

## 그라우트 주입공법에 의한 구조물 복원효과에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Restoring Tilted Structures by Grouting Method

조형진<sup>1)</sup>, Hyung-Jin Cho, 김찬국<sup>2)</sup>, Chan-Kuk Kim, 고효석<sup>3)</sup>, Hyo-Seog Koh, 김학문<sup>4)</sup>, Hak-Moon Kim

1) 단국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

2) 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

3) 지승구조건설(주) 대표이사, President, Jee-Seung Construction Co., Ltd

4) 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

**SYNOPSIS** : The D-ROG(Digitalized Restoring of Grouting) Method is the restoring method for structures subjected to differential settlement and tilting by means of high grout injection pressure. This study investigate effect of grouting through in field test which applied D-ROG method in different conditions(overload, ground condition).

**Keywords** : D-ROG, Grouting, Restoring of tilted structures

### 1. 서 론

인구의 급격한 증가와 도시집중으로 인한 용지 부족은 도심지에서 교통의 마비, 주거공간의 부족 등의 많은 문제점을 야기하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기위해 매립지의 개간 및 연약지반의 개량이 점차 늘어가고 있으며 고층건물의 신축, 지하공간의 활용 등이 확대되고 있다. 그러나 이에 따른 문제점으로 진동·충격 등에 의한 주변지반의 침하와 붕락, 인접구조물의 균열 등의 피해가 발생하고 있다. 또한 최근에 자주 지진이 발생하고 있어 내진 설계가 미비한 국내 실정으로 앞으로 구조물의 침하와 관련하여 많은 문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 기울어진 구조물의 복원을 위한 공법이 개발되었다.

본 연구에서는 상재압 및 지반조건을 달리하여 현장시험을 수행함으로써 기울어진 구조물의 복원을 위한 D-ROG(Digitalized Restoring of Grouting)공법의 복원 메카니즘 및 주입효과를 확인하고자 한다.

### 2. D-ROG공법 소개

D-ROG공법은 부등침하된 구조물을 지반보강후 원상태로 완전복원하여 안전성 및 사용성의 문제점을 근본적으로 해결하는 공법이다. 복원방법은 구조물 기초바닥에 주입공을 천공한 후, 구조물 기초 전체가 거의 동시에 균등한 힘을 받도록 주입공마다 주입량을 조절하면서 빠른 속도로 다점·반복 주입하는 방식으로서, 고압의 주입기를 통해 1차적으로 침하된 지반에 6종류의 무기계 재료를 혼합한 중결성 그라우트를 주입하여 지반을 보강한 후, 2차적으로 보강된 지반층과 구조물 기초저면 사이에 급결성 그라우트를 주입하여 기울어진 구조물을 복원하는 기술이다.

