

# 京沪高速铁路跨越长江特大桥桩孔施工技术

杨宗仁<sup>1</sup>, 张西坤<sup>2</sup>, 杨冬冰<sup>2</sup>

(1. 河北大直径工程井建设有限公司, 河北 石家庄 050031; 2. 河北建设勘察研究院有限公司钻探机械厂, 河北 石家庄 050031)

**摘要:**介绍了京沪高速铁路南京大胜关长江大桥桩孔工程施工的主要工艺技术。根据工程的特点,选择主要施工设备、钻头和刀具的具体形式。根据施钻区域的工程地质条件和设备能力,具体选择钻压、转速等钻进工艺参数。并讨论了获得最佳进尺效率与工艺参数之间的关系。

**关键词:**桩基; 钻孔; 施工技术; 钻进参数; 京沪高速铁路

**中图分类号:**U445.55<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)03-0048-05

**Drilling Construction Technology in Super-large Bridge for Jing - Hu High-speed Railway Crossing Yangtze River/YANG Zong-ren<sup>1</sup>, ZHANG Xi-kun<sup>2</sup>, YANG Dong-bing<sup>2</sup>** (1. Hebei Large Diameter Engineering Well Construction Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China; 2. Drilling Machinery Factory of Hebei Construction Exploring Institute Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China)

**Abstract:** The paper introduced the main technology of drilling construction for Dashengguan Changjiang bridge of Jing - Hu high-speed railway. Main construction equipments, concrete forms of drilling bits and cutting tools were selected according to the engineering characteristics; bit weight, rotating speed and other process parameters were selected according to the engineering geological conditions and equipment capacity. The relationship between optimum footage efficiency and process parameters was obtained by discussion.

**Key words:** pile foundation; borehole; construction technology; drilling parameter; Jing - Hu high-speed railway

京沪高速铁路连接北京和上海两座现代化的大城市,铁路设计时速为300~350 km/h,是我国第一条正在建设的准高速铁路。跨越长江特大桥——南京大胜关长江大桥(见图1)是京沪高速铁路干线的控制性工程,全长约9.3 km,主桥结构形式为(109.5+192+336+336+192+109.5)m六跨连续钢桁梁拱桥,桥梁按六线(高速铁路双线、沪汉蓉铁路双线、南京地铁双线)标准设计。主桥基础采用

钻孔灌注桩,6、7、8号墩为主桥墩,每个主墩采用46根 $\varnothing 3.2/2.8$  m的变截面钻孔灌注桩组成的巨型群桩基础。钻孔桩呈梅花状布设,桩底高程-120.0 m,桩顶高程-5.0 m。钢护筒直径为3.20 m,护筒底高程-29.0 m,护筒顶高程+10.0 m,钻孔平台高程为+10.0 m。桥梁结构具有造型美观、结构新颖等特点,建成后必将成为我国乃至世界高速铁路桥梁建设的里程碑。



图1 南京大胜关长江大桥效果图

## 1 桥址区的工程地质情况

主塔墩位于长江主水道的深泓区,河床面高程

为-10.0 m,覆盖层厚度大,由上至下分为3 大层:

①全新统河相最新沉积的松散状细砂层,厚度16.0 m;②全新统河床相地层,层厚39.0 m,主要由中、细

收稿日期:2008-11-14

作者简介:杨宗仁(1971-),男(汉族),内蒙古赤峰人,河北大直径工程井建设有限公司副经理、工程师,注册安全工程师、注册建造师,岩土工程专业,从事大直径工程井施工技术工作,河北省石家庄市建华南大街58号,hbjkyzr@sina.com。

