

비선형 해석 기법을 이용한 항복점 이후의 단일말뚝 수평저항력에 관한 연구

The Study for Horizontal Resistance Beyond Yield Condition on Single Pile Using Nonlinear Analysis

유 정 호¹⁾ · 조 삼 덕²⁾ · 김 대 학³⁾ · 이 광 우[†]

Jeong Ho Ryu · Sam Deok Cho · Dae Hak Kim · Kwang Wu Lee

Received: April 27th, 2017; Revised: May 11th, 2017; Accepted: May 24th, 2017

ABSTRACT : The behavior of the lateral resistance beyond the yield condition on single pile has been evaluated by comparative analysis. Pushover analysis of single pile has been performed to compare to the results on lateral load test of the pile foundation. The study for the behavior beyond the yield condition on single pile had been performed on the results on the lateral load test and pushover analysis considering mechanical conditions of the ground soil and the pile foundation.

Keywords : Lateral load test, Pushover analysis, Pushover curve, Numerical model calibration, Pile foundation

요 지 : 본 연구는 기 시공된 단일말뚝의 항복점 이후 수평저항력에 관한 거동을 현장시험 및 해석적기법의 결과와 비교분석하는 과정을 다루고 있다. 또한 현장시험 및 해석적 기법의 비교분석을 통하여 횡하중을 받는 말뚝 및 기초지반의 수치모델을 검증(model calibration)하였다. 검증 및 매개변수에 관한 해석을 수행하기 위해 pushover 해석기법을 적용하였고, 본 해석기법을 통해 말뚝의 횡방향 거동에 대한 수치모형과 현장시험과의 비교분석을 통한 모델 검증, 그리고 현장시험에서는 빈도가 매우 드문 횡방향 재하를 통한 말뚝의 항복점 이후 거동까지 검증된 수치모델을 통해 분석하였다.

주요어 : 말뚝 재하시험, 푸쉬오버해석, 푸쉬오버커브, 수치모델 검증, 말뚝기초

1. 서 론

본 연구에서는 현장에서 수행한 기성말뚝의 수평재하 시험결과와 해석결과를 본 연구에서 구성한 수치모델과 비교 조사한 후 항복점 이후의 말뚝의 횡방향 거동에 대해 분석하였다. 사용한 해석기법은 pushover analysis로서, pushover 해석이란 구조물의 항복 이후의 거동과 한계상태를 효과적으로 파악하기 위해 수행하는 해석단계로서 성능기초기반 설계에서 구조물의 비탄성 보유능력을 평가하는데 가장 많이 적용되는 해석방법 중 하나이다. 수평지지력 산정방법 중 가장 많이 사용하는 Broms(1964)의 경우 지반의 비선형성을 고려하지 못하므로 교량과 같은 주요 구조물에 적용하지 못하고 교통표지판이나 방음벽 등 중요도가 떨어지는 구조물에 적용한다(FHWA, 2010). 그리고 Chang 방법의 경우 국내의 한계상태 설계법 기준 저항계수가 없으므로 적용이 곤란하다. 따라서 국내에서도 한계상태 설계법으로 말뚝을 설계

하는 경우 Pushover 해석이 가장 적절하다고 판단된다(Fig. 1). 본 연구는 단일말뚝의 수평재하 시험결과와 수치해석을 비교하여 항복점 이후의 수평거동에 대한 분석을 말뚝 구조특성별로 분석하였고, 그 해석방법으로서 pushover analysis를 적용하였다. pushover 해석 시 수평저항력 산정기준은 AASHTO 2007 기준을 참조하였다.

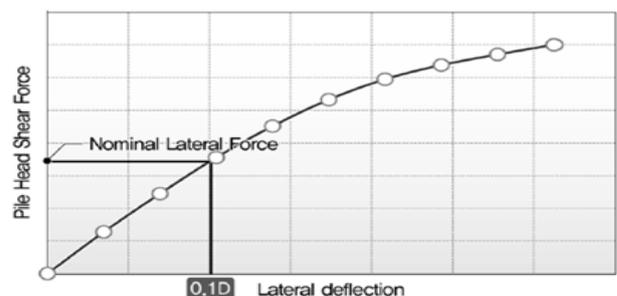


Fig. 1. Schematic drawing of pushover curve (박영철 외, 2015)

