

# FLAC3D 應用於複雜褶皺構造 之近域流場分析案例研究

張偉哲\* 徐文杰\* 辜炳寰\* 蕭富元\*\*

## 摘要

臺灣位於板塊交界帶，山區地下水儲量豐富且水文地質環境複雜，山岳隧道施工遭遇出水問題時有所聞，而隧道施工長期出水或突發性大量湧水，除對隧道施工安全與工期造成影響外，亦可能引發地下水資源流失疑慮。一般理論解析或簡易二維分析無法適用於臺灣複雜水文地質環境之隧道開挖出水問題研究，近年來隨著電腦系統升級與運算能力大幅提升，三維數值分析已逐漸成為主流分析工具，但目前多數的三維分析仍假設均質或簡化水文地質單元，基本上可適用於臺灣西部沉積岩地層或簡單地質構造環境，但對於臺灣東部複雜變質岩構造環境之適用性則偏低，甚可能出現誤判風險。本文乃應用國內大地工程廣為應用之 FLAC3D 三維分析工具，針對臺灣東部多期地質褶皺構造為例，依據詳細地質調查結果，建構隧道周圍複雜褶皺構造水文地質環境，進行三維水文流場分析，模擬隧道開挖遭遇複雜褶皺構造之湧水問題與因應處理方式。本文乃國內首次嘗試進行複雜褶皺構造之三維水文地質流場分析，分析結果與現場實測大致吻合，顯示分析方法與結果未來可應用於複雜水文地質構造之流場分析，提升國內隧道工程設計與施工水準。

關鍵字：山岳隧道、水文地質、複雜褶皺構造、三維水文流場分析

## 一、前言

臺灣位於板塊交界帶，地質破碎且構造複雜，同時臺灣平均年降雨量約 2,500 (mm)，約為世界平均降雨量之 2.6 倍，局部地區之年降雨量更可高達 6,000~8,000 (mm)，使得臺灣蘊藏豐富的地下水資源。山岳隧道施工遭遇滲湧水問題在臺灣時有所聞，除對隧道施工安全與施工工期造成影響外，亦對鄰近區域地下水位、地下水流場及地下水儲量造成衝擊，倘若長期持續大量出

水，更可能引發區域性地下水資源流失之疑慮與爭議（黃俊鴻，2005）。近年來各種隧道水文地質調查在國內逐漸受到重視，蕭富元等（2014）彙整目前隧道工程常用之水文地質調查技術，包括水文地質遙感探測、水文地質地球物理探查、水文地質測繪、鑽孔水文地質調查、水文地質現地試驗、水文動態觀測調查等。國內指標性的公路工程—蘇花改隧道乃辦理一系列水文地質調查工作，觀測隧道施工過程的水文地質環境變化（蕭富元等，2015；辜炳寰等，2019）；三維水文地

\* 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心地工維安組組長

質分析技術在國內之應用亦蓬勃發展，例如林廷彥等（2014）乃應用三維水文地質分析技術探討隧道施工對鄰近區域地下水資源影響；辜炳寰等（2017）乃設定不同水文地質情境分析推估隧道開挖可能出水量；Hsiao *et al.*（2019）結合水文地質觀測與三維數值分析技術，探討隧道施工所造成的地下水位短暫降低與回復情形等。

上述所提之三維水文分析與研究仍停留在均質或簡化水文地質情境，尚未涉及複雜褶皺構造水文地質單元環境，而臺灣東部變質岩區常見複雜之多期褶皺構造，如圖 1 及圖 2 所示，導致

水文地質條件極為複雜，此種多期褶皺構造對於大區域水文地質分析仍將其適度簡化，但對於隧道鄰近小範圍湧水問題探討，如果主要含水層受劇烈褶皺作用影響時，將出現地下水來源具有特定方向，以及可能受壓含水層情形，過度簡化水文地質模型，將影響分析結果精度。故本文乃嘗試建構複雜褶皺構造之三維水文地質模型，透過流場分析與現場實測比對，冀能提升國內水文地質分析技術。

## 二、數值分析工具

目前水文地質分析的方法與工具甚多，各有其適用領域與限制，本文乃採用美國 ITASCA 公司所研發之有限差分程式 FLAC3D 進行分析。

該軟體目前已廣泛應用在臺灣的大地工程領域，可分析熱、水、力等複雜模式的耦合行為，本文僅使用 FLAC3D 之水流分析模組，模型所採用的水流分析理論概述如下：

### （一）FLAC3D 多孔隙介質水流傳輸行為

藉由達西傳輸方程式進行求解，如下式

$$q_i = -k_i(s) \left[ p - \rho_f x_j g_j \right] \quad (1)$$

其中， $q_i$  為流率 ( $m^3/s$ )， $k_i(s)$  為水力傳導係數（與飽和度  $s$  有關）， $p$  為孔隙水壓， $\rho_f$  與  $g_j$  分別為水的單位重與重力加速度。

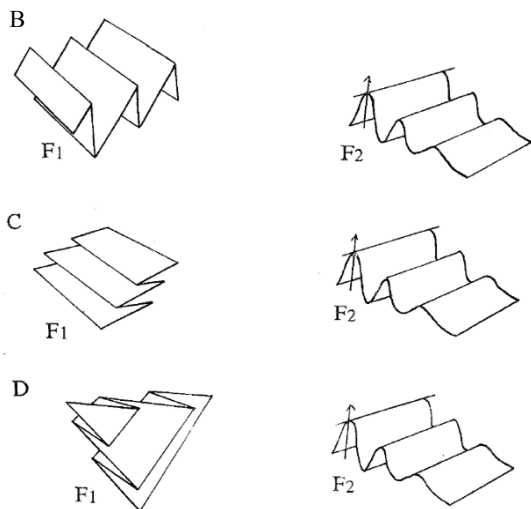
對於任意格點（Grid Point），水的質量平衡必須滿足下列條件所述，如式（2）

$$-q_{i,j} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2)$$

式中， $q_v$  為補助水源， $\zeta$  為格點內的水量。

而任意格點內的水壓變化可由下式求得，如式（3）

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K_w}{n} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (3)$$



（摘自：楊昭男，1995）

圖 1 地層多期褶皺構造疊加干涉型式示意圖



（摘自：楊昭男，1995）

圖 2 臺灣東部綠色片岩夾變質石灰岩多期褶皺情形

其中  $K_w$  為水的體積模數， $n$  為材料孔隙率， $\alpha$  為比奧係數 (Biot Coefficient)， $\varepsilon$  為體積應變。式 (3) 所描述的水壓變化，可同時考慮水流與力學影響。惟近域模式為純水流模式，故僅有水流因素影響水壓變化。

### (二) FLAC3D 水流分析模式

FLAC3D 可分析等向性水流 (Isotropic Flow) 與異向性水流 (Anisotropic Flow) 議題，若採用等向性水流模式，則每個網格僅需輸入一個等效滲透係數值，而若使用異向性水流模式，則需針對每一個網格輸入相應之滲透係數張量 (Permeability Coefficient Tensor)。本文所建構之三維網格模型，已經將褶皺構造單元之空間分布特性納入考量並呈現於三維幾何模式中，因此乃採用等向性水流模式，配合個別地質單元之滲透係數，進行水流行為描述。

## 三、褶皺構造網格建置

本文所發展之褶皺構造係以臺灣東部某實際隧道工程為例，該隧道開挖過程中並未遭遇明顯出水情形，隧道開挖貫通後，在雨季期間發生多日連續降雨，根據中央氣象局資料顯示，2017 年 10 月 20 日抽坍前，10 月 3 日~15 日持續降雨，累計雨量達 950 (mm)，其中 10 月 13~15 日更發生高強度降雨，3 日累積降雨量達 563.5 (mm)，短暫豐沛降雨導致抽坍區上方水壓增加，可能為抽坍發生外力之一。由於隧道開挖過程並未有出水情形，因此研判主要含水層應在隧道上方，經過持續降雨後，含水層水壓抬升，受隧道頂拱軟弱剪裂帶及水壓增加等雙重影響，導致既有支撐工的支撐力不足而發生抽坍如圖 3 所示。

