

말뚝기초의 내진설계

이 인 모*
오 진 기**

1. 머리말

지진은 우리가 경험하는 자연재해 중에서 심한 지각변동과 막대한 인명 및 재산피해를 가져오는 무서운 현상이다. 이러한 지진은 지진 다발 지역인 지진대에서 주로 발생하고 있으나 지진규모와 빈도의 차이는 있지만 지구표면 어디에서나 발생할 수 있다는 것이 지진학자들의 일반적인 견해이다. 특히 우리나라도 통념적으로 지진에 대한 안전지대로 인식되어 왔으나 역사기록으로 보면 많은 지진이 과거에 발생되었음을 볼 수 있으며 20세기에 들어와서도 지진활동이 활발해지고 있음이 여러가지 관측에서 볼 수 있다. 그러므로 건물의 고층화와 밀집화 현상이 점점 심화되어 있는 우리의 현실을 비추어 볼 때 큰 규모의 지진이 발생한다면 그 피해가 대형화 될 우려가 있다. 따라서, 최근 우리나라에서도 지진으로 인한 재해를 최소한으로 감소 또는 방지하기 위하여 일반 건축 구조물의 내진설계를 의무화 하도록 규정하고 있다. 그러나 지진하중에 대한 지반-말뚝-구조물 시스템의 내진해석과 설계는 아직도 완전하게 정립되지 못한 실정이며, 지금까지 우리나라에서 원자력 발전소, 해양 구조물등과 같은 특수 구조물과 몇몇 고층건물을 제외한 대부분의 일반 건축물에 대한 말뚝의 설계도 지반의 동적특성을 제대로 반영하지 않는 정적해석이 수행되고 있다. 그렇지만 정적하중과 지진

하중의 하중특성은 근본적인 차이가 있으므로 이에 대한 설계를 추가하여야 한다.

따라서 본고에서는 깊은 기초의 내진설계에 적용하기 위해 이제까지 연구발표된 여러가지 내진해석 방법을 간략하게 소개하고 이를 비교, 검토함으로써 동적특성을 어느 정도 반영하는 실용적인 설계법을 제시하고자 한다.

2. 내진 해석방법

2.1 유사정적해석(Pseudo-Static Analysis)

이 방법은 간단하고 실용적인 적용을 위해 등가 정적 수평하중(Equivalent-Static Lateral Load)을 대체하여 Subgrade Reaction Theory, 탄성해석(Elastic Analysis) 및 Broms Theory와 같은 정적해석 방법을 이용해 지진효과에 저항하도록 설계하는 것이다.

1) Subgrade Reaction Theory

1896년 Winkler에 의해 처음 제안되었던 지반 거동의 Subgrade Reaction Model은 지반이 일련의 불연속한 선형 탄성 스프링으로 대체된 모델이다. Winkler지반 모델에서 한점이 응력 P 와 변위 ρ 는 수평재하에 대해 K_h 로 정의되는 지반계수를 통하여 관계된다고 가정한다. 그러므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P = K_h \rho \quad (1)$$

* 고려대학교 공과대학 토목공학과 조교수

** 고려대학교 대학원 토목공학과

여기서, 계수 K_h 는 힘/길이³의 단위를 가지고 있다. 말뚝은 보통 거동이 보 방정식(Beam Equation)에 의해 결정되는 얇은 Strip으로써 작용한다고 가정하여 평형방정식이 유도된다. 따라서 축하중 항까지 고려한 수평재하 말뚝의 변위에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.

$$E_p I_p \frac{d^4 \rho}{dz^4} + (P_z) \frac{d^2 \rho}{dz^2} + K_h \rho d = 0 \quad (2)$$

여기서, ρ 는 변위, z 는 깊이, P_z 는 깊이 z 에서 말뚝에 대한 축하중, d 는 말뚝의 폭 혹은 직경이다. 위의 식에 대한 해법은 Hetenyi's Solution, Scott' Solution, p - y 극선법등 여러가지 방법들이 제안되었다.

2) 탄성 해석(Elastic Analysis)

이 해석방법은 실제지반을 이상적인 연속탄성체로 가정하고 말뚝의 거동을 묘사하는 방법이다. 이 방법에 대해 여러학자들이 논문을 발표하였는데 대부분 원리가 비슷하며, 다만, 말뚝작용에 관한 가정들에서 약간의 차이가 있다. 이중 실무에서 많이 사용되는 방법으로 Poulos의 해석방법이 있는데 설계에 쉽게 적용할 수 있도록 Floating말뚝과 Socketted말뚝에 대해 포괄적으로 도표와 공식을 제안하였다. 설계시에는 지반계수가 깊이에 따라 일정한 경우와 선형적으로 변하는 경우에 대해서 해석을 할 수 있도록 도표화 하였으며, 두 경우 모두 자유단 말뚝(Free Head Pile)과 고정단 말뚝(Fixed Head Pile)으로 분리하여 최대상대변위 및 최대모멘트를 산출할 수 있다.

