

## 낙동강 하구지역 성토하부 연약지반의 측방변형 특성에 관한 사례 연구(I)

### Case Study of Characteristics on Lateral Deformation in Soft Ground under Embankment in the Nakdong River Estuary(I)

한병원<sup>1)</sup>, Byung-Won Han, 손화수<sup>2)</sup>, Hwa-Soo Son, 성인출<sup>3)</sup>, In-Chool Sung, 백영균<sup>4)</sup>, Young-Gyun Baek, 이계춘<sup>5)</sup>, Gay-Chun Lee

<sup>1)</sup> (주)바이텍코리아 영남지사 이사, Director, Baytech Korea Inc.

<sup>2)</sup> (주)바이텍코리아 영남지사 사원, Engineer, Baytech Korea Inc.

<sup>3)</sup> LH 과장, Section Chief, Korea Land & Housing Corporation

<sup>4)</sup> LH 선임 과장, Section Chief, Korea Land & Housing Corporation

<sup>5)</sup> (주)바이텍코리아 계측 엔지니어링 사업본부 사장, President, Baytech Korea Inc.

**SYNOPSIS** : 낙동강 하구지역 연직배수공법이 적용된 연약지반에서 성토시 발생할 수 있는 지반의 측방변형에 대해 3개소 현장 35개 지점에서 수행한 현장 계측데이터를 분석하였다. 성토과정에서 측방변형 패턴 및 변형량을 파악하는데 가장 우선적으로 파악해야 할 계측항목이 지중경사계이며 지반특성별 측방변형 패턴(최대 측방변위발생 지점, 전단변위 발생지점, 지층에 따른 변위발생 형태 등)의 정밀 분석을 위해서는 지중경사계가 설치된 지점의 지층구성을 파악하는 것이 가장 중요하다는 것을 알 수 있었다. 최대 측방변위량과 성토체 중앙부 침하량과의 관계에서는 Tavenas et al.(1979)이 제안한  $\Delta y = (0.18 + 0.09)\Delta s$  이하로 관측되었다. 또한 측방변형 억제 및 인접지반의 동반침하를 차단하기 위해 보강된 D.C.M., C.I.P.구간에서는 Tavenas et al.(1979)이 제안한  $\Delta y = (0.18 - 0.09)\Delta s$  이하로 관측되었다. 최대 측방변위량과 성토속도와의 관계에서는 과잉간극수압 소산에 필요한 충분한 시간과 원활한 배수가 될 수 있도록 시공관리(성토속도조절, 배수관리 철저)하는 것이 무엇보다도 중요하다는 사실을 다시 한 번 확인 할 수 있었다. 마지막으로 편재하중 재하에 따른 인접 지반 및 구조물의 침하 및 기울기 변화는 측방유동에 의한 거동과 함께 압밀침하에 의한 체적감소로 인한 인접지반의 동반침하가 상당기간 동안 발생하고 있는 것으로 관측되었다.

**Keywords** : embankment on soft ground, lateral soil movement, field monitoring, inclinometer, settlement, pusan clay

## 1. 서 론

최근 들어서 낙동강 하구일대를 중심으로 항만 및 도로, 철도, 단지조성공사가 활발하게 이루어지고 있다. 그런데 낙동강 하구 일원에 분포하는 부산점토(평야부 및 해안지역의 점토를 통칭)는 20m ~ 70m의 두꺼운 퇴적층을 형성하고 있는 연약지반으로서, 이 지역에 도로, 단지조성, 항만 등의 사업을 위해 각종 구조물을 설치할 경우 예상보다 과대한 침하와 장기침하 뿐만 아니라 측방유동에 대한 영향으로 시공의 안정성 및 인접구조물의 안정성을 위협하고 있다.

일반적으로 측방유동은 연약지반 위에 도로성토나 하천 제방과 같이 편재하중이 작용하게 되면, 지중 응력이 증가하고 간극수압이 변화되면서 체적이 수축되어 지반의 침하가 발생한다. 이러한 지반의 변형은 하중재하 초기에 탄성거동을 보이다가 하중이 증가하여 어느 시점(지반의 비배수 전단강도를 초과한

한계 성토고 근접)에 이르면 과잉간극수압이 급증하여 강도가 저하되고 소성영역이 확대되어 점차 소성 평형상태로 이전된다. 즉, 간극수압의 소산에 필요한 충분한 시간이 지나기 전에 재하하중을 지속적으로 증가시키면, 지반내의 과잉간극수압이 증가하게 되어 측방유동압이 발생 되고 이로 인해 흙입자의 소성화에 의한 수평적인 측방변위와 주변지반의 용기가 발생하게 된다.(홍원표, 2006) 이러한 측방변형은 결국 활동과괴를 유발시켜 성토체 및 인접구조물의 안정성에도 영향을 미치게 된다.(그림 1 참조)

통상 연약지반 상에 성토에 따른 측방변형을 파악을 위해서는 현장 계측 공법(Observation method)을 이용하여 설계단계에서 예측하지 못한 거동을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 다음단계 거동상태를 예측할 수 있어 보다 안전한 시공이 가능하다. 특히 지중경사계는 지반의 측방거동형태 및 양을 완벽하게 표현해주는 중요한 계측기기인데 실제 현장계측관리에서는 단순히 측방변위량에만 초점을 맞추어서 계측관리를 하기 때문에 보다 정밀한 분석이 실시되지 않고 있다. 따라서 측방유동의 정밀분석을 위해서는 지반의 프로파일, 시공이력(성토고, 속도)등과 연계된 분석이 중요할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 연직배수공법 및 측방유동억제공법(C.I.P., D.C.M.)이 적용된 연약지반 단지조성 공사 현장 3개소에서 경사계가 설치된 35단면의 계측결과를 분석하여 낙동강 하구지역 성토하부 연약지반의 측방변형 특성을 규명하고자 한다.

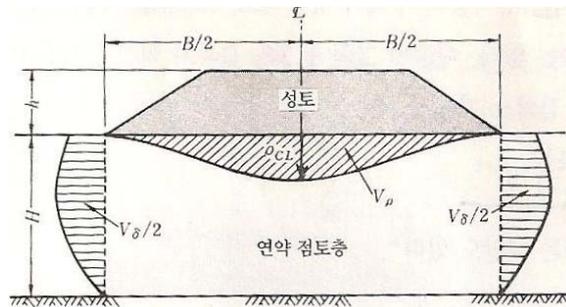


그림 1. 성토제방 하부 연약지반의 변형거동

## 2. 측방유동에 관한 기존 연구내용

일반적으로 연약지반에 편재하중(부분재하) 재하에 따른 거동특성은 다음과 같다.(土の壓密入門 참조)

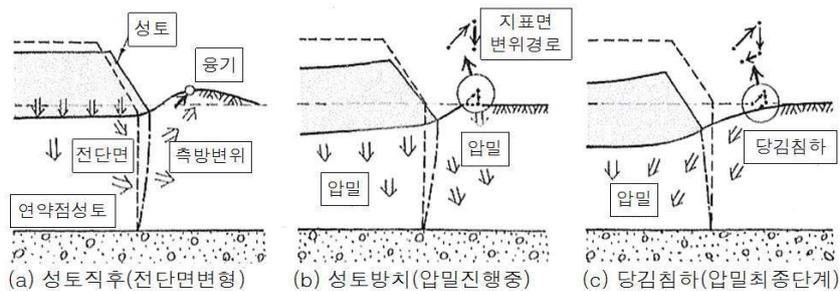


그림 2. 편재하중 재하에 따른 연약지반의 변형 형태

부분재하(도로성토, 제방성토, 등)에 의한 침하는 그림 2에서 보는 바와 같이 체적감소에 의한 압밀침하성분과 형상변형에 의한 전단변형 성분의 침하가 동시에 작용하며 그리고 2차압밀과 같은 크리프 변형이 추가로 발생한다. 전단변형에 의한 침하는 성토직후 단기간에 내에 발생한다.(a) 이때의 침하는 재하중의 크기 및 흙의 비배수 전단강도와 밀접한 관계를 가지며 측방유동에 대해 주의가 필요한 시점이다. 전단변형이 발생한 후에는 압밀침하가 시간이 진행됨에 따라 점진적으로 발생하며(b) 마지막 단계에서는 성토체 안쪽으로 끌어당김 침하가 발생하게 된다.(c) 부분재하 인접에 구조물이 있을 경우에는 성토직후의 측방변형에 따른 안정성 검토뿐만 아니라 압밀단계에서 발생하는 성토체 안쪽으로 끌어당김 침하에 기인한 구조물의 안정성이 확보될 수 있도록 별도의 보강공법 등이 사전에 계획되어야 한다.

