

제방성토에 따른 연약지반의 측방변위와 연직변위의 상관관계 분석

Correlation between Lateral and Vertical Deformation of Soft Ground under Embankment

정하익¹⁾, Ha-Ik Chung, 진현식²⁾, Hyun-Sik Jin, 김경호³⁾, Kyung-Ho Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, KICT

³⁾ 한국토지공사 연구개발처 과장, Section Chief, Korea Land Corporation

SYNOPSIS : This paper starts with reviewing general patterns of deformation of the soft ground with by embankment. Correlation between lateral and vertical deformation of soft ground under embankment are analyzed and discussed by comparing the performance of the Yangsan test embankment on treated soft ground with vertical drains.

KEYWORDS : soft clay, artesian pressure, embankment, consolidation, Deformation

1. 서론

연약지반상에 성토 및 구조물 하중이 재하되는 경우 지중내에서 편재하중이 유발된다. 이로 인하여 기초지반은 압밀에 의한 침하 및 지반의 소성화에 의한 측방유동이 발생한다. 측방유동이란 연약지반상에 성토시공시 성토에 의한 편재하중이 하부지반에 작용할 경우, 저항력이 부족하여 성토층 하부 연약지반이 수평방향 압력을 받아 소성유동현상이 발생하는 것을 말한다. 이러한 측방유동은 성토 및 구조물의 안정과 침하거동에 큰 영향을 미칠 뿐 아니라 때에 따라서는 지구계 밖에 있는 다른 사람의 토지나 구조물에도 나쁜 영향을 미치기 때문에 그에 대한 대책이 매우 중요하다.

본 연구에서는 측방유동과 그에 따른 안정관리에 대한 거동을 규명하기 위하여 기존의 이론적인 배경을 조사하고, 연약지반에 성토 등의 상재하중이 가해지는 경우 발생하는 측방변형 또는 전단변형의 특성 및 전단변형이 침하량에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 양산시험시공 현장에서 계측된 자료를 이용하여 페이퍼드레인, 팩드레인, 메나드드레인 별로 각 연직배수공법의 종류에 따른 측방변위와 연직변위의 상관관계 및 측방변위체적과 연직변위체적의 상관관계를 분석하였다.

2. 지반조건 및 현장계측

2.1 지반조건

그림 1은 대표적인 지층구조 및 실내 시험에 의하여 산출된 각종 토질특성을 깊이별로 나타내고 있다. 상부층은 약간 과압밀상태를 보여주고 있으며, 8.0m이후 부터는 정규압밀형태를 보여주고 있다. 본 지역의 지층구조는 그림 5에서 보듯이 실트질 모래층, 점토층, 모래층 및 자갈층의 순으로 구성되어 있다. 실트질 모래층은 지표면 부근에 약 1.5m 정도의 두께로 분포하고 있으며, 농경지로 활용하기 위하여

인위적으로 성토된 지층이다. 그리고 점토층은 구하상퇴적층으로서 매우 연약한 연경도를 보인다. 전반적으로 색깔은 짙은 암회색이고 포화상태의 함수비를 나타내며, 두께는 약 30m로 거의 일정하게 분포하고 있다. 모래층은 하상퇴적층으로 세립질 모래로 구성되어 있으며, 두께는 3.5~5.0m내외로 나타나고 암회색을 띠고 있다. 자갈층은 하상퇴적층의 최하부이며 주 대수층을 형성하는 층으로 다량의 자갈에 의하여 높은 간극률을 보이는 지층에 해당되며 전반적으로 조밀내지는 견고한 지층이고, 흑갈색의 색조를 갖는 지층이다. 특히 점토층 아래에 있는 자갈·모래층에서 피압이 약 33kPa가 발생하고 있다.

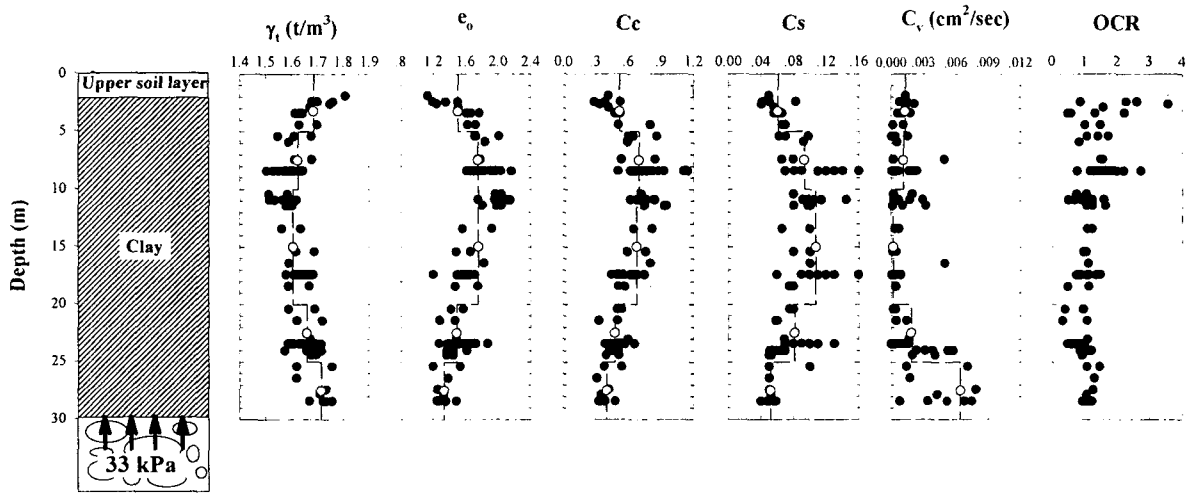


그림 1. 양산물금 지구의 대표적인 지반조건

2.2 현장계측

양산물금 시험시공구간에서 연직배수공법으로 처리된 연약지반상에 성토하중이 작용할 경우 성토기 초지반에 발생하는 측방변위의 계측을 위하여 그림 2와 같이 경사계(inclinometer)를 설치하였다. 경사계는 페이퍼드레인 구간 8개소, 메나드드레인 구간 4개소, 팩드레인 구간 4개소로 하였다. 페이퍼드레인 구간에는 장변의 3지점에 3개, 단변의 중앙부에 1개를 설치하였다. 그리고 팩드레인 및 메나드드레인 구간에는 4변의 중앙부에 1개씩을 설치하였다.

침하량 측정을 위한 전단면침하계(profilemeter)는 페이퍼드레인 구간에는 4번과 8번 계측점을 연결하여 설치하였고, 팩드레인 및 메나드드레인 구간에는 2번과 4번의 계측점을 연결하여 설치하였다. 경사계 및 침하계는 성토시작 이전에 설치하여 성토초기 단계부터 계측이 되도록 하였다.

측방변위 측정을 위하여 설치된 경사계는 그림 3와 같이 성토법면 기슭에서 바깥으로 5m 떨어진 지점에 위치하였다. 경사계를 성토법면 기슭밖으로 5m 떨어진 지점에 설치한 이유는 성토시공시에 경사계의 파손을 방지하기 위한 때문이다. 경사계의 설치깊이는 지중 약 45m 까지로 하였다. 본 연구대상 지역 점토층의 깊이는 평균 약 30m이었다. 제방성토는 2단계로 나뉘어 진행이 되었는데 1단계의 성토고는 5m이고 2단계의 성토고는 3m이었다.

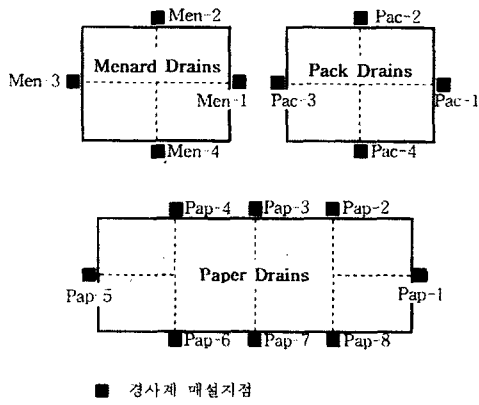


그림 2. 경사계 설치 평면도

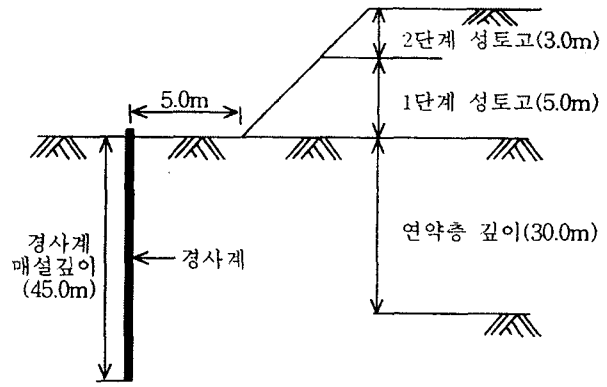


그림 3. 경사계 설치 단면도

3. 측방변위와 연직변위의 상관관계

3.1 측방변위와 연직변위의 상관관계

연약지반에 성토하중이 작용하게 되면 연직변위와 측방변위가 발생하게 된다. 이때 연직변위와 측방변위는 동일한 크기로 발생하지 않고 서로 다르게 발생하는데, 일반적으로 연직변위가 측방변위보다 크게 발생한다. 따라서 연직변위와 측방변위의 크기를 파악하는 것은 성토기초 연약지반의 거동해석 측면에서 매우 의미가 크다고 할 수 있다.

그림 4에 성토단계별 측방변위-연직변위의 상관관계를 도시하였다. 이를 토대로 하여 측방변위-연직변위 관계식을 표 1에 요약정리하였다. 그림 및 표에서 보는 바와 같이 1차 성토중에 해당되는 측방변위-연직변위의 평균 관계식은 페이퍼드레인, 메나드드레인 및 팩드레인구간별로 각각 $\delta_m = 0.20S - 3.24$, $\delta_m = 0.19S - 2.08$ 및 $\delta_m = 0.33S - 1.17$ 로 나타났다. 그리고 1차 성토 후에서 2차 성토직전인 압밀기간중에 해당되는 측방변위-연직변위의 평균 관계식은 페이퍼드레인, 메나드드레인 및 팩드레인구간별로 각각 $\delta_m = 0.04S + 17.01$, $\delta_m = 0.01S + 21.82$ 및 $\delta_m = 2.91S + 23.68$ 로 나타났다.

그리고 양상시험시공 전체구간에 대하여 1차 성토중에 해당되는 측방변위-연직변위의 평균 관계식은 $\delta_m = 0.24S - 2.16$ 이고, 1차 성토 후에서 2차 성토직전인 압밀기간중에 해당되는 측방변위-연직변위의 평균 관계식은 $\delta_m = 0.99S + 20.84$ 로 나타났다. 이로부터 성토하중에 의하여 발생하는 측방변위는 성토후의 압밀기간 보다는 성토가 진행되는 기간 중에 더 크게 발생함을 알 수 있다.

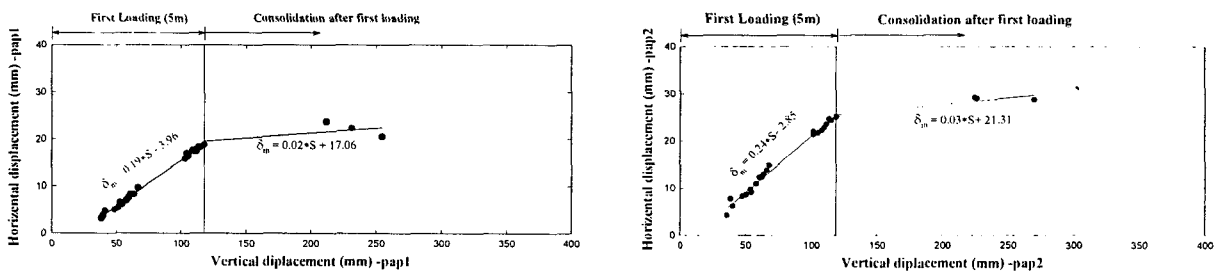


그림 4. 측방변위-연직변위의 관계

표 1. 전체구간에 대한 측방변위-연직변위 관계식 요약

구 간	관 계 식		비 고
	1차 성토중	1차 성토후 압밀기간	
페이퍼드레인	$\delta_m=0.20S-3.24$	$\delta_m=0.04S+17.01$	
팩드레인	$\delta_m=0.33S-1.17$	$\delta_m=2.91S+23.68$	
메나드드레인	$\delta_m=0.19S-2.08$	$\delta_m=0.01S+21.82$	
전 체 평 균	$\delta_m=0.24S-2.16$	$\delta_m=0.99S+20.84$	

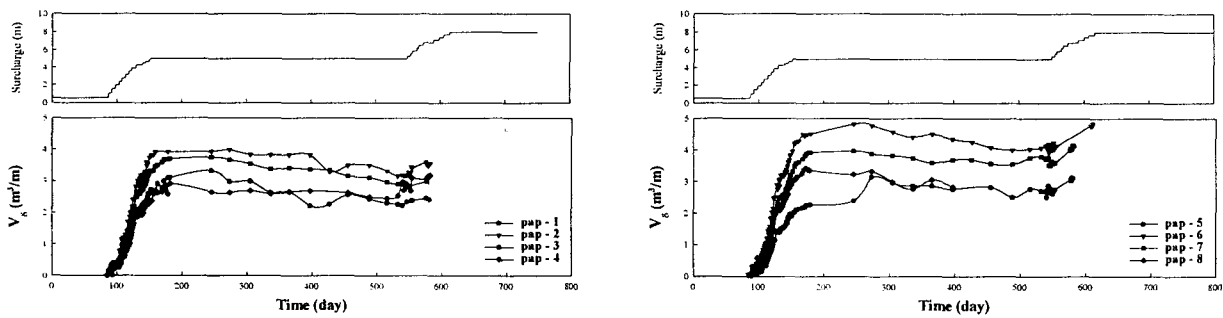
3.2 측방변위체적과 연직변위체적의 상관관계

(1) 성토단계별 측방변위체적

성토가 진행됨에 따라 연직변위 및 측방변위가 발생하게 되는데, 이들의 변위에 의하여 형성되는 지반체적을 연직변위체적(V_s) 및 측방변위체적(V_δ) 이라고 말한다. 성토가 진행됨에 따라 연직변위 및 측방변위가 변화하게 되므로 이에 따라 연직변위체적 및 측방변위체적도 변화하게 된다.

그림 5에 양산시험성토 구간의 성토단계별 측방변위체적을 도시하였다. 성토에 따른 측방변위체적을 살펴보면 1차 성토단계가 진행됨에 따라 측방변위체적이 급격하게 증가하게 되고 그 이후에는 매우 미미하게 증가하였다. 그리고 2차 성토단계에 들어서게 되면 다시 측방변위체적이 증가하였다.

이와 같이 성토단계가 진행되는 기간에는 측방변위체적이 급격하게 증가하게 되고 성토단계후 압밀 기간에는 미소하게 증가하였다.



(a) 페이퍼드레인 구간 (계측점 1, 2, 3, 4)

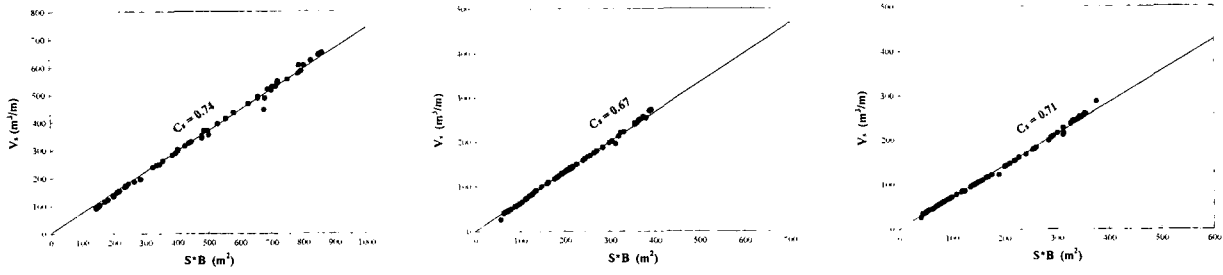
(b) 페이퍼드레인 구간 (계측점 5, 6, 7, 8)

그림 5. 성토에 따른 측방변위체적의 변화

(2) 연직변위량과 연직변위체적

기존의 연구결과에 의하면 성토가 진행됨에 따라 발생하는 연직변위량과 연직변위체적은 일정한 상관관계를 가지고 있다고 한다. 이를 살펴보기 위하여 양산시험 시공구간에 대하여 그림 6과 같이 성토 단계별로 연직변위량과 연직변위체적의 관계를 도시하였다. 여기에 제시된 연직변위량과 연직변위체적은 페이퍼드레인구간의 경우에는 계측점 4와 8의 전단면을 기준으로 하여 계측된 전단면침하계로부터 산정된 것이고, 팩드레인 및 메나드드레인구간의 경우에는 계측점 2와 4의 전단면을 기준으로 하여 계측된 전단면침하계로부터 산정된 것이다. 연직변위체적은 전단면침하계에서 계측된 침하량을 전체 성토 제방 폭에 대하여 적분하여 구하였다.

연직변위량과 연직변위체적의 상관관계식인 $V_s = C_s(S \cdot B)$ 에서 형상계수, C_s 의 크기는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 0.74, 0.71 및 0.67로 나타났고, 이의 평균치는 0.71로 나타났다. 따라서 양산시험 시공구간에 대한 연직변위체적은 최대침하량에 제방성토 폭을 곱한 체적의 71%가 됨을 알 수 있다.



(a) 페이퍼드레인 구간 (계측점 4와 8의 전단면 기준) (b) 팩드레인 구간 (계측점 2와 4의 전단면 기준) (c) 메나드드레인 구간 (계측점 2와 4의 전단면 기준)

그림 6. 연직변위량과 연직변위체적

(3) 측방변위량과 측방변위체적

기존의 연구결과에 의하면 성토가 진행됨에 따라 발생하는 측방변위량과 측방변위체적은 일정한 상관관계를 가지고 있다고 한다. 이를 살펴보기 위하여 양산시험 시공구간에 대하여 그림 7에 측방변위량과 측방변위체적의 관계를 도시하였다. 여기에 제시된 연직변위량과 연직변위체적은 페이퍼드레인 구간의 경우에는 계측점 4와 8의 전단면을 기준으로 한 것이고, 팩드레인 및 메나드드레인 구간의 경우에는 계측점 2와 4의 전단면을 기준으로 한 것이다.

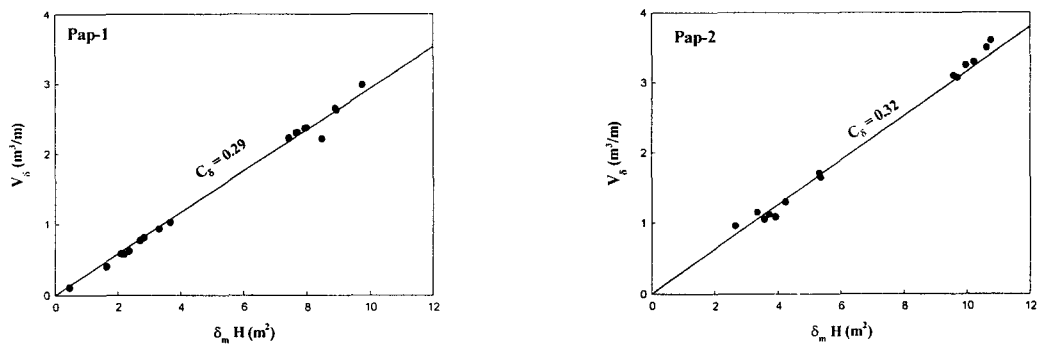


그림 7. 페이퍼드레인 구간의 측방변위와 측방변위체적

측방변위량과 측방변위체적의 상관관계식은 $V_\delta = C_\delta(2\delta_m \cdot H)$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서 측방변위체적인 V_δ 는 성토제방 중심을 대칭으로 하여 양쪽 기슭에서 발생한 측방변위체적을 더한 것이다. 양산시험 시공지역의 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간 내에 타설된 배수재는 설치간격이 구역별로 다르기 때문에 각 구간별로 마주 보게 설치된 경사계에서 계측된 측방변위값은 상호 대칭성이 있는 것이 아니고 독립적인 것이다. 따라서 그림 7를 도시하는데 있어서 측방변위체적 V_δ 는 각 계측점에 대한 측방변위체적을 두 배로 하여 사용하였다. 측방변위체적은 경사계에서 계측된 측방변위량을 점토층의 깊이에 대하여 적분하여 구하였다.

그림에서 측방변위체적 형상계수인 C_δ 의 크기는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로

각각 평균 0.30, 0.32 및 0.25로 나타났고, 다시 이의 전체 평균치는 0.29로 나타났다. 이로써 양산시시험시공 구간에 대한 측방변위와 측방변위체적의 형상계수 C_δ 는 평균 0.29인 것으로 평가되었으며, 이는 측방변위체적이 최대측방변위에 점토층의 깊이를 곱한 체적의 29%가 됨을 의미한다.

앞에서 언급된 연직변위체적의 형상계수가 평균 0.71인 것으로 나타났음을 상기할 때, 측방변위체적의 형상계수보다는 연직변위체적의 형상계수가 크게 나타났음을 알 수 있다.

표 2. 측방변위량과 측방변위체적의 상관관계식

구 간		관 계 식	구 간		관 계 식
페이퍼 드레인	pap-1	$V_\delta = 0.29 \cdot \delta_m \cdot H$	팩드레인	pac-1	$V_\delta = 0.15 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-2	$V_\delta = 0.32 \cdot \delta_m \cdot H$		pac-2	$V_\delta = 0.27 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-3	$V_\delta = 0.28 \cdot \delta_m \cdot H$		pac-3	$V_\delta = 0.27 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-4	$V_\delta = 0.43 \cdot \delta_m \cdot H$		pac-4	$V_\delta = 0.31 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-5	$V_\delta = 0.24 \cdot \delta_m \cdot H$	평 균	$V_\delta = 0.25 \cdot \delta_m \cdot H$	
	pap-6	$V_\delta = 0.22 \cdot \delta_m \cdot H$	메나드 드레인	men-1	$V_\delta = 0.29 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-7	$V_\delta = 0.30 \cdot \delta_m \cdot H$		men-2	$V_\delta = 0.32 \cdot \delta_m \cdot H$
	pap-8	$V_\delta = 0.33 \cdot \delta_m \cdot H$		men-3	$V_\delta = 0.33 \cdot \delta_m \cdot H$
평 균	$V_\delta = 0.30 \cdot \delta_m \cdot H$	men-4		$V_\delta = 0.32 \cdot \delta_m \cdot H$	
			평 균	$V_\delta = 0.32 \cdot \delta_m \cdot H$	
전 체 평 균	$V_\delta = 0.29 \cdot \delta_m \cdot H$				

범례) V_δ : 수평변위체적(m^3/m), δ_m : 최대측방변위(m), H: 점토층깊이(m)

δ_m 은 성토제방선단에서 외부로 5.0m 떨어진 지점에 설치된 경사계에서 측정된 최대측방변위임.

(4) 측방변위체적과 연직변위체적의 체적비

성토하중에 의하여 발생하는 지반변형을 표현하는 데에는 변형률, 변위 및 체적이라는 서로 다른 세 가지 형태를 생각할 수 있다. 그 가운데 체적개념을 생각해 볼 때 측방변위체적 V_δ 와 연직변위체적 V_s 의 관계는 전체 매체로서 기초지반의 변형 메카니즘, 특히 부분 배수의 정도를 파악하는 데에 참고자료가 될 수 있다.

양산시 시험 시공지역에서 1차 성토 중에 발생한 연직변위에 의한 체적변화(V_s)와 측방변위에 의한 체적변화(V_δ)의 크기를 성토단계에 따라 그림 8에 제시하였다. 여기에 도시된 연직변위체적은 전단면침하계에서 측정된 침하량을 성토제방 전체 폭에 대하여 적분하여 구한 것이고, 측방변위체적은 경사계에서 측정된 측방변위량을 점토층의 깊이에 대하여 적분하고 대칭되는 지점의 경사계에서 구한 것을 합산한 것이다.

여기에 제시된 표 및 그림에서 연직변위에

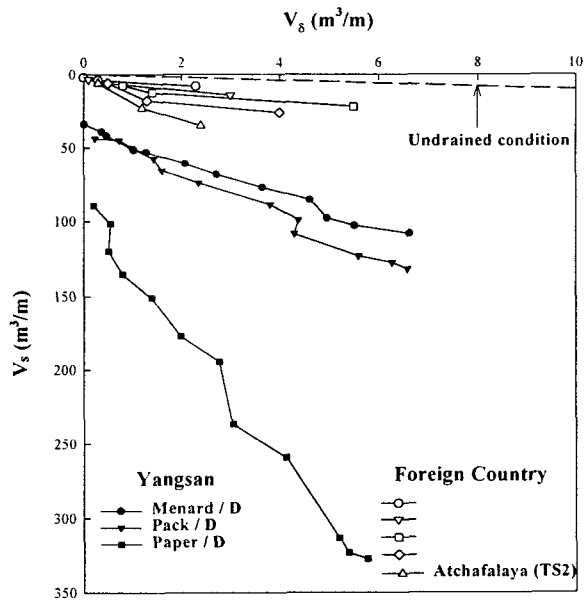


그림 8. 성토단계별 연직변위체적과 측방변위체적의 비교

의한 체적변화가 측방변형에 의한 체적변화보다 상당히 큼을 알 수 있다. 이 그림에서 점선은 완전 비배수($V_s=V_p$)를 나타내는데, 어느 성토에서나 점선과 크게 벗어나 $V_s \gg V_p$ 로 된다. 따라서 기초지반의 측방유동은 상당한 부분배수를 동반한다는 것을 잘 알 수 있다. 측방변위체적과 연직변위체적의 비율 $\Delta V_s/\Delta V_v$ 를 살펴보면 페이퍼드레인 구간의 경우에는 0.0023~0.0176, 팩드레인 구간의 경우에는 0.0055~0.0497, 메나드드레인 구간의 경우에는 0.0003~0.0611로 나타났다. 이의 평균치는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간의 경우 각각 0.011, 0.0328 및 0.0339로 나타났으며, 전체 구간의 평균치는 0.0259로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 양산시시험시공 현장을 대상으로 하여 측방변위와 연직변위의 상관관계 및 측방변위체적과 연직변위체적의 상관관계를 분석하였으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 제방기슭 외부 5m에 설치된 경사계로부터 계측된 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간의 최대측방변위량의 범위는 13.15~28.13cm, 27.14~54.27cm 및 19.74~25.34cm로 나타났고, 이의 평균치는 23.22cm, 36.98cm 및 23.04cm로 나타났다. 그리고 전체 구간에 대한 최대측방변위량의 범위는 13.15~54.27cm이고 이의 평균치는 27.75cm이었다.
- (2) 최대측방변위가 발생하는 지점의 범위는 지표에서 6.5~11.0m로 나타났다. 그리고 최대측방변위가 발생하는 지점을 깊이비로 살펴보면 점토층 깊이에 대하여 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 평균 0.276H, 0.255H 및 0.266H로 나타났고, 전체평균치는 0.267H로 나타났다.
- (3) 측방변위와 연직변위의 상관관계식은 1차 성토 중에는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 $\delta_m=0.20S-3.24$, $\delta_m=0.19S-2.08$ 및 $\delta_m=0.33S-1.17$ 로 나타났고, 이의 평균치는 $\delta_m=0.24S-2.16$ 로 나타났다. 그리고 1차 성토 후의 압밀기간에는 각각 $\delta_m=0.04S+17.01$, $\delta_m=0.01S+21.82$ 및 $\delta_m=2.91S+23.68$ 로 나타났고, 이의 평균치는 $\delta_m=0.99S+20.84$ 로 나타났다.
- (4) 연직변위량과 연직변위체적의 상관관계식인 $V_s=C_p(S \cdot B)$ 에서 형상계수 C_p 의 크기는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 0.74, 0.71 및 0.67로 나타났고, 전체 평균치는 0.71로 나타났다.
- (5) 측방변위량과 측방변위체적의 상관관계식인 $V_s=C_b(2\delta_m \cdot H)$ 에서 형상계수 C_b 의 크기는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 평균 0.30, 0.32 및 0.25로 나타났고, 전체 평균치는 0.29로 나타났다.
- (6) 측방변위체적과 연직변위체적의 체적비 $\Delta V_s/\Delta V_v$ 는 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인 구간별로 각각 0.011, 0.0328 및 0.0339로 나타났고, 전체 평균치는 0.0259로 나타났다.

참고문헌

1. 안종필, 홍원표(1994), 측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제10권 제2호, pp. 25~40.
2. 오다영(1992), 현장계측에 의한 압밀계수 산정 및 강도증가 예측기법에 관한 연구, 중앙대학교, 석사논문.
3. 이재훈, 홍성영(1995), 지반의 측방유동, 건설도서.
4. 정하익, 진현식, 진규남, 김달용(1999), 연약지반 성토시 전단변형에 의하여 유발된 즉시침하량의 산정, 연약지반처리위원회 '99학술세미나, 한국지반공학회, pp.78~83.

5. 정하익(1999), 연약지반의 측방유동 특성, 해안공간 개발을 위한 연약지반 처리기술, 한국건설기술연구원, pp.7~46.
6. 조성민(1998), 국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석, 박사학위 논문 서울대학교 대학원.
7. 조충봉(1994), 응용토질기초공학, 창우출판.
8. 최혁(1998), 연약지반의 측방변위에 관한 거동분석, 서울시립대학교, 석사논문.
9. 충북대학교 지반공학연구소(1998), 장항-서천간 도로확장 및 포장공사 시행에 따른 성토의 안정성 및 대책공법에 관한 연구보고서.
10. 한국토지공사(1997), 양산물금지구 시험시공연구공사 사전조사 보고서.
11. 한국토지공사(1996), 연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구-양산물금지구 연약지반 시험시공, 연구 96-7-22.
12. 한국토지공사(1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구 · II”
12. Chai J. C., Miura N., Bergado D. T., and Long P. V.(1997), Finite element analysis of embankment failure on soft subsoil, Geotechnical Engineering, Journal of Southeast Asian Geotechnical Society, Vol. 28, No. 2, pp 249~276.
13. Dai J., Zhang C., and Yuan W.(1996), A calculation method of immediate settlement caused by shear deformation, Proceedings of Second International Conference on Soft Soil Engineering, pp 820~825.
14. Hartlen J., and Wolski, W.(1996), Embankments on organic soils, Elsevier.
15. Lerouil S., Magnan J-P., and Tavenas, F.(1990), Embankments on soft clays, Ellis Horwood.
16. Travenas F. and Bouges M. F.(1979), Lateral displacement in clay foundation under embankments, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16. pp 532-550.
17. Tavenas F. and Leroueil, S.(1980), The behaviour of embankments on soft clay foundation, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp 236~260.
18. 關口秀雄, 柴田徹(1986), “軟弱地盤における側方流動”, 京都大學防災研究所年報, 第29號 B-2, pp. 62~82.