

세굴을 고려한 말뚝기초의 동적 거동분석

Dynamic Behaviour of Pile Foundation with Scour

김정환* 허택영** 박용명***
Kim, Jung Hwan Heo, Taek Young Park, Yong Myung

ABSTRACT

This study considered the effect of scour depth on the behaviour of pile foundation of bridge structure under seismic excitation. The numerical model was composed of the superstructure, pile foundation and soil. The superstructure and pile was modeled by beam elements and soil was by spring elements. The pile head and concrete footing was considered as hinge and rigid connected situation, respectively. A zero-gap element was used to model the expansion joint of superstructure. Nonlinear dynamic analysis was carried out on the constructed model. It was acknowledged that the steel pile become to yield after the scour depth reached about 2.0m.

1. 서 론

1995년 일본 고베 지방에서 발생한 Hyogo-ken Nanbu 지진시 말뚝으로 지지된 많은 구조물들이 파괴되어 졌다. 이러한 구조물들 중 상당수가 교량의 하부 구조물이어서 교통망의 붕괴로 이어져 막대한 인적, 경제적 손실을 가져왔다. 그리고 교통망의 증가로 인한 도로망의 확충으로 하천을 횡단하는 교량이 증가하고 있으며 하천을 횡단하는 교량에 있어 세굴은 교량파괴의 주 원인으로 작용한다. 그리고 앞서 연구된 자료를 참조하면 세굴이 진행중이거나 세굴로 인해 기초지반의 강성이 저하된 상태에서 지진하중과 같이 큰 하중이 기초지반에 직접적으로 작용하는 경우가 가장 불리한 조건임을 알 수 있다.⁽¹⁾

따라서 세굴진행시 지진에 의한 말뚝기초의 동적 거동분석이 절실히 필요하다. 대부분의 경우 기초의 해석과 상부구조의 해석은 서로 다른 영역에서 이루어져 왔다. 즉 기초를 고정단으로 가정하고 상부구조의 해석이 수행되었다. 즉 지반-기초-상부구조간의 상호작용이 고려되지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 상부구조-기초-지반을 전부 고려한 모델을 산정하고 기초와 지반은 스프링 요소로, 상부구조에서 신축이음부의 기하학적 비선형은 gap 요소로 사용하고 말뚝의 재료 비선형 거동까지 포함한 모델을 사용했다.

지진의 영향은 교축방향은 100%로 교축직각은 30% 의 양방향 지진으로 하고 damping은 한계감쇠비 0.03에 해당하는 Rayleigh Damping을 사용하여 말뚝파괴의 한계 세굴깊이를 평가하고자 한다.

* 부산대학교 토목공학과 석사과정

** 부산대학교 토목공학과 박사과정

*** 정희원, 부산대학교 토목공학과 조교수

2. 이론적 배경

2.1 세굴

세굴현상은 하상 및 제방에서 흐름의 침식활동으로 인하여 하상재료가 제거되는 현상으로 정의할 수 있으며 하상재료의 구성에 따라 서로 다른 세굴 양상을 보여준다. 일반적으로 느슨한 입상(granular)토양은 세굴이 빠른 반면 점착성(cohesive)토양은 비교적 세굴이 느리다고 할 수 있다. 그러나 궁극적으로 점착성 토양은 사질하상(sand bed)과 같은 정도의 세굴 깊이를 가지는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾

하천에서의 세굴은 시간에 따라 장기적인 변화(long-term bed elevation change)와 단기적인 변화로 구분할 수가 있는데, 장기변화는 하상의 상승(aggradation)이나 저하(degradation)로 하천과 유역에 있어서의 수리특성과 하천단면변화와 관련이 있고, 여러 학자들에 의해 장기간의 하상변화를 예측하는 공식이 제안되었으나 아직 비교적 정확한 예측을 하지 못하고 있는 실정이다.

단기변화로는 단면축소로 인한 세굴(contraction scour) 및 국부세굴(local scour)로 나눌 수가 있다. 단면축소 세굴은 교량 등 인공구조물에 의해 하천내의 통수단면적이 축소되어 발생하는 세굴이다. 국부세굴은 다시 교대와 교각에서의 국부세굴로 나눌 수가 있는데 흐름속에 설치된 구조물에 의한 흐름의 간섭 때문에 발생하게 된다. 따라서 총 세굴 깊이는 하상의 상승 및 하강, 통수단면 축소에 의한 세굴 그리고 국부 세굴의 세가지 요소의 합으로 구하게 된다.

2.2 수평지반반력계수 K_h 의 산정

지반의 K_h 를 결정하기 위한 방법에는 말뚝의 수평재하시험, 평판재하시험, 등 경험적인 방법들과 Chang의 방법, 평판재하시험에 의한 방법이 있다.⁽³⁾

2.2.1 탄성지반반력법에 의한 Chang의 방법

수평하중을 받는 말뚝의 거동을 분석하기 위해 처음 Winkler는 지반을 스프링 모델로 가정하여 어느 지점에서 말뚝에 연결된 스프링은 독립적으로 작용하며 다른 스프링의 영향을 받지 않는다는 지반반력 모델을 제시하였다. 식 (1), (2)는 이러한 지반반력모델을 제시하고 있다.⁽³⁾

$$E_p I_p \frac{d^4 \rho}{d_x^4} + \rho \cdot d = 0 \quad (1)$$

$$\rho = K_h \cdot \rho \quad (2)$$

여기서, E_p , I_p 는 말뚝의 탄성계수와 단면 2차모멘트이며, ρ 는 수평방향 말뚝의 변형, d 는 말뚝의 직경, ρ 는 지반반력, K_h 지반반력 계수.

식(1), (2)로부터 각각 항두자유, 항두구속의 경우 다음과 같은 식(3), (4), (5)를 얻을 수 있다

$$\rho = H \times \frac{(1 + \beta \cdot h)^3 + 1/2}{3E_p I_p \beta^3} \quad (\text{free}) \quad (3)$$

$$\rho = \frac{Hh^3}{12E_p I_p} \times \frac{(1 + \beta h)^3 + 2}{(\beta h)^3} \quad (\text{Fixed}) \quad (4)$$

$$\beta = \left(\frac{k_h \rho}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (5)$$

2.2.2 경험적인 방법에 의한 K_h 의 산정

1995년 Terzaghi는 사질토의 경우 지반반력계수는 단지 지반의 밀도와 상재압에 의존한다는 가정 하에 식 (6)에서 제시된 지반반력계수의 n_h 의 값을 제시하였다. 표 1에서는 상대밀도에 따른 n_h 값을 제시하고 있다.⁽³⁾

$$K_h = n_h \cdot \frac{z}{d} \quad (6)$$

표 1. 모래의 상대밀도에 따른 지반반력계수의 추정 (Terzaghi,1955)

상대밀도	Loose	Medium	Dense
지하수위상부모래 n_h (kgf/cm^3)	0.25	0.74	1.98
지하수위 아래 모래 n_h (kgf/cm^3)	0.14	0.49	1.20

2.2.3 평판재하시험에 의한 방법

국내의 도로교 설계기준에서는 K_h (kgf/cm^3)를 추정하는 방법으로 평판재하시험을 이용한 식 (7)을 적용하는 것으로 하고 있다.⁽⁴⁾

$$K_h = K_{ho} \frac{B_H^{3/4}}{30} \quad (7)$$

$$K_{ho} = \frac{\alpha E_o}{30} \quad (8)$$

$$B_H = \sqrt{\frac{D}{\beta}} \quad (9)$$

K_{ho} 는 직경 30cm의 강시험에서 결정된 수평지반반력계수로서 평판재하시험 자료가 없는 경우 변형계수를 이용한 식(9)를 이용한다. E_o 는 하중 작용방향으로 직교되는 말뚝의 환산재하폭으로 식(10)으로서 결정한다. B_H 는 지반의 변형계수로 재하시험의 자료가 없을 경우 표준관입시험 N값으로 $E_o = 28N$ 로서 추정할 수 있다. 마지막으로 α 는 지반반력계수에 사용되는 계수로서 지진시 1.5, 정상시 1.0을 사용한다.⁽⁴⁾

3. 해석모델 및 결과

3.1 해석모델

본연구의 해석에 사용된 교량의 제원은 다음과 같다.

- 교량형식 : 4경간 연속 + 4경간 연속 steel box 합성거더교
- 교량연장 : 4@50 + 4@50 = 400 m
- 폭 원 : 15 m
- 기 초 : 말뚝기초 (SPS490), $\Phi=800mm$, $t=15mm$

pile cap은 판요소로, 신축이음부는 gap 요소로 그 외 상부구조 및 기초는 보요소로 모델링했고 pile 과 pile cap은 접합방법이 고정, 힌지인 경우를 각각 고려하였다. (그림1)

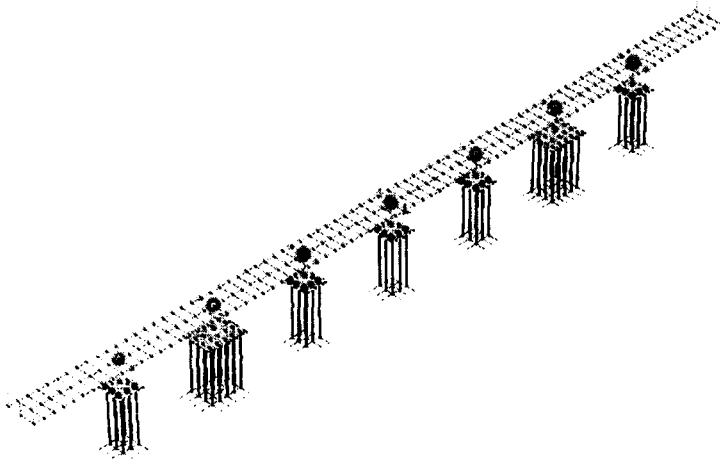


그림 1 전체구조 모델

3.2 지반과 기초의 모델

상부구조물과 말뚝기초의 거동을 함께 고려할 때 주로 많이 사용되어지는 스프링을 이용하여 지반을 모형화하고(그림2). 집중질량을 사용하여 관성에 의한 질량의 동적작용을 고려하였다. 스프링 계수를 산정하기 위해 도로교 설계기준에 제시되어 있는 평판재하시험에 의한 방법을 이용하였다.⁽⁴⁾

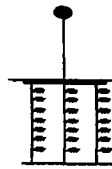


그림2. 기초-지반의 스프링 모델

3.3 신축이음부의 비선형 gap 요소

신축이음부에서 불가입성 조건을 구현하기 위해 접촉이 예상되는 두 영역 사이에 쌍을 이루는 절점들을 설정하고 이 절점을 연결하는 gap요소를 구성한다. 이 때, 각 쌍의 절점들의 상대적인 위치에 따라 요소의 강성을 비선형적으로 보정하면서 다양한 접촉거동을 모델링한다. gap요소의 강성을 보정하는 기본적인 개념은 두 영역의 간격이 떨어져 있으면($g > 0$) 강성을 0으로 설정하여 인장력과 압축력 모두가 발생하지 않게 하고, 일단 접촉하게 되면($g = 0$) 압축력에 대한 강성을 큰 값으로 증가시킨다.

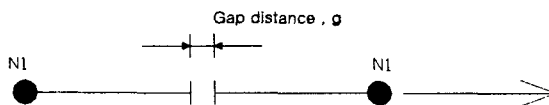


그림 3 gap 요소

3.4 비선형 동적해석

본 연구에서는 비선형 동적해석을 위해 지반종류를 2(지반계수 1.2)로 가정하고 Δt 는 0.02초, 총 지속시간은 총 20초, 최대지반가속도는 0.14g인 그림4의 인공지진을 사용하였다.

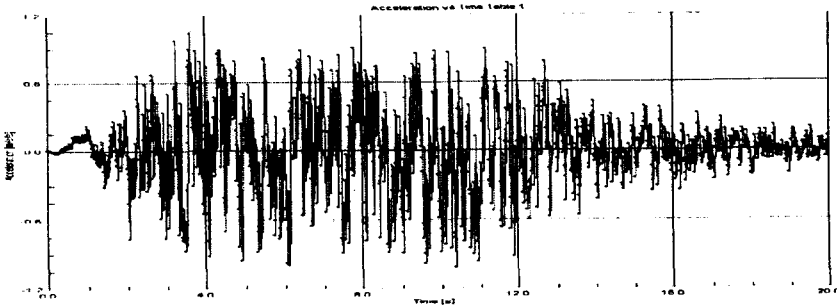


그림 4 인공지진파

비선형 시간이력해석을 위해 직접적분법(Direct Integration Method)을 이용하고 적분방법은 Newmark β -method를 사용하였다. 그리고 damping은 한계감쇠비 0.03에 해당하는 Ralyeigh Damping을 적용했다.⁽⁵⁾

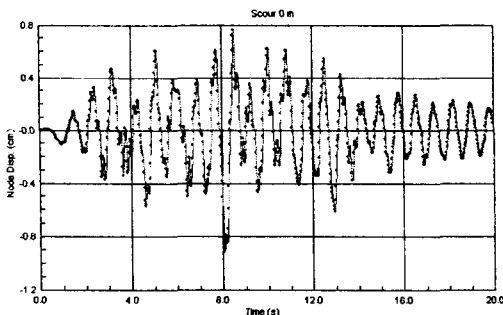
4. 해석결과

세굴의 영향은 양방향 지진하에서 말뚝기초에 모델링된 지반 스프링강성을 세굴 깊이별로 감소시키는 방법을 사용했다. 말뚝기초의 동적거동을 분석하기 위해 세굴깊이를 주요 변수로 선정하고 각각 세굴 깊이에 대한 말뚝기초의 변위와 말뚝기초 응력의 항복정도를 분석하였다.

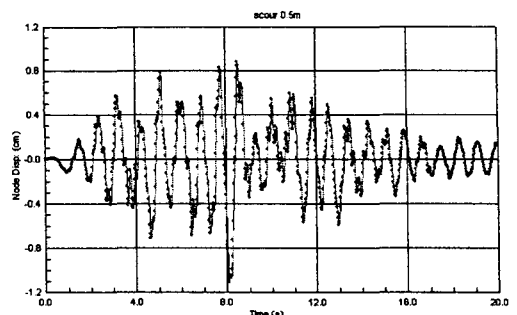
4.1 세굴깊이에 따른 말뚝머리 변위의 동적응답

세굴의 진행이 말뚝기초의 동적거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 취약할 것으로 예상되는 고정단 교각에 대해 세굴깊이별 말뚝기초 머리의 변위에 대한 시간이력을 각각 산정하고 각각의 경우에 대한 최대값을 세굴깊이에 따라 분석하였다.

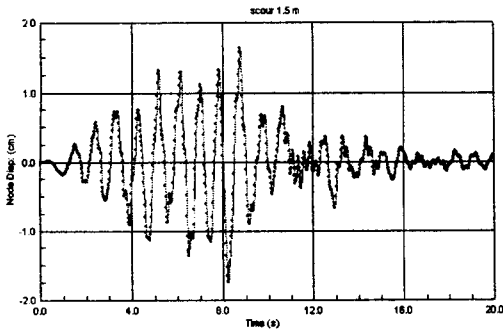
그림 6, 그림 7은 각각 말뚝머리가 고정, 힌지인 경우로 말뚝기초가 세굴된 경우에 있어서 지반에 대한 상대변위 이력을 나타낸다. 이들 그림으로부터 세굴이 진행됨에 따라 말뚝기초의 변위는 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 말뚝머리가 고정, 힌지인 경우 최대변위를 비교한 것으로 말뚝기초의 머리가 고정으로 연결된 경우엔 세굴깊이에 따라 말뚝머리의 수평변위가 거의 선형으로 증가하며 세굴이 0.5 m에서 1.5m사이 변위에서 허용변위량인 1.5cm를 초과 하였다. 이에 비해 말뚝머리가 힌지로 접합된 경우엔 세굴진행에 따라 변위가 급격히 증가함을 알 수 있다.



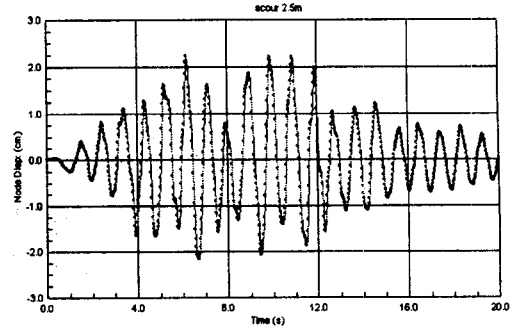
(a) 세굴깊이 0 m



(b) 세굴깊이 0.5 m

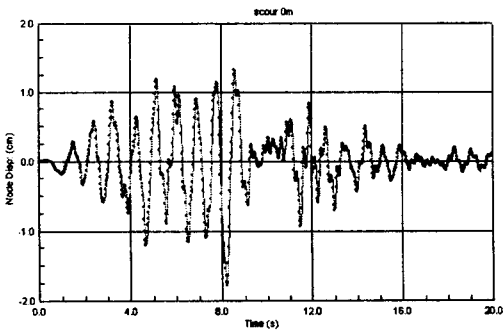


(c) 세굴깊이 1.5 m

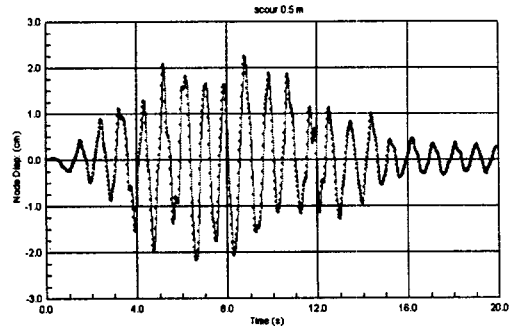


(d) 세굴 깊이 2.5 m

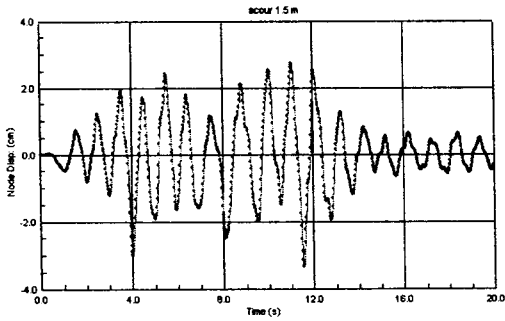
그림.6 말뚝기초 변위의 시간이력 (말뚝머리가 고정인 경우)



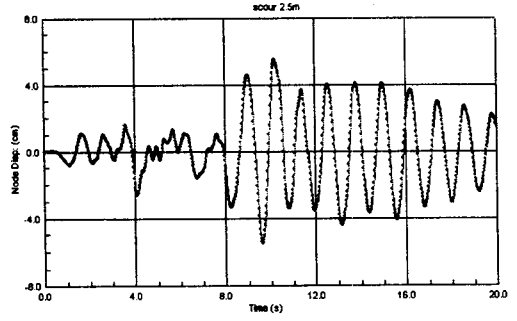
(a) 세굴깊이 0 m



(b) 세굴 깊이 0.5 m



(c) 세굴깊이 1.5 m



(d) 세굴깊이 2.5 m

그림.7 말뚝기초 변위의 시간이력 (말뚝머리가 힌지인 경우)

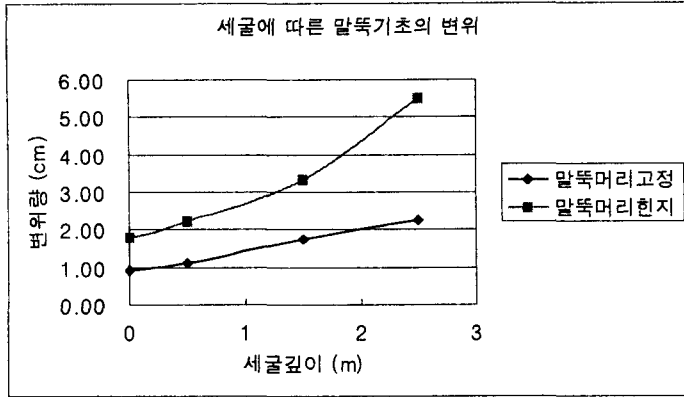


그림 8 말뚝기초변위의 최대값 변화

4.2 세굴깊이에 따른 말뚝응력의 동적응답

교축방향으로는 100%의 지진을 교축직각방향으로는 30%의 양방향 지진을 작용시켜 말뚝응력의 시간이력을 산정하고 각각의 시간이력에 대해 말뚝기초가 항복응력에 도달할 때까지 세굴깊이를 고려한 결과 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림9에 의하면 세굴의 진행에 따라 말뚝응력은 증가하고 세굴깊이가 2.0m에 이르면 말뚝기초가 항복응력에 도달한다는 것을 알 수 있다.

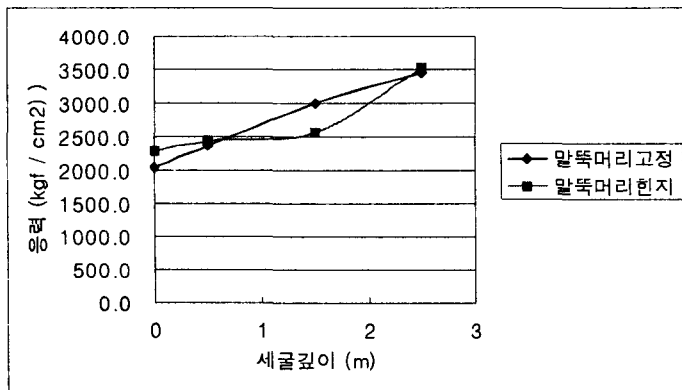


그림 9 세굴깊이에 따른 말뚝기초의 응력변화

5. 결론

본 연구에서는 상부구조-말뚝기초-지반으로 모델링된 전체 구조계를 고려해서 양방향 지진을 받고 있는 말뚝기초가 세굴의 진행에 의해 어떠한 동적인 거동을 하는지 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세굴의 진행에 따라 말뚝기초의 응답이 차이가 많이 생기므로 새굴은 말뚝기초 거동 전반에 영향을 미침을 알 수 있다.
- 2) 말뚝머리 변위는 세굴 깊이에 따라 고정인 경우 거의 선형으로, 힌지인 경우는 급격히 증가함을 보인다.
- 3) 현재 설계시 통상 적용하는 안전율로 설계된 말뚝기초를 감안할 때 세굴이 2.0m에 이르면 말뚝기초가 항복응력에 도달하므로 설계시 계산된 세굴깊이에 상관없이 2.5m 이상의 깊이까지 세굴에 대한 보강을 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김상효, 최성욱, “지진 및 기초의 세굴을 고려한 교량시스템의 동적거동분석”, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 2002 pp187 ~194
2. 강정훈, 이은태, “교량 기초부의 세굴에 관한 연구”, 경희대학교 산학협력기술연구소논문집, 2000 pp74~84
3. 이송, 이장덕, “수평력을 받는 말뚝의 지반반력계수 평가”, 대한토목학회 논문집, 2001 pp349~357
4. 도로교 설계기준, 2000
5. Anil k. Chopra, “Dynamics of structures” second edition, 2001
6. N. Bildik, “Inelastic analysis of pile soil structure interaction”, Engineering Structures, 2003
7. R.A. Dameron, “Nonlinear seismic analysis of Bridge structures”, Foundation-Soil representation and ground motion input, Computers & Structures, 1997
8. 이종세, 최준성, “지반-구조물 상호작용과 교각의 비선형성을 고려한 교량의 지진응답해석”, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 2003 pp415~421
9. 김상효, 마호성, “2방향 지진하중을 받는 세굴된 교각기초의 파괴확률분석”, 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 2002 pp300~307
10. 김나엽, 김성렬, “교각의 내진설계를 위한 말뚝기초의 모델링 기법 비교”, 한국지진공학회 논문집, 2002