

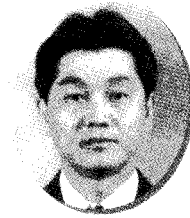
베트남 호치민 나베지역의 연약지반 특성 소개



김 병 탁
GS건설(주) 차장
btkim@gsconst.co.kr



김 재 성
GS건설(주) 부장



김 용 진
나우이엔지 대표이사

1. 서론

GS건설은 Global Top 10이라는 Vision 2015의 목표를 설정하고 국내사업 뿐만 아니라 해외사업 활성화를 위하여 다양한 영역에서 도전적으로 사업을 전개하고 있다. 주요 해외개발사업의 하나로 GS건설은 동남아 신흥 개발 국가이며 경제 성장률이 매년 증가하고 있는 베트남 호치민 시 인근 나베(Nha Be)지역에 신도시 개발 사업을 추진하고 있다. 나베 신도시개발사업과 같은 대규모 개발사업은 베트남 호치민에서 처음으로 추진되고 있으며 현지민들로부터 관심의 대상이 되고 있다. 현재 나베 신도시부지조성공사와 관련하여 토목사업부내 TFI를 구성하여 도시계획과 토목설계가 동시에 진행되고 있으며, 도시계획분야에서는 1/2000 Detail Plan (DP) 승인(2008.3.7)과 1/500 Detail Plan 승인(2008.11.20)을 득한 상태이고 현재 기본설계가 현지에서 마무리 되어가는 중이다.

국내 많은 지반공학자들이 외국의 다양한 연약지반 특성을 경험하여 왔지만, 특히 베트남 호치민 나베지역에 분

포하고 연약지반 특성을 직접 경험할 기회가 없어 본 사업을 통하여 조사된 지반특성을 소개함으로써 사전 정보제공의 의미가 있다고 할 수 있다. 이에 본 고에서는 직접 현지에서 조사된 연약지반 입질특성과 물리적, 역학적 특성을 정리하여 소개하고자 한다.

2. 사업개요

나베 신도시개발사업의 규모와 위치는 표 1과 같다. GS건설은 나베지역의 신도시 건설 후 호치민 남부지역의 명품 신도시를 지향하며, 자족도시 기능을 갖고 호치민의 균형발전에 기여하는 신도시 개발목표를 수립하여 추진하고 있다. 신도시 개발부지는 그림 1에서와 같이 호치민 시내에서 10km, 푸미흥에서는 5km 거리에 위치하고 있으며 호치민 남부지역의 핵심 생활권으로 부상할 것으로 기대하고 있다. 공사규모는 확정되지 않았지만, 1/2000 DP를 기준으로 도로 27.5km, 연약지반처리 300ha, 상수관



그림 1. 사업위치

표 1. 나베 신도시 개발사업 개요

1. 사업명	나베 신도시 개발부지 조성공사
2. 사업위치	Nhon Duc & Phuoc Kien communes, Nha Be Province, Ho Chi Minh city
3. 발주처	GSND (특수목적법인, SPC)
4. 사업기간	2009년 ~ 2019년
5. 세대수	17,000 세대
6. 인구수	68,000 명
7. 면적	349.36ha (약 106만평)
8. 설계사	계획: (주)건화, ACCCO(베트남) 설계: (주)건화, 나우이엔지, TEDs (베트남)
9. 시공사	GS건설(주)

32.4km, 우수관 40.9km, 교량 6개소, 조경 64.2ha, 그리고 주거자에게 안정적인 전력공급을 위한 부지내 변전소 1개소, 환경오염방지를 위한 부지내 하수처리장 1개소로 향후 1/500 DP 승인과정에서 일부 변경의 소지가 있다.

3. 호치민 자연조건

3.1 기후조건

호치민시는 적도에 인접한 열대성 몬순(monsoon)기후

에 해당한다. 기후는 건기(12월~4월)와 우기(5월~11월)로 나뉘며 연 강우량의 90%가 우기에 집중된다. 1일 최대 강우량은 6, 9월에 최대 300mm에 달하며, 월 평균 강우일은 15~20일 정도이다. 연 평균기온은 약 25°~28° 범위이다. 호치민시의 평균 습도는 78~80% 정도이며 4월에 최대 86% 그리고 3월에 최저 71%이다.

