

현장타설 말뚝의 품질관리

Quality control of auger cast pile

박종배, Jong-bae Park,

대한주택공사 구조토목토질연구부 연구원

1. 현장타설 말뚝의 종류

소음과 진동에 의한 민원을 예방하기 위하여 유럽 및 미국등지에서는 현장타설 말뚝의 사용이 활발하다. 우리나라는 저소음,저진동 공법으로써 매입말뚝이 대부분 사용되었으며 '98년 에 처음으로 국내현장에 비배토 방식의 현장타설 말뚝이 사용되기 시작하였다. 현장타설 말뚝에 대한 관심이 날로 고조되고 있는 이유는 현장타설 말뚝이 소음과 진동에 의한 민원을 최소화할 수 있기 때문이다. 우리나라에서도 생활수준의 향상으로 도심지는 물론 농촌에서도 소음과 진동에 대한 민원이 기하급수적으로 증가하고 있다. 현재 국내에서는 SIP공법이 널리 사용되고 있으나 최종 경타마저도 허락하지 않는 사회적 분위기 속에서 조만간 SIP공법의 사용이 크게 제한될 것으로 예상된다.

현장타설 말뚝은 크기로 분류하면 대구경 현장타설 말뚝과 소구경 현장타설 말뚝으로 구분되는데 대구경 현장타설 말뚝은 이미 꽤 오래전부터 국내에서 여러 가지 공법이 사용되고 있다. 직경 350 ~ 610mm 정도의 소구경 현장타설 말뚝은 국내에서 몇가지 공법이 시도되었지만 품질관리의 어려움과 현장여건 때문에 활성화되지 못하였다. 본 고에서 다루고자 하는 소구경 현장타설 말뚝은 지반의 천공방식에 따라 잔토를 배출시키는 배토공법과 배출시키지 않는 비배토 공법으로 나눌 수 있다.

미국과 유럽에서는 현장타설 말뚝으로 배토방식의 cfa(continous flight auger)공법이 널리 쓰이고 있는데 이 공법은 1950년에 개발되어 특허권이 해제된 1970년대에 널리 사용되기 시작하였다. cfa는 지반 천공후 오거인발과 동시에 오거의 중공관을 통해 시멘트 페이스트 또는 콘크리트를 타설하기 때문에 공벽을 잘 유지할 수 있도록 한 공법이며 공벽이 잘 유지될 때는 비교적 높은 지지력을 발휘하는 것으로 알려져 있다(Neely, 1991). 그러나 이 공법은 배토방식의 지반천공에 의하여 공벽 주변지반이 이완되기 때문에 포화된 느슨한 사질토와 같은 지반에서는 여전히 공벽붕괴의 문제점을 가지고 있으며 이로 인하여 설계지지력을 확보할 수 없게 된다.

이를 해결하기 위하여 유럽을 중심으로 비배토방식의 현장타설 말뚝이 개발되었으며 이 공법은 특수한 오거의 형상에 의하여 천공중 발생한 흙을 지표밖으로 배출시키지 않고 발생된 잔토로써 공벽을 다지도록 오거를 설계하였다. 천공중 다짐작용에 의하여 공벽주위 지반이 원지반 이상의 강도를 유지하므로 공벽이 충분히 자립하고 이로 인하여 높은 지지력을 발휘한다. 비배토 현장타설 말뚝에는 오메가(Ω) 말뚝, 아틀라스(Atlas) 말뚝, 펀덱스(Fundex) 말뚝이 있으며 이중 오메가 말뚝이 경제성, 시공성과 지지력면에서 가장 우수한 것으로 알려져 있다. Van Impe(1996)는 오메가 말뚝이 동일 직경의 항타말뚝과 유사한 지지력을 발휘한다고 하였으며 공벽이 잘 유지되기 때문에 cfa 말뚝에 비해 품질관리도 더 쉽고 하였다. 유럽에서는 중간 정도 굳기의 점토층을 지나 q_c 가 10~20MPa 정도인 지지층에 직경 410mm의 오메가 말뚝을 시공하여 70ton 이상의 하중을 지지하도록 설계하고 있다.

국내에서도 오메가 말뚝공법의 핵심인 오메가 오거만을 도입하여 국내의 장비와 재료를 사용하여 3차례에 걸친 시험시공을 성공한 바 있으며 모래-자갈층에서 실제 구조물 기초로 사용된바 있다.

표 1.1은 유럽 각국의 말뚝시공 실적을 집계한 것이다.

표 1.1 유럽 각국의 말뚝시공 실적 집계(Van Impe, 1994)

A:시장점유율		말뚝공법별 시장점유율 및 총시공물량																	
		이태리		독일		네덜란드		영국		프랑스		벨기에		오스트리아		스위스			
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
		%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km		
		15000km		1500km		1200km		10000km		6000km		1000km		2000km		2000km			
무배토형	항타	영구 케이싱사용 현장타설	12	1,820	15	2,250	8	960	7	700	27	1,650	32	320	6	120	5	25	
		기성말뚝	강말뚝	1	150	5	750	-	-	4	400	1	50	2	20	3	60	-	-
			콘크리트	5	750	10	1,150	44	5,280	11	1,120	0.2	12	10	120	5	100	14	75
		나무말뚝	0	-	0	-	15	1,820	0	-	0	-	0	-	1	20	4	20	
	압입	기성말뚝	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	10	1	10	1	5	
	나선식	현장타설	-	-	9	1,350	8	960	6	620	6	240	30	300	2	40	2	10	
배토형	굴착	D650mm이상 대구경말뚝	41	6,150	28	4,200	(0.1)	10	30	3,000	40	2,420	2	20	53	1,600	59	295	
		-					-	1					10	-	5	1	5		
	및 현장타설	영구케이싱 소구경 cfa말뚝	15	2,250	15	2,250	23	2,750	40	4,000	20	1,220	15	150	10	200	4	20	
		제트 그라우팅등	10	1,500	12	1,800	2	220	-	-	2	120	7	120	10	200	6	30	
		고압분사주입 마이크로말뚝	16	2,400	6	900			2	200	4	240	2	20	10	200	3	15	

2. 시공방법

2.1 시공순서

현장타설 말뚝은 지반을 배토 또는 비배토 방식으로 천공하고 오거 인발과 동시에 오거 증공관을 통해 굴착바닥면부터 콘크리트 또는 몰탈을 타설한다. 오거를 완전히 인발하고 난후에는 철근망등의 보강재를 삽입한다(그림 2.1 참조). 콘크리트와 몰탈은 공벽붕괴 방지 및 공동(Cavity) 또는 공극(Void) 발생을 방지하기 위해 압력상태로 타설된다. 오메가 말뚝과 같은 경우는 분리형 슈를 선단부에 부착하여 천공시 오거 증공관내로 토사가 유입되는 것을 방지하며 콘크리트 타설시 타설압력에 의해 오거에서 분리되어 지반속에 박히게 되어 천공중 이완된 선단부 지반을 보강하도록 하고 있다.

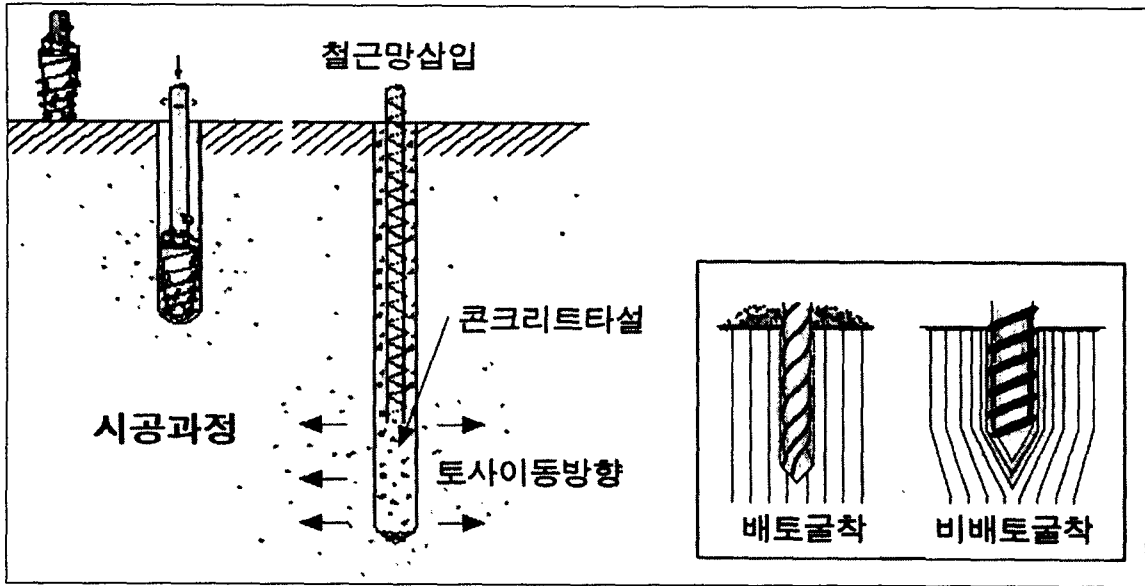


그림 2.1 오메가 말뚝 시공 흐름도

2.2 시공간격

현장타설 말뚝을 서로 인접하여 시공할때는 한계시공거리를 결정하여야 하며 다음 두가지 사항을 고려하여야 한다.

- 1) 다공성 지반(잡석, 자갈지반)을 통한 수평방향의 말뚝상호간 영향
- 2) 인접 말뚝 시공시 발생한 진동이 굳지 않은 말뚝의 재료경화에 미치는 영향

Standard Building Code에서는 현장타설 말뚝의 경우 24시간이 경과하기 전에 중심간 거리 6D(D:말뚝직경) 이내에 다른 말뚝을 시공하는 것을 규제하고 있다. Booth/McIntosh는 적어도 12시간 이전에는 3D(윤변간 거리) 이내의 거리에서 다른 말뚝을 시공하지 않는 것이 가장 효율적이라고 주장하였다. 이러한 말뚝상호간의 영향거리는 토질조건에 따라서 달라질 수 있다.

연약지반일수록 인접하여 시공할 수 있는 거리를 멀게 하고 다음 말뚝을 시공할때까지 시간간격을 두는 것이 현장말뚝의 품질관리에 유리한 것으로 알려져 있으며 본시공에 앞서 시험시공에서 계획한 시공간격이 적합한지를 확인하여야 한다.

국내 현장에 적용된 오메가 말뚝의 시험시공에서 중심간 거리 5D간격으로 시공된 말뚝들을 굴착하여 조사한 결과 네킹등의 심각한 구조적 문제와 균열등의 문제는 발생하지 않았으므로 시공간격을 5D로 결정한 바 있다.

