

베트남 하이퐁 지역의 완속성토에 따른 압밀거동특성 분석

Analysis of Consolidation Behavior Due to a Low Speed Filling in Hai Phong, Vietnam

권형석¹⁾, Hyung-Seok Kwon, 손창범²⁾, Changbum Sohn, 서원석³⁾, Won-Seok Seo, 황은아⁴⁾, Eun-Ah Hwang

¹⁾(주)EJtech 전무, 토질 및 기초 기술사, Executive Director, P.E., EJtech CO., Ltd.

²⁾(주)EJtech 연구원, Researcher, EJtech CO., Ltd.

³⁾GS 건설(주) 기술본부 지반팀 과장, Manager, GS E&C.

⁴⁾(주)미래지반 연구소 소장, 토질 및 기초 기술사, Research Director, P.E., Mirae Geotechnical Engineering Institute

SYNOPSIS : In this project, geological and geotechnical aspects of Haiphong in Vietnam have been studied. In Vietnam, the Truong Son belt and the Kontum Massif which were parts of the same Gondwana-derived Indochina continental block had been influenced by the Triassic Indosinian collision. This thermotectonic event occurred during the Lower Triassic 250-240-Ma time interval. By the structural and kinematic investigations, a consistent northwest-striking convergence of Indochina to the adjacent block resulted in the collisional process in the Indosinian metamorphic rocks. It means that this motion was followed by a pair of opposite subduction zones. In the geotechnical aspect, soil profile was developed for the soft soil treatment. Based on four different undrained shear strength tests - FVST, UU Test, SPT, and CPT - consolidation soil parameters have been developed. Also, it is explained how a low speed filling may influence on consolidation behavior. By using a one-dimensional consolidation analysis program, K-EMBANK v2.1, it is shown that a settlement rate becomes less as a rate of filling decreases.

Keywords : Initial undrained shear strength, Consolidation, UU test, Field Vane Shear Test, SPT, CPT

1. 서 론

본 논문에서는 베트남 하이퐁 7공구간 고속도로(Sta. 76+300~660)의 지질학적인 특성과 성토속도에 따른 압밀특성을 대표단면 Sta. 76+400에 대하여 소개하였다. 본 현장은 하노이-하이퐁 고속도로 중 하이퐁 시에 위치한 7공구이다 (그림 1). 베트남의 인도차이나 반도는 곤드와나에서 유래된 해안의 여러 지류에 의해 탄생하였다. 베트남의 지각 구조물은 트라이아스기와 제 3기 동안, 두 번의 대규모 충돌에 의해 형성되어 다양한 암질의 연속적인 사건에 의해 베트남 전역에 널리 분포되어 있다.

본 현장의 연약지반 분포 특성은 GL-19.10m 까지 매우 연약에서 연약한 점토층이 분포하고 연약지반 아래에는 매우 견고한 점토층 또는 보통에서 조밀한 모래로 구성되어 있다. 지하수위가 매우 높고 초기 성토기간 중 성토재료의 조달이 어려워 2010년 12월 30일 기준으로 성토개시 후 440일이 경과하였으며, 성토 완료 후 방치기간은 234일이었다. 이에 따른 압밀거동특성을 현장계측관리를 이용하여 측정분석하고, 수치해석프로그램(K-EMBANK v2.1)을 사용하여 1단계 성토에 따른 최종 침하량과 설계 예측치를 비교 분석하였다.

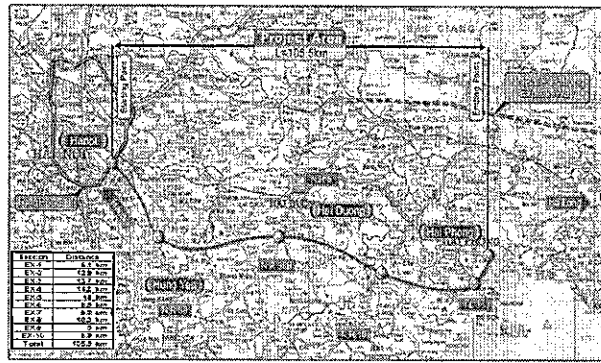


그림 1. 사업 위치

또한 Slope/w로 사면의 안정성 평가에 근거하여 2단계 성토에 대한 침하 해석을 실시하였다. 그 결과, 성토속도에 따른 침하속도를 예측하여 지반이 견딜 수 있는 허용범위 내에서 성토속도를 빠르게 하면 공사기간을 단축하고 잔류침하를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 베트남 하이퐁 시에 분포하는 연약지반의 특성을 지질학적인 측면과 현장 계측결과에 따른 압밀 및 침하특성을 함께 정리 소개하였다.

