

연직배수공법이 적용된 연약지반 상에 도로성토로 인한 측방유동의 특성

Characteristics of Lateral Flow due to Embankments for Road Construction on Soft Grounds Using Vertical Drain Methods

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

김 정 훈² Kim, Jung-Hoon

Abstract

Field monitoring data for embankments in thirteen road construction sites at coastal area of the Korean Peninsula were analyzed to investigate the characteristics of lateral flow in soft grounds, to which vertical drain methods were applied. First of all, the effect of the embankment scale on the lateral flow was investigated. Thicker soft soils and larger relative embankment scale produced more horizontal displacements in soft grounds. Especially, if thick soft grounds were placed, the relative embankment scale, which was given by the ratio of thickness of soft ground to the bottom width of embankments, became larger and in turn large horizontal displacement was produced. And also higher filling velocity of embankments induced more horizontal displacements in soft grounds. The other major factors affecting the lateral flow in soft ground were the thickness and undrained shear strength of soft grounds, the soil modulus and the stability number. Maximum horizontal displacement was induced by less undrained shear strength and soil modulus of soft grounds. Also more stability numbers produced more maximum horizontal displacements. When the shear deformation does not develop, the stability number was less than 3.0 and the safety factor of bearing was more than 1.7. However, if the stability number was more than 5.14 and the safety factor of bearing was less than 1.0, the unstable shear failure developed in soft ground. 50mm can be recommended as a criterion of the allowable maximum horizontal displacement to prevent the shear deformation in soft ground, while 100mm can be recommended as a criterion of the allowable maximum horizontal displacement to prevent the shear failure in soft ground.

요 지

연직배수공법이 적용된 연약지반의 측방유동 특성을 조사하기 위해 우리나라 해안지역에서 계획관리가 실시된 13개 연약지반 현장의 자료를 수집하여 조사분석을 실시하였다. 먼저 성토규모가 연약지반의 측방유동에 미치는 영향을 분석하였다. 연약층의 두께와 상대적 도로성토규모가 클수록 연약지반 속의 수평변위는 크게 발생하였다. 특히 연약지반이 두꺼우면 도로성토저면폭에 대한 연약층의 두께의 비인 상대적 성토규모도 자연 커지므로 수평변위량은 크게 발생하였다. 또한 도로성토속도가 빠르면 연약지반의 수평변위량이 크게 발생하였다. 그 밖에도 연약지반의 두께와 비배수전단강도, 지반계수 및 안정수는 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 중요한 요소로 나타났다. 즉 연약지반의 비배수전단강도와 지반계수가 작을수록 그리고 안정수가 클수록 연약지반의 최대수평변위량은 크게 발생하였다. 도로성토로 인하여 연약지반 속에 전단변형이 발생되지 않는 안전한 상태에서는 안정수가 3이하가 되고 지지

1 정희원, 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil, Environmental & Plant Engineering, Chung-Ang University, Tel: +82-2-820-5258, Fax: +82-2-822-8722, wphong@cau.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, (주)동명기술공단 전무, 공학박사 (Doctor of Engineering, Executive director, Dong Myeong Engineering Consultants)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

안전율이 1.7이상이었다. 그러나 연약지반 속에 전단파괴가 발생하는 불안정한 상태에서는 안정수가 5.14이상이고 지지안전율이 1.0이하가 되었다. 도로성토로 인하여 연약지반 속에 전단변형이 발생하는지 여부를 판단할 수 있는 허용최대수평변위량의 기준은 50mm로 정하는 것이 바람직하며 연약지반에 전단파괴가 발생됨이 없이 도로성토를 실시할 수 있는 연약지반의 수평변위량 기준은 100mm로 정하는 것이 바람직할 것이다.

Keywords : Embankment, Lateral displacement, Lateral flow, Soft ground, Vertical drain, Undrained shear strength

1. 서론

최근 경제성장과 더불어 해안의 연약지반을 매립하여 부지를 조성한 후 주거단지, 산업단지, 공항 등으로 개발하여 공급하는 경우가 많다. 이렇게 조성된 연약지반 상에 도로 철도 등을 성토 시공하는 경우 성토하중은 연약지반에 편재하중으로 작용하게 되어 연약지반의 측방유동이나 활동파괴가 종종 발생하게 된다(홍원표, 1994).

특히 도로성토를 빠른 속도로 시공할 경우에는 연약지반에 수평응력이 크게 증가하게 되고, 이로 인하여 지반의 측방유동과 용기현상이 발생하게 되어 인접구조물의 안전을 위협하게 된다(Peck et al, 1969; 이광우, 2006). 이 경우 연약지반의 측방유동으로 인한 도로의 변형은 교통장애요인으로 작용하며 막대한 경제적 손실을 야기한다.

한편 국내에서는 최근 연약지반상에 고속도로를 건설하거나 공단 및 주거단지 등을 조성하는 경우가 많아지면서 교대, 안벽, 인접구조물, 지하매설물 등의 변형으로 인한 문제가 종종 발생하였다(김재홍, 2011). 이러한 변형발생의 주원인은 측방유동과 관련이 있는 것으로 밝혀져 측방유동에 대한 관심이 높아지고 있다.

연약지반 상에 도로성토를 하면 성토하중에 비해 연약지반의 지지력이 부족한 경우 연직변위와 측방변위가 발생하게 된다. 측방유동판정법에 대해 기존의 제안들은 연약지반처리공법이 적용되지 않은 연약지반 상에 성토 시 성토사면 선단부 지표면에서 최대수평변위량을 측정하여 사용하였다(Marche and Chapuis, 1974).

그러나 최근에는 연약지반 압밀촉진을 위해 연직배수공법을 대부분 적용하면서 연직배수재와 수평배수재 및 장비주행성(Trafficability)을 위한 PET mat을 사용함으로써 성토사면 선단부 지표면보다 성토사면 선단부 직하 연약지반 속에서 최대수평변위량이 발생하게 된다.

본 연구에서는 도로성토로 인한 해안지역 연약지반

의 측방유동 특성을 조사하고자한다. 해안지역 연약지반의 측방유동 특성을 조사하기 위해 우리나라 해안지역에서 계측관리가 실시된 13개 연약지반 현장 200개소 계측지점의 자료를 수집하여 조사분석을 실시하였다. 연직배수공법을 적용하여 지반개량 공사가 실시된 연약지반 현장으로 동남해안지역의 양산, 울산, 김해, 밀양의 네 곳과 서남해안지역의 영암, 광양, 여수의 세 곳, 서해안지역의 김포, 영종, 경인고속도로, 청라, 논산, 군산의 여섯 곳에 대해 연약지반의 지반특성과 도로성토규모의 관계를 조사하였다.

