

C.G.S공법을 적용한 연약점토지반에서의 거동특성에 관한 연구

A Study on the Behavior Characteristics of Soft Clay Ground by C.G.S Method

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik

여 유 현*² Yeoh, Yoo-Hyeon

Abstract

In this study the pilot test of C.G.S (Compaction Grouting System) as injection method by low slump mortar was performed and the results were analyzed in order to find out the application of this method to the soft ground and the 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 occurs continuously because this ground is very soft. Site investigations such as SPT, CPT and vane shear test were performed to determine the characteristics of ground improvement after the installation of C.G.S. Field measurements were performed on purpose to find out the displacement of ground during the installation of C.G.S. From the results of this study, C.G.S method can be optimized by the control of radius, space, depth, injection material and injection pressure. C.G.S improves soft ground with radial consolidation of adjacent soft ground. Considering that increase of N value to about 3, C.G.S can be considered as an effective method to increase the bearing capacity as well as constrain the settlement of soft ground. It is also expected to be economic and effective in the improvement of ground when it is used in applicable sites.

요 지

본 연구에서는 침하가 발생한 연약지반에 대하여 저유동성 몰탈에 의한 주입공법인 C.G.S공법의 적용성과 침하억제 효과를 확인하기 위하여 시험시공을 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 지반조건에 적합한 설치직경, 간격, 심도, 주입재, 주입압 등 다양한 조건을 고려한 시공관리기준을 정하여 본 시공을 실시하였다. 본 시공과정 중에는 지반개량 효과를 파악하기 위하여 C.G.S개량 전, 후 현장지반조사 및 이에 따른 실내토질시험, 계측관리 등을 수행하였다. 현장조사시험에 의한 강도특성 확인결과 C.G.S주입 주변지반은 개량전과 비교하여 전반적으로 지반강도가 증가되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 계측관리 및 압밀특성을 분석한 결과 주변지반의 압밀특성이 개선되었음을 확인할 수 있었으며, 특히 C.G.S주입재의 압축강도시험 결과 주변지반에 비해 강성이 매우 큰 C.G.S주입에 따른 복합지반효과를 통해 지지력 증대효과 및 응력분담으로 장래침하량을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 연약점성토 지반에서 C.G.S주입시공에 의한 침하억제효과로부터 공법의 적용성이 매우 양호한 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : Bearing capacity, C.G.S, Injection, Low slump, Pilot test, Settlement restraint, Soft ground

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

*2 정희원, (주)가야엔지니어 대표이사 (Member, President. Gaya Engrg. Company, Yeohyh@naver.com)

1. 서론

연약점성토 지반에서 구조물 축조시 부적절한 조사 및 설계, 구조물하중 증가, 지하수위 강하와 같은 주변 환경의 변화에 의해 공사완료 후 지속적으로 침하가 발생한다면, 구조물에는 예상 밖의 대규모 피해가 발생할 수 있다. 이에 대하여 적용성 있는 지반개량대책으로는 구조물 하중 조건을 고려한 파일설치 및 교반주입 등의 여러 방법이 있으나, 적용할 수 있는 지반개량공법은 매우 제한적이며 시공성, 효율성 및 경제성 등에서 당초 시공시와 비교하여 그 조건은 매우 악화된다.

본 연구에서는 포화 점성토지반의 침하발생을 억제하기 위한 대책으로 C.G.S공법을 적용하였으며, 이에 따른 현장적용성 및 지반개량특성을 파악하고자 하였다.

C.G.S(Compaction Grouting System)공법은 몰탈을 주입재로 이용하는 비배출 치환원리에 의한 주입공법으로서 지반을 정적으로 압축시켜 밀도증대효과를 기대할 수 있고 저공해, 저소음, 내구성 확보뿐만 아니라 높은 주입고결체의 강도에 의해 경우에 따라서는 기초 파일로 사용할 수도 있다(천병식 등, 1997). 최근 국내에서도 구조물 기초의 개량, 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(천병식 등, 1999(a),(b), 2000(a),(b)).

연구대상 부지는 강원도 ○○지역으로 현재 사용중인 APT단지내 부지로서 Sand Drain공법에 의한 지반개량을 시행하였음에도 불구하고, 입주 후에도 지속적인 대규모의 지반침하가 발생하여 대책이 요망되는 곳이다. 따라서, 본 연구에서는 지속적인 침하발생을 억제하기 위한 대책으로 C.G.S공법을 선정하고, 시험시공을 실시하여 시험자료를 토대로 C.G.S설치패턴 즉, 설치직경, 설치간격, 배치형태 등을 검토하였으며, C.G.S 주입 전·후의 개량효과확인을 위하여 현장 및 실내토질시험 실시하고, 지반거동특성을 파악하고자 계측관리를 수행하였다.

2. C.G.S에 의한 지반개량 메커니즘

C.G.S공법은 비유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써

주변지반을 압축 강화시키는 지반개량공법으로서 기존의 주된 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 백상고결, 약액의 침투고결, Jet Grout의 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출 치환'이라는 독특한 기법의 주입공법이다(천병식 등, 1998).

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 주입에 따른 지반의 방사방향압축 메커니즘을 이해할 필요가 있다(Warner, 1978; Bowen; 1981; Al-Alusi, 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.

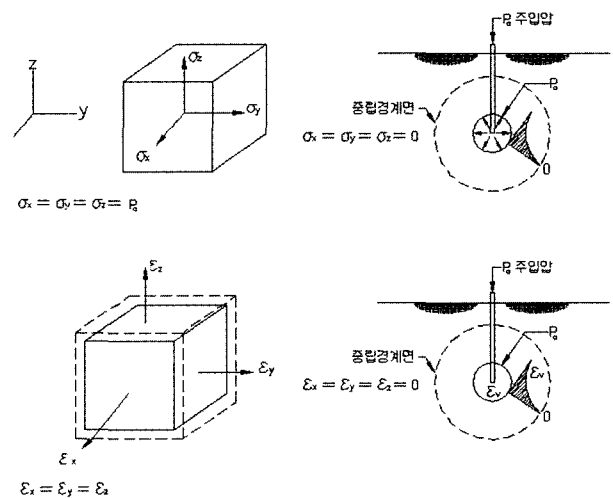


그림 1. 주입에 따른 응력과 변형관계

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.

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

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

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

따라서,

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

그러므로, C.G.S공법에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta\gamma$ 는

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

지반이 받는 다짐정도를 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

3. C.G.S주입 시험시공

3.1 지반특성

시험시공을 위한 배치평면은 그림 2와 같으며, 본 시험시공 지역에서 실시한 시추조사결과, 지층구성은 그림 3과 같이 지표로부터 매립층, 충적층, 풍화대층으로 구성되어 있고, 상부의 매립층은 N치 11/30~18/30으로 입도가 불량한 모래 혹은 모래섞인 점토로서 보통조밀한 상대밀도를 나타낸다. 충적층은 모래와 점토가 혼재되어 분포하는 특성을 보이고 있다. 지반개량대상인 충적점토층(유기질실트)은 N치가 2/30~9/30으로 층후는 8.5~12.2m로 두껍게 분포되어 있으며, 토질특성은 다음 표 1과 같다.

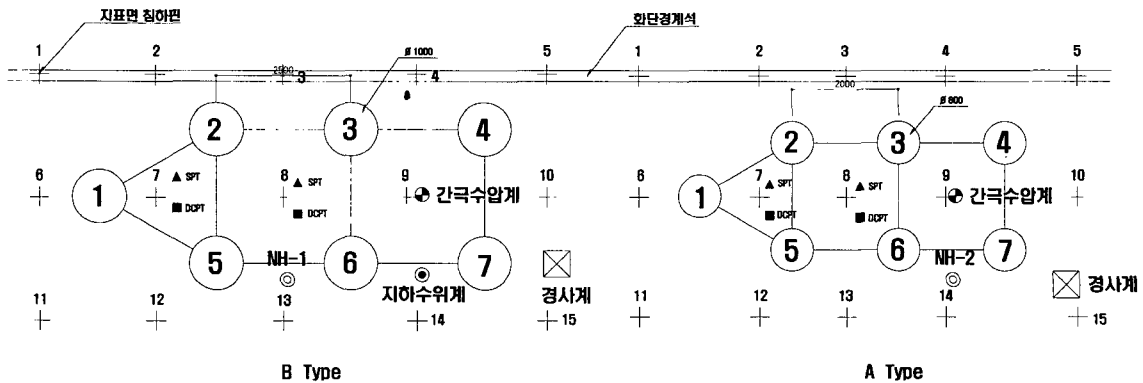


그림 2. 시험시공 배치평면도

표 1. 층적점성토층의 토질특성

시추 번호	depth (m)	W _n (%)	e _o	G _s	Atterberg Limit		Compressive Strength			Shear Strength		Consolidation		USCS
					LL(%)	PI(%)	q _u (t/m ²)	q _r (t/m ²)	S _i (t/m ²)	C (t/m ²)	φ	C _c	P _c (t/m ²)	
NH-1	8.0	203.0	1.56 ~ 1.58	2.132	86.3	45.75	0.64	-	-	0.3	0.8	0.556 ~ 0.569	0.75	OH
NH-2	8.0	151.0	3.42 ~ 3.80	2.225	87.7	42.15	1.24	-	-	0.58	1.6	1.382 ~ 1.314	0.72	OH

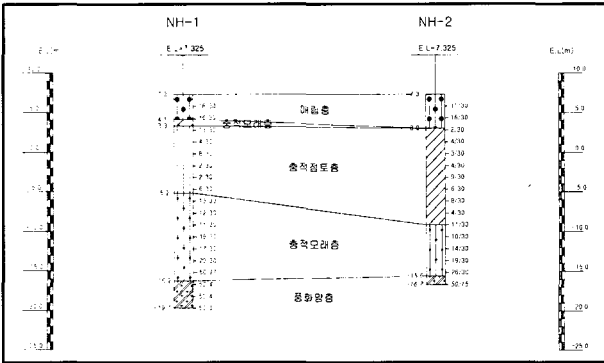


그림 3. 지층단면도

3.2 C.G.S주입 시험시공

3.2.1 C.G.S주입 간격

C.G.S주입 간격을 그림 2와 같이 A Type(2.0m 간격)과 B Type(2.5m 간격)으로 구분하고, 삼각형 및 정방형 배치로 구분하여 각각의 배치에 대한 개량효과 및 시공성을 파악하였다.