依據抽坍現場後續的補充地質調查成果並與監造單位地質師討論後，發現該位置抽坍區附近地質呈現複雜多期褶皺構造，區域內至少發生兩次褶皺行為，第一期褶皺 (F1) 軸部略呈南北 (或

北偏東) 走向，第二期褶皺 (F2) 軸部略呈東西走向，褶皺波幅較小，並造成 F1 軸面折曲如圖 4，雖然褶皺波長不一，但大致可找出 20~30 (m) 的重複區間，空間上主要以與片理呈軸面之褶皺 (F2) 控制其分布。



圖 3 隧道抽坍後出水情形

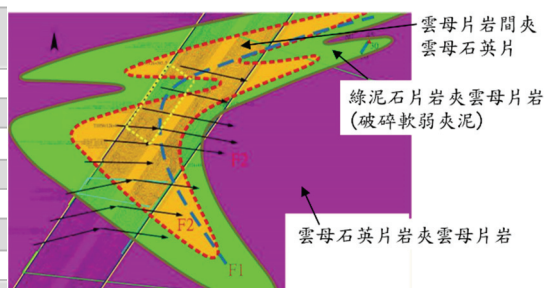


圖 4 現場地質平面示意橫剖面圖

抽坍區南北兩端地層分布較堅硬之雲母石英片岩夾雲母片岩，中間則為層厚較薄之綠泥石片岩夾雲母片岩，該岩層分布于軟硬岩層介面，於半脆性~脆性變形條件下受褶皺軸部剪動影響，呈現破碎軟弱夾泥之產狀，具有阻水特性，另其下部尚有出露薄至中層之大理岩，中段則出露雲母片岩間夾雲母石英片岩；抽坍區上方地層主要為雲母石英片岩間夾雲母片岩，岩材較為堅硬，但受複雜褶皺構造影響，呈現不規則狀分布，且具有高角度節理及裂隙；頂拱附近分布軟弱夾泥之綠泥石片岩間夾雲母片岩，研判為主要阻水層，開挖面所見之夾泥剪裂帶和綠泥石片岩所形成之阻水層厚度可達 3-5 公尺以上，縱剖面如圖 5 所示。





表 1 水文地質模擬單元與現場調查地層對應

水文地質模擬單元	現場調查對應地層 (構造)
HF1、2~10、14	雲母石英片岩穿插雲母片岩
HF11	綠泥石片岩穿插雲母片岩，下部出露薄至中層之大理岩透鏡體
HF13、HF12	雲母片岩間夾雲母石英片岩
間雜分布於 HF11~HF12	剪動構造

#### 四、水文地質數值參數設定

本研究水文地質模式之分析參數，主要參考廣域模式分析所率定驗證之參數（財團法人中興工程顧問社，2019），本研究針對位處抽坍段阻水層上方之主要含水層褶皺構造—含節理及裂隙之矽質片岩，大致應屬於廣域模式分析所率定之中度破碎矽質片岩，其等效透水係數約為  $1 \times 10^{-6}$  (m/sec)。由於無法確切掌握節理與裂隙的實際分布情形，因此乃利用統計之冪級數分布 (Power Law Distribution) 模擬設定透水係數之不均勻與變異性，設定後透水係數範圍介於  $5.98 \times 10^{-7} \sim 1.41 \times 10^{-6}$  (m/sec)，結果如圖 9 所示；其餘非含水地層則參考廣域分析率定之綠色片岩、黑色片岩及低度破碎矽質片岩之透水係數範圍，採用冪級數分布模擬地質變異性如圖 10，所設定之透水係數範圍介於  $3.50 \times 10^{-7} \sim 1.29 \times 10^{-6}$  (m/sec)，如表 2 所示。

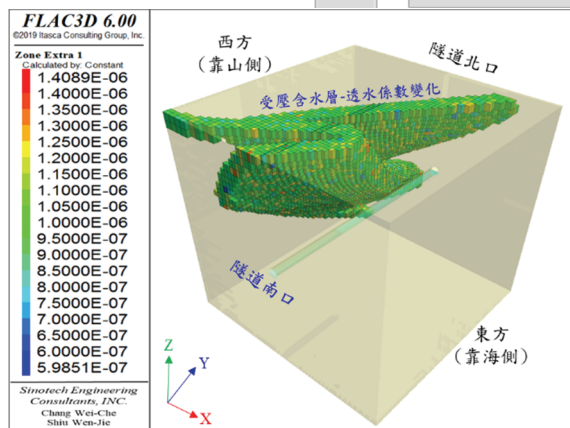


圖 9 主要含水層透水係數變化分布設置

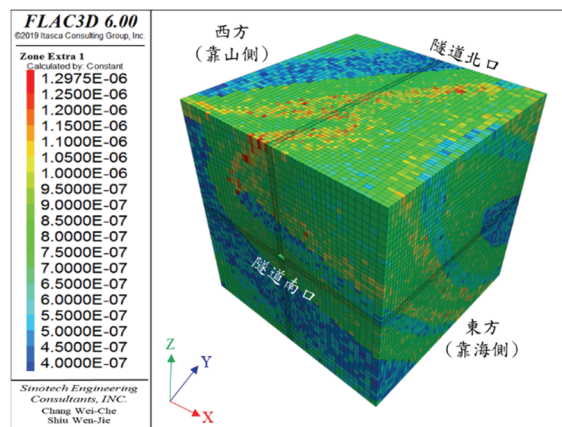


圖 10 非含水層透水係數變化分布設置

表 2 三維水文地質模式之透水係數參數彙整表

地層名稱	透水係數 K (m/sec)	比貯水係數 Ss (1/m)
黑色片岩	$5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
漢本大理岩	$5 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
綠泥石片岩	$6 \times 10^{-7} \sim 2.32 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
低度破碎矽質片岩	$7 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$
中度破碎矽質片岩	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
大理岩	$1.2 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-6}$
抽坍區	$3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$

#### 五、隧道抽坍流場分析

##### (一) 抽坍過程分析

本研究的三維水文地質模式之流場變化分析，於水文邊界條件設置乃基於廣域模式分析所對應之邊界位置水頭分布（財團法人中興工程顧問社，2019），進行本研究定水頭邊界模式設置，如圖 11 所示。模式內地下水補注主要係來自於西南兩方向（靠山側）挹注，經由劇烈褶皺作用所形成之破碎或剪切錯斷構造，蓄積於隧道上方含水層內（約開挖面上方 10~30 m），如圖 12。

本分析假定抽坍區上方約 10 (m) 範圍阻水層，因開挖擾動造成損傷，自持能力不足，再加上持續強降雨所導致水壓增加，導致抽坍與湧水等連鎖事件發生。模擬分析時將抽坍區上方約



10 (m) 範圍透水係數提高一個數量級，以模擬開挖鬆動影響，同時將隧道頂拱處水頭設定為零，據以分析抽坍後地下水瞬間湧入隧道內情形。抽坍後流場分析顯示，地下水沿軸線破碎含水層流動，大量地下水持續湧入隧道內（如圖 13），抽坍後穩態出水量約 6,770 (L/min)，與隧道抽坍後出水量觀測值大體相符如圖 14 所示，顯示分析結果應可反應此次抽坍出水行為。

低地層透水性，來達到止水與抽坍修復效果。因此分析乃將隧道抽坍段影響 100 (m) 範圍上方半徑約 10 (m) 岩體的透水性降低。基於時間因素，本分析並未模擬現場逐輪灌漿修復情形，而係簡化以假設抽坍影響範圍一次灌漿補強修復完成，灌漿補強之透水係數採用漸進式遞減，以模擬灌漿逐步完成過程。本分析所採用透水係數隨時間逐漸變化公式，如下式所示：

$$k = \max(k_{ini} \times \beta^{(t-100)/\Delta t}, k_{ini} \times 0.1) \quad (4)$$

上式中 t 為時間 (天)；β 設定為 0.97。

模式分析結果顯示，抽坍段灌漿修復完成後，隧道出水量進一步減少為約 2,930 (L/min)，比對隧道抽坍後長期出水實測值（約 2,000~4,000 L/min），兩者數量級及出水變化趨勢大體符合（如圖 14），抽坍修復後流場變化分布如圖 15，結果

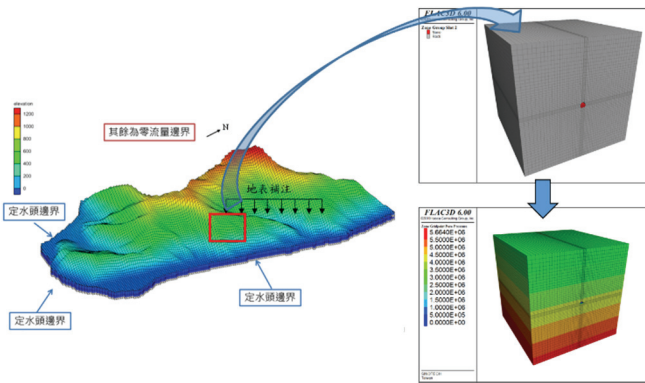


圖 11 本文分析網格邊界條件設定示意圖

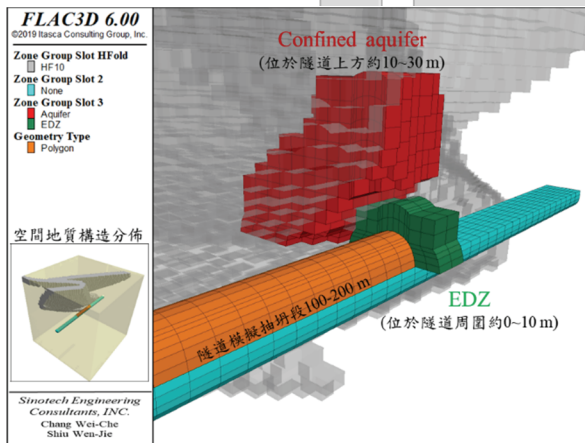


圖 12 模式之隧道上方含水層分布情形

(二) 抽坍後處理分析

隧道抽坍後立即進行相關因應處理，包括未抽坍段支撐補強、排水孔打設、管幕鋼管施作、前進止水灌漿及固結灌漿、開挖鏡面土心灌漿加固、逐輪開挖修復與支撐加固、抽坍空洞灌漿回填等。本文分析在探討抽坍修復及灌漿補強成效時，考量灌漿主要乃改良提高周圍岩體強度，降

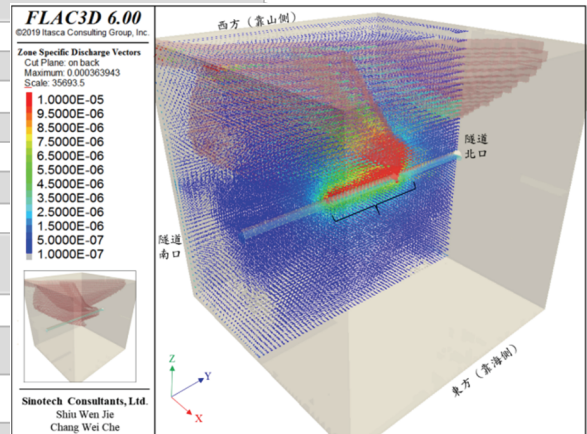


圖 13 隧道抽坍後模式流場分布情形

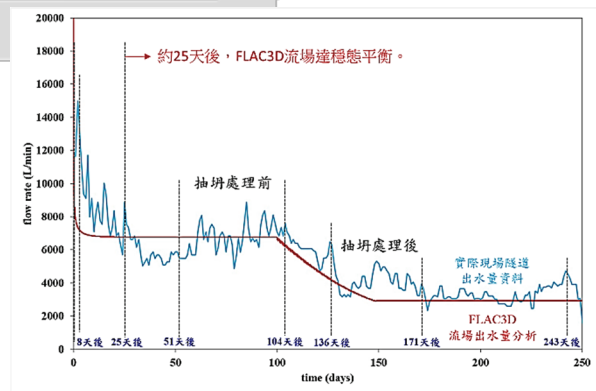


圖 14 抽坍段出水分析與實測值比對情形

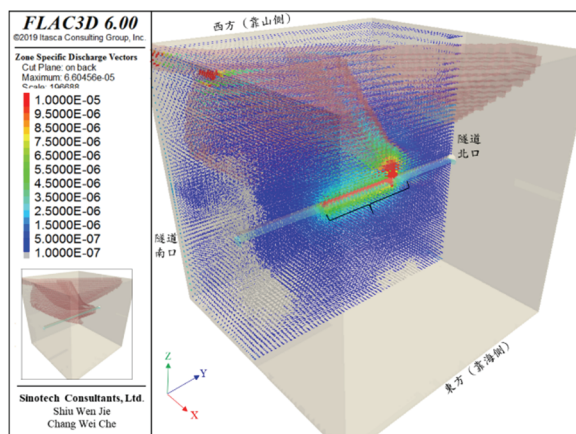


圖 15 隧道抽坍修復後模式流場分布情形

可見相較於抽坍初期出水流量 (圖 13) 已有明顯改變, 即便遠域水量仍持續挹注至近域場內, 但因隧道抽坍段止水固結灌漿已發揮成效, 因此隧道抽坍段出水流量獲得減緩改善。

## 六、結 論

臺灣水文地質環境複雜, 過於簡化的水文地質模式有時無法真實反應現場狀況。本文依據實際工程案例與地質調查結果, 嘗試建構複雜多期褶皺構造水文地質模式, 並進行三維流場分析, 分析具有特定補注來源含水層對工程影響, 分析結果與現場實測比對顯示, 本文所建構之三維水文地質模式與現場狀況吻合, 除可藉以瞭解隧道抽坍前後出水模式外, 後續亦可進一步進行長期的影響評估。

在氣候變遷劇烈及臺灣環保意識日漸高漲情形下, 未來工程之推動無可避免需面臨地下水資源保護議題, 本文所發展建構技術有助於改善目前業界之三維數值地層過於簡化分析之不足, 將實際各種地質構造 (例如褶皺擠壓、斷層剪裂帶、

向斜背斜等) 納入模式分析, 可更真實模擬工址的水文地質環境與行為, 探討工程施工與周圍水文地質環境相互影響關係, 期冀對工程興建與環境保護之平衡提供助力, 使臺灣未來的工程建設邁向更優質化與科學化里程。

## 參考文獻

- 財團法人中興工程顧問社 (2019) 臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫—水文地質模式檢測及區域水資源環境影響分析委託專業服務工作—107 年年度分析評估報告, 交通部公路總局蘇花公路改善工程處, 宜蘭
- 林廷彥、蕭富元、高憲彰、彭詩容 (2014) 三維分析技術應用於公路隧道施工鄰近區域水資源環境影響研究, 臺灣公路工程, 第 40 卷, 第 8 期, 第 26-42 頁
- 黃俊鴻 (2005) 雪山隧道工程施工湧水與鄰近地表、地下水文及翡翠水庫進流變異之關聯研究, 國道新建工程局項目研究報告, 臺北
- 楊昭男 (1995) 臺灣的地質構造現象, 臺灣地質之六, 經濟部中央地質調查所編印
- 蕭富元、彭詩容、高憲彰、冀樹勇 (2014) 水文地質調查與分析在隧道工程中的應用探討, 隧道建設, 第 34 卷, 第 6-14 頁
- 蕭富元、高憲彰、邵厚潔、林廷彥 (2015) 蘇花改隧道施工對地下水文影響評估, 地工技術, 第 146 期, 第 33-42 頁
- 辜炳寰、蔡文瀚、高憲彰、蕭富元、劉文煜、邵厚潔 (2017) 考量水文地質特性之隧道開挖出水推估分析, 第 16 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集, 貴州, 第 63-70 頁
- 辜炳寰、蔡文瀚、蕭富元、高憲彰 (2019) 高出水潛勢隧道施工水文地質調查與地下水資源影響分析, 中興工程季刊, 第 143 期, 第 57-67 頁
- Hsiao, F.Y., H.C. Kao & H.J. Shau (2019) Hydrogeological Investigation and Environmental Impact Assessment During a Large Water Inflow Tunnel Construction in Taiwan, Proceedings of the World Tunnel Congress 2019 – Tunnel and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture