

연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 안정관리 방법에 관한 연구

A Study on the Stability Control Method of Soft and Polluted Silt Soils

안 종 필¹ Ahn, Jong-Pil

박 상 범² Park, Sang-Bum

Abstract

This study investigated the existing theoretical backgrounds in order to examine the stability control method of lateral flow caused by the plasticity of soils when unsymmetrical surcharge works on polluted soils and then compared and analyzed the results measured through model tests. Ultimate bearing power of ML and ML_{p1} and ML_{p2} obtained at surcharge(q)-settlement(S_v) curve showed similar trends to ultimate bearing power obtained from control chart of deflection (S_v - Y_m) by Tominaga·Hashimoto, that of S_v -(Y_m/S_v) by Matsuo·Kawamura and that of (q/Y_m)- q by Shibata·Sekiguchi and so it is considered that it has no problem in actual applicability. $\{S_v-(Y_m/S_v)\}$ of control chart of ML_{p1} by Matsuo·Kawamura showed smaller value than ultimate bearing capacity value from surcharge-settlement curve (q - S_v). Expression of ML of fracture baseline at stability control charge by Matsuo·Kawamura is $S_v=3.21\exp\{-0.48(Y_m/S_v)\}$ and expression of ML_{p1} is $S_v=3.26\exp\{-0.96(Y_m/S_v)\}$ and expression of ML_{p2} is $S_v=6.33\exp\{-0.45(Y_m/S_v)\}$.

요 지

오염지반에 편재하중이 작용하는 경우에 있어서 지반의 소성화로 인한 측방유동에 대한 안정관리방법을 규명하기 위하여 기존의 이론적인 배경을 고찰하고, 모형실험을 통하여 실측한 결과를 상호 비교·분석하였다. ML과 ML_{p1} , ML_{p2} 모두 하중(q)-침하량(S_v) 곡선에서 얻어진 극한지지력은 富永·橋本の 변위량(S_v - Y_m)에 대한 관리도, 松尾·川村의 $\{S_v-(Y_m/S_v)\}$ 의 관리도, 紫田·關口の $\{(q/Y_m)-q\}$ 의 관리도에서 얻어진 극한지지력과 상당히 유사하게 나타나고 있어 실제 적용시 무리가 없을 것으로 사료된다. ML_{p1} 의 松尾·川村의 $\{S_v-(Y_m/S_v)\}$ 관리도에서 얻어진 극한하중은 하중-침하량 곡선(q - S_v)에서 얻어진 극한하중 값보다 작은 값을 보이고 있다. 松尾·川村의 안정관리도의 파괴기준선에 대한 ML의 산정식 $S_v=3.21\exp\{-0.48(Y_m/S_v)\}$ 이며, ML_{p1} 의 산정식 $S_v=3.26\exp\{-0.96(Y_m/S_v)\}$, ML_{p2} 의 산정식 $S_v=6.33\exp\{-0.45(Y_m/S_v)\}$ 으로 결정할 수 있다.

Keywords : Excretion, Model test, Stability control, Ultimate capacity

1. 서 론

연약지반은 구조물의 기초지반으로서 지지력이 작고 압축성이 크기 때문에 지반의 강도를 증대시키지 않으면 활동파괴가 일어날 우려가 높은 지반으로 알려져 있다.

특히 가정용 생활오폐수나 산업폐수 및 축산폐수, 분뇨, 쓰레기 매립장에서 나오는 오염물과 수많은 자동차에서 나오는 폐유를 완벽하게 처리하지 못해 발생하는 환경오염 및 생태계 파괴가 커다란 문제로 제기된다. 이러한 오염물질이 지반속으로 유입되면서 오염물질의 성분에

1 정회원, 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수(Mamber, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ.)

2 정회원, 조선대학교 공과대학 토목공학과 선임연구원(Mamber, Senior Researcher, Dept. of Civil Engrg., Chosun Univ., parksb0502@daum.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의해 흙의 전기적 성질이 변함과 동시에 흙의 역학적 성질인 일축압축강도(q_u), 비배수전단강도(c_u), 지반계수(E_s), 지반반력계수(K_H) 등의 변화에 직접적인 영향을 미친다는 점이다. 성토나 매립을 실시하거나 교대나 안벽 등과 같은 구조물을 설치하게 되면 재하중에 의해 응력이 증가하고, 오염물질에 의하여 지반내의 과잉간극수압이 증가하게 되며 토립자의 소성화로 인한 지반의 수평적인 측방유동압의 작용에 의한 토립자의 측방변위의 발생과 자유표면의 융기현상이 발생되어 결국에는 국부적인 활동전단파괴를 유발하여 지반과 구조물의 안전성에 있어서 큰 문제를 일으키게 된다.

지금까지 Tschebotarioff(1973), Tavenas(1979, 1980) 등은 다수의 현장실험의 결과를 이용하여 연약지반에서의 측방유동의 발생기원과 침하량과 측방유동량의 관계 및 실측치와 계산치를 비교·분석하여 측방변위량의 분포상태 및 크기를 산정할 수 있는 제안식을 발표하여 측방유동의 이론적인 체계를 정립하였다. 박준범(1996)은 계면활성제를 이용한 지반오염 처리기술을 소개한 바 있고, 모형실험을 통하여 연약지반과 오염지반의 지지력 결정 및 측방변형 거동과 안정관리방법에 대해 분석한 바 있다(朴 2004). 지금까지 많은 연구가 거듭되어 왔음에도 불구하고, 연약지반과 오염지반의 측방유동에 대한 인식의 부족과 적용상의 문제점으로 인해 연약지반상의 설계와 시공단계에서의 측방유동의 이론적 정립이 불확실한 상태이다.

본 연구에서는 모형실험용 재하장치를 제작하고, 모형실험에 필요한 시료는 연약한 실트지반(ML)에 대하여 함수량을 일정하게 증가시키면서 조성하였다. 오염된 실트지반은 첫 번째 연약한 실트지반에 오염물질인 축산폐수와 분뇨를 함유한 오염된 실트지반(ML_{p1})과 두 번째 복합오염물질인 생활오폐수와 공장폐수 및 축산폐수와 분뇨를 혼합하여 함유한 오염된 실트지반(ML_{p2})를 조성하였다. 모형재하실험 결과를 분석하여 기존의 지지력 값의 변화와 안정관리방법에 대한 실제의 적용성을 검토하고, 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 구조설계시에 구조물이 받게 되는 피해를 예측하여 지반의 소성변형에 대한 안정설계를 도모하고자 한다.

2. 오염지반의 안정관리방법

2.1 오염지반의 거동과 특성

2.1.1 오염지반의 거동

오염된 지반위에 성토를 실시하거나 교대나 잔교 등

의 구조물을 설치하고, 굴착을 하므로써 편재하중이 작용하게 되면, 지중의 응력 증가에 따라 간극수압이 증가하는 등에 의하여 토립자가 측방으로 소성변형을 일으켜 측방유동을 유발하게 되고, 이러한 거동에 의하여 발생한 측방유동은 구조물이나 지반에 과다한 변형을 일으키거나 파괴를 유발하는 경우가 많다(安 1993; 日本土質工學會 1994). 즉 Fig. 1과 같이 연약지반위에 편재하중이 작용하면 하부지반은 재하에 의한 응력이 증가하고 간극수압의 변화에 따라 체적이 수축되면서 탄성평형에 의한 침하가 발생한다. 이와 같은 연약지반에 오염물질이 혼입되게 되면 지반중의 토립자의 소성화의 거동은 크게 증가되어 측방유동을 더욱 촉진시키고 그로 인해 구조물의 안정이 위태롭게 된다.

이와 같은 연약지반의 측방유동에 대하여 지반과 구조물을 보존하기 위하여 오염된 지반속에 연직말뚝을 설치하게 되는데, 오염된 연약지반속에 말뚝이 존재하면 주변지반과 말뚝의 상호작용에 의해 토립자의 수평방향의 측방유동에 의한 압력을 받게 되어 말뚝이 변형하거나 심지어는 파괴에 이르게 된다(洪 1983; 中國支部 1991).