2. 지질학적 특성

인도차이나 반도는 곤드와나 (Gondwana)에서 유래되어져, 그림 2에서 보여지는 것 과 같이 펠리오테티안 (Palaeotethyan)해안의 여러 지류의 탄생에 의해 구체화된 지형이다. 북서쪽의 베트남에서는 널리 알려진 북서 방향의 송마 봉합대 (Song Ma Suture)가 남중국 반도의 양쯔지역의 경계를 정의하고 있다. 중남부의 베트남에서는 북쪽 주향의 포코 봉합대 (Po Ko Suture)가 인도차이나를 서부와 동부로 구분짓는다. 베트남의 지각 구조물은 트라이아스기와 제 3기동안 두 번의 대규모 충돌에 의하여 형성되었다. 인도지니아 (Indosinian)지각 구조물에 해당하는 첫 번째 충돌사건은 상부 트라이아스기 레드베드의 부정합에 의해 정의된다. 인도지니아 지각 구조물은 곤드와나에서 유래된 반도와 호상 열도 사이에 인접한 인도차이나 반도와 충돌에 의한 결과물로서 베트남 전역에 널리 분포되어 있다. 송마 봉합지역은 여러 북서쪽 주향 단층으로 구성되어 있다(그림 3). 서쪽방면으로는 송마 지역과 송다 단층에 의해 형성된 송다 구역이 제 3기에 발생한 디엔비엔 푸 (Dien Bien Phu)단층의 오른쪽 움직임에 의해 시계방향으로 형성되어있다(그림 4). 송마 지역의 축 단위는 송마와 함룡 형성물의 변성퇴적물에 의해 표시된다. 남쪽으로는 송마 단층에 의해 변성되지 않은 트라이아스 송마 화강암이 노출되어 있다. 그 화강암은 규선석-석류석 운모 편암과 각석암으로 구성된 변성의 수루 (Su Lu)형성층의 측면에 관입되어 있다. 서쪽으로는 이러한 관입 및 디엔비엔 화강암 작물 (Dien Bien Granite Complex)같은 것들이 상부 트라이아스기의 역암과 사암에 의해 부정합적으로 덮여있다. 북쪽 지역은 송마 북배사라 불리는 다양한 변성의 형성층으로 구성되어 있다. 송마 지역은 침입대로 널리 알려져있으며, 인도차이나와 남중국 사이의 트라이아스기 판 경계를 묘사하는데 도움이 된다. 송마 지역에서 250-240-Ma 시대에 하부 트라이아스기는 인도지니아 지각구조열 사건에 큰 영향을 끼쳤으며, 최근 HP 인도지니아에서 변성물의 발견은 대륙 지각의 침입 흔적으로서의 중요한 근거 자료가 되었다. 남 중국 아래 인도차이나에서 북쪽으로 하향하는 대양의 침입대는 이첩기 분출암이 송다 지역의 여러 장소에 분포되어 있다는 것을 보여준다. 그러나 이첩기 화산암에 대하여 송다 형성층을 제외하고 어떠한 화산호의 환경조성에 대해서도 언급되지 않지만, 유전적으로 화산암이 열개와 매우 깊은 관계가 있음을 의미한다. 그러므로 송마 지역에서 발생한 인도지니아의 완곡한 충돌 및 대륙의 침입이 대양의 침입 후 나타났다는 학설은 더 많은 연구에 의해 입증되어야 한다. 시대별 다양한 암질의 연속적인 사건들과 지질 구조에 대한 요약이 표 1 과 2에 설명되어 있다.



그림 2. 주요 봉합대를 포함하고 있는 인도차이나와 그 주변의 지각판 (Lepvrier et al., 2008)

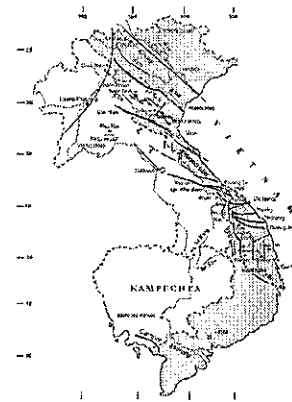


그림 3. 베트남의 주요 인도차이나 전단 및 암쇄 암화작용 지역 - 진한 점선선 부분 (Lepvrier et al., 2008)

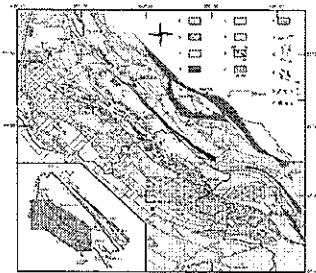


그림 4. 송마-송다 지역의 지질도 (Lepvrier et al., 2008)

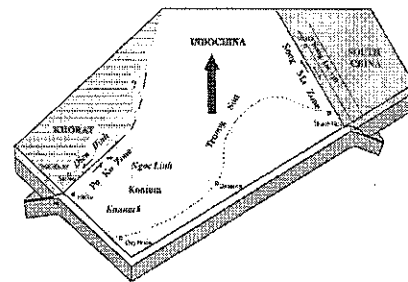


그림 5. 이첩기 후 트라이아스기 초기의 가상 판 구조 배열 (Lepvrier et al., 2008)

표 1. 베트남의 암질적 연대기

연 대		표 사
선캄브리아기		산성 편마암, 각섬암
고생대	캄브리아기 ~ 하부 데본기	편암, 사암, 셰일, 석회암, 이회토
	실루리아기 ~ 상부 데본기	셰일, 사암, 실트암, 석회암, 규질암, 편암
	석탄기	석회암, 협탄층
	석탄기 ~ 이첩기	석회암
	이첩기	화산-육원, 탄산염
중생대	이첩기 ~ 트라이아스기	화산암
	하부 ~ 중부 트라이아스기	해양의 사질 & 점토질의 퇴적물, 화산암
	중부 트라이아스기	역암, 화산암, 실트암, 이회토, 석회암
	상부 트라이아스기	협탄층, 석회암, 이회토, 셰일
	하부 ~ 중부 쥐라기	대륙 실트암, 점토암 & 해양의 셰일, 역암, 천연 숫돌, 사암
	상부 쥐라기 ~ 백악기	붉은 대륙 사암, 실트암, 역암
	상부 백악기	중발 잔류암, 실트암, 사암
신생대	제3기 ~ 하부 제4기	역암, 천연 숫돌, 실트암, 점토암, 현무암
	제4기	하상바위, 자갈, 모래, 실트, 현무암

