

베트남지역에서의 연약지반 개량 설계 · 시공 사례 A Case Study on Soft Soil Treatment Design and Construction in Vietnam

윤동덕¹⁾, Dong-Duk Yoon, 조성한²⁾, Sung-Han Cho, 서원석³⁾, Won-Seok Seo

¹⁾ (주)GS 건설 기술본부 지반팀 부장, Senior Manager, GS Engineering & Construction

²⁾ (주)GS 건설 기술본부 지반팀 팀장, Senior Manager, GS Engineering & Construction

³⁾ (주)GS 건설 하이퐁 현장 과장, Manager, GS Engineering & Construction

SYNOPSIS : GS E&C was awarded the contract for the construction of *Hanoi - Hai Phong Expressway Package EX-7* from Station Km 72+000 to Station Km 81+300 in December 2008. This project is the 7th contract package of the 105.5 km long expressway near Hai Phong city, which includes a FCM-styled bridge along with high embankments over soft ground. For these high embankments, there is a need to treat the soft soil for improving the overall stability during construction and for reducing the post-construction settlement of the expressway. The Designer of this project had adopted four (4) different types of ground improvement techniques to treat the soft ground, including the prefabricated vertical drains (PVD), sand drains (SD), pack drains (PD, or sometimes called packed sand drains), and sand compaction piles (SCP).

The main focus of soft soil treatment should be paid attention to the residual settlement after construction. In current design, however, it appeared that the secondary compression (or creep) of the improved soil layer and the consolidation settlement of the lower untreated compressible soil layer have been neglected in the estimation of the post-construction settlement. These uncalculated residual settlements may not only unsatisfy the design criteria but also raise serious problems during service period of this expressway. In this paper, the subsoil condition and current design were reviewed focusing on the employed soft soil treatment method and expected residual settlement.

Keywords : Hanoi-Haiphong expressway, ground improvement techniques, secondary compression, post-construction settlement

1. 서론

베트남은 최근 수년간의 급속한 경제발전으로 대규모의 SOC사업에 대한 수요가 증가하고 있으며, 항만 및 고속도로 부문의 경우 이미 2020년까지 주요 항만 및 간선도로망 개발계획을 수립하고 단계적으로 건설을 진행하고 있다. 베트남 항만은 1975년 통일 이후 1986년까지 하이퐁(Hai Phong), 벤투이(Ben Thuy), 다낭(Da Nang), 퀴년(Quy Nhon), 나짱(Nha Trang), 그리고 사이공(Saigon)항 이렇게 6개의 주요 거점 항만이 운영되었다. 1986년 개방정책 이후 경제 사회 전반의 사회적 교류가 활발해짐에 따라 베트남 정부는 과거에 주 정부 주도하에 진행되었던 항만시스템을 여러 연구기관을 통해 계획을 수립하였다. 이를 바탕으로 하이퐁, 다낭, 반퐁, 붕따우, 티바이 지역에서 항구개발이 계획, 설계, 시공되고 있

다. 도로망은 전국에 걸쳐 비교적 조밀하게 개설되어 있으나 대부분 좁고 포장상태가 좋지 않아 베트남 정부는 베트남 고속도로공사(Vietnam Expressway Corporation)를 설립하여 2005~2025년간 전국 고속도로망 장기 계획을 수립하는 등 고속도로 건설을 야심차게 추진하고 있다. 하지만 SOC 건설에 필요한 재정이 부족하여 외국의 원조 또는 투자가 절대적으로 필요한 상황이며, 현재 한국, 일본, 중국 등의 국가들로부터 원조와 투자를 기대하고 있다. 이러한 시장여건에 따라 한국의 건설관련 기업들은 투자와 수주의 목적으로 베트남 진출을 급격히 확대하고 있다.

본 논문에서는 베트남 지역의 항만 및 도로건설에 따른 연약지반 개량 설계·시공에 관한 사례를 조사하였고, 특히 우리나라에서 EDCF 자금지원으로 발주한 하노이-하이퐁 고속도로 7공구를 중심으로 사전 설계검토 하는 과정에서 나타난 지반공학적 문제점을 기술하였다.

2. 연약지반 개량공법 사례조사

베트남 남부, 북부지역의 해안은 주로 해성퇴적층으로 연약층심도가 20~50m에 이르며 기반암층까지는 80m 이상인 곳이 상당히 많이 분포하고 있다. 이러한 지역에 항만이나 도로건설시 사용성을 확보하기 위하여 연약지반 개량은 반드시 시공되어야 할 요소이며, 주로 적용되는 연약지반 개량공법은 PVD+Preloading, Sand Drain+Preloading, Sand Compaction Pile, Deep Cement Mixing, PVD+Vacuum+Preloading으로 조사되었으며, 한국과 유사하게 PVD+Preloading 공법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 최근에는 교대접속부의 부등침하 발생사례가 심각한 사회문제로 대두되어 교대접속부 또는 Off Shore Revetment 구역에서는 DCM공법, Piled Embankment 공법 적용이 증가하고 있다. 베트남지역에서 시공되고 있는 주요 프로젝트별 연약지반 개량공법을 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 주요 프로젝트별 연약지반 개량공법