Tavenas et al.(1979)은 총 21개소의 성토구간에 대한 현장계측 결과를 토대로 연약지반의 침하량과 측방유동량 사이의 관계를 분석하였다. Tavenas et al.(1979)가 제시한 연약지반 상 성토시 침하량과 측방유동량 사이의 관계를 정리하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3에서 하중의 초기단계(O'P')에는 비교적 빠른 배수로 측방변위량이 연직침하량에 비하여 작지만( $\Delta y = (0.18 \pm 0.09)\Delta s$ ), 성토하중이 증가하면 정규압밀(NC)상태로 변화되며, 공사의 종료단계(P'A')에서는 배수상태로 거동하게 되어 측방변위량이 급격히 증가하고 그 크기는 연직변위량과 거의 같아진다.( $\Delta y = (0.9 \pm 0.2)\Delta s$ ) 또한 공사완료 후 장기간 방치시킨 경우(A'B')에는 배수상태로서 연직변위량에 비하여 측방변위량이 작아지는 것으로 보고되고 있다.( $\Delta y = (0.16 \pm 0.02)\Delta s$ )

Leroueil et al.(1990)은 측방유동에 의한 연약지반 변형거동의 과정을 세 단계로 설명하고 있다. 하중 재하시점부터 한계하중까지의 거동과 그 이후부터 극한하중까지의 거동, 그리고 극한하중 이후의 장기 거동의 3단계의 순서를 거치는 것으로 설명하였다. 재하초기에는 간극수압의 소산이 없는  $K_0$ 상태로 탄성적인 침하만이 인식되고, 하중의 증가에 따라 유효응력이 증가하여 어느 한계치를 넘게 되면 토립자가 항복하여 압축성이 급증함과 더불어 측방 변위량의 증가가 시작된다고 하였으며, 대부분의 측방유동은 이 구간에서 발생된다고 하였다.

홍원표(2006)는 Pack Drain(논산현장, 계측지점 19개소), Sand Drain(군산A, 계측지점 14개소) 및 Sand Drain + Sand Compaction Pile(군산B, 계측지점 23개소) 적용된 세 개의 현장에 대해서 성토 중앙부 침하량과 선단부 지중 최대수평변위량 관계를 분석한 결과 최대 측방변위량은 세 현장 모두 유사한 경향을 보이고 있으며 회귀분석결과  $\Delta y = (0.09)\Delta s$ 의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 위식에서 나타난 결과는 Tavenas et al.(1979)이 제안한 경험식의 하한계와 유사하며 대부분의 계측결과는 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 Tavenas et al.(1979)이 제안식의 상한계선 아래에 위치하고 있다. 침하량 증가에 따른 측방유동량의 증가가 Tavenas et al.(1979)의 연구결과에 비해 작은 원인은 연직배수재에 의한 배수 촉진 효과로 인해 성토하중 증가에 따른 과잉간극수압의 증가가 상대적으로 적어서 측방유동압이 작게 발생하였고 또한 Sand mate 및 PET mat가 연약지반의 측방유동 발생에 저항하는 효과를 발휘하였기 때문이라고 한다.

이광우(2009)는 성토하부 연약지반의 변형거동에 관한 모형실험에서 성토속도가 연약지반 침하 및 측방변위에 미치는 영향을 평가하기 위하여 성토속도에 따른 일평균 지반변형을 평가하였다. 모형 시험 결과 성토속도가 빨라질수록, 침하량 및 측방변위량이 비선형적으로 급속히 증가되었으며 이 비선형적인 지반변위의 증가는 모형지반의 예압밀 하중에 관계없이 성토속도의 증가에 따라 일정한 지수함수의 관계를 보이고 있는 것으로 관측되었다.

$$\Delta s = 0.3594e^{1.12v} \tag{1}$$

$$\Delta y_m = 0.0667e^{1.24v} \tag{2}$$

여기서,  $\Delta s$ 는 일평균 침하량(mm/day),  $\Delta y_m$ 은 일평균지중 최대수평변위(mm/day),  $v$ 는 성토속도(kPa/day)를 나타낸다.

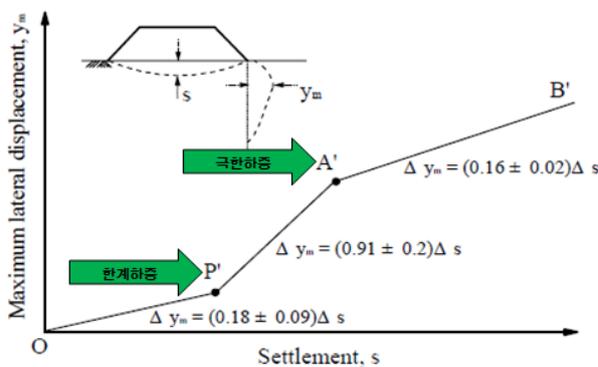


그림 3. 최대 측방변위와 침하량 관계(Tavenas et al. 1979)

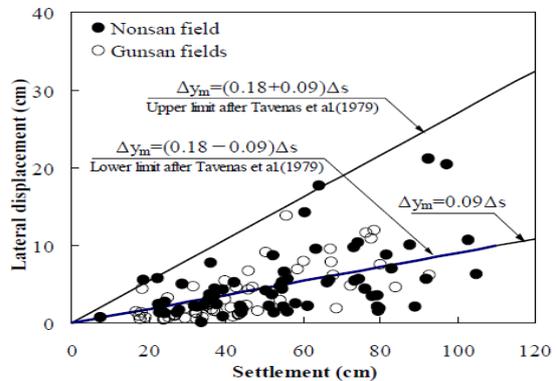


그림 4. 침하량과 측방변위량 관계(홍원표, 2006)

### 3. 낙동강 하구 퇴적층의 지반특성

정성교(2006)에 의하면 낙동강하구 일원에 분포하는 부산점토(평약부 및 해안지역의 점토의 통칭)의 퇴적환경 및 염분도 분포를 종합하면 심도 30m를 기준으로 상, 하부 점토층으로 각각 명확하게 구분된다. 즉 30m이전의 상부 점토층은 해수에서 비교적 느린 속도로 퇴적되어 염분도가 높으며 점토입자들 사이의 구조가 잘 발달될 수 있었으며, 하부점토층은 담수의 영향을 많이 받는 환경에서 퇴적되었으므로 상대적으로 염분도가 낮으며 상부점토층보다 점토입자들 사이의 구조가 덜 발달된 것으로 보고되고 있다. 본 연구대상지역중 A 지구를 제외한 B, C지구 현장은 위에서 언급한 바와 같이 30m를 기준으로 상, 하부 점토층으로 명확하게 구분되고 있는 것이 지반조사결과에서 알 수 있었으며 소성도 분석결과 CL, CH층이 주를 이루고 있는 것으로 나타났다.(그림 5 ~ 8)