표 2. 베트남의 지질학적 구조

연 대	구조 지역	요 사
선캄브리아기	베이카니안 (Baicanian)	라오스-미얀마 국경에서 발견되어진 매우 굴곡된 변성암. 화강암에 의해 크게 영향을 받음.
고생대 전	칼레도니아 (Caledonian)	세콩지역 내 습곡의 화산 퇴적물 형성.
고생대	헤르치니안 (Hercinian)	중앙 베트남과 중동부 라오스 내의 북서 방향의 습곡
이첩기 후 ~ 트라이아스기 전	인도지니안 (Indosinian)	북서부 라오스내의 광범위한 북동쪽 방향의 습곡.
상부 중생대 ~ 신생대 습곡 구조		비엔티안과 사파나 분지내의 증발 퇴적물과 상부 중생대 퇴적물의 습곡. 화산 활동과 연관 있는 볼로방(Boloven) 분지내의 더 강렬한 지각구조물.

3. 지반 조사

3.1 조사계획

지반조사에 대한 평가수행은 시공사의 기술적인 요건 및 베트남 또는 국제적 기준 (ASTM)에 근거하여 2009년 8월 31일부터 9월 4일까지 이루어졌다.

표 3. 지반조사 항목 및 수량

조사 항목		수량 및 내용	비고
현장 시험	시추 조사	· 사용장비: Driller XI-1(중국) · 시추반지름: 89mm · 베트남 기준(22TCN 259-2000)에 따른 회전식 천공법으로 벤토나이트를 사용한 샘플채취	총 40m
	SPT	20회	-
	Vane 시험	15회	
실내 시험	기본 물성 시험	6개 샘플 사용	
	1-D 압밀시험	2개 샘플 사용	
	비압밀 압축시험 (UC)	5개 샘플 사용	
	삼축 압축시험 UU)	2개 샘플 사용	

시추공 및 현장 베인 전단 시험에 대한 장소는 하이퐁 시의 안라오 구역에 위치한 하노이 하이퐁 고속도로 7공구내 Sta. 76+400에서 이루어졌다. 조사기간동안 작업수행은 건설업자 및 전문가에 의하여 검토되었다.

3.2 지층현황

조사 지역의 지층 분포는 표준관입시험 (SPT)과 시추조사의 문서 및 실내시험에 근거하여 수행되었다. 그 결과 다음과 같은 토양지층이 지표면에서부터 약 35m까지 분포되어 있다:

1. 뒤채움 층 (층 두께: 0.8m)

노란색을 띠는 회색의 자갈 및 굵은 입자의 모래가 분포함. 0.3에서 0.8m 까지는 짙은 회색의 작은 입

자 모래가 분포함.

2. 모래-SM (층 두께: 2.5m)

뒤채움 층 밑에 있는 지층으로서 작은 입자의 회색, 짙은 회색, 그리고 노란빛 회색의 실트질 모래가 분포함. $N_{30} = 3$ (blow/30cm)

3. 낮은 소성점토-CL (층 두께: 3.70m)

검은색, 짙은 회색의 실트질 점토로 주로 분포됨. 매우 연약함. 세일 및 유기물 포함. $0 < N_{30} < 1$ (blow/30cm)

4. 높은 소성점토-CH (층 두께: 12.10m)

이 토양층은 보링 주상도에서 최대 두께를 나타냄: 회색, 약간 갈색빛깔의 회색, 밝은 회색빛의 매우 연약한 점토로 분포됨. 세일과 유기물 포함. 가끔 밝은 회색빛의 작은 입자 모래를 포함. $N_{30} = 1 \div 3$ (blow/30cm)

5. 낮은 소성점토-CL (층 두께: 2.50m)

이 토양은 노란색 및 회색빛의 흰색으로 구성되어 있으며 매우 견고함. $N_{30} = 9$ (blow/30cm)

6. 점토성 모래-SC (층 두께: 2.40m)

주요 구성물은 풍부한 실트질이 함유된 노란색과 회색빛의 흰색을 띠는 미립의 모래로 분포됨. 대개 연약함. $N_{30} = 9$ (blow/30cm)

7. 낮은 소성 점토-CL (층 두께: 4.50m)

주요 구성물은 실트질의 노란색, 노란빛의 회색, 회색빛의 흰색을 띠는 견고한 점토임. 종종 검은 유기물 및 미립의 모래가 분포함. $N_{30} = 4 \div 9$ (blow/30cm)

8. 모래-SM

보링 주상도의 마지막 층임. 층 두께는 측정되지 않았으며, 노란빛을 띠는 회색, 회색빛을 띠는 흰색의 견고한 실트질 미립 모래로 분포됨. 종종 연약 점토와 검은 유기물을 포함. $N_{30} = 13 \div 21$ (blow/30cm)

베트남 기준 (TCXD 245-2000)에 따르면, 연약지반 구간은 표준관입시험 시, $N=5$ 이하로 정의된다. 앞의 토양 단면도에 근거하여, 약 2.5m에서 9m 높이의 성토 압력에 의해 영향을 많이 받게 되는 연약 지반층은 GL-19.10m 까지 분포하며 이를 2a 와 2b 토양층으로 정의하였다. 2a 토양층은 매우 연약에서 연약한 점토층으로 분포되며 2b는 보통에서 견고한 점토층으로 구성되어 있다. 연약 지반 아래에는 2c 토양층인 견고함에서 매우 견고한 점토층 혹은 3 토양층인 보통에서 조밀한 모래로 구성되어 있다. 이와 같이 하이퐁 지역의 지층분포는 매우 반복적인 점토 그리고 모래층으로 분포되어 있다. 연약 지반 아래의 2c층과 3 토양층은 하노이-하이퐁 7공구 간 연약지반의 안정성 평가에서 제외될 수 있는데, 그 이유로는 사면 안정에 대한 효과가 미미할 것으로 간주되기 때문이다.

