

연약지반상의 흩쌓기 안정관리 기법 개발

A Development of Embankment Stability Evaluation Method on Soft Foundation

김 정 선¹ Kim, Jeong-Seon
 장 용 채² Chang, Yong-Chai
 박 성 수³ Park, Sung-Su

Abstract

This study proposed a new embankment stability control method to analyze the measurement data on the slope activities of the soft ground, using the Stability Control Index (SCI) obtained from the $p-q$ stress paths. In order to validate this new technique, the data from triaxial compression tests (CU) and field measurement were compared. SCI is calculated from the current path of the effective stress points ($p' = p - \Delta u$) using the relative position between the Total Stress Path p_{max} and the point of k_f line p_f . From this result, the point of effective stress $p' (= p - \Delta u)$ will have access to the point p_f of k_f line when the pore water pressure occurs or the point of total stress pass p'_{max} when the pore pressure dissipates. Thus, the Stability Control Index (SCI) can evaluate quantitatively the safety of embankment from the relative position of the effective stress path.

요 지

본 연구는 연약지반현장의 사면활동에 관한 계측자료를 분석하여, $p-q$ 응력경로에서 얻은 안정관리지수(Stability Control Index, SCI)를 이용한 새로운 성토체의 안정관리기법을 제안하고자 한다. 여기서는 이와 같은 새로운 기법을 검증하기 위하여 삼축압축시험(CU)을 실시하여 현장 계측자료와 상호 비교 검토하였다. 안정관리지수(SCI)는 응력경로에서 전응력경로점 p_{max} 와 k_f 선상의 점 p_f 사이의 상대적인 위치를 이용하여 현재의 유효응력경로점 ($p' = p - \Delta u$)으로부터 얻은 값이다. 이와 같은 결과로 유효응력점 $p' (= p - \Delta u)$ 는 간극수압이 발생될 때는 k_f 선상의 점인 p_f , 간극수압이 소산될 때는 전응력점인 p'_{max} 에 접근할 것이다. 따라서 안정관리지수(SCI)는 유효응력경로점의 상대적인 위치로부터 성토체의 안정상태를 정량적으로 평가할 수 있다.

Keywords : SCI, Stress pass, p_{max} , $p' = p - \Delta u$

1. 서 론

연약지반에서의 성토 시 지반활동을 방지하려는 노

력을 기울이고 있으나 현장에서는 지반활동이 여전히 빈번하게 발생하고 있다. 그 이유는 지금까지 지반파괴를 예측하는 방법이 지반 변위를 계측 분석하여 예측하

1 정회원, 나주시청 경제건설국장 (Member, Director of General of Economic & Construction, Naju City)
 2 정회원, 목포해양대학교 해양플랜트건설공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Ocean Plant Civil Eng., Mokpo National Maritime Univ., Tel: +82-61-240-7311, Fax: +82-61-240-7341, geo@mmu.ac.kr, 교신저자)
 3 정회원, (주)삼안 토질부 이사대우 (Member, Director, Dept., of Soil Saman Co.)
 * 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 방법으로 실제 지반활동이 변위발생과 동시에 활동 파괴가 발생할 때가 많아 현장에서는 지반활동의 방지에 많은 어려움이 있다(Chang, 1995).

본 연구에서는 실제현장의 자료를 이용하여 $p-q$ 응력 경로에 의한 안정관리지수(Stability Control Index, SCI)를 제안하고 이를 검증하기 위하여 삼축압축시험(CU)을 실시하여 비교 검토하였다. 안정관리지수(SCI)는 응력경로(Stress Path)에서 현재의 유효응력경로점이 전 응력경로점인 p_{max} 와 k_f 선상의 점인 p_f 사이의 상대적인 위치를 이용하여 구한 지수이다. 간극수압 발생 시 유효 응력점인 $p(= p - \Delta u)$ 은 k_f 선상의 점인 p_f 에 도달될 수 있으며, 간극수압이 소산되어 압밀이 진행될 경우 p' 은 전응력점인 p'_{max} 에 접근할 것이다. 따라서 안정관리지수(SCI)는 응력경로점의 상대적인 위치를 표시하여 안정상태를 정량적으로 평가할 수 있다.

현장에서 채취한 시료와 계측자료는 삼축압축시험의 압밀비배수(CU)시험을 이용하여 $p-q$ 응력경로(Stress Path)상에 파괴기준선(k_f)을 선정하고 간극수압계, 경사계, 층별침하계 등에서 계측기를 통해 구득한 자료를 이용하여 제체의 안정성을 분석한다. 또한 성토고 증가에 의한 연직응력의 증분과 이로 인해 발생하는 간극수압을 측정하고 이를 응력경로상의 $p-q$ 응력점에 도시하여 이 응력점이 파괴기준선(k_f)에 접근할 때 지반의 침하량, 측방변위량과 변위형태를 연구하였다(Chung et al., 2003).

분석결과 $p-q$ 다이어그램의 간극수압계를 이용한 유효응력 경로(Effective Stress Path, ESP)가 파괴기준선(K_f)에 접근 시에는 수평변위가 급격히 발생하여 불안정적으로 접근하며, 이는 간극수압계를 이용한 유효응력경로(ESP) 관계를 잘 분석하면 성토 과정중에 발생하는 변위관계로부터 구한 기존의 연약지반 성토관리 방법보다 더욱 효율적인 연약지반 성토관리 기법이 될 수 있음을 알 수 있다(Chun et al., 2011).

2. 안정관리지수(SCI)에 의한 측방유동 평가법

2.1 기존의 안정관리 평가법

기존의 성토체 안정관리는 성토체 중앙부 침하량(S)과 성토법면의 수평변위량(δ) 및 성토하중(q)을 이용하여 관리한다(Korean Geotechnical Society, 2005).

S- δ 관리도법(富永Tominaga, 橋本Hashimoto)에 의한

관리기법은 성토 중앙부의 침하량 S와 성토사면 선단의 수평변위량 δ 의 관계를 나타내어 측방유동 가능여부를 판단한다. S- δ 관리도법처럼 성토고가 낮아 안정한 구간에서는 직선적인 관계에 있지만 성토고가 높아져 불안정하게 되면 δ 의 증가가 S에 비해서 상대적으로 커지게 되는 현상을 이용하였다.

S- δ /S 관리도 방법(松尾Kurihara, 川村Ichimoto)은 성토 중앙부의 침하량 S를 종축으로 하고, 성토사면 선단의 수평변위 δ 를 이용하여 δ /S를 횡축으로 해서 정리한 결과, 파괴는 일정한 곡선 부근에서 발생함이 보고되었다. Lambe는 응력경로(Stress Path)에 의한 안전관리 방법을 제안하였다. 이 방법은 구조물 아래 지반내의 한 점 또는 여러점을 선정하여 구조물 재하에 따라 발생하는 응력경로를 추정하여 실내시험에 의해 응력경로를 그릴 것이다(Lambe, 1979).

본 연구에서 제안한 안정관리지수는 현장계측기 즉 간극수압계 측정자료를 직접 응력경로점에 표시할 수 있는 논리를 제공 하였을 뿐만 아니라 K_f 선과 K_o 선 사이에 위치를 위치좌표로 세분하여 도시하여 안정관리 지수로 정량화하고 이를 위험, 불안정, 안정구역으로 구분하여 관리하였다.

2.2 안정관리지수에 의한 측방유동 평가법

연약지반위상에서 성토가 이루어짐에 따라서 지반내 모든 점들에서의 응력은 변화하게 되며 지반 내 임의의 점에서 안정관리지수를 구할 수 있게 된다.