구분	적용공법	허용 잔류침하량(cm)	배수재 길이(m)	배수재 간격(m)	성토고(m)	방치기간(일)
CaiMep International Terminal	PVD+PL	50(2yr), 75(2-50yr) 125(50yr)	33~38	0.9~1.3	8~12	180~400
	Vacuum+PL	"	"	0.9	7.2	180(Pumping)
Posco Port	PVD+PL	Road : 20 Yard : 30	28~36	1.25	5.7~7.5	150
	Pile Cap		Pile 직경 : 300mm, 간격 : 2m, G/T 20t 2겹			
CaiMep ThiVai International Port	PVD+PI	총침하량의 20%이하	40~45	1.5	5.3~8.6	120
Gemalink International Terminal	PVD+PL	두지점 거리의 1%이내	45~49	1.0~1.4	6.0~7.3	180
DaNang New Town	PVD+PL	도로:10, 아파트: 20 골프장 : 30	17.5~34	0.8~1.5	3.0~8.5	180
하노이 - 하이퐁 고속도로 7공구	PVD,SD,PD, SCP	교대:10, BOX:20, 일반구간:30	10.5~40.5	1.2~2.5	2.5~10.5	180

3. 하노이 - 하이퐁 고속도로 7공구 설계 · 시공

하노이 - 하이퐁 고속도로는 총 연장 105.5km, 왕복6차선의 신설도로로 베트남 최초의 고속도로이며, 그중 7공구(연장 9.3km)를 2008년 11월에 GS건설이 낙찰 받았다. 본 고속도로의 특징은 전 구간 연약지반위에 시공되어야 하는데, 상대적으로 깊은 연약지반 층(10.5m~40.5m) 위에 높은 성토고(2.5m~10.5m)를 갖고 있으므로 연약지반처리 및 사면안정성 등에 기술적인 문제들을 내포하고 있다. 현재 설계에 따르면 연약지반 처리공법으로 Prefabricated Vertical Drain (PVD), Pack Drain (PD), Sand Drain (SD), Sand Compaction Pile (SCP) 등 총 4개 종류의 수직배수체가 적용되어 있다. 총 연장 105.5km 중 7공구의 공사위치는 하이퐁 인근의 STA. 72+000 ~ STA. 81+300 까지의 9.3km 구간으로 그림 1과 같으며, 공사개요는 다음 표 2와 같다.

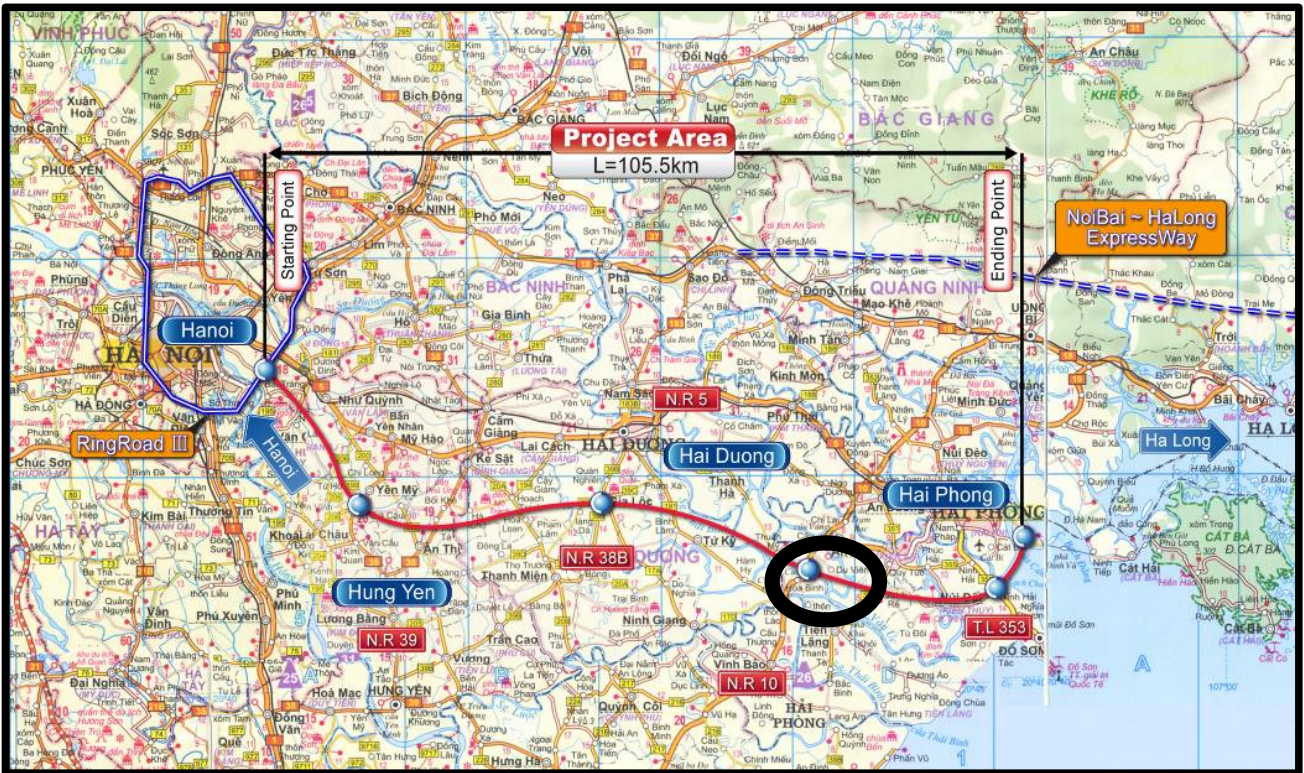


그림 1. 공사 위치도

표 2. 공사 개요

구분	내용	비고
공사명	Hanoi ~ Haiphong 고속도로 건설공사 제 7공구 (EX-7)	
발주처	VIDIFI(Vietnam Infrastructure Development and Finance Investment)	
연장 및 폭	9.3km, 폭 33m	
차로 및 IC	본선 6차로, 부체도로 2차로, IC 1개소, Toll Gate 1개소, 휴게소 1개소	
순성토	306만 m ³	
연약지반 처리깊이	PVD 217만m, SCP 64만m, PD 71만m, SD 16만m	
교량	FCM 장대교량 963m 1개소 포함 (1,446m/6개소)	
공사기간	2009년 2월 ~ 2011년 12월(34개월)	

3.1 설계내용

3.1.1 지반조건

본 프로젝트에 해당하는 연약지반은 그림 2와 같이 크게 2a layer, 2b layer, 2c layer 등 크게 3가지로 분류할 수 있다. 2a layer는 초연약 점성토층으로 대부분의 지표면으로부터 10m에서 20m 깊이까지 분포하고 있다. 일부 유기질 점토를 포함하고 있으며 통일분류법으로 CH, CL, ML, MH 등으로 분류할 수 있다. 국부적으로 연약 또는 중간 굳기 정도의 Sand Seam을 포함하고 있다. 2b layer는 2a layer 하부에 위치하고, 두께는 10m에서 깊게는 30m의 두께로 분포하며, 통일분류법으로 CH, CL, MH 등으로 분류할 수 있다. 2b layer 역시 국부적으로 2b-1, 2b-2 등의 Sand Seam을 동반한다. 2c layer는 2b layer 하부에 존재하며 대부분 중간 굳기 이상의 점토로 표준관입시험을 통한 N값은 대부분 10 이상을 나타내고 있다. 통일분류법으로 CL, MH, ML 등에 해당하며, 본 설계에서는 연약지반 대상에서 제외되어 시추 조사는 2c layer에서 종료되었다. 각 지층의 지반공학적인 물성 특성치를 표 3에 나타내었다.

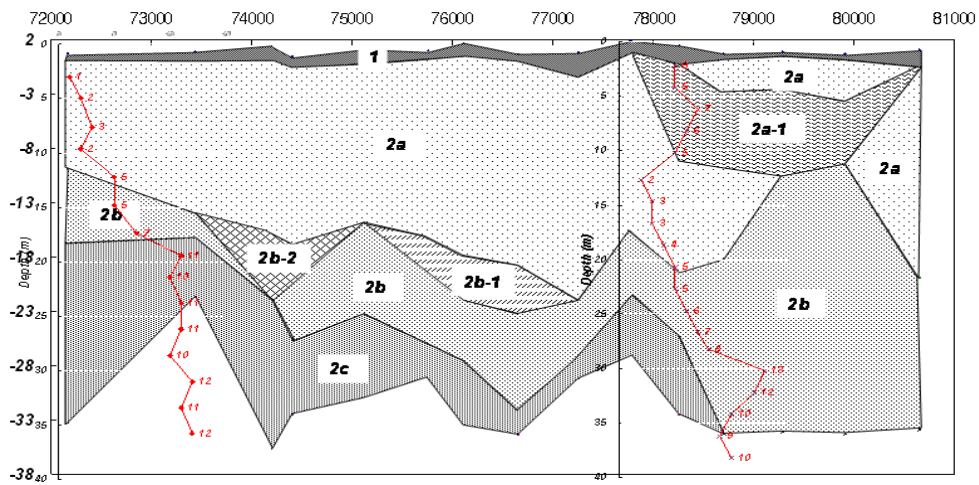


그림 2. 하노이-하이퐁 도로 7공구 지층단면도

표 3. 각 연약층의 지반공학적인 물성치

지반공학적인 물성치		2a layer	2b layer	2c layer
액터버그 한계	액성한계, LL (%)	52.6 (23.6~73.6)	55.2 (27.3~78.0)	41.0 (20.5~61.3)
	소성한계, PL (%)	27.5 (14.3~42.9)	26.9 (14.0~46.4)	21.8 (13.1~36.4)
	소성지수, PI (%)	25.1 (7.1~47.0)	28.3 (9.1~45.5)	19.3 (7.2~34.1)
함수비, w (%)		50.2 (22.1~75.1)	46.2 (22.0~68.1)	28.1 (17.5~47.9)
간극비, e		1.39 (0.59~2.06)	1.28 (0.62~1.86)	0.79 (0.52~1.28)
압밀시험	압밀계수, C_v ($10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$)	1.44 (0.41~5.07)	1.21 (0.53~4.64)	No Testing
	압축지수, C_c	0.44 (0.11~0.87)	0.45 (0.19~0.59)	No Testing
	선형압밀응력, P_c (kg/cm^2)	0.73 (0.38~1.46)	0.94 (0.50~1.60)	No Testing
	투수계수, K ($10^{-7} \text{cm}/\text{s}$)	0.57 (0.18~1.06)	0.53 (0.26~1.32)	No Testing
삼축압축시험(UU), C_u (kg/cm^2)		0.185 (0.101~0.326)	0.249 (0.525~1.00)	No Testing
표준관입시험, N		(0~6)	(4~11)	(9~21)
현장배인	비교란, $S_{u,max}$ (kPa)	(7.79~45.02)	(41.1~49.0)	No Testing
	교란, $S_{u,min}$ (kPa)	(1.92~27.3)	(17.5~41.1)	No Testing

* 괄호()안의 값은 각 층, 각 물성치의 범위임

3.1.2 설계기준

연약지반 개량 설계는 베트남 설계기준인 22 TCN 262-2000(Standard for Investigation and Design of Embankment on Soft Ground)의 고속도로 기준에 따라 허용잔류침하량을 교대부근 10cm 이하, 콘크리트 수로 또는 지하통로와 같은 구조물 부근은 20cm 이하, 일반도로구간은 30cm 이하로 정하였다. 그러나 이와 같은 허용 잔류침하량은 시공후의 1차 압밀의 잔류침하량으로, 2차 압밀침하량을 고려하지 않은 값이다. 현재 베트남 설계기준은 이 부분이 명확하지 않은 상태이고, 실제 시공 후 공용 중에는 2차 압밀이 발생하므로, 허용 잔류침하량에 대한 정의를 명확히 할 필요가 있다. 한편, 지반개량에 따른 사면안정 검토시 안전율은 성토중에는 1.2이상, 공용시에는 1.4이상으로 규정하고 있다.

3.1.3 개량공법 선정

연약지반 개량공법은 연약층 두께, 성토고에 따라 그림 3과 같이 4개의 공법으로 정하였다. 즉, 성토고가 6m 미만이고 연약층이 20m 내외인 구간은 PVD, 성토고가 5m~7m 사이 이거나 연약층 두께가 20m 이상인 구간은 PD 또는 SD 공법을, 성토고가 7m 이상인 지역 및 교대부근은 SCP 공법을 적용하였다.

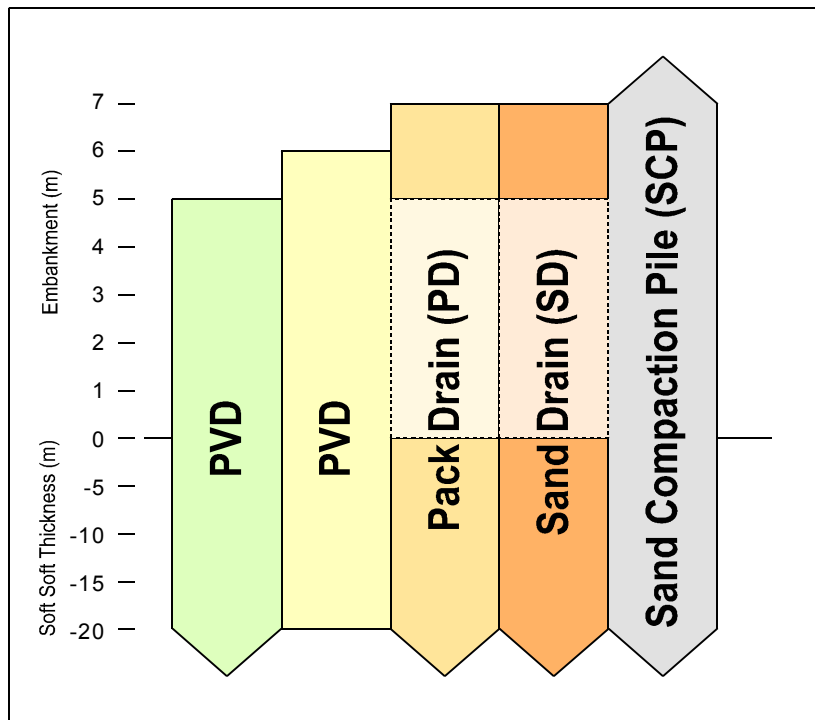


그림 3. 지반개량공법 선정 개념

3.2. 지반 개량설계 평가

3.2.1 조사 및 지반개량 심도

본 과업구간의 지반조사는 현지 업체인 GMC (Geotechnical Mastery Construction and Development Joint Stock Company)와 TCIC (Haiphong Transport & Communication Construction and Investment Consultancy Joint Stock Company)에서 약 5개월에 걸쳐 수행하였다. 시추조사 공수는 57공으로 자연시료채취 및 Field Vane Test를 실시하여 지반의 공학적 특성을 파악하였다. 그러나 시추조사 심도는 그림

4에 나타난 바와 같이 5개소를 제외하고 대부분 35m 이하에서 조사를 종료하였다. 주상도를 살펴보면 종료된 조사심도 하부에 N치 6이하의 연약점성토층이 존재함에도 시추를 종료하여 지반개량 설계시 지반개량 심도 부족으로 공용 후 추가 잔류침하가 발생할 수 있는 것으로 검토되었다.