4. 지반 특성

4.1 초기 비배수 전단강도

연약지반의 초기 비배수 전단강도 (C_o)는 현장 배인 전단시험 (FVST)과 비압밀 비배수 삼축시험 (UU)에 근거하여 평가되었다. 그러나 토양 조사결과에 따르면, 현장 배인 전단시험에서 얻어진 초기 비배수 전단강도는 토양 표면에서 10m 아래까지 비압밀 비배수 삼축시험에서의 값보다 2배에서 2.5배 이상 크게 나타났다. 이러한 이유로는 토적물의 세일 조각 또는 모래층의 영향으로 추정된다. 그러므로 보다 신뢰할 만한 초기 비배수 전단강도 값을 구하기 위하여 표준관입시험 (SPT)과 콘관입시험 (CPT)이 추가로 수행되었다. 각각의 시험으로부터 얻어진 N 값과 q_c 값으로부터 비배수 전단 강도 값이 다음과 같은 공식에 의하여 계산되었다.

$$C_o = \frac{N}{16} \times 100 (Kpa) \quad (1)$$

$$C_o = \frac{q_c - p_o}{N_k} \quad (2)$$

그림 6과 표 4는 각각의 4가지 시험으로부터 얻어진 초기 비배수 전단 강도 값을 비교하여 나타낸다. 이러한 분석을 바탕으로 다음과 같은 C_o 값이 설계를 위해 사용되었다.

- 2a 토양: $C_o = 1.8 \text{ ton/m}^2$ (0 ~ 8m), $C_o = 0.096z + 0.93$ (8m ~)
- 2b 토양: $C_o = 0.096z + 0.93$

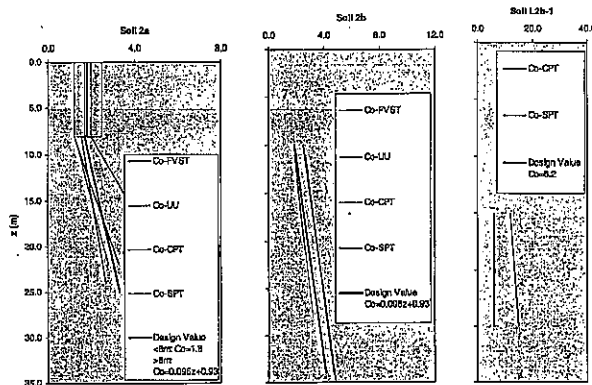


그림 6. 각 시험으로부터 얻어진 일반 비배수 전단강도 값의 요약

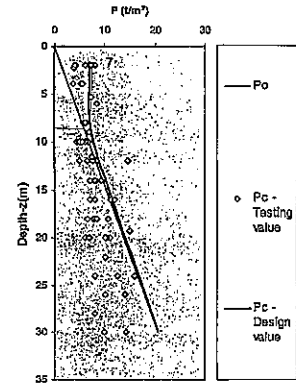


그림 7-1. 깊이에 따른 P_c 값의 다양한 분포

표 4. 시험으로부터의 일반 비배수 전단 강도(C_o) 값의 요약

시험 방법	일반 C_o 값 (ton/m^2)		
	2a 토양		2b 토양
	<8m	>8m	
FVST	2.5	$0.25z$	$0.2z + 1.3$
UU	1.8	$0.11z + 0.36$	$0.08z + 1$
CPT	2.0	$0.07z + 1$	$0.09z + 1.7$
SPT	1.2	$0.15z$	$0.096z + 1.54$

4.2 압밀 특성

압밀 특성 평가시험에서 깊이 (z)가 증가 할수록 압밀압의 분포는 다양한 양상을 나타내는데, 이것은 7공구간의 토적물이 지표면에서부터 약 8m정도까지 과압밀 ($P_c = 7 \text{ ton/m}^2$)상태가 되었다는 것을 의미한다. 8m 아래부터는 토양이 정상적으로 압밀되었다 (그림 7-1). 다른 여러 압밀 시험에서 또한 $e-p$, C_v-p , 그리고 $k-p$ 곡선모양 (그림 7-2~4)에 대한 다양한 변화가 나타났으며, 그 곡선에 근거하여 연약 지반 보완설계에 대한 적절한 토양의 압밀 특성 값에 대한 평가가 이루어졌다 (표5).

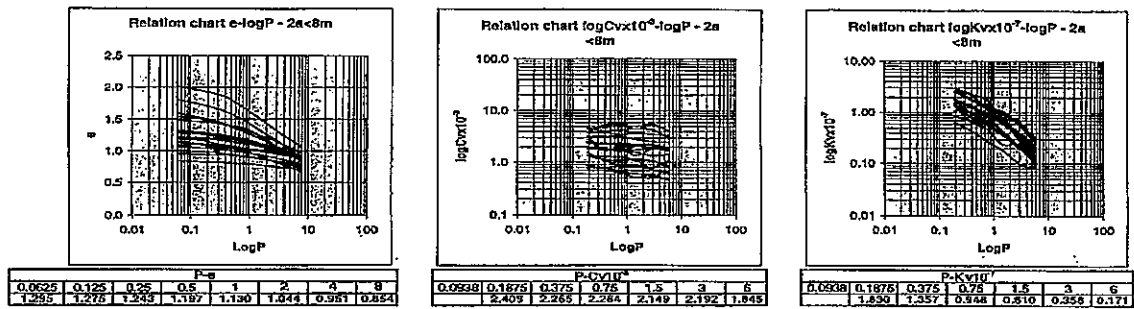


그림 7-2. 8m까지 2a 토양에 대한 시험 곡선: a) 압축지수 b) 압밀계수 c) 투수계수 곡선

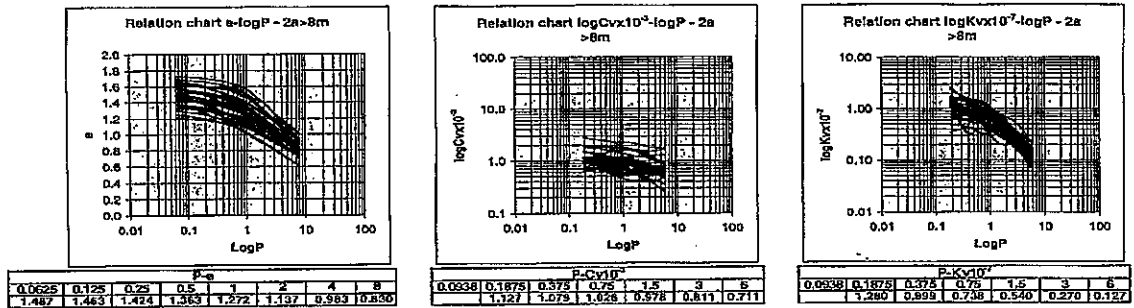


그림 7-3. 8m아래 2a 토양에 대한 시험 곡선: a) 압축지수 b) 압밀계수 c) 투수계수 곡선

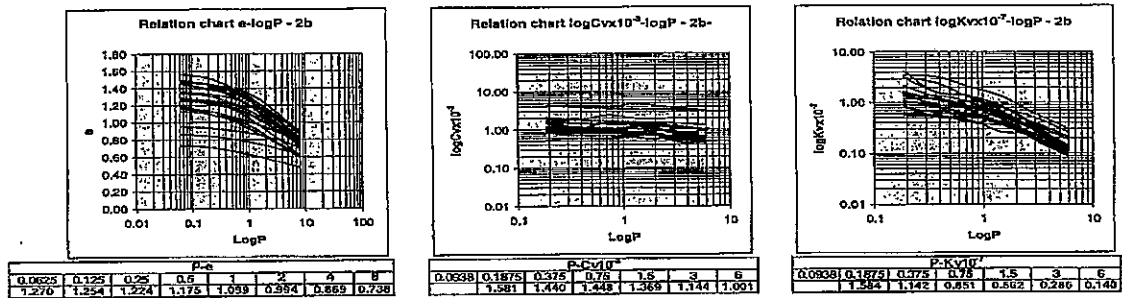


그림 7-4. 2b 토양에 대한 시험 곡선: a) 압축지수 b) 압밀계수 c) 투수계수 곡선

표 5. 연약지반 설계를 위한 토양 압밀 특성 요약

매개 변수	단위	2a 토양		2b 토양
		< 8m	> 8m	
γ	ton/m ³	1.72	1.67	1.72
Co	ton/m ²	1.80	0.096z+0.93	0.096z+0.93
ϕ	-	-	-	-
Cc	-	0.40	0.55	0.40
Cs	-	0.04	0.05	0.04
Pc	ton/m ²	7.00	-	-
OCR	-	2.80	1	1
N	-	-	-	-

5. 계측결과 분석

5.1 계측현황

성토의 높이에 따른 연약지반에 대한 침하량을 점검 및 관리하기 위하여 침하판, 수위관 측정계, 수위계, 경사계, 간극 수압계가 설치되었다 (그림 8). 침하판은 57 개가 설치되었으며, 수위관 측정계 및 수위계는 각각 3 개씩 설치되었고, 경사계와 간극 수압계는 7 개 와 6 개씩 설치되었다. 침하판은 베트남 현지에서 제작되었으며 일본 Topcon 회사의 측정기를 사용하였다. 침하판으로 성토기간동안 하루에 한번씩 계측을 수행하였으며, 압밀이 시작되고 한달동안 한주에 2번씩 수행하였으며, 두 달째부터 침하가 끝나는 시점까지는 한주에 한 번씩 수행하였고, 침하가 끝난 뒤는 한달에 한 번씩 수행하였다. 간극 수압계는 지반의 수압을 측정하는 장비로써, 압밀도를 분석하는 중요한 지표로 사용된다. 캐나다 RST 사의 측정기를 사용하고 국산 Casing을 이용하여 연약지반의 상부 (GL-4.2 m)와 하부 (GL-9.1m)부근에 간극 수압계를 설치하였으며, 초기 최대치 및 성토 하중에 따른 초기 과잉간극 수압과 현재 과잉간극 수압을 측정하였다.

