한국지반공학회논문집 제22권 12호 2006년 12월 pp. 77 ~ 88

지중연속벽 시공을 위한 트렌치 굴착시 지반변형에 관한 모형실험

Model Tests on Ground Deformation during Trench Excavation for Diaphragm Walls

홍 원 표[1] Hong, Won-Pyo
이 문 구[2] Lee, Moon-Ku
이 재 호[3] Lee, Jae-Ho

Abstract

A series of model tests were performed to investigate the ground deformation during trench excavation for diaphragm walls. An apparatus was manufactured to observe the failure pattern of a slurry-supported trench in sandy ground. Ground deformations including settlement and lateral displacement of the surrounding ground adjacent to the trench were carefully monitored during excavation. Experimental observations indicated that the settlement of the adjacent ground increased with closing to the trench. Especially, the considerable settlement occurred at the distance which was equal to 40% of the excavation depth. And, the higher settlement was obtained when the relative density of ground was looser and the ground water table was higher. Also, the lateral wall face of excavated trench was bulged with lowering the slurry level in stages and then the upper part of trench failed finally. The envelope of ground surface settlement could be represented as a hyperbolic line and the measured settlement was smaller than those predicted by Clough and O'Rourke (1990).

요 지

지중연속벽 시공을 위한 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하거동을 규명하기 위한 모형실험을 실시하였다. 트렌치 굴착을 모사하는 모형실험장치를 제작하였으며 계측시스템을 이용하여 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하를 측정하였다. 모형실험결과 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하량은 굴착면에 가까워질수록 크게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 지반의 상대밀도가 작고, 지하수위가 높을수록 굴착시 배면지반에서의 침하량은 크게 발생하였다. 그리고, 굴착배면지반에서의 침하량은 최종 굴착깊이의 약 40%에 해당하는 이격거리에서 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 한편, 트렌치 굴착완료후 굴착면내 안정액의 수위를 저하시킬 경우 굴착측벽에서는 벌징(Bulging) 현상이 발생되고, 굴착배면지반에서는 침하현상이 발생되어 종국에는 굴착면 상부에서 지반붕괴가 발생되었다. 모형실험에서 측정된 굴착배면지반에서의 침하량은 Clough and O'Rourke(1990)에 의해 제안된 침하량보다 작게 발생하였으며, 굴착배면지반의 침하기준선은 굴착벽면 주변에서 급격하게 증가하는 쌍곡선형태로 관찰되었다.

Keywords : Diaphragm wall, Excavation, Ground water level, Model test, Settlement, Trench

1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)
2 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)
3 정회원, 중앙대학교 방재연구소 전임연구원 (Member, Researcher, Disaster Prevention Research Institute, CAU, jaeho71@hanmail.net, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

도심지에서의 굴착공사는 대부분이 기존구조물이나 지하매설물에 인접하여 시공하게 되므로 주변지반과 인접구조물에 영향을 미친다. 예를 들면 지하굴착 공사로 인한 굴착배면지반의 변형, 인접구조물의 균열, 굴착장비 가동으로 인한 소음·진동과 같은 환경공해 등을 들 수 있다. 따라서 이러한 문제를 보완하고 해결하기 위하여 새로운 굴착공법이 개발되었으며, 이들 굴착공법 중의 하나가 지중연속벽(diaphragm wall) 공법이다.

지중연속벽공법은 근입부의 연속성이 보장되어 차수성이 좋으며, 단면강성이 매우 크므로 굴착공사로 인한 주변지반의 변형을 최소화시킬 수 있다. 그러므로 대규모·대심도 굴착공사시 많이 사용되고 있으며, 공사중 소음과 진동이 적어 도심지공사에 적합한 공법으로 알려져 있다. 이 공법은 벤토나이트 슬러리 용액을 사용하여 트렌치를 굴착하고, 굴착된 트렌치에 철근망을 삽입한 후 콘크리트를 타설하여 콘크리트벽체를 만드는 과정으로 지중연속벽을 지하공간에 구축하게 된다. 이때 트렌치 굴착을 모래 및 자갈층에서 실시할 경우 안정액의 유출이나, 굴착장비의 진동으로 인한 지반손실(ground loss) 또는 굴착측벽 벌징(bulging)현상이 발생하여 철근망의 삽입이 불가능하거나 주변지반이 함몰되는 경우도 일어날 수 있으므로 주의해야 한다.

벤토나이트 슬러리를 이용한 트렌치 굴착시 굴착면의 안정에 관한 연구는 주로 국외에서 1960년대 이후에 수행되었다. Nash & Jones(1963)는 한계상태이론을 적용하여 점성토 및 사질토 지반에서 굴착면의 안정성을 검토하였다. 그리고, Schneebeli(1964)와 Huder(1972)는 사일로 이론을 적용하여 트렌치 굴착면의 안정성을 검토한 바 있다. 최근에는 Tsai et al.(2000)에 의해 현장실험을 통하여 트렌치 굴착면의 안정성을 조사한 연구가 있다. 또한, Thorely & Forth(2002)는 지중연속벽 시공도중 발생된 인접건물의 침하량을 조사한 바 있다.

국내의 경우에는 주로 콘크리트벽체를 지중에 완성시킨 후 실시하는 본 굴착과정에서 발생되는 지중연속벽의 변형이나 굴착주변지반의 변형에 대한 연구(이처근 등, 2000; 중앙대학교, 2003; 이철주, 2005)가 진행되어 왔으며, 트렌치 굴착으로 인한 굴착면 및 굴착배면지반의 변형거동에 대한 연구나, 이들 변형거동에 미치는 영향인자에 대한 조사 및 분석이 아직까지 미미한 실정이다.

지중연속벽을 이용한 굴착공법은 다른 흙막이 굴착공법과는 달리 트렌치 굴착을 먼저 실시하게 되므로 이때 굴착면이나 굴착배면지반에 상당한 변형이 발생하게 된다. 그러나 국내에서 지중연속벽을 시공하는 경우에는 대부분 지중콘크리트벽체가 완성된 후, 본 굴착이 실시되는 시점에서부터 현장계측을 실시하여 흙막이벽 및 굴착배면지반의 안정관리를 실시하고 있다. 특히 지중경사계(inclinometer), 지표면 침하계 등의 지반의 거동을 측정하는 계측기도 콘크리트벽체 축조 이후에 설치되어, 초기점 선정(zero setting)이 이루어지고 있다. 이로 인하여 트렌치 굴착시 발생되는 초기의 지중변위는 본 굴착시 발생되는 변위에 비해 상당히 큼에도 불구하고 무시되어 버리는 실정이다. 따라서 지중연속벽을 시공하기 위하여 실시되는 트렌치 굴착시 굴착면의 안정에 대한 사항은 반드시 검토되어야 하며, 이로 인한 굴착배면지반의 침하거동은 반드시 규명되어야 할 것이다.

본 연구에서는 지중연속벽 시공을 위한 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하거동을 규명하기 위한 기초적인 연구로서 모형실험을 수행하고자 한다. 본 연구에서 수행된 모형실험은 모래지반을 대상으로 하며, 단계별 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하과정을 조사한다. 지반조건에 따른 영향을 검토하기 위하여 모형지반의 상대밀도를 변화시키면서 실험을 수행하였고, 지하수위에 따른 영향을 검토하기 위하여 지하수위의 위치를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그리고, 트렌치 굴착면 내 안정액의 영향을 살펴보기 위하여 안정액 수위저하에 따른 굴착면 및 굴착배면지반의 변형거동을 조사해 보고자 한다.

