

주면마찰력을 보강한 저소음·저진동 말뚝공법(KSIP)에 관한 모형시험연구(I)

Model Tests of KSIP Method Increased Skin Friction

신민호^{*1}Shin, Min-Ho 전병승^{*2}Jun, Byung-Seung 김상훈^{*2}Kim, Sang-Hun 방윤경^{*3}Bang, Yoon-Kyung

^{*1} 금호건설 기술연구소 지반연구실장, Ph.D., Kumho Institute of Construction Technology

^{*2} 금호건설 기술연구소 연구원, Researcher, Kumho Institute of Construction Technology

^{*3} 대원전문대 토목과 조교수, Assistant Professor, Daewon Technical College

SYNOPSIS : In this study, a new SIP method, KSIP (KUMHO Spiral prebored, cement paste Injected, precast Pile) method which increases skin friction of piles, has been developed. Calculated and measured bearing capacity of piles have been analyzed by using PDA (Pile Driving Analyzer) in field, and bearing capacity and skin friction of KSIP were analyzed through the model pile test, for the shape of drilling surface, contents of cement paste, ageing and ground conditions.

Based on the field observation and testing, it is known that total and unit skin friction of KSIP were increased by 13 % and 51 %, respectively relative to those of plain SIP. When empirical formula such as Meyerhof were used, their prediction of total and unit skin friction showed underestimation, compared to the field tested values. Through the modified model test, increase of bearing capacity by 9 % and skin friction was proved with respect to cement contents, ageing effects and ground conditions, the convinced results will be expected.

1. 서 론

최근 환경문제에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 건설공사에 대한 소음, 진동, 및 분진 등의 규제가 엄격하게 강화되고 있는 상황에 놓여있다. 따라서 도심지 또는 주거지역과 인접한 건설현장에서 말뚝기초의 경우 항타시공으로 인한 소음 및 진동을 환경규제기준을 만족시키기 위해 무소음·무진동 또는 저소음·저진동 매입말뚝공법이 널리 적용되는 증가추세에 있다. 매입말뚝공법 가운데 일반적으로 SIP (Soil-cement Injected Precast Pile) 공법이 도심현장에서의 말뚝기초공법으로 많이 이용되고 있으나, 기존의 SIP 공법은 선굴착의 영향으로 인한 지반교란이 주면마찰력의 크기를 감소시켜, 결과적으로 말뚝지지력에 불리한 조건으로 작용하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 주면마찰력의 크기를 현격히 증가시킨 새로운 SIP 공법 (KSIP 공법, Kumho Spiral prebored, cement paste Injected, precast Pile) 을 개발하였으며, KSIP 공법의 현장적용 확대를 위해 시험시공을 실시하여 말뚝의 지지력 특성을 규명하였다. 이를 위해 매입말뚝 4본에 대한 동재하시험을 실시하고 그 결과를 계산치와 비교하였으며, 재하시험 결과에 대한 신뢰도를 확인하기 위해 타현장의 동재하시험 결과와 비교·분석하였다.

또한 다양한 조건하에서의 매입말뚝의 거동특성을 분석하기 위하여 모형말뚝시험을 수행하였다. 실제 현장의 상황을 재현하도록 모형토조를 제작하고, 천공형상에 따른 비교 (KSIP 공법과 SIP 공법의 거동비교), 주변부 시멘트페이스트의 시멘트함량 및 시간경과에 따른 거동 분석, 그리고 지반강도의 변화에 따른 말뚝의 지지력 및 주면마찰특성을 분석하도록 하였다.

2. KSIP 공법 개요

본 공법은 기존의 SIP 장비의 Auger head 선단부에 고정된 지반굴착용 비트에 반구형 팁을 부착하여 굴착함으로써 천공면에 요철을 주어 천공면의 조도, 즉 마찰효과를 증가시킴으로서 결과적으로 말뚝의 주면마찰력을 증대시키는 효과를 나타낸다.

KSIP 장비는 Fig. 1 과 같이 비트의 외면에 팁을 부착하는 간단한 구조로서, 천공작업 후 인발할 때 저질로 확정되므로 별도의 확정장비와 추가확정작업이 불필요하므로 시공성이 좋고 경제적 시공이 가능하다. 또한 나선형의 흙을 형성할 때 흙을 원심방향으로 자연스럽게 밀어내서 다지는 비삭성식으로 흙을 형성하므로 슬라임이 거의 발생하지 않으며, 말뚝의 선단지지력 저하의 염려가 없다.

비트에 부착하여 나선형 흙을 형성하는 반구형 팁의 크기는 오거드릴로 천공시 발생하는 여굴폭인 10~25 mm 와 사

용장비의 비트가 마모된 상태를 고려하여 반경 3.5 cm 의 텃이 가장 적절하다는 판단 하에 이를 적용하여 시험을 행하였다.

3. 현장시험시공

3.1 형상확인

실제 말뚝시공에 앞서 SIP 공법과 KSIP 공법으로 시공된 매입말뚝의 천공면 및 시멘트페이스트가 고결된 말뚝의 형상을 확인하였다. 그 결과 Fig. 2 와 같이 천공면과 말뚝 표면에 나선형의 연속적인 홈과 돌기가 형성되어 있으며, 요철과 함께 말뚝의 주변장이 증가된 것을 확인할 수 있었다.

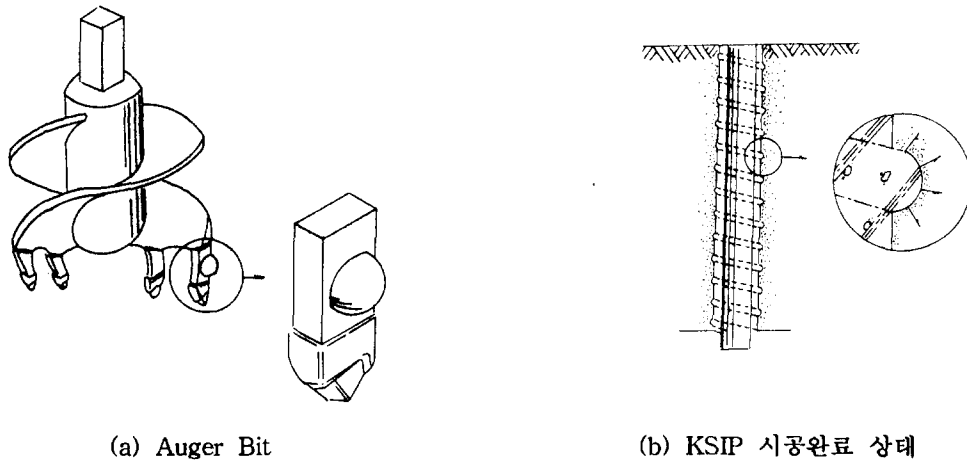


Fig. 1 KSIP 공법개요

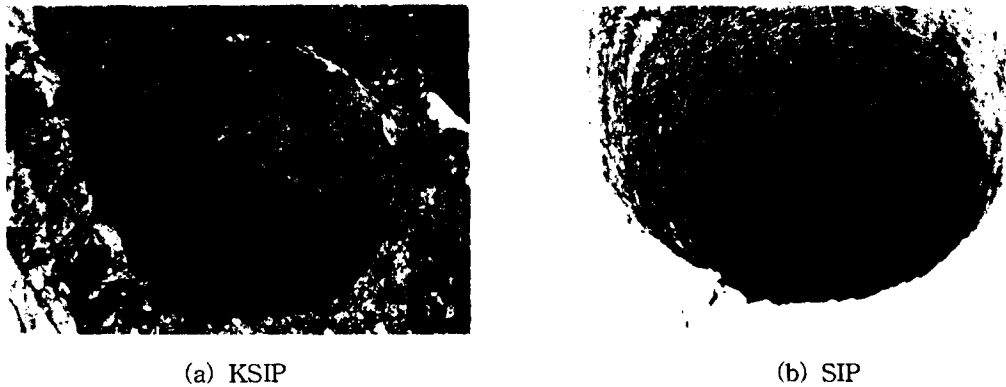


Fig. 2 천공면의 비교

3.2 말뚝지지력 산정

국내의 경우 매입말뚝공법의 설계지지력을 계산할 수 있는 설계기준이 없는 실정으로서 대부분의 설계에서 항타말뚝에 대한 지지력공식을 사용하고 있다. KSIP 공법의 지지력 산정을 위하여 일본 건설성고시 제 111 호의 매입말뚝 지지력 산정공식에 근거하여 지지력을 산정하였다.

KSIP의 지지력증대 효과는 이형천공 굴착으로 인한 나선형 홈만큼의 주변장 증가에 의하는 것으로 본다.

$$R_u = 20NA_p + (0.2N_sL_s + 2N_cL_c) \phi \quad (N \leq 60, N_s \leq 25, N_c \leq 4) \quad (\text{식 1})$$

L_s : Length of Pile

N : 선단부 지지층의 N 치

L_c : 점성토층에 관입된 말뚝길이

N_s : 사질토층의 평균 N 치

A_p : 말뚝 선단부 단면적

N_c : 점성토층의 평균 N 치

ϕ : 말뚝의 주면장

이형천공굴착에 의한 주면장 증가량은 $n\sqrt{p^2 + (\pi D)^2}$ 로서, 여기서 p = 피치간격 (0.13 m), D = 나선홈의 천공직경 (0.55 m), n = 피치의 개수 (68개) 로 모두 현장 실측값이다. 사용말뚝은 직경 400 mm PC 말뚝이며, 근입심도 8.9 m, 평균 주면 N 치 15.6, 선단부 N 치 25 의 비교적 균질한 풍화토 지반이다.

상기의 식에 의한 KSIP의 지지력계산 결과, 주면 마찰력 54.32 ton, 선단지지력 98.17 ton 으로 전체 지지력은 152.49 ton 으로 계산되었다. 또한 일반 SIP로 보면 주면마찰력 43.62 ton 전체지지력은 141.79 ton 으로 계산되었다.

따라서 기존의 SIP와 비교하여 KSIP의 주면마찰력은 약 25 %, 전체지지력은 약 8 % 증가된 것으로 계산되었다.

3.3 말뚝재하시험결과

KSIP 공법으로 시공된 말뚝의 주면마찰력증대 효과를 확인하기 위하여 동재하시험을 통해 지지력을 측정하였다.

동재하시험은 KSIP 2분과 기존의 SIP 2분에 대하여 드롭해머를 이용하여 2 ton의 추를 2.5 m 높이에서 낙하시켜 이의 순간충격하중과 가속도를 근거로 지지력을 측정, 해석하였다.

주면마찰력 증대효과 확인을 위하여 동일한 지반조건에서 말뚝이 시공되었으며, 시험현장의 지반조건은 Fig. 3 과 같이 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있으며, 시험말뚝의 경우 계획 근입심도까지 동일한 토층인 풍화토층으로 구성되어 있다.

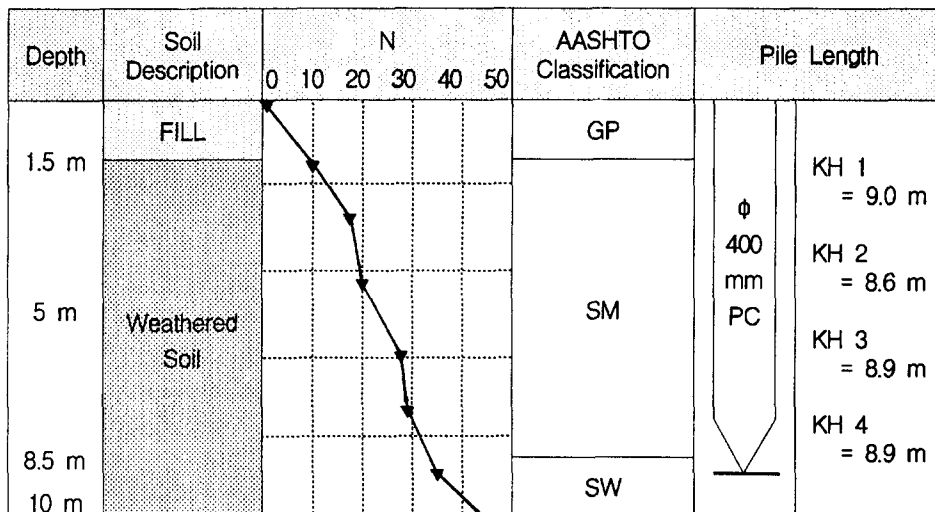


Fig. 3 지질주상도

재하시험을 위해 시험시공된 말뚝은 선단지지력 보다는 주면마찰력의 증대효과 측정에 주 목적이 있으므로 지지층까지 천공하지 않았으며, 천공직경 500 mm, 시멘트페이스트의 w/c 40 %, 조강재 사용비는 시멘트페이스트 중량의 10 %, 그리고 양생기간은 10 일이었다.

3.4 동재하시험

재하시험을 통하여 말뚝지지력을 측정된 결과는 Table 1 과 같으며, 주면마찰력 분포는 Fig. 4 에 도시하였다.

재하시험결과를 분석하면 KSIP 의 경우 평균 17.4 ton/m' 의 주면마찰력이 산정되어, 일반 SIP에 의한 시험말뚝의 평균 주면마찰력 11.5 ton/m' 보다 약 51 % 정도의 마찰력 증대효과를 보여주고 있고, 전체지지력 측면에서도 약 13 % 정도의 증대효과를 보여주고 있다.

시험말뚝의 단위면적당 주면마찰력 분포는 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 말뚝선단부와 비교하여 상부 쪽에서 더 크게

분포하는 것을 알 수 있었으며, KH-4 의 경우처럼 불규칙한 분포를 보이는 것은 시공성의 양부에 따른 시멘트페이스트 고착상태가 균일하지 못한 영향을 받은 것으로 판단된다.

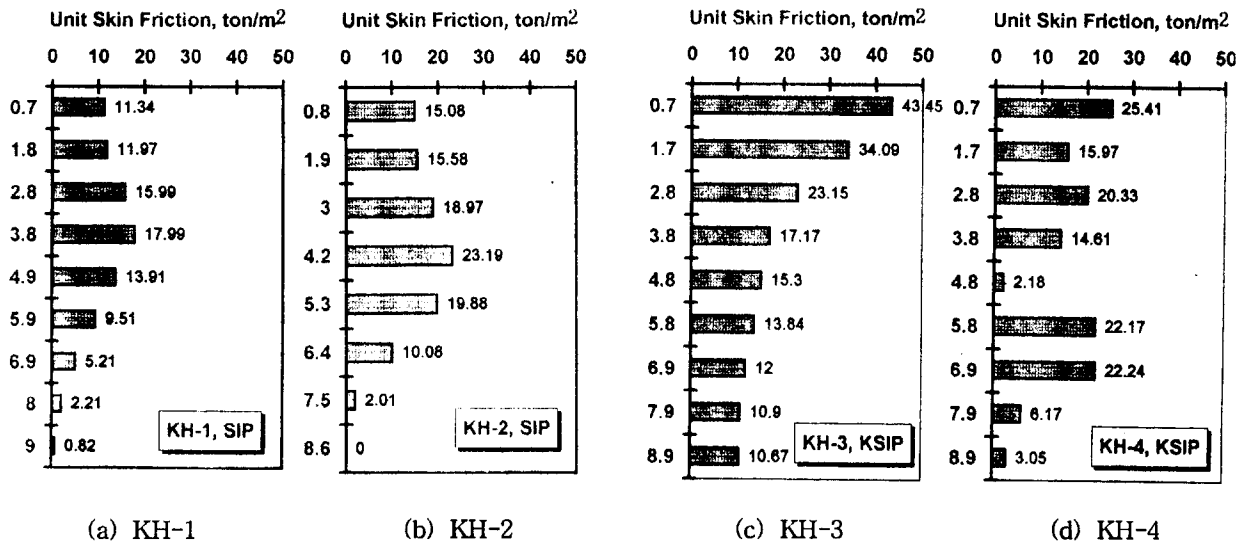


Fig. 4 주변마찰력 분포

Table 1 동재하시험 결과 (Pile Dynamic Analysis)

	Pile Length (m)	Skin Resistance (ton)	End Resistance (ton)	Total Resistance (ton)	Average Unit Skin Resistance (ton/m²)	
KH-1	9.0	115.5	117.6	233.1	11.5	SIP
KH-2	8.6	146.5	64.4	211.9		
KH-3	8.9	232.0	21.6	253.6	17.4	KSIP
KH-4	8.9	169.8	78.4	248.2		

3.5 이론치와 시험치의 비교

이론식으로 산정된 KSIP의 주변마찰력 및 전체지지력과 재하시험결과를 비교하면, 이론적으로 산정하였던 주변마찰력 및 전체지지력의 증가율이 재하시험치에 비하여 낮게 평가된 것으로 나타났다. 또한 시험치에서는 전체지지력에 대한 주변마찰력의 비가 70 % 정도를 차지하고 있으나, 이론치에서는 36 % 정도를 차지하고 있다.

Table 2 말뚝지지력 계산치 및 측정치

		Skin Resistance (ton)	End Resistance (ton)	Total Resistance (ton)	Increasement Ratio	
					Skin	Total
Calculated	KSIP	54.32 (36 %)	98.17 (64 %)	152.49	25 %	8 %
	SIP	43.62 (31 %)	98.17 (39 %)	141.79		
Measured	KSIP	200.9 (80 %)	50 (20 %)	250.9	51 %	13 %
	SIP	131 (59 %)	91 (41 %)	222		

즉, 이론치와 시험치는 상반된 경향을 보이고 있으나, 이는 매일말뚝의 지지력 산정식이 항타말뚝의 지지력 산정식에 근거하여 제안된 것으로서 실제 매일말뚝의 거동을 예측하는데는 적합하지 않으며, 실제 시공상의 토질의 다양한 변화, 시멘트페이스트의 배합비에 따른 강도변화 및 고착의 양부 등의 시공상의 문제들이 고려되지 못한 결과로 사료된다. 그러나 KSIP 공법의 주변마찰력 및 전체지지력의 증대효과를 기존 공법과 비교하기 위해 상기식을 적용하는 것은 무리가

없을 것으로 판단된다.

3.6 SIP말뚝의 지지력특성

이론치와 시험치의 주변마찰력력 분포간의 상반된 경향에 대한 고찰과 함께 동재하시험 결과의 신뢰도를 확인하기 위해 타 현장의 동재하시험 결과와 비교하였다. 그 결과는 Table 3 과 같으며, 주변마찰력이 전체지지력의 약 70 % 정도로서 본 연구 시험 결과치와 유사한 경향을 나타내고 있다. 이상의 분석결과를 종합해 볼 때 KSIP 공법의 전체지지력 향상을 위한 주변마찰력 증대방안은 접근방법이 타당하고 그 효과가 우수한 것으로 평가되며, KSIP 공법의 적용으로 말뚝주면에 형성된 나선형돌기가 주변마찰력을 증대시키는 효과를 충분히 발휘한 것으로 사료된다.

단 시험회수가 지반조건의 다양성, 시공품질의 양부 등이 종합적으로 검토될 수 있는 정도에 미치지 않은 상태이므로, 실용화 공법으로 적용하고 이론적으로 정량화하기 위해서는 다양한 조건에 대한 현장 및 모형시험 등의 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

Table 3 SIP 말뚝지지력 (단위 : ton)

	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5
Skin	159.5 (67.2%)	133.7 (64.3%)	156.0 (76.6%)	199.7 (68.4%)	169.8 (68.4%)
End	77.8 (32.8%)	74.3 (35.7%)	47.7 (23.4%)	44.9 (18.4%)	78.4 (31.6%)
Total	237.3	203.7	244.6	244.6	248.2

4. 모형말뚝시험

4.1 모형시험개요

본 모형시험은 Table 4 와 같이 천공형상, 시멘트함량, 시멘트페이스트의 양생기간, 그리고 지반조건 등의 각 조건에서 말뚝을 시공한 후 말뚝재하시험을 통하여 말뚝의 극한지지력과 주변마찰특성을 분석하는 것으로 구성되어 있다.

말뚝재하시험은 급속재하시험을 선택하였으며, 각 조건에 따라 설계지지력이 결정되지 않은 상태이므로 하중을 2 ton 까지는 0.5 ton 단위로 하중은 재하하고 2 ton 이후는 0.25 ton 단위로 재하하였다. 각 하중단계마다 5 분간 재하하고 말뚝의 침하와 말뚝에 작용하는 응력을 각 3 회씩 측정하였다.

Table 4 모형시험 개요

지반조건	천공형태	시멘트함량	재령	총시험수
4 종류				
18<qc<60	원형천공	200 kg/m ³	7 일	72 회
(N=qc/3 로 가정하면, 6<N<20)	이형천공	300 kg/m ³	14 일.	
		400 kg/m ³	28 일	

4.2 모형토조

본 연구에서는 토조를 조성하여 모형시험을 수행하도록 한다. 즉, 토조를 이용한 모형시험에서 고려해야할 요소인 경계조건에 대한 영향을 최소화하기 위하여 실제 지반을 굴착하여 지반을 조성하는 방법을 이용하였으며, 시험에 사용된 모형말뚝은 직경 89 mm 로서 토조의 크기에 대한 말뚝직경비는 약 49 이다. 이는 조밀한 모래에 폐단말뚝이 타입된 경우에 경계효과를 무시할 수 있는 직경비로 Parkin 과 Lunne 이 제안한 50 과 매우 근사한 값으로 사료된다.

말뚝의 최종관입깊이는 120 cm 로서 토조의 밀면과 말뚝선단부가 말뚝직경의 4.5 배 떨어져 있으므로 말뚝의 지지력에 대한 경계효과는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 또한 모형시험의 경계효과를 제거하기 위해서 매우 작은 직경의 말뚝이 사용되나, 이러한 경우 지반조성에 사용된 모래의 입자크기와 모형말뚝 직경의 비가 현장상태와 다르기 때문에 내적치수효과 (internal scale effect) 가 발생하게 된다. 그러나 Peterson (1988) 은 모형말뚝의 직경이 지반조성에 사용된 시료의 유효직경에 50배 이상이면 내적치수효과가 무시될 수 있다는 시험결과를 보고하였다. 이러한 시험결

과에 근거하면 본 시험에서는 말뚝직경과 시료의 유효직경비가 50 배 이상으로 내적크기효과도 무시될 수 있는 것으로 판단된다. ($D_{10} = 0.1 \text{ mm}$)

본 모형시험을 위해 제작된 토조와 인공지반은 Fig. 5 와 같이 각 토조당 6 개의 말뚝을 시공할 수 있도록 제작하였으며, 넓이 $6.4 \times 4.4 \text{ m}$, 18 m 의 깊이이다.

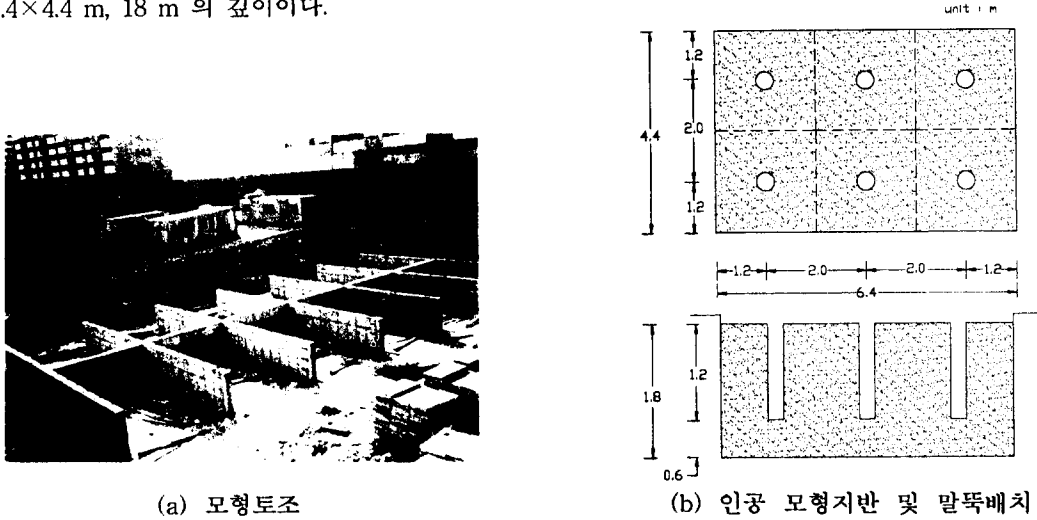


Fig. 5 모형토조 및 인공 모형지반

4.3 지반조성

지반강도가 상대적으로 다른 조건의 풍화토지반을 재현하기 위하여 석분과 진동로울러를 이용하여 지반의 강도와 다짐도를 조절하였다. 시료의 기본 물성치는 다음의 Table 5 와 같다.

Table 5 기본물성치

비중		2.65	연경도	액성한계	N.P.
자연함수비 (%)		12.3		소성한계	
입도	모래 (%)	95.3	다짐	최적함수비 (%)	13.2
	실트 (%)	3.1		최대건조밀도 (g/cm^3)	1.87
	점토 (%)	1.6			
	균등계수 (%)	6.8			

모형지반의 역학적 특성치는 화관식 콘관입시험을 수행하여 측정하였다. 본 연구에서는 모형지반에 대한 관입과 동시에 30 cm 깊이마다 관입저항치를 측정하였으며, 각 깊이별, 지반종류에 따른 시험결과는 다음 Table 6 과 같다.

관입시험 결과 Case 4 지반의 경우 콘관입저항치가 심도 증가에 따라 오히려 감소하는 결과를 보이고 있으며, 이는 모형토조가 설치된 기초지반으로부터 지하수가 침투되어 모형지반 하부층의 지지력이 저하된 것으로 판단된다.

Table 6 콘관입저항 (단위 : kg/cm^2)

깊이	0.3 m	0.6 m	0.9 m	1.2 m	1.5 m	선단부평균	전체평균
CASE 1	23.4	16.8	22.3	23.1	24.9	24.0	22.1
CASE 4	36.7	49.5	38.2	25.5	28.8	27.2	35.7

4.4 모형말뚝의 시공

Fig. 6 과 같이 모형시험에 사용된 말뚝은 스테인레스 재질로서 직경 89 mm, 두께 6 mm, 길이는 1200 mm 이다. 모형말뚝은 200 mm 단위로 제작되어 내부에 각각 3개씩의 진동현 게이지가 부착되었으며, 총 6개를 연결하여 하나의 본체

를 구성하였다. 즉, 모형말뚝 1본에 총 18 개의 진동현 게이지가 설치되어, 말뚝의 변형을 측정하고 이를 증폭기를 통해 하중으로 환산할 수 있다.

모형말뚝 시공시 말뚝 상하간의 간격을 최소 2.0 m 를 유지하였다. 단독말뚝과 군말뚝을 구분하는 간격 산정식에 근거하면, 군말뚝 효과를 배제하기 위한 최소 말뚝간격 37 cm 이하다.

모형말뚝을 타입하기 위한 천공장비로 Fig. 6 과 같은 소형 Auger 를 제작하였다. 제작된 소형오거는 오거 직경 112 mm, 길이 150 cm, 오거 날개의 각도는 20° 이다. 여기서 오거직경 112 mm 는 모형말뚝의 직경 89 mm 에 실제 시공시에 발생하는 여굴의 크기를 모형시험 치수로 환산한 값을 더하여 구한 값이다. 또한 오거의 회전속도는 매분 20회로 실제 시공장비 (매분 17~18회 회전) 와 근사한 회전속도이다.

실제 시공장비와 마찬가지로 굴착 후 말뚝 인발과 동시에 오거장비의 증공을 통하여 고압으로 시멘트페이스트가 지반에 주입되도록 제작하였으며, 주입되는 시멘트페이스트는 말뚝의 선단부와 주변부 모두 동일한 배합의 페이스트를 주입하였다.

원형 굴착 외에 이형천공 굴착을 위하여 지반굴착용 오거비트 단부에 반구형 팁을 설치하여 이형면을 형성하도록 하였다. 여기서 팁의 크기는 천공결과 나선형 돌기의 형상이 가장 우수한 직경 2.2 cm 크기의 팁을 모형시험에 도입하였다.

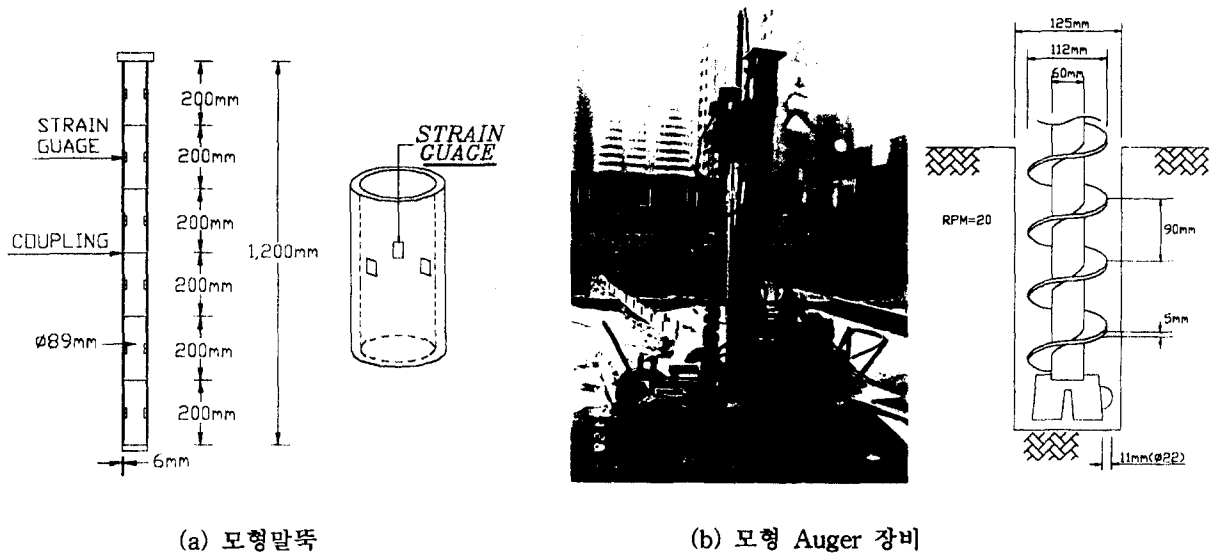


Fig. 6 모형말뚝 및 모형 Auger

4.5 모형시험 결과분석

전술한 바와 같은 각 조건별 말뚝의 극한지지력 및 주변마찰특성을 분석하였다. 말뚝의 극한지지력은 P-S, S-log t, log P-log S 등의 관계도를 이용하여 산정하였으며, 각 하중단계에서의 말뚝에 작용하는 주변마찰력을 측정하였다.

4.5.1 천공형상에 따른 말뚝 거동

천공형상에 따른 지지력의 변화를 산정하기 위하여, (식 1)을 사용하여 모형 KSIP 말뚝과 SIP 말뚝의 지지력을 비교하였다. 모형말뚝의 이론적 지지력 계산결과는 Table 7 과 같으며, 이론적으로 계산된 모형 SIP 말뚝의 전체지지력과 주변마찰력은 2.49 ton 및 0.82 ton, 그리고 모형 KSIP 말뚝은 각각 2.68 ton 및 1.00 ton 으로서, 이형천공 굴착에 따른 말뚝의 전체지지력과 주변마찰력은 각각 7.44 % 및 22.6 % 증가하였다. 이는 시험시공에서 이론식으로 계산된 결과인 8 % 및 25 % 와 상당히 근사한 결과이다.

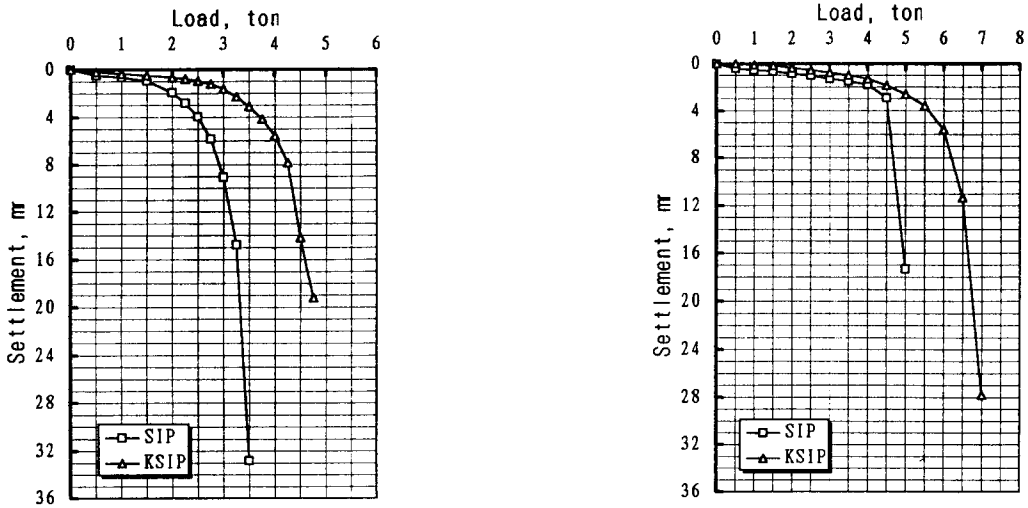
또한 모형말뚝의 재하시험결과를 분석한 결과 이형천공 굴착에 따른 말뚝의 전체지지력 증가비는 평균 9.13 % 로서, 현장 시험시공시의 전체지지력 증가비인 13 % 보다 상대적으로 작은 결과를 얻었으나, 이론식으로 계산된 증가비인 7.44 % 와는 근사한 수치이다. 이는 현장에서의 말뚝재하시험의 경우 시공과정 및 품질상의 문제들이 포함되어 다소의 오차가 유발되는 반면, 모형시험의 경우는 원하는 다양한 시험조건을 최대한도로 재현시킬 수 있으므로, 계산치와 시험치간의 오차가 적은 것으로 사료된다.

Table 7 모형말뚝의 지지력 계산치 및 시험치

		Skin Resistance (ton)	End Resistance (ton)	Total Resistance (ton)	Total Resistance Increasement Ratio
Calculated	KSIP	1.00	1.68	2.68	7.44 %
	SIP	0.82	1.67	2.49	
Measured	KSIP	2.82	0.71	3.53	9.13 %
	SIP	2.58	0.65	3.23	

말뚝의 전체지지력 가운데 주변마찰저항에 의해 지지되는 비율을 살펴보면 약 80 %로서 기존 연구결과에서 나타난 매입말뚝의 주변마찰저항이 전체지지력 가운데 차지하는 비율과 근사한 수준으로서, 주변마찰력을 극대화함으로써 전체 지지력의 증가를 목적으로하는 KSIP 공법이 효율적으로 적용되고 있음을 알 수 있다.

KSIP 및 SIP 말뚝의 대표적인 하중-침하관계도는 Fig. 7 과 같으며, KSIP의 경우 말뚝의 침하가 SIP와 비교하여 보다 점진적으로 진행하고 있음을 볼 수 있다.



(CASE 1 지반, 시멘트함량 300 kg, 재령 7 일)

(CASE 1 지반, 시멘트함량 300 kg, 재령 14 일)

Fig. 7 KSIP 및 SIP 의 하중-침하관계도

4.5.2 시멘트함량에 따른 말뚝 거동

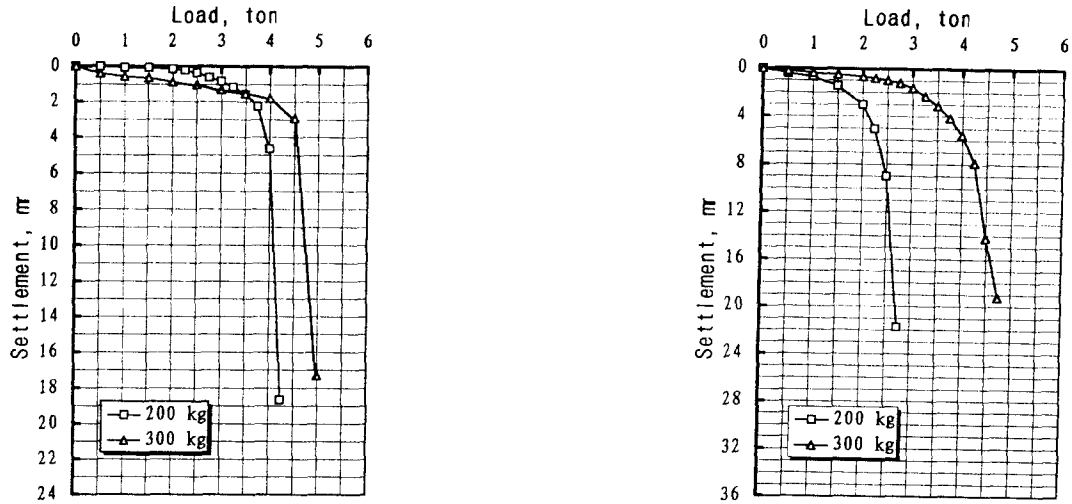
일반적으로 매입말뚝의 주변부 시멘트페이스트의 표준 시멘트 배합비는 120 kg 이나, 실제 현장에서는 표준배합비의 약 2.5 배인 m 당 1 포 정도의 시멘트가 사용되고 있으며, 매입말뚝의 주변마찰력은 주변고정을 위한 시멘트페이스트의 일축압축강도에 비례하므로, 주변지반이 연약지반이 아닐 경우 시멘트의 함량을 표준배합비의 2.5 배 정도 높여 시공하면 상당히 큰 주변마찰력을 얻을 수 있으며, 많은 경우 이 주변마찰력만으로도 소정의 지지력을 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 매입말뚝의 최적의 시멘트페이스트 함량을 제시하기 위하여, 말뚝 주변부의 시멘트페이스트의 시멘트 함량에 따른 말뚝지지력의 영향을 분석하였다. 현재까지 본 시험에서는 시멘트 함량 200 kg/m³, 300 kg/m³ 의 2 가지 경우에 대하여 지지력의 변화를 분석하였으며, 그 결과 Table 8 과 같이 전체지지력이 2.97 ton 에서 3.45 ton 으로 약 16 % 증가하였다.

Table 8 시멘트함량에 따른 말뚝지지력의 변화

시멘트함량	200 kg/m ³ (w/c = 212 %)	300 kg/m ³ (w/c = 130 %)
평균 말뚝지지력	2.97 ton	3.45 ton

매입말뚝공법의 시멘트페이스트 표준배합량 120 kg 은 공벽의 이완방지 차원에서는 그 효과를 볼 수 있으나, 실제 매입말뚝 공사에서 주변지반의 이완 및 시멘트페이스트의 유실 등에 따른 주변고정액의 역할 미흡으로, 주변마찰력이 작게 발휘되는 등의 문제점을 발생시키는 침등을 고려할 때, 주변마찰력의 향상을 기대하는 KSIP 공법의 경우 시멘트페이스트의 강도 향상이 필수적이므로 시멘트의 함량은 실제 현장에서 시공중인 바와 비슷한 수준인 300 kg 내외가 적합한 배합비인 것으로 사료된다.



(SIP, CASE 4 지반, 재령 14 일)

(KSIP, CASE 4 지반, 재령 7 일)

Fig. 8 시멘트함량 변화에 따른 하중-침하관계도

4.5.3 시멘트페이스트의 양생기간에 따른 말뚝 거동

말뚝 주변부에 주입되는 시멘트페이스트의 양생기간에 따른 말뚝지지력의 변화를 측정하였다. 일반 건설현장의 경우 말뚝재하시험은 일반적으로 말뚝시공 완료 후 7 일 이상 경과 후에 실시되고 있으나, 주변부 시멘트페이스트의 재령에 따른 강도 발현의 문제를 고려하지 못하고 있는 실정이다. 또한 재하시험 수행상의 시간과 비용의 제약, 말뚝지지력 거동의 불충분한 이해 등으로 짧은 기간내에 재하시험을 실시함으로써, 시간경과에 따른 말뚝지지력 증가 (혹은 감소) 효과 등을 고려하지 못하므로, 적절한 지지력 평가와 설계, 시공의 경제성과 합리성을 재고해야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 동일 조건의 말뚝에 대해서 말뚝 시공후 7 일, 14 일, 28 일 후에 재하시험을 실시하여, 시멘트페이스트의 양생기간에 따른 강도발현과 지지력의 변화, 그리고 시간경과에 따른 말뚝지지력의 증가 효과 등을 검토하고자 한다.

매입말뚝의 주변마찰력이 주변고정을 위한 시멘트페이스트의 일축압축강도에 비례하는 점으로 볼때, 시멘트페이스트의 양생기간 증가에 따라서 시멘트페이스트의 일축압축강도의 증가, 즉 그에 따른 주변마찰력의 증대가 기대된다. 현재까지의 시험 진행결과 재령 7 일 및 14 일에 대해서 말뚝의 지지력과 주변마찰특성을 측정하였으며, 7일 경과후의 말뚝의 평균지지력은 3.2 ton, 14일 경과후는 3.5 ton 으로, 시간경과에 따른 지지력의 증가 경향을 보이고 있다.

4.5.4 지반조건에 따른 말뚝 거동

지반강도의 변화에 따른 말뚝지지력의 변화를 확인하기 위하여, 각 지반조건에서의 계산된 지지력과 재하시험 결과에 의한 지지력을 비교하였다.

먼저 조성된 인공지반의 강도 평가는 화란식 콘관입시험결과를 이용하였으며, Case 1 및 Case 4 의 지반강도는 Table 6 에 수록한 바와 같이 22.1 kg/cm² 및 35.7 kg/cm² 이다. 이와 같은 지반강도는 N 값으로 추정할 경우 약 7~8 및 12 정도의 연약지반과 보통 강도의 지반이다.

콘관입시험 결과를 이용한 말뚝지지력은 다음과 같은 Meyerhof 가 제안한 말뚝지지력 산정식을 사용하여 계산하였다.

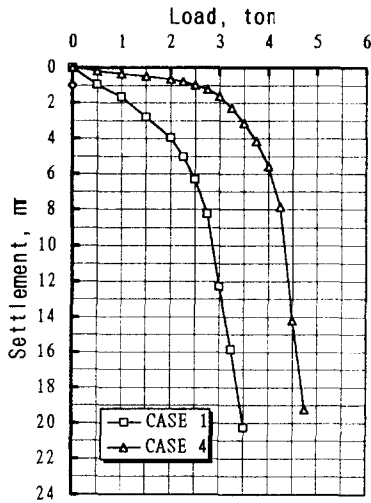
$$R_u = q_c A_p + \frac{1}{200} \bar{q}_c A_s \quad (\text{여기서 } \bar{q}_c \text{ 는 평균 } q_c \text{ 값이다.}) \quad (\text{식 2})$$

상기 식에 의한 말뚝지지력 계산 결과는 Case 1 의 경우 2.83 ton, Case 4 의 경우 3.43 ton 이며, 모형말뚝의 재하시험을 통하여 얻은 지반강도에 따른 말뚝지지력은 Case 1 의 경우 2.73 ton, Case 4 의 경우 3.92 ton 으로서, 계산치와 시험치가 약간의 오차를 보이고 있다.

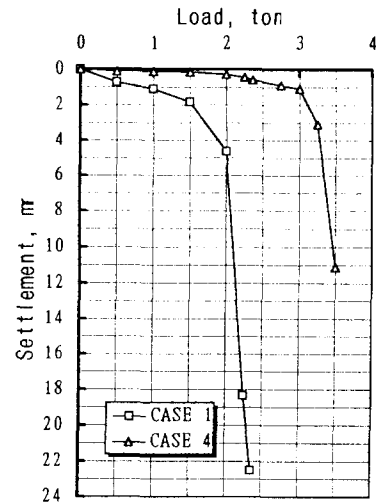
Table 9 지반강도에 따른 말뚝지지력의 변화

	Case 1 ($q_c = 22.1 \text{ kg/cm}^2$)	Case 4 ($q_c = 35.7 \text{ kg/cm}^2$)
Meyerhof 식	2.83 ton	3.43 ton
재하시험결과	2.73 ton	3.92 ton

지반강도의 변화에 따른 말뚝의 대표적인 하중-침하곡선은 Fig. 9 에 도시하였으며, 주변마찰력의 분포는 Fig. 10 과 같다.

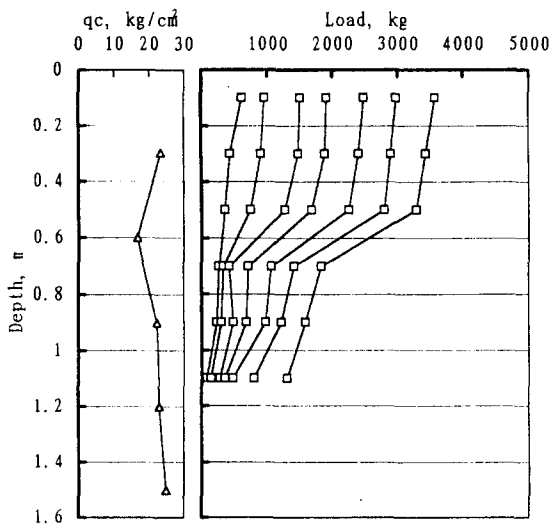


(KSIP, 시멘트함량 300 kg, 재령 7 일)

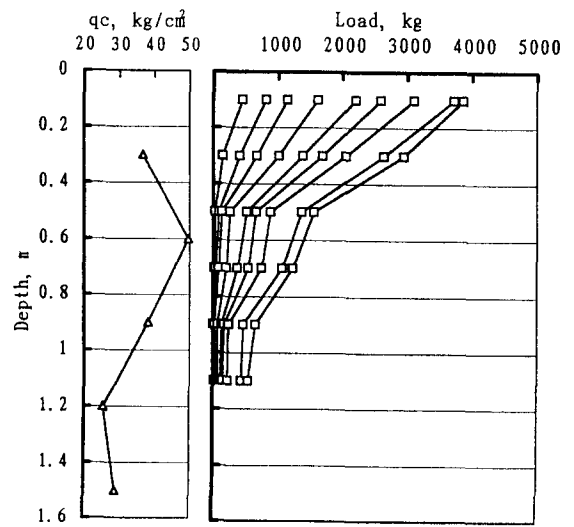


(SIP, 시멘트함량 400 kg, 재령 7 일)

Fig. 9 지반조건에 따른 하중-침하관계도



(Case 1 지반)



(Case 4 지반)

Fig. 10 주변마찰력 분포

Table 10 은 재하하중의 증가에 따른 선단저항과 주변저항의 크기를 측정된 결과로서, 매입말뚝의 전체지지력 가운데 주변마찰저항이 차지하는 비율이 Case 1 지반의 경우 약 80 %, Case 4 지반의 경우 약 90 % 수준임을 알 수 있다. 이와 같이 Case 4 지반에 설치된 말뚝의 선단지지력이 과소평가되고 주변마찰저항이 과대평가된 이유는 콘관입시험 결과에 나타난 바와 같이, Case 4 지반의 경우 모형토조가 설치된 기초지반으로부터의 지하수가 침투하여, 모형지반의 하부층의 지지력이 저하된 것에 기인하는 것으로 판단된다.

또한 매입말뚝의 주변마찰력 분포는 말뚝의 선단부로 갈수록 감소하는 경향을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 전체지지력 가운데 주변마찰저항에 의해 지지되는 비율이 재하 하중 증가에 따라 점차 감소하는 결과를 볼 때, 말뚝의 파괴 진행은 주변부의 파괴가 선행되는 것을 확인할 수 있다.

Table 10 주변마찰력 측정결과

		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
CASE 1	1	Skin	0.416 (83.2 %)	0.860 (86.0 %)	1.230 (82.0 %)	1.654 (82.7 %)	2.030 (81.2 %)	2.212 (73.7 %)			
		End	0.084 (16.8 %)	0.140 (14.0 %)	0.270 (18.0 %)	0.346 (17.3 %)	0.470 (18.8 %)	0.788 (26.3 %)			
	2	Skin	0.428 (85.6 %)	0.869 (86.9 %)	1.290 (86.0 %)	1.705 (85.3 %)	2.104 (84.2 %)	2.514 (83.8 %)	2.937 (83.9 %)	3.350 (83.8 %)	
		End	0.072 (14.4 %)	0.131 (13.1 %)	0.210 (14.0 %)	0.295 (14.7 %)	0.396 (15.8 %)	0.486 (16.2 %)	0.563 (16.1 %)	0.650 (16.2 %)	
CASE 4	1	Skin	0.487 (97.4 %)	0.970 (97.1 %)	1.451 (96.7 %)	1.929 (96.4 %)	2.393 (95.7 %)	2.855 (95.2 %)	3.283 (93.8 %)	3.571 (89.3 %)	
		End	0.013 (2.6 %)	0.029 (2.9 %)	0.049 (3.3 %)	0.071 (3.6 %)	0.107 (4.3 %)	0.145 (4.8 %)	0.217 (6.2 %)	0.429 (10.7 %)	
	2	Skin	0.492 (98.3 %)	0.987 (98.7 %)	1.479 (98.6 %)	1.976 (98.8 %)	2.460 (98.4 %)	2.906 (96.9 %)			
		End	0.008 (1.7 %)	0.013 (1.3 %)	0.021 (1.4 %)	0.024 (1.2 %)	0.039 (1.6 %)	0.094 (3.1 %)			
	3	Skin	0.491 (98.2 %)	0.977 (97.7 %)	1.472 (98.1 %)	1.952 (97.6 %)	2.409 (96.4 %)	2.845 (94.8 %)	3.269 (93.4 %)	3.712 (92.8 %)	4.080 (90.7 %)
		End	0.009 (1.8 %)	0.023 (2.3 %)	0.028 (1.9 %)	0.048 (2.4 %)	0.091 (3.6 %)	0.155 (5.2 %)	0.231 (6.6 %)	0.288 (7.2 %)	0.420 (9.3 %)

6. 결 론

1) 천공형상의 확인

KSIP의 천공면 및 시멘트 페이스트가 고결된 형상을 확인한 결과 천공면과 말뚝 표면에 나선형의 연속적인 홈과 돌기가 형성되어 있으며, 요철과 함께 말뚝의 주변장이 증가된 것을 확인할 수 있었다.

2) 현장 시험시공 결과.

① 재하시험 결과 KSIP 공법의 경우 기존 SIP에 비해 전체지지력 약 13 %, 주변마찰력의 경우에도 단위면적당 평균 주변마찰력이 17.4 ton/m² 으로 후자의 11.5 ton/m² 보다 약 51 % 정도 증가한 것으로 나타났으며, 이론식으로 산정한 전체지지력 및 주변마찰력의 증가율은 시험치에 비하여 다소 낮게 평가되는 것으로 나타났다.

② 이는 매입말뚝의 지지력 산정식이 항타말뚝의 지지력 산정식에 근거하여 제안된 것으로서 실제 매입말뚝의 거동을 예측하는 데는 적합하지 않으며, 시공상의 토질의 다양한 변화, 시멘트페이스트의 배합비에 따른 강도변화 및 고착의 양부 등의 시공상의 문제들이 고려되지 못한 결과로 사료된다. 따라서 매입말뚝공법에 대한 전반적인 거동특성 규명파 지지력 산정식의 제안이 요망된다.

③ 본 연구의 시험시공자료와 타현장의 재하시험 결과를 비교 분석한 결과 SIP 공법은 전체지지력의 약 70 % 정도가

주면마찰에 의해 지지되며, 본 연구에서 제안한 지지력향상을 위한 주면마찰력 증대방안이 타당한 것으로 사료된다.

3) 모형말뚝의 재하시험 결과

① 모형말뚝의 재하시험결과를 분석한 결과 이형천공 굴착에 따른 말뚝의 전체지지력 증가비는 평균 9.13 % 로서, 현장 시험시공시의 전체지지력 증가비인 13 % 보다 상대적으로 작은 결과를 얻었으나, 이론식으로 계산된 증가비인 7.44 % 와는 큰 차이를 보이지 않는다.

② 매입말뚝의 전체지지력 가운데 주면마찰저항에 의해 지지되는 비율을 살펴보면 약 80 % 로서 기존 연구결과에서 보고된 비율과 근사한 수준으로서, 주면마찰력을 극대화함으로써 전체지지력의 증가를 목적으로하는 KSIP 공법이 효율적으로 적용되고 있음을 알 수 있다.

③ 매입말뚝의 최적의 시멘트페이스트 함량을 제시하기 위하여, 말뚝 주면부의 시멘트 함량 200 kg/m^3 , 300 kg/m^3 의 2가지 경우에 대하여 지지력의 변화를 분석한 결과 전체지지력이 2.97 ton 에서 3.45 ton 으로 약 16 % 증가하였다. 주변지반의 이완 및 시멘트페이스트의 유실 등에 따른 주변고정액의 역할 미흡으로 주면마찰력이 작게 발휘되는 등의 문제가 발생되는 점을 고려할 때, 주면마찰력의 향상을 위해 시멘트페이스트의 강도 향상이 필수적이므로 시멘트의 함량은 300 kg 내외가 적합한 배합비인 것으로 사료된다.

④ 동일 조건의 말뚝에 대해서 말뚝 시공후 7일, 14일 후에 재하시험을 실시하여, 시멘트페이스트의 양생기간에 따른 강도발현과 지지력의 변화, 그리고 시간경과에 따른 말뚝지지력의 증가 효과 등을 검토한 결과 7 일 경과후의 말뚝의 평균지지력은 3.2 ton, 14일 경과후는 3.5 ton 으로, 시간경과에 따른 지지력의 증가 경향을 보이고 있다.

⑤ 지반강도 향상에 따라 전체지지력 가운데 주면마찰저항이 지지하는 비율이 점차 증가하였으며, 매입말뚝의 주면마찰력 분포는 말뚝의 선단부로 갈수록 감소하는 경향을 나타내며, 전체지지력에서 주면마찰저항이 차지하는 비율이 재하하중 증가에 따라 점차 감소하는 결과를 볼 때, 말뚝의 파괴 진행은 주면부의 파괴가 선행되는 것을 확인할 수 있다.

4) 향후 연구과제

본 연구는 KSIP공법의 경제적이고 합리적인 설계 및 시공을 위하여 지반조건, 시멘트 배합비, 시간경과 등에 따른 마찰특성 규명, 말뚝 매입지반의 압밀침하에 따른 말뚝의 거동특성 규명, 그리고 구조물 축조 후에도 이를 종합적으로 관리할 수 있는 말뚝의 사후관리시스템 개발을 위한 목적으로 수행되고 있으며, 데이터베이스의 구축을 위하여 현재 모형시험이 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 건설교통부 건설기술연구개발사업과제로서 선정되어 현재 연구 진행중이며, 본 연구를 위하여 협조하여 주신 건설교통부, 백경엔지니어링, 명지대학교 토목공학과, Piletech 이명환박사님, 그리고 당사 인천 청천동 아파트현장 감상기소장님 이하 임직원 여러분께 심심한 감사의 말씀 올립니다.

참고문헌

- 申旻浩, 方潤瓊, 全炳勝, 金相勳, “異形先掘削セメントペーストの埋込み杭工法(KSIP)の開発に関する研究”, 日本土木學會 西部地部 技術發表會 論文集, pp. 22~29, 1996.
- 신민호, 방윤경, 전병승, 김상훈, “이형 선굴착 시멘트풀 주입말뚝공법의 거동특성 분석”, *대한토공회보* 신년호, pp. 77~83, 1996.
- 신민호, 방윤경, 전병승, 김상훈, “이형 선굴착 시멘트풀주입 말뚝의 거동특성에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp. 407~410, 1995.
- 이명환, 윤성진, “SIP 시공말뚝의 지지력 특성”, *한국지반공학회 학술발표회논문집*, pp. 91~115., 1993.
- Crowther, C. L., *Load testing of deep foundations*, John Wiley & Sons, 1988.
- Fellenius, B. H., “The analysis of results from routine pile load tests”, *Ground Engineering, Vol.13, No.6.*, 1980.
- Vanimpe, W. F., *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, BAPII, 1993.
- 건설부, *구조물 기초설계기준*, 1986.