

文章编号: 1000-4750(2012)06-0188-08

# 基于延缓固结法的地基工后沉降控制的数值分析

刘远锋<sup>1,2</sup>, 李九林<sup>2</sup>, 徐舜华<sup>1</sup>

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室/天津大学土木工程系, 天津 300072;

2. 中国土木工程集团有限公司科技与设计咨询部, 北京 100038)

**摘 要:** 延缓固结法(地基延缓固结处理法)是一种通过限制工程运营期间地基的孔隙压力消散来消除后期的地基固结沉降,从而达到控制地基工后沉降目的的新型地基处理方法。通过设置深层水平防渗层完善了延缓固结法,并以此为基础完成该文的研究工作。有限元模拟计算表明,延缓固结法处理的地基工后沉降随帷幕的深度增加而减小,但是当帷幕达到一定深度以后,再增加帷幕的深度,工后沉降不再减小,而竖向防渗帷幕的深度非常小时,延缓固结法反而会使地基工后沉降加大。采用有限元方法比较了分别采用延缓固结法和刚性桩处理地基的超孔压分布、竖向位移场的分布、沉降时程曲线和控制地基工后沉降的效果,且粗略地比较了二者的经济性能。在竖向防渗帷幕的深度适宜的情况下,延缓固结法控制地基工后沉降的作用确实存在。当处理深度在一定范围之内时,延缓固结法和刚性桩相比具有经济和技术双重优势。

**关键词:** 岩土工程; 地基处理; 有限单元法; 工后沉降控制; 地基延缓固结处理法; 刚性桩

**中图分类号:** TU472.99 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.08.0576

## NUMERIC ANALYSIS ON GROUND POST-CONSTRUCTION SETTLEMENT CONTROLLING BASED ON CONSOLIDATION DECELERATING METHOD

LIU Yuan-feng<sup>1,2</sup>, LI Jiu-lin<sup>2</sup>, XU Shun-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety of Ministry of Education /

Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Department of Technology, Design and Consultancy, China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** CDM (Consolidation decelerating ground treatment method) is a new ground treatment method which eliminates later ground consolidation settlement and controls the post-construction settlement by confining the pore pressure dissipation of the ground during the operation service period. CDM is refined by setting a deep horizontal anti-seepage layer and the research is based on it. Finite element method calculation shows that the post-construction settlement of ground treated by CDM decreases with the increase of depth of anti-seepage curtain, but no more decrease will occur when anti-seepage curtain is deep enough, while CDM with very shallow anti-seepage curtain results in larger ground post-construction settlement than natural ground. Comparisons of excess pore pressure distribution, vertical displacement field distribution, settlement time process curves and ground post-construction settlement controlling effect between a rigid pile and CDM are made by the finite element method, also, economy of the two methods is compared simply. CDM does can reduce ground post-construction settlement with a feasible depth of the anti-seepage curtain. CDM is better than the rigid pile on economy and technology with the treatment depth within a certain limit.

收稿日期: 2010-08-11; 修改日期: 2011-01-24

通讯作者: 刘远锋(1973—), 男, 江西上饶人, 高工, 博士, 部门助理, 主要从事岩土工程方面的科研(E-mail: liu\_yuanfeng@163.com).

作者简介: 李九林(1970—), 男, 河北保定人, 高工, 理学学士, 副部长, 主要从事铁道工程方面的科研(E-mail: lijulin@cccce.com.cn);

徐舜华(1972—), 女, 河南许昌人, 工程师, 博士后, 主要从事岩土力学方面的研究(E-mail: xushunhua@sina.com).

**Key words:** geotechnical engineering; ground treatment; finite element method; post-construction settlement controlling; consolidation decelerating ground treatment method; rigid pile

近些年来,随着我国经济建设的不断发展,高速铁路、高速公路路基等工程中软弱地基的沉降控制问题显得很突出<sup>[1]</sup>。现行规范规定,高速公路、一级公路一般路堤路基工后沉降不大于30cm,路涵连接段路基工后沉降不大于20cm,路桥连接段路基工后沉降不大于10cm<sup>[2]</sup>。高速铁路则要求更为严格,其要求路基工后沉降量一般路段不应大于15mm,路桥或路隧交界处的差异沉降不应大于5mm<sup>[3]</sup>。研究表明,严格按照设计要求的压实标准填筑的路堤本体的工后沉降量极为有限,所占总工后沉降的比例很小<sup>[4-6]</sup>,所以路基工后沉降的主要来源在于地基部分的沉降。在对地基工后沉降要求极为严格的条件下,地基处理费用占工程的总体费用超过1/3<sup>[7]</sup>,也使得一些承载力完全满足要求,仅仅工后沉降较大,按以前的工程建设标准根本不必进行任何处理的松软地基开始进入工程师的视野<sup>[8]</sup>。工后沉降的控制问题成为如今修建高速铁路、高速公路等沉降要求严格的工程的重重大难题和技术瓶颈,只有开发全新的地基处理技术才能找到路基工程的广阔出路,因此,近些年来国内外的地基处理新技术<sup>[9-16]</sup>发展非常迅速。

