

선단지지력이 보강된 강관말뚝공법

Steel Piling method with increased end bearing

이명환¹⁾ : Lee, Myung Whan 홍현성²⁾ : Hong, Hun Sung 이원재³⁾ : Lee, Won Jac 전영석⁴⁾ : Jun, Young Suk 강영천⁵⁾ : Kang, Young Chun

¹⁾ 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.

²⁾ 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.

³⁾ 파일테크 차장, Senior researcher, PILETECH consulting engineers.

⁴⁾ 파일테크 대리, Researcher, PILETECH consulting engineers.

⁵⁾ (주)태화강재 이사, Director, Tae-Wha Engineering Co.

SYNOPSIS : A newly developed steel piling method which can increase and end bearing capacity has used a separable pile shoe and a pile driving energy transmitter or a method using inner-pile hammer. Consequently a pile driveability into the soil has been maximized. As a result of this method, we have been able to obtain more than two times higher capacity than usual steel piling method.

1. 서 론

우리나라는 국가 경제규모에 비하여 많은 물량의 말뚝기초를 사용하고 있다. 말뚝기초를 말뚝재료별로 보면 콘크리트말뚝이 300만톤/년, 강관말뚝이 26만톤/년정도 사용되고 있다. 이와 같은 물량은 우리나라 경제규모의 10배이며, 세계적으로 건설활동이 활발한 것으로 알려진 일본의 연간 콘크리트말뚝 물량 600만톤 및 강관말뚝 물량 100만톤과 비교해 보면 분명해 진다.

우리나라의 말뚝사용물량은 지속적인 주택건설수요와 경부고속철도, 서해안 개발 및 영종도 신공항 건설 등 대규모 사회간접자본시설의 확충으로 향후에도 그 물량이 늘어날 것으로 전망된다. 더구나 향후의 건설사업은 종래 내륙지방의 비교적 양호한 지반조건 보다는 해안지역의 연약한 지반조건에서의 건설이 많아질 것으로 예측되어 말뚝의 대구경화 및 장대화가 가속화 될 전망이다. 이에 따라 말뚝기초의 규격이나, 설계, 시공개념도 바뀌어 갈 것으로 예상된다.

이처럼 많은 물량의 말뚝이 사용되고 있음에도 불구하고 국내의 말뚝기초 관련기술 수준은 극히 낮은 실정이다. 우리나라의 말뚝기술 수준 낙후는 말뚝의 설계 및 시공전반에 걸친 제반요인으로 부터 기인한 결과이며 이를 말뚝재료별로 설명하면 아래와 같다.

먼저 기성 콘크리트말뚝은 말뚝의 재료비가 강관말뚝에 비하여 저렴하다는 장점으로 각종 구조물 기초에 폭넓게 사용되고 있다. 국내에서 가장 많이 사용되는 기성 콘크리트말뚝은 원심력 PC말뚝으로 콘크리트의 압축강도가 500 kg/cm^2 인 재질을 갖고 있다. 그러나 실제 말뚝 시공시 낮은 재질강도와 시공관리의 부적절함 등의 원인으로 두부파손, 중파, 종방향 균열발생 등 결함이 발생하기 쉽고 따라서 구조물의 안전에 치명적인 위해가 될 수 있다.

1992년부터 국내에서도 사용되기 시작한 원심력 고강도 콘크리트말뚝(PHC말뚝)은 콘크리트의 재질강도가 800 kg/cm^2 로 기존의 원심력 PC말뚝보다 60%높으며 따라서 기존의 문제점 해소에 큰 기여를 하고 있다. 실제로 PHC말뚝을 향타시공해 본 결과 말뚝의 두부손상, 중파 등이 크게 감소한 것으로 나타나고 있다.

이는 말뚝재료의 재질강도가 높은 데에도 원인이 있으나 보다 근본적인 원인은 철저한 품질관리가 병행되었기 때문이다. 이와 같은 장점이 널리 인식되자 이음이 필요한 장대말뚝 시공현장에서의 PHC말뚝 적용은 급속도로 확산되어 현재 국내에서 사용되는 전체 기성 콘크리트말뚝의 약 40%를 점유할 정도로 많이 사용되고 있다.

그러나 PHC말뚝을 항타시공 함에 있어서도 많은 문제점들이 제기되고 있다. 그중 심각한 문제점으로는 말뚝의 압축강도가 높아짐에 따라 취성 또한 높아져 재료파손이 발생하고 있으며 특히 이음시공시 중간지층이 조밀한 지반조건을 갖고 있을 경우에는 용접이음이 불가능할 정도의 두부손상, 종방향 균열 등이 발생하고 있다. 이와 같은 시공의 결과는 이음부에서의 취약으로 나타나게 되고 축조되는 구조물의 안전을 위협하기도 한다.

강관말뚝은 콘크리트말뚝에 비하여 재질강도가 높고 따라서 취급, 운반, 항타시 말뚝재료의 손상가능성이 낮다. 따라서 장대말뚝의 경우에도 신뢰도 높은 이음시공이 가능하고 1개 말뚝이 받을 수 있는 지지력도 콘크리트말뚝에 비하여 높다. 이와 같은 장점은 콘크리트말뚝에 비해 불리한 경제성에도 불구하고 주요 토목구조물 기초에는 강관말뚝이 채택될 수 있도록 해주고 있다.

실제로 우리나라에서도 이와 같은 강관말뚝의 장점으로 연간 공사비 기준 1000억원 이상의 강관말뚝이 사용되고 있다. 그러나 강관말뚝의 실무 적용현황을 세부적으로 분석해 보면 의외로 많은 문제점들이 내포되어 있음을 알 수 있다.

강관말뚝과 관련한 여러가지 문제점들중 가장 심각한 것은 그 경제성이다. 우리나라에서 사용될 수 있는 강관말뚝의 재질은 건설부 제정 「구조물기초 설계기준」에 의하면 아래의 2가지 재질로 구분된다.

SWS41 강관말뚝, 허용압축응력 = 1400 kg/cm²

SWS50 강관말뚝, 허용압축응력 = 1900 kg/cm²

강관말뚝 재질의 허용압축응력과는 상관없이 실제 강관말뚝의 설계는 과거의 경험식에 의하고 있다. 아래의 표 1에는 국내에서 실제로 적용되는 몇가지 설계사례를 대상으로 하여 말뚝재질이 허용할 수 있는 하중과 실제 설계내용을 비교 분석하였다.

표 1. 국내의 강관말뚝 설계현황

번호	말뚝 규격		단면적 (cm ²)		재료의 허용하중 (ton)		실제설계 (ton)	비고
	직경 (mm)	두께 (mm)	총단면적	부식 2mm제외 순단면적	SWS41	SWS50		
1	609.6	12	225.3	187.1	261.9	355.5	134.0	고속철도
2	508.8	12	206.1	171.2	239.7	325.3	120.0	"
3	914.4	16	451.6	394.3	552.0	749.2	300.0	고속도로
4	812.8	16	400.5	349.6	489.4	664.2	207.0	"
5	609.6	12	225.3	187.1	261.9	355.5	121.34	"
6	508.0	12	187.0	155.2	217.3	294.9	90.0	"
7	406.4	9	112.4	87.0	121.8	165.3	80.0	고속도로
8	812.8	16	400.5	349.6	489.4	664.2	210.0	LNG인수기지
9	711.2	9	198.5	154.0	215.6	292.6	155.0	항만

표 1에 나타난 내용을 보다 상세하게 말뚝의 재질강도와 대비하여 보면 표 2와 같이 정리할 수 있다.

표 2. 국내의 설계와 말뚝재료의 허용하중과의 대비

번호	SWS41대비 (%)	SWS50대비 (%)	비고
1	51.2	37.7	
2	50.1	36.9	
3	54.3	40.0	
4	42.3	31.2	
5	46.3	34.1	
6	41.4	30.5	
7	65.7	48.4	
8	42.9	31.6	
9	71.9	53.0	

표 2에서도 나타난 바와 같이 우리나라의 강관말뚝 설계는 말뚝재료가 허용하는 하중과 대비해 볼 때 SWS41강관말뚝은 50%정도, SWS50강관말뚝은 40%미만이 되고 있음을 알 수 있으며, 이와 같이 말뚝재료가 허용하는 지지력의 극히 일부만을 활용할 수 밖에 없는 이유는 지반조건과 관련되는 항타시공의 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다.

이상에서 나타난 바와 같이 공약성이 큰 주요 구조물의 안전을 확보하기 위하여 강관말뚝의 적용은 필수적이다. 그러나 실제 강관말뚝의 설계 및 시공기술은 극히 낙후되어 국가적으로 엄청난 예산이 낭비되고 있는 실정이다.

본 공법은 이와 같은 국내의 건설여건에서 강관말뚝의 지지력 원리를 분석하고 분석된 원리에 따라 최적의 시공방안을 도출하였다. 그 결과 강관말뚝의 안전성과 경제성을 크게 향상시킬 수 있었다.

2. 공법의 원리

국내의 경우 강관말뚝은 선단부가 개단상태(open ended)로 항타시공된다. 항타관입 초기에는 개방된 선단부를 통하여 흙이 강관말뚝의 내부에 차오르게 된다. 강관말뚝 내부로 올라오는 흙은 관내토라 부르며 항타초기에는 말뚝이 관입되는 깊이만큼의 흙이 강관말뚝 내부에 차오른다. 강관말뚝이 점차 깊은 곳으로 항타 관입되면 강관말뚝 내벽과 차오르는 관내토 사이에서 내주면 마찰력이 발생한다. 강관말뚝이 점차 깊은 곳으로 관입됨에 따라 지반조건도 조밀해지고 관내토의 조건도 조밀한 상태가 된다. 이에 따라 내주면 마찰력도 증가하게 되고 이 마찰력이 관내토가 차오르는 현상에 저항하게 된다. 말뚝이 더욱 깊은 곳까지 관입되면 내주면마찰력이 최대로 발휘되어 말뚝을 더 관입시키더라도 관내토가 말뚝내부로 차오르는 현상이 중지되고, 이때부터는 개단강관말뚝도 선단부가 폐색된 말뚝과 같은 거동을 하게 된다.

대부분의 항타공법에서는 말뚝머리에 가해지는 항타에너지가 지반의 저항보다 큰 경우에 말뚝이 지반속으로 관입되게 된다. 항타에너지는 종량 W 의 램이 높이 h 의 낙하고를 갖고 낙하함으로써 발생된다. 이때 항타장비 내부의 에너지 손실요인을 제외한 실제 말뚝머리에 가해진 항타에너지는 해머의 효율 e_h 를 곱하여 산출되며 $e_h W \cdot h$ 와 같이 표시된다. 말뚝에 가해진 항타에너지($e_h W \cdot h$)는 말뚝재료의 탄성압축에 그 일부만이 사용되며 이 값을 제외한 에너지가 말뚝이 지반내에 관입되는데 사용된다.

항타에너지에 대한 지반저항은 말뚝면적과 이를 둘러싸고 있는 주변지반간의 마찰저항과 말뚝선단부 아랫쪽 지반으로 부터의 선단저항으로 구성된다. 따라서 말뚝이 지반속에 보다 깊은 곳까지 관입되기 위해서는 전술한 「마찰저항+선단저항」보다 큰 타격에너지가 말뚝에 가해져야 한다.

앞에서도 설명한 바와 같이 말뚝기초가 큰 지지력을 얻기 위해서는 보다 견고한 지반까지 항타관입되어야 한다. 말뚝이 지지력이 큰 지반까지 관입되면 지반으로 부터의(마찰저항+선단저항)값도 커지게 되고 따라서 보다 큰 항타에너지가 필요하게 된다. 즉 말뚝이 보다 큰 지지력을 얻기 위해서는 보다 큰 항타에너지로 항타하여야 한다.

그러나 큰 말뚝지지력을 얻기 위하여 항타에너지를 무한정 높게할 수는 없다. 왜냐하면 말뚝재료에 과대한 항타에너지가 가해지면 말뚝재료의 파손이 발생하기 때문이다. 말뚝재료의 파손은 단위면적당의 항타응력 값이 어느 일정한 기준값 이상이 되는 경우에 발생한다. 기준 항타응력은 콘크리트말뚝의 경우에는 콘크리트 압축강도의 60%이며 강관말뚝의 경우에는 강관재료의 항복강도의 90%가 일반적으로 적용된다.

이상과 같은 말뚝의 항타관입 과정으로 인하여 일정규격의 말뚝을 항타관입하여 기대할 수 있는 말뚝의 정적지지력은 일정한 한계값 이하가 될 수 밖에 없다. 그 결과 주요 토목구조물 기초에 사용되는 강관말뚝의 설계지지력은 앞의 표 1과 같은 정도가 되며 말뚝재료의 활용은 표 2에 표시한 바와 같이 강관재질강도(SWS50기준)의 30~50%수준에 머무르게 된다.

