

연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 지지력 결정

Determination of the Bearing Capacity of Soft and Polluted Silt Soils

안종필¹⁾, Jong-Pil Ahn, 박상범²⁾, Sang-Bum Park, 박경호³⁾, Kyung-Ho Park, 유덕찬⁴⁾, Deog-Chan Yu

¹⁾ 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun University

²⁾ (주) 삼보기술단 지반부 과장 공학박사, Senior Engineer, Ph.D, Sambo Engineering Co., Ltd

³⁾ (주) 아이엠기술단 연구원 공학박사, Researcher, Ph.D, IAM Co., Ltd

⁴⁾ 조선대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Chosun University

SYNOPSIS : In this study, model tests of soft silt soils(ML) and silt soils was polluted with wastewater and waste oil from factories(ML_p). Distribution of displacement, bearing capacity comparing the test results with existing theoretical expressions and analyzing the test results, the following conclusions were obtained.

It was found out that in soft silt soils the relationship of critical surcharge and undrained cohesion is $q_{cr}=4.14C_u$ and polluted silt soils ML_p those are $q_{cr}=1.78C_u$, respectively and the relationship of ultimate capacities $q_{ult}=9.53C_u$ and undrained cohesion in polluted silt soils are $q_{ult}=4.39C_u$. Critical surcharge and ultimate capacity is less in polluted silt soils than in soft silt soils.

Key words : polluted silt soils, wastewater, bearing capacity, ultimate capacity

1. 서 론

국토의 효율적이고 균형적인 발전을 위하여 지반이 양호한 지역뿐만 아니라 지반조건이 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. 이러한 오염물질이 지반으로 유입되면서 흙의 물리적 성질인 일축압축강도(q_u), 비배수전단강도(C_u), 지반계수(E_s), 지반반력계수(K_h) 등의 변화에 직접적인 영향을 미친다는 것이다. 연약지반과 오염물질이 함유된 오염지반의 공학적 성질은 매우 복잡한 특성을 가지고 있으며, 지반의 강도가 작고 특히 심도가 클 때는 침하나 측방유동과 같은 변형이 크게 발생되므로, 안정적이고 경제적으로 설계하고 관리하기 위해서는 해당되는 연약지반과 오염지반의 공학적 성질을 정확히 분석하여야 하며 지반개량시 필요한 제반 대책들이 충분히 강구되어야 한다.

본 연구에서는 모형실험용 재하장치를 제작하고, 단계별로 $0.05\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하의 단위 하중을 재하하면서 측방유동에 관련된 모형실험을 실시하였다. 모형실험에 필요한 시료는 연약한 실트지반에 대하여 함수량을 일정하게 증가시키면서 조성하였고, 오염된 실트지반의 시료는 연약한 실트지반에 오염물질을 혼합하여 조성하였다. 조제된 시료를 토조내에 거치한 후 편재하중을 재하하여 모형실험을 실시하고, 모형실험결과를 통하여 물리적 특성의 변화에 따른 연약한 실트지반의 지지력과 오염된 실트지반의 지지력의 변화 등에 대한 실제의 적용성을 기존의 연구결과와 비교·분석하여 지반의 변화에 대한 안전설계를 도모하고자 하는데 목적이 있다.

2. 모형실험에 의한 극한지지력

2.1 극한지지력의 이론적 고찰

연약지반에 성토나 구조물 등의 하중이 작용하게 되면 초기단계에서는 탄성적인 거동에 의한 침하가 발생하지만, 하중의 증가에 따라 재하면 하부의 지반은 이등변삼각형분포의 흠뻑기가 압축되면서 점차 소성의 상태로 이전되어 가게 된다. 이와 같이 지반이 탄성상태에서 소성상태로 바뀌어지는 시점의 하중 값을 한계하중(항복응력)이라고 규정하였고, 赤井(1964)과 Tschebotarioff(1962, 1973) 등은 지반중에 소성변형이 시작되는 시점의 하중을 한계하중으로 규정하였다. 극한하중은 한계하중을 초과하여 더욱 하중을 증가시키면 지반의 소성평형에 의한 전단파괴가 이루어질 때의 하중을 극한하중이라고 하고, 구조물의 종류에 따라 적당한 안전율로 극한하중을 나눈 값이 허용지지력이다. 표 1은 지금까지 제안된 한계하중과 극한하중을 산정할 수 있는 이론식을 보여주고 있다.