일부 시추조사 및 개량심도 결정에서 나타난 문제점들을 그림 5에 나타난 바와 같이 크게 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째, case 1과 같이 일부 시추조사에서 시추가 2c layer의 확인 없이 개량 대상층인 2b layer에서 종료되었고, 그에 따라 개량심도가 결정된 부분이다. 두 번째는 case 2와 같이 시추는 2c layer 깊이까지 진행되었지만, 개량심도 결정이 단순히 Sand Seam(2b-2 layer)에서 종료된 부분이다. 이 경우에는 Sand Seam 하단부에 개량이 필요한 연약층 2b layer가 존재함에도 불구하고, 설계에서 고려하지 못하였다. 세 번째는 case 3과 같은 형태로, 시추는 2c layer까지 수행되었지만 개량심도는 별도의 기준 없이 2b layer 중간부분에서 결정되었다. 이와 같은 시추 및 개량심도 결정에 따른 문제점은 실제 연약지반 처리가 필요한 층이 있음에도 불구하고 미처리 층으로 남게 되어 향후 공용 중에 설계보다 추가적인 잔류침하가 발생할 수 있는 것으로 검토되었다. 그림 6에 설계시 적용된 지반개량심도와 압밀대상층을 조사하여 하부 미처리층의 두께를 나타내었다.

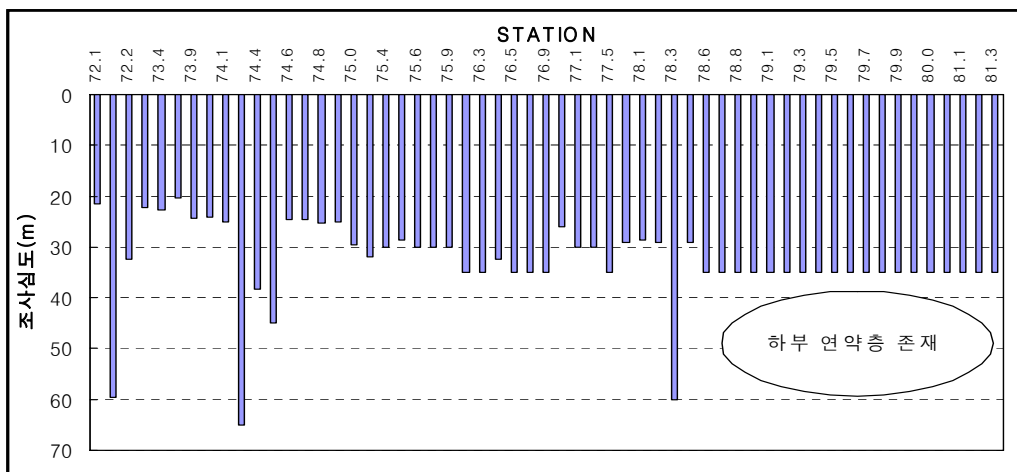


그림 4. STA.별 지반조사 심도

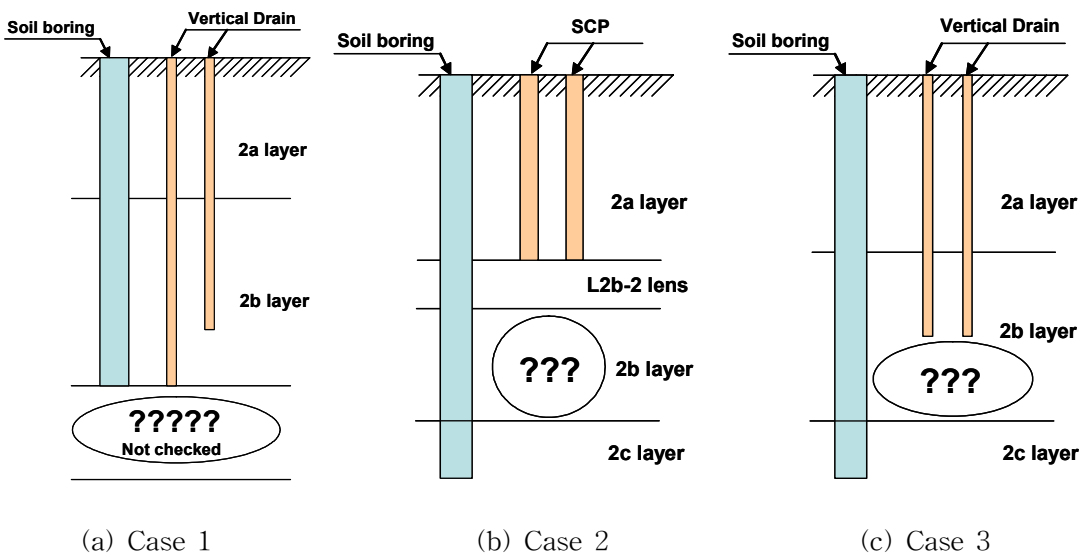


그림 5. 지반조사 및 지반개량 심도의 문제점

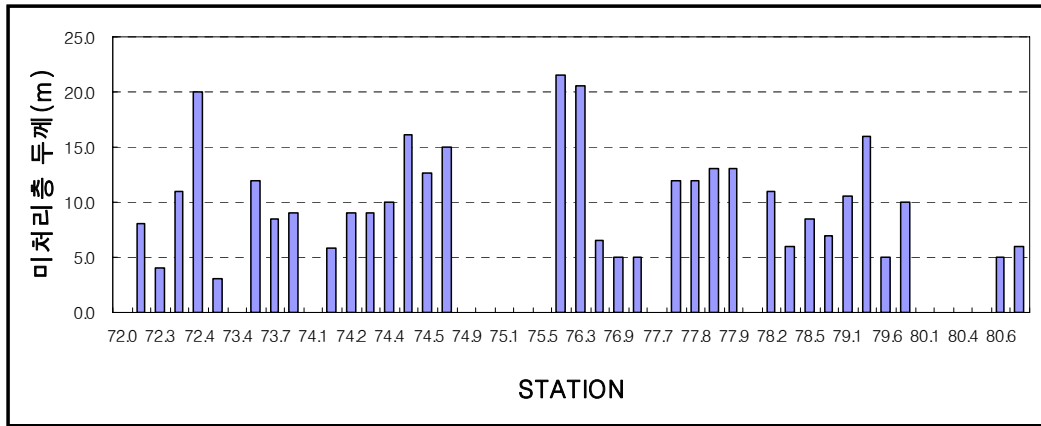


그림 6. STA.별 하부 미처리층 두께

3.2.2 잔류침하량

잔류침하량(S_r)은 연약지반 처리층에 대한 공용개시 후 발생하는 침하량으로 정의할 수 있다. 그러나, 베트남 설계기준에서는 잔류침하량에 대하여 1차 압밀에 대한 잔류침하량만을 고려하는 것인지, 2차 압밀을 고려한 포괄적인 시공 후의 잔류침하량인지 정의가 불명확하다. 본 과업구간의 설계에서는 2차 압밀 침하 및 하부 미처리층에 대한 잔류침하가 무시되고 연약지반 처리층의 1차 압밀에 대한 잔류침하량만을 산정하였다. 그러나 시공 후 잔류침하량은 1차압밀의 잔류침하 뿐만 아니라 2차 압밀에 의한 침하량 및 설계시 미처리층의 압밀침하량 등 시공 후 발생할 수 있는 모든 침하량을 고려하여 산정함이 바람직하다. 이에 관련하여 명확한 기준을 정하지 않으면 향후 시공회사에서 품질 및 유지 관리등과 관련한 리스크를 감수해야 하므로 각별한 주의가 필요하다.

본 설계에서 적용된 대표적인 연약지반 개량 단면은 그림 7과 같으며 이를 토대로 각 층에 대한 잔류침하와 2차압밀 침하를 산정하였다. 총 잔류침하량(S_r)은 식(1)과 같다. 여기서, S_{r1} 은 개량층의 잔류침하량, S_{r2} 는 하부 미처리층의 잔류침하량이고 S_{rc} 는 2차 압밀에 의한 Creep 침하량이다.

$$S_r = S_{r1} + S_{r2} + S_{rc} \quad (1)$$

위의 식을 토대로 구간별 총 잔류침하량을 산정하여 그림 8에 나타내었다. 총 잔류침하량의 범위는 그림 8에 나타낸 바와 같이 공용 후 15년 동안 15~66cm 발생하여 대부분의 구간에서 현재의 설계기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 설계기준을 만족하는 잔류침하를 줄이기 위해서는 미처리층에 대해 지반개량 심도를 늘려야 하며, 1차 압밀에 대한 잔류침하량을 줄이고, 2차 압밀에 의한 침하량을 줄여야 한다. 2차 압밀침하량은 지반의 이력상태, 즉, OCR에 영향을 받으며, 정규압밀의 지반에 비하여 과압밀된 지반일수록 침하량이 급격히 감소한다. 따라서, 개량심도층을 과압밀된 상태로 만들기 위해서는 원설계보다 추가적인 surcharge를 적용함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