3.2.2 천공

천공에 사용되는 Rod는 주입중 고압에 견딜 수 있는 특수재질로 제작되었으며, 길이 1.0m, 외경 Ø3" 이다. 한편, 사용된 Bit는 천공 초기단계(매립층 천공)에서는 크라운메탈비트를 사용하였으나, 점토지반에서는 점토가 Rod내에서 Core가 형성되므로 Wing Bit를 사용하여 Core형성을 방지하였으며, 천공수 사용량을 최소화하였다.

3.2.3 주입재의 구성과 배합

(1) 주입재 구성

C.G.S주입재는 시멘트, 골재(자갈~점토)와 물로 구성된다. 골재는 C.G.S주입에 있어서 가장 중요한 재료이며, 입자의 크기 및 특성에 따라 토사와 석분으로 구분한

다. 토사는 석산에서 운반하여 현장에서 목적하는 크기의 입자를 사용하기 위해 체가름을 실시하였으며, 현장 배합시험시 점토함유량이 많고 모래함유량이 작아 모래를 첨가하였다. 또한, 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하여 주입재의 배합강도가 발현되도록 6포(240kg) 이상을 배합하였다.

(2) 배합비

본 현장의 지반상황에 대하여 적합한 배합비를 결정하고자 배합시험 및 시험주입을 통하여 표준배합비를 결정하였다. 주입재의 허용 Slump치는 0~5cm 범위를 유지하였다.

(3) 주입량과 주입률

본 시험시공에서는 초기 주입속도를 3초/stroke로 0.12m³/min으로 주입하였으나 지표용기와 주입재의 유동성을 방지하기 위하여 6초/stroke, 0.06m³/min으로 변경하여 주입하였다.

(4) 주입방식

C.G.S공법의 주입방식에는 Top-Down방식의 하향주입방식과 Bottom-Up방식의 상향주입방식 및 두 방식의 조합형이 있다. 본 현장의 경우 지반개량(보강)이 주목적이므로 Bottom-Up방식을 적용하였다.

3.3 시험시공 분석

본 현장의 지반침하 대책공법으로 선정된 C.G.S공법을 적용하여 수행한 시험시공 결과를 분석·정리하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 본시공에 반영하였다.

3.3.1 C.G.S 주입점토

본 현장에 대한 시험 주입결과, 주입재의 배합비는

10:4:3(모래:황토:석분)의 경우가 현장적용성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 주입량은 천공 1m당 0.5m³을 주입하고, 1회 펌핑량은 0.006m³으로 적용하는 것이 바람직하며, 지층상태에 따라 주입압 및 주입량을 변화시키는 시공방안이 필요하다.

3.3.2 현장시험결과 검토

C.G.S주입 전, 후의 표준관입시험결과 N값은 그림 4와 같이 개선되었으며, 표 2의 현장베인시험결과 C.G.S주입전과 비교하여 전단강도가 증대된 것으로 나타났다.

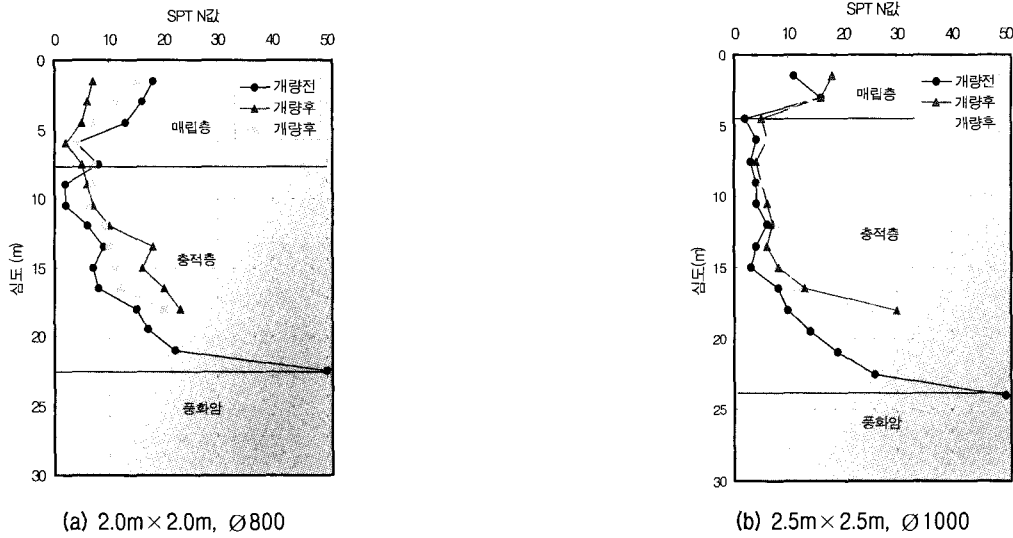


그림 4. 시험시공지역 표준관입시험 N값 비교

표 2. 현장베인전단시험 결과

구 분	A type 2.0m×2.0m, Ø800	B type 2.5m×2.5m, Ø1000	비 고
C.G.S 주입전	0.186 kg/cm ²	0.218 kg/cm ²	
C.G.S 주입후	0.546 kg/cm ²	0.655 kg/cm ²	

표 3. 시험시공 지반의 물리적 특성

구 분	심 도 (m)	함수비 (%)	비중 (G _s)	Atterberg Limits		입도분석			U.S.C.S
				LL (%)	PI (%)	No.4	No.10	No.200	
A Type	1.5 - 4.5	19.0	2.722	27.7	4.28	99.61	98.03	3.52	SP
	6.0 - 12.0	203.0	2.132	86.3	45.75	100	97.66	50.76	OH
	13.5 - 21.0	20.0	2.675	29.3	3.12	100	94.98	51.23	ML
	22.5 - 24.0	23.0	2.657	20.2	NP	100	100	5.44	SP-SM
B Type	1.5 - 4.5	16.0	2.673	29.9	6.97	95.16	86.82	8.09	SP-SC
	6.0 - 12.0	151.0	2.225	87.7	45.55	100	97.11	53.15	OH
	13.5 - 21.0	17.0	2.667	51.7	NP	100	97.58	50.82	MH
	22.5	18.0	2.668	22	NP	100	100	5.96	SP-SM

표 4. 주입전·후 지반의 역학적 특성

공 번	일축압축강도 (kg/cm ²)	유기물 함유량 (%)	삼축압축시험(UU)		직접전단시험		비 고
			C(kg/cm ²)	Ø(°)	C(kg/cm ²)	Ø(°)	
A type	0.64	10	0.3	0.8	0.042	10	주입전
	1.14~2.82	-	1.0~1.41	1.5~3.9	0.136~0.271	20~23	주입후
B type	1.24	29	0.58	1.6	0.338	17	주입전
	1.71~3.41	-	0.67~1.38	2.3~7	0.194~0.294	21~22	주입후

표 5. 주입전·후 지반의 압밀특성

구 분	압축지수 C_c	초기간극비 e_0	선형압밀하중 P_c	평균압밀계수 C_v	평균체적압축계수 m_v	비 고
A type	0.556~0.569	1.15~1.19	0.72~0.75	0.073~0.12	0.095~0.131	주입전
	2.08~2.19	3.65~4.49	0.75~0.78	0.0018~0.0046	0.218~0.228	주입후
B type	1.314~1.382	2.95~3.07	0.73~0.75	0.062~0.063	0.149~0.152	주입전
	0.971~1.440	2.04~3.61	0.76~0.85	0.0011~0.0008	0.145~0.289	주입후

한편, 불교란 시료를 채취하여 실내토질시험을 수행한 결과 표 3~표 5에 나타난 바와 같이 강도특성과 압밀특성이 개선됨을 알 수 있었다. 이러한 사항으로부터 C.G.S주입에 의한 방사방향압축으로 토사지반이 조밀화되어 지반개량효과를 나타내는 것으로 판단된다.

3.3.3 주입 Pattern 검토

시험시공에서는 고결체의 형성직경이 $\phi 800\text{mm}$ 및 $\phi 1000\text{mm}$ 의 경우와 주입간격이 2.0m와 2.5m인 경우에 대하여 C.G.S주입에 따른 침하/용기특성을 파악한 결과, 그림 5와 같이 C.G.S고결체 형성직경 및 주입간격이 작을수록 용기량이 작게 나타났으며 개량효과도 양호한 것으로 사료된다. 한편, 지중경사계 측정을 이용하여 수평변위특성을 파악한 결과, C.G.S고결체 형성직경이 증가할수록 수평변위량이 크게 나타나므로 가능한 주입직경을 최소화하는 방안이 필요하다. 따라서, 본 시공에는 2.0m×2.0m 정방형배치를 기본으로 하고, 형

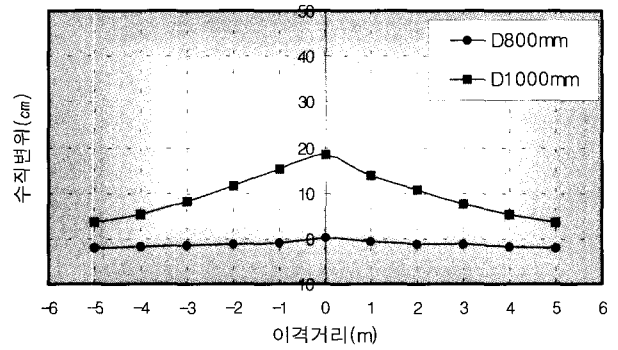
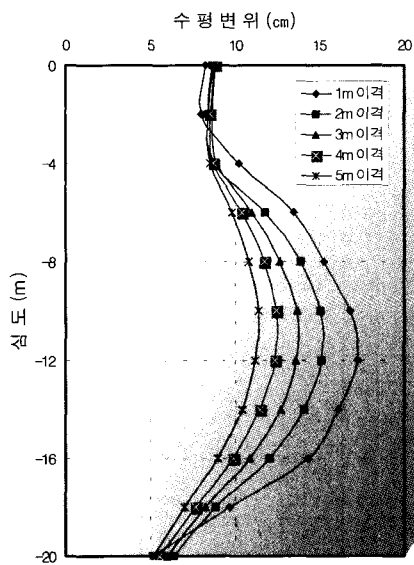


그림 5. 침하용기특성

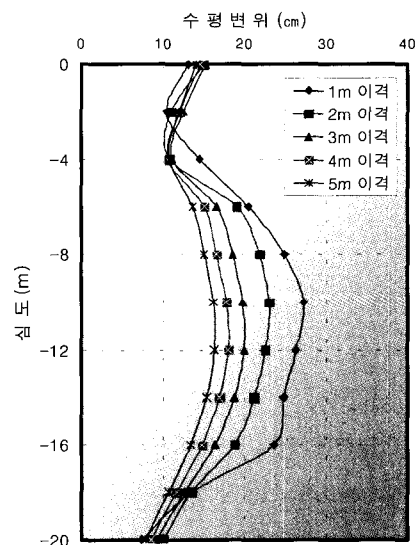
성직경은 $\phi 800\text{mm}$ 로 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.3.4 고 찰

C.G.S주입에 의해 방사방향으로 토사가 밀려나면서 발생하는 주변지반에서의 과잉간극수압특성은 크게 변화되지 않음을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 주입전, 후 불교란 시료로 실시한 압밀시험결과와도 유사



(a) $\phi = 800\text{mm}$ 설치시



(b) $\phi = 1000\text{mm}$ 설치시

그림 6. 수평변위특성

하게 나타나 C.G.S개량지역은 C.G.S고결체와 주변지반의 특성을 고려한 복합적인 압밀특성의 고려가 필요하다.

이와 같이 시험시공결과를 종합·정리하면 전반적으로 C.G.S주입에 의해 주변지반의 강도특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 지반조건을 고려한 적절한 주입시공이 필요하며 주입량이 과다할 경우 주변지반의 이완으로 주입효과가 저감되므로 계측관리를 통한 정보화시공에 의해 최적의 조건으로 시공이 이루어져야 할 것이다.

4. C.G.S주입시공

4.1 주입시공 계획

C.G.S 주입패턴은 시험시공결과를 반영하여 삼각형 및 정방형으로 실시하였다. 그림 7은 공사구간내 C.G.S 주입시공 위치를 나타내며, 시공순서는 Zone V → IV → II → I → III의 순서로서 공사지역의 외부에서 내부로 진행되었다. 그림 7에 나타난 등고선은 지반의 상태를 나타내는 것으로 각 등고선은 N치가 20인 지점의 깊이를 나타낸다. C.G.S는 N치가 20에 해당하는 지점까지 주입이 되었으므로 그림에서 보여지는 등고선은 결론적으로 C.G.S 주입깊이를 나타내는 것이다. 한

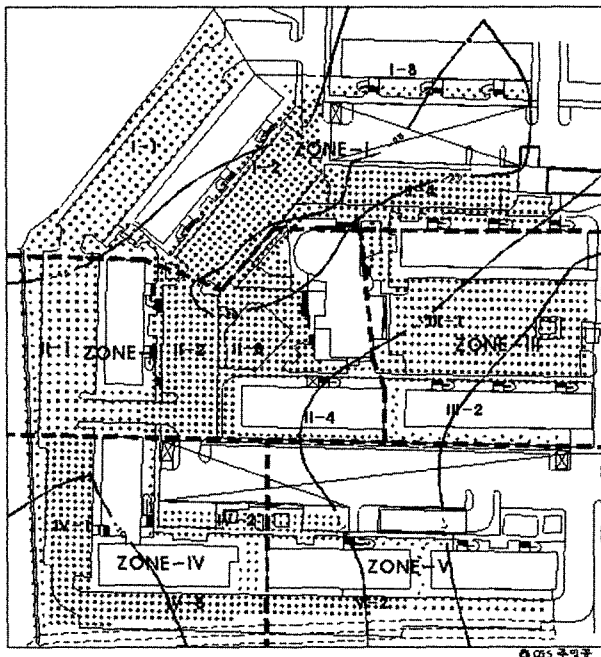


그림 7. 현장 주입시공 위치도

편, C.G.S주입은 3.3절에서 검토한 바와 같이 시험시공 결과를 고려하여 $\varnothing 800\text{mm}$, $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 정방형을 기본으로 하였으며, 침하발생량이 상대적으로 작은 지역 및 협소한 구간에 대해서는 $\varnothing 600\text{mm}$, $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 로 변경 적용하였다.

4.2 주입시공 관리

4.2.1 주입재의 구성과 배합

주입재료의 선정 및 배합시 골재는 체분석시험을 통하여 그림 8과 같이 Ideal-Line(Samson, 1997)에 근접하는 재료를 선정하였으며, 주입재의 배합비는 주입층 지반압밀을 유도할 수 있는 내부마찰각, Pumping 가능한 소성 및 현장여건 등을 고려하여 그림 8에서와 같이 주입재의 입경분포 범위를 결정하였다. 적용한 표준배합비는 표 6과 같다.

4.2.2 적용 주입재의 강도특성

적용 주입재의 배합시험을 통하여 주입재의 Slump치는 0~5cm 범위를 유지하도록 하였다. 한편, 지중에서 고결된 C.G.S 주입재가 하중에 대해 견디는 파괴강도를 측정하기 위해 KS F 2405에 따른 일축압축강도 시험을 실시하였으며, 20공당 3조(각조 3EA)씩 제작하여 각각 3일, 7일, 28일간 수중양생 후 실시하였다. 시험결과 재령일수별 일축압축강도를 나타내면 그림 9와 같으며, 28일 경과시 약 $120\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도를 나타내었다.

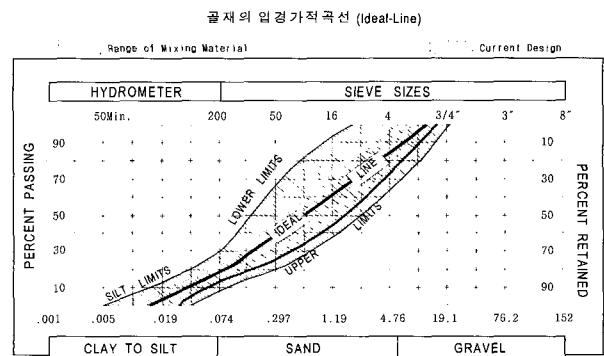


그림 8. 최적배합비 곡선

표 6. CGS의 표준배합비

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

C.G.S 공시체 재령일수별 일축압축강도 분포

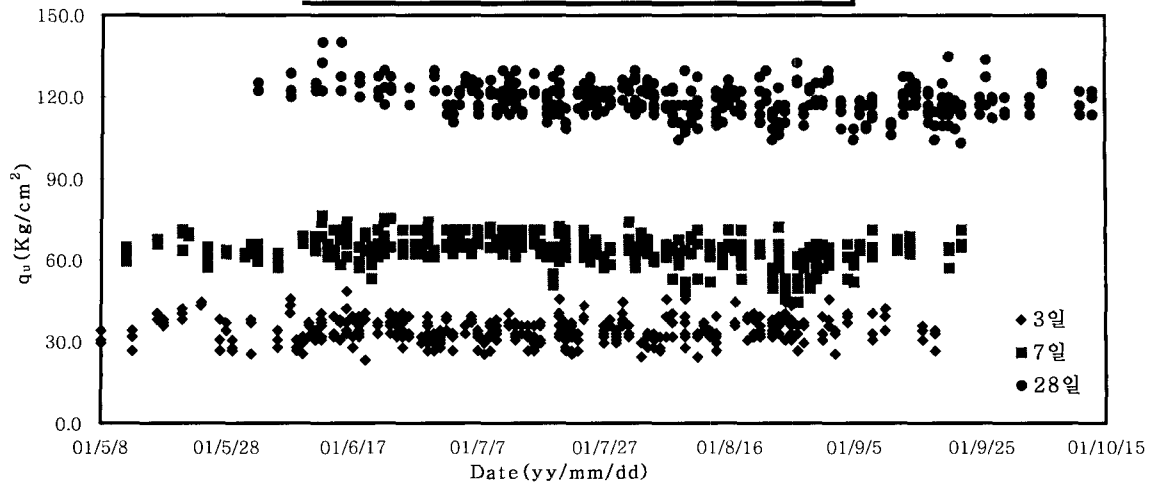


그림 9. C.G.S공시체 재령일수별 일축압축강도 분포

4.2.3 주입방식 및 주입순서

C.G.S주입은 Top-Down방식과 Bottom-Up방식 및 두 방식의 조합형이 있으나, 본 현장에서는 지반개량 및 기초개량시에 주로 이용되는 Bottom-Up방식을 적용하였다. 주입방법은 다음과 같이 선택 주입토록 계획하였다.

- ① 정량주입 : ϕ 800mm 층죽 주입량 주입($0.5m^3/m \rightarrow$ 누계stroke수 \times 1회 토출량($m^3/stroke$))
- ② 정압주입 : 허용 상한주입압 $562.6 t/m^2$ 발생시 1단계 인발.

4.2.4 주입속도 및 주입량

정량 및 정압주입이 가능하도록 초기 주입속도를 3초/stroke, $0.12m^3/min$ 으로 계획하여 주입을 실시하였으나, 주입중 지표용기와 주입재의 유동성의 문제가 있어 이를 방지하기 위하여 6초/stroke, $0.006m^3/stroke$ 으로 변경하여 주입하였다.

4.3 지반거동특성 파악

C.G.S 주입 전, 후 주변지반의 거동특성을 파악하기 위하여 지하수위계, 간극수압계, 지중경사계, 지표침하판을 설치하여 계측관리를 수행하였으며, 구역별로 현장시험(SPT, CPT, Vane시험)을 실시하였다. 각 계측기의 설치위치는 그림 10과 같다. 또한, 현장시험시 채취된 불교란 시료로 실내토질시험을 실시하여 C.G.S주입에 의한 주입 전·후의 지반개량특성을 파악하였다.

4.4 주입시공에 의한 영향 평가

연약한 점성토 지반의 지반침하 억제대책으로 C.G.S 공법을 적용할 경우의 주변지반 및 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 현장시험, 실내토질시험 및 계측관리 결과를 분석·검토하였으며, 그 결과를 이용하여 C.G.S주입에 따른 지반거동특성과와 주변구조물에 영향이 발생하지 않도록 하기 위한 대책수립의 수단으로 이용하였다.

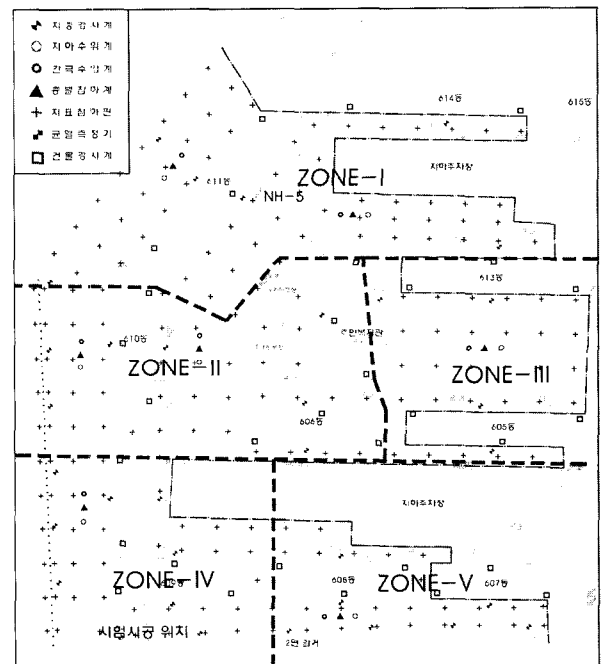


그림 10. 현장조사시험 및 계측설치 위치

5. 분석 및 고찰

그림 10에 나타낸 바와 같다.

5.1 현장시험 결과분석

본 절에서는 주입시공시 병행하여 수행한 현장시험 및 계측결과를 분석하였으며, 현장시험 및 계측위치는

5.1.1 표준관입시험

C.G.S주입 전, 후에 실시한 표준관입시험 결과는 그림 11과 같다. 그림 11은 Zone별 대표적인 특성을 나타내는 지점의 심도별 N치 변화를 나타낸 것으로 지역별

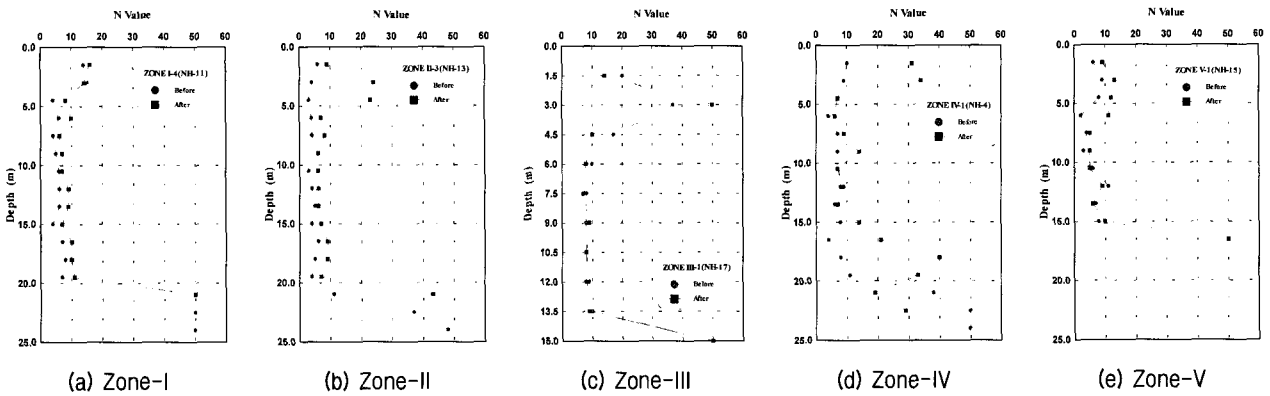


그림 11. CGS주입에 따른 지역별 대표지점의 N치 변화

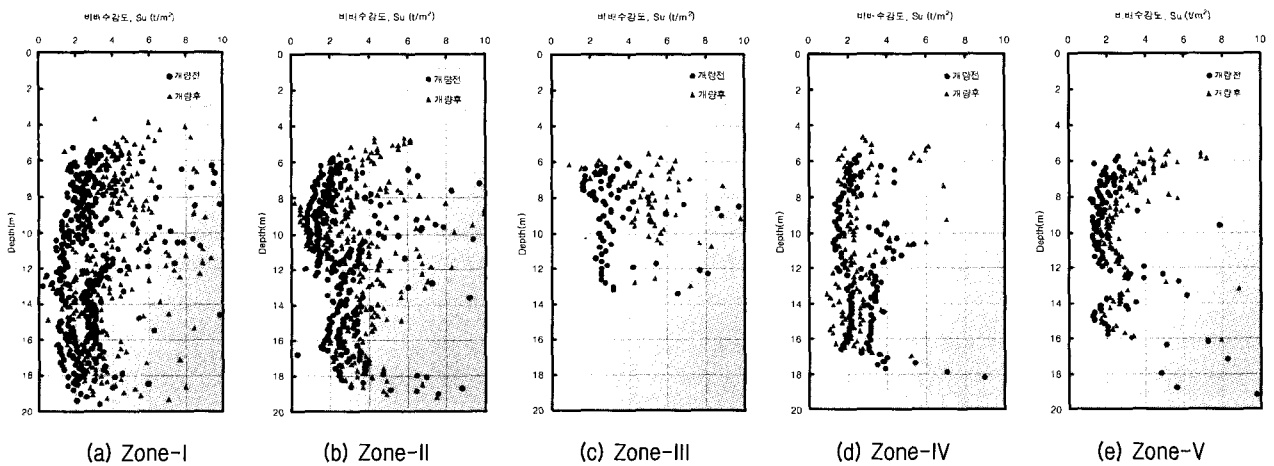


그림 12. CGS주입에 따른 지역별 비배수전단강도의 변화

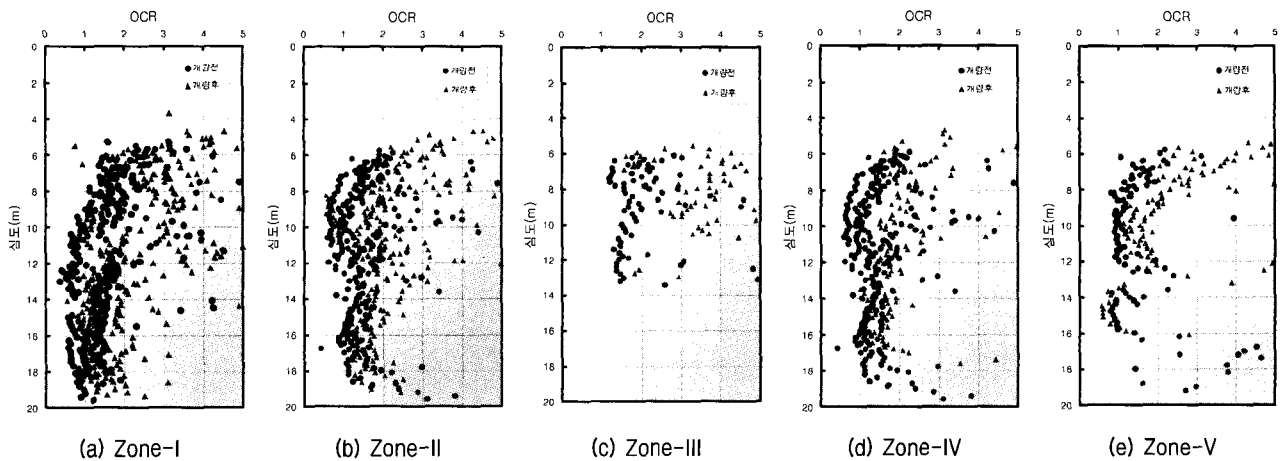


그림 13. CGS주입에 따른 지역별 OCR의 변화

N값의 평균증가량은 약 1~6 이었으며, 지반개량 대상 층인 고함수비의 유기질 층적층(GL-6~12m)의 N값의 변화는 전반적으로 증가하는 경향으로 나타나 C.G.S주입에 의하여 양호한 지반개량 특성을 나타내는 것으로 판단된다. 한편, 매립토층 일부구간에서 개량 후 N값이 다소 감소하는 경향을 보이는 것은 지반의 불균질성에 기인한 것으로 사료된다.

5.1.2 피조콘관입시험

C.G.S주입 전·후 주변지반에서 실시한 CPT시험결과와 비배수전단강도(S_u), 및 과압밀비(OCR)의 변화를 나타내면 다음 그림 12 및 그림 13과 같다. 검토결과, 그림에서와 같이 원지반과 비교하여 C.G.S주입에 의한 방사방향의 압축으로 비배수전단강도 및 과압밀비가 증가하는 경향으로 나타나므로 양호한 지반개량특성을 보이는 것으로 사료된다.

5.1.3 현장베인시험

현장베인시험 결과로부터 구한 지층깊이에 따른 비배수전단강도는 선행압밀하중(σ_p)과 관련된다. Mesri는 Bjerrum의 연구결과를 재분석하여 선행압밀응력에 대한 비배수전단강도 사이에는 0.22의 일정한 관계가 존재한다고 하였다. 이 관계를 적용하면, 유효토피하중과 비교함으로써 과압밀비를 결정할 수 있으며, Larsson

은 이 관계를 유기질토의 소성지수변화 관계로 나타내었다(한국지반공학회, 1997). 이러한 관계를 본 현장 베인전단시험 결과를 이용하여 나타내면 그림 14와 같으며, 그림의 세로축은 전단강도와 유효응력의 관계로 동일한 상재하중과 심도 및 같은 소성지수를 나타내는 토질이라도 베인전단시험값이 크면, 비배수전단강도가 크게 나타난다. 본 현장의 경우, C.G.S주입에 의한 방사방향 압축으로 베인전단시험값이 증가하여 양호한 지반개량특성을 나타낸다.

5.2 실내시험 결과분석

5.2.1 물리적특성

시추조사시 채취한 불교란 시료에 대한 실내토질시험은 C.G.S주입 전·후로 구분하여 수행하였다. 원지반 및 C.G.S주입후의 물리적 특성을 각 지역별 대표지점에 대하여 정리하면 다음 표 8과 같다.

표 8에서와 같이 평균함수비는 주입전과 비교하여 약

표 7. 현장베인전단시험 결과

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

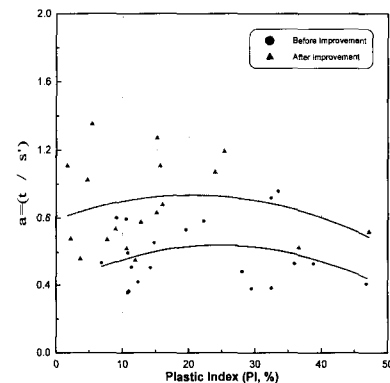


그림 14. 개량전후 심도별 소성지수 관계

표 8. 물리적 특성 시험결과

구 분	자연함수비 (%)	비중 (Gs)	Atterberg Limit (%)		비 고	
			액성한계	소성지수		
Zone-I	주입전	171.8	2.47	87.5	22.3	NH-11
	주입후	105.8	2.41	72.4	24.0	
Zone-II	주입전	109.5	2.49	82.2	28.0	NH-13
	주입후	95.2	2.47	56.3	10.6	
Zone-III	주입전	106.4	2.29	61.4	14.2	NH-17
	주입후	101.6	2.24	60.8	15.1	
Zone-IV	주입전	117.0	2.61	60.4	19.6	NH-4
	주입후	46.2	2.50	40.8	4.7	
Zone-V	주입전	167.4	2.37	49.9	32.5	NH-15
	주입후	124.6	2.34	76.1	36.6	

4.5~60.5%의 감소경향을 나타냈으며, C.G.S주입으로 인한 에터버그한계의 변화를 살펴보면 액성한계 및 소성지수가 각각 감소한 것으로 나타났다.

5.2.2 역학적 특성

불교란 시료에 대한 실내토질시험 결과로부터 역학적 특성을 파악하여 각 시험치의 평균값을 나타내면 다음 표 9와 같다.

표 9에 의하면 일축압축강도(q_u)는 주입전과 비교하여 약 3.8~55.1% 증가하였으며, 삼축압축시험에 의한 비배수전단강도(C_u)는 주입전과 비교하여 약 3.3~69.2% 증가된 것으로 나타났다. 또한, 직접전단시험결과에서도 유사한 결과를 얻어 전반적으로 양호한 지반 개량특성을 보이는 것으로 판단된다.

5.2.3 압밀특성

실내토질시험 결과로부터 원지반과 비교된 C.G.S주

입후의 압밀특성은 표 10과 같다.

표 10에서와 같이 C.G.S주입에 의한 연약층의 압축지수(C_c), 초기간극비(e_0)는 감소되는 경향으로 나타났으며, 선행압밀하중(P_c)는 증가되는 경향으로 나타나 압밀특성이 개선된 것으로 판단된다.

5.3 현장계측 결과분석

5.3.1 과잉간극수압 변화

포화점성토 지반내에 C.G.S공법에 의한 저유동성 몰탈의 주입과정중의 과잉간극수압 변화특성을 파악하기 위하여 각 조사공별 2개 심도에 대하여 간극수압과 지하수위를 측정하였다.

그림 15는 과잉간극수압의 변화를 Zone별로 나타낸 것으로서, Zone-I의 과잉간극수압 발생경향은 C.G.S주입 즉시 발생하였으며, Zone-II, IV, V는 C.G.S주입에 따라 서서히 증가된 후 점차 감소하여 수렴되는 양상의

표 9. 역학적 특성 시험결과

구 분		일축압축강도 (kg/cm ²)	삼축압축시험(UU test)		직접전단시험		비 고
			C(kg/cm ²)	Ø	C(kg/cm ²)	Ø	
Zone-I	주입전	0.49	0.3	0	0.182	11	NH-11
	주입후	0.76	0.31	0	0.206	21	
Zone-II	주입전	0.37	0.13	0	0.165	12	NH-13
	주입후	0.45	0.22	0	0.194	16	
Zone-III	주입전	0.56	0.3	0	0.214	19	NH-17
	주입후	0.59	0.44	0	0.267	17	
Zone-IV	주입전	0.52	0.38	0	0.204	7	NH-4
	주입후	0.87	0.47	0	0.346	20	
Zone-V	주입전	0.80	0.41	0	0.118	2	NH-15
	주입후	0.83	0.43	0	0.136	21	

표 10. 압밀특성 시험결과

구 분		압축지수 (C_c)	초기간극비 (e_0)	선행압밀하중 (P_c , kg/cm ²)	비 고
Zone-I	주입전	0.508	2.73	0.65	NH-11
	주입후	0.387	1.74	1.2	
Zone-II	주입전	0.894	3.04	0.54	NH-13
	주입후	0.303	2.33	1.4	
Zone-III	주입전	0.951	4.15	0.27	NH-17
	주입후	0.366	3.42	0.8	
Zone-IV	주입전	0.896	1.73	0.81	NH-4
	주입후	0.730	1.19	0.8	
Zone-V	주입전	0.842	3.52	0.56	NH-15
	주입후	0.369	2.51	0.69	

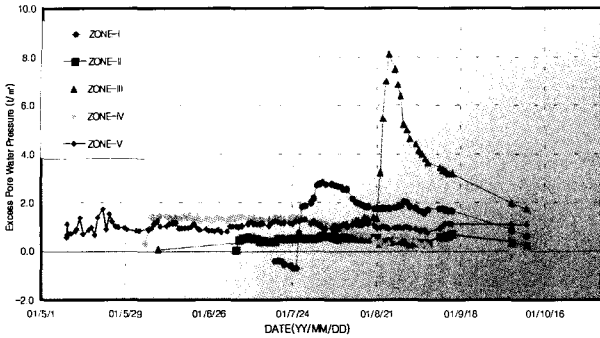


그림 15. CGS 주입에 따른 과잉간극수압의 변화

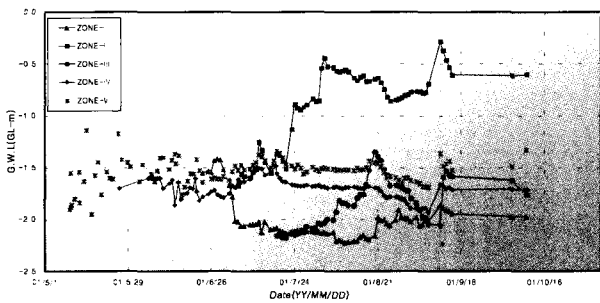


그림 16. CGS 주입에 따른 지하수위 변화

로 과잉간극수압 발생정도는 크지 않았으며, Zone-III의 경우는 주입초기 점진적인 증가경향을 보이다 주입종료 후에 과잉간극수압이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 Zone-III의 주변부터 주입시공을 실시함에 따른 경향으로서, 주변부의 선주입은 III지역 내부의 과잉간극수압을 증가시키는 것으로 사료되며, 계측지점에 인접한 위치에서의 주입의 결과로 높은 과잉간극수압이 발생하는 것으로 판단된다. 평균적인 과잉간극수압의 증가량은 Zone-I에서 나타난 바와 같이 1.0~3.0 t/m² 정도이다. 또한, 심도별로 다른 크기의 과잉간극수압이 관측되었는데 얇은심도 보다는 깊은심도에서 높은 과잉간극수압이 발생하는 것으로 측정되었다. 이는 심도가 깊은 곳에서는 간극수압의 소산이 짧은 시간 내에 이루어지기 어려우므로 비배수 조건에 가까운 것으로 C.G.S주입으로 인해 발생하는 주입압의 대부분이 과잉간극수압을 생성한 것으로 사료된다. 또한, 과잉간극수압이 C.G.S주입중 급격히 증가한 후 급격한 소산을 보이는 것은 단지조성시 타설한 지중의 샌드드레인 에 의한 영향인 것으로 판단된다. 한편, C.G.S주입시 측정된 지하수위 변화는 그림 16과 같이 과잉간극수압 변화양상과 유사하게 대체로 변화가 거의 없는 것으로 나타나고 있으며, 일부구간의 높은 과잉간극수압 변화양

상과 유사하게 C.G.S주입전 미소한 변화양상을 보이다 C.G.S주입시 급격히 상승되어 이후 감소하는 경향을 나타내었다.

5.3.2 지중수평변위 및 지표면거동특성

C.G.S주입에 따른 지반거동특성을 파악하기 위하여 Zone별 수직 및 수평변위를 측정하였다. 그림 17 및 그림 18은 C.G.S주입후의 수평 및 수직변위를 나타낸 것으로서 지중경사계 측정에 의한 수평변위의 경우 지표면으로부터 7.5m 아래에서 최대변위(약 140mm)가 관측되었으며, 그 상부 혹은 하부에서는 보다 적은 양의 변위가 관측되었다. 이는 상부는 조밀한 자갈층 또는 실트질모래가 위치하므로 상대적으로 작은 변위를 보이며 하부는 기반암에 위치하는 지반조건에 의하여 변위가 작게 나타나는 것으로 사료된다.

C.G.S주입 시공시 지표면의 침하·용기정도를 파악하는 것은 주입에 따른 주변지반 거동을 이해하는 매우 중요한 관리방안중의 하나이다. 본 현장에서는 주입중 및 주입후의 침하·용기정도를 파악하기 위해 지표침하핀을 설치하여 측정하였으며, 아래 그림 18은 지표면 거동특성을 나타낸 것이다.

C.G.S주입시 일반적인 형태의 지중수평변위는 주입종료후 수렴화 경향을 보이며 수직변위는 점진적으로 감소한다. 이는 주입재의 체적만큼 치환이 발생된 후 간극수압이 소산됨에 따라 압밀, 용기된 영역이 점진적으로 감소하는 것으로 사료된다. 지표침하핀을 측정 한 결과 주입압에 의한 팽창압이 횡방향뿐만 아니라 수직방향으로도 작용하여 지반을 용기시키는 것으로 사료되며, 주입공에 인접할수록 용기정도가 크고, 주입공에서 멀어질수록 용기정도는 감소하는 것으로 판단된다.

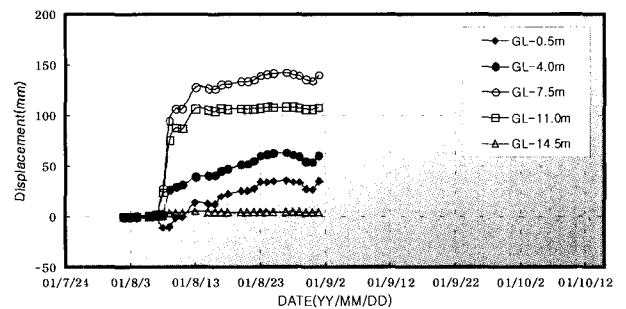
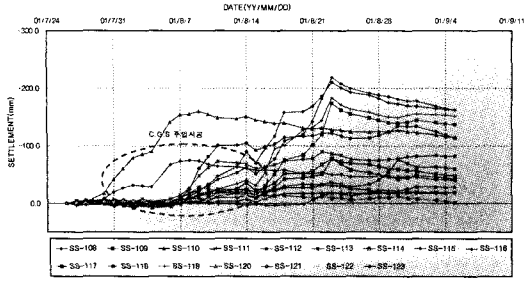
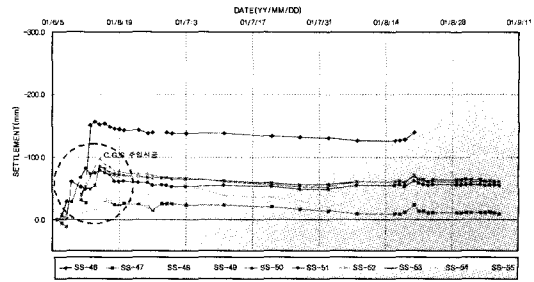


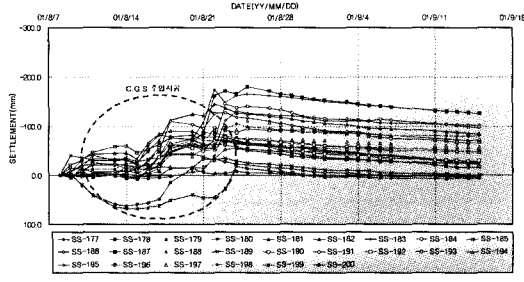
그림 17. CGS주입중 지중수평변위



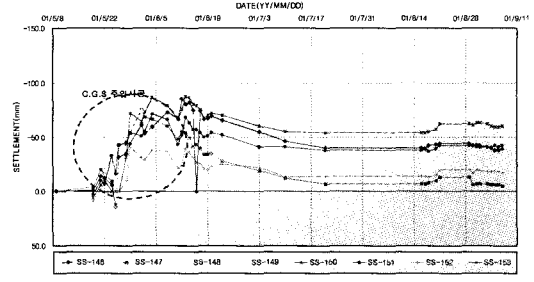
(a) Zone-I구역 지표면 침하양상



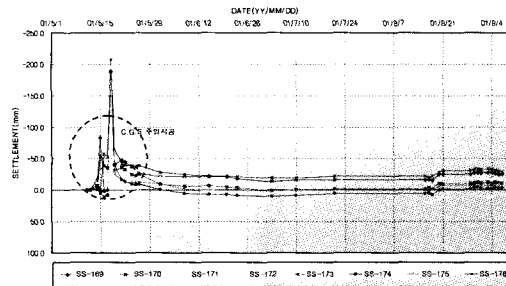
(b) Zone-II구역 지표면 침하양상



(c) Zone-III구역 지표면 침하양상



(d) Zone-IV구역 지표면 침하양상



(e) Zone-V구역 지표면 침하양상

그림 18. C.G.S주입에 따른 지표면변화

5.3.3 C.G.S주입에 따른 인접구조물 영향

C.G.S주입으로 인한 인접구조물의 안정성 평가를 위하여 구조물과 1.0m 이격시킨 지중경사계 및 옥상에 건물경사계를 설치하여 측정한 결과, 지중에서 최대 약 140mm의 수평변위가 관측되었으나, 건물경사계에서 측정된 수평 및 수직변위는 미소하여 실제 구조물에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

한편, C.G.S주입공과 약 1.0m, 2.0m 이격하여 설치한 지중경사계의 수평변위를 파악한 결과, C.G.S에 의하여 조밀성이 증가되는 영향반경은 주입형성직경의 2배정도임을 확인할 수 있었으며, 인접구조물과의 적절한 이격과 지반조건을 고려한 적절한 주입패턴을 적용할 경우, 주변지반의 교란과 주변구조물 기초(Pile 기초)에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

또한, 수평 및 수직변위의 발생은 주입 패턴에 있어 한 지점에 대하여 집중적인 주입시공에 의한 것으로 사

료되며, 이와 같은 결과로 볼 때, 격공으로 주입하는 주입방식이 바람직한 것으로 판단된다.

5.4 고찰

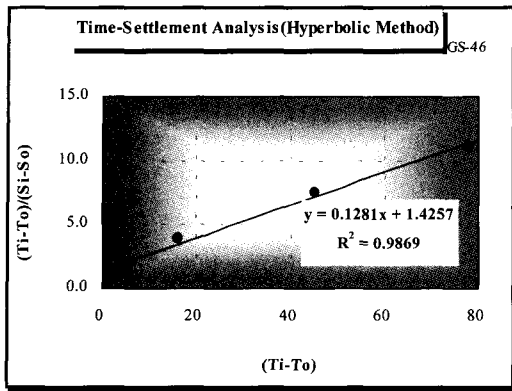
5.4.1 C.G.S주입에 의한 침하억제효과

본 현장은 당초, Sand Drain 타설 불량으로 인한 지반 개량효과를 거의 기대할 수 없는 상황으로서 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 총침하량은 182cm로, 침하량 평가시점인 2001년 2월까지의 발생침하량은 119cm, 평균 압밀도는 65.4%이며, 63cm의 지속적인 잔류침하가 예상되는 상황이었다.

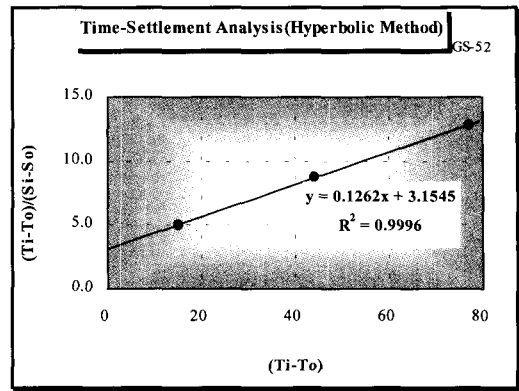
본 현장에서는 C.G.S주입과정 및 주입완료후의 지표 침하된 측정결과를 이용하여 장래 발생될 예상침하량을 쌍곡선법에 의해 분석하였으며, 침하발생 예측결과를 나타내면 그림 19에 나타난 바와 같다.

표 11에 나타낸 바와 같이 C.G.S주입에 의한 지반보강을 시행한 후 지표침하량의 거동에 따른 예상침하량을 분석한 결과, 잔류침하량은 10.07~24.83mm로 평가

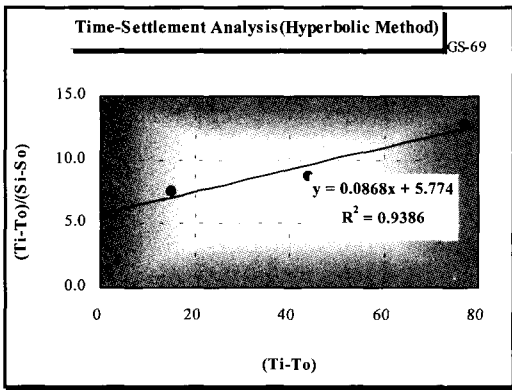
되었다. 이러한 사항은 지반보강을 실시하지 않고 방치하였을 경우와 비교하여 잔류침하량을 크게 감소시킬 수 있는 것이며, C.G.S주입으로 연약점성토 지반의 침



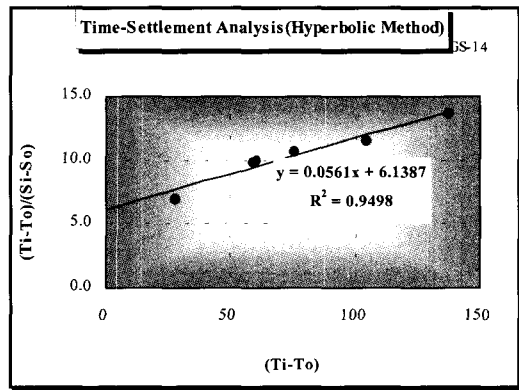
(a) Zone-I



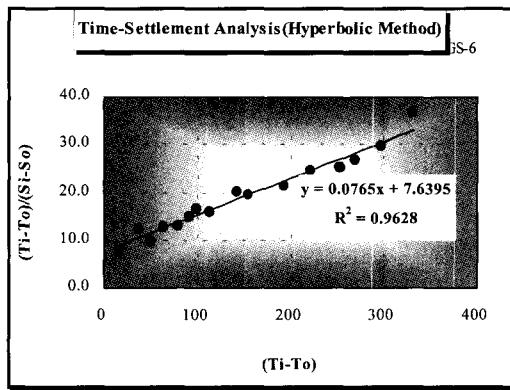
(b) Zone-II



(c) Zone-III



(d) Zone-IV



(e) Zone-V

그림 19. 침하계측에 의한 잔류침하량 예측

표 11. 침하계측에 의한 잔류침하량 예측결과

구 분	대표 지점	예측잔류침하량(mm)	현재침하량(mm)	허용침하량(mm)	평 가	비 고
Zone-I	GS - 46	17.80	17.0	25.4	O.K	
Zone-II	GS - 52	20.92	19.0	25.4	O.K	
Zone-III	GS - 69	24.51	19.0	25.4	O.K	
Zone-IV	GS - 14	24.83	17.0	25.4	O.K	
Zone-V	GS - 6	10.07	6.0	25.4	O.K	

하역제에 대해 양호한 지반보강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

5.4.2 C.G.S 주입특성

C.G.S주입시공시의 주입속도는 지반의 압축성, 주입재의 유동성과 함께 매우 중요한 요소로 알려져 있다. 주입속도가 높을 경우 지반을 압밀시키는 과정에서 C.G.S 주입재가 균등한 속도로 사방으로 퍼져나가는 것이 아니라 응력이 약한 곳으로 집중되어 과잉간극수압의 증대를 초래하며 지반의 파괴거동을 유발할 수 있기 때문이다. 또한, 주입순서에 의해서도 지반의 압밀도 저하와 지하수위의 변화를 초래하여 주입효과에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 주입시공으로 인한 개량대상지역 외부로의 용기현상 및 인접구조물에의 악영향을 최소화하기 위하여 구조물이나 대상지반의 주변을 1차 주입공으로, 각 정방형배치의 주입공 중앙부에 2차 내지 3차로 주입공을 배치하는 주입방안이 바람직한 것으로 판단된다.

5.4.3 C.G.S주입시 침하·용기 특성

계측관리를 통한 침하·용기특성을 살펴본 결과, C.G.S 설치직경을 증가하려면 주입압을 증가시켜야 한다. 그러나, 주입압을 증가시키면 주변지반이 교란되어 수압파쇄현상을 유발할 수 있는 문제가 있다. 본 연구에서는 주입방식이 정압주입이 아닌 각 지역별 여건에 따라 주입압을 다르게 적용하였으며, 시험시공을 통하여 적정주입압의 범위를 산정하였다. 이러한 방법으로 어느 정도의 지반개량효과는 관측되나, 추후 시공에서는 보다 체계적인 수평, 수직변위의 검측을 통하여 적절한 주입압을 산정하는 기법도 시도해 볼 필요가 있다.

5.4.4 압밀특성

C.G.S주입시 주변지반의 과잉간극수압이 크게 발생하는 것은 연약한 포화점성토에 대하여 몰탈주입에 의한 방사방향압축에 의한 영향으로 사료되며, 주입완료 후 안정화시기에 수렴치로 나타나는 0.2~1.7 t/m²의 과잉간극수압은 압밀의 종료율을 의미하지 않는다. 이는 C.G.S고결체는 시멘트 몰탈이므로 배수재의 역할이 불가능한 것으로서, 발생된 과잉간극수압이 완전 소산되려면 많은 시간이 소요될 것으로 판단된다. 또한, 안정화시기에 과잉간극수압이 크게 발생하는 원인은 본 시공지역이 당초 부지공사중 매립성토하중에 의한 발생 과잉간극수압이 소산 완료되지 못하고 압밀진행중인

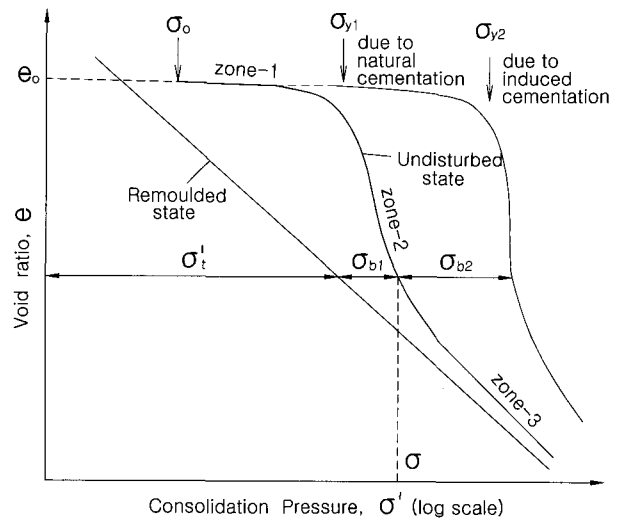


그림 20. 원지반에서 지반개량특성에 따른 압밀거동특성 비교(Nagaraj, 2000)

현상이 주요 원인인 것으로 판단된다.

압밀시험결과로부터 평가된 압축지수는 C.G.S주입 후 감소하는 경향으로 나타났다. 일반적으로 압축지수가 감소하는 것은 시료의 교란에 의한 영향 또는 지반의 강성증대로 인한 압축특성의 개선을 의미한다. 그러나 원지반이 압밀진행중인 점을 고려하면 부지조성 공사 중 샌드파일 시공에 의한 지반교란 후 시간경과에 따른 압밀특성회복(또는 강도회복)이 그림 20에서와 같이 지반개량에 의해 압축지수가 증가될 수 있는 것이다.

본 시공결과로부터 압밀특성의 개선을 정확히 파악하기는 다소 어려우며 강도특성의 개선에 따른 압밀특성의 개선효과를 유추할 수 있는 사항 정도로 여겨지므로 향후 다양한 시험결과와의 분석을 통하여 압밀특성 파악이 가능할 것으로 본다. 그러나 현재의 압밀상태를 표현할 수 있는 선행압밀하중은 원지반과 비교하여 C.G.S 주입후 전반적인 증가경향을 보이므로 압밀특성이 개선된 것으로 판단할 수 있을 것이다.

5.5 향후 연구과제

5.5.1 주입 Pattern 및 지지력 특성

C.G.S주입에 의한 주변지반의 개량특성을 파악하기 위하여 원지반과 C.G.S주입 후 현장 및 실내토질시험에 대한 자료를 분석한 결과, 지반강도의 증진 및 지지력특성의 개선을 확인하였다.

한편, C.G.S주입에 따른 주변지반의 지지력 증대효과는 면적치환비와는 일정한 상관관계를 나타내지 않으며 적절한 C.G.S설치직경과 간격이 이루어질 때 지지력

특성이 양호하게 나타나고 있다. C.G.S 설치직경과 간격에 대해서는 아직 제대로 정립된 이론이 없는 바 시험 시공을 먼저 수행하여 현장지반조건을 반영하는 실정으로 하나의 현장시공사례로 적용성이 있다고 단정하기는 무리가 있는바 추가자료의 분석이 반드시 필요하다. 따라서, 향후 다양한 지반조건에 따른 적절한 C.G.S 설치직경 및 간격에 대한 연구가 수행되어 지지력 특성의 규명이 필요하다.

5.5.2 복합지반효과

C.G.S주입으로 인한 지반거동의 영향범위는 고결체 직경의 2배 정도이므로 그림 21에 나타난 바와 같이 C.G.S간격이 2.0m 인 경우 거의 영향권 내에 위치한다고 할 수 있다. 따라서 방사방향의 압축이 인접한 주입구까지 미치므로 적정 치환율에 의한 복합지반효과를 나타낼 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 적용한 C.G.S의 설치간격과 직경은 그 영향범위를 고려한다면 그림 22에서와 같이 일정한 하

중을 개량된 지반이 받을 수 있도록 하는 적정치환율의 상태로 볼 수 있다. 그림 22에서와 같이 적정치환율 상태인 경우 전이되는 하중이 C.G.S고결체로 집중되는 것이 아니라 개량된 지반도 그 일부를 분담하므로 보다 경제적인 시공이 될 수 있다. 한편, C.G.S주입후의 지반 침하양상에 있어서도, C.G.S고결체부의 아칭효과에 의해 지반의 부등침하가 예상되었으나, 균일침하를 나타내는 것을 볼 때, 상재하중을 C.G.S고결체뿐만 아니라 압축에 따른 지반개량으로 인하여 점토지반도 분담하여 하중을 지지하는 것으로 판단된다.

이와 같은 복합지반효과에 대하여 향후, 평판재하시험 및 토압계 설치·측정에 의한 응력분담비 파악 등을 통한 면밀한 분석을 수행하여 효과규명이 수행되어야 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 연약점성토 지반에서 암밀축진공법의

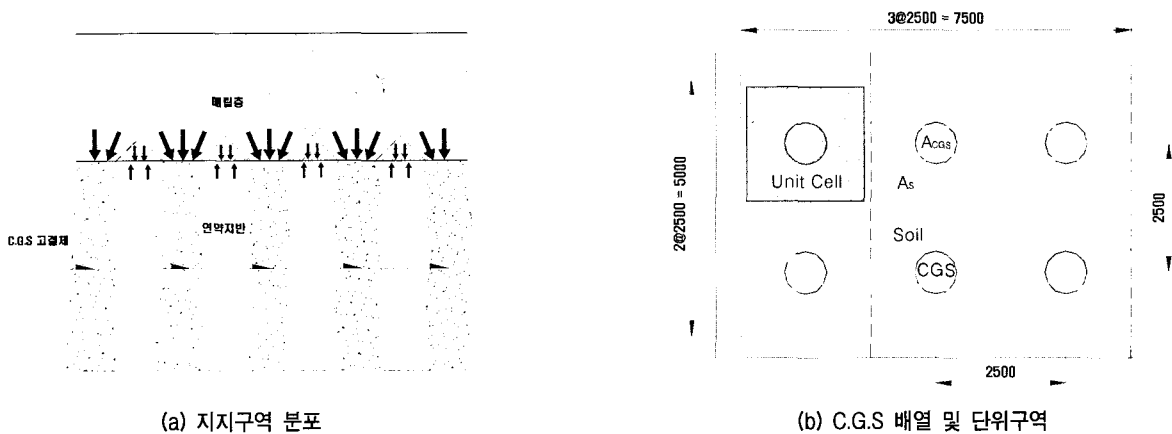


그림 21. 복합지반효과에 의한 개량특성

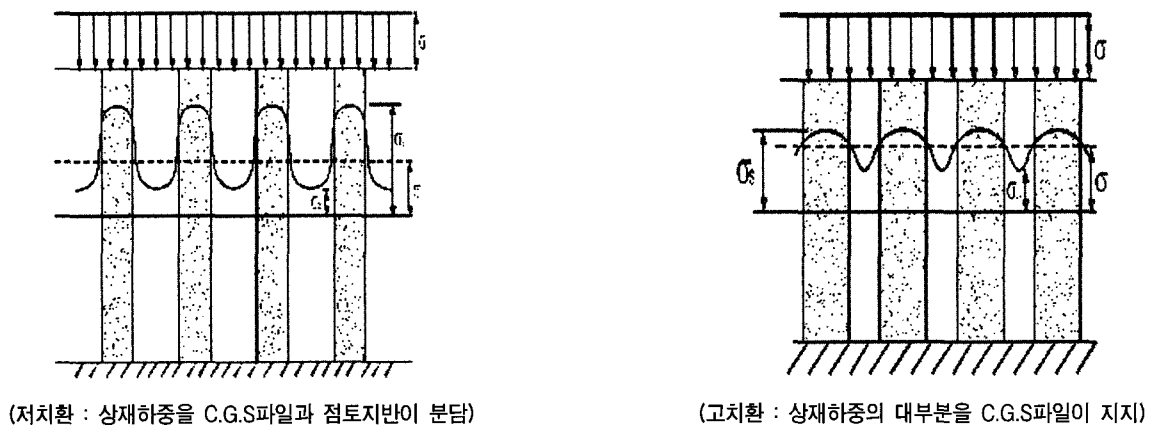


그림 22. 치환율에 따른 복합지반의 응력분담

부적절한 적용으로 인해 지반개량을 시행했음에도 불구하고, 준공된 후 지속적으로 발생하는 압밀침하를 억제하기 위하여 C.G.S공법을 적용하였으며, 그 적용성과 개량특성을 파악한 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) C.G.S공법 적용에 따른 주입 전·후의 현장 및 실내 토질시험 결과, N치가 평균 1~6정도 증가하였으며, 비배수전단강도, 과압밀비(OCR) 등이 원지반과 비교하여 C.G.S주입 후 증가하는 경향으로 나타나, 강도특성이 개선된 것으로 판단된다.
- (2) C.G.S주입에 의해 주입전과 비교하여 함수비, 압축지수, 간극비가 감소하는 경향으로 나타났으며, 선형압밀하중은 크게 증가하여 C.G.S주입에 의한 양호한 지반개량효과를 보이는 것으로 나타났다.
- (3) C.G.S주입의 적용성은 본 현장의 개량대상 지반조건(유기질점토)과 주입효과 등을 고려할 때 주입재의 배합비는 약 10:4:3, 모래(0.6) : 점토질화강토(0.25) : 석분(0.15)으로, 주입량은 천공 1m당 0.5m³, 펌핑량은 0.006m³/stroke로 주입할 경우에 양호한 효과를 보이는 것으로 판단된다.
- (4) C.G.S주입공과 약 1.0m, 2.0m 이격된 지중경사계의 수평변위를 파악한 결과, C.G.S에 의하여 조밀성이 증가되는 영향반경은 주입형성직경의 2배정도인 것으로 나타났으며, 인접구조물과의 적절한 이격과 지반조건을 고려한 적절한 주입패턴을 적용할 경우 주변지반의 교란과 주변구조물에 미치는 영향은 작을 것으로 사료된다.
- (5) 지표침하권을 측정된 결과 주입압에 의한 팽창압이 횡방향뿐만 아니라 수직으로 작용하여 지반을 융기시키는 것으로 나타났으며, 주입공에 인접할수록 융기정도는 크며, 주입공에서 이격 될수록 융기정도는 감소하는 경향을 나타내었다.
- (6) 동일한 면적치환비의 조건에서도 C.G.S형성직경이 작을수록 융기량이 작게 나타났으며, 지중경사계 측

정을 이용하여 수평변위특성을 파악한 결과, C.G.S 고결체 형성직경이 증가할수록 수평변위량이 크게 나타나므로 가능한 한 주입직경을 최소화하는 방안이 필요하다.

- (7) C.G.S고결체 자체의 강성에 의한 지지력 증가와 주입에 따른 방사방향압축에 의한 지지력증대를 종합적으로 고려해 볼 때, C.G.S공법은 지반침하억제 대책공법으로 적용성이 양호한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 천병식, 조천환, 이영근, 우근우(1997), "Compaction Grouting에 의한 지반개량 시공사례", 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, Vol.3, pp.493-496.s
2. 천병식(1998), "최신 지반주입-이론과 실제.", 원기술, pp.17-37.
3. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999a), "C.G.S에 의한 지반개량 공법 사례연구", 한국철도학회 춘계학술대회, pp.375-382.
4. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석(1999b), "C.G.S에 의한 기초지반 개량 효과에 관한 연구", 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년 학술발표회논문집, pp.1-13.
5. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석(2000a), "저유동성 몰탈형 지반 주입공법에 의한 다짐효과", 대한토목학회 2000가을학술발표회 논문집, pp.255-258.
6. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석(2000b), "저유동성 몰탈형 주입재에 의한 건물기초개량", 한국지반공학회 2000가을학술발표회 논문집, pp.71-76.
7. 한국지반공학회(1997), "지반공학시리즈6 - 연약지반", 구미서관, pp.17-18.
8. Warner James(1978), "Compaction Grouting - A Significant Case History", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.104, No.7, pp.837-847.
9. Al-Alusi H. R.(1997), "Compaction Grouting: From Practice to Theory of Grouting: Compaction, Remediation and Testing", *Geotechnical Special Pub. No.66*, pp.43-53.
10. Bowen Robert(1981), "*Grouting in Engineering Practice*", Applied Science Pub. pp.77-84.
11. W. Bandimere Samson(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*.
12. T. S. Nagaraj(2000), "*Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization*", Special Invitation Lecture, pp.1-25.

(접수일자 2003. 9. 4, 심사완료일 2003. 10. 30)