3.2 지형조건

호치민시는 베트남 남부의 메콩델타지역과 중부 산악지역이 만나는 접경지역에 위치하고 있다. 전반적으로 북에서 남으로, 동에서 서로 낮아지는 지형분포이다. 호치민의 북부, 북동부, 북서부의 평균 해발고도는 10~25m 정도의 구릉들이 산재해 있으며 Long Binh 지역은 최고 해발고도 32m이다. 호치민의 중부지역 (구찌, 중심지, 흑면현 등)의 평균 해발고도는 5~10m이며, 개발부지가 위치한 남부지역의 평균 해발고도는 1m 이하로 0.5~2m 분포이다.

3.3 지질조건

본 개발부지는 베트남 지질분류상 견져층군(QIV²⁻³cg)에 해당한다. 견져층군은 하성 및 해성 퇴적물, 하성-해성 복합퇴적물, 해성습지 퇴적물, 하성습지 퇴적물, 그리고 해양풍성 퇴적물을 기원으로 하며, 본 부지는 이 중에서 하성-해성 복합퇴적층과 해성 습지 퇴적층이 분포하고 있다. 하성-해성 복합 퇴적층(am QIV²⁻³cg) 하부는 매우 연

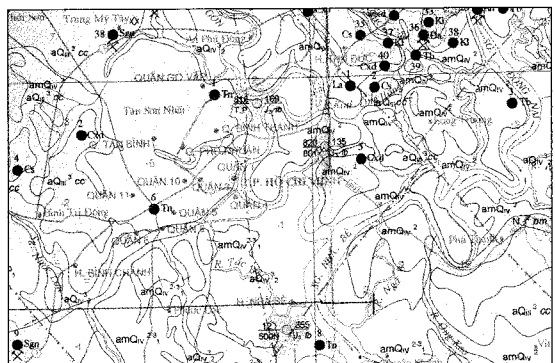


그림 2. 개발부지 주변 지질도

약한 점토층이나 모래질 점토층으로 암회색을 띠고 소량의 식물뿌리를 함유하고 있으며 분급은 불량한 편이다. 상부층은 실트질 모래층으로 갈색내지 황갈색을 띠며 포화되어 있다.

해성습지 퇴적층(6m QIV²⁻³cg)은 암회색의 매우 연약한 점토내지 모래질 점토로 구성되고 식물뿌리 등의 유기물이 20~30% 함유되어 있으며 분급도는 불량하다. 이 지층의 두께는 2~10m 정도의 범위를 보이며 분포면적 또한 불규칙적이다. 지층의 함수비는 79~90%로 매우 높으며 큰 간극비를 갖는다. 투수계수와 강도는 매우 낮은 상태이다.

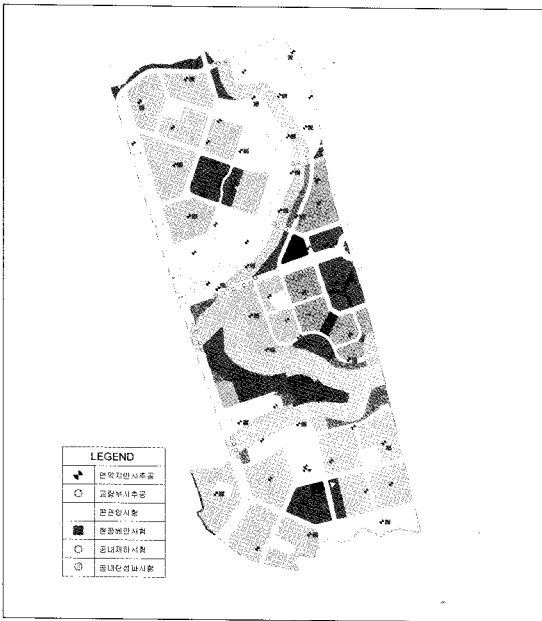


그림 3. 시추조사 및 현장시험 위치

4. 지반조사 계획

본 사업에서 주요공종은 연약지반처리 및 교량공으로서 이에 부합하고 베트남화 설계에 필요한 지반조사 수량 및 항목을 설정하여 지반조사를 호치민에서 가장 많은 현장조사와 실내시험 장비를 보유한 TEDIs라는 현지업체가 수행하였다. 수행된 지반조사 항목 및 수량은 표 2 그리고 시추조사 및 현장시험 위치는 그림 3과 같으며 조사기간은 약 6개월이 소요되었다. 현장조사 및 실내시험은 대부분 국제기준 (ASTM)에 근거하여 실시하였으나 시추조사는 베트남 기준

