

CGS공법에 의한 해성점토 및 준설패립지반의 기초보강 사례

Case Study for Improvement of Marine Clay and Dredgedfill Ground by CGS Method

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 정덕교²⁾, Duek-Kyo Chung, 서귀창³⁾, Kui-Chang Seo, 이명신⁴⁾, Myung-Shin Lee

¹⁾ 인천대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Incheon

²⁾ (주)성우지오테크 대표이사, President, Seong-woo Geotec Co.,LTD

³⁾ (주)유신코퍼레이션 감리단장, Head of Construction Management, Yooshin Engineering Corp. Co.,LTD

⁴⁾ 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Incheon

SYNOPSIS : The CGS method is non-discharge replacement method improving ground stiffness by the effect of static compaction with injecting very low slump mortar into ground, and is applied for increasing bearing capacity and filling ground cavity by lifting or restoring differential settled structures and preventing differential settlement. This paper suggests design of ground improvement and construction case history for civil engineering structures by CGS method. This method can be used for reinforcing soft ground and liquefaction of loose sandy soil.

This method was used in SongDo area in Incheon Economic Free Zone due to its low vibration of ground while it can improve the soft soil where underground structures(subway and box culvert) are already existed.

Keywords : Compaction Grouting System, Ground Improvement, Low Slump Motar Grout

1. 서론

우리나라 서해 연안에서의 부지조성은 주로 느슨한 실트질점토 지반에 준설토로 매립조성하여 대부분 시공전까지 압밀이 진행 중이며 실트질모래 등으로 구성된 해성매립지반은 액상화에 취약한 특성을 나타낸다. 또한, 대규모로 계획, 건설되는 신도시는 준공에 따른 시간적, 공간적 제한 때문에 기간·시설 등의 동시시공이 필연적으로 발생하여 시공 중 인접 공사와 연관성 및 깊은 영향관계에서 상호의 안전성을 확보함이 필요하다. 이에 본 연구에서는 인접 공사와의 깊은 연관성속에 침하 및 액상화 보장을 위해 대규모로 진행된 CGS(Compaction Grouting System)공법에 의한 지반개량의 설계 및 시공사례를 토목기술의 발전 및 축적을 위해 소개하고자 한다. CGS공법은 슬럼프치가 낮은 저유동성(5cm이하) 콘크리트형 모르타르를 소정의 주입관을 통하여 지중에 비배출 방식으로 압입하여 원지반을 사방으로 밀어내어, 주위지반의 밀도를 증가시킴과 동시에 원기둥에 가까운 콘크리트 파일을 형성하여 말뚝 기초로서 지지력확보 및 주위지반의 지내력 증대를 도모하는 공법이다(성우지오테크, 2009). 송도국제도시는 현재 국제화, 정보화 도시조성이라는 목표 하에 교육·연구·주변공간을 활용한 문화·관광·물류유통·산업단지 등을 조성함은 물론 친환경적인 생태도시 조성을 목적으로 건립중에 있으며, 본 연구대상 지역은 송도 국제도시의 송도 1공구 기반시설 중앙대로 건설공사(L=2.4Km, B=70.0m) 현장이다. 이 건설공사 현장은 2003년 5월 준설토로 매립이 완료된 지역으로 시공전까지 압밀이 진행중인 것으로 판단되었고, 인접하여 도시철도 시공을 위한 굴토 가시설이 계획되어 있어 이에 대한 안정성을 확보해야 하는 상황이다. 따라서 연약지반개량공법으로 하중영향이 없고 무진동으로 시공이 가능하며 가시설 동시시공 시 및 가시설 시공 후 문제가 없을 것으로 판단되는 공법이 필요하여 지지말뚝으로써의 지지력과 주위

지반의 지내력확보를 동시에 만족하는 공법인 CGS공법(천병식 등, 1997)을 적용하였다.

2. 공사 및 지반현황

2.1 지반특성

본 연구대상지역의 시추조사 결과 크게 4단계(매립층, 퇴적층, 잔류토층, 풍화암층)로 구분할 수가 있으며, 각 지반의 특성으로는 다음과 같다. 준설토로 구성된 매립층은 지표로부터 1.7~8.5m의 심도로 분포하고, 황갈~회갈색, 담회(백)색 내지 회백색의 모래섞인 자갈 및 전석, 실트질 모래층으로 구성되어 있다. N값이 1/30~15/30으로 나타나며, 부분적으로 자갈 및 전석층이 혼재하여 N값의 변화가 심한 구간도 분포한다. 퇴적층은 실트질 점토 및 실트, 실트질 모래, 점토질 모래, (잔)자갈섞인 모래로 이루어져 있고, 지표하 1.7~32.3m심도까지 분포하며, 퇴적층의 상부층은 N값 1~4/30 정도의 연약한 실트 및 점토로 구성되어 있으며 그 하부는 굳은 점토 및 실트로 분포하여 지역에 따라 모래층이 실트 및 점토층 하부에 분포하고 있다. 잔류토층은 퇴적층 하부에 1~7m의 두께로 분포하고 있으며 색조는 회색, 주로 황갈색의 암편 섞인 실트질 모래로 구성되어 있다. N값은 50회 이상으로 매우조밀(very dense)한 상대밀도를 보이고 있다. 풍화암층은 지표하 31.0m~43.0m심도에서 출현하여 1.0~16.0m의 두께를 나타내고 있으며, N값은 50회/10cm 이상으로 대단히 조밀한 상태이다(김태익, 2001). 그림 1은 연구대상지역의 위치 및 도로계획평면을 나타낸다.

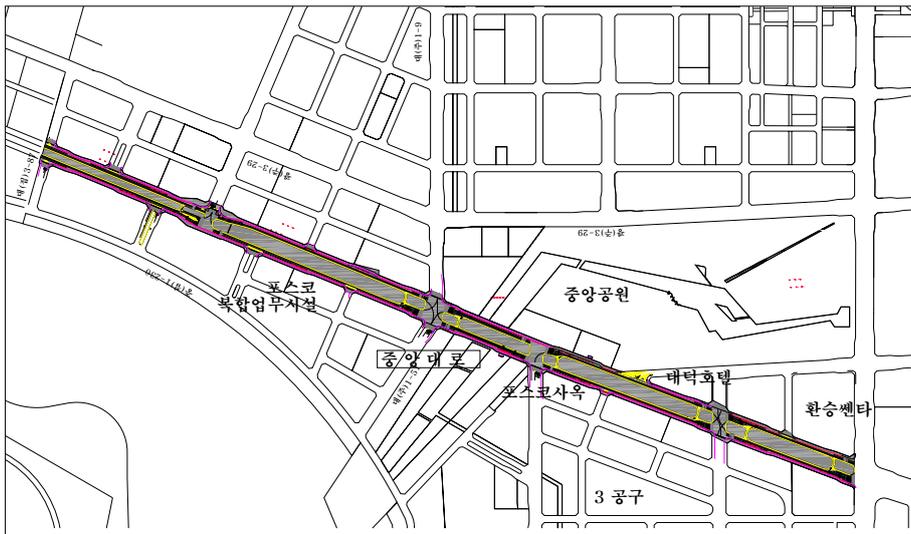


그림 1. 연구대상 지역 및 도로계획평면도

2.2 실내시험결과 및 설계 토질정수

중앙대로 구간 내 점성토지반의 토질특성을 파악하기 위해 시추조사와 병행하여 채취한 자연시료를 대상으로 KS F규정에 의거하여 실내시험을 실시하였다. 자연함수비는 9.9~44.6%, 평균 28.9%의 범위로 보이고 있으며 심도에 따른 특성은 없는 것으로 판단된다. 액성한계는 23.8~39%의 범위, 평균 23.8%의 값이고, 소성한계는 14.7~22.7%의 범위, 평균 19.8%의 값을 보이며 심도에 따른 특성은 나타나지 않는 것으로 판단된다. 소성지수는 평균 14.7%로 준소성(slightly plastic)상태이며 상부층은 액성지수가 1이상이므로 불안정한 상태를 보이고 있다. 압밀특성시험결과 심도에 따른 뚜렷한 특성은 보이지 않았고, 간극비 평균값은 0.87, 압축지수 평균값은 0.18로서 압축성이 크지 않은 비교적 양호한 상태로 판단된다. 과

압밀비는 평균 0.37정도이며, 이는 산정 시 준설매립을 포함하여 낮게 산정된 것으로 매립층 미포함시는 평균 0.79로 대부분 심도에서 1이하로 압밀이 진행중인 상태로 판단이 된다. 압밀특성 결과 설계토질정수는 표 1에 나타내었다.

표 1. 설계토질정수-압밀특성

구 분	간극비(e_o)	압축지수(c_c)	압밀계수($c_v, cm^2/sec$)
중앙대로	0.867	0.182	2.36×10^{-3}

3. 주요설계 및 시공현황

3.1 지반보강설계

지반보강설계는 크게 무처리시 안정성 검토, 보강설계, 개량 후 안정성 검토로 구분이 되며, 무처리시 안정성 검토에는 잔류침하 검토, 액상화 검토, 도시철도 인접구간 안정성검토로 보강설계에는 지반개량 검토대상구간 및 적정한 공법선정 그리고 개량공 배치 및 세부설계 사항들이 포함되어 있고, 개량후 안정성 검토부분에는 개량후 침하검토, 개량후 액상화 검토로 구분이 된다.

3.1.1 무처리 안정성 검토

침하량 산정은 정규압밀점토 조건으로 압축지수(c_c)법으로 산정한 결과 총침하량(S1+S2+S3)은 0.115m ~ 0.881m이고, 시공을 고려한 압밀기간 40개월일 때의 압밀도(U)는 35.3~100%이며, 이때의 잔류침하량은 3.0~58.7cm로 대부분 지역에서 도로의 허용침하량인 10cm를 초과하는 것으로 나타났다. 액상화 검토에서는 원지반 상부층이 준설매립층(N값 10이하)으로 액상화 우려가 있어 Seed & Idriss의 간편법을 이용하여 검토한 결과 대부분 지역에서 액상화의 가능성이 있는 것으로 분석이 되었다. 또한, 연약지반 개량공사가 시행중인 도시철도 공사와 공정이 중복되는 것으로 나타나 이에 대한 안전성을 검토 결과 P/L 하중 및 진동에 대한 가시설 영향범위는 압밀을 위한 P/L재하시의 하중범위를 고려할 때 주동파괴범위로 판단되는 20~25m 이내에서 하중증가에 따른 토압에 영향이 있는 것으로 나타났으며, 연직배수재 타 입장비 및 다짐장비에 따른 영향도 최소 20m에서는 영향이 큰 것으로 나타났다. 표 2는 도시철도 인접구간에서의 안정성 검토를 위한 토압검토 구간별 결과이다.

표 2. 토압검토구간 및 결과

구 분	도 시 철 도						
	4공구	5공구			6공구		
	검토 1	검토 2	검토 3	검토 4	검토 5	검토 6	
도시철도 STA	26km70~ 27km740	28km90~ 28km191	28km405~ 28km459	28km755~ 28km765	29km288~ 29km326	29km669~ 29km717	
위치	본선	본선	정거장	본선	정거장	본선	
P/L 높이	1.0m	1.0m	1.5m	1.5m	2.0m	2.0m	
굴착고	19.6m	17.8m	17.8m	18.0m	18.2m	17.3m	
토압 결과	최대	45.7%(↑)	22.9%(↑)	423.6%(↑)	120%(↑)	68.1%(↑)	67.0%(↑)
	평균	16.8%(↑)	10.1%(↑)	18.4%(↑)	21.7%(↑)	27.5%(↑)	21.7%(↑)

3.1.2 보강설계

무처리시 침하검토 결과를 토대로, 총 침하가 구간별로 허용침하량(10cm)이상 발생하는 도시철도 가시 설 인접구간 및 액상화 가능 구간을 검토대상구간으로 하였으며, 본 연구에 적용한 공법은 침하 및 액상화에 대한 지반개량효과가 높고 시공에 따른 진동 영향이 없으며, 타공정에 비해 슬라임 처리비가 없어 상대적으로 유리한 CGS공법을 채택하였다. 그림 2는 보강설계에 따른 지반개량 검토대상 구간을 나타낸 것이다.

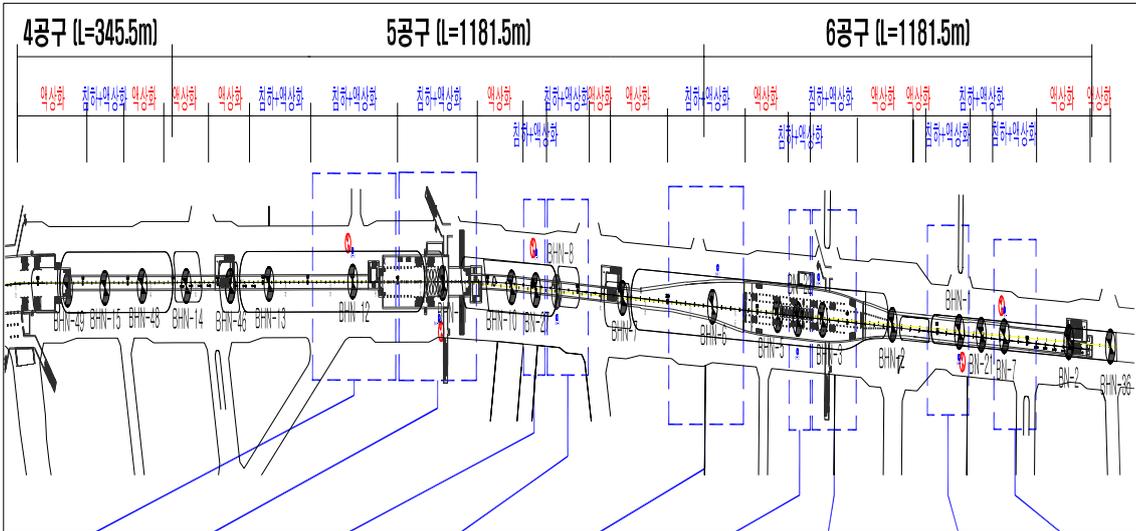


그림 2. 지반개량 검토대상구간

그라우팅 공법의 복합지반 개량효과를 도시철도 인접구간에 적용하기 위해 기존문헌을 분석한 결과, 적용가능한 개량효과는 저유동성 몰탈 주입공의 제원이 시공직경 D600~D1000mm, 시공간격 2.0~2.5m, 개량율 5.22~14.5%의 범위인 것으로 나타났다. 그러므로 본 현장에서도 그림 2와 같이 동일한 개량효과를 적용하기 위해 개량율과 직경의 관계를 분석하였으며, 개량직경 및 개량율의 추세선 상에서 오차범위가 10%이내이고, 가장 경제적이면서 개량효과의 적용이 가장 적절한 개량직경과 개량율을 검토하였다. 검토결과에 따른 개량율 확보를 위해 CGS의 배치는 시공간격 2.5m, 배치형태는 개량효과를 고려하여 삼각형(▲)배치로 계획하였으며, 시공직경은 D800mm로 계획하였다.

3.1.3 개량 후 안정성 검토

상기에서 검토된 결과에 따라 CGS공법에 의한 연약지반 처리는 시공간격(C.T.C) 2.5m, 시공직경(D)은 800mm로 검토하였다. 이에 대한 침하검토시 C.G.S부위는 강성체로서 침하가 없는 것으로 간주하고, 원지반과 CGS의 응력분담비(n)와 치환율(a_s) 개념을 이용하여 복합지반의 응력해석으로 연약지반에 대한 압밀침하량을 검토하였다. CGS를 시공한 지반에서의 침하량은 무처리시의 침하량보다 감소하게 되는데 그 원인은 CGS가 상재하중을 분담하여 압밀지반에 작용하는 응력을 감소시키고, 주변지반의 압밀특성을 변화시키기 때문이라고 판단된다. 표 3은 CGS 공법을 적용하여 지반을 개량한 결과 침하량을 검토한 결과이며, 개량 후 모든 구간에서의 침하량이 허용잔류침하량인 10cm 이내로 만족하는 것으로 나타났다.

표 3. CGS 개량 후 침하량 검토

구 분	개량체 배치간격 (m)	연약층 층후 (m)	선행압밀 하중 P_0' (tf/m^2)	응력저감계수 μ_s	하중증가량 ΔP (tf/m^2)	압축지수 (C_c')	개량후 침하량 (cm)	판 정	비고
BHN-1	2.5	9.8	8.082	0.73	3.35	0.13	6.5	O.K	
BHN-3	2.5	4.8	9.146	0.73	3.69	0.13	3.1	O.K	
BHN-6	2.5	6.8	10.168	0.73	3.07	0.13	3.4	O.K	
BHN-8	2.5	12	17.239	0.73	3.39	0.13	4.0	O.K	
BHN-11	2.5	15.8	10.095	0.73	2.97	0.13	7.7	O.K	
BHN-12	2.5	10	9.201	0.73	2.77	0.13	5.0	O.K	
BHN-13	2.5	6.1	11.180	0.73	2.77	0.13	2.5	O.K	
BHN-15	2.5	10.1	16.157	0.73	2.68	0.13	2.9	O.K	
BN-7	2.5	7	8.937	0.73	3.20	0.13	4.1	O.K	
BN-21	2.5	11.6	6.932	0.73	3.20	0.13	8.5	O.K	
BN-22	2.5	6.4	6.884	0.73	3.80	0.13	5.5	O.K	
BN-27	2.5	11.4	7.506	0.73	3.39	0.13	8.2	O.K	

개량 후 액상화 검토 결과 중앙대로 도시철도 인접구간 매립층에 대한 액상화 검토를 Seed & Idriss의 간편법과 지진응답해석으로 검토를 수행하였으며, 두 가지 해석방법에 의한 검토결과는 토질조사 위치 별로 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 BHN-1,2의 경우 지진응답해석 결과는 안정한 것으로 나타났지만, Seed & Idriss의 간편법 검토결과는 불안정한 것으로 검토되었으며, 그라우팅 개량 후에는 원지반의 N 값이 상승하여 액상화에 대해 안정한 것으로 검토되었다.

3.2 시험시공 및 결과

연약지반 및 준설매립층 개량공사와 관련하여 본 공사에 앞서 CGS공법 시험시공을 통하여 설계적정성을 확인하였다. 시험시공 배치구간은 도시철도 공사구간을 고려하여 비개착구간 중 설계 개량심도가 깊은 곳을 시험시공위치로 선정하였으며, 시험시공 배치의 주변현황을 고려하여 그림 3과 같이 시공간격을 2.0m, 2.5m, 3.0m로 시험시공을 실시하였다.

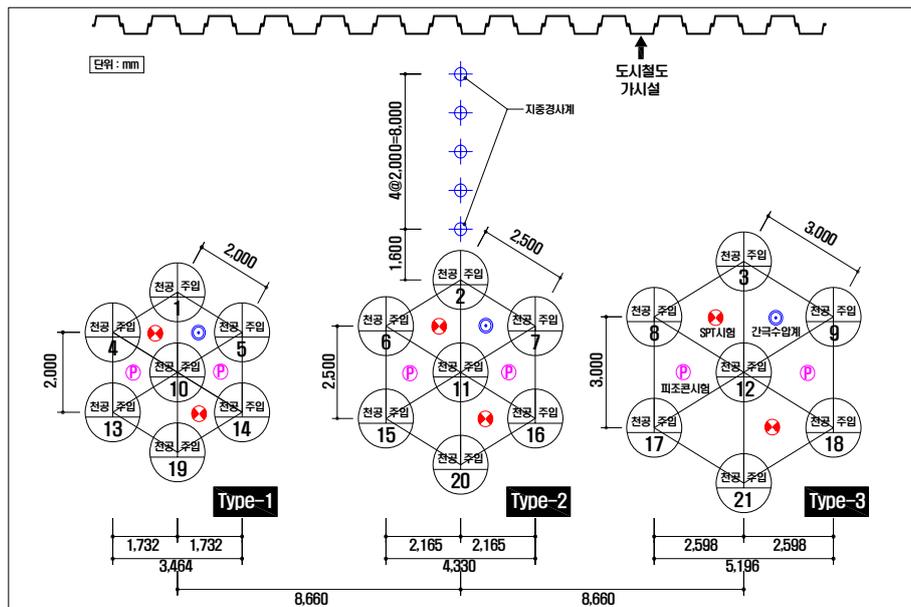


그림 3. 시험시공 배치 및 공변도

CGS공법 시험시공구간에 대하여 각각 사전/사후 시추 및 피조콘관입시험, 실내시험을 실시하고 계측 및 품질시험을 통하여 적용성 및 효과를 검토한 결과 Type-2(시공간격 2.5m, 구경 800)가 액상화, 허용 침하량 등에서 가장 적정한 것으로 분석되었으며, 도시철도 가시설 구간에서도 안전하게 시공될 것으로 판단되었다. 시험시공결과는 표 4에 나타내었다.

표 4. Type-2 시험시공 결과

구 분		표준관입시험	피조콘관입시험	압밀시험
결 과	개량 전	N값: 3.3	q_c : 2.51Mpa	c_c : 0.39
	개량 후	N값: 8.75	q_c : 4.4Mpa	c_c : 0.22

계측결과는 도시철도 가시설 안전성을 지중변위 측정결과(가시설 허용수평변위; 이격거리 1.6m에서 300mm이하) 일부구간에 대한 집중 및 동시작업만 방지하면 문제가 없을 것으로 분석되었으며, 주입작업에 의해 발생된 간극수압도 주입완료 10일 경과 후에는 소산되는 것으로 분석되어 인접공의 작업순서를 조절하면 지장이 없는 것으로 나타났다.

3.3 CGS 공법 시공

2007년 4월 17일부터 2008년 9월 8일까지 약 17개월 동안 CGS공법 시공을 실시하였다. 시공방법으로는 크게 천공작업과 주입작업으로 구분 할 수가 있다. 천공작업은 73mm의 비트 및 케이싱을 사용하여 소정의 계획심도까지 천공을 하는 것이고, 주입작업은 선단부터 계획량을 지반의 절삭없이 비배출형으로 주입재를 전용펌프로 주입하였고 주입관의 33cm/1회 기준으로 소정의 주입량을 주입한 후 인발하는 과정이다. 본 시공에 사용된 장비는 천공장비로 150m 천공능력 이상의 회전수세식 보링기를 사용하였고, 주입장비로 주입압력 $70kgf/cm^2$ 이상의 용량으로 저슬립프의 주입재를 펌핑할 수 있는 CGS 전용펌프를 사용하였다.

본 공법에 사용된 주입재의 배합은 시멘트, 세립토, 석분으로 이루어져 있으며, 설계 및 시험시공에 의한 주입재 비율로 배합을 실시하였다.

시험시공 시 주입압 및 주입에 따른 압력 및 간극수압으로 인한 인접 도시철도 가시설 안전성에 대해 일부구간에 대한 집중 및 동시작업만 방지하면 문제가 없을 것으로 분석되었으나 본 시공 중 시공여건 등에 의해 가시설의 일부 변형이 관찰되어 이에 대한 안전대책이 필요하다고 판단하였다. 따라서 가시설 구조물과 10m 떨어진 위치에 $\phi 75mm$ PVC 스트레이너를 관입하여 드레인 방식의 압력해소공을 설치하였다. 그 결과 미리 설치된 계측기를 통해 가시설의 변형이 나타나지 않아 안전한 시공이 가능하였다. 그림 4는 시공 시 발생한 문제를 극복하기 위하여 압력해소공을 설치하는 모습이다.



그림 4. 압력해소공 설치 및 지하수, 이토의 배토작업

3.4 CGS 공법의 개량 효과

CGS 공법 시공에 따른 개량효과 확인을 위하여 피조콘 관입 등에 의한 현장시험, 구근의 육안 및 코아채취에 의한 확인, 실내시험 결과 지반개량 목표치를 상회하는 것으로 나타나 침하 및 액상화 보강이 충분이 이루어진 것으로 검토가 되었다.

3.4.1 현장시험

현장시험은 표준관입시험과 피조콘관입시험을 실시하였다. 표준관입시험 결과 준설매립층의 액상화 개량구간에 대한 관리기준치인 최소(평균)의 6(10)/30을 상회하는 8(10)/30으로 나타나 목표치를 상회하여 개량된 것으로 나타났으며, 심도에 따른 N값의 변화는 그림 5와 같다.

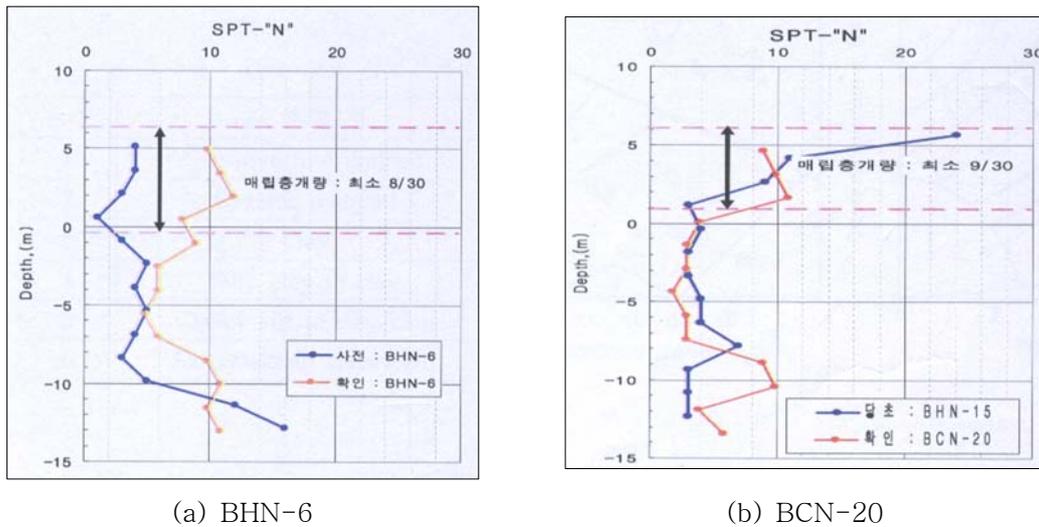


그림 5. 표준관입 시험 결과

피조콘관입시험 결과는 매립층의 콘저항치(q_c)는 관리기준치인 최소 4 Mpa(평균 6Mpa)를 만족시키는 값으로 나타났고, 심도에 따른 콘저항치(q_c) 변화는 그림 6에 나타내었다.

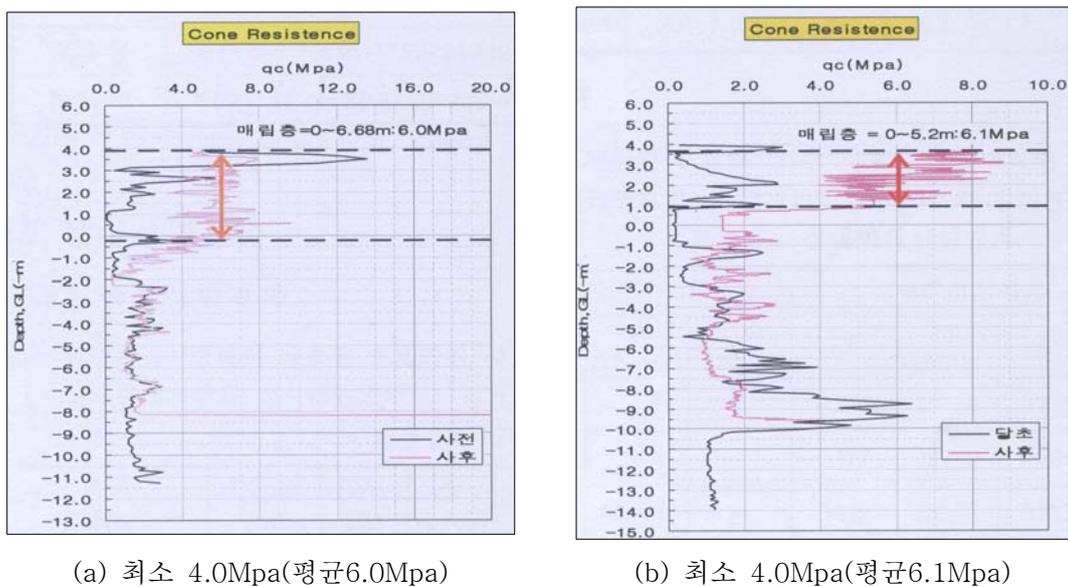


그림 6. 피조콘관입시험 결과

3.4.2 CGS 구근 확인

육안에 의한 구근이 확인되고 코아회수율(TCR)은 97.3~99.7%로 연속성이 있는 것으로 나타났다. 육안에 의한 CGS 구근의 모습은 그림 7, 코어채취한 모습은 그림 8과 같다.



그림 7. 구근 확인



그림 8. 코어 채취

일축압축 강도 시험 결과 일축압축 강도는 $213\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상으로 관리기준인 $80\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상을 만족시키는 것으로 나타났고, 위치별 일축압축 시험 결과는 표 5에 나타내었다.

표 5. 코아채취 및 일축압축시험 결과

위 치	말뚝 공번	타설 심도 (m)	매립층 두께 (m)	말뚝 길이 (m)	채취 심도 (m)	코아회수율 (%)	일축압축강도 (kgf/cm^2)	판정
STA No 57	No.36	20.0	1.5	18.5	18.0	97.3	235.5	OK
STA No 13	No.98	12.43	1.6	10.89	10.7	98.3	213.1	OK
STA No 92	No.125	12.13	1.9	10.59	10.5	99.7	217.2	OK

3.4.3 개량 후 실내시험 및 잔류침하량

개량후의 실내시험 결과에 의한 잔류침하량 검토결과 관리기준인 10cm이하로 나타났다. 각 시추공별 침하량은 표 6에서와 같이 BHN-6과 BCN-20에서의 침하량은 각각 8.4cm, 5.3cm로 모두 허용 잔류침하량 이내로 수렴하는 것을 확인하였다. 표 7에는 개량 전과 개량 후 토질정수들의 변화를 비교한 것이다. CGS 공법을 이용하여 지반개량을 한 결과, 함수비, 비중, 초기간극비, 압축지수는 감소하였고, 반대로 단위중량과 선행압밀하중은 증가하는 것으로 나타났다.

표 6. 시추공별 침하량

공 번	BHN-6	BCN-20
침 하 량(cm)	8.4	5.3
기준관리	허용 잔류 침하량 10cm 이내	

표 7. 개량전·후의 토질정수 비교

내 용	구 분	연약지반처리구간(C.G.S 공법)					
		사전	사후	증감	당초	사후	증감
		BHN-6 6.4~7.2	BHN-6 9.7~10.5		BHN-36 5.0~5.8	BCN-20 8.0~8.8	
함수비(w_n , %)	61.7	26.0	(↓)35.7	40.7	28.9	(↓)11.8	
비중(G_s)	2.722	2.687	(↓)0.035	2.689	2.680	(↓)0.009	
단위중량(γ , g/cm ³)	1.669	1.984	(↑)0.315	1.806	1.929	(↑)0.123	
소성지수(I_p , %)	58.4	10.2	(↓)48.2	6.5	NP	-	
초기간극비(e_o)	1.681	0.712	(↓)0.969	1.095	0.786	(↓)0.309	
압축지수(c_c)	0.640	0.119	(↓)0.521	0.220	0.177	(↓)0.043	
선행압밀하중 (p_c , kN/m ²)	64.72	231.78	(↑)167.1	46.09	233.69	(↑)187.6	

4. 결론

연약한 실트질 점토층 위에 해성준설토로 조성한 부지에 건설되는 송도국제도시의 중앙대로건설공사는 지반보강이 가장 중요한 공종으로 도시철도의 굴토공정과 동시에 진행되어 굴토 가시설의 안전성을 저해하지 않는 범위에서 침하 및 액상화 보강이 필요하였다. 이에 침하 및 액상화에 대한 지반개량효과가 높고 시공에 따른 진동영향이 없으며, 타 공정에 비해 슬라임 처리비가 없어 상대적 경제성이 유리한 CGS공법을 채택 적용하였다.

또한 설계 시 고려되기 어려운 지반 고유의 특성인 비등방 비균질성의 극복을 위해 시험시공을 통하여 최적의 직경과 간격을 검토하고 일부 수정·적용 하였으며, 도시철도 가시설의 안전조건을 도출하였다. 시공 중 시공여건의 변화로 가시설 일부의 변형이 있어 압력해소공을 설치하여 극복하였으며, CGS 시공에 따른 개량효과는 피조콘 등 현장시험, 실내물성 및 역학시험, CGS 구근의 육안확인 등을 통하여 확인하였다.

그 결과 요구되는 지반개량의 기준을 상회하는 것으로 나타나 침하 및 액상화 방지를 위한 CGS공법은 성공적으로 수행되었음이 확인되었으며, 송도국제도시의 중심도로인 중앙대로 건설공사를 안전하고 양호한 고품질로 마무리할 수 있었다.

참고문헌

1. 김태익(2001), 지반침하방지를 위한 CGS공법의 적용성에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교, pp.12~19.
2. 성우지오텍(2009), 인천도시철도 1호선 송도신도시 1,2공구 지하 Box구조물보강 C.G.S 및 S.Q.J 공법, pp.2~6.
3. 천병식, 권형석(1999), CGS에 의한 기초지반보강에 관한 연구, 한국철도학회 논문집, Vol.2, No.4, pp.15~18.
4. 천병식, 임해식, 조천환, 정현철(1997a), 수도권 신국제공항 전용철도 노반 실시설계의 Box 구조물 지반보강법 검토 결과, 한양대학교 건설연구소, pp.7~21.