그림 5. 연구대상 지역

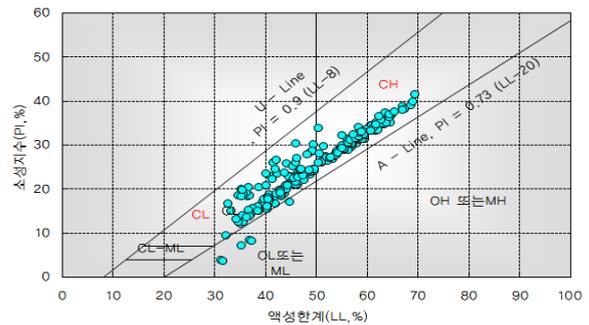


그림 6. A지구 현장의 소성도

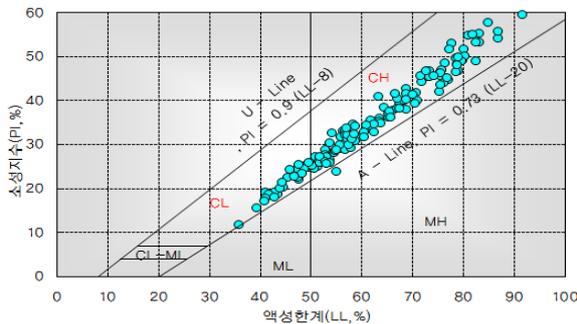


그림 7. B지구 현장의 소성도

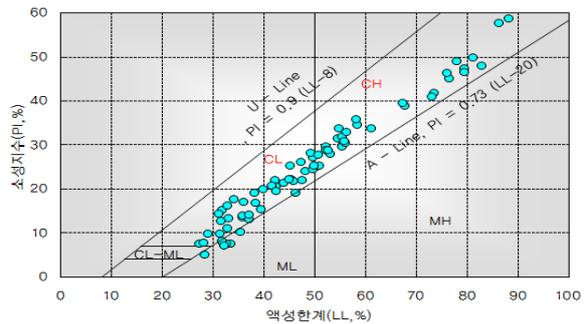


그림 8. C지구 현장의 소성도

#### 3.1 A지구 현장의 지반특성

A지구 현장의 지층구성은 전답 및 매립층, 퇴적층(점토, 모래, 자갈), 풍화암층으로 구성되어 있다. 먼저 전답 및 매립층은 지표로부터 0.3m ~ 2m 층후로 분포하며 주성분은 실트 섞인 모래, 점토 섞인 모래로 구성되어 있다. 퇴적층은 점토, 모래, 자갈층으로 구성되어 있다. 상부 점토층은 9.5m ~ 23.3m의 층후로 분포하며 주성분은 모래 섞인 점토, 실트 섞인 점토로 부분적으로 패각이 혼재되어 있어 하상퇴적층임을 보여주고 있다.(N값은 1/30 ~ 19/30) 모래층은 18m ~ 49.7m의 층후로 분포하고 있으며 주성분은 실트 섞인 모래, 점토 섞인 모래, 실트 및 점토 섞인 모래로 구성되어 있다. 자갈층은 0.9m ~ 18.3m의 층후로 분포하고, 주성분은 모래 섞인 자갈을 이루고 있으며 일부구간에서 실트 섞인 점토층이 혼재되어 나타나고 있다. 풍화암층은 1.2m ~ 2.8m의 층후로 분포하며 굴진 및 타격 시 실트 섞인 모래로 분해된다. 본 현장의 연약점성토층은 대부분 CL 및 CH층으로 분류되었으며 함수비는 28.7 ~ 61.4%, 액성한계( $W_L$ )는 31.2 ~ 69.3% ( $W_L > 50\%$ ), 액성지수(LI)는 0.33 ~ 1.88(액성지수(LI) > 1)로 관측되고 있다. 압밀시험결과 압축지수( $C_c$ )는 0.245 ~ 0.911, 수직압밀계수( $C_v$ )는 평균  $2.77 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 압밀이

력 특성은 약간 과소압밀상태를 보이거나 전반적으로 정규압밀상태로 나타났다. 강도 특성에서 비배수전단강도는 일축압축시험결과  $5.61 \sim 59.86\text{kN/m}^2$ (평균 :  $27.44\text{kN/m}^2$ ), 삼축압축 시험결과는  $5.95 \sim 63.25\text{kN/m}^2$ (평균 :  $29.16\text{kN/m}^2$ ), 강도증가율  $0.21 \sim 0.25$ (점토 강도증가율 :  $0.2 \sim 0.35$ )로 나타났다.

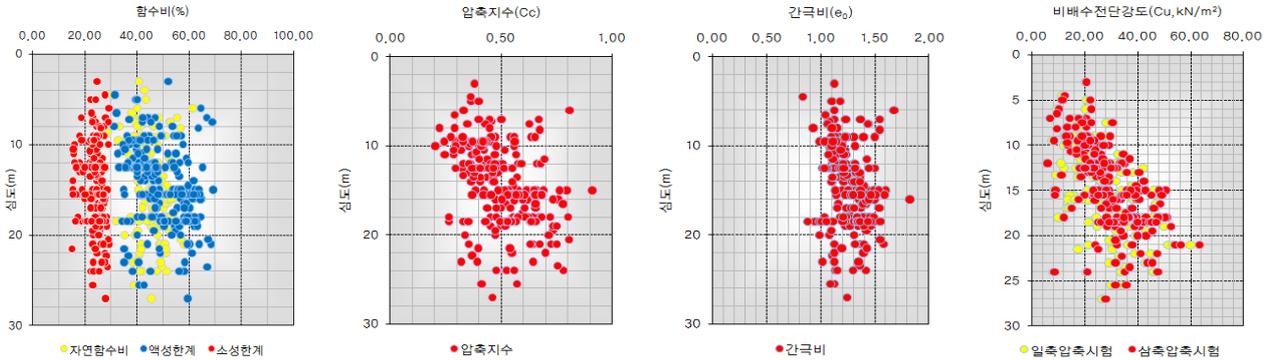


그림 9. A지구 현장의 지반특성

### 3.2 B지구 현장의 지반특성

B지구 현장의 지층구성은 매립층(모래, 점토), 퇴적층(모래, 점토, 모래, 자갈), 기반암층(풍화토, 풍화암, 연암)으로 구성되어 있다. 본 현장의 연약점토층은 대부분 CL 및 CH층으로 분류되었으며 함수비는 상부점토층은 55.7%, 중부 점토층은 67.5%, 하부점토층은 41.4%, 액성한계( $W_L$ )는 상부점토층 63.2%, 중부점토층은 75.9%, 하부점토층은 50.7%로 관측되고 있다. 압밀시험결과 초기간극비( $e_0$ )는 상부점토층은 1.59, 중부점토층은 1.80, 하부점토층은 1.08로 관측되었으며 압축지수( $C_c$ )는 상부점토층 0.74, 중부점토층 1.11, 하부점토층은 0.58로 나타났다. 수직압밀계수( $C_v$ )는 상부점토층  $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 중부점토층  $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 하부점토층은  $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 수평압밀계수( $C_h$ )는  $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 중부점토층  $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 하부점토층은  $6.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 관측되었다. 강도특성에서는 비배수전단강도(kPa)는 상부점토층  $1.58D_z + 12.62$ , 중부점토층  $1.66D_z + 12.60$ , 하부점토층은  $1.25D_z + 20.04$ , 강도증가율 0.28(점토 강도증가율 :  $0.2 \sim 0.35$ )로 나타났다.

