

北宜高速公路坪林隧道金盈斷層施工與監測成果概述

*周光永

摘要

北宜高速公路中的坪林隧道全長12.9公里，為雙孔各雙車道之隧道，主要由東口（即頭城端）採TBM單向鑽掘施工，但為了配合TBM製造、運輸、組裝之時程，故自東口先以鑽炸法先行開挖，鑽炸法開挖斷面約13公尺，其中西行線部份因依預定進度TBM較晚進場，故鑽炸法開挖長度較長，達880公尺，亦即是以鑽炸法開挖通過坪林隧道第一個主要斷層—金盈斷層。

在稍早導坑以TBM以通過金盈斷層時，曾先後發生兩次受困事件，故西行線在開挖通過金盈斷層時，依據以往的經驗採多項加強措施，諸如增加預估變形量，改用重形鋼肋配合系統岩栓，鋼肋腳以縱向型鋼連接，降洞台後立即施作臨時仰拱閉合等，而且在該範圍內設有二組計測斷面，於開挖過程中每日測讀以觀測其變形情形，並隨採必要之因應措施，至目前為止大致情形尚稱良好，本文即針對上述施作情形及計測結果作一說明。

*交通部台灣區國道新建工程局第三區工程處頭城工務所

一、前言

北宜高速公路自南港經石碇、坪林至頭城，全長約31公里，其中有五座隧道，約佔全線總長 $2/3$ ，其中自坪林至頭城段之坪林隧道長度約12.9公里，由頭城端往坪林方向施工，採分離之雙孔隧道，每孔隧道為單向之雙車道，直徑約12公尺，除主隧道兩端入口段，因利用TBM訂購、設計及製造期間，隧道洞口先以鑽炸法施工，（東行線約 720公尺及西行線 880公尺）其餘採用TBM鑽掘法施工，TBM開挖時採用外徑11.8公尺之圓形斷面，外支撐使用預鑄環片。兩種施工法均以混凝土或鋼筋混凝土為內襯砌。

二、金盈斷層特性推估

坪林隧道位於中央山脈地質區之雪山山脈區，雪山山脈由已摺皺之第三世紀輕度變質沉積岩地質所構成，岩性主要種類包括硬頁岩、石英岩及砂岩，沿線範圍內存在有多條斷層，並含豐富的地下水，其中較具規模的斷層包括金盈、上新、巴陵、大金面、石牌等，前述斷層均位於頭城端前三公里內，但限於外在環境之影響（坪林端為台北水源保護區，且腹地狹小）不得不自頭城端先行掘進，其施工之困難自不在話下。

原先依基本設計及細部設計地質結果研判，金盈斷層寬約18~20公尺，其中在四稜砂岩側約為六公尺之斷層破碎帶，主要為斷層及角礫岩，部份為斷層。

另一側為乾溝層之硬頁岩，寬約12公尺，主要為斷層及角礫岩。此外四稜砂岩側之石英砂岩質角礫岩透水性相當高，且為高壓水帶，而斷層泥則為不透水。該斷層材料經由導坑現場採樣進行試驗結果，塑性指數大致在10~18之間，孔隙比約為 0.2，濕密度在 $2.91\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，依統一土壤分類法屬於低塑性粘土質(SG)，另中興工程顧問公司地力中心取樣進行直剪試驗，其尖峰凝聚力約為 27KPA，摩擦角約為38度，且推估約20公尺寬。TBM通過金盈斷層時，曾發生兩次受困事件（即第六、七次受困事件），其受困現象均是斷層泥持續崩坍，造成進渣料太大而挾埋TBM切削頭及機身，在斷層帶之前及斷層帶附近並無太大之地下水，而通過斷層帶後岩性逐漸變為細砂岩，且開始出現大量之地下水。

鑑於導坑TBM對於乾溝層硬頁岩地質弱帶頗難適應之經驗，經各方人員研究後，咸認若以鑽炸法通過金盈斷層後，再以TBM工法開挖，則可避免主坑TBM一開始未臻熟練前，即遭遇金盈斷層不良地質而受困，減少重蹈導

坑TBM受困之風險。

三、金盈斷層處理過程概述

依據導坑第六、七次受困地質顯示，斷層帶地質甚複雜，影響開挖變數特別多，故參酌原設計支撐工及主坑鑽炸法之施工經驗，研擬其可能遭遇的狀況及處理如下：

(一)預計處理方式

1. 開挖前施作6M以上(深度依現場狀況而定)探查孔兼排水孔。
2. 預估沉陷量將大於原細設圖之VI類岩體之預估變形量15CM，應擴大開挖半徑40CM，施作15CM噴凝土(含焊接鋼絲網)二次，以免開挖後，造成淨空不足。
3. 鑽設支撐鋼管於岩盤鬆軟及較易坍塌處，並利用支撐鋼管灌漿，形成一拱形支撐。
4. 開挖工作分為上半斷面、洞台 I、洞台 II 及仰拱四個階段開挖(如圖一)。
5. 於開挖前尚能穩定之情況下，上半斷面採環狀局部開挖，預留土心，開挖面出現不穩定有抽坍之慮時，上半斷面改以半邊局部處理，組立H200*200支保完成後，再處理另外半邊，並視需要施作臨時仰拱。此外，在斷層及前後12M(1D)範圍內，於鋼肋兩側基腳向下(俯角約45度)各打設一排6M非預力岩栓，以加強拱基穩固(如圖一)。
6. 頂拱岩體應於上半斷面完成後分次全面施作固結灌漿。
7. 洞台 I、II降挖前，分別先施作兩側支撐工之基腳灌漿。
8. 洞台 I、II降挖完成後，仰拱必須儘速閉合。
9. 施作期間應加強計測斷面變形觀測，必要時需施作預力鋼鍵及其他補強措施。

(二) 實際處理過程

1. 上半斷面

自84.02.20西行線上半斷面前進開挖至預估斷層起點里程9K+415時並未發現明顯之斷層岩體出露，但至39K+413處時，開挖面出現整面黑色泥片之岩體，為了免除大量湧水之情形發生，先進行取心探查工作，每次鑽設三孔，每孔9M深，由鑽設9M結果發現岩盤內含有泥及不透水層，所以研判已逐漸接近西行線第一個斷層，故經研判後將原先的輪進1.5M改為1.2M，以維隧道及人機安全。當84.02.25開挖工作面至39K+408.2~407.8間，頂拱正在修挖斷層泥時，突然發生抽坍現象（約 28M^3 ），現場俟岩盤稍為穩定後，即以噴凝土向抽坍空洞回噴封面，再打設H100型鋼、支撐鋼管、鋼護板形成一拱形支撐，然後再重新掛網噴漿，並施作回填灌漿等措施，處理本次抽坍所耗時日約三天。其由於岩體已近金盈斷層邊緣（該斷層實際出露之里程為39K+400至39K+370），且該斷層地質惡劣及複雜，故由39K+402.2起隧道支撐改為第VI類，輪進為1M。本斷層帶施工另一次抽坍發生於39K+395至394處之頂拱位置，現象與處理方法則與前次大致相同，於此不多作說明。整個上半斷面開挖工作持續至84.04.11於39K+358（鑽炸段終端點）組立最後一對鋼肋，完成支撐而暫告一段落。全程處理時間，自84.02.22起至84.04.02止，完成該斷層里程始於39K+415~370止之上半斷面處理工作，所耗時數為約40天。

2. 洞台 I

降挖洞台 I 始於84.04.27起，施工步驟大致為預留土心、半邊局部開挖，除系統岩栓外，兩側基腳鑽設一排6M岩栓。並自39K+408.2至370區段之山海側支保連接H150型鋼成縱向支撐，底部施作15CM臨時仰拱，以維隧道安全。降挖洞台 I 里程39K+401至399處，現場正在修挖海側上半斷面支保腳下方時，斷層泥突然不斷崩落，造成約 5M^3 之抽坍，幸無傷及工作人員，俟抽坍面趨穩定時，隨即封面並打設鋼管及鋪網與埋設灌漿管施作回填灌漿等補強措施。該斷層區降挖洞台工作，除前述一次抽坍外，整體而言尚屬順利，故至84.06.01完成降挖事宜。

3. 洞台 II

洞台 II 於 84.06.16 開始降挖，亦採半邊分階局部開挖，由山側先行開挖，約施作 10M 後，改施作海側，俟完成後，即修挖仰拱面，然後施作掛網及噴漿封面等，完成仰拱閉合之工作。當降挖至 39K+401 處之海側，洞台 I 下方之開挖面仍發生 1~2M 深之抽坍現象，故即先行封面，惟因開面岩盤有少量滲水，致使噴凝土甚難附著於開挖面，必須待水量較小或調整噴凝土速凝劑用量，方使封面作業勉強完成。由於隧道內仍持續變形，故自 39K+405~390 仰拱閉合改以每 5M 閉合一次，唯仍難以抑止變形，故再改以每 2M 閉合一次，方使得變形現象趨於收斂。降挖洞台 II 及仰拱閉合之工作，因上述等因素，致處理該部份之工作甚為艱辛，於 84.07.31 處理完成，所耗時數約 45 天。

四、金盈斷層監測成果概述

在金盈斷層內設有計測斷面兩處，分別為：39K+387 與 39K+378，其計測結果顯示（如圖二），開挖面到達計測斷面前（約一個 D 之距離）即開始有變形產生，大約於開挖面通過計測斷面時，變位速率最大。其變位速率大致如後：

由里程 39K+387 及 378H 1 收斂計測得知，於於洞台 I 臨時仰拱閉合時，開挖面已分別通過 10M 及 9M，故其變形速率，迅速由閉合前之 10~30mm/day 及 6~8mm/day，收斂至閉合後的 2~3mm/day，而 H 2 之計測，因洞台 II 仰拱閉合時，開挖面與計測斷面之距離僅為 2M，致其變形收斂不若 H 1 收斂明顯，分別為：

里程 39K+387 合前為 10~20mm/day 閉合後為 5~10mm/day

里程 39K+378 閉合前為 20~30mm/day 閉合後為 10~20mm/day

而於開挖面約通過 10M 後方收斂至 2mm/day 以下。

頂拱部份之 H 1 收斂及 H 2 收斂，因上半斷面、洞台 I 及洞台 II 開挖所產生

之變形量如下：（單位：公分）

里 程	測 線	上半斷面	洞台 I	洞台 II	合 計
39K+387	頂拱	10	10	8	28
	H1	12	32	15	59
	H2	-	10	35	45
39K+387	頂拱	5	8	5	18
	H1	5	20	12	37
	H2	-	6	30	36

由上表所示之變形量可知：

- (一) H 1、H 2 測線之變形現象產生，主要因洞台降挖所致。
- (二) 頂拱因上半斷面、洞台 I、洞台 II 開挖所產生之變形量，大致相等。
- (三) 頂拱之變形量約為 H 1、H 2 之二分之一。
- (四) 洞台 II 降挖時，H 1 測線之變形量僅為 H 2 之 $1/2 \sim 1/3$ 。

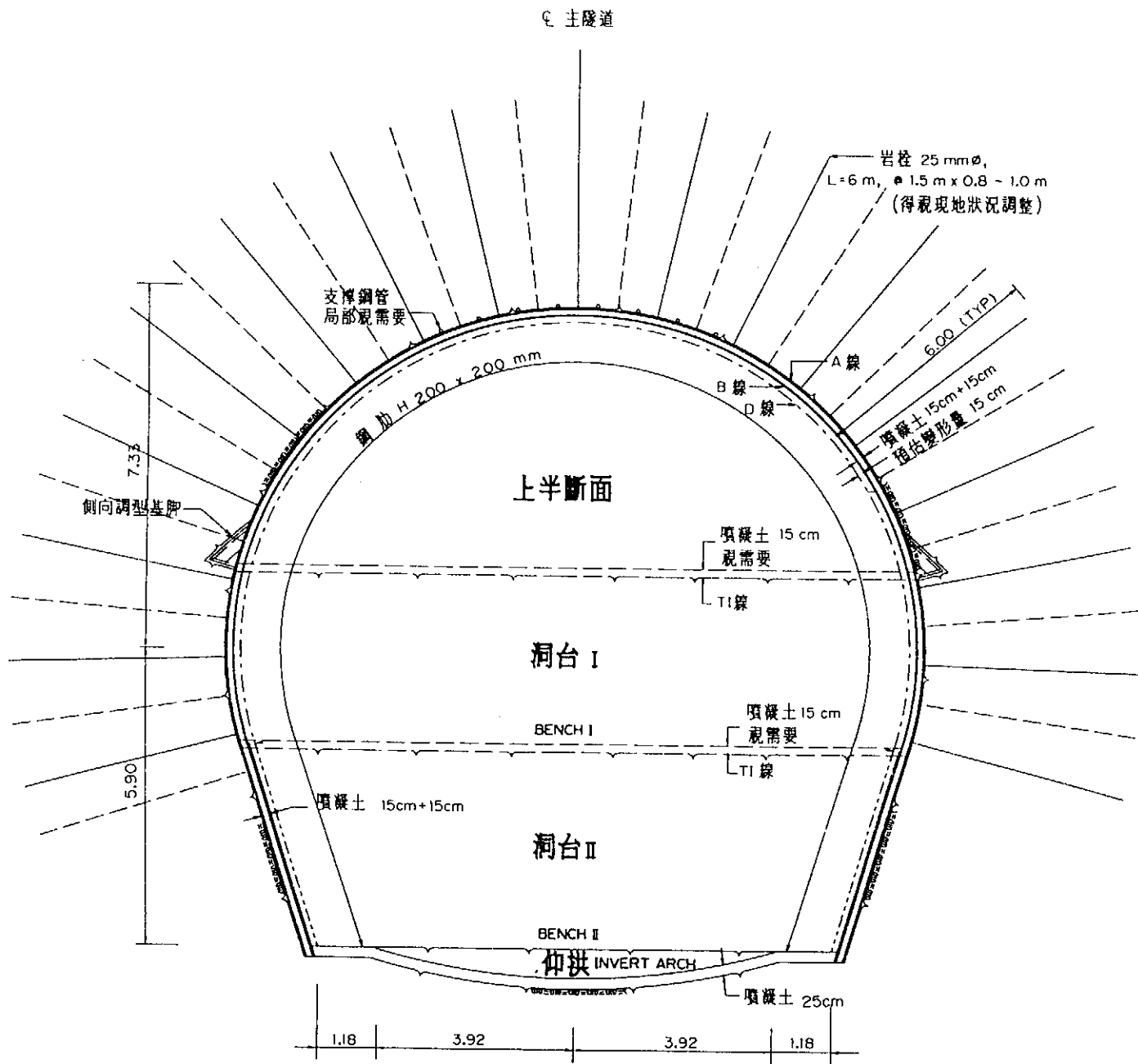
五、檢討與結論

主坑西行線自遭遇金盈斷層至完全通過共耗費約五個月，從其處理與監測經過可獲得以下經驗：

- (一) 仰拱閉合對於抑制變形，具有明顯之效果。
- (二) 隧道開挖其變形與距開挖面之距離有直接之關連性，故縱使開挖後即時閉合，因開挖面過近，往後的變形仍難以避免，惟應可使變形量減少，故當洞台 I 降挖後立即施作臨時仰拱閉合，應可減少其變形量。
- (三) 金盈斷層由其變形行為觀察，為一具有相當整體性之材料。
- (四) 地質狀況與施工效率常是成相對應之關係，例如在地質較破碎之地質開挖時，斷面之開挖量亦必然較大，導致支撐完成之時間拉長，

所耗材料及機具相對的增加。

主坑西行線通過金盈斷層後，雖後續均以TBM開挖，但仍有數個斷層帶須遭遇與突破，相信在現場全體施工人員群策群力的奮鬥下，預期主坑TBM應可較導坑更為順利。



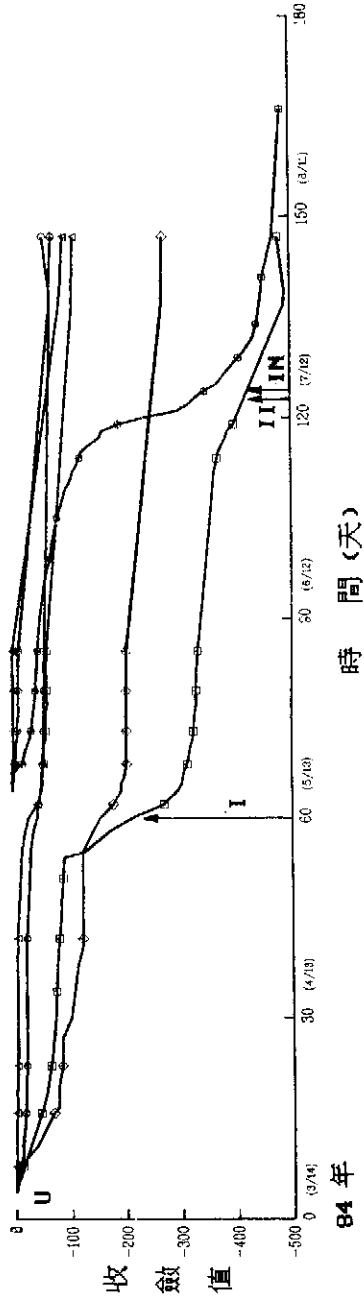
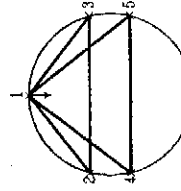
圖一 坪林隧道西行線金盈斷層開挖支撐圖

說明：

U - 上半斷面開
I - 洞台I開挖
II - 洞台II開挖
IN - 仰拱開挖

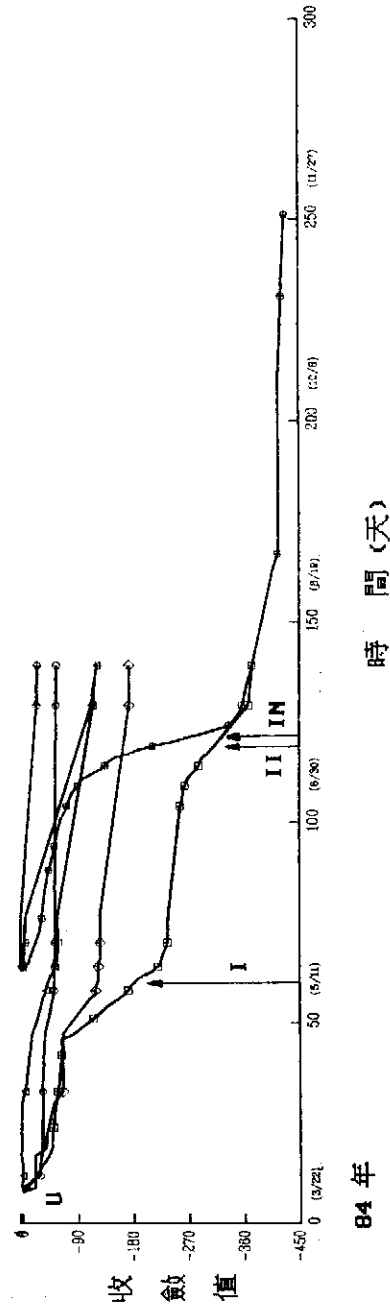
圖例

- 2 - 3 (B1) : □
- 1 - 2 (D1) : ○
- 1 - 3 (D2) : △
- 4 - 5 (D2) : #
- 1 - 4 (D3) : ◆
- 1 - 5 (D4) : ☆
- 1 : (V1) : ◇



(a) 里程：39K+387

編號：PWESI3-C
 里程：39K+387
 岩性：硬頁岩
 岩體評分：8(RMR)
 支撐型式：H200X200@1.0M
 開挖日期
 上半斷面：3/15/1995
 洞台-I：5/15/1995
 儀器設置時間
 上半斷面：3/18/1995
 洞台-I：5/17/1995
 覆土厚度：276 (M)



(b) 里程：39K+378

編號：PWESI4-C
 里程：39K+378
 岩性：斷層帶
 支撐型式：H200X200@1.0M
 開挖日期
 上半斷面：3/23/1995
 洞台-I：5/22/1995
 儀器設置時間
 上半斷面：3/29/1995
 洞台-I：5/23/1995
 覆土厚度：292 (M)

圖二 金盈斷層收斂計測歷時曲線圖