大韓土木學會論文集
第10卷 第1號 · 1990年 3月
pp. 145~153

느슨한 모래地盤에서 앵커로 支持된 널말뚝의 背面地盤沈下

Settlement of Ground Surface behind Anchored Sheet-Piles in Loose Sand

千 柄 植* · 姜 寅 成**
Chun, Byung Sik · Kang, In Sung

Abstract

The relationship between ground surface settlements and wall displacements associated with excavation is analysed by the results of model test of anchored sheet-piles in loose sand. The effect of wall restriction at the toe, anchor slope, wall rigidity, and excavation level on settlement of ground surface and wall displacement are considered for model test. The results of model test are compared with the theory and the results of field measurement of braced wall. The results of analysis are shown by fitted regression equations that may be used for prediction of ground surface settlement adjacent to anchored sheet-piles. It is found that wall displacement and ground surface settlement associated with excavation are different from the supporting methods.

要 旨

本 硏究는 굴착에 따른 地盤沈下와 壁變形의 관계를 규명하고자 느슨한 모래 地盤에서 앵커로 支持된 널말뚝의 模型實驗을 한 것이다. 實驗에 고려된 요소로는 널말뚝의 下端拘束, 앵커의 傾斜角, 널말뚝의 剛性, 굴착段階이며 實驗結果는 기존의 理論과 버팀대로 支持된 土留壁의 現場計測結果와 비교되었다. 分析結果는 一段의 앵커로 支持된 널말뚝의 地盤沈下를 예상하는 데에 이용될 수 있는 回歸式으로 나타냈고, 굴착으로 인한 壁變形과 地盤沈下는 굴착면의 支持方法에 따라 차이가 크다는 것을 확인하였다.

1. 序 論

都心地의 地盤굴착工事를 위한 地下假設 構造物을 施工하는 동안 周邊地盤의 變形 문제는 土壓과 土留壁의 安定性 문제와 함께 중요한 검토 항목이다. 地盤의 굴착은 周邊地盤의 應力을 再分布시키고, 이로 인하여 地盤變形을 포함한 여러 가지의 土質工學的인 문제를 발생하게 한다. 흙의 應力-變形 特性, 施工의 影響, 沈下에 대한 構造物 能力 등의 상관 관계는 沈下量을 산정하는 데에 대단히

*正會員 · 漢陽大學校 工科大學 敎授, 土木工學科
**正會員 · 漢陽大學校 大學院 博士課程

중요하다.

굴착에 따른 地盤變位에 대한 연구는 경험적[1, 2], 이론적인 해석[3, 4, 7, 10], 現場計測[5, 6, 9]을 통하여 수행되고 있으나, 여기에 상관되는 요소들은 다양해서 정확한 상관 관계를 규명하기에는 쉽지 않다.

여러 地盤굴착工事現場의 變位計測資料를 분석한 기존 연구로서 Peck[1]의 土質條件과 굴착形態에 따른 沈下解析圖가 있는 데, 이 解析圖에서 最大沈下量은 굴착면에서 일어나고, 횡방향 거리의 증가에 따라 규칙적인 감소를 보여준다. 沈下形態에 대한 壁體剛性의 영향을 고려하지 않은 이 解析圖는 많은 이론적인 연구[4, 7]에서도 확인 되었다. Fry등[8]은 이 解析圖 보다 地質條件을 세분하여 地中의 鉛直, 水平變位를 구할 수 있는 解析圖表를 제시하였다. 또한 Mana등[5]은 연약 내지 중간 정도의 강도를 가진 粘土地盤 11곳의 現場計測資料와 유한요소 해석결과를 분석하여 버팀대로 지지된 굴착工事의 壁變位와 地盤沈下量을 산정하는 방법을 발표하였다. 飯吉[6]과 松尾등[9]도 여러 곳의 現場計測資料를 분석하였는 바, 飯吉[6]은 土質條件의 良否를 地下水位의 위치로 판별하였고, 松尾등[9]은 굴착現場周邊地盤의 沈下를 예측할 수 있는 回歸式을 제시한 바 있다. Caspe[10]는 버팀대로 지지된 널말뚝의 壁變形과 地盤沈下量의 관계에 대한 이론식을 제안하고, 이를 現場計測結果에 비교하여 합리적임을 입증하였지만, 이의 적용에 비평[11]이 있은 후 Bowles[12]에 의해 간편한 방법으로 수정 발표되었다. 유한요소의 해석방법의 地盤沈下分析에 적용[4, 13, 14]되었으나, 국내의 論文[15, 16]에서 발표된 바와 같이 예측결과가 실측결과의 20~40 %에 불과하여 地表變位가 應力解放效果에 의한 영향보다 시공의 영향이나 숙련도에 의해 지배되는 것으로 나타났다.

상기의 연구 대부분이 버팀대로 지지된 土留壁의 工事現場計測資料分析이나 이론적인 분석이므로 앵커로 지지된 널말뚝 구조물에 적용하기에는 적합하지 않다. 水平으로 지지된 버팀대에 비해 앵커의 경사는 다양하고 널말뚝 벽체의 강도 역시 다양하기 때문이다. 더구나 널말뚝의 下端이 견고한 지반위에 있을 경우 벽체의 움직임과 地盤沈下量이 달라진다[13]. 본 연구에서는 이러한 점을 배경으로 一段의 앵커로 지지된 널말뚝 벽체의 模型實驗을 통해서 地盤굴착에 따른 壁體의 움직임과 地盤沈下의 상관 관계를 분석하였다. 특히 널말뚝의 下端轉位 여부가 이들에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다.

2. 널말뚝 壁에 의해 지지된 地盤의 沈下

옹벽에 대한 主動土壓의 Rankine이나 Coulomb 이론에 따르면 壁 뒤에 흙쐐기가 작용한다. 그림 1과 같이 이 쐐기의 체적(ade)이 변하지 않는다면 壁體의 變位量(bacd)과 沈下體積(agfe)은 동일하다.

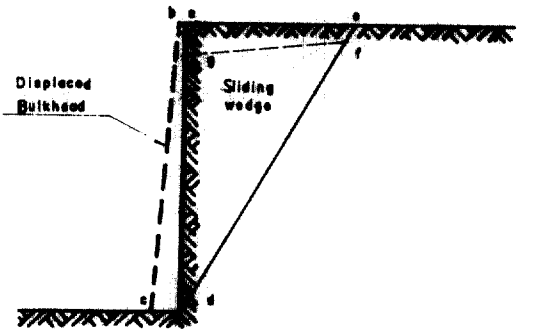

그림 1. Zone of influence by "sliding wedge theory"

굴착의 진행에 따른 앵커로 지지된 널말뚝의 變位는 塑性平衡狀態의 Rankine이나 Coulomb 이론의 壁變形과는 달리 앵커의 지점에서 回轉하므로 흙쐐기의 움직임을 앵커의 상부에서 막아준다. 이 때의 앵커 지점과 흙 지지 사이에는 arching 현상이 일어나므로, 이 위치에서는 지반내의 水平壓縮應力 증가가 일어난다[18]. 따라서 흙쐐기의 움직임에 의해 생기는 地盤沈下는 무시될 수 있다.

Caspe[10]은 버팀대로 지지된 널말뚝의 地盤沈下量 算定에서 그림 2 처럼 널말뚝 背面地盤을 3개 지역으로 구분하였다.

임의의 위치에서 水平變形은

$$\varepsilon_h = \Delta / L \qquad (1)$$

여기서 Δ는 두께 H인 水平切片의 伸張量이고 L는 널말뚝으로 부터 滑動面 까지의 수평 거리이다. 이 變形은 지역 A에서 균등하게 일어나며, 지역 C의 경계에서 0으로 선형 감소한다고 가정하였다.

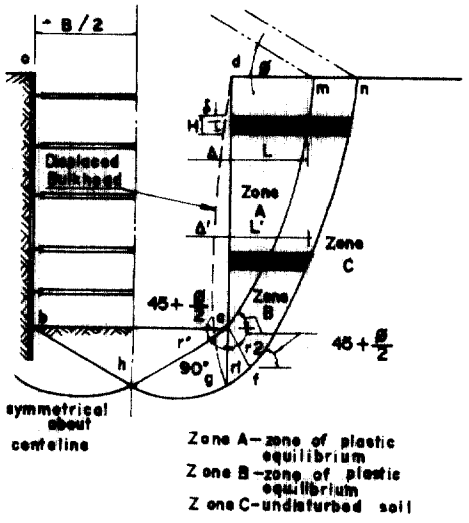

그림 2. Theoretical zones in soil behind bulkheads[10]

垂直變形과 水平變形의 관계는

$$\varepsilon_v = \mu\,\varepsilon_h = \mu(\Delta/L) \qquad (2)$$

이다. 여기에서 μ는 포아손비인 데 Kane[11]은 식 (2)가 一軸應力狀態이므로

$$\varepsilon_v = \frac{\mu}{1-\mu}\,\varepsilon_h \qquad (3)$$

라고 하였다. $\varepsilon_v = \delta/H$이므로

$$\delta = \frac{\mu}{1-\mu}\left(\frac{H\Delta}{L}\right) \qquad (4)$$

이다. 여기에서 $K_0 = \mu/(1-\mu)$로 한다면

$$\delta = K_0\left(\frac{H\Delta}{L}\right) \qquad (5)$$

인 데, Jaky 이론에 의해서

$$K_0 = 1 - \sin\bar{\phi} \qquad (6)$$

이므로 식 (5)는

$$\delta = (1-\sin\bar{\phi})\left(\frac{H\Delta}{L}\right) \qquad (7)$$

이다. 이 관계에 대해서 Bowles[12]는 地盤沈下曲線을 포물선으로 가정한 간편한 방법을 제시하였다.

3. 模型實驗

模型實驗의 實驗裝置, 使用材料 및 實驗方法등에 관한 상세한 사항은 발표된 필자의 일련의 연구[18]와 같으며 본 연구에 맞도록 보완된 사항은 다음과 같다. 사용된 모래의 密度는 1.51t/m³이고 內部摩擦角은 28°인 데, 이 때의 相對密度는 32 % 정도로 느슨한 상태이다. 이 모래와의 摩擦角이 19°인 시험 알미늄판은 길이(H)가 70 cm이며, 두께가 0.2 ~0.4 cm인 4개로 하여 유연성수를 $\log\rho = -5.35 \sim -6.25$로 하였다. 여기 에서 $\log\rho = \log\left(\frac{H^4}{EI}\right)$인 데, E(kg/cm²)는 시험판의 탄성계수이고 I(cm⁴/m)는 단위폭당 단면2차 모멘트이다. 앵커의 위치는 地表面에서 0.14H이며, 앵커의 傾斜角(α)은 水平面과 0°, 15°, 30°, 45°로 하고, 앵커의 荷重은 水平力이 自由端支持設計方法에 의한 設計荷重(0.04t/m)으로 하였으므로 각 傾斜角에 대한 引張力(T)은 0.04 secα이다. 널말뚝의 下端回轉狀態의 실험은 그림 3과 같이 시험판의 下端位置에 0.5 cm의 아크릴판을 깔았으며, 시험판은 이 위치에서 직경 3 mm 알미늄봉의 힌지로 고정시켜 수행하였다.

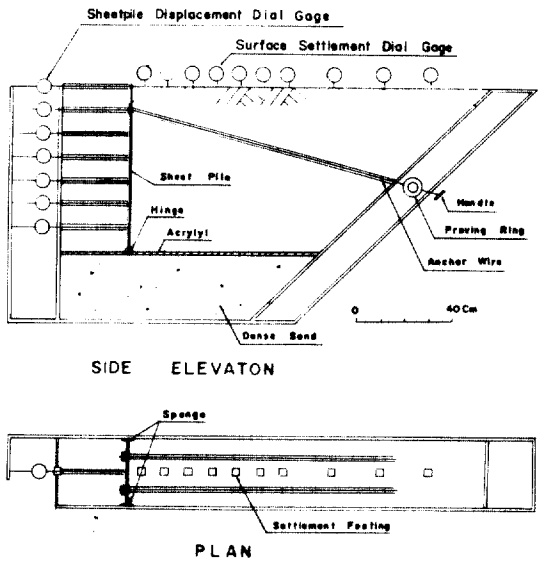

그림 3. Plan and section of test apparatus for hinged toe

4. 實驗結果 및 考察

4. 1 壁變位

그림 4는 自由端支持設計方法의 貫入 깊이에 대한 안전율(F_S)과 무차원의 壁變位 관계를 나타낸 것인데, 실험값은 각 앵커의 傾斜度에서 계측한 값

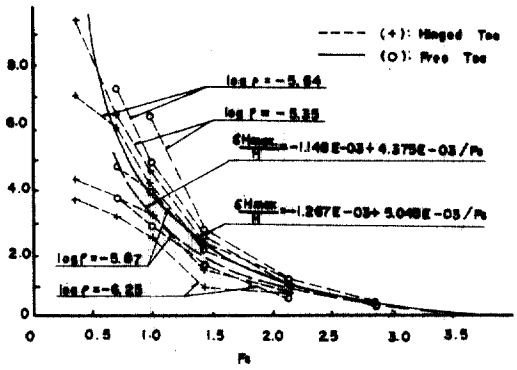

그림 4. The relationships between safty factor of penetration depth and wall displacement for different flexibility of walls

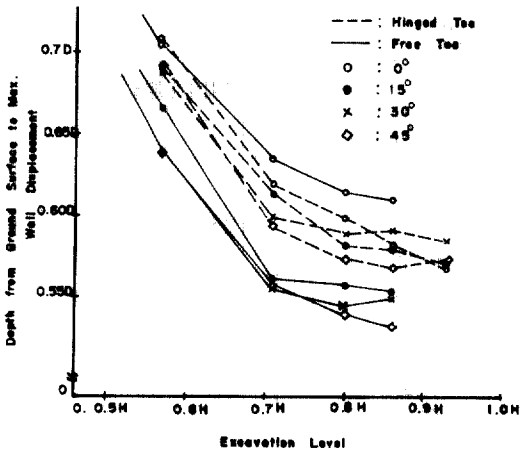

그림 5. The level of max. wall displacement associated with excavation

을 평균한 것이다. 안전율이 1.43 이하에서는 壁變位가 급하게 증가하는 현상을 보이며 柔軟性이 큰 壁體일수록 그러한 현상은 뚜렷하다. 또한 앵커 하단의 구속 여부에 대한 壁變位 관계를 回歸式으로 고찰해 보면 안전율이 작을수록 壁變位量의 차이가 심하여 안전율이 1일 때 自由端狀態가 回轉端狀態 보다 약 17 % 정도 큰 變位가 일어남을 알 수 있다. 단 이 回歸式들은 안전율이 0.71~2.86의 자료를 분석한 것인데, 이는 自由端狀態에서 안전율이 0.36일 때에 變位量을 계측할 수 없을 정도로 파괴되었기 때문이다.

地盤을 굴착하는 동안 앵커로 지지된 널말뚝 壁變位가 가장 크게 일어나는 지점을 壁의 柔軟性, 앵커의 傾斜度, 壁下端의 구속 여부의 관점에서 고찰하였다. 세로축을 원지표면으로부터의 거리로 나타낸 그림 5에서 처럼 굴착初期에는 壁의 最大變位支點이 굴착位置로 부터 가까운 곳에서 발생하는 데, 0.71 H 이상의 굴착 깊이(D)에서 부터는 굴착位置와 점차 멀어져 0.55 D~0.60 D의 위치에서 거의 일정하게 일어난다. 이것은 굴착初期에 앵커의 引張力으로 인하여 앵커 위치 부근의 壁體가 背面地盤 쪽으로 이동하여 굴착면 쪽으로의 變位量이 작고 最大壁變位發生支點은 상대적으로 굴착位置로 이동하기 때문이다.

그림 6은 실험 준비 시 모래 1개 층 (10 cm) 마다 0.5 cm 두께의 색 모래 층을 두었는데 굴착에 따른 地盤滑動으로 인한 절단 지점을 점선으로 표시한 滑動面이다. 壁이 강체이고 回轉端狀態에서는 하단까지 굴착하여도 절단 지점을 식별할 수 없었다. 앵커의 傾斜角이 15°일 때, 가장 柔軟한 壁 ($\log \rho = -5.34$)의 壁體變位에 미치는 滑動面내 土量은 自由端狀態가 回轉端狀態보다 약 4 % 정도 많음을 보여 준다. 또한 이 滑動面들은 버팀대로 지지된 壁體에 대한 Terzaghi[17]의 대수나선 滑動面

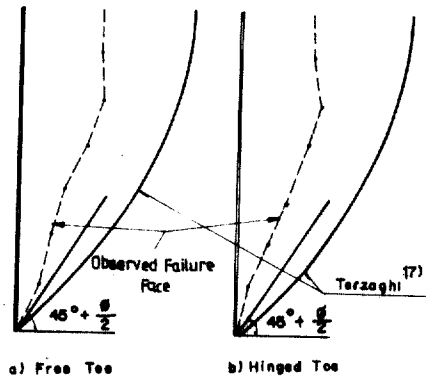

그림 6. Effect of restriction the toe of wall on failure face($\log \rho = -5.34$, $\alpha = 15°$)

과 $45°+\phi/2$의 面보다 壁에 가까운 곳에 위치해 있다.

그림 7은 壁體의 變位面積에 대한 最大 壁變位量을 나타낸 것인 데, 이는 앵커의 傾斜度나 壁體의 剛性에 관계없이 원점을 지나는 回歸式에 상관되고 있음을 보여 준다. 그러나 本 回歸式의 沈下量이 버팀대로 지지된 土留壁 工事現場計測資料를 분석한 松尾등[9]의 상관 관계식

$$\delta_{H\,max.}(mm)=71.39\,A_w(m^2)+2.345 \qquad (8)$$

과는 동일한 壁變形面積(A_w)에 대해서 3배 이상의 차이가 있다. 이는 一段의 앵커로 지지된 널말뚝의 壁變形形態가 버팀대로 지지된 土留壁과 달리 半圓形態[18]이고 실험 결과의 자료가 안전율 1.0 이하의 상태까지도 포함시켰기 때문으로 사려된다.

