

# 깊은 掘鑿에 따른 砂質土 地盤의 變形

Displacement of Sand Layer during Deep Excavation

俞 泰 成\*

Yoo, Tai Sung

辛 宗 昊\*\*

Shin, Jong Ho

---

## ABSTRACT

Braced excavation for a new building was carried out at a very close proximity of an existing tall building of which columns are supported by individual spread footings on sand layer. The excavation was planned to reach far below the footing level of the existing building.

To assess the foundation performance and stability of the existing building, the behavior of ground subjected to loss of confinement from excavation was analytically studied using finite element method. Field instrumentation was also conducted to monitor the actual ground responses during excavation. Based on these studies, various remedial measures were taken to minimize the adverse effects to the building, and excavation was successfully completed.

This paper presents the results from the analytical studies and field monitoring, and compares the predicted and measured responses at different stages of excavation.

## 要 旨

一般的으로, 地盤의 掘鑿은 周邊地盤의 應力解放에서 應力再配置 過程을 거치는 동안 地盤變形을 包含한 여러가지 土質工學의 問題를 수반하게 된다. 이러한 問題들은 특히, 密集된 高層建物사이에 새로운 建物を 建築하기 위한 掘鑿을 하는 경우, 隣接한 既存建物の 安定과 聯關된 問題들을 誘發하게 되어 掘鑿方法이나 施工管理에 있어서 많은 技術的인 努力을 必要로 한다.

本 研究는 이와 같은 問題들을 수반하는 砂質土 地盤에서의 깊은 掘鑿問題를 다루고 있는데, 研究對象地域은 上記와 같이 既存建物 및 附屬施設이 掘鑿面에 매우 近接하여 있고, 新築建物の 基礎가 隣接建物の 基礎보다 아래에 位置하는 특징을 內包하고 있다.

本稿에서는 이러한 現場特性을 갖는 掘鑿地盤에 대하여 彈塑性 有限要素解析을 遂行, 地盤變位를 豫測하였고, 計測 System을 導入하여 地表, 地中水平變位, 建物舉動 등을 測定, 掘鑿에 따른 變形特性을 考察하였다.

---

\* 正會員·(株)大宇엔지니어링 專務

\*\* 正會員·大宇建設技術研究所 研究員

## 1. 概要

密集된 高層建物 사이의 敷地에 새로운 建物を 新築하는 경우는 既存建物 및 附屬施設의 安全을 위하여 상당한 技術的 努力과 細心한 施工 管理가 必要하다.

이러한 掘鑿工事は 좁은 作業空間과 既存建物 建設時 攪亂된 地盤特性으로 인하여 工法을 選定하는데 있어서 많은 制約要件을 가지게 되며, 특히 新築建物の 基礎가 既存建物基礎面의 下部에 位置하는 경우에는 既存建物の 基礎安定問題와 關聯해서 慎重하게 다루어야 한다.

一般的으로 이와 같은 깊은 掘鑿은 地盤變位, 土壓, 施工振動, 地下水位低下, 掘鑿低面의 隆起 등의 土質工學의 問題를 隨伴하게 되는데, 이러한 問題때문에, 通常 對象區間에 計測 System을 導入하여 地盤舉動을 觀測하고, 그 結果를 分析, 補強對策을 樹立하는 등의 施工管理가 철저히 수행되어야 한다.

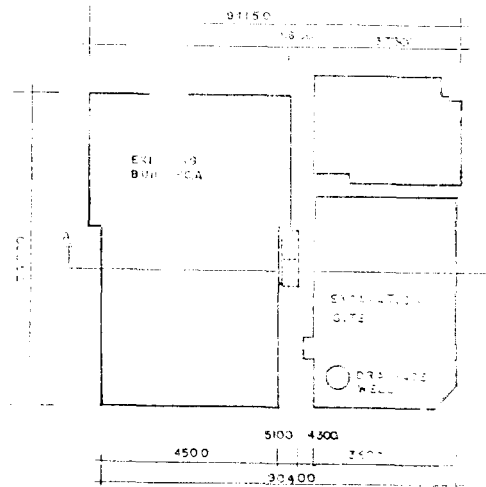
本稿에서는 이러한 背景으로 砂質土層에서 遂行된 깊은 掘鑿問題를 地盤變位에 重點을 두어 다루고 있으며, 특히 有限要素解析을 통한 地盤變位豫測結果 및 計測資料로부터 地盤의 舉動特性을 考察하였다.

