

수평재하에 따른 복합말뚝의 거동분석

황택진^{1*}

¹동의대학교 토목공학과

Analysis of Composite Pile Behavior under Lateral Loadings

Taikjean Hwang^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Dong-Eui University

요 약 복합말뚝은 서로 다른 재질을 사용하여 말뚝을 구성하는 말뚝으로 상부는 강관말뚝 하부는 콘크리트 말뚝으로 구성된 말뚝을 선 굴착 공법으로 시공하였다. 말뚝에는 7쌍의 변형률계와 경사계를 설치하여 말뚝의 수평재하시험 중 말뚝에 작용하는 응력과 변위를 측정하였다. 측정된 계측치는 여러 가지 이론적 공식을 이용하여 분석 비교하는 역 해석을 수행하였다. 분석결과 공식들로부터 예측한 말뚝에 작용하는 응력은 실제 측정된 값보다 크게 평가 되었으며, 말뚝상부에 응력이 크게 측정되다가 말뚝깊이에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 측정된 응력은 모두 말뚝재질의 응력을 초과 하지 않아 복합말뚝의 설계개념을 검증할 수 있었다.

Abstract A composite pile consisted of a concrete lower part with a steel tubular pile at upper part was installed by pre-drilling method. Seven pairs of strain gauges and inclinometer were attached on the pile in order to measure stresses and displacement along the pile during the lateral loading test. The results of instrumentation were analyzed using various theoretical approaches. The back analysis showed that the measured stresses were smaller than those of the calculated. The maximum stress is measured at the steel upper part and decreased rapidly with depth of the pile. The calculated lateral displacement along the pile provide very good agreement with the measured values if the coefficient of subgrade reaction is selected properly. The design concept of a composite pile is verified by the measured stresses and displacement which is within the tolerable limits of the pile.

Key Words : Composite Pile, Lateral Loading Test, Equations for Lateral Resistance of Pile, Field Instrumentation, Back Analysis

1. 서론

복합말뚝(Composite Pile)이라 함은 2개 이상의 이질의 말뚝 재료로 구성된 말뚝을 말한다. 오래전부터 항만 구조물에 적용한 복합말뚝의 형태로는 상부 콘크리트 말뚝에 수면하부의 나무 말뚝으로 연결하여 수면상부로 노출된 나무말뚝의 부식문제를 해결하기 위해 적용한바 있으며 이러한 복합말뚝의 적용은 말뚝의 기능향상 목적이 우선이지만 부수적으로 경제적인 효과도 상당히 크다 [9,14].

최근 일본에서는 내진 설계 시 작용하는 수평력에 대해 효과적으로 대처하기 위해 상부에 강성이 큰 말뚝 재료, 말뚝하부에는 현장타설 콘크리트 말뚝이나 콘크리트 기성말뚝을 사용하고 있고 동경전력에서는 수평진동하중이 작용하는 원자력 발전소 설비에 복합말뚝을 적용한 바 있다 [3]. 미국에서는 항만구조물 기초에 기존의 강관 말뚝을 대신할 수 있는, 부식에 반영구적인 재질을 이용한 복합말뚝에 대한 연구가 2000년 이후에 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 FRP (Fiber Reinforced Polymers) 나 탄성섬유로 원형말뚝 안쪽에 PC나 RC콘크리트를 채

본 연구는 동의대학교(2011AA150) 연구 결과의 일부로 지원되었으며, 자료 협조해 주신 이장덕 박사께 감사드립니다.

*교신저자 : Taikjean Hwang

Tel: +82-10-7542-3936 e-mail: tajhwang@deu.ac.kr

접수일 12년 01월 05일

수정일 (1차 12년 02월 21일, 2차 12년 02월 28일)

게재확정일 12년 03월 08일

우는 방식이다[12].

국내에서는 현장타설 콘크리트 말뚝, 고강도 콘크리트 말뚝 (PHC), 강관말뚝이 주로 사용된다. 2004년을 기점으로 세계 원자재 값의 급등은 강관 말뚝의 급격한 가격 상승으로 이어진 반면 국내에서 수급이 가능한 콘크리트 말뚝의 가격은 증가하지 않았다. 2011년 동일 직경 대비 강관말뚝과 콘크리트 말뚝의 가격비가 3배에서 5배 이르게 되어 경제적 측면에서 국내에 복합 말뚝의 필요성 및 연구에 대한 요구가 증대되고 있다.

본 연구에서는 국내에 적용되고 있는 상부의 강관 말뚝과 하부의 기성콘크리트 말뚝으로 구성되어 있는 복합 말뚝에 대한 수평거동을 파악하기 위하여 현장수평재하시험을 수행하였다. 재하시험 수행 중 말뚝의 거동을 파악하기 위하여 말뚝 본체에 일정한 간격으로 변형률계를 설치하였고 수평재하 시험 시 말뚝의 깊이에 따른 수평 변위를 파악하기 위하여 말뚝에 경사계를 설치하였다. 현장계측 결과와 설계 시 예측되었던 수평력 및 변위의 크기 비교뿐 아니라 역 해석을 통해 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 분석하고 이를 토대로 복합말뚝의 설계개념에 대한 검증을 하였다.

2. 말뚝의 수평지지력 해석방법

국내에서는 일반적으로 수평 말뚝을 도로교 설계기준 해설(2008) 하부구조 설계편람에 의거 설계하고 있다[1]. 지반 물성치로 필요한 지반반력계수는 일반적으로 표준 관입시험이나 각종 토질 실험의 결과로부터 구한 탄성계수로부터 산정하여 구한다. Chang 방법은 Reese 방법을 기본으로 말뚝과 지반을 균질하게 가정하여 다양한 지층으로 구성된 지층을 하나의 스프링으로 모형화 한다. 해석적 방법을 위해서는 말뚝은 단면이 일정하여야 하고, 말뚝두부가 15mm 변위가 허용 침하량으로 가정하여 말뚝의 수평 지지력을 구한다. Chang 방법은 해석적 방법이므로 말뚝 깊이에 따른 모멘트, 변위, 전단력의 분포를 계산할 수 있다. 하지만 이런 해석적 방법은 실제 현장에 적용 시 현실적이지 않은 가정으로 인해 많은 제약이 따른다.

해석적 방법과는 달리 수치해석 방법을 적용하면 말뚝 단면의 변화 뿐 아니라 지층변화는 물론 비선형적 지반 반력계수를 p-y 곡선을 적용하여 모델링 할 수 있다 [4,19,11]. 이와 같은 수치해석 방법과 지반의 다양한 구성방정식의 발달은 현장상황을 보다 근접하게 재현 할 수 있는 장점이 있지만, 지반의 모델링 방법에 따라 그 신뢰도가 영향을 받는다. Reese 방법은 지반반력계수가

필요한데, 지반반력계수는 기초의 크기와 말뚝 변위의 함수를 통해 실제 지반거동을 비교적 신뢰성 있게 평가하는 것으로 알려져 있다[18,19].

본 연구에서는 Chang 방법과 p-y 곡선을 이용한 수치 해석 프로그램, 그리고 지반을 탄성체로 가정한 Poulos 방법을 이용하여 실제 현장 계측치와 비교 분석을 수행하였다.

3. 시험말뚝 및 현장시험

현장 시험말뚝은 교량의 교대 기초로 매입 말뚝으로 시공되었다. 지반 조건은 그림 1과 같다. 시험말뚝이 타설 된 지반은 계획고에서 4.3m 까지는 성토된 지반이고 그 하부는 잔류토와 풍화토층으로 구성된 지층이다. 말뚝 상부 강관부의 길이는 도로설계요령(한국도로공사, 2001)에 따라 말뚝 최대모멘트 1/2 위치에 여유치 1.0m를 가산하여 정하였다. 말뚝 매립된 상부 5.4m는 강관말뚝($\phi = 500\text{mm}$, $t = 12\text{mm}$)과 하부는 12m 길이의 고강도 콘크리트 말뚝의 복합말뚝을 설치하였다.

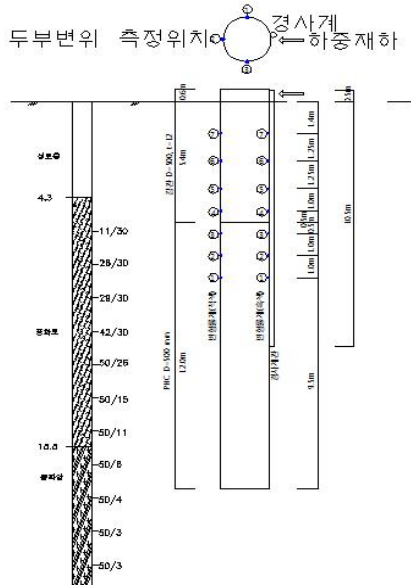
말뚝 항타 시 상부의 강관말뚝에 전달되는 하중은 하부의 콘크리트 말뚝으로 전달된다. 강관말뚝과 콘크리트 말뚝의 접속부는 단면적의 차이로 인해 콘크리트 말뚝에 응력집중이 발생되어 말뚝 손상이 야기될 수도 있으므로, 강관말뚝에 전달되는 하중 하중을 분산하기 위해 말뚝 접합부에 강관을 이용한 보강관을 부착시켜 연결부의 보강 뿐 아니라 하중을 분산시키도록 하였다.

말뚝 시공은 15m 길이의 케이싱을 이용하여 17.5 m 까지 공기해머(T-4)로 굴착 하였다. 굴착공의 직경은 초기에 580mm이었으나 말뚝에 경사계 등 계측기를 부착하였을 경우 계측기의 손상 없이 말뚝이 관입될 수 있는 굴착공의 직경이 650 mm가 필요하여 굴착 배토 후 케이싱을 인발하고 케이싱 하단에 굴착부를 확대할 수 있는 비트를 부착, 굴착공의 직경을 조절할 수 있도록 하였다.

굴착 후 케이싱 안쪽으로 오거와 압축공기로 완전 배토를 시도 했지만 여전히 약 1.0m의 슬라임은 제거 되지 않아 i) 물/시멘트 비 150%인 주변 고정액을 주입 후 ii) 이미 조합된 복합 말뚝을 삽입하고 iii) 4.2ton 해머를 1.5m 자유 낙하하여 최종 관입량이 1-2mm/blow인 깊이인 17.4 m 까지 관입이 완료 후 iv) 2차로 주변 고정액을 주입하여 관입된 말뚝과 지반이 밀착되도록 하였다.

말뚝의 수평재하시험을 위해 말뚝두부는 십자 강재로 말뚝 안쪽을 보강하여 수평재하시험 시 말뚝이 두부의 국부적인 찌그러짐을 방지하였다. 말뚝 길이 방향으로 경사계와 말뚝의 일정 간격으로 변형률계를 부착하여 수평

재하 시험 시 각 하중 단계별로 말뚝의 거동을 파악 하였다. 변형률계는 진동현식을 이용하여 상부 강관 부에 4개소 하부 콘크리트부에 3개소 총 7개소에 수평력이 작용하는 면과 반대 면에 각 2개씩 총 14개의 변형률계를 그림 1과 같은 위치에 설치하였다. 경사계는 말뚝 상부 10.5m 하부에 고정점이 되도록 설치하여 말뚝 상부에서 발생하는 변위를 측정하도록 하였다.



[그림 1] 시험말뚝이 시공된 지반조건
[Fig. 1] Ground conditions at tested pile

그림 2는 말뚝관입 전 수평재하 시험 전경을 보인 것으로 말뚝의 수평재하시험은 허용수평지지력 15.7ton의 두 배인 31.4ton 까지 하중재하를 계획 하였으나 설계 하중의 170% 인 26.7ton 재하 시 말뚝두부의 변위가 허용 범위인 15mm를 초과 할뿐 아니라 말뚝 두부의 변형이 발생하여 하중 재하를 중단하였다.

수평하중은 설계 수평력의 25%씩 하중을 증가 시켰으며 말뚝의 수평변위가 종료된 후 다음 하중 단계를 재하 하였다. 최종 하중 단계 재하 후 하중을 제하하는 것으로 시험을 종료하였다. 하중재하 시 변형률계는 2초 간격으로 측정하였으며 경사계는 중요하중 단계인 50%, 100%, 150%, 과 170% 의 하중 단계에서 하중 재하 60분 후 측정을 수행하였다. 수평재하 시험 시 말뚝의 수평 변위는 말뚝에 3개의 다이얼 게이지를 설치하여 측정하였다. 그림 3은 복합말뚝의 관입 전경을 보인 것이다.



[그림 2] 말뚝 수평 재하 시험 전경
[Fig. 2] Lateral loading test on the pile

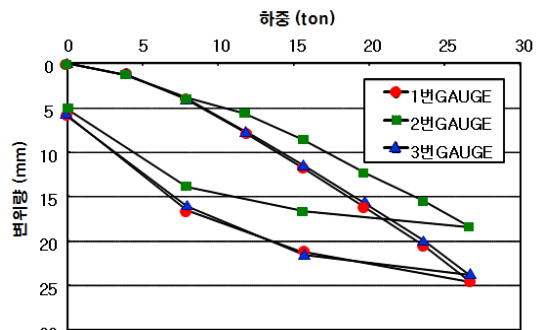


[그림 3] 계측기가 설치된 복합말뚝 관입 전경
[Fig. 3] Pile installation

3.1 수평재하시험 결과

그림 1에서 나타난 것처럼 1, 3번 게이지는 하중재하 방향과 직각한 위치에, 2번 게이지는 하중재하 반대 측 지표면 17cm 높이에 위치해 있다.

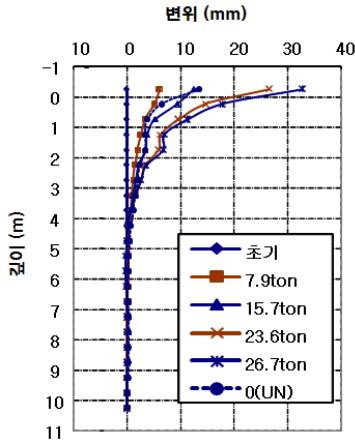
수평하중과 두부변위 측정 결과는 그림 4에 나타내었다. 하중재하방향 두부변위(1, 3번 게이지)가 하중재하 반대 측 두부변위(2번 게이지) 보다는 크게 나타나는 것으로 예측되었으며 이는 말뚝 머리부의 변형으로 인한 것으로 보인다.



[그림 4] 수평하중과 수평변위의 관계
[Fig. 4] Lateral loadings with displacement

3.2 하중단계별 수평변위

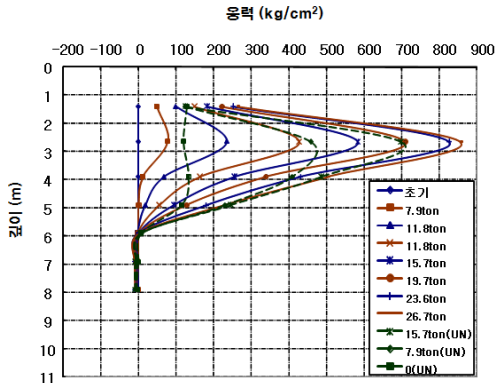
그림 5는 수평 하중 재하 시 하중 단계별로 경사계에서 측정된 수평변위를 나타낸 것이며 그림 5에서 보는 것과 같이 말뚝의 수평변위는 말뚝상부에서 발생하고 하부 깊이가 4m 정도에서 하중단계와 관계없이 거의 변위가 없는 것으로 측정되었다.



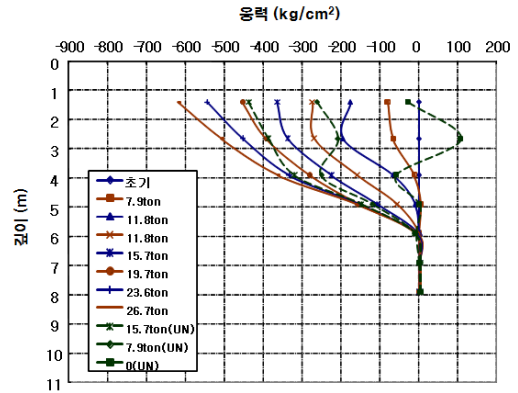
[그림 5] 말뚝 깊이에 따른 말뚝 수평변위
[Fig. 5] Lateral displacement of the pile with depth

3.3 말뚝깊이-응력 관계

그림 6과 같이 말뚝의 하중 재하 방향과 반대 측에서는 압축력이 작용하고, 그림 7과 같이 하중 재하 방향에서는 인장력이 작용하므로 말뚝과 주변 지반의 영향으로 인장응력이 작용하는 하중재하 방향에서 측정된 응력이 하중재하 반대 방향에서 측정된 응력보다 약간 작은 것으로 측정되었다.



[그림 6] 말뚝깊이-응력관계(하중 재하 반대 측)
[Fig. 6] Pile depth-stress relationship (opposite side of loading)



[그림 7] 말뚝깊이-응력 관계(하중 재하 측)
[Fig. 7] Pile depth-stress relationship (loading side)

4. 말뚝의 수평 거동해석

Chang 방법과 p-y 곡선을 이용한 수치 해석 프로그램, Poulos 방법을 이용하여 실제 현장 계측치와 비교 분석을 수행하였다. Broms 방법은 단순히 말뚝의 극한 수평지반력을 계산하고 말뚝 길이에 따른 응력 분포나 수평 변위의 분포는 알 수 없으므로 본 현장 시험결과와 비교하지 않았다[7,8].

말뚝을 탄성지반에 지지한 보(Beam)라고 가정한 극한 지반반력법에서 지반의 대표적인 물성치인 수평지반반력계수가 전체지반에 일정한 것으로 가정하여 해를 구하였다. 적용되는 수평지반반력계수는 도로설계기준 해설(2008)에 제시 되어있는 방법 중 지반의 변형계수로부터 산정하였다.

상부지반의 표준 관입치를 15로 가정하여 구한 수평 지반반력계수는 2.55kg/cm³ 이다.

하지만 이러한 수평지반반력계수를 이용하여 계산한 말뚝에 작용하는 변위와 응력은 실제 측정치와 많은 차이를 보인다. 그러므로 측정된 말뚝의 변위로부터 역 해석을 통하여 수평지반반력계수를 구하였다. 각 하중 단계마다 적용한 지반 반력계수는 표 1과 같다.

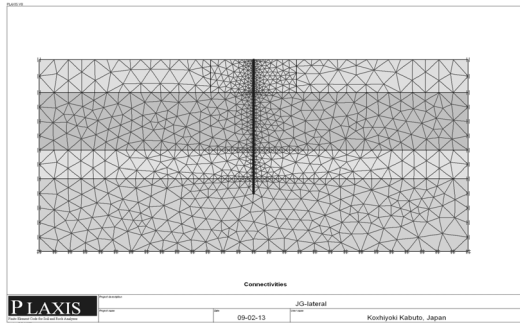
[표 1] 수평반력계수(kh)
[Table 1] Lateral modulus of subgrade reaction(kh)

하중단계(ton)	7.9	15.7	23.6	26.7
적용k _h (kg/cm ³)	3.42	2.09	1.73	1.60

Chang 방법은 설계 시 적용한 수평지반반력계수 2.55 kg/cm³ 으로는 말뚝 거동을 예측하는 데는 한계가 있어

각 하중 단계마다 표 1과 같이 수평 지반 반력 계수를 적용하여야 실제 말뚝의 거동인 말뚝깊이에 따른 변위를 이론적으로 근사적으로 예측 할 수 있었다.

그러므로 말뚝의 수평 지반반력계수는 말뚝의 변위에 따라서도 달라지는 변수임을 확인할 수 있었다. 시험결과 분석을 위해 요코야마와 후쿠오카방법을 이용하여 지반 반력계수 물성치를 산정하였고 표 2와 같다.



[그림 8] 유한 요소 해석 단면
[Fig. 8] FEM analysis section

Chang 방법, LPILE 해석과 함께 Poulos 방법을 이용하여 말뚝의 수평 거동을 해석하는 유한요소 프로그램(PLAXIS Ver. 8.2)을 사용하여 수평재하 시험에 대한 해석을 수행하였다. 그림 8은 수평재하 시험을 모사한 유한 요소 해석 단면이다. 지반은 탄소성으로 가정하고 말뚝은 빔(Beam)요소로 모델링하였다. 적용한 물성치는 표 3과 같다. PLAXIS 해석 역시 23.6ton 재하 시 변위계측 결과를 해석결과와 비교하여 지반 물성치를 결정하고 이 지반 물성치로 부터 말뚝의 전체하중 단계에 대한 말뚝의 수평거동을 해석 하였다.

말뚝의 깊이별 응력에 대한 실측된 자료와 해석결과와의 비교를 하중단계별로 그림 9에 나타내었다. Chang의 방법으로 해석 된 말뚝의 응력은 실제 측정치 보다는 약간 크게 평가 되었으며 해석치와 실측치는 매우 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 분석 되었다.

LPILE 프로그램이 Chang 이론식 보다 말뚝 깊이에 따른 응력 분포가 크게 평가 되는 경향을 보이고 있으며 전체적으로 측정된 응력의 2배정도의 응력크기를 보이는 것으로 계산되었다. 하지만 강관의 허용응력 1400kg/cm²

[표 2] LPILE 해석에 적용한 물성치
[Table 2] Input parameters in LPILE analysis

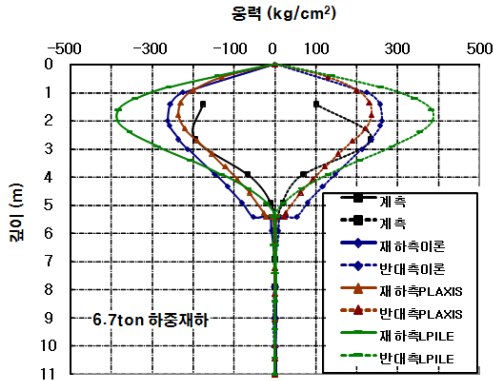
구분	깊이 (m)	평균 N	단위중량 (kN/m ³)	내부 마찰각	점착력 (kN/m ²)	지반반력계수(kN/m ³)	
						요코야마	후쿠오카
매립층	0~4.3	15(가정)	19	30	10	30000	21000
풍화토1	4.3~11.8	32	19	35	10	64000	28000
풍화토2	11.8~15.5	50	20	38	20	100000	34000
풍화암	15.5~	-	21	40	30	150000	40000

구분		근입길이 (m)	외경 (cm)	두께 (cm)	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)	단면계수 (cm ³)	탄성계수 (kN/m ²)
HCP 500	강관12t	5.4	50	1.2	184.0	54798	2192	2.1×10 ⁸
	PHC	12.0	50	8.0	1055.6	241199	9648	4.0×10 ⁷

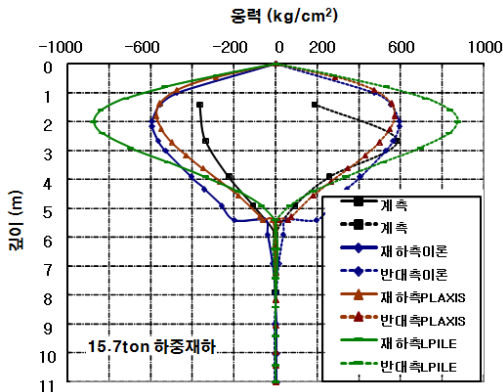
[표 3] PLAXIS 해석에 적용한 물성치
[Table 3] Input parameters in PLAXIS analysis

구분	깊이 (m)	평균 N	단위중량 (kN/m ³)	내부 마찰각	점착력 (kN/m ²)	변형계수(kN/m ²)		포아송 비
						역해석전	역해석후	
매립층	0~4.3	15(가정)	19	30	10	10000	-	0.3
풍화토1	4.3~11.8	32	19	35	10	22000	220000	0.3
풍화토2	11.8~15.5	50	20	38	20	35000	350000	0.3
풍화암	15.5~	-	21	40	30	50000	500000	0.3

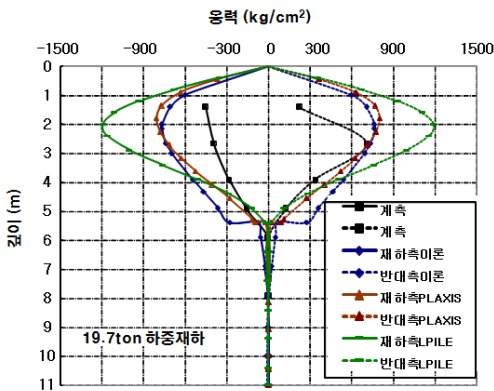
및 PHC 말뚝의 허용인장응력인 40kg/cm^2 에 미치지 못하는 것으로 평가되어 복합 말뚝의 설계적정성은 만족하고 있다.



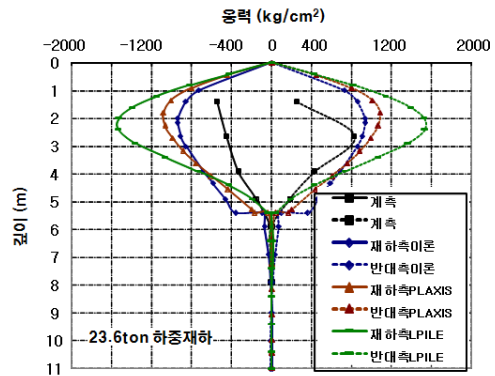
(a) 6.7ton 하중재하



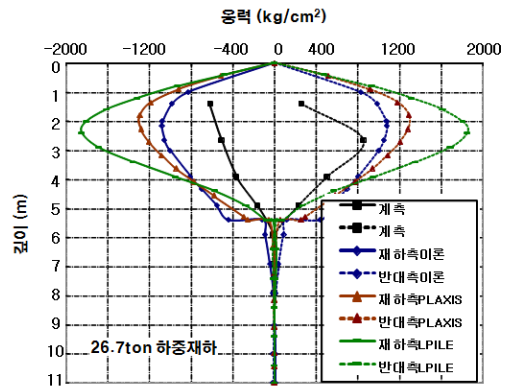
(b) 15.7ton 하중재하



(c) 19.7ton 하중재하



(d) 23.6ton 하중재하



(e) 26.7ton 하중재하

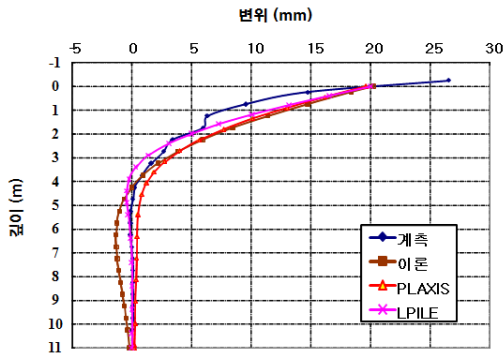
[그림 9] 하중단계별 말뚝깊이에 따른 응력 비교
[Fig. 9] Stress Comparison according to pile depth and loading steps

이러한 유사한 결과는 각 하중 단계마다 적용한 수평 지반반력계수가 계측결과를 반영하기 때문인 것으로 평가된다. 또한 강관말뚝과 콘크리트말뚝의 경계부에 계산된 응력이 실제 측정된 응력과는 다르게 급격히 변화하는 것처럼 보이는데, 이는 계산된 모멘트로부터 응력을 계산할 때 말뚝과 콘크리트의 강성차이로 인해 발생한 것이다. Chang방법으로는 적용하는 복합말뚝을 해석하는데 한계가 있을 뿐 아니라, 신뢰성 분석을 위해서는 매 하중 단계마다 수평지반반력계수를 재 산정해야 하는 어려움이 있다.

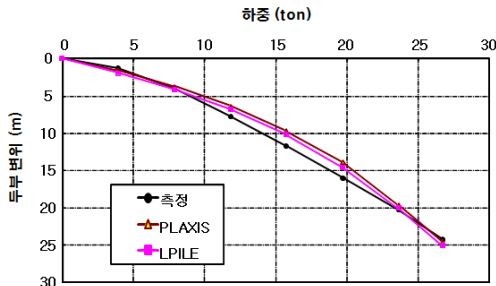
PLAXIS의 해석 결과, 말뚝의 응력은 Chang 방법의 응력과 비슷한 분포를 보이지만 LPILE의 결과 보다는 작은 분포를 보이는 것으로 분석되었다. 해석 결과 모두 실측치 보다 크게 평가되었다. PLAXIS 프로그램의 해석 결과에 크게 영향을 미치는 지반 물성치는 지반의 탄

성계수다. 지반의 탄성계수는 NAVFAC 7-2, 구조물 기초 설계기준 (2003), Bowels(1988) 등에 제시한 표준 관입시험으로 구한 값을 초기 해석에 적용하였으나 실측치로부터 물성치를 다시 산정 하는 과정에서 상부 매립층을 제외하고 초기치의 10배에 해당하는 탄성계수의 증가가 표 3과 같이 필요하였다. 이러한 이유는 실제로 수평 재하시험 중 말뚝두부의 변위로 인해 지반에 발생한 지반 변위는 계측치에서와 같이 말뚝의 상부에서 많이 발생하는 대신 말뚝 하부에서는 변위가 거의 발생하지 않거나 미소 변형이 발생하므로 탄성계수가 크게 산정되어야 하는 반면 말뚝 상부에서는 변형이 크게 발생 하여 적은 탄성계수가 필요하기 때문인 것으로 해석된다. 유한요소 해석에서 변형률을 고려한 탄성계수의 적용이 전체 해석에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

말뚝 깊이에 따른 변위와 각 해석방법의 결과를 비교하여 그림 10에 나타내었다. 그림 11은 말뚝의 수평재하시험 중 측정한 말뚝두부와 변위를 각 해석 결과와 비교한 것이다. 그림 10 및 그림 11에서 보는바와 같이 하중-변위는 매우 유사한 결과를 보이고 있다.



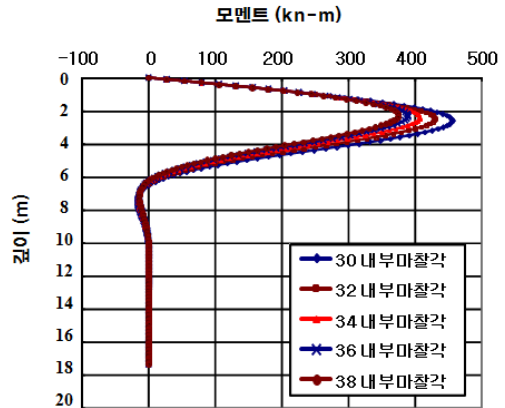
[그림 10] 해석방법 별 하중 말뚝깊이에 따른 변위 [Fig. 10] Displacement according to analysis methods



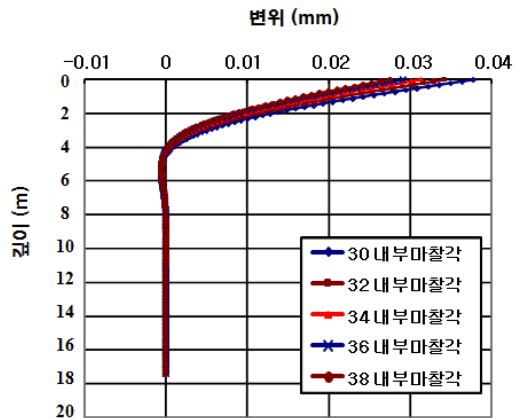
[그림 11] 두부의 변위와 각 해석 결과 비교 [Fig. 11] Comparison of result of each analysis method and displacement of head of pile

복합 말뚝의 설계에서 입력 물성치에 대한 민감도에 대한 분석을 수행하였다. 민감도 분석에서 표 2의 입력 물성치는 고정하였다. 분석 결과 수평지반반력계수의 변화는 수평말뚝의 거동에 크게 영향을 미치지 못한 것으로 평가 되었으나 지반의 강도정수는 말뚝의 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

그림 12는 상부 매립층의 마찰각이 30에서 38까지 변화 할 때 말뚝의 거동에 어떤 영향을 미치는지를 보인 것이다.



(a) 깊이와 내부 마찰각 변화에 따른 모멘트분포



(b) 깊이와 내부 마찰각 변화에 따른 변위 분포

[그림 12] 내부마찰각이 말뚝수평 거동에 미치는 영향 민감도 분석 [Fig. 12] Pile lateral behavior effect on internal friction angle

마찰각의 변화는, 모멘트 분포와 지반의 수평 변위의 분포에는 영향이 크지 않으나 모멘트 크기에 영향을 미

치는 것으로 분석 되었다. 이는 p-y 곡선에서 입력한 수평 지반 반력 계수는 초기지반 반력계수를 결정하는 초기 값으로 전체적인 말뚝 수평 거동에는 영향을 미치지 않고 거듭되는 반복계산에서 수평지반 반력계수를 구하는 p-y 곡선형태가 지반의 전단강도에 의해 결정되기 때문이다. 하지만 지반의 물성치 변화는 말뚝깊이에 따른 모멘트 변화의 크기에만 영향을 미치고 깊이에 따른 형태에 대한 영향이 없다. 따라서 지반조건에 변화에 관계없이 말뚝상부에만 크게 작용하는 모멘트를 강성이 큰 강관 말뚝으로 저항케 하고 깊이에 따라 급격히 감소하는 하부의 작은 모멘트에 저항 할 수 있는 콘크리트 말뚝을 사용하는 것이 효과적이다

5. 결론

말뚝 상부는 강관 말뚝 하부는 콘크리트 말뚝으로 구성된 복합 말뚝에 대한 수평재하시험을 수행하여 말뚝심도에 따른 변위분포, 응력 분포를 측정하였다. 측정된 계측결과와 이론 해석치와 비교 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 계측결과와 해석 결과를 통해 수평력이 작용한 말뚝의 변위나 모멘트분포는 말뚝 상부에서 크고 급격이 작아져 말뚝 하단에서는 매우 작은 값을 나타냈다. 이로부터 말뚝 상부만 모멘트에 저항력이 큰 말뚝 재질이 필요하며 하부는 경계성이 큰 콘크리트 말뚝으로 구성하는 복합말뚝의 개념을 정립할 수 있었다.
- 2) Chang 방법은 국내에서 일반적으로 수평말뚝에 적용하는 이론식이나 해석결과 매 하중 단계마다 수평지반 반력계수를 재 산정 하여야 실측치와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 즉 수평 지반 반력계수는 말뚝 변위의 함수로 하나의 수평지반 반력 계수로 모든 하중 단계를 고려한 해석을 수행하는 Chang방법은 균질한 말뚝만 해석할 수 있어 복합 말뚝의 해석에 한계가 있었다.
- 3) LPILE의 해석 결과는 계측치나 다른 이론적 방법보다도 말뚝응력이 크게 평가 되었으며 실측치와 비교할 때 약 2배 정도 크게 계산되었다. 하지만 계산된 응력은 강관 말뚝의 허용강도나 콘크리트 인장 강도 보다 크지 않았다. LPILE의 계산 시 사질토 지반에서 모래의 물성치의 민감도를 분석한 결과 지반의 내부마찰각이 말뚝의 모멘트크기에 영향을 미치지만 모멘트 분포와 지반의 수평변위 분포 형태에는 영향이 크지 않았다.

- 4) 말뚝의 두부에서 변위나 말뚝깊이에 따른 변위 분포는 매우 신뢰성 있게 분석 되었지만 말뚝의 측정된 응력은 해석치보다 작게 평가 되었다.
- 5) 유한요소법으로 해석 시 수평하중에 의한 모멘트 분포는 실측치보다 크지만 LPILE 보다는 작은 것으로 평가 되었으며 Chang 방법보다는 크게 평가 되었다. 유한요소 해석 시 적용한 탄성계수는 변형률의 함수로 변형이 큰 말뚝의 상부는 상대적으로 작은 탄성계수가 필요하나 말뚝 하부는 미소 변형으로 초기 값보다 10배 정도 크기의 탄성계수가 필요하였으며 정확한 거동분석을 위해서는 많은 현장 실험과 수치해석을 통해 추가 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Society of Civil Engineers, Road Design Basis explanations, 2008.
- [2] Korean Geotechnical Society, Foundation of Structure Design Basis, 2003.
- [3] Ishida et al, "Static Horizontal Loading Test of Steel and Concrete Composite Pile Group", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Architectural Institute of Japan, 2002, pp.591-598
- [4] Bhushan, K., Haley, S. C., and Fong, P. T., "Lateral Load Tests on Drilled Piers in stiff Clays", J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 105, No. GT 8. August 1979, pp.969-985.
- [5] Bowels, J.E., "Foundation analysis and design, 4th edition", McGraw Hill Book Company, New York,1988, pp.131-143.
- [6] Brinch Hansen, J., "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Danish Geotechnical Institute (Geoteknisk Institut) Bull. No.12, Copenhagen, 1961, pp.5-9
- [7] Broms, B., "The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils," J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM2, March 1964a, pp.27-63.
- [8] Broms, B., "The Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils," J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM3, May 1964b, pp.123-156
- [9] FHWA, Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundation, FHWA-DP-66-1, Federal Highway Administration, Washington, DC (available at the Construction Group Library), 1986.
- [10] Hetenyi, M. Beams on Elastic Foundation. University

- of Michigan Press, Ann ARbor, 1946.
- [11] Matlock, H. "correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay," Proceeding, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Paper No. 1204, 1970. pp. 557-594.
- [12] Pando, M., Filz, G., Dove, J. and Hoppe, E., 2002, "Axial and Lateral Load Performance" TRB 82nd Annual Meeting in January 2003 pp.61-70.
- [13] Mindlin, R.D. "Force at a Point in the Interior of a Semi-infinite Solid," physics, Vol. 7, No. 5, May, 1936, pp. 195-202
- [14] NAVFAC Foundations and Earth Structures, Design Manual 7.2, Department of the Navy, Alexandria, VA, May 1982.
- [15] Poulos, H.G., "Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single Piles," J.Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97 No. SM 5, 1971a, pp.711-731.
- [16] Poulos, H.G., "Behavior of Laterally Loaded Piles: II-Pile Groups," J.Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97 No. SM 5, 1971b, pp.733-751.
- [17] Poulos, H.G., "Analysis of Pile Groups Subjected to Vertical and Horizontal Loads," Aug. Geomechanics J., Vol., G4, No. 1, 1974, pp.26-32.
- [18] Reese, L.C. and Matlock, H., "Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth," Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, TX, 1957, pp.1-41.
- [19] Reese, L.C., Cox, W.R., and Koch, F.D. "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," Proceedings, VII Annual Offshore Technology Conference, Houston, TX, Vol. 2, Paper No. 2312, 1974, pp. 473-484.

황택진(Taikjean Hwang)

[정회원]



- 1987년 2월 : 충남대학교 토목공학(공학석사)
- 2007년 2월 : 부산대학교 토목공학(공학박사)
- 1982년 6월 ~ 2010년 7월 : 부산광역시청(도시개발실장)
- 2010년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

도시계획, 토질및기초, 토목시공