一、综述

需要全本请访问 www.ertongbook.com

高等级公路地基处理技术在我国的发展

龚晓南
（浙江大学土木工程学系　　杭州　310027

摘要：本文扼要介绍我国高等级公路地基处理技术的发展情况，主要内容有 地基处理技术的普及和提高，公路工程地基处理方法的分类和适用范围，基础刚度和垫层对桩体复合地基性状的影响，地基处理原则和规划程序，减小桥梁和引道路堤之间沉降差的措施，道路拓宽和新老路堤接头处的地基处理对策，填筑路堤过程中地基失稳地段的处理措施，地基处理发展中存在的问题及展望。

关键词：高等级公路　地基处理　规划程序　适用范围　沉降差　发展与展望

1 前言

地基处理技术在我国的应用已有悠久的历史，灰土垫层在我国的应用应在秦汉以前，具体时间已难以考证。工程建设的需要促进了地基处理技术的发展，现代地基处理技术是伴随现代化建设而不断发展的。改革开放以后，我国土木工程建设事业日新月异，地基处理技术也相应得到了飞速发展。表 1 给出几种地基处理方法在我国应用的最早年份。从表 1 可知，大部分地基处理技术是改革开放后发展或引进的。

作者简介 龚晓南博士，浙江大学教授，主要研究方向 软粘土工程学，地基处理及复合地基理论，基坑工程，基础施工环境效应及防治，土塑性力学等。

部分地基处理方法在我国应用的最早年份　　表 1

地基处理方法	年　份	地基处理方法	年　份
普通砂井法	五十年代	土工合成材料	七十年代末
真空预压法	一九八零年	强夯置换法	一九八八年
袋装砂井法	七十年代	EPS 超轻质填料法	一九九五年
塑料排水带法	一九八一年	低强度桩复合地基法	一九九零年
砂桩法	五十年代	刚性桩复合地基法	一九八一年
土桩法	五十年代中	锚杆静压桩法	一九八二年
灰土桩法	六十年代中	掏土纠偏法	六十年代初
振冲法	一九七七年	顶升纠偏法	一九八六年
强夯法	一九七八年	树根桩法	一九八一年
高压喷射注浆法	一九七二年	沉管碎石桩法	一九八七年
浆液深层搅拌法	一九七七年	石灰桩法	一九五三年
粉体深层搅拌法	一九八三年		

注：表中年代均指二十世纪。

为了适应现代化的要求，实现交通运输高效率，高速公路和其他高等级公路建设在我国发展很快。高速公路在我国大陆走过不足 18年的历程，但至今已有近 4万公里的高速公路。高等级公路网不仅是交通现代化的重要标志，也是国家现代化的重要标志。 2004 年 12 月 17 日国务院审议通过《国家高速公路网规划》标志着我国高速公路的发展进入了新的历史阶段。《规划》确定的国家高速公路网采用放射线与纵横网格相结合的布局形态，构成由中心城市向外放射以及横连东西、纵贯南北的公路交通大通道，包括 7 条首都放射线、9 条南北纵向线和 18 条东西横向线，可以简称为“7918 网”，总规模大约为 8 万 5 千公里。

高等级公路具有路面宽、路堤高、桥涵多、弯道半径大等特点，如高速公路最小弯道半径一般为 800m 左右。高等级公路对路面工后沉降和工后差异沉降控制标准要求高，允许工后沉降和差异沉降数值小。高等级公路的这些特点对路堤地基提出了较高的要求。在软弱地基上修建高等级公路，如何有效控制沉降和工后差异沉降更为重要。

近二十多年来，我国地基处理技术发展很快，主要反映在下述三个方面：

(1)地基处理技术的普及和提高

地基处理技术的普及和提高在我国发展都非常迅速。为了满足土木工程建设对地基处理的要求，我国引进和发展了多种地基处理新技术。在引进处理方法的同时，也引进了新的处理机械、新的处理材料和新的施工工艺。可以说，目前国外有的地基处理方法，我国基本上都有。各地还因地制宜地发展了许多适合我国国情的地基处理技术，取得了良好的经济效益和社会效益。地基问题处理得恰当与否关系到整个工程质量、投资和施工进度，其重要性已越来越多地被人们所认识。

(2)地基处理队伍不断扩大

地基处理技术发展还反映在地基处理队伍的不断扩大。从事地基处理施工的专业队伍不断增加，很多土建施工单位也从事地基处理施工。除施工队伍外，从事地基处理机械生产的企业发展也很快。在地基处理施工机械方面，我国与国外的差距不仅在逐步减小而且某些方面已处于国际领先水平，并研制了许多新产品。从事科研、设计、施工、检测几个环节的专业技术队伍已经形成，并发展壮大。

(3)地基处理理论的发展

我国地基处理的发展还反映在理论上的进步。探讨加固机理，改进施工机械和施工工艺，发展检验手段，提高处理效果，改进设计方法，在上述几个方面，每一种地基处理方法都取得不少进展。除了针对某一类地基处理方法的设计计算理论得到发展外，对一些共同性规律的研究也取得不少成果，如复合地基理论、地基处理方法选用多因素分析法等。特别是复合地基理论发展更快，复合地基概念从狭义复合地基发展到广义复合地基，形成了较系统的广义复合地基理论。并对复合地基进行了合理的分类，研究了各类复合地基的形成条件、工作性状，研究了基础刚度对复合地基性状的影响，发展了按沉降控制复合地基设计和复合地基优化设计思路。

总之，地基处理技术在我国得到广泛的普及，地基处理水平不断提高。地基处理技术已得到土木工程界的各个部门,如勘察、设计、施工、监理、教学、科研和管理部门的关心和重视。地基处理技术的进步带来了巨大的经济效益和社会效益。应该说我国地基处理技术总体上达到世界先进水平。

2 公路工程地基处理方法的分类和适用范围

对地基处理方法进行严格的统一分类是很困难的。根据地基处理的加固原理，公路工程中的地基处理方法可划分为五类。下面分别作简要介绍：

(1)置换

置换是指用物理力学性质较好的岩土材料置换天然地基中部分或全部软弱土体，以形成双层地基或复合地基，达到提高地基承载力、减少沉降的目的。

加固原理主要属于置换的地基处理方法有：换土垫层法、挤淤置换法、强夯置换法和膨胀土掺灰改性换土法等。采用石灰桩法加固地基具有多种效用，其中也有置换效用，故也将其包括在这一部分。另外，气泡混合轻质料填土法和 EPS 超轻质料填土法一般不是用于置换，主要用于填方，即采用轻质填料代替比较重的填料。为了叙述方便，将气泡混合轻质料填土法和 EPS 超轻质料填土法也包括在这一部分。

(2)排水固结

排水固结又称预压法，是指饱和软弱土体在一定外荷载作用下排水固结，使其孔隙比减小，抗剪强度提高，以达到提高地基承载力、减少工后沉降的目的。

加固原理主要属于排水固结的地基处理方法按预压加载方法可分为：加载预压法、超载预压法、真空联合堆载预压法、降低地下水位法等。属于排水固结的地基处理方法又可按在地基中设置竖向排水系统不同划分为：普通砂井法、袋装砂井法和塑料排水带法等。

(3)灌入固化物

灌入固化物是指向土体中灌入或拌入水泥、石灰或其他化学固化浆材，使其在地基中形成增强体，以达到地基处理的目的。

加固原理主要属于灌入固化物的地基处理方法有：深层搅拌法、高压喷射注浆法、渗入性灌浆法、劈裂灌浆法、挤密灌浆法、有机大分子溶液改良法等。

(4)振密、挤密

振密、挤密是指采用振动或挤密的方法使地基土体密实以达到提高地基承载力和减少降的目的。

加固原理主要属于振密、挤密的地基处理方法有：表层原位压实法、强夯法、振冲密实法、

需要全本请访问 www.ertongbook.com

挤密砂石桩法、爆破挤密法、土桩和灰土桩法等。

(5)加筋

加筋是指在地基中设置强度高、模量大的筋材，如土工格栅、土工织物等，以达到提高地基承载力、减少沉降的目的。

加固原理主要属于加筋的地基处理方法有：加筋土垫层法、加筋土挡墙法和土钉墙法等。为了叙述方便，将隔水封闭法、锚杆支护法、锚碇板挡土结构、树根桩法、低强度混凝土桩复合地基和钢筋混凝土桩复合地基法等加固方法也归入这一部分。

可以将采用上述各类地基处理方法而形成的人工地基分为以下两大类：

一类是在地基处理过程中天然地基土体的物理力学性质得到普遍的改良，形成的人工地基类似于均质地基。这类人工地基的承载力和沉降计算方法仍可采用均质地基的计算方法，不同的是地基土层的物理力学指标得到改善。

另一类是在地基处理过程中部分土体得到增强，或被置换，或在天然地基中设置加筋材料，形成复合地基例如：采用强夯置换法、石灰桩法、深层搅拌法、低强度桩复合地基法等均可形成复合地基。通过该方法形成的复合地基在地基处理形成的人工地基中占有很大的比例，而且呈发展趋势。从上述分析可以看到重视复合地基理论研究的必要性和重要性。复合地基技术在地基处理技术中占有非常重要的地位。

公路工程地基处理方法的简要原理和适用范围如表 2 所示。

公路工程地基处理方法分类及其适用范围表2

类别	方法	简要原理	适用范围
置换	换土垫层法	将软弱土或不良土开挖至一定深度，回填抗剪强度较高、压缩性较小的岩土材料，如砂、砾、石渣等，并分层夯实，形成双层地基。垫层能有效扩散基底压力，可提高地基承载力，减少沉降	各种软弱土地基
	膨胀土掺灰改性换土法	掺灰改性换土法是将原地膨胀土翻松，掺加一定比例的石灰后，分层压实。经过一段时间的养护，可以很好地消除或减小膨胀性，提高土体强度，降低土中的含水量	膨胀土地基
	挤淤置换法	通过抛石或夯击回填碎石置换淤泥达到加固地基的目的，也可采用爆破挤淤置换	淤泥或淤泥质粘土地基
	强夯置换法	采用边填碎石边强夯的方法在地基中形成碎石墩体，由碎石墩、墩间土以及碎石垫层形成复合地基，以提高承载力，减小沉降	粉砂土和软粘土地基等
	石灰桩法	通过机械或人工成孔，在软弱地基中填入生石灰块或生石灰块加其他掺合料，通过石灰的吸水膨胀、放热以及离子交换作用来改善桩与土的物理力学性质，并形成石灰桩复合地基，可提高地基承载力，减少沉降	杂填土、软粘土地基
	气泡混合轻质料填土法	气泡混合轻质料的容重为 5 ~ 12kN/m^3，具有较好的强度和压缩性能，用作路堤填料可有效减小作用在地基上的荷载，也可减小作用在挡土结构上的侧压力	软弱地基上的填方工程
	EPS 超轻质料填土法	发泡聚苯乙烯(EPS)容重只有土的 1/50 ~ 1/100，并具有较好的强度和压缩性能，用作填料，可有效减小作用在地基上的荷载和作用在挡土结构上的侧压力，需要时也可置换部分地基土，以达到更好的效果	软弱地基上的填方工程

