

동재하시험을 이용한 모래지반의 말뚝지지력 산정

Evaluation of Bearing Capacity of Piles in Sand Using Pile Driving Analyzer

이 우 진*1	윤 기 항*2
Lee, Woo-Jin	Yoon, Ki-Hang
석 종 수*3	이 원 제*4
Suk, Jong-Soo	Lee, Won-Je

Abstract

Though the static pile load test gives the most accurate estimation on the load carrying capacity of tested pile, it appears time-consuming and not economical. Many test methods using equipments, such as Pile Driving Analyzer(PDA), STATNOMIC, and Osterberg cell, have been introduced in Korea, and pile test using PDA has been gaining popularity because of its fast and simple operation.

Static and dynamic test results on the piles installed in the granular soils were analyzed to investigate the effect of geometrical damping on the estimated load carrying capacity. It was found that the CAPWAP analysis without considering geometrical damping effect underestimates the pile capacity by 30~60% under certain conditions. It was observed that the underestimation of pile capacity by CAPWAP occurs on the piles installed in the water-borne granular soils by SIP methods. When Smith skin damping value(SSkn) greater than 1.0 sec/m is obtained in CAPWAP analysis, it may reflect the large possibility of underestimation of pile capacity. The introduction of the geometrical damping option in CAPWAP analysis gives reasonable pile capacity, compared with the static pile load test results, and reduces the SSkn value under 0.7 sec/m.

요 지

말뚝재하시험방법 중 정적재하시험은 시험에 소요되는 시간과 비용측면에서 불리하여 이를 개선하기 위한 여러 가지의 시험방법이 개발되어 소개되고 있다. 국내에 소개된 시험방법으로는 동재하시험으로 불리는 향타분석기(PDA; Pile Driving Analyzer)를 이용한 방법을 비롯하여 STATNOMIC, Osterberg cell 등이 있다. 이들 중 동재하시험의 사용은 상당히 활성화되어 있는

*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

*2 정희원, 현대건설 토목설계실

*3 정희원, 대구공업전문대학 토목과 교수

*4 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정

실정이나 지반조건과 말뚝시공방법에 따라서는 지지력산정시 추가적인 해석모델을 사용하여야 보다 정확한 지지력을 평가할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 현장에서 수행한 정적 및 동적 재하시험결과의 비교/분석으로 부터 주로 SIP 말뚝에 대한 동재하시험시 발생할 수 있는 기하감쇠(geometrical damping)의 영향을 고찰하였다. 해석결과로 부터 기하감쇠가 발생한 지반의 경우 CAPWAP에 의해 산정된 지지력이 정재하시험에 의한 지지력에 비해 30~60% 정도 과소평가 되었으며 이때 말뚝주면에 대한 Smith의 감쇠계수(SSkn)가 1.0 sec/m를 초과하였다. CAPWAP해석시 기하감쇠를 고려한 해석모델을 사용함으로써 정재하 시험결과와 근사한 지지력을 얻을 수 있었으며 SSkn값도 0.7sec/m이하의 일반적인 범위로 해석되었다.

Keywords : Pile load test, PDA, CAPWAP, Geometrical damping, SIP

1. 서론

말뚝을 이용한 기초구조물을 안전하고 경제적으로 설계/시공하기 위해 일반적으로 사용되는 시공관리 방법은 말뚝에 대한 재하시험이다. 재하시험은 설계하중을 결정하거나 시공된 말뚝에 대한 지지력을 확인하기 위해 가장 보편적으로 실시되며 말뚝의 압축지지력에 대한 시험이 말뚝재하시험의 대부분을 차지하고 있다. 이러한 재하시험은 주로 정적재하시험으로 수행되어 왔으나 최근에는 향타분석기(Pile Driving Analyzer; PDA)를 이용한 동재하시험이 널리 확산되는 추세이다. 동재하시험은 시험결과와 신뢰도가 비교적 양호할 뿐 아니라 시험소요시간과 비용면에서 경제적이므로 시험의 빈도수 증대로 기초의 시공관리차원에서 상대적으로 유리하다.

동재하시험은 파동이론(wave mechanics)에 근거한 시험방법으로서 선진외국에서는 이미 오래전부터 사용해온 방법이며 이 시험방법이 국내에 소개된지는 몇 년정도에 불과하지만 활용도가 점차 증가하면서 방대한 시험데이터가 누적되고 있다. 일반적으로 말뚝시공방법이 향타기를 사용하여 직접 타입시공한 경우는 정재하시험결과와 비교하여 양호한 지지력 산정결과를 주는 것으로 알려져 있으나 특정한 지반조건과 시공방법에서는 동재하시험의 결과가 실제보다 상당히 과소평가되는 경우가 발생할 수 있다(Lee 등, 1996; Yoon, 1996). 외국의 경

우에도 Likins 등(1992)과 Thompson 등(1988)이 지하수위가 높은 모래지반에 시공된 직타말뚝에서 지지력의 과소평가현상이 관찰된 사례를 보고하였다. 따라서 이러한 지반에 시공된 말뚝의 지지력을 산정하기 위해 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)을 이용할 경우 기존의 지반모델로는 실제 지지력과 상당히 다른 값을 보일 수가 있다.

본 연구에서는 동재하시험과 정재하시험이 동일말뚝 또는 동일현장에서 병행 실시된 현장 시험결과중 기하감쇠로 인하여 두 시험결과 사이에 차이가 발생한 것으로 추정되는 13본의 재하시험결과를 분석함으로써 기하감쇠의 말뚝지지력에 대한 영향, 기하감쇠 발생의 징후, CAPWAP 해석방법을 고찰/제시하고자 한다.

2. 기하감쇠(geometrical damping)

동재하시험시에는 향타기 또는 낙하추에 의해 말뚝의 두부에 동적하중을 가하므로 말뚝을 지지하는 지반의 저항력은 동적저항과 정적저항이 동시에 발휘된다. 말뚝의 지지력은 정적 지지력으로 산정되어야 하므로 전체 지지력성분중 동적저항력은 제거되어야 하며, 이를 위해 CAPWAP해석시 다음과 같은 Smith모델이나 Case모델 등의 감쇠모델이 일반적으로 사용된다(GRL Associates, 1993).

$$R_s = J_s V R_s \quad (1)$$

$$R_d = J_c V Z = J_c V \left(\frac{AE}{C} \right) \quad (2)$$

여기서 R_d =지반의 동적저항력, J_s =Smith 감쇠계수, J_c =Case 감쇠계수, V =말뚝의 입자 속도, R_s =지반의 정적저항력, Z =말뚝의 임피던스(impedance), A =말뚝의 단면적, E =말뚝의 탄성계수, C =말뚝내의 파동 전달속도이다.

식 (1)과 (2)로 각각 표현되는 감쇠모델들은 항타로 인한 지반의 동적저항이 말뚝과 지반의 경계면에서 발생하는 전단에 의해서만 소산되는 것으로 가정하고 있다. 그러나 말뚝과 주변 지반이 치밀하게 부착되어 있는 경우, 항타시 말뚝을 둘러싼 주변지반이 말뚝과 같이 움직이게 되며 항타에너지는 말뚝과 흙간의 전단 뿐만 아니라 말뚝주변 흙(soil mass)의 관성력(inertia force)으로 일부 에너지가 소산되는 기하감쇠 현상이 발생한다. 부가적으로 소산되는 이러한 에너지는 지반의 종류, 말뚝의 형상 및 크기, 말뚝주변의 거칠기 등에 의해서 영향을 받는다. 동재하시험시 기하감쇠가 발생한 말뚝을 Smith모델을 이용하여 해석하는 경우, 관성효과(inertia effect)에 의해 소산된 항타 에너지를 지반의 동적저항력(R_d)으로 인식하여 상대적으로 정적지지력(R_s)을 과소평가하게 되며 감쇠계수(J_s)가 일반적인 범위보다 커

지는 현상이 발생한다. 따라서 Smith의 모델을 기본적인 해석모델로서 채택하고 있는 CAPWAP은, 기하감쇠가 발생할 경우 말뚝의 지지력을 합리적으로 예측할 수가 없다.

Likins 등(1992)은 기하감쇠효과를 고려하기 위해 그림 1과 같은 모델을 제안하였다. 이는 Smith의 모델에 mass와 damper를 추가한 것으로, 말뚝의 움직임으로 영향을 받는 주변 흙을 mass로, 주변흙의 관성효과는 mass에 작용하는 가속도에 비례하여 저항하는 damper로 표현하였다. 이러한 모델을 이용하여 기하감쇠를 관성효과로 모델링하면 지반의 동적저항력이 과대평가되는 것을 방지하므로 말뚝의 지지력이 적절히 평가된다.

3. 기하감쇠가 말뚝의 지지력에 미치는 영향

3.1 동일말뚝에 대한 시험결과와 비교

1) 분석대상 말뚝과 CAPWAP 해석

본 연구에서는 동일한 말뚝에 동재하시험과 정재하시험이 실시된 30본의 말뚝에 대하여 시험 결과를 분석하였다. 이중 10본의 말뚝은 SIP(Soil-cement Injected Pile)공법으로 시공된 PC 또는 PHC말뚝이며, 11본의 콘크리트 말뚝과 9본의 강관말뚝은 디젤 또는 유압항타기로 직타 시공된 것이다. 대부분의 콘크리트 말뚝은 고층아파트의 기초 또는 공장의 기초로 시공된 것이고, 강관말뚝은 교량의 기초나 공장의 기초로 시공된 것이다. 기하감쇠로 인한 문제가 야기된 SIP말뚝은 시공 후 최소 5일의 양생기간을 갖도록 하여 말뚝주변의 시멘트 페이스트가 충분히 경화된 후 동적 또는 정적재하시험이 수행되도록 하였으므로 시간에 따른 지지력의 변화로 인한 오차는 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

대부분의 정적재하시험은 ASTM Designation D 1143-81에 규정된 시험방법에 준하여 실시되었으며 반력말뚝을 이용하여 설계하

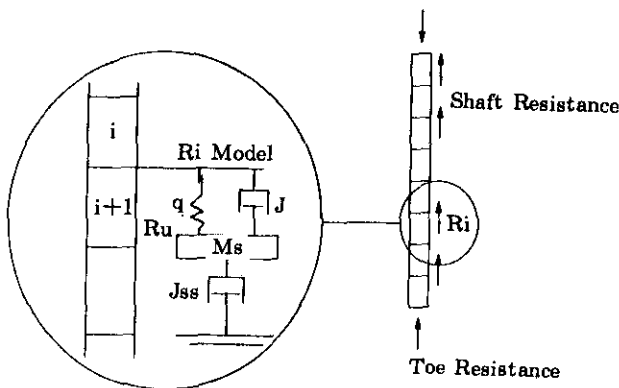


그림 1. 기하감쇠를 고려한 지반모델

중의 200%를 8단계로 등분하여 재하하였다. 각단계의 하중은 말뚝의 침하율이 0.25mm/hr를 초과하지 않을 때까지 유지되었으며 재하시간이 2시간을 초과하지 않도록 하였다. 대부분의 말뚝은 정적재하시험에 의해 극한파괴가 발생하지 않았으며, 이 경우 Davisson의 기준, S-logT 곡선 분석법, logP-logS 곡선 분석법, 25.4mm 전침하량 기준, 말뚝직경의 2.5%에 해당하는 순침하량 기준 등을 적용하여 침하량의 기준에 의한 한계하중이나 항복하중을 판정하였다.

본 연구에서 분석한 동재하시험 결과는 항타 분석기 모델 PAK을 이용하여 ASTM Designation D 4945-89에 규정된 시험방법으로 시험을 실시한 것이다. 수집된 데이터는 동재하시험 해석 프로그램인 CAPWAP으로 식 (1)

과 (2)의 모델을 이용하여 manual matching으로 해석하였다.

해석결과에 의하면 27본의 말뚝은 정적 및 동적재하시험의 결과가 매우 유사한 지지거동 및 침하거동을 보여 주는 것으로 분석되었으나, 3본의 말뚝에서는 CAPWAP으로 예측된 지지력이 정적재하시험의 결과보다 상당히 과소 평가되는 경향이 발견되었으며 이들 모두 모래질 또는 자갈/모래지반에 시공된 SIP말뚝이었다. 동재하시험에 의한 지지력의 과소평가 현상을 조사하기 위해 모래질 또는 자갈/모래 지반에 시공된 4본의 말뚝(SIP01, SIP02, SIP06, SIP10)에 대하여 일반적인 Smith모델 또는 기하감쇠를 고려한 지반모델을 이용하여 CAPWAP해석을 다시 실시하였다. 해석결과 는 표 1과 표 2에 요약되어 있으며, CAPWAP

표 1. 정재하시험 결과

(단위 : tons)

해석기준 말뚝번호	Davisson Criteria	1" butt total Settlem.	2.5% Dia. plastic Settlem.	S-logT	logP-logS	Plunging Load
SIP01	170 ↑	170 ↑	170 ↑	170 ↑	170 ↑	170 ↑
SIP02	280	322	320	270 ↑	270 ↑	270 ↑
SIP06	108	160	140 ↑	140 ↑	140 ↑	140 ↑
SIP10	170	242	240 ↑	240 ↑	240 ↑	240 ↑

주) ↑ : 재하시험시 해당 하중까지 재하하였으나 뚜렷한 파괴점이 관찰되지 않았음.

표 2. 동재하시험 해석 결과

말뚝 번호	Type of soil damping model	SSkn (sec/m)	SToe (sec/m)	Capacity by CAPWAP (tons)	Ratio*
SIP01	Smith damping	1.505	1.504	68.1	0.339
	Geometrical damping	0.662	0.142	200.6	
SIP02	Smith damping	0.630	0.159	286.5	-
SIP06	Smith damping	0.984	0.215	89.1	0.628
	Geometrical damping	0.620	0.061	141.9	
SIP10	Smith damping	1.240	0.641	113.8	0.653
	Geometrical damping	0.410	0.560	174.3	

주)* : 기하감쇠를 고려하여 해석한 말뚝의 지지력에 대한 기하감쇠를 고려하지 않은 말뚝의 지지력의 비

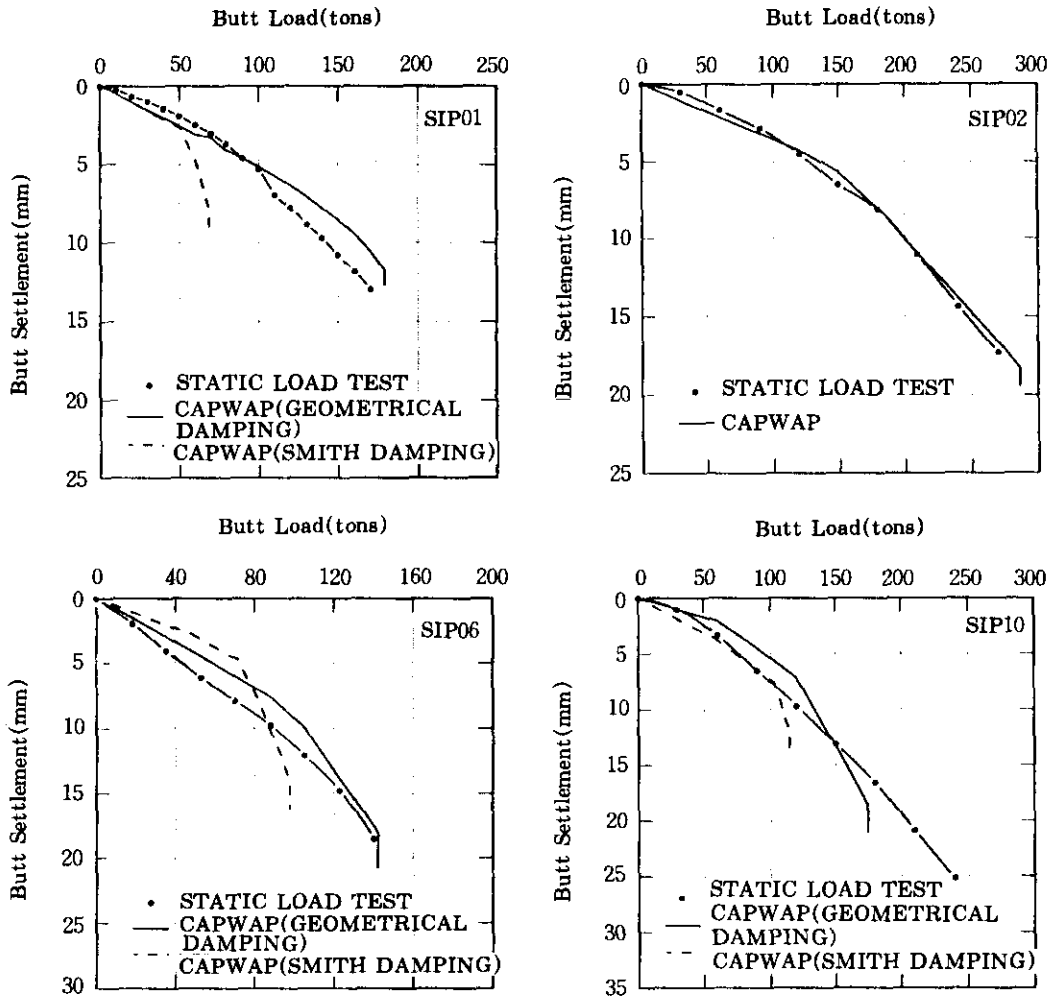


그림 2. SIP01, SIP02, SIP06, SIP10의 하중-침하량 곡선

에서 얻어진 모사 정적재하곡선(simulated static load test curve)과 정적재하시험의 하중-침하 곡선은 그림 2에 보이는 바와 같다.

1) 기하감쇠의 발생여부 판단 및 CAPWAP 해석방법

표 1과 2에 의하면 SIP02를 제외한 3본의 말뚝은 Smith모델을 사용하여 CAPWAP으로 예측된 말뚝의 지지력과 기하감쇠를 고려하여 해

석한 지지력의 비율이 35~66% 정도이므로, 기하감쇠를 고려하지 않는 경우 CAPWAP 지지력이 상당히 과소평가 됨을 알 수 있다. 또한 그림 2의 정적재하시험 곡선과 CAPWAP의 결과의 비교에서도 지지력의 과소평가현상이 뚜렷함을 알 수 있다. SIP02를 제외한 3본의 말뚝은 강주변에 위치한 현장에 시공된 것으로 지하수위가 높고 모래 또는 모래/자갈의 조립토가 주류를 이루는 지반에서 SIP공법으로 시공된 것이 특징이다. SIP02의 경우, 표 2와 그

림 2로부터 Smith모델을 이용한 CAPWAP 해석 결과가 정적재하시험의 하중-침하량 곡선과 상당히 유사함을 알 수 있으므로 실제로는 기하감쇠가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 이는 SIP02의 지반조건은 나머지 3본의 말뚝과 비슷하나, 지하수위가 다른 현장에 비해 상대적으로 높지 않았기 때문으로 판단된다. 지하수위가 높은 조립토지반에 SIP말뚝을 시공하면 주입되는 시멘트 페이스트가 지하수와 섞이면서 투수성이 큰 공극을 통해 주변지반에 넓게 퍼지고 이들이 경화하면 주변마찰력이 커져 동재하시험을 실시하면 주변지반으로의 타격에너지소산에 기인하는 기하감쇠가 발생하는 것으로 추정된다.

기하감쇠가 발생한 것으로 판단되는 SIP01, SIP06, SIP10 말뚝은 Smith모델에 의한 CAPWAP해석시 지지력의 과소평가와 함께 Smith skin damping(SSkn)이 약 1.0sec/m보다 큰 값을 나타냈으며 SIP01은 Smith toe damping(SToe)도 1.0sec/m보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 기하감쇠에 의한 주변지반에서의 에너지 소산을 지반의 동적저항으로 인식하여, Smith damping 값을 과대평가하고 정적저항력 또는 말뚝의 지지력을 과소평가한 것이다. 반면 기하감쇠가 발생하지 않은 SIP02는 Smith모델만으로 해석하여도 SSkn이나 SToe가 1.0 sec/m 이하의 적절한 값으로 산정되었다. SIP01, SIP06, SIP10 말뚝을 기하감쇠 모델을 고려하여 CAPWAP해석한 경우 SSkn이나 SToe가 0.7sec/m 미만으로 감소하였으며, CAPWAP으로 산정된 지지력과 모사정적재하곡선이 정적재하시험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. Likins 등(1992)에 의하면 타입말뚝의 경우 말뚝주면과 선단에서의 Smith damping(SSkn과 SToe)이 1.3sec/m 이상이면 기하감쇠가 커서 CAPWAP에 의한 지지력이 과소평가된다고 하였다. 그러나 국내에서 많이 시공되는 SIP말뚝은 주변마찰이 선단지반에 비해 상당히 큰 것이 특징이므로 SSkn이 SToe보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

말뚝에 대한 동재하시험시 기하감쇠의 가능성 및 발생여부는 시험대상 말뚝의 시공법과 지반조건, 동재하시험시 PDA화면에 나타나는 force파와 velocity파의 특징, CAPWAP해석시 Smith damping(SSkn 또는 SToe)의 크기, CAPWAP지지력과 정적재하시험 결과와의 비교 등으로부터 추정해 볼 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 현재까지의 경험에 의하면 지하수위가 높은 조립토에 SIP말뚝이 시공된 경우 기하감쇠의 가능성이 있음에 유의하여야 한다. 그림 3은 SIP10 말뚝의 동재하시험시 관찰된 파형으로 force파와 velocity파가 초반에 일찍 분리되고 시간 2L/C에 도달하기 전에 velocity가 음으로 감소하고 있으며 2L/C이후에는 force파의 급격한 감소현상이 나타나고 있다. 본 연구에서 분석된 10본의 SIP말뚝 중 SIP01, SIP02, SIP06, SIP10을 포함한 6본의 말뚝에서 이러한 현상이 관찰되었는데 이와 같은 파형이 관찰되면 기하감쇠의 가능성은 내재되어 있으나 결정적인 증거는 될 수 없다. 이러한 현상의 Smith모델에 의한 CAPWAP해석 결과중 Smith damping(SSkn 또는 SToe)값이 1.0 sec/m을 초과하는 것이 추가로 관찰되면 기하감쇠로 인한 지지력 과소평가의 증거로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 이 경우 기하감쇠 모델을 도입하고 manual matching으로 CAPWAP해석을 실시하여 Smith damping값이 0.7 sec/m 이하의 값이 되도록 유지하면

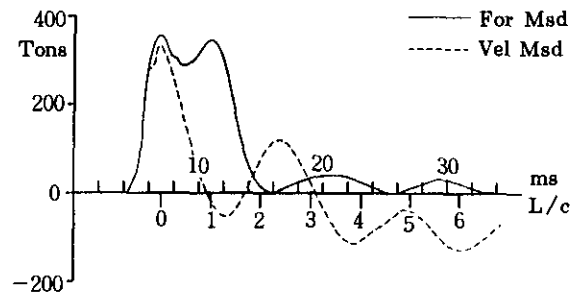


그림 3. 기하감쇠가 발생한 경우의 PDA화면상에서 관측된 파형

정적재하시험 결과와 대비할 때 유사한 정적지 지력 예측치를 얻을 수 있었다.

3.2 동일 현장내의 다른 말뚝에 대한 시험결과의 비교

앞서 살펴본 시험현장은 동일 말뚝에 대하여 동재하 및 정재하시험이 병행되어 시험결과를 직접 비교함으로써 기하감쇠의 영향을 고찰하였던 예이며, 본 현장의 경우는 동일현장내의 서로 다른 말뚝에 대하여 각각 실시된 재하시험결과를 비교/평가하여 기하감쇠의 영향을 분석한 것이다. 여기서 분석된 두 현장의 지반

조건은 앞에서의 현장과 유사하게 주로 사질토 지반으로 구성되어 있고 현장의 지하수위도 높은 편이었으며 역시 SIP공법으로 시공된 말뚝 기초 현장이었다.

표 3에는 시험말뚝의 제원을, 표 4 및 표 5에는 각 현장에서 실시한 정재하 및 동재하시험 결과를 비교하여 나타내었다.

A 현장의 3분에 대한 정재하시험결과를 살펴보면 설계하중의 2배이상을 재하하였으나 극한파괴나 뚜렷한 항복현상의 징후가 관찰되지 않는 시험결과를 보여주고 있다. 그러나 동재하시험결과에 대해 Smith모델로 CAPWAP

표 3. 해석 말뚝 제원

말뚝번호	말뚝 type	설계하중(tons)	길이(m)	시험방법	시험일자
SIPA1	PHC400	70	13.00	Static	95.3.22
SIPA2		70	14.50	Static	95.2.09
SIPA3		70	12.50	Static	95.2.24
SIPA4		70	12.00	Dynamic	95.3.08
SIPB1	PHC500	120	14.30	Static	95.2.06
SIPB2		120	15.50	Dynamic	95.4.12
SIPB3		120	17.90	Dynamic	95.4.27
SIPB4		120	18.00	Dynamic	95.2.11
SIPB5		120	13.80	Dynamic	95.4.13

표 4. A현장의 말뚝시험 결과 비교

Static pile load test (tons)						
Pile ID	Davisson	1' butt S	2.5% Dia.S	S-logT	logP-logS	Plunging
SIPA1	105	140 ↑	136	140 ↑	140 ↑	140 ↑
SIPA2	180	158 ↑	158 ↑	158 ↑	158 ↑	158 ↑
SIPA3	140 ↑	140 ↑	140 ↑	140 ↑	140 ↑	140 ↑
Dynamic pile load test						
Pile ID	Type of soil damping model	SSkn (sec/m)	SToe (sec/m)	Capacity by CAPWAP (tons)	Ratio*	
SIPA4	Smith	1.608	1.500	80.4	0.775	
	Geometrical	0.485	1.650	103.7		

주) ↑ : 재하시험시 해당 하중까지 재하하였으나 뚜렷한 파괴점이 관찰되지 않았음

* : 기하감쇠를 고려하여 해석한 말뚝의 지지력에 대한 기하감쇠를 고려하지 않은 말뚝의 지지력의 비

표 5. B현장의 말뚝시험 결과 비교

Static pile load test (tons)						
Pile ID	Davisson	1" butt S	2.5% Dia.S	S-logT	logP-logS	Plunging
SIPB1	210	270	260	240 ↑	240 ↑	240 ↑
Dynamic pile load test						
Pile ID	Type of soil damping model	SSkn (sec/m)	SToe (sec/m)	Capacity by CAPWAP (tons)	Ratio*	
SIPB2	Smith damping	1.199	1.182	134.9	0.642	
	Geometrical damping	0.654	1.047	210.1		
SIPB3	Smith damping	1.492	8.448	147.7	0.643	
	Geometrical damping	0.479	1.005	229.7		
SIPB4	Smith damping	1.650	8.580	157.1	0.707	
	Geometrical damping	0.695	3.236	222.1		
SIPB5	Smith damping	1.660	0.160	112.1	0.544	
	Geometrical damping	0.516	0.576	206.1		

주) ↑ : 재하시험시 해당 하중까지 재하하였으나 뚜렷한 파괴점이 관찰되지 않았음

* : 기하감쇠를 고려하여 해석한 말뚝의 지지력에 대한 기하감쇠를 고려하지 않은 말뚝의 지지력의 비

해석한 결과는 말뚝의 극한지지력을 80.4톤으로 추정하고 있으며 이는 정재하시험결과에 비하여 상당히 작은 값으로 판단된다. 또한 Smith damping(SSkn과 SToe)값도 1.5sec/m 이상이므로 기하감쇠의 영향으로 인해 지지력이 과소평가되고 있음을 알 수 있다. 기하감쇠를 고려한 경우, SSkn은 0.5sec/m 이하로 감소하고 지지력은 104톤 정도로 증가되었으나 정적재하시험의 결과에 비해 적게 평가되고 있으며 하중-침하곡선의 양상은 SIPA3의 말뚝과 유사함을 보이고 있다. 이러한 차이는 다른 말뚝에 대한 시험결과와의 비교와 해석상의 부정확에 의한 것으로 판단된다.

B 현장의 경우, 정재하시험결과는 동적재하시험의 결과와 매우 상이하여 직접적인 비교는 어려우며, 4본의 말뚝에 대한 동적재하시험결과의 기하감쇠효과를 비교하는데 주안점을 두었다. 이들에 대해 Smith모델로 CAPWAP해석한 결과는 SIPB2, SIPB3, SIPB4의 경우 SSkn과 SToe 모두 1.0sec/m 이상이며, SIPB5는

SSkn이 1.5sec/m 이상임을 알 수 있어 기하감쇠의 발생을 시사하고 있다. 기하감쇠를 고려하여 해석한 결과 4본 말뚝 모두 SSkn이 0.7sec/m 이하로 감소하였으며 CAPWAP 지지력은 모두 200톤을 상회하고 있다.

이상과 같이 표 4와 표 5의 분석결과로부터 기하감쇠가 발생한 경우에 기본모델인 Smith 모델을 이용하여 해석하면, 동적재하시험결과로부터 산정되는 말뚝의 지지력이 22~46% 정도 과소평가되며 이 경우 공히 SSkn값이 1.0 sec/m를 초과하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 지지력 과소추정/평가현상은 시공품질의 차이에서도 발생할 수 있음을 배제할 수는 없지만 전술한 측정파형의 특징, 시공조건 등을 면밀히 검토/반영하여 기하감쇠 모델을 적용하여 해석하면 A현장 및 B현장에서와 같이 SSkn값도 정상적인 범위내로 개선되며 또한 산정된 지지력도 Case 지지력이나 정재하시험에 의해 산정된 지지력과 매우 근접하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

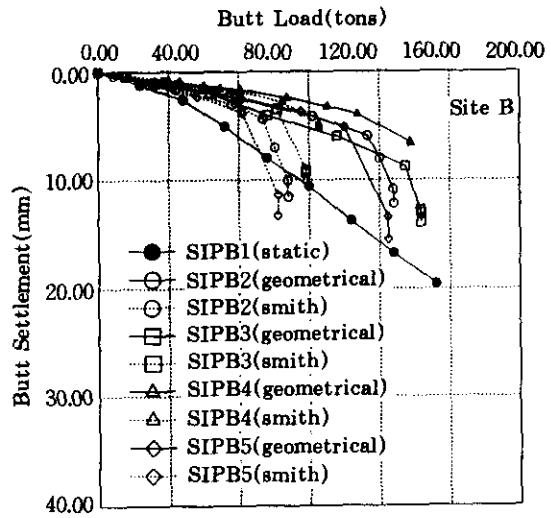
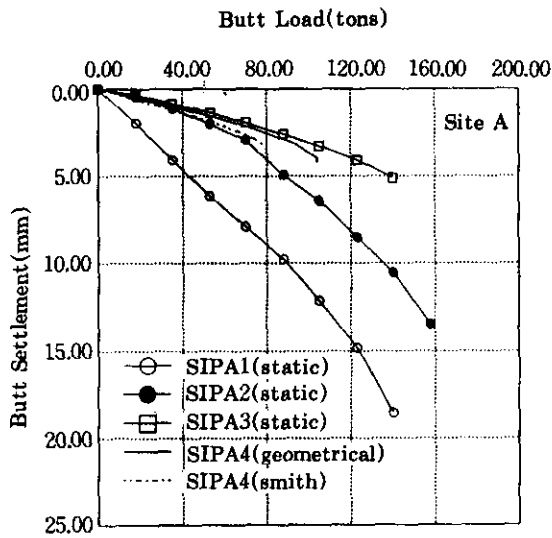


그림 4. Site A와 B의 해석말뚝의 하중-침하량 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 현장에서 실시한 동재하시험을 각각 다른 지반모델을 이용하여 CAPWAP 해석하고 이를 정재하시험결과와 비교/분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지하수위가 높고 조립토가 지배적인 지반에 시공된 SIP의 경우, 동재하시험시 PDA화면에서 F파와 V파가 초반에 분리되고 시간 $2L/C$ 이전에 V파가 음으로 나타나는 현상이 관찰되면 기하감쇠로 인해 CAPWAP 지지력이 정적재하시험 결과와 비교하여 과소평가될 가능성이 있다.
- 2) 동재하시험결과에 대해 Smith모델을 이용하여 CAPWAP 해석을 실시한 결과 Smith damping(SSkn 또는 SToe)값이 1.0 sec/m 이상이면, 기하감쇠로 인한 지지력 과소평가현상이 나타났다. 본 연구에서 조사된 바에 의하면 Smith모델에 의한 CAPWAP 지지력은 기하감쇠를 고려한 CAPWAP 지지력에 비하여

24~76% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다.

- 3) 기하감쇠가 발생한 것으로 판단되면 기하감쇠해석 option을 이용하여 CAPWAP 해석을 실시함으로써 Smith damping(SSkn 또는 SToe)값이 0.7 sec/m 정도 이하가 되도록 지지력을 평가하였을 때 정재하시험의 결과와 유사한 결과를 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며 동 재단에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 건설부 (1986), 구조물기준 설계기준, pp. 185~309.
2. 석종수 (1997), "동적재하시험에 의한 말뚝지 지지력의 평가", 공학박사학위 논문, 국민대학교 대학원.

3. GRL Associates, Inc. (1993), CAPWAP User's Manual, Cleveland, Ohio.
4. Hannigan, P. J. (1990), "Dynamic Monitoring and Analysis of Pile Foundation Installations", *Continuing Education Committee of Deep Foundation Institute*, First edition.
5. Lee Woo-Jin, Lee In-Mo, Yoon Sung-Jin, Choi Yoo-Joong and Kwon Jang-Hyuk (1996), "Bearing Capacity Evaluation of the Soil-Cement Injected Pile using CAPWAP", *Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Orlando, Florida, pp. 409~419.
6. Likins, G., Rausche, F., Dimaggio, J. and Teferra, W. (1992), "A Solution for High Damping Constants in Sands", *Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Hague, Netherlands, pp. 117~120.
7. Smith, E. A. L. (1960), "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 86, pp. 36~61.
8. Thompson, C. D. and Goble, G. G.(1988), "High Case Damping Constants in Sand", *Proceedings of the Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Ottawa, Canada, pp. 555~563.
9. Yoon, Ki-Hang (1996), "Determination of Pile Design Load by Dynamic Load Test", M.S.C.E. Thesis, Korea Univ., Seoul, Korea.

(접수일자 1997. 8. 16)