실내모형시험을 통한 OPC와 친환경 MIS 그라우트의 지반 침투성능 분석

안정호¹ · 임희대^{2*} · 최동남³ · 송영수⁴

¹한국수자원공사, ²충남대학교, ³삼성건설, ⁴지오텍엔지니어링(주)

Analysis of Permeation Efficiency in Soil for OPC and Non-Pollution MIS Grouts by Laboratory Model Test

Jung-Ho Ahn¹, Heui-Dae Lim^{2*}, Dong-Nam Choi³ and Young-Su Song⁴

¹Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea

²Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

³Samsung C&T Corporation, Daechung E. Spilway Con. Daejeon, 306-814, Korea

⁴Geotech Engineering Corporation, Daewoo Dio-Valley, Anyang 431-763, Korea

In this paper, a laboratory model test was conducted to evaluate grouting efficiency of ordinary portland cement(OPC) and micro cement used in MIS(Micro-Injection Process System). For this research, a injection equipment was developed for pressure permeation which can evenly simulate various grouting tests in a laboratory and suggested a standard for the production of the test specimen. Using the injection device, the laboratory injection tests of grouts were prepared with water/cement ratio of 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, and 5:1. The analysis of injection test for pressure permeation showed that the efficiency of injection increases linearly as the water/cement ratio increases. Comparison of efficiency of the injection indicates that MIS with a relatively smaller average diameter shows more efficient injection than the OPC. In the low ratio of water/cement as 2:1~1:1, the injection efficiency of OPC was especially poor. Also, a nonlinear grout volume-injection time is represented by a hyperbolic model and grout volume predicted by hyperbolic model was compared with the value measured. From the comparison, it shows that the hyperbolic model has the potential of evaluating the efficiency of grouting.

Key words : grout, ratio of water/cement, pressure permeation test, injection, efficiency of permeation

본 연구에서는 보통 포틀랜드 시멘트 OPC(Ordinary Portland Cement)와 MIS (Micro-Injection Process System) 공법에서 사용하고 있는 마이크로 시멘트의 지반 침투성능을 평가하기 위해 실내모형시험을 수행하였다. 이를 위해 그라우트 주입을 일정한 방법으로 재현할 수 있는 가압침투주입장치를 제작하였으며 공시체 제작방법을 마련하였다. 물시멘트비를 5:1에서 1:1까지 변화하여 주입시험을 수행한 결과 물시멘트비가 증가함에 따라 침투성능이 선형적으로 증가하였으며 주입성능을 비교하면 상대적으로 비표면적이 큰 MIS가 OPC보다 동일한 배합비에서 침투성능이 우수한 것으로 나타났다. 특히 물시멘트비가 2:1~1:1의 부배합에서 OPC의 침투성능이 매우 낮은 것으로 관찰되었다. 또한 침투량과 주입시간과의 관계곡선을 hyperbolic으로 모델링하여 예측치를 산정하고 이를 측정치와 비교한 결과 그라우트 성능평가에 대한 hyperbolic 모델의 잠재력이 검증되었다.

주요어 : 그라우트, 물시멘트비, 가압침투시험, 주입, 침투성능

1. 서 론

침투 그라우팅은 그라우트를 지반에 주입하여 고결시키는 연약지반 안정처리공법중의 하나로서 간단하고

신속할 뿐만 아니라 응급처리에도 뛰어나다는 장점을 가지고 있으며 댐 및 제방의 차수, 시가지의 개착 공사 시 흩막이 배면의 지수, 인접구조물의 보호 및 지반침하 방지 등 여러 가지 목적으로 사용되고 있다.

*Corresponding author: hdlm@cnu.ac.kr

1800년대 이전의 그라우팅은 대부분 댐의 차수를 위해 기반암의 균열이나 미세한 틈에 수용성 현탁액, 슬러리, 석회 및 점토 등을 주입하는 것이었다(Warner, 2004). 때문에 그라우트는 유동성이 매우 크고 입자의 최대 크기가 암반의 틈새보다 훨씬 작아야만 했다. 압력을 이용한 최초의 침투 그라우팅은 프랑스에서 Bérigny(1832)가 처음으로 시도하였다. 현재 사용하고 있는 그라우트의 어원은 여러 가지 주장이 있으나 원래 죽과 비슷한 연경도를 지닌 액체 몰탈의 의미와 “to grout”라는 동사의 의미를 동시에 가지고 있다(Glossop, 1961; Houlby, 1992).