본 공법의 원리는 이상에서 설명한 기존 강관말뚝의 항타 미케니즘을 분석하여 그 취약점을 보완하여 고안되었다.

본 공법에서는 강관말뚝의 선단부에 그림 1과 같은 분리선단부를 제작 삽입하여 강관말뚝을 폐단(close ended)상태로 만들어 준다. 분리선단부의 삽입은 강관말뚝을 항타하기전에 분리선단부를 먼저 항타위치에 세워놓은 후 그위로 일반적으로 사용하는 개단 강관말뚝을 씌워줌으로써 용이하게 시행할 수 있다. 분리선단부를 장착한 강관말뚝의 항타시공 과정은 1차와 2차의 항타과정을 통해 지반속으로 항타관입하게 된다. 그림 2는 1차항타 과정을 나타내 주고 있는데 이 과정은 재래식 일반항타 과정과 동일하다. 말뚝의 항타관입은 말뚝 머리에 가해지는 항타에너지에 의하며 이때의 항타에너지는 그림 3에 표시한 바와 같이 ① 말뚝자체의 탄성압축 ② 주변부의 저항 ③ 선단부의 저항을 극복하는데 사용된다.

1차 항타는 말뚝의 선단부가 어느정도의 지지력을 갖는 지지층에 도달할 때까지 계속한다. 말뚝선단부가 지지층까지 도달하였는지 여부는 일반적으로 항타말뚝에서 채택되고 있는 판단기준인 타격당 관입량을 기준으로 하여 판단한다.

2차 항타는 1차 항타가 완료된 후 실시하는데 여기에는 두가지 방법을 채택할 수 있다. 첫째방법은 항타에너지 전달장치(mandrel)를 사용하며 둘째방법은 말뚝 내부에서 내부해머(hammer)를 사용하는 방법이 있다. 두가지 방법 모두 공법의 원리에 있어서는 유사하며 기존의 강관말뚝 항타공법의 취약점을 보완한 것이다.

먼저 항타에너지 전달장치를 이용한 2차 항타과정은 그림 4에 나타내었다. 1차 항타가 완료된 강관말뚝의 중공부내에 항타에너지 전달장치를 삽입한다. 항타에너지 전달장치는 그 외부직경이[강관말뚝 내부직경 -50 mm]정도이며 두께가 25 mm정도인 강관으로 제작한다.

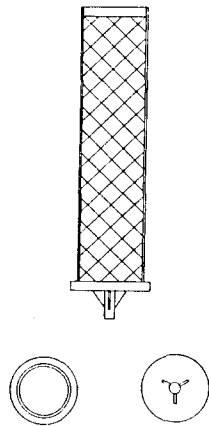


그림 1. 분리선단부

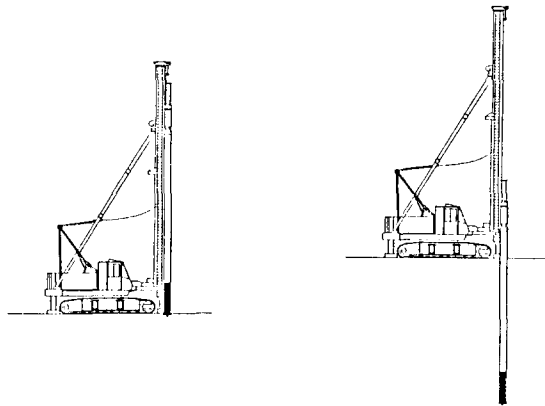


그림 2. 1차 항타과정



그림 3. 1차 항타시의 항타에너지 작용

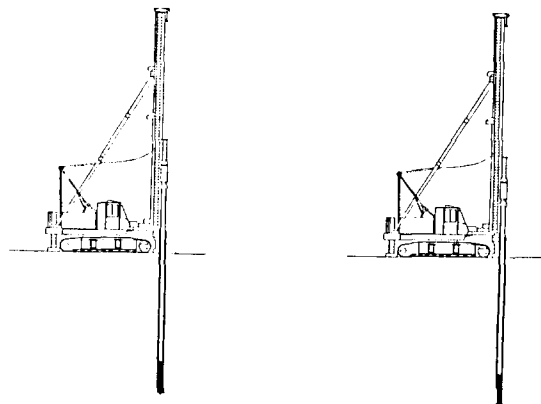


그림 4. 2차 항타과정(항타에너지 전달장치 사용)

항타에너지 전달장치의 단면적은 우리가 일반적으로 사용하는 강관말뚝의 단면적과 대비해 볼때 상당히 큰 값을 갖는다. 표 3에는 국내에서 많이 사용되는 강관말뚝과 그 규격에서 사용하는 항타에너지 전달장치의 규격 및 단면적을 표시하였다. 표 3에서도 나타나고 있듯이 국내에서 많이 사용하는 직경 406.4 mm×두께 9 mm의 강관말뚝 재질단면적이 112.4 cm²인데 비하여 직경 338.4 mm×두께 25 mm의 항타에너지 전달장치의 단면적은 246.1 cm²가 된다.

표 3. 국내에서 일반적으로 사용하는 강관말뚝 규격 및 그때의 항타에너지 전달장치 규격

말뚝규격(A)			항타에너지 전달장치 규격(B)			단면적 대비 (B/A)
직경(mm)	두께(mm)	단면적(cm ²)	직경(mm)	두께(mm)	단면적(cm ²)	
406.4	9	112.4	338.4	25	246.1	2.19
508.0	10	156.5	438.0	25	324.4	2.07
609.6	12	225.3	535.6	25	401.0	1.78
711.2	12	263.6	637.2	25	480.8	1.82

이와 같은 규격을 갖는 항타에너지 전달장치의 길이는 말뚝길이와 동일한 것을 사용한다. 앞에서 설명한 바와 같이 강관말뚝의 선단부에는 이미 분리선단부가 장착되어 있으며 따라서 삽입된 항타에너지 전달장치는 분리선단부 윗쪽에 위치하게 된다. 결국 항타에너지 전달장치는 분리선단부의 길이만큼 말뚝머리 윗쪽으로 돌출하게 된다.

이와 같은 상태에서 2차 항타를 실시하면 항타에너지는 말뚝머리 윗쪽으로 돌출된 항타에너지 전달장치에 전달되게 된다. 이때 항타에너지는 1차 항타시보다 2배이상 큰 에너지를 사용할 수 있다. 이는 항타에너지가 전달되는 항타에너지 전달장치의 재질은 강관말뚝과 동일하지만 표 3에 표시한 바와 같이 그 단면적이 강관말뚝의 2배 이상이 되기 때문이다. 즉 강관말뚝 항타시보다 2배이상의 큰 항타에너지에서도 재료가 파손되지 않기 때문에 보다 큰 지지력을 갖는 조밀한 지지층까지 항타관입이 가능하다.

항타에너지 전달장치를 사용하면 큰 단면적을 활용하여 보다 큰 항타에너지로 항타를 실시하는 이점외에 그림 5에 표시한 바와 같이 가해지는 모든 항타에너지가 주변마찰저항이 배제된 상태에서 말뚝의 분리선단부에만 전달되어 결과적으로 보다 큰 선단지지력을 얻을 수 있다.



그림 5. 2차 항타시의 항타에너지 작용

실제 말뚝을 향타시공할 때 얼마만큼의 에너지가 선단부와 주면부 저항을 극복하는데 사용되는지는 측정이 곤란하다. 표 4에는 국내의 여러가지 지반조건에서 강관말뚝 향타시 측정된 주면마찰력과 선단지지력을 나타내 주고 있다. 말뚝향타시 향타에너지의 분포는 표 4에 표시한 바와 같이 반드시 일치하지는 않지만 상당한 에너지가 주면마찰력 극복에 사용되고 있음을 알 수 있다. 주면마찰력이 낮은 값을 갖는 지반에서의 선단지지력은 상대적으로 큰값을 갖는데 비하여 큰 주면마찰력이 나타나는 지반에서는 상대적으로 낮은 선단지지력이 나타나는 것에서도 앞서서의 설명이 입증됨을 알 수 있다.

표 4. 향타시 측정된 선단지지력과 주면마찰력의 비교

번호	주면마찰력 (ton)	선 단 지 지 력		비 고
		전체(ton)	단위면적당 (ton/m ²)	
1	99.0	178.0	1372.2	B공단, φ 406.4 mm×9 mm(t)
2	140.8	53.6	413.2	B공단, φ 406.4 mm×9 mm(t)
3	250.4	20.8	102.6	I항구, φ 508.0 mm×9 mm(t)
4	103.0	59.7	294.5	I항구, φ 508.0 mm×9 mm(t)
5	138.5	52.5	259.0	I항구, φ 508.0 mm×9 mm(t)
6	203.9	25.1	123.8	I항구, φ 508.0 mm×9 mm(t)
7	132.1	32.8	252.9	아파트 현장, φ 406.4 mm×9 mm(t)
8	51.0	75.0	578.2	아파트 현장, φ 406.4 mm×9 mm(t)
9	62.4	215.7	739.0	고속도로 현장, φ 609.6 mm×12 mm(t)
10	121.4	32.0	246.7	K단지, φ 406.4 mm×9 mm(t)
11	190.0	23.0	177.3	K단지, φ 406.4 mm×9 mm(t)
12	193.4	15.4	118.7	K단지, φ 406.4 mm×9 mm(t)
13	95.9	105.9	816.4	고속도로 현장, φ 406.4 mm×9 mm(t)
14	19.0	191.4	1475.5	고속도로 현장, φ 406.4 mm×9 mm(t)
15	149.0	36.0	277.5	C공단, φ 406.4 mm×9 mm(t)
16	173.0	39.0	300.7	C공단, φ 406.4 mm×9 mm(t)
17	104.0	69.0	531.9	C공단, φ 406.4 mm×9 mm(t)
18	208.6	52.6	180.2	Exp. railway, φ 609.6 mm×12 mm(t)
19	111.0	136.0	671.0	고속도로 현장, φ 508.0 mm×12 mm(t)

이상에서 알아본 바와 같이 본 공법은 지반조건에 따라 전체 향타에너지의 상당히 큰 부분을 저항하는 주면마찰저항을 배제함으로써 분리선단부를 선단지지력이 극대화되는 지반까지 향타관입시킬 수 있다.

결과적으로 본 공법을 사용하면 정상적인 향타에 의한[주면마찰력+선단지지력]에 추가하여 극대화된 선단지지력을 얻을 수 있게된다. 분리선단부를 향타관입하는 데에는 앞서서 설명한 향타에너지 전달장치(mandrel)를 사용하거나 그림 6에 표시한 것과 같이 말뚝내부에 내부해머를 삽입하고 이를 사용하여 분리선단부만을 향타하여 선단지지력을 극대화할 수 있다. 내부해머를 사용할 때에도 향타에너지는 주면마찰력이 배제된 상황이며 공법의 원리는 동일하다.

2차 향타가 완료된 후 향타에너지 전달장치 또는 내부해머를 제거하고 말뚝의 중공부에 콘크리트를 타설함으로써 본 공법을 완료하게 된다.

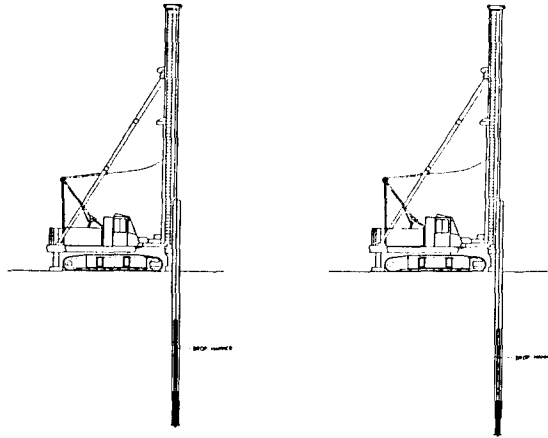


그림 6. 2차 항타과정(내부해머 사용)

3. 공법의 효과

본 공법을 사용하여 시공한 말뚝의 지지력은 앞에서 설명한 공법의 원리에서 나타난 바와 같이 국내에서 일반적으로 사용하는 개단 강관말뚝의 지지력과는 상이하다. 이러한 상이한 지지력 개념을 재래식 개단강관말뚝의 지지력과 비교하여 설명하기로 한다.

먼저 1차 항타가 완료된 시점에서의 본 공법 사용말뚝의 지지력은 말뚝의 선단부가 분리선단부 삽입으로 완전폐색되어 기존의 개단강관말뚝의 지지력과는 차이가 난다.

