



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Tunnel Engineering—Article

基于数据互联服务的隧道新奥法施工构想与初探

杜博文^a, 杜彦良^b, 徐飞^{b,*}, 贺鹏^c

^a State Key Laboratory of Software Development Environment, Beihang University, Beijing 100083, China

^b Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

^c Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 June 2017

Revised 13 July 2017

Accepted 31 July 2017

Available online 3 February 2018

关键词

新奥法

大数据环境

数据服务

隧道施工

摘要

新奥法 (NATM) 广泛应用于山岭隧道、城市地铁、地下贮库、地下厂房、矿山巷道等地下工程, 掌子面前方地质、围岩变形、支护结构受力状态等在施工过程中的动态变化情况, 是评价结构稳定程度、优化施工方案, 确保隧道施工安全与质量的必要信息。施工过程中获取的大量动态监测信息的不确定性与离散性, 给施工方案的选择及灾害事故与险情的准确预测带来了巨大挑战, 增加了隧道安全隐患。针对上述问题, 本文提出了一种基于互联网大数据支持环境下的隧道施工数据服务系统, 通过对已施工案例中各检测器结果进行标记, 建立同场景下施工相关参数的关联, 利用工程案例的积累不断补充和完善, 实现相似环境下的参数提取, 为同类场景下施工方案设计、施工资源的合理分配提供数据支撑, 为后续工程设计、施工提供依据。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

随着我国交通基础事业的发展, 越来越多的山岭隧道、城市地铁等地下工程正在如火如荼地规划与建设中, 极大地改善了交通出行效率。然而, 在深部地下空间与复杂地层环境中, 地下工程修建过程中面临着诸多挑战, 如大变形、塌方、岩爆和突水突泥等。尤其以深长隧道的大变形灾害最为突出, 如奥地利的陶恩隧道和阿贝格隧道[1]、土耳其的博陆山隧道[2]、我国的乌鞘岭隧道[3]和龙溪隧道[4]等, 在修建过程中均面临着围岩大变形灾害的威胁。基于不同的地质特点与条件, Meng等[5]将围岩大变形发生机制划分为三类: 塑性流

动、剪切滑移和等层状沉积岩弯曲破坏。隧道大变形主要由挤压应力[6,7]和膨胀应力[8]导致, 合理的分析方法、支护措施、建设方案和施工设备对控制隧道围岩稳定具有重要作用[9]。新奥法 (NATM) 作为一种高效的施工方法被广泛应用, 该方法的核心思想是施工信息的及时反馈和施工方案的动态调整。现场实时监测、信息及时反馈和施工方案的动态调整是保证隧道施工安全的重要手段。施工过程中获取的大量信息具有不确定性和离散性, 给施工方案选择和突发事故及危险工况的准确预报造成了巨大的技术挑战。

目前对于新奥法和现代智能化隧道施工方法均存在两个关键的技术挑战。一个挑战是建立一个能够快速有

* Corresponding author.

E-mail address: sduxfly@126.com (F. Xu).

效的方法获取、管理和分析在施工过程中迅速增加的海量数据；另一个挑战是建立不同工况下隧道施工数据之间的内在联系。基于这种数据关联，海量服务数据以一种便捷高效的方式为类似工程建设提供技术查询和借鉴服务。

针对上述问题，本文基于数据互联技术，以新奥法施工为核心，在大数据环境支撑下，提出了一种新型的数据服务框架技术体系。运用该服务技术体系，施工过程中获取的多源异构数据信息可以被融合，并以数据评估模型建立数据之间的内在关联。建立的这种数据关系被存储在一个数据资源池中，随着数据池的不断补充、完善和发展，可为相似的工程提供数据服务和技术指导，如施工方案的优化和施工资源的有效整合等。

2. 新奥法施工

Rabczewicz于1964年提出新奥法[10]，Brown[11]和Romero[12]详细阐述了新奥法的观点和定义，并进行了相关研究，在此基础上Kovári[13]及Karakus和Fowell[14]对新奥法的理念进行了细化区分。采用新奥法施工时，洞室开挖和支护结构施作是一个复杂的过程，也是保证施工及结构安全的关键所在。施工过程中获取的掌子面前方地质、围岩变形、支护结构受力状态等信息，决定着开挖方式和支护参数的选取。从工程角度考虑，准确的测量围岩的收敛量以及支护结构的受力状态对保证隧道围岩的稳定性至关重要。当围岩的变形以及地应力水平超过安全范围，则需要增加监测的频率。在开挖影响区内，采取加强支护或者调整施工方案等措施以避免支护结构失稳破坏，继而引发严重的安全事故。新奥法集合了许多已有的隧道开挖和支护方法，但是其最为重要的一方面是及时监测围岩的收敛变化和支护结构的受力情况，动态调整施工方案，保证工程建设的安全顺利进行。因而，新奥法具有广泛的应用性。

3. 新奥法隧道施工的数据服务框架体系

为应对隧道施工过程中产生的海量多源异构数据信息给隧道施工带来的技术挑战，本文提出了一种数据服务框架系统，利用该系统实现对施工数据资源的融合、互联与检索及为类似工程建设提供数据查询服务。该数据服务框架体系包括三部分：获取隧道施工过程中的多

源异构数据信息、基于高斯评估模型数据分析及信息反馈和存储。下面详细介绍服务框架体系中3个主要组成部分，并以在建成兰（成都—兰州）铁路金瓶岩隧道大变形施工段为案例，概述整个服务框架系统的运行流程。

3.1. 隧道建设过程数据获取

3.1.1. 基于 TSP 超前地质预报信息

TSP (tunnel seismic prediction)法，即隧道前方地震预报或超前地质预报法，采用地震波勘探原理，产生的地震波以球面波的形式在隧道围岩中传播，当围岩波阻抗发生变化时，一部分地震波将会被反射回来，另一部分地震波将会继续向前传播，通过对反射弹性波的处理，获取掌子面前方围岩纵波波速 V_p ，其他参数如泊松比、弹性模量等均可通过经验公式和 V_p 换算得到。同时，隧道主要结构面与隧道轴线的夹角 θ 、裂隙发育状态和地下水赋存情况均可通过2D地质剖面图、深度偏移和反射层分析判读[15,16]。除此之外，为了更好地与高斯过程的机器学习算法匹配，文献[17,18]中将定性的描述实现量化。断层与破碎带可以根据以下准则进行判断：

(1) 纵波波速减小，横波与纵波比值增大；

(2) 深度偏移图像出现强烈的负反射并且以强烈的正反射结束，同时在反射区内存在较多的正负反射层[19]。

此外，对于富水地质构造可由以下现象进行判断[20]：

(1) 在2D地层结构反射图中，横波波速减小，同时纵波增大，纵波与横波的比值以及泊松比突然增大，密度与弹性模量大幅度减小；

(2) 出现明显的负反射层，同时负反射层之后无明显正负反射层存在。

3.1.2. 支护结构与围岩状态行为信息

在隧道及地下工程施工过程中，通过对围岩的收敛变形、围岩深部位移、围岩与初支之间的接触压力、支护结构内力、锚杆轴力、初支与二衬之间的接触压力和二衬应变等信息监测分析，动态调整施工方案及支护参数，同时实现对隧道支护结构的安全与稳定的评估与分析，尤其针对复杂和特殊地层环境中的隧道及地下工程的建设具有重要的工程意义。基于新奥法施工，掌子面

超前地质情况、支护结构的应力应变状态和围岩的变形信息实时监测监测、动态反馈与存储,为施工方案选择及支护参数的优化提供决策依据。

3.2. 基于高斯过程的数据评估模型

高斯过程是一个随机过程,其任意有限变量集合的分布都是高斯分布,在许多应用中,表现出了一流的监督学习方法,GP的统计特征完全由它的均值 $m(\mathbf{x})$ 和协方差函数 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 来确定,可由下式定义:

$$f(\mathbf{x}) \sim GP[m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')] \quad (1)$$

式中, \mathbf{x} 和 \mathbf{x}' 为输入向量对。

一般来讲,普遍认为GP的均函数为零[21]。GP模型是一个非参数、服从贝叶斯分布的模型。基于对训练样本的学习,GP可以通过极大似然法,获得协方差函数的最优超参数;采用较为通用的径向基函数作为其核函数,即

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma^2 \exp \left[-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2 / (2l^2) \right] \quad (2)$$

式中, l 为特征尺度; σ^2 为噪声方差; l 与 σ^2 这两自由参数即为GP模型的超参数。

假设有 n 个观察数据的训练集 $D = \{(\mathbf{x}_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$, $\mathbf{x}_i \in R_d$ 是 d 维输入矢量, y 是分类标示+1/-1。输入数据矩阵 $d \times n$ 设定为 X ,通过GP模型给定的输入样本 \mathbf{x}' 来进行预测。GP二元分类通过不断获得实际观察值后,根据贝叶斯规则,获取潜在函数 f 的后验分布为[21]:

$$P(f' | X, y, \mathbf{x}') = \int P(f' | X, \mathbf{x}', f) P(f | X, y) df \quad (3)$$

式中, $p(f | X, y) = p(y | f) p(f | X) / p(y | X)$ 是潜在函数 f 的后验分布; $p(f' | X, \mathbf{x}', f)$ 是对应潜在函数的先验分布,其变量分布范围为 $(-\infty, +\infty)$,因此,概率预测为

$$\bar{\Pi}' = P(y' = +1 | \mathbf{X}, y, \mathbf{x}') = \int s(f') P(f' | \mathbf{X}, y, \mathbf{x}') df' \quad (4)$$

式中, s 可以是任何sigmoid函数,其作用是将区间约束的 $f(\mathbf{x})$ 转换为 $[0, 1]$ 区间的函数值,从而保证概率值落在 $[0, 1]$ 区间。

对于多元分类问题,可将某类看作为有别于其他的单独类别,然后通过二元分类器划分该类与其他类别(图1)。

利用高斯过程的数据评估模型,将开挖段获得数据作为训练数据,建立数据之间的内在联系,实现对待开挖段数据信息的评估与预测,结合实际开挖揭露的数据

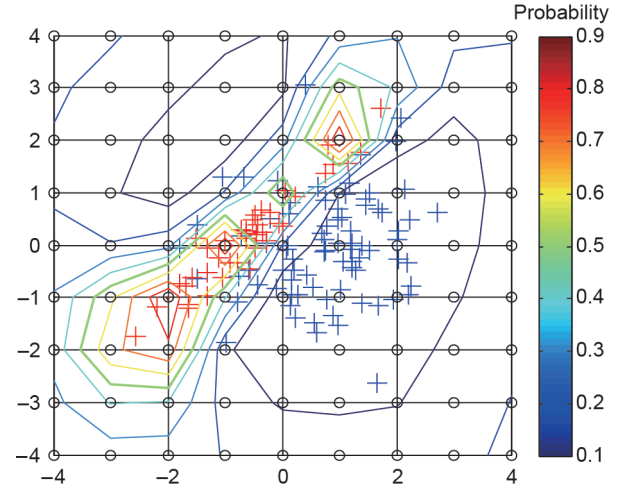


图1. 高斯过程分类模型示意图。

信息不断对模型参数进行修正,从而为待开挖段施工方案动态调整及支护参数优化设计决策提供数据支持。

3.3. 信息反馈与存储

为了更好地对隧道施工期间反馈的海量数据进行管理与分析,现场监测元件及探测设备反馈的有效数据被存储在一个大数据云平台。为实现大量数据的云平台存储,首先,基于数据服务DaaS提出互联网数据存储的概念(IoD),既包括数据源服务,也包括数据转化模块的服务。这些服务都以本体的形式存储在本体语义网络之中,能更好地满足数据使用者的需求。其次,建立适用于隧道智慧施工的数据服务框架体系,通过用户终端存储器状态和网络宽带服务将所需要的查询数据发送给数据服务框架体系(DaaS)。最终,服务系统向数据终端发送查询命令,并将所需结果派发给数据需求者。互联网数据服务流程如图2所示。

4. 案例分析

4.1. 工程背景

穿越汶川强震区的成兰高速铁路十一标段金瓶岩隧道,位于四川省阿坝州松潘县,不同于唐山地震和其他毁灭性的重灾地震,汶川强震主要集中在山岭地区[22]。受汶川强震区的影响,隧址区岩体经历强震及多次余震反复揉搓损伤,进一步恶化了岩体的物理力学特性[23,24]。金瓶岩隧道全长12 773 m,最大埋深约791 m,隧址区主要为三叠系上统侏倭组碳质千枚岩,局部夹千枚岩,碳质千枚岩呈灰色、黑灰色,岩质较软,强风

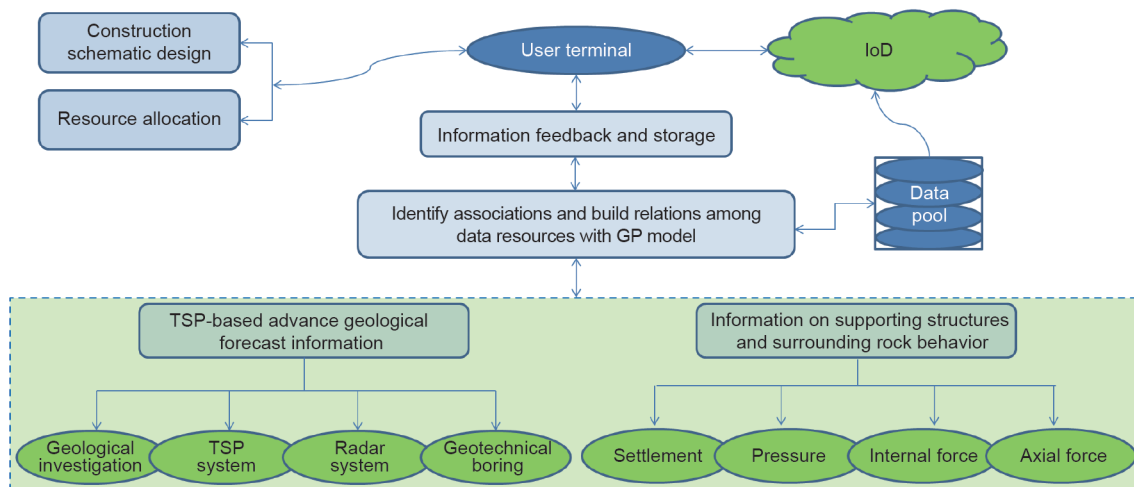


图2. 互联网数据服务流程。

化，节理裂隙发育，遇水泥化。同时，隧道围岩变形表现出了典型的流变特征，施工已揭露地段发生多起喷层大面积开裂、掉块、塌方、初支钢架扭曲破坏、二衬开裂等大变形事故，支护结构严重侵限，如图3[25]所示，给隧道安全施工和铁路后期顺利运营带来了巨大的挑战。金瓶岩隧道典型断面的跨度和宽度分别为13.7 m和11.5 m，采用三台阶方法施工，施工程序主要包括上台阶开挖、上台阶支护、中和下台阶开挖、边墙和仰拱支护。如图4所示，支护结构包括初期支护和二次衬砌。

4.2. 基于 TSP 超前地质预报信息

纵波与横波深度偏移分析图、反射提取层特征提取图可通过TSPwin PLUS处理软件获得，结果见图5。预测结果的二维图像可基于图6直接进行解译。综合P波、SH波、泊松比及杨氏模量等信息的量值分布范围，将预测区域的围岩划分为若干段（图7），量化处理后[17]，可获取所有包括训练及测试样本的输入数据，见表1。

4.3. 监测方案

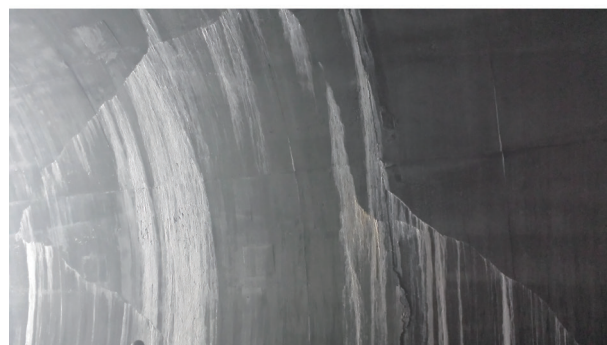
洞室开挖过程中分别对围岩的净空收敛变形、围岩深部位移、围岩与初支接触压力、拱架内力、锚杆轴力、初支与二衬接触压力和二次衬砌环向应变的变化特征与分布规律进行系统对比分析。各监测内容的获取方法如下，利用全站仪配合反光片的无接触测量方法对隧道拱顶沉降以及水平收敛变形进行持续监控，使用双膜压力盒对围岩与初支接触压力进行监测；使用表面应变计和钢筋应力计对拱架变形及内力监测；通过在锚杆待测点



(a)



(b)



(c)

图3. 围岩大变形情况。(a) 右拱肩塌方；(b) 初喷开裂；(c) 二衬开裂。

位置以套管链接钢筋应力计的方法进行锚杆轴力监测，使用多点位移计对围岩深部不同位置处的变形进行监

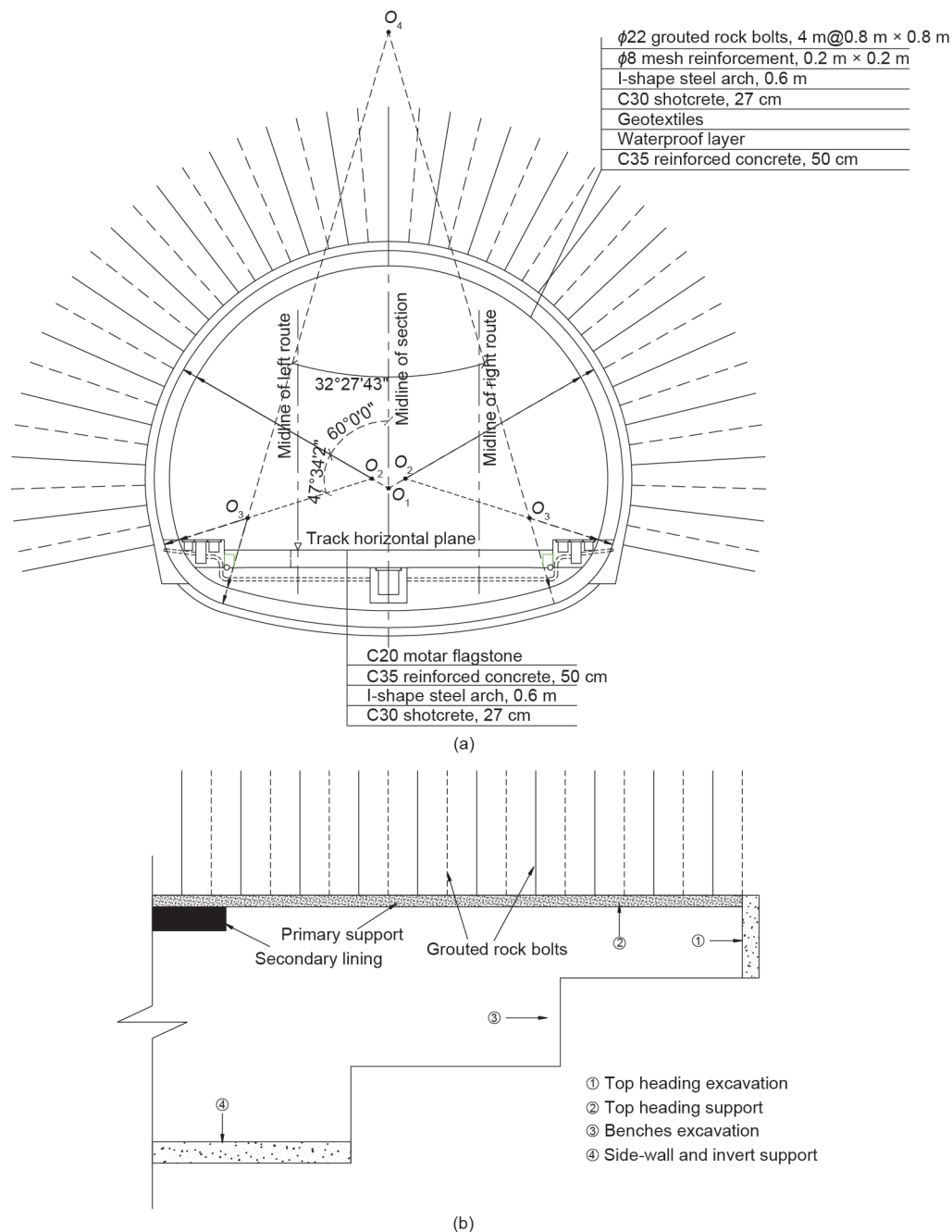


图4. (a) 支护结构参数设计; (b) 施工工法。

测; 使用双膜压力盒对二次衬砌与初支之间的接触压力进行监测; 使用埋入式应变计对二次衬砌混凝土的应变进行监测。图8所示为现场监测所涉及的监测元件, 图9所示为监测点的布设情况。

4.4. 代表性监测结果及分析

4.4.1. 拱顶沉降

如图10所示, 围岩净空变形随时间增长迅速, 且未呈现收敛趋势; 其中随着掌子面推进, 拱顶沉降呈现

出明显的三台阶波动增长, 监测39 d达323 mm, 超出了250 mm预留变形量。由于自承拱范围随着洞室开挖外移, 大体积量的软弱破碎围岩挤出, 围岩自重荷载及地层构造应力荷载作用在支护结构上, 支护结构发生较大变形, 丧失承载能力, 继而引起了围岩持续大变形灾害。同时, 隧址区受水平挤压应力的作用影响, 中台阶及下台阶的收敛变形随着掌子面推进增加, 且变形呈现出不收敛的趋势(由于矮边墙浇筑测点被破坏, 未进行下台阶收敛监测)。支护结构封闭成环7 d后, 拱顶及拱

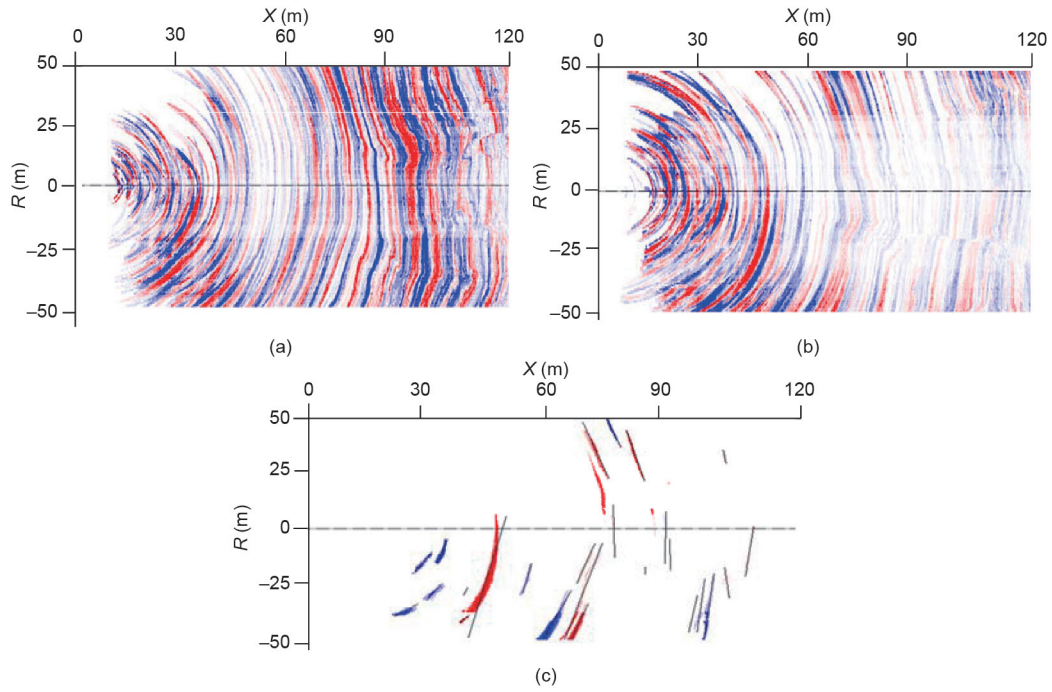


图5. 纵波、横波的深度偏移及特征提取图。

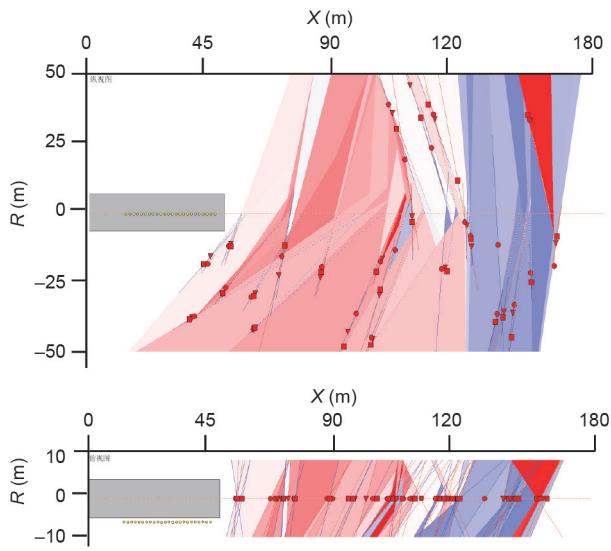


图6. 预测结果的二维效果图。

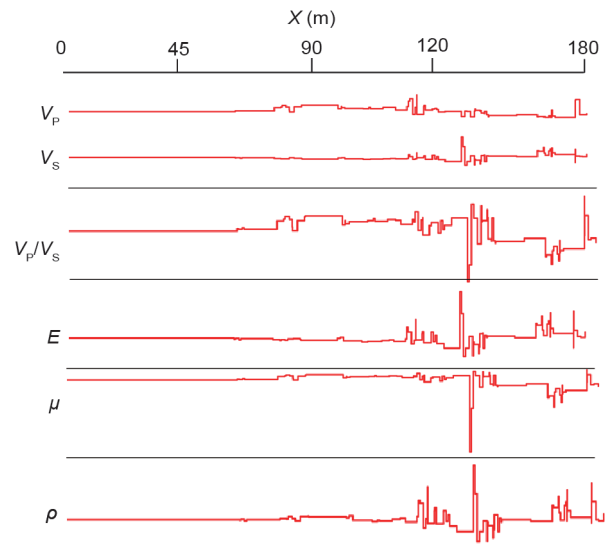


图7. 岩体力学参数预测值。

表1 岩体物理力学参数

Mileage	V_p/V_s	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	μ	E (GPa)	θ ($^\circ$)	Parameter of structural surface state	Groundwater condition
YK200+525-546	1.75	2.41	0.26	18	63	0.35	0.31
YK200+546-591	1.83	2.42	0.29	18	52	0.56	0.37
YK200+591-620	1.94	2.34	0.32	11	27	0.81	0.73
YK200+620-638	1.64	2.43	0.20	20	35	0.62	0.65
YK200+638-655	1.51	2.46	0.11	24	25	0.77	0.52

肩部位出现喷层开裂，局部掉块，为避免变形进一步恶化，现场采取了局部凿除重新挂网复喷的补强措施，软

弱破碎碳质千枚岩在高地应力作用下表现出显著的流变特征。

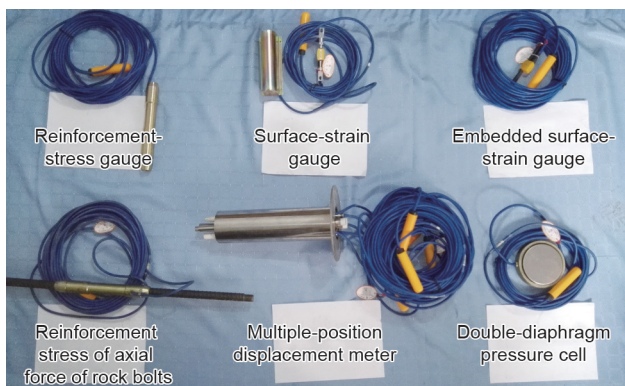


图8. 监测元件实物图。

4.4.2. 围岩与初支接触压力

围岩与初期支护之间接触压力时程曲线如图11所示（部分监测元件在施工过程中破坏造成相应测点数据缺失）。随掌子面的推进，围岩释放荷载以及爆破振动对围岩的二次扰动卸荷作用在支护结构上，接触压力增长趋势受施工影响显著，对监测点的围岩接触压力变化的时程曲线具有类似的变化态势，围岩与初支之间的最大接触压力为拱顶处的33 kPa。由图11分析可知，接触压力变化呈现明显的三台阶变化态势，尤其是对拱顶和左

右拱肩位置的接触压力。同时，在主支撑闭合后接触压力增长迅速且呈现不收敛趋势。

4.4.3. 施工方案的调整与优化

针对施工过程中获取的大量监测与探测数据信息，运用高斯评估模型建立多源异构数据之间以及数据与结构安全之间的联系，建立预测预警控制阈值。当围岩变形、支护结构应力超出预警阈值，针对相应区域加密布设高精度监测元件，再次将获得的数据导入到服务体系中，进一步对支护结构的安全与性能进行评估预测，为施工方案的选择及支护参数优化设计提供数据支持，避免重大灾害事故的发生。多种工况下建立的数据之间的联系都会存储到数据池中，数据池会不断补充、完善和发展，同时服务系统将会为其他类似工程的顺利建设提供更多有工程价值的查询与技术指导服务。

5. 结论

基于数据互联技术和新奥法隧道施工特点，在大数据环境的支持下，提出了一种优化的数据服务框架系

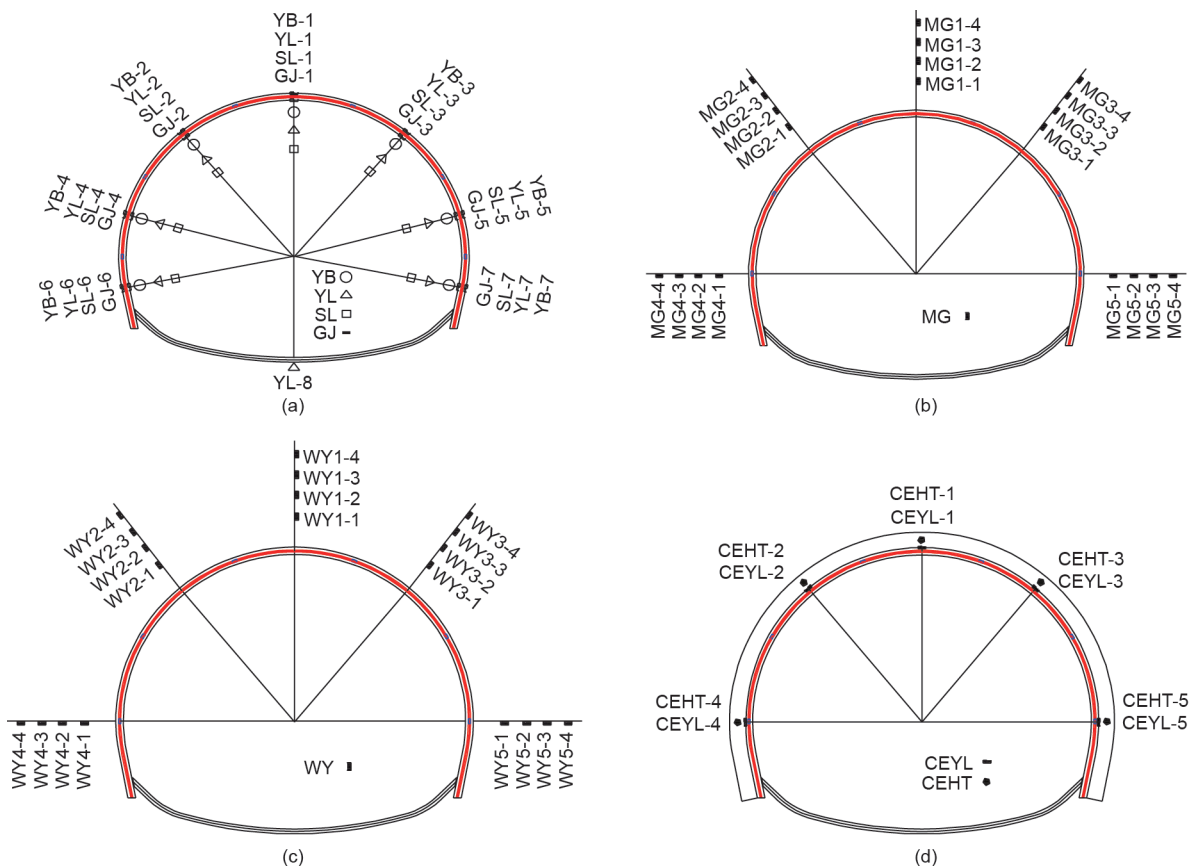


图9. 监测元件分布示意图。

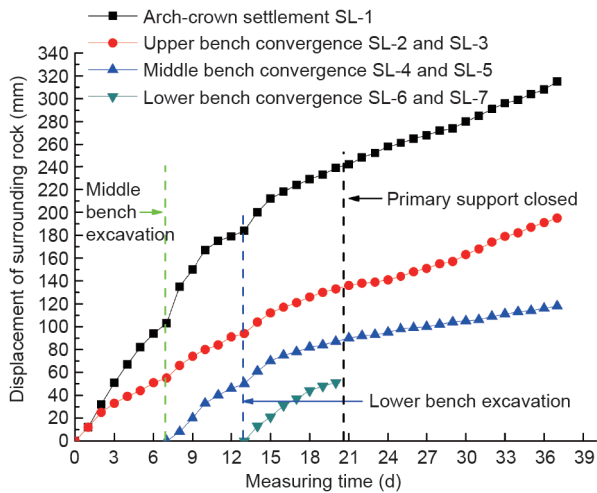


图10. 围岩收敛变形时程曲线。

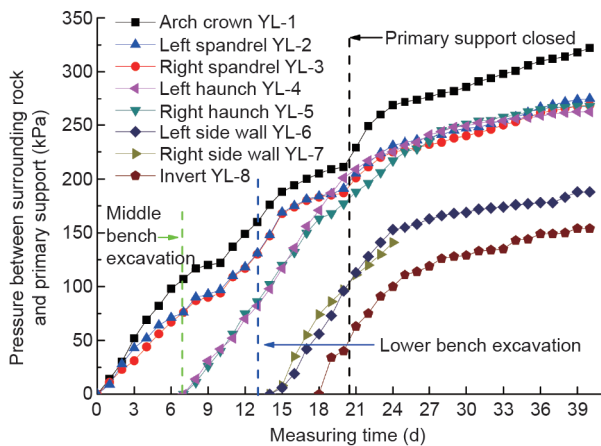


图11. 围岩与主支撑之间接触压力变化时程曲线。

统。通过该系统，整合施工过程中获取的海量多源异构数据信息，基于高斯评估模型建立同场景下施工相关参数关联。数据之间的关联被存储到一个数据池中，利用工程案例的积累不断完善和补充，实现相似环境下的参数提取，为施工资源的合理分配和后续工程设计、施工提供数据支撑。本文以在建的成兰铁路典型碳质千枚岩大变形段施工为例，围绕本文所提出的数据服务框架系统，概述了基于数据服务系统实现施工信息实时监测与施工方案动态调整的服务流程。随着数据池不断补充和完善，该服务系统可为其他类似工程施工方案选择和支持参数优化提供技术依据。

Acknowledgements

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51778033 and 51408018). Great

appreciation goes to the editorial board and the reviewers of this paper.

Compliance with ethics guidelines

Bowen Du, Yanliang Du, Fei Xu, and Peng He declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Reference

- [1] Steiner W. Tunneling in squeezing rocks: Case histories. *Rock Mech Rock Eng* 1996;29(4):211–46.
- [2] Dalgıç S. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey. *Eng Geol* 2002;67(1–2):73–96.
- [3] Wang SR, Liu ZW, Qu XH, Fang JB. Large deformation mechanics mechanism and rigid-gap-flexible-layer supporting technology of soft rock tunnel. *China J Highw Transp* 2009;22(6):90–5. Chinese.
- [4] Li CL, Li TB, Chen LW, Zhai XP. Analysis on the genetic mechanism of the large deformations of surrounding rocks on the test section in Longxi left tunnel. *Mod Tunn Technol* 2009;46(5):46–50. Chinese.
- [5] Meng LB, Li TB, Jiang Y, Wang R, Li YR. Characteristics and mechanisms of large deformation in the Zhegu Mountain Tunnel on the Sichuan-Tibet Highway. *Tunn Undergr Space Technol* 2013;37:157–64.
- [6] Franciss FO. Weak rock tunneling: a simplified analytical simulation, a PCbased model and design charts for engineering practice. Rotterdam: AA Balkema; 1994.
- [7] Li GF, He MC, Zhang GF, Tao ZG. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Min Sci Technol* 2010;20(1):28–34.
- [8] Aydan Ö, Akagi T, Kawamoto T. The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction. *Rock Mech Rock Eng* 1993;26(2):137–63.
- [9] Palmstrom A, Stille H. Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations. *Tunn Undergr Space Technol* 2007;22(4):363–76.
- [10] Rabcewicz LV. The New Austrian Tunnelling Method: Part one. *Water Power* 1964;16(11):453–7.
- [11] Brown ET. Putting the NATM into perspective. *Tunnels Tunnelling* 1981;13(10):13–7.
- [12] Romero V. NATM in soft ground—A contradiction in terms? *World Tunnel* 2002;15(7):338–43.
- [13] Kovári K. Erroneous concepts behind the new Austrian tunnelling method. *Tunnels Tunnelling* 1994;26(11):38–42.
- [14] Karakus M, Fowell RJ. An insight into the new Austrian tunnelling method (NATM). In: *Proceedings of ROCKMEC'2004: The VIIIth Regional Rock Mechanics Symposium; 2004 Oct 21–22; Sivas, Turkey; 2004.*
- [15] Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *Int J Rock Mech Min Sci* 2002;39(2):185–216.
- [16] Christensen NI, Salisbury MH. Structure and constitution of the lower oceanic crust. *Rev Geophys Space Phys* 1975;13(1):57–86.
- [17] Qiu DH, Li SC, Zhang LW, Xue YG, Su MX. Prediction of surrounding rock classification in advance based on TSP203 system and GA-SVM. *Chin J Rock Mech Eng* 2010;29(s1):3221–6. Chinese.
- [18] Gholami R, Rasouli V, Alimoradi A. Improved RMR rock mass classification using artificial intelligence algorithms. *Rock Mech Rock Eng* 2013;46(5):1199–209.
- [19] Li SJ, Feng XT, Zhao HB, Feng SR, Liu LP, Zhao HB. Forecast analysis of monitoring data for high slopes based on three-dimensional geological information and intelligent algorithm. *Int J Rock Mech Min Sci* 2004;41(3):519–20.
- [20] Liu ZG, Liu XF. TSP application and development in tunnel lead forecast. *Chin J Rock Mech Eng* 2003;22(8):1399–402. Chinese.
- [21] Rasmussen CE, Williams CKI. *Gaussian processes for machine learning*. Cambridge: The MIT Press; 2006.
- [22] Yuan YF. Impact of intensity and loss assessment following the great Wenchuan earthquake. *Earthq Eng Eng Vib* 2008;7(3):247–54.
- [23] Xu XW, Wen XZ, Yu GH, Chen GH, Klinger Y, Hubbard J, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology* 2009;37(6):515–8.
- [24] Chen Y, Li L, Li J, Li G. Wenchuan earthquake: Way of thinking is changed. *Episodes* 2008;31(4):374–7.
- [25] Xu F, Li S, Zhang Q, Li L, Shi S, Zhang Q. A new type support structure introduction and its contrast study with traditional support structure used in tunnel construction. *Tunn Undergr Space Technol* 2017;63:171–82.