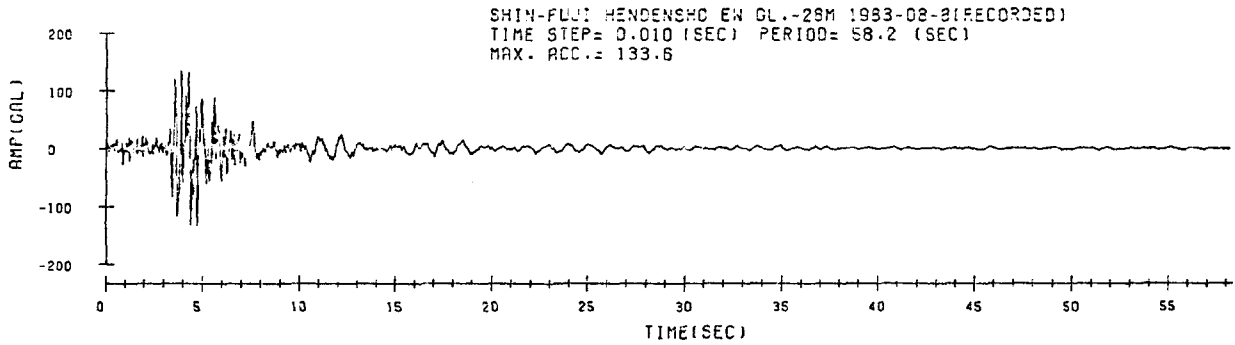


그림 4.4 Observed Earthquake at G.L.-28.0m-E-W Dir., SHIN FUJI Site

표 4.1 Properties of Soil Layers in SHIN-FUJI Site

Layer No	depth(m)	r(t/m <sup>3</sup> )	Vs(m/sec)	Go(t/m <sup>2</sup> )
1	0.0~ -5.0	1.46	125.	2328.
2	-5.0~ -7.0	1.48	130.	2552.
3	-7.0~ -13.2	1.68	252.	10886.
4	-13.2~ -24.0	1.69	425.	31148.
5	-24.0~ -28.0	1.95	780.	121059.
6	-28.0~	1.95	621.	76734.

(Base)

Note:

$$Go = p \times Vs \times Vs$$

$$p = r / g \quad g : \text{gravitational acceleration (m/sec}^2\text{)}$$

지표면에서의 북-남 및 동-서 두 방향의 응답 가속도 시간이력과 Fourier Spectrum 을 관측지진의 그것과 비교한 결과를 보여준다.

“QWAVE1” 해석에서는 다음과 같은 사항들이 고려되었다.

- 1) 그림 4.2와 4.4의 입력시간이력에서 유효지

표 4.3 Subdivided Soil Layers for QWAVE1 Analysis

Layer No	Layer Thk (m)	Go(t/m <sup>2</sup> )	Material No
1	(m)	2328.	1
2	2.5	2328.	1
3	2.5	2552.	2
4	2.0	10886.	3
5	2.0	10886.	3
6	2.1	10886.	3
7	2.1	31148.	4
8	2.0	31148.	4
9	2.2	31148.	4
10	2.2	31148.	4
11	2.2	31148.	4
12	2.2	121059.	5
13	2.0	121059.	5
14	2.0	76734.	6

N/A

속시간이라고 판단되는  $d_{eff}=15\text{sec}$  를 사용하였다.

2) 입력지진에 대한 Baseline Correction 은 수행하지 않았다.

3) 그림 4.6, 4.8의 Fourier Spectra 는 Frequency Window 0.2 Hz 를 적용하여 평활화(

표 4.2 G / Go vs r and H vs r Curves of SHIN-FUJI Soils

STRAIN $\gamma$ (%)	LAYER 1		LAYER 2		LAYER 3		LAYER 4		LAYER 5	
	G / Go	H	G / Go	H	G / Go	H	G / Go	H	G / Go	H
0.0003	1.000	0.065	1.000	0.030	1.000	0.040	1.000	0.040	1.000	0.055
0.0005	1.000	0.065	1.000	0.030	0.990	0.040	0.995	0.040	1.000	0.055
0.0010	0.990	0.065	0.990	0.030	0.970	0.040	0.970	0.040	0.980	0.055
0.0020	0.960	0.065	0.970	0.030	0.930	0.040	0.950	0.040	0.980	0.055
0.0040	0.910	0.065	0.950	0.030	0.860	0.040	0.890	0.040	0.860	0.055
0.0070	0.850	0.065	0.920	0.030	0.790	0.040	0.820	0.045	0.790	0.060
0.0100	0.785	0.065	0.900	0.030	0.745	0.040	0.770	0.050	0.730	0.065
0.0200	0.660	0.070	0.830	0.030	0.640	0.045	0.660	0.060	0.620	0.075
0.0400	0.515	0.080	0.750	0.030	0.520	0.055	0.540	0.080	0.495	0.085
0.0700	0.405	0.090	0.685	0.035	0.420	0.070	0.440	0.100	0.400	0.105
0.1000	0.335	0.100	0.635	0.040	0.360	0.090	0.370	0.110	0.345	0.129
0.2000	0.220	0.125	0.525	0.050	0.250	0.120	0.250	0.140	0.250	0.140
0.4000	0.140	0.145	0.400	0.070	0.170	0.145	0.155	0.165	0.170	0.155
0.7000	0.095	0.160	0.285	0.100	0.125	0.160	0.105	0.180	0.125	0.165
1.0000	0.075	0.165	0.225	0.120	0.100	0.165	0.085	0.190	0.100	0.170
2.0000	0.045	0.170	0.135	0.160	0.060	0.170	0.060	0.195	0.060	0.170

Smoothering)한 것이다.

4) 유효전단변형율의 산정에 있어서 계수법의 경우  $\alpha=0.65$ 를 각 층에 대해 공히 적용하여 구한 결과는 실제 기록지진과 상당한 불일치를 보여주었다. 따라서 기록지진의 특성과 일치시키기 위해 시뮬레이션을 수행하여 기록지진과 유사한 결과를 보여주는 값을 구한 결과 약 0.3이었다.

그림 4.5~4.8의 결과는 계수법 대신 R.M.S 법으로 구한 것이다.

시간영역 해석결과

시간영역 해석에서는 2장에서 언급한 전산 프로그램 "NSRESP"가 사용되었다.

먼저 오사끼-하라의 비선형 모델의 검증을 위해 표 4.2의 Strain Levels과 표 4.1의 각 지층의  $G_0$  값을 사용하여 3가지 경우 즉,  $G_0/S_u=500$ (Case 1) 및  $G_0/S_u=1100$ (Case 2),  $G_0/S_u=400$ (Case 3)에 대해 비선형 모델로서 구한  $G/G_0$  값과 표 4.2의 시험치를 비교하였다. 식 (2.1)에서 주어진 Strain 및  $G_0/S_u$  관계로부터

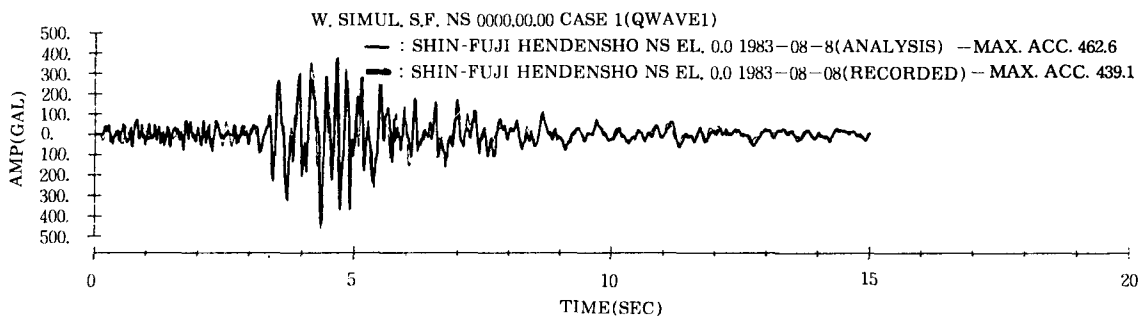


그림 4.5 Comparison of Observed and Calculated Time Histories of North-South G.L. (by QWAVE1)

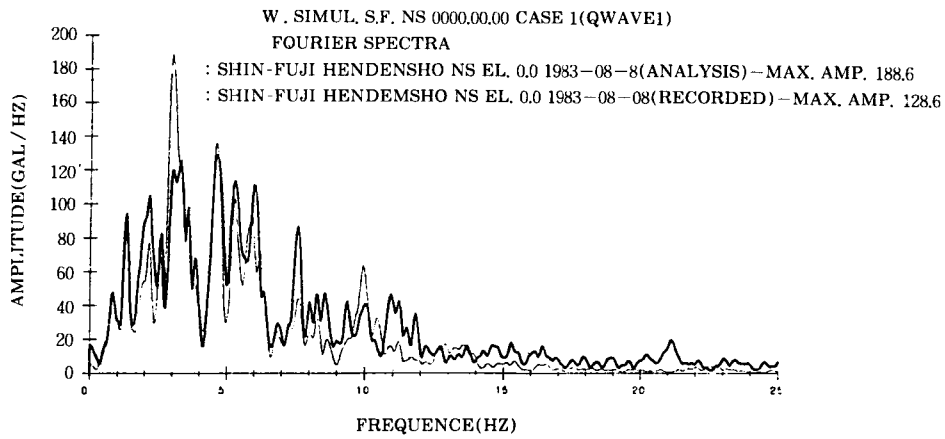


그림 4.6 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.)  
of North-South G.L. (by QWAVE 1)

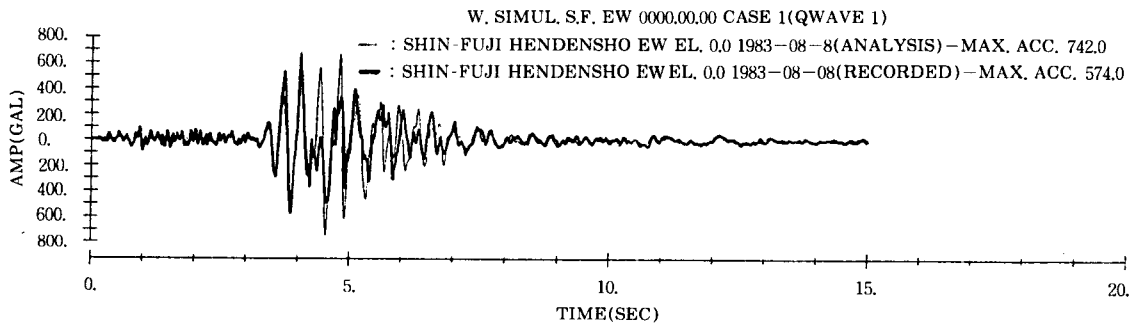


그림 4.7 Comparison of Observed and Calculated Time Histories  
of East-West G.L. (by QWAVE 1)

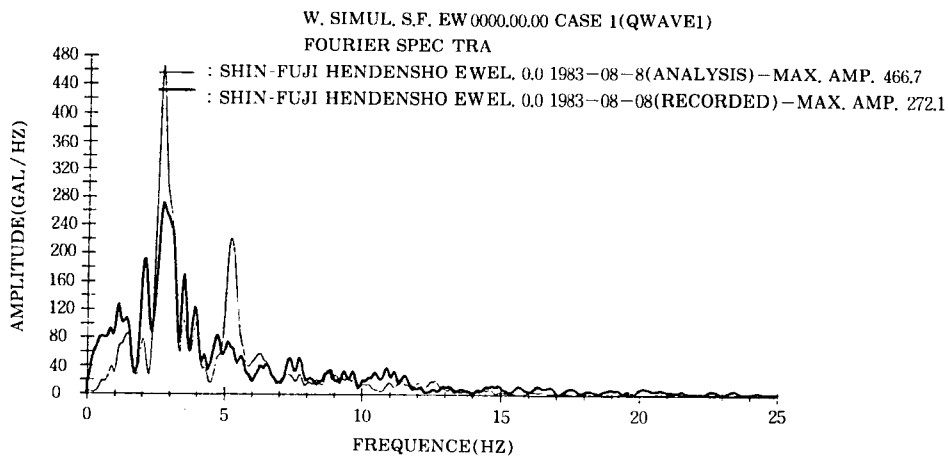


그림 4.8 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.)  
of East-West G.L. (by QWAVE 1)

전단응력  $\tau$ 는 수치반복법을 사용하여 구할 수 있다.

그림 4.9~4.11은 Newton-Raphson의 Iteration Scheme을 사용하여 구한  $G/Go$  값과 시험치를 상기한 3 경우에 대해 비교 도시한 결과를 보여준다.

이 결과로부터 Case I의  $Go/Su=500$ 이 가장 실제와 근접한 경우로 나타났으므로 "NSRESP"에 의한 시간영역 해석에서는  $Go/Su=500$ (Case I)과 이와 유사한  $Go/Su=600$ (Case II)의 값을 사용하였다.

Case I와 II의 두 경우에 대해 시간영역 해석법으로 구한 결과는 그림 4.12~4.32에 나타나 있다.

"NSRESP" 해석에서는 다음과 같은 사항들이 고려되었다.

1) 입력시간이력의 시간증분( $\Delta t$ )은 해석오차 및 응답시간이력의 수렴의 문제와 밀접한 연관성을 가지므로 충분히 작아야 한다. 해석시에는 기록지진의 시간증분 0.01sec의 1/4 값을 사용하여 선형보간 하였다. 시간증분  $\Delta t$ 에 관한 사항은 본 논단의 결론에서 언급한다.

2) 입력시간이력에 포함된 고진동수특성은 통상적인 토양지반의 동적특성을 고려할 때 이론적으로는 무의미하다. 그러나 해석적으로는 이러한 고진동수특성이 직접적분법에 의해 지반응답을 계산하는 시간영역 해석에서 예기치 않은 응답을 초래시키게 된다. 따라서 본 해석에서는 25Hz의 Frequency Filter를 입력시간이력과 응답시간이력에 공통적으로 사용하였다.

3) 기타의 사항은 "QWAVE1" 해석에서 고려한 것과 동일하다.

참고로, 그림 4.20~4.32은 각 지층의 Stress-Strain 곡선을 보여주고 있으며 이들로부터 각 지층의 동적 비선형특성을 알 수 있다.

해석결과에 대한 논의 및 OHSAKI-HARA 모델의 보와

전술한 "QWAVE1" 및 "NSRESP"의 해석결과는 그림에서 알 수 있듯이 실제 관측지진의 특성과 상당히 잘 일치하고 있으며 특히 시간이

력의 경우 0~4sec 및 7sec 이상의 시간대에서 거의 완벽한 일치를 보여준다. 그러나 동·서 방향의 응답시간이력의 경우 특히 4.5sec~6sec 사이의 시간대는 심한 Peak 값의 차이가 나타나고 있다. 참고문헌 3)의 보고서에서는 이와 연관된 보고내용이 나타나 있으며, 그 원인이 지진계의 Automatic Gain Control 회로가 고증폭 신호들을 감지하지 못하였기 때문에 결과적으로 증폭기(Amplifier)의 Saturation 현상이 발생하였기 때문이라고 설명하고 있다. 한편, 오사끼-하라의 비선형모델이 천차만별의 특성을 갖는 각종 토양에 모두 개연성을 갖는가라는 데는 많은 의문이 있다. 그림 4.9~4.11에 보여진 바와 같이 시험자료와 모델과는 많은 차이가 있는 점이 그 의문에 대한 하나의 답이 될 수 있다. 따라서 기고자는 시험자료의  $G/Go$  값에 대해 최소자승법으로 식 (2.1)의  $Su$ ,  $b$  값을 구하는 Subroutine "OHCRVF"를 시험하였다. 여기서 상수  $a$ 는 오사끼-하라가 정의한  $a=Go/Su \times 0.01 - 1.0$ 의 관계를 그대로 사용하였다. 그림 4.33과 표 4.4는 "OHCRVF"로 구해진 Curve Fitting 결과를 보여준다.

그림에서 나타난 바와같이 최소자승법으로 구한  $Su$ ,  $b$  및  $a$ 에 의한  $G/Go$ - $r$  곡선의 일치성은 매우 양호하나 반면, 식 (2.4)로 정의되는 감쇠계수( $\beta=H$ )와 전단변형율( $r$ ) 곡선은 여전히 많은 차이를 보이고 있다.

오사끼 하라의 비선형모델은 "OHCRVF"의 방법과 유사하게 개선·보완되어야 하며 이러한 문제는 Parametric Study를 통해서 해결되어야 한다.

## 5. 결 론

4장에서 언급한 신후지 변전소부지의 관측지진에 대한 지진파 시뮬레이션을 통해 기고자는 다음과 같이 진동수영역 해석법과 시간영역 해석법의 관련 특성 및 몇가지 중요한 해석시의 주의사항을 논의한다.

\*\*\* G/G<sub>0</sub> CURVE COMPARISON (CASE 1) \*\*\*

(G<sub>0</sub> = 500 Su)

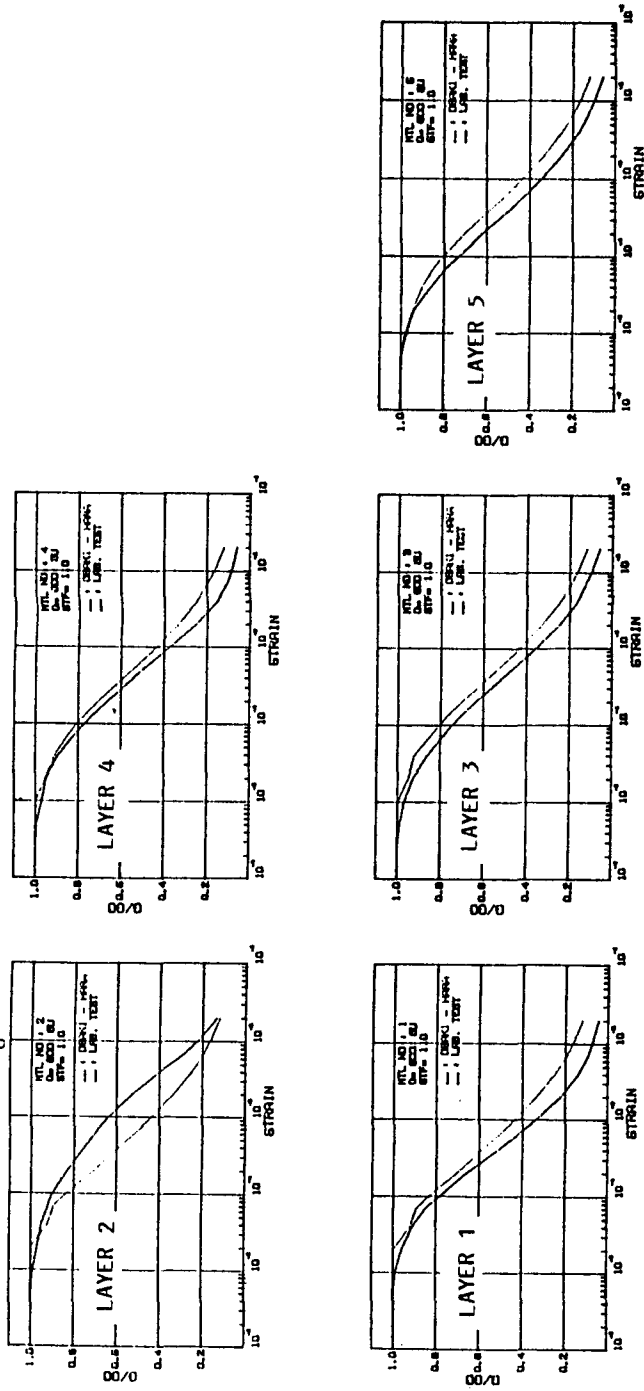


그림 4.9 G / G<sub>0</sub> vs  $\gamma$  Curve Fitting Results for SHIN-FUJI Soils by OHSAKI-HARA's Nonlinear Model - Case 1 (G<sub>0</sub>=500Su)

圖 4.10 G/Go vs r CURVE COMPARISON (CASE 2) 續前

( $G_0 = 1100 \text{ Su}$ )

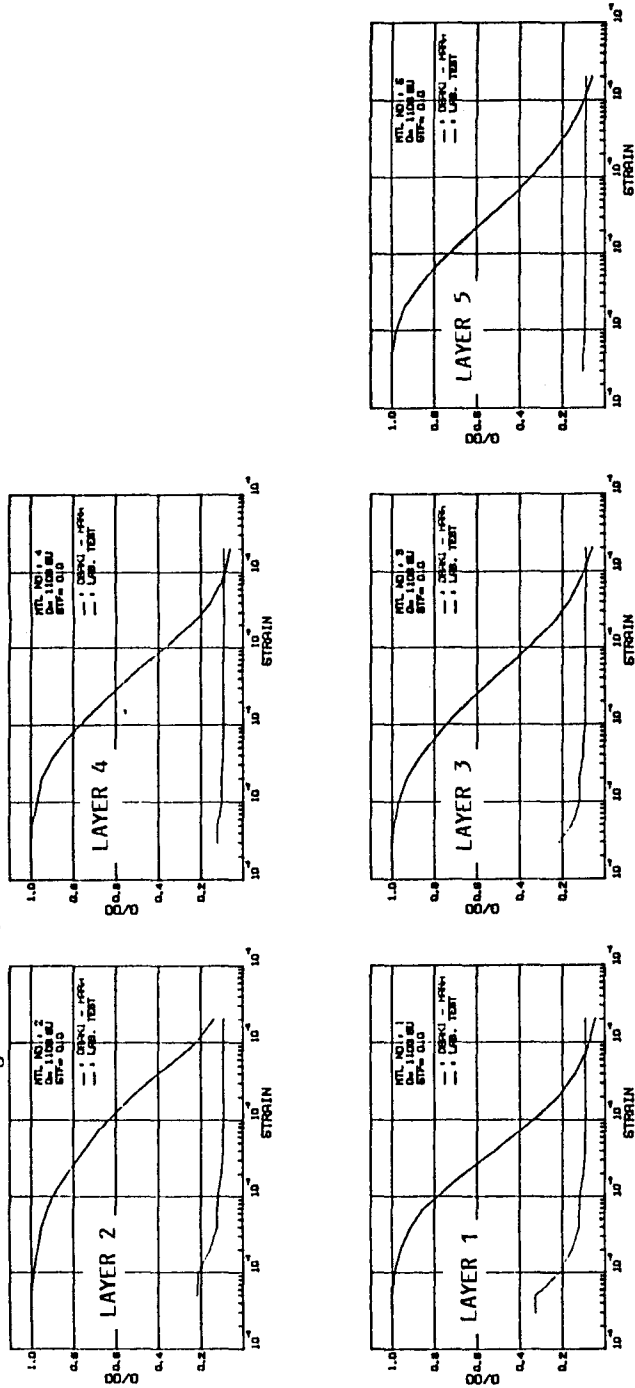


그림 4.10  $G/G_0$  vs  $r$  Curve Fitting Results for SHIN-FUJI Soils by OHSAKI-HARA's Nonlinear Model - Case 2 ( $G_0 = 1100 \text{ Su}$ )

圖 4.11 G/Go 曲線比較 (CASE 3) 續

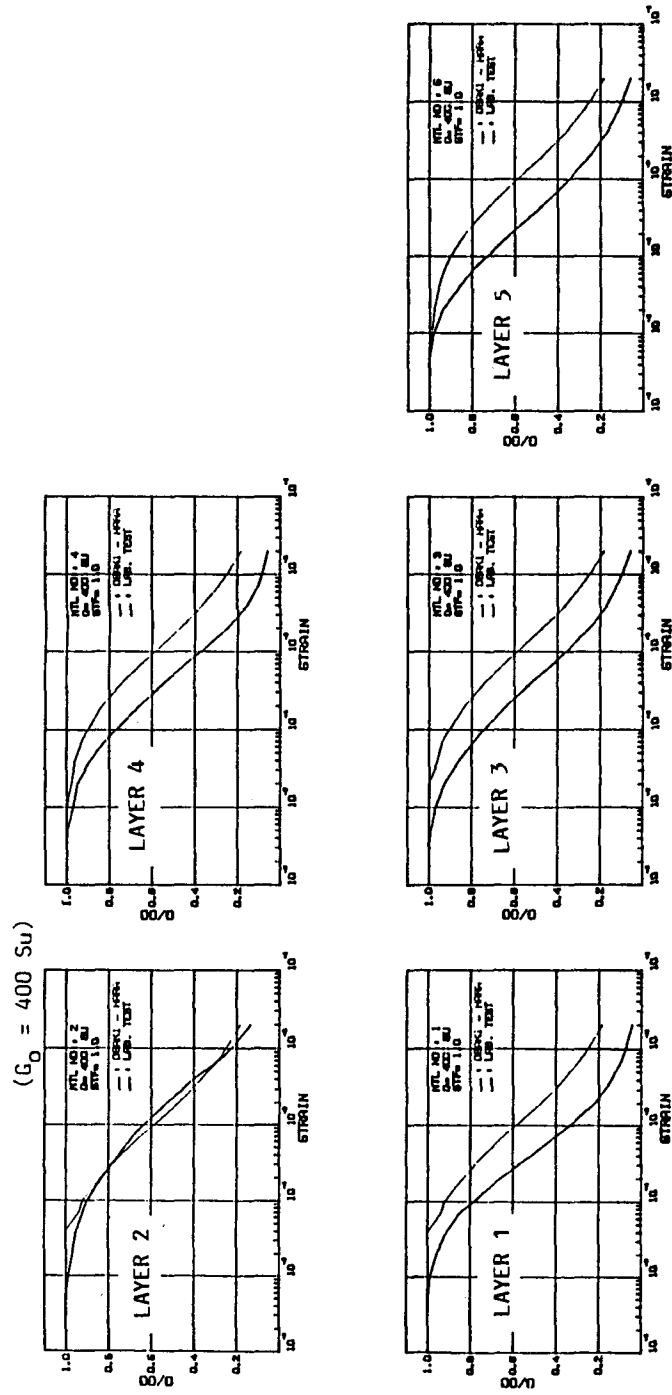


그림 4.11 G / Go vs r Curve Fitting Results for SHIN-FUJI Soils by OHSAKI-HARA's Nonlinear Model - Case 3 ( $G_0=400S_u$ )



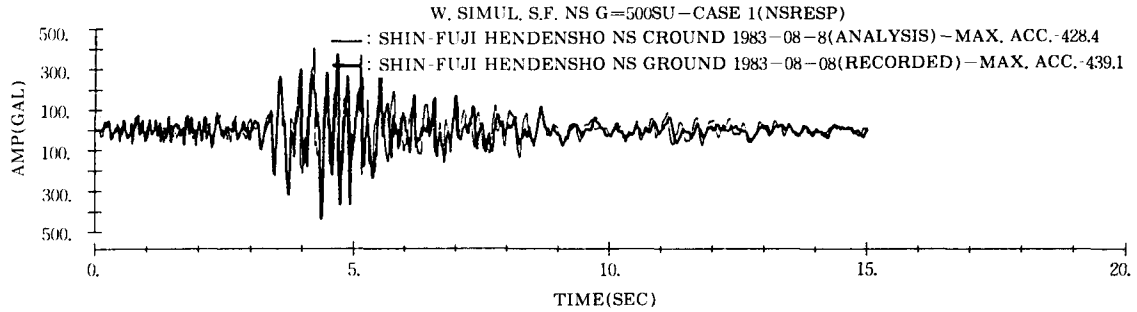


그림 4.12 Comparison of Observed and Calculated Time Histories of North-South G.L.—Case I (by NSRESP)

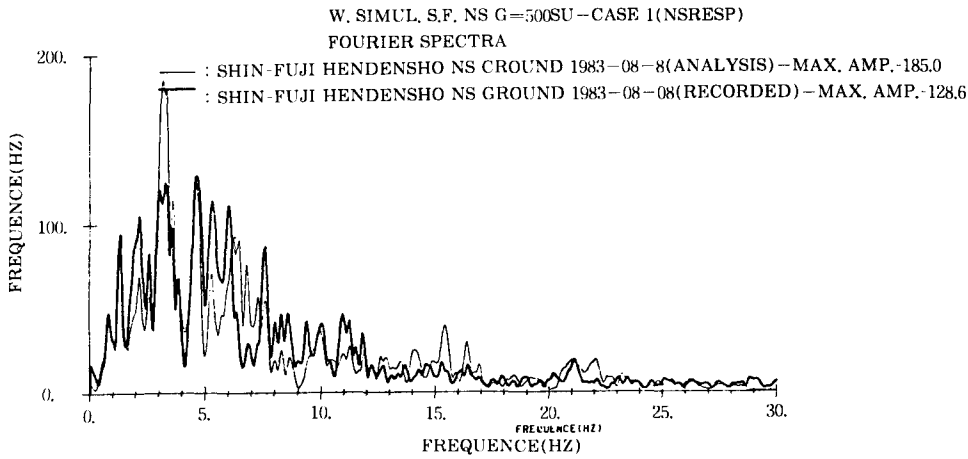


그림 4.13 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.) of North-South G.L.—Case I (by NSRESP)

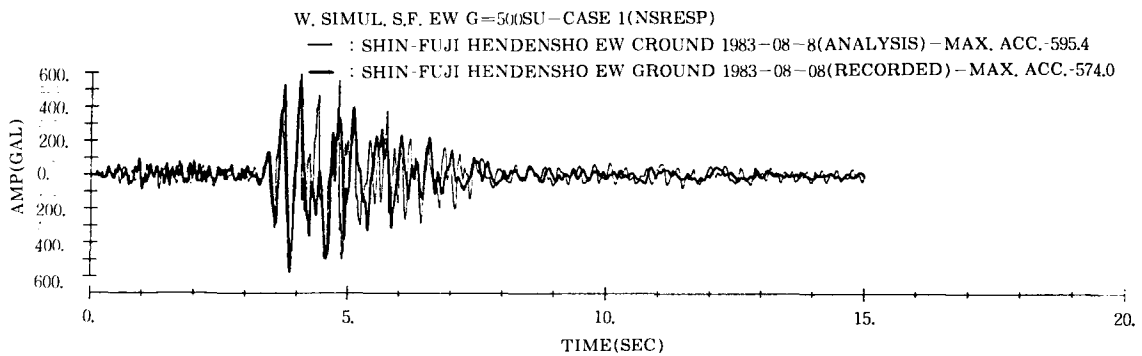


그림 4.14 Comparison of Observed and Calculated Time Histories of East-West G.L.—Case I (by NSRESP)

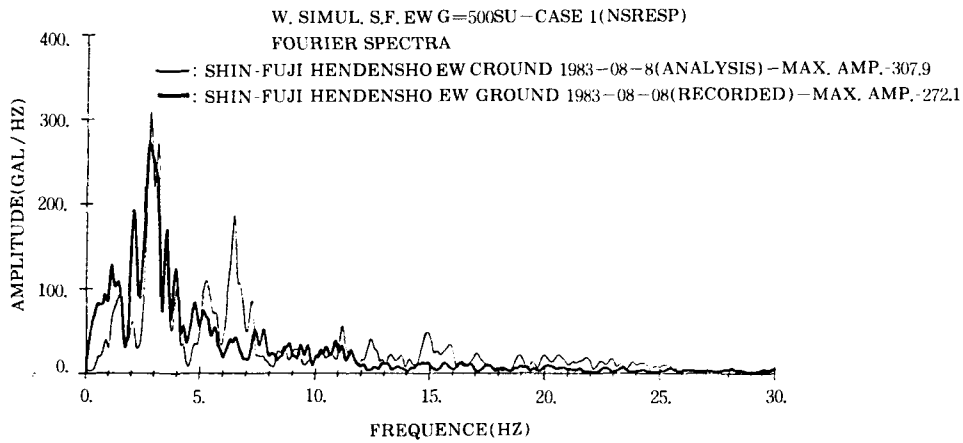


그림 4.15 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.)  
of East-West G.L.-Case I (by NSRESP)

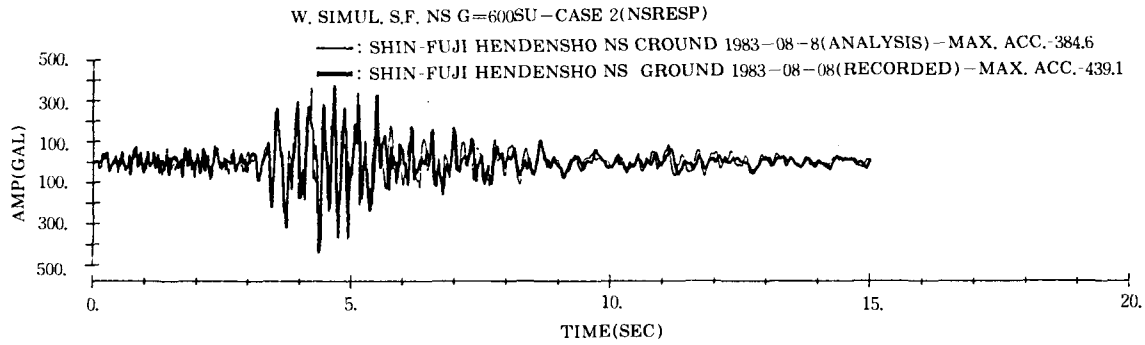


그림 4.16 Comparison of Observed and Calculated Time Histories  
of North-South G.L.-Case II (by NSRESP)

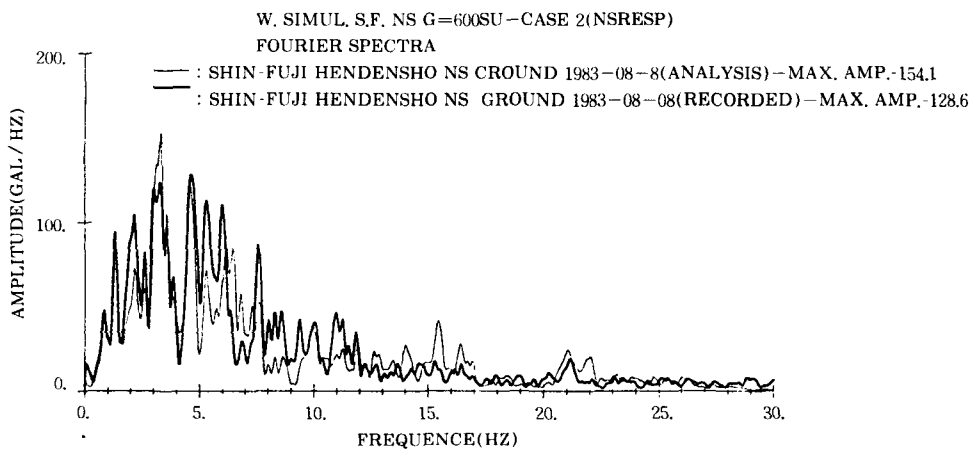


그림 4.17 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.)  
of North-South G.L.-Case II (by NSRESP)

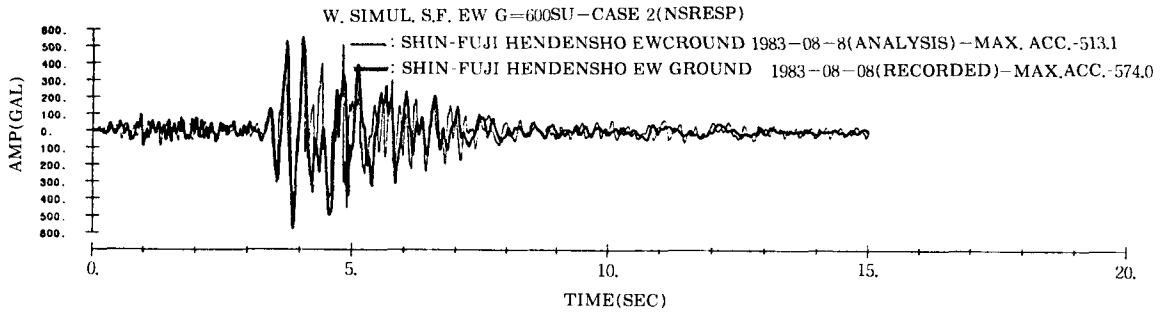


그림 4.18 Comparison of Observed and Calculated Time Histories of East-West G.L. - Case II (by NSRESP)

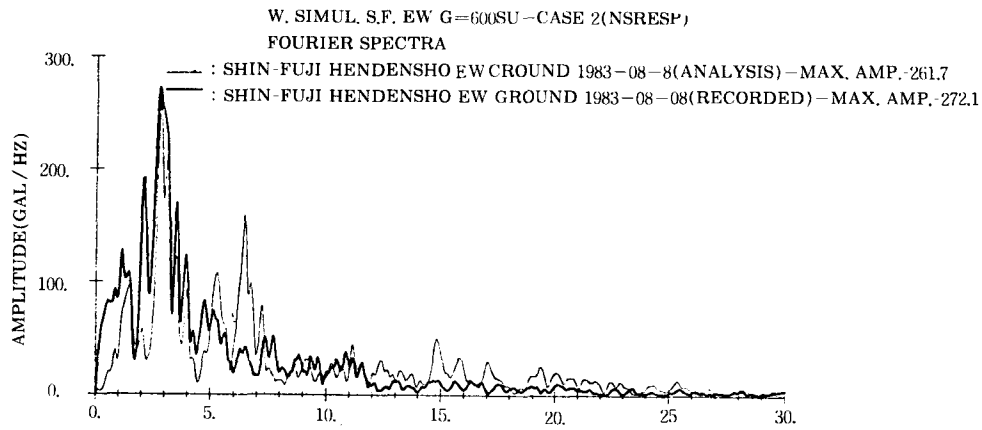


그림 4.19 Comparison of Fourier Spectra (of observed & calculated T.H.) of East-West G.L. - Case II

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

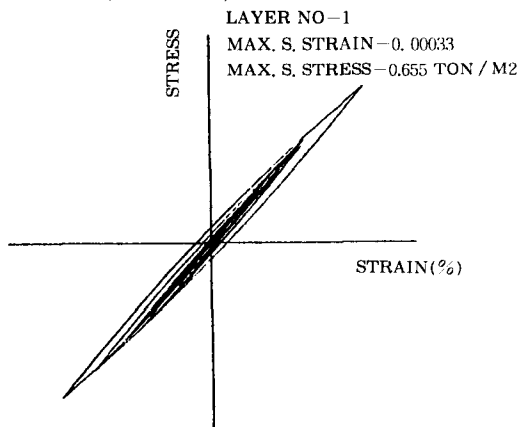


그림 4.20 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 1 - Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

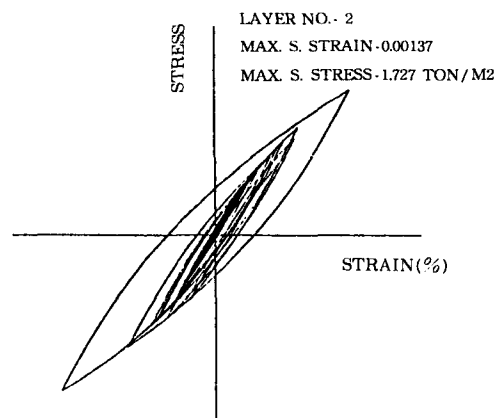


그림 4.21 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 2 - Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL,-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

LAYER NO.-3  
 MAX. S. STRAIN-0.00218  
 MAX. S. STRESS-2.467 TON / M2

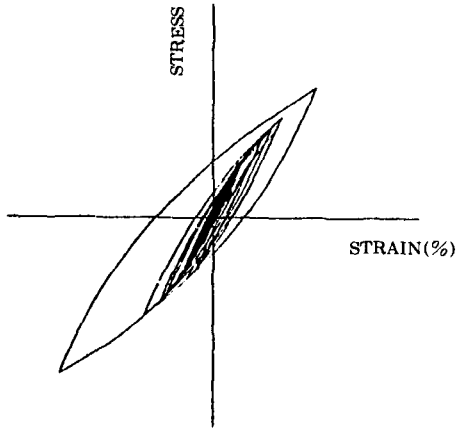


그림 4.22 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 3-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL,-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

LAYER NO.-4  
 MAX. S. STRAIN-0.00031  
 MAX. S. STRESS-2.904 TON / M2

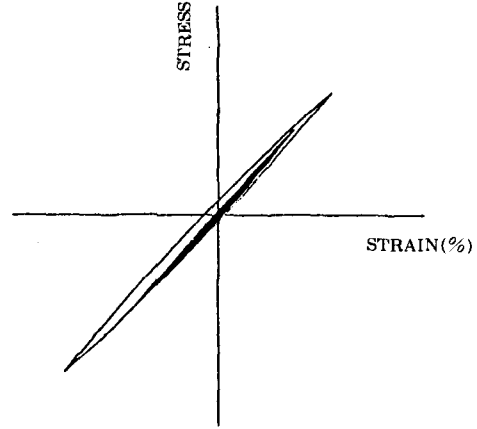


그림 4.23 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 4-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL,-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

LAYER NO.-5  
 MAX. S. STRAIN-0.00038  
 MAX. S. STRESS-3.404 TON / M2<sup>1</sup>

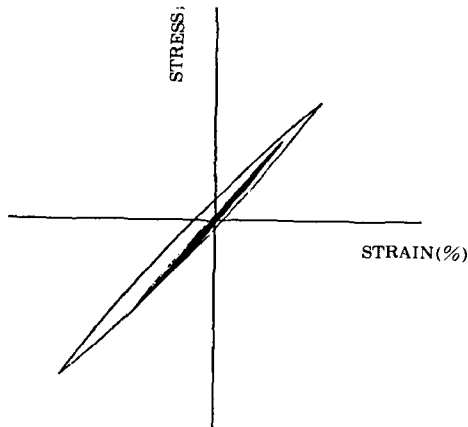


그림 4.24 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 5-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL,-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

LAYER NO.-6  
 MAX. S. STRAIN-0.00044  
 MAX. S. STRESS-3.805 TON / M2

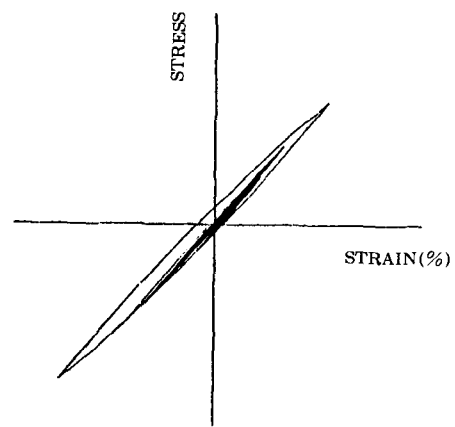


그림 4.25 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 6-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

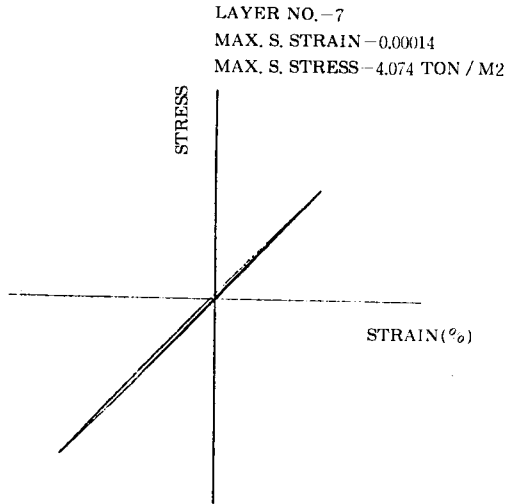


그림 4.26 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 7-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

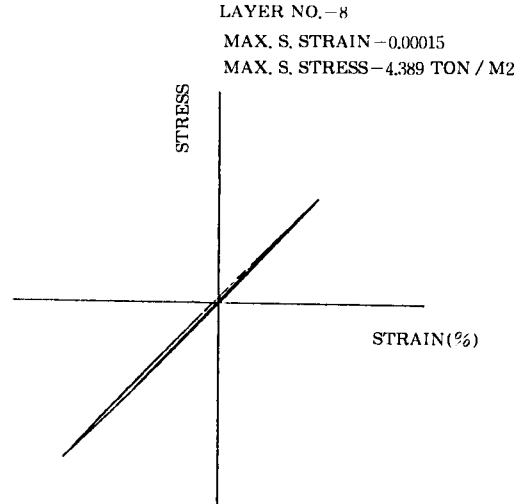


그림 4.27 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 8-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

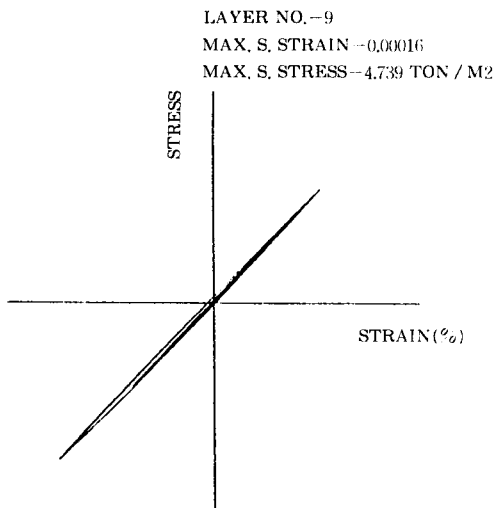


그림 4.28 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 9-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

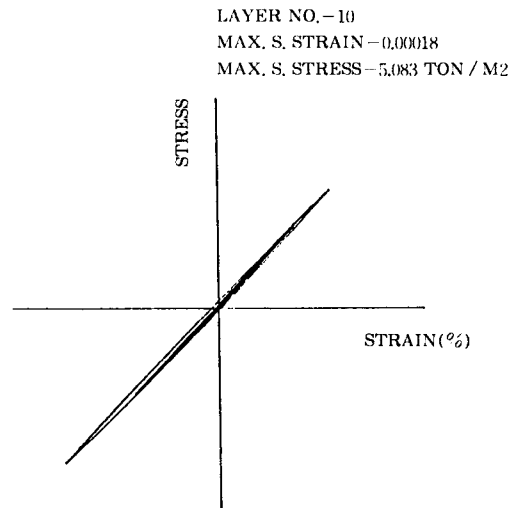


그림 4.29 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 10-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

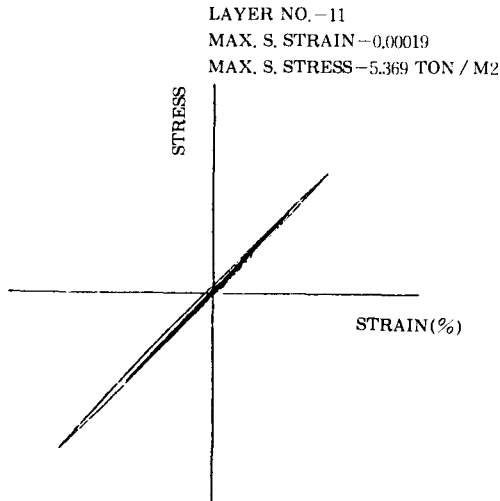


그림 4.30 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 11-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

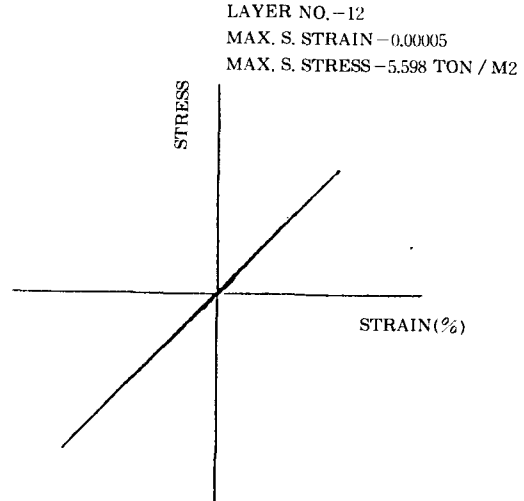


그림 4.31 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 12-Case I (by NSRESP)

W. SIMUL. S.F. NS G=500SU-CASE 1(NSRESP)  
 STRAIN-STRESS CURVE  
 I.D : SHIN-FUJI HENDENSHO NS GL.-28M  
 1983-08-8(RECORDED)

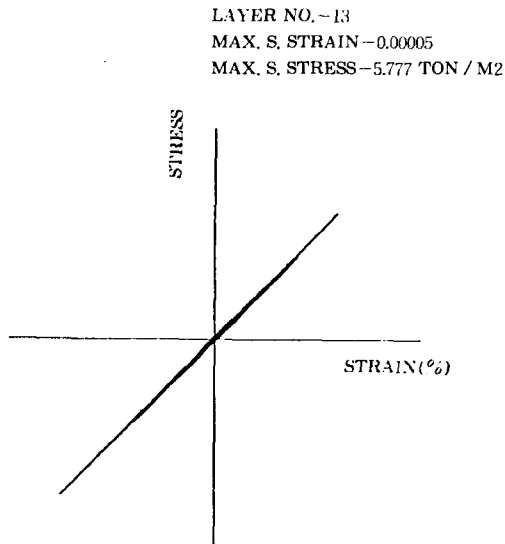


그림 4.32 Calculated Stress vs Strain Curve of Layer No 13-Case I (by NSRESP)

가. 시간영역 해석법은 사용하는 토양의 비선형 모델이 충분한 실제적 타당성과 보편성을 가질 경우 진동수영역 해석법에 비해 불확실성이 감소 되고 결과에 대한 신뢰성 보장이 가능하다.

토양의 비선형 모델에 있어서, 오사끼-하라의 모델은 충분한 시험에 의해 그 신뢰성이 보장된다고 하나  $S_u$ ,  $a$ ,  $b$  계수를 오사끼-하라가 제시하는 방법에 따라 정하는 것은 상당히 무리이다. 따라서 이는 실제 시험결과( $G/G_0$ - $r$  곡선,  $H-r$  곡선)에 근거하여 각각의 토질의 특성에 맞는  $S_u$ ,  $a$ ,  $b$  계수를 해석에 앞서 구해야 한다.

나. 시간영역 해석법에 있어서 입력지진의 시간증분( $\Delta t$ )과 고려할 최대 진동수( $f_{max}$ )는 해석결과의 오차 및 수렴에 직접적인 영향을 미친다.

$\Delta t$ 는 이론적으로 푸리에 변환에서  $\Delta t = \frac{1}{2f_{max}}$ 의 관계만 만족시키면 되나 시간영역 해석의 경우 직접적분법에 의해 응답을 계산하는 과정에서 상당한 고진동수 특성이 포함될 수 있으므로

Ⅲ 4.4 G / Go vs r Curve Fitting Results  
Subroutine OHCRVF

Layer No	Go (t/m <sup>2</sup> )	Su (t/m <sup>2</sup> )	a*	b	Go/Su	Go/Su by Ohsaki-Hara
1	2328	2.0	10.64	1.6	1164	Clay: 600 Sand: 1100
2	2552	6.4	2.987	1.1	399	
3	10886	12.4	7.779	1.18	878	
4	31148	32.6	8.555	1.36	955	
5	121059	132.6	8.130	1.18	913	

\*: a = Go / Su × 0.01 - 1.0

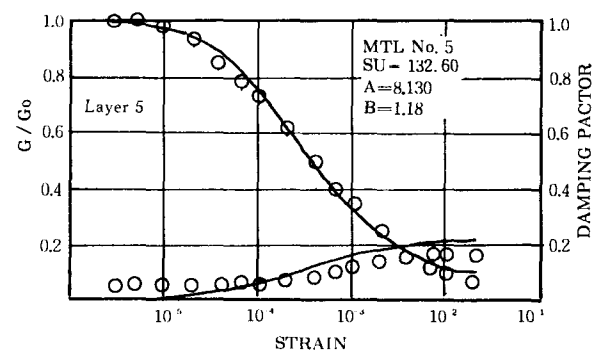
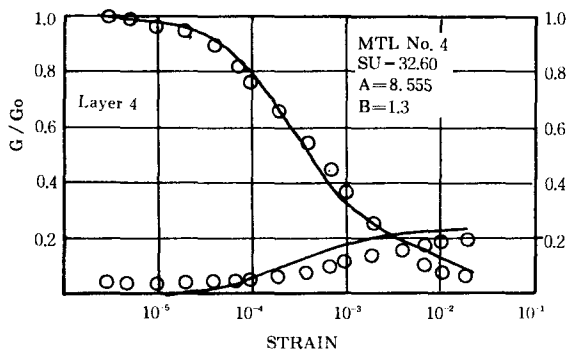
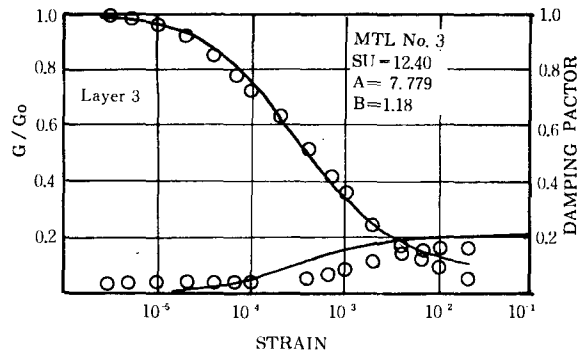
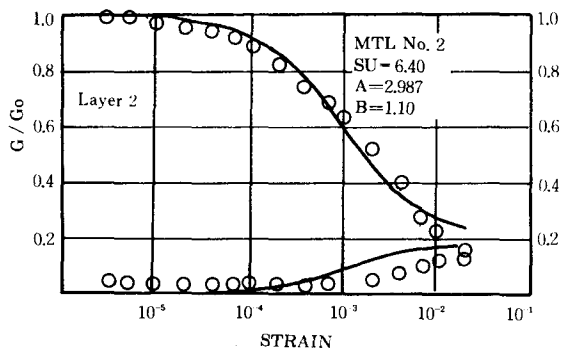
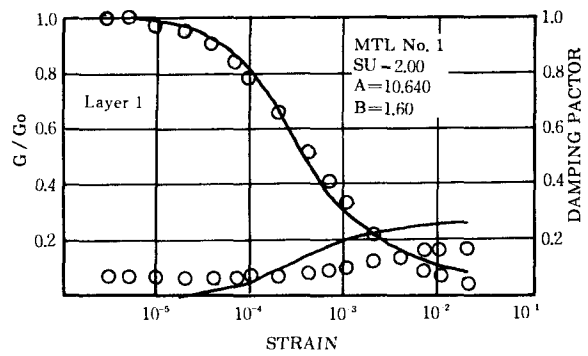


그림 4.33 G / Go vs r Curves Fitting Results for SHIN-FUJI Soils

상기한 관계를 적용할 수 없다. 따라서 충분히 작은  $\Delta t$ 를 해석에 사용해야 하며  $\Delta t = \frac{1}{10f_{max}}$ 로 정할 경우 문제는 없다.

토양의 경우 고려할 최대진동수  $f_{max}$ 는 일반적으로 15 Hz 근처의 범위로 정하며 이는 일반 토양의 경우 지반의 첫번째 고유진동수의 약 4배값에 해당되는 값이다.

그러나 지반모델의 다양한 진동수 특성을 고려하여  $f_{max}$ 를 20 Hz 정도로 정하는 것이 안전하다.

입력지진은 해석시  $f_{max}$  사용하여 High Frequency Filtering을 행하여야 하며 해석하기에 앞서 입력지진의 진동수 특성을 조사하는 작업이 필요하다.

결과인 응답지진의 경우도 직접적분법에 의해 응답을 계산하는 과정에서 고진동수특성이 포함될 수 있으므로 Filtering 작업을 수행하는 것이 바람직하다.

다. 진동수영역 해석법은 3장에서 언급한 바와 같이 유효전단변형율을 정하는 방법이 가장 중요한 문제이다.

특성이 상이한 지층들로 구성된, "Multi-Layered Soil Deposits"의 경우 계수법(Factor Method)을 적용하여 각 지층에 대해 동일한 계수를 사용하는 기존의 방법은 상당한 문제점을 가진다. 따라서 이러한 경우 R.M.S법을 적용하여 유효전단변형율을 구하는 것이 오히려 합리적인 방법이 된다. 그러나 이 R.M.S법에서도

Strain Time History 내의 Local Strain Maxima를 모두 고려해야 하는가에 대한 점은 여전히 문제가 된다.

라. 결론적으로 본 논단을 통하여 기고자는 진동수영역 해석법과 병행하여 자유장해석에서의 시간영역 해석법 사용을 추천한다. 물론 이 방법의 실제에서의 적용은 더 많은 연구와 Case Study를 거쳐 결정되어야 할 것이다.

## 6. 참 고 문 헌

- 1) Y. Ohsaki : Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits, Research Report 82-02, Tokyo Univ.
- 2) Y. Ohsaki : Dynamic Characteristics and One-Dimensional Linear Amplification Theories of Soil Deposits, Research Report 82-01, Tokyo Univ.
- 3) 東電設計(株) : 新富士 變電所 基礎地盤における地震派動 傳播特性 調査報告書 昭和 60年 2月, 東京, 日本
- 4) Wilson, E. L., Farhoomand, I. & Bathe, K. J.: Nonlinear Dynamic Analysis of Complex Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, 1973.
- 5) Hardin B. O. & Drnevich V. P. (1970) : Shear Modulus and Damping in Soils, Tech. Report UKY 27-70-CE3, Soil Mech. Series No. 2, Dept. of Civil Eng., Univ. of California.
- 6) Ohsaki, Y., Hara, A. & Kiyota, Y.: Stress-Strain Model of Soils for Seismic Analysis, Proc. 5th Japan Earthquake Engineering Symposium-Nov., 1978.