독일에서는 1864년 처음으로 광산의 차수 그라우팅에 시멘트를 사용하였으며, 프랑스에서는 1880년 최초로 시멘트 그라우팅을 터널에 적용하였다(Bachy, 1934). ASCE(American Society of Civil Engineers)는 1962년 시멘트 그라우트의 재료에서 주입방법에 이르기까지 전반적인 내용에 대한 실무지침을 마련하였으며, 이 지침은 물/시멘트비의 범위를 5:1에서 0.8:1로 규정하고 있다. 이후 ASCE는 “시멘트 그라우팅(ASCE, 1963)”과 “케미컬 그라우팅(ASCE, 1966)”에 대한 지침서를 발간하였다. 최근 일본에서는 비표면적이 $11,300 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 울트라 시멘트와 다양한 경화제 및 분산제를 개발하여 시멘트 그라우트로 사용하고 있다(Sawaki, 2004).

우리나라는 1960년대 소양강댐을 비롯한 다목적댐의 건설과 1970년대 중반부터 시작한 지하철공사에서 그라우팅공법이 본격적으로 활용되기 시작하였으나, 초기에는 토목기술자들의 전문지식과 중요성에 대한 인식 부족으로 기술축적이 제대로 이루어지지 않았다. 이후 농업기반공사는 제방의 그라우팅 경험을 바탕으로 그라우팅시방서(KRCC, 1997)를 마련하였으며, 최근 한국수자원공사에서는 댐 시공 및 보수·보강을 통하여 그라우팅 시공지침(KWRC, 2008)을 작성하였다.

특히, 지반의 차수목적으로 시멘트 그라우팅을 실시할 경우 그라우트의 유동성, 입경 및 블리딩이 중요한 역할을 한다. 이들의 성질을 지배하는 가장 중요한 요소는 그라우트의 물시멘트비이며 이에 따라 블리딩, 소성 및 최종 강도가 달라진다(Littlejohn, 1982).

일반적으로 보통포틀랜드 시멘트를 사용하고 있으나 물시멘트비의 조절로 소정의 효과를 얻기 곤란한 경우에는 평균입경이 작은 마이크로 시멘트를 사용한다. 그동안 국내에서도 보강 전후의 공내재하시험을 통한 마이크로 시멘트의 실용화(KRCC, 1997), 초미립자 시멘트의 주입특성(Kim, 1999), 마이크로 복합실리카 그라

우트의 공학적 특성(Chun *et al.*, 2000) 및 초미립자 시멘트의 이동 특성(Lee and Im, 2007) 등을 통하여 마이크로 시멘트에 대한 연구가 수행되어 왔다.

주입에 의한 개량효과를 생각할 때 가장 중요한 것은 지반 속에서의 시멘트 그라우트의 주입형태이다. 시멘트 그라우트를 소정의 영역에 주입하여 지반을 고결시킬 수 있으면 개량효과는 충분하다고 할 수 있다. 그러나 흙 속에 주입되는 그라우트의 움직임이 분명하지 않기 때문에 주입형태를 파악하기 곤란한 경우도 적지 않다. 그라우트의 주입형태는 지반조건에 의해 매우 다르다(FHWA, 2000). 투수성이 비교적 큰 사질토에서는 흙 속의 간극부분을 시멘트 그라우트로 대체하는 즉, 침투주입이 가능하다. 그러나 투수성이 작은 사질토, 실트, 점성토에서는 침투주입이 곤란하여 그라우트가 지반 속에 맥상으로 들어가는 할열주입이 될 수 있다.

또한, 주입형태는 지반조건뿐만 아니라 물시멘트비 및 시멘트의 입경에 따라 좌우된다(Houlby, 1990; Kutzner, 1996). 따라서 지반조건이나 시멘트 그라우트의 성질과 상태에 따라 시멘트 그라우트가 소정의 영역에 침투하지 못하기 때문에 주입에 의한 지반의 개량이 충분하지 않고 주입공법의 채용자체가 적당하지 않는 경우가 생길 수 있다. 주입에 의한 침투효과를 평가하는 방법으로는 실제 지반에서 시험 주입하는 것이 가장 확실한 방법이나, 이와 같은 시험주입은 많은 경비와 시간을 필요로 한다. 따라서 실내에서 주입의 적합여부나 침투효과를 개략적으로 파악하기 위한 간단하고 실용적인 시험방법이 필요하게 된다. 우리나라의 경우 아직 실내에서 그라우트 주입을 재현할 수 있는 기준 및 장비가 마련되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 실내에서 시멘트 그라우트를 간단하고 쉽게 주입할 수 있을 뿐만 아니라 침투결과를 직접 확인할 수 있는 가압침투시험 장치를 자체 개발하였고 공시체의 표준적인 제작방법과 적정 배합비 기준을 마련하였으며, 보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 마이크로 시멘트인 MIS(Micro-Injection Process System) 시멘트의 물시멘트비를 변화시켜 가압침투시험을 실시하였다. 또한 시험결과를 분석하여 배합비, 경과시간 및 침투유량에 대한 모델을 제안하여 예측치를 산정하고 이를 실측치와 비교·검증함으로써 OPC와 MIS의 배합비별 침투유량 산정 및 성능 비교를 가능하게 하였다. 또한 연약지반의 안정처리공법에 사용되는 주입제의 종류, 배합시간 및 배합량에 따라 주변 암석 및 토양에 환경오염을 유발시킬 수 있는 잠재적 오염원이 되기 때문에 이 연구를 통하여 환경오염인자의 저감에

도 기여하리라 생각된다.

MIS는 용탈현상이 발생하지 않기 때문에 반영구적 구조이고, 강도의 저감이 적다. 또한 용탈현상의 발생으로 Cr^{6+} 의 발생이 거의 없어 친환경적인 공법이다.

2. 지반 침투그라우팅 공법의 종류

2.1. 지반 그라우팅

지반에 그라우팅을 하는 목적은 매우 다양하고 그라우팅 방법과 재료에 따라 주입결과가 다르게 나타난다. 지반에 대한 그라우팅 기술은 보통 침투그라우팅, 콤팩션 그라우팅, 제트 그라우팅 및 할렐그라우팅 방법 중 하나로서 설명된다(Michael *et al.*, 1995). 그라우팅 기술은 전 세계적으로 개착공법과 터널굴착공사에 사용되어 왔을 뿐만 아니라 침하보수, 기초보강, 지하수 조절, 댐 및 제방의 안정, 구조물에 대한 지지력의 제공 등 광범위하게 사용되어왔다. 입상토에 대한 그라우트 재료의 적용범위는 지반의 초기투수계수 등의 지반특성에 따라 다르다.

AFTES(Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 1991)는 균열의 크기와 모양에 따른 그라우트의 형태와 입상토의 종류 및 초기 투수계수 등 지반조건에 따른 그라우트의 적용 범위를 제시하였다. 이에 따르면 1 mm 이상의 균열에 대해서는 시멘트 그라우트가 가능하며, 1 mm 이하의 균열의 경우에는 실리카 및 아크릴계의 특수 그라우팅이 요구된다. 또한 투수계수를 기준으로 할 때 1×10^{-3} cm/sec 이상의 경우 시멘트 그라우팅이 가능한 것으로 보고 있다.

2.2. 침투그라우팅

침투그라우팅은 주입재가 토립자의 골격을 교란시키는 일없이 토립자 간극에 침투하여 주입되며 주입재는 소정의 시간을 지나면 고결된다(FHWA, 2000). 이 공법에 의한 지반개량의 메커니즘은 주입재가 토립자 사이에 차지하고 있는 물이나 공기를 밀어내어 치환하는 것이다. 이는 기계적으로 흙과 고화재를 혼합교반하거나 압축공기 및 물을 사용하여 흙을 다지는 다른 지반개량과는 크게 다르며, 원 지반이 가지고 있는 토립자 사이의 맞물림을 그대로 이용하는 특징을 가지고 있다.

침투 그라우팅은 주로 차수목적 또는 비점성토의 강도 증가 목적으로 사용되어왔다. 일반적으로 재료 구성 요소에 따라 약액주입공법과 시멘트계 주입공법으로 대별된다. 침투 그라우팅의 공정은 그라우트 재료의 혼합, 주입 파이프로의 펌핑 및 슬리브관이나 개단

관을 통한 주입으로 구성된다. 현장에서 그라우트 혼합이 필요한 경우 연속적인 계량 공정을 사용하지만 배치 공정으로도 혼합할 수 있다.

그라우트 주입 과정은 그라우트의 고결이나 경화시간, 주입비와 주입압에 따라 조정된다(FHWA, 2000). 그라우트의 부피 측정과 그라우트의 경화시간 및 혼합 비율을 조정하기 위해서 계측기가 필요하며 상당한 정확성과 정밀성을 가지고 있어야 한다. 침투 그라우트는 흙이나 암석 매트릭스의 간극을 침투할 수 있을 정도로 상당히 낮은 점성력을 가지고 있으며 매트릭스의 수압할렬과 지표면의 용기를 방지하려면 상대적으로 낮은 주입압이 요구된다.

그라우트 배합은 흙의 투수성이나 간극 크기에 기초하며 #200체 통과량이 12%이하의 세립토를 함유한 흙은 그라우트가 용이하다. 또한 12~15%의 세립토를 함유한 흙은 보통 정도의 그라우트가 가능하며, 15~20%의 세립토를 함유한 흙은 최소한의 그라우트가 가능하다(Task Force 27, 1990). 연구결과에 따라서는 세립토의 함유량에 약간의 차이가 있을 수 있다(Baker, 1982). 또한 투수계수가 10^{-1} cm/sec~ 10^{-3} cm/sec정도의 지반은 침투주입이 용이하고 투수계수가 10^{-3} cm/sec~ 10^{-4} cm/sec의 지반은 보통이 그라우트가 가능하며 10^{-4} cm/sec~ 10^{-5} cm/sec의 지반에서는 그라우트 주입이 곤란하다(FHWA, 2000).

그라우트 주입을 제어하는 가장 큰 요소는 간극의 크기, 간극 크기의 분포 및 그라우트의 점성 등이며 그라우트의 85% 통과입경에 대한 토립자 15% 통과입경의 비로 정의된 N값을 실무에서 많이 이용하고 있다. 점성의 경우 작은 점성에 낮은 강도를 갖는 그라우트는 조금 더 큰 점성과 큰 강도의 그라우트보다 작은 간극의 흙에 스며든다.

3. 침투모형시험 방법

3.1. 주입시험장비

현장에서 수행하고 있는 시멘트 그라우트 주입방법을 실내에서 축소하여 실시하려면 주입장비를 소형화하고 주입대상 지반을 공시체로 제작해야 한다. 실내에서 현장 조건에 맞게 주입하려면 압력조절장치 및 주입장비뿐만 아니라 공시체 제작에 대한 표준이 필요하다. 공시체를 원래 지반의 상태 그대로 성형하는데 상당한 어려움이 따른다. 국내에는 아직 시멘트 그라우트의 침투주입 시험장치에 대한 기준이 없어 일본의 토질공학회 기준(JSFT 831-1990)을 참고하여 Fig. 1의

Fig. 1. Simplified map of injection equipment.

Fig. 2. Pressure control equipment.

Fig. 3. Injection for permeate.

개념도와 같이 자체 제작하였다.

Fig. 2는 압력조절장치로서 에어 콤푸레서에서 가압된 공기를 일정한 압력으로 조절하여 주입장치에 전달하는 역할을 하며 3개 시료의 압력을 동시에 제어할 수 있다. Fig. 3은 믹서에서 교반된 그라우트를 주입 몰드에 일정한 압력으로 주입하는 기구이며, 사진 좌측에 있는 아크릴 실린더는 시멘트 그라우트 주입 전

Fig. 4. Silica sand No.6, Curve by particle size distribution of Silica sand No.6.

에 물을 주입하여 시료의 투수계수를 측정하는 역할을 하며 사진 좌측과 우측에 있는 3개의 철제 실린더는 공시체제작용 몰드이다.

3.2. 공시체 제작

현장에서 주입의 성공여부나 주입 후의 고결토의 성질과 상태는 주입 전의 흙의 간극물에 좌우되기 때문에 침투주입의 효과를 확인하려면 실제 지반과 동일한 상태인 흙을 성형하여 그라우트를 주입하여 조사하는 것이 확실한 방법이나, 교란되지 않은 상태의 흙을 채취하는데 어려움이 많이 따른다. 때문에 시료를 채취하여 실제 지반의 상태에 가까워지도록 다지는 것이 중요하다. 실내 주입시험에서 가능한 한 높은 침투성을 발휘하기 위해 시멘트의 종류와 그 배합조건 등을 선정할 경우에는 공시체의 제작을 용이하게 하여 시험결과와 재현성을 좋게 할 필요가 있으며 공시체 제작을 위한 몰드는 폭 150 mm, 높이 170 mm의 규격으로 제작하였다.

침투를 위한 시료로는 표준화를 위해 국내에서 생산하고 있는 주문진 표준사를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단되어 표준사를 사용하여 가압침투시험을 실시하였으나, OPC는 물론 MIS 조차 주입이 원활하지 못하였다. 이는 표준사에 세립분이 많아 간극이 매우 작고 이들 간극을 시멘트 그라우트가 통과하지 못하였기 때문이다. 따라서 표준사의 #200체 통과량을 제거하고 입도를 조정하여 시료를 제작한 결과 물시멘트비가 낮은 부배합의 경우에도 시멘트 그라우트가 몰드내의 시료를 짧은 시간에 통과하여 유출되는 현상이 발생하였다. 3회 이상의 시험을 반복 수행한 결과 표준사를 가지고는 시멘트 그라우트 시험을 수행할 수 없을 뿐만 아니라 표준사 정도의 입도 또는 투수계수를

Table 1. Material property of sample

Sample	Specific Gravity	Dry Density (g/cm ³)	Void Ratio (%)	Permeability (cm/sec)
Silica Sand No. 6	2.61	1.47	43.3	2.1×10^{-1}
Silica Sand No. 3	2.67	1.53	42.2	-

가진 지반에서는 시멘트 그라우트의 주입이 곤란하다는 사실을 알 수 있었다.

따라서 시험의 용이성과 편리성을 위해 주문진 표준사 대신 규사 6호를 사용하였다. 표준사와 비교할 때 전반적으로 침투성능이 개선되었으나 부배합에서는 침투가 잘 이루어 지지 않았다. #30체를 통과하고 #140체에 잔류한 규사 6호를 가지고 3층으로 나누어 진동다짐으로 시료를 성형한 결과 시멘트 그라우트가 원활하게 주입되었다. 필터재료로는 #10체를 통과하고 #30체에 잔류한 규사 3호를 사용하였다. 규사 6호의 비중 및 공시체의 건조단위중량 및 간극률은 다음과 같다.

3.3. 그라우트의 주입 방법

그라우팅의 목적은 균열을 충분히 채우는 것이며 그라우팅의 품질은 유동성, 불리딩 및 지반의 간극 등 다양한 요인에 따라 복합적으로 결정되기 때문에 일정한 방법으로 규정하기 어렵다. 여러 가지 요인 중에는 물시멘트비(w/c)가 가장 큰 요인으로 작용하기 때문에 부배합으로 주입하는 것이 최선이라고 주장하는 학자들이 많이 있다. Houlby(1982) 와 Kunzner(1996) 등은 물시멘트비를 3보다 더 빈배합으로 해서는 안 된다고 주장하였으며 미공병단에서는 4보다 묽게 해서는 안 된다는 주장이 있다. 또한 미 내무성 개척국에서 12:1까지 허용하고 있으나 그동안 많은 연구결과를 통하여 5:1을 적용하고 있다.

그동안 국내 댐 및 제방의 보수·보강 공사의 경우 1:1에서 5:1의 범위의 물시멘트가 보편적으로 적용하였으며 코어의 침투그라우팅에서 2:1의 배합비가 가장 많이 사용되었다. 이러한 근거를 바탕으로 가압침투주입에서는 5:1에서 1:1까지의 물시멘트비를 선정하였다.

시멘트 그라우트의 유동성은 동일한 배합비라도 배합 믹서에 따라 약간의 차이가 있으므로 일정한 배합이 이루어지도록 믹서의 크기와 교반축의 회전속도를 규정할 필요가 있다. 실내에서 사용하고 있는 믹서의 용량에 알맞게 배합량을 조정하였으며, 회전속도를 1,500 rpm으로 일정하게 유지하여 매회 동일한 배합이 이루어지도록 하였다.

몰드 안의 다져진 시료에 그라우트가 침투할 때 침투량을 정확히 측정하기 위해서는 그라우트 주입 전에

시료의 간극을 물로 채워야 할뿐만 아니라 시료의 투수계수를 측정하여 공시체가 표준규격을 만족하는지 검증해야 한다. 이 때 물 및 그라우트 주입압력에 대한 규정이 필요하다. 주입압력은 일반적으로 그라우트의 주입속도와 점성계수에 비례하고, 지반의 투수계수에 반비례한다. 따라서 소정량의 그라우트가 겔화시간 내에 주입될 수 있도록 시료의 투수성이나 그라우트의 점성에 따라 주입압력을 조절할 필요가 있다. 본 기준 제작방법에서는 시료가 몰드에서 구속되어 있기 때문에 주입압력이 높아져도 그라우트가 시료 속을 맥상으로 빠져나가는 할열주입은 발생하기 힘들 것으로 예상된다.

그라우트의 주입압력은 일본 토질공학회에서 사용하고 있는 0.5 kg/cm²을 적용하였으며 그라우트의 주입시간은 믹서의 용량 및 공시체의 규격을 고려하여 최대 60초로 규정하였다.

4. 시험결과

4.1. 재료 및 배합비별 침투특성

배합비별 OPC와 MIS의 침투시간에 따른 침투량을 도시하면 Fig. 5에서 Fig. 9와 같다. 두 시멘트 모두 물시멘트비의 증가에 따라 침투량이 선형적으로 증가하였으며 OPC에 비하여 비표적이 큰 MIS의 침투성능이 월등한 것으로 나타났다. OPC의 경우 부배합인 1:1 및 2:1의 배합비에서 그라우트가 매우 적게 침투되

Fig. 5. Permeation velocity(time) and permeation volume (w/c=1).

Fig. 6. Permeation velocity(time) and permeation volume (w/c=2).

Fig. 9. Permeation velocity(time) and permeation volume (w/c=5).

Fig. 7. Permeation velocity(time) and permeation volume (w/c=3).

Fig. 10. Comparison of extreme permeation volume for OPC and MIS.

Fig. 8. Permeation velocity(time) and permeation volume (w/c=4).

있으며 물시멘트비의 증가에 따라 MIS의 침투량과 차이가 감소되는 현상을 보였다.

주입압 0.5 kg/cm²에서 MIS의 최대침투량에 대한

OPC의 최대침투량을 비율로 나타내면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 배합비 1:1 및 2:1과 같은 부배합에서 약 7배의 침투량 차이를 나타내었으나 배합비 4:1과 5:1의 빈배합에서는 2배 정도의 차이를 보였다. 이러한 결과로 볼 때 배합비 3:1을 경계로 이보다 빈배합일 경우에는 OPC를 사용하는 것이 경제적인 수 있으나 배합비 3:1 이하의 빈배합일 경우 과도한 압력으로 수압할렬이나 맥상주입의 가능성이 크다, 따라서 배합비 3:1 이하의 부배합에서는 MIS를 사용하는 것이 안전성 확보 및 침투성능의 개선에 효과적이다.

4.2. 침투시간과 주입량 모델링

Fig. 5에서 Fig. 8과 같이 침투성능이 우수한 MIS의 경우 침투시간별 침투량 곡선이 Fig. 11의 hyperbolic 곡선과 비슷한 모양을 보이고 있으며 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

Fig. 11. Hyperbolic curve of permeation volume and time.

Fig. 12. Linear relation of permeation volume and time.

$$Q = \frac{t}{\frac{1}{G_i} + \frac{t}{Q_{ult}}} \quad (1)$$

여기서 Q 는 침투유량, Q_{ult} 는 극한상태의 침투유량, t 는 경과시간이며 G_i 는 초기 접선 침투율이다.

수치모델링을 위하여 식 (1)과 Fig. 11에 나타난 hyperbolic 곡선을 변형시키면 식 (2) 및 Fig. 12와 같이 된다.

$$t/Q = \frac{1}{\frac{1}{G_i} + \frac{t}{Q_{ult}}} \quad (2)$$

초기 접선 침투율과 극한 상태의 침투유량은 Fig. 5에서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 물시멘트비에 따라 증가하는 경향을 가지고 있으며 비선형적인 변화를 보이고 있으므로 이를 수식으로 나타내면 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

Fig. 13. Linear relation of permeation volume and time.

Fig. 14. Relation of initial permeation percent of grout and water-cement ratio.

$$G_i = \alpha(w/c)^m \quad (3)$$

$$Q_{ult} = \beta(w/c)^n \quad (4)$$

따라서 식 (3)과 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 시간경과에 따른 침투량은 식 (5)와 같이 된다.

$$Q = \frac{t}{\frac{1}{\alpha(w/c)^m} + \frac{t}{\beta(w/c)^n}} \quad (5)$$

4.3. Hyperbolic 모델의 검증

Fig. 5에서 Fig. 8에 도시된 실험결과를 이용하여 배합비별 침투시간과 침투량의 선형적 관계를 나타내면 Fig. 13과 같이 된다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 배합비의 증가에 따라 초기 접선 침투율과 극한상태의 침투량은 비선형적 모습을 나타내고 있으며, 배합비에 따른 초기 접선 침투율과 극한상태의 침투량을 구하여 도시하면 각각 Fig. 14 및 Fig. 15와 같다.

Fig. 14와 Fig. 15에 도시된 시험결과를 이용하여

Fig. 15. Relation of extreme permeation volume of grout and water-cement ratio.

Fig. 16. Comparison of predictive value and actual measurement value for permeation volume.

배합비, 침투시간 및 침투량의 관계를 수치모델링하면 식 (6)과 같이 된다.

따라서 수치모델에 의해 배합비 및 침투시간별 침투량을 예측하고 이를 실내모형시험에 의한 실측치와 비교하면 Fig. 16과 같다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 배합비가 낮은 경우 예측치와 실측치 사이에 어느 정도 차이가 있으나 부배합으로 갈수록 차이가 감소하는 현상을 나타내고 있으며 전반적으로 일치하는 경향을 보이고 있다. 따라서 간편한 실내모형시험과 hyperbolic 모델을 통하여 배합비별 침투량을 예측함으로써 현장에서 시멘트 그라우트 성능을 평가하는데 활용될 것으로 기대된다.

$$Q = \frac{t}{\frac{1}{56(w/c)^{0.38}} + \frac{t}{199(w/c)^{1.6}}} \quad (6)$$

5. 결 론

시멘트 그라우트를 실내에서 간편하고 쉽게 주입할 수 있는 실내모형침투주입장치를 개발하여 OPC와 MIS의 지반 침투성능을 비교하였으며, 실내시험결과를 이용하여 주입시간과 침투량의 관계를 수치 모델링한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 제작된 침투주입장치는 실내에서 시멘트 그라우트를 간편하고 효과적으로 주입할 수 있으며, 사전에 보통 포트랜드 시멘트와 마이크로계 시멘트 시트의 침투성능을 비교·평가하여 현장에 적용함으로써 시공성 개선, 경제성 향상, 지질재해 저감 등에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 배합비 5:1과 4:1의 빈배합에서 MIS 침투량에 대한 OPC의 침투량 비율이 약 2배 정도로 나타났으나, 부배합으로 갈수록 OPC의 침투가 원활하지 못하여 배합비 2:1과 1:1의 부배합에서는 약 7배의 큰 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 실제 현장의 OPC 및 MIS 주입실적과 어느 정도 일치하는 것으로 판단된다.

3. 공시체의 투수계수가 AFTE의 정상적용범위에 있으며 AASHTO의 Task Force 보고서의 그라우팅 가능성 평가지수 기준을 만족하여 OPC의 침투가 가능한 것으로 평가되나 모형시험결과와 일정 배합비 이하에서 주입이 곤란한 것으로 밝혀져 그라우트의 침투 가능성은 투수계수 및 N값만으로 평가하는 것은 문제가 있으며 배합비를 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.

4. 현장에서 토질구조물의 보수·보강공사시 일반적으로 OPC를 사용하는 것이 경제적이거나, 본 시험결과와 같이 부배합에서 OPC의 침투주입이 곤란하여 주입압력 증가시킬 경우 지반이 할렬현상을 일으키거나 맥상 주입의 가능성이 크므로 침투성능이 뛰어난 MIS를 사용하는 것이 안전성 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

5. 그라우트 주입시간과 침투량의 관계곡선 모양을 hyperbolic 곡선으로 모델링하여 수치화 하였으며, 실내모형 가압침투시험에 의한 실측치와 수치모델에 의한 예측치를 비교·분석한 결과 극한상태에서는 약간의 차이를 나타내고 있으나, 전반적으로 매우 유사한 결과를 나타냄으로써 침투그라우팅공법 적용시 그라우트 주입성능평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 2010년도 충남대학교 학술연구비에 의해

지원되었으며 이에 사의를 표합니다. 심사과정에서 이
논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 심사위원님께 깊
이 감사드립니다.

참고문헌

- AFTES (1991) Recommendations on Grouting for Underground Works. Tunnelling and Underground Space Technology, AFTE 6, p.383-461.
- ASCE (1962) Cement Grouting. Proc. ASCE 88 p. 49-98.
- ASCE (1963) Bibliography on Cement Grouting. Proc. ASCE 89, p.45-89.
- ASCE (1966) Bibliography on Chemical Grouting. Proc. ASCE. 92, p.39-66.
- Bachy, P. (1934) Matrial et Mthodes D'injection Dans Les Travaux Publics, Science et Industr, p.154-160.
- Baker, W.H. (1982) Planning and Performing Structural Chemical Grouting. Proceedings of the Conference on Grouting Geotechnical Engineering, 10. W.H. Baker ed., ASCE, p.515-539.
- Brigny, C. (1832) Mmoire sur un procdd'injection propre a prvenir ou arreter les filtrations sous les fondations des ouvrages hydrauliques, Paris, August 1832.
- Chun, B.S., Kim, J. C., Choi, Y., Jung, J.J., Shin, S.J. and Lee, H.J. (2000) A Study on the Engineering Properties of Micro Fine Hybrid Silicate Based Grout. Proceeding of The Korea Geotechnical Society Conference Nov : 2000, Korea Geotechnical Society, p.64-65.
- FHWA (2000) Ground Improvement Technical Summaries. Demonstration Project 116. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, p.9-1, 9-11, 9-12, 9-57.
- Glossap, R. (1961) The Invention and Development of Injection Processes. Geotecnique, Dec. p.225-279.
- Houlsby, A.C. (1982) Optimum Water: Cement Ratio for Rock Grouting ASCE. Grouting in Geotechnical Engineering, p.328-329.
- Houlsby, A.C. (1990) Construction and Design of Cement Grouting. p.69-70, 91-93.
- Kutzner, C. (1996) Grouting of Rock and Soil. p.14-15, 175.
- Houlsby, A.C. (1992) Construction and Design of Cement Grouting. A Guide to Grouting in Rock Foundations, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.
- JSFT (831-1990) 藥液注入による安定處理土の 共試製作方法, 土質工學會
- Korea Rural Community Corporation (1997) Grouting specification, Korea Rural Community Corporation.
- Korea Water Resources Corporation (2008) Grouting Construction Guidelines, Korea Water Resources Corporation
- Kim, J.C. (1999) A study on the injection properties of ultrafine cement grouting materials. Doctor of Philosophy in Civil Engineering Hanyang University, p.6-32.
- Kunzner, C. (1996) Grouting of Rock and Soil. p.14-15.
- Lee, H.H. and Im, H.D. (2007) Analysis of Fine Particle Transfer and Shear Strength Increase Using PFC in Permeation Grouting. Philosophy Journal of Korea Geotechnical Society, v.23, p.49-58.
- Littlejohn, G.S. (1982) Design of Cement Based Grouts. Proceedings of the Conference on Grouting Geotechnical Engineering. W.H. Baker ed., ASCE, p.35-40.
- Michael, J.B. and Roy, H.B. (1995) Verification of Geotechnical Grouting. Geotechnical Special Publication No. 57, Michael et al. ed., ASCE, New York, N.Y, p.6-7.
- Sawaki, M., Shibata, K., Nakae, M. and Terato, H. (2004) Overcoming Uncomposed Ground of Little Soil Covering with Cement-Based Impregnant. Tunnel and Underground, v.35, p.13-19.
- Task Force 27 Report,(1990) In Situ Soil Improvement Techniques, AASHTO-AGC-ARTBA Joint Committee, Washington, DC, p.291-293.
- Warner James, P.E.(2004) Practical Handbook of Grouting, p.4.

2012년 5월 22일 원고접수, 2012년 6월 19일 게재승인