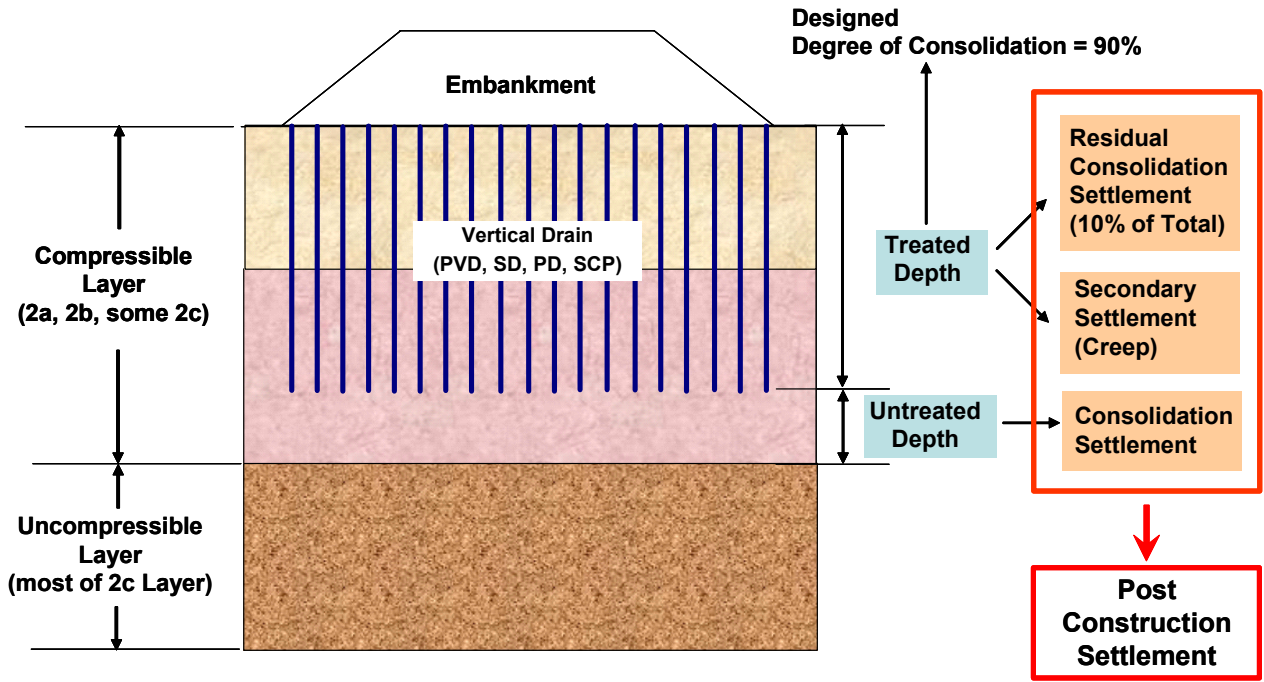


그림 7. 연약지반 개량 단면

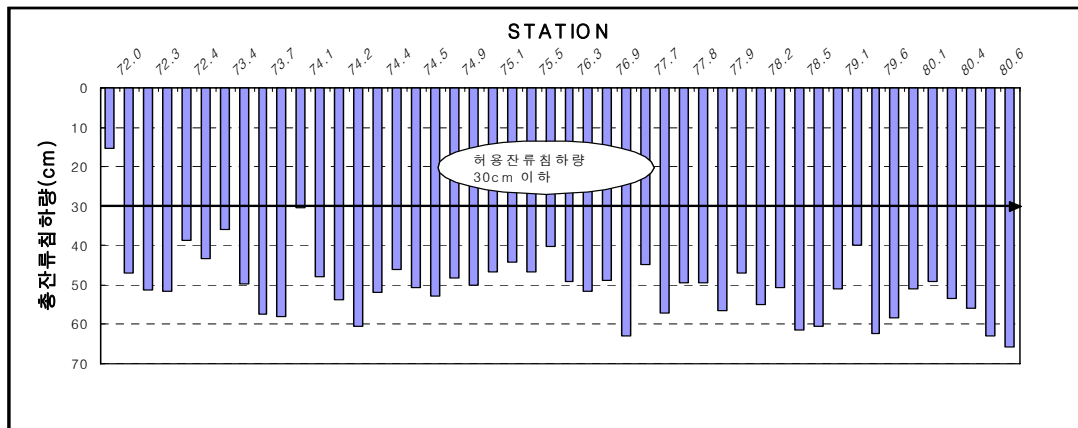


그림 8. STA.별 총 잔류침하량

3.2.3 지반개량 공법

하노이-하이퐁 고속도로 7공구의 연약지반 개량공법은 진술한 바와 같이 성토고 및 연약층의 두께에 따라 PVD, SD, PD, SCP 4가지 공법이 적용되었다. 9.3km 구간의 한 공구에 이와 같은 다양한 연약지반 개량공법의 적용은 시공성 및 현장 관리 측면에 있어서 불리하게 작용할 수 있다. 그럼에도 불구하고 설계자가 이와 같이 다양한 연약지반 처리공법을 적용한 이유는 베트남 지역에서의 연약지반 처리공법의 특성과 관계가 있다. 기존의 베트남 시공사례에서 PVD 공법은 20m 이상 되는 연약지반 처리에 있어서 성공을 거두기 힘들었고, 성토고가 5m 이상 되는 곳에서는 안정성의 문제가 있다는 이유로 PVD 공법은 연약지반 처리 두께가 20m 내외이고, 성토고가 6m 이하 구간에 국한되어 설계가 적용되었다. 따라서, 25m ~ 40.5m 두께의 깊은 연약지반층에 대해서는 PD, SD, SCP 공법을 적용하였다. 이와 같이 설계에

적용된 지반개량공법을 요약하여 표 4에 나타내었다.

표 4. 설계에 적용된 지반개량공법

처리공법	개량심도(m)	성토고(m)	본선처리구간* (km)	배수재 간격 (m)	비고
PVD	10.0~21.5	3.5~6.0	1.25 (15.3%)	1.2~1.8	-
PD	18.0~40.5	3.2~7.0	4.363 (53.6%)	1.6~2.5	30m 이상 근입구간 3.183km
SD	26.5~30.0	7.0~8.0	0.44 (5.4%)	2.0~2.3	-
SCP	11.0~40.5	6.0~9.3	2.091 (25.7%)	1.5~2.5	교대배면처리

*본선 연약지반 처리구간 : 교량구간 제외한 총 연장 8.144km

표 4에 나타난 바와 같이 대부분의 연약지반 처리공법이 현재 최근 5년 이상 국내 및 해외에서 사용되지 않은 PD 공법으로 설계가 이루어진 부분은 주목할 만하다. 더욱 문제가 되는 부분은 지반개량 심도 30m 이상 되는 구간에 PD 공법을 적용하였는데, 이는 본 프로젝트를 담당하는 베트남 기관에서 PVD 공법 적용을 20m 내외에서 제한하고 있기 때문에 비교적 가격이 저렴한 PD 공법을 선택하였기 때문이다. 그러나 문제는 이론과는 달리 실무적인 검토에서 PD, SD, SCP 공법을 30m 이상 깊이로 시공하는 것은 국내시공사례 및 장비조합사례가 거의 없는 것으로 조사되었으며, 장비조합에 따른 기술적인 한계가 있는 것으로 검토되었다. 지반개량층 심도별 적용장비 중량은 그림 9에 나타낸 바와 같이 지반개량 심도가 깊어질수록 장비중량은 급격히 증가하여 Trafficability 및 장비진도 안전성에 위대한 요소로 작용하고 있다.

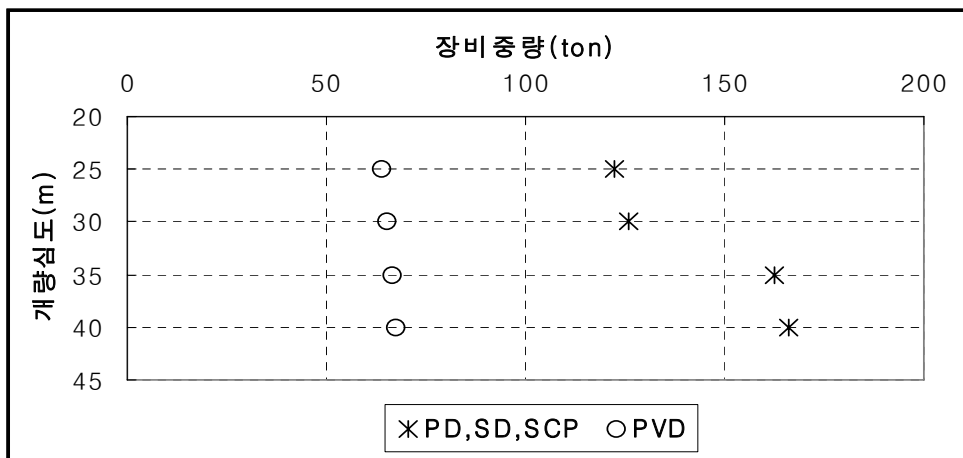


그림 9. 지반개량 심도별 적용 장비 중량

따라서 30m 이상의 일반 도로구간에서는 PVD 필터나 Core강도가 크고, 통수능력이 우수한 대심도용 PVD공법을 적용하는 것이 바람직하다. 최근 국내를 비롯하여, 해외시공 사례에서 30m 이상 되는 연약지반 처리에 PVD 공법이 성공적으로 많이 사용되고 있다. 단, PVD 공법 적용시 사면안정이 우려되는 고 성토구간은 사면파괴 방지를 위하여 성토체 양측면에 Counterweight Berm을 설치하거나 (PVD+Counterweight Berm) 사면파괴가 예상되는 깊이까지 SCP를 시공하여 (PVD+SCP) 사면안정을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 본 사업에서는 대부분 연약지반 처리 심도가 30m 이상이고 성토고가 상대적으로 높으므로, 연약지반 처리공법을 PVD, SCP 공법으로 한정하고 경우에 따라 두 공법을 조합하는 방법이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

본 고에서는 베트남지역에서 적용되고 있는 연약지반 개량 공법의 설계·시공 사례를 조사하였으며, 이를 바탕으로 현재 수행되고 있는 베트남 하노이-하이퐁 고속도로 7공구의 연약지반개량 설계와 관련하여 원 설계를 검토 및 분석하고, 문제점 등을 해결할 수 있는 방안을 모색하였다. 실제, 본 사업의 진행에 있어서 이와 같은 문제점들이 본 논문에 소개된 시공사의 설계검토를 바탕으로 재설계를 실시하고 있으며, 원설계의 근본적인 문제점에 대한 해결을 강구하고 있다. 현재, 국내 건설업이 베트남 시장 진출의 확대를 모색하며 실제 많은 국내 기업들이 베트남 건설시장에서 사업을 추진하고 있다. 그러나, 우리나라와 여러 가지 실정이 다른 베트남 시장에서 기술적 검토를 바탕으로 하지 않고 무분별한 수주 참여 확대는 향후, 시공사들이 상당한 리스크를 수반할 수 있으므로 각별한 주의가 요구된다.

참고문헌

1. VIDIFI (2008), Report on Geological Investigation of HANOI-HAIPHONG Expressway Project
2. VIDIFI (2008), Soft Soil Treatment Calculation Report of HANOI-HAIPHONG Expressway Project
3. Hansbo, S. (1979), "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains," Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 16-25.
4. Ladd, C. C. and DeGroot, D. J. (2004), "Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture". 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, MIT.
5. Mesri, G., Kwan Lo, D.O., and Feng, T.W. (1994). "Settlement of embankments on soft clays." Proc., Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. ASCE GSP 40, College Station, 1, 8-56.
6. NAVFAC (1986). Design Manual DM7.1, Soil Mechanics, Department of Navy Facilities Engineering Command, Alexandria, Virginia.
7. Seah, T. H. and Wongsopit, K. (2000). "Evaluation of Bearing Unit design at km 31 of Highway No. 34". Third Seminar on Ground Improvement on Highways, pp. 112-132, Thailand.
8. Execution of Special Geotechnical Works - Vertical Drainage. European Standard EN 15237: 2005