

해성퇴적토지반에서 파이핑 현상 발생으로 인한 흠막이 가시설 배면지반의 토성변화

황영철¹⁾, 이광재²⁾, 김영철²⁾

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 지반·터널 2부 상무이사

²⁾ (주)유신코퍼레이션 지반·터널 2부 차장

1. 개 요

송도 신도시 입주민의 대중교통수단 확보로 신도시 교통문제를 해소하기 위해 인천도시철도 1호선 연장선의 조속한 건설이 필요하게 되었다. 또한 송도 신도시 입주민의 인천국제공항 접근을 위해 대중교통의 상호 연계 확충이 요구됨에 따라 도시철도 노선이 필요하게 되었을 뿐만 아니라 도시의 광역화와 더불어 승용차 운행의 대중화로 인한 도로교통망 만으로는 교통문제의 해결은 어려운 전망이었다.

현재 인천도시철도 1호선 송도연장사업은 6개 공구로 분할하여 토공사 및 구조물공사를 진행중에 있으며, 전체 토목공사진행은 약 75%(9월말 기준)의 공정율을 나타내고 있고 2009. 10월에 완공 예정이다. 건설공법은 굴착심도가 약 20m 내외로 비교적 얇아 연장사업 전구간을 개착공법으로 계획하였고, 흠막이 가시설공법은 굴착심도까지 해성퇴적토인 지반조건과 경제성을 고려하여 슈트파일+버팀보 공법을 적용하였다.

송도 4정거장 부근 본선구간(Sta. 27k160~27k360)은 그림 1의 가시설 표준단면도에서 보인 바와 같이 설계당시 구조물 계획고 하부에 N치가 19~26 정도로 매우 견고한 상태의 점토질 실트층이 약 5.5m 두께로 분포하고 있어 굴착지반의 히빙(Heaving)과 보일링(Boiling)에는 안정한 것으로 평가되었으나, 굴착도중에 보일링에 의한 파이핑(Piping)현상이 발생하여 슈트파일의 변형 및 침하, 버팀보의 손상이 발생하여 굴착작업을 중단하였다.

이러한 현상의 발생원인을 조사하고 대책방안을 수립하기 위하여 현장에서 확인 지반조사를 실시하였고, 본고에서는 확인 지반조사결과에서 나타난 토류배면 지반의 토성변화를 실시설계시 조사된 토성과 비교 분석한 내용을 소개하고자 한다.

