

해안매립지반에서의 토류가시설 시험시공 및 변경사례

A Field Case on the Pilot Constructions and Changes of a Braced Cut Wall in a Coastal Filled Land

황영철¹⁾, Young-Chul Hwang, 김기림²⁾, Ki-Rim Kim, 김연정³⁾, Yeon-Jung Kim

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 상무이사, Senior Engineer, Tunnel Dep. of Yooshin Corporation Engineering

²⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 과장, Engineer, Tunnel Dep. of Yooshin Corporation Engineering

³⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 전문이사, Senior Engineer, Geotechnical Department of Yooshin Corporation Engineering

SYNOPSIS : There are many kinds of braced cut wall methods as the sheet pile, SCW, CIP and slurry wall which is adoptable for a deep excavation construction in a coastal filled land. The braced cut wall which has a strong stiffness is very stable but it has the weak point that the construction cost is high. Thus when a braced cut wall is designed, the geotechnical engineers choose the braced cut wall which has more safe and economic in the consideration of surrounding buildings near the construction site. Especially, when the sheet pile method as a braced cut wall is choosed, the layer order and consistence of a coastal deposit stratum are considered and the pile driving method is also considered. This paper introduces the case that the originally box-type sheet pile wall was changed to U-type and high strength material after the pilot test at the subway constuction site in a coastal filled land. This paper also introduces the case that the sheet pile's driving method was changed to special method in the section of the temporary coffer dam which had made when the present coastal filled land was formed.

Keywords : coastal filled land, deep excavation, box-type sheet pile, sheet pile's driving, temporary coffer dam

1. 개 요

해안 매립지반에서 공항시설과 공장시설을 건설하거나 지하철을 건설할 때 지반분야 설계에서는 연약지반의 분포 및 공학적 특성을 파악하고 시설물 용도에 적합한 연약지반 대책공법을 적용하는 것이 매우 중요하다. 공항 활주로의 경우 성토하중과 비행기 하중으로부터 연약지반의 침하량을 산정하고 침하량이 활주로의 허용침하량을 초과할시에는 압밀을 촉진시키는 연약지반개량공법을 적용하여야 하고, 공장시설의 경우 말뚝기초의 지지력을 확보할 수 있는 대심도 말뚝시공법과 부마찰력 감소 공법을 적용하여야 하며, 이러한 공항이나 공장시설에서의 연약지반 대책공법은 많은 연구와 시험시공을 통해 어느 정도 적정 공법들이 알려져 있다. 해안 매립지반에서 지하철 건설은 구조물 시공심도가 약 20m정도로서 대심도 연약지반 굴착에 해당되며 이 경우에는 연약지반의 토압에 대응하는 적정 토류가시설 공법 적용이 매우 중요하고 또한 지하철이 선형으로 계획되므로 토류벽 공법 적용시에는 매립공사의 시공특성이 고려되어야 한다.

해안 매립지반에서 대심도 굴착공사시 적용할 수 있는 토류벽 공법은 슈트파일공법, SCW공법, CIP공법, Slurry Wall공법이 있으며, 강성이 큰 토류벽은 토압에 매우 안정적이지만 공사비가 비싼 단점이 있어 설계시에는 개착주변의 건물여건을 고려하여 안정성과 경제성 측면에서 유리한 토류벽공법을 선정하게 된다. 특히 이 공법들 중에서 슈트파일 토류벽 선정시에는 해성퇴적층의 층서와 연경도(Consistence)를 고려하여 슈트파일 항타공법을 설계에 반영하여야 한다.

본 고는 해안을 매립하여 신도시 부지가 조성되어 있는 지역에 사회기반시설로서 지하철건설이 진행되고 있는 현장에서 당초 설계에 적용된 Box형 슈트파일을 시험항타한 결과 연약 해성점토 하부에 단단한 실트층이 위치하여 슈트파일 항타시공성이 매우 불량함에 따라 고강도 U형 슈트파일로 변경한 사례와 해안매립공사시 축조한 가호안 통과구간에서 슈트파일 항타시공 변경사례, 기초지반 지반개량공법 변경사례를 소개하였다. 향후 해안 매립지반에서 대심도 굴착공사에 슈트파일 토류벽 공법을 선정할 때에는 지반조건에 적합한 슈트파일 항타 시공법과 가호안 통과구간에 대한 대책방안이 고려되어야 하고, 연약한 기초지반에 대한 지반개량공법 선정시에는 해성퇴적층의 층서와 연경도, 개량심도 등을 감안한 시공 가능성에 대하여 고려되어야 하겠다.

2. 송도신도시 지반특성

2.1 지질 및 지층 구조

인천 송도신도시 지역의 지질은 주로 선캠브리아기(Pre-Cambria Period)의 편마암 및 이를 관입한 쥬라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루며, 기반암은 흑운모 화강암으로써 기반암 상부에는 장기간의 풍화로 생성된 풍화토 및 풍화암이 덮고 있고 풍화대 상부는 해수에 의해 운반 퇴적된 해성퇴적(갯벌)층이 덮고 있다.

지층구조는 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암 순으로 확인되었으며, 매립층 하부의 퇴적토층은 모래질 실트(ML)층, 실트질 점토(CL)층, 모래질 실트(ML)층, 실트질 모래(SM)층 또는 실트질 점토(CL)층, 모래질 실트(ML)층, 실트질 점토(CL)층, 모래질 실트(ML)층, 실트질 모래(SM)층으로 실트층과 점토층이 교호로 구성되어 있다. 본 지역의 퇴적토 지층특성은 하부의 모래질 실트가 상부의 모래질 실트에 비해 매우 단단하며, 하부 모래층은 지하수(해수에 가까움)를 풍부하게 함유하고 있어 피압대수층으로 작용할 가능성이 있으며, 실트층과 점토층에는 부분적으로 Sand Seam이 얇은 층으로 위치하고 있다. 그림 1과 2는 구간별 상이한 퇴적토층의 지층구조를 보이고 있다.

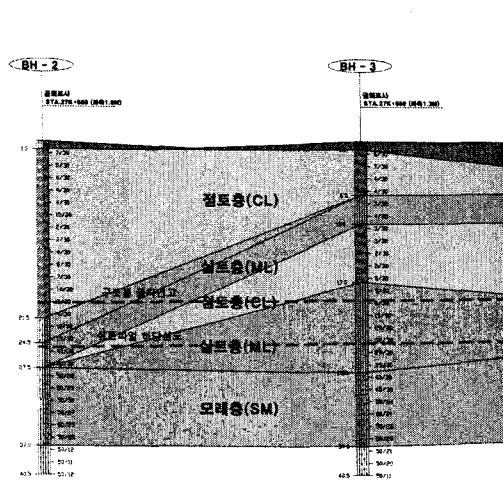


그림 1. A구간 지층구조도

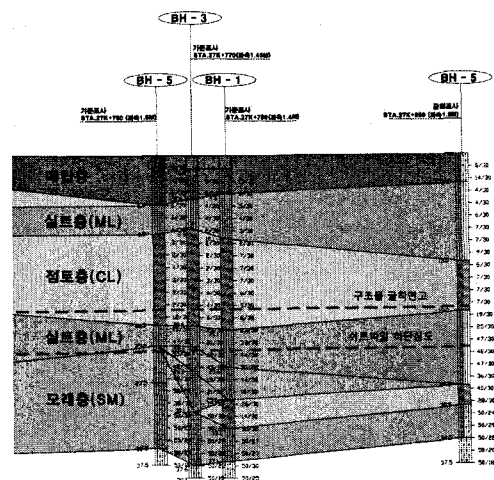


그림 2. B구간 지층구조도

2.2 지반의 공학적 특성

2.2.1 지반정수

본 과업구간의 퇴적토층은 사질토와 점성토가 상호 교호하고 있으며, 연경도 또는 조밀도 역시 혼재되어 층후를 구성하고 있어 정확한 토질경계 구분은 다소 어려운 점이 있었다. 점성토층의 점착력은 일축 및 삼축압축시험 결과를 종합 분석하여 산정하였고, 변형계수는 공내재하시험 및 삼축압축시험 결과를 종합 분석하여 산정하였다. 표 1은 본 지역에 분포하는 지층특성을 반영하여 선정한 지반정수값이다.