3) Broms Theory

Broms는 횡방향 극한 지지력 개념을 이용하여 말뚝의 거동을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 강성계수(Stiffness Factor)에 따라 장주(Long Flexible Pile)와 단주(Short Rigid Pile)로 나누어지는데 장주일 경우에는 말뚝 자체의 항복전도 모멘트에 의해 지배받고 단주는 흙의 저항력에 의하여 지배받는 것이 보통이며, 말뚝머리의 구속조건과 지반의 종류에 따라 도표와 공식이 제시되어 있어 설계에 쉽게 이용될 수 있다.

2. 2 동적해석

1) Equivalent Cantilever 방법

Lumped Parameter의 가장 단순한 예로 실무에서 간략법으로 많이 이용된다. 전체 System은 단자유도 Mass-Spring-Damper모형을 사용하며, Equivalent Cantilever 길이는 축하중, 수평하중 또는 모우먼트에 의해 결정된다. 일반적으로 축하중시 주변마찰력이 무시되는 선단지지말뚝에서는 $L_c = L$ 이며 마찰말뚝일 경우에는 $L_c = L/2$ 가 되며 다른 조건일 경우에는 보간법을 이용하여 구하면 된다. 수평하중 또는 모우먼트 작용시 Equivalent Cantilever 길이는 다음과 같다.

$$L_b = 1, 2/\beta$$

$$\beta = (kr/EF)_{1/4} \quad (3)$$

k : 지반반력계수

r : 파일의 반경

kr 값의 흙의 전단계수(Shear Modulus) G 로부터 얻어진다.

$$kr = \frac{8*\pi*G}{\ln(EI/r^4) + 10.7 - \ln(kr)} \quad (4)$$

2) Chandrasekaran과 Prakash가 제안한 방법

Chandrasekaran과 Prakash는 동적하중을 받는 지반-말뚝 상호작용 모델을 집중질량, 스프링, Dashpot으로 나타내어 동적 말뚝기초의 거동해석과 함께 실험을 병행하여 해석을 실시하였으며 각종 Parametric Study를 통하여 지반-말뚝 시스템의 고유진동주기를 구할 수 있는 식을 제안하여, 이 고유진동 주기를 첫번째 모드로 하여 상부구조물이 말뚝머리에 집중된 단자유도계(Single-Degree of System)로 가정한 설계응답 스펙트럼을 이용하여 상부구조물 혹은 말뚝두부의 횡방향 변위를 구할 수 있도록 하였다. 또한 Parametric Study로부터, 말뚝에 걸리는 최대 휨모멘트를 계산할 수 있는 공식과 도표를 제시하였다. 원 제안자의 해석자체가 동적해석이었고, 응답 스펙트럼을 이용한다는 면에서 이 방법을 아주 단순한 동적해석 형태로 볼 수 있다.

3) Gazetas가 제안한 방법

Gazetas는 연직으로 전파하는 조화 전단파(ω)를 이용하여 동적해석을 수행한다. 이 방법은 동적하중을 받는 지반-말뚝 상호작용 모델을 집중질량, 스프링, Dashpot으로 나타내어 동적 말뚝기초의 거동해석과 함께 실험을 병행하여 해석을 실시하였으며 각종 Parametric Study를 통하여 지반-말뚝 시스템의 고유진동주기를 구할 수 있는 식을 제안하여, 이 고유진동 주기를 첫번째 모드로 하여 상부구조물이 말뚝머리에 집중된 단자유도계(Single-Degree of System)로 가정한 설계응답 스펙트럼을 이용하여 상부구조물 혹은 말뚝두부의 횡방향 변위를 구할 수 있도록 하였다. 또한 Parametric Study로부터, 말뚝에 걸리는 최대 휨모멘트를 계산할 수 있는 공식과 도표를 제시하였다. 원 제안자의 해석자체가 동적해석이었고, 응답 스펙트럼을 이용한다는 면에서 이 방법을 아주 단순한 동적해석 형태로 볼 수 있다.

Harmonic S-Wave)로 인한 선단지지 단말뚝의 동적거동을 3가지 지반모델에 대해 Kinematic Interaction 과 Inertial Interaction으로 나누어 해석을 실시하였으며, 포괄적인 Parametric Study를 통하여 무차원 도표와 공식으로 결과를 제시하였다. 또한 이들 결과를 무차원 Interaction Factor, Amplification Factor 및 말뚝두부 임피던스의 형태로 제시하였고, 그의 연구결과 지반층에 대한 응답에 가장 영향을 주는 요소가 강성비(E_p/E_s), 세장비(L/d), 진동수비(f/f_i), 상대 진동수비(f_{sl}/f_i)임을 발견하였다. 여기서, f_s 는 작용하중의 진동수이며, f_i 은 교란되지 않은 지반의 고유진동수이고, f_{sl} 는 말뚝으로 지지된 상부구조물의 고유진동수이다.

4) 말뚝의 최대곡률 산정

Oweis는 지진으로 인한 지반운동(Ground Motion) 동안 설계를 지배하는 말뚝의 최대곡률(휨응력)을 계산할 수 있는 간단한 방법을 제안하였다.

제안된 방법의 주요가정은 첫째, 지반의 전단응력과 변형은 암반으로 부터 연속적으로 전파하는 전단파(Shear Wave)의 결과이고 둘째, 말뚝은 지반과 동일하게 거동 한다는 것이다. 이 기본적인 단계는 (1)지반계수에 부합하는 변형을 사용한 지진 전단 변형의 산정과 (2) 깊이에 따른 전단변형의 변화율로 곡률을 산정하는 것이다.

위의 방법에 대한 적용시에 상부구조물의 효과를 고려하지 못할지라도 지반-말뚝시스템의 휨효과는 고려할 수 있다.

3. Cyclic효과 및 군효과의 고려

전절에서 서술한 방법은 단(Single)말뚝에 대한 해석의 경우이다. 그러나 설계시군말뚝에 의한 횡방향 변위의 증가효과가 고려되어야 한다. 정확한 군효과의 산정을 위해서는 군 말뚝 전체에 대한 해석이 실시되어야 하나 해석이 복잡하기 때문에 단지 군말뚝 상호간의 Interaction만을 고려한 근사법이 설계시에 적당하다. 본절에서는 등가 피어개념, 정적 Interaction Factor Approach, Prakash의 제안, Kaynia와 Kausel이 제안한 방법, Gazetas 방법이 언급되었으며, 이외에도 말뚝 상호간의

상호작용 효과를 고려하지 않는 방법, Novak & Sheta가 제안한 군효과비(Group Efficiency Ratio)를 이용하는 방법, Equivalent Bent Method등이 있다.

1) 등가 피어개념(Equivalent Pier Concept)

여러개의 말뚝이 동일한 변위(Displacement)가 발생하는 경우 즉, 여러개의 말뚝이 Cap으로 씌워져 있어 일체가 되어있는 경우에는 군말뚝을 하나의 등가피어로 환산하여 처짐등을 계산할 수 있으며, 이 개념은 주로 정적인 하중에 대한 근사적 해석법으로 사용되어져 왔다. Novak의 실험결과에 의하면 등가 피어개념으로 구한 군말뚝의 강성은 실험결과와 잘 일치하며, 감쇠는 이론치가 실험치보다 약 2배정도 과대하다고 한다.

2) 정적 Interaction Factor Approach

이 방법은 Poulos가 제안한 방법으로 정적 하중에 대한 Interaction Factor가 도표의 형태로 제시되어 있다. 이는 군효과를 수평하중과 모멘트하중을 받는 2개의 인접 말뚝사이의 Interaction Factor를 유도하여 일반적인 군말뚝으로 확장시켰다. 이 Interaction Factor는 다음과 같이 정의된다.

$$ar = \frac{\text{인접말뚝에 기인한 추가변위}}{\text{자기하중(Own Loading)에 기인한 변위}} \quad (5)$$

위의 ar 는 다양한 하중조건 및 경계조건에 대해 도표로 제시되어 있다. 동일한 하중을 받는 n 개의 말뚝에 의한 군효과를 고려한 변위와 단 말뚝의 변위사이의 관계는 다음과 같다.

$$U_G = U_1 \sum_{i=1}^n a_i \quad (6)$$

이 방법은 말뚝사이의 간격이 좁을 때 또는 말뚝수가 적을 때 유효하며, 동적 군효과로 산정된 경우와는 차이가 있으므로 수정이 요구된다. 그러나 낮은 진동수에서는 어느정도 정확하다고 알려져 있다.

3) Prakash가 제안한 방법의 군효과

Prakash는 정하중 조건에 대해 하중이 작용하는 방향에서 말뚝중심간의 간격이 $8d$ 이하이고 하중

작용방향의 직각방향에서 적어도 2.5d이하일 때는 군효과가 존재한다고 제안하였다. 하중이 작용하는 방향으로 간격이 3d이면 군 말뚝의 지지력 계수값은 단 말뚝값의 25%가 취해지며 다른 간격에서는 보간법이 적용된다. 또한 반복하중의 작용시에는 변위가 증가하므로(50회 반복 이상에서 첫하중 작용시에 비해 최소 2배이상) 위의 모든 경우를 고려했을 때 K_{group} 은 K_{single} 의 10% 혹은 그 이하가 된다고 제시하였다.

4) Kaynia와 Kause이 제안한 방법

Kaynia and Kausel은 3차원 연속체를 사용하여 군말뚝의 동적 거동을 산정하기 위한 해를 공식화하였고 동적 군효과의 산출을 위해 Poulos의 중첩 구조에 대한 적용성을 조사했다. 그들이 제안한 동적 Interaction Factor는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{동적 Interaction Factor} = \frac{\text{말뚝2의 동적변위}}{\text{말뚝1의 정적변위}} \quad (7)$$

또한 수평하중을 받는 수평변위 및 회전각에 대한 Interaction곡선이 이들에 의해 도표로 제시되었다. 이 방법으로 산정한 결과는 Novak의 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

5) Gazetas방법의 군 효과

이 방법은 선단지지 단말뚝과 군말뚝의 지진응답을 비교할 목적으로 Prakash가 제안한 군효과에 입각하여 확장되었다. 해석시 군말뚝의 강성은 단말뚝 강성의 10%를 말뚝본수와 함께 고려해 근사적으로 산정된다. 이를 해석할 때에는 반무한체 해석 Program을 이용하며, Coupling Term을 무시한 말뚝의 정적 강성계수, 동적 강성계수, 동적 감쇠계수, 구조물의 제원 및 지반의 전단계수등이 입력으로 사용된다.

4. 해석 방법 비교

지금까지 나열한 해석방법들은 여러나라에서 현재 많이 사용되고 있는 내진해석 방법을 토대로 해서 정리하였다. 필자들이 위에서 언급한 방법들을 설계목적에 맞게 모델링하여 비교검토한 결과 여섯가지 특징으로 요약할 수 있다.

첫째, 유사정적해석방법의 응답들은 대체적으로 비슷하게 산출되며, 탄성해석과 Broms The ory는 간단한 공식과 도표로 이루어져 있고 동적해석의 결과와 비교하여 볼때 응답의 한도가 크게 벗어나지 않으므로 현장에서 이용되기에 적합한 방법이라고 사료된다.

둘째, Equivalent Cantilever방법은 비록 지반의 감쇠효과를 고려하지 않는 비효율적인 방법이지만 약간의 동적특성을 반영할 수 있는 가장 간단한 방법이다.

셋째, Chandrasekaran과 Prakash가 제안한 방법은 구조물의 중량과 동적 지반반력계수의 영향이 응답변화의 주된 요인이 판명되었고, 다른 방법과 비교해 볼 때 대체적으로 과대설계가 되므로 적당한 보정을 필요로 한다.

네째, 최대 곡률방법에서 말뚝의 최대 곡률은 일단 주어진 지진에 대해 지반의 응답을 알 수 있으면 쉽게 얻어지고 이를 이용하여 휨모멘트 및 휨응력을 구할 수 있다. 따라서 이 값은 말뚝 설계의 보조자료로서 유용하다.

다섯째, 말뚝의 군효과는 5가지 방법으로 검토되었는데 간단한 설계를 위해서는 Kaynia와 Kausel이 제안한 방법이 가장 합리적인 방법이며, 정적 Interaction Factor Approach나 Prakash방법은 과대평가 되지 않도록 보정을 요한다.

마지막으로, Gazetas방법은 Kinematic Interaction 효과와 Inertial Interaction효과로 나누어 해석을 실시하여 지진에 따른 지반의 효과, 말뚝의 효과 및 구조물의 효과를 나타내므로 설계시에 유사정적 해석의 검사용으로 필요하다고 판단된다.

이제까지의 결론을 종합해 볼 때 단말뚝의 내진 설계시 유사정적 해석방법을 사용해도 큰 무리는 없으며, Gazetas방법을 이용해 검사가 이루어 진다면 안전한 설계가 된다고 생각한다. 또한 군 효과는 Kaynia와 Kausel이 제안한 방법이 가장 합리적이며 정적 Interaction Factor Approach나 Prakash방법도 과대평가 되지 않도록 보정하면 설계에 이용할 수 있다고 사료된다.

5. 맺음말

본 고에서는 내진설계가 법제화됨에 따라, 기초

구조물도 이의 고려가 요구됨을 감안하여 우리나라에서 가장 많이 사용되는 말뚝기초의 내진설계법을 소개하고, 여러 방법들을 비교한 결과를 제시하였다. 각 설계회사들이 아직도 기초구조에 대한 내진을 고려함에 어려움을 겪고 있는 듯 하며, 특히 말뚝기초의 설계에는 더욱 그렇다. 내진설계가

법제화 됨에 따라 말뚝의 본 수가 연직하중에 의해 지배받는 것이 아니라 지진에 의한 수평하중에 의해 지배받는 것이 대부분임을 볼 때, 말뚝기초의 내진 설계법을 업계에서 정립함이 무척이나 시급한 것으로 생각되며, 본 글이 이에 조금이나마 도움이 되길 바란다.