

隧道施工遭遇廢棄煤坑處理案例
TUNNELING IN ABANDONED COAL MINE

郭文祥，葉向陽，陳國華
W.S. Guo, H.Y. Yeh and K.H. Cheng

原著載於台北捷運工程研討會,1993年

*Reprinted from Proceedings of
Symposium of Taipei Metropolitan Rapid Transit Systems,
Vol.C, pp.698-712, Taipei, 1993*

隧道施工遭遇廢棄煤坑處理案例

郭文祥—亞新工程顧問公司經理

葉向陽—台北市政府捷運局東區工程處處長

陳國華—亞新工程顧問公司工程地質師

中文摘要

含煤地層產生特殊大地工程問題，尤其無開採記錄廢棄煤坑存在時，更增加重大工程地下開挖施工之複雜性及危險性。本文介紹台北都會區大眾捷運系統木柵線木柵隧道施工開挖遭遇廢棄煤坑空穴及空穴坍塌擾動過的含煤頁岩層，造成約50立方公尺體積的岩塊坍塌，經由填充空穴灌漿，固結灌漿地質改良，及補助先撐、環狀上半開挖工法，終於通過廢棄煤坑危害區段之案例。

Tunneling in Abandoned Coal Mine

W. S. Guo — Manager, Moh and Associates, Inc.

H. Y. Yeh — Director, EDPO, Department of Rapid Transit Systems,
Taipei Municipal Government.

K. H. Cheng — Engineering Geologist, Moh and Associates, Inc.

Abstract

Geotechnical problems in coal-bearing formations, especially, the existence of unrecorded abandoned coal mining works enhance the complexities and difficulties of underground excavations in major construction. This paper shows a case in which the Mucha Tunnel of Taipei MRT encountered a large void and disturbed zone in a coal-bearing stratum resulting in cave-in of debris of about 50 cubic meters in volume. The tunnel was finally completed by using the ring-cut method accompanied by grouting and auxiliary support.

壹、前言

台灣煤層主要分佈在北部區域第三紀中新世地層，由於目前許多重大工程建設規畫經過煤層分佈地區，產生特殊大地工程問題；例如已採掘礦坑造成地表沉陷、地盤坍塌、或形成空洞，地下開挖施工時遭遇廢棄礦坑或空洞之瓦斯毒氣、甲烷爆炸、湧水泛濫、煤層或煤矸接觸空氣自然現象、開挖面坍塌、礦矸堆積區不穩定、礦坑水或礦矸環境污染等潛在性工程問題層出不窮[1][2]。

台灣煤田依地理位置可分為北部及中部煤田區，在台灣東部及南部均無煤田。而台灣中部之煤既薄且劣，多成不規則凸鏡體，難以大規模開發。台灣煤層主要分佈在台灣北部，含煤地層之地質年代均屬第三紀中新世。有開採價值煤層共有十四層，分佈於三個不同含煤地層，自下而上為木山層、石底層、及南莊層[3]。

台灣於民國三十八年前的煤礦開採多未保留開採記錄或坑道平面圖等資料，或未備案開採及越界開採等，使煤層分佈地區廢棄礦坑存在增加重大工程規畫施工之複雜性及危險性。其不僅使工程進度受阻、預算增加、將來維護困難，國外隧道施工曾有甲烷逸出及爆炸危及施工人員及機具安全。

本文即以台北都會區大眾捷運系統木柵隧道施遭遇含煤地層及廢棄煤坑為案例說明。本隧道本洞全長712公尺，上半開挖直徑約為10公尺，採台階開挖，其深度為2.4公尺，以新奧工法(NATM)的觀念進行設計及施工，並用自由斷面挖掘機械(Roadheader)開挖。

貳、隧道地質概述

本隧道位於台北盆地東南側邊緣之丘陵地，屬於西部斷層山塊地形區，地表高程介於+18公尺至+70公尺之間。本洞穿越中新世石底層，屬陸台相沉積，由砂岩、頁岩和薄煤層構成，其中砂、頁岩常形成條紋狀薄葉互層，其地質剖面如圖1所示。

隧道遭遇廢棄煤坑段，覆土厚度為20至35公尺，煤坑分佈於一層厚頁岩層內，其走向傾角為 $N72^{\circ} E, 25^{\circ}$ 至 $30^{\circ} S$ ，與隧道開挖方向(向正北)約呈垂直，傾

角方向逆於開挖方向。頁岩層厚度約為10公尺，呈黑褐色，富夾煤屑，強度弱至甚弱。本層含有二層煤層，厚度約為20公分，尖減及局部增厚現象常出現於上部及下部。在各煤層的上下部則有厚度50公分至120公分的黑色炭質黏土層，極為軟弱。

參、施工異常現象

79年10月20日上午，於隧道里程14K+246.9斷面鋼支撐架設完成後，開挖面突然發生大量岩塊坍落，最大岩塊之體積約為1.5立方公尺，估計共約為50立方公尺，並於拱頂出現一處深邃的空洞(照片1)。俟崩落現象穩定後，地質師擬深入坑洞調查。為了預防坑洞內可能積存沼氣及其他有害氣體，先行在洞口以瓦斯偵測器測試洞內空氣，於安全無慮後攜帶瓦斯偵測器入洞調查。發現拱頂上方約1公尺處存在一長方盒形空穴，寬約10公尺、高約1公尺、深約7公尺，正好位於隧道正上方(如照片2及圖2示)。空穴底部遍佈板塊狀剝落砂岩塊，空穴頂為厚砂岩的層面，由其產狀顯示，底部岩塊是從厚砂岩層的薄葉頁岩夾層面分離剝落。普遍鐵染風化，顯示此空穴存在已久。在東側出現一約50公分×50公分的小空洞。並有許多直徑約5公分，長30公分至60公分不等的木支撐。經深入調查，發現一可見長度約60公尺的坑洞(如照片3及圖2示)，斷面約為1公尺寬、1.6公尺高，長軸方向為S20° E、俯角5° 沿著健質厚砂岩夾頁岩層中延伸。底部積有淤泥3公分至10公分，上部則呈鐵染現象，顯示曾經有地下水淹積坑內。坑道末端為爛泥淹沒，且已離隧道側兩倍直徑距離外，故無深入調查。此坑道局部出現保存良好的門型木支撐，並且底部可見 I 型的車軌，顯示隧道開挖遭遇了廢棄煤坑。

肆、廢棄煤坑區段岩體特性

由坑洞調查顯示，本廢棄煤坑屬於淺層的煤層採掘，且有關礦務單位無資料顯示附近曾有開採記錄，再由附近鑽探資料顯示相同煤層均得相當高的取樣率，局部研判其為一盜採的煤坑。

隧道通過本區段的岩體由上而下，可分為四類，分述如下：

(一)上部厚砂岩：白色，由以往之鑽探資料顯示，平均單壓強度為282.9公斤/平方公分。現場岩體微濕至全乾，RMR值65以上，Q值10以上，屬優良，堅實岩

體。

(二)中部炭質頁岩層：灰色，厚度約為10公尺，上下部各夾一層炭質黏土層，各厚約50公分至120公分，不整合接觸。本層炭質頁岩層富夾煤屑，依其產狀可分為二類，彼此間不規則接觸：

1.原狀層狀炭質頁岩：厚層，呈極薄葉層狀。依以往之鑽探資料結果，其單壓強度約為61.8公斤/平方公分。現場岩體全乾至微濕。RMR值約為45至55，Q值約為1至4，屬中等岩體。

2.破碎炭質頁岩：呈破碎狀，高孔隙，普遍呈稜角狀空隙，局部有泥質夾角礫團塊現象，顯示曾受強烈變形及破壞作用，岩體濕至微滲水，RMR值小於30，Q值小於0.16，開挖後自立性差。

(三)炭質黏土層：黑褐色，夾於炭質頁岩層中，局部夾有少量直徑15公分及5公分的木支撐，呈近垂直狀及散亂倒狀。岩體極軟，濕至微滲水，RMR值小於20，Q值小於0.1。開挖後微滲水處無自立性，容易產生斷續抽坍或順向坍滑。

(四)底部厚砂頁岩互層：依以往鑽探資料顯示，其單壓強度平均為172.8公斤/平方公分。現場岩體RMR值約為45至55，Q值約1至4，屬中等岩體。其與炭質頁岩界面，順向傾角約 25° 至 30° ，開挖中曾發生一次土心順向坍滑。

岩體因採煤活動形成的煤巷、片道等面狀及條狀空穴，造成中部炭質頁岩層向下塌陷閉合空穴，並且往上擴展。由於上部厚砂岩層強度大，足以形成良好的板樑作用，塌陷活動至砂岩底部即停止。整個空穴上移機制類似水中氣泡上浮至水中玻璃蓋底棲止，而在健質砂岩底部形成空穴。一般推論此棲止空穴的體積應和塌陷前的原始空穴體積約相等。但是由於塌陷的炭質頁岩呈塑性行為，並保有脆性破壞特性，故其發生塌陷後，呈泥質角礫團塊狀，形成高孔率，故棲止空穴體積應小於原始空穴體積，推測本案例棲止空穴與原始空穴體積比約為60%至70%，且其塌陷邊界應呈高角度，約在 70° 附近。另外由於砂岩的優良岩拱特性，而在覆土約30公尺岩壓不大的狀態下，在厚砂岩中的巷道外形保持良好。

圖3為本案例煤坑塌陷模式，基於此模式推論隧道前進開挖遭遇煤坑時需考慮既存棲止空穴、煤巷等空穴穩定處理，及不良自立性炭質頁岩層的穩定處理。

因此有必要了解煤坑空間分佈位置。由於本區段覆土淺，岩壓不大，且採煤活動相關的炭質頁岩層傾角呈 25° 至 30° 向隧道前進方向上昇，故採行補充鑽探調查範圍為隧道周邊10公尺，及隧道開挖前進方向30公尺。圖4為依據調查結果推測的煤坑分布狀況示意圖，由圖中顯示，隧道穩定處理有三個課題：炭質頁岩層固結改良、空穴填充及隧道底部之防止沉陷。

伍、施工對策

本段煤坑災害區處理，分成四個階段，分述如下：

一、緊急穩定處理

(一) 里程14K+246.9斷面附近之坍方區為避免繼續惡化，先行將坍落岩塊以噴凝土封面。

(二) 建噴凝土擋牆，預埋回填灌漿管，採用輕質泡沫混凝土回填空穴及廢棄煤坑。

二、補充鑽探

(一) 鏡面前進水平鑽探3孔(拱頂1孔，兩邊側壁底部各1孔)，以探查煤層分佈及地層受廢棄煤坑坍塌擾動程度。

(二) 於每日開鑽前及上下鑽桿時以瓦斯偵測器探測是否有害氣體存在，結果顯示在安全值以內。

(三) 含煤層係順向傾斜，為確定煤坑分佈是否延伸至已完成隧道下方，以垂直鑽探取樣，結果顯示此段炭質頁岩層曾受塌陷擾動，因此隧道底部需要處理以防止沉陷。

三、前進施工對策

處理範圍為里程14K+245.9至14K+222.7，共23.2公尺。

(一) 固結灌漿地質改良。施工方式為低壓(小於10公斤/平方公分)、3號水玻璃

系、單鑽桿1.5shot、隧道周圍10公尺範圍之環形低仰角灌漿。

(二)開挖方式採環狀留核心開挖，輪進長度0.8至1公尺，開挖斷面呈現穩定狀態。

(三)使用H-150型鋼支保間距0.8到1公尺、噴凝土厚度25公分，掛網二層、環狀先撐鋼棒打設(間距20至30公分)、非預力全面灌漿黏著型系統岩栓(長度為5公尺、橫向間距0.8至1公尺、縱向間距1至1.5公尺)。

四、隧道底部防止沉陷：

於隧道底部與炭質頁岩交會區打設40公分厚混凝土仰拱。

五、長期穩定處理

為提高安全係數，採用鋼筋混凝土襯砌為60公分厚，內置二層鋼筋。

本區段上半開挖及支撐全部完成約5個月。

陸、監測結果

北隧道例行安全監測配置為25公尺一組內空變位監測斷面，每一斷面分佈5點收斂觀測點。在煤坑災害處理段提高為每10公尺一組斷面。為了解煤坑災害處理段周圍岩體變位情形，在里程14K+260.5加設一組地中伸縮儀。監測斷面配置示於圖5。

處理段的岩體變位，其特性可分成二類：

一、災害發生前後期間：

圖6為災害發生岩體變位行為的監測結果：79年10月20日災害發生之前，岩體內空變位呈向東側(受地層傾斜分佈影響)偏壓型式約8天後即已穩定，相對變位量最高為8公厘。當災害發生時，偏壓相對變位突增(煤坑東側參見圖4)，里程

14K+261至14K+257.5拱頂西側出現一條縱向裂縫，噴凝土內鋼絲網受到剪動變形。經過補強12支系統分佈岩栓(非預力；5公尺長)後，岩體相對變位即呈現穩定。

與隧道交會之前，既存60公尺長廢棄坑道因其(1)覆土厚度僅20公尺至35公尺，(2)坑洞斷面小(圖2)，(3)上下部為硬厚砂岩層，提供極強的板樑效應，故監測結果無顯著變化。

二、穩定處理後岩體變位

圖7及8為處理段體變位特性，由圖7顯示，上半段開挖階段，最高相對變位量僅有5公厘，台階及仰拱開挖後，最高相對變位量僅18公厘，遠小於安全管理值。整體變位模式類似均質岩體，推測可能原因為地質改良後，隧道周圍岩體呈均質化。

由圖8推估隧道周圍岩體的彈塑性邊界約在3公尺深處，且相對變位量甚小。顯示周圍岩體已呈甚穩定的狀態，證實前述處理措施達成預定穩定成效。

柒、結論

- (一)煤層分佈區域之工程設計施工，需要仔細調查煤層分佈及坑道位置、開採情形、以及可能盜採及越界開採範圍。
- (二)本案例廢棄煤坑塌陷後形成棲止空穴行為，乃為台灣煤田區一般性的塌陷破壞機制。
- (三)煤坑空穴應力擾動及採煤地層崩陷擾動後，呈現弱化的物理及工程性質，對隧道施工造成危險。
- (四)由於本案例的覆土不深，岩壓不大，煤坑上、下部又有優良厚砂岩層提供很好的板樑作用，所以岩壓問題的危害程度並不大，主要重點在於克服此含煤地層的遇水即失去自立性的問題，本案例顯示固結灌漿的去水效果為決定成功的要素。由於此段軟弱層長度並不長，且回脹性不顯著，相信配合部份補

助工法，以短輪進，支撐儘快施工方式，咸認可收到良好成果。

誌謝

本文承蒙台北市捷運局東區工程處長官之協助，及亞新工程顧問公司莫總經理若楫、游協理坤、高協理聰忠、杜專案副理保興之指導斧正，和所有參與木柵隧道工程之各單位同仁之辛勞幫助，特此誌謝。

參考文獻

- [1]亞新工程顧問公司，"交通部國道北宜高速公路工程基本設計階段南港坪林段煤坑調查工作報告"，1981，PP51-62。
- [2]郭文祥，傅怡仁，段紹緯，"煤層分佈地區調查方法"，現代營建，第十二卷，第九期，總號141期，1991，9月，PP39-44。
- [3]何春蓀，"台灣之煤礦資源"，台灣地質調查所彙刊，第十號，1959，PP1-164。

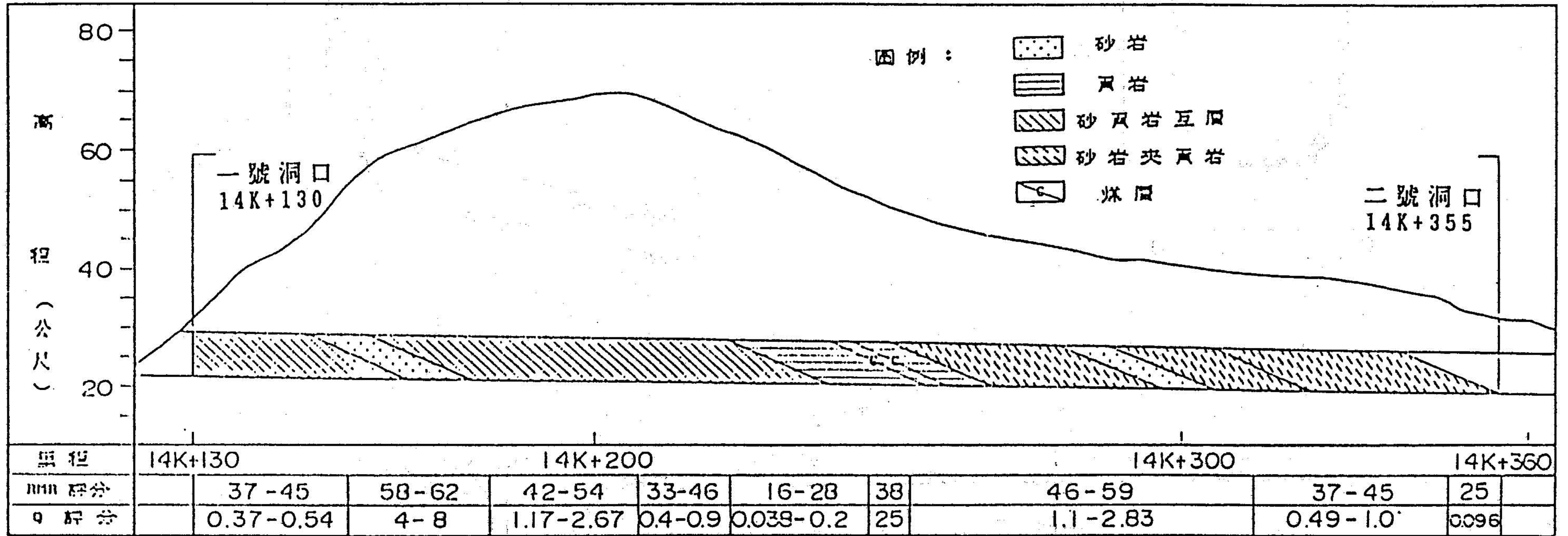
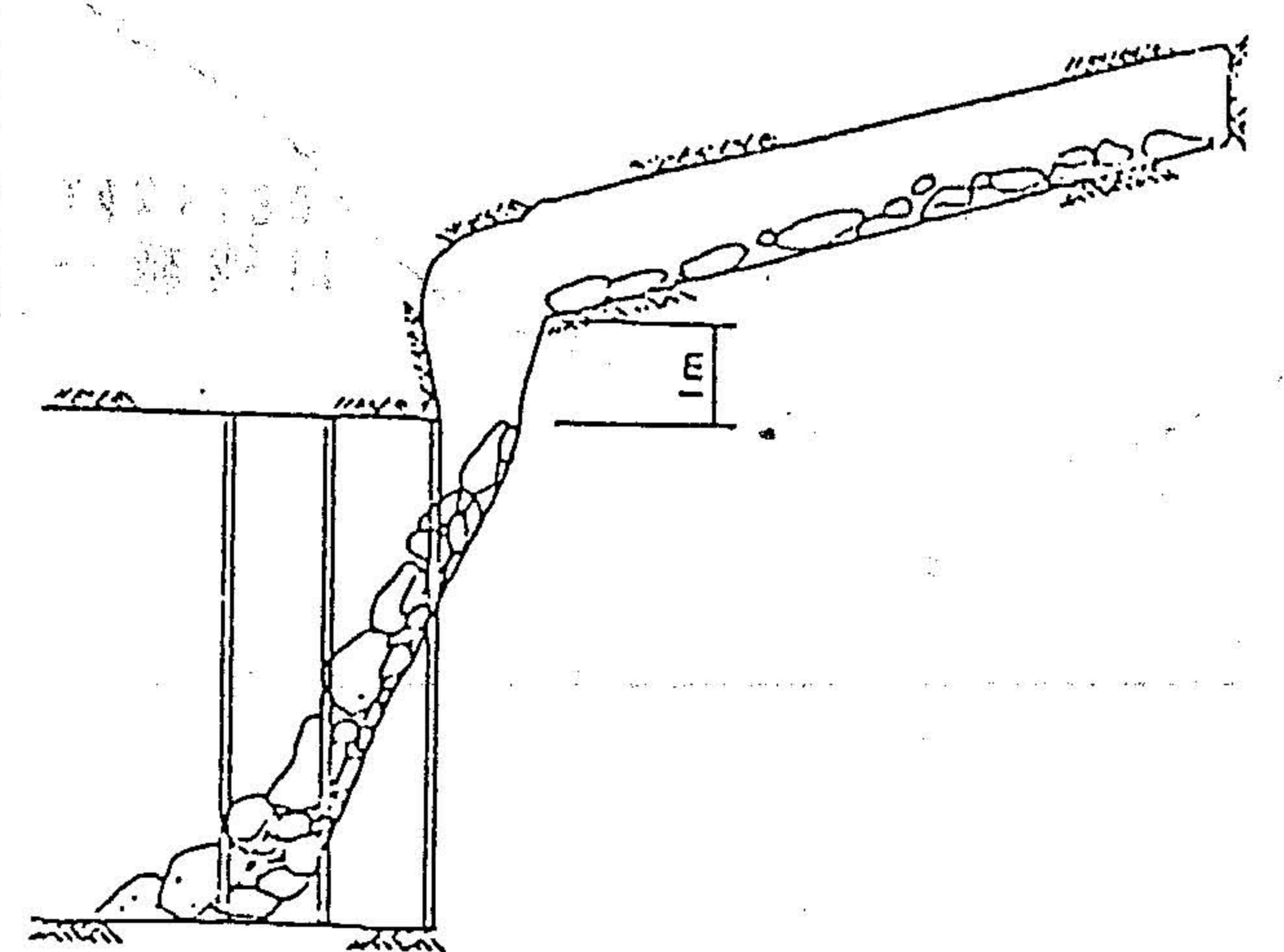
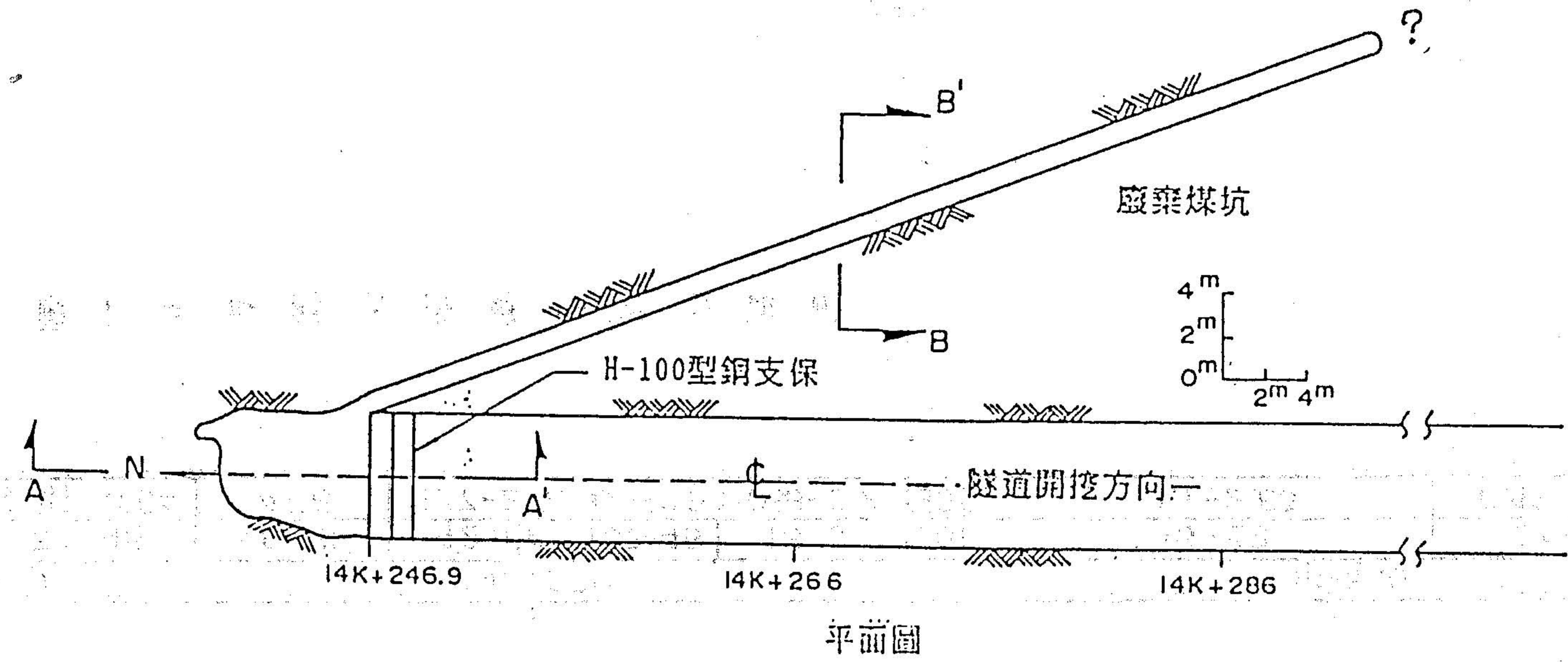


圖 1 木柅隧道沿線地質剖面圖



立面圖 14K+246.9 A-A'剖面圖

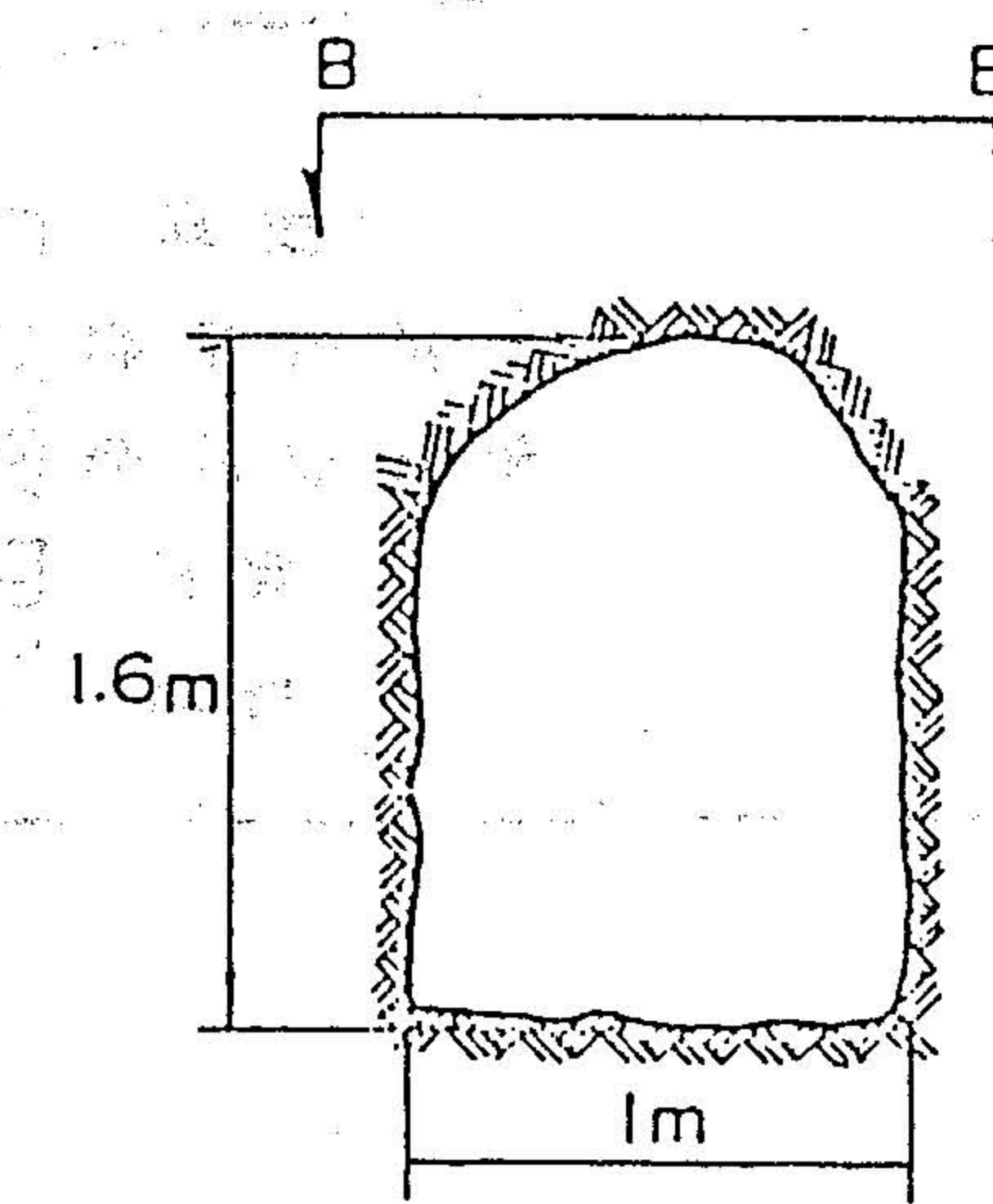


圖 2 木柵隧道遭遇廢棄煤坑發生岩塊坍塌

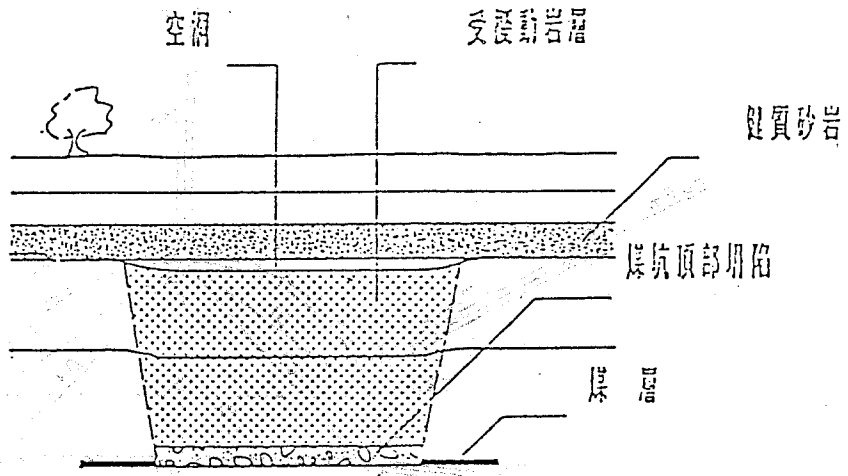


圖 3 煤坑塌陷模式示意圖

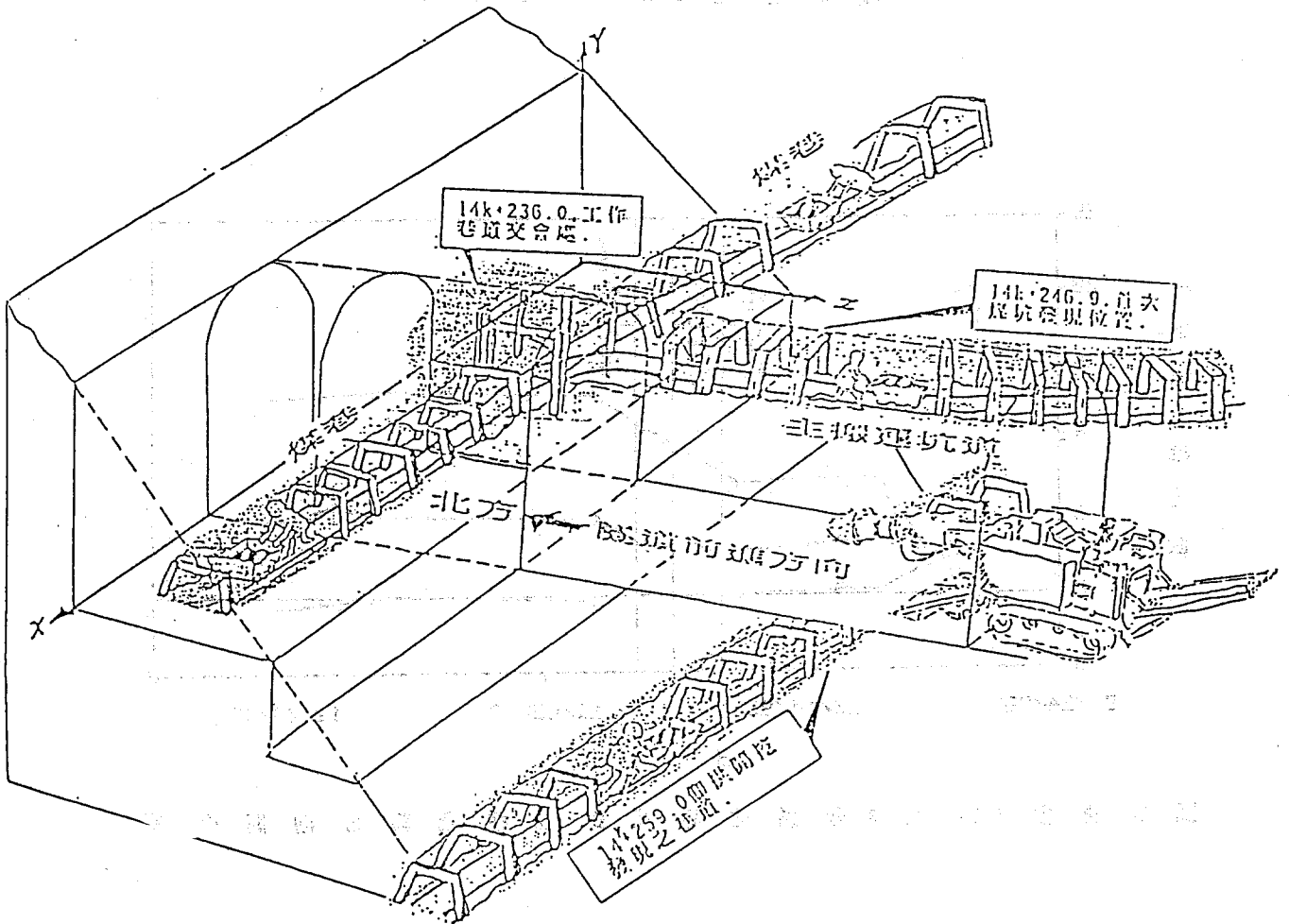
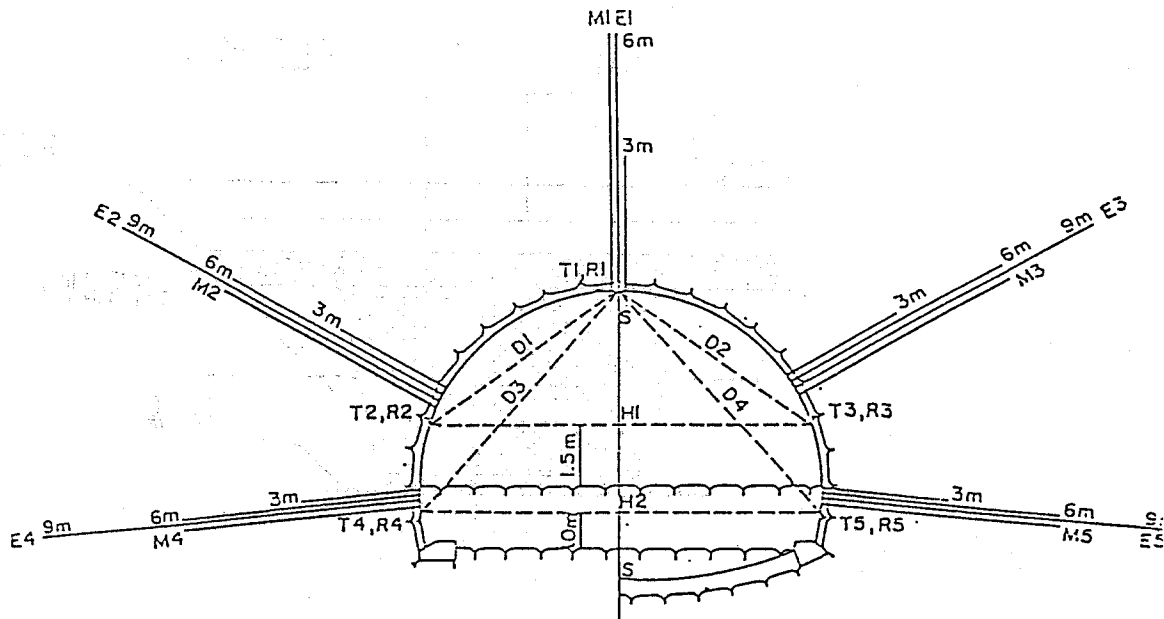


圖 4 木柵隧道廢棄煤坑分佈狀況示意圖



E : 伸縮儀 M : 計測岩栓 T : 切向應力
 R : 徑向應力計 D1~D4, H1, H2 : 收斂岩釘

圖 5 里程 14K+260.5 監測斷面

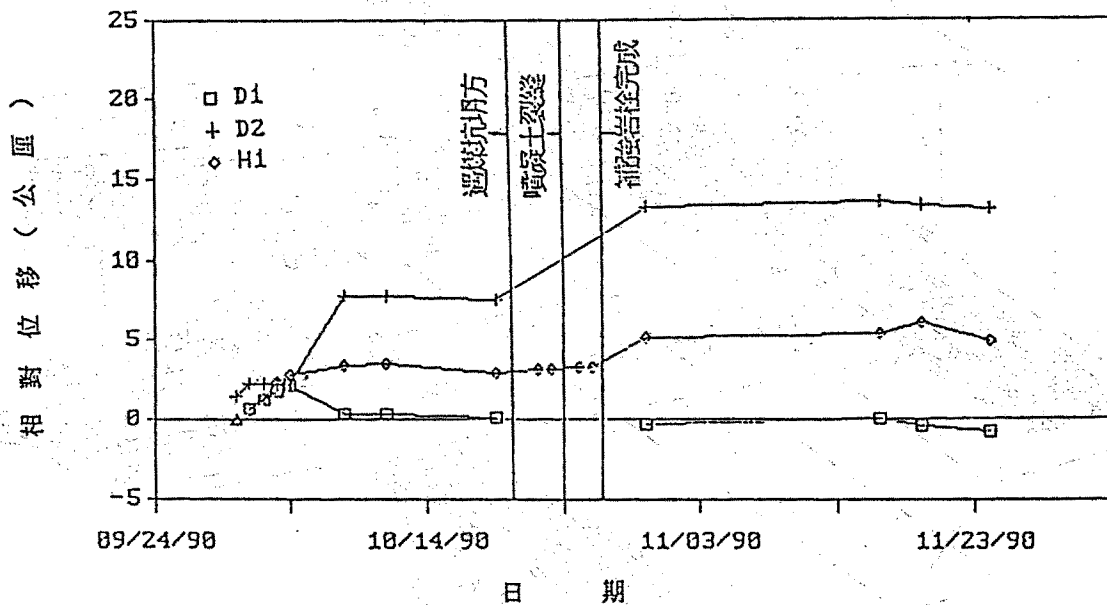


圖 6 里程 14K+272.3 收斂岩釘相對位移量與日期關係圖

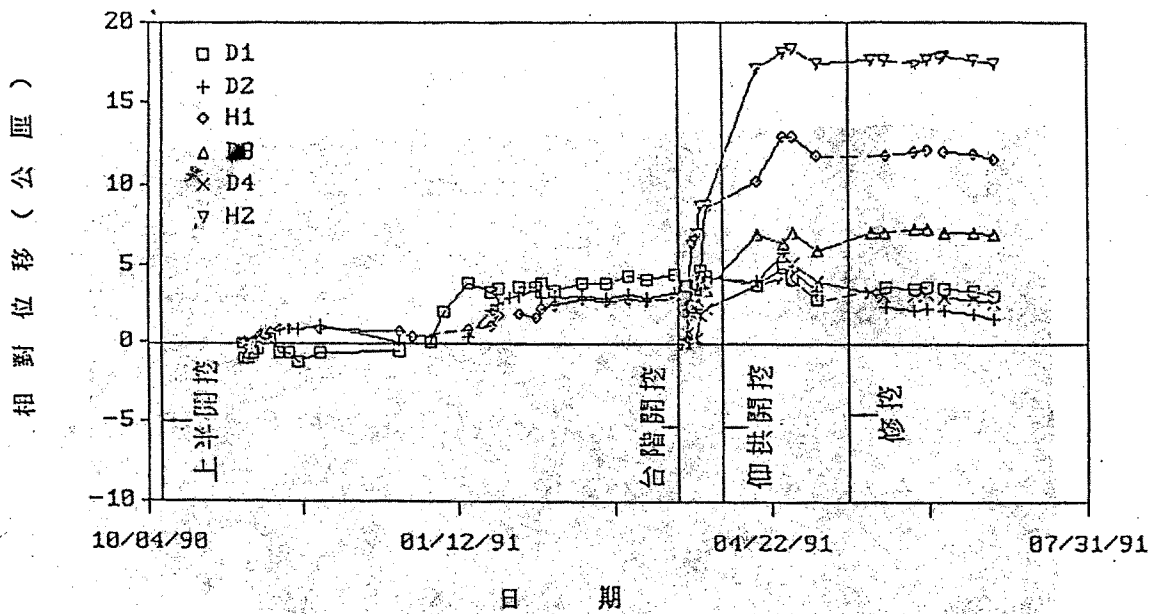


圖 7 里程 14K+259.0 收斂岩釘相對位移量與日期關係圖

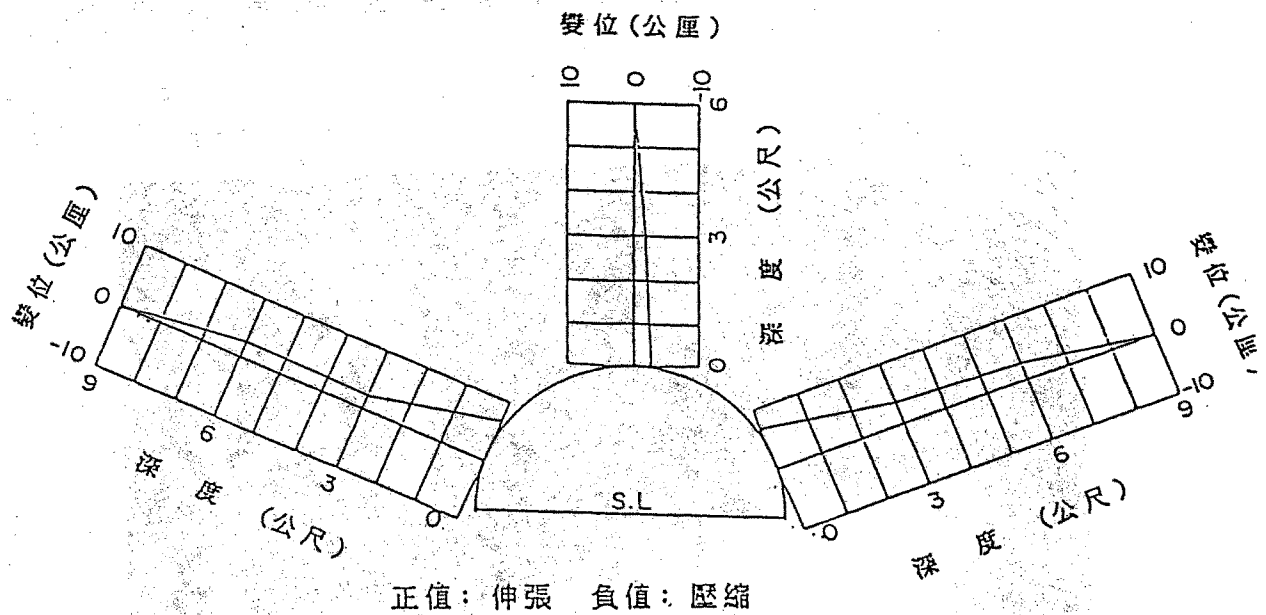
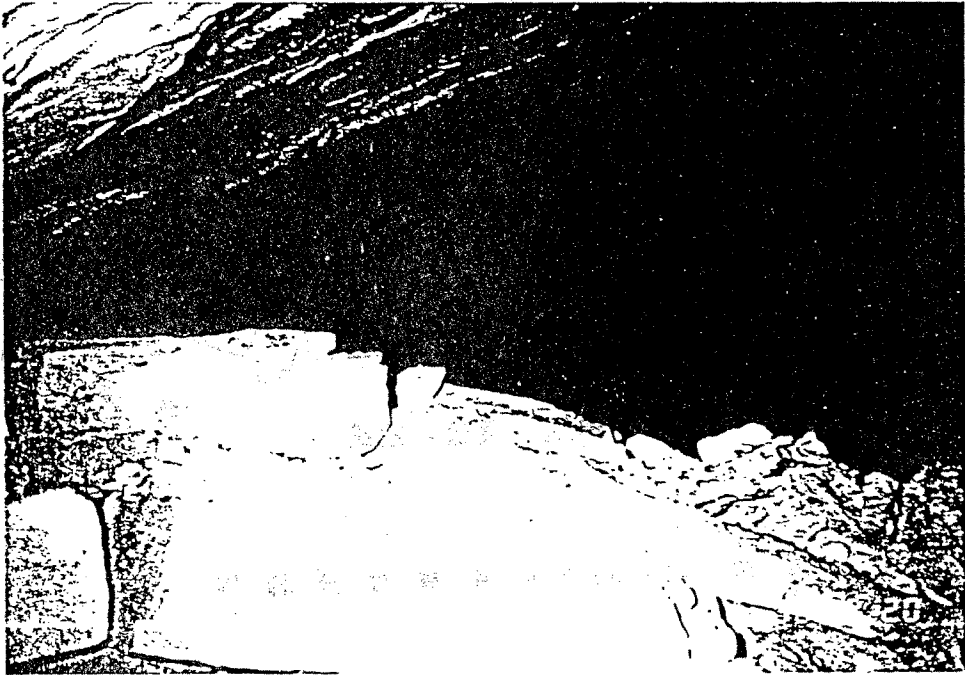


圖 8 里程 14K+260.5 地中變位分佈圖



照片 1 里程 14K+246.9 遭遇煤坑開挖面發岩塊坍塌



照片 2 里程 14K+246.9 隧道拱頂空穴，因底部煤坑坍塌後形成之棲止空穴（成因參照圖 3）



照片 3 廢棄煤巷。左側為直徑 15 公分的木支撐，右側為直徑 10 公分 PVC 預埋回填灌漿管。