通常处于饱和状态的软弱土可以被近似视为由土颗粒和孔隙水组成的固、液两相系统,其固结沉降的过程也就是孔隙水渗透排出的过程。如果通过一定的措施延长其排水路径来增加孔隙水排出的阻力,那么固结沉降会变得比正常情况慢,排水路径越长,阻力就会越大,地基的固结沉降就会越慢,甚至在一定情况下会完全终止。只要采用的地基处理技术能使地基在工程使用期限内产生的工后沉降小于设计要求值,那么这种地基处理技术就能满足工程设计的不要求。基于上述原理,刘远锋<sup>[16]</sup>于2003年提出一种新型的地基处理方法——“地基延缓固结处理法”,英文缩写CDM(Consolidation decelerating ground treatment method),简称“延缓固结法”,专门用于解决软土地基工后沉降控制的问题。

## 1 延缓固结法的工作机理及其完善

延缓固结法是在建筑物地基的四周设置一圈或路基两侧的坡脚位置沿线路方向设置两道竖向

防渗帷幕,而在建筑物或路基的底面铺设一层与竖向防渗帷幕密封连接的水平防渗层。这样的结构形式可防止地基中的超孔隙水压力向地基表面及土层的侧向扩散,只能绕过竖向防渗帷幕向外排出,这样会使其渗透路径加长,增加渗透阻力,从而可减缓固结过程。延缓固结法的基本结构形式如图1所示。

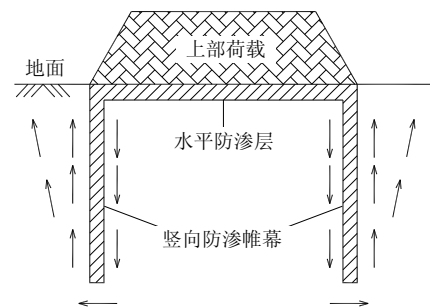


图1 延缓固结法基本结构示意图

Fig.1 The elementary structure sketch of CDM

延缓固结法进行地基处理的关键在于地基内部的竖向防渗帷幕的施工技术、施工质量和工程造价。土质地基垂直防渗技术在我国水利行业的发展时间已经超过50年,尤其是20世纪50年代到70年代之间,垂直防渗技术得到了很大发展<sup>[17]</sup>,并且已经在多个行业有了广泛的应用。目前,形成竖向防渗帷幕的方法有垂直铺塑(也叫垂直铺膜或者土工膜防渗墙)、射水法造连续墙、掏槽成墙法、锯槽成墙法、导管反循环工法、抓斗法成墙、振动切槽法、板桩墙工法、深层搅拌工法、注浆法、高喷法、土固结工法、自凝灰浆法、SMW法、TRD工法等十多种。而且,目前来说土质地基垂直防渗技术已经形成一整套设计、施工、检测等完整的体系,技术比较成熟,造价相对较低(例如垂直铺塑的综合造价大约为20元/m<sup>2</sup>~70元/m<sup>2</sup>)<sup>[18-21]</sup>,可以方便、有效地应用于本项技术当中。

由延缓固结法的基本结构和工作原理可知,由于地基土的固结过程被限制,地基土强度得不到提高,故只能应用于地基承载力和稳定性满足要求,而只需要控制地基工后沉降的松软土地基,对于地基土强度不满足要求的情况,尚需要结合其它方法来提高地基土的强度。而且,由于延缓固结法只封闭了地基的表层和竖向,底部却是敞口的,地基的固结沉降仍然可能发生,对于某些地层条件

下, 仍然较难达到严格的工后沉降控制要求, 有必要对其进行进一步的改进。

为了完善延缓固结法, 在竖向防渗帷幕范围内的地基深层设置一层与竖向防渗帷幕密封连接的深层水平防渗层, 以更好地阻隔地基处理范围内的超孔隙压力的消散, 其结构如图 2 所示。深层水平防渗层可以采用高压旋喷、化学灌浆等方法制成。

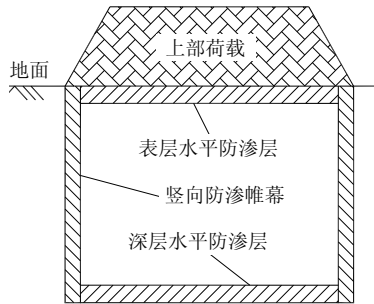


图 2 设置深层水平防渗层的延缓固结法结构示意图

Fig.2 The structure sketch of CDM with deep horizontal anti-seepage layer

对于地基土强度不满足要求, 而需要结合其它方法共同处理的情况, 将另做专门的研究, 限于篇幅, 本文不做讨论。

## 2 延缓固结法处理后的地基沉降规律

为了对延缓固结法控制地基工后沉降的作用进行验证, 结合华北某高速铁路路基试验段的部分基础数据, 设计一个实例, 采用数值计算的方法来研究延缓固结法处理后的地基的沉降规律。

### 2.1 有限元分析模型的建立

考虑均布条形荷载作用于地面水平的半无限空间均质地基之上的情况。荷载集度为 120kPa, 宽度 20m, 方向竖直向下。工程分两个时期: 一是半年的施工期, 施工期内荷载由 0 线性增加至 120kPa; 另一个是竣工以后 70 年的运营期(工后沉降期), 荷载维持竣工时的大小不变。为了尽可能地消除地基的有害沉降, 并部分增强地基土的强度, 到竣工时才将竖向防渗帷幕和表层水平防渗层进行密封连接, 而允许施工期内防渗体包裹范围内的地基土体发生固结和沉降。

为了减少计算工作量, 取条形荷载中心一侧的 1/2 地基来建立有限元分析模型, 模型宽 60m, 高 150m。

竖向防渗帷幕、深层水平防渗层厚度都取 1m。为了简化起见, 认为地基土处于完全饱和状态, 分析过程暂不考虑土的流变特性和渗透、强度特性随

时间的变化。

土体的本构模型采用摩尔库仑模型。所有材料的干密度 $\rho_d=1500\text{kg/m}^3$ , 弹性模量 $E=15\text{MPa}$ , 泊松比 $\mu=0.4$ , 粘聚力 $c=43\text{kPa}$ ,  $\varphi=32^\circ$ , 对于地基土取渗透系数 $k=1\times 10^{-9}\text{m/s}$ , 孔隙比 $e=0.716$ 。

地基土采用平面 8 节点孔压单元来模拟, 竖向防渗帷幕、深层水平防渗层采用平面应变单元来模拟其不透水性。表层水平防渗层仍然采用平面 8 节点孔压单元来模拟, 其透水与否通过孔压边界条件的改变来实现。有限元分析几何模型如图 3 所示, 边界条件设置见表 1。

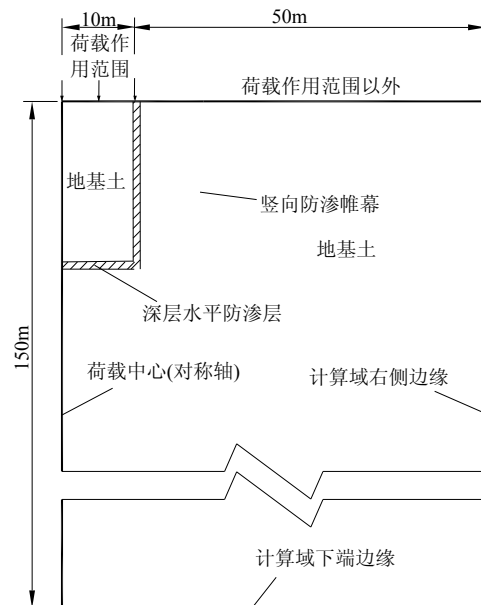


图 3 有限元几何模型

Fig.3 Geometric model of finite element method

表 1 边界条件设置

Table 1 Boundary condition settings

边界位置	边界条件设置	作用时段
计算域下端边缘	竖向位移为 0, 不排水	分析全过程
荷载中心	水平位移和旋转为 0, 不排水	分析全过程
计算域右侧边缘	水平位移为 0, 不排水	分析全过程
荷载范围内的地表	无位移约束, 自由排水	施工期
	无位移约束, 不排水	运营期
荷载范围以外的地表	无位移约束, 自由排水	分析全过程

### 2.2 荷载中心地基工后沉降和竖向防渗帷幕深度的关系

保持其它条件不变, 只变化竖向防渗帷幕深度这一个参数, 做出荷载中心处的工后沉降和竖向防渗帷幕深度的关系曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出一个明显的规律: 随着竖向防渗帷幕深度加大, 荷载中心地基工后沉降逐渐减小, 延缓固结法控制地基工后沉降的作用确实存

在，且有以下两个特征：

1) 总体上来说，工后沉降随帷幕的深度增加而减小。当帷幕深度较浅时，工后沉降随帷幕的深度增加而减小的速率较大；当帷幕深度较大时，工后沉降随帷幕的深度增加而减小的速率较小。本算例当中，当处理深度大于 33m 时，延缓固结法控制工后沉降的效果急剧下降，随着处理深度的进一步增加，工后沉降几乎没有减少。因此，实际使用中，应该存在一个临界深度，竖向防渗帷幕的深度不应大于此临界深度。

上述现象的原因就在于附加应力在浅层较大，引起的超孔压也较大，通过限制浅层地基土超孔压的消散来控制工后沉降的效果自然显著；到一定深度以后，附加应力小到可以忽略了，再增加帷幕的深度来控制工后沉降的效果自然是微乎其微了。

