

저유동성 몰탈주입에 의한 연약지반의 침하억제 효과

Settlement Restraint of Soft Ground by Low Slump Mortar Injection

천 병 식 ^{*1}	Chun, Byung-Sik
여 유 현 ^{*2}	Yeoh, Yoo-Hyeon
정 영 교 ^{*3}	Joung, Young-Kyo

Abstract

In this study the pilot test of CGS as injection method by low slump mortar was performed and the results were analyzed in order to find out the application of this method and effect of settlement restraint. The site for pilot test is adjacent to apartments supported by pile foundations. Sand drain method was performed previously as countermeasures against settlement, but settlement occur continuously because this ground is very soft. Site investigations such as SPT, DCPT and vane shear test were performed to determine the characteristics of ground improvement. Field measurements and FDM analysis were performed on purpose to find out the displacement of ground during injection works. From the results of this study, CGS method can be optimized by the control of diagram, space, depth, injection material, and injection pressure. CGS improved soft ground compositely by the bearing effect of CGS columns and reinforcement of adjacent ground. Considering that increase of N value is about 2.1, CGS can be considered as an effective method to increase the bearing capacity as well as to stop the settlement of soft ground. It is also expected to be economic and effective in improvement of ground when it is used in applicable sites.

요 지

본 연구에서는 침하가 발생한 연약지반에 대하여 저유동성 몰탈에 의한 주입공법인 CGS공법의 적용성과 침하억제 효과를 확인하기 위하여 시험시공을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 시험시공 현장은 파일에 의하여 지지된 기 시공된 아파트의 주변지반으로서 사전에 sand drain공법으로 지반에 대한 처리를 실시하였으나 이후에도 지속적인 침하가 발생하고 있는 연약지반이다. CGS주입 전·후의 지반개량특성을 파악하기 위하여 현장 및 실내토질시험과, 주입시공 중 거동특성을 파악하기 위하여 계측관리와 FDM해석을 실시하였다. 분석결과 연약지반의 지반침하 방지를 주목적으로 하는 CGS공법은 지반조건에 적합한 설치직경, 간격, 심도, 주입재, 주입압 등 다양한 조건으로부터 시공관리가 가능하며, 따라서 설치된 CGS구체는 파일의 지지효과와 더불어 주변지반을 압축강화시켜 복합적으로 지반을 개량시키므로 N치가 평균 2.1 증가하는 등 지반의 지지력 증대 및 침하억제에 효과가 있었다. 또한 적용성 있는 다양한 현장에 일반적으로 사용하게 될 경우 개량효과와 더불어 경제성이 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Bearing capacity, CGS, Injection, Low slump, Pilot test, Settlement restraint, Soft ground

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg, Hanyang Univ.)

*2 정회원, 한국해양대학교 공과대학 토목공학과 겸임교수 (Member, Concurrent Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime Univ.)

*3 정회원, 덴버코리아 그라우팅(주) 대표이사 (Member, President, Denver Korea Grouting Co., Ltd.)

1. 서론

연약지반에서 구조물 축조시 부적절한 조사 및 설계, 구조물하중 증가, 지하수위 강하와 같은 주변환경의 변화에 의해 공사완료후 지속적으로 침하가 발생할 경우 구조물에 예상 밖의 대규모 피해가 발생할 수 있으며 이러한 피해가 발생하지 않도록 하기 위해서는 여러가지 지반개량대책이 있을 수 있다. 그러나 적용할 수 있는 지반개량공법은 매우 제한적이며 시공성, 효율성과 경제성 등에서 당초 시공사와 비교하여 그 조건은 매우 악화된다. 일반적인 보강공법으로는 구조물 하중 조건을 고려한 파일을 설치한다든가 또는 교반주입하는 등의 방법이 있다. 본 연구의 대상 공법인 CGS(Compaction Grouting System)공법은 몰탈을 주입재로 하여 비배출 치환원리에 의해 주입하는 공법으로서 지반중 정적으로 밀도증대효과를 기대할 수 있고 저공해, 저소음, 내구성 확보 뿐 만 아니라 높은 주입고결체의 강도에 의해 경우에 따라서는 기초파일로 사용할 수도 있다(천 등, 1997(a),(b)). 또한 기존의 시멘트계 맥상고결방식의 장점과 약액에 의한 침투고결 공법에서 얻을 수 있는 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),(c), 2000(a),(b),(c)).

본 연구에서는 CGS공법을 포화점성토지반에서 침하 발생 억제를 위하여 시험시공을 통하여 그 적용성을 파악하고자 하였다. 시험시공 위치는 강원도 OO지역으로 현재 입주중 인 APT단지 내 부지로서 입주후에도 지속적으로 대규모 지반침하가 발생하여 시급히 대책이 요망되는 곳이다. 시험시공은 적절한 CGS설치 패턴 즉, 설치직경, 배치형태, 설치간격을 정하기 위하여 2개 Type으로 구분하였고 CGS주입전·후의 개량효과확인을 위하여 현장 및 실내토질시험이 실시되었으며 계측관리와 FDM해석을 실시하여 지반거동특성을 파악하였다. 시험시공 결과를 분석하여 본시공에서의 현장 적용성을 고찰하고, 유사 현장에서의 본 공법 적용을 위한 기초자료로 이용하고자 하였다.

2. CGS에 의한 지반개량 메커니즘

CGS공법은 비유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써 주변지반을 압축강화시키는 지반개량공법으로서 기존의 주된 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, Jet Grout의 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출 치환'이라는 독특한 기법의 주입공법이다(천 등, 1998(a)).

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-Usui, 1997).

주입재의 체적과 상대적 다짐의 증가량과의 관계를 유도하기 위해서는 먼저 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.

지중에서의 변형률은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 균질하고 선형탄성적인 등방성 재료일 경우, 체적변형률은

$$\epsilon_v = \frac{V_g}{V_{nb}} \quad (1)$$

여기서, V_g : 주입재의 체적

V_{nb} : 중립경계면내 흙의 체적

이고, 흙의 체적변형계수는 다음과 같다.

$$E_b = \frac{P_g}{\epsilon_v} \quad (2)$$

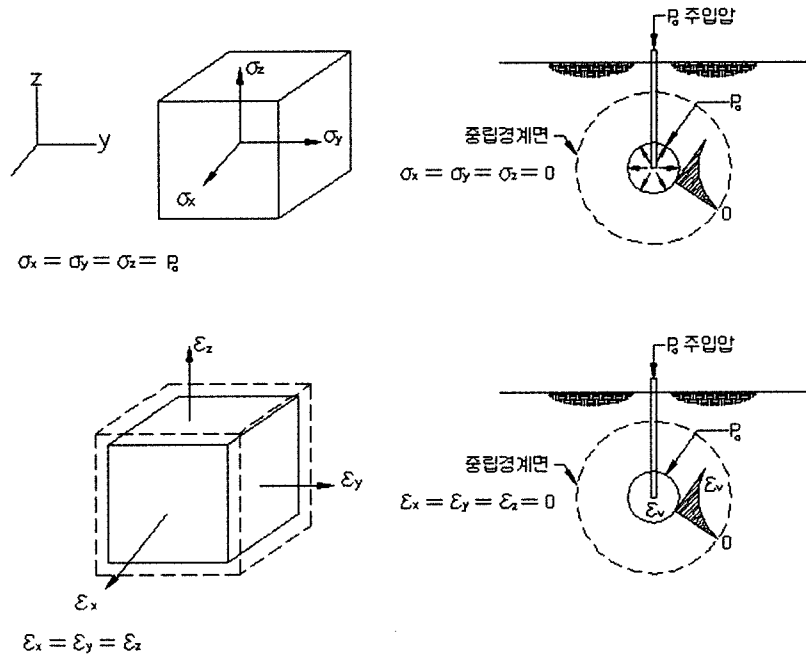


그림 1. 주입에 따른 응력과 변형관계

$$\epsilon_v = \frac{P_g}{E_b} \quad (3)$$

또한 식(1)에 식(3)을 대입하면,

$$\frac{V_g}{V_{nb}} = \frac{P_g}{E_b} \quad (4)$$

더욱 지반의 밀도 증가량($\Delta\gamma$)은

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta m}{V_{nb} - V_g} \quad (5)$$

여기서, Δm : 주입에 따른 질량증가분

$$\Delta m = V_g \cdot \gamma_s \quad (6)$$

여기서, γ_s : 주입점에서의 흙의 단위중량

$$\Delta\gamma = \frac{\left(\frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right) \cdot \gamma_s}{V_{nb} - \left(\frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right)} \quad (7)$$