续上表

类别	方法	简要原理	适用范围
排水固结	加载预压法	在地基中设置排水通道——砂垫层和竖向排水系统(竖向排水系统通常有普通砂井、袋装砂井、塑料排水带等),以缩小土体固结排水距离,地基在填筑路堤荷载作用下排水固结,地基承载力提高,工后沉降小	软粘土、杂填土、泥炭土地基等
	超载预压法	原理基本上与堆载预压法相同,不同之处是其预压荷载大于设计使用荷载。超载预压不仅可减少工后固结沉降,还可消除部分工后次固结沉降	同上
	真空联合堆载预压法	在软粘土地基中设置排水体系(同加载预压法),然后在上面形成一不透气层(覆盖不透气密封膜,或其他措施),通过对排水体系进行长时间不断抽气抽水,在地基中形成负压区,而使软粘土地基产生排水固结,达到提高地基承载力、减小工后沉降的目的,常与堆载预压联合使用	软粘土地基
	降低地下水位法	通过降低地下水位,改变地基土受力状态,其效果如堆载预压,使地基土产生排水固结,达到加固目的	砂性土或透水性较好的软粘土层
灌入固化物	深层搅拌法	利用深层搅拌机将水泥浆或水泥粉和地基土原位搅拌形成圆柱状、格栅状或连续墙式的水泥土增强体,形成复合地基以提高地基承载力,减小沉降。也常用它形成水泥土防渗帷幕。深层搅拌法分喷浆搅拌法和喷粉搅拌法两种	淤泥、淤泥质土、粘性土和粉土等软土地基,有机质含量较高时应通过试验确定适用性
	高压喷射注浆法	利用高压喷射专用机械,在地基中通过高压喷射流冲切土体,用浆液置换部分土体,形成水泥土增强体。按喷射流组成形式,高压喷射注浆法有单管法、二重管法、三重管法。高压喷射注浆法可形成复合地基以提高承载力,减少沉降	淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基,当含有较多的大块石,或地下水流速较快,或有机质含量较高时应通过试验确定适用性
	渗入性灌浆法	在灌浆压力作用下,将浆液灌入地基中以填充原有孔隙,改善土体的物理力学性质	中砂、粗砂、砾石地基
	劈裂灌浆法	在灌浆压力作用下,浆液克服地基土中初始应力和土的抗拉强度,使地基中原有的孔隙或裂隙扩张,用浆液填充新形成的裂缝和孔隙,改善土体的物理力学性质	岩基或砂、砂砾石、粘性土地基
	挤密灌浆法	在灌浆压力作用下,向土层中压入浓浆液,在地基土中形成浆泡,挤压周围土体。通过压密和置换改善地基性能。在灌浆过程中因浆液的挤压作用可产生辐射状上抬力,引起地面隆起	常用于可压缩性地基、排水条件较好的粘性土地基
	有机大分子溶液改良法	往土中掺加高价金属盐类物质或有机阳离子化合物,通过离子交换吸附,削弱蒙脱石晶内负电斥力和减薄双电层的厚度,从而抑制蒙脱石晶内膨胀性和粘土微粒之间膨胀性,达到改善土的吸水性质的目的	膨胀土地基

续上表

类别	方法	简要原理	适用范围
振密、挤密	表层原位压实法	采用人工或机械夯实、碾压或振动，使土体密实。密实范围较浅，常用于分层填筑	杂填土、疏松无粘性土、非饱和粘性土、湿陷性黄土等地基的浅层处理
	强夯法	采用质量为 10～40t 的夯锤从高处自由落下，地基土体在强夯的冲击力和振动力作用下密实，可提高地基承载力，减少沉降	碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、杂填土和素填土等地基
	振冲密实法	一方面依靠振冲器的振动使饱和砂层发生液化，砂颗粒重新排列，孔隙减小；另一方面依靠振冲器的水平振动力，加回填料使砂层挤密，从而达到提高地基承载力、减小沉降，并提高地基土体抗液化能力。振冲密实法可加回填料也可不加回填料。加回填料，又称为振冲挤密碎石桩法	粘粒含量小于 10% 的疏松砂性土地基
	挤密砂石桩法	采用振动沉管法等在地基中设置碎石桩，在制桩过程中对周围土层产生挤密作用。被挤密的桩间土和密实的砂石桩形成砂石桩复合地基，达到提高地基承载力、减小沉降的目的	砂土地基、非饱和粘性土地基
	爆破挤密法	利用爆破在地基中产生的挤压力和振动力使地基土密实以提高土体的抗剪强度，提高地基承载力和减小沉降	饱和净砂、非饱和但经灌水饱和的砂、粉土、湿陷性黄土地基
	土桩、灰土桩法	采用沉管法、爆扩法和冲击法在地基中设置土桩或灰土桩，在成桩过程中挤密桩间土，由挤密的桩间土和密实的土桩或灰土桩形成土桩复合地基或灰土桩复合地基，以提高地基承载力和减小沉降，有时用于消除湿陷性黄土的湿陷性	地下水位以上的湿陷性黄土、杂填土、素填土等地基
加筋	加筋土垫层法	在地基中铺设加筋材料（如土工织物、土工格栅、金属板条等）形成加筋土垫层，以增大压力扩散角，提高地基稳定性	筋条间用无粘性土，加筋土垫层可适用各种软弱地基
	隔水封闭法	隔水封闭法是采用土工膜或其他隔水材料进行隔水封闭，达到隔断地下水的流通或阻止气候干湿循环对地基或坡面土体的影响，达到稳定路基或边坡的目的	膨胀土地基和盐渍土地基
	加筋土挡墙法	利用在填土中分层铺设加筋材料以提高填土的稳定性，形成加筋土挡墙。挡墙外侧可采用侧面板形式，也可采用加筋材料包裹形式	用于填土挡土结构
	土钉墙法	通常采用钻孔、插筋、注浆在土层中设置土钉，也可直接将杆件插入土层中，通过土钉和土形成加筋土挡墙以维持和提高土坡稳定性	用于维持和提高土坡稳定性
	锚杆支护法	锚杆通常由锚固段、非锚固段和锚头三部分组成。锚固段用于稳定土层，可对锚杆施加预应力。用于维持边坡稳定	用于维持和提高土坡稳定性
	锚碇板挡土结构	由墙面、钢拉杆、锚碇板和填土组成。锚碇板处在填土层，可提供较大的锚固力。锚碇板挡土结构用于填土支挡结构	用于填土挡土结构
	树根桩法	在地基中设置如树根状的微型灌注桩（直径 70～250mm），提高地基承载力或土坡的稳定性	各类地基

