

파동방정식에 근거한 매입말뚝의 동적 분석

Dynamic Analyses on Embedded Piles Based on Wave Equation

서 미 정¹ Seo, Mi-Jeong

박 종 배² Park, Jong-Bae

박 용 부³ Park, Yong-Boo

이 종 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

For the bearing capacity evaluation, dynamic pile tests instead of static pile tests have been commonly used in embedded piles, which are known to have low noise and low vibration construction method. The objective of this study is to analyze the bearing capacity and penetration behaviors of embedded piles, which are constructed in different ground conditions, by using force and velocity signals obtained in the final blows during construction of embedded piles. For the dynamic pile analyses, the CAsE Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) and Wave Equation Analysis of Piles (WEAP) have been commonly used. In this study, the CAPWAP and WEAP are used for the analyses of the dynamic pile tests, which are conducted on embedded piles. The input values, output values, and force-velocity graphs of CAPWAP determined by analyzing the measured force-velocity signals are investigated. In addition, similar force-velocity signals are obtained from the WEAP by analyzing the input values of the WEAP. Considering the subsurface investigation results around the pile tips, if the N-value increases exponentially along the depth, toe quake value should be small, and therefore large bearing capacity is identified. On the contrary, if the N-value increases linearly, the bearing capacity is small because of large toe quake value. Furthermore, the stiffness of hammer cushion and pile cushion, which is difficult to find correct values, is recommended lower than 500 kN/mm. This study demonstrates that the results of WEAP may be similar to those of CAPWAP and the WEAP can be used to estimate the bearing capacity of embedded piles.

요 지

저소음, 저진동 공법으로 널리 사용되고 있는 매입말뚝도 과거와 달리 정재하시험 보다는 동재하시험을 이용한 지지력 확인시험을 많이 수행하고 있다. 본 연구의 목적은 선단부 근처의 지반조건이 상이한 곳에 시공된 두본의 매입말뚝의 최종 경타동안에 획득된 힘과 속도 파형을 대하여 동적해석을 수행하여 매입말뚝의 지지 및 관입 거동을 분석하는 것이다. 파동방정식을 근거로 하는 동재하시험 분석 프로그램으로는 CAPWAP과 WEAP 등이 있으며 본 논문에서는 실제 현장에서 동재하시험을 수행한 매입말뚝을 CAPWAP과 WEAP을 이용하여 분석하였다. 동재하시험에서 측정된 데이터를 분석한 CAPWAP의 입력값과 결과값, 힘-속도 그래프 파형을 분석하였고, WEAP의 입력조건을

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원 (Member, Research Associate, Housing & Urban Research Institute, LHI, Tel: +82-42-866-8428, Fax: +82-42-866-8431, jbpark@lh.or.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원 (Member, Research Associate, Housing & Urban Research Institute, LHI)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

변화시키며 CAPWAP 결과와 유사한 WEAP 결과를 도출하였다. 이 때, 선단부 근처의 지반조사 결과를 고려하여 관입 깊이에 따른 N치의 분포가 지수 함수 형태이면 입력조건 중 Toe quake의 값이 작으며 이로 인해 큰 지지력이 얻어지고, 관입 깊이에 따른 N치의 분포가 선형 함수 형태이면 이와 반대되는 결과가 얻어진다. 또한 정확한 값을 구하기 어려운 해머 및 말뚝 쿠션의 강성 입력값으로서 500kN/mm 이하인 값을 추천할 수 있었다. 본 연구는 WEAP으로 실제 측정된 데이터를 분석하는 CAPWAP과 유사한 결과를 얻을 수 있으며, WEAP을 이용하여 매입말뚝의 지지력 평가가 가능함을 보여준다.

Keywords : CAPWAP, Cushion stiffness, Embedded piles, Signal matching, Toe quake, Ultimate capacity, WEAP

1. 서론

도심지 등의 항타공사로 인한 소음과 지반진동 등의 문제로 매입말뚝공법이 적용되고 있다(Hong et al., 2002). 이 때 말뚝의 지지력을 산정하는 방법으로 동재하시험은 대부분의 현장에서 적용가능하고 경제적이므로 많이 사용된다. 매입말뚝의 마무리 경타는 항타말뚝의 항타와 동일하게 파동방정식에 근거한 동적해석을 수행할 수 있으며(Im et al., 2001), 매입말뚝의 동재하시험에서 산정된 지지력을 정재하시험의 지지력과 비교한 결과 신뢰성이 매우 높은 것으로 나타났다(Park et al., 2004; Linkins et al., 2004).

동재하시험에서는 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용하여 항타시 측정된 힘과 속도파를 1차원파동방정식에 근거하여 현장에서 분석할 수 있으며, CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)을 이용하여 보다 정밀한 방법으로 수집된 파를 분석할 수 있다. CAPWAP은 동재하시험 시 측정된 힘과 속도 파형 중 1개를 이용하여 다른 1개를 예측할 수 있으며 예측값과 측정값이 최소가 되도록 여러 가지 변수를 조절할 수 있는 프로그램이다. WEAP(Wave은 측정된 파가 아닌, 입력조건을 변화시키며 발생시킨 예상 파를 이용한다는 점에서 CAPWAP과 차이가 있다. 이는 모두 파동방정식에 근간을 둔 프로그램이므로 WEAP의 입력조건으로 적절한 값을 사용하면 CAPWAP 결과와 유사한 WEAP 분석결과를 얻을 수 있다. 즉, 동재하시험 전에 지반조사 자료와 예상된 말뚝 길이를 적용하여 말뚝의 지지력을 예측할 수 있다. 선단부 근처의 지반 조건이 동일하더라도 선단부 하부의 지반 특성이 선단지지력에 영향을 줄 수 있으며, 매입말뚝의 경우 선단부 하부 지반의 N값의 변화에 따른 WEAP 연구는 이루어지지 않았다.

