

저유동성 몰탈주입 적용지반의 거동에 관한 연구

A Study on the Deformation of Ground by the Low Slump Mortar Grouting

도 종 남¹⁾ · 이 진 규¹⁾ · 천 병 식[†]

Do, Jongnam · Lee, Jinkyu · Chun, Byungsik

ABSTRACT : Low slump mortar grouting is widely used in reinforcement of structural foundation and ground improvement in soft ground, and has advantage which construction is possible in insufficient space. However it has been not yet studied sufficiently to estimate the effect of ground improvement in design step and to prove the estimating method. So the method must be developed in order to use the low slump mortar grouting method in various cases. In this study, the field tests were performed in the reclaimed soils to measure the effect of ground improvement. Then it was compared with what was calculated by the existing formula that was formerly suggested. The results show that the value from the formula was similar with the value from the field tests. Also it was proved that the formula was available to estimate the effect of ground improvement in the loose granular soils.

Keywords : Low slump mortar grouting, Ground improvement, Reinforcement of structural foundation

요 지 : 저유동성 몰탈주입은 구조물기초의 보강이나 연약지반 개량 등에 폭넓게 쓰이고 있으며, 작업 공간이 협소한 경우도 주변 여건에 크게 구속받지 않고 시공할 수 있는 등 매우 유리한 특징을 가지고 있다. 그러나 현재 저유동성 몰탈주입공법의 설계단계에서 적용할 수 있는 개량효과 및 영향 반경에 대한 예측방법과 이에 대한 검증이 이루어지지 않아 지반보강공법으로써의 다양한 적용을 위하여 이에 대한 정립이 필요하다. 본 연구에서는 매립토층에서 저유동성 몰탈주입 후 현장시험을 실시하여 주입에 의한 지반개량 효과를 확인하고, 이를 기존의 제안된 개량효과에 대한 이론식으로 계산된 값과 비교함으로써 이론식의 적용성을 평가하고자 하였다. 연구결과, 저유동성 몰탈주입에 의해 개량효과가 매우 우수함을 확인할 수 있었으며, 이를 기존의 이론식과 비교한 결과 서로 유사한 결과를 나타내어 연구대상 현장과 유사한 느슨한 사질토의 경우 기존의 이론식은 적용성이 양호한 것으로 판단된다.

주요어 : 저유동성 몰탈주입, 지반개량, 구조물 기초보강

1. 서 론

저유동성 몰탈주입공법은 부등침하된 구조물의 복원, 폐광함몰 지역 및 석회암 동굴지역에서의 지반보강, 연약지반에서 구조물 기초의 지반보강, 손상된 흙댐 코어의 보수보강 등, 연약지반 개량을 위하여 폭넓게 쓰이고 있으며 작업 공간이 협소한 경우도 주변여건에 크게 구속받지 않고 시공할 수 있는 등 매우 우수한 특징을 가지고 있다(천병식 등, 2001).

그러나 현재 저유동성 몰탈주입공법의 설계단계에서 적용할 수 있는 개량효과 및 영향 반경에 대한 예측방법과 이에 대한 검증이 이루어지지 않아 지반보강공법으로써의 다양한 적용을 위하여 이에 대한 정립이 필요하다(천병식 등, 2003).

따라서, 본 연구에서는 매립토층에서 저유동성 몰탈주입

후 현장시험(들밀도시험, 표준관입시험) 및 지반변위 계측을 실시하여 주입에 의한 지반개량 효과(단위중량의 증가) 및 영향 반경을 확인하고 이를 H.R.Al-Alusi(1997)에 의하여 제안된 개량효과(밀도증가량 $\Delta\gamma$) 및 영향 반경(r_0)에 대한 이론식에 의해 계산된 값과 비교함으로써 이론식의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 지반개량 메커니즘

2.1 저유동성 몰탈주입공법의 원리

저유동성 몰탈주입(Low Slump Mortar Grouting) 공법은 저유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써 주변 지반을 압축 강화시키는 지반개량공법으로 그림 1과 같이 기존의 3가지 주입방식 즉,

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

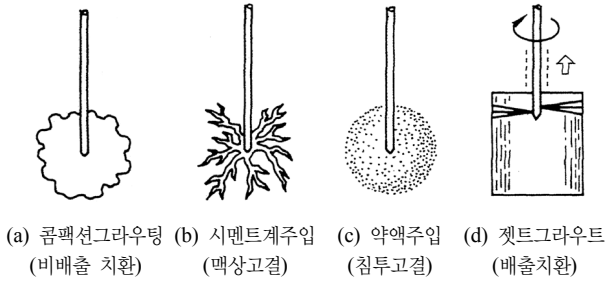


그림 1. 주입공법별 주입방식 비교

시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, Jet Grouting의 배출치환 등과는 전혀 다른 ‘비배출 치환’이라는 독특한 기법의 주입공법이다(천병식 등, 1997a).

저유동성 몰탈주입공법은 주입재가 주변지반의 공극 속으로 침투되는 것이 아니라, 고결체의 형태로 지중에 방사형의 압력을 가하여 흙을 압밀시킴으로써 토립자 사이의 공극을 감소시켜 지반이 조밀화 되도록 개량하는 공법이다. 또한, 고압주입으로 주변지반을 압축팽창 시키는 원리를 이용하여 기울어진 피해건물의 기초층을 소요량만큼 자유자재로 들어 올려 기초를 보강하는 기법인 언더피닝으로도 많이 사용되고 있다(천병식 등, 1997b; Warner, 1978).

2.2 다짐효과 및 영향 반경에 관한 이론

저유동성 몰탈주입공법은 이론적 배경보다는 경험적인 방법에 의하여 주로 발전해 왔으나, 50년의 역사를 거치는 동안 많은 실험적 연구와 함께 이론적인 접근이 이루어지고 있다. 주입과정 중 주입고결체의 형성과 팽창으로 인하여 고결체에 인접한 흙은 심각한 변형과 응력을 받으며 그 결과 흙과 고결체 경계면에서 국부적인 피압대가 형성되고 어느 정도 이격된 곳에 있는 흙은 응력분포가 규칙적이고 탄성적이어서, 보다 정성적인 콤팩션을 받는다. 본 공법의 효과를 예측하여 설계에 반영하고 그 적용성을 높이기 위하여 지반공동구 확장 메커니즘을 이해할 필요가 있는데, 저유동성 몰탈주입공법의 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 대략 원기둥 형태로 형성된다.

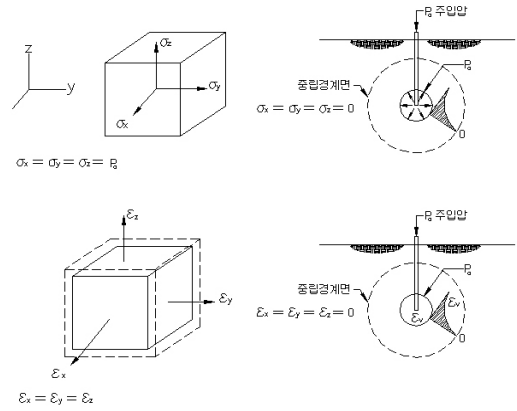


그림 2. 주입에 따른 응력 변형관계(H.R.Al-Alusi, 1997)

균질하고 등방성인 지반일 경우 지중에 가해지는 주입압은 주입공의 선단을 중심으로 한 구형의 중립경계면을 통해 소산되고, 그 중립경계면에서는 주입에 따른 응력과 변형의 영향은 없다(천병식, 1998).

그러므로 지중에서의 변형률은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며 균질하고 선형탄성적인 등방성 재료일 경우, 체적변형률은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(H.R.Al-Alusi, 1997).

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

여기서, V_g : 주입재의 체적

V_{nb} : 중립경계면내 흙의 체적

흙의 체적변형계수는 식 (2)와 같이 정의될 수 있고, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 지반의 밀도증가량($\Delta\gamma$)과 지반주입에 따른 질량증가분(Δm)은 식 (4) 및 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\begin{aligned} \frac{V_g}{V_{nb}} &= \frac{p_g}{E_b} \\ \therefore V_g &= \frac{p_g \cdot V_{nb}}{E_b} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\Delta m = V_g \cdot \gamma_s \quad (5)$$

따라서 식 (4)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 여기에 식 (3)을 대입하면 저유동성 몰탈주입공법에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta\gamma$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\gamma = \frac{V_g \cdot \gamma_s}{V_{nb} - V_g} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= \frac{\left(\frac{p_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right) \cdot \gamma_s}{V_{nb} - \left(\frac{p_g \cdot V_{nb}}{E_b}\right)} \\ &= \frac{\frac{p_g \cdot V_{nb} \cdot \gamma_s}{E_b}}{\frac{E_b \cdot V_{nb} - p_g \cdot V_{nb}}{E_b}} \\ \rightarrow \Delta\gamma &= \frac{p_g - \gamma_s}{E_b - p_g} \quad (7) \end{aligned}$$

또한, 주입재의 반지름을 r 이라 하면, 주입공선단에서 중립 경계면까지의 거리 r_0 는 식 (3)에 의해 식 (8)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{V_g}{V_{nb}} &= \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\frac{4}{3}\pi r_0^3} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 = \frac{p_g}{E_b} \\ \therefore r_0 &= \sqrt[3]{\frac{E_b}{p_g}} \cdot r \quad (8) \end{aligned}$$

3. 시험시공

3.1 시험시공 개요

3.1.1 주입공의 배치형태 및 간격

본 시험현장에서는 그림 3, 4와 같이 격자형 배치와 일점

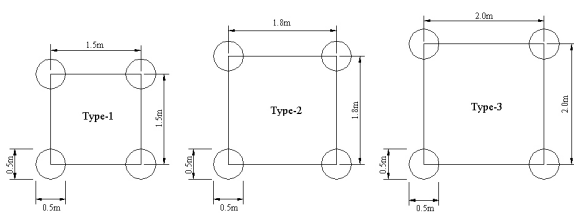


그림 3. 격자형 배치

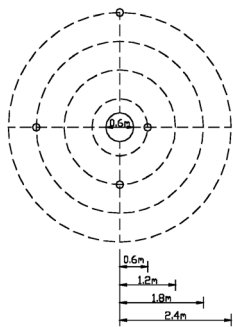


그림 4. 일점형 배치

형 배치의 2가지 패턴으로 주입공을 배치하였다.

격자형 배치는 저유동성 몰탈을 이용한 지반개량 시에 일반적으로 적용되는 배치형태이며 본 시험현장에서는 배치 간격을 각각 1.5m, 1.8m, 2.0m로 변화시켜 Type-1, Type-2, Type-3으로 세분화하였고, 주입 전·후 표준관입시험이 실시되었다.

일점형 배치에서는 주입 전·후 경사계, 토압계, 지표침하핀을 이용하여 횡 방향 변위, 횡 방향 토압, 지표면 용기량을 측정하였는데, 일점형 배치는 주변에 위치한 주입공이 없이 단순히 한 지점에 주입하는 것으로 그림 4와 같이 주입공 주변에 일정한 간격으로 경사계, 토압계, 지표면 침하핀을 설치할 수 있도록 하였다.

3.1.2 주입재의 구성과 배합

본 연구에서는 쇄석:점토질 화강토:시멘트의 중량비를 시공현장에서 사용하는 배합비와 동일하게 2:2:1로 하는 배합비를 적용하였다. 쇄석은 석산에서 생산된 10mm이하의 골재로 자갈, 모래, 미량의 실트질을 함유한 골재를 사용하였으며 점토질 화강토는 현장 근처에서 채취하여 사용하였다. 각각의 주입재는 규정 슬럼프치를 유지토록 물을 첨가하여 배합하였으며, 주입 전 허용슬럼프치는 1 inch이하의 범위로 슬럼프 테스트를 매 공마다 실시하여 주입재의 유동성을 갖지 않도록 하였다.

3.1.3 주입압과 주입량

저유동성 몰탈주입 시공 시 1 step이 완료되는 시점을 결정하는 데는 정압주입과 정량주입 두가지 방식이 있다. 전자는 일정한 주입압을 설정하여 주입압이 그 이상을 초과하게 되면 1 step을 종료하는 방식이고, 후자는 계획된 주입량이 주입되면 주입압과 상관없이 1 step을 종료하는 방식이다. 주입량이 많을수록 지반개량으로써의 주입효과는 좋으나, 정압주입방법으로 허용주입압을 통해 조절해야 한다. 본 시험현장에서는 목표된 주입량을 주입하는 정량주입(R.D.Q : Reached Desire Quantity)으로 실시하였고, 최대허용주입압은 약 5,000kPa으로 제한하였다. 이러한 주입과 인발로 구성된 step을 반복적으로 시행한 후 공 당 주입을 종료하였다.

주입은 주입펌프에 의해 어느 정도의 펌핑간격(보통 6~10초)을 두고 행해지므로, 펌핑 시 1 stroke 당 주입량을 미리 계량하여 주입 중 펌프의 stroke 수로 주입량을 추정하여 주

표 1. 주입압, stroke당 주입량, 주입율

평균주입압 (kPa)	주입량 (m ³ /stroke)	주입율 (m ³ /min)
1,000	0.006	0.028~0.084

입량을 조절한다. 본 시험현장에서는 1 stroke 당 주입량을 계산하기 위하여 주입을 시작하기 전에 0.5m×0.5m×0.5m의 용기에 시험적으로 주입재를 가득채운 후 이 때의 부피를 stroke 수로 나누어 1 stroke 당 주입량을 계산하였다. 본 시험 현장에 적용된 주입압, 주입량/stroke, 주입율은 표 1과 같다.

3.2 지반특성

3.2.1 원지반 기본물성시험 결과

본 시험시공 부지는 경기도 OO시에 위치하고 있으며 7~8m로 성토된 매립 토사지반이다. 시추자료에 의하면 본 시험현장은 화강풍화토층으로 구성되어 있고 기본물성시험을 실시한 결과를 요약 정리하면 표 2와 같다.

3.2.2 원지반 표준관입시험 결과

원지반에 대한 표준관입시험 결과는 표 3과 같으며 N치를 이용하여 상대밀도를 추정하면 원지반은 대단히 느슨한 지반으로 판단되었다.

3.2.3 원지반 들밀도시험 결과

각 Type별로 깊이에 따라 원지반에 대한 들밀도시험을 실시한 결과는 표 4와 같다. 시험결과 Type-1은 17.6~18.3 kN/m³, Type-2는 17.6~18.0kN/m³, Type-3는 17.5~18.0kN/m³

표 2. 개량대상지반 토질의 기본물성 시험성과

	자연 함수비 ω _N (%)	액성 한계 ω _L (%)	소성 한계 ω _P (%)	비중 G _s	통일 분류 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

표 3. 원지반에 대한 표준관입시험 결과

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

표 4. 원지반에 대한 들밀도시험 결과

깊이(G.L.)	단위중량(kN/m ³)		
	Type-1	Type-2	Type-3
지표면	17.6	17.6	17.5
-0.7m	18.3	17.9	17.9
-1.2m	18.2	18.0	18.0

으로 나타났다.

3.3 시험방법

3.3.1 들밀도시험

주입 전·후의 단위중량변화를 측정하기 위하여 KS F 2311 모래치환법에 의한 흙의 단위중량시험을 주입 전에는 지표면에서 주입 후에는 지표면, G.L.-0.7m, G.L.-1.2m에서 실시하였다. 시험은 각 Type별로 실시하였으며 시험위치는 각 Type별 격자의 중심부에서 실시하였다.

3.3.2 표준관입시험

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

3.3.3 경사계설치

주입으로 인한 주변지반의 횡 방향 변위를 측정하기 위하여 주입 전에 경사계를 설치하였다.

경사계 케이싱의 설치 위치는 그림 5와 같이 주입공을 중심으로 각각 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m를 이격시켜 설치하였다. 측정범위는 G.L.0.0m에서 G.L.-7.5m로 하여 주입 전, 주입 중 2회, 주입 직후, 주입 1시간 후에 실시하였다.

3.3.4 토압계설치

주입으로 인한 주변지반의 횡 방향 토압의 변화를 측정하기 위하여 주입 전에 토압계를 설치하였다. 토압계의 설치위치는 그림 6과 같이 이격거리에 따른 횡 방향 토압의

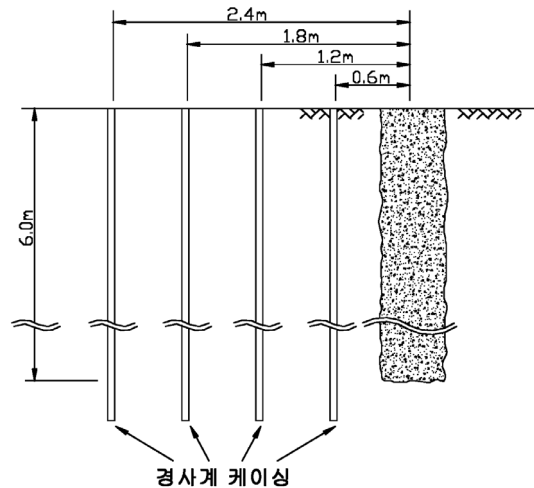


그림 5. 경사계 설치

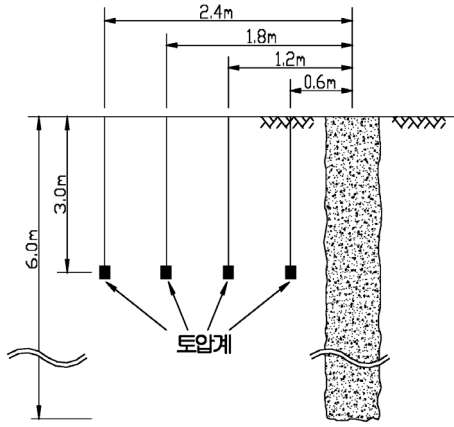


그림 6. 투입계 설치

변화량을 비교하기 위하여 주입공을 중심으로 각각 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m를 이격시켜 일률적으로 G.L.-3.0m에 설치하였다. 계측은 주입 전, 주입 중 2회, 주입 직후, 주입 1시간 후에 실시하였고 주입 후 10일까지 1일 1회 실시하였다.

3.3.5 지표면 침하핀 설치

주입으로 인한 지반의 용기량을 측정하기 위하여 주입 전에 지표면침하핀을 그림 7과 같이 주입공을 중심으로 각각 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m를 이격시켜 지표면에 설치하였다. 레벨측정은 주입 전, 주입 중 2회, 주입 직후에 실시하였다.

4. 시험시공결과

4.1 들밀도시험

개량 전·후 지표면, 지표면 -0.7m, 지표면 -1.2m에서 실시한 현장 들밀도시험의 결과는 표 5와 같다. 주입에 의한 지표면의 단위중량 증가의 경향을 살펴 보면 Type-1, Type-2의 경우 주입 전 단위중량 17.6kN/m³, 17.6kN/m³에서 주입 후

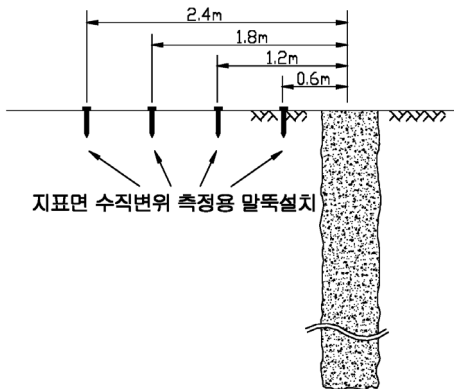


그림 7. 지표면침하핀 설치

표 5. 현장 들밀도시험 성과

	()는 주입 전 단위중량		
	단위중량(kN/m ³)		
	Type-1	Type-2	Type-3
지표면	18.3 (17.6)	17.7 (17.6)	17.5 (17.5)
G.L.-0.7m	18.3 (18.0)	17.9 (17.7)	17.9 (17.9)
G.L.-1.2m	18.5 (18.2)	18.1 (18.0)	18.0 (18.0)

각각 18.3kN/m³, 17.5kN/m³로 0.7kN/m³, 0.1kN/m³이 증가하였으며, Type-3의 경우 주입 전·후로 단위중량의 변화가 없었다.

G.L. -0.7m와 G.L. -1.2m에서 실시된 들밀도시험 또한 지표면에서 실시된 들밀도시험과 유사한 양상을 보였으며 심도가 깊어질수록 주입 전·후 모두 단위중량이 상부토층에서보다 0.2~0.5kN/m³ 정도 증가하는 것으로 나타났다.

4.2 표준관입시험

주입 전·후의 Type별 표준관입시험의 결과는 표 6과 같다. 먼저 표준관입시험 결과를 Type별로 세분화하여 살펴 보면 Type-1은 개량 전 3~5에서 6~9로 N치가 3~4정도 증가하였고 Type-2와 Type-3는 각각 개량 전 4~6, 4~5에서 개량 후 6~8, 5~6으로 미소한 증가를 보였다.

4.3 경사계 계측

주입 전·후 경사계 계측결과는 그림 8~11과 같으며 이 값들은 주입 전 초기치를 0으로 보정하여 주입에 의하여 증가된 변위만을 나타낸 값이다. 계측결과 주입공으로부터 가장 가까운 0.6m 이격된 지점에서는 최대 14.46cm의 횡 방향 변위가 발생하였으며, 1.2m 이격된 지점은 최대 3.10cm, 1.8m 이격된 지점은 최대 4.22cm, 그리고 주입공으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 이격거리 2.4m 지점에서는 최대 4.58cm의 횡 방향 변위가 발생하여 주입공과의 거리가 멀어질수록 변위량은 대체로 감소하는 경향을 보였다. 본 시험에서 발생한 최대 수평변위는 최대 4.58cm로 말뚝기초의 허용수평탄성변위량 1.5cm를 초과하여 구조물기초와 인접하여 적용

표 6. 주입 후 표준관입시험 결과

깊이(m)	()는 주입 전 N치		
	관입저항치(N치)		
	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)

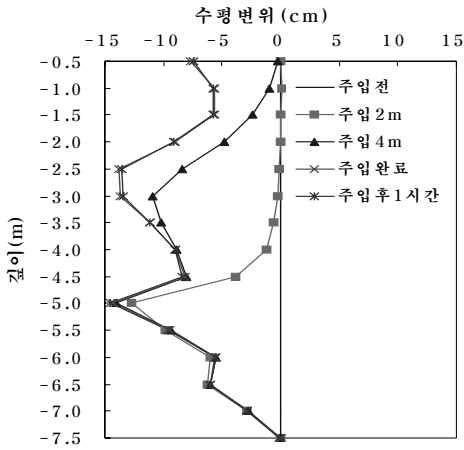


그림 8. 경사계 계측결과(이격거리 0.6m)

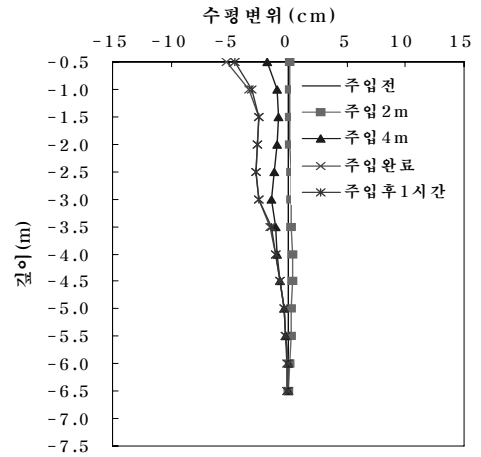


그림 11. 경사계 계측결과(이격거리 2.4m)

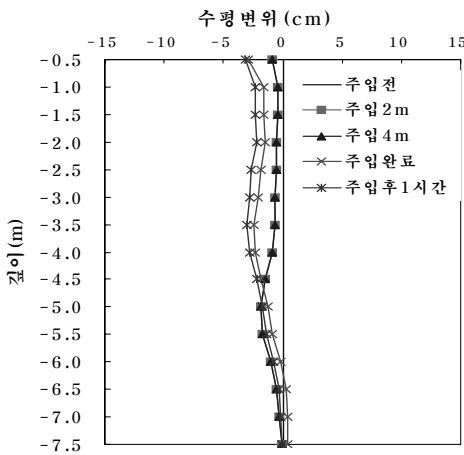


그림 9. 경사계 계측결과(이격거리 1.2m)

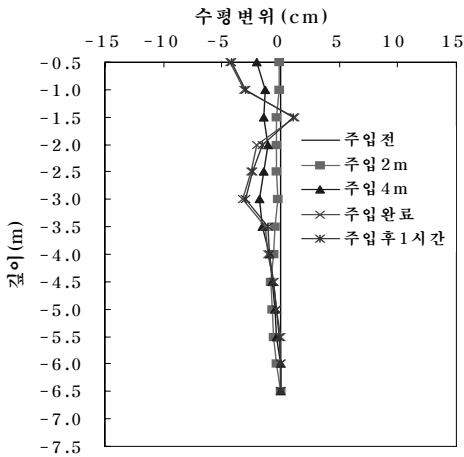


그림 10. 경사계 계측결과(이격거리 1.8m)

시 문제가 있을 수 있으므로, 지반의 큰 변위가 예상되는 구조물 복원 시공 시 이 점에 유의하여 시공하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 깊이별로 측정된 횡 방향 변위는 그림 8~11과 같이 나타낼 수 있으며, 최대변위가 일어나는 지점은 주입선단부의 위치와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

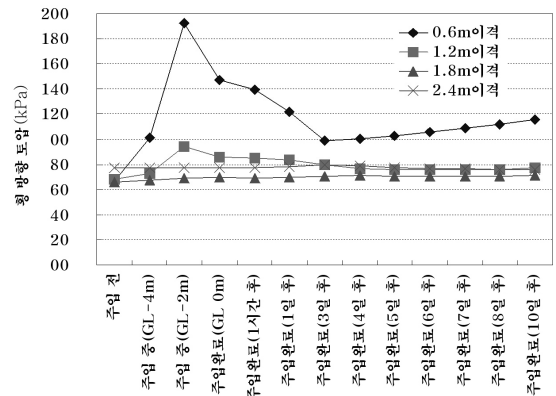


그림 12. 토압계측 결과

4.4 토압계측

주입공으로부터 각각 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.4m 이격시켜 GL-3m 지점에 설치한 토압계의 계측결과는 그림 12와 같다. 주입 전 측정된 토압은 66.4~77.5kPa이었으며 0.6m 이격된 지점에서는 주입 중 최고 192.5kPa까지 상승되었다.

1.2m 이격된 지점에서는 토압의 증가량은 주입 중 최고 94kPa로 나타났고, 1.8m 이상 이격된 지점에서는 주입 전과 비교해 볼 때 토압의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

4.5 지표면레벨 측정

주입으로 인한 지표면의 융기량을 측정할 결과는 그림 13과 같다. 주입에 의한 지표면의 융기는 주입과 더불어 계속하여 증가하였으며 주입완료 후에는 주입공으로부터 0.6m 지점에서 최대 약 8.0cm까지 발생하였고 1.2m 지점에서 2.8~4.9cm, 1.8m 지점에서 0.2~0.5cm, 2.4m 지점에서 0~0.2cm 발생하였다.

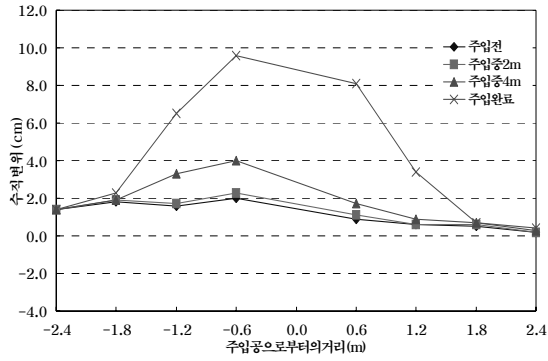


그림 13. 지표면 레벨 측정결과

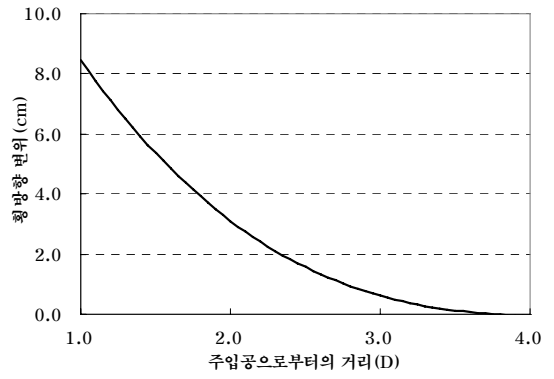


그림 16. 주입공으로 부터의 거리에 따른 횡 방향 변위

4.6 주입압 측정

주입 시 주입재가 유입되는 압력을 측정하기 위하여 인발 잭의 상부에 유압계를 설치하였으며 주입압을 측정한 결과 주입압은 평균 1,000kPa 이었으며, 최저값은 350kPa, 최고값은 2,500kPa이며, 대부분의 경우 500kPa~1,500kPa에 분포하였다.

4.7 시험결과 분석

4.7.1 주입에 의한 영향 반경

시험시공 후 현장 시험 및 계측결과를 주입공으로부터의

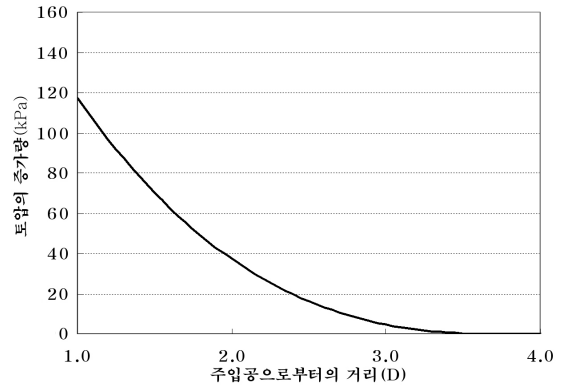


그림 17. 주입공으로 부터의 거리에 따른 토압의 증가량

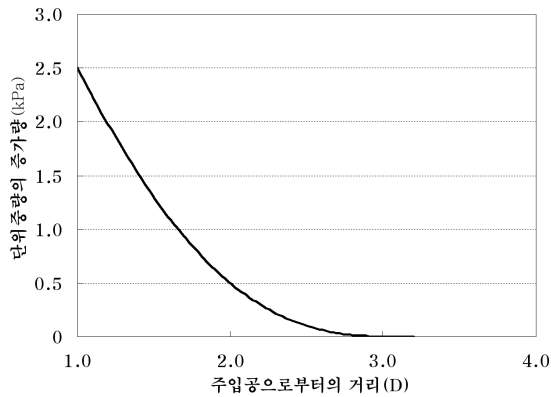


그림 14. 주입공으로 부터의 거리에 따른 단위중량의 증가량

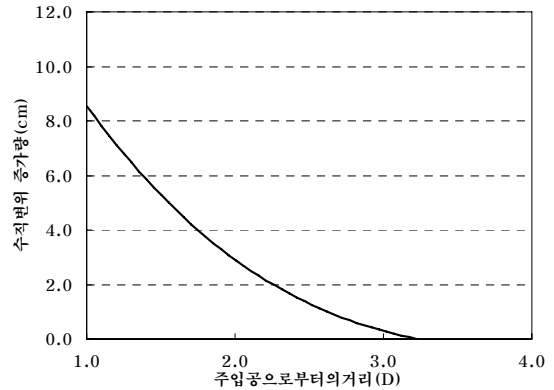


그림 18. 주입공으로 부터의 거리에 따른 수직변위의 증가량

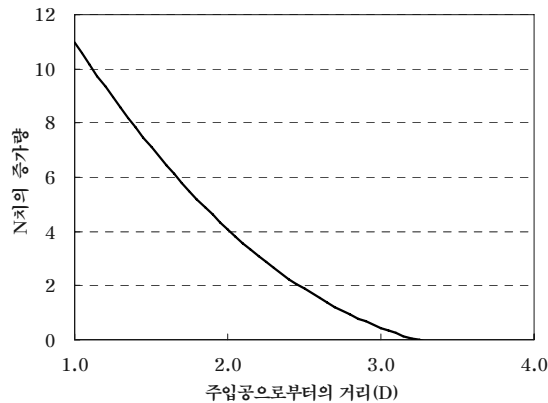


그림 15. 주입공으로 부터의 거리에 따른 N치의 증가량

거리별로 분석 한 결과, 그림 14~18과 같이 각각 다른 기울기를 가지며 주입공으로부터 멀어질수록 주입에 의한 효과가 감소하였다.

주입에 의해 생성된 몰탈기둥의 직경을 1D라고 하였을 때 그 한계는 몰탈기둥 직경의 3배인 3.0D 정도였다.

4.7.2 주입에 의한 단위중량 증가율

Type별 단위중량의 증가율($\Delta\gamma/\gamma_0$)은 단위중량의 증가율을 주입 전 단위중량으로 나눈 값으로 Type-1의 경우 0.02~0.04%, Type-2의 경우 0.01%, Type-3의 경우 0.00%이며 각

Type별 들밀도시험의 위치는 주입공으로부터 2.1D, 2.5D, 2.8D 이므로 주입에 의한 영향 반경을 4.71 절과 같이 3.0D로 볼 때 영향 반경 중 외측 1/3에서의 단위중량의 증가율은 0.00~0.03%임을 알 수 있었다.

5. 고찰

2.2절의 다짐효과 및 영향 반경에 관한 이론에서 제안된 영향 반경 및 단위중량의 증가량을 추정하는 기존의 이론식이 실제 저유동성 몰탈주입현장에서 적용성이 있는지 파악하기 위하여 기존의 이론식에 본 시험현장의 물성치를 대입하여 추정된 값과 실제 현장시험 결과 및 계측결과를 비교하였다.

5.1 영향 반경에 대한 기존의 이론식과의 비교

영향 반경에 대한 기존의 이론식인 식 (8)에서 $r_0 = r$ 일때 구근직경을 1.0D라 하면, 영향 반경 R은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{E_b}{p_g}} \cdot r$$

$$\frac{r_0}{r} = 1D = 2R = \sqrt[3]{\frac{E_b}{p_g}}$$

$$2R = \sqrt[3]{\frac{E_b}{p_g}}$$

그런데, $E_b = \frac{E_s}{3(1-2\nu)}$ 이므로

$$2R = \sqrt[3]{\frac{E_s}{3(1-2\nu) p_g}}$$

$$\therefore R = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_s}{3(1-2\nu) p_g}} \quad (9)$$

여기서, R : 영향 반경(D)

E_b : 흙의 체적탄성계수(MPa)

E_s : 흙의 탄성계수(MPa)

ν : 흙의 푸아송비

p_g : 주입압(kPa)

본 시험현장의 경우 원지반이 느슨한 사질토이기 때문에 푸아송비는 0.2~0.35(Bowles, 1997)이므로 평균값인 0.28을 일괄적으로 적용하였다. 푸아송비를 상수(0.28)로 보면 식 (9)에서 D는 E_s 와 p_g 의 이변수 함수가 된다.

영향 반경 R을 1.0D, 2.0D, 3.0D, 4.0D로 변화시켜가며

E_s 와 p_g 의 관계를 그래프로 나타내면 각각은 절편이 0인 일차함수의 형태를 나타내며 그림 19와 같다.

본 시험현장의 주입압은 평균 1,000kPa이고 지반의 탄성계수는 Gravelly Sand 층이 50~150MPa(Bowles, 1997)이므로 각각의 범위가 주입압 500~1,500kPa, 탄성계수 80~120MPa라 가정하면 영향 반경은 그림 19의 빗금친 부분에 해당하며 약 2.0D~3.0D임을 알 수 있다. 이것을 실제 측정된 영향 반경(3.0D)과 비교해 보면 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있으며, 근소한 차이는 지반의 불균질성에 의해 몰탈구근이 완전한 원기둥 형태로 주입되지 않았기 때문이라고 추정할 수 있다.

5.2 단위중량의 증가율에 대한 기존의 이론식과의 비교

단위중량의 증가율에 대한 기존의 이론식은 식 (10)과 같으며,

$$\Delta\gamma = \frac{P_g \cdot \gamma_s}{E_b - P_g} \quad (10)$$

양변을 변형하면, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_s} = \frac{P_g}{\frac{E_s}{3(1-2\nu)} - P_g} \quad (11)$$

여기서, $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_s}$: 단위중량의 증가율

E_s : 흙의 탄성계수(MPa)

ν : 흙의 푸아송비

p_g : 주입압(kPa)

5.1절과 같이 푸아송비를 상수(0.28)로 보면 식 (8)에서

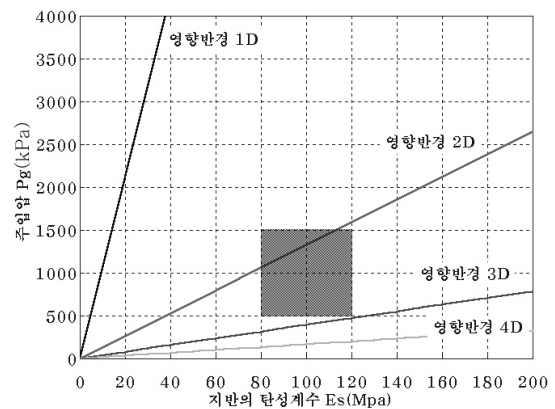


그림 19. 탄성계수와 주입압을 이용한 영향 반경의 추정 (단, $0.2 < \nu < 0.35$ 의 느슨한 사질지반)

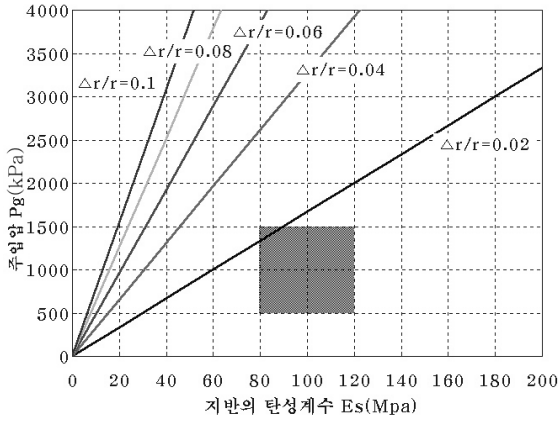


그림 20. 탄성계수와 주입압을 이용한 단위중량의 증가량 추정 (단, $0.2 < \nu < 0.35$ 의 느슨한 사질지반)

$\frac{\Delta\gamma}{\gamma_s}$ 는 E_s 와 p_g 의 이변수 함수가 된다. 여기서 $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_s}$ 를 0.02~1.0으로 변화시켜가며 E_s 와 p_g 의 관계를 그래프로 나타내면 그림 20과 같이 각각은 절편이 0인 일차함수의 형태로 나타내어진다.

주입압과 탄성계수를 5.1절과 같이 가정하면 단위중량의 증가율은 그림 20의 빗금친 부분에 해당하는 약 0.02 이고 실제 측정된 단위중량의 증가율은 0.00~0.03으로 기존의 이론식에 의한 추정치와 유사한 범위를 갖는다.

6. 결 론

본 연구는 매립토층에서 저유동성 몰탈주입에 의한 지반 변형을 측정하여 개량효과를 확인하고 단위중량의 변화율과 영향 반경을 기존의 이론식과 비교한 것으로써 그 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 저유동성 몰탈주입에 의하여 단위중량은 주입 전 $17.5 \text{ kN/m}^3 \sim 18.2 \text{ kN/m}^3$ 에서 주입 후 $17.5 \text{ kN/m}^3 \sim 18.5 \text{ kN/m}^3$ 로 증가하였고 표준관입시험 결과 주입 전 N치는 3~6에서 주입 후 5~9으로 평균 2~3이 증가하여 본 공법

은 느슨한 사질토 지반에서 개량효과가 우수함을 확인하였다.

- (2) 저유동성 몰탈주입에 의한 횡 방향 지중 수평변위와 연직 방향 지표면 융기는 주입공으로부터 1.0D 이격된 거리에서 횡 방향 최고 14.46cm, 연직 방향 최고 9.6cm까지 발생하였으며, 3.0D 이상의 거리에서는 수평, 연직 방향 모두 주입에 의한 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.
- (3) 영향 반경 및 단위중량의 증가율에 대한 기존의 이론식의 적용성을 파악하기 위하여 지반물성치를 대입한 값과 실제 측정된 값을 비교해 본 결과, 추정된 영향 반경 및 단위중량의 증가율(영향 반경 2.0D~3.0D, 단위중량의 증가율 0.02)은 실제 측정된 값(영향 반경 3.0D, 단위중량의 증가율 0.00~0.03)과 유사한 범위를 나타내어 기존 이론식의 적용성이 우수한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 천병식, 조천환, 이영근, 우근우(1997a), Compaction Grouting에 의한 지반보강 시공사례, *대한토목학회 논문집*, Vol. 3, pp. 493~496.
2. 천병식, 임해식, 조천환, 정현철(1997b), 수도권 신국제공항 전 용철도 노반 실시설계의 Box 구조물 지반보강공법 검토연구, 한양대학교 부설 건설연구소, pp. 7~21.
3. 천병식(1998), *지반공학 - 이론과 실제-*, 구미서관, pp. 684~729.
4. 천병식, 여유현, 정영교(2001), 저유동성 몰탈주입에 의한 연약지반의 침하억제 효과, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 17, No. 6, pp. 53~67.
5. 천병식, 여유현(2003), C.G.S공법을 적용한 연약점토지반의 거동특성에 관한 연구, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 19, No. 6, pp. 307~323.
6. H.R.Al-Alusi(1997), *Compaction Grouting : From to Theory, Grouting : Compaction*, Edited by C. Vipulanandan(Geotechnical Special Publication No. 66), Geo Institute ASCE, pp. 44~50.
7. Joseph E. Bowles(1997), *Foundation Analysis and Design*, The McGraw-Hill Companies, N.Y., pp. 123~125.
8. James Warner(1978), Compaction Grouting - A Significant Case History, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 104, No. 7, pp. 837~847.

(접수일: 2010. 3. 26 심사일: 2010. 4. 2 심사완료일: 2010. 5. 3)