표 1. 한계하중과 극한하중의 제안된 이론식

Proposer	Critical Surcharge	Ultimate 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	$q_{cr} = 4.00C_u$	-	-

모형실험에서의 한계하중과 극한하중의 값은 모형실험에 의한 하중-침하량곡선(q_0-S_v), 상용대수의 하중-침하량곡선($\text{Log}q_0-\text{Log}S_v$)과 침하량-측방변위량곡선(S_v-Y_m) 및 하중-하중/측방변위량비의 곡선($q-q/Y_m$) 관련도에서 구한 값을 평균해서 지지력 값을 산출할 수 있다. 결정된 값은 기존의 제안식에 의해서 산정된 값과 비교하여 값을 검증하였다. 여기서, C_u 는 점토의 비배수강도, B는 재하폭, H는 토층의 두께를 나타낸다.

2.2 오염물질이 지반거동에 미치는 영향

물이 아닌 액상의 화합물을 NAPL(Nonaqueous Phase Liquid)이라고 하고, NAPL은 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.

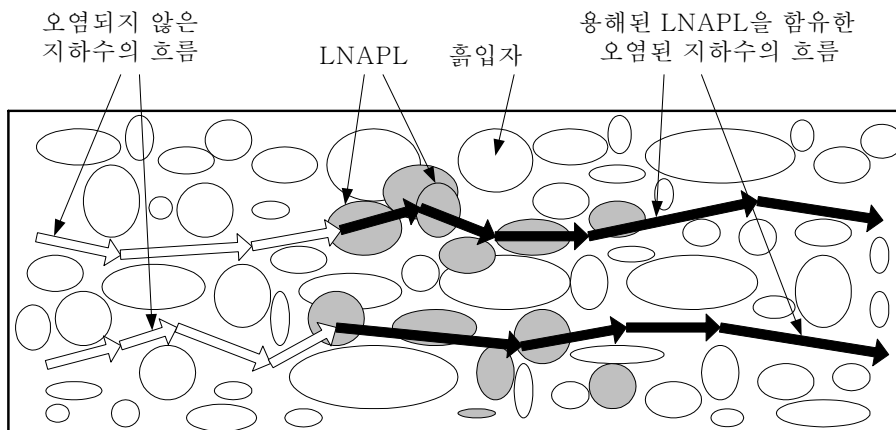


그림 1. 지하수의 흐름에 따른 LNAPL의 확산

인위적으로 만들어진 화합물 중에서 토양에서 오염물질로 작용하는 가장 대표적인 DNAPL은 PCB (Polychlorinated Biphenyl), TCE(Trichloroethene), Chlorophenols 등이다. NAPL은 단일 화합물이거나 여러 가지 화합물이 혼합된 것이다. 연약지반에 이와 같은 오염물질이 혼입되게 되면 지반중 토립자의 소성화는 크게 증가되어 측방유동을 더욱 촉진시키고 그로 인해 구조물의 안정이 위태롭게 된다.

그림 1은 매립지의 오염물질 즉 침출수가 지하수의 흐름을 따라 이동하여 오염범위를 확산시키는 현상을 나타낸다. 지하수의 유속이 빠르고 간극률이 큰 경우 LNAPL의 용해도 빠르게 진행된다. 토립자에 흡착된 LNAPL(오염물질)은 흡입자로 부터 쉽게 떨어지지 않으므로 장기적인 지반오염을 초래하게 되고, 양수처리 공법(Pump-and-Treat)으로 지반정화를 시도 할 때 초기에는 오염농도가 많이 떨어지나, 시간이 지날수록 어떤 한계밑으로 떨어지지 않는 잔존현상(Tailing Effect)으로 지반오염이 장기화된다.

오염된 연약지반 위에 성토하중이 작용하면 과잉간극수압은 성토 중앙부의 하부지반에서 최대값을 나타내고, 성토사면의 선단부근에 가까워질수록 재하시간의 경과에 따라 증가되는 것으로 Peck(1969)은 설명하였다. 쓰레기 매립장의 침출수나 생활오폐수 및 공장폐수 등의 오염물질이 지하수와 복합되어 연약지반내로 유입되어 지반의 간극수압을 증가시키고, 지반중의 점착력이나 마찰력 등의 전단저항을 감소시킨다. 그렇게 되면 토립자의 소성유동이 크게 증가하여 과도한 침하량과 측방변위량 및 지표면 융기량을 확대하는 요인으로 오염물질의 유회작용에 의해서 연약지반의 전단저항에 의한 응력의 구속이 감소하므로서 변위량이 발생하게 되는 것이다. 이러한 오염된 연약지반은 복토설치 후 동다짐 공법이나 지반개량공법 등으로 침출수에 의한 소성유동을 감소시키고, 차량진동과 반복하중으로 인한 침출수와 간극수압의 유발에 따른 지반의 액상화 현상이 발생하기 쉬우므로 동다짐 및 내진설계를 고려하여 지반을 안정시켜야 한다.

2.3 모형실험 방법

모형실험은 먼저 모형실험재하장치(토조)를 제작하고, 함수량을 일정하게 증가시킨 6종류의 연약한 실트지반(ML)과 연약한 실트지반에 오염물질인 생활오폐수(삼푸, 린스, 옥시클린, 가루비누, 풍풍)와 자동차나 공장에서 사용된 중금속을 함유한 폐유를 혼합한 오염된 실트지반(ML_p)은 오염물질 함유량을 일정하게 증가시킨 8종류의 시료를 재성형 조성하여 모형실험을 실시하였다. 비배수조건하에서 일정한 시간간격으로 $q=0.05\text{kg/cm}^2$ 단위로 편재하중을 증가시켜 각각의 재하단계마다의 지반의 침하량과 측방변위량 및 융기량을 계측하여 기록하고, 단계별 실험과정을 사진촬영을 통해 분석하는 순서로 진행하였다. 연약지반 위에 편재하중이 작용하게 되면 하부지반에 응력이 증가하고 간극수압이 증가하여 활동파괴가 유발되는 변형거동을 모형실험을 통해 구현하고 분석함으로써 각 모형지반의 전반적인 지지력 특성을 규명하였다.

그림 2는 모형실험장치의 모식도이고, 그림 3은 모형실험과정을 사진으로 나타낸 것이다.