그러므로, CGS공법에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta\gamma$ 는

$$\Delta\gamma = \frac{P_g \cdot \gamma_s}{E_b - P_g} \quad (8)$$

지반이 받는 다짐의 정도를 지중에 압입된 주입재의

체적과 연관지어 개량대상 토체의 상대적인 다짐의 증가는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta RC = \frac{100W}{\gamma_{max}} \left[\frac{1}{V_o - (V_g - V_s)} - \frac{1}{V_o} \right] \quad (9)$$

여기서, W : 개량대상 토체의 중량

V_o : 개량대상 토체의 원체적

γ_{max} : 흙의 최대밀도

V_g : 압입된 주입재의 체적

V_s : 지표면 상승에 대한 체적 수정

3. CGS 시험시공

3.1 지층현황

본 시험시공 현장은 강원도 OO지구 APT단지로서 건물 자체는 말뚝기초로 지지되어 침하현상은 발견되지 않고 있으나 건물 주변 주차장지역의 고함수비 연약지반에 대해서는 Sand Drain공법으로 기 처리되었음에도 불구하고 최근 80cm전후의 압밀침하가 발생되었으며 추가적인 침하가 예상된다. 시추조사 결과, 지질 분포상 태는 지표로부터 매립토층, 충적층, 풍화대층으로 구성되어 있으며 각각의 지층에 대한 토질특성을 살펴보면 다음과 같다.

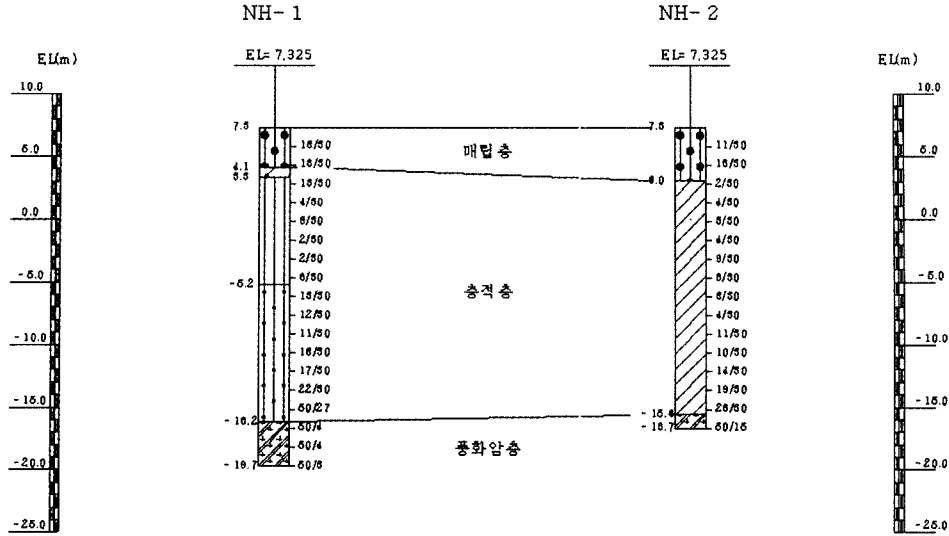


그림 2. 지층단면도

상부의 매립층은 N치 11회~18회로 입도가 불량한 모래 혹은 모래섞인 점토로 구성되어 있고 중간정도의 상대밀도를 나타낸다. 충적층의 경우 N치는 2회~50회이고 상부에는 150%~200%의 고풍수비의 비중이 낮은 유기질점토가 있고 하부에는 무기질의 실트층이 존재하며 이러한 연약지층의 두께는 18.6~20.4m이다.

3.2 시험시공 계획

3.2.1 주입공 배치 및 시험 계획

CGS주입시 배치형태는 그림 3과 같이 삼각형 및 정방형 배치로 CGS주입을 실시하였으며, A type(2.0m간격, ϕ 800), B Type(2.5m간격, ϕ 1000)으로 구분하여 각각에 대한 개량효과 및 시공성을 파악하였다. 또한 CGS주입전·후의 개량효과를 파악하기 위하여 Type별로 현장시험(표준관입시험, 동적콘관입시험, 현장배인전단시험)을 실시하였다. 또한 현장시험시 불교란시료를 채취하여 실내토질시험을 실시하여 CGS주입에 의한 개

표 1. CGS의 표준배합비 (m³당)

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

량전·후의 지반개량특성을 파악하였다.

3.2.2 주입 계획

(1) 주입재의 구성과 배합

주입재료의 선정, 배합시 골재 체분석시험을 통하여 Ideal-Line(Samson, 1997)에 근접하는 재료를 선정하였다. 또한 적용한 표준배합비는 표 1과 같이 계획하였으며 주입재의 허용 Slump치는 0~5cm범위를 유지하도록 계획하였다.

(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.

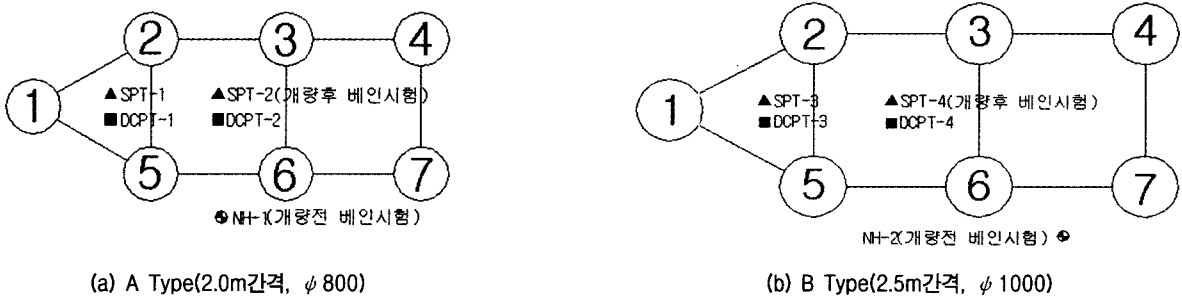


그림 3. 시험시공의 배치 및 지반조사 계획

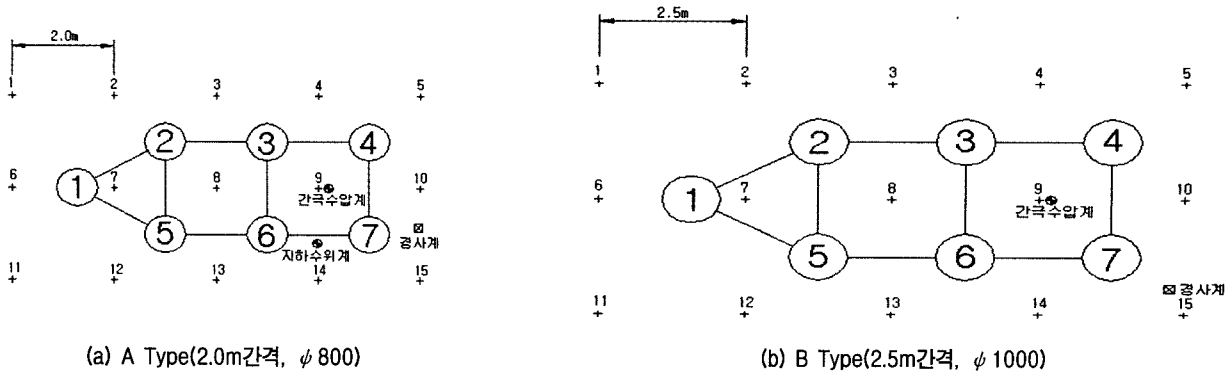


그림 4. 계측관리 계획

(3) 주입방식 및 주입순서

일반적으로 CGS공법의 주입방식에는 Top-Down 방식과 Bottom-Up 방식 및 두 방식의 조합형이 있으나 여기서는 지반개량 및 기초보강시에 주로 이용되는 Bottom-Up 방식을 적용하였다. 주입방법은 다음과 같이 선택 주입토록 계획하였다.

- ① 정량주입: $\phi 800\text{mm}$ 총측 주입량 주입($0.5\text{m}^3/\text{m} \rightarrow$ 누계stroke수 \times 1회 토출량(m^3/stroke))
- ② 정압주입: 허용 상한주입압 800psi 발생시 1단계 인발.

3.2.3 계측관리

CGS주입시공중 및 시공완료후의 주변지반의 거동특성을 파악하기 위하여 계측관리를 실시하였다. 계측항목은 지하수위계, 간극수압계, 경사계, 지표면침하판 등이며 각 Type별로 비교 평가가 가능하도록 동일하게 배치하여 그림 4와 같이 계획하였다.

3.2.4 주입시공에 의한 영향 평가

연약지반의 지반침하 방지공법으로 CGS공법을 적용할 경우 주변지반 및 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 현장시험결과에 따른 지반물성치와 계측결과를 이용하여 유한차분해석(FLAC)을 실시하였다. 이와 같은 해석결과는 CGS주입에 따른 지반의 거동특성과 주변구조물에 악영향이 없도록 하기 위한 대책수단으로 이용하였다.

4. 시험 결과

4.1 개량확인시험

4.1.1 표준관입시험

원지반 조건과 CGS주입후 조건으로 구분하여 실시한 표준관입시험 결과는 그림 5, 표 2와 같다. Type별 평균 증가량은 A Type(2.0m간격, $\phi 800$)에서 1.8, B

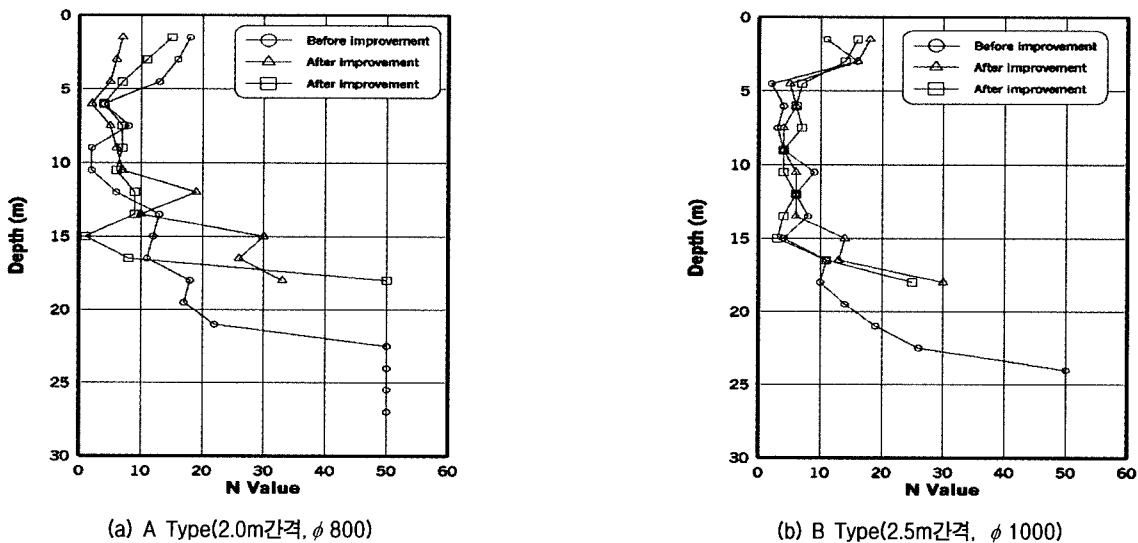


그림 5. CGS 주입전 · 후 N치의 변화

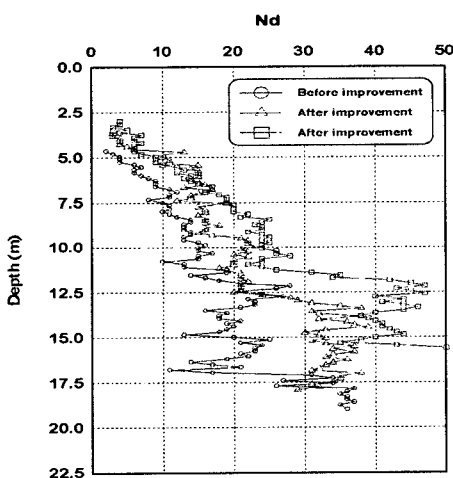
표 2. CGS 주입전 · 후 N치의 변화

심 도 (m)	A Type			B Type		
	주입전	주입후		주입전	주입후	
		삼각형배치	사각형배치		삼각형배치	사각형배치
1.5	18	7	15	11	18	16
3.0	16	6	11	16	16	14
4.5	13	5	7	2	5	7
6.0	4	2	4	4	6	6
7.5	8	5	7	3	4	7
9.0	2	6	7	4	4	4
10.5	2	7	6	9	6	4
12.0	6	19	9	6	6	6
13.5	13	10	9	8	6	4
15.0	12	30	1	4	14	3
16.5	11	26	8	11	13	11
18.0	18	33	50/26	10	30	25
19.5	17			14		
21.0	22			19		

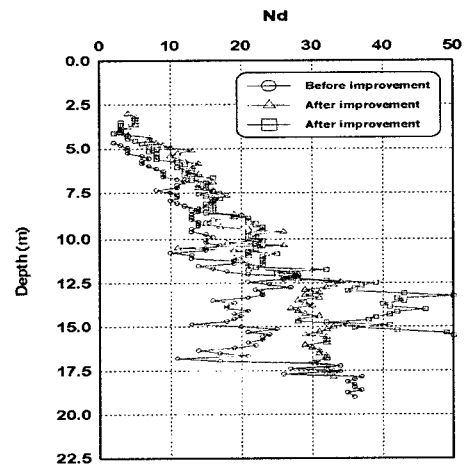
Type(2.5m간격, ϕ 1000)에서 2.5였으며 그림에서와 같이 지반처리 대상지층인 GL-6~12m의 고함수비의 유기질 층적층에서의 N치의 변화는 A Type 및 B Type 모두에서 전반적으로 증가(매립토층 일부구간에서 개량후 N치가 감소하는 경향을 보이고 있으나 이것은 지반의 시료채취위치의 변화와 지반의 불균질성에 따른 미소한 변화라고 사료됨)하고 있는 경향을 보여주고 있으며 이 결과는 CGS주입으로 인해 주변지반에서의 압축강화로 지반의 강도증대효과가 있음을 보여준 것이다.

4.1.2 동적콘관입시험

원지반 조건과 CGS 주입후 실시한 동적콘관입시험 결과 각 Type 및 심도별 타격수 (N_d)의 변화를 나타내면 그림 6, 표 3과 같다. 주입완료후 타격수 (N_d)의 증가는 평균 A Type이 11.0, B Type이 10.1로 원지반의 타격수 (N_d)와 비교하여 두 Type모두 크게 증가하였다. 또한, A Type의 경우 삼각형배치보다 정방형배치의 타격수가 크게 증가하였으며, B Type의 경우 심도 약 8m까지는 삼각형배치의 타격수 증가경향이 크고 8m이하의 정방형배치의 타격수가 크게 증가하였다. 또한 동일한 면적 치환비 조건에서 설치직경이 작은 A Type의 경우에서



(a) A Type(2.0m간격, ϕ 800)



(b) B Type(2.5m간격, ϕ 1000)

그림 6. CGS주입전 · 후 동적콘관입시험 결과의 변화

표 3. CGS주입전 · 후 동적콘관입시험 결과의 변화

심 도 (m)	주입전 (타격수, N_d)	주입후 (타격수, N_d)			
		A Type		B Type	
		삼각형배치	사각형배치	삼각형배치	사각형배치
3.0	-	-	4	4	-
4.5	2	6	6	7	5
6.0	7	15	12	13	11
7.5	10	19	19	17	14
9.0	13	16	23	16	21
10.5	15	22	26	21	22
12.0	21	21	34	28	28
13.5	16	31	44	28	43
15.0	20	33	43	33	36
16.5	17	33	50/7(16m)	31	50/12(15.7m)
18.0	36	29(17.9m)		33	
18.9	36				

표 4. 현장베인전단시험 결과

구 분	원지반		CGS 주입후	
	Type A	Type B	Type A	Type B
최대 Torque (kg · cm)	85	100	250	300
최대전단강도 (kg/cm ²)	0.186	0.218	0.546	0.655

개량이 크게 나타나고 있으며, 삼각형 배치시 보다 면적 치환비가 작은 정방형 배치시에서 개량이 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이것은 적절한 면적치환비와 CGS설치시 지반교란이 작을수록 지반개량특성이 크게 평가되는 것으로 나타났다.

4.1.3 현장베인시험

CGS주입 전 · 후 실시한 현장베인전단시험 결과를 요약 정리하면 다음 표 4와 같다. 최대전단강도는 원지반조건에서 A Type의 경우 0.186 kg/cm², B Type의 경

우 0.218 kg/cm²이었으나, CGS 주입완료후에는 A Type의 경우 0.546 kg/cm², B Type의 경우 0.655 kg/cm²로서 주입전에 비해 약 3배로 증대되었다. 이와 같이 CGS주입에 의해 CGS구체 주변지반의 강도특성은 표준관입시험 및 동적콘관입시험 결과에서와 같이 강도가 크게 개선되었음을 확인할 수 있었다.

4.2 실내토질시험 성과

4.2.1 강도특성

불교란 시료에 대한 토질역학 시험성과를 원지반 및 CGS개량후에 대하여 정리하면 표 5와 같다.

표에서와 같이 일축압축강도(q_u)는 A Type의 경우 원지반의 0.64kg/cm²에서 주입완료후 1.14~2.82kg/cm²로, B Type의 경우 원지반의 1.24kg/cm²에서 주입완료후 1.71~3.41 kg/cm²의 범위로 나타났다. CGS 주입에

표 5. 실내토질역학 시험결과로 부터 CGS개량에 의한 강도특성

위 치		일축 압축강도 (kg/cm ²)	삼축압축시험 (UU test)		직접전단시험		비 고	
			C	ϕ	C	ϕ		
원지반	A Type(GL-8m)	0.64	0.3	0.8	0.042	10	유기물 함유량 A Type : 10% B Type : 29%	
	B Type(GL-8m)	1.24	0.58	1.6	0.338	17		
주입후	A Type	삼각형배치 (GL-7m)	2.82	1.41	3.9	0.136		20
		정방형배치 (GL-9m)	1.14	1.0	1.5	0.271		23
	B Type	삼각형배치 (GL-7m)	3.41	1.38	7	0.294		21
		정방형배치 (GL-8m)	1.71	0.67	2.3	0.194		22

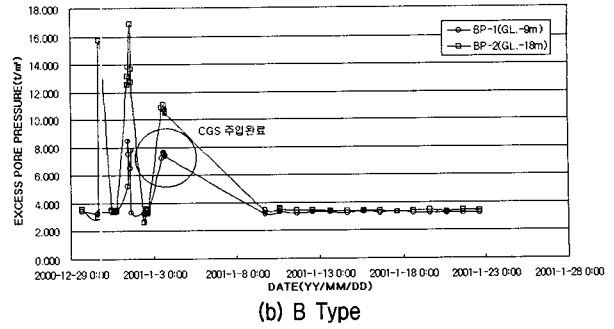
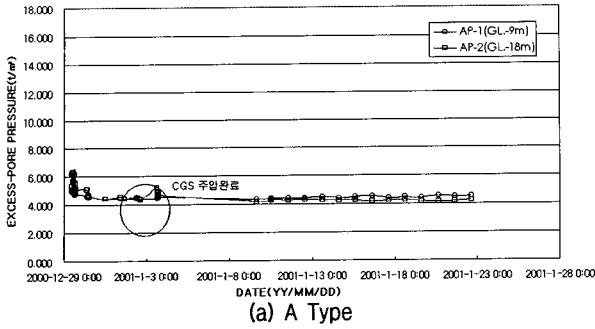


그림 7. CGS 주입에 따른 과잉간극수압 경시변화

의한 일축압축강도는 A Type의 경우 1.8~4.4배 정도로 증가하였으며, B Type의 경우는 1.4~2.8배 정도 증가한 것으로 나타났다. 또한 전방적으로 정방향 배치시 보다 삼각형 배치시 2배이상의 강도 증대가 있음을 확인할 수 있었다.

삼축압축시험(UU-test)에 의한 점착력은 A Type의 경우 원지반의 0.3 kg/cm²에서 주입완료후 1.0~1.41 kg/cm²로, B Type의 경우 원지반의 0.58 kg/cm²에서 주입완료후 0.67~1.38 kg/cm²로 증가되었다. CGS주입에 의한 점착력 증가율은 설치직경이 작은 A Type의 경우 크게 발생하였으나 절대치는 B Type의 경우가 더 컸다. 이와 같은 현상은 직접전단시험결과에서도 유사한 결과를 얻었으며 동일한 면적치환비조건에서 CGS설치직경이 작을수록 강도증대효과가 큼을 확인할 수 있었다.

4.2.2 압밀특성

실내토질시험 성과로부터 원지반과 비교된 CGS개량 후의 압밀특성은 표 6과 같다. 표에서 CGS주입 완료 후의 압밀특성은 원지반과 비교하여 상관관계를 파악하기는 다소 어렵다. 이것은 개량 대상지층에 존재하는 불

규칙한 유기질토층에서 원지반조건과 상이한 시료채취에 기인하거나 CGS주입에 의해 주변지반의 교란에 의한 압밀특성의 변화에 기인할 수 있다. 개량완료후의 압밀특성이 열악화(압축지수, 초기간극비)된 조건에서도 선행압밀하중이 다소 증가됨을 확인할 수 있었는데 이것은 CGS 주입압의 영향으로서 압밀특성이 개선되었던 것으로 판단된다.

4.3 현장계측 결과

4.3.1 간극수압

포화 점성토지반내에 CGS공법에 의한 저유동성 물탈의 주입과정중 과잉간극수압 특성을 파악하기 위하여 각 Type별로 2개 심도에 대하여 진동현식 간극수압계(V/W Type Piezometer)와 지하수위계를 설치하여 계측관리를 하였다. A Type의 경우 그림 7(a)에서와 같이 CGS 주입과정중 최대 6.4 t/m²까지 발생 과잉간극수압이 증가하였으나 주입완료후 안정화 시기에는 4.1~4.4 t/m²정도로 수렴하였다.

또한 B Type의 경우도 그림 7(b)에서와 같이 CGS 주

표 6. 실내토질역학 시험결과로부터 CGS개량에 의한 압밀특성

구 분		압축지수 C_c	초기간극비 e_o	선행압밀하중 P_c	압밀계수 C_v	체적압축계수 m_v	
원지반	A Type(GL-8m)	0.556~0.569 (0.5625)	1.15~1.19 (1.17)	0.72~0.75 (0.735)	0.073~0.12 (0.0965)	0.095~0.131 (0.113)	
	B Type(GL-8m)	1.314~1.382 (1.348)	2.95~3.07 (3.01)	0.73~0.75 (0.740)	0.062~0.063 (0.0625)	0.149~0.152 (0.1505)	
주입후	A Type	삼각형배치 (GL-7m)	2.190	4.49	0.78	0.0046	0.218
		정방형배치 (GL-9m)	2.080	3.65	0.75	0.0018	0.228
	B Type	삼각형배치 (GL-7m)	0.971	2.04	0.85	0.0011	0.145
		정방형배치 (GL-8m)	1.440	3.61	0.76	0.0008	0.289

()은 평균치임

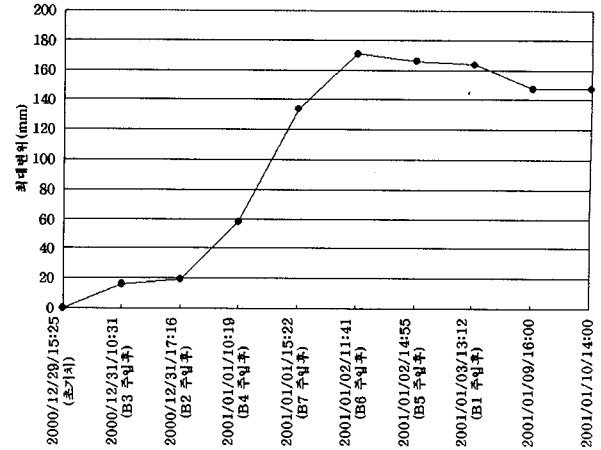
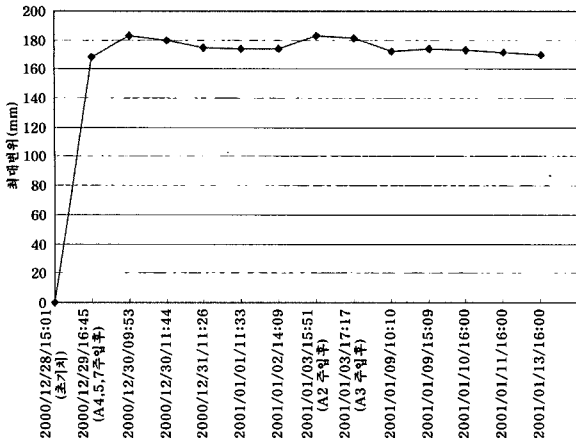


그림 8. CGS주입에 따른 지중수평변위

입중 최대 과잉간극수압은 16.9 t/m^2 로서 매우 크게 발생하였으나 주입완료후 안정화 시기에는 3.5 t/m^2 정도로 수렴되는 경향을 보이고 있다.

4.3.2 지중수평변위

포화점성토 지반중에 CGS 설치직경별로 CGS주입에 따른 지중수평변위 발생량을 측정하였다. 지중수평변위계 설치위치는 각 타입별 CGS설치간격으로 하여 A Type의 경우는 2.0m, B Type의 경우는 2.5m이격하여 시공중 주요공정별 변위특성을 파악하였다.

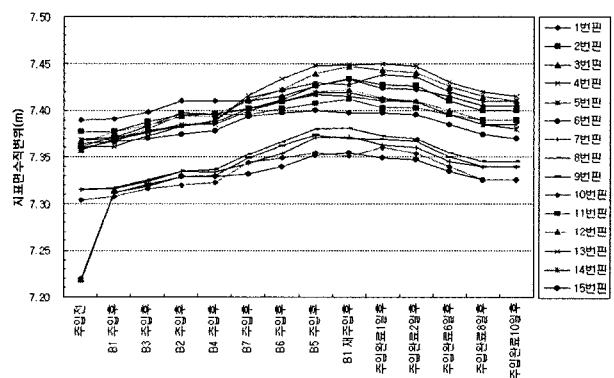
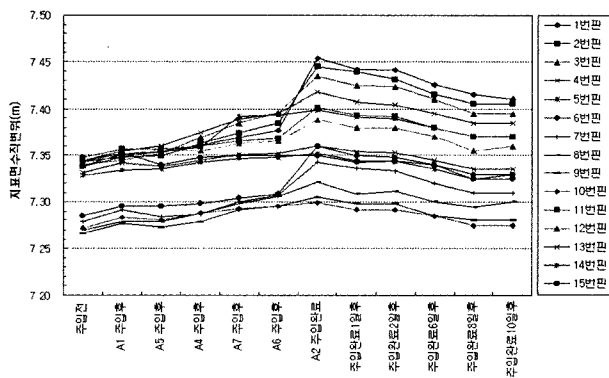
A Type(2.0m간격)의 경우 경사계 설치 인접위치인 A7 위치에서 CGS주입시 수평변위 최대발생량은 168.42mm (GL-10.5m)이었고 인접 위치에서 CGS주입시에도 지속적으로 수평변위 발생량이 증가하여 최대 183.03mm (GL-10.5m)까지 발생하였다. 특히, 지중수평변위 발생량은 안정화 시기중에 170.04mm(GL-10.5m)로서 약 13mm정도 감소하였다. B Type(2.5m간격, $\phi 1000$)의 경우 경사

계 설치위치와 인접한 B7위치에서 CGS주입시 과도한 지중수평변위가 발생하여 경사계가 설치심도까지 probe를 관입할 수 없는 상황이 발생하여 각 심도별 실제 발생변위를 파악하지 못하고 측정치만 기록하게 되었다.

이와 같이 CGS의 설치직경이 증가할수록 주변지반의 수평변위가 크게 발생하는 현상은 주변지반의 교란과 주변 지하구조물에 영향을 미칠 수 있는 사항으로서 지반조건에 따라서 지반개량목적과 인접 구조물의 영향등을 복합적으로 고려한 CGS 설치직경과 설치간격의 선택 적용이 매우 중요한 사항인 것으로 판단된다. 측정시각별 지중수평변위는 그림 8과 같다.

4.3.3 지표면에서의 침하·윤기

CGS공법으로 주입시공시 지표면에서의 침하·윤기량을 파악하는 것은 CGS주입에 의한 주변지반의 거동을 이해하는 매우 주요한 관리 방안중의 하나이다. 본 시험시공에서는 요구되는 CGS구체의 직경과 설치간격



(a) A Type

(b) B Type

그림 9. CGS주입에 따른 지표면변화

을 결정하기 위하여 주입속도와 슬럼프치를 조절하면서 주입을 실시하였으며 원지반과 주입중 및 주입완료 후의 침하·용기 특성을 파악하기 위하여 각 Type별로 15개소씩 지표면 침하판을 설치하여 계측관리를 실시하였다. 시공과정에서 주요공정별 침하·용기 변화량은 그림 9와 같다.

그림에서와 같이 A, B Type 모두 주입전 측정치와 비교하면 주입과정에서 점진적으로 지반용기가 발생하여 주입완료시점에서 A Type의 경우 평균 6cm, B Type의 경우 평균 7cm정도 용기하였다. 안정화 과정중 용기되었던 지표면이 침하 하였는데 주입완료 10일경과후에는 A Type이 평균 3cm, B Type이 평균 4cm정도 용기된 것으로 나타났다. 이와 같이 안정화 과정중 용기되었던 지반이 침하되는 현상은 지중수평변위 측정결과에서도 유사한 현상을 보여주고 있다.

5. 분석 및 고찰

5.1 주변지반에 미치는 영향

5.1.1 해석개요

CGS주입에 의해 주변지반에 미치는 영향을 검토하고 이에 대한 대책을 수립하기 위한 접근방법으로 개량조건을 고려한 유한차분해석(FDM)을 실시하였다. 해석시 주요 평가항목은 CGS에 의한 침하억제효과, CGS주입에 의한 주변지반 및 구조물에 미치는 영향으로 CGS주입시공중 주변지반 및 구조물의 안정성 확보를 목적으로 하였다. 검토를 위하여 시험시공시 획득한 각종 자료 및 기 실시된 지반조사자료를 이용하였으며, 영향검토는 유한차분해석 Program인 FLAC을 이용하여 CGS주입에 따른 주변지반 및 구조물의 거동특성을 파악하였다.

5.1.2 해석단면 산정 및 적용 물성치

본 해석에서의 모델선정은 CGS시공으로 인한 주변지반의 변형과 침하특성, CGS시공으로 인한 지반개량효과를 FDM해석을 통하여 파악하고자 하였다. 지반의 거동모델은 Mohr-Coulomb Model을 적용하였다. 해석단면의 경계조건은 좌우측은 횡방향 변위를 고정시키고 하부는 중횡방향의 변위를 고정시키는 고정지점을 설치하였다. 주입지점에서 거리는 좌우 10D(D: CGS 직경)이상 하부 5D이상을 이격시켜 경계조건이 단면해석에 미치는 교란 요소를 감소시켰다. 단면해석은 미리 형

표 7. FDM 해석 적용 물성치

구 분	머릿층	퇴적층1	퇴적층2	잔류토층	풍화암층	CGS주입재
E (t/m^2)	900	200(700)	200(700)	500	2000	17600
ν	0.25	0.4(0.35)	0.3(0.35)	0.25	0.3	0.22
C (t/m^2)	1.0	2.0(2.5)	2.0(2.5)	0.1	30	220
ϕ ($^\circ$)	25	5(10)	7(12)	30	35	40

()은 주입완료후 조건

성한 원지반에 실제 현장에서 시공된 CGS 공동을 설치하고, CGS주입시 측정된 주입압을 내공에 주어 CGS복합지반을 해석하였다. 본 해석에 적용된 입력 물성치는 지반조사에서 구한 표준관입시험치와 실내토질시험결과를 이용하여 산정하였으며 그 외에는 일반적으로 적용되는 값을 기본으로 하였다. 또한 CGS에 의한 연약지반에서의 거동영향을 파악하기 위하여 CGS 주입에 따른 계측수행결과(지중수평변위계)의 변위를 임의로 발생시켜 주변구조물의 응력상태를 파악할 수 있도록 물성치를 변화시켜 적용하기도 하였으며 이에 따른 적용 물성치는 표 7에 나타내었다.

5.1.3 CGS에 의한 압밀특성변화 해석

시험시공지역은 부지조성공사 완료후 지속적으로 침하가 발생하여 향후 예상되는 잔류침하량은 약 50cm이다. 이와 같은 침하가 추가로 발생할 경우 일반적으로 규정하는 허용잔류침하량 기준을 크게 상회하게 되므로 지반개량은 필수적이라고 본다. 따라서, 지반조사로 파악한 압밀특성결과를 이용하여 전체침하량 및 추정 압밀도로 부터 파악된 현재상태에서 CGS 주입후의 발생침하량을 해석하였다. CGS 직경 800mm, 설치간격 2.0m×2.0m일 경우 해석결과를 표 8에 나타내었다.

표 8에서와 같이 CGS주입후 발생침하량은 개량공법 적용없이 현재상태로 방치할 경우와 비교하여 크게 감소시킬 수 있으며, 예상되는 잔류침하량은 2.4cm로서 일반적으로 정하는 구조물기초의 허용잔류침하량 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 시험시공시와 같이 치환율을 12.5%로 할 경우 본 공사 적용시 향후 발생할 수 있는 잔류침하량을 크게 억제시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 8. FDM해석을 통한 침하량 해석 결과 요약

구 분	전체침하량 (cm)	현재침하량 (cm)	잔류침하량 (cm)
CGS에 의한 지반 개량전	154.1	108.2	45.8
CGS에 의한 지반 개량후	110.6	108.2	2.4

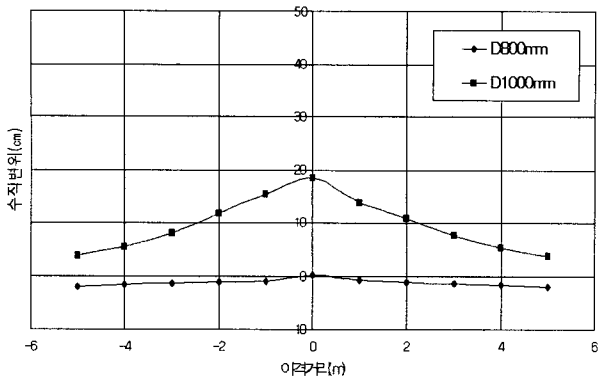


그림 10. CGS설치에 따른 이격거리별 지표면 침하·용기량

5.1.4 주변지반 및 구조물에 미치는 영향

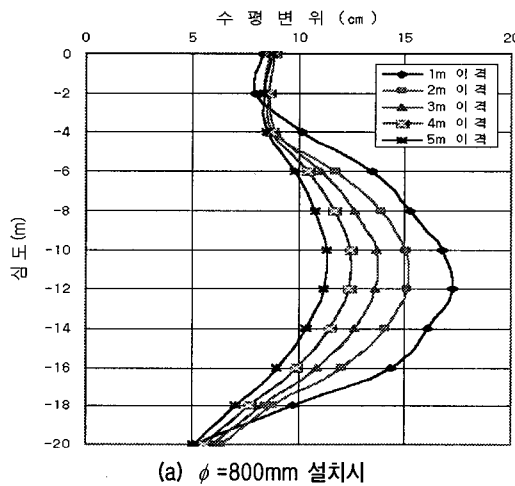
CGS주입 과정에서 계측관리를 통하여 주변지반의 수평변위현상과 용기현상을 파악할 수 있었다. 이와 같

은 현상은 CGS주입에 의해 주변구조물에 영향을 미칠 수 있는 것으로서, 계측관리결과를 근거로 하여 FDM해석을 실시하여 침하·용기, 수평변위 특성을 파악하고자 하였다.

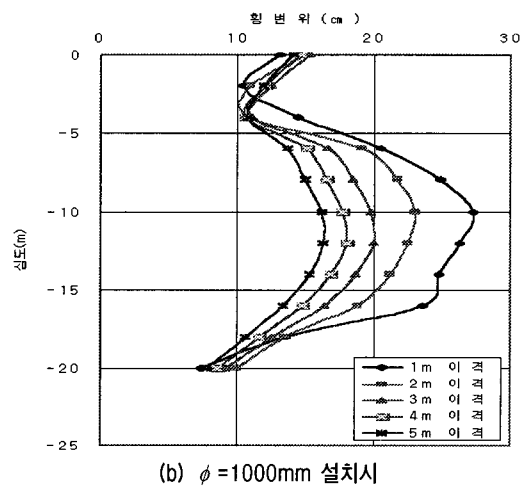
(1) 침하·용기 특성

CGS설치위치 및 설치거리별 침하·용기특성을 분석하여 나타내면 다음 그림 10과 같다.

그림 9에 나타난 바와 같이 CGS설치직경이 $\phi 800\text{mm}$ 인 경우, 지반의 용기 및 침하특성은 양호하였지만 설치직경을 $\phi 1000\text{mm}$ 로 할 경우 용기량이 매우 크게 발생하였다. CGS설치직경을 $\phi 1000\text{mm}$ 로 할 경우 용기현상이 크게 발생하는 이유는 CGS설치시 주입압에 의한

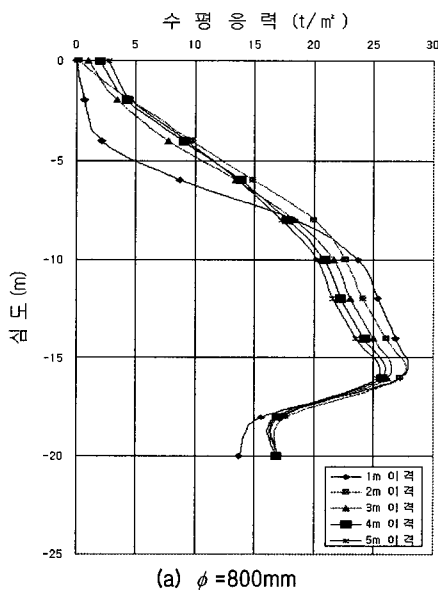


(a) $\phi = 800\text{mm}$ 설치시

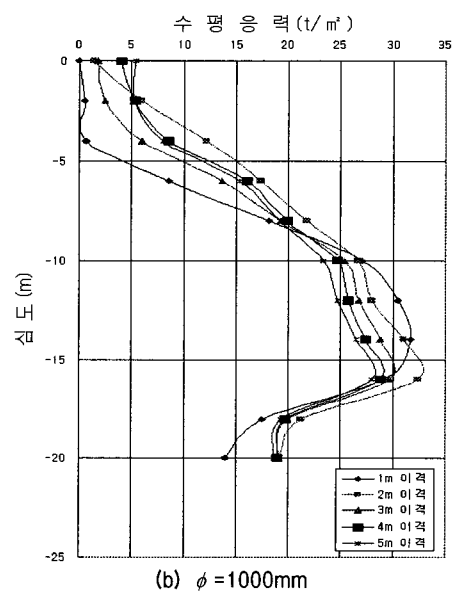


(b) $\phi = 1000\text{mm}$ 설치시

그림 11. CGS 이격거리별 수평변위 특성



(a) $\phi = 800\text{mm}$



(b) $\phi = 1000\text{mm}$

그림 12. CGS주입에 따른 주변지반의 수평응력 분포

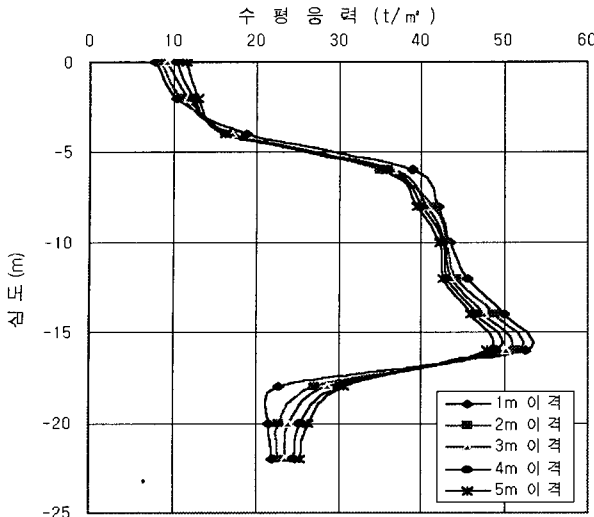


그림 13. CGS주입시 이격거리별 수평응력
($\phi=800\text{mm}$, 설치간격 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$)

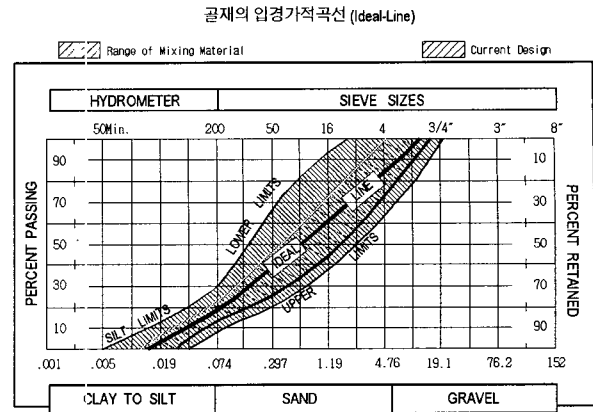


그림 14. 최적배합비 곡선

영향이며 CGS설치에 의한 주변지반 및 구조물의 영향을 최소화하기 위해서는 CGS설치직경을 $\phi 800\text{mm}$ 이하로 적용하여야 한다고 판단된다.

(2) 방사방향 수평변위특성

CGS설치에 따른 말뚝 중심으로 부터 이격거리별 지중 수평변위특성을 파악하여 이격거리별(1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0m, 5.0m)로 수평변위발생량을 나타내면 그림 11과 같다.

그림에 나타낸 바와 같이 CGS이격거리별 수평변위 특성을 살펴보면 설치직경을 $\phi=800\text{mm}$ 로 할 경우, 이격거리 3m에서 최대 13.68cm로 나타났으며 $\phi=1000\text{mm}$ 인 경우 19.98cm로 나타나 설치직경이 커질수록 발생 수평변위가 크다. CGS 설치직경을 $\phi=800\text{mm}$ 로 하여 3m 이격시와 $\phi=1000\text{mm}$ 시의 수평변위 발생량을 동일하게 하기 위하여는 5m이상의 이격이 필요한 것으로 나타났다. 해석결과로부터 주변지반의 변위로 인한 영향을 최소화하기 위하여 동일한 CGS에 의한 치환율에서도 설치직경을 작게하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

(3) 수평작용응력에 대한 검토

CGS시공에 의한 주변 지하구조물에 미치는 응력변화를 CGS설치 직경별로 해석하면 그림 12와 같다.

그림에서와 같이 설치직경과 주입거리에 따른 응력 변화는 직경이 커질수록, 설치거리가 가까워질수록 증가하였지만 절대적인 크기는 비교적 유사하게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 CGS주입시 주입압에 의해 주변지반에서의 수평작용압력의 영향범위가 넓게 분포

하고 있음을 알 수 있다. 또한, 다량의 CGS를 주입할 경우의 수평응력변화를 나타내면 그림 13과 같다.

그림에서와 같이 CGS를 여러개 설치할 경우의 수평변위 발생량은 1개 설치하는 그림 11의 경우와 비교하여 매우 크게 증가하였다. 이와 같은 현상은 CGS설치시 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.

5.2 주입특성

CGS 주입시 사용 골재는 주입설계기준에 따라 이상적인 배합비를 설정하였다(Samson, 1997). 주입재의 배합비는 주입중 지반 압밀을 유도할 수 있는 내부마찰각, Pumping 가능한 소성 및 현장여건 등을 고려하여 그림 14에서와 같이 주입재의 입경분포 범위를 정하였다. CGS주입시공시의 주입속도는 지반의 압축성, 주입재의 유동성과 함께 매우 중요한 요소로 알려져 있다. 주입속도가 높을 경우 지반을 압밀하는 과정에서 CGS 주입재가 균등한 속도로 사방으로 퍼져나가는 것이 아니라 응력이 약한 곳으로 집중되어 과잉간극수압의 증대를 초래하며 지반의 파괴거동을 유발할 수 있기 때문이다.

또한 주입 순서에 따라서도 지반의 압밀도 저하, 지하수위의 변화를 초래하여 주입효과에 영향을 미칠 수 있다. 특히 주입시공으로 인한 개량대상지역 외부로의 용기현상 및 인접구조물에의 악영향을 최소화 하기 위하

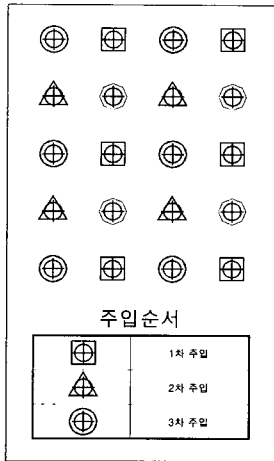


그림 15. 주입시공순서 계획도

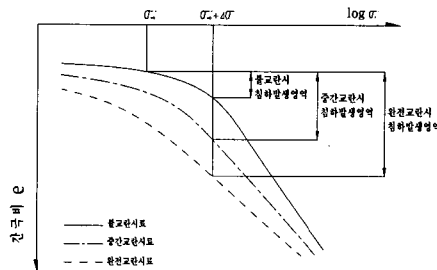


그림 16. 교란과 불교란 상태에 따른 침하발생영역 비교

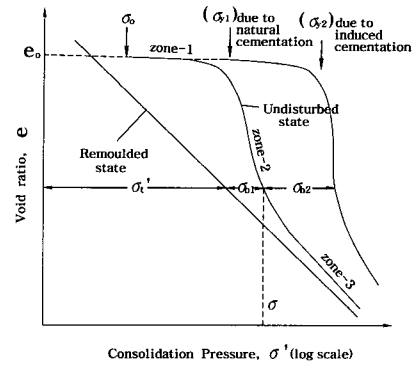


그림 17. 원지반에서 지반개량특성에 따른 압밀거동 특성 비교(Nagaraj, 2000)

여 그림 15에서와 같이 구조물이나 대상지반의 주변 둘레를 1차주입공으로, 각 정방형배치의 주입공 중앙부에 2차 내지 3차로 주입공을 배치, 주입함으로써 목적하는 지반개량효과를 극대화시킬 수 있도록 주입순서를 계획하였다.

5.3 강도특성

연약한 포화점성토 지층에서의 지반압밀침하억제를 목적으로 CGS공법을 적용할 경우 CGS구체의 강성에 의해 지반지지력이 증가한다는 것은 일반적으로 인정되고 있다. 또한 CGS주입시공중 방사방향으로의 압축 거동에 의해 주변지반의 밀도증대효과를 기대할 수 있게 된다. 그러나 포화 점성토지반에서 CGS의 급격한 주입시공이 이루어질 경우 적절한 배수가 이루어지지 않는다면 발생과잉간극수압이 소산되면서 압밀이 진행되어 지지력이 증대하는 효과는 기대하기 힘들 것이다.

이와 같이 포화점성토지반에서 CGS주입에 의한 주변지반의 개량특성을 파악하기 위하여 CGS설치 Type 별로 원지반과 CGS주입완료후에 대하여 현장 및 실내 토질시험을 실시한 결과 현저한 지지력 특성의 개선을 확인할 수 있었다.

CGS설치에 따른 각 Type별 주변지반의 지지력 증대 효과는 면적치환비와 일정한 상관관계를 나타내지 않으며 적절한 CGS설치직경과 간격이 이루어질 때 지지력 특성이 양호하게 나타나고 있다. 이것은 동일한 면적치환비의 조건에서도 CGS의 설치직경이 클 경우 CGS 설치시 지반의 교란으로 강도특성이 감소할 수 있으며,

CGS설치직경을 줄이고 CGS설치수량을 증대시키는 것이 주변지반의 지지력 증대에 효과적인 것으로 판단된다.

5.4 변위특성

5.4.1 침하·용기 특성

계측관리를 통한 침하·용기특성 파악 결과 동일한 면적치환비 조건에서 CGS설치직경이 $\phi 800\text{mm}$ 인 경우 평균용기량은 3cm , $\phi 1000\text{mm}$ 인 경우 4cm 정도로 나타나 설치직경이 증가할수록 발생용기량이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 것은 CGS설치직경을 증가시키려면 주입시 주입압을 증가시켜야 하는 것으로 주입압을 증가시키면 주변지반이 교란되어 연약화되는 현상에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 CGS 주입시공시 주변지반의 용기발생은 지반의 파괴를 의미하는 것으로 주변지반의 지지력증대효과를 극대화 하면서 주입시공이 이루어지려면 CGS설치 직경을 가능한 한 감소시키는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5.4.2 압밀특성

계측결과로부터 CGS 주입시에 주변지반에서 발생하는 과잉간극수압이 크게 나타나는 것은 연약한 포화점성토지층에 몰탈주입에 의한 방사방향 압축과 주입압에 의한 영향일 것으로 판단된다. 그러나 주입완료후 안정화 시기에 수렴치로 나타나는 $3.5 \sim 4.4 \text{ t/m}^2$ 의 과잉간극수압은 압밀의 종료를 의미하지 않는다. 이것은 CGS구체가 시멘트 몰탈로 연직배수재의 역할이 이루어지지 못하므로 발생과잉간극수압이 완전 소산되면 많

은 시간이 소요될 것으로 판단된다. 또한 안정화 시기에 과잉간극수압이 크게 발생하는 원인은 본 시험시공지역이 당초 부지공사중 매립성토하중에 의한 발생 과잉간극수압이 소산 완료되지 못하고 압밀진행중인 현상이 주요 원인인 것으로 판단된다.

압밀시험결과로부터 평가된 압축지수의 범위는 주입전 0.556~1.382로 나타났으며, 주입후 0.971~2.190의 범위로 증가한 경향이 나타났다. 일반적으로 압축지수가 감소하는 것은 그림 16에서와 같이 시료의 교란에 의한 영향 또는 지반이 강성증대로 인한 압축특성의 개선을 의미한다. 본 현장에서와 같이 Cc 값의 증가현상은 지반개량 또는 교란에 의한 영향이 아닌 시험대상토의 불균질한 특성이 그 원인일 것으로 본다.

그러나 원지반이 압밀진행중인 지반임을 고려하면 부지조성공사중 샌드파일 시공에 의한 지반교란 후 시간경과에 따른 압밀특성회복(또는 강도회복)에 그림 17에서와 같이 지반보강에 의해 압축지수가 증가될 수 있을 것이다.

일반적으로 현장조건에서의 하중재하조건이 10t/m² 이내인 점과, 실내 표준압밀에서의 하중조건이 최대 128t/m²로서 작용하중조건의 차이가 크므로 이와 같은 차이를 고려하면 본 현장에서와 같이 CGS 주입에 따른 방사방향 압축으로 인한 복합지반효과에 의해 압축특성이 개선되었음을 설명 할 수 있게 된다. 본 시험시공 결과로부터 압밀특성의 개선을 정확히 파악하기는 다소 어려우며 강도특성의 개선에 따른 압밀특성의 개선효과를 유추할 수 있는 사항 정도로 여겨지므로 향후 다양한 시험결과의 분석을 통하여 압밀특성 파악이 가능할 것으로 본다. 그러나 현재의 압밀상태를 표현할 수 있는

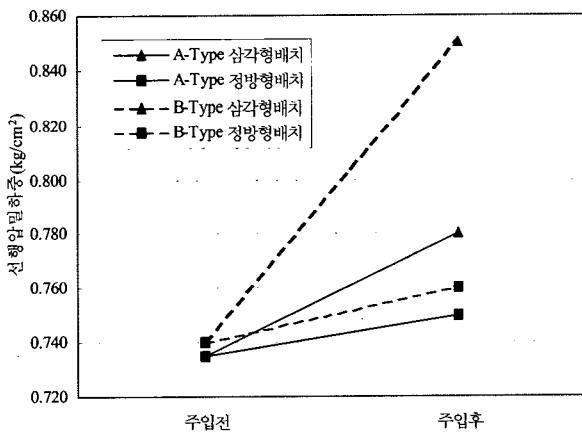


그림 18. 주입전·후 선행압밀하중의 변화

선행압밀하중은 다음 그림 18에서와 같이 매우 크게 증가하여 압밀특성이 개선되었음을 확인할 수 있게 된다.

5.5 복합지반효과

FDM해석결과로 부터 현재 침하가 발생한 시점에서 CGS로 지반개량을 실시할 경우 무처리시 예상되는 발생 침하량을 크게 억제시키는 것으로 해석되었다. 이와 같은 결과는 CGS에 의한 파일지지효과와 주변지반의 지지력특성의 개선에 의한 복합지반효과(Nagaraj, 2000)를 얻을 수 있게 된다. 지반자체의 강성증대에 따른 압밀특성의 개선은 그림 17로부터 설명이 가능하다. 시험시공 결과로 부터 면적치환비 12.5%조건에서 CGS 파일 자체의 강성에 의해 증가된 지지력 증가는 각 type별로 10ton/m²를 상회하는 것으로 검토되고 주변지반의 압축강화에 의한 지지력 증대를 종합적으로 고려하면 CGS에 의해 개량된 지반은 작용하중조건에 의해 지반 지지력 증대효과와 더불어 추가 발생침하를 억제시킬 수 있는 적용성이 양호한 공법인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 APT건물 건축이 준공된 지역의 연약지반처리가 완료된 현장에서 예상되는 압밀침하를 억제시키기 위한 공법으로 선정된 CGS공법의 침하억제효과와 현장적용성을 확인하였으며 그 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) CGS주입 전·후에 실시한 압밀시험 결과 포화점성토지반에서의 Cc, Cv특성의 개선은 파악하기는 어려웠으나 현재 압밀상태를 표현할 수 있는 선행압밀하중은 CGS주입 후 크게 증가하여 CGS주입으로 인한 압밀침하의 억제효과를 확인할 수 있었다.
- (2) CGS주입의 적용성은 본 현장의 지반조건과 주입효과 등을 고려하였을 때 주입재의 배합비는 10:4:3(모래:점토질화강토:석분)으로, 주입량은 천공 1m당 0.5m³, 1회 펌핑량은 0.006m³로 주입할 경우에 양호하였으며 주입형태는 정압주입과 정량주입의 병행형태를 취할 경우 개량효과가 가장 우수함이 확인되었다.
- (3) CGS공법 적용에 따른 개량전·후의 실내토질역학 시험결과 강도특성이 크게 개선되었으며 표준관입 시험 결과 N치가 평균 2.1 증가하였으며 동적콘관

입시험 결과 평균 10.5 증가하였다. 동일한 면적치환비의 조건에서도 CGS의 설치직경이 클 경우에는 CGS설치시 지반의 교란으로 강도특성이 감소될 수 있으며, 지반조건을 고려한 적절한 CGS 설치직경 및 간격을 적용할 경우에는 주변지반의 지지력 특성을 증가시킬 수 있는 것으로 판단된다.

- (4) CGS주입에 따른 침하·용기특성을 파악한 결과 동일한 면적치환비(12.5%) 조건에서 CGS설치직경이 작을수록 용기량이 작게(ϕ 800mm: 3cm, ϕ 1000mm: 4cm) 나타났다. CGS공법의 현장적용시 주입량이 부족할 경우 개량효과가 작고 주입량이 과다할 경우 주변지반의 이완으로 주입효과가 저감되는 현상을 고려할 필요가 있다.
- (5) 현장계측과 FDM해석 결과로부터 CGS주입에 의한 수평변위특성을 파악할 수 있었으며, CGS설치직경을 800mm로 할 경우 주변구조물에 미치는 영향을 최소화할 수 있고 이격거리는 약 3.0m이상 이어야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한양대학교 교내연구비 지원(과제명: 부등침하 또는 기울어진 구조물의 복원 및 기초보강 신공법 연구)에 의하여 이루어졌으며, 시험시공을 위한 현장제공 및 장비지원·계측관리 등 물심양면의 큰 지원을 해준 덴버코리아 그라우팅(주)를 비롯한 성하지질공업(주), 한미기초(주)등 3사의 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 천병식, 임해식, 조천환, 정현철(1997a), "수도권 신국제공항 전용철도 노반 실시설계의 Box구조물 지반보강공법 검토연구", 한양대학교부설 건설연구소, pp.7~21.
2. 천병식, 조천환, 이영근, 우근우(1997b), "Compaction Grouting에 의한 지반보강 시공사례", 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, Vol.3, pp.493~496.
3. 천병식(1998a), "최신 지반주입-이론과 실제-", 원기술, pp.17~37.
4. 천병식(1998b), "지반공학 -이론과 실제-", 구미서관, pp.684~729.
5. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999a), "CGS에 의한 지반보강 공법 사례연구", 한국철도학회 춘계학술대회, pp.375~382.
6. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999b), "CGS에 의한 기초지반보강 효과에 관한 연구", 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년 학술발표회논문집, pp.1~13.
7. 천병식, 권형석(1999c), "CGS에 의한 기초지반보강에 관한 연구", 한국철도학회 논문집(2/4), pp.9~19.
8. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석(2000a), "저유동성 몰탈형 지반주입공법에 의한 다짐효과", 대한토목학회 2000가을학술발표회 논문집, pp.255~258.
9. 천병식, 권형석, 정의원(2000b), "CGS공법에 의한 기초지반보강", 한국지반공학회 2000년 봄 학술발표회논문집, pp.441~448.
10. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석(2000c), "저유동성 몰탈형 주입재에 의한 건물기초보강", 한국지반공학회 2000가을학술발표회 논문집, pp.71~76.
11. James Warner(1978), "Compaction Grouting - A Significant Case History", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 104, No. 7, pp.837~847.
12. 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.
13. Robert Bowen(1981), "Grouting in Engineering Practice", Applied Science Publishers, pp.77~84.
14. 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.
15. T.S. Nagaraj(2000), "Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization", Special Invitation Lecture, pp.1~25.

(접수일자 2001. 7. 24, 심사완료일 2001. 12. 12)