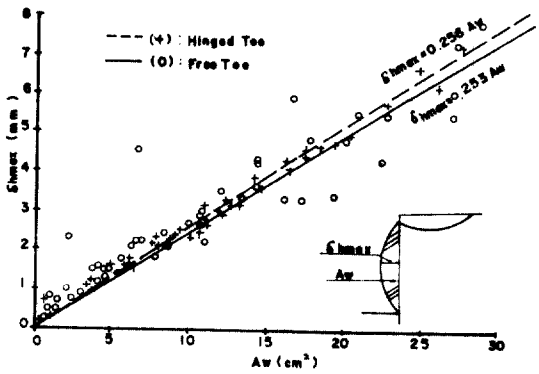

그림 7. Relationships between the max. wall diplacements and strain area of wall

4. 2 地盤沈下

그림 8은 가장 剛性이 큰 壁($\log\rho=-6.25$)과 가장 柔軟한 壁($\log\rho=-5.35$)의 실험 결과를 自由端支持設計方法에 의한 貫入 깊이(0.2 H) 보다 작도록 0.86 H를 굴착했을 때의 沈下曲線이다. 비교된 곡선 중에서 F_{IV}곡선은 F_{IV} 解析圖表[8]중 뒷채움 지반(Fill)인 E곡선에 해당하는 것이고, Peck 곡선은 Peck의 地盤沈下解析圖[1]의 지역 Ⅰ과 지역 Ⅱ의 경계 곡선을 역산한 것이다. Caspe 이론에 의한 Bowles곡선[12]은 $\log\rho=-6.25$壁의 回轉端狀態와 $\log\rho=-5.35$壁의 自由端狀態에 대한 것이다. 沈下量의 대부분은 Bowles의 2개 곡선 내에서 계측되었고, 沈下影響 범위는 Peck[19]의 한계와 飯吉[6]의 한계 내에서 계측되었다. 또한 비교된 3개의 곡선은 모두 壁體에서 最大沈下量을 보이는 데, 계측된 最大沈下量의 위치는 그림 9와 같이 앵커의 傾斜度와 굴착 깊이가 증가할수록 굴착면 방향으로 이동하는 경향이있다. 앵커의 傾斜角이 작을 때 自由端狀態는 回轉端狀態보다 약간의 차이로 壁體에 가까운 곳에서 발생하지만 傾斜角이 클수록 이 위치의

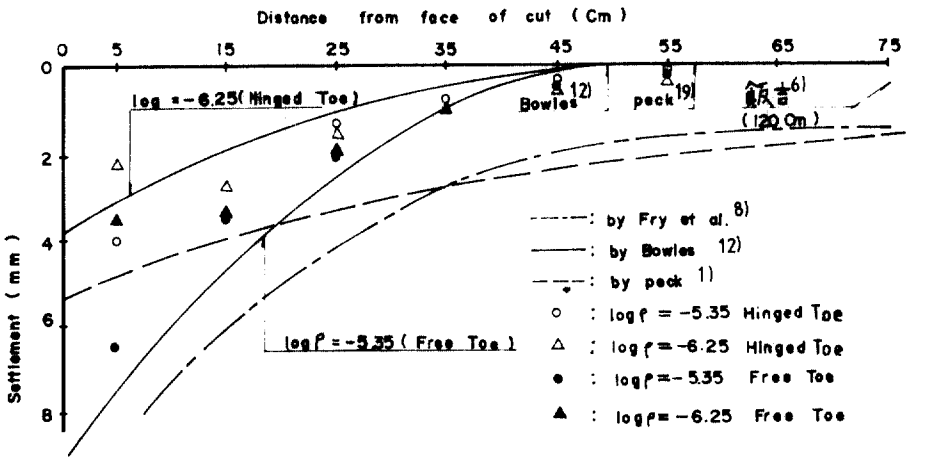

그림 8. Ground surface settlement(D=0.86 H, α=30°)

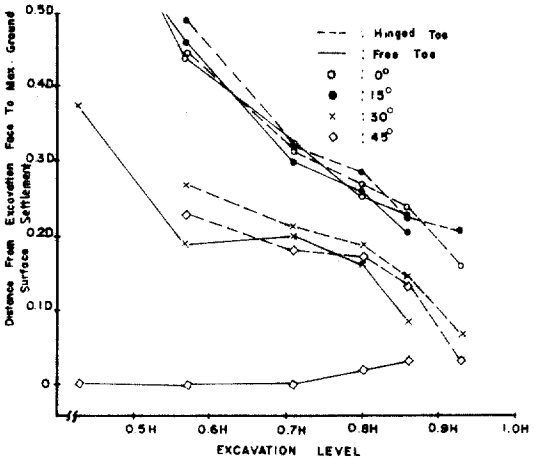

그림 9. The point of max. ground surface settlements associated with excavation

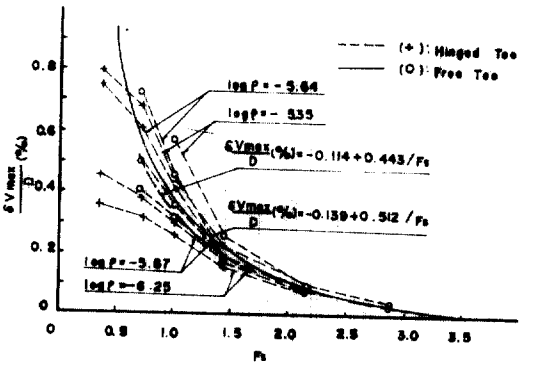

그림 10. The relationships between safty factor of penetration depth and ground surface settlement for walls of different flexibility

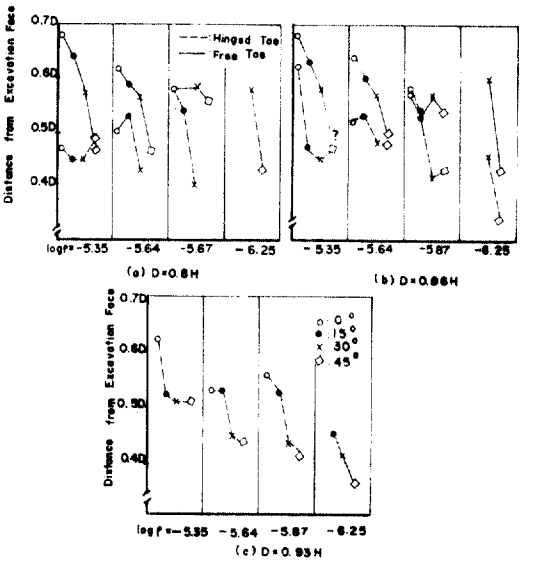

그림 11. Distance from excavation face to angular distrotion(=1/150) for walls of different flexibility

차이는 현저하다. 이는 앵커의 傾斜角이 클수록 壁에 대한 垂直分力이 크게 되므로 自由端인 경우 壁의 垂直沈下와 이에 따른 壁과 흙의 摩擦力 때문으로 사려된다. 단 이 그림은 굴착 깊이(D)에 따른 地盤最大沈下位置를 각각의 앵커 傾斜度 별로 평균한 값을 나타낸 것이다.

그림 10은 自由端支持設計方法의 貫入 깊이에 대한 안전율(F_S)과 最大地盤沈下量의 관계를 나타낸 것인데, 이는 안전율과 最大壁變位量의 관계를 나타낸 그림 4와 아주 근사한 경향을 보인다. 분석한 자료도 그림 4와 동일한 상태(F_S=0.71~2.86)에 계측한 것이므로 예상한 바와 같이 壁變位量과 地盤沈下量 사이에는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 이 부분의 세부적인 것은 다음 절에서 고찰하였다.

地盤沈下가 隣接建物의 손상에 미치는 영향은 沈下量의 크기 보다 不等沈下量에 있다. Skempton[20]은 98곳의 建物沈下 역사를 관찰한 후, 이 不等沈下量을 角變形으로 나타내고 일반적인 건물의 구조적 손상에 필요한 한계를 1/150로 보았다. 그림 11은 地盤沈下 測定位置의 간격 10 cm에 해당하는 角變形 1/150의 위치를 나타낸 것이다. 이 위치는 대부분이 굴착 깊이(D)의 0.4배인 지점 밖에서 발생하게 되지만 앵커의 傾斜度와 壁의 剛性이 증가할수록 굴착면 방향으로 이동하는 경향이 있다. 또한 回轉端狀態가 自由端狀態 보다 굴착면 가까이에서 발생한다. 飯吉[6]은 地盤굴착 現場計測 자료 분석 결과로 周邊地盤이나 隣接建物의 균열 발생 위치는 굴착 깊이의 0.5배와 1.0배의 2가지로 구분하였다.

4. 3 壁變位에 따른 地盤沈下

그림 12는 굴착으로 인한 널말뚝의 變形面積과 地盤最大沈下量의 관계를 나타낸 것이다. 이는 앵커의 傾斜度와 널말뚝의 剛性에 관계없는 원점을 지나는 回歸式으로서 回轉端狀態가 自由端狀態보다 동일한 沈下量에 대해서 약 15 %정도 작게 壁變形이 일어남을 보여준다. Bowles[12]의 沈下曲線에서 最大沈下量은 壁體 바로 뒤에서 발생하는 데, 一段의 앵커로 지지된 널말뚝의 最大沈下量 보다 동일한 壁變形面積에 대해서 약 16 %정도 크다. 단 이 때의 Bowles의 沈下曲線 식은 貫入 깊이에 대한 안전율이 1인 굴착 깊이에 대해서 산정된 것이다.

그림 13은 最大壁變位量과 最大地盤沈下量의 상관 관계를 앵커의 傾斜度, 널말뚝의 剛性에 관계없이 무차원의 좌표에 원점을 지나는 回歸式으로 나타낸 것이다. 여기에서도 回轉端狀態가 自由端狀態보다 동일한 壁變位量에 대해서 약 4 %정도 큰 沈下量이 일어나지만, Mana등[7]의 現場計測資料를 분석한 $(1.0\sim0.5)\delta_H$내에 모두 포함되고 있음을 보여준다.

5. 結　論

一段의 앵커로 지지된 널말뚝에 관한 模型實驗 결과와 기존의 이론식이나 地盤굴착工事에 주로 이용되는 버팀대로 지지된 土留壁의 現場計測資料와의 비교 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 一段의 앵커로 지지된 널말뚝 壁變位形態는 버팀대로 지지된 土留壁의 變位形態와 달라서 굴착背面地盤의 沈下를 예측하는 데는 상당한 차이가 있고, 앵커의 傾斜度에 따라 그 정도는 심하다.

2) 앵커로 지지된 널말뚝은 壁과 地盤의 움직임에 대해 효과적인 조절을 할 수 있지만, 경사진 앵커의 引張은 垂直分力의 作用荷重과 壁과 흙의 摩擦力 때문에 壁 뒷면 가까이에 큰 沈下를 발생하게 한다.

3) 앵커로 지지된 널말뚝의 下端이 견고한 地盤위에 있을 경우 壁의 轉位滑動과 垂直沈下가 구속되어 地盤沈下를 더욱 작게 한다. 특히 안전율이 1.43이하일 경우 壁變位와 地盤沈下가 급히 일어나며, 이에 미치는 널말뚝 下端의 구속 영향도 크다.

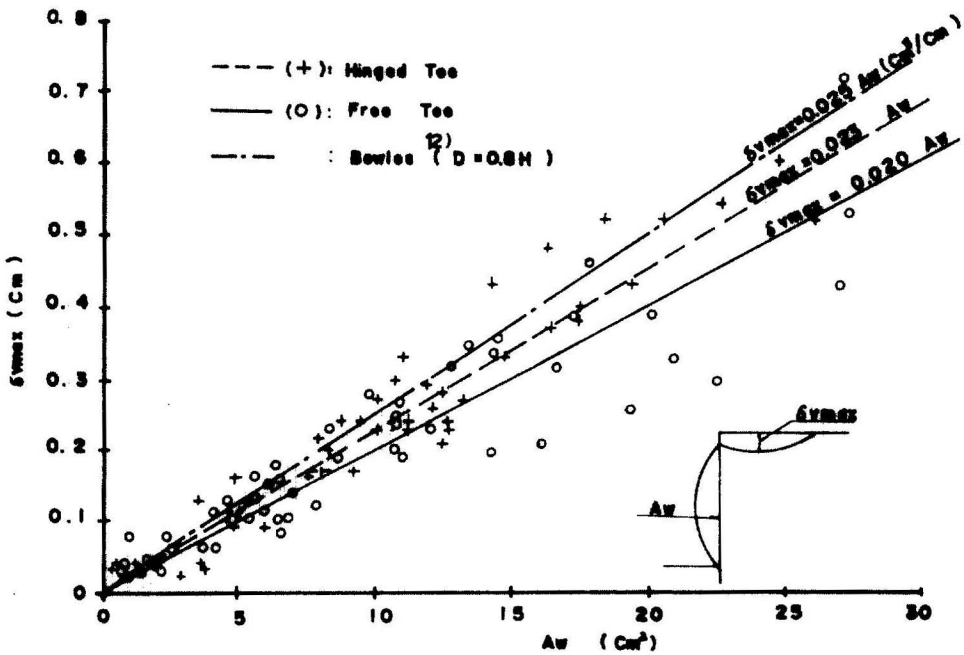

그림 12. Relationships between max. ground surface settlements and strain area of wall

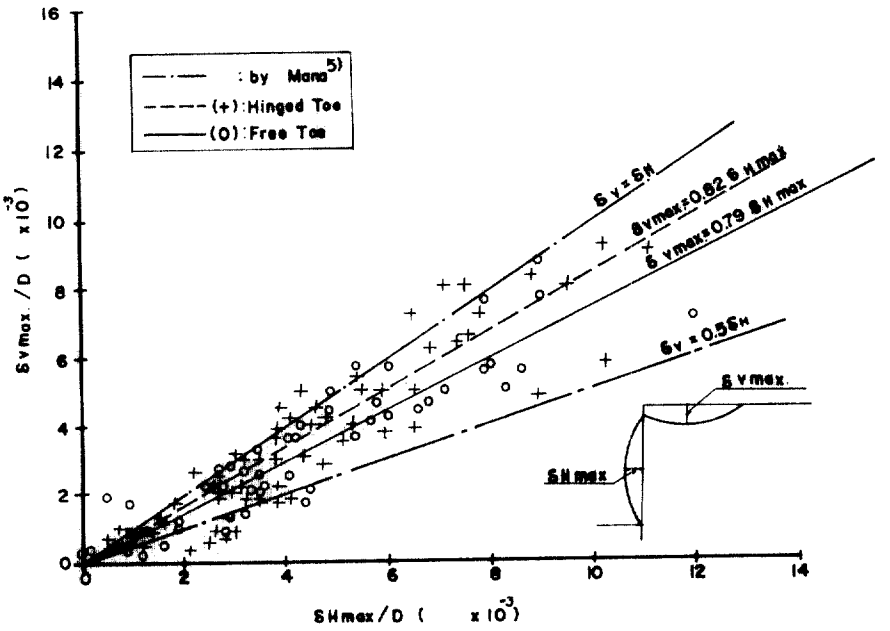

그림 13. Relationships between max. ground surface settlement and max. wall displacement

본 연구 결과는 실험 범위내에서만 적용된다. 그러나 그 결과는 一段의 앵커로 지지된 유연한 널말뚝 周邊地盤의 擧動 特性을 보여준다. 이러한 擧動은 粘着性이 없는 흙에서 널말뚝 벽의 설계에 대한 지침을 줄 수 있다고 보여지나, 일반성을 고려하여 앵커의 단수와 위치 및 地盤條件 변화에 대한 연구가 더욱 진행되어야 한다.

參 考 文 獻

1. Peck, R. B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground," *Proc. 7th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineerign*, Mexico, 1969.
2. O' Rourke, T. D., "Ground Movement Caused by Braced Excavations," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, No. GT 9, 1981 pp.1159-1178.
3. Lee, K. L. and C. K. Shen, "Horizontal Movements Related to Subsidence," *Journal of Soil Mechanics and foundation Division, ASCE*, Vol 95, No. SM 1, 1969, pp.139-166.
4. Bang, S. C., "*Analysis and Design of Lateral Earth Support System*, PH. D. Thesis, the Univ. of California, at Davis, Calif., 1979.
5. Mana, A. I. and Clough, G. W., "Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay, "*Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, No. GT 6, 1981, pp.759-77.
6. 飯吉精一, "地盤の掘削 -施工學的考察-," 技報堂, 1983, pp.207-268.
7. Shen, C. K., Bang, S. C., and Herrman, L. R., "Ground Movement Analysis of Earth Support System," *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, Vol. 107, No. GT 12, 1981, pp.1609-1624.
8. Fry, R. H. and Rumsey, P. B., "Prediction and Control of Ground Movement Associated with Trench Excavation," *Water Pollution Control Federation High-light*, Vol. 82, No. 2, 1983, pp.151-163.
9. 松尾捻, 川村國夫, "掘削現場 周邊 地盤の 沈下 豫測," 第26回 土質工學 シソポジウム, 土質工學會, 1981, pp.61-68.
10. Caspe, M. S. "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM 4, 1966, pp.51-59.
11. Kane, H., "Discussion of Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM

6, 1966, pp.255-256.
12. Bowles, J. E., "*Foundation Analysis and Design*," McGraw-Hill, 2nd Edition, 1977, pp.463-465.
13. Al-shlash, K. T., "*Applications of the Finite Element Method in Assessing the Behavior of Tied-Back Walls*," PH. D Thesis, the Univ. of Sheffield, England, 1979.
14. Nyby, D. W., "*Finite Element Analysis of Soil-Sheet Pile Interaction*," PH. D Thesis, the Univ. of Utah, 1981.
15. 兪泰成, 辛宗昊, "깊은굴착에 따른 砂質土地盤의 變形," **大韓土質工學會誌**, 第1卷2號, 1985, pp.81-89.
16. 李相根 外 3, "地盤沈下防止工法에 關한 硏究," 韓國建設技術硏究院, 1985.
17. Terzaghi, K. "*Theoretical Soil Mechanics*," John Wiley & Sons, 1954, pp.182-185.
18. 千柄植, 姜寅成, "앵커의 傾斜가 널말뚝의 擧動에 미치는 影響," **大韓土木學會論文集**, 第9卷1號, 1989, pp.79-87.
19. Terzaghi, K. and Peck, R. B. "*Soil Mechanics in Engineering Practice*," 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1967, pp.570-580.
20. Skempton, A. W. and D. H. MacDonald, "Allowable Settlement of Buildings," *Proc. Instn. Civil Engrs, Part 3*, Vol. 5, 1956.

(接受 : 1989. 10. 12)