

## 대구경 강관말뚝의 항타시 동적 거동

### Dynamic Behavior of Large Diameter Steel Pipe Piles during Driving

이 영 남\*<sup>1</sup> Lee, Young-Nam

이 중 섭\*<sup>2</sup> Lee, Jong-Sub

#### Abstract

For the construction of 4.8 km long Multi-Purpose Jamuna Bridge in Bangladesh, 2 or 3 large diameter open-ended steel pipe piles were used for the foundation of piers. A total of 123 piles were driven for 50 piers and 2 test piles from the river bed through the normally-consolidated upper sand layer and rested on top of gravel layer. Two types of piles, having 3.15 or 2.50m diameter and variable wall thickness in the range of 40 to 60mm, were driven to the depths of 69 to 74m with the rake of 6:1 by connecting 2 or 3 pieces of short piles. Dynamic pile tests were performed on 24 selected piles during pile driving and soil plug length inside the pile was also measured after driving of each short section.

These piles were plugged with soil to, though slightly affected by pile diameters, about 75% of total length of pile driven. Active plug at the tip of pile contributed substantial amount of inner skin friction to the total capacity. Piles soon after driving showed a skin-friction dominant pile behaviour, that is, 90% of total capacity being developed by skin resistance. Quake values and Smith damping factors were almost constant regardless of pile diameters. This result reflects the influence of uniform soil condition at the site.

#### 요 지

방글라데시의 자부나 강을 가로지르는 길이 4.8km 교량의 교각기초에 대구경 개단 강관말뚝 2본 또는 3본이 사용되었다. 총 50개의 교각과 시험용 말뚝 2본을 포함한 123본의 말뚝이 강 하저에서 정규압밀된 모래층을 지나 자갈층 위까지 항타하여 설치되었다. 두께 40mm 내지 60mm의 변단면을 갖는 직경 3.15m와 2.50m의 짧은 말뚝 2, 3개를 연결하여 69m에서 74m 깊이까지 6:1의 경사로 항타하여 시공하였다. 전체 123본의 말뚝에 대하여 항타후 관내토 길이를 측정하였고, 이 중 24본의 말뚝들에 대해서는 항타시 동적시험을 수행하였다.

말뚝 항타완료 후 측정된 결과에 의하면, 시공한 말뚝 모두에 대하여 그 직경에 따라 약간 차이는 있지만 관입깊이의 75% 정도가 폐색된 것으로 나타났으며, 선단부 근처에서는 주동 관내토(Active Plug)가 주변마찰력 발현에 크게 기여한 것으로 나타났다. 시험한 모든 말뚝들은 약 90% 정도의 지지력이 주변마찰력에 기인하는 주변마찰지지형 말뚝으로 나타났다. 현장 모래지반에서의 탄성변형량(Quake) 값과 감쇠 계수(Smith Damping) 값은 직경에 상관없이 일정하게 나타났는데, 이는 주변 지반의 균질함이 잘 반영된 것으로 판단되었다.

**Keywords :** Dynamic pile capacity, Skin friction, Soil plug, Quake, Damping

\*1 정희원, 현대전설(주) 기술연구소, 소장

\*2 정희원, (주)중앙기술, 부장

## 1. 서론

지지층이 매우 깊은 위치에 존재하는 지반에 장대교량을 건설하는 경우에 교각기초로써 대구경 강관말뚝을 사용하는 경향이 증가되고 있다. 본 논문에서는 지지층이 상당히 깊은 지반에 교량을 건설하기 위해 강관 말뚝을 향타, 시공하면서 조사한 강관말뚝의 향타거동을 분석하여, 그 결과를 보고하였다. 운모 성분을 다량 함유한 모래지반에 타입된 말뚝의 직경은 3.15m와 2.50m이었으며, 관입깊이는 69~74m로써 6:1의 수직대수평의 경사로 총 123본의 말뚝을 향타하여 시공하였다. 말뚝 설계와 시공에 대한 간략한 소개를 한 후, 동재하시험 결과와 향타완료후 측정된 관내 토 깊이를 분석한 결과를 보고하였다. 향타시 관내토의 거동과 최종 관입깊이에서 지지력 거동과 모래지반의 탄성변형량(Quake) 값과 감쇠 계수(Smith Damping) 값을 검토하여 보고하였다.

## 2. 공사 개요 및 지반 조건

본 공사는 방글라데시 수도 다카에서 북서쪽으로 140km 떨어진 지점에 위치한 자무나 강(Jamuna River; 유량면에서 세계 5위의 강; 강폭, 평상시 5km, 홍수시 15 km; 해수면 기준선 PWD(+6.5m)을 가로지르는 교량을 건설하는 공사로써 이 교량에는 폭 18.5m, 길이 4,800m의 왕복 4차선 도로와 단선 철도, 고압 송전선 및 고압 가스 파이프가 설치되었다. 교량경간은 약 100m로써 총 50개의 교각이 건설되었으며, 각 교각 하부에는 직경 3.15m와 2.50m의 대구경 개단 강관말뚝들이 기초로 사용되었다(이영남, 이종섭, 1997).

