

단주 구조 송전탑 기초의 횡방향 거동에 관한 연구 Laterally Loaded Behavior of Short Drilled Shaft Foundation for Single-Pole Structures

최호영¹⁾, Ho-Young Choi, 김영훈²⁾, Yeong-Hun Kim, 이승래³⁾, Seung-Rae Lee, 김대학⁴⁾, Dae-Hak Kim,
김대홍⁵⁾, Dae-Hong Kim,

- 1) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST
- 2) 현대건설 기술개발원 토목기술부 지반팀 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Team, Hyundai Institute of Construction Technology
- 3) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST
- 4) 유니콘 기술연구소 대표, President, Unicorn Technical Institute(UTI)
- 5) 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, Senior Researcher, KEPRI, KOPEC

SYNOPSIS : Single-pole transmission structures which are supported by drilled shaft foundations are usually subjected to large overturning moments with modest vertical and lateral loads. To analyze the behavior of the drilled shaft under such loading conditions, an analytical model was developed based on beam-column and subgrade reaction methods. Field model tests were performed to calibrate the developed analytical model in which additional subgrade spring models were adopted. The field test results estimated from the calibrated analytical model were compared with those calculated by one spring model and other commercial program. According to the comparison study, the developed analytical model was proven to be a useful tool to analyze the laterally loaded behavior of foundations for single-pole structures.

Key words : lateral behavior, single-pole, analytical model, beam-column, subgrade reaction, drilled shaft

1. 서 론

전력수요의 증가에 따라 고압송전선로의 건설이 꾸준히 증가되고 있으나, 대부분 사각철탑(lattice tower)형태로 기초가 차지하는 면적이 크고 대형화 되어 공사비 증가 및 과도한 산림훼손, 복구비용 증가 등 많은 문제점을 안고 있다. 현장 타설 단일 말뚝에 의해 지지되는 강관주형 철탑은 철탑부지면적을 획기적으로 감소시킬 수 있으며, 공사비 절감, 산림훼손 최소화 및 복구비용 감소, 미관 수려 등 환경 친화적 철탑기초로써 대관인허가는 물론 민원발생 최소화 등으로 사각철탑에 대한 대안으로 최근 적용이 급증하고 있는 추세이다. 사각철탑에 비해 많은 장점이 있음에도 불구하고 설계에 대한 기준이 제대로 마련되어 있지 않아 설계된 기초의 안정성과 경제성에 대한 논의가 계속되고 있다. 따라서 다양한 지반조건 및 현장여건을 고려한 실증연구를 수행하여 국내실정에 맞는 최적화된 철탑기초 설계 기준 마련이 시급한 실정이다(산업자원부, 2006).

송전용 강관주 철탑을 지지하기 위한 현장 타설 단일 말뚝은 풍하중, 지진 그리고 횡토압 등으로 인

해 수직력에 비해 상대적으로 큰 수평력과 모멘트를 받게 된다. 이런 하중 조건에서는 수평력과 모멘트의 대부분을 횡방향 수동 토압 지지력이 분담하지만, 주면을 따라 발현되는 마찰력, 기초의 저면에 발현되는 마찰력과 수직력 또한 전체 지지력에 상당한 부분을 분담하게 된다. Davison(1982)은 횡방향 수동 토압 지지력을 제외한 나머지 지지력을 고려하지 않을 경우 말뚝의 변위를 과다하게 산정할 수 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 횡하중과 모멘트를 주로 받는 현장 타설 단일 말뚝의 해석을 위해 Beam-Column 모델을 사용하여 말뚝과 지반을 모델링하고, 하중전이 함수를 이용하여 말뚝과 지반의 상호작용을 고려한 해석기법을 개발하였다. 아울러 횡방향 하중전이 함수 이외에 추가적인 지반스프링 모델을 이용하여 횡방향 거동이 지배적인 말뚝의 지지력을 유발하는 하중 메카니즘을 고려하였다. 개발된 해석 기법은 1/8 규모의 현장 모형 시험과 현장 타설 말뚝 기초 시험 사례와의 비교 분석을 통해 최적화되었다(김영훈, 2008). 최적화된 해석 기법의 적용성을 파악하기 위해 시험 사례에 대한 해석을 수행한 결과는 횡방향 하중전이 함수만을 고려한 단일 스프링 모델과 FAD(Foundation Analysis and Design) 결과와 비교되었다.

2. 이론적 모델

2.1 Four-spring 모델

횡방향 하중을 받는 말뚝과 지반의 상호작용에 대한 극한 지지력과 하중-변위 모델의 대부분은 수평 방향의 토압과 그에 상응하는 압력-변위 관계에 의해서만 정의된다는 가정에 근거하고 있다. 수직방향, 횡방향 하중과 모멘트를 받는 현장 타설 말뚝에 작용할 수 있는 힘을 그림 1과 같이 표현하면, 말뚝의 주면에 수직으로 작용하는 횡방향 수동 토압 뿐만 아니라 주면에 작용하는 수직 주면 전단력, 말뚝의 저면에 작용하는 전단력 그리고 말뚝 저면에 수직 방향으로 작용하는 힘이 발현될 수 있다. DiGioia 등(1981)은 횡방향 하중을 받는 말뚝과 지반 사이에 발현되는 모든 지지력 요소들을 고려하는 그림 2와 같은 Four-spring subgrade modulus 해석 모델을 제안하였다. 이 모델에서는 현장 타설 말뚝의 메카니즘에서 고려되는 네 가지 힘의 성분을 각각 횡방향 변위 스프링(lateral translational spring), 수직 주면 전단 모멘트 스프링(vertical side shear moment spring), 저면 전단 변위 스프링(base shear translational spring) 그리고 저면 모멘트 스프링(base moment spring)으로 구현하였다. Vallabhan & Alikhanlou(1982)는 Davison 등이 제안한 것과 거의 유사한 개념으로 점토에서 큰 수평력과 전도 모멘트를 받는 짧은 강성 말뚝 기초의 해석을 위한 지반-스프링 모델을 제안하였다. Vallabhan & Alikhanlou가 제안한 모델은 말뚝의 강체 거동에 대한 3차의 강성 매트릭스를 사용하여, 횡방향 지반 스프링 뿐만 아니라 저면의 모멘트 저항, 저면의 마찰력, 저면의 수직 반력 그리고 주면 마찰을 나타내는 스프링을 고려하였다.

4개의 스프링 지반반력 계수를 정의하기 위해서는 차원 해석(dimensional analysis)을 통해 지반반력 계수에 영향을 미치는 최소한의 독립적인 매개변수들을 결정할 필요가 있다 (Huntley, 1967). 지반반력 계수에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 매개변수들을 통해 식 (1)과 같이 횡방향 지반반력 계수를 표현할 수 있다.

$$k_h = f(D, L, E_s, EI_p, \nu, e) \quad (1)$$

여기서, k_h 는 횡방향 지반반력 계수, f 는 함수, D 는 말뚝의 직경, L 은 말뚝의 묻힘 깊이, E_s 는 지반의 탄성계수, EI_p 는 말뚝의 유효 휨강성, ν 는 포아송비 그리고 e 는 말뚝이 지표면 위로 돌출된 길이이다.

지반반력 계수를 표현하기 위한 무차원 매개변수의 조합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

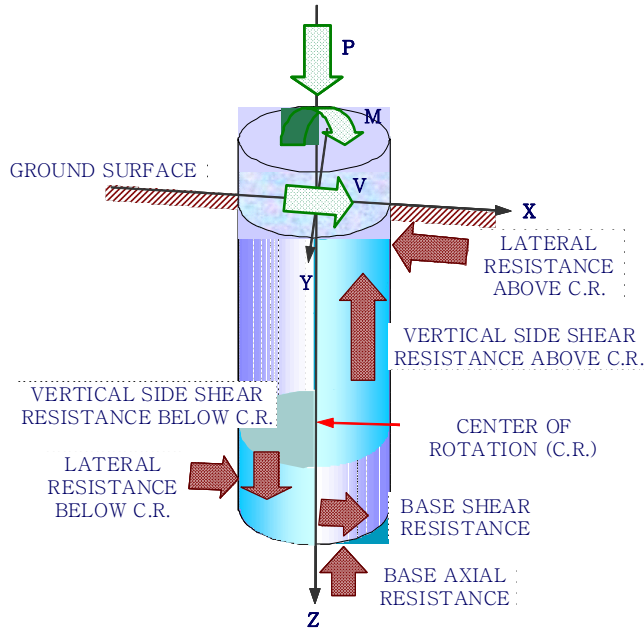


그림 1. 횡하중 말뚝의 하중 메카니즘

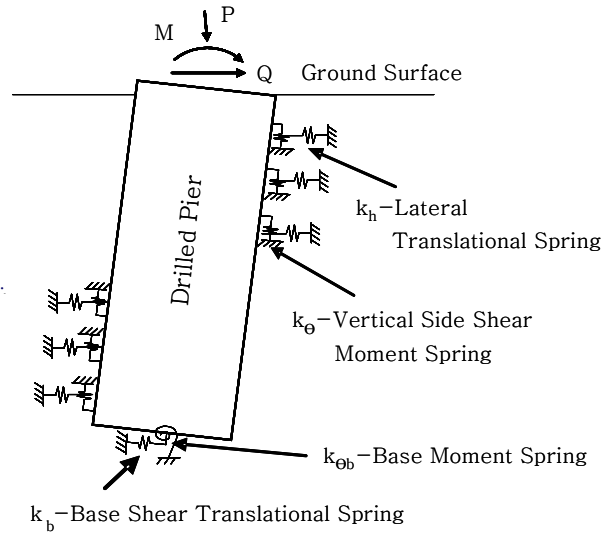


그림2. Four-spring subgrade modulus model

$$\frac{k_h}{E_s} = f\left(\frac{L}{D}, \frac{EI_p}{E_s L^4}, \frac{e}{L}, \nu\right) \quad (2)$$

무차원 매개변수들의 조합으로 표현되는 지반반력 계수의 전형적인 형태들은 식 (3)과 같다.

$$\frac{k}{E_s D} \text{ or } \frac{kD}{E_s} = \alpha \left(\frac{L}{D}\right)^\beta \quad (3)$$

여기서 α 와 β 는 이론적인 모델에서 사용되는 상수이다.

이러한 형태의 지반반력 계수들은 Douglas & Davis(1964)가 균질한 탄성 무한 지반에 묻힌 강관에 대한 연속체 모델 해에 근거해서 유도한 횡방향 지반반력 계수의 식과 동일한 형태를 갖는다. Davison(1982)이 3차원 수치해석을 통해 제안하고 14번의 현장실증 시험을 통해 보정한 지반반력 계수식들은 식 (4)~(7)과 같다.

· Lateral spring

$$\frac{k_h}{E_s} = 5.7 \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.4} \quad (4)$$

· Vertical side shear moment spring

$$\frac{k_\theta}{E_s D} = 0.55 \quad (5)$$

· Base shear spring

$$\frac{k_b D}{E_s} = 2.1 \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.15} \quad (6)$$

· Base moment spring

$$\frac{k_{\theta b}}{E_s D} = 0.24 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.4} \quad (7)$$

2.2 Beam-column 모델

Matlock 등(1981)은 수직력과 횡하중을 받는 보-기둥의 이산요소모델을 제안하였고, 그림 3은 횡하중을 받는 해석적인 모델을 나타낸다. 각 부재들은 절점 i 에서 탄성 힌지로 연결된 단위 길이 h 의 강체 요소들로 모델링하였고, 임의의 절점 i 에 작용하는 우력(couples)과 회전구속조건은 직접 절점에 작용시킬 수 없으므로 인접한 양 절점에 등가의 하중 및 탄성스프링으로 대체하여 작용시켰다. 수직력이 휨모멘트에 미치는 P- Δ 효과를 고려하기 위해, 수직 하중을 받는 현장 말뚝에 대한 해석에서 산정된 내부 부재력(T)이 발생시키는 추가적인 우력을 고려하였다. 본 연구에서는 수직력과 횡하중에 대한 이산요소 모델을 모두 고려하여, 수직력, 수평하중 그리고 모멘트의 복합하중을 받는 현장 타설 단일 말뚝에 대한 해석을 수행하였다.

식 (8)과 식 (9)는 각각 절점 i 와 요소 i 에서의 모멘트 평형과 힘 평형에 관한 식을 나타낸다. 절점 i 에서의 힘-변위 관계는 식 (10)과 같다.

$$M_{i-1} - M_i + V_i h + T_i(-y_{i-1} + y_i) = 0 \quad (8)$$

$$V_i - V_{i+1} + Q_i - S_i y_i - (C_{i-1} - C_{i+1})/2h - R_{i-1} - (-y_{i-2} + y_i)/4h^2 + R_{i+1}(-y_i + y_{i+2})/4h^2 = 0 \quad (9)$$

$$M_i = F_i(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})/h^2 \quad (10)$$

여기서, M_i 은 절점 i 에서 내부 휨 모멘트, V_i 는 요소 i 에서의 전단력, h 는 단위요소 길이, T_i 는 요소 i 에서의 수직부재력, y_i 는 절점 i 에서의 횡방향 변위, Q_i 는 절점 i 에서의 외부하중, S_i 는 선형스프링 상수, C_i 는 절점 i 에서의 외부 우력 그리고 R_i 은 절점 i 에서의 회전 스프링을 의미한다.

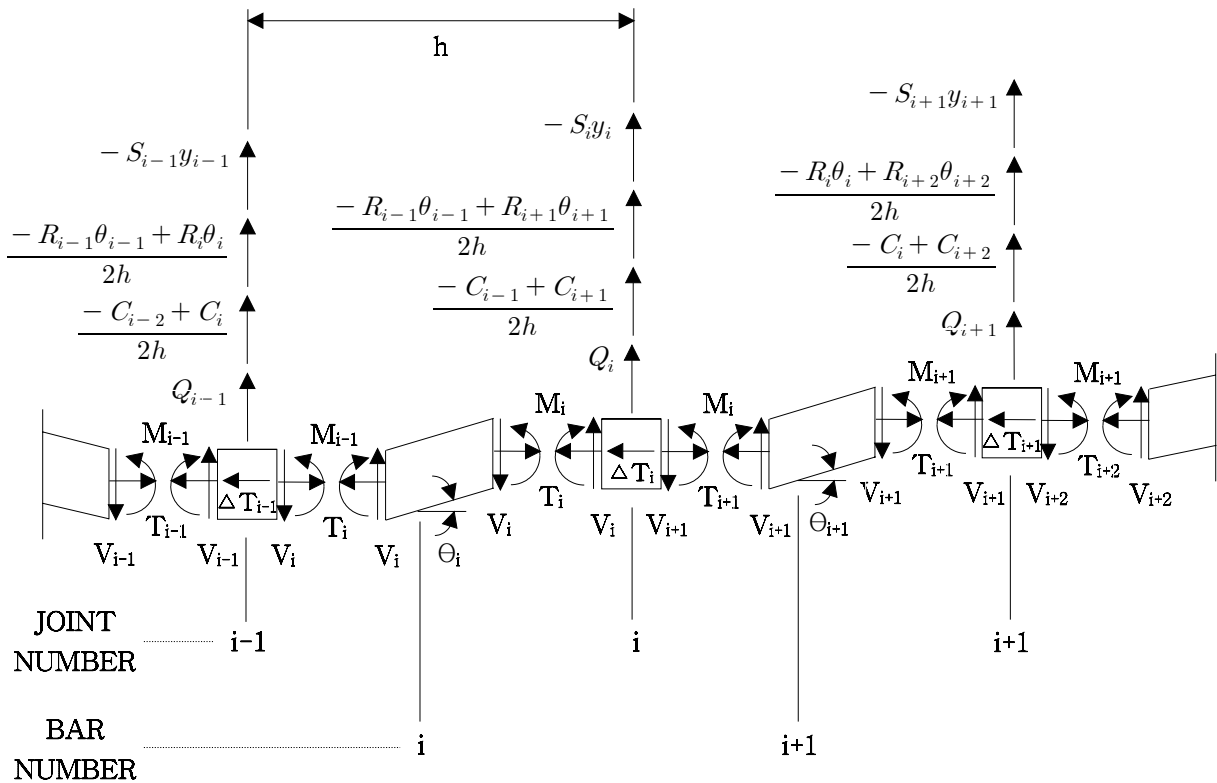


그림 3. 횡방향 모델

2.3 Four-spring 모델을 이용한 해석 모델

Beam-column model에서 four-spring 모델을 고려하기 위해 수직 주면 전단 모멘트 스프링과 저면 모멘트 스프링은 회전 스프링으로, 저면 전단 변위 스프링은 추가적인 선형 스프링으로 적용하였다. 횡방향 변위 스프링을 제외한 세 가지 스프링이 횡하중과 모멘트에 대한 상당한 지지력을 분담하지만 가장 큰 지지력은 횡방향 변위 스프링이 분담하게 된다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 거동을 좀 더 엄밀하게 반영하기 위해 식 (4)과 같은 횡방향 변위 스프링 대신 수평 하중전이함수(p-y model)를 사용하였다. P-y model은 횡하중 말뚝의 유한차분해석에서 필수적인 역할을 하기 때문에 많은 연구자들은 지반 종류, 현장 조건 그리고 하중 조건 등에 따라 다양한 수평 하중전이함수를 개발하였다(한국지반공학회, 2002). 따라서 적절한 수평 하중전이함수를 이용하여 지반반력해석을 수행하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서는 API와 FHWA에서 권장한 p-y model을 선택하였다. 연약점토와 사질토에 대해서 각각 Matlock(1970)과 O'Neill & Murchinson(1983)이 제안한 p-y model을 사용하여 해석을 수행하였다. 또한 수직 하중에 대한 해석에 필요한 주면 하중전이함수와 전단 하중전이함수는 Vijayvergiya(1977)이 사질토와 점성토에 대해 제안한 모델을 사용하였다.

3. 현장 모형 시험

수직력, 수평력 그리고 전도 모멘트를 받는 현장 타설 단일 말뚝의 현장 거동에 관한 계측자료를 얻기 위해 표 1과 같이 154kV 2회선 철탑에 대한 1/8 규모 축소 시험을 수행하였다. 시험말뚝은 직경(D) 0.4m이고, 오거를 이용한 천공을 통해 문힘 깊이가 2.4m(6D)와 4.8m(12D)가 되도록 하여 철근망 투입과 레미콘 타설 후 양생하였다.

익산 지역에서 수행된 현장 모형 시험은 풍화토층이 14.0m 층후로 출현하였으며, 주성분은 실트가 섞인 조립 내지 세립의 모래성분으로 N값은 11/30 ~ 48/30이다. 표 2는 해석에 사용된 풍화토층의 대표적인 물성값을 보여주고 있다.

시험말뚝을 약 0.15m 정도 지상으로 돌출시킨 지표면에서 LVDT와 로드셀을 사용하여 시험 말뚝의 변위와 하중을 각각 계측하였다. 경사계는 철근망을 이용하여 말뚝 중심에 견고하게 연결하여 레미콘 양생이 끝난 후 자동경사계 프로브를 연결하였으며, 토압계와 변형률계를 주철근에 설치하였다. 수평재하시험은 ASTM D3966(1995)의 6.1항의 표준재하방법에 의하여 실시하였으며, 이 때 인접한 지반에 반력재하대를 설치하여 시험하였다. 모멘트시험 방법은 미전기전자연구소(IEEE, 2001)의 Std. 691-2001의 Overturning(Moment) 시험 방법에 의해 시험 말뚝에 연결된 강관주 상부에서 수평으로 인장하는 방법을 택하여 지상에서 2m 및 4m 지점에서 수평이 되도록 재하하였다(김대학 등, 2007).

표 1. 현장 타설 단일 말뚝 시험 계획

시험 지반	시험방법 (가력위치)				합계
	길이	수평 재하 시험 (지표면)	모멘트 재하 시험 (2m)	모멘트 재하 시험 (4m)	
풍화토	6D	1	2	1	4
	12D	1	1	1	3

표 2. 시험 지반 대표 물성치

깊이(m)	N치	ϕ (°)	c(kPa)	γ (kN/m ³)	E _s (MPa)
4.8	8 ~ 11	34	-	19	10.35

4. 수정된 Spring 모델

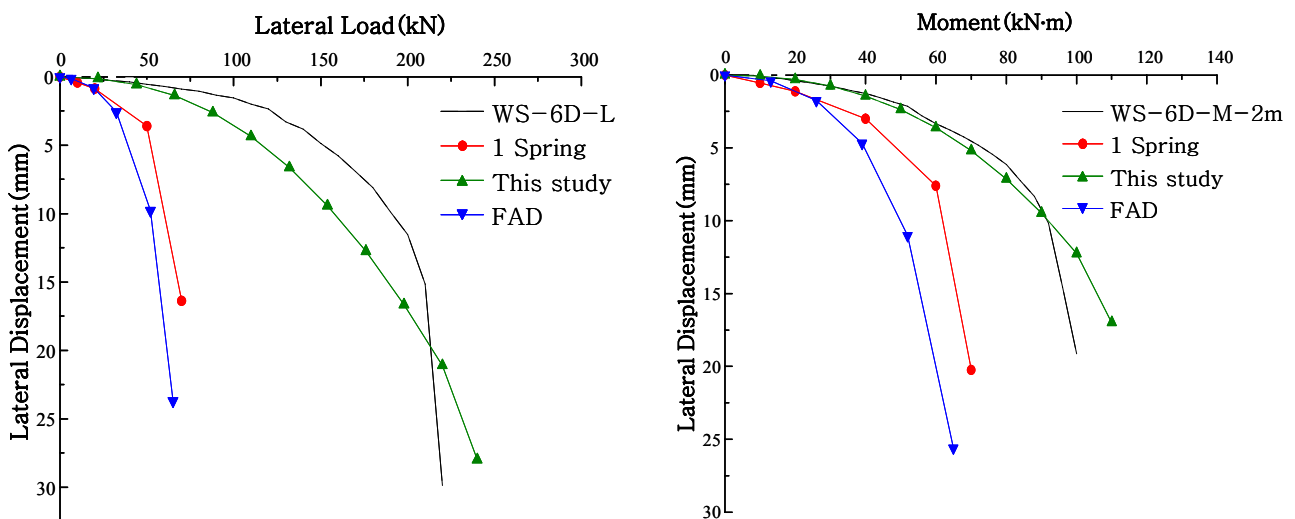
횡방향 수평변위 스프링을 제외한 나머지 지반반력 계수들은 Davison이 제안한 식 (5)~(7)와 같이 다양한 현장시험 결과를 통해 수정될 필요가 있다. 현장시험과의 비교분석을 통해 수직 주면 전단 모멘트 스프링, 저면 모멘트 스프링 그리고 저면 전단 변위 스프링 중에서 수직 주면 전단 모멘트 스프링이 횡방향 하중을 받는 말뚝의 거동에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 해석기법에서는 다양한 지반구성을 갖는 현장시험과의 비교검토를 통해 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 수정하였다. 저면 모멘트 스프링과 저면 전단 변위 스프링의 경우 지반에 상관없이 Davison이 제안한 식 (6)과 식 (7)을 각각 사용하였다.

사질토의 경우 본 연구에서 풍화토 지반에 대해서 수행한 1/8 규모 현장 모형 시험 결과를 이용하여 식 (11)과 같이 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 수정하였다.

$$\frac{k_{\theta}}{DE_s^{1.1}} = 0.15 \quad (11)$$

식 (11)을 사용한 해석모델로부터 산정된 하중-변위 곡선은 그림 4에서 현장 시험 자료와 다른 해석 결과와 함께 비교되었다. 그림에서 1 spring 모델은 횡방향 하중전이 함수만을 고려한 단일 스프링 모델이고, FAD 4.0(EPRI, 2003)은 식 (4)~(7)을 사용하여 four-spring subgrade modulus model을 고려한 상용 유한요소해석 프로그램이다. 또한 WS는 풍화토(weathered soil), L은 수평 재하 시험(lateral test), M은 모멘트 시험(moment test), 6D와 12D는 말뚝의 묻힘 깊이를 나타내는 약자로서, WS-6D-M-2m는 풍화토 지역에서 6D(2.4m)의 묻힘 깊이를 갖는 시험말뚝에 대해 2m의 가력위치에서 수평재하를 하여 모멘트 시험을 수행한 결과를 의미한다.

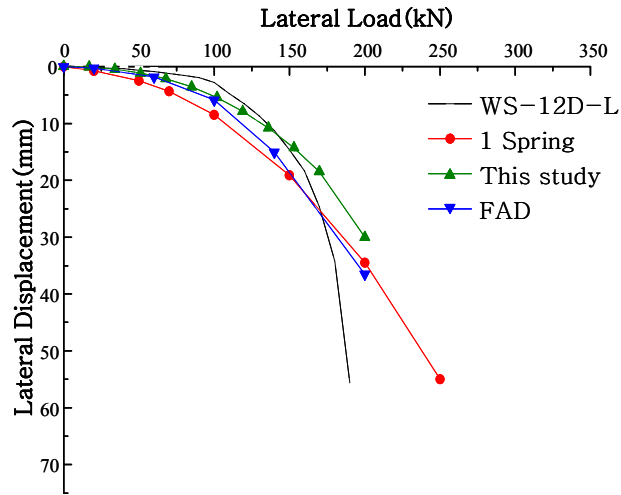
1 spring model과 FAD의 해석 결과를 말뚝 시험 결과와 비교하면 단일 스프링 모델과 FAD가 말뚝의 수평 변위를 과다하게 산정하고 있음을 확인할 수 있다. 과도한 수평 변위는 단일 스프링 모델이 횡방향 수동 토압만으로는 수평력과 모멘트가 주요하게 작용하는 현장 타설 단일 말뚝의 전체 지지력을 충분히 반영할 수 없음을 의미한다. 수정된 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 사용한 본 연구의 해석 모델은 현장 시험 결과와 잘 일치하고 있으며, 이를 통해 개발된 해석 모델이 현장 시험 결과에 맞게 최적화되었음을 확인할 수 있다.



(a) WS-6D-L

(b) WS-6D-M

그림 4. 풍화토 지역에서 수행된 실험과의 하중-변위 비교(계속)



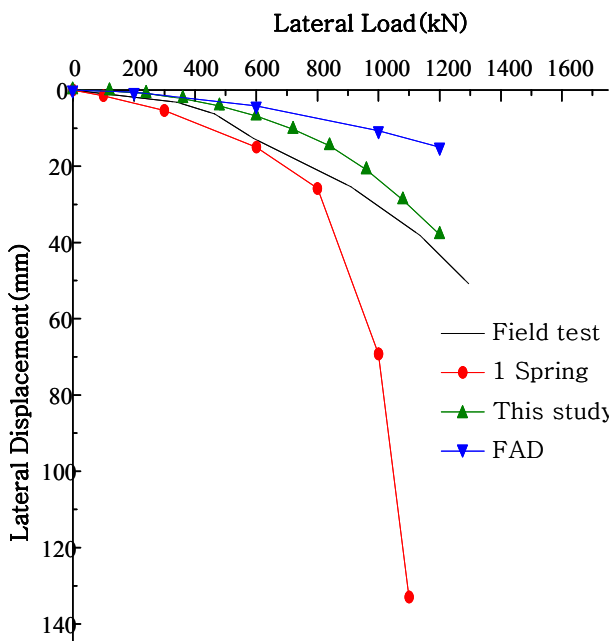
(c) WS-12D-L

그림 4. 풍화토 지역에서 수행된 실험과의 하중-변위 비교

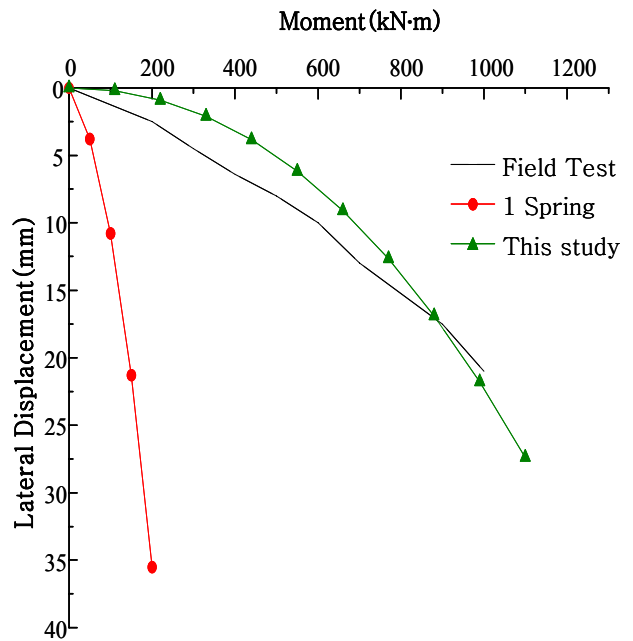
점성토와 암반의 경우 현장 타설 말뚝 기초 시험 사례(Bhushan, 1979; Gabr 등, 2002)에 대한 결과를 이용하여 각각 식 (12)와 식 (13)과 같이 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 수정하였다.

$$\frac{k_{\theta}}{DE_s^{1.1}} = 0.01 \quad (12)$$

$$\frac{k_{\theta}}{DE_s^{1.1}} = 0.015 \quad (13)$$



(a) 점성토 지역(Los Angeles)



(b) 암반 지역(Wilson county)

그림 5. 점성토와 암반 지역에서 수행된 실험과의 하중-변위 비교

그림 5와 그림 6을 통해 수정된 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 사용한 본 연구의 해석 모델이 현장 시험 결과에 맞게 최적화되었음을 확인할 수 있다. 암반지역의 경우 말뚝 직경에 대한 길이의 비율이 허용치를 벗어나서 FAD를 이용한 해석이 수행될 수 없었다.

5. 현장 시험과의 비교

1/8 규모 현장 모형 시험과 말뚝 기초 시험 사례와의 비교 분석을 통해 수직 주면 전단 모멘트 스프링을 수정한 해석 기법으로 다른 현장 시험 결과를 해석, 비교함으로써 개발된 해석 기법의 타당성을 검증하였다. 비교 검증은 Ontario 주 London 지역과 Wisconsin 주 Hager city 근교에서 수행한 시험을 이용하여 수행하였다.

5.1 Ontario 주 현장 시험

Ontario 수력 발전소는 Ontario 주 London 근교에서 230kV 회선 철탑 설치 구간을 따라 모래 지반에서 원형(prototype) 말뚝 기초에 대한 모멘트 시험을 수행하였다(Adams & Radhakrishna, 1973). 표 3은 시추 주상도로부터 결정된 현장 시험 지반의 대표적인 물성값을 보여주고 있다. 현장 시험에 사용된 말뚝은 길이 6m이며, 직경은 0.9m이다.

표 3. Ontario 현장 시험 지반 대표 물성치

깊이(m)	흙의 특성	$\phi(^{\circ})$	c(kPa)	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E_s(\text{MPa})$
1.5	느슨한 사질토	33	-	15.7	4.31
2.4	중간 밀도의 사질토	34	-	18.8	7.37
4.8					13.0
6.0					

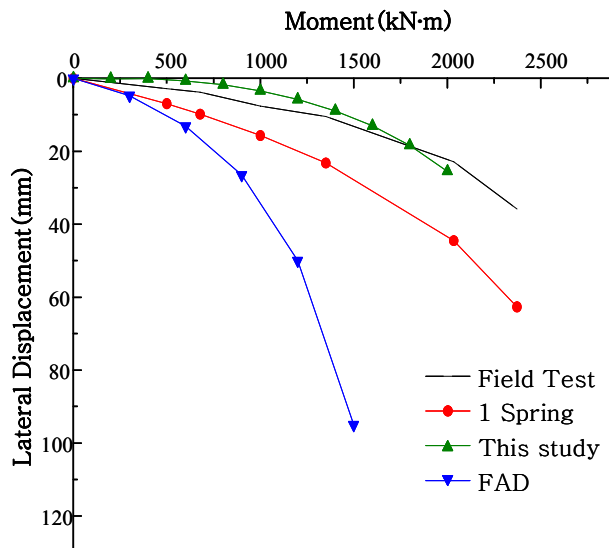


그림 6. 하중-변위 비교(Ontario)

그림 6은 시험 말뚝에 대한 계측자료와 해석 모델들을 이용한 결과를 비교하여 보여주고 있다. 본 연구를 통해 개발된 해석 모델은 1 spring model과 FAD의 해석 결과와 비교했을 때 계측된 말뚝의 거동

을 정확하게 따라가고 있음을 알 수 있다. FAD의 경우 four-spring subgrade modulus model을 사용하기 때문에 횡방향 변위 스프링을 제외한 나머지 세 가지 스프링에 의해 분담되는 지지력을 고려할 수 있지만, FAD에 의해 산정되는 하중-변위 곡선은 시험 결과로부터 다소 벗어나고 있다. 수평 하중전이 함수만을 사용하는 1 spring 모델이 FAD보다 현장 시험에 근접한 결과를 나타내고 있다는 점은 P-y model이 횡하중 말뚝의 유한차분해석에서 핵심적인 역할을 담당한다는 점을 상기시켜준다. 따라서 four-spring 모델의 개념을 하중전이함수와 함께 사용하여 해석을 수행할 때 다양한 하중전이함수들의 영향을 검토하여 지반에 적절한 하중전이함수를 선택하는 것이 중요하다.

5.2 Wisconsin 주 현장 시험

ITT Meyer 전력 회사는 Wisconsin 주 Hager City 근교에서 원형(prototype) 말뚝 기초에 대한 두 번의 모멘트 시험(H1 test, H2 test)을 수행하였다(Monahan & Fiss, 1978). 표 4와 표 5는 시추 주상 도로로부터 결정된 현장 시험 지반의 대표적인 물성값을 보여주고 있다. 두 번의 현장 시험에 사용된 말뚝의 길이는 각각 2.7m, 3.6m이며, 직경은 각각 1.8m, 2.0m이다.

표 4. Wisconsin 현장 시험 지반 대표 물성치(H1 test)

깊이(m)	흙의 특성	$\phi(^{\circ})$	c(kPa)	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E_s(\text{MPa})$
1.35	중간 굳기의 점토질	-	48	18.8	4.13
2.7	느슨 내지 중간 밀도의 사질토	32	-	17.6	9.59

표 5. Wisconsin 현장 시험 지반 대표 물성치(H2 test)

깊이(m)	흙의 특성	$\phi(^{\circ})$	c(kPa)	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E_s(\text{MPa})$
1.2	중간 굳기의 점토질	-	48	18.0	2.23
3.6	느슨 내지 중간 밀도의 사질토	32	-	18.8	11.3

현장 시험 계측 자료와 해석 모델들을 이용한 결과는 그림 7에서 비교되었다. Ontario 주 현장 시험 결과에 대한 비교와 마찬가지로 1 spring model과 FAD를 이용한 해석 결과와 비교했을 때 개발된 해석 모델의 결과와 계측된 말뚝의 거동이 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. FAD를 이용한 해석은 직경에 대한 길이의 비율이 허용 범위를 벗어나서 비교할 수 없었다.

6. 결론

본 연구에서는 Beam-Column 모델과 하중전이 함수를 근간으로 현장 타설 단일 말뚝의 횡방향 거동에 관한 연구를 수행하였다. 연구에 수행된 해석 기법에서는 횡방향 거동이 지배적인 말뚝의 전체 지지력을 충분히 고려하기 위해 횡방향 하중전이 함수 이외에 추가적인 지반스프링 모델을 이용하여 하중 메카니즘을 고려하였다. 1/8 규모의 현장 모형 시험과 현장 타설 말뚝 기초 시험 사례와의 비교 분석을 통해 수정된 스프링 모델을 이용한 해석 기법으로부터 도출한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 횡방향 하중과 모멘트가 지배적인 말뚝의 거동은 수평 하중전이함수만을 사용하는 1 spring 모델을

사용할 경우 수평 변위를 과다하게 산정할 수도 있다.

- (2) 본 연구에서 수행된 현장 모형 시험과 기초 시험 사례와의 비교 분석을 통해 추가적인 스프링 모델을 최적화할 수 있었다.
- (3) 수정된 스프링 모델을 사용한 해석 기법은 현장 타설 단일 말뚝의 횡방향 거동 해석에 유용하게 사용할 수 있는 것으로 분석되었다.

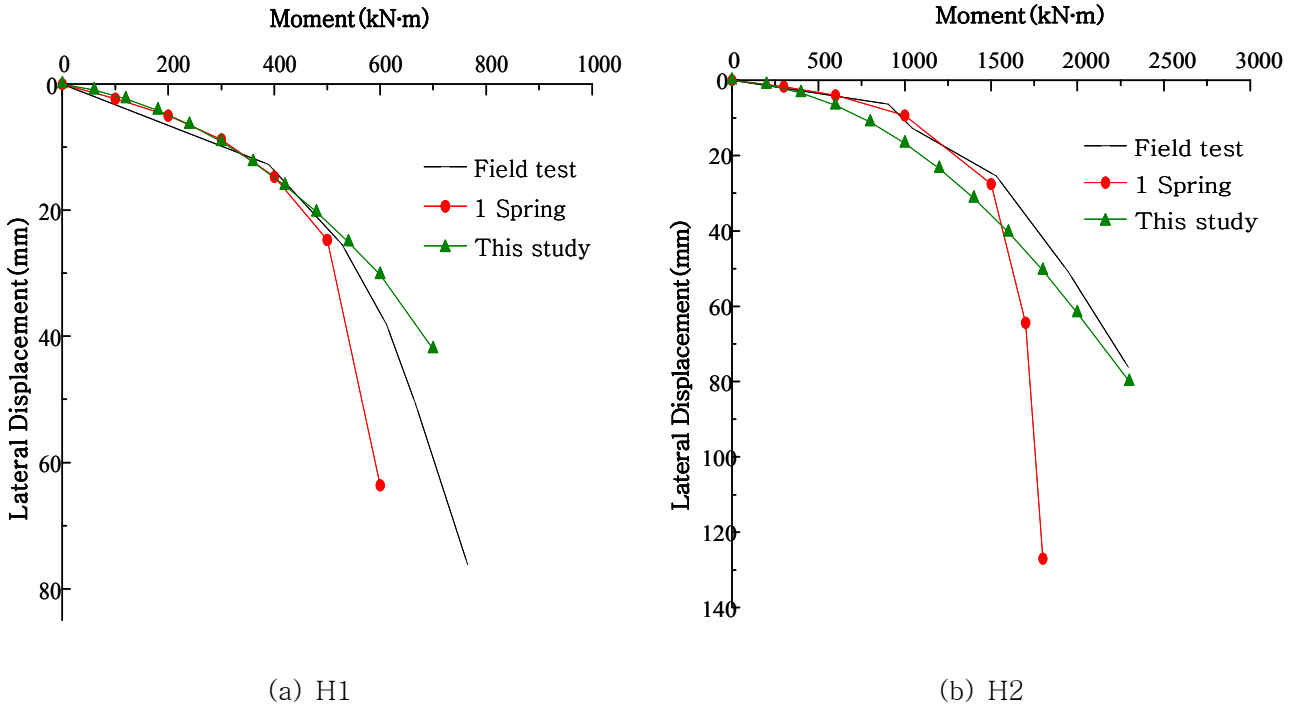


그림 7. 하중-변위 비교(Wisconsin)

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “가공송전용 강관주 철탐기초 설계 기준 수립연구”에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김대학, 이대수, 김대홍, 배을호, 강태식(2007), “강관주 송전철탐을 위한 1/8 규모 현장타설말뚝 기초 모멘트시험 사례 연구(풍화토)”, 한국지반공학회 2007 추계논문 발표회 발표논문.
2. 김영훈(2008), “송전용 강관주 현장타설 말뚝 기초의 거동 해석기법 개발”, 한국과학기술원, 공학석사 학위논문.
3. 산업자원부(2006), “가공송전용 강관주 철탐기초 설계기준 수립연구 1차년도 중간보고서”.
4. 한국지반공학회(2002), 깊은 기초, 지반공학시리즈 4, 구미서관.
5. Adams, J. I. and Radhakrishna, H. S.(1973), "The Lateral Capacity of Deep Augered Footings", Proc. of 8th Inter. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., Moscow, ISSMFE, Vol. 2, No. 1, pp.1~8.
6. ASTM D3966-90(1995), "Standard Test Method for Piles Under Lateral Load", ASTM.
7. Bhushan, K., Haley, S. C. and Fong, P. T.(1979), "Lateral Load Tests on Drilled Piers in Stiff Clays", J.

- of Geotech. Eng. Division, ASCE, Vol. 105, No. GT8, pp.969~985.
8. Davison, H. L.(1982), "Laterally Loaded Drilled Pier Research Vol. 2: Research documentation", GAI Report EL-2197, Research Project 1280-1, Prepared for Electrical Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
 9. DiGioia, A. M., Davison, H.L. and Donovan, T.D.(1981), "Laterally loaded drilled piers - a design model", Drilled Piers and Caissons, Proc. a session sponsored by the Geotechnical Engineering Division at St. Louis, Missouri.
 10. Douglas, D. J. and Davis, E. H.(1964), "The Movement of Buried Footing Due to Moment and Horizontal Load and the Movement of Anchor Plates", Geotechnique, Vol. 14, No. 2, pp.115~132.
 11. EPRI(2003), "Foundation Analysis and Design 4.0 - User's Guide", EPRI Energy Delivery and Utilization Center.
 12. Gabr, M. A., Borden, R. H., Cho, K. H., Clark, S. C. and Nixon, J. B.(2002), "P-y Curves for Laterally Loaded Drilled Shafts Embedded in Weathered Rock", FHWA Report NC/2002-008.
 13. Huntley, H.E.(1967), "Dimensional Analysis", Dover Publications, New York.
 14. IEEE Std. 691(2001), "IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing", IEEE.
 15. Matlock, H.(1970), "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay", Paper No. OTC1204, Proc. Second Annual Offshore Tech. Conf., Houston, Texas, Vol. 1, pp.577~594.
 16. Matlock, H., Bogard, D. and Lam, I. P.(1981), "A Computer Program for the Analysis of Beam-Columns under Static Axial and Lateral Loading", University of Texas, Austin, Texas.
 17. Monahan, D. R. and Fiss, R. A.(1978), "Evaluation of Full-Scale Test Results of Transmission Pole Foundations", IEEE Winter Meeting, New York, January 29-February 3.
 18. O'Neill, M. W. and Murchinson, J. M.(1983), "An Evaluation of p-y Relationships in Sands", American Petroleum Institute.
 19. Vallabhan, C. V. G. and Alikhanlou, F.(1982), "Short Rigid Piers in Clays", J. of Geotech. Eng. Division, ASCE, Vol. 108, No. GT10, pp.1255~1272.
 20. Vijayvergiya, V. N.(1977), "Load-movement characteristics of piles", Proc. 4th Annu. Symp. of the Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Div. of ASCE, ASCE, Long Beach, Calif., Vol. 2, pp.269~284.