

概化地质模型在复杂地层力学参数反演中的应用*

韩昌瑞¹, 王玉朋¹, 白世伟²

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 4300711)

摘要: 围岩的物理力学参数不容易通过常规测试手段准确获取, 而这些参数往往对计算结果产生较大的影响, 因此在数值模拟过程中如何选择符合工程实际的参数是工程中的首要问题。地层参数反演是准确获得围岩力学参数的重要手段。根据地铁下穿复杂地层物理力学特性对其进行归纳和简化, 提出符合实际工程的概化地质模型; 并利用能够反映围岩非线性性质的应变软化模型建立数据库, 结合人工神经网络反演硬土层、岩层力学参数。为后续的工程分析提供可靠的地层参数, 避免单纯为提高计算精度而对地层参数调整的随意性。

关键词: 概化地质模型; 数值模拟; 反演分析; 地层力学参数

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)增1-0140-09

Application of Generalized Geological Model in Inverse Analysis of Complex Strata Mechanical Parameters

Han Changrui¹, Wang Yupeng¹, Bai Shiwei²

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: The mechanical parameters of surrounding rock would not be exactly obtained through conventional measuring means, and those parameters often create large influence on the calculation results, so how to select parameters fitted to practical project is the key problem in the progress of numerical simulation. Inverse analysis of strata mechanical parameters is an important means to obtain the mechanical parameters of surrounding rock. According to physical and mechanical property of surrounding rock and soil, the complex strata parameters are induced and simplified, and generalized geological model conformed to actual project is extracted. Data base is established using strain softening model because it can reflect the non-linear character of surrounding rock and soil. Mechanical parameters of hard soil and rock are analyzed by artificial neural network. The reliable parameters of soft soil are obtained by engineering analogical method and compared to other ones from domestic projects. The method can solve the uncertainty of mechanical parameters of complex strata, and the reliable parameters are supplied for subsequent engineering analysis. At the meantime, the random adjustment of parameters only for increasing accuracy of numerical simulation should be avoided.

Key words: generalized geological model; numerical simulation; inverse analysis; strata mechanical parameters

* 收稿日期: 2015-01-01(修改稿)

作者简介: 韩昌瑞(1971-) 男, 山东费县人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: hanchangrui@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(40802078); 山东省自然科学基金(ZR2011EEM020)

1 引言

隧道开挖引起地表沉降已有较多的研究,有代表性的工作是 Peck 公式法^[1~4]和随机介质理论^[5~9]。应用最广的经验方法是 Peck 公式,其核心是要估算“沉降槽宽度”和“地层损失”,这两个物理量的概念清晰,根据沉降曲线推求这两个参数比较容易。但如何反过来针对不同的工程特点事前确定这两个参数,并进而预测沉降变形却并非易事。而随机介质理论预测沉降变形除了计算工作难度较大以外,参数取值带有经验性质,掌握起来十分困难,推广应用也受到一定的限制。

相比之下,数值方法有更多的优势。地下工程开挖使围岩和初始应力状态受到扰动,导致应力重分布和围岩变形,如果已知围岩的地层结构,各地层的力学特性参数和初始应力状态,地下工程开挖产生的二次应力场和岩体发生的变形位移可以通过数值分析计算出来。如果条件和理论模型选择符合工程实际,数值模拟能够得到合理的解答。正因为如此,国内地铁研究多数采用数值分析方法。

虽然数值分析已相当成熟,但是数值模拟是否合理受到三个方面的制约,一是如何建立符合实际的概化地质力学模型,由于地质条件的千变万化,对每个工程研究的首要问题就是根据工程的地层结构、地质构造、岩土基本力学特性和工程结构的相互关系,构造概化地质力学模型,它是经过归纳和简化,能够基本反映工程地质特征,又具有工程代表性的模型^[10];二是岩体的非线性和非连续性,使得传统的本构方程不能合理的反应岩体的物理力学特性,如何建立符合岩体力学特性的本构方程是岩体力学研究的难点问题^[11];三是岩体的物理力学特性参数测不准,由室内实验或现场实验测定

的围岩力学参数与实际岩体存在较大的偏差,加之岩体本身的非均匀性和赋存环境的复杂性,使得实验结果缺乏足够的代表性。用这样的参数进行分析,所得计算结果往往与实际存在较大的偏差。现在普遍认为,利用监测的位移信息,通过反演分析反求岩土体的力学参数,再应用于后续的分析将更合理、更科学^[12~16]。

本文以广州地铁五号线淘金-区庄区间线路监测资料为背景的数值分析研究工作,首先要建立工程概化地质力学模型,并合理选择初始地层力学特性参数。概化地质力学模型可以通过对地层结构的分析简化来实现,地层力学特性参数则通过人工神经网络方法,进行地层力学特性参数反演得到。

2 工程概况

广州市轨道交通五号线淘金~区庄区间隧道位于环市中路和环市东路下,从淘金站出站后,分为两个单线隧道沿环市中路向东延伸。本区段为微丘台地,大部分地段地表为风化残坡积土,局部低凹地段,沉积有冲积-洪积土层或砂层,地形略有起伏,地面标高 15.48~22.7 m。基岩主要为强风化~微风化暗紫红色粗砂岩、砾岩及泥质粉砂岩、粉砂岩和暗红色泥质粉砂岩,局部夹砾石。第四系覆盖层主要为冲积~洪积土层及残积土层,局部夹冲积~洪积砂层和淤泥质土层。地表为人工填土层覆盖。

各岩层土厚度、埋深、标高及分布范围见表 1。应当指出,上述 <1>~<9> 层地层当中,<2-1> 为淤泥和淤泥质土层,<2-2> 为淤泥质砂土,但 <2-1> 和 <2-2> 地层在本区间缺失;<4-2> 为河湖相淤泥质土层,在该区间仅零星分布,埋藏浅、厚度小、层位不连续、对地面沉降影响小和震陷影响不大。

表 1 各岩土分层顶面标高、埋深及厚度统计表

Table 1 Top surface elevation, buried depth and thickness of each stratum

岩土分层	岩土名称	顶面标高/m		顶面埋深/m		厚度/m		分布范围
		范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	
<1>	人工填土层	-15.48~26.12	19.44	0.00	0.00	0.20~7.45	3.47	全部钻孔有揭露
<3-1>	冲~洪积粉砂、细砂	9.58~15.97	12.01	4.50~9.55	6.49	0.40~4.20	1.62	9个钻孔有揭露
<3-2>	冲洪积中砂、砾砂	7.60~20.52	11.01	4.75~8.00	6.54	0.85~5.75	2.13	8个钻孔有揭露
<4-1>	冲洪积粘性土层	6.58~21.47	14.27	0.80~8.90	4.73	0.40~5.53	3.30	21个钻孔有揭露
<4-2>	淤泥质土层	13.05~15.94	14.50	6.33~9.05	7.69	0.50	0.50	2个钻孔有揭露
<5-1>	可塑、稍密~中密残积土层	6.75~22.06	12.23	0.25~10.60	6.06	0.85~7.10	3.81	10个钻孔有揭露

续表

岩土分层	岩土名称	顶面标高/m		顶面埋深/m		厚度/m		分布范围
		范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	
<5-2>	硬塑、密实残积土层	3.12~21.50	13.52	0.20~16.85	6.15	0.85~13.70	4.22	42个钻孔有揭露
<6>	碎屑岩 全风化带	-18.73~18.68	5.11	3.00~39.80	15.08	0.40~15.45	3.58	43个钻孔有揭露
<7>	碎屑岩 强风化带	-21.80~18.49	0.52	2.80~40.20	20.08	0.40~18.40	2.83	37个钻孔有揭露
<8>	碎屑岩 中风化带	-17.10~22.90	-1.09	1.50~35.68	21.23	0.45~8.69	2.55	41个钻孔有揭露
<9>	碎屑岩 微风化带	-20.60~17.80	-4.20	3.50~39.00	24.33	0.30~34.20	9.11	全部钻孔有揭露

3 概化地质力学模型

从隧址区地质勘察结果可以看出,在不同里程处地层结构变化很大,在不同里程处剖切计算剖面将会很不相同,理论上能够针对任何剖面进行数值分析,但科学的作法是找寻能反映地层结构特征和有工程代表性的剖面进行研究,以便得到普适性的研究成果。

从地层参数反演技术的角度看,未知量是各地层的力学特性参数,要对<3>~<9>地层的力学特性参数进行反演,如果每种地层3个主要参数 E 、 c 、 φ ,那么将有21个未知数,而已知量是断面地表沉降量,隧道拱顶下沉量,和隧道收敛变形量。由于实际监测收敛资料数据不理想,不能用于定量反演分析,已知量只剩下两个。由两个已知量反演21个未知量,显然反演结果的唯一性可疑。对地层结构进行简化,使反演计算的未知数尽量减少是必然的选择。

各岩土层室内实验或现场实验测定的土力学参数见表2。根据表1,地层<1>~<9>可粗略划分为三类,<1>~<5-1>具有软土的特征,<5-2>和<6>具有硬土的特征,<7>~<9>为岩体,具有较高的强度和较大的弹性模量。仔细研究表2,可以进一步看出<1>~<5-1>具有软土特征各层,处于地表附近,强度低,模量低。<5-1>和<6>分别为密实残积土层和全风化碎屑岩,两者的物理力学参数比较相近,都具有硬土特征,该土层在软土层和岩层之间,分布较广,地层较厚,是隧道上覆地层的主体部分,对隧道开挖引起隧洞拱顶沉降起决定性的作用,是岩土力学特性参数反演研究的重点。<7>~<9>为强风化到微风化岩体,岩土分界面多处于隧洞拱顶附近,对维护隧道的稳定非常重要。这样把隧道上覆地层简化成具有不同力学特性的三层结构,即软土层、硬土层、岩层。这一简化基本符合工程地层结构特征,也便于通过数值分析方法反演地层力学特性参数。

表2 地层物理力学参数建议值

Table 2 Recommended mechanical parameter values of each stratum

岩土分层	天然含水量 $\omega/\%$	天然容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	标准贯入度 $N/\text{击}$	围岩初评 级别
<1>					10.2	VI
<3-1>		18.5			7.6	VI
<3-2>		19.0			9.1	VI
<4-1>	27	19.1	29.83	13.6	8.4	VI
<4-2>	56.0	16.0	8.00	8.00	/	VI
<5-1>	23.6	18.2	29.3	14.5	8.2	VI
<5-2>	29.5	18.5	34.1	14.4	16.4	V
<6>	23.4	20	31.08	15.30	24.9	V
<7>	21.4	19.5	350	25	38.4	IV
<8>		25	1 000	35		III
<9>		25.7	1 500	39		II

4 地层参数反演

4.1 力学参数反演的计算剖面

应选择地层信息典型、现场监测资料详尽的剖面作为代表剖面。根据钻孔资料可以粗略的剖切各断面, 获取地层结构的计算剖面。各计算剖面应与相关的变形监测资料相对应, 以利于使用已获得的监测数据反演各层的物理力学参数。图 1 ~ 图 3 是根据钻孔资料对地层简化以后得到的三种反演计算剖面。

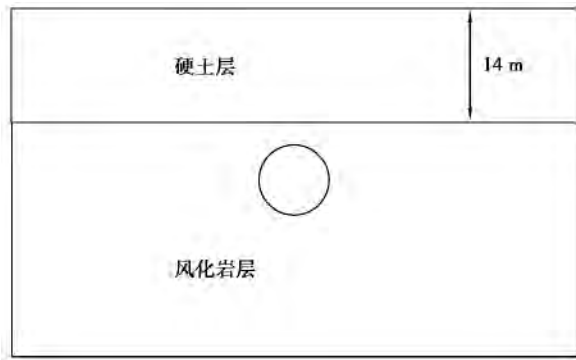


图 1 里程 K11 + 150

Fig. 1 Section of K11 + 150 mileage

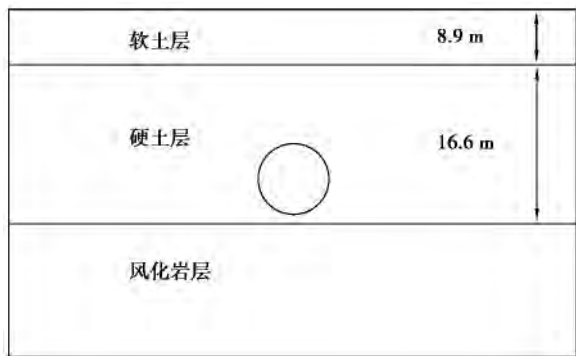


图 2 里程 K11 + 095

Fig. 2 Section of K11 + 095 mileage

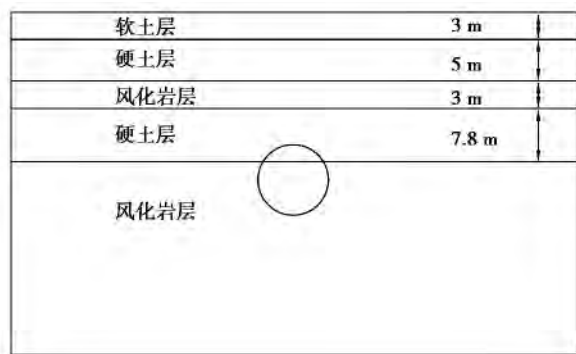


图 3 里程 K11 + 130

Fig. 3 Section of K11 + 130 mileage

拱顶沉降量和地表沉降变形除受各地层力学参数的影响以外, 因各层的空间分布厚度不同, 影响也很大, 力学参数的反演变得非常复杂。图 1 的地层模型最简单, 可以认为软土层缺失, 只有硬土层和岩层 <7>, 因此通过该模型反演硬土层的物理力学参数比较简单。

一旦获得硬土层的物理模型参数, 并用图 2、图 3 所示的地层结构模型重复上述的反演过程, 就可获得软土层和风化岩层的物理力学特性参数。

4.2 硬土层物理力学特性参数的反演

数值计算采用 ABAQUS 为平台, 由于地表沉降较大, 直接利用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型导致计算结果难以收敛, 故应考虑应变软化效应, 采用自编子程序嵌入 ABAQUS 后予以实现^[17]。

建立概化地质力学模型以后, 在确知岩层力学特性参数之前, 为试算需要, 有必要事前提出软土层、硬土层、风化岩层的力学特性参数参考值, 广州地铁五号线针对隧道上覆岩层的分布特征进行了采样试验, 并根据设计经验提供了一组岩层力学特性参数建议值, 用这一组力学参数建议值进行数值模拟试算, 得到变形值同实测结果比较吻合, 因此参考表 2, 归纳出试算参考力学参数如表 3。

表 3 软土层、硬土层、岩层力学特性参数参考值

Table 3 Recommended mechanical parameter values of soft clay, hardpan and rock layer

土层	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c / kPa	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ
软土层	18	15	12	7	0.33
硬土层	19	32	15	14	0.28
岩层	25	350	30	300	0.25

采用图 1 所示的地层结构模型, 试算力学特性参数参考表 3, 改变硬土层的物理力学特性参数, 计算隧道开挖引起的地表沉降和洞周变形, 计算结果作为学习样本 (见表 4), 以开挖位移响应代表值和围岩力学参数的映射关系为学习样本进行训练。

以一个未参加学习的样本检验训练好的 BP 网络的映射效果, 结果如表 5 所示。可以看出训练好的 BP 网络建立起了开挖位移响应代表值和围岩力学参数的映射关系, BP 网络映射结果与检测样本的误差在 4% 以内。

利用训练好 BP 网络, 以里程 K11 + 150 处实测的拱顶沉降 (29.0 mm) 和地表沉降值 (8.75

mm) 作为输入,对实际的硬土层力学参数进行预测。结果见表 6。

表 4 BP 网络训练样本(硬土层)

Table 4 Training samples for BP neural net (hardpan)

样本序号	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
1	34.06	19.61	10	32	15
2	26.21	15.11	11	32	15
3	22.65	13.7	12	32	15
4	21.55	12.85	13	32	15
5	20.6	12.19	14	32	15
6	19.79	11.52	15	32	15
7	19.06	10.98	16	32	15
8	18.42	10.5	17	32	15
9	17.92	10.11	18	32	15
10	23.12	13.8	14	24	15
11	21.17	12.58	14	26	15
12	21	12.43	14	28	15
13	20.71	12.2	14	30	15
14	20.6	12.19	14	32	15
15	20.55	12.08	14	34	15
16	20.28	11.87	14	36	15
17	20.16	11.79	14	38	15
18	20.28	11.87	14	40	15
19	21.6	12.92	14	32	14
20	20.25	11.87	14	32	16
21	19.9	11.57	14	32	17
22	19.43	11.23	14	32	18
23	19.2	11.08	14	32	19
24	18.94	10.9	14	32	20
25	20.6	12.19	14	32	15

表 5 BP 网络映射效果检验(硬土层)

Table 5 Tested mapping results of BP neural net (hardpan)

	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
检测样本	20.6	12.19	14	32	15
BP 网络映射结果	20.6	12.19	14.35	30.90	15.07
BP 网络映射误差	—	—	2.5%	3.4%	0.5%

表 6 硬土层力学参数反演结果

Table 6 Inverse analysis results of hardpan layer mechanical parameters

网络输入		网络输出		
拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
29	8.75	16.56	33.26	16.58

至此完成了硬土层力学特性参数的反演。

4.3 软土层物理力学特性参数的确定

在此基础上利用图 2 反演软土层的力学特性参数。注意到图 2 所示的剖面,风化岩层处于隧洞底部以下,对隧洞围岩变形和地表沉降起控制作用的将主要是软土层和硬土层,硬土层的力学参数已经确知,通过上述的反演过程就能得到软土层力学参数。

但样本计算结果表明软土层的强度参数 c 、 φ 发生变化的时候,地表沉降量和拱顶沉降量不变,变形模量发生变化的时候,地表沉降量和拱顶沉降

量只发生很小的变化,由此表明,软土层的物理力学特性参数对地表变形和拱顶沉降变形影响很小,试图以这两个沉降量来反演软土层的力学特性参数是不可能的。

为了获得完整的地层参数,对软土层只能通过其它的方法获取,本文采用工程类比,参考国内其它工程,通过试验和经验获取的软土力学特性参数可以作为以后分析的依据。根据本课题组收集到的内工程参数取值,软土各土层力学参数参考值见表 7,考虑各地层厚度后取加权平均值作为软土层力学参数。

表 7 软土参数参考值

Table 7 Reference values of soft clay mechanical parameters

	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c /kPa	摩擦角 φ /(°)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ
人工填土 <1>	18.4	8.96	15.8	6.85	0.38
细粉砂 <3-1>	18.3	0	28.0	11.0	0.30
粉质粘土 <4-1>	19.0	10.96	14.7	7.3	0.34
粉质粘土 <4-2>	17.4	10.3	6.9	6.3	0.40
粉质粘土 <5-1>	19.0	10.96	14.7	7.3	0.34

4.4 岩层物理力学特性参数的确定

已知软土层和硬土层力学参数的前提下,以图 3 所示地层结构可以反演风化岩土层的力学特性参数,虽然风化岩体力学参数对隧道拱顶变形和地

表沉降变形的影响不及硬土层敏感,但 BP 神经网络反演力学参数是可行的,通过大量计算得到表 8 的训练样本。

表 8 BP 网络训练样本(岩层)

Table 8 Training samples for BP neural net (rock layer)

样本序号	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
1	27.44	15.3	200	350	30
2	26.56	15.26	250	350	30
3	25.77	15.16	300	350	30
4	25.15	15.07	350	350	30
5	24.55	14.95	400	350	30

续表

样本序号	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
6	24.09	14.87	450	350	30
7	23.58	14.73	500	350	30
8	23.19	14.64	550	350	30
9	22.84	14.58	600	350	30
10	25.6	15.04	300	200	30
11	25.64	15.07	300	220	30
12	25.65	15.08	300	240	30
13	25.66	15.08	300	260	30
14	25.73	15.12	300	280	30
15	25.73	15.13	300	300	30
16	25.78	15.16	300	320	30
17	25.76	15.15	300	340	30
18	25.77	15.16	300	360	30
19	25.81	15.18	300	400	30
20	25.82	15.19	300	420	30
21	25.8	15.18	300	350	25
22	25.78	15.17	300	350	26
23	25.78	15.17	300	350	27
24	25.78	15.16	300	350	28
25	25.78	15.16	300	350	29
26	25.77	15.16	300	350	30
27	25.77	15.15	300	350	31
28	25.77	15.15	300	350	32
29	25.78	15.2	300	350	33
30	25.77	15.15	300	350	34
31	25.77	15.15	300	350	35

以一个未参加学习的样本检验了训练的好的 BP 网络的映射效果,结果如表 9 所示。可以看出训练好的 BP 网络建立起了开挖位移响应代表值和围岩力学参数的映射关系, BP 网络映射结果与未参加学习样本的误差在 10% 以内,预测效果

较好。

利用训练好 BP 网络,以里程 K11 + 130 实测拱顶沉降(19.0 mm)和地表沉降(9.57 mm)为输入,对实际的围岩力学参数进行预测,结果见表 10。

表 9 BP 网络映射效果检验(岩层)

Table 9 Tested mapping results of BP neural net (rock layer)

	拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
未参加学习样本	25.78	15.16	300	380	30
BP 网络映射结果	25.78	15.16	297.9	344.8	29.9
BP 网络映射误差	—	—	0.7%	9.3%	0.3%

表 10 围岩力学参数反演结果

Table 10 Inverse analysis results of rock layer mechanical parameters

网络输入		网络输出		
拱顶沉降/mm	地表沉降/mm	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
19.0	9.57	341.0	378.7	29.8

通过选择典型断面实际观测资料,使用 BP 网络反演技术求得了硬土层和风化岩体的物理力学参数弹性模量、粘聚力和内摩擦角,它们的重度和泊松比不会有太大的变化,可以通过经验获得。虽

然未能通过变形资料反演获得软土层的物理力学参数,课题组收集同类工程经验参数解决了软土层的参数取值。归纳起来通过反演分析得到了一组反映隧道围岩地层力学特性的参数值示于表 11。

表 11 反演参数结果

Table 11 Inverse analysis results of strata mechanical parameters

土层	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
软土层	18	11	15	7	0.35
硬土层	19	33	16.5	16.6	0.28
岩层	25	380	30	340	0.25

比较表 11 与表 3,反演得到的参数同设计单位提出的经验参数两者差别不大。用设计单位提供的物理力学参数建议值进行设计,基本合理。另一方面由于变形监测资料并不完美,尤其是收敛监测结果太差,增加了反演的难度,通过典型断面的精心选择,硬土层和风化岩层物理力学参数反演的结果取得了预期的结果。

4.5 岩层物理力学特性参数的验证

断面 K11+200 处的地层概化地质模型如图 4 所示,利用表 11 中围岩地层力学特性的参数值进行计算。拱顶下沉计算值为 20.94 mm,现场 150 d 实测值为 20.0 mm,二者基本一致。地表沉降计算结果与 40 d 实测地表沉降数据对比,见图 5。从图 5 可以看出,现场监测点的沉降规律与计算结果一致,但监测值小于计算值,主要原因为现场仅监

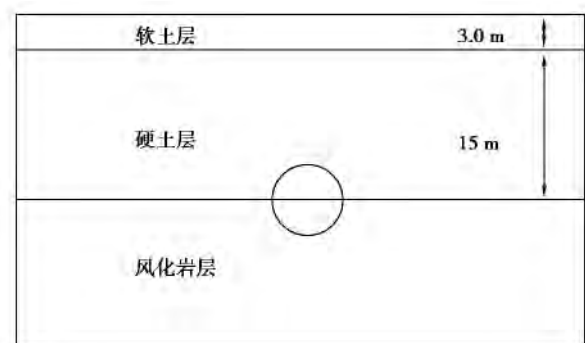


图 4 里程 K11+200

Fig. 4 Section at K11+200 mileage

测了 40 d 的地表沉降,实际地表沉降值应略大于监测数据。通过该断面的计算结果与实测数据的对比,说明地层力学参数反演结果的合理性,从而证明了概化地质模型可以用于复杂地层力学参数的反演。

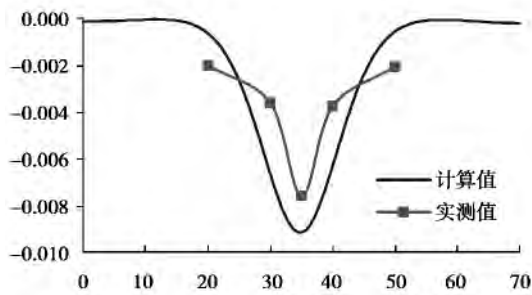


图 5 里程 K11+200 处地表沉降对比

Fig. 5 Ground settlement trough curves at K11+200 mileage

5 结 论

(1) 针对于地层复杂、物理力学参数众多的隧址区,根据其工程地质特点和各土层的物理特性进行概化,利用概化模型简化岩土层分布,有利于岩土层物理力学参数的反演以及后续的工程分析。

(2) 精心选择典型断面,利用设计单位提供的物理力学参数,结合地层概化模型,加权计算得出概化后典型断面的各土层初始力学参数值。

(3) 利用初始力学参数进行数值分析,建立参数反演的数据库。反演分析隧道附近硬土层及岩层的力学参数。

(4) 由于地表上覆软土层相对较薄,对隧道掘进导致地表沉降和拱顶沉降的影响较小,难以通过数值方法准确反演其力学参数,故采用工程类比法获得其力学参数值。

通过地层概化、数值分析、神经网络反演以及工程类比获取地层力学特性参数的方法可以弥补室内实验或现场实验测定的围岩力学参数的不足,为实际的工程分析提供可靠的地层参数。

参考文献(References)

- [1] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [A]. Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. Mexico City: [s. n.], 1969, 225-290.
- [2] 魏纲,陈春来,余剑英. 顶管施工引起的土体垂直变形计算方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 619-624.
- [3] 韩焯,李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 594-600.
- [4] 韩焯,李宁, Jamie R. STANDING. 隧道施工引起地层位移规律的探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 609-613.
- [5] 祝志恒,阳军生,董辉. 双洞隧道施工引起地表移动的多参数反分析研究[J]. 岩土力学, 2007, 31(1): 293-298.
- [6] 施成华,彭立敏,刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3310-3316.
- [7] 朱忠隆,张庆贺,易宏伟. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 56-59.
- [8] 时亚昕,陶德敬,王明年. 大断面浅埋暗挖隧道施工引起的地表移动及变形预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 465-469, 474.
- [9] 韩焯,李宁. 隧道开挖不均匀收敛引起的地层位移的预测模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 347-352.
- [10] 李晓昭,罗国煜,龚洪祥,等. 土体工程地质层组的划分[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 759-763.
- [11] 冯夏庭,杨成祥. 智能岩石力学(2)-参数与模型的智能辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 350-353.
- [12] 龚玉峰,周创兵,梁轶,等. 参数反演在岩质高边坡变形与稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 570-574.
- [13] 贾善坡,伍国军. 基于 Nelder-Mead 算法与有限单元法的岩土力学参数反演[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 44-46.
- [14] 房莹光. 地铁隧道-地层系统的参数优化反演与动力学响应分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 45-49.
- [15] 强天驰,周维垣,杨若琼. 拱坝多参数优化反演分析法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 997-1000.
- [16] 冯夏庭,张治强,盛谦,等. 三峡工程永久船闸三闸首区开挖变形特征的智能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 633-637.
- [17] 韩昌瑞. 有限变形理论及其在岩土工程中的应用[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.