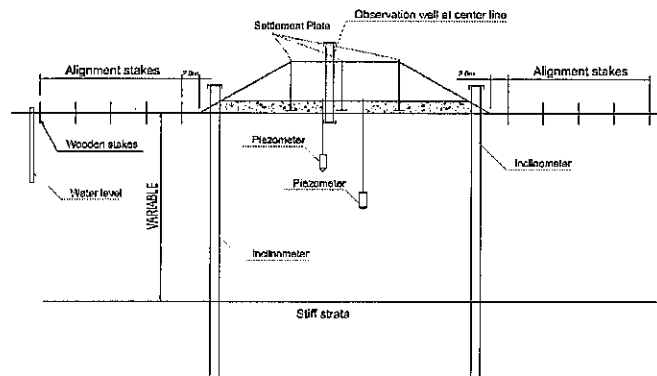


그림 8. 계측단면도

5.2 시공현황 및 계측결과

Sta. 76+400의 경우 지난 2009년 10월 17일 성토 후 2010년 05월 10일 1단계 성토를 완료하였는데 이때 성토의 높이는 최대 4.45 m 였다. 2010년 12월 30일 기준으로 성토개시 후 440일이 경과한 상태이며, 성토완료 후 방치기간은 234일이다. 표 4는 Sta. 76+400에 대한 시공현황을 요약적으로 설명하고 있다.

표 4. 시공현황

구분		성토개시일	성토완료일	성토고 (m)	초기침하량 (m)
Sta. 76+400	좌측	2009.10.17	2010.05.10	4.45	0.577
	중앙	2009.10.17	2010.05.10	4.45	0.839
	우측	2009.10.17	2010.05.10	4.45	0.631

침하를 예측하기 위하여 쌍곡선법과 Asaoka Method를 사용하였다. 쌍곡선법에 의한 침하분석결과 1 단계 성토에 따른 잔류침하량(압밀도)은 Sta. 76+400의 경우 좌측부 17.3 cm (78.9%), 중앙부 22.0 cm (83.5%), 우측부 17.8 cm (82.5%)로 나타났다 (그림 9). Asaoka Method에 의한 침하분석결과 1단계 성토에 따른 잔류침하량은 좌측부 3.7 cm (95.4%), 중앙부 4.3 cm (96.2%), 우측부 3.8 cm (95.6%)로 나타났다 (그림10).

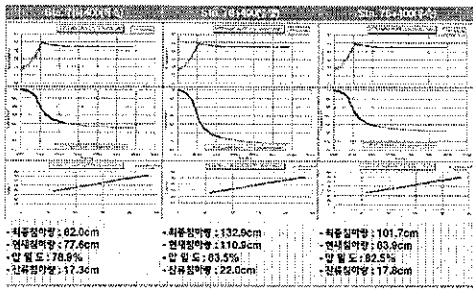


그림 9. Sta. 76+400 구간에 쌍곡선법을 이용한 침하량 및 압밀도 계산

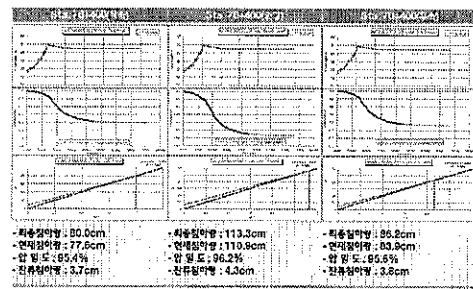


그림 10. Sta. 76+400 구간에 Asaoka Method를 이용한 침하량 및 압밀도 계산

표 5에서 보이듯이, 연약지반의 상부와 하부에 대하여 초기 최대치에 대한 압밀도와 성토하중에 대한 압밀도가 계산되었다. 초기 최대치에 대한 압밀도는 36.6%이고 성토하중에 대한 압밀도는 76.4%로 같은 연약지반의 상부에서 큰 차이를 보인다. 그 이유는 완속성토에 의하여 성토기간 중 과잉간극 수압이 소산되었기 때문이다. 또한 상부 점토의 중앙부에서는 성토하중에 대한 압밀도가 약 76.4%이므로, 평균 압밀도는 대략 80%이고 그에 따른 시간계수는 약 0.6으로 추정된다.

표 5. 간극수압 분석결과

설치심도 (EL, m)	1st P/L 완료일 (h=4.0m)	최종 계측일	초기과잉간극수압		현재 과잉 간극 수압	초기 최대치 에 의한 압밀도 (%)	성토 하중에 의한 압밀도 (%)	침하에 따른 압밀도 (%)
			초기 최대치 (t/m ²)	성토 하중 (t/m ²)				
상부	-4.2	10.05.10	10.08.02	2.68	7.2	1.70	36.6	76.4
하부	-9.1	10.05.10	10.08.02	3.34	7.2	0.40	88.0	94.4
								83.5

5.3 계측결과에 따른 역해석

5.3.1 1단계 성토에 대한 역해석

1단계 성토에 따른 설계침하량과 실측침하량을 비교 분석하기 위하여, 수치해석프로그램인 K-EMBANK v2.1을 사용하였다. 1단계 성토 기간 214 일을 적용한 결과, 설계 최종 침하량은 약 101.54 cm로 나타났으며 (그림 11), 쌍곡선법에 의한 실측 최종 침하량은 약 132.90 cm로 예측되었다 (그림 12). 이는 침하량과 침하속도가 차이가 있다는 것을 나타내며, 역해석을 실시하여 별도의 토질정수 재산정이 필요하다는 것을 의미한다 (그림 13).

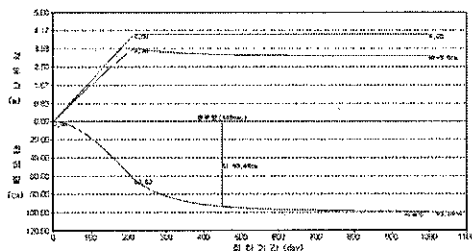


그림 11. 설계토질정수에 의한 1단계 침하량 예측 (1단계 성토기간 214일 적용)

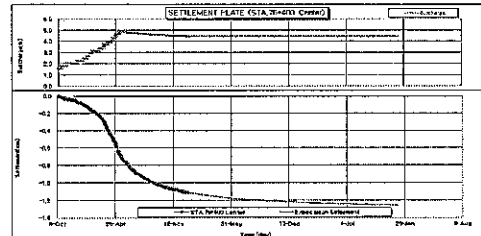


그림 12. 실측침하에 의한 1단계 침하량 예측 (쌍곡선법 적용)

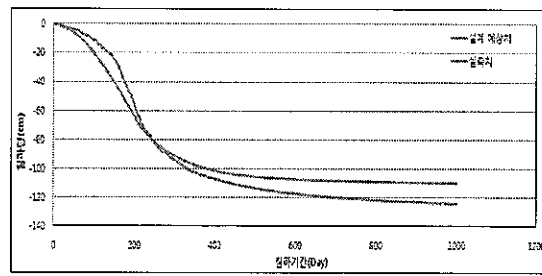


그림 13. 1단계 성토에 따른 설계침하량과 실측침하량의 비교

침하량을 보정하기 위하여 표 6과 같이 기존 Cc값을 19% 증가시킨 뒤 이를 보정하였고 침하속도를 보정하기 위해서 표 7과 같이 기존 Cv값에 대해 63% 감소시켜 적용하였다.

표 6. 침하량 압밀특성치 보정 값

구분	Layer 1	Layer 2	Layer 4	Layer 5
설 계	0.4	0.55	0.16	0.15
보 정	0.479	0.655	0.190	0.176

표 7. 침하속도 압밀특성치 보정 값

구분		P (Kgf/cm ²)					
		0.19	0.38	0.75	1.50	3.00	6.00
설 계	Layer 1	208.14	195.70	228.10	185.67	189.39	159.41
	Layer 2	37.37	93.23	88.65	84.50	70.07	61.43
	Layer 3	136.6	124.42	125.11	118.28	98.84	86.49
	Layer 4	290.74	268.27	271.73	257.47	237.17	207.36
	Layer 5	491.62	456.19	520.13	522.72	346.46	491.62
보 정	Layer 1	131.13	123.29	143.70	116.97	119.32	100.43
	Layer 2	61.34	58.73	55.85	53.24	44.14	38.70
	Layer 3	86.06	78.38	78.82	74.52	62.27	54.49
	Layer 4	183.17	169.01	171.19	162.21	149.42	130.64
	Layer 5	309.72	287.40	327.68	329.31	155.27	309.72

수치해석프로그램을 사용하여 침하곡선에 대하여 역해석한 결과, 실측 최종침하량과 역해석에 의한 최종 침하량은 132.90 cm로 동일하였다. 그러므로 역해석에 의한 침하곡선과 실측침하곡선이 매우 일치한다는 사실을 확인하였다 (그림 14, 15).

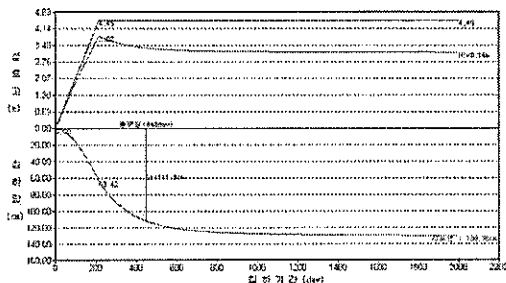


그림 14. 역해석한 결과 1단계 침하량 예측

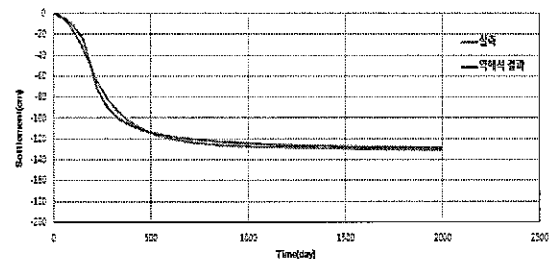


그림 15. 역해석에 따른 설계침하량과 실측침하량의 비교

5.3.2 2단계 성토시 안전성 검토

2단계 성토시 안전성을 검토하기 위하여 저면 Mat의 인장력을 검토하였다. 표층처리공법의 일종으로서 저면 Mat의 역할은 Drain 타입의 Trafficability 확보 및 복토 포설시 원지반과 복토층의 재료분리를 위하여 포설하는 것으로 저면 Mat 포설시 하부지반의 침하와 융기현상으로 인한 소성유동으로 인장응력이 저면 Mat에 발생한다. 또한 Drain 타설시 저면 Mat가 파손되어 Mat의 인장응력이 감소함에 따라 충분한 안전율을 감안하여 안정성 검토를 시행하여야 한다. Mat의 인장력에 대한 안전율은 복토 및 Drain 타입에 대하여 지지력을 확보하여야 하므로 장기적인 Creep, 화학적 및 생물학적인 안전율을 무시하고 포설시 손상에 대한 안전율을 적용하였다. 다시 말해서, Mat 포설시 안전율인 2.0과 Drain 타입으로 인한 Mat 파손 안전율 2.0을 적용하여 Mat의 전체적인 안전율을 4.0을 적용하여 검토하였다. 역해석에 의해 산정된 성토하중에 의한 지반 강도 증대효과를 적용하여 Slope/w로 사면의 안정성을 평가한 결과 점토층의 층 미분할시 안전율은 1.54, 점토층 분할시 안전율은 1.43으로 안전함으로 나타났다 (그림 16, 17).

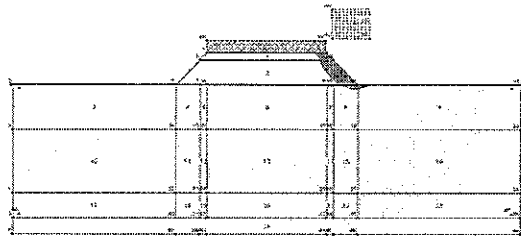


그림 16. 점토층의 층 미분할시 안전율은 1.54

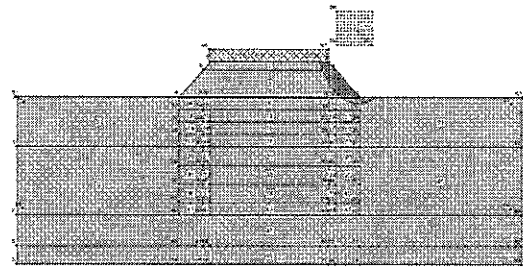


그림 17. 점토층의 층 분할시 안전율은 1.43

5.3.3 2단계 성토에 대한 침하해석

2단계 성토 개시일은 500일 제인 2011년 02월 20일에 이루어졌으며 527일 제인 2011년 03월 19일에 성토가 완료되었다 (그림 18). 공용하중 최종침하량은 F.G =5.16 m 기준으로 유지관리 기간동안 F.G를 유지할 수 있는 성토하중에 대한 침하량으로써 3회 반복계산을 실시하였다. 목표 침하량은 공용하중 최종침하량에서 허용 잔류침하량의 차이 값으로 계산되었다.

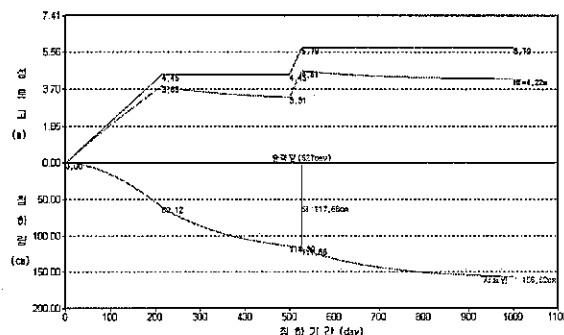


그림 18. 2단계 성토 개시 및 종료일에 따른 침하해석

표 8에서 보여지듯, 역해석에 의한 2단계 성토시점에 따른 침하량은 114.30 cm로, 성토가 실시되어 완료될 경우 교통하중을 고려하면 목표 침하량은 155.90 cm, 방치기간은 438일이며 목표압밀도는 94.2%로

매우 높게 평가되었다. 교통하중을 고려하지 않을 경우 목표침하량은 132.20 cm, 방치기간은 76일로 예측되며 목표압밀도는 79.9%로 평가되었다. 교통하중을 고려하지 않을 경우 설계 방치기간인 145일을 만족하기 위하여 1.3m의 추가성토가 가능하다.

위의 침하분석에 대한 결과에 근거하여, 성토속도가 빠를수록 침하속도는 증가하는 경향을 나타내므로 지반이 파괴되지 않는 범위 내에서 성토속도를 가능한 크게 하면 공사기간을 단축시킬 수 있고 성토 완성후의 잔류침하를 적게 할 수 있다고 결론지을 수 있다.

표 8. 2단계 성토에 대한 침하해석 결과 요약

구 분	2단계 성토시점 침하량 (cm)	2단계 최종 침하량 (cm)	공용하중 최종 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)	2단계 방치기간 (일)	목표 압밀도, U (%)	잔류 침하량 (cm)
해석결과 (교통하중 미고려)	114.30	165.52	152.20	132.20	76	79.9	33.32
해석결과 (교통하중 고려)	114.30	165.52	175.90	155.90	438	94.2	9.62
U = 90%	114.30	165.52	-	148.97	248	90.0	15.50
원설계	82.04	156.45	-	135.64	145	86.7	20.81

6. 결 론

본 논문에서는 베트남 하이퐁시의 지질학적 및 지반공학적인 측면에 대한 조사가 이루어졌다. 지질학적인 측면으로는 베트남의 압밀적 연대기 및 지질학적인 구조가 소개되었으며 지반공학적인 측면에서는 하이퐁 7공구의 지층현황 및 지반특성 그리고 침하를 예측하기 위하여 쌍곡선법과 Asaoka Method에 대한 소개가 이루어졌다. 또한, 완속성토에 따른 압밀거동특성을 설명하기 위하여, 계측결과에 대한 역해석을 수행하였다. 본 논문을 바탕으로 베트남 하이퐁시 지역의 연약지반에 대한 유용한 자료로 활용되기 바란다.

참고문헌

1. 김병탁, 김재성, 김용진. “베트남 호치민 나베지역의 연약지반 특성소개.” 한국지반공학회지. 25.2 (2009): 31-38.
2. Engineering Geology. 2583. Lao PDR: Asian Development Bank T.A., 1998. 7-1 ~ 6.
3. Holtz, Robert D., William D. Kovacs, and Thomas C. Sheahan. An Introduction to Geotechnical Engineering. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.
4. Lepvrier, Claude, Nguyen Van Vuong, Henri Maluski, Phan Truong Thi, and Tich Van Vu. “Indosinian tectonics in Vietnam.” Geoscience. (2008): 94-111. <www.sciencedirect.com>.
5. Report on Geoengineering Investigation. Hai Phong: Hai Phong Costruction Testing and Verification Center, 2009.
6. “Soft Soil Treatment Calculation Report.” Hanoi-Haiphong Expressway Project. I. Yooshin-KPT J.V., 2008.