말뚝의 선단부 폐색효과에 대한 국내의 연구결과(백규호, 1994)에 의하면 선단부가 폐색된 말뚝의 지지력은 선단부가 개단상태인 말뚝의 지지력보다 큰 것으로 보고되고 있다.

이처럼 개단말뚝과 폐단말뚝의 지지력이 차이가 발생하는 이유를 말뚝지지력을 구성하는 두가지 성분, 선단지지력과 주변마찰력으로 구분하여 알아보기로 한다. 말뚝의 관입초기에는 폐단말뚝의 선단지지력이 개단말뚝의 선단지지력 보다 1.6배 정도 큰 값을 갖지만 관입깊이가 증가함에 따라 궁극적으로는 거의 같은 선단지지력을 갖게되는 것으로 보고하고 있다.

이와 같이 개단말뚝의 선단지지력이 폐단말뚝의 선단지지력 보다 낮은 이유는 개단말뚝의 선단부 폐색효과에 기인한다. 즉 개단말뚝의 선단부가 조밀한 선단지지층에 충분한 깊이까지 항타되어 관내토에 의한 내주면마찰력이 최대가 되기 전까지는 충분한 선단지지력이 발휘되지 못하기 때문이다. 이러한 관내토 폐색효과는 실무 설계에서도 채택되고 있다.

이상에서 설명한 바와 같이 본 공법을 적용하면 1차 항타가 완료되었을 때의 선단지지력은 기존의 개단말뚝 공법으로 얻을 수 있는 선단지지력보다 큰 값을 얻을 수 있다고 결론지을 수 있다. 물론 이론상 개단강관말뚝을 표준관입시험 N값이 50이상인 조밀한 지지층내에 충분히 항타관입시키면 완전한 폐색이 이루어지고 폐단말뚝과 같은 정도의 선단지지력을 얻을 수 있다. 그러나 지반조건상 주변마찰력이 큰 경우에는 가해지는 항타에너지의 대부분이 주변마찰저항 극복에 사용되며 따라서 말뚝의 선단부가 충분한 선단지지층까지 관입되지 못한다. 이와 같은 상황으로 인하여 실제 현장에서 이루어지는 말뚝항타에서는 개단강관말뚝의 선단지지력은 폐단말뚝의 선단지지력 보다 낮게된다. 즉 본 공법을 적용하면 폐색효과의 차이로 인하여 기존의 개단강관말뚝 항타시보다 높은 선단지지력을 얻을 수 있다.

본 공법에서와 같은 강관말뚝의 선단부 폐색은 말뚝의 선단지지력 뿐만아니라 주변마찰력에도 영향을 미친다. 개단강관말뚝을 항타시 공하면 토사가 강관말뚝의 내부에 차오르게 된다. 물론 완전한 선단부 폐색이 이루어지면 이러한 현상은 중지되지만, 그때까지의 과정에서는 상당한 토사가 강관말뚝 내부로 차오르게 된다. 따라서 강관말뚝 외부의 지반조건은 말뚝이 관입되기 전보다 약간 더 조밀해 지는 정도가 된다. 반면 폐단말뚝을 항타관입하면 강관말뚝 관입으로 형성되는 체적만큼의 토사는 강관말뚝 주변으로 밀려나게 된다. 밀려난 토사는 한정된 범위내에 재분포하게 되며 따라서 강관말뚝 주변의 지반조건을 조밀하게 변화시키고 말뚝의 주변마찰력에 직접적인 영향을 미치는 횡방향 토압계수가 증가하게 된다. 결과적으로 폐단말뚝의 주변마찰력은 개단말뚝의 주변마찰력보다 큰 값을 갖게된다.

모형말뚝 시험으로 연구한 개단말뚝과 폐단말뚝의 주면마찰력을 대비한 결과를 인용하면 말뚝관입초기에는 폐단말뚝의 주면마찰력이 개단말뚝의 주면마찰력의 1.2배 정도이나 관입깊이가 증가할수록 그 차이는 크게되어 약 1.4배 정도의 차이를 갖는 것으로 보고되고 있다.

이상에서 설명한 바와 같이 1차 항타로 인한 본 공법적용의 효과는 분리선단부에 의한 선단부 폐색에 기인한다. 즉 선단부가 폐색되어 선단지지력 및 주면마찰력이 기존의 개단강관말뚝보다 높아지는 효과를 기대할 수 있다.

그러나 이와 같은 선단부가 폐색된 강관말뚝은 외국에서도 실용화 되어 있으며 새로운기술로 볼 수 없다. 본 공법의 효과는 2차 항타 과정에 있다. 2차 항타에서는 앞의 공법의 원리에서 설명한 바와 같이 1차 항타가 완료된 후 항타에너지 전달장치(mandrel) 또는 내부 해머를 사용하여 주면마찰 저항이 배제된 상태에서 항타에너지가 분리선단부에 직접 전달된다.

강관말뚝을 항타시공하면 말뚝의 선단부가 관입될 수 있는 지반조건은 주면마찰력의 크기에 크게 영향 받는다. 이는 말뚝에 가해지는 항타에너지의 전달과정이 「마찰저항+선단저항」으로 나뉘어 작용하기 때문이다. 즉 앞의 표 4의 말뚝번호 14와 같이 주면마찰력이 극히 낮은 지반조건일 경우 말뚝선단부는 단위면적당 선단지지력이 1475.5 ton/m^2 에 이르는 극히 견고한 지층까지 관입이 가능하다. 그러나 말뚝번호 3, 6, 11, 12, 18에서와 같이 큰 주면마찰력이 나타나는 지반조건에서는 단위면적당 선단지지력이 200 ton/m^2 미만의 극히 낮은 값을 얻을 수 있다.

이처럼 개단강관말뚝의 실제 선단지지력이 낮은 주원인은 큰 주면마찰력으로 인한 항타에너지의 분산효과이다.

본 공법의 2차 항타 과정에서의 주면마찰저항이 배제된 상태에서 가해지는 모든 항타에너지가 분리선단부 관입에 사용되면 극히 높은 선단지지력을 얻을 수 있다. 분리선단부만을 항타하여 얻을 수 있는 선단지지력의 상한값은 분리선단부의 재질, 규격 및 가해지는 항타에너지에 따라 상이하지만, 표 4의 일반적인 강관말뚝 및 항타장비를 사용하는 경우에서 나타난 실적에 의하면 1500 ton/m^2 이상이 될 수 있음을 알 수 있다.

또한 2차 항타시에는 일반적으로 사용하는 강관말뚝 단면적 대비 2배정도의 큰 단면적을 갖는 항타에너지 전달장치를 사용하거나 항타 에너지로 인한 말뚝재료 손상 우려가 없는 내부 해머를 사용하여 선단부를 직접 타격하기 때문에, 일반적인 개단강관말뚝 항타에 사용하는 것보다 2배 정도 큰 항타에너지를 사용할 수 있다. 즉 일반 항타에너지의 2배인 항타에너지를 사용할 경우 이론상 2배의 선단지지력을 기대할 수 있다. 이와 같은 가정에 입각할 때 분리선단부만을 항타관입하면 이론상 3000 ton/m^2 의 선단지지력을 기대할 수 있다.

이상과 같은 가정을 입증하기 위하여 시험시공을 실시하였다. 말뚝항타가 시행된 지반조건은 그림 7과 같다. 여기에 직경 406.4 mm × 두께 9 mm의 개단강관말뚝과 분리선단부를 장착한 시험말뚝을 항타하였다. 말뚝항타는 램중량이 5 ton인 유압해머를 사용하였으며 개단말뚝과 분리선단부를 갖는 말뚝 모두 14.5 m까지 관입되었다.

1차 항타가 완료된 후 항타에너지 전달장치를 삽입하고 2차 항타를 실시하였다. 2차 항타에는 1차 항타시 보다 큰 용량의 해머가 필요하지만 본 시험시공에서는 1차 항타에 사용한 것과 동일한 해머를 사용하였다. 따라서 본 시험시공에서는 주면마찰력이 배제된 상태에서 일반적인 항타장비를 사용하여 분리선단부를 항타할 경우 기대할 수 있는 선단지지력의 상한값만을 측정할 수 있었다.

2차 항타를 실시한 결과 분리선단부는 0.3~0.4 m 정도의 추가관입이 가능하였다. 말뚝의 지지력은 항타후 2개월이 경과한 시점에서 동재하시험으로 확인하였다. 말뚝재하시험 결과는 표 5에 요약한 바와 같다.

표 5. 시험시공결과

말뚝번호	주면마찰력	선 단 지 지 력		비 고
	(ton)	(ton)	(ton·m ²)	
T1	118.4	162.1	1249.6	개단강관말뚝 분리선단부 장착 시험말뚝 " " "
T3	73.3	251.0	1935.0	
T5	94.9	210.1	1619.7	
T6	153.2	232.9	1795.4	
T7	69.3	226.0	1742.3	

시험시공이 실시된 지반조건은 비교적 큰 값의 주면마찰력이 나타나고 있으며 선단지지력도 상당히 큰 값을 갖는다. 개단강관말뚝의 선단지지력이 1249.6 ton/m^2 인데 비하여 주면마찰저항이 배제된 상태에서 분리선단부 만을 향타한 결과 $1619.7 \sim 1935.0 \text{ ton/m}^2$ 의 선단지 지력을 얻을 수 있었다. 이러한 시험시공 결과로 부터 분리선단부의 2차 향타로 말뚝이 선단지지력을 30~55%까지 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

시험시공이 실시된 지반조건은 본 공법 적용으로 인한 지지력 증대효과가 현저한 조건은 되지 못한다. 본 공법 적용으로 큰 지지력 증대효과를 기대할 수 있는 지반조건은 주면마찰력이 큰 지반조건이다. 큰 값의 주면마찰 저항으로 인하여 말뚝선단부가 지지력이 큰 선단지지층까지 향타 관입되지 못하는 지반조건일 경우 본 공법 채택으로 기대할 수 있는 지지력 증대효과가 높게된다. 예를 들어 표 4 에 수록한 여러 지반조건중 주면마찰력이 상대적으로 큰 조건에서 큰 지지력 증대를 기대할 수 있다. 이를 좀 더 상세히 비교하기 위하여 표 6에는 일반적인 향타장비를 사용하여 표 4의 현장조건에 본 공법을 적용한 경우의 예상지지력을 추정하여 보았다. 본 계산에서 예상최대 선단지지력은 1500 ton/m^2 로 가정하였다.

표 6에서 추정한 바와 같이 본 공법을 적용하더라도 지지력 증가효과가 그리 크지 않은 경우도 나타나고 있다. 그러나 대부분의 현장 조건에서는 상당히 큰 지지력 증가가 나타날 것으로 기대된다. 여기서 본 추정은 2차 향타시에도 1차 향타시와 같은 향타장비를 사용하는 경우에 대한 가정이며, 실제 시공시에는 1차 향타장비보다 2배 정도 큰 향타에너지를 가할 수 있으며 따라서 지지력 증가효과도 클 것으로 기대된다.

표 6. 본 공법 적용시 예상지지력

번호	주면마찰력 (ton)	선 단 지 지 력				전체지지력 (ton)	선단지지력 증가 (%)	전체지지력 증가 (%)
		개단강관말뚝		본 공법 적용시				
		(ton)	(ton m^{-1})	(ton)	(ton/m^2)			
1	99.0	178.0	1372.2	194.6	1500.0	293.6	6.0	9.3
2	140.8	53.6	413.2	194.6	1500.0	248.2	263.0	27.7
3	250.4	20.8	102.6	304.0	1500.0	324.8	1462.0	19.8
4	103.0	59.7	294.5	304.0	1500.0	363.7	409.3	123.5
5	138.5	52.5	259.0	304.0	1500.0	442.5	479.2	133.2
6	203.9	25.1	123.8	304.0	1500.0	507.9	1111.6	121.8
7	132.1	32.8	252.9	194.6	1500.0	326.7	493.1	98.1
8	51.0	75.0	578.2	194.6	1500.0	245.6	159.4	94.9
9	62.4	215.7	739.0	437.8	1500.0	500.2	103.0	79.9
10	121.4	32.0	246.7	194.6	1500.0	316.0	508.0	106.0
11	190.0	23.0	177.3	194.6	1500.0	384.6	746.0	80.6
12	193.4	15.4	118.7	194.6	1500.0	388.0	1263.7	85.8
13	95.9	105.9	816.4	194.6	1500.0	290.5	83.7	44.0
14	19.0	191.4	1475.5	194.6	1500.0	213.6	1.7	1.5
15	149.0	36.0	277.5	194.6	1500.0	343.6	440.5	85.7
16	173.0	39.0	300.7	194.6	1500.0	367.6	398.8	73.4
17	104.0	69.0	531.9	194.6	1500.0	298.6	182.0	72.6
18	208.6	52.6	180.2	437.8	1500.0	646.4	732.4	147.5
19	111.0	136.0	671.0	304.0	1500.0	415.0	123.5	68.0

표 7에는 2차 항타시 사용한 항타장비 용량의 2배인 해머를 사용하여 분리선단부 만을 항타하여 3000 ton/m²의 선단지지력을 얻는 경우를 가정하여 말뚝의 예상지지력을 계산해 보았다.

표 7. 본공법 적용시 예상지지력(2차 항타시 1차 항타장비의 2배 용량 해머 적용)

번호	주면마찰력 (ton)	선 단 지 지 력				전 체 지 지 력 (ton)	선 단 지 지 력 증가 (%)	전 체 지 지 력 증가 (%)
		개 단 강 관 말 뚝		본 공 법 적 용 시				
		(ton)	(ton/m ²)	(ton)	(ton/m ²)			
1	99.0	178.0	1372.2	389.0	3000.0	488.0	118.5	76.2
2	140.8	53.6	413.2	389.0	3000.0	529.8	625.7	172.5
3	250.4	20.8	102.6	608.0	3000.0	858.4	2823.1	216.5
4	103.0	59.7	294.5	608.0	3000.0	711.0	918.4	239.0
5	138.5	52.5	259.0	608.0	3000.0	746.5	1058.1	290.8
6	203.9	25.1	123.8	608.0	3000.0	811.9	2322.3	254.5
7	132.1	32.8	252.9	389.0	3000.0	521.1	1086.0	216.0
8	51.0	75.0	578.2	389.0	3000.0	440.0	418.7	249.2
9	62.4	215.7	739.0	875.6	3000.0	938.0	305.9	237.3
10	121.4	32.0	246.7	389.0	3000.0	510.4	1115.6	232.7
11	190.0	23.0	177.3	389.0	3000.0	579.0	1591.3	171.8
12	193.4	15.4	118.7	389.0	3000.0	582.4	2426.0	178.9
13	95.9	105.9	816.4	389.0	3000.0	484.9	267.3	140.3
14	19.0	191.4	1475.5	389.0	3000.0	408.0	103.2	93.9
15	149.0	36.0	277.5	389.0	3000.0	538.0	980.6	190.8
16	173.0	39.0	300.7	389.0	3000.0	562.0	897.4	165.1
17	104.0	69.0	531.9	389.0	3000.0	493.0	463.8	185.0
18	208.6	52.6	180.2	875.6	3000.0	1084.2	1564.6	315.1
19	111.0	136.0	671.0	608.0	3000.0	719.0	347.1	191.1

본 공법을 적용할 경우 앞의 표 6 및 표 7에 나타난 바와 같이 기존의 개단강관말뚝 항타시 보다 지반조건에 따라 상이하나 2~3배 더 큰 말뚝지지력을 기대할 수 있다. 결과적으로 본 공법을 적용하면 기존 강관말뚝의 취약점인 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 공법개발의 의의

본 공법은 강관말뚝의 항타와 관련한 에너지 배분원리 및 지반의 특성을 감안하여 말뚝의 지지력을 극대화 시킨 방안이다.

선진 외국의 경우 강관말뚝의 선단부를 폐색하여 항타하는 공법은 이미 일반화 되어 있지만 본 공법에서와 같이 항타에너지를 주면마찰저항이 배제된 상태에서 분리될 수 있는 선단부에만 가하는 공법은 존재하지 않고 있다.

최근 이태리에서는 Multiton공법이라는 강관말뚝 공법이 개발되어 강관말뚝의 지지력을 향상시킨 것으로 보고되었다. 공법의 원리는 그림 8에 나타나고 있는 바와 같이 폐색된 강관말뚝 내부에 항타에너지 전달장치를 삽입하여 보다 큰 항타에너지로 항타할 수 있도록 고안하였다. 여기서 항타에너지 전달장치의 길이는 강관말뚝과 완전히 동일한 규격이 사용되도록 하여 항타에너지가 [말뚝단면적+항타에너지 전달장치의 단면적]에 동시에 작용하도록 하였다.

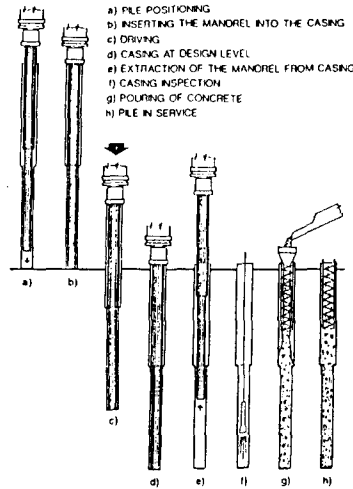


그림 8. Multiton공법의 개요

항타에너지 전달장치의 단면적이 강관말뚝의 2배일 경우 이론상 기존의 강관말뚝 항타에 사용하는 해머의 용량보다 3배 큰 해머를 사용할 수 있으며 따라서 보다 큰 지지력을 얻을 수 있는 공법이다.

그러나 이와 같은 대용량화는 항타장비 규격의 대규모화를 필요로 하여 다음과 같은 제약사항이 뒤따르게 된다.

- (1) 항타용해머의 대용량화로 항타장비 규격의 대규모화가 필요하다.
- (2) 항타에너지 전달장치를 항타초기에 삽입하여야 하므로 항타장비의 리더(leader)가 말뚝길이의 2배 이상이 되어야 한다.
- (3) 기존의 공법에 비하여 큰 항타에너지를 사용하므로 말뚝의 지지력을 크게 할 수 있으나 항타에너지가 [주면마찰저항+선단저항]으로 동시에 저항되는 바 기대할 수 있는 말뚝의 지지력에는 한계가 있다.

반면 본 공법에서는 2차 항타시 항타에너지가 주면마찰력이 배제된 상태에서 분리선단부에만 가해지도록 고안되었으므로 ① 비교적 작은 항타장비만으로도 시공이 가능하며 ② 지반조건 변화와 관계없이 어느 경우에도 선단지지력을 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다.

또한 본 공법에서는 주면마찰력과 선단지지력을 분리하여 측정할 수 있으며 따라서 보다 고급의 설계를 가능케 해준다.

이상에서 나타난 바와 같이 본 공법은 선진외국에서 가장 최신의 공법으로 알려져 있는 Multiton공법보다도 향상된 공법임을 알 수 있다. 따라서 공사비 측면에서도 가장 경제적인 시공이 가능하게 되었다. 그 결과 향후 예상되는 건설시장 개방시에도 국내기술의 우위를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 공법의 실무적용 방안

본 공법의 원리 및 공법적용의 이론적 효과는 앞에서 설명한 바와 같다. 그러나 본 공법을 실무에 적용하기 위해서는 아래와 같은 과정을 통하여 해당 지반조건과 축조되는 상부 구조물의 특성에 가장 적합한 말뚝규격, 시공장비를 선정하여야 한다.

1) 개략설계

지반조건을 토대로 하여 개략적인 말뚝규격(두께 및 길이)과 분리선단부의 규격(단면적과 길이)을 결정한다. 이때 개략적인 예상말뚝 지지력은 수정된 Meyerhof공식으로 주면마찰력을 계산하고 선단지지력은 1500 ton/m^2 개념 및 3000 ton/m^2 개념을 적용하여 계산한다.

2) 말뚝의 항타시공성 검토

지반조건과 말뚝규격 가정에 입각하여 파동이론 분석을 실시한다. 파동이론 분석에서는 말뚝의 예상극한지지력 뿐만 아니라 1차 항타 장비 및 2차 항타장비를 선정할 수 있다.

3) 시험시공

개략 설계개념에 입각하여 시험시공을 실시하고 동재하시험을 실시하여 주면마찰력과 선단지지력을 분리측정한다. 특히 주면마찰력은 항타시 측정과 항타후 일정시간이 경과한 후 재항타 측정을 실시하여 시간경과 효과를 설계에 반영하도록 한다.

4) 최종설계확정

시험시공 결과에 따라 말뚝규격(두께 및 길이), 분리선단부 규격(단면적 및 길이)을 결정하고 항타장비의 기종, 최종관입량 기준 등을 확정한다. 이때 측정되는 상부구조물의 하중조건에 따라 말뚝두께를 적의 조정하여 최적설계가 되도록 한다.

5) 시공 및 품질관리

본 공법을 적용하면 말뚝의 지지력을 말뚝재료가 허용할 수 있는 상한값까지 극대화할 수 있다. 따라서 시공시 품질관리의 중요성이 기존의 공법에 비하여 높다. 이를 위하여 본 공법 적용시에는 동재하시험 및 타격당 침하량 기록을 철저히 수행하여 품질관리에 만전을 기하도록 한다.

6. 결 언

앞에서 설명한 바와 같이 국내의 강관말뚝 설계 및 시공기술 수준은 극히 낮은 실정이다. 국내의 기술수준은 말뚝재료가 갖고 있는 성능의 40~60%정도만을 설계에서 활용하고 있으며, 이러한 경우에도 실제 시공시 설계하중이 미달되는 사례가 빈발하고 있다. 이는 말뚝기초의 지지력에 대한 충분한 이해가 되지 못하고 합리적 시공법 검토가 결여된 상태에서 시공이 이루어지고 있기 때문이다.

결과적으로 강관말뚝기초는 공익성이 큰 주요 토목구조물에 사용되고 있으나 기존의 공법으로는 축조되는 구조물의 안전이 보장되지 못하고 있으며 이에 수반하여 막대한 예산손실도 발생하고 있다.

본 공법은 공법의 원리및 효과에서 설명한 바와 같이 주면마찰저항이 배제된 상태에서 말뚝의 선단부를 확실한 지지층까지 관입시킬 수 있기 때문에 지지력 확보가 보장된다. 아울러 분리선단부의 2차 항타는 말뚝재료가 허용할 수 있는 상한값까지 실시하여 재료의 효율을 극대화 함으로써 경제성을 크게 향상시킬 수 있다.

표 8에는 기존의 개단강관말뚝 적용시의 개략적인 공사비와 본 공법 적용시의 공사비를 대비하였다. 본 공법 적용시에는 말뚝관입깊이에 따라 상이하지만 기존 공법대비 25~50%까지 예산을 절감할 수 있는 것으로 기대할 수 있다. 따라서 국내에서 강관말뚝 공사비가 연간 1000억원 정도인 것을 감안하면 본 공법적용으로 연간 300억원 이상의 예산을 절감할 수 있다. 이 계산은 단순히 국내의 강관말뚝 적용공사만을 대상으로 하였으며, 경제성 문제로 강관말뚝을 사용하지 못하는 공사에까지 본 공법이 확산되면 그 효과는 이보다 훨씬 클 것으로 전망된다.

표 8. 기존강관말뚝과 본 공법 적용시의 공사비 대비

말뚝 규격		설계하중 (ton)	공 사 비 (×1000원)					ton당 공사비	비 고
직경×두께(mm)	길이(m)		재료비	선단부	콘크리트	시공비	계		
406.4×9.0	10	80	353			40	393	4.91	기존공법
	20	80	706			80	786	9.83	
	30	80	1058			120	1178	14.73	
	40	80	1411			160	1571	19.64	
508.0×12.0	10	120	587			50	637	5.31	기존공법
	20	120	1174			100	1274	10.62	
	30	120	1762			150	1912	15.93	
	40	120	2349			200	2549	21.24	
609.6×12.0	10	140	707			60	767	5.48	기존공법
	20	140	1414			120	1534	10.96	
	30	140	2122			180	2302	16.44	
	40	140	2829			240	3069	21.92	
812.8×16.0	10	200	1258			80	1338	6.69	기존공법
	20	200	2515			160	2675	13.38	
	30	200	3773			240	4013	20.07	
	40	200	5030			320	5350	26.75	
406.4×8.0	10	160	314	100	75	100	589	3.68	본공법
	20	160	629	100	151	200	1080	6.75	
	30	160	942	100	226	300	1569	9.81	
	40	160	1258	100	302	400	2060	12.88	
508.4×10.0	10	250	491	150	118	125	884	3.54	본공법
	20	250	982	150	236	250	1618	6.47	
	30	250	1474	150	353	375	2352	9.41	
	40	250	1965	150	471	500	3086	12.34	

참 고 문 헌

1. 백규호(1994) "사질토지반에 타입된 개단강관말뚝의 지지력 특성", 한국과학기술원 박사학위 논문
2. A.Fioruzzi, P.Ceretti, L.F.Albert, S.Machetti(1991) "Example applications of a new type of steel, driven pile : 'Multiton'", Proceedings of the 4th International conference on Piling and Deep Foundations, STRESA, Italy, pp.221-230.