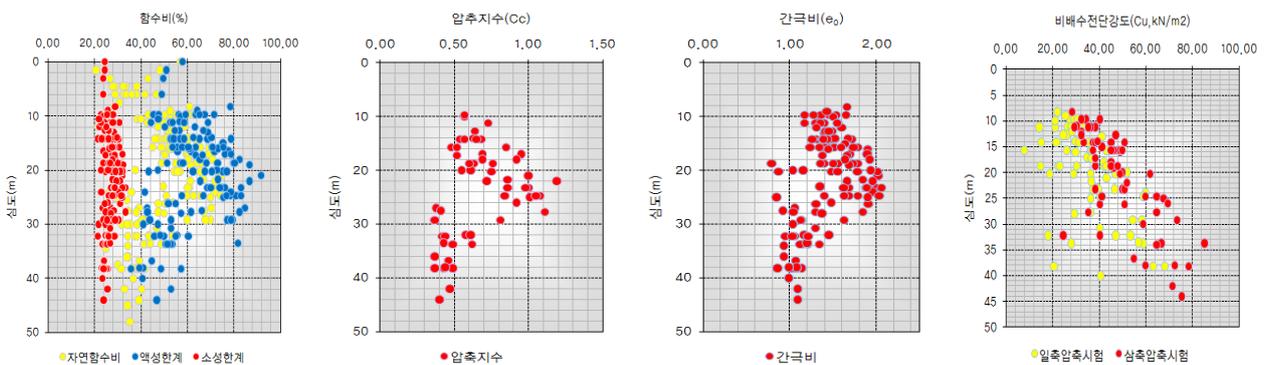


그림 10. B지구 현장의 지반특성

### 3.3 C지구 현장의 지반특성

C지구 현장의 지층구성은 매립층(매립토), 상부퇴적층(충적모래질토층), 연약점토층(충적점토층), 하부퇴적층(홍적사질토층, 제1홍적 점토층, 제2홍적 점성토, 홍적모래자갈층), 풍화암(풍화토, 풍화암), 기반암층으로 구성되어 있다. 먼저 매립토층은 지표로부터 0.7m ~ 3.5m 층후로 분포하고 있으며 성토 및 발의 경작토가 관측되고 있다. 상부퇴적층은 3.2m ~ 10.4m 층후로 분포하고 있으며 중, 소량의 실트를 함유한 세립질 모래가 관측되고 있다. 연약점토층은 16.3m ~ 29.7m 층후로 분포하고 있으며 세립질 점

토로 구성되어 있다.(패각 및 운모편 혼입) 하부퇴적토층 중 홍적사질토층은 층후가 13.2m ~ 20.3m 분포하며 세립질, 중립질 모래가 주를 이루고 있다. 제1홍적 점성토층은 층후가 0m ~ 5.7m분포하며 제2층적 점성토층은 층후가 0m ~ 6.6m 분포하며 실트질 점토가 주를 이루고 있다. 홍적모래자갈층은  $\phi 2 \sim 5\text{cm}$ 의 아원 ~ 아각상 자갈로 채취되었으며 그 하부에 풍화암 및 기반암이 존재하고 있는 것으로 관측되었다. 본 현장의 연약점성토층은 대부분 CL 및 CH층으로 분류되었으며 함수비는 35.7 ~ 70.4%, 액성한계( $W_L$ )는 35.8 ~ 82.8%( $W_L > 50\%$ ), 액성지수(LI)는 0.44~0.8로 관측되고 있다. 압밀시험결과 초기간극비( $e_0$ )는 상부점토층 구간은 평균 1.263, 하부점토층 구간은 1.628의 평균값을 보이고 압축지수( $C_c$ )는 0.35 ~ 0.81, 수직압밀계수( $C_v$ )는 평균  $2.47 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 관측되었다. 강도 특성에서 비배수전단강도는 일축압축시험결과 평균  $0.247\text{kg}/\text{cm}^2(24.22\text{kN}/\text{m}^2)$ , 삼축압축 시험결과  $0.310\text{kg}/\text{cm}^2(30.4\text{kN}/\text{m}^2)$ , 강도증가율 0.224 ~ 0.252(점토 강도증가율 : 0.2 ~ 0.35)로 나타났다

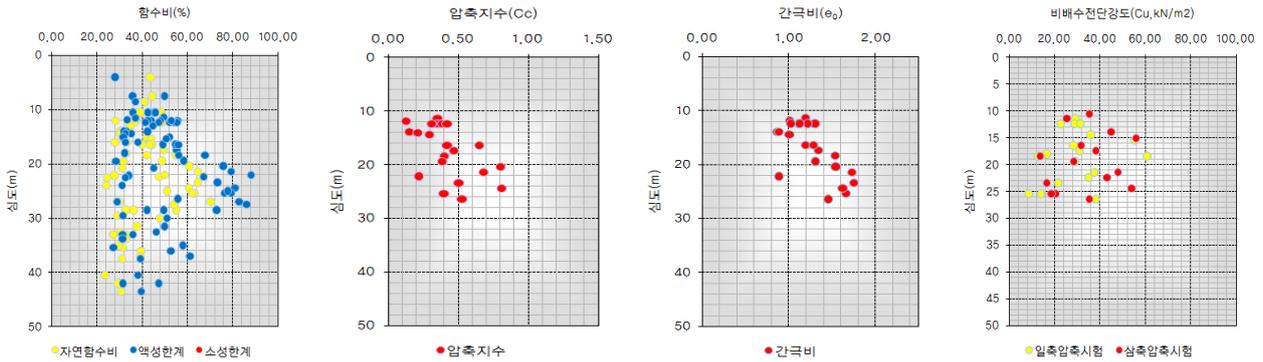


그림 11. C지구 현장의 지반 특성

#### 4. 측방변형 특성

##### 4.1 낙동강 하구 연약지반의 측방유동 형태

연약지반 상 성토로 인한 측방유동 형태는 일반적으로 지층의 구성 형태에 따라 크게 달라진다. 특히 연약한 점토층 상부에 상대적으로 강성이 큰 토층이 존재할 경우에는 상부 측방변위가 구속되는 효과를 보이고 있으며 또한 지표면 부근에서는 성토내측으로 끌려 들어가는 측방변위가 생기는데 이는 모래층과 같이 그 자체가 압축성이 작은 지층이 그 하부 고압축성 점토층의 침하형태에 적응하고자 탄성보처럼 처짐에 의한 것으로 판단된다.

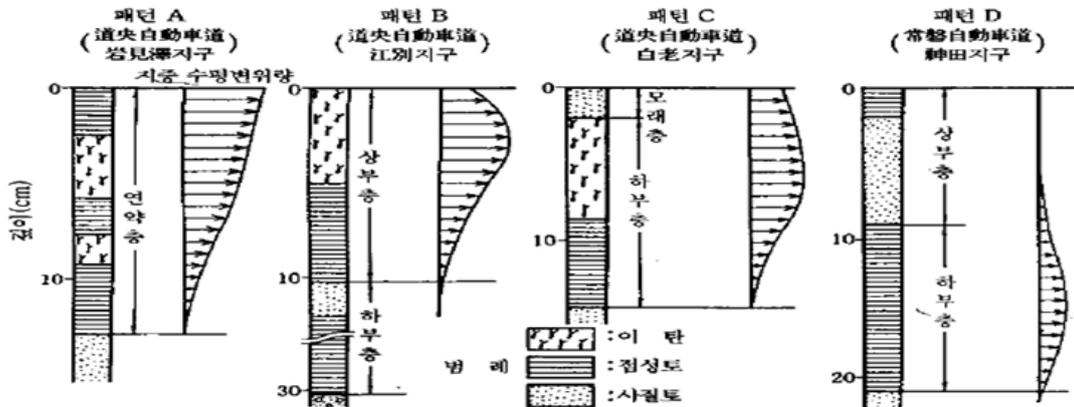


그림 12. 지층구성에 따른 측방변형 형태(지반의 측방유동 참조)

본 연구 대상지역의 지층경사계를 통한 측방변형의 대표적인 패턴은 다음과 같다.

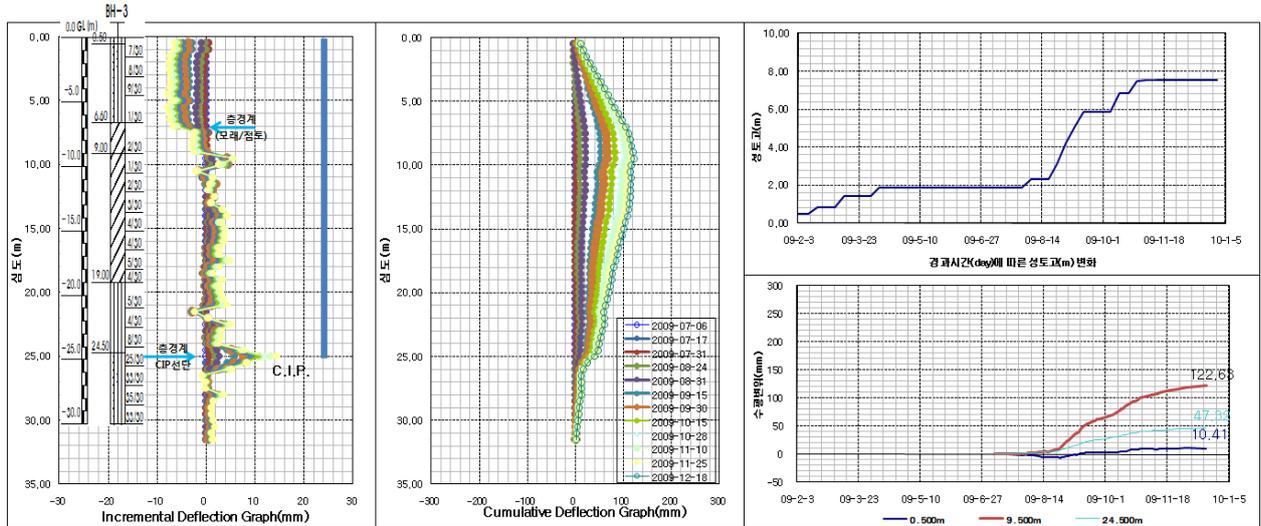


그림 13. A지구 현장의 대표적인 측방변형 Pattern(P.B.D. + C.I.P.)

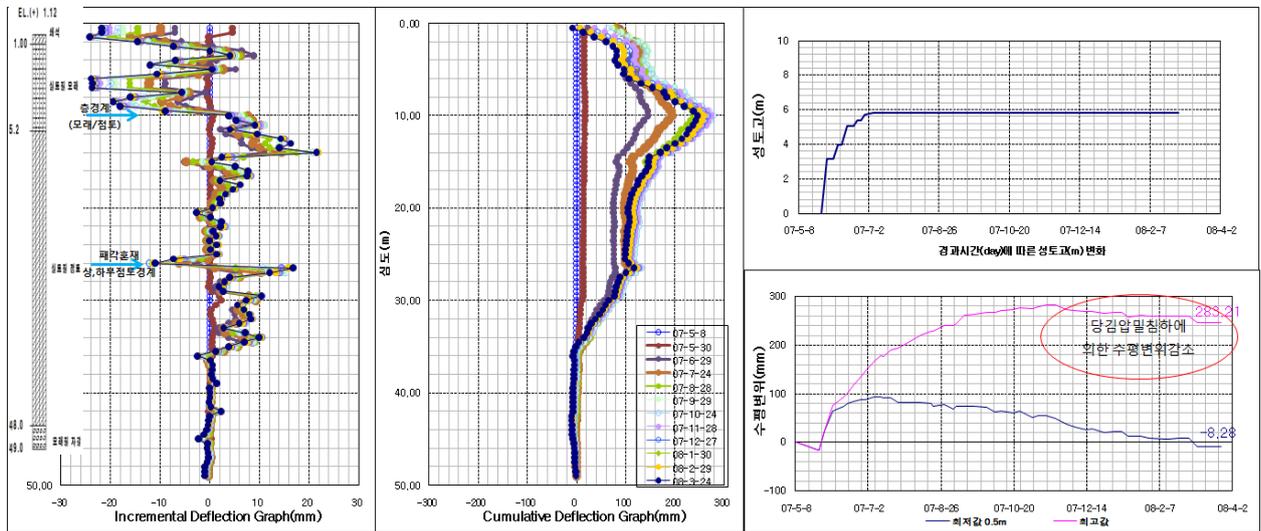


그림 14. B지구 현장의 대표적인 측방변형 Pattern(P.B.D.)

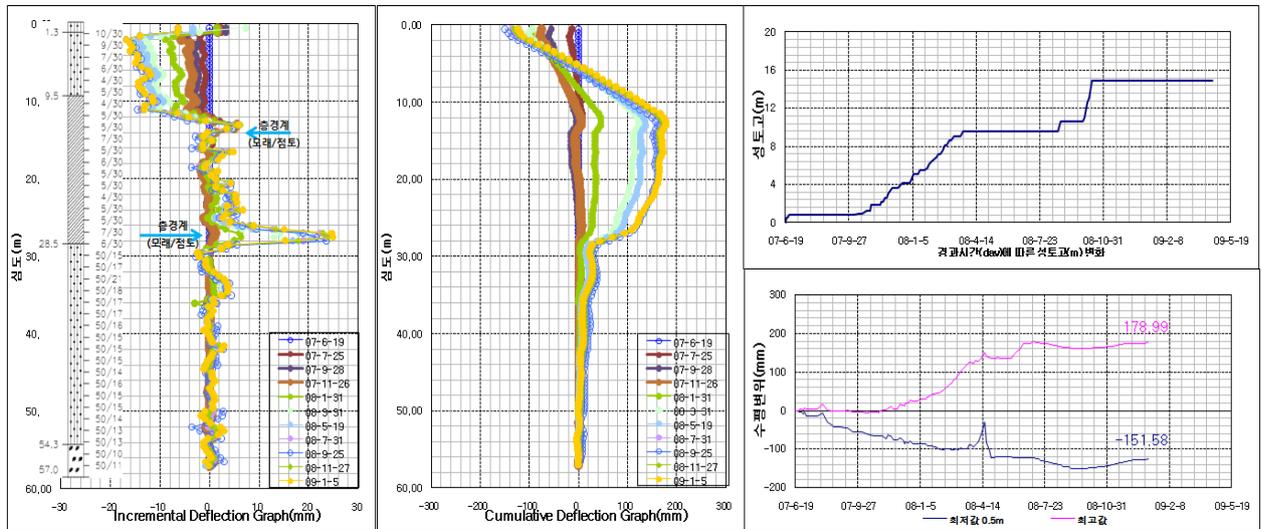


그림 15. C지구 현장의 대표적인 측방변형 Pattern(P.B.D.)

본 연구대상지역에서 편재성토에 의한 측방변형 패턴은 모래층과 연약층의 층경계를 기점으로 상부 모래층은 성토체 내측으로 연약층 구간은 성토체 외측으로 변형이 발생하고 있는 것이 Incremental Deflection Graph에서 관측되고 있다. 또한 측방변위 최대 발생지점은 대부분 상부 모래층과 하부 연약층의 층경계부에서 발생하고 있는 것으로 관측되었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 상대적으로 연약층에 비해 강성이 큰 모래층이 존재함으로써 상부에서 측방변형을 구속하는 효과를 보이고 있는 것으로 판단된다.

층경계부와 측방변형을 억제하기 위해 설치된 D.C.M., C.I.P. 선단부에서 상부 지층과의 강성차이에 의한 국부적인 변형이 관측되고 있으며, 일부 경사계에서는 연약층 내에 존재하는 Sand Seam 및 패각 혼재에 기인한 것으로 추정되는 변형이 관측되기도 했다.(그림 13, 14 참조)

전반적으로 연약지반에서 편재 성토를 실시될 경우 지중의 측방변형 형태는 지중의 구성을 직접적으로 반영하는 형태의 변형형태를 보이고 있으므로 성토체의 안정관리를 위해서는 보다 정밀한 지중경사계의 분석이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4.2 측방변위와 침하 관계

일반적으로 연약지반 상부에 성토를 시공하면 침하량과 측방변위량이 거의 선형적인 관계를 보이며 배수공법이 적용된 현장에서는 성토체 중앙부의 침하량이 측방변위량 보다 크게 발생한다. Tavenas et al.(1979)은 지반 개량공법이 적용되지 않는 연약지반 상 성토현장 계측사례를 분석한 결과 성토 초기에는 성토중앙부 침하량과 성토제방 선단부 직하 지중 최대수평변위량은  $\Delta y = (0.18 \pm 0.09)\Delta s$  식과 같은 관계를 가진다고 하였다. 본 연구대상의 계측결과 성토 중앙부 침하량과 성토제방 선단부 최대 지중수평변위량을 Tavenas et al.(1979)의 연구결과 함께 나타내면 다음과 같다.(그림 16 ~ 20 참조)

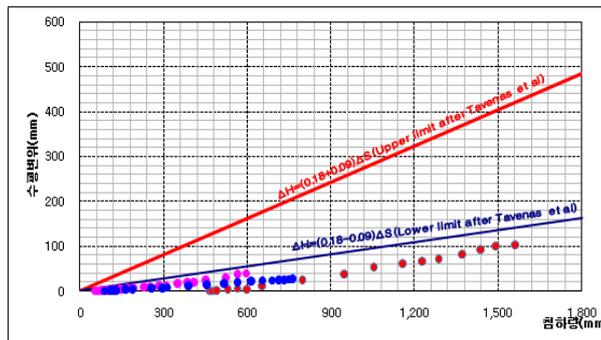


그림 16. A지구 측방변위량 vs 침하량(P.B.D.+C.I.P.)

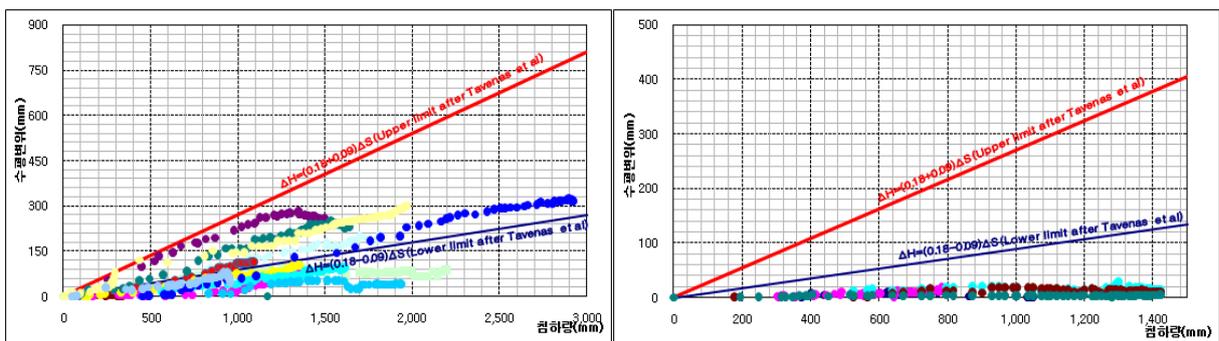


그림 17. B지구 측방변위량 vs 침하량(P.B.D.)

그림 18. B지구 측방변위량 vs 침하량(P.B.D.+D.C.M.)

- 계측결과 성토 중앙부 침하량과 최대측방 변위량은 먼저 연직배수공법만 채택된 구간에서는 3개소 현장 모두 유사한 경향을 보이고 있으며 최대 측방변위량은 Tavenas et al.(1979)이 제안한 상한치 ( $\Delta y = (0.18 + 0.09)\Delta s$ ) 이하로 관측되고 있다.

- 측방변형을 억제 및 인접지반 동반 침하를 차단하기 위해 보강된 D.C.M. 및 C.I.P.구간에서는 Tavenas et al.(1979)이 제안한 하한치( $\Delta y = (0.18 - 0.09)\Delta s$ )이하로 관측되고 있다. 특히 D.C.M.(3열)으로 보강된 구간에서는 측방변위량이 현저히 감소하여 관측되었다.

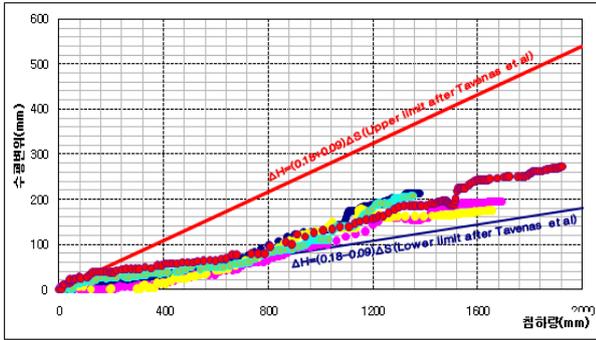


그림 19. C지구 측방변위량 vs 침하량(P.B.D.)

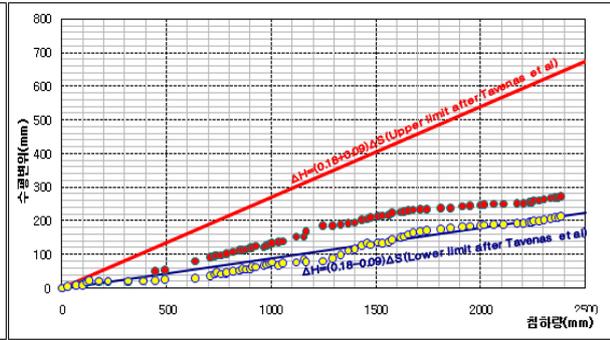


그림 20. C지구 측방변위량 vs 침하량(P.B.D.+S.C.P.)

- 성토체 사면부에 S.C.P로 보강된 단면에서의 계측결과는 연직배수공법만 채택된 구간과 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 관측되었다.
- 초기 성토 이후 한계 성토고를 초과하는 시점부터 최대측방 변위량은 Tavenas et al.(1979)이 제안한 상한치에 근접하여 나타나고 있는데 이는 간극수압의 소산에 필요한 충분한 시간이 지나기 전에 재하하중의 지속적인 증가에 기인한 결과로 판단되며 이후 배수가 원활하게 진행되면서 침하량에 비해 측방변위량이 작아지는 것으로 관측되고 있다.
- 따라서 연직배수공법이 채택된 현장에서 측방변위량을 줄이기 위해서는 과잉간극수압 소산에 필요한 충분한 시간과 원활한 배수가 될 수 있도록 시공관리(성토속도, 성토중 배수관리 철저)하는 것이 무엇보다 중요하다.

### 4.3 측방변위와 성토 관계

본 연구대상 중 연직배수공법만 시공된 지반에서 최대 측방변위량을 성토와 연계시켜서 분석한 결과는 다음과 같다.(그림 21, 22 참조)

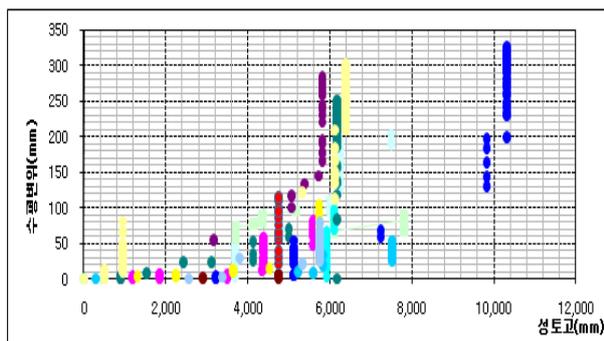


그림 21. B지구 측방변위 vs 성토고(P.B.D.)

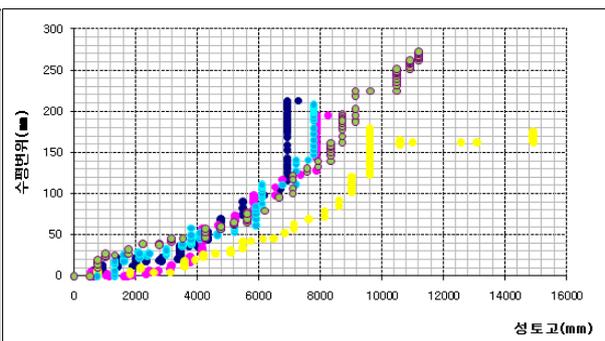


그림 22. C지구 측방변위 vs 성토고(P.B.D.)

- 일반적으로 성토고가 증가하면서 침하량이 증가하고 이에 따라 선형적으로 측방변위량도 증가하는 것은 당연하다. 그런데 수평변위량과 성토고의 관계에서 급속 성토에 의한 영향으로 측방변위량이 급격히 증가하는 경향이 지층의 구성, 연약층의 두께, 비배수전단강도 등과는 크게 관계없이 일률적으로 관측되고 있다.

다음 그림은 성토속도가 연약지반 침하 및 측방변위에 미치는 영향을 파악하기 위해 성토속도에 따른

일평균 침하량 및 측방변위량과의 관계를 분석하였다.(그림 23, 24 참조)

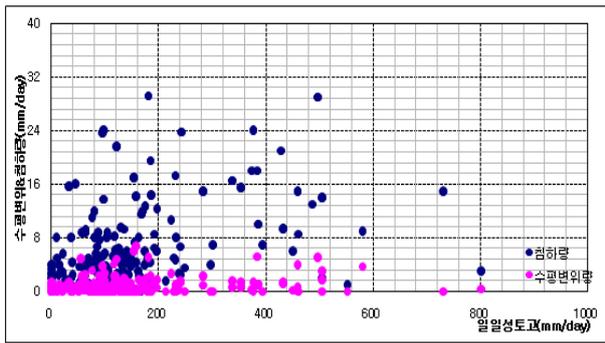


그림 23. B지구 지반변위속도 vs 성토속도

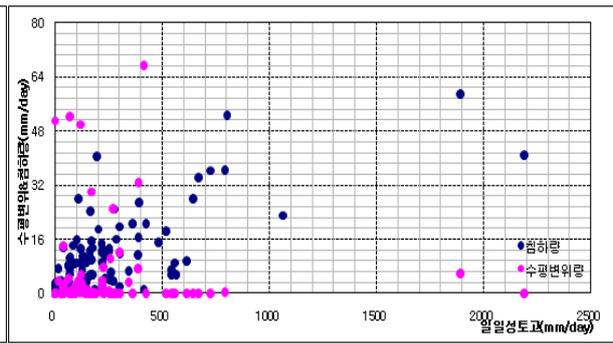


그림 24. C지구 지반변위속도 vs 성토속도

- 침하속도는 성토속도가 증가하면 선형적인 증가현상이 B, C지구 현장에서 관측되었으나 측방변위 속도는 성토초기에는 선형적인 증가를 보이나 단계별 성토후 방치구간에서는 측방변위속도가 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 관측되고 있는데 이는 성토체체의 압밀침하가 가속되면서 체체의 체적이 수축되어 오히려 측방변위량을 감소시킨 것으로 추정된다.

### 4.3 편재하중재하에 따른 인접지반의 거동 특성

편재하중재하에 따른 인접지반의 거동 특성을 관찰하기 위해 C.I.P.로 보강된 단면과 연직배수공법만 시공된 단면에 대해서 인접지반 및 구조물에 침하계 및 구조물기울기를 설치하여 성토중양부 침하량과 인접지반의 침하량, 구조물기울기와의 상관관계를 분석하였다.

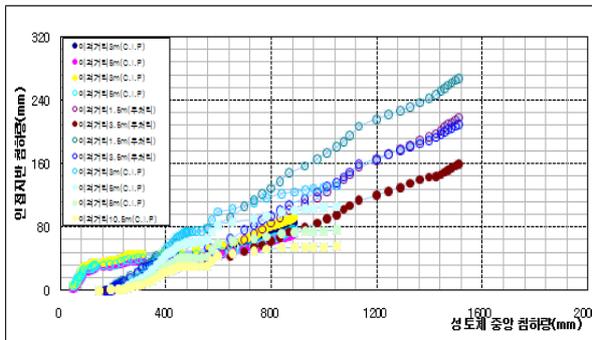


그림 25. 성토중양부 침하 vs 인접지반 침하(A 지구)

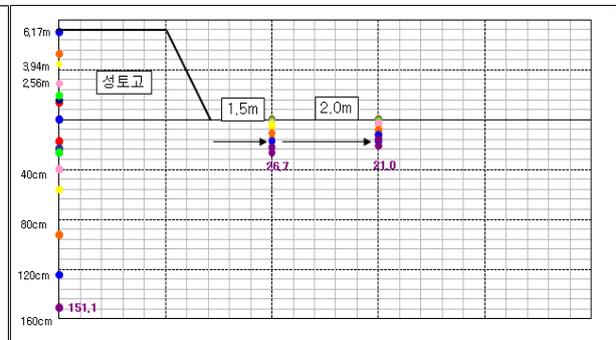


그림 26. 이격거리별 인접지반 침하(A 지구)

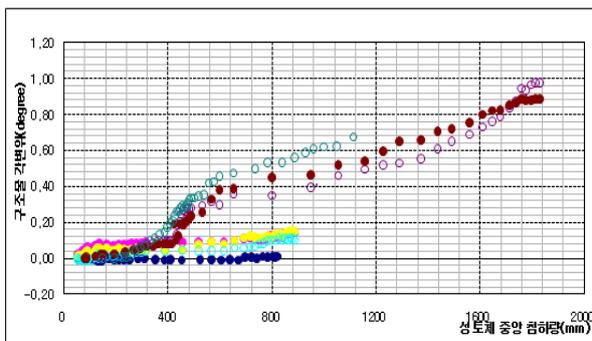


그림 27. 인접구조물 기울기 vs 성토체 중양부 침하(A 지구)

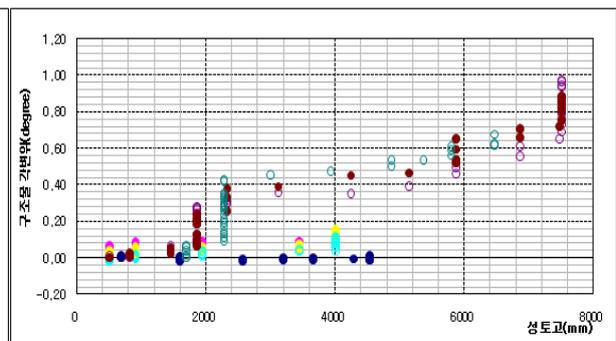


그림 28. 인접구조물 기울기 vs 성토고(A 지구)

- 성토에 따른 인접지반의 침하 및 구조물 기울기는 성토체 중앙부 침하 증가와 선형적인 관계를 보이고 있다.
- 편재하중 성토에 따른 인접지반의 침하량은  $\Delta s_{1.5\text{이격}} = (0.18)\Delta s_{center}$ 로 관측되고 있다.
- 편재하중 성토에 따른 인접지반의 침하량은  $\Delta s_{2.0\text{이격}} = (0.14)\Delta s_{center}$ 로 관측되고 있다. 여기서,  $\Delta s_{center}$  = 성토체 중앙부 침하량을 나타낸다.
- 연직배수공법이 적용된 연약지반에 편재성토가 진행될 경우 인접해 있는 구조물의 변형은 성토에 따른 측방변형에 의한 변위와 성토체체의 체적변형에 의한 변위로 구분할 수 있다. 측방변형에 의한 인접구조물에 의한 측방변형은 실제로 단기간에 의해 발생한다. 그런데 성토체의 체적변형(성토체 내측으로의 변형) 즉 압밀에 따른 영향은 인접지반의 동반침하를 장기간에 걸쳐서 진행되기 때문에 지속적인 관리가 요망된다.
- 실제적으로 편재하중에 인접해 있는 구조물 기울기계의 거동 방향은 측방변형 증가에 기인한 성토의 측으로 변형은 거의 관측되지 않고 성토체 안쪽으로 지속적으로 관측되고 있는데 이는 연직배수공법에 의한 압밀축진 동반침하에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 측방유동을 억제시키기 위해 설치되는 보강공법(Sheet Pile, G.C.P., D.C.M., C.I.P. 등)은 성토 시공중 발생하는 측방유동을 억제하는 효과뿐만 아니라 압밀침하에 의한 체체의 체적감소로 인한 인접지반의 동반침하를 차단할 수 있는 보강공법 선정이 무엇보다 중요하다.
- 본 연구 대상 현장의 인접건물의 기울기 변화를 살펴보면 측방유동 억제를 위해 시공되는 보강공법 시공시 장비의 중량에 의한 즉시 침하에 기인한 변형과 보강공법 천공시 발생하는 지반교란에 의한 변형이 관측되고 있으므로 이에 대해 사전에 충분한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

낙동강 하구 연약지반에서 편재성토 시공시 발생하는 지반의 측방변형양상을 실측계측결과를 토대로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시공과정에서 측방변형양상을 파악하는데 가장 중요한 인자인 지중경사계를 이용하여 측방변형 패턴 및 변형량을 관찰할 경우 우선적으로 지중경사계가 설치된 지점의 지층구성을 파악하는 것이 가장 중요하다.
- 2) 낙동강 하구 연약지반에서 현장 계측결과 침하량에 따른 최대 측방변위량은 먼저 연직배수공법만 채택된 구간에서는 Tavenas et al.(1979)이 제안한 상한치( $\Delta y = (0.18 + 0.09)\Delta s$ ) 이하로 관측되고 있다.
- 3) 측방변형을 억제 및 인접지반 동반 침하를 차단하기 위해 보강된 D.C.M. 및 C.I.P.구간에서는 Tavenas et al.(1979)이 제안한 하한치( $\Delta y = (0.18 - 0.09)\Delta s$ ) 이하로 관측되고 있다.
- 4) 최대 측방변위와 성토속도와의 관계에서는 과잉간극수압 소산에 필요한 충분한 시간과 원활한 배수가 될 수 있도록 시공 관리(성토속도조절, 배수관리 철저)하는 것이 무엇보다도 중요하다.
- 5) 부분재하 성토시 인접 구조물의 기울기 변화를 살펴보면 측방유동에 의한 변형보다는 압밀에 의한 인접 지반의 동반침하에 기인한 영향이 장기간에 걸쳐 발생하고 있는 관측되고 있으므로 측방유동을 억제시키기 위해 설치되는 보강공법(Sheet Pile, G.C.P, D.C.M., C.I.P. 등)은 성토 시공중 발생하는 측방유동을 억제하는 효과뿐만 아니라 압밀침하에 의한 체체의 체적감소로 인한 인접지반의 동반침하를 차단할 수 있는 보강공법 선정이 무엇보다 중요하다.
- 6) 일반적으로 연약지반 편재성토시 각종 안정관리 방법에 이용되는 성토중앙부의 지표면 침하량( $\rho$ )와 성토 법면 기슭부의 지표면 수평변위량( $\delta$ ) 또는 지중경사계의 최대 측방변위량( $\delta_m$ )을 이용하는 경우가 일반적이다. 그러나 아래 그림 29, 30에서 보는 바와 같이 지반에 따라서는 그것들이 지반의 변형 특성을 대표할 수 없는 경우가 있다. 지표면 침하량( $\rho$ ) ~ 성토 기슭부 부근의 최대치( $\delta$ ), 상부층의 침하량( $\rho_u$ ) ~ 성토 기슭부 부근의 최대치( $\delta$ ), 상부층의 침하량( $\rho_u$ ) ~ 성토법면 기슭부의 지중변위

량의 최대변위량( $\delta_m$ ) 세 종류의 관계를 가지고 안정관리기법에 적용한 결과 성토체체의 균열발생 상황에 가장 민감하게 반응하는 것은 상부층의 침하량( $\rho_u$ ) ~ 성토법면 기슭부의 지중변위량의 최대변위량( $\delta_m$ )인 것으로 관측되었다. 이와 사례를 종합해 볼 때 성토의 안정관리를 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 우선적으로 정밀한 지중경사계 데이터를 통한 성토조건 및 지층특성에 따른 변형 특성(진단변형발생 지점 등) 파악과 함께 층별침하계를 통한 전체침하량, 상부 침하량, 하부침하량 등으로 구분하여 안정관리기법에 적용하는 것이 더 타당할 것으로 판단된다.(지반의 측방유동 참조)

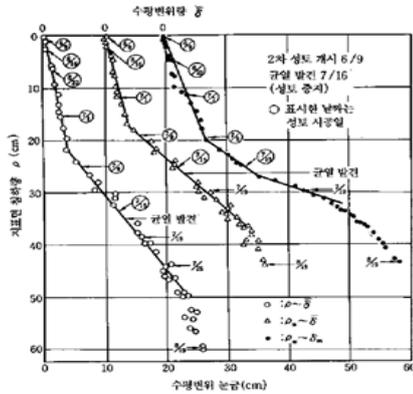


그림 29.  $\rho \sim \delta$  관계(江別시험성토 무처리 공구)

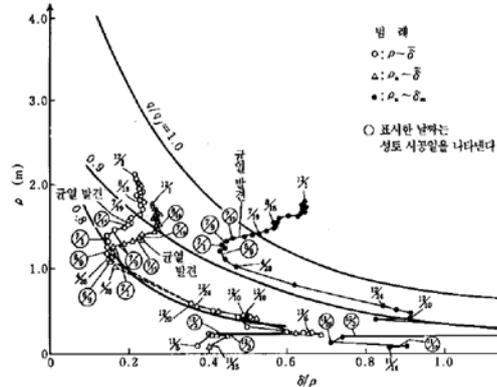


그림 30.  $\rho \sim \delta/\rho$  관계(江別시험성토 무처리 공구)

## 참고문헌

1. 안종필, 홍원표(1994), “측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구”, 한국지반공학회, 제10권 제2호, 1994, pp.25~40.
2. 홍원표, 이광우, 조삼덕, 이재호(2006), “성토하부 연약지반의 측방유동 평가”, 한국지반공학회, 제22권 10호 2006, pp.93~100
3. 정성교, 장우영, E.Ninjarav, 류준길(2006), “낙동강 하구지역 부산점토의 퇴적환경에 따른 압축특성”, 한국지반공학회, 제22권 12호 2006, pp.57~65
4. 이광우, 조삼덕, 홍원표(2009), “성토하부 연약지반의 변형거동에 관한 모형실험”, 한국지반공학회, 제 25권 5호 2009, pp.17~28
5. 坪田, 中島, 誠(2009), “軟弱地盤における築堤盛土による周辺地盤沈下対策工の考察”, 土木學會論文集, Vol.63 No.3 2007, pp.323~334
6. 地盤工學會士の壓密入門編集員會(2003), “土の壓密入門”, 土木學會論文集, 社団法人地盤工學會, pp.18 4~188
7. 이재훈, 홍성영(1995), “지반의 측방유동”, 도서출판 건설도서, pp.10~61
8. “Geomonitor Center 홈페이지” <http://www.geomoitor.co.kr>