

연약지반 암버력 치환공법의 구조물 안정성과 경제성 분석

- 청주시 미호천 횡단도로를 대상으로

허강국* · 박형근** · 안병철*** · 민병욱****

Heo, Kang Kug*, Park, Hyung Keun**, Ahn, Byung Chul***, Min, Byeong Uk****

Analysis on the Safety of Structure and Economics of Replacement Method Using Rock Debris in the Soft Ground - Case Study of Miho Stream Crossing Road in Cheongju City

ABSTRACT

For the soft ground construction, the factors not considered in the design stage occurs in the construction stage so that they cause the increase of the construction cost due to the structural stability and the design change. The subject of the study is the construction section of the industrial complex access road made in the Ochang region of Chungcheongbuk-do. The study is concerned with selecting the soft ground handling method such as the replacement method using rock debris and the surcharge reflecting the service load as the soft ground handling measure and analyzing the effect of reducing the construction cost with the stability of structures and the reduction of the construction period. The soft ground in the study section consists of sandy and cohesive soil and is 2.4m to 5.5m deep. It is distributed unevenly between the 1.5m to 5.9m stratum under the ground surface. Settlement is not serious, but the future uneven settlement and difference are expected so that the future settlement behavior is estimated by analyzing the site measurement results after the soft ground treatment. Moreover, in consideration of the regional characteristics and economic efficiency, soil with good quality is replaced with rock debris as the replacement material so that 29% of the construction cost is reduced due to the increase of stability and the reduction of duration. If the estimation of the dispersion of the pore water pressure within the dam body and the change of the underground water level and the relation of the actually measured soft ground with consolidation is studied further on the basis of the study, it is expected that the behavior of the soft ground will be correctly estimated in various site conditions.

Key words : The future settlement, Field measurement, Soft ground treatment, Economic analysis

초록

연약지반 공사는 설계단계에서 고려하지 못한 변수들이 시공단계에서 발생되어 구조물의 안정성과 설계변경에 따른 공사비 증가의 원인이 된다. 본 연구는 충청북도 오창지역에 조성되는 산업단지 진입도로 조성구간을 연구대상으로 하며, 연약지반 처리공법으로 암버력을 이용한 치환공법 및 사용하중을 고려한 과재성토를 연약지반 처리대책으로 선정, 구조물의 안정성 및 공기 단축으로 공사비 절감효과 분석에 목적이 있다. 연구구간의 연약지반 두께는 사질토 및 점성토 연약지반으로 2.4~5.5m로 규모가 작으나 지표하 1.5~5.9m의 지층사이에 불균등하게 분포하며, 침하발생은 크지 않으나 장래 부등침하와 단차 발생이 예상되어 연약지반 처리후 현장 계측결과를 분석하여 장래 침하거동을 예측하였다.

* (주)태영건설 토목부장 (TAEYOUNG · hkk0408@empas.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Chungbuk National University · parkhk@chungbuk.ac.kr)

*** NANO-GEOtechnical E&C, Co. 공학박사, 토질및기초기술사 (NANO-GEO E&C · anbc90@naver.com)

**** 정회원 · 씨큐브엔지니어링 대표 (C Cube Engineering · cvlmstr@hanmail.net)

Received March 23, 2016/ revised April 11, 2016/ accepted May 18, 2016

또한, 치환재료는 지역특성 및 경제성을 고려하여 양질토사를 암버릭으로 치환하여 안정성 증가, 공기단축 등으로 공사비 29%를 절감하였다. 본 연구를 바탕으로 향후 제체내 간극수압 소산, 지하수위 변동 등의 예측과 실제 계측된 연약지반의 압밀과의 관계 등에 대한 추가적인 연구를 수행할 경우, 다양한 현장조건에서 연약지반 거동을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 장래침하, 현장계측, 연약지반처리, 경제성분석

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

전 국토의 약 70%가 산악지형으로 구성되어 있는 우리나라는 최근 산업의 발달과 인구의 증가로 인한 산업용지와 택지부족 문제를 해결하기 위하여 토지의 효율적인 이용에 대한 요구가 증가되고 있는 실정이다. 따라서, 과밀지역 외곽에 매립에 의한 부지조성으로 부족한 용지난을 해소하고 있다. 특히 이렇게 조성된 지역은 대부분 지반 공학적으로 압축성과 침하량이 크며, 구조물 축조나 성토시 지지력 부족 및 침하 등의 문제점들을 포함하는 특성을 가진다. 이러한 연약지반 공사는 설계단계에서 고려하지 못한 변수들이 시공단계에서 발생하여 구조물의 안정성과 설계변경에 따른 공사비 증가의 원인이 된다.

본 연구의 목적은 암버릭을 이용한 치환공법 및 사용하중을 고려한 과제성토를 연약지반 처리대책으로 선정시 구조물의 안정성 및 공기 단축으로 공사비 절감효과 분석에 목적이 있다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구의 범위는 충청북도 오창지역에 조성되는 산업단지 진입도로 조성구간을 연구대상으로 하며, 연약지반 처리공법으로 암버릭 치환공법에 대한 공사비, 공기에 대한 경제성과 안정성 분석을 연구범위로 한다.

연구 방법은 첫째, 당초 설계단계의 연구대상구간 연약지반의 분포양상과의 시공 중 시험터파기를 시행한 분석결과와 확인시추조사를 수행하여 정확한 연약지반 증후를 확인하였다. 둘째, 현장에서 채취한 불교란 시료(Undisturbed samples)에 대하여 실내 압밀시험과 설계단계의 연약지반 특성과 상이한 것으로 확인하여 연약지반에 대한 침하량 검토를 수행하였으며 셋째, 시공 후 발생한

침하량 추이를 현장계측을 통하여 분석하였다. 마지막으로 당초 계획과의 비교·검토를 통한 경제성과 안정성을 분석하여 대책공법의 적용성과 타당성 평가를 연구 방법으로 하였다.

2. 현장개요

2.1 지반조사 현황

대상지역은 충청북도 미호천변의 충적평야로써 주로 전답토 및 퇴적층이 주요 지지층을 구성하고 있다. 검토 대상은 평야지대를 가로지르는 진입도로 성토부로서 주요검토 지역은 전구간 3.78km 구간 중 560m구간으로 당초 설계단계의 시추조사에서 연약층이 1.5~5.9m로 시점부에서 종점부로 연약층의 규모가 감소하는 것으로 판단되었다. 그러나 시공중 시험터파기 조사결과, 기 시추조사와 층상이 상이하여 확인시추조사 4공을 수행하여 연약층의 분포를 확인한 결과, 시점측에서 5.5~2.4m, 2.4~4.1m로 연약층의 규모가 검토구간에서 불균등하게 분포하는 것으로 나타났다. 또한 시추조사 시료로 기본물성 시험을 수행하였고, 2개소의 불교란 시료를 채취하여 삼축압축시험 및 압밀시험을 연약층에 대하여 수행하였다.

2.2 지반조사 결과

시추조사는 회전수세식(Rotary Wash Type) 시추기를 이용하여 표준관입시험과 병행하는 방법으로 실시하였다. 시추 후 형성된 시추공은 각종 원위치 시험에 이용하였다. 굴진은 NX (φ76mm) 구경으로 실시하였으며 공벽 붕괴가 없는 견고한 지층까지 Casing을 삽입하는 Casing방식을 채택하였다. 상부의 토사구간에 대해서는 원위치에서의 흙의 경연도 및 다짐 정도를 파악하는데 지표가 되는 N치를 구하기 위하여 표준관입시험을 시행하였으며, 이와

Table 1. Index Properties of Soil Samples

Division	Depth (m)	Water content (%)	Density	Atterberg Limits (%)			Grain Size Distribution (% , Finer than)					U.S.C.S
				LL	PL	PI	4.75mm	2.0mm	0.425mm	0.075mm	0.005mm	
NSB-1	3.0	14.6	2.654	-	N.P	-	97.8	66.9	10.6	2.8	-	SP-SM
NSB-2	5.0	33.3	2.661	-	N.P	-	100.0	99.9	98.8	81.8	6.5	ML
NSB-3	1.5~2.3	26.4	2.643	46.3	25.1	21.2	100.0	99.5	98.2	84.7	24.9	CL
NSB-4	3.0~3.8	28.5	2.664	33.8	27.6	6.2	100.0	99.7	98.4	90.0	14.2	ML

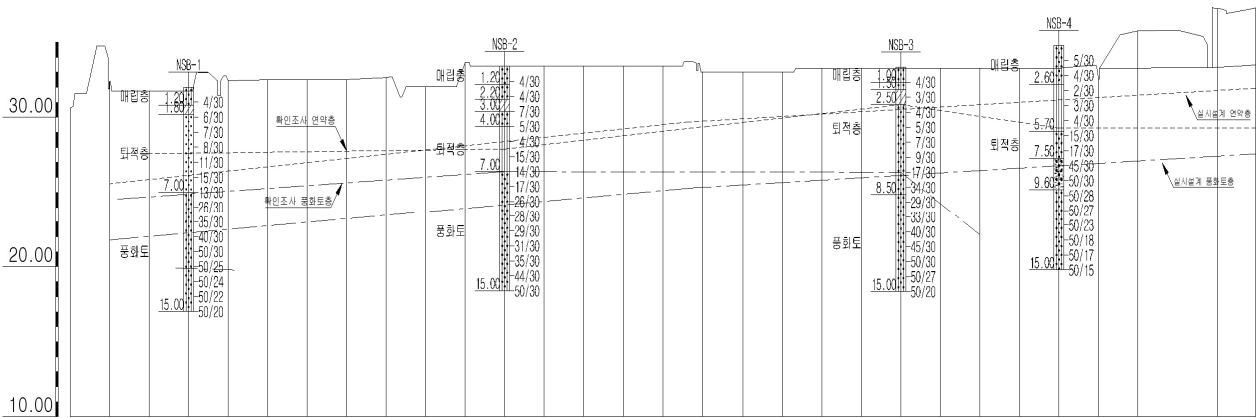


Fig. 1. The Thickness Distribution of Softground

Table 2. The Ground Depth According to Soil Characteristics

Division	Depth (m)	Unconfined Test		Triax Comp. Strength		Consolidation Test			U.S.C.S
		q_u (kg/cm ²)	S_t	C_{uu} (kg/cm ²)	ϕ_{uu}	C_c	C_{CF}	P_c (kg/cm ²)	
NSB-3	1.5~2.3	0.98	3.34	0.52	0	0.325	0.441	1.16	CL
NSB-4	3.0~3.8	0.81	2.73	0.42	0	0.191	0.269	2.82	ML

병행하여 Split Barrel Sampler로 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 흙의 상태와 역학적 성질이 원위치에 있을 때에는 달린 교란시료로서 흙의 판별 분류를 위한 물리적 성질인 비중, 입도, 액성한계, 소성한계, 함수비 등을 구하는데 이용하였으며, 연약층에 대하여는 불교란 시료(Undisturbed samples)를 채취하여 삼축압축시험 및 압밀시험 등 역학시험을 수행하였다.

2.3 계측기 설치

실내시험이나 현장시험에 의해 얻어진 한정된 자료를 이용한 추정치는 많은 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 침하관리와 안정관리가 필요하며 연약지반의 현장계측을 실시함으로써 이러한 불확실성을 최소화해야 한다. 또한, 경제적이고 안전한 시공을 위하여 시공과정에서 지반의 거동에 대한 정확한 정보를 확보하는 것이 바람직하다. 이러한 결과를 현장에 Feed Back 하여 다음 단계에서 발생할 지반의 거동을 사전에 예측하여 당초 설계시 추정된 안정성을 확인하고 필요시에는 안정성 확보대책을 수립하여야 한다.

계측관리의 주목적은 시공 중에 실시한 계측결과를 수집, 분석하여 설계 예상치와 비교함으로써 공사 진행의 안정성을 평가하는데 있다. 지반의 거동이나 구조물의 이상변위 등을 확인하여 인명보호 및 구조물의 파괴를 방지함으로써 공사의 안정성 및 경제성을 동시에 구현하는 것이다. 본 검토구간의 계측수량 및 빈도는 Table 3과 같다.

Table 3. Measurements and Frequency

Division	Measurement frequency	Installation quantity
Surface Settlement Measurement	1 time / 2 weeks	15EA (5EA/200m)
Inclinometer	1 time / 2 weeks	6EA (2EA/200m)
Differential Settlement Gauge	1 time / 2 weeks	3EA (1EA/200m)
Pore Pressure Meter	1 time / 2 weeks	3EA (1EA/200m)
Water level meter	1 time / 2 weeks	6EA (2EA/200m)

3. 확인조사 침하량 분석

3.1 연약지반 분석개요

연약지반이란 강도가 약하고 압축되기 쉬운 흙으로 이루어진 연약토를 말한다. 연약지반 관정시 중요사항은 단순히 지반의 조건만으로 결정되는 것은 아니며 토질의 성상 및 시공상황 등에 따라 다르기 때문에 구조물의 종류, 형식, 규모, 지반특성을 충분히 검토한 뒤에 판단할 필요가 있다.

검토구간에서는 시추조사로 확인된 토질의 성상, 주상도, 실내시험 의한 연약층의 심도 및 특성 등을 충분히 검토한 후 N값을 결정하여 설계에 반영한다. 검토구간의 연약층은 최대 2.4~5.5m의

층후로 나타났으며, 표준관입시험결과 연약사질토 및 점성토의 N값은 2~6로 분석되었다. 느슨한 상대밀도 및 연약-보통 견고한 연경도의 연약지반으로 판단하여 Table 4와 같이 연약지반 판정기준을 선정하고 상부 성토고를 고려한 침하량 검토를 수행하였다.

Table 4. The Criteria of Soft Ground

Division	Clay and Organic soil		Sand
	below 10m	more then 10m	
Thickness of layer	below 4	below 6	below 10
N value	below 4		below 10
Applied	below 4		below 10

3.2 연약지반 설계 적용기준

검토구간의 연약지반 처리를 위한 설계기준으로 설계하중, 흩쌓기 속도, 허용잔류침하량 기준을 다음과 같이 적용하였다. 설계하중은 흩쌓기 하중과 포장하중 그리고 표준 트럭하중인 DB-24하중을 적용하여 과제성토하였으며, 하중고로 0.80~0.85m를 추가성토로 고려하였다. 흩쌓기 속도는 토질특성을 고려하여 5cm/day의 속도로 성토하는 것으로 고려하였으며 잔류침하량은 각 기관별 설계기준을 참조하여 10cm를 적용 검토를 수행하였다.

Table 5. The Criteria of Permissible Residual Settlement

Division	Permissible residual settlement (cm)	Remarks
Korea Expressway Corporation (After completion of paving work)	10.0	Applied
Ministry of Land	10.0 ~ 30.0	Embankment section
	5.0 ~ 10.0	Bridge
National highway and the highway	10.0	

3.3 검토지반 설계정수

확인조사에서 채취한 불교란 시료에 대한 삼축 및 압밀시험 등 실내 역학시험 결과를 분석하여 연약지반 설계를 위한 지반정수로 적용하였다.

Table 6. Soil Characteristics

Unit weight (kN/m ³)	The initial void ratio (e ₀)	Compression index (C _c)	Recompression index (C _s)
19.34	0.750	0.258	0.030
Over consolidation ratio (OCR)	Vertical coefficient of consolidation, C _v (cm ² /s)	Vertical permeability K _v (cm/s)	Strength Increase rates α
6.46	7.08E-03	3.70E-07	0.171

3.4 연약지반 침하량 예측방법

3.4.1 연약지반 침하량 산정방법

점성토의 압밀침하를 산정하는 방법은 일반적으로 e₀, m_v, C_c법, Skempton-Bjerrum, Lambe 응력경로법 등의 방법이 있다. 본 검토의 연약지반 압밀침하량 산정은 응력이력에 따른 침하량 산정이 용이한 압축지수(C_c)법을 이용하였다. 검토구간의 연약지반은 압밀특성 분석결과, 압밀비가 OCR=6.46으로 과압밀 상태(P₀ < PC < P₀ + ΔP)에 있으므로 과압밀 점토로 다음식과 같이 적용하였다.

$$S = \frac{C_s}{1 + e_0} \times \log\left(\frac{P_c}{P_0}\right) + \frac{C_c}{1 + e_0} \times \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_c}\right) \quad (1)$$

여기서, C_s는 재압축계수, C_c는 압축계수, H는 대상 점성토층의 두께(cm), e₀는 초기간극비, P₀는 유효상재하중(kPa), ΔP는 성토 및 외부하중에 의한 수직응력증가분(kPa)이다.

3.4.2 사질토지반 침하량 산정방법

사질토층에서 발생하는 침하는 하중의 재하와 동시에 발생하는 즉시침하이며, 이 즉시침하량을 산정하는 방법은 Schmertmann, Mayerhof, Peck, De Beer, Parry 등이 제안한 방법들과 N치를 이용한 방법들이 있다. 각각의 방법들은 적용방법에 따라서 침하량에 상당한 변화를 나타낸다. 본 검토시 사질토층은 표준시험값인 N치를 이용하여 사질토 지반의 침하량을 산정하는 De Beer 방법을 다음과 같이 적용하였다.

$$S_i = 0.4 \frac{P_0}{N} \times H \times \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (2)$$

여기서, N은 표준관입 시험치, H는 대상 사질토층의 두께(cm), P₀는 유효상재하중(kPa), ΔP는 성토 및 외부하중에 의한 수직응력증가분(kPa)이다.

3.5 검토구간 연약지반 침하량 예측

3.5.1 대표단면 침하량 산정

검토구간의 연약지반 층후 및 성토고 등을 고려하여 다음 Table 7과 같이 3구간의 대표단면을 선정하였으며, 포장 및 공용층 차량하중 등을 과제성토로 구간별로 적용하였다. 배수조건은 지층특성을 고려하여 양면배수를 적용하였다. 압밀 침하량 해석프로그램은 연약지반 설계에 주로 사용되는 K-embank v2.1을 적용하였다. 이 프로그램은 1, 2차 압밀 침하량 검토가 가능하고 무처리 및 처리시 압밀시간/압밀도 계산, 성토 및 외부하중으로 인한 지중응력 증가 및 Smear효과, Well Resistance효과 등을 고려할 수 있다.

Table 7. Characteristics of Representative Sections

Representative section	Thickness of softground (m)	Heights of embankment (m)	Drainage conditions	Period of embankment (day)
No.3+340	4.86	6.00	both	6 months
No.3+600	2.50	4.21	both	6 months
No.3+680	3.98	3.50	both	6 months

검토구간의 대표단면에 대하여 흙쌓기 시공기간 및 일시성토 등을 고려하여 압밀침하량 검토 결과는 Table 8과 같다. 총 침하량은 2.35~15.48cm로 나타났으며, 검토구간의 연약지반의 최대 침하발생은 주로 성토단계(6개월 이내)에서 발생하였고, 성토후 침하거동은 양면배수 조건의 배수거리가 짧고 연약지반의 규모가 크지 않아 직선적이며 잔류침하량은 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Table 8. Total Settlements at Design Stage of Representative Sections

Division	Section 1 (No.3+340)	Section 2 (No.3+600)	Section 3 (No.3+680)
	settlement(cm)	settlement(cm)	settlement(cm)
Left side	15.48	2.35	2.94
Center of road	15.35	2.66	3.89
Right side	12.91	2.53	3.36

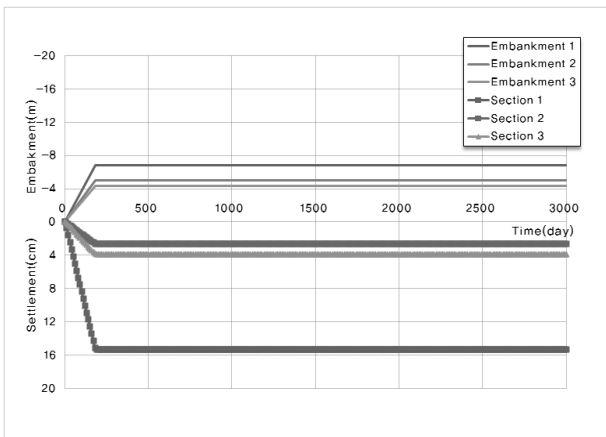


Fig. 2. Embankment-Settlement of Representative Sections

Fig. 3의 등침하선도는 검토구간의 평면좌표 상의 침하량에 대하여 kriging기법을 적용하였다. Kriging은 거의 모든 data를 유연하게 표현할 수 있는 방법으로 대표단면의 침하량을 구간별 성토고 및 연약지반 두께에 대하여 Linear Variogram Model을 적용하여 검토구간의 좌표평면 상에 2차원적으로 gridding하여 구간

별 최대 침하량을 예측하였다. 검토구간 발생침하량은 성토고의 영향으로 시점측에서 종방향으로 침하발생이 진행되는 것으로 예측되었다.

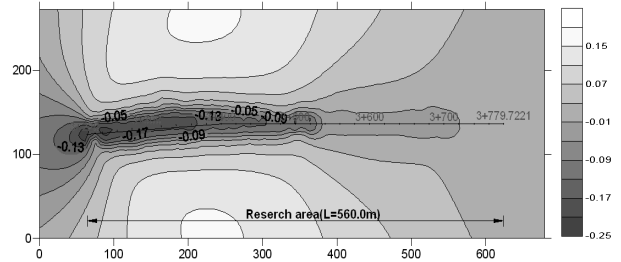


Fig. 3. Equivalence Settlement Lines of Design Stage

3.6 기초지반 활동 검토

연약층으로 인한 성토시 하중에 의한 기초지반 활동 및 측방유동 발생 가능성에 대하여 검토하였다. Bishop의 절편법을 적용하여 연약지반 상에 성토한 비탈면의 한계평형 해석을 수행한 결과는 Table 9와 같이 기준 안전을 이상으로 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

Table 9. Slope Stability Analysis Results

Division	Dry season		Rainy season	
	F.S	Criteria	F.S	Criteria
No.3+340	1.913	1.5	1.794	1.3
No.3+600	2.312	1.5	2.120	1.3
No.3+680	2.447	1.5	2.302	1.3

3.7 연약지반 처리 계획

확인조사를 통한 상기의 검토로 성토부의 압밀 침하는 국내 적용기준인 잔류침하량 10.0cm 이하로 검토구간에서 침하에 대한 문제가 없는 것으로 나타났으며, 비탈면 활동 및 측방유동에 대한 안정성도 국내기준에 부합하여 안정한 것으로 나타났다. 그러나 시점측 약 390m구간 및 종점측 약 180m구간의 침하량이 종방향으로 약 13.13cm의 부등침하가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 당초 설계의 과재성토를 하더라도 종방향으로 불균등한 두께의 연약층이 형성되어 있어 전구간에 걸친 균등한 침하발현이 어려우며, 시공 중 현장에서의 추가하중 및 운영중 중차량 통행 등으로 인한 부등침하 및 단차가 발생할 것으로 예측되었다. 따라서 이용자의 주행 안정성을 위하여, 시공기술자와 협의를 통하여 대책수립의 필요성을 공감하고 검토구간의 연약지반 침하를 조기에 유발하여 장래 발생침하량을 최소화하기 위한 연구를 수행하였다.

검토구간이 위치한 충청북도 청원, 오창지역은 최근 다양한

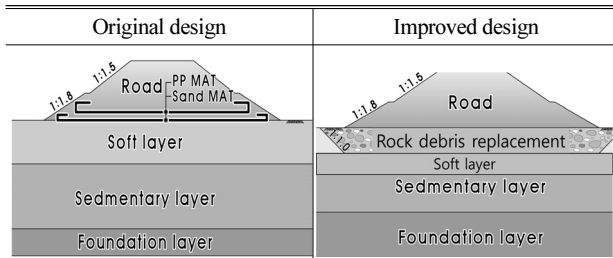
대규모 단지공사 및 도로공사 등의 개발계획으로 양질토사의 수급이 현실적으로 매우 어려운 지역이다. 검토구간의 연약지반 처리대책으로 치환공법 적용시 치환재료로서 인근지역에서 수급이 용이한 암버력을 이용한 암버력 치환공법 및 암버력 내 공극메움을 고려하여 설계보다 높은 과재성도 적용을 연약지반 처리대책으로 선정하였다.

구간별 처리대책은 Tables 10 and 11과 같다. 실제로 암버력 치환은 성토지반의 침하 조기유발과 확실한 지지력 확보 및 성토체의 활동, 측방유동 등에 매우 유리한 것으로 판단되었으며, 암버력 사용으로 성토제체에 필요한 순성토, 샌드매트 및 P.P Mat부설 등의 공종에서 공사비 절감효과를 볼 수 있을 것으로 판단하였다.

Table 10. Soft Ground Improvement Plan

Division	Section 1	Section 2	Section 3	Remarks
Replacement thickness	1.0m	1.0m	1.0m	rock debris
Preloading	-	1.3m	2.0m	
Height Total embankment	6.0m	5.5m	5.5m	

Table 11. The Sections of Soft Ground Improvement



상기와 같이 연약지반 처리대책을 적용하여 예측된 침하량은 Table 12와 같으며, 이는 상단 치환도에 의한 즉시침하량 감소 및 연약지반 압밀침하량의 감소로, 중앙에서 최대 3.87cm의 침하량 감소가 예측되었다. 또한, 검토지역의 최대 부등침하량은 도로 좌측에서 11.23cm가 발생하는 것으로 예측되었다.

Table 12. Embankment-Settlement for Applied Replacement Method

Division (of road)	Section 1	Section 2	Section 3
	Settlement (cm)	Settlement (cm)	Settlement (cm)
Left side	12.49	1.26	1.72
Center	11.48	1.9	3.84
Right side	10.49	1.26	3.04

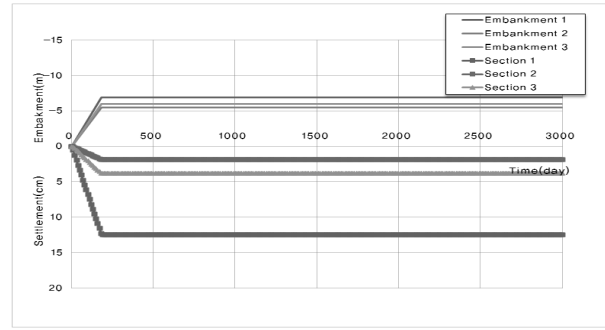


Fig. 4. Embankment-Settlement for Applied Replacement Method

4. 계측결과 분석

상기와 같은 처리계획을 적용한 검토구간의 시공중 및 시공후 침하량 발생추이를 현장계측을 통하여 관찰하였다. 침하량은 성토부 상단 도로중심 및 좌우측에 설치된 지표침하판을 통하여 관찰하였고, 계측기간은 총 1.1년(404일)으로 성토완료 후 약 0.9년간 주2회에 걸쳐 수행하였다. 현장 계측자료를 분석한 결과, 도로중앙부를 기준으로 Section 1구간은 공사 시작후 약 5.9개월 후에 침하량 31.5cm로 침하가 완료되었고, Section 2구간은 공사 시작후 약 6.7개월 후에 침하량 44.5cm로 침하가 완료되었으며, Section 3구간은 공사 시작 후 약 4개월 후에 침하량 39.7cm로 침하가 완료되었다.

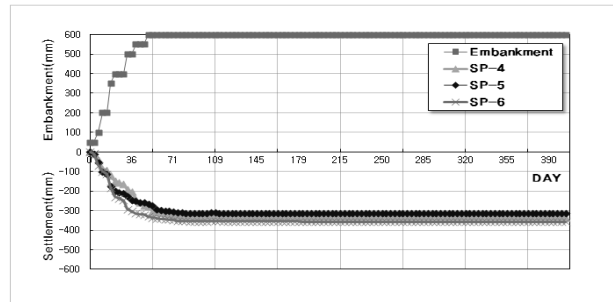


Fig. 5. Section 1 (STA. 3+340.0)

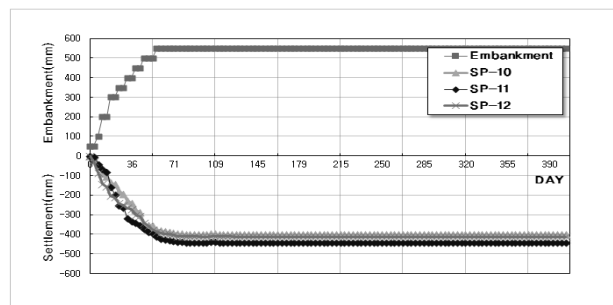


Fig. 6. Section 2 (STA. 3+600.0)

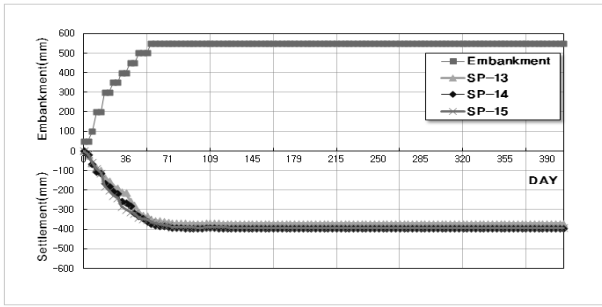


Fig. 7. Section 3 (STA. 3+680.0)

또한, Fig. 8의 등침하선도에서 볼 수 있듯이 현장 계측된 침하량은 예측된 침하량과 달리 시점부에서 종점부로 적용구간에 균일하게 분포하며, 성토부 좌우측면의 침하량도 유사하게 최종침하량으로 수렴하는 것으로 분석되었다.

Table 13. Measured Settlements of Sections

Division (of road)	Section 1		Section 2		Section 3	
	SP	Settlement (cm)	SP	Settlement (cm)	SP	Settlement (cm)
Left side	SP-6	35.7	SP-12	41.4	SP-15	39.2
Center	SP-5	31.5	SP-11	44.5	SP-14	39.7
Right side	SP-4	33.5	SP-10	40.2	SP-13	37.2

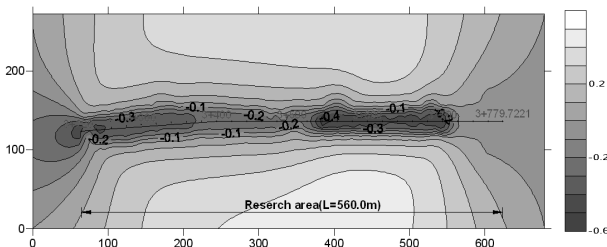


Fig. 8. Equivalence Settlement Lines of Measurement

5. 분석 및 고찰

5.1 안정성 분석

검토구간의 도로는 설계시 종점측으로 갈수록 성토고가 낮아져 계산침하량은 감소하여야 하나, 실제 공사시 종점측으로의 부등침하 등을 고려하여, 설계 성토고에 약 1.3~2.0m의 추가 과재성토를 적용하였으며, 전체구간의 성토고를 약 5.5~6.0m으로 적용하였다. 이때 발생침하는 공사시작 후 약 4~6.7개월에 최종침하량에 도달하였으며 이후의 계측기간 동안 추가 잔류침하량은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

또한, 대표단면 계측결과를 적용하여 크리깅을 통한 계측 전구

간의 예측침하량은 등침하선도에서 약 8.5~52.9cm로 예측되었으며, 수치해석에 의한 전구간 예측침하량은 약 0.7~23.0cm로 예측되었다.

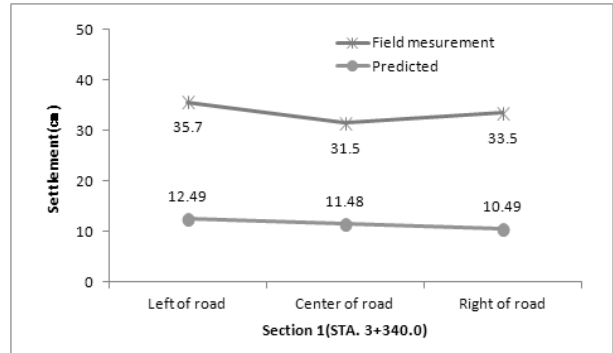


Fig. 9. Final Settlement of Section 1

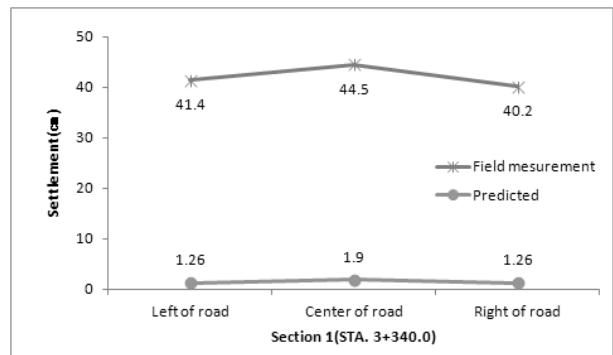


Fig. 10. Final Settlement of Section 2

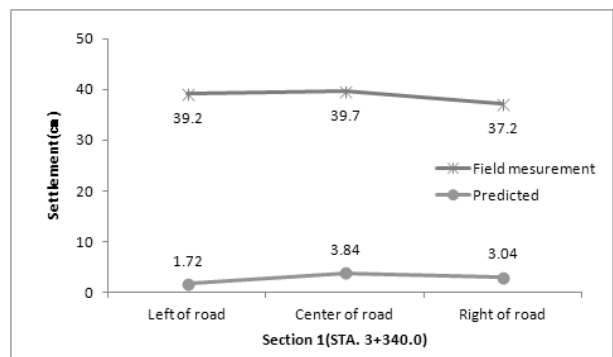


Fig. 11. Final Settlement of Section 3

현장 계측결과와 실내 역학시험으로 예측한 압밀거동은 도로중심을 기준으로 4.3~36.4%의 침하량이 예측되어, 실제 압밀거동과 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 검토구간의 연약층 압밀은 조기에 완료되어 추가 잔류침하의 거동은 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

Fig. 12에서 수치해석을 통한 치환시 예측한 최대 부등침하량은 11.23cm로 나타났고, 과제성토 시공후 계측을 통한 대표단면의 종방향 최대 부등침하량은 13.0cm로 설계단계의 부등침하량 13.13cm보다 작게 나타났으며, 포장전 과제성토 제거 및 포장시 노면 평탄화로 발생한 부등침하를 제거하고 주행성 및 이용자 안정성을 확보하였다.

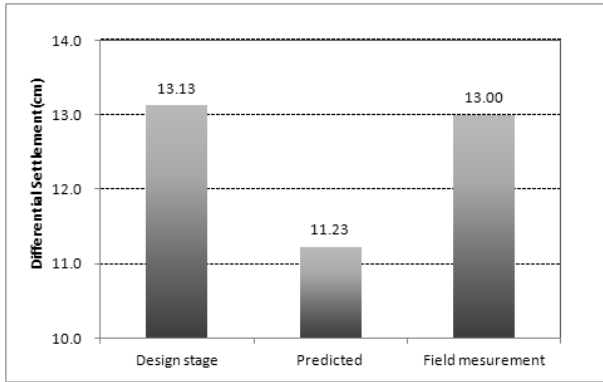


Fig. 12. Differential Settlements

5.2 경제성 분석

구간 STA.3+220~3+280단면의 경우 하부 기초 구간에만 잡석 치환(압성토)2.0m를 적용할 경우 부등침하가 우려되어 옹벽기초 하부에만 잡석치환을 횡방향으로 전체 치환하였다. STA.3+280~3+680 구간의 경우 연약층 및 성토고의 차이로 인해 압밀침하량의 차이가 다소 크게 발생하여 공용시 도로의 부등침하 및 단차 등의 문제점이 예상되어 1m정도 하부를 전체 치환하였다. 또한, STA. 3+680~3+700구간은 현장 시공성 등을 고려하여 Sand mat 대신 압성토로 성토하였으며 Table 14는 당초계획과 변경한 결과이다.

Table 14. Difference of Earth Work

Division	Unit	Original design	Improved design	Difference
Soil (settlement)	m ³	787	-	-787
Sand mat	m ³	8,229	-	-8,229
P.P mat	m ²	16,516	-	-16,516
Soil (for replacement)	m ³	1,841	11,620	9,779
Road bed filled up ground	m ³	60,398	54,373	-6,025
Soil (anti-freeze layer)	m ³	2,368	-	-2,368
Soil (embankment)	m ³	66,056	55,325	-10,731
Ripping rock (embankment)	m ³	-	10,563	10,563

Table 14와 같이 치환한 결과 직접공사비는 Table 15와같이 당초 보다 약 29% 절감할 수 있었다.

Table 15. Difference of Construction Cost (Unit : Million Won)

Division	Initially	Change	Difference	Difference percentage
Contract amount	678	488	-190	28%
Direct cost	498	353	-145	29%
Indirect cost	180	135	-45	25%

6. 결론

본 연구는 현장의 여건상 양질 토사의 수급이 현실적으로 매우 어려운 지역으로 치환재료로서 인근지역에서 수급이 용이한 압버력을 이용한 치환공법 및 공용하중을 고려한 과제성토를 연약지반 처리대책으로 선정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 보강토옹벽 시공구간의 경우 원지반에 대한 비탈면 안정성 및 기초 지지력 평가결과 압버력 치환공법을 적용하여 연약지반을 보강하여 기준안전율을 만족하여 안정성을 확보하는 것으로 평가되었다.
- (2) 단계성토에 따른 연약지반 침하거동을 수치해석 및 계측을 통하여 검토한 결과, 최종성토 완료단계 직후 대부분의 최종침하량이 발생하였으며, 시공 종료후 추가 잔류침하량은 거의 발생하지 않는 것으로 계측되어 수치 해석시 예측된 결과와 동일한 거동 양상을 나타냈다.
- (3) 치환재료는 지역특성 및 경제성을 고려하여 양질토사(모래)를 대신 압버력으로 치환하여 성토체의 자중을 증가시키고 배수거리를 단축시켜 조기에 침하를 유발토록 하여 안정성 증가, 공기단축 등으로 공사비 29%의 절감효과를 타나냈다.
- (4) 시공완료 후 계측결과를 분석하여 수치해석과 비교한 결과, 현장에서 계측된 침하량이 예측된 침하량보다 크게 나타났는데, 이는 치환재료인 압버력의 자중과 압버력 사이의 공극으로 세립자가 이동하여 침하가 발생하는 것을 방지하기 위한 과제성토고의 영향, 그리고 현장지반을 대표하는 지반 물성치에 포함된 오차 등으로 판단된다.

본 연구는 현장조건에 가장 적합한 연약지반 처리방법에 따른 연약지반의 거동을 수치해석과 계측결과를 분석하여, 대상구간의 설계 및 시공의 적정성을 연구하였다. 본 연구를 바탕으로 향후 체내 간극수압 소산, 지하수위 변동 등의 예측과 실제 계측된

연약지반의 압밀과의 관계 등에 대한 추가적인 연구를 수행할 경우, 다양한 현장조건에서 연약지반 거동을 정확히 예측 대처할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2014).

References

- An, T. H. (2011). A Study on the Characteristics of Settlement Behavior of Overconsolidated Clayey Layer, Chonnam National University, Master's thesis, pp. 1-20.
- Basis soft, Inc, K-EMBANK v1.0 Manual.
- Cheon, B. S. (2004). Geotechnical Engineering-Theory and Practice, pp. 189-115.
- Chungcheongbuk-do (2012). Reports of Cheongju Technopolis access road construction site investigation.
- Kim, D. B. and Ahn, T. B. (2007). "Comparison of compressibility between the oedometer tests with the field measurements in namak clay." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 5, pp. 15-20 (in Korean).
- Lee, K. J., Lee, S. J. and Yoon, H. S. (2006). "A verification for determination of soil properties using field measurement and back analysis." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 7, No. 5, pp. 5-11 (in Korean).