1) Post Doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

3) Researcher, Unicon Tech Institute

† Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : kwangwu@kict.re.kr)

2. 현장시험과의 비교분석을 통한 수치모델 검증

2.1 현장시험 데이터 수집

수치모델 구성을 통한 비교분석을 수행하기 위해 현장에 서 수행된 말뚝의 수평재하 시험 데이터를 수집하였다. 직경은 중소형으로 구분되는 ϕ 500(PHC), 508-12t(steel) 및 재질도 두 가지 경우(PHC 및 steel)에 대한 자료 위주로 수집하였다. 향후 해석의 신뢰성을 높이기 위해 보다 많은 자료 보강이 필요할 것으로 판단된다(Fig. 2, Table 1).

2.2 현장시험 데이터 분석

말뚝의 수평재하 시험은 ASTM D 3966-90을 준용하여 수행하였고, 시험이 종료되는 하중은 1) 시험 말뚝이 본 공사에 사용되는 것은 말뚝체가 파손되지 않을 정도의 하중 2) 탄성설계법으로 설계되는 경우는 설계하중 3) 극한 설계법으로 설계되는 경우는 말뚝 혹은 지반이 파괴될 때까지의 하중에 특정 여유 하중까지 더한 값 4) 구조물에서 구해지는 말뚝의 수평 변위량 이상의 변위가 발생하는 하중 5) 상기의 조건들 중에서 말뚝두부의 고정조건이나 돌출길이 등을 고려하여 결정한다.

PHC 말뚝 및 강관말뚝에 대한 현장 수평재하 시험결과, 모든 경우에 대해서 설계 허용 수평변위(15mm) 이내에서 최종하중재하가 종료되었고, 그 하중의 범위는 대체로 설계

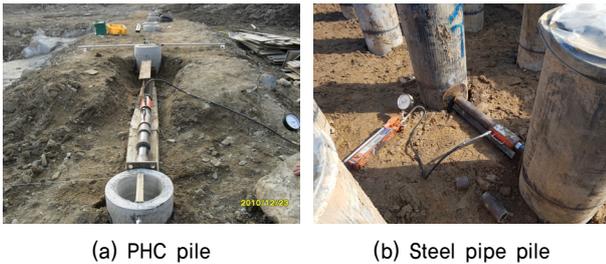


Fig. 2. Lateral load test (in-situ)

Table 1. The basic description of in-situ lateral pile load test

Site No. (#)	Soil condition	Site description	Installation depth (m)	Pile/Installation type
1	Silty sand	○○강 환경복원 사업 현장	20	PHC/ Driven
2		○○ 인천공항 공사현장	17	
3		○○ 신도시 공사현장	12	Steel pipe/ Bored
4		○○ IC 공사현장	19	

하중의 200% 내외로 확인되었다. 상기의 시험조건 및 결과를 살펴보았을 때 최대하중재하 단계에서도 항복·극한하중은 확인되지 않았다(Table 2, Fig. 3).

본 연구에서 분석한 수평재하시험 결과 이외에도 대부분의 재하시험은 항복점 이하에서 종료되는 경우가 보편적이므로 항복점 이후 파괴거동까지 확인 후 설계에 대한 검증을 마치는 경우는 매우 드물다. 따라서 수평재하시험 결과를 바탕으로 하여 수치모델 구성·검증 후 해석모델을 이용하여 말뚝의 파괴거동을 조사하는 과정이 필요하다.

2.3 수치모델 구성 및 검증

말뚝의 수평재하시험을 수치모델로 구성하기 위해 말뚝 수평거동 전용 프로그램을 본 연구에 사용하였다. 말뚝 수평거동 전용 프로그램을 사용하여 해석을 수행하기 이전에 말뚝 수평거동 해석이론을 간략히 소개한다.

