연약지반 설계 오류에 따른 설계변경 사례

글 이우석 / 보성~임성리 철도건설 제6공구 노반공사 현장 과장 / **전화** 061-463-6632 / **E-mail** wwjd@ssyenc.com

1. 머리말

보성~임성리 철도건설 제6공구 노반신설 기타공사는 경부선 및 동해남부선, 호남선과의 연결운행체계 형성으로 남해안 동서축 간선철도망 구축을 목적으로 시행중이며, 총 82.5km를 7개 공구가 분할하여 시공하며 당 현장은 6번째 공구로 13.72km의 신설 철도건설을 시행중이다.

본 고에서는 시험시공 시 연약지반 구간 설계에 대한 문제점을 조기 발견하여 설계변경을 시행한 사례를 소개하고자 한다.

2. 공사개요

공 사 명	보성~임성리 철도건설 제6공구 노반신설 기타공사
계약방식	최저가입찰, 장기계속공사
공사위치	전남 영암군 미암면 남산리 ~ 학산면 매월리 일원
공사기간	2015.11.12 ~ 2019.11.10(1,460일)
공사금액	97,495백만원(VAT포함)
발 주 처	한국철도시설공단
공사개요	- 총 연장 13.72km - 토공 9.28km, 교량 2.49km - 터널 1.95km, 정거장 1개소 등

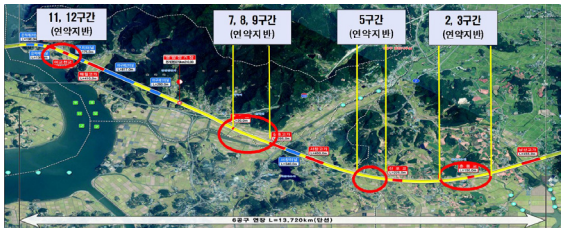
[그림 1] 전체사업 노선도

3. VE 수행 배경

착공 초기(2016년 3월) 교량(매월고가)파일항타를 위한 장비진입시 설치한 지지판의 파단 및 장비의 전도위험이 발생하고 시험터파기 작업중 장비가 빠지는 등 공사를 진행할 수 없게 됨에 따라 외부전문기관에 토질시험을 의뢰한 결과 연약지반으로 판정되어 1차적인 설계변경을 진행하였으나, 일반토공구간 구조물 터파기 중 추가 연약지반이 발견되어 설계연약지반구간을 포함한 연약지반 예상구간에 대하여 추가지반조사를 한 결과 당초 설계와의 현황 차이를 발견하게 되어 전체적인 연약지반공법 변경을 시행하게 되었다.

[그림 2] 연약지반 터파기 현황

[그림 3] 연약지반 현황도



4. 원설계 및 문제점 검토

4.1 연약지반구간 선정

수행된 지반조사 결과를 바탕으로 토공구간 내 축조되는 구조물의 종류 및 특성에 따라 연약지반을 선정한 결과, 총 12개 성토구간 중 6개 구간을 연약지반 구간으로 선정하였다.

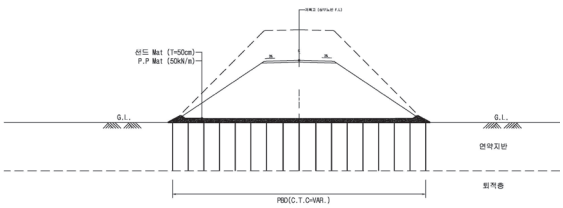
<표 1> 연약지반 분포현황

구 간	연장(m)	대표단면	계획고(m)	연약층두께(m)		비고
				사질토	점성토	
1구간	127.00	271km100	7.20	2.8	-	
2구간	296.00	271km440	8.01	3.0	-	
3구간	240.00	271km900	8.92	3.0	-	
4구간	220.00	273km660	4.59	4.7	-	
5구간	260.00	274km060	10.23	-	5.0	
6구간	287.00	275km280	11.53	2.4	-	
7구간	465.00	276km720	9.70	-	8.70	
8구간	200.00	277km160	7.13	-	6.70	
9구간	321.00	277km360	6.89	-	2.60	
10구간	40.00	277km760	6.97	1.0	-	
11구간	47.00	282km266	11.77	-	5.0	
12구간	14.00	282km416	11.07	-	4.0	

4.2 설계 연약지반 개량공법

압밀촉진공법은 경제성 및 시공성을 고려하여 가압탈수공법(Vertical Drain) 중 P.B.D공법(Plastic Board Drain)과 Preloading공법을 적용하였다

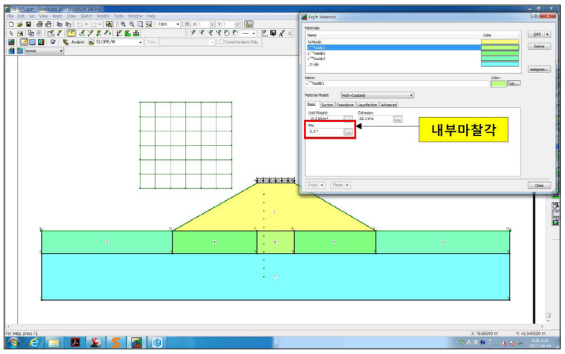
[그림 4] 연약지반 처리공법(Pre-Loading + P.B.D)



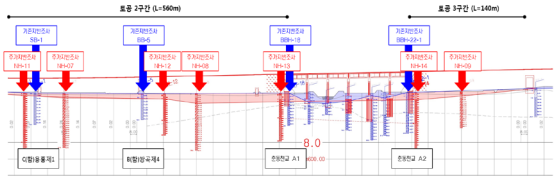
4.3 원설계 문제점 검토

성토사면 안정성 검토시 내부마찰각(Φ)을 0°를 적용하지 않고 8.5°로 적용함에 따라 수정 적용시 성토사면 안정성 미확보(Fs=0.75~1.06<1.2, N.G)된 것으로 파악되었고, 지반조사 당시 노선구간의 용지를 경작하고 있어 농로 인근에서 시추한 자료를 활용하였으나 실제 공사구간의 시추자료와 상이하여 연약지반 선정과정에서 오류가 발생하였다.

[그림 5] 내부마찰각 적용 오류



[그림 6] 추가지반조사 현황



5. 대책방안 검토

5.1 표층처리공법 변경

시공장비의 Trafficability에 대한 안정성 확보 및 간극수의 원활한 지표배수를 위해 표층고화처리공법을 적용하였고, 기존 연약토에 친환경 자재를 혼합·포설하여 성토재로 재사용이 가능한 공법을 적용하였다.

[그림 7] 표층고화처리

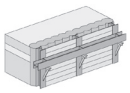
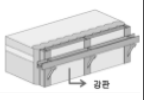
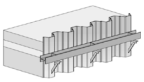
<고화처리 전>

<고화처리 후>

5.2 교량터파기 공법변경

연약지반 구간 구조물 기초 터파기시 Open-cut공법을 사용할 경우 사면 자립이 불가능하여 가시설 공법으로 설계변경을 추진하였고 현장현황과 경제성을 고려한 공법을 선정하여 현장에 적용하였다.

<표 2> 가시설 공법 비교

구분	H-Pile+토류판 (1안)	H-Pile+강판 (2안)	Sheet Pile (3안)
개념도			
장점	공사비 저렴 일반적인공법	차수효과 양호 시공의 편이성	차수효과 우수 시공이 빠름
단점	지하수유출 토사유출	시공관리 필요 (수직도)	전석층 시공불가
적용안	◎	-	◎
적용구간	도로인접구간	-	연약지반구간

5.3 토공구간 연약지반 처리공법변경

1) 원설계 누락구간

원설계시 시추조사결과 연약점토층이 분포하지 않는 것으로 조사된 구간 중 추가로 발견된 구간에 현장여건에 적합한 연약지반 처리공법 검토가 필요하였다.

① 검토조건1. 설계기준

설계하중 및 허용잔류침하량은 원설계와 동일하게 적용하고 연약지반 처리기간은 현장여건을 고려하여 36개월 이하로 검토

② 검토조건2. 비탈면 허용안전율

연약지반 쌓기 비탈면의 안전율은 원설계와 동일하게 적용 (공사중 Fs>1.2, 공용후 상시 Fs>1.3)

③ 검토조건3. 설계지반정수

풍화토와 성토층이 설계지반정수는 원설계와 동일하게 적용하였으며, 연약점성토층의 설계지반정수는 추가 시추결과를 토대로 적용함

<표 3> 토사 및 쌓기재 설계지반정수

구 분	단위중량 (kN/m³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
풍화토	19.0	20.0	30.0
성토층	19.0	15.0	25.0

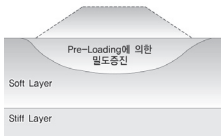
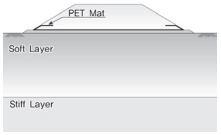
<표 4> 추가검토구간 연약지반 설계지반정수

구 분	단위중량 (kN/m³)	초기 간극비	압축 지수	2차 압축지수	압밀계수 (cm²/s)	비배수 전단강도(kPa)
2구간	16.19	1.631	0.838	0.0055	$1.5x10^{-3}$	11.8
3구간	16.43	1.120	0.613	0.0033	$3.0x10^{-3}$	17.3

④ 검토조건4. 침하량산정 및 배수조건

원설계와 동일하게 압축지수(C_c)법을 사용, 1차압밀침하량과 2차 압밀침하량을 모두 고려함

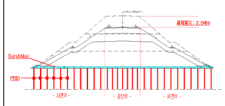
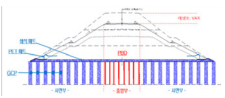
<표 5> 검토결과(대책공법 선정)

구분	압밀촉진공법	활동방지공법
	Pre-Loading	단계성토 + PET Mat공법
개요도		
공법개요	여성토 후 일정 기간 방치하여 압밀을 완료	고강도 토목섬유 Mat를 포설하여 지반활동에 저항
특징	• 시공 및 품질관리 용이 • 공기가 상대적으로 길게 소요됨 • 연약층 심도가 깊을 경우지 반개량 효과 낮음	• 공정단순, 시공용이 • Mat 인장강도 신뢰성 문제 • Mat 접합부 이음시공 품질관리 유의 필요
선정사유	• 연약점성토층 두께가 1.7~4.2m로 비교적 얇고 공사기간이 36개월로 충분하여 별도의 연직배수공법 불필요함 • 시공성과 경제성이 유리한 Pre-Loading공법과 단계성토 + PET Mat공법을 적용함	

2) 설계 연약지반구간

당초 연약지반으로 선정된 구간에 대한 설계내용을 수정하여 현장 여건을 반영한 연약지반 처리공법 변경을 시행하였다.

<표 6> 연약지반 처리공법 변형

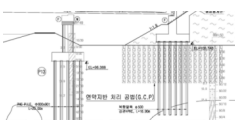
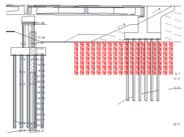
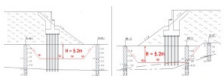
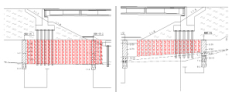
구분	당 초 (PBD + Pre-Loading)	변 경 (PBD + GCP + PET매트 + Pre-Loading)
개요도		
공법 개요	PBD를 통한 간극수 배출하고 전단파괴의 영향을 주지 않는 성토고로 일정기간 방치하여 압밀을 완료	사면부는 GCP시공으로 지반보강 및 지반활동에 대하여 저항하고 중앙부는 PBD를 통한 간극수 배출하며 압밀 완료
특징	• 시공 및 재료수급 용이 • 지반교란이 적고 재질 균질 • 공기가 상대적으로 길게 소요됨	• 지반강도 증대효과 및 침하량 저감효과 우수 • 활동방지효과 우수 • 대형타설장비 투입으로 장비주행성확보 필요
변경 사유	• 지반정수 적용 오류에 따른 사면안정 미확보로 수정한 결과에 따른 공법변경이 필요 • 시공성과 경제성이 유리한 PBD + GCP + PET매트 + Pre-Loading 공법을 현장여건에 맞게 구간별로 적합하여 적용함.	

5.4 연약지반 인근 구조물 공법변경(보완)

지반정수 적용 오류에 따른 교대 측방유동 및 터파기 사면의 안

정성 미확보에 따른 공법변경이 필요함에 따라 현장 여건을 반영한 연약지반 처리공법 변경을 시행하였다.

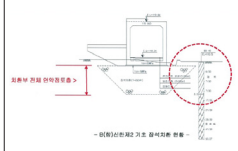
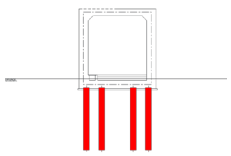
<표 7> 연약지반 인근 구조물 공법변경

구분	당 초	변 경
개요도		
		
공법 개요	① (삼호고가)GCP 18m시공 (C.T.C 1.2m×1.2m, L=9.0m) ② (미교천교)잡석치환 5.2m	① (삼호고가)GCP 21m시공 (C.T.C 1.2m×1.2m, L=8.8m) ② (미교천교)GCP 46m시공 (C.T.C 1.2m×1.2m, L=4.8~9.2m)
특징	• 잡석치환 공법 적용시 터파기 비탈면에 대한 안정성 미확보 (Fs=0.8<1.1, N.G)	• GCP공법 적용 및 보강범위 확대로 교대측방유동의 안정성확보
변경 사유	• 지반정수 적용 오류에 따른 교대측방유동 및 터파기 사면안정 미확보로 공법변경이 필요. • 시공성과 경제성이 유리한 GCP공법을 현장여건에 맞게 추가로 적용함.	

5.5 BOX구조물(B(함),C(함)) 공법변경

당초 연약지반 구간내 BOX구조물은 연약지반처리 완료 후 설치 및 잡석치환을 통하여 설치하도록 설계되었으나, 공기단축 및 효율성 증대를 위하여 하부기초공 변경을 시행하였다.

<표 8> BOX구조물 공법변경

구분	당 초	변 경
개요도		
공법개요	• 잡석 치환 후 BOX시공	• PHC파일 항타 후 BOX시공
특징	• 연약층 심도가 깊은 구간 치환공법 적용 시 잔류침하 발생으로 구조적 안정성이 미확보	• 연약지반 개량에 필요한 시간동안의 기존 농로 및 수로 단절문제 해결
변경 사유	• 용지보상 지연에 따른 연약지반 처리기간 및 후속공종 (구조물)에 소요되는 시간 최소화 필요. • 시공성과 경제성이 유리한 PHC파일기초를 현장여건에 맞게 변경 적용함.	

6. 적용효과

당 현장은 연약지반 처리공법 설계변경을 통해 설계와 상이한 현장 여건을 반영하여 최적의 공법을 선정하였다.

이를 통해 시공성 향상 및 안정성을 확보하였으며, 추후 예상될 수 있는 하자발생 등의 문제점을 예방하는 효과를 실현하였다.

[그림 8] 매월고가 전경

7. 맺음말

전라남도 영암지역 중 당 현장 노선이 속해 있는 지역은 과거 강과 바다를 막아 육지를 만드는 개간사업을 실시했던 구역으로 다수의 연약지반이 산재되어 있어 기초공사를 시행함에 어려움이 많았다. 특히 설계와 다른 지반상태는 원활한 공정 추진을 막는 걸림돌이 되었지만, 착공 초기에 경험한 지질상태를 기반으로 연약지반 의심지역을 선행조사하여 전체공기에 영향이 끼치지 않도록 조속한 설계변경을 진행하였으며, 본사 토목기술팀의 적극적인 지원으로 발주처 설계변경심의를 시행할 때마다 현장과 긴밀하게 소통하여 사전에 심의위원들을 직접 찾아가 기술적인 부분을 설명하는 등 아낌없는 노력이 있었기에 원활한 설계변경을 진행할 수 있음에 감사의 인사를 전한다.

끝으로, 공사 착공부터 현장의 어려움이 있을 때마다 관심을 가지고 다양한 시각과 방향을 제시해주고 아낌없는 지원을 해준 본사 유관부서와 어려울 때 더욱 힘을 내며 화이팅을 해준 현장 동료들에게 감사의 인사를 전하고 싶다.