» » 해성퇴적토지반에서 파이핑 현상 발생으로 인한 흙막이 가시설 배면지반의 토성변화

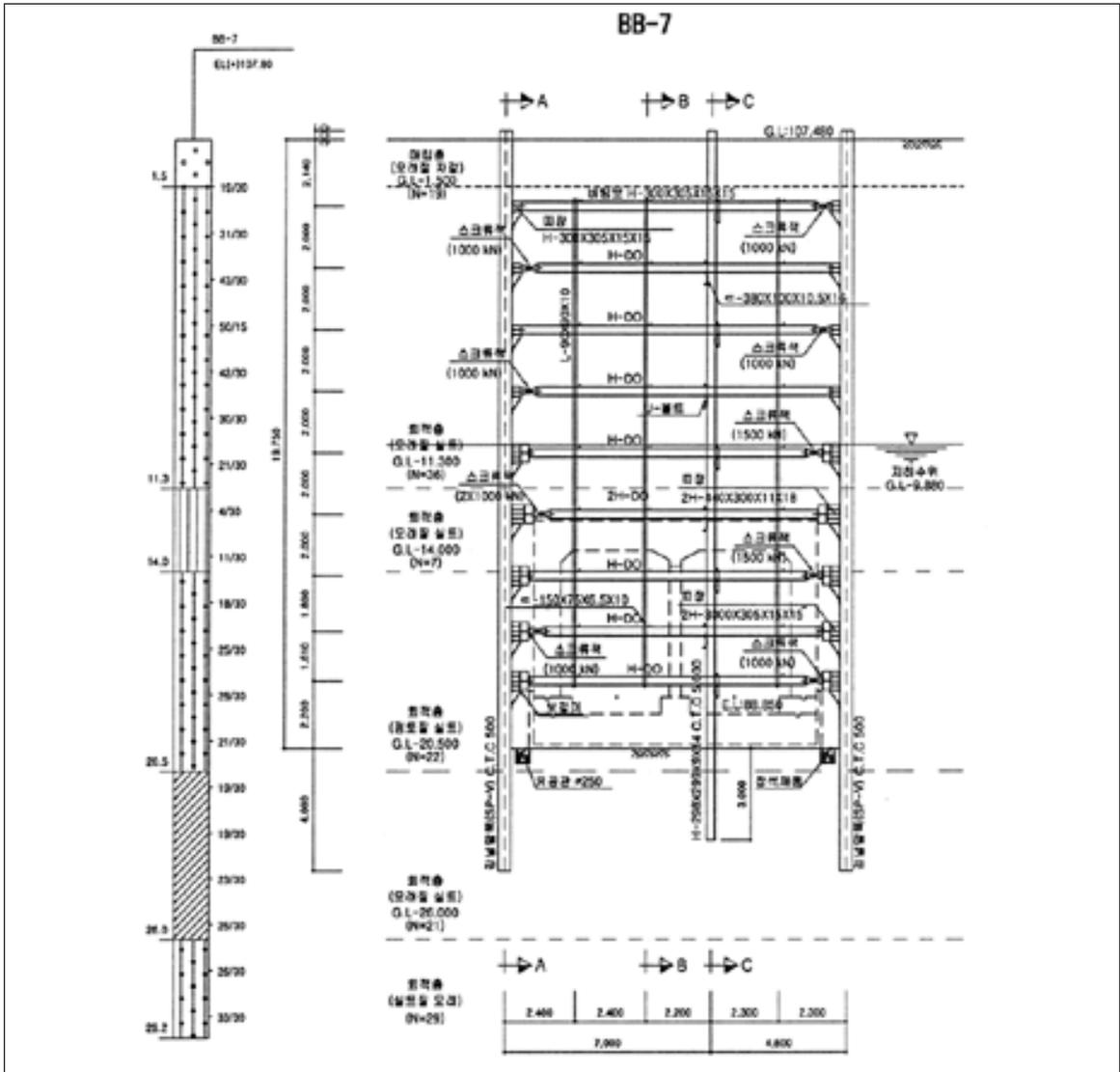


그림 1. 대상구간 가시설 표준단면도

2. 대상구간 설계당시 해성퇴적토의 지반특성

2.1 지층 현황

인천 송도신도시 지역의 지질은 주로 선캄브리아기 (Pre-Cambria Period)의 편마암 및 이를 관입한 주라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루며, 기반암은 흑운모

화강암으로써 기반암 상부에는 장기간의 풍화로 생성된 풍화토 및 풍화암이 덮고 있고 풍화대 상부는 해수에 의해 운반 퇴적된 해성퇴적(갯벌)층이 덮고 있다.

본 대상구간의 지층구조는 그림 2에서 보인 바와 같이 지표로부터 매립층, 해성퇴적층, 풍화토층, 풍화암층 층서로 구성되어 있다. 매립층 하부의 해성퇴적토층은 구간

기술기사

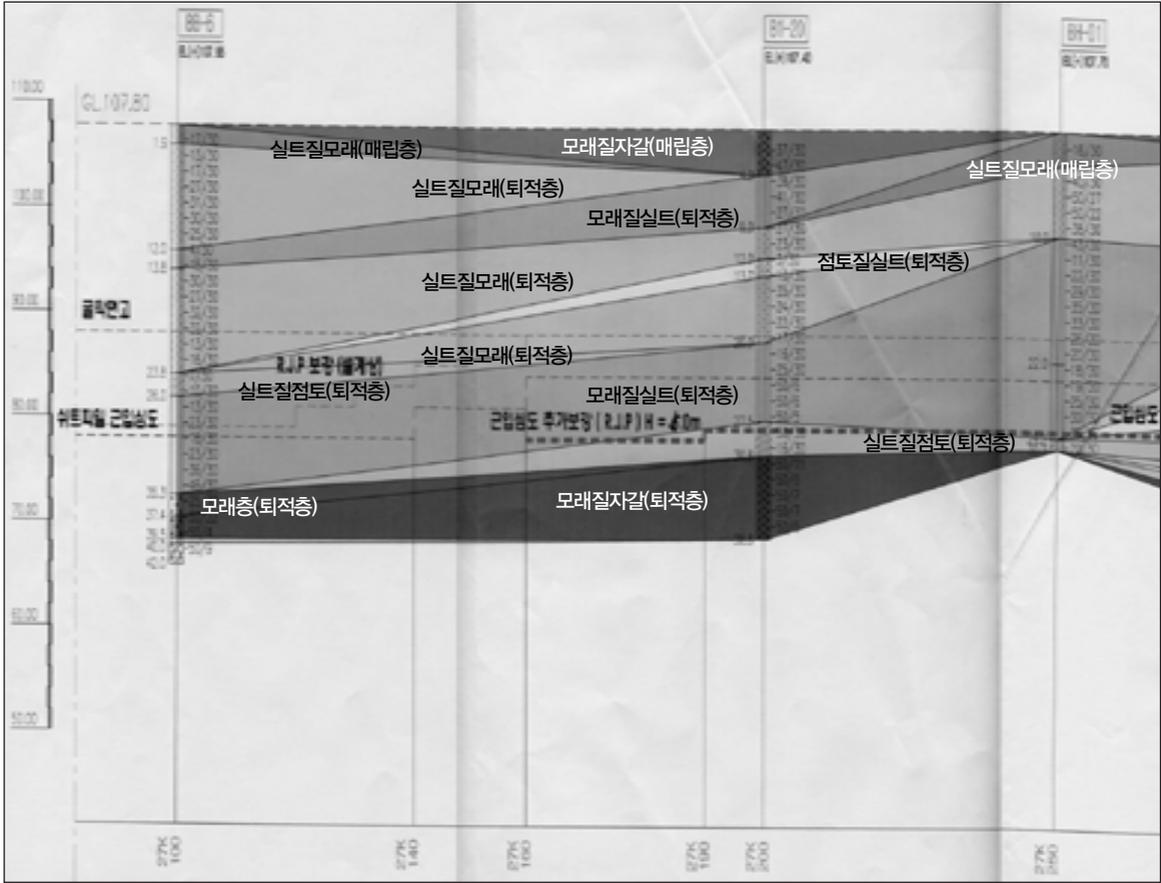


그림 2. 대상구간 지층구조도

에 따라 상부로 부터 실트질 모래(SM)층, 모래질 실트(ML)층, 실트질 점토(CL)층, 모래질 자갈(GP)층 또는 상부 모래질 실트(ML)층, 실트질 모래(SM)층, 하부 모래질 실트(ML)층, 실트질 점토(CL)층, 모래질 자갈(GP)층 순으로 퇴적되어 있으며 매우 복잡한 퇴적력을 보인다. 또한 본 해성퇴적토층의 특징은 하부의 모래질 실트가 상부의 모래질 실트에 비해 매우 단단하며, 하부 모래질 자갈층은 지하수(해수에 가까움)를 풍부하게 함유하고 있어 피압대수층으로 작용할 가능성이 있고, 실트층에는 부분적으로 Sand Seam이 얇은 층으로 분포하고 있다.

2.2 시추공별 심도에 따른 N치

설계당시 본 대상구간의 표준관입시험 N치는 상부 일부 부구간에서 느슨한 지층(N=3)을 제외하고는 전반적으로 N=20 이상의 견고하거나 매우 조밀한 지층을 나타내었다. 특히, 토류벽인 슈트파일 근입심도 구간인 20~25m 구간은 N=19~50(평균 32)의 견고 또는 매우 견고한 실트층이 분포하고 있었다. 그림 3은 본 대상구간의 시추공별 심도에 따른 N치의 분포도를 나타낸다.

2.3 토질 및 심도에 따른 투수계수(K)

본 대상구간의 대표적인 퇴적층의 투수특성을 파악하

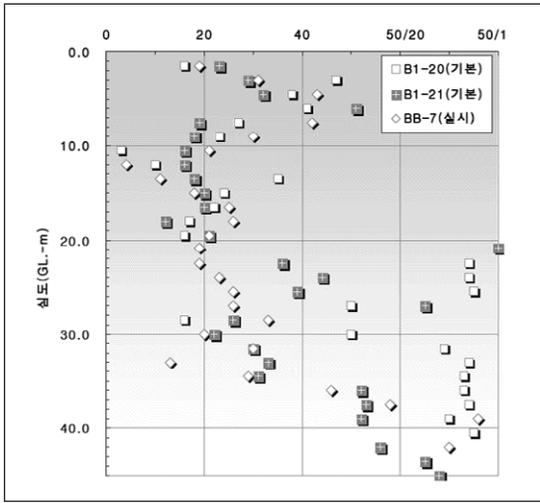


그림 3. 시추공별 심도에 따른 N치 분포도

기 위하여 시추조사와 병행하여 투수시험을 실시하였고, 투수시험결과 실트(ML)층은 투수불량, 모래나 자갈로 이루어진 퇴적토(SM, GP)는 투수성이 양호한 지반으로 평가되었다. 표 1은 설계당시에 본 대상구간에 실시한 투수 시험결과이다.

표 1. 본 대상구간 설계당시 투수시험 결과

| 공 번 | 시험구간(m) | 지층명 | 통일분류 | N치 | 투수계수(cm/sec) | 비 고 |
|-------|-----------|-----|------|----|-----------------------|------|
| B1-20 | 12.0~12.5 | 퇴적층 | ML | 10 | 1.42×10^{-5} | 기본설계 |
| B1-21 | 19.5~21.0 | 퇴적층 | SM | 21 | 3.41×10^{-4} | 기본설계 |
| BB-7 | 39.0~39.5 | 퇴적층 | GP | 50 | 2.11×10^{-4} | 실시설계 |

표 2. 가시설 해석용 지층별 지반정수

| 구 분 | | $\gamma(\text{tf/m}^3)$ | $C(\text{kN/m}^2)$ | $\phi(^{\circ})$ | $E(\text{MPa})$ | |
|-------|-----------------|-------------------------|--------------------|------------------|-----------------|----|
| 퇴 적 층 | 매 립 토 | N=10 | 1.8 | - | 30 | 10 |
| | 모래 (모래섞인 실트) | N≤10 | 1.8 | - | 28 | 5 |
| | | 10(N≤20) | 1.8 | - | 30 | 15 |
| | | 20(N≤30) | 1.8 | - | 33 | 15 |
| | | N>30 | 1.9 | - | 35 | 30 |
| | | 점토 (점토섞인 실트) | N≤6 | 1.8 | 30 | - |
| | 6(N≤15) | | 1.8 | 50 | - | 6 |
| | 15(N≤30) | | 1.9 | 140 | - | 10 |
| | N>30 | | 2.0 | 200 | - | 15 |
| | 풍 화 토 | - | 1.9 | 15 | 30 | 30 |
| 풍 화 암 | - | 2.0 | 30 | 35 | 100 | |

2.4 지층별 지반정수 선정

본 대상구간의 흙막이 가시설 해석에 이용되는 지층별 지반정수는 지반조사결과와 경험식 및 기존 적용사례 등을 토대로 장기간 진행되는 가시설공사라는 점을 감안, 원지반의 지표 노출에 의한 강도저하를 고려하여 표 2와 같이 선정하였다

2.5 히빙(Heaving) 및 보일링(Boiling) 검토

인천도시철도 1호선 연장구간의 계획노선은 지표면 하부로부터 GL(-)16m~20m 아래에 Box형 구조물로 계획되어 있다. 구조물 시공을 위한 토공작업시 흙막이 가시설 굴착저면의 히빙(Heaving)이나 보일링(Boiling)에 대한 안정성을 검토하기 위하여 지반조사결과와 지층현황 및 상부 구조물 특성에 따라 검토구간과 대표단면을 선정하였고, 굴착면 하부 연약한 점토층 존재구간은 히빙, 모래층 존재구간은 보일링 발생 예상구간으로 선정하여 굴착저면의 안정성을 검토한 후 불안정구간에 대해서는 안

기술기사

표 3. 대상구간 검토단면 및 지층현황

| 검토 단면 | 지층 현황 |
|-------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • 퇴적토(점토질 실트) <ul style="list-style-type: none"> - 계획고 하부에 5.5m 두께로 분포 - N치 19~26 정도로 매우 견고한 상태 • 퇴적토(실트질 모래) <ul style="list-style-type: none"> - 점토질 실트층 하부에 3m 내외의 층후로 분포 - N치 26~33 정도로 보통 조밀한 상태 |

정대책을 수립하였다.

본 대상구간의 대표단면인 27k300지점의 검토단면 및 지층현황은 표 3과 같다. 구조물 계획고 하부에 N치가 19~26 정도로 매우 견고한 상태의 점토질 실트층이 약 5.5m 두께로 분포하고 있고, 이 점토질 실트층 하부에 3m 내외의 층후로 N치 26~33의 보통 조밀한 실트질 모래층이 분포하고 있어 본 대상구간의 굴착지반은 허빙(Heaving)과 보일링(Boiling)에 모두 안정한 것으로 평가되었다.

3. 굴토공사중 흠막이 가시설 변형

Sta.27k160 지점에서 종점측으로 8단 토공굴착 및 버팀보 설치작업중에 굴착바닥면에서 보일링 현상으로 추정되는 토립자가 포함된 지하수 유출현상이 발생하였다. 지하수 유출현상 발생 4일후부터는 슈트파일의 침하되면서 슈트파일 배면지반의 균열 및 침하, 버팀보 Jack 파손, 슈트파일의 내측 휨 변형 등이 발생하여 토공작업을 중단하고 버팀보 추가 보강, 보일링 발생지점 부직포 포설후 잡석 포설하여 토립자 유출방지, 슈트파일 근입심도 RJP 보강 등을 실시하였다. 이와 같은 보강조치를 실시한 후

에 토공작업을 재개했으나 가시설 변형 및 보일링 현상이 심화되어 토공작업을 중지하였다. 사진 1~사진 4는 굴토 공사중에 발생한 굴착지반 보일링 현상과 가시설 침하발생에 대한 사진이다.

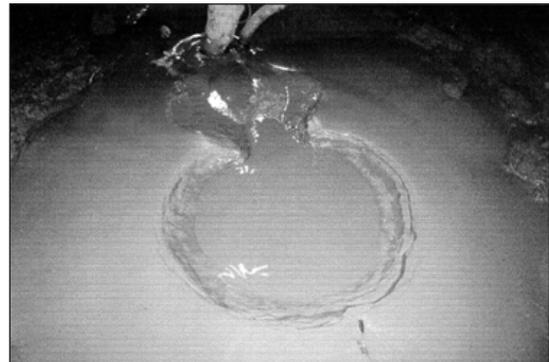


사진 1. 굴착지반 보일링 현상



사진 2. 슈트파일 침하

» » 해성퇴적토지반에서 파이핑 현상 발생으로 인한 흙막이 가시설 배면지반의 토성변화

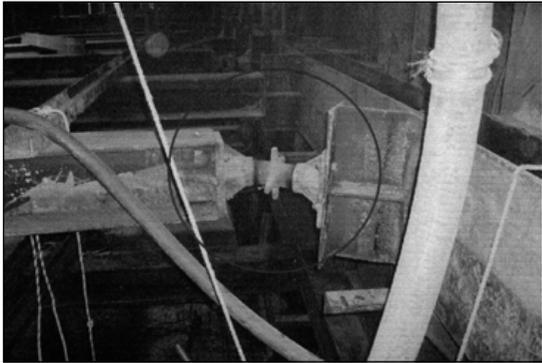


사진 3. 버팀보 Jack 파손



사진 4. 배면지반 침하

쉬트파일 침하현상은 굴착바닥에서 토립자를 포함한 지하수 유출이 발생된 후에 배면지반의 침하를 동반하면서 가시설의 변형이 발생하였고, 이 현상의 발생원인은 보일링에 의한 파이핑 현상과 쉬트파일의 근입장 부족인 것으로 판단되었다.

4. 시공중 확인 지반조사

4.1 조사 개요

3장에서 기술한 바와 같이 토공작업중에 굴착바닥면에서 보일링에 의한 파이핑 현상으로 가시설 변형 및 배면

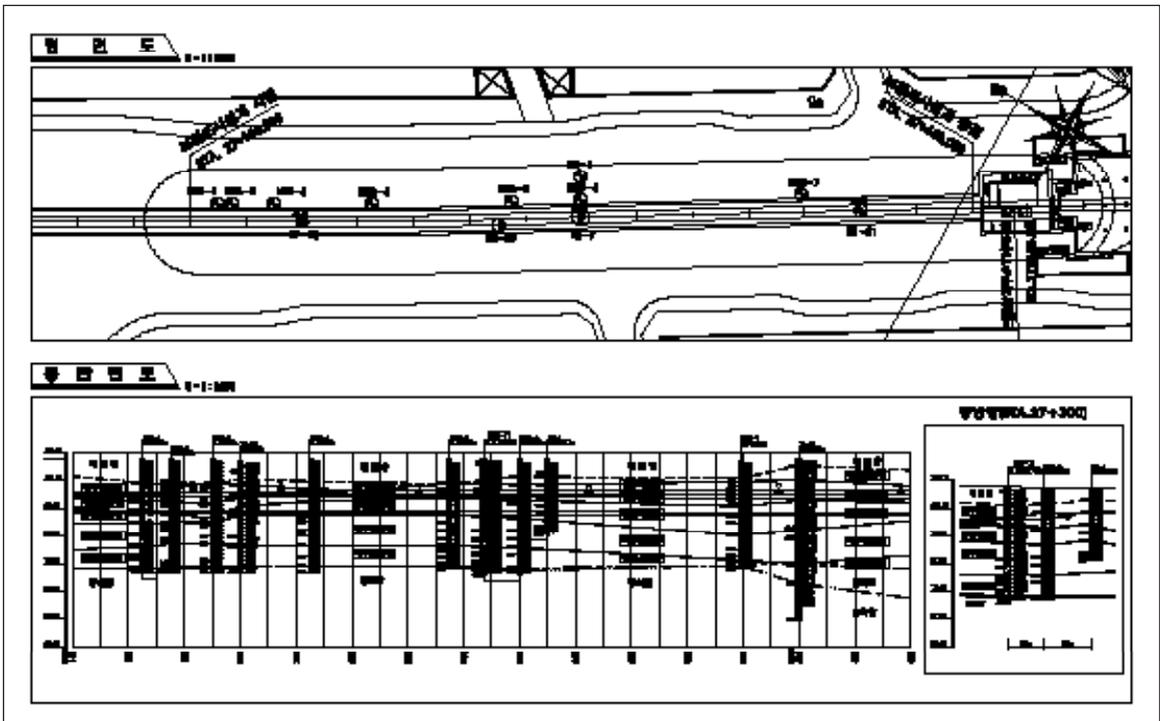


그림 4. 시추조사 위치도

기술기사

지반 침하현상이 발생하여 원인분석 및 보강대책을 수립하기 위하여 지반조사(시추조사, 표준관입시험, 현장투수시험 및 물리적 특성 시험)를 실시하였으며, 시추조사 위치는 그림 4와 같다.

4.2 조사 결과

4.2.1 표준관입시험(SPT) 결과

본 대상구간은 전반적으로 점성토와 사질토로 구성된 퇴적토층이 분포하고 있으며, 점성토와 사질토층이 불확실한 지층경계와 불규칙하게 서로 반복적으로 교호하는 특징이 있다.

표준관입시험결과 본 대상구간의 전체 N치 분포 경향을 보면 GL(-) 8.0m 부근에서 급격하게 N가 감소하고 GL(-) 21.0m 부근에서 급격하게 증가하며, GL(-) 39.0m 상부에서는 N치의 분산정도가 크며 하부에서는 N치가 집중되어 있다. 그림 5와 그림 6은 지층별과 시추공별 심도에 따른 N치 분포도를 나타낸다.

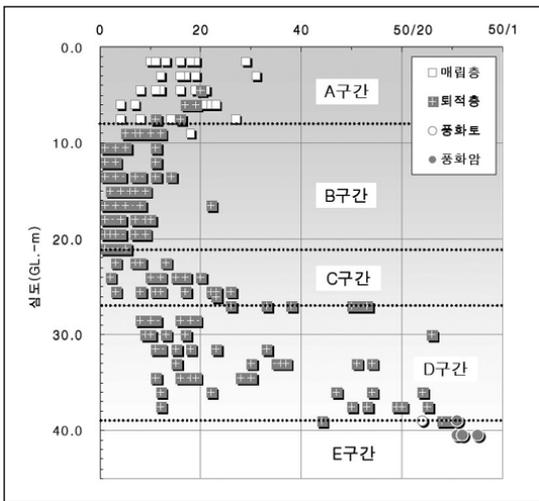


그림 5. 지층별 심도에 따른 N치 분포

4.2.2 현장투수시험 결과

본 대상구간의 대표적인 퇴적층의 투수특성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 총 26회의 현장투수시험을 실시하였다. 현장투수시험에 대하여 심도별, 토성별로 도시하면 표 4와 같다.

투수계수 분포는 심도의 증가에 따라 변화 경향이 없으며, 이러한 사유로는 지층의 분포상태가 심도에 따라 조립토와 세립토가 혼재되어 분포하기 때문인 것으로 판단된다. 퇴적토의 토성에 따른 투수계수는 실트섞인 점토(CL)층의 투수계수가 가장 낮게 산정되었고 나머지 토층에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 특히 모래질 실트층의 투수계수는 실트섞인 모래, 실트질 모래와 거의 차이가 나지 않은 것으로 산정되었다. 토층별로 분류된 투수계수값은 표 5와 같다.

4.3 실시설계 조사와 시공중 확인조사 비교 분석

4.3.1 지층분포

본 대상구간의 지층분석은 실시설계 당시 기본설계자

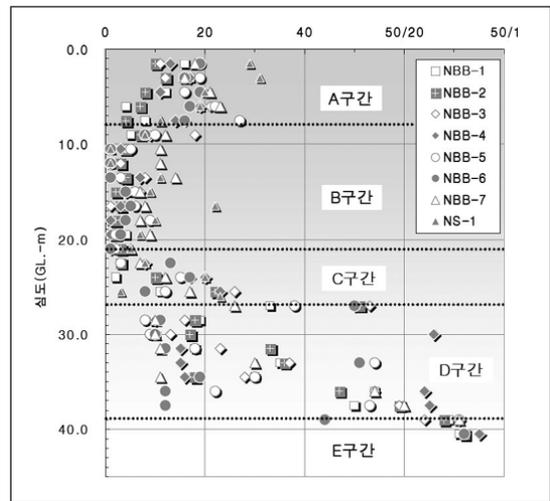


그림 6. 시추공별 심도에 따른 N치 분포

» » 해성퇴적토지반에서 파이핑 현상 발생으로 인한 흙막이 가시설 배면지반의 토성변화

표 4. 심도별, 토성별 투수계수 분포

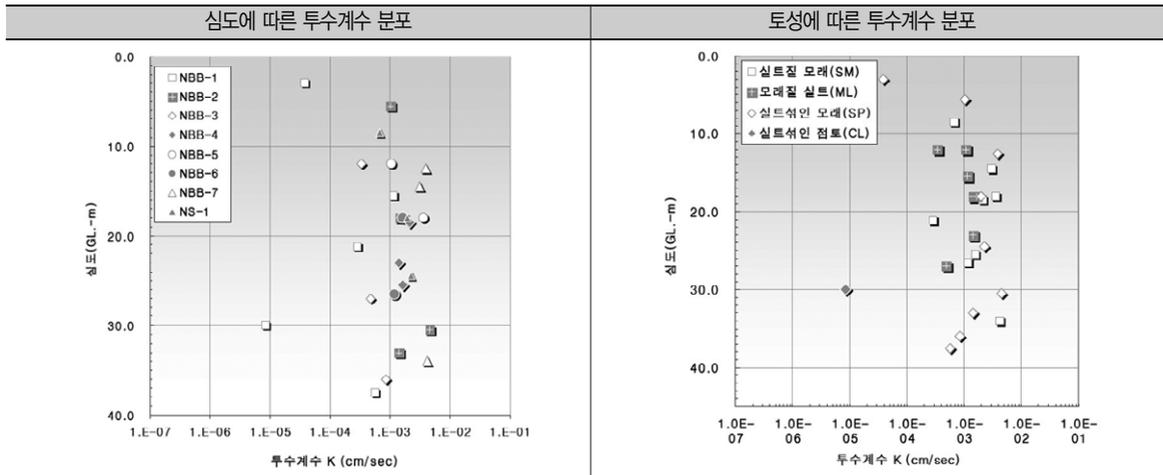


표 5. 토성별 투수계수

| 토 층 | 투수계수 k (cm/sec) | | | 시험 회수 |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| | 최소 | 최대 | 평균 | |
| 실트질 모래(SM) | 2.84×10^{-4} | 4.24×10^{-3} | 2.05×10^{-3} | 9회 |
| 실트섞인 모래(SP) | 3.84×10^{-5} | 4.61×10^{-3} | 1.85×10^{-3} | 9회 |
| 모래질 실트(ML) | 1.07×10^{-3} | 4.82×10^{-4} | 1.09×10^{-3} | 7회 |
| 실트섞인 점토(CL) | 8.50×10^{-6} | 8.50×10^{-6} | 8.50×10^{-6} | 1회 |

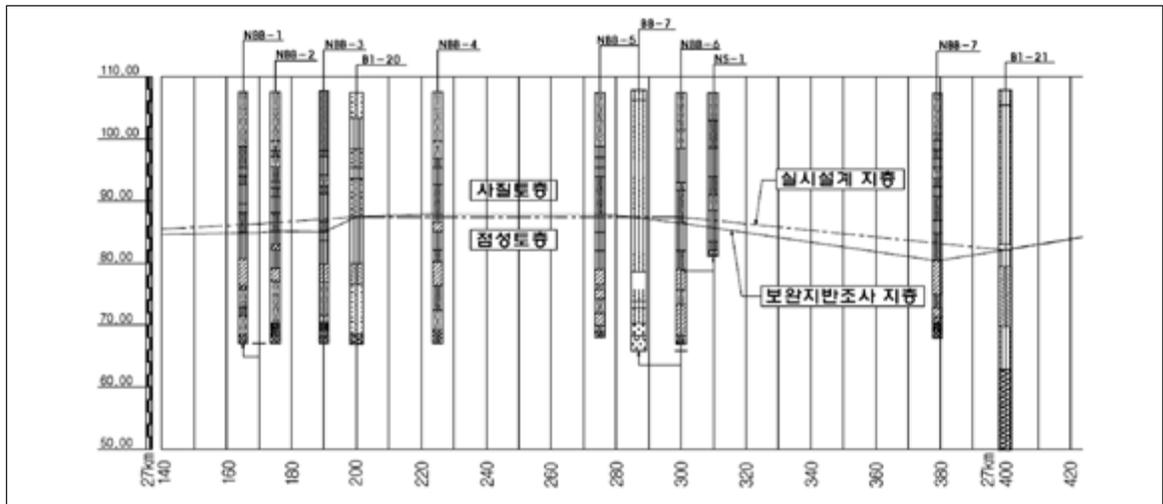


그림 7. 지층분포 현황도

료 2공(2003년), 실시설계 1공(2004년) 총 3공의 시추조사 자료를 활용하였다. 실시설계 당시 추정된 지층분포 심

도는 기본설계 조사간격 200m와 실시설계 조사간격 200m(실시설계 조사위치는 기본설계 시추조사 위치 사

기술기사

이에 시행하여 전체적으로는 100m 간격)으로 시추조사를 시행하여 추정한 결과이며, 시공중 확인조사에서는 기본 및 실시설계시 조사되지 않은 구간에 조사를 수행하므로써 지층이 분포하는 심도는 보다 세밀하게 구분할 수 있었다.

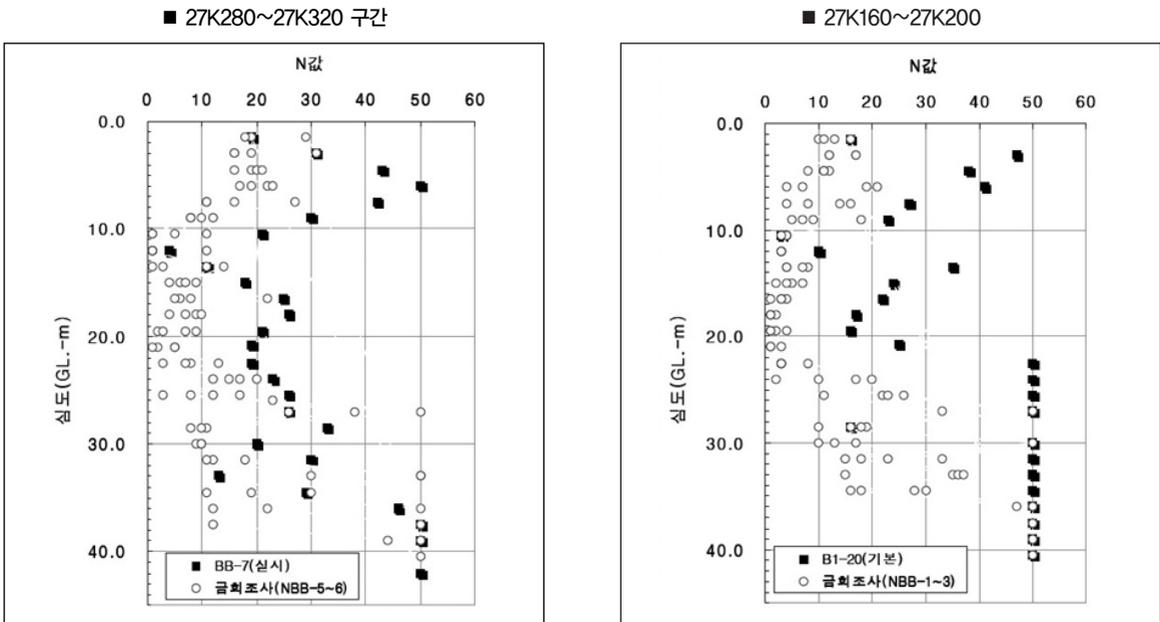
실시설계시 분석된 상부의 사질토층, 점성토층, 중간 사질층과 하부의 점토층, 사질층의 지층분포 현황은 그림 7에서 보인 바와 같이 확인조사 결과에서도 동일한 결과를 보이고 있으며, 특히 NBB-6공 심도 26m 부근에서 수행된 표준관입시험 시료를 확인한 결과 실트섞인 모래, 자갈섞인 조립모래, 모래질 실트 등이 혼재되어 분포함을

확인한 바, 본 대상구간의 지층은 모래질과 점토질 성분이 불규칙하게 분포하는 것으로 분석되었다.

4.3.2 표준관입시험

본 대상구간의 지층상태 변화유무 확인을 위하여 실시설계와 금회 확인조사에서 수행한 표준관입시험결과의 N값을 비교 분석하였다. 금회 확인조사에서는 전체적으로 시추심도 약 25m까지 N=5 이하의 매우 느슨하거나 연약한 지층이 확인되었으며, 이는 기본설계, 실시설계, 시공 확인조사 결과와 상이한 결과를 보였다.

그림 8에서와 같이 27k160~27k200 구간에서 수행한



| 심도 | 실시설계 조사자료 | 시공 확인조사 결과 |
|-------------|-------------------|------------------|
| 1.0 ~ 10.0 | 16 ~ 50 (평균 ≒ 32) | 4 ~ 31 (평균 ≒ 15) |
| 10.0 ~ 15.0 | 3 ~ 35 (평균 ≒ 16) | 1 ~ 14 (평균 ≒ 5) |
| 15.0 ~ 20.0 | 12 ~ 26 (평균 ≒ 20) | 1 ~ 22 (평균 ≒ 5) |
| 20.0 ~ 25.0 | 19 ~ 50 (평균 ≒ 32) | 1 ~ 20 (평균 ≒ 8) |
| 25.0 ~ 30.0 | 16 ~ 50 (평균 ≒ 35) | 3 ~ 50 (평균 ≒ 23) |
| 30.0 ~ 35.0 | 13 ~ 50 (평균 ≒ 44) | 9 ~ 50 (평균 ≒ 34) |

그림 8. 심도별 표준관입시험 비교 분석

» » 해성퇴적토지반에서 파이핑 현상 발생으로 인한 흙막이 가시설 배면지반의 토성변화

표 6. 지층별 투수계수 비교

| 구 분 | | 실시설계 투수계수(cm/sec) | | 확인조사 투수계수(cm/sec) | |
|--------------|--------|--|----------------------|--|-----------------------|
| | | 분포 범위 | 적용 | 분포 범위 | 적용 |
| 퇴적토 | 점토(CL) | $4.98 \times 10^{-7} \sim 1.09 \times 10^{-6}$ | 8.0×10^{-7} | 8.50×10^{-6} | 8.0×10^{-6} |
| | 실트(ML) | $1.42 \times 10^{-5} \sim 1.86 \times 10^{-4}$ | 8.0×10^{-5} | $1.07 \times 10^{-3} \sim 4.82 \times 10^{-4}$ | 1.10×10^{-3} |
| 퇴적토(모래), 풍화토 | | $9.22 \times 10^{-5} \sim 1.07 \times 10^{-4}$ | 3.0×10^{-4} | $3.84 \times 10^{-5} \sim 4.61 \times 10^{-3}$ | 2.0×10^{-3} |

실시설계 조사(기본설계 조사자료, B1-20)와 금회 확인 조사 결과(NBB-1~NBB-3)를 비교 분석하면 당초 실시설계시에는 상부 일부구간에서 느슨한 지층(N=3)을 제외하고는 전반적으로 N=20 이상의 견고하거나 매우 조밀한 지층을 나타내었다. 특히, 가시설 슈트파일 근입심도 구간인 20~25m 구간은 당초 실시설계를 위한 조사결과에서는 평균 N=32 값을 나타내었으나, 금회 확인조사 결과에서는 평균 N=8 정도로 확인되어 매우 큰 변화 양상을 나타내었다.

4.3.3 투수계수

금회 확인조사시 보다 신뢰성이 높은 투수계수를 얻기 위하여 공당 2~5회의 현장투수시험을 수행하였으며, 현장시험결과 표 6과 같이 실시설계시 산정된 투수계수에 비하여 상당히 크게 나타났다. 당초 설계시 산정된 투수계수와 비교하면 투수계수 증가량은 점토층(CL) 약 10배, 실트층(ML) 약 14배, 모래층(SM,SP) 약 7배인 것으로 나타났으며, 특히 실트층(ML)의 투수계수는 약 $1.10 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 산정되어 가는 모래로 분류되어 투수성이 높은 지반으로 평가되었다.

이러한 결과는 확인 시추조사 위치가 가시설 배면 1.5m 이격된 위치에서 이미 시공중 보일링 현상 등이 확인된 지역에서 수행된 바, 지하수의 침투현상 발생시 원지반의 세립분이 함께 유실되어 발생된 결과인 것으로 판단되며, 그림 9의 실트의 #200체 통과량 비교도에서 알 수 있다.

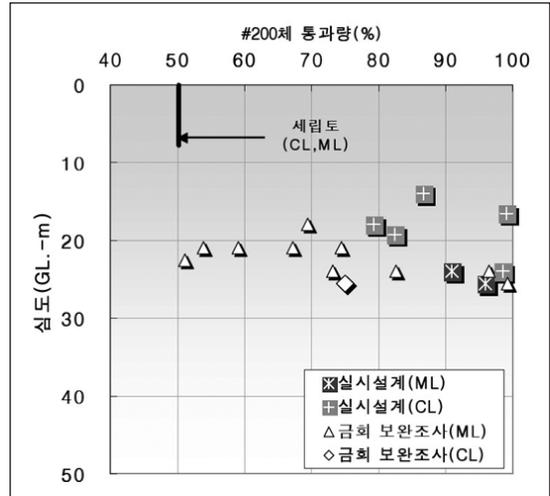


그림 9. 하부 점성토층의 #200체 통과량 비교

5. 결론

인천도시철도 1호선 연장 송도 4정거장 부근 본선구간 (Sta. 27k160~27k360)에서 토공작업 도중에 발생한 파이핑 발생원인을 조사하고 대책방안을 수립하기 위하여 현장에서 확인 지반조사를 실시하였다.

확인조사결과 지층이 분포하는 층서 및 층후는 실시설계와 매우 유사한 것으로 확인되었으나, 지층의 연경도 및 조밀도를 나타내는 표준관입시험의 N치는 상당히 큰 차이를 보였으며 투수계수 또한 실시설계시와 비교할 때 크게 산정되었다. 특히 공학적 특성변화가 심한 하부 점성토층 구간(심도 약 20~25m)은 당초 설계와 동일하게 실트(ML)로 분류할 수 있으나 #200체 통과량 및 투수계

기술기사

수 등에서 조립토의 공학적 성질과 유사한 특성을 나타냈다.

이러한 결과는 확인 시추조사 위치가 가시설 배면 1.5m 이격된 위치에서 이미 시공중 보일링 현상 등이 확인된 지역에서 수행된 바, 지하수의 침투현상 발생시 원지반의 세립분이 함께 유실되어 발생된 결과인 것으로 평가되었다.

본 해상퇴적토층의 토성 변화는 굴착지반의 보일링에 의한 파이핑 현상에 의해 발생하였다. 보일링이 발생한 굴착지반의 토질은 실트이며 당초 가시설 설계시에는 이 실트를 점토질 실트로 분류하여 슈트파일의 근입심도를

결정하였으나, 현장에서 굴착중에 확인된 실트는 모래질 실트였으며 결국 가시설의 근입장 부족이 굴착지반에 파이핑 현상을 일으킨 것으로 판단된다.

본 현장과 같은 해상퇴적토 지반에서 가시설 설계시에는 통일분류법상에 점성토로 분류되는 실트층에서도 해석적으로 보일링에 대해서 안정하더라도 굴착공사중에 슈트파일 항타방법, 슈트파일 변형에 의한 배면지반의 변형 등에 의해 지하수 침투 유로가 형성되어 보일링에 의한 파이핑 현상이 발생할 수 있으므로 가시설 설계시에는 실트층의 지반정수(C, ϕ)를 사질토로 분류하여 적용하는 것이 보다 안전한 설계가 되는 것으로 사료된다.

[참고문헌]

1. 인천광역시 도시철도건설본부(2004), 인천도시철도1호선 송도신도시 연장사업 4공구 토목공사 실시 설계보고서
2. (주)지엠이엔씨(2006), 인천도시철도 송도 4공구 지반조사보고서
3. 황영철, 김기림, 김연정(2006), "해안매립지반에서의 토류가시설 시험시공 및 변경사례", 한국지반공학회 2006 가을학술발표회 논문집
4. 황영철, 박명렬(2007), "해상퇴적토 지반에 시공된 슈트파일 흠막이벽체의 지중경사계 계측관리기준에 대한 고찰", 한국지반공학회지 Vol.23, No8, 2007, pp.20~26