본 해석을 하기위하여 Fig. 1에 제시한 조건을 중심으로 측방유동 평가법을 검토하면 다음과 같다. 해석에 사용되는 응력은 유효응력이며, 또한 과잉간극수압을 사용하게 되는데, 현장측정의 간극수압에서 정수압을 감하여 식 (1)과 같이 과잉간극수압을 계산하였다.

$$\Delta u = u - r_w \cdot z \quad (1)$$

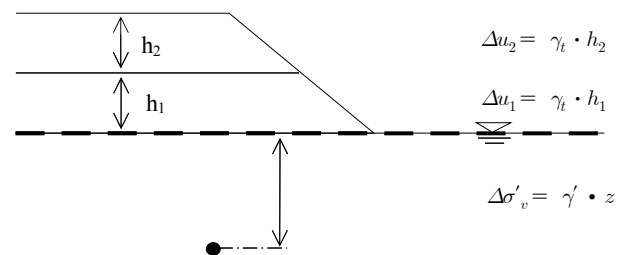


Fig. 1. Vertical stress under embankment

h_1, h_2 등 단계적 성토가 진행되므로 성토가 h_1 만큼 진행된 경우 지표아래 임의의 점에서의 수직 수평응력을 구하는 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\sigma'_v = r_t \cdot h_1 + r' \cdot z \quad (2)$$

$$\sigma'_h = K(r_t \cdot h_1 + r' \cdot z) \quad (3)$$

여기서, K 는 토압계수로서 응력을 구하고자하는 점의 위치에 따라서 그 값이 달라진다. 과잉간극수압 Δu 는 성토높이 h 와 시간 t 의 함수비로 그 관계는 다음 식과 같다.

$$\Delta u = f(h, t) \quad (4)$$

지중의 한 점에서 발생하는 과잉간극수압은 초기에는 성토체의 하중이 그대로 전달되는 것으로 판단하였다. 즉, 윗 식에서 $t=0$ 이면, $\Delta u = r_t \cdot h$ 가 되며 $t=\infty$ 가 되면 과잉간극수압은 완전히 소산되어 0이 될 것이다. 식 (3)에서 토압계수를 적용하는데는 고려대상의 한 점의 위치가 성토체 중앙에 있는지, 가장자리에 있는지에 따라 토압계수의 적용이 달라진다. 즉, 중앙에 있는 경우는 $K=K_0$ 를 사용하고, 가장자리에 있는 경우에는 $K=K_a$ 를 사용하는데, 본 연구에서 간극수압 예측기가 매설된 지점은 중앙으로 판단하여 $K=K_0$ 를 사용키로 하였다. 따라서, 초기 수평응력과 수직응력을 다음과 같이 구한다.

$$\sigma'_v = r' \cdot z \quad (5)$$

$$\sigma'_h = K_0 \cdot r' \cdot z \quad (6)$$

상기 응력들을 가지고 초기 p_0', q_0' 좌표를 구하면 다음과 같다.

$$p_0' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{r' \cdot z + k_0 \cdot r' \cdot z}{2} \quad (7)$$

$$q_0' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2} = \frac{r' \cdot z - k_0 \cdot r' \cdot z}{2} \quad (8)$$

성토높이가 h_1 만큼 재하되면 초기과잉간극수압 $\Delta u_1 = r_t \cdot h_1$ 이 된다. 그러나, 시간이 무한대가 되어 과잉간극수압이 완전히 소산하게 되면, $\Delta u_1 = 0$ 로 될 것이다. 아래 식은 식 (2)와 (3)에 $\Delta u_1 = 0$ 를 대입하여 정리한 것이다.

$$\sigma'_v = r_t \cdot h_1 + r' \cdot z \quad (9)$$

$$\sigma'_h = K_0(r_t \cdot h_1 + r' \cdot z) \quad (10)$$

상기 두 식을 가지고 Fig. 2에 도시된 TSP(Total Stress Path)응력경로상의 한 점인 p'_{max} 를 구하면 다음식이 된다.

$$p'_{max} = \frac{(r' \cdot z + r_t \cdot h_1) + k_0(r' \cdot z + r_t \cdot h_1)}{2} \quad (11)$$

임의의 시간 t 에서의 p' 값은 p'_{max} 에서 과잉간극수압 Δu 를 뺀 값으로서 다음식으로 구한다.

$$p' = p'_{max} - \Delta u \quad (12)$$

성토높이 h_1 에서 q' 값은 다음과 같다.

$$q'_1 = \frac{(r' \cdot z + r_t \cdot h_1) - k_0(r' \cdot z + r_t \cdot h_1)}{2} \quad (13)$$

q' 값은 과잉간극수압의 크기에는 무관하며 언제나 일정하다. 그러나, 성토 높이 h_1 이 달라지면 그만큼 커지게 된다. 성토높이 h_1 에 대해 q'_1 값이 결정되면 일정한 q'_1 을 가진 수평선상의 선에서 파괴포락선 K_f 와 만나는 파괴점의 p'_j 를 아래식으로 구할 수 있게 된다.

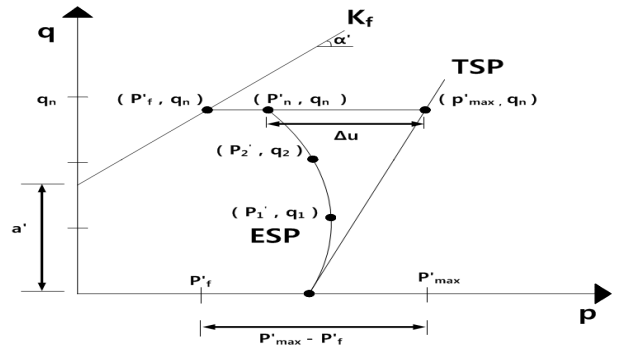


Fig. 2. Stability Control Index (SCI) of p - q diagram

$$p'_f = \frac{q'_1 - a'}{\tan \alpha'} \quad (14)$$

여기서, q'_1 은 성토높이 h_1 일 때, 축차응력에 해당하며, a' 는 $p-q$ 좌표에서 그려지는 파괴포락선의 절편에 해당되는 값이다. 그리고 α' 는 $p-q$ 좌표상의 파괴포락선의 기울기에 해당한다.

따라서, 임의의 높이 h_1 만큼 성토를 했을 경우에 안정관리지수(SCI)를 구하는 식은 아래와 같다.

$$SCI = \frac{p' - p'_f}{p'_{\max} - p'_f} \quad (15)$$

3. 현장계측 자료 분석

3.1 연약지반 분포

본 연구대상 지역은 영산강을 끼고 있는 신도시 개발 현장으로 연약지반의 분포현황은 Fig. 3과 같으며 연약지반의 두께는 평균 15m 최고 25m까지 분포하며 남창천 방향, 그리고 영산강 방향으로 갈수록 연약층의 두께가 깊어지고, 대죽도를 중심으로 대죽도 좌측보다 우측의 연약층 두께가 다소 깊어진다.

영산강 하구언의 연약지반에 분포하는 퇴적 점성토는 통일분류상 CL~CH이며, 소성상태는 중간소성상태로 나타나고 있다.

3.2 지반특성

연구대상지역의 지반조건은 Fig. 4에서 같이 지표면으로부터 표토층 해성점토층, 모래질 자갈층의 순으로 구성되어 있다. 해성퇴적층은 15~25m의 두께로 분포하고 있으며 N치는 0~2의 범위를 보이고 있다. Fig. 4에서 Intensive표식은 집중관리지역이며 General 표식은 일반관리지역이다. 연구대상지역의 토질은 주로 CL~CH의 점토층으로 구성되어 있다.

