

C.G.S에 의한 기초지반보강효과에 관한 연구

A Study on the Ground Improvement by Compaction Grouting System

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyeon Yeoh, 최현석²⁾, Hyun-Seok Choi,
오일석³⁾, Il-Seok Oh

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

2) 한양대학교 대학원 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

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

SYNOPSIS : The use of Compaction Grouting evolved in the 1950's to correct structural settlement of buildings. Over the almost 50 years, the technology has developed and is currently used in wide range of applications. Compaction Grouting, the injection of a very stiff, 'zero-slump' mortar grout under relatively high pressure, displaces and compacts soils. It can effectively repair natural or man-made soil strength deficiencies in variety of soil formations.

Major uses of Compaction Grouting include densifying loose soils or fill voids caused by sinkholes, poorly compacted fills, broken utilities, improper dewatering, or soft ground tunneling excavation. Other application include preventing liquefaction, re-leveling settled structures, and using compaction grout bulbs as structural elements of minipiles or underpinning.

The technique replaced slurry injection, or 'pressure grouting', as the preferred method of densification grouting. There are several reasons for the increased use of Compaction Grouting which can be summarized in one word: CONTROL. The low slump grout and injection processes are usually designed to keep the grout in a homogeneous mass at the point of injection, while acceptable in some limited applications, tends to quickly get out of control. Hydraulic soil fracturing can cause extensive grout travel, often well beyond the desired treatment zone.

So, on the basis of the two case history constructed in recent year, a study has been performed to analyze the basic mechanism of the Compaction Grouting and verify the effectiveness of the ground improvement using some test methods.

Key Words : Compaction Grouting, ground improvement, low slump grout, re-leveling settled structure, underpinning.

1. 서론

최근 우리나라는 고속철도, 인천 국제공항, 도심지 지하철, 서·남해안 항만공사 등 대규모 국가건설공사가 진행 중에 있으며, 아울러 시공도중 터널붕락, 주변지반 및 인접구조물의 부등침하, 측방유동에 의한 구조물 변위 등 대형 안전사고가 빈발하고 있다. 이러한 건설공사에서의 안전사고 및 효과적인 연약지반 처리를 위하여 공해, 내구성, 주입효과증대, 인접구조물손상 등 기존의 주입공법들이 안고 있는 문제점을 보완할 수 있는 우수한 주입공법의 필요성을 절감하게 된다.

현재 국내에서 쓰여지고 있는 주입공법들은 주로 약액의 침투고결, 시멘트계의 맥상고결, Jet Grout의

배출치환 등의 주입방식을 따르고 있으나, Compaction Grouting System(C.G.S)은 Slump치가 거의 '0'인 몰탈 또는 콘크리트를 주재료로 하여 '비배출치환'이라는 독특한 기법의 주입공법이다. 본 공법의 지반 보강효과가 기존의 고압분사주입공법 등 타공법에 비하여 월등히 뛰어나고, 주입고결체의 강도가 매우 높아 신규 건물의 기초파일로서 쓰일 정도이며, 기울어진 건물의 기초를 들어올려 바로 세우는 것뿐 아니라, 근래에는 광범위한 지반개량, 폐광충전재, 항만공사 등에 폭넓게 쓰이고 있다.

따라서 본 연구에서는 C.G.S공법의 기본 메카니즘을 이해하기 위한 이론적 접근과 함께 APT 기초지반보강공사 및 항만의 부두안벽 지반보강공사 등의 시공사례를 통하여 그 지반개량효과에 대하여 검토하였다.

2. 공법 개요

Compaction Grouting공법이란, 비유동성의 몰탈형 주입재를 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성함으로써 그림 1과 같이 주변 지반을 압축 강화시키는 지반개량공법으로, 1950년대 초 미국 캘리포니아주 주입기술자들이 Low Slump Mortar형 주입재를 이용한 실험을 시도하던 중 재하중을 받는 구조물 하부의 느슨한 토질을 인위적으로 조밀하게 만드는 데에 응용할 수 있다는 사실에 착안하여 고안되었다. 이러한 독특한 기법의 주입기술은 흙을 다지는 효과가 있어서 'Compaction Grouting'이라고 명명되었고, 현재는 Low Slump Mortar Grouting 또는 Limited Mobility Displacement Grouting 등으로 불리고 있으며, 국내에서는 C.G.S(Compaction Grouting System)공법으로 잘 알려져 있다.



사질지반에서의 주입고결체



해성점토층에서의 주입고결체

그림 1. Compaction Grouting의 주입고결체

1980년 ASCE(American Society of Civil Engineering)의 Grouting위원회는 본 공법을 다음과 같이 정의하였다.

Compaction Grouting이란 Slump치가 1inch(25mm) 이하의 비유동성 몰탈로서 주입재의 소성확보를 위한 세립토(실트질 크기)와 내부마찰력 증대를 위한 조립토(모래질 크기)로 구성되며, 이것은 Soil-Cement가 기본재료로서, 주변 지반의 공극속으로 침투되는 것이 아니라 지중에 원기둥 형태의 균질한 고결체를 형성하여 지중에 방사형으로 압력을 가함으로써 주변지반을 압밀시키고 공극속의 물과 공기를 강제 배출, 토립자 사이의 공극을 감소시켜 지반이 조밀화되도록 개량하는 것이다.

약액이나 시멘트계 주입재는 암반의 절리나 파쇄대, 흙속의 공극을 충전시키면서 여러 목적으로 이용되지만, 비유동성의 주입재가 지반에 덩어리채로 들어가 상대밀도를 증가시키는 등 콤팩션 효과를 발휘한다는 생각은 하지 못하였는데, 점차 이러한 주입기법이 유용하고 응용범위가 넓다는 사실을 알게 되었다.

C.G.S공법은 기존의 주된 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 맥상고결, 약액의 침투고결, Jet Grout의 배출치환 등과는 전혀 다른 '비배출치환'이라는 독특한 기법의 주입공법이다(그림 2 참조).

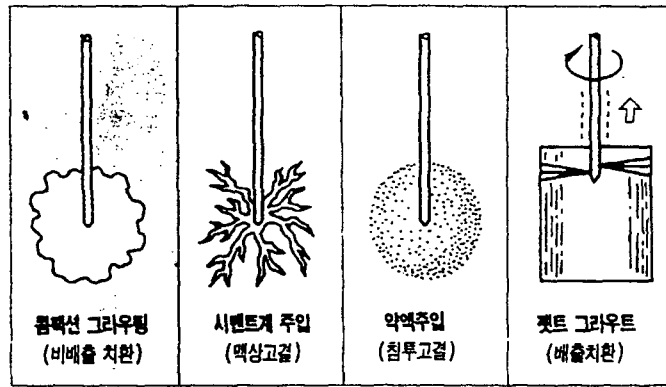


그림 2. 주입공법별 주입방식 비교

3. 이론적 고찰

C.G.S공법은 이론적 배경보다는 경험적 방법에 의하여 주로 성장해 왔으나, 50년의 역사를 거치는 동안 많은 실험적 고찰과 함께 이론적 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 변형이 탄성적이어서 보다 정성적인 콤팩션을 받는다. 본 공법의 효과를 예측하여 설계에 반영하고 그 적용성을 높이기 위해 지반공동구 확장 메커니즘을 이해할 필요가 있으며 개략적인 내용은 다음과 같다.

- (1) 흙과 콤팩션 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 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 3과 같이 나타낼 수 있으며 균질하고 선형탄성적인 등방성 재료일 경우, 체적변형율은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, V_g = 주입재의 체적, V_{nb} = 중립경계면내 흙의 체적이다. 흙의 체적변형계수를 식(2)와 같이 정의하면,

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

식(1)과 식(2)로부터 식(3)을 유도할 수 있다.

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

지반의 밀도 증가량 (Δ_γ)은 식(4)와 같으며

$$\Delta_\gamma = \frac{\Delta_m}{V_{nb}} \quad (4)$$

여기서, Δ_m = 주입에 따른 질량증가분이고 식(3)으로부터 V_{nb} 를 치환하면 식(5)가 성립된다.

$$\Delta \gamma = \frac{\Delta_m}{V_g} \cdot \frac{P_g}{E_b} \quad (5)$$

여기서, Δ_m 은 주입재의 질량이 아니고, $\Delta_m = V_g \cdot \gamma_s$ 이다 (γ_s =주입점에서의 흙의 단위중량).
 그러므로, C.G.S에 의한 지반의 밀도증가량 $\Delta \gamma$ 는 식(6)으로 나타낼 수 있다.

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

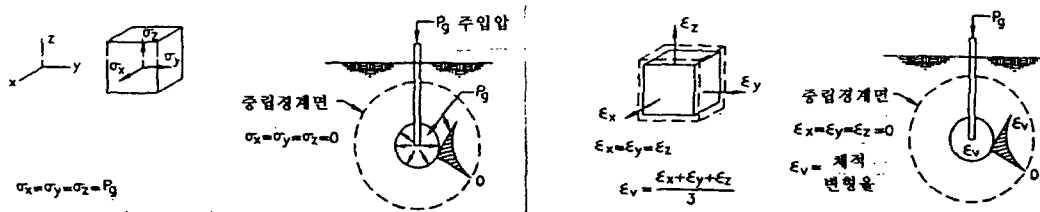


그림 3. 주입에 따른 응력과 변형관계

또한, 지반이 받는 콤팩션의 정도를 지중에 압입된 주입재의 체적과 연관지어 개량대상 토체의 상대적 인 콤팩션 증가를 식(7)과 같이 나타낼 수도 있다.

$$\Delta RC = \frac{100W}{\gamma_{max}} \left[\frac{1}{V_0 - (V_g - V_s)} - \frac{1}{V_0} \right] \quad (7)$$

여기서, W : 개량대상 토체의 중량, V_0 : 개량대상 토체의 원체적, γ_{max} : 흙의 최대밀도, V_g : 압입된 주입재의 체적, V_s : 지표면 상승에 대한 체적 수정이다.

4. 설계와 시공

C.G.S공법의 설계 및 시공계획도는 그림 4와 같다. 주입 설계의 첫 단계는 대상지반의 토질공학적 측면과 구조물의 구조적 문제점을 함께 이해하는 것이다. 이를 위해서 지반조사와 구조물에 대한 철저한 검토를 통해 공법의 적용성 및 적합성을 판단해야 한다.

본 공법의 주요 설계 제요소는 주입재료, 주입압, 주입을, 주입량, 주입방식 등이며 설계시 고려되는 모든 제요소들은 주입고결체의 형상, 수압파쇄현상 등 주입효과에 지대한 영향을 주게 되므로 어느 한가지 소홀함없이 세심한 주의를 필요로 한다. 그리고 주입효과의 극대화를 위해서는 시공현장에서의 시험주입을 행하여 설계에 충분히 반영해야 한다.

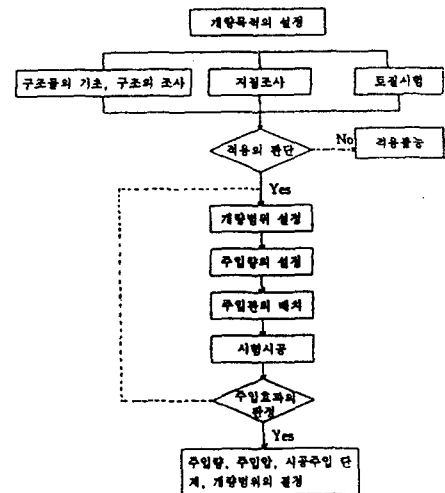


그림 4. C.G.S공법의 설계 및 시공계획 흐름도

4.1 주입재의 구성과 배합

본 공법의 재료 배합시에는 내부마찰과 응력해방 메커니즘의 복잡한 관계를 바탕으로 주입재를 통제할 수 있는 유동학적 특성을 반드시 고려해야 한다. 주입재의 유동학적 특성은 골재와 세립토의 입도조성과 주입재의 슬럼프 및 컨시스턴시에 의해 좌우되며 특히, #200번 체(0.074mm)보다 작은 세립분의 경우 그 양의 조절에 각별히 주의하여야 한다.

주입재료의 선정, 배합시에는 반드시 골재 체분석시험을 통하여 입경가적곡선이 Ideal-Line(그림 5)에 근접하도록 해야 하며, 이는 재료분리, 펌핑한계, 고결체의 형상 및 수압파쇄현상 등에 근거하여 수많은 현장시험을 통해 얻어진 것이다.

주입목적에 따라 주입재의 구성은 달라질 수 있는데, 주변 지반의 조밀화 즉, 지반개량이 주된 목적일 경우, 주입고결체 자체의 강도는 그다지 중요한 요소가 아니므로 시멘트는 섞지 않고 적당한 입도 분포와 수분을 함유한 실트질 모래가 유리하다. 반면에 주입고결체를 말뚝 등의 구조요소로서 이용할 경우, 고결체의 강도는 매우 중요한 요소가 되므로 소요강도에 적합한 양의 시멘트와 골재(일반적으로 직경 5mm 이하)를 첨가해야 한다. 그리고 현장의 여건에 따라 플라야에쉬, 벤토나이트, 카오리나이트 등과 화학첨가제를 사용할 수도 있으며, 대표적인 표준배합비는 다음 표 1과 같다.

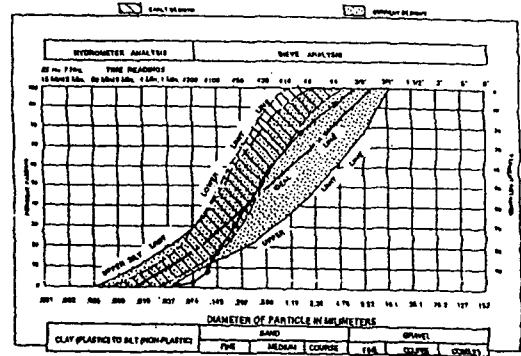


그림 5. 주입재 배합시 적용되는 Ideal-Line

표 1. C.G.S의 표준배합비

시멘트	골재와 세립토	물	비고
240kg	0.84 m ³	0.4 m ³	m ³ 당

만일 세립분의 함량이 지나치게 많거나 물의 양이 많으면 주입재 자체의 내부마찰이 부족하여 유동성(슬럼프치 5cm 이상)을 가지게 되므로 Grease와 같이 거동하게 되고 고결체의 형상 및 주입재의 통제가 어려워지며 수압파쇄 등을 야기하여 주입효과는 크게 떨어지게 된다. 따라서 주입재는 될 수 있는 한 된반죽이 좋다. 그러나 세립분의 양이 너무 적고 골재나 모래의 양이 많으면 주입재의 내부마찰이 커서 주입시 펌핑이 곤란하게 되고 재료분리가 생겨 고결체의 균질성이 결여되고 주입관내에 Dry Packing 또는 Sand Blocking 현상이 발생하는 등 주입이 불가능하게 된다.

4.2 주입압

주입과정 중 가해지는 주입압은 지반의 최대주응력과 최소주응력 상태를 복잡하게 변화시키며 주입관의 선단에서 최대가 되고 멀어질수록 감소한다. 또한 지반의 토질특성 및 상재구조물 하중 등의 구속응력과 관계되며 지표면이나 구조물의 융기 등은 가장 일반적인 주입시공의 제한 요소이다. 지표면의 융기가 관찰되면 콤팩션의 응력이 구속응력을 초과했음을 나타내며, 지반이 다짐이 되기보다는 파괴되었음을 의미하며 그 이후의 주입이나 최소한 그 단계의 주입은 실제적으로 큰 효과가 없다. 따라서 주입압의 상한(지표면이나 구조물의 융기를 일으키는 압력)은 현장 여건에 맞게 설정되어야 한다.

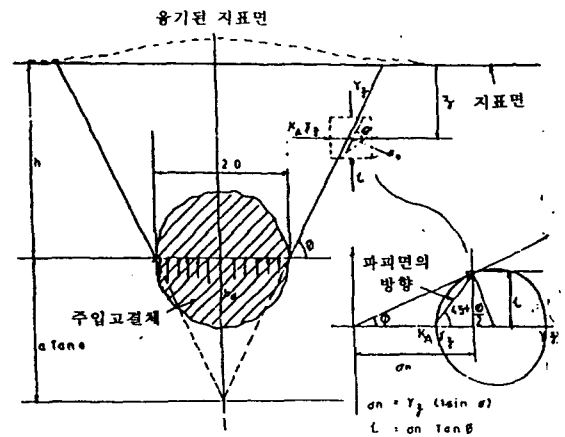


그림 6. 주입압과 지표면 융기

간단한 경우로 고결체의 반경을 a , 지표면으로부터의 심도를 h 로 하여 주입된 구형의 고결체를 생각해 보면(그림 6), 주입이 이루어지는 동안 고결체 상부의 원추형 지반은 교란된다. 잠재적인 원추형 전단파괴면은 수평면과 θ 의 각을 이루고(대략 60°) Mohr-Coulomb의 파괴기준과 동가이다. 느슨한 사질토의 내부마찰각(ϕ)이 30° 정도이므로 $\theta = 45^\circ +$

$\phi/2$ 즉, 대략 60° 를 이루게 되는 것이다. 주입압은 전 주입고결체에 걸쳐 균등하다고 가정하면 주입압이 증가할수록 그 반경 a 는 증가한다. 고결체의 팽창에 의해 발생하는 상향력은 원추형 지반의 중량과 잠재적 파괴면을 따라 발생하는 하향의 전단저항력을 더함으로써 계산될 수 있으므로, 상한 주입압 P_0 는 식(8)과 같다.

$$P_0 = \gamma h \frac{(\frac{h}{a})^2 + 3(\frac{h}{a})\tan\theta + 3\tan^2\theta}{3\tan^2\theta} \left[1 + \frac{2(1 - \sin\phi)\cos(180 - \theta + \phi)}{\cos\phi\cos\theta} \right] \quad (8)$$

위의 식으로부터 주입심도(h)와 고결체 반경(a)에 대한 여러 조건에서의 최대허용주입압을 구할 수 있으며 대체로 60~400 psi(4~30kg/cm²) 정도의 범위에 있게 된다. 만일 상재구조물 하부의 주입시공일 경우는 구속응력이 그만큼 높아지므로 이를 고려하면 되고, 주입고결체의 직경($2a$)은 주입된 주입재의 양으로부터 결정할 수 있다.

4.3 주입양과 주입율

주입양이 많을수록 지반개량으로서의 주입효과는 좋으나, 정압주입개념으로 허용주입압을 통해 조절해야 한다. 주입은 어느 정도의 펌핑간격(보통 6~10초)을 두고 행해지므로 펌핑시 1회 토출량을 미리 계량하여 총 주입양을 계산한다. 주입율은 펌핑간격으로 결정되는데, 주입율이 낮을수록 현저히 많은 주입양이 주입될 수 있으며, 이는 주입에 따른 지반의 안정과 주입압의 자연소산에 걸리는 시간적 여유가 주어지기 때문이다. 따라서 주입율은 전적으로 현장의 토질 특성에 의존되는 변수이며, 배수성이 나쁘거나 지표근처에서는 0.5~1.0ft³/min의 낮은 펌핑속도가 이용되며, 배수성이 양호하거나 건조토일 경우는 1.0~4.0ft³/min의 중간 펌핑속도가 이용되고, 공극이 큰 느슨한 토질에서는 4.0~12.0ft³/min 또는 그 이상의 빠른 펌핑이 가능하다.

주입율이 대상 지반의 조건에 비해 너무 높으면 주입 초기에 수압파쇄현상이 일어나 주입효과가 크게 떨어진다. 수압파쇄지수(Vg/k)를 주입율(Vg)과 지반의 투수계수(k)와의 관계로 정의하면, 일반적으로 $Vg/k \geq 50m^2$ 일 때 수압파쇄현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

4.4 주입방식 및 주입순서

본 공법의 주입방식에는 Top-Down방식의 하향 주입방식과 Bottom-Up방식의 상향 주입방식 및 두 방식의 조합형이 있다. 주입방식 결정시에는 개량 대상지반의 토질 구성과 구조물의 구조 등 모든 현장 조건을 고려해야 하며 일반적으로 Top-Down방식은 천층개량 및 구조물 복원에, Bottom-Up방식은 지반개량에 주로 이용되며 가장 일반적이고 경제적이다.

주입공의 배치나 간격의 결정은 경제성이나 주입효과면에서 매우 중요하다. 일반적인 주입공 배치는 Grid형으로 바둑판 모양의 사각형이나 삼각형이 주가 되며, 주입공 간격은 대개 1.0~3.0m이나, 시공목적에 따라 융통성있게 조절되고 흔히 1.5~2.0m를 적용한다.

구조물이나 대상 지반의 주변 둘레를 1차 주입공으로, 각 사각형모양의 주입공 중앙부에 2차 내지 3차의 주입공을 배치, 주입함으로써 목적하는 지반개량효과를 극대화시킬 수 있다. 그러나 미리 설정된 구조물 용기량의 허용치를 주입과정 중 반드시 계측하여 주입작업을 중지하고 다음의 주입공으로 옮겨가는 등의 현장 여건에 적합한 주입순서를 정하여야 한다.

5. 시공효과확인

C.G.S 시공후 지반개량이나 시공효과확인을 위한 시험은 시험기구 설치의 어려움, 토질조건의 다양성 때문에 작업이 모두 완료된 후에 실시하는 것이 일반적이다.

지반개량정도를 파악하기 위해서는 현장에서 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPT), 현장밀도시험 등이

일반적이며, 최근에는 전기비저항탐사, GPR(Ground Penetration Radar)시험들도 적용되고 있다. 또한 구조요소로서 주입고결체를 말뚝으로 사용할 경우, 각종 말뚝재하시험이나 임의의 주입위치에서 Coring을 하여 계획된 주입시공여부를 확인하고 채취된 주입고결체의 일축압축강도시험을 행하여 소요강도 확인 등을 할 수 있다.

그러나 무엇보다 중요한 것은 주입과정 중 항상 주입재의 슬럼프시험을 행하여 주입재의 유동성을 계속 확인하여야 하며 일반적으로 허용되는 범위는 0~3cm이다.

6. 시공사례 1 : 춘천시 OO아파트 기초지반보강공사

본 공사는 강원도 춘천시 효자동에 건설되어 있는 OO아파트 604동(지상5층)의 일부가 부등침하로 인해 균열과 침하가 발생, 침하방지와 건물 안정을 위한 언더피닝의 일환으로 C.G.S공법을 적용하였다.

6.1 현장 조건 및 지층분포

아파트 604동은 좌측의 1, 2, 3, 4호가 우측의 5, 6, 7, 8호보다 2.5m정도 높은 F.L.을 유지하고 있으며 4호와 5호 사이는 옹벽에 의하여 경계지워지고 있다. 건물의 시공당시 실시된 지질조사는 건물의 중앙부였고 본공사의 시공을 위해 건물 좌측부 전면과 후면에서 실시한 6공의 지질조사결과 건물 후면의 지지층이 전면보다 4~7m 낮은 상태임을 알았다. 따라서 부실한 지반조사와 성토부 다짐 등으로 인해 건물의 좌측부가 서북방향(건물후면)으로 부등침하되는 것으로 판단되며 지질조사공에 의한 현장의 지층분포를 요약하면,

- 지질조사공 BH-1, BH-2, BH-3, BH-4는 건물좌측부 후면에 BH-5, BH-6는 전면에서 실시하였다.
- 상부로부터 매립층, 풍화토, 풍화암층이 수직분포한다.
- BH-1, BH-2의 매립층은 GL-9.5m의 분포를 보이고 있으며, BH-3, BH-4의 매립층은 GL-7.2~-7.7m로 양질의 풍화토가 상층하는 지층구조를 보이고 있다.
- BH-5, BH-6은 GL-3.0m에서 아주 단단한 풍화토로 구성되어 있다.
- 토사층의 N치는 3~14정도의 느슨내지는 중간정도의 상대밀도를 가지고 있다.
- 풍화토는 N치 20이상의 굳고 조밀한 상대밀도를 나타낸다.

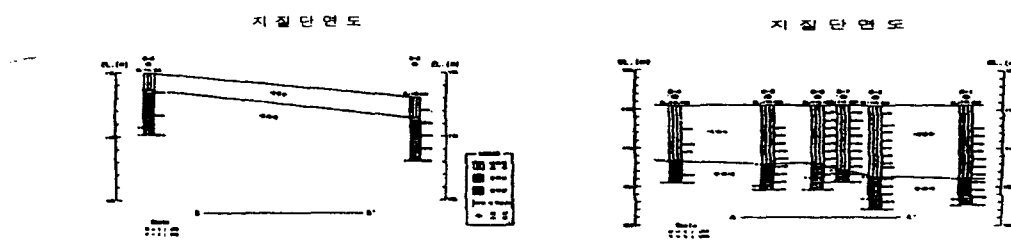


그림 7. OO아파트 주변 지질주상도

6.2 시험 시공

시험시공은 본시공전 지질조사된 BH-1, BH-2 사이의 위치에서 실시하였으며 목적하는 구근형성과 계획된 지지력에 만족되는지를 파악하기 위해 $\phi 500\text{mm}$, $\phi 450\text{mm}$ 의 구근형성을 계획, 각 1공씩 실시하였다. 시험시공후 구근형성의 육안확인 및 시공된 C.G.S 주입고결체의 core를 채취하여 일축압축강도시험을 실시하였다.

표 2. 일축압축강도 시험결과

시료번호	공시체직경(cm)	공시체높이(cm)	극한재하하중(kg)	일축압축강도 (kg/cm ²)	비 고
1	10	20	10,800	138	φ 450mm
2	10	20	11,600	148	φ 500mm

설계시 C.G.S 본당 내력은 41.52t이었고 시험결과로 확인된 지지력은 F.S=4를 고려하였을 때,

$$q_u = 138 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_a = \frac{138}{4} = 34.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$Q_a = \frac{\pi D^2}{4} \times 34.5 = \frac{\pi(0.45)^2}{4} \times 34.5 = 54.86 \text{ t/본}$$

으로 소요본당내력(41.52 t/본)을 충분히 만족시키는 것으로 나타났다.

지반의 개량정도를 확인하기 위해 시험공의 가운데 지점과 1m 떨어진 지점에서 SPT 시험을 하여 N치를 측정하여 시공전의 같은 지반의 N치와 비교해 보았다(그림 8 참조).

심도(GL)	개량전(BH-2)	확인공1	확인공2
-1.0	3	14	8
-2.5	12	12	11
-3.5	7	8	13
-4.5	6	10	15
-5.5	4	11	15
-6.5	9	16	13
-7.5	8	20	19
-8.5	10	29	50
-9.5	12	47	50
-10.5	23	50	50
비고		BH-7	BH-8

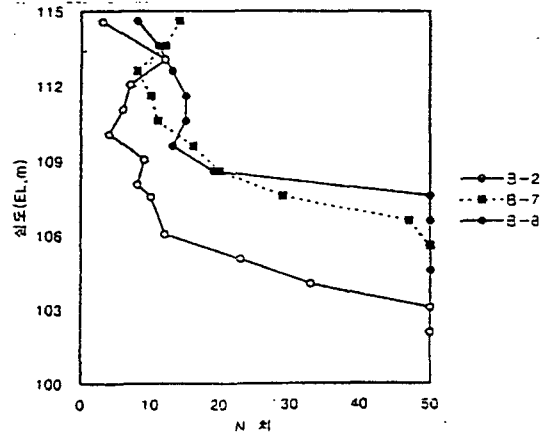


그림 8. 표준관입시험에 의한 주입효과 확인

시험시공된 지반의 N치는 원지반의 N치보다 현격히 증가함을 알 수 있고 원주형의 구근을 원지반에 형성시킴으로써 그 체적비만큼 밀려난 토사에 의해 주위지반의 조밀화를 통한 지반강도 증가 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

6.3 시 공

1997년 9월 28일부터 10일간 작업을 하였으며 아파트 604동의 2, 3, 4호 구간의 기초보강과 4호와 5호 옹벽의 지반보강을 실시하였다. 아파트 후면은 기초저면에서 평균 -9.0m 작업을 실시하였고, 전면은 평균 -6.0~-6.5m 주입하였다. 옹벽에서의 시공은 지하실 바닥에서 -6.5m 주입하였다. Pile의 지지선 계획은 시공전 N치 35선을 기준으로 설정하였으나, 시공시 계획을 수정하여 N치 50선을 기준으로 시공하였다(그림 9). 또한 시공중 주민들은 불편없이 계속 생활하였다.

계획된 12개소의 각 기초에 4공씩 시공하여 48공을 기초하부에 언더파닝시켰으며 4호 옹벽에 3공, 5호 옹벽에 3공씩을 보강하여 총 54공을 시공하였다.

천공시 지하실 PIT의 높이가 약 1.5m인 관계로 Hand-Drill로 φ 70mm 천공하였고, 주입재에 사용될

골재는 체분석을 통해 Ideal Line에 접근하도록 하고 슬럼프치는 2~3cm, 배합강도는 150kg/cm²를 기준으로 배합하였다. 주입시 계량측정을 행하여 1회 pumping시 토출량은 0.0052m³, pumping간격은 6~7sec로 시공하였다. 주입작업전 배합된 주입재료의 시편을 제작한 뒤 일축압축강도를 각각 시험하는 등 품질관리에 만전을 기하였다.

표 3. 시공수량 총괄표

항 목	단 위	수 량
천 공	m	439
주 입	m ³	60.39
시멘트	대	363
골 재	m ³	60.39
기초천공	공	54
시험시공	공	2

공사완료후 지금까지 아파트 604동 건물은 더 이상의 침하를 보이지 않고 있으며 주민들도 만족할만한 주거생활을 계속하고 있다.

금번 춘천 00아파트 604동의 기초보강공사를 설계에 의하여 시공 완료하고 그 결과를 시공자료에 의하여 분석 검토하여 요약하였다.

- 1) 아파트 지하에서 2.5m의 성토된 흙을 퍼낸 뒤 시공할 기초를 노출시키고 기초를 천공한 뒤 N치 50 정도의 지지층까지 천공, 주입하였다.
- 2) 각 기초에 4공씩 천공위치를 선정하고 매립층의 상대밀도가 매우 느슨한 관계로 구근의 크기를 ϕ 450mm로 계획하여 균형있게 주입하였다.
- 3) 4호와 5호의 경계인 옹벽의 근접지점에서 3공씩 6공을 보강주입하여 경계면의 지반내력을 강화시켰다.
- 4) 재료의 배합은 재령28일 일축압축강도가 150kg/cm² 이상이 나오도록 배합 시공하였다. 제작된 시편의 일축압축강도 시험결과는 150kg/cm² 이상이 측정되었으며 시험공의 core 일축압축 강도는 138~148kg/cm² 로 측정되었는데, 이는 시험시 가압면의 편평도가 좋지 않은 관계로 가압시 응력 집중의 영향이 있었을 것으로 보인다. 그러나 압축강도가 다소 미달하더라도 본당 허용지지력이 54.86t/본이므로 설계시 소요지지력 41.52t/본을 충분히 만족시키고 대략 30% 이상의 내력 여유가 있어 소요지지력 이상을 확보하고 있다고 판단된다.
- 5) 시험시공 전후의 지반의 N치의 변화를 통해 지반의 상대밀도가 증가된 것으로 나타났으며 Compaction Grouting을 시공함으로써 말뚝형성 이외에도 주위지반의 강도증대 효과 또한 얻을 수 있음을 확인하였다.

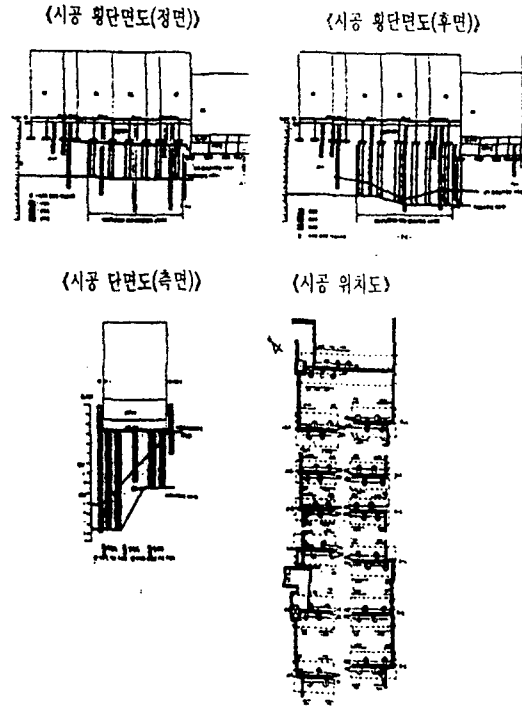


그림 9. 시공단면도 및 평면도

7. 시공사례 II : 한국중공업 00공장 부두안벽 지반보강공사

7.1 개요

본 공법의 시공 대상물은 1983년에 축조된 한국중공업 00공장내 3,000 DWT급 제2단계 부두 접안시설 물로서 준공후 안벽의 변형과 지반침하가 발생하여 1985년, 1986년 각각 안전진단과 보수·보강공사를 실시하였으나 지반의 압밀침하와 안벽의 측방유동, 과재하중에 의한 영향 등으로 접안시설물의 안전성

문제가 대두되었다. 97년 2월에 실시된 비파괴시험과 정밀안전진단 결과, 안벽의 활동과 전도 및 기초지반의 원호과괴 가능성이 지적되어, 지반보강에 의한 구조물 안정화가 요구되었다. 부두접안시설(DOCK)의 콘크리트구조물 하부는 직경 1M이상의 대형 전석으로 매립되어 있어 바닷물이 사석층 사이로 드나들며 DOCK 배면부 지반의 토사를 유출시켜 지반 침하가 진행중이며, 사석층하부에 연약이토층이 형성되어 있어 출하되는 기장비의 하중에 의해 콘크리트구조물이 부등침하되는 상황이다. 본 공사는 하부 사석층에 대하여 사석층 채움그라우팅을 실시하여 접안시설의 침하방지와 주위지반의 침하방지·안정화에 그 목적이 있다.

7.2 현장조건 및 지질분포

안벽구조물은 1985년의 점검에서 확인된 침하량(굴입식부두와의 접속부에서 최대 10.6cm)보다 다소 증가하였으며(동일위치에서 12.3cm) 전체적으로는 부두 양단이 중앙부보다 침하량이 큰 것으로 나타났다. 안벽전면(해상측)과 후면(육상측)은 4~6cm 정도의 표고차를 보인다(전면이 더 낮음). 굴입식 부두와의 접합부(A21 ~ A24)는 최대 11.5cm의 표고차가 발생하였는데, 이는 기초사석의 급경사 및 굴입식부두 안벽과의 단차에 의한 측방유동으로 판단된다. 또한 안벽 배면의 포장도 안벽과 유사한 침하형태를 나타내며 특히 주출하통로로 이용되는 A15 ~ A21 구간은 다른 부분보다 약 7cm 정도의 침하가 더 발생하였다. 배면포장은 육상(5번)에서 해상측(4번)으로 갈수록 2~3cm 정도가 낮아지며, 이는 안벽의 변형과도 관계가 있을 것으로 보인다. 안벽과 포장의 경계면은 기존의 콘크리트 뒷채움 보수부분으로서 부분적인 파쇄가 발생하여 수준측량 결과의 신뢰성이 다소 저하된다. 접안시설 안벽부의 주된 손상은 부분적인 안벽 기초사석 하부의 연약층에 의한 부등침하와 남·북측 양단부의 단부구속력 저하에 따른 측방유동, 중앙부 주출하통로부의 과대상재하중 등에 의한 콘크리트 균열, 안벽 침하, 시공 Joint등의 이격이며, 전반적인 안벽의 활동·전도에 의한 변형도 확인되었다. 또한 Joint의 수량부족에 의한 안벽의 인장균열, 선박충격에 의한 콘크리트 및 Fender의 파손 등이 발견되었으며, 일부 시공이 불량한 사항도 확인되었다. 수중부의 손상은 주로 Block의 이격이었으며, 기초사석의 유실 및 세굴도 일부 확인되었고 토사가 두껍게 퇴적되어 있었다.

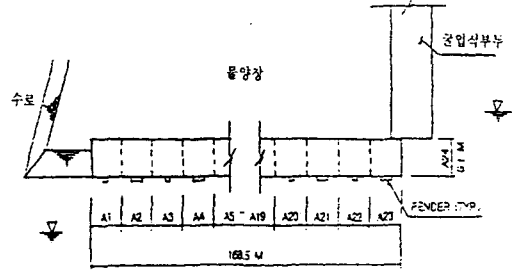


그림 10 제2단계 접안시설 안벽 구획도

제 2단계 접안시설 부두의 제원은 다음과 같다.

- 대 장 선 박 : 3,000 DWT급 Barge이하
- 연 장 : 168.5m
- 상치 콘크리트폭 : 6.1m
- 준 설 수 심 : (-)5.0m(안벽전면)
- 안 벽 구조 형식 : 사석경사제 + 콘크리트 Block(중력식)
- 안 벽 천 단 고 : (+)3.5m
- 하 역 설 비 : 400TON급 Mobile Crane, Skid Rail 2식
- 계 류 설 비 : 50TON급 Bitt 2기, 20TON급 Bollard 8기(@20.0m)
- Fender : V형(400H × 1500L) 24set

시추조사결과 안벽배면의 지반상태는 매립층이 안산암 전석 및 점토질 실트로 구성되어 있으며, 전석의 크기는 하부로 갈수록 1m 이상 대형 전석이 분포하며, 조석 간만의 차이에 의한 해수의 유입 및 유출로 인해 부분적으로 토사의 유실 및 습윤한 상태를 보여주고 있다. 접안시설물의 9.0m 두께의 콘크리트하부는 사석매립층이 13.0m의 두께로 기초를 형성하고 있으며 전석의 크기는 직경 0.2 ~ 0.5m로 소량의 자갈이 혼재된 상태로 하부로 갈수록 그 크기가 크며, 사석매립층 하부에 매립토층이 3.5m의 두께

로 분포하며, 20 ~ 30cm의 간격으로 전석과 점토질 실트가 반복되어 나타난다. 그 하부의 지층은 풍화암이 나타난다.

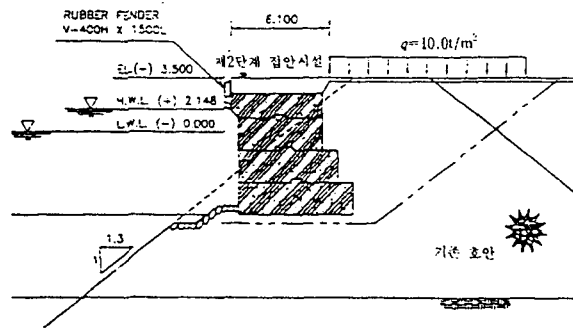


그림 11 제 2단계 접안시설도

7.3 시 공

1997년 10월 28일부터 93일간 작업을 하였다. 제 2단계 접안시설의 안벽 보강 및 배면부 지반보강을 위해 A1~A23, 총 168.5m의 구간에서 구근직경 800mm, CTC 750mm로 2열의 콤팩션주입을 하였고, 1열의 주입심도는 지표포장 두께를 제외한 4.3m, 2열은 6.3m로 총 $214 \times 2 = 428$ 공을 시공하였다. 안벽 하부의 사석매립층에 대해서는 총 70m의 구간에서 구근직경 1,000mm, CTC 1,500mm로 3열 주입시공하여 안벽의 콘크리트 Block 하부 지반 전체를 일체화시켰다. 평균 주입심도는 25.37m로 총 $47 \times 3 = 141$ 공을 시공하였다(그림 12).

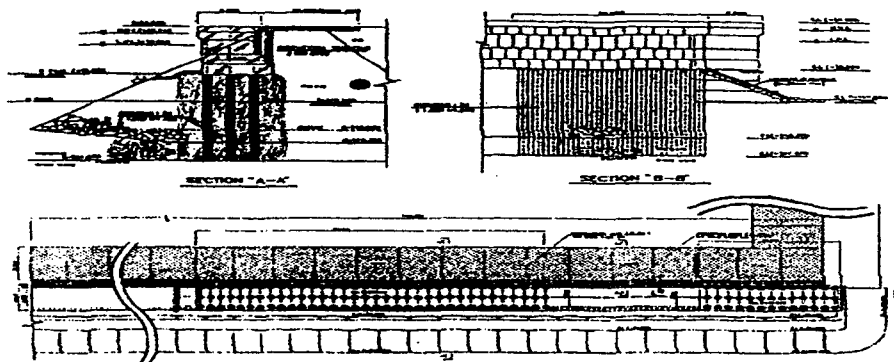


그림 12 시공단면도 및 평면도

표 4. 시공수량 총괄표

항목	천공 (m)	주입공(공)	주입량 (m ³)	시멘트(대)	골재+세립토 (m ³)
수량	6,145.2	569	3,245.7	23,646.5	2,989.14

시공후 품질관리를 위하여, 형성된 구근의 core를 채취하였고 다음 표 5와 같은 시험결과를 얻었다.

표*5. 주입시공후 채취된 Core의 일축압축강도 시험결과

채취된 core NO.	채취심도(m)	크기(D×L, mm)	일축압축강도(kg/cm ²)
1 - 12	21.1 - 21.6	52.1×106.9	210
1' - 6	21.3 - 21.5	51.4×107.0	270
2 - 8	14.0 - 14.3	51.4×111.1	400
2' - 20	12.2 - 12.5	51.5×114.4	350
2' - 33	24.2 - 24.5	51.7×116.6	200

정밀안전진단시 제 2단계 접안시설물의 소요강도가 상기 표와 같이 충분한 지지력을 확보하여 본 보강공사가 성공적이었음을 알 수 있다.

8. 결론

C.G.S공법의 기본 메카니즘 및 기초지반 보강효과에 관한 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) C.G.S(Compaction Grouting System)공법은 지반개량효과 및 주입고결체의 강도가 높아 향후 각종 건설현장에서의 적용성이 매우 높을 것으로 기대되며, 과거 구조물의 보수공사에 국한되었던 C.G.S공법이 오늘날에는 광범위한 적합성과 활용성이 입증되면서 다음과 같이 크게 네가지 범주로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

- 지반개량 · 대상지반 전 체적 혹은 국부적 개량에 따른 기초지반의 지내력 향상.
 - 터널 및 굴착공사시, 주변지반의 보강 및 수평토압 감소효과.
 - 부두안벽 기초 및 배면보강, 차수 또는 지수, 지반의 액상화방지책.
- 말 뚝 · 기존 구조물 Underpinning
 - PC말뚝이나 CIP공법 등의 대체 효과.
- 충 전 · 폐광이나 지반내 석회암 대공동 충전.
 - 호안 및 해안구조물 하부 사석매립층 등의 공극 충전.
- 복 원 · 구조물의 부등침하 발생시, 원상태로의 수평복원 및 장래침하방지책.

(2) 시공사례를 통한 개량효과 연구결과, 2개소의 시험공 모두 계획된 크기 이상의 원기둥형 주입고결체를 확인할 수 있었고, SPT 시험결과에 의하면 원지반의 N치와 비교할 때, 평균 10~20이상의 N치가 증가함으로써 확실한 지반개량효과를 확인할 수 있었다. 또한 주입고결체의 core를 채취하여 실시한 일축압축강도시험에서는 설계시의 소요강도보다 훨씬 높은 강도특성을 나타내는 것으로 확인되었다.

(3) 본 연구를 통해 앞으로 C.G.S공법에 대하여 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되며 향후 연구과제를 제안하면 다음과 같다.

- C.G.S 주입고결체들을 무리말뚝으로 고려, 마찰말뚝과 선단지지말뚝 효과를 동시에 발휘하는 등의 고결체 거동 및 파괴특성에 대한 연구
- 보강처리된 복합지반에서의 지반과 주입고결체사이의 하중분배율에 관한 연구
- 주입시공 후 보강된 지반의 지내력(N치 등)을 정확히 예측하여 얇은기초 설계에 적용할 수 있는 접근 방법에 관한 연구 등이다.

9. 참고 문헌

1. 천병식 외, “지반공학 -이론과 실제-”, 구미서관, 1998.2
2. 천병식, “기초지반개량공법”, 건설연구사, 1994
3. 천병식, “건설기술자를 위한 지반주입공법”, 원기술, 1995.
4. 천병식, “영종도 신공항 고속도로 연육교 1공구 논굴교 교대측방유동 대책공 연구 보고서”, 한양대학교 부설 건설연구소, 1996.6
5. 천병식, 정덕교, 우근우, 정영교, 권용완, Samson, W.B., “기울어진 피해구조물의 원상복구를 위한 기초지반 개량공법에 관한 연구”, 한국구조물안전진단학회 '97 가을학술발표회 논문집, pp.235-240, 1997.
6. A.F. Bell, “Grouting in the Ground”, Tomas Telford, 1992.
7. ASCE, “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, 1997.
8. Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah, “Grouting Technology”, A. A. Balkema, 1993
9. M.P. Moseley, “Ground Improvement”, Blackie A.&P., 1984.
10. Richard Witmann, “Grouting in Rock and Soil”, A.A. Balkema, 1993.
11. Wallace Hayward Baker, “Grouting in Geotechnical Engineering”, ASCE, 1982.
12. Warner, J., “Compaction Grouting-A Significant Case History”, ASCE, Vol.94, No. SM4, July, pp.951-979, 1968.