표 2. 지반조사 항목 및 수량

조사 항목	수량 및 내용	비 고	
현 장 시 험	시추조사	연약지반 63공 교량부 25공	평균 184m간격
	SPT	2,225회	2m 간격
	자연시료채취	111회	Piston sampler
	공내투수시험	24회	
	Vane 시험	30개소 (429m)	최대 20m
	CPTu	30개소 (907m)	최대 30m
	공내재하시험	6공 (15회)	교량부
실 내 시 험	Downhole시험	4공	교량부
	기본물성시험	입도분석, 함수비, 비중, Atterberg limit 등	
	표준압밀시험	연직/수평방향, Creep 시험	112회 실시 13회 실시
	역학시험	일축압축/UU/CU시험, 직접전단시험	
	지하수수질 분석	부지내 5개소 분석	조경수사용곤란
구조물부식 평가	pH를 이용	부식방지 필요	



사진 1. 부지내 Fish pond



사진 2. 회전수세식 XJ-100 시추기

그리고 공내투수시험은 BS기준에 근거하여 실시하였다.

본 부지는 현재 수많은 소하천과 수목들 그리고 거주자들이 생계를 목적으로 만든 fish pond가 곳곳에 산재하고 있어 현장 시추조사를 위하여 부득이하게 小路 및 소하천을 통하여 이동이 용이한 회전수세식 XJ-100 시추기를 이용하였다(사진 1과 2 참조). 지반조사 착수 전 실시한 지형측량 결과, 지반고는 EL(+).38~1.62m 범위이며 조사부지의 개발단계별 평균 지반고는 0.46~0.7m로 조사되었다.

5. 조사결과

5.1 지층 현황

부지내 연약지반 판정을 위하여 당 TFT에서는 베트남 기준(TCXD 245-2000)을 적용하였으며, 이 기준에 의하면 N=5 이하를 연약지반 개량구간으로 판단하였다. 이에 연약지반 판단을 위하여 N=5 이상구간이 10m 이상 확보 되도록 시추조사를 수행하였으며, 교량구간의 경우 풍화암 이상의 견고한 지층이 최소 100m 이상 깊이에 분포하고 있어 N=50 이상구간이 10m 이상 되도록 시추조사를 실시하였다. 그 결과, 연약지반 판단을 위한 시추는 40~50m 정도 그리고 교량부 시추는 75~90m 정도까지 실시하였다. 통일분류법상 N≤5의 연약지반층은 고압축성 점토(CH)로 분류되며 층후가 17.4~40m로 나타났으며 부지 전체의 연약지반 층후 분포는 그림 4와 같이 北에서 南으로 층후가 발달하고 있다.

