

## 연약점성토지반의 얇은 굴착시 줄말뚝을 이용한 흠막이공

### Earth Retaining Structure Using a Row of Piles during Shallow Excavation in Soft Clay

홍 원 표\*<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo

윤 중 민\*<sup>2</sup> Yun, Jung-Mann

송 영 식\*<sup>3</sup> Song, Young-Suk

#### Abstract

In this study, the earth retaining structure using a row of piles considering plastic flow of the ground is suggested for shallow excavation works instead of conventional anchored sheet-pile wall method in the marine clays with high groundwater level. The behavior of the earth retaining structure using a row of piles is precisely observed during excavation by inclinometer and piezometer installed in opposite to the excavation side. As a result of field measurement, it was found that the behaviors of the piles and the soil were influenced mainly by slope of excavation face, interval ratio of piles, fixity condition of pile head, and stability number, etc. The earth retaining structure using a row of piles is ascertained for workability, stability, and economical construction on the soft ground having no adjacent structures.

#### 요 지

본 연구에서는 굴착부지가 넓고 지하수위가 높은 점성토지반에 얇은 굴착시 종래에 널리 적용되었던 강널말뚝 흠막이공 대신 줄말뚝을 이용한 흠막이공을 제안하였다. 줄말뚝을 이용한 흠막이구조물의 거동을 관찰하기 위하여 지하굴착기간동안 경사계 및 지하수위계를 설치하여 말뚝과 지반의 수평변위와 지하수위 변화를 조사하였다. 현장계측결과 말뚝과 지반의 변형거동은 굴착면 기울기, 말뚝두부구속조건, 말뚝설치간격, 굴착지반의 안정수 등의 요소에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 줄말뚝을 이용한 흠막이공의 시공성과 안정성 뿐만 아니라 근접시공의 문제점이 없는 연약지반에서는 강널말뚝 흠막이공보다 경제적인 공법임을 확인하였다.

**Keywords :** Soft clay, A row of piles, Field monitoring, Shallow excavation, Slope of excavation face

\*1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

\*2 정회원, 안산공과대학 토목과 전임강사

\*3 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

지하수위가 높은 지반에서 실시되는 지하굴착공사에는 일반적으로 강널말뚝 흠막이벽이 적용되며 흠막이벽 지지구조로는 굴착부지가 넓은 경우 앵커지지방식이 채택된다. 이러한 강널말뚝을 이용한 가설흠막이(물막이) 구조물에 대해서는 지반조건 및 지지방식 등을 고려한 토압, 모멘트 등 강널말뚝의 변형에 대한 연구(Rowe, 1957; Lambe & Whitman, 1979) 뿐만 아니라 지지구조인 앵커 및 타이백시스템의 극한 저항력 등에 대한 연구(Littlejohn, 1970; Neeley et al., 1973)도 많이 이루어져 설계법도 확립되어 있는 상태이다.

그러나 해안매립지와 같이 연약한 해성점성토가 매우 두텁게 분포되어 있는 지반에서 본 공법이 적용되는 경우 지지체인 앵커의 정착장을 기반암층에 설치하는데 어려움이 있으며 자유장의 길이가 상당히 길어져 흠막이벽의 지지효과를 충분히 발휘하지 못할 수 있다. 또한 본 흠막이벽은 수밀성이 뛰어나므로 지하수위가 높은 지반에서는 오히려 수압이 크게 작용하게 되어 흠막이벽의 과도한 변형을 유발시켜 안정성에도 문제가 야기될 수도 있다.

본 연구의 사례현장은 굴착깊이가 얇고 현장주변에 구조물이나 지중매설물이 없어 근접시공의 문제점도 거의 없는 현장이다. 따라서 현장주변환경 및 굴착공사에 대한 시공성 및 경제성을 고려하여 기존의 설계안인 1단 앵커 지지방식의 강널말뚝 흠막이벽 대신 엄지말뚝(흠막이말뚝)을 일정간격으로 1열 혹은 2열로 지중에 관입시켜 배면 토압에 저항하는 흠막이공(이후 줄말뚝을 이용한 흠막이공이라 함)을 적용하는 것으로 하였다(홍원표 외 2인, 1998).

따라서 본 연구에서는 연약점성토지반에서 줄말뚝을 이용한 흠막이공의 합리적인 지하굴착방안을 제안하고, 근접시공에 문제점이 없는 점성토지반의 얇은 굴착공사에서 본 공법의 시공성, 안정성 그리고 경제성을 확인하는데 있다. 이를 위하여 흠막이말뚝 및 굴착배면지반에 경사계 및 지하수위계를 설치하여 주기적으로 현장계측을 실시한다. 그리고, 현장에서 측정된 계측결과를 이용하여 흠막이말뚝과 굴착배면지반에 대한 변형거동과 이에 영향을 미치는 요소를 조사·분석한다.

## 2. 사례현장

### 2.1 현장개요

본 연구의 사례현장은 경기도 안산시 고잔지구에 P아

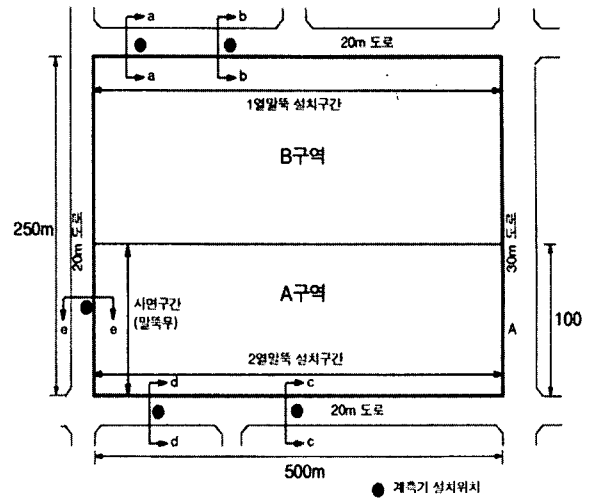


그림 1. 굴착평면도 및 계측기 설치위치

파트가 건설되는 공사현장이다. 본 현장은 연약한 해성점성토 지반에서 실시된 지하굴착현장으로서 굴착면적은 500m×250m이고 굴착깊이는 6.2m이다. 그리고, 굴착주변에는 택지조성사업이 진행되고 있으며 기설 구조물이나 지하매설물이 전혀 없어 굴착으로 인한 근접시공의 문제점은 전혀 없는 현장이다.

그림 1은 본 현장의 굴착평면도 및 계측기 설치위치를 나타낸 것이다. 본 현장의 아파트 단지조성을 위한 지하굴착공사는 그림에 나타낸 바와 같이 A구역과 B구역으로 구분되어 진행되었다. 먼저 A구역에서 지하굴착을 실시하고 굴착시공상황에 따른 흠막이벽 및 굴착배면지반의 변형거동을 계측결과를 토대로 관찰 한 후 B구역의 지하굴착공사에 이 결과를 활용하여 흠막이공을 실시하는 것으로 되어있다.

