

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.013

水平排水砂垫层对天然地基固结效率影响分析

徐梨丹^{1,2}, 雷国辉^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对天然地基上的水平排水砂垫层, 结合地基土体的渗透系数和厚度, 综合考虑砂垫层的渗透系数、宽度和厚度对地基固结的影响, 采用平面应变有限元方法, 通过参数分析, 研究砂垫层与地基参数共同作用对地基固结效率的影响, 并采用砂垫层与地基的集总参数, 分析其与地基固结效率之间的关系。结果表明: 现行规范对于天然地基上砂垫层渗透系数的要求偏于保守; 地基固结效率随集总参数的增大呈双曲线形非线性增加, 且存在一个集总参数值, 可以满足最优固结效率要求并可作为设计控制指标, 用于不同地基土质条件下砂垫层的设计计算依据。

关键词: 天然地基; 砂垫层渗透系数; 砂垫层宽度; 砂垫层厚度; 软土固结; 有限元分析; 集总参数
中图分类号: TU470 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)01-0078-06

Effect of horizontal sand drainage cushion on consolidation efficiency of natural ground

XU Lidan^{1,2}, LEI Guohui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With regard to a horizontal sand drainage cushion on natural ground, a parameter study using the plane strain finite element method was carried out to investigate the effects of the parameters of the sand cushion and ground on the efficiency of ground consolidation. The influences of the permeability, thickness, and width of the sand cushion on ground consolidation were considered, together with the permeability and thickness of ground soil. Meanwhile, a lumped parameter for the sand cushion and ground soil was adopted, and its relationship with the ground consolidation efficiency was analyzed. It was found that the permeability of the sand cushion on natural ground required by the existing technical specification was unreasonable. The ground consolidation efficiency increases nonlinearly, in a hyperbolic manner, with the lumped parameter. There exists a certain value of the lumped parameter that can meet the requirements of optimum consolidation efficiency. This value can be used as a controlling index for designing a sand cushion on the ground with various soil conditions.

Key words: natural ground; permeability of sand cushion; width of sand cushion; thickness of sand cushion; soft soil consolidation; finite element analysis; lumped parameter

砂垫层作为地基固结的地表水平排水边界已在工程中广泛采用^[1-3], 但是, 如果设计和应用不当, 反而会对工后沉降量及地基稳定性造成不利影响^[4-5], 其重要性不可忽视。然而, 由于缺乏有效的设计计算方法, 实际工程中一般只依据经验或有关规范的规定来确定设计参数。《地基处理手册》^[6]认为, 砂垫层一般采用级配良好的中粗砂, 渗透系数不低于 2×10^{-4} m/s, 垫层的厚度按软基所处条件确定, 对陆上一般软土地

收稿日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51278171); 中央高校基本科研业务费专项(2014B04914)

作者简介: 徐梨丹(1991—), 女, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: xldhhu@163.com

基,厚度为 30~50 cm,对于水下软基施工条件,厚度大于 100 cm。JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》^[7]则规定,预压法处理地基时,砂垫层砂料宜用中粗砂,渗透系数应大于 10^{-4} m/s,砂垫层的厚度不应小于 0.5 m。

对于水平排水砂垫层的研究并不多见。Gibson 等^[8]推导了含夹砂层水平向排水条件下黏土土堤堤身竖向固结的解析解,提出采用夹砂层中超孔隙水压力消散程度评估其排水效率的概念(并得到 Sills^[9]分析的 3 个工程案例的实测结果验证),其参数分析结果表明,要使夹砂层达到完全透水条件,其水平向渗透系数至少应为黏土竖向渗透系数的 10^6 倍,当两者的比值大于 3×10^4 时,夹砂层中的平均超孔压将小于其上覆土堤荷重所引起超孔压的 30%。他们认为,从工程实用角度考虑,该比值是可接受的。不过,Gibson 等^[8]的分析仅适用于含夹砂层土堤堤身的固结效率分析,并不适用于地表设置砂垫层地基的固结效率分析。Jang 等^[10]针对某含夹砂层黏土地基的固结开展了二维有限元分析,黏土的渗透系数为 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ m/s 量级,结果表明,当夹砂层的渗透系数超过 10^{-5} m/s 时,则相当于自由排水条件。刘吉福^[11]根据水平排水体排水能力等于地基排水速率的原则,针对不同断面形状的砂垫层,提出了依据砂垫层中水头的水平向分布、地基固结沉降速率、砂垫层宽度和渗透系数,确定砂垫层厚度取值的理论计算公式。李玲玲等^[12]针对某滩涂圈围海堤工程采用塑料板排水固结、土工格栅加筋以及吹填粉细砂筑堤的过程开展有限元分析,地基待固结土体水平向渗透系数为 10^{-9} m/s 量级,砂垫层采用充填粉细砂的土工管袋(厚度约 0.8 m,宽度约 100 m),结果表明,当砂垫层渗透系数大于 5×10^{-5} m/s 时,地基的固结、变形和稳定与地基表面为完全透水条件下的结果相近。王路军等^[13]针对另一滩涂圈围海堤工程采用塑料板排水固结和吹填粉细砂筑堤的过程开展有限元分析,砂垫层采用 2 层充填粉细砂土工管袋(总厚度为 2.0 m,宽度为 56.0 m),根据计算得到垫层中超孔压不超过堤身荷载 5% 的原则,确定垫层渗透系数应不小于 3.8×10^{-5} m/s,并提出了垫层厚度 T 和渗透系数 k 的设计控制指标 $\delta_{\min}$,要求 $Tk \geq \delta_{\min}$,给出了 $\delta_{\min}$ 的取值经验公式(其取决于堤身与垫层渗透系数的比值,并近似与垫层宽度的平方成正比)。

水平排水砂垫层的设计不仅依赖于砂垫层本身的渗透系数、厚度和宽度,还与地基待固结土体的渗透系数和厚度有关。现有的研究成果中还没有综合考虑这些参数共同作用影响且较为普适的设计计算方法。为此,笔者针对天然软土地基及堤身不透水情况下的水平排水砂垫层,采用平面应变有限元方法,通过参数分析,研究砂垫层与地基参数共同作用对地基二维固结效率的影响。借鉴 Tan 等^[14]针对含夹砂层水平向排水条件下的吹填黏土围垦地基竖向(一维)固结问题提出的夹砂层排水与地基固结效率集总参数,通过有限元计算,分析该集总参数与地基固结效率的关系,得到最优固结效率所对应的砂垫层与地基集总参数值,以其作为设计控制指标,期望为不同地基土质条件和土堤宽度条件下砂垫层的设计提供依据。

1 有限元计算模型

图 1 为地表设置水平排水砂垫层地基的固结问题示意图(其中 u 为超静孔隙水压力, z 为竖直方向坐标, k_s 为砂垫层水平向渗透系数, k_c 为黏土层渗透系数, H_s 为砂垫层厚度, H 为黏土层厚度, L 为砂垫层半宽)。该砂垫层顶面为完全不透水的土堤,通过土堤的重力作用为地基固结提供预压荷载。本文采用 Abaqus 软件对其进行平面应变有限元分析。

根据对称性,取图 1 所示几何形状的 1/2 开展计算分析,其有限元计算模型如图 2 所示。在左右边界上施加水平向位移约束和不透水边界条件,在底边界上施加竖向和水平向位移约束以及不透水边界条件,将砂垫层的顶面设置为不透水边界,在固结计算时将砂垫层的坡面位置以及砂垫层外的地表设置为透水边界。计算模型中,单元的类型均采用平面四节点孔压单元 CPE4P。砂垫层和地基待固结土体的厚度根据参数分析要求而确定。通过敏感性分析,根据模型右边界超静孔隙水压力为零的原则,确定计算模型的宽度为 100 m。同时,有限元网格的剖分,也通过敏感性分析,根据计算结果收敛的原则,确定网格的尺寸:砂垫层中网格尺寸为宽 0.5 m、厚 0.1 m,土体中网格尺寸为宽 0.5 m、厚 0.5 m。

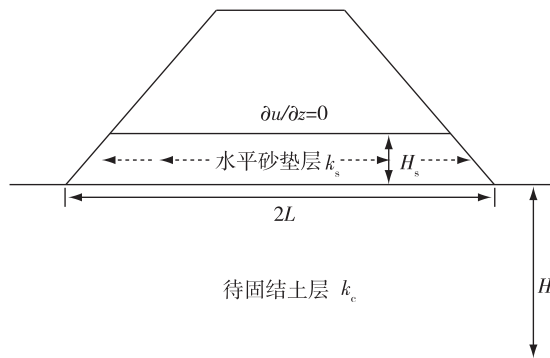


图 1 含水平排水砂垫层地基固结问题示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ground consolidation covered with horizontal sand drainage cushion

计算过程中假设静止侧压力系数为 0.5, 考虑土体的初始应力为其自重应力, 同时, 考虑到地基固结速率对预压荷载大小的不敏感性, 施加 100 kPa 均布荷载于砂垫层顶面进行分析。在加荷分析步, 所有边界均设置为不透水边界, 以生成初始超静孔隙水压力。在固结分析步, 则将砂垫层坡面位置以及砂垫层外的地表设置为透水边界。考虑到本文的重点在于固结分析, 因此对于土体和砂垫层的力学性质参数做简化处理, 将土体和砂垫层均假设为线弹性材料。土体的弹性模量为 2.5 MPa, 泊松比为 0.35。砂垫层的弹性模量为 35 MPa, 泊松比为 0.2。土体的密度取为 1800 kg/m^3 。为使砂垫层的自重不引起地基土体的附加应力, 将其密度取为 0 kg/m^3 。在 Abaqus 有限元固结分析中, 需要设定孔隙比参数。不过, 试算结果表明, 该参数对于本文所采用模型得到的沉降和固结计算结果没有影响, 因此将其取为定值。假设地基土体的孔隙比为 1.5, 砂垫层的孔隙比为 0.5。

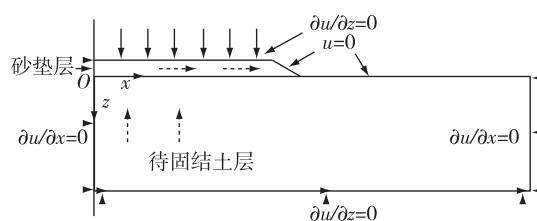


图2 有限元计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element model

2 砂垫层参数影响分析

为评估砂垫层的参数变化对地基固结的影响, 取地基土层的厚度 H 为 20 m, 渗透系数 k_e 为 10^{-9} m/s , 通过分别改变砂垫层的渗透系数、宽度和厚度, 开展计算分析, 研究这些砂垫层参数对于地表砂垫层中心点以下 15 m 深度处的超静孔隙水压力消散, 以及地表砂垫层中心处固结度随时间变化的影响。该固结度定义为地表砂垫层中心处某时刻的沉降量占其最终沉降量的百分比。

同时, 在保持其他各项参数不变的情况下, 将砂垫层的渗透系数 k_s 取为 1 m/s , 将其作为完全透水边界条件开展计算, 得到相应的结果, 用于对比分析并确定砂垫层满足完全透水边界条件时的参数取值。

2.1 砂垫层渗透系数对地基固结的影响

取砂垫层半宽 L 为 45 m, 厚度 H_s 为 0.5 m, 渗透系数 k_s 分别为 1 m/s (即完全透水)、 10^{-4} m/s 、 10^{-5} m/s 、 10^{-6} m/s 和 10^{-7} m/s 进行计算, 得到地表砂垫层中心点以下 15 m 深度处的超静孔隙水压力和地表砂垫层中心处的固结度分别如图 3 和图 4 所示。可以看出, 砂垫层的渗透系数对超静孔压消散速率和固结速率有显著影响。当砂垫层的渗透系数为 10^{-5} m/s 时, 超静孔隙水压力的消散与固结度随时间的发展与完全透水情况下的结果几乎是完全相同的。这说明, 当砂垫层的渗透系数为 10^{-5} m/s 时, 已满足完全透水边界条件。笔者认为《地基处理手册》^[6] 要求砂垫层的渗透系数不低于 $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 《建筑地基处理技术规范》^[7] 要求砂垫层的渗透系数应大于 10^{-4} m/s , 两者皆明显偏于保守, 砂垫层渗透系数的经济设计仍有潜力可以挖掘。

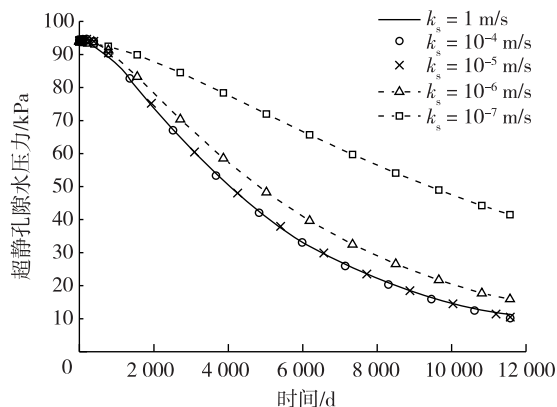


图3 砂垫层渗透系数对超静孔隙水压力消散的影响

Fig. 3 Effect of permeability of sand cushion on excess pore-water pressure dissipation

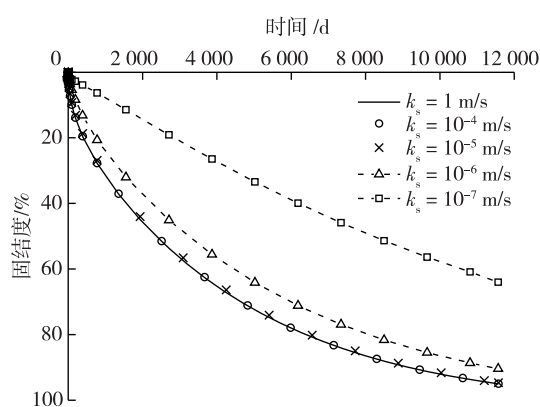


图4 砂垫层渗透系数对固结度的影响

Fig. 4 Effect of permeability of sand cushion on degree of consolidation

2.2 砂垫层宽度对地基固结的影响

取砂垫层厚度 H_s 为 0.5 m, 渗透系数 k_s 分别为 1 m/s (即完全透水)、 10^{-5} m/s 、 10^{-6} m/s 和 10^{-7} m/s , 砂垫层半宽分别为 30 m 和 60 m 进行计算, 得到地表砂垫层中心点以下 15 m 深度处的超静孔隙水压力和地表砂

垫层中心处的固结度分别如图5和图6所示。可以看出,砂垫层宽度越小,超静孔压消散速率和固结速率就越大,这是由于砂垫层的水平向排水距离缩短所致。对于半宽为30 m的砂垫层,当其渗透系数为 10^{-6} m/s时,已接近满足完全透水边界条件;而对于半宽为60 m的砂垫层,当其渗透系数为 10^{-6} m/s时,却距离满足完全透水边界条件还有一段明显的差距。这说明,对于不同的砂垫层宽度,满足完全透水边界条件所需的砂垫层渗透系数的取值并不相同。砂垫层宽度越小,满足完全透水边界条件所需的渗透系数则要求越低。因此,在砂垫层设计时仅仅规定砂垫层渗透系数的限值并不合适。

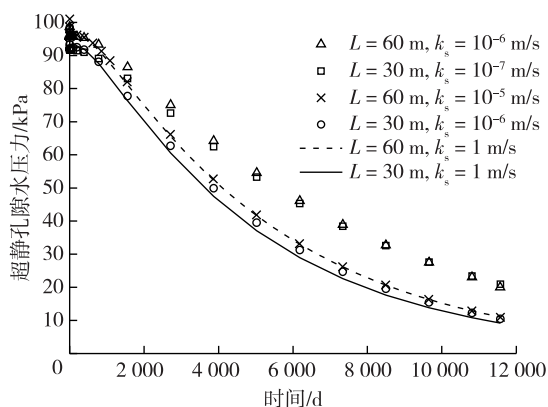


图5 砂垫层宽度对超静孔隙水压力消散的影响

Fig. 5 Effect of width of sand cushion on excess pore-water pressure dissipation

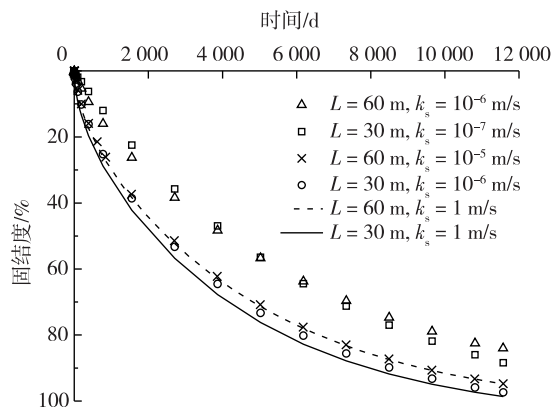


图6 砂垫层宽度对固结度的影响

Fig. 6 Effect of width of sand cushion on degree of consolidation

2.3 砂垫层厚度对地基固结的影响

取砂垫层半宽 L 为45 m,渗透系数 k_s 分别为1 m/s(即完全透水)、 10^{-5} m/s、 10^{-6} m/s和 10^{-7} m/s,厚度 H_s 分别为0.3 m和2.0 m进行计算,得到地表砂垫层中心点以下15 m深度处的超静孔隙水压力和地表砂垫层中心处的固结度分别如图7和图8所示。从完全透水情况下的计算结果可以看出,砂垫层的厚度大小对于超静孔压消散速率和固结速率的影响甚微。但是,对于不同厚度的砂垫层,满足完全透水边界条件所需的渗透系数并不相同。比如,对于厚度为0.3 m的砂垫层,当其渗透系数为 10^{-5} m/s时,已接近满足完全透水边界条件;而对于厚度为2.0 m的砂垫层,当其渗透系数为 10^{-6} m/s时,即已接近满足完全透水边界条件。这说明,对于不同的砂垫层厚度,满足完全透水边界条件所需的砂垫层渗透系数的取值并不相同。砂垫层厚度越大,满足完全透水边界条件所需的渗透系数则要求越低。因此,在砂垫层设计时应结合地基土体的渗透系数和厚度,综合考虑砂垫层的渗透系数、宽度和厚度对地基固结的影响。

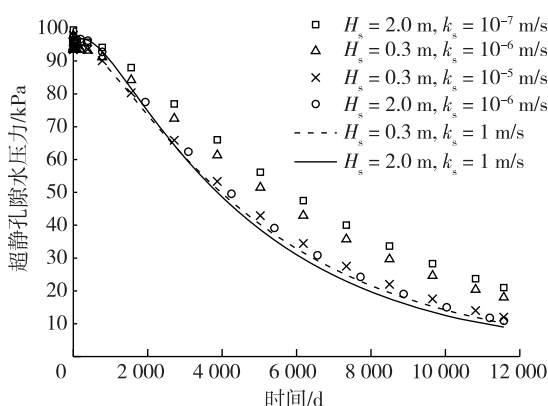


图7 砂垫层厚度对超静孔隙水压力消散的影响

Fig. 7 Effect of the thickness of sand cushion on excess pore-water pressure dissipation

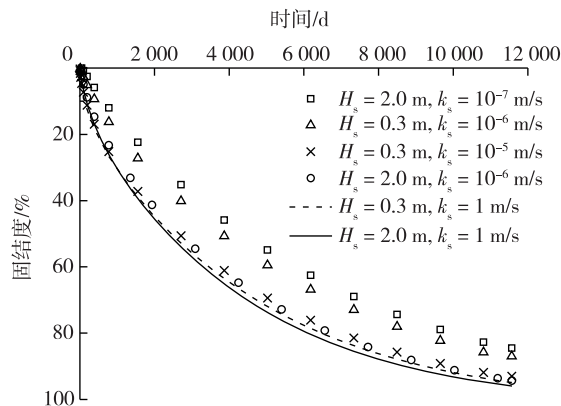


图8 砂垫层厚度对固结度的影响

Fig. 8 Effect of thickness of sand cushion on degree of consolidation

3 砂垫层设计指标分析

3.1 集总参数 λ 和固结效率系数 η'_{90}

Tan 等^[14]针对含夹砂层水平向排水条件下的吹填黏土地基的固结问题,建立了固结控制方程,根据该方程确定地基的固结受夹砂层与黏土的集总参数 λ 控制,其表达式为

$$\lambda = \frac{k_s}{k_c} \frac{H}{L} \frac{H_s}{L} \quad (1)$$

为评估 λ 对地基固结的影响,Tan 等^[14]定义地基固结度达到 90%时的效率系数为

$$\eta_{90} = \frac{\lg(T_{90})_F - \lg(T_{90})_S}{\lg(T_{90})_F - \lg(T_{90})_P} \quad (2)$$

式中: $(T_{90})_F$ 、 $(T_{90})_P$ 、 $(T_{90})_S$ ——在保持其他参数不变的情况下,夹砂层分别为完全不透水、完全透水以及实际工况条件下,地基固结度达到 90%时所需时间对应的无量纲化时间因数。当夹砂层满足完全透水边界时 $\eta_{90} = 1$,当其满足完全不透水边界时 $\eta_{90} = 0$ 。

考虑到本文天然地基砂垫层水平排水固结问题与 Tan 等^[14]分析的夹砂层黏土地基固结问题的相似性,本文采用式(1) λ 和式(2) η_{90} 的概念,分析砂垫层和地基参数综合作用对天然地基固结效率的影响。为消除不同计算参数情况下无量纲化时间因数的不同对计算结果可比性的影响^[15],采用实际时间确定固结效率:

$$\eta'_{90} = \frac{\lg(t_{90})_F - \lg(t_{90})_S}{\lg(t_{90})_F - \lg(t_{90})_P} \quad (3)$$

式中: $(t_{90})_F$ 、 $(t_{90})_P$ 、 $(t_{90})_S$ ——在保持其他参数不变的情况下,砂垫层分别为完全不透水($k_s = k_c$)、完全透水($k_s = 1 \text{ m/s}$)以及实际工况条件下,地基固结度达到 90%时所需时间。考虑到对于本文所研究的固结问题,其时间因数不容易确定,式(3)中不涉及时间因数的定义,因此,采用式(3)的概念评价固结效率更为合理。

考虑到砂垫层中心位置处地基的固结效率是整个天然地基固结效率的关键控制指标,本文采用该位置处的固结度来评价地基的固结效率。通过有限元计算,得到在保持其他参数不变的情况下的 $(t_{90})_F$ 、 $(t_{90})_P$ 和 $(t_{90})_S$,将其代入式(3)则可得到 η'_{90} 。通过分析 λ 与 η'_{90} 的关系,以研究其对天然地基固结的影响,确定砂垫层的设计控制指标。

3.2 计算参数和工况

根据上述分析思路,通过有限元参数分析,开展了大量计算,研究砂垫层排水对地基固结效率的影响。计算参数取值如下:地基土层 $H = 10 \text{ m}$ 、 20 m 、 30 m , $k_c = 10^{-8} \text{ m/s}$ 、 10^{-9} m/s 、 10^{-10} m/s ;砂垫层 $H_s = 0.3 \text{ m}$ 、 0.5 m 、 1.0 m 、 2.0 m , $L = 30 \text{ m}$ 、 45 m 、 60 m , $k_s = 10^{-4} \text{ m/s}$ 、 10^{-5} m/s 、 10^{-6} m/s 、 10^{-7} m/s 。由上述参数的组合得到计算工况共计 432 种。将上述参数代入式(1),可得到每种工况对应的砂垫层与地基土体的集总参数 λ 。通过有限元计算,得到砂垫层中心位置处地基固结度为 90%时所需时间,代入式(3)确定 η'_{90} 。

3.3 砂垫层设计控制指标

图 9 为砂垫层与地基土体的 λ 与对应的 η'_{90} 计算结果(图中 $\lambda > 20$ 情况下的 η'_{90} 值均大于 0.95,接近于完全透水边界,因此未予示出)。可以看出,地基的固结效率随着 λ 的增大总体呈双曲线形非线性增大。 λ 值小于 2 时,地基的固结效率几乎随 λ 的增大呈线性增大; λ 值介于 2 和 7 之间时,随着 λ 增大,地基的固结效率增大的速率逐渐趋于平缓; λ 值大于 7 时,地基的固结效率随集总参数 λ 的增大而增大的速率已变得非常缓慢。 $\lambda = 4$ 时地基的 η'_{90} 已达到 0.80 以上, $\lambda = 7$ 时地基的 η'_{90} 已超过 0.90,说明砂垫层的水平排水作用

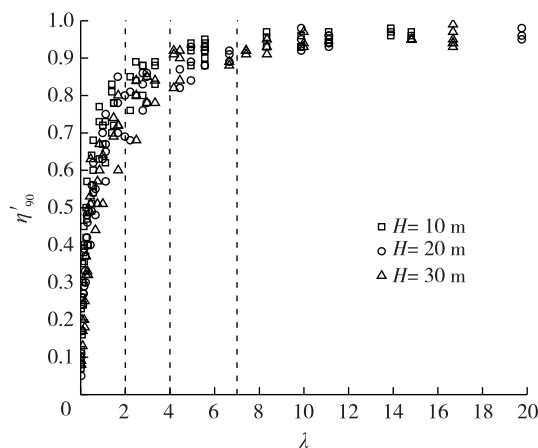


图 9 η'_{90} 与 λ 的关系曲线

Fig. 9 Relationship between consolidation efficiency factor η'_{90} and lumped parameter λ

已接近于完全透水边界。再继续增大 λ 值对于地基固结效率的提升作用已十分不明显。因此,可以将 $\lambda = 7$ 作为天然地基上砂垫层的最优设计控制指标。

4 结 论

a. 砂垫层的设计除了对其厚度和渗透系数提出要求以外,还应综合考虑地基土体的厚度和渗透系数,提出设计要求。

b. 数值分析计算结果表明,对于天然地基上的水平排水砂垫层,现行的建筑地基处理技术规范对渗透系数应大于 10^{-4} m/s的规定偏于保守。

c. 地基的固结效率取决于砂垫层和地基土体的 λ 值的大小。固结效率随 λ 的增大总体呈双曲线形非线性增大。 λ 值大于7时,增大 λ 值对于地基固结效率的提升作用已十分有限。因此,建议将 $\lambda = 7$ 作为天然地基上砂垫层的最优设计控制指标。

参考文献:

- [1] 彭劼,何钜,张文彬,等. 真空-堆载联合预压处理地基的沉降特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 670-675. (PENG Jie, HE Ju, ZHANG Wenbin, et al. Ground settlement characteristics under vacuum and surcharge combined preloading[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(6): 670-675. (in Chinese))
- [2] 沈才华,任明,许永明. 复合地基中砂垫层作用机理研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 569-572. (SHEN Caihua, REN Ming, XU Yongming. Function of sand cushion in composite foundations[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(5): 569-572. (in Chinese))
- [3] 付冠杰,范明桥,李杰,等. 软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 82-88. (FU Guanjie, FAN Mingqiao, LI Jie, et al. A synchronous vacuum preloading technique for treating soft ground and its overlying hydraulic surcharge fills[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 82-88. (in Chinese))
- [4] 李斌,孙立军. 水平边界条件对排水固结处理地基沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 587-593. (LI Bin, SUN Lijun. Influence of horizontal boundary condition on settlement of subgrade improved with drainage consolidation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 587-593. (in Chinese))
- [5] CHAE Y S, CHUN B S, KIM Y N, et al. Delayed consolidation effect dependent on permeability of sand mat[C]//CHUNG J S, MATSUI T, NAITO S, et al. Proceedings of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conference. Montreal. Canada: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1998: 441-444.
- [6] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版.北京:中国建筑工业出版社, 2008: 122-125.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012: 23.
- [8] GIBSON R E, SHEFFORD G C. The efficiency of horizontal drainage layers for accelerating consolidation of clay embankments[J]. Géotechnique, 1968, 18(3): 327-335.
- [9] SILLS G C. An assessment, using three field studies, of the theoretical concept of the efficiency of drainage layers in an embankment[J]. Géotechnique, 1974, 24(4): 467-474.
- [10] JANG W Y, MIMURA M. Effect of permeability and compressibility of sandwiched gravelly sand layers on subsequent settlement of Pleistocene deposits[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(6): 111-119.
- [11] 刘吉福. 排水固结法砂垫层厚度需求[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 366-371. (LIU Jifu. Requirements of thickness of sand mats for consolidation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 366-371. (in Chinese))
- [12] 李玲玲,陈振华,王立忠. 软弱滩涂上堤基细砂垫层的适用性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2577-2584. (LI Lingling, CHEN Zhenhua, WANG Lizhong. Applicability of fine sand cushions for embankments on soft foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2577-2584. (in Chinese))
- [13] 王路军,李锐,卢永金. 淤泥堤基上粉细砂排水垫层特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊1): 129-135. (WANG Lujun, LI Rui, LU Yongjin. Study of characteristics of silty sand drainage mat of sea dyke on muck foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup1): 129-135. (in Chinese))
- [14] TAN S A, LIANG K M, YONG K Y, et al. Drainage efficiency of sand layer in layered clay-sand reclamation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(2): 209-228.
- [15] LOVISA J, READ W, SIVAKUGAN N. Time factor in consolidation: critical review[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2013, 13(1): 83-86.