砂组成,以中密状为主,该层底部含有8 m的砾、卵石,局部呈密实状;③基岩层段,为白垩系成岩程度稍差的泥岩、泥质粉砂岩,岩质较软,基岩岩面平缓。

## 2 钻孔工程施工的主要特点

(1) 钻孔直径大:6、7、8号主墩基础钻孔直径为 $\varnothing 3.2/2.8$  m,每个主墩设计46根钻孔灌注桩。钻孔桩成梅花状布置。

(2) 钻孔深度大:自钻孔平台起计算,钻孔深度为130 m。

(3) 钻孔进入基岩深度大:根据设计要求,钻孔进入基岩深度为60 m。

(4) 钻孔质量要求高:设计要求钻孔垂直度控制在1/200以内,使用KE200型超声波仪器进行垂直度检测。现行规范要求为1/100以内。

(5) 钻孔施工在水上平台进行,时值长江的主汛期,江水流速为2.30 m/s,水深为20 m。增大了

水上平台钻孔施工作业的风险。

## 3 钻孔施工工艺的确定

钻孔施工在水中平台上进行,钻孔平台以沉放到预定深度的钢围堰和钢护筒为支撑体,与其上面的联系梁组成钻孔施工平台。根据施钻区域的工程地质情况,上部覆盖层部分采用刮刀钻头全断面钻进,基岩部分采用滚刀钻头全断面钻进,气举反循环施工工艺,使用PHP泥浆护壁。

## 4 主要施工设备及钻头的选择

### 4.1 钻机的选择

主6号墩钻孔施工时值长江流域的主汛期,要在40天的时间内完成8根钻孔灌注桩,保证巨型钢围堰在长江主汛期的安全渡汛。前期共投入8台钻孔施工设备,具体型号及性能参数见表1。

表1 采用的几种型号钻机的性能参数

型号	钻孔直径 /m	钻孔深度 /m	输出扭矩 /(kN·m)	提升能力 /kN	转数 /(r·min <sup>-1</sup> )	循环方式	总功率 /kW	钻机形式	钻杆规格/mm
KPG-300	1.50~3.00	150.00	220	1500	0~6~12	气举反循环	242.5	液压转盘绞车提升	$\varnothing 351 \times 25 \times 5000$
ZYD-300	1.50~3.00	120.00	180	1000	0~8~16	气举反循环	195	液压力头油缸提升	$\varnothing 325 \times 20 \times 3000$
FM-300	1.50~3.00	130.00	200	1300	0~6~12	气举反循环	230	液压力头油缸提升	$\varnothing 351 \times 25 \times 3000$
JT-300	1.50~3.00	120.00	180	1000	0~8~16	气举反循环	165	液压转盘油缸提升	$\varnothing 325 \times 20 \times 3000$
KTY-400	1.50~4.00	150.00	300	1800	0~6~12	气举反循环	300	液压力头油缸提升	$\varnothing 460 \times 25 \times 3000$

根据工程特点及所采用的施工工艺,参考目前国内大直径钻孔施工设备及综合考虑施工平台的承载能力、配电系统能力、施工平台的总体布局情况等因素,施工初期为保证钻孔平台安全渡汛,选用了3台KPG-300型钻机、2台ZYD-300型钻机、2台FM-300型钻机、1台JT-300型钻机参与施工。因钻机扭矩、提升能力及钻具等因素的影响,各种型号钻机的单孔成孔周期表现出很大的差异。KPG-300型钻机的提升能力为1500 kN,加压配重可加至400 kN,钻机的输出扭矩为220 kN·m,单孔的成孔周期为20天。FM-300型钻机的提升能力为1300 kN,加压配重为300 kN,下部50 m范围内的钻杆位置加设3个稳定器,可由部分钻杆加压,钻机的输出扭矩为200 kN·m,单孔的成孔周期为23天。KPG-300型钻机和FM-300型钻机的设备能力能够满足钻孔施工的要求。ZYD-300型钻机和JT-300型钻机的加压配重为220 kN,提升能力为1000 kN,钻机的输出扭矩为180 kN·m,当孔深钻至100 m、进入微风化泥岩时,进尺效率只有0.05~0.06 m/h,随着钻孔深度的增加,钻进进尺效率有明显的下

降趋势,预计完成一个钻孔施工的周期约在35天左右。JT-300型钻机在施工过程中发生过2次钻杆折断的孔内事故;ZYD-300型钻机在施工过程中发生过一次钻杆螺栓松脱掉钻的孔内事故。根据钻孔施工工期和质量的要求,ZYD-300型钻机和JT-300型钻机不能满足施工需要。经过调整,3台KPG-300型钻机、2台FM-300型钻机在完成第一轮钻孔时,替换下ZYD-300钻机和JT-300钻机,继续完成其单个钻孔剩余部分的工作量,保证了40天完成8根钻孔桩的节点施工任务,确保了巨型钢围堰在主汛期的安全渡汛。为保证主墩的整体施工工期、质量和安全要求,又投入了一台KPG-300型钻机和一台KTY-400型钻机,更换了ZYD-300型钻机和FM-300型钻机。KTY-400型钻机的提升能力为1800 kN,输出扭矩为300 kN·m,单孔的施工周期为16天,表现出很强的施工能力。经过调整,主6号墩共投入7台套扭矩为200 kN·m以上的大型钻机,才保证了主墩钻孔施工的顺利完成。

### 4.2 钻头及刀具的选择

钻头的形式直接决定钻头刀具的破岩形式,进

而影响了钻进的进尺效率。第四系覆盖层及全风化、强风化泥岩地层使用刮刀钻头钻进,弱风化、微风化泥岩地层使用滚刀钻头钻进。

#### 4.2.1 刮刀钻头

##### 4.2.1.1 刮刀钻头形式的选择

钻头形式的选择要综合施工钻孔的工程地质条件、钻孔直径、钻孔深度及钻孔质量要求等因素。

选用六翼刮刀钻头,主要考虑钻孔直径大、覆盖层底部有密实的卵砾石厚层,延长钻头的使用寿命,减少提下钻具修复、更换钻头的辅助时间。

刮刀钻头翼板间的夹角为 $100^{\circ}$ (一般情况下为 $120^{\circ}$ ),主要是考虑钻头刀具破碎的钻渣在冲洗液的作用下,能够较易滑落聚集到钻头的锥尖部位排至地表获得进尺,特别是解决钻进全风化、强风化泥岩地层易产生泥包钻的现象有很好的效果。

刮刀钻头2个导向圈之间的有效高度为2.00 m(一般情况下为1.00 m左右),主要考虑是使钻头有很好的导向作用,满足钻孔垂直度控制在 $1/200$ (规范要求为 $1/100$ )的质量要求。

##### 4.2.1.2 刮刀钻头刀具的选择

以往刮刀钻头硬质合金刀具选择YG8系列的硬质合金,这种硬质合金的特点是:有很高的抗耐磨性,但抗冲击性较弱。使用这种硬质合金钻进卵、砾石地层和风化破碎的软岩地层,硬质合金受到钻头回转过程中产生的冲击力容易崩碎、脱落,失去破岩能力,大幅度降低硬质合金的使用寿命。市场上可供应的硬质合金形状一般有大八角状和薄片状等。在主墩钻孔施工的过程中,选择了D404型号硬质合金,取得了良好的效果。D404硬质合金的抗耐磨性相当于YG8系列的硬质合金,但其抗冲击韧性大于YG8系列的硬质合金。使用这种硬质合金钻进卵、砾石地层和风化破碎的软岩地层,很少发现硬质合金崩碎、脱落的现象,很大程度上提高了钻头使用寿命。

KPG-300型钻机使用D404硬质合金焊制的刮刀钻头在全风化泥岩地层可获得 $0.4\text{ m/h}$ 左右的进尺效率。D404硬质合金可根据施工现场的实际使用情况定制成各种规格形状。

#### 4.2.2 滚刀钻头

##### 4.2.2.1 滚刀钻头形式的选择

在弱风化和微风化的泥岩地层钻进,由于岩石的抗压强度大多属于软岩(岩石的抗压强度在 $30\text{ MPa}$ 以内),钻进施工过程中选择平底滚刀钻头;为了便于排除钻渣,钻头的吸渣口形状以长条状为宜,

长度为尽量覆盖钻头的半径方向,吸渣口的底面到孔底的距离一般为 $0.12\text{ m}$ 左右,吸渣口的截面积一般是钻杆的通径面积的1.5倍;在满足破岩带宽度的条件下尽量减少滚刀的数量, $\text{Ø}2.80\text{ m}$ 的滚刀钻头可布置19把滚刀,一般钻进中硬岩层的 $\text{Ø}2.80\text{ m}$ 滚刀钻头可布置23把滚刀。

KPG-300型钻机使用布置19把滚刀的 $\text{Ø}2.80\text{ m}$ 的滚刀钻头,钻进弱风化和微风化地层可获得 $0.22\text{ m/h}$ 左右的进尺效率。

##### 4.2.2.2 滚刀形式的选择

在弱风化和微风化的泥岩地层钻进,选择12系列的中高齿焊齿滚刀,刀齿为TM60硬质合金,TM60硬质合金的特点是能够使用电焊焊接。第一轮钻孔滚刀使用普通的E506焊条焊接,出现焊体非正常的严重磨损,而TM60硬质合金刀齿正常磨损的现象。主要是地层的岩石抗压强度较低,刀齿压入地层较深,已超过硬质合金的出露部分,产生焊体过度磨损的现象。后来TM60硬质合金使用高耐磨性的焊接材料焊接,改变焊接工艺,解决了焊体过度磨损的问题。

## 5 钻进工艺参数的确定

钻进工艺参数的选择主要与钻孔参数(包括孔径、孔深、垂直度等)、施钻区域的工程地质情况及所选用的施工设备能力等因素有关。根据所选用的施工工艺,回转钻机施工,主要有以下几个参数:钻压、转速、泥浆循环量。

### 5.1 钻压

钻压是钻孔施工作业中的一项重要参数,是钻孔施工作业中获得理想的进尺效率及保证钻孔垂直度的重要因素。钻孔施工初始,由于对地层没有充分认识,以为在风化泥岩地层钻进,岩石的强度属于软岩类别,使用高强度的刮刀钻头就能满足施工需要,所以在钻压参数认识上存在问题。ZYD-300型钻机和JT-300型钻机之所以在孔深 $100\text{ m}$ 时进尺效率只有 $0.05\sim 0.06\text{ m/h}$ ,远不能满足施工工期要求,主要原因是钻压偏低。受转盘输出扭矩和钻机提升能力的限制,配重只加 $220\text{ kN}$ ,粗径钻具的质量为 $300\text{ kN}$ ,为保证钻孔的垂直度,加到孔底的钻压实际为粗径钻具总重扣除浮力的 $80\%$ 时,实际加至孔底的压力为 $200\text{ kN}$ ,加至每把滚刀的钻压不足 $10\text{ kN}$ ,排出地表的钻渣为细小的颗粒状。短时间内试图加大钻压进行钻进,但受钻进扭矩的影响,加大钻压钻进时钻机转数下降,很大程度上影响了

进尺效率。同时,加大钻压钻进时,钻机出现明显的震动摇晃,孔内钻杆摇摆厉害。JT-300型钻机出现孔内钻杆折断事故。KPG-300型钻机和FM-300型钻机的粗径钻具的质量为400 kN,加至孔底的钻压可达到320 kN,每把滚刀的钻压远大于ZYD-300型和JT-300型钻机的钻压,在微风化泥岩地层中钻进,排至地表的钻渣为15~25 mm片状,可获得进尺效率为0.15~0.25 m/h。加大钻压进尺效率还可以提高,但还得考虑钻压对钻孔垂直度的影响。孔底钻压控制在320 kN以内,钻机运转正常。在这种地层钻进,钻压与钻进效率成正比的关系,但钻压过大有时会造成刀具寿命缩短等不良现象。

## 5.2 转数

钻压恒定的情况下,在一定的转数范围内转数与钻速成正比的关系。转数提高,会增加钻头在孔底破碎岩石的频率,提高进尺效率。用 $\varnothing 2.80$  m的滚刀钻头全断面钻进基岩地层,钻头回转所需的扭矩很大,这就要求钻机的输出扭矩大,只有钻机在低转数运转时才能获得较大的扭矩。在钻孔施工过程中,所选用的施工钻机在获得较大的扭矩时的输出转数在4~8 r/min以内,此时,钻头外沿的线速度为0.58~1.17 m/s,滚刀的自转数<100 r/min,满足一般规定的安全要求。钻孔施工基本上都是用低速完成的,也试图采用提高转速的方法提高钻进效率,但都未能达到预期的目的。ZYD-300型钻机和JT-300型钻机施工时,使用过12~16 r/min钻进,钻具震动明显加剧,钻杆摇摆,整个钻架左右晃动,短时间获得了一定的进尺,但极易发生孔内事故。同时发生孔内上返气泡的现象,提钻检查发现,有的钻杆连接螺栓松动,导致密封圈失效,压缩空气中间泄露,无法正常钻进。KPG-300型钻机在使用高转速钻进时,因钻具强度高,未出现问题,液压系统出现卸载保护现象。同时转数过高钻进时,还会引发其他一些不良现象,比如钻头滚刀的自转超过100 r/min时,会缩短滚刀轴承和密封的使用寿命;TM60硬质合金刀齿由于转速高而引起冲击疲劳使硬质合金早期折断或崩刃而失效,降低了滚刀的使用寿命;转速过高,钻头运转不平稳,还会带来一些其它孔内事故。

## 5.3 泥浆循环量的确定及空压机的选择

泥浆在大直径钻进施工中的重要作用,一是维护孔壁的稳定,保证钻孔施工的顺利进行;二是排除岩渣,清洁孔底。钻孔进尺时,泥浆必须及时把钻头

破碎下来的钻渣携带走,避免在孔底重复破碎,才能实现最佳的钻进效率。泥浆的循环量直接影响钻孔排渣能力。

泥浆冲洗量的确定:

$$Q = 2828d^2V$$

式中:  $Q$ ——需要的冲洗液量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $d$ ——钻杆内径,  $d = 0.301$  m;  $V$ ——泥浆在钻杆中的上返速度,  $V = 2.5$  m/s。

则  $Q = 2828d^2V = 2828 \times 0.301^2 \times 2.5 = 640.55$   $\text{m}^3/\text{h}$ 。

提升单位体积泥浆压风消耗量:

$$V_0 = (K_1\gamma h) / \{231\lg[(\gamma H_0 + 10)/10]\}$$

式中:  $V_0$ ——提升单位体积泥浆的压风消耗量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\gamma$ ——泥浆密度,  $\gamma = 1.2$   $\text{kg}/\text{cm}^3$ ;  $K_1$ ——系数,  $K_1 = 2.17 + 0.164h = 3.48$ ;  $h$ ——扬程,  $h = 8$  m;  $H_0$ ——压风管埋入深度  $H_0 = [(P_{\text{压}} - \Delta P)/\gamma] \times 10 = 58.33$  m;  $P_{\text{压}}$ ——供风压力,  $P_{\text{压}} = 8$   $\text{kg}/\text{cm}^2$ ;  $\Delta P$ ——供风管路压力损失,  $\Delta P = 1$   $\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

则:  $V_0 = (3.48 \times 1.2 \times 8) / \{231\lg[(1.2 \times 58.33 + 10)/10]\} = 1.60$   $\text{m}^3/\text{m}^3$

每台钻机钻孔施工,循环泥浆所需的供风量  $V = QV_0/60 = 17.08$   $\text{m}^3/\text{min}$ 。

所以每台钻机钻孔施工选用一台供风量为22  $\text{m}^3/\text{min}$ 、排气压力为8  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (0.8 MPa)的空压机,供风富余系数为22/17.08 = 1.29,满足钻孔施工的要求。钻孔施工过程中,选择了表2所列的几种型号的空压机。

表2 选用的几种型号空压机的性能参数

型号	排气量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	排气压力/MPa	主机功率/kW	生产厂家
BES760	21.5	1.4	185	北京复盛机械有限公司
L22/7	22	0.7	132	济南空压机厂有限公司
VHP750E	21.5	1.2	160	上海英格索兰压缩机有限公司

影响气举反循环钻进的重要参数即为送风量,送入混合器风量的大小直接影响到钻杆内三相流的密度,即实现气举反循环正常所需要的压力差,进而影响到泥浆的循环量及泥浆在钻杆内的上返速度。在空压机送风量一定的情况下,排气压力越大,混合气在钻孔内埋入的深度也越大,随着混合器埋入深度的增加,钻杆内外形成的压力差也越大,泥浆循环量随之增加,提高了泥浆循环的排渣能力。实际钻孔施工过程中,KPG-300型钻机在微风化泥岩地层中钻进,其它条件相同的情况下,使用L22/7型空

压机循环泥浆排渣,混合器的埋入深度在60 m以内,进尺效率为0.15 m/h。使用BES760型和VHP750E型的空压机,混合器的埋入深度可达90 m,获得进尺效率为0.25 m/h以上。在上部砂层等松散地层中钻进时,过大的泥浆循环量,会造成钻头的围圈与孔壁的环状间隙泥浆的流速过大,对孔壁造成冲刷,不利于孔壁的稳定。

#### 5.4 钢护筒内钻进方法

设计要求在护筒内使用 $\varnothing 3.20$  m的钻头钻进,以保证钢护筒内壁不能附着有地层的砂土,更好地保证钢护筒参与灌注桩的承载力。考虑到钢护筒的椭圆度和钢护筒沉放时的垂直度的偏差,不能保证 $\varnothing 3.20$  m的钻头顺利通过,施工过程中采用在 $\varnothing 2.80$  m钻头的基础上加设活动翼板和钢丝刷的方法进行改制。在 $\varnothing 2.80$  m钻头的外围圈加设活动翼板,使钻头直径达到3.0 m,活动翼板与 $\varnothing 2.80$  m钻头的外围圈使用M32 mm的螺栓固定。在活动翼板外侧固定钢丝刷,使钢丝刷外端所在的直径达到3.2 m,钢丝刷用 $\varnothing 28$  mm的钢丝绳焊制。使用 $\varnothing 3.20$  m的钢丝刷钻头钻进至设计标高(钢护筒底角位置),提钻拆除活动翼板,再恢复正常钻进 $\varnothing 2.80$  m钻孔。通过钢丝绳的柔性来调整钻头的直径,以满足护筒的椭圆度和护筒垂直度偏差的要求,同时又保证钢丝刷能够刷除钢护筒内壁附着地层的砂土。经超声波仪器检测,钻孔直径与钢护筒内径

一致,钢护筒内壁未附着地层砂土的痕迹,满足了设计要求。

## 6 结语

(1)大直径钻孔工程施工选择主要施工设备时,必须根据钻孔参数(孔径、孔深、垂直度)及施工区域的工程地质情况来确定。主墩钻孔施工前期投入的ZYD-300型钻机和JT-300型钻机在设备能力上不能完全满足工程对质量、安全、工期的需要,后来经过重新调整选择才保证主墩钻孔施工的顺利进行。

(2)钻进工艺参数——钻压、转数、泥浆循环量是钻孔施工作业中的重要参数。钻压是保证获得理想进尺效率、保证钻孔垂直度的关键因素。钻压一定、设备能力允许的条件下,在合理的转数范围内,可以通过提高转数获得进尺效率。钻压不足时企图用提高转数的方法来获得高进尺,不能取得理想的效果。泥浆循环量是钻孔施工中取得进尺效率的保证,在软岩地层、易糊钻地层中较易钻进,必须有足够的泥浆循环量把破碎下来的钻渣及时携离孔底排至地表,才能获得理想的进尺。

## 参考文献:

- [1] 靖向党. 钻孔工程[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.

(上接第47页)

以及双曲线法的误差多数分布在0.5%~2%之间,误差相对较高。而基于遗传BP神经网络的龚帕斯预测模型的预测误差均低于0.5%。

另外,预测精度除了受模型样本的影响,还受遗传算法反演模型参数时目标函数的构造、选择率、交叉率等参数的选取以及BP神经网络的结构影响。

## 3 结论

(1)针对人工神经网络学习过程的收敛时间过长,易陷入局部最小,以及搜索能力较差的特点,在人工神经网络的学习过程中,应用遗传算法对神经元连接权值进行动态调整,能有效提高神经网络学习速度,增强网络的搜索能力,获得全局最优解。

(2)基于遗传-神经网络沉降预测方法,采用龚帕斯曲线来分解沉降时序,利用沉降趋势线偏移量来训练网络。与传统的沉降预测方法相比,该方法能有效提高预测精度,在软基处理沉降预测方面有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 陈国良,王煦法,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.
- [2] 吴大志. 高速公路路基沉降计算方法[D]. 长沙:中南大学,2000.
- [3] 雷英杰,张善文,李续武. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005. 8-28.
- [4] 钟才根,丁文其,等. 神经网络模型在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. 中国公路学报,2003,16(2):31-34.