

기초의 uplift를 고려한 건축구조물의 동적해석

Dynamic Analysis of Building Structures with Foundation Uplift

이 동 근*
Lee, Dong Guen

송 윤 환**
Song, Yoon Hwan

요 약

본 연구에서는 기초의 uplift의 영향을 고려하여 지진하중에 대한 건축구조물의 동적 거동을 예측하는 효율적인 방법을 제안하였다. 기초와 지반의 관계에 대한 모델에는 Winkler 모델과 Two-Spring 모델이 있다. Winkler 모델에 의한 해석 방법은 정확하기는 하나 계산 시간이 오래 걸리고 복잡하다는 단점이 있다. 본 연구에서 Winkler 모델을 보다 정확하게 나타낼 수 있고 해석이 간편하며 효율적인 등가 Two-Spring 모델(S 모델)을 제안하였다. S 모델은 기초에 정적하중이 작용했을 때의 기초 중앙의 모멘트와 회전각의 비선형 관계를 간단한 5개의 선형적인 관계로 나타냄으로써 유도되며, S모델에 의한 동적해석 결과는 Winkler 모델에 의한 해석 결과와 잘 일치하였다.

ABSTRACT

In this study, the earthquake response of building structures with foundation uplift was investigated. The Winkler foundation model and two-spring model are widely used to represent the interaction between foundation mat and soil. While the analysis using the Winkler foundation model results in more accurate prediction, it requires a complex procedure and longer computation time.

In this study, an equivalent two-spring model(S model) is proposed. The S model can represent the Winkler foundation model more accurately and the analysis using the S model is simpler and more effective. The S model is derived by simplifying the nonlinear moment-rotation relationship of foundation mat. The dynamic responses predicted by the S model gave a good agreement to those of the Winkler foundation model.

1. 서론

지진하중에 대한 구조물의 동적해석은 일반적

으로 기초가 지반에 견고하게 부착되어 있다고 가정하고 수행된다. 그러나 구조물은 지반에 부착되어 있는 것이 아니라 중력에 의해서 접촉되

* 정회원, 총무이사, 한국과학기술원 토목공학과 조교수
** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

이 논문에 대한 토론을 1988년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면, 그 결과를 1989년 6월호에 게재하겠습니다.

어 있는 경우가 대부분이며 이것은 그 구조물이 지진하중을 받는 동안 지반으로부터 기초가 분리되는 현상(uplift)이 발생할 수 있음을 의미한다. 일반적으로 기초의 uplift는 구조물의 거동을 비선형으로 만드므로 uplift를 구속한 경우와 상당히 다른 결과를 준다는 것이 밝혀졌다.

Chopra는 단층구조물에서 토질역학에서 많이 사용하는 Winker 모델에 의한 uplift의 영향을 조사하였으며 복잡한 Winker 모델에 대한 단순화된 등가 Two-Spring 모델을 제시했다.²⁾ 그러나 그에 의해서 제안된 등가 Two-Spring 모델은 uplift가 크게 발생하는 주기가 짧은 구조물에 대해서는 잘 맞지 않는 결과를 준다. Chopra는 또한 Two-Spring 모델을 사용하여 다층구조물에서 기초의 uplift가 구조물의 동적거동에 미치는 영향을 조사하여 기초의 uplift가 밀면전단력의 감소를 초래할 수 있음을 보였다.³⁾ Huckelbridge와 Clough는 U.C.Berkeley에서 Shaking Table을 이용하여 철골건물 모델에 대한 실험을 함으로써 uplift의 효과를 조사하였다.³⁾ 그들은 uplift를 허용함으로써 구조물의 강도와 연성(ductility)에 대한 요구가 감소될 수 있다는 결론을 얻었다. Psycharis는 강체(rigid body)에 대한 단순화된 Two-Spring 모델을 개발하고 그 모델을 이용하여 uplift가 구조물의 동적거동에 미치는 영향을 조사하였다.^{4), 5)} 그는 예제 해석을 통하여 uplift가 발생하면 구조물에 유리하다든가 그렇지 않다는 결론을 내릴 수는 없으며 이는 구조계의 특성이나 입력지진의 특성에 의존한다는 사실을 지적하였다.⁵⁾

기초와 지반의 관계에 대한 모델에는 기초 밀면 전체에 스프링-댐퍼 요소가 균등하게 분포되어 있는 Winkler 모델과 기초 밀면 양끝에 스프링-댐퍼 요소가 각각 하나씩 달려 있는 Two-Spring 모델이 있다. Winkler 모델은 정확한 모델이긴 하나 기초와 지반 사이의 접촉된 면적에 따라 고차원 비선형 평형방정식을 요구하므로 이에 대한 동적해석은 상당히 복잡하다. 지금까지 알려진 Two-Spring 모델은 단순하기 때문에 해석이 용이하고 계산시간이 많이 감소되는 장점이

있지만 정확도가 떨어지는 단점도 있다.

본 연구에서는 Winkler 모델을 정확하게 나타낼 수 있고 해석이 간편한 효율적인 등가 Two-Spring 모델(S 모델)을 제안하고자 한다. 여기에서 제안된 S 모델은 Winkler 모델의 거동을 단순화시켜서 기초의 전도모멘트와 회전각의 관계를 구하고 그로부터 등가 스프링의 성질을 결정함으로써 얻어지게 된다.

2. Uplift 해석을 위한 모델

2-1. 해석 모델을 위한 가정

연성지반 위에 강체기초에 의해서 지지되고 있는 건물 모델을 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 그림 1은 지반과 기초 사이의 관계가 Winker 모델임을 보여주고 있으며 그림 2는 S 모델의 경우이다. 건물의 질량은 각 층에 집중되어 있으며 건물의 층당 자유도는 수평 방향으로 하나만 남도록 하였다. 기초(foundationmat)는 질량을

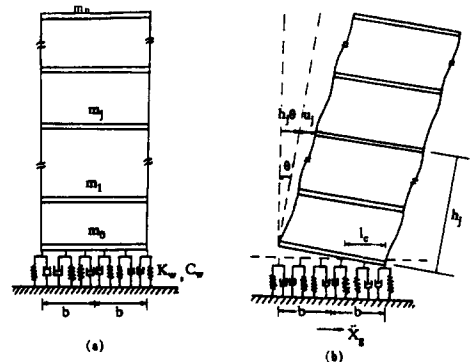


그림 1. 연성지반에 놓인 해석 건물 모델(Winkler 모델)

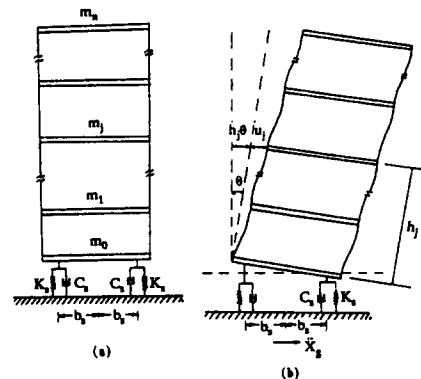


그림 2. 연성지반에 놓인 해석 건물 모델(S 모델)

가진 강체의 직사각형판이고 지표면상에 위치하며 기초의 문힘에 따른 영향은 고려하지 않았다. 기초의 수평 방향의 변위는 없는 것으로 가정하였으며 지반의 강성과 감쇠상수는 지반운동의 진동수에 무관한 것으로 가정하였다.

2.2 Winker 모델

Winkler 모델은 그림 1(a)에서와 같이 기초와 지반 사이에 스프링과 댐퍼가 균등하게 분포되어 있는 것이며 지반의 강성상수와 감쇠상수는 선형반공간(elastic half space) 이론에 따라 지반의 진동수에 무관하게 구할 수 있다. 지반의 강성과 감쇠상수는 인장에 대하여 저항을 할 수 없으며 따라서 중력에 의한 정적 처짐하에서 기초 양끝에서의 변위가 이 정적처짐보다 크게 되면 uplift가 일어나게 되며 그 곳에서는 스프링이 저항력을 잃게 된다. 그러므로 건물이 그림 1(b)와 같이 변형을 일으켰을 때 스프링과 댐퍼가 압축력에 대하여 저항을 할 수 있는 길이는 l_c 가 된다.

지반의 감쇠를 무시하고 기초에 연직하중 P가 가해졌다고 했을 때의 기초 중앙에서의 모멘트와 기초의 회전각과의 관계는 그림 3의 실선과 같은 관계로 나타낼 수 있다. 그림에서 회전각 $\theta_s (P/(2K_w b^2))$ 는 uplift가 처음으로 발생했을 때를 나타내며 이 때의 모멘트는 $Pb/3$ 이 된다. Uplift가 일어나지 않는 경우 ($|\theta| \leq \theta_s$)에 대해서는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 uplift가 일어나는 경우 ($|\theta| > \theta_s$)에는 기초와 지반

의 접촉된 면적이 변하기 때문에 모멘트와 회전각과의 관계가 비선형적인 관계가 된다. 이러한 비선형성을 나타내는 곡선은 중국적으로 $M=Pb$ 선에 접근하게 된다.

2.3 S 모델

본 연구에서 제안된 S 모델은 기초 밑에 각각 2개의 스프링과 댐퍼가 달려 있는 모델로서 그림 2에 나타난 바와 같다. Chopra에 의해 제안된 등가 Two-Spring 모델은 스프링이 인장에 대해서는 저항을 할 수 없는 성질을 가지나 S 모델에서는 인장에 대해서도 저항을 할 수 있도록 가정을 하였다. 이러한 가정을 함으로써 기초 중앙에서의 모멘트-회전각의 관계를 Winker 모델에 의한 관계와 더욱 근접시킬 수 있다.

건물이 그림 2(b)와 같은 변형을 하였을 때 기초 밑의 왼쪽 스프링은 인장력을, 오른쪽 스프링은 압축력을 받게 된다. 지반의 감쇠를 무시하고 기초에 연직하중 P가 가해졌다고 했을 때 기초 중앙에서의 모멘트와 기초의 회전각과의 관계는 그림 3의 점선과 같이 원점과 A, B, C 점을 차례로 연결함으로써 얻을 수 있다. Winkler 모델에 대한 M- θ 관계는 구조물의 집중질량과 기초의 half base width만 주어지면 그림 3과 같이 오직 하나의 비선형적인 관계로 나타내어진다. 이러한 비선형 관계를 선형화시키기 위해서는 두 점에 의한 관계(bilinear)로는 곤란하며 A, B, C의 세 점이 필요하다. 그림 3의 일점쇄선으로 나타나 관계는 Chopra에 의해 제안된 모델로서 스프링이 인장에 대해서는 저항을 할 수 없으므로 uplift가 일어나고 난 후에는 회전각에 대한 모멘트의 변화가 없다.

지반의 감쇠를 무시하고 기초의 어느 한쪽의 스프링이 있는 곳에서의 반력과 변위와의 관계를 그림 4에 점선으로 나타내었다. 스프링이 압축을 받을 때는 기울기가 K_s 가 되고 인장을 받게 되면 Y가 Y_1 이 될 때까지는 K_s' 의 기울기, 그 이후는 K_s'' 의 기울기를 갖게 되어 인장에 대해서도 저항을 할 수 있도록 한다. Y_1 의 값은 뒤에서 설명하기로 한다. 그림 4의 실선은 Chopra

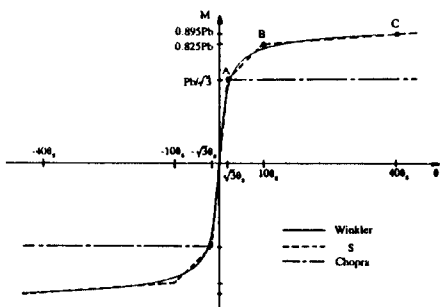


그림 3. 기초 중앙에서의 모멘트 - 회전각 관계

에 의해서 제안된 등가 Two-Spring 모델의 반력-변위 관계이며 스프링이 압축력을 받을 때에는 S 모델과 같이 K_s 의 기울기로 선형적인 관계를 보이지만 기초 한쪽의 스프링이 있는 곳에서의 수직변위(Y)가 영보다 크게 되는 경우에 대해서는 힘을 받지 못하므로 반력이 영이 된다.

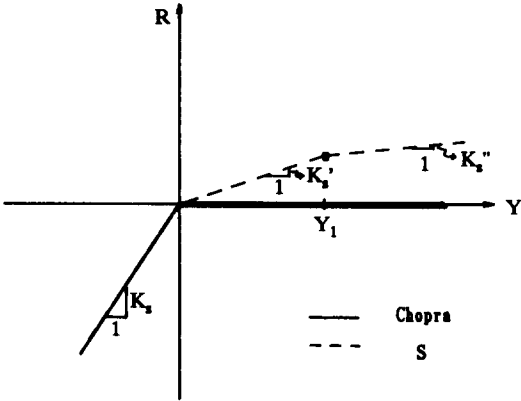


그림 4. 기초 한쪽의 스프링이 있는 지점에서의 반력-변위 관계

본 연구에서 제안된 S 모델은 그림 3의 Winkler 모델에 의한 모멘트-회전각의 비선형 관계를 몇 구간의 선형적인 관계로 나타내는 것으로부터 유도되었다.

2.3.1 스프링 사이의 길이($2b_s$)와 스프링 상수(K_s)

S 모델에서 기초 왼쪽의 스프링이 있는 지점에서 uplift가 일어나는 순간(그림 5)에 기초의 회전각은 다음과 같다.

$$\theta = \frac{P}{2K_s b_s} \quad (1)$$

여기서 스프링 상수 K_s 는 Winkler 기초의 스프링 상수에 half base width를 곱한 값으로서

$$K_s = bK_w \quad (2)$$

이고 이 때, 기초 중앙에서의 모멘트는 다음과 같다.

$$M = Pb_s \quad (3)$$

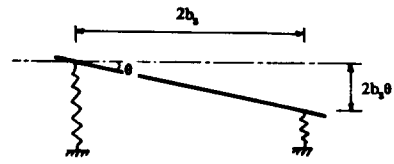


그림 5. Uplift가 일어나는 순간에서의 변위-회전각 관계

Winkler 모델의 선형구간(그림 3의 실선)의 식은

$$M = 2K_w b^3 \theta / 3 \quad (4)$$

와 같다. b_s 를 결정하기 위해 식 (1), (3)을 식 (4)에 대입하고 식 (2)를 이용하여 정리하면

$$b_s = b / \sqrt{3} \quad (5)$$

이 되며 따라서 식(1)과 식(3)은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \sqrt{3} P / (2K_w b^2) = \sqrt{3} \theta_s \quad (6)$$

$$M = Pb / \sqrt{3} \quad (7)$$

S 모델에서 uplift가 일어나는 순간에서의 회전각과 모멘트는 Winkler 모델에서 uplift가 일어나는 순간에서의 값보다 $\sqrt{3}$ 배만큼 크음을 알 수 있으며 이는 half base width가 Winkler 모델의 그것보다 $1/\sqrt{3}$ 배만큼 작음에 기인한다.

2.3.2 Uplift가 일어나는 첫 구간에서의 인장에 대한 스프링 상수(K_s')

Uplift가 일어나는 첫 구간에서의 모멘트-회전각의 관계는 그림 3에서 점 A($\sqrt{3}\theta_s, Pb/\sqrt{3}$)와 점 B($10\theta_s, 0.825Pb$)를 연결하여 얻을 수 있다. 점 B는 Winkler 모델의 M- θ 선 위에 있는 점이 아니고 Winkler 모델의 비선형적인 모멘트-회전각의 관계를 보다 정확하게 대표할 수 있도록 임의로 정한 값이다.

그림6에서 정적하중 P가 동일하다는 조건으로부터

$$K_w b^3 \theta_2 \left(\epsilon - \frac{K_s'}{K_s} (2/\sqrt{3} - \epsilon) \right) = 2K_w b^3 \theta_1 / \sqrt{3} \quad (8)$$

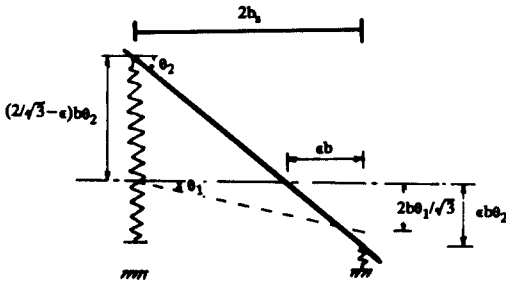


그림 6. Uplift가 일어나는 첫 구간에서의 변위-회전각 관계

여기서 θ_1 은 S 모델에서 uplift가 시작될 때의 회전각으로서 $\theta_1 = \sqrt{3}\theta_s$ 이며 θ_2 는 $10\theta_s$ 가 된다. 또한 K'_s 은 uplift가 일어나는 첫구간의 지반의 인장에 대한 스프링상수이며 ϵb 는 그 때의 기초와 지반 사이의 접촉된 길이이다. 기초 중앙에서의 모멘트는

$$0.825Pb = K_w b^3 \theta_2 \left(\epsilon + \frac{K'_s}{K_s} (2/\sqrt{3} - \epsilon) / \sqrt{3} \right) \quad (9)$$

이며 식 (8)과 식 (9)를 연립하여 풀면 K'_s 과 ϵ 을 구할 수 있다.

2.3.3. Uplift가 일어나는 두번째 구간에서의 인장에 대한 스프링상수 (K''_s)

Uplift가 일어나는 첫 구간의 마지막 점 B($10\theta_s, 0.825Pb$)와 Winkler 모델에서 $\theta = 40\theta_s$ 에 해당하는 점 C($40\theta_s, 0.895Pb$)를 연결하여 uplift가 일어나는 두번째 구간의 모멘트-회전각 관계를 얻는다.

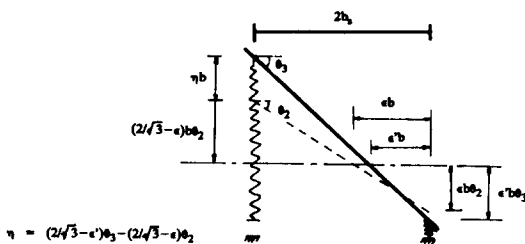


그림 7. Uplift가 일어나는 두번째 구간에서의 변위-회전각 관계

그림 7의 기하학적인 형상으로부터 정적하중 P가 동일하다는 조건을 이용하면

$$\begin{aligned} & K_w b^2 \theta_2 \left(\epsilon - \frac{K'_s}{K_s} (2/\sqrt{3} - \epsilon) \right) \\ &= K_w b^2 \theta_3 \epsilon' - \frac{K'_s}{K_s} (2/\sqrt{3} - \epsilon) K_w b^2 \theta_2 - K_w \\ & b^2 \frac{K''_s}{K_s} \left((2/\sqrt{3} - \epsilon') \theta_3 - (2\sqrt{3} - \epsilon) \theta_2 \right) \quad (10) \end{aligned}$$

와 같고 여기서 θ_3 는 $40\theta_s$ 에 해당한다. 기초 중앙에서의 모멘트에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (0.895 - 0.825)Pb &= \epsilon' K_w b^2 \theta_3 b / \sqrt{3} + \frac{K'_s}{K_s} (2/\sqrt{3} \\ & - \epsilon) K_w b^2 \theta_2 b / \sqrt{3} + K_w b^2 \frac{K''_s}{K_s} \left((2/\sqrt{3} - \right. \\ & \left. \epsilon') \theta_3 - (2/\sqrt{3} - \epsilon) \theta_2 \right) b / \sqrt{3} - \epsilon K_w b^2 \theta_2 b / \sqrt{3} \\ & - \frac{K'_s}{K_s} (2/\sqrt{3} - \epsilon) K_w b^2 \theta_2 b / \sqrt{3} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서 K''_s 은 uplift이 일어나는 2번째 구간의 지반의 인장에 대한 스프링상수이며 $\epsilon' b$ 는 $\theta = 40\theta_s$ 일 때의 지반과 기초의 접촉된 길이이다. 식 (10)과 식 (11)을 연립하여 풀면 K_s, ϵ' 을 구할 수 있고 따라서 Winkler 모델의 비선형적인 M- θ 관계를 비교적 간단한 Trilinear 모델로 나타낼 수 있다.

3. Winkler 모델에 의한 해석 방법

3.1 동적평형방정식

Small deflection을 가정하고 그림 1의 구조물에 대하여 각 층에 대한 수평 방향의 평형을 고려하면 다음과 같은 n개의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [m]\{\ddot{u}\} + [m]\{\dot{h}\}\dot{\theta} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} &= -\{m\} \\ \{1\} \ddot{X}_g(t) \quad (12) \end{aligned}$$

여기서 $[m]$ 은 $n \times n$ 의 차원을 가지는 건물의 질량행렬로서 diagonal matrix이고 $\{h\}$ 는 높이벡터, $[c]$ 는 건물의 감쇠행렬, $[k]$ 는 건물의 강성행렬이다. 또한 $\ddot{X}_g(t)$ 는 수평 방향의 지반가속도이고 $\{1\}$ 은 단위벡터이며 $\{u\}$ 는 건물의 수평 방

항 상대변위, 그리고 θ 는 구조물 전체의 회전각이다.

기초 중앙에서의 모멘트에 관한 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_0\ddot{\theta} + \{h\}^T[m]\{\ddot{u}\} + \{u\}^T[m]\{h\}\dot{\theta} + M_s = -\{h\}^T[m]\{1\}\ddot{X}_g(t) \quad (13)$$

여기서 I_0 는 기초의 관성모멘트(moment of inertia)로서 $I_0 = m_0 b^2 / 3$ 이며 m_0 는 기초의 질량이다. 구조물 전체의 수직 방향의 평형을 고려하면

$$m_t \ddot{y} - F_s = m_t g \quad (14)$$

이 되고 m_t 는 건물 각 층에 집중된 질량과 기초의 집중질량의 합으로서 $m_t = \sum_{i=1}^n m_i + m_0$ 이고 g 는 중력가속도, y 는 구조물 전체의 수직 방향의 변위이다. 식 (12)는 지반에 기초가 완전히 접촉된 상태이거나 부분적으로 분리가 일어난 상태 (uplift condition)일 때에 다 같이 사용되는 식이며 M_s 와 F_s 는 지반과 기초가 접촉된 상태에 따라 변하므로 모멘트와 수직 방향의 평형에 관한 식은 각각 다른 형태가 된다.

기초와 지반이 접촉된 상태에서 M_s 와 F_s 는 다음과 같다.

$$M_s = 2(K_w \theta + C_w \dot{\theta}) b^3 / 3 \quad (15)$$

$$F_s = -2(K_w y + C_w \dot{y}) b$$

Uplift가 일어나는 상태에서는

$$M_s = \mp (K_w y + C_w \dot{y}) (b^2 - (y/\theta)^2) / 2 + (K_w \theta + C_w \dot{\theta}) b^3 / 3 \mp (K_w \theta + C_w \dot{\theta}) (y/\theta)^3 / 3$$

$$F_s = -(K_w y + C_w \dot{y}) (b \mp (y/\theta)) \pm (K_w \theta + C_w \dot{\theta}) b^2 / 2 \mp (K_w \theta + C_w \dot{\theta}) (y/\theta)^2 / 2 \quad (16)$$

이 되며 이 식에서 비선형 항 (y/θ) 들이 포함되어 있음을 알 수 있다. (16) 식에서 \pm , 또는 \mp 부호중 위의 것은 왼쪽 uplift가 일어난 경우, 아래는 오른쪽에서 uplift가 일어난 경우이다.

3.2 Uplift 판정조건

임의의 사건에 대한 기초의 왼쪽과 오른쪽 끝의 반력과 변위를 첨자를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$R_i(t) = -K_w Y_i(t) - C_w \dot{Y}_i(t) \quad (17)$$

$$Y_i(t) = y(t) \pm b\theta(t) \quad (18)$$

여기서 \pm 부호는 앞에서 설명한 바와 같다.

지반이 인장에 대해서 저항을 할 수 없으므로 $R_i(t)$ 가 영보다 작을 때 기초의 왼쪽 또는 오른쪽에서 uplift가 일어날 것이다. 그러므로 첫번째 uplift 판정 기준을 수식으로 나타내면

$$R_i(t) < 0 \quad (19)$$

이 되고 uplift 판정의 또 하나의 다른 조건은

$$Y_i(t) > 0 \quad (20)$$

이다. 여기서 $Y_i(t)$ 는 시간 t 에 대한 기초의 왼쪽 또는 오른쪽 끝의 수직 방향의 변위이다.

4. S모델에 의한 해석 방법

4.1 동적평형방정식

S 모델에 의한 동적평형방정식은 기본적으로 식 (12), (13) 및 (14)와 같다. 이 3개의 식중에서 식 (13), (14)에 포함된 M_s 와 F_s 를 적절하게 결정함으로써 Winkler 모델을 간략하게 Two-Spring 모델로 바꿀 수 있다. 기초와 지반이 완전히 접촉되어 있는 상태에서는 M_s 와 F_s 를 식 (15)와 같이 놓음으로써 Winkler 모델과 완전히 같아질 수 있다.

S 모델에서 uplift가 일어나는 구간을 2단계로 나누기로 한다(그림3의 $\sqrt{3}\theta_s \leq |\theta| \leq 10\theta_s$ 구간과 $|\theta| > 10\theta_s$ 구간). 제1단계에 대한 M_s 와 F_s 는

$$M_s = \mp \left(1 - \frac{K'_s}{K_s}\right) b^2 (C_w \dot{y} + K_w y) / \sqrt{3} + \left(1 + \frac{K'_s}{K_s}\right) b^2 (C_w \dot{\theta} + K_w \theta) / 3$$

$$F_s = -\left(1 + \frac{K'_s}{K_s}\right) b (C_w \dot{y} + K_w y) \pm \left(1 - \frac{K'_s}{K_s}\right) b^2 (C_w \dot{\theta} + K_w \theta) / \sqrt{3} \quad (21)$$

이 되고 \pm 또는 \mp 부호는 앞서 설명한 바와 같다. 제 2단계에 대한 M_s 와 F_s 는 다음과 같다.

$$M_s = \mp \left(1 - \frac{K''_s}{K_s}\right) b^2 (C_w \dot{y} + K_w y) / \sqrt{3} + \left(1 + \frac{K''_s}{K_s}\right) b^3 (C_w \dot{\theta} + K_w \theta) / 3 + 5m_t g (2/\sqrt{3} - \epsilon)$$

$$\left(\frac{K'_s}{K_s} - \frac{K''_s}{K_s}\right) / \sqrt{3} \quad (22)$$

$$F_s = -\left(1 + \frac{K''_s}{K_s}\right) b (C_w \dot{y} + K_w y) + \left(1 - \frac{K''_s}{K_s}\right) b^2 (C_w \dot{\theta} + K_w \theta) / \sqrt{3} - 5m_t g (2/\sqrt{3} - \epsilon)$$

$$\left(\frac{K'_s}{K_s} - \frac{K''_s}{K_s}\right)$$

4.2 Uplift 판정조건

S 모델은 2단계의 uplift 판정 조건이 필요하며 이를 편의상 1단계와 2단계로 구분하기로 한다. 1단계의 uplift 판정 조건은 Winkler 모델의 uplift 판정 기준과 같으며 2 단계의 uplift 판정 조건은 다음과 같다.

$$Y_1(t) > Y_1 \quad (23)$$

여기서 Y_1 은 그림 6에서 $\theta_s=100_s$ 일 때의 왼쪽의 스프링이 있는 지점에서의 수직 방향의 변위로서 다음과 같이 나타내어 진다.

$$Y_1=5m_s g b(2\sqrt{3} - \epsilon) / (b^2 K_w)$$

S 모델에 의한 동적평형방정식은 Winkler 모델에 관한 동적평형방정식 (12), (13) 및 식 (14)로 나타낼 수 있다. 그러나 이 식들에 포함된 M_s 와 F_s 가 결정되며 uplift 제 1단계에서는 식 (21), 제 2단계에서는 식 (22)에 의해서 M_s 와 F_s 가 결정되며 uplift 제 1단계에서는 식(21), 제2단계에서는 식 (22)에 의해서 M_s 와 F_s 를 결정할 수 있다. 그러므로 구조물 전체에 대한 강성과 감쇠행렬은 uplift 판정 조건에 따라 5가지의 경우로 다르게 구성되며 각 경우에 대한 지배방정식을 수치적분법에 의해 해석할 수 있다. 본 연구에서 사용한 수치적분법은 constant average acceleration method이다.

동적해석시 uplift 판정조건에 의하여 바로 전의 상태와 다른 상태가 되면, 즉, 강성행렬과 감쇠행렬을 재구성해야 할 때에는 계산상의 오차를 줄이기 위하여 시간간격이 더 작아져야 할 필요가 있다. 해석시간 동안에 이러한 경우를 만나게 되면 기초 양쪽 끝의 수직변위의 바로 전 단계의 값과 현 단계의 값의 비례 관계로부터 그 구간에 대해서 시간간격을 새로 구성하여 동적해석을 수행하였다. 이와 같은 기법을 사용하면 입력하는 시간간격이 매우 작지 않아도 되며 따라서 계산 시간을 절약할 수 있다.

5. 예제 해석

5.1 해석 모델과 입력 지진

예제로 1경간 10층 철근콘크리트건물을 택하

여 Winkler 모델과 S 모델에 대하여 uplift를 허용하여 각각 동적해석을 수행하였다. 구조물의 2개의 모드에 대한 감쇠비는 5%를 주었고, 구조물의 크기 및 집중질량을 그림 8에 나타내었다. 지반의 강성상수와 감쇠상수는 지반을 충질지반인 것으로 하여 선형반공간이론에 따라 계산을 하였다.

예제에서 사용된 지진하중은 El Centro(1940)와 Pacoima dam(1971) 지진기록이다. El Centro 지진기록은 SOOE 성분의 지반가속도를 사용하여 최대 지반가속도는 2.12초일 때 0.349 g이다. Pacoima dam 지진기록은 S16E 성분을 사용하였으며 최대 지반가속도는 7.74초에서 1.171 g이다. 두 개의 지진기록은 모두 기초의 바로 밑에 작용한 것으로 가정하였으며 10초까지의 값을 입력데이터로 사용하였다.

5.2 결과 분석

지진하중에 대한 구조물의 동적거동에 uplift가 미치는 영향을 알아 보기 위하여 uplift를 구속한 경우와 허용하였을 때에 동적 해석을 하여 얻은 결과를 그림9에 나타내었다. 그림 9는 Winkler 모델에 El Centro 지진기록을 입력하여 구한 밀면전단력의 시간에 따른 변화이다. 여기서 기초의 uplift가 밀면 전단력의 감소를 초래한다는 사실을 알 수 있으며 이러한 감소 효과는 uplift가 일어나는 시간이 길고 그 양이 클수록 커지게 된다.⁶⁾

Uplift를 허용하고 기초를 Winkler 모델로 했을 때와 S 모델로 하였을 때에 동적해석을 하여 얻은 밀면전도모멘트(base overturning moment)의 시간에 따른 변화를 그림 10에 나타내었다. 그림 10은 El Centro 지진기록을 입력한 경우이고 여기서 본 연구에서 제안된 S 모델이 Winkler 모델과 잘 일치함을 알 수 있다. 건물 최상부의 수평 방향 전체변위의 시간에 따른 변화를 나타내는 그림 11에서도 두가지의 경우가 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 12는 동적해석으로부터 구한 기초 중앙에서의 모멘트와 회전각의 관계를 나타낸다. 그림 12에서 3가지의 경우에 대한

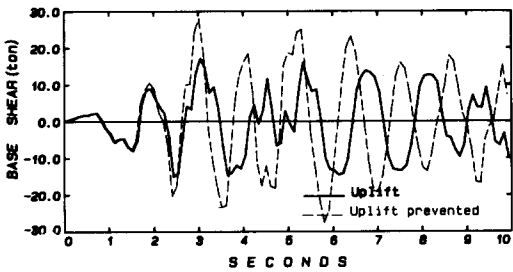
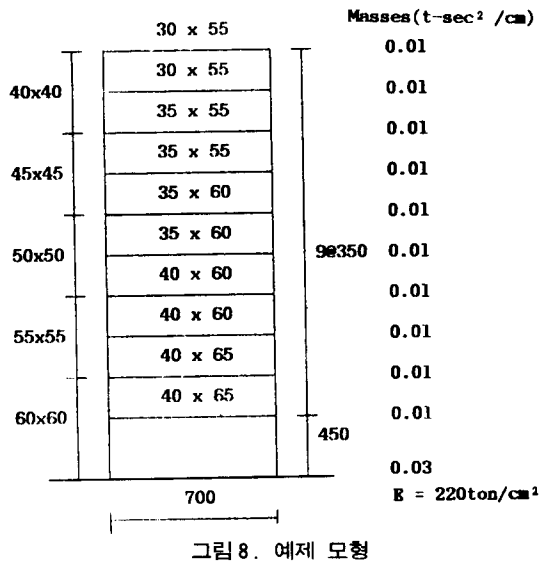


그림 9. Uplift를 구속한 경우와 허용한 경우의 밑면전단력

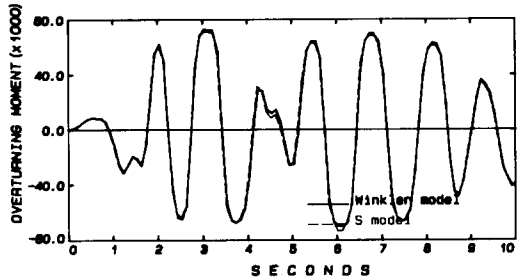


그림 10. 밑면전도모멘트의 변화

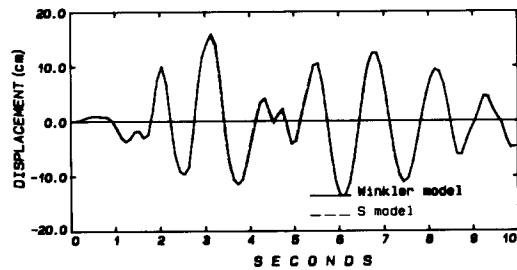
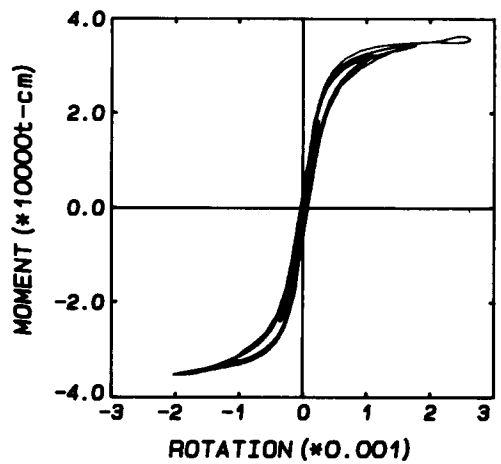
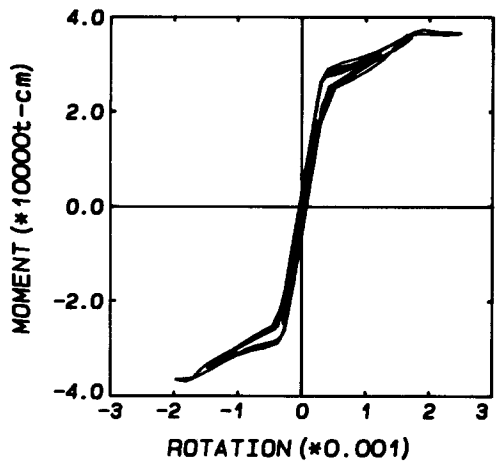


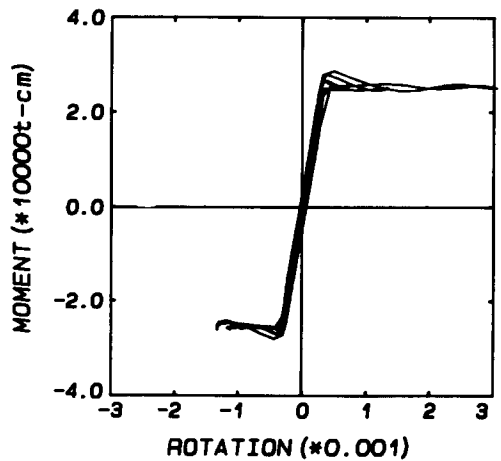
그림 11. 건물 최상부의 수평방향 변위



(a) Winkler model



(b) S model



(c) Chopra's model

그림 12. 기초의 모멘트 - 회전각 관계

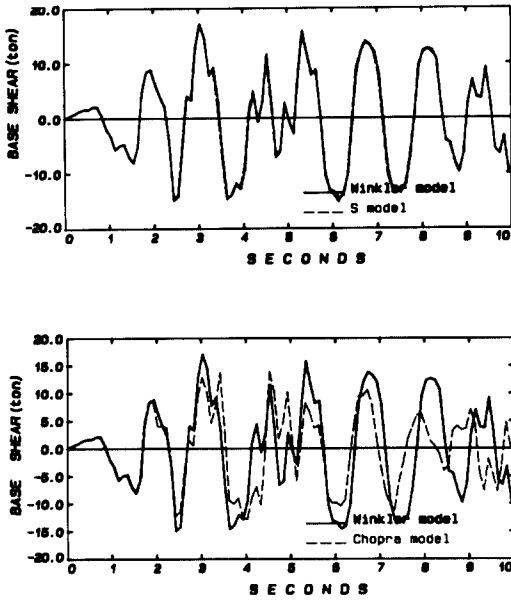


그림 13. El Centro 지진기록을 입력한 경우의 밀면전단력의 변화

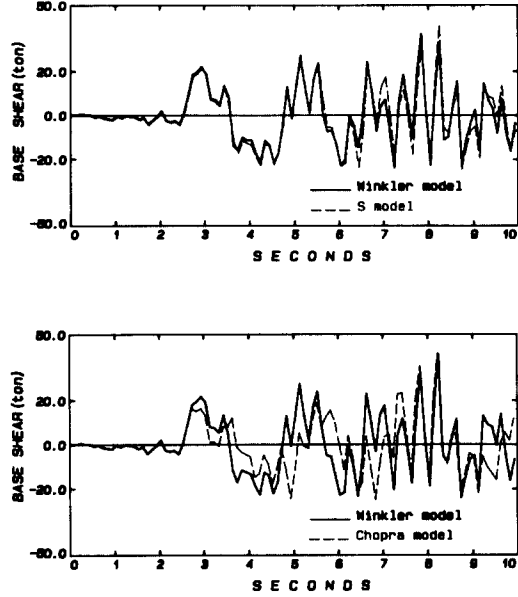


그림 14. Pacoima dam 지진기록을 입력한 경우의 밀면전단력의 변화

관계를 나타내었는데 Chopra에 의해 제안된 등가 Two-Spring 기초에 관한 M- θ 관계는 Winkler 모델의 경우와 많이 다름을 알 수 있다. 이러한 차이는 uplift가 일어나는 시간이 더욱 긴 경우에 대하여 커질 것임은 당연하며 M- θ 관계를 Winkler 모델의 경우와 일치시킬수록 동적해석으로부터 얻게 되는 결과들이 더욱 비슷하게 된다. 밀면전단력의 시간에 따른 변화를 보여주는 그림 13에서 본 연구에서 제안된 S 모델의 경우가 Chopra에 의해 제안된 모델에 비해 더욱 잘 일치함을 알 수 있다.

Pacomia dam 지진을 입력하였을 때에는 uplift가 일어나는 시간이 상당히 길어지며 θ 의 최대 값이 El Centro 지진기록에 의해서 구한 값의 약 6배가 된다. 이렇게 큰 지진이 입력되었을 때에는 Chopra에 의해서 제안된 모델에 의한 결과가 Winkler 모델과 더욱 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며 이러한 차이는 본 연구에서 제안된 S 모델을 사용함으로써 해결할 수 있다(그림 14).

6. 결론

기초의 uplift의 영향을 고려한 건축구조물의 지진하중에 관한 동적거동을 조사하였다. 지반의 연성과 감쇠는 기초의 전 길이에 걸쳐 스프링 뎀퍼가 고르게 분포되어 있는 Winkler 모델에 의해서 나타내었으며, 복잡한 Winkler 모델을 효율적으로 나타낼 수 있는 간단한 S 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 제안된 S 모델은 기초에 정적하중이 작용했을 때의 기초 중앙의 모멘트와 회전각의 관계로부터 유도하였다. Winkler 모델의 비선형적인 모멘트와 회전각의 관계를 3구간의 선형적인 관계로 잘 나타낼 수 있으며 이러한 일치는 동적해석으로부터 나오는 결과들에 대해서도 볼 수 있다. 2구간의 선형적인 관계를 사용하면 어느 특정한 지진에 대해서는 Winkler 모델을 잘 대표할 수 있으나 일반적인 경우에 대한 적용은 곤란하다. 3구간의 선형적인 관계를 사용할 경우에는 거의 모든 입력지진에 대하여 Winkler 모델을 잘 대표할 수 있다.

지진하중에 대하여 기초의 uplift의 영향을 고려한 건축구조물의 동적해석은 본 논문에서 제안된 S 모델에 의하여 어떠한 종류의 지진하중에 대해서도 복잡하고 비경제적인 Winkler 모델을 사용한 해석을 보다 간편하며 경제적으로 수행될 수 있다.

참고문헌

1. Chopra, A.K. and Yim, C.S., Earthquake Responses of Structures with Partial Uplift on Winkler Foundation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.12, 1984, pp.265-281
2. Yim, C.S. and Chopra, A.K., Simplified Earthquake Analysis of Multistory Structures with Foundation Uplift, Journal of the Structural Engineering, Vol.111, 1985, pp.2708-2731
3. Arthur, A. Huckelbridge, and Ray, W. Clough,

Seismic Response of Uplifting Building Frames, Journal of the Structural Division ASCE, Vol. 104, 1978, pp.1211~1229.

4. I.N. Psycharis and P.C. Jennings, Rocking of Slender Rigid Bodies Allowed to Uplift, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, 1984, pp.57-7
5. I.N. Psycharis, Dynamics of Flexible Systems with Partial Lift-off, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, 1983. pp. 501-521
6. 송윤환, Foundation Uplift의 영향을 고려한 건축구조물의 지진하중에 대한 동적 해석, 석사 학위논문, KAIST, 1988
7. Meek, J.W., Effects of Foundation Tipping on Dynamic Response, Journal of the Structural Division ASCE, Vol.101, 1975, pp.1297-1311.
(1988년 6월 11일 접수)