

다층지반에 근입된 현장타설말뚝의 수평 지지거동분석

Lateral Resistance Behavior Analysis of Drilled Shafts in Multi-layered Soil

장 서 용*

정 재 훈**

김 종 렬***

Jang, Seo-Yong,

Jeong, Jae-Hoon,

Kim, Jong-Ryeol

Abstract

In this research, load-transfer-function method was selected, because that is widely used in geotechnical engineering among the analysis methods to verify the behavior of load-lateral displacement. Lateral loading test of field scale was conducted, this measured data was analyzed. From the analysis, the model of load-lateral displacement was suggested. The test results were studied and compared to the commercial programs, 'LPILE', which contain the load transfer functions proposed before. By analysis of measure data of load-lateral displacement that expressed to several functions, $y = a e^{bx}$ model was the simplest and applicable to the field. In that case a value converged about 1.3, b value had a tendency to converge about 0.02. From the comparison analysis between measured data and load transfer function by 'LPILE', it is examined that if the lateral load is small, calculated displacements of them show a similar value compared to measured values. Furthermore, the bigger lateral loads, the bigger calculated values compared to the measured data. If the results are compared by Matlock-Reese method and Matlock-API method, Matlock-Reese method shows result of safe side because lateral displacement is calculated greatly relatively.

요 지

본 연구에서는 말뚝의 하중-수평변위 거동에 대한 해석 방법 중에서 지반공학적인 측면에서 널리 쓰이고 있는 하중전이함수법에 대해 고찰하였다. 다층지반에 관입되어 사질토에 근입된 대구경 현장타설말뚝의 실물 수평재하시험을 실시하여 계측결과를 분석하였고, 계측데이터의 분석을 통해 현장에 적용가능한 하중-변위를 제안하였다. 현장재하시험결과와 유한차분해석 프로그램인 "LPILE"에 의한 기준에 제안된 하중전이함수식의 조합에 의한 해석결과를 대상으로 비교, 분석을 수행하였다. 계측데이터의 분석에 의해 하중-변위곡선을 여러 함수식으로 표현해본 결과, 지수형 모델인 $y = a e^{bx}$ (여기서 y : 변위(mm), x : 하중(ton))가 가장 간단하고 적용성이 뛰어난 것으로 분석되었고, a 값은 대체로 1.3에, b 값은 0.02에 근접한 경향을 보인다. 현장 실측결과와 'LPILE'에 의한 하중전이함수식의 조합에 의한 해석결과를 비교, 분석한 결과 수평하중이 작을 때에는 계산된 변위와 실측 변위가 거의 유사한 값을 보이다가 수평하중이 커짐에 따라 계산된 변위가 실측 변위보다 크게 나타나는 경향을 보였다. 하중전이함수의 조합인 Matlock-Reese의 방법과 Matlock-API 방법에 의한 결과를 비교해보면 Matlock-Reese의 방법이 수평변위가 상대적으로 크게 산정되었다.

Keywords : Drilled shafts, Load-lateral displacement, Load transfer analysis, Multi-layered soil

핵심 용어 : 현장타설말뚝, 하중-수평변위, 하중전이분석, 다층지반

* 전남대학교, 조선대학교 대학강사, 공학박사

** 전남대학교 토목공학과 박사수료

*** 전남대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

E-mail : jrkim@chonnam.ac.kr 062-530-1654

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 현장타설말뚝은 소구경의 타입말뚝과 달리 중요구조물의 하부기초로 이용되고, 시공시 대부분 직경이 1m 이상인 대구경으로 설치되며, 소구경 타입말뚝에 비해 소요 말뚝 본수도 작아 각 말뚝의 하중 부담률이 증가하게 된다. 이러한 이유로 현장타설 말뚝 한본의 소요지지력 부족은 상부구조물의 심각한 피해를 야기할 수 있으므로 설계와 시공시 상당한 주의를 요구하게 된다. 국내·외 현장재하시험에 의한 연구는 풍화암 이상의 암반층에 말뚝의 선단부를 지지하는 것이 거의 대부분을 차지하고 있다. 암반이 존재하지 않는 다층토 지반은 종류 및 형성과정에 따라 매우 다른 공학적 성질을 가지나 이에 대한 시험결과가 극히 부족한 실정이다. 그러므로 다층지반에 근입된 말뚝의 지지거동 특성을 연구하고, 이 결과를 이용한 하중전이 분석이 절실히 요구된다.

수평력을 받는 말뚝 거동에 대한 해석방법으로는 대표적으로 Broms' Method(1964a and 1964b), 탄성법(Poulos 1971a and 1971b)과 p-y해석법(Matlock 1970, Reese 1977, Murchison and O'Neill 1984, etc.) 등이 있다. 그 중 Matlock(1970)과 Reese(1977)의 p-y해석법이 그 해석절차가 간편하여 수평하중을 받는 말뚝의 해석을 위해 가장 일반적으로 사용되고 있다.

Matlock(1970)은 완전 포화된 연약한 점성토 지반에 대한 p-y곡선을 제안하였으며, Welch & Reese(1972), Reese & Welch(1975)와 Reese등(1975)은 완전 포화된 견고한 점성토 지반에 대한 p-y곡선을 제안하였다. 사질토 지반에 대한 p-y곡선은 Reese등(1974)에 의해 제안되었으며, 토사의 점착력과 내부마찰각을 고려한 p-y곡선은 Evan & Duncan(1982)에 의해 제안되었다. 또한, Smith(1983)와 Robertson등(1989)은 각각 pressuremeter 시험과 dilatometer 시험을 통해 개선된 p-y해석법을 제안하였다.

현재까지의 연구 결과는 대구경 현장타설말뚝의 경우 풍화암 이상의 암반층에 근입하는 것을 전제로 해석이 수행되고 있는데, 본 연구에서는 점성토와 사질

토로 구성된 다층지반에 근입된 대구경 현장타설말뚝에 대해 계측된 데이터를 통한 수평재하시험 결과를 분석하여 하중-변위 모델을 제안하고, 기존의 이론식을 이용한 수치해석결과와 현장시험결과를 비교, 분석을 수행하여 수평 지지거동 특성을 분석하는데 그 목적이 있다.

2. 지반조건 및 시험말뚝 시공

대만고속철도 구간중 연구대상 구역은 총 연장 34.4km로 지층구성은 충적층과 퇴적층으로 구성되어 있다. 대상지반에 대해 지반조사를 실시한 결과 지표면으로부터 110m까지도 암반층(bedrock)이 발견되지 않았다. 충적층은 주로 실트질 모래와 점성토층으로 복합된 다층지반으로 구성되어 있기 때문에 교량구조물은 충분한 지지력을 확보를 위해 말뚝기초로 지지하는 것으로 계획되었다. 시험대상말뚝 6본이 근입된 위치에 보오링을 실시한 결과는 Fig. 1과 같다.

시험말뚝의 시공법으로는 두가지 방법이 사용되었는데 TP-1, TP-2, TP-4, TP-6 말뚝에는 올케이싱(All Casing Drilling) 공법을 그리고 TP-3, TP-5 말뚝은 RCD(Reverse Circular Drilling) 공법을 적용하였다. 또한 소요지지력을 충족할 수 있는 적정 단면을 산정하기 위해 직경을 변화시켜 실험을 실시하였다.

올케이싱 공법을 적용한 시험말뚝(TP-1, TP-2, TP-4, TP-6) 시공은 굴착시 공벽붕괴를 방지하기 위하여 Casing tube를 좌·우로 회전시키는 요동압입장치(Oscillator)로 지중에 삽입하고, 동시에 굴착기로 그 내부를 굴착 배토하여 소정의 깊이까지 굴착한다. 굴착이 완료된 후 말뚝 선단의 슬라임(Slime)을 제거한다. 슬라임 제거는 펌프를 이용하여 청수의 수위를 말뚝의 두부까지 유지시키고 이 상태에서 직경 15cm의 파이프 선단부 옆면에 고압의 공기를 불어넣는 방식(Air surging)을 사용하여 실시하였다. 이상의 방법으로 슬라임을 제거한 후 조립된 철근망을 거치하였다. 철근은 주철근으로 D32를 사용하였고 전단철근으로 D19를 사용하였다. 철근망을 거치한 후 트레미관(Tremie pipe)에 의해 말뚝의 선단부에서부터 콘크리트를 타설하였고 마지막으로 요동압입장치로 케

이상을 인발하였다.

RCD 공법을 적용한 시험말뚝(TP-3, TP-5)은 상

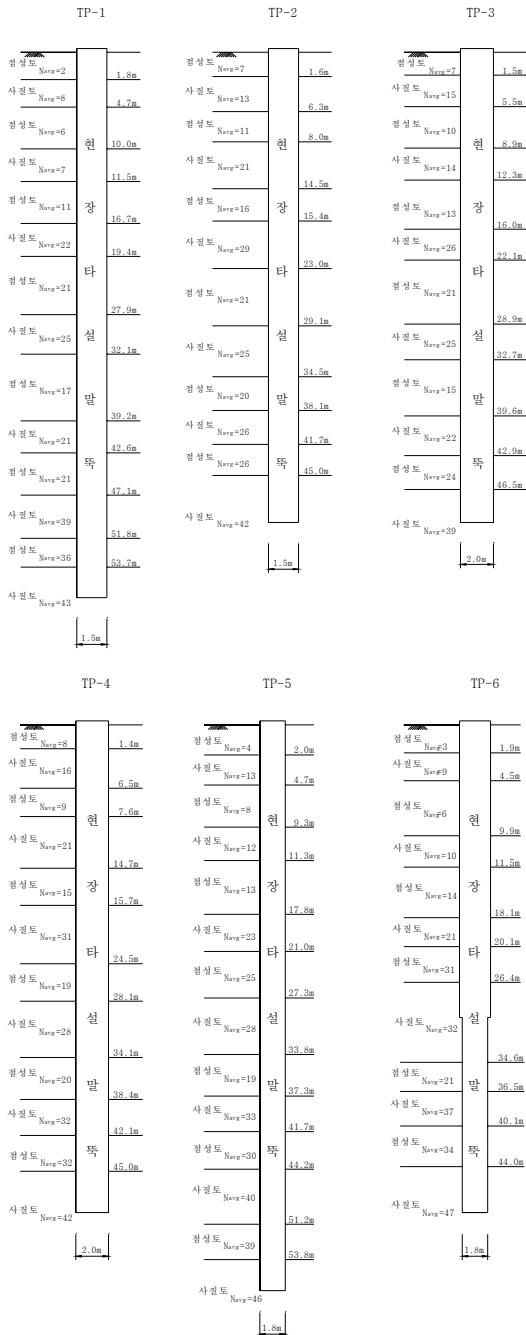


Fig. 1 시험말뚝의 지반조건 (TP-1~TP-6)

부 8m 정도의 Stand Pipe(Casing)를 설치하고 그 이하는 0.2kg/cm² (지하수위+2m) 이상의 정수압과 굴착중에 발생하는 자연 이수에 의해 공벽을 유지하면서 케이싱 없이 굴착하였다.

굴삭방법은 로타리 테이블의 회전력으로 드릴의 선단에 취부된 특수 비트를 회전시키면서 지반을 굴삭하고 흡상펌프로 드릴파이프를 통하여 순환수와 토사를 공의로 배출한 후 배출된 니수는 침전지로 유도시켜 토사를 침전시켰다. 토사가 어느 정도 침전된 후 상등수는 수중펌프로 의하여 다시 굴삭공내로 순환시켜 재 활용 하였다. 슬라임 제거는 펌프를 이용하여 청수의 수위를 말뚝의 두부까지 유지시키고 이 상태에서 직경 15cm의 파이프 선단부 옆면에 고압의 공기를 불어넣는 방식(Air surging)을 사용하여 실시하였다.

이상의 방법으로 슬라임을 제거한 후 조립된 철근망을 거치하였다. 철근은 주철근으로 D32를 사용하였고 전단철근으로 D19를 사용하였다. 철근망을 거치한 후 트레미관(Tremie pipe)에 의해 말뚝의 선단부에서부터 콘크리트를 타설하였다.

3. 말뚝 시험계획 및 재하시험 결과

3.1 시험계획

다층지반에 근입된 말뚝의 수평거동을 분석하기 위해 현장타설말뚝을 시공하고 정적재하시험을 수행하였다. 말뚝 시공시 경사계 케이싱을 설치하여 재하시험 시 각 하중 단계에 따른 깊이별 수평변위를 측정하여 말뚝기초의 수평지지거동을 파악하였다.

시험방법은 ASTM D3966-81 규정에 의한 표준재하시험방법(Standard Loading Test)인 설계하중의 200%까지 하중을 재하하는 것으로 하였으며, 설계하중의 200% 단계에서 60분 동안 하중을 지속시킨 후 하중을 제거하고 소성변위를 측정하였다. 하중 재하(Loading) 및 제하(Unloading)는 ASTM D3966-81의 Standard Loading 방식에 의하여 실시하였다.

본 수평재하시험에서는 시험말뚝에 유압잭에 의해 하중이 작용할 때 2본의 말뚝이 앵커시스템으로 사용되도록 하였다. Fig. 2와 같이 앵커말뚝 앞으로 반력

부재(241cm×50cm×14m)가 설치되었다. 이 반력부재 앞에 구조용 부재가 설치되었다. 반력하중은 반력부재와 구조부재에 의해 전달된다. 정확한 하중측정을 위해 Fig. 2, 3과 같이 하중계가 유압잭 앞에 설치되었다.

경사계 장비는 각 시험말뚝에 콘크리트를 이용하여 설치된 플라스틱 케이싱속에서 기울기의 변화를 측정한다.

기울기의 변화는 서로 직교하는 두방향, A방향과 B 방향으로 측정된다. 수평변위는 경사계 장비의 길이에 대하여 측정된 기울기로부터 계산할 수 있다. 만약에

경사계 판의 바닥이 고정되어 있다고 가정한다면 판의 바닥에서 시작하여 윗부분으로 진행하면서 변위를 평가할 수 있다.

일반적으로 수평변위 관측에 대한 정밀도는 두 판의 이음부분 같은 곳에서 계측장비 바퀴의 위치문제 같은 조작상의 실수가 발생하지 않는다는 가정하에 30.5cm 길이에 대하여 6.35mm이내에 있다.

수평재하시험을 통한 주된 관심사는 하중 증가에 따른 말뚝의 수평변위의 변화이다. 이에 의거하여 대규모 현장타설말뚝의 수평재하시험을 위한 계측장비를 Table 1과 같이 나타내었다.

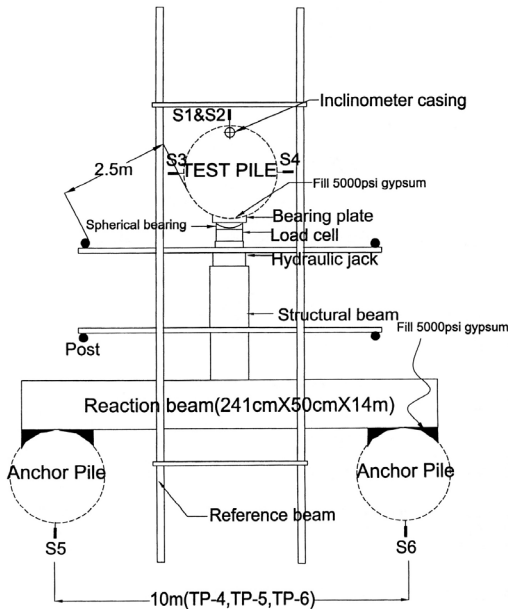


Fig. 2 수평재하시험 평면도

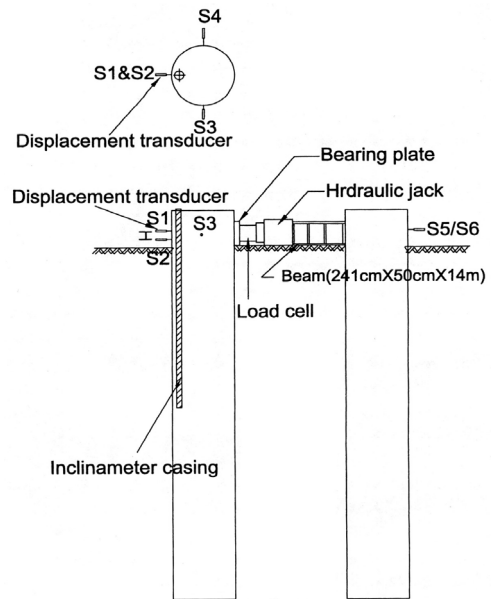


Fig. 3 수평재하시험 정면도

Table 1 수평재하시험 계측장비

No.	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5	TP-6
시험목표하중(ton)	200	200	300	500	400	400
반력시스템	반력말뚝					
유압잭	1개. 600t	1개. 600t	1개. 600t	1개. 600t	1개. 600t	1개. 600t
변위계(LVDT)(CDP-100, Japan)	시험말뚝 4개소, 각 반력말뚝 1개소					
경사계 케이싱	시험말뚝 1개소					
하중계(Tokyo sokki, Japan)	1EA	1EA	1EA	1EA	1EA	1EA
제어장치(TML, Japan)	Automatic data acquisition system					
시험기본	ASTM D3966-81					

수평재하시 말뚝두부의 수평변위를 측정하기 위하여 Fig. 3에서 보듯이 말뚝의 몸체에 4개의 변위계(LVDT)를 사용하였으며, 이중 전면부에 2가지 값(S1, S2)의 평균치를 말뚝두부의 평균 수평변위량으로 말뚝의 거동을 분석하였다. 또한 말뚝의 깊이별 수평변위는 말뚝두부로부터 40m까지 50cm 간격으로 경사계 케이싱을 통해 산정하였다.

3.2 말뚝 재하시험 결과

Fig.4는 수평재하시험 결과를 종합하여 도시한 것이다. 말뚝 직경 크기에 따라 $\phi 1.5\text{m}$ 인 TP-1, TP-2 말뚝에 비해 $\phi 2.0\text{m}$ 인 TP-3, TP-4, TP-6 말뚝의 지지력이 더 큰 것을 알 수 있다.

$\phi 2.0\text{m}$ 인 동일 직경의 TP-3, TP-4, TP-6 말뚝의 재하시험 결과를 비교해 보면, 초기 선형구간인 약 80ton 까지는 기울기가 서로 비슷한 것을 알 수 있고, 이 이후의 하중-변위곡선의 기울기는 약간의 차이를 보인다. 여기서 TP-4 말뚝이 가장 지지력이 큰 것으로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 지표면 하 10D 까지의 N치가 상대적으로 더 커 횡방향 지지력을 증대시켰기 때문인 것으로 판단된다.

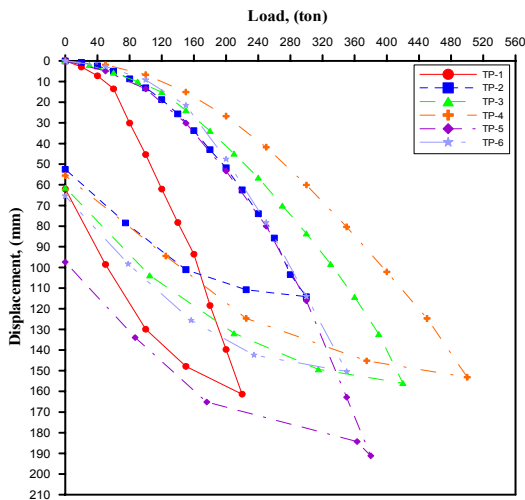


Fig. 4 전체 재하시험 결과

4. 수평재하에 관한 하중-침하 모델 제안

4.1 실측데이터 분석

현장에서 실측한 수평재하시의 현장타설말뚝의 변형에 관한 데이터는 수평재하와 말뚝의 하중-변위 모델을 제안하기 위해 재하(load) 구간만의 데이터를 이용하였다. 제하(unloading) 구간의 데이터는 수평재하에 따른 현장타설말뚝의 변형과는 무관하므로 분석대상에서 제외하였다. 나아가 재하(load)구간의 데이터는 지반이 견딜 수 있는 극한지지력 범위까지를 대상으로 하였다. 이는 지반이 잔류변형과 파괴를 동반하지 않는 탄성영역내의 small strain만을 분석대상으로 함으로서, 파괴된 지반과 현장타설말뚝의 수평재하에 따른 거동을 분석하기 위함이다. 즉, 소성변형(large strain)에 의한 잔류변형은 토목구조물의 변형이나 파괴를 동반하므로, 실제 토목구조물의 유지관리와 사용에 있어서 탄성영역내의 거동과 극한지지력이 매우 중요하기 때문이다.

상기에 언급한 계측데이터의 분류 및 분석에 의한 계측데이터의 pattern을 여러 가지 함수식으로 표현해본 결과, 가장 간단하고 현장 적용성이 뛰어난 모델은 지수형 모델로 판명되었다.

