

연약한 실트지반과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 지지력 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of Bearing Capacity of Soft Silty Ground and Polluted Silty Ground with Wastewater and Factory Waste Oil

안 종 필¹ Ahn, Jong-Pil
박 상 범² Park, Sang-Bum

Abstract

Laboratory model test with soft silty ground (ML) and polluted silty ground with wastewater and factory waste oil (ML_p) was conducted and the applicability of changes of bearing capacity from the increase of pollutants was compared and analyzed with existing findings. As silty ground polluted with wastewater and factory waste oil had increased contents of pollutants, plasticization of ground was fostered compared to soft silt ground due to the influence of pollutants, and characteristics of ground strength decreased. Critical surcharge value of soft silty ground $q_{cr}=4.14c_u$, ultimate bearing capacity value $q_{ult}=9.53c_u$, critical surcharge value of silty ground polluted with wastewater and factory waste oil $q_{cr}=1.78c_u$ and ultimate bearing capacity value $q_{ult}=4.39c_u$. Critical surcharge and ultimate bearing capacity of silty ground polluted with wastewater and factory waste oil were less than those of soft silty ground. It meant that shearing resistance due to the increase of pollutants decreased and rather a smaller value was obtained.

요 지

연약한 실트지반(ML)과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반(ML_p)에 실내모형실험을 실시하여 오염물질의 증가에 따른 지지력값의 변화 등에 대한 실제의 적용성을 기존의 연구결과와 비교·분석하였다. 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반은 오염물질 함량이 점차 증대할수록 오염물질의 영향으로 연약한 실트지반 보다 지반의 소성화가 촉진되어 지반의 강도특성은 감소하는 것으로 나타났다. 연약한 실트지반의 한계하중 값 $q_{cr}=4.14c_u$, 극한지지력 값 $q_{ult}=9.53c_u$ 로 산정되었으며, 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중 값 $q_{cr}=1.78c_u$, 극한지지력 값 $q_{ult}=4.39c_u$ 로 산정되었다. 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중과 극한지지력 값이 연약한 실트지반의 한계하중과 극한지지력 보다 다소 작게 나타났다. 이는 오염물질의 증가로 인하여 전단저항이 저하되므로써 다소 작은 값을 나타낸 것으로 사료된다.

Keywords : Critical surcharge, Excretion, Laboratory pilot tests, Ultimate bearing capacity

1. 서 론

경제 성장과 더불어 공업용지 및 주거용지에 대한 수요

가 점점 증가되고 있으나 지반조건이 양호한 용지의 확보가 어려운 상황이다. 국토의 효율적이고 균형적인 발전을 위하여 지반이 양호한 지역뿐만 아니라 지반 조건이

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 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

연약한 지역에서도 새로운 공간개발이 진행되고 있다. 또한 사회의 발전에 따라 늘어나는 생활오폐수나 산업폐수 및 축산폐수, 쓰레기 매립장에서 나오는 오염물과 수많은 자동차에서 나오는 폐유를 완벽하게 처리하지 못해 발생하는 환경오염 및 생태계 파괴가 커다란 문제로 제기된다.

더욱 심각한 것은 이러한 오염물질이 지반속으로 유입되면서 오염물질의 성분에 의해 흙의 전기적 성질이 변함과 동시에 흙의 역학적 성질인 일축압축강도(q_u), 비배수전단강도(c_u), 지반탄성계수(E_s), 지반반력계수(K_H) 등의 변화에 직접적인 영향을 미친다는 점이다. 특히 아주 작은 지지력을 갖는 오염된 연약지반 위에 성토나 매립을 실시하거나 교대나 안벽 등과 같은 구조물을 설치하게 되면 재하하중에 의해 응력이 증가하고, 오염물질에 의하여 지반내의 과잉간극수압이 증가하게 되며 토립자의 소성화로 인한 지반의 수평적인 측방유동압의 작용에 의한 토립자의 측방변위의 발생과 자유표면의 용기현상이 발생되어 결국에는 국부적인 활동전단 파괴를 유발하여 지반과 구조물의 안전성에 있어서 큰 문제를 일으키게 된다(朴 2004; 安, 金, 朴 1998).

지금까지 연약지반의 지지력 결정에 관해 Jaky & Fröhlich(赤井 1964), Tschebotarioff(1973) 및 Das & Meyerhof(1984) 등에 의한 한계하중과 극한하중의 결정 방법 등을 비롯하여 매우 많은 연구가 수행된 바 있고, 근래에 있어서는 연약지반의 변형해석의 복합적인 성질과 비선형적 변형-시간의 관계를 고려한 유한요소해석 등이 행해지고 있으나, 오염된 연약지반에 대한 인식과 연구 및 실질적인 적용면에서는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 모형실험용 재하장치를 제작하고, 모형실험에 필요한 시료는 연약한 실트지반(ML)에 대하여 함수량을 일정하게 증가시키면서 조성하였고, 오염된 실트지반(ML_p)의 시료는 연약한 실트지반에 오염물질인 생활오폐수와 공장폐유를 혼합하여 조성하였다. 모형재하실험 결과를 분석하여 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 연약한 실트지반의 오염물질의 증가에 따른 지지력값의 변화 등에 대한 실제의 적용성을 기존의 연구결과와 비교·분석하였다.

2. 오염지반의 지지력

2.1 오염물질의 성질 및 거동

연약지반상에 성토를 실시하거나 교대나 잔교 등의

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 과도한 변형을 일으키거나 파괴를 유발하는 경우가 많다(安 1993; 安, 洪 1994; 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(安 1993; 安, 洪 1994). NAPL(Nonaqueous Phase Liquid)은 물보다 가벼운 LNAPL(Light NAPL)과 무거운 DNAPL(Dense NAPL)로 나누어진다. LNAPL은 지하수면위에 머무르게 되고, DNAPL은 지하수면을 통과하여 아래로 내려가 불투수층인 하부의 반암에 도달하게 된다. 지반을 오염시키는 밀도가 작은 LNAPL(Light Nonaqueous Phase Liquid)은 주로 석유추출물이며, 그 추출물은 용해도가 다양한 여러 화합물질로 구성된 복합물질의 유기화합물이다. 침출수를 구성하는 성분으로는 Cl, Fe, Cu, Na, N 및 염소계통의 유기물과 PCB 등이 있다(申, 李 1997). 본 연구에서는 가정용 생활오폐수인 세제류와 음식물 오폐수, 중금속이 함유된 공장폐유 등을 혼합하여 모형실험을 시행 하였다.

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 LNAPL(오염물질)은 토립자로부터 쉽게 떨어지지 않으므로 장기적인 지반오염을 초래하게 되고, 양수처리공법(Pump-and-Treat)으로 지반정화를 시도 할 때 초기에