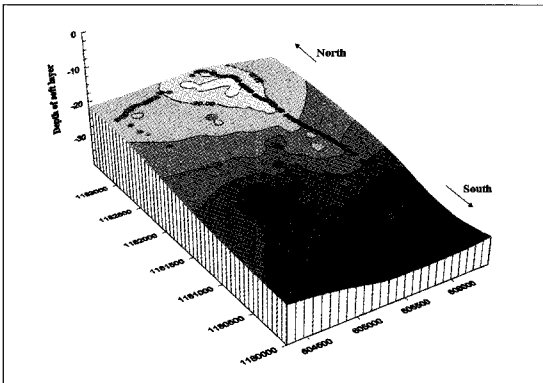


그림 4. 연약지반 층후 3D Surface

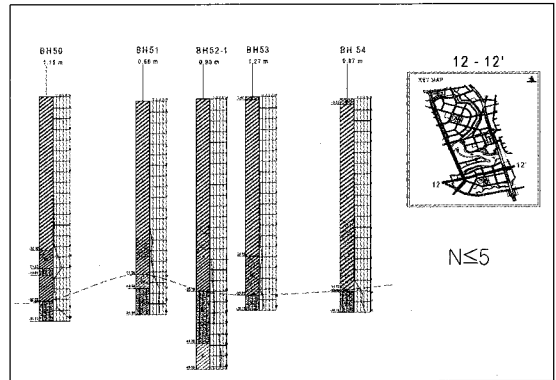


그림 5. 부지내 중, 횡단 시추 주상도 단면

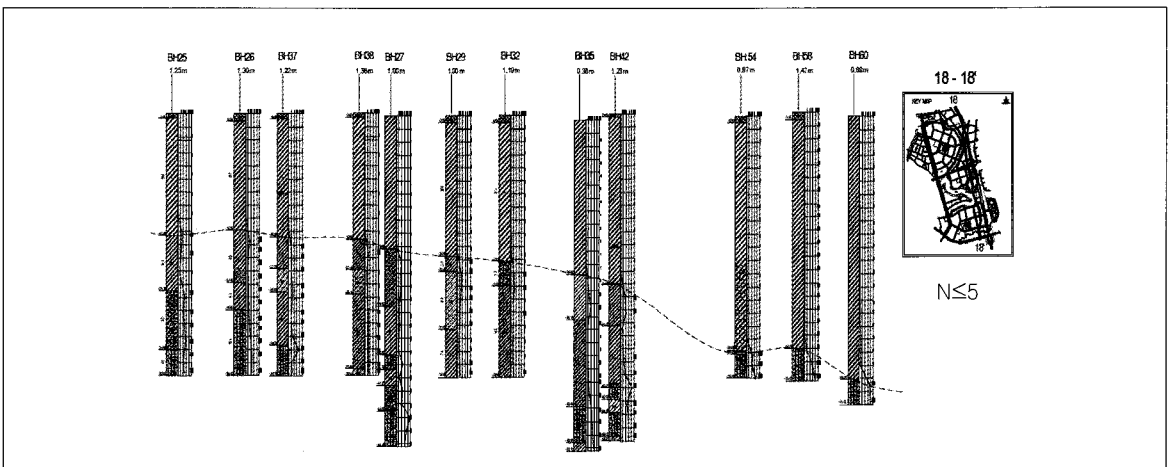


그림 5. 부지내 중, 횡단 시추 주상도 단면(계속)

베트남 호치민 나베지역의 연약지반 특성 소개

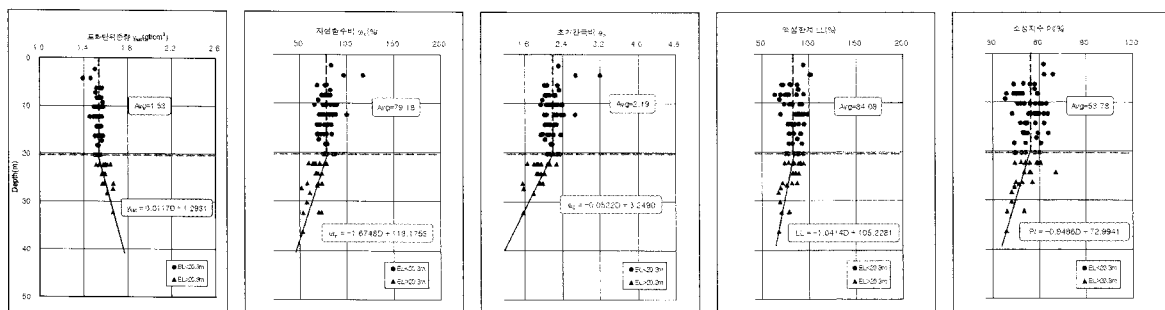


그림 6. 심도별 연약지반의 기본물성 변화

층상분포는 표층부에 암흑색을 띠며 유기물을 함유한 견고한 얇은 층이 최대 1.3m까지 존재하며 그 하부에는 녹회색내지 암흑색의 매우 연약한 고압축성 점토층(N≤5) - 녹회색, 담갈색의 견고한 점토층(N=12~21) - 녹회색, 담황색의 느슨~보통 조밀한 실트질 모래(SM), 점토질 모래(SC) 층(N=7~13) - 부분적으로 세립질 모래가 혼재한 보통~견고한 점토층(N=7~14) - 보통 조밀한 실트질 모래(N=9~17) - 녹갈색의 견고한 점토층(N=14~18) - 연약지반 시추조사 종료심도 부근에서 세립내지 중립질 모래로 구성된 실트질 모래층이 나타나고 있다.

이와 같이 지층분포는 매우 반복적인 점토, 모래층으로 구성되어 있어 사이공강 주변에서 홍수범람에 의한 퇴적 반복 현상이 일어났을 것이라 판단된다. 퇴적이력의 검토를 위한 자료수집에 노력하였지만 검토를 위한 충분한 자료를 확보하지 못하여 수행되지 못하였다. 개발부지내 지하수위를 측정된 결과, EL(+0.2~ 0.87m 범위로 EL(+0.38~ 1.62m범위의 지반고와 비교하면 지표하 1m 이내에서 유지되고 있었다.