2.1.2 오염물질의 특성

지반오염을 유발시키는 유기화합물의 소수성 액체의 총칭인 NAPL(No Aqueous Phase Liquid)은 휘발, 용해, 흡착, 생분해라는 4가지의 지중변환과정을 거치게 되며, 유해성분이 많이 함유된 공장폐수 및 폐유 등은 지중 침출수의 주성분이 된다. 지반을 오염시키는 밀도가 작은 LNAPL(Light Nonaqueous Phase Liquid)은 주로 석유추출물이며, 그 추출물은 용해도가 다양한 여러 화합물질로 구성된 복합물질의 유기화합물이다.

Fig. 2는 오염지반에서 오염물질 즉 침출수가 지하수의 흐름을 따라 이동하여 오염범위를 확산시키는 현상을 나타내며, 지하수의 유속이 빠르고 간극률이 큰 경우 LNAPL의 용해도 빠르게 진행된다. 토립자에 흡착된 LNAPL은 토립

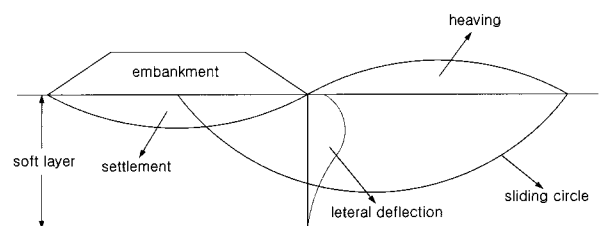


Fig. 1. Pattern of the lateral flow and failure in soft soils by embankment

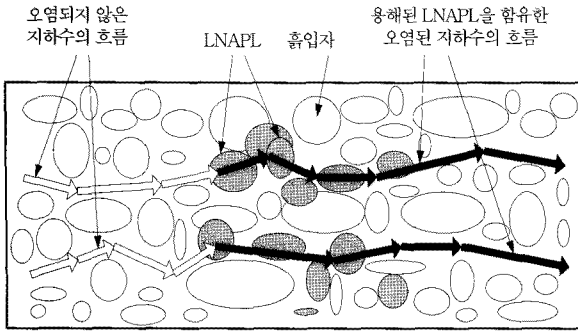


Fig. 2. Groundwater pollution of LNAPL with solution

자로부터 쉽게 떨어지지 않으므로 장기적인 지반오염을 초래하게 되고, 양수처리공법(Pump-and-Treat)으로 지반정화를 시도 할 때 초기에는 오염농도가 많이 떨어지나, 시간이 지날수록 어떤 한계밀도로 떨어지지 않는 잔존현상(Tailing Effect)으로 지반오염이 장기화된다.

이러한 오염물질이 연약지반내로 유입되어 지반의 간극압을 증가시키고 지반중의 점착력이나 마찰력 등의 전단저항을 감소시켜 토립자의 소성유동을 크게 증가시켜 과도한 침하량과 측방변위량 및 지표면 융기량을 확대하는 요인으로 연약지반의 전단저항에 의한 응력의 구속이 감소하므로서 변위량이 발생하게 되는 것이다.

2.2 한계하중과 극한지지력의 산정

연약지반에 성토 등의 하중이 작용하게 되면 초기단계에서는 탄성적인 거동에 의한 침하가 발생하지만, 하중의 증가에 따라 재하면 하부의 지반은 이등변삼각형 분포의 흠뻐기가 압축되면서 점차 소성의 상태로 이전되어 가게 된다. 지반이 탄성상태에서 소성상태로 바뀌는 시점의 하중값을 Fröhlich(赤井 1964) 등은 항복응력이라고 규정하였고, Tschebotarioff(1973) 등은 지반중에 전단변형이 시작되는 시점의 하중을 한계하중으로 규정하였으며, Das(1984) 등에 의하면 한계하중이란 하중과 변위량의 증가가 거의 직선적인 경향을 보이다가 하중량의 증가에 비해서 변위량의 증가가 큰 폭으로 커지면서 하중과 변위량의 관계가 직선에서 곡선으로 이행되는 시점으로 정의한 바 있다.

극한지지력은 한계하중을 초과하여 더욱 하중을 증가시키면 하부지반에는 토립자의 전단저항에 의해 탄성영역인 주동쌍기가 하향으로 침하함에 따라 과잉간극수압의 증가를 유발하여 토립자의 측방변위를 발생시키므로써 소성영역은 전단 및 수동영역까지 확장되

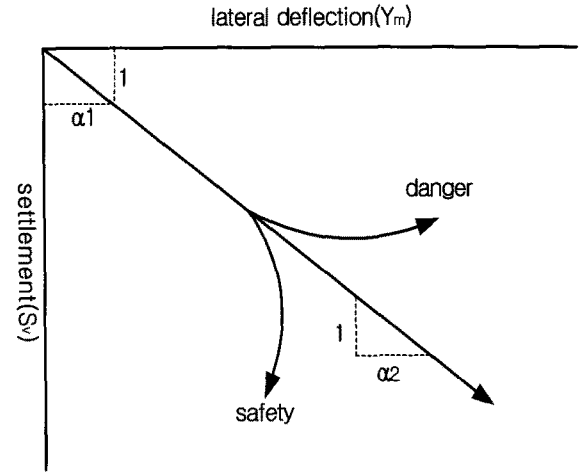


Fig. 3. Control diagram by S_v - Y_m

고 원호활동파괴면이 지표면까지 도달하려는 경향을 나타내는 소성평형 파괴형태에 이르게 된다. 이와 같이 지반의 소성평형에 의한 전단파괴가 이루어 질 때의 하중을 극한지지력이라고 하고, 구조물의 종류에 따라 적당한 안전율로 극한지지력을 나눈 값이 허용지지력이다.

2.3 측방유동의 안정관리방법

성토의 전단면이나 사면에 미세한 균열이 발생하여 성토의 중앙부에 침하가 급격히 증가하면 사면전단 부근지반의 수평변위가 성토의 외측방향으로 급증하고 지반의 연직변위(융기량)는 윗쪽으로 급증하고 성토작업을 중지하여도 지반내의 간극수압의 상승이 지속된다(安, 洪 1994; 安, 金, 朴 1998). 성토나 지반의 전단파괴 혹은 불안정한 상태의 정성적인 안정관리방법에는 침하량에 의한 관리방법, 지표면변위량에 의한 관리방법, 지중변위량에 의한 관리방법 등이 있다.

현장계측결과에 의한 성토중앙부의 침하량(S_v)과 성토사면 전단부의 측방변위량(Y_m) 및 성토하중(q)을 이용하여 성토나 지반의 소성파괴를 정량적으로 예측하는 관리방법에는 富永·橋本(1974)의 방법(S_v - Y_m 관리도법), 紫田·關口(1980, 1982)의 방법 (q/Y_m - q 관리도법), 松尾·川村(1975)의 방법 (S_v - Y_m/S_v 관리도법), Hong(1980) 등의 방법이 있다.

2.3.1 富永·橋本の 방법(S_v - Y_m 관리도법)

Fig. 3과 같이 재하면 중앙부의 최대침하량(S_v)와 최대측방변위량(Y_m)의 관계를 plot한 경우 하중이 작아서 안정한 동안에는 직선관계에 있지만, 하중이 증가되어

불안정하게 되면 최대측방변위량(Y_m)의 증가가 침하량(S_v)에 비해서 상대적으로 커지게 된다. 이 곡선 중의 변곡점 이후의 경사 즉 측방변위량과 침하량의 증분비율 $\alpha_2(=\Delta Y_m/\Delta S_v)$ 가 0.7 이상 또는 변곡점 이전의 증분비율 α_1 에 0.5를 합한 값보다 크게 되면 불안정 혹은 파괴한 것으로 판정한다.

2.3.2 紫田·關口の 방법(q/Y_m - q 관리도법)

Fig. 4와 같이 비배수조건에서 일정한 속도로 재하한 경우, 성토하중(q)에 대해서 성토하중과 최대측방변위량의 비(q/Y_m)가 거의 직선적으로 감소하는 것으로 하여 (q/Y_m)→0 으로 되는 때 (q/Y_m)와 q 의 직선이 횡축과 만나는 점이 파괴하중이 된다고 하였으며, (q/Y_m)가 $15t/m^3$ 이하이면 불안정하게 된다.

2.3.3 松尾·川村의 방법(S_v/Y_m - S_v)

Fig. 5와 같이 다수의 성토 파괴사례에 대해서 (S_v/Y_m - S_v)의 관계를 정리할 경우, 파괴는 일정한 곡선부근에서 발생하게 되는데 이 곡선을 파괴기준선이라고 부르며, 시공중 (S_v/Y_m - S_v)의 관계가 파괴기준선에 가까워지는 경우에는 파괴에 접근하는 경향이 있고, 반대로 멀어지는 경우에는 안정하게 되는 경향을 갖는다.

또한 P_j 를 임의의 시점의 성토하중, P_f 를 파괴시의 성토하중, α_3 는 S_v 와 (Y_m/S_v)의 증분비율로 변곡점 이후의 경사라고 하면, (Y_m/S_v)≥0.6인 경우 또는 (Y_m/S_v)≥0.1에서 P_j/P_f ≥0.95인 경우 또는 P_j/P_f ≥0.8에서 $-1 \leq \alpha_3 \leq 1$ 인 경우는 불안정하게 되며, 파괴기준선에 대한 제안식은 다음과 같다.

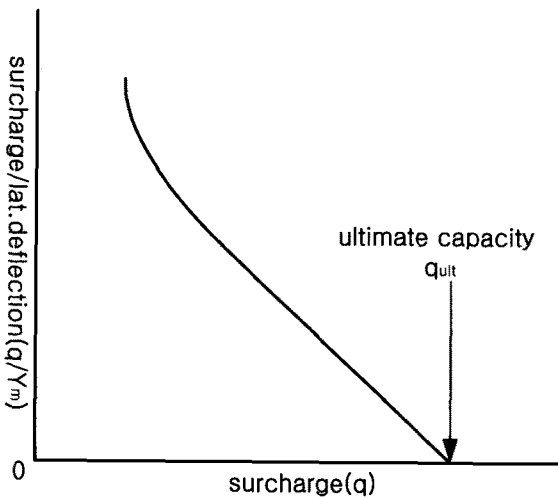


Fig. 4. Control diagram by (q/Y_m - q)

$$P_j/P_f=1.0 : [0 < (Y_m/S_v) \leq 1.4]$$

$$S_v=5.93 \exp[1.28(Y_m/S_v)^2 - 3.41(Y_m/S_v)] \quad (1)$$

3. 모형실험

3.1 모형실험장치의 제작

토조의 측면에는 마찰의 영향을 현장조건에 맞게 고려하기 위하여 오일을 바르고 편면재하를 작용 시켰으며, 모형토조의 규격을 정리하면 다음과 같다.

- ① 모형재하장치의 제원은 길이 50cm, 높이 40cm, 폭 15cm로 하였다.
- ② 변형을 관측할 수 있도록 재하들의 전면에 60cm×50cm×2cm의 투명한 아크릴을 부착하였다.
- ③ 배면에는 투명한 아크릴판과 같은 크기의 두께 2cm의 강판을 부착하여 강성을 유지하였다.
- ④ 양측면은 15cm×40cm, 두께 6mm의 강재channel을 부착하여 강성을 증가시켰다.
- ⑤ 저면에는 50cm×15cm, 두께 12cm의 강재channel을 이용하여 재하지반의 변형을 억제하였다.
- ⑥ 투명한 아크릴판의 변형방지를 위해 폭 5cm, 두께 5mm의 모서리띠를 보강하였다.
- ⑦ 측면channel과 전면 및 배면판과의 접합부의 누수방지를 위해 고무패킹을 시행하고 볼트 접합하였다.
- ⑧ 토조의 하부에 2cm 높이의 투수공간을 설치하여 배수를 유지토록 제작하였다.

3.2 모형실험의 방법

연약한 실트지반(ML로 표기)의 측방유동압 산정에

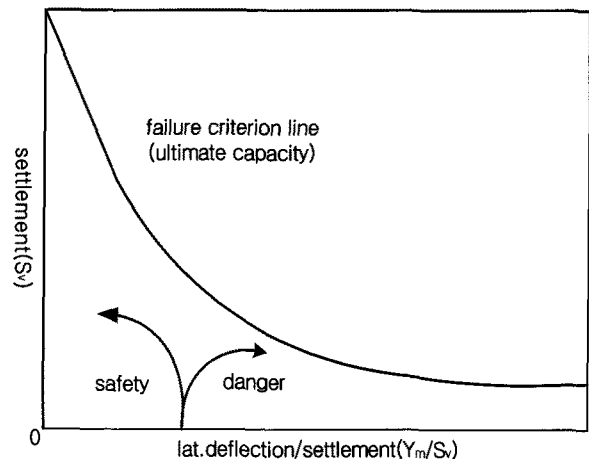


Fig. 5. Control diagram by S_v - Y_m/S_v

사용된 6가지의 시료는 함수비 30.06%를 기본함수량으로 하고, 매 시험 단계마다 함수량을 각각 20%씩 점차 증가시키면서 조제하여 모형실험을 실시하였다.

첫번째 시료는 자연지반 상태의 함수량으로 하고(ML000로 표기), 두번째 시료는 함수량을 20% 증가(ML020)시키고, 세번째 시료는 함수량을 40% 증가(ML040)시키는 등 매 시험단계마다 20%씩 증가하여 100%(ML100)까지 증가시킨 6종류의 연약한 실트지반 시료를 실제의 지반 조건에 가장 유사하게 재성형하여 토조 안에 조성하였다.

2종류의 오염된 실트지반에 대한 모형실험에 필요한 시료는 오염물질 종류별로 다음과 같이 조제하였다.

축산폐수 및 분뇨로 오염된 실트지반(ML_{p1}로 표기)은 다음과 같이 6가지를 조제하였다.

첫번째 시료는 오염물질을 혼합하지 않은 자연지반 상태의 시료이며(ML_{p1}000로 표기), 두번째 시료는 자연지반 상태의 함수량에 대한 오염물질을 20% 함유(ML_{p1}020)하고, 세번째 시료는 자연지반 상태의 함수량에 대한 오염물질을 40% 함유(ML_{p1}040)하고, 매 시험단계마다 오염물질을 20%씩 증가하여 100%(ML_{p1}100)까지 증가시킨 6가지의 오염물질이 함유된 시료를 실제의 오염지반 조건에 가장 유사하게 재성형하여 조제하였다.

복합물질로 오염된 실트지반(ML_{p2}로 표기)의 모형실험에 사용된 시료는 앞에서 사용한 오염물질인 생활오폐수와 공장폐수 및 축산폐수와 분뇨 및 생활오폐수와 공장폐수를 혼합한 복합오염물질로 자연지반 상태의 함수량을 기준으로 매 시험 단계마다 20%씩 증가시킨 반면에 함수량은 20%씩 감소시키면서 다음과 같이 조제하였다.

첫번째 시료는 오염물질을 혼합하지 않은 자연지반 상태의 시료이며(ML_{p2}000로 표기), 두번째 시료는 자연지반 상태의 함수량에 대한 복합오염물질을 20% 함유하였고(ML_{p2}020), 세번째 시료는 복합오염물질을 40% 함유하였다(ML_{p2}040). 매 시험단계마다 복합오염물질을 20%씩 증가하여 140%(ML_{p2}140)까지 증가시킨 8가지의 시료를 실제의 오염지반 조건에 가장 유사하게 재성형하여 모형지반을 조성하였다.

모형실험은 먼저 모형실험 재하장치(토조)를 제작하여 토조안에 함수량을 일정하게 증가시킨 연약한 실트지반(ML)과 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반(ML_{p1}), 복합물질로 오염된 실트지반(ML_{p2})을 재성형하여 모형 실험 장치에 거치하고, 편재하중을 일정한 시간 간격으로

재하시켜 각 하중단계 마다의 변형거동을 관측하여 분석하는 순서로 진행하였다

시료가 안정된 후에 관측창을 분리하고 시료의 전면 에 백색의 수성페인트로 20mm 간격의 Mesh를 그린 후 관측창을 다시 결합하여 관측창의 Mesh와 일치시킨 후 비배수조건하에서 일정한 시간 간격으로 $q=0.5g/mm^2$ 단위로 편재하중을 증가시켜 각각의 재하단계마다 오염지반의 침하량과 측방변위량 및 용기량의 변화와 전단활동파괴 등의 변형거동을 정밀한 카메라로 촬영하여 관측하는 순서로 진행하였다.

또한 각각의 재하단계마다 시간의 경과에 따라 재하 판 우측의 지표면상에 60mm 간격으로 설치한 용기량 측정용 Dial Gauge를 설치하여 변위량이 15분 동안에 1/100mm 이하가 되면 변형이 정지된 것으로 보고 다음 단계의 하중을 작용시켰다.

Fig. 6은 모형실험 재하장치의 모식도이다.

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 공학적 특성

모형실험에 사용된 시료는 전남 화순군 춘향면지역의 지표면 아래 3~4m 깊이에서 채취한 저소성 실트(ML)로서, 채취된 시료 중에 2mm 이상의 자갈 및 세편은 체로 쳐서 제거한 후 재성형하여 사용하였다. 다음 Table 1은 모형실험에 사용된 시료의 공학적 특성을 나타낸 것이다. 연약한 실트지반은 함수량이 증가할수록 간극비와 압축지수는 증가하는 경향을 보였으며, 비배

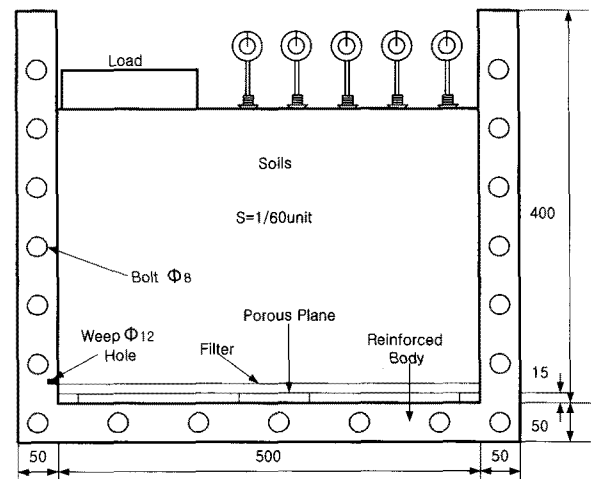


Fig. 6. Front view of model test apparatus (mm)

Table 1. The physical properties of model soils

시험결과	흙의 종류	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100	-	-
		ML _{p1} 000	ML _{p1} 020	ML _{p1} 040	ML _{p1} 060	ML _{p1} 080	ML _{p1} 100	-	-
		ML _{p2} 000	ML _{p2} 020	ML _{p2} 040	ML _{p2} 060	ML _{p2} 080	ML _{p2} 100	ML _{p2} 120	ML _{p2} 140
함수비(%)		30.06	32.51	35.18	37.92	42.30	46.84	-	-
		46.84	46.31	45.79	45.33	44.65	43.84	-	-
		46.84	46.14	45.25	44.42	43.57	42.86	42.11	41.23
간극비		0.77	0.82	0.88	0.95	1.03	1.12	-	-
		1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	-	-
		1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06
압축지수		0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	0.31	-	-
		0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22	-	-
		0.28	0.27	0.26	0.24	0.23	0.22	0.20	0.19
비배수전단강도 (kPa)		19.03	6.37	4.90	3.33	1.28	0.59	-	-
		5.30	4.81	4.12	2.94	2.75	2.45	-	-
		3.24	3.53	3.82	4.22	4.61	4.81	5.20	5.30

Table 2. Critical surcharge of model tests (kPa)

한계하중	흙의 종류	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100	-	-
		ML _{p1} 000	ML _{p1} 020	ML _{p1} 040	ML _{p1} 060	ML _{p1} 080	ML _{p1} 100	-	-
		ML _{p2} 000	ML _{p2} 020	ML _{p2} 040	ML _{p2} 060	ML _{p2} 080	ML _{p2} 100	ML _{p2} 120	ML _{p2} 140
q-S _v		79.43	28.93	21.18	8.83	7.85	4.90	-	-
		16.67	14.81	12.65	9.02	8.43	7.55	-	-
		9.32	10.20	11.18	12.55	13.83	14.71	15.69	16.18
Log(q-S _v)		79.43	29.42	21.38	8.83	7.85	4.22	-	-
		16.77	14.81	12.75	9.02	8.43	7.55	-	-
		9.41	10.10	11.38	12.36	13.83	14.71	16.18	16.18
S _v -Y _m		79.43	28.44	20.59	8.83	6.86	4.41	-	-
		16.67	14.81	12.65	9.02	8.43	7.55	-	-
		9.32	10.20	10.98	12.75	13.83	14.71	15.20	16.18
한계하중(q _{cr})		79.43	28.93	21.08	8.83	7.55	4.51	-	-
		16.67	14.81	12.65	9.02	8.43	7.55	-	-
		9.32	10.20	11.18	12.55	13.83	14.71	15.69	16.18

수전단강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반은 오염물질의 함량이 증대할 수록 함수비와 비배수전단강도는 적어지는데, 이는 오염물질의 영향으로 변형이 증대되어 지반의 강도특성이 감소하는 것으로 사료된다. 복합물질로 오염된 실트지반은 오염물질의 함량을 점차 증가시키고 함수량은 감소시킬수록 간극비와 압축지수는 감소하였고, 비배수전단강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 오염물질의 함량이 증가한 반면 함수량이 감소함에 따라 간극수압의 감소로 인하여 지반의 변형을 감소시키며, 오염물질과 함수량의 차이에 따라 전단강도의 증가가 현저함을 알 수 있다.

4.2 한계하중의 결정

연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 한계하중의 결정은 모형실험에 의한 하중-침하량 (q-S_v)곡선, 하중-측방변위량 (q-Y_m)곡선, 하중-용기량 (q-H_v)의 곡선에서 산정한 값과 침하량-측방변위량 (S_v-Y_m)관리도와 침하량-용기량 (S_v-H_v)관리도 및 하중/측방변위량-하중 {(q/Y_m)-q} 관리도에서 구한 값을 평균하여 채택하였으며, 그 결과 값은 Table 2와 같다.

Fig. 7은 모형실험에서 얻어진 Table 2의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식 (2)와 같이 제안식 보다 약간 큰 경향을 나타내고 있다.

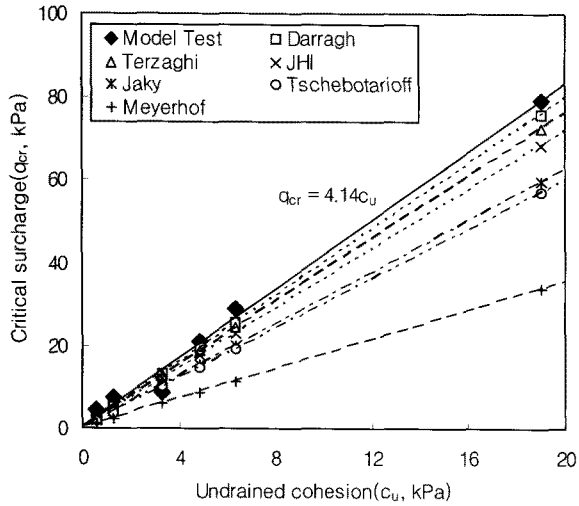


Fig. 7. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML)

$$q_{cr} = 4.14c_u \quad (2)$$

Fig. 8은 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 모형 실험에서 얻어진 Table 2의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식 (3)과 같이 Tschebotarioff의 제안식과 유사하게 산정되었다.

$$q_{cr} = 3.12c_u \quad (3)$$

Fig. 9는 복합물질로 오염된 실트지반의 모형실험에서 얻어진 Table 3의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식 (4)와 같이 복합오염물질이 증가할수록 한계하중 q_{cr} 의 변화는 Tschebotarioff의 제안식에 근접하고 있어 모형실험에 의한 한계하중의 결정에 대한 타당성을 입증하고 있다.

$$q_{cr} = 3.06c_u \quad (4)$$

4.3 극한하중의 결정

연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 극한하중의 결정은 모형실험에 의한 하중-침하량 ($q-S_v$)곡선, 하중-측방변위량 ($q-Y_m$)곡선, 하중-용기량 ($q-H_v$)의 곡선에서 산정한 값과 침하량-측방변위량 (S_v-Y_m)관리도와 침하량-용기량 (S_v-H_v)관리도 및 하중/측방변위량-하중 $\{(q/Y_m)-q\}$ 관리도에서 구한 값을 평균하여 채택하였으며, 그 결과 값은 Table 3과 같다.

Fig. 10은 모형실험에 의해 결정된 극한하중을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. 연

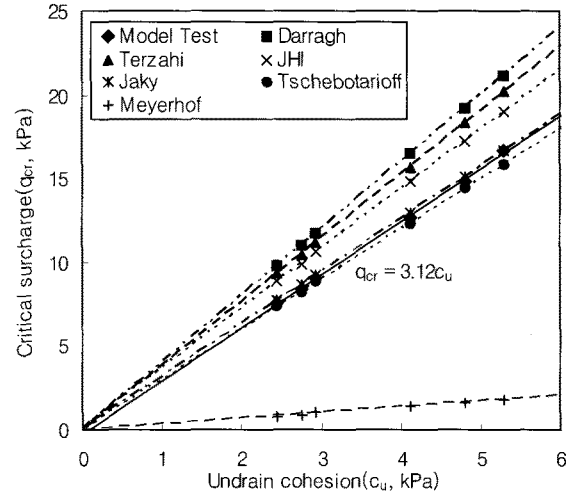


Fig. 8. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML_{p1})

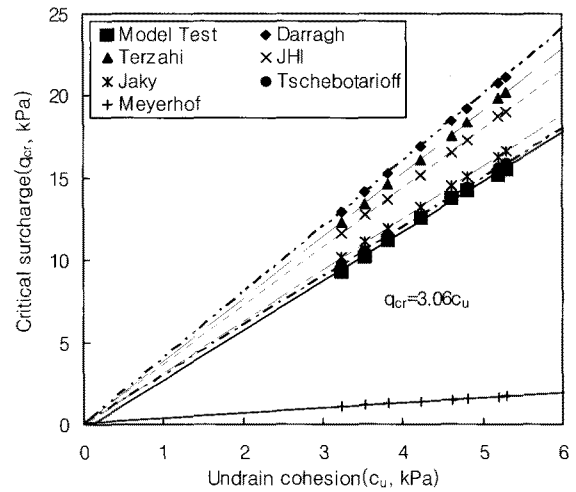


Fig. 9. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML_{p2})

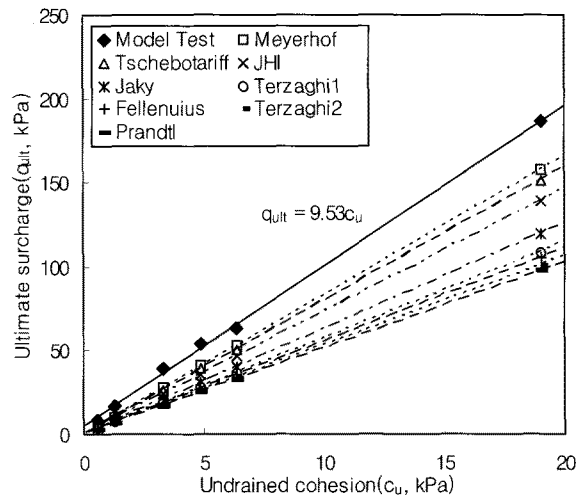


Fig. 10. Relations of undrained cohesion & ultimate capacity (ML)

Table 3. Ultimate capacity of model tests (kPa)

극한하중	흙의 종류	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100	-	-
		ML _{p1} 000	ML _{p1} 020	ML _{p1} 040	ML _{p1} 060	ML _{p1} 080	ML _{p1} 100	-	-
		ML _{p2} 000	ML _{p2} 020	ML _{p2} 040	ML _{p2} 060	ML _{p2} 080	ML _{p2} 100	ML _{p2} 120	ML _{p2} 140
q-S _v		186.33	63.74	53.94	39.23	16.67	8.83	-	-
		50.01	46.09	41.48	33.24	26.77	19.03	-	-
		18.14	20.01	21.87	24.12	26.38	28.64	30.89	31.38
Log(q-S _v)		186.33	63.74	53.94	39.23	17.65	8.83	-	-
		50.11	46.09	41.48	33.15	26.77	19.03	-	-
		18.14	20.01	21.87	24.12	26.38	28.64	30.89	31.38
S _v -Y _m		188.29	63.74	52.96	40.21	16.67	8.83	-	-
		50.11	45.11	40.21	31.38	25.50	19.52	-	-
		17.95	20.50	22.16	24.52	26.38	28.64	31.38	31.87
q-q/Y _m		184.37	63.74	54.92	38.25	16.67	8.83	-	-
		50.21	42.46	38.34	29.62	23.63	19.61	-	-
		18.34	19.52	21.57	23.73	26.38	28.64	30.40	30.89
극한하중(q _{ult})		186.33	63.74	53.94	39.23	16.97	8.83	-	-
		50.11	44.91	40.40	31.87	25.69	19.32	-	-
		18.14	20.01	21.87	24.12	26.38	28.64	30.89	31.38

약한 실트지반의 극한하중 실험값은 다음 식 (5)와 같이 이론식에 의한 극한하중 산정값에 비해 다소 큰 값을 나타내었다. 이는 실트가 가지고 있는 불규칙적인 입도 배합과 함수량의 증가로 인하여 지반내의 소성화가 급진적으로 촉진되고 있는 것에 기인한 것으로 사료된다.

$$q_{ult} = 9.53c_u \quad (5)$$

축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 극한하중은 Fig. 11과 같이 제안값 보다 크게 나타났으며, 실험값의 극한하중 값은 다음 식 (6)과 같다. 이는 오염물질 함량의

증가에 의한 지반내 소성화의 경향이 훨씬 빨라지고 있으며, 변위량의 급격한 증가에 기인한 것으로 사료된다.

$$q_{ult} = 9.45c_u \quad (6)$$

복합물질로 오염된 실트지반의 극한하중 실험값은 Fig. 12와 같이 Terzaghi 1 제안식과 유사하게 나타내고 있어, 모형실험에 의한 극한하중 값의 결정에 타당성을 입증하고 있다. 이와 같이 모형실험에 의한 극한하중 값을 배수전단강도와의 관계에서 회귀 분석에 의해 직선식으로 나타내면 식 (7)과 같이 표시 할 수 있다.

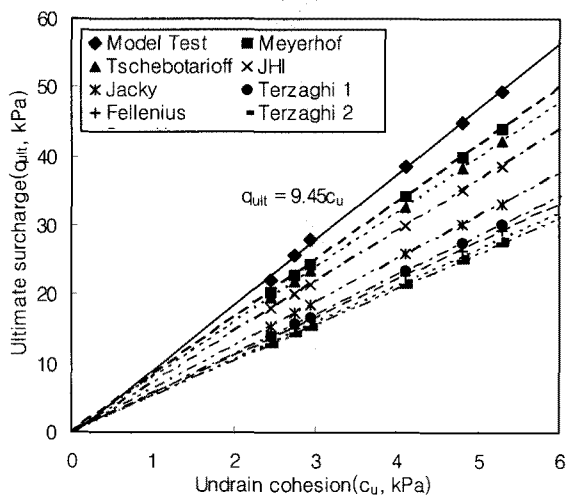


Fig. 11. Relations of undrained cohesion & ultimate capacity (ML_{p1})

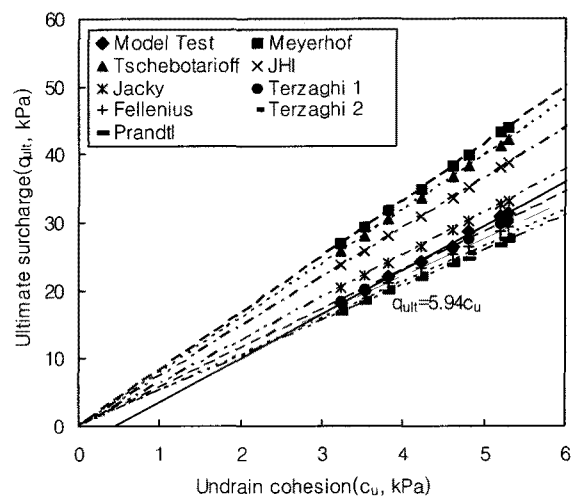


Fig. 12. Relations of undrained cohesion & ultimate capacity (ML_{p2})

$$q_{ult} = 5.94c_u \quad (7)$$

4.4 안정관리방법의 검토

Fig. 13~Fig. 15는 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 모형지반을 富永·橋本이 제안한 침하량(S_v)-측방 변위량(Y_m)의 관리도에 적용하여 나타낸 것이다. 축산 폐수와 분뇨 및 복합물질로 오염된 실트지반은 오염물질의 함량이 증가할수록 침하량보다 측방변위량의 증가경향이 현저하게 나타나 연약한 실트지반 보다 지반의 불안정이 더 증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16~Fig. 18은 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 모형지반을 紫田·關口가 제안한 상재하중과 측방 변위량의 증분(q/Y_m)-상재하중(q)의 관리도에 적용하여 나타낸 것이다. 연약한 실트지반과 축산폐수와 분뇨 및 복합물질로 오염된 실트지반은 함수량과 오염물질의

함유량이 증가할수록 극한하중은 감소하는 경향을 나타내고 있어 지반의 소성화에 의한 국부전단파괴의 가

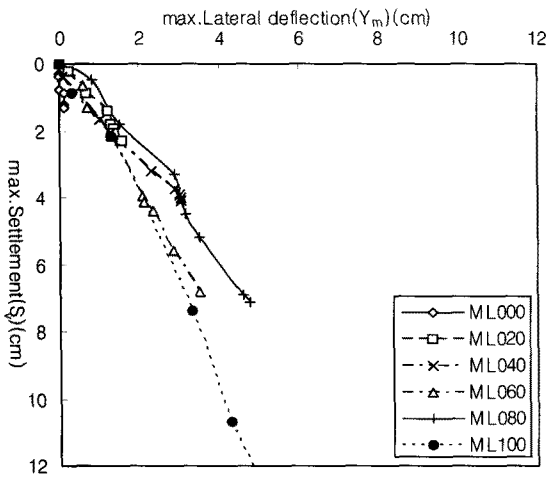


Fig. 13. Control diagrams by S_v - Y_m (ML)

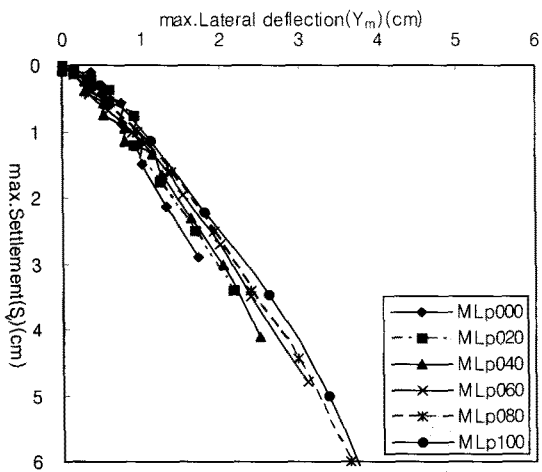


Fig. 14. Control diagrams by S_v - Y_m (ML_{p1})

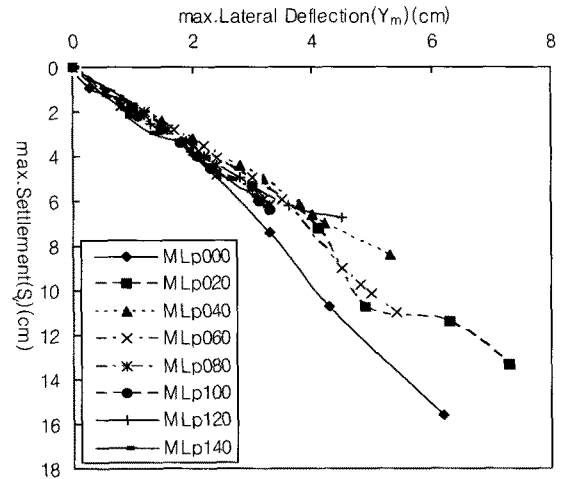


Fig. 15. Control diagrams by S_v - Y_m (ML_{p2})

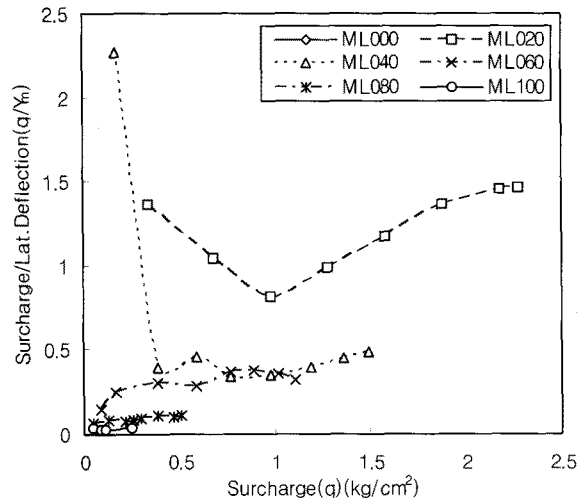


Fig. 16. Control diagrams by q/Y_m - q (ML)

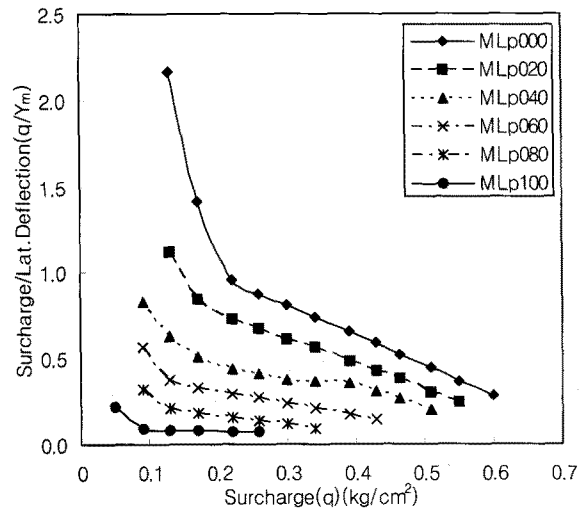


Fig. 17. Control diagrams by q/Y_m - q (ML_{p1})

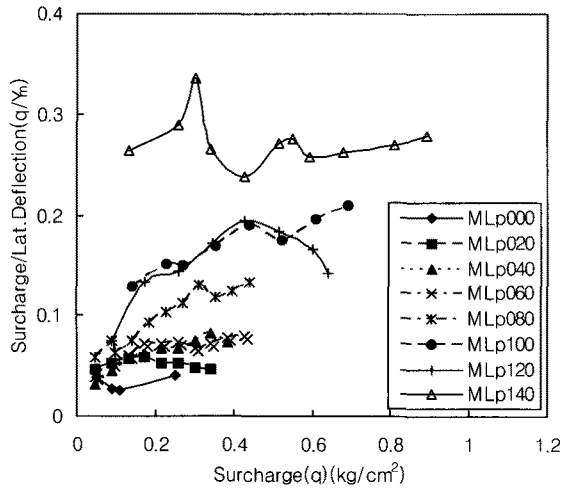


Fig. 18. Control diagrams by q/Y_m-q (ML_{p2})

능성이 훨씬 크게 됨을 알 수 있다. 이는 함수량과 오염 물질의 증가로 인하여 소성유동의 거동이 증가하게 됨에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 19~Fig. 21은 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 각각 모형지반에서 얻어진 변위량을 松尾·川村의 관리도에 적용하여 x축에 축방변위량/침하량(Y_m/S_v)을 y축에 침하량(S_v)을 적용해본 결과 松尾·川村의 기준에 의한 파괴하중은 모형실험에 의한 극한하중보다 다소 작은값을 나타내어 너무 지나치게 안전측을 고려한 것으로 사료된다.

연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 극한하중에 대한 침하량의 산정식은 다음 식과 같다.

$$S_v = 3.21 \exp\{-0.48(Y_m/S_v)\} \quad (8)$$

$$S_v = 3.17 \exp\{-0.45(Y_m/S_v)\} \quad (9)$$

$$S_v = 6.33 \exp\{-0.45(Y_m/S_v)\} \quad (10)$$

Table 4와 Fig. 22는 연약한 실트지반의 위의 세경우의 관리도에서 구한 파괴하중을 모형실험에서 구한 극한하중과 비교하여 나타낸 것으로, 하중(q)-침하량(S_v)의 곡선에서 얻어진 극한하중은 富永·橋本の (S_v-Y_m)의 변위량에 대한 관리도에서 얻어진 극한하중과 松尾·川村의 ($S_v-(Y_m/S_v)$)의 관리도와 紫田·關口の ($(q/Y_m)-q$)의 관리도에서 얻어진 극한하중과 상당히 유사한 값을 나타내어 관리도에서 얻어진 극한하중은 실제 적용시 문제가 없음을 알 수 있다.

Table 4와 Fig. 23은 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 3가지의 관리도에서 구한 파괴하중을 모형실험에서 구한 극한하중과 비교하여 나타낸 것이다. 하중

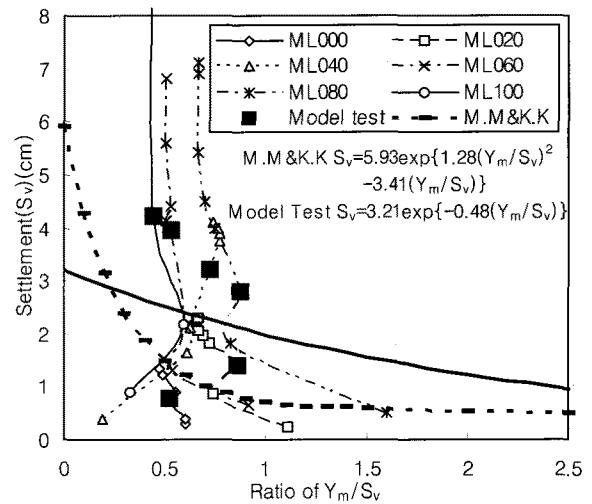


Fig. 19. Control diagrams by S_v-Y_m/S_v (ML)

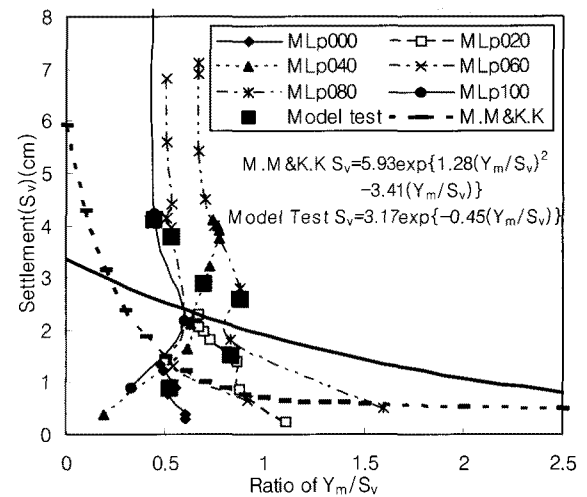


Fig. 20. Control diagrams by S_v-Y_m/S_v (ML_{p1})

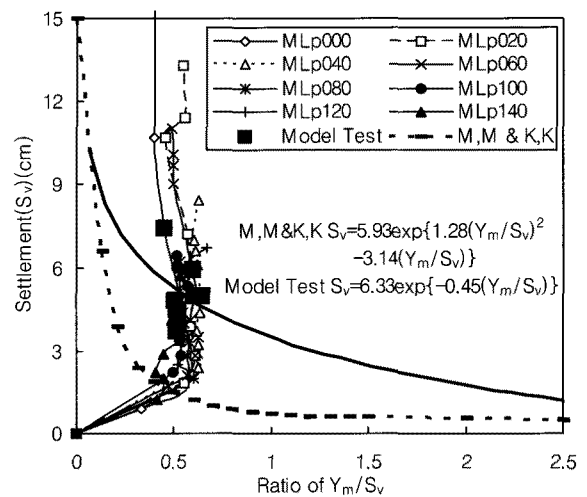


Fig. 21. Control diagrams by S_v-Y_m/S_v (ML_{p2})

(q)-침하량(S_v)의 곡선에서 얻어진 극한하중은 富永·橋本の (S_v-Y_m)의 변위량에 대한 관리도와 紫田·關口の

Table 4. Comparison of ultimate capacity & failure criterion by control diagram(kPa)

극한하중	축의 종류	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100	-	-
		ML _{p1} 000	ML _{p1} 020	ML _{p1} 040	ML _{p1} 060	ML _{p1} 080	ML _{p1} 100	-	-
		ML _{p2} 000	ML _{p2} 020	ML _{p2} 040	ML _{p2} 060	ML _{p2} 080	ML _{p2} 100	ML _{p2} 120	ML _{p2} 140
q-S _v		186.33	63.74	53.94	39.23	16.67	8.83	-	-
		50.01	46.09	40.00	29.28	27.26	20.88	-	-
		18.14	20.01	21.87	24.12	26.38	28.64	30.89	31.38
S _v -Y _m		188.29	63.74	52.96	40.21	16.67	8.83	-	-
		50.01	42.46	39.60	26.48	25.50	20.76	-	-
		17.95	20.50	22.16	24.52	26.38	28.64	31.38	31.87
S _v -Y _m /S _v		186.33	68.65	53.94	39.23	16.67	8.83	-	-
		46.09	41.28	36.34	28.44	25.50	20.64	-	-
		17.65	19.91	21.97	24.03	25.99	28.64	30.99	31.38
q/Y _m -q		184.37	63.74	54.92	38.25	16.67	8.83	-	-
		50.01	42.46	38.34	29.28	23.63	20.16	-	-
		18.34	19.52	21.57	23.73	26.38	28.64	30.40	30.89

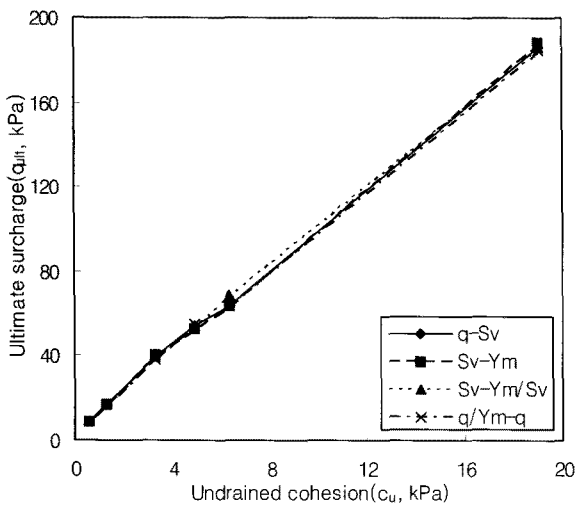


Fig. 22. Comparison of ultimate capacity & failure criterion by control diagram (ML)

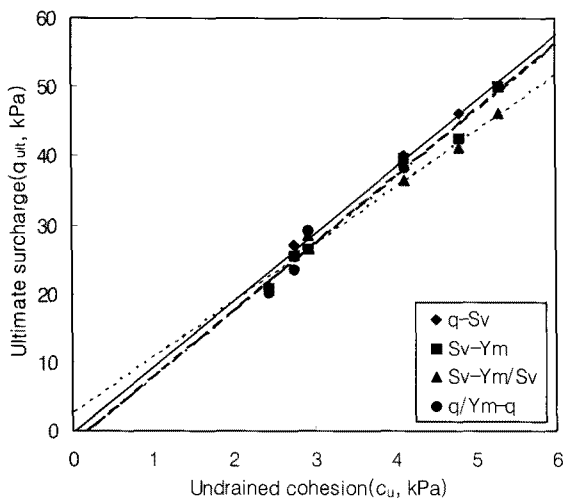


Fig. 23. Comparison of ultimate capacity & failure criterion by control diagram (ML_{p1})

(q/Y_m-q)의 관리도에서 얻어진 극한하중과 거의 유사하게 나타났다. 그러나 松尾·川村의 (S_v-Y_m/S_v)관리도에서 얻어진 극한하중은 하중(q)-침하량(S_v) 곡선에서 얻어진 극한하중 보다 다소 작은 값을 나타내어 松尾·川村의 관리도에서 결정한 극한하중 값은 다소 안전측면을 고려한 것으로 사료된다.

Table 4와 Fig. 24는 복합물질로 오염된 실트지반의 3가지의 관리도에서 구한 파괴하중을 모형실험에서 구한 극한하중과 비교하여 나타낸 것이다. 하중(q)-침하량(S_v)의 곡선에서 얻어진 극한하중은 富永·橋本の (S_v-Y_m)의 변위량에 대한 관리도에서 얻어진 극한하중과 松尾·川村의 (S_v-Y_m/S_v)의 관리도와 紫田·關口の (q/Y_m-q)의 관리도에서 얻어진 극한하중 값과 상당히 유사하게 나

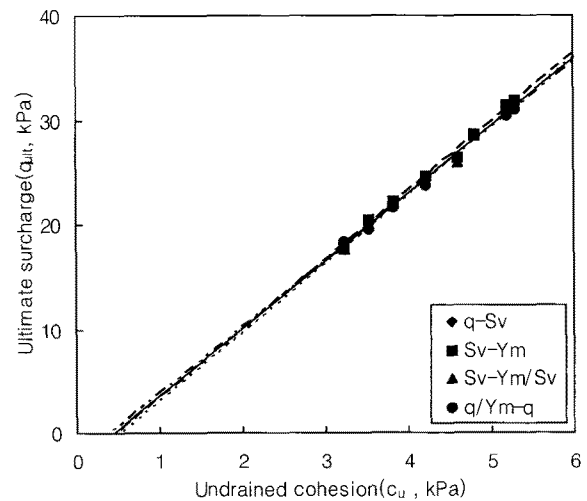


Fig. 24. Comparison of ultimate capacity & failure criterion by control diagram (ML_{p2})

타나고 있어 실제 적용시 무리가 없을 것으로 사료된다.

5. 결 론

연약한 실트지반(ML)과 축산폐수와 분뇨(ML_{p1})로 오염된 실트지반 및 복합물질로 오염된 실트지반(ML_{p2})에 대해서 모형실험을 통하여 지반의 측방유동에 대한 안정관리방법의 적용상의 문제점을 분석하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연약한 실트지반과 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반은 함수량과 오염물질의 함량이 증가함에 따라 지반의 변형을 촉진시켜 전단강도의 저하가 현저함을 알 수 있다. 복합물질로 오염된 실트지반은 오염물질의 함량이 증가한 반면 함수량이 감소함에 따라 지반의 변형을 감소시키며, 오염물질과 함수량의 차이에 따라 전단강도가 증가함을 알 수 있다
- (2) 연약한 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=4.14c_u$, 극한하중 $q_{ult}=9.53c_u$ 로 산정되었다. 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=3.12c_u$, 극한하중 $q_{ult}=9.45c_u$ 로 산정되었고, 복합물질로 오염된 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=3.06c_u$, 극한하중 $q_{ult}=5.94c_u$ 로 연약한 실트지반의 한계하중과 극한하중 보다 오염물질로 오염된 실트지반의 한계하중과 극한하중이 다소 작게 나타났다. 이는 오염물질의 증가로 인하여 전단저항이 저하되므로써 다소 작은 값을 나타낸 것으로 사료된다.
- (3) 연약한 실트지반과 복합물질로 오염된 실트지반 모두 하중(q)-침하량(S_v) 곡선에서 얻어진 극한지지력은 富永·橋本の 변위량(S_v-Y_m)에 대한 관리도, 松尾·川村의 $\{S_v-(Y_m/S_v)\}$ 의 관리도, 紫田·關口の $\{(q/Y_m)-q\}$ 의 관리도에서 얻어진 극한지지력과 상당히 유사하게 나타나고 있어 실제 적용시 무리가 없을 것으로 사료된다. 반면 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 松尾·川村의 $\{S_v-(Y_m/S_v)\}$ 관리도에서 얻어진 극한하중은 하중-침하량 곡선(q- S_v)에서 얻어진 극한하중 값보다 약간 작은 값을 보이고 있다.
- (4) 松尾·川村의 안정관리도의 파괴기준선에 대한 연약한 실트지반의 산정식 $S_v=3.21\exp\{-0.48(Y_m/S_v)\}$

이며, 축산폐수와 분뇨로 오염된 실트지반의 산정식 $S_v=3.17\exp\{-0.45(Y_m/S_v)\}$, 복합물질로 오염된 실트지반의 산정식 $S_v=6.33\exp\{-0.45(Y_m/S_v)\}$ 으로 결정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 박상범 (2004), 연약한 실트지반과 오염된 실트 지반의 측방유동에 관한 연구, 박사학위논문, 조선대학교 대학원, pp.1-114.
2. 박준범 (1996), "계면활성제를 이용한 지반오염 처리 기술 소개", 건설기술정보, 한국건설기술연구원.
3. 안종필 (1993), "편재하중을 받는 연약지반의 측방유동에 관한 연구", 지질공학 대한지질공학회지, 대한지질공학회, 제3권, 제2호, 9월, pp.177-190.
4. 안종필, 홍원표 (1994), "측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구", 한국지반공학회지, 한국지반공학회, 제10권, 제2호, 6월.
5. 안종필, 김병호, 박상범 (1998), "오염지반의 측방 유동압 산정에 관한 연구", 학술발표회논문집, 대한토목학회, 10월, pp.237-240.
6. 홍원표(1983), "수평력을 받는 말뚝", 대한토목학회지, 대한토목학회, 제31권, 제5호, 10월, pp.32-36.
7. 關口秀雄, 紫田 徹 (1982), 盛土基礎地盤の側方流動 解析上の問題點, 土と基礎, Vol.30, No.5 (No.292), pp.47-54.
8. 富永直生, 橋本正治 (1974), 側方變位の現場計測による盛土の施工管理について, 土と基礎, Vol.22, No.11, pp.43-51.
9. 松尾 捻, 川村國夫 (1975), 盛土の情報化施工とその評價に關する研究, 日本土木學會論文報告集, No.241, pp.81-91.
10. 紫田 徹, 關口秀雄 (1980), 盛土基礎地盤の彈·粘塑性舉動解析と礎變豫測, 日本土木學會論文報告集, 日本土木學會, No.301, pp.93-104.
11. 赤井浩一 (1964), 土の支持力と沈下, 山海堂, 日本, 東京, pp.25-42.
12. 土質工學會 中國支部 (1991), "側方流動を受ける受動杭", 日本土質工學會 中國支部 講習會テキスト, pp.1-25.
13. 土質工學會 (1994), "盛土基礎地盤の側方流動, 地盤の側方流動", 日本土質工學會, pp.1-57, 103-151.
14. Das, B. M. (1984), *Principles of foundation engineering*, Brooks/Cole Engineering division, Monterey, California, pp.101-206.
15. Tavenas,F.,Mieussens,C. & Bourges,F. (1979), "Lateral displacements in clay foundations under embankments", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.532-550.
16. Tavenas,F. & Leroueil,S. (1980), "The behaviour of embankments on clay foudations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, pp.236-260.
17. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., Wiley, New York.
18. Tschebotarioff, G.P. (1962), *Chapter 5 on Retaining structures in foundation engineering(editor-Leonards)*, McGraw-Hill, New York, pp.486-496.
19. Tschebotarioff,G.P. (1973), *Foundations, retaining & earth structures*, McGrawHill, Kogakusha, Tokyo, pp.389-414.
20. W.P.Hong (1980), *Stability Analysis of Slope Containing Piles in a Row and Its Design Method*, Thesis, Eng.Dr.Osaka University, pp.47-52.

(접수일자 2007. 4. 2, 심사완료일 2008. 6. 26)