

물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구

남정만·조영웅*

제주대학교 토목환경공학전공, *제주대학교 대학원

A Study on the Waterproof Effect for Ground Reinforcement by Water-glass Chemical Grouting Method

Jung-Man Nam and Young-Woong Cho*

Major of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

*Graduate School, Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

This study is on the waterproof effect for ground reinforcement by the water-glass chemical grouting method. To study the waterproof effect, firstly, in-situ permeability tests were performed on the bore-holes at the construction sites in Jo-chun and Pyung-dae, which are two of construction sites for the wastewater treatment plant for Buk-jeju province. Secondly, constant head & variable-head permeability tests were performed on the scoria of Jo-chun construction site in a laboratory. Finally, the results of the permeability tests were compared with the estimated value by the finite element method.

Key words : waterproof effect, grouting, permeability, scoria

서론

제주도의 지층은 반복된 화산활동에 의해 형성된 섬으로 화산지질의 특성상, 투수성이 큰 지층구조를 하고 있다. 또한 지하수 부존 형태가 해안을 중심으로 이루어져 해안인접지역에서의 지하구조물을 시공하는 경우 지반 굴착 시 지하수유입이 쉬운 조건이다. 따라서 지반굴착 시 지하수유입을 근본적으로 차단하기 위해, 현재 건설현장에서는 차수 또는 지반개량 목적으로 그라우팅 공법이 널리 이용되고 있다. 그러나 제주도의 지질특성은 육지와 상이하기 때문에 차수를 목적으로 그라우팅을 시공하는 경우, 차수효과에 대한 구체적인 포괄적인 자료가 미미하다.

본 연구는 해안인접지역에서의 물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강 시 차수효과를 규명하는 것을 목적으로 한다. 물유리계(L.W) 그라우팅공법을 이용하여 지하수에 의한 누수에 대한 차수효과를 기대하기 위해서는 지반 보강을 위한 그라우팅 주입공이 불균질한 지반을 대상으로 하기 때문에 설계대로 주입을 하여도 주입효과에 대한 확신을 갖기 어렵다. 이를 위해 현재 물유리계(L.W) 그라우팅공법을 적용하고 있는 현장을 선정하여 그라우팅 시공 전·후의 현장투수시험결과와 현장에서 채취한 시료에 대한 실내 투수시험결과를 비교분석 검토하고, 시공 전 지질 주상도 및 시추된 암석 코아(Core), 현장투수시험결과를 바탕으로 침투해석을 실시하여 물유리계(L.W) 그라우팅공법에 의한 차수효과를 고찰하고자 한다.

투수시험

실내 투수시험

사용된 시료

전반적으로 제주도의 동서를 기준, 장축과 일치하는 방향으로 제주도에서 오름이라 불리는 기생화산을 중심으로 송이층이 널리 분포하고 있다. 송이층이 화산활동 시 화산쇄설물이 낙하여 퇴적되어 있는 층이라는 점을 감안한다면 해안인접 지층까지 분포할 가능성이 충분하며 실제로도 도로 및 각종 토목공사 시 송이층의 출현으로 공사 시 많은 어려움 겪고 있다. 또한 연구대상지역의 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 전 지반 조사 시에도 투수성이 높은 송이층이 분포하여 현장투수시험 시 많은 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 물유리계(L.W) 그라우팅 보강 시 차수효과를 검토하기 위하여 복제주근 조천읍에 위치한 현장에서 채취한 송이층 시료에 대하여 정수두 및 변수두 투수시험을 실시하였다.

시험장비

본 연구를 위하여 정수두 및 변수두 투수시험이 가능한 시험기를 자체 제작하여 투수시험을 시행하였다. Fig. 1은 변수위 투수시험기(정수위 투수시험겸용)를 대략적으로 나타낸 것이다. 정수두 투수시험장치는 물을 공급하는 입구를 조정함으로써 실험하는 동안 물의 입구와 출구사이의 수두차를 일정하게 유지하도록 하였다.

정수두 및 변수두 투수시험기는 동일한 시료원통을 사용하였으며 상부에 토출관을 만들어 월류되는 수량을 측정할 수 있게 하였고 시료원통 하부에는 표준사를 10 cm 넣고 시료원통의 직경과 일치하는 다공(多孔)질 밀판을 설치하였다. 공시체 제작 시 다공질 판을 통하여 흡입자나 주입액의 침투를 방지하기 위하여 거름종이를 다공질 판 위에 2겹 이상으로 덮어 실험을 시행하였다. 시료원통 내부에는 실리콘 그리스를 발라 공시체와 원통내부 사이로 물이 유입되는 것을 사전에 방지하였다.

주입량 산정

주입량은 개량대상지반의 지반조건, 약액의 성질뿐

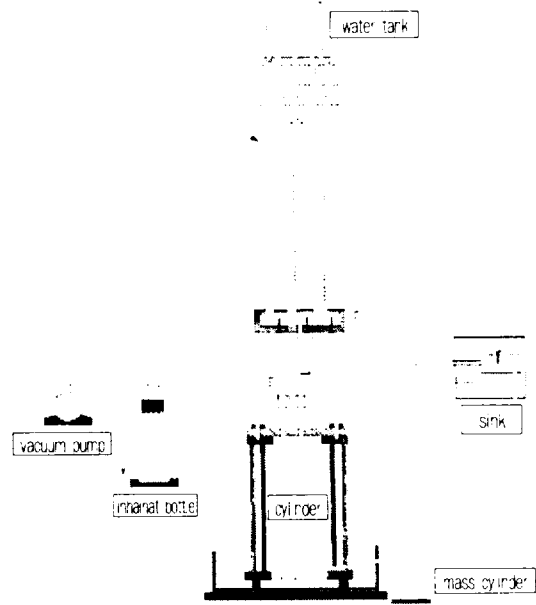


Fig. 1. Permeability Test Setup.

Table 1. Indoor Test Result of Scoria

Division	Test result
Moist unit weight(γ ,g/cm ³)	0.85
Water content(w ,%)	20.88
Specific gravity(G_s)	2.54
Dry unit weight(γ_d ,g/cm ³)	0.703
Void ratio(e)	2.67
Porosity(n)	0.73

만 아니라 주입목적이나 개량효과의 신뢰도를 고려해서 결정해야만 한다. 주입량은 약액고결체가 압밀작용을 일으키기 때문에 설계주입범위 내에서의 지반전체에 대하여 주입된 약액량의 비율을 나타내는 것이지, 고결된 약액의 체적을 의미하는 것이 아니다. 일반적으로 주입량을 구하는 기본식은 개량대상지반의 체적(V)에 주입율(λ)을 곱한 다음의 식으로 표시되고 있다(日本土質工學會, 1985).

$$Q = V \times \lambda \quad (1)$$

$$V = EA \times H \times \frac{(\pi \times d^2)}{4} \quad (2)$$

$$\lambda = n \times a \times (1 + b) \quad (3)$$

여기서, Q 는 개량대상지반에 대한 주입량($m^3=1000 \ell$).

n은 간극율, a는 충전율(%), b는 손실율(%), EA는 주입공수, H는 그라우팅심도, d는 영향원의 직경을 말한다.

공시체 제작

시료를 채취하는 과정에서 시료는 토립자의 변형 및 재배열 등이 일어나고 교란되기 때문에 현장조건과 동일한 상태하의 공시체를 제작. 실내실험을 실시한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 공시체의 제작시 동일한 다짐에너지를 얻기 위하여, 2.5 kg 해머를 30.48 cm 높이에서 10회씩 떨어뜨려 3층을 다지는 방법을 실시하였다. 공시체 별 주입량은 주입하지 않은 경우와 실제 간극율을 토대로 주입율을 산정한 설계 주입량 그리고 간극율을 0.3, 0.5, 0.8로 가정하여 산정한 설계주입량으로 배합하였다. 주입하지 않은 경우를 제외한 공시체는 각각 3일, 7일, 14일 동안 양생시켰다. 또한 모든 공시체의 시료가 완전하게 포화상태에 이르게 하기 위하여 24시간 수침 시켰다. Table 1은 주입량 산정을 위해 실시된 물성실험 결과를, Table 2는 이를 바탕으로 한 공시체 별 주입량을 나타내었다.

Table 2. Infiltration Quantity According to Porosity

Porosity	Infiltration quantity (cm)	Solution A		Solution B		
		Sodium silicate (ml)	Water (ml)	Cement (g)	Bentonite (g)	Water (ml)
0.8	2077.98	727	312	415.6	41.56	893
0.7	1818.23	636	273	363.6	36.36	782
0.5	1245.37	436	187	250	25	536
0.3	747.22	262	112	150	15	322

투수시험방법

1) 정수두 투수시험

현장에서 채취한 송이의 기본 물성시험 결과 Table 1과 같이 간극비가 2.67이고 건조단위중량이 0.703 g/cm³로 입자자체의 기공이 상당히 많고 가벼운 물리적 성질을 가지고 있어, 높은 투수계수를 갖는 조립토에 적합한 정수두 투수시험을 실시하였다.

완전한 포화를 위하여 24시간 수침 시킨 후, 상부 월류구에서 나오는 월류수량이 일정한지 점검하여 포

화상태를 판단하였다. 일정한 수위차를 유지하며 월류구로 나오는 월류수를 메스실린더에 집수함과 동시에 시간을 재는 일련의 과정을 3회 이상 측정함으로써 오차범위를 줄였다. 투수계수 k는 다음과 같이 계산된다.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \tag{4}$$

여기서, Q는 집수량, A는 시료의 단면적, t는 집수시간, h는 수위차, L은 시료의 길이를 말한다.

2) 변수두 투수시험

변수두 투수시험은 낮은 투수계수를 갖는 세립토에 더 적합한 시험방법으로 시료가 입자가 크며 기공이 많은 송이인 경우 부적절한 시험방법이지만, 주입된 약액이 간극 및 절리로 침투하여 고결체가 형성, 그 고결체에 의해 차수효과를 기대하는 물유리계(L.W) 그라우팅의 시공특성 상 약액이 주입된 공시체의 경우 낮은 투수계수를 기대할 수 있으므로 변수두 투수 시험방법이 이용되었다.

기본 물성시험의 결과를 바탕으로 식 1, 2, 3을 적용하여 설계배합비를 산정한 결과 Table 2와 같다. 주입량에 따른 차수성의 증진효과를 판별하기 위하여 각각 간극율을 0.3, 0.5, 0.8로 가정하여 산정한 설계 주입량에 따른 공시체를 별도로 준비하여 변수두 투수 시험을 시행하였다.

양생기간에 따른 차수효과를 판별하기 동일한 다짐 에너지와 주입량을 가한 공시체를 각각 3개를 만들어 3일, 7일, 14일 동안 양생시켰으며 시료의 포화를 위하여 진공펌프를 이용한 강제 포화법을 실시하였다. 투수계수의 측정은 시료원통 하부에 위치한 유입구와 연결된 스탠드 파이프 상의 수위변화를 측정하여 산정한다. 임의의 시간 t에서 시료를 통해 흐르는 투수 계수 k는 식 5와 같다.

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \tag{5}$$

여기서, a는 스탠드 파이프의 단면적, A는 시료의 단면적, L은 시료의 길이, t는 투수경과 시간, h1, h2는 초기 및 종료 수위를 말한다.

현장 투수시험

대상지역

본 연구 대상지역으로 구좌읍 평대리 및 조천읍 조천리 해안인접지역에 위치한 중계펌프장의 일반적인 지형 및 지질의 특성은 시추조사결과 지층의 일반적인 상태는 매립층 혹은 송이층, 절리가 발달한 다공질암층 및 절리가 발달된 보통암층의 순서로 분포되어 있으며, 지하수위의 분포는 GL(-)0.7 ~ (-)2.8 m 사이에 있었으며 이는 기반 암층의 위치, 해안 인접지역에 따른 지형적인 영향과 조수간만의 차이 등에 영향을 받고 있었다.

Lugeon Test

원지반의 지층별 투수성을 평가하기 위하여 각 중계 펌프장별 대표 지점에서 현장투수시험방법 중 Lugeon Test 방법을 이용하여 투수계수를 산정하였다.

1963년에 Lugeon에 의해서 고안된 이 시험법은 댐 기반의 안정성 유지를 위한 투수계수를 측정하고 이에 따른 그라우팅의 가능성을 검토하기 위하여 사용되었다. 이 시험법은 현장 투수계수를 Lugeon이라는 단위로 측정한다. 1 Lugeon은 단위길이의 관정을 통하여 10기압의 압력으로 분당 1리터의 물이 주입될 때를 말한다. 즉 규정 압력(10 kgf/cm²)으로 구멍길이 1m당, 1분간에 1ℓ의 물이 압입 되면 1Lugeon이 된다(1 Lu = 1 ℓ/min/m/10 kgf/cm²) (천,1997).

$$L_u = \frac{10}{pl} Q \quad (6)$$

여기서, Q는 주입량(ℓ/min), l은 시험구간길이(m), P는 주입압력(kgf/cm²)을 나타낸다.

수위 강화법

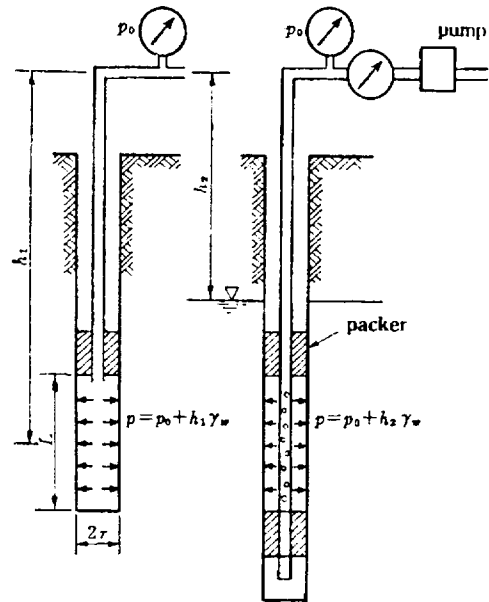
원 지반의 지층별 투수성을 산정하기 위하여 각 중계 펌프장별 대표지점에서 Lugeon Test를 실시하였으나, Lugeon Test는 투수계수가 낮은 암반지역이나 그라우팅 후, 그라우팅에 대한 품질검사 등에 적합한 시험법으로서 매립층 또는 송이층, 일반 토사지역은 투수계수 측정은 어려웠다. 따라서 이러한 지층의 투수성을 산정하기 위하여, 투수시험 중 추가적인 압력을 가하지 않고 단지 수위의 자유강하에 의해 지층별

투수계수를 산정하는 수위강하법을 현장여건에 따라 적용하였다. 수위 강하에 의한 수위 강하법 시험 시, 적용 식은 일반적으로 다음의 2가지를 이용하였다. 식 7은 천공 후 소정의 시험구간 만큼 케이싱(Casing)을 인발하지 않는 경우에 적용되며, 식 8은 이와 반대로 천공 후 소정의 시험구간 만큼 케이싱을 인발하여 투수시험을 시행할 때 적용된다. 본 연구에서는 식 8을 적용하였다.

$$K = \frac{r}{4T} \log \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (7)$$

$$K = \frac{r^2}{2LT} \ln \left(\frac{L}{r} \right) \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (8)$$

여기서, K는 투수계수(m/sec), T는 수위관측 시간(t1-t2), H₁은 초기수위에서 지하수위 면까지의 거리(cm), H₂는 투수시험 종료수위에서 지하수위 면까지의 거리(cm), r은 공반경(cm), L은 시험 구간(cm)을 나타낸다.



(a) single packer 방식 (b) double packer 방식

Fig. 2. Lugeon Test Setup(천, 1997).

투수시험결과

실내 투수시험에 의한 투수성

조전에서 채취한 송이에 대한 실내 투수시험을 통하여 주입량과 양생기간에 따른 투수계수의 변화를 관찰하였다.

Fig. 3은 간극율이 0.3인 시료에 대한 정수두 투수 시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 9.521×10^{-3} cm/sec, 7일이 지난 경우는 8.151×10^{-3} cm/sec 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 8.087×10^{-3} cm/sec로 자연 상태의 투수계수 1.203×10^{-2} cm/sec에 비하여 약간의 투수계수의 증진 현상은 관찰할 수 있었으나 이는 단순히 수치적인 변화일 뿐 실제 토목공사 시 차수효과를 기대할 수 있는 수준은 아니라고 판단되며 양생기간이 7일 이후의 투수계수 변화는 거의 미미함을 알 수 있다.

Fig. 4는 간극율이 0.5인 시료에 대한 변수두 투수 시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 4.241×10^{-4} cm/sec, 7일이 지난 경우는 2.863×10^{-4} cm/sec 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 2.758×10^{-4} cm/sec로 자연 상태의 투수계수 1.203×10^{-2} cm/sec에 비하여 현저하게 투수계수가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있으나, 차수를 목적으로 하는 토목공사에서 그 기대효과는 낮다고 판단된다.

Fig. 5는 간극율이 0.7인 시료에 대한 변수두 투수 시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 6.907×10^{-6} cm/sec, 7일이 지난 경우는 4.672×10^{-6} cm/sec 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 3.203×10^{-6} cm/sec로 자연상태의 투수계수 1.203×10^{-2} cm/sec와 간극율이 0.3, 0.5인 경우의 투수계수 변화에 비하여 불투수층에 가까울 정도로 현저하게 투수계수가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 양생기간에 따른 투수계수의 증진은 양생 7일의 투수계수가 양생 3일의 투수계수에 비하여 낮아지고는 있으나 양생 7일 경과 후, 7일을 기점으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 간극율이 0.8인 시료에 대한 변수두 투수 시험의 결과를 양생기간에 따른 투수계수의 변화로 나타내었다. 양생기간이 3일 경과한 후의 투수계수가 5.212×10^{-6} cm/sec, 7일이 지난 경우는 3.923×10^{-6} cm/sec 그리고 14일이 경과한 후의 투수계수는 3.32×10^{-6} cm/sec로 간극율이 0.7인 경우의 공시체에 대한 투수시험결과

에 비하여 약간의 투수계수 증진은 있었으나 주입량의 증가량에 비하여 그 효과는 미미하다고 판단된다.

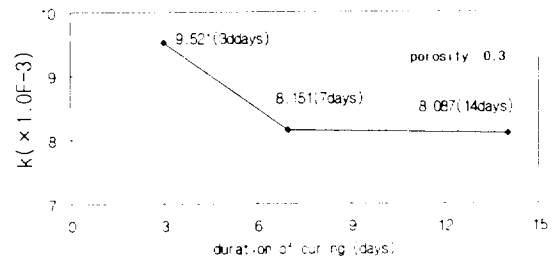


Fig. 3. Results of the Constant-head Permeability Test (Porosity = 0.3).

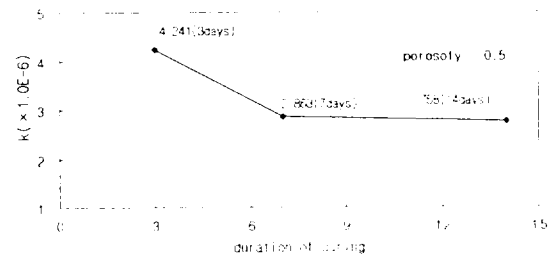


Fig. 4. Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.5).

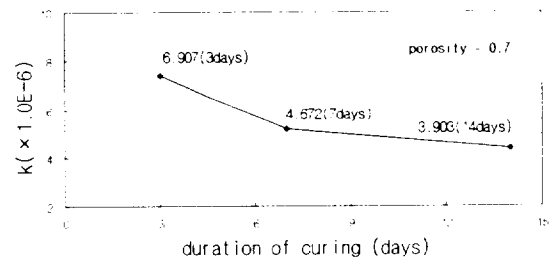


Fig. 5. Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.7).

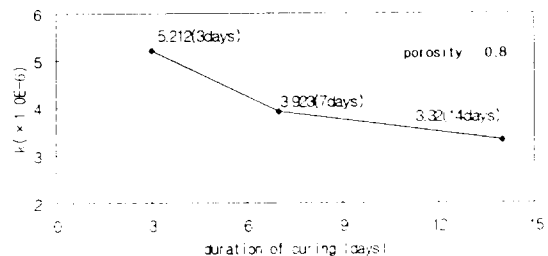


Fig. 6. Results of the Variable-head Permeability Test (Porosity = 0.8).

현장 투수시험에 의한 투수성

물유리계(L.W) 그라우팅 시공전후의 차수효과를 파악하기 위하여 시공 전후에 현장지반에 대한 투수시험을 실시하였다. 현장 투수시험에 의해 산정된 그라우팅 시공 전후의 평대 및 조천 증계펌프장에 대한 투수시험 결과는 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 시공 전후의 각각의 현장에 대한 투수계수 비교에 있어서 시공 전의 평균 투수계수는 평대 $3.218E-02$ cm/sec, 조천 $8.166E-02$ cm/sec로 고투수성을 형성하고 있었으나, 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 후에는 평대 $1.96E-05$ cm/sec, 조천 $4.338E-06$ cm/sec로 비교적 양호한 투수계수를 보이고 있다. 두 현장이 동일하게 해안과 바로 인접한 곳에 위치하였고 평대 증계펌프장의 경우, 조천 증계펌프장 보다 시공 전 투수시험에서 낮은 투수계수를 보였으나 시공 후에는 오히려 조천 증계펌프장의 경우가 $4.338E-06$ cm/sec로 평대 증계펌프장보다 시공 후 투수계수가 더욱 증진되었음을 알 수 있다. 이는 주입량을 고려했을 때 조천의 경우 $536,676$ m³인 평대보다 약 28% 정도 더 많은 $687,488$ m³가 주입된 결과라고 볼 수도 있으나, 시공 전 투수계수가 조천이 더 높고 굴착고가 평대보다 3m 정도가 깊은 점을 감안한다면 단순히 주입량에 의한 영향이라고는 볼 수 없다. 평대의 경우는 해안에 인접하여 위치하였으나 주변에 주택가가 형성되지 않아 일반 굴착기로 터파기를 실시하였으나, 조천의 경우 해안 인접지역에 바로 생활권이 형성되어 있어 민원을 고려 그라우팅 시공 후, 무진동공법을 이용하여 터파기를 실시하였다. 물유리계(L.W) 그라우팅공법이 벤토나이트계 규산소다를 지반에 주입 후 고결체를 형성하여 차수효과를 기대하는 공법이지만 고결체의 강도가 낮아 장기적인 구조체로서의 사용이 불가능한 단점을 고려할 때 일반 굴착기로 터파기 시 진동에 의한 고결체의 파괴 및 암반의 크랙 발생빈도가 무진동 공법을 이용하는 경우보다 빈번하다는 점이 차수효과의 증진작용에 마이너스 요인이 되었다고 판단된다. 따라서 주입의 효과를 투수성 측면에만 국한하여 본다면 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 후 차수효과의 증진이 매우 뛰어나지는 않으나 비교적 양호하게 개선되었음을 알 수 있었으며 이는 주입재의 주입으로 인한 일차적인 대공극의 충전과 이차적인 침투 및 할렬주입(Fracture Grouting)의 효과에

의한 것이라고 판단된다.

본 현장 내의 불균일한 지층 분포상태를 고려한다면, 이러한 지반에서의 차수효과를 검토하기 위해서는 지상에서 그라우팅 시공 후에 시공구간에 대한 시추조사나 현장투수시험으로 차수효과를 간접적으로 판단할 수는 있으나 조사 지점이 국부적으로 편중되어 전체구간에 대한 차수효과 판단에 있어서 문제성이 대두되므로 일정구간을 설계에 맞게 실 시공한 이후에 이들의 효과를 직접 굴착함으로써 유입되는 지하수의 양과 이에 대한 보강효과를 판단하는 것이 현실적으로 가장 적합할 것으로 판단되었다.

Table 3. Results of In-situ Permeability Test in Field Before & After Construction

Site		Before construction			After construction		
		Depth (m)	k (cm/sec)	Average	Depth (m)	k (cm/sec)	Average
Pyung-dae	A	15.2	6.00 E-02	3.218 E-02	15	2.039 E-05	1.96 E-05
	B	15.2	4.363 E-03		15	1.880 E-05	
Jo-cheon	A	18.2	1.125 E-01	8.166 E-02	18.2	1.398 E-06	4.338 E-06
	B	18.2	1.241 E-01		18.2	7.288 E-06	
		12	8.393 E-03				

차수효과에 대한 수치해석

지배 방정식

Seep/W(Ver4.22)프로그램에서 적용된 기본적 이론은 Dracy의 법칙이다. 초기 Darcy의 법칙은 포화토에 대하여 유도되었으나, 최근의 연구에서 불포화토에도 Darcy의 법칙이 적용될 수 있다고 제시하였다(Richard et. al., 1931). 단지 포화토에서의 물의 흐름과 불포화토에서의 물의 흐름의 유일한 차이점은 불포화토에서의 물의 흐름상태에서 수리 전도도(Hydraulic Conductivity)는 더 이상 일정하지 않고 함수비의 변화에 의하여 변하며, 간극수압의 변화에 의해 2차적으로 변한다는 사실이다. 따라서 프로그램

상에서 포화 또는 불포화된 흙에서의 물의 흐름은 Darcy의 법칙의 적용을 받는다. Darcy의 법칙은 층류조건 하에서 유효하며 여러 종류 흙들에 적용가능하다(Brajas, 1999). 방정식은 식 9와 같다.

$$q = ki \quad (9)$$

여기서, q = 비유출량(Specific Discharge), k = 수리전도도(Hydraulic Conductivity), i = 동수경사(Gradient of Fluid or Potential)를 나타낸다.

Darcy의 법칙은 일반적으로 식 10과 같이 표현된다.

$$v = ki \quad (10)$$

여기서, v 는 Darcy의 속도(Darcian Velocity)로 일반적으로 유출속도라 하며 k 는 투수계수이다.

Seep/W(Ver4.22) 프로그램에서 사용된 지배 방정식은 식 11과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (11)$$

여기서, H 는 전수두, k_x 는 x 방향에서의 수리전도도, k_y 는 y 방향에서의 수리전도도, Q 는 적용 경계 흐름, θ 는 Volumetric Water Content, t 는 시간을 나타낸다.

식 11은 시간에 따라 임의의 한 지점인 요소체적(Elemental Volume)에서의 유입량과 유출량의 차가 Volumetric Water Content의 변화와 같다는 것을 보여준다.

정상류 상태에서 요소체적을 지나는 유입량과 유출량은 항상 같다. 결과적으로 방정식의 우변은 0이 되고 식 11은 식 12와 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (12)$$

Volumetric Water Content에서의 변화는 흙의 특성과 응력상태의 변화에 따라 좌우된다. 포화 상태 및 불포화 상태에서의 응력상태는 두개의 변수로 나타낼 수 있다(Fredlind and Morgenstern, 1976,1977). 응력상태를 나타내는 두개의 변수는 $(\sigma - u_a)$ 와 $(u_a - u_w)$ 이며, 여기서, σ 는 전응력(total stress), u_w 는 간극공기압(Pore-air pressure), 그리고 u_a 는

간극수압이다.

Seep/W(Ver4.22) 프로그램 상에서의 전응력은 일정하다고 가정한다. 즉, 토량(Soil Mass)에 의한 하중재하>Loading) 또는 하중제거(Unloading)는 없음을 말한다. 두 번째 가정은 간극공기압이 대기압에 일정하다고 가정한다. 이는 $(\sigma - u_a)$ 이 일정하게 존재하며, Volumetric Water Content에서의 변화에 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 Volumetric Water Content에서의 변화는 오직 응력상태변수인 $(u_a - u_w)$ 항의 변화에 따라 변하며, 간극공기압 (u_w) 이 일정할 때, Volumetric Water Content의 변화는 오직 간극수압의 변화에 대한 함수이다. Volumetric Water Content에서의 변화는 식 13에 의하여 간극수압의 변화와 연관된다.

$$\partial O = m_w \partial u_w \quad (13)$$

여기서, m_w = 저류곡선(storage curve)의 경사를 나타내며, 전수두(Total Hydraulic Head)는 식 14와 같이 정의 된다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (14)$$

여기서, u_w 는 간극수압, γ_w 는 물의 단위중량, y 는 지반고(elevation)를 나타내며, 식 14를 이항하여 정리하면 식 15가 된다.

$$u_w = \gamma_w(H - y) \quad (15)$$

식 15를 식 13에 대입하여 정리하면 식 16이 된다.

$$\partial O = m_w \gamma_w \partial(H - y) \quad (16)$$

식 16을 식 11에 대입하여 정리하면 식 17이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q \\ = m_w \gamma_w \frac{\partial(H - y)}{\partial t} \end{aligned} \quad (17)$$

지반고가 일정하기 때문에, 시간에 대한 y 의 미분계수는 소거되어 식 18과 같은 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (18)$$

해석영역 및 경계조건

해석영역은 직교좌표계에서 x축에 해당하는 지표면 (Ground Level)에 수평방향으로 설계 굴착 폭의 좌·우측에 각각 굴착 폭의 2배에 해당하는 지표면을 설정하였으며, 지표면에 수직방향으로는 지표면 기준으로 설계 굴착고의 4배에 해당하는 지반고(Elevation)를 설정하였다.

경계조건은 해석영역의 좌우측은 수평이며 하부경계면을 포함한 외부 경계면에서의 침투유량이 0인 불투수층으로 가정하였다. 그라우팅 시공 시 예상되는 침투유량을 산정하기 위하여 지하수의 유동은 수평흐름이 주를 이루고 있어 침투해석 굴착단면 하부에는 Flux Section을 설정하였다. 지하수위는 현장에서 조사된 시추주상도 상의 지하수위를 적용하였다. 시간에 따른 지하수위의 변동은 고려하지 않았다.

수치해석을 이용한 유입량 산정을 위하여 각각의 현장에 대하여 정상류 상태의 2차원 해석을 실시하였다. 그리고 해석영역을 x, y방향 각각에서 격자선을 이용하여 노드(Node)가 4개인 4변형의 메쉬(Mesh)로 분할하였다.

수리전도율(Hydraulic Conductivity Ratio)은 1로써 x, y방향으로 수리전도도가 같다고 가정하였다. 여기서 수리전도율은 x방향의 수리전도도에 대한 y방향의 수리전도도의 비를 말한다.

조석에 따른 지하수위의 변동 요인과 암반선의 불균일함을 배제한 시추주상도 상의 지층만을 고려하였다.

차수효과에 대한 수치해석결과

평대 중계펌프장

Seep/W(Ver4.22)프로그램에 의한 평대 중계펌프장의 수치해석결과는 Table 4와 같다. 수치해석결과 그라우팅을 고려하지 않았을 경우의 유입량은 794 m³/hr를 보이고 있으나, 그라우팅 심도를 8m로 제한한 경우는 침투유량이 464 m³/hr로 42%정도의 유입량 감소를 보이고 있다. 그라우팅 심도를 15m로 제한한

경우는 침투유량이 78 m³/hr로 그라우팅 심도를 8m로 제한한 경우에 비하여 상당한 감소를 보이고 있다. 한편 Grouting 심도를 17m로 한 경우는 침투유량이 77 m³/hr로 작게 나타나고 있으나 심도가 15m로 제한한 경우에 비해 침투유량의 감소가 미미한 것으로 나타나고 있다. Fig. 7, 8, 9, 10은 평대 중계펌프장의 수치해석결과를 보여주고 있다.

Table 4. Seepage Quantity According to the Depth of Grouting (Pyung-dae)

Pyung-dae		
Depth of grouting	Flux section (m ³ /sec/m)	Seepage quantity (m ³ /hr)
No grouting	8.8553E-03	794
8 m	5.1717E-03	464
15 m	8.7296E-04	78
17 m	8.6162E-04	77

조천 중계펌프장

Seep/W(Ver4.22)프로그램에 의한 조천 중계펌프장의 수치해석결과는 Table 5와 같다. 수치해석결과 그라우팅을 고려하지 않았을 경우의 유입량은 804 m³/hr를 보이고 있으나, 그라우팅 심도를 15m로 제한한 경우는 침투유량이 147 m³/hr로 82%정도의 유입량 감소를 보이고 있다. 그라우팅 심도를 18m로 제한한 경우는 침투유량이 85 m³/hr로 그라우팅 심도를 15m로 제한한 경우보다 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 그라우팅 심도를 20m로 제한한 경우는 침투유량이 84 m³/hr로 심도가 18m로 제한한 경우에 비해 침투유량의 감소가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. Fig. 11, 12, 13, 14는 조천 중계펌프장의 수치해석결과를 보여주고 있다.

Table 5. Seepage Quantity According to the Depth of Grouting (Jo-cheon)

Jo-cheon		
Depth of grouting	Flux section (m ³ /sec/m)	Seepage quantity (m ³ /hr)
No grouting	8.9699E-03	804
15 m	1.6388E-03	147
18 m	9.503E-04	85
20 m	9.3768E-04	84

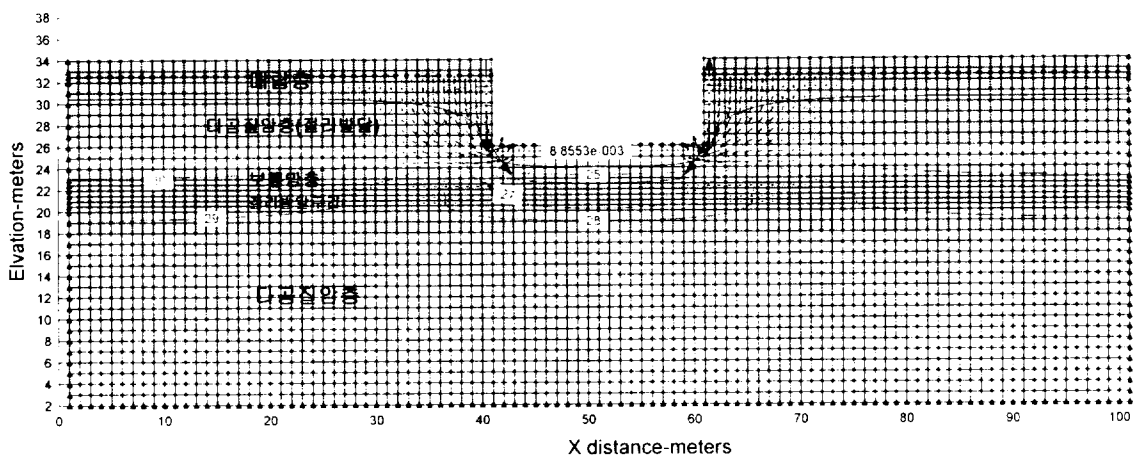


Fig. 7. Result of Seepage Analysis(No Grouting).

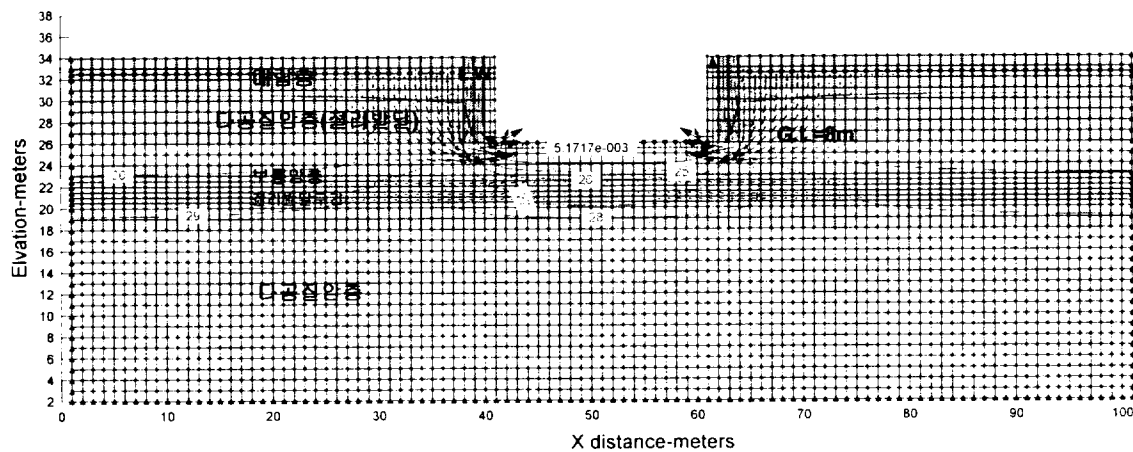


Fig. 8. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 8 m).

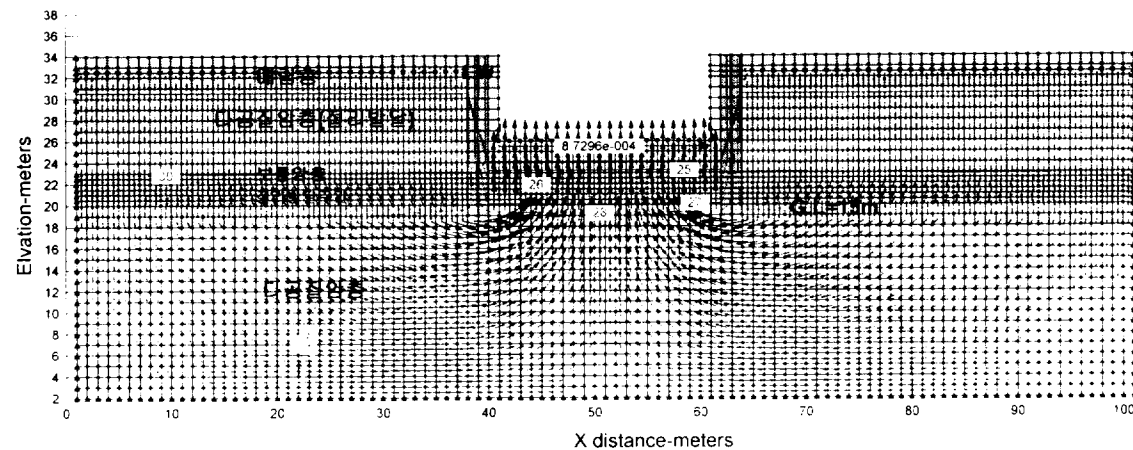


Fig. 9. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 15 m).

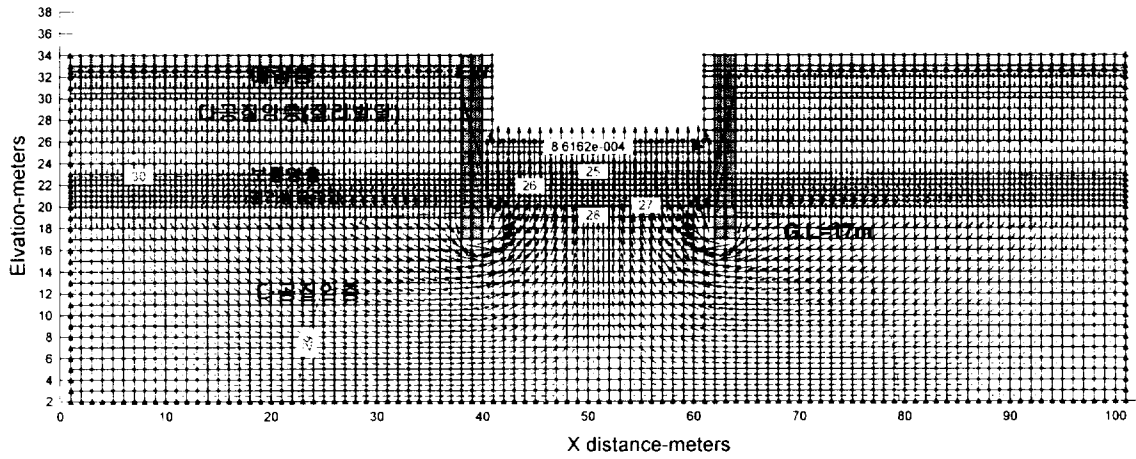


Fig. 10. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 17 m).

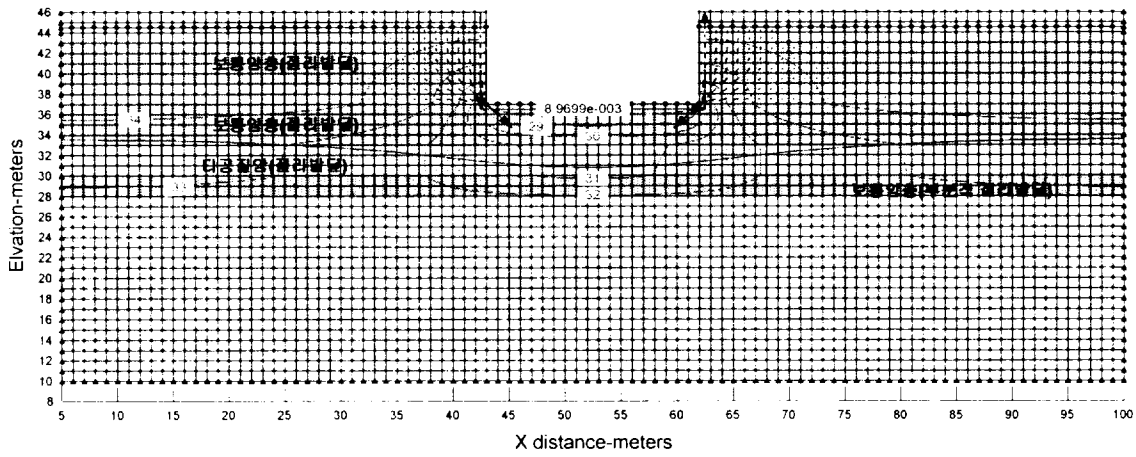


Fig. 11. Result of Seepage Analysis(No Grouting).

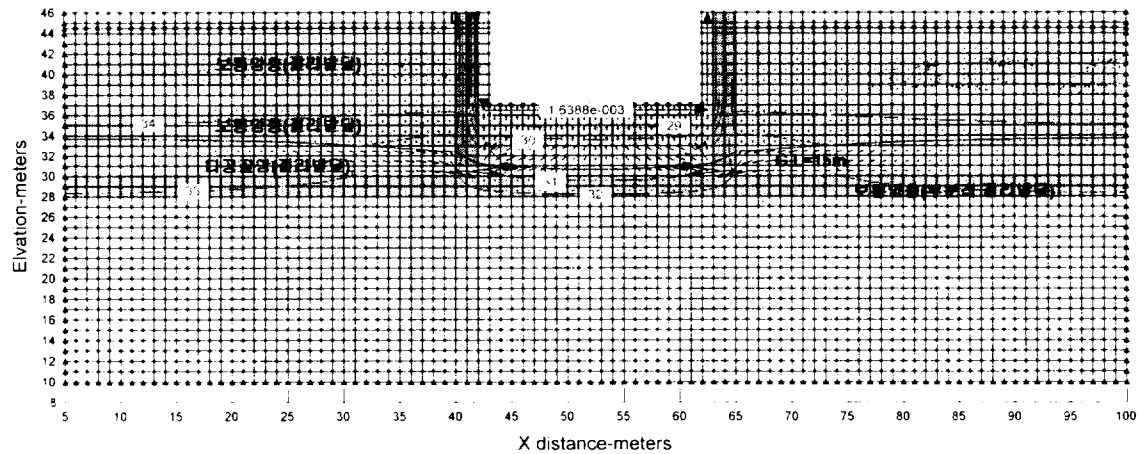


Fig. 12. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 15 m).

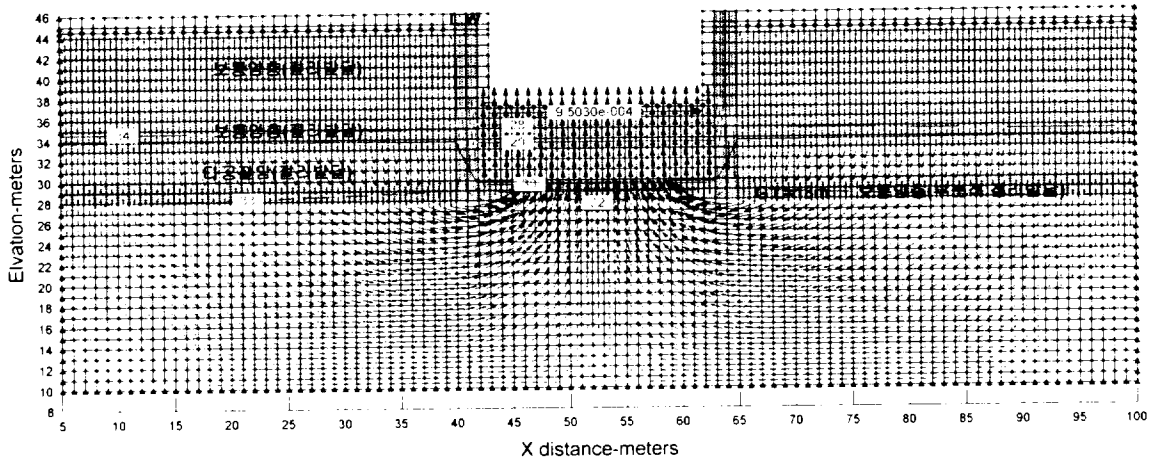


Fig. 13. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 18 m).

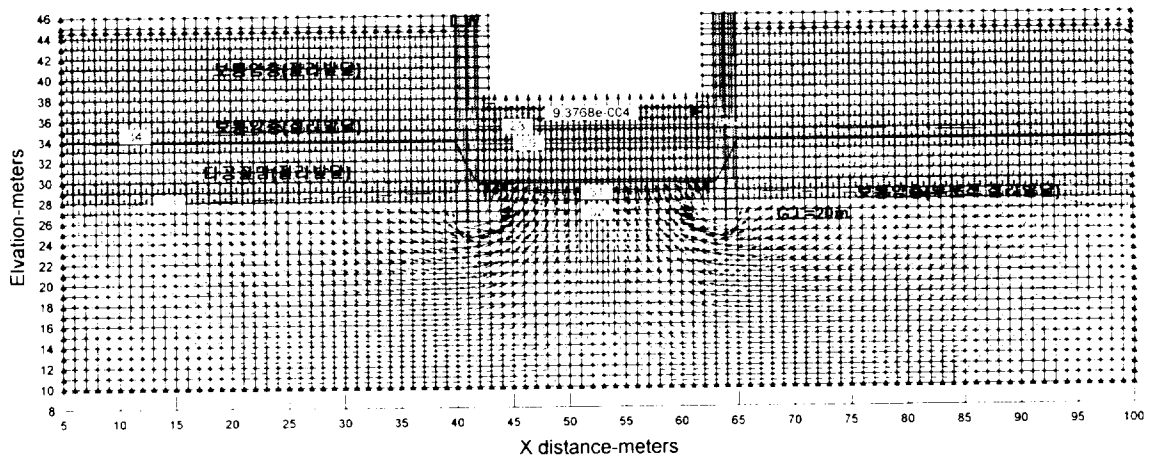


Fig. 14. Result of Seepage Analysis(Depth of Grouting = 20 m).

결론

조건 및 평대 증계펌프장에 대한 그라우팅 시공 전 후의 현장 투수시험 및 해당 현장에서 채취한 송이 시료에 대한 실내 투수시험을 실시하여 투수특성을 고찰하고 유한요소법에 의한 예측치를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실내 투수시험을 통하여 자연 상태의 송이시료에 대한 투수계수를 산정하고 기본물성실험을 바탕으로 주입량을 산정한 후, 그 주입량에 따라 물유리

(L.W)약액을 배합하여 제작한 공시체 및 실제 간극율보다 15%정도 과대 및 15%, 30%과소하게 제작한 공시체에 대한 투수계수를 산정한 결과, 송이층에 대한 차수효과는 송이층의 간극율과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 실제 간극율보다 낮게 간극율을 산정할수록 주입량이 적어지며 투수시험결과 투수계수는 높아져 차수증진효과를 기대할 수가 없다. 이와 반대로 실제 간극율보다 간극율을 과대하게 산정한다면 차수증진효과는 증진되나 경제적 시공이 어렵기 때문에 물유리계(L.W) 그라우팅 시공 전, 정확한 간극율 산정이 필요하다.

2) 실내 투수시험을 위한 공시체 제작 시, 양생일수

에 따른 투수계수의 변화가 양생 7일 전까지는 증진되나 그 후 14일까지는 양생 7일을 기점으로 점차 수렴함을 알 수 있다. 이는 현장에서 그라우팅 시공 후, 성과투수계수를 산정하기 위하여 최소 7일정도의 양생기간을 두고 현장 투수시험을 실시할 필요가 있다.

3) 산정된 투수계수의 값만을 고려하여 시공 전후 현장 투수시험결과와 실제 간극율에 의한 송이시료에 대한 실내 투수시험 결과를 수치적으로 비교하면 실내투수시험에서 차수증진효과가 다소 크지만 그 효과가 미미하다. 그러나 실내 투수시험이 단일시료에 대한 시험이라는 점과 송이 자체의 높은 투수성을 감안한다면, 송이층에 대한 물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 보강시 다른 지층에 비해 상대적으로 차수효과가 높다고 판단된다. 이는 지반에서의 암반선이 불균일하고 지층별로 다른 물성치를 가지고 있다는 점과 물유리계(L.W) 그라우팅은 주입압에 의한 주입방식으로 간극 및 절리면에 그라우트재가 완전히 충전되었다고 볼 수 없는 반면, 실내시험의 경우 현장 배합비에 따른 물유리 약액과 송이시료를 동시에 섞어 배합하는 방식으로 공시체를 제작하여 송이 입자사이에 물유리 약액이 충분히 충전된 결과라 볼 수 있다.

4) 송이에 대한 실내 투수시험결과를 바탕으로, 송

이층을 포함하는 지층 또는 매립층이나 퇴적층, 절리가 발달한 다공질암층에서의 지반보강이 아닌 차수를 목적으로 현장에서 물유리계(L.W) 그라우팅을 적용하는 경우, 시공에 어려움이 없을 것으로 본다.

5) 시공 후 현장투수시험결과와 수치해석결과를 비교하면 지하수의 유입속도를 고려하지 않고 단지 지하수위만 고려하는 차수대상지반에서 Gel-time 조절이 용이한 물유리계(L.W) 그라우팅 시공이 적합하다.

참고 문헌

- 정용성. 1986. 약액주입을 중심으로 한 차수효과증대에 관한 연구. 한양대학교 석사학위논문, pp. 31-36.
- 천병식. 1998. 건설기술자를 위한 지반주입공법. 원기술, pp. 115-141.
- 日本土質工學會. 1985. 藥液注入工法の調査・設計から施工まで, 日本土質工學會, 71 pp.
- Braja M. Das. 1997. Principles of Geotechnical Engineering. PWS publishing company, pp. 129-145.
- R.H karol. 1983. Chemical Grouting. Marcel Dekker, INC.N.Y. pp. 12-23