

## 사질토 지반에서 대구경 강관말뚝의 항타거동 Driving Behavior of Large Diameter Steel Pipe Piles in the Sandy Soil

이종섭<sup>1)</sup>, Jong-Sub Lee, 이형주<sup>2)</sup>, Hyuong-Joo Lee, 박영호<sup>3)</sup>, Young-Ho Park, 유명삼<sup>4)</sup>, Young-Sam Yoo

- <sup>1)</sup> 현대건설 기술연구소 대리, Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology
- <sup>2)</sup> 현대건설 토목설계부 과장, Senior Engineer, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.
- <sup>3)</sup> 현대건설 토목설계부 차장, Senior Engineer, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.
- <sup>4)</sup> 현대건설 JMB-1현장 사원, Engineer, JMB-1, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.

**SYNOPSIS** : Piles for the 4.8km Jamuna Bridge in Bangladesh are large diameter open ended steel pipe piles. There is a total 123 piles and all are driven with a 6:1 rake. Piles are either 3.15 or 2.50m diameter steel pipe piles of variable wall thickness, and driven in two or three sections. All piles were driven to a depth of 69 to 74m. Driving of piles was done using a MHU-1700 double acting hydraulic hammer (ram weight 102 tonnes). The soils consist of an upper layer of the normally consolidated sand with about 10% mica underlain by gravel layer.

Capacity of 3.15m diameter piles at the end of drive is about 70MN, while it is about 55MN for 2.50m diameter piles. In both pile sizes, shaft friction accounts for about 93% of the total capacity. Unit skin friction is generally low (less than 50kPa) down to a depth of the about 50m. Below 5 8m the unit friction is about 300 to 350kPa and probably represents the sum of both inner and outer friction. The normalized set value during re-driving is in inverse proportion to  $\log_{10}t$ . The RSPLT(Reduced Scale Pile Load Test) of 762mm diameter steel pipe pile was carried out to verify the design. In the RSPLT capacity is increased 1.4 times by comparing end of driving capacity and compression load test of 3 days after driving and tension load is increased more than 2.5 times by comparing pull-out test of 3 days after driving and that of 9 month later.

**Key Words** : Soil Plug, Plug Length Ratio, Specific Recovery Ratio, Set Value, Set-up

### 1. 서론

지지층이 존재하지 않거나 매우 깊은 위치에 존재하는 지반에서 장대교량의 건설이 요구되면서 기초로써 대구경 강관 말뚝의 사용이 증가되고 있다. 더구나 지진이 다발적으로 발생하는 지역이나, 선박의 충돌, 유속 및 풍하중에 의한 큰 횡하중에 지지하도록 경사말뚝이 종종 채택되어지고 있으나 대구경 경사말뚝의 항타거동에 관한 특성이 거의 알려지지 않고 있는 실정이다.

본 논문은 현대건설에서 1994년 10월부터 방글라데시의 자무나(Jamuna) 강을 가로지르는 교량을 건설중에 사용된 대구경 강관말뚝을 대상으로 하였다. 본 현장의 지반조건은 운모 성분을 다량 함유한 모래지반이다. 직경 3.15m 및 직경 2.50m의 대구경 강관말뚝을 관입깊이 69~74m까지 6:1의 경사로 항타하면서 관내토 높이를 측정하여 항타시 대구경 강관말뚝의 폐색정도를 산정하였으며 동재하시험을 수행하여 항타시 지지력을 산정하였다. 그리고 대구경 강관말뚝에서 시간경과에 따른 Set Value의 변화 특성과 직경 762mm 강관말뚝에서 수행된 동재하시험, 압축재하시험 및 인발시험으로부터 시간경과에 따른 지지력 변화 특성으로부터 시간경과에 따른 말뚝 거동의 변화를 관찰하였다.

## 2. 공사개요 및 지반조건

### 2.1 공사개요

본 공사는 방글라데시 수도 다카에서 북서쪽으로 140km 떨어진 지점의 자무나 강을 가로지르는 교량을 건설하는 공사이다. 본 교량은 길이 4.8km, 폭 18.5m로써 왕복 4차선 도로, 단선 철도, 240kV의 고압 송전선 및 고압 가스 파이프가 설치되는 다목적 교량이다. 교량경간의 사이가 약 100m로써 총 50개의 교각이 사용되었으며 각 교각 아래에는 대구경의 말뚝기초가 사용되었다. 자무나 강은 유량 측면에서는 세계 5위의 큰 강으로 준안정의 섬과 움직이는 모래톱들이 강 곳곳에 존재하며 강폭, 모래섬 위치와 제방 위치는 매년 심하게 변하다. 강폭은 건기시에 최소로써 5km(수위 : PWD-해수면 기준선 (+)6.5m)이며 우기시에 최대로써 15km(수위 : PWD (+)14m)로 변하기 때문에 교량 양단에 별도의 제방공사가 수행되었다.

