

매립토층에서 CGS에 의한 지반개량특성에 관한 연구

Characteristics of Ground Improvement by Compaction Grouting System in Filled Ground

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyeon Yeoh, 정영교³⁾, Young-Gyo Jung, 정완균⁴⁾, Wan-Gyun Jung, 정의원⁵⁾, Eui-Won Jung, 김우종⁶⁾, Woo-Jong Kim

¹⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾ 한국해양대학교 겸임교수, Concurrent Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime Univ.

³⁾ 덴버코리아(주) 회장, President, Denver Korea Grouting Co.,Ltd

⁴⁾ 한미기초(주) 사장, President, Han Mi Geologic Engineering Co.,Ltd

⁵⁾ 성하지질공업주식회사 이사, Director, Seong Ha Geologic Engineering Co.,Ltd

⁶⁾ 한양대학교 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Compaction Grouting System, the method which makes ground compact by injection of low slump mortar, is widely used for reinforcement of soft ground, restoration of structures happened differential settlement, underpinning and restoration of damaged dam core. The quantitative analysis of ground improvement for this method has not performed yet. So, design parameters about this method must be studied through performance of CGS in various types of soil to make CGS adaptable widely. In this study PBT, SPT and field density test were performed for analysis of the characteristics of ground improvement and pressuremeter and inclinometer were installed for analysis of the characteristics of compaction in adjacent ground. In this paper, denoted much effects for filled ground that increasing of the bearing capacity, confirming the displacement of adjacent ground and the effective radius of injection.

Key words : CGS, low slump mortar, re-leveling settled structure, improvement of bearing capacity, ground reinforcement by compaction

1. 서론

지반주입공법은 1802년 프랑스의 C. Berigny가 실시한 점토와 석회의 수용액의 지반 내에 주입을 시 초로 지반개량과 차수효과증대 또는 기초보강 등의 다양한 목적으로 국외에서 활발하게 사용되어 오고 있다. 국내에서는 1970년대말 서울지하철 건설공사의 착공과 함께 LW, SGR, JSP 등 여러 가지 주입공법이 도입되기 시작하여 지금은 우레탄, Jet Grout, RJP, CGS 공법 등 신공법이 도입되어 여러 건설현장에 다양하게 쓰여지고 있다(천, 1998). 이들 공법중 특히 CGS 공법은 슬럼프가 낮은 저유동성 몰탈을 지반내에 고압으로 주입하는 공법으로 부동침하된 구조물복원이나, 댐 코어의 보수보강, 구조물기초 지반의 지반보강 등의 다양한 목적으로 쓰이며 시공현장의 공간이 협소한 경우나 소음, 진동 등의 영향을 많이 받는 지역에서도 시공할 수 있는 특징이 있다(천 등, 1998).

본 연구는 느슨한 사질 매립지반에서 지반개량을 목적으로 CGS 공법을 적용할 경우 주변지반에서의 지지력 특성, 압축특성등을 파악을 위하여 경기도 용인시 00부지에서 주입간격 및 패터별로 시험시공을 실시하였다. CGS 주입공사에는 현장시험(평판재하시험, 표준관입시험, 현장밀도시험)과 계측관리(토압계, 경사계, 지표면침하핀)를 실시하여 CGS 주입에 따른 주변지반 개량특성을 파악하고자 하였다.

2. CGS공법

ASCE의 그라우팅 위원회에서 1980년 발표한 CGS의 정의에 의하면 Compaction Grouting이란 “슬럼프치가 1 inch(25mm) 이하의 비유동성 몰탈로서 소성확보를 위한 세립토(실트질 크기)와 내부마찰력 증대를 위한 조립토(모래질 크기)로 구성되는데 이것은 Soil-Cement가 기본재료이며, 주변지반의 공극속으로 침투되는 것이 아니라 고결체의 형태로 지중에 방사방향으로 압력을 가하여 흙을 압밀시킴으로써 토립자 사이의 공극을 감소시켜 지반이 조밀화 되도록 개량하는 것” 이라고 되어 있다. 즉 CGS공법은 유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성시켜 주변 지반을 압축 강화시키는 지반개량공법으로써, 기존의 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, Jet Grouting의 배출치환 등과는 전혀 다른 ‘비배출 치환’이라는 독특한 기법의 주입공법이다(천 등, 2000).

지반의 조밀성을 증대시키는 다른 공법으로는 지표면에 진동이나 충격을 가하여 다지는 동다짐이나, 바이브로플로테이션 등이 있으나 진동이나 소음 등의 영향에 의한 적용상의 제한을 받게 된다. 그러나 CGS공법은 소음이나 진동 등으로 인한 인접지역의 피해가 없기 때문에 높은 적용성을 가지며, 시공성 측면에서도 개량범위와 고결체의 형상을 자유로이 형성할 수 있으며, 좁은 장소에서도 시공이 가능한 점 등 매우 우수한 효과를 가지고 있으며, 품질관리와 시공관리의 측면에서도 주입량이 계량기에 의해 확인되므로 우수한 특성을 가지고 있다. 또한 일반 그라우팅 공법의 주재료가 Cement Paste(Cement+물)인 반면 Cement Mortar(Cement+토사+물)가 주재료이므로 일종의 무근콘크리트로서 $30\sim 200\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 압축강도를 가지고 있어 선진외국(미국, 일본등)에서와 같이 기성 콘크리트 파일과 같은 기능의 구조물 기초파일로서 사용할 수도 있다.



그림 1 CGS주입장비



그림 2 CGS주입장면

개량대상 토질에 대한 적용성 측면에서 살펴보면 액상화 가능성을 가진 지반에서의 활용에도 사용될 수 있으며(Boulanger & Hayden, 1995) 해성점토 지반에서 CGS를 시공할 시에는 본 공법이 원지반의 흠과는 관계없이 Cement Mortar만으로 구체를 형성하는 공법의 특징이 있다. 따라서 해수 또는 원지반의 염분등에 의한 영향을 거의 받지 않으므로, 원지반 토사를 이용하여 시멘트밀크를 주입하는 JSP, Jet Grouting 등의 고압분사공법에 비해 해성점토 지반에 함유된 유기물 또는 염류에 의한 강도열화, 침식등의 영향을 거의 받지 않는 등 매우 유리한 조건을 가지고 있다. 특히 염분에 의한 강도열화를 막기 위해서는 일반적으로 쓰이는 보통 포틀랜드 시멘트 대신 고로 Slag시멘트를 쓰면 효과적이며 또한 천공시 고압분류수를 사용하지 않고 로타리 퍼커션 장비 또는 Air Track Drill을 이용하여 천공되므로 원지반을 연약화시키지 않는다. 또한 사용하는 Mortar이 고함수비가 아니므로 타공법에 비해 주입재로 인하여 원지반의 토성을 연약화 시키지 않는 매우 유리한 공법이다(천 등, 1997). 최근 CGS공법은 고압의 주입으로 주변지반을 압축팽창 시키는 원리를 이용하여 기울어진 피해건물의 기초부를 소요량만큼 자유롭게 들어올려 기초를 보강하는 기법인 Underpinning으로도 많이 사용되고 있다(Warner, 1978).

3. 현장시험시공

매립토층의 CGS에 의한 지반개량특성을 파악하기 위하여 실시한 본 시험시공 부지는 경기도 용인시에 위치하고 있으며 7~8m로 성토된 토사지반이다. 주입패턴은 그리드형, 일점형(1개의 CGS설치)으로 구분하여 그리드형의 주입의 경우 주입전·후에 평판재하시험, 표준관입시험, 들밀도시험 등의 현장시험을 실시하여 지지력 특성을 파악하였으며, 일점형 주입의 경우는 토압계 및 경사계를 설치하여 주변지반의 방사방향 압축특성을 파악하였다.

그리드형 주입은 그림 3과 같이 주입공을 1.5m~2.0m 간격의 격자형으로 배치하고 심도 6m까지 주입을 실시하였으며, 주입시 구근의 직경이 $\varnothing 500\text{mm}$ 로 형성되도록 주입량을 조절하여 주입압을 가하였다.

주입전·후 각각의 Yard별로 평판재하시험, 들밀도시험, 표준관입시험을 실시하였는데 주입후 평판재하시험은 개량효과를 위치별로 세밀하게 파악하기 위하여 1개의 Yard에서 시험위치를 그림 4와 같이 하여 시험을 실시하였다.

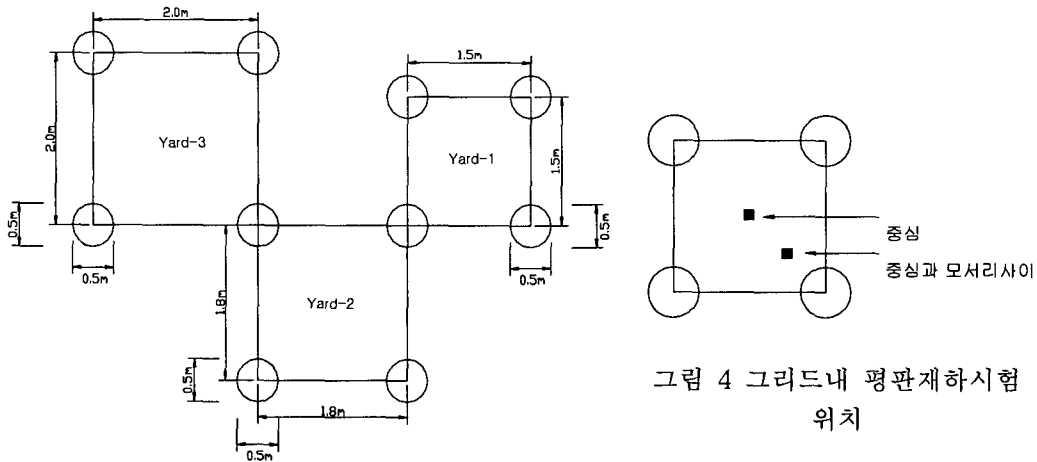


그림 3 지반지지력 평가를 위한 그리드형 주입배치

일점형 주입에서는 CGS주입시 발생하는 주변지반의 수직 및 수평변위와 토압의 변화를 평가하기 위하여 본 시험시공에서는 그림 3과 같이 주입심도는 6m이며 구근의 직경이 $\varnothing 600\text{mm}$ 가 되도록 주입을 실시하였다. 계측기는 그림 6, 7, 8 과 같이 주입공을 중심으로 1D, 2D, 3D, 4D간격으로 토압계, 경사계 및 지표면침하판을 설치하였다.

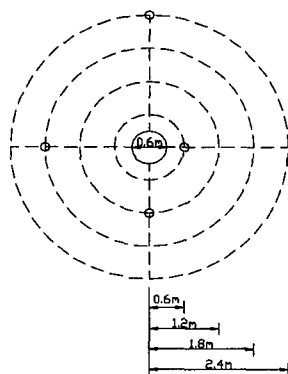
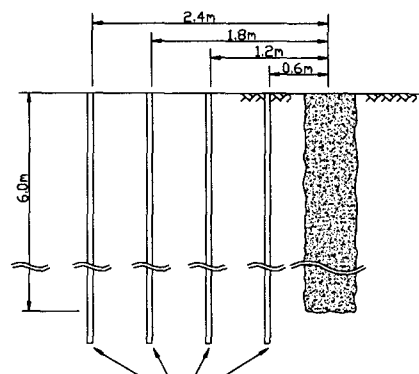


그림 5 경사계, 토압계 및 지표면말뚝의 위치도



경사계 케이싱
그림 6 경사계 설치도

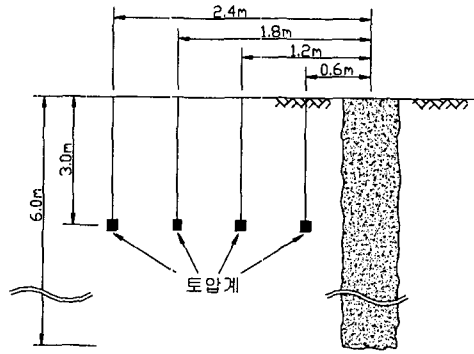


그림 7 토압계 설치도

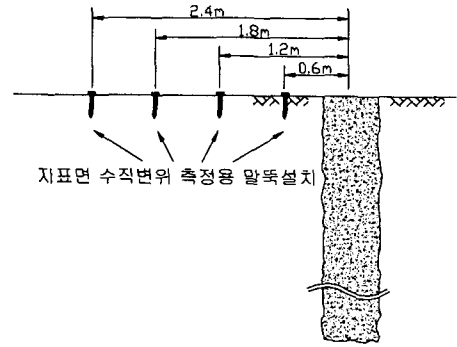


그림 8 지표면말뚝 설치도

4. 시험결과

4.1 현장시험

시험시공시 현장에서 실시한 현장시험(표준관입시험, 평판재하시험, 현장들밀도시험), 계측(지중수평면 위, 지중토압, 수직변위)결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1.1 표준관입시험

개량전·후의 Yard별 표준관입시험의 결과는 그림 9와 같이 각 Yard별로 개량전과 비교하여 N치의 증가경향을 확인할 수 있었으며 CGS의 설치간격이 가까울수록 개량특성이 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

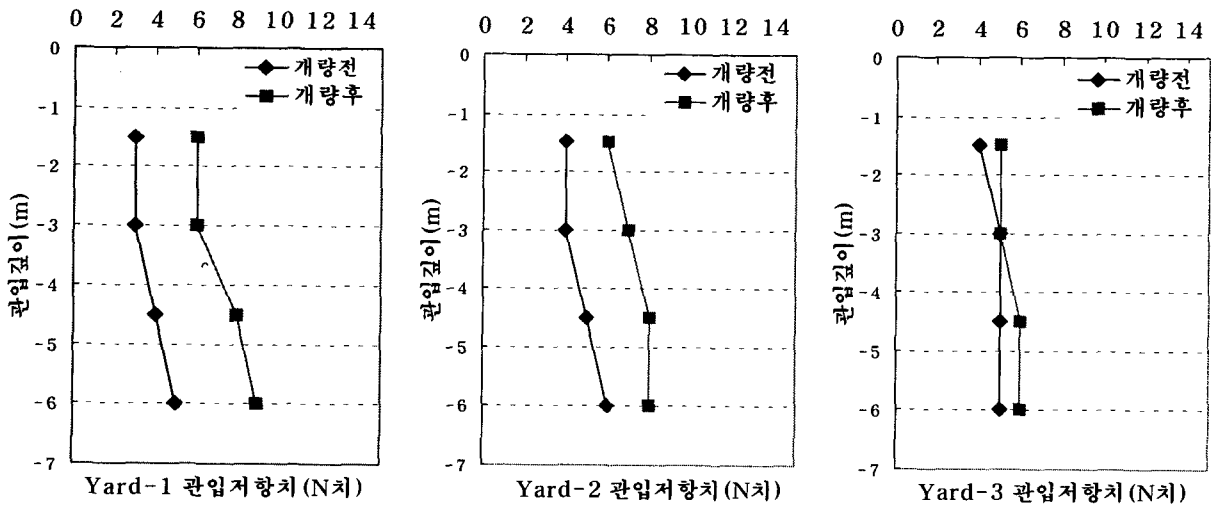


그림 9 개량전·후의 표준관입시험에 의한 관입저항치(N치)의 변화

4.1.2 평판재하시험

개량전·후의 각각의 Yard에서 실시한 평판재하시험의 결과는 표 1과 같다. 표에서 보는 바와같이 개량후 지표면에서 측정된 지반지지력의 증가는 주입간격이 Yard-1에서 약 $1.0t/m^2$, Yard-2에서 약 $0.5\sim 2t/m^2$, Yard-3에서 $0.5\sim 1.0t/m^2$ 의 증가를 보이고 있었으며 지표하에서 지반지지력의 측정값은 지표면에서 측정값보다 $1\sim 3t/m^2$ 정도 높게 나타났다.

표 1 평판재하시험 성과

(단위 : t/m²)

		시험전	시험후		
		지표면	지표면	GL-0.7 m	GL-1.2 m
Yard-1	중 심	21.5 (4.2)	22.5 (7.0)	23 (7.5)	25 (16.5)
	중심과 모서리 사이		22.5 (5.3)	24 (18.0)	25 (15.0)
Yard-2	중 심	21.5 (6.0)	21 (9.0)	22.5 (8.0)	24 (4.0)
	중심과 모서리 사이		23.5 (3.0)	24 (10.0)	24.5 (6.0)
Yard-3	중 심	20 (5.0)	21 (3.0)	22.5 (10.0)	23 (8.4)
	중심과 모서리 사이		20.5 (4.0)	21 (10.0)	23. (13.0)

※ ()안은 침하량, 단위 mm

4.1.3 들밀도시험

개량전 원지반의 현장들밀도시험 결과와 주입후 지표면, 지표면-0.7m, 지표면-1.2m에서 실시한 현장 들밀도시험의 결과는 표 2, 그림 10과 같다. 그림에 나타난 바와같이 CGS설치간격이 작은 Yard-1의 경우 지반의 밀도가 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

표 2 현장 들밀도 시험결과
(단위: t/m³)

	Yard 1	Yard 2	Yard 3
주입전 지표면	1.76	1.76	1.75
주입후 지표면	1.83	1.77	1.75
주입후 -0.7m	1.83	1.79	1.79
주입후 -1.2m	1.85	1.81	1.80

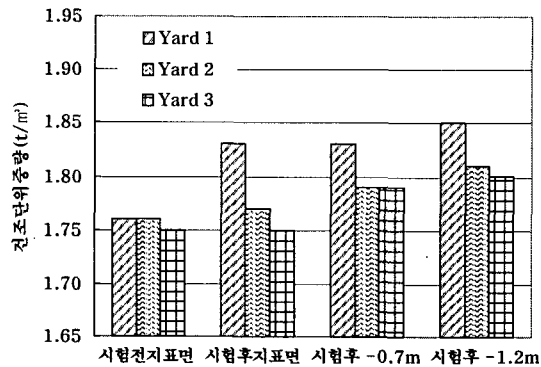


그림 10 현장들밀도 시험결과

4.2 현장계측

4.2.1 지중수평변위

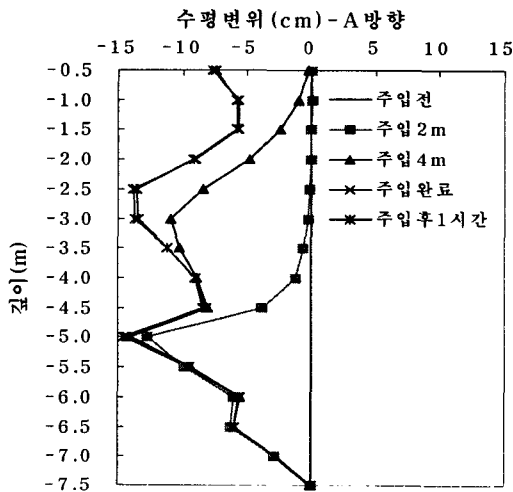


그림 11 주입공으로부터 0.6m의 수평변위

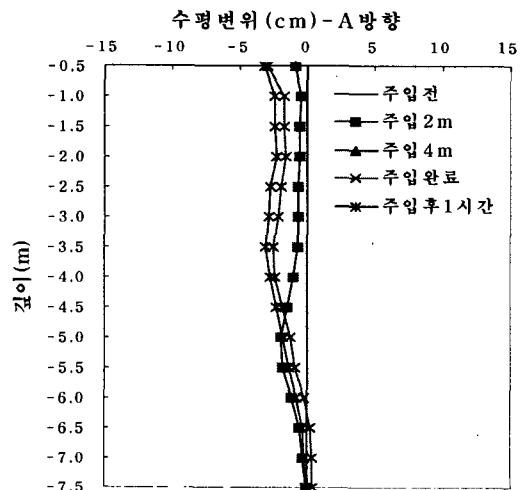


그림 12 주입공으로부터 1.2m의 수평변위

CGS주입에 따라 주변지반의 방사방향 압축특성을 파악하기 위하여 이격거리별(1D, 2D, 3D, 4D) 지표하 7.5m까지의 수평변위를 계측한 결과 그림 11~14와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 주입공으로부터 0.6m(1D) 이격위치에서의 지중수평변위는 최대 15cm정도로 나타났으며 4D범위에서도 5cm정도 발생하는 것으로 나타나 매립토층에서의 방사방향 압축이 발생하는 지역은 4D이상 나타나고 있음을 알 수 있다.

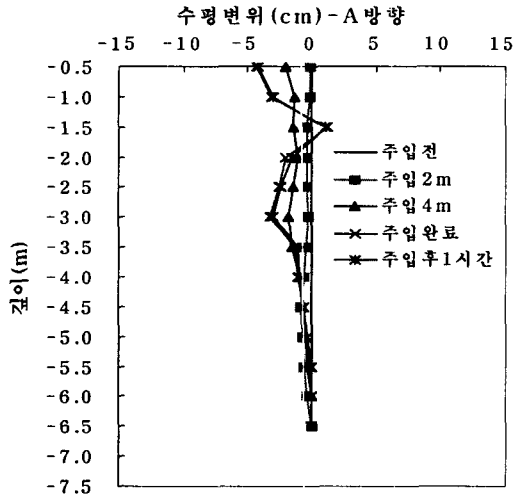


그림 13 주입공으로부터 1.8m의 수평변위

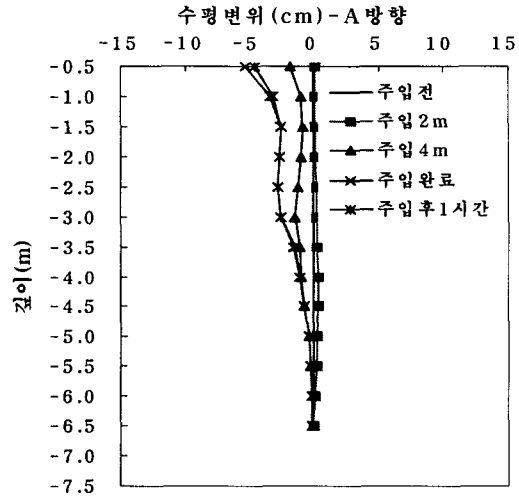


그림 14 주입공으로부터 2.4m의 수평변위

4.2.2 지중토압

주입으로 인한 횡방향 토압의 증가를 지하 3m에 매설해 놓은 토압계를 계측하여 얻은 결과는 그림 15와 같다. 그림에서와 같이 0.6m(1D) 이격거리에서 토압증가량은 최대 12.5kg/cm² 정도로 나타나 시간에 따라 크게 감소한 후 개량과정중 지속적으로 0.5kg/cm² 이상 증가하는 경향을 보이고 있다. 이격거리가 1.8m(3D) 이상에서의 토압변화는 작게 나타나고 있으며, 1.2m(2D) 이내에서는 주입중 토압변화는 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

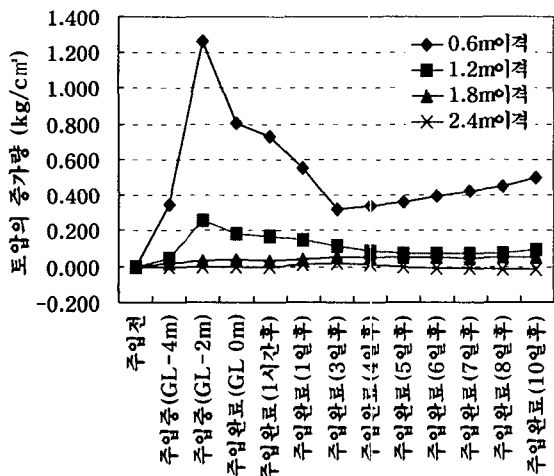


그림 15 주입공으로부터 이격거리별 주입전후의 지중토압변화

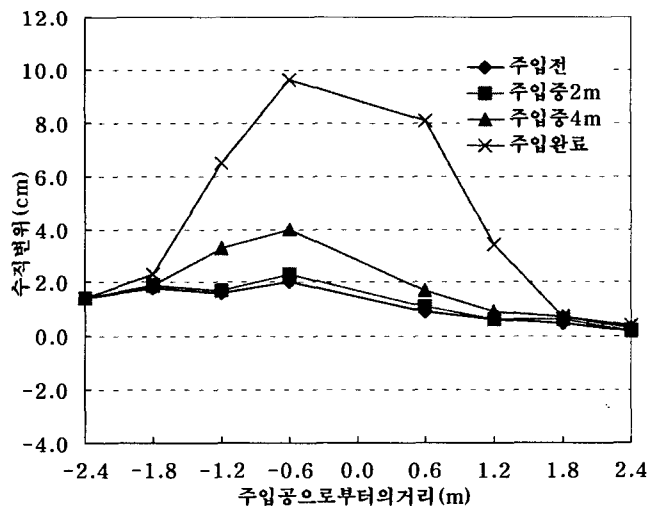


그림 16 주입전후의 주입공으로부터의 이격거리에 따른 지표면 수직변위

4.2.3 수직변위

주입전 주입공을 중심으로 지표면에 설치해 놓은 말뚝의 레벨을 주입전·후로 계측함으로써 주입으로

인한 지표면 수직변위를 계측하였으며 그 결과는 그림 16과 같다. 그림에서와 같이 CGS주입에 따른 주변지반의 융기현상은 4D이상까지 넓게 분포하고 있으며 3D범위까지 융기량은 크게 나타나 융기량은 최대 10cm정도로 나타났다.

5. 분석 및 고찰

5.1 지지력특성

시험시공전·후에 현장시험을 통하여 파악한 지반의 지지력은 대체적으로 증가하였음을 알 수 있었고 다음과 같은 특징이 있음을 확인하였다.

N치가 2~4정도의 매우 느슨한 사질 매립지반에서 지지력 및 밀도증가가 크게 나타난 범위는 1.2m(2D) 이내로 CGS설치 거리별로 CGS직경($\phi 600\text{mm}$)을 고려한 개량범위를 나타내면 그림 15와 같다. 그림에서와 같이 CGS설치거리가 1.5m인 경우 주변지반은 모두 개량지역에 포함되며 설치간격이 증가할수록 미개량지역이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 속성을 고려하여 CGS주입에 의한 개량 범위 및 개량목표를 설정함이 바람직한 것으로 판단된다.

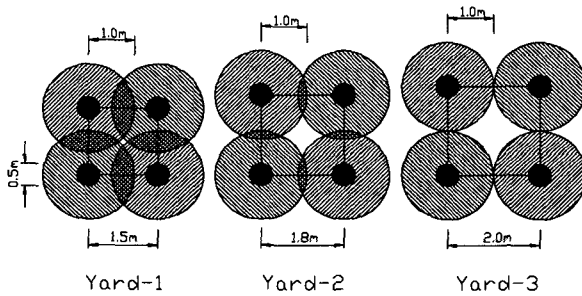


그림 17 Yard별 조밀성증가의 영향반경

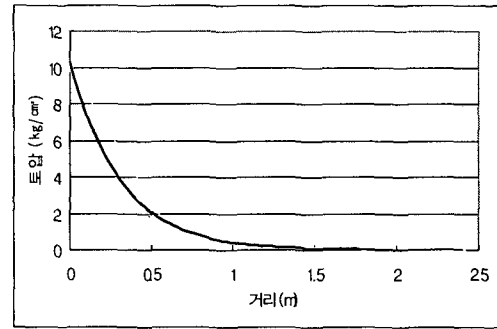


그림 18 주입공과의 거리와 최대토압과의 관계

5.2 주변지반 변형특성

CGS 주입시 경사계와 토압계를 이용하여 주변지반의 거동을 확인한 결과 주변지반은 항타말뚝의 타입시 주변지반의 변위와 유사한 거동을 보이며 구근의 직경에 약 2D이상 범위에 이르는 곳까지 수평변위 발생량이 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그림16은 주입공과의 이격거리별 최대토압을 나타낸 것으로 1.5m(2.5D) 외측에서의 토압발생량은 매우 미약한 것으로 나타났다. 또한 주입중 발생하는 횡방향 토압은 급격히 증가하였다가 주입 완료 후 감소하며 다시 서서히 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 주입중에 주변지반의 방사방향 압축에 의해 토압의 급격한 증가가 이루어 졌다가 주입이 완료된 후에는 지반내 응력과 평형이 될 때까지 감소한 후 시간경과에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이고 있는데 이와 같은 현상은 개량과정중 지반과 CGS의 상호거동에 의한 영향으로 추론되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 CGS주입시 지반의 융기는 주변지반의 파괴를 의미하는 것으로 인식되고 있는 바, CGS주입으로 인한 주변지반의 지지력특성과 변형특성 파악과 더불어 수직변위 특성은 지반특성변화의 파악이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

매립층에서 CGS주입에 의한 지지력특성 및 주변지반 압축특성을 파악하기 위하여 실시한 현장시험시공 결과 주입에의하여 개량되는 지반의 영향반경, 주입간격에 따른 지반개량특성, 주변지반의 토압발생

변화등을 파악할 수 있었고 이를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- 1) CGS주입에 의한 주변지반의 지지력특성을 파악하기 위하여 CGS주입위치로부터 심도별과 이격거리 별로 평판재하시험, 표준관입시험, 현장밀도시험 등을 실시한 결과 CGS주입직경의 2배까지 지반개량특성이 크게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) CGS를 격자형으로 배치할 경우 설치간격을 작게할수록 주변지반의 지반개량 특성은 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.
- 3) CGS주입에 의한 주변지반의 압축특성을 파악하기 위하여 경사계 및 토압계의 계측수행 결과 CGS주입압에 의한 변형발생 범위는 2.5D 이내로 2.5D 외측에서의 방사방향 변위 및 토압발생은 미약한 것으로 나타났다.
- 4) CGS주입에 의한 인접위치(1D,0.6m)에서의 토압변화는 주입시공시 크게 증가하다가 주입완료후 감소하는 경향을 보인후 또다시 점진적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 개량과정중 지반과 CGS의 상호거동에 의한 영향으로 추론되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.
- 5) N=2~4인 사질토로 이루어진 매립지반에서 직경 $\phi 600\text{mm}$ 의 CGS구체를 형성할 경우 최대 10cm정도의 주변지반의 용기현상을 파악할 수 있었는데, 이와같은 용기현상은 주변지반의 파괴를 의미할 수 있으므로 CGS주입에 의한 주변지반의 개량특성 파악시 주변지반의 지지력 개선과 변형특성 파악과 더불어 용기특성에 대한 평가되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 천병식, 임해식, 조천환, 정현철(1997), "수도권 신국제공항 전용철도 노반 실시설계의 Box구조물 지반보강공법 검토연구", 한양대학교부설 건설연구소, pp.7~21.
2. 천병식, 조천환, 이영근, 우근우(1997), "Compaction Grouting에 의한 지반보강 시공사례", 대한토목학회, 1997년 가을 학술발표회 논문집, pp.493-496.
3. 천병식(1998), "최신 지반주입 -이론과 실제-", 원기술, pp.17~37.
4. 천병식(1998), "지반공학 -이론과 실제-", 구미서관, pp.684~729.
5. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999), "C.G.S에 의한 기초지반보강효과에 관한 연구", 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년 학술발표회논문집, pp.1~13.
6. 천병식, 권형석, 정의원(2000), "C.G.S.공법에 의한 기초지반보강", 한국지반공학회 2000년 봄 학술발표회논문집, pp. 441-448.
7. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석(2000) "저유동성 몰탈형 지반주입공법에 의한 다짐효과", 대한토목학회 2000가을학술발표회논문집, pp.255~258.
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. James Warner(1978), "Compaction Grouting - A Significant Case History", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 104, No. 7, pp. 837-847.
10. Robert Bowen(1981), "Grouting in Engineering Practice", Applied Science Publishers, pp.77~84.
11. Ross W. Boulanger & Robert F. Hayden(1995), "Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 12, pp. 844~855.