

지반함몰 방지를 위한 지하수 재주입 실험적 연구

An Experimental Study on Recharge Well Technology for Prevention of Ground Collapse

신은철¹⁾ · 박춘성[†]

Eunchul Shin · Chunsung Park

Received: March 10th, 2017; Revised: March 29th, 2017; Accepted: April 10th, 2017

ABSTRACT : It is a method of suppressing back ground subsidence by re-injecting groundwater back to the target ground and recovering the underground water level. In order to analyze the subsidence of the back ground due to maintaining the underground water level, indoor model experiments were conducted. Through this study, the factors influencing on the groundwater and the tendency of subsidence back ground by experiments were analyzed and the effect of ground subsidence by reinfusion of groundwater was also investigated. As a result of the subsidence analysis with considering only the influence of the underground water level, the settlement of the ground occurs as the underground water level at the time of ground excavation goes down. The closer to the back of the retaining wall, the maximum settlement occurred. Moreover, it was analyzed that the influence distance where subsidence occurs from retaining wall to the point of about 1.8 H on the basis of the ground collapse. The most effective location of water reinjection is the closet location to the back of braced-cut wall for reducing the groundwater down and also minimizing the ground settlement.

Keywords : Ground collapse, Recharge well technology, Underground water level, Ground settlement

요지 : 지하수위 저하를 방지하기 위한 방법으로 지반 굴착에 따라 배출된 지하수를 대상 지반에 다시 재주입함으로써 흠막이 벽체 배면의 지반함몰 및 침하를 방지하는 방법에 관한 연구이다. 지하수 재주입에 따른 흠막이 벽체 배면의 지반함몰 및 침하를 분석하기 위해 지하수 재주입 여부와 흠막이 벽체 배면으로부터 거리 등 조건을 달리하며 재주입정 위치별 효과를 확인할 수 있는 실내모형실험을 수행하였다. 실험을 통해 지하수위에 영향을 미치는 인자와 흠막이 벽체 배면의 지반함몰 및 침하경향을 분석하고, 지하수 재주입에 따른 지반함몰 방지효과에 대한 연구를 수행하였다. 지하수위의 영향을 고려한 침하분석 결과, 흠막이 전면 굴착할 때 지하수위 저하에 따라 지표면 침하가 발생, 흠막이 벽체 배면에서 최대가 된다. 또한 흠막이 길이를 기준으로 흠막이 벽체 배면으로부터 재주입정 위치별 거리 비에 따라 침하량이 달라지는 것으로 분석되었다. 지하수의 영향에 의한 지반함몰 및 침하를 방지하기 위한 방법으로 흠막이 벽체 배면으로부터 가까운 위치에 지하수를 재주입 할 때 지반함몰 및 침하 방지 효과가 크고 최대 침하영향거리도 감소하는 것으로 분석되어 지하수 재주입정 공법의 지반함몰 방지효과를 확인하였다.

주요어 : 지반함몰, 지하수 재주입정 공법, 지하수위, 지반침하

1. 서론

최근 우리나라에서도 싱크홀(sinkhole) 등 지반함몰 및 침하, 공동화 현상이 심각한 사회문제로 등장하고 있다. 실제 인천광역시 서구 왕길동 인천 도시철도 2호선 공사현장에서 무려 가로 11m 세로 12m에 달하는 싱크홀이 발생하였다. 2014년 8월에는 서울특별시 석촌호수 부근 도로 주변에서 7개 이상의 싱크홀, 동공이 무더기로 발생하는 등 피해가 급증하고 있다. 더욱이 상하수도 시설 등이 매립된 도로면에서 지반함몰이 자주 발생한다는 점에서 물적 피해뿐만

아니라 인적 피해 사례도 증가하고 있다(김윤승, 2015). 김창룡(2012)에 따르면 도심지 내 지반함몰 발생건수가 2010년도에는 435건, 2012년도에는 689건, 2013년도에는 845건으로 매년 증가하고 있으며, 이러한 추세는 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다. 지반함몰과 침하는 다양한 원인으로 발생하고 있으나 크게 토사지반의 터널 굴진, 상·하수도관 등 지하시설물 손상에 의한 발생, 굴착에 따른 흠막이 가시설 배면 토사 유실에 의한 발생 등 세 가지 경우가 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(이송, 1999).

석촌호수 주변과 인천 도시철도 2호선 공사 현장 싱크홀

1) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Sciences, Incheon National University

† Ph.D Student, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Sciences, Incheon National University (Corresponding Author : sherikim315@naver.com)

은 지하철 건설 등 토사지반의 터널 굴진으로 인한 지하수 배출로 지반함몰이 발생하여 지하수위 저하의 위험성을 보여주고, 도심지 내에서 자주 발생하는 도로함몰은 주로 상하수도관 파열에 의한 토사유출에 의해 발생하고 있으며, 굴착에 따른 흙막이 벽체 배면에서의 지하수 배출과 토사유출로 인하여 인접 대지에 지반침하가 발생, 건축물의 안정성이 심각히 훼손, 안전문제와 재산권 분쟁을 유발하고 있다. 포장이 되지 않은 교외지역에서는 지하시설물이 적고, 강우 시 우수가 땅속으로 스며들어 지하수위가 유지되는 반면, 높은 포장률을 보이는 도심지에서는 강우의 유출과 지하시설물이 많아 상대적으로 더 많이 지하수위 저하에 따른 위험요인에 노출되어 있다. 지반함몰과 침하 발생 시 현장 조사와 수습에만 그칠 경우 2차, 3차 피해로 연결될 수 있어 이에 대한 대책이 요구되지만, 도심지 과밀화, 상·하수도관로 등 지하시설물 노후화와 지하시설물 증가 등 다양한 요인으로 오히려 지반의 변형과 교란은 더욱 증가하고 있어 지반함몰 및 침하를 방지하기 위한 구체적인 대책이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 사회적 요구에 국회와 국토교통부 등 정부는 지반함몰 및 침하 방지를 위하여 2016년 1월 “지하안전관리에 관한 특별법”을 제정(2018년 1월 1일 시행)하였으며 2016년 9월 시행령 및 시행규칙을 입법 예고함으로써 법적 근거를 마련하였다.

따라서, 이 논문에서는 지반 굴착으로 인하여 발생하는 흙막이 배면 지반함몰 및 침하를 억제하기 위한 방안으로써 지하수를 대상 지반에 재주입하는 방법을 연구하였다. 지하수를 재주입하는 방법에 대한 실내모형실험으로 지하수의 재주입 방법 및 위치에 따른 흙막이 배면의 지반침하 경향을 분석하고, 침하영향거리 및 최대침하량에 대한 분석을 함으로써 재주입 공법의 적용 가능성 확인하는 것을 목적으로 하였다.

흙막이 배면의 침하량에 대한 연구에서는 지하수의 영향을 고려하지 않고 흙막이 벽체 횡면위 영향만을 고려하여 침하영향거리와 최대침하량을 산출하였다. 이 연구는 기존 이론에서는 고려되지 않았던 지하수 영향을 고려하여 지하수위 저하가 지반함몰 및 침하에 미치는 영향을 알아보고 재주입 공법을 통하여 지하수를 재주입, 지하수위를 복원하고 유지하여 지표의 침하량과 침하범위를 최소화함으로써 지반함몰 및 침하를 방지하기 위한 공법 개발을 목적으로 연구를 진행하였다(Maliva, R.G. et al., 2011; Shen et al., 2011; Zhang, X.S. et al., 2013) 대상 지반의 재주입으로부터 재주입된 지하수로 인한 수위변화가 흙막이 배면에서 발생하는 지반의 침하영향거리와 최대침하량에 끼치는 영향을 알아보기 위하여 실험 모형실험을 수행하였다. 지하수위 저하에 따라 흙막이 배면에서 발생하는 지표침하의 변화를 분석하기 위한

방법으로 한 개의 재주입정으로부터 공급되는 지하수 재주입과 흙막이 벽체로부터의 최대 침하영향거리와 최대침하량의 관계를 도출할 수 있도록 실험을 구성하였다.

2. 지하수 재주입 방법의 이론적 고찰

2.1 지하수 재주입 방법의 특징

일본에는 지하수 재주입 공법이 복수공법이라는 이름으로 알려져 있고 다수의 시공 사례가 있다. 배수 공법으로 양수된 지하수를 대심도 집수정 등과 같은 구조의 재주입정을 매개로 대수층에 재주입하는 공법이다. 이 공법을 채용하는 주요 목적은 배수 공법에 의한 대상지반 주변 우물고갈, 압밀침하 방지, 방류 능력이 없거나 있어도 부족한 경우에 대처하기 위해서이다. 단, 다음 항에서 기술하는 문제점 등이 있기 때문에 현재는 배수 공법이나 지수공법에 비해 적용사례가 매우 적다. Fig. 1은 재주입 공법의 개념도를 나타낸 것이다. 양수되는 대수층과 동일한 대수층에 재주입하는 경우, 배수 공법만을 적용하는 경우에 비해 필요 배수 또는 양수량이 증가하기 때문에 대심도 집수정을 설치해야 하는 등 배수 및 집수설비가 증가한다. 배수량은 지하수 재주입정이 대심도 집수정에 가까울수록 크다. 따라서 재주입정은 대심도 집수정과 근접거리에 설치하지 않고 일정거리 이상 이격시키는 것이 효율적이다. Fig. 2는 양수 및 재주입 대상 대수층이 동일한 경우 재주입 모형도를 나타낸 것이다.

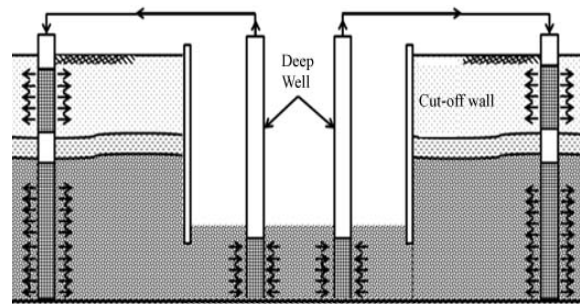


Fig. 1. Schematics of recharge well method

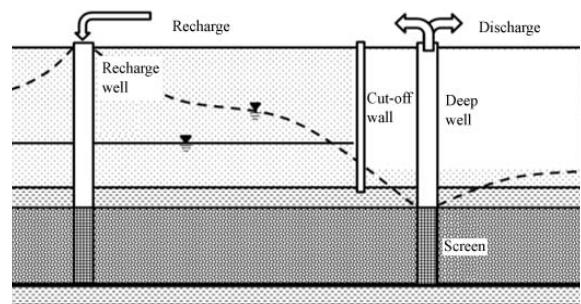


Fig. 2. Same capacity between recharge well and discharge well

2.2 지하수 재주입 공법의 설계방법

지하수 처리공법 선정 시 재주입 공법의 적용 여부가 결정되면 앞에서 검토한 바와 같은 유의점이나 문제점을 파악하여 설계에 반영하여야 한다. 적용성 검토가 완료되면 재주입정의 위치와 필요 개수를 산정한다. 이때 일시적으로 많은 양이 필요하다고 판단되는 경우 몇 개를 설치하여 재주입 시험 등을 실시해서 최종의 개수를 정해야 한다. Fig. 3은 재주입 공법의 설계 순서를 정리한 흐름도이다. 필요수량 산정은 우측 플로(b)에 나타난 바와 같이 필요배수량 Q 를 산정한 후 어느 정도의 지하수를 재주입할 것인지 결정한다. 특히, 양수(discharge) 대상 대수층과 동일 대수층에 재주입하는 경우, 재주입에 따른 터파기부의 수위 상승이 있기 때문에, 당초의 필요 양수량 산정 시 요구되는 수위저하를 조금 높게 산정해야 한다. 보통 전체 양수량의 몇 % 밖에 재주입할 수 없고, 재주입정의 주입구 막힘현상으로 재주입량이 감소하기 때문에 이를 고려하여 예상 필요 재주입량(QR)을 정해야 한다. 재주입정 1개당 가능 재주입량(QRw)을 산정하여 재주입정의 필요 개수 n 을 구한다.

3. 지하수 재주입 실내모형실험

3.1 실험재료의 공학적 특성

건설현장에서는 현장의 시공성과 안정성, 작업여건 개선을 위해 지하수의 처리 및 수위저하를 목적으로 사용하는 중력식 배수로 대신도 집수정(deep well), 진공압력으로 강제배수하는 웰포인트(well point), 두 공법의 혼용인 진공대심도 집수정의 공법을 사용하고 있다. 이 논문에서는 지하수위를 효과적으로 관리하기 위한 방법으로 대신도 집수정

이나 웰포인트로부터 양수되는 지하수를 다시 원지반에 재주입하는 방법에 대한 연구를 실내실험, 실대형 모형실험을 통하여 수행하였다. 지하수 재주입 시 굴착에 따른 지표침하에 대한 연구를 위하여 실내실험에서는 크게 두 가지로 구분하여 실험을 수행하였다. 첫째, 지하수를 주입할 때 주입관으로부터의 영향범위를 산정하고 둘째, 흙막이 벽체 배면으로부터의 재주입정 이격거리 따른 지하수위 저하와 지반함몰 및 침하에 대한 것이다.

지하수 재주입 공법 적용을 위하여 비교적 입자가 균등하고 투수계수가 양호한 모래를 사용하였다. 모래를 사용한 이유는 입자가 작은 세립토에 해당하는 실트나 점토는 투수계수가 매우 작기 때문에 지하수 재주입에 의한 지하수위의 변화를 뚜렷하게 관찰하기 어렵고, 지하수 재주입 시 고압의 주입을 사용하여야 하는데 고압의 압력을 사용하게 되면 침투형태의 주입이 아닌 나무의 뿌리형태처럼 할렬의 형태로 주입되기 때문에 적절하지 않은 것으로 판단된다. 지하수 재주입 실험에서 사용한 모래를 통일분류법(USCS)으로 분류하면 입도가 나쁜 모래인 SP로 분류할 수 있다. Table 1은 재주입 실험 흙 시료의 공학적 특성을 정리하여 나타낸 것이다.

모형토조를 이용한 실험을 수행하기 위해서는 각각의 실험조건마다 모형지반을 균질하게 조성하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 비교적 조작이 쉽고 균질하게 지반을 조성하도록 하였으며 조밀한 조건에 해당하는 80%의 상대밀도로 모형지반을 조성하였다. Table 2는 재주입 실험용 흙 시료의 다짐상태에 따른 상대밀도와 건조단위중량을 나타낸 것으로 강사장치를 이용하여 낙하고에 따라 흙 시료의 상대밀도와 건조단위중량을 나타낸 것이다.

3.2 지하수 재주입 실대형 모형실험방법

3.2.1 실대형 모형실험을 위한 배수저항실험

배수저항실험은 Gabr et al.(1999)이 제시한 배수저항 실험

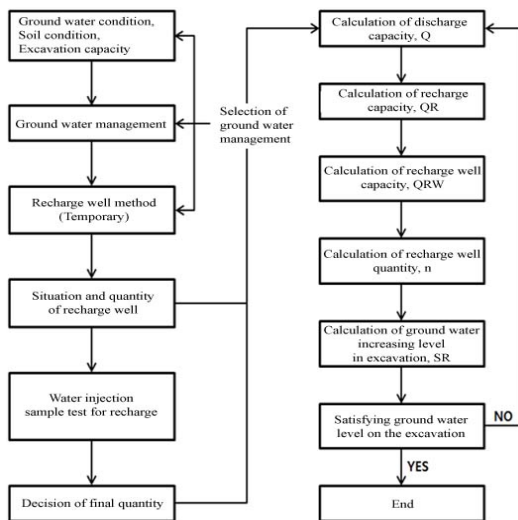


Fig. 3. Flow chart of recharge well design

Table 1. Mechanical properties of soil for recharge well test

Gravity (G_s)	Permeability (k , cm/sec)	Particle distribution		Atterberg limit		USCS
		No.4 passing	No.200 passing	Liquid limit	Plastic limit	
2.63	0.03	100%	2%	N.P.		SP

Table 2. Relative density and dry unit weight with regard to soil specimen for recharge well test

Height (cm)	Relative density (%)	Dry unit weight (kN/m^3)
15	20	13.11
21	40	13.78
30	60	14.52
50	80	15.35

험장치의 원리를 활용하여 제작하였다. 실내실험장치는 높이 100cm, 직경 20cm인 실린더 형태의 압력조절장치를 나타낸 것으로 상부와 하부의 덮개는 강철판으로 구성되어 있고, 실린더는 정확한 재주입량을 측정할 수 있도록 아크릴 재료를 이용하여 제작하였다. 압력이 주어졌을 때 실린더의 변형을 방지하기 위해 상부와 하부의 강철판을 연결하는 직경 7mm의 철제봉 6개로 연결하였다. 이 장치는 브로워에서 공급되는 공기압을 수압으로 바꾸어 주는 역할을 하며 상부에 공기압을 조절할 수 있는 게이지를 부착하여 재주입압을 조절할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 Gabr가 제안한 배수저항 실험 모형도이다. 물이 주입되는 주입관은 PVC 재질로 되어있는 60mm의 원형관을 사용하여 길이방향으로 발생하는 진공손실과 공기 투과를 최소화하기 위하여 실리콘으로 부착시킨 후 테이프로 실링을 하였다. Fig. 5는 실대형 모형

실험의 개념도를 나타낸다. PVC 주입관을 이용한 지하수 재주입 시 재주입 영향범위에 대한 실험적 연구를 위하여 모형실험장치를 이용하였다. 모형토조를 이용하여 흙 시료를 토조내부에 단계별로 포설하고 다짐을 실시하였다. 다짐 실시 후에 저수조에서 물을 공급하여 48시간 이상 안정화 시킴과 동시에 시료의 상부에는 흙의 팽창을 방지하기 위하여 일정 하중을 가하여 구속하였다. 모형토조 내부에 구성된 지반을 안정화 시킨 후 Fig. 5에 나타난 바와 같이 간극수압계 1열 방향으로 PVC 주입관으로부터 5cm씩 6개를 각각의 위치마다 40cm의 깊이에 설치하였다.

3.2.2 실대형 모형실험 구성

이 실험에서 사용한 흙은 비교적 입자가 큰 모래와 화강 풍화토를 이용하였으며, 흙막이 벽체로부터의 거리에 따른 재주입정의 주입효과에 대한 분석을 하였다. 재주입정의 주입효과는 비산출률, 침하량, 토압 및 간극수압의 관계를 이용하여 주입효율에 관한 분석을 실시하였다. 지반의 침하 및 지하수의 흐름을 파악하기 위해 아크릴로 모형토조를 제작하였다. 토조의 크기는 길이 2m, 폭 50cm, 높이 70cm이고

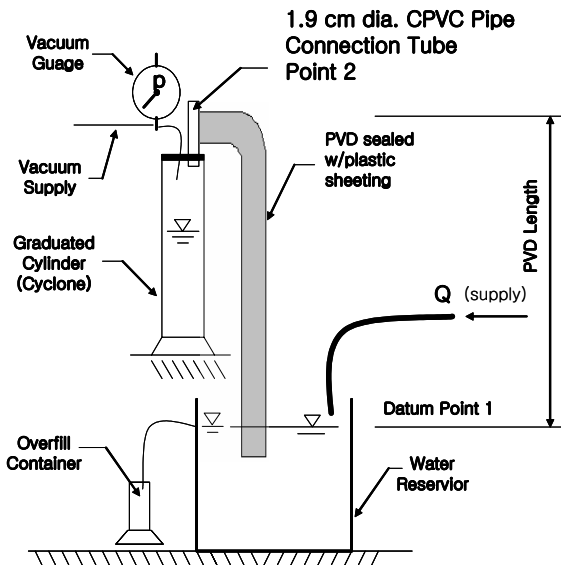


Fig. 4. Schematic measurement device for discharge well resistance (Gabr et al., 1999)

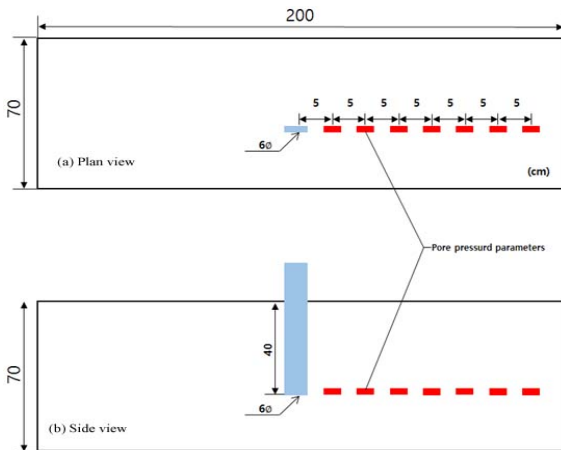
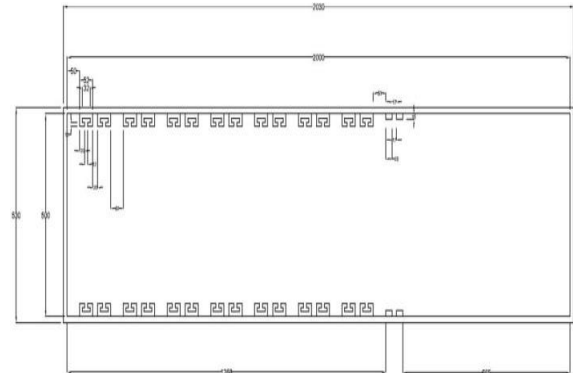
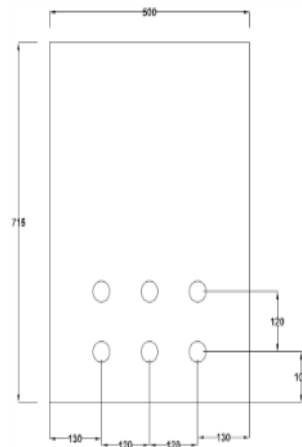


Fig. 5. Schematics of water migration experiment for range effect of the recharge well



(a) Plan view



(b) Front view

Fig. 6. Design of ground water migration experiment for recharge well range effect test

강철 프레임을 이용하여 하중에 의한 토조의 변형을 최소화 하였다. 토조의 측면에는 10cm와 22cm 높이에 지하수 배수를 위해 지름이 4.2cm인 구멍 6개를 만들었다. Fig. 6은 지하수 재주입 실험을 위한 모형토조의 도면이다. 지반 굴착으로 인한 인접지반의 지표침하량을 확인하기 위해 LVDT 3개를 흙막이 벽체로부터 20cm, 60cm, 100cm에 설치하였고, 토압계는 지하수위 변화에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 수평토압의 변화를 측정하기 위해 흙막이 벽체 밀면으로부터 10cm 간격으로 3개 설치하였다. 또한, 간극수압계는 지하수위 변화에 따른 위치별 간극수압을 측정하기 위해 바닥으로부터 30cm 지중에 흙막이 벽체로부터 20cm, 60cm, 100cm에 설치하였다. 실험용 모형실험은 입도가 큰 조립토인 모래를 사용하였고, 지하수 재주입의 유무, 흙막이 벽체 배면으로부터의 재주입정의 위치 등을 변수로 실험을 수행하였다. 실험은 총 4종류로, 지하수 재주입의 유무, 흙막이 벽체로부터 재주입정까지의 거리는 각각 20cm, 40cm, 60cm이다. 흙막이 벽체 전면에 설치되어있는 웰포인트로부터 양수한 지하수를 재주입정을 통해 재주입하는 방식으로 실험을 수행하였다.

4. 지하수 재주입 실내모형실험 결과

4.1 지하수 재주입 영향범위 산정결과

이 연구에서는 진공 브로워 장비에 대하여 공급되는 공기 흐름율과 진공압에 대한 관계를 보정하여 적용하였다. Fig. 7은 진공압력과 공기 흐름율과의 관계를 나타낸다. 이는 PVC 주입관을 통하여 공기가 흐를 때 진공압력의 관계를 나타낸 것으로서, 적용되는 진공압의 함수관계를 공기 흐름율로 표현한 것이다. 즉, PVC주입관 으로부터 공기 흐름율과 통수능력을 도출할 때 이용하였고, 요구되는 재주입압을 얻기

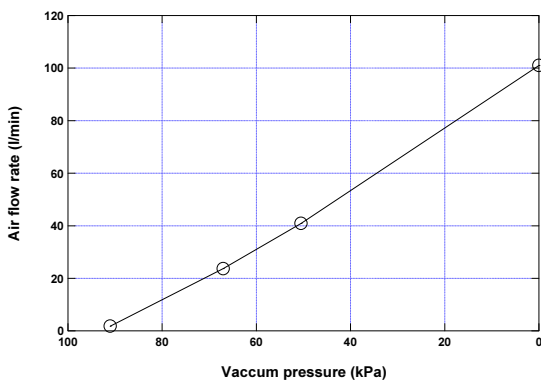
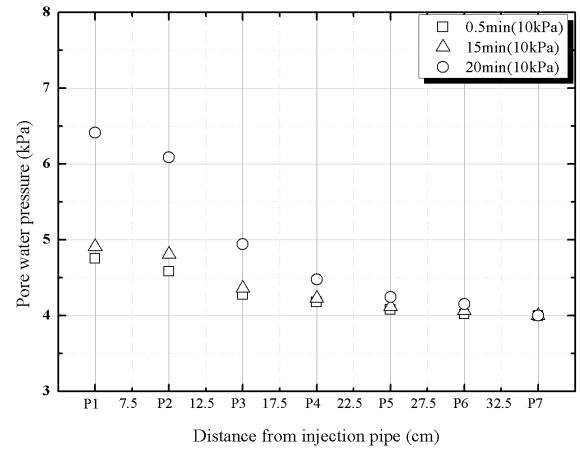


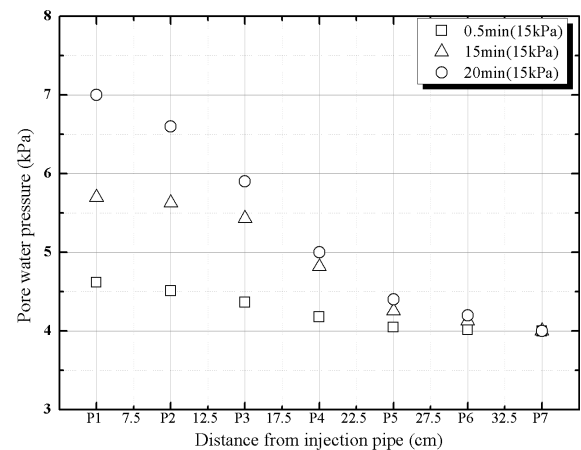
Fig. 7. Relationship between vacuum pressure and rate of air flow

위하여 필요로 하는 공기의 부피를 알아야 하기 때문에 중요한 사항이다.

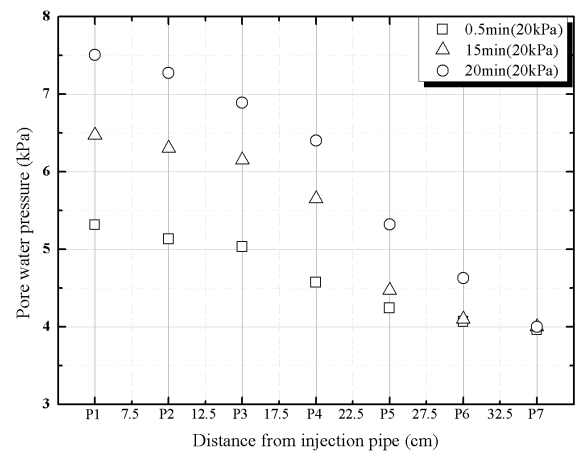
재주입압이 큰 경우 터파기면의 히빙이나 파이핑 현상이 발생할 수 있다. 재주입 압력과 재주입되는 위치로부터의



(a) Change of pore water pressure with distance between recharge well and cut-off wall (10 kPa)



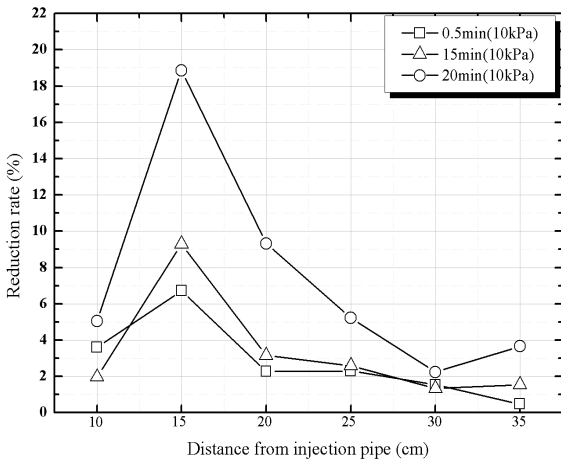
(b) Change of pore water pressure with distance between recharge well and cut-off wall (15 kPa)



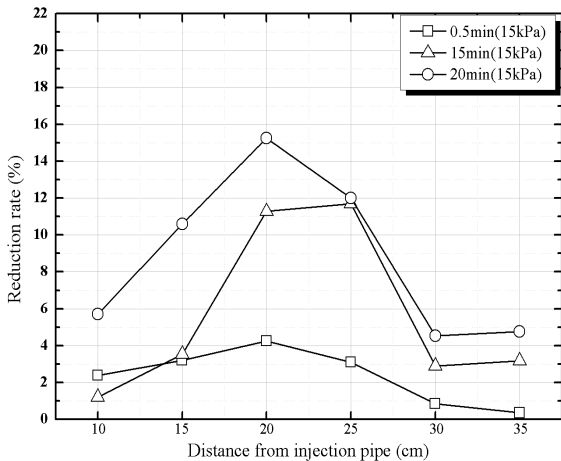
(c) Change of pore water pressure with distance between recharge well and cut-off wall (20 kPa)

Fig. 8. Range effect of GWL on the relationship between recharge well pressure and pore water pressure

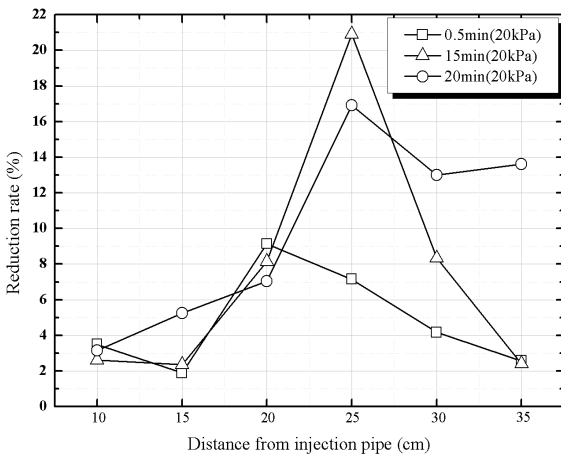
거리에 따른 지하수위 영향범위를 실내실험을 통해 확인하였다. 재주입 압력과 재주입 위치로부터 거리에 따른 지하수위 변화 영향범위는 Fig. 8과 같다.



(a) Reduction rate of P.W.P. depending on the distance between recharge well and cut-off wall (10 kPa)



(b) Reduction rate of P.W.P. depending on the distance between recharge well and cut-off wall (15 kPa)



(c) Reduction rate of P.W.P. depending on the distance between recharge well and cut-off wall (20 kPa)

Fig. 9. Reduction rate of P.W.P. on the relationship between recharge well pressure and interval of pipe

굴착면의 토조 내 간극수압에 미치는 영향을 분석하기 위해 재주입 압력과 재주입 위치로부터 간극수압 감소율을 측정하였다. 간극수압은 주입관으로부터 거리가 가까울수록 크게 나타났으며, 멀어짐에 따라 재주입압에 대한 영향력이 감소하는 경향을 나타내었다. 10kPa의 재주입압을 적용하였을 경우 간극수압의 감소율은 주입관으로부터 거리가 10cm~15cm 구간에서 6.7%~18.9%로 평균 11.6%의 감소율을 보인다. 15kPa의 주입압을 적용하였을 경우 간극수압의 감소율은 주입관으로부터 거리가 15cm~20cm 구간에서 4.3%~15.3%로 평균 10.3%의 감소율을 나타낸다. 20kPa의 재주입압을 적용하였을 경우 간극수압의 감소율은 주입관으로부터 거리가 20cm~25cm 구간에서 7.2%~16.9%로 평균 15%의 감소율을 나타낸다. 또한, 간극수압은 초기 측정시간이 지나고 대략 30분 정도 시간이 경과한 후부터는 간극수압이 평형상태를 이루는 것으로 예측할 수 있어 일정 간극수압이 유지되는 것으로 판단된다.

지하수 재주입 실험 시 재주입압에 대한 유효 영향범위는 10kPa에서 15cm~20cm, 15kPa에서 20cm~25cm, 20kPa에서 25cm~30cm로 나타났으며, 토조의 크기 및 지하수 재주입 위치를 고려하여 실험형 모델실험에서는 15kPa를 적용하여 지하수를 주입하였다. 재주입 압력과 재주입 위치로부터 거리에 따른 간극수압의 변화는 Fig. 9와 같다.

4.2 지하수 재주입에 따른 지하수위 분석결과

흙막이 벽체의 전면에 설치한 웰포인트로부터 양수한 지하수의 양은 시간의 경과에 따라 다른 양상을 보인다. 웰포인트로부터 양수되는 지하수의 양을 살펴보면 각 특징에 따라 총 4개의 구역으로 나누어진다. 이 4개의 구역은 일정한 양수량이 유지되다가 급격히 감소하는 (A)구간, 낮아진 양수량이 일정시간 지속되는 (B)구간, 낮아진 양수량으로부터 서서히 증가하는 (C)구간, 높아진 양수량으로 계속 유지되는 (D)구간으로 구별된다. 지하수 재주입정의 위치변화에 따른 양수량의 변화는 Fig. 10과 같다. (A)구간의 특징은 지하수 양수량이 일정시간 유지되고 후에 급격히 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 흙막이 벽체 전면을 굴착하는 과정에서 양수한 지하수의 양으로 추정할 수 있고, 양수량이 급격히 감소하고 일정 양수량에 도달하는 이유는 터파기 구간의 지하수가 모두 양수되고 지속적으로 유입되는 지하수가 양수되는 양을 나타내는 것이라고 추정할 수 있다.

(B)구간은 (A)구간에서 기술한 유입된 지하수가 계속 양수되는 구간으로 추정할 수 있으며, 이 구간이 지속되는 시간은 흙막이 벽체로부터 재주입정이 설치되어있는 거리에 따라 다르게 나타난다. (C)의 구간은 서서히 일정 양수량에

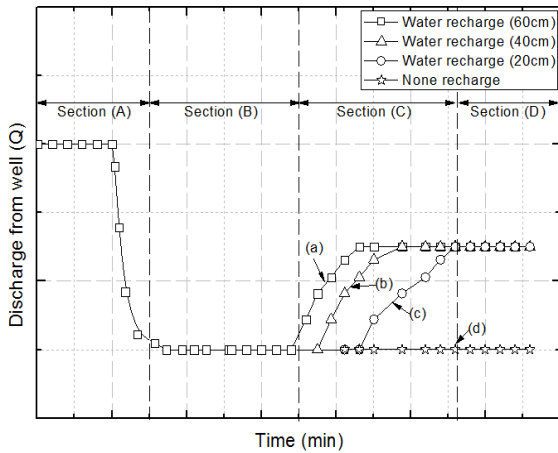


Fig. 10. Amount of discharge with elapsed time in section A, B, C, D area

도달하는 구간으로 (B)에서 언급된 지하수위의 상승과 관련이 있을 거라 사료된다. (D)의 구간은 유입되는 지하수와 재주입정을 통하여 재주입된 지하수가 함께 양수되는 구간으로 생각할 수 있다.

한편, (C)와 (D)구간에서의 (a)는 흠막이 벽체로부터 60cm 떨어진 위치에 설치되어있는 재주입정에 지하수를 재주입하였을 때의 결과를 나타내고, (b)와 (c)는 각각 40cm, 20cm에 위치한 재주입정에 지하수를 재주입하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. (d)는 지하수를 재주입하지 않았을 때의 결과를 나타낸다. 각각의 경우에 대하여 유입되는 지하수만이 양수되는 구간의 길이가 다른 이유는 재주입정에 지하수를 재주입함에 따라 지하수위의 상승이 일어나기 때문인데, 이는 재주입정의 위치에 따라 지하수위 상승 정도가 다르기 때문에 시간적인 차이가 있을 것이라 분석된다. 또한 (d)는 지하수의 재주입이 없으므로 지속적으로 유입되는 지하수만 양수되는 것으로 추정할 수 있다.

지하수 재주입정 위치변화에 따른 측정위치별 지하수위 변화는 Table 3에 나타내었다. 지하수가 주입되고 변화가 없는 상태에서의 최종 지하수위를 나타낸 것이며, Table 4는 지하수 재주입 후 지하수위 증가량을 나타낸 것이다. 재주입정 위치변화에 따른 재주입 전과 후의 유선 변화를 확인하였고 Fig. 11과 같이 도시하였다.

지하수를 재주입하기 전의 기존 지하수위는 55cm로서 흠막이 벽체 배면으로부터 벽체에 가까울수록 낮고, 지하수위는 log 형태의 곡선으로 감소하는 경향을 보이며, 지하수 재주입정의 위치에 따라 인접 지반의 지하수위가 증가하는 것을 알 수 있다.

(a)는 흠막이 벽체 배면으로부터 20cm 거리에서 지하수 재주입을 하는 경우인 Case No. 2이며, 지하수를 주입하는 위치에서는 3.9cm의 지하수위 상승을 보였고, 지하수의 흐

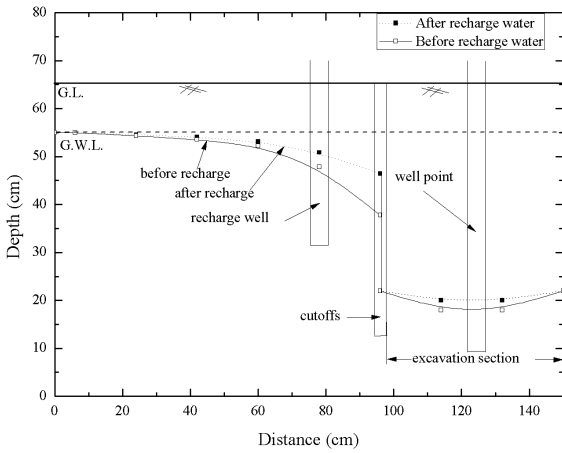
Table 3. Change of ground water level after recharging water depending on the distance between recharge well and cut-off wall

Case	Distance from cut-off wall (cm)					
	0	20	40	60	80	
Change of G.W.L after recharging water	Case No. 1	37.8	46.9	51.8	53.3	54.4
	Case No. 2	46.7	50.8	53.2	54.0	54.7
	Case No. 3	43.1	51.1	53.9	54.5	54.8
	Case No. 4	39.7	48.7	52.8	54.4	54.5

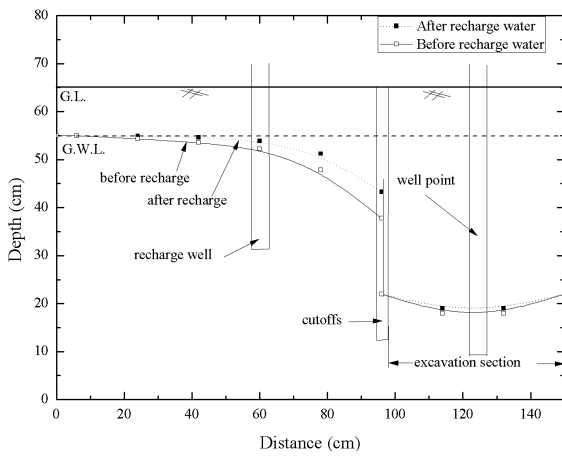
Table 4. Increase of G.W.L depending on the distance between recharge well and cut-off wall

Case	Distance from cut-off wall (cm)					
	0	20	40	60	80	
Change of G.W.L after recharging water	Case No. 1	0	0	0	0	0
	Case No. 2	8.9	3.9	1.4	0.7	0.3
	Case No. 3	5.3	4.2	2.1	1.2	0.4
	Case No. 4	1.9	1.8	1	1.1	0.1

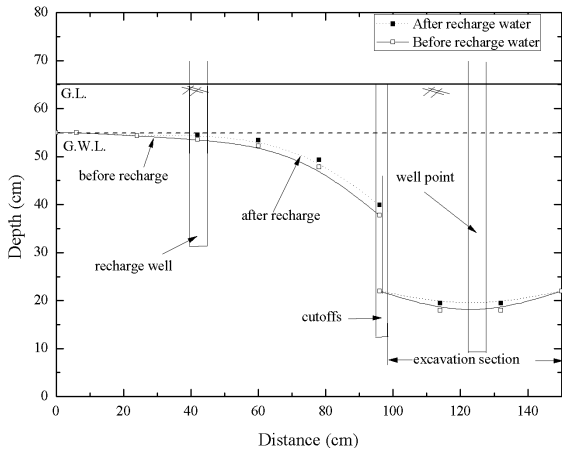
름방향으로 20cm에 위치해 있는 벽체의 배면부분에서는 약 8.9cm의 지하수위가 상승하여 그 감소율은 15.1%인 것으로 나타나, 재주입하지 않았을 경우보다 약 16.2% 감소율이 작아진 것을 알 수 있다. 반면, 지하수의 흐름 반대방향으로 20cm의 위치에서는 지하수위의 상승이 1.4cm로서 지하수위가 상승은 하였지만, 재주입관으로부터의 거리가 같은 흠막이 벽체 배면부분의 지하수위 상승량인 8.9cm보다는 현저하게 작은 것을 알 수 있다. 또한, 지하수 흐름 반대방향인 40cm, 60cm의 지하수위 상승량은 지하수를 재주입하였을 때보다는 증가하였지만 그 효과는 미미한 것으로 나타났다으며, 이는 재주입에 의한 영향거리보다 먼 곳에 위치하기 때문이라 판단된다. (b)는 흠막이 벽체 배면으로부터 40cm 거리에서 지하수 재주입을 하는 경우인 Case No. 3으로, 지하수를 재주입하는 위치에서는 2.1cm의 지하수위 상승을 보였고, 지하수의 흐름방향으로 흠막이 벽체 배면으로부터 20cm, 40cm에 위치에서는 각각 4.2cm, 5.3cm만큼 지하수위가 상승한 것으로 나타났다. Case No. 2의 경우와 마찬가지로 지하수의 흐름 반대방향으로 20cm, 40cm 거리의 지하수위 상승량은 각각 1.2cm, 0.4cm로 상승 변화폭이 흐름방향에 비하여 현저하게 낮은 것으로 나타났다. (c)는 흠막이 벽체 배면으로부터 60cm 거리에서 지하수 재주입을 하는 경우인 Case No. 4이며, 지하수를 재주입하는 위치에서는 1.1cm의 지하수위 상승을 보였고, 지하수의 흐름방향으로 흠막이 벽체 배면으로부터 20cm, 40cm, 60cm에 위치에서는 각각 1cm, 1.8cm, 1.9cm의 지하수위가 상승한 것으로 나타났다. 지하수의 흐름 반대방향으로 20cm의 위치에서의 지하수위 상승량은 0.1cm로 거의 변화가 없는 것으로



(a) Change of ground water level at the distance of 20 cm from cut-off wall



(b) Change of ground water level at the distance of 40 cm from cut-off wall



(c) Change of ground water level at the distance of 60 cm from cut-off wall

Fig. 11. Comparing the ground water level before and after injecting water at the distance between recharge well and cut-off wall

나타났고 Case No. 4의 경우는 다른 두 가지의 경우보다 지하수의 흐름방향에 위치하는 곳의 지하수위 상승효과는 미미한 것으로 나타났다. 지하수를 웰포인트로부터 양수하여

재주입정으로 재주입하는 경우, 흠막이 벽체에 가까울수록 지하수위 상승효과의 변화폭이 큰 것으로 나타났으며, 지하수의 흐름 반대방향 보다는 지하수의 흐름방향으로 지하수위 상승효과가 큰 것으로 분석되었다.

흠막이 벽체 배면으로부터 0cm(cutoffs), 20cm, 40cm, 60cm, 80cm 거리에 위치한 지점에서의 지하수위 증가량을 측정하였다. 지하수의 재주입이 없는 Case No. 1의 경우, 흠막이 벽체로부터 지하수가 유입되는 지점인 80cm~100cm부터 지하수위가 서서히 하강하기 시작하여 흠막이 벽체 배면에서 약 31.3%의 지하수위 저하가 발생하였다.

5. 결론

건설공사 시 지하수위 저하로 인해 발생하는 지반함몰과 지반침하를 방지하기 위한 방법으로 대상지반에서 발생하는 지하수를 대상 지반에 재주입하여 안정화 시키기 위한 연구를 수행하였다. 지하수 재주입에 따른 효과를 분석하기 위해 대상 지반의 공학적 특성, 실험대형 모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지하수위 저하와 흠막이 벽체 배면으로부터의 거리는 지표 침하량이 발생하는 데에 주요한 인자이며, 지하수위 저하가 클수록 흠막이 벽체 배면으로부터의 거리가 가까울수록 지표의 침하가 크다. 흠막이 전면의 굴착에 따라 지하수위 저하는 흠막이 벽체 배면에서 최대가 되며, 초기 지하수위보다 최대 31.3%의 감소를 보였다. 흠막이 벽체로부터의 거리 및 벽체의 길이와의 비를 고려한 일정 범위내에서 지하수 재주입에 의한 지하수관리가 필요하고, 흠막이 벽체 배면으로부터 재주입정까지의 거리가 가까울수록 양수량과 재주입량이 많아진다는 측면도 함께 고려할 필요가 있다.
- (2) 토립자가 비교적 큰 조립토인 사질토 지반에 지하수 재주입 할 때, 지하수위 저하를 감소시키는 요인은 흠막이 벽체로부터 재주입정까지의 거리와 재주입압이다. 재주입압이 클수록 재주입정으로부터 넓은 반경의 지하수위의 유지효과가 크고 지하수위의 저하가 가장 크게 일어나는 흠막이 배면의 지하수위 저하 감소량은 흠막이 배면으로부터 거리가 가까울수록 크다. 다만, 지하수를 재주입 하는 데 있어 압력이 지나치게 크면, 주변 지반의 교란으로 인해 지반의 불안정화를 야기할 수 있고, 대상 지반 주변에 진행 중인 터파기·굴착공사 현장에서 히빙이나 보일링 등이 발생하는 경우가 있을 수 있으므로 이에 대한 검토 역시 필요하다.

(3) 지하수위 변동에 따른 지반의 영향이 증가하고 이와 같은 지하수 거동에 의한 지반침하의 예측이 필요하며, 흙막이 벽체 시공 시 굴착 이전 지하수 거동 및 시공 중, 시공 이후 평가 기술에 관한 연구가 필요하다. 이를 통하여 지반함몰의 예측 및 평가, 굴착 및 방지 공법의 개발로 안전한 생활환경을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

References

1. 김윤승 (2015), 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선 방안 연구, 한국환경정책·평가연구원.
2. 김창룡 (2012), 대심도 지하도로 설계기준 제정 연구, 한국건설기술연구원.
3. 이송 (1999), “국내 적용되고있는 흙막이 구조물의 관리기준치에 대한 신뢰도 분석”, 대한토목학회논문집 제19권, pp. 479~487.
4. Gabr, M. A., Williamson, A., Sabodish, M. and Bowders, J. J. (1999), BTEX extraction from clay soil using prefabricated vertical drains, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(3), pp. 615~618.
5. Maliva, R. G., Coulibaly, K., Guo, W. and Missimer, T. (2011), Confined aquifer loading implications for ground water management, *Ground water*, 49(3) pp. 302~304.
6. Shen, Shui-Long. and XU Ye-Shuang. (2011), Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48.9, pp. 1378~1392.
7. Zhang, X. S., Wang, J. X., Wong, H., Leo, C. J., Liu, Q., Tang, Y. Q., Yan, X. L., Sun, W. H., Huang, Z. Q. and Hao, X. H. (2013), Land subsidence caused by internal soil erosion owing to pumping confined aquifer groundwater during the deep foundation construction in Shanghai, *Natural hazards*, Vol. 69.1, pp. 473~489.