현장타설 말뚝의 시공간격 결정에는 시공시간도 고려하여야 한다. 그림 2.2에서와 같이 Retempering에 대한 실험결과를 보면 타설후 2-3시간후에 진동을 주고 재성형을 하면 그렇지 않은 공시체 보다 오히려 콘크리트 강도가 증가함을 보여주고 있다. 그러므로 타설후 2-3시간 후에 말뚝을 시공하여도 이때의 진동에 의해 기 시공된 말뚝의 품질에 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있다. '90년 6월에 주택연구소에서 발간한 "진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향"을 보면 콘크리트 타설후 4-5시간 사이에 진동이 가해지면 강도가 감소할 수 있고 4-5시간 이전 또는 이후에 진동이 가해질때에는 강도변화가 거의 없다는 실험결과를 제시하였다. 그러므로 콘크리트 타설후 4-5시간 사이에는 진동이 가지 않도록 말뚝시공순서를 정하여 시공하면 진동으로 인하여 기 타설된 말뚝의 품질에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

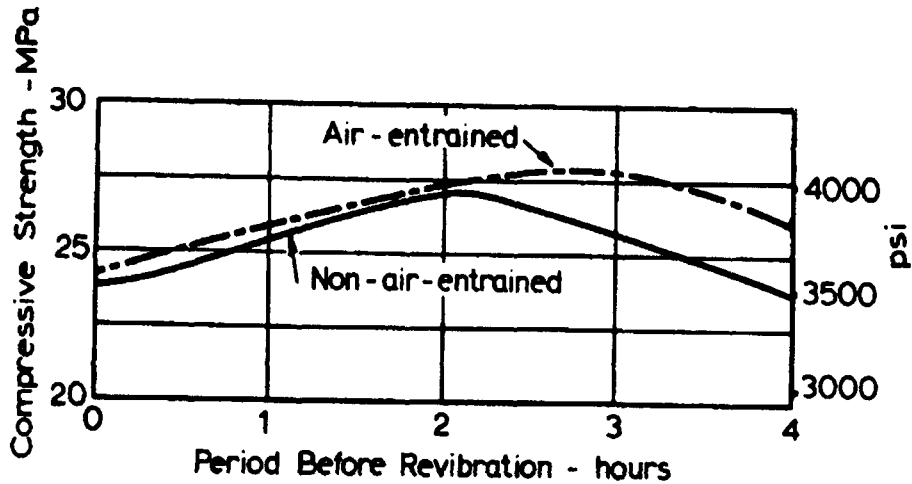


그림 2.2 Retempering(Revibration) 효과

3. 시공장비

원하는 직경의 말뚝을 지지층까지 시공하기 위해서는 장비의 토크가 충분해야 한다. 특히 비배토 방식의 오메가 말뚝은 천공중 지반다짐 작업을 동시에 수행하기 때문에 일반 cfa 말뚝에 비해 더 큰 토크가 필요하다. 다음에서 각 공법별 작업에 필요한 장비의 제원을 나타내었다.

3.1 오메가 말뚝 천공에 필요한 동력 및 장비제원

비배토 방식의 오메가 오거는 지반을 천공할 때 다른 비배토 방식의 천공장비에 비해 최소의 에너지가 소요되도록 설계했지만 오메가 굴착에 필요한 토오크는 토질과 천공직경에 따라 변한다. 표 3.1에서 천공 직경별 필요 표준 토오크를 나타내었다.

40t·m의 큰 토오크로는 매우 큰 직경으로 지반을 천공할 수 있고 또는 단단한 지반에서의 천공을 가능케 한다. 이 토오크로 작은 직경의 오메가 말뚝을 시공하면 회전속도의 pull-down 힘의 증가로 시공속도가 증대된다.

표 3.1 오메가 말뚝의 천공에 필요한 직경별 표준토오크 및 최소 오거회전속도

천공 직경	필요 표준 토오크	최소 오거 회전속도
310, 360, 410mm	16t·m	8 ~ 10 RPM
460, 510, 560mm	24t·m	
560mm 이상	24t·m ~ 30t·m	

위의 표는 지반상태에 상관없이 웬만한 단단한 지반이라도 원하는 직경으로 천공할 수 있는 토오크를 나타내었다. 실제의 작업에서는 표 3.1보다 작은 토오크로서도 성공적으로 오메가 말뚝을 시공한 사례가 보고되고 있다.

여러 가지 지반조건속에서 원하는 직경의 오메가 말뚝을 무리없이 시공하기 위해서는 최소 16t·m의 토오크를 사용하는 것이 바람직하다. 최근 벨기에의 Vorst-Forest 설계시 130ton의 허용지지력이 발휘되도록 직경 510mm의 오메가 말뚝을 16t·m의 토오크로 25m 깊이까지 시공하였는데, 이 공사에서는 하루 8시간 동안 말뚝 200~300m를 시공하였다.

일반적으로 장비의 회전수와 토오크가 높으면 좋지만 사정이 허락치 않으면 둘 중에 하나라도 표준 이상의 성능을 가져야 한다. 즉, 높은 회전수를 가지고 토오크가 다소 낮거나 반대로 토오크가 높고 회전수가 낮으면 된다. 표 3.2에서 오메가 오거 천공에 필요한 토오크를 얻기 위한 장비의 제원들을 나타내었다.

표 3.2 장비의 제원

구 분	11t·m	16t·m	25t·m	36t·m
엔진 파워	160~200 HP	250~350 HP	350~500 HP	650 HP
유 압	280~350 kg/cm ²	280~350 kg/cm ²	280~350 kg/cm ²	280~350 kg/cm ²
Oil Flow (로타리 헤드)	250~350 l/min	250~350 l/min	500 l/min	860 l/min
Rig 중량	40ton	55ton	90ton	110ton

3.2 cfa 말뚝 천공에 필요한 동력

천공에 필요한 동력을 결정하기 위해서는 컷팅헤드 및 기어장비의 무게와 지반의 단단함 정도를 고려하여야 한다. 천공할 때 필요한 토오크는 최소 1.4t·m, 최대 7t·m인데 일반적으로 1.7~5t·m 범위의 토오크가 가장 많이 사용된다. 장비의 토오크 뿐만 아니라 컷팅헤드의 형태나 설계도 지반을 천공할 때 중요한 요소이다. 1.4t·m는 풍화된 석회암반은 뚫지 못하는 정도이고 3.5~4t·m는 이 층을 2~3m 정도 천공할 수 있는 크기이다.

천공가능한 지반의 종류는 다음과 같다.

- 1) 인공 성토층
- 2) 사질토층
- 3) 연약점성토 및 유기질토(bulging 발생가능)
- 4) 풍화암, 자갈층

4. 지반천공

오거는 증공관에 의해 로타리 헤드에 연결되어 있고, 이 유압로타리 헤드가 회전함에 따라 오거가 회전하면서 지반을 천공할 수 있다.

말뚝의 시공위치가 확정되면 leader를 지표면에 놓고 천공작업을 시작한다. 운전실에 모니터링 시스템이 설치되었으면 운전자는 시공할 말뚝에 대한 정보를 입력한다.

지표면 부근을 천천히 천공한 뒤 지표면에서 약 1m를 천공하고 나면 다시 천공장비의 수직성을 검

토해야 한다. 이때 큰 호박돌과 같은 장애물이 나타나면 백호우로 제거한 뒤 다시 천공작업을 재개한다. 모니터링 시스템을 통하여 운전자는 천공중에 오거 회전속도, 관입속도 및 관입압력 등을 점검하면서 지반을 천공한다.

4.1 천공속도

지반을 천공할 때 천공지반이 이완 및 유실되면 말뚝주면 지반의 강도저하로 인한 마찰지지력의 감소와 bulging 및 necking 현상이 발생하여 말뚝의 품질에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 지반의 이완은 느슨한 모래지반에서 굴진속도가 감소하거나 작업의 중단 및 한 지점에서 오거회전만 계속될 때 발생한다. 지반을 천공할 때는 적절한 천공속도와 회전 토오크를 유지하여 신속하고 연속적으로 작업을 하는 것이 중요하다.

현장타설 말뚝의 시공중 천공에 의하여 공벽의 다짐효과를 얻기 위해서는 적당한 관입속도를 유지하여야 한다. 실제로 지반을 천공하는 속도는 이론적으로 계산된 관입속도보다 커서는 안된다. 실제 관입속도가 이론치보다 크게 되면 천공된 흙이 오메가 오거내에서 위로 이동되지 않게 되고 이로 인해 공벽을 다지는 효과가 없어진다. 식(4.1)은 이론적인 관입속도를 계산하는 식이다.

$$v_i = n \cdot l \quad (1)$$

여기서, v_i : 이론적 관입속도($m/hour$)

n : 회전속도(RPM)

l : *Pitch(cm)* 플랜지(오거 날개) 간격

cfa 말뚝의 경우 천공작업이 연속적으로 진행되지 않고 한 깊이에서 계속되거나 느슨한 포화모래지반에서 경사말뚝을 시공할 때에는 지반이 유실될 수 있다. 이렇게 되면 당초에 계산된 천공홀의 체적보다 크게 된다.

또한 기존 구조물 부근에서 천공작업이 중단되면 지반의 유실로 인하여 기초와 매설관에 침하와 균열 등의 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 경우 오거의 회전속도를 감소시켜 배토되는 흙의 양을 줄이고 천공과 그라우팅작업이 연속적으로 중단없이 이루어질 수 있도록 주의하여야 한다.

4.2 천공중 지지지반 확인

지반조사 결과를 바탕으로 조사된 지지층에 도달하면 천공작업을 종결한다. 이때, 지반의 저항에 의해 장비의 관입압력은 증가한다. 모니터링 시스템이 없는 장비의 경우 이 관입압력은 장비의 전류치(암페어)로 표시된다. 지반조사를 말뚝시공 위치마다 실시할 수 없으므로 지반조사를 실시한 처음 말뚝시공 위치에서의 지지층에 도달하였을 때의 관입압력을 측정한다. 다른 지점에 천공할 때도 동일한 관입압력이 발생할 때 천공작업을 멈추면 일일이 지반조사를 하지 않고도 지지층에서 천공작업을 완료할 수 있다.

천공작업을 완료할 수 있는 관입압력 허용범위는 처음에 지지층을 확인했을 때의 관입압력에서 $\pm 20\%$ 이내라야 한다. 관입압력이 이 범위내에 들지 않으면 아직 지지층에 도달하지 않은 것이므로 천공작업을 계속하여야 한다. 장비가 시공할 수 있는 최대 깊이에 이르렀는데도 관입압력이 이 범위내에 들지 않으면 마찰저항력을 고려한 말뚝의 총지지력이 설계값에 도달하였는지 검토하고 적절히 조치한다.

5. 타설 및 오거인발

5.1 콘크리트 및 몰탈 배합설계

현장타설 말뚝에 쓰이는 콘크리트는 주로 유럽에서 많이 사용되고 있으며 미국에서는 골재를 넣지 않는 시멘트 몰탈(그라우트)을 많이 사용한다. 그라우트 말뚝은 오래전 부터 사용된 것이고 콘크리트 말뚝은 최근에 개발되었다. 이 둘을 사용함에 있어서 장단점은 명확하지 않다. 다만 콘크리트 말뚝의 경우에는 그라우팅 말뚝보다 타설이 끝난 뒤 철근을 삽입할 때 다소 어려움이 있다. 현장타설 말뚝의 중요한 특성인 주변 마찰지지력의 경우, Neely(1992)는 두 재료를 사용하였을 때 주변마찰력은 차이가 없다고 한 반면에 Roscoe(1983)는 그라우팅 말뚝의 주변마찰력이 콘크리트 말뚝의 마찰력 보다 크다고 주장하고 있다. 유럽지역에서의 시공결과는 콘크리트에 재료분리가 일어나지 않을 경우 설계 마찰지지력을 충분히 발휘하는 것으로 알려져 있다. 오메가 말뚝을 개발한 벨기에에서는 표 5.1과 같이 콘크리트 배합설계를 하며 몰탈의 설계는 표 5.2와 같다.

표 5.1 현장타설 말뚝의 콘크리트 배합설계

물-시멘트비	0.55
시멘트 함량	320~350kg/m ³ 이상 (HK40)
콘크리트의 슬럼프	F ₃ 을 사용할 경우, 10~15cm
골재크기	7/20mm, 7/14mm, 4/14mm
유동화제	F ₃ ~F ₄ (CEN 기준) : 낮은 점도와 높은 workability를 가질 것
지연제	3시간 동안 소성을 증가시킬 수 있도록 설계

표 5.2 현장타설 말뚝의 몰탈 설계

물-시멘트비	수프 정도의 점도를 가질 것
시멘트 함량	9~13포대/m ³
슬럼프	슬럼프 시험 불가능 3/4inch 크기의 Orifice를 가진 플로콘(flowcone)시험
배합재료	시멘트, 모래, 물, 플라이애쉬, 유동화제
유동화제	폴리머 레진 계통(Euloflow, R) (3시간동안 소성을 증가시킬 수 있도록 설계)

5.2 타설재 현장관리

콘크리트와 몰탈의 품질과 재령은 세밀하게 기록하여야 한다. 대부분은 배칭 후 60~90분 이내에 타설하여야 한다. 콘크리트의 워커빌리티를 향상시키기 위해 지연제를 혼합한 경우에는 시간제한이 유동적일 수 있다. 콘크리트가 시간이 지나면 initial set 상태가 되는데 이 상태가 되기 전에 콘크리트를 타

설하여야 한다.

현장에서 initial set 상태를 알기 위해서는 현장에 도착한 믹싱 트럭으로 부터 콘크리트나 그라우트를 컵에 받는다. 시간이 경과하여 컵을 기울였을 때 콘크리트나 몰탈이 흘러내리지 않고 원래의 형태대로 그대로 있는 상태가 initial set이다.

몰탈의 적합성을 검사하는 다른 방법으로써 플로우 콘을 사용한다. 몰탈은 슬럼프시험을 할 수 없으므로 3/4inch 직경의 orifice를 가진 플로우 콘을 사용한다(ASTM C 939, CRD C 79).

때때로 콘크리트의 워커빌리티를 향상시키고 콘크리트의 강도저하를 막기 위하여 소성제(plasticizer)를 콘크리트 1m³ 당 1,000ml 첨가한다. 이보다 많은 양을 넣으면 콘크리트에 재료분리가 발생할 우려가 있다. 현장에서 워커빌리티를 증가시키기 위해서 콘크리트에 물을 타는 경우도 있는데 콘크리트에 물을 타면 워커빌리티는 증가시키지만 강도를 크게 저하시키므로 절대로 물을 타면 안된다. 대략 1yard³(0.76m³)의 콘크리트에 물 1갤런(3.8리터)을 타면 콘크리트의 28일 강도가 14kg/cm² 감소한다. 표 5.3은 배합설계한 콘크리트를 원통형 및 육면체 시료로 만들어 일축압축강도를 시험한 결과이다.

표 5.3 콘크리트 일축압축강도

재 령	시료치수	시료형태	일축압축강도
28일	D=150mm, h=300mm	원통형	250kg/cm ²
28일	각변이 150mm	정육면체	300kg/cm ²

표 5.3에서와 같이 콘크리트의 일축압축강도가 C25/30이면 일반적인 값이지만 각국의 규준이 조금씩 다를 수 있다. 참고로 벨기에로부터 라이선스 계약한 호주의 경우는 콘크리트 일축압축강도가 500kg/cm²이 되도록 배합설계하고 있다.

5.3 적정 타설량

천공직경과 천공깊이로부터 계산한 천공홀의 체적보다 많은 양의 콘크리트를 타설하여야 천공홀 속의 공극들을 완전히 메꿀 수 있다. 현장에서는 콘크리트를 1.5m 타설할 때마다 1.5m 높이의 천공홀의 체적보다 콘크리트를 15% 더 타설하는지 검토하여야 한다. 이를 위해서 1.5m 씩 콘크리트를 타설할 때마다 펌프의 누적 스트로크를 기록하여야 한다. 펌프 보정계수(스트로크당 콘크리트 타설 체적)을 알고 스트로크를 기록함으로써 타설된 콘크리트의 양을 쉽게 알 수 있다.

펌프 보정계수는 타설작업을 시작하기 이전에 수행되어야 하며 현장에서 쉽게 실시할 수 있다. 먼저, 현장에서 드럼통과 같은 큰 용기를 준비하고 펌프의 스트로크를 일정하게 하여 용기에 타설된 콘크리트의 체적을 스트로크 수로 나누면 쉽게 보정계수를 결정할 수 있다.

타설된 재료의 양이 충분해야 천공홀 속의 간극을 완전히 메꿀 수가 있으므로 타설양이 충분한지가 현장타설 말뚝의 품질에 중요한 부분을 차지한다.

5.3.1 cfa 말뚝의 타설량

계산한 천공홀의 체적에 대한 실제 타설량의 비를 타설 재료의 소모계수(Grout Factor)라 하여 말뚝 품질을 확인하는데 사용하고 있다. 이 소모계수는 지반의 상태에 따라 틀려지게 되는데 단단한 지반의 경우는 공벽의 유실이나 붕괴가 거의 발생하지 않으므로 계산한 천공홀 보다 약간 많은 양의 재료를 타

설하면 된다. 그러나 점토지반이나 자갈층과 같은 연약지반 및 간극이 큰 지반에서는 타설재료가 지반 속으로 유실되는 이유로 계산한 천공홀의 체적보다 많은 양이 소요된다. 일반적으로 소모계수는 1.15~3 이 많이 사용된다. 지반별 재료의 소모계수는 표 5.4와 같다.

표 5.4 지반별 말뚝 주입재료의 소모계수

지반종류	소모계수	비 고
굳은 점토층 조밀한 사질토	1.3 이하 (Low GF)	bulging 현상 발생하지 않음
다공성의 석회석 연약지반 자갈층 느슨한 사질토	1.7 이상 (High GF)	

소모계수가 1.1 이하(Under Grouted)가 되면 천공지반에서 상당한 응력이완이 발생하므로 말뚝의 선단지지력이 상당히 감소하는 것으로 실험결과 밝혀졌다. 일반적으로 현장타설 말뚝은 지반을 천공할 때 선단부에서 지반의 이완이 많이 발생하므로 항타말뚝에 비해 지지력이 작게 나타난다. 그렇지만 타설재료의 소모계수가 1.1이하가 되면 타설량 불충분으로 인하여 말뚝 중간중간에 공극이 발생하거나 지반의 이완으로 타설재료와 토질이 섞여 말뚝자체의 강도가 저하될 수 있다(그림 5.1 참조).

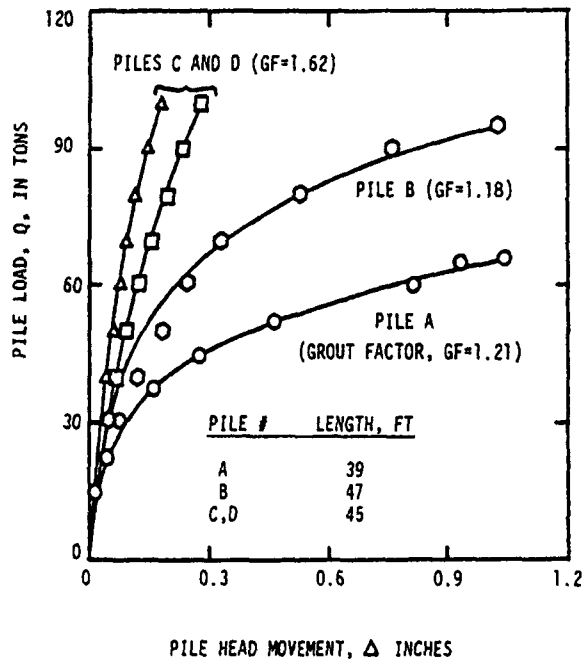


그림 5.1 타설재료 소모계수별 현장타설 말뚝의 지지력 비교(Neely, 1991)

5.3.2 오메가 말뚝의 콘크리트 타설량

일반적으로 말뚝의 직경이 커질수록 소모계수는 줄어 든다. 그리고 오메가 말뚝의 경우는 지반을 천공하고 나면 지반이 오히려 다져져서 공극이 없어지고 표면이 매끈하게 처리되기 때문에 일반 배토방식의 말뚝에 비해서 소모계수가 줄어든다. 동일한 지반조건을 가정하였을 때 보통 배토방식의 소모계수는 1.3 정도이고 오메가 말뚝은 1.15 정도이다. 달리 표현하면 오메가 말뚝이 배토방식의 말뚝에 비해서 같은 직경의 경우 콘크리트의 타설량을 약 15% 줄일 수 있다는 것이다. Bottiau는 배토방식의 말뚝이 오메가 말뚝과 같은 지지력을 얻기 위해서는 오메가 말뚝보다 단면을 크게 시공하여야 하며 콘크리트를 약 50% 더 타설하여야 한다고 하였다.

타설압력이 너무 크면 천공홀 상단부에서 상당량의 콘크리트가 낭비될 수 있다. 감독자는 현장에서 이러한 사유들을 자세히 기록하여야 한다. 공내의 콘크리트 레벨이 지반고에 이르기 전에 콘크리트의 타설펌프의 작동을 멈추어서 콘크리트가 과다소모되는 것을 막아야 한다. 콘크리트의 타설펌프를 멈춘 순간에도 오메가 오거의 중공관속에는 여전히 콘크리트가 남아 있는 상태이며 오거를 인발하면서 남아 있던 콘크리트가 공내로 타설된다.

5.4 타설압력 관리

콘크리트는 $0.3\sim 0.4\text{kg/cm}^2$ 의 압력으로 타설관을 통과하며 이 타설관은 로타리 헤드를 통하여 오거의 중공관에 연결된다. 이때, 충분한 타설압력이 형성되어야 콘크리트와 흙과의 접촉성이 좋아지고 공벽주면의 공극이 콘크리트로 완전히 메꿔진다. 이 압력헤드를 형성하기 위해서는 오거를 인발하기 전에 선단부에서 2kg/cm^2 의 압력이 형성될때까지 오거를 빼내지 말고 콘크리트를 타설하여야 한다.

오거를 빼내기 시작하면 압력은 감소하나 인발 동안에 $0.5\sim 1.5\text{kg/cm}^2$ 의 타설압력을 유지하여야 한다. 타설압력이 높으면 흙과 콘크리트의 접촉성이 좋아지지만 타설압력이 너무 높으면 타설후에 철근을 설치할 때 어려움이 있으므로 $1.5\sim 2.0\text{kg/cm}^2$ 를 넘지 않도록 하여야 한다.

오거를 인발하는 중에 콘크리트의 타설이 중단되면 부(negative)의 콘크리트 소모계수가 되며 타설초기에 형성된 타설압력이 급격히 상실된다. 부의 소모계수가 발생하면 말뚝주면 지반의 공극이 많으면 공벽이 무너져 Necking 현상이 발생할 수 있어 말뚝의 품질에 심각한 영향을 미친다. 그러므로 작업자는 콘크리트가 항상 압력상태에서 타설되고 있는지 살펴야 하고 타설중간에 콘크리트의 공급이 중단되지 않도록 주의해야 한다.

콘크리트의 타설을 조절하기 위해서는 오거의 상단부에서 타설압력을 측정하는 방법이 가장 널리 사용되어 왔다. 그러나 오거의 상부에서 타설압력을 측정하는 것은 오거의 선단부에서의 타설압력과 때때로 상당한 차이를 나타낼 수 있다. 이 차이는 콘크리트와 몰탈의 소성 때문이다. 특히, 콘크리트의 경우 타설구(중공관)의 직경이 경화된 콘크리트에 의해 감소하는 현상이 발생하여 오거 상단부에서 측정된 타설압력과 선단부에서의 타설압력의 차이를 나타낼 때가 있다. 참고로 그림 5.2는 오거의 상단부와 하단부에서 몰탈의 타설압력을 측정한 것으로 지하수에 의한 간극수압과의 관계도 나타내었다.

