

# 傾斜觀測管變位型態之判釋及模擬校正試驗之探討

鄭清江<sup>[1]</sup>\* 游友友<sup>[1]</sup> 林正陽<sup>[2]</sup>

**摘要** 本研究結合本校坡地試區現有完整之監測系統所累積之資料，針對不同監測儀器間彼此變位關係之綜合判釋，將監測變位資料之判釋結果，作機制型態分類與量化分析探討，以釐定出各種監測訊息所代表在坡體崩滑機制上之意義闡釋，並利用校內大樓樓梯間架設傾斜觀測管校正試驗設備，以模擬各種觀測變位曲線型態，例如管周回填出現空洞、接合點脫落、管體扭轉、層間相對滑動達極限而卡管、多層滑動及不同滑動層厚等現象，藉以印證變位量測資料之各種受力及環境因素變化行為，並可供作儀器校正量測之用。總合研究結果，探討完整之監測資料判釋案例說明，以供坡地災害預警及防治之參考使用。

**關鍵詞：**傾斜管、邊坡監測、校正試驗。

## Research on interpretation of Inclinometer deformation types and modeling calibration test

Ching-Jiang Jeng<sup>[1]</sup>\* yo-yo Yo<sup>[1]</sup> Younger Lin<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** This research is to integrate information and data from complete monitoring system on the slope at Huaan University campus to interpret relationship of slope displacement recorded by various kinds of monitoring equipment. Interpretation principles and criteria of monitoring displacement are studied by classifying and quantitatively analyzing failure mechanism to clarify its meaning of information and data from various monitoring equipment. Inclinometer mounted within staircase in the building is used for calibration to simulate different curve patterns of monitored displacement, such as voids appearing in backfill around the inclinometer pipes, loose joint points, pipe body twisting, stocking due to bedding slip exceeding limit, multiple layer slipping, and each slip layer thickening. These phenomena can reflect the different monitored displacement resulting from change in force and environments, and can be used to calibrating the monitoring equipment. Based on the study results, it is suggested to establish in-situ mounting principles and complete description for interpretation of monitoring data, and the study results are expected to be a reference for slope hazard warning and prevention.

**Key Words :** Inclinometer, slope monitoring, calibration test.

---

[1] 華梵大學環境與防災設計學系

Department of Environmental and Hazards-Resistant Design, Huaan University, New Taipei City 22301, Taiwan

[2] 三聯科技股份有限公司

San Lien Technical Corporation Limited.

\* Corresponding Author. E-mail: [jcjh@cc.hfu.edu.tw](mailto:jcjh@cc.hfu.edu.tw)

## 一、前言

傾斜觀測管(Inclinometer)為一般坡地變位監測最常埋設之設施，其觀測結果也常被引用作為安全警示，甚至當作發生損害爭議時研判之重要根據。傾斜觀測儀器為極高精度之傾斜變位量測儀器，惟其精確度需架構在正確之儀器埋設及資料判讀前提下。傾斜觀測管從管子埋設、量測儀器校正到量測資料整理，可能存在許多足以影響結果之誤差或錯誤判斷，例如孔深未達不動點、管周回填不實、管體扭轉、儀器零點偏移、測點深度不正確、管周回填出現空洞、接合點脫落、層間相對滑動達極限而卡管、多層滑動及不同滑動層厚等現象，故量測數值須先經過整理分析研判。傾斜觀測值的判釋，除其位移量的檢核外，尚包括位移速率及型態上之判別。

本研究結合本校坡地試區現有完整之監測系統所累積之資料，針對不同監測儀器間彼此變位關係之綜合判釋，將監測變位資料之判釋結果，作機制型態分類與量化分析探討，以釐定出各種監測訊息所代表在坡體崩滑機制上之意義闡釋，並利用校內大樓樓梯間架設傾斜觀測管埋設試驗校正設備，以模擬各種傾斜管埋設情況及觀測變位曲線型態，例如管周回填出現空洞、接合點脫落、管體扭轉、層間相對滑動達極限而卡管、多層滑動及不同滑動層厚等現象，藉以釐訂變位判釋之正確要領，並可供作儀器校正量測之用。

## 二、研究案例監測與模擬校正試驗

### 1. 華梵大學試驗基地之監測成果概述

本研究以華梵校園試驗基地為主，華梵大學多年來已陸續埋設地層中與排樁(bored pile)中之傾斜管(inclinometer)、排樁內混凝土與鋼筋應變計(concrete strain gage and rebar strain gauges)、結構物傾斜計(tiltmeter)、地滑計(Surface Extensometer)等監測設施，並設置雨量計(rain gauges)、地下水水位(water level observation wells)等自動監測系統，91年則設置氣象站。歷年來已建構累積之監測資料內容包含 45 支傾斜觀測管(圖 1)、4 支自動地下水水位計、30 多處建物傾度盤(tiltmeter)、13 棟建物傾斜觀測、約 300 個道路與建物之位移沉陷觀測點(Settlement & Displacement Marks)、2 座地滑計、36 個混凝土應變計，48 個鋼筋應變計等，部分儀器因變位過大或年久損毀，目前仍可正常測量之傾斜管總數為 31 支、傾度盤共 28 處、36 個混凝土應變計、48 個鋼筋應變計，以及持續觀測之位移沉陷觀測點長期監測資料。

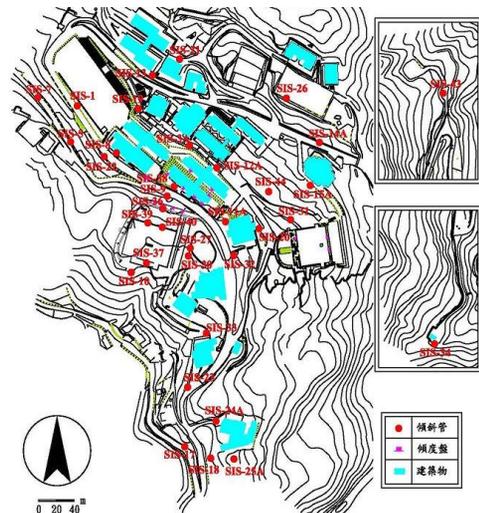


圖 1 華梵校區傾斜管埋設位置圖

Fig.1 Location of Inclinometers on Huaifan campus

### 2. 案例資料整理分析判釋

根據華梵校園坡地部份傾斜觀測管初期幾種不同變位形式，包括變位無一定趨勢者；邊坡無相對滑動，僅為

潛變型式之變形者；有一組以上潛在滑動面通過者等。在判釋邊坡是否存在滑動危險時，常須另外配合變位與時間之關係曲線。此外，隨著觀測儀器所在環境因素，如壁內管(bored pile inclinometer)或壁外管(ground inclinometer)、是否拉地錨(ground anchor)、管口是否保護、所在位置靠近滑動區位何處、氣象因子、施工因子……等，皆會影響觀測曲線之結果。詳細分析判釋時，須綜合其他監測儀器觀察所得，就其個別可能影響因素加以分離探討，以歸納、演繹出正確判釋之原則基準。

### 3. 模擬校正試驗

圖 2 為傾斜管模擬校正試驗裝置詳細示意圖及實際照片。利用真實傾斜管材，在各不同距離架設可調節點，一來作為傾斜管埋設校正試驗之用，二來可製作各種模擬可能變位條件，經由管口實測觀測數據與已知條件對照，來了解各種觀測數據曲線之涵義，並可針對傾斜管,其容許變位範圍之探討,延伸至不同環境之適用性(例如邊坡/連續壁/基樁/土壤中/回填區等)。

