

# 軟弱粘土潛變引致連續壁依時變位行為之案例探討

方篤誠 蔡淵堯 蘇鼎鈞

亞新工程顧問股份有限公司

叢雲飛

南山人壽保險股份有限公司

PETER SEELEY

美國國際集團

## 摘要

本文藉由軟弱粘土層深開挖工程案例，探討開挖靜置期間粘土潛變引致之壁體變位依時行為。本工程案例之研究結果顯示，靜置5至6天後壁體最大變位之增量已達最終穩定值之70%至80%，超過10天後即趨近穩定值，約為最大立即變位量之10%至20%。最大變位之增量速率隨開挖深度增加而增加，但最大變位之增量比於第二階開挖後則隨開挖深度增加而遞減。值得注意的是，除第一階開挖以外，最大之變位增量大多發生於開挖面下方約4至5公尺處。

## A CASE STUDY ON TIME-DEPENDENT DISPLACEMENT OF DIAPHRAGM WALL INDUCED BY CREEP OF SOFT CLAY

FANG T. C. TSAI Y. Y. SU T. C.

MOH AND ASSOCIATES, INC.

TSUNG P.

NAN SHAN LIFE INSURANCE CO., LTD

P. SEELEY

AMERICAN INTERNATIONAL GROUP

## ABSTRACT

This paper presents a case study on time-dependent displacement of diaphragm wall induced by creep of soft clay during excavation. Results show that increment of the maximum wall displacement ( $\Delta\delta_{hm}$ ) reaches 70%-80% of its final magnitude in 5-6 days and becomes stable beyond 10 days after the completion of excavation. This final increment amounts to approximately 10%-20% of the maximum immediate displacement ( $\delta_{hm}$ ). The time rate of increment of the maximum wall displacement, defined as  $\Delta\delta_{hm}/\Delta t$  ( $\Delta t$  is the period of the excavation depth remaining unchanged), increases with excavation depth, whereas the displacement ratio, defined as  $\Delta\delta_{hm}/\delta_{hm}$ , decreases with excavation depth after the completion of the 2nd excavation stage. Finally, the maximum increment of wall displacement takes place at a depth of approximately 4 to 5 meters below the bottom of excavation except for the 1st stage.

## 一、前言

由國內外位於軟弱粘土層深開挖之壁體變形監測資料顯示，在各個開挖靜置階段，壁體變位皆有隨時間增加而遞增之現象，尤其開挖深度很大或開挖靜置時間較長時，壁體變位增量將相當可觀。本研究將以位於台北信義計劃區軟弱粘土層某順打深開挖之工程案例，探討各階開挖靜置期間壁體變位增量、增量速率與開挖深度之關係，以作為類似工程在設計上之參考。