5.2 물리적 특성

Piston sampler로 채취한 불교란 시료에 대한 기본물성 시험, Atterberg limit test을 각 157회 수행하고 깊이별로 분석한 결과, 전반적으로 개발부지내 기본물성은 20m 부근심도에서 선형적인 변화를 일으키는 것으로 조사되었다. 깊이별 물리적 특성을 주요물성에 대하여 정리하면 그림 6과 같다. 조사부지의 흙비중은 2.65~2.72 범위이며 간극비와 함수비의 상관성($e_s = 0.024u_n + 0.314$, $R^2 = 0.94$)

이 가장 큰 것으로 나타났다.

5.3 압밀 특성

연약지반 설계를 위하여 베트남 현지에서 수행 가능한 표준압밀시험(수평/수직방향, 112회), 장기압밀시험(13회), CPTu(30회) 시험들을 수행하였으며 이들 시험결과들을 종합적인 분석을 통하여 압밀특성을 평가하였다. 부지내 연약지반 상부층의 압밀상태는 심도 5m까지는 과압밀 상태이며 5m이상 심도의 연약지반은 정규압밀상태인 것으로 나타났다(그림 7참조).

베트남 설계기준에 근거하여 부지내 연약지반으로 분류된 지층의 압축지수는 전체심도에 걸쳐 0.708~1.938의 범위이며 심도 20m까지는 평균 1.13, 20m이상 심도에서는 선형적으로 감소하는 것으로 그림 8에서와 같이 조사되었

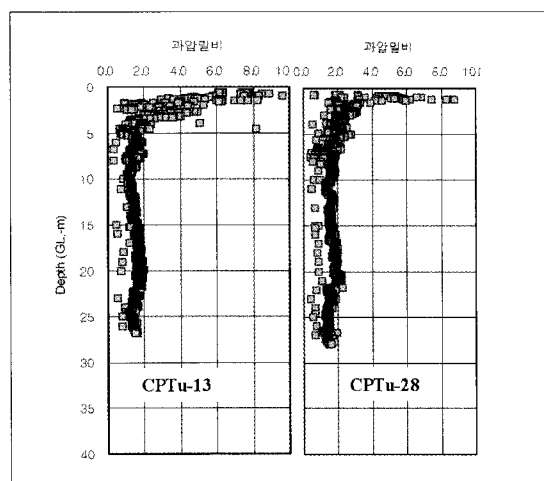


그림 7. 심도별 과압밀비 변화 (CPTu 자료)

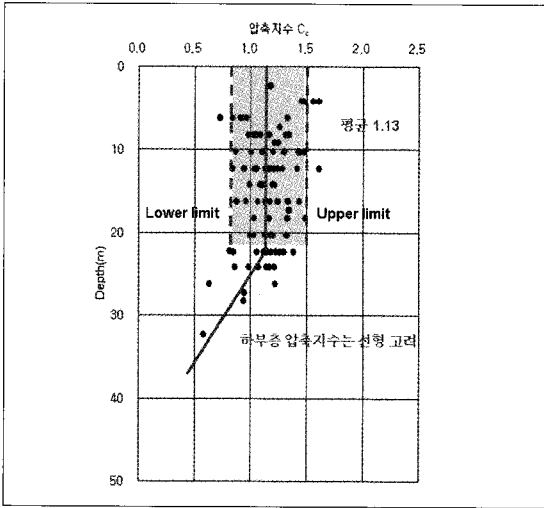


그림 8. 심도별 압축지수의 변화

표 3. 점토 종류별 압축지수 비교

점토 종류	압축지수(Cc)
Boston Blue clay(CL)	0.3~0.5
Vickburg Buckshot clay(CH)	0.5~0.6
Swedish clay	1.0~3.0
Canadian Lead clay	1.0~4.0
San Francisco Bay Mud(CL)	0.4~1.2
Bangkok clay(CH)	0.4
South coast(Korea)	0.17~1.91
Nha Be clay(CH)	0.708~1.938

표 4. 압축지수에 대한 상관성 분석

Empirical equation ($C_c = f(\omega_l, e_o, \omega_n, PI)$)	Reference (Yoon & Kim)
$0.0247(\omega_l - 28.34)$ $R^2 = 0.10$	0.013($\omega_l - 13.5$), Yamagutshi 0.017($\omega_l - 20$), Shouka ($\omega_l - 13$)/109, Mayne
$0.826(e_o - 0.484)$ $R^2 = 0.26$	0.54($e_o - 0.35$), Nishida 0.43($e_o - 0.25$), Cozzolino (Brazilian clay) 0.75($e_o - 0.5$), Sowers (clays with low plastic)
$0.0203(\omega_n - 10)$ $R^2 = 0.16$	0.01($\omega_n - 5$), Azzouze et al. 0.01 ω_n , Koppula
$0.459 + 0.0126PI$ (Best for $PI > 40\%$) $R^2 = 0.20$	$0.02 + 0.014PI$, Nacci et al. (North Atlantic clay) $0.046 + 0.0104PI$, Nakase et al. (Best for $PI < 50\%$)

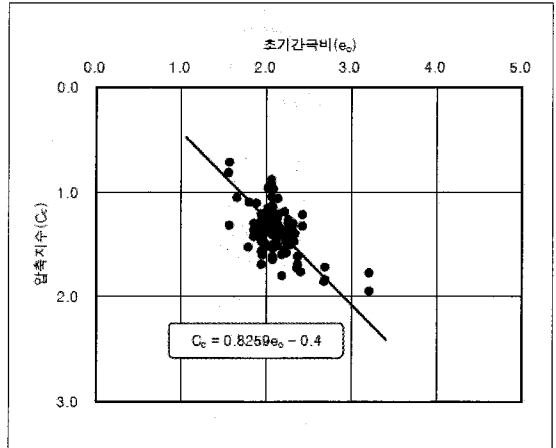


그림 9. 간극비 - 압축지수에 대한 경험식

다. 설계 적용시에는 지반 침하량에 지배적인 영향을 미치는 심도 20m까지에서 과도하게 큰값과 작은값을 제외한 압축지수의 lower ~ upper boundary를 설정하여 연약지반 침하량의 최대 및 최소발생범위로 제시하고자 한다.

국내 해안가 연약지반의 경우, 충후 분포중 가장 두꺼운 지역이 남해안으로서 약 40m 정도까지 연약지반이 발달하고 있으며(윤길림 및 김병탁, 2004), 외국 연약지반 압축지수와 국내 남해안 압축지수를 Nha Be부지의 데이터와 비교하면 표 4와 같다. 외국지역 연약지반의 압축지수보다 압축성이 큰 범위에 해당하는 것을 알 수 있다. 2차 압밀량 계산을 위하여 장기압밀시험(13회)을 수행하고 얻은 2차 압축지수는 0.008로서 2차 압밀량이 크지 않으며, 베트남 설계기준(TCXD 245-2000, 22TCN 262-2000)에 따르면 2차 압밀량을 총 침하량에 포함하지 않음으로 설계에서는 고려하지 않았다.

많은 연구자들의 단일변수 경험식에 근거하면 압축지수는 간극비, 함수비, 액성한계 그리고 소성지수에 의존하는 것으로 알려져 있다. 나베부지의 압축지수는 어떤 기본물성에 보다 더 의존하는지를 상관성 분석을 통하여 조사하였다. 그 결과, 나베지역의 압축지수는 다른 기본물성값 보다 간극비에 의존하는 것으로 나타났으며 간극비 - 압축지수에 대한 회귀분석 결과는 그림 9와 같다. 표 3, 4에는 나베부지의 간극비, 함수비, 액성한계 그리고 소성지수와 압축지수의 회귀결과 경험식과 외국 연구경험식을 함께 비교 하였다.

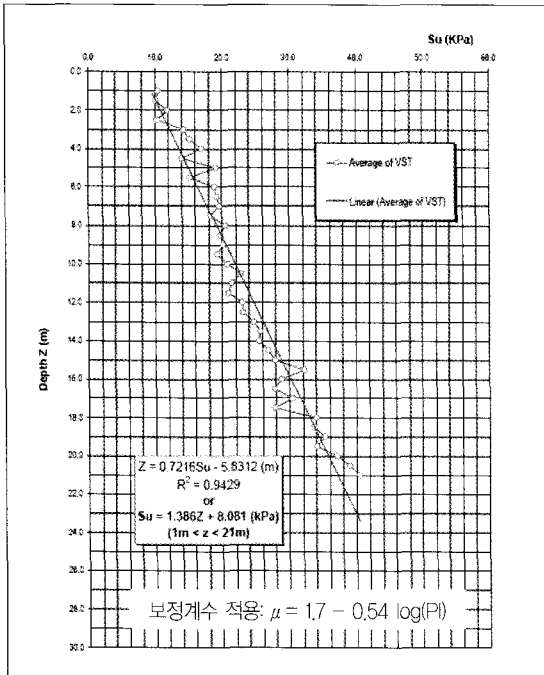


그림 10. 심도별 비배수 전단강도 변화 (VST)

연약지반 침하속도에 영향을 미치는 압밀계수는 $\log t$ 방법으로 산정하였으며 수직 압밀계수(C_v)는 표준압밀시험 결과에 근거하여 설계적용 값으로 $2.7 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 가 산정되었다. 수평압밀계수는 표준압밀시험과 CPT 소산시험결과를 비교 분석하여 합리적으로 산정하였으며, CPT 소산시험에서 수평압밀계수 결정은 고소성점토에 신뢰성이 높은 Byrnes & Mayne 식을 이용하여 산정하였다. 그 결과, CPT 소산시험 결과($C_h = 1.82 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)가 표준압밀시험 결과($C_h = 2.52 \sim 4.51 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$)보다 평균 3.7배 정도 크게 나타났다. 표준압밀시험결과와 CPT 소산시험결과를 종합분석한 결과 최종적으로 연약지반 설계 시에는 압밀계수비(C_h/C_v)를 3.0으로 적용하고자 한다.

5.4 역학 특성

연약지반개발상기 장비주행성 및 성토하중 활동평가를 위한 표층강도를 확인하기 위하여 개발부지내 30개소에서 Vane 시험을 수행하고 연약층 전반의 비배수 전단강도를 확인하기 위하여 30개소에서 CPTu 시험을 수행하였다.

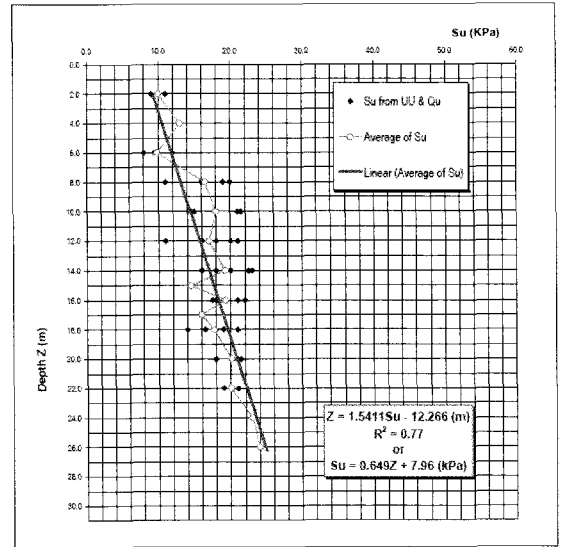


그림 11. 심도별 비배수전단강도 변화 (UU, $q_u/2$)

그리고 비배수 전단강도에 대한 실내시험(일축, UU, CU 시험)도 병행하여 실시하고 콘관입계수(N_{kt}) 결정에 이용하였다. Vane 시험은 ASTM D2573-94, CPTu 시험은 ASTM D5778에 근거하여 실시하였다. Vane 시험심도는 최대 20m 깊이까지 그리고 CPTu 시험시험심도는 최대 30m 깊이까지 수행이 가능하였다. 현장에서 구한 베인 전단강도는 베트남 기준(22TCN 262-2000)에 근거하여 소성 지수를 이용하는 Bjerrum 방법으로 보정하였다. 조사심도에 따른 베인 비배수전단강도의 변화는 그림 10과 같으며 심도(z)에 선형적으로 증가하는 회귀식을 얻을 수 있었다.

베인시험결과에서와 같이 부지내 표층부(3m이내) 전단강도가 평균 10kPa로서 강도측면에서 비교적 양호한 상태로 판단된다. 실내시험은 일축압축(25회), UU시험(42회)을 실시하였다. 비배수전단강도는 베인시험결과에 비하여 전반적으로 작게 나타났으며, 심도에 따른 비배수전단강도의 증가는 베인시험결과의 50% 수준으로 나타났다(그림 11 참조).

총 30회의 CPTu 시험결과를 통하여 나베부지 연약지반의 강도특성을 분석하고자 동일 위치에서 수행한 베인시험과 실내 압축전단시험결과를 이용하여 콘 관입계수(N_{kt})를 역산하여 비배수전단강도를 산정하였다. 통상적으로 국내 연약지반의 콘 관입계수는 7~15 범위내에 있는 것으

표 5. 나베부지의 콘관입 계수

콘 관입계수		UU 시험결과	베인시험결과
N _{kt}	범위	9.3 ~ 28.1	7.1 ~ 17.2
	평균	18.2	12.0

로 알려져 있다. UU 시험과 베인시험결과를 적용하여 산정한 콘관입계수는 표 5와 같다.

베인시험결과에 의한 콘관입계수가 UU 시험결과 보다 작게 나타났으며, 실내시험에서 시험기술자의 시험능력 부족에 따른 교란으로 인한 강도저하를 감안하고 현장시험 결과의 신뢰성을 고려하여 CPTu의 비배수전단강도 산정에 N_{kt} = 12를 적용하였다. 산정한 콘관입계수를 적용하여 심도별 CPTu 비배수전단강도를 나타내면 그림 12와 같다.

압밀진행에 따른 개량지반 강도의 증가율을 산정하여 재하중 공법 설계시 단계 성토고 및 지반안정해석에 적용하기 위하여 경험적인 상관식(소성지수 및 액성한계 고려), 실내시험(강도시험결과 고려) 및 현장시험(베인시험 및 CPTu 시험 고려) 결과를 이용하여 강도증가율(m)을 산정 후 편차가 크고 나베부지의 지반특성에 적용성이 낮은 적용방법은 최종 강도증가율 산정에서 제외하여 설계 신뢰

도를 향상하고자 하였다.

Skempton이 제안한 소성지수를 이용한 방법으로는 강도증가율이 0.25~0.37로 산정되었으며, Hansbo가 제안한 액성한계를 이용한 방법으로는 0.29~0.46으로 산정되었다. 현장 및 실내시험결과를 이용한 방법으로는 강도증가율이 0.15로 산정되어 경험식과 실내시험 및 현장시험결과를 종합적으로 분석한 결과, 강도증가율은 평균 0.25로 산정되어 설계에 적용하고자 한다.

6. 결론

GS건설은 Global Top 10을 향한 제2의 도약을 위하여 도전적인 해외사업의 일환으로 베트남 호치민시 나베에 100만평규모의 신도시 개발사업을 추진하고 있다. 현재 신도시 계획 승인을 앞두고 설계를 위한 부지 지반조사를 실시하여 현지 연약지반의 물리적, 공학적 특성을 분석하고 이를 설계에 적용하려고 한다. 조사결과, 나베지역의 연약지반의 압축지수는 국내 연안지역의 결과와 유사하며 압축지수를 추정할 수 있는 회귀식은 간극비를 고려함이 타당하리라 판단된다. 또한, 호치민 남부지역에 적합한 콘관입계수(N_{kt}) 및 강도증가율(m)을 제시할 수 있었다. 당시는 베트남 호치민지역에서 명품 신도시가 건설될 수 있도록 최선의 노력을 경주하고자 한다. 향후 베트남 지역에 많은 건설관련 업체들의 진출이 예상되는바, 본 고의 정보가 지반공학분야의 기술자에게 조금이나마 도움이 되기를 기대한다.

참고 문헌

1. GS건설 (2008. 08.) "나베부지조성공사 지반조사보고서"
2. G.L. Yoon, B.T. Kim, and S.S. Jeon, "Empirical Correlations of Compression Index for Marine Clay from Regression Analysis", Can. Geotech. J. Vol. 41, 1213-1221, 2004
3. Vietnam Standard "TCXD 245-2000", 2000
4. Vietnam Standard "22TCN 262-2000", 2000

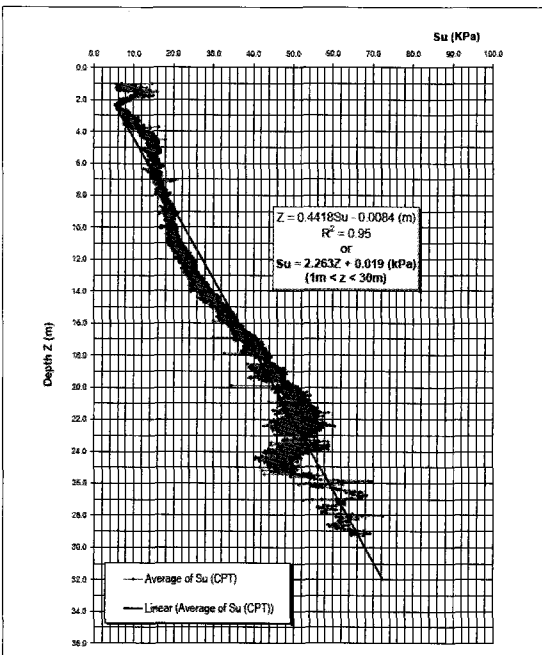


그림 12. 심도별 비배수전단강도 변화(N_{kt} = 12적용)