WEAP의 입력조건은 크게 해머, 쿠션, 말뚝, 지반에

관한 조건 등으로 나뉜다. 해머에 관한 조건은 해머의 종류와 해머효율, 해머낙하고 등으로 동재하시험 분석 시 가장 큰 영향을 미친다(Kim et al., 2000). 말뚝에 관한 조건으로는 말뚝의 길이, 관입 깊이, 단면적, 탄성계수, 단위중량 등을 입력할 수 있으며 쿠션에 관한 조건은 해머 쿠션과 말뚝 쿠션의 반발계수와 강성 등이다. 또한 파동방정식 이론에서의 지반 조건은 Toe quake와 Shaft quake, Toe damping, Shaft damping으로 표현된다(Cho, 2010). CAPWAP은 말뚝에 전달되어 측정된 힘과 속도 파형을 이용하므로 해머 및 쿠션 조건은 입력 시 사용되지 않으며, CAPWAP의 입력값 중 말뚝과 지반 조건은 WEAP과 거의 유사하다.

본 연구에서는 WEAP의 입력조건을 변화시키며 분석 수행 시 CAPWAP 결과에 근접한 WEAP 분석결과를 얻을 수 있다는 것에 초점을 맞추어, 실제 K 현장에서 동재하시험을 수행한 매입말뚝에 대해 CAPWAP 결과를 분석하고, 동일 말뚝에 대한 WEAP 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 WEAP의 입력조건을 변화시켜 산정된 결과와 실제 측정된 결과를 바탕으로 하는 CAPWAP 결과와 비교하였다. 또한 해머와 쿠션, 말뚝, 지반에 관한 입력조건이 WEAP 분석결과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 선단부 근처의 지반 조건이 유사하더라도 선단부 하부의 지반 조건에 따라 WEAP과 CAPWAP의 선단부 지반 조건이 달라져야 한다는 것을 보여준다.

2. 현장 동재하시험 결과

2.1 현장조건

본 연구에서는 실제 K 현장에서 매입말뚝공법으로 시공된 직경 600mm PHC 말뚝을 램 중량 5ton의 드롭 해머로 마무리 경타한 항타시(EOID: End Of Initial

Driving) 동재하시험 데이터를 분석하였다. 두 본의 말뚝을 각각 가장 가까운 지반조사 결과를 이용하여 분석하였다.

P1과 P2 근처에서 수행된 지반조사 결과 중 관입 깊이에 따른 N치 분포는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 N값이 50 이상인 경우는 측정된 N값과 이에 해당하는 관입 깊이로부터 선형 보간을 통해 산정된 값이다. P1과 P2의 관입 종료 시의 N치는 약 100 정도로 비슷하나, 서로 다른 분포를 보인다. Fig. 1의 (a)는 P1의 관입 깊이에 따른 N치 분포로서 지수 함수와 비슷한 곡선 형태이나, P2의 관입 깊이에 따른 N치 분포인 (b)는 비교적 선형 형태에 가깝다.

2.2 동재하시험 결과 분석

2.2.1 입력값

P1과 P2의 CAPWAP 입력값 중 말뚝의 단면적은

1441.99cm², 탄성계수는 37,240MPa, 단위중량은 24.01 kN/m³으로 동일하며, 이는 직경 600mm PHC 말뚝의 일반적인 제원이다. 이외의 P1과 P2의 CAPWAP 입력값을 Table 1에 나타내었다.

일반적인 지반에 시공된 직경 600mm 말뚝의 항타시 지반에 관한 조건의 표준값은 각각 Toe quake는 12mm, Shaft quake는 2mm, Toe damping factor는 0.25s/m, Shaft damping factor는 0.65s/m이다. P1과 P2의 지반에 관한 입력조건 중 Toe quake를 제외한 다른 값들은 P1과 P2 말뚝에서 서로 유사하다. Toe quake는 P1의 경우 18.197mm, P2의 경우 24.88mm로 차이가 크며, 두 값 모두 일반적인 추천값인 12mm보다 훨씬 큰 값을 갖는다.

2.2.2 결과값

P1과 P2를 CAPWAP으로 분석하여 얻은 결과값을

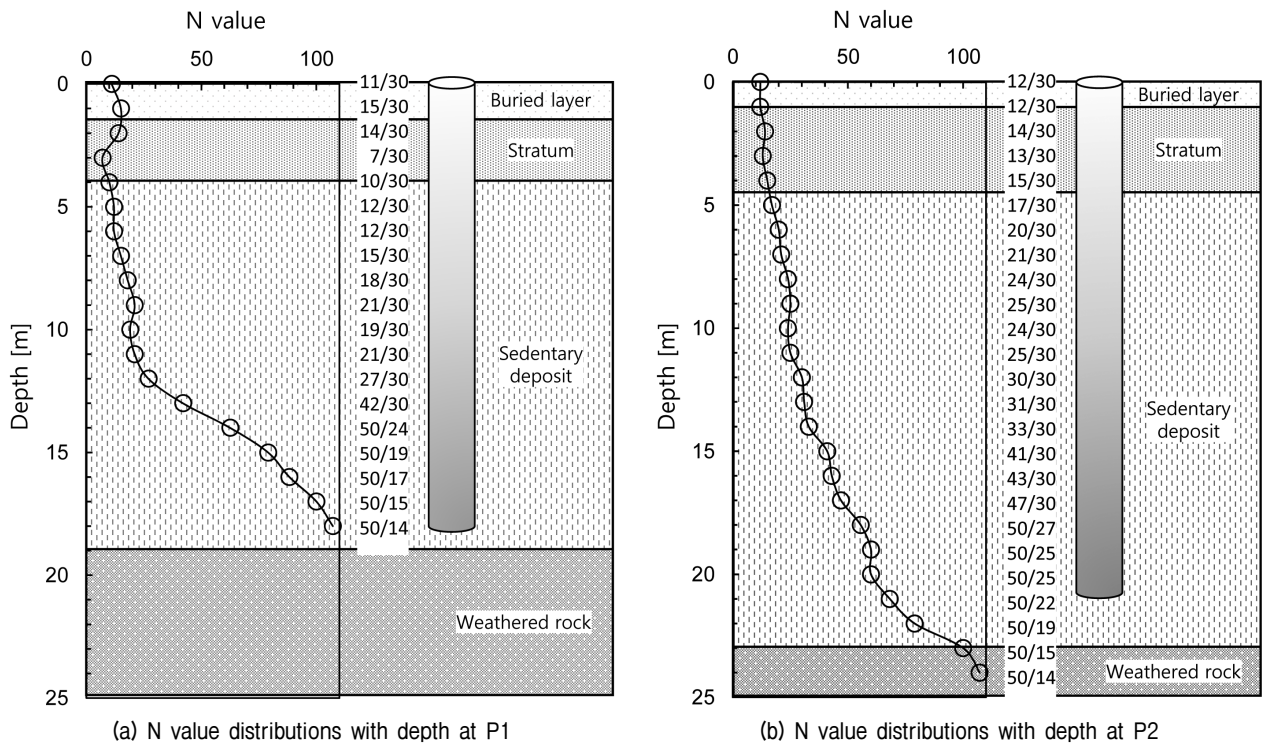


Fig. 1. Results of Subsurface investigation in K construction site

Table 1. CAPWAP input values of P1 and P2 piles

Input condition	P1	P2	CAPWAP recommended value
Pile length	18.1 m	21.0 m	-
Penetration depth	18.0 m	20.9 m	-
Toe quake	18.197 mm	24.88 mm	12 mm
Shaft quake	1.237 mm	1.262 mm	2 mm
Toe damping	0.211 s/m	0.28 s/m	0.25 s/m
Shaft damping	1.202 s/m	1.34 s/m	0.65 s/m

Table 2에 나타내었다. 결과값 중 지지력은 2mm의 Set value를 기준으로 한 극한지지력이며 압축 및 인장 응력은 말뚝 전체에서의 최대값을 의미한다.

Table 2에서 알 수 있듯이 P1과 P2의 항타에너지는 57.92kN-m으로 같지만 P1의 지지력이 3,362kN으로 P2의 지지력인 2,253kN보다 훨씬 크다. Table 1의 입력값 중 다른 값들은 거의 동일하나 Toe quake의 차이가 크므로 Toe quake가 지지력에 큰 영향을 미친다고 생각할 수 있다. 매입말뚝공법으로 시공된 P1과 P2의 지지력은 대부분 선단지지력일 것이므로 이는 타당하다고 할 수 있다. 또한 이를 Fig. 1에 나타낸 관입 깊이에 따른 N치 분포와 연관지을 수 있다. 즉, 관입 깊이에 따라 N치가 지수적으로 증가하는 P1의 경우 Toe quake가 상대적으로 작은 값을 가지며 이로 인해 큰 지지력이 기대된다. 반대로 관입 깊이에 따라 N치가 선형적으로 증가하는 형태인 P2는 Toe quake가 상대적으로 크며 이로 인해 지지력으로 비교적 작은 값이 기대된다.

2.2.3 힘-속도 그래프

현장의 동재하시험 시 해머로 타격된 말뚝의 두부에 압축파가 발생하고, 이로 인해 발생한 압축력이 말뚝을 따라 전달되며 말뚝의 상부에서부터 하부까지 압축변형이 발생하게 된다. 이 때 말뚝 두부에 부착된 변형률계와 가속도계를 이용해 항타시 발생한 압축력과 말뚝 입자의 변위속도를 구할 수 있다. 이렇게 측정된 압축력과 변위속도를 이용하여 힘-속도 그래프 파형을 얻을 수 있는데 이는 말뚝의 단면이 일정하고 지반 저항이 없다면 힘과 속도의 파형은 비례관계를 이룬다는 것에 근거한다. 즉, 실제로 측정된 힘-속도 파형 간 차이를 분석하면 관입된 말뚝의 실제 단면의 변화와 지반 저항의 위치 및 크기를 결정할 수 있다.

P1과 P2의 CAPWAP 분석결과로서 나타나는 힘-속도 그래프 파형은 Fig. 2와 같다.

Table 2. CAPWAP result values of P1 and P2 piles

Result condition	P1	P2
Total bearing capacity	3,362 kN	2,253 kN
End bearing capacity	3,259 kN	2,204 kN
Skin friction capacity	103 kN	49 kN
Driven energy	57.92 kN-m	57.92 kN-m
Maximum compressive stress	26.3 MPa	27.1 MPa
Maximum tensile stress	5.2 MPa	5.7 MPa

3. 파동방정식 정밀 분석

본 연구에서는 WEAP의 입력조건으로 적절한 값을 사용한다면 CAPWAP 결과와 유사한 WEAP 분석결과를 얻을 수 있다는 점에 초점을 맞추어 K현장의 P1과 P2의 입력조건을 변화시키며 WEAP 분석을 수행하였다. 이 때 입력값으로 해머의 종류는 램 중량이 5ton인 드롭 해머를 직접 모델링하여 사용하였으며 말뚝과 지반에 관한 조건은 각각 실제 말뚝의 물성치와 CAPWAP 분석 시 입력값인 Table 1과 동일한 값을 사용하였다..

3.1 Signal Matching

2.2.2와 2.2.3의 CAPWAP 분석결과와 유사한 결과를 얻기 위한 WEAP 분석을 수행하였다. 해머효율은 일반적인 드롭 해머의 효율인 70%로 입력하였고 해머 및 말뚝 쿠션의 강성을 각각 100, 200, ... 2,000kN/mm, 해머 낙하고를 2.0m, 2.1m, ... 4.0m로 변화시키며 WEAP 분석을 수행하였다. 이 때 CAPWAP과 WEAP의 지지력과 에너지 결과가 동일하면서 WEAP의 인장 및 압축 응력 결과값이 CAPWAP의 인장 및 압축 응력 결과값의 오차범위 10% 이내를 만족하는 해머 및 말뚝 쿠션의

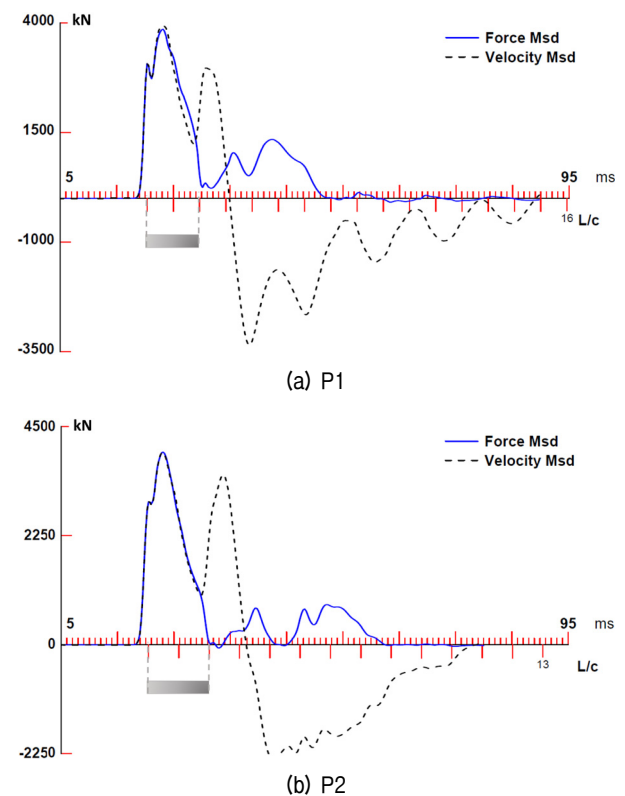
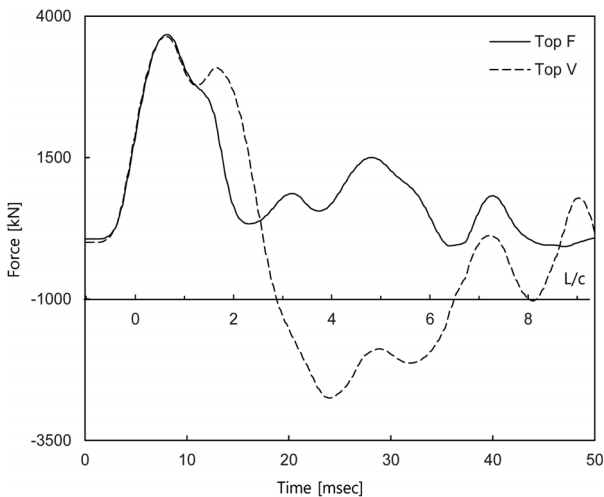


Fig. 2. CAPWAP force-velocity graph

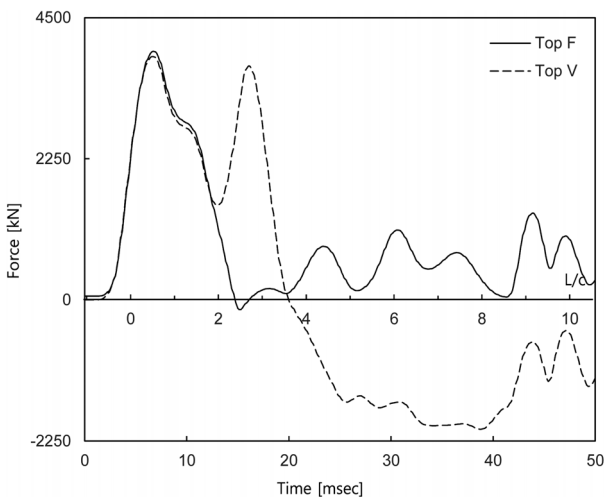
강성과 해머낙하고의 순서쌍을 구하였다.

위 분석을 수행하였을 때 P1과 P2 모두 WEAP의 입력값으로 해머 및 말뚝 쿠션의 강성을 500kN/mm 이한 조합을 사용한 경우, 해머낙하고를 조절하여 CAPWAP 분석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 모든 경우의 WEAP 힘-속도 그래프 파형을 분석했을 때 CAPWAP의 힘-속도 그래프 파형과 가장 가깝게 나타나는 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

WEAP의 힘-속도 그래프 파형이 CAPWAP의 힘-속도 그래프 파형에 가장 가깝게 나타나게 하는 입력값은 P1의 경우는 해머 쿠션 강성이 200kN/mm, 말뚝 쿠션 강성이 400kN, 해머낙하고가 2.7m이며 P2의 경우는 해머 쿠션 강성이 300kN/mm, 말뚝 쿠션 강성이 600kN/mm, 해머낙하고가 2.4m이다.