### 2.2 지반특성

지반조사 결과 본 현장의 지층구성은 그림 2에 나타난 바와 같이 매립토층, 점성토층, 모래자갈층, 풍화토층, 풍화암층 순으로 구성되어 있다. 표토층은 택지조성시 작업 차량의 주행성을 확보하기 위하여 점성토층위에 1.5~2.0m 두께로 포설되어 있다. 점성토층은 매립토층 아래 12.4m~13.7m의 두께로 분포하고 있으며 표준관입시험 결과 N치는 1~16의 값을 갖으며 상부에서는 매우 연약하고 하부로 갈수록 굳은 상태를 보이는 것으로 나타났다. 그 하부에는 하상퇴적층인 모래자갈층이 조밀 내지 매우 조밀한 상대밀도를 보이며 분포하고 있다. 모래자갈층의 하부에는 기반암이 풍화된 풍화잔류토 및 풍화암이 놓여 있

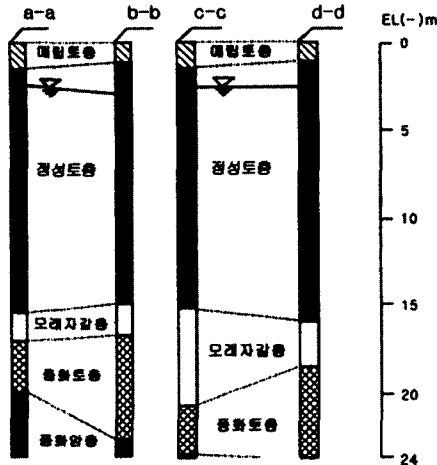


그림 2. 토질주상도

표 1. 점토층의 실내시험결과

깊이(m)	함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	일축압축시험 Cu (kg/cm <sup>2</sup> )	삼축압축시험 Cu (kg/cm <sup>2</sup> )
2.0~2.7	56.5 ~59.4	42.7 ~45.8	22.7 ~28.7	0.27~0.41	-
4.0~4.7	51.9 ~64.7	43.6 ~47.6	23.4 ~26.9	0.33~0.46	0.32~0.38
6.0~6.7	52.3 ~56.5	42.4 ~46.5	19.7 ~26.6	0.50~0.64	-

다. 한편 본 현장의 지하수위는 약GL(-)2.0~2.5m정도에 위치하고 있다.

본 현장에 두텁게 분포되어 있는 해성점성토층의 물리역학적 성질을 분석하기 위하여 실내시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료는 그림 1에 나타나 있는 A구역의 계측기 설치위치에서 2.0m~6.7m 깊이에 있는 점성토층의 불교란 시료를 채취하였다. 실내시험은 애터버그한계시험, 함수비시험, 일축압축시험, 삼축압축시험(UU Test) 등을 실시하였으며, 이들 실내시험결과를 정리하면 표 1과 같다.

### 2.3 흠막이공

본 현장의 흠막이공은 당초설계에는 Sheet - Pile을 1열로 맞물려 시공하는 강널말뚝 흠막이벽으로 말뚝의 근입 깊이는 10m 정도로 되어 있다. 그리고 흠막이벽은 1단 앵커를 설치하여 지지하는 것으로 되어 있으며 수평면과 40°의 각도를 이루는 것으로 되어 있다. 그러나 본 현장에서는 앵커지지 강널말뚝 흠막이공을 적용하는데 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 나타나 설계를 변경하는 것으

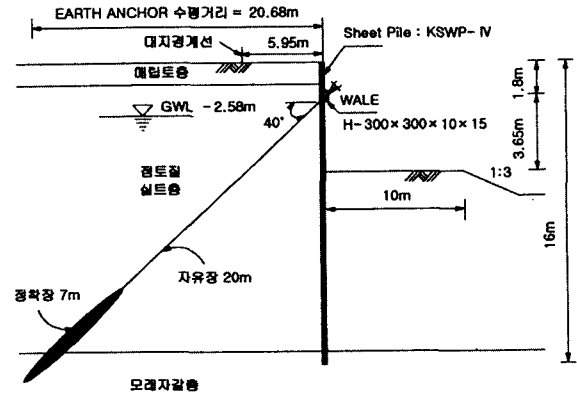


그림 3. 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽

표 2. 강널말뚝 흠막이공과 줄말뚝을 이용한 흠막이공의 경제성 비교

구 분	강널말뚝 흠막이공	줄말뚝 흠막이공
소요비용	₩1,880,000,000	₩980,000,000
지지방식	앵커	무지보
사용말뚝본수	강널말뚝 : 2746본 앵커 : 536본	H-말뚝 : 720본 흠막이판 : 480본
시공기간	장기간	단기간

로 하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 본 현장의 경우 흠막이벽을 지지하는 앵커의 정착장이 기반암층에 위치하는 것이 아니라 점성토층과 모래자갈층 사이에 위치하고 있어 흠막이벽의 지지효과를 충분히 발휘하지 못할 수도 있다. 그리고 지하수위가 높으므로 수압이 크게 작용하게 되어 흠막이벽의 과도한 변형이 유발될 수 있다.

본 현장은 굴착부지가 상당히 넓어 강널말뚝 흠막이벽을 적용할 경우 줄말뚝을 이용한 흠막이공에 비해 말뚝 사용본수가 상당히 많아 시공비용이 증가하고 공사기간도 길어 비경제적인 시공이 될 수 있다. 표 2는 본 연구의 사례 현장에 대한 앵커지지 강널말뚝 흠막이공과 줄말뚝을 이용한 흠막이공을 서로 비교한 것이다.

본 현장은 주변에 기설 구조물이나 지중매설물이 없고 굴착깊이가 비교적 얇아 근접시공에 대한 문제점이 전혀 없는 경우이다. 따라서 지하수위 저하에 따른 굴착배면지반의 침하를 어느 정도 허용하여도 큰 문제가 없으므로 위에서 언급된 문제점들과 시공성, 경제성 등을 고려하여 줄말뚝을 이용한 흠막이공을 적용하기로 하였다. 줄말뚝을 이용한 흠막이공은 산사태방지대책의 하나인 역지말뚝 공법(Matsui et al., 1982)을 응용하여 지하굴착현장에 흠막이구조물로서 적용한 것이다(홍원표 외 2인, 1989). 즉, 그림 4에 나타난 바와 같이 엄지말뚝을 일정간격으로 설치하고 1열 혹은 그 이상의 열로 지중에 관입시킨 다음 따

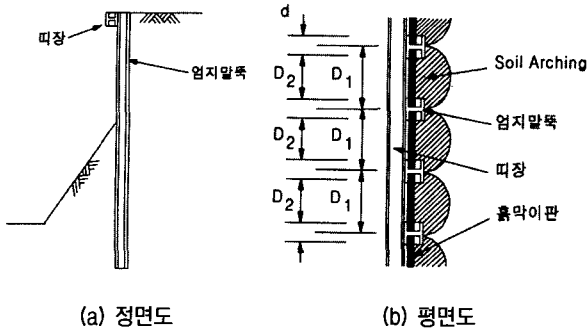


그림 4. 줄말뚝을 이용한 흠막이벽

장으로 상부를 결합시킨 후 굴착을 실시하는 방법이다.