해성점토층의 자연함수비(w_n)는 평균 56.1%이며 소성한계(PL) 28.6%, 액성한계(LL) 49.5%로서 대부분 자연함수비가 액성한계를 초과하여 연약한 상태이다. 간극비(e_o)는 심도에 따라 감소하는 경향을 보이며 평균값은 1.562이다. 간극비와 연관된 점토층의 단위체적중량(γ_t)은 1.510~1.781t/m³의 범위를 보이며, 그 값의 평균은 1.634t/m³로서 심도의 증가에 따라 증가한다. 비배수 전단강도는 삼축압축시험(UU-Test) 결과 0.117~0.4 kg/cm² 범위이며 심도에 따라 다소 증가하는 경향을 보

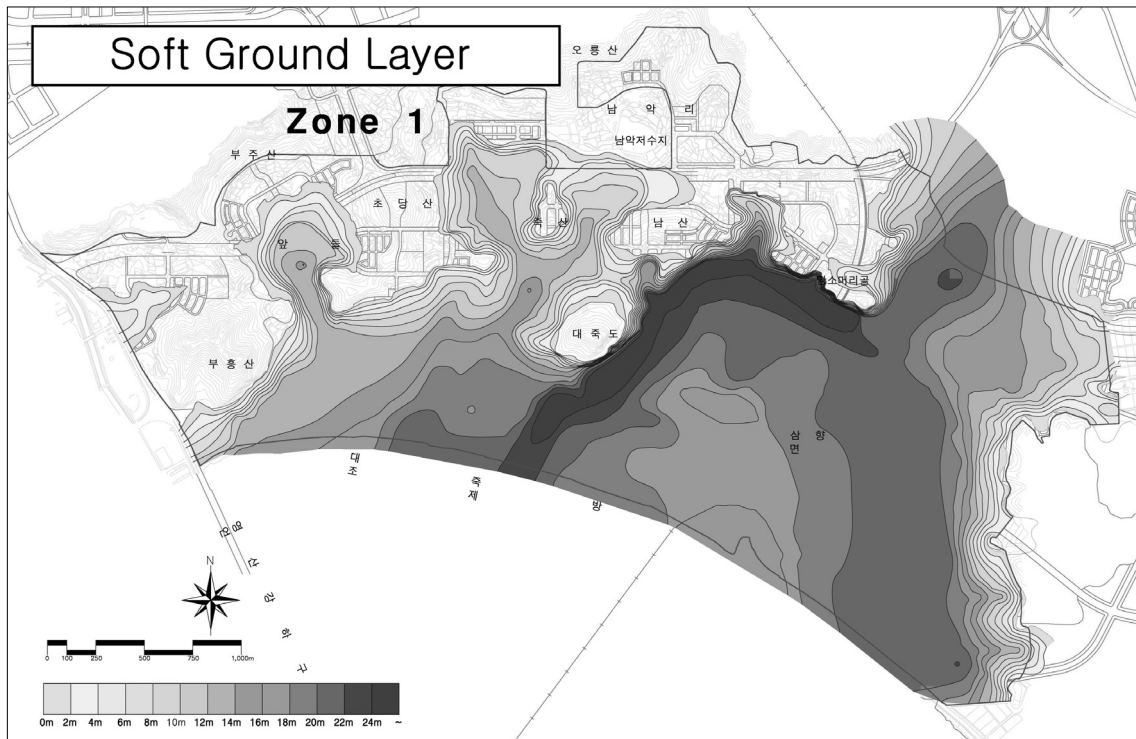


Fig. 3. Distribution map of soft foundation around Yongsan river

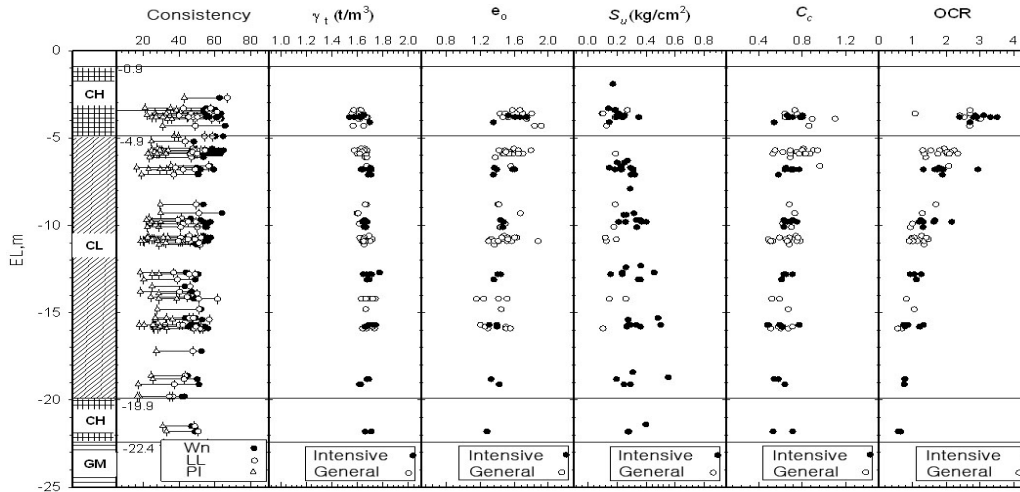


Fig. 4. Distribution map of soft layer

Table 1. Date and process of embankment

Embankment Date	Embankment Height (m)		Period	Remark
	Total Height	Additional Height		
06.12. 11	0.79	0.79	63	
07. 2. 12	1.84	1.05	30	
07. 3. 14	3.55	1.71	26	
07. 4. 9	6.02	2.47	7	Tension Crack
07. 4. 16	6.4	0.38	8	Sliding
07. 4. 24	4.80	-1.60	48	
07. 6. 11	6.15	1.35	232	
08. 1. 29	7.14	0.99	322	

이며 평균은 0.244kg/cm^2 이다. 지반의 응력이력을 나타내는 과압밀비(OCR)는 심도 EL:-3.6m에서 OCR=2가 되어 과압밀 상태가 되며 심도 EL:-10.6m에서 OCR=1이 되어 정규압밀상태가 된다. 과압밀비(OCR)를 기준으로 점성토층의 압밀이력을 분석하여 보면 심도 EL:-10.6를 기준으로 상부는 과압밀 상태, 하부는 정규압밀상태로 추정된다. 압축지수(C_c)는 압밀침하량을 결정하는 중요한 요소로 0.48~1.10의 범위에 있으며 평균은 0.73이 된다.

3.3 성토현황

연구대상 지역의 성토현황을 정리하면 다음과 같다. 최초 성토는 06년 12월 11일 높이 0.79m를 시작하여 실시하였으며, 07년 4월 16일에 총성토고 6.4m가 되었을 때 사면활동현상이 목격되어 1.6m를 제거하여 총성토고 4.8m 유지한 상태에서 08월 1월 29일에 최종성토 7.14m를 실시하였다

3.4 계측분석

침하특성을 파악하기 위한 지중침하계는 침하측정소자인 SM(Spider Magnetic Sensor, SM)를 총 23m 두께인 연약지반을 5.0m 간격으로 나누어 설치하였다. Fig. 7와 같이 연약층 최상부 0.0~5.0m 두께에 SM1, 5.0~10.0m 두께에 SM2, 그 하부 연약층 10.0~15.0m 두께에 SM3 최하부 연약층 15.0~23.0m 깊이에 SM4를 설치하였으며 하부지지층에 기준소자 RM(Ring Magnetic Sensor, RM)을 근입 설치하였다.

본 현장에 설치한 진동현식 간극수압계는 일정깊이 이상으로 관입하여 점토의 교란이 최소화되도록 매설하였다. 본 계측기는 정확도:±0.05%를 갖는다. PP1은 심도 2.5m, PP2는 심도 7.5m, PP3는 심도 12.5m PP4는 17.5m의 심도에 매설하여 침하 및 변형 시 간극수압의 변화를 측정하여 경시변화 및 응력경로를 분석할 수 있도록 하였다.

경사계는 지지층 24.0m까지 천공 설치하였으며 측정간격은 0.5m 간격으로 하여 성토사면부의 지반 내 수평방향의 변형량과 변형속도를 측정하여 성토중양부

의 침하량과 병행하여 성토사면의 안정관리를 실시하도록 하였다.

3.4.1 층별침하 및 간극수압

간극수압 발생현황을 살펴보면 다음과 같다. 다음

Fig. 6(a)의 성토현황에 따른 Fig. 6(b)의 간극수압 변화를 보면 PP1 : 8.84tf/m², PP2 : 5.86tf/m², PP3 : 5.40 tf/m², PP4 : 5.06tf/m²로 측정되었다. 맨 윗층에 매설한 PP1이 가장 크게 나타나며 가장 아래층에 매설한 PP4가 가장 작게 나타났다. 성토가 완료후 소산되면서 점차

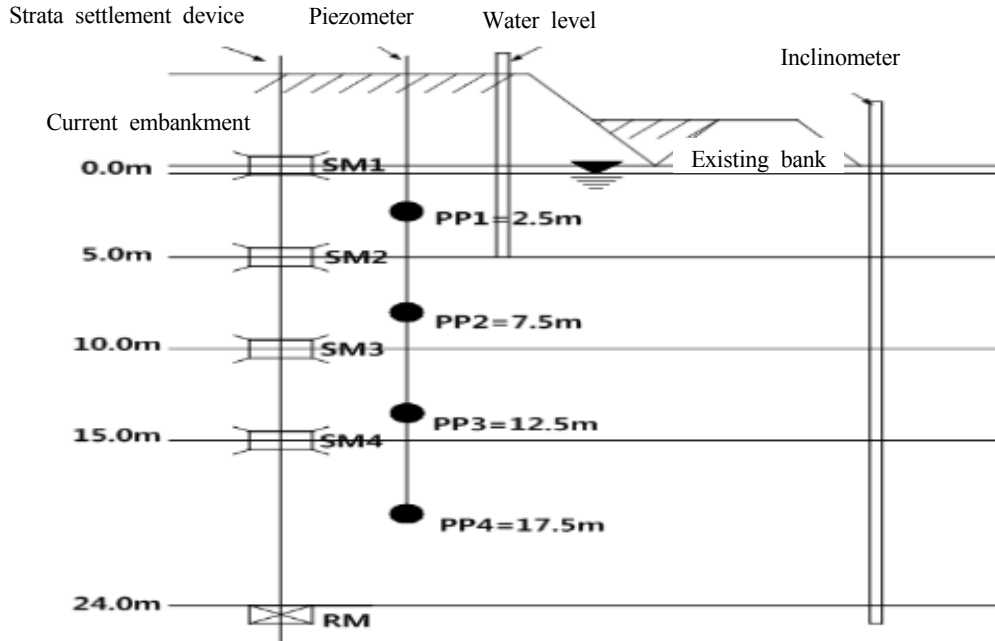
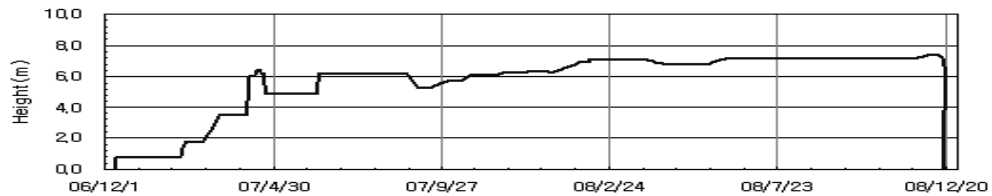
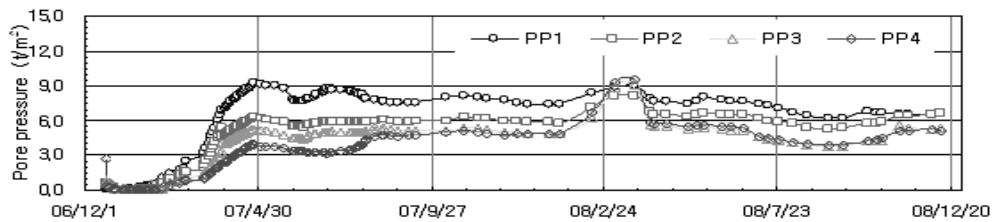


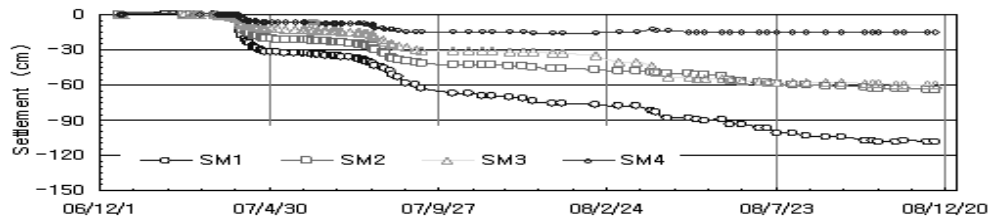
Fig. 5. Instrumentation installed



(a) Embank status



(b) Change of pore pressure



(c) Change of settlement

Fig. 6. Graph of pore-pressure and settlement under the embankment

안정화되었다. 성토고에 따른 침하량은 Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 SM1은 108.7cm, SM2는 63.4cm, SM3는 59.5cm, SM4는 15.0cm로 나타나 맨 윗층의 침하량이 맨 아래층의 침하량보다 7배이상 크게 발생하였으며 최종 성토재하 후 점차 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다.

3.4.2 수평변위

본 연구지역에서는 성토 인접부에 지중경사계를 매설하여 측정하였다. 성토고 3.55m에서는 최대수평변위가 22.8mm로 미미하게 발생하다가 인장균열이 발견되었던 6.02m 성토 시에 147.9mm로 수평변위가 급격히 증가하였다. 6.4m 성토하여 사면활동이 발생하였던 기간의 최대 수평변위량은 341.0mm가 되었다. 이후 성토하중을 제거하여 안정화되었다가, 최종 성토고 7.14m가 재하된 후 수평변위량이 372mm로 측정되었다.

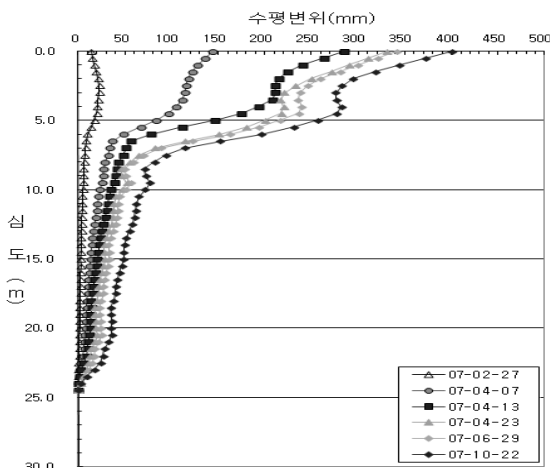


Fig. 7. Horizontal displacement

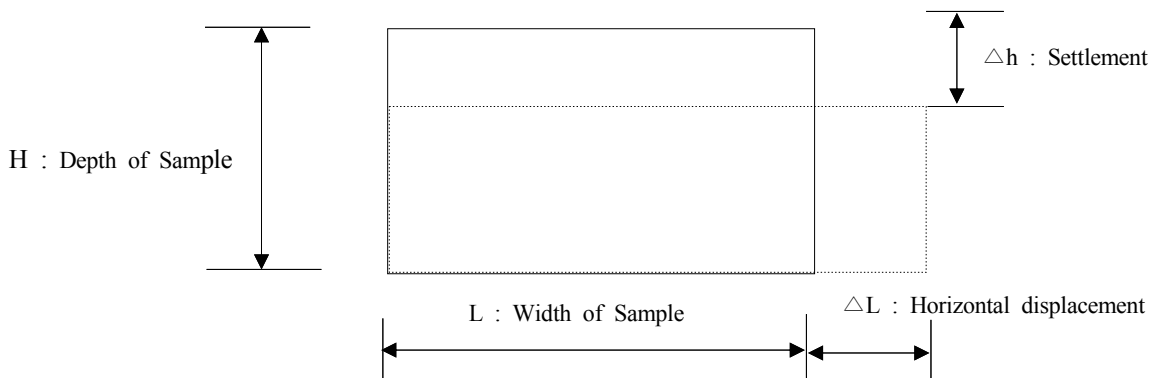


Fig. 8. Schematic diagram of volumetric strain

4. 체적변형률을 이용한 측방유동 판단

4.1 체적변형률과 변위

즉시침하는 성토체 하부의 토체가 측방유동압에 의해 수평변위시 발생하는 침하로써 포화된 점성토에서는 간극수의 배출이 발생하지 않으므로 체적의 변화는 발생하지 않는다. 본 논문에서는 체적변화율을 도입하여 체적변화없이 발생하는 즉시침하와 간극수압 소산에 의해 체적변화를 동반하는 압밀침하를 구분하였다.