매우 연약한 지반에서는 오거상단부에서 타설압력을 측정할 뿐만 아니라 오거 하단부에서의 타설압력을 측정하여야 하는데 오거 하단부에서의 타설압력이 연약한 흙의 강도를 초과하게 되면 지반파쇄가 발생하고 과다한 콘크리트가 소모되게 된다(사진 5.1 참조). 부마찰력이 발생하는 연약지반에서는 이러한 지반파쇄 부위가 말뚝에 부마찰력이 더욱 크게 걸리도록 하는 고리역할을 하므로 지지력 측면에서 바람직하지 않을 뿐만 아니라 콘크리트량이 많이 소모되므로 경제적 면에서도 좋지 않다.

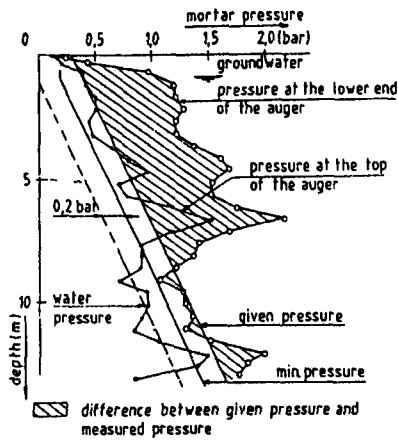


그림 5.2 오거의 상단부와 하단부에서 측정된 몰탈의 타설압력(Brons & Kool, 1988)

콘크리트의 타설압력을 잘 조절할 수 있으면 말뚝 주면의 균일성을 확보할 수 있다.

오거선단부에서의 콘크리트의 타설압력을 측정하면 바로 지반에 가해지는 압력을 알 수 있으므로 측정된 타설압력과 주위 지반과의 강도를 비교하여 타설압력을 조정하면 말뚝주면의 건전도를 향상시킬 수 있을 것이다. 즉, 굳은 지층이나 풍화암지대에는 높은 타설압력을 가하고 연약한 지반에서는 타설압력을 줄여서 시공하여야 한다.

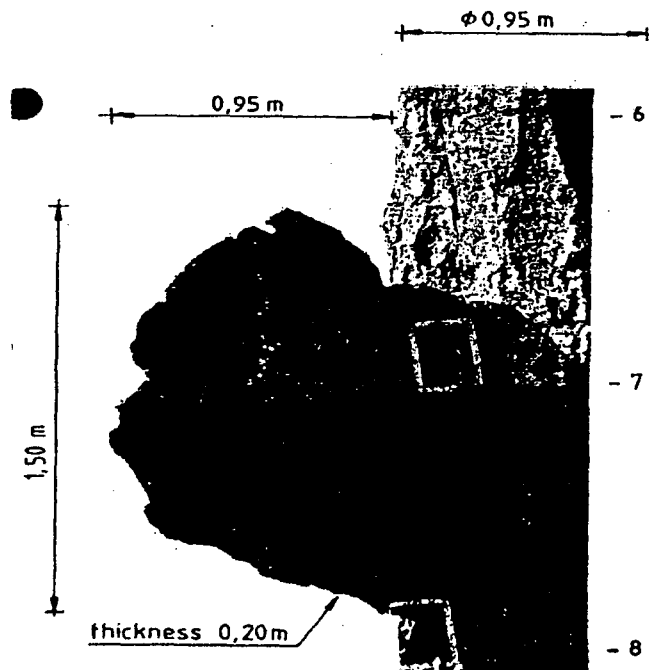


사진 5.1 부적절한 타설압력으로 발생한 말뚝주면부의 지반파쇄

5.5 타설시 주의사항

- ① 적절한 압력헤드를 형성하여 압력상태에서 콘크리트를 타설하여야 하며
- ② 콘크리트 소모계수도 철저히 검토하여야 한다.

오메가 말뚝공법은 보통의 오거로 굴착하는 cfa공법에 비하여 천공된 공벽이 상당히 다져지기 때문에 cfa 말뚝과 같이 재료 소모계수를 크게 할 필요가 없다. 소모계수가 1보다 작지 않으면 콘크리트의 타설 체적에 비해 오거의 인발속도가 빠르지 않음을 나타낸다. 소모계수가 1미만이라고 해서 말뚝 주변에 반드시 necking이 발생한다는 것을 의미하지는 않으며 다만 오거를 빼내는 속도를 줄여야 함을 나타낸다.

동일 지점에서 깊이에 따라서 지반의 구성이 판이한 경우가 흔히 발생한다. 콘크리트를 타설할 때 동일 공내에서 단단한 지층에서 느슨한 지층으로 오거가 이동하면 콘크리트의 압력은 감소한다. 이때는 오거의 인발속도를 늦춰서 압력이 떨어지기 전의 값으로 회복될 때까지 기다려야 한다. 이러한 경우에는 콘크리트 소모계수가 1보다 커야 한다. 오메가 말뚝은 천공시 공벽이 효과적으로 다져지기 때문에 이와 같은 문제가 잘 발생하지는 않는다.

이와 같이 동일 지점이라도 깊이에 따라서 지반의 구성이 달라지면 말뚝의 전길이에 걸쳐서 콘크리트의 압력을 토질조건에 따라 조절하여야 한다. 경험자료에 의하면 모래지반에서 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 콘크리트 압력을 유지하려면 콘크리트 소모계수값이 커진다. $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 압력상태로 조밀한 모래층을 통과할 때 높은 콘크리트 소모계수를 나타내면 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트 압력이 적절하지 않음을 의미하므로 오거를 좀 더 빨리 빼냄으로써 콘크리트의 압력을 $0.2\sim 0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도로 낮추어야 한다.

모래지반에서 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트 압력을 얻기 위해서 오거를 빼내는 것을 멈춘채 오래 콘크리트를 타설하게 되면 콘크리트가 공벽을 너무 다지게 되므로 콘크리트 속의 수분이 모래지반속으로 침투하게 되고 이로 인한 콘크리트의 조기경화에 의해 철근의 설치가 어렵게 된다.

5.6 인발속도 및 주의사항

오메가 말뚝의 경우 오거의 독특한 형상에 의하여 천공시에도 지반이 이완되지 않고 다짐작용에 의해 강도가 증가한다. 다져지는 영역은 말뚝직경의 4~5%로 일정하다. 소구경 말뚝의 경우 이 다져지는 영역에 의해 말뚝공벽이 무너지는 것을 충분히 감당할 수 있지만 말뚝직경이 커질수록 이 영역이 공벽의 함몰 방지에는 부족하게 된다. 특히, 점착력이 없는 석영질 모래지반에서는 말뚝품질에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

인발시에도 공벽붕괴를 방지하기 위해서는 다음을 검토하여야 한다.

- ① 오메가 오거의 Counterscrew의 상태 점검(천공도중 변형되지 않고 원형을 잘 유지하고 있는지 살펴야 함)
 - 만약 배토가 발생했다면 얼마만한 양이 발생했는지 검토.
 - 배토가 발생하였다면 천공과 인발중 언제 배토가 발생하였는지 검토.
 - 흙이 오메가 오거에서 떨어지지 않고 붙어 있는지 또는 장비의 결함이 없는 데도 배토가 발생했는지를 검토한 후 작업일지에 기록.
- ② 신속히 말뚝을 시공
- ③ 오거인발시, 오거의 회전속도는 빠르게 하고 오거의 인발속도는 너무 빠르지 않게 한다(오 거의 인발속도 보다 회전속도를 빠르게)

오메가 오거의 이론적 인발속도는 다음 식에 의해 계산되며 이론적인 관입속도와 인발속도는 같은 식을 쓴다.

$$v_u = n \cdot l \quad (2)$$

여기서, v_u : 이론적 인발속도

n : 회전속도(RPM)

l : Counterscrew의 피치(cm) 플랜지(오메가 오거 날개) 간격

오메가 오거를 인발시에는 계산된 이론적 인발속도보다 빨리 빼내서는 안된다. 이보다 빨리 빼내면 흙이 상부로 이동되지 않으므로 공벽이 다져지지 않는다. 경험에 의하면 이론적 인발속도의 반정도의 속도로 인발하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

5.7 지하수위가 높은 지반에서의 타설

현장타설 말뚝은 천공바닥면에서부터 오거 중공관을 통하여 콘크리트 또는 몰탈을 타설하면서 오거를 인발한다. 지하수위가 높은 지반에서는 지하수로 인한 간극수압 보다 타설 압력이 높아야 지하수가 지표면 밖으로 빠져나오고 지하수 대신에 타설재가 천공홀내를 메꿀 수 있다. 타설 압력이 충분하면 공내로 부터 처음에는 지하수가 흡과 섞인 흙탕물이 빠져 나옴 그 뒤에 타설재가 흘러나오게 된다.

5.8 콘크리트의 온도관리

기온이 매우 높은 여름에 콘크리트를 타설하려면 콘크리트 자체의 온도상승으로 조기경화 등의 문제가 발생한다. 보통 땅속은 여름에도 낮은 온도를 유지하고 있으나 문제는 지열로 인하여 지표면 부근의 콘크리트 온도가 매우 높고 상승한다는 것이다.

콘크리트의 온도를 내리기 위해서는 액체 질소 또는 액체 CO₂를 믹서에서 콘크리트와 섞으면 되고 이들을 첨가하더라도 콘크리트의 품질에는 영향을 미치지 않는다.

콘크리트를 배합하기 전에 얼음물을 골재나 모래 등에 끼얹어 콘크리트의 온도를 낮출 수 있다.

5.9 말뚝의 침강에 대한 대책

감독자는 인접하여 말뚝을 시공할 때 시공이 완료된 말뚝의 상단부의 레벨을 살펴 콘크리트의 침강이나 재료분리 등의 문제가 일어나지 않는 지 관찰해야 한다.

현장타설 말뚝은 시공직후에 침강하는 것이 일반적인데 다공성 석회석 지반이나 연약점성토 지반에서는 많은 양이 침강한다. 보통 콘크리트의 자중에 의해 콘크리트가 암반의 절리 속으로 파고들거나 연약 지반에서는 타설압력에 의하여 말뚝주면이 부풀려 질 때 콘크리트의 침강이 발생한다. 시공 후 아직 유동상태일 때 모르타르의 경우 약 30cm 침강하는 것이 보통이며 이때는 initial set 상태가 되기 전에 말뚝두부에 몰탈을 부어서 레벨을 맞추면 된다.

말뚝 두부면이 30cm 이상 침강하면 그라우트 호스를 말뚝에 삽입하여 그라우팅을 하여 말뚝 두부의 레벨을 맞추어야 한다. 이때 중요한 것은 추가로 그라우팅 할 때 주위 흙과 몰탈이 섞이지 말아야 한다.

6. 현장타설 말뚝의 보강

콘크리트는 압축하중에 잘 견디는 성질을 가지고 있고 내구성이 뛰어나 건설재료로서 각광을 받아 왔다. 콘크리트의 단점이라면 상대적으로 인장과 휨에 약하다는 것이다. 인장과 휨은 콘크리트 구조물에 균열과 파괴를 가져올 수 있는 것이다.

말뚝은 일반적으로 연직하중에 의한 압축력에 견디도록 설계되어 있다. 그러나, 말뚝의 사용목적 및 형태에 따라서는 인장과 휨도 많이 받게 된다.

최근에는 아파트 및 빌딩의 대형, 고층화의 추세로 인하여 풍하중을 무시할 수 없는 상황이 되었으며 이러한 풍하중에 의하여서도 상당한 횡력에 의하여 기초말뚝의 일부분에 큰 인장 및 휨하중이 발생할 수 있다.

그러나, 지반에 시공된 말뚝의 경우는 횡력에 대해서 상당량을 지반이 받아 주기 때문에 큰 문제가 안될 수 있다. 그러나, 벽체로 시공되어 주동면이 노출되게 되면 상당한 휨하중을 견디도록 철근을 보강하여야 할 것이다.

현장타설 말뚝에 대한 보강설계는 콘크리트와 철근의 허용응력을 계산하여 말뚝의 직경에 대한 철근의 개수 및 치수 등을 결정한다.

6.1 보강재의 조건 및 방법

보강재(길이방향)의 주요 역할은 휨과 인장에 저항하는 것이다. 보통 이러한 하중들은 지표면 부근에서 가장 크게 발생하고 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 말뚝하부에서 발생하는 휨은 매우 작고 또한 지반이 상당량을 저항하므로 설계에서 무시될 때도 있다.

보강재를 설치하다 보면 특히 콘크리트에 철근망을 말뚝선단까지 보강하기가 매우 어려운 경우가 있다. 말뚝의 선단까지 보강을 하여야 하지만 철근이 저항해야 하는 힘이 말뚝선단부까지 전달되지 않는 경우가 많으므로 말뚝상부만 보강하고 말뚝하부는 보강하지 않는 것을 시공하는 측에서는 선호한다. 그러나 아직 인장과 휨이 어디까지 전달되고 어디까지 보강하여야 하는가에 대한 연구결과가 부족하며 유럽에서는 말뚝선단까지 철근을 설치하는 방법들이 개발되고 있으며 성공적으로 시공한 실적도 있다.

보강재는 말뚝내에서 수직이 되도록 시공하여야 하며 인장력이 작용할 때 영구변형되지 말아야 된다.

보강방법에는 H형강을 콘크리트에 삽입하는 방법과 철근망을 거치하는 방법 및 시공성을 향상시킨 스틸파이버를 시공하는 방법 등이 있다. 보강재를 삽입하는 방법에도 말뚝재료를 타설하고 난 후에 철근을 삽입시키는 방법이 있고 또한 재료를 타설하기 전에 오거의 중공관 내부로 미리 철근을 설치하고 재료를 타설하는 방법이 있다.

타설후 보강재를 삽입할 때는 타설작업이 끝나면 말뚝머리 부분을 깨끗이 하여 철근의 설치를 용이하게 한다. H형강 및 짧은 철근망은 별다른 장비없이 설치될 수 있지만 선단부까지 보강할 때에는 소형 진동해머를 사용하여야 한다.

보통의 경우는 특별히 큰 수평하중이나 휨하중이 말뚝에 작용하지는 않으므로 원형철근에 연직철근을 용접한 형태로 말뚝을 보강한다. 나선 철근의 직경은 6~8mm로 하고 원형철근사이의 간격은 20~33cm로 하는 것이 가장 보편적이다.

6.2 철근망 보강

현장타설말뚝의 경우 아직 유동상태에 있는 콘크리트나 몰탈이나 철근망 삽입하여 말뚝을 보강한다. 이 철근을 삽입하는 것도 주의가 필요하다. 간극이 큰 모래나 자갈지반에 철근을 거치하다 보면 간극속

으로 콘크리트나 몰탈의 수분이 빠져나가 조기에 도우넛 모양으로 말뚝주면이 경화되는 현상 때문에 철근의 거치를 방해한다. 또한 말뚝중간이 잘록하게 necking된 경우나 철근을 말뚝중심에 잘 맞춰 수직으로 시공하지 않으면 거치도중 말뚝공벽에 걸리기 때문에 철근이 잘 삽입되지 않는다.

말뚝선단 부근의 콘크리트가 경화되어 설계 선단지지력에 가깝게 되는 경우도 철근을 거치하기가 힘들다. 이 경우도 말뚝이 잘록하게 된 경우와 말뚝주면부가 급속하게 경화된 경우와 같이 거치하려던 철근을 제거하고 재굴착 및 재타설작업을 한 뒤 철근을 삽입하여야 한다. 사진 6.1은 국내 현장에 적용된 오메가 말뚝의 철근망 보강재이다.

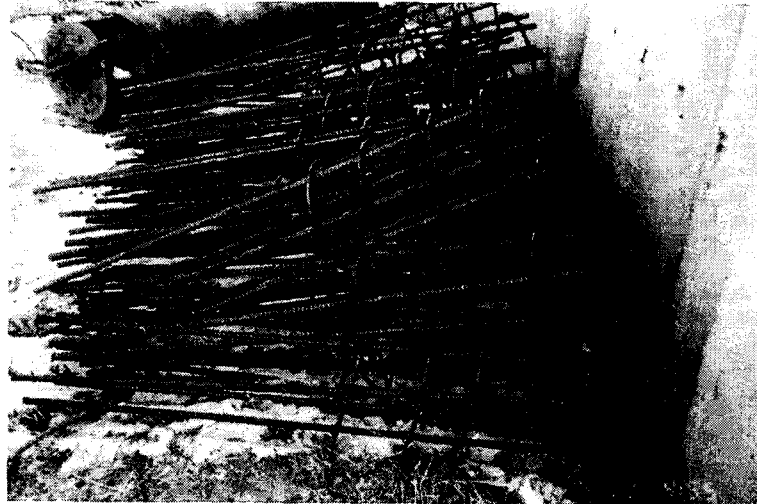


사진 6.1 철근망 보강재

6.2.1 연직철근의 설계

주로 사용되는 오메가말뚝 직경에 대한 연직철근의 설계는 표 6.1와 같다.

표 6.1 연직철근의 설계

구 분	말뚝직경 310, 360mm	말뚝직경 410, 460mm	
철 근 수(개)	4	5	4
철근직경(mm)	14	14	16
철 근 길 이	주위 지반의 수평응력에 따라 최소 3.5m에서 말뚝 전체길이까지 보강		

6.2.2 횡방향 철근(transversal reinforcement) 또는 나선 철근

횡방향 철근의 설계는 모든 직경의 오메가 말뚝에 동일하게 적용된다. 통상적으로 직경 8mm 철근을 사용하며 간격은 330mm로 한다.

주위 지반의 굴착으로 말뚝이 노출되는 등과 같이 큰 수평하중이 말뚝에 작용하는 경우에는 직경 430mm 이상의 말뚝에 보강재로 H형강을 사용하기도 한다.

6.2.3 철근망의 삽입 및 피복두께 확보

철근망의 직경과 콘크리트에 삽입할 때 중심을 잡는 것은 철근의 피복두께를 확보하는 데 중요하다. 적어도 피복두께는 75mm가 확보되어야 한다. 철근의 피복두께는 15cm 이상 되어서는 안되고, 철근망의 직경은 말뚝직경보다 적어도 160mm 작아야 한다. 각 말뚝 직경별 철근망의 바깥지름은 표 6.2와 같다.

표 6.2 말뚝 직경별 철근망의 최대 외경

말뚝 직경	철근망의 최대 외경
310mm	150mm
360mm	200mm
410mm	250mm
460mm	270mm

모래지반에서는 타설재의 수분이 모래층으로 흡수되어 경화가 촉진되기 때문에 철근망을 삽입하기가 어려우므로 표 6.2의 말뚝직경에 대한 철근망의 최대 외경 규정을 잘 따라야 한다. 점성토에서는 투수계수가 매우 작기 때문에 타설재의 조기 경화현상이 발생하지 않아 철근을 설치하는데 상대적으로 별 어려움이 없다. 점성토에서는 최소 피복두께 150mm만 확보할 수 있다면 철근망의 최대 외경보다 큰 외경의 철근망을 시공할 수 있다.

보강재의 거치때에 많은 문제가 발생하여 cfa 말뚝의 경우 대구경 stem이 개발되었고 말뚝의 전체 길이에 걸쳐 시공될 수 있도록 하였다. 증가된 stem의 직경대 오거날개 직경비는 80%까지 이르고 이로써 철근망의 정확한 거치를 가능케 한다. stem이 크면 토오크가 많이 필요하게 되고 장비의 사이즈가 커진다. 보강재의 직경이 커져도 현장타설 말뚝이 지중벽체로 사용될 때에는 수평하중에 대한 최대 허용 휨모멘트가 충분치 못하다.

오거의 증공관에 철근망을 삽입한 후에 콘크리트를 타설하는 경우에는 압력상태로 타설하는 것이 어려워진다. 즉, 공내의 콘크리트의 압력이 커지면 이미 삽입된 철근망이 떠오를 수 있는데 특히, 오거의 증공관 직경과 철근망의 직경이 비슷한 경우에는 이러한 문제가 더욱 심각해진다. 반대로 오거의 증공관 내경이 크고 철근망의 외경이 상대적으로 작으면 별문제 없이 콘크리트를 압력상태에서 타설할 수 있다.

타설작업을 완료한 후에 철근을 설치하는 것이 작업의 간편성 때문에 선호되는 방법이다.

6.2.4 철근의 보강정도 및 심도

철근의 보강정도는 말뚝의 품질에 있어서 큰 문제는 아니다. 즉, 10mm 직경의 철근을 4개 사용하는 것이나 20mm 직경의 철근을 10개 사용해도 말뚝품질에는 별차이는 없다. 다만, 위에서 설명한 말뚝의 직경별로 철근망의 최대 외경을 잘 지켜 시공하는 것이 말뚝품질에 있어서 더욱 중요하다. 현장타설 말뚝에 철근망을 거치하는 것이 H형강을 삽입하는 것보다 어려운 작업이다. 일반적으로 철근망은 콘크리트에 거치할 때는 6m 내외, 몰탈 속에 거치할 때는 12m가 한계삽입깊이로 알려져 있다.

그러나 최근에는 유동화재 등을 사용하여 콘크리트가 적절히 설계되면 진동기를 사용하여 깊은 깊이까지 별문제 없이 철근망을 콘크리트 속에 거치할 수 있다. 유럽에서는 이러한 진동기의 도움으로 콘크

리트 말뚝에 입상토는 15m 이상, 세립토는 18m 이상까지 시공하고 있다.

6.3 H형강 보강

일반적으로 말뚝길이가 말뚝직경의 10배를 초과할 때에는 철근을 삽입하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 말뚝선단까지 확실히 보강하고 수평하중 뿐 아니라 연직압축하중에 대해 보강하기 위해 H형강으로 보강하기도 한다. H형강의 연직성을 확보하고 말뚝의 중심에 시공하기 위해 그림 6.1과 같은 장치가 국내 오메가 말뚝 현장에 이용되었다.

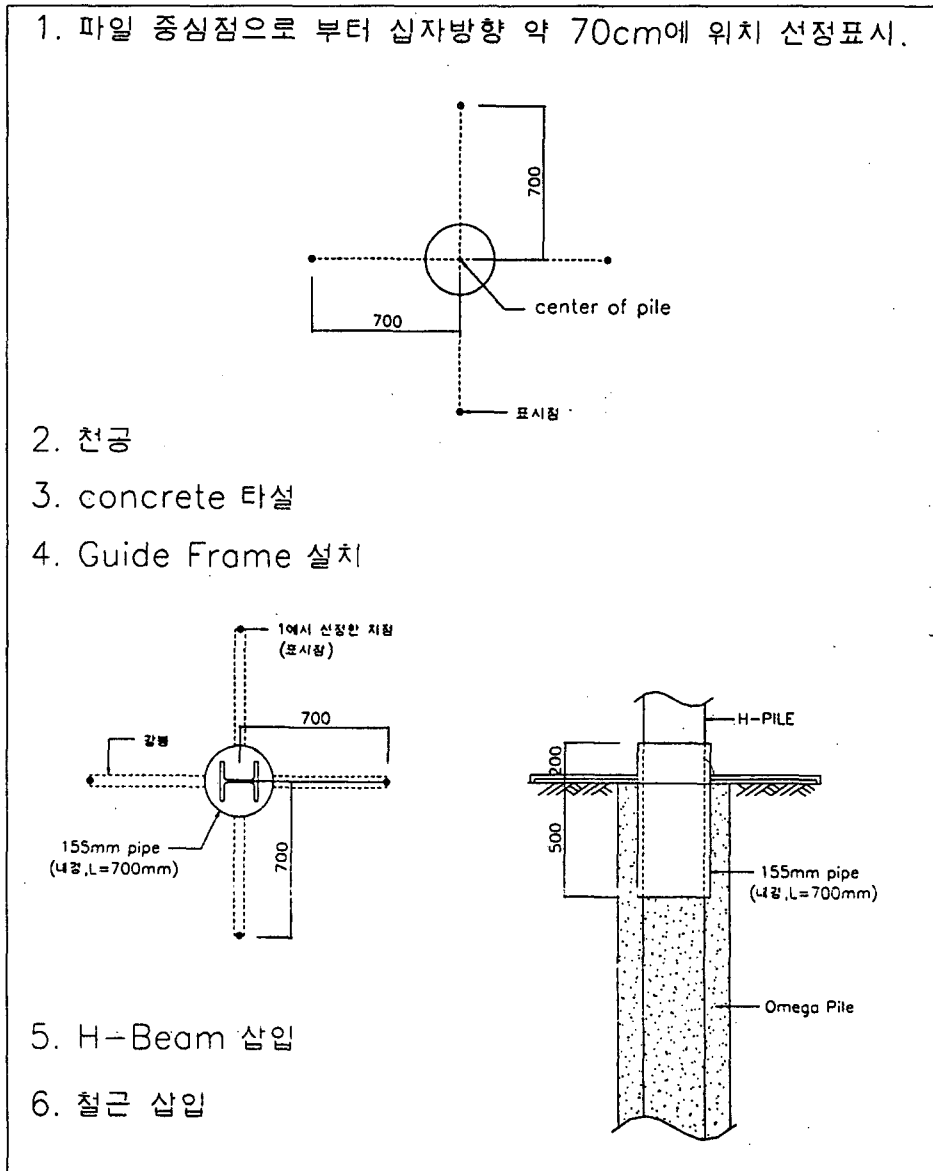


그림 6.1 H형강을 연직성을 확보하며 말뚝중심에 시공하기 위한 장치

H형강을 굴착바닥면까지 밀어 넣기 위하여 사진 6.2와 같이 진동햄머를 사용할 수 있다. 진동햄머를 사용하면 콘크리트에 진동다짐 효과를 주어 품질관리에 유리할 수 있다.



사진 6.2 진동햄머를 사용하여 H형강을 삽입

H형강을 삽입하는 것이 철근망을 삽입하는 것보다는 쉽지만 여전히 굴착바닥면까지 삽입하는 것은 어려운 작업이다. 특히 장대 말뚝의 경우 단면이 작은 H형강은 세장비의 증대로 굴착공내로 삽입 도중 공벽을 건드려서 바닥까지 삽입이 어려울 때가 종종 있다. 이럴 때는 콘크리트 타설을 하기 직전에 중공관을 통하여 H형강을 삽입할 수도 있다. 이때 H형강 단면의 대각선 길이는 중공관 내부 직경의 40% 이내라야 한다. 이 방법은 천공바닥면까지 H형강을 확실히 삽입할 수 있다는 장점이 있지만 시간이 많이 소모되므로 잘 사용되지 않는다. 또한 이 방법에 의하면 H형강의 단면에 제한이 있으므로 휨저항력이 감소하는 단점이 있다.

국내 현장의 오메가 말뚝 시공시 H형강을 중공관에 먼저 삽입하고 콘크리트를 타설하였는데 콘크리트의 막힘현상이 자주 발생하여 시공이 불가능한 경우가 발생하였다. 이는 H형강의 대각선 길이가 중공관 내경의 40%를 초과하여 H형강에 골재가 걸렸기 때문이었다. 골재 크기(25mm → 19mm)를 줄였지만 콘크리트 단가만 올라갈 뿐 막힘현상은 여전히 발생하였다. H형강의 단면을 중공관 내경의 40%로 줄이면 보강효과가 감소하여 결국 타설후 H형강을 삽입하는 방법이 사용되었다.

6.4 스틸파이버 보강

스틸파이버 보강기술은 기존의 철근을 거치할 때의 어려움을 극복하고자 개발되었다. 이 기술은 수 센티미터의 가는 철사와 같은 스틸파이버를 콘크리트와 같이 섞어서 말뚝시공에 사용하는 것으로 높은 인장 및 휨강도를 가지고 내구성도 뛰어나다. 물론 스틸파이버로 보강하면 철근망과 같이 큰 하중에는 견디지 못하지만 일반 연직말뚝에 발생할 수 있는 인장 및 휨에는 잘 견디는 것으로 나타났다.

6.4.1 스틸파이버 콘크리트의 설계

스틸파이버 콘크리트의 품질은 최적 배합과 특수 유동화제와 스틸파이버의 혼합에 있다. 유동화제의 성질이 중요한데 이 유동화제는 콘크리트와 스틸파이버 사이에 윤활역할을 하고 두 물질이 골고루 섞이도록 하는 역할을 한다. 스틸파이버 콘크리트의 설계는 표 6.3과 같다.

표 6.3 스틸파이버 콘크리트의 설계

물-시멘트비	0.55 이하
시멘트 함량	350kg/m ³ 이상
콘크리트의 슬럼프	5cm
골재크기	25mm(D ₅₀ = 1~8mm)
유동화제	폴리머 레진 계통(Euroflow, R) (3시간 동안 소성을 증가시킬 수 있도록 설계)
스틸파이버	길 이 : 50 ~ 60mm 직 경 : 0.8 ~ 1.0mm 무 게 : 0.16 ~ 0.36g 5,100 ~ 2,700fibres/kg 인장강도 : 12,000 ~ 14,000 kg/cm ²

6.4.2 스틸파이버 콘크리트의 제작

콘크리트에 스틸파이버를 혼합하더라도 콘크리트의 워커빌리티가 감소되거나 펌핑작업에 지장이 있어서는 안된다. 스틸파이버와 콘크리트는 현장에서 특수 기계를 사용하여 혼합한다.

스틸파이버는 처음에 진동망(vibrating mesh)에 의해 걸러진 뒤, 30m/sec의 속도로 콘크리트 믹서속에 분사된 후 1~2분 동안 혼합시킨다.

6.4.3 스틸파이버 콘크리트의 강도

스틸파이버의 형태와 스틸파이버의 양의 변화에 따른 스틸파이버 콘크리트의 압축 및 휨강도의 변화를 표 6.4에 나타내었다(Lamote, 1989). 이때 스틸파이버를 섞지 않은 콘크리트만의 압축강도는 330kg/cm²이다.

표 6.4 스틸파이버 콘크리트의 강도변화

구 분	스틸파이버 Type				
	60/100		50/80		
스틸파이버 함량(kg/m ³)	25	30	20	25	30
압축강도(kg/cm ²)	340	350	350	360	370
휨 강 도(kg/cm ²)	50	540	540	570	600

표 6.5와 같이 배합설계한 스틸파이버 콘크리트 및 무근 콘크리트로 원통형 또는 육각형 시편을 만들어 압축, 휨강도 시험을 한 결과는 표 6.6과 같다.

표 6.5 스틸파이버 콘크리트의 배합

스틸파이버 콘크리트의 배합	시멘트 HK 40	400kg
	모 래 0/5	725kg
	골 재 2/7	125kg
	5/15	920kg
	물	180kg
	유동화제	5kg
	스틸파이버 60/100	30kg
배합된 콘크리트의 성질	물/시멘트 비	0.53
	단위중량	2.34t/m ²
	슬럼프	5cm
	슬럼프(유동화제사용)	18cm

표 6.6 스틸파이버 및 무근콘크리트의 평균압축 및 휨강도(28일 강도)

구 분	압축강도	휨강도
무근 콘크리트	470kg/cm ²	43kg/cm ²
스틸파이버 콘크리트	590kg/cm ²	51kg/cm ²

스틸파이버 콘크리트는 무근 콘크리트와 같이 과하중이 가해질 때 취성파괴는 발생하지 않는다.

7. 두부성형 및 두부정리

말뚝과 기초와의 접합을 위하여 공동주택의 경우 기초바닥선(B.L)에서 말뚝머리가 10cm 올라 오도록 시공하고 있다. 이렇게 시공하기 위해 기성 말뚝은 실제 길이보다 길게 시공하여 절단하는 방법을 사용하며 대구경 현장타설 말뚝도 절단하는 방법 등이 사용되고 있다. 말뚝을 절단하는 방법은 매우 번거로울 뿐 아니라 절단시 잘못하면 말뚝 본체에 치명적인 손상을 입히게 된다. 그러므로 좀더 간편한 두부정리 방법이 필요하다. 국내 현장에 오메가 말뚝을 시공할 때 초기 배출된 토사를 자연공벽으로 이용하는 방법과 철제 밴드로 성형하는 방법에 대해 검토하였다.

7.1 배출된 토사 이용법

오메가 말뚝은 비배토 방식이긴 하지만 오거의 다짐몸체가 지반속으로 들어가기 전에 소량의 배토가 발생하며 그림 7.1에서와 같이 약 20cm 높이의 공벽이 지표부근에 형성된다. 이렇게 형성된 공벽내로 콘크리트를 기초바닥면 보다 10cm 이상 타설한다. 보통의 콘크리트는 초기 경화가 시작하는 타설후 2시간 정도에서 블리딩이 완료하며 이후에 그림에서와 같이 블리딩 발생부분을 걷어내고 두부면을 깨끗하게 정리하면 된다. 타설후 2시간내에 두부를 정리하면 그림 2.2에서와 같이 Retempering 효과에 의하여 원래의 강도보다 오히려 증가하는 효과를 나타낼 수 있다. 블리딩이 많이 발생하지 않는 것으로 관찰되면 타설후 바로 기초 바닥면에서 말뚝을 10cm 남겨놓고 면정리를 하면 된다.

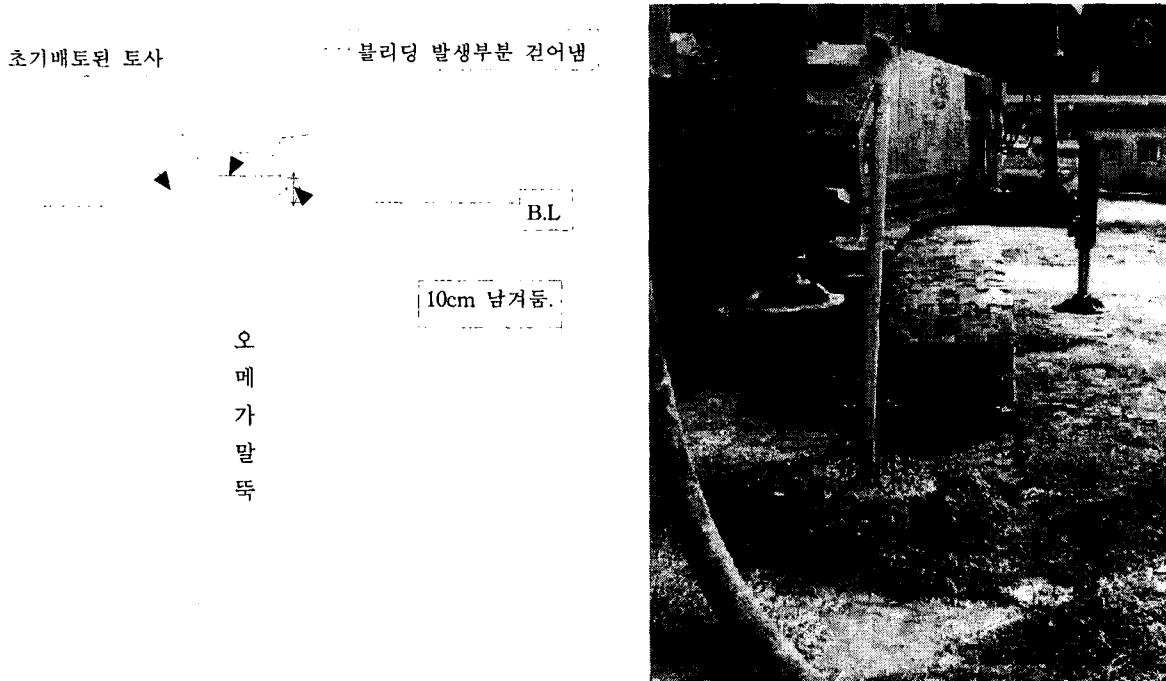


그림 7.1 배토된 토사로 두부성형하는 방법 사진 7.1 배토된 토사로 두부시공된 오메가말뚝

7.2 밴드 성형법

배토된 토사로 두부를 시공하면 그림 7.2(b)와 같이 두부의 형태가 접시형으로 시공되기 때문에 10cm 높이의 철제 밴드로 두부를 성형할 수 있다. 성형방법은 콘크리트 타설이 끝나면 지표면을 정리한 후 밴드를 말뚝 중심부에 연직으로 올려놓고 밴드안에 콘크리트를 채워 넣는다(사진 7.2 참조). 이 방법은 말뚝중심과 밴드의 중심을 잘 맞추지 않으면 그림 7.2(a)와 같이 말뚝과 두부 중심이 이탈되어 시공될 수 있으며 이럴 경우 구조적인 결함으로 작용한다. 시공경험에 의하면 말뚝과 밴드의 중심을 잘 맞추는 것이 매우 어려우므로 밴드의 직경을 말뚝보다 크게 하여 말뚝을 덮는 형식으로 시공하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(a) 밴드성형된 두부 (b) 배토된 흙으로 성형된 두부
그림 7.2 성형된 두부의 형상



사진 7.2 밴드를 이용한 두부성형

8. 품질관리 및 검사

8.1 모니터링 시스템의 사용

Couldery and Fleming(1987)은 타설압력만을 측정해서는 만족스러운 타설관리가 이루어질 수 없다고 결론지었다. 시공자가 처음 현장타설 말뚝을 시공하거나 시공이 익숙치 않은 경우에는 모니터링 시스템을 갖추고 작업하는 것이 좋다.

모니터링 시스템이 점검해야 할 주요 사항은 다음과 같다.

- ① 시공깊이
- ② 토오크
- ③ 콘크리트의 압력

콘크리트는 압력상태에서 타설되기 때문에 콘크리트의 압력을 관찰하는 것은 현장타설 말뚝의 품질관리에 있어서 매우 중요하다. 또한 압력을 관찰하면 콘크리트가 막혀서 타설되지 않는 것도 알아낼 수 있다.

현장타설 말뚝의 품질에 있어서 타설압력 뿐만 아니라 타설재료의 소모계수를 검토하여야 한다. 이 소모계수는 말뚝의 품질 뿐만 아니라 타설되는 재료의 양에 영향을 미치기 때문에 경제성도 관계가 있다. 적은 양의 재료를 사용하여 품질이 좋은 말뚝을 얻기 위해서는 모니터링 시스템을 이용하여 말뚝시공상 각종 자료들을 계속해서 관찰하고 적절한 조치와 조정을 하는 것이 고품질의 말뚝을 저렴한 원가로 시공할 수 있을 것이다.

모니터링 시스템에는 대표적으로 TARACORD와 NDT 시스템이 많이 쓰인다. 영국의 경우, 현장타설 말뚝을 시공하는 장비의 80% 이상이 NDT 시스템이 장착되어 있으며 실무에 적극 활용하고 있다. NDT 시스템이 다른 장비로 이동설치가 간편하고 내구성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 모니터링 시스템이 설치되었으면 컴퓨터 화면에 말뚝의 시공시 품질관리에 필요한 자료들이 나타나며 자동적으로 기록된다.



사진 8.1 모니터링 시스템

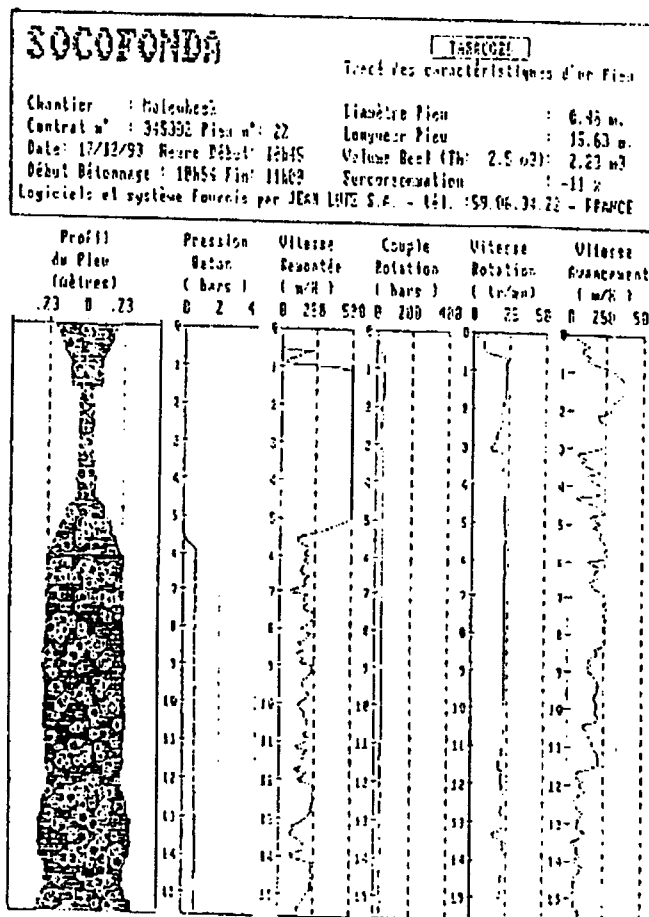


그림 8.1 모니터링 출력 결과

8.2 건전도 시험

현장타설 말뚝의 시공후 바람직한 품질확인 방법은 가급적 많은 수의 말뚝에 대하여 건전도 시험을 실시하는 것이다. 비파괴 건전도 시험은 시험방법이 간단하고 비용이 적게 들기 때문에 하루에도 많은 수의 말뚝에 대해 품질을 확인할 수 있으며 시험결과 품질에 의문이 가는 말뚝은 재하시험을 실시하여 품질을 재확인 할 수 있다.

현장타설 말뚝의 건전도를 알기 위한 비파괴 시험방법에는 크게 소닉로깅 건전도시험(Sonic logging integrity test)와 저변형률 방식인 PIT(Pile integrity test) 등이 있다.

8.2.1 소닉로깅 시험

소닉로깅(SIL) 시험은 발신기와 수신기 사이의 울트라 소닉파의 전파속도와 신호강도를 측정한다. 초음파 소닉로깅 시험은 현장타설 말뚝 시공직후에 한 개 이상의 측정관($d = 50 \text{ mm}$ 정도)을 말뚝에 삽입하고 콘크리트등이 경화될때까지 기다린다. 적어도 타설후 7일후에 측정관에 물을 가득 부은 다음 발신기와 수신기를 측정관을 통하여 말뚝 선단에서부터 통과시킨다. 이렇게 하면 말뚝 깊이별로 수신된 데이터가 중앙처리 장치에서 처리되고 화면에 지중에 시공된 말뚝의 시공상태를 나타내 준다. 사진 8.2는 소닉로깅 시험을 하는 모습이며 사진 8.3은 소닉로깅 시험을 한 말뚝의 지중성형상태이다.

말뚝의 직경에 따라서 삽입하는 강관을 개수를 변화시켜 말뚝의 품질을 더욱 정밀하게 또는 효과적으로 측정할 수 있다. 측정방식에는 크로스 홀 시험(cross hole test)과 싱글 홀 시험(single hole test)이 있다. 대구경의 말뚝에서는 4개 이상의 강관을 삽입하여 그림 8.2와 같이 측정위치를 변화시키면서 상세하게 건전도를 측정할 수 있다(cross hole test). 직경이 1m 미만의 말뚝은 한 개의 강관만을 삽입하고 발신기와 수신기를 그림 8.2(b)와 같이 아래 위로 삽입하여 시험하여 양호한 정도의 시험결과를 얻을 수 있다(single hole test).

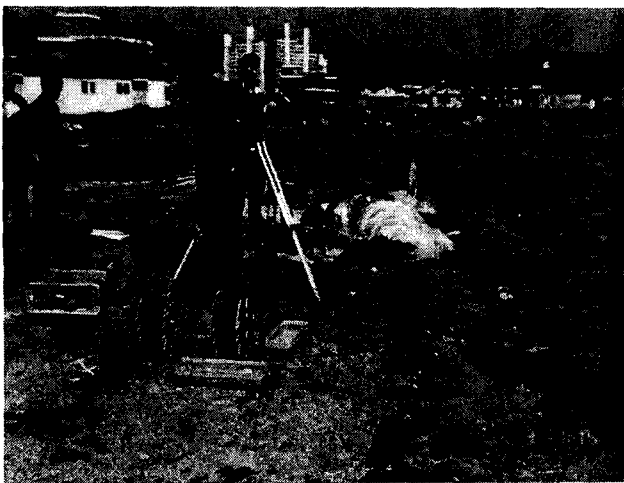
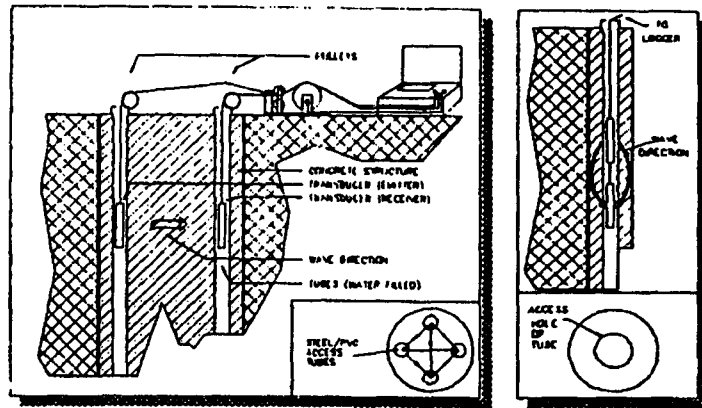


사진 8.2 소닉 로깅 건전도 시험장면



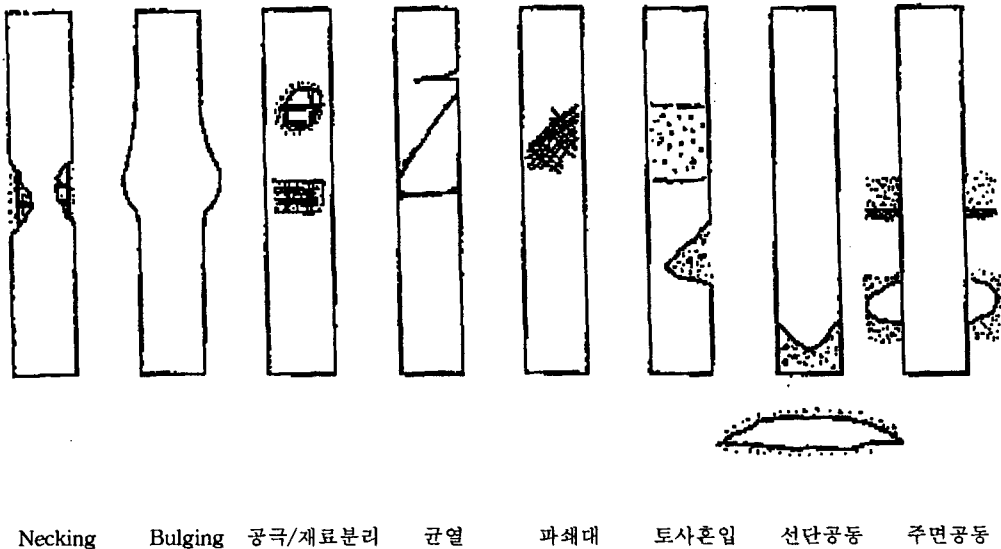
사진 8.3 SIL 시험말뚝(오메가)의 지중성형상태



(a) cross hole 시험 (b) single hole 시험
그림 8.2 SIL 시험형태

(1) 측정가능한 결함

현장타설 말뚝의 내부결함의 대표적인 유발요인은 콘크리트의 재료분리, 표면수에 의한 시멘트 유실, 공동(Void), 균열, 병목부(Necking), 확대부(Bulging), 파쇄부, 이물질 함유, 시공이음 및 부적당한 재료의 사용등이 있다. 이와 관련된 결함의 형태는 그림 8.3과 같다. 소닉로깅시험에서는 말뚝내의 결함의 불균질한 상태가 초음파 전달과정에서 전파속도의 차이로 나타남으로써 이상상태를 판단할 수 있다. 이러한 상태가 파악되면 스케일을 재조정하여 확인작업을 해야 한다.



Necking Bulging 공극/재료분리 균열 파쇄대 토사혼입 선단공동 주변공동

그림 8.3 현장타설 말뚝에서 발생가능한 결함

(2) 강도추정

소닉로깅 시험은 말뚝의 탄성계수를 측정하는 장비는 아니지만 대략적인 값을 계산할 수 있다. 탄성계수 계산식 $E = c^2 \rho$ 에서 c 는 발신속도, ρ 는 측정된 재질의 밀도이다. 일반적으로 콘크리트의 밀도가

2,400kg/m³이라고 할 때 탄성계수의 계산이 가능하다.

아울러 $E = \frac{d^2 p}{t^2}$ 식으로도 탄성계수의 계산이 가능하다. 여기서 d는 두 측정 지점간의 거리, t는 발신시간이다. 예를 들어 0.85m에서 발신시간이 333μs, 측정관 사이의 간격이 120cm일 때 발신속도 c = 3,604m/s(120cm/333μs)이고 탄성계수는 다음과 같이 계산된다(그림 8.4 참조).

$$\begin{aligned}
 E &= c^2 p \\
 &= (3,604\text{m/s})^2 \times 2,340\text{kg/m}^3 \\
 &= 30,394 \times 10^6\text{kgm/s}^2\text{m}^2 \\
 &= 30.4\text{kN/mm}^2
 \end{aligned}$$

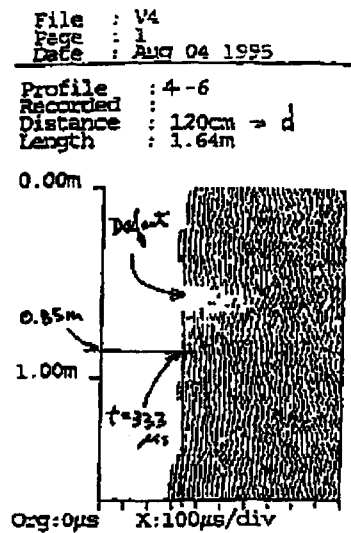


그림 8.4 소닉로깅 시험결과

소닉로깅 시험에 의해 대략적인 탄성계수를 구할 수 있으나 이 결과를 이용할 때 발생할 수 있는 많은 변수를 고려하여야 한다. 측정관은 플라스틱 보다는 강관을 사용하면 시험결과가 우수하다. 그리고 강관 튜브를 쓰더라도 말뚝내에서 측정관이 완전한 직진성을 유지한다고는 보기 어렵다. 또한 전달파의 매질의 특성상 100% 콘크리트로 이루어지지 않았다는 점들을 고려하여야 한다. 왜냐하면 전달파의 매질 일부는 물이거나 측정관 재질등이 포함되었으므로 계산된 영률 결과는 말뚝 기초의 결합을 측정함에 있어 단지 참고용으로만 이용된다.

8.2.2 PIT시험

PIT 시험은 지중에 시공된 말뚝의 건전도를 알기 위해 실시하는 것으로 저변형률(Low Strain) 방식이다. 이 방법은 말뚝머리를 작은 햄머로 가격했을 때 말뚝머리의 거동과 말뚝선단으로 부터의 반사된 파를 측정하여 말뚝단면의 변화를 해석하는 것으로 해석방법에 따라 펄스반향법(Pulse Echo Method : PEM), 순간응답법(Transient Response Method : TRM) 및 임피던스 프로파일 해석법(Impedance

Profile Analysis)등이 있다. 저변형을 시험은 간단하고 경제적이나 정확한 결과를 도출하기 위하여 많은 경험을 필요로 한다.

PIT 시험에서 기본적으로 발견 가능한 사항들로서는 말뚝재료의 임피던스의 변화에 따른 단면형상, 말뚝의 시공길이(계획길이 대비 실제 길이), 충격 압축파의 속의 변화에 따른 콘크리트 품질등이다. 이들 사항이 제대로 파악되기 위해서는 양호한 파형이 측정되어야 한다.

(1) 발견가능한 결함

- a) 기준말뚝(reference pile)이 있는 경우 계획 시공길이보다 5% 이상 짧게 시공된 말뚝(기준 말뚝이 없을 때는 10% 이상 짧은 경우)
- b) 말뚝단면이 분리될 정도의 완전한 균열, 예를 들어 수축에 의하여 발생한 무근말뚝 부위의 노출 균열 또는 굴착도중 시공장비에 의해 손상된 부분 등에서는 완전한 반사파가 형성되므로 감지가가능하나 이러한 균열 바로 아래에 위치하는 균열은 감지하기 어렵다.
- c) 선단부 반사파를 분명하게 확인할 수 있을 정도의 충분한 충격 에너지가 주어지면 약 20% 이상의 임피던스 감소현상을 감지할 수 있음. 만일 기준말뚝이 없거나 선단부의 반사파가 불분명한 경우에는 경험적 방법으로 해석할 수 있으며 이 경우 말뚝길이가 대략 30D(D : 말뚝직경) 정도까지의 범위내에서 결함의 존재여부를 파악할 수 있음.
- d) 임피던스 변화에 대한 정량적 평가는 공칭 임피던스(Nominal Impedance)에 대하여 20% 정도의 정밀도를 갖는 정도로 제한되며 20% 이하의 결함은 확실있는 판단이 쉽지 않다.

(2) 발견할 수 없는 결함

- a) 말뚝주면의 지반저항의 영향으로 임피던스 변화가 복잡하게 형성되는 부분적으로 산재하는 균열.
- b) 임피던스 변화가 50% 이상 발생하는 경우에는 매우 복잡한 파형을 형성하게 되어 해석이 어려우며 특히 이렇게 큰 임피던스 변화 부위의 바로 아래 있는 결함.
- c) 충격파의 폭(impact pulse width)의 수배이상 거리를 두고 발생하는 콘크리트 재질의 점진적인 손상 또는 단면적 변화.
- d) 충격파 전파속도는 $\pm 5\%$ 정밀도에 그치므로 정확한 말뚝길이 산정은 이의 영향을 받게됨.
- e) 선단부 반사파가 분명한 경우는 예외이나 대체로 30D 이상의 길이를 갖는 말뚝시공상태.

8.2.3 시험횟수

건전도 시험은 재하시험에 비하여 시험이 간단하고 비용이 적게 소요되므로 많은 말뚝에 대한 시험이 가능하다. 시험횟수는 구조물의 중요도 및 말뚝의 크기와 시공상태등을 고려하여 결정하여야 한다. 건전도 시험은 시공품질 확인용으로써만 아니라 품질관리 목적으로도 수행되어야 하기 때문에 시험횟수 뿐만 아니라 시험시점에 대해서도 계획을 세워야 한다. 특별히 시험횟수를 규정하는 지침은 없으며 현장 타설 말뚝의 시공이 활발한 전체 말뚝수의 10 ~ 30% 이내에서 관례적으로 실시하고 있으며 홍콩에서는 건전도 시험방식에 상관없이 최소 5% 이상 시험하여야 한다고 추천하고 있다.

참고문헌

1. 대한주택공사(1997), 소구경 현장타설 콘크리트 말뚝(Omega) 공법의 현장적용 방안 연구, 대한주택공사 주택연구소, 서울, pp.86~193.
2. 박종배, 박태순, 정형식, 이명환(1998), "현장계측을 이용한 비배토 현장타설 콘크리트 말뚝의 하중전이 특성에 관한 연구", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.179~186.
3. 박종배, 박용부, 박태순, 김진성(1997), "비배토 현장타설 콘크리트 말뚝의 품질관리", 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, pp.421~424.
4. 박태순, 박종배, 박용부(1997), "벨기에 비배토 현장타설 콘크리트 말뚝시공 현장 방문기", 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.181~186.
5. 이명환, 이인모(1994), "말뚝기초(VII)", 한국지반공학회지, 제10권, 제1호, pp.61-74.
6. 조천환, 이명환, 홍현성, 엄재경(1997), "매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 특성 및 분석기법 연구", 97 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp39~46.
7. Bottiau, M., "Recent experience with OMEGA pile and new applications", Sixth International conference & Exhibition on piling and deep foundation DFI 96, pp.1.2.1~1.2.5.
8. G. H. Roscoe.(1984), "The behaviour of flight auger bored piles in sand", Piling and ground improvement, pp.241~250.
9. Impe, V.(1996), "Deep Foundations on Screw Piles", Preceedings of International Symposium on Pile Foundation, pp.111~151.
10. Neely, W. J.(1991), "Bearing Capacity of Auger-Cast Piles in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp.331~345.
11. Van Impe, W., De Beer, E. & Lousberg, E.(1988), "Prediction of the single bearing capacity in granular soils out of CPT results", International Symposium on Penetration Testing(ISOPTI), Specialty session, pp1~34.
12. Vesic, A.S.(1977), Design of pile foundation, (Tranportation Research Board,1977), Ch2, pp.22~28.