

土工合成材料及其加筋结构的研究现状

肖成志¹ 刘波¹ 栾茂田²

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300130; 2. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁大连 116024)

【摘要】 随着土工合成材料在岩土加固领域的应用的不断扩展和延伸, 土工合成材料的工程特性及其加筋机理的研究得到了迅速发展。对国内外有关土工合成材料的静载、动载作用下的力学特性和流变特性, 以及筋材加筋结构分析理论的国内外研究现状与发展动态进行了综合比较评述, 探讨了研究中存在的主要问题, 并提出了解决问题的思路与建议。

【关键词】 土工合成材料; 工程特性; 动载特性; 流变特性; 加筋结构

【中图分类号】 TU 476.4

Research Situation of Geosynthetics and Its Reinforced Structure

Xiao Chengzhi¹ Liu Bo¹ Luan Maotian²

(1 School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2 Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024 China;)

【Abstract】 With the extensive application of geosynthetics in the field of geotechnical reinforced projects, studies on engineering properties and reinforced mechanics of geosynthetics are rapidly developed. Present status and development at domestic and abroad of static load properties, dynamic load properties and rheological properties of geosynthetics, as well as its reinforced mechanics are briefly discussed. At the same times, comparative analysis of various theories and computational methods is carried out and major problems existed in the study of geosynthetics are presented. The idea and suggestions of solving these problems are proposed.

【Key Words】 geosynthetics; engineering properties; dynamic load properties; rheological properties; reinforced structure

0 引言

作为矿物颗粒、水及空气的集合体, 土体自身具有很低或者几乎没有抗拉强度。通过在土体内铺设适当的加筋材料, 依靠筋-土间摩擦和嵌锁咬合作用, 可以传递拉应力并分担土体应力, 增加土体的变形模量, 从而改善土体的强度和变形特性, 达到加固土体及其构筑物的目的。人类早期活动将自然界中天然植物如茅草、柳条等埋入土体中来改善土体整体稳定性的方法是建立在感性基础上, 且主要依靠经验指导实践。真正将加筋概念上升到理论高度并作为实用技术加以研究和推广应用的是法国工程师 Vidal^[1], 他提出了“加筋土”概念, 初步分析与发展了土体加筋设计与计算原理, 从而为加筋土技术开辟了广阔的应用前景。土工合成材料加筋结构作为土体的稳定体系, 被应用于边坡与路堤加固和地基

处理等工程中; 其结构作为支挡结构时, 被广泛应用于港口码头、道路挡墙和桥头跳车处理等实际工程领域。正是土工合成材料在岩土加固工程中显示出不可替代的优势, 使其被誉为“继钢筋混凝土之后又一造福人类的复合材料”^[1,2]。

1 土工合成材料的工程特性

1.1 土工合成材料及其与填料界面的静载特性

在土工合成材料加筋土工程中, 筋土界面作用特性对结构内部稳定性具有重要影响。当前, 关于筋-土相互作用特性的分析, 主要通过直剪或拉拔试验的方法获得, 且加筋土回填料大多选用粒状土, 主要原因是认为粒状土具有较大的内摩擦角和良好的排水性能等优异的工程力学特性, 并且粒状土与筋材的相互作用能够提供较大的摩阻力。因此, 早期筋土接触面特性的研究主要集中在分析筋材与粒

状土之间的相互作用机理研究。Schlosser 等^[2]首先采用三轴压缩试验研究金属条加筋砂土。随后,国内外一些学者利用直剪试验和拉拔试验对筋材-填料的界面作用特性进行了分析研究,填料集中在砂土和碎石土,加筋材料主要是土工织物或土工格栅。闫澍旺等^[3]针对土工格栅进行了拉拔试验,结果表明:筋土界面摩阻力及土对格栅横肋的阻力构成了总的格栅抗拉拔阻力,且在变形较小时摩擦力即达到峰值,随着格栅变形的发展,格栅的横肋阻力逐渐增加并最终承担大约 90% 以上的格栅加筋承载拉力。张 嘎等^[4]在大型拉拔试验机上对粗粒土与土工织物接触面进行了较系统的试验研究,结果表明粗粒土与土工织物接触面出现了一定程度的应变软化,且由于土与土工织物接触面的剪胀性造成接触面的抗剪强度与法向应力呈非线性关系。

