

真空预压加固深厚软土效果的影响因素分析

汪国贤¹, 苏银强¹, 杨倩²

(1.珠海交通集团, 广东 珠海 519060; 2.东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 在介绍现有真空预压理论的基础上, 指出真空预压加固软土地基的要点为负压环境下地基土固结、地下水位、排水板通水性、侧向变形及加固区范围, 并就这些问题对真空预压法中土体介质中真空度传递、侧向土压力和排水板的淤堵和弯曲对井阻的影响、涂抹区影响、真空加载方式、真空导致的非饱和区等关键问题进行分析, 指出今后研究关键点, 如真空压降与孔隙压降的差异、负压条件下地下水位测量等。

关键词: 公路; 软土地基; 真空预压; 加固效果

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)05-0086-05

中国沿海地区广泛分布着由淤泥沉积物及各类腐殖质组成的海相软弱土层, 其具有高含水量、大孔隙比、高压缩性、低强度、渗透性差、结构性显著等特点。软土中具有代表性的有淤泥和淤泥质土, 主要由极细的黏土颗粒、有机物、氧化物等固相物质和水组成。软土地基所呈现出的低承载能力和高压缩性影响各类基础设施的稳定性, 施工前必须稳定软土, 以防出现差异沉降及过大的工后沉降。真空预压是目前常用加速软土地基固结速率、提高软土地基抗剪强度的处理技术之一, 它通过土工膜密封软地面, 不需增加总应力即可减少孔隙压力、增加土体的有效应力, 是一种经济有效的软土地基加固方法, 广泛应用于机场跑道、复垦土地、软基路堤、水库地基调节等工程中。真空预压法从工程应用角度已较成熟, 但其理论研究远滞后于工程实践, 许多理论问题仍存在较大争议。该文通过对真空预压重点关注问题的分析, 从真空预压环境下渗流情况、地下水位、排水板、侧向变形及加固区等方面对真空负压加固效果的影响因素进行分析。

1 排水板真空预压加固机理

1.1 真空预压理论基础

真空预压法通过改变土内孔隙压力, 增加有效应力而加固土体。孔隙水压力降低是逐步实现的, 水平排水垫层中的真空度通过打设在地基中的横向排水体逐渐向下延伸, 又通过竖向排水体向其四周土体中扩散(见图 1)。在真空度及吸力梯度的作用下, 土体孔隙中的水、气由土体→流向竖向排水通道→流向地表水平排水垫层→汇集到滤管、主管→射

流泵抽出, 地基土体因发生固结而得到加固(见图 2)。真空预压和堆载预压一样都是固结过程, 只是其边界条件不同, 真空预压是保持土中初始条件, 降低边界孔隙水压力形成渗流。

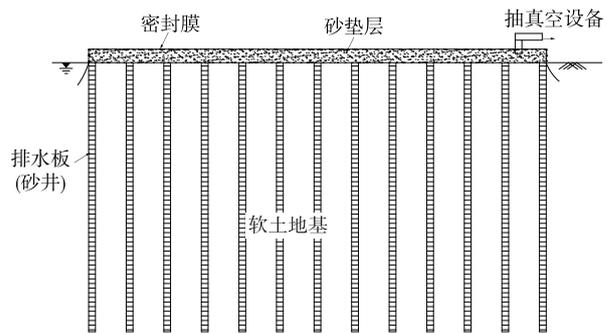


图 1 真空预压现场示意图

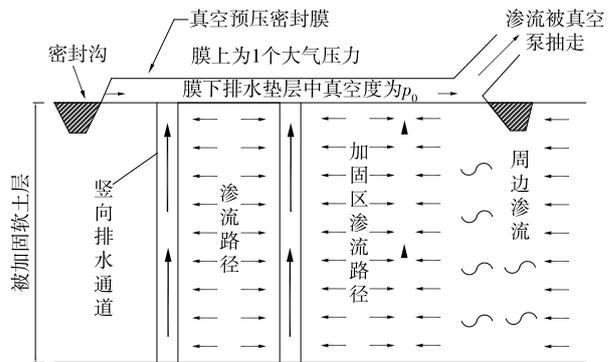


图 2 真空预压渗流示意图

与堆载预压相比, 真空预压的特性如下: 1) 与吸力压力相关的有效应力呈各向同性增加, 相应的侧向运动为压缩。即使在较高的路堤填筑速度下, 剪切破坏的风险也可降到最低; 2) 真空可通过排水系统传播到更深的地层; 3) 根据现场真空系统的效

率,可减少堆填以达到相同的沉降量;4) 由于可降低堆载高度,真空预压产生的超孔隙压力小于常规堆载法;5) 真空预压可改善土-水界面不可避免的非饱和状态,提高固结速率。

1.2 真空预压土体固结理论

文献[13]在 Terzaghi 固结理论的基础上提出真空与堆载相结合的一维固结模型,并探究了真空与堆载复合加载的机理可由堆载预压与真空预压的叠加规律来确定的可行性。真空和堆载联合预压下固结度的平均值为:

$$U_{vc} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \exp - M^2 T_{vc} \quad (1)$$

$$T_{vc} = c_{vc} t / H^2 \quad (2)$$

式中: T_{vc} 为真空-堆载联合预压时间因子; c_{vc} 为真空-堆载联合预压固结系数。

文献[14]通过试验提出修正的径向固结理论,包括不同的真空压力分布模式(见图3)。结果表明垂直排水效率既取决于真空压力大小,也取决于真空压力分布。为研究真空损失的影响,假设真空压力呈梯形分布,得到含真空预压的径向排水土圆柱体的平均超静孔压比($R_u = \Delta p / u_0$)为:

$$R_u = \left(1 + \frac{p_0}{u_0} \frac{1+k_1}{2} \right) \exp \left(-\frac{8T_h}{\mu} \right) - \frac{p_0}{u_0} \left(\frac{1+k_1}{2} \right) \quad (3)$$

$$\mu = \ln \left(\frac{n}{s} \right) + \left(\frac{k_h}{k_s} \right) \ln(s) - 0.75 + \pi z (2l - z) \left\{ 1 - \frac{k_h/k_s - 1}{(k_h/k_s)(n/s)^2} \right\} \quad (4)$$

式中: p_0 为排水板顶部施加的真空压力; k_1 为排水管底部的真空压力与排水管顶部的真空压力之比; u_0 为初始超静孔隙水压力; T_h 为时间因子; n 为 d_e/d_w 的比值; d_e 为等效土柱的直径; d_w 为排水管

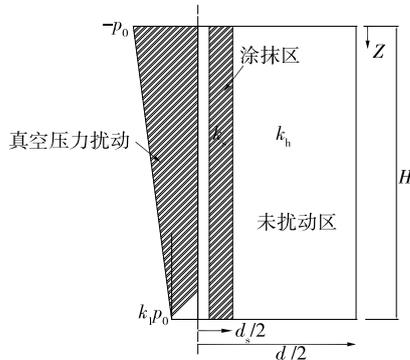


图3 真空压力在水平和垂直方向上的分布规律

直径; s 为 d_s/d_w 的比值; d_s 为涂抹区直径; k_h 为原状区土的水平渗透系数; k_s 为涂抹区土的水平渗透系数; l 为等效排水板长度; z 为深度。

2 真空预压处理软基的关注问题

2.1 渗流与固结

采用堆载预压加固软土地基时,达西定律基本适用。但采用真空预压加固时,真空渗流场范围内流动的是真空流体。真空流体包含气、水两相,具有一定真空度,加之土体微观结构的复杂性,其渗流固结过程复杂。此外,真空预压土中固体颗粒对孔隙水流动的阻力对土体的固结和孔隙水的耗散起着重要作用。然而均匀非变形多孔介质流动阻力系数的计算公式是否适用于真空预压土的流动目前尚不清楚。真空预压土的流动阻力与均匀多孔介质的流动阻力有很大不同,均匀填充层流动阻力系数的计算公式不适用于真空预压土的流动,粒径、均匀系数和孔隙度对真空作用时的阻力也亟待进一步明确。

2.2 地下水位

真空预压过程中持续的抽气、抽水作用使地基中的地下水位下降,直到预压地基周围的补充水和排出的水达到动态平衡为止。地下水位下降将使相应土层的上覆土重增加,并产生排水固结现象。而真空压力下的流体根据不同外界条件以单相流、两相流或多相流的方式运动,且根据现场试验结果,真空预压中真空压力在地面达到最大值,并随着深度的增加迅速下降,垂直方向的压力梯度各有不同。随着地下水位的下降,非饱和带逐渐扩大,非饱和带内存在气、水两相流动,且流体压力与真空压力随深度产生变化。真空压力诱导土体进行各向同性固结,并引起周围土体向处理区向内的侧向位移,对加固软土地基的效果有很大影响。抽真空作用的强度、土体渗透特性及地基中薄砂层及水源补给等影响地下水位下降的因素都应加以考虑。

2.3 排水板

在真空预压地基加固中,通常采用塑料排水板加速软黏土地基的固结,提高软土地基的抗剪强度。而软土地基的固结速率与排水板的通水能力密切相关。理论和试验研究及现场实践均表明,排水板的通水能力受其材料和形状、排水截面积、围压、渗透性和耐久性等因素的影响。空间尺度上,土体围压随埋深的增加而增大,导致通水能力随深度而下降(见图4)。

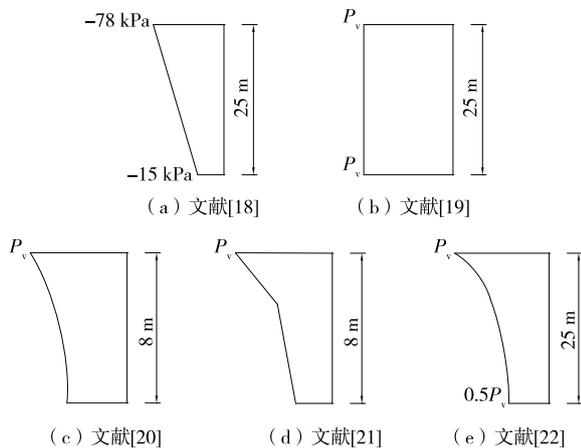


图4 不同文献中真空度下降规律对比

为考虑井阻对轴对称平面应变匹配过程的影响,文献[23]建立通水量线性递减的解析模型,得到了超静孔隙水压力随深度的分布。排水板通水量随时间变化,即排水板在生命周期内淤堵累积作用及围压作用下排水性变形等因素对排水板的通水能力同样有着不可忽视的影响。文献[24]提出考虑通水能力随深度和时间变化对单元格内软土沉积物固结行为的数学模型,模型假设通水能力随深度线性减小或非线性变化对孔隙水压力的影响,结果表明通水能力随深度和时间的变化对超静孔隙水压力分布有显著影响,当通水能力随深度和时间变化时土体的超静孔隙水压力将进一步降低。

2.4 侧向变形

真空预压过程中,排水板之间的土体不仅会产生竖向沉降,还会产生侧向变形,这种纵横向联合位移形成围绕排水板的土柱和真空预压后的V形土表面,即“土柱”现象。胶体颗粒随水气运动,从大孔隙逐渐迁移到小孔隙并堵塞通道,其微观机理见图5。真空预压中土体的最终侧向变形由排水板打设间距、深度、真空度、土体性质等因素决定。由于侧向位移的最大值与膜下真空度成正比,随排水板间距的减少而增大,排水板打设越深,侧向变形越大。而侧向变形的大小与真空度水平、加载速率及土体环境因素等密切相关。

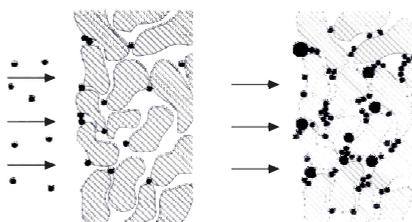


图5 “土柱”现象微观机理示意图

2.5 加固影响区大小

真空预压处理软基的加固范围是现场构筑物的抗变形能力、构筑物的基础结构、加固区内外土质条件等因素综合影响下产生的。由于加固区内负压作用使区外地下水向区内渗流,地下水位下降,在负压、地下水位下降联合作用下区外土体向加固区位移,并伴随沉降发生。加固影响区大小关系到排水板通水设计,与真空压力在土体中的传播范围及土体孔隙水压力的消散相关。

3 影响真空固结性能的相关因素分析

3.1 真空度的影响分析

真空预压法加固软土地基技术运用以来,理论研究在不断完善。但由于实际工程中密封不足、土体介质不同等引发的真空度在横向及纵向上的衰减程度仍存在较大不确定性,在时间上真空度的衰减速率前期较大而后期较小、在空间上真空度随深度的增加而衰减得到普遍认同,但在径向的衰减规律未得到统一。如文献[3-4]认为真空度传递过程中的衰减在深度上呈线性变化;文献[29]通过试验证明真空度在横向及纵向上的衰减可以系数的形式表示,并得到衰减系数大小与土的渗透系数有关。影响真空度传递的因素如下:

(1) 土体介质。膜下真空度形成后,真空度传递到塑料排水板、淤泥与砂井中,在不同介质中所受到的阻力不相同,总体上膜下真空度>塑料排水板真空度>砂井真空度>淤泥真空度。在不同介质中,真空度随时间的变化规律不同:塑料排水板中的真空度变化曲线基本与膜下真空度变化曲线相同,在抽真空的开始阶段,真空度迅速上升,之后处于相对稳定;砂井中的真空度随着时间的增加开始迅速上升,之后随着抽气时间的增加缓慢上升,最后接近塑料排水板中的真空度;淤泥中的真空度随着时间的增加开始迅速上升,之后随着抽气时间的增加逐渐下降,最后趋于相对稳定的低真空度值。

(2) 真空度的维持与损失。真空度的作用效果为负压,通过抽真空降低孔隙水压力,提高土体的固结度。一般真空预压中抽真空设备的设置情况为(800~1 500) m²/台,而随着土体真空度的提高,地下水位降低,抽真空所带来的水气混合体的传输历程增大,开泵量的增加对真空度的提高效果不再明显。随着抽真空时间的加长,砂垫层不断被压密,排水管滤膜也不断贴紧压薄,从而使真空压力在砂垫

层中传递阻力加大,滤膜通透性降低,负压差加大,膜下真空度降低。真空预压结合砂井地基同步进行,由于不同于天然土体的砂井的存在,膜下真空度的传递受阻,随着深度伴有不同程度的降低。

3.2 井阻影响

随着真空度在排水板和土体中的不断传递和扩散,排水板和土体中将形成连通的真空渗流场,并不断向深处和远处土体发展。真空度随深度增加而衰减的特性表明砂井阻力的实际存在,并阻碍真空度在竖直方向上的传递,影响土体排水固结的进行。且砂井材料渗透系数越小,砂井长细比越大,井阻作用越显著,砂井地基固结越慢。

(1) 侧向土压力的影响。文献[33-34]通过试验论证了侧向土压力的存在会降低排水板的通水能力。土体中自然的土体侧压力作用在排水板上,使排水板长期受压,排水通道受力变形进而缩减排水通道。真空吸力作用时,分体式排水板的滤膜向芯板靠近紧缩,从而进一步减小排水通道,影响真空吸力在土体中的传导作用。

(2) 排水板淤堵及弯曲。土体中由于真空吸力带来的水气流体在通过颗粒孔隙时会携带微小土颗粒并附着在排水板的外层,形成致密的淤堵泥层。文献[35]认为由于细颗粒沿渗透路径迁移的过程中在沿途不断滞留,导致渗透路径变短、变窄,最终渗透路径完全堵塞形成淤堵泥层。泥层的渗透系数低,产生的淤堵效应严重阻碍真空压力的传导。此外,排水板的弯曲也会导致通水能力降低。

3.3 涂抹区的影响

在打设砂井或排水板时,小而细的土壤颗粒被拖拽移动,从而在砂井或排水板周边的土体环境中形成渗透性降低的区域,即涂抹区。文献[36]提出通过降低固结系数的整体值降低渗透性的概念,预压引起的水力梯度在固结过程中挤压孔隙水,使其水平向排水板快速流动,垂直向渗透至排水层排出。但涂抹区的存在会降低水平渗透率,同时不同程度降低竖直方向的渗透性。由于渗透性降低,涂抹区起到向排水板流动的屏障作用,降低排水固结速率。

3.4 真空加载方式的影响

文献[43]利用大型固结仪试验,通过分阶段短时间释放真空压力,研究真空卸载和再加载的影响。结果表明随着排水深度的增加,吸力水头逐渐减小;真空压力的加载、卸载影响排水板中吸力向下衰减的传播,对于沉降的影响存在时间滞后效应。文献

[44]通过改进真空预压法,利用多次真空预压法和改进的同步、交替真空预压法,得到比传统预压法分别提高近15%的排水量。在总侵入体积、孔隙率相近的情况下,采用改进的交替真空预压法可将超软土地基处理得更均匀。

3.5 排水不饱和问题

通过排水板施加真空压力,排水板附近土体可能会发生不饱和现象。文献[43]通过一系列模型描述试验中孔隙压力耗散的明显井阻作用,并考虑排水土界面的非饱和影响。结果表明,相对于干燥排水的存在加上气隙的产生会阻碍固结初期超静孔隙压力的耗散。

4 有待进一步研究的问题

实际工程中,由真空预压引起超净孔压及其引起的固结过程和理论极其复杂。上述仅从单影响因素进行分析,而现场加固效果往往由多方面因素共同作用,在进行固结解析和分析计算的过程中,考虑由真空吸力引起孔压、渗透变化导致固结的影响仍需进一步研究。具体如下:1)对真空预压法中真空压降与孔隙压降的差异进行量测与量化,使之可适用于真空预压工程中土体固结分析。2)对负压条件下地下水位进行精准量测。普适性的地下水位的定义不适用于真空预压后土体,如何结合真空预压水位的特点进行分析以改良监测技术有待研究。3)真空度在土体范围内的传递效果仍存在争议,如何结合土体渗透性、井阻效应、增压式改进等对负压环境下地基固结进行计算分析有待研究。4)排水板和板周土体淤堵为真空预压处理中关键难题,如何从材料、渗流特性出发提出适用于各类土体的排水材料 and 设计方法有待研究。

参考文献:

- [1] 娄炎.真空排水预压法加固软土技术[M].2版.北京:人民交通出版社,2013.
- [2] JOHNSON S J.Precompression for improving foundation soils[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1970,96(1):111-114.
- [3] INDRARATNA B,BAMUNAWITA C,KHABBAZ H.Numerical modeling of vacuum preloading and field applications[J].Canadian Geotechnical Journal,2004,41(6):1098-1110.
- [4] INDRARATNA B,RUJIKIATKAMJORN C,BALASUBRAMANIAM A S,et al.Soft ground improvement via

- vertical drains and vacuum assisted preloading[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 30(4): 16-23.
- [5] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(2): 127-146.
- [6] SHANG J Q, TANG M, MIAO Z. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(5): 740-749.
- [7] 李自强. 机场跑道不停航软土地基处理技术[J]. *工程机械与维修*, 2020(4): 106-107.
- [8] 刘飞禹, 张志鹏, 王军, 等. 分级真空预压联合间歇电渗法加固疏浚淤泥宏微观分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1893-1901.
- [9] LIU S Y, ZHANG D W, DU G Y, et al. A new combined vacuum preloading with pneumatic fracturing method for soft ground improvement[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 454-461.
- [10] 雷华阳, 胡珪, 雷尚华, 等. 增压式真空预压加固吹填超软土微观结构特征分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增刊1): 32-40.
- [11] 彭劼. 真空-堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [12] 董志良, 胡利文, 张功新. 真空及真空联合堆载预压法加固软基的机理与理论研究[J]. *水运工程*, 2009(1): 30-38.
- [13] MOHAMED ELHASSAN E, SHANG J Q. Vacuum and surcharge combined one-dimensional consolidation of clay soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39: 1126-1138.
- [14] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42: 994-1014.
- [15] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2002, 35(2): 7-10.
- [16] QIU Q C, MO H H, DONG Z L. Vacuum pressure distribution and pore pressure variation in ground improved by vacuum preloading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(12): 1433-1445.
- [17] DENG Y B, XIE K H, LU M M. Consolidation by vertical drains when the discharge capacity varies with depth and time[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 48: 1-8.
- [18] 彭劼, 汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(5): 560-563.
- [19] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [20] 韩雪峰, 邝国麟, 谭国焕, 等. 水下真空预压过程中孔隙水压力变化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 658-662.
- [21] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(9): 1429-1433.
- [22] 林志强. 真空预压排水板有效真空压力变化规律[J]. *水运工程*, 2015(7): 161-166.
- [23] CHAI J C, MIURA N, SAKAJO S, et al. Behavior of vertical drain improved subsoil under embankment loading[J]. *Soils and Foundation*, 1995, 35(4): 49-61.
- [24] DENG Y B, LIU G B, LU M M, et al. Consolidation behavior of soft deposits considering the variation of prefabricated vertical drain discharge capacity [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 62: 310-316.
- [25] 陈祥龙. 真空预压加固人工吹填软土地基的效果评价与淤堵机制[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [26] 朱继伟, 闫澍旺, 孙万禾. 真空预压侧向变形影响因素的研究[J]. *岩土工程技术*, 2003(6): 327-332.
- [27] 董志良. 真空预压-塑料排水板加固软基固结理论及真空度的研究[D]. 南京: 河海大学, 1990.
- [28] 吴跃东, 吴鸿昇, 罗如平, 等. 考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 122-128.
- [29] 李宁, 李向凤, 吴跃东. 真空压力传递规律与渗透系数关系的试验研究[J]. *路基工程*, 2011(4): 101-103.
- [30] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南, 等. 真空排水预压法中真空度分布的影响因素分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(11): 1399-1401+1404+1408.
- [31] 吴跃东, 惠炜. 真空预压法中开泵率对加固效果的影响[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(4): 1077-1082.
- [32] 尚世佐. 真空联合堆载预压在上海某装卸区的试验研究[J]. *水运工程*, 1988(3): 1-8.
- [33] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soil by prefabricated drains [C]// *Proceeding of the 10th IC-SMFE*, 1981: 677-682.
- [34] HANSBO S. How to evaluate the properties of prefabricated drains [C]// *Proceeding of the 8th EC-SMFE*, 1983: 621-626.
- [35] 李哈峰, 占宏, 陆靖凌. 真空预压过程中滤膜等效孔径和土颗粒级配对排水板淤堵影响的试验研究[J]. *地基处理*, 2020, 2(1): 9-13.
- [36] BARTON R A, LANE K S, KEENE P, et al. Consolidation of fine-drained soils by drain wells[J]. *Geotechn*

$$B_4 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.058 \quad 5 \quad 0.941 \quad 5]$$

$$B_5 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.066 \quad 7 \quad 0.933 \quad 3]$$

(3) 确定综合评价矩阵 S 。一级安全评价指标与评语等级之间的隶属度矩阵 $R = [B_i]$ 。将一级权重向量 W_i 与隶属度矩阵 R 合成, 计算得到综合评价矩阵 $S = W_i \circ R$ 。其中权重向量 W_i 采用《公路项目安全性评价规范释义手册》附表 2 中推荐值。

$$R = \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.024 & 7 & 0.975 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.058 & 5 & 0.941 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.066 & 7 & 0.933 & 3 \end{bmatrix}$$

$$S = W_i \circ R = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.042 \quad 3 \quad 0.957 \quad 6]$$

(4) 计算安全性模糊综合评价结果。总体安全系数 $E = S \times F^T = 10.8$ 。

5 结论

(1) 推荐线 K 和比较线 B 的安全性评分均为好, 推荐线 K 的总体安全系数 E 更高, 从安全性角度评价, K 线更合理。具体路线方案还应结合工程经济性、环境敏感性、实施可行性等因素综合确定。

(2) 通过模糊综合评价法对路线方案进行比选, 可摆脱安全性比选受设计人员工作年限长短、认识问题全面性、个人偏好等因素的影响, 比选结果更客观公正, 可为路线方案比选论证提供可靠支撑。

参考文献:

[1] 华杰工程咨询有限公司. 公路项目安全性评价指南 [M]. 广州: 广州出版社, 2014.

[2] 郭忠印, 方守恩. 道路安全工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[3] 王宏元, 钟小明, 贾嘉, 等. 公路项目安全性评价规范释义手册 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

[4] 华杰工程咨询有限公司. 公路项目安全性评价规范: JTJG B05—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[5] 温学钧, 杨迄东. 高速公路运行速度研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 19(1): 80—82.

[6] 张勇慧, 李红绪, 盛谦, 等. 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3151—3156.

[7] 刘胜, 王吉平. 模糊综合评价法在伍益高速公路路线方案比选中的应用 [J]. 公路与汽运, 2019(1): 46—49.

[8] 王道强. 基于经济决策的高速公路路线方案评价模型 [J]. 公路与汽运, 2019(2): 144—148.

[9] 郭风平, 侯云飞. AHP 模糊综合评价在永龙高速公路路线方案比选中的应用 [J]. 公路与汽运, 2016(1): 224—228.

[10] 王玉标. 基于绿色交通的国家高速公路路线方案研究 [J]. 公路与汽运, 2018(5): 31—33.

收稿日期: 2020—12—22

(上接第 90 页)

tical Special Publication, 2002, 113(118): 324—360.

[37] HANSBO S. Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains [J]. Ground Engineering, 1979, 12(5): 16—25.

[38] 江文豪, 詹良通. 真空联合堆载预压下基于指数形式渗流的砂井地基非线性固结解 [J]. 工程力学, 2021, 38(2): 69—76+133.

[39] 张玉国, 万东阳, 郑言林, 等. 考虑径向渗透系数变化的真空预压竖井地基固结解析解 [J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3533—3541.

[40] CHEN J F, TOLOOIYAN A, XUE J F, et al. Performance of a geogrid reinforced soil wall on PVD drained multilayer soft soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 219—229.

[41] NGUYEN T T, INDRARATNA B. Experimental and numerical investigations into hydraulic behaviour of

coir fibre drain [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(1): 75—87.

[42] ZHOU Y, CHAI J C. Equivalent ‘smear’ effect due to non-uniform consolidation surrounding a PVD [J]. Geotechnique, 2017, 67(5): 410—419.

[43] INDRARATNA B, GENG X Y, RUJIKIATKAM-JORN C. Review of methods of analysis for the use of vacuum preloading and vertical drains for soft clay improvement [J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2010, 5(4): 223—236.

[44] 雷华阳, 李宸元, 刘景锦, 等. 交替式真空预压法加固吹填超软土试验及数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2112—2125.

[45] 丁成生, 黄骅港区软土路基真空预压加固效果分析 [J]. 水道港口, 2019, 40(3): 334—337.

收稿日期: 2021—05—22