续上表

类别	方法	简要原理	适用范围
加筋	低强度混凝土桩复合地基法	在地基中设置低强度混凝土桩，与桩间土形成复合地基，提高地基承载力，减小沉降	各类深厚软弱地基
	钢筋混凝土桩复合地基法	在地基中设置钢筋混凝土桩，与桩间土形成复合地基，提高地基承载力，减小沉降	各类深厚软弱地基
	长短桩复合地基	由长桩和短桩与桩间土形成复合地基，提高地基承载力和减小沉降。长桩和短桩可采用同一桩型，也可采用不同桩型。通常长桩采用刚度较大的型桩，短桩采用柔性桩或散体材料桩	深厚软弱地基

3 基础刚度和垫层对桩体复合地基性状的影响

近年来复合地基技术在我国交通工程中得到广泛的应用和发展。在交通工程中，人们发现路堤下的桩体复合地基性状与建筑工程中刚性基础下复合地基性状有较大差别。为叙述方便，将类似土堤下的桩体复合地基称为柔性基础下复合地基。当复合地基各种参数都相同的情况下，在荷载作用下，柔性基础下复合地基的桩土荷载分担比要比刚性基础下复合地基的桩土荷载分担比小，也就是说刚性基础下复合地基中桩体承担的荷载要比柔性基础下复合地基桩体承担的大。现场试验研究表明（吴慧明，2002）：柔性基础下桩体复合地基和刚性基础下桩体复合地基破坏模式不同。当荷载不断增大时，柔性基础下桩体复合地基破坏是由土体先破坏造成的，而刚性基础下桩体复合地基破坏是由桩体先破坏造成的。桩体复合地基极限承载力大小与基础刚度有关。其他条件相同的情况下，刚性基础下复合地基比柔性基础下复合地基的极限承载力大。

复合地基的极限承载力 P_{cf} 可用下式表示：

$$P_{cf} = k_1\lambda_1 mp_{pf} + k_2\lambda_2(1-m)P_{sf} \tag{1}$$

式中：P_{pf}——单桩极限承载力，kPa；

P_{sf}——天然地基极限承载力，kPa；

k_1——反映复合地基中桩体实际极限承载力与单桩极限承载力不同的修正系数；

k_2——反映复合地基中桩间土实际极限承载力与天然地基极限承载力不同的修正系数；

λ_1——复合地基破坏时，桩体发挥其极限强度的比例，称为桩体极限强度发挥度；

λ_2——复合地基破坏时，桩间土发挥其极限强度的比例，称为桩间土极限强度发挥度；

m——复合地基置换率；

$$m = A_p/A$$

A_p——桩体面积；

A——对应的加固面积。

在应用式（1）计算复合地基极限承载力时，对刚性基础下复合地基，λ_1 取1.0，λ_2 小于1.0；而对柔性桩基础下复合地基，λ_2 取1.0，λ_1 小于1.0。试验成果还表明：在相同的条件下，柔性基础下复合地基的沉降比刚性基础下复合地基沉降要大。

柔性基础下桩体复合地基沉降较大的原因有两个方面：一是土中应力大；二是桩体会向上刺入到像土堤这样的柔性基础中。

为了提高路堤下复合地基桩土荷载分担比，减小复合地基沉降，可在复合地基和路堤之间设置刚度较大的垫层，如灰土垫层、土工格栅碎石垫层等。不设较大刚度的垫层的路堤下桩体复合地基应慎用。

4 地基处理原则和规划程序

地基处理工程要做到确保工程质量、经济合理和技术先进。

我国地域辽阔,工程地质条件千变万化,各地施工机械条件、技术水平、经验积累、建筑材料品种及其价格差异均很大，在选用地基处理方法时一定要因地制宜，具体工程具体分析，要充分发挥地方优势，利用地方资源。地基处理方法很多，每种处理方法都有一定的适用范围、局限性和优缺点。没有一种地基处理方法是万能的。要根据具体工程情况，因地制宜选用合适的地基处理方法。在引用外地或外单位某一方法时应该克服盲目性，注意地区特点。因地制宜是选用地基处理方法的一项重要原则。

地基处理规划程序建议按图 1所示的程序进行。

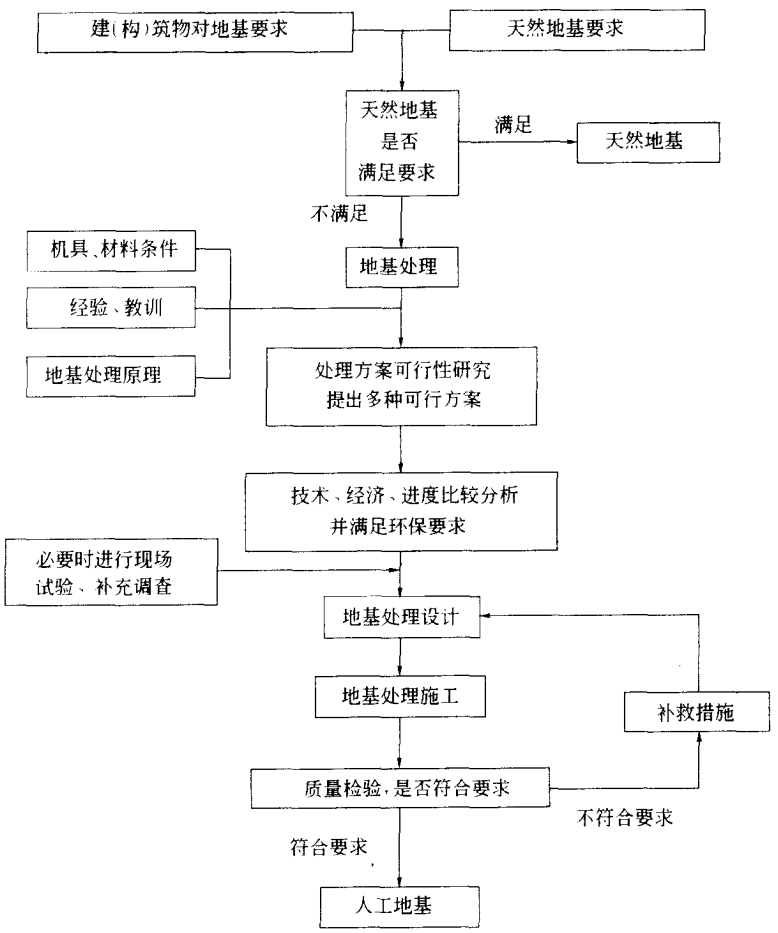

图 1 地基处理规划程序

首先，根据道路工程对地基的要求和天然地基条件确定地基是否需要处理。若天然地基不能满足要求，则需要确定进行地基处理的天然地层的范围以及地基处理的要求。

在具体确定地基处理方案前，应根据天然地层的条件、地基处理方法的原理、过去应用的经验和机具设备、材料条件，进行地基处理方案的可行性研究，提出多种技术上可行的方案。

然后,对提出的多种方案进行技术、经济、进度等方面的比较分析,并重视考虑环境保护要求，确定采用一种或几种地基处理方法。这也是地基处理方案的优化过程。

最后，可由初步确定的地基处理方案，根据需要决定是否进行小型现场试验或进行补充调查。先进行施工设计，再进行地基处理施工。施工过程中要进行监测、检测，如需要还应进行反分析，根据情况可对设计进行修改、补充。

实践表明，这是比较恰当的地基处理规划程序。

另外，需要强调的是在进行地基处理多方案比较时，对一具体工程，技术上可行的地基处理方案往往有几个，应通过技术、经济、进度等方面的综合分析，以及对环境的影响，进行地基处理方案优化，以得到较好的地基处理方案。

5　减小桥梁和引道路堤之间沉降差的措施

在软土地基上修建高等级公路，桥梁工程往往采用桩基础，而且一般采用端承桩，因此桥台沉降量很小为了满足河道通航高度，高等级公路桥梁的设计高度一般较高。因此，高等级公路桥头引道路堤高度相应也较高。引道路堤填方高，作用在地基上荷载大，作用在桥台上的土压力也大，高等级公路桥头引道路堤地基沉降量大，路堤填方本身压缩量也大。因此如何保证桥头引道路堤地基的稳定性和减少桥台和引道路堤工后差异沉降是设计需要解决的重要问题。

通常采用下述措施以减少桥台和引道路堤之间的工后沉降差：

(1)通过对桥头引道路堤进行地基处理，以减少引道路堤的沉降

供选用的地基处理方法很多，可以分为两类：复合地基法和土质改良法，也可采用桩基础。

①土质改良法

土质改良法中通常采用排水固结法处理地基。在软粘土地基上修建高等级公路，由于排水固结法处理软土地基具有成本低、效果好的优点，一般应优先考虑。

为加速地基土体在荷载作用下固结，需在地基中设置竖向排水通道，与水平砂垫层形成排水体系。竖向排水通道可由塑料排水带、袋装砂井和普通砂井形成。塑料排水带、袋装砂井和普通砂井三类排水通道各有优缺点。设计人员可根据工程条件、地基处理深度和技术、经济比较分析结果，合理选用竖向排水通道。

在道路工 程中，排水固结法施加预压荷载又可分下述两种情况：路堤荷载预压、真空联合堆载预压。根据施加预压荷载的大小又可分为一般堆载预压和超载预压两种情况。

在采用排水固结法加固桥头引道路堤地基时还有几个问题是与一般线路的路堤地基加固不同的，设计人员需要予以注意。一是地基排水固结沉降对桥台桩基产生的负摩阻问题；二是地基排水固结处理工后固结沉降和次固结沉降值的合理控制问题；三是引道地基堆载预压加固与桥台施工衔接处的相互配合问题。

②复合地基法

复合地基法中常采用水泥土桩复合地基，或低强度桩复合地基，或刚性桩复合地基加固地基。采用复合地基法加固时在复合地基和路堤间应铺设刚度较好的垫层，如加筋碎石垫层、灰

需要全本请访问 www.ertongbook.com

土垫层等，以改善复合地基性状。未设垫层的复合地基应慎用。

a.水泥土桩复合地基

可通过深层搅拌法形成水泥土桩复合地基。采用深层搅拌法加固路堤地基需要注意的问题是：采用深层搅拌法加固桥头引道路堤地基加固区应覆盖主要软弱土层，否则工后沉降较大。为减少复合地基沉降量应尽量减少软弱下卧层的厚度。

b.低强度桩复合地基

低强度桩复合地基主要指采用沉管灌注法施工形成的桩身强度较低的一类混凝土桩复合地基。与深层搅拌桩复合地基相比，它有两个优点：一是低强度桩复合地基加固深度可以较深；二是低强度桩比搅拌桩施工质量相对容易控制。

低强度混凝土桩除采用圆形断面外，还可采用异形桩，如 X 形桩、Y 形桩等。上述异形桩与圆形桩相比，可提高比表面积，增加可能产生侧阻力的桩身表面积。但应指出，与圆形桩桩侧阻力沿桩周均匀分布不同，异形桩桩侧阻力沿桩周分布是不等的，在异形桩的凹面处桩侧阻力强度可能很小。异形桩增加了可能产生侧阻力的桩身表面积，但改变了侧阻力的强度。异形桩的侧阻力是否比等截面的圆形桩大要通过载荷试验比较分析确定。而且试验比较分析结论还与工程地质条件有关，不能盲目套用。采用圆形桩桩侧阻力强度计算异形桩侧阻力是不对的、不安全的，这点应引起重视。而且现浇异形桩在软土层中施工质量很难保证。

c.刚性桩复合地基

预应力薄壁管桩复合地基和大直径薄壁筒桩复合地基也可认为是刚性桩复合地基。预应力薄壁管桩和大直径薄壁筒桩两者桩体质量好，但成本高。

③桩承堤法

桩承堤处理示意图如图 2 所示。在地基中设置钢筋混凝土桩，桩端设钢筋混凝土承台，在桩承台上铺设土土格栅，然后再填筑路堤。从示意图上可以看出，路堤荷载和以后的行车荷载基本上是由桩承担。桩承堤实质上是桩基础。采用桩承堤处理建设成本高。桩承堤中桩间软土固结对路堤工作性状的长期影响尚有待进一步观察。

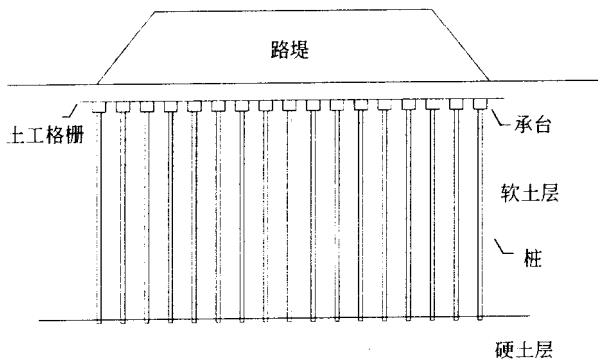

图2　桩承堤处理示意图

(2)通过采用轻质填料减轻路堤荷载，以减少引道路堤的沉降

桥头引道路堤填筑高度大，除对路堤软土地基采取地基处理外，常辅以采用轻质填料填筑路堤以减轻路堤荷载，从而减少引道路堤的沉降。轻质填料如粉煤灰、气泡混合轻质土和 EPS 超轻质填料等

采用轻质填料填筑路堤，不仅可以减轻作用在路基上的荷载，也可以减小作用在桥台上的

土压力。

(3)设置桥头搭板

通过在桥头引道与桥台相接处设置桥头搭板以减小桥梁和引道路堤之间产生较大不均匀沉降对通行的影响。

(4)工后修补

在满足引道路堤地基稳定性前进下，允许引道路堤产生较大的工后沉降，允许桥梁和引道路堤之间产生较大不均匀沉降。通过预留高和工后对引道路基路面进行修补，调整产生的不均匀沉降差，以满足运行要求，这也是一种处理对策。在工后修补对维持交通影响不大的条件下应是一种很好的方法。据说国外某一高速公路通车后一年内修补高达 13 次,通过持续几年修补后满足质量稳定要求。是通过高标准的一次处理来尽量避免工后修补，还是尽量节省建设费用通过工后修补来保证质量，应通过综合分析后确定。

上述措施可综合应用。

6 道路拓宽和新老路堤接头处的地基处理对策

由于交通流量的增加，原有高等级公路已不能满足车流量的要求，往往需要对原高等级公路进行拓宽，如杭甬、沪杭高速公路从四车道拓宽到六车道等。高等级道路拓宽示意图如图 3 所示。道路拓宽部分路堤荷载不仅使拓宽路堤下地基产生沉降，而且将引起原路堤下地基产生新的沉降。当沿道路横向路基沉降差较大时，可能使原有路堤产生纵向裂缝，或产生较大的横向坡度，轻者影响行车速度，重者影响行车安全。若道路拓宽部分路堤地基失稳，将影响原有路堤的稳定性。

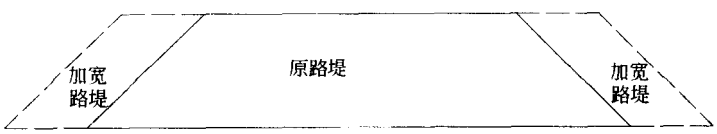

图 3 高等级道路拓宽示意图

当原路堤地基处理采用排水固结法处理时，拓宽路堤地基可采用排水固结法处理或采用复合地基法处理。拓宽路堤地基采用排水固结法处理施工工期较长，对原路堤沉降影响大；采用复合地基处理，施工工期短而且对原路堤沉降影响小。但前者工程投资小，而后者工程投资大一些。采用哪种方法更合理应根据具体工程综合分析确定。

当原路堤地基处理采用复合地基处理时，拓宽路堤地基也应采用复合地基处理。当原路堤地基采用复合地基处理时，对加固区尚存在软弱下卧层的情况，拓宽路堤地基采用复合地基加固处理时应比老路堤下采用复合地基处理时适当减少软弱下卧层厚度，以减少工后沉降。

在道路拓宽过程中也可采用超轻质填料填筑拓宽路堤部分。图 4 表示采用 EPS 超轻质填料拓宽路堤的示意图。从图中可以看出，采用 EPS超轻质填料填筑拓宽路堤的优点是无需征地，或征地很少。其缺点是工程建设费用高。当土地价格较高和人工成本较高时，采用 EPS 超轻质填料拓宽路基不失为一种好方案。日本东(京)名(古屋)高速公路拓宽工程中不少路段采用该方案。

软土地基上新老高等级公路相接处地基处理基本上同软土地基上高等级公路拓宽路堤地基处理，也与桥头引道路堤地基处理类似。设计人员应重视尽量减少新路堤地基沉降对原有

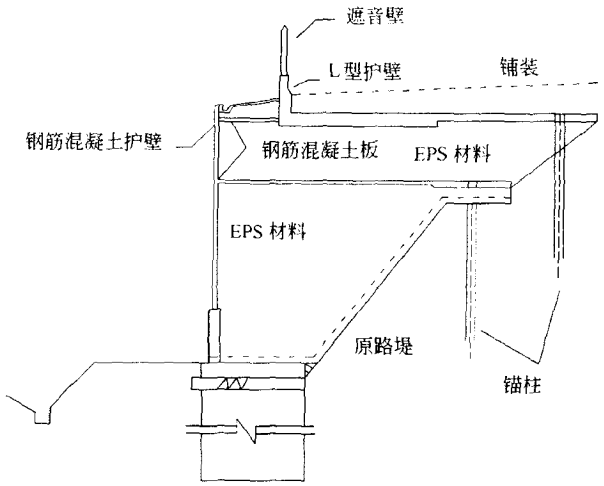

图 4　采用 EPS 超轻质填料拓宽路堤的示意图

路堤的不良影响。

一般情况下，在软土地基上新老高等级公路接头处，不管老路堤软土是采用排水固结法处理还是采用复合地基处理，接头附近新路堤地基采用复合地基处理都比较好。当新路堤的一般路堤下的地基土采用排水固结法处理时，应处理好用不同处理方法引起不同沉降的各路段间的逐步过渡，尽量减小不均匀沉降造成的不良影响。

7　填筑路堤过程中地基失稳地段处理措施

在软土地基上填筑路堤，由于未能有效地控制路堤填筑速率，由于填筑速度过快，或地基承载力不能满足填筑路堤的要求，往往会造成路堤地基失稳。当地基产生失稳破坏时，如何采取有效措施是很重要的。地基产生失稳破坏情况很复杂，需要了解失稳破坏的路堤地基破坏前是否经过地基处理、如何进行地基处理、地基失稳性状如何、滑动区范围及破坏面的深度等。应采用具体工程具体分析的方法，对路基失稳破坏路段进行及时处理。下面几项破坏地段处理措施可供选用：

(1)采用桥梁跨越

当地基失稳破坏严重，对地基土体扰动严重、扰动范围大，且难以采用一般地基处理方法加固时，可以采用桩基础架桥跨越地基失稳破坏地段。采用桥梁跨越具有工期短、质量可靠的优点，但工程投资费用大。

(2)采用 EPS超轻质填料路堤

除架桥跨越外,也可采用 EPS 超轻质填料筑堤通过破坏路段。一般情况下不需对地基进行处理，对地基平整后可直接采用 EPS超轻质填料筑堤。采用 EPS 超轻质填料填筑路堤的缺点是工程投资费用大。

(3)采用桩承堤处理

也可采用桩承堤作为破坏路段地基处理方法。桩承堤实质上是采用桩基础承担路堤荷载。

(4)采用复合地基处理

采用复合地基处理失稳地段地基是最常用的方法。通常采用低强度桩复合地基，有时也

可采用预应力薄壁管桩复合地基，或大直径薄壁筒桩复合地基等形式。在采用复合地基加固时应考虑破坏路段施工的可能性。

(5)采用土工格栅加筋垫层处理

也可采用土工格栅加筋垫层处理失稳破坏地段地基。铺设土工格栅加筋垫层具有施工方便、工期短的优点，但工后沉降可能较大。

8 发展中存在的问题

近二十多年来，我国地基处理技术得到很快的发展。为了进一步提高地基处理水平，检讨发展中存在的问题是很有意义的。虽然有些老问题现在很少发生，但对过去存在的问题进行反思还是很有好处的。笔者认为地基处理在发展中存在的主要问题可归纳为下述几个方面：

(1)未能因地制宜合理选用处理方法

在如何合理选用地基处理方法上有时存在一定的盲目性。例如饱和软粘土地基不适宜采用振密、挤密法加固，但采用强夯加固软土地基未能成功的工程实例在 10 多年前也时有报道，应该说现在认识上基本统一了。根据工程地质条件和地基加固原理，因地制宜合理选用处理方法特别重要。有关这方面，现在的问题是对几个技术上可行方案的比较、优化不够。不少工程采用的地基处理方法不是较好的方法，更不是最好的方法。有时工程问题是解决了，但多花了钱并拖延了工期，这样的工程实例不少。

(2) 不能正确评价每种地基处理方法的适用性

人人都承认每种地基处理方法都有一定的适用范围，但遇到具体问题就会盲目扩大其应用范围。对这种情况，施工单位和专利发明人更应注意。现举两个例子加以说明。如劈裂注浆在坝体防渗处理中是一种很好的方法，但将其应用于软土地基中的建筑物地基加固是否可行？又如，笔者曾见一单位宣传自己的一种工法是“一切疑难地基的克星”，可想而知其宣传效果不会好。类似例子不少，由此导致地基处理失败的例子也屡见不鲜。

(3)如何合理控制工后沉降量

在设计中如何合理控制工后沉降量是十分重要的问题。首先谈谈允许工后沉降量的标准问题，允许工后沉降量的大小不仅是技术问题，也与经济实力有关。允许工后沉降量的标准影响工程投资和建设工期，笔者认为应通过认真分析论证确定。不宜不分地区、不分工程类别，采用同一个标准；应该按地区、按工程类别，有所区别。其次是在设计中对工后沉降量的合理控制，应采用按沉降控制设计思路进行设计。

(4）道路工程建设中重视前期工作不够

可以说重视前期工作不够是基本建设中的通病。在高等级公路设计中也存在重视前期工作不够的问题。为了赶工期，缺乏必要的调查研究、比较分析，势必造成事故隐患，或造成资金的浪费。

(5)施工单位素质差影响地基处理质量

这方面最典型的例子是深层搅拌桩施工。几年前上海市建委发文在上海市区禁用喷粉深层搅拌法，接着不少地区也采取类似措施。深层搅拌法不能满足地基处理要求是因为深层搅拌技术本身不成熟吗？绝不是。是深层搅拌法加固地基设计方法不对吗？也不是。是什么原因呢？造成施工质量问题的质因主要是施工单位素质差和施工机械不完善这两方面问题。地基处理施工队伍的快速膨胀，使绝大多数施工队伍缺乏必要的技术培训，缺乏熟练技术工是普遍现象；除此以外，还存在偷工减料现象。其他地基处理方法或多或少也存在类似问题。

施工队伍素质低与建设管理体制也有关系。现行体制重视总包单位是否具有高资质，而忽视对具体施工实体的资质考核与管理于是难以形成熟练的专业化施工队伍。完成工程具体施工的一个个实体往往是分散的、临时的。现行体制很难使这些实体转变成为熟练的专业化队伍。

(6)施工机械简陋影响地基处理水平和质量

近二十几年来，我国地基处理施工机械发展很快，许多已形成系列化产品。但应看到，与我国工程建设需要相比较，差距还很大。仍以深层搅拌法为例，不能很好保证施工质量不仅与施工单位素质有关，也与目前应用的施工机械水平有关。简陋的机械是很难保持稳定良好的施工质量。

(7)地基处理理论落后于实践

从实践-理论-再实践的角度看，实践先于理论是一般规律，对土木工程更是如此。但重视理论研究，用理论指导实践也是很重要的。对地基处理各种工法及一般理论缺乏深入、系统的研究也是发展中存在的问题。

(8)不少工法缺乏完善的质量检验手段

完善的质量检验手段是保证施工质量的重要措施。目前不少工法缺乏完善的质量检验手段。

9 发展与展望

前面已经提到，近二十几年来，我国地基处理技术发展很快，主要表现为各种地基处理方法得到应用和普及，涌现了许多从事处理施工的专业化队伍。现在展望地基处理技术的发展，笔者认为应重视在普及基础上的进一步提高。发展地基处理技术，应在提高上做文章。地基处理技术进一步发展应重视下述几个方面工作：

(1)研制和引进地基处理新机械，提高各种工法的施工能力

在土木工程建设中，与国外差距较大的是施工机械能力，在地基处理领域情况也是如此。近几年虽有不小改进，但差距还是很大。在深层搅拌法、高压喷射注浆法、振冲法等工法的施工机械能力上都存在较大差距。随着综合国力提高，地基处理施工机械将会有较大的发展。笔者认为不仅要重视引进国外先进施工机械，而且要重视研制国产先进施工机械。只有各种工法的施工机械能力有了较大提高，地基处理水平才能有较大提高。

(2)加强理论研究,提高设计水平

地基处理实践的发展势必然促进地基处理理论的进步，理论的进步又将指导地基处理实践的进一步发展。

加强地基处理理论研究,要加强一般理论研究,如复合地基计算理论、优化设计理论、按沉降控制设计理论等；也要加强各种工法加固地基的机理以及设计计算理论研究。

这里特别要强调优化设计理论研究。地基处理优化设计包括两个层面：一是地基处理方法的合理选用；二是某一方法的优化设计。目前在这两个层面都存在较大的差距。许多地基处理设计仍停留在能够解决工程问题，而不能做到合理选用和优化地基处理设计。地基处理优化设计领域发展潜力很大。

(3)合理控制工后沉降量

前面已经谈到允许工后沉降量的标准影响工程投资和建设工期，因此合理确定工后沉降量的控制标准很重要，同时还要考虑投资效益。笔者认为应允许不同地区、不同工程类别、同

一工程不同路段，所采用标准有所区别。应采用按沉降控制设计思路进行设计。

(4)重视道路工程建设中的前期工作

在基本建设中应重视前期工作。搞好前期工作是做好设计工作的基础，搞好前期工作具有非常高的社会效益和经济效益。在高等级公路设计中一定要重视前期工作，开展必要的调查研究和比较分析，做好设计工作。

(5)发展地基处理技术

随着地基处理理论、地基处理材料、新机械和新工艺的发展，一定会产生地基处理新方法。土工合成材料的应用被称为岩土工程的革命，土工合成材料进一步发展势必促进地基处理新技术的发展。例如用三维土工网格加植被加固边坡是近年发展的新方法。发展地基处理新方法也是工程建设的需要。可以相信一定会有一些新的地基处理方法在工程建设中得到应用。

发展地基处理技术还包括发展地基处理新材料，如深层搅拌专用固化剂等。

(6)提高地基处理技术综合应用水平

近几年，多种地基处理技术的综合应用得到重视和发展，如澳门国际机场人工岛建设中综合应用了换填法、排水固结法、振冲密实法、表层压密法等多种地基处理方法，取得了很好的经济效益和社会效益。多种地基处理技术的综合应用是很重要的方向，随着人们地基处理技术水平的提高，以后在综合应用方面肯定会有较大的发展。

(7)发展地基处理测试技术

地基处理测试技术包括各种地基处理工法本身的质量检验，以及地基处理效果的评价。发展地基处理测试新技术，有助于地基处理实现信息化施工。发展地基处理原位测试、现场试验以及监测技术对提高地基处理技术水平有非常重要的意义，应予以重视。

(8)深化施工管理体制改革，重视专业施工队伍建设

地基处理施工专业性很强，一定要加强专业的分工，加强专业施工队伍的培育、发展和提高。对每种工法的施工队伍不仅要求现场技术人员掌握地基处理理论和实践知识，而且对技术工人也应有一定要求。技术工人需要通过培训，对所从事作业工法的加固机理、材料要求、加固工艺有较全面、系统的了解。通过定期考核，建设一大批相对固定、有资质的专业化地基处理施工队伍。

地基处理是土木工程中非常活跃的领域，也是高等级公路建设中非常重要的环节。高等级公路地基处理设计非常具有挑战性，挑战与机遇并存。可以相信在不远的将来，高等级公路地基处理技术会在普及的基础上得到较大的提高，发展到一个新的水平。

参 考 文 献

1 地基处理手册编委会.地基处理手册.北京：中国建筑工业出版社,2000

2 龚晓南.地基处理技术发展展望.地基处理,第 11卷,第 1期,2000

3 龚晓南.复合地基理论及工程应用.北京：中国建筑工业出版社,2002

4 龚晓南主编.地基处理技术发展与展望.北京：中国水利水电出版社,2004

5 龚晓南.高速公路软土地基处理技术.高速公路软弱地基处理理论与实践（龚晓南等主编）.上海：上海大学出版社,1998

需要全本请访问 www.ertongbook.com