近些年来,随着土工合成材料较多的用于软基处理、港口岸墙和堤坝等加固结构中,且受实际地质、运输与经济等条件的限制,一些加筋结构开始尝试采用黏性土作为回填料。然而,由于早期国内外对加筋结构回填料的技术指标或使用要求都有明确规定,并对黏性土填料使用持否定态度,认为黏性土的含水量会影响筋-土界面的剪切强度。因此,相比之下筋材与黏性土相互作用的界面特性的研究很少。Bergado^[5]试验指出风化黏土中钢制格栅的抗拔性能主要受筋材的横肋影响。Collin 等^[6]针对实际工程中所采用的黏性土加筋结构进行分析时指出,当黏性土中含水量较高时,筋-土黏结效果明显下降。Mohiuddin^[7]通过室内模型和现场拉拔试验指出黏性土体中筋材抗拔力受界面法向荷载力与筋材长度的影响明显。Murad 等^[8]采用室内和现场拉拔试验对不同筋材与黏性土体之间的相互作用进行了分析研究,结果表明控制适量含水量,黏性土与筋材间的抗拔阻力、筋-土相互作用系数和接触面间的摩擦因子可以得到保证。张 波等^[9]实验分析了含水量和剪切速率对黏性土-筋材接触特性影响,指出高液限黏性土-筋材接触面剪切性能不良且水稳定性较差,应适当降低接触面设计强度指标。

1.2 土工合成材料及其与填料间界面的动力特性

大量实验表明土工合成材料的动力特性与动载水平、频率、循环次数及筋材材料性质密切相关。针对 PET 和 HDPE 材料的土工格栅, Bathurst 等^[10]在循环次数相同的情况下,通过变化动载大小和频率进行动力拉伸试验,结果表明动载频率对 HDPE 格栅的拉伸特性影响更明显; HDPE 格栅的刚度随

着动载水平的增加而减少,而 PET 格栅的刚度随着动载水平的增加而增大。Moraci 等^[11]在增加动载循环次数和变化荷载频率的筋材动力拉伸试验中指出,格栅阻尼比随着动载作用次数的增加而增加。Ling 等^[12]对 PP、PET 和 HDPE 等三种材质的格栅进行动力拉伸试验,结果表明:格栅动载强度随着荷载循环作用次数的增加没有发生明显变化,但随着动载水平的增加而有所增强;当动载水平较低时,格栅的应力应变关系近似为线性,随着动载水平增加,应力应变关系逐渐变成非线性;筋材阻尼比随着荷载循环次数增加而减少,但随着动载水平增加而增大。刘华北^[13]基于双曲线方程、修正曼辛准则和过应力型粘塑性理论,建立了考虑土工合成材料在循环荷载作用下的弹塑性、滞回性、蠕变和应力松弛的统一本构模型。但相比静载条件下常用的经验本构关系曲线如直线、双曲线和多项式等形式而言,反映土工合成材料动载特性的本构模型尚不多见。

目前,在动载作用下筋-土界面的接触特性及力的传递机理的研究较少。Hanna 等^[14]针对埋设土中的筋材作了单一和循环荷载作用下的对比拉拔试验,结果表明循环荷载作用下筋材最大抗拔力要大于单一荷载作用下的结果,且最大抗拔力随动载幅值增加而增大。Raju 等^[15]分析了单一和循环荷载作用下土体内筋材的荷载-应变-位移特性,发现荷载频率对接触面摩阻力影响很小,而动载大小对接触面拉拔稳定性有较大的影响;筋材拔出位移的累积随着振动次数的增加而逐渐减少,并最终趋于稳定;当格栅具有较大连接强度时,筋材抗拔力随着位移增加而增大,呈现强化特性;当格栅具有较小连接强度时,筋材抗拔力在达到最大值后,随位移的增加而减少,呈现软化特性。

界面动摩擦系数是反映动载作用下筋材-土界面特性的重要参数。De 等^[16]基于试验指出:筋-土接触面的动摩擦角随着动载作用次数增加而增大;当接触面上的正应力越小时,动摩擦系数随着动载作用次数增多而增大,但动载的频率对接触面上的动摩擦角的影响很小。另外,动摩擦角的变化特点亦受试验方法影响,在振动台试验中界面沿筋材纵向和横向的动摩擦角的增长相同,而循环直剪试验中纵向动摩擦角比横向动摩擦角增长的幅度要大,究其原因可能是往复荷载作用下筋材表面产生磨损而引起。Christopher 等^[17]研究表明动载作用下筋-土接触面相互作用系数约为静载时的 80%。与此相反,Raju 等^[15]实验表明:动载作用下接触面作用

系数大于或等于静载时的作用系数。张兴强等^[17]认为将接触面作用系数看成静接触面作用系数的80%趋于保守。目前,有关筋-土接触面动摩擦系数的确定尚未达成统一,有待进一步规范处理。

1.3 土工合成材料的流变特性

大量的试验表明筋材的蠕变特性不仅与原材料性质相关,而且与载荷大小、加载方式、试样尺寸、加载速率、试验时间、环境温度和约束条件等因素密切相关。McGown^[18]和王钊^[19]等试验探讨了筋材蠕变特性受温度与加载速率之间的关系。Andrawes^[20]通过筋材加速蠕变试验,探讨了蠕变过程中荷载、应变、时间和温度等各种因素的相关性,并分析了在加载和卸载时总体应变的变化。Bush^[21]认为,相比温度变化的影响,加载水平对筋材蠕变总应变的影响更为显著,并建立了等时曲线刚度关于时间和温度的依赖关系。

最初,在加筋结构的数值分析中,不考虑时间效应的筋材本构关系如直线、双曲线和多项式等形式得到了广泛应用。然而,考虑筋材受力特性与时间相关性本构模型尚不多见。Finnigan等^[22]通过试验试探性地提出了反映土工合成材料的短期和长期蠕变特性的经验数学方程。Das^[23]对Singh等^[2]所提出的土的流变经验模型进行了修正,给出了格栅应变速率的经验模式。相对于蠕变模型而言,模拟筋材应力松弛特性的模型更少,Koerner等^[1]提出了双参数应力松弛模型。此外,在分析筋材松弛效应时,更多地是采用了能将蠕变和松弛相结合的元件流变模型,如Sawicki^[24]基于由弹簧和Kelvin体串联所组成的标准线固体流变模型,进而为考虑筋材的塑性,在此模型基础上增加一个塑性滑块组成了4参数流变模型。尽管这两种元件模型更具有普遍性,但在实际应用中必须给定加筋格栅的受力效应,而且模型不能有效地反映加载历史,使得计算过程比较复杂。另外,栾茂田等^[25]基于大量蠕变试验,建立了反映筋材长期工作性能的黏弹性本构模型,为加筋结构的数值计算提供了有益的帮助。

事实上,筋材在长期拉力荷载作用下,表现出明显的蠕变特性。因此,考虑筋材的蠕变特性及其加筋结构的长期变形特性不仅符合工程实际需要,而且有助于推动土工加筋技术与理论的发展。

2 土工合成材料加筋结构的计算方法

2.1 土工合成材料加筋结构的极限平衡法

极限平衡法是一种偏于保守的设计方法,但目前在实际加筋土工程的设计中,仍得到了广泛应用。

早期出现的设计分析中,多采用修正圆弧滑动法,在计算时认为加筋材料在整体的稳定中仅提供拉力或者抗滑力矩的作用,如Ingoad^[26]所发展的Bishop法和瑞典条分法等均考虑了加筋材料的拉力作用。Low^[27]等则认为加筋增强了抗滑力矩,并在此基础上提出了一个加筋路堤的简便稳定性分析方法。事实上,加筋有助于改善土体的力学性能,徐少曼^[28]提出了改善土工织物加筋效果的新途径,计算时考虑筋-土界面摩阻力和加筋垫层的应力扩散作用。Buhan^[29]经理论推导得到了加筋土的宏观强度准则,结果表明加筋使土体的强度增加。朱湘等^[30]考虑加筋对土体的局部抗剪强度的增强,提出了改进的加筋路堤圆弧滑动法。显然,这些方法均未考虑结构加筋可能引起的滑动面有改变。但对加筋和未加筋边坡的对比试验观测表明,加筋能使最危险滑动面的位置向靠近坡底地基的深部移动。在此基础上,Kaniraj^[31]等修正了Low等所提出的分析方法,认为最危险滑动面位置将使加筋材料发挥最大的拉力,进而Woods^[32]等提出了计算填土内加筋材料拉力的简化算式。刘祖德等^[2]采用弹性理论预测陡坡达到极限平衡状态时所需要的加筋力和滑动面的位置,对极限平衡方法进行了改进。

这些方法在一定程度上考虑了加筋对滑动面的影响,但未考虑筋-土之间的变形协调。因此,学术界和工程界尝试对加筋结构的极限平衡理论进行完善。Rowe等^[33]在稳定性分析中引入了一个“允许相容应变”的概念,随后Juran^[34]提出了一种考虑应变相容性的分析方法,考虑筋材的变形和土的剪胀特性,且能够计算加筋挡土墙或土坡中筋材的最大拉力和潜在滑裂面的位置。Gourc等^[35]在极限平衡法的基础上提出了土与筋材应变相容关系的位移法。进而,Lemonnier等^[36]将位移法与变分法相结合并提出计算加筋边坡安全系数的变分位移法,进而估算筋材拉应力和应变。另外,刑怀海等^[37]将格栅流变模型引入到加筋堤坝的稳定性分析中,探讨了筋材蠕变对路堤稳定性的影响。

2.2 土工合成材料加筋结构的数值解法

目前,在加筋结构的有限元数值分析中,土体单元一般采用较成熟的非线性弹性或弹塑性模型,如非线性弹性模型及弹塑性模型等,筋材主要采用线弹性和非线性弹性模型。如早期Andrawes等^[38]分别采用邓肯-张双曲线模型和多项式非线性模型作为土体和筋材本构关系。Karpurapu等^[39]对刚性基础上加筋挡土墙进行了有限元分析。刘华北

等^[40]采用弹塑性有限元法探讨了填土性质、筋材布置方式及土体与面板间相互作用特性等参数对格栅加筋挡墙应力分布与变形的影响。介玉新等^[41]将“等效周围压力”的概念加以延伸,提出了等效附加应力法,提高了计算效率。

然而,这些分析中很少考虑土体与筋材的流变性。Sawicki^[42]假定格栅加筋挡墙内蠕变发生在主动区,筋材采用标准线固体黏弹性模型,提出了计算墙体侧向蠕变变形的的方法,在此基础上,肖成志等^[43]探讨了考虑格栅流变性时加筋挡墙中格栅等效应力的计算方法。Helwany等^[44]对于格栅和土体分别采用非线性流变模型和黏塑性本构模型,进行加筋结构的有限元分析,计算所得筋材自由端应变过大,与实测结果有一定差距。栾茂田等^[45]采用黏弹塑性流变模型和黏弹性本构模型分别考虑土体与筋材的非线性蠕变性,对加筋挡墙的应力分析与变形长期特性进行了有限元分析。此外,周世良等^[46]引入了饱和多孔介质模型来模拟土体和筋土复合材料,建立了饱水格栅加筋土挡墙结构的流固耦合特性的数值分析模型。

然而,最初普遍认为加筋土结构为柔性结构,具有较好地抵抗动载的性能。事实上,振动或地震荷载作用对加筋土结构的影响不容忽视。周志刚等^[47]在试验基础上分析了格栅与填土相互作用机理及其加筋柔性桥台的机理,指出加筋结构在列车重复荷载作用下表现的动力特性与线路运营条件密切相关。但在加筋结构进行动力分析时,如何模拟筋-土间的相互作用是关键的问题之一。Bray等^[48]将接触面设定为一维和二维模型进行了对比研究,指出一维模型在模拟摩擦接触面时存在不稳定性,且认为计算中忽略筋材作用是解决该方法之一,而Kavazanjian^[49]研究表明若模拟计算中忽略筋材作用将过高地估计加速度。随后,Muthucumarasamy等^[50]基于筋-土间完全连结假设,在有限元计算中分别采用等效迭代线弹性法和弹性增量法对动载作用下加筋土响应问题进行了模拟分析,结果表明忽略筋材作用将会过高估计加速度。Yegian等^[51]采用等效弹簧-阻尼延迟器-质量块系统来模拟动载作用下筋材与土的接触面特性,张兴强等^[17]基于此建立了交通荷载作用下格栅加筋路基的弹塑性分析方法,并成功用于交通荷载作用下加筋桥台的效果分析。

3 结论与展望

1) 土工合成材料的静、动载特性、长期蠕变特

性及其相应的本构模型建立是工程应用和加筋土数值模拟技术的关键。然而,由于各种试验手段及材料性质的差异性,使的现有反映筋材本构模型在使用上受到限制。因此,必须首先完善筋材的试验条件,按照相对统一的标准进行试验,基于试验数据,以现代本构理论为指导,建立能够合理地考虑各种影响因素的本构模型,并由此建立确定本构模型参数的实用方法。

2) 极限平衡法和有限元等数值方法仍是当前研究加筋结构的主要方法。当前,极限平衡法中开始尝试考虑筋材蠕变特性和适当考虑筋-土间应变相容性,正逐步完善加筋结构的极限平衡分析法。在有限元等数值方法分析加筋结构工程特性时,加筋结构的长期工作性能和动载特性将成为重点问题,尤其是分析黏性土填料的加筋结构时,还应重点考虑加筋土的流固耦合问题和变形冲蚀等实际问题。

参 考 文 献

- [1] Koerner R M. Designing with Geosynthetics[M], Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- [2] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [3] 闫澍旺, Ben Barr. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 56-61.
- [4] 张 嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 51-55.
- [5] Bergado D T, Hardiyatimo H C, Cisneros C B, et al. Pullout resistance of steel geogrids with weathered clay as backfill material[J], Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(1): 33-46.
- [6] Collin J G. Earth Wall Design[Ph. D Thesis] [D]. Berkeley: Dissertation of University of California, USA, 1986.
- [7] Mohiuddin A. Ananysis of laboratory and field pull-out tests of geosynthetics in clayed soils[D]. Baton: Louisiana State University, USA, 2003.
- [8] Murad Y A, Farrag K, Izzaldin A, et, al. Evaluation of interaction between geosynthetics and marginal cohesive soils from pullout tests[C] // Geo Jordan 2004, Jordan, 2004, ASCE Geotechnical Special Publication, pp: 299-309.
- [9] 张 波, 石名磊. 粘土与筋带直剪试验与拉拔试验对比分析[J]. 岩土力学(增刊), 2005, 25(6): 61-64.
- [10] Bathurst R J, Cai F. In-isolation cyclic load-extension

- behavior of two geogrids[J] . Geosynthetics International, 1994(1): 1-19.
- [11] Moraci, Montanelli. Behavior of geogrids under cyclic loads[C] // Proceeding of the International Conference on Geosynthetics, Long Beach, 1997: 961-976.
- [12] Ling H I, Yoshiyuki M, Toshinori K. Tensile properties of geogrids under cyclic loading[J] . Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1998, (8): 782-787.
- [13] 刘华北. 土工合成材料循环受载、蠕变和应力松弛特性的统一本构模拟[J] . 岩土工程学报, 2006, 28(7): 823-828.
- [14] Hanna T H, Touhamia M. Comparative behavior of metal and tensar geogrid strips under static and repeated loading[C] . Proceedings of the International Conference on Geosynthetics, Atlanta, 1991: 575-585.
- [15] Raju, Fannin R J. Monotonic and cyclic pullout resistance of geogrids[J] . Geotechnique, 1997 (2): 331-337
- [16] De A, Zimmie. Factors Influencing Dynamic frictional behavior of geosynthetic interfaces[C] . Proceedings of the International Conference on Geosynthetics, Long Beach, 1997(2): 575-585.
- [17] 张兴强, 闫澍旺. 交通荷载作用下桥头跳车的加筋效应分析[J] . 土木工程学报, 2005, 38(10): 125-128.
- [18] McGown A, Andrawes K Z, Yeo. The load-strain-time behavior of Tensar geogrids[C] . Proceeding of Conference Polymer Grid Reinforcement, London: Thomas Telford, 1985: 11-17.
- [19] 王 钊. 土工合成材料的蠕变试验[J] . 岩土工程学报, 1994, 16(6): 96-102.
- [20] Andrawes K Z, McGown A, Murray R T. The load-strain-time-temperature behavior of geotextiles and geogrids[C] . Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, 1986: 707-712.
- [21] Bush. Variation of long term design strength of geosynthetics in temperatures up to 40[C] . Proceeding of the 4th Inter- Conference on Geotextiles[C] , The Hague, 1990: 673-676.
- [22] Finnigan J A. The creep behaviour of high tenacity yarns and fabrics used in civil engineering application [C] . Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics, Paris, 1977(2): 305-309.
- [23] Das B M. Creep behavior of geotextiles[C] . Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, The Hague, 1990: 667-674.
- [24] Sawicki A. A basis for modeling creep and stress relaxation behavior of geogrids[J] . Geosynthetics International, 1998, 5(6): 637-645.
- [25] 栾茂田, 肖成志, 杨 庆, 等. 土工格栅蠕变特性的试验研究及粘弹性本构模型[J] . 岩土力学, 2005, 26(2): 187-192.
- [26] Ingold T S. An analytical study of an geotextile reinforced embankments[C] . Proceeding of the 2nd International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Las Vegas, USA, 1982: 683-688.
- [27] Low B K. Slip circle analysis of reinforced embankments on soft ground[J] . Geotextiles and Geomembranes, 1990, 9(2): 165-181.
- [28] 徐少曼, 林瑞良. 提高土工织物加筋效果的新途径[J] . 岩土工程学报, 1997, 19(2): 49- 55.
- [29] Buhan P D, Mangiavacchi R, Nova R, et al. Yield design of reinforced earth walls by a homogenization method[J] . Geotechnique, 1989, 39(2): 189-201.
- [30] 朱 湘, 黄晓明, 邓学钧. 加筋路堤圆弧滑动法稳定性验算的改进[J] . 东南大学学报, 1999, 29(5): 109-114.
- [31] Kaniraj S R, Panwar. Reinforcement force in embankment on soft soils[C] . Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice, Japan, 1992: 245-250.
- [32] Woods R I. A computer design method for reinforced soil structure[J] . Geotextiles and Geomembranes, 1990, 9(3): 233-260.
- [33] Rowe R K. An approximate method for estimating the stability of geotextiles-reinforced embankments [J] . Canadian Geotechnical Journal, 1985(22): 392-398.
- [34] Ilan Juran, Halis M I, Farrag K. Strain compatibility analysis for geosynthetics reinforced soil walls[J] . Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990: 312-329.
- [35] Gourc J P, Ratel A. Design of fabric retaining walls: displacement method[C] . Proceeding of the 3rd International Conference on Geotextiles, Austria, 1986: 1067-1072.
- [36] Lemonnier P, Soubra A H, Kastner R. Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis: Local Stability[J] . Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16(1): 1-25.