수평하중을 받는 말뚝해석의 기본 방정식은 말뚝을 보요소로, 지반을 탄소성 스프링으로 모델화하였는데 말뚝길이 방향으로의 지반강성 변화를 고려한 지반반력 해석법을 적용하여 말뚝의 수평거동을 예측하였다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - p(x) = 0$$

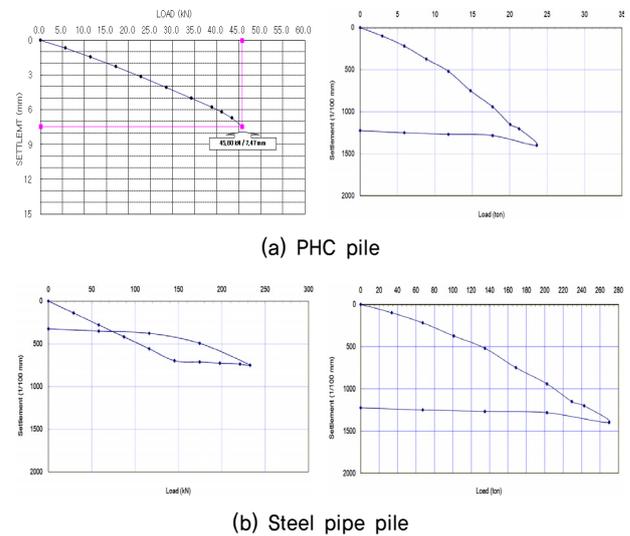


Fig. 3. Test results for lateral pile load test

Table 2. Test results on in-situ lateral pile load test

Test No.	Pile type (dia.)	Head condition	Max. load (kN)	Total deflection (mm)
1	PHC (ϕ 500)	Free	45.8	7.47
2			231.5	14.0
3	Steel (ϕ 508, 12t)		220.91	13.95
4			260.34	7.59

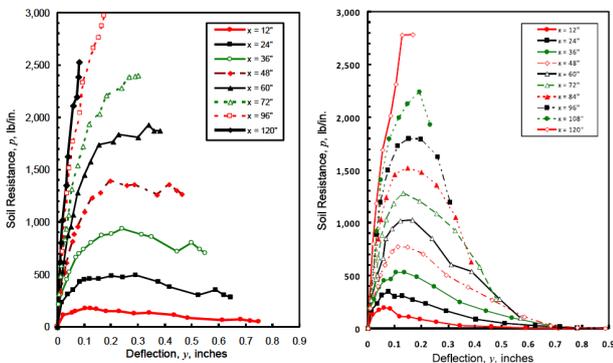
균질한 지반에 시공된 말뚝의 수평거동 예측은 말뚝과 지반을 탄성체로 간주하고 지반을 비선형 스프링으로 모델링하여 해석을 수행하는 것이 보편적이다. 하지만 현실의 지반은 다층으로 구성되어 있으며 이때 지반과 말뚝의 상호작용 관계를 잘 고려하고 있는 p-y곡선 함수를 적용하여 말뚝의 비선형 수평거동을 해석할 수 있다.

2.3.1 p - y 곡선

흙과 말뚝의 비선형 거동에 관한 해석은 현장실험결과를 바탕으로 하여 여러 연구자들로부터 제안된 p-y곡선이 통상적으로 이용되고 있다(Reese & William, 2011, Fig. 4). 본 연구에서는 실무 및 연구에서 보편적으로 많이 사용하는 p-y 곡선이 데이터베이스화되어있고 해석 알고리즘 또한 유한요소법이나 유한차분법 기반의 범용 솔루션이 아닌 말뚝-지반 비선형 해석에 특화된 해석코딩(상용 프로그램)을 사용하여 현장실험결과와 해석모델을 비교분석하였다. 현장실험결과와 비교분석하여 검증된 해석모델을 사용하여 현장 실험에서 확인되지 못한 항복점 이후 파괴까지의 거동(응력 및 변형 거동)에 관한 분석을 수행하였다. 모델검증 후 말뚝의 항복점 이후 거동분석에 사용된 해석기법은 Pushover analysis를 적용하였다.

2.3.2 Pushover analysis

Pushover 해석은 정적-비선형 해석방법 중 하나로서 해석대상 구조물은 중력에 의한 수직하중과 대체로 변위로 정의되는 수평하중의 조합을 받고 있는 상태이다. 구조물에 작용하는 수평하중은 탄성에서 비탄성영역까지 지속적으로 증가하는 특징을 보이며, 이는 부재의 한계상태까지 도달하게 한다(Reese et al., 2016). Pushover 해석결과는 부재의 강도기반 매개변수와 그에 상응하는 수평변위에 관한 매개변수로 표현된다. 예를 들어 말뚝의 경우, 말뚝 두부의 수평



(a) Curves from static load test (b) Curves from cyclic load test

Fig. 4. Example of p-y curves (Reese & William, 2011)

저항력과 그에 상응하는 수평변위에 관한 상관관계로 표현되는 경우가 많다(Fig. 5).

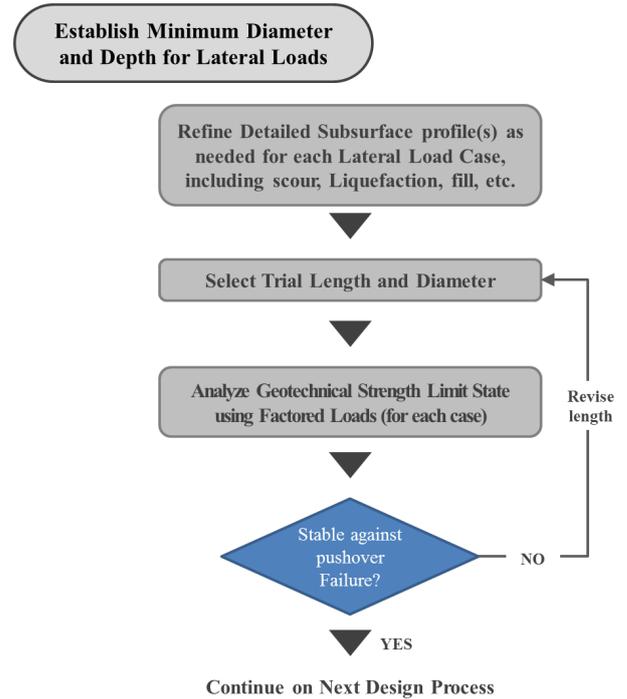


Fig. 5. Design process for lateral loads (using pushover analysis; FHWA, 2010)

2.3.3 수치모델의 구성

기성말뚝(PHC, steel pipe)에 대한 현장 수평재하 시험결과를 분석하고, 현장시험에서 재현하기 어려운 항복점 이후 거동을 분석하기 위하여 말뚝 수평저항력 해석에 특화된 프로그램으로 수치모델을 구성하였다(Table 3). 수치모델은 Ensoft사의 L-pile 2016 프로그램을 이용하여 구성하였다.

본 연구에서 수집된 현장시험 데이터는 모두 사질지반에서 시험한 결과이고, 지하수위는 관입깊이 아래에 위치하고 있다. 현장시험 말뚝은 PHC 및 강관말뚝이고 17~23m 범위에서 최종적으로 관입 되어 있는 상태이다. 수직 및 수평하중 시험방식과 동일하게 단계별로 하중을 재하여 모델을 검증하였고, 검증된 모델은 pushover 해석을 통

Table 3. Soil Properties for the lateral resistance analysis of the single pile

Site no. (#)	Soil type	Installation depth (m)	Strength parameter		Stiffness parameter (k, kN/m ³)	
			c (kPa)	φ (deg)	Initial	Final
1	Silty sand	20	3.2	22.9	18,752.8	13,008.06
2		17	1.02	27.4	65,010.9	30,416.9
3		23	0	24.1	22,531.6	10,725.3
4		19	4.87	30.8	436,979.6	204,451.2

하여 현장시험에서 볼 수 없었던 항복점 이후의 거동을 분석하였다.

2.3.4 수치모델의 검증

단일말뚝이 시공된 현장지반정보 및 말뚝구조체 정보를 이용하여 수치모델을 구성하였고, p-y curve를 이용한 수평 저항력에 관한 해석을 수행한 결과를 현장 수평재하 시험결과와 비교하였다(Fig. 6, 7, Table 4). 비교결과 수평변위의 경우 현장시험결과와 해석결과의 차이가 4% 이내인 것을 확인하였다.

현장시험결과와 해석결과 둘 다 4% 이내 변위 차이에서

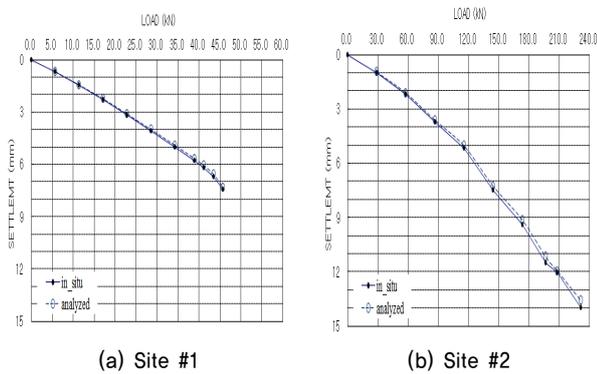


Fig. 6. Comparative charts between in-situ test result and analyzed value using numerical model on lateral load test of PHC pile

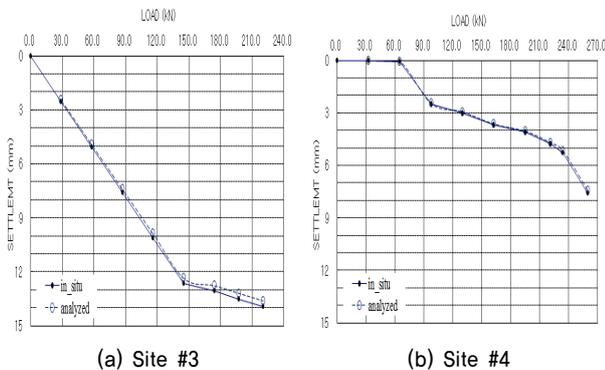


Fig. 7. Comparative charts between in-situ test result and analyzed value using numerical model on lateral load test of Steel pipe pile

Table 4. lateral deflection check between in-situ test result and analyzed value of numerical model

Site #	Soil type (p-y curve)	In-situ test value (mm)	Analyzed value (numerical model, mm)	Tolerance, % (1-analyzed value/in-situ test result)
1	Silty sand	7.47	7.34	1.74
2	Reese &	14.0	13.59	2.92
3	William,	13.95	13.62	2.37
4	2011)	7.59	7.45	1.85

거의 유사한 거동을 보이고 있으며, 말뚝의 수평거동은 항복점 이내에 존재하고 있는 것으로 판단된다. 다만 #3 site의 경우, 초반에 항복점과 유사한 변곡점이 보이고 있으나 후에 응력연화 또는 응력경화 거동 없이 선형적 거동을 보이고 있다.

상기와 같이 검증된 수치모델을 이용하여 현장시험에서는 확인하기 어려웠던 항복점 이후의 거동을 pushover 해석 기법을 통해 수평거동을 분석하였다.

3. 비선형 해석(Pushover analysis)을 통한 단일말뚝 거동예측

3.1 Pushover 해석 결과

말뚝의 수평저항에 대한 현장시험 결과는 시험규정에 따라 수행되었으며, 항복점 이하에서 시험이 종료되었다. 기성 말뚝 대부분이 수직정적하중에 대한 설계가 주를 이루었으며, 수평방향에 대한 저항력 계산 및 설계 또한 교각 또는 교대와 같은 구조물이 저항하는 수준으로 설계가 진행되어 왔다. 지진하중으로 대표되는 비선형 영역의 수평저항 거동을 고려한 말뚝설계 역시 수행되고 있지만 그것을 검증하기 위한 현장시험은 항복점 이내의 거동만 분석되는 것이 대부분이다. 본 연구에서는 현장시험 특성이 그대로 반영된 수치모델을 이용하여 pushover 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 설계검증에 반영하는 과정을 소개하고 말뚝구조체별(재료별) 비선형 수평저항 거동을 분석하고자 한다. pushover 해석에 관한 개요는 2.3.2절에 언급되어있다.

3.2 말뚝구조체별 비선형 거동 분석

3.2.1 PHC 말뚝의 비선형 거동 분석

PHC 말뚝을 대상으로 완료된 수평재하 시험결과를 이용하여 pushover 해석을 수행하였다. 그 결과 PHC 말뚝은 항복점 이후 응력경화현상 또는 완전소성상태와 유사한 거동을 보였으며 이는 동일한 하중증분에 대하여 수평변위 증분이 급격히 감소되는 것을 의미한다(Fig. 8). 본 해석에서 수평변위 한계기준은 0.1D=50mm로 설정하였다.

Fig. 8, 9에 표기되어 있는 범례에 대한 내용을 아래표에 간단히 요약하였다(Table 5).

AASHTO 2007_LRFD 설계법에 의한 수평거동에 대한 변위한계(FHWA, 2010)는 0.1D(D는 말뚝의 직경)로 정의한다. 본 해석에 사용된 PHC 말뚝의 경우 직경이 500mm이므로 수평거동에 대한 변위한계기준은 50mm를 적용하였다. PHC말뚝의 수평변위 한계에 상응하는 말뚝 두부의 공칭전

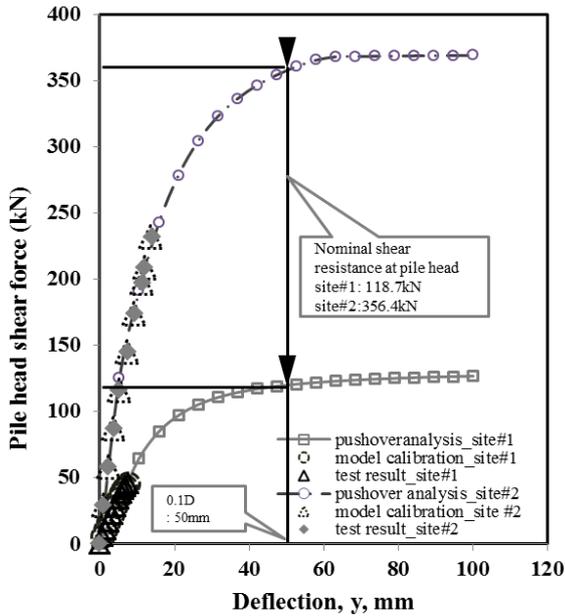


Fig. 8. Pushover curve at site #1 and #2

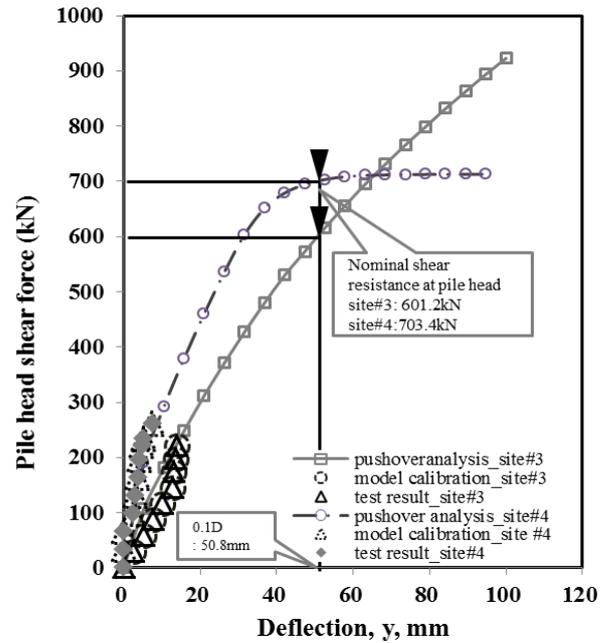


Fig. 9. Pushover curve at site #3 and #4

Table 5. The description of the legend in the Fig. 9 and 10

	Legend	Description
1	Pushover analysis_site #.	Site #.에서 pushover 해석결과
2	Model calibration_site #.	2.3.4절에 기술한 수치모델 검증
3	Test result_site #.	현장시험 결과

단력(nominal shear force)는 2배 이상의 차이를 보였으며, 이는 수평저항에 대한 극한한계상태를 고려할 경우, 기성말뚝인 PHC 말뚝을 동일하게 적용하는 경우, 특정 부분에서는 상당한 과다설계가 이루어질 수도 있다는 것을 의미한다.

3.2.2 강관말뚝의 비선형 거동 분석

강관말뚝(ϕ 508, 12t)을 대상으로 완료된 수평재하 시험결과를 이용하여 pushover 해석을 수행하였다. 그 결과 강관말뚝은 PHC 말뚝과 동일한 수평변위 한계기준(0.1D=50.8mm)을 적용하였고, 그 결과 Nominal shear force 도달 전까진 전반적으로 선형탄성 거동을 보였고, 그 이후 항복점이 확실히 드러나는 경우(site #4)와 지속적으로 선형탄성 거동을 보이는 경우(site #3)를 확인할 수 있었다(Fig. 9).

본 해석에서 수평저항에 대한 극한한계상태에서 PHC 말뚝은 강관말뚝의 거동보다 다소 큰 차이가 나는 nominal shear force를 결과로써 보여주고 있다. 강관말뚝은 강성이나 강도면에서 매우 우수한 재료로 이미 알려져 있지만 경제성 및 환경성에서 여러 가지 불리한 조건이 많아 현재 건설시장에서 그 사용도가 지속적으로 하락하고 있는 추세이다. 반면 PHC 말뚝은 강세를 보이고 있지만 수평저항에 대한 극한한계상태에서 상부하중조건 및 기반조건에 따라 과다 및

과소 설계의 격차가 매우 클 것으로 예상된다.

특히 지진하중과 같은 극한한계상태에서 설계에 따른 기성말뚝의 선택을 할 때 매우 제한된다는 것을 의미하여 이는 다른 의미의 경제성 손실로 판단된다. 따라서 기성말뚝으로 대표되는 중소건설시장의 기초공사 재료로서 대안이 필요한 시점이라 전망된다.

4. 결 론

본 연구는 단일말뚝이 시공된 현장지반정보 및 말뚝구조체 정보를 이용하여 수치모델을 구성하였고, p-y curve를 이용한 수평저항력에 관한 해석을 수행한 결과를 현장 수평재하시험 결과와 비교하였다. 현장시험결과와 구성된 수치모델은 약 4% 이내의 결과 차이로 매우 유사한 경향을 보였고 이 모델을 기본으로 현장시험에서 확인하기 어려웠던 항복점 이후의 거동을 조사하기 위해 pushover analysis를 수행하였다. pushover 해석결과 말뚝 구조체별로 거동의 차이가 나타났는데 세부 내용은 아래와 같다.

- (1) PHC 말뚝의 경우 항복점이 선명하게 나타났으며 항복점 이후 거동이 응력경화거동 또는 완전소성상태와 유사한 경향을 보였다.
- (2) 이는 항복점 이후 PHC 말뚝은 수평저항력이 완전 상쇄되거나 급격히 저하될 수도 있다는 것을 의미한다. 즉, 본 해석결과에서 PHC 말뚝은 항복점 이하에서의 설계

만이 유효하다는 것을 추정할 수 있다.

- (3) 강관말뚝의 경우, 일부 시험결과 및 해석결과에서는 뚜렷한 항복점을 찾기 어려웠고 해석 시 지정한 한계 변위(100mm) 계속 선형탄성거동을 보이는 결과도 있었으며, 항복점 이후 완전소성상태와 유사한 거동을 보이는 경우도 확인되었다. 이와 같은 거동에 대해서 PHC 말뚝은 지반 및 구조체에 대한 탄소성 특성으로 추정되지만 강관말뚝의 경우 지반의 비선형 탄소성 특성에 의존되는 것으로 사료된다. 향후 말뚝 단면 및 지반의 소성 특성을 고려한 하중전이 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 해석결과 PHC 말뚝은 수평저항에 대한 극한한계 상태에서 상부하중조건 및 지반조건에 따라 단면설계의 격차가 매우 클 것으로 예상된다.
- (5) 따라서 지진하중과 같은 극한한계상태에서 설계에 따른 기성말뚝의 선택을 할 때 매우 제한된다는 것을 의미하여 이는 다른 의미의 경제성 손실로 판단된다. 따라서 기성말뚝으로 대표되는 중소건설시장의 기초공사 재료로서 대안이 필요한 시점이라 전망된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 16CTAP-C116826-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS [ASTM] (1990), "Standard Test Method for Piles Under Lateral Loads": D 3966-90.
2. Broms, B. B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE 90 (SM3), pp. 123~156.
3. FHWA (2010), "Drilled shafts: construction procedures and LRFD design methods", pp. 12-9~12-13.
4. Reese, L. C. and William F. Van Impe (2011), "Single piles and pile groups under lateral loading, 2nd edition", CRC press, pp. 38~50.
5. Reese, L. C., Wang, S. T., Isehower. W. M. and Arrellaga, J. A. (2016), "Computer program LPILE 2016 Technical manual", Ensoft. Inc. Austin, Texas, pp. 85~89.
6. 박영철 외 (2015), "한계상태설계법에 의한 현장타설말뚝 설계법 소개", 유신기술회보, 제 22호, pp. 129~143.