2. 모형실험

2.1 모형실험장치

사질토 지반에서의 단계별 트렌치 굴착시 배면지반의 침하와 지하수위의 영향을 조사하기 위하여 모형실험장치를 제작하였다. 그림 1은 모형실험장치의 계통도를 도시한 것으로 모형실험장치는 모형토조, 트렌치굴착장치 및 계측장치의 세 부분으로 크게 구성되어 있다. 그림 2는 모형토조와 트렌치굴착장치를 촬영한 것이다.

2.1.1 모형토조

모형토조는 외부치수를 길이 80cm, 높이 80cm 및 폭 20cm로 제작하였으며, 그림 3은 모형토조의 정면 및 측

면을 촬영한 것이다. 단계별 굴착을 재현하기 위해 1회 굴착토사체적을 63.75cm^{3}로 산정하여 아크릴 블록으로 제작하였다. 1단계 굴착시 토사의 체적은 127.5cm^{3}로서 단계별 2개 블록을 제거하였으며, 총 20회에 걸쳐 굴착을 완료하였다. 그리고 1.5cm 두께의 투명아크릴 판을 사용하여 토조내부의 거동을 관찰할 수 있도록 하였으며, 모형지반 조성시 토조의 변형이 없도록 제작하였다. 모형토조 배면에 배수밸브를 설치하여 안정액 수위를 임의로 조절할 수 있도록 제작하였다. 또한, 실험 중 안정액 수위를 일정하게 유지하기 위해 토조 측면에도 안정액 배출구를 설치하여 안정액 수위가 일정높이 이상으로 상승하지 못하도록 하였다.

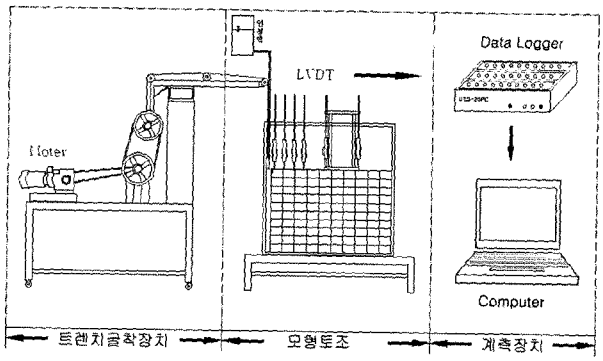


그림 1. 모형실험장치 계통도

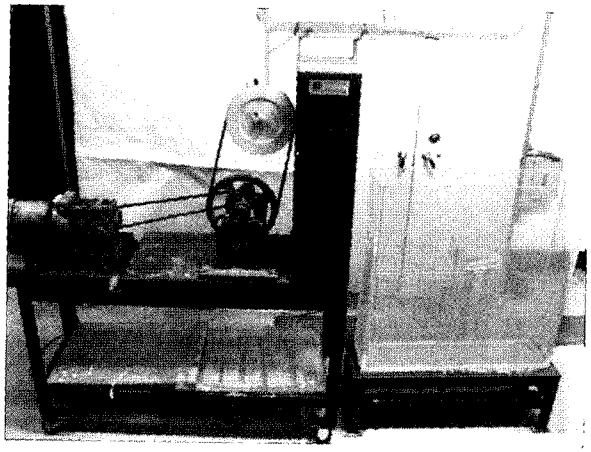


그림 2. 모형실험장치

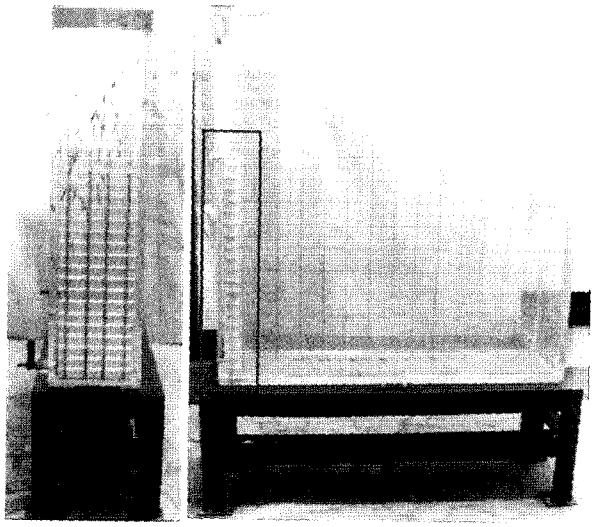


그림 3. 모형실험토조

2.1.2 계측장치

단계별 트렌치 굴착시 배면지반의 거동을 조사하기 위하여 굴착배면지반의 지표면에 일정한 간격으로 미소변위계(LVDT)를 설치하였다. 그림 4는 본 실험에 사용된 LVDT를 나타낸 것으로 모형토조 거치대가 설치된 모습이며, 그림 5는 트렌치 굴착배면지반의 지표면에 LVDT가 설치된 상태이다. 미소변위계는 자기저항식으로서 1/100mm 단위로 최대 100mm까지 측정이 가

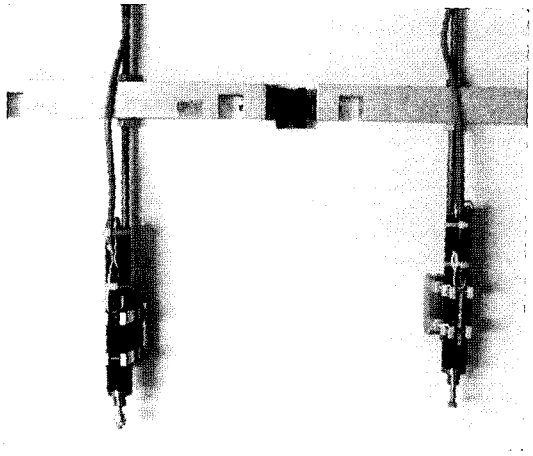


그림 4. 거치대가 설치된 LVDT

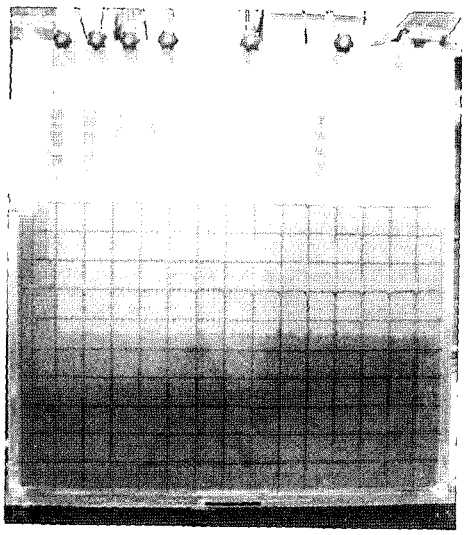


그림 5. LVDT가 설치된 모습

능하다. 이와같은 미소변위계를 트렌치 굴착면으로부터 배면지반 방향으로 각각 20mm, 80mm, 140mm, 200mm, 350mm, 500mm 위치에 설치하였다. 설치위치는 지반의 내부마찰각과 굴착으로 인한 트렌치 배면지반에 발생하는 지반아칭현상을 고려한 Piaskowski et al.(1965) 이론과 Rankine(1857)의 소성영역범위를 고려하여 선정하였다. 또한 모형지반 조성시 색사를 이용하여 50mm간격으로 수평 및 수직의 그리드를 표시하여, 트렌치 굴착시 디지털 카메라를 이용하여 연속촬영함으로서 지반변형을 관찰할 수 있도록 하였다. 이와 같이 측정된 자료는 데이터로거를 통하여 컴퓨터에 자동 저장되도록 하였다.

2.1.3 트렌치블록제거장치

일정한 속도로 트렌치블록을 제거할 수 있도록 속도제어가 가능한 트렌치블록제거장치를 제작하였다. 그림 6은 트렌치블록제거장치를 이용하여 블록을 제거하는 과정을 도식화한 것이다. 트렌치블록의 제거속도는 10mm/sec이며, 블록제거시 모터의 진동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 모형실험토조와 분리하여 제작하였다. 트렌치블록의 크기는 폭 1.5cm, 높이 2.5cm, 길이 17cm로서 버킷식 굴착장비에 의한 트렌치 굴착시 축척을 고려하여 제작하였다. 한편, 현장에서의 가이드월(guide wall) 역할을 모사하도록 트렌치굴착면 상부에 아크릴블록을 고정시켰다. 모형실험에서의 가이드월은 실험중 안정액이 흘러넘쳐 배면지반으로 유입되는 현상을 방지하고, 또한 굴착 초기 토사가 구벽으로 함몰되지 않도록 하기 위한 목적으로 설치하였다.

2.2 모형지반

2.2.1 모형지반의 물리적 특성

본 모형실험에서는 모형지반의 재료로 주문진 표준사를 사용하였다. 주문진 표준사의 공학적 특성을 조사하기 위하여 체분석시험, 비중시험, 단위중량시험 등을 실시하였으며, 이들 시험결과를 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 주문진 표준사의 비중은 2.62이며, 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)는 각각 1.49 및 0.97로 조사되었다. 그리고, 최대건조단위중량과 최소건조단위중량은 각각 15.2kN/m^3, 13.4kN/m^{3}으로 나타났다. 그림 7은 주문진 표준사의 체분석시험 결과로부터 구한 입도분포곡선을 나타낸 것으로 입도가 매우 균등함을 알 수 있다.

2.2.2 상대밀도에 따른 내부마찰각

모형지반의 상대밀도에 따른 내부마찰각을 측정하기 위하여 일련의 압밀배수 삼축압축시험을 수행하였다.

표 1. 주문진 표준사의 물리적 특성

입도분석	D_{10}	0.45
	D_{30}	0.54
	D_{60}	0.67
	C_u	1.49
	C_g	0.97
비중(Gs)		2.62
최대건조단위중량(kN/m^3)		15.2
최소건조단위중량(kN/m^3)		13.4

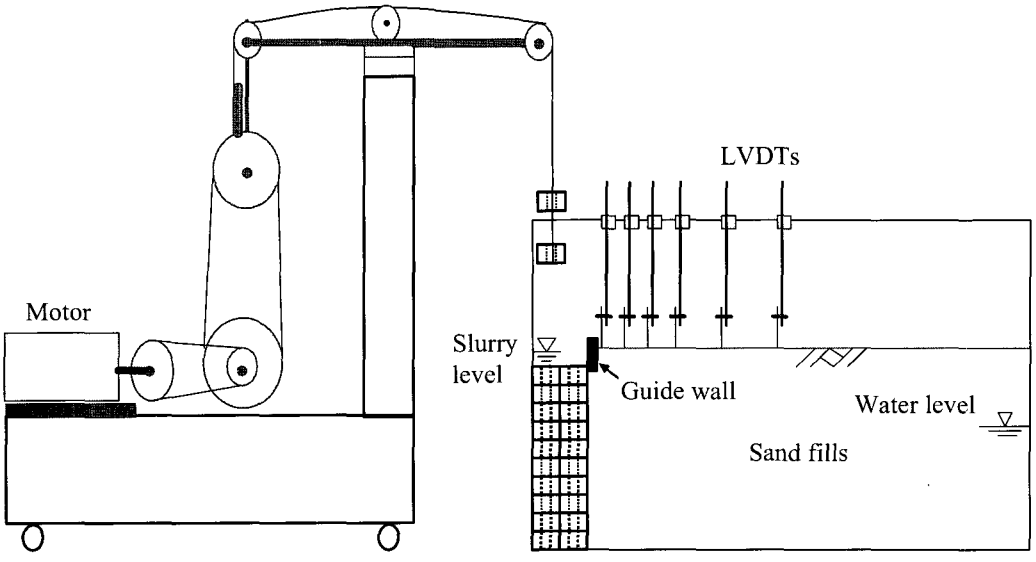


그림 6. 트렌치블록제거장치 모식도

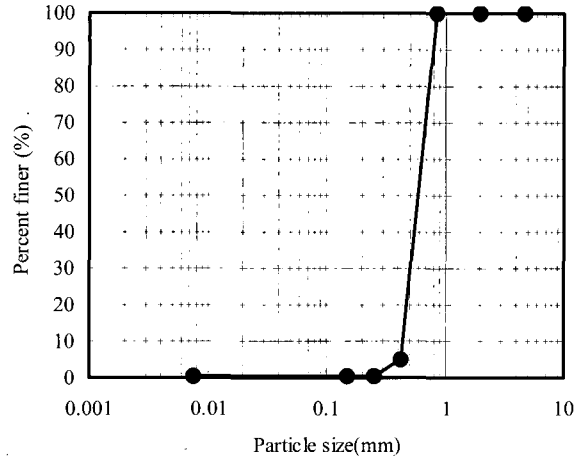


그림 7. 주문진 표준사의 입도분포곡선

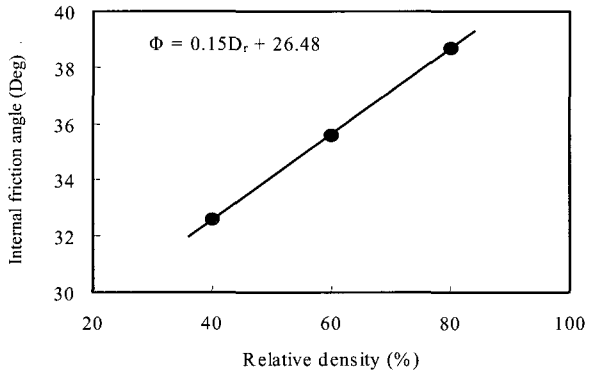


그림 8. 상대밀도에 따른 내부마찰각

본 모형실험에서 적용되는 모형지반의 상대밀도는 60% 및 80%이다. 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 삼축압축시험결과를 p-q도로 작도하였으며, p-q도로부터 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 내부마찰각을 결정하였다. 그림 8은 압밀배수 삼축압축시험 결과로부터 얻은 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 내부마찰각을 나타낸 것이다.

상대밀도가 40%일 때 주문진 표준사의 내부마찰각은 32.6°이고, 상대밀도가 60%일 때 내부마찰각은 35.6°이며, 상대밀도가 80%일 때 내부마찰각은 38.7°인 것으로 나타났다. 따라서 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 내부마찰각에 대하여 회귀분석을 실시한 결과 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\phi(^\circ) = 0.15D_r + 26.48 \quad (1)$$

여기서, D_r : 주문진 표준사의 상대밀도(%)

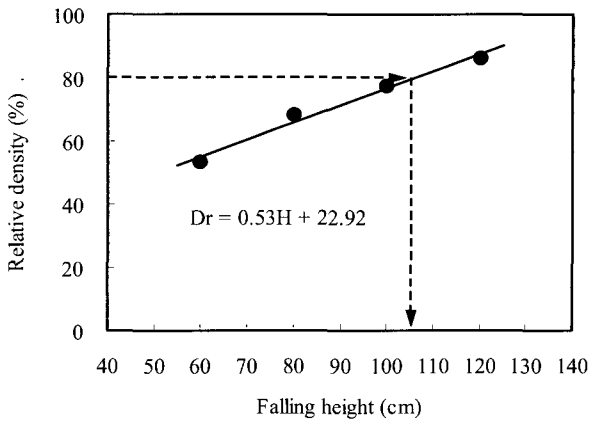


그림 9. 낙하고에 따른 상대밀도

2.2.3 모래살포장치에 의한 상대밀도 결정

본 모형실험에서는 모래살포장치를 이용하여 모래를 일정한 높이에서 자유낙하시킴으로서 균질한 지반을 조성하였다. 이를 위하여 모래살포장치를 이용하였으며, 본 모래살포장치는 모래살포판과 낙하높이를 조정하기 위한 낙하고 제어장치로 크게 구분할 수 있다(홍원표와 강승인, 2000). 본 실험에 사용된 모래살포장치로서 가로, 세로, 높이가 각각 740mm×170mm×50mm이며, 1회 살포시 모형지반이 50mm높이로 조성되도록 하였다. 모래살포장치를 이용할 경우 주문진 표준사의 낙하높이에 따른 지반의 상대밀도를 조사하기 위하여 일련의 낙하시험을 실시하였다. 낙하시험은 주문진 표준사의 낙하높이를 60cm에서 120cm까지 20cm 간격씩 조절하면서 토조에 자유낙하하여 실시하였다.

그림 9는 주문진 표준사의 낙하높이에 따른 상대밀도 측정시험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 회귀분석결과를 통하여 자유낙하높이에 따른 상대밀도를 추정할 수 있으며, 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_r = 0.53H + 22.92 \quad (2)$$

여기서, D_r : 상대밀도(%)

H : 낙하고(cm)

따라서, 모형실험시 지반의 상대밀도를 결정할 때 식 (2)를 이용하여 낙하높이를 결정하였다. 예를 들어 배면지반의 상대밀도를 80%로 조성하는 경우 모형살포장치를 이용한 주문진 표준사의 낙하높이를 105cm로 하였다.

2.3 벤토나이트

벤토나이트는 모형실험시 트렌치 굴착면내의 안정액으로 사용하며, 증류수에 수화되었을 경우 부피는 10~15배까지 팽창되는 특징이 있다. 사용된 벤토나이트의 단위체적중량은 11.9kN/m^{3}이고, 비중은 2.5이며, 광물명은 몬모릴로나이트이다.

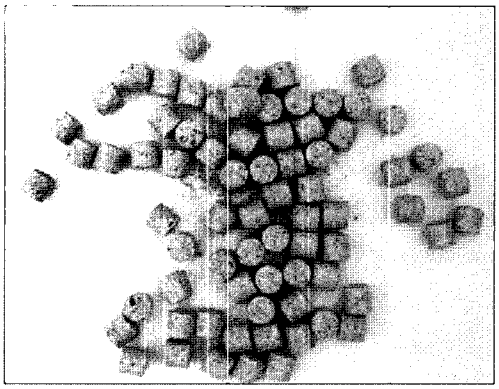
슬러리 안정액의 농도는 트렌치굴착의 안정성 및 주변지반 거동에 영향을 미친다. 본 연구에서는 일반적인 안정액의 밀도가 1.04~1.08g/cm^{3}임을 감안하여(한국지반공학회, 2002), 안정액의 농도를 7%가 되도록 증류수와 교반하여 제작, 사용하였다. 그림 10은 모형실험에서 사용된 벤토나이트와 물과 교반시키는 모습을 나타낸 것이다.

3. 실험방법 및 계획

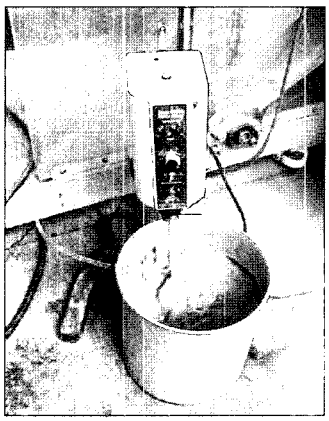
3.1 실험방법

모형실험은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

1) 모형토조내 굴착 예상지반에 아크릴블록을 소정의 높이(500mm)로 설치한다.
2) 아크릴블록 배면에 모래살포장치를 이용하여 일정한 상대밀도로 모형지반을 형성한다. 모래지반 형성시 색사를 이용하여 트렌치 굴착 및 안정액 저하시 지반의 거동을 관측하기 위한 수직 및 수평 그리드를 표시한다.
3) 지하수위 영향을 조사하기 위한 실험에서는 물을 모형실험토조에 일정한 높이(G.L(-)350mm, 250mm)로 형성시킨다.
4) 교반장치를 이용하여 벤토나이트와 물을 혼합하고 7% 벤토나이트 농도의 안정액을 만든다.
5) 모형실험토조에 일정한 간격으로 LVDT를 설치한다.
6) 모형실험토조 전면에 디지털카메라를 설치하여 수직 및 수평변위를 연속 촬영한다.
7) 일정한 속도로 안정액을 트렌치에 투입하며, 이때 안정액 수위가 일정하게 유지되도록 주의한다.
8) 트렌치블럭 제거장치를 이용하여 트렌치 블록을 10mm/sec의 속도로 제거한다. 동시에 디지털카메라를 이용한 촬영과 배면지반의 침하량을 변위계를 통해 계측한다.
9) 트렌치 최종굴착 후 10분의 경과시간을 두어 지반을 안정화시킨 후 안정액 수위를 10mm씩 일정하게 저하시키면서 트렌치 굴착면의 파괴를 유도한다. 이때에도 디지털카메라를 이용한 촬영을 실시한다.



(a) 벤토나이트



(b) 물과 교반

그림 10. 실험에 사용된 벤토나이트

3.2 실험계획

본 모형실험을 통하여 지중연속벽 시공을 위한 트렌치굴착시 지하수위에 따른 배면지반의 침하 양상을 조사하고자 한다. 그리고, 단계별 굴착 후 트렌치내 안정액의 수위를 저하시킴으로서 배면지반의 변형을 조사하고자 한다. 먼저 지하수위의 영향을 고려하지 않을 경우 지반의 상대밀도에 따른 지반변형을 조사하였다. 표 2는 지하수위의 영향을 검토하기 위한 트렌치굴착에 대한 모형실험계획을 나타낸 것으로 총 4가지 경우에 대

표 2. 모형실험계획

실험번호	지반 상대밀도 (%)	지하수위 위치 (GL(-) mm)	비고
W500-R60	60	500	지하수위 없음
W500-R80	80	500	지하수위 없음
W350-R80	80	350	
W250-R80	80	250	

한 실험을 실시한다. 먼저 지반의 상대밀도에 따른 영향을 검토하기 위하여 지하수위를 고려하지 않고, 모형지반의 상대밀도를 60%와 80%로 변화시키면서 실험을 수행한다. 그리고, 지하수위에 따른 영향을 검토하기 위하여 모형지반의 상대밀도를 80%로 동일하게 하고, 지하수위를 GL(-)350mm 및 GL(-)250mm로 변화시키면서 실험을 수행한다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 굴착으로 인한 배면지반 침하

그림 11은 굴착이 진행되는 동안 굴착배면지반의 지표면에 설치된 LVDT에서 측정된 침하량의 변화를 나타낸 것이다. LVDT는 굴착면으로부터 20mm, 80mm, 140mm, 200mm, 350mm, 500mm위치에 설치하였으며, 그림 11에서는 굴착면과 가장 인접해 있는 굴착배면 20mm 위치에서의 지표침하량을 상대밀도 80% 및 60%에 대하여 나타낸 그림이다. 이때, 트렌치 굴착이 진행되는 동안 안정액의 수위는 GL(-)15mm를 유지하였으며, 지하수위는 없는 경우이다.

그림에서 보는 바와 같이 굴착배면에서의 침하량은 굴착초기에 급격하게 증가하며 굴착이 진행됨에 따라 침하량은 서서히 증가하다가 수렴하는 경향을 보이고 있으나 침하량이 수렴되는 굴착깊이는 차이가 있는 것으로 나타났다. 즉, 지반의 상대밀도가 60%인 경우, 지표면 침하량은 굴착이 300mm까지 진행되는 동안 지속적으로 증가하고 있으며 그 이하 깊이부터 수렴되고 있으나 상대밀도가 80%인 경우에는 100mm 굴착 이후부터 거의 일정하게 수렴되고 있다. 한편, 지반의 상대밀도가 60%인 경우 최대침하량은 0.75mm이고, 상대밀도가 80%인 경우 최대침하량은 0.37mm인 것으로 나타났다. 따라서, 지반의 상대밀도가 클수록 굴착시 배면지반에서의 침하량은 작게 발생함을 알 수 있다.

그림 12는 지반의 상대밀도가 80%일 때, 지하수위가 없는 경우(GL(-)500mm)와 지하수위가 GL(-)350mm 및 GL(-)250mm에 위치한 경우의 굴착배면지반에서의 침하량 변화를 나타낸 결과이다. 굴착심도가 200mm 이내에서는 지하수위 위치에 관계없이 서로 유사한 지표침하량을 나타내다가 200mm 이상 굴착이 진행됨에 따라 지표침하의 차이가 발생하고 있다. 즉, 지하수위가 가장 높은 GL(-)250mm의 경우가 침하량이 급증하고 있음을 알 수 있다. 따라서 굴착심도가 지하수위 상부에 존재하더라도 지하수위와 어느정도 근접한 굴착심도내에서는 굴착에 따른 영향을 받는 것으로 판단된다.

전반적으로 지하수위가 존재하지 않는 경우는 굴착초기에 대부분의 침하가 발생되는 경향을 보이고 있지만 지하수위가 존재하는 경우에는 굴착초기부터 중기까지 지속적으로 침하량이 증가하고 있다. 특히 지하수위가 GL(-)250mm에 존재하는 경우에는 굴착이 완료될 때까지 침하량이 지속적으로 증가하고 있다. 한편, GL(-)350mm인 경우 최대침하량은 0.48mm이고, 지하수위가 GL(-)250mm인 경우 최대침하량은 1.04mm이며, 지하수위를 고려하지 않은 경우 최대침하량은 0.37mm인 것으로 나타났다.

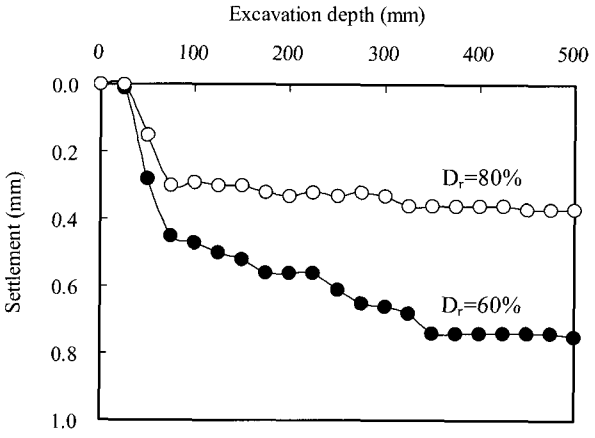


그림 11. 트렌치굴착시 배면 20mm 지점에서의 침하량 분포 (지하수위 없음)

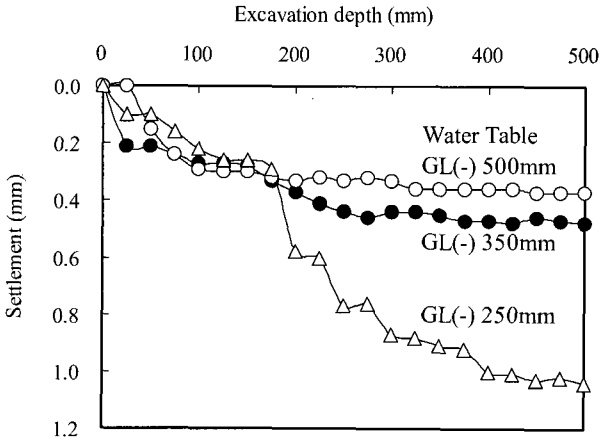


그림 12. 트렌치굴착시 배면 20mm 지점에서의 침하량 분포 (D_r = 80%, 지하수위 존재)

따라서, 그림 12에서 보는바와 같이 지하수위가 높아질 경우 굴착시 배면지반에서의 침하가 크게 발생됨을 알 수 있다.

4.2 최종굴착시 배면지반 침하량

그림 13 및 그림 14는 최종굴착단계에 대한 굴착배면지반에서의 침하양상을 나타낸 것이다. 그림 13은 지하수위를 고려하지 않은 경우에 대하여 지반의 상대밀도가 각각 60% 및 80% 일 때, 굴착배면지반에서의 침하양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착면에 가까워질수록 침하량은 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 굴착면으로부터 약 100mm 이내 위치에서 침하량은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 굴착면 주변에서의 최대침하량은 상대밀도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으나 침하영향범위는 지반의 상대밀도와 관계없이 대략 굴착면에서 200mm 범위까지 동일하게 나타났다.

한편, 그림 14는 지반의 상대밀도가 80% 일 때, 지하수위가 없는 경우(GL(-)500mm)와 GL(-)350mm 및 GL(-)250mm에 지하수위가 존재할 경우, 최종굴착단계에 대한 굴착배면지반에서의 침하양상을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 굴착면에 가까워질수록 침하량은 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 지하수위가 존재하는 경우에는 굴착면으로부터 약 200mm 이내 위치에서 침하량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 지하수위가 높아짐에 따라 굴착면 주변에서의 최대침하량은 크게 증가하는 것으로 나타났으며 침하영향범위도 확장되어 굴착면에서 대략 400mm까지 이르는 것으로 나타났다. 따라서, 지반의 상대밀도와 지하수위의 위치는 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하 및 침하영향범위에 크게 영향을 미치는 인자임을 확인할 수 있다.

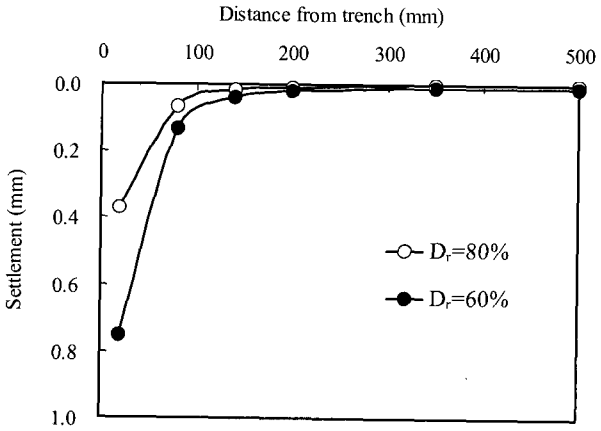


그림 13. 지반의 상대밀도에 따른 굴착배면지반에서의 침하양상 (지하수위 없음)

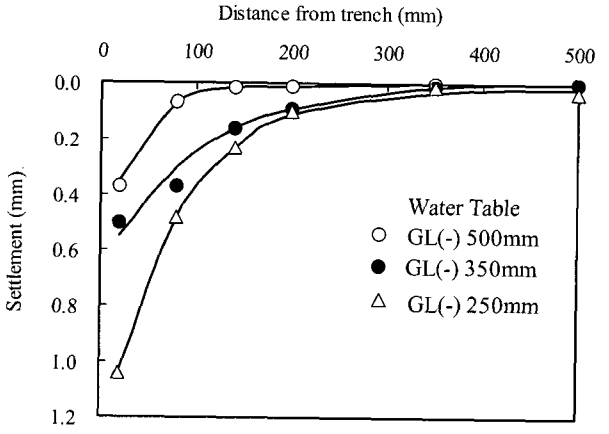


그림 14. 지하수위에 따른 굴착배면지반에서의 침하양상 (상대밀도 80%)

4.3 안정액 수위저하로 인한 배면지반의 변형

4.3.1 상대밀도의 영향

Tasi et al.(2000)은 대만의 지중연속벽 시공현장에서 안정액의 수위저하에 따른 트렌치 굴착면의 변형거동을 조사한 바 있다. 본 연구에서도 안정액의 수위저하에 따른 트렌치 굴착면의 거동을 조사하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 이 실험은 지중연속벽 시공시 트렌치 굴착면내 안정액의 수위저하로 인하여 압력이 일부 해방되었을 경우 발생될 수 있는 굴착면 및 배면지반의 변형거동을 조사하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 먼저 굴착을 완료한 이후 안정액의 수위를 GL(-)15mm로 유지하며 지반을 안정화시켰다. 그리고, 굴착면내 안정액 수위를 10mm씩 감소시키면서 트렌치 굴착면의 파괴를 유도하였다. 이때 굴착면 및 배면지반의 변형거동을 조사하기 위하여 디지털 카메라를 이용하여 사진촬영을 실시하였으며, 촬영된 사진을 캐드(cad) 파일로 도면화하여 변형량을 조사하였다.

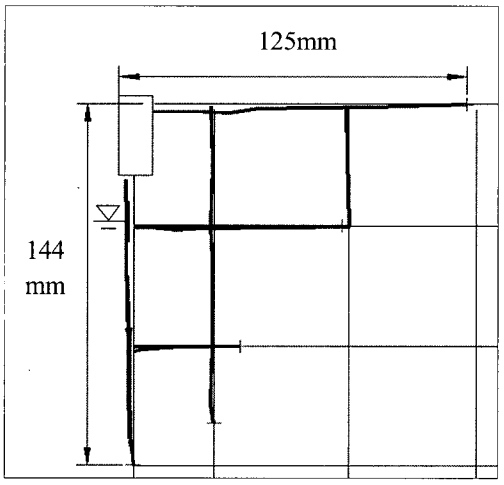
그림 15는 지하수위를 고려하지 않은 경우, 지반의 상대밀도를 고려하여 안정액의 수위저하에 따른 굴착면 및 배면지반의 변형거동을 조사한 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 굴착면내 안정액의 수위저하로 인하여 굴착면에서는 벌징현상이 발생되고, 굴착배면지반에서는 침하현상이 발생되어 종국에는 굴착면 상부에서 붕괴가 발생되었다. 그림 15(a)는 지반의 상대밀도가 60%

인 경우 굴착면의 붕괴직전에 지반변형을 도시한 것이다. 트렌치 굴착면의 붕괴는 안정액의 수위를 GL(-)50mm로 저하시키는 도중 발생되었다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착면의 변형영역은 지표면으로부터 144mm 깊이까지이고, 굴착면에서 배면지반으로 125mm 위치에 이르는 것으로 나타났다. 한편, 그림 15(b)는 지반의 상대밀도가 80%인 경우 굴착면의 붕괴직전에 지반변형을 도시한 것이다. 트렌치 굴착면의 붕괴는 안정액의 수위를 GL(-)70mm로 저하시킨 이후 발생되었다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착면의 변형영역은 지표면으로부터 109mm 깊이까지이고, 굴착면으로부터 106mm 위치에 이르는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 토대로 안정액의 수위 저하에 따른 굴착면의 변형영역은 상대밀도가 작을수록 더 커짐을 알 수 있다.

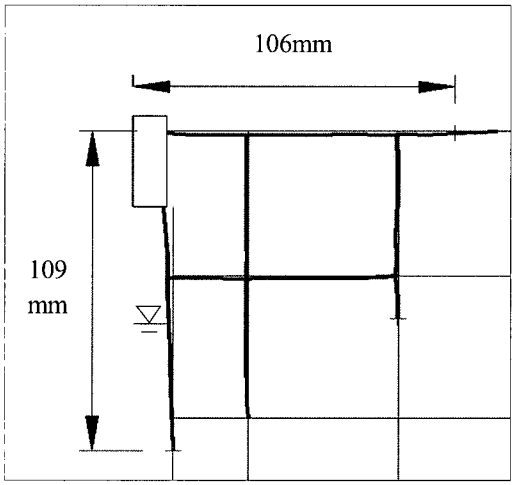
4.3.2 지하수위의 영향

그림 16은 지하수위를 고려하여 안정액의 수위저하에 따른 굴착면 및 배면지반의 변형거동을 조사한 결과를 나타낸 것이다.

그림 16(a)는 지하수위가 GL(-)350mm이고, 지반의 상대밀도가 80%인 경우 굴착면 붕괴직전의 지반변형을 도시한 것이다. 트렌치 굴착면의 붕괴는 안정액의 수위

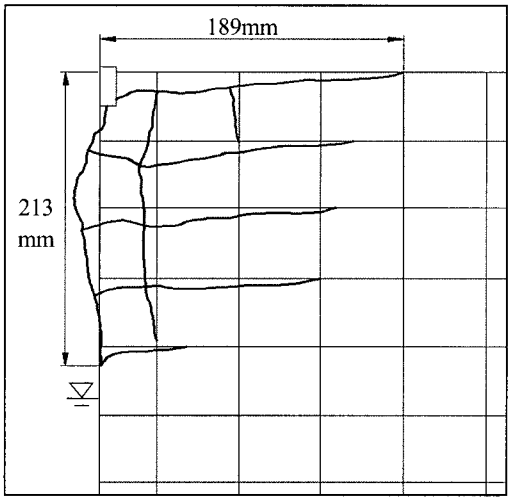


(a) 상대밀도 60%(붕괴시 안정액수위 : GL(-)50mm)

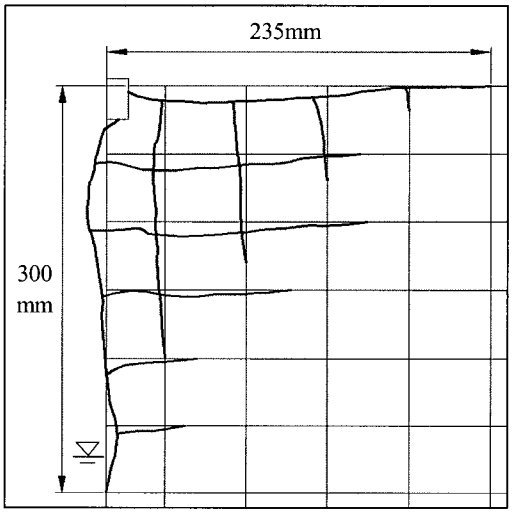


(b) 상대밀도 80%(붕괴시 안정액수위 : GL(-)70mm)

그림 15. 지반조건별 안정액의 수위저하로 인한 굴착배면지반의 변형
(지하수위 없음)



(a) 지하수위 GL(-)350mm(붕괴시 안정액수위 : GL(-)235mm)



(b) 지하수위 GL(-)250mm(붕괴시 안정액수위 : GL(-)275mm)

그림 16. 지하수위별 안정액의 수위저하로 인한 굴착배면지반의 변형
(상대밀도 80%)

를 GL(-)235mm로 저하시키는 도중 발생되었다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착면의 변형영역은 지표면으로부터 213mm 깊이까지이고, 굴착면으로부터 189mm 위치에 이르는 것으로 나타났다.

그림 16(b)는 지하수위가 GL(-)250mm이고, 지반의 상대밀도가 80%인 경우 굴착면의 붕괴직전에 지반변형을 도시한 것이다. 트렌치 굴착면의 붕괴는 안정액의 수위를 GL(-)275mm로 저하시키는 도중 발생되었다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착면의 변형영역은 지표면에서 300mm 깊이까지이며, 수평으로는 굴착면에서 235mm 거리에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서 지하수위가 GL(-)250mm로 높은 경우가 지하수위가 GL(-)350mm에 낮게 위치한 경우보다 안정액의 수위저하에 따른 굴착면의 변형영역이 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 그림 16(b)의 경우 안정액 수위가 그림 16(a)보다 낮은 상태에서 트렌치붕괴가 발생하여, 자립심도가 상대적으로 컸던 영향도 배제할 수 없으므로, 지하수위가 트렌치 붕괴에 미치는 영향은 더욱 다양한 조건에 대한 실험을 실시하여 평가할 필요가 있다고 판단된다.

5. 고 찰

5.1 트렌치 굴착시 지반침하율

그림 17은 지하수위에 따른 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하량을 무차원화시켜 지반침하율로 나타낸 것이다. 즉, 무차원화된 그래프로 나타내기 위하여 굴착면으로부터의 이격거리와 최대침하량을 각각 최대굴착깊이로 나누어 도시하였다. 이때 지하수위는 각각 GL(-)500mm, 350mm 및 250mm이며, GL(-)500mm는 지하수위를 고려하지 않은 경우에 대한 실험결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위가 상승함에 따라 트렌치 굴착으로 인한 최종침하량은 증가함을 알 수 있다. 그리고, 배면지반에서 침하량이 급격하게 증가하는 이격거리는 최종굴착깊이의 약 40% 지점에 해당하는 것으로 나타났다.

5.2 기존 연구와의 비교

Clough & O'Rourke(1990)는 사질토 및 잔류토 지반에서 측정된 굴착배면지반에서의 침하량을 토대로 굴착깊이에 따른 최대침하량을 제안한 바 있다. 이들 결과에 의하면 최대침하량은 흙막이벽체의 종류에 관계없이 대부분 굴착깊이의 0.5% 이내인 것으로 나타났다.

그림 18은 모형실험결과를 Clough & O'Rourke(1990)의 기준과 비교하기 위하여 함께 도시한 것이다. 그림 18에서 검은원으로 표시된 것은 지하수위가 없는 경우로서 배면지반의 상대밀도가 60%인 모형실험결과를 나타내며, 흰원, 세모 및 네모는 상대밀도가 80%인 상태에서 각각 지하수위가 없는 경우, 지하수위가 GL(-)350mm에 위치한 경우 및 지하수위가 GL(-)250mm에 위치한 경우의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 굴착초기에 침하가 급격하게 발생하여 Clough & O'Rourke가 제안한 최대침하곡선식인 S_{max} = 0.5%H에 근접하여 분포하고 있으나 굴착이 계속 진행되면서 침하증가속도는 둔화되고 있으며, 굴착완료시에는 지반의 상대밀

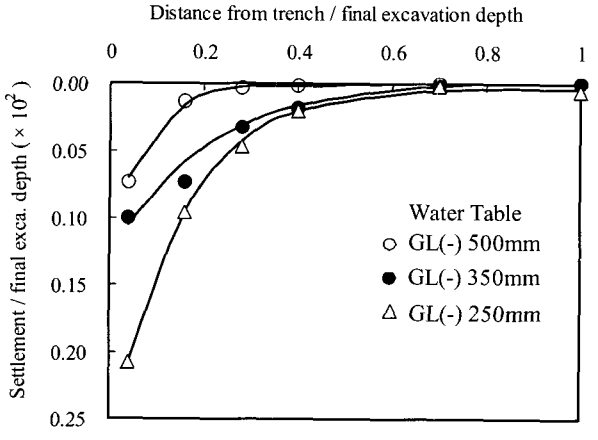


그림 17. 지하수위에 따른 트렌치 굴착시 배면의 지반침하율

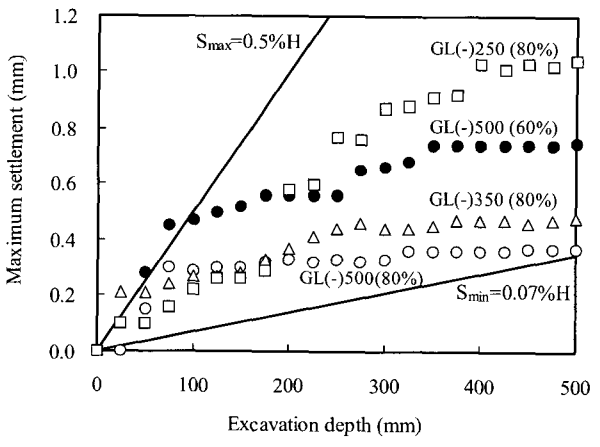


그림 18. Clough and O'Rourke(1990)와의 최대침하량 비교

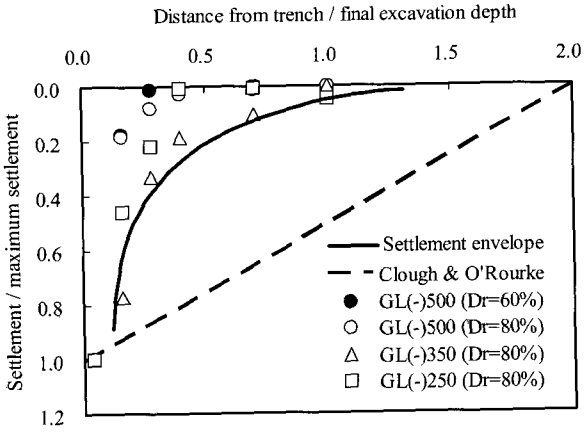


그림 19. 모형실험결과의 침하율 분포 비교

도나 지하수위의 위치에 관계없이 일정하게 수렴되어 최대침하곡선식 아래에 분포하고 있다. 그리고 굴착초기의 침하량은 지하수위가 없는 상대밀도가 60%인 지반에서 가장 크게 발생하고 있으나 굴착완료시에는 지하수위가 GL(-)250mm에 위치한 지반에서 침하량이 가장 크게 발생하고 있다. 따라서 트렌치 굴착시 굴착초기의 침하량은 지반의 상대밀도에 영향을 받지만 굴착이 완료된 후의 최종침하량은 지하수위의 위치에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Clough & O'Rourke(1990)의 최대침하량(굴착깊이의 0.5%)은 트렌치굴착 이외에 본 굴착시의 침하량을 포함한 값이므로, 트렌치굴착시 발생되는 지반변형이 매우 크게 발생한다는 것을 정성적으로 보여주고 있다. 한편, 흰원으로 표시한 배면지반의 상대밀도가 높고, 지하수위가 없는 지반의 침하량이 가장 작게 발생하고 있으며 발생침하량은 최대굴착깊이의 약 0.07%에 해당된다.

그림 19는 모형실험결과와 Clough and O'Rourke(1990)가 제안한 배면지반의 이격거리별 침하율을 비교하기 위하여 함께 도시한 것이다. 여기서 종축은 굴착배면으로부터의 이격거리별 침하량을 최대침하량으로 나눈 값이며, 횡축은 굴착면으로부터 이격거리를 최대굴착심도로 나눈 값이다. 먼저 지반의 상대밀도에 따른 비교에서는 Clough and O'Rourke에 의하여 제안된 침하율보다 모형실험에 의한 침하율 분포가 매우 작게 발생되는 것으로 나타났다. 또한, 지하수위에 따른 비교에서는 모형실험 결과가 Clough and O'Rourke에 의하여 제안된 침하율 분포보다 역시 작게 발생되는 것으로 나타났다. 침하영향범위는 Clough and O'Rourke가 제안한 최종굴착심도의 2배 범위보다 작게 나타나고 있으며 Clough and O'Rourke에 의해 제안된 침하기준선(settlement envelope)은 직선형태이지만 본 실험결과에서의 침하기준선은 굴착면 주변에서 급격하게 침하가 증가하는 쌍곡선형태로 나타남을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 지중연속벽 시공을 위한 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하거동을 규명하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험을 통하여 지반조건 및 지하수위에 따른 영향을 검토하였으며, 트렌치 굴착면내 안정액의 영향을 조사하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 지반의 상대밀도가 작을수록, 그리고 지하수위가 높을수록 굴착시 배면지반에서의 침하량은 크게 발생함을 알 수 있다. 즉, 지반조건과 지하수위는 트렌치 굴착시 굴착배면지반의 침하에 영향을 미치는 주요 인자임을 확인할 수 있다.

(2) 트렌치 굴착면내 안정액의 수위저하로 인하여 굴착면에서는 벌징(Bulging) 현상이 발생되고, 굴착배면지반에서는 침하현상이 발생되어 종국에는 굴착면 상부에서 붕괴가 발생된다. 따라서, 굴착면내 안정액의 수위를 유지하는 것은 트렌치 굴착면의 안정에 매우 중요한 사항이다.

(3) 지하수위가 상승함에 따라 트렌치 굴착으로 인한 최대침하량은 증가하며, 침하영향범위도 확장된다. 그리고 배면지반에서 침하량이 급격하게 증가하는 굴착면으로부터의 이격거리는 최종굴착깊이의 약 40% 지점까지이다.

(4) 트렌치 굴착시 배면지반의 침하는 굴착초기단계에서 급격히 증가하였다가 이후 점진적으로 수렴하는 형태를 보이며, 이격거리별 침하분포는 쌍곡선형태로 나타난다.

(5) 트렌치 굴착시 초기단계에서의 굴착배면지반에서 발생된 침하량은 지중연속벽 시공 후 본 굴착시의 침하량을 포함한 값에 상응하는 상당한 큰 변위가 발생하고 있다. 따라서 지중연속벽을 적용한 굴착공사에서 굴착배면지반의 침하관리는 트렌치 굴착시의 침하량을 반드시 고려하여 실시하는 것을 권장한다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임을 밝히며, 이에 감사드리는 바이다. 아울러, 모형실험 수행에 기여한 전 중앙대학교 대학원생 신관영, 김지훈군에게도 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이처근, 안광국, 허열 (2000) "Diaphragm Wall에서 굴착깊이-시간-변위에 관한 원심모형실험", *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제5호, pp.179-191.
2. 이철주 (2005) "해성점토층에 실시된 지중연속벽 시공에 의한 지반의 변위 분석", *한국지반공학회논문집*, 제21권, 3호, pp.43-54.
3. 중앙대학교 (2003) "*미주아파트 재건축을 위한 근접 지하굴착공사가 주변건물의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구보고서*", 중앙대학교, pp.60-81.
4. 한국지반공학회 (2002) "*굴착 및 흙막이 공법 - 지반공학시리즈 3*", 구미서관, pp.172-175.
5. 홍원표, 강승인 (2000) "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중에 대한 모형실험" *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제4호, pp.239-242.
6. Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. (1990) "Construction induced movements of insitu walls", Design and Performance of Earth Retaining Structures, *Geotechnical Special Publication, No.25, ASCE*, pp.439-470.
7. Huder, J. (1972) "Stability bentonite slurry trenches with some experiences in Swiss practice, *Proc. of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, Vol. 4, pp.517-522.
8. Nash, J.K.T.L. and Jones, G.K. (1963) "The support of trenches using fluid mud", *Proc. of Symposium on Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice*", London U.K., pp.177-180.
9. Piaskowski, A. and Kowalewski, Z. (1965) "Application of thixotropic clay suspension for stability of vertical sides of deep trenches without strutting", *Proc. of the 6th ICSMFE*, Montreal, Vol. 2, pp.526-529.
10. Rankine, W. M. J. (1857) "*On stability on loose earth*", *Philosophic Transactions of Royal Society*, London, Part Ⅰ, pp.9-27.
11. Schneebeli, G. (1964) "Le stabilite des tranchees profondes forees en prensence de boue" *Houille Blanche*, Vol.17 No.9, pp.815-820.
12. Thorley, C.B.B. and Forth, R.A. (2002) "Settlement due to diaphragm wall construction in reclaimed land in Hong Kong", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,* Vol.128 No.6, pp.473-478.
13. Tsai, J.S., Jou, L.D. and Hsieh, H.S. (2000) "A full-scale stability experiment on a diaphragm wall trench", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.379-392.

(접수일자 2006. 8. 30, 심사완료일 2006. 12. 4)