

大同一运城高速公路某软基复合地基检测 results 分析

毛新虎^{1,2}

(1. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 以山西大同一运城高速公路某段软基处理为例, 从挤密碎石桩的加固机理和破坏方式入手, 通过对软基复合地基的原位测试结果分析, 得出碎石桩不但提高了地基的承载力, 增加了桩间土的强度, 减少了地基沉降, 而且消除或减轻了地基的液化, 使复合地基承载力达到了设计要求, 特别是为以后在高速公路修筑中的软基处理提供了参考资料。

[关键词] 高速公路; 软基; 复合地基; 挤密碎石桩; 静力载荷试验

[中图分类号] TU473.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)01-0033-05

[作者简介] 毛新虎(1967—), 男, 山西夏县人, 高级工程师, 长安大学博士研究生, 现从事岩土工程与地质灾害研究工作。

自从20世纪60年代首次使用复合地基以来, 复合地基因其充分利用桩和桩间土共同作用的特有优势和相对低廉的价格在工程中得到广泛应用, 尤其是近几年在高速公路建设中经常会遇到天然地基不能满足高填路堤荷载的要求, 需要对地基进行人工处理, 以满足建设要求, 所以, 复合地基在软土路基处理中应用越来越普遍。碎石挤密桩加固技术是当前高速公路加固软基的主要手段之一, 随着新的施工方法和施工工艺的产生和发展, 挤密碎石桩加固软基的范围不断扩大, 如砂石土、人工填土、粉土及粘性土(包括饱和淤泥质土)等地基均可采用挤密碎石桩来加固, 同时挤密碎石桩的类型也在不断增加。在高速公路建设中, 用挤密碎石桩处理软基, 对其处理效果进行检测分析, 为以后公路软基处理提供参考资料很有必要。

1 场地工程地质条件

山西大同一运城高速公路某合同段立交桥枢纽工程被交道上MIK1+930~MIK2+013段为软基加固地段, 设计采用碎石挤密桩复合地基, 采用锤击双管

法进行施工, 设计桩长5.5~6.0 m, 桩径0.45 m, 以梅花型布置, 桩间距为0.55 m, 行距为1.20 m, 布桩密度为1.52根/m², 面积置换率为0.241, 处理后的复合地基承载力标准值应达到160 kPa。

据该段《岩土工程勘察报告》, 场区碎石挤密桩处理深度范围内的地层叙述如下:

①层耕填土: 黄褐色, 可塑, 上部含少量植物根茎, 厚0.40~2.30 m, 平均1.77 m。承载力标准值 $f_k=90$ kPa。

②层粉质粘土(Q₄¹): 暗褐色, 软塑—可塑, 湿—很湿, 厚0.90~5.30 m, 平均4.51 m。承载力标准值 $f_k=90$ kPa。

③层粉土(Q₄^{al}): 黄色, 松散—稍密, 很湿, 厚0.30~4.00 m, 平均5.62 m。承载力标准值 $f_k=100$ kPa。

④层粉细砂(Q₄^{al}): 黄褐—褐灰色, 松散—密实, 饱和, 以细砂为主, 粉砂次之, 矿物成分主要为长石、石英、云母等, 厚3.30~10.30 m, 平均12.18 m, 顶部承载力标准值 $f_k=150$ kPa, 下部 $f_k=250$ kPa。

2 挤密碎石桩加固机理及破坏形式

2.1 挤密碎石桩加固机理

碎石桩加固地基的实质是将天然地基转变为由碎石桩和周围土体共同组成的复合地基, 以提高

[收稿日期] 2003-04-08

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10071045); 山西省科技厅科技项目(200108)

地基的承载力,减少路基的沉降和沉降差。碎石桩桩体本身是散体材料,它之所以能成桩,完全是依据桩周土体对它的侧向约束作用,因此,碎石桩体必须与四周土体的变形相协调。桩体除作为地基土的一部分外,还具有支承作用,并且复合地基中的碎石桩是很好的排水通道,显然复合地基中碎石桩的作用主要是桩体作用、垫层作用和排水作用。

当碎石桩桩体进入相对硬层时,由于桩体材料的压缩模量远比软弱土的压缩模量大,由基础传给复合地基的外荷载随着桩土的等量变形而逐渐集中到桩体中去,软弱土负担的应力相应减少,碎石桩体发挥了应力集中的作用。当碎石桩桩体未进入相对硬层时,复合土层主要起垫层作用,垫层将外荷载在地基内引起的应力向四周扩散,使地基中应力趋于均匀,提高了地基下整体承载力。

复合地基中的碎石桩能发挥与砂井相同的排水作用,由于制桩过程中振动、挤压和扰动等因素的影响,使桩间土中出现了较大的附加孔隙水压力,桩间土的强度相应降低,当制桩结束后,随着土中孔隙水压力的消散,地基土的结构强度将不断恢复,在对复合地基加载过程中,桩体排水作用使土体中的超静水压力不断消散,有效应力和桩周土的强度不断增大,复合地基的强度也不断提高。需要指出的是,为确保排水的畅通,在用碎石桩加固时,要尽量减少粘料进入碎石桩体。

2.2 挤密碎石桩的破坏形式

碎石桩桩顶作用有足够荷载时,桩体将发生破坏,其破坏形式有3种:刺入破坏、剪切破坏和鼓出破坏。只要桩长大于临界桩长(约为碎石桩直径的4倍),碎石桩就不会发生刺入破坏,除那些相对硬层而长度又很短的桩体,一般不考虑刺入破坏;对于剪切破坏,只要基础底面不太小或桩周土体上有足够大的边载,便不会发生这种形式的破坏,因此,碎石桩桩体绝大多数发生鼓出破坏。一方面,桩体材料是无粘性的,桩体本身的强度随深度的增加而增大,当强度增加时,桩体产生塑性鼓出的可能性将逐渐减少;另一方面,桩周土抵抗桩体鼓出的阻力也是随着深度增加而增大的,所以最容易产生鼓出破坏的部位是桩体的上端,实际工程中,碎石桩和桩周土体组成的复合地基共同承担基础传来的荷载,桩周土体上边作用有外荷载,从而增强了对碎石桩发生鼓出变形的约束,因此,复合地基中的桩体和桩周土体的相互作用使碎石桩的破坏形式

更为复杂。

3 碎石桩复合地基的承载力标准值

当碎石桩复合地基受到上部荷载作用时,外荷载将由桩体和桩间土共同承担,若基础是刚性的,则由于桩体的压缩模量大于桩间土体的压缩模量,根据虎克定律,外荷载将向碎石桩集中。复合地基承载力标准值应按现场复合地基载荷试验确定,也可用单桩和桩间土的载荷试验按下式确定

$$f_{sp,k} = mf_{p,k} + (1-m)f_{s,k} = \frac{mf_{p,k}}{1+(n-1)m} \quad (1)$$

式中: $f_{sp,k}$ 为复合地基承载力标准值(kPa); $f_{s,k}$ 为加固后桩间土的承载力标准值(kPa); $f_{p,k}$ 为桩体单位面积承载力标准值(kPa); m 为面积置换率; n 为桩土应力比。

因为面积置换率 m 的确定比较简单,所以在碎石桩复合地基设计中,关键问题是确定桩土应力比 n , 应力比 n 与桩体和土的相对刚度、桩长、面积置换率、垫层性质以及应力水平和时间因素有关。根据实测资料统计, n 值大多在 2 ~ 5 之间。通过以上分析,碎石桩复合地基承载力受面积置换率、桩土应力比、桩周土的应力强度、成桩方式和充盈系数等因素影响,在确定碎石桩复合地基承载力理论尚未成熟的前提下,其复合地基承载力应根据现场载荷试验进行测定,并据此确定复合地基承载力的设计值。

4 挤密碎石桩复合地基检测资料分析

对该枢纽工程软基碎石挤密桩复合地基进行岩土工程检测的目的是评价其碎石挤密桩复合地基的挤密质量,检验复合地基的承载力是否能达到设计要求。为了评价此软基复合地基的挤密质量,检验复合地基的承载力是否能达到设计要求,现场采用螺旋、岩心管钻进、自动落锤做桩间土的标准贯入试验和碎石桩的重型圆锥动力触探试验(N63.5)。场区原为农田,由于碎石桩的挤密作用,场地土体普遍隆起。鉴于场区地形,检测时,采用相对高程,即回填路基底层设计高程为 0.00 m。标准贯入试验、重型圆锥动力触探试验的起始深度及载荷试验深度均以路基底层埋深、检测点孔口高程进行控制。现场共布重型圆锥动力触探、标

准贯入试验 175 组（每组对碎石桩进行重型圆锥动力触探试验、桩间土进行标准贯入试验），静力载荷试验点 9 个。

4.1 重型圆锥动力触探试验及标准贯入试验检测结果分析

标准贯入试验、重型动力触探试验、室内土工试验等测试手段能够确定复合地基中纵向和横向的均匀性，并确定测试不同深度承载力标准值。本次检测据路基走向平面图、场区地形，标准贯入试验、重型圆锥动力触探试验的起始深度均为路基地面。据载荷试验点实测桩径为 0.44~0.50 m 之间，场区碎石桩重型圆锥动力触探试验结果显示，基底下碎石桩的重型圆锥动力触探试验击数有较强的规律性，离散性较小，试验击数最小值为 3 击，平均值为 7.68 击。承载力标准值按平均值考虑，取 $f_k=280$ kPa。

根据钻探和标准贯入试验、岩土试验报告、野外土样鉴别，天然地面以下土层以素填土、粉质粘土、粉土为主，局部粉、细砂层。通过对桩间土标准贯入试验击数修正值的数理统计，回填路基底层设计高程 0.00 m，即相对于正负零点试验深度以下桩间土层标准贯入试验，结果见表 1。

表 1 可看出，无论是粉质粘土、粉土，还是粉细砂，经处理后的土层承载力标准值有明显提高。为了和载荷试验作对比，取 0.0~1.0 m 深的土层承载力标准值，其中粉质粘土 $f_{sp,k}=163$ kPa，粉土 $f_{s,k}=130$ kPa，重型圆锥动力触探试验经综合分析，碎

石桩桩身承载力标准值取 $f_{p,k}=280$ kPa，根据碎石桩复合地基承载力计算公式(1)得碎石挤密桩复合地基承载力标准值 ($f_{sp,k}$): 对于粉质粘土 $f_{sp,k}=191.2$ kPa; 对于粉土 $f_{sp,k}=166.15$ kPa。可见碎石挤密桩复合地基承载力标准值 $f_{sp,k}$ 不小于 166 kPa。

另外，依据桩间土标准贯入试验资料对处理后地基进行液化判别，经地震液化判别，场区检测深度范围内的饱和粉、细砂及粉土的液化均已消除。

4.2 静力载荷试验结果分析

4.2.1 试验工作简介

本次载荷试验点共 9 个，试验点深度均为基底下 0.30 m，试坑为正方形，边长 2.5 m，加载采用面积为 0.66 m² 承压板，1 000 kN 油压千斤顶，反力装置采用堆载平台反力装置，堆载平台支承架由平置的工字钢及其上横担的无缝钢管构成，沉降观测采用百分表进行测量。静载试验采用慢速维持荷载法，分 8 级加荷，首级荷载为 45 kPa，每级荷载增量为 45 kPa，每级加载后，按间隔 10、10、10、15、15 min，以后每隔 30 min 读一次沉降，当连续两小时内，每小时的沉降量<0.1 mm 时，则认为已趋于稳定，加下一级荷载。

4.2.2 载荷试验结果分析

静载试验主要用于确定基础地面处承载力标准值和变形模量，本次共做静载试验点 9 个，这 9 个载荷试验点由于其 $p-s$ 曲线基本都无明显的比例界线点，故采用最小二乘法修正沉降原始观测值，所采用的公式为

表 1 不同深度桩间土标准贯入试验结果

Table 1 Standard penetrate testing results of earth between piles in different depths										
岩性	相对于正负零点 试验深度 h/m	频数 $n/\text{次}$	最大值 $N/\text{击}$	最小值 $N/\text{击}$	平均值 $N/\text{击}$	标准差 σ	变异系 数 δ	统计修正 系数 γ_s	推荐值 $N/\text{击}$	承载力标准 值 f_k/kPa
粉质粘土	0.0~1.0	105	9.0	3.0	6.0	1.291	0.216	0.964	5.8	163
	1.0~2.0	62	11.7	3.9	7.2	1.746	0.242	0.947	6.8	186
	2.0~3.0	13	10.4	6.8	8.2	1.241	0.151	0.924	7.6	204
	3.0~4.0	20	22.7	11.0	15.2	3.442	0.226	0.911	13.9	345
	<4.0	3	21.1	12.9	16.3				14.6	360
粉土	0.0~1.0	7	7.8	5.8	6.6	0.770	0.116	0.914	6.1	130
	1.0~2.0	55	15.6	4.0	8.6	3.130	0.362	0.916	7.9	158
	2.0~3.0	52	23.0	5.8	11.9	4.471	0.376	0.910	10.8	184
	3.0~4.0	74	40.5	9.5	23.9	7.786	0.325	0.935	22.4	300
	<4.0	11	29.4	18.3	25.1	3.57	0.142	0.921	23.1	300
粉细砂		40	64.0	13.3	37.3	10.774	0.289	0.921	34.3	268

$$C_0 = \frac{N \sum (pS') - \sum p \sum S'}{N \sum p^2 - (\sum p)^2}, \quad (2)$$

$$S_0 = \frac{\sum S' \sum p^2 - \sum p \sum (pS')}{N \sum p^2 - (\sum p)^2}, \quad (3)$$

式中: N 为载荷等级; S_0 为沉降校正值; S' 为各级荷载下的起始沉降值(mm); C_0 为斜率。经过沉降修正后的 p - s 曲线见图 1, 从曲线形态及经过综合分析可得出:

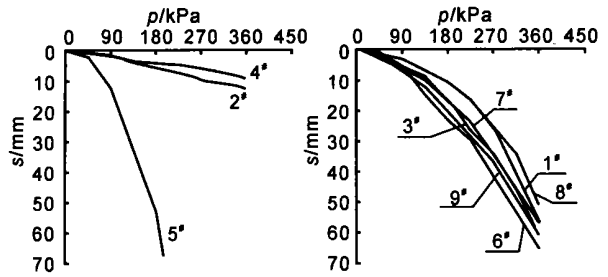


图 1 挤密碎石桩复合地基静载试验综合曲线
Fig. 1 Load Vs settlement cure of crashed stone piles

(1)5[#]载荷试验点试验期间复合地基土含水量较高, 桩间土标准贯入试验击数为 2.5 击, 具高压缩性。当加荷至第 5 级时, 复合地基土“沉降急剧增大、且 24 h 内未稳定”, 故确定前一级荷载即第 4 级荷载 180 kPa 为该点载荷试验的极限荷载, 则该试验点的承载力基本值可取为极限荷载的一半即 90 kPa; 另外根据 $\Delta S_2 = 10.33 > 2S_1 = 4.22$ mm, 故可得比例界限值 $p_y = p_2 = 90$ kPa, 所以该试验点承载力基本值取 90 kPa。

(2)2[#]、4[#]试验点试验曲线基本为直线型, 桩间土密实, 其最终沉降量分别为 12.62 mm、9.27 mm, 沉降较小, 其比例界限值 > 360 kPa, 这里根据实际情况承载力基本值取 315 kPa。

(3)其他载荷试验点(1[#]、3[#]、6[#]~9[#]) p - s 曲线形态均呈缓变型, 无明显的比例界限点。按规范以相对变形值确定复合地基承载力基本值。各试验点取: $s/d = 0.02$ (即 $S_0 = 18.33$ mm) 所对应的承载力基本值见表 2, 依据变形模量公式

$$E_0 = \frac{\rho_A}{Sb} (1 - \mu^2), \quad (4)$$

式中: A 为承压板面积(m^2); S 为承压板的沉降(mm); E_0 为地基土的变形模量(MPa); p 为承压板压力(kPa); b 为方形承压板宽度(m); μ 为波松比($\mu = 0.3$, 按粉土取值)。

计算各试验点的变形模量 E_0 见表 2。

表 2 各载荷试验点结果

试验点号	1	2	3	4	5
实测承载力基本值/ kPa	231	315	189	315	90
变形模量/MPa	9.33	21.81	7.63	32.06	5.35

试验点号	6	7	8	9
实测承载力基本值/ kPa	160	193	230	168
变形模量/MPa	6.45	7.79	9.28	6.78

由表 2 可得: 实测承载力基本值范围为: 90 ~ 315 kPa, 平均值 $\mu = 210.11$ kPa, 标准差 $\sigma = 72.7$, 变异系数 $\delta = 2.89$ 。很明显基本值 90 kPa、315 kPa 的极差远远超过平均值的 30%, 所以剔除 2[#]、4[#]、5[#] 3 点的异常值不做统计, 剩下的 6 个载荷点的承载力基本值平均值为 $\mu = 195.17$ kPa, 从而取复合地基承载力标准值为 $f_{sp,k} = 195$ kPa; 计算复合地基压缩模量范围为 5.35 ~ 32.06 MPa, 平均值 $\mu = 11.76$ MPa, 标准差 $\sigma = 8.94$, 变异系数 $\delta = 1.31$, 其中变形模量 5.35、21.18、32.06 MPa 的极差远远超过平均值的 30%, 所以剔除这 3 个异常值, 剩下的 6 个变形模量平均值为 $\mu = 7.88$ MPa, 从而取复合地基变形模量为 $E_0 = 7.88$ MPa。由以上载荷试验参数计算分析可以看出, 无论复合地基承载力基本值, 还是变形模量, 其变异系数都很高, 远远 > 0.4 , 属于变性性很高的复合地基, 这说明整个场地不均匀, 在设计时要考虑不均匀沉降问题。

5 结论与建议

(1)根据碎石挤密桩桩身重型动力触探试验和桩间土的标准贯入试验及静力载荷试验结果, 经综合分析认为: ①根据载荷试验结果, 碎石挤密桩除 5[#]载荷试验点外处理后的复合地基承载力标准值 $f_{sp,k} = 195$ kPa, 变形模量 $E_0 = 7.88$ MPa。根据碎石挤密桩桩身重型动力触探试验和桩间土的标准贯入试验结果以及碎石桩复合地基承载力计算公式得: 对于粉质粘土 $f_{sp,k} = 191.2$ kPa; 对于粉土 $f_{sp,k} = 166.15$ kPa, 可见碎石挤密桩复合地基承载力标准值($f_{sp,k}$)不小于 166 kPa, 达到处理要求; ②经碎石挤密桩处理后检测深度范围内的饱和粉、细砂及粉土的液化已消除; ③场区 5[#]载荷试验点附近, 碎石挤密桩复合地基较为软弱, 地基土含水量较高, 桩间土标准贯入试验击数为 2.5 击, 具高压缩性, 承载力标准值为 90 kPa, 变形模量为 5.35, 应进一

步处理;④场区复合地基承载力值差异较大,应考虑不均匀沉降问题。

(2)标准贯入试验、重型动力触探试验、室内土工试验等测试手段能够确定复合地基中纵向和横向的均匀性,并确定测试不同深度承载力标准值,静载试验主要用于确定基础地面处承载力标准值和变形模量。在进行静载试验时,应当在基础地面位置压板下铺设 3~5 cm 厚的中粗砂,压板面积和形状要与复合地基的具体情况相符,否则就改变了复合地基的单元块边界条件(即周围桩和土对单元块的约束条件),相当于改变了原设计的面积置换率 m 值,即桩间距发生了变化,同时也改变了桩土约束条件,使测试结果不具有代表性。

[参 考 文 献]

[1] 建设部职业资格注册中心. 注册岩土工程师必备规范规程汇编[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
[2] 陈仲颐, 叶书麟. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
[3] 张喜发. 岩土工程勘察与评价[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
[4] 毛新虎. 某高层建筑软基多重复合地基检测结果分析[J]. 工程地质学报, 2002 10(增刊): 655~660.
[5] 王杰贤. 动力地基与基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
[6] 牛志荣. 复合地基处理及其工程实例[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
[7] 高大钊. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

Analysis of testing results of composite ground
for a soft foundation in Datong-Yuncheng expressway

MAO Xin-hu^{1, 2}

(1. Shanxi Academy of Traffic Science, Taiyuan 030006, China; 2. School of
Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Taking the examples of the treatment for a soft foundation reinforced with densification by gravel piles in Datong-Yuncheng expressway in Shan'xi province, the testing results of the composite ground is studied. The reinforcing mechanism and destroying manner for the densification by gravel pile is discussed. The in-situ testing result for the composite ground of a soft foundation is analyzed. It is found that the reinforcing method, which uses densification by gravel pile to consolidate the soft foundation, not only improves the bearing capacity, increases the strength of the soil between piles and reduces the ground settlement, but also removes and reduces ground liquefaction. The bearing capacity of composite ground, which is handled with densification by gravel pile, achieves the designing request. In particular, it will provide reference data for treating soft ground in highway construction in the future.

Key words: highway; soft ground; composite foundation; densification by gravel piles; static loading test

(英文审定: 苏生瑞)