

지반침투모형시험에 의한 시멘트그라우트의 주입성능 분석

송영수¹ · 임희대^{2*} · 최동남³

¹지오텍엔지니어링(주), ²충남대학교 토목공학과, ³삼성건설

Analysis of Injection Efficiency for Cement Grouts by Model Test of Permeation in Soil

Young-Su Song¹, Heui-Dae Lim^{2*} and Dong-Nam Choi³

¹Geotech Engineering Corporation, Daewoo dio-valley, Anyang 431-763, Korea

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

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

When cement grout is used for waterproofing of grounds, important roles are played by fluidity, particle size and bleeding. The most important element which determines their characteristics is the water/cement ratio of grout. Moreover in order to improve the efficiency of soil permeation, micro cement with a smaller average diameter is used in addition to ordinary portland cement. Besides the mixing ratio and cement diameter, the condition of ground is also of fundamental importance in the efficiency of permeation. In order to evaluate grout in terms of permeation ability into ground, we need a field test of grouting, which is cost and time consuming. In this paper we present a laboratory test method in which the suitability and efficiency of grouts are simply and more practically tested. In Korea neither a test standard nor devices are available to simulate grouting in a laboratory. We devised a grout injection equipment in which grouting was reproduced in the same condition with different materials, and suggested a standard for the production of specimens. Our tests revealed that the efficiency of injection increases with the water/cement ratio. We also found that more efficiently injected is the grout with the order of decreasing size; MS8000, micro cement, and ultra fine cements, and colloidal super cement.

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

시멘트 그라우트가 지반의 차수목적으로 사용될 경우 유동성, 입경 및 블리딩이 중요한 역할을 한다. 이들의 성질을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 그라우트의 물시멘트비이며, 지반침투성능을 개선하기 위해서 보통포틀랜드 시멘트 외에 평균입경이 작은 마이크로 시멘트를 사용하고 있다. 또한, 주입효과는 지반조건뿐만 아니라 배합비 및 시멘트의 입경에 따라 좌우된다. 주입에 의한 침투효과를 평가하는 방법으로는 실제 지반에서 시험 주입하는 것이 가장 확실한 방법이지만 이와 같은 시험주입은 많은 경비와 시간을 필요로 한다. 때문에 주입의 적합여부나 침투효과를 대략적으로 파악하기 위한 간단하고 실용적인 시험방법이 필요하게 된다. 우리나라의 경우 아직 실내에서 그라우트 주입을 재현할 수 있는 기준 및 장비가 전혀 없는 실정이다. 본 연구에서는 실내에서 여러 가지 그라우트의 주입을 일정하게 재현할 수 있는 가압침투주입장치를 개발하였으며 공시체 제작의 표준을 마련하였다. 가압침투주입시험을 실시하여 자료를 분석한 결과 침투성능은 물시멘트비가 증가할수록 선형적으로 증가하였으며 재료의 평균입경이 작을수록 침투성능이 개선되었다. 또한 마이크로 시멘트인 마이셈 8000과 초미분말 시멘트인 콜로이드 슈퍼 시멘트의 침투성능을 비교한 결과 평균입경이 상대적으로 작은 콜로이드 슈퍼 시멘트가 침투성능이 좋은 것으로 나타났다.

주요어 : 시멘트 그라우트, 물시멘트비, 가압침투시험, 주입, 침투성능

1. 서 론

시멘트 그라우팅(grouting)은 지반 속에 소정의 배합

과정을 거친 시멘트 그라우트를 주입하여 지반을 고결시키는 안정처리공법으로서 간단하고 신속하며 응급처리에 도 뛰어난 장점을 가지고 있다. 따라서 시멘트 그라우팅

*Corresponding author: hdlim@cnu.ac.kr

은 댐 및 제방의 차수, 시가지의 개착 공사 시 흙막이 배면의 지수, 인접구조물의 보호 및 지반침하 방지 등 여러 가지 목적으로 사용되고 있다. 우리나라에서는 1960년대 소양강댐을 비롯한 다목적댐의 건설과 1970년대 중반부터 시작한 지하철공사에서 그라우팅공법이 본격적으로 활용되기 시작하였으나, 초기에는 토목기술자들의 전문지식과 중요성에 대한 인식부족으로 기술축적이 제대로 이루어지지 않았다. 이후 농업기반공사는 제당의 그라우팅 시공 경험을 바탕으로 그라우팅 시방서를 마련하였으며, 최근 한국수자원공사에서는 댐 시공 및 보수보강을 통하여 그라우팅 시공지침을 작성하였다.

특히, 지반의 차수목적으로 시멘트 그라우팅을 실시할 경우 그라우트의 유동성, 입경 및 블리딩(bleeding)이 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 마이크로시멘트를 사용한다. 그동안 국내에서도 보강 전후의 공내재하시험(PMT=pressure meter test)을 통한 마이크로 시멘트의 실용화(Ministry of Construction and Transportation, 1997), 초미립자 시멘트의 주입특성(Kim, 1999) 및 마이크로 복합실리카 그라우트의 공학적 특성(Chun, 2000) 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 분별하지 않기 때문에 주입형태를 파악하기 곤란한 경우도 적지 않다. 그라우트의 주입형태는 지반조건에 의해 매우 다르다. 투수성이 비교적 큰 사질토에서는 흙 속의 간극부분을 시멘트 그라우트로 대체하는 침투주입이 가능하다. 그러나 투수성이 작은 사질토, 실트 및 점성토에서는 침투주입이 곤란하여 그라우트가 지반 속에 맥상(venation)으로 들어가는 할렬주입(fracturing injection)이 될 수 있다.

또한, 주입형태는 지반조건뿐만 아니라 물시멘트비 및 시멘트의 입경에 따라 좌우된다. 따라서 지반조건이나 시멘트 그라우트의 성질과 상태에 따라 시멘트 그라우트가 소정의 영역에 침투하지 못하기 때문에 주입에 의한 지반의 개량이 충분하지 않고 주입공법의 채용 자체가 적당하지 않는 경우가 생길 수 있다. 주입에 의한 침투효

과를 평가하는 방법으로는 실제 지반에서 시험주입을 실시하는 것이 가장 확실한 방법이나, 이와 같은 시험주입은 많은 경비와 시간을 필요로 한다. 때문에 실내에서 주입의 적합여부나 침투효과를 개략적으로 파악하기 위한 간단하고 실용적인 시험방법이 필요하다. 우리나라의 경우 아직 실내에서 그라우트 주입을 재현할 수 있는 기준 및 장비가 마련되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실내에서 시멘트 그라우트를 간단하고 쉽게 주입할 수 있을 뿐만 아니라 침투결과를 직접 확인할 수 있는 가압침투주입시험 장치를 자체 개발하였고 시멘트의 종류와 그 배합조건 등에 적합한 시료 모형의 표준적인 제작방법을 마련하였으며, 그라우트의 재료와 물시멘트비를 변화시켜 가압침투시험을 실시하고 그라우트의 물리적 특성에 따른 침투성능을 파악하고자 하였다.

2. 지반 침투그라우팅 공법

2.1. 지반 그라우팅

광범위한 의미로 그라우팅이란 용어는 어떤 물질을 지반에 주입하는 과정을 설명하는데 사용되며 그라우팅을 하는 이유는 매우 다양하고 그라우팅 방법과 재료에 따라 주입결과가 다르게 나타난다. 지반에 대한 그라우팅 기술은 보통 침투그라우팅(permeation grouting), 콤팩션그라우팅(compaction grouting), 제트그라우팅(jet grouting) 및 할렬그라우팅(fracturing grouting)방법으로 구분된다(Michael and Roy, 1995). 그라우팅 기술은 전세계적으로 개착공법과 터널공사를 지지하는데 사용되어 왔을 뿐만 아니라 침하방지, 기초보강, 지하수 조절, 댐 및 제방의 안정 및 구조물의 지지력 향상 등 광범위하게 사용되어왔다. 입상토(granular soil)에 대한 그라우트 재료의 적용범위는 지반의 간극 및 초기 투수계수 등의 지반특성에 따라 다르다.

AFTES(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 교란시키

는 일 없이 토립자 간극에 침투하여 주입되며 주입재는 소정의 시간을 지나 고결한다. 이 공법에 의한 지반개량메커니즘(mechanism of ground improvement)은 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, 원지반이 가지고 있는 토립자 사이의 맞물림을 그대로 이용하는 특징을 가지고 있다. 침투 그라우팅은 주로 차수목적 또는 비점성토의 강도 증가 목적으로 사용되어 왔다. 일반적으로 재료 구성 요소에 따라 약액 주입공법과 시멘트계 주입공법으로 대별된다. 침투그라우팅의 공정은 그라우트 재료의 혼합, 주입 파이프(injection pipe)로의 펌핑(pumping) 및 슬리브관(sleeve pipe)이나 단관(rod)을 통한 주입으로 구성된다. 현장에서 그라우트 혼합이 필요한 경우 연속적인 개량 공정(conditioning process)을 사용하지만 배치 공정(batch process)으로도 혼합할 수 있다.

