

토질의 종류에 따른 CGS공법의 지반개량효과에 관한 연구

Effects of Ground Improvement Depending on the Type of Soil by Compaction Grouting System

천 병 식*

Chun, Byung-Sik

Abstract

CGS(Compaction Grouting System) is widely used in reinforcement of structural foundation and ground improvement in soft ground. But the effects of ground improvement depending on the type of soil must be studied in order to adopt in various soils (granular soil and cohesive soil). In this study, characteristics of ground improvement (the increase of N value, increase in unit weight, vertical displacement on the ground surface) by CGS method was compared through two cases that were performed in granular and cohesive soil. The results show that the closer to the grout hole, the more increase in N value and this trend appear distinctly in granular soil. Unit weight of ground increase largely near by the grout hole and decrease in far from it independently of the soil type. The vertical displacement on the ground surface appeared in smaller area in case of granular soil than cohesive soil.

keywords : CGS, Low Slump Mortar Grout, Ground Improvement

1. 서 론

지반주입공법은 1802년 프랑스의 C. Berigny가 실시한 점토와 석회의 수용액의 지반 내에 주입시킨 것을 시초로 하여 지반개량과 차수 또는 기초보강 등의 다양한 목적으로 국외에서 활발하게 사용⁴⁾되고 있

으며, 국내에서는 1970년대 말부터 지하철 공사현장 등에서 활발하게 적용⁵⁾되기 시작하였다. 현재 국내에서는 물유리계 약액주입공법, MSG공법, 우레탄, 고압분사주입공법, 침층혼합처리공법, CGS공법 등이 단독으로 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있다. 이렇게 다양한 지반주입공법 중 저유동성 몰탈을 이용하는

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : hengdang@unitel.co.kr 011-774-3270

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

CGS공법은 부등침하된 구조물의 복원, 폐광 함몰지역 및 석회암 동굴지역에서의 지반보강, 구조물 기초의 지반보강^{8),9)} 손상된 흙댐 코어의 보수보강 등 연약지반 개량을 위하여 폭넓게 쓰이고 있으며, 작업 공간이 협소한 경우도 주변여건에 크게 구속받지 않고 시공할 수 있는 등의 특징⁶⁾을 가지고 있다.

본 공법은 현재 다양한 토질에서 더욱 폭넓게 적용되기 위하여 사질토와 점성토 등의 토질의 종류에 따른 지반개량효과에 관한 검토가 요망되고 있다.

본 연구에서는 서로 다른 토질특성을 가진 지반에서 실시한 CGS공법의 시험시공사례^{1),10)}를 통하여 각각의 지반에서 나타난 지반특성의 변화(N치의 증가율, 지중 수평변위, 지표면 수직변위, 단위중량의 증가율)를 비교하고자 하였으며, 이를 위하여 각각의 토질에서 지반특성의 변화를 파악하기 위하여 CGS 시험시공 전·후 표준관입시험, 현장 단위중량시험, 지표면 수직변위측정이 실시되었다.

2. 지반개량의 메커니즘

CGS공법은 저유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써 주변 지반을 압축 강화시키는 지반개량공법이다. 기존의 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, Jet Grouting의 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출치환'²⁾이라는 독특한 기법의 주입공법으로써 주입재가 주변지반의 공극 속으로 침투되는 것이 아니라, 고결체의 형태로 지중에 방사형의 압력을 가하여 흙을 압밀시킴으로써 토립자 사이의 공극을 감소시켜 지반이 조밀화 되도록 개량하는 공법이다. 이러한 고압의 주입으로 주변지반을 압축팽창시키는 원리를 이용하여 기울어진 피해건물의 기초층을 소요량만큼 자유자재로 들어올려 기초를 보강하는 기법인 Underpinning³⁾으로도 많이 사용되고 있다.

본 공법은 이론적 배경보다는 경험적인 방법에 의하여 주로 성장해 왔으나, 50년의 역사를 거치는 동안 많은 실험적 고찰과 함께 이론적인 접근이 이루어지고 있다. 주입과정 중 주입고결체의 형성과 팽창으로 인하여 고결체에 인접한 흙은 심각한 변형과 응력을 받

으며 그 결과 흙과 고결체 경계면에서 국부적인 피압대가 형성되고 어느 정도 이격된 곳에 있는 흙은 응력 분포가 규칙적이고 탄성적이어서, 보다 정성적인 다짐을 받는다. 본 공법의 효과를 예측하여 설계에 반영하고 그 적용성을 높이기 위하여 지반공동구 확장 메커니즘을 이해할 필요가 있는 데, CGS공법의 기본적인 이론을 위한 가정은 다음과 같다.

- 1) 흙과 주입재 사이에 뚜렷한 접촉면이 있다.
- 2) 충전과 소성변형에 의해 가장 연약한 부분을 치환하는 경향이 있다.
- 3) 주입고결체의 형태는 토질의 물리적·역학적 특성 및 상재구조물의 하중 등 여러 요인에 의하여 불규칙한 형태로 고결될 수도 있으나, 균질한 지반에서는 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. 그러므로 지중에서의 변형률은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며 균질하고 선형탄성적인 등방성 재료일 경우, 체적변형률(ϵ_v)은

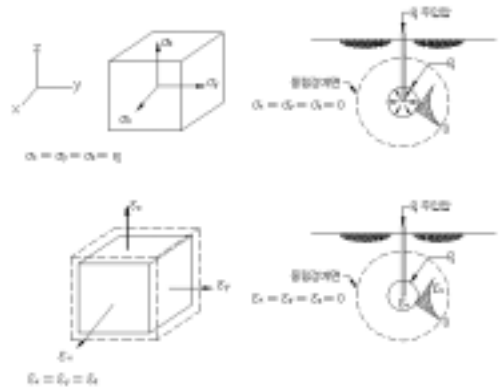


Fig. 1 주입에 따른 응력 변형관계

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

여기서,

V_g : 주입재의 체적

V_{nb} : 중립경계면내 흙의 체적

이고, 흙의 체적변형계수(E_b)를 다음과 같이 정의하면,

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

여기서,

P_g : 주입압

식 (2)에 식 (1)을 대입하면,

$$\frac{V_g}{V_{nb}} = \frac{P_g}{E_b} \quad (3)$$

Al-Alusi(11)에 의해 제안된 지반의 밀도 증가량 $\Delta\gamma$ 는 중립경계면 내의 체적을 주입에 따른 질량의 증가분으로 나눈 값이며 다음과 같다.

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta m}{V_{nb}} \quad (4)$$

여기서,

Δm : 주입에 따른 무게증가분

$$\Delta m = V_g \cdot \gamma_s = \frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b} \cdot \gamma_s \quad (5)$$

여기서,

γ_s : 주입점에서의 흙의 단위중량

그러므로 식 (5)를 식 (4)에 대입하면, CGS공법에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta\gamma$ 는

$$\Delta\gamma = \frac{\left(\frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right) \cdot \gamma_s}{V_{nb}} = \frac{P_g \cdot \gamma_s}{E_b} \quad (6)$$

천 등(7)에 의해 제안된 지반의 밀도 증가량 $\Delta\gamma$ 는 중립경계면 내의 체적에서 주입에 의한 CGS구근의

체적을 제외한 값을 주입에 따른 무게의 증가분으로 나눈 값이며 다음과 같다.

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta m}{V_{nb} - V_g} \quad (7)$$

그러므로 식 (7)을 식 (4)에 대입하면, CGS공법에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta\gamma$ 는

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= \frac{\left(\frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right) \cdot \gamma_s}{V_{nb} - \left(\frac{P_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right)} \\ &= \frac{\frac{P_g \cdot V_{nb} \cdot \gamma_s}{E_b}}{\frac{E_b \cdot V_{nb} - P_g \cdot V_{nb}}{E_b}} \\ &= \frac{P_g \cdot \gamma_s}{E_b - P_g} \end{aligned} \quad (8)$$

또한, 주입체의 반지름을 r 이라 하면, 주입공선단에서 중립경계면까지의 거리 r_0 는 식 (3)으로 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{V_g}{V_{nb}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\frac{4}{3}\pi r_0^3} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 = \frac{P_g}{E_b}$$

따라서,

$$r_0 = 3\sqrt{\frac{E_b}{p_g}} \cdot r \quad (9)$$

3. 토질의 종류에 따른 개량효과

3.1 점토층에서의 개량효과

3.1.1 원지반 토질특성

시험시공 현장은 강원도 OOAPT 단지로써 시추조

사 결과, 지표로부터 매립토층, 충적층, 풍화대층 순으로 구성되어 있다. 상부의 매립층은 지표로부터 심도 약 3m까지 분포하며 N치 11~18회/30cm로 입도가 불량한 모래(SP 또는 SP-SC) 혹은 모래섞인 점토로 구성되어 있고 중간정도의 상대밀도를 나타낸다. 충적층의 경우 심도 약 3~23m까지 분포하며 N치는 2~50회/30cm이고 상부에는 150%~200%의 고풍수비의 비중이 낮은 유기질점토가 있고 하부에는 무기질의 실트층이 존재한다. 풍화대층의 경우 약 23m이하의 심도에 분포하며 통일분류상 SP-SM을 나타내고 완전 풍화상태로 약한~아주 약한 강도를 보이고 있다

3.1.2 주입공 배치 및 현장시험 계획

CGS주입 시 주입공의 배치형태는 Fig. 2와 같은 삼각형 및 정방형 배치이며, CGS구근의 직경과 배치간격은 A-Type(2.0m간격, $\phi 800$), B-Type(2.5m

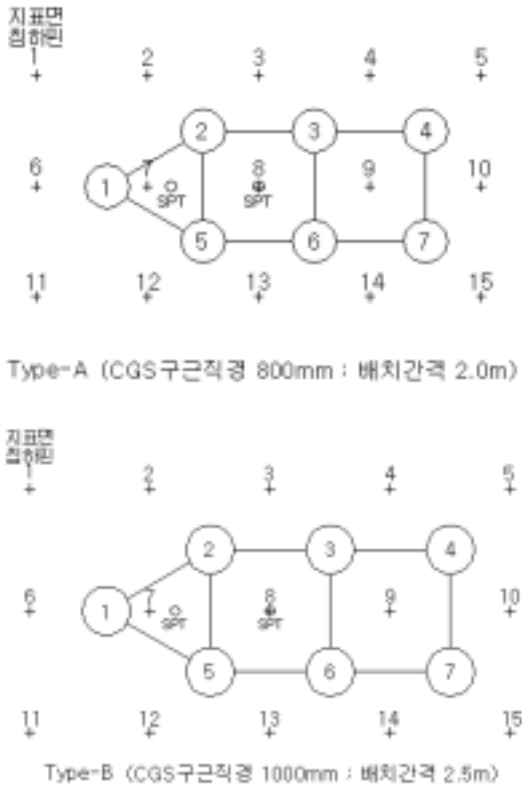


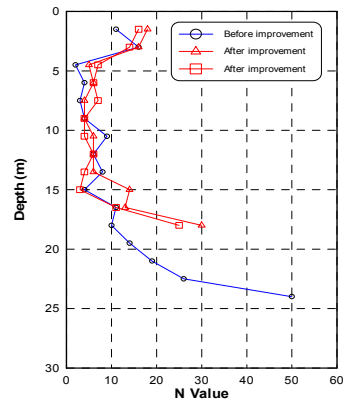
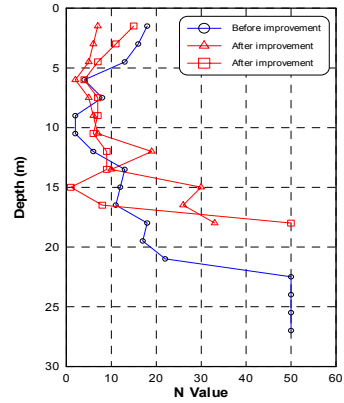
Fig. 2 주입공의 배치 및 현장시험 계획

간격, $\phi 1000$)으로 구분하여 실시하였다. 주입전·후의 개량효과를 파악하기 위하여 Type별로 표준관입시험을 실시하였으며 불교란시료를 채취하여 주입에 의한 단위중량의 증가를 파악하고자 하였다.

CGS주입에 의한 지반의 수직변위를 파악하기 위한 계측계획은 Fig. 2와 같이 15개의 지표면침하핀을 설치하여 주입에 의한 지표면의 수직변위를 측정하였다.

3.1.3 표준관입시험 결과

원지반 조건과 CGS주입후 조건으로 구분하여 실시한 표준관입시험 결과는 Fig. 3과 같다.



- 주입전
- △ 주입후 삼각형 배치
- 주입후 정방형 배치

Fig. 3 점토층에서 CGS 주입전·후 N치의 변화

Type별 평균 증가량은 A-Type(2.0m간격, $\phi 800$)에서 1.8, B-Type (2.5m간격, $\phi 1000$)에서 2.5였으며 그림에서와 같이 지반처리 대상지층인 G.L(-)6~12m의 고탍수비의 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)하는 경향을 보였다.

N치의 증가는 심도가 깊을수록 크게 일어났는데, 이는 상부토층에서는 주입압에 의해 지반을 압축하는 힘이 지반을 조밀화 하기보다는 지표면 용기를 일으키는데 사용되었기 때문이며 하부, 특히 G.L(-)13m 이하에서 N치의 증가가 급격히 일어난 이유는 G.L(-)13m 부터가 지반의 구속응력이 주입압을 초과하는 상태이기 때문이라고 판단되다.

3.1.4 현장 단위중량 측정결과

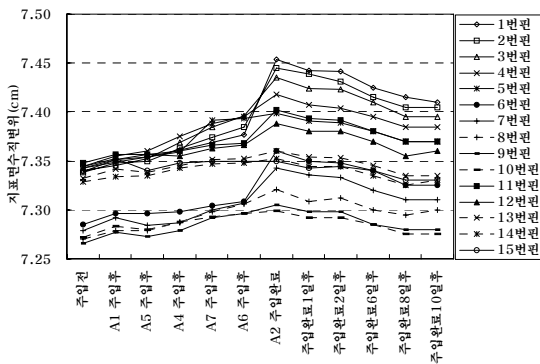
CGS 주입전·후 주입에 의한 단위중량의 변화를 측정하기 위하여 불교란 시료를 채취하여 단위중량을

측정한 결과는 Table 1과 같다. 주입 후 단위중량은 A-Type 에서는 $0.08t/m^3 \sim 0.18t/m^3$, B-Type에서는 $0.02t/m^3 \sim 0.16t/m^3$ 증가한 것으로 나타났다.

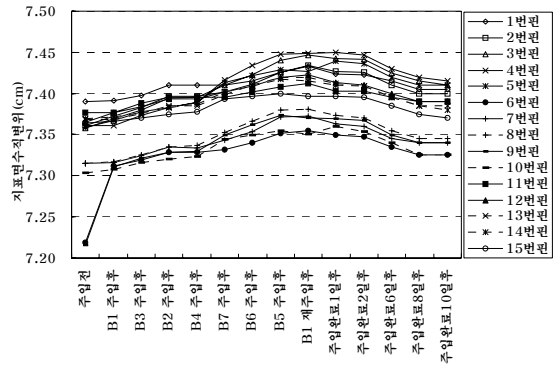
3.1.5 지표면 수직변위 측정결과

CGS주입에 의한 지표면 수직변위를 파악하기 위하여 각 Type별로 15개소씩 지표면 침하핀을 설치하여 계측관리를 실시한 결과 시공과정에서 지표면 수직변위량은 Fig. 4와 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 과정 중 용기되었던 지표면이 침하하였는데 주입완료 10일경과후에는 A-Type이 평균 3cm, B-Type이 평균 4cm정도 용기된 것으로 나타났다. Type에 상관없이 평균 용기량이 비슷하게 나타난 이유는 A-Type과 B-Type이 CGS구근의 직경이 다르지만, 배치간격 또한 같은 비율로 늘어나서 개량율이 Type과 상관없이 일정하기 때문이라고 판단된다.



(a) A-Type



(b) B-Type

Fig. 4 점토층에서 CGS주입에 따른 지표면 수직변위

Table 1 사질토층에서 주입 전·후 현장단위중량의 변화(G.L(-)8m)

	A-Type		B-Type	
	삼각형배치	사각형배치	삼각형배치	사각형배치
주입전(t/m^3)	1.26	1.26	1.24	1.24
주입후(t/m^3)	1.44	1.34	1.40	1.26
증가량(t/m^3)	0.18	0.08	0.16	0.02
증가율 (%)	14.29	6.35	12.90	1.61

3.2 사질토층에서의 개량효과

3.2.1 원지반 토질특성

시험시공 현장은 경기도 OO시에 위치하고 있으며 7m~8m로 성토된 매립 토사지반이다. 시추자료에 의하면 본 현장은 통일분류상 SW인 화강풍화토층으로 구성되어 있고, 주입패턴에 따라 Fig. 5와 같이 Type-1, Type-2, Type-3으로 구분하였는데 Type별 기본물성시험을 실시한 결과를 요약 정리하면 Table 2와 같다. 원지반에 대한 표준관입시험 결과는 Table 3과 같으며 N치를 이용하여 상대밀도를 추정하면 원지반은 대단히 느슨한 지반으로 나타났다.

각 Type별로 깊이에 따라 원지반에 대한 들밀도시험을 실시한 결과는 Table 4와 같다. 시험결과 Type-1은 1.76~1.83 t/m³, Type-2는 1.76~1.80 t/m³, Type-3는 1.75~1.80 t/m³ 으로 각각의 Type에서 거의 같은 값이 나타났다.

3.2.3 주입공 배치 및 현장시험 계획

CGS주입을 위한 주입공은 Fig. 5와 같이 주입공이 격자형으로 배치하였으며 주입공의 배치간격에 따라 Type-1, Type-2, Type-3로 구분하여 주입이 이루어졌고 주입전·후 격자 중앙에서 표준관입시험 및 현장 단위중량시험이 실시되었다.

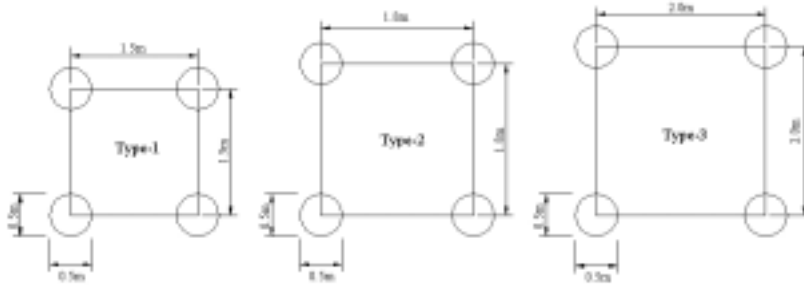


Fig. 5 주입공의 배치

Table 2 원지반(사질토층)에 대한 기본물성 시험결과

	자연함수비 $w_N(\%)$	액성한계 $w_L(\%)$	소성한계 $w_P(\%)$	비중 G_s	통일분류 USCS
Type-1	7.9	26.5	N.P	2.63	SW
Type-2	7.2	25.9	N.P	2.62	SW
Type-3	7.8	27.6	N.P	2.61	SW

Table 3 원지반(사질토층)에 대한 표준관입시험 결과

깊이(G.L(-)m)	관입저항치 (회/30cm)		
	Type-1	Type-2	Type-3
1.5	3	4	4
3.0	3	4	5
4.5	4	5	5
6.0	5	6	5

Table 4 원지반(사질토층)에 대한 들밀도시험 결과

깊이(G.L(-)m)	단위중량 (t/m ³)		
	Type-1	Type-2	Type-3
지표면	1.76	1.76	1.75
0.7	1.83	1.79	1.79
1.2	1.82	1.80	1.80

현장 단위중량시험은 주입전·후의 단위중량변화를 측정하기 위하여 KS F 2311 모래치환법에 의한 흙의 단위중량시험을 주입전에는 지표면에서 주입후에는 지표면, G.L(-)0.7m, G.L(-)1.2m에서 실시하였다. 시험은 각 Type별로 실시하였으며 시험위치는 각 Type별 격자의 중심부에서 실시하였다.

표준관입시험은 주입전·후의 N치의 변화를 측정하기 위하여 KS F 2307 표준관입시험을 주입전·후 실시하였다. 시험은 각 Type별로 실시하였으며 시험위치는 들밀도시험과 마찬가지로 주입공의 각 Type별 격자의 중심부에서, 심도는 G.L(-)1.5m에서 G.L(-)6.0m까지 실시하였다.

주입으로 인한 지표면 수직변위를 측정하기 위하여 주입전에 지표면침하판을 Fig. 6, Fig. 7과 같이 주입공을 중심으로 각각 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m를

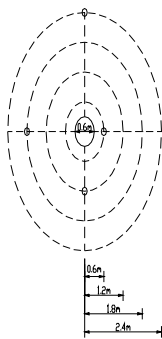


Fig. 6 지표면 침하판의 배치

이격시켜 지표면에 설치하였다. 레벨측정은 주입전, 주입중 2회, 주입직후에 실시하였다.

3.3.3 표준관입시험 결과

주입전·후의 Type별 표준관입시험의 결과는 Table 5와 같다. 먼저 표준관입시험 결과를 Type별로 세분화하여 살펴보면 Type-1은 개량전 3~5에서 6~9로 N치가 3~4정도 증가하였고 Type-2와 Type-3는 각각 개량전 4~6, 4~5에서 개량후 6~8, 5~6으로 미소한 증가를 보였다.

3.3.4 현장 단위중량시험 결과

개량 전·후 지표면, G.L(-)0.7m, G.L(-)1.2m에서 실시한 현장 들밀도시험의 결과는 Table 6과 같다.

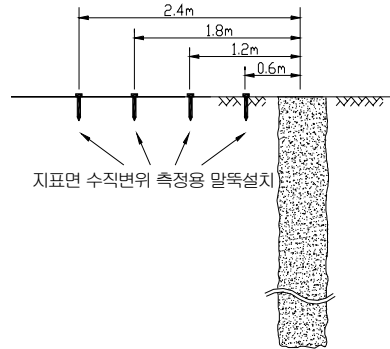


Fig. 7 지표면침하판 설치단면도

Table 5 사질토층에서 주입후 표준관입시험 결과 ()은 주입전 N치

깊이(G.L(-)m)	관입저항치 (회/30cm)		
	Type-1	Type-2	Type-3
1.5	6 (3)	6 (4)	5 (4)
3.0	6 (3)	7 (4)	5 (5)
4.5	8 (4)	8 (5)	6 (5)
6.0	9 (5)	8 (6)	6 (5)

Table 6 사질토층에서 현장 들밀도 시험결과 ()는 주입전 단위중량

깊이(G.L(-)m)	단위중량 (t/m ³)		
	Type-1	Type-2	Type-3
지표면	1.83 (1.76)	1.77 (1.76)	1.75 (1.75)
0.7	1.83 (1.80)	1.79 (1.77)	1.79 (1.79)
1.2	1.85 (1.82)	1.81 (1.80)	1.80 (1.80)

주입에 의한 지표면의 단위중량증가의 경향을 살펴 보면 Type-1, Type-2의 경우 주입전 단위중량 1.76 t/m³, 1.76 t/m³에서 주입후 각각 1.83 t/m³, 1.75 t/m³으로 증가하였으며, Type-3의 경우 주입 전·후로 단위중량의 변화가 없었다. G.L(-)0.7m와 G.L(-)1.2m에서 실시된 들밀도시험 또한 지표면에서 실시된 들밀도 시험과 유사하게 주입공의 간격이 작을수록 단위중량의 증가량이 큰 양상을 보였다.

3.3.5 지표면 수직변위 측정결과

주입으로 인한 지표면 수직변위량을 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 주입에 의한 지표면 수직변위는 주입과 더불어 계속하여 증가하였으며, 주입완료 후에는 주입공으로부터 0.6m지점에서 최대 7.6cm까지 발생하였고 1.2m지점에서 2.8cm~4.9cm, 1.8m지점에서 0.2cm~0.5cm, 2.4m지점에서 0cm~0.2cm 발생하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 N치의 증가

표준관입시험 결과, Fig. 9와 같이 점토층에서는 N치의 증가율이 최고 220% 까지 발생하였고, 증가폭이 매우 넓었으며 사질토층에서는 N치의 증가율이 최고 100% 까지 발생하였고, 증가율의 범위가 점토층에 비하여 좁은 것으로 나타났다.

이는 점토층에서 주입시 사질토층에서 보다 주변지

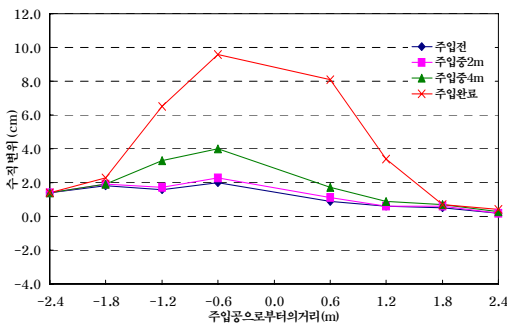


Fig. 8 지표면 레벨 측정결과

반의 횡방향 변위가 크게 발생되었기 때문이라고 사료된다. 또한 주입에 의해 형성된 CGS구근의 직경을 1.0D라고 하면 사질토층의 경우 주입공으로부터 이격거리가 2.1D, 2.5D, 2.8D로 커질수록 N치의 증가율 또한 커지는데 점토층의 경우 이격거리와 증가율과는 무관한 N치의 증가를 보여 CGS주입에 의한 N치의 증가는 점토층보다는 사질토층에서 이격거리와 더욱 밀접한 상관관계를 갖는 것으로 판단되었다. 그러므로 사질토에는 CGS시공 전 기존의 시공사례 등을 통하여 N치의 증가를 어느 정도 예측할 수 있지만, 점토층의 경우에는 N치의 증가량을 예측하기 위해서는 반드시 시험시공을 실시해야 한다고 판단된다.

4.2 단위중량의 증가

각각의 현장에서 단위중량을 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 점토층의 경우 G.L(-)8m에서 최고 12%의 단위중량 증가가 발생하였고 사질토층의 경우 최고 4%의 미소한 증가만이 발생하였다. 점토층과 사질토층은 모두 주입공으로부터 거리가 가까울수록 단위중량의 증가율이 크고 주입공으로부터 거리가 멀수록 단위중량의 증가율은 작은 추세를 나타내었다.

4.3 지표면 수직변위

CGS에 의한 지표면 수직변위를 측정하기 위하여 지표면 침하판을 설치하여 주입전·후 레벨측량을 실시한 결과를 주입공과의 거리별로 나타내면 Fig. 11과 같다.

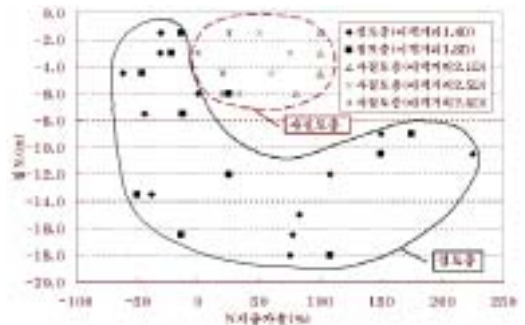


Fig. 9 CGS시공에 의한 토질별 N치의 증가율

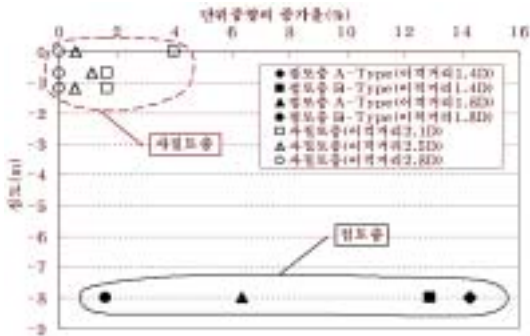


Fig. 10 CGS시공에 의한 토질별 지표면 단위중량의 증가율

점토층에서는 주입공과의 거리가 멀어질수록 지표면 수직변위가 서서히 감소하였는데 감소추세를 고려하면 주입에 의한 영향반경은 약 5.0D로 판단된다. 사질토층의 경우에는 점토층에서보다 급한 기울기를 보이며 주입공과의 거리가 멀어질수록 감소하는 추세를 나타내고 있으며 영향반경은 3.0D~4.0D로 판단된다. 토질특성에 따른 지표면 수직변위특성을 살펴보면, 사질토의 경우 주입공과의 거리에 따른 지표면 수직변위의 기울기가 급하고 영향반경이 작는데 비하여, 실트질 점토층의 경우 주입공과의 거리에 따른 지표면 수직변위의 기울기가 완만하고 영향반경이 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 점토층과 사질토층에서 CGS공법의 시험 시공을 실시한 결과를 통하여 각각의 토질에서 나타나는 지반개량특성을 비교·분석한 것으로써, 그 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 표준관입시험 결과, 점토층에서는 N치의 증가율이 심도에 따라 폭넓은 범위를 가지고 있으며 주입공과의 거리와 N치의 증가율과는 상관관계가 작고, 느슨한 사질토층의 경우 N치는 최고 100%까지의 좁은 범위 내에서 증가하였고 주입공과의 거리가 가까울수록 N치의 증가율이 커지는 뚜렷한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

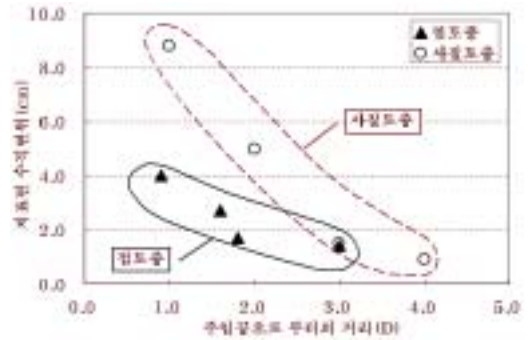


Fig. 11 CGS시공에 의한 토질별 지표면 수직변위

- (2) 현장 단위중량은 점토층의 경우 G.L(-)8m에서 최고 14% 증가하였고 사질토층에서는 최고 4%의 미소한 증가만이 발생하였으며, 토질특성에 관계없이 모두 주입공으로부터의 거리가 가까울수록 단위중량의 증가가 크고 주입공으로부터의 거리가 멀어질수록 단위중량의 증가는 작은 추세를 나타내었다.
- (3) 지표면 침하핀을 설치하여 CGS에 의한 지표면 수직변위량을 측정된 결과, 주입공과의 거리가 멀어질수록 지표면 수직변위가 감소하였는데, 사질토층의 경우 용기범위가 작고 감소하는 기울기가 점토층의 경우보다 급하였으며, 점토층의 경우 용기범위가 크고 주입공과의 거리가 멀어질수록 수직변위가 완만하게 감소하였다.

감사의 글

본 논문은 2001년 한양대학교 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄에서 지원하는 연구과제인 "고기능성 첨단 주입약액의 개발연구"의 연구수행 결과의 일부를 밝히며, 아울러 연구비를 지원해준 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 강인성, 고용일, 정의원, 김우중, 저유동성 몰탈주입에 의한 지반변형의 기존 이론식에 대한 고찰, 한국지반환경공학회 약액주입 및 고화처리 기술위원회 2001학술

- 발표회 논문집, 2001, pp. 67~79.
2. 천병식, 임해식, 조천환, 정현철, 수도권 신국제공항 전용철도 노반 실시설계의 Box구조물 지반보강공법 검토 연구, 한양대학교부설 건설연구소, 1997a, pp. 7~21.
 3. 천병식, 조천환, 이영근, 우근우, Compaction Grouting에 의한 지반보강 시공사례, 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, 1997b, Vol.3, pp. 493~496.
 4. 천병식, 최신 지반주입 -이론과 실제-, 원기술, 1998a, pp. 17~37.
 5. 천병식, 지반공학 -이론과 실제-, 구미서관, 1998b, pp. 684~729.
 6. 천병식, 여유현, 최현석, 오일석, CGS에 의한 기초지반 보강 효과에 관한 연구, 한국지반공학회 연약지반처리위원회, 1999년 학술발표회논문집, 1999, pp. 1~13.
 7. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석, 저유동성 몰탈형 지반 주입공법에 의한 다짐효과, 대한토목학회 2000가을학술발표회논문집, 2000a, pp. 255~258.
 8. 천병식, 권형석, 정의원, CGS공법에 의한 기초지반보강, 한국지반공학회 2000년 봄 학술발표회논문집, 2000b, pp. 441~448.
 9. 천병식, 강인성, 고용일, 권형석, 저유동성 몰탈형 주입재에 의한 건물기초보강, 한국지반공학회 2000가을학술발표회 논문집, 2000c, pp. 71~76.
 10. 천병식, 정영교, 여유현, 양진석, 김우중, 김진수, 연약지반의 지반침하 방지공법으로써 CGS공법의 시공사례연구, 한국구조물진단학회 2001봄학술발표회 논문집 Vol.5. No.1, 2001, pp. 225~232.
 11. H.R. Al-Alusi, Compaction Grouting : From Practice to Theory of Grouting : Compaction, Remediation and Testing, ASCE Geotechnical Special Publication No.66, 1997, pp. 43~53.

(접수일자 : 2001년 12월 27일)