

# “软土路基沉降控制设计新方法”的工程验证与分析

朱兆芳 谷李忠

(天津市市政工程设计研究院)

**摘要:**介绍了“软土路基沉降控制设计新方法”的主要内容和特点,以及该方法在唐津高速公路沉降观测段的试验验证结果。

**关键词:**软土地基 路基沉降 工程验证 分析

## 1 概述

软土在我国沿海、内陆分布较广,天津地区软土也分布甚广。由于其具有低强度、高压缩性、透水性差及变形持续期长等特点,因而软土基的工程设计与施工技术一直为工程界关注。二十世纪八十年代以来,随着公路建设快速发展,全国各地结合工程对软土路基的设计与施工技术进行了广泛试验研究与理论研究,并取得较丰富的实践经验。在八十年代初,天津在位于典型厚软土地区的经济技术开发区修建道路工程实践中,提出了天津地区软土地基上修筑路堤的加固设计方法,并取得了成功;八十年代末,天津与全国一样,也开展了较大规模的高等级公路建设,结合京津塘高速公路的实践对软基处理设计与施工也开展了广泛试验研究,但缺乏系统的成熟的理论计算分析方法,设计与施工存有很大的经验性、盲目性,往往耗资大,工程质量很难保证。

近年来,西安公路交通大学对全国软基实践进行了系统研究,并提出了一套理论上合理、使用较简便的软土路基沉降控制设计新方法。

自1996年起,院、校联合对“软土路基沉降控制设计新方法”进行长达四年的攻关研究,主要成果如下。

## 2 “软土路基沉降控制设计新方法”的主要内容及特点

针对天然及用排水固结法处理的软土路基沉降控制设计问题,从土中一点在任意时刻的变形

条件出发,提出了路基多维非线性沉降计算方法,并合理地解决了土体多维固体理论方法的工程实用计算问题。与国内外现有方法相比较,该课题具有如下创造性和先进性。

(1)首次从土中一点在任意时刻的变形条件出发研究路基沉降过程,从而正确地反映了加载速率、加载方式、土体应力历史以及基底附加应力随沉降的变化等影响因素。

(2)克服了现有方法在计算沉降时间曲线时存在的应力固结度与应变固结度不相等的问题,保持了理论方法本身的推理严密性。

(3)根据土体任意时刻的应变与有效应力一一对应的关系,建立饱和土地基一维和多维非线性沉降公式,提出了土中一点应力固结度的计算公式。

(4)针对地下水位下土体当液性指数为 $0 < I_L < 1$ 的情况,提出了土中自重应力的理论计算公式。

(5)所提出的方法理论上严谨,公式简便,所需试验参数少而易通过试验取得。此外,该课题还对软土路基沉降线性分析方法和有限元数值模拟分析方法进行了研究,并编制了相应的应用软件,以供工程中在资料缺乏或一些特殊情况下选用。

该课题软土路基沉降分析新方法应用于天津地区以及国内其它地区五处工程20余个路基断面进行计算,并与实测结果比较表明,该方法具有良好的工程适用性,而现有软基规范方法则误差较显著。

由于该题方法反映了软土路基沉降的普遍规律,因而可望在国内外软土路基沉降控制设计中得到普遍推广应用,预期将大大减少工程设计的

朱兆芳:天津市市政工程设计研究院副总工程师,教授级高级工程师

盲目性,降低地基处理及工后养护费用,具有十分显著的经济效益和社会效益。

### 3 “软土路基沉降控制设计新方法”的工程验证与分析

该课题主要结合具体工程对提出的理论方法开展软土路基沉降现场观测,进行广泛验证研究,现将天津唐津高速公路 K8+020~K9+000 路段及清河农场互通立交匝道引路路基沉降测试结果及分析分叙如下。

#### 3.1 唐津高速公路清河农场互通式立交匝道引路沉降测试及分析

沉降观测段位于唐津高速公路天津段清河农场互通式立交匝道桥南北两端各 200 m 引路上。该路段地势平坦,地下水位埋深约 0.5~1.0 m 左右;地质分层及土性指标见表 1。根据地质钻探资料,该路段地基软土层厚度约在地面下 11.0 m

范围内,压缩模量为 2.14~3.15 MPa;其下土体压缩性较低,压缩模量为 8.3 MPa 平均静探阻力值约为上层软土层的 6~8 倍;在地表下 1~2.5 m 范围土体为素填土和杂填土,由于长期受地下水的浸湿,其强度很低,压缩模量与淤泥质粘土接近。

沉降观测段路基断面设计要素见表 2,其中北段 200 m 路段的路堤最大高度(包括路面)为 6.902 m,南段 200 m 路段的路堤最大高度(包括路面)为 6.752 m。路基填土加载历程见表 3。由于工程中多方面原因,实际填土加载过程与原设计有较大出入。

为了验证该课题提出的软基沉降分析方法,在沉降观测段十个不同路基高度断面布置了沉降板,用于观测实际填土加载过程中及工后路基的沉降规律。

表 1 地基土层典型土性指标

土层编号	土层名称	层厚 (m)	代表土层	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$e_0$	$E_s$ (MPa)	$C_{co}$ (MPa)	$\Phi_{1\sigma}$ (°)
1	$Q_{m3}$	1~2.5	粘土	18.77	28.57	0.89	2.14	13	24
2	$Q_{3al} \sim Q_{3m}$	4~4.5	淤泥质土	17.90	41.70	1.12	2.68	12	16
3	$Q_{3m}$ 中部	4.0	粉质粘土 夹淤泥土	18.58	34.33	1.09	3.15	8.25	20.44
4	$Q_{3i}$ 下部	5.0	粉土	19.99	23.04	0.76	8.30	14.25	28
5	$Q_{3al}$	6.0	粉质粘土	19.87	23.56	0.75			
6	$Q_{3^{3-4}al}$ 上部	4.5	粉土	20.14	21.40	0.66			
7	$Q_{3^{3-4}al}$ 下部	3.0	粉砂	20.44	20.70				
			粉细砂	20.67	19.08				
8	$Q_{2^{5-6}m}$	18.5 (揭示厚度)	粘性土 透镜体	19.61	25.85				

表 2 测设断面设计要素表

序号	断面桩号	路基宽度 (m)	设计路面高程 (m)	原地面高程 (m)	路基高度 (m)	反压护道		塑料排水板处理	
						宽度 (m)	高程 (m)	桩长 (m)	间距 (m)
1	F1+290	23	4.656	1.60	3.056	0	0	不处理	
2	F1+340	23	5.167	1.64	3.527	0	0	不处理	
3	F1+390	23	6.034	1.63	4.404	0	0	不处理	
4	B0+010	23	6.371	1.80	4.571	6	4.50	16.0	1.0
5	B0+050	24.5	7.432	1.80	5.632	6	4.75	16.0	1.0
6	B0+090	16	8.702	1.80	6.902	6	5.00	16.0	1.0
7	B0+310	16	8.702	1.95	6.752	6	4.969	16.0	1.0
8	B0+350	16	7.499	1.95	5.549	6	4.50	16.0	1.0
9	B0+400	16	6.435	1.98	4.455	6	4.50	16.0	1.0
10	B0+030	8.5	5.058	1.98	3.078	4.5	3.75	16.0	2.0

在十个沉降观测断面中,有3个断面对地基未作处理,其余断面对地基采用塑料排水板处理,路基两侧设置反压护道。路堤与地基之间均铺设50 cm厚度的砂垫层,沉降观测板是在铺筑砂垫层及其上打设塑料排水板后,才进行布设并开始观测的。由于打设塑料排水板施工持续了较长时间(约2个月),故50 cm厚度砂垫层自重引起的地基沉降有一部分未包括在实测沉降结果中。

根据沉降实测结果及道路通车后的营运情况,可看出如下几点。

(1) 由于路基施工前期,实际填土加载缓慢,所以,施工过程中,路基的实测沉降值较小,且沉降时间曲线变化平缓。

(2) 在路基施工后期,由于填土加载及路面施工期加快,给地基施工期内的排水固结留有的

时间较短,故路基工后的沉降较原设计为大。

(3) 该路段路基填土取自两侧原地基土。由于该土体含水量很高,且带有粉质淤泥土特性,路基施工压实较困难,因此引发填土路堤本身的压缩变形,增大路基顶面的工后沉降。此外,在路基两侧较近范围取土填筑路堤,相对使路基沉降有所增大,且不利于路基的稳定性。

### 3.2 唐津高速公路K8+020至K9+000路段路基沉降测试及分析

沉降观测段位于清河农场十二分场境内,三个观测断面的桩号分别为K8+020、K8+800及K9+000。该路段地势较平坦,灌溉干渠、支渠纵横交错,地下水位约为地表下1.5~4.5 m;雨季时,地表低洼处经常积水;地质分层及土性指标见表4。

表3 各测设断面路基填筑进程表

序号	观测断面	各时期内路基填高(m)							
		96年6月 1日之前	96.6.1- 96.11.30	96.12.1- 97.3.30	97.4.1- 97.9.30	97.10.1- 97.12.30	98.1.1- 98.3.30	98.4.1- 98.5.30	98.6.1- 98.8.30
1	F1+290		0.5		2.056				
2	F1+290		0.5		2.527				
3	F1+390		0.5		2.0	1.404			
4	F1+390	50 cm 砂	0.5	冬	2.0	1.571	冬		施作路面
5	B0+010	垫层和塑	0.5	季	2.0	2.0	季	0.632	结构和交
6	B0+090	料排水板	0.5	休	2.0	2.0	休	1.902	通工程及
7	B0+310	全部完成	0.5	整	2.0	2.0	期	1.752	附属设施
8	B0+350		0.5	期	2.0	2.0		0.549	
9	B0+400		0.5		2.0	1.455			
10	C0+030		0.5		2.0	0.708			

表4 地基土层土性指标

层号	层厚 (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$e_0$	$I_L$	$C$ ( $\times 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> /s)	$E_s$ (MPa)
1	2.5	19.1	24.2	0.805	0.06	9.33	9.33
2	2.0	17.8	32.1	1.045	0.33	2.52	3.25
3	1.0	19.0	32.0	0.910	0.59	2.95	3.55
4	1.0	17.7	44.8	1.260	0.86	0.39	2.32
5	3.0	18.0	40.5	1.130	1.29	0.62	2.78
6	1.0	18.6	36.1	1.010	0.97	0.62	2.78
7	1.0	18.4	38.8	1.060	1.24	0.69	3.63
8	1.0	18.5	33.7	0.970	0.92	0.69	3.63
9	1.0	19.1	35.1	0.910	1.66	1.68	4.65
10	1.0	19.3	30.1	0.830	1.02	1.68	4.65
11	2.0	20.4	21.3	0.600	0.91	3.60	5.79
12	1.0	18.8	34.9	0.960	1.01	2.00	2.92
13	1.0	19.3	38.8	0.980	0.61	2.00	2.92
14	1.7	18.8	30.2	0.910	0.48	2.20	6.05
15	1.3	20.4	22.2	0.610	0.60	3.80	7.54
16	1.0	20.3	25.2	0.680	0.42	3.80	7.54
17	2.5	20.0	23.1	0.660	0.93	6.00	11.65

根据地质钻探资料,该路段地表存在约 2.5 m 左右厚的人工填土层,主要以素填土为主,土较均匀,工程性状较好,压缩模量  $E_s = 2.32 \sim 5.79$  MPa,固结系数  $C_v = 0.39 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 。软土层下面 8.5 m 厚为中等压缩性的粉质粘土,土质不均匀,交错夹层较多。

该路段路基宽度为 26 m,路基边坡 1:2,填料为素土,容重为  $18 \text{ kN/m}^3$ ,地基未作处理。K8+020、K8+800、K9+000 三个断面路基填筑高

度分别为 4.849 m、3.133 m、4.343 m。该沉降观测段从 1994 年 12 月至 1996 年 10 月进行了路基填筑和地基沉降观测。三个观测断面的填土速度分别为  $0.037 \text{ m/d}$ 、 $0.034 \text{ m/d}$  及  $0.037 \text{ m/d}$ 。由于填土速率较小,故瞬时沉降小,路基沉降实测值均明显小于按软基规范的计算值。

### 3.3 计算分析与实验验证

(1) 唐津高速公路清河农场互通式立交匝道引路沉降实测值与理论计算值的比较。

该路段典型断面的地基土性参数见表 1,其

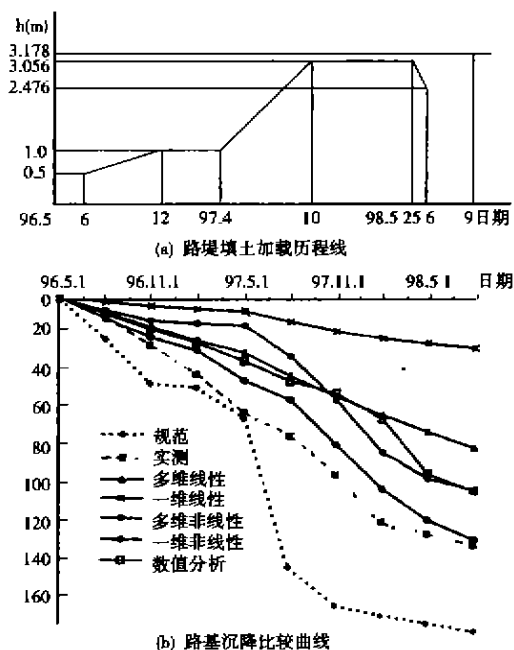


图 1 F1+290 断面软基沉降曲线

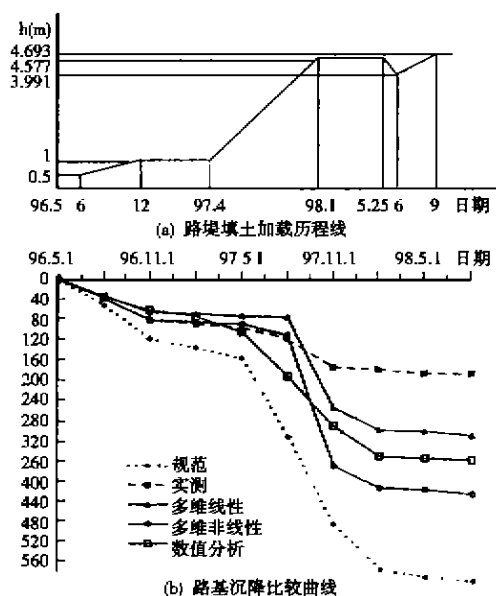


图 3 B0+010 断面软基沉降曲线

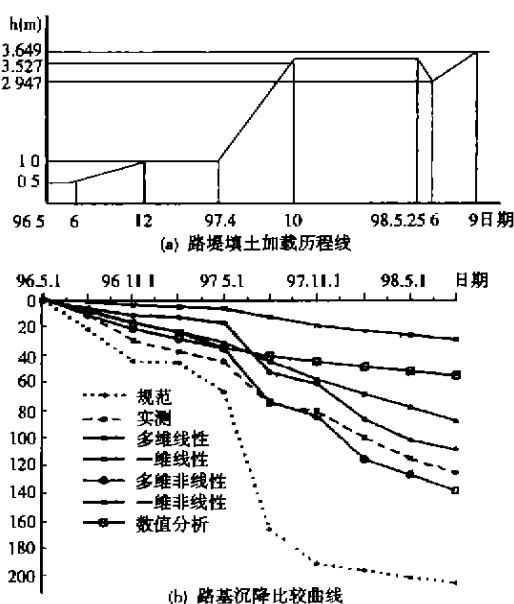


图 2 F1+340 断面软基沉降曲线

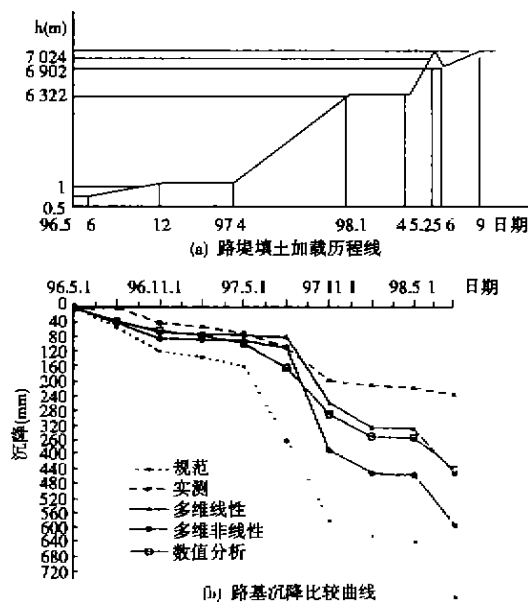


图 4 B0+090 断面软基沉降曲线

中泊松比  $\mu=0.30$ 。三轴不排水试验  $\epsilon\%-q/p_1$  曲线初始段斜率倒数  $ad=0.01$ 。压缩指数  $CC$  的取值采用分段压缩曲线的近似解决办法,这样既反映了土体应力历史的影响,又避免了实际工程中的困难;超固结比  $OCR$  取为 1。地基按单面排水情况考虑,压缩层厚度由程序自动选取。各断面实测值与理论计算值的比较曲线如图 1~图 5 所示。

由各图可见,现行软基规范法与实测值的差距较大;数值分析法得出的结果在规律上与实测

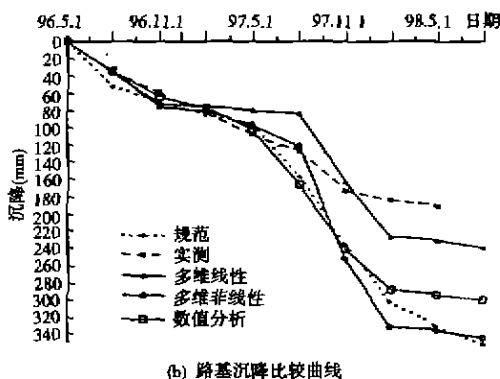
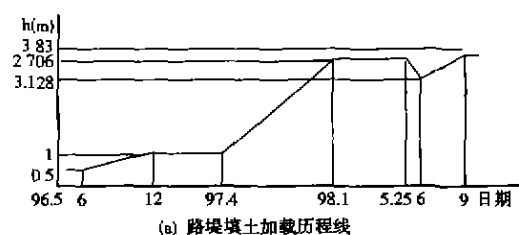


图 5 C0+030 断面软土沉降曲线

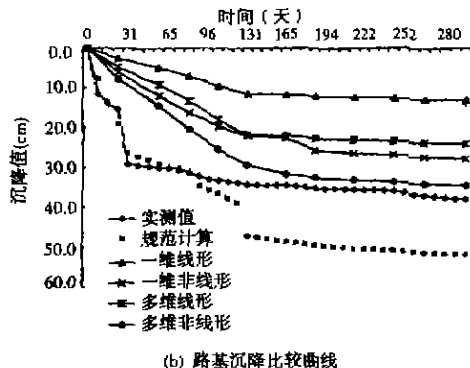
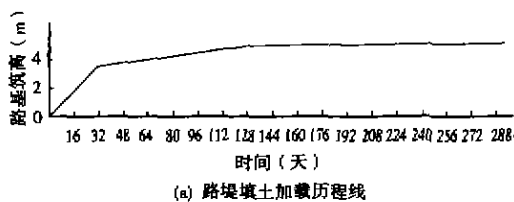


图 6 K8+020 断面软土沉降曲线

曲线接近,由于采用了线弹性应力应变本构关系,故较实测值偏小。在塑料排水板处理地基情况下,由于实测值未能包含 50 cm 砂垫层引起的沉降,以及其它原因,故数值分析结果及理论计算值较实测值偏大。在该课题四种理论公式法中,采用多维非线性方法,得出的结果与天然地基情况下的实测值较为接近。

(2) 唐津高速公路 K8+020 至 K9+000 路段沉降实测值与理论计算值的比较。

该路段地基土质资料见表 4,其余计算参数选取同清河农场立交沉降段类似。对地基按单面

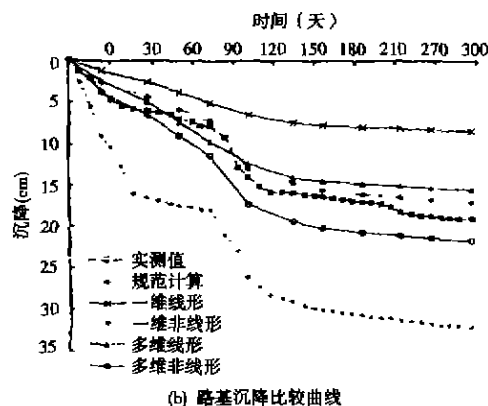
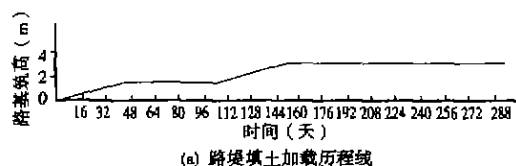


图 7 K8+880 断面软土沉降曲线

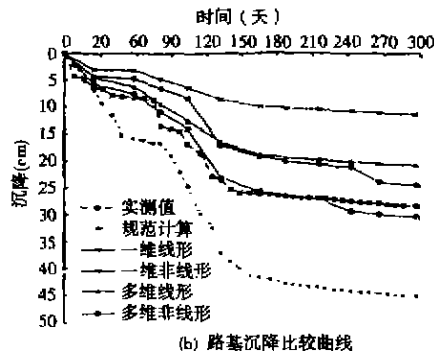
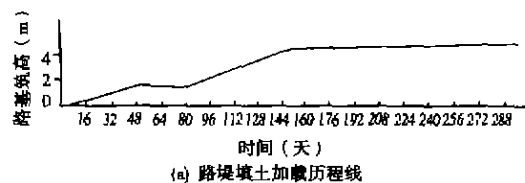


图 8 K9+000 断面软土沉降曲线

# 迈向“交通现代化”

杨佩昆

(同济大学)

**摘 要:**本文回顾了“交通现代化”的演变,其中提到了“交通需求管理”的理念和信息化、智能化交通系统的发展趋势;探讨了当代和新世纪近几十年“交通现代化”的展望;综合了“可持续发展”的时代要求,“交通需求管理”的理念和交通信息化、智能化的发展,把当代“交通现代化”概貌归纳为“交通集约化”和“交通有序化”;提出了迈向“交通现代化”的建议,包括提高干道网密度、干道机非分流、改造传统交叉口、发展现代公交系统和逐步发展交通信息化、智能化等五个方面。

**关键词:**交通现代化 可持续发展 交通需求管理 信息化、智能化交通系统

## 1 “交通现代化”演变概要

二十世纪二战后,为振兴经济、改善国防,以美国为首,高速公路建设得到蓬勃发展,成为当时并延续了一段时期的“交通现代化”的象征。

五、六十年代,汽车交通量的剧增,使人们感觉到汽车对环境污染的严重性,兴起了降低交通污染、保护环境的研究。随着人们生活水准的提高,环境保护越来越受到人们的重视。同时随着当时电子计算机的普及、自动控制技术以及系统工程、运筹学等学科的发展,交通工程领域各方面得到全面的发展:运用应用数学、物理学研究交通流现象的广泛成果,形成了交通流理论;计算机的应用,在交通规划方面,出现了交通数据处理、交通需求预测算法等的研究与运用,开创了定性规划方案和定量交通需求预测与方案评价计算的交通规划方法;同时还出现了运用计算机的交通仿真技术;交通信号方面,兴起了交通信号计算机自动控制系统的研究等等。

七十年代,人们在治理交通的实践中,认识到

增建道路交通设施、增加道路交通容量是永远也满足不了交通需求的增长的。逐步形成了“交通需求管理”的观念与方法。这是交通规划与交通治理观念上的一次划时代的变革,从历来由增加道路交通容量来满足交通需求增长观念,转变为对交通需求要加强管理以适应道路交通设施容量的观念。“交通需求管理”的根本理念是:引导人们采取科学的交通行为,理智地使用(不滥用)道路交通设施的有限资源,(把限制汽车拥有与出行的措施,看成是交通需求管理的主要措施,是对交通需求管理基本理念的一种曲解)。“交通需求管理”的主要措施是引导人们改变出行方式,发展轨道交通,开辟“大容量车辆车道”、提高公共交通服务水平并配以停车收费政策等,吸引人们把小汽车(及其他个人交通工具)出行改为小汽车换乘轨道交通、公共交通的出行方式,以减少道路上的小汽车交通;其中还包括正在研究中的“道路拥挤定价与收费方法”,籍以改变当前人们滥用道路资源的陋习。“交通需求管理”观念的提出,配上对环境保护的越来越高的要求,兴起了对各类大中型轨道交通工具的研究与运用。

八、九十年代,“智能交通系统(ITS)”成为各

排水情况考虑,理论计算值与实测值的比较如图6~图8所示。三个比较图再一次反映了多维非线性方法计算值和实测值接近程度较好。

## 4 结论

通过天津唐津高速公路软土路基沉降观测及分析,验证了“软土路基沉降控制设计新方法”,并

完善了新方法。该方法是符合软土路基沉降规律的,课题还提供了应用软件。2001~2005年期间,全国高等级公路将掀起建设高潮,该方法将大大提高工程质量,节约工程投资,同时还可高等级公路软土路基沉降控制设计提供良好的技术手段,取得明显的经济效益。

(收稿日期:2001-01-15)

杨佩昆,同济大学教授