## 2. 現場條件

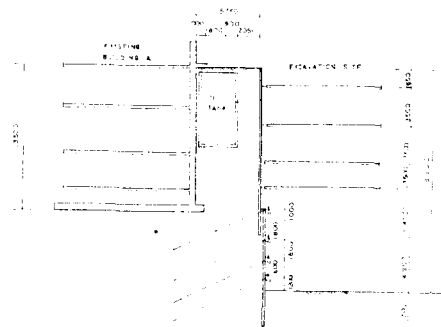
### 2.1. 現場概要

掘鑿敷地는 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 2개의 既存高層建物과 隣接하여 있다. 既存建物 A는 地下3層, 地上17層의 콘크리트 라멘構造로서, 각 기둥은 獨立基礎로 設置되어 있고, 新築建物は 地下4層, 地上16層으로 計劃되어 最終掘鑿斷面은 既存建物 A의 基礎低面보다 6.4 m 아래 位置하고 있다.

新築建物を 위한 掘鑿面과 建物 A와의 距離는 약 5.8 m 程度로서 掘鑿面이 매우 近接하여 있으며, 一部區間에 Oil Tank가 獨立構造物로서 埋設되어 있다.



(a) Site Plan(Unit : mm)



(b) Excavation Profile(Unit : mm)

Fig. 1. Site Excavation Plan

### 2.2. 地盤條件

Fig. 2는 研究對象地域에서의 地盤條件을 보인 것인데, 주로 모래, 자갈 등의 運搬堆積土로 構成되어 있으며 基礎岩은 地表로부터 약 20 m 程度의 깊이에서 약간의 風化形態로 나타났다.

그림에서 보인 바와 같이 土層上部에는 모래層이 分布되어 있으며 N 값이 약 50 程度로서 中粒質(Medium Size)의 모래에 약간의 잔자갈

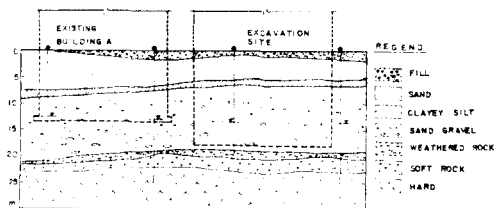


Fig. 2. Soil profile at Section A-A

을 함유하며, 그 아래로 얇은 粘土質 Silt 層이 分布하고 있다. 沙礫層은 粗立 및 中立(Coarse to Medium Size)의 모래가 섞인 堆積層으로서, 왕자갈 크기의 호박돌이 包含되어 있어, 統一分類法에 의하면 GP 및 GW로 分類된다. 특히, 攪亂되지 않은 狀態에서는 比較的 緻密한 相對 密度를 보이며 N 값은 50~70 程度를 나타내었다.

그러나 既存建物 周邊 0.5~1m 以內에서는 既存建物 建設時의 퇴비층 지역으로서 콘크리트, 雜石 등이 包含되어 있어 不良한 地盤構成을 보이고 있으며 原地盤에 비하여 느슨한 密度를 가지고 있다. 地下水位는 地表에서 12m 아래 位置하는 것으로 觀察되었다.

## 2.2. 施工條件

掘鑿은 Back Hoe를 使用하여 터파기를 하고 이를 Cramshell로 引揚하는 方法으로 遂行되었으며 地表로부터 12.5m까지는 4段 strut 構造, 12.5m부터 19.9m까지는 4段 Anchor의 假設 構造로 支持되었다.

既存建物과 掘鑿敷地 사이의 地盤堤體는 幅이 좁고 埋立土가 分布하여, 地盤狀態가 不安定할 뿐만 아니라, Soldier Pile의 打入에 따른 충격과 土流板 뒤채움 不實 等の 假設構造物의 施工 狀態가 不良하여 既存建物 基礎部位에 대하여 廣範圍한 地盤補強이 實施되었다.

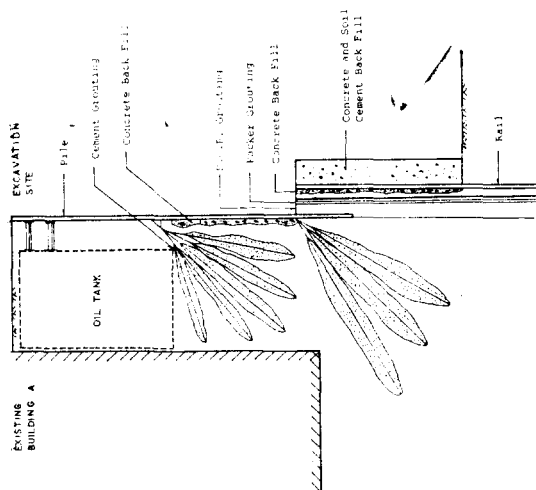


Fig. 3. Ground Reinforcement Scheme

使用한 補強工法은 Fig. 3에서 보인 바와 같이 地表 및 掘鑿壁面의 7m 및 13m 깊이에서 각각 50cm 간격으로 2열 Cement Grouting을 實施하였고, 掘鑿깊이 13m 以下의 既存建物 基礎部位에서는 土流構造物 背面에 30cm 간격의 2열 Packer Grouting을 實施하였으며, 이때  $\phi$  22mm 鐵筋 2개씩을 插入하고 Cement Milk를  $55 \text{ kg/cm}^2$ 의 壓力으로 注入하여 周邊地盤 및 土流構造物의 剛性を 補強하였다. 또한 같은 位置에서 地下水의 過大流入 및 土砂의 流失을 防止하기 위한 Curtain Grouting도 實施하였다.

## 3. 地盤變位の 豫測

### 3.1. 有限要素解析

地盤變位를 豫測하기 위하여 有限要素法에 의한 解析을 遂行하였으며, 現場與件을 감안하여 채택된 解析 Model은 Fig. 4와 같다. 解析領域은 掘鑿의 影響範圍를 고려하여 幅 50m, 길이 33.5m로 하였으며 境界條件은 左, 右斷部에서 垂直方向의 變位를 許容하였고, 下斷部에서는 모든 方向을 拘束하였다. 그리고 建物A와 地盤堤體의 境界面은 密度가 작은 埋立土의 特性을 고려하여 摩擦을 無視한 Roller 支點을 使用하였다.

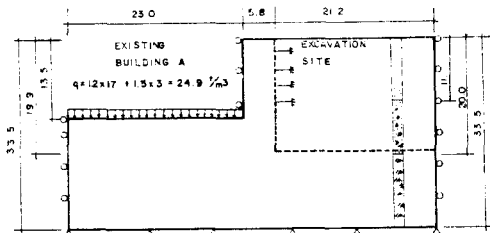


Fig. 4. Finite Element Model

解析要素는 地盤을 平面變形要素로, 既存建物과 Soldier Pile은 Rod要素로, Strut는 材料의 特性과 一致하는 Spring要素로 고려하였으며 Earth Anchor에 의한 支持效果는 Earth Anchor에 作用하는 힘을 堆定하여 그 節點에 外力으로 作用시켰다.

使用된 土質定數는 Table 1에 보인 바와 같으며 解析에는 이미 여러 차례에 걸쳐 地盤問題 解析에 使用된 바 있는 DWTAP(7)이 使用되었

**Table 1.** Input Data for Finite Element Analysis

Depth	Property	Elastic Modulus (t/m <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio	Unit Weight (t/m <sup>3</sup> )	Friction Angle (°)	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )	Tensile Strength (t/m <sup>2</sup> )
0~11 m	Sand with little Silt	2,000	0.35	1.85	32	10	1
11~20 m	Sandy gravel	1.2×10 <sup>4</sup>	0.35	2.15	40	30	3
below 20 m	Bed Rock	5.0×10 <sup>5</sup>	0.30	2.50	45	100	10

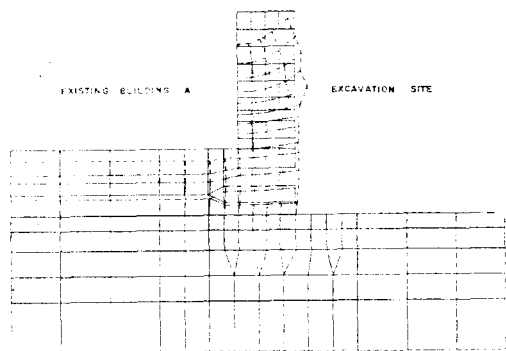
다. DWTAP은 地盤의 彈塑性 應力~變形關係와 Drucker-Prager 파괴조건을 채용하며, 掘鑿으로 誘發되는 應力解放效果를 等價荷重으로 作用시켜 掘鑿段階에 따른 地盤變位를 豫測한다.

### 3.2. 解析結果의 分析

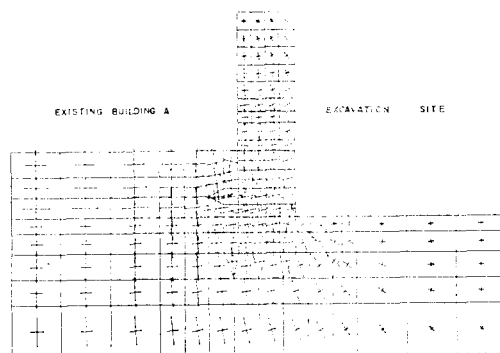
上記 解析을 通하여 推定된 地盤의 變形 및 應力의 分布는 Fig. 5와 같다. 地盤堤體의 地表變位 形象은, 掘鑿面의 Soldier Pile 및 Strut의 剛性이 既存建物의 周위에 分布되어 있는 埋立土의 剛性보다 큰 影響을 고려하여 既存建物 側에서 더 큰 變位가 進行된 形狀으로 나타났다.

掘鑿面에서의 水平變位는 Strut 및 Anchor의 支持效果를 반영한 變位形象을 보이고 있으며, 地表로부터 약 7 m 位置에서 29 mm의 最大水平變位가 豫測되었다.

主應力 分布圖에서 보는 바와 같이 掘鑿은 應力解放效果 및 應力集中效果를 야기하여 既存建物 A의 基礎가 30 mm 程度 沈下하는 것으로 計算되었으며, 掘鑿低面에서도 약간의 隆起를 보였는데 基盤岩層이 掘鑿低面に 近接하여 있기 때문에 地盤隆起는 比較的 작게 豫測되었다.



(a) Displacement



(b) Principal Stresses

**Fig. 5.** Results of Finite Element Analysis

### 3.3. 地下水 下降으로 인한 沈下

地下水位의 低下는 地盤의 有效應力을 增加시켜 彈性沈下를 誘發하게 된다. 이때 形成되는 沈下는 地下水位 下降높이 만큼의 有效應力 增加에 해당하는 荷重이 地下水 下降區間에 作用하는 것으로 가정하여 彈性變位를 求하였다.

研究對象地域에서의 初期 地下水位는 地表로부터 12 m에 位置하였었는데, 基礎低面掘鑿後 19.9 m까지 下降한다고 假定하여, 地下水位 低下로 인한 沈下는 大略 8 mm 程度로 推定되었다.

## 4. 現場計測 및 結果分析

### 4.1. 計測計劃

掘鑿에 따른 建物 및 地盤의 學動을 把握하기 위하여 地表沈下, 地中水平變位, 建物變位 등에 대한 現場計測이 實施되었고, 建物內部的 Crack 發生 등 構造物에 대한 精密한 觀察이 並行되었다.

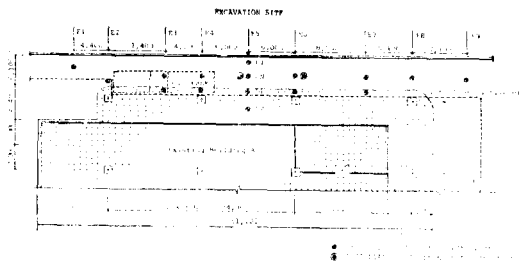


Fig. 6. Field Instrument Layout

Fig 6은 地表沈下 및 水平變位の 測點設置圖를 보인 것인데, 建物 1層 Slab, Oil Tank 上部, 進入 道路面, 集水井部近 等을 重點의으로 管理하였다.

測點은 地表沈下測點이 16個所, 傾斜變位測點이 2個所 等이며, 計測頻度는 地表沈下는 1日 1回, 水平變位는 1주일에 2~3回씩 測定하는 것을 原則으로 하였으며 掘鑿現場에서의 施工活動에 따라 適切히 調整하였다.

分 Crack의 垂直 및 水平크기를 根據로 하여, 計測以前의 沈下が 計測初期의 變位進前 趨勢로 進行되었다는 假定하에 Table 2와 같이 推定하였다.

#### 4.2.2. 地表沈下

地盤變位の 測定位置가 掘鑿面과 매우 가까이 位置하고, 一部는 埋立土가 分布하는 地域으로서 地盤狀態가 不安定하여 計測結果는 比較的 큰 값을 나타내었으며, Fig. 7에 보인 바와 같이 過多한 地表沈下로 1層 Slab의 Cantilever 및 地表에 甚한 Crack이 發生하였다.

測定된 地表沈下の 橫方向 分布는 Fig. 8(a)와 같이 測點 E9 쪽으로 더 큰 地盤變位가 發生한 것으로 나타났는데, 그 理由는 E8, E9 部近의 掘鑿面에 集水井을 設置하여 地下水를 誘導하였고, Strut 및 Anchor 區間의 境界部分으로서 支持력하가 不良하였으며, 地表 Grouting 作業時 많은 양의 물이 이 部分을 通하여 流失

Table 2. Estimated Initial Displacements Occurred prior to Measurement

		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>
Vertical Displacement(mm)	L 2	—	—	—	—	0.0	—	—	—	—
	L 1	—	—	10.0	20.0	27.0	16.0	8.0	—	—
	CN	0.0	0.0	17.0	24.0	29.0	16.0	6.0	4.0	5.0
	R 1	—	—	—	—	28.0	—	—	—	—
Horizontal Displacement(mm)		—	—	14.0	—	26.0	—	33.0	—	—

掘鑿이 進行되면서 過多한 水平變位가 發生하여 水平變位 測定裝置中 1個는 그 測定限界를 超過하여 계속적인 測定이 不可能하였으며, 이에 따라 代替 觀測用으로 建物 A의 地下 3層 및 地上 2, 4, 6層에 傾斜計를 設置하여 構造物의 舉動狀態를 測定하였다.

## 4.2. 計測結果

### 4.2.1. 初期變位の 評價

計測은 地盤을 6m 掘鑿한 結果, 地盤의 變形이 過大하게 發生되어 實施케 되었다. 따라서 計器設置 以前에 進行된 初期變位の 評價가 必要하였다. 初期沈下는 1層 Slab의 Cantilever 部

된 點等을 들 수 있다.

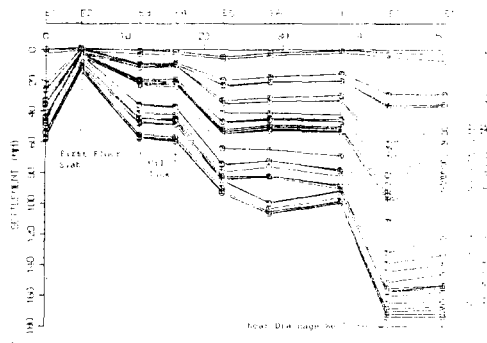
縱方向 沈下形狀은 Fig. 8(b)와 같이 初期에는 中央部에서 最大沈下를 보이는 듯하다가 점차 土流板 쪽으로 移動하는 양상을 나타내어 掘鑿면 쪽으로 기울어지는 特性을 보였는데 이것은 施工上의 振動 및 雨期로 인한 土沙流失의 影響이 반영된 때문인 것으로 判斷된다.

이로부터 既存建物과 掘鑿壁面 사이의 地盤 堤體가 橫方向으로는 集水井쪽으로, 縱方向으로는 掘鑿面을 向하여 舉動한 것으로 解析할 수 있다.

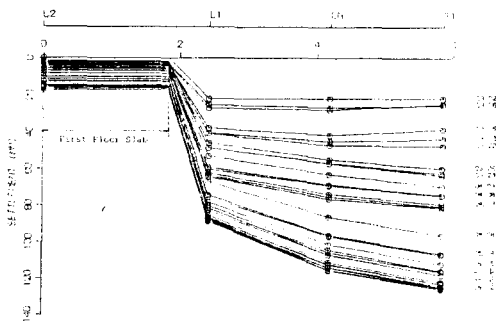
Fig. 9는 研究對象地域에서 測定된 一般的인 形態의 沈下~時間曲線의 한 例를 보인 것인데,



Fig. 7. Cracks Caused by Surface Settlement



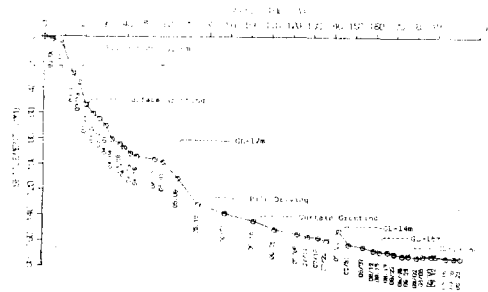
(a) Transverse Settlement Profile



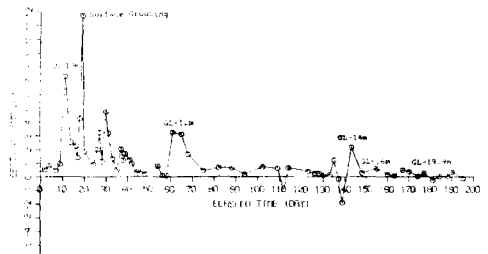
(b) Longitudinal Settlement Profile.

Fig. 8. Measured Settlements

掘鑿工事의 각 工程에 따른 影響을 直接的으로 反映하여 掘鑿, 杭打作業, 補強工事 도중에 大部分의 沈下가 形成되는 것으로 나타났다. 이러한 特性은 平均沈下速度~時間曲線으로부터 명확히 관찰할 수 있다. 즉 Fig. 9(b)曲線의 Peak는 施工의 각 Event와 聯關되고 있음을 알 수 있다. 또한 沈下速度~時間曲線의 Peak 크기는 初期掘鑿 이후 현저히 減少하는 경향을 보이는데 이것은 어느 정도 地盤補強效果를 반영한 것으로 判斷할 수 있다.



(a) Settlement vs Time(E8-CN)



(b) Settlement Velocity vs Time(E8-CN)

Fig. 9. Measured Settlement Changes with Time

既存建物 A의 舉動을 測定하기 위하여 1층 Slab 상에 設置한 測點으로부터 총 15 mm의 沈下가 計測되었는데, 이 값은 그 測點의 隣接位置에 Reference Point를 設定하여 測定해 본 結果, 1층 Slab Cantilever 部分의 파괴에 따른 Slab의 휨變形에 의하여 影響을 받은 것으로 나타났다으며, 따라서 실제 建物基礎의 舉動은 測定值보다 작을 것으로 豫想되었다.

#### 4. 2. 3. 水平變位

Fig. 10은 計測初期와 掘鑿완료 후에 測定된 水平變位の 變化를 보인 것이다. A'는 既存建

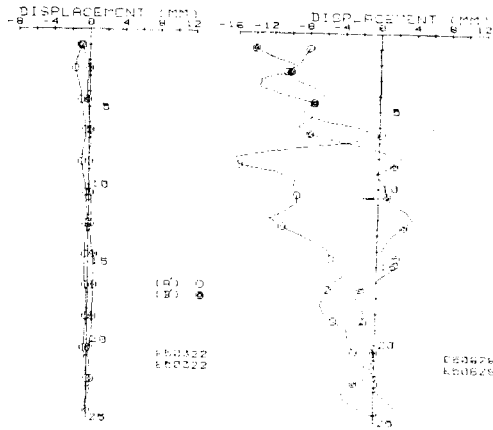


Fig. 10. Horizontal Displacements Measured with Inclinometers

물의 方向, B' 是 Oil Tank 의 方向을 表示하는 데 計測結果는 地盤堤體가, 掘鑿面方向 및 集水井方向으로 變形하는 양상을 나타내어 地表에서 推定된 地盤堤體의 舉動과 一致하였다.

掘鑿面에서 水平變位の 形狀은 strut 位置에 따른 굴곡을 보이고 있는데 地表로부터 약 8 m 位置인 2번째 strut 와 3번째 strut 사이에서 最大沈下를 보였다.

### 4.3. 沈下特性의 評價 및 結果比較

#### 4.3.1. 沈下特性

時間~沈下曲線으로부터 觀察되는 沈下の 主要原因은 掘鑿에 따른 應力解放效果로 인한 彈性變位, Soldier Pile 의 打設作業, Grouting 및 Anchoring 作業에 의한 地盤의 영향 등을 들 수 있으며, 이 외에도 地下水의 流出, 既存建物 建設時의 埋立狀態不良, 土流板 뒷채움의 不實 및 既存建物 掘鑿工事に 使用되었던 Anchor 의 제거 등의 影響이 있었던 것으로 推測된다.

掘鑿깊이에 따른 沈下の 分布特性을 把握하기 위하여 몇개의 測點에서 測定된 結果를 掘鑿位置에 따른 沈下構成比로 圖示한 結果, Fig. 12 와 같이 나타났다. 이 그림으로부터 研究對象區間의 地盤堤體의 變形은 大部分, 既存建物 基礎位置의 前段階 掘鑿에서 形成되나 1층 slab 의 沈下는 既存建物 아래部分의 掘鑿段階에서 全體變位の 40%가 形成되는 것으로 나타났는데 이것은 掘鑿 및 地下水流出 등이 既存建物の 基礎學

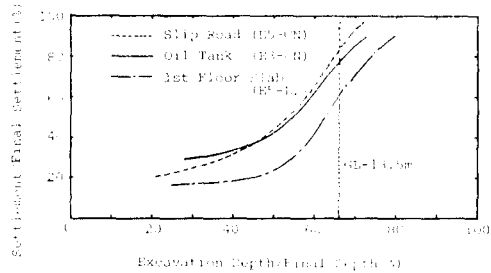


Fig. 11. Settlements Versus Excavation Depth

動에 어느 정도 影響을 미치고 있음을 나타내고 있다.

#### 4.3.2. 計測結果의 比較

本 研究對象地域에서의 計測結果는 既存建物과 掘鑿面간의 폭이 좁고, 埋立部分이 分布하는 特性때문에 유사한 條件의 比較對象이 거의 없고 一般的인 計測結果와의 比較 역시 용이하지 않았다.

地盤에 따른 沈下の 相對的 크기를 評價하기 위하여 Peck(1969)은 掘鑿깊이와 沈下の 關係를 分類하였는데, 이 資料를 參照하면 本 研究對相區間의 沈下の 크기는 Fig. 12와 같이 分布하였다. 이러한 特性은 研究對象地域과 같이 掘鑿背面土가 連續的이지 않고 一部區間만 存在하는 地盤堤體에서도 地表變位の 크기가 一般的인 砂質土의 變位傾向의 範疇에 속하는 것을 意味하고 있다.

Fig. 14는 計測結果와 有限要素 解析結果를 比較한 것이다. 地表沈下는 Fig 13(a)와 같이, 두 結果가 서로 다른 傾向을 보이고 있으며 특히

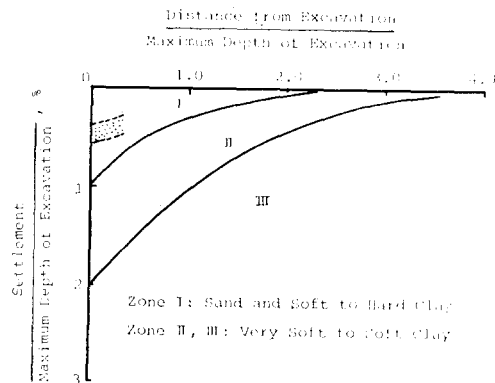
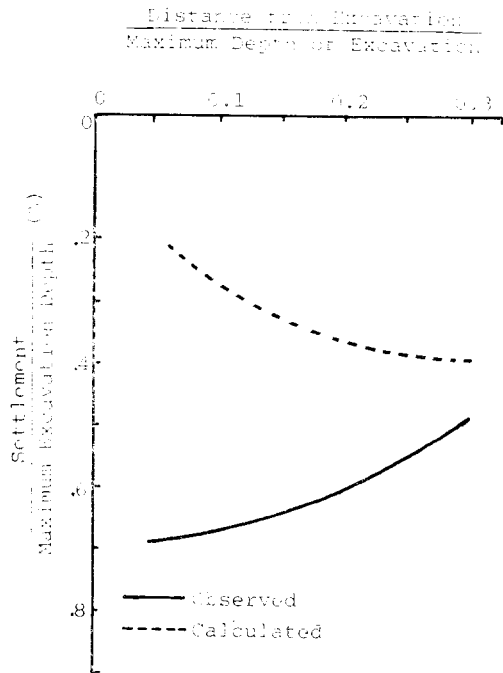
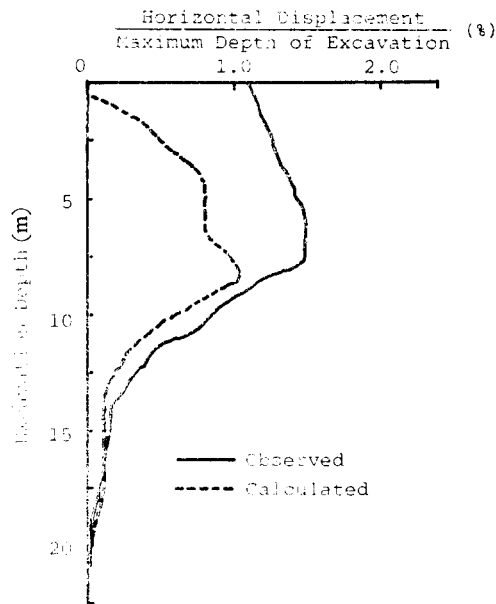


Fig. 12. Comparison with Other Observations



(a) Surface Settlement



(b) Horizontal Displacement

Fig. 13. Comparison of Predicted and Measured Results

掘鑿面 가까이에서 상당히 큰 差를 나타내었는데, 이것은 計測結果가 掘鑿面 가까이에서 掘鑿作業, 즉 杭打時의 충격, 土流板을 통한 土砂流失 등, 의 施工影響에 의한 沈下를 內包하고 있는 반면, 解析結果는 이러한 影響이 고려되지 못한 때문으로 判斷된다. 따라서 全體的으로 解析結果는 실제발생 變位보다 훨씬 작은 값으로 豫測되었음을 알 수 있다.

Fig. 13(b)는 水平變位에 대한 計測結果와 解析結果를 比較한 것인데, 대체로 Strut의 支持效果를 나타내는 傾向을 보이고 있으며, 특히 最大變位는 地表아래 8m 附近에서 形成되어 두 結果가 거의 一致하는 모양을 보였다.

## 5. 結 論

既存建物이 가깝게 위치하고, 埋立土가 部分的으로 分布하는 砂質土 地盤에서, 既存建物 아래까지 掘鑿하는 경우의 地盤變形을 數値解析 및 現場計測을 통하여 고찰하였다.

地盤變位の 豫測 및 現場計測結果의 分析으로부터 얻은 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 研究對象區間에서의 計測은 施工管理 및 補強根據樹立의 判斷資料로서 既存建物의 安定과 聯關된 關聯土質工學的 問題를 解決하는데 有效하였다.

2. 對象區間の 地盤堤體는 掘鑿을 비롯한 施工 및 地下水 低下의 影響을 反映하여, 掘鑿 및 集水井 方向으로 기우는 舉動을 보였으며, 變位の 크기는 背面土가 連續한 砂質土層의 範位로 分布하였다.

3. 地表變位の 豫測結果는 實測結果의 20~40%에 不過하여 地表變位가 應力解放效果에 의한 影響보다는 施工의 影響에 의하여 支配되는 것으로 나타났다.

4. 水平變位도, 計測結果가 豫測結果보다 크게 나타났으나, 變位の 形狀 및 最大變位 發生位置는 대체로 一致하였다.

5. 既存建物의 基礎變位는 豫測값보다 훨씬 작은 實測結果를 보였으며, 따라서 沈下速度의 Peak 값이 減少하는 特性과 함께 地盤補強의 效果가 地盤堤體의 安定 및 構造物의 沈下抑制에



寄與하였음을 입증하였다.

### 參 考 文 獻

1. Peck, R.B. "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, Mexico City, 1969, pp.225~290.
2. James A. Cunningham and Jose L. Fernandez, "Performance of Two Slurry Wall Systems in Chicago", Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, 1972, pp.1425~1449.
3. Thomas K.Liu and John P. Dugan, "An Instrumented Tied Back Deep Excavation", Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, 1972, pp.1323~1340.
4. T. William Lambe, L.Anthony Wolfskill and Walter, "The Performance of a Subway Excavation", Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, 1972, pp.1403~1423.
5. G.W. Clough, P.R. Weber and J.Lamont, "Design and Observation of a Tied Back Wall", Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, 1972, pp.1367~1389.
6. Marc S caspe, "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts.," ASCE, Vol.91, SM 4, 1966, pp. 51~59.
7. 大宇建設技術 研究所(1984), "NATM 터널 解析을 위한 有限要素프로그램(DWTAP), 研究開發報告書", (株)大宇엔지니어링.