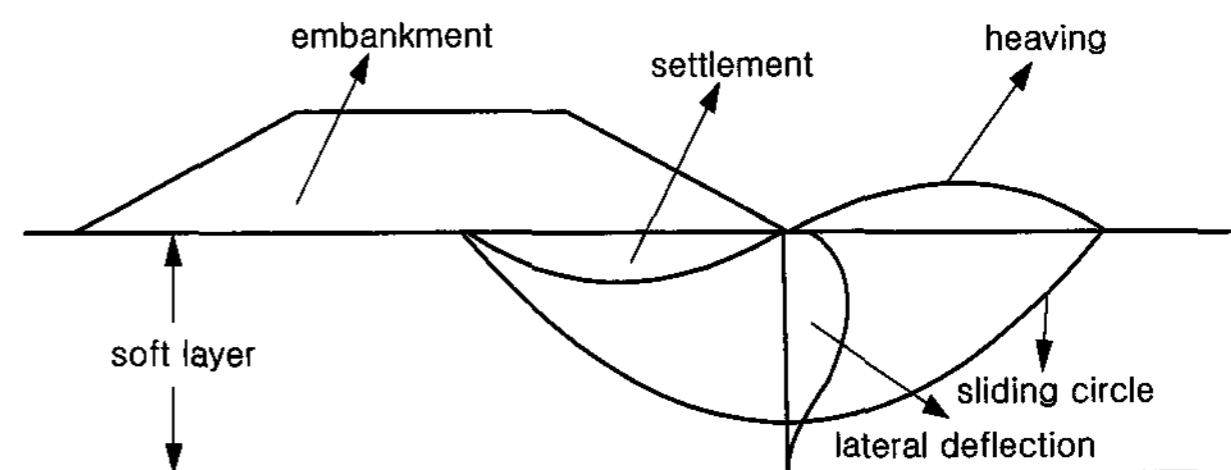


Fig. 1. Pattern of the lateral flow and failure in soft soils by embankment

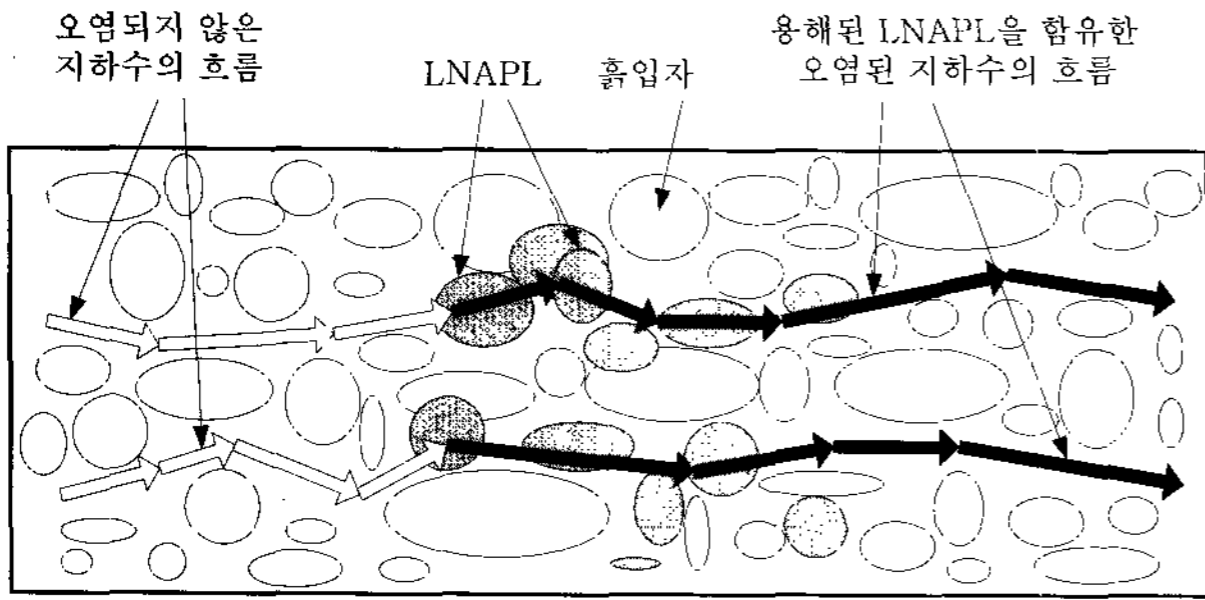


Fig. 2. Groundwater pollution of LNAPL with solution

는 오염농도가 많이 떨어지나, 시간이 지날수록 어떤 한 계밀로 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 흩뿌리가 압축되면서 점차 소성의 상태로 이전되어 가게 된다. 지반이 탄성상태에서 소성상태로 바뀌는 시점의 하중값을 Jaky & Fröhlich(赤井 1964) 등은 항복응력이라고 규정하였고, Tschebotarioff(1962, 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.

다음으로 극한지지력이란 Meyerhof(1984)등이 제안한 것처럼 한계하중을 초과하여 더욱 하중을 증가시키면 하부지반에는 토립자의 전단저항에 의해 탄성영역인 주동쇄기가 하향으로 침하함에 따라 과잉간극수압의 증가를 유발하여 토립자의 측방변위를 발생시키므로써 소성영역은 전단 및 수동영역까지 확장되고 원호활동파괴면이 지표면까지 도달하려는 경향을 나타내는

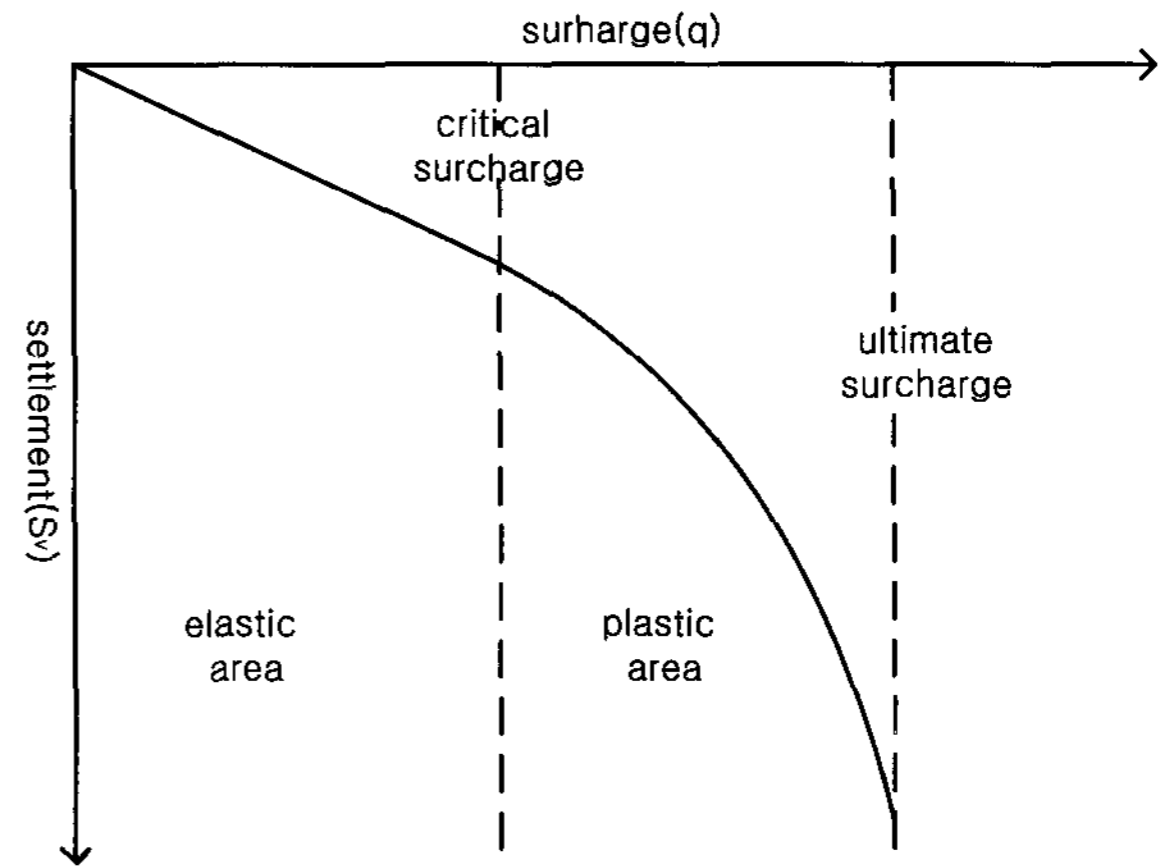


Fig. 3. Critical surcharge and ultimate bearing surcharge

소성평형 파괴형태에 이르게 된다. 이와 같이 지반의 소성평형에 의한 전단파괴가 이루어 질 때의 하중을 극한 지지력이라고 하고, 구조물의 종류에 따라 적당한 안전율로 극한지지력을 나눈 값이 허용지지력이다.

연약지반에서는 지내력이 작기 때문에 과대한 침하를 허용할 수 없는 구조물에 대해서는 말뚝기초나 케이슨기초와 같은 깊은 기초형식이 많이 사용된다. 그러나 사전에 조성된 성토지반이나 매립지반에 건설되는 경량건물 등에 대해서는 얕은 직접기초가 많이 이용되고 있다 (洪 1983; 中國支部 1991).