2) 当帷幕深度非常小时(本算例中是 2m，为 1/10 荷载宽度)，相对天然地基(即帷幕深度为 0)来说，延缓固结法对减小工后沉降是起到相反作用的，即反而会使工后沉降加大。

延缓固结法只能减少竖向防渗帷幕深度范围内的工后沉降，如果防渗帷幕深度太浅，则工后沉降的减少量是很有限的，而由于水平防渗层的存在，阻碍了浅层一大部分地基土在施工期的固结过程，将这部分沉降带入运营期，故而反倒使得工后沉降较之不做任何处理的天然地基更大。

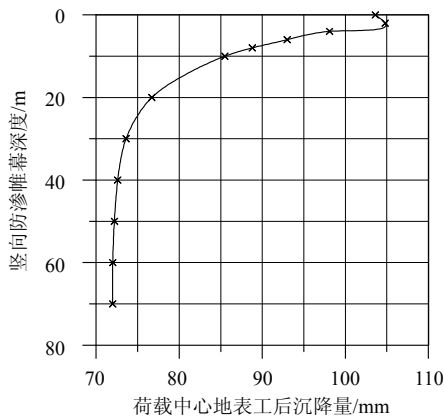


图 4 荷载中心的地表工后沉降和竖向防渗帷幕深度关系  
Fig.4 Curve of ground surface post-construction settlement at load center vs depth of vertical anti-seepage curtain

### 3 延缓固结法和传统地基处理方法的比较

可以将传统的地基处理方法粗略地分成加速地基排水固结过程和对地基进行补强这样两类。塑

料排水板、砂井等属于加速地基排水固结过程的地基处理方法，其工程费用相对较低，但是这类方法往往要求很长的预压期，对于工后沉降要求严格的工程，其要求的预压期则很难让人接受<sup>[8]</sup>。所以，主要将延缓固结法和刚性桩进行比较来了解延缓固结法和传统地基处理的关系。

仍然采用有限元方法来模拟。为简化起见，仍然按照平面应变情况来考虑刚性桩处理的地基。由于刚性桩是空间分布的，按平面问题来考虑具有空间效应的问题，就要先进行相应的转换，这样的转换可以应用等效刚度转换法<sup>[22]</sup>。取刚性桩桩径为 1m，间距为 2m，按正方形布置，表面有 1m 厚的刚性基底，基底不透水。把桩作为理想线弹性材料，其干密度  $\rho_d=1500\text{kg/m}^3$ ，弹性模量  $E=30\text{GPa}$ ，桩转换成连续墙后的弹性模量  $E=11.78\text{GPa}$ ，泊松比  $\mu=0.3$ 。其它地基、荷载条件与上述延缓固结法的算例一致。

#### 3.1 超孔压的分布比较

超孔压的消散是有效应力发生改变的原因，从而也是地基产生固结沉降的根本原因，对比研究延缓固结法和刚性桩地基超孔压的消散、分布对于研究其沉降变形规律有着重要意义。图 5~图 6 是处理深度分别为 10m 和 70m 的上述两种方法处理的地基中的孔压分布等值线图。

从图 5~图 6 可以看出，不同处理深度上述两种地基有一个共同的特征，即施工期末超孔压的分布很不均匀，处理区域及其下附近的超孔压较大，周边区域较小，而运营期末超孔压分布则要均匀很多，其等值线近似为平行地面的直线，数值在深度上的分布也很接近。延缓固结法地基不同于刚性桩

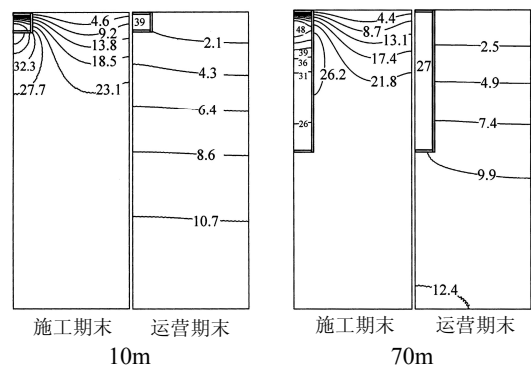


图 5 帷幕深 10m 和 70m 施工期末和运营期末的延缓固结法地基超孔压分布等值线图

Fig.5 Excess pore pressure contour of CDM foundation with curtain depth of 10m and 70m at the end of construction and the end of operation

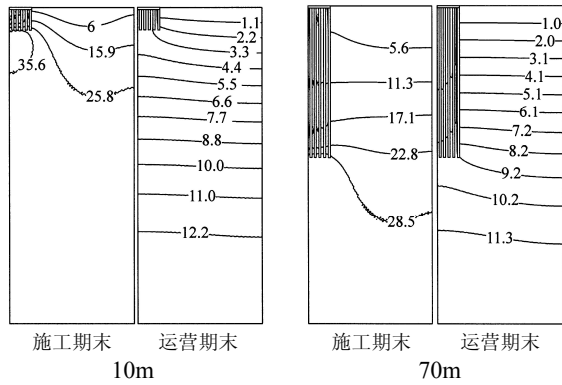


图6 桩长 10m和 70m时施工期末和运营期末的刚性桩地基超孔压分布等值线图

Fig.6 Excess pore pressure contour of rigid pile foundation with pile length of 10m and 70m at the end of construction and the end of operation

地基的一个明显不同的地方是，运营期末处理区域超孔压是均布的，且比起外围的超孔压要高出很多。因此，可以更清楚地认识到尽量减少运营期处理区域的超孔压消散，正是延缓固结法控制工后沉降的基本原理，且帷幕深 10m的情况比帷幕深 70m的情况，处理区域的超孔压保持量要高很多，这也正是延缓固结法帷幕浅比帷幕深时的沉降控制效率更高的原因所在，正如从图 4 中所看到的一样。

3.2 竖向位移场的分布比较

图 7~图 8 是处理深度分别为 10m和 70m的延缓固结法和刚性桩地基中的竖向位移(沉降)场分布等值线图，图 7~图 8 中位移方向以向下为正。

从图 7~图 8 看出，延缓固结法地基沉降的等值线分布比较接近椭圆，处理区域内的沉降不均匀；而刚性桩地基的沉降等值线则呈近似平行于桩基处理范围的矩形，桩长范围内地基竖向位移比较均匀。对于同一种处理方法，处理深度不同，等值线

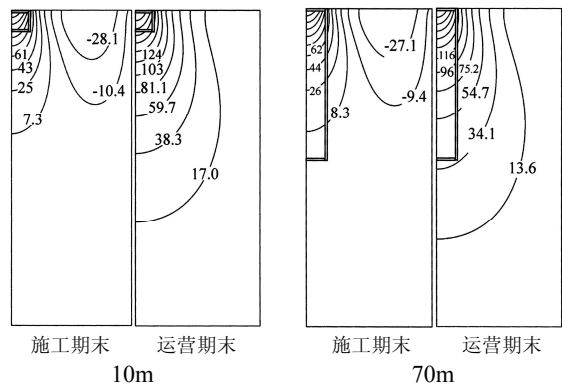


图7 帷幕深 10m和 70m时施工期末和运营期末的延缓固结法地基竖向位移场等值线图

Fig.7 Vertical displacement field contour of CDM foundation with curtain depth of 10m and 70m at the end of construction and the end of operation

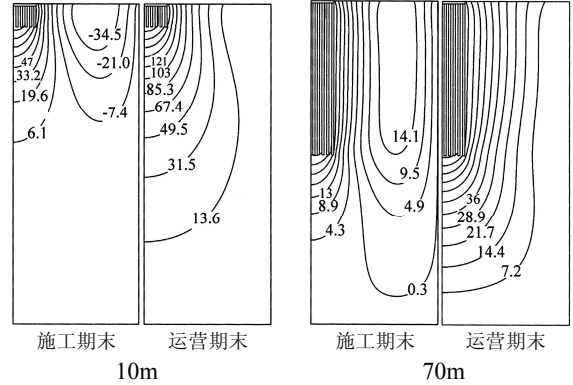


图8 桩长 10m和 70m时施工期末和运营期末的刚性桩地基竖向位移场等值线图

Fig.8 Vertical displacement field contour of rigid pile foundation with pile length of 10m and 70m at the end of construction and the end of operation

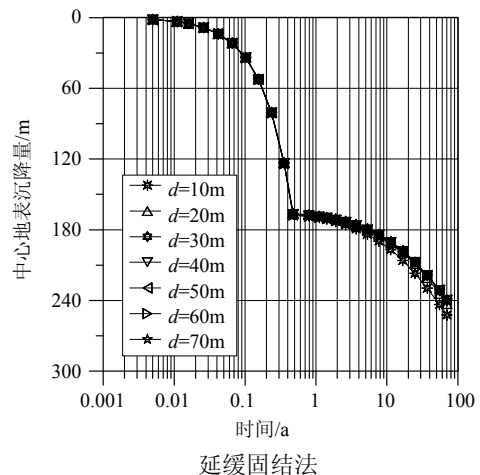
的分布形状没有太大的区别，仅是沉降具体数值大小有所不同而已。

上述分析说明，延缓固结法处理区域的沉降均匀性不如刚性桩地基，但是容易推断出当处理面积较大或者延缓固结法结合其它方法共同处理时，延缓固结法处理地基的沉降均匀性和刚性桩地基的差别将会减小。

3.3 沉降时程曲线的比较

处理深度(对延缓固结法为竖向防渗帷幕深度  $d$ ，对于刚性桩为桩长  $L$ )分别为 10m、20m、30m、40m、50m、60m、70m的延缓固结法地基和刚性桩地基的沉降时程曲线如图 9 所示。

由图 9 看出不同帷幕深度的延缓固结法的沉降时程曲线分布离散程度比刚性桩地基要小很多，也就是说，相对刚性桩来说，延缓固结法可以通过较小的处理深度获得更为接近较深处理深度的效果。同时，还可以由图 9 看出，延缓固结法工后沉降段的曲率很接近刚性桩地基，二者工后沉降速率控制效果相近。



延缓固结法

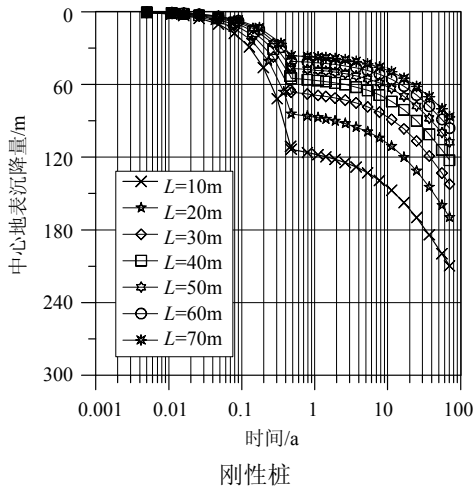


图9 不同处理深度延缓固结法和刚性桩地基沉降时程曲线

Fig.9 Settlement time process curves of CDM and rigid pile foundations with different treatment depth

### 3.4 工后沉降控制效果比较

刚性桩处理后的地基荷载中心处的工后沉降与桩长的关系如图 10 所示。

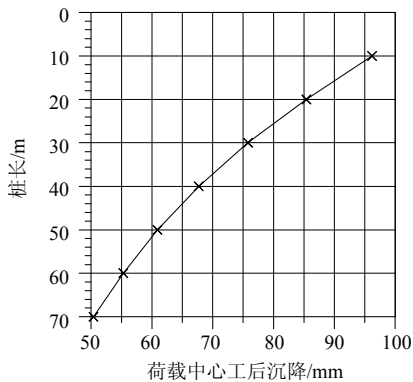


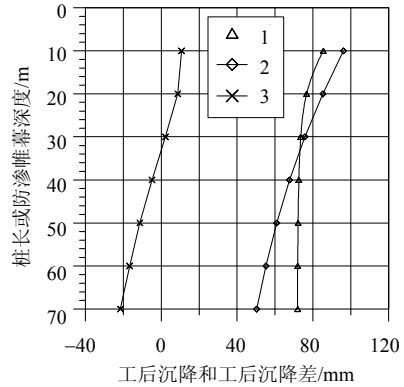
图 10 荷载中心的地基工后沉降和桩长的关系

Fig.10 Curve of ground post-construction settlement at load center vs pile length

为了比较刚性桩和延缓固结法的处理效果，将刚性桩和延缓固结法两种方法各自处理后的地基工后沉降和处理深度的关系曲线作于同一坐标系内，且将相同处理深度的刚性桩和延缓固结法两种方法各自处理后的地基工后沉降之差(前者减去后者)和处理深度的关系曲线也作于此坐标系内，如图 11 所示。

从图 11 可以得出一个很有价值的结论，当处理深度为大约 33m(具体数值将随不同实例的具体参数不同而有所变化)时，延缓固结法和刚性桩处理后的地基工后沉降量相等，即二者具有相同的沉降控制效果，当处理深度小于此深度时，刚性桩地基工后沉降要大于延缓固结法地基工后沉降，也就是

说延缓固结法控制地基工后沉降的效果要优于刚性桩地基；反之，当处理深度大于此深度时，刚性桩地基控制地基工后沉降的效果则要优于延缓固结法。换句话说，相比较于刚性桩而言，处理深度较浅时，延缓固结法控制地基工后沉降的效率更高。



1—延缓固结法处理后地基工后沉降；2—刚性桩处理后地基工后沉降；3—刚性桩和延缓固结法各自处理后的地基工后沉降之差(前者减去后者)

图 11 相同处理深度的两种方法各自处理后的地基荷载中心的工后沉降和处理深度的关系及其差值

Fig.11 Curves of ground post-construction settlement at load center treated separately by the two methods with the same treatment depth vs treatment depth and the difference between them

### 3.5 经济性能的比较

由于延缓固结法尚未确定定型的施工方法，其工程造价还无法精确计算，若考虑采用垂直铺塑的方法形成垂直防渗帷幕，经粗略估算，在竖向防渗帷幕经济施工深度范围内的情况下，延缓固结法造价比刚性桩大约可以节约 1/5 以上。而且有一点是显然的，即由于延缓固结法不需要对地基内部进行满堂处理，其用于大面积的地基沉降控制时造价优势肯定会比较明显。

## 4 结论

延缓固结法通过保持处理区域的超孔压不消散来达到控制工后沉降的目的，是一种完全不同于传统观念的地基处理方法，这种方法对于大面积的地基沉降控制会比较有优势。关于延缓固结法有如下的结论：

(1) 延缓固结法控制地基工后沉降的作用确实存在。

(2) 总体上来说，地基工后沉降随竖向防渗帷幕的深度增加而减小。当帷幕深度较浅时，地基工后沉降随帷幕的深度增加而减小的速率较大；当帷

幕深度较大时,地基工后沉降随帷幕的深度增加而减小的速率较小。且当帷幕达到一定深度以后,再增加帷幕的深度,地基工后沉降不再减小。

(3) 延缓固结法竖向防渗帷幕的深度不能太小。当帷幕深度非常小时,延缓固结法对减小地基工后沉降是起相反作用的,即反而会使地基工后沉降加大。

(4) 延缓固结法地基相对刚性桩地基,前者处理区域的超孔压要大很多,也要均匀很多;前者处理区域的沉降均匀性不如后者,但是二者的工后沉降速率控制效果相近;处理深度较浅时,延缓固结法控制地基工后沉降的效率更高。当处理深度在一定范围之内时,延缓固结法和刚性桩相比具有经济和技术双重优势。

延缓固结法是一种全新的地基处理方法,其工作机理尚不够明晰,为了推动此地基处理方法走向大规模的工程应用,有必要进一步对其处理的地基的受力、变形规律开展室内模型试验以及原位测试试验等更深入的研究,并探索选择最适宜的竖向防渗帷幕施工方法。

#### 参考文献:

- [1] 刘双菊. 桩-板不同连接方式沉降机理及在路基处理中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
Liu Shuangju. The settlement mechanism of different connection between pile and raft and its application in railway subgrade [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [2] JTJ017-96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.  
JTJ017-96, Technical specifications for design and construction of highway embankment on soft ground [S]. Beijing: People's Communication Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 铁建设[2004]157, 京沪高速铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.  
Railway Construction [2004]157, Tentative design specifications for high-speed railway from Beijing to Shanghai [S]. Beijing: China Railway Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 王炳龙, 周顺华, 杨龙才. 高速铁路软土路基工后沉降试验研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1163—1167.  
Wang Binglong, Zhou Shunhua, Yang Longcai. Experimental study on soft soil settlement of high-speed railway subgrade after construction [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1163—1167. (in Chinese)
- [5] 杨广庆, 刘树山, 刘田明. 高速铁路路基设计与施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.  
Yang Guangqing, Liu Shushan, Liu Tianming. Design and construction of the high-speed railway subgrade [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 屈晓辉. 秦沈客运专线主要设计技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 32—38.  
Qu Xiaohui. Main design technology of Qinhuangdao-Shenyang dedicated passenger railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 32—38. (in Chinese)
- [7] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
Zhang Chenghou, Yuan Wenming, Dai Jiqun. Soft ground treatment of highway [M]. Beijing: Chinese Construction Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 吴连海, 刘远锋. 高速铁路松软土地基变形特征及治理技术研究[R]. 天津: 铁道第三勘察设计院, 2004.  
Wu Lianhai, Liu Yuanfeng. Study on deformation characteristic and treatment technology for high-speed railway subgrade on loose ground [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute, 2004. (in Chinese)
- [9] Zayyat M M, Jackson A W, Tanaka T, et al. Foundation soil improvement using vibro compaction combined with geo grids [J]. Innovations in Grouting and Soil Improvement, 2005: 212—222.
- [10] Plomteux Cyril, Porbaha Ali, Spaulding Charles. CMC Foundation system for embankment support——a case history [J]. Geo-Support, 2004: 312—325.
- [11] Wong Daniel O, Fitz Patrick Brendan T, Wissmann Kord J. Stabilization of retaining walls and embankments using rammed aggregate piers [J]. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, 2001, 7: 1866—1875.
- [12] 郑刚, 刘冬林, 顾晓鲁. 预置劲芯夯实水泥土桩及其施工方法[P]. 中国: ZL 200410093879.5, 2004-12-9.  
Zheng Gang, Liu Donglin, Gu Xiaolu. Tamped cement soil pile with preinstalled rigid core and its construction method [P]. China: ZL 200410093879.5, 2004-12-9. (in Chinese)
- [13] 郑刚, 顾晓鲁, 刘冬林. 桩顶设置完全柔性桩垫的复合地基和复合桩基及其施工方法[P]. 中国: ZL 200410093878.0, 2004-12-9.  
Zheng Gang, Gu Xiaolu, Liu Donglin. Compound foundation and compound pile foundation with entire flexible mat on the top of the piles and its construction method [P]. China: ZL 200410093878.0, 2004-12-9. (in Chinese)
- [14] 徐士龙. 快速“高真空击密法”软地基处理工法[P]. 中国: ZL 01127046.2, 2001-07-28.  
Xu Shilong. Fast high vacuum densification method for soft ground treatment [P]. China: ZL 200410093879.5, 2004-12-9. (in Chinese)
- [15] 刘汉龙, 马晓辉, 宫能和. 软基处治大直径现浇管桩复合地基施工方法[P]. 中国: ZL 02112538.4, 2002-1-14.  
Liu Hanlong, Ma Xiaohui, Gong Nenghe. Construction method for compound foundation on soft ground treated with large diameter pipe pile casted in situ [P]. China: ZL 02112538.4, 2002-1-14. (in Chinese)

- [16] 刘远锋. 地基延缓固结处理法 [P]. 中国: ZL 03130321.8, 2003-6-30.  
Liu Yuanfeng. Consolidation decelerating ground treatment method [P]. China: ZL 03130321.8, 2003-6-30. (in Chinese)
- [17] 曹宏德. 垂直防渗技术进展探讨 [J]. 人民珠江, 2001(1): 42—44.  
Cao Hongde. Discussion on evolvement of vertical seepage control technique [J]. Pearl River, 2001(1): 42—44. (in Chinese)
- [18] 杨国顺, 刘伟, 党爱琴. 垂直防渗单价初析 [J]. 水利科技与经济, 2002, 8(3): 151—152.  
Yang Guoshun, Liu Wei, Dang Aiqin. The preliminary unit price analysis of the vertical seepage control for the dyke [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2002, 8(3): 151—152. (in Chinese)
- [19] 陶秀玉, 乔建利, 张立新, 等. 垂直铺塑防渗技术及其应用 [J]. 山东水利科技, 1995(1): 24—29.  
Tao Xiuyu, Qiao Jianli, Zhang Lixin, et al. Technologies and its application of seepage control by vertically placing geomembrane [J]. Water Resources Science and Technology of Shandong, 1995(1): 24—29. (in Chinese)
- [20] 刘宾, 李洪德, 赵明杰. 高密度电法在地下防渗墙检测中的应用 [J]. 华北地震科学, 2004, 22(4): 50—52.  
Liu Bin, Li Hongde, Zhao Mingjie. Application of high density electric method in the detection of underground anti-seepage walls [J]. North China Earthquake Sciences, 2004, 22(4): 50—52. (in Chinese)
- [21] 郭秀军, 宋克民, 张晓培, 等. 利用双排列CP电阻率测试技术进行垂直铺塑施工质量检测研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(18): 3266—3270.  
Guo Xiujun, Song Kemin, Zhang Xiaopei, et al. Conformation detection of geomembrane vertically laid underground with two-row CP electrode array [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 24(18): 3266—3270. (in Chinese)
- [22] 史晓慧. 坡积土湿化变形试验与数值模拟 [D]. 南京: 河海大学, 2008.  
Shi Xiaohui. Wetting deformation test and numerical simulation of slope-wash-soil [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese)

(上接第 137 页)

- [8] 郑刚, 王丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 680—687.  
Zheng Gang, Wang Li. Finite element analysis of bearing capacity of pile under inclined load in layered soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 680—687. (in Chinese)
- [9] 栾茂田, 金崇磐, 林皋. 非均质地基上浅基础的极限承载力 [J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4): 14—27.  
Luan Maotian, Jin Chongpan, Lin Gao. Ultimate bearing capacity of shallow footings on nonhomogeneous soil foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(4): 14—27. (in Chinese)
- [10] Salencon J, Pecker A. Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads part I: Purely cohesive soils [J]. European Journal of Mechanics and Applied Solids, 1995, 14: 349—375.
- [11] 张其一. 复合加载模式下地基失效机制研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2940—2944.  
Zhang Qiyi. Study of failure patterns of foundation under combined loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2940—2944. (in Chinese)
- [12] Mohammed Hjiqj, Andrei V Lyamin, Scott W Sloan. Bearing capacity of a cohesive-frictional soil under non eccentric inclined loading [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(6): 491—516.
- [13] 郑爱元. 复杂工况下三维地基极限承载力可靠度研究之一: 地基极限承载力的三维解析解 [J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 6—9, 24.  
Zheng Aiyuan. Three dimensional analytic solution for ultimate bearing capacity of ground under complicated loading conditions [J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 6—9, 24. (in Chinese)
- [14] Roberto Paolucci, Alain Pecker. Soil inertia effects on the bearing capacity of rectangular foundations on cohesive soils [J]. Engineering Structures, 1997, 19(8): 637—643.
- [15] DL/T 5219-2005, 架空送电线路基础设计技术规定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
DL/T 5219-2005, Technical regulation for designing foundation of overhead transmission line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 叶列平. 混凝土结构 [M]. 第2版, 上册. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
Ye Lieping. Concrete structures [M]. 2nd ed, Volume I. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.  
Chen Zhongyi, Zhou Jingxing, Wang Hongjin. Soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese)