

친환경 주입재를 사용한 중압 그라우팅 기법의 차수효과에 관한 연구 A Study on the Impervious Effect of Middle Pressure Grouting Technics in using the Environmentally Friendly Impregnation Materials

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyen Yeoh, 백기현³⁾, Ki-Hyun Baek, 최춘식⁴⁾, Choon-Sik, Choi, 정중주⁵⁾, Jong-Ju Jung, 도종남⁶⁾, Jong-Nam Do, 임주현⁷⁾, Joo-Heon Lim

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

²⁾ (주)가야이엔씨 대표이사, President, Gaya ENC

³⁾ (주)대우건설 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology

⁴⁾ (주)우지스 회장, Present, Woogis Co., Ltd.

⁵⁾ 한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

⁶⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정, Graduate Student, M.S. & Dept. of Civil Engineering, Hanyang University(donamtech@empal.com)

⁷⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, M.S. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : This paper studies the field applicability of the Special Chemical grouting Method(SCM) in reinforcing and reducing permeability of the back of an existing continuous wall. SCM uses double rod which imposes intermediate pressure(981~9,810kPa) to disturb, cut, discharge, and mix the ground. It is observed that a bulb is formed by using cement paste and environmentally friendly injection materials with minimal alkali leaching.

Uniaxial compression tests, test for chemical properties and fish poison test are performed. Test results indicate that the method results in higher durability, less leaching through use of the environmentally friendly injection material, and faster mobilization of the strength. In addition, field tests confirm the formation of the bulb and the seepage cutoff wall.

Key words : SCM, Eco-environmental grouting, Middle pressure, Permeability

1. 서 론

주입공법은 지반 내에 주입관을 삽입, 이것을 통하여 약액을 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간이 흐르면 지반이 고결, 경화되며 따라서 지반의 불투수화 또는 지반의 강도 증대를 주목적으로 하게 된다. 이와 같이 주입공법은 직접적인 차수공 또는 지반보강을 위해 비교적 간단하게 그리고 소규모로 실시할 수 있고 소음, 진동, 교통난 등의 공해가 적으며, 공기가 짧고 더욱이 다른 공법으로는 달성 불가능한 공사를 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 주입공법은 여러 가지 주입재가 사용되어 왔으나 환경유해성 등의 문제로 많은 부분이 제약되어 온 것이 사실이다. 현재 사용하고 있는 주입재는 환경유해성이 적은 물유리계와 시멘트계가 대부분이며 차수 및 지반강도증대를 주목적으로 사용한다. 종래, 주입공법은 응급대책 또는 보조공법으로서 주로 사용되어 왔으나, 점차 본격적·항구적 지반보강공법으로 되어가고 있으며 강도 및 내구성 증대, 차수성 증대 등 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 임의의 대상토의 물

리적 특성에 맞춰 주입제의 선정과 침투성의 문제, 그리고 Gel-time이나 점성에 따른 고결성의 변화 등에 대한 평가문제, 환경영향성 평가 문제 등에 대한 연구, 검토가 필요하다.

현재 우리나라에서 사용되는 차수공법의 경우 1개~4개의 노즐이 부착되어 있는 장치를 사용하고 있는데, 이 장치로 직경 $\phi 300\sim 500\text{mm}$ 정도의 작은 개량체를 만들기 위해서는 콧드의 인발시간을 빨리 해야 한다. 하지만 1개~4개의 노즐로 인발을 빠르게 했을 경우 파배기 또는 스크류형의 개량체가 형성되는 문제점이 발생한다. 또한 물유리계의 약액을 사용함으로써 알칼리 용출에 의한 내구성 저하 및 환경영향성 평가문제 등이 발생하고 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구는 기존의 문제점을 보완하기 위하여 개발된 친환경주입제를 중압에 의한 지반 절삭과 분사주입이 단일공정으로 이루어져 절삭과 동시에 지반내의 공극에 친환경적 약액과 시멘트paste를 균일하게 회전·분사하여 확실한 주입효과를 나타낼 수 있는 SCM(Special Chemical grouting Method)에 대한 실내시험 및 현장시험을 실시하였다.

2. 중압주입 개요

2.1 중압 분류체의 구조

공기 중에 분사된 중압분류체의 구조는 그림 1에 표시된 바와 같다. 초기영역 A는 노즐의 출력(p_0)이 일정한 영역, 즉 분류의 분사압력을 그대로 유지하는 영역이고, 초기영역에서 주요영역 B에 이동하는 부분 D를 천이영역이라 한다. 한편 주요영역 B는 jet 분류가 보다 발달한 A영역을 통과한 유체가 공기를 혼입하여 본래의 분류효과를 발휘하는 영역이다. 최종영역 C에서는 분류체가 불연속이 되어 본래의 분류효과가 충분히 발휘되지 않는다(천병식, 2005).

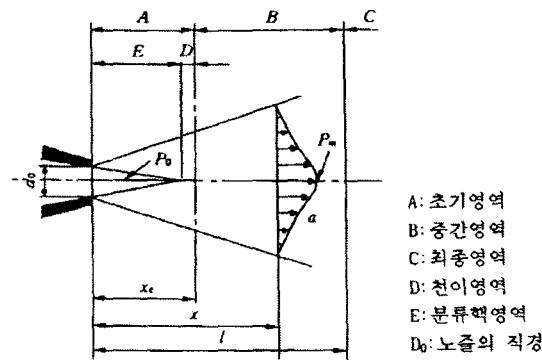


그림 1. 중압분류체의 구조

2.2 주입압과 거리와의 관계

분류체를 공기중에 분사시킨 경우에 분류체의 주요영역은 이론과 실험에 의해 식(1)과 같은 관계식이 성립된다(천병식, 2005).

$$\frac{P_m}{P_0} = \frac{x_c}{x} \quad (1)$$

여기서, x_c : 초기영역의 길이, $x_c = (75 \sim 100)d_0$ (m)

x : 분류축상의 노즐에서부터의 거리

P_0 : 노즐 입구에서의 분류의 동압(Pa)

P_m : 분류축상의 동압

d_0 : 노즐의 직경 (m)

한편, 수중분류의 경우에는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{P_m}{P_0} = \left(\frac{x_c}{x}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, $x_c = (6.0 \sim 6.5)d_0$ (m)

이러한 관계를 나타내고 있는 것이 그림 2이며, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 어느 일정구간에 있어서는 압력의 감소현상이 보이지 않고 있다. 이 부분은 분류핵에 해당되는 부분이다.

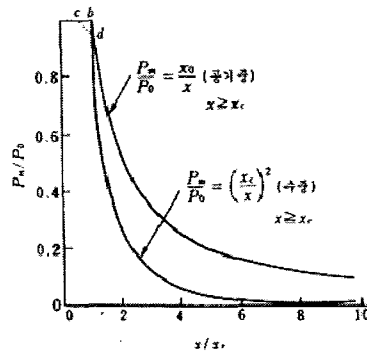


그림 2. 물분류 중심축상의 압력분포

이와 같은 구조체로 된 분류수 축상의 압력과 노즐구멍에서 거리와의 관계를 공기중 및 수중에 이르는 환경에서 측정된 사례를 그림 3에 A와 B로 표시하였다. 이에 의하면 분출압력 9,810kPa로 분사했을 시 공기중 A에 있어서는 노즐 출구에서 1000mm이상 원거리까지 영향을 미치는데 반해, 수중 B에서는 압력의 감소가 커 250mm정도에서 소멸되고 있다. 이는 지반 시추조사 결과 나타난 지층의 N치에 따른 SCM 지중시공 인발시험 시 최초 인발시간 적용에 사용되었다.

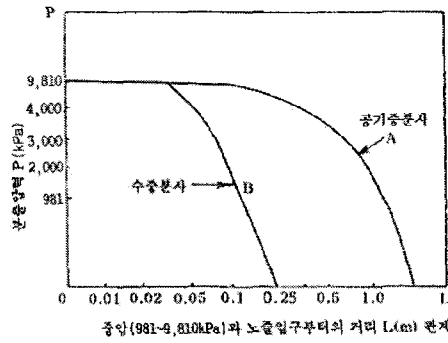


그림 3. 노즐입구에서의 거리와 압력과의 관계

2.3 절삭력과 유속과의 관계

중압분류체에 의해 발생하는 절삭력은 식(3)에 의해서 이론적으로 설명할 수 있다(천병식, 2005).

$$F = \rho \cdot Q \cdot V_m \quad (3)$$

여기서, F : 절삭력 (Pa)

ρ : 밀도 ($\rho = v/g$, kg/m^3)

Q : 유량 (m^3/s)

V_m : 유체의 평균유속 (m/s)

이 식에서 설명한 것처럼 밀도(ρ)와 유량(Q)과 유속(V_m)의 곱으로서 절삭력이 결정된다. 또한, 유량(Q)은 노즐의 단면적(A)과 유속(V_m)의 곱으로 식(4)와 같이 표시된다.

$$Q = A \cdot V_m \quad (4)$$

따라서, 식(1-3)의 절삭력 F 는 식(5)와 같이 된다.

$$F = \rho \cdot A \cdot (V_m)^2 \quad (5)$$

즉 밀도(ρ)와 노즐의 단면적(A)이 일정하면 절삭력은 유속(V_m)의 제곱에 비례한다. 따라서, 큰 파괴력을 얻기 위한 가장 효과적인 방법은 유속(V_m)을 크게 하면 되고, 유속을 크게 하려면 분류의 분사속도를 높게 하는 것이 좋다. 주입압과 분사속도의 관계는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{이므로,} \quad P_0 = \frac{F}{A} = \frac{\rho Q V_m}{A} = \frac{\rho A V_m^2}{A} = \rho V_m^2 \quad (6)$$

$$P_0 \propto V_m^2$$

2.4 물의 힘으로 흙이 절삭되는 원리

물의 힘으로 흙이 절삭되는 것은, 중압 분류수가 가진 운동 에너지가 지반의 조직 구조를 절삭함과 동시에 입자를 이동시켜 공간을 만들기 때문이다.

2.5 중압주입 시스템

SCM공법의 주입시스템은 그림 4와 같다. 주입시스템에 따라 시공하기 위한 자재와 시공 순서는 천공, 주입 및 인발의 과정으로 이루어진다.

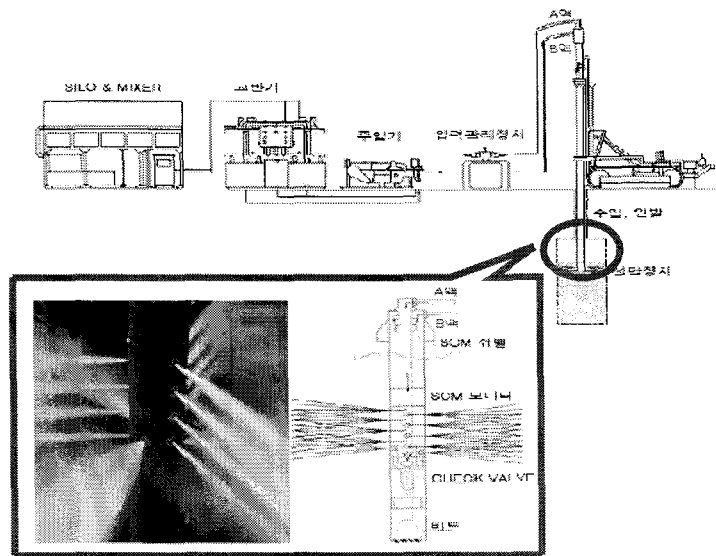


그림 4. 중압주입 시스템

2.5.1 천공

각 천공의 위치에 대한 지하매설물의 유무를 조사·확인한 후, 회전 수세식 천공기를 이용하여 물을 주입하면서 지반을 천공경 Ø89mm로 천공한다. 천공기는 회전식으로 하는 것을 원칙으로 하고 지층에 따라서는 회전충격식으로 할 수 있다. 전석층이 혼재한 지층인 경우에는 충격식도 병용하여 시행한다.

2.5.2 주입 및 인발

작업전 2중관의 회전수 및 양관 속도를 지층 구성 상태에 따라 소정의 수치에 맞춘 다음 중·고압 펌프에서는 천공시 공급하던 물을 시멘트 페이스트로 바꾸고 사용기준압력인 981~9,810kPa가 될 때까지 서서히 압력을 높인다. 그리고 A액(시멘트 Paste)과 B액(WGS-C1)을 주입기를 이용하여 입력관리장치로 각각 주입시켜 룯드에 장착된 특수 선단장치로 보내며, A액은 12개의 노즐로, B액은 3개의 노즐을 통해 중압(981~9,810kPa)으로 각각 분사된다. 이때 지반상으로 선단장치가 회전하면서 분사된 A액이 지반을 절삭함과 동시에 두개의 주입계가 혼합·주입되어 고결한다. 인발시간은 지반상태에 따라 다르게 적용한다.

3. 실내시험

주입재의 물리·화학적 특성을 알아보기 위하여 시멘트, 물, WGS-C1약액을 4:3:1의 배합비로 공시체를 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하여, 내구성 시험을 통해 압축강도와 내화학을 측정하고 환경영향성 평가를 위해 어독성 시험을 실시하였다. 또한 공시체 제작 시 Gel-time조절을 위해 경화제(시멘트 중량의 5%)를 첨가하였다.

3.1 내구성 평가시험

3.1.1 재령별 강도발현

일축압축시험을 실시하여 재령별 강도발현 시험을 실시하였다. 시험방법은 「흙의 일축압축시험방법(KSF 2314)」의 규정(한국표준협회, 2000)을 바탕으로 설정하였다. 재령별 일축압축강도 시험결과 1일 강도는 2,080.2kPa, 3일강도는 4701.9kPa으로 28일 강도인 4878.17kPa의 96.39% 강도가 3일 만에 조기발현 되어 보조 지반보강재로서의 적합성을 확인할 수 있었다.(그림 5 참조).

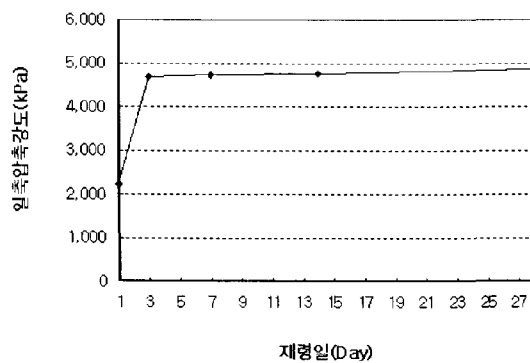


그림 5. 재령별 일축압축강도 발현

3.1.2 내화학적평가

고결체의 내화학을 평가하기 위해 일반적으로 해수에는 약 35g/kg의 각종 염류가 용해되어 있으며 시멘트 수화물의 열화에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 $MgCl_2$ 및 $MgSO_4$ 이므로 자연해수의 6배인 $MgCl_2$ 용액 및 자연해수의 10배인 $MgSO_4$ 용액에 WGS-C1과 시멘트 혼합물의 공시체와 보통포틀랜드시멘트(OPC) 공시체를 시험장치(천병식, 2005)에 침적시키고 공시체의 길이변화를 비교 측정(천병식, 1997)하였다.

시험결과는 표 1과 같고 이 결과를 그래프로 나타내면 그림 6, 그림 7과 같다. 이 결과에 의하면 WGS-C1과 시멘트 혼합물은 보통포틀랜드시멘트(OPC) 보다 염화물 및 황산염 수용액에 침적시킨 경우 팽창이 상대적으로 매우 적게 발생하는 것으로 나타남을 알 수 있다.

표 1. 주입제 종류별 팽창측정 실험결과

침적용액	재령(주)	팽창율(×10 ⁻⁴)					
		0	4	8	13	19	26
2,500 g/ml MgCl ₂ (자연해수 6배)	보통포틀랜드시멘트(OPC)	0	2.7	8.6	11.5	13.3	15/7
	WGS-C1 + 보통포틀랜드시멘트	0	1.5	3.7	4.3	4.6	5.2
2,500 g/ml MgSO ₄ (자연해수 10배)	보통포틀랜드시멘트(OPC)	0	2.5	5.1	10.6	42.7	69.3
	WGS-C1 + 보통포틀랜드시멘트	0	1.2	3.1	4.1	12.8	18.5

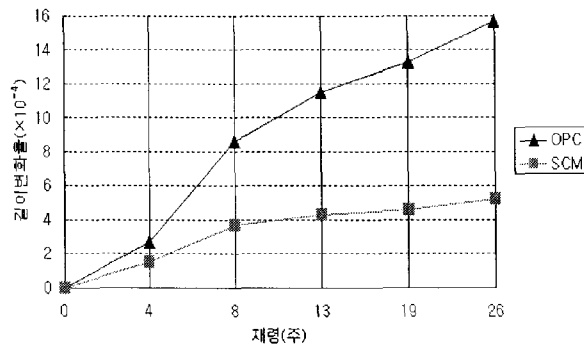


그림 6. 자연해수의 6배 농도 MgCl₂ 수용액 침적실험 후 길이변화 경향

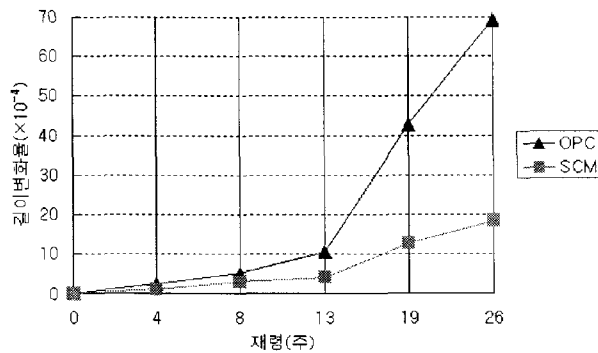
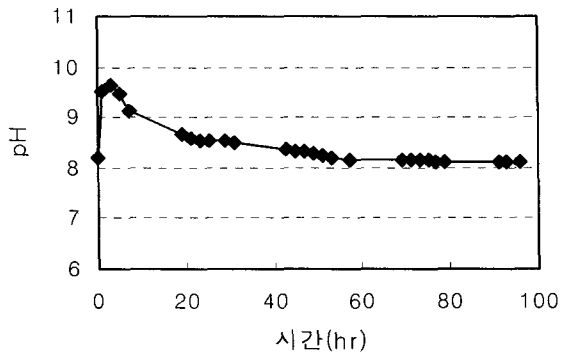


그림 7. 자연해수의 10배 농도 MgSO₄ 수용액 침적실험 후 길이변화 경향

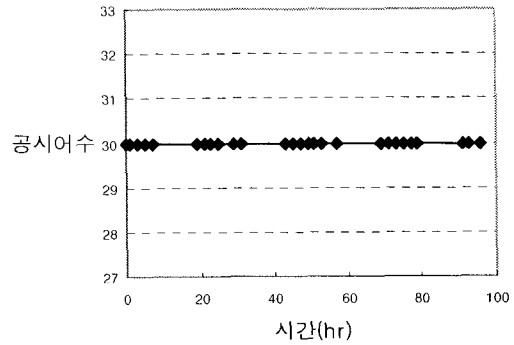
3.2 환경영향성 시험

3.2.1 어독성시험

약액주입에 의한 환경오염의 정도를 파악하기 위해 「어류에 의한 급성 독시험(KS M 0111)」의 규정을 바탕으로(한국표준협회, 1993)으로 시험(천병식 등, 1998a)을 실시하였다. 또한 알칼리 용탈에 의한 pH 변화를 측정(천병식 등, 1998b)하였다. 시험 결과는 그림 8과 같으며 pH가 9.65까지 증가하였으나 3시간 이후부터 감소하기 시작하여 50시간 이후 초기 pH 값을 회복하였다. 또한 공시어의 수가 초기 숫자인 30마리를 유지하여 알칼리 용탈에 의한 오염도가 적은 것으로 판단되어 친환경적임을 알 수 있었다.



(a) 시간에 따른 pH 변화

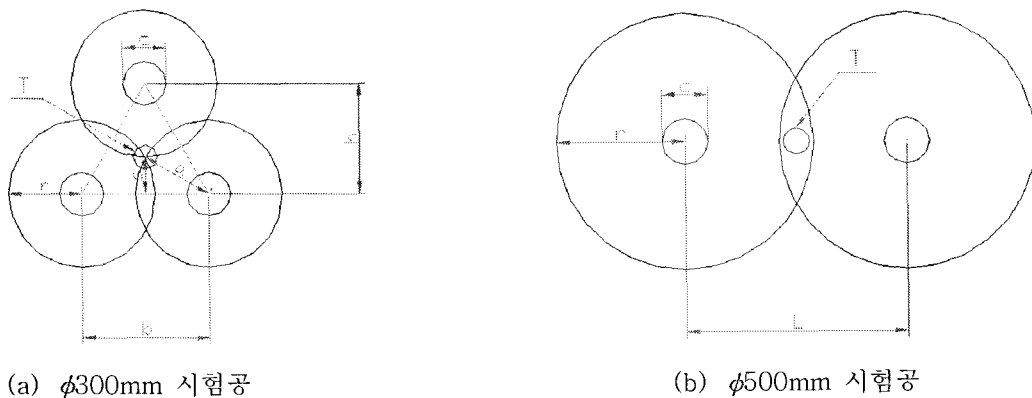


(b) 시간에 따른 공시어수 변화

그림 8. 시간에 따른 pH변화 및 공시어 수

4. 현장시험

본 시험시공 장소는 충남 천안시 성정동 철도청부지 일대이며 지반조사를 실시한 후 시험시공을 실시하고 14일, 28일 동안 양생하여 현장투수시험 및 공내재하시험을 실시하였다. 시험시공은 ϕ 300mm와 500mm 공으로 실시하였으며 ϕ 300mm공은 3공을 삼각형배치로, ϕ 500mm공은 2공을 선형으로 배치하였으며 현장투수시험 및 공내재하시험 위치는 T지점이다(그림 9 참조).



(a) ϕ 300mm 시험공

(b) ϕ 500mm 시험공

그림 9. 시험시공 배치도

4.1 현장투수시험

시추조사와 병행하여 지반의 투수성을 파악하기 위해 5분 동안 변수위투수시험으로 시추공의 심도 3, 6, 9m 지점에서 현장투수시험을 실시하였다.

현장투수시험 결과는 표 2와 같으며 원지반의 $\alpha \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 과 비교하여 시험시공 후 투수계수가 $\alpha \times 10^{-4} \sim \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 차수효과가 양호하게 개선됨을 알 수 있었다. 공번 BH-1은 ϕ 300mm, BH-2는 ϕ 500mm 구근을 나타낸다.

표 2. 현장투수시험 결과

심 도(m)	원지반(cm/s)	공 변	14일(cm/s)	28일(cm/s)
3	2.82×10^{-3}	BH-1	1.25×10^{-5}	1.21×10^{-5}
		BH-2	1.73×10^{-5}	1.68×10^{-5}
6	3.62×10^{-3}	BH-1	9.83×10^{-5}	6.99×10^{-5}
		BH-2	1.41×10^{-4}	1.30×10^{-4}
9	2.53×10^{-3}	BH-1	1.04×10^{-4}	3.59×10^{-5}
		BH-2	8.45×10^{-5}	8.18×10^{-5}

4.2 공내재하시험

시추공의 공벽면을 가압하고, 이때 발생하는 공벽면의 변형량을 측정함으로써 지반의 성질(강도, 변형특성)을 파악하기 위하여 ELASTMETER 4018을 이용하여 공내재하시험을 실시하였다. 공내재하시험 결과는 표 3과 같으며 원지반과 비교하여 시험시공 후 14일, 28일의 변형계수 및 탄성계수가 증가하는 것으로 보아 강도가 증대함을 알 수 있다. 공변 BH-1은 $\phi 300\text{mm}$, BH-2는 $\phi 500\text{mm}$ 구경을 나타낸다.

표 3. 공내재하시험 결과

단위(MPa)

분류	지반	원지반	14일		28일	
			BH-1	BH-2	BH-1	BH-2
변형계수		22.54	541.19	644.41	1114.46	1548.11
탄성계수		55.40	885.79	1052.87	1984.62	2370.98

5. 결 론

본 연구에서는 친환경주입재에 의한 중압 그라우팅(SCM)의 차수효과를 알아보기 위하여 중압분류체의 개요에 대해 살펴보고 실내시험 및 현장시험 결과를 분석·정리하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령별 일축압축강도 시험결과 1일강도는 2,080.2kPa, 3일강도는 4701.9kPa으로 28일 강도인 4878.17kPa의 96.39% 강도가 3일만에 조기발현 되어 보조 지반보강재로서의 적합성을 확인할 수 있었다.
- 2) 내화학적 시험 결과 WGS-C1과 시멘트 혼합물은 보통포틀랜드시멘트(OPC) 보다 염화물 및 황산염 수용액에 침적시킨 경우 팽창은 상대적으로 매우 적게 발생하는 것으로 나타났으며 내화학성이 우수함을 알 수 있었다.
- 3) 어독성 시험결과 pH가 초기에는 9.65까지 증가하였으나 3시간 이후부터 감소하기 시작하여 50시간 이후 초기 pH 값을 회복하였다. 또한 공시어의 수가 초기 숫자인 30마리를 유지하여 알칼리 용탈에 의한 오염도가 적은 것으로 판단되어 친환경적임을 알 수 있었다.

- 4) 현장투수시험 결과 원지반의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 에서 시험시공 후 투수계수가 $\alpha \times 10^{-4} \sim \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 차수효과가 양호하게 개선됨을 알 수 있었다.
- 5) 공내재하시험 결과 원지반과 비교하여 시험시공 후 14일, 28일의 변형계수 및 탄성계수가 증가하는 것으로 보아 강도가 증대함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 천병식(1997), **지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구**, 건설교통부, pp.152~186.
2. 천병식, 김진춘(1998a), “어독성 시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가”, **대한토목학회논문집**, 제 18권, 제 III-4호, pp.531~538.
3. 천병식, 김진춘(1998b), “지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구”, **1998년도 한국지반공학회 봄학술 발표회 논문집**, pp.321~326.
4. 천병식(2005), **최신 지반주입 이론과 실제**, 원기술, p.23, pp.32~33, pp.169~170.
5. 한국표준협회(1993), KS M 0111, **공장폐수 시험방법**.
6. 한국표준협회(2000), KS F 2413, **흙의 일축압축 시험방법**.