Fig. 3은 하중과 변위의 관계곡선으로부터 구하여지는 한계하중과 극한지지력을 나타낸 것이고, 일반적으로 보통의 지반에 대해서 극한지지력에 대한 한계하중의 비는 0.35~0.75의 관계를 나타내고 있다.

한계하중과 극한지지력은 지반의 탄성평형과 소성평형상태에서의 활동파괴면의 점착력에 의한 전단저항과 재하면에서의 평형조건에서 결정하거나, 재하판 단부에서의 모멘트의 평형조건에서 산정할 수 있으며, 실험에 의한 하중-변위량의 관계에서도 결정할 수 있다.

지금까지 제안되어 있는 한계하중과 극한지지력을 산정할 수 있는 이론식에 의한 방법은 Table 1과 같으며, 한계하중과 극한지지력 값은 모형실험에 의한 하중-침하량곡선 (q_0-S_v), 상용대수 하중-침하량곡선 ($\text{Log}q_0-\text{Log}S_v$)과 침하량-측방변위량곡선 (S_v-Y_m) 및 하중-하중/측방변위량비의 곡선 ($q-q/Y_m$)관리도에서 구한 값을 평균해서 지지력 값을 산출하였으며, 기존의 제안식에 의해서 산정된 값과 비교하여 값을 검증하였다(赤井 1964; 日本土質工學會 1979, 1994). 또한 한계하중과 극한지지력의 비율은 (0.4~0.7)의 사이에 있음을 알 수 있다. 여기서, c_u 는 점토의 비배수강도, B는 재하폭, H는 토층의 두께를 나타낸다.

Table 1. Proposed equation of critical surcharge and ultimate bearing capacity in clay

Proposer	Critical surcharge	Ultimate bearing capacity	q_{cr}/q_{ult}
Meyerhof	$q_{cr} = (B/2H + \pi/2)c_u$	$q_{ult} = 8.30c_u$	-
Tschebotarioff	$q_{cr} = 3.00c_u$	$q_{ult} = 7.95c_u$	0.38
JHI	$q_{cr} = 3.60c_u$	$q_{ult} = 7.30c_u$	0.49
Jaky	$q_{cr} = 3.14c_u$	$q_{ult} = 6.28c_u$	0.50
Terzaghi-1	$q_{cr} = 3.81c_u$	$q_{ult} = 5.71c_u$	0.67
Fellenius	-	$q_{ult} = 5.52c_u$	-
Terzaghi-2	$q_{cr} = 3.81c_u$	$q_{ult} = 5.30c_u$	0.72
Prandtl	-	$q_{ult} = 5.14c_u$	-
Darragh	$q_{cr} = 4.00c_u$	-	-

* JHI:Japan Highway Institute(일본도로협회)

3. 모형실험

3.1 모형실험장치의 제작

모형실험은 먼저 모형실험 재하장치(토조)를 제작하여 토조안에 함수량을 일정하게 증가시킨 6종류의 시료와 함수비를 일정하게 유지한 상태에서 생활오폐수와 공장폐수 오염물질의 함유량을 일정하게 증가시킨 농도가 다른 8종류의 오염된 재성형 모형지반을 거치하고, 편재하중을 일정한 시간 간격으로 재하시켜 각 하중단계 마다의 변형거동을 관측하여 분석하는 순서로 진행하였다.

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

- ① 모형재하장치의 제원은 길이 500mm, 높이 400mm, 폭 150mm로 하였다.
- ② 변형을 관측할 수 있도록 재하틀의 전면에 600 mm×500mm×20mm의 투명한 아크릴을 부착하였다.
- ③ 배면에는 투명한 아크릴판과 같은 크기의 두께 20mm의 강판을 부착하여 강성을 유지하였다.
- ④ 양측면은 150mm×400mm, 두께 60mm의 강재 channel을 부착하여 강성을 증가시켰다.
- ⑤ 저면에는 500mm×150mm, 두께 120mm의 강재 channel을 이용하여 재하지반의 변형을 억제하였다.
- ⑥ 투명한 아크릴판의 변형방지를 위해 폭 50mm, 두께 5mm의 모서리띠를 보강하였다.
- ⑦ 측면channel과 전면 및 배면판과의 접합부의 누수방지를 위해 고무패킹을 시행하고 볼트 접합하였다.
- ⑧ 토조의 하부에 20mm 높이의 투수공간을 설치하여 배수를 유지토록 제작하였다.

3.2 모형실험의 방법

모형실험에 사용된 연약한 실트지반은 동일한 입도 분포를 갖는 오염된 연약지반의 흙으로서, 함수량을 일정하게 20%씩 증가시킨 6종류의 시료이다. 생활오폐수와 공장폐수로 오염된 실트지반은 연약한 실트지반에 함수비를 일정하게 유지한 상태에서 일상생활에서 일반적으로 가장 많이 쓰이는 가정용 세제(샴푸, 린스, 세탁세제, 가루비누 및 주방세제)의 오염물질과 음식물 오폐수, 중금속이 함유된 공장폐수를 혼합하였다. 오염물질의 함유량은 시료를 완전 노건조시킨 후 함수량을 일정하게 하고 그 함수량에 대한 비율로 오염물질을 혼합하였다. 첫번째 시료는 오염물질을 혼합하지 않은 자연 지반상태의 시료이며(S000로 표기), 두번째 시료는 오염물질인 가정용 세제와 공장폐수를 50:50으로 혼합하여 함수량에 대한 20%를 함유(S020), 세 번째 시료는 오염물질을 40% 함유(S040), 매 시험단계 마다 20%씩 증가하여 140%(S140)까지 증가시킨 8종류의 오염물질이 함유된 시료를 실제의 오염지반상태에 가장 유사하게 시료를 재성형하여 토조안에 거치하였다.

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 $q=0.05\text{kg/cm}^2$ 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 6cm 간격으로 설치한 용기량 측정용 Dial Gauge를 설치하여 변위량이 15분 동안에

1/100mm 이하가 되면 변형이 정지된 것으로 보고 다음 단계의 하중을 작용시켰다.

Fig. 4는 모형실험 재하장치의 모식도이며, Fig. 5는

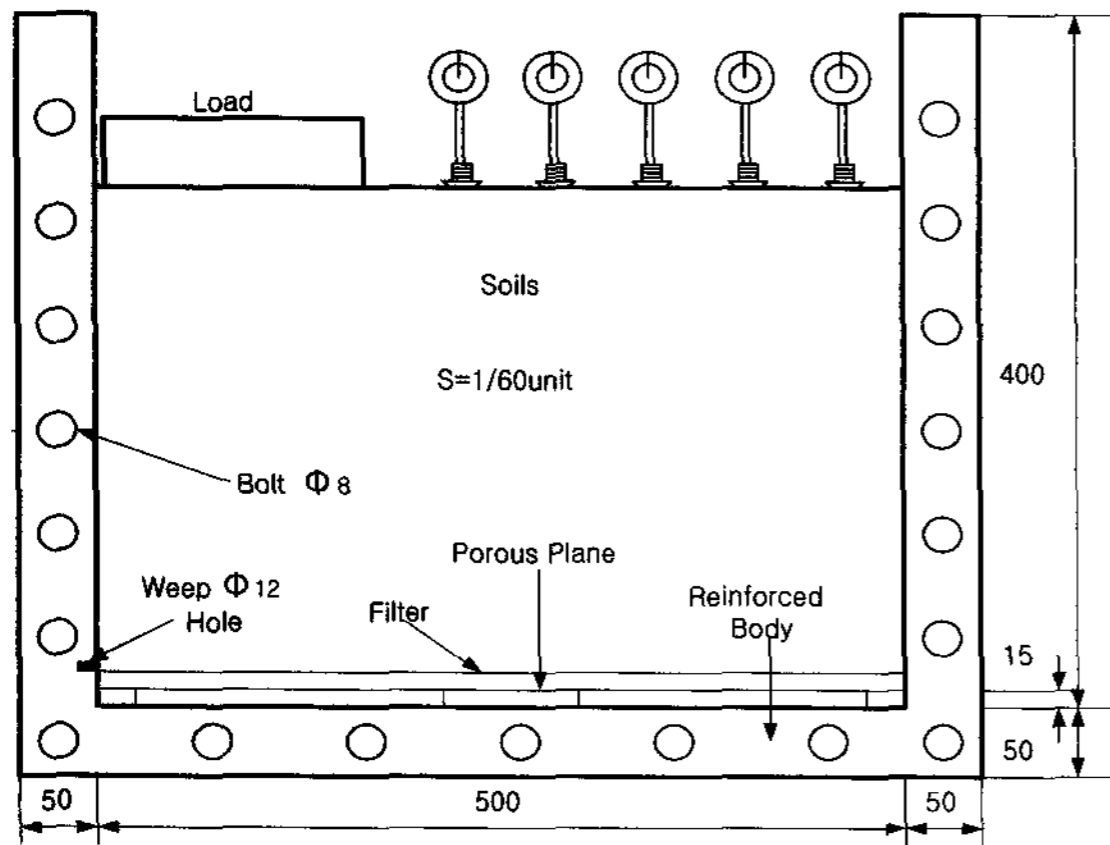


Fig. 4. Front view of model test apparatus (mm)

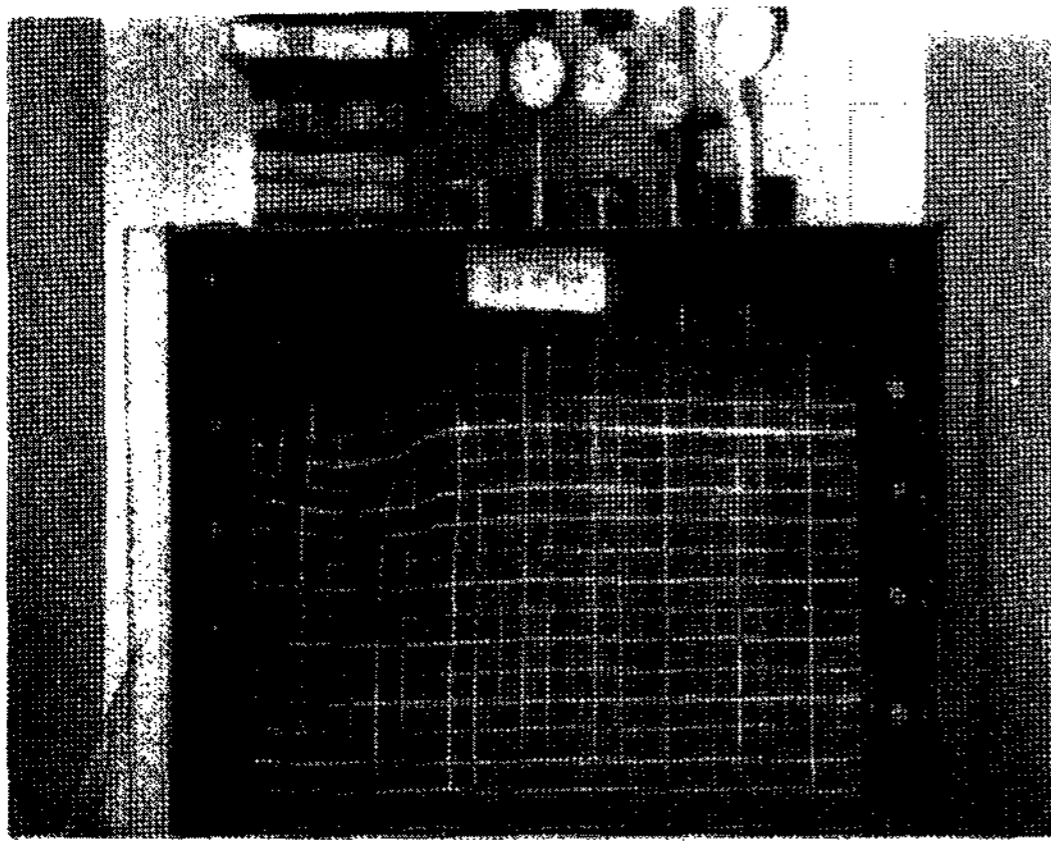


Fig. 5. The photograph during model test

모형실험에서 하중에 의한 오염지반내의 토립자의 변위형태를 변위벡터로써 도시한 것이다.

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 공학적 특성

다음 Table 2는 연약지반과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 모형실험에 사용된 시료의 공학적 특성을 나타낸 것이다. 오염물질의 함량이 증대할수록 함수비와 비배수전단강도는 적어지는데, 이는 오염물질의 영향으로 지반의 소성화가 촉진되어 지반의 강도특성은 감소하는 것으로 사료된다.

4.2 한계하중의 결정

다음 Table 3의 연약한 실트지반과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중 값은 모형실험에 의한 하중-침하량곡선(q_0-S_v), 상용대수 하중-침하량곡선($\text{Log}q_0-\text{Log}S_v$)과 침하량-측방변위량곡선(S_v-Y_m) 및 하중-하중/측방변위량비의 곡선($q-q/Y_m$)관리도에서 구한 값을 평균해서 산출하였다.

Table 4는 연약한 실트지반의 모형실험에 의해 결정된 한계하중을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 6은 모형실험에서 얻어진 Table 3의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식 (1)과 같이 Darragh의 제안식과 Terzaghi의 제

Table 2. The physical properties of model soils

Result	Soil No.	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100	-	-
		ML _p 000	ML _p 020	ML _p 040	ML _p 060	ML _p 080	ML _p 100	ML _p 120	ML _p 140
Moisture content (%)		30.06	32.51	35.18	37.92	42.30	46.84	-	-
		44.51	44.23	44.04	43.55	43.37	42.89	42.52	41.76
Void ratio		0.77	0.82	0.88	0.95	1.03	1.12	-	-
		0.94	0.96	0.97	1.03	1.12	1.13	1.17	1.22
Compression index		0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	0.31	-	-
		0.44	0.43	0.42	0.42	0.39	0.37	0.36	0.34
Undrained shear strength (kPa)		19.03	6.37	4.90	3.33	1.28	0.59	-	-
		5.98	5.49	4.81	4.31	4.02	3.82	3.43	3.24

Table 3. Critical surcharge of model tests (ML, ML_p) (q_{cr} , kPa)

Soil Name	Soil No.	000	020	040	060	080	100	120	140
ML		79.43	28.93	21.08	8.83	7.55	4.51	-	-
ML _p		17.36	15.10	12.85	12.06	10.69	10.00	10.00	5.88

안식 보다 약간 큰 경향을 나타내고 있다. 따라서 연약한 실트지반의 한계하중 결정은 Darragh의 제안식보다 약간 큰 값을 적용한다면 합리적인 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

$$q_{cr}=4.14c_u \quad (1)$$

Table 5는 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 모형실험에 의해 결정된 한계하중을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7은 모형실험에서 얻어진 Table 3의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식 (2)와 같이 Tschebotarioff의 제안식과 Meyerhof의 제안식의 중간 정도를 나타내고 있어, 모형실험에 의한 한계하중의 결