(a) P1

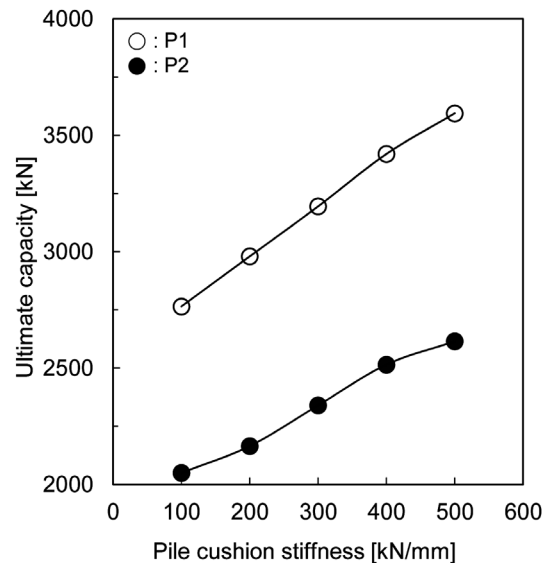


(b) P2

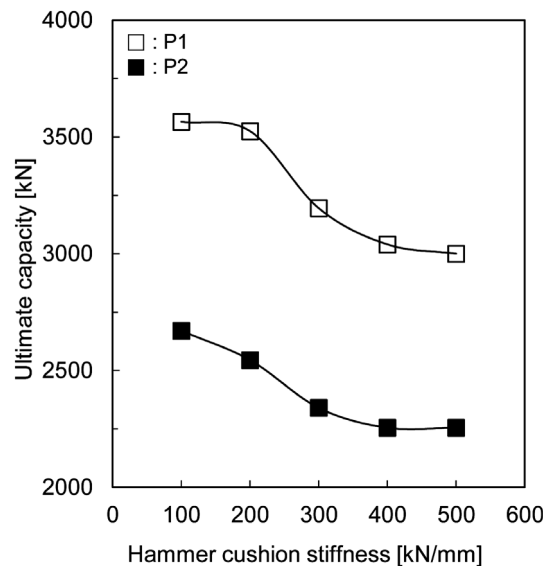
Fig. 3. WEAP force-velocity graph

3.2 쿠션 조건의 영향

PHC 말뚝 향타 시 사용되는 쿠션은 주로 합판 소재를 여러 장 덧댄 것을 말뚝 단면적에 맞추어 자른 형태이며 해머의 램과 말뚝 캡 사이에 놓이는 것을 해머 쿠션, 말뚝 캡과 말뚝 사이에 놓이는 것을 말뚝 쿠션이라고 일컫는다. 해머 및 말뚝 쿠션을 반영하는 입력조건으로는 반발계수와 강성이 있다. 반발계수는 재료 고유의 물성치이며 합판의 반발계수는 0.5이다. 쿠션의 강성은 쿠션의 면적, 탄성계수, 두께의 조합으로 나타내지는데



(a) Changes of ultimate capacity to the variation of pile cushion stiffness (in case of 300 kN/mm hammer cushion stiffness)



(b) Changes of ultimate capacity to the variation of hammer cushion stiffness (in case of 300 kN/mm pile cushion stiffness)

Fig. 4. Changes of ultimate capacity to the variation of cushion stiffness

이는 식 (1)과 같다.

$$k = \frac{A \cdot E}{t} \quad (1)$$

여기서 k는 쿠션의 강성, A는 면적, E는 탄성계수, t는 두께이며 단위로는 주로 kN/mm가 사용된다(Heo, 2007).

합판 소재의 쿠션은 항타 시 지속적으로 재질이 변하는데 그 중 특히 두께가 현저하게 감소하기 때문에 강성이 계속 증가하게 된다. 이처럼 쿠션의 강성은 매 타격마다 변하며 실제 현장에서 쿠션의 강성값은 거의 측정되거나 기록되지 않으므로 CAPWAP 및 WEAP 분석 시 정확한 값을 입력하기 어렵다. 이 때문에 쿠션 강성의 입력값은 통상적인 값의 25% 이내의 값들을 이용하여 계산된 값들을 적용하여 결과를 비교해볼 수 밖에 없다(Cho, 2010).

Signal matching을 수행하며 쿠션 강성이 지지력과 에너지, 압축 및 인장 응력 등의 분석결과에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 쿠션 강성이 지지력에 미치는 영향을 알아보기 위해 P1과 P2의 해머 쿠션 강성을 300kN/mm로 고정시키고 말뚝 쿠션 강성을 100kN/mm에서 500kN/mm까지 변화시킨 경우와 말뚝 쿠션 강성을 300kN/mm로 고정시키고 해머 쿠션 강성을 100kN/mm에서 500kN/mm까지 변화시킨 경우를 분석하였으며 그 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 때 해머효율은 70%, 해머낙하고는 3m로 입력하였다.

P1과 P2의 경우 모두 해머 쿠션 강성이 일정할 때 말뚝 쿠션 강성을 증가시키면 지지력이 증가하고, 말뚝 쿠션 강성이 일정할 때 해머 쿠션 강성을 증가시키면 지지력이 감소하는 경향을 보인다.

3.3 해머 조건의 영향

입력조건 중 해머에 관한 조건은 동재하시험 분석결과에 가장 큰 영향을 미치며, 해머의 종류를 선택하고 해머효율과 해머낙하고를 입력함으로써 고려할 수 있다. 해머의 종류는 유압 해머, 디젤 해머, 드롭 해머 등이며, CAPWAP과 WEAP에서는 기성 해머 모델을 선택하여 분석할 수도 있지만 사용자가 직접 해머를 모델링하여 사용하는 것 또한 가능하다.

모든 해머 항타는 램이 낙하하며 위치에너지에서 전

환된 운동에너지가 말뚝을 타격하는 과정으로 진행된다. 이 때 램의 에너지 손실을 고려하는 인자로서 해머효율이 사용되고, 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\text{해머효율} = \frac{\text{운동에너지}}{\text{위치에너지}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{m \cdot g \cdot H} \quad (2)$$

여기서 m은 램의 질량, g는 중력 가속도, H는 해머낙하고, v는 타격 직전의 램 속도이다. 해머효율은 해머의 종류, 사용되는 쿠션의 특성, 말뚝의 재료 등에 영향을 받으며 보통 유압해머의 경우 90%, 디젤해머의 경우 70%, 드롭해머의 경우 50~70% 정도로 알려져 있다(김종대 등, 2000).

해머낙하고는 항타시 램의 낙하 높이를 말하며, 실제 말뚝 관입을 위한 항타 시의 해머낙하고는 보통 1.5m 이내이나 동재하시험 분석 시에는 지지력을 확인하기 위해 3~4m 이상 높게 낙하시키는 경우도 있다.

Signal matching을 수행하며 해머 및 말뚝 쿠션 강성이 500kN/mm 이하인 조합을 사용한다면 CAPWAP 분석결과와 유사한 WEAP 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이 조합 중 해머 및 말뚝 쿠션 강성을 모두 300kN/mm인 경우 해머효율을 50%, 70%, 해머낙하고를 2m, 3m로 변화시키며 지지력과 Set value 간의 관계를 분석하였다. 해머낙하고가 2m일 때 해머효율을 50%, 70%로 변화시킨 분석결과를 Fig. 5, 해머효율이 70%일 때 해머낙하고가 2m, 3m로 변화시킨 분석결과를 Fig. 6에

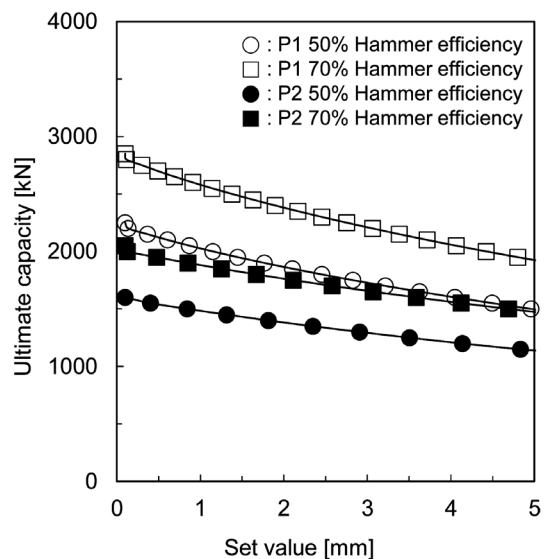


Fig. 5. Changes of ultimate capacity to the variation of set value in case of 2 m stroke

각각 도시하였다.

각각의 경우 해머효율과 해머낙하고가 증가할수록 확인되는 지지력이 증가하는 것을 알 수 있다. 해머효율과 해머낙하고가 증가하면 항타에너지가 증가하므로 지지력이 증가하는 것은 타당하다. Fig. 5, 6의 분석결과 중 Set value가 2mm일 때의 지지력을 나타낸 것은 Fig. 7과 같다.

또한 Fig. 5~7을 보면 해머에 관한 조건이 동일할 때 같은 Set value에서 확인되는 지지력은 P1이 P2보다 큰 것을 알 수 있다.

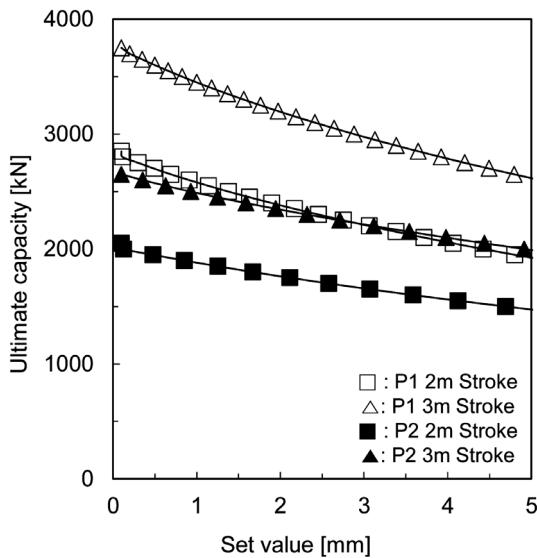


Fig. 6. Changes of ultimate capacity to the variation of set value in case of 70% hammer efficiency

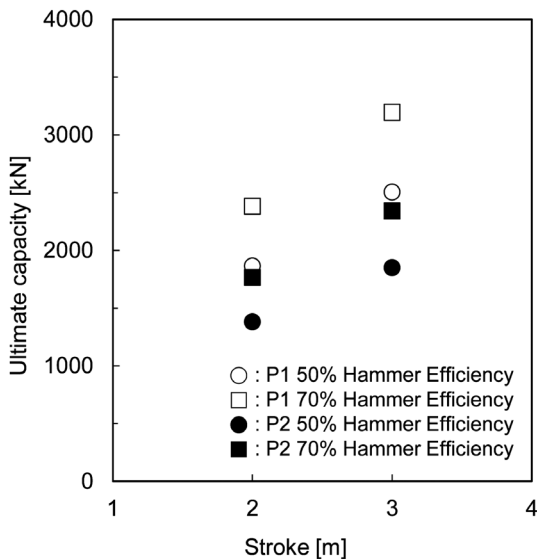


Fig. 7. Values of bearing capacity in case of 2 mm set value

3.4 말뚝 조건의 영향

말뚝에 관한 입력조건으로는 말뚝의 길이, 관입 깊이, 단면적, 탄성계수, 단위중량 등이 있으며, 매입말뚝공법의 경우 기성 PHC 말뚝이 사용되므로 주로 표준 규격 또는 말뚝 제조사에서 제공하는 제원을 사용한다. 이 때 말뚝을 균일한 재료로 이루어진 하나의 원기둥 형태로 가정하여 분석할 수도 있지만, 말뚝을 여러 부분으로 나누어 각 부분의 입력조건을 다르게 설정하여 분석할 수도 있다.

Signal matching 분석결과를 보면, Fig. 2의 CAPWAP 힘-속도 그래프 파형과 Fig. 3의 WEAP 힘-속도 그래프 파형이 완벽하게 일치하지는 않는다. 그 이유는 실제 현장의 동재하시험 시험 시 파의 측정 혹은 CAPWAP 분석이 제대로 이루어지지 않았거나, 사용자에 의해 입력된 해머와 쿠션, 지반에 관한 입력조건이 실제 항타를 잘 반영하지 않았을 수도 있다. 이 이외에 CAPWAP과 WEAP의 분석결과에 차이가 발생하는 가장 큰 이유는 실제 말뚝은 프로그램에서 가정한 것처럼 단면적과 탄성계수, 단위중량 등이 균일하지 않기 때문이다. 만약 말뚝 각 부분의 단면적과 탄성계수, 단위중량 등의 물성치를 정확하게 알 수 있다면 보다 더 정밀한 분석이 가능할 것이며 보다 더 정확한 분석결과를 얻을 수 있을 것이다.

3.5 지반 조건의 영향

CAPWAP과 WEAP이 근거로 하는 파동방정식의 수치해석 모델에서 지반의 저항력은 정적저항과 동적저항 두 가지로 구성된다. 지반의 정적저항에 대한 모델은 탄성에서 소성까지 변형되는 스프링으로 나타내지는데 탄성변위까지의 거리를 지반의 탄성변형량이라고 정의하며 이는 곧 입력조건의 Quake를 의미한다. 또한 동적저항에 대한 모델은 동적지지력이 속도에 선형으로 비례하는 대쉬포트로 구성되며 이 기울기를 Damping factor라 한다(Linkins et al., 1988). Quake와 Damping factor의 개념이 선단부와 주변 각각에 적용되며, 이에 따라 지반에 관한 입력조건은 Toe quake, Shaft quake, Toe damping factor, Shaft damping factor 네 가지이다.

Fig. 4~7에서 알 수 있듯이 해머, 쿠션, 말뚝에 관한 입력조건이 동일할 때 항상 P1이 P2보다 지지력이 크다. P1과 P2의 가장 큰 차이점은 지반조건, 그 중에서도

Toe quake이다. 2.3.2에 언급하였듯이 관입 깊이에 따른 N치 분포의 차이 때문에 Toe quake가 달라지며 이로 인해 확인되는 지지력 또한 다르다고 생각된다. 이를 검증하기 위해 P1과 P2의 입력조건 중 Toe quake만 서로 바꾸어 WEAP 분석을 수행하였다. P1의 Toe quake를 P2의 Toe quake인 24.88mm로 바꾸어 분석을 수행한 결과 지지력이 이전의 3,362N에서 2,600kN으로 감소하였다. 또한 P2의 Toe quake를 P1의 18.197mm로 바꾸어 분석을 수행한 결과 지지력은 2,253kN에서 2,810kN으로 증가하였다. 즉, 관입 깊이에 따른 N치 분포 형태에 따라 Toe quake가 달라지며, 이로 인해 확인되는 지지력이 다르다는 주장은 타당하다.

Toe quake가 지지력에 영향을 미친다는 주장을 뒷받침하기 위해 P1과 P2의 Toe quake를 각각 5mm에서 30mm까지 변화시키며 WEAP 분석을 수행하고, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에 나타내었듯이 Toe quake가 5mm에서 30mm까지 증가할 때 P1과 P2의 지지력은 각각 4,440kN에서 1,940kN, 4,029kN에서 1,689kN으로 감소하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 실제 K 현장에서 매입말뚝공법으로 시공된 직경 600mm PHC 말뚝을 램 중량 5ton의 드롭 해머로 마무리 경타한 초기항타시(EOID) 측정된 동재하시험 데이터를 분석하였으며 각 말뚝의 인접한 지반 조사 결과 또한 고려하였다.

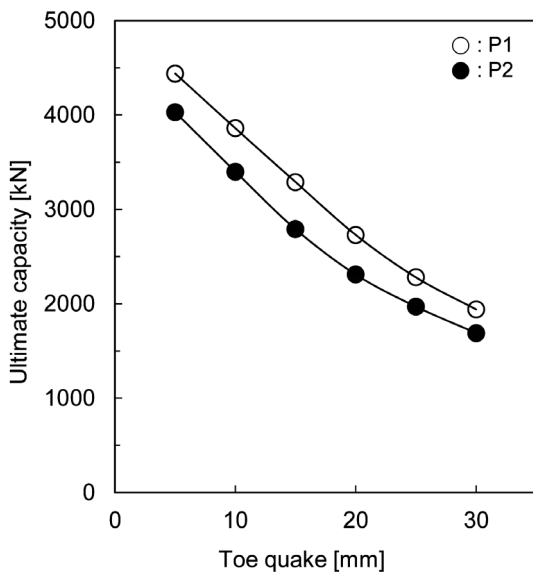


Fig. 8. Changes of ultimate capacity to the variation of toe quake

분석 과정으로는 실제 동재하시험 시 측정된 데이터를 분석한 CAPWAP의 입력값과 결과값, 힘-속도 그래프 파형을 이용하였고, WEAP의 입력조건을 변화시키며 CAPWAP 결과와 유사한 WEAP 결과를 얻기 위한 분석을 수행하였다. WEAP 입력조건은 해머, 쿠션, 말뚝, 지반에 관한 조건 등으로 나뉘며 본 연구에서는 각 입력조건의 영향을 알아보기 위해 여러 입력조건을 변화시키며 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 제시된 결론은 다음과 같다.

- (1) WEAP은 측정된 파가 아닌, 입력조건을 변화시키며 발생시킨 예상 파를 이용하는 프로그램이라는 점에서 CAPWAP과 차이가 있지만 WEAP의 입력조건으로 적절한 값을 사용한다면 실제 측정된 파를 분석하는 CAPWAP 분석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 전체지지력 중 선단지지력이 대부분인 시멘트풀 경화전 매입말뚝의 경우, 관입 종료 시의 최종 도달 N치가 비슷하더라도 그 분포 형태에 따라 지반 조건 중 Toe quake 값이 달라지며, 이로 인해 지지력이 영향을 받는다. 관입 깊이에 따라 N치가 지수적으로 증가하는 경우, Toe quake가 비교적 작은 값을 갖고 이로 인해 큰 지지력이 기대되나 관입 깊이에 따라 N치가 선형적으로 증가하면 Toe quake가 큰 값을 갖으며 지지력은 작게 나타난다.
- (3) PHC 말뚝 항타 시 사용되는 합판 소재의 쿠션의 강성은 실제 현장에서 거의 측정되거나 기록되지 않고 항타 시 쿠션의 강성이 변하기 때문에 WEAP 분석을 수행할 때 정확한 값을 입력하기 어렵다. 본 연구에서는 직경 600mm PHC 말뚝을 5ton 해머로 항타하는 경우의 CAPWAP과 WEAP 간 Signal matching을 통해 해머 및 말뚝 쿠션의 강성을 500kN/mm 이하인 조합을 사용하는 것이 적절한 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구는 직경 600mm PHC 말뚝을 이용한 매입말뚝 경우에 제한되며 직경이 다른 말뚝의 경우 본 연구와 유사한 연구가 필요하다.

참고문헌 (References)

1. Cho, C. W. (2010), "Piling Engineering Practice", *Engineer Book*, Seoul, 744p.
2. Choi, D.W., Han, B. K., Seo, Y. H., and Cho, S. H. (2002), "A

- Study on the Improvement of Bearing Capacity Prediction Equation for Auger-drilled Piling”, *2002 Fall Geotechnical Engineering*, pp.382-389.
3. Han, J. T., Yoo, M. T., Yang, E. K., and Kim, M. M. (2010), “Evaluation of Particle Size Effect on Dynamic Behavior of Soil-Pile System”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.26, No.7, pp.49-58.
 4. Heo, J. H. (2007), “The Study on Measurement of Noise from SIP Steel Pipe Pile and Energy Transfer Rate in Association with the Pile Cushion Material Using a Dynamic Load Test”, Thesis for Master’s Degree at Chonnam National University, 66p.
 5. Hong, W. P. and Yun, J. M. (2013), “The Lateral Load Capacity of Bored-precast Pile Depending on Injecting Ratio of Cement Milk in Sand”, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.12, No.4, pp.99-107.
 6. Hong, W. P. and Chai, S. G. (2007), “Estimation of Frictional Capacity of SDA Augered Piles in Various Ground”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.4, pp.279-292.
 7. Im, H. S., Park, Y. B., Park, J. B., Kim, J. S., Han, K. R., and Kim, D. H. (2001), “The Proposal of Quality Improvement Guide and Bearing Capacity Estimation of SIP”, Housing & Urban Research Institute, Daejeon, 154p.
 8. Jung, D. W. (2000), “Evaluation of Driving System Efficiency and Driven Pile Capacity Based on Dynamic Pile Load Tests”, *Journal of Korea Polytechnic University*, Vol.5, pp.277-284.
 9. Kim, B. S. (1997), “A Study on the Pile/Soil Correlation of Underground”, *Journal of the Korea National University of Transportation*, Vol.32, No.2, pp.453-462.
 10. Kim, B. T., Lee, S. U., and Kim, Y. S. (1998), “Model Testing on the Behavior of Laterally Loaded Pile in NC Clay Soils”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.14, No.5, pp.39-52.
 11. Kim, J. D., Hong, J. K., Park, Y. B., Park, J. B., and Song, Y. (1998), “The Manual for Pile Load Test and Analysis of Test Result”, Housing & Urban Research Institute, Daejeon, 175p.
 12. Kim, J. D., Im, H. S., Park, Y. B., Park, J. B., and Lee, W. J. (2000), “Determination of the Optimized Driving Force and End Time of Driving for Pile Construction”, Housing & Urban Research Institute, Daejeon, 237p.
 13. Kim, J. Y., Lee, C. K., and Heo, Y. (1999), “Comparative Analysis of Bearing Capacity in Driven and Embedded Piles”, *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, Vol.13, No.1, pp.129-140.
 14. Kwon, H. J. and Moon, B. S. (1996), “Estimation of the Bearing Capacity of Pile by Static Load Test and Dynamic Load Test in Sangmoo District of Kwangju City”, *Journal of Industrial Technology Research*, Vol.7, pp.17-37.
 15. Lee, C. H., Chung, S. G., and Kim, S. R. (2009), “Applicability of CPT-based Toe Bearing Capacity of PHC Driven Piles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.25, No.12, pp.107-118.
 16. Lee, J. S., Chang, Y. C., and Kim, Y. K. (2002), “A Study on the Allowable Bearing Capacity of Pile by Driving Formulas”, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol.26, No.1, pp.106-111.
 17. Lee, J. B. (2011), “A Consideration of Theoretical Value and Measured Value about a Formula in Statics of Bored Pile Method”, Thesis for Master’s Degree at Kwandong University, 44p.
 18. Lee, M. W. and Hong, H. S. (2006), “A Report on the Problems Associated with PDA Testing in Korea”, *2006 Spring Geotechnical Engineering Conference*, pp.1259-1268.
 19. Lee, W. J., Yoon, K. H., Suk, J. S., and Lee, W. J. (1998), “Evaluation of Bearing Capacity of Piles in Sand Using Pile Driving Analyzer”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.13, No.5, pp.145-154.
 20. Linkins, G. and Rausche, F. (2004), “Correlation of CAPWAP with Static Load Tests”, *Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles*, pp. 153-165.
 21. Paik, K. and Salgado, R. (2003), “Determination of Bearing Capacity of Open-Ended in Sand”, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, Issue.1, pp.46-57.
 22. Paik, K., Salgado, R., Lee, J., and Kim, B. (2003), “Behavior of Open- and Closed-Ended Piles Driven into Sands”, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, Issue.4, pp.296-306.
 23. Park, J. B., Kim, J. S., Lim, H. S., and Park, Y. B. (2004), “Estimation of Bearing Capacity of SIP Pile by Static & Dynamic Load Test”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2004, No.10, pp.2356-2361.
 24. Randolph, M. F., Dolwin, J., and Beck, R. (1994), “Design of Driven Piles in Sand”, *Geotechnique*, Vol.44, No.3, pp.427-448.
 25. Seo, Y. H., Cho, S. H., Choi, D. W., and Han, B. K. (2003), “A Study on the Optimum Design Guide for Auger-drilled Piling”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.51, No.7, pp. 8~16.
 26. Shim, T. S., Joo, S. W., and Choi, S. Y. (1999), “A Study on a Evaluation of Pile Bearing Capacity Using PDA Test”, *Journal of Construction Technology Research*, Vol.19, No.2, pp.1-21.
 27. Yoon, J. Y. (2003), “Evaluation of Ultimate Bearing Capacity on Granular Compaction Pile Considering Varying Stresses in a Ground”, Thesis for Master’s Degree at Hongik University, 78p.

Received : June 25th, 2015

Revised : October 7th, 2015

Accepted : November 10th, 2015