### 2.2 지반조건

본 현장의 지반구성은 실트층, 상부모래층, 자갈층 그리고 하부모래층으로 구성되어 있으나 모든 말뚝은 실트층을 준설한 후 (PWD 0.0m) 상부모래층부터 항타관입하였으며 이들 세층의 지반특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

상부모래층은 운모질(Micaceous)의 정규압밀 모래 지반으로써 거의 균일한 층을 이루며 PWD (-)64m ~ (-)68m까지 이어진다. 상대밀도는 상부에서 느슨한 상태(Loose)를 나타내며 하부로 내려가면서 중간(Medium)정도의 상대밀도를 나타낸다. 콘관입시험시 과잉간극수압은 정수압상태를 나타내었다.

자갈층은 자갈과 모래로 구성되어 있으며 PWD (-)70m근처에서 나타난다. 상대밀도는 조밀(Dense)한 상태이며 이 층의 두께는 약 7m정도으로써 Gravel의 크기는 최고 60mm까지 존재한다. 콘관입시험시 간극수압은 정수압상태를 유지한다. 이 층을 말뚝 지지층으로 간주하였으며 교각이 시공될 모든 위치에서 콘관입시험을 수행하여 자갈층의 정확한 깊이를 결정하였다.

하부모래층은 운모질 모래로 구성되어 있으며 PWD (-)71 ~ (-)80m 사이에서부터 나타나며 최고 지반조사깊이인 PWD (-)120m까지도 이 층으로 구성되어 있다. 상대밀도는 조밀한 상태이다. 지질학적(생성연도) 및 지반공학적인(상대밀도) 관점에서 "상부모래층"과 다른 특징을 보이며 특히 콘관입시험시 높은 부 과잉간극수압(Highly Negative Pore Water Pressure)이 발생하기도 하였다.

본 현장 모래의 실내시험 결과를 표 1에 나타내었다. 본 현장 모래의 가장 큰 특징은 일반적인 석영질 모래와 달리 운모(Mica)의 함유량이 많다는 것으로 모래지반에 운모가 포함되면 작은 함유량으로도 압축성 증가, 건조단위중량 감소 및 강성(Stiffness) 감소등의 공학적으로 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 세립분 함유량이 10% 미만이며 입자크기가 거의 균등하며 상당히 큰 투수계수를 나타낸다.

표 1. 자무나 강 지반의 실내시험 결과

	운 모 함 유 량 (%)	세 립 분 함 유 량 (%)	입자크기(mm)		균등계수	통 일 분 류 법	투수계수 (cm/sec)
			D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>			
상부모래층	5 ~ 15	2 ~ 10	0.06~0.20	0.20~0.40	2 ~ 4	SP or SM	0.01~0.002
자 갈 층	10	0 ~ 10	0.20~5.00	0.50~10.0	>5	GP or GM	5.0~0.05
하부모래층	5 ~ 15	8 ~ 20	0.02~0.06	0.08~0.40	2 ~ 8	SP or SM	0.007~0.0036

### 3. 말뚝 및 해머 특성

#### 3.1 말뚝

말뚝은 직경(외경 기준임) 3.15m인 경우와 2.50m인 2종류의 개단강관말뚝이 사용되었다. 직경이 3.15m인 경우에는 말뚝 2본이 1개의 교각을 지지하며, 2.50m인 경우에는 3본의 말뚝이 1개의 교각을 지지하도록 설계되어 총 123본(시험말뚝 2본 포함)의 말뚝이 시공되었다. 지진, 선박의 충돌, 홍수시 유속 및 풍하중에 의한 횡하중을 지지하도록 모든 말뚝이 6 : 1 비율로 기울어진 경사말뚝으로 시공되었다. 설계지지력(축방향)은 직경 3.15m 말뚝의 경우 44MN(4400ton)이며 직경 2.50m 말뚝의 경우 30MN이며, 극한 지지력은 각각 110MN 및 85MN이다.

