

CGS 공법에 의한 지반침하억제 사례연구 A Case Study on the Plan for Settlement Restraint by CGS

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyeon Yeoh, 김우종³⁾, Woo-Jong Kim,
황성식³⁾, Sung-Sik Hwang, 김우철³⁾, Woo-Chul Kim.

¹⁾ 한양대학교 공과대학 교수, Professor, College of Engineering, Hanyang University

²⁾ 한국해양대학교 겸임교수, Concurrent Professor, K.M.N.University

³⁾ 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate student, Hanyang University

SYNOPSIS : In this study the CGS as an injection method by low slump mortar was performed the pilot test to confirm the applicability of this method and the effectiveness of settlement restraint. From the results, there has been concluded the construction control standard such as an institutional diameter, space, depth, injection materials, injection pressure etc. Also, there has been estimated the ground improvement effectiveness which has resulted from the field investigation and consolidation test etc. From the results, in the adjacent ground the CGS, generally, has been confirmed to increase ground strength to improve the consolidation characteristic obtained from the field investigation and consolidation test. Especially, the CGS which performed the larger stiffness to the ground has been concluded that the settlement restraint to the ground complicates the ground effect which increases the bearing capacity and stress assignment. So, the CGS can be considered as an effective method to increase the bearing capacity as well as the settlement restraint of soft ground.

key word : CGS, low slump, injection, soft ground, settlement restraint, bearing capacity

1. 서론

포화된 연약점성토 지반에서의 건설시 부적절한 조사 및 설계, 구조물하중 증가, 지하수위 강하와 같은 주변환경의 변화에 의해 공사완료후 지속적으로 침하가 발생한다면 구조물에 예상밖의 대규모 피해가 발생할 수 있다. 이와 같은 피해가 예상되는 경우 적용성 있는 지반개량대책은 매우 제한적이며 시공성, 효율성과 경제성 등에서 당초 시공시와 비교하여 그 조건은 매우 악화된다.

본 연구대상 공법인 CGS(Compaction Grouting System)공법은 몰탈을 주입재로 하여 비배출 치환원리에 의해 주입하는 공법으로서 지반중 정적으로 밀도증대효과를 기대할 수 있으며, 저공해, 저소음, 내구성 확보뿐만 아니라 높은 주입 고결체의 강도에 의해 경우에 따라서는 기초파일로 사용할 수도 있다. 또한 기존의 시멘트계 맥상고결방식의 장점과 약액에 의한 침투고결 공법에서의 장점을 얻을 수 있다. 최근 국내에서도 구조물 기초의 보강, 초연약지반의 개량, 폐광 함몰지역의 공동충전 등을 목적으로 다양한 용도로 사용이 보편화되고 있는 추세이나 아직도 본 공법의 적용에 있어서 경험에 의존하거나 시험시공을 통하여 그 개량특성을 파악하고 있는 실정이다(천 등, 1998(b), 1999(a),(b), 2000(a),(b),(c)).

본 연구는 포화 점성토지반에서 침하발생 억제를 위하여 시공에 적용된 CGS공법의 개량특성과 적용

성을 파악하기 위하여 실시하였다. 본 시공이 실시된 지역은 강원도 OO지역으로 현재 입주중인 APT단지내 부지로서 입주후에도 지속적으로 대규모의 지반침하가 발생하여 침하억제를 위한 대책이 요망되는 곳이다. 주입시공은 기존의 시험시공 자료를 토대로 적정한 CGS설치 패턴 즉, 설치직경, 배치형태, 설치간격을 정하여 시행하였으며, CGS주입 전·후의 개량효과확인을 위하여 현장 및 실내토질시험을 실시하고, 계측관리를 실시하여 지반거동특성을 파악하고자 하였다.