이상의 관계를 도식화하면 Fig. 8과 같으며, 여기서, H는 연약지반심도, L는 대상지반의 폭, ΔH는 침하량, ΔL는 수평변위량이다.

성토하중에 의하여 침하 및 수평변위가 발생되기 전 원래의 체적 V_o 는 연약지반 심도와 대상지반의 폭과 관련되며 침하나 수평변위에 의해 변화된 체적이 V_p 라면 체적변화율 v_r 은 다음과 같다.

$$V_o = H \times L \times \text{단위길이} : \text{원래의 체적}$$

$$V_p = (H - \Delta H) \times (L + \Delta L) \times \text{단위길이} : \text{변화된 체적}$$

$$V_r = 1 - \frac{v_p}{v_o} : \text{체적변화율} \quad (16)$$

4.2 체적변형률에 의한 측방유동 평가

연구지역의 체적변형률에 의한 측방유동 및 압밀기간을 분석하여 보면 Fig. 9와 같다. Fig. 9(b), (c)에서 보듯이 성토고 1.84m 이내였던 2007년 3월 14일까지는 체적변화율(%), 수평변형률(%) 및 연직변형률(%)의 변화는 거의 보이지 않았다.

성토가 6.02~6.4m로 증가하였던 2007년 4월 9일경

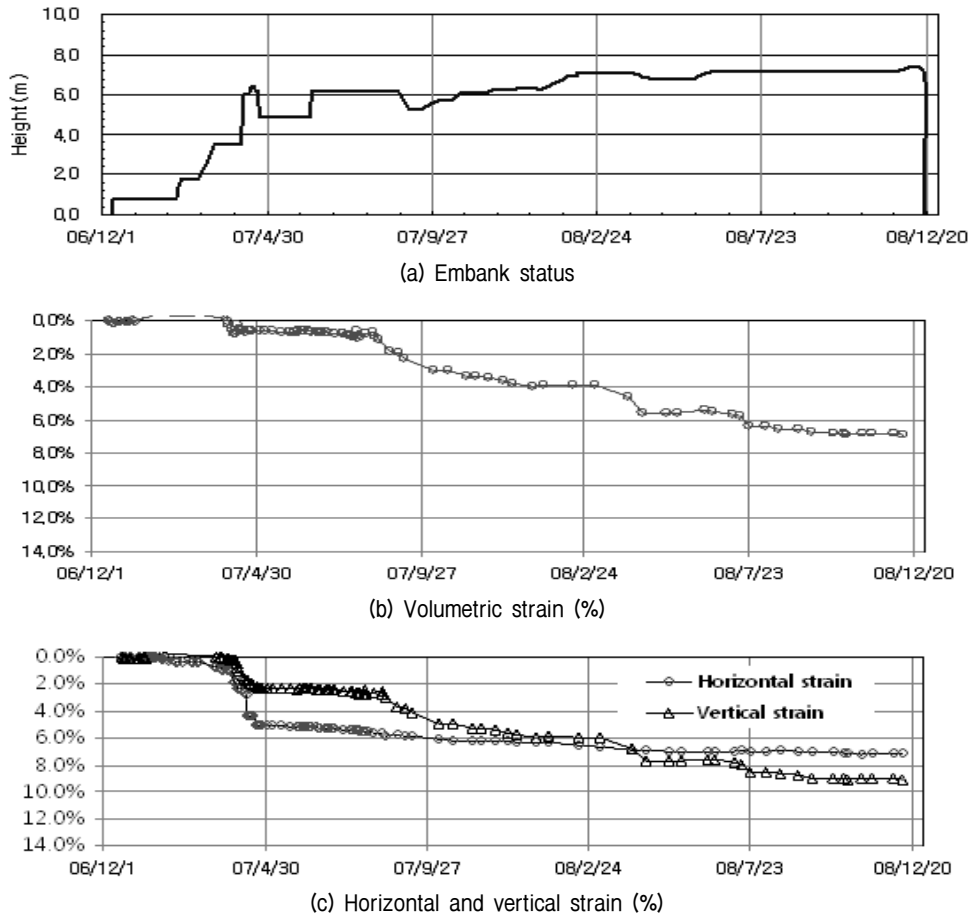


Fig. 9. Volume strain, lateral strain and vertical strain (depth 0.0~5.0 m)

에 Fig. 9(b)에서 보듯이 체적변형률은 1.1% 감소하였다. 이 기간에 Fig. 9(c)에서 보듯이 수평변형률은 5.2%로 급격히 증가하였으나 연직변형률은 1.6%로 매우 낮은 값을 보이고 있다. 이 기간에 현장제체도 인장균열 및 사면활동 현상이 발견되었다. 이는 재하성토속도가 간극수의 배수속도보다 더 크기 때문에 발생하며 이때의 연직침하하는 측방유동으로 인한 즉시침하로 판단된다.

2007년 6월 11일 이후 Fig. 9(b)의 체적변형률은 1.1%에서 6.9% 증가되어 배수상태 경향을 보인다. 이때 연직변형률은 2.3%에서 9.6%로 증가하나 수평변형률은 6.7%에서 7.1%로 증가하였다. 이는 성토에 의한 간극수가 배출되어 압밀침하가 우세하게 발생하였음을 의미한다.

5. 안정관리지수에 의한 측방유동 분석

5.1 현장계측자료에 안정관리지수평가

개량 및 안정관리연구를 위한 연약층 0.0~5.0m의 간

극수압계 설치심도는 2.5m이며 성토 진행에 따른 안정관리지수(SCI)값의 변화를 연구하여 보았다.

$p-q$ 응력좌표에서 k_f -line의 방정식은 $q_f = p_f \tan \alpha + a$ 이다. 여기서 $\tan \alpha$ 와 a 는 삼축압축시험에 c, ϕ 값을 이용하여 구하며 $\tan \alpha = \sin \phi = \sin 22^\circ = 0.375$ 이며, $a = c \cdot \cos \phi = 1.6 \cdot \cos 22^\circ = 1.5$ 으로 선정하여 k_f -line을 작도한다. 그리고 성토체 중앙에서의 연직과 수평응력의 비는 k_o -line을 따라 이동한다.

$p-q$ 응력경로에서 점①은 초기응력이며 간극수압계 설치 심도인 2.5m에서 지반의 연직응력과 수평응력에 의해 따라(1.20, 0.28) 경로점에 위치하게 된다.

$p-q$ 응력경로점 ②는 성토고 1.84m에서의 경로점이다. 1.84m 성토 시 q 값은 0.92로 상승하며 그 값은 간극수압과 파괴기준선과 관계없이 일정한 값을 유지한다. p'_{max} 는 전응력의 최대값 3.97, p_f 는 q 선상의 파괴기준선과 접하는 값 -1.56이며 p' 은 p'_{max} 에서 간극수압(Δu) 1.96t/m² 뺀 값 2.01이 된다. 성토고 1.84m일 때 안정관리지수(SCI)는 0.64가 되며 수평변형율은 0.3%로 안정

을 유지하고 있다.

$p-q$ 응력경로점 ③은 성토고 3.55m에서 6.02m로 성토하는 과정에서 경로점이다. 성토고 3.55m에서 q 값은 1.50로 상승한다. p' 는 전응력의 최대값 6.55, p_f 는 q 선상의 파괴기준선과 접하는 값 0.0이며 p' 은 p'_{max} 에서 간극수압(Δu) 7.66t/m² 뿐 값 -1.11이 된다. 성토고 3.55m에서 6.02m 성토과정에서 안정관리지수(SCI)는 -0.16이 급격히 감소하며 이때 수평변형율은 5.2%로 증가되어 재하성토부에 인장균열 현상이 나타났다. $p-q$ 응력경로점 ④는 성토고 6.02m로 성토 후 경로점이다. 성토고 6.02m에서 q 값은 2.364로 상승하였으며, p'_{max} 는 전응력의 최대값 10.26, p_f 는 q 선상의 파괴기준선과 접하는 값 2.29이다. p' 은 p'_{max} 에서 간극수압(Δu) 8.74t/m² 뿐 값 1.56이 되며, 이때 성토고 6.02m에서 안정관리지수(SCI)는 -0.09되어 측방유동현상이 나타났다.

측방유동현상이 나타나 4.8m로 재하성토를 제거 후 232일(약 8개월) 동안 압밀대기 후 지반의 강도가 회복되었다 판단되어 6.02m로 성토 후 최종 성토고 7.14m를 실시하였다.

$p-q$ 응력경로점 ⑤는 성토고 7.14m로 성토 후 간극수압 소산 후 안정된 상태에서의 응력경로점이다. 성토고 7.14m에서 q 값은 2.75이며, p'_{max} 는 전응력의 최대값

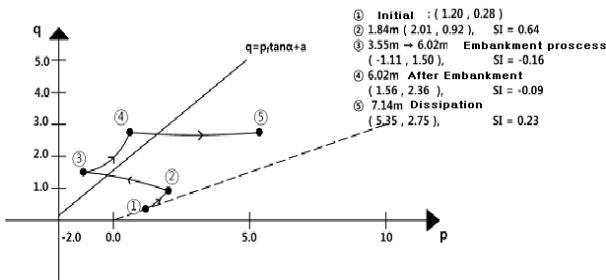
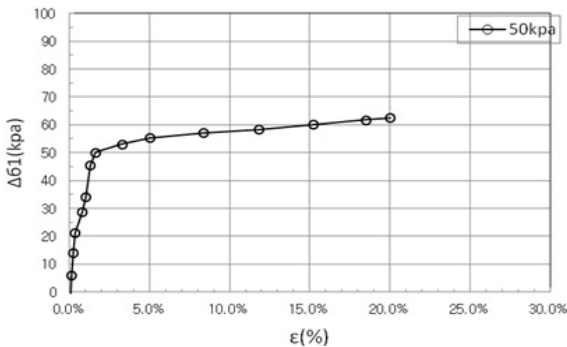


Fig. 10. SCI of $p-q$ diagram



(a) Strain vs Deviatoric stress

11.94, p_f 는 q 선상의 파괴기준선과 접하는 값 3.34이다. p' 은 p'_{max} 에서 간극수압(Δu) 6.59t/m² 뿐 값 5.35이 되며, 이때 안정관리지수(SCI)는 0.23되었으며 수평변형율도 거의 발생하지 않았다.

다음 Fig. 10은 서술된 5개 지점에 개략적인 응력경로를 그래프로 도시하였다.

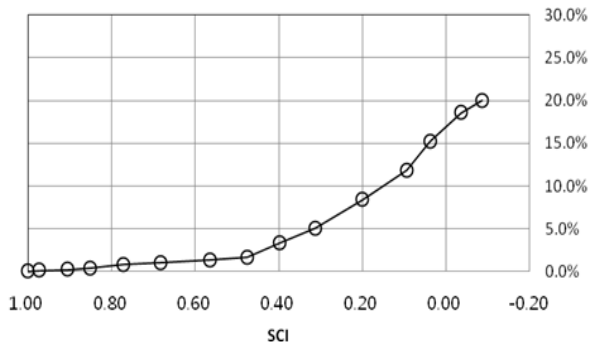
5.2 실내시험에 의한 안정관리지수평가

본 실내시험은 응력경로에서의 안정관리지수(SCI)값의 변화를 파악하기 위하여 다음과 같은 조건으로 실시하였다.

삼축압축시험은 구속압(σ_c) 50kpa, 100kpa, 150kpa의 3가지의 구속압 상태에서 시험하였으며, 측방유동 현상이 나타난 연약지반 심도 5.0m 이하의 구간과 유사한 조건인 구속압(σ_c) 50kpa와 비교하였다.

구속압(σ_c) 50kpa에서 변형율과 축차응력과의 관계를 Fig. 11(a)에 나타내었다. 연직변형율이 1.64% 발생할 시 축차응력은 50.08kg/cm²으로 시료의 저항응력은 급하게 상승하였다. 연직변형율 3.3% 발생 이후 저항응력은 53.08~60kg/cm²로 완만하게 상승한 반면 연직변형율은 3.3~20%로 급격하게 증가하여 파괴되는 현상을 발견하였다. Fig. 11(a)의 변형율과 축차응력의 관계에서 일정 변형율 값 이내에서는 저항응력 증가비율이 크나, 일정변형율을 초과하면 저항응력 발생 비율이 작아진다.

안정관리지수(SCI)와 연직변형율의 관계를 나타내면 Fig. 11(b)와 같다. 안정관리지수(SCI)가 0.4 이상에서는 연직변형율 발생이 1.6%로 안정된 상태를 유지, 안정관리지수(SCI)가 0.4 이하로 감소 시에는 연직변형율이 3%에서 20%까지 급격히 증가하는 현상을 발견하였다.



(b) Strain vs Stability Control Index (SCI)

Fig. 11. Stability Control Index (SCI) based on triaxial compression tests

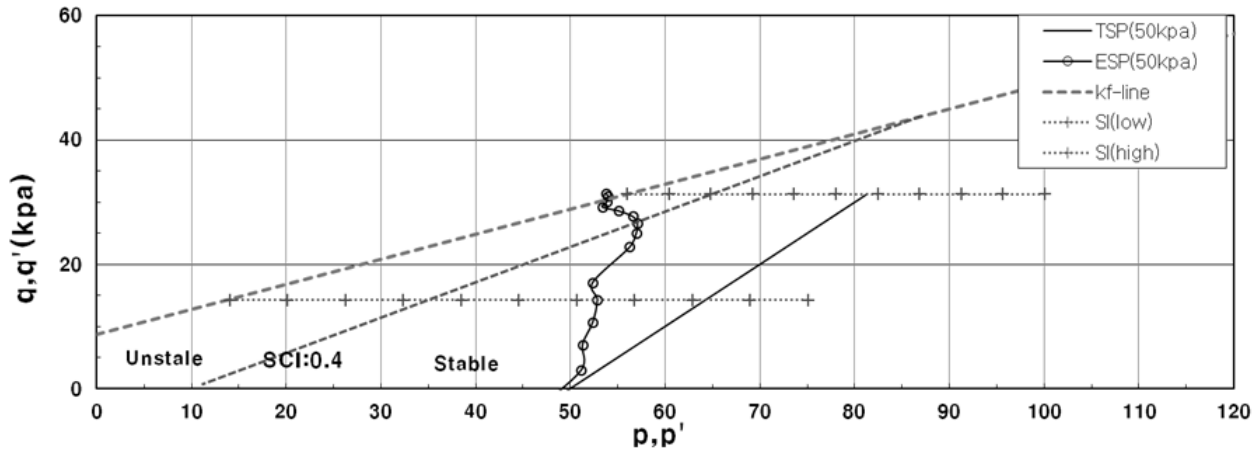


Fig. 12. SCI transition of tri-axial compression test ($\sigma_c = 50$ kPa)

수직응력의 증가 시 간극수압발생에 따른 안정관리지수(SCI) 값의 변화는 안정관리지수가 0.4 이상일 경우에는 유효응력경로(ESP)점이 비교적 완만하게 k_f -line을 향하여 접근하고 있으나, 안정관리지수가 0.4 이하인 경우는 급격하게 k_f -line으로 접근하고 있는 것으로 분석되었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 안정관리지수 값이 0.4 이하에서 안정관리지수 값이 급격히 k_f -선으로 접근하는데, 이때 지반에 이상 징후가 발생한다고 예측할 수 있다. 현장에서는 안정관리지수(SCI) 값이 0.4 이하가 되면 성토체가 불안정할 수 있기 때문에 적절한 조치를 취해서 제체의 안정성을 기해야 한다.

5.3 현장계측 및 실내시험의 안정관리지수 비교

현장계측자료와 실내시험값을 비교분석하여 본 논문에서 제안한 안정관리지수(SCI)값의 상호관계를 파악하고자 다음과 같이 검토하였다. 현장성토과정에서의 응력경로와 삼축압축시험에서의 응력경로는 Fig. 13와 같이 서로 다른 경로과정을 보인다. 이는 현장성토에서의 응력경로는 성토에 따라 연직 및 수평응력이 증가하므로 성토 후 응력경로점이 성토하중만큼 상승 후 간극수압 발생과 소산에 따라 응력경로점이 우측으로 이동하게 된다. 반면에 삼축압축시험에서의 응력경로는 변형률 증가와 더불어 수직응력과 간극수압이 증가하는 형태로 응력경로점이 파괴포락선에 점진적으로 접근하는 형태를 보인다. 또한 삼축압축시험에서의 응력경로점은 변형률이 증가 시 파괴포락선에 접하게 될 때 발생응력이 급격히 감소하여 응력경로점이 파괴포락선을 넘지 못한다. 그러나 현장성토과정에서의 응력경로

는 성토에 따른 지반 내 응력이 파괴기준선과 관계없이 성토하중에 따라 증가하므로 이에 발생한 응력과 간극수압에 의해 응력경로점이 증가되므로 한계성토고를 초과하는 성토 시 파괴기준선 외측에 응력경로점이 형성될 수 있다.

실내시험의 경우 안정관리지수(SCI)가 0.4 이상에서는 안정관리지수(SCI)의 감소비율이 매우 작게 나타나고 있다. 반면에 안정관리지수가 0.4 이하에서는 급격히 k_f -line으로 접근하였고 안정관리지수(SCI)가 0.0 이하가 될 경우 시료는 파괴가 되었다.

현장계측의 경우 3.5m 이상 성토 시부터 간극수압의 발생으로 인해 안정관리지수(SCI)가 급격히 감소하였다. 이후 간극수압이 일부 소산과정을 거친 후 성토하중이 6.0m로 재하됨에 따라 지반에서는 측방유동현상이 나타났다. 따라서, 현장에서는 지반의 안정을 기하기 위하여 6.0m 성토 후 일부 하중을 제거하여 지반 안정상태를 유지시킨 다음 재성토하여 지반을 안정화시켰다. 현장계측에서는 실내시험과 응력재하형태가 달라 동일한 경로과정을 거치고 있지 않으나 안정관리지수(SCI)가 0.4 이상에서는 지반이 안정한 상태로 유지되다가, 안정관리지수(SCI)가 0.4 이하로 감소될 경우 급격한 변위의 발생과 측방유동의 위험성이 증대되며 안정관리지수(SCI) 0.0 이하가 되었을 때 실제 측방유동 발생현상이 나타났음을 알 수 있다. 이상의 결과들을 정리하면, 실내시험과 현장계측의 응력경로는 서로 상이하나 유효응력경로점이 안정관리지수(SCI) 0.4 이하에 있어서 변위발생 및 k_f -line 접근방식이 매우 유사한 양상을 보일 수 있다.

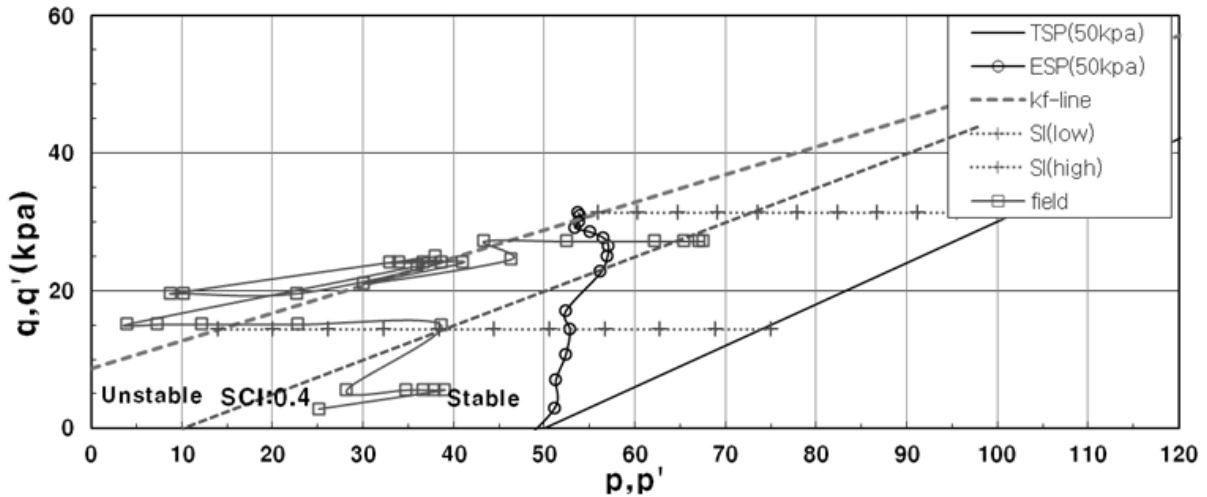


Fig. 13. Comparison of stress pass under field instrument and lab test

5.4 안정관리지수(SCI)에 의한 안정관리기준

본 논문에서는 제체의 안정관리를 현장계측 및 실내의 응력경로상의 안정관리지수에 따른 변형률을 평가하여 분석하였다(Asaoka, 1978). 실내삼축시험의 연직 변형률발생은 Fig 14에서 도시한 것처럼 안정관리지수(SCI)가 0.5 이상에서는 연직변형률의 발생이 매우 작게 나타나나, 안정관리지수(SCI)가 0.5 이하에서는 연직 변형률의 발생이 급격하게 증가되고 있음을 보여준다. 현장계측자료의 경우, 안정관리지수(SCI)가 0.4 이상에서는 안정상태를 유지하며 안정관리지수(SCI)가 0.2~0.4 범위에서는 변형률의 발생이 증가되게 나타난다. 이는 삼축압축시험의 연직변형률 발생에 비해 시각적으로 작게 표현되나, 실제 현장에서는 수평변위가 일어나고 있는 현상으로 토체의 크기를 감안하면 결코 적은 수평 변위량은 아닌 것으로 판단된다. 결과적으로 안정관리 지수(SCI)가 0.0~0.2 구간에서 수평변위는 위험상태가 되고, 0.0 이하에서 파괴상태가 되었다

이들 현장계측자료와 실내시험결과를 보면 안정관리 지수가 0.4~0.5 값에서 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 두 값이 약간의 차이는 있지만, 본 연구에서는 현장계측자료에서 분석된 안정관리지수(SCI) 0.4를 관리기준으로 선정하였다.

본 연구에서는 안정관리지수(SCI)의 범위를 Fig. 15(a)와 같이 응력경로상에 표시하여 연약지반에서 안전하게 성토할 수 있는 관리기준을 제안하였다.

안정관리지수(SCI)에 의한 성토관리법은 기존의 성토안정관리기법이 침하와 변위의 상대적인 변화에 주

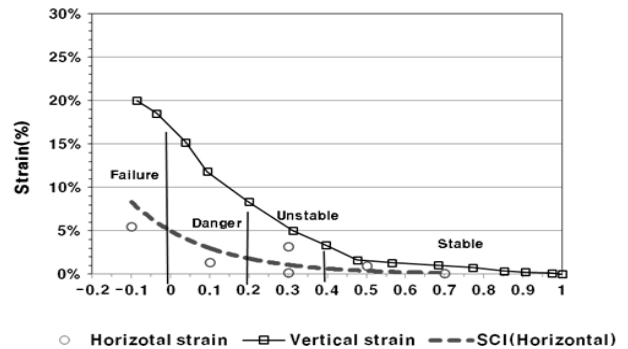


Fig. 14. Relationship of SCI and strain under field (horizontal) and lab (vertical) test

목하여 관리하는 방법이나 응력이력을 잘 반영하는 간극수압의 발생과 소산에 기초를 두고 있다.

기존의 성토안정관리기법은 변위를 측정하여 안정 및 불안정을 판단하여 성토체 안정관리를 실시하므로 성토 후 안정관리기준에 따라 안정관리를 실시할 수 밖에 없다. 이 경우 추가 성토이전에 성토체 안정성을 판단할 수 있는 근거는 추측이나 성토시공속도 규정 등에 의존할 수 밖에 없으며, 현장지반의 지반특성이나 현장 내에서의 토층변화가 무시되어 자칫 사면활동이나 측방유동으로 연결되거나 지나치게 성토속도를 구속하여 시공의 경제성을 저해할 수 있다.

새로운 성토체 안정관리법인 안정관리지수(SCI)는 현재지반의 안정상태를 판단할 수 있으며, 대기기간과 추가성토고를 결정할 수 있는 근거를 제공한다. Fig. 15(b)에서 현재 ① $\Delta u = \gamma h_1$ 위치의 안정상태를 판단할 수 있을 것이다. 만약 ①의 위치에서 간극수압 소산없이 곧장 최종 성토한다면 ⑥, ⑦의 위치로 접어들어 불안정

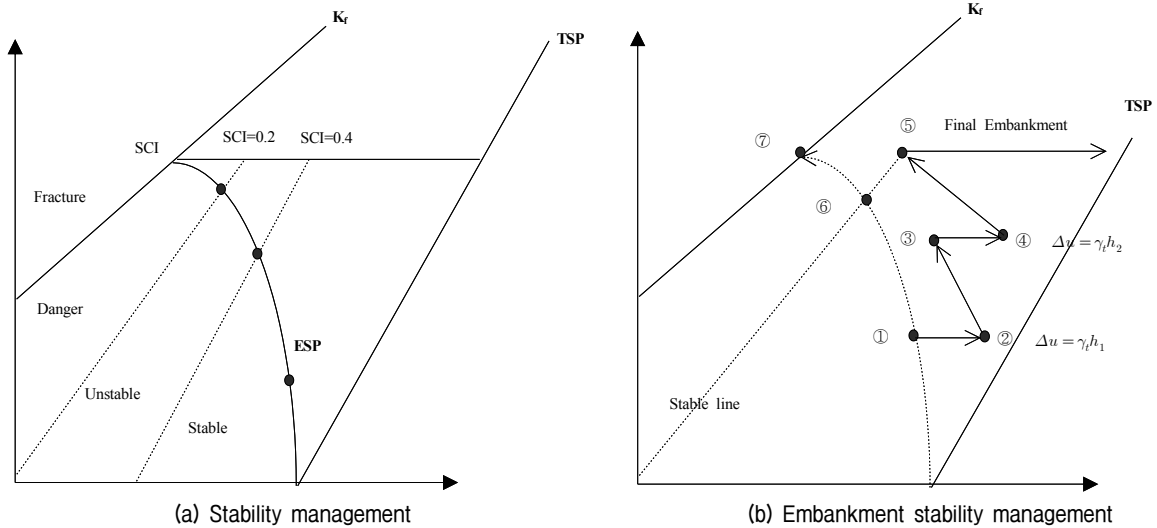


Fig. 15. Stability management and embankment management from SCI

구역이 되므로 성토체의 안정성을 저해할 수 있다.

①의 위치에서 충분히 대기기간을 거쳐 ②의 위치로 이동하였다면 추가성토고는 안정관리지수(SCI)에서 q 값의 차만큼 되므로 안정하게 성토할 수 있는 위치 ③의 성토고를 결정할 수 있다. 만약에 추가 성토 시에 간극수압이 발생하지 않고 안정상태에 있다면 성토 속도를 조절할 수 있으며, 반대로 간극수압이 발생한 후 안정선에 접근할 경우 최종성토고에 도달하기 전 대기기간을 거쳐 ④의 위치까지 대기하여야 한다. ④의 위치에서 최종성토하여 ⑤에 도달 시에 안정상태를 유지할 수 있는 판단근거가 된다.

안정관리지수(SCI)에 의한 성토체 관리는 기존방법에서 할 수 없었던 추가성토고 결정 대기기간 및 성토속도를 조절할 수 있어 안정적이고 경제적인 성토관리가 가능할 것으로 예상된다.

6. 결론

본 연구는 현장측정자료를 활용한 안정관리지수(SCI)를 도입하여 새로운 성토체 안정관리 기준을 수립하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 안정관리지수(SCI)는 $p-q$ 응력좌표계에 성토시 예상되는 TSP 또는 k_o -압밀경로(p_{max})와 삼축압축시험(압밀비배수, CU)에서 산출된 파괴포락선의 응력경로(p_f)를 도시하여 과잉간극수압으로 생기는 유효응력경로(p')의 위치를 표시하여 현재 지반의 응

력상태와 안정상태를 분석할 수 있는 새로운 성토 안정관리기법을 제안하였다.

- (2) 안정관리지수는 $q=q'$ 선상에서 p' 의 p'_{max} 와 p'_f 의 상대적인 위치이며, $SI = \frac{p' - p_f}{p'_{max} - p_f}$ 로 나타낼 수 있다.
- (3) 성토체 안정관리의 기준은 안정관리지수(SCI) 0.4 : 안정, 0.2~0.4 : 불안정, 0.0~0.2 : 위험, $0.0 \geq$ 안정관리지수 파괴구간으로 구분할 수 있다. 따라서 본 안정관리지수(SCI)를 이용하여 기존의 성토관리법에 비해 효율적인 시공관리가 가능할 것으로 생각되어진다.

참고 문헌

1. Asaoka, A. (1978), "Observational procedure of settlement prediction", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
2. Chang, Y. C. and Lee, K. I. (1995), "Soil Engineering of Soft Ground Foundation", *Saeron books*.
3. Chung, S. Y., Han, S. J., and Kim, S. S. (2003), "The Numerical Analysis of Consolidation Characteristics Considering Self-Weight and Creep", *Journal of KSCE*, Vol 23, No.5, pp.265-271.
4. Chun, B. S. (2011), "Geotechnical Engineering", *Goomi Books*, pp.286-321.
5. Korean Geotechnical Society (2001), "Realtime Construction Control System", *Goomi Books*, pp.345-352.
6. Korean Geotechnical Society (2005), "Soft Foundation", *Goomi Books*, pp.481-514.
7. Lambe, T.W. (1979), "Soil Engineering", *John Willey & Sons*, pp. 423-454.

(접수일자 2013. 3. 4, 수정일 2013. 6. 12, 심사완료일 2013. 9. 2)