말뚝전체 길이는 80~86m 정도이며, PWD 0.0m까지 준설한 후 항타를 시작하였으니 관입깊이는 69~74m 정도이다. 기 제작된 2~3개의 강관(Bottom, Middle, Top Section)을 현장용접하여 1본의 말뚝을 구성하며, 대부분의 경우 길이 45m 정도인 Bottom Section과 35m 정도인 Top Section으로 이루어지며 관입깊이가 깊은 몇몇 말뚝에 대해서 Middle Section이 이용되었다. 말뚝의 두께는 길이에 따라 변하며 직경 3.15m 말뚝의 경우 두부에서 60mm이며 선단부로 내려가면서 55, 50, 40으로 감소하며 선단부에서 60mm로 증가(Shoe부분)되며, 직경 2.50m 말뚝의 경우 50, 45, 40 그리고 60mm로 변한다.

말뚝과 교각의 확실한 결합을 위하여 말뚝 상부의 내부와 외부에 Shear Key를 설치하였고, 선단부의 내부에도 이들을 설치하였다. 선단부 내부에 Shear Key를 설치한 이유는 본 현장에서는 설계깊이까지 말뚝을 항타한 후 관내토를 제거(선단부로부터 직경의 2배 정도를 제외한 모든 관내토)하고 콘크리트를 타설하도록 되어 있으며 이들 콘크리트와 말뚝간의 확실한 결합을 위한 것이다. 관내토 제거시 말뚝선단이 교란되었을 가능성을 고려하여 말뚝 내부에 콘크리트를 타설하여 양생시킨 후 6MPa(60Bar)의 고압으로 선단 그라우팅(Base Grouting)을 실시하였다.

#### 3.2 해머

본 현장의 대구경 강관말뚝을 항타하기 위해 독일 Menck사에서 제작한 MHU-1700 Underwater Type 복동 유압해머가 사용되었다. 본 해머는 램중량이 102ton이고 해머 전체 무게가 234ton이며, 해머 슬리브를 제외한 길이가 16.6m이다. 해머에너지는 램 중앙에 설치된 속도 측정 장치를 이용하여 계산 및 조절되며 해머에서 발휘되는 최고에너지는 1700~1900kN·m정도이다. 그림 1에 말뚝항타 장면을 나타내었다.

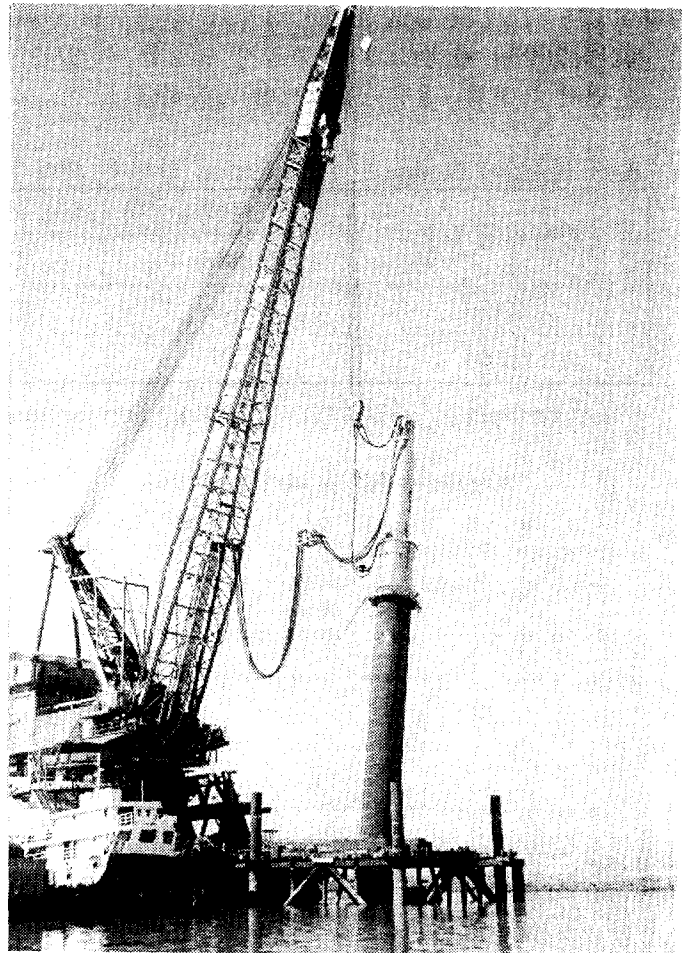


그림 1. 말뚝 항타 장면

## 4. 대구경 말뚝의 항타 거동

### 4.1 Free Run, 총항타수, 폐색정도

말뚝항타는 1000ton Crane이 설치된 해상 Barge와 Jacket를 이용하여 이루어졌다. 말뚝항타중 말뚝 자중과 해머 무게로 말뚝이 관입되는 양(Free Run), 총항타수 그리고 Bottom Section과 Top Section을 항타한 후에 관내토높이 등을 측정하였다.

Free Run 값은 말뚝의 Bottom Section과 해머의 자중에 의한 관입량으로써, 123본의 말뚝 전체에 대한 Free Run의 평균값은 직경 3.15m 말뚝에서 4.04m, 직경 2.50m 말뚝에서 3.76m로 나타났다. 평균 총항타수의 경우 각각 9500과 7500으로써 말뚝직경비율과 거의 일치( $3.15/2.5=1.26$ ,  $9500/7500=1.27$ )하였다.

개단강관 말뚝의 폐색정도는 폐색길이비(Plug Length Ratio : PLR(%) = 관내토길이 / 관입깊이)와 특정회수율(Specific Recovery Ratio :  $\gamma$ (%) = 관내토길이 증분 / 관입깊이 증분)로 표시할 수 있으며 특정회수율이 폐색정도를 보다 더 잘 나타내는 것으로 알려져 있다(백규호 외, 1993). Bottom Section과 Top Section 항타후 관내토의 높이를 측정하였으며 관입깊이 증가로 인한 폐색효과를 관찰하였다. 표 2에 Bottom Section과 Top Section에서 계산된 폐색길이비와 특정회수율을 표시하였다. 관입깊이에 따른 폐색효과를 자세히 관찰하기 위하여 직경 3.15m 말뚝 1본에 대하여, 여러 위치에서 관내토의 높이를 측정하였으며, 이때 관입깊이에 따른 관내토길이, 폐색길이비, 그리고 특정회수율의 변화를 그림 2에 나타내었다. Top Section 항타시 3~5m 간격으로 관내토 높이를 측정하여 관입깊이에 따른 폐색길이비를 계산하였으며 관내토 높이 측정시 발생할 수 있는 약간의 측정오차도 특정회수율 계산에 큰 영향을 줄 수 있어 특정회수율은 2곳에서만 계산하였다.

표 2. Bottom Section과 Top Section 항타후 폐색정도

말뚝직경 (m)	폐색길이비 (PLR, %)		특정회수율 ( $\gamma$ , %)	
	Bottom	Top	Bottom	Top
3.15	84.8	76.1	84.8	71.1
2.50	78.5	72.1	78.5	68.5

\* Bottom Section 관입깊이 : 27~32m, Top Section 관입깊이 : 42m, 총 관입깊이 : 69~74m

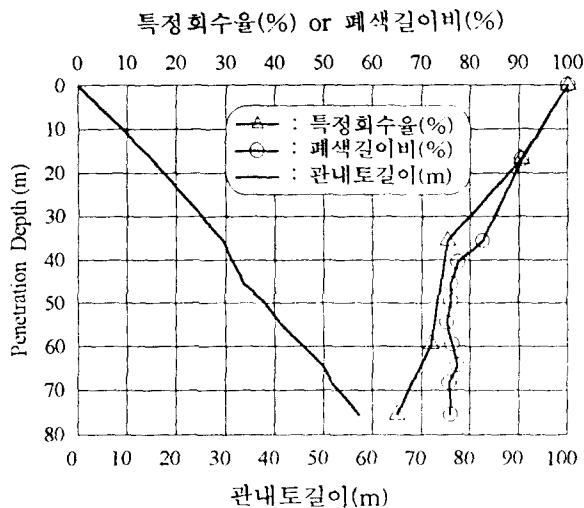


그림 2. 말뚝항타시 관내토높이 및 폐색정도 변화

관입깊이가 비슷한 위치에서 직경이 작은 말뚝의 폐색길이비가 더 작게 나타나고 있어, 직경이 감소할수록 관입깊이와 상관없이 폐색이 잘 되는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 관입깊이 증가시 즉, Top Section 부분에서 특정회수율 값의 차이가 크게 줄어들고 있으며 모두 부분폐색 거동을 나타내고 있다. 특히 그림 2와 같이 직경 3.15m 말뚝의 경우 최종관입깊이 위치에서 특정회수율 값이 65%까지 감소하였다. 이것은 직경 3.15m 말뚝에서도 관입깊이 증가시 직경 2.50m 말뚝과 비슷한 폐색효과가 나타나고 있음을 의미하는 것으로 생각할 수 있다.