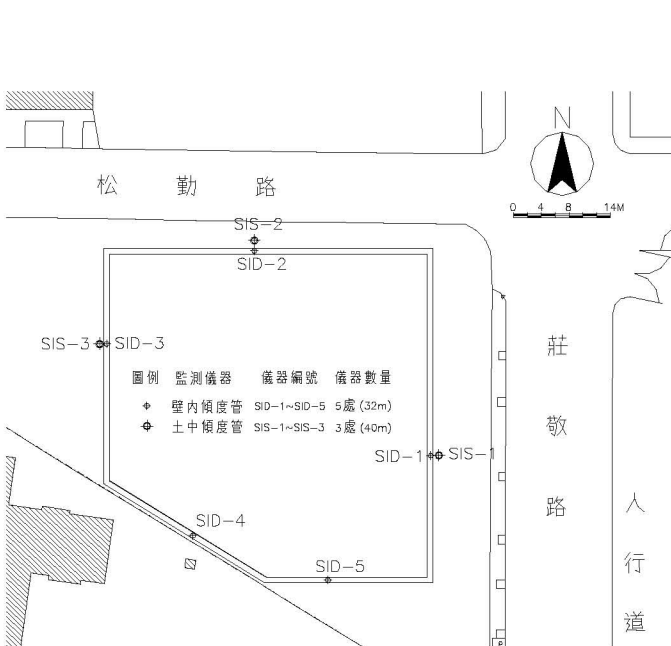
## 二、土壤潛變對深開挖工程之影響

Ou等人(1998)曾針對某一台北盆地厚層軟弱粘土中之逆打深開挖工程案例進行研究，該案例於各開挖階段靜置時間長達30至70天不等，靜置期間壁體變位持續增大。由於靜置期間並無大規模改變土體應力狀態之施工活動，故壁體變位增量之原因研判應為粘土發生壓密或不排水潛變(簡稱潛變)所致。因靜置期間開挖區內外側之孔隙水壓力變化均不大，整體而言，該基地之開挖行為較接近完全不排水狀況，研判靜置期間壁體變位增量主要應為粘土潛變所致。龔東慶(1997)以修正Cam-Clay模式針對上述案例之研究則進一步指出，靜置期間之總壁體變位增量中，黏土壓密造成之壁體變位增量僅佔25%，潛變引致之壁體變位增量則佔75%，顯見粘土潛變對深開挖工程之影響不容忽視。

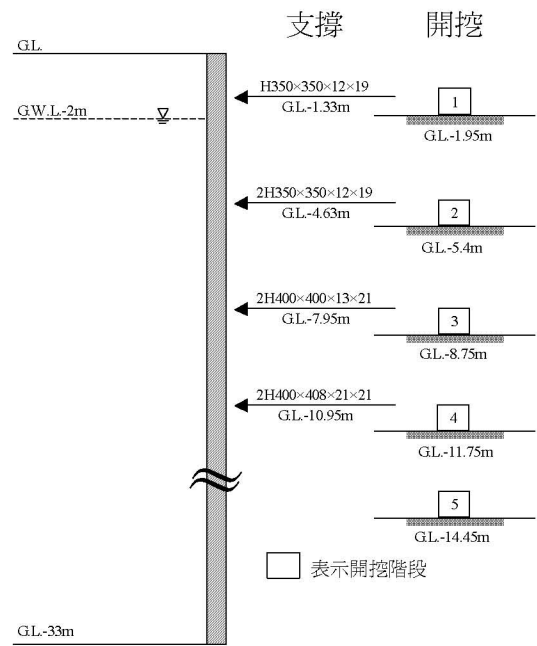
由於對土壤潛變的成因與機制尚未完全了解，土壤潛變方面的研究大多以歸納試驗結果而得之半經驗模式為主，包括Singh與Mitchell(1968)、Semple(1973)、Mesri等人(1981)及Lin與Wang(1998)等。綜合上述學者之研究結果可知，潛變速率隨時間之增加而遞減，且潛變速率會隨著潛變開始之應力位階(Stress Level，即土壤承受之剪力與剪力強度之比值)的增加而增加。若潛變應力位階接近1.0時，潛變速率會有快速遞增之現象，進而發生潛變破壞(Creep Rupture)。此外，在相同靜置時間與應力位階條件下，潛變量與潛變速率隨土壤過壓密比(OCR)增加而遞增。本研究即藉由軟弱粘土層中深開挖案例之監測資料，觀察粘土潛變對深開挖工程壁體變位之影響，並嘗試透過學者於潛變試驗之結論來解釋部分現象。

## 三、案例工程概述

本研究之基地係位於台北市信義計劃區內，計劃興建一地上十七層地下三層之鋼結構構造。基地開挖面積約2033平方公尺，大致呈長26至43公尺、寬41公尺之梯形。採用順打開挖工法，擋土壁為80公分厚、深33公尺之連續壁，最終開挖深度為14.45公尺，分為四層鋼支撐、五個階段進行開挖，基地之平面位置、分階開挖深度與支撐順序分別如圖一與圖二所示。基地基礎施工歷時八個月，目前已完成地下一層樓版構築，正進行上部鋼構組件安裝。茲將基地土層及地下水分佈狀況與監測系統分述如后。



圖一 基地平面與傾度管配置示意圖



圖二 基地分階開挖深度與支撐順序示意圖

### 3.1 地層分佈與地下水概況

根據鑽探調查結果，基地開挖影響範圍內之地層大致分為五個主要層次，岩盤分佈於深度35.7公尺至48.8公尺以下，以上土層可概分為四層，其中於地表下0.7至28公尺範圍內之土層，其SPT-N值介於2至3之間，且自然含水量與液性限度相近，為具極軟弱至軟弱稠度之粉質粘土層，地層分佈概況及其參數如表一所示。

基地地下水位約位於地表下2公尺，地表下15公尺以內水壓大致呈靜態分佈，地表下15公尺以下則略低於靜態水壓。本案例基地於開挖區外側地下40公尺處埋設2支水壓計，開挖前量測值分別為33.9t/m<sup>2</sup>與36.7t/m<sup>2</sup>，顯示深層水壓較靜態水壓低約1.3 t/m<sup>2</sup>至4.1t/m<sup>2</sup>。

表一 地層分佈概況及其參數

層次	土層描述	層次底部分佈深度(m)	$\gamma_t$ (tf/m <sup>3</sup> )	SPT-N	$s_u$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\bar{\phi}$ (degree)
I	回填土層	1.1~1.3	—	—	—	—
II	粉質粘土層	0.7~13	1.89	2±0.5	2.5	30
III	粉質粘土層	13~28.1	1.84	3±1	3.5	30
IV	粉質粘土層	25~42.8	1.90	13±3	8.0	32
V	砂岩、泥岩或凝灰岩	35.7~48.8以下	2.2	>100	—	—

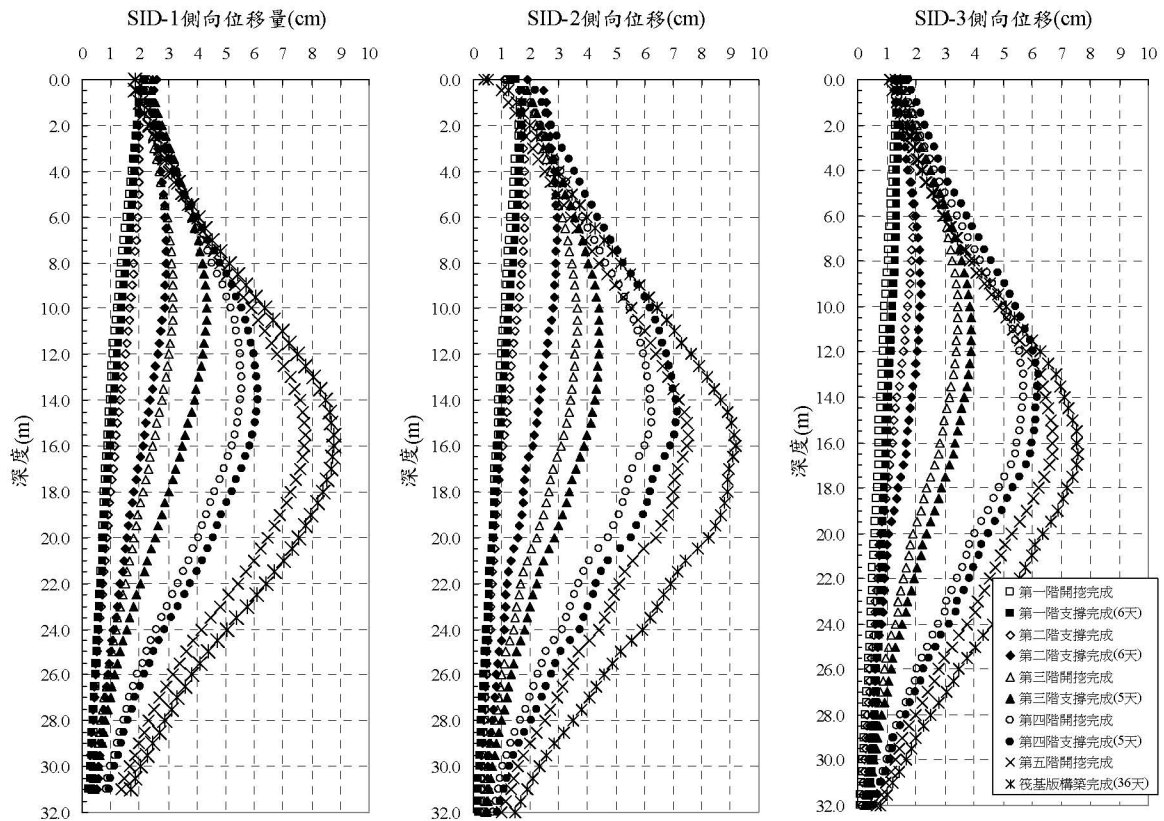
### 3.2 壁體變位監測結果概述

本案例基地共埋設5支連續壁內之傾度管(SID-1~5)監測壁體變位，並在其中3支壁內傾度管之外側50公分處埋設土中傾度管(SIS-1~3)，其配置如圖一所示。因SID-1~3配置位置接近平面應變條件，且壁外亦有SIS-1~3可供確認壁底位移量，故後續有關各開挖階段之連續壁側向變位行為之研究均以SID-1~3數據為探討對象。SID-1~3之壁底位移量經參照SIS-1~3之量測結果修正後，其壁體變位量測結果如圖三所示，各開挖階段靜置時間內，壁體側向變位皆明顯有增加之現象。由於本案例基地並沒有在粘土層中埋設水壓計，無法藉由觀察開挖過程中孔隙水壓之變化來確認排水狀況，但因本案例基地土層分佈狀況與Ou等人(1998)研究之案例類似，故研判本案例基地靜置期間之壁體變位增量主要來自於粘土潛變。

## 四、靜置期間壁體變位增量之探討

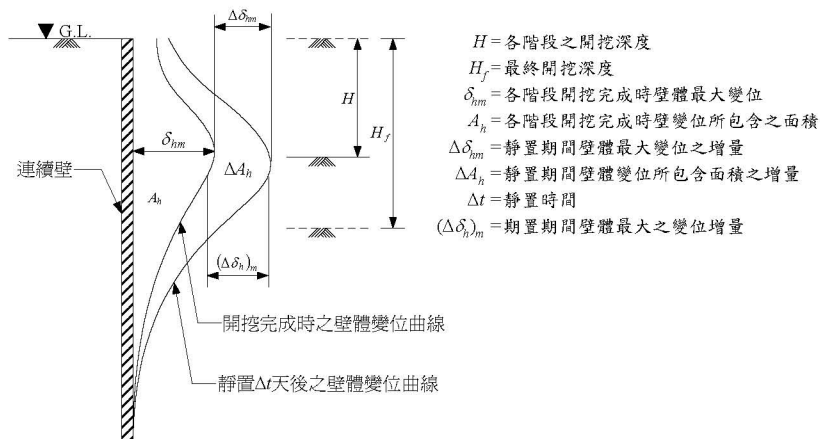
本節依前述案例之監測資料，於各階開挖完成後，取靜置期間壁體變位變化狀況進行分析，主要針對靜置期間壁體最大變位之增量比及最大變位之增量速率與開挖深度的關係作一探討。各項變數之定義如圖四所示。

針對開挖靜置期間壁體依時變位行為之研究，可就壁體最大變位之增量 $\Delta\delta_{hm}$ 或最大之變位增量 $(\Delta\delta_h)_m$ 進行討論，如圖四所示，主要係考量靜置前後壁體最大變位之位置可能不同，且發生最大之變位增量的位置亦可能不在壁體最大變位處。因工程實務上通常以壁體最大變位為安全監測之主要控制項目，故本研究後續探討以壁體最大變位之增量為主。依王建智等人(2001)之研究結果，靜置24小時潛變引致之變位增量已發揮約40%至60%，若靜置超過200小時，隨後之壁體變位增量即不顯著，惟王建智等人(2001)並未清楚說明其壁體變位增量係指最大變位之增量或是最大之變位增量。本研究之案例最後一階開挖完成後靜置時間達36天，各傾度管測得壁體最大變位之增量與靜置時間的關係如圖五所示，由圖五之趨勢可推估本案例最終最大變位之增量約為0.90公分至1.70公分之間，靜置5天後最大變位之增量約已達穩定值之70%至80%，靜置10天後幾乎已趨於穩定值，與王建智等人(2001)之研究結論類似。

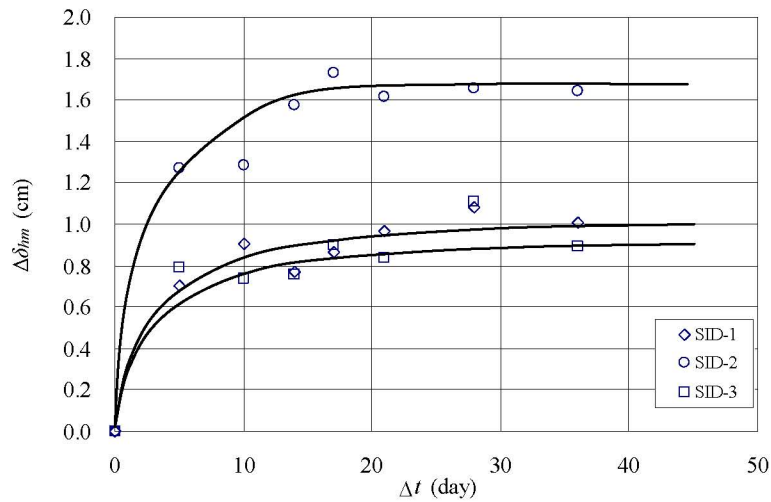


圖三 傾度管SID-1、SID-2與SID-3各階段壁體變位量測值

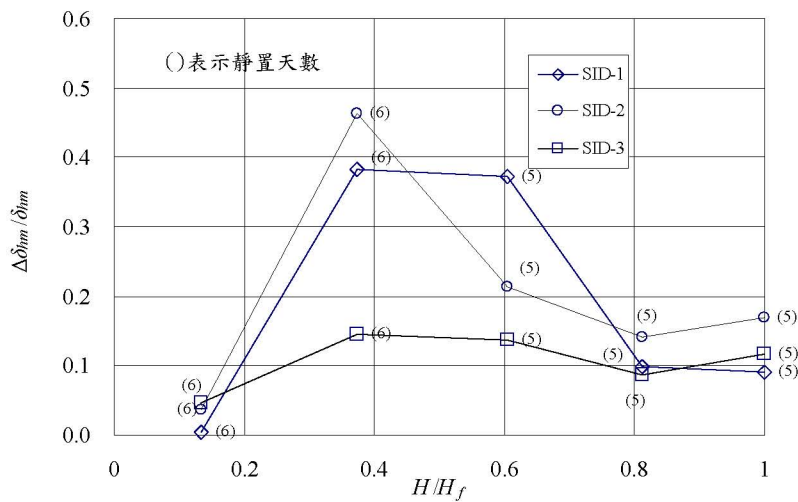
此外，依據Ou等人(1998)之深開挖案例研究結果，在相同開挖深度下，壁體最大之變位增量速率隨靜置時間增加而遞減，若要比較靜置期間壁體最大變位之增量速率與開挖深度之關係，應於各開挖階段取相同靜置時間之監測結果以使比較基準一致。周忠仁等人(2003)曾整理台北盆地內某逆打深開挖工程案例之監測結果，針對靜置期間壁體最大變位之增量速率與開挖深度之關係進行討論，惟因各階靜置時間不同，故各開挖階段壁體最大變位之增量速率比較基準不一。本研究嘗試以相同之靜置時間整理不同開挖深度與最大變位之增量速率的關係，以求比較基準一致。本案例基地因採用順打工法，第一階至第四階之開挖靜置時間僅約5至6天以架設支撐，支撐架設完成後即進行後續階段之開挖。為保持各階段壁體變位增量速率比較基準一致，本研究取靜置5至6天之監測結果，整理各階段開挖靜置期間之壁體最大變位之增量速率進行相關趨勢比較。



圖四 各項變數之定義及使用符號



圖五 第五階開挖(GL.-14.45m)壁體最大變位之增量與靜置時間之關係



圖六 壁體最大變位之增量比與開挖深度比之關係

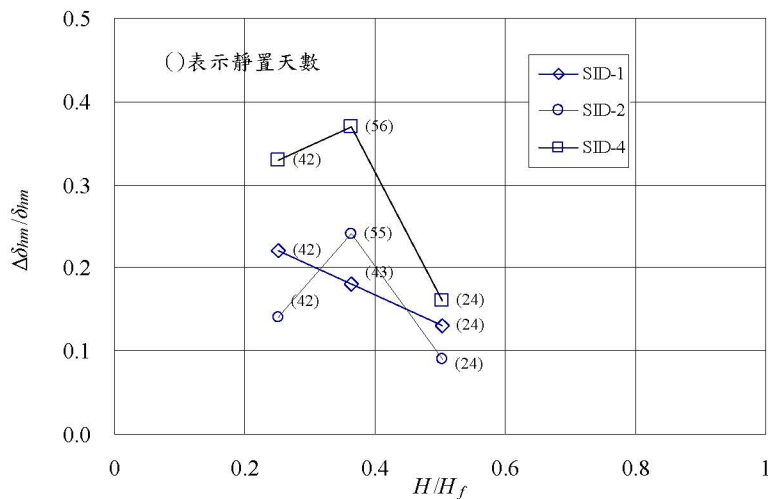
#### 4.1 靜置期間壁體最大變位之增量比

本案例基地各開挖階段於靜置5至6天時，最大變位之增量比 $\Delta\delta_{hm}/\delta_{hm}$ 隨開挖深度比 $H/H_f$ 變化的關係如圖六所示。在開挖初期，最大變位之增量比隨開挖深度增加而增加，至第二階開挖靜置期間達到最大，爾後隨開挖深度增加而逐漸減少。其中，傾度管SID-3監測值並沒有明顯先增後減之趨勢，與SID-1及SID-2略為不同，研判可能係因SID-3附近於靜置期間為支撐型鋼堆置場，經常受到施工車輛及機具影響，導致SID-3附近土體之應力變化較為複雜所致。經重新整理另一位於類似土層之逆打開挖案例資料（周忠仁等人，2003），該基地靜置24天至56天後最大變位之增量比與開挖深度比的關係如圖七所示，該案例之SID-2與SID-4監測結果亦明顯有先增後減之趨勢。兩案例之工法不同，但最大變位之增量比與開挖深度比的關係卻頗為相似。由於最大變位之增量比僅針對靜置前後壁體發生最大變位之位置進行討論，可能無法代表整體之行為。本研究另取壁體變位所包含面積之變化來代表整體潛變之效應，靜置期間壁體變位增量面積比 $\Delta A_h/A_h$ 與開挖深度比之關係如圖八所示，除SID-3第四階開挖外，其變化趨勢與圖六相似，第二階開挖後面積增量比亦隨開挖深度增加而逐漸減少。造成第一階開挖靜置期間壁體最大變位之增量比與後續開挖階段趨勢不同之原因，初步研判可能是因為初期開挖階段連續壁處於無支撐狀態，壁體變位接

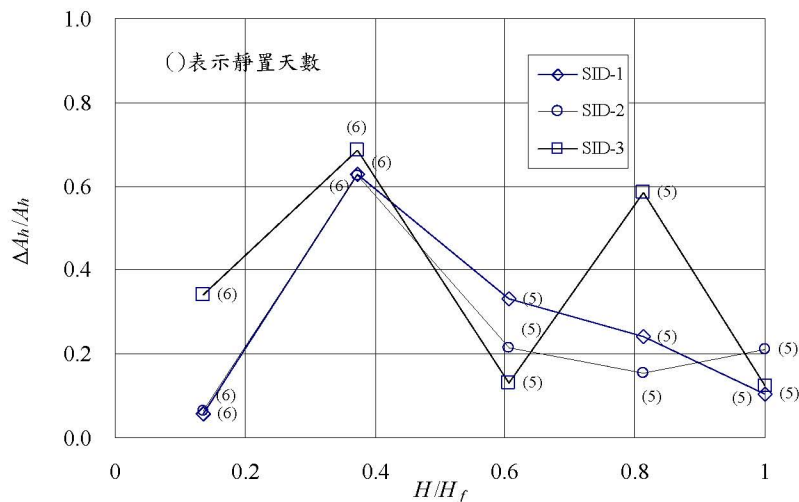
近懸臂式變位，與後續開挖階段不同，造成土體應力分佈狀況不同所致。

圖六顯示，除第二階段開挖靜置期間最大變位之增量比較大外，其他各階段最大變位之增量比大多介於10%至20%之間，故研判以平均約10%至20%之最大壁體立即變位來推估靜置期間最大變位之增量，對於地層條件、基地面積、工法及開挖深度與本案例類似之其他基地，應可獲得一合理估計值。

如前所述，最大之變位增量的發生位置可能不在最大變位處，以本案例而言，除第一階段開挖外，其餘各階段靜置期間最大之變位增量大多發生於開挖面下方約4至5公尺處。因此，若要抑制靜置期間之壁體變位增量，在此範圍內進行地盤改良應可達到其目的，惟仍需進一步之研究與相關案例佐證。



圖七 壁體最大變位之增量比與開挖深度比之關係（資料取自周忠仁等人(2003)）

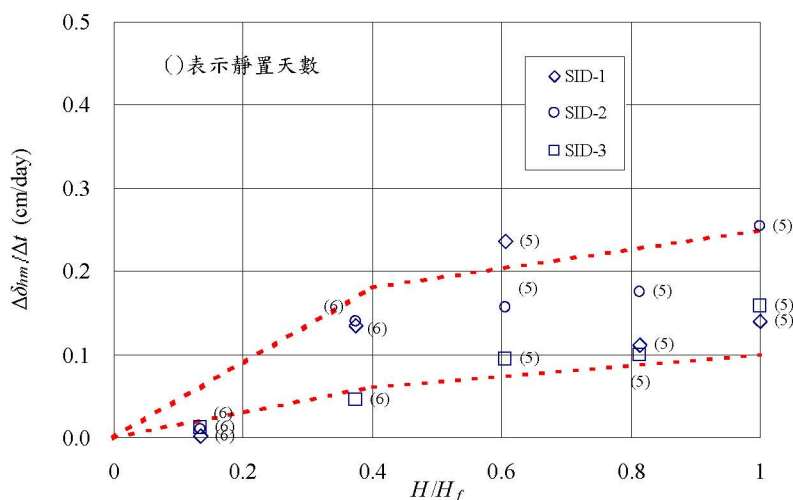


圖八 壁體位移增量面積比與開挖深度比之關係

## 4.2 靜置期間壁體最大變位之增量速率

本案例基地各開挖階段於靜置5至6天時，最大壁體變位之增量速率  $\Delta\delta_{hm}/\Delta t$  與開挖深度比  $H/H_f$  的關係如圖九所示。整體而言，最大變位之增量速率與開挖深度為正相關，開挖深度愈深則最大變位之增量速率愈大。初步研判可能是因為開挖深度與土壤應力位階有關，開挖深度愈深，

土壤元素承受之應力位階愈高，導致靜置潛變期間壁體變位增量速率較快。王建智(1997)曾建議在相同靜置潛變時間下，壁體最大變位之增量速率與開挖深度比約成通過原點之線性遞增關係，但在開挖深度比大於0.5之後，此線性關係將高估實際之變位增量速率。顯示壁體最大變位之增量速率雖與開挖深度成正相關，但隨開挖深度增加，最大變位之增量速率增加的速度有減緩之趨勢。圖九顯示，本案例基地連續壁體最大變位之增量速率與開挖深度比之關係約可以開挖深度比等於0.4為分界，開挖深度比大於0.4後，最大變位之增量速率隨開挖深度比增加之斜率明顯較小，與王建智(1997)之研究成果類似。



圖九 壁體最大變位之增量速率與開挖深度比之關係

## 五、結論

本研究依據某一厚層軟弱粘土中順打深開挖工程案例之監測結果，針對開挖靜置期間連續壁變位之依時行為，可獲致以下結論：

(1)開挖靜置期間壁體變位增量會隨時間增加而遞增，本研究之案例監測資料顯示，靜置5天後最大變位之增量約已達穩定值之70%至80%，靜置10天後幾乎已趨於穩定值。

(2)開挖初期，最大變位之增量比隨開挖深度增加而增加，至第二階開挖靜置期間達到最大，爾後隨開挖深度增加而逐漸減少。靜置期間壁體最大變位之增量約為最大變位量之10%至20%。

(3)壁體最大變位之增量速率與開挖深度為正相關，開挖深度愈深則最大變位之增量速率愈大，但隨開挖深度增加，最大變位之增量速率增加的斜率有減緩之趨勢。

(4)壁體最大之變位增量並不一定發生在最大變位處，本案例基地除第一階開挖以外，其餘各階段靜置期間最大之變位增量大多發生在開挖面下方約4至5公尺處。

## 六、致謝

本文撰寫期間承蒙亞新工程顧問公司莫總經理若楫、秦副總中天、王經理劍虹、吳志宏先生及台灣科技大學營建工程系歐章煜教授之指正，台灣科技大學營建工程系博士研究生拱祥生慨允提供資料，以及南山人壽保險股份有限公司同意發表，特此併誌謝忱。

## 參考文獻

王建智 (1997)，深開挖引致之軟弱粘土不排水潛變行為之研究，博士論文，台灣科技大學，台北。

- 王建智、曾國鴻、林宏達 (2001), “深開挖引致粘土潛變之壁體變位分析”, 第九屆大地工程學術研究討論會論文集, 第A030-1~A030-8頁, 台北。
- 周忠仁、莊孟翰、蘇鼎鈞、吳祖亮 (2003), “軟弱粘土層之開挖潛變探討”, 第十屆大地工程學術研究討論會論文集, 第321~324頁, 台北。
- 龔東慶 (1997), 深開挖依時性之行為分析研究, 碩士論文, 台灣工業技術學院, 台北。
- LIN, H. D. and WANG, C.C. (1998), “Stress-Strain-Time Function of Clay”, *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 289-296.
- MESRI, G., FEBRES-CORDERO, E., SHIELDS, D. R. and CASTRO, A. (1981), “Shear Stress-Strain-Time Behaviour of Clays”, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp. 537-552.
- OU, C. Y., LIAO, J. T. and LIN, H. D. (1998), “Performance of Diaphragm Wall Constructed Using Top-Down Method”, *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp.798-808.
- SEMPLE, R. M. (1973), The Effect of Time-Dependent Properties of Altered Rock on the Tunnel Support Requirements, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, Ill.
- SINGH, A. and MITCHELL, J. K. (1968), “General Stress-Strain-Time Behavior Function for Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 99, No. SM1, pp. 21-46.