즉 연약지반 상에 도로성토 시에 측정된 연약지반의 수평변위량과 성토규모와의 상관성을 조사하고 연약지반의 지지력이 성토하중과의 관계를 나타내는 지지안전율 크기에 따라 수평변위량 발생여부를 파악하고자하였다.

그리고 측방유동에 영향을 미치는 요소로 연약지반의 두께와 연약지반의 비배수전단강도 및 지반계수, 안정수에 주목하여 연직배수공법이 적용된 연약지반의 측방유동특성을 분석한다.

2. 기존연구

연약한 점성토지반 상에 도로성토 하중을 재하하면 연약지반에 편재하중이 작용하게 되어 지중응력이 증가하고 간극수압이 증가되면서 지반침하가 발생한다. 재하하중을 지속적으로 증가시키면 Figure 1에서 보는 바와 같이 측방유동압(lateral flow pressure)이 발생되고 이로 인해 연약지반에 수평변위와 용기가 발생하게 된다.

Leroueil et al.(1990)은 연약지반 변형거동의 과정을 Figure 2에서 보는 바와 같이 재하초기부터 한계하중까지의 거동(OA)과 그 이후부터 극한하중까지의 거동(AB), 그리고 극한하중 이후의 장기배수거동(BC)의 3단계를 거치는 것으로 설명하였다. 재하초기(OA)에서는 간극수압의 소산이 없는 K_0 상태로 탄성적인 침하만이 인식되어 지

고, 하중의 증가에 따라 유효응력이 증가하여 어느 한계치를 넘게 되면(AB) 토립자가 항복하여 압축성이 급증함과 더불어 측방변위량의 증가가 시작된다고 하였다. 대부분의 측방유동은 이 구간에서 발생된다고 하였다.

Tschebotarioff(1973)는 전단변형이 시작되는 점의 응력을 한계하중으로 규정하고 소성평형의 상태에서 지반의 침하량과 측방변위량이 극단적으로 증대하여 국부적인 활동파괴를 나타낼 때의 하중을 극한하중으로 규정하였다.

Tavenas et al.(1979)은 총 21개소의 성토구간에 대한 현장계측 결과를 토대로 연약지반의 침하량과 측방유동량 사이의 관계를 Figure 3과 같이 분석하였다. Figure 3에서 알 수 있는 바와 같이 하중의 초기단계(OP)에는 비교적 빠른 배수로 측방변위량의 증가량이 연직침하량의 증가량에 비하여 작지만 $[\Delta y_m = (0.18 \pm 0.09)\Delta s]$, 성토하중이 증가하면 정규압밀(NC)상태로 변화되며 공사의 종료단계(P'A)에서는 비배수상태로 거동하게 되어 측방변위량의 증가량이 급격히 증가하고 그 크기는 연

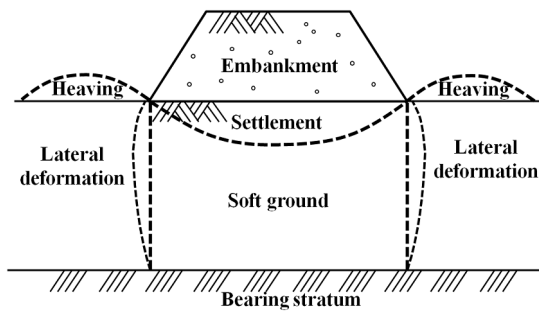


Fig. 1. Schematic diagram of soil deformation in soft ground under embankment for road construction (Hong, 2005)

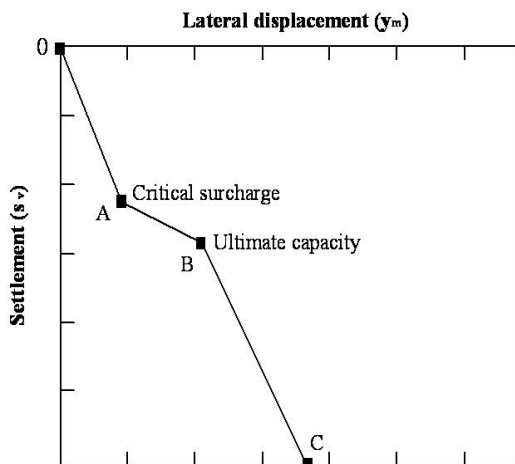


Fig. 2. Relationship between settlement and lateral displacement in soft ground (Leroueil et al., 1990)

직변위량의 증가량과 거의 같아진다 $[\Delta y_m = (0.91 \pm 0.2)\Delta s]$.

또한 공사완료 후 장시간 방치시킨 경우(A'B)에는 배수상태로서 연직변위량의 증가량에 비하여 측방변위량의 증가량이 작아진다 $[\Delta y_m = (0.16 \pm 0.02)\Delta s]$.

연약지반 상에 성토를 실시한 13개소에 대한 계측사례 분석결과에 의하면 성토법면의 경사각 β 와 형상계수 $\xi (= \Delta y_m / \Delta s)$ 의 관계는 Figure 4와 같이 나타났다. 단 이때의 성토사면안전율은 1.25~1.5범위에 있는 경우를 대상으로 하였다(Tavenas and Leroueil, 1980). 또한 Tavenas and Leroueil(1980)은 시험성토에 대한 장기간(약 3~17년)에 걸친 계측결과, 측방변위의 깊이에 따른 분포형태는 압밀기간 중에 거의 변화가 없다는 사실을 발견하였다. 또한 측방변위의 깊이에 따른 분포형태가 변하지 않는다는 연구결과로부터, 시공 완료 후 제방의 공용기간 (lifetime) 동안 발생할 수 있는 최대측방변위증분의 상한치를 형상계수를 적용하여 산정할 수 있다고 하였다.

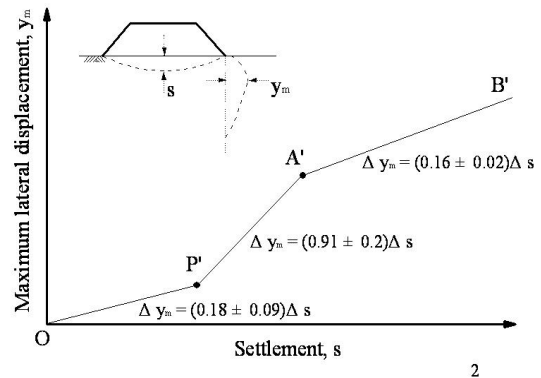


Fig. 3. Relationship between maximum lateral displacement and settlement(Tavenas et al., 1979)

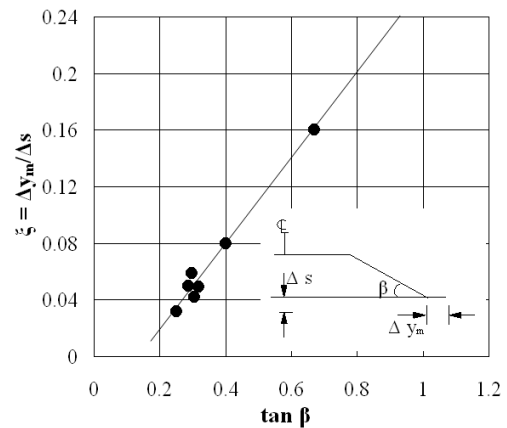


Fig. 4. Relationship between slope inclination of embankments and $\Delta y_m / \Delta s$ (Tavenas and Leroueil, 1980)

3. 도로 성토를 실시한 연약지반의 계층관리현장

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있는 반도국가이다. 특히 서해안과 남해안은 리아스식 해안으로 구성되어 있어 매립을 하여 토지로 활용할 수 있는 지역이 많다. 최근까지도 해안 매립을 활발히 실시하여 상당히 많은 토지를 조성하였고 산업단지, 주택단지 등으로 공급하여 오고 있다. 이러한 해안매립지역에 도로를 축조할 경우 성토하중으로 인한 연약지반의 변형(침하 및 측방 변형)이 발생하는 경우가 많다.

본 연구에서 활용한 13개 연약지반현장 자료는 지역적 위치에 따라 Figure 5에서 보는 바와 같이 동남해안 지역, 서남해안지역, 서해안지역의 총 세 지역으로 분류하였다.

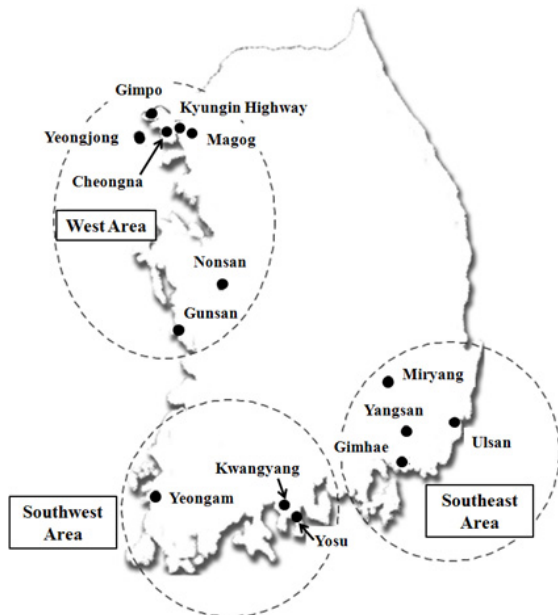


Fig. 5. Location of monitoring fields of soft grounds

3.1 동남해안지역 연약지반 현장

동남해안지역에서는 Figure 5에서 보는 바와 같이 양산, 울산, 김해, 밀양 지역 4곳의 연약지반 현장을 대상으로 선정하였다. 이 지역은 주로 낙동강 유역권으로 퇴적층이 두껍게 분포되어 있다.

동남해안지역 연약지반은 대체로 지표로부터 매립층, 퇴적토층, 풍화대층 및 기반암층의 순으로 구성되어 있다. 퇴적토층 두께는 14~46m 정도로 두껍게 형성되어 있으며, 이 중 연약지반은 2~41m 정도이며 강 하류로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다. 상부 실트질 모래층은 N치가 0~10 정도이며, 중간부 점성토층은 N치가 0~5 정도로 매우 연약하며 하부모래층의 N치가 30~50 이상으로 대단히 조밀한 상태를 보이고 있다. 퇴적토층의 두께는 해안에서 멀어질수록, 동쪽으로 갈수록 두꺼우며 녹산지역의 경우 두께가 70m되는 곳도 있다.

다른 지역보다 퇴적토층 두께가 두껍고 액성한계, 소성한계, 소성지수, 간극비, 압축지수도 높다. 그러나 조립성분을 많이 함유하고 있어서 비배수전단강도, 일축 압축강도가 비교적 큰 특성을 가지고 있다. 양산지역과 김해지역 연약지반은 충적퇴적물로 구성되어 있어 강도가

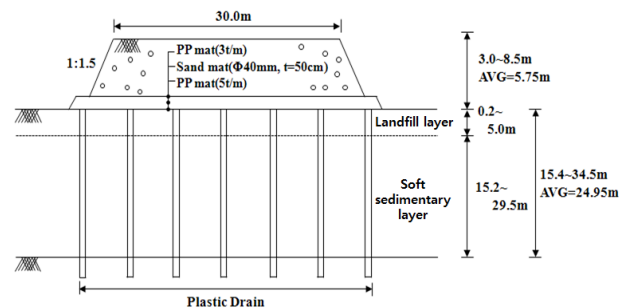


Fig. 6. Soft ground installed Plastic Drains at Yangsan field

Table 1. The properties of soft grounds and the embankment scale in southeast area

Field	Natural moisture content (w_n , %)	Liquid limit (LL, %)	Plastic Index (PI, %)	Undrained shear strength (c_u , kN/m^2)	Rate of strength increase ($m = c_u/P$)	Unit weight (kN/m^3)	USCS	Depth of soft layer (m)	Dimension of Embankments		Vertical drain
									B (m)	H (m)	
Yangsan	53.20	45.4	30.1	25.50	0.185	16.95	CL	15.2~29.5	47.25	24.9	P.V.D. (Plastic drain)
Ulsan	44.86	39.13	26	22.56	0.186	17.25	CL	19.6~20.2	43.5	17.45	P.V.D. (Plastic drain)
Gimhae	67.22	71.1	42.2	14.71	0.313	15.48	CH	16.5~18.6	35	17.55	P.V.D. (P.B.D)
Milyang	41.00	39.4	16.4	29.42	0.200	17.15	CL CH	7.6~25.1	36.5	16.35	P.V.D. (P.B.D)
Average	51.57	48.76	28.7	20.92	0.221	16.66			40.56	19.07	

상당히 낮은 경우가 많았다.

동남해안지역에 속하는 연약지반 현장중 대표적으로 양산지구의 연약지반에 대하여 연약층의 두께, 적용된 연직배수재, 도로성토규모를 개략적으로 도시하면 Figure 6과 같다. 연직배수공법으로 plastic drain공법을 적용하였고 이 plastic drain을 시공하고 PP mat와 sand mat를 포설한 후 도로성토를 실시하였다.

동남해안지역에 속하는 그 밖의 연약지반 현장의 연약층의 두께와 역학적 특성, 연약지반에 적용된 연직배수재, 도로성토규모 등을 정리하면 Table 1과 같다.

3.2 서남해안지역 연약지반 현장

서남해안지역은 Figure 5에서 보는 바와 같이 영암, 광양, 여수의 3개 지구 연약지반현장을 대상으로 하였다. 남해안은 주로 해수면의 하강 시 퇴적된 상류 사질 토퇴적물로 덮여 있으나 서쪽으로 갈수록 세립질 퇴적물이 많으며 주로 양쯔강이 주공급원이므로 이 지역은 세립질 점성토가 두껍게 분포되어 있었다.

서남해안지역 연약지반은 대체로 지표로부터 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 기반암층의 순으로 구성되어 있다. 층 두께는 10~40m 정도로 상부 모래층은 일

반적으로 세립 내지 중립질 모래로서 층 하부로 갈수록 세립분 함량이 증가하며 N치는 10 미만이다. 중간부 점성토층은 실트질 점토, 점토질 실트 또는 사질 실트로 구성되어 있다. 상부 모래층 및 하부 층적층과의 접촉부에서는 세립내지 중립질 모래가 많이 함유되어 있다. 특히 광양만은 세립질 점토가 우세하게 나타난다. 서남해안지역도 동남해안지역과 같이 대체로 다른 지역보다 퇴적층 두께가 두껍고 액성한계, 소성한계, 소성지수, 간극비, 압축지수도 높으며 조립성분을 많이 함유하고 있으나 비배수전단강도, 일축압축 강도가 작은 특성을 가지고 있다.

서남해안지역에 속하는 연약지반 현장중 대표적으로 영암지구의 연약지반에 대하여 연약층의 두께, 적용된 연직배수재, 도로성토규모를 개략적으로 도시하면 Figure 7과 같다. 연직배수공법으로 P.B.D. 공법을 적용하였고 이 P.B.D.을 시공하고 PP mat와 수평배수층을 포설한 후 도로성토를 실시하였다.

서남해안지역에 속하는 그 밖의 연약지반 현장의 연약층의 두께와 역학적 특성, 연약지반에 적용된 연직배수재, 도로성토규모 등을 정리하면 Table 2와 같다.

3.3 서해안지역 연약지반 현장

서해안지역은 Figure 5에서 보는 바와 같이 김포, 영종도, 경인고속도로, 인천, 논산, 군산의 6개 지구의 연약지반현장을 대상으로 하였다. 이 지역에는 중국의 황하강 및 한반도의 여러 하천에서 흘러온 세립질 퇴적물이 넓게 분포되어 있다.

서해안지역의 지반은 대체로 지표로부터 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 기반암층의 순으로 구성되어 있다. 퇴적토층은 상부 점성토층과 하부 사질토층으로

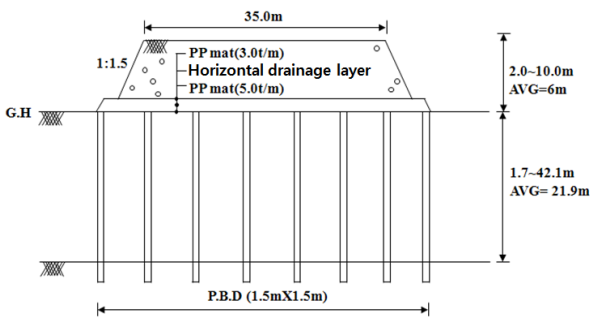


Fig. 7. Soft ground installed Plastic Drains at Yeongam field

Table 2. The properties of soft grounds and the embankment scale in southwest area

Field	Natural moisture content (w_u , %)	Liquid limit (LL, %)	Plastic Index (PI, %)	Undrained shear strength (c_u , kN/m^2)	Rate of strength increase ($m = c_u/P$)	Unit weight (kN/m^3)	USCS	Depth of soft layer (m)	Dimension of Embankments		Vertical drain
									B (m)	H (m)	
Yeongam	49.00	54.4	33.3	23.54	0.250	16.77	CL CH	1.7~42.1	53	21.9	P.V.D.(P.B.D)
Kwangyang	52.50	54.4	28.4	13.73	0.200	16.57	CH	3.0~12.2	43.5	14.35	P.V.D.(P.B.D)
Yeosu	83.40	63.2	39.1	17.67	0.290	15.40	CL CH	3.6~4.8	39.75	13.65	P.V.D.(P.B.D), Sand drain
Average	61.63	56.67	33.6	18.31	0.247	16.25			45.41	16.63	

구분되며 상부점성토층은 해수의 작용으로 인해 운반 및 퇴적되어 생성된 층으로 바다 쪽으로 갈수록 층 두께가 두꺼워지는 경향을 보이고 있다.

퇴적토층의 두께는 0~35m 정도로 모래질 실트, 모래 섞인 실트로 대부분 갈색내지 암갈색을 띠고 있고 일부 조개껍질도 포함하고 있다. 다른 연안에 위치한 지역에 비해 입자가 크며 N치는 1~50정도로 다양하게 측정된다. 주로 실트질 점토 및 모래가 넓게 분포하고 있으며 실트질 점토층은 1~10m 정도, 실트 섞인 모래층은 2~18m 정도 두께를 나타낸다. 하부 사질토층은 하부로부터 모래질 자갈층, 중간 입자로 된 모래층, 가는 입자로 된 모래층으로 퇴적된 경향을 보이고 있다. N치는 35~50 이상으로 나타낸다.

서해안지역에 속하는 연약지반 현장중 대표적으로 김포지구의 연약지반에 대하여 연약층의 두께, 적용된 연직배수재, 도로성토규모를 개략적으로 도시하면 Figure 8과 같다. 연직배수공법으로 plastic drain공법과 쇠석말뚝공법을 병행 적용하였고 이후 PET mat와 쇠석말뚝을

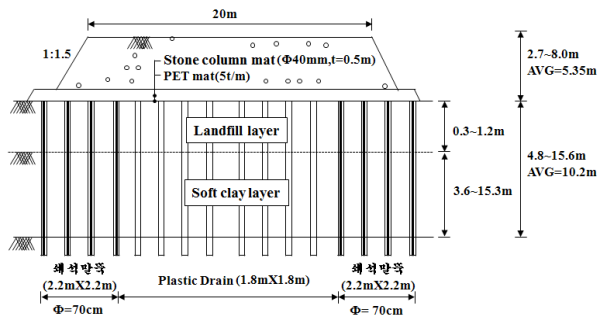


Fig. 8. Soft ground installed Plastic Drains at Gimpo field

포설한 후 도로성토를 실시하였다.

서해안지역에 속하는 그 밖의 연약지반 현장의 연약층의 두께와 역학적 특성, 연약지반에 적용된 연직배수재, 도로성토규모 등을 정리하면 Table 3과 같다.

4. 도로성토규모와 연약지반규모의 관계

4.1 연약지반규모의 영향

Figure 9는 연약지반의 규모가 연약지반의 측방유동량에 미치는 영향을 조사해 본 결과이다. 즉 연약지반속에서 발생된 최대수평변위량과의 관계를 도시한 그림이다. 이 그림에서 상대적 도로성토크기는 도로성토저면폭 B에 대한 연약지반의 두께 H의 비인 H/B로 나타냈으며 최대수평변위량은 도로성토사면선단하부 연약

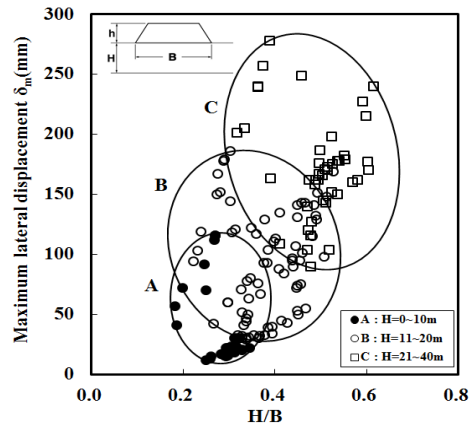


Fig. 9. Relationship between relative scale of road embankment and maximum lateral displacement of soft ground

Table 3. The properties of soft grounds and the embankment scale in west area

Field	Natural moisture content (w_n , %)	Liquid limit (LL, %)	Plastic Index (PI, %)	Undrained shear strength (c_u , kN/m^2)	Rate of strength increase ($m = c_u/P$)	Unit weight (kN/m^3)	USCS	Depth of soft layer (m)	Dimension of Embankments		Vertical drain
									B (m)	H (m)	
Gimpo	41.00	39.4	19.0	15.69	0.185	17.35	CL	3.6~15.3	46.81	10.2	Stone Column, P.V.D (Plastic drain)
Yeongjong	34.92	39.7	20.9	34.32	0.260	18.13	CL	0.9~26.8	36.25	14	P.B.D
Kyeongin Expressway	27.20	39.5	15.6	26.48	0.220	18.33	CL	8.0~15.0	63.3	15.5	P.B.D
Cheongna	30.86	36.87	16.0	24.52	0.200	18.33	CL	2.0~18.0	34.25	13.0	Plastic drain
Nonsan	62.00	55.8	17.3	21.57	0.190	18.13	CL CH	6.8~26.5	57.85	16.7	Pack drain
Gunsan	57.40	64.4	22.3	36.28	0.220	17.74	CL CH	2.1~14.6	40.35	8.35	Sand drain, S.C.P
Average	42.23	45.95	18.5	26.48	0.208	18.00			46.47	12.86	

지반 속에 발생된 최대수평변위량 δ_m 으로 나타냈다. 그림 중에 A그룹에 속하는 연약지반의 두께는 10m이하이며 B그룹에 속하는 연약지반의 두께는 10m에서 20m사이이며 C그룹에 속하는 연약지반의 두께는 20m이상 40m이하이다.

Figure 9에서 보면 연약지반의 수평변위량은 A그룹의 경우가 제일 작고 C그룹의 경우가 제일 크게 발생하였음을 알 수 있다. 즉, 이 결과로부터 연약지반의 두께가 두꺼울수록 수평변위가 크게 발생한다는 경향을 확인할 수 있다.

일반적으로 도로는 교통량의 수용 목적에 따라 결정되므로 도로저면폭 B의 변화는 비교적 적으나 연약지반의 두께 H는 지역에 따라 크게 변할 수 있다. 따라서 연약지반이 두꺼우면 상대적 도로성토규모 H/B도 자연 커진다고 할 수 있으며, 이 상대적 도로성토규모가 커지면 연약지반의 수평변위가 크게 발생됨을 의미한다.

Marche and Chapuis(1974)는 성토규모 H/B가 0.14로 작은 경우 사면안전율이 1.3이상이 되면 측방변위가 크게 감소하지만 성토규모 H/B가 1.15로 큰 경우는 사면안전율이 1.4이상이 되어야 측방변위가 크게 감소할 수 있다고 하였다. 따라서 상대적 성토규모는 연약지반의 측방유동에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 성토규모와 소요사면안전율을 이용하면 연약지반 상 도로성토 시 측방유동 발생가능성을 판단할 수 있다고 하였다.

또한 Oteo(1977)는 성토규모 H/B와 무차원계수 R(= $\delta_o E_s / qB$: δ_o 는 성토사면 선단에서의 측방변위, E_s 는 지반계수, q 는 성토하중, B는 성토저면폭)의 관계를 이용하여 측방유동판정법을 제시하였다. 따라서 성토규모가 크면 수평변위량이 크게 발생하므로 측방유동을 방지하려면 사면의 안전성도 함께 검토해야한다고 하였다.

4.2 연약지반의 지지안전율

Figure 10은 연약지반의 지지안전율(F_b)과 현장실측 최대수평변위량(δ_m)과의 관계를 나타낸 그림이다. Figure 10에 의하면 연약지반의 지지안전율이 크면 수평변위가 작게 발생되었으나 지지안전율이 작으면 수평변위가 크게 발생되었다. 특히 지지안전율이 1이하가 되면 수평변위가 급격히 크게 발생되었음을 보여주고 있다.

여기서 연약지반의 지지안전율(F_b)은 성토하중($p = \gamma h$)

에 대한 점성토지반의 극한지지력(q_u)의 비로 나타낼 수 있으므로 다음과 같다.

$$F_b = \frac{q_u}{p} = \frac{q_u}{\gamma h} \quad (1)$$

Tschebotarioff(1973)는 상재하중이 연약지반 비배수 전단강도의 3배 이상이 되면 연약지반 속에 전단변형이 발생되기 시작하고 5.14배 이상이 되면 연약지반 속에 전단파괴가 발생된다고 하였다.

전단파괴는 성토하중에 의한 상재압이 연약지반의 지지력과 같아 질 때 발생되므로 $p = q_u$ 에서 $p = \gamma h = 5.14c$ 가 되어 지지안전율은 $F_b = q_u/p = 5.14c/\gamma h = 1$ 이 된다는 것을 의미이다.

한편 성토하중에 의한 상재압이 연약지반의 비배수 전단강도의 3배와 같아 질 때 연약지반 속에 전단변형이 발생된다고 하므로 $p = \gamma h = 3c$ 로 표현할 수 있으며, 이때의 지지안전율은 $F_b = 5.14c/\gamma h = 5.14c/3.0c = 1.7$ 이 된다.

Figure 10에서 보면 지지안전율 F_b 가 1.7 이상일 때 최대수평변위량은 50mm이하로 예측되었다. 따라서 최대수평변위량이 50mm이하로 발생한 경우는 연약지반 속에 전단변형이 일어나지 않는 안전한 상태였다고 할 수 있을 것이다. 그러나 지지안전율 F_b 가 1.0이하일 때는 최대수평변위량이 100mm이상으로 예측되었다. 이 경우는 연약지반 속에 전단파괴 후에 수평변위량이 크게 발생된 것으로 판단된다. 한편 지지안전율 F_b 가 1.0 ~ 1.7사이의 경우는 수평변위량이 50mm이하에서부터

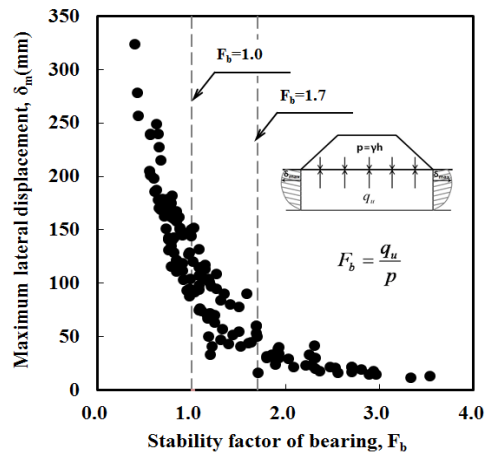


Fig. 10. Relationship between stability factor of bearing and maximum lateral displacement

100mm 이상까지도 측정된 값으로서 전단변형에서부터 전단파괴 시까지 발생한 수평변위량이라는 것을 알 수 있다. 결국 지지안전율이 크면 수평변위량이 작게 발생하고 지지안전율이 작으면 수평변위량은 크게 발생한다는 것을 알 수 있다.

5. 측방유동에 영향을 미치는 요소

연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 요소는 연약지반에 관련된 요소와 도로성토에 관련된 요소의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 먼저 연약지반에 관련된 요소로는 연약지반의 두께, 비배수전단강도, 지반계수를 들 수 있으며 도로성토에 관련된 요소로는 성토규모와 성토속도를 열거할 수 있을 것이다. 그 밖에도 연약지반과 도로성토에 모두 관련된 요소로 안정수를 들 수 있다. 이들 요소에 대한 영향을 조사하면 다음과 같다.

5.1 연약지반의 두께와 도로성토저면폭

Figure 11은 13개 연약지반지역에서 도로성토를 실시하여 발생한 연약지반의 최대수평변위 δ_m 와 연약층의 두께 H 의 관계를 도시한 결과이다. 이 그림 속에 표시된 바와 같이 연약지반에서 발생한 최대수평변위량 δ_m 은 연약지반의 두께 H 와 식 (2)의 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\delta_m = 9H + k_1 \quad (2)$$

여기서 δ_m 의 단위는 mm이며 H 의 단위는 m이다. k_1

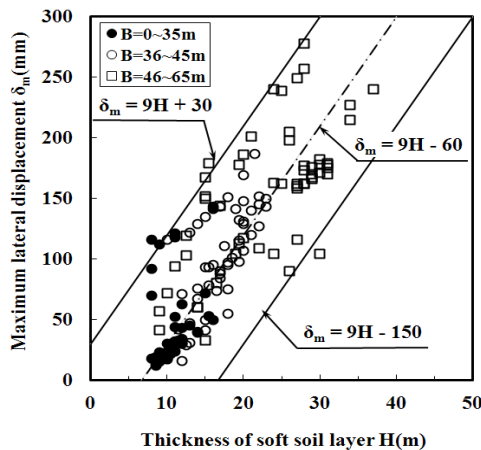


Fig. 11. Relationship between thickness of soil layer and maximum lateral displacement

은 30에서 -150 사이의 상한 하한 값을 가지며 평균적으로 -60을 적용할 수 있다.

Figure 11에 의하면 연약지반의 최대수평변위는 연약층의 두께가 클수록 선형적으로 크게 발생하였음을 알 수 있다. 즉 연약지반 속 최대수평변위량의 변화량 $\Delta\delta_m$ 은 연약층 두께의 증가량 ΔH 의 0.9% 정도씩 증가하여 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 연약지반의 두께가 큰 지역일수록 측방유동이 발생할 가능성이 크므로 대책을 보다 철저히 마련하고 도로성토시공을 할 필요가 있다. 이 결과로부터 연약지반의 두께는 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중에 하나임을 확인할 수 있을 것이다.

또한 Figure 11 속에는 모든 계측 자료를 도로성토 저면폭의 크기에 따라 세 그룹으로 구분하여 도시하였다. 즉 도로성토 저면폭이 35m이하인 경우, 36m에서 45m이하인 경우, 46m에서 65m사이인 경우의 세 그룹으로 구분하였다. Figure 11에서 알 수 있는 바와 같이 도로성토저면폭이 큰 그룹일수록 수평변위가 크게 발생되었다. 다시 말하면 46m~65m폭의 경우가 수평변위가 제일 크게 발생하였고 0~35m폭의 경우가 제일 작게 발생하였다. 도로성토저면폭은 성토높이와 연관이 있게 결정되므로 결국 도로성토저면폭은 성토규모를 나타내는 지표가 된다. 따라서 도로성토저면폭도 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

5.2 연약지반의 비배수전단강도

Figure 12는 도로성토를 실시하여 발생한 연약지반의 최대수평변위량 δ_m 을 연약지반의 비배수전단강도 c_u 와 연계시킨 상관관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 성토높이 및 비배수전단강도가 다르더라도 비배수전단강도가 큰 연약지반에서는 최대수평변위량이 적게 발생되었으며 비배수전단강도가 작은 연약지반에서는 최대수평변위량이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

Figure 12에 도시된 바와 같이 연약지반에서 발생한 최대수평변위량 δ_m 은 연약지반의 비배수전단강도 c_u 와 식 (3)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\delta_m = -290 \ln c_u + k_2 \quad (3)$$

여기서 δ_m 의 단위는 mm이며 c_u 의 단위는 kPa이다.

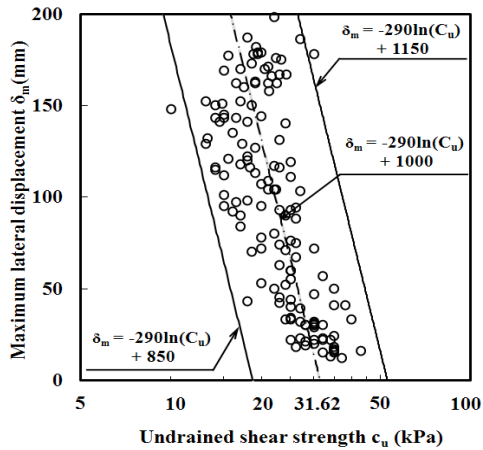


Fig. 12. Relationship between undrained shear strength and maximum lateral displacement

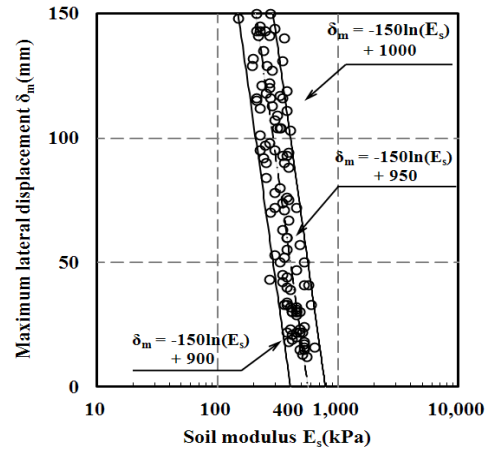


Fig. 13. Relationship between soil modulus and maximum lateral displacement

한편 k_2 은 850에서 1,150 사이의 값을 가지며 평균치로 1,000을 적용할 수 있다. Figure 12의 검토결과 연약지반의 비배수전단강도도 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있다.

5.3 연약지반의 지반계수

Figure 13은 도로성토를 실시하여 발생된 연약지반의 최대수평변위량 δ_m 을 연약지반의 지반계수 E_s 와 연계시킨 상관관계를 나타낸 그림이다. 여기서 지반계수는 비배수전단강도와 연계하여 적용하였다(김정훈, 2012). 이 그림에서 보는 바와 같이 연약지반의 지반계수가 클수록 최대수평변위는 감소함을 알 수 있다.

연약지반의 변형계수 즉 지반계수는 변형률에 대한 응력의 기울기로서 지반계수가 크다는 것은 작은 변형률에서 큰 응력이 발달한다는 의미이다. 따라서 큰 도로 성토하중이 연약지반 상에 작용하여도 연약지반의 변형률이 작게 발생하므로 연약지반 속의 최대수평변위량도 작게 발생할 것이다. 따라서 지반계수가 큰 연약지반에서는 수평변위량이 작게 발생하였고 지반계수가 작은 연약지반에서는 수평변위량이 크게 발생하였다. 결국 연약지반의 지반계수도 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있다.

Figure 13에 도시된 바와 같이 연약지반에서 발생된 최대수평변위량 δ_m 은 연약지반의 지반계수 E_s 와의 관계는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\delta_m = -150 \ln E_s + k_3 \quad (4)$$

여기서 δ_m 의 단위는 mm이며 E_s 의 단위는 kPa이다. 한편 k_3 는 900에서 1,000 사이의 값을 가지며 평균치로 950을 적용할 수 있다.

5.4 연약지반의 안정수

Figure 14는 도로성토를 실시하여 발생된 연약지반의 최대수평변위량 δ_m 을 연약지반의 안정수 $N_s (= \gamma h/c)$ 와 연계시킨 상관관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 최대수평변위는 연약지반의 안정수가 클수록 선형적으로 크게 발생하였음을 알 수 있다. 연약지반에서 발생된 최대수평변위량 δ_m 은 연약지반의 안정수 N_s 와 식 (5)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\delta_m = 28N_s + k_4 \quad (5)$$

여기서 δ_m 의 단위는 mm이다. 한편 k_4 는 30에서 -90 사이의 값을 가지며 평균치로 -30을 적용할 수 있다. 이 식의 관계에 의하면 연약지반의 최대수평변위량의 증가량 $\Delta\delta_m$ (mm)은 안정수의 증가량 ΔN_s 의 28배에 해당함을 알 수 있다. 결국 연약지반의 안정수도 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있다.

여기서 안정수 $N_s (= \gamma h/c)$ 는 연약지반의 비배수전단강도에 대한 성토하중 γh 의 비로서 성토하중이 클수록 혹은 연약지반의 비배수전단강도가 작을수록 안정수가 커지게 된다. 성토하중이 클수록 혹은 연약지반의 비배수전단강도가 작을수록 연약지반의 측방유동의 가능성은 증대될 것이므로 Figure 14에서 보는 바와 같이 안정

수가 큰 현장 일수록 연약지반 속의 수평변위가 크게 발생된 것이라 생각된다.

Tschebotarioff(1973)는 N_s 가 3이 되면 연약지반 속에 전단변형이 시작된다고 하여 이 때의 성토하중을 항복 하중과 같다고 하였고, N_s 가 5.14가 되면 연약지반 속에 전단파괴가 발생된다고 하였다. 또한 Meyerhof(1951)는 N_s 가 8.3이 되면 성토하중이 극한하중에 도달한다고 하였다.

Figure 14에 도시된 최대수평변위량 δ_m 과 안정수 N_s 사이의 관계식 (5)의 평균치에 $N_s=3$ 을 대입하면 최대수평변위는 54mm로 산정된다. 따라서 연약지반에 전단변형이 발생됨이 없이 도로성토를 실시할 수 있는 연약지반의 허용수평변위량 기준은 안정수 N_s 가 3일 때 산정된 최대수평변위 54mm에 10%정도의 여유를 보아 50mm로 정하는 것이 바람직할 것이다.

한편 식 (5)에 $N_s=5.14$ 를 대입하면 최대수평변위는 114mm로 산정된다. 이는 연약지반에 최대수평변위가 114mm에 이르면 전단파괴가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 연약지반에 전단파괴가 발생됨이 없이 도로성토를 실시할 수 있는 연약지반의 수평변위량 기준은 안정수 N_s 가 5.14 일 때 산정된 최대수평변위 114mm에 10%정도의 여유를 보아 100mm로 정하는 것이 바람직할 것이다.

5.5 성토속도

Figure 15는 성토속도와 연약지반의 최대수평변위량 δ_m 과의 상관관계를 도시한 그림이다. 여기서 성토속도

는 성토완료시점에서의 일일평균속도 v (m/day)를 적용하였다. 이 그림에 의하면 성토속도가 빠를수록 연약지반의 최대수평변위는 크게 증가되었음을 알 수 있다. 이는 성토를 빠르게 시공하면 성토하중재하로 인하여 연약지반에 발생하는 과잉간극수압이 소멸될 시간적 여유가 없어 압밀이 이뤄지지 못하고 연약지반이 측방으로 유동하였기 때문으로 생각된다. 따라서 도로성토 시에는 일일성토속도를 적절히 조절하여 수평변위가 허용치이내에 있도록 항상 시공관리를 철저히 해줄 필요가 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있을 것이다.

Figure 15에 도시되어 있는 바와 같이 성토속도 v (m/day)와 최대수평변위량 δ_m (mm)은 다음과 같은 상관식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$\delta_m = 3500v - k_5 \quad (6)$$

여기서 δ_m 의 단위는 mm이며 v 의 단위는 m/day이다. 한편 k_5 는 200에서 400 사이의 값을 가지며 평균치로 300을 적용할 수 있다.

앞 절에서 연약지반에 전단변형이 발생됨이 없이 도로성토를 실시할 수 있는 연약지반의 허용수평변위량 기준은 50mm로 정하는 것이 바람직하다고 제안한 바 있다. 만약 연약지반 속에 발생하는 측방변형량을 이 기준에 맞춰 50mm이내로 관리하고자 한다면 성토속도는 식 (6)에 의하여 0.1m/day으로 산정된다. 따라서 연약지반 속에 발생하는 연약지반의 측방변형량을 50mm이내로 관리하고자 한다면 성토속도를 0.1m/day이하로 정하여 성토시공을 실시함이 좋을 것이다. 결국 도로성토속

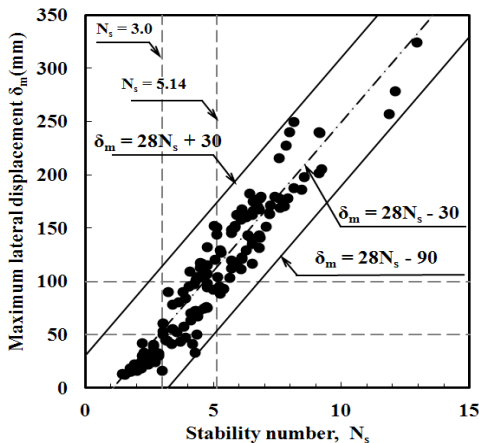


Fig. 14. Relationship between stability number and maximum lateral displacement

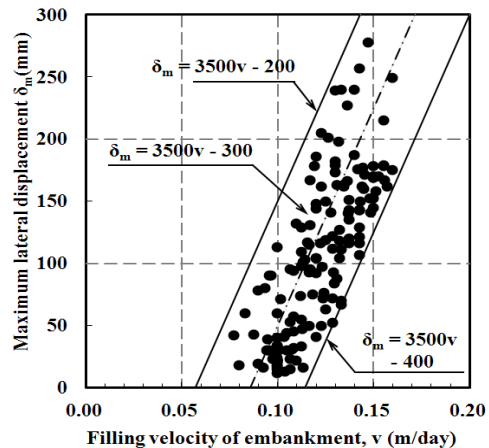


Fig. 15. Relationship between filling velocity of embankment and maximum lateral displacement

도로 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 주요 요소 중에 하나임을 알 수 있다.

6. 결론

연직배수공법이 적용된 연약지반상에 도로성토를 실시할 경우 성토규모와 지지안전율이 연약지반의 수평변위량에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 요소를 분석 고찰한 결과로 얻은 중요한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연약지반의 규모에 대한 상대적 성토규모가 클수록 연약지반 속의 수평변위는 크게 발생한다. 특히 연약지반이 두꺼우면 성토규모 H/B도 자연 커지므로 연약지반의 수평변위량은 크게 발생한다.
- (2) 연약지반의 두께와 비배수전단강도, 지반계수 및 안정수는 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 중요한 요소다. 즉 연약지반의 비배수전단강도와 지반계수가 작을수록 그리고 안정수가 클수록 연약지반의 최대수평변위량은 크게 발생된다.
- (3) 도로성토로 인하여 연약지반 속에 전단변형이 발생되지 않는 안전한 상태에서는 안정수가 3이하가 되고 지지안전율이 1.7이상인 된다. 그러나 연약지반 속에 전단파괴가 발생하는 불안정한 상태에서는 안정수가 5.14이상인 되고 지지안전율이 1.0이하가 된다.
- (4) 도로성토로 인하여 연약지반 속에 전단변형이 발생하는지 여부를 판단할 수 있는 허용수평변위량의 기준은 50mm로 정하는 것이 바람직하며 연약지반에 전단파괴가 발생됨이 없이 도로성토를 실시할 수 있는 연약지반의 수평변위량 기준은 100mm로 정하는 것이 바람직할 것이다.

- (5) 도로성토속도는 연약지반의 측방유동에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중에 하나이다. 연약지반에 전단변형이 발생됨이 없이 도로성토를 실시하여 연약지반 속에 발생하는 측방변형량을 제안치 50mm 이내로 관리하고자 한다면 성토속도를 0.1m/day이하로 정하여 시공함이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. 김재홍 (2011), 측방유동 영향을 받는 해안매립 연약지반속 지하매설관에 관한 연구, 박사학위논문, 중앙대학교대학원.
2. 김재홍, 홍원표 (2010), 연약지반의 측방유동으로 인하여 매설관에 작용하는 측방토압, 한국지반환경공학회논문집, 11(9), 27-38.
3. 김정훈 (2012), 도로성토로 인한 연약지반의 측방유동에 관한 연구, 박사학위논문, 제주대학교대학원. pp.121-124
4. 이광우 (2006), 연약지반 측방유동 억제를 위한 토목섬유 보강성토지반말뚝시스템의 설계법, 박사학위논문, 중앙대학교대학원.
5. 홍원표 (1994), 수동말뚝, 이진문화사.
6. Hong, W. P. (2005), Lateral soil movement induced by unsymmetrical surcharges on soft grounds in Korea, IW-SHIGA2005, pp.135-154.
7. Hong, W. P. and Lee, K. W. (2009), Evaluation of lateral movement of piled bridge abutment undergoing lateral soil movement in soft ground, Marine Georesources and Geotechnology, Vol.27, pp.177-189.
8. Leroueil, S., Magnan J. P., and Tavenas, F. (1990), Embankments on soft clays, Ellis Horwood, pp.360.
9. Marche, R. and Chapuis, R. (1974), Contrôle de la stabilité des remblais par la mesure des déplacements horizontaux, Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, No.1, pp.182-201 (in French).
10. Oteo, C. S. (1977), Horizontally Loaded Piles Deformation Influence, Proc. 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo, pp.101-106.
11. Peck, R. B. (1969), Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, Proc. 7th ICSMFE State of the Art Volume, pp.225-290.
12. Tavenas, F., Mieussens, C., and Bourges, F. (1979), Lateral displacements in clay foundations under embankments, Canadian Geotechnical Journal, Vol.16, pp.532-550.
13. Tavenas, F. and Leroueil, S. (1980), The behaviour of embankments on soft clay foundation, Canadian Geotechnical Journal, Vol.17, pp.236-260.
14. Tschebotarioff, G. P. (1973), Foundations, retaining and earth structures, Mc Graw-Hill Kogakusha, Ltd., pp.400-410.

(접수일자 2011. 11. 3, 심사완료일 2012. 9. 3)