그림 2를 살펴보면, 폐색길이비는 관입깊이 45m 정도까지 계속 감소하나 그 이후에는 76%를 기준으로 증감을 반복하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 관입깊이 45m까지는 상부모래층의 느슨한 부분이 말뚝내부에서 향타로 인한 진동으로 다져지면서 관내토길이가 관입깊이 증가시 감소하였으나 그 이후에는 상부 관내토가 더 이상 다져지지 않고 특정회수를 만큼만 말뚝 내부로 유입되었기 때문으로 사료된다.

## 4.2 향타시 지지력

향타시 말뚝의 지지력을 산정하기 위하여 직경 3.15m 말뚝에서 14분, 직경 2.50m 말뚝에서 10분으로 총 24분의 말뚝에 대하여 동재하시험을 수행하였다. 최종관입위치에서 산정된 지지력을 표 3에 정리하였고 단위 주면마찰력 분포를 그림 3에 나타냈었다.

향타시 측정된 지지력은 직경 3.15m 말뚝의 경우 70MN 직경 2.50m 말뚝의 경우 55MN 정도로 나타나 이들 지지력은 말뚝직경 비율과 비교할 경우 잘 일치하고 있다. 그리고 대부분의 지지력은 주면마찰력에 기인하고 있으며, 직경에 상관없이 전체지지력의 93% 정도가 주면마찰력으로 나타났다. 또한 직경에 관계없이 Quake 값은 주면의 경우 0.2~0.25 선단의 경우 0.33~0.37cm으로 나타났으며, Smith Damping 값은 주면과 선단의 경우 각각 0.5~0.55 및 1.4~1.6s/m 정도로 나타났다. 이와 같이 지지력 비율이 거의 일치하고 Quake 및 Damping에서 거의 유사한 값을 보이는 것은 모든 위치에서 지반조건과 주면마찰력이 매우 유사함을 입증하는 것이다.

표 3. 향타시 측정된 지지력 분포

말뚝 직경 (m)	지지력 (MN)			지지력 비율 (%)	
	전체	주면	선단	주면	선단
3.15	70	65	5	92.9	7.1
2.50	55	51	4	92.7	7.3

\* 선단지지력은 두께부분만 고려한 것임

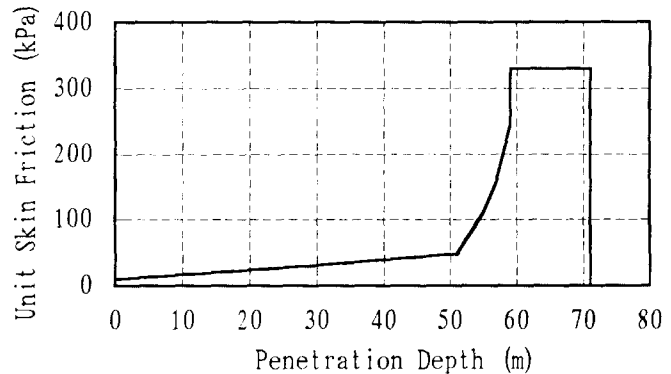


그림 3. 향타시 단위 주면마찰력 분포

단위 주면마찰력의 분포와 관내토길이(폐색길이비를 적용하면 약 52m)를 살펴보면, 말뚝상부에서 50m까지(선단부에서 20m 정도 떨어진 위치)의 단위 주면마찰력의 크기는 50kPa 이하로 나타나고 있으며 전체 주면마찰력중 23%정도가 이 부분에서 발휘되고 있다. 이 부분에서의 단위 주면마찰력의 크기가 관내토의 위치에 관계없이 거의 일정하거나 아래로 내려가면서 약간 증가하는 경향을 보이고 있어 이 부분의 관내토는 Passive Plug의 거동을 함을 간접적으로 관찰할 수 있었다.

전체 주면마찰력중 60% 정도가 선단부에서 12m 정도(말뚝직경의 4~5D)에서 발휘되고 있으며 이 부분에서의 단위 주면마찰력이 300~350kPa로써 매우 크게 나타났다. 이 값은 개단강관말뚝의 내주면마찰력과 외주면마찰력의 합으로써 이 부분의 관내토는 Active plug의 특성을 나타내는 것 같다. 정적하중 작용시 관내토에 작용하는 하중의 대부분은 말뚝내경의 3배에 존재하는 관내토에 의하여 지지되므로(백규호 외, 1993) 선단부 근처에서 크게 측정된 주면마찰력은 정하중 작용시 선단지지력 부분으로 변환되어 선단지지력 증가에 크게 기여할 것이다. 또한 본 현장의 경우처럼 관내토 제거후 말뚝내부에 콘크리트를 타설하고 선단 그라우팅(Base Grouting)을 실시한 경우 선단지지력은 크게 증가할 것으로 사료된다.

### 4.3 시간 경과에 따른 말뚝 거동 변화

#### 4.3.1 재항타시 Set Value 변화

Bottom Section을 항타한 후 Top Section을 용접연결한 후 항타를 시작하는 시점까지는 6~13시간 정도가 소요되며 용접전후의 항타에너지가 동일한 말뚝에 대하여 Set Value를 비교한 결과 약 90~100%정도로 조금 감소하거나 거의 일정하였다.

설계깊이(관입깊이 : 69~74m정도)까지 항타를 완료한 후 5개의 말뚝에 대하여 동일한 에너지로 재항타시험을 실시하여 그림 4와 같이 항타완료후 시간 경과에 따른 정규화된 Set Value(재항타시 Set Value / 초기항타시 Set Value) 변화를 얻을 수 있었다. 정규화된 Set Value는  $\log_{10}$ (시간)에 반비례하여 감소하는 경향을 보였다. 재항타로 인한 지지력 증가율은 말뚝상부에서 크게 나타났으며 전체지지력은 16~20% 정도 증가하였다. 그러나 재항타시 Set Value가 크게 감소(1.49mm/blow까지 감소)하여 재항타시 말뚝의 극한지지력은 확인할 수 없었다.

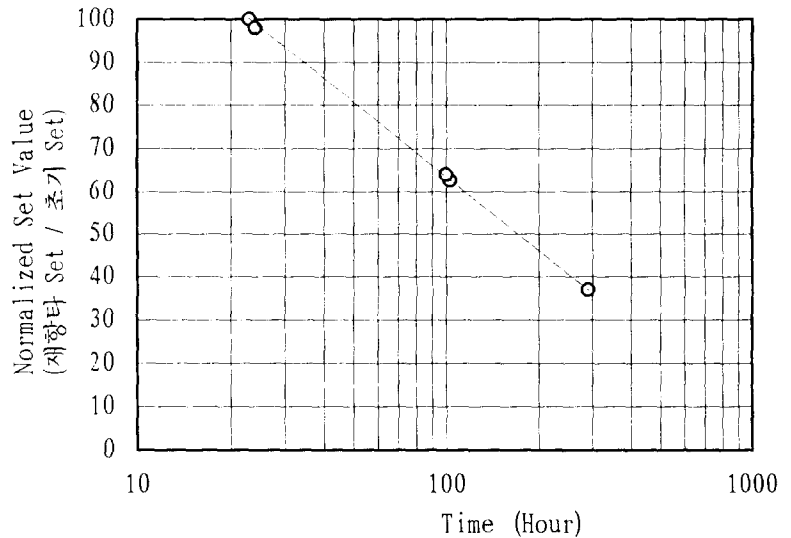


그림 4. 재항타시 Set Value 변화

#### 4.3.2 시간 경과에 따른 지지력 변화

본 현장에서는 말뚝의 설계지지력이 매우 큰 관계로 정적재하시험으로 말뚝의 항복하중이나 극한하중을 구하는 것이 현실적으로 불가능하고 또한 동재하시험을 통하여 지지력의 Set-up효과를 관찰하는 것도 불가능하여 RSPLT(Reduced Scale Pile Load Test)를 수행하였다. RSPLT에 사용된 말뚝은 직경이 762mm이고 두께가 38mm이며 관입깊이는 수직으로 78.3m(해수면 기준 PWD (-)65.3m)로써 항타에는 램 중량 7.2ton인 MH-72 디젤 해머가 사용되었다. RSPLT에서는 변형윤계(축방향 및 원주방향)와 토압계를 설치하여 압축재하시험시 선단지지력과 외주면마찰력을 분리하였다. 또한 항타후 시간경과에 따른 지지력 변화를 관찰하기 위하여 항타시 동재하시험을 실시하였고, 항타후 3일 경과후에 CRP(Constant Rate of Penetration) 방법에 의한 압축재하시험 및 인발시험을 수행하였으며 항타후 9개월이 경과한 후에 ML(Maintained Load) 방법에 의한 인발시험을 수행하여 표 4에 그 결과를 정리하였다.

항타시와 압축재하시 관내토의 거동이 상이하므로(항타시 부분폐색 거동을 하여도 정적재하시 완전폐색 거동을 보임) 비록 압축재하시험시 주면마찰력과 선단지지력을 분리하였지만 항타시 전체지지력과 3일 경과 후 압축재하시험의 전체지지력만 비교하였다. 3일 경과후 수행한 압축재하시험은 말뚝 두부에서의 침하량이 210mm가 발생할 때까지 수행하였으며 Set-up 효과를 산정하기 위한 지지력 비교는 말뚝두부 침하량이 0.1D(76mm)인 경우와 최대 침하량인 0.27D(210mm)일 때의 결과를 이용하였다. 항타시와 비교할 경우 전체지지력은 말뚝 두부의 침하량이 0.1D인 경우 1.4배 그리고 0.27D인 경우 1.76배가 증가하였다. 주면마찰력과 선단지지력은 말뚝두부의 침하량 증가시(최대침하량 210mm까지) 계속 증가하는 경향을 나타내었다.

표 4. 항타후 시간경과에 따른 지지력 변화

	Pile Capacity (MN)			비 고
	동재하시험	압축재하시험	인발시험	
항 타 시	6.4	-	-	Set Value : 2.5mm/blow
3일 경과 후	-	8.95	2.62	두부침하량 : 76mm (0.1D)
	-	11.28	-	두부침하량 : 210mm (0.27D)
9개월 경과 후	-	-	6.70 이상	

인발시험은 항타후 3일 경과후 그리고 9개월 경과후 재수행하였으며 그 결과를 표 4와 그림 5에 나타내었다. 항타후 3일 경과시 실시한 인발시험에서는 2.62MN의 하중에서 완전 파괴가 발생하였다. 그러나 9개월 경과후 실시한 인발시험에서는 6.7MN에서도 전혀 파괴가 발생하지 않고 하중-변위곡선이 선형적으로 증가하고 있으나 시험장비의 제약으로 시험을 중지하였다. 인발시험 결과는 말뚝자중, 관내토 무게등이 제외된 순수한 인발하중로써 3일 후와 9개월 경과 후의 순수한 인발하중에 대한 지지력 증가비는 2.5배 이상으로 나타났다.

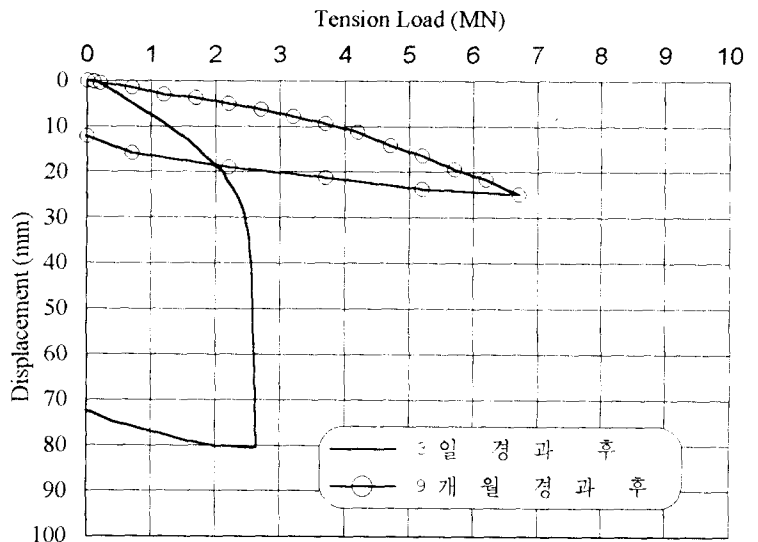


그림 5. RSPLT의 인발시험 결과

직경 3.15m 말뚝과 직경 2.50m 말뚝에서 시간 경과에 따른 Set Value 감소량이 항타후 24시간내에서는 거의 발생하지 않았으나 오랜시간이 지나면서 크게 발생하였으며 RSPLT 결과에서도 지지력 증가가 오랜시간이 경과하면서 크게 발생하고 있다. 본 공사의 말뚝과 RSPLT 말뚝은 상부모래층을 관통하여 자갈층을 1m 정도 관입하였다. 이들 두 층에서의 세립분 함유량이 모두 10% 이하이고 깊이에 따라 감소하는 경향이 있으며 입자크기가 거의 균등하여 통일분류법으로 분류할 경우 상부모래층은 대부분 SP이고 자갈층이 대부분 GP로써 투수계수 또한 상당히 크게 나타났다. 즉 입자크기가 거의 균등하고 투수계수가 상당히 큰 지반임에도 불구하고 Set Value 감소와 지지력 증가가 오랜 시간이 경과하면서 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상을 볼 때 시간에 따른 Set Value 감소와 지지력 증가는 항타시 발생한 과잉간극수압의 소산이 주원인이라고 볼 수 없는 것이다. 균등계수가 2.94인 모래지반에서 진동다짐과 폭파다짐후 큰 저항력이 시간경과에 따라 크게 증가한다는 결과(Mitchell, 1986)도 본 현장의 말뚝거동과 비슷한 현상을 나타내는 것으로 생각된다.

현재까지 모래구조와 시간영향에 대한 정확한 반응기구가 알려지지 않았지만 항타시 모래구조가 파괴되며 그 이후 시간이 경과하면서 입자간의 결합력(Bonding or Cementation)이 증가하면서 모래지반에서 시간의존 특성이 나타나는 것으로 사료된다. 특히 본 현장과 같이 상대적으로 적은 함량만 포함되어도 모래지반의 공학적 특성에 큰 영향을 주는 운모함유량이 10% 내외로 상당히 큰 것도 시간에 따른 말뚝의 거동에 영향을 준 것 같으나 광물질 함유량과 지반특성 변화에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

#### 4.4 항타시 말뚝 손상

항타시 강관말뚝의 두부손상은 주로 말뚝중심축과 해머중심축의 불일치, 말뚝과 해머의 부분접촉 등에 기인하여 말뚝두부에 심한 좌굴이 발생(이영남 외, 1995)할 수 있으며 말뚝을 항타하는 해머의 충격으로 재료자체가 손상될 수 있다. 본 현장의 경우 말뚝이 경사로 항타되고 또한 과항타가 이루어졌으나 말뚝 두부의 두께가 55~60mm로써 매우 두꺼워 말뚝 두부에 좌굴등이 전혀 발생하지 않았으나, 두부 근처에서 항타로 인한 열에 의해서 말뚝자체가 심하게 녹는 현상이 발생하기도 하였다.

#### 5. 결론

자무나 강을 가로지르는 길이 4.8km 교량의 기초에 사용된 직경 3.15m 및 직경 2.50m인 대구경 강관말뚝에서 항타시 관내토높이 측정과 동재하시험 및 재항타시험을 수행하고 직경 762mm인 강관말뚝에서 동재하시험, 압축재하시험 및 인발시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 말뚝항타시 관내토의 높이를 측정하여 폐색정도를 산정하였다. 최종 관입깊이에서 폐색길이비로 표시할 경우 직경 3.15m 말뚝과 직경 2.50m 말뚝에서 각각 76%와 72% 정도로 나타났으며, Top Section에서 특정회수율로 표시할 경우 각각 71%와 68.5% 정도로 나타났다. 최종관입깊이에서 직경 3.15m 말뚝에서 특정회수율이 65%까지 감소한 결과에서 두 종류의 말뚝에서 관입깊이 증가시 폐색정도가 점점 비슷해짐을 알 수 있었다.
- 2) 항타시 동재하시험에서 산정된 지지력은 직경 3.15m 말뚝에서 70MN, 직경 2.50m 말뚝에서 55MN 정도로 나타났으며, 말뚝 직경에 상관없이 전체지지력의 93% 정도가 주면마찰력으로 나타났고 모든 말뚝에서 Quake 및 Damping 값이 거의 유사하게 나타났다.
- 3) 항타시 수행한 동재하시험의 주면마찰력 분포에서 항타시 Active Plug 영역과 Passive Plug 영역을 간접적으로 관찰할 수 있었다.
- 4) 입자크기가 거의 균등하며 투수계수가 큰 모래지반에서 시간경과에 따른 Set Value 감소와 Set-up 현상은 항타시 발생한 과잉간극수압의 소산 때문이기 보다는 항타후 모래지반에서 시간경과에 따른 입자간의 결합력 증가에 기인하는 것으로 사료되며, 시간경과에 따른 지지력 변화는 지반내 입자성분을 고려한 다각적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 6. 참고문헌

1. 백규호, 이종섭, 이승래(1993), “모래지반에 타입된 모형 개단강관 말뚝의 지지력 분석”, 한국지반공학회지, 제 9권, 제 1호, pp.21~44.
2. 이영남, 이종섭, 박영호, 이형주(1995) “항타시 강관말뚝의 손상사례 분석”, 강관말뚝의 현장거동에 관한 세미나, 대한토목학회 & 한국강관협회, pp.67~84.
3. Fugro-Engineers B.V.(1996), “Interpretive Report, Phase I Ground Investigation, Jamuna Bridge Bangladesh,” Report No. K-2380/117.
4. Mitchell, J. K.(1986), “Practical Problems from Surprising Soil Behavior,” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp.259~289.