본 현장의 지반특성을 파악하기 위해 시료채취와 표준 관입시험을 위한 보링, 말뚝의 지지력 산정을 위한 콘관입시험, 지반의 전단특성 및 상대밀도 파악을 위한 콘프레셔미터 시험, 전단과 속도측정을 위한 SCPT(Seismic Cone Penetration Test)를 비롯한 다수의 현장시험이 실시되었다. 또한 투수시험, 압밀시험, 삼축시험, 링 전단시험, 운모 및 세립자 함유량, X-레이 회절시험 등의 각종 실내시험이 수행되었다. 지반조사 결과에 의하면, 말뚝이 관입된 지층의 토질특성은 표 1과 같으며, 대표적인 콘관입시험 결과는 그림 1과 같다. 지반구성은 실트층, 상부 모래층, 자갈층 그리고 하부 모래층으로 분류할 수 있으며, 모든 말뚝은 실트층을 준설한 후(PWD 0.0m : PWD- 해수면 기준) 상부 모래층에서부터 향타로 시공하였으며 실트층 하부의 세 지층의 지반특성을 정리하면 다음과 같았다(Fugro, 1996).

### (1) 상부 모래층

운모질의 정규압밀 모래 지반으로써 거의 균일한 층을 이루며 PWD(-)68m까지 이어진다. 이 모래층의 가장 큰 특징은 일반적인 석영질 모래와 달리 운모의 함유량이 많으며, 세립분 함유량이 10% 미만이고, 입자크기가 거의 균등하다는 것이다. 상대밀도는 상부에서 느슨한 상태를 나타내며, 하부로 내려가면서 중간정도의 상대밀도를 나타낸다. 콘관입시험시 과잉간극수압은 그림 1에서와 같이 정수압상태를 나타내었다.

### (2) 자갈층

주로 자갈로 구성되어 있으며 상부 모래층 하부인 PWD(-)68m 근처에서 나타난다. 상대밀도는 조밀한 상태이며 이 층의 두께는 약 7m 정도로써 자갈의 크기는 최고 60mm까지 존재한다. 본 공사에서는 이 층을 지지층으로 간주하였으며, 교각이 시공될 모든 위치에서 콘관입시험을 수행하여 자갈층의 정확한 깊이를 확인한 후 말뚝의 관입깊이를 결정하였다.

### (3) 하부 모래층

운모질 모래로 구성되어 있으며 PWD(-)75m 근처에서부터 나타나며, 최대 지반조사 깊이인 약 PWD(-)110m까지도 이 층으로 구성되어 있다. 상대밀도는 조밀한 상태이다. 지질학적 및 지반공학적 관점에서 상부모래층과 다른 특징을 보이며 특히 콘관입시험시 높은 부 과잉간극수압이 발생하기도 하였다.

표 1. JAMUNA Bridge 현장 토질 특성

지 층		상 부 모래층	자갈층	하 부 모래층
광 물 조성비 (체적비)	장석(%)	50~65	55~65	35~65
	석영(%)	10~20	15~20	10~20
	운모(%)	5~15	10	5~15
입 자 크 기	세립분(%)	2~10	0~10	8~20
	D <sub>10</sub> (mm)	0.06 ~ 0.20	0.20 ~ 5.00	0.02 ~ 0.06
	D <sub>50</sub> (mm)	0.20 ~ 0.40	0.50 ~ 10.0	0.08 ~ 0.40
균등계수		2~4	>5	2~8
통일 분류법		SP~SM	GP~GM	SP~SM
상대밀도(%)		50~55	>70	>70

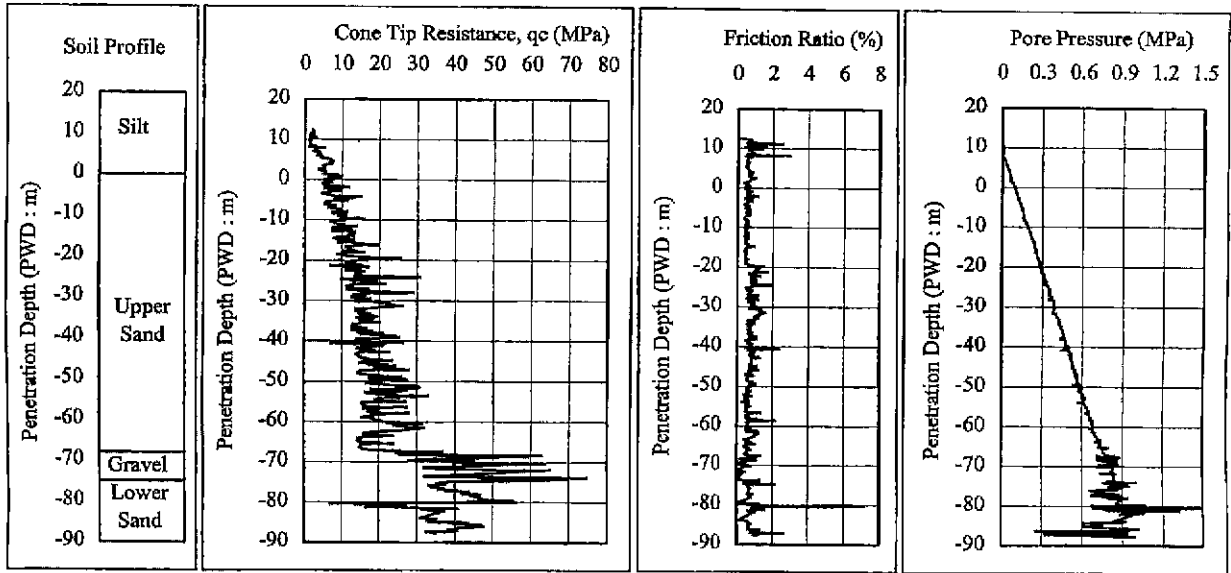


그림 1. JAMUNA 현장 콘관입저항치 (C101S)

### 3. 강관말뚝 설계

#### (1) 말뚝 직경 및 설계지지력

교량에는 총 50개의 교각이 100m 간격으로 시공되었으며, 그중 29개의 교각은 직경 3.15m인 말뚝 2본으로 지지되었으며, 21개의 교각은 직경 2.50m인 말뚝 3본으로 지지되었다. 교량공사에 사용된 말뚝은 시험용 말뚝 2본을 포함하여 총 123본으로, 직경 3.15m인 말뚝 60본과 직경 2.50m인 말뚝 63본이 사용되었다. 말뚝의 설계지지력(축방향)은 상부구조물의 자중, 활하중, 지진하중, 선박의 충돌 및 홍수시 유속으로 인한 하중과 풍하중으로 인한 횡하중을 고려하여 직경 3.15m 말뚝 1본의 경우 4,400톤(44MN), 직경 2.50m 말뚝의 경우 3,000톤(30MN)으로 설계되었다. 모든 말뚝은 횡방향 저항력을 높이기 위해 6(V):1(H) 비율로 기울어진 경사말뚝으로 설계되었다.

#### (2) 소규모 말뚝재하시험

말뚝의 설계지지력(최대 4,400톤)이 매우 큰 관계로 정재하시험으로 말뚝의 항복하중이나 극한하중을 산정하는 것이 현실적으로 불가능하여 콘관입시험결과와 직경 760mm 말뚝에 대해 수행한 실험결과와의 상관관계를 이용하여 관입 깊이를 결정하였다. 변형율계를 설치한 총 3본의 소구경 말뚝에 대하여 소규모 말뚝재하시험(RSPLT: Reduced Scale Pile Load Test)을 수행하여, 단위지지력 성분들과 콘관입 저항값과의 상관관계를 규명한 후, 이를 이용하여 말뚝의

설계 관입 깊이를 결정하였다. 말뚝재하시험에 사용된 말뚝의 외경은 760mm이고 두께가 38mm인 강관말뚝이며, 말뚝의 관입 깊이는 2본은 44m이었으며 이중 1본은 길이를 더 연장하여 78.3m까지 관입하였다. 시험 말뚝들은 수직으로 향타되어 시공되었으며 말뚝향타에는 MH72B 디젤해머가 사용되었다. 변형율계를 말뚝에 축방향과 접선방향으로 부착하여 정재하시험시 정확한 하중전이특성을 파악하였으며, 정재하시험은 향타후 3~10일 사이에 수행되었다. 정재하시험법은 변위량을 조절하는 CRP(Constant Rate of Penetration)법에 의해 이루어졌으며 소규모 말뚝재하시험에 관한 자세한 내용은 추후 발표예정이다.

말뚝재하시험에서 산정된 콘관입저항값과 단위 외주면 마찰력과의 관계는 Lehane & Jardine(1994)가 제안한 식 (1)을 이용하였으며, 단위 선단지지력은 선단변위량이 0.1D(여기서 D는 말뚝직경)에 대해 식 (2)를 사용하였다 (Fugro, 1995).

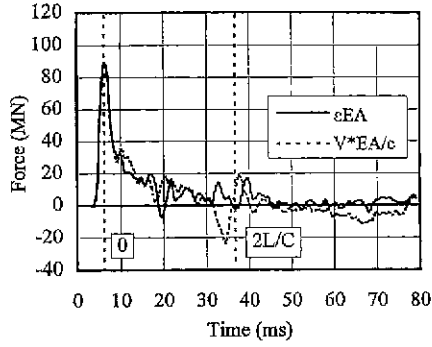
$$\text{단위 주면마찰력} : f_s = \alpha q_{c,av} \leq 250 \text{ kPa} \quad (1)$$

$$\text{단위 선단지지력} : q_e = 0.6 q_{c,ts} \leq 15 \text{ MPa} \quad (2)$$

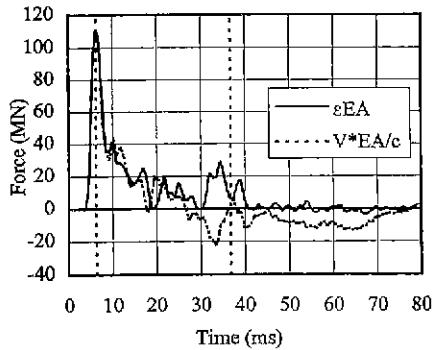
여기서,

$$\alpha = 0.007 \left( \frac{H}{D} \right)^{-0.5}$$

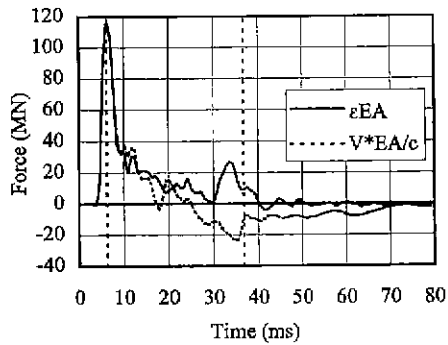
H: 말뚝내 한 지점에서 선단부까지의 거리



(a) Penetration Depth . 30m, RMX : 30MN



(b) Penetration Depth . 50m, RMX : 50MN



(c) Penetration Depth : 70m, RMX . 70MN

그림 2. 항타시 측정된 힘과 속도의 파형

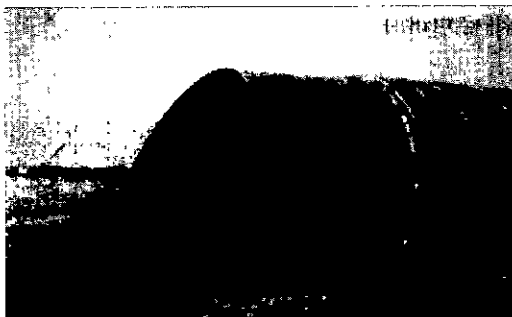


사진 1. Stabbing Guide

D : 말뚝직경

$q_{c,av}$ ,  $q_{c,b}$  : 구간 H에서의 평균(average) 및 하한(lower bound) 콘관입저항값

(3) 관입깊이 결정

말뚝의 관입깊이는 단위 주면마찰력과 단위 선단지지력에 대한 상기 식들을 이용하여 설계하중을 지지할 수 있는 깊이를 산정하여 결정하였는데, 이 과정에서 침식과 액상화 현상의 영향을 고려하여 관계식을 보정하여 적용하였다. 침식이 관입깊이 산정에 미치는 영향은 유효응력의 감소로 나타나고, 액상화 현상으로 인한 영향은 과잉간극수압의 발생으로 인한 주면마찰력과 선단지지력의 감소로 나타나게 되는데, 이들을 고려한 단위 주면마찰력 및 단위 선단지지력과 콘관입저항값 사이의 관계는 식 (3)과 식 (4)로 표시되었다(Fugro, 1995).

단위 주면마찰력 :

$$f_s = \alpha \beta_1 (1 - r_u) q_{c,av} \leq 250 \text{ kPa} \quad (3)$$

단위 선단지지력 :

$$q_e = 0.6 \beta_1 (1 - r_u) q_{c,b} \leq 15 \text{ MPa} \quad (4)$$

여기서

$\beta_1$  : 침식 감소계수

$r_u$  : 과잉 간극수압계수

상기의 식들을 이용하여 산정된 말뚝 관입깊이는 69~74m 정도이고, 여기에 수심 등을 고려하여 구한 말뚝의 전체길이는 80~85m 정도였으므로 연속적으로 항타하여 시공하는 것이 불가능하여, 기 제작된 2~3개의 강관(상, 중, 하부구간)을 용접으로 연결한 다음 항타하여 시공하도록 설계하였다. 말뚝의 두께는 길이에 따라 변하는데, 직경

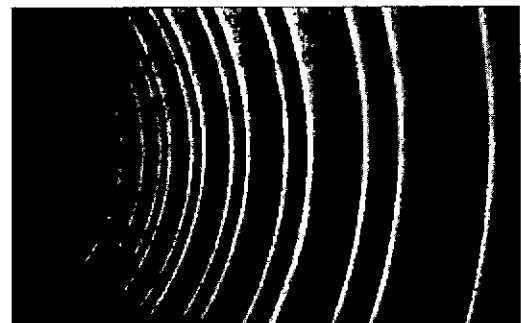


사진 2. 전단키(Shear Key)

3.15m 말뚝의 경우에는 두부에서 60mm, 선단부로 내려가면서 55, 50, 40mm로 감소하다가 선단부에서는 슈(Shoe)로 인해 다시 60mm가 되었으며, 직경 2.50m 말뚝의 경우에는 상부로부터 50, 45, 40 그리고 60mm 순으로 되었다.

#### 4. 강관말뚝 시공

대구경 강관말뚝을 항타하기 위해서 독일 Menck사에서 제작한 MHU-1700 수중식(Underwater Type) 복동 유압해머가 사용되었다. 본 해머는 램 증량이 102ton이고 해머 전체 무게가 234ton이며, 해머 슬리브를 제외한 길이가 16.6m(전체길이: 22m)이다. 해머에너지는 램 중앙에 설치된 속도 측정 장치를 이용하여 계산 및 조절되며, 항타시 최고에너지는 1900kN-m 정도가 발휘되었다.

모든 말뚝은 실트층(지표면에서 PWD 0m)까지 수상에서 준설을 실시한 후 상부모래층부터 항타하기 시작하였다. 말뚝항타는 1,000톤 크레인이 설치된 해상바지(HD-1000)와 자켓(Jacket)을 이용하여 이루어졌다. 기 제작된 상, 중, 하부단면으로 구성된 2~3개의 강관을 사용하였는데, 대부분의 경우 길이 45m 정도인 하부단면을 먼저 항타한 후 길이 35m 정도인 상부단면을 용접하여 최종깊이까지 항타하였다. 관입깊이가 깊은 몇몇 말뚝에 대해서는 길이 27m 정도의 중앙단면을 추가적으로 사용하였다.

6(V):1(H)의 경사로 2, 3개의 말뚝을 연결하여 시공해야 하는 관계로 각 연결말뚝의 배열과 방향 조절을 용이하게 하기 위하여 사진 1과 같은 안내 가이드(Stabbing Guide)를 설치하였다. Stabbing Guide는 직경이 약간 작은 강관 파이프로서 두께가 25mm이고, 길이가 3m 정도인 것이 이용되었다. 말뚝과 상부기초와의 부착력을 증가시키기 위하여 말뚝상부에 사진 2와 같이 내부와 외부에 전단키(Shear Key)를 설치하였고, 선단부의 내부에도 이들을 설치하였다.

말뚝은 하부단면과 해머의 자중에 의해 평균 4m 정도 관입(Free Run)되었고, 항타는 1m 관입시 100~150타를 유지하도록 에너지를 조금씩 높여 항타하였다. 최종 관입깊이에서 총항타수는 직경 3.15m 말뚝의 경우 9,400타 정도였고, 직경 2.50m 말뚝의 경우 평균 7,500타였다. 순수하게 항타에 소요된 시간은 평균 8시간, 하부단면과 상부단면 연결을 위한 용접에는 7시간, 말뚝항타후 두부절단에 약 2시간 정도가 소요되어, 1분을 항타 완료하는데 평균 17시간 이상이 소요되었다.

항타시 말뚝의 지지력을 산정하기 위하여 직경 3.15m 말

뚝에서 14분, 직경 2.50m 말뚝에서 10분, 총 24분의 말뚝에 대하여 항타시 동재하시험을 수행하였다. 동일한 말뚝들에 대하여 항타시 개단말뚝의 폐색정도를 관찰하기 위해 하부단면과 상부단면을 항타한 후 관내토의 높이를 측정하였다.

#### 5. 강관말뚝의 항타거동

##### 5.1 항타시 관내토의 거동 특성

항타거동 특성파악을 위해 전체 123본 중 24본의 말뚝에 대하여 항타시 말뚝두부에서의 응력과 가속도를 측정하는 동재하시험(ASTM D 1143-81)을 수행하였다. 직경 3.15m 말뚝인 말뚝번호 P20-1A에 대하여 항타중에 3개 위치의 관입깊이에서 측정된 힘과 속도 파형의 변화를 그림 2(a)~(c)에 나타내었으며, CASE방법으로 산정한 말뚝의 지지력(RMX)도 함께 표시하였다. 관입깊이가 증가하면서 힘과 속도 파형의 분리가 발생하는데, 이러한 경향은 선단부로 내려가면서 현저해지는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 선단부(2L/C 부근)의 관내토가 상당히 다져지면서 발생하는 것으로 판단되었으며, 이는 CASE방법으로 산정한 말뚝의 지지력(RMX)이 깊이에 따라 계속 증가하는 경향과 일치함을 알 수 있었다.

항타로 인해 관내토 하부가 점점 더 조밀해 지는 것을 간접적으로 나타내 주는 것 중의 하나는 말뚝의 폐색정도이다. 상부단면과 하부단면을 최종깊이까지 항타한 후의 폐색길이비(PLR : Plug Length Ratio, 관내토 길이와 관입깊이 비율)를 24본의 말뚝에 대하여 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이, 직경 3.15m 말뚝의 경우 하부단면 항타시에는 30m 중 약 25m가 폐색되었고(폐색길이비 84.8%), 상부단면의 최종 항타완료 후에는 전체 관입깊이 71.2m 중 54.2m가 폐색된 것(폐색길이비 76.1%)으로 나타났는데, 이는 폐색이 얇은 깊이에서부터 시작되어 최종 관입 깊이인 71.2m까지 계속되었다는 것을 의미한다. 전체 관입깊이 중 폐색되지 않은 구간의 길이는 하부단면 항타시에는 5m 정도 이었으나, 상부단면을 항타완료한 시점에는 17m로 늘어났는데, 이는 항타가 진행됨에 따라 그리고 깊이가 깊어짐에 따라 선단부의 관내토가 점점 더 조밀하게 다져져서 선단부의 지반이 관내토의 내주면마찰력을 극복하고 말뚝대로 관입할 수 없는 구간이 점점 더 늘어난 것으로 판단되었다. 직경 2.50m 말뚝의 경우에도 정도의 차이는 있지만, 역시 동일한 경향이 관찰되었다.

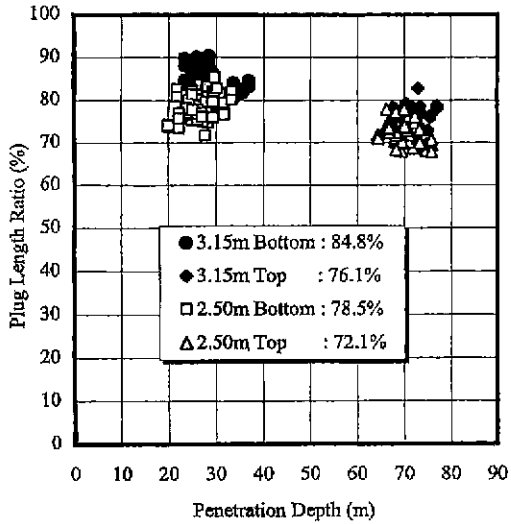


그림 3. 말뚝항타시 대구경 말뚝의 폐색정도 변화

항타시 관내토 하부가 조밀해지는 현상을 조사하기 위해 최종관입깊이(72m)에서 측정된 힘과 속도 파형을 CAPWAP(GRL, 1996)을 이용하여 정밀 분석한 말뚝의 단위 주면마찰력의 분포를 그림 4에 나타내었으며, 좀 더 명확한 설명을 위해 콘저항시험 결과와 관내토 길이도 포함시켰다. 이 그림에서 보듯이, 콘관입저항 값은 모래지반(관

입깊이 70m 까지)에서는 깊이에 따라 완만한 증가세를 보이는 것으로 나타났지만, 단위 주면마찰력은 50m까지는 일정하게 증가하다가 그 하부에서는 현저하게 큰 값으로 증가하는 이상한 경향을 보이고 있다. 즉, 말뚝상부에서 50m까지(선단부에서 20m 정도 떨어진 위치)는 단위 주면마찰력이 일정한 경향으로 증가하여 그 크기가 최대값 50kPa 정도에 이르며, 이 구간에서 발현되는 주면마찰력은 전체의 23% 정도인 것으로 산정되었다. 이 부분에서의 단위 주면마찰력의 크기가 관내토가 없는 구간(상부 20m 구간)이나 관내토가 존재하는 구간(상관없이 거의 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있었다. 이와 같은 이유는 상부의 관내토가 항타시 주면마찰력 발현에 영향을 주지 않았으며 발현된 주면마찰력은 대부분 외주면마찰력에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 이 부분의 관내토는 지지력을 발휘하지 못하는 비주동 관내토(Inactive Plug : Murff 등, 1990)의 거동을 보여주고 있음을 간접적으로 관찰할 수 있었다.

그러나 이와는 반대로, 선단부 20m에서는 전체 주면마찰력의 77%가 발현되었는데, 이는 외부 및 내부 주면마찰력이 모두 발현된 것으로 선단부 근처의 관내토가 상당히 조밀하게 다져져 있다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상

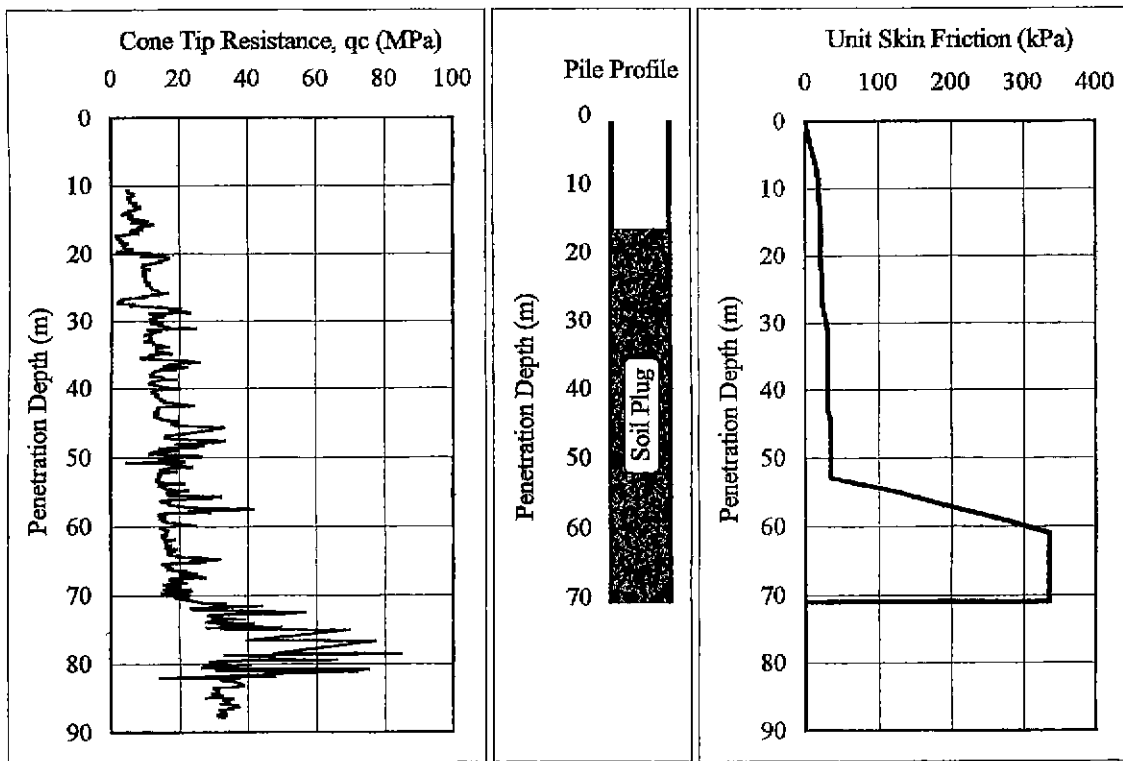


그림 4. 동재하시험시 측정된 주면마찰력 분포(말뚝 번호 · P20-1A)

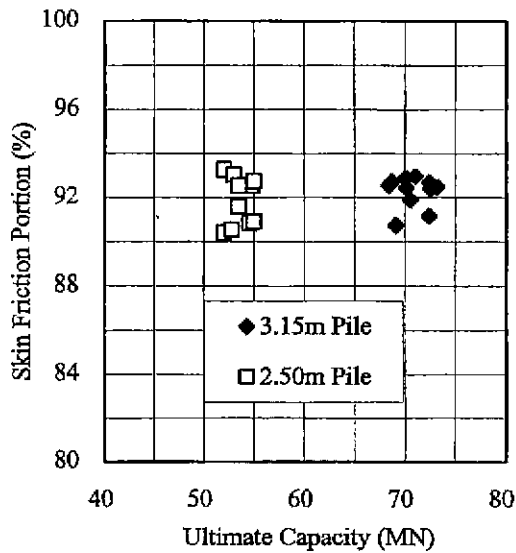


그림 5. 최종항타시 전체지지력과 주변마찰력 비율

은 선단부의 약 12m(말뚝직경의 4D) 구간에서 발현된 주변 마찰력이 전체 주변마찰력의 60% 정도이고, 단위 주변마찰력의 값도 300~350kPa로써 매우 크게 나타났다는 사실에서 더 잘 설명될 수 있었다. 이 값은 매우 조밀한 자갈모래층에 대해 API가 추천한 값 114.8kPa보다 훨씬 큰 값이다. 콘저항값의 변화를 보면, 70m 깊이까지는 콘 값이 비교적 균일하게 증가하는 모래층이 나타나다가 자갈층을 만나면서 콘저항값이 갑자기 증가하고 있지만 말뚝의 단위주변마찰력은 자갈층보다 17m 정도 상부에서부터 급격히 증가하고 있었다. 이와 같은 현상은 말뚝이 관입되면서 말뚝선단부 근처의 팽창(Dilatation) 현상(Lehane 등, 1993)이 지지층인 단단한 자갈층으로 인해 억제되면서 하부의 관내토가 단단하게 다져 지면서 주동 관내토(Active Plug : Murff 등, 1990)가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 이렇게 선단부 근처에 형성된 주동 관내토는 주변마찰력의 현저한 증가에 영향을 주는 것은 물론, 백규호 등(1993)이 보고한 것처럼, 선단지지력의 증가에도 크게 기여한 것으로 판단되었다.

### 5.2 항타시 지지력 거동 특성

24회의 동재하시험 수행중 최종항타시에 측정된 힘과 속도 파형을 CAPWAP으로 정밀 분석하여 산정한 전체 지지력과 주변마찰력 비율을 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 최종 관입깊이에서 전체 극한지지력은 직경 3.15m 말뚝의 경우 68.5~72.5MN 정도이고 평균

은 70.6MN 정도로 나타났으며, 직경 2.50m 말뚝에서는 52.0~55.0MN 범위에었으며 평균은 53.6MN 정도로 나타났다. 또한, 항타시 최종 관입깊이에서의 전체지지력에 대한 주변마찰력의 비율은 직경에 관계없이 90.7~93.3%로 나타났으며, 평균 92.1%정도로 나타나 대부분의 지지력이 주변마찰력에 의해 발현되고 있음을 알 수 있었다. 항타시 수행한 동재하시험에서 결정된 말뚝의 지지력을 설계지지력과 비교해 보면, 직경 3.15m 말뚝의 경우 항타시 발현된 지지력이 68.5MN이고 설계지지력은 44MN이어서 안전율은 1.56정도이고, 직경 2.50m 말뚝에서는 측정값 52MN과 설계치 30MN으로써 안전율은 1.73정도로 작게 나타났다. 그러나, 향후 별도로 보고될 소규모 말뚝재하시험 결과에 근거해보면, 시간이 경과함에 따라 지지력이 크게 증가하여 항타후 1주일 정도가 경과하면 안전율이 3 이상으로 증가하게 되었다.

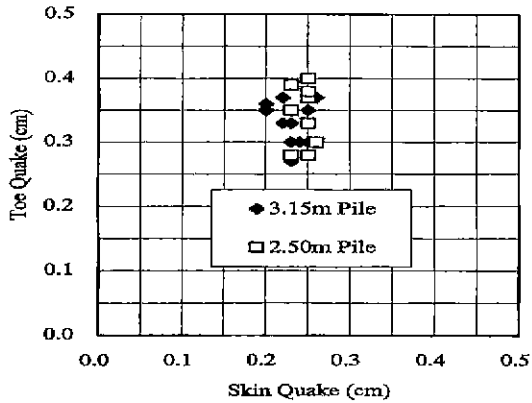
### 5.3 동적 토질 상수

24회의 동재하시험 결과에서 산정된 탄성변형량(Quake) 값과 감쇠계수(Smith Damping) 값을 그림 6에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이, 말뚝직경에 상관없이 탄성 변형량 값과 감쇠계수 값은 일정한 범위의 값을 나타내고 있었다. 탄성변형량 값은 주변의 경우 0.20~0.27cm, 선단의 경우 0.27~0.40cm로 나타났으며, 감쇠계수 값은 주변과 선단의 경우 각각 0.45~0.61 및 1.24~1.69s/m 정도로 나타났다. 본 실험에서 구한 탄성변형량 값과 감쇠계수 값을 요약 정리하면 표 2와 같은데, 비교를 위해 CAPWAP에서 일반적으로 추천하는 값도 표 2에 정리하였다. 표 2에서 보면, 선단의 감쇠계수 값만이 일반적인 추천값 보다 약간 크게 산정되었음을 알 수 있었다. 말뚝의 동재하시험 해석시 사용되는 감쇠계수 값은 지반조건 뿐만 아니라 말뚝특성에도 의존하는데, 사용한 강관말뚝의 재료 조건이 동일

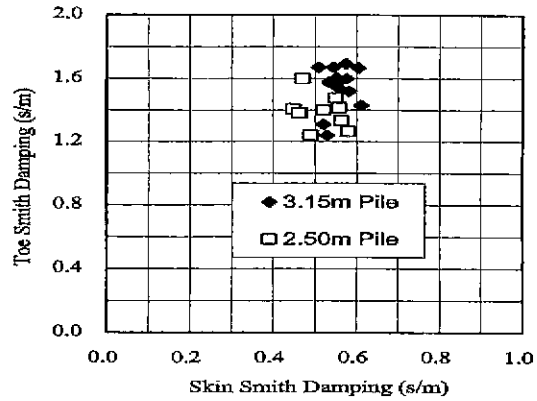
표 2. 탄성변형량(Quake) 및 감쇠계수(Damping) 값 비교

		CAPWAP 추천값	JAMUNA 현장 산정값
Quake (cm)	주변	0.10~0.75	0.20~0.27
	선단	0.1~max $U_{tce}$	0.27~0.40
Smith Damping (s/m)	주변	0.075~1.3	0.45~0.61
	선단	0.075~1.3	1.24~1.69

\*  $U_{tce}$  : 항타시 선단변위량



(a) Skin and Toe Quake



(b) Skin and Toe Damping

그림 6. 동재하시험에서 결정된 토질상수

하므로 측정된 일정한 범위의 탄성변형량과 감쇠계수 값으로부터 이 지역의 지반조건이 거의 균일함을 간접적으로 파악할 수 있었다.

## 6. 결론

자무나 강을 가로지르는 길이 4.8km 교량의 기초에 사용된 직경 3.15m 및 2.50m인 대구경 강관말뚝에 대하여 항타 완료후 관내토 높이를 측정하고 선택된 24본의 말뚝들에 대하여 항타시 동재하시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 말뚝항타시 관내토의 높이를 측정하여 폐색정도를 평가하였는데, 최종 관입깊이에서 직경 3.15m 말뚝과 직경 2.50m 말뚝들은 관입깊이의 75% 정도만이 관내토로 채워졌는데, 상부는 주변마찰력 발현에 기여하지 못하나 하부에서는 대단히 크게 기여하였다.
- (2) 폐색길이중 선단부 근처의 4D(말뚝 직경) 길이에서는 API 추천치 보다 3배나 큰 주변마찰력이 발현되는 것으로 산정되었다. 이러한 현상은 말뚝항타시 지지층인 자갈층으로 인해 항타에너지의 대부분이 선단부 근처의 지반과 관내토를 단단하게 다지는데 사용되어, 말뚝 선단 내부에 주동 관내토(Active Plug)를 형성시켜서 대단히 큰 주변마찰력을 발현 시켰기 때문이라고 판단되었다.
- (3) 항타시 직경 3.15m 말뚝과 2.50m 말뚝에서 직경에 상관없이 전체지지력의 약 90% 정도가 주변마찰력으로 평가되어 항타시 말뚝이 주변마찰지지형으로 거동함을 알 수 있었다.

- (4) 동재하시험시 결정된 모래지반에서의 탄성변형량(Quake) 값과 감쇠계수(Smith Damping) 값은 직경에 상관없이 일정한 값을 나타냈는데, 이는 말뚝 특성보다는 주변지반의 균질함을 반영하는 것으로 판단되었다.

## 참고 문헌

1. 백규호, 이종섭, 이승래(1993). "모래지반에 타입된 모형 개단강관 말뚝의 지지력 분석", 한국지반공학 회지, 제 9권, 제 1호, pp.21~44.
2. 이영남, 이종섭(1997), "대구경 말뚝의 거동예측 및 지지력 산정", 현대건설 기술연구소, 연구보고서, 연구번호 : 92GEO02, pp.150~184.
3. API RP 2A(Recommended Practice) (1991), "Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platform," American Petroleum Institute, Ninetcenth Edition, pp.48-60.
4. Fugro-Engineers B.V. (1995), "Foundation Design - Bridge Piles Jamuna Bridge, Bangladesh," Report No. K-2380/121.
5. Fugro-Engineers B.V. (1996), "Interpretive Report, Phase I Ground Investigation, Jamuna Bridge Bangladesh," Report No. K-2380/117.
6. GRL and Associates, Inc (1996), CAPWAP - CAsE Pie Wave Analysis Program, Manual, Cleveland, Ohio
7. Lehane, B.M, and Jardine, R.J. (1994), "Shaft Capacity of Driven Piles in Sand : A New Design Approach," Proceedings of Conference on Behavior of Offshore Structure, BOSS '94, Massachusetts, U.S.A., Volume 1 Geotechnics, pp.23~36.
8. Murff, J.D, Rames, R.D., and Randolph, M.F. (1990), "Soil Plug Behavior of Piles in Sand," Offshore Technology Conference, OTC 6421, pp.25~32.

(접수일자 2000. 3. 15)