

桩承式加筋路堤设计理论研究进展

费 康¹, 刘汉龙²

(1. 扬州大学岩土工程研究所, 江苏 扬州 225009; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 综述国内外关于桩承式加筋(GRPS)路堤设计理论的研究成果, 分析了土拱效应理论和拉膜效应理论。指出了目前桩承式加筋路堤设计理论的不足, 提出了 GRPS 路堤中路堤、桩和土工合成材料三部分设计中有待进一步研究的问题。

关键词 桩承式加筋路堤 土拱效应 拉膜效应

中图分类号 :TU435

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2008)04-0089-06

Advances in research on design theory of geosynthetic reinforced pile supported embankment//FEI Kang¹, LIU Han-long²
(1. Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Design theory of geosynthetic reinforced pile-supported (GRPS) embankments at home and abroad is reviewed. The representative soil arching theory and tensioned membrane theory are analyzed in detail. The shortcomings of the current design theory are pointed out. Furthermore, some key problems in the design of embankments, piles and geosynthetics, which need further study, are presented.

Key words : geosynthetic reinforced pile-supported embankment; soil arching effect; tensioned membrane effect

根据 2004 年国家制定的高速公路发展规划, 我国将在未来 20 多年修建约 8.5 万 km 的国家级高速公路和一批地方高速公路, 形成国家高速公路网, 以保障我国的经济发展和进步。这意味着一方面要新建大量公路, 另一方面又要对老化或不适应经济发展要求的道路进行修整和拓宽。在软土地区修建或拓宽公路必须解决承载力不足、沉降或不均匀沉降过大、侧向变形过大、整体或局部失稳等问题, 往往需要一定的时间进行地基处理。这期间造成的交通堵塞、物流不畅等问题不仅影响人们的正常出行, 而且会给当地经济带来不利影响, 其损失远超过工程本身的费用。因此发展和完善软弱路基上高速公路的快速修建和拓宽技术对我国经济的长期健康发展十分必要。

缩短施工期的核心实质上就是要选取合适的地基处理方法, 常用的超载预压法或排水板固结方法费用低廉, 但需要相当长的时间来保证地基土固结和强度增长的要求, 并且这类方法会引起相邻建筑物的沉降, 若应用在高速公路拓宽工程中, 会造成新老路堤之间的差异沉降, 或可能造成老路堤侧向失稳。柔性桩(如深搅桩)和散体材料桩(如碎石桩)的

造价低廉, 施工期相对较短, 效果也有一定保证, 在高速公路路基加固中得到了广泛运用。但存在施工质量不易控制、加固深度有限等问题。目前在施工期和道路性能要求较高的重要工程中倾向于采用刚性桩, 如沪宁高速公路苏州段的拓宽就采用了预制管桩进行处理, 江苏省南京市大厂市政公路采用了现浇薄壁管桩进行处理^[1-2]。

刚性桩支撑的路堤(简称桩承式路堤)的性状与常规的柔性桩或散粒体桩的情况是不相同的, 通常可认为后者在路堤荷载作用下桩、土的竖向应变相等, 按照复合地基理论进行设计^[3]。而桩承式路堤中, 桩与土体的弹性模量相差大, 加上路堤本身刚度较小, 桩间路基土与桩之间必然产生差异沉降, 差异沉降越大, 采用桩土等应变假设进行设计的误差也就越大, 而且其结果是不安全的。实质上, 由于桩间土与桩之间的差异沉降, 路堤中将产生抵抗差异沉降趋势的剪应力, 从而将路堤荷载传递给桩顶, 这种荷载转移机理称为土拱效应^[4]。常规的桩承式路堤为了通过土拱效应将路堤荷载传递给桩, 需要采用较小的桩间距或采用大尺寸的桩顶盖板, 费用较大。若在桩顶布置一层土工合成材料加筋垫层, 则可大

基金项目 国家自然科学基金(50679017)