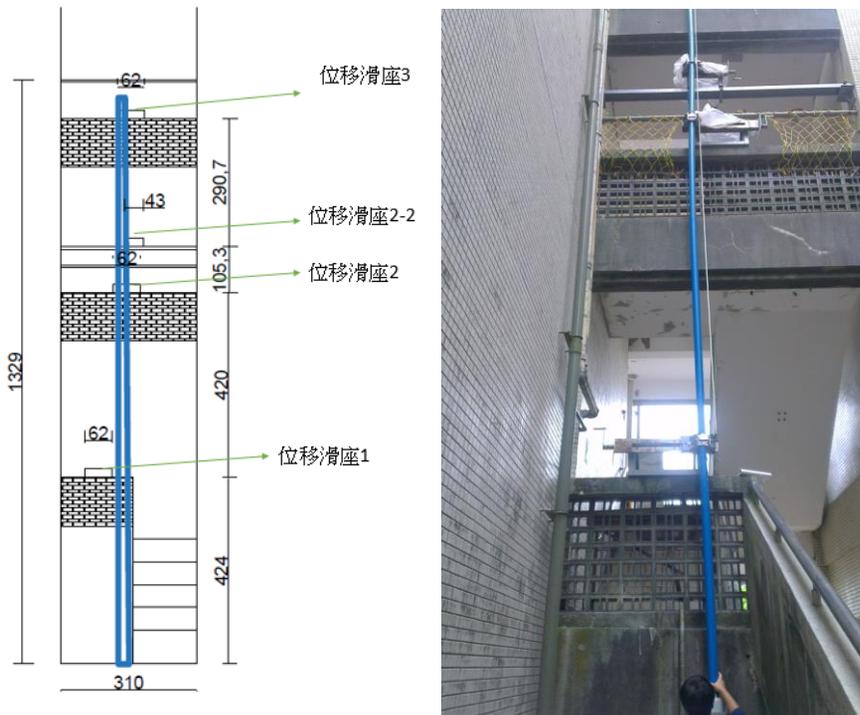


圖 2 之安館樓梯間裝設傾斜管校正儀實際裝設完成示意圖及照片

Fig.2 Schematic diagram and photo of Inclinator calibration device set up within staircase in the building

## 三、結果與討論

### 1. 華梵坡地傾斜管各種變位型態分析探討

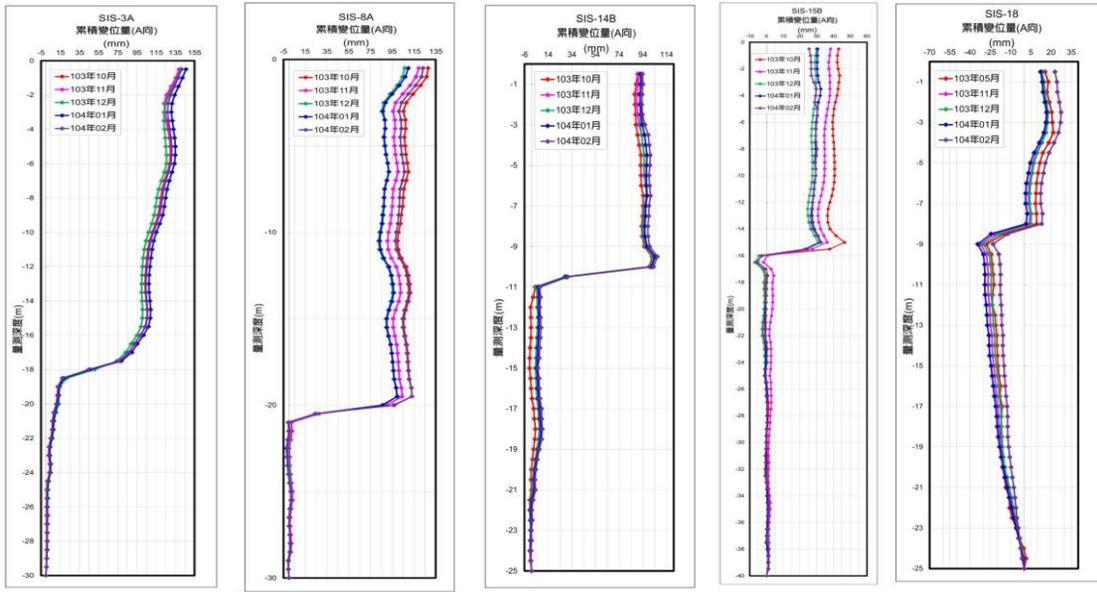
(1)一層滑動面型態：圖 3 為一層滑動面型態傾斜管隨深度之變位曲線舉例，包括 SIS-3A、SIS-8A、SIS-14B、SIS-15B、SIS-18 等孔號。其中 SIS-3A 位於菩提大道上，滑動深度約位於地表下 17.5 至 18.7 公尺，滑動層位移量約 6 公分，換算垂直傾斜角度約 3.4 度，17.5 公尺以上地層變位顯示有隨深度往上逐漸相對累積之位移。SIS-8A 位於而時館前，滑動深度約位於地表下 20 至 21 公尺，滑動層位移量約 7.5 公分，換算垂直傾斜角度約 4.3 度，其

中地表下 20 至 20.5 公尺位移量達 6.5 公分，換算垂直傾斜角度約 7.4 度，惟與前設 3A 孔不同者，其 20 公尺以上地層變位並無隨深度往上逐漸相對累積之位移現象，而是較趨向於整體滑移。SIS-14B 位於精進軒球場下方的大學之道上，滑動深度約位於地表下 10 至 11 公尺，滑動層位移量約 10 公分，換算垂直傾斜角度約 5.7 度，其中地表下 10 至 10.5 公尺位移量達 8 公分，換算垂直傾斜角度約 9 度，惟同樣與前設 3A 孔不同者，其 10 公尺以上地層變位並無隨深度往上逐漸相對累積之位移現象，而是較趨向於整體滑移。SIS-15B 孔位於覺照樓下方的坡地上，滑動深度約位於地表下 15 至 16 公尺間，惟主要滑動位於地表下 15.5 至 16 公尺，滑動層位移量約 4.5 公分，換算垂直傾斜角度約 5.1 度，其 15 公尺以上地層變位並無隨深度往上逐漸相對累積之位移現象，而是較趨向於整體滑移。SIS-18 孔位於校區外慈蓮苑的道路旁花園內，滑動深度約位於地表下 8 至 9 公尺間，其主要滑動位於地表下 8 至 8.5 公尺，滑動層位移量約 2.3 公分，換算垂直傾斜角度約 2.6 度，其 8 公尺以上地層變位並無隨深度往上逐漸相對累積之位移現象，而是較趨向於整體滑移，惟本孔另有較特殊現象，即深度 9 公尺以下至孔底位移往負值方向變化，推估其可能因素為存在較孔底更深之滑動面，而出現倒轉傾斜之情況，惟因其淺層深度(8-8.5 公尺)另有相對滑動層，且淺層滑動量較深層滑動量大，導致出現圖 3(e)之曲線狀態。以上 5 孔顯示滑動層厚度大約都為 1 公尺以下，而滑動層位移量平均約 6 公分，平均垂直傾斜角度介於 2.6~5.7 度之間，最大垂直傾斜角度則介於 7.4~9 度之間，平均約 5 度。詳細資料統計如下表 1。

表 1 一層滑動面型態滑動層判釋數據統計表 Table 1 Monitoring data of single slip cases

孔號	位置	滑動層深度(m)	滑動厚度(m)	總滑動量(cm)	滑動層垂直傾斜角(度)	土體變位型態說明
SIS-3A	菩提大道	17.5~18.7	1.2	6	3.4	隨深度逐漸累積
SIS-8A	而時館前	20~21	1.0	7.5	4.3~7.4	整體滑移
SIS-14B	精進軒下方	10~11	1.0	10	5.7~9	整體滑移
SIS-15B	覺照樓下方	15~16	1.0	4.5	5.1	整體滑移
SIS-18	慈蓮苑	8~9	1.0	2.3	2.6	整體滑移，有負向位移
平均	-	14.62	1.04	6.06	4.86	-

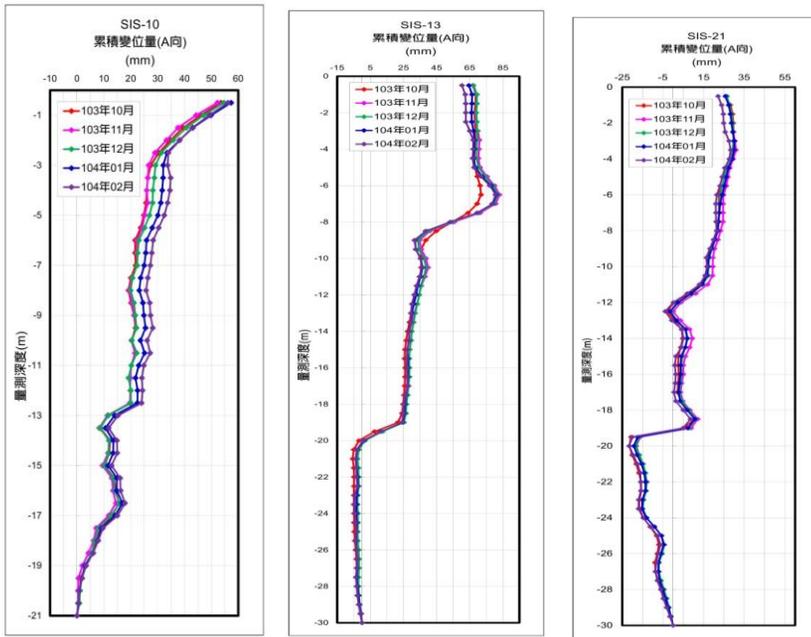
(2)多層滑動面型態：圖 4 為多層滑動面型態傾斜管隨深度之變位曲線舉例，包括 SIS-10、SIS-13、SIS-21 等孔號。其中 SIS-10 位於圖資大樓下坡面，約有 3 層滑動深度約分別位於地表下 2 公尺、12.5 至 13 公尺及 16.5 至 19 公尺等，滑動層位移量分別約 2.25 公分、1 公分及 1.5 公分，換算垂直傾斜角度約 0.64 度、1.15 度及 0.34 度，其中地表下 2 公尺以上地層變位為隨深度往上逐漸相對累積之位移，而 12.5 至 13 公尺滑動深度則較趨向於整體滑移，16.5 至 19 公尺地層變位亦為整體滑移。SIS-13 位於男生宿舍前，約有 2 層滑動深度約分別位於地表下 7 至 9 公尺及 19 至 20 公尺等，滑動層位移量分別約 4 公分及 2.5 公分，換算垂直傾斜角度約 1.15 度及 1.43 度，兩層滑動深度均趨向於整體滑移。SIS-21 位於素食餐廳旁，約有 2 層滑動深度約分別位於地表下 7 至 9 公尺及 19 至 20 公尺等，滑動層位移量分別約 4 公分及 2.5 公分，換算垂直傾斜角度約 1.15 度及 1.43 度，淺層滑動趨向於隨深度逐漸累積，而深層滑動趨向於整體滑移。以上 3 孔顯示滑動層厚度約為 0.5~2.5 公尺平均 1.64 公尺，而滑動層位移量約 1~4 公分平均約 2.18 公分，平均垂直傾斜角度介於 0.34~2.86 度之間平均 1.13 度。詳細資料統計如下表 2。



(a)SIS-3A (b) SIS-8A (c) SIS-14B (d) SIS-15B (e) SIS-18

圖 3 一層滑動面型態傾斜管隨深度之變位曲線

Fig.3 Deformation curves along Inclinometer depth in single slip cases



(a)SIS-10 (b)SIS-13 (c)SIS-21

圖 4 多層滑動面型態傾斜管隨深度之變位曲線

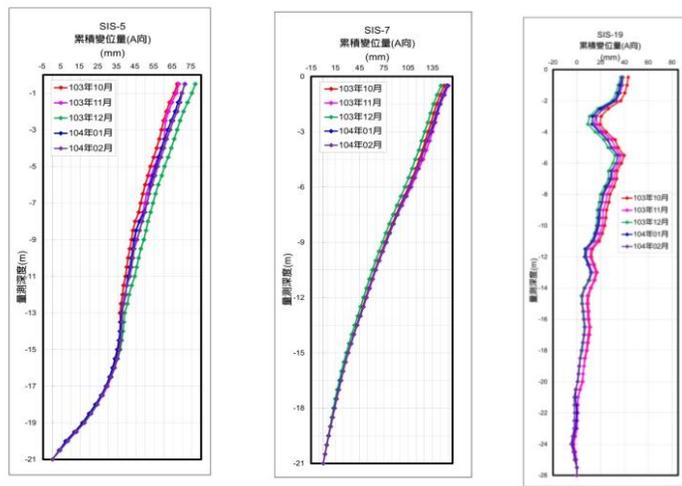
Fig.4 Deformation curves along Inclinometer depth in multi-slip cases

(3)懸臂式傾斜變位型態：圖 5 為懸臂式型態傾斜管隨深度之變位曲線舉例，包括 SIS-5、SIS-7、SIS-19 等孔號。前兩孔均位於運動場下坡面之擋土排樁內，第三孔位於運動場上坡面，其變位曲線並無相對滑動深度，而係隨深度往上逐漸相對累積之位移，地表最大位移量分別約 7.7 公分、15.5 公分及 3.5 公分，換算垂直傾斜角度約 0.21 度、0.42 度及 0.1 度，其中 SIS-5 號孔地表相對累積之位移量較 SIS-7 號孔少約一半，故整體變位曲線呈現往上漸

筆直之狀態，反之，SIS-7 號孔整體變位曲線呈現往上漸傾斜之狀態。此兩孔之變位曲線型態，係因擋土排樁受上坡面運動場之高填方載重作用，呈現懸臂式彎曲變形，故埋設在排樁內之傾斜管跟著懸臂彎曲變位。本擋土排樁設計貫入地下岩盤至少 4 公尺，高出地表懸臂牆面高約 10 公尺，牆面上設有一排背拉地錨，詳如圖 6 所示，地錨預力為 50 噸，錨固段長約 10 公尺，民國 100 年國道三號高速公路發生坍塌後，校方亦委託專業進行地錨檢測，其結果顯示多數地錨已發生鏽蝕，而其中部分地錨已呈現斷裂狀態，靠近 SIS-7 號孔地表甚至出現 PC 層陷落(圖 7)，此為為何 SIS-7 號孔變位量較大及出現上述線型特殊的原因。SIS-19 號孔非在排樁內而係在地層中，因地表有回填土故有伴隨地層沉陷之 S 形壓縮變形。以上 3 孔顯示滑動層厚度平均約 20.7 公尺，而滑動位移量平均約 8.9 公分，平均垂直傾斜角度 0.24 度。詳細資料如下表 3。由表中結果比較前述表 1 與表 2 得知，懸臂式彎曲變形之垂直傾斜角明顯小於其他型式之變形情況，此可能為以回填土層為主之坡面及受擋土排樁約束之傾斜管變形特性。

表 2 多層滑動面型態滑動層判釋數據統計表  
Table 2 Monitoring data of multi-slip cases

孔號	位置	滑動層深度(m)	滑動厚度(m)	總滑動量(cm)	滑動層垂直傾斜角(度)	土體變位型態說明
SIS-10	圖書大樓下坡面	2、 12.5~13、 16.5~19	2、 1.5、 2.5	2.25、 1、 1.5	0.64、 1.15、 0.34	隨深度逐漸累積 整體滑移 整體滑移
SIS-13	男生宿舍前	7~9 及 19~20	2.0 及 1.0	4 及 2.5	1.15 及 1.43	整體滑移
SIS-21	素食餐廳旁	10~12 及 19~19.5	2.0 及 0.5	1.5 及 2.5	0.43 及 2.86	隨深度逐漸累積 整體滑移
平均	-	8.4、18.4	1.64	2.18	1.13	-



(a)SIS-5

(b)SIS-7

(c)SIS-19

圖 5 懸臂式型態傾斜管隨深度之變位曲線

Fig.5 Deformation curves along Inclinator depth with cantilever type

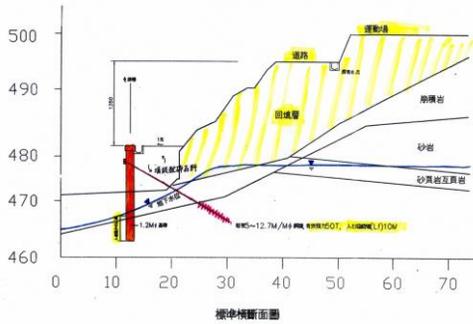


圖 6 運動場下坡面懸臂式擋土排樁背拉地錨設計圖  
Fig.6 Profile of slope for cantilever bore pile with tieback anchor in the toe of stadium



圖 7 運動場下坡面懸臂式擋土排樁頂 PC 陷落  
Fig.7 Settlement of surface PC shown on the top of cantilever bore pile in the toe of stadium

表 3 懸臂式傾斜變位型態滑動層判釋數據統計表

Table 3 Monitoring data of cantilever deformation cases

孔號	位置	滑動層深度(m)	滑動厚度(m)	總滑動量(cm)	滑動層垂直傾斜角(度)	土體變位型態說明
SIS-5	運動場下擋土排樁	0~21	21	7.7	0.21	隨深度逐漸累積
SIS-7	運動場下擋土排樁	0~21	21	15.5	0.42	隨深度逐漸累積
SIS-19	運動場上菩提大道	0~20	20	3.5	0.1	隨深度逐漸累積
平均	-	20.7	20.7	8.9	0.24	-

(4)地層沉降導致 S 型管變位型態:圖 8 為 S 型管變位型態傾斜管隨深度之變位曲線舉例,包括 SIS-24A、SIS-25A、SIS-43、SIS-34 等孔號。其中 SIS-24A 位於慈蓮苑上坡面,可能接近滑動面冠部因地層下滑沉陷而呈現 S 形壓縮變形,地表位移量約達 2 公分,而接近孔底另有 1 層滑動深度約位於地表下 19.5 至 20.5 公尺,滑動層位移量約 1.2 公分,換算垂直傾斜角度約 0.69 度。SIS-25A 位於慈蓮苑廚房上坡面,可能接近滑動面冠部因地層下滑沉陷而呈現 S 形壓縮變形,最大位移量約達 3 公分。SIS-43 位於後山生態池入口道路旁,可能接近滑動面冠部因地層下滑沉陷而呈現 S 形壓縮變形,最大位移量約達 1.3 公分。SIS-34 位於後山資源回收廠,可能接近滑動面冠部因地層下滑沉陷而呈現 S 形壓縮變形,最大位移量約達 0.9 公分。

(5)滑動深度超過管底情況:圖 9 為滑動深度超過管底情況傾斜管隨深度之變位曲線舉例,包括 SIS-12A、SIS-37 等孔號。其中 SIS-12A 位於霓虹館前菩提大道,孔深為 21 公尺,其現象為孔底第一段線段即出現傾斜,即孔底無零變位,顯示管底未貫入固定層,地表位移量約達 10 公分,而接近孔底地層呈現隨深度逐漸累積之位移,滑動深度約位於地表下 17 至 21 公尺以下,換算垂直傾斜角度約 1.07 度。SIS-38 位於薈萃樓前路旁,孔深為 32 公尺,同樣顯示管底未貫入固定層,地表位移量約達 11 公分,而接近孔底地層呈現整體位移,滑動層厚度超過 1.5 公尺以上,相對滑動量達 8.5 公分以上,換算垂直傾斜角度約 3.24 度。以上 2 孔顯示滑動層深度平均達 19~31 公尺,厚度平均 2.75 公尺以上,而滑動位移量平均 8.5 公分,平均垂直傾斜角度 2.16 度。詳細資料統計如下表 4。綜合表 1 至 4 統計數據得知,校區坡地存在淺層及深層滑動面,淺層部分深度約在 8~11 公尺,此深度約位在土層與岩層交界帶附近,深層部分深度約在 15~30 公尺(平均約 20 公尺),此深度可能為岩層中剪裂帶位置,故整體邊坡存在土岩界面與岩層中剪裂帶之滑動。滑動層厚度介於 1~2.75 公尺(平均約 1.8 公尺),其中整體滑動變位型態滑動層厚度平均約 1.2 公尺。累積滑動量介於 2~9 公分(平均約 6.4 公分),換算滑動層垂直傾斜角約介於 0.24~4.86 度(平均約 2.1 度),此相當於地層之剪動應變約介於 4%~8.5%(平均 3.7%)。

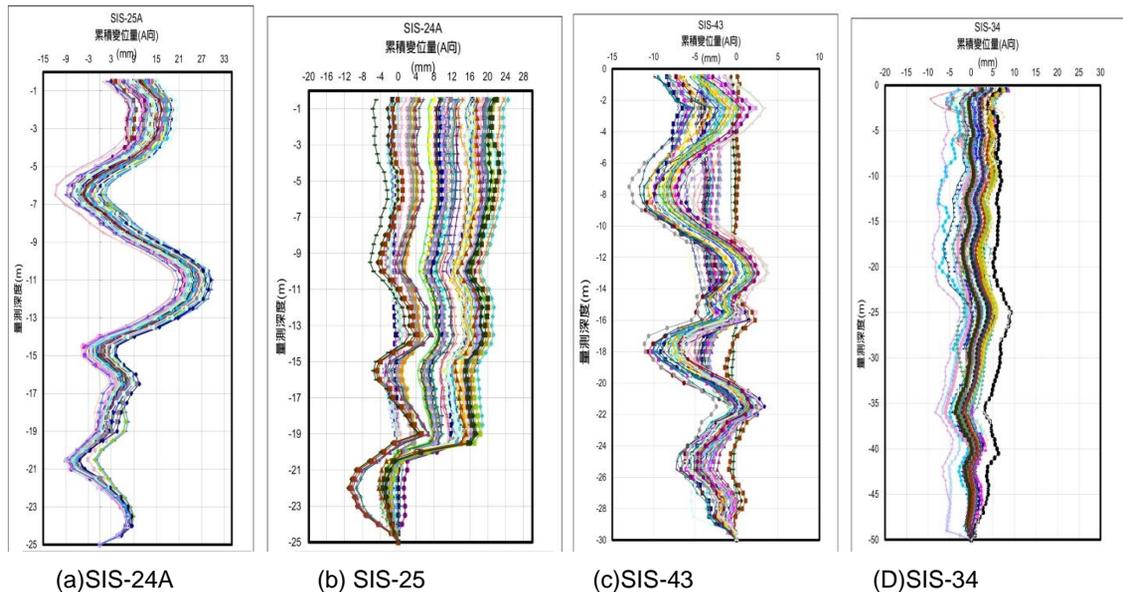


圖 8 S 型管變位型態傾斜管隨深度之變位曲線 Fig.8 Deformation curves along Inclinometer depth with S type

表 4 滑動深度超過管底情況滑動層判釋數據 Table4 Monitoring data for case of slip depth under the bottom of the pipe

孔號	位置	滑動層深度(m)	滑動厚度(m)	總滑動量(cm)	滑動層垂直傾角-度	土體變位型態說明
SIS-12A	寬虹館菩提大道	17~21 以下	4 以上	8.5	1.07	隨深度逐漸累積
SIS-38	薈萃樓前路旁	30~32 以下	>1.5	8.5	3.24	隨深度逐漸累積
平均	-	19~31	2.75	8.5	2.16	-

(6)管體不同深度滑動變位扭轉情況：為瞭解傾斜管在地表下滑動變位之扭轉情況，將各傾斜管 AB 兩方向所得位移量求取其合向量，並依照傾斜管量測方向符號規定標示各深度之總和變位量，圖 10(a)至(d)為傾斜管管體不同深度滑動總變位方向扭轉情況分佈圖，圖 10(a)為 SIS-1A 之情況，圖中括號內數字為其變位總和量，單位為 mm，由圖顯示最大變位量 83.2mm 在深度 6m，位移方向朝向 A+順時鐘夾 7.8 度方位，其餘不同深度位移方向朝向逆時鐘夾 28.4 度內，總和轉動分佈角度約 36 度，換算平均每公尺轉動角度約為 6.5 度。由於一般傾斜管埋設時會將 A+方向朝向最可能滑動方向，通常情況都是朝下邊坡方向，故圖 10(a)顯示各深度滑動方向大致是朝下坡面方向滑移。此角度分佈之差異可能隱含著傾斜管管體之扭曲，亦可能地層滑動在不同深度受到不同滑動塊體作用力的機制上差異所導致，管體扭曲角度將會隨著管深度增加而累積增大。其餘各管最大變位深度的方向與總和轉動分佈角度，以及換算平均每公尺平均轉動角度分別整理統計如表 5 所示，其中方向夾角順時鐘角度為正逆時鐘為負，單位為度。根據表 5 統計結果最大變位方向，除了 SIS-10 號孔因鄰近凹谷往東南溪谷變位外，其餘皆朝向下坡面方向位移，合位移方向角度分別位於-5.1~+15 度，平均約+4.81 度，總和轉動角度範圍分別介於 5~36 度，平均約 12.38 度，平均每 m 轉動角度介於 0.49~6.5 度，平均值約 1.04 度。

(7)其他特殊情況：地表孔口淺層往負向變位，圖 11 為 SIS-9 地表孔口淺層往負向變位之案例，本孔位於圖書資訊大樓(簡稱圖資大樓)連接大學之道的坡面，在圖資大樓基礎開挖施工時期所埋設，當圖資大樓結構體完成後，由於大樓連接道路有極剛性(rigid)的鋼筋混凝土樓板頂住，且本大樓靠道路側設有深基礎基樁，故相對於本滑動坡地形成一坡腳之穩定擋土構造，故在整體坡面仍存在下滑趨動力下，連接圖資大樓之樓板反而向上坡面作用，此可說明為何圖 11 之變位曲線中地表 2.5 公尺以上呈現往負值方向變位的現象。

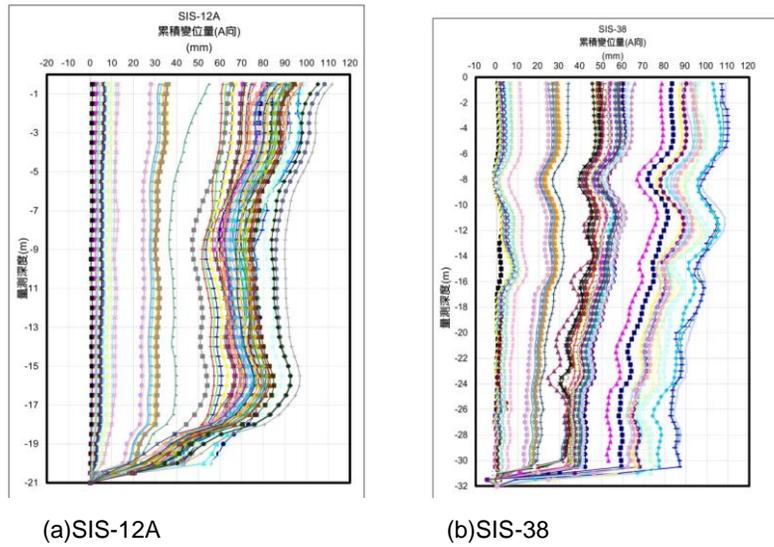


圖 9 滑動深度超過管底情況傾斜管隨深度之變位曲線

Fig.9 Deformation curves along Inclinometer depth for case of slip depth under the bottom of the pipe

表 5 最大變位方向與總和轉動角度 Table 5 Maximum deformation direction and direction angle along the pipe

孔號	最大變位方向	總和轉動角度	每 m 轉動角度	備註
SIS-1A	+7.8	36	6.5	
SIS-3A	-1.3	11.9	1.3	
SIS-5	-5.1	5.1	0.49	
SIS-7	-2.7	6	0.55	
SIS-8A	+2.9	14.2	2.18	
SIS-10	-83.2	15.3	1.06	往東南溪谷滑
SIS-11	+15	6.3	0.66	
SIS-12A	+7.7	6.7	1.67	
SIS-13	+14.6	7.5	1.36	
SIS-14	-0.8	5	0.53	
SIS-15A	+2.5	15.4	1.03	
SIS-17	+12.3	19.1	4.78	
平均	+4.81	12.38	1.04	

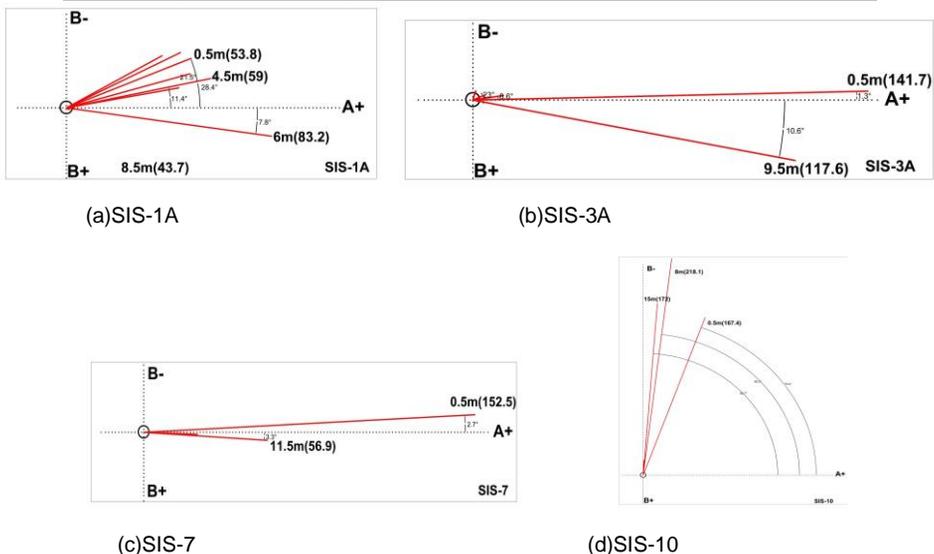


圖 10 管體不同深度滑動總變位方向扭轉情況分佈圖

Fig.10 Distribution of maximum deformation direction angle along the pipe

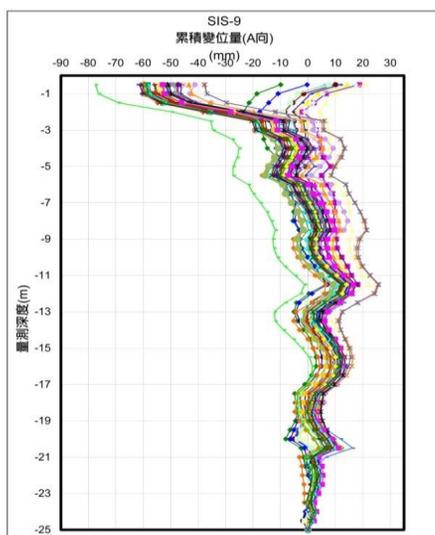


圖 11 SIS-9 地表孔口淺層往負向變位案例 **Fig.11** Case of negative deformation on the shallower depth of the pipe

## 2 模擬傾斜管變位試驗檢測結果

綜合以上案例得知傾斜管有各種變位曲線型態，為了解該變位曲線型態所真實反應之傾斜管變位及地層變化，本研究另以校區內樓梯間架設模擬傾斜管便為試驗設備，來模擬製作各種可能變位型態，並對傾斜管系統量測誤差進行探討。以下分別針對深度累積誤差分布情況、管體初始垂直度之影響、不同人員量測誤差情況、連接套管對誤差之影響、管體勁度引致滑動層附近變位之反曲現象加以模擬分析。

### (1) 傾斜試驗管-重複性試驗(單節管)

結果數據：詳圖 12，本試驗結果說明單節傾斜管在無變位情況下由不同人操作重複做初值量測所得之誤差範圍為-0.04 到 0.02 之間，顯示正常情況下傾斜儀在管中所量測之誤差量極小，惟由曲線圖可看出因為傾斜管之水平位移量測原理係以管底當不動點，再逐漸往上疊加由每 50 公分量測得之垂直傾斜角變化換算其水平位移量，故曲線顯示越靠近地表其誤差累積量越大。

### (2) 重複性試驗(單節含連接管)

數據結果：詳圖 13，由本試驗可得知傾斜試驗管在加上連接套管，然後在無變位情況下做重複多次量測，結果顯示比原先無連接管的單支傾斜管誤差最多多了 0.06mm，故多了連接管會略微增加誤差值之影響。

### (3) 重複性試驗(三節完整觀測管)

數據結果：詳圖 14，本實驗可得知傾斜觀測管在無變位量測情況下進行多次的初始值反覆試驗，其誤差數值為 2.79mm 到 0.93mm 變動甚大，換算垂直傾斜角度變化量約為 0.014 度(即約 50 秒)，經討論後評估原因為全管固定不夠與初始管未校直，將於後續試驗改善。

### (4) 重複性試驗(經緯儀校直後)

詳圖 15 與圖 16，得知傾斜觀測管在經由經緯儀校直與位移滑座固定後在未變位情況下進行多次的初始值反覆量測，所得之誤差值為 0.17mm 到 0 之間變動明顯變小，換算垂直傾斜角度變化約為 0.00085 度(即約 3 秒)。

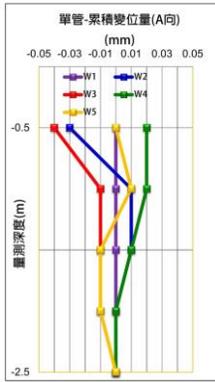


圖 12 單節管情況之傾斜管變位圖  
**Fig.12** Deformation curves of single pipe

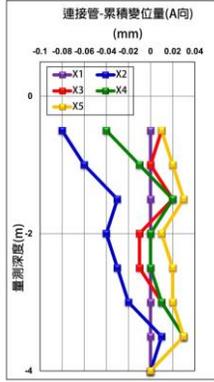


圖 13 含連接管情況之傾斜管變位圖  
**Fig.13** Deformation curves with connection joint

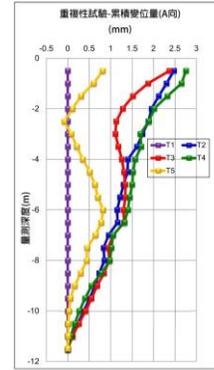


圖 14 傾斜觀測管三節長度變位圖  
**Fig.14** Deformation curves with length of three segments



圖 15 經緯儀校直情況  
**Fig.15** Vertical alimnt with theodolite

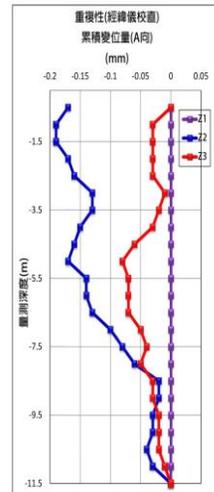


圖 16 傾斜觀測管經校直後的變位數據圖  
**Fig.16** Deformation curves after alimnt with theodolite

(5)最大垂直傾度試驗

研究目的：得到傾斜管在地底下所能量測的最大垂直傾度角，超過其角度傾斜儀在管中將卡管而不能再測量。

圖 17 顯示太大彎曲(約超過 14 度)會使儀器滑輪脫軌。

數據結果：詳圖 18，本次試驗中四次的實驗四條曲線數據相對於其變化量幾乎重疊，故取其兩端切線之相交的夾角  $\theta$  為所求之最大傾角，換算最大角度約為 12.19 度。

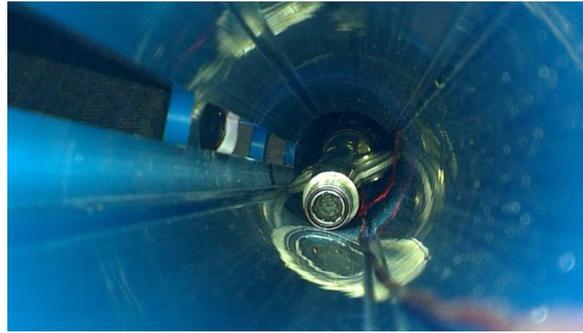


圖 17 傾斜儀在彎曲太大(約超過 14 度)傾斜管中滑輪脫離溝槽之情況

Fig.17 Case of over bending (>14°) showing the wheel of Inclinator escape from guide groove of the pipe

(6) 相對滑動(懸臂式變位)

數據結果如圖 19 至圖 20：由於模擬傾斜管在 9m(管底上方 2.5m)附近有固定點，故有一段垂直線不動情況，此與校內懸臂式變位孔 SIS-7 所示(圖 19)，自管底以上即開始傾斜略有不同，但最大變位量及曲線形態上已大致相同，此種變位型態因屬隨深度逐漸累積，較無過度彎曲卡管問題，換算垂直傾斜角約 0.91 度。

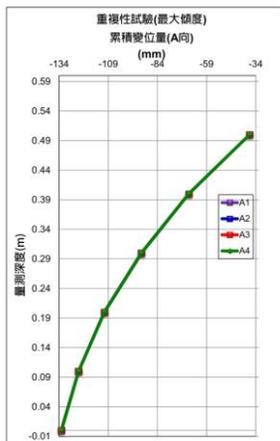


圖 18 傾斜管最大傾度變位數據圖  
Fig.18 The maximum bending curves of Inclinator pipe

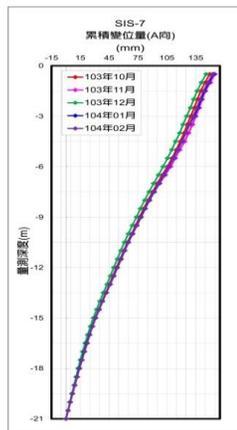


圖 19 校內懸臂式變位 SIS-7  
Fig.19 SIS-7 cantilever type pipe deformation

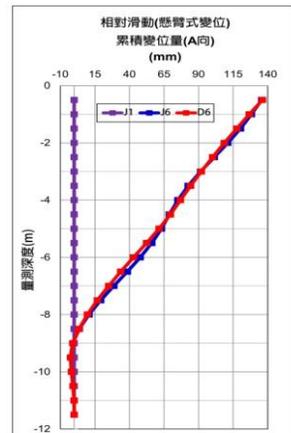


圖 20 模擬試驗懸臂式變位量測數據圖  
Fig.20 Model test cantilever type pipe deformation

(7) 相對滑動(一個相對位移)

數據結果：詳圖 21，本次試驗結果可得知傾斜管在深度 5m 到 8m 處曲線位移有明顯反曲現象，此乃因模擬傾斜管除了裝設位移滑座點外，其餘深度管周無束制而材料受彎曲之慣性反曲變形，此現象在實際案例中若管周圍存有空洞或回填不夠緊密時亦可看到，如圖 3(d)(e)及圖 4，為進一步模擬有圍束之整體滑移情況，經修改與評估後將加裝新的設備以固定此處，並再進行一次試驗。

(8) 最大傾斜量測限度數據：

本次試驗經過新加裝的固定設備於第一及第二滑座之間後，原圖 21 中深度 6~7m 的變位曲線有顯著的改善反曲現象(圖 22)，惟第 2-2 滑座到第 3 滑座間因未加圍束固定，仍會有慣性彎曲現象。經分析後繪製下方反曲變位與滑座最大位移關係圖(圖 23)、實際量測值與操作位移誤差圖(圖 24)、上方最大彎曲點圖(圖 25)三張圖並進行分析探討。圖 23 中水平軸為滑座操作位移量，垂直軸為反曲變位，由圖可得知反曲量在大於 5cm

時反曲量會大幅增加。

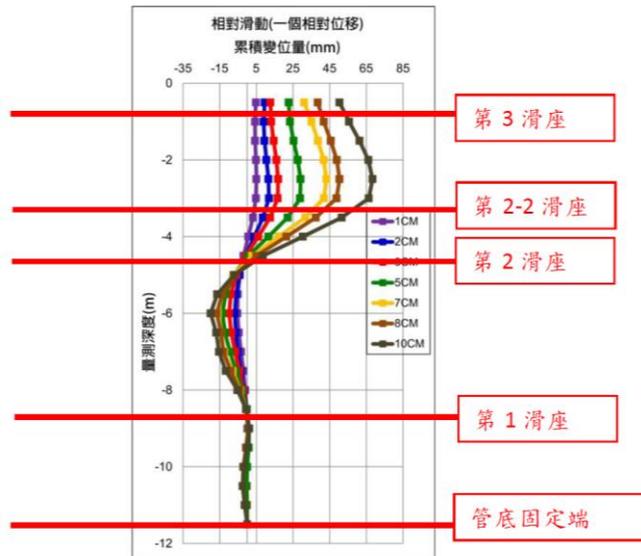


圖 21 模擬試驗一個相對位移變位置量測數據圖 Fig.21 Model test pipe deformation for one slip case

圖 24 可得知當操作位移量小於 5cm 時誤差量為 0.15mm/cm(即 1.5%)，當大於 5cm 時誤差量為 0.5mm/cm(即 5%)。圖 25 可以看出當 2-2 滑座每位移 1cm，則第 2-2 滑座到第 3 滑座懸空段有 1.4cm 的反曲點最大彎曲量，即上方會多出 0.4cm 的反曲點彎曲變位，而此現象在圖 3 中現地實測管內亦可發現，在相對滑動點上方有一小段反曲變形的額外增量，約 0.5~1.0 cm。最後將模擬傾斜管逐漸加大水平位移直至儀器卡管無法再量測為止，以獲取最大彎曲限度值，其結果詳如下圖 26 所示。由下圖得知最大傾斜量測角度約 12 度，即 3m 至 4.5m 之間位移量由 32.11cm 減為 0，換算垂直傾斜角度約 12.03 度。圖 27 為最大彎曲限度曲線管照片情況。

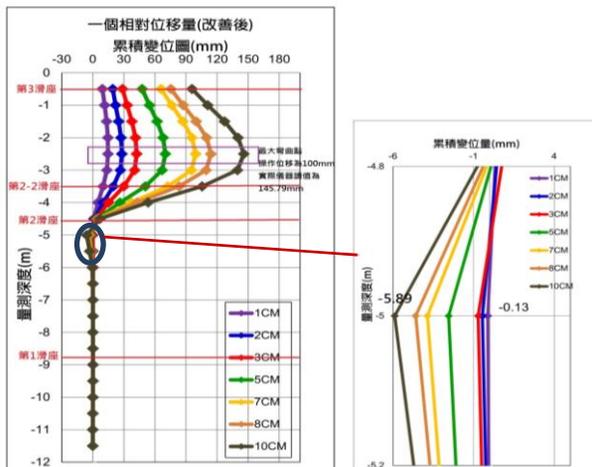


圖 22 一個相對位移量增設固定座改善後變形圖  
 Fig.22 Model test pipe deformation for one slip case after adding fixed points

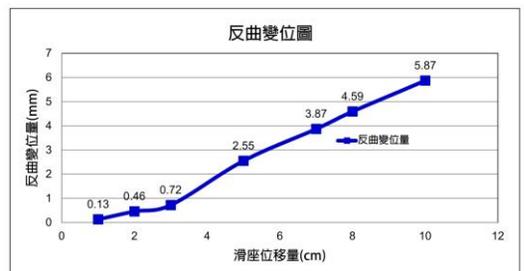


圖 23 滑座位移量與下方反曲變位量關係圖  
 Fig.23 Correlation of Inflection deformation with sliding seat shift amount

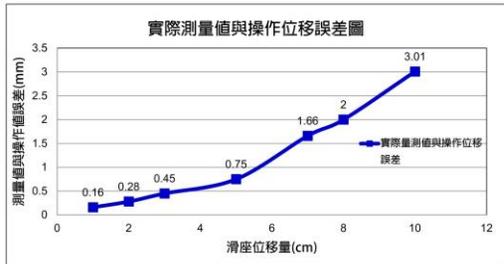


圖 24 實際量測與操作位移誤差

Fig.24 Error between measured pipe deformation and sliding seat shift amount

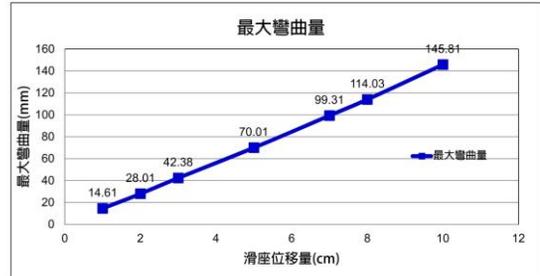


圖 25 滑座位移量與上方反曲點最大彎曲量關係圖

Fig.25 Correlation of upper inflection deformation with sliding seat shift amount

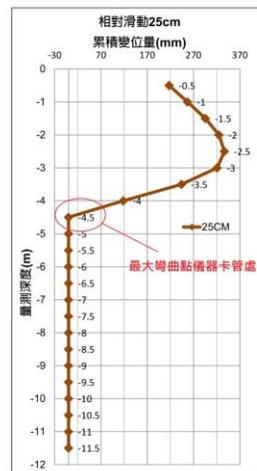
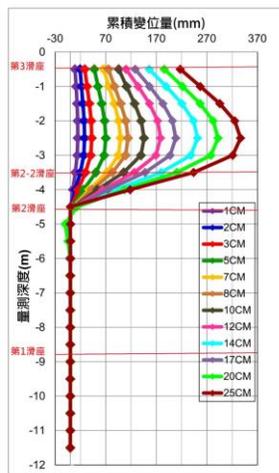


圖 26 最大彎曲限度曲線 Fig.26 Maximum bending curve of the Inclinometer pipe



(a)整體管彎曲情況

(b)最大彎曲段背面近照

圖 27 最大彎曲限度曲線管照片 Fig.27 Photos of maximum bending of the Inclinometer pipe

(9)管底淤積之影響：

圖 28 為以滑座位移 10 公分情況，假設孔底不同淤積厚度，量測時讀數深度分別給予提高，所得數據繪製曲線結果，藉以探討若孔底有淤泥沉積時對量測位移量誤差之影響，以圖中深度 4m 點為例，在淤積量於 5 公分、

10 公分與 15 公分下，讀數誤差值分別達 5.12mm、10.5mm、15.5mm 等，換算誤差百分比分別達 9%、19%、29%，其誤差量甚為可觀，故當管底有淤積時，需格外注意量測深度校正，以免受誤差影響讀值的正確性。

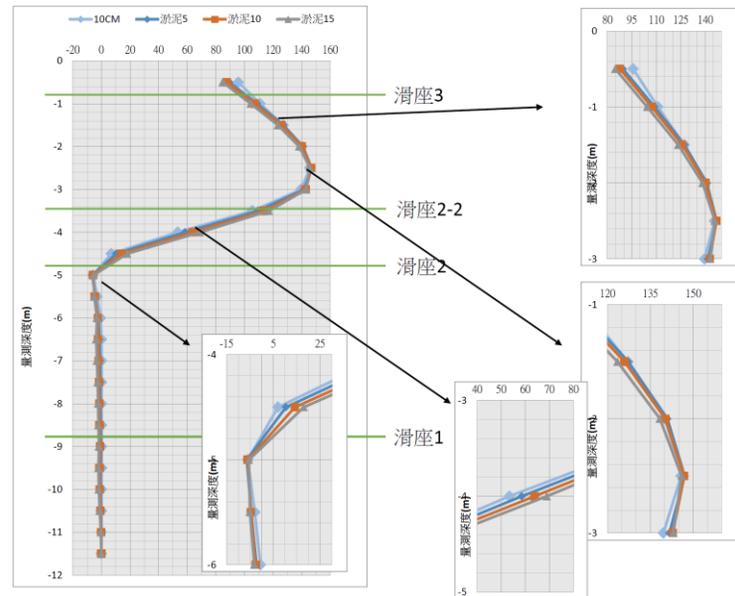


圖 28 以滑座位移 10 公分情況探討若孔底有淤泥沉積時對量測位移量誤差之影響

Fig.28 Error of the measuring curves when silt deposited in the pipe bottom for sliding seat shift 10cm

(10)管體扭轉之影響：為了解當變形後傾斜管是否會彈性回復，前述第 2-2 號滑座達最大 25cm 水平位移後將手搖桿歸回至零點，並放鬆滑座管夾，與初值相減管體出現無可回復之塑性變形，其中第 2-2 號滑座永久變位達 15mm，其餘深度滑座點亦分別有 4~7.5mm 之塑性變形。

圖 29 為變形後管體扭轉 15 度與 30 度各深度之位移讀值誤差量分佈。由圖顯示變形後管體若在扭轉情況下，水平位移讀數誤差將會受到頗大的影響，最大誤差量可達 10~11.5mm，若誤差值與扭轉角度成正比關係，則換算扭轉角度每度將造成水平位移讀數誤差達 0.4~0.7mm。而在人力可扭轉範圍下，管體最大可扭轉角約為 30 度。若以表 5 中實際整理案例管體平均轉動角度約 12.38 度，則換算相對可造成水平位移誤差值約 6.8mm。

圖 30 為原狀新管體扭轉 15 度與 30 度各深度之水平位移讀值誤差量。由圖顯示原狀新管體若在扭轉情況下，水平位移讀數甚小，誤差量平均分別達 1.13~2.54mm，若誤差值與扭轉角度成正比關係，則換算扭轉角度每度將造成水平位移讀數誤差為 0.075~0.085 mm/度。故若以表 5 中實際整理案例管體平均轉動角度約 12.38 度，則換算相對可造成水平位移誤差值約 1mm。

## 六、結論與建議

本研究結合本校坡地試區現有完整之監測系統所累積之資料，針對不同監測儀器間彼此變位關係之綜合判釋，配合現地勘查與數值分析結果，將監測變位資料之判釋結果，作機制型態分類與量化分析探討，以釐定出各種監測訊息所代表在坡體崩滑機制上之意義闡釋，並利用校內大樓樓梯間架設傾斜觀測管理設試驗校正設備，以模擬各種埋設情況及觀測變位曲線型態，例如管周回填出現空洞、接合點脫落、管體扭轉、層間相對滑動達極限而卡管、多層滑動及不同滑動層厚等現象，藉以供釐訂變位監測結果判釋之正確要領，並印證變位量測資料之受力及環境因素變化行為，並可供作儀器校正量測之用，研究結果獲致以下結論與建議：

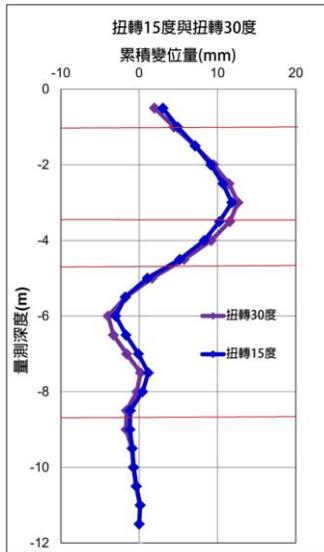


圖 29 變形後管體扭轉 15 度與 30 度位移讀值誤差

Fig.29 Error curves when deformed pipe twist with 15° and 30°

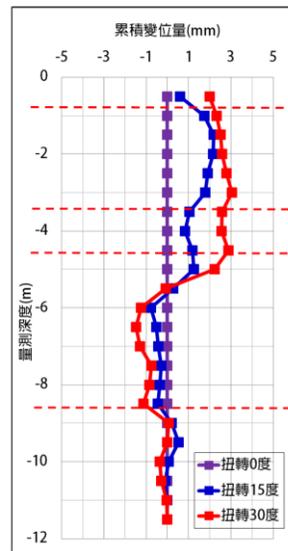


圖 30 原狀新管扭轉 15 度與 30 度位移讀值誤差

Fig.30 Error curves when new pipe twist with 15° and 30°

由本校監測案例單一滑動層觀測結果顯示，本順向坡地層整體滑動，單一滑動層厚度大約都為 1 公尺以下，而滑動層位移量平均約 6 公分，平均垂直傾斜角度介於 2.6~5.7 度之間，最大垂直傾斜角度則介於 7.4~9 度之間，平均約 5 度。對於擋土排樁中傾斜管變位都呈懸臂狀變形，滑動層厚度平均約 20.7 公尺，而滑動位移量平均約 8.9 公分，平均垂直傾斜角度 0.24 度。

由多層相對滑動之傾斜管觀測結果顯示，校區坡地存在淺層及深層滑動面，淺層部分深度約在 8~11 公尺，深層部分深度約在 15~30 公尺(平均約 20 公尺)。滑動層厚度介於 1~2.75 公尺(平均約 1.8 公尺)，其中整體滑動變位型態滑動層厚度平均約 1.2 公尺。累積滑動量介於 2~9 公分(平均約 6.4 公分)，換算滑動層垂直傾斜角約介於 0.24~4.86 度(平均約 2.1 度)，此相當於地層之剪動應變約介於 4%~8.5%(平均 3.7%)。

有關管體不同深度滑動變位扭轉情況，根據表 5 統計結果最大變位方向分別位於 -5.1~+15 度，平均約 +4.81 度，總和轉動角度分別介於 5~36 度，平均約 12.38 度，每 m 轉動角度介於 0.49~6.5 度，平均約 1.04 度。

由模擬傾斜管變位試驗檢測結果獲知：

- (1) 單節傾斜管在無變位情況下由不同人操作重複做初值量測所得之誤差範圍為 -0.04 到 0.02mm 之間，顯示正常情況下傾斜儀在管中所量測之誤差量極小，惟由曲線圖可看出因為傾斜管之水平位移量測原理係以管底當不動點，再逐漸往上疊加由每 50 公分量測得之垂直傾斜角變化換算其水平位移量，故曲線顯示越靠近地表其誤差累積量越大。
- (2) 加上連接管會略微增加誤差值之影響，在總長 11.5m 傾斜觀測管未特別校直的初始情況下進行多次的初始值反覆試驗，其誤差數值為 2.79mm 到 0.93mm 變動甚大，換算垂直傾斜角度變化量約為 0.014 度(即約 50 秒)。
- (3) 經由經緯儀校直與位移滑座固定後在未變位情況下進行多次的初始值反覆量測，所得之誤差值為 0.17mm 到 0 之間變動明顯變小，換算垂直傾斜角度變化量約為 0.00085 度(即約 3 秒)。
- (4) 傾斜管儀器可量測最大傾角，換算最大角度約為 12.19 度，彎曲太大(約超過 14 度)傾斜管中滑輪會有脫離溝槽之情況。當操作位移量小於 5cm 時誤差量為 0.15mm/cm(約 1.5%)當大於 5cm 時誤差量為 0.5mm/cm(約 5%)。
- (5) 對於懸臂式變位型態因屬隨深度逐漸累積，較無過度彎曲卡管問題。
- (6) 對於孔底有淤積導致量測誤差問題，在滑座位移 10 公分情況，淤積量於 5 公分、10 公分與 15 公分時，讀數誤差值分別達 5.12mm、10.5mm、15.5mm 等，換算誤差百分比分別達 9%、19%、29%，其誤差量甚為可觀，故當管底有淤積時，需格外注意量測深度校正，以免受誤差影響讀值的正確性。

- (7) 對於變形後管體扭轉角度每度將造成水平位移讀數誤差達 0.4~0.7mm。而在人力可扭轉範圍下，管體最大可扭轉角約為 30 度。若以表 5 中實際整理案例管體平均轉動角度約 12.38 度，則換算相對可造成水平位移誤差值約 6.8mm。惟若係原狀新管體則扭轉角度每度將僅造成水平位移誤差達 0.075~0.085mm，故若以表 5 中實際整理案例管體平均轉動角度約 12.38 度，則換算相對可造成水平位移誤差值約 1mm。

## 誌 謝

本文得以順利完成，要感謝行政院科技部及三聯科技股份有限公司的研究經費贊助 (MOST 103-2622-E-211-001-CC3)。

## 參考文獻

- [1] 廖瑞堂，(1999)，「山坡地護坡工程設計」，台灣省土木技師公會。
- [2] 鄭清江，(2003)，「以傾斜管變位及極限穩定分析進行華梵坡地穩定機制之探討」，華梵學報，第九卷。
- [3] 黃鑑水 鄭清江，「大崙地區地質之再調查與分析」，華梵藝術與設計學報，第一期，第 59-69 頁，(2004)。
- [4] 鄭清江、謝宗燁，坡地監測滑動面判釋分析之案例研討」，華梵藝術與設計學報，第六期，第 1-14 頁，(2010 年 7 月)。
- [5] 鄭清江、蔣佳仁，「降雨入滲水位變化引致崩積土坡穩定性及位移量之連鎖行為探討」，華梵藝術與設計學報，第八期，第 17-31 頁，(2013 年 7 月)。
- [6] 杜居巢，(2003)，「坡地滑動監測與結果判讀之研究」，雲林科技大學，營建工程系碩士論文。
- [7] 廖洪鈞，廖瑞堂，2000，「坡地社區開發安全監測手冊」，內政部營建署營建自動化研究報告。
- [8] Jeng Chingjiang, Chu Bing-Lin, Tsao Shunping, Lin Taian, "Matrix Suction of Unsaturated Colluvium Slope Influenced by Rainfall and Plant Condition: A case of Taiwan Huafan University", Wuhan University Journal of Natural Sciences, Vol.12, No.4, pp.689-694 (2007), (94-2745-E211-004-URD) (EI)
- [9] Ching-Jiang Jeng And Tai-An Lin, "A Case Study On The In-Situ Matrix Suction Monitoring And Undisturbed-Sample Laboratory Test For The Unsaturated Colluvium Slope", Soils And Foundations, Vol. 51 No. 2, Pp.321-331, (2011) (SCI) .
- [10] Green, G. E., (1974), "Principles and Performance of two Inclinometers for Measuring Horizontal Ground Movements," In Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 166-179.
- [11] Slope Indicator (1998), "Geotechnical & Structural Instrumentation," SINCO, CO, U.S.A..
- [12] Slope Indicator (2000), "Digitilt Inclinator Probe," Slope Indicator Company.
- [13] 地すべり対策技術協會，(1978)，「地すべり対策技術設計實施要領」，第六章。
- [14] 独立行政法人土木研究所、日本工営株式会社、坂田電機株式会社，(2012)，「孔内傾斜計データ不良の原因に関する実態調査と計測技術の改善・開発共同研究報告書」，整理番号第 430 号。