

对水平增强体复合地基设计中几个问题的探讨

彭良泉^{1,2}

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对目前水平增强体复合地基在承载力、沉降以及稳定计算中存在的问题进行了研究。算例结果表明: 考虑筋材水平拉力和垂直拉力的作用, 对于底层加筋软土, 其地基极限承载力提高幅度约为 10.32%, 对于铺设 3 层土工织物的软土, 其地基极限承载力提高幅度约为 84%; 考虑筋材受拉产生的垂直向上的拉力对减小基底附加应力的有利作用, 同时考虑筋材受拉产生的水平拉力均化地基表面附加应力, 从而减小不均匀沉降的有利影响, 双层土工织物加筋地基沉降较无筋地基减小幅度为 59.6%。本文提出的拟黏聚力分析模型舍弃了加筋路堤仅考虑筋材抗滑力矩的常规稳定分析方法, 将筋材加固作用转化为加筋土体抗剪强度的提高, 能够充分反映加筋路堤的实际工作状态, 算例表明, 边坡稳定安全系数比不考虑拟黏聚力时提高 53.36%。

关键词: 水平增强体复合地基; 拟黏聚力; 极限承载力; 沉降; 加筋路堤稳定性

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0469-06

Discussion on the issues in the design of horizontal reinforced composite foundation

PENG Liangquan^{1,2}

(1. Changjiang Surveying, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei, China;

2. National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: This paper investigates the issues in the calculation of bearing capacity, settlement and stability of horizontal reinforced composite foundation. The results show that considering the effects of horizontal and vertical tension of reinforcement, the ultimate bearing capacity of the foundation increases by 10.32% for the soft soil foundation with bottom reinforcement, and 84% for the foundation with three layers of geotextile. Considering the beneficial effect of the vertical tension generated by the reinforcement on reducing the additional stress of the foundation, and the beneficial effect of the horizontal tension generated by the reinforcement on reducing the additional stress on the surface of the foundation to reduce the uneven settlement, the settlement of the double-layer geotextile reinforced foundation decreases by 59.6% compared with that of the non-reinforced foundation. The proposed pseudo-cohesive force analysis model abandons the conventional method which only unilaterally consider the anti-sliding moment of the reinforcement material, but converts the reinforcement effect into the improvement of the shear strength of the reinforced soil body, which can fully reflect the actual working state of the reinforced embankment. Case studies indicate that the safety factor is 53.36% higher than that without considering pseudo-cohesive force.

Key words: horizontal reinforced composite foundation; pseudo-cohesive force; ultimate bearing capacity; settlement; stability of reinforced embankment

0 引言

水平增强体复合地基是指在地基中铺设各

种水平向加筋材料, 如土工织物、土工格栅、金属材料、竹筋等形成的复合地基, 人们常称之为“水平加筋地基”, 在公路、铁路、水运和水利

工程中得到了广泛的应用。但应当指出的是,在水平加筋地基广泛应用的同时,对有关加筋机理和计算方法的理论研究落后于工程实践的发展,主要表现在以下3个方面:(1)对于底层加筋软土地基的极限承载力验算,现行规范^[1]采用的计算方法假定不考虑加筋材料对地基承载力的有利影响,但原型试验结果表明^[2],铺设土工织物可使试验堤坝的极限高度提高30%以上,甚至可提高1倍以上。再如在泰国曼谷,在8 m厚的软黏土沉积土上建造了3座足尺路堤试验段,其中2条路堤加筋,第3条不加筋。2条加筋路堤中的1条(路堤A)用1层极限抗拉强度 T_{ult} 为200 kN/m的高强度土工织物加筋;另1条(路堤B)用4层低刚度针刺的无纺土工布加筋,这4层中的第1层土工布 $T_{ult}=18$ kN/m,其他3层 $T_{ult}=8.3$ kN/m,总的组合强度大约为43 kN/m。加筋使路堤A的破坏高度提高了50%,路堤B提高了15%^[3]。(2)水平加筋地基的沉降计算,至今也没有得到很好的解决,如《土工合成材料应用技术规范》(GB/T 50290—2014)^[1]规定,对于利用底筋法加固软基的沉降量与沉降速率的计算,可按未加底筋时的常规方法估算;规范[4-5]没有给出计算规定。(3)按现有方法得到的计算结果不能充分反映水平加筋材料对改善地基整体稳定性的有利作用,譬如,文献[6]指出,水平加筋软土地基按常用的圆弧滑动或水平滑动核算的安全系数一般只增加2%~5%,文献[7-8]指出,即使按有限元法计算,其安全系数也只增加4%,而实际工程表明,堤坝极限高度都能够得到显著的提高,如某公路路堤建于厚度从1.2 m到11.3 m不等的泥炭层地基上,稳定性分析表明不用加筋路堤只能填筑到1.8 m,使用1层极限抗拉强度为17.7 kN/m的土工格栅直接铺在地面上,另4层土工格栅的每层极限抗拉强度 $T_{ult}=108$ kN/m,以60 cm的竖向间距设置,在设计高度为6 m时,采用加筋使竣工期的安全系数从0.46增加到所需的1.15^[9]。

综上所述,对于水平增强体复合地基的承载力、沉降和稳定计算,现有计算方法缺乏指导性,计算结果与实际情况相差较大,阻碍了水平增强体复合地基技术的应用和发展。本文针对上述3个问题,从工程实践角度出发,探讨实用的设计计算方法,以期抛砖引玉,共同促进复合地基技术的发展。

1 加筋地基承载力

1.1 问题

对于底层加筋软土地基的极限承载力 P_u ,规范^[1]规定不考虑加筋材料对提高地基承载力的有利影响,与天然地基相同:

$$P_u = c_u N_c \quad (1)$$

式中: c_u 为地基土的不排水抗剪强度, kPa; N_c 为地基土条形基础下地基承载力因素,取5.14。

式(1)得到的极限承载力 P_u ,指的是饱和软土地基不排水承载力,即短期承载力,且不考虑筋材的有利作用,显然低估了底层加筋软土地基的极限承载力^[10-11]。

1.2 探讨

在地基中设置水平增强体,一般是在建筑物基础下一定范围内以等间距 z 铺设多层土工织物。水平筋材布置如图1所示,图中: b 为基础宽度; n 为筋材布置层数; z_1 为第一层筋材到基础底面的距离; z_n 为第 n 层筋材到基础底面的距离; L_i 为第 i 层筋材的布置长度。

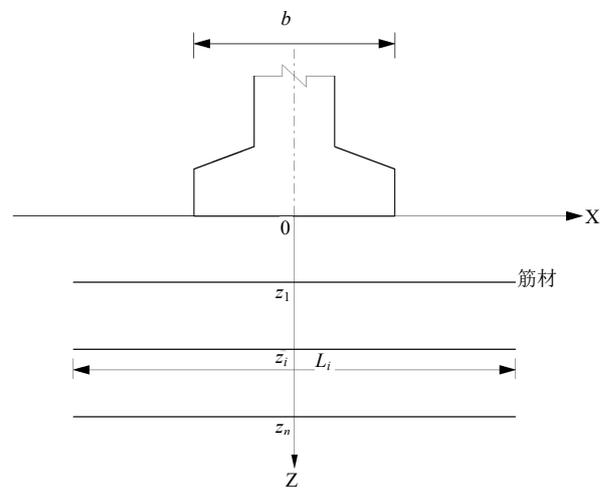


图1 水平筋材布置示意图

Fig. 1 Horizontal reinforcement layout

在上部建筑物荷载作用下,筋材(水平增强体)发生向下弯曲变形,筋材拉力可以分解为水平和垂直向上两个分力(见图2),分别为:

$$T_h = T_{ult} \sin \alpha \quad (2)$$

$$T_v = T_{ult} \cos \alpha \quad (3)$$

式中: T_{ult} 为筋材极限抗拉强度; α 为筋材拉力与垂

直方向的夹角，可取 $\alpha = 45^\circ - \varphi / 2$ ，对于饱和软土，其内摩擦角 φ 一般为 0° ， $\alpha = 45^\circ$ ； T_v 为筋材产生的垂直向上的拉力； T_h 为筋材产生的水平向拉力。

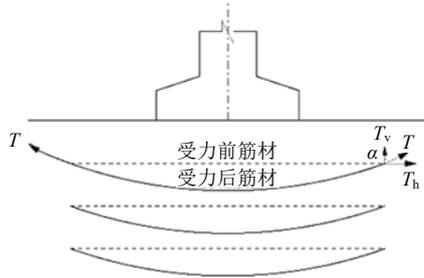


图 2 筋材受力分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reinforcement force analysis

筋材产生的水平向拉力 T_h ，相当于给筋材之间的土体施加了一个围压作用，可认为土体增加了一个拟黏聚力 c_p ，其值为^[10-11]：

$$c_p = \frac{T_h}{2z} \sqrt{K_p} \quad (4)$$

式中：被动土压力系数 $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi / 2)$ ，对于饱和软土 φ 取为 0° ，则 $K_p = 1$ ； z 为筋材竖向布置间距。

按照规范^[1]，对于深厚软土地基上的加筋堤坝，如果仅在底部加筋，不考虑筋材对地基承载力的提高，地基极限承载力计算公式为：

$$P_u = c_u N_c \quad (5)$$

式中： c_u 为基底下软土不排水抗剪强度； $N_c = 5.14$ 。

由于筋材水平拉力的作用，筋材之间的土体增加了一个拟黏聚力 c_p ，则水平拉力作用下加筋地基极限承载力计算公式为：

$$P_{uh} = (c_u + c_p) N_c \quad (6)$$

设加筋层数为 n ，每层间距为 $30 \sim 50$ cm，筋材产生的垂直向上的拉力为 T_v ，由于筋材布置在较小的深度范围内，尽管其变形随地基沉降会有所差异，但差异较小，因此，当地基接近临界破坏时，可以视每层筋材都同时达到极限状态，发挥极限抗拉强度。由于筋材垂直向上的拉力作用，地基承载力的附加提高值为：

$$P_{uv} = n T_v \quad (7)$$

由于筋材的水平拉力和垂直拉力作用，加筋地基极限承载力为：

$$P_u = P_{uh} + P_{uv} = (c_u + c_p) N_c + n T_v \quad (8)$$

需要指出的是，加筋层数 n 对地基承载力的贡献或影响并非无限，而是具有上限值。BINQUET 等^[12] 将水平加筋材料对地基承载力的改善用承载力比 (BCR) 表示：

$$BCR = \frac{q}{q_0} \quad (9)$$

式中： q_0 为天然地基的极限承载力； q 为加筋地基的极限承载力，其沉降等于天然地基在 q_0 作用下的沉降。

BINQUET 等^[12] 完成了 65 组加筋地基的试验，其后 GUIDO 等^[13]、MIYAZAKI^[14] 和 JU^[15] 对筋材布置也进行了大量的试验工作，得出的规律为：当 $z_1 \leq 0.67b$ 、 $z_n \leq 2b$ 时，BCR 值在 $2 \sim 4$ ，在此有效布置范围内，BCR 随 n 增大而增加，当 $n = 4$ 时，BCR 已接近最大值。因此，实际工程中加筋层数一般为 $1 \sim 4$ 层。

1.3 算例

一软土地基，土体容重为 16.5 kN/m^3 ， $\varphi = 0^\circ$ ，其不排水抗剪强度 $c_u = 20 \text{ kPa}$ 。堤坝顶宽为 6 m ，底宽为 30 m ，填筑高度为 6 m ，基底平均压力为 59.4 kPa 。在地基表层下分别铺设 1 层和 3 层土工织物，间距为 50 cm ，土工织物极限抗拉强度 $T_{ult} = 15 \text{ kN/m}$ 。计算 2 种铺设方式下该加筋地基的极限承载力。

根据规范^[1]，地基极限承载力 $P_u = 5.14 \times 20 = 102.8 \text{ kPa}$ 。根据本文提出的方法计算如下：

(1) 底面铺设 1 层土工织物

$$c_p = 0;$$

$$P_u = P_{uh} + P_{uv} = 113.41 \text{ kPa}.$$

(2) 地基下铺设 3 层土工织物

$$c_p = \frac{T_h}{2z} \sqrt{K_p} = 10.61 \text{ kPa};$$

$$P_u = P_{uh} + P_{uv} = 189.15 \text{ kPa}.$$

根据上述分析，考虑筋材拉力对地基极限承载力的作用，底层加筋和 3 层加筋地基极限承载力提高幅度分别为 10.32% 和 84% 。

上述实例得到的计算结果，与文献^[2]原型试验结果表明的铺设土工织物可使试验堤坝的极限高度提高 30% 以上，甚至可提高 1 倍以上的结论一致。

2 加筋地基沉降

2.1 问题

由于筋材的存在,地基中的位移场和应力场发生了显著变化,这种变化目前很难用简单的方法获得,即使采用数值方法,由于土的本构关系和参数很难准确获取,得到的计算结果也与实际工程情况差别较大。

2.2 探讨

水平增强体对地基沉降的影响主要包括2个方面:(1)可以减小地基表面承担的压力,从而减小地基沉降;(2)均化地基表面压力,从而减小不均匀沉降。

对于未加筋的天然地基,在基底附加应力 P 作用下,均质地基表面产生中间大、两端小的沉降曲线,形如“锅底状”,根据沉降变形的连续性,可以近似将“锅底状”视为圆弧形,中心处最大沉降 s 、地基沉降曲线弧长 L 、弦长(或者基础宽度) B 之间存在如下几何关系(见图3):

$$L = B(1 + 4\beta^2) \arctan(2\beta) / 2\beta \quad (10)$$

$$\beta = s / B \quad (11)$$

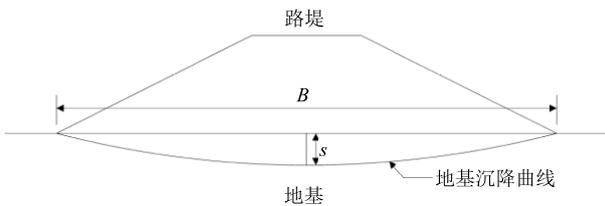


图3 天然地基表面沉降曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of foundation surface settlement curve

同1.2节一样,当加筋层数为 n 时,其中筋材提供的垂直向上的作用为:

$$P_{uv} = nT_v = nT_{ult} \cos \alpha \quad (12)$$

上部荷载施加给地基的附加应力为 P_1 ,则地基实际承担的附加应力 P 为:

$$P = P_1 - P_{uv} \quad (13)$$

水平增强体对一个相对软弱下卧层地基而言,具有较大的抗拉、抗弯和抗剪强度,可视为一种柔

性的筏板基础,具有将上部荷载向基础两侧转移、降低地基应力峰值、均化地基应力的作用,进而调整地基不均匀沉降。监测及研究表明,均质地基加筋后,地面沉降由“锅底状”调整成“平底碟状”,且最大沉降量 s' 显著减小(见图4)。

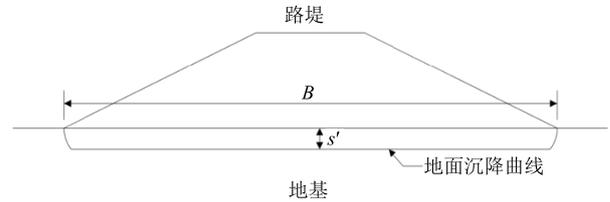


图4 加筋地基表面沉降曲线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reinforced foundation surface settlement curve

假设天然地基表面沉降形状近似为圆弧形(图3),加筋地基表面沉降形状近似为矩形(图4)。对于均质地基,根据能量守恒原理,在上部荷载作用下,天然地基在附加应力 P 作用下产生的变形 s 所做的功在数值上应该等于加筋地基在附加应力 P 作用下产生的变形 s' 所做的功,可以得到:

$$\frac{1}{2} PLs = PBs' \quad (14)$$

将式(10)代入式(14)中,得到水平增强体复合地基沉降计算值 s' :

$$s' = \frac{1}{2} s (1 + 4\beta^2) \arctan(2\beta) / 2\beta \quad (15)$$

2.3 算例

一淤泥质土地基,厚度 H 约15 m,其下为砂土层,淤泥质土变形模量 E 为1 MPa。基础底宽5 m,基底附加压力 P 为100 kPa。在地基表层及其下0.5 m铺设2层土工织物,土工织物极限抗拉强度 $T_{ult} = 20$ kN/m。为了简化计算过程,假设砂土层顶面处附加应力为0 kPa,沉降计算深度取15 m,计算加筋地基沉降。

当地基不加筋时,地基沉降为:

$$s = \frac{PH}{2E} = \frac{100 \times 15}{2 \times 1} = 75 \text{ cm}。$$

当地基加筋时,根据式(12)和式(13),作用在加筋地基表面的附加应力 P 为:

$$P = P_1 - P_{uv} = 100 - 2 \times 20 \times \cos 45^\circ = 71.72 \text{ kPa}。$$

在上述附加应力 P 作用下,当不考虑筋材均化

地基应力作用时，地基沉降为：

$$s = \frac{PH}{2E} = \frac{71.72 \times 15}{2 \times 1} = 54 \text{ cm}。$$

当考虑筋材均化地基应力作用时，根据式 (11) 和式 (15)，地基沉降为：

$$\beta = \frac{s}{B} = \frac{0.54}{5} = 0.108；$$

$$s' = \frac{1}{2} s (1 + 4\beta^2) \arctan(2\beta) / 2\beta = 28 \text{ cm}。$$

根据上述分析，考虑筋材对地基沉降的有利影响，双层加筋地基沉降较天然地基减小幅度为 59.6%，与有关原位浅层平板载荷试验得到的加筋地基总沉降可减小至少 50% 以上的结论吻合^[16]。

3 加筋路堤稳定分析

3.1 问题

现场填筑试验表明^[17]，部分经过水平筋材加固的路堤建成后按照瑞典法或者荷兰法计算的稳定系数均小于 1，但事实上路堤稳定，这表明瑞典法或者荷兰法缺乏针对性。基于此，改进的或新的计算方法被相继提出，这些方法在现行计算方法的基础上对筋材拉力的作用进行了不同的假设，但未涉及筋材作用对加筋前后滑动模式和滑动面的修正，因此，计算方法仍有较大的改进空间。

3.2 探讨

根据 1.2 节，筋材产生的水平向拉力 T_h 相当于给筋材之间的土体施加一个围压作用，将本来松散的砂土颗粒紧密地联系在一起，相当于土体增加了一个拟黏聚力 c_p ，如果取 $T_h = 24 \text{ kN/m}$ 、 $z = 0.5 \text{ m}$ ，当取砂的内摩擦角为 25° 时， $c_p = 37.7 \text{ kPa}$ ，该值是基于极限状态，即路堤发生破坏，筋材被拉裂时加筋土的极限拟黏聚力。

在上述基础上，针对底部加筋路堤和多层加筋路堤的稳定计算，提出了“拟黏聚力”稳定计算模型^[18]。该计算模型舍弃了仅能片面考虑筋材抗滑力矩的常规方法，将筋材加固作用转化为加筋土体抗剪强度的提高。上述假设主要基于两方面的考虑：一方面，由于地基表面浅层土体加固后，强度得以提高，迫使滑动面向地基深处发展；另一方面，将筋材拉力作用等效成土体强度的提高，从而稳定性相应提高，能够充分反映加筋路堤的实际工作状态。此外，该计算模型仍然基于极限平衡法，无需对目前工程技术人员所熟悉的稳定计算方法进行

较大的修改，只需在不同区域土体的抗剪强度指标中再叠加一个拟黏聚力即可，使用简单。

需要指出的是，在实际工程中，软基上路堤的破坏面在上部堤体中多近似竖直，在下部堤基中多呈圆弧状，采用圆弧滑动面搜索的最危险滑动面形状也显示出类似特征。因此，采用圆弧滑动面进行搜索计算可以满足实际工程的需要。

3.3 算例

有一袋装砂路堤(见图 5)，填筑高度为 4.0 m ，顶宽为 6.0 m ，两侧边坡为 $1:2$ 。筋材竖向间距为 0.5 m 。地基土层依次为淤泥和淤泥质黏土。如果不考虑土条之间的相互作用，取袋装砂内摩擦角为 25° ，有以下 2 种情况：

(1) 当拟黏聚力 c_p 取 0 时，相当于路堤不加筋，得到边坡稳定安全系数为 1.012，其圆弧滑动面如图 6 中的①所示。

(2) 当拟黏聚力 c_p 分别取 5 kPa 、 10 kPa 、 15 kPa 、 20 kPa 、 25 kPa 、 30 kPa 、 37.7 kPa 时，其圆弧滑动面分别见图 6 中的②、③、④、⑤、⑥、⑦和⑧，边坡稳定安全系数见图 7。从图 6 和图 7 中可以看出，随着袋装砂的拟黏聚力增大，最危险滑动面逐渐下移，最终与地基土中软硬土层交界处相切，筋材的强度控制着滑动面发展的位置。随着袋装砂的拟黏聚力增大，安全系数逐渐增加，但增加的幅度呈下降趋势，当 c_p 达到最大值 37.7 kPa 时，安全系数为 1.552，比不考虑拟黏聚力时的安全系数提高 53.36%。

未注明单位为 m

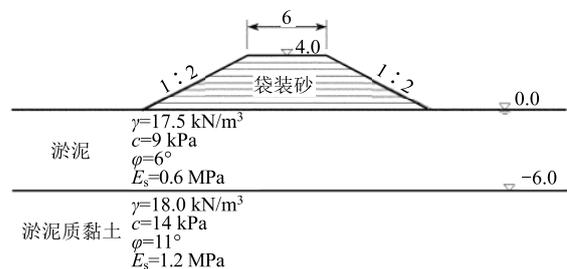


图 5 袋装砂路堤断面

Fig. 5 Bagged sand embankment section

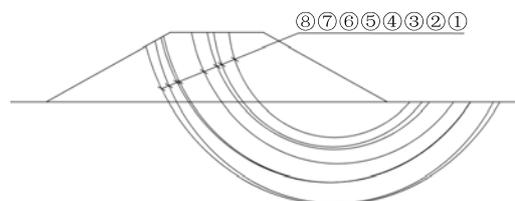


图 6 袋装砂路堤滑动面

Fig. 6 Sliding surface of bagged sand embankment

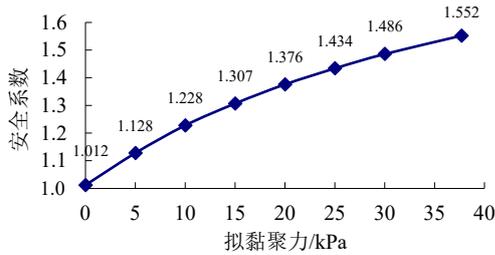


图7 袋装砂路堤边坡稳定安全系数

Fig. 7 Safety factor of bagged sand embankment slope

4 结论

本文针对水平增强体复合地基的承载力、沉降以及稳定性分析方法进行了初步探讨和研究,从简单实用方面提出了改进的计算方法,得到以下结论:

(1) 现有计算方法完全不考虑筋材对地基极限承载力的有利作用,与工程实际不符。考虑筋材水平拉力和垂直拉力的作用,根据算例,对于底层加筋软土地基,地基极限承载力提高幅度约10.32%;对于铺设3层土工织物的情况,地基极限承载力提高幅度约84%。

(2) 考虑到筋材垂直向上的拉力对减小基底附加应力的有利作用,同时考虑筋材水平拉力均化地基表面附加应力从而减小不均匀沉降的有利影响,提出了一种改进算法。根据算例,考虑筋材对地基沉降的有利影响,双层加筋地基沉降较无筋地基减小幅度为59.6%。

(3) 算例表明,考虑多层加筋对软土地基上路堤稳定的影响,其边坡稳定安全系数可以提高53.36%。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土工合成材料应用技术规范: GB/T 50290—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Application of Geosynthetics: GB/T 50290—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [2] ROWE R K, LIA L. Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations[J]. Geosynthetics International, 2005,

12(1): 50-85.

- [3] 李广信. 关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 605-610.
LI Guangxin. Some problems in design of geosynthetic-reinforced soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 605-610.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程土工合成材料应用技术规范: JTS/T 148—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Code for Application of Geosynthetics for Port and Waterway Engineering: JTS/T 148—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程土工合成材料应用技术规范: SL/T 225—98[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Applications of Geosynthetics in Hydraulic and Hydro-Power Engineering: SL/T 225—98[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1998.
- [6] BAO C G. Study on the interaction behavior of Geosynthetics and soil in China[C]//In GeoAsia2004 Proceeding of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics. 2004: 104-115.
- [7] ASHMANY A K, BOURDEAU P L. Effect of geotextile reinforcement on the stress-strain and volumetric simulation of dynamic behavior of soil with reinforcement[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Geotextiles. 1998: 1079-1082.
- [8] BAUER C E, ZHAO Y J. Effect of soil dilatancy on shear strength of reinforced composites[C]//Proceedings of the International Conference on Geotextiles. 1994: 369-372.
- [9] ROWE R K, LIA L. Insights from case histories: reinforced embankments and retaining walls[C]//Proceedings International Symposium on Earth Reinforcement. 2001: 31-60.
- [10] 彭良泉. 软基加筋设计中的不当与改进[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 124-131.
PENG Liangquan. Discussion on impropriety and improvement in design of geosynthetic-reinforced soft foundation[J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 124-131.