4.2 지수형 모델의 적용

지수형 모델은 $y = a e^{bx}$ (여기서 y : 침하(mm), x : 하중(ton))의 형태를 가지는 모델을 적용하였으며, 이 경우 a , b 값을 결정하면 모델의 함수식을 알 수 있는 간단한 형태이다. 이 지수형 모델은 간단하게 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 함께 분석된 로그 방정식형 모델, 다항식형 모델, 선형모델, 거듭제곱형 모델 및 이동평균모델 등의 여러 가지 모델에 따른 함수식과 비교하여 계측데이터의 graph에 가장 근접하는 최상의 R2 값을 나타내었다. 그러므로 가장 간단하며 최상의 R2 값을 나타내는 지수형 모델이 현장에 적용된 말뚝의 수평재하에 따른 변형을 계산하는데 있어 적용성이 가장 뛰어난을 알 수 있었다.

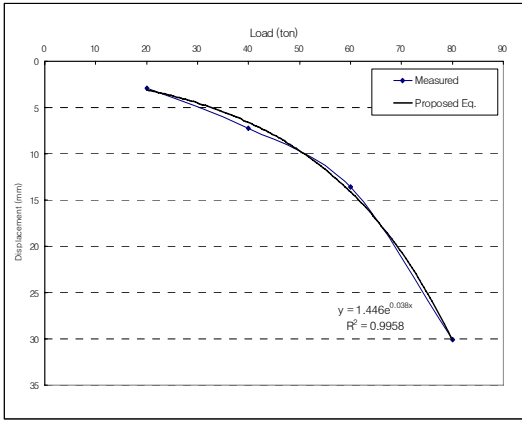


Fig. 5 TP-1 말뚝의 하중-변위 모델

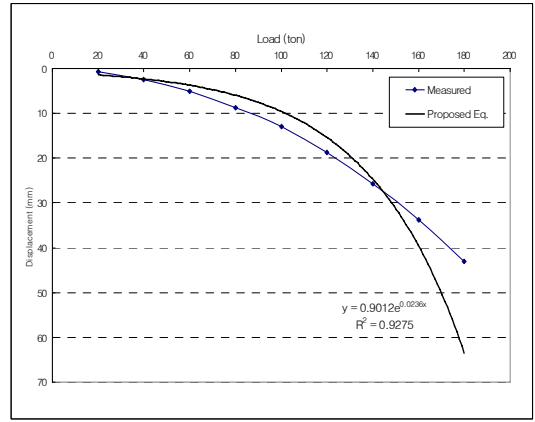


Fig. 6 TP-2 말뚝의 하중-변위 모델

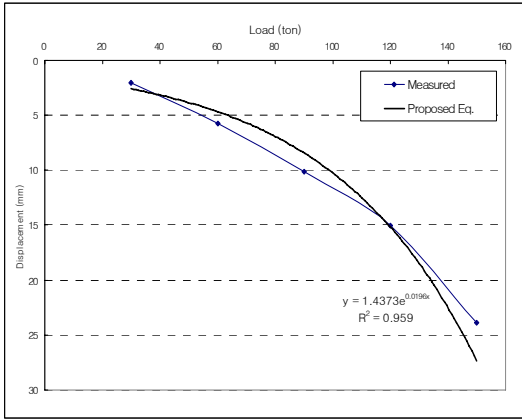


Fig. 7 TP-3 말뚝의 하중-변위 모델

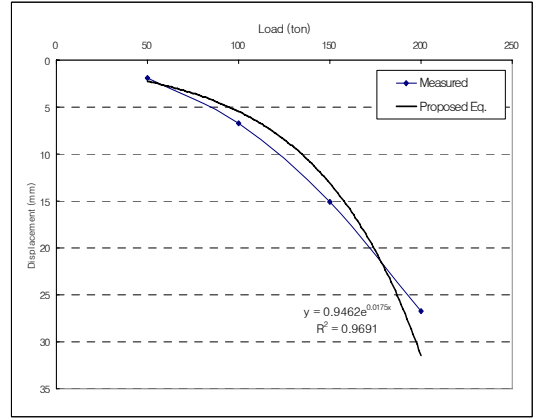


Fig. 8 TP-4 말뚝의 하중-변위 모델

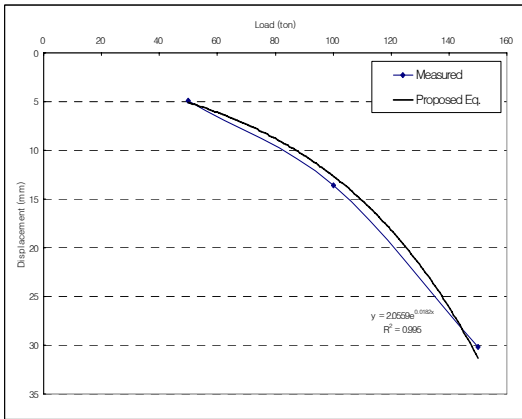


Fig. 9 TP-5 말뚝의 하중-변위 모델

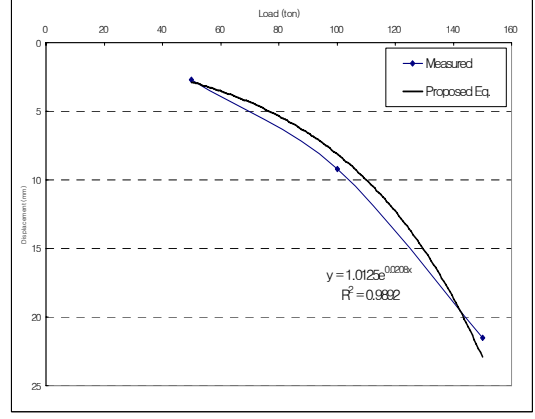


Fig. 10 TP-6 말뚝의 하중-변위 모델

각 시험말뚝에 대한 분석결과는 Fig. 5~Fig. 10에 나타내었고, 시험말뚝의 수평재하시험 결과별 하중-변위 곡선의 방정식과 R2 값은 Table 2에 정리하였다. 지수형 모델을 적용한 결과, 함수식($y = a e^{bx}$)의 a 값은 대체로 1.3에, b 값은 0.02에 수렴하는 경향을 보인다. 이는 복잡한 다층지반에 적용된 현장다설말뚝의 수평재하에 따른 모델식의 경향을 결정할 수 있는 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 수치해석을 이용한 하중전이분석

수치해석은 미국 Ensoft사의 유한차분해석프로그램인 'LPILE'을 이용하였다. 말뚝의 변위가 커지면 지반 반력이 항복치에 도달하게 되므로 이러한 지반에서의 말뚝변위와 지반반력사이의 일반적인 관계는 비선형성

Table 2 수평재하시험 결과별 하중-변위의 방정식 모델 (단위 x : ton, y : mm)

No.	방정식	R2
TP-1	$y = 1.4460 e^{0.038x}$	0.9958
TP-2	$y = 0.9012 e^{0.0236x}$	0.9275
TP-3	$y = 1.4373 e^{0.0196x}$	0.9590
TP-4	$y = 0.9462 e^{0.0175x}$	0.9691
TP-5	$y = 2.0559 e^{0.0182x}$	0.9950
TP-6	$y = 1.0125 e^{0.0208x}$	0.9892

Table 3 수평재하 해석시 입력물성치(TP-1)

지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	1.2	0.020	830
사질토	1.8	27	-	-	554
점성토	1.7	-	2.4	0.010	2769
사질토	1.8	27	-	-	554
점성토	1.7	-	4.6	0.005	2769
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.8	0.005	27642
사질토	1.9	33	-	-	3458
점성토	1.8	-	7.7	0.005	27642
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.9	-	9.8	0.005	13872
사질토	2.0	37	-	-	3458
점성토	1.9	-	19.8	0.005	55386
사질토	2.0	38	-	-	3458

Table 4 수평재하 해석시 입력물성치(TP-2)

지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	2.8	0.010	2769
사질토	1.9	30	-	-	1663
점성토	1.7	-	4.5	0.005	2769
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.8	-	7.0	0.005	13872
사질토	1.9	34	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.8	0.005	27642
사질토	1.9	33	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.8	0.005	13872
사질토	1.9	33	-	-	3458
점성토	1.9	-	14.0	0.005	27642
사질토	2.0	38	-	-	3458

Table 5 수평재하 해석시 입력물성치(TP-3)

지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	2.8	0.010	2769
사질토	1.8	30	-	-	1663
점성토	1.7	-	4.5	0.010	2769
사질토	1.8	30	-	-	1663
점성토	1.8	-	5.6	0.005	13872
사질토	1.9	34	-	-	3458
점성토	1.9	-	10.5	0.005	27642
사질토	1.9	33	-	-	3458
점성토	1.8	-	7.0	0.005	27642
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.9	-	11.9	0.005	27642
사질토	2.0	37	-	-	3458

Table 6 수평재하 해석시 입력물성치(TP-4)

지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	3.2	0.010	2769
사질토	1.9	31	-	-	1663
점성토	1.7	-	3.6	0.010	2769
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.8	-	6.3	0.005	13872
사질토	2.0	35	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.1	0.005	13872
사질토	1.9	34	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.8	0.005	13872
사질토	2.0	35	-	-	3458
점성토	1.9	-	17.5	0.005	27642
사질토	2.0	38	-	-	3458

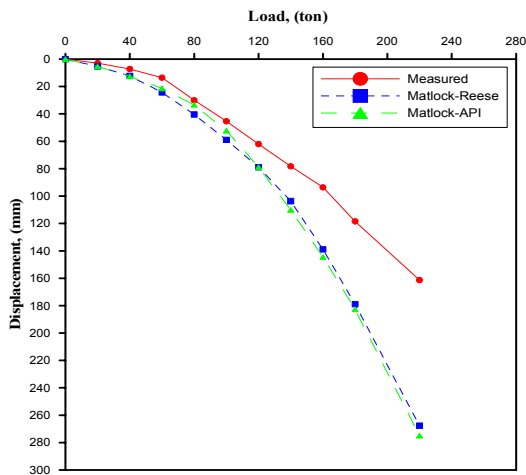
을 보인다. 따라서 말뚝의 단위수평저항력과 말뚝 변위의 관계는 p-y곡선을 통해 나타낼 수 있다.

수치해석은 시험말뚝인 TP-1~TP-6 말뚝에 대해 실시하며, 해석시 적용한 단위중량, 내부마찰각, 점착력, ϵ_{50} 및 지반반력계수의 입력값들은 Table 3.~ Table 8.에 나타내었다.

해석시 적용한 수평하중전이함수는 Table 9.와 같이 사질토에 Reese 등 및 API에서 제안한 함수식을 이용하였으며, 점성토에 대하여는 Matlock이 제안한 함수식을 각각 적용하였다.

Table 7 수평재하 해석시 입력물성치(TP-5)

지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	2.0	0.020	830
사질토	1.9	30	-	-	1663
점성토	1.7	-	3.2	0.010	2769
사질토	1.9	29	-	-	1663
점성토	1.8	-	4.9	0.005	13872
사질토	1.9	33	-	-	3458
점성토	1.9	-	12.6	0.005	27642
사질토	1.9	34	-	-	3458
점성토	1.8	-	9.1	0.005	13872
사질토	2.0	35	-	-	3458
점성토	1.9	-	16.1	0.005	27642
사질토	2.0	37	-	-	3458
점성토	1.9	-	20.5	0.005	55386
사질토	2.0	39	-	-	3458



(a) TP-1

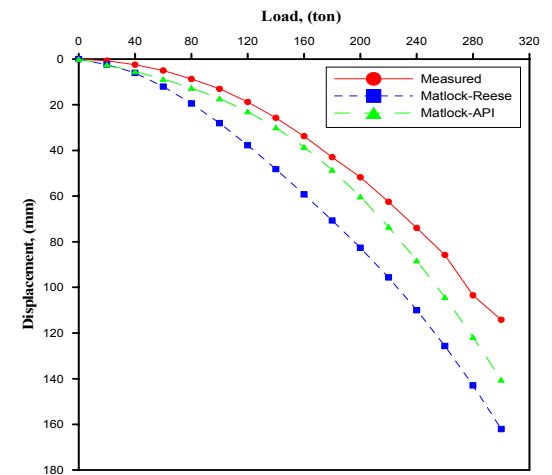
Fig. 11은 각각의 시험말뚝에 대한 재하시험 및 수치해석결과 얻어진 말뚝 두부에서의 하중-수평변위 관계를 도시하였다. 그 결과 적용한 두가지 하중전이함수 조합의 경우 모두 재하시험에 의한 실험결과와 대체로 유사한 곡선경향을 보였다.

Table 8 수평재하 해석시 입력물성치(TP-6)

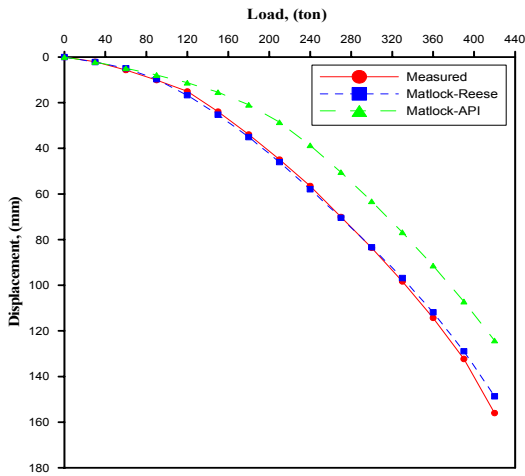
지층구성	해석시 입력값				
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	ϵ_{50}	k (t/m ³)
점성토	1.7	-	1.6	0.020	830
사질토	1.8	28	-	-	1663
점성토	1.7	-	2.4	0.010	2769
사질토	1.8	28	-	-	1663
점성토	1.8	-	5.6	0.005	13872
사질토	1.9	32	-	-	3458
점성토	1.9	-	16.8	0.005	27642
사질토	2.0	35	-	-	3458
점성토	1.9	-	9.8	0.005	27642
사질토	2.0	36	-	-	3458
점성토	1.9	-	18.9	0.005	27642
사질토	2.0	39	-	-	3458

Table 9 수평재하 해석시 하중전이함수 비교

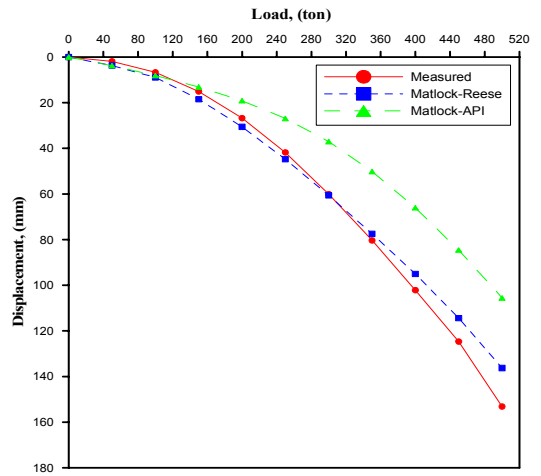
	지층구성	수평하중전이함수
Case 1	점성토	Matlock
	사질토	Reese et al
Case 2	점성토	Matlock
	사질토	API



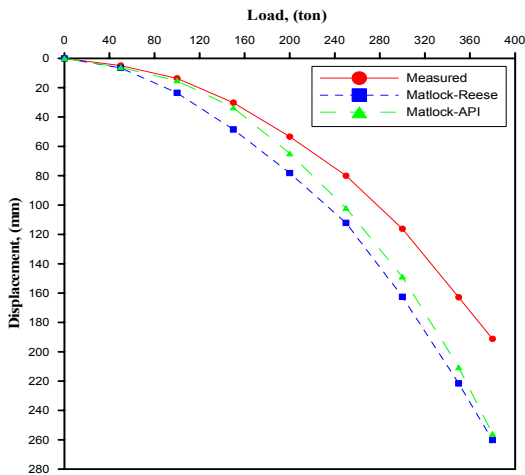
(b) TP-2



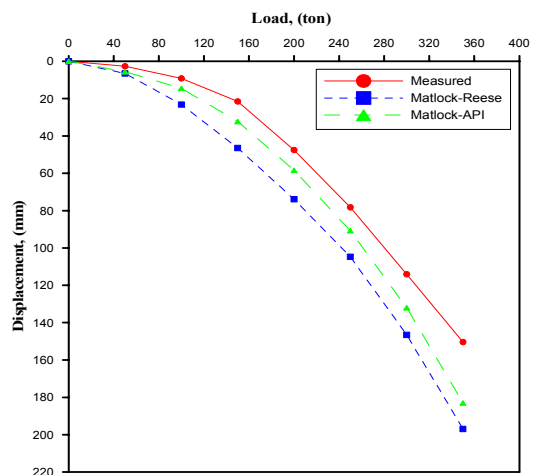
(c) TP-3



(d) TP-4



(e) TP-5



(f) TP-6

Fig. 11 수평재하시 하중전이함수 비교분석

전체 하중단계별 말뚝 두부수평변위의 관계는 Fig. 11에 나타나 있는 바와 같이 TP-3, TP-4 경우를 제외하고는 계산된 변위가 실측 변위에 비하여 대체적으로 큰 값을 나타내고 있다. 수평하중이 작을 때에는 계산된 변위와 실측 변위가 거의 유사한 값을 보이다가 수평하중이 커짐에 따라 계산된 변위가 실측된 값보다 크게 나타나는 경향을 보였다.

하중전이함수의 조합인 Matlock-Reese의 방법과 Matlock-API 방법에 의한 결과를 비교해보면 Matlock-

Reese의 방법이 수평변위가 상대적으로 크게 산정되어 안전측의 결과를 보인다. 특히 계측결과 수평지지력이 크게 산정되었던 TP-3, TP-4 말뚝에 대해서는 Matlock-API 방법에 의해 수치해석결과가 실측치에 비해 수평변위가 작게 산정되는 결과를 보였다. 따라서 두가지 경우로 나누어 해석한 결과 사질토에서 Reese 등 이 제안한 함수식을 사용하고, 점성토에서 Matlock이 제안한 함수식을 사용하는 경우가 실측치와 유사한 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

다층지반에 관입되어 사질토에 근입된 대구경 현장 타설말뚝의 수평재하시험을 실시하여 계측결과를 분석하였고, 계측데이터의 분석을 통해 현장에 적용가능한 하중-침하 모델을 제안하였다. 또한 현장재하시험결과와 유한차분해석 프로그램인 "LPILB"에 의한 기존에 제안된 하중전이함수식의 조합에 의한 해석결과를 대상으로 비교, 분석을 수행하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수평재하시험결과 초기 탄성구간은 하중과 변위의 관계가 직선으로 나타나며, 탄성구간 이후부터는 하중-변위 곡선의 기울기가 크게 커지며 하중-변위 관계는 비선형성을 보인다.
- 2) 계측데이터의 분석에 의해 하중-변위곡선을 여러 함수식으로 표현해본 결과, 지수형 모델인 $y = a e^{bx}$ (여기서 y : 변위(mm), x : 하중(ton))가 가장 간단하고 적용성이 뛰어나며, a 값은 대체로 1.3에, b 값은 0.02에 가깝다.
- 3) 전체 하중단계별 말뚝 두부수평변위관계 및 심도와 수평변위 관계는 TP-3, TP-4 경우를 제외하고는 계산된 변위가 실측변위에 비하여 대체적으로 큰 값을 나타내고 있다. 수평하중이 작을 때에는 계산된 변위와 실측 변위가 거의 같은 값을 보이다가 수평하중이 커짐에 따라 계산된 변위가 실측된 값보다 크게 나타나는 경향이 있다.
- 4) 수평하중 전이함수(p - y 곡선)의 조합인 Matlock-Reese의 방법과 Matlock-API 방법에 의한 결과를 비교해보면 Matlock-Reese의 방법이 수평변위가 상대적으로 크게 산정되어 안전측의 결과를 보인다. 특히 계측결과 수평지력이 크게 산정되었던 TP-3, TP-4 말뚝에 대해서는 Matlock-API 방법에 의해 수치해석결과가 실측치에 비해 수평변위가 작게 산정되는 결과를 보였다. 따라서 두가지 경우로 나누어 해석한 결과 점성토에서 Matlock이 제안한 함수식을 사용하고, 사질토에

서 Reese 등이 제안한 함수식을 사용하는 경우가 실측치와 유사하였다.

참고문헌

1. 장서용, "다층지반에 근입된 대구경 현장타설말뚝의 하중전이분석", 전남대학교 대학원 박사학위논문, 2007.
2. Broms, B. B., "Lateral resistance of piles in cohesionless soils" Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM3, 1964, pp. 123-156.
3. Evans, L. T., and Duncan, J. M., "Simplified analysis of laterally loaded piles" Report No. UCB/GT/82-04, Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, California Univ., Berkely, 1982.
4. Matlock, H., and Reese, L. C., "Generalized solutions for laterally loaded piles" Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, No. SM5, 1960, pp. 61-75.
5. Poulos, H. G., "Load-deformation mechanism for bored piles." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 97, No. SM12, 1971, pp. 1716-1720.
6. Poulos, H. G., and Davis, E. H., "Pile foundation analysis and design" John Wiley & Sons., New York, 1980.
7. Prakash, S., and Sharma, H. D., "Pile foundation engineering practice" John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.
8. Reese, L. C., and Wang, S. T., "Technical manual of computer program LPILBPLUS3.0" Ensoft, Inc.
9. Reese, L. C., Touma, F. T., and O'Neill, M. W., "Behaviour of drilled piers under axial loading." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT5, 1976, pp. 493-510.

(접수일자 : 2007년 5월 25일)
(심사완료일자 : 2008년 3월 17일)