본 현장에서는 굴착구간에 따라 H-300×300×10×15인 말뚝을 1열 또는 2열로 설치하는 것으로 하였다. 흠막이 말뚝(H-말뚝)의 근입깊이는 굴착면으로부터 약 10m로 모래자갈층까지 근입하는 것으로 하였으며 말뚝과 말뚝 사이의 중심간 간격은 1.8m로 하였다. 흠막이말뚝이 2열로 설치되는 구간에서 말뚝열 사이의 간격은 2m로 하였다.

### 3. 굴착시공

#### 3.1 굴착단면선정

본 현장은 굴착구간에 따라서 대지경계선과 아파트기초경계선 사이에 활용 가능한 시공부지의 여유폭이 차이가 있으므로 시공여유폭을 고려한 여러 가지 굴착시공방안의 제안이 가능하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 시공여유폭을 고려하여 말뚝을 설치하지 않은 굴착구간(이하 사면구간), 말뚝을 1열만 설치하는 굴착구간, 그리고 말뚝을 2열 설치하는 굴착구간으로 구분하여 이들 구간에서 각각 현장실험을 수행하였다. 말뚝이 설치된 구간의 굴착방법은 그림 5에 나타난 바와 같이 시공경계면까지의 여유폭이 약 6m인 경우 굴착면의 기울기를 1:1로 하고 말뚝을 1열로 설치하는 것으로 하였다. 그리고, 여유폭이 약 4m인 경우 굴착면의 기울기를 1:0.7로 하고 말뚝을 2열로 설치하는 것으로 하였다. 한편 사면구간은 굴착면의 기울기를 1:2.7로 하는 것으로 하였다. 표 3은 각 구간별 굴착배면지반의 안전율을 나타낸 것이다.

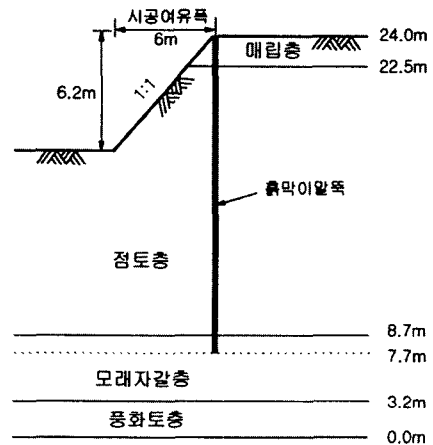
#### 3.2 굴착방법

1열말뚝 설치구간과 2열말뚝 설치구간의 시공과정은 구분하여 설명하면 다음과 같다. 먼저 1열말뚝 설치구간

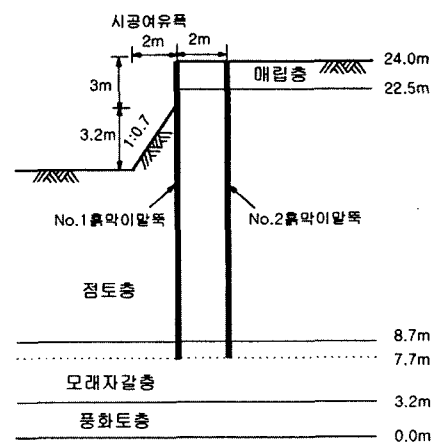
표 3. 굴착배면지반의 안전율

구분	1열말뚝 설치구간		2열말뚝 설치구간		사면구간
굴착면 기울기	1 : 1		1 : 0.7		1 : 2.7
굴착배면지반 안전율	말뚝 설치전	말뚝설치후		말뚝 설치전	말뚝 설치후
		말뚝설치 간격 1.8m	말뚝설치 간격 0.9m	말뚝설치간격 1.8m	
	0.9	1.1	1.3	0.7	1.2

은 굴착전 흠막이말뚝을 설치하고 말뚝상부를 띠장으로 연결한 후 굴착면의 기울기를 1:1로 유지하여 수동측의 저항력을 증가시키면서 굴착을 실시하는 것으로 하였다. 한편, 2열말뚝 설치구간은 말뚝을 2열로 설치하고 GL(-)3m까지 직립으로 굴착을 실시한 후 흠막이판을 설치하였다. 그리고 그 이하 깊이부터 최종굴착깊이(GL(-)6.2m)까지는 굴착면의 기울기를 약 1:0.7 정도 두어 흠막이공을 지지



(a) 1열말뚝 설치구간



(b) 2열말뚝 설치구간

그림 5. 줄말뚝을 이용한 흠막이공의 단면도

하도록 하면서 굴착을 실시하였다.

한편, 2열말뚝 설치구간에서 c-c단면은 굴착전에 No.1 말뚝열과 No.2말뚝열에 띠장을 설치하여 두열의 말뚝을 서로 결합시켰다. 그러나, d-d단면은 굴착전 No.1열 말뚝에만 띠장을 설치하고 굴착을 실시하고 굴착완료후 No.2 말뚝열에 띠장을 설치한 다음 No.1말뚝열과 No.2말뚝열을 서로 결합하였다. 즉, 1열말뚝에 설치된 띠장과 2열말뚝에 설치된 띠장을 L형강을 이용하여 warren truss 모양으로 서로 연결하여 말뚝열 전체를 용접이음 하였다.

#### 4. 현장실험

##### 4.1 계측기 설치

지하굴착에 따른 흙막이말뚝과 배면지반의 변형거동을 파악하기 위하여 계측장비를 활용하여 굴착시공중에 주기적으로 현장계측을 실시하였다. 말뚝이 설치되지 않은 굴착구간에는 1개단면에 경사계 1개소, 지하수위계 1개소를 설치하였으며 말뚝이 1열로 설치된 구간에는 2개단면에 경사계 4개소, 지하수위계 2개소를 설치하였다. 그리고 말뚝이 2열로 설치된 구간에는 2개단면에 경사계 8개소, 지하수위계 2개소에 설치하였다. 경사계와 지하수위계는 지표면으로부터 약 15~17m깊이에 설치하였다.

그림 6은 흙막이말뚝 및 굴착배면지반의 계측기설치 평면도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 흙막이말뚝이 1열로 설치된 구간은 경우 흙막이말뚝의 변형거동을 관찰하기 위하여 경사계를 흙막이말뚝 배면에 밀착시켜 설치하였다. 그리고 굴착배면지반의 변형거동과 지하수

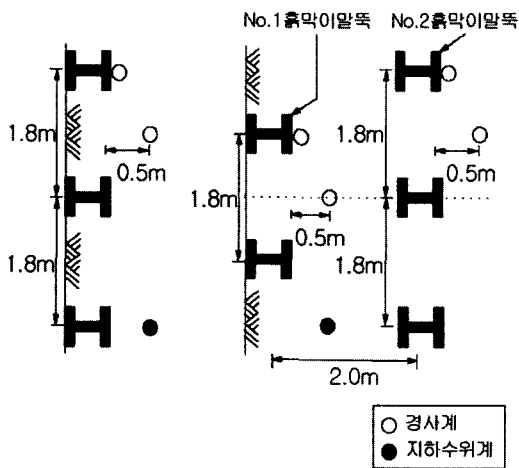


그림 6. 계측기 설치도

(a) 1열말뚝구간 (b) 2열말뚝구간

위 변화를 관찰하기 위하여 말뚝과 말뚝사이의 소성영역으로 예상되는 위치에 경사계와 지하수위계를 설치하였다. 그리고 흙막이말뚝이 2열로 설치된 구간도 말뚝이 1열로 설치된 구간과 동일한 방법으로 경사계 및 지하수위계를 설치하였다. 단 2열말뚝 배면지반속에는 지하수위계를 설치하지 않았다.

#### 4.2 계측결과

##### 4.2.1 수평변위

###### (1) 1열말뚝구간

그림 7 및 그림 8은 말뚝이 1열로 설치된 구간의 a-a단면과 b-b단면에서 측정된 말뚝과 배면지반의 수평변위를 시공단계별로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 굴착깊이가 증가함에 따라 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위는 점진적으로 증가하고 있으며 굴착완료 후에는 변위가 미세하게 증가하다가 일정한 값으로 수렴되고 있다. 계측종료시(굴착완료후 20일)까지 각 단면에서 측정된 수평변위량을 비교하여 보면 말뚝의 수평변위가 지반의

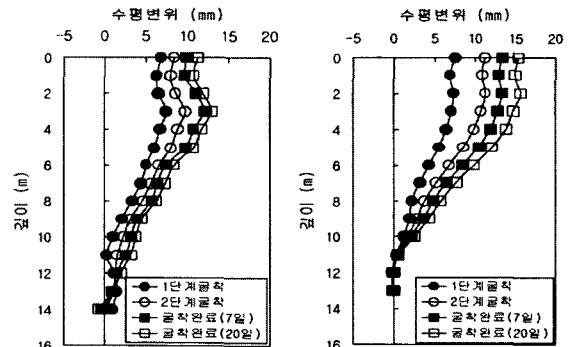


그림 7. a-a단면의 수평변위변화

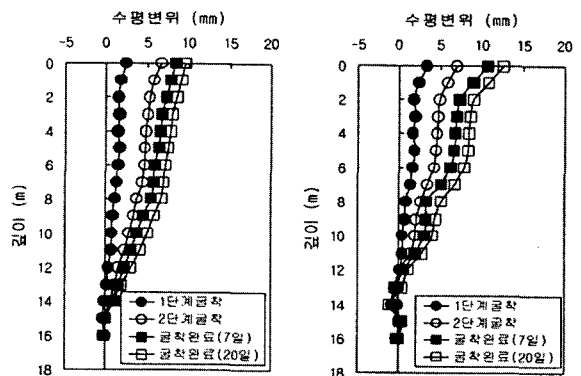
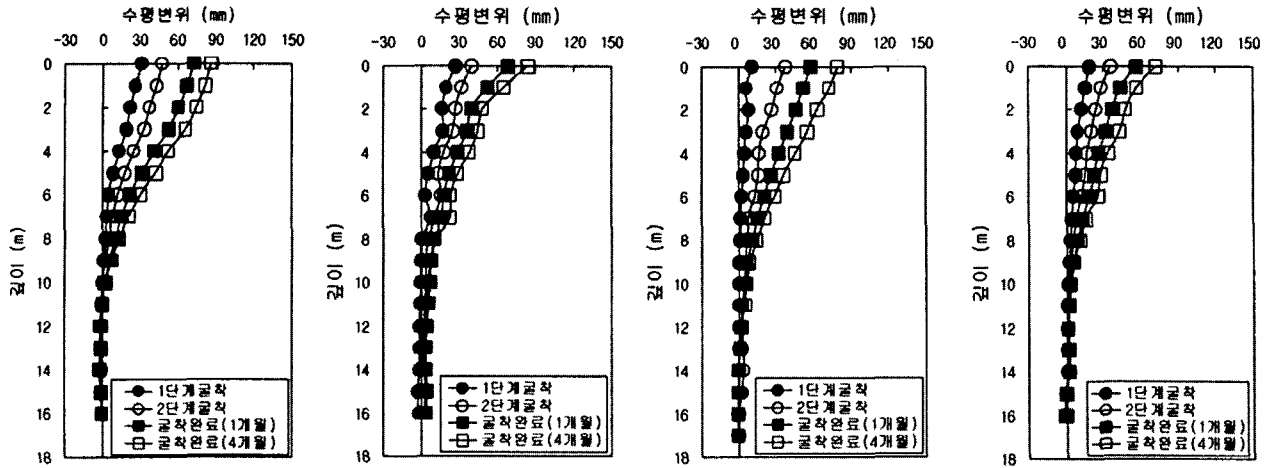
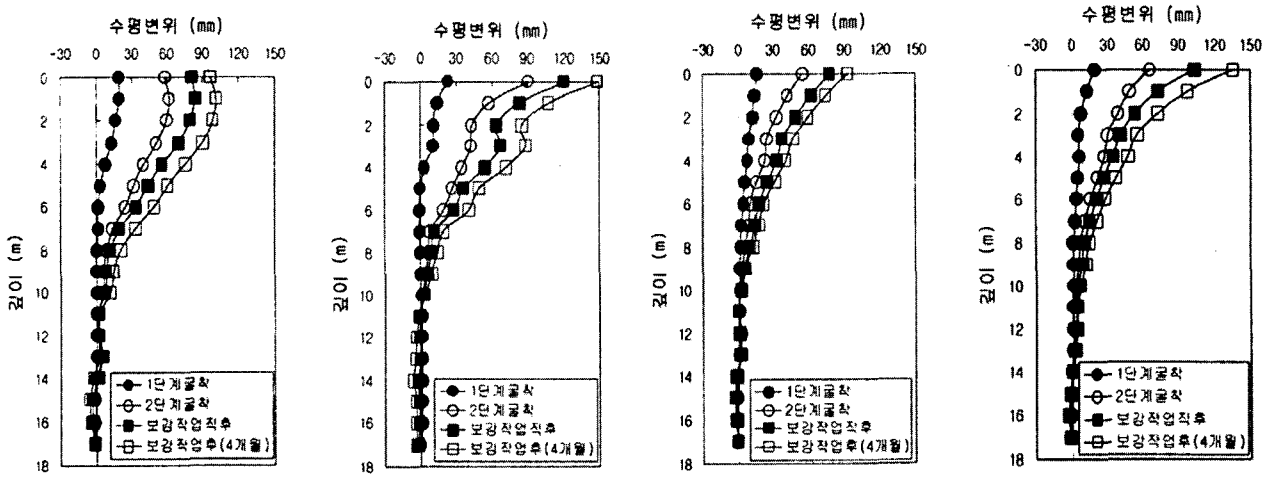


