

송도국제도시 중앙대로 도시철도 인접구간 연약지반처리 시험시공 사례

서귀창¹⁾, 곽수정²⁾, 최인걸³⁾

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 송도국제도시 1공구 기반시설공사 감리단장/전무이사

²⁾ 한미기초개발 주식회사 대표이사

³⁾ (주)유신코퍼레이션 전무이사

SYNOPSIS : 본 연구는 인천 송도국제도시 중앙대로 구간의 도시철도공사와 인접한 연약지반 및 준설매립층 개량공사와 관련하여 설계의 적정여부 판단 및 시공방안을 제시하기위해, 본공사에 앞서 시험시공을 통해 C.G.S의 개량효과를 확인하고 분석하였다. 시험시공결과 당초 설계제원에서 계획했던 개량효과가 만족되는 것으로 분석되었다.

Keywords : C.G.S, Soft Ground, liquefaction

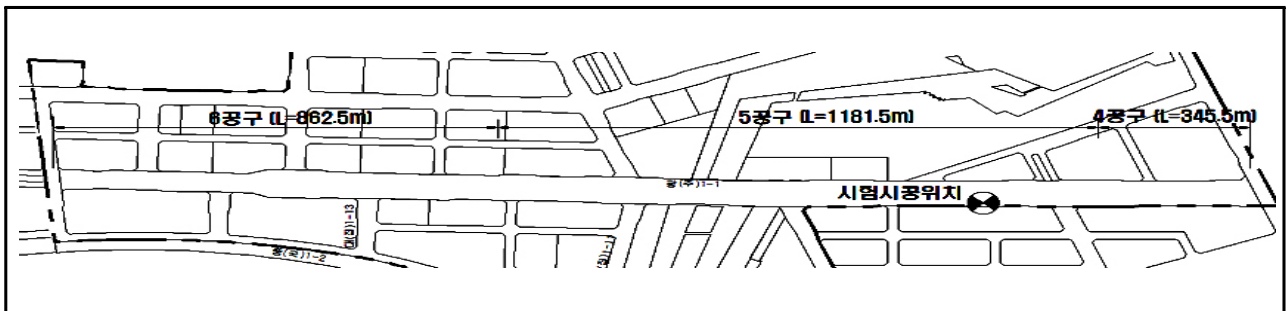
1. 서론

C.G.S(Compaction Grouting System)공법은 지반개량 공법의 일종으로 복합지반형성에 의한 지반개량 효과가 양호하며 협소한 작업공간에서도 작업이 가능하다. 이 공법은 건물내에서 기초보강에 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 인천 송도 1공구 기반시설 중앙대로 건설공사와 관련하여 진행중인 도시철도와 인접한 구간의 연약지반 침하방지 및 준설매립층 액상화 개량공사를 위해 본 공사에 앞서 시험시공을 통해 C.G.S 주입전·후의 개량효과를 확인하여 지반의 강도변화와 침하억제 효과를 분석함으로써 설계의 적정여부 판단 및 시공시 적용한 시험시공 사례를 기술하고자 한다.

2. 설계의 주요내용

2.1 시험시공 위치

시험시공은 중앙대로 No.49~No.51(도시철도 STA28Km+130~28Km+150) 위치에서 설계자료를 근거로 시공간격 2.0m, 2.5m, 3.0m로 나누어 시험시공하였으며, 그림-1에 시험시공 위치도를 나타내었다.



[그림-1] 시험시공 위치도

2.2 연약지반특성

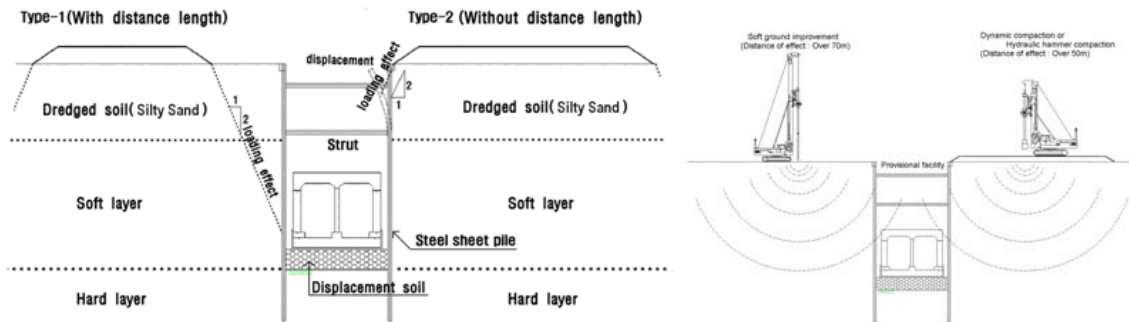
송도국제도시 지역의 중앙대로 구간의 지층 분포는 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화대(잔류토, 풍화암), **기반암**의 순으로 수직분포를 보이고 있다. 중앙대로 구간내 점성토지반의 토질특성을 파악하기 위해 시추조사와 병행하여 채취한 자연시료를 대상으로 KS F 규정에 의거하여 실내시험을 실시하였다. 실내시험 결과는 각 심도별 평균값을 사용하여 나타내었으며, 그 결과는 아래표와 같다.

[표-1] 물리적특성 및 압밀특성

위치	함수비(%)	액·소성(%)			압밀			
		LL	PL	PI	간극비(e_0)	압축지수(C_c)	압밀계수(C_v , cm^2/sec)	과압밀비(OCR)
인천 송도	28.9	23.8	19.8	14.7	0.87	0.18	2.36×10^{-3}	0.37(준설매립 포함시)
								0.79(매립층 미포함시)

2.3 설계 계획

송도국제도시 지역의 공기를 고려한 잔류침하량 검토결과 잔류침하량이 3.0~124.9cm로 대부분의 지역에서 허용침하량 기준치 10cm를 상회하여 연약지반 대책공법 도입이 필요한 것으로 나타났으며, 설계 결과 P.B.D공법(연약지반처리), 동다짐공법(액상화구간처리)으로 지반개량공사가 계획되었다. 그러나 기존에 진행중인 도시철도공사의 가시설과 철도구조물에 대한 토압 및 진동영향이 발생할 수 있는 것으로 검토되어, 여러 공법을 비교 검토한 결과 현장특성을 감안한 C.G.S공법이 대책공법으로 선정되었다. 표-2는 본 지역의 설계계획을 개략적으로 나타낸 것이다.



[그림 2] 연약지반개량 및 도시철도 단면도

[표-2] 본 지역의 설계계획

설계지역	인천 송도 국제도시	대책공법 	가시설과 철도구조물에 대한 토압 및 진동영향이 발생할 수 있는 것으로 검토됨. ⇨ 현장특성을 감안한 "C.G.S공법"이 대책공법으로 적용됨.
연약지반두께	2.0~28.0m		
지층구성상태	장기침하 및 액상화 우려		
설계 공법종류	P.B.D공법(연약지반처리) 동다짐공법(액상화구간처리)		

2.4 CGS공법 기존 시공사례 검토

C.G.S 공법을 적용한 기존 시공사례의 실내시험성적을 보면 C.G.S를 주입하기 전과 비교하면 일축압축강도(q_u)는 약 3.8~55.1%, 삼축시험에 의한 비배수전단강도(C_{uu})는 약 3.3~69.2% 증가된 것으로 나타났다. 또한 압밀특성은 C.G.S 주입에 의한 연약층의 압축지수(C_c)는 최대 70%까지 감소하는 것으로 나타났고, 초기간극비(e_0) 또한 감소되는 경향을 나타냈으며, 선행압밀하중(P_c)은 최대 90%까지 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 압축지수의 감소와 선행압밀하중(P_c)의 증가는 지반의 강성증대로 인한 압축특성의 개선을 의미한다. 이를 토대로 도시철도 가시설 인접구간(중앙대로)은 터파기를 위한 가시설이 시공되어 있는 점을 고려하여 대책공법을 검토하였다.

2.5 C.G.S 공법을 적용한 연약지반개량 검토

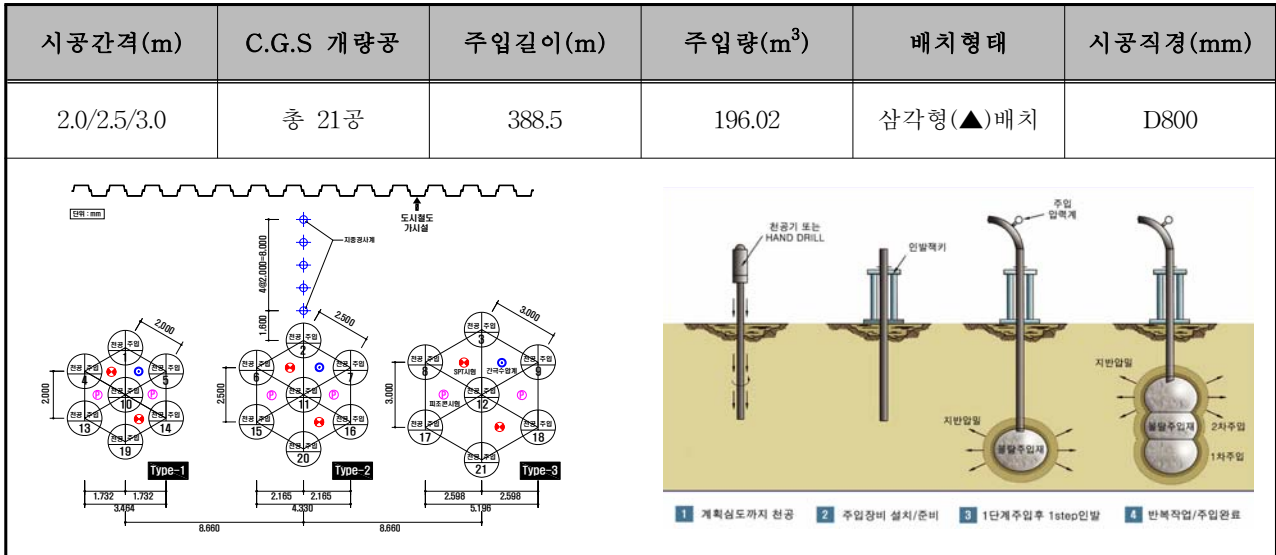
C.G.S를 시공한 지반에서는 C.G.S가 상재하중을 분담하여 압밀지반에 작용하는 응력을 감소시키고, 주변지반의 압밀특성을 변화시키기 때문에 무처리시의 침하량보다 감소하게 된다. 무처리시 침하검토 결과를 토대로 도시철도 가시설 인접구간 중, 공용하중 재하시 침하량이 허용침하량(10cm) 이상 발생된 것으로 판단되는 구간에 대해 기존 시공사례를 근거로 그라우팅 보강시 개량 후 침하량에 대한 검토를 수행하였으며, 그 결과 개량 후 침하량이 허용침하량 이내로 나타나 개량 후 침하에 대해 안정한 것으로 나타났다.

2.6 C.G.S 공법을 이용한 다짐개량효과 검토

도시철도 인접 가시설 영향구간에 대한 다짐공법 적용을 위해 공법 검토결과 동다짐 및 유압해머 다짐공법 적용시 진동영향으로 기존 가시설과 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 가시설 인접구간의 경우 다짐공법으로 진동영향이 없고, 도시철도 가시설과 동시시공이 가능하며, 주입에 따른 다짐효과를 만족할 수 있는 저유동성 몰탈(다짐그라우팅)공법을 적용하는 것이 적절할 것으로 검토되었다. 대상구간에 대해 기존 시공사례를 근거로 C.G.S 주입전·후 표준관입시험을 실시하여 지반개량 정도를 판단하였으며, 그 결과 N값의 전반적인 증가로 양호한 지반개량 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 사질토지반의 주입전·후의 표준관입시험 결과 전체적으로 N값의 증가량이 크게 나타났으며, 그라우팅 개량후에는 원지반의 N값이 증대되어 액상화에 대하여 안정한 것으로 나타났다.

3. 시험시공현황

C.G.S 공법은 슬럼프치가 5.0cm이하의 저유동성 Con'c형 Mortar의 주입재를 지중에 비배출형으로 압입주입하여 균질한 덩어리로 확산시켜 느슨한 흙을 사방으로 밀어내며, 주위지반의 밀도를 증가시킴과 동시에 원기둥에 가까운 Con'c Pile을 형성하여 지지말뚝으로서의 지지력과 주위지반 지내력 확보를 동시에 만족하는 공법이다. 본 현장의 시험시공은 현장의 지층구성이 위치별로 상이한 점을 감안하여 설계 목표값 확보를 위해 시공간격을 2.0m, 2.5m, 3.0m로 나누어 시험시공을 실시하였다. 시험시공은 가장 경제적이면서 개량효과의 적용이 가장 적절한 개량직경과 개량율을 검토하였으며, 중앙대로에서 설계자료를 근거로 도시철도 공사구간을 고려하여 비개착구간 중 설계 개량심도가 깊은 곳을 시험시공위치로 선정하였다. 시험시공 배치 현황은 아래 그림과 같다.

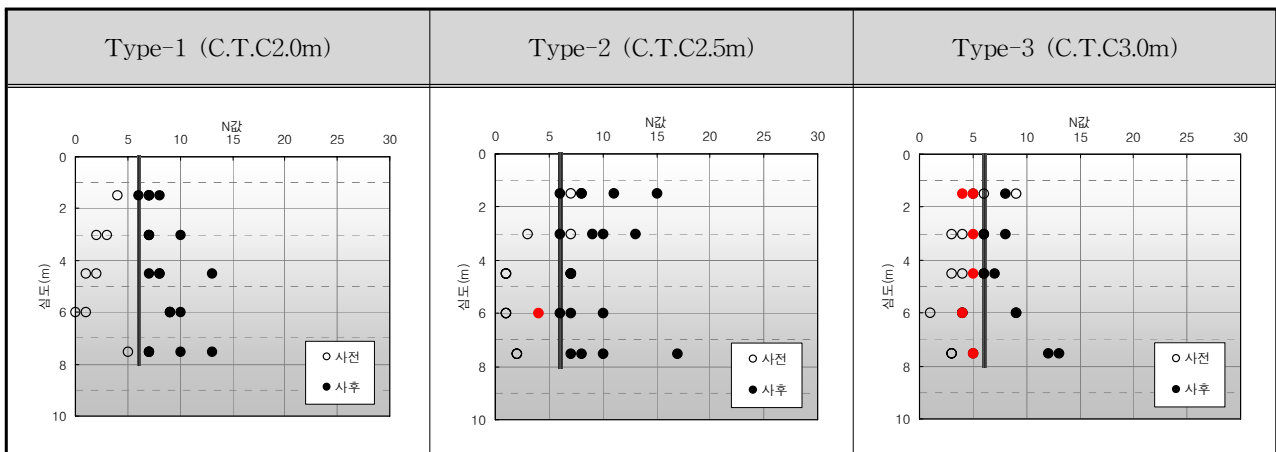


[그림 3] 시험시공 배치 및 공법

4. 시험시공 품질관리시험 결과

4.1 표준관입시험 결과분석

각 시공간격별로 액상화구간(매립층)에 대해 개량전과 개량후의 표준관입시험 N값을 검토한 결과 아래의 그래프와 같이 개량후 N값의 시방 관리기준($N > 6/30$) 적정비율이 Type-1에서는 100%, Type-2에서는 95%, Type-3에서는 70%인 것으로 나타났으며, 시험오차 및 상이한 지층을 고려할 때 중앙대로 액상화구간 개량은 설계 시공간격($\Delta 2.5m$) 및 구경(D800mm)이 적정한 것으로 분석되었다.

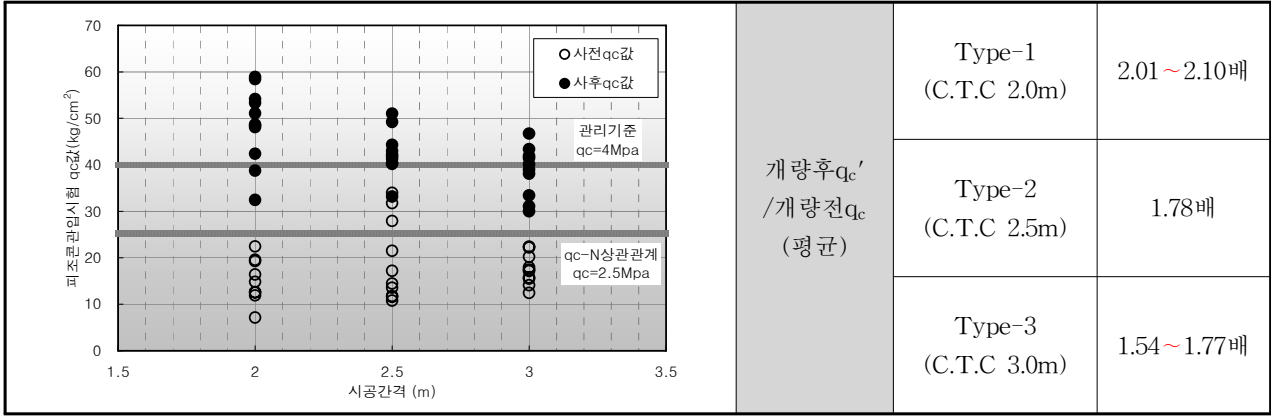


[그림 4] 표준관입시험 사전, 사후 지반조사결과

4.2 피조콘관입시험 결과분석

각 시공간격별 액상화구간(매립층)에 대한 개량전·후의 피조콘관입시험 q_c 값을 검토한 결과, 개량후 원지반의 q_c 값이 최대 2.1배까지 개량된 것으로 나타나 중앙대로 액상화구간 개량은 설계 시공간격($\Delta 2.5m$) 및 구경(D800)이 적정한 것으로 분석되었다. 또한, 중앙대로 시험시공 구간에 대한 q_c -N값의

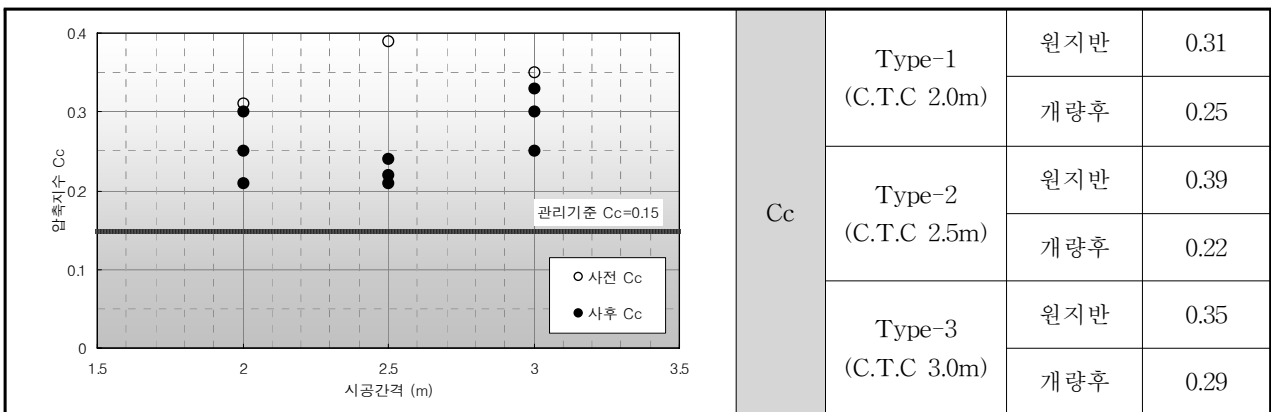
상관관계를 분석한 결과 $q_c=3.69\sim 4.63N$ 의 관계를 나타내고 있으므로 중앙대로 구간의 토질특성을 감안할 때 q_c-N 의 상관관계는 평균 $q_c=4.2N(kg/cm^2, N=6)=25.2kg/cm^2=2.5Mpa$ 인 것으로 나타났다. 이 결과를 이용하여 그라우팅 주입후 q_c 값의 개량효과($q_c>2.5Mpa$)를 분석하면 Type-1과 2는 95%이상, Type-3도 90%이상 개량효과를 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 5] 피조콘관입시험 사전, 사후 조사결과

4.3 압밀시험 결과분석

침하에 대한 하부 연약 점토층의 개량효과를 확인하는 시험으로서 시험공 사이 지반의 시료를 채취하고 압밀시험을 통한 압밀특성 개량 정도를 원지반과 비교분석하여, 설계 목표값의 확보여부를 판단하였다. 개량 후 시공간격별 압축지수(C_c)값을 검토한 결과 개량 후 원지반의 압축지수가 최대 46%까지 개량된 것으로 나타났다. 그러나, 원지반의 압축지수 값이 도시철도 공사로 인해 설계시 적용된 중앙대로 구간의 압축지수(0.182)보다 최대 2.14배 높은 것으로 나타나, 개량후 압축지수값이 관리기준치를 만족하지 못하는 것으로 나타났으므로, 시험시공에 의한 개량값을 기준으로 중앙대로 전구간 위치별로 침하검토를 재실시하였다.

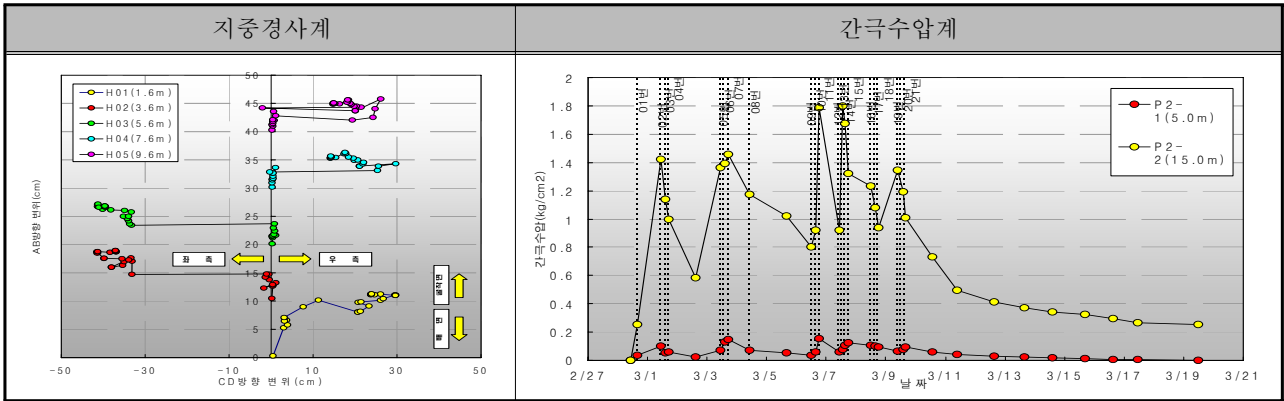


[그림 6] 압밀시험 사전, 사후 결과

5. 계측관리 결과분석

주입작업시 주변지반의 변위를 측정 및 간극수압의 변화를 측정하여 개량지반에 대한 영향을 검토하기 위해 계측관리를 실시하였다. C.G.S주입 후 주입위치로부터 이격거리 1.6m에서 가시설방향 지중변위 300mm이하 관리기준을 만족하며, 주입에 따라 증가된 간극수압은 주입작업 완료 10일 경과 후 소산

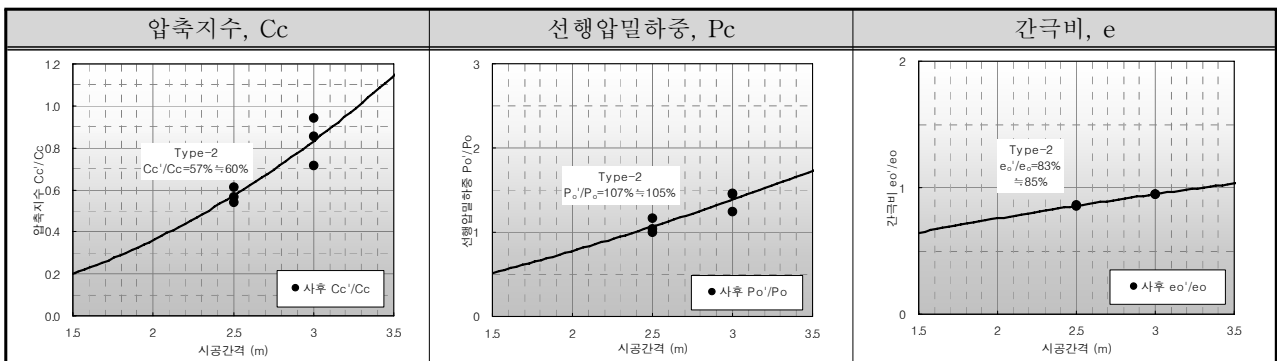
되는 것으로 분석되었다. 주입작업에 따른 측방변형 및 간극수압발생은 시험시공 작업공이 일정구간 (10m×20m)에 집중되어 짧은 시간(10일)내에 주입작업이 일시에 수행된 결과로 판단되므로 본 공사에서는 연약점토 특성을 고려하여 응력평형상태를 유지하고 있는 도시철도 가시설에 대한 영향을 최소화 할 수 있도록 인접 개량공 동시작업을 방지하고, 가시설로부터 외측방향으로 범위를 조절하여, 안전하고 효과적인 연약지반개량 작업이 이루어 질 수 있을 것으로 판단하였다.



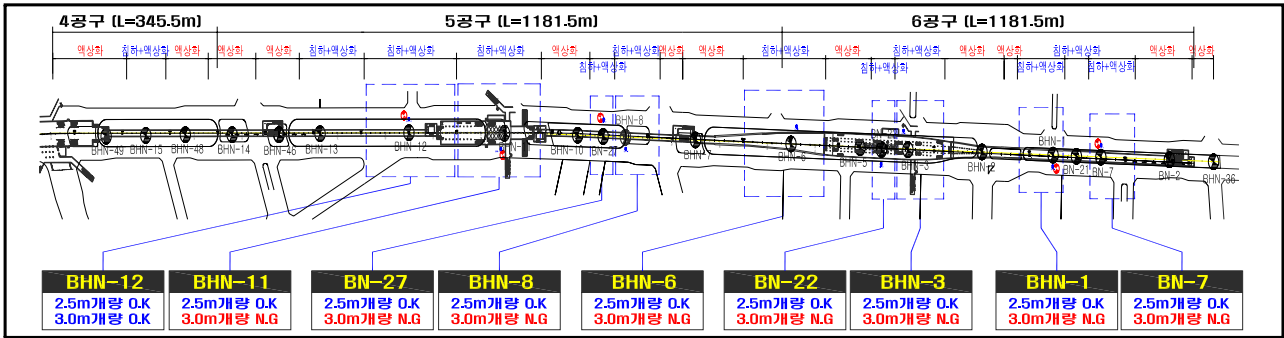
[그림 7] 계측관리 측정결과

6. 시험시공 결과를 이용한 본시공구간 시공방안

시험시공에 의한 개량값을 기준으로 중앙대로 전구간 위치별 침하검토 결과 설계 시공간격(Type-2, Δ2.5m, D800mm) 적용시 개량후 침하량은 모두 허용침하량(10cm)범위 이내로 개량되는 것으로 검토되었으므로, 중앙대로 연약층 침하 개량에는 당초 설계 시공간격 및 직경이 가장 적정한 것으로 분석되었다. 시험시공결과에 따른 개량후 압밀정수의 개량정도를 분석하고, 그 결과를 이용하여 중앙대로 위치별 침하검토를 재실시함으로써, 연약지반 개량의 적정성 여부를 판단하였다. 본시공 구간의 토질조사결과 압축지수는 0.11~0.74, 간극비는 0.69~1.72의 분포로 나타났으며, 위치별 토질정수의 편차도 크게 나타났다. 시험시공 결과분석을 토대로 본시공구간에 대해 설계 시공간격(Type-2, Δ2.5m, D800mm) 적용시 개량후 침하량은 모두 허용침하량(10cm)범위 이내로 개량되는 것으로 검토되었다.



[그림 8] 개량후 압축지수, 선행압밀하중 및 간극비



[그림 9] 개량 후 공구 및 위치별 침하검토 결과

7. 결론

- 1) 송도 국제도시 연약지반처리를 위해 일반구간에서는 P.B.D공법(연약지반처리), 동다짐공법(액상화 구간처리)으로 지반개량공사가 계획되었으나, 중앙대로 도시철도 가시설 인접구간은 연약지반 처리를 위한 P.B.D+P/L공법, 동다짐공법을 적용할 경우 가시설과 철도구조물에 대한 토압 및 진동영향이 발생할 수 있는 것으로 검토되어 현장특성을 감안하여 C.G.S공법이 대책공법으로 적용되었다.
- 2) 본공사에 앞서 시험시공을 통해 C.G.S의 개량효과를 확인하고 분석하였으며, C.G.S공법의 당초 설계 시공간격($\Delta 2.5\text{m}$) 및 직경(D800mm)이 중앙대로 액상화 및 침하구간 개량에 적정한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 『송도1공구 기반시설 기본 및 실시설계 토질조사보고서』 (2005.12)
2. 『송도1공구 기반시설 중앙대로 C.G.S시험공 토질조사보고서』 (2007.4)
3. 『부등침하/기울어진 구조물의 복원 및 기초보강 신공법 연구 보고서』 (2003) - 한양대
4. 『Compaction Grouting에 의한 지반보강 시공사례』 (1997) - 토목학회 논문집