- tion analysis[J]. *Journal of system simulation*, 2002, 14(2): 257-261.
- [7] 张建新, 吴东云, 张淑朝. 嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1221-1224.
- [8] 刘兴远, 郑颖人. 影响嵌岩桩嵌岩段特性的特征参数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 383-386.
- [9] R K Rowe. Theoretical solutions for axial deformation of drilled shafts in rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 24, 114-125.
- [10] Michael W O Neil. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2001, 1: 3-16.
- [11] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]
- [12] 潘时声, 侯学渊. 桩的刚度计算[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(1): 1-6.
- [13] 许宏发, 吴华杰, 郭少平, 等. 桩土接触面单元参数分析[J]. *探矿工程*, 2002(5): 10-12.
- (上接第 83 页)
- [37] 邢怀海, 顾晓卉, 徐 波. 流变模型在格栅加盘堤坝稳定分析中的应用[J]. *盐城工学院学报*, 2002, 15(2): 21-24.
- [38] Drawes K Z, McGown A, Wilson-Famhmy R F, et al. The finite element method of analysis of applied to soil-geotextile systems[C]// *Proceeding of the 2nd International Conference of Geotextiles*, Las Vegas, USA, 1982: 695-700.
- [39] Karpurapu R, Bathurst R J. Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining walls using the finite element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 1995, 17: 279-299.
- [40] 刘华北, Ling H I. 土工格栅加筋挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 668-673.
- [41] 介玉新, 李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 614-616.
- [42] Sawicki A. Rheological Model of Geosynthetic Reinforced Soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1999, 17(2): 33-49.
- [43] 肖成志, 栾茂田, 杨 庆. 考虑格栅流变性的加筋挡土墙格栅等效应力计算[J]. *岩土工程技术*. 2004, 18(1): 23-27.
- [44] Helwany M B, Wu J T H. A numerical model for analyzing long-term performance of geosynthetic reinforced soil structures[J]. *Geosynthetic International*, *Journal of the International Geosynthetics Society*, 1995, 2(2): 429-453.
- [45] 栾茂田, 肖成志, 杨 庆, 等. 考虑蠕变性的土工格栅加筋挡土墙应力与变形有限元分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 857-864.
- [46] 周世良, 刘占芳, 何光春. 饱水格栅加筋土挡墙结构特性数值分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 1015-1021.
- [47] 周志刚, 郑健龙, 宋蔚涛. 土工格栅加筋柔性桥台的机理分析[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(1): 18-21.
- [48] Bray, et al. Seismic stability procedures for solid waste landfills[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1995, 121(2): 131-151.
- [49] Kavazanjian, Matasovic, et al. *Seismic analysis of solid waste landfills*[M]// *Geoenvironment 2000*, Geotechnical Special Publication, New York, 1995.
- [50] Muthucumarasamy Y, Richard J, et al. Dynamic response analysis of reinforced retaining wall[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1992(8): 1158-1167.
- [51] Yegian M K, Harb J N, Kadakal U. Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1998: 1027-1033.

收稿日期: 2008-01-11

收稿日期: 2008-01-23