2. CGS에 의한 지반개량 메커니즘

본 공법은 경험적인 방법으로 발전되어 왔으며, 또한 그 메커니즘도 완전히 연구되지 못했기 때문에 공법의 효과를 판정하고 그 적용성을 높이기 위해서는 기본적인 과정을 이해하는 것이 필요하다. 본 공법의 효과를 예측하여 실제 시공에 반영하고 그 적용성을 높이기 위해서는 지반공동구 확장 메커니즘을 이해할 필요가 있다(James Warner, 1978, Robert Bowen, 1981, H.R. Al-Alusi, 1997). 주입재의 체적과 상대적 다짐의 증가량과의 관계를 유도하기 위해서는 지반상태를 다음과 같이 가정한다.

- ① 흙과 Compaction Grouting 주입재 사이에 뚜렷한 접촉면이 있다.
- ② 충전과 소성변형에 의해 가장 연약한 부분을 치환하는 경향이 있다.
- ③ 주입고결체의 형태는 토질의 물리·역학적 특성 및 상재구조물의 하중 등 여러 요인에 의하여 불규칙한 형태로 고결될 수도 있으나 균질토에서는 대개 원기둥 형태로 형성된다. 균질하고 등방성인 지반일 경우 지중에 가해지는 주입압은 주입공의 선단을 중심으로 한 구형의 중립경계면을 통해 소산되고, 그 중립경계면에서는 주입에 따른 응력과 변형의 영향은 없다.

3. CGS 주입시공

3.1 지층현황

CGS공법 적용현장은 강원도 OO지구 APT단지로서 건물자체는 말뚝기초로 지지되어 침하현상은 예견되지 않으나, 건물주변 주차장지역의 고함수비 연약지반에 대해서는 Sand Drain공법으로 기 처리되었음에도 불구하고 최고 80cm의 압밀침하가 발생된 후 추가적인 침하가 예상되었다. 시추조사결과, 지층분포는 지표로부터 매립층, 충적층, 풍화대층으로 구성되며, 상부의 매립층은 N치 11~18회로 SP 혹은 SC로 구성되어 있고 중간정도의 상대밀도를 나타낸다. 충적층의 경우 N치는 2~50회이고 상부에는 150~200%의 비중이 낮은 유기질점토, 하부에는 무기질실트층이 존재하며 연약층두께는 18.6~20.4m이다.

3.2 주입시공 현황

3.2.1 주입공 배치 및 시험

CGS주입시 배치형태는 삼각형 및 정방형배치로 실시하였으며, CGS주입 전·후의 개량효과를 파악하기 위하여 구역별로 현장시험(SPT, CPT, CPTU, Vane Test)을 실시하였다. 또한, 현장시험시 채취한 불교란시료로 실내토질시험을 실시하여 CGS주입에 의한 개량전·후의 지반개량특성을 파악하였다.

3.2.2 주입 계획

(1) 주입재의 구성과 배합

주입재료의 선정·배합시 체분석시험을 통하여 Ideal-Line(Samson, 1997)에 근접하는 재료를 선정하였으며, 적용된 표준배합비는 표 1과 같다. 또한, 주입재의 Slump치는 0~5cm범위를 유지하도록 하였다.

표 1. CGS의 표준배합비

시멘트	모래	점토질 화강토	석분
200kg(5포)	0.6m ³	0.25m ³	0.15m ³

(2) 주입속도 및 주입량

정량 및 정압주입이 효과적으로 가능하도록 초기 주입속도를 3초/stroke, 0.12m³/min으로 주입하였으나, 지표용기와 주입재의 유동성을 방지하기 위하여 6초/stroke, 0.06m³/min으로 추가주입을 시행하였다.

(3) 주입방식 및 주입순서

일반적으로 CGS공법의 주입방식에는 Top-Down방식과 Bottom-Up방식 및 두 방식의 조합형이 있으나, 본 연구에서는 지반개량 및 기초보강시에 주로 이용되는 Bottom-Up방식을 다음과 같이 적용하였다.

- ① 정량주입: $\phi 800\text{mm}$ 총측 주입량 주입(0.5m³/m \rightarrow 누계stroke수 \times 1회 토출량(m³/stroke))
- ② 정압주입: 허용 상한주입압 800psi 발생시 1단계 인발.

3.2.3 계측관리

CGS주입시공중 및 시공완료후 주변지반의 거동특성을 파악하기 위하여 지하수위계, 간극수압계, 경사계, 지표면침하핀, 자동계측기(건물경사계, 균열측정기) 등의 계측관리를 수행하였으며 각 구역별로 비교평가가 가능하도록 배치하였다.

3.2.4 주입시공에 의한 영향 평가

연약한 점성토 지반의 지반침하 억제공법으로 CGS공법을 적용함에 있어 주변지반 및 인접구조물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 현장시험결과와 계측결과를 이용하여 분석·검토하였으며, 그 결과는 지반거동특성과파악과 주변구조물에 영향이 발생하지 않도록 하기 위한 대책수립의 수단으로 이용하였다.

4. 시험 결과

4.1 개량확인 현장시험

4.1.1 표준관입시험

원지반 조건과 CGS주입후 조건으로 구분하여 실시한 표준관입시험 결과는 그림 2와 같다. 구역별 평균 증가량은 약 1~6 이었으며, 그림 2에서와 같이 지반처리 대상지층인 GL-6~12m의 고함수비의 유기질층적층에서의 N치변화는 전반적으로 증가(매립토층 일부구간에서 개량후 N치가 감소하는 경향을 보이고 있으나, 이것은 지반의 시료채취위치의 변화와 지반의 불균질성에 따른 미소한 변화라고 사료됨)하는 경향을 보여주고 있어 CGS주입에 따라 주변지반의 강도증대효과가 있는 것으로 나타났다.

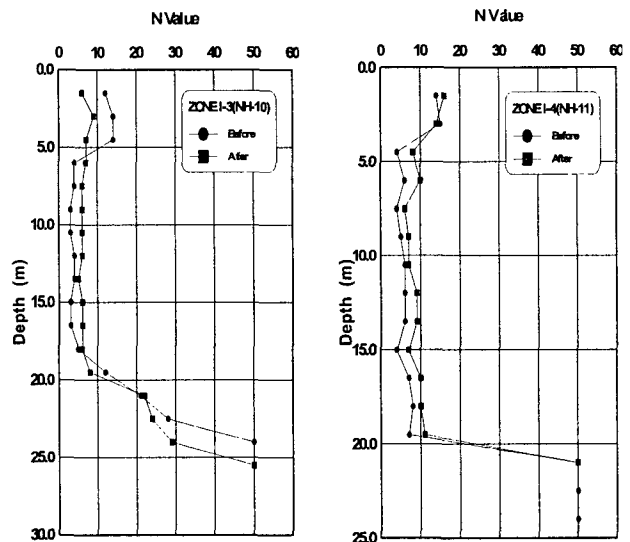


그림 2. CGS 주입전·후 N치의 변화

4.1.2 피에조콘관입시험

원지반 조건과 CGS 주입후 실시한 피에조콘관입시험 결과 콘선단저항치 (q_c), 비배수강도 (S_u), 과압밀비(OCR) 및 $F_r - q_t$, $B_q - q_t$ 분류도의 변화를 나타내면 그림 3과 같다. 분석결과 원지반과 비교하여 주입완료 후 전반적인 증가경향을 보이는 것으로 나타났다.

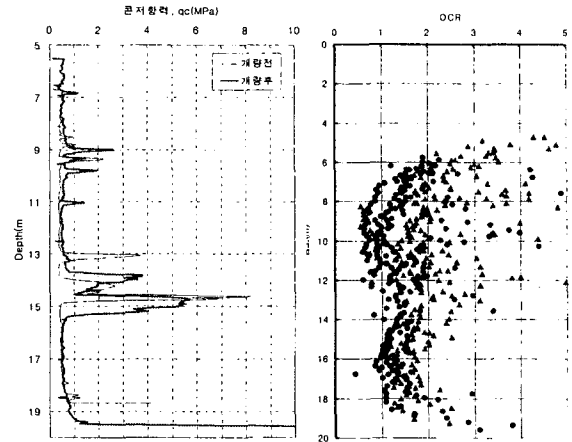


그림 3. 주입전·후 피에조콘관입시험 결과

4.1.3 현장베인시험

CGS주입 전·후 실시한 현장베인전단시험 결과를 요약·정리하면 다음 표 2와 같다. CGS 주입완료후 주입전과 비교하여 약 54% 증대된 것으로 나타났다. 이와 같이 CGS주입에 의해 주변지반의 강도특성은 표준관입시험 및 피에조콘관입시험 결과에서와 같이 전반적으로 개선되었음을 확인할 수 있었다.

표 2. 현장베인전단시험 결과

평균 Torque (kg·cm)		평균 현장 베인전단강도 (kg/cm ²)	
개량전	개량후	개량전	개량후
220	340	0.480	0.741

4.2 실내토질시험 성과

4.2.1 강도특성

불교란 시료에 대한 토질역학 시험성적을 원지반 및 CGS개량후에 대하여 정리하면 표 3과 같다. 표 3에서와 같이 CGS주입에 따라 전반적인 강도증대효과가 있음을 확인할 수 있었다.

표 3. 실내토질 시험 성과

위 치	일축압축강도 (kg/cm ²)	삼축압축시험 (UU test) (kg/cm ²)		직접 전단시험 (kg/cm ²)		비고
		C	φ	C	φ	
원지반	0.589	0.323	0	0.224	12.9	
주입후	0.625	0.377	0	0.211	17.0	

4.2.2 압밀특성

실내토질시험 성과로부터 원지반과 비교된 CGS개량후의 압밀특성은 표 4와 같다. 표에서 CGS주입 완료후의 압밀특성은 원지반과 비교하여 상관관계를 파악하기는 다소 어렵다. 이것은 개량 대상지층에 존재하는 불규칙한 유기질토층에서 원지반조건과 상이한 시료채취와 CGS주입에 의해 주변지반의 교란에 의한 압밀특성의 변화에 기인할 수 있다. 개량완료후의 압밀특성이 악화(압축지수, 초기간극비)된 조건에서도 선행압밀하중이 다소 증가됨을 확인할 수 있었다.

표 4. 개량에 의한 압밀특성

구 분	압축지수 C_c	초기간극비 e_o	선행압밀하중 P_c (kg/cm ²)	압밀계수 C_v (cm ² /sec)	체적압축계수 m_v (cm ² /g)
원지반	0.686	2.55	0.820	$1.88 \sim 8.44 \times 10^{-4}$	$0.908 \sim 3.84 \times 10^{-2}$
주입후	0.662	2.03	1.059	$1.24 \sim 8.60 \times 10^{-4}$	$1.75 \sim 5.20 \times 10^{-2}$

4.3 현장계측 결과

4.3.1 간극수압

연약한 포화점성토 지반내에 CGS공법에 의한 저유동성물탈의 주입과정중 과잉간극수압 특성을 파악하기 위하여 각 구역별로 진동현식 간극수압계(V/W Type)와 지하수위계를 설치하여 계측관리를 수행한 결과 그림 4에서와 같이 CGS 주입과정중 최대 8.1 t/m² 까지 발생 과잉간극수압이 증가하였으나 주

입완료후 안정화 시기에는 0.5~1.7 t/m² 정도로 수렴되는 것으로 나타났다.

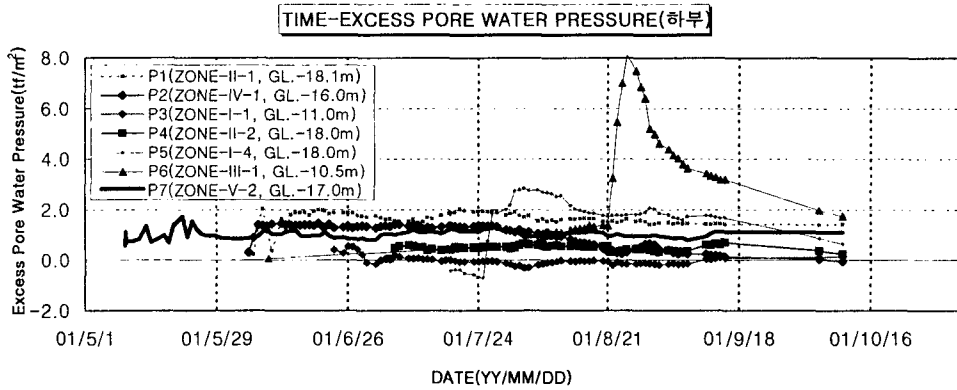


그림 4. CGS 주입에 따른 과잉간극수압 변화

4.3.2 지중수평변위

포화점성토 지반중에 CGS주입에 따른 지중수평변위 발생량을 측정하여 시공중 주요공정별 변위특성을 파악한 결과, CGS주입시 APT건물 주변의 최대수평변위발생량은 전반적으로 200mm이하로 나타났으며, 보강토옹벽구간의 수평변위는 CGS주입시 최대 350mm 정도 발생하였으나 주입종료후 안정화된 것으로 나타나, 지반개량목적과 인접구조물의 영향 등을 복합적으로 고려한 CGS 설치직경과 설치간격의 선택적인 적용이 매우 중요한 사항인 것으로 판단된다. 일반적인 형태의 지중수평변위는 그림 5와 같이 일정기간의 주입종료후 수렴화 경향을 보이는 것으로 나타났다.

4.3.3 지표면에서의 침하·응기

CGS공법 주입시공시 지표면에서의 침하·응기량 파악은 CGS주입에 따른 주변지반거동을 이해하는 매우 중요한 관리방안중의 하나이다. 주입중 및 주입완료후의 침하·응기특성을 파악하기 위하여 205개소의 지표침하핀을 설치·측정하였으며, 시공과정에서 침하·응기량의 대표적인 경우는 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 주입과정에서 점진적으로 지반응기가 발생하였으며, 주입종료후 전반적인 안정화 상태로 평균 3~4cm정도 응기된 것으로 나타났다. 이와 같이 안정화 과정중 응기되었던 지반이 침하되는 현상은 지중수평변위 측정결과에서도 유사한 현상을 보여주고 있다.

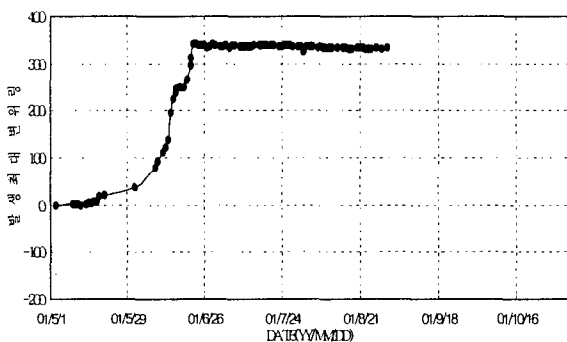


그림 5. 지중수평변위양상(보강토 옹벽구간)

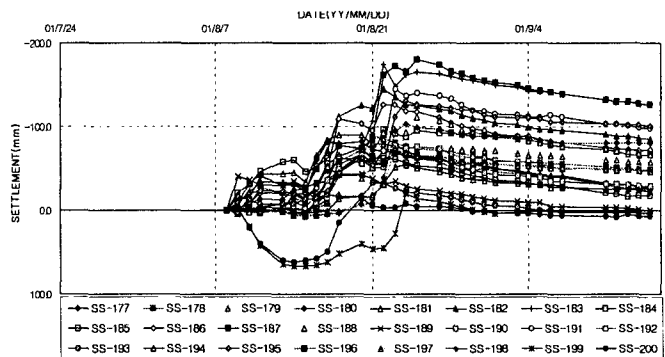


그림 6. CGS주입에 따른 지표면변화

5. 분석 및 고찰

5.1 주변지반에 미치는 영향

5.1.1 CGS에 의한 압밀특성변화

시험시공지역은 부지조성공사 완료후 지속적으로 침하가 발생하여 향후 예상되었던 잔류침하량은 약 50cm로 파악되었다. 본 현장에서 CGS주입시공과정중 및 개량완료후의 지표침하편 계측결과를 이용하여 향후 발생침하량을 쌍곡선법에 의하여 그림 7과 같이 예측하였다. 이와 같이 CGS주입에 의하여 발생침하량을 현재상태로 방치할 경우와 비교하여 크게 감소시킬 수 있으며, 예상되는 잔류침하량은 1cm 미만으로서 구조물기초의 허용잔류침하량 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 치환율을 12.5%로 할 경우 향후 발생할 수 있는 잔류침하량을 크게 억제시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5.1.2 주변지반 및 구조물에 미치는 영향

CGS 주입과정에서 계측관리를 통하여 주변지반의 수평변위현상과 융기현상을 파악할 수 있었다. 그림 8에서와 같이 CGS주입시공시 주변에 설치한 CGS의 연쇄적인 영향에 의해 주변지반의 작용응력이 변화되고 있음을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 이와 같은 수평응력발생 특성을 고려한 주변지반 및 구조물의 영향을 최소화할 수 있는 대책이 필요한 것으로 판단된다.

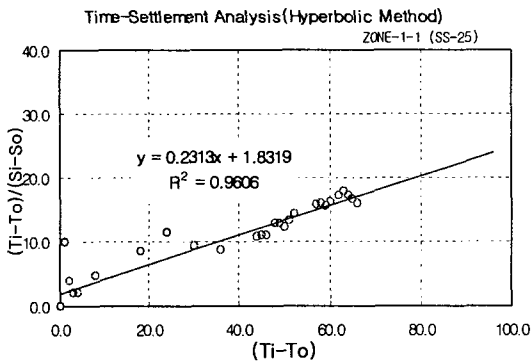


그림 7. 쌍곡선법을 통한 잔류 침하량 예측

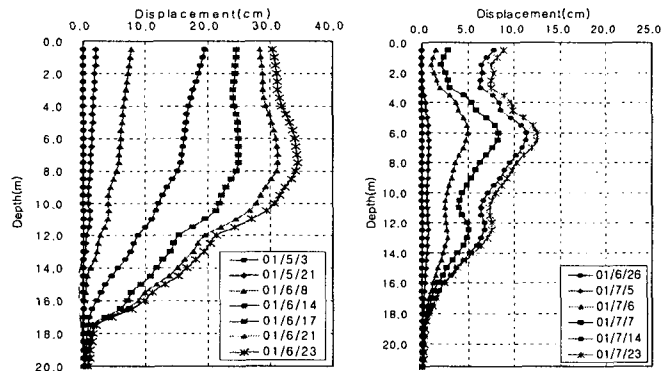


그림 8. APT 주변지반의 지중수평변위 경시변화

5.2 CGS 주입특성

CGS주입시 사용골재는 주입설계기준에 따라 이상적인 배합비를 설정하였다(Samson, 1997). 주입재의 배합비는 주입중 지반의 압밀을 유도할 수 있는 내부마찰각, Pumping 가능한 소성 및 현장여건 등을 고려하여 그림 9에서와 같이 주입재의 입경분포범위를 결정하였다.

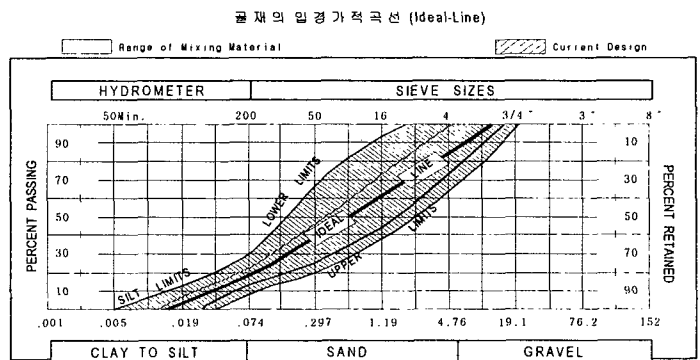


그림 9. 최적배합비 곡선

5.3 강도특성

포화점성토지반에서 CGS주입에 의한 주변지반의 개량특성을 파악하기 위하여 원지반과 CGS주입완료 후에 대하여 현장 및 실내토질시험을 실시한 결과 현저한 지지력 특성의 개선을 확인할 수 있었다.

CGS설치에 따른 주변지반의 지지력 증대효과는 면적치환비와 일정한 상관관계를 나타내지 않으며 적절한 설치직경과 간격이 이루어질 때 지지력 특성이 양호하게 나타나고 있다. 이것은 동일한 면적치환

비의 조건에서도 설치직경이 클 경우 주입에 따른 지반교란으로 강도특성이 감소할 수 있으며, CGS설치직경을 줄이고 CGS설치수량을 증대시키는 것이 주변지반의 지지력증대에 효과적인 것으로 판단된다.

5.4 변위 특성

5.4.1 침하·용기 특성

계측관리를 통한 침하·용기특성 파악 결과 CGS설치직경을 증가시키려면 주입압을 증가시켜야 하는 것으로 주입압을 증가시키면 주변지반이 교란되어 연약화되는 현상에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 CGS주입시 주변지반의 용기발생은 지반파괴를 의미하는 것으로 주변지반의 지지력 증대효과를 극대화하면서 주입시공이 이루어지려면 설치직경을 가능한 감소시키는 것이 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 CGS주입시 주입속도를 낮추고 일정주입압에 의해 시공되도록 계획하였다.

5.4.2 압밀특성

계측결과로부터 CGS주입시 주변지반에 발생하는 과잉간극수압이 크게 나타나는 것은 연약한 포화점성토 지층에 몰탈주입에 의한 방사방향압축과 주입압에 의한 영향인 것으로 판단된다. 그러나, 주입완료 후 안정화시기에 수렴치로 나타나는 $0.5\sim 1.7\text{ t/m}^2$ 의 과잉간극수압은 압밀의 종료를 의미하지 않는다. 이는 CGS고결체가 연직배수재의 역할을 하지 않으므로 발생과잉간극수압이 완전 소산되려면 많은 시간이 소요될 것이다. 또한, 안정화시기에 과잉간극수압이 크게 발생하는 원인은 본 지역의 부지공사중 성토로 인한 과잉간극수압의 소산이 완료되지 못하고 압밀진행중인 현상이 주 원인인 것으로 판단된다.

본 시공결과로부터 압밀특성의 개선을 정확히 파악하기는 다소 어려우며 강도특성의 개선에 따른 압밀특성의 개선효과를 유추할 수 있는 사항 정도로 여겨지므로 향후, 다양한 시험결과의 분석을 통한 압밀특성 파악이 이루어져야 할 것이다.

5.5 복합지반효과

현장조사, 실내토질시험 및 현장계측관리 결과를 종합분석한 결과 침하가 발생한 시점에서 CGS공법으로 지반개량을 실시할 경우 무처리시 예상되는 발생침하량을 크게 억제시키는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 CGS에 의한 파일지지효과와 주변지반의 지지력특성의 개선에 의한 복합지반효과(Nagaraj, 2000)를 얻을 수 있게 된다.

시공결과로부터 면적치환비 12.5%조건에서 CGS 파일자체의 강성에 의해 증가된 지지력증가는 10 t/m^2 를 상회하는 것으로 검토되고 주변지반의 압축강화에 의한 지지력증대를 종합적으로 고려하면 CGS에 의해 개량된 지반은 작용하중조건에 의해 지반지지력 증대효과와 더불어 추가 발생침하를 억제시킬 수 있는 적용성이 양호한 공법인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 지반침하억제를 목적으로 선정된 CGS공법의 적용성과 개량특성을 파악하고자 하였으며, 그 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) CGS주입 전·후에 실시한 압밀시험결과, 포화점성토지반에서의 C_c , C_v 특성의 개선과 함께 선행압밀하중은 CGS주입후 크게 증가하여 압밀침하의 억제효과를 확인할 수 있었다.
- (2) CGS에 의한 개량전·후의 현장조사결과 N치는 평균 3정도 증가하였으며, 피에조콘관입시험 결과에

서도 q_c , S_u , OCR 등이 원지반과 비교하여 증가하는 등 CGS주입에 의해 주변지반의 지지력 특성이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

- (3) CGS주입재의 일축압축강도시험 결과 주변지반에 비해 강성이 매우 큰 CGS주입에 따른 복합지반효과에 통해 지지력 증대효과 및 응력분담으로 잔류침하량을 크게 억제할 것으로 판단된다.
- (4) CGS주입의 적용성은 시공 현장의 지반조건과 주입효과 등을 고려할 때 주입재의 배합비는 10:4:3 (모래:점토질화강토:석분)으로, 주입량은 천공 1m당 0.5m³, 1회펌핑량은 0.006m³로 주입할 경우에 양호하고, 주입형태는 정압주입과 정량주입방식을 병행할 경우 개량효과가 우수한 것으로 나타났다.
- (5) 전체적으로 현장시험, 현장계측, 실내토질시험결과 CGS주입에 의한 주변지반의 지반특성이 개선되었으며, 연약점토지반에서 CGS에 의한 침하억제에 대한 적용효과는 우수한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 천병식(1998), "최신 지반주입-이론과 실제-", 원기술, pp.17~37.
2. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999a), "CGS에 의한 지반보강공법 사례연구", 한국철도학회 춘계 학술대회, pp.375~382.
3. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999b), "CGS에 의한 기초지반보강 효과에 관한 연구", 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년 학술발표회논문집, pp.1~13.
4. 천병식, 여유현, 정영교, 김우종(2001a), "연약지반의 지반침하 방지대책으로써 CGS공법의 시공사례연구", 대한토목학회 2001가을학술발표회, P.3-223.
5. 박홍규, 정영교, 여유현(2001b), "CGS공법에 의한 지반침하억제 대책", 한국지반환경공학회 2001년 가을 학술발표회논문집, pp.125~137.
6. 천병식, 여유현, 정영교(2001c), "저유동성 몰탈주입에 의한 연약지반의 침하억제 효과", 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 6호, pp.53~67.
7. James Warner(1978), "Compaction Grouting - A Significant Case History", **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 104, No. 7, pp.837~847.
8. H.R. Al-Alusi(1997), "Compaction Grouting: From Practice to Theory of Grouting: Compaction, Remediation and Testing", **Geotechnical Special Pub. No. 66**, pp.43~53.
9. Robert Bowen(1981), "Grouting in Engineering Practice", **Applied Science Publishers**, pp.77~84.
10. Samson W. Bandimere(1997), "Grouting : Compaction, Remediation and Testing", Proc. of sessions sponsored by the Grouting Committee of the Geo-Institute of the ASCE in conjunction with the Geo-logan '97 Conference.
11. T.S. Nagaraj(2000), "Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization", Special Invitation Lecture, pp.1~25.