

도로교 말뚝기초의 간편한 내진설계절차

Simple Seismic Design Procedure for Pile Foundation of Highway Bridge

최 용 규¹⁾ Choi, Yongkyu
서 정 해²⁾ Seo, Jeong-Hae
김 동 철³⁾ Kim, Dong-Chul

Abstract

For seismic design on pile foundation of highway bridge, various methods have been suggested. It is known that dynamic analysis method is complicated and has some limits in design application. In this study, a simple seismic design procedure for pile foundation of highway bridge using the equivalent static analysis method was suggested and was applied to a reported design case. To confirm the applicability of a suggested simple seismic design method, the results calculated by the equivalent static analysis method were compared with the results based on the analytical exact solution. Also, the analyzed results considering the superstructure - pile - soil interaction and using seismic ground motion as earthquake forces were compared with the results based on the analytical exact solution.

요 지

도로교의 대표적인 기초형식인 말뚝기초에 대한 내진설계방법으로 여러 가지 방법들이 제안되어 있다. 이 중 동적 해석법과 같은 복잡한 절차에 의한 해석은 적용성에 한계가 있을 수 있고, 실무에서의 적용상 많은 어려움이 예상되었다. 본 연구에서는 등가정적해석법을 이용한 도로교 기초 말뚝에 대한 간편한 내진설계절차를 제안하였으며, 사례에 적용하였다. 또한, 제안된 간편한 내진설계절차에 사용할 수 있는 해석코드의 적용성을 확인하기 위하여 수식적 정해에 의한 계산결과를 기준 값으로 하여 해석코드에 의한 해석결과들을 비교·분석하였다. 또한, 지진 진동을 이용한 동적 해석결과와 SPS 상호작용(Superstructure - pile - soil interaction)을 고려한 해석결과를 수식적 정해에 의한 결과와 비교·분석하였다.

Keywords : Pile foundation, Seismic design, Simple seismic design procedure, SPS(Superstructure - pile - soil interaction)

1. 서 론

국내의 경우 지진에 대한 피해가 다른 나라들에 비해 미미하여 내진설계가 보편화되어 있지 않고 원자력 발전소와 같은 중요한 구조물에 대해 제한적으로만 실시되었다. 그러나 최근 우리 나라에서도 소규모 지진의 발생빈도가 증가하면서 내진설계의 필요성이 부각

되고 있다. 지진에 의한 피해사례가 발생되지 않고 있다고 하더라도 인명피해와 재산상의 손실을 초래할 수 있는 지진에 대한 대비는 필요할 것으로 보인다.

현재 우리 나라의 내진 설계에서는 교량 또는 건축 구조물 등의 상·하부를 구분하지 않고 뼈대구조로 가정하여 설계하고 있으나, 말뚝기초는 지반과 말뚝과의 상호 작용으로 인하여 상부 구조물처럼 뼈대구조물로

* 1 정희원, 경성대학교 건설·환경공학부 부교수
* 2 정희원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사
* 3 정희원, 대원토질(주) 연구원

거동하지는 않는다. 또한, 상부구조와 기초구조물을 일괄적으로 모델링하여 해석할 수 있는 해석 및 설계방법은 개발되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 내진설계시 상부구조와 기초구조를 따로 모델링하고 해석하여 상호 보완적으로 해석해야 할 수 밖에 없으며, 기초구조에 대해 실무적으로 간편하게 적용시킬 수 있는 내진해석 절차를 제안해야 할 필요성이 제기되었다.

도로교의 확대기초를 지지하는 대표적인 예인 기초 말뚝에 대한 내진설계방법은 다양하게 제안되었다. 이중 동적해석법은 복잡한 해석절차로 인하여 적용성에서 한계가 있었으며, 실무에서의 적용상 많은 어려움이 예상되었다. 또한, 동적해석법은 이론적으로 모든 경우에 적용할 수 있고 보다 정확한 해석을 수행할 수 있다고 알려져 있으나, 그림 1에 나타낸 교량기초인 직경 1,000 mm의 현장타설말뚝에 대한 전단력 해석결과를 살펴보면 동적 해석결과는 등가정적 해석결과와 큰 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다(김명모와 최용규, 2001).

본 연구에서는 정적해석법을 이용한 도로교 기초 말뚝에 대한 간편한 내진설계절차를 구체적으로 제안하였으며, 문헌에 보고된 사례에 적용하였다. 또한 내진해석방법들의 적용성을 검토하기 위하여 해석코드를 이용한 해석결과들을 수식적 정해에 의한 결과와 비교·분석하였다.

2. 말뚝기초의 등가 정적 내진설계법

도로교 설계기준(2000)에서는 지진에 대한 말뚝기초의 설계는 등가 정적 하중법을 이용하도록 규정하였으므로, 등가 정적 하중법을 이용한 해석방법에 대하여 요약하였다.

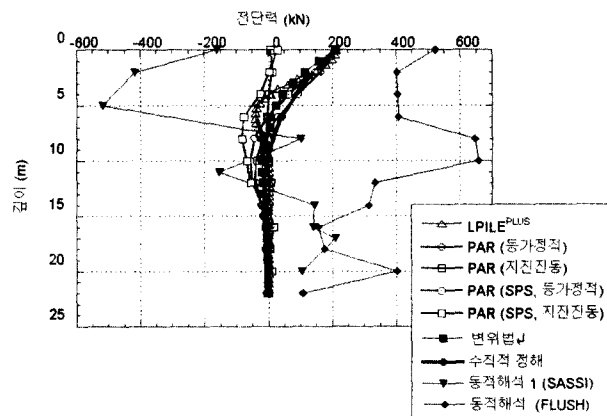


그림 1. 등가정적 해석과 동적해석에 의한 전단력 비교

2.1 등가 정적 설계수평하중의 산정

등가 정적 하중법에서 설계지진계수는 내진성능목표, 지진구역 그리고 지반의 종류에 따라 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\text{설계지진계수} = \text{지진구역계수} \times \text{위험도 계수} \quad (1)$$

또는,

$$\text{설계지진계수} = \text{지반의 종류에 따른 지진계수} \times \text{위험도 계수} \quad (2)$$

여기서, 식(1)에 의한 설계지진계수는 기반암에서의 지진 가속도를 결정하는데 사용할 수 있으며, 식(2)에 의한 그것은 지반의 특성을 고려한 지표에서의 설계수평지진계수인데 등가 정적 설계수평하중(이하에서는 “등가수평하중”이라고 함.)을 결정하는데 사용할 수 있다. 또한, 지진구역계수, 지반의 종류에 따른 지진계수, 위험도 계수 등은 참고문헌들(도로교 설계기준, 2000; 김수일 등, 2000; 건설교통부, 1997)을 참고할 수 있을 것이다.

등가정적하중법에서 등가수평하중은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{등가수평하중} = k_h \times W \quad (3)$$

여기서, k_h 는 지반종류별 설계수평지진계수인데 참고 문헌(김수일 등, 2000)을 참고할 수 있으며, W 는 말뚝두부에 작용된 연직하중이다.

2.2 정적수평하중을 받는 말뚝의 해석방법들

지진시, 연직진동성분은 말뚝기초의 거동에 거의 영향을 미치지 못하지만 수평진동성분은 말뚝기초의 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Choi와 O'Neill, 1997). 등가정적하중법에서는 지진의 영향을 식 (2)와 (3)에 의해 계산된 등가수평하중으로 환산하여 말뚝두부에 작용시킨 후 정적수평하중을 받는 말뚝의 해석방법들을 이용하여 정적인 해석을 수행한다.

흔히 사용하고 있는 해석방법으로는 일본도로교시방서(1996)에서 채택하고 있는 변위법(또는 진도법), Poulos와 Davis (1980)에 의해 제안된 탄성해석법, 탄성지반위에 지지되는 탄성보의 방정식에 기초한 지반반력해석법, 전자의 방정식을 경계조건과 하중조건을 도입하여

수식적으로 풀이한 수식적 정해(목영진, 1998), P - y 모델에 기초한 말뚝해석코드를 이용한 방법 그리고 말뚝의 수평정재하시험방법 등을 들 수 있다. 여기서, 탄성해석법과 지반반력해석법은 말뚝기초공학 관련 서적들에서 흔히 볼 수 있는 방법이고 말뚝정재하시험방법은 말뚝수평정재하시험시 두부의 고정조건 등의 재현이 어려워 적용이 쉽지 않은 방법이다. 본 연구에서는 수식적 정해, 해석코드방법 등에 의한 해석을 수행하였으므로 이들 방법들에 관하여 설명하였다.

2.2.1 수식적 정해

탄성지반상에 지지되는 탄성보이론에 기초하여 작성된, 수평하중을 받는 말뚝기초에 관한 지배방정식 식(4)를 다음과 같은 가정하에서 수식적으로 풀이하였다.

- EI는 일정하다.
- 긴말뚝이며 하중이 말뚝 두부에만 작용한다.
- α_h (지반반력계수)는 깊이에 따라 일정하다. 여기서, 일반적으로 지반반력계수는 k_h 라고 나타내지만 지진수평계수와 구분하기 위하여 α_h 로 표시하였다.

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} = P = -\alpha_h \cdot y \quad (4)$$

$$y = e^{-\beta z} (C \cdot \cos \beta z + D \cdot \sin \beta z) \quad (5)$$

여기서,
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{\alpha_h}{4EI}} \quad (m^{-1}) \quad (6)$$

말뚝머리부의 경계조건(하중작용상태와 말뚝머리 구속상태)에 따라 적분 상수 C와 D를 결정할 수 있으며, 수평변위(y) 뿐만 아니라 경사각(α), 모멘트(M), 전단력(V) 그리고 지반반력(P)의 말뚝관입깊이에 따른 분포도를 구할 수 있는데, 풀이결과를 참고문헌(목영진, 1998)에 요약하였다. 여기서, A_1, B_1, C_1, D_1 은 βz 에 따른 함수로 나타낼 수 있으며, 간편하게 적용할 수 있도록 관입 깊이의 증가에 따라 도표화 할 수 있다(목영진, 1998).

2.2.2 말뚝해석코드 방법

수평하중에 대한 말뚝해석 코드는 많이 제안되어 있으나, 본 연구에서는 LPILE^{PLUS}와 PAR을 이용한 해석을 수행하였으므로, 이 코드들을 소개하였다. 그러나, 다른 해석코드들도 비슷한 결과를 줄 것으로 예상된다.

(1) LPILE^{PLUS}

연직말뚝에 말뚝축방향하중 Q가 작용하고 지반의 수평하중에 대한 수평변위의 비선형 거동관계를 P-y곡선으로 모델링하는 경우 지배방정식 식(7)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI = \frac{d^4 y}{dz^4} + Q \frac{dy^2}{dz^2} + \alpha_h \cdot y = 0 \quad (7)$$

여기서, $\alpha_h(= P/y)$ 는 지반반력계수이며, 깊이(z)와 수평변위(y)에 따라 비선형적으로 변하는 값이다.

이 미분방정식을 유한차분법에 의하여 수치해석적 형태로 해를 구하고 말뚝머리의 경계조건(하중작용상태와 말뚝머리구속상태)을 적용하여 해를 구할 수 있도록 작성된 말뚝해석용 코드의 대표적인 것이 LPILE^{PLUS}(Reese와 Wang, 1997)이다.

(2) PAR(Pile Analysis Routines)

말뚝 - 지반(-상부구조물)의 상호작용을 정적 및 동적 하중하에서 해석할 수 있는 해석코드이며 연직하중 뿐만 아니라 수평하중하에서도 해석가능하다. 또한, 말뚝체에 작용된 하중 뿐만 아니라 변위를 외력으로 하더라도 해석할 수 있다. 말뚝구조체는 유한요소기법(FEM)에 의하여 모델링한다. 그리고, 인접지반은 스프링과 감쇠기 요소를 이용하여 모델링하며 말뚝에 인접한 흙의 응답(즉, 하중 - 변위 관계)은 개별적인 비선형 선요소(discrete nonlinear line element)에 의해 모델링할 수 있는데, 이들 요소들은 다음과 같은 내용들을 포함하고 있다.

- 사질토와 점성토에 대한 API기준(1993)
- 정하중 영향, 완전주기하중영향, 변형을 하중영향, 주기적인 하중영향
- 정적 또는 동적해석
- 방사감쇠의 단순화
- 흙과 말뚝의 변형관계를 나타내는데 비선형적인 말뚝직경의 영향고려

지반의 응답은 매우 일반적인 다선 비선형요소로 나타내었으며 이 요소는 자동발생되거나 사용자가 입력할 수 있다. 하중 - 변형관계는 P - y관계나 t - z/q - z관계로 구분하여 나타낼 수 있으며, 이 관계도 자동발생되거나 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

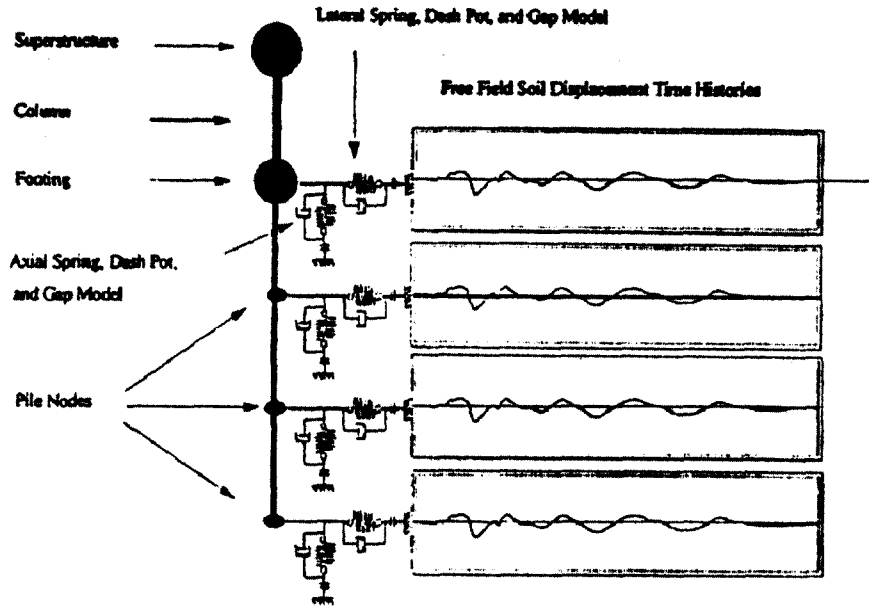


그림 2. PAR에 의한 지반 - 말뚝 - 상부구조물의 상호작용 해석 예

PAR에서는 말뚝에 3차원적인 동적 하중이나 변위를 작용시켜 해석할 수도 있으며, 3차원적인 지반진동(가속도 - 시간 이력 이나 변위 - 시간 이력)을 작용시켜 지진에 대한 말뚝의 거동을 해석할 수도 있다. 또한, 이와 같은 경우, 말뚝 - 지반 - 상부구조의 상호작용해석도 가능하다. 즉, 상부구조물의 자중을 교각거리 위치에, 그리고 교각과 확대기초의 자중의 합을 확대기초위치에 각각 집중질량으로 작용시켜 해석할 수 있다(그림 2). 이 방법은 말뚝의 해석시 작용하는 하중을 실제와 비슷하게 모델링하여 실제에 근접한 말뚝의 거동을 모사할 수 있다.

3. 등가정적하중법에 의한 간편한 내진 설계 절차

등가 정적하중법(건설교통부, 2000)에 의하여 기초의 내진설계를 수행할 때에는 구조물의 평형조건을 만족하도록 지진시 기초의 지진하중(즉, 연직반력, 수평반력 및 모멘트)을 결정해야 한다.

이에 기초하여 간편하게 적용할 수 있는 내진 설계 절차를 다음과 같이 제안하였으며 그림 3에 흐름도를 요약하였다.

(1) 액상화의 판정 및 확대 기초의 중심에 작용하는 지진하중 계산

상부구조, 교각부, 확대기초 등의 자중을 계산하고, 액상화의 우려가 있는 지반은 안전성을 평가하여 불안

정한 경우 대책을 수립한다. 설계수평지진계수를 고려하여 등가 수평지진력을 계산한다. 확대기초의 중심에서 평형조건을 만족하도록 지진하중(연직반력, 수평반력, 모멘트)을 구한다.

(2) 균 말뚝의 해석

동일한 확대기초아래에서 하중을 지지하는 말뚝들이라도 개별말뚝의 하중분담은 다를 수 있으므로 교축 방향과 교축 직각 방향에 대한 균말뚝해석을 통하여 개별 말뚝이 부담하는 하중을 계산하고, 이중 가장 큰 하중을 받는 말뚝을 선정한다. 이 때, 균말뚝해석용 코드를 사용할 수 있다.

(3) 단일 말뚝의 해석

최대 하중이 작용하는 말뚝에 대하여 해석 코드에 의하여 단일 말뚝해석을 수행한다. 여기서, 각 말뚝에 발생하는 수평 변위, 전단력, 휨 모멘트 등을 계산하여야 하며, 현장여건 및 시공조건 등을 감안하여 말뚝머리의 고정조건도 다양하게 변화시켜 해석할 수 있다.

(4) 말뚝기초의 설계

도로교 설계기준(건설교통부, 2000)에 채택된 허용응력설계법에 따라 계산된 수평변위, 전단력, 그리고 모멘트를 만족시킬 수 있도록 말뚝기초의 구성부재에 대한 응력 검토를 실시한다.

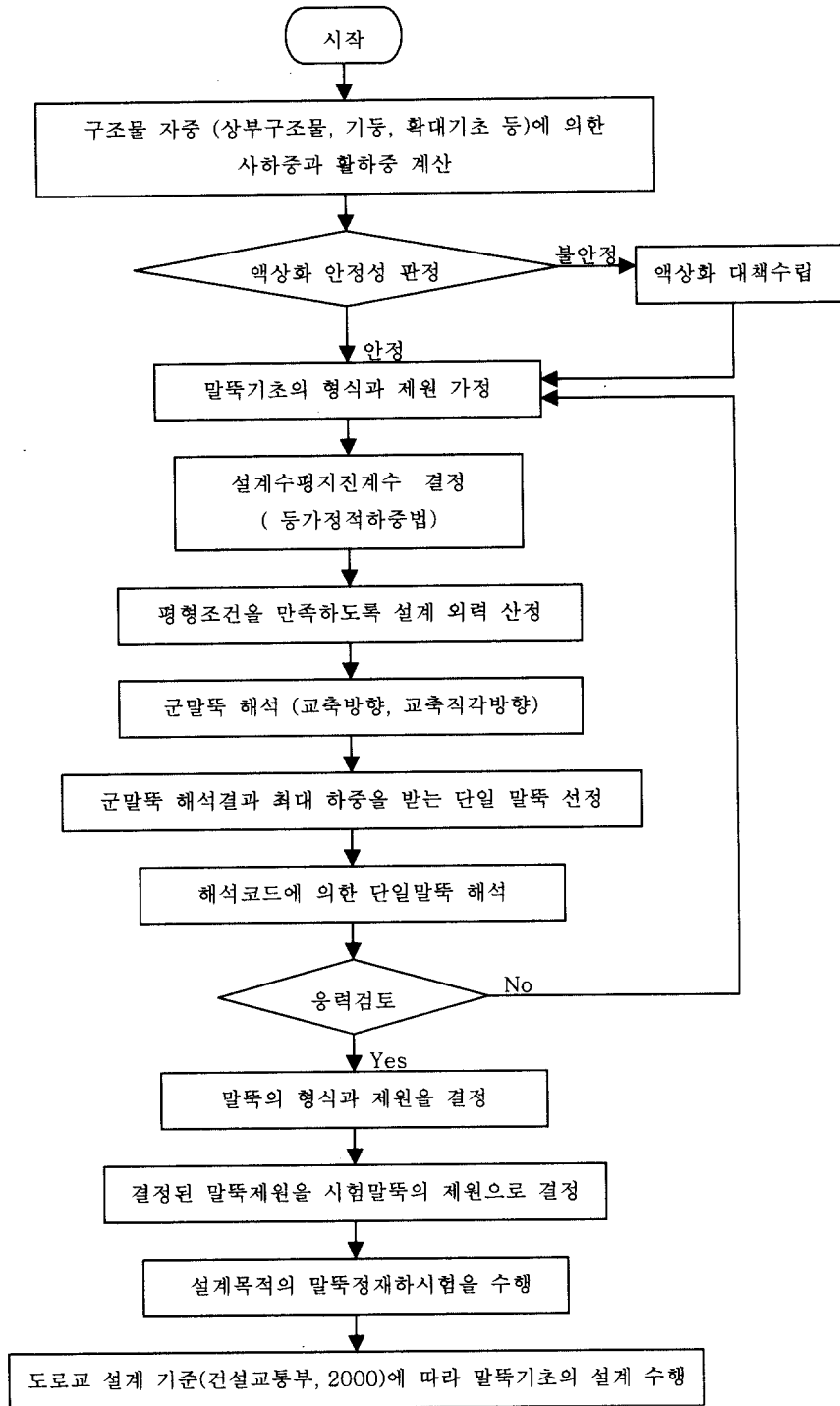


그림 3. 간편한 내진 해석절차

(5) 말뚝기초의 지지력과 침하에 대한 검토

내진설계절차는 말뚝기초의 예비설계단계에서 수행되어야 하며, 예비설계단계 선정된 말뚝을 시험말뚝으로 하여 검증시험을 수행하여 지지력과 변위량에 대한 검토를 실시하여야 한다. 말뚝기초에 대한 설계단계는 도로교 설계기준(건설교통부, 2000)의 말뚝기초 설계(5.8절)에 규정되어 있다.

4. 내진설계의 해석 사례

본 연구에서는 말뚝기초의 내진설계를 위한 해석을 수행하기 위하여 3개의 사례를 선정하였다. 도로교의 각기 다른 형식의 말뚝기초에 대하여 해석을 수행하였으며, 그 결과는 비슷한 양상을 나타내어(서정혜, 2000), 대표적인 사례에 대하여 설명하였다.

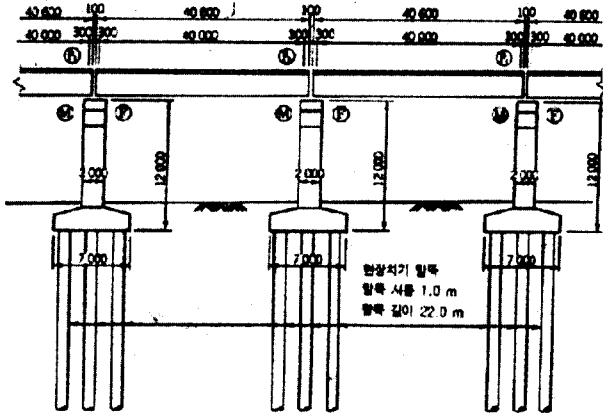


그림 4. 사레 교량의 종단도

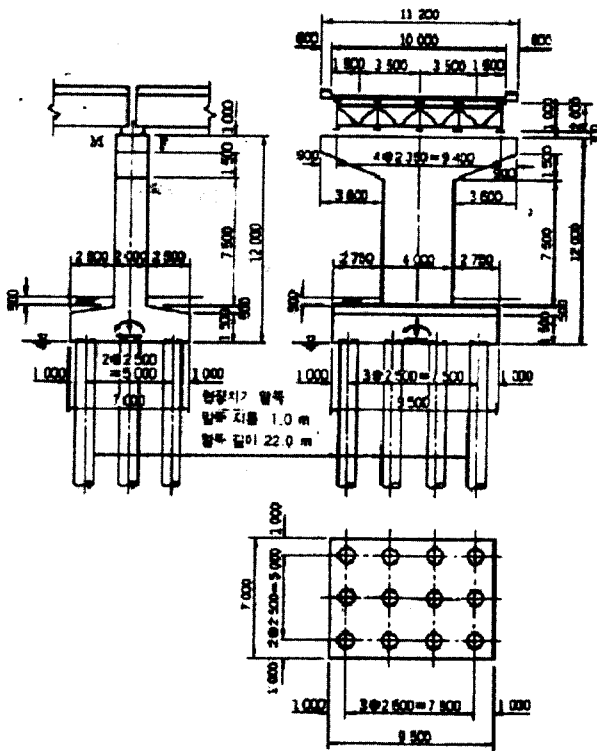


그림 5. P₃ 교각의 형상 치수도

4.1 설계조건

해석대상으로 그림 4에 나타난 단순합성형교의 교각을 지지하는 군말뚝기초를 선정하였으며, 그림 5와 그림 6은 각각 내진해석을 수행한 말뚝기초의 제원과 지층 구성을 보여준다.

4.2 액상화의 검토

그림 5에서 알 수 있듯이 지표면에서 20m까지는 사질토이며 N치도 2 ~ 16이고 지하수위도 높은 느슨한

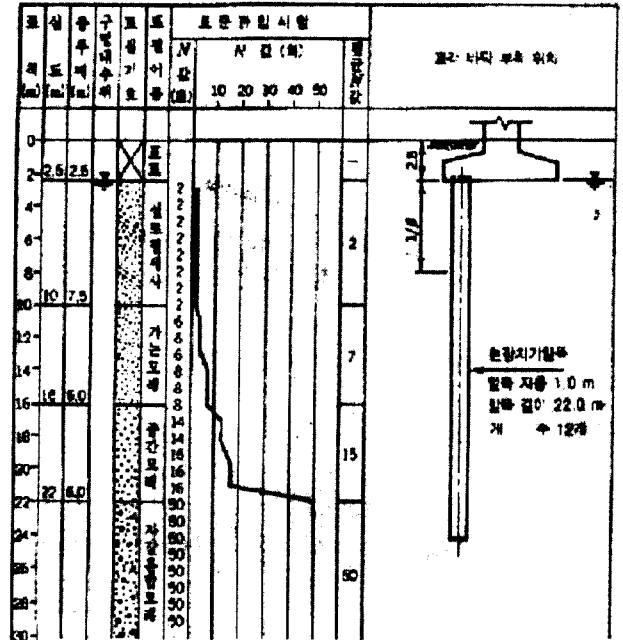


그림 6. 사레현장의 지층 구성

포화 사질토이므로 지진시 액상화 가능성이 우려되어 일본도로교시방서 방법에 따라 액상화에 대한 검토를 실시한 결과, 본 사례는 액상화에 대하여 안전한 것으로 판단되었고, 자세한 것은 참고문헌(과학기술, 1997)을 참조할 수 있을 것이다.

4.3 등가 정적 하중법에 의한 내진해석 사례

4.3.1 등가 지진하중의 계산

(1) 등가 수평하중의 계산

모래층의 N치가 15이하이므로 내진설계기준(II) (건설교통부, 1997)에서 분류한 S_E지반에 해당하였다. 사레 교량은 지진구역(II)에 건설되고, 1등급 교량이며, 붕괴 방지 수준으로 설계한다고 가정하면 설계수평지진계수 k_h는 참고문헌(김수일 등, 2000)을 참조하여 0.24로 결정할 수 있었으나, 계산의 편의를 위하여 0.25로 하였다. 등가 수평하중은 다음과 같이 계산할 수 있었다.

$$P_h = 0.25 \times (4508 + 5545.04) = 2513.25 \text{ kN}$$

(2) 등가 지진 하중의 계산

교축방향과 교축직각방향의 등가지진하중을 계산하면 표 1과 같다.

표 1. 교축방향과 교축직각 방향의 등가지진하중

	교축방향	교축직각방향
연직지진하중(kN)	10778.53	10778.53
수평지진하중(kN)	2513.31	2513.31
모멘트(kN · m)	19344.42	21936.52

4.3.2 간편한 내진설계절차에 의한 해석 결과

(1) 지진시 최대하중이 작용하는 말뚝선정

군말뚝 해석코드인 3DPILE에 의하여 교축 및 교축직각 방향으로 해석을 수행하여 지진 시 최대하중을 부담하는 말뚝기초를 선정하였다. 교축직각 방향으로 등가 지진하중이 작용할 경우 제 1열에 있는 4개의 말뚝이 최대의 하중을 부담하였으며, 말뚝두부에 작용하는 최대 하중(수직력, 수평력, 모멘트)을 표 2에 요약하였다. 여기서, 수평하중에 대한 해석코드인 PAR에 의한 지반 - 말뚝 - 상부구조물(SPS)의 상호작용을 고려한 해석에서는 상부구조물의 자중은 각 말뚝에 분배하여 집중질량화하였으며, 기둥과 확대기초의 자중은 군말뚝해석결

과에 따라 각 말뚝에 분배하여 집중질량화하였다.

(2) 단일 말뚝의 해석결과

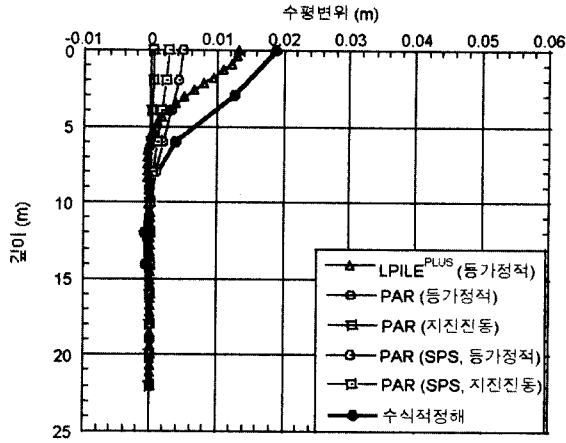
지진시 최대 하중(수직력, 수평력, 모멘트)이 작용되는 말뚝에 대하여 수평하중 작용시 해석코드인 LPILE^{PLUS}와 PAR을 사용하여 해석을 수행할 경우 표 3에 나타난 것과 같은 시공조건과 말뚝머리 고정조건을 고려하여 해석을 수행할 수 있다. 여기서, 해석조건 BC1은 확대기초만 시공되어 상부구조물의 연직하중이 작용하지 않은 상태에서 말뚝기초의 머리를 고정시킨 경우인데, 이 경우는 해상에 돌출된 말뚝기초의 지진에 대한 안정성 검토시 필요할 수 있다. 그러나, 해석조건 BC2는 상부구조물까지 시공되어 연직하중이 작용되고 말뚝머리가 고정된 경우이며, 해석조건 BC3는 상부구조물까지 시공된 상태에서 지진에 의하여 말뚝머리가 힌지된 경우로 구분할 수 있다. 그리고, 각 해석조건에서 PAR을 이용한 해석시 지진진동을 입력시켜 해석을 수행하는 경우(GM)와 지반 - 말뚝 - 상부구조물의 상호작용을 고려하여 해석하는 경우(SPS)를 추가하였다.

표 2. 지진시 말뚝에 작용하는 최대하중

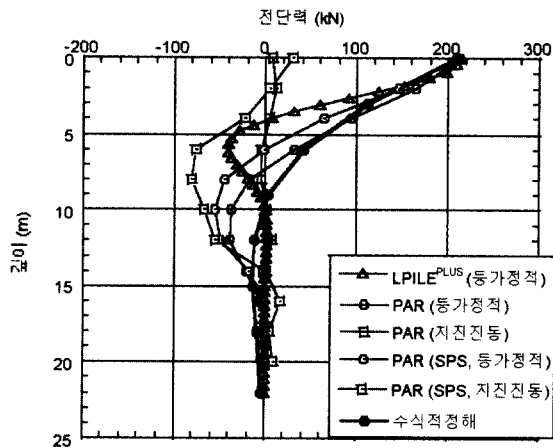
말뚝머리 고정조건	해석조건	해석 수단	수직력(kN)	수평력(kN)	모멘트(kN · m)
고정	일반	LPILE ^{PLUS} , PAR	2497.73	209.52	-378.18
	SPS 상호작용	PAR	188.55(상부구조물) 2485.57(교각+확대기초)	209.52	-378.18
힌지	일반	LPILE ^{PLUS} , PAR	2216.07	209.52	-378.18
	SPS 상호작용	PAR	188.55(상부구조물) 2027.52(교각+확대기초)	209.52	-378.18

표 3. 다양한 해석 조건 요약

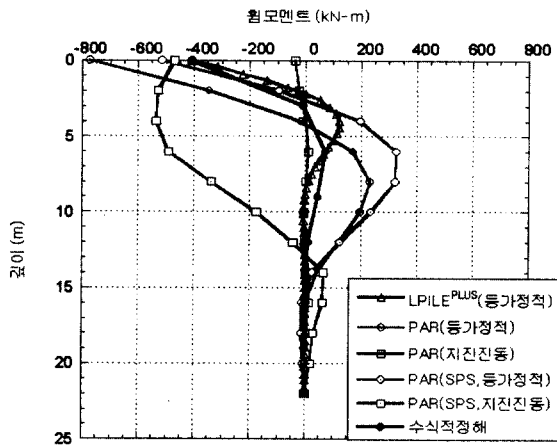
해석코드	말뚝머리 고정조건	연직력 작용	수평력 작용	모멘트 작용	지진진동 고려	SPS 상호작용 고려	기호구분
LPILE ^{PLUS}	1 고정	X	O	O	X	X	BC1(등가정적)
	2 고정	O	O	O	X	X	BC2(등가정적)
	3 힌지	O	O	X	X	X	BC3(등가정적)
PAR	1 고정	X	O	O	X	X	BC1(등가정적)
		X	X	O	O	X	BC1(지진진동)
		X	O	O	X	O	BC1(SPS, 등가정적)
		X	X	O	O	O	BC1(SPS, 지진진동)
	2 고정	O	O	O	X	X	BC2(등가정적)
		O	X	O	O	X	BC2(지진진동)
		O	O	O	X	O	BC2(SPS, 등가정적)
		O	X	O	O	O	BC2(SPS, 지진진동)
	3 힌지	O	O	X	X	X	BC3(등가정적)
		O	X	X	O	X	BC3(지진진동)
		O	O	X	X	O	BC3(SPS, 등가정적)
		O	X	X	O	O	BC3(SPS, 지진진동)



(a) 수평변위



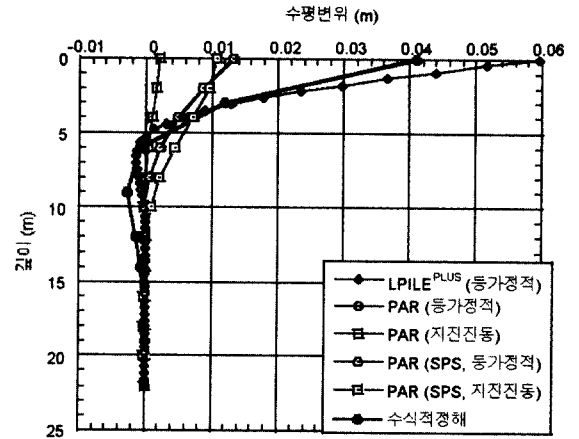
(b) 전단력



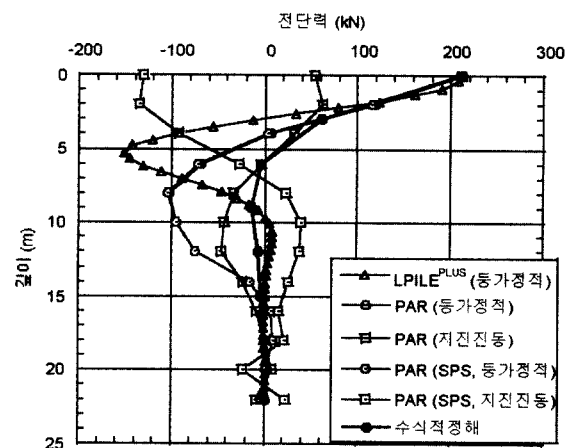
(c) 휨모멘트

그림 7. 말뚝머리가 고정된 경우(BC2)에 대한 해석결과의 비교

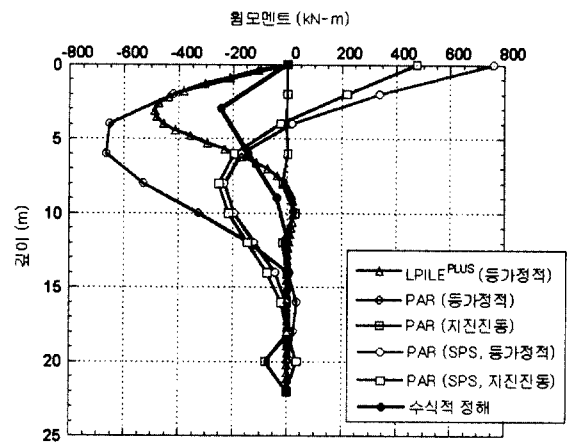
LPILE^{PLUS}와 PAR을 이용하여 해석가능한 조건들을 표 3에 요약하였다. 여기서, 본 해석사례의 경우 확대기초가 지중에 관입되어 있어 해석조건 1에 의한 해석은 크게 중요하지 않을 것으로 예상되었으므로 해석조건 2와 3에 의한 해석만을 수행하였다. 해석결과를 토대로



(a) 수평변위



(b) 전단력



(c) 휨모멘트

그림 8. 말뚝머리가 힌지된 경우(BC3)에 대한 해석결과의 비교

말뚝에 발생하는 수평변위, 전단력, 모멘트를 말뚝의 관입길이에 따라 도시할 수 있었다. 그림 7에는 상부구조물까지 완성되고 말뚝머리가 고정된 상태에 대한 해석결과를 도시 하였으며, 그림 8에는 상부구조가 완성되고 말뚝머리가 힌지된 상태에 대한 해석결과를 도시하였다.

4.4 사례해석결과 비교 및 분석

4.4.1 수평변위

말뚝머리 고정조건은 수평변위량을 중시한 설계의 필요성 여부에 따라 적절히 선택되어야 한다. 예를 들면, 도로교 등에서는 교량의 낙하방지가 설계 조건으로서의 가장 중요한 항목의 하나로 되어 있으므로 수평변위가 특히 문제가 된다. 말뚝의 허용수평변위량은 보통 말뚝 지름의 1%이며, 최소값은 15 mm로 규정하고 있다.

사례는 소구경 균말뚝의 경우로 긴 말뚝(Long pile)의 거동을 하는 것으로 나타났다. 말뚝머리로부터 0.4L(여기서, L = 말뚝의 길이)이내에서 수평변위가 발생하였다. 말뚝머리가 고정된 경우가 말뚝머리가 힌지된 경우에 비해 수평변위량이 작은 것으로 나타나 말뚝머리가 고정된 경우가 내진해석적으로 우위에 있는 것으로 판명되었다.

말뚝머리가 고정된 경우 LPILE^{PLUS}에 의한 결과가 수식적 정해에 가장 근접한 것으로 나타났으며 PAR에 의한 결과는 등가정적하중을 고려하여 해석한 경우가 가장 큰 수평변위를 나타내었다. 즉, 수식적 정해에 의해 계산된 수평변위는 20 mm 정도로 나타났으므로, 통상적인 허용 수평변위량인 10 mm를 초과하였다.

LPILE^{PLUS}에 의한 수평변위는 13 mm 정도 였으나 PAR에 의한 수평변위는 매우 작은 값으로 나타나 최대 5 mm 정도 였다.

말뚝머리가 힌지된 경우 수식적 정해에 의해 계산된 수평변위는 40 mm 정도 였으며, 이 값은 말뚝머리가 고정된 경우에 비해 2배를 상회하였다. LPILE^{PLUS}에 의한 수평변위는 수식적 정해에 의한 수평변위보다 크게 산정 되었으며 말뚝머리가 고정된 경우에 비해 4배를 훨씬 초과하였다. PAR에 의한 수평변위는 최대 13 mm 정도였으며, 등가정적하중은 고려하여 해석한 경우가 가장 큰 수평변위를 나타내었다.

수식적 정해에 의한 수평변위를 기준으로 할 때 등가정적하중법에 의한 해석결과(LPILE^{PLUS}(등가정적), PAR(등가정적))들이 수식적 정해에 의한 해석값에 근접하였으나 지진진동을 고려한 경우와 SPS상호작용을 고려한 경우에는 수식적 정해에 의한 값과 큰 차이를 나타내었다.

4.4.2 전단력

말뚝머리가 고정된 경우 등가정적하중을 고려하여

LPILE^{PLUS}와 PAR에 의해 해석된 최대 전단력이 수식적 정해에 의해 계산된 최대 전단력과 동일한 값을 나타내었다. 말뚝두부에서 최대 전단력이 발생하였으며 지중으로 관입되면서 전단력이 크게 감소하였다. 그러나, 말뚝의 지중관입부에서 발생된 전단력의 분포양상은 대체로 비슷하였으나 지진진동을 고려한 해석결과는 다소 다른 양상을 나타내었다. 이와 같은 경향은 말뚝머리가 힌지된 경우에도 비슷하였다.

4.4.3 모멘트

말뚝머리가 고정된 경우 긴 말뚝의 거동을 나타내었다. 말뚝두부에서 최대 휨모멘트가 발생하였으며 말뚝두부로부터 0.4L이내에서 대부분의 휨모멘트가 발생하였다. 수식적 정해에 의한 모멘트를 기준으로 할 때 등가정적하중법에 의한 LPILE^{PLUS}와 PAR의 해석결과가 가장 잘 부합되었다. 등가정적 하중법에 의한 해석결과의 경우, 말뚝의 지중관입부에서 모멘트는 급격히 감소하였다.

말뚝머리가 힌지된 경우 0.2 L 이내에서 최대 모멘트가 발생하였다. 등가정적하중법에 의해 해석된 모멘트가 수식적 정해에 의한 모멘트와 비슷한 분포양상을 보였으나, 그 값은 2배 이상 큰 값을 나타내었다.

지진진동을 고려한 경우와 SPS상호작용을 고려한 경우 말뚝머리고정조건에 관계없이 PAR에 의한 해석값은 수식적 정해에 의한 값과 다소 상이한 경향을 나타내었다.

이와 같은 경향은 모멘트 뿐만 아니라 수평변위와 전단력에서도 나타났는데, 그 이유를 다음과 같이 추정하였다. 즉, 지진진동을 고려한 해석에서는 지반의 진동에 대한 말뚝의 동적 응답이 제대로 나타나지 않는 것으로 보였으며, SPS상호작용을 고려한 경우 그림 2에 있는 것과 같이 기둥 위에 집중질량(lumped mass)을 작용시켜 해석을 수행하기 때문에 기초 부분만을 모델링하는 등가정적해석방법의 경우와 다소 다른 경향을 나타내는 것으로 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 수평말뚝 해석코드를 이용하여 실무에서 간편하게 적용할 수 있는 내진설계법을 제안하였으며, 설계 사례에 적용하여 분석하였다. 이때, 지진 시 실제구조물에 대한 실측자료를 구할 수 있

다면 그 값을 기준값으로 설정하는 것이 바람직하다고 생각되었으나, 실측 자료를 구하는 것이 어려웠으므로 수식적 정해에 의한 값을 기준으로 하였다. 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안한 간편한 내진설계절차를 요약하면 다음과 같다.
 - 1) 구조물의 자중과 이들에 의한 모멘트의 계산; 2) 진도법에 의한 설계진도를 이용하여 등가 지진하중을 계산; 3) 2)에서 산정된 하중 작용시 균말뚝 해석 코드에 의한 균말뚝 해석; 4) 균말뚝 해석결과 중 최대 하중을 받는 단일 말뚝 선정; 5) 수평하중작용시 해석코드를 이용한 단일말뚝의 해석 수행; 6) 단일 말뚝에 대한 해석결과 중 최대 모멘트와 전단력에 대한 응력 검토; 7) 말뚝의 제원의 결정.
- (2) 본 연구에서 제안한 내진설계절차는 실무에 간편하게 적용할 수 있을 뿐만 아니라 등가정적하중법을 이용한 해석 결과는 수식적 정해에 의한 값과 가장 잘 부합되었다.
- (3) 해석코드에 의한 등가정적 해석의 경우 수식적 정해와는 달리 수직하중을 고려하여 해석이 가능하였으므로 시공단계별 해석이 가능하였다.
- (4) SPS 상호작용을 고려하여 해석한 경우 실제 교량구조물에서 상부구조물까지도 함께 모델링할 수 있었으나 해석결과는 신뢰할 만하지 못하였다. 또한, 지진동을 고려한 경우의 해석결과도 마찬가지였다.
- (5) 지반의 $p-y$ 곡선을 이용한 해석코드의 경우 지반의 비선형 변형 특성이 고려되어야 하는 도로교 기초말뚝에 대한 해석에 적합한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1997), “내진설계연구(II) (내진설계 성능기준과 경제성 평가)”, 한국 지진공학회, 한국건설기술연구원.
2. 건설교통부 (2000), “도로교 설계기준”, 한국도로교통협회, 한국 지진공학회.
3. 과학기술 (1997), “이해하기 쉬운 교량하부구조물의 내진설계”.
4. 김명도, 최용규 (2001), “말뚝기초의 간편한 내진설계”, 2001년도 지반진동위원회 WORKSHOP, 지반공학분야에서의 내진설계, 2001. 2. 15, pp.129-166.
5. 김수일, 박종관, 박인준, 박영호 (2000), “지반진동과 내진설계(II)”, 지반, 2000.8, 한국지반공학회, pp.32-44.
6. 목영진 (1998), “교량기초의 내진설계”, 도로교의 내진설계, 한국지진공학회 제1회 기술강습회, (사)한국지진공학회(1998), pp. 185-253.
7. 서정해 (2000), “도로교 말뚝기초에 대한 간편한 내진설계 절차 제안”, 2000.2, 경성대학교대학원 토목공학과 석사학위논문.
8. 최용규 (2000), “지반진동과 내진설계(III)”, 지반, 2000.10, 한국 지반공학회, pp.40-55.
9. 日本道路協會 (1996), “道路橋方書・同解説”, IV下部構造編, V耐震設計編.
10. Abghari, A. and Chai, J. (1995), “Modeling of Soil - Pile - Superstructure Interaction for Bridge Foundations”, Performance of Deep Foundations under Seismic Loading, edited by Turner, J. P. ASCE Geotechnical Special Publication, No.51, pp.45-59.
11. API (1993), “Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms”, API RP2A, 18th edition, sept, 1th.
12. Choi, Y. and O'Neill, M. W. (1997), “Response of Soil Plug to Horizontal and Vertical Excitation”, Proc. of the 7th(1997) ISOPE Conference, Honolulu, USA. May, 1997, Vol.7, pp.772-777.
13. Lysmer, J., Ostadam, F. and Chin, C. C. (1999), “SASSI 2000-Theoretical Manual”.
14. PMB Engineering Inc. (1994), “PAR (Pile Analysis Routines) Users Manual, Theoretical Manual, Reference Manual”, San Francisco, California.
15. Reese, L.C., Vallabhan, C.V.G. and Wang, S.T. (1994), “3DPILE, Analysis of three dimensional pile groups subjected to axial and lateral loading”, Ensoft, INC.
16. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), “Pile Foundation Analysis and Design”, John Wiley and Sons, New York.
17. Reese, L.C and Wang, S.T. (1997), “LPILE^{PLUS} 3.0 For WINDOWS, Technical Manual of Documentation of Computer Program”, Austin, TX, USA.

(접수일자 2001. 1. 12)