표 1. 지반정수

구 분		rt(tf/m')	C(kN/m')	$\phi(^{\circ})$	E(MPa)	
매 립 토		N=10	1.8	-	30	10
퇴 적 층	모래 (모래섞인 실트)	N≤10	1.8	-	28	5
		10<N≤20	1.8	-	30	15
		20<N≤30	1.8	-	33	15
		N>30	1.9	-	35	30
	점토 (점토섞인 실트)	N≤6	1.8	30	-	3
		6<N≤15	1.8	50	-	6
		15<N≤30	1.9	140	-	10
		N>30	2.0	200	-	15
풍 화 토		-	1.9	15	30	30
풍 화 암		-	2.0	30	35	100
연 암		-	2.4	100	40	1,000

2.2.2 압밀특성

시험자료를 이용해 연약 점성토층의 특성을 분석한 결과 전 지역에 걸쳐 대부분의 연약지반은 점토질 실트(ML)와 실트질 점토(CL)의 공학적 특성이 유사하였고, 시험결과를 종합 분석하여 설계정수로 활용하였다. 표 2는 본 점성토의 압밀특성값을 나타낸다.

표 2. 해성 점성토의 압밀특성

구 분	OCR	Cc	eo	Cv(cm ² /sec)
1차 조사	0.968~2.500(1.496)	0.150~0.340(0.228)	0.733~1.047(0.922)	2.62×10 ⁻³ ~1.00×10 ⁻²
2차 조사	0.706~2.231(1.466)	0.227~0.355(0.297)	0.977~1.108(1.051)	2.20×10 ⁻³ ~7.10×10 ⁻³
적 용	1.0	0.25	0.968	2.50×10 ⁻³

2.2.3 수리특성

본 지역의 대표적인 지층의 투수특성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 투수시험을 실시하였으며, 퇴적층 및 풍화대를 대상으로 정수위법과 변수위법을 적용하여 실시하였다. 시험결과 퇴적 점성토

및 사질토, 풍화토, 풍화암의 투수계수는 지층별로 일정한 분포를 보이며, 그 범위는 아래 표와 같다.

표 3. 지층별 투수계수

구 분	투수계수(cm/sec)	적 용(cm/sec)	
퇴적토	점토(CL)	$4.98 \times 10^{-7} \sim 1.09 \times 10^{-6}$	8.0×10^{-7}
	실트(ML)	$1.42 \times 10^{-5} \sim 1.86 \times 10^{-4}$	8.0×10^{-5}
퇴적토(모래), 풍화토	$9.22 \times 10^{-5} \sim 1.07 \times 10^{-4}$	3.0×10^{-4}	
풍 화 암	$1.77 \times 10^{-5} \sim 3.79 \times 10^{-4}$	2.0×10^{-4}	

3. 흙막이 가시설 및 지반개량공법 변경사례

3.1 슈트파일 규격 변경사례

3.1.1 설계내용

1) 토류공법

토류공법 선정시 설계목적, 지형, 지질 및 토질, 시공환경, 공정 등을 고려하여 본 지역이 해안가의 매립지층으로 지하수가 높고, 연약한 지층으로 차수가 시공중에 큰 문제가 될 것으로 검토되어 수밀성이 우수하고 차수성이 양호한 슈트파일 공법을 적용하였다. 슈트파일 규격은 ISP-VA, 500×200×19.5이며 강재의 소요 단면력에 따라 U-Type, All Box Type, Alternate Double Box Type(2EA-U Type+ 2EA-Box Type)을 조합하여 설계되었다. 아래 그림은 슈트파일 형식별 대표적인 적용 단면이다.

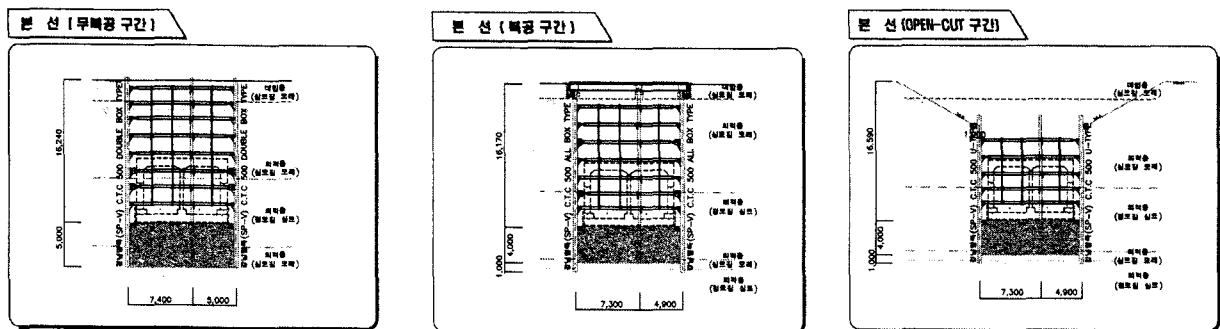


그림 3. 슈트파일 형식별 대표 단면

2) 슈트파일 공사장비 조합

설계시 고려된 슈트파일 시공장비는 표준장비는 표준품셈을 근거로 하여 다음의 장비가 적용되었다.

표 4. 슈트파일 적용 장비

토질명	해머 규격	대상 지반 및 길이	비고
사질토, 역질토	60kW	11m < L ≤ 20m 40 < N ≤ 50	◦ 전동식 진동파일해머 ◦ 표준품셈 2004 pp419~420

시공될 슈트파일의 길이는 약 24~26m이며, 시공지반의 N값은 약 5~40정도이므로 표준품셈기준보다는 슈트파일의 길이는 다소 길고 지반강성은 상대적으로 약하다. 설계단계에서 Water Jet를 병용한 진동파일해머가 검토되었으나, 품셈기준을 근거로 할 때 진동파일 해머만으로 근입이 가능할 것으로 판단되어 표준품셈에서 제시된 시공장비중 규격이 가장 큰 시공장비를 선정하였다.

작업량은 상기의 60kw 진동해머와 무한궤도 크레인 40ton, 발전기 250kw로 장비조합하여 표 5와 같이 설계기준을 설정하였다.

표 5. 슈트파일 작업량 설계기준

구 분	Box - Type	U - Type
평균 길이(m)	25.85	16.75
항타 속도(분/hr)	0.84	2.38
1m당 항타시간(분/m)	2.87	1.51
1분당 항타시간(분)	71.41	30.06

3.1.2 시험시공 및 변경내용

1) 시험시공 결과

시험시공은 설계의 60kw 진동해머로 Box-type과 U-type의 슈트파일에 대하여 실시하였고, 60kw의 진동해머는 슈트파일이 설계심도보다 미근입되는 현상이 발생하여 일부 개소에서는 120kw 진동해머로 변경하였다. 아래 표는 시험시공 현황을 나타낸다.

표 6. 슈트파일 작업량 설계기준

위 치	규 격	설 계 기 준		시 험 시 공		비 고
		근입깊이(m)	근입시간(분)	시공길이(m)	시공시간(분)	
26k 451.0	Box-type	24.00	59.92	24.00	111.27	120kw 교체
26k 451.5	Box-type	24.00	59.92	19.30	108.23	
26k 452.0	Box-type	24.00	59.92	21.30	56.78	
27k 161.0	U-type	24.25	29.41	18.48	109.6	90kw 사용
27k 162.0	U-type	24.25	29.41	24.25	66.82	120kw 사용
27k 162.5	U-type	24.25	29.41	24.25	55.37	120kw 사용
27k 163.0	Box-type	24.25	57.79	24.25	136.28	120kw 사용
27k 416.0	Box-type	24.39	57.79	24.39	123.18	120kw 사용

시험시공결과, 60kw의 진동해머로는 슈트파일의 관입이 어려워 120kw로 용량을 변경하여 사용하였지만 슈트파일 일부는 미근입되었고 작업시간은 2배 이상으로 소요되었다. 슈트파일의 미근입과 작업시간 과다소요의 원인은 선단부 지반의 견고도 및 입경, 주변마찰력, 장비능력, 슈트파일 수직도, 작업원의 숙련도 등 여러 원인에 의해 발생할 수 있으며, 본 현장의 경우는 점토층 하부에 위치하는 N=30이상의 매우 단단한 실트층 또는 실트질 모래층에서 관입이 어려웠고 특히 Box-type의 경우 선단 폐색효과로 U-type 보다 관입이 어려워 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다.

2) 슈트파일 규격 변경

슈트파일은 시험시공결과로 보아 60kw의 진동해머로는 설계 근입깊이까지 관입이 어렵고, 120kw 진동해머를 사용하더라도 작업시간이 2배가 소요되어 1일 최대 3~5분의 시공으로는 공기지연이 예상되었다. 따라서 공기지연 및 원활한 시공을 위하여 천공+진동파일해머 또는 Water Jet+진동파일해머 항타공법에 대하여 검토하였으나, 슈트파일 제조업체에서 고강도(항복강도 400Mpa)의 슈트파일이 생산됨에 따라 선단부 폐색효과로 관입이 어려운 Box-type은 모두 고강도 U-type으로 변경하였고, 진동해머의 용량도 120kw로 변경하였다. 한편, U-type 적용과 진동해머 용량을 증대하여도 작업시간이 과다소요가 예상되는 구간에서는 오거천공후에 슈트파일을 항타하였다.

3.2 매립공사용 가호안 통과구간 슈트파일 시공방법 변경사례

3.2.1 가호안 현황

해안을 매립하여 부지를 조성할 때는 그림 4와 같이 구역을 나누어 단계적으로 매립공사가 진행되며, 이때 파랑에 의한 매립토의 유실방지와 공사용 차량의 진입도로 역할을 위해 외곽호안과 가호안을 축조하며, 본 공구의 가호안 단면은 그림 5와 같다. 매립공사 완료후 가호안은 도로로 활용되기 때문에 가호안 축조에 사용된 피복석(0.2m²급)은 지중지장물로 존재하게 된다.

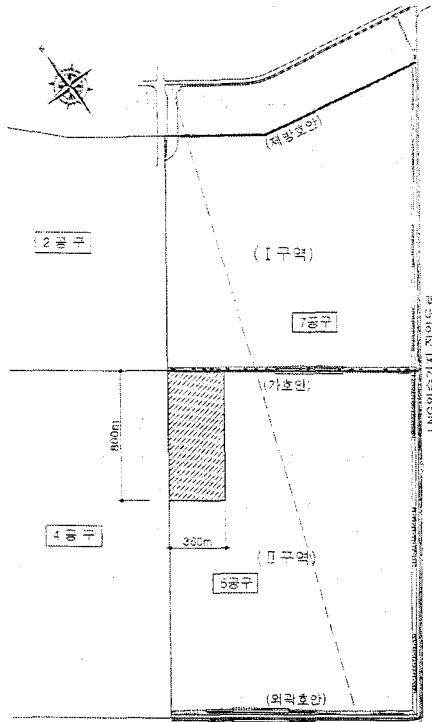


그림 4. 매립공사 현황도

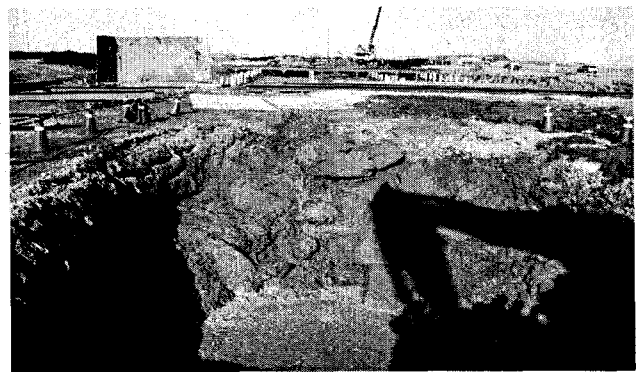
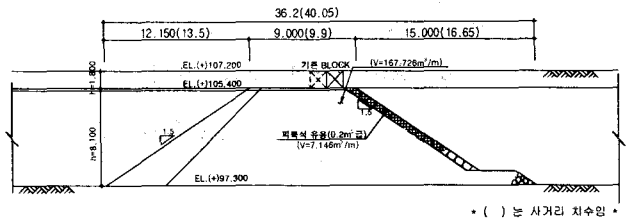
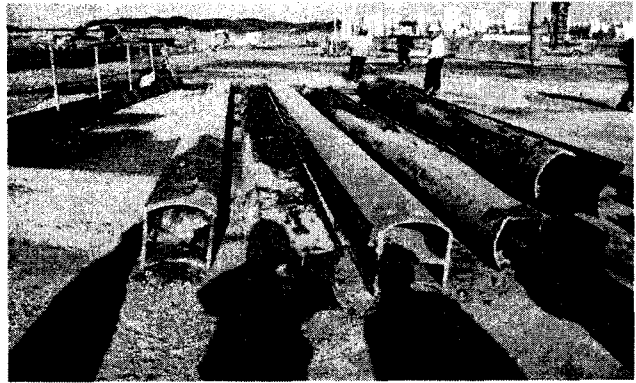
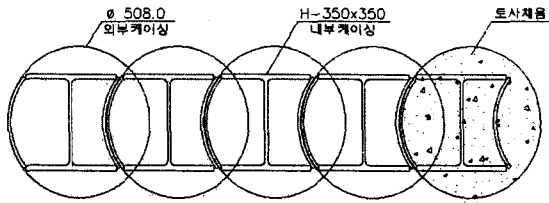


그림 5. 가호안 단면도

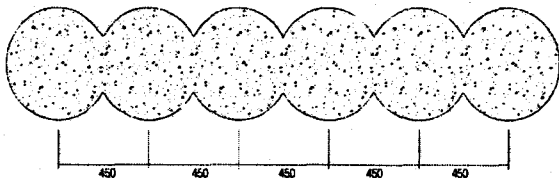
3.2.2 슈트파일 시공방법 변경

현장에서 가호안의 사석제 현황을 파악하기 위해 5m까지 백호우로 사석제 형상을 조사한 결과, 길이가 1m 이상되는 경암이 다수 발견되었고 또한 10~50cm 크기의 호박돌도 발견되었다. 설계의 슈트파일 직항타 시공방법은 사석 때문에 불가하여 매립된 사석(피복석 및 호안사석)을 T-4 천공하여 케이싱 근입 외부케이싱(원형)과 내부케이싱(조합 H-Pile)을 삽입하여 시공이 가능한 홀을 형성 유지한 후 슈트파일을 항타하는 시공방법으로 변경하였다. 그림 6은 사석구간의 항타공법에 대한 시공상세도이다.

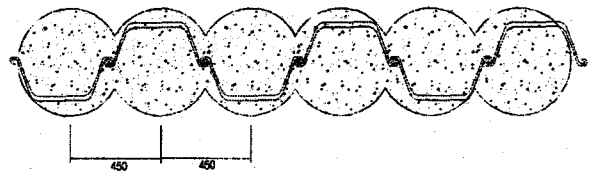


- ① T-4 천공 및 외부케이싱 설치
- ② 내부케이싱 설치(조합 H-Pile)
- ③ 토사 채움
- ④ 외부케이싱 인발
- ⑤ 다음구간 T-4 천공 및 외부케이싱 설치
- ⑥ 다음구간 내부케이싱 설치
- ⑦ 토사 채움후 반복작업

a) T-4 천공 및 케이싱 설치, 토사채움



b) 토사 지중연속벽 형성



c) 쉬트파일 향타

그림 6. 사석구간 향타공법 시공상세도

3.3 기초지반 개량공법 변경사례

3.3.1 설계내용

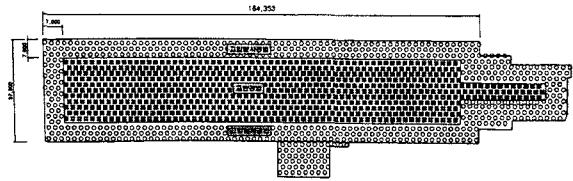
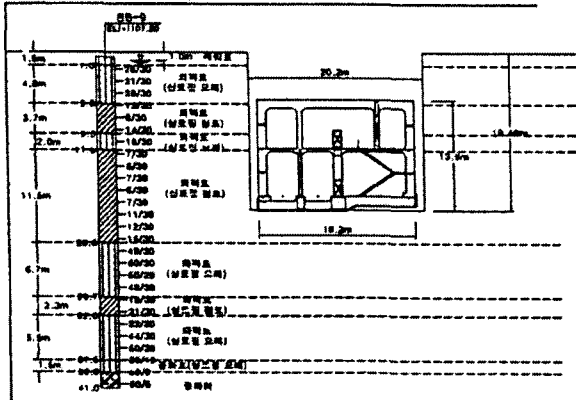
정거장구간은 구조물 하부에 N치가 10 내외의 연약지반이 분포하고 있어 가설공사중 예상되는 히빙의 방지 및 시공중 또는 향후 예상되는 증가하중(20~160kN/m²)에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 대책공법이 필요하였다. 히빙의 대책공법으로는 견고한 지반까지 흠막이벽의 근입깊이를 연장하는 방법, 지반을 개량하여 지반강도를 높이는 방법, 배면의 지반을 굴착하는 방법 등이 있으나, 흠막이벽의 근입깊이를 증가시키기보다는 지지력 및 침하 안정성을 동시에 만족시킬 수 있는 복합지반개량공법을 적용하였다.

지반개량공법 적용은 그림 7과 같이 잔류법면에 의해 가설구조물의 안정성이 확보될 수 있도록 가설벽체에서 7.0m 이상 이격하여 교반공법(D.C.M)을 적용하고 그 이내의 구간은 지반교란이 적은 고압분사공법(R.J.P)을 적용하였다.

3.3.2 시험시공 및 변경내용

1) 시험시공

정거장 구조물 기초지반의 연약한 지층에 대해 설계에 적용된 D.C.M(Deep Cement Mixing Method) 교반공법이 실제 설계기준을 만족하는지 여부를 확인하기 위하여 표 7과 같이 단위시멘트량 및 물-시멘트비를 달리하여 3개 Type(3공/Type), 총 9공의 시험시공을 실시하였고, 그림 8과 사진 1은 시험시공 단면도와 교반공법 장비 사진이다.



○ : 고압분사공법
 ⊗ : 교반공법

그림 7. 정거장구간 지반개량공법 적용 현황도

표 7. 시험시공 사양

Type	시멘트량 (kg/m ³)	물시멘트비 (w/c=%)	인발시간 (분/m)	개량심도 (m)	총주입량 (m ³)	총주입시간 (분)	주입시간 (분/m)
1	250	80	1.1	9	5,058	9.73	0.86
		90	1.2	9	5,508	10.59	0.95
		100	1.3	9	5,958	11.46	1.05
2	300	80	1.3	9	6,066	11.67	1.07
		90	1.4	9	6,606	12.70	1.19
		100	1.5	9	7,155	13.74	1.31
3	350	80	1.5	9	7,074	13.60	1.29
		90	1.6	9	7,704	14.82	1.43
		100	1.8	9	8,343	16.04	1.56

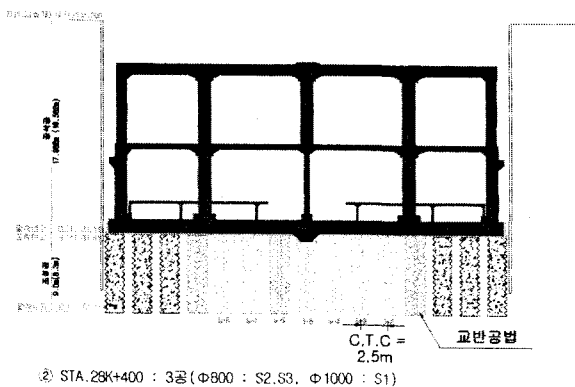


그림 8. 시험시공 단면도

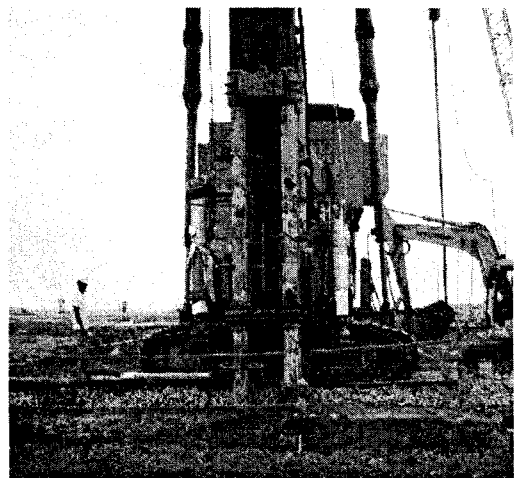


사진 1. 교반공법 장비

2) 시험시공 결과 및 지반개량공법 변경

4축 장비로 본 교반공법을 시험시공한 결과, 다음과 같은 문제점이 발생하였다.

- $N > 10$ 지반에서는 천공시간 현저히 지연 및 천공 곤란, $N > 30$ 지반에서는 천공불가
- 공당 작업시간이 설계 47분(천공+주입)에서 시공 90~179분으로 과다 소요됨.
- 공당 60~70ton(300~400ton/일)의 천공수가 소요되며, 천공수 대부분이 점토와 시멘트로 혼합된 슬러리 상태로 지표로 유출되어 상부지반이 연약화되고, 현장 집수시 경화시간이 일주일 이상 소요되어 후속공사 추진 불가 및 저장 Pit 확보 곤란
- 중앙파일과 시공위치의 중복 또는 근접되어 설계위치에 시공 곤란
- 장비의 무게가 130ton에 이르고 리더가 높은데다 지상과 지중이 천공수로 인해 연약화가 되어 전도사고 발생 우려
- 슬라임 발생량이 개량체 체적의 290% 발생

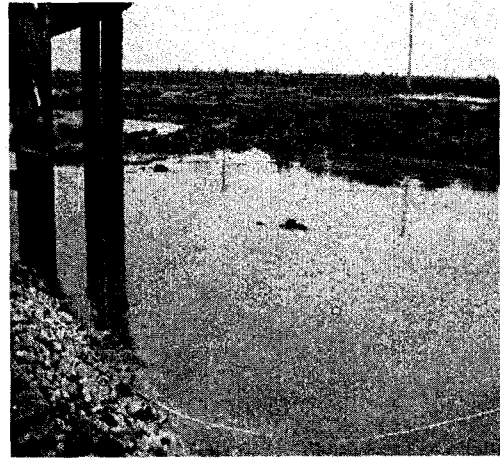
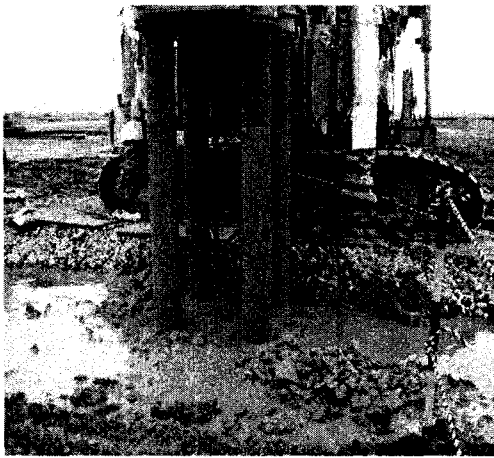


사진 2. 교반공법 시험시공 전경

이와 같이 교반공법 시공시에는 천공시간 과다소요 또는 천공불가, 슬라임 발생, 지반연약화 등으로 시공성 및 경제성 확보가 어려운 것으로 판단되어 본 지반여건에 적합하고 시공성, 안정성, 경제성이 확보되는 고압분사공법으로 변경하였다.

4. 결 론

해안 매립지반에서 지하철 건설 등 구조물 시공심도가 약 20m정도의 대심도 연약지반 굴착의 경우 연약지반의 토압에 대응하는 적정 토류가시설 공법 적용이 매우 중요하고 특히 지하철 건설의 경우 노선이 선형으로 계획되므로 토류벽 공법 적용시에는 매립공사의 시공특성이 고려되어야 한다. 또한 연약 기초지반 개량공법 적용시에는 해성퇴적층의 층서와 연경도, 개량심도 등을 감안한 시공 가능성에 대하여 고려되어야 한다.

본 고에서는 해안을 매립하여 조성한 송도 신도시에 사회기반시설로서 지하철건설이 진행되는 현장에서 설계에 반영된 흙막이공법과 지반개량공법에 대하여 실제 현장에서 설계기준을 만족하는 지 여부를 확인하기 위하여 본 공사에 앞서 시험시공을 실시하였다. 국내에서는 해안지역 대심도 연약지반에 대한 설계는 주로 압밀침하를 위한 연약지반개량공법과 구조물 말뚝기초시공법에 대한 사례는 많으나, 본 고의 사례와 같이 20m정도의 대심도 및 대규모 연약지반에서의 굴착설계 사례는 거의 없는 실정이다. 설계 당시에는 본 해성퇴적층에 대한 지반특성조사를 통해 경제성과 시공성을 고려한 공법을 채택하였지

만, 본 공사구간의 연약점토층 상하부에 N치 30이상의 모래층과 실트층이 위치하는 지층특성에서 표준
품셈에 의한 작업시간 산정에 한계와 이러한 지층에서의 대심도 연약지반개량 교반공법의 실적이 거의
없는 관계로 설계 작업시간 이상의 작업시간 소요 등 설계에서 예상하지 못한 결과가 현장에서 시험시
공시 도출되어 당초에 계획된 공법들이 변경되는 사례가 발생하였다. 따라서 본 시공사례를 참조하여
향후 연약지반 대심도 굴착설계시에는 경제성 보다는 시공성이 우선되는 공법이 선정되어야 되겠다.

또한 해안매립지반에는 매립공사시 파랑에 의한 매립토사의 유실방지와 공사용 차량의 진입도로로 활
용된 가호안이 지중에 존치되어 있기 때문에 매립공사의 도면입수 등 정확한 가호안의 위치파악과 적절
한 가시설 시공방안이 제시되어야 하겠다.

참고문헌

1. (주)지엠이엔씨(2006), ○○도시철도 송도○공구 지반조사보고서.
2. ○○광역시 도시철도건설본부(2004), ○○도시철도1호선 송도신도시 연장사업 ○공구 토목공사 설
시 설계보고서.