그림 8. b-b단면의 수평변위변화

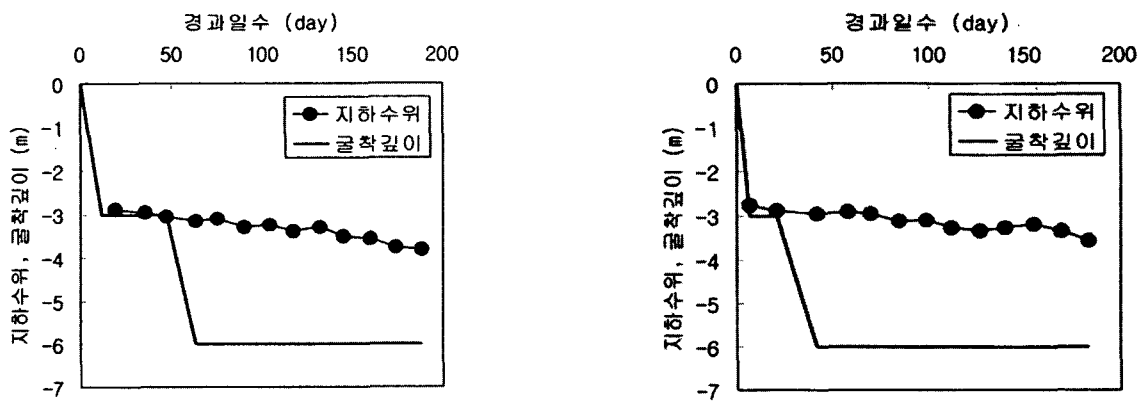
(a) 흙막이말뚝 (b) 배면지반



(a) No.1말뚝 (b) No.1말뚝배면지반 (c) No.2말뚝 (d) No.2말뚝배면지반  
 그림 9. c-c단면의 수평변위변화



(a) No.1말뚝 (b) No.1말뚝배면지반 (c) No.2말뚝 (d) No.2말뚝배면지반  
 그림 10. d-d단면의 수평변위변화



(a) c-c 단면 (b) d-d단면

그림 11. 굴착에 따른 지하수위변화

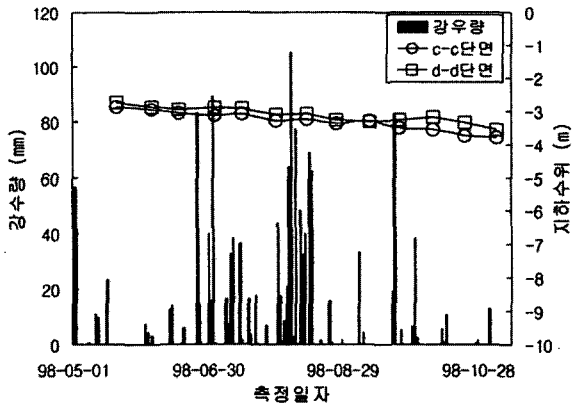


그림 12. 강우와 지하수위와의 관계

수평변위보다 작게 발생하고 있다. 말뚝의 최대수평변위량은 9~13mm정도 발생하였으며 지반의 최대수평변위는 13~16mm정도 발생하였다.

### (2) 2열말뚝구간

그림 9 및 그림 10은 2열말뚝이 설치된 굴착구간의 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위를 시공단계별로 도시한 것이다. 그림 9에 나타난 바와 같이 굴착전에 No.1말뚝열과 No.2말뚝열에 띠장을 설치하고 트러스형태로 강체결합을 실시한 c-c단면의 경우에는 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위량이 굴착깊이에 비례하여 점진적으로 증가하지만 급격한 증가현상은 보이지 않고 있다.

한편, 그림 10에 나타난 바와 같이 굴착전 No.1말뚝열에만 띠장을 설치한 d-d단면의 경우 굴착이 GL(-)3.2m까지 굴착이 진행되는 동안에는 굴착배면지반에서 관로공사를 위하여 폭 3m, 깊이 4m인 트렌치 굴착이 이루어져 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위량은 a-a 단면보다 작게 발생하고 있다. 그러나 배면지반에 굴착된 폭 3m, 깊이 4m인 트렌치의 되메우기 완료되고 계속 굴착이 진행되어 최종굴착깊이(GL(-)6.2m)까지 굴착이 완료된 이후 수평변위는 급격히 증가하고 있다. 따라서 흙막이말뚝 보강작업을 실시하였으며 그 이후에는 말뚝 및 지반의 수평변위의 증가량이 a-a단면과 유사하게 둔화되는 경향을 보이고 있다

### 4.2.2 지하수위

그림 11은 본 현장의 2열말뚝구간에서 굴착공사의 진행에 따른 지하수위의 변화를 측정된 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 b-b단면 및 c-c단면의 굴착전 지하수위는 각각 GL(-)2.87m 및 GL(-)2.75m에 위치하고 있었으나 굴착이 진행되는 동안 서서히 감소하여, 계측종료시(굴착

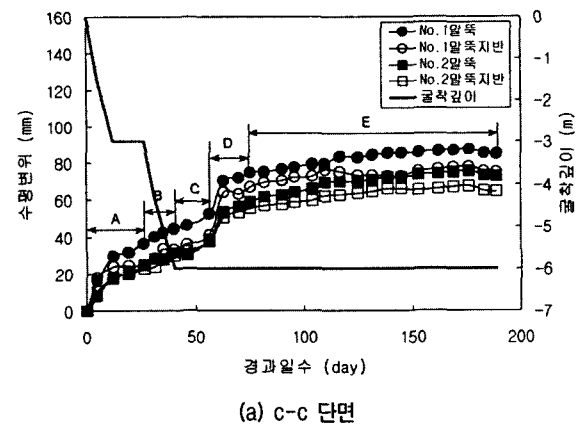
완료 후 약 4개월)에는 약 0.8~0.9m 정도 저하되어 GL(-)3.8m 및 GL(-)3.58m에 위치하고 있는 것으로 나타났다.

한편, 그림 12는 배면지반의 지하수위와 강우와의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 우리나라의 전형적인 기후특성인 장마로 인하여 6~9월 사이에 총강우량의 78%가 집중된 것으로 나타났다. 특히, 8월 달에만 총강우량의 35%가 집중된 것을 알 수 있다. 그러나, 본 현장에서 계측된 지하수위는 강우에 민감하게 영향을 받지 않고 있음을 볼 수 있다. 이러한 이유로는 본 현장의 지층이 투수성이 매우 낮은 점토층으로 구성되어 있어 일시적인 집중호우에 의한 강우가 지반속 깊이 유입되지 못하고 일부만 지표면의 매립층에만 침투되고 대부분이 지표로 유출되었기 때문이다.

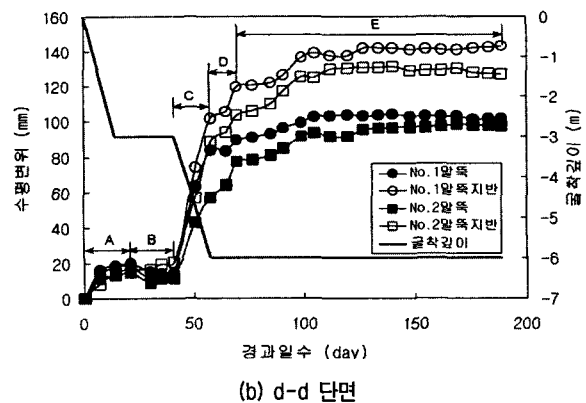
## 5. 분석 및 고찰

### 5.1 시공단계별 말뚝 및 지반의 변형거동

그림 13은 지하굴착으로 인한 흙막이말뚝과 배면지반의 변형거동을 분석하기 위하여 2열말뚝 설치구간의 c-c



(a) c-c 단면



(b) d-d 단면

그림 13. 시공단계별 말뚝 및 지반의 수평변위변화

표 4. 각 단면별 시공단계

시공단계	c-c단면	d-d단면
제1단계 (A영역)	1차굴착 (GL(-)3.0m)	1차굴착 (GL(-)3.0m)
제2단계 (B영역)	2차굴착 (GL(-)6.2m)	배면지반 굴착
제3단계 (C영역)	굴착면내부 굴착	2차굴착단계 (GL(-)6.2m)
제4단계 (D영역)	강우로 인한 지표수 침투	흙막이벽 보강단계 (트러스결합)
제5단계 (E영역)	정지작업 및 말뚝기초공사	정지작업 및 말뚝기초공사

단면과 d-d단면에서 측정된 흙막이말뚝 및 배면지반의 최대수평변위 변화를 시공단계별로 구분하여 나타낸 것이다. 각 단면의 시공단계는 표 4에 나타내었다.

그림 13(a)에서 보는 바와 같이 c-c단면의 경우, 1차 및 2차굴착단계에서 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위는 굴착깊이에 비례하여 증가하고 있으며 증가속도도 빠르게 나타나고 있다. 굴착깊이는 증가하지 않고 있지만 굴착면적이 넓어지는 굴착면 내부굴착단계에서는 수평변위가 계속적으로 증가하고 그 증가속도는 다소가 둔화되는 것으로 나타나고 있다. 한편, 강우로 인한 지표수 침투단계에서는 수평변위의 증가속도가 다시 빠르게 나타나고 있다. 이는 굴착완료후 장마철의 집중강우로 형성된 지표수가 지표면 매립층에 침투하여 지반의 단위중량을 증가시켜, 흙막이말뚝에 작용하는 측방토압이 증가되어 추가적인 수평변위의 발생이 유발된 것으로 판단된다. 굴착저면 정지작업 및 말뚝기초공사단계에서는 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위가 비교적 안정되고 일정한 값으로 수렴되는 경향을 보이고 있다.

한편, 그림 13(b)에 나타난 바와 같이 d-d단면의 경우, 1차굴착단계에서 굴착이 GL(-)3m까지 진행되는 동안 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위는 증가하였으나 그 이후 굴착이 일시적으로 중단된 기간에는 수평변위는 거의 증가하지 않고 일정하게 유지되고 있다. 배면지반 굴착단계에서는 흙막이벽체로부터 5m정도 떨어진 배면지반에 관로공사를 위하여 폭 3m, 깊이 4m의 트렌치를 굴착하여 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위가 굴착배면쪽으로 회복되는 현상을 보이고 있다. 2차굴착단계에서 굴착배면에서 굴착된 트렌치의 되메움작업이 완료되고 굴착이 GL(-)6.2m까지 진행되는 동안 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위는 급격히 증가하고 있으며 굴착이 완료된 후에도 수평변위는 계속적으로 증가하고 있다. 따라서 수평변

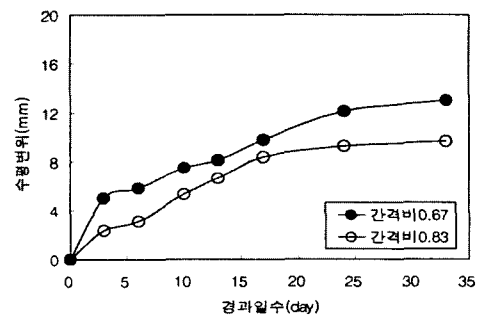
위의 증가를 억제시키기 위하여 No.1말뚝열과 No.2말뚝열을 L형강으로 결합시키는 보강작업을 실시하였다. 보강직후 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위 증가량은 크게 둔화되어 보강효과가 있는 것으로 나타났다. 굴착이 완료되고 굴착저면지반의 정지작업 및 말뚝기초공사단계에서는 c-c단면과 마찬가지로 수평변위가 비교적 안정되고 일정한 값으로 수렴되는 경향을 보이고 있다.

## 5.2 변형거동에 영향을 미치는 요소

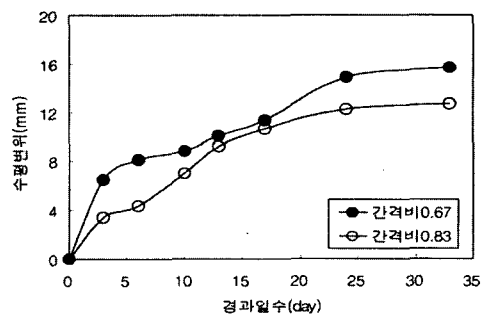
### 5.2.1 말뚝간격비

말뚝이 1열 혹은 2열의 줄말뚝으로 설치되는 경우 줄말뚝에 작용하는 토압은 지반과 말뚝사이의 상호작용에 의해 결정되므로 단일말뚝의 변형거동과는 상당히 다르다 (홍원표, 1984). 이러한 줄말뚝의 말뚝간격에 대한 영향을 조사하기 위하여 1열말뚝 설치구간에서 a-a단면은 말뚝을 1.8m 간격으로 설치하여 말뚝간격비 ( $D_2/D_1$ )를 0.83으로 하였고, b-b단면은 말뚝을 0.9m 간격으로 설치하여 말뚝간격비 ( $D_2/D_1$ )를 0.67로 하였다.

그림 14는 말뚝설치간격에 따른 흙막이말뚝 및 배면지반의 최대수평변위량을 비교하여 나타낸 것이다. 일반적인



(a) 흙막이 굴착



(b) 배면지반

그림 14. 말뚝설치간격에 따른 최대수평변위량 비교



으로 말뚝의 간격비가 작을수록 말뚝의 수평변위는 크게 발생한다. 이는 말뚝간격이 작을수록 지반아칭현상이 보다 확실히 발생하여 말뚝에 작용하는 하중이 크기 때문이다. 그림 14(a)에서도 흙막이말뚝의 수평변위량은 말뚝간격비가 작을 경우가 크게 발생하고 있으며 이로 인하여 그림 14(b)에 나타난 배면지반의 수평변위량도 크게 발생하고 있다. 한편, 말뚝의 설치간격에 관계없이 배면지반의 수평변위량이 말뚝의 수평변위량보다 크게 발생하고 있다. 이는 절개사면의 보강대책으로 역지말뚝공법이 적용된 현장에서 관찰된 역지말뚝과 사면지반의 거동과 유사함을 알 수 있다(홍원표 외 2인, 1995). 즉 말뚝사이의 지반에는 이들 변위의 상대적인 차이에 의하여 지반아칭(soil arching)현상이 발생되어 굴착배면지반의 활동을 말뚝이 저항하고 있음을 알 수 있다.

### 5.2.2 말뚝두부 구속조건

흙막이말뚝의 두부구속조건에 의해 흙막이말뚝과 배면지반의 변형은 큰 영향을 받게 된다. 앞에서 언급된 바와 같이 2열말뚝 설치구간의 c-c단면과 d-d단면은 굴착시 흙막이말뚝의 두부구속조건이 서로 다르게 시공되었다. 즉, 굴착이 진행되는 동안 c-c단면은 말뚝두부 구속조건이 회전구속이고, d-d단면은 자유조건이 된다.

그림 15는 말뚝두부 구속조건에 따른 말뚝 및 지반의 변형을 검토하기 위하여 c-c단면과 d-d단면의 No.1말뚝열과 No.1말뚝열 배면지반의 최대수평변위를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝두부조건이 자유조건인 d-d단면에서 발생된 흙막이말뚝 및 배면지반의 최대수평변위량이 회전구속인 c-c단면의 최대수평변위보다 크게 발생하고 있으며 특히, 배면지반의 수평변위량은 자유조건인 경우가 거의 두배이상 크게 발생하고 있다. 그리고 굴착전 전·후 말뚝열을 미리 결합시켜 말뚝두부

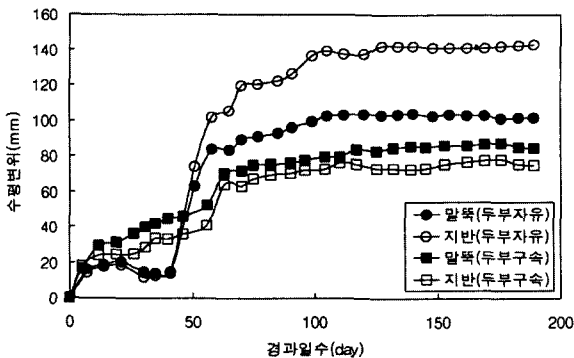


그림 15. 말뚝두부구속조건에 의한 영향 (2열말뚝의 경우)

가 회전구속된 c-c단면은 지표면부근에서 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위가 비슷하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 5.2.3 지반의 안정수

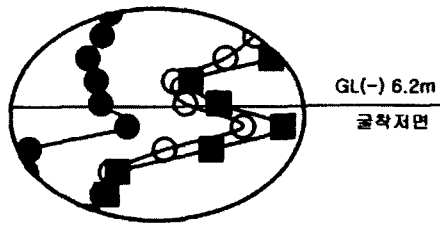
Peck(1969)은 굴착저면지반의 안정검토를 위하여 굴착지반의 전단강도와 굴착깊이와의 관계로부터  $N_s = \gamma H / c_u$ 로 표현되는 굴착지반의 안정수를 제안하였다. 여기서  $\gamma$ 는 단위중량,  $H$ 는 굴착깊이, 그리고  $c_u$ 는 비배수전단강도이다. 즉, 굴착지반의 안정수가 3.14이상이면 지반의 소성영역이

발생되기 시작하고 5.14이상이면 소성영역의 확대에 의한 저부파괴가 발생된다고 하였다.

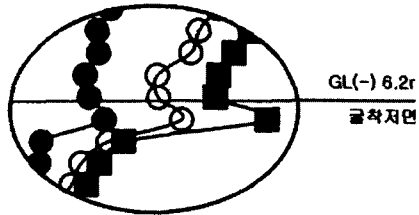
본 현장의 굴착지반 ( $H: 6.2m$ ,  $\gamma: 1.68t/m^3$ ,  $c_u: 2t/m^2$ )에 대해서 굴착저면의 안정성을 검토한 결과 굴착지반의 안정수가 5.21로 나타나 굴착저면의 안정성에 문제가 있는 것으로 나타났다. 그림 16에 나타난 d-d단면의 배면지반 수평변위도에서 GL(-)6.5m 지점의 변위형태로 미루어 볼 때 굴착저면지반속에서 지반의 측방유동이 발생하여 소성영역이 확대되고 있음을 분명히 알 수 있다. 한편, 그림 17은 굴착저면부근(GL(-)6.5m지점)에서 측정된 굴착저면지반속의 최대측방이동량을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 최대측방이동량은 No.1말뚝열 배면지반속에서 18mm정도, No.2말뚝열 배면지반속에서 약 10mm정도 발생하고 있다. 그리고 굴착저면지반의 소성영역은 No.1말뚝열 배면지반에서 먼저 발생되기 시작하여 배면지반의 측방이동량이 어느 정도 증가한 후에 No.2말뚝열 배면지반에서 소성영역이 발생되고 있다. 한편, 그림에서 배면지반의 측방이동량이 일시적으로 감소하는 영역이 나타나고 있는데 이는 아파트 기초공으로 말뚝을 굴착지반속에 시공하는 과정에서 지반이 굴착배면 쪽으로 이동하였기 때문이다. 그리고, 말뚝시공이 완료된 이후에는 다시 굴착면 쪽으로 지반이 이동하는 것으로 나타나고 있다.

### 5.2.4 굴착면의 기울기

그림 18은 사면구간, 1열말뚝 설치구간, 2열말뚝 설치구간에서 측정된 지표면부근 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위량을 굴착깊이에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 최종굴착깊이에 대한 단계별 굴착깊이 ( $H/H_{max}$ )로 나타내고, 종축은 최종굴착깊이에 대한 수평변위



(a) No.1말뚝배면지반



(b) No.2 말뚝배면지반

그림 16. 굴착저면 수평변위 상세도

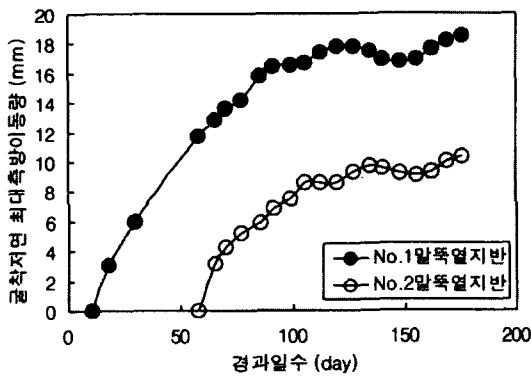


그림 17. 굴착저면지반의 최대측방이동량(2열말뚝의 경우)

( $\delta/H_{max}$ )로 무차원화시켜 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 흙막이말뚝 및 배면지반의 수평변위량은 2열말뚝 설치구간, 1열말뚝 설치구간, 사면구간 순으로 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉, 사면구간(홍원표 외 2인, 1999) 및 1열말뚝 구간은 지표면에서부터 굴착면을 일정한 기울기를 유지하면서 굴착이 이루어졌기 때문에 이 굴착사면에 의한 수동측저항력(수동토압)이 증가하여 말뚝 및 지반의 수평변위가 작게 발생하는 것으로 판단된다. 반면, 2열말뚝 설치구간의 GL(-)3.0m까지는 직립으로 굴착한 후 그 이후 깊이부터 굴착면을 1:0.7의 기울기로 유지하면서 굴착이 이루어졌기 때문에 이 굴착사면에 수동측저항력이 그다지 크지 않아 말뚝을 2열로 설치하였음에도 불구하고 사면구간이나 1열말뚝 설치구간보다 크게 발생한 것으로 판단된다. 따라서 굴착으로 인

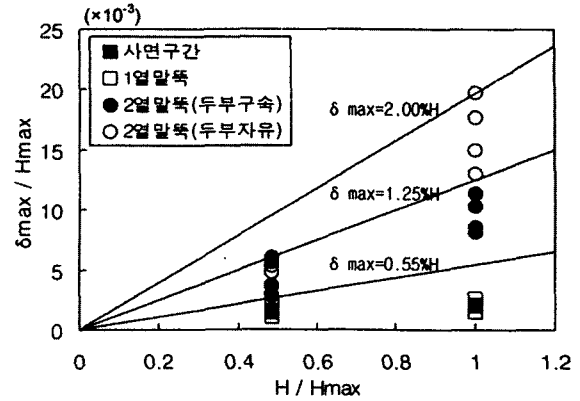


그림 18. 굴착깊이와 수평변위와의 관계

한 말뚝 및 지반의 변형은 말뚝의 강성, 말뚝의 설치간격, 말뚝두부의 구속조건, 말뚝열수 등에도 영향을 받지만 이보다도 굴착면의 기울기에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

줄말뚝을 이용한 연약점성토지반의 얇은 굴착시 흙막이말뚝 및 지반의 변형거동을 조사하기 위하여 시험시공현장을 선정하고 현장계측을 실시하였다. 그리고, 현장계측결과를 이용하여 흙막이말뚝과 배면지반의 변형거동과 영향요소를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 근접시공에 문제점이 없는 점성토지반의 얇은굴착공사에서 줄말뚝을 이용한 흙막이벽을 설치할 경우 기존의 앵커지지 강널말뚝 흙막이벽보다 매우 경제적이며, 시공성이 우수함을 확인할 수 있다.
- 2) 연약점성토지반에서 굴착부지의 시공여유공간을 활용한 합리적인 지하굴착방안을 제안하였다.
- 3) 굴착으로 인한 말뚝 및 지반의 변형은 말뚝의 설치간격, 말뚝두부의 구속조건, 말뚝열수 등에 영향을 받지만 이보다도 굴착면의 기울기에 더 큰 영향을 받고 있다.
- 4) 굴착저면지반의 안정수가 5.14를 초과하면 말뚝사이에서 지반의 측방유동이 발생하여 굴착저면지반속에서 소성영역이 확대되고 파괴가 발생하고 있음을 분명히 알 수 있다.
- 5) 말뚝 및 지반의 수평변위량은 2열말뚝 설치구간, 1열말뚝 설치구간, 사면구간 순으로 크게 발생하고 있다. 즉, 굴착전면지반의 지지효과가 있는 사면구간 및 1열말뚝 설치구간의 흙막이말뚝과 배면지반의 수평변위량은

굴착전면지반의 지지효과가 거의 없는 2열말뚝 설치구간의 수평변위량보다 작다.

### 참고문헌

1. 홍원표(1984) "수동말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회 논문집, 제4권, 제2호, pp.77-88.
2. 홍원표, 권우용, 고정상(1989) "점토지반속 주열식 흙막이벽 설계법", 대한토질공학회 논문집, 제5권, 제3호, pp.29-38.
3. 홍원표, 한중근, 송영석(1999) "역지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면의 설계", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제5호, pp.157-170.
4. 홍원표, 한중근, 윤중만(1998) "사면안정용 역지말뚝의 해석법 및 적용사례", 사면안정 학술발표회 논문집, pp.7-50.
5. 홍원표, 한중근, 이문구(1995) "역지말뚝으로 보강된 절개사면의 거동", 한국지반공학회 논문집, 제11권, 제4호, pp.111-124.
6. Lambe, T. W. and Whitman, R. V.(1979) Soil mechanics (SI version), John Wiley & Sons, pp.12-14.
7. Littlejohn, G. S.(1970) "Soil anchors", Proc. Conference on Ground Engineering, Institute of Civil Engineers, London, pp.33-44.
8. Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T.(1982) "Earth pressures on piles in a row due to lateral soil movements", Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.71-81.
9. Neeley, W. J., Stuart, J. G. and Graham, J.(1973) "Failure loads of vertical anchor plates in sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.99, No. SM9, pp.669-685.
10. Peck, R. B.(1969) "Deep excavation and tunneling in soft ground", Proc. 7th ICSMFE, State of the art volume, pp.225-290.
11. Rowe, P. W.(1957) "Sheet pile walls in clay", Proc. Institute of Civil Engineers, Vol.7, pp.629-654.

(접수일자 1999. 11. 16)