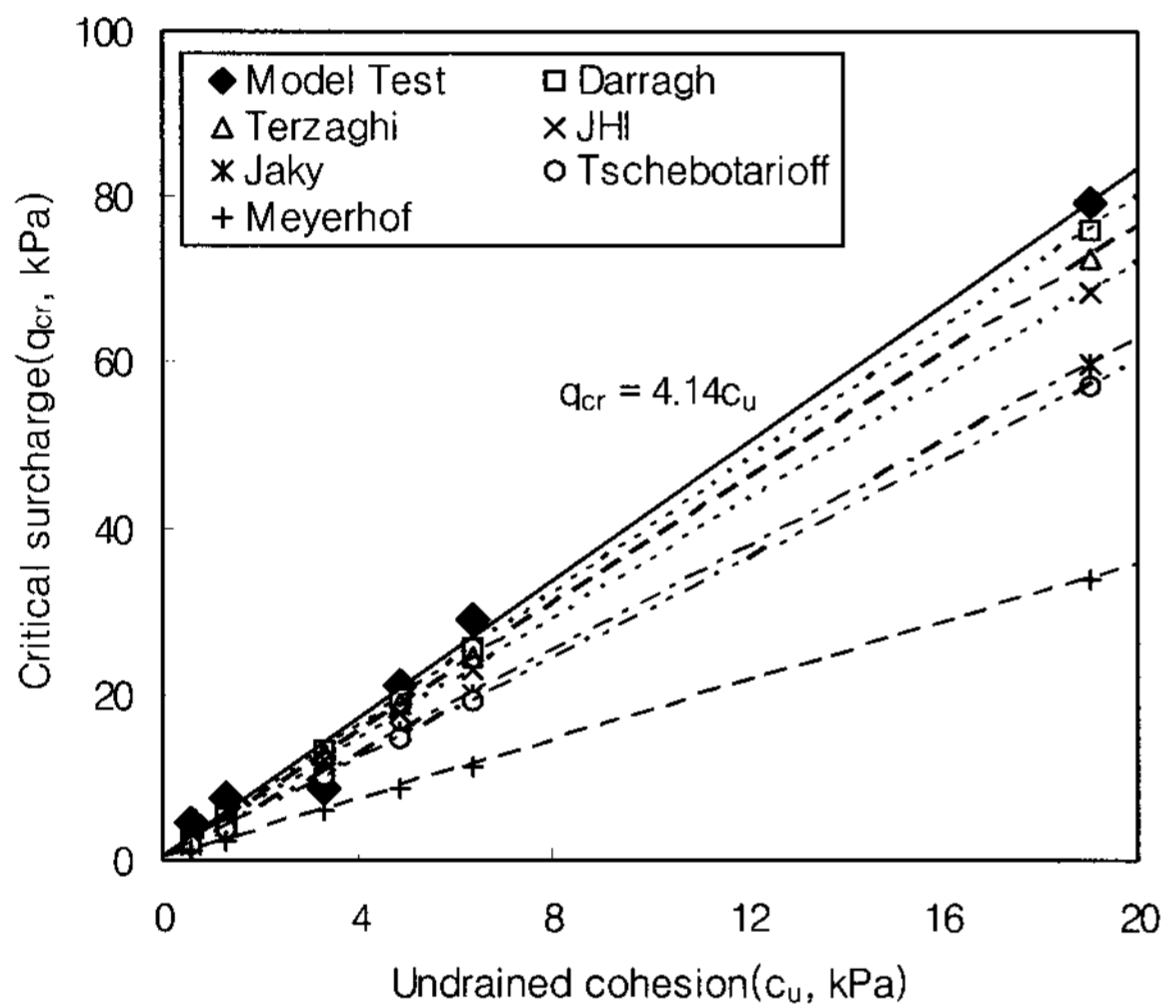


Fig. 6. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML)

Table 4. Comparison of critical surcharge (ML) (q_{cr} , kPa)

Soil No	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100
Model test	79.43	28.93	21.08	8.83	7.55	4.51
Darragh	76.10	25.50	19.61	13.43	5.10	2.35
Terzaghi	72.47	24.32	18.73	12.75	4.90	2.26
JHI	68.45	22.95	17.65	11.96	4.61	2.16
Jaky	59.72	20.01	15.40	10.49	4.02	1.86
Tschebotarioff	57.07	19.12	14.71	10.00	3.82	1.77
Meyerhof	33.83	11.38	8.73	5.98	2.26	1.08

Table 5. Comparison of critical surcharge (ML_p) (q_{cr} , kPa)

Soil No	ML_p000	ML_p020	ML_p040	ML_p060	ML_p080	ML_p100	ML_p120	ML_p140
Darragh	23.93	21.97	19.22	17.26	16.08	15.30	13.73	12.94
Terzaghi	22.75	20.89	18.34	16.48	15.30	14.61	13.04	12.36
JHI	21.57	19.81	17.26	.9	14.51	13.73	12.36	11.67
Jaky	18.83	17.26	15.10	13.53	12.65	12.06	10.79	10.20
Tschebotarioff	17.95	16.48	14.42	12.94	12.06	11.47	10.30	9.71
Model test	17.36	15.10	12.85	12.06	10.69	10.00	10.00	5.88
Meyerhof	10.69	9.81	8.53	7.65	7.16	6.77	6.08	5.79

정에 대한 타당성을 입증하였다. 이는 오염물질 함량의 증가에 의한 지반내 소성화의 경향이 훨씬 빨라지고 있으며, 변위량의 급격한 증가에 기인한 것으로 사료된다.

$$q_{cr}=1.78c_u \quad (2)$$

4.3 극한지지력의 결정

다음 Table 6은 연약한 실트지반과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 모형실험 결과에서 나타난 극한지지력을 나타낸 것이다.

Table 7은 연약한 실트지반의 모형실험에 의해 결정된 극한지지력을 기존의 제안식에 의하여 산정한 값과

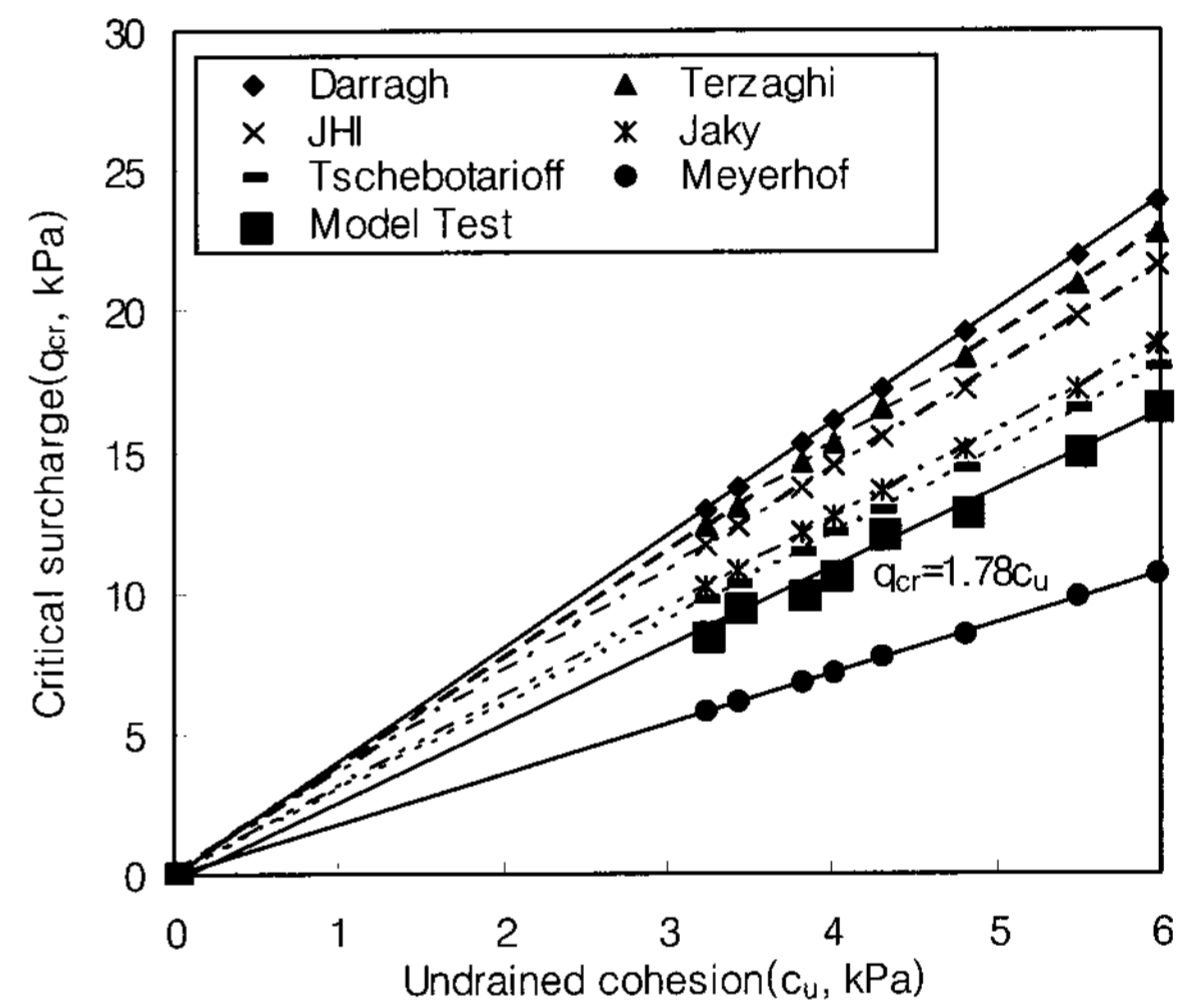


Fig. 7. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML_p)

비교하여 나타낸 것이며, Fig. 8은 Table 6과 같이 모형 실험에 의해 결정된 극한지지력을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다.

극한지지력의 실험값은 다음 식 (3)과 같이 이론식에 의한 극한지지력 산정값에 비해 다소 큰 값을 나타내었다. 이는 실트가 가지고 있는 불규칙적인 입도배합과 함수량의 증가로 인하여 지반내의 소성화가 급진적으로 촉진되고 있는 것에 기인한 것으로 사료된다.

$$q_{ult} = 9.53c_u \quad (3)$$

Table 8은 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 모형실험에 의해 결정된 극한지지력을 기존의 제안식에 의하여 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 9는 Table 6과 같이 모형실험에 의해 결정된 극한지지

력을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. 이와 같이 모형실험에 의한 극한지지력 값을 배수전단강도와의 관계에서 회귀 분석에 의해 직선식으로 나타내면 식 (4)와 같이 표시 할 수 있으며, Prandtl의 제안값에 근접함을 보였다.

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

$$q_{ult} = 4.39c_u \quad (4)$$

4.4 한계하중과 극한지지력 분석

Fig. 10과 Fig. 11은 연약한 실트지반과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반에 대한 측방유동이 발생

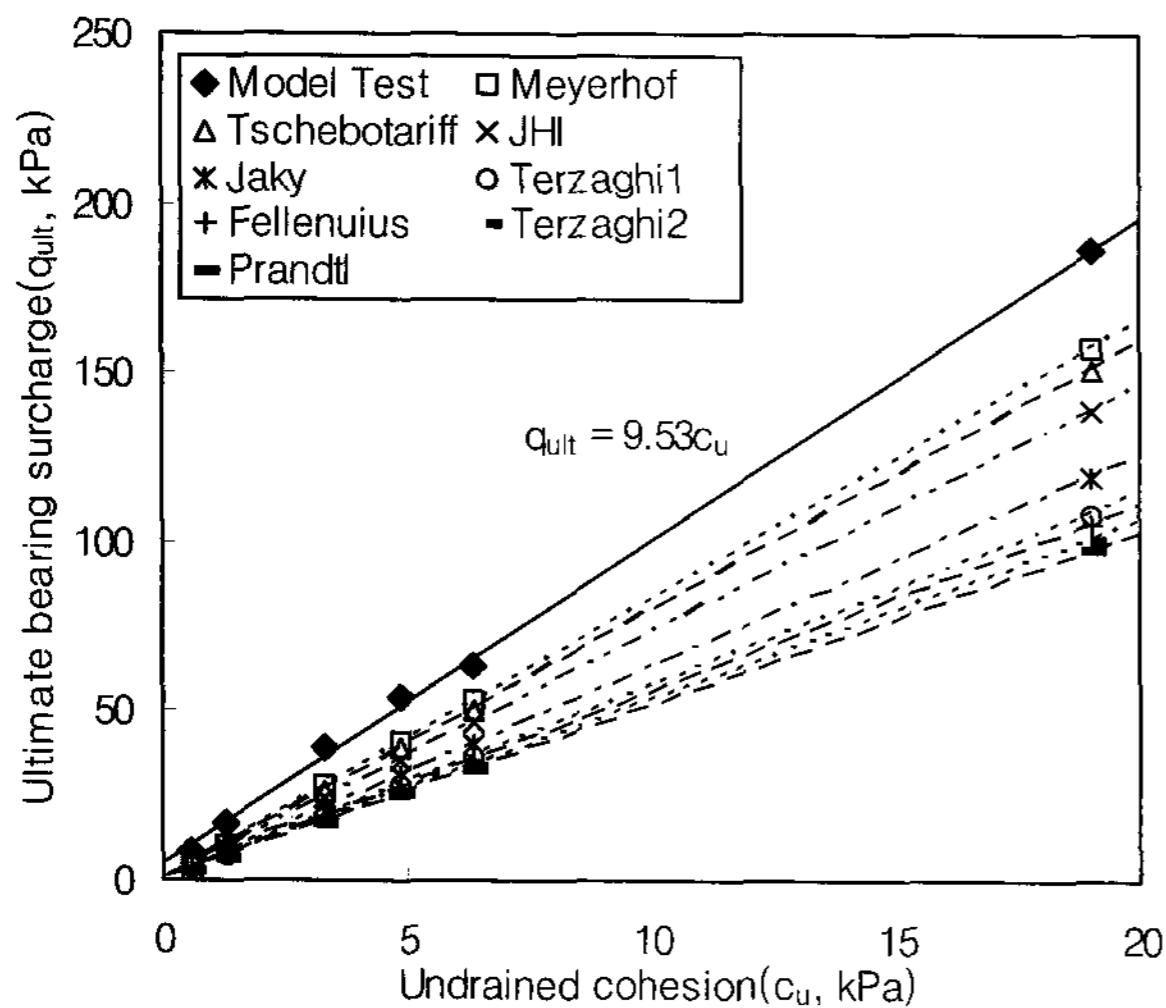


Fig. 8. Relations of undrained cohesion & ultimate bearing capacity (ML)

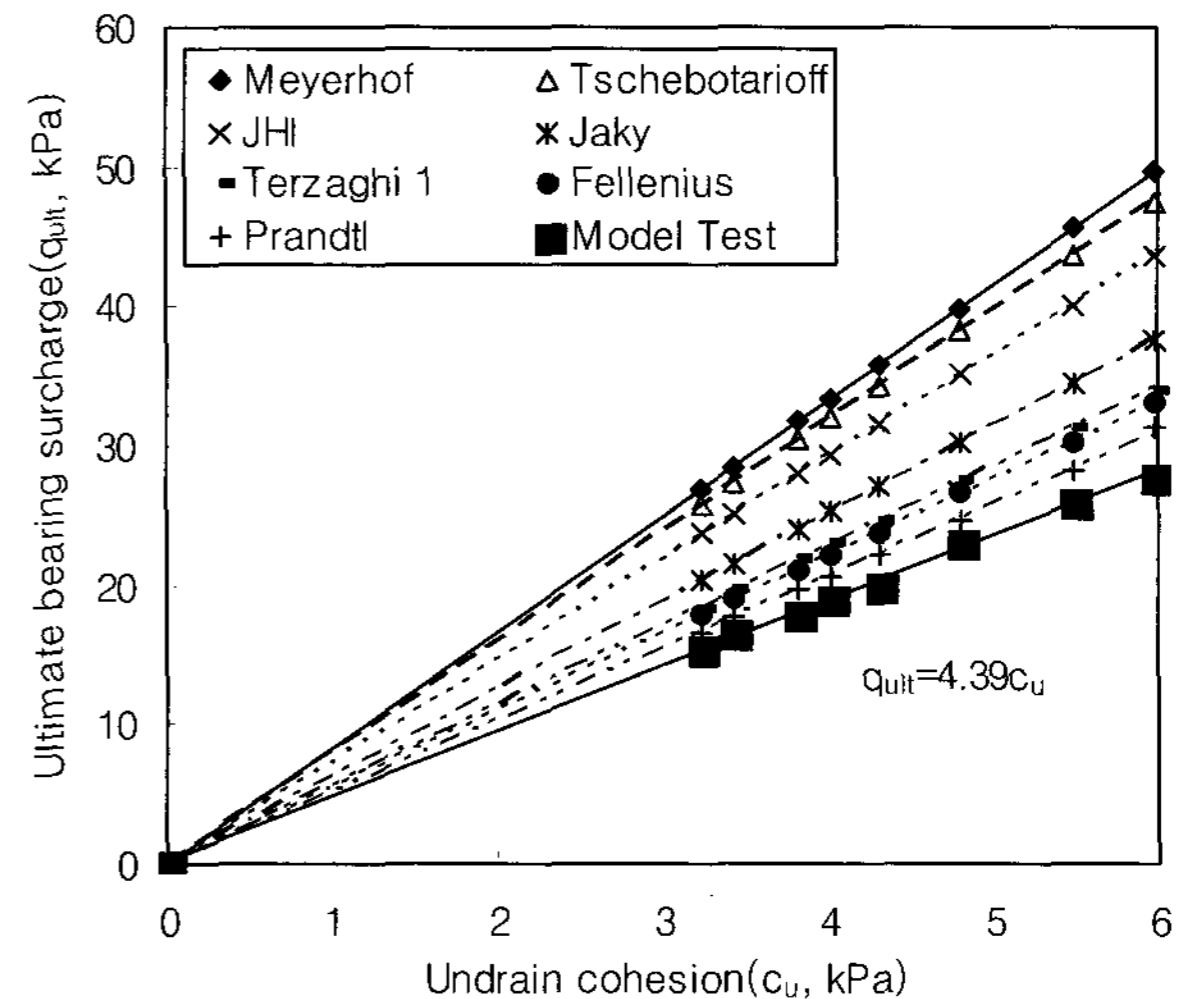


Fig. 9. Relations of undrained cohesion & ultimate bearing capacity (ML_p)

Table 6. Ultimate bearing capacity of model tests (ML, ML_p) (q_{ult}, kPa)

Soil No.	000	020	040	060	080	100	120	140
ML	186.63	63.74	53.94	39.23	16.97	8.83	-	-
ML _p	27.75	27.07	23.44	22.65	21.77	19.22	19.12	13.63

Table 7. Comparison of ultimate bearing capacity (ML) (q_{ult}, kPa)

Soil No	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100
Model test	186.33	63.74	53.94	39.23	16.97	8.83
Meyerhof	157.89	52.86	40.70	27.65	10.59	4.90
Tschebotarioff	151.22	50.70	39.03	26.48	10.10	4.71
JHI	138.86	46.58	35.79	24.32	9.32	4.31
Jacky	119.44	40.01	30.79	20.99	8.04	3.73
Terzaghi 1	108.66	36.38	28.05	19.02	7.26	3.33
Fellenius	105.03	35.21	27.07	18.44	7.06	3.24
Terzaghi 2	100.81	33.83	25.99	17.65	6.77	3.14
Prandtl	97.77	32.75	25.20	17.16	6.57	3.04

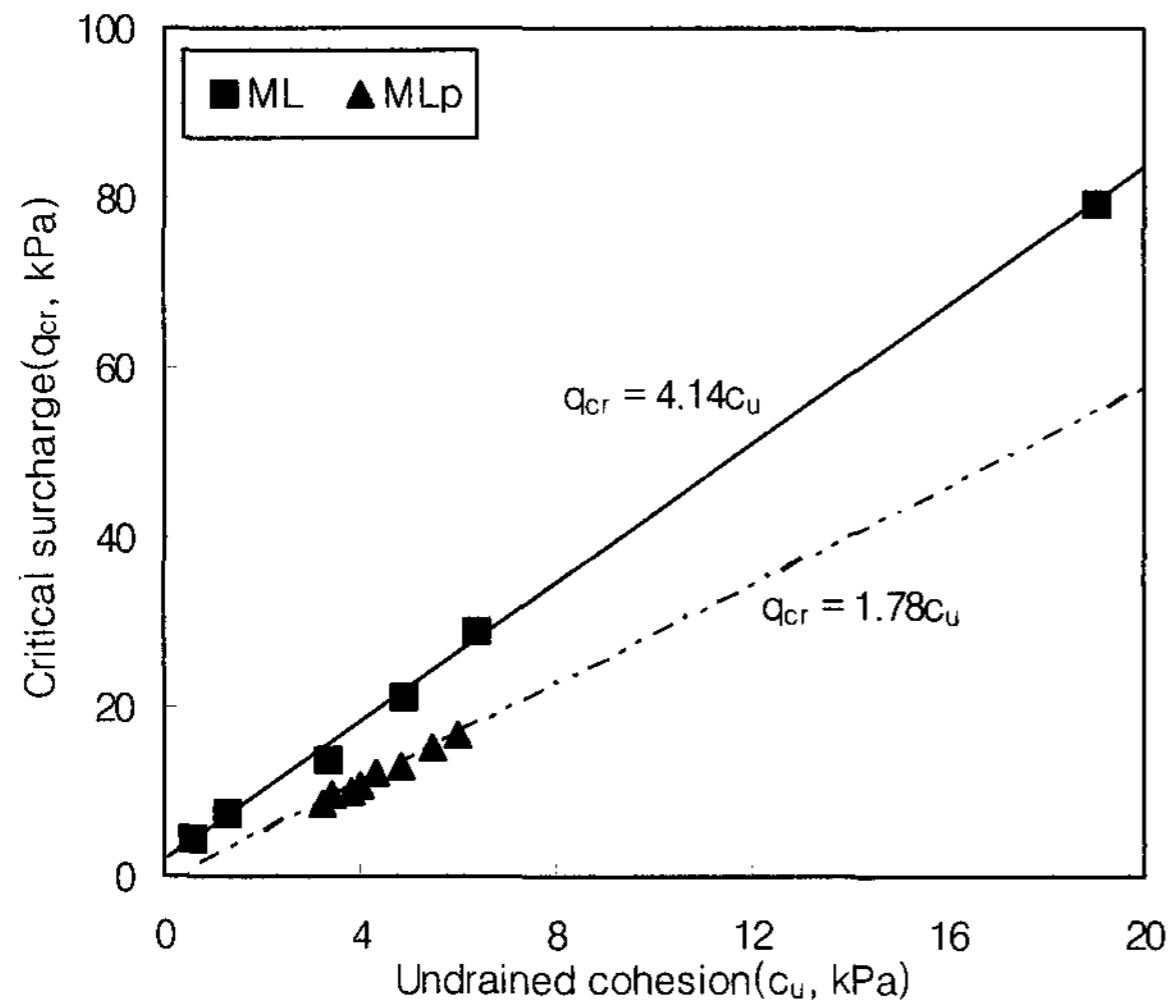


Fig. 10. Relations of undrained cohesion & critical surcharge (ML, ML_p)

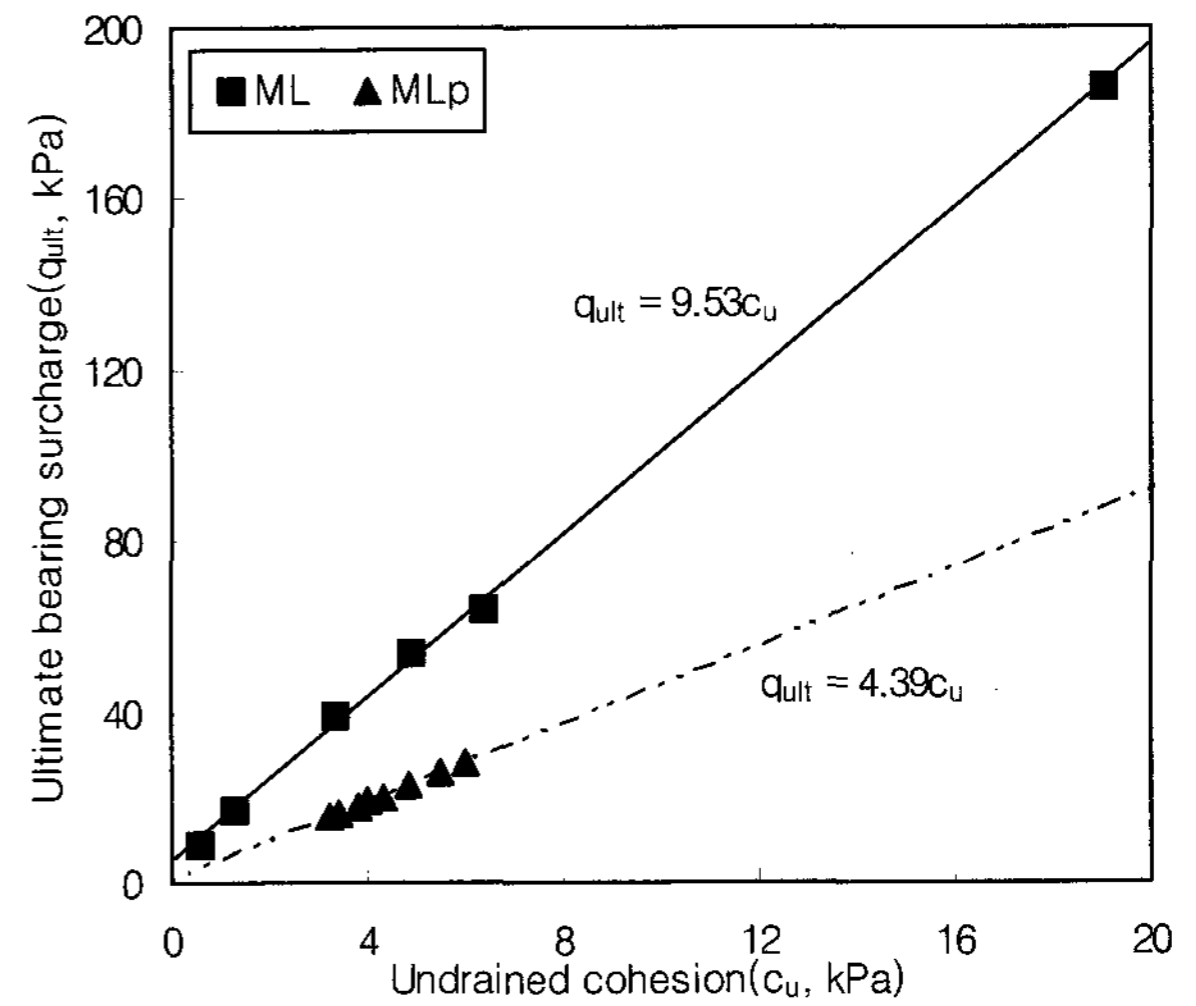


Fig. 11. Relations of undrained cohesion & ultimate bearing capacity (ML, ML_p)

Table 8. Comparison of ultimate bearing capacity (ML_p) (q_{ult}, kPa)

Soil No	ML _p 000	ML _p 020	ML _p 040	ML _p 060	ML _p 080	ML _p 100	ML _p 120	ML _p 140
Meyerhof	49.62	45.60	39.91	35.79	33.34	31.77	28.54	26.87
Tschebotarioff	47.56	43.64	38.25	34.32	31.97	30.40	27.26	25.69
JHI	43.64	40.11	35.11	31.48	29.32	27.95	25.11	23.63
Jacky	37.56	34.52	30.20	27.07	25.30	24.03	21.57	20.30
Terzaghi 1	34.13	31.38	27.46	24.61	22.95	21.87	19.61	18.44
Fellenius	33.05	30.30	26.58	23.83	22.16	21.08	18.93	17.85
Terzaghi 2	31.68	29.13	25.50	22.85	21.28	20.30	18.24	17.16
Prandtl	31.28	28.24	24.71	22.16	20.69	19.71	17.65	16.67
Model test	27.75	27.07	23.44	22.65	21.77	19.22	16.50	15.50

하기 시작하는 시점의 한계하중과 극한지지력을 나타낸 것이다.

연약한 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=4.14c_u$ 이고, 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=1.78c_u$ 로 연약한 실트지반의 한계하중 보다 작게 나타났다. 또한 연약한 실트지반의 극한지지력 $q_{ult}=9.53c_u$ 이고, 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 극한지지력 $q_{ult}=4.39c_u$ 로 연약한 실트지반의 극한하중 보다 작게 나타났다. 이는 오염되지 않은 상태의 한계하중과 극한지지력 값에 비해 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중과 극한지지력 값은 오염물질의 증가로 인하여 토립자 사이의 윤택작용으로 전단강도가 감소하고, 지반내 소성화가 빨라지면서 지지력이 감소한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 연약한 실트지반(ML)과 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반(ML_p)에 대해서 모형실험을 실시하였고, 실험 결과로부터 얻어진 모형지반의

지지력을 기존 이론식과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반은 오염물질 함량이 점차 증대할수록 오염물질의 영향으로 연약한 실트지반 보다 지반의 소성화가 촉진되어 지반의 강도특성은 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 연약한 실트지반의 한계하중 값 $q_{cr}=4.14c_u$ 로 Darragh의 제안식보다 약간 큰 값을 적용한다면 합리적인 결과를 얻을 수 있으리라 사료되며, 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 한계하중 값 $q_{cr}=1.78c_u$ 로 Tschebotarioff의 제안식을 적용한다면 합리적인 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.
- (3) 연약한 실트지반의 극한지지력 값 $q_{ult}=9.53c_u$, 생활오폐수와 공장폐유로 오염된 실트지반의 극한지지력 값 $q_{ult}=4.39c_u$ 로 연약한 실트지반의 극한지지력 보다 다소 작게 나타났다. 이는 오염물질의 증가로 인하여 전단저항이 저하되므로써 다소 작은 값을 나타낸 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박상범 (2004), *연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 측방유동에 관한 연구*, 박사학위논문, 조선대학교 대학원, pp.1-114.
2. 신은철, 이재범 (1997), “원유로 오염된 지반의 역학적 특성”, *한국지반공학회지*, 한국지반공학회, 제13권, 제6호, 12월, pp.37-43.
3. 안중필 (1993), “편재하중을 받는 연약지반의 측방유동에 관한 연구”, *지질공학(대한지질공학회지)*, 대한지질공학회, 제3권, 제2호, 9월, pp.177-190.
4. 안중필, 홍원표 (1994), “측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, 한국지반공학회, 제10권, 제2호, 6월.
5. 안중필, 김병호, 박상범 (1998), “오염지반의 측방유동압 산정에 관한 연구”, *학술발표회논문집*, 대한토목학회, 10월, pp.237-240.
6. 홍원표 (1983), “수평력을 받는 말뚝”, *대한토목학회지*, 대한토목학회, 제31권, 제5호, 10월, pp.32-36.
7. 赤井浩一 (1964), *土の支持力と沈下*, 山海堂, 日本, 東京, pp.25-42.
8. 土質工學會 (1979), “土と基礎の沈下と變形の解析方法, 土の沈下と變形の實態と豫測”, *日本土質工學會*, pp.3-58.
9. 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.
10. 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.
11. Das, B. M. (1984), *Principles of foundation engineering*, Brooks/Cole Engineering division, Monterey, California, pp.101~206.
12. Tavenas, F., Mieussens, C. & Bourges, F. (1979), “Lateral displacements in clay foundations under embankments”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.532-550.
13. Tavenas, F. & Leroueil, S. (1980), “The behaviour of embankments on clay foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, pp. 236-260.
14. Tschebotarioff, G.P. (1962), *Chapter 5 on Retaining structures in foundation engineering (editor-Leonards)*, McGraw-Hill, New York, pp.486-496.
15. Tschebotarioff, G.P. (1973), *Foundations, retaining & earth structures*, McGrawHill, Kogakusha, Tokyo, pp.389-414.

(접수일자 2007. 4. 2, 심사완료일 2008. 3. 7)