

V-1. 지반-구조물의 동적 상호작용 해석법

1. 서론

근래 들어 우리 나라를 포함하여 전세계적으로 빈발하는 지진 등으로 인해 지반과 구조체의 동적 메케니즘에 관심이 높아지면서 이 분야에의 여러 이론의 개발 및 재해석과 평가가 이루어지고 있으며, 또한, 실무에서는 이와 같은 영향을 받아 해석 퓌키지들이 정력적으로 개발되어지고 있다. 동시에 지금까지 사용해 온 여러 해석 퓌키지들의 적용 방법과 적용한계, 바른 사용방법 및 효율적으로 보다 실제 현상에 가깝게 표현하려고 하는 경향이 높아져 가는 추세를 부인할 수 없다. 그리고, 일반인은 물론 이 분야의 전문인조차 동적해석에 대해 추상적으로 받아들이는 부분이 많은 것 또한 사실이다. 즉, 동적해석의 텍스트에서 흔히 볼 수 있는 그 많은 복잡한 이론을 어떻게 실무에 도입해야 하는지, 혹은 지반 조건과 구조체의 중요도 혹은 조건에 따라 어떤 해석 모델을 사용해야 하는지, 일반적으로 동적해석은 비용과 시간이 많이 요구된다고 하는데 정적해석과 같은 방법으로서 동적해석과 같은 성과를 획득할 수는 없는지 등에 대해 의문을 가지고 있는 것이 일반적이라고 여겨진다.

따라서, 본 강좌에서 지난 2년간에 걸쳐 우리 나라에서 실제로 수행되어진 일련의 해석 예를 인용하여 실무에서 지반과 구조물의 동적 상호 작용을 취급 할 때에 요구되어지는 현상을 표현하고자 했다.

2. 간단한 이론

지진동특성은 그 지진자체가 발생하는 기구나 그 전달경로 및 지표면 부근에서의 지형, 지반 등의 국지적인 조건에 의해 강한 영향을 받는다. 이 지진동특성의 차이는 그것을 받아서 생기는 건물의 피해에도 다양한 양상을 초래한다. 이 때문에 각종 요인이 지진동특성에 미치는 영향을 정량적으로 해명하고, 합리적인 지진하중의 설정이 가능하다면 구조물의 보다 합리적인 내진화가 가능하게 된다. 일반적으로 지진발생 이래 구조물이 지진에 의하여 거동하기까지의 과정을 고려하여, 구조물 정상부에서의 응답량을 주파수영역으로 표시하면, 그 응답량 $R(j\omega)$ 은 $R(j\omega) = E(j\omega) \cdot W(j\omega) \cdot X_G(j\omega) \cdot X_{BG}(j\omega) \cdot X_B(j\omega)$ 이고, 여기서 $E(j\omega)$ 는 진원특성, $W(j\omega)$ 는 전파 경로의 전달특성, $X_G(j\omega)$ 는 지반의 진동특성, $X_{BG}(j\omega)$ 는 지반-구조물 상호작용 특성, $X_B(j\omega)$ 는 구조물의 진동특성, $(j\omega)$ 는 실수-허수부 표시이다. 이 지진동의 전파과정을 그림1에 나타내고 있다.

*1 정희원, 경주대학교 건설환경시스템공학부, 조교수

*2 정희원, 한국수자원공사 수자원연구소, 선임연구원

*3 정희원, 경남대학교 토목공학과, 박사과정

*4 비희원, 일본사토공업주식회사 중앙기술연구소 토목연구부

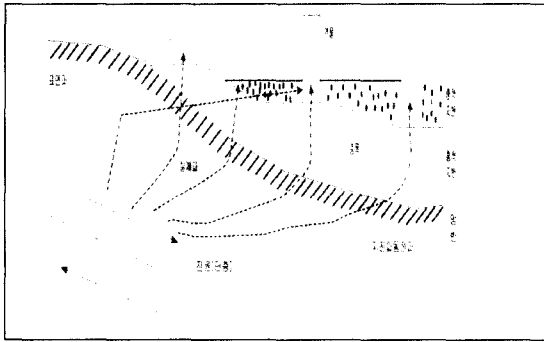


그림 1. 파동전달과정의 개념

2.1 동적 상호작용의 특징

지반 위 또는 지중에 구조물이 존재할 때, 지진시에 구조물과 지반의 접촉면에 있어서의 힘의 평형 및 변위의 적합 조건에 따라 구조물과 지반은 상호 영향을 미친다. 즉, 지반이 구조물에 대하여 영향을 미치는 것 이외에, 구조물도 지반에 대하여 작용을 미친다. 그 결과, 구조물과의 접촉면 및 그 근처 지반의 움직임은, 구조물이 존재하지 않는 경우와는 달라, 구조물의 움직임도 이것을 고려하지 않는 경우와는 다른 현상으로 나타난다. 이와 같은 현상을 구조물과 지반의 동적 상호작용이라고 한다. 이들 상호작용에는 다음의 2 가지가 있다.

- ① 구조물의 관성력에 의해 지반에 변형률을 발생시키는 경우(관성효과 : Inertia Interaction).
- ② 구조물의 강성에 의해 지반의 변형률을 구속시키는 경우(기하학적인 구속효과 : Kinetic Interaction).

위의 2 가지의 어느 경우에 있어서도, 지반에서 구조물에 입사한 진동에너지의 일부 또는 전부가 지반에 반사되는 것으로 흔히들 이해되어진다. 즉, 동적 상호작용이라고 하는 것은 지반과 구조물의 상호간에 에너지를 주고 받는 것에 지나지 않는 것이라고 할 수 있다.

2.1.1 고유주기의 지연

동적상호작용에 의해 구조물기초의 지지조건은 스

프링으로 지지된 상태이기 때문에, 구조물의 고유주기는 기초고정의 경우(지반의 영향을 무시한 경우)보다도 길게 되어진다. 이 비율은 동적 상호작용에 의한 진동모드의 변화와 밀접한 관련이 있다.

기초고정시의 구조물의 고유주기를 T_B , 구조물 정상부의 수평변위에 차지하는 상호작용효과 (sway-rocking 현상)의 구조물정상부에 수평변위에 차지하는 비율을 X_{BG} 라 하면, 동적 상호작용을 고려한 구조물상의 주기 T 는 식(1)로 된다.

$$T = \frac{1}{\sqrt{1-X_{BG}}} T_B \quad (1)$$

2.1.2 진동모드의 변화

동적 상호작용에 의해 구조물 기초에 변위가 생기는 것에 의하여 진동 모드가 변화한다. 구조물 기초의 변위성분은 수평 움직임(스웨이)과 수평축 주위의 회전 움직임(록킹)이 있다. 일반적으로 구조물 천단부의 수평변위에 차지하는 스웨이의 비율을 스웨이 비율이라 하고, 록킹에 의해 수평변위가 차지하는 비율을 록킹 비율 이라고 하여 동적 상호작용의 정도를 나타내고 있다(그림2 참조).

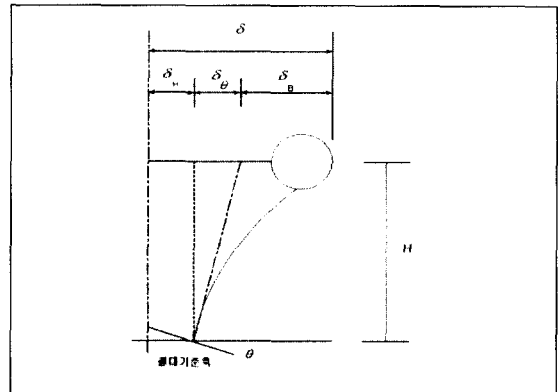


그림 2. 스웨이, 록킹과 그 개념도

여기서 δ : 구조물의 전 수평변위, δ_r : 록킹에 의한 수평변위, δ_s : 구조물의 변형, δ_H : 스웨이 변위, H : 구조물의 높이, θ : 구조물 기초부에서의 회전각이다.

2.1.3 감쇠의 증대

지진시에 구조물을 지지하고 있는 지반이 구조물로부터 전달되는 힘에 의해 변형하는 현상은 구조물이 지반에 대해 발생하는 일(에너지소비)로 이해된다. 이와 같은 에너지소비(일산)는 구조물의 진동을 감쇠시키는 효과(일산감쇠)를 가져 지반이 연약할수록 그 효과는 크다고 할 수 있다.

2.1.4 동적입력레벨의 변화

구조물 진동의 영향을 받아서 구조물을 지지하고 있는 지반이 변형되기 때문에 그 지반의 움직임은 구조물이 없는 자유지반의 거동과는 다른 것으로 되어진다. 따라서, 자유 지표면과 구조물 기초와의 진동을 비교할 때, 일반적으로 그 값은 다르며, 특히, 가속도에 대해서는 자유 지표면보다 기초의 진폭쪽이 작게 되어지는 경우가 많다.

2.2 지반과 기초구조물의 동적 상호작용장

지진동을 입력할 때의 동적 상호작용의 파동장의 변위는 그림3에서 나타낸 바와 같이 (1)자연지반으로서의 파동전파에 의한 u^* 와 구조물로부터의 산란파에 의한 u^s 를 더하고, 나아가 (2)구조물이 진동하는 것에 의해 방사되는 파동에 의한 u^r 을 서로 선형으로 겹친 것으로 한다.

즉, $u = u^* + u^s + u^r$ 로 다시 쓸 수 있다.

2.2.1 모델화 수법에 있어서 유의점

i) 해석의 차원성 : 실제의 기초구조물은 3차원체

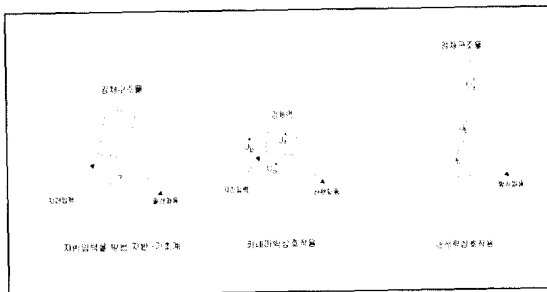


그림 3. 지반과 구조물의 동적 상호작용장

이고, 지반과의 동적 상호작용은 3차원 공간에서 이루어져야만 된다. 그러나, 구조 형식에 따라서는 해석을 용이하게 하기 위해서 그 몇 가지 특징만을 취해, 축대칭 3차원체, 의사 3차원체 혹은 2차원 평면으로 치환하는 것은 공학적 의미가 있다.

- ii) 반무한 먼거리 경계 : 지반을 파동 전파체로서의 역학적인 특징을 무한 원거리의 경계로 취급하여 해석에 임할 필요가 있다.
- iii) 근처지반의 비선형성 : 지반의 비선형 거동은 지반자체의 진동에 의해서 발생하는 것과, 기초와의 상호작용에 있어서 고려해야만 할 것으로 나누어진다.
- iv) 동적요소/평가항목 : 지반-구조물계의 해석수법으로서, 대상 구조물의 특징을 반영한 다음, 섭스트럭처화를 취하여, 평가 항목을 합리적으로 계산할 수 있는 모델화 방법으로 한다.

2.3 유한요소법 모델

유한요소법은 연속체를 이산화한 유력한 수법으로, 특히 기초 주변의 물성 및 기하학적으로 복잡하게 변화하는 지반의 모델화에 용이하게 대응하는 것이 가능하다 (그림4 참조).

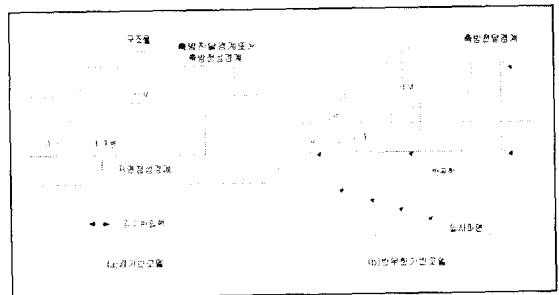


그림 4. FEM과 경계처리

2.3.1 영역의 이산화

지반과 기초의 동적 상호작용장의 지배방정식은 가상 일의 원리를 적용하여 구한다. 탄성체에 가상변위 δ_p 를 부여했을 때, 관성력, 표면력에 의한, 외부일

과 내부 변형률 에너지의 증가가 같은 것으로부터 다음 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dv = \rho \int_V \delta u^T \ddot{u} dv + \int_S \delta u^T \tau_s t dv \quad (2)$$

여기서, u 는 변위, σ 는 내부응력, ϵ 는 내부 변형률, t 는 경계상의 표면력, ρ 는 밀도를 정의하고 있다.

해석대상영역을 매쉬분할하여 각 요소내의 변위, 속도 및 가속도를 동일 내삽함수를 이용하여 절점 변위, 절점속도, 절점가속도로부터 나타낸다. 그 결과 식(2)는 이산화된 다자유도계(多自由度系)의 지배방정식으로 치환하여 다음 식(3)과 같이 되어진다.

$$M\ddot{U} + KU = P \quad (3)$$

여기서, M , K 는 질량, 강성 매트릭스, P 는 절점력으로 각 요소마다 구하여지는 것의 합이다.

대상영역의 물성치를 내부감쇠효과로 인해 이력감쇠정수 ζ 를 도입하여, 복소수의 라미정수로 나타내면 식(4)와 같이 된다.

$$\lambda^* = \lambda(1 + i2\zeta), \mu^* = \mu(1 + i2\zeta) \quad (4)$$

이 결과 강성 매트릭스는 복소강성 매트릭스를 사용하여 정의할 수 있다. 따라서 손실 에너지가 같다는 것에서부터 등가점성감쇠계로 치환하면 식(5)가 된다.

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P \quad (5)$$

단, 경계조건을 명확히 규정할 필요가 있다.

2.3.2 가상경계

가상경계는 아래와 같이 점성경계와 전달경계로 크게 나눌 수 있다.

i) 점성경계 : 이것은 기초로부터의 일산 파동에

너지를 점성력에 의해 흡수하여 가상 경계면으로 파의 반사를 일으키지 않도록 하는 것이다.

ii) 전달경계 : 원거리 지반 영역을 강성 기반 (근사적으로 반무한 기반으로 하는 것도 가능하다.) 위의 성층 지반으로 모델화하고, 깊이 방향으로 유한요소법의 이산화를 실시한다. 이것에 의해 같은 표층내의 표면파의 전파를 각 진동수에 대해서 파수에 관한 고유 모드 분해로부터 해석하는 것이 가능하다.

(1) 점성경계

파동에너지를 흡수한 점성경계를 만족하는 경계응력조건은 다음 식(6)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \rho V_p \cdot \dot{u} \\ \tau &= \rho V_s \cdot \dot{u} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ρ : 밀도, V_p : P파의 속도, V_s : S파의 속도이다. 기반으로부터의 상대속도를 고려하면 점성경계에서의 등가 절점력은 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \end{Bmatrix} = \frac{\rho l}{6} \begin{bmatrix} 2V_s & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 2V_p & 0 & V_p \\ V_s & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & V_p & 0 & 2V_p \end{bmatrix} = [C_b] \{\dot{u}\} = [C_b] i\omega \{u\} e^{i\omega t} \quad (7)$$

여기서, l : 수평방향의 요소의 길이이다.

(2) 전달 경계

오른쪽 영역에서 그림5에 작용하는 힘은 이산화하여 표현할 수 있다. 절점력 $\{P\}_S$ 는 지층내의 응력과 변형률을 고려하여 계산한다. 변형률은 변위 u, v 및 w 를 미분하여 구한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= -ik_s u(z) \\ &= -\frac{ik_s}{h_j} \{ (z_{j-1} - z)v_{2j-1} + (z - z_j)v_{2j+1} \} \quad (8) \end{aligned}$$

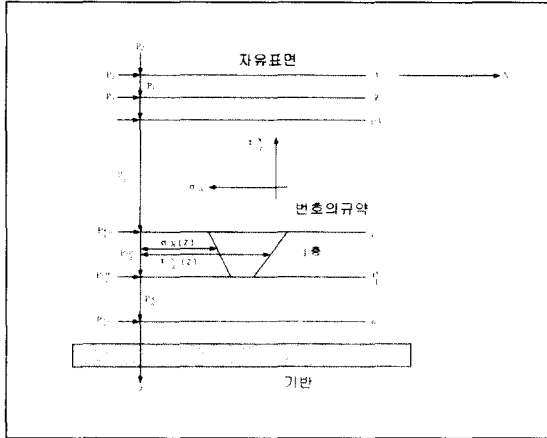


그림 5. 이산화

$$\epsilon(z) = \frac{dw(z)}{dz} = \frac{1}{h_j} (v_{2j+2} - v_{2j}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &= -\frac{du(z)}{dz} = -ik_s w(z) = \frac{1}{h_j} \{ v_{2j+1} - v_{2j-1} \\ &\quad - ik_s \{ (z_{j+1} - z)v_{2j} + (z - z_j)v_{2j+2} \} \} \quad (10) \end{aligned}$$

이것의 변형률 성분을 Hook의 법칙을 이용하여 응력으로 변환하고 그것을 다시 절점력으로 변환하면 다음 식(11)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} P_{2j-1} \\ P_{2j} \\ P_{2j+1} \\ P_{2j+2} \end{Bmatrix} = (ik_s [A]_j + [D]_j) \begin{Bmatrix} V_{2j-1} \\ V_{2j} \\ V_{2j+1} \\ V_{2j+2} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $[D]_j$ 는 다음 식(12)와 같다.

$$[D]_j = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\lambda_j & 0 & -\frac{1}{2}\lambda_j \\ \frac{1}{2}G_j & 0 & -\frac{1}{2}G_j & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\lambda_j & 0 & -\frac{1}{2}\lambda_j \\ \frac{1}{2}G_j & 0 & -\frac{1}{2}G_j & 0 \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

따라서, 지반전체의 절점력은 이상의 서브매트릭스를 중복하여 구할 수 있다.

$$\{P\}_s = [R]_s \{v\}_s \quad (13)$$

여기서,

$$[R]_s = (ik_s [A] + [D]) \quad (14)$$

(여기서, $[D]$ 는 $2n \times 2n$ 매트릭스이다.)

x 의 정방향으로 전달되는 진동은 s 에 대해서 서로 조합하면 다음 식(15)가 된다.

$$\{u\}^R = \sum_{s=1}^{2n} \alpha_s \{v\}_s = [V] \{\alpha\} \quad (15)$$

여기서, $\{\alpha\}$ 는 $\alpha_s (s = 1, 2, 3, \dots, 2n)$ 의 벡터로 되고, $[V]$ 는 모드매트릭스로 된다.

식(15)를 역변환하면 일반적인 운동방정식 중에서의 여러 가지 Rayleigh파의 모드기여율을 계산하는데 이용하는 것이 가능하다.

$$\{\alpha\} = [V]^{-1} \{u\}^R \quad (16)$$

$x=0$ 에서의 절점력은 식(13,14)에 의해 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} [P] &= \sum_{s=1}^{2n} \alpha_s (ik_s [A] + [D]) \{v\}_s \\ &= (i[A][V][K] + [D])[V] \{\alpha\} \quad (17) \end{aligned}$$

$$\{P\}^R = [R] \{u\}^R$$

$$[R] = i[A][V][K][V]^{-1} + [D] \quad (18)$$

이고, 이것을 구하는 경계조건식이다. 반대로, 왼쪽으로 전달된 파동에 대응하는 힘은

$$\{P\}^L = [L]\{u\}^L \quad (19)$$

로 된다. [R]과 [L]은 같지만, 부호를 고려할 필요가 있다. 또한, 저면 점착력경계를 사용하는 경우는 전단파의 파장의 1.5배 길이 되는 장소를 기반으로 설정하여 저면점성경계를 근사화한다.

2.3.3 지반 인피던스와 기초유효입력

동적 상호작용에서는 유한한 크기의 구조물과 반무한적으로 넓은 지반의 두 가지의 탄상체 간의 상호작용을 대상으로 한다. 일반적으로 구조물과 지반에서는 각각 가장 적당한 해석방법이 존재한다. 이 때문에 구조물과 지반을 분리하여 해석하는 부분해석법을 사용하는 기회가 많아지게 된다. 따라서 크게 구조물과 지반을 일체로 해석하는 일체법(직접해법)과 분리하여 해석하는 부분해법(부분법; Substructure법)으로 나누어진다.

부분법의 대표적 방법으로는 주파수응답해석을 전제로하여 각 진동수로 동적강성을 경계상에 축약한 동적 서브스트럭처(Substructure)법과 각 부분 구조의 고유치해석 결과를 이용하여 모드축약한 부분 모드법이 있지만, 후자는 동적 상호작용해석에는 거의 이용되지 않는 방법이다.

상부구조물의 동적해석에서는 지반 인피던스와 기초유효입력이 전제로 되어진다. 지금, 기초 주변 지반(굴착부를 가지는 지반)의 정상진동상태를 고려한다면 그림6에 나타난 것과 같이 자유도계로서의 지배방정식을 표현한 동적강성행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = -w^2M + iwC + K \quad (20)$$

여기서, D는 자연지반의 강성매트릭스, M은 질량 매트릭스, C는 일반화된 후크법칙을 나타내는 강성

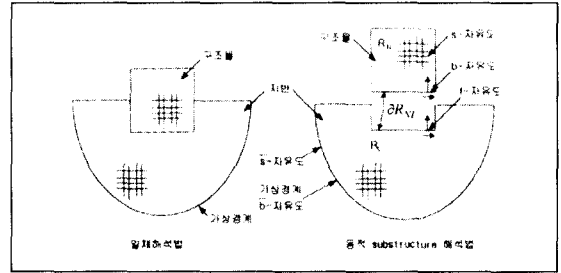


그림 6. 일체해석법과 동적 Substructure 해석법

매트릭스, K는 파수에 의해 만들어지는 대각 매트릭스이다.

이 때에, 절점을 기초와의 인터페이스 절점 f, 입력 기반면상의 절점 b, 이 2가지의 어느 쪽에도 속하지 않는 절점 s와 구별하여 이들에 대응하여 동적 강성 매트릭스를 분할 표시하면 지배 방정식(21)은 일반적으로 아래의 식(22)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$[K - w^2M + L + R] U = P_E + (L_L + R_L)U_L^R + (L_R + R_R)U_R^R \quad (21)$$

여기서 P_E는 상부 구조물로부터 기초에 작용하는 힘을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} D_{ff}^s & D_{fs}^s & D_{fd}^s \\ D_{sf}^s & D_{ss}^s & D_{sb}^s \\ D_{bf}^s & D_{bs}^s & D_{bb}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f^s \\ U_s^s \\ U_b^s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f^s \\ 0 \\ P_b^s \end{Bmatrix} \quad (22)$$

나아가, 식(22)에 있어서, 절점s에 관한 변위를 축합 조작에 의해 소거하면, 변위 벡터 U_f^s에 대한 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\bar{D}_f^s U_f^s = P_f^s + \bar{P}_f^s \quad (23)$$

여기서, \bar{D}_f^s 는 지반 인피던스 매트릭스를 \bar{P}_f^s 는 지반과 기초의 운동학(키네틱; Kinematic)적인 상호작용으로부터 발생하는 기초에의 유효 입력을 정의하고 있고, 각각 아래 식(24, 25)와 같이 표시할 수 있다.

$$\bar{D}_f^s = D_{ff}^s - (D_{fs}^s \ D_{fb}^s) \begin{bmatrix} D_{ss}^s & D_{sb}^s \\ D_{bs}^s & D_{bb}^s \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} D_{sf}^s \\ D_{fb}^s \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\bar{D}_f^s = (D_{fs}^s \ D_{fb}^s) \begin{bmatrix} D_{ss}^s & D_{sb}^s \\ D_{bs}^s & D_{bb}^s \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b^s \end{Bmatrix} \quad (25)$$

이들의 연산은 실제적으로는 식(22)의 부분 소거법으로부터 효율적으로 해결되어진다. 또한, 키네마틱적인 상호작용을 도입하면 식(23)에서 자유 굴착면, 즉, $P_f^s = 0$ 을 가정하여 기초 유효 입력동(入力動)이 구해진다.

$$U_f^s = (\bar{D}_f^s)^{-1} \bar{P}_f^s \quad (26)$$

유효입력평가에 있어서 굴착부가 없는 지반, 즉, 자연지반의 응답을 이용하면 기초와 자연 지반과의 인터페이스상의 변위 U_b^s 와 절점력 P_b^s 을 이용하여 식(25)는, 아래 식(27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{P}_f^s = \bar{D}_f^s U_b^s - P_b^s \quad (27)$$

이상의 다른 섭스트럭처(Substructure) 모델화에 대응한 결과를 그림7에 정리하여 두었다.

| 진동 방향 | 진동 형태 | 중 거 초 | | 현 상 거 초 | |
|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| | | 중 거 초 | 현 상 거 초 | 중 거 초 | 현 상 거 초 |
| 수직 | 수직진동 | | | | |
| | 수평진동 | | | | |
| 수평 | 수직진동 | | | | |
| | 수평진동 | | | | |

그림 7. 지반 인피던스와 유효입력

3. 해석방법의 일반

3.1 해석법의 종류

지진에 의한 구조물의 해석방법으로는 대표적으로 등가정적해석법과 수정진도법 및 응답스펙트럼해석법과 시간력응답해석법을 포함하는 동적해석법 등을 들 수 있다. 설계 과정에 대한 흐름도는 그림8에서와 같다.

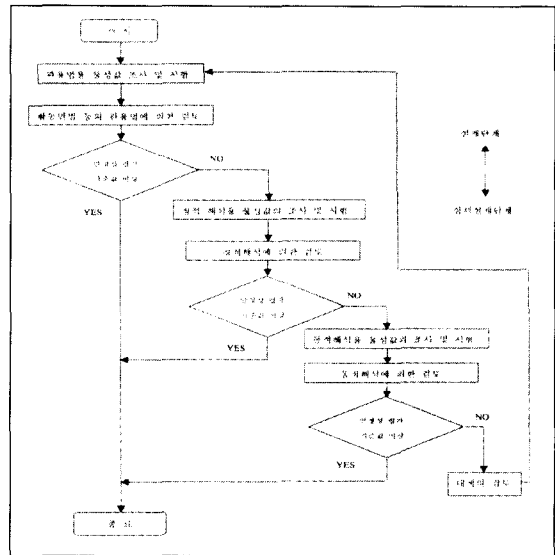


그림 8. 설계시 해석 흐름도

3.1.1 정적해석법

지진에 대한 구조물의 안전성을 평가하기 전에 정적인 상태에서의 응력상태를 평가해야 한다. 평상시의 응력상태에서 지진시의 응력상태로 변한다고 했을 때의 비교결과를 낼 필요가 있다. 또, 댐의 경우에는 축제 이후 제체배면에 담수가 되었을 때 제체내부의 침윤선을 확인하여 고려하여야 한다. 이와 같은 것은 현재의 상태가 어떤 변형률(예를 들어, 압밀 등)일지 모르므로 현재의 안전성 평가에는 변형된 이후의 단면을 이용하여 안정성을 평가하여야 한다.

3.1.2 등가정적해석법(FEM)

등가정적해석법은 진도법이라고도 하는데 구조물에 작용하는 불규칙적인 진동인 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법이다. 지진시 구조물의 안정이나 부재의 응력 계산을 평상시의 해석과 같이 간단히 할 수 있기 때문에 외국의 많은 구조물의 내진설계에 채용되어 있는 실정이다. 이러한 방법에서는 설계지진 계수의 산정이 중요한 역할을 하는데 설계지진 계수의 선정을 위해서는 다음의 가정이 필요하다.

- i) 지진은 정적외력으로서 구조물의 각부분의 질량에 작용한다.
 - ii) 지진력의 크기는 질량에 비례한다. 수평방향 지진력의 크기를 중량으로 나눈값을 지진 계수라고 한다.
- 따라서 구하는 수평방향 지진력은 지진계수를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_h = K_h \cdot m \cdot g \quad (28)$$

여기서

F_h : 수평방향 지진력, k_h : 지진계수 (설계진도),
 m : 질량, g : 중력가속도이다.

- iii) 지진계수의 값은 각 질량에 대하여 같은 크기이다.
- iv) 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 연직방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다.

이상의 가정을 기초로 한 해석기법을 등가정적 해석법이라고 한다.

3.1.3 수정진도법

일반설계에서 진도는 구조물의 상부에서 저면에 까지 같다고 가정(진도법)한다. 그러나 이 가정은 지진시 높이가 높은 구조물의 관측의 정밀도에 의문이 생

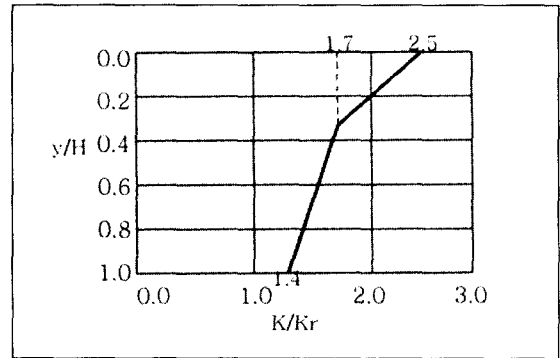


그림 9. 제체의 지진계수

기게 된다. 모든 관측결과에 의하면, 상부진동은 하부진동에 비하여 크며, 그 비도 매우 크다. 그러므로 높이가 높은 구조물의 경우에 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것이 보다 더 합리적일 것이다.

(1) 제체지진계수 (k)

$$0 < y/H \leq 0.4 \text{ 일때}$$

$$k = k_F \times \{2.5 - 1.85 \times (y/H)\}$$

$$0.4 < y/H \leq 1 \text{ 일때}$$

$$k = k_F \times \{2.0 - 0.6 \times (y/H)\}$$

여기서, H: 제방높이, y: 천단표고와 활동면의 최저 표고차, k_F : 설계 지반 진도이다.

(2) 지진계수에 대해서

성토와 암지층 사이에 연약지층에 존재하는 경우 그림9와 같이 y와 H를 고려하는 경우에서 성토층에 일반적인 경우보다 큰 제체진력계수를 고려하는 것이 가능하다. 단, 연약층은 지진계수에 0.0을 지정하는 것에 의해 제체진력계수 = 0.0으로 된다.

제체진력계수(k)

$$0 < y/H \leq 0.4 \text{의 경우}$$

$$k = k_F \times \{2.5 - 1.85 \times (y/H_0)\} \times \text{지진계수}$$

$$0.4 < y/H \leq 1 \text{의 경우}$$

$$k = k_F \times \{2.5 - 0.6 \times (y/H)\} \times \text{지진계수}$$

3.1.4 동적해석방법

구조물의 형상이 단순하여 일차 진동모드가 탁월하고 고차모델의 영향을 무시할 수 있는 경우에는, 진도법이나 수정진도법에 의해 구조물의 실제의 지진시의 응답을 정밀도 있게 근사할 수 있다. 그러나 진동성상이 복잡한 구조물이나 댐과 같은 중요도가 높은 구조물에 대해서는 상세한 내진검토가 요구되기 때문에 동적해석법이 사용된다.

동적해석법은 대상으로하는 구조물 혹은 구조물과 지반을 진동모델로 모델화 하여 지진입력으로 지진동과형 혹은 응답 스펙트럼을 입력하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 등가정적해석법에 비해, 보다 실제 현상에 가까운 거동을 재현할 수 있고, 원리적으로 어떠한 구조물에도 적용할 수 있는 방법이다.

(1) 응답스펙트럼 해석 방법

응답스펙트럼 해석방법은 단자유도계에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답의 구하는 방법이다. 응답 스펙트럼 해석법은 시간이력응답 해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 근사적인 방법이지만 대형 구조물이거나 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 동적특성을 비교적 잘 파악할 수 있다. 현재 대부분의 구조물에 대한 지진해석은 응답스펙트럼 해석법에 의하여 수행되고 있다.

(2) 시간이력 응답해석법

시간이력 응답해석은 모드 중첩법과 직접적분법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구조물이 탄성 거동을 하는 경우에는 모드 중첩법이 편리하게 사용되며 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법이 사용된다.

(3) 주파수응답해석법

진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시각력응답을 구하는 방법이다. 시각영역에서 주파수영역으로, 또는 그 반대의 변환은 일반적으로 고속 푸리에 변환(FFT)이 사용된다. 최근에는

지반과 구조물의 상호작용을 고려한 지진응답해석을 실시하는 것이 종종 있다. 이 경우 지반탄력이 주파수에 의존하여 변화하는 복수강성으로 표현되기 때문에 이 해석법에 의하여 해석 할 필요가 있다.

3.2 동적상호작용의 해석법

3.2.1 진동수 영역에 있어서의 응답해석

동적 상호작용을 고려한 해석에서는, 진동수영역에서 계의 응답특성을 구하는 경우가 많다. 이산화된 상부 구조물계의 운동 방정식 계를 서로 겹치게 하면, 전체 계의 운동 방정식으로서 다음 식(29)를 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\{F\}\ddot{u}_g^* \quad (29)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량, 점성계수, 강성매트릭스, $\{x\}$ 는 전체계의 변위벡터, $\{F\}$ 는 질량영향계수벡터, \ddot{u}_g^* 는 유효입력가속도이다. 또, 식(29)의 양변을, 푸리에 변환하면 아래 식(30)과 같이 되어진다.

$$\{-w^2[M] + iw[C(w)] + [K(w)]\}\{X(w)\} = -\{F\}U_g^*(w) \quad (30)$$

여기서, $\{X\}$ 는 $\{x\}$ 의 U_g^* 는 \ddot{u}_g 의 푸리에 변환에 의한 것이다. 이 경우 계의 응답은 아래 식과 같이 된다.

$$X(w) = -\{H(w)\}\{F\}U_g^*(w) \quad (31)$$

여기서, $H(w)$ 는 주파수 응답함수이고, 아래 식과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$\{H(w)\} = [-w^2[M] + iw[C] + [K]]^{-1} \quad (32)$$

주파수 응답함수가 구해지고 유효입력 가속도의 푸리에 변환이 주어진다면, 식(31)을 이용하여 진동

수 영역에서 계의 응답이 계산 가능하다.

3.2.2 시간이력 응답해석

(1) 주파수 특성을 가지는 계의 시간 적분법

① 진동수에 의존하는 복소 강성의 모델화와 입력 지진동의 보정

반무한탄성체의 표면에 설치된 강(剛)기초의 연직 진동의 경우를 예로 들어서 모델화의 구체적인 수법에 대해 간략히 설명하고자 한다. 병진, 회전, 비틀림 등 복수의 진동모드가 연성하는 것과 같은 경우 대해서는 Wolf에 의해 이미 전개되어 졌지만, 여기서는 기본적인 개념만 설명하기로 한다.

그림10(a)는 진동수에 의존한 스프링과 대쉬포트에 의해 모델화된 지반-기초계이다. 기초의 질량 m_0 가 없는 경우에는, 기초의 변위 $U_0 e^{i\omega t}$ 와 작용력 $P_0 e^{i\omega t}$ 와의 사이에 다음 식(33)과 같은 관계가 성립한다.

$$P_0 = k^*(\omega)U_0 \quad (33)$$

여기서, k^* 는 복소수로서 진동수에 의존하는 강성으로 통상 식(34)와 같이 나타내어 진다.

$$k^*(\omega) = k_b(\omega) + i\omega c_b(\omega) \quad (34)$$

이 복소강성을 가지는 무질량의 하중-변위관계를 그림10(b)에 나타낸 것과 같이 2자유도계로 근사적으로 나타내는 것을 고려해 볼 수 있다.

② 힐버트변환을 이용한 해석

본 강좌에서는 그림2-10(a)의 예를 참고로 하여 복소강성의 진동수의존부분의 실수부에서 허수부를 식(35)를 이용하여 구한다.

$$\omega c_w = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_w(y)}{y - \omega} dy \quad (35)$$

식(35)에 기초한 계산은, 푸리에변환을 이용하는 것에 의해 그림11에 나타낸 것과 같이 간단하게 계산

할 수 있다.

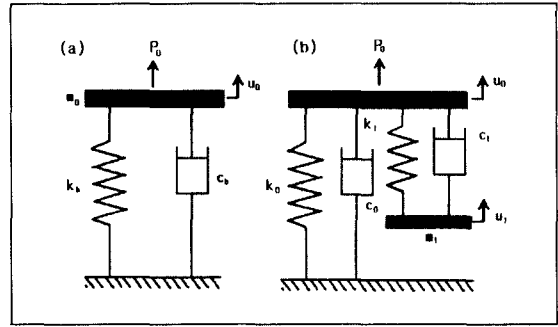


그림 10. 지반-기초계의 모델화

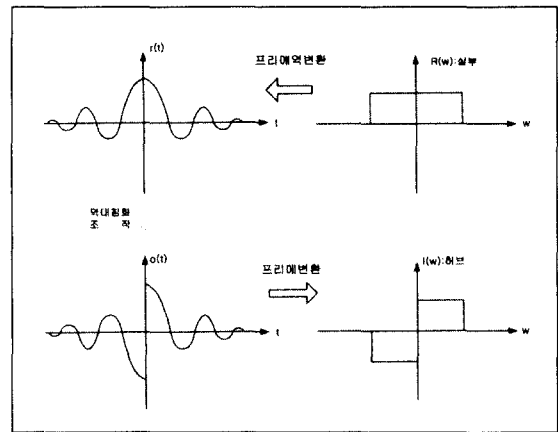


그림 11. 힐버트변환의 개념도

③ 진동수에 의존하는 계의 시각력해석

시각력 응답해석에 이용할 수 있는 복소강성의 취급에 대하여 그 종류와 방법에 대해 설명하고, 또 힐버트 변환을 이용한 해석법의 예를 간단히 소개하기로 한다.

$$\{R(\omega)\} = ([k_b(\omega)] + i\omega[C_b(\omega)]) \{X_b(\omega)\} \quad (36)$$

여기서, $\{R\}$ 은 기초지반에 작용하는 수평력 및 모멘트로 되는 벡터이고, $\{X_b\}$ 는 수평변위 및 연직축에 대한 회전각으로 되는 벡터이다.

식(36)에서 정의한 복소강성 $K^* = [K_b(\omega)] + i\omega[C_b(\omega)]$ 를 실험으로 결정하기 위해서는 시험체에

수평력과 모멘트를 작용시킨 가진실험결과가 필요하게 된다. 케이슨 기초에 대하여 가진시험을 하여 얻은 기초 중심점에서의 주파수 응답배율과 위상 특성을 구할 수 있다. 또, 이것에 기초하여 그림12와 같은 SR모델을 설정하여 복소강성의 주파수 의존성을 구한 것이 그림13 이다.

(2) 등가선형화 개념

동적 상호작용을 고려한 해석에서는 종종 등가 선형화 기법이 필요하게 되어 진다. 이들은 비선형계의 응답을 선형계의 응답으로 근사시키기 위한 등가선형

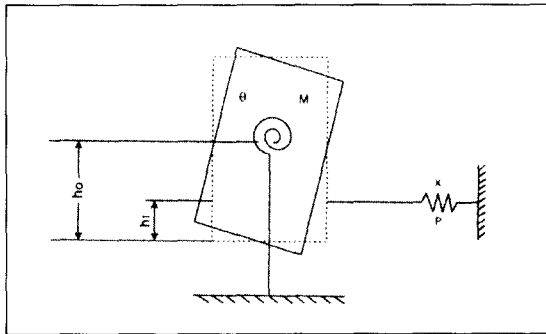


그림 12. SR 모델

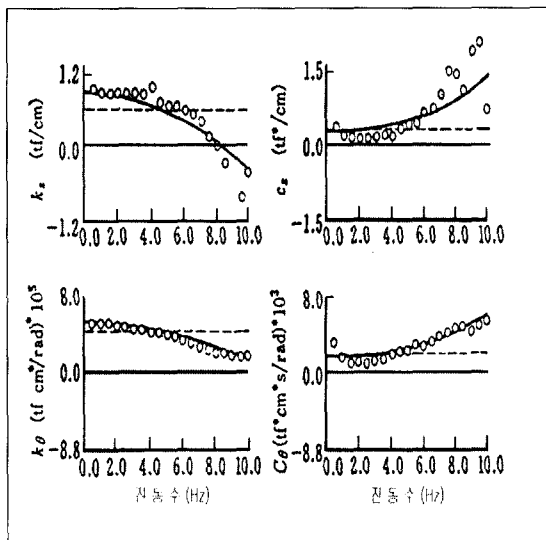


그림 13. 복소강성의 진동수의존성

계의 강성과 감쇠계수를 결정하기 위한 기준을 설정한다. 복소강성의 개념을 도입하고 이력특성이 있는 흙의 응력~변형률의 관계는 다음 식(37)과 같다.

$$r^* = G^* \gamma^* \tag{37}$$

$$G^* = G(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1-h^2})$$

여기서,

- r^* : 복소 전단 응력, G^* : 복소 전단 탄성계수,
- γ^* : 복소 변형률, G : 등가 전단탄성계수,
- h : 등가 감쇠정수이다.

이 선형관계는 지진응답해석과 같이 팽대한 연산량을 필요로하는 비정상계산을 효율적으로 추진하는 것은 무척 중요하다. 본 강좌에 사용한 복소 응답법에서는 입력 지진파에 대해 FEM모델계의 응답을 입력지진파의 각 주파수성분에 대응하는 계의 응답을 중복하여 구할 수 있다.

그런데 식(33)의 G 와 h 는 흙의 경우 변형률 진폭의 크기에 의존하는 것이 잘 알려져 있다. 다시 여러 개의 전단 변형률 진폭 레벨에 대해서 토질 시험을 실행해 두고, 각 변형률 진폭에 대한 G , h 의 값(그

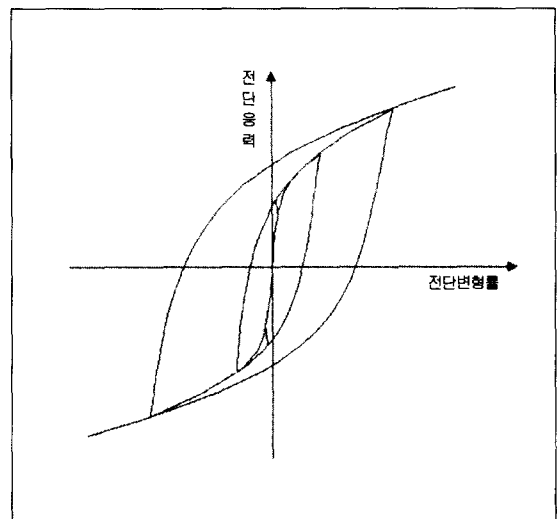


그림 14. 이력 Loop

림 15 참조)을 구해준다. 그리고 FEM 모델의 각 요소에 정의된 G, h 해석결과의 변형률 진폭 레벨에 적합하게 반복 계산을 실행하는 것이다. 그런데 이 반복과정에 있어서 G, h의 갱신은 램덤과 입력에 의한 응답해석의 경우, 발생한 전단 변형률 시각력의 최대값의 γ_{max} 의 값에서 다음 식(38)에 대한 유효변형률 γ_{eff} 을 구해서 실행 한다.

$$\gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max} \quad (38)$$

이것은 특성곡선을 구하는 토질시험이 일정 변형률 진폭의 조화진동에서 실행하므로 램덤과형의 응답시각역을 그것과 등가한 정진폭조화과형에 환산할 (실행 변형률을 구한다.) 필요가 있기 때문이다. 이 계수 0.65로 절대 경험적인 것이며 이론적 근거는 없다고 본다. 따라서, 정진폭에 가까운 입력과형에 대한 응답해석 등의 경우는, 이 계수의 값을 바꿀 필요가 있다. 이 프로그램에서는 이 계수의 입력이 가능하므로 적의대응된다.

3.3 동적해석의 고려 방법

현재 국내에서 동적해석으로의 접근이 급속히 진행되고 있으나, 그와 수반된 해석적 기법이나 관련 프로그램 등의 저변확대는 미흡한 실정이다. 따라서 동적해석의 수법이 어려운 것으로만 인식 되어 오고 있다. 실제 지진응답해석의 모델링이나 해석은 상당히 어려운 작업이고, 그 결과의 평가도 쉽지 않은 것은 사실이다. 그래서 무조건적으로 지진응답해석에 의해 동적해석을 실시하는 것이 아니라 유사정적해석 등의 지진력을 고려할 수 있는 방법으로서의 접근도 필요하다고 여겨진다. 본 강좌에서는 지진응답해석법과 등가정적해석법 등의 수법에 대해 자세한 예로서 언급하고자 한다.

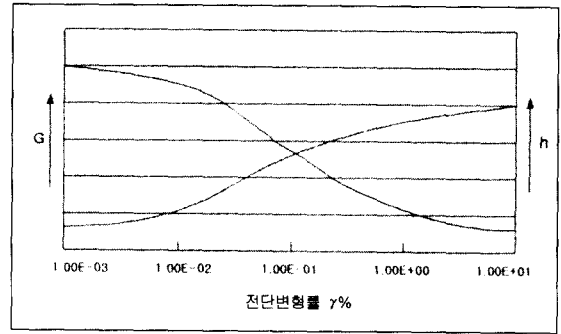


그림 15. G, h의 특성곡선

참고문헌

1. Drnevich, V. P. and Massarsch, K. R.(1979), Sample disturbance and stress-strain behavior, Proc ASCE, Vol. 105, No. GT9, pp. 1001 - 1016
2. Hardin, B. O. and Black, W. L.(1968), Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE. Vol. 94, No. SM2, pp 353 - 369
3. Kokusho, T.(1987), In-situ dynamic soil properties and their evaluations, Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2
4. 日本土木學會(1989), 動的解析と 耐震設計 (地震動・動的物性) Vol. 1
5. 石原研而(1976), 土質 動力學の基礎
6. 池田俊雄(1999), 地盤と 構造物, 鹿島出版會
7. 土木學會(1989), 動的解析と 耐震設計 (地震動・動的物性)

2000년 12월호에 게재된 지반진동과 내진설계 강좌 「액상화 현상」은 연재번호 IV가 VII으로 잘못 표기되어 이를 바로 잡습니다.