

文章编号: 0451-0712(2005)09-0081-06

中图分类号: U416.1

文献标识码: B

珠海市公路软基处理技术浅谈

温武贤, 周华云, 谢应梅

(珠海中港路桥建设有限公司 珠海市 519000)

摘 要: 以珠海市建成的公路软基处理及沉降观测资料为基础, 分析指出地基处理不可能消除工后沉降, 选择地基处理方法应与地基条件、路堤高度相结合, 不同处理方法均需足够的预压, 地基沉降规律较符合双曲线关系, 工后沉降会引起横坡改变, 加筋土桥台是消除“三孔”跳车现象的有效方法。

关键词: 公路; 软土地基; 处理技术

1 珠海市公路软基处理发展过程概述

珠海地区高路堤软基处理的主要目的是减少高路堤工后沉降量, 路堤稳定性是地基处理的重点。

自1986年珠海市第一条一级公路——国道105

珠海段公路开始修建以来, 至今已有省线S111港湾大道段、珠海大道及珠港大道等高等级公路相继建成或处于工程建设之中。表1列出了各条高等级公路的最大路堤高度与局部路段曾使用的地基处理方法。

表1 珠海市高等级公路建设情况一览表

工程名称	长度/km	路堤最大高度/m	平均高度/m	建设期	地基处理	备注
105国道珠海段	11.6	4.5	2.7	1986-07~1988-10	粉煤灰填筑, 砂井, 堆载预压	多数欠载预压, 部分试验路超载预压
港湾大道	30.59	7.5	3	1991-10~1993-12	粉煤灰路堤, 砂井, 塑料排水板	等载预压为主
珠海大道	45	8.9	3	1994-02~1997-12	粉煤灰路堤, 粉喷桩	粉喷桩处为欠载预压
珠港大道	26	7.5	4.3	2000-08~2003-10	粉煤灰路堤, 粉喷桩、钢渣桩	粉喷桩处主要是欠载预压
南新公路	16	7.5	4	2002-12~2004-01	粉煤灰路堤, 塑料排水板, 粉喷桩、钢渣桩	

1986年105国道主要采用袋装砂井处理软土, 最大路堤高度控制在4.5 m以下, 在部分试验段进行了超载预压, 多数路段为欠载预压, 且预压时间不

足。试验路还进行不同砂井间距的对比, 在不同间距砂井处理段之间设过渡段。有些路堤采用粉煤灰填筑, 约减少了路堤自重的1/4。1991年港湾大道一级

收稿日期: 2005-05-10

method, mechanistic-empirical method and reliability design method. The random and fuzzy quality in the load, environment and design parameters will affect the reliability of pavement structure. In order to develop design theory more reasonable, the current design specification code of cement concrete pavement is systematically analyzed and the definition of reliability of pavement structure discussed. On the basis of the fuzzy-random reliability, the design formula for the fuzzy-random reliability of pavement is established and the variability of various design variables is discussed. Last, the detailed design steps and the practical design process are put forward.

Key words: cement concrete pavement; fuzzy-random reliability; design method

公路仍采用袋装砂井处理,同时进行了塑料排水板试验,在堆载方面强调超载预压的技术措施。神前立交采用全粉煤灰路堤试验,地基采用砂井处理,最大路堤高度达 7.5 m。1994 年珠海大道东段大规模采用粉煤灰路堤,地基用粉喷桩处理,最大路堤高度达 8.9 m;此外还进行了不处理地基条件下的超载预压试验;为解决“三孔”跳车,首次试用加筋土桥台,以期保证桥台与路基的同步沉降,减少差异沉降。2000 年珠港大道地基主要采用粉喷桩处理,并对钢渣桩进行了试验。2003 年南新公路动工修建,在地基处理方面总结以往经验,根据软土层厚度分别采用塑料排水板、粉喷桩、钢渣桩等处理技术,并进一步使用超载预压,采取综合处理、因地制宜的技术方案。

2 珠海市软土地基特性

珠海市的地基主要为沿海软土层。从高路堤的工程特性来看,影响沉降量及工后沉降的主要土层为:褐黄色粉质粘土②(俗称“硬壳层”);淤泥质土③、④;暗绿色粉质粘土⑥等。根据该 3 类土层的分布及厚度,珠海的地基土主要分为 2 大类:一类地基

“硬壳层”厚度一般在 2~3 m 左右,淤泥质土厚度达 10 m 以上,暗绿色土层埋藏较深或缺失,该类地基采用砂井等竖向排水固结法或粉喷桩法无法打穿淤泥质土层,地基土的压缩变形量大;另一类地基“硬壳层”一般较厚,淤泥质土层不厚,暗绿色土层埋深浅,该类地基可采用打穿软土层的处理工艺,地基土的变形量较小。图 1 根据珠海市几条高等级公路的地质资料绘制而成,可以看出珠海市地基土的厚度存在较大的差异。表 2 为 3 类土的主要物理力学指标。

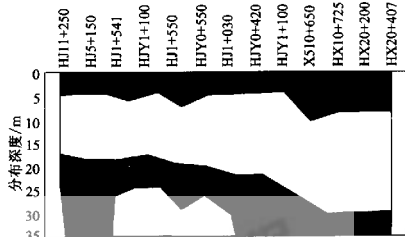


图 1 珠海市软土层厚度分布

表 2 珠海地基土主要土体物理力学指标

符号	土名	孔隙比 e	天然含水量 / %	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 MPa^{-1}	压缩模量 kPa	天然密度 kN/m^3	抗剪强度 (固快)	
									$\varphi / (^{\circ})$	c / kPa
②	褐黄色硬壳层	0.9~1.06	26.5~38	7~16	0.6~1.1	0.14~0.33	4~6	18.5	20~27	11~22
③	灰色淤泥质粉粘土	0.96~1.3	40.6~49	14~15	1.5~1.67	0.62~0.88	2.5~3.1	17~17.6	15~17	13

3 高路堤软基处理总体评述

3.1 软基处理不能完全消除工后沉降

在目前有限的施工期内,堆载时间不可能很长,要通过地基处理来完全消除工后沉降是不现实的,施工后修补不可避免。高路堤软基处理不能完全消除工后沉降包括 2 层含义:一是工后沉降不可能为 0;二是工后沉降不能满足地基处理设计的控制标准。珠海地区高等级公路工后沉降控制指标为:路桥连接段高路堤控制工后沉降量为 10 cm;结构物之间的高路堤段控制工后沉降量为 30 cm。根据珠海市 105 国道、港湾大道及珠海大道等几条高等级公路建成通车后 3.5~8 年内高路堤的沉降观测资料,工后沉降量基本都超过 10 cm,最大的工后沉降量超过 50 cm,只有砂井打穿软土层后的路堤工后沉降

量不大于 10 cm。表 3 列出了部分路段的工后沉降观测结果。

从珠海市公路建成以来历年不断修补的事实来看,105 国道自通车第 1 年就进行桥头沉降处理,连续 4 年以上,每年都要进行修补;港湾大道自通车后第 2 年也开始桥头沉降处理,到 1997 年,部分桥头已进行过 2 次处理,1998 年 6 月以后,开始对几座沉降较大的桥接坡进行罩面处理;珠海大道工程在通车不到 1 年的时间内就对前山高架路堤接坡进行了修补,通车 3 年内先后对其他 2 座桥接坡进行了罩面处理,通车 5 年后,路堤沉降基本稳定。这说明,采用地基处理后不可能消除工后沉降,施工后修补不可避免。

3.2 选择软基处理方法应与路堤高度、地基条件相结合

表3 珠海市几条公路工后沉降量

公路名称	105国道珠海段				港湾大道				珠海大道			
位置	K1994+030	K1994+486	K1994+541	K1997+465	神前立交	港塘塘桥	马溜河桥	庙前新桥	K2+400	K2+550	K2+938	K3+190
时间范围	1988-10~1996-12	1988-10~1996-12	1988-10~1996-12	1988-10~1996-12	1993-12~1996-06	1993-12~1996-06	1993-12~1996-06	1990-12~1993-06	1997-12~2004-10	1997-12~2004-10	1997-12~2004-10	1997-12~2004-10
路堤高/m	3.37	3.22	3.22	3.67	7.56	4.3	4.2	3	8.6	6.2	4.1	4.5
沉降量/cm	4	8.6	16.6	28	>24	>14	>19	>16	22	17	3	5
地基处理	砂井,超载(打穿)	天然粉煤灰,等载	天然粉煤灰,等载	砂井,填浜(未打穿)	粉煤灰,砂井(未打穿)				粉煤灰,粉喷桩(未打穿)	粉煤灰,粉喷桩(未打穿)	粉煤灰超载	粉煤灰,超载

10多年来,珠海先后进行过袋装砂井、塑料排水板、粉喷桩、钢渣桩及超载预压等地基处理方法的实际工程应用,从减少工后沉降的实践来看,各种软基处理方法在不同的路堤高度、不同的地基条件下,减少工后沉降的实际作用差异较大,具体表现为:(1)同一种方法在某一路堤高度范围内效果较佳;(2)路堤高度不同,处理方法的效果相比较存在差异;(3)地基条件不同,不同处理方法的效果也存在差异。

图2为港湾大道、105国道珠海段及珠海大道路堤工后沉降量与路堤高度的散点关系。港湾大道公路自神前立交至马溜河桥范围内路堤高度大多大于3 m,最大路堤高度达7.65 m,多数桥接坡采用砂井处理,工后沉降基本与路堤高度成比例;105国道公路自中山路至上冲段路堤高度在2~4 m之间,部分路段桥接坡采用砂井处理,从总体上看,工后沉降与路堤高度成比例增加,个别情况路堤接近4 m而工后沉降量小于10 cm、路堤高度只有2 m而工后沉降量大于10 cm;珠海大道为粉喷桩加固地基,在路堤高度大于4 m的情况下,工后沉降量与高度成比例,且都大于10 cm,这说明不同地基处理方法的技术效果与路堤高度有关,还可以看出,当路堤高度达到4~5 m以上时,选用砂井与选用粉喷桩的处理效果相差不多。

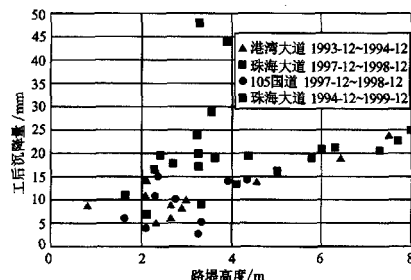


图2 工后沉降与路堤高度关系

万方数据

105国道珠海段与港湾大道的地质条件也有较大差别。105国道在近中山及上冲路段,软土层厚度在10 m左右,14 m深可见暗绿色土层,该路段砂井打穿软土层,因而工后沉降量较小,3.3 m高度路堤在施工后2年内沉降量小于5 cm;港湾大道公路近神前段软土层厚度达15~20 m,采用砂井处理的路段一般经过18个月的等载预压,不少3 m以下路段施工后18个月的沉降量达10 cm;珠海大道软土层厚度为10~15 m,暗绿色土层缺失,粉喷桩处理,工后沉降量超过10 cm。这表明,在地基条件较好时,可选用砂井或粉喷桩等打穿软土层的处理方法,而软土层厚度大时,可采用较经济的砂井、预压处理方法。

3.3 软基处理需要足够的预压荷载和预压期

众所周知,天然地基与砂井需要一定的预压荷载和预压期,对粉喷桩、钢渣桩这一类柔性桩是否也需要预压荷载与预压期尚需论证。根据珠海大道与港湾大道公路的应用结果,粉喷桩处理地基仍需要一定的预压期。预压荷载分超载、等载与欠载3种类型。超载预压是减少工后沉降的有效方法,对于天然地基及砂井处理地基,应尽可能采用超载或等载预压形式。在105国道珠海段公路修建时,不少路段因工期紧,预压荷载达不到等载要求,因而工后沉降量较大,即使某些2.5 m以下高度路堤也不例外(图2);港湾大道公路普遍采用等载预压,预压期保持1年以上,因而工后沉降量相对105国道珠海段而言要小,个别路段因预压期不够,工后沉降量较大(图2);珠海大道工程对4~4.5 m高度粉煤灰路堤采用超载预压,预压时间为9个月,施工后18个月的沉降量小于5 cm,港塘桥与马溜河桥两侧桥接坡路堤由于预压时间短,工后沉降量达10 cm。对于粉喷桩处理软基的措施,较普遍的观点是沉降能很快稳定,预压荷载不强调等载或超载。然而在珠海大道工程中,粉喷桩段路堤荷载采用欠载预压,预压时间仅4个

月,4.2 m 高粉煤灰路堤施工后18个月沉降量达15 cm。可见,无论是砂井处理或者粉喷桩处理,保持等载预压是必要的。

预压期的确定比较复杂,一方面要考虑工后沉降技术标准;另一方面又要现实地考虑工期太长,确定施工期沉降稳定的标准非常必要。从几条公路建设的实际情况看,105国道珠海段公路建设期为3.5~4年,路堤预压期为3个月到2.5年;港湾公路建设期为5年多,路堤预压期一般为14个月;珠海大道工程建设期为2年,路堤预压期为4~9个月;珠港大道公路工程建设期为3.5年,路堤预压期为6~9个月。究竟预压多少时间较为合理呢?下面就等载预压作一简要分析。

当地基处理方式选定之后,地基的沉降规律就基本确定。比如,当砂井的间距、长度、直径、地基土类型确定后,地基固结规律就已确定,固结度仅与时间有关。表4中列出105国道珠海段、港湾大道等部分路段不同预压时间的固结度、沉降速率及工后沉

降量,可以看出,当预压时间达6个月时,沉降速率为0.35~1.61 mm/d,工后沉降量为17.8~62 cm;当预压时间达12个月时,沉降速率为0.2~0.53 mm/d,工后沉降量为13~29.3 cm;当预压时间达18个月时,沉降速率为0.11~0.32 mm/d,工后沉降量为8.5~22 cm。要使工后沉降量满足不大于10 cm的控制标准,预压期需要2年以上;在路堤大于6 m或地质条件差的路段预压时间需2.5~3年。从沉降过程看,当路堤超过临界高度时,沉降速率逐渐增大,满载预压一段时间后,沉降速率逐渐减小。沉降曲线上一般存在一个拐点,拐点之前,增加单位预压时间减少的工后沉降量很大,拐点之后沉降速率逐渐变小,增加单位预压时间减少的工后沉降量逐渐减小,因此预压时间至少应超过拐点。拐点上实际上是沉降速率变化最大的位置,部分路段拐点的时间见表4。达到拐点的时间一般要4~13个月,地质条件好,达到拐点的时间短,反之则长。

表4 不同预压时间的沉降速率及工后沉降量

公路名称	105 国道珠海段				港湾大道				珠港大道					
位置	K1+030		K1+541		K1+330		K1+360		K19+735		K20+520		K19+600	
路堤高/m	3.37		3.22		4		4		4.2		7.4		6.7	
指标	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	施工后沉降	沉降速率	工后沉降
6 个月	0.61	18.4	0.44	17.8	1.8	51	1.61	62	0.35	19.3	0.81	55.4	0.5	33
12 个月	0.29	13.3	0.20	13	0.5	25	0.53	29.3	0.2	15.3	0.35	29	0.35	24
18 个月	0.14	8.3	0.11	8.5	0.3	18.6	0.3	22.2	0.18	13.2	0.20	19.4	0.32	19
拐点时间	6		9		13		13		5		4		5	
地基处理	砂井,超载,打穿		天然粉煤灰		等载,砂井,未打穿		等载,砂井,未打穿		欠载,粉喷桩		欠载,粉喷桩		天然地基	

注:(1)沉降速率单位为mm/d;(2)工后沉降量单位为cm;(3)拐点时间的单位为月。

由此来看,要使工后沉降量满足或接近不大于10 cm的标准,等载预压18个月是完全必要的;在地基条件较好或路堤高度较低(小于3 m)时,预压时间可减少为1年;而地基条件较差或路堤高度较高(大于6 m)时,预压时间应增加到2年以上。以沉降速率达到0.1~0.2 mm/d作为路堤稳定和施工面层的依据,是符合地基沉降规律的。在等载预压条件下,工后沉降量达到不大于10 cm的控制标准也是可能的。争取合理的工期,予以合理的施工组织,确保必要的预压期,是降低工后沉降量最经济的措施。

3.4 桥台接坡软基处理长度应与路堤高度、地基条件及工后沉降相结合

桥接坡软基处理长度取多少,没有一个明确的选择标准,多数路段以50 m作为标准。从理论上讲,软基的纵向处理长度首先应保证减少工后沉降量的需要,其次要确保道路纵向线形的流畅。从实际情况来看,桥接坡路堤预压期普遍较短,施工后纵向沉降造成桥接坡段路面产生一个凹槽段,其纵向长度一般在30~50 m。在路堤高度大于5 m时,影响长度可达80 m,尽管产生这一现象的原因较多,但凹槽段的长度与形状变化不大,产生最大沉降处一般距离桥头10~15 m,在搭板的端部存在较大的折点。从施工后加罩处理层改善路面线形的实践来看,工后沉降量较小的桥接坡罩面长度为20~30 m;工后沉

降量在10~20 cm范围内的桥接坡罩面长度为50~60 m;工后沉降量超过20 cm的桥接坡罩面长度为80~100 m。由此看来,桥头接坡段软基处理的长度也应按路堤高度、地基条件及工后沉降等因素综合考虑,一般路段路堤高度在5 m以下时取50 m还是较为合理的。

桥头接坡段软基处理是否有必要设置长度渐变或间距渐变的过渡形式,应根据地质条件来定。对于软土较厚的地基,工后沉降较大,有无过渡段不会反映在路面线形的变化上。而对于处理深度能打穿软土层、工后沉降较小的情况,有必要设过渡段。事实上,当路堤达到一定高度后整体刚度较大,地基条件变化反应到路面上也是平滑过渡的。

3.5 路面横坡应增大0.5%~1%作为预留坡度

不处理地基及砂井处理地基,路堤断面沉降呈现锅底状;而粉喷桩处理后,断面沉降变得较为平缓。根据105国道、港湾大道等公路观测的成果,路面横坡改变随着时间与沉降的增大而增大,如图3所示。横坡与沉降成曲线关系,沉降小于100 cm时,曲线斜率较大;超过100 cm时,曲线斜率变小。当路堤高度大于6 m或当地基条件较差时,路堤总沉降量一般为120~160 cm,若工后沉降量为30 cm,通车后横坡变化约为0.5%;而路堤高度在4~5 m左右时,总沉降量一般为70~100 cm,若工后沉降量为30 cm,通车后横坡变化约为0.7%。105国道珠海段公路完工8年后的路面横坡变化一般在0.3%左右,少数路段达0.5%。可见,在施工时对路面横坡增大0.5%~1%作为预留坡度,当工后沉降引起横坡变化后,使横坡仍能满足设计要求。

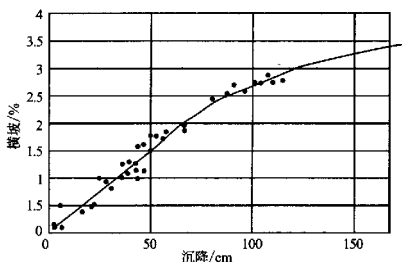


图3 沉降盆横坡变化与路堤沉降量的关系

3.6 关于地基沉降规律及最终沉降量推算

地基总沉降量的推算方法有双曲线法、指数曲

线法和双对数曲线法等,曾有不少文章探讨过珠海地区最终沉降量采用何种方法较为合理,从推算的结果看,对数曲线法最大,双曲线法次之、指数曲线法最小。从105国道珠海段公路工后沉降观测资料来看,沉降量与时间不完全呈单对数关系,在单对数图中曲线尾部略微逐渐变平,说明用单对数曲线预测工后沉降量略微偏大,可用双曲线推算;日本的观测资料表明,沉降量与时间呈单对数关系。而珠海市几条公路沉降曲线不完全呈单对数关系,但与对数曲线较为接近。从地质条件来看,日本的条件较差,105国道的条件相对较好,这说明地质条件越差,曲线越接近对数曲线(图4)。实际上,对数关系反映了地基的流变特性,这是软粘土固有的工程特性。

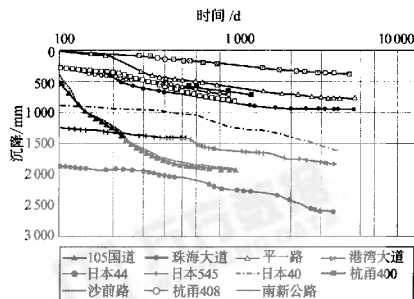


图4 沉降量与时间的关系曲线

3.7 关于砂井与粉喷桩布桩间距的设计

间距设计是砂井与粉喷桩地基处理设计内容之一。砂井间距受地基固结度控制,根据105国道和港湾大道的试验结果,砂井间距大于4.5 m后排水固结的作用已不明显。105国道珠海段的经验是,间距为3 m与1.5 m的布置方式能达到大致相等的固结效果,并且布桩间距越密沉降量也越大;同不处理地基相比较,砂井处理后可增加10%左右的沉降量,从沉降过程看,增加的该部分沉降是在施工预压期内产生的,并不对工后沉降产生影响。因此,可视具体地质条件,选用1.5~3 m的布桩间距。粉喷桩布桩间距受面积置换率控制,从桩长范围内复合体的模量来看,桩间距越小,模量越高,该范围内压缩量越小。但从路堤总沉降量来看,桩间距在1.4~1.6 m之间变化,总体沉降量变化不大,只是桩长范围内与桩端以下压缩量的相对比例发生了改变。桩距为1.4 m时,桩长范围内压缩量占总沉降量的10%;而桩距为1.6 m时,

桩长范围内压缩量占总沉降量的40%。从粉喷桩处理后总沉降量减少方面来看,基本能减少20%~30%,桩间距变化并不产生总沉降量较大的改变。粉喷桩间距通常采用1.5 m,尚有潜力可挖。

3.8 关于路堤临界高度

珠海市天然地基在低路堤(小于2.5 m)荷载作用下总沉降量不大,且沉降可很快稳定。根据105国道的经验,当填土在1.8 m高时,经15个月预压,沉降量稳定在10 cm以内;填土高度在2~2.3 m时,在2年时间内沉降量稳定在15~20 cm,曲线较平缓。因此,港湾大道施工中提出2.3 m作为最佳填土高度,在此高度范围内无需地基处理。105国道珠海段的沉降资料表明:路堤高度在1.5 m以下时,工后沉降量仅为3~4 cm;路堤高度在1.9~2.7 m时,工后沉降量为8~11 cm,大都满足或者接近工后沉降量不大于10 cm的控制标准;路堤高度达到3 m的桥接坡工后沉降量为14.1 cm,略超过10 cm。从地质条件来看,105国道比港湾大道好,不处理地基的临界高度也略有变化,一般将2.5 m作为一个平均的临界路堤高度还是比较恰当的。

粉喷桩处理后地基也存在“临界路堤高度”。对存在这一高度的原因不少学者做过分析研究,笔者认为地基的超固结特性应是主要原因。地表以下5~10 m范围内的地基土处于超固结状态,并且天然地基临界高度荷载与地基土先期固结压力相吻合。粉喷桩处理地基存在这一现象与天然地基有较大区别。桩土作为实体基础,当路堤高度达到临界时,实体与地基侧向摩阻力达到极限,桩尖产生刺入变形,桩尖以下淤泥质软土变形量较大,从而开始出现沉降量增大的趋势。根据珠海大道实测沉降资料,当路堤高度达3.5~3.8 m时沉降量有较大幅度增加。这说明粉喷桩处理后对3.8 m以下高路堤可较大幅度减少总沉降量,从而也较大地减少工后沉降量,但实际上对这样高的路堤采用粉喷桩处理并不经济。

3.9 加筋桥台技术可消除“三孔”跳车现象

高等级公路汽通、机通和人通(三孔)这三类横穿通道是引起跳车的主要构筑物,其数量在高速公路桥涵通道中占有相当高的比例。虽然这些通道接坡路堤高度较大中型桥涵低,但从105国道运营期

的养护情况看,不少“三孔”跳车现象严重,需进行多次单面处理。

鉴于这种情况,在珠海大道首次对平一路汽通和沙前路拖通采用加筋土桥台处理技术,彻底解决了因差异沉降而引起的跳车问题,在通车3.5年后2座通道仍无行车颠簸感觉。图5为2座通道工后沉降量曲线,可以看出,平一路汽通两侧路堤与桥台同步沉降;沙前路拖通加筋土桥台下沉较大,两侧路堤下沉较小,这是由于两侧进行过超载预压,而加筋土桥台未预压的缘故,尽管如此,行车无任何跳车感觉。事实证明,加筋土桥台处理技术是解决“三孔”跳车的一种可行方法,重要的是要确保“三孔”的净空。

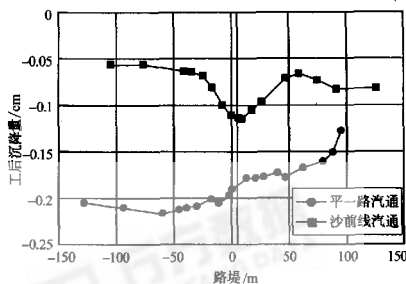


图5 加筋土桥台处理后“三孔”工后沉降量

4 结语

纵观珠海市高路堤软基处理10多年来的研究过程,围绕解决路桥连接处跳车现象,已先后尝试运用了砂井(包括塑料排水板)、粉喷桩、钢渣桩、超载预压、超载砂井联合预压等多种方法,从采用单一地基处理技术改为因地制宜、各种方法综合使用的措施。地基处理不可能完全消除工后沉降;路堤高度是影响工后沉降的重要因素,地基条件是影响地基处理效果的主要因素,在软土层厚度能打穿的情况下,应坚决打穿以充分发挥砂井或粉喷桩的作用。在软土层较厚的情况下,应采用超载预压加砂井联合处理方法;在路堤高度不大的地段,可采用超载预压不处理地基的办法。加筋土桥台处理技术是解决“三孔”跳车现象的有效方法,应该推广。