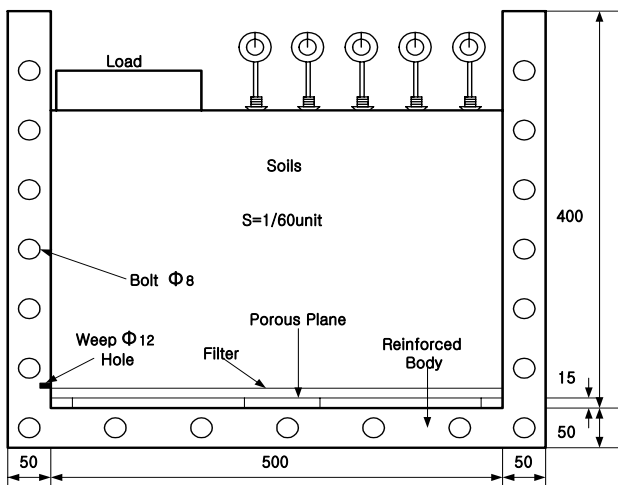


그림 2. 모형실험장치 모식도

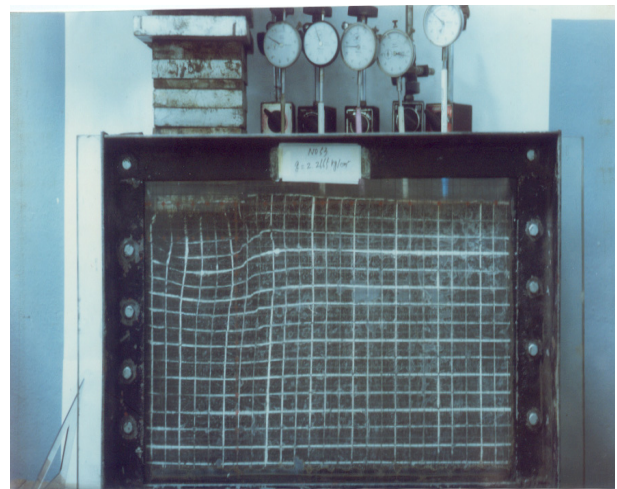


그림 3. 모형실험 사진

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 공학적 특성

모형실험에 사용하기 위해 채취된 시료에 대해서는 2mm 이상의 자갈 및 세편(細片)은 체로 쳐서 제거한 후 재성형하여 사용하였다. 다음 표 2~3은 연약지반과 모래 섞인 실트지반의 모형실험에 사용된 시료의 공학적 특성을 나타낸 것이다.

표 2. 연약한 실트지반의 공학적 특성

Soil No. Test Result	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100
W(%)	30.06	32.51	35.18	37.92	42.30	46.84
e	0.68	0.82	0.88	0.95	1.03	1.12
γ_s (kg/cm ³)	1.72	1.70	1.68	1.66	1.63	1.62
C_u (kg/cm ²)	0.194	0.065	0.050	0.034	0.013	0.006

연약한 실트지반의 함수량이 증가할수록 단위중량과 비배수전단강도 등은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 함수량이 증가함에 따라 간극수압의 증가로 인하여 지반의 소성화를 촉진시키며 함수량의 차이에 따라 전단강도의 저하가 현저함을 알 수 있다.

표 3. 오염된 실트지반의 공학적 특성

Soil No. Test Result	ML _p 000	ML _p 020	ML _p 040	ML _p 060	ML _p 080	ML _p 100	ML _p 120	ML _p 140
W(%)	44.51	44.23	44.04	43.55	43.37	42.89	42.52	41.76
e	0.94	0.96	0.97	1.03	1.12	1.13	1.17	1.22
γ_s (kg/cm ³)	1.70	1.68	1.66	1.62	1.58	1.55	1.53	1.51
C_u (kg/cm ²)	0.061	0.056	0.049	0.044	0.041	0.039	0.035	0.033

오염물질의 함량이 증대할수록 함수비와 단위중량, 비배수전단강도는 적어지지만, 간극비 만이 약간 증가한다. 이는 오염물질의 윤택작용에 의하여 지반의 소성화를 촉진시키는 것에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 한계하중

다음 표 4는 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 모형실험 결과에서 나타난 한계하중을 나타낸 것이다.

표 4. 모형실험 각 지반의 한계하중(q_{cr})(kg/cm²)

Soil No. Test Result	000	020	040	060	080	100	120	140
ML	0.810	0.295	0.215	0.090	0.077	0.046	-	-
ML _p	0.177	0.154	0.131	0.123	0.109	0.102	0.102	0.060

표 5와 그림 4는 연약한 실트지반의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 식(1)과 같이 Darragh의 제안식과 Terzaghi의 제안식 보다 약간 큰 경향을 나타내고 있다.

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

표 5. 기존 제안식에 의해 결정된 한계하중(ML)(q_{cr})(kg/cm^2)

Soil No	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100
Darragh	0.776	0.260	0.200	0.136	0.052	0.024
Terzaghi	0.739	0.248	0.191	0.130	0.050	0.023
JHI	0.698	0.234	0.180	0.122	0.047	0.022
Jaky	0.609	0.204	0.157	0.107	0.041	0.019
Tschebotarioff	0.582	0.195	0.150	0.102	0.039	0.018
Meyerhof	0.345	0.116	0.089	0.061	0.023	0.011
Model Test	0.810	0.295	0.215	0.090	0.077	0.046

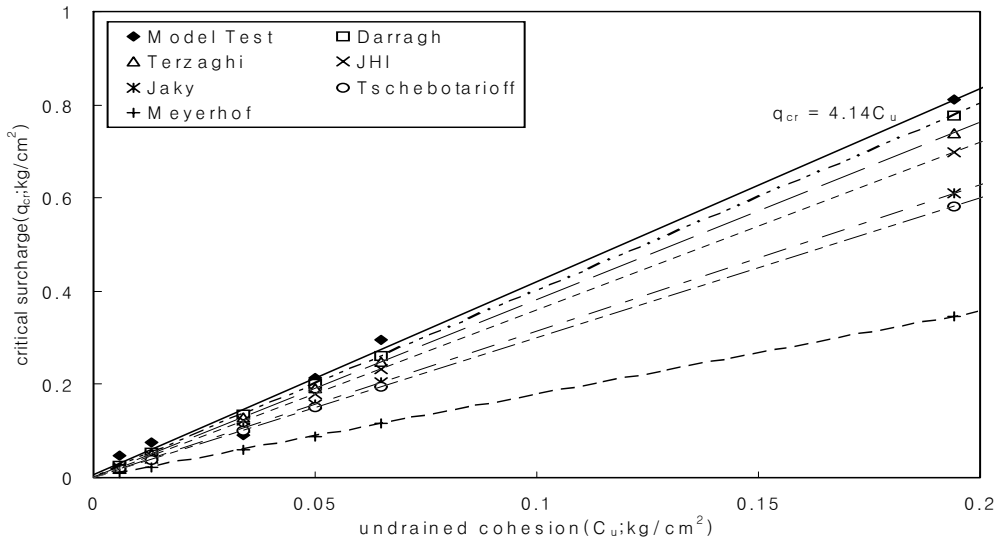


그림 4. 비배수전단강도 따른 한계하중(ML)

표 6. 기존 제안식에 의해 결정된 한계하중(ML_p)(q_{cr})(kg/cm^2)

Soil No	ML_p000	ML_p020	ML_p040	ML_p060	ML_p080	ML_p100	ML_p120	ML_p140
Darragh	0.244	0.224	0.196	0.176	0.164	0.156	0.140	0.132
Terzaghi	0.232	0.213	0.187	0.168	0.156	0.149	0.133	0.126
JHI	0.220	0.202	0.176	0.158	0.148	0.140	0.126	0.119
Jaky	0.192	0.176	0.154	0.138	0.129	0.123	0.110	0.104
Tschebotarioff	0.183	0.168	0.147	0.132	0.123	0.117	0.105	0.099
Model Test	0.177	0.154	0.131	0.123	0.109	0.102	0.102	0.060
Meyerhof	0.109	0.100	0.087	0.078	0.073	0.069	0.062	0.059

표 6과 그림 5는 오염된 실트지반의 한계하중을 비배수전단강도에 따라 나타낸 것으로 실험값은 다음 식(2)와 같다. 실험값은 Tschebotarioff의 제안식과 Meyerhof의 제안식의 중간 정도를 나타내고 있어, 모형실험에 의한 한계하중의 결정에 대한 타당성을 입증하였다. 이는 오염물질 함량의 증가에 의한 지반내 소성화의 경향이 훨씬 빨라지고 있으며, 변위량의 급격한 증가에 기인한 것으로 사료된다.

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

연약한 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=4.14C_u$ 나타났으며, 오염된 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=1.78C_u$ 로 나타났다. 오염된 실트지반의 한계하중은 오염물질에 의한 지반의 소성화로 인하여 연약한 실트지반의 한계하중에 비해 약 47% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

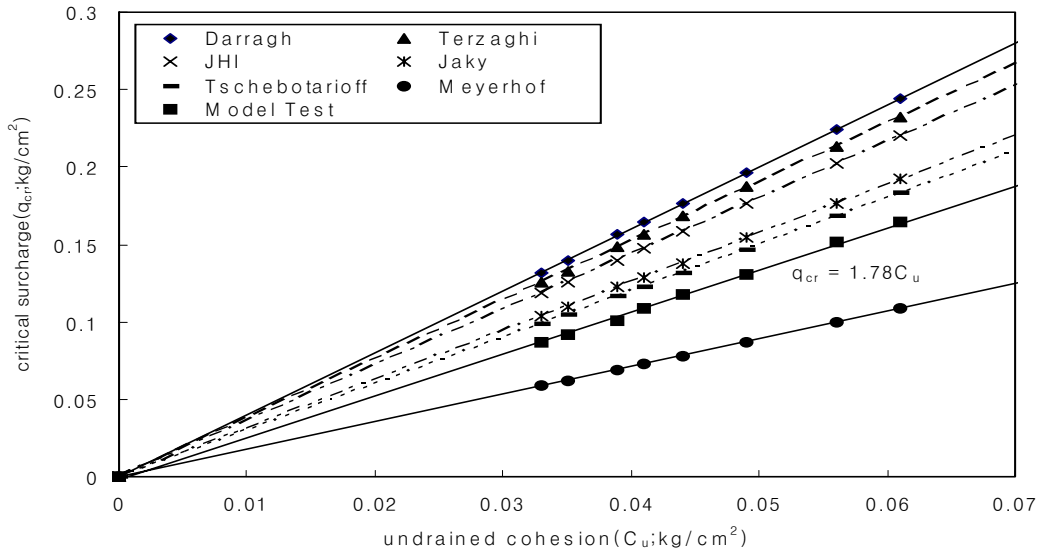


그림 5. 비배수전단강도 따른 한계하중(ML_p)

3.3 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 극한하중

다음 표 7은 연약한 실트지반과 오염된 실트지반의 모형실험 결과에서 나타난 극한하중을 나타낸 것이다.

표 7. 모형실험 각 지반의 극한하중(q_{ult})(kg/cm²)

Soil Name \ Soil No.	000	020	040	060	080	100	120	140
ML	1.900	0.650	0.550	0.400	0.173	0.090	-	-
ML _p	0.283	0.276	0.239	0.231	0.222	0.196	0.195	0.139

표 8. 기존 제안식에 의해 결정된 극한하중(ML)(q_{ult})(kg/cm²)

Soil No	ML000	ML020	ML040	ML060	ML080	ML100
Meyerhof	1.610	0.539	0.415	0.282	0.108	0.050
Tschebotarioff	1.542	0.517	0.398	0.270	0.103	0.048
JHI	1.416	0.475	0.365	0.248	0.095	0.044
Jacky	1.218	0.408	0.314	0.214	0.082	0.038
Terzaghi 1	1.108	0.371	0.286	0.194	0.074	0.034
Fellenius	1.071	0.359	0.276	0.188	0.072	0.033
Terzaghi 2	1.028	0.345	0.265	0.180	0.069	0.032
Prandtl	0.997	0.334	0.257	0.175	0.067	0.031
Model Test	1.900	0.650	0.550	0.400	0.173	0.090

표 8과 그림 6은 모형실험에 의해 결정한 극한하중을 기존의 제안식으로 산정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. 연약한 실트지반의 극한하중값은 다음 식(3)과 같이 이론식에 의한 극한하중 산정값에 비해 다소 큰 값을 나타내었다. 이는 실트가 가지고 있는 불규칙적인 입도배합과 함수량의 증가로 인하여 지반내의 소성화가 급진적으로 촉진되고 있는 것에 기인한 것으로 사료된다.

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

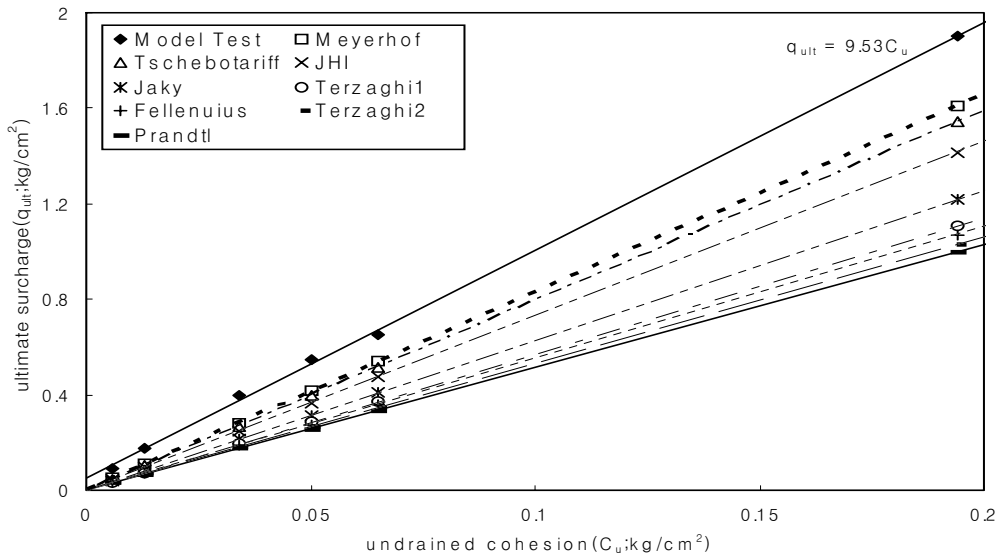


그림 6. 비배수전단강도 따른 극한하중(ML)

표 9. 기존 제안식에 의해 결정된 극한하중(ML_p)(q_{ult})(kg/cm²)

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	0.506	0.465	0.407	0.365	0.340	0.324	0.291	0.274
Tschebotarioff	0.485	0.445	0.390	0.350	0.326	0.310	0.278	0.262
JHI	0.445	0.409	0.358	0.321	0.299	0.285	0.256	0.241
Jacky	0.383	0.352	0.308	0.276	0.258	0.245	0.220	0.207
Terzaghi 1	0.348	0.320	0.280	0.251	0.234	0.223	0.200	0.188
Fellenius	0.337	0.309	0.271	0.243	0.226	0.215	0.193	0.182
Terzaghi 2	0.323	0.297	0.260	0.233	0.217	0.207	0.186	0.175
Prandtl	0.319	0.288	0.252	0.226	0.211	0.201	0.180	0.170
Model Test	0.283	0.276	0.239	0.231	0.222	0.196	0.195	0.139

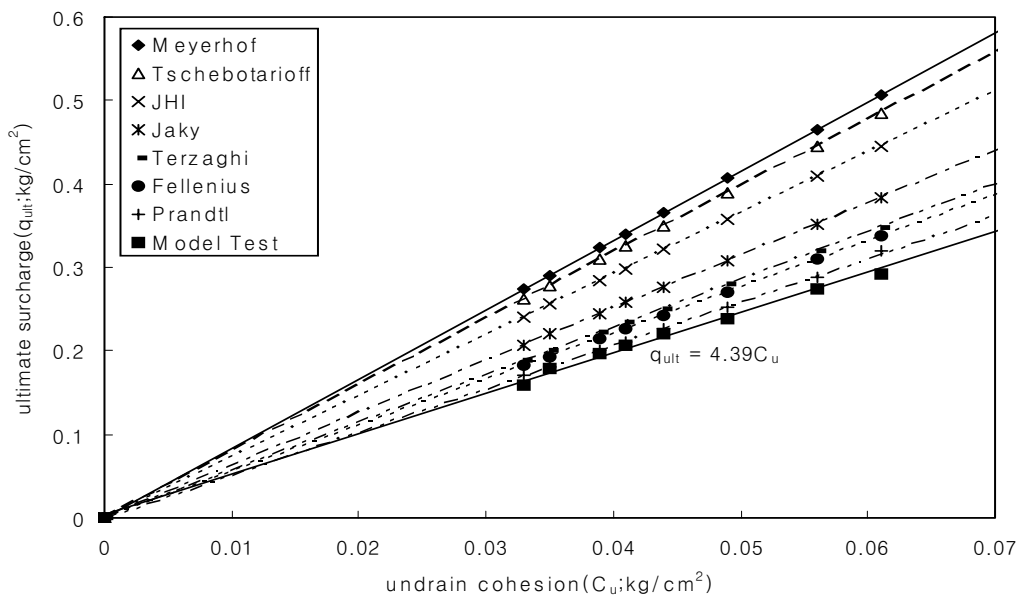


그림 7. 비배수전단강도 따른 극한하중(ML)

표 9와 그림 7은 모형실험에 의해 산정한 극한하중을 기존의 제안식으로 결정한 값과 비교하여 나타낸 것으로, 오염된 실트지반의 극한하중값은 제안식의 최소값인 Prandtl의 제안식과 비슷한 경향을 나타내어 Prandtl의 제안식에 대한 합리성을 보여주고 있다. 이는 실트가 가지고 있는 불규칙적인 입도배합과 오염물질의 증가로 인하여 지반의 소성화가 급진적으로 촉진되고 있는 것에 기인한 것으로 사료된다.

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

연약한 실트지반의 극한하중 $q_{ult}=9.53C_u$ 로 나타났으며, 오염된 실트지반의 극한하중 $q_{ult}=4.39C_u$ 로 다소 작은 값을 나타내고 있다. 이는 오염된 실트지반의 극한하중은 생활오폐수와 공장 폐유를 혼합한 오염물질이 지반속으로 유입되어 유효효과로 인하여 연약한 실트지반의 극한하중에 비해 약 44% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 연약한 실트지반(ML)과 생활오폐수와 공장 폐유를 혼합한 오염된 실트지반(ML_p)에 대해서 모형실험을 실시하였고, 실험 결과로부터 얻어진 모형지반의 지지력을 기존 이론식과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연약한 실트지반의 한계하중 $q_{cr}=4.14C_u$ 나타났으며, 오염된 실트지반의 한계하중은 오염물질에 의한 지반의 소성화로 인하여 한계하중 $q_{cr}=1.78C_u$ 로 나타나 연약한 실트지반의 한계하중 보다 다소 작게 산정 되었다.
2. 연약한 실트지반의 극한하중 $q_{ult}=9.53C_u$ 로 나타났으며, 오염된 실트지반의 극한하중 $q_{ult}=4.39C_u$ 로 연약한 실트지반 보다 다소 작은 값을 나타내고 있다. 이는 오염된 실트지반의 극한하중은 오염물질이 지반속으로 유입되어 유효효과로 인하여 연약한 실트지반의 극한하중 보다 다소 작게 산정되었다.
3. 생활오폐수와 폐유로 오염된 실트지반은 오염물질의 함유량의 증가로 인하여 지반내의 소성화가 급진적으로 촉진되어 지반이 불안정화가 되어 감을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 권호진, 박준범, 박규홍(1996), “지반오염물질의 특성과 정화(1)”, **대한토목학회지**, 제44권 제11호, pp.69~75.
2. 신은철, 이재범(1997), “원유로 오염된 지반의 역학적 특성”, **한국지반공학회지**, 한국지반공학회, 제13권, 제6호, 12월, pp.37~43.
3. 안종필, 박상범(1998), “오염된 연약지반의 변위량 분포에 관한 연구”, **건설기술연구**, 조선대학교 건설기술연구소, 제18-2집, pp.111~138.
4. 안종필, 박상범, 박경호(1998), “오염지반의 지지력 결정에 관한 연구”, **대한토목학회**, 학술발표회 논문집(Ⅱ), 10월, pp.217~220.
5. 안종필, 박상범, 박경호(1999), “함수량이 다른 오염지반의 지지력 결정에 관한 연구”, **한국지반공학회**, ‘99 봄 학술발표회 논문집, pp.481~488.
6. 안종필, 박상범(1999), “농도가 다른 오염지반의 지지력 결정에 관한 연구”, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, pp.57~69.
7. Tavenas, F. & Leroueil, S., (1980), “The behaviour of embankments on clay foundations”, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.17, pp.236~260.
8. Tschebotarioff, G.P., (1973), “Foundations, retaining & earth structures”, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, pp.389~414.