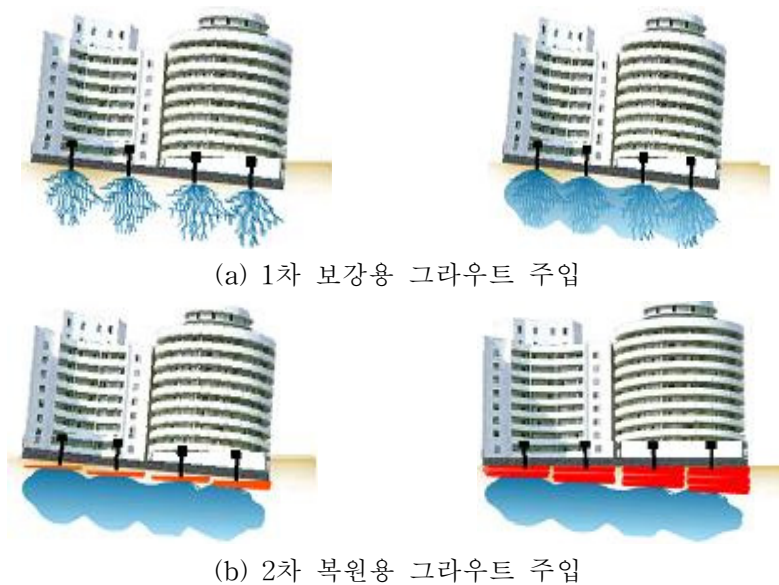


그림 1. D-ROG 공법에 의한 구조물 복원

보강용 그라우트 주입재는 시멘트와 중결 경화제, 초미립자 실리카 혼화재 등을 배합하여 주입펌프에 의해 지반에 주입되며 2중관을 통해 지반에 분사된 분말형 재료와 액상형(경화제) 재료가 지반내부에 반응하여 30~90의 켈타임을 갖는다. 복원용 그라우트 주입재는 시멘트, 급결 경화제, 초미립자 실리카 혼화재, 중화제 등의 재료를 배합한 것으로 상부하중에 따라 주입압을 조절하여 기초하부에 주입한다. 켈타임은 1~3초로 매우 짧고 초기 강도 발현에 우수하다. 표 1은 기존 주입공법과의 차이를 나타낸 것이다.

표 1. D-ROG 공법과 기존공법 비교

구 분		D-ROG 공법	기존 공법	비 고
재 료	종류	시멘트의 5종류	시멘트의 3종류	
	분말도	MS-P제 : 13,000cm <sup>2</sup> /g	마이크로시멘트 : 8,000cm <sup>2</sup> /g 이하	
	켈타임	급결 : 1~3초, 중결 : 30~90초	급결 : 5~12초, 완결 : 40~150초	
	강 도	40kgf/cm <sup>2</sup> 이상	10~20kgf/cm <sup>2</sup> 이상	
용 도		지반보강 및 침하 구조물 복원	지반보강 및 차수	
자동개폐밸브 (A.S.V)		자동제어 주입을 위해 주입관별 센서부착 밸브 및 시스템 채택	X	
중앙제어장치 (C.C.S)		주입순서, 주입량, 펌프가동 제어	주입량 제어	
분전반 (M.D.S)		동시 128개소 주입관 설치 작업 가능	X	
복원량 측정 및 기술 관리법(M.C.R.S)		mm 단위의 정밀계측 및 복원량 제어	계측관리 불필요 (지반보강/차수)	
주입방식 및 형태		미세/다점/순환방식	다점방식	
컴퓨터제어 프로그램		주입순서 수동/자동제어 단위 주입량 제어 주입관별 재료 누적 전체 주입량 누적	주입순서 수동제어 단위 주입량 수동제어 전체 주입량 누적	
구조물 복원기술		정밀복원 가능	정밀복원 불가	
지반보강 기술		○	○	

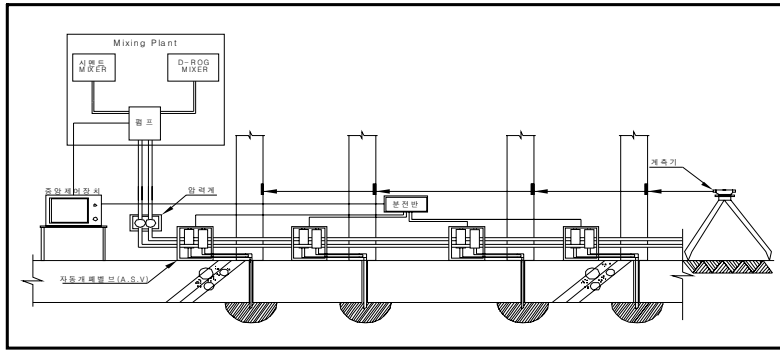


그림 2. 주입시스템 구성도

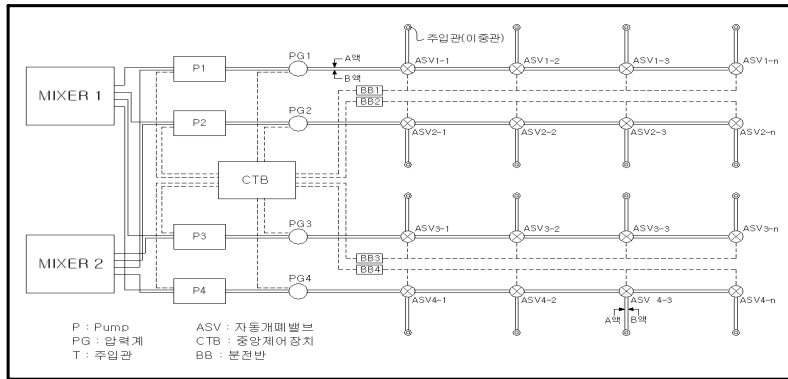


그림 3. 시스템 배선도(4대의 펌프를 이용한 다점주입 동시작업)

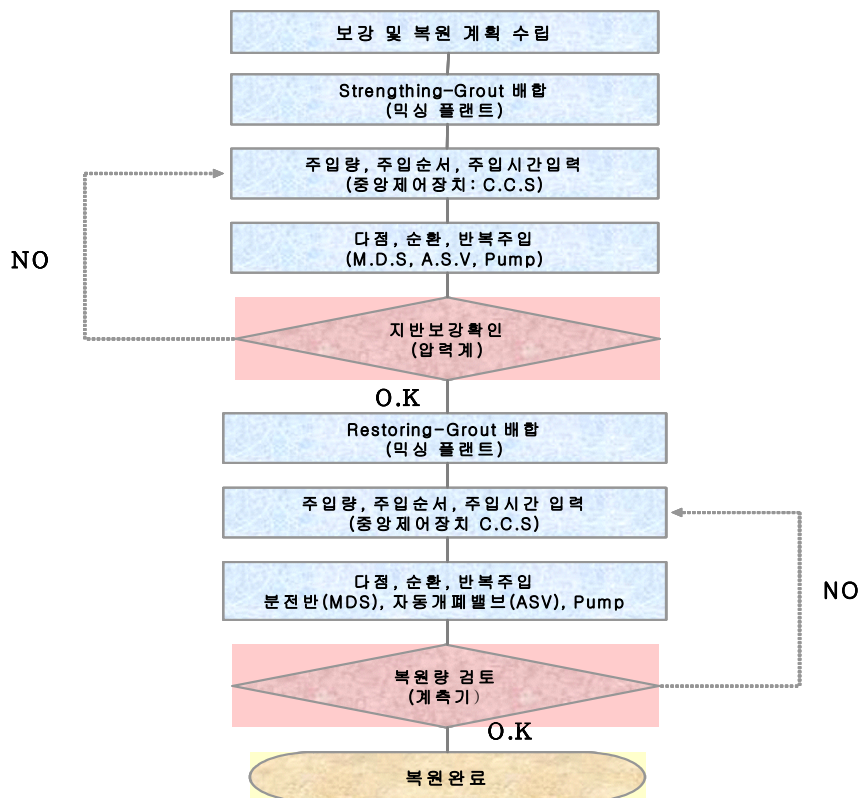


그림 4. D-ROG 공법 시공 흐름도

주입시스템은 그림 2과 그림3와 같으며 다점주입 및 계측에 의한 미세조절에 의해 응력의 집중 현상을 최소화하여 발생하는 접지압을 균등하게 분포하도록 하여 구조물의 복원을 가능하게 한다. 그림 4는 D-ROG공법의 시공 흐름도를 나타낸 것이다.

### 3. 현장시험

#### 3.1 현장시험 개요

토질별 그라우트 주입특성을 확인하기위해 사질토와 점성토의 2case로 각각 3개소씩 총 6개소로 조성하였고 하중조건을 건물하중을 고려하여 각각 5ton(1층하중), 10ton(2층하중), 20ton(5층하중)을 재하하였다. 본 시험에서의 기초의 크기는 폭 2m×2m, 두께 0.4m로 철근콘크리트 매트 기초로 타설하였다. 시험지반의 실내시험 결과 토질 물성치는 표2와 같고 시험 지반의 조성 평면도와 단면도는 그림5, 그림6과 같다.

표 2. 시험 지반 물성치

시험 지반 번호	단위중량( $\gamma_t$ )	함수비(w,%)	간극비(e)	투수계수(k)	흙의 분류
S-1, S-2, S-3	1.944(t/m <sup>3</sup> )	14.4	0.57	1.146×10 <sup>-2</sup> (cm/sec)	SP
C-1, C-2, C-3	1.943(t/m <sup>3</sup> )	24.7	0.48	5.24×10 <sup>-4</sup> (cm/sec)	SC

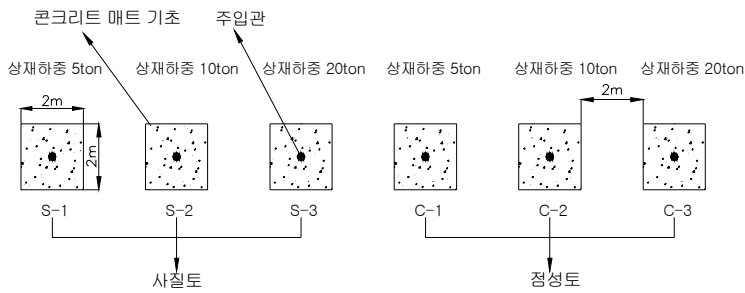


그림 5. 시험지반 조성 평면도

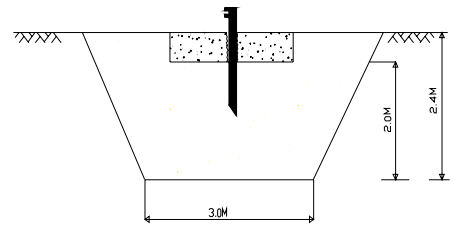


그림 6. 시험지반 조성 평면도

표 3. 그라우트 주입 조건

시험 번호	지반조건	상재압(t/m <sup>2</sup> )	주입압(kgf/cm <sup>2</sup> )	주입량(L)	주입시간(sec)	복원 목표값(mm)
S-1	사질토	1.25	5kgf/cm <sup>2</sup>	S-G : 800 R-G : 1200	1565	30mm 복원 시 주입중지
S-2		2.5		S-G : 800 R-G : 1350	1420	
S-3		5		S-G : 800 R-G : 1800	2317	
C-1	점성토	1.25		S-G : 700 R-G : 800	1030	
C-2		2.5		S-G : 800 R-G : 800	1060	
C-3		5		S-G : 800 R-G : 1600	1147	

### 3.2 시험방법

지반조건은 사질토와 점성토의 지반으로 모사하여 각각 시험 하였으며 세부적인 방법은 다음과 같다.

- (1) 시험 부지를 선정, 터파기를 실시한 후 사질토와 점성토의 지반으로 시험지반을 조성한다.
- (2) 실내실험을 위한 시료채취 및 콘관입시험을 실시한다.
- (3) 각 시험 지반에 철근콘크리트 매트 기초를 타설하여 양생한다.
- (4) 기초를 천공하여 주입관을 설치하고 상재하중을 재하한 후 계측점을 설치 초기 계측을 실시한다.
- (5) 각 시험 지반에 1차적으로 S-Grout를 주입하여 지반 보강을 한 후 2차적으로 R-Grout를 주입하여 목표값으로 복원시킨다.
- (6) 철근콘크리트 매트기초를 제거하고 콘관입시험을 실시한후 샘플을 채취한다.
- (7) 각 시험 지반별로 굴착을 하여 착색제를 살포하여 주입효과를 확인한다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 지반 보강 효과

지반 보강효과를 확인하기 위해 정적인 콘관입시험을 주입 전, 후에 실시하였다. S-Grout의 주입에 따른 지반 보강효과는 표 4에 나타난 바와 같이, 점성토 지반에서는 평균콘지수가 7.98kgf/cm<sup>2</sup>에서 9.71kgf/cm<sup>2</sup>으로 21.7%가 증가하였고 사질토 지반에서는 8.14kgf/cm<sup>2</sup>에서 9.27kgf/cm<sup>2</sup>으로 16.3%가 증가하였다.

그라우팅에 의한 보강효과는 일반적으로 사질토가 더 크다는 것이 일반적이나 현장실험결과는 점성토의 보강효과가 더 큰 것으로 확인되었다. 이는 점성토의 과잉 간극수압이 완전히 소산되지 않아 이러한 결과가 나온 것으로 판단되며 장기적인 검토가 필요할 것으로 판단된다..

표 4. 콘관입 시험 결과

구 분		점성토			사질토		
상재압(kgf/cm <sup>2</sup> )		1.25	2.5	5	1.25	2.5	5
콘지수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	주입 전	7.90	8.00	8.04	8.29	7.89	8.24
	주입 후	9.80	10.03	9.30	9.37	9.43	9.61
보강 효과		21.7% 증가			16.3% 증가		

### 4.2 지반별 주입 특성

#### 4.2.1 복원 메카니즘

복원 메카니즘을 규명하기 위해 보강용 그라우트와 복원용 그라우트의 색을 구분하여 지반내에 주입 하였으며 지반내의 주입된 그라우트의 형상을 검토하여 복원 메카니즘을 규명하였다. 그림 7과 같이 보강용 그라우트가 초기에 주입되어 주입관을 중심으로 고결체를 발달하다가 지반의 수평·수직 반력에 의해 점차 상향으로 고결체 형성하면서 지반을 보강한다. 켈타임이 짧고 초기 강도발현이 큰 복원용 그라우트가 보강용 그라우트의 경로를 따라 활렬 주입되는 메카니즘을 보이며 주입된 체적만큼 미세하게 상향으로 변위를 발생, 복원시킨다.

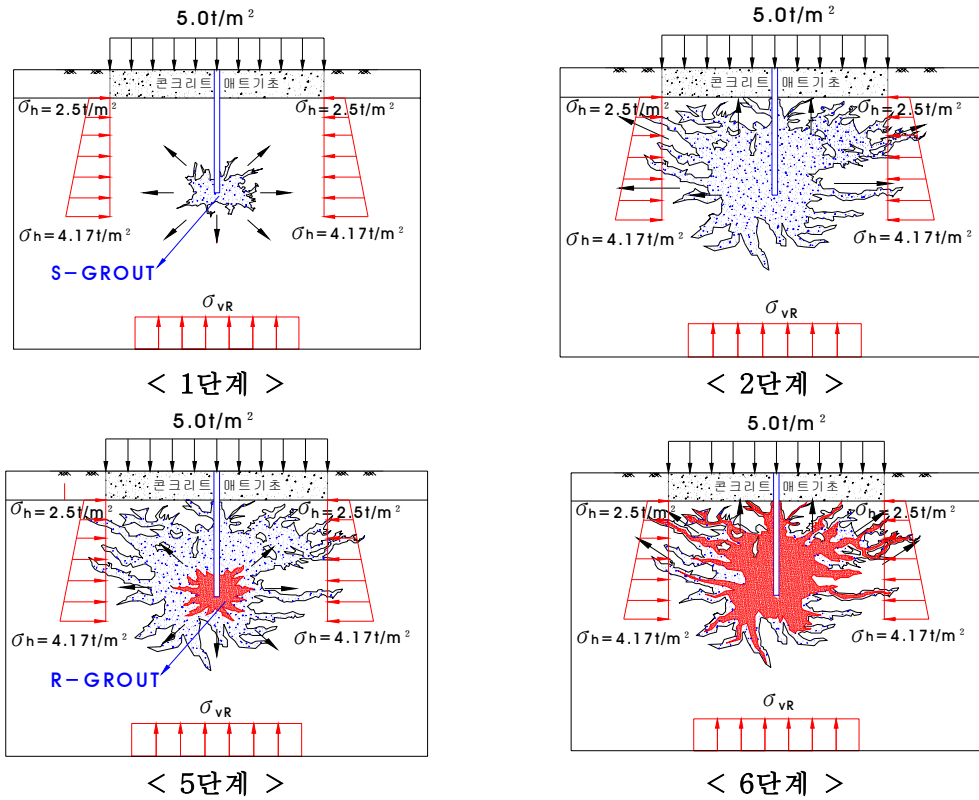


그림 7. 보강용 그라우트(S-Grout)와 복원용 그라우트(R-Grout) 주입 시 Mechanism

#### 4.2.2 주입 형상 및 주입거리

지반별 그라우트의 주입형상을 검토하면 그림 8과 그림 9에서 보이는 바와 같이 투수계수 및 간극율이 큰 사질토의 경우 그라우트가 지반에 할렬 및 침투 주입되어 뿌리형상을 나타내며 상재하중이 커질수록 팽이형상에 가까운 안정적인 형상을 나타내고 있다. 반면 투수계수 및 간극율이 작은 점성토는 기둥형상을 보이며 할렬 현상은 사질토에 비해 더 적게 발생하였다. 주입범위는 Magg의 이론식과 Karol의 이론식과 비교해 본 결과 표 5와 같이 많은 차이를 나타내고 있다. 이침림 이론식과 계측치 사이에 많은 차이가 나는 이유는 이론식(Magg식)은 그라우트 주입이 구면형상으로 주입된다고 가정하여 산정되었으나 실제 주입양상은 그림 8 및 그림 9에서 보는 바와 같이 침투 및 할렬 주입이 동시에 일어나기 때문에 상이한 결과를 나타내고 있는 것으로 사료되며, 또한, 이론식에서는 그라우트의 점성이 일정하다고 가정하여 예측된 값이나 실제로 지반에 주입시 시간변화에 따라 겔화현상 및 탈수현상에 의해 점성이 변화하기 때문에 상이한 결과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

사질토의 경우 상재하중이 증가함에 따라 주입범위가 조금씩 증가하는 양상을 보이며 기초폭 B에 유사한 범위 내에 주입되었다. 또한 투수계수 및 간극율이 큰 사질토의 경우가 더 넓은 범위에 주입범위를 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

표 5. 주입거리의 이론식과 계측치 비교

구분		주입거리(반경)		
		상재압(1.25t/m <sup>2</sup> )	상재압(2.5t/m <sup>2</sup> )	상재압(5.0t/m <sup>2</sup> )
magg이론식	사질토	4.6 cm	4.4 cm	5.2 cm
	점성토	1.4 cm	1.5 cm	1.5 cm
시험치	사질토	98cm	105cm	110cm
	점성토	71cm	81cm	90cm

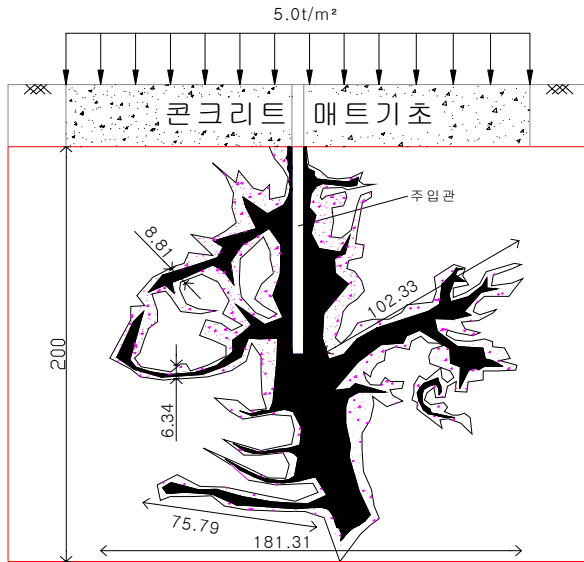


그림 8. 점성토(5.0t/m<sup>2</sup>) 주입단면

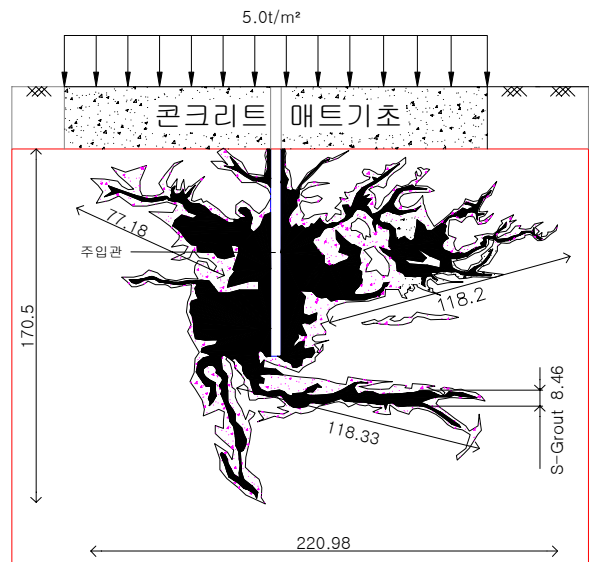


그림 9. 사질토(5.0t/m<sup>2</sup>) 주입단면

#### 4.2.3 복원 효과 분석

토질별 그라우트 주입량에 따른 복원의 관계를 검토한 결과 그림 10과 같이 나타났다. 초기 주입에 따른 복원 효과는 미미하나 복원이 진행되어짐에 따라 주입량에 따라 복원 효과가 향상되는 비선형적 관계를 나타낸다. 투수계수가 큰 사질토의 지반이 점성토 지반보다 목표 복원치에 이르기 위해 더 많은 주입량이 주입되며, 상재 하중이 커질수록 주입량이 증가하는 것으로 나타났다. 상재하중에 따른 주입량의 관계는 그림11과 같다.

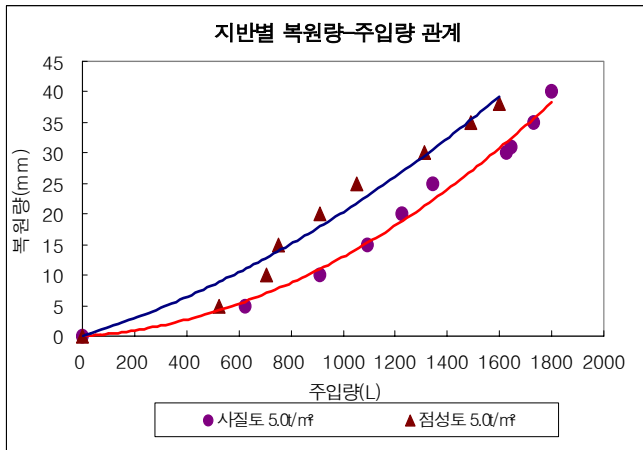


그림 10. 지반별 복원량과 주입량의 관계(상재압 5.0t/m<sup>2</sup>)

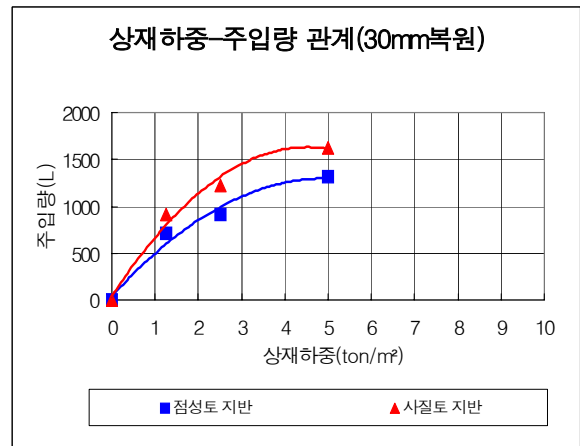


그림 11. 상재하중과 주입량의 관계(300mm복원 시)

## 4. 결 론

기울어진 구조물을 복원 할 수 있는 D-ROG공법 적용 시 지반조건, 주입압, 투수계수, 간극율에 따른 주입효과를 확인하고자 현장시험을 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보강용 그라우트 주입에 의해 보강된 지반은 사질토의 지반에서는 콘지수가 16.3%가 증가, 점성토 지반에서는 21.7%의 콘지수 증가를 보이며 사질토, 점성토 모두 지지력이 향상됨을 확인 할 수 있었다. 또한, 주입에 의한 지반 보강 효과는 상재압의 영향을 받지 않는 것으로 확인 되었다.
2. D-ROG 공법의 그라우트의 주입 메카니즘은 1차적으로 보강용 그라우트가 초기에 주입되어 주입관을 중심으로 고결체를 발달하다가 지반의 수평·수직 반력에 의해 점차 상향으로 고결체 형성하면서 지반을 보강하고, 2차적으로 켈타임이 짧고 초기 강도발현이 큰 복원용 그라우트가 보강용 그라우트의 경로를 따라 할렬 주입되는 메카니즘을 보이며 주입된 체적만큼 미세하게 상향으로 변위를 발생, 복원시키는 메카니즘으로 확인되었다.
3. 상재압이  $1.25t/m^2$ ,  $2.5t/m^2$ ,  $5t/m^2$ 으로 증가함에 따라 구근의 크기는 점점 더 증가하였으며 주입범위 또한 증가하였다. 이론값과 계측치가 차이가 난 이유는 이론식은 구면 침투를 바탕으로 산정되었으나 실제 주입양상은 침투 및 할렬 주입이 동시에 일어났고 또한, 이론식에서 점성이 일정하다고 가정하였으나 실제로 지반에 주입되면서 켈화현상이나 탈수현상에 의해 점성이 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 현장 시험 계측치를 통해 주입범위는 거의 기초폭(B)의 범위 내에서 이루어져 주입에 따른 인접 구조물에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.
4. 토질별 그라우트 주입량에 따른 복원의 관계를 검토한 결과 복원이 진행되어짐에 따라 주입량에 따라 복원 효과가 향상되는 비선형적 관계를 나타나고 투수계수가 큰 사질토의 지반이 점성토 지반보다 목표 복원치에 이르기 위해 더 많은 주입량이 주입되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 상재 하중이 커질수록 주입량이 증가하는 것으로 나타났다

## 참고문헌

1. 천병식(1995), 지반주입공법, 원기술
2. 서울특별시 編(1996), 지반보강편람 : 주입공법중심, 서울특별시
3. 권오석 (2004), “기울어진 구조물의 복원을 위한 JOG공법의 모형실험 연구”, 단국대학교(2004).
4. 박종호 (2003), “가압 그라우팅 구근의 강도특성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회논문집
5. 박종호, 박용원, 김병일, 홍성수(2002), “지반보강 그라우팅 적정 주입압력에 관한 실험적연구” 대학 토목학회 학술발표회 논문집.
5. Karol, R.H.(1961), "Symposium on Grouting, Grouting in Flowing Water and Stratified Deposites", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 87.
6. Karol R.H(1983), "Chemical Grouting", Marcel Dekker, Inc.
7. Robert Bowen(1981), "Grouting in Engineering Practice", John Wiley & Sons.
8. Miki, G.(1973), "Chemical Stabilization of Sandy Soils By Grouting in Japan", Proceedings of The Eighth International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering.