

# 岩石隧道施工技術研究 - 隧道交叉段之設計及施工探討 (一)

研究單位：財團法人臺灣工業技術研究發展基金會

計畫主持人：陳堯中

類別：隧道

編號：研究報告 106

出版年月：1998 年 12 月

GPN 9124870150

## ◎摘要

本研究報告為兩年期研究計畫之第一年工作報告，研究目的係探討隧道交叉段之力學行為，以作為交叉段之力學行為，以作為交叉段設計施工之參考。第一年工作主要分成現場監測及數值分析兩部分。現場監測係配合北宜高速公路彭山隧道之施工進度，於 5 號及 8 號人行聯絡道開挖期間，進行以三維光學變形量測為主而內空收斂量測為輔之監測工作，量測主隧道在聯絡道開挖期間之絕對變形量。並進行相關之回饋分析，以驗證數值分析模式之適用性，及更深入瞭解隧道交叉段之力學行為。

數值分析以 FLAC3D 為分析工具，建立交叉段之三維分析模式，進行各項參數分析，包括不同 RMR 值，側向壓力係數，主應力方向等，以瞭解隧道交叉段在各種不同情況下之力學行為。隧道交叉型式分正交及斜交兩種，正交交叉段模擬北宜高速公路車行交叉段之實際斷面，並參考現場施工情形，分上下兩階輪進開挖。斜交交叉段考量 45 度交叉角度，分別模擬圓形及三心圓斷面，採全斷面輪進開挖。岩體材料假設為莫耳一庫倫彈塑性，支撐系統以噴凝土模擬，假設為彈性。

經由現場監測及數值分析之探討，已大致瞭解主隧道在聯絡道開挖期間之力學行為，主隧道在各種情況下之變形量及襯砌應力變化情形及主隧道受影響之範圍等，可作為交叉段設計施工之參考。

## ◎結論與建議

### 結論

#### 隧道交叉段數值分析

本研究計畫之隧道交叉段數值分析部分，係以 FLAC3D 程式分析工具，假設地質條件 RMR=30~70，隧道覆蓋深度為 200 公尺，岩體強度以 Hoek 與 Brown 建議之經驗式估計（其他假設條件詳報告內文），進行正交交叉段與斜交交叉段之數值分析及力學行為之探討。

## 1. 正交交叉段

本研究建立三向度之隧道交叉段數值模式，模擬實際之施工行為，探討聯絡道開挖輪進及上下台階開挖對主隧道的影響、以及不同現地應力大小、應力方向、岩體評分值之情況下，主隧道在聯絡道開挖過程中之變形行為及襯砌應力變化，由分析結果可得以下幾點結論：

- (1) 聯絡道上半斷面開挖對主隧道淨空變位量及襯砌應力之影響皆明顯大於聯絡道洞台開挖，聯絡道上半開挖對主隧道頂拱變形量及側壁襯砌應力之影響最大，其影響隨著聯絡道開挖輪進而增加，聯絡道開挖至第 5 輪進（約 1 倍聯絡道直徑）以後對主隧道之影響已經趨於緩和。聯絡道洞台開挖時，僅對聯絡道側之主隧道側壁有較明顯之影響。
- (2) 主隧道交叉區域之頂拱在聯絡道上半斷面破孔時為解壓狀態，而後隨開挖輪進襯砌應力逐漸增加，在聯絡道上半開挖完成後，若側向應力係數大於 1，則主隧道頂拱仍呈現解壓狀態。不論側向應力係數大小，主隧道靠聯絡道之側壁其襯砌應力在聯絡道開挖後皆有明顯增加之現象。
- (3) 聯絡道上半斷面開挖時，主隧道變位隨側向壓力係數增加而增加，但變位之影響範圍大致上隨著側向壓力係數的增加而減少，其變位影響範圍最大可達約 3 倍主隧道直徑之距離。
- (4) 聯絡道上半斷面開挖時，側向壓力係數愈大，主隧道襯砌應力影響範圍愈小，其應力影響範圍最大可達約 2 倍主隧道直徑之距離。
- (5) 以各點的變位方向而言，主隧道在頂拱和聯絡道側之側壁均向主隧道內擠進變形，變位量大小主要受側向應力係數、洞台束制作用和塑性區分之影響。而主隧道在聯絡道對面側之側壁變形方向，則與側向應力係數及支撐效應有關，在側向應力係數小於 1 時，側壁向主隧道外變形，側向應力係數大於 1 時，則向主隧道內擠進。
- (6) 主隧道之頂拱和仰拱的塑性區隨側向應力係數  $K$  值增加而增加，而主隧道側壁的塑性區則隨側向應力係數增加而減少。當兩個水平方向之側向應力係數相差愈大時，在頂拱、仰拱與側壁塑性區分佈情形差異愈大，其中以頂拱與仰拱的變化趨勢最為顯著。
- (7) 就主應力方向之影響而言，主隧道沿最大主應力方向開挖時，主隧道靠聯絡道側之側壁其變位量、襯砌應力及塑性區皆較小，故主隧道沿最大主應力方向開挖對交叉段穩定性最有利。
- (8) 無論現地應力之大小和方向如何變化，聯絡道開挖後，主隧道靠聯絡道側之側壁皆呈現高應力集中之現象，因此隧道交叉段設計施工時應加強該處之補強。
- (9) 聯絡道開挖對主隧道變位量、襯砌應力及塑性區之影響隨岩體評分 RMR 值增加而減少。

## 2. 斜交交叉段

### (1) 圓形斷面斜交交叉段

本研究以數值分析來探討圓形斷面主隧道與圓形斷面聯絡道為斜交  $45^\circ$

之應力應變行為，並與正交情況比較，主隧道中心與聯絡道中心在同一高程上，且聯絡道直徑 ( 9m ) 小於主隧道直徑 ( 12m )，隧道交叉型式為斜交  $45^\circ$  對主隧道的變位影響，獲得結果如下：

- A. 聯絡道開挖完後，主隧道頂拱、仰拱變位趨勢相同，都向主隧道內部擠進，銳角側變位大於鈍角側變位，在  $RMR=30$  時變位增加達到 80%，在  $RMR=70$  時，為 45%。
- B. 在  $RMR=30$  時，聯絡道開挖完後，與聯絡道同側的側壁，向主隧道內部擠進，鈍角側變位大於銳角側變位，銳角側變位加大 60%。在  $RMR=70$  時，聯絡道開挖完後，銳角側變為朝主隧道外側變形，鈍角側仍然朝主隧道內部，銳角側變位增加 30%。
- C. 至於應力影響方面，因為本圓形斷面係最先分析在分析過程中尚未引用薄殼元素，以致分析出來之結果不盡理想。改進之道為引用薄殼元素，所以在研究過程中再購買 FLAC3D 軟體升級版，使之具備加入薄殼元素之功能，並用在後續之三心圓與馬蹄形斷面中。至於圓形斷面因乏實際監測案例且受限於人力時效，有關薄殼元素之引入分析未再繼續進行

(2) 三心圓與馬蹄形斷面斜交交叉段

本研究以數值分析來探討三心圓斷面主隧道與馬蹄形斷面聯絡道呈斜交  $45^\circ$  之應力應變行為，並與正交  $90^\circ$  情況比較。本研究主隧道寬 ( 17.8m ) 聯絡道寬 ( 7m )，主隧道與聯絡道以行車高程相同之方式交叉，經由數值分析獲得結果如下：

- A. 隧道交叉型式為斜交  $45^\circ$  對主隧道的變位影響
  - (A) 聯絡道開挖後，主隧道頂拱、仰拱變位趨勢相同，都向主隧道內部擠進。銳角側變位大於鈍角側變位， $RMR$  愈大變位百分比愈小， $RMR=30$  時銳角處變位增量為 25%，在  $RMR=70$  時則為 19%。
  - (B) 在主隧道上與聯絡道同側的側壁，鈍角側皆向主隧道內部擠進。銳角側在  $RMR=30$  時向主隧道外側變位，變位增加 30%；在  $RMR=70$  時朝主隧道外側變形，銳角側變位增加 25%。
- B. 隧道交叉型式為斜交  $45^\circ$  對主隧道的應力影響
  - (A) 聯絡道開挖完後，在  $RMR=30$  時，頂拱會產生受壓的現象，應力較聯絡道未開挖前的主隧道應力增加 10%，但在， $RMR=50$ 、70 時，頂拱會產生解壓的現象，隨著地質情況改善，應力減少量愈大，在  $RMR=50$  時應力減少 10%、 $RMR=70$  時為應力減少 20%。仰供應力變化趨勢與頂拱同，但是應力變化量比頂拱大。
  - (B) 側壁應力變化大於頂供、仰供的應力變化，有很明顯的應力集中現象，在  $RMR=30$  時，銳角側與鈍角側之應力集中程度相近，應力增量為 60%， $RMR=50$  時，銳角側應力集中為鈍角側值的 2 倍，銳角側應力增量為 75%，在  $RMR=70$  時，銳角側應力集

中為鈍角側值的 5 倍銳角側應力增量為 100%。

- C. 聯絡道開挖後，主隧道側壁塑性區的影響範圍隨 RMR 增大而縮小，同時也會隨 K 值增加而減少。銳角側的影響範圍較鈍角側大。
- D. 破孔處的應力大於主隧道上破孔區外的應力，在地質愈差時，應力差異愈大。

### 隧道交叉段現地監測

1. 現地量測結果顯示，三維變形量測可真實反應因聯絡橫坑開挖造成交叉段附近複雜的三向度位變化，該技術可應用於長大隧道交叉段如豎井、車行橫坑、人行橫坑等複雜三向度位移變化的量測。
2. 比較三維變形量測結果與收斂儀內空位移結果，兩者具有相當一致的變化趨勢，顯示三維變形量測結果之正確性及用於量測隧道變形量之可行性。
3. 現地量測結果顯示，5 號人行聯絡橫坑東行線與 8 號人行聯絡橫坑西行線在聯絡橫坑開挖後，其對側之主隧道側壁向主隧道外擴張，此結果無法由收斂儀之量測結果獲得。
4. 三維變形量測結果顯示，聯絡橫坑開挖後，以交叉側側壁之位移變化最明顯，通常呈現一影響槽線，故交叉側側壁應是評估主隧道因聯絡橫坑開挖產生變形之較佳位置。

### 模式驗證

1. 東行線 5 號人行聯絡橫坑模式驗證分析結果顯示，採用不同之岩體參數所得之分析結果亦不同（主要為頂拱 X 方向之變位方向不同），且岩體強度與變形模數較高者其變形量較小；整體而言，聯絡橫坑開挖後，各位置之位移增量變化以該位置之徑向最大，即頂拱為 Z 方向位移增量變化最大，兩側壁則為 X 方向位移增量變化最大。比較各位置位移增量變化可看出，以交叉側側壁受聯絡橫坑之影響最大。
2. 東行線 8 號人行聯絡橫坑模式驗證分析結果顯示，由於岩體所受應力較小（覆蓋深度較淺），其各方向移增量皆很小（最大僅達 2.0mm）。以位移變化趨勢來看，頂拱位置位移增量變化仍以其徑向最大（Z 方向），在交叉側側壁則以 Y 方向位移增量變化最大（向聯絡橫坑中心線變形），而交叉段對側側壁則受聯絡橫坑開挖之影響甚小（位移增量很小）。
3. 西行線 8 號人行聯絡橫坑模式驗證分析結果顯示，西行線 8 號人行聯絡橫坑之分析結果與東行線 8 號人行聯絡橫坑之分析結果相同，即分析結果顯示各方向位移增量皆很小（最大僅達 2.0mm）。以位移變化趨勢來看，頂拱位置位移增量變化仍以其徑向最大（Z 方向），在交叉側側壁則以 Y 方向位移增量變化最大（向聯絡橫坑中心線變形），而交叉段對側側壁則受聯絡橫坑開挖之影響甚小（位移增量很小）。
4. 綜合現地量測和模式驗證分析結果可知，兩者在顯現主隧道受聯絡橫坑開挖影響最顯著的區域、方向與變形量上具有相當的一致性。就工程應用上而言，影響最

顯著的區域與方向是工程設計施工考量的重點，故本研究採用的數值分析模式之適宜性與分析結果的正確性應已獲驗證。

## 建議

### 隧道交叉段數值分析

#### 1. 正交交叉段

- (1) 在本研究中是以斷面尺寸較大之車行聯絡道為研究對象，而在斷面尺寸較小之人行聯絡道因現場實際施工方式不同，是否會有相同之分析結果，值得進一步探討。
- (2) 在本研究中之臨時支撐系統，僅考慮噴凝土之架設，且為一固定厚度，可就隧道交叉段之補強方式與數量作更進一步之研究，瞭解其補強效果，以符合工程之安全性與經濟性。

#### 2. 斜交交叉段

根據本研究分析之結果，提出下列之建議：

- (1) 本研究僅針對圓形斷面、全斷面開挖進行分析，實際上隧道斷面及施工情況未必符合，因此有待後續進一步研究，以更接近現場實際狀況。
- (2) 在本研究中，岩體假設為均質，然而實際周圍岩體多為不連續狀況，所以有關非均質岩體研究，有待往後的探討。

### 隧道交叉段現地監測

1. 三維變形量測除其施作不需高空作業車、不影響隧道施工、測量作業方便迅速等特性外，更可真實反應三向度的位移變化，是量測與評估隧道變形的較佳工具，建議推廣使用。
2. 本研究現地量測只包含彭山隧道 5 號及 8 號斷面較小之人行聯絡橫坑，對於斷面較大應力釋放更劇烈之車行聯絡橫坑，原計劃於南港二號隧道中量測，惟因現地條件造成量測結果不佳，建議配合坪林隧道之施工，於斷面較大處進行量測，以作為數值回饋分析及參數研究之參考。
3. 本研究只完成交叉段三維變形之量測，對於作為設計依據之應力並未能成功量得，建議研究其他可行方式進行應力量測，以做為回饋分析之參考依據。

## 模式驗證

本研究採用之數值分析方法，其分析模式之適宜性與分析結果之正確性已獲現地量測結果驗證。影響隧道交叉段力學行為之相關參數建議進行參數研究，以進一步了解隧道交叉段複雜的三向度力學行為。