作者简介 费康(1978—), 男, 江苏如皋人, 讲师, 博士, 从事地基处理、岩土数值分析研究。E-mail: fei@hhu.edu.cn

幅度增加桩的间距,降低工程造价。这种采用了土工合成材料加筋垫层的桩承式路堤,称为桩承式加筋(GRPS)路堤,见图 1。根据 Han 等的研究^[5],GRPS 路堤中桩体面积置换率最低可为 10% ~ 20%,远低于常规桩承式路堤中的桩体面积置换率(40% ~ 60%),具有明显的技术经济优点。实践表明,采用 GRPS 结构支撑路堤,具有施工工期短、处理深度大、施工质量易控制、对相邻建筑影响小、加固效果好等特点,尤其适合高速公路拓宽项目。

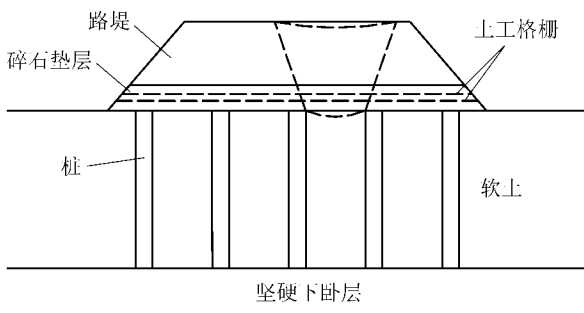


图 1 GRPS 路堤

由于涉及路堤填土、桩、原路基土和土工合成材料之间的相互作用,GRPS 路堤的荷载传递机理与常规的桩承式路堤和柔性桩复合地基又有较大区别,目前也没有形成完善的设计理论。本文拟通过笔者的研究以及收集到的资料对目前有关 GRPS 路堤的国内外研究进展进行总结分析,并在此基础上提出今后研究中亟待解决的几个关键问题,期望为以后类似课题的研究提供参考。

1 GRPS 路堤的荷载传递机理及设计理论

1.1 GRPS 路堤的荷载传递机理

与常规的桩承式路堤相似,GRPS 路堤中的桩与桩间土之间也存在差异沉降,这种差异变形造成了路堤填土中的土拱效应。图 2 为土拱效应发生机理的简单示意图,图中路堤高度为 H ,路堤材料密度为 ρ ,路堤顶面荷载为 p_0 ,土拱效应的产生减少了作

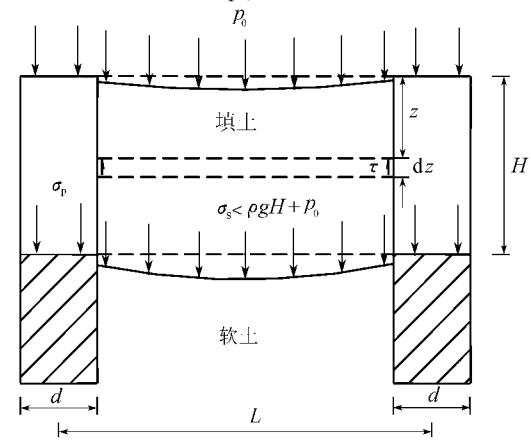


图 2 GRPS 路堤中的土拱效应

用在软土顶面或土工合成材料顶面的平均应力 σ_s ,即 $\sigma_s < \rho gH + p_0$ 。部分路堤荷载被直接传递给桩,并通过桩传递到坚硬的下卧层。由此可见,GRPS 结构处理地基的思路是尽量减小软弱土体所承担的荷载,这与那些通过排水固结等方法提高土体承载能力的地基加固措施是不同的。

Han 等^[6]指出 GRPS 路堤的荷载传递机理除了土拱效应之外,还包括土工合成材料的拉膜效应和应力集中效应。由图 2 可见,土拱效应使部分路堤荷载直接传递给桩,剩余的荷载作用于土工合成材料的顶面。由于桩土间的差异沉降,土工合成材料会产生一定的拉伸变形和拉力,可以承受一定的竖向路堤荷载,并通过拉力的垂直分量传递到桩体上,减少了原路基土的沉降及差异沉降,这就是所谓的拉膜效应,如图 3 所示。另一方面,如果加筋垫层能起到横跨桩间软土的作用,那么在理想情况下,加筋垫层如为绝对刚性,就不会产生不均匀沉降,加筋材料也不会有拉伸,这时候就没有土拱效应和拉膜效应。但由于桩和土体之间的刚度差异,仍然有荷载向桩头集中,即应力集中效应。

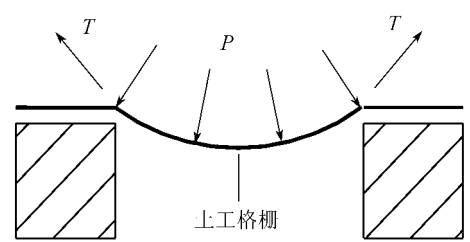


图 3 土工合成材料的拉膜效应

Ohkubo 等^[7]按照轴向抗压刚度相同将三维 GRPS 路堤转换为平面应变条件,采用二维有限元研究了桩间距、桩刚度和土工合成材料层数的影响。

Sa 等^[8]同样采用二维平面有限元对 GRPS 路堤的工作性状进行了分析。计算中对不同桩间距、不同土工合成材料层数进行了分析。研究结果表明,相对于土工合成材料的模量,加筋材料的层数对沉降的影响更明显。

Han 等^[5],Pham 等^[9]选取 GRPS 路堤中的单根桩及等效作用范围作为分析区域进行了轴对称有限元分析。考虑到土工合成材料本身具有各向异性,且在桩的边缘处可能具有拉力集中现象,这些和轴对称条件不相符合,因而轴对称分析不能合理地计算出土工合成材料中的拉力和应变。

费康等^[10]采用三维有限元对一段采用现浇混凝土薄壁管桩的 GRPS 路堤的工作性状及参数敏感性进行分析。分析结果表明土工合成材料的刚度、桩的刚度、桩土刚度比、填土高度等影响加筋垫层、桩、桩间土的相互作用问题,对 GRPS 路堤的工作性

状有着重要的影响,而这些因素在目前的设计理论中并没有得到正确的反映。

陈仁朋等^[11]建立了考虑土-桩-路堤变形和应力协调的平衡方程,分析了路堤、桩、土的荷载传递特性,获得了路堤的土拱效应、桩土荷载分担、桩和土的沉降等结果,其中没有考虑土工格栅的作用。随后,陈仁朋等^[12]利用弹塑性有限元方法研究了桩承式路堤的沉降组成和分布规律、适用条件、荷载分担比的影响因素等内容。计算结果表明路堤沉降主要取决于桩端以下软土层的压缩,荷载分担比随桩托板尺寸和路堤高度的增加而增大,随桩间距的增加而减小。他们还指出,土工格栅对荷载分担比和路堤沉降影响都不大,这一点似和其他学者的研究有所不同^[7-9]。

曹卫平等^[13]通过模型试验,研究了桩土相对位移、路堤高度、桩梁净间距、桩梁宽度及水平加筋体等因素对桩土应力比及路堤沉降的影响。研究结果表明,桩土应力比随桩土相对位移的发展而变化,存在上限值和下限值,当路堤高度与桩梁净间距之比小于1.4时,无论是否使用水平加筋体,路堤顶面均会出现明显的差异沉降;当路堤高度与桩梁净间距之比大于1.6时,路堤顶面不会出现明显的差异沉降。

目前的设计中将土拱效应和拉膜效应简单地分开考虑^[14-16],分两步进行分析:第一步,应用土拱效应理论给出作用在土工合成材料顶面的压力;第二步,根据土工合成材料顶面压力大小,应用拉膜理论确定土工合成材料的拉力。这种方法没有考虑到这些荷载传递分量中存在耦合作用,比如引起拱效应的差异沉降受到自身拱效应程度的影响(拱效应决定了作用于软土地基上的压力),差异沉降决定了土工格栅的拉伸变形及产生的拉力等。

1.2 土拱效应理论

土拱效应一词最早源于 Terzaghi 在 1943 年做的活板门(Trap door)试验^[17]。在这个试验中,土体被放置在活板门的上方,活板门开启后(即相当于 GRPS 路堤中软土顶面的沉降),土体由于失去支撑作用将产生沉降变形,但土体并不会完全塌落, Terzaghi 将这种现象称为土拱效应。

土拱效应的程度可以通过应力折减系数 S_R 来评判,其定义为作用在土工合成材料顶面的平均应力 σ_s 与路堤自重和路面超载引起的竖向平均应力之比,即

$$S_R = \frac{\sigma_s}{\rho g H + p_0} \quad (1)$$

式中参数意义如前, S_R 的范围在 0~1 之间变化,当路堤中没有发生土拱效应时 $S_R = 1$;当路堤荷载全

部直接传递给桩时 $S_R = 0$ 。

Hewlett 等^[18]基于模型试验的结果,从支撑在桩顶的土穹的极限平衡条件出发给出了 S_R 的公式。当极限平衡状态出现在桩顶上的土体中时,

$$S_R = \left\{ \frac{2K_p}{K_p + 1} \left[\left(1 - \frac{d}{s} \right)^{1-K_p} - \left(1 - \frac{d}{s} \right) \left(1 + \frac{d}{s} K_p \right) \right] + \left(1 - \frac{d^2}{s^2} \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

当极限平衡状态出现在土穹顶部时,

$$S_R = \left(1 - \frac{d}{s} \right)^{2(K_p-1)} \left[1 - \frac{s}{\sqrt{2}H} \frac{2(K_p-1)}{2K_p-3} \right] + \frac{s-d}{\sqrt{2}H} \frac{2(K_p-1)}{2K_p-3} \quad (3)$$

式中: K_p 为被动土压力系数; d 为桩的直径或宽度; s 为桩中心间距,其余参数意义同前。

Kempfert 等^[19],根据下限塑性解、模型试验和数值分析的结果提出了相应的计算方法,主要是对低路堤的情况进行了修正。陈云敏等^[20]基于单桩等效处理范围内堤身土体受力平衡改进了 Hewlett 等的方法,对比了弹性和塑性状态下桩体荷载分担比的结果,并对桩间距、桩帽大小和填料内摩擦角对桩体荷载分担比的影响进行了分析。曹卫平等^[21]基于最小势能原理,分析了路堤填土、水平加筋体、桩(桩顶托板)及桩间土之间的相互作用,得到了桩体荷载分担比。

英国的标准 BS 8006^[22]认为当路堤的高度足够高时,即 $H > 1.4(s-d)$ 时,该高度以上的路堤填土荷载通过土拱效应传递给桩,对应的 S_R 为

$$S_R = \frac{2.8s}{(s+d)^2 H} \left[s^2 - d^2 \left(\frac{p_c}{\rho g H + p_0} \right) \right] \quad (4)$$

式中 p_c 为作用于桩顶的竖向压力,根据式(5)确定。

$$\frac{p_c}{\rho g H + p_0} = \left(\frac{C_c d}{H} \right)^2 \quad (5)$$

$$\text{其中 } C_c = \begin{cases} 1.95 \frac{H}{d} - 0.18 & (\text{端承桩}) \\ 1.5 \frac{H}{d} - 0.07 & (\text{摩擦型桩}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 C_c 为经验系数。

Rogbeck 等^[23]指出 BS 8006 方法不够连续和严谨,对于桩直径(或桩顶盖板宽度)与桩间距之比较大的情况所求出的 S_R 为负值。Love 等^[24]则指出 BS 8006 方法不满足竖向的平衡条件。

Russell 等^[25]改进了 Terzaghi 的土拱效应理论,并将其推广到三维情况:

$$S_R = \frac{s^2 - d^2}{4HdK \tan \varphi'} \left[1 - \exp \left(\frac{-4HdK \tan \varphi'}{s^2 - a^2} \right) \right] \quad (7)$$

式中: φ' 为路堤填土的有效摩擦角; K 为土压力系

数,即水平有效应力与竖向有效应力之比。Russell 等^[25]认为 K 应大于静止土压力系数 K_0 ,但比被动土压力系数要小得多,为保守起见,取 1 较为合适。

随后 Russell 等^[26]对这种方法进行了改进,其中侧向土压力系数取 0.5,并将路堤高度的 20% 作为超载对待,这两个变化都提高了作用在土工合成材料顶面上的压力,有利于控制路堤表面的差异沉降。

一些学者的研究表明^[25-28],不同方法所求得的 S_R 相差很大,且计算结果对桩间距、路堤高度等参数的敏感程度也不一样。Russell 等^[25]发现 Hewlett 等^[18]的方法与改进后的 Terzaghi 方法得到的结果最为接近,而与 BS 8006 的结果相差较大。曹卫平等^[29]通过对现场实测数据的分析指出根据 Hewlett 等^[18]及陈云敏等改进的土拱效应计算方法^[20]所得到的桩体荷载分担比与实测结果比较接近,而与 BS 8006 的计算结果差异较大。

1.3 拉膜效应理论

在确定了作用在土工合成材料顶面的荷载之后,接下来的任务就是要确定土工合成材料中的拉力和应变。

Kempfert 等^[19]直接采用了弹性嵌固膜理论来计算土工合成材料中的拉力和应变,其计算出的拉力结果偏大。而其余大多数求解方法都需要对土工合成材料的变形形状做出假设,由此建立土工合成材料顶面压力与土工合成材料拉力之间的关系。如 BS 8006^[22]和 Rogbeck 等^[23]采用了抛物线假设,其建议的公式为

$$T = \frac{W_T(s-d)}{2d} \sqrt{1 + \frac{1}{6\epsilon}} \quad (8)$$

式中: T 为每单位宽度土工合成材料的拉力; ϵ 为土工合成材料中的应变,为了保证路堤表面不出现过大的差异沉降,其一般控制为 6%; W_T 是横跨在桩间的土工合成材料每单位长度上所承受的竖向压力,按式(9)确定:

$$W_T = \frac{\sigma_s(s^2 - d^2)}{2(s - d)} \quad (9)$$

Giroud 等^[30]则认为土工合成材料在桩边固定,变形后土工合成材料在平面内呈圆弧状,计算公式为

$$T = \sigma_s(s - d)\Omega \quad (10)$$

式中: Ω 为无量纲系数,反映了土工合成材料中拉力与其最大竖向变形的关系,可按 Giroud 等^[30]给出的表格确定。

需要指出,尽管研究表明 BS 8006 方法中土拱效应的分析方法存在一定不足,其计算结果与其他方法有较大差异,但是 BS 8006 的土工合成材料拉力分析方法的计算结果与其他方法较接近,结果是可信

的。这意味着可采用不同的土拱效应分析理论计算出 σ_s ,由式(9)确定出 W_T 后按照 BS 8006 的方法计算土工合成材料拉力。

在上述计算土工合成材料拉力的方法中,都没有考虑地基承载能力的影响。而一些研究表明^[31-32],土的抗力将大幅度减小土工合成材料中的拉力。但是如何在设计时考虑路基土的抗力还未能得到解决。所以如果桩间土体由于水位下降、次固结等因素发生沉降,造成土工合成材料底面与路基土顶面脱开,那么就不能考虑土的抗力。另一方面,目前的计算方法中都假设只有 1 层加筋,没有考虑多层加筋的拉力计算^[33]。

2 结论与展望

通过对国内外研究现状的分析可以发现,目前对 GRPS 路堤的研究主要集中在路堤填土的土拱效应和土工合成材料的拉膜效应上。各种方法得到的结果有较大差异,对关键参数的敏感性也不尽相同,加上大多数设计方法将土拱效应和拉膜效应分开单独考虑,没有同时满足路堤填土中的竖向平衡条件和土工合成材料的荷载-应变关系的相容条件,也没有反映路堤填土、桩、路基土和土工合成材料的相互作用及其对 GRPS 路堤性状的影响。这些不确定因素可能带来工程事故隐患或造成巨大的浪费。

另一方面,GRPS 路堤设计中的一些关键问题在现有的方法中也没有得到很好的反映。事实上,一个完整的 GRPS 路堤设计应包括路堤本身的设计、桩的设计和土工合成材料加筋垫层的设计 3 个部分,而现有的设计理论并没有完全涵盖这 3 个方面的内容。笔者认为尚需在以下几个方面做进一步的研究:

a. 对路堤而言,路堤侧向滑动的局部稳定性可通过常规的方法进行分析,而滑动面通过路基土的整体稳定性就要复杂一些。桩的倾斜或断裂会造成路堤在低荷载水平下就发生破坏,这是常规的极限平衡方法无法反映的,也无法采用柔性桩复合地基中常用的复合强度参数的方法。另外,对于 GRPS 路堤来说,路堤表面的差异沉降比路基土的总沉降更重要,这方面的设计方法还很少。

b. 对桩而言,桩间距、桩的布置、桩长等几方面的设计与常规的桩基础设计并没有太大的区别。但由于路基土的沉降大于桩的沉降,桩将受到负摩擦作用。如何在承载力设计时考虑负摩擦作用以保证桩具有足够的安全储备需要进一步研究。

c. 在目前 GRPS 路堤土工合成材料的设计方法中,加筋材料的拉力主要是由竖向路堤荷载引起的,

而路堤侧向扩展变形会造成土工合成材料在水平方向的拉伸,也将在土工合成材料中引起拉力。因此在选用土工合成材料时除了按拉膜理论计算外,还必须考虑到路堤本身的侧向扩展对土工合成材料的要求。另一方面,对于采用多层低强度土工合成材料的GRPS路堤,由于土工合成材料和垫层材料的相互作用,加筋垫层将具有一定刚度,这种情况下拉膜理论是否适合还需要研究。究竟是多层低强度土工合成材料的加固效果好还是单层高强度土工合成材料的加固效果好,目前还缺少相关研究支持。如果采用多层土工合成材料,那么各层加筋材料的位置及间距又如何确定,这些都是设计中要考虑的问题。

参考文献：

- [1] 刘汉龙,费康,马晓辉,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用 :I 开发研制与设计理论[J]. 岩土力学, 2003,24(2) :164-168.
- [2] 刘汉龙,郝小员,费康,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用 :II 工程应用与现场试验[J]. 岩土力学, 2003,24(3) :372-375.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2002.
- [4] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993,120(11) :1917-1938.
- [5] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1) :44-53.
- [6] HAN J, AKINS K. Use of geogrid-reinforced and pile-supported earth structures[C]//O'NEILL M W, TOWNSEND F L. Deep Foundations : An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance. Orlando :ASCE, Geotechnical Special Publication,2002,116 :668-679.
- [7] OHKUBO T, ASADA S, KARUBE D. A study on the reinforcing effects of geogrids over laid on pile group for the embankment foundations [C]//OCHIAI H, YASUFUKU N, OMINE K. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement. Rotterdam :Balkema A A, 1996 :641-646.
- [8] SA C T, PALMEIRA E M, DELLABIANCA L M A, et al. Numerical analysis of reinforced embankments on soft soils [C]//OCHIAI H, OTANI J, YASUFUKU N. Landmarks in Earth Reinforcement : International Symposium on Earth Reinforcement. Lisse :Swets and Zeitlinger, 2001 :265-270.
- [9] PHAM H T V, SULEIMAN M T, WHITE D J. Numerical analysis of geosynthetic :rammed aggregate pier supported embankments [C]//YEGIAN M K, KAVAZANJIAN E. Proceedings of Geo-Trans 2004 Conference : Geotechnical Special Publication No. 126. Los Angeles :ASCE,2004,126 :

- 657-664.
- [10] 费康,刘汉龙,高玉峰. 路堤下现浇薄壁管桩复合地基工作特性分析[J]. 岩土力学,2004,25(9) :1390-1396.
- [11] 陈仁朋,许峰,陈云敏,等. 软土地基上刚性桩-路堤共同作用分析[J]. 中国公路学报,2005,18(3) :7-13.
- [12] 陈仁朋,徐正中,陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. 中国公路学报,2007,20(2) :7-12.
- [13] 曹卫平,陈仁朋,陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(3) :436-441.
- [14] BELL A L, JENNER C, MADDISON J D, et al. Embankment support using geogrids with vibro concrete columns [C]//KARUNARATNE G P, CHEW S H, WONG K S. Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products. Singapore : Southeast Asia Chapter of the International Geotextile Society, 1994 :335-338.
- [15] JENNER C G, AUSTIN R A, BUCKLAND D. Embankment support over piles using geogrids [C]//ROWE R K. Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics. Atlanta, Georgia : Industrial Fabrics Association International, 1998 :763-766.
- [16] BRANDL H, GARTUNG E, VERSPOHL J, et al. Performance of a geogrid-reinforced railway embankment on piles [C]// Publications Committee of XIV ICSMFE. Proc of the Fourteenth Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam :Balkema A A,1997 :1731-1736.
- [17] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics [M]. New York : John Wiley and Sons,1943.
- [18] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3) :12-18.
- [19] KEMPFERT H G, GOBEL C, ALEXIEW D, et al. German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements[C]//FLOSS R. Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference : Geotechnical Engineering with Geosynthetics. München :TUM-Zentrum Geotechnik, 2004 :279-284.
- [20] 陈云敏,贾宁,陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报,2004,17(4) :1-6.
- [21] 曹卫平,陈仁朋,陈云敏. 桩承式加筋路堤桩体荷载分担比计算[J]. 中国公路学报,2006,19(6) :1-6.
- [22] BS 8006, Code of Practice for Strengthened Reinforced Soils and Other Fills[S].
- [23] ROGBECK Y, GUSTAVSSON S, SODERGREN I, et al. Reinforced piled embankments in Sweden-design aspects [C]//ROWE R K. Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta, Georgia : Industrial Fabrics Association International,1998 :755-762.
- [24] LOVE J, MILLIGAN G. Design methods for basally reinforced pile-supported embankments over soft ground [J]. Ground Engineering, 2003, 36(3) :39-43.
- [25] RUSSELL D, PIERPOINT N. An assessment of design

- methods for piled embankments [J]. Ground Engineering, 1997,30(11) 39-44.
- [26] RUSSELL D, NAUGHTON P J, KEMPTON G. A new design procedure for piled embankments [C]//DON K. Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference and 2003 NAGS Conference. Winnipeg, Manitoba: Canadian Geotechnical Society, 2003 858-865.
- [27] HABIB H A A, BRUGMAN M H A, UIJTING B G J. Widening of Road N247 founded on a geogrid reinforced mattress on piles [C]//DELMAS P, GOURC J P, GIRARD H. Geosynthetics: State of the Art, Recent Developments: Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2002 369-372.
- [28] HORGAN G J, SARBYS R W. The arching effect of soils over voids and piles incorporating geosynthetic reinforcement [C]//DELMAS P, GOURC J P, GIRARD H. Geosynthetics: State of the Art, Recent Developments: Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2002 373-378.
- [29] 曹卫平, 凌道盛, 陈云敏. 刚性桩加固高速公路软基土拱效应现场试验研究及其与解析解的比较 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1577-1581.
- [30] GIROUD J P, BONAPARTE R, BEECH J F, et al. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids [J]. Geotextiles and Geomembrane, 1990, 9(1): 11-50.
- [31] JONES C J F P, LAWSON C R, AYRES D J. Geotextile reinforced piled embankments [C]//HOEDT G D. Proceedings of 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products. Netherlands: Taylor & Francis, 1990: 155-160.
- [32] COLLIN J G. Column supported embankment design considerations [C]//LABUZ J F, BENTLER J G. Proceedings of the 52nd Annual Geotechnical Engineering Conference. Minnesota: Canadian Geotechnical Society, 2004 51-78.
- [33] 周镜, 叶阳升, 蔡德钧. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 1-6.

(收稿日期 2007-07-02 编辑 方宇彤)

(上接第 29 页)

火、核电厂水环境研究中数据种类繁多、数据量庞大, 随时间引起变化的因素众多。为高效、准确地处理这些数据并从中提取可靠的信息, 进而为管理决策层服务, 必须建立起可将环境数据、环境信息、水质预报、环境容量评估以及专家决策一体化的火、核电厂水环境管理信息系统。

近年来随着管理科学、信息科学、计算机技术与通信技术高速发展及其相互交融, 管理信息系统(MIS)的产生和发展有了坚实的基础。

建立信息化的模型, 并在此基础上组建现代火、核电厂水环境管理信息系统是把电厂循环冷却水环境影响预测与环境容量评价提到先进水准的必由之路, 也是大水域电厂群建设及运行高效管理的必由之路。

5.2 电厂群梯级开发

对火、核电厂建设而言, “梯级”意为建设时域上的先后、地域上的优选、地方经济发展需求的轻重缓急以及燃料配给的便利程度等。梯级开发旨在有计划、有步骤地规划大水域中火、核电厂的建设, 合理利用大水域资源。梯级开发着眼于大水域整体环境的电厂建设规划, 可避免各个地方自行其是、急功近利、不顾大局的短期行为, 便于联合调度、集中控制以提高自然资源的利用率。

梯级开发研究是一个典型的系统工程, 涉及国家发展计划、地方经济规划、政策法规和自然资源等。火、核电厂水环境管理信息系统可以从自然资

源优化使用的高度上指导梯级开发, 是水域开发决策层做出开发判断可以依赖的工具之一。

6 结 语

2006 年 11 月由国家电力监管委员会主办的和谐电力论坛倡议书第一条 共建规划科学、发展协调的电力。尊重和坚持电力发展的客观规律, 科学确定电力发展目标和发展速度, 实现电力与国民经济之间、电力生产各环节之间的协调发展。

大水域电厂群温排水环境热影响研究中的主要议题, 即环境热容量评估与修复以及大水域火、核电厂梯级开发等, 正是建立在上述倡导的“共建规划科学、发展协调的电力”的科学发展观上。

参考文献:

- [1] 贺益英. 关于火、核电厂循环冷却水余热利用问题 [J]. 中国水利水电科学院学报, 2004, 2(4): 315-320.
- [2] 金岚. 水域热影响概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 177-178.
- [3] GB 3838—2002, 地表水环境质量标准 [S].
- [4] 贺益英. 寒区工业取水口防冰工程新方法的研究 [J]. 水利学报, 2003(1): 7-11.
- [5] 刘兰芬, 贺益英, 潘荔. 火电厂余热综合利用研究评价——全国火电厂余热利用情况调查报告 [R]. 北京: 中国水利水电科学院, 1999.

(收稿日期 2007-07-16 编辑 方宇彤)