전기삼투펄스 기법을 이용한 점토의 배수에 관한 연구

A study on dewatering of clay using electro-osmotic pulse technology

○ 김지태*, 조원철**

1. 서 론

점토를 비롯한 세립토는 낮은 투수계수의 영향으로 배수가 용이하지 않다. 최근 들어 이러한 세립토에서 지하수를 강제적으로 이동시키기 위하여 전기삼투를 이용하는 연구가 주목을 받고 있다. 일반적으로 전기삼투의 실험 및 현장 적용에는 주로 직류의 일정한 전압을 연속적으로 사용하고 있는데 시간이 경과함에 따라 전기 효율이 감소하여 결과적으로 배수 효과가 감소되는 단점이 나타나고 있다. 이는 주로 시료 내 함수비 분포의 불균형에 의한 것으로 밝혀지고 있다. 함수비 분포의 불균형은 양극 부근에서 간극수가 배수되어 음극으로 이동함에 따라 양극 부근의 함수비는 감소하고 음극 부근의 함수비가 증가하여 양극 부분에서 저항이 증가하면서 효율이 감소됨에 따라 발생하는 것으로서 이러한 단점을 보완하기 위하여 여러 가지 기법이 제시되고 있다. Gray와 Somogyi (1977)는 극성을 전환하면 배수량이 증가하고 압밀효과가 증대한다는 결과를 제시하였으며, Lockhart와 Hart (1988), Rabie 등 (1994)은 주기적으로 전원을 차단하는 연구를 수행하였다. Gopalakrishnan 등 (1996)은 점토의 전기삼투 배수 실험에서 30초마다 0.1초씩 전원을 차단함으로써 일정한 전압을 주는 경우보다 배수량이 증가함을 보였다. Yoshida 등 (1999)은 교류전기를 적용하여 0.001 Hz의 주파수에서 배수효과가 가장 좋다고 제안하였다. 본 연구에서는 배수 효과를 개선하기 위한 방법으로 펄스 기법을 제시하였다. 펄스 기법은 주기적으로 전극의 극성을 전환하는 것으로서 토양 내 함수비의 분포를 균일하게 함으로써 저항의 감소를 억제하여 배수 효과를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

전기삼투를 이용한 연직 배수 실험을 실시하기 위하여 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 아크릴로 제작하였으며 시료가 들어가는 셀은 내경 9 cm, 높이 15 cm로 하였다. 장치의 하부에는 배출구를 설치하였고 셀 내부의 하부에는 다공판을 놓아 전극을 지지하도록 하였으며 다공판 위에는 전극을 설치하였다. 전극은 보통 탄소, 구리, 철 등이 사용되는데 본 연구에서는 부식에 대한 영향을 최소화하기 위하여 탄소를 사용하였다. 탄소 전극은 두께 0.3 cm, 직경 9 cm의 원형판으로 하였으며 일정한 간격으로 천공하여 물의 흐름이 원활하도록 하였다. 탄소 전극의 위에는 시료의 입자가 흘러 나오지 않도록 하기 위하여 여과지를 놓았다.

---

* 연세대학교 토목공학과 박사과정(jtkim@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 사회환경시스템 공학부 교수(woncheol@yonsei.ac.kr)

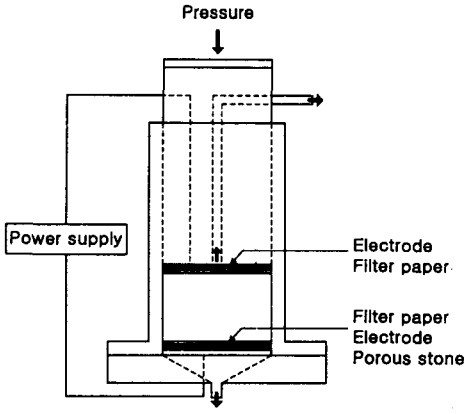

그림 1 실험장치

셀의 상부에는 여과지와 탄소전극을 설치하고 시료와 접촉이 잘 이루어지도록 하였으며 일정한 압력을 가할 수 있도록 하였다. 또한 상부로도 배출수가 배수될 수 있도록 배출구를 설치하였다. 전원 공급은 교류 전기를 입력으로 하여 직류전기를 출력하며 펄스를 제어할 수 있는 장치를 제작하였다. 제작한 전원 공급 장치는 전압 240 V, 전류 2 A까지의 범위에서 연속 전압 및 펄스, 즉 양극과 음극의 극성 전환 및 전원 차단을 포함한 다양한 주기로 전원을 공급할 수 있으며, 펄스 주기는 프로그램에 의해 0.001초의 단위로 입력할 수 있다.

2.2 실험방법

배수실험을 위한 시료는 카올리나이트를 사용하였다. 카올리나이트 분말과 증류수를 배합하여 초기 함수비를 70%로 하였으며 각 실험마다 동일한 초기조건을 맞추기 위하여 일정한 양의 시료를 실험에 사용하였다. 전기는 일반적인 직류와 펄스로 구분하여 적용하였다. 직류전기는 양극에서 음극으로 전류의 흐름이 발생하는 것으로서 한 방향으로만 전류가 흐르게 된다. 이에 따라 간극수가 양극에서 음극으로 이동하게 됨으로써 시간이 경과함에 따라 상대적으로 양극쪽의 함수비가 낮아지게 된다. 함수비의 저하는 저항을 증가시키게 되어 전류가 감소되는 결과를 초래하며 이로 인해 배수의 효율이 저하된다. 이와 같은 현상을 개선하기 위하여 펄스를 적용하였다. 펄스는 일정 시간 간격으로 양극과 음극의 극성을 전환시켜 주는 것으로서 주기적으로 전류의 흐름 방향이 바뀌게 되고 이에 따라 간극수의 흐름 방향도 주기적으로 전환된다. 본 실험에서는 셀의 상부에 양극을, 하부에 음극을 주었으므로 일반적인 직류전압의 경우 상부에서 하부로 간극수가 연속적으로 이동하게 되며 펄스를 주는 경우 초기에는 상부에 양극, 하부에 음극이 되었다가 극성을 전환하여 상부에 음극, 하부에 양극이 적용되기 때문에 간극수가 주기적으로 상하로 이동하게 된다. 극성 전환의 시간은 일정하게, 즉 순방향과 역방향의 적용시간을 동일하게 하였다. (그림 2)

전압은 일정하게 유지하였으며 전류계를 설치하여 일정 시간 간격으로 전류를 측정하였다. 또한 상부와 하부의 배출구를 통해 배수되는 배출량을 측정하였으며 시료의 높이 변화를 관측하였다. 배출수는 메스실린더를 이용하여 그 양을 측정하였으며 정밀저울을 이용하여 정확한 측정값을 구하였다. 상부에 주는 압력은 압력계를 통해 측정하여 일정하게 유지하였으며 각 경우에 대하여 4시간 동안 실험을 실시하였다. 실험 종료 후에는 시료를 상·중·하의 세부분으로 구분하여 함수비를 측정하였다. 함수비는 건조를 통한 중량으로 계산하였다.

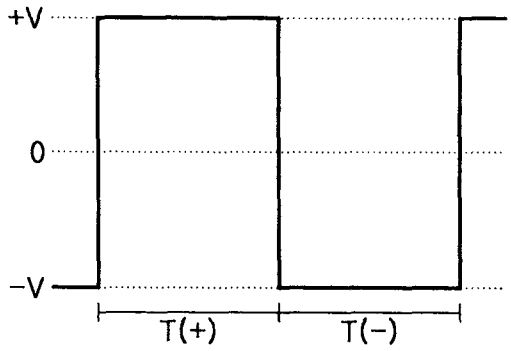

그림 2 펄스 주기

3. 결과 및 분석

3.1 배출량

압력 및 압력과 전기장이 결합된 .배수 실험에서 시간에 따른 배출량을 그림 2에 나타내었다. 0.2 kg/cm^{2}의 압력을 가한 상태에서 25 V(5 V/cm)의 전압을 적용한 결과 상부(양극)에서 하부(음극)로 일정한 방향을 갖는 직류전압의 경우 총 56.5 cm^{3}이 배출되었다. 그림에서는 이를 D.C.로 표시하였다. 펄스는 순방향(그림 2의 T(+)) 30분, 역방향(그림 2의 T(-)) 30분(30-30), 순방향 50분, 역방향 50분(50-50)의 결과를 도시하였다. 30-30의 경우 총 배출량은 58.1 cm^3, 50-50의 경우 61.1 cm^{3}를 나타내었으며 이는 D.C.에 의한 총배출량에 비해 각각 3%와 8%가 증가된 값이다. 그림 3에 나타난 바와 같이 D.C.는 배출량 곡선이 연속적으로 증가하다가 감소하는 반면 펄스에 의한 결과는 순방향의 적용기간에는 배출량이 증가하다가 역방향이 되면, 즉 셀의 하부에서 상부로 물이 이동하는 동안에는 배출량 증가가 둔화되는 양상을 보인다. 그러나, 이 기간 동안 상부로 물이 이동되면서 상부 전극 부근의 함수비가 증가하게 되어 다시 순방향으로 전환되면 저항의 감소로 전류가 증가되며 많은 양의 물이 배출된다. 이를 반복하면서 2시간이 지난 후부터는 D.C.의 배출량보다 많아지게 된다. 즉, 초반에는 펄스에 의한 배출량이 D.C.에 의한 배출량보다 적다가 후반부에는 역전되는 현상을 나타낸다.

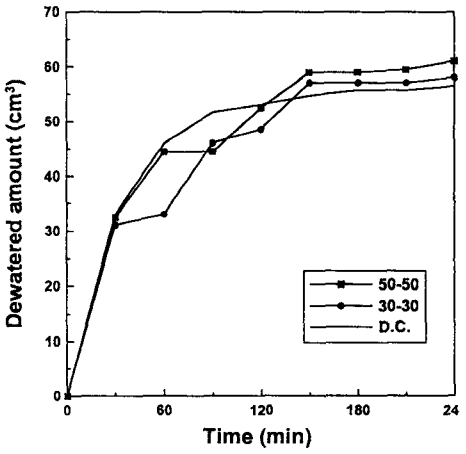

그림 3 배출량 변화

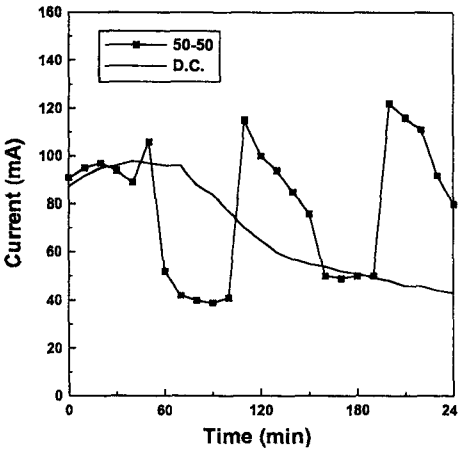

그림 4 전류 변화

3.2 전류 변화

D.C.와 펄스 중 50-50의 주기에 대한 전류 변화를 그림 4에 도시하였다. D.C.의 경우 초기에 전류가 약간 증가하다가 점차 감소하여 실험 종료시에는 초기 전류의 약 50% 정도까지 감소하는 특성을 나타낸다. 이는 3.1절에서 언급한 바와 같이 상부 전극 부근의 저항증가로 인하여 전체적으로 저항이 증가함에 따른 결과인 것으로 판단된다. 펄스의 경우는 극성이 전환되는 경우 전류의 흐름 방향이 반대로 되어 음의 값으로 표시되는데 그림 3에는 그 크기만을 비교하기 위하여 절대값을 도시하였다. 극성이 전환되어 전류의 흐름이 반대가 되면 급격한 전류 저하 현상을 나타내는데 이는 순방향으로 전류가 흐르는 동안 상당량의 물이 배출되어 반대 방향으로 전압이 걸리면 저항이 커지는 데 기인하는 것으로 판단된다. 역방향의 전류 적용 기간 중에는 물이 상부로 흐르게 되므로 상부 전극 부근으로 물이 이동하게 되어 다시 순방향으로 전환되면 전류가 급격히 증가되는 양상을 보인다. 이에 따라 전류 변화 곡선의 기울기가 주기적으로 변동하는 현상을 보이며 이는 배출량의 변화 곡선의 변동 현상과 일치하는 것으로서 전류의 변화가 배출량과 관계가 있음을 알 수 있다.

3.3 함수비 분포

실험 종료 후 시료의 함수비를 구간별로 측정하였다. 셀에서 시료를 분리한 후 세 부분으로 절단한 후 상부와 중간, 하부의 함수비를 측정하였다. 그 결과 D.C.는 상부로부터 각각 39.9%, 42.1%, 45.2%로 측정되었으며 평균은 42.4%, 상부와 하부의 함수비 차이는 5.3%로 나타났다. 이에 비해 펄스(50-50)는 38.8%, 40.4%, 41.5%로 평균은 40.2%, 상부와 하부의 차이는 2.7%로 D.C.에 의한 평균 함수비보다 낮게 나타났으며 시료 전 깊이에 걸쳐 함수비의 편차가 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 점토의 배수를 위하여 전기삼투 현상을 적용한 실험을 실시하였으며 배수 효과를 개선하기 위하여 펄스 기법을 도입하였다. 펄스 기법을 적용하여 주기적으로 극성을 전환한 결과 주기적인 극성 전환으로 인해 직류 전압을 적용하는 것보다 시료 내의 함수비 분포를 비교적 일정하게 유지할 수 있었으며 이에 따라 직류 전압에 비해 전류를 높게 유지할 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 배출량도 증가되었다. 따라서, 주기적 극성변환에 의한 펄스기법은 직류전기 적용에 의한 저항증가의 단점을 개선하여 배수효과를 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

Gray, D. H. and Somogyi, F. (1977). "Electro-osmotic dewatering with polarity reversals." Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 103, No. GT1, pp. 51-54.

Gopalakrishnan, S., Mujumdar, A. S., and Weber, M. E. (1996). "Optimal off-time in interrupted electroosmotic dewatering." Separations technology 6, pp. 197-200.

Lockhart, N. C. and Hart, G. H. (1988). "Electro-osmotic dewatering of fine suspensions: The efficiency of current interruptions." Drying Technology, Vol. 6, No. 3, pp. 415-423.

Rabie, H. R., Mujumdar, A. S., and Weber M. E. (1994). "Interrupted electroosmotic dewatering of clay suspensions." Separation Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 38-46.

Yoshida, H., Kitajyo, K., and Nakayama, M. (1999). "Electroosmotic dewatering under A.C. electric field with periodic reversals of electrode polarity." Drying technology, Vol. 17, No. 3, pp. 539-554.