그라우트 주입 과정은 그라우트의 고결이나 경화시간, 주입비와 주입압에 따라 조정된다. 그라우트의 부피 축정과 그라우트의 경화시간 및 배합비율을 조정하기 위해서 계측기가 필요하며 정확성과 정밀성을 가지고 있어야 한다. 침투그라우팅에서 시멘트 그라우트는 흙이나 암석 매트릭스의 간극을 침투할 수 있을 정도로 상당히 낮은 점성력을 가지고 있으나, 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. 연구결과에 따라서는 세립토의 함유량에 약간의 차이가 있을 수 있다(Baker, 1982). 또한 투수계수를 기준으로 평가할 때 투수계수가 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/sec 정도의 지반은 침투주입이 용이하고 투수계수가 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec의 지반은 보통의 그라우트가 가능하며, $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec의 지반에서는 그라우트 주입이 곤란하다(Federal Highway Administration, 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(Task Force 27, 1990). 점성의 경우 낮은 점성에 낮은 강도를 갖는 그

라우트는 조금 더 큰 점성과 큰 강도의 그라우트보다 작은 간극의 흙에 잘 스며든다.

3. 침투 모형 시험

3.1. 주입시험장비

현장에서 수행하고 있는 시멘트 그라우트 주입방법을 실내에서 축소하여 실시하려면 주입장비를 소형화하고 주입대상 지반을 축소하여 모형으로 제작해야 한다. 실내에서 현장 조건에 맞게 그라우트를 주입하려면 압력조절장치 및 주입장비뿐만 아니라 시료의 모형인 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

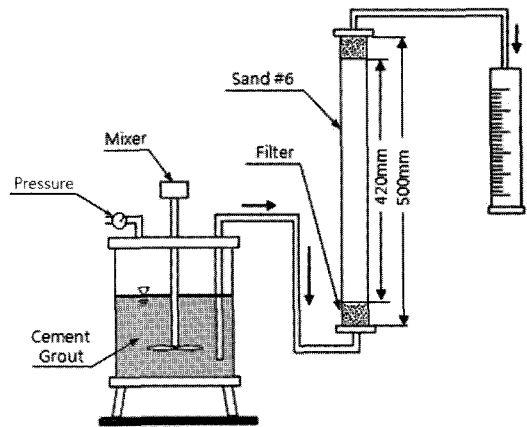


Fig. 1. Conceptual diagram of equipment for pressure permeation test.

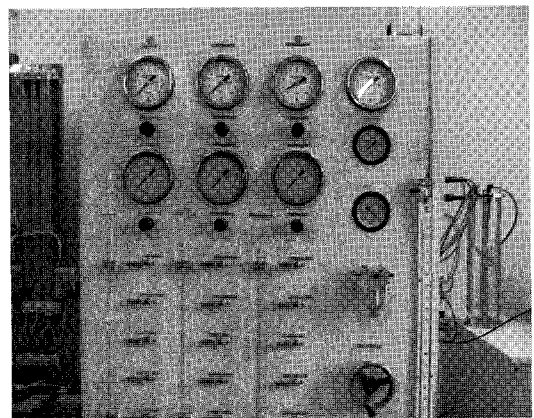


Fig. 2. Pressure regulator.

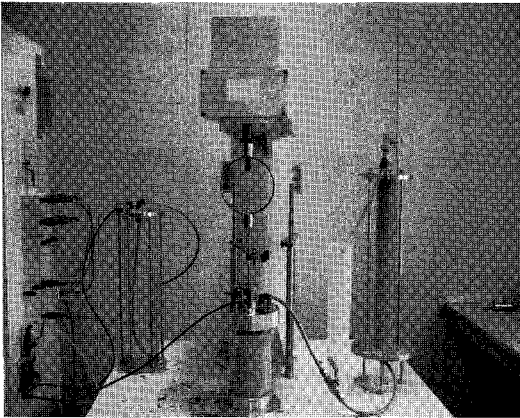


Fig. 3. Injection for permeate.

(Japanese standards F 831, 1990)을 참고하여 Fig. 1의 개념도와 같이 자체 제작하여 사용하였다. Fig. 2는 압력조절장치로서 에어 콤프레서(compressor)에서 가압된 공기를 일정한 압력으로 조절하여 주입장치에 전달하는 역할을 하며 3개 시료의 압력을 동시에 제어할 수 있도록 제작하였다. Fig. 3은 믹서에서 교반된 그라우트를 주입 몰드(mold)에 일정한 압력으로 주입하는 장치이며, 사진의 중앙 왼쪽에 있는 아크릴 실린더는 시멘트 그라우트 주입 전에 물을 주입하여 시료의 투수계수를 측정하는 역할을 한다.

3.2. 시료 및 모형 제작

현장에서 주입의 성공여부나 주입 후의 고결토의 성질과 상태는 주입 전의 흙의 간극률에 좌우되기 때문에 침투주입의 효과를 확인하려면 실제의 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 침투성능을 발휘하기 위해 시멘트의 종류와 그 배합조건 등을 선정할 경우 공시체의 제작을 용이하게 하여 시험결과와 재현성을 좋게 할 필요가 있으며, 이를 위해서는 표준사를 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단하였다.

따라서 국내에서 생산하고 있는 단위중량 1.53~1.60 g/cm³의 주문진 표준사를 사용하여 시료를 제작한 후 가압침투시험을 실시하였다. 시험결과 Fig. 4(a)와 같이 필터와 시료의 경계부에서 주입이 정지하였으며, 이는 표준사에 세립분이 많아 간극이 매우 작고 이들 간극을 시멘트 그라우트가 통과하지 못하였기 때문이다. 표

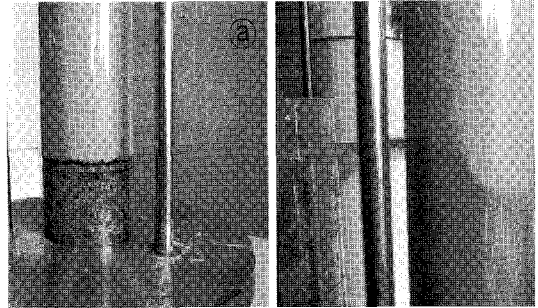


Fig. 4. Injection State of sample by grout, (a) Standard sand, (b) Silica sand No.6.

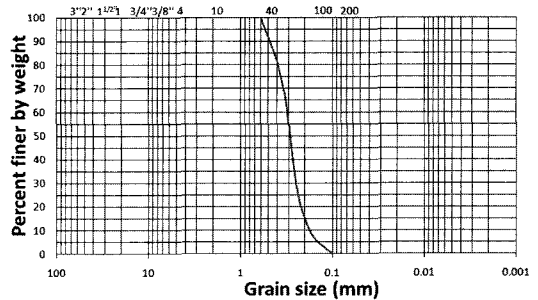


Fig. 5. Silica sand No.6, Curve by particle size distribution of Silica sand No.6.

준사의 #200체 통과량을 제거하고 입도를 조정하여 시료를 제작한 결과 물시멘트비가 낮은 부배합의 경우에도 시멘트 그라우트가 몰드내의 시료를 매우 짧은 시간에 통과하여 유출되는 현상이 발생하였다. 5회 이상 시험을 반복하여 수행한 결과 표준사로는 시멘트 그라우트 시험을 수행할 수 없을 뿐만 아니라 표준사와 유사한 정도의 입도 또는 투수계수를 가진 지반에서는 시멘트 그라우트의 주입이 곤란하다는 사실을 알 수 있었다. 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 시료를 성형한 결과 Fig. 4(b)와 같이 시멘트 그라우트가 원활하게 주입되었다. Fig. 5는 규사 6호의 입도조정 결과를 나타낸 것이다.

3.3. 그라우트의 주입 방법

시멘트 그라우트의 유동성은 배합 믹서에 따라 약간의 차이가 있으므로 일정한 배합이 이루어지도록 믹서

의 크기와 교반축의 회전속도를 규정할 필요가 있다. 실내에서 사용하고 있는 믹서의 용량이 알맞게 배합량을 조정하였으며, 회전속도를 일정하게 유지하여 매회 동일한 배합이 이루어지도록 하였다. 몰드 안의 다져진 시료에 그라우트가 침투할 때 침투량을 정확히 측정하기 위해서 그라우트 주입 전에 3개의 공시체를 제작하고 시료의 간극을 물로 채웠으며, 시료의 투수계수를 측정하여 공시체가 표준규격을 만족하는지 검증하였다. 이 때 물 및 그라우트 주입압력에 대한 규정이 필요하다. 주입압력은 일반적으로 그라우트의 주입속도와 점성계수에 비례하고, 지반의 투수계수에 반비례한다. 때문에 일정량의 그라우트가 겔화시간 내에 주입될 수 있도록 시료의 투수성이나 그라우트의 점성에 따라 주입압력을 조절할 필요가 있다. 본 가압침투시험에서는 시료가 몰드에서 구속되어 있기 때문에 주입압력이 높아져도 그라우트가 시료 속을 맥상으로 빠져나가는 할렬주입의 발생 가능성은 매우 희박할 것이다. 그러나 본 방법에서 매우 높은 주입압력이 필요할 경우 실제 지반에서는 Fig. 6과 같이 할렬주입이 발생할 가능성이 높다. Fig. 6은 어느 دم 해체시 그라우팅 주입상태를 조사한 것이며, 빨강색과 같이 맥상의 할렬주입이 관찰되었다. 압력을 어느 정도로 설정할지는 시료를 물로 포화시킬 때 대략적인 예측이 가능하다.

일본토질공학학회에서는 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력을 기준으로 하고 있으며 보통 0.5 kg/cm^2 의 압력을 사용하고 있으나, 국내 그라우팅 공사에서 사용하고 있는 유량계의 최소 단위가 1.0 kg/cm^2 임을 감안할 때 현장에서 적용이 용이하고 향후 원위치 시험과의 비교에 대비하여 물 및 그라우트 주입압력을 1.0 kg/cm^2 으로



Fig. 6. Fracturing injection of venation, purple is result that reaction caused by grout and phenolphthalein($\text{C}_2\text{OH}_{14}\text{O}_4$).

결정하였다. 그라우트의 주입량은 실린더 및 공시체의 규격을 고려하여 최대 600 ml 정도로 하였으며 측정 시간은 최대 10분으로 규정하였다. 그라우트의 주입량은 압력용기의 액면변화와 그라우트 주입을 개시한 뒤 그라우트가 밀어낸 물의 유출량으로 구하였다. 또한 공시체의 시료가 균질하지 않을 경우 침투가 극부적으로 발생할 수 있으므로 주입시 몰드내 침투 길이를 측정하고 침투모양을 세밀히 관찰하였다.

4. 시험결과 분석

4.1. 배합비별 침투특성

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 물시멘트비가 가장 큰 요인으로 작용하기 때문에 부배합으로 주입하는 것이 최선이라고 주장하는 학자들이 많이 있다. Houlshy(1982)와 Kunzner(1996) 등은 물시멘트비를 3보다 더 빈배합으로 해서는 안 된다고 주장하였으며 미공병단에서는 4보다 묽게 해서는 안 된다는 주장이 있다. 또한 미 내무성 개척국에서는 12:1까지 허용하고 있으나 그동안 많은 연구결과를 통하여 5:1을 적용하고 있다.

그동안 국내 دم 및 제방의 보수보강 공사의 경우 1:1에서 5:1 범위의 물시멘트비가 보편적으로 적용되었으며 دم 및 제방의 보수보강을 위한 침투그라우팅에서는 2:1의 배합비가 가장 많이 사용되었다. 이러한 근거를 바탕으로 본 가압침투시험에서는 5:1에서 1:1까지의 물시멘트비를 선정하였으며 그라우트는 보통 포틀랜드 시멘트, 마이셈(MS)6000, 마이셈(MS)8000 및 콜로이달 슈퍼 등 4 종류의 시멘트를 사용하였다.

Fig. 7은 보통 포틀랜드 시멘트 그라우팅(OPC)의 주입결과를 나타낸 것으로서 물시멘트비 1:1에서는 주입이 되지 않았고 물시멘트비 2:1의 경우 초기에 비선형적으로 주입량이 증가한 후 4분후 100 ml 정도 주입된 후 정지되었으며 물시멘트비 5:1에서는 5분후 약 200 ml가 침투된 후 더 이상 주입이 이루어지지 않았다. 물시멘트비가 2:1에서 5:1로 증가함에 따라 침투량은 약 200% 까지 증가하였다. Fig. 8은 MS6000의 주입결과를 나타낸 것이며 물시멘트비 1:1의 부배합에서는 22초까지 140 ml가 주입된 후 정지하였다. 물시멘트비 2:1부터는 600 ml 통과시간이 점차 감소하기 시작하여 물시멘트비 5:1에서는 21초 이내로 그계 단

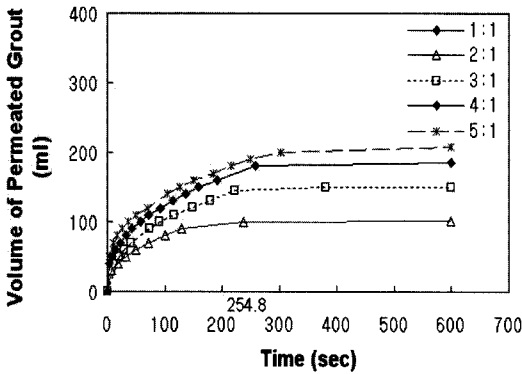


Fig. 7. Permeation velocity(time) and permeation volume of OPC.

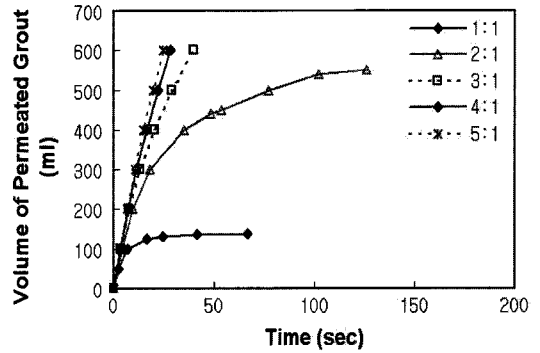


Fig. 10. Permeation velocity(time) and permeation volume of colloidal super.

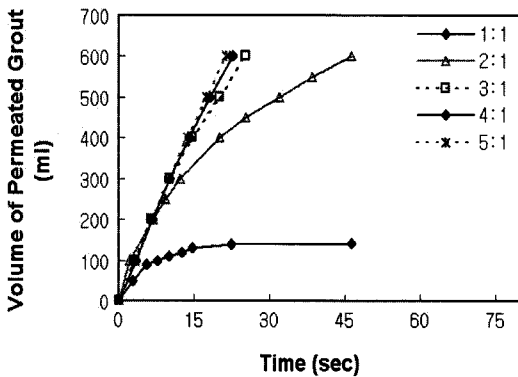


Fig. 8. Permeation velocity(time) and permeation volume of MS6000.

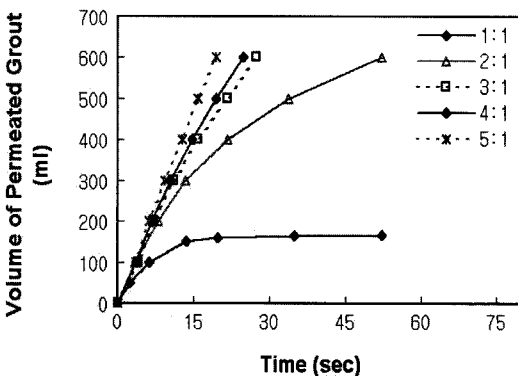


Fig. 9. Permeation velocity(time) and permeation volume of MS8000.

축되었고 주입량이 크게 증가하였으며 부배합으로 갈수록 주입량과 침투속도에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 9는 MS6000보다 33% 정도 비표면적이 큰 MS8000에 대한 시험결과이다. 물시멘트비 1:1에

서는 MS6000보다 25 ml 정도 더 주입된 후 정지하였으나 빈배합으로 갈수록 MS6000과 거의 비슷한 결과를 보였다. 이러한 결과는 마이크로 시멘트의 기본적인 성질과 배합 믹서의 성능 및 시료의 간극 등 여러 가지 요인에 따라 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 10은 콜로이드 슈퍼의 주입결과를 나타낸 것이다. 부배합에서 보통 포틀랜드 시멘트와는 상당한 차이가 발생하였으나, 빈배합으로 갈수록 MS6000 및 MS8000과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4.2. 재료별 침투특성

시멘트는 비표면적이 크고 및 평균입경이 작을수록 침투성능이 크며 이는 사용재료를 통하여 확인할 수 있다. 보통 포틀랜드 시멘트, MS6000, MS8000 및 콜로이드 슈퍼를 현장의 침투그라우팅에서 가장 많이 적용하고 있는 물시멘트비 2:1의 동일한 주입조건하에 실험을 실시하고 침투성능을 비교한 결과 Fig. 11과 같이 나타났다. 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 4분후에 100 ml가 침투한 후 정지하였으며 MS6000과 MS8000은 각각 48초 및 52초, 콜로이드 슈퍼는 2분후에 600 ml를 통과하였다. 콜로이드 슈퍼의 비표면적이 11,300 cm²/g임을 감안하면 MS8000보다 침투속도가 빠를 것으로 예상되나, 빈배합의 경우 MS6000 및 MS8000보다 약간 적은 침투량을 보였으며 빈배합에서는 거의 동일한 효과를 나타내었다.

순수 시멘트 그라우트는 물시멘트비에 따라 임계 유동성을 가지고 있다. 물시멘트비가 1:1인 부배합에서는 플라스틱 점성이 0.06이나 5:1에서는 0.014로서 물의 점성 0.010에 매우 가깝다(Littlejohn, 1982). 이러한 관계를 고려할 때 5:1 정도의 빈배합에서는 유동성이 비슷하여 침투량에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 현재

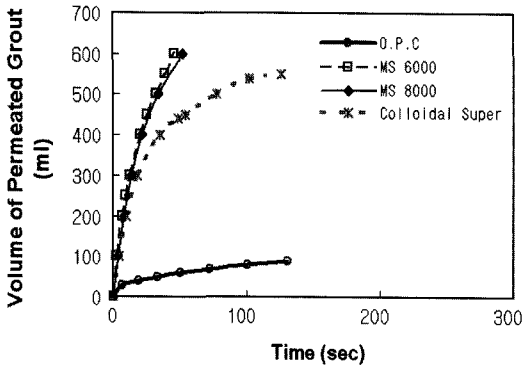


Fig. 11. Permeation velocity and permeation volume by grout(w/c=2).

사용하고 있는 믹서로서 배합과정에서 발생할 수 있는 초미분말 시멘트의 응집현상을 방지하기 어려울 뿐만 콜로이달 슈퍼의 경우 수입과정과 보관과정에서 약간 품질이 저하될 수 있는 요소를 가지고 있다. 일본 현지의 콜로이달 슈퍼 생산 공장을 직접 방문하여 주입 시험을 실시한 결과 MS8000보다 콜로이달 슈퍼의 침투성능이 우수한 것으로 나타나 이 같은 사실을 뒷받침하고 있다.

4.3. 초분말 시멘트의 침투성 비교

시멘트를 사용한 현탁액형 그라우팅은 사질토지반에서 침투성능의 한계를 보여 중요한 구조물의 지반보강의 경우 마이크로 시멘트를 주로 사용하여 왔다. 분말도가 높은 마이크로 시멘트의 경우 공기투과방식에 의한 분말도만을 측정하였으나, 국내에는 실제 침투주입에서 침투성능을 좌우하는 주입재료의 입자 크기에 대한 시방규정이나 연구가 상당히 미흡한 실정이다.

반면 일본의 경우 초미분말 시멘트의 침투주입 성능에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 이러한 요구에 맞는 제품이 개발되어 사용되고 있다. 국내에서 사용하고 있는 마이크로 시멘트인 MS8000과 일본의 초미분말 시멘트인 콜로이달 슈퍼를 가지고 가압침투주입시험을 실시하였으며, Table. 1과 Fig. 12는 각각 두 제품의 물리적 성능과 가압침투시험에 의한 침투성능을 비교한 것이다. 앞에서 논의된 침투성능은 주입압력을 1.0 kg/cm² 로 실시한 결과이며 Fig. 12의 침투량은 일본 시멘트 생산 공장에서 사용하고 있는 0.5 kg/cm² 을 주입압력으로 실시한 결과이다. 시험결과 시멘트의 분말도를 나타내는 비표면적이 크고 및 평균입경이 작은 콜로이달 슈퍼가 상대적으로 침투성능이 우수한 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of physical performance by grout

	OPC	MS8000	Colloidal Super
Fineness(cm ² /g)	3,630	8,000	11,300
Mean diameter(μm)	13.8	4~6	4.5
Particle size of passed 90%(μm)	39.2	<13	7.4
Particle size of passed 95%(μm)	51.5	-	8.5

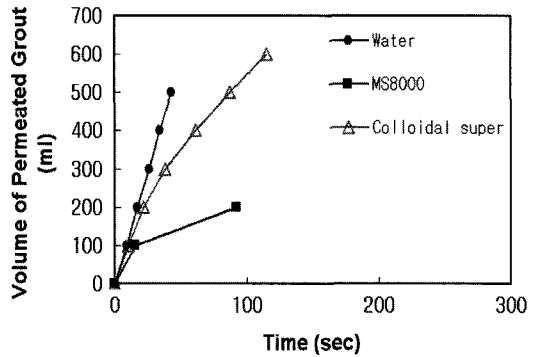


Fig. 12. Comparison of permeation effect of ultra fine cement.

5. 결 론

현장에서 수행하는 시멘트 그라우트 주입을 실내에서 간편하고 쉽게 주입할 수 있는 압력조절장치와 침투주입장치를 개발하고 공시체 제작의 표준을 마련하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트, MS6000, MS8000 및 콜로이달 슈퍼를 가지고 물시멘트비에 따른 침투주입 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공시체의 제작이 용이하고 시험결과와 재현성을 향상시키기 위해 국내에서 생산되고 있는 단위중량 1.53~1.60 g/cm³ 의 주문진 표준사를 사용하였으나, 시멘트 그라우트가 시료에 침투하지 못하였다. 이는 주문진 표준사에 세립분이 많아 간극이 작고 이를 시멘트 입자가 통과하지 못하기 때문이며, 주문진 표준사 대신 국내에서 생산하고 규사 6호의 입도를 조정하여 사용한 결과 문제점이 해결되었다.

2. 규사 6호의 단위중량이 일정 기준에 미달할 경우 가압침투 과정에서 시료의 분리가 발생하였고 일정 기준을 넘었을 경우에는 주입이 전혀 이루어지지 않아 반복시험을 통하여 다양한 물시멘트비에서 침투주입이 가능한 단위중량을 구한 결과 1.52 g/cm³ 가 최적으로 나타나 이를 공시체 제작의 표준으로 하였으며 공시체의 투수계수는 2.0×10⁻¹ cm/sec 를 기준으로 약 ±5%

의 오차범위를 유지하였다.

3. 시멘트의 종류별로 5가지 배합조건을 선정하였고 예상대로 물시멘트비가 증가할 수록 침투성능이 현저히 증가하였으며, 시멘트별 침투성능은 보통포틀랜드 시멘트, 마이셀 6000, 마이셀 8000 및 콜로이달 슈퍼순으로 증가되었으나, 마이크로 시멘트에 비하여 보통포틀랜드 시멘트의 침투성능은 현저히 떨어졌다. 포틀랜드 시멘트의 경우 부배합에서 전혀 주입이 되지 않아 지반의 간극 및 투수계수 작은 지반에서는 마이크로 시멘트를 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

4. 부배합 조건에서 마이크로 시멘트와 초미분말 시멘트의 침투성능을 비교한 결과 비표면적이 상대적으로 큰 초미분말시멘트의 침투성능이 우수한 것으로 나타났다. 빈배합으로 갈수록 두 제품의 침투성에 차이가 거의 없었으며 오히려 초미분말 시멘트보다 마이크로 시멘트의 침투속도가 빠르게 나타났다. 이는 그라우트의 점성이 임계점에 가까이 도달하여 유동성에 차이가 거의 없을 뿐만 아니라 현재 사용하고 있는 일반적인 믹서로는 배합과정에서 발생할 수 있는 초미분말 시멘트의 응집현상을 방지하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

사 사

이 논문의 내용을 개선하기 위해 건설적인 비평과 수정을 하여 주신 한국지질자원연구원 송인선 박사께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- AFTES (1991) Recommendations on grouting for underground works. Tunnelling and underground space technology, p.383-461.
- Baker, W.H. (1982) Planning and performing structural chemical grouting. Proceedings of the conference on grouting. Geotechnical engineering, p.515-539.
- Chun, B.S., Kim, J.C., Choi, Y.C., CHung, J.S., Sin, S.J. and Lee, H.J. (2000) A study on the engineering properties of micro fine hybrid silicate based grout. J. Korean geotechnical, p.64-65.
- Federal Highway Administration (2000) Ground improvement technical summaries. Demonstration project 116, Federal highway administration, Jour. U.S. Department of Transportation, v.2, p.9-57.
- Houlsby, A.C. (1982) Optimum water: Cement ratio for rock grouting ASCE, Grouting in geotechnical engineering, p.328-329.
- Japanese standards F 831 (1990) 薬液注入による安定處理土の共試製作方法, 土質工學會, p.263-267
- Kim, J.C. (1999) A study on the injection properties of ultrafine cement grouting materials. Hanyang Univ., p.6-32.
- Kunzner, C. (1996) Grouting of rock and soil. p.14-15.
- 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 v. 57, Michal et al. ed., ASCE, New York, p.6-7.
- Ministry of Construction and Transportation (1997) Development and practice of the inorganic ultra fine cement and silica sol, p.152, 239-241.
- Task Force 27 Report (1990) In Situ soil improvement techniques. ASHTO-AGC-ARTBA Joint committee, Washington, DC, August, p.291-293.

2010년 3월 9일 원고접수, 2010년 4월 5일 게재승인