

지반의 비선형 변형 특성을 고려한 교각 말뚝 기초의 내진 설계

A Seismic Design of Pile Foundations for Bridges Using Nonlinear Deformational Characteristics of Soils

목영진¹⁾, Young-Jin Mok,

¹⁾경희대학교 토목·건축 공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil and Architectural Engineering, KyungHee Univ.

SYNOPSIS : A pseudo-static seismic design was conducted by adopting p-y method and an analytical solution for lateral loaded piles. The soil resistance used in present practices appears to be overestimated, partly because of using different deformation model from real deformational phenomenon of soils behind piles.

Key words : Group Pile, Lateral Load, Seismic Design p-y curve.

1. 서론

최근 홍성지진(1978), 백령도지진(1995), 영월지진(1996), 경주지진(1997) 등 중규모 지진 발생이 빈번하여 한반도가 지진의 안전지대가 아니라는 우려와 함께 사회간접시설의 내진 성능에 관심이 높아지고 있다. 건설교통부에서도 도로교 표준 시방서(1992,1996) 내진 설계를 제정하여 신설되는 교량에 대해 내진 설계를 실시하고 있다.

현재 시행되는 말뚝의 내진 설계는, 지진하중(주로 수평하중)을 포함한 상부구조의 하중이 말뚝머리 확대 기초에 작용하는 단면력으로 말뚝을 설계하고 있다. 내진 설계와 상시 설계의 차이는 지진에 의해 증가된 수평력에 대해 말뚝의 횡방향 변위와 말뚝 본체의 응력을 엄밀한 기준으로 추가로 검토한 것이다.

본 논문에서는 수평하중을 받는 말뚝의 설계에 적용하는 두 방법이 해석적 방법(analytical solution)과 p-y곡선을 이용한 수치 해석적 방법에서 적용한 지반반력(soil resistance)을 설계사례를 통해 비교 검토하고자 한다.

2. 수평하중을 받는 말뚝

수평하중을 받는 말뚝의 변위에 대한 미분 방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + \alpha y = 0 \quad (1)$$

여기서 EI는 말뚝의 휨 강성이고 α 는 지반변형계수(단위: 힘/면적)이다. 여기서 사용한 말뚝의 변위, 경사각, 모멘트, 전단력 및 지반반력의 부호 범례(sign convention)는 Reese & Wang(1989)과 같다. 말뚝의 휨강성이 일정하고 지반이 균질하고 선형 탄성(α =일정)이면, 아래와 같은 해석적 정해(analytical solution)이 얻어진다.

$$y = e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (2)$$

여기서, $\beta = \sqrt[4]{\frac{\alpha}{4EI}}$ 이고 C와 D는 말뚝머리의 경계 조건에 따라 결정되는 상수이다. β (단위 : 길이의 역수)는 말뚝과 지반의 상대적 강성을 나타내는 계수로, $1/\beta$ 이 말뚝길이의 1/3이하이면 긴 말뚝(long pile)의 해는 식 (2)와 같다. 경계조건에 따른 여러 가지 해가 도로교 시방서(1996)에 게재되어 있다.

한편, EI가 말뚝 길이에 따라 변하고 지반변형계수(α)가 말뚝 깊이와 변위(y)에 따라 변하면 수치 해석으로 해를 얻게된다. p-y 곡선을 이용한 유한차분 프로그램 LPILE(Reese & Wang, 1989)이 대표적인 수치 해석적 방법이다.

3. 지반반력 (Soil Resistance)

3.1 지반반력계수

도로교 시방서에서 정의된 지반반력계수(k)는 다음과 같다.

$$k = \frac{p}{y} \quad (3)$$

여기서 p는 지반저항응력(단위 : kg/cm^2)이고 y는 변위량이다. k는 평판재하시험에서 얻어진 응력-변위량 곡선에서 한 변위량에서 그은 할선 구배에 해당되며 단위는 kg/cm^3 와 같다. 다른 시험(삼축압축시험, 현장관입시험)에서 구하는 방법이 도로교 시방서에 게재되어 있다. 여기서 주의할 점은 지반반력계수는 분포 하중을 받는 반무한 지반의 변형 거동에 입각하여 산출한 것이다.

3.2 지반변형계수

Reese & Wang(1989)에 정의한 지반변형계수(α)는 p-y곡선의 할선 구배이다. 여기서 p는 파일의 변위에 대한 지반반력으로 선하중과 같은 단위(힘/길이)를 갖는다. p-y곡선은 그림 1과 같은 개념에서 정립되었다. 그림 1.a는 지반에 향타된 파일의 입면도이다. 지표면으로부터 깊이 x_1 에서 파일 주변의 지반

의 요소를 생각해 보자. 깊이 x_1 에서 항타후의 응력 분포는 그림 1.b와 같이 평형상태에 있다. 파일에 변위 y_1 이 일어나면 그림 1.c와 같이 파일의 전면에서는 응력이 증가하고 배면에서는 응력이 감소하게 된다. 이 응력 분포를 적분하여 얻어진 힘의 불균형값, p 가 변위의 반대방향으로 저항하게 된다. p 의 단위는 단위 길이당 힘(F/L)이다. 지반반력 p 는 깊이와 말뚝 변위의 함수로 산정되는데, 깊이별 지반의 극한 저항(ultimate soil resistance)이 주요 역할을 한다. 극한지반저항력 p_u 는 다음과 같은 두 가지 파괴 모델에 입각하여 산정된다. 첫 번째 모델은 그림 2와 같이 파일 배면에 형성된 흩새기가 수평하중에 의해 경사진 저면과 양 측면을 따라 미끌어져 올라간다. 이 경계면에 발생하는 마찰저항이 수평력(F_p)과 비기게 된다. 극한저항력(p_u)는 F_p 의 길이에 대한 미분 값에 해당된다. 이러한 파괴 모델도 지표 부근에서 일어난다. 지표에서 어느 정도 깊어지면 흩새기 형태의 파괴보다는 흩입자가 파일의 전면으로부터 배면으로 이동하는 “우회유동(flow-around)’ 파괴현상이 일어난다. 이 형태의 파괴 모델에서, 극한저항력, p_u 는 대략 지표면에 놓인 대상기초(strip footing)의 지지력(bearing stress)의 두 배 정도이다. 예를 들면, 포화된 점성토 지반위에 놓인 대상기초(strip footing)의 지지력은 $5c$ (여기서 c 는 비배수 전단강도)이고, 우회유동 파괴에 의한 p_u 는 $9c$ 가 된다.

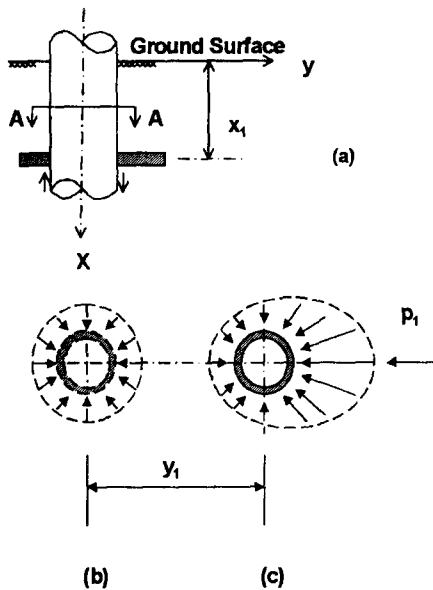


그림 1. p 와 y 의 정의

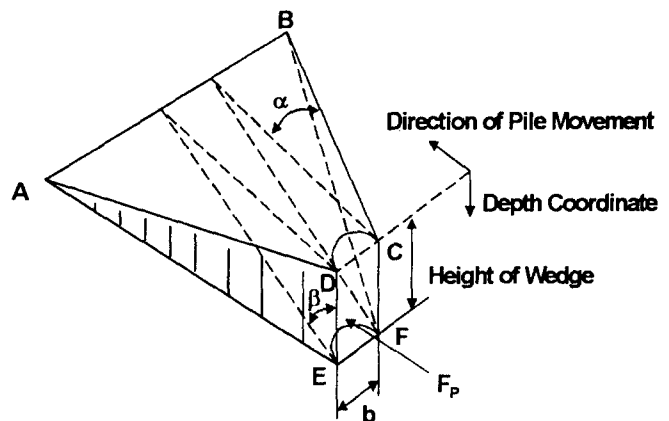


그림 2. 지표부근의 p_u 계산을 위한 흩새기 모델

3.3 p-y 곡선

수치해석을 위해 깊이별 지반반력과 변위의 관계(p - y)곡선이 필요하다. 전형적인 p - y 곡선의 형태는 그림 3.과 같고 한 변위에서 할선의 구배가 지반변형계수이다. 여기서 지반변형계수 α 는 kD (k : 지반반력계수, D : 파일직경)에 해당된다. 두 계수의 차이점은 단위뿐만 아니라 서로 상이한 변형 모델로부터 산정 되었다는 점이다. 각 지반종류별 p - y 곡선은 실규모 현장실험결과로부터 개발되어 제안되었다 (Reese & Wang, 1989).

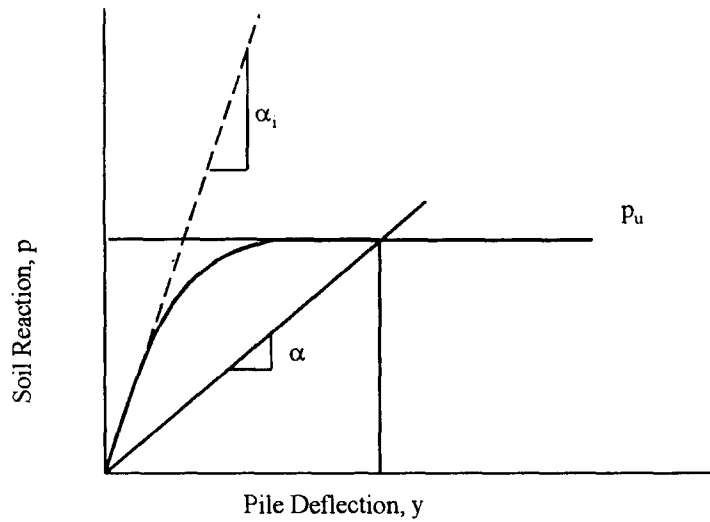


그림 3. 전형적인 p-y곡선

4. 설계 사례

본 사례에서는 4경간 연속교의 피어 말뚝 기초를 도로교 표준 시방서를 따라 설계한 결과와 LPILE의 결과와 비교 분석하였다. 지면 관계상 필요한 해석 및 분석 결과만 언급하므로 자세한 내용은 목영진 (1998)을 참조하기 바란다.

4.1 설계 제원

선정된 강관 말뚝 제원은 다음과 같다.

직경(D) = 60.56 cm , 길이(L) = 670 cm
 두께(T) = 12 mm , 단면적(A) = 187.11 cm²
 E = 2,100,000 kg/cm² , I = 82993.9 cm⁴

말뚝배열은 5×5이고, 말뚝중심 간격은 1.5 m이다. 말뚝머리 위의 확대기초(cap)는 8 m×8 m 크기이다. 상부구조의 하중(지진하중 포함)에 의해 말뚝머리의 확대기초에 작용하는 단면력은 아래와 같다.

단면력	교축 방향	교축 직각 방향
V. ton	1871	1871
H. ton	372	372
M. ton-m	1560	1560

4.2 설계 기준

지진시 강관 말뚝의 허용 휨응력은 $\sigma_a = 2100 \text{ kg/cm}^2$ 이고 말뚝머리의 횡방향 변위는 1.5 cm이내이어야 한다.

4.3 설계지반

일반적으로 설계를 위한 지반조사는 표준관입시험 N치와 보링주상도 정도로 그치고 있다. 이 사례도 별도의 강도시험 결과가 없어 보링주상도와 N치를 참조로 설계강도정수를 추정하였다.

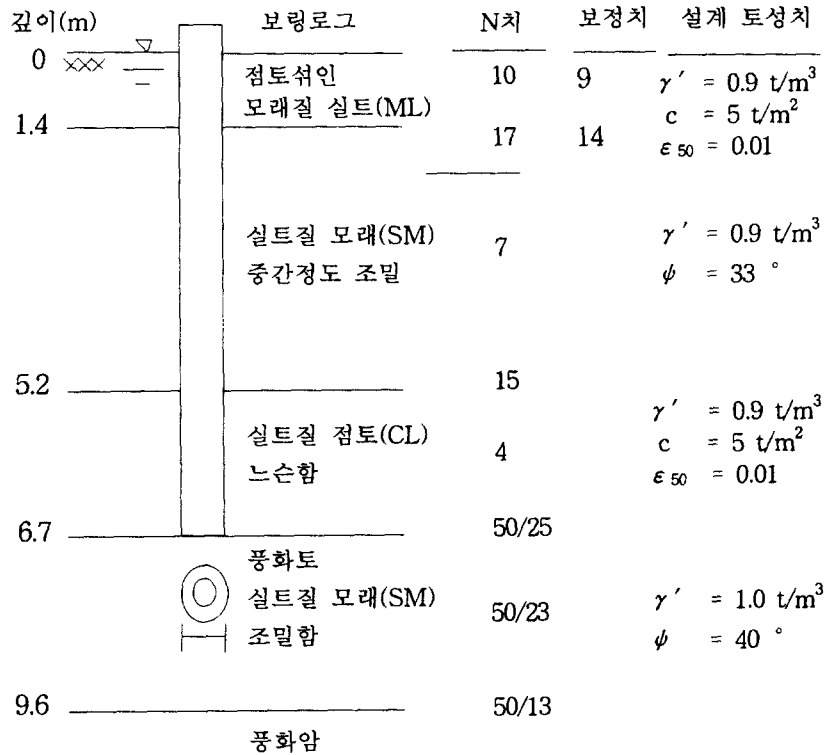


그림 4. 설계 지반 조건

4.4 탄성지반해석(도로교 표준 시방서, 1996)

도로교 표준 시방서에 따라 깊이 $1/\beta$ 까지의 평균 보정 N값은 12로 산정하였다. $N=12$ 를 이용해 균질한 탄성지반으로 간주한 수평지반반력계수(k_h)는 8.59 kg/cm^3 이고 β 는 0.0052 1/cm 이었다. 말뚝머리를 고정과 힌지인 경우로 나누어 말뚝 스프링계수를 산정하여 변위법으로 각 단말뚝에 분배되는 하중(수평 하중, 수직하중, 모멘트)과 변위를 계산하였다. 최대 말뚝머리 하중으로부터 단말뚝의 변위와 모멘트를 계산하였다.

4.5 p-y 곡선을 이용한 수치해석(LPIL)E)

앞의 변위법에서 산정된 최대 말뚝머리 하중을 사용하여 추정된 설계 토성치를 사용하여 다음과 같은 말뚝머리 경계조건으로 단말뚝 해석을 수행하였다.

- 1) 수평력 = 14.89 ton, 모멘트 = -11.46 ton · m (이하 BC1로 부름)
- 2) 수평력 = 14.89 ton, 경사각(S_t) = 0(고정) (이하 BC2로 부름)
- 3) 수평력 = 14.89 ton, 모멘트 = 0(힌지) (이하 BC3로 부름)

4.6 해석 결과 및 분석

두 해석 결과는 표 1.과 그림 5.와 같다.

해석방법		말뚝머리변위 (cm)	최대압축응력 (kg/cm ²)	비고
해석적방법	고정	0.18	1087	선형탄성
	힌지	0.30	963	
p-y곡선	고정1(BC1)	0.90	1182	비선형
	고정2(BC2)	0.40	1514	
	힌지(BC3)	1.47	1508	

표 1. 단말뚝 해석결과

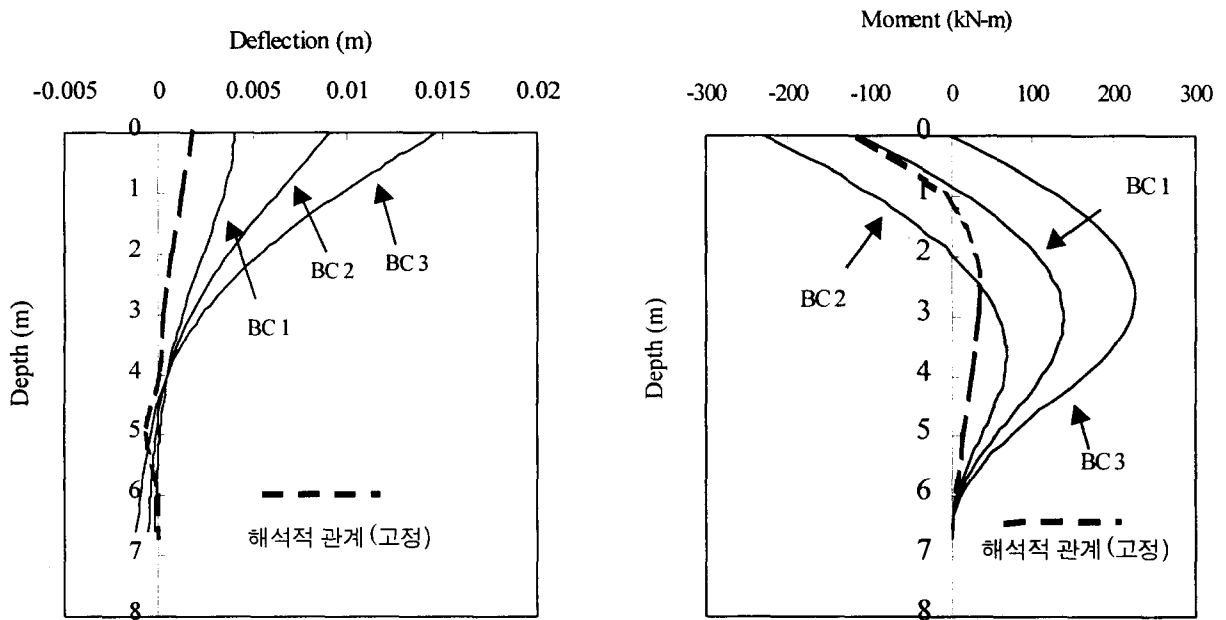


그림 5. 해석적 방법과 p-y곡선을 이용한 수치해석 결과

두 해석 결과는 모두 허용범위 1.5 cm와 허용응력 2100 kg/cm²(지진시)를 만족시킨다. 수치해석 방법으로 구한 값들이 해석적 방법으로 구한 값보다 크게 나타나고 있는데 이는 지반의 비선형 특성에 의한 것이다. 또한 수치해석 방법에서는 지표 부근에서는 말뚝 주변 지반의 흠뻐기 파괴 양상(mechanism)을 고려하여 지반 반력 및 지반 반력계수를 산정하여 현실적으로 타당성이 있다.

그림 6.은 수치 해석적 방법에서 사용한 깊이별 대표적인 p-y곡선이다. 이와 대응하는 해석적 방법에서 사용한 지반반력계수(k_h , F/L³)는 8.59 kg/cm³이다. p-y방법의 지반변형계수(α , F/L²)는 $\alpha = k_h D$ 인 관계가 성립된다. 여기서 D는 파일 직경이다. 따라서, $k_h D = (8.59 \text{ kg/cm}^3)(60.56\text{cm}) = 520 \text{ kg/cm}^2 = 50,960 \text{ kN/m}^2$ 이다. 그림 6.에서 점선이 탄성 지반에 해당하는 선형 p-y곡선이다.

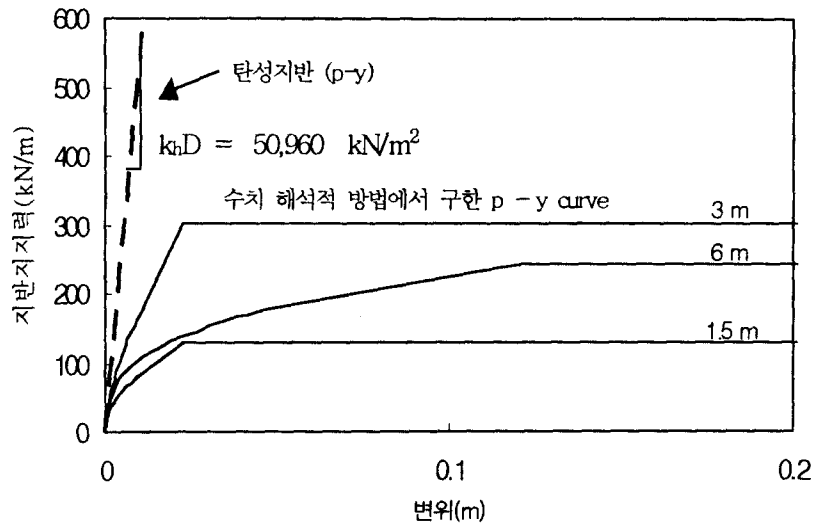


그림 6. 깊이별 p-y곡선

아래 그림은 수치해석 방법에서 파일 변위에 따른 깊이 및 지반변형계수(α , F/L^2)이다. 해석적 방법에서 대응하는 지반변형계수($k_h D$)도 같이 플롯하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 지표 가까이에는 말뚝 주변 지반이 흠뻑기 형태의 파괴를 일으켜서 지반저항 및 지반변형계수가 작다. 또한 지표 부근에서는 파일 변위가 크기 때문에 지반변형(저항)계수도 작다.

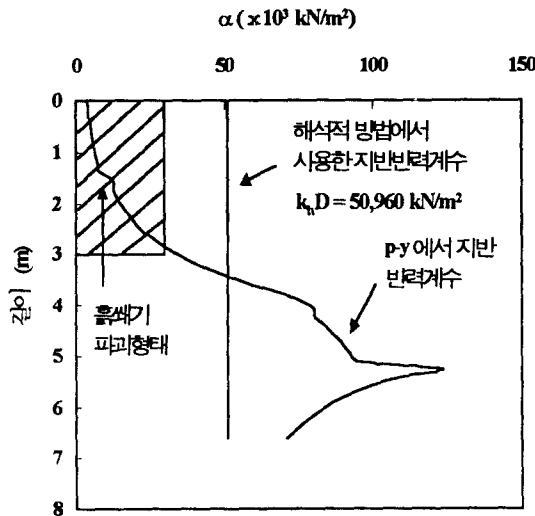


그림 7. 지반변형계수, (α)

이 결과로부터 다음과 같은 결과가 도출되었다.

1. 말뚝에 적용되는 지표 부근의 반무한 탄성체 위에 놓인 평판의 변형 거동보다는 흠뻑기 변형 거동에 입각하여 산출되어야 할 것으로 판단된다.
2. 해안지역 연약한 지반의 파일 내진 설계는 지반의 비선형 특성을 고려한 해석이 필요한 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 말뚝기초의 내진 설계중 유사정적방법에 적용할 수 있는 해석적 방법과 p-y곡선을 이용한 수치 해석적 방법을 설계사례를 통해 비교 분석하였다. 특히 두 방법에서 적용한 지반반력의 차이를 규명하였다. 해석적 방법에서 사용하는 지반반력계수는 말뚝배면의 지반과피양상과 상이한 변형모델로부터 산정되어 과도한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 도로교 표준시방서(1996), **대한토목학회**
2. 목영진(1998), 도로교의 내진설계 : 교량기초의 내진 설계, 제1회 기술강습회 교재, **한국 지진공학회** pp. 185~253
3. Reese, L. C. and Wang. S.(1989), *Documentation of Computer Program LPILE*, Ensoft, Inc.