

文章编号: 1001-1986(2015)01-0062-06

加筋地基承载力研究现状

郭鹏辉, 李良勇, 陈宝成, 杨晓楠

(同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 基于目前国内外文献对加筋地基承载力的研究成果, 总结了加筋地基承载力的影响因素及其影响规律, 并基于已有文献的研究成果得到了最优加筋参数的建议取值范围。对目前加筋地基的破坏模式及承载力计算公式进行了总结, 并讨论了各承载力计算公式的区别与联系及优劣性。提出加筋地基承载力计算公式应基于准确的破坏模式与加筋机理。加筋地基的破坏模式与破坏模式类型定量化判断标准、加筋机理、原型实验等应成为加筋地基承载力未来的研究重点。

关键词: 承载力影响因素; 破坏模式; 承载力计算公式

中图分类号: TU472 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.01.013

Research status of bearing capacity for geosynthetic-reinforced foundation

GUO Penghui, LI Liangyong, CHEN Baocheng, YANG Xiaonan

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper summarized the influence factors of bearing capacity of reinforced foundation on the basis of the historical literatures, and proposed the optimum parameters of reinforced foundation. The paper also summarized the failure modes of reinforced foundation and analytical solutions, discussed advantages and disadvantages of formulas used to calculate bearing capacity of reinforced foundation. It is advised that calculation method of bearing capacity of reinforced foundation should be based on accurate failure mode and complete reinforcement mechanism. And research on failure modes and quantified standards to identify the type of failure modes, reinforcement mechanism, and large scale tests should be the focus of research in future.

Key words: influence factor of bearing capacity; failure mode; formula for calculation of bearing capacity

加筋地基是地基处理的一种方法, 它是指在基础下一定范围内的软弱土层中铺设增强体与某种填土组成的加筋垫层来作为持力层的地基^[1]。目前, 增强体通常为各种土工合成材料, 包括土工格栅、土工织物和土工格室等, 填土通常为具有一定密实度的砂土。这种地基处理技术造价低、施工简便且取材广泛^[2-3], 在公路、铁路和建筑等领域中得到了广泛的应用^[4]。

加筋地基承载力是加筋地基研究的重要方面, 近几十年来, 国内外学者对加筋地基承载力进行了大量的研究, 取得了一定的成果, 这些研究主要集中在对加筋地基承载力影响因素和加筋地基承载力计算公式方面的研究, 下面, 就这两方面的内容对加筋地基的研究现状及存在的问题进行综述。

1 加筋地基承载力的影响因素

加筋地基承载力的影响因素较多, 加筋参数(如

图 1 所示, 首层筋材与基础底面的距离 u 、筋材的层间距 h 、筋材长度 L 和加筋深度 D_r 、筋材的性质、筋材的布置形式、填土的性质等均会对加筋地基的承载力造成影响。另外, 常用承载比 BCR (Bearing Capacity Ratio)^[5]作为评价加筋地基加筋效果的参数, $BCR=q/q_0$, 其中, q 为加筋地基在基础达到某一沉降量时, 基底平均压力值; q_0 为无筋地基在基础达到与加筋地基相同沉降量时, 基底平均压力值。

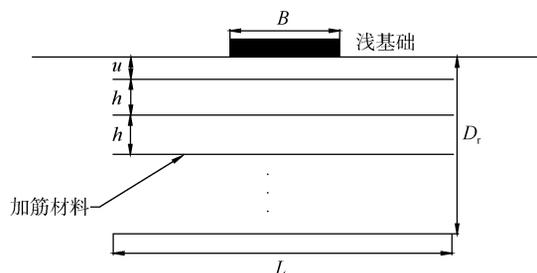


图 1 加筋地基示意图

Fig.1 Schematic diagram of reinforced foundation

收稿日期: 2014-04-08

作者简介: 郭鹏辉(1988—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 从事加筋土方面的研究. E-mail: guopenghui8@163.com

引用格式: 郭鹏辉, 李良勇, 陈宝成, 等. 加筋地基承载力研究现状[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(1): 62-67.

a. 加筋参数

首层加筋材料与基础底面的距离 u/B 的大小与加筋地基承载力的关系可以描述为一单峰曲线, 即 u/B 存在最优值, 当 u/B 达到最优值时, 加筋地基承载力达到最大。关于这一现象, 文献[6-7]认为当 u/B 较小时, 筋材的上覆压力较小, 致使筋土界面的摩擦阻力无法充分发挥; 当 u/B 较大时, 筋材处于基础荷载的影响范围之外, 这两种情况均会导致筋材的加筋效应无法充分发挥。

在加筋深度相同的情况下, 层间距 h/B 的减小意味着加筋层数的增多, 这样会大大约束地土体的侧向位移, 同时, 在基础沉降较大时, 筋材的膜效应会更加明显。这两种效应均会导致加筋地基承载力的增加。文献[7]通过模型试验得到加筋地基承载力随着层间距的减小均匀增加, 验证了这种情况。

加筋长度(L/B)存在最优值, 即当加筋长度达到最优值时, 加筋地基的承载力已经达到较大值, 进一步增加加筋长度, 加筋地基的承载力增量则较小。关于这一现象, 文献[8]认为: 加筋地基中布置的筋材分布于两个区域: 剪切区和锚固区。剪切区位于基础正下方及附近区域, 筋材在这一区域主要提供拉力; 锚固区位于剪切区之外, 筋材在这一区域主要提供抗拔力。超出这两区域之外的加筋长度, 筋材的加筋效应较小。

加筋深度(D_r/B)存在最优值, 也可称为有效加筋深度。在有效加筋深度内, 加筋地基承载力随着加筋深度的增加而增大, 当筋材深度超过有效加筋深度时, 加筋地基承载力增量较小。关于这一现象, 文献[6]认为有效加筋深度即为基础荷载的影响深度, 一般为 $1.5B \sim 2B$, 超过这一深度时, 地基内附加应力很小, 导致在这一深度内的筋材无法发挥加筋效应。

本文总结了部分学者^[2,5-13]对最优加筋参数的研究成果, 如表 1 所示。可以看出, 对于平面加筋地基, 最优加筋参数范围分别为: $u/B=0.3 \sim 0.4$, $D_r/B=1.5 \sim 2$, $L/B=4 \sim 5$ (独立基础)/ $6 \sim 8$ (条形基础), 对于 h/B , 由于有效数据较少, 本文不提供具体数值, Sharma(2009)^[14]对 h/B 的建议值为 $0.2 \sim 0.5$ 。最优加筋参数可以为加筋地基的设计提供参考, 能够在成本较低的情况下, 取得最佳的加筋效果。

b. 填土性质

填土的种类、相对密实度等因素会影响筋土界面的性质以及筋材的变形, 这些均会对加筋地基的承载力造成影响。一般来说, 填土为砂土的加筋地基承载力优于填土为黏土的加筋地基, 文献[9]通过比较加筋砂土地基与加筋黏土地基的承载力, 认为砂土颗粒与格栅孔径的锚固作用更能发挥格栅在砂

土中的加筋效应。而填土密实度对加筋地基承载力的影响则较为复杂: 填土密实度较大的加筋地基承载力较大, 文献[15]通过模型试验验证了这一结论。

c. 筋材性质

筋材的性质主要包括筋材的类型、抗拉刚度和强度, 筋材的这些性质对加筋地基的承载力有较大的影响。加筋地基采用抗拉刚度和抗拉强度较大的筋材往往具有较高的承载力, 文献[5,8]通过数值分析发现加筋地基的承载力随着筋材刚度的增加而增加。对于加筋材料的选择, 土工格栅应成为首选材料, 已有的研究成果^[8]表明在加筋参数相同的情况下, 土工格栅加筋地基明显优于土工织物加筋地基。在采用相同筋材时, 不同的筋材布置形式也会大大影响地基的承载力。文献[1,16]通过模型实验发现: 立体式加筋效果最好, 平铺式加筋其次, 随机分布式加筋最差, 但三者的经济成本和施工程序存在差别, 实际工程中应综合加筋效果和经济成本综合确定筋材布置形式。另外, 通过对一般筋材的改造, 改变筋材的性质, 也可提高筋材在加筋地基中的加筋效应, 如采用预应力筋材等。文献[17]通过模型试验验证了预应力筋材的优势。

2 加筋地基承载力计算思路

2.1 加筋地基破坏模式

加筋地基承载力计算的前提应首先对加筋地基破坏模式和加筋机理有全面深刻的认识。对于加筋地基破坏模式, 已有部分学者对其进行了研究, 得到了一定的成果。文献[18-19]用长 50 mm、直径为 1.6 mm 和 3 mm 两种铝棒分别模拟两种粒径的砂颗粒, 将这两种铝棒按照重量比 3:2 混合形成 $100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 大小的模拟砂土地基, 分别采用纸片和塑料片作为加筋材料, 形成了模拟加筋地基, 并采用数字图像变形量测标点法对该模拟加筋地基破坏模式进行了研究, 结果显示: 加筋地基的破坏形式与 Prandtl 地基破坏形式相似, 不同的是加筋地基的破坏滑移线较无筋地基向更深、更宽的方向延伸。且随着加筋层数的增多、加筋长度的增加、筋材刚度强度的增加, 这种延伸也随之增加。文献[1,20]利用数字图像变形量测无标点法对不同加筋层数的加筋地基进行了研究, 结果显示: 加筋地基的破坏面先从基底两侧形成, 随荷载的增加, 破坏面竖直向下发展, 在此过程中加筋体有从土体中拔出的作用, 随荷载进一步增加, 破坏面竖直向下发展直至加筋区底部, 并在加筋区底部形成一个三角形楔体, 最后直至形成地基完全破坏。这种破坏模式类似于冲剪破坏模式。文献[21]对单层加筋地基的破坏模式

表 1 部分文献提供的最优加筋参数值
Table 1 The optimum parameters for reinforced foundation obtained from literatures

| 文献 | 基础类型 | 加荷方式 | 筋材性质 | | | | |
|--------|------|-------|--------|----------------------------|--------------------------|------------|--------------|
| | | | 名称 | 抗拉强度/(kN·m ⁻¹) | 模量/(kN·m ⁻¹) | 孔径/mm | 布筋形式 |
| 文献[10] | 方形基础 | 应力控制式 | 双向土工格栅 | — | — | 25.4×33.02 | 水平布置 |
| 文献[5] | 矩形基础 | 应力控制式 | 单向土工格栅 | 28.6 | — | 80×14 | 水平布置 |
| 文献[11] | 圆形基础 | 应力控制式 | 双向土工格栅 | 12 | — | 20×20 | 水平布置 |
| 文献[2] | 方形基础 | 应力控制式 | 土工织物 | 200 | — | — | 水平布置 |
| 文献[6] | 方形基础 | 位移控制式 | 麻制土工织物 | 16~18 | — | — | 水平布置 |
| 文献[8] | 方形基础 | 应力控制式 | 土工网 | 7.6 | 317 _{5%} | 1.5×1.5 | 水平布置 |
| 文献[7] | 方形基础 | 应力控制式 | 编织棕绳 | 0.7~1.1 | — | — | 纵横交错 水平布置 |
| 文献[12] | 条形基础 | 应力控制式 | 无纺土工织物 | 13.1 | 5.7 _{5%} | — | 水平布置 |
| 文献[10] | 条形基础 | 应力控制式 | 双向土工格栅 | — | — | 25.4×33.02 | 水平布置 |
| 文献[9] | 条形基础 | 应力控制式 | 双向土工格栅 | — | — | 25.4×33.02 | 水平布置 |
| 文献[9] | 条形基础 | 应力控制式 | 双向土工格栅 | — | — | 25.4×33.02 | 水平布置 |
| 文献[13] | 条形基础 | 应力控制式 | 土工格栅 | — | — | 25.4×33.02 | 水平布置 |

| 文献 | 基础类型 | 加荷方式 | 填土性质 | | | 最优加筋参数 | | | | BCR _{opt} |
|--------|------|-------|------|-----------|---------|----------------------|---------|-------------------|----------------|--------------------|
| | | | 名称 | 平均粒径/mm | 相对密实度/% | u/B | h/B | D _r /B | L/B | |
| 文献[10] | 方形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.5 | 70 | 0.4 | — | 1.4 | 4.5 | 2~3 |
| 文献[5] | 矩形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.20~0.35 | 70~73 | 0.3 | 0.2 | 1.5 | 4.5 | — |
| 文献[11] | 圆形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.5 | 68 | 0.1 | — | — | 4 | 3.2 |
| 文献[2] | 方形基础 | 应力控制式 | 砂土 | — | — | 0.3 | — | — | 3 | — |
| 文献[6] | 方形基础 | 位移控制式 | 粉煤灰 | — | — | 0.312 5 | 0.312 5 | 1.75 | 5~7 | 3.54 |
| 文献[8] | 方形基础 | 应力控制式 | 砂土 | — | 70 | 0.1~0.2 ^N | 0.5 | 2 | 4 ^N | — |
| 文献[7] | 方形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.39~0.49 | 25 | 0.4 | — | 0.6 | 3 | — |
| 文献[12] | 条形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 1.53 | 72 | 0.35~0.4 | — | 1.75~2 | 5 | 2.5 |
| 文献[10] | 条形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.5 | 70 | 0.4 | — | 2 | 8 | 4~5 |
| 文献[9] | 条形基础 | 应力控制式 | 砂土 | 0.5 | 70 | 0.3 | — | 2 | 8 | 4~5 |
| 文献[9] | 条形基础 | 应力控制式 | 粘土 | — | — | 0.4 | — | 1.75 | 5 | 1.4~1.5 |
| 文献[13] | 条形基础 | 应力控制式 | 砂土 | — | 70 | <1 | — | 2.25 | 6 | 4 |

注：1. 模量列中 a_b 的格式表示在 b 应变下的割线模量为 a ；2. 数据中右上标的 'N' 表示该数据是通过数值模拟方法获得；3. 标有 '—' 的单元格表示该数据在对应的文献中没有提供；4. BCR_{opt} 表示具有最优加筋参数的加筋地基的 BCR 值。

进行了研究，结果显示：单层加筋地基的破坏模式与 Prandtl 破坏模式相似。总结以上学者对加筋地基破坏模式的研究成果，可以得出通过模型试验观察到的加筋地基破坏模式有以下两种：Prandtl 破坏模式(图 2) 和冲剪破坏模式(图 3)。另外，文献[22]还提出了另外一种可能发生的破坏模式，如图 4 所示。然而，这种破坏模式目前还没有通过实验得到验证。文献[23]还提出了加筋地基中浅层土和层间土破坏

的情况，然而，文献[9]提出在实际工程中，只要首层筋材与基础底面距离和层间距小于 $0.5B$ 就可以避

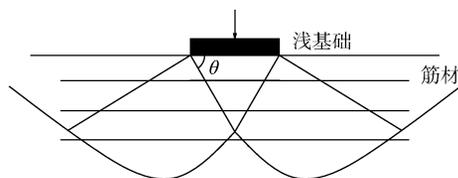


图 2 Prandtl 破坏模式
Fig.2 Prandtl's failure mode

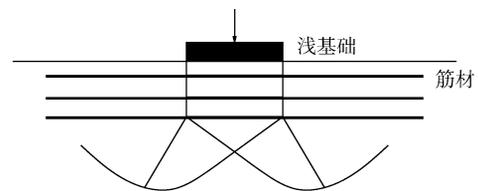


图 3 冲剪破坏模式
Fig.3 Punching shear failure mode

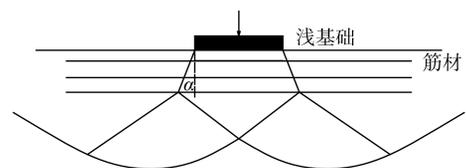


图 4 Huang(1997)^[22]提出的破坏模式
Fig.4 Failure mode proposed by Huang(1997)

免这种情况的发生,故在目前的承载力计算公式中,并没有考虑这种破坏模式。

然而,目前对于上述各种破坏模式发生的条件研究不足。文献[9]指出当加筋层强度远大于无筋下卧层的强度且加筋层厚度较小时,冲剪破坏模式更易发生;当加筋层强度与无筋下卧层强度相差不大且加筋层厚度较大时,更易发生加筋层内的 Prandtl 破坏模式。文献[9]所提出的破坏模式判断标准仅是定性表述,在实际应用中操作性不强。所以,量化的破坏模式判断标准是未来进一步研究的重点。文献[24]提出了加筋比(R_r)的概念,以此来定量判断加筋层强度的大小,从而确定破坏模式的类型,这是研究加筋地基破坏模式类型量化判断标准的有效尝试。然而,确定每种破坏模式所对应的加筋比取值范围还需要大量的实验数据作为研究基础。

2.2 加筋地基承载力计算方法

加筋地基承载力计算公式往往是基于某种破坏模式推导而得。目前已经有较多的国内外学者提出了各自的加筋地基承载力计算公式。

文献[25]假设加筋地基破坏模式与 Prandtl 破坏模式一致,筋土界面摩阻力抑制了地基土体的侧向位移,在引入筋土摩阻力之后,以过渡区为脱离体,利用极限平衡法推导了单层加筋地基的极限承载力计算公式。文献[23]基于冲剪破坏模式(图 3),并认为筋材的“膜效应”提高了加筋地基的承载力,在对 Meyerhof-Hanna 双层土地基承载力计算公式中加入筋材由于“膜效应”而产生的承载力增量得到了加筋地基承载力计算公式。文献[9]则认为加筋层内的 Prandtl 破坏模式与冲剪破坏模式在加筋地基中均有可能发生。基于上述两种破坏模式,加入筋材的“侧向约束效应”而产生的承载力增量,分别推导了两种破坏模式下加筋地基极限承载力计算公式。文献[9,23]均在冲剪破坏模式的基础上,通过对 Meyerhof-Hanna 双层土地基承载力计算公式的修正得到了加筋地基承载力计算公式,不同的是两者的加筋机理不同,导致承载力计算公式的不同,可见,对加筋机理的深刻认识,是推导精确的承载力计算公式的前提。文献[22]则认为,加筋地基的“深基础效应”与“应力扩散效应”是加筋地基承载力增大的主要因素,并据此提出了图 4 所示的破坏模式。该破坏模式下加筋地基的极限承载力计算公式相对较为简单,相当于对无埋深的基础极限承载力进行深度(D_R)和宽度(ΔB)修正,其中, D_R 为加筋深度; ΔB 为基础宽度沿应力扩散线在加筋深度上的增量。文献[22]还通过已有的加筋地基实测数据,利用回归分析法,

得到了应力扩散角与层间距、加筋长度、筋材覆盖率以及加筋层数的线性公式。文献[18]通过对条形基础上加筋地基破坏模式的研究得出加筋地基的破坏模式与 Prandtl 破坏模式形状一致,不同的是加筋地基中的破坏滑移线向更深、更宽范围内延伸。作者利用加筋地基滑移线的这种特征,利用上限解法重新推导了加筋地基的承载力系数 N_{γ} 。然而,文献[18]只是提出了一种承载力的计算方法,而该公式实际应用时,还需要找到加筋参数、筋材性质、填土性质等因素对滑移线的具体影响规律,从而找到承载力系数随这些影响因素的变化关系,要建立这一关系,也需要大量的实验数据为基础,这也是应用该公式需要进一步研究的重点。文献[26]基于加筋层内 Prandtl 破坏模式,利用上限解法分别推导了筋材在发生拔出破坏和拉断破坏两种情况下的极限承载力计算公式,并建议最终的极限承载力应取这两种情况下的较小值。文献[26]只提供了 3 层加筋以内加筋地基承载力的计算方法,且该公式要求层间距与加筋深度应符合一定的要求,这个条件在一定程度上限制了该公式的应用范围。文献[27]基于极限分析的上限解法,求得了单层加筋和两层加筋条件下加筋地基承载力系数的加筋影响系数 η_{γ} 、 η_c 。利用此影响系数对经典承载力公式中的承载力系数进行修正,即可得到对应的加筋地基承载力计算公式。文献[26-27]在确定相关系数时均采用了数值计算方法,故这类公式在实际应用时还应做大量的验证性工作。

部分学者在加筋地基承载力的计算中并没有基于某种破坏模式,而是着重从加筋机理的角度推导加筋地基承载力增量计算公式。

文献[28]认为,加筋地基承载力的增量来源于筋材的“膜效应”与“侧限约束效应”,并指出筋材主要在应力扩散线与筋材的交点处产生弯曲,此时筋材中拉力的垂直分量即为筋材“膜效应”产生的承载力增量;筋材中拉力的水平分量即为侧向约束力,这一侧向约束力也会使加筋地基承载力增大。将这两种作用力所产生的承载力增量叠加即得到加筋地基承载力增量计算公式。文献[29]同样没有基于任何一种破坏模式,而是假设筋材在与应力扩散线交点处发生弯曲,并且假设加筋地基与无筋地基中的应力场分布相同,基于弹性半空间理论解,推导了加筋地基与相应的无筋地基在沉降相同时的承载力之比计算公式。文献[28-29]所提出的方法有相同点也有不同点。相同点是:①均未基于任何一种具体的破坏模式;②均认为筋材在与应力扩散线交点处

发生弯曲。不同点是：①文献[28]认为筋材在与应力扩散线交点处，筋材与水平面的夹角为 $\pi/4+\varphi/2$ ；而文献[29]则假设其夹角为 90° 。关于这一点，目前学术界还没有统一的意见，而筋材在地基中的变形形状也应成为未来研究的一个重点。但是，文献[29]提出的 90° 则明显不符实际。②文献[29]只考虑了筋材的“膜效应”，而文献[28]则较全面的考虑了筋材“膜效应”与“侧限约束效应”两种加筋机理。③文献[28]的公式中仅仅考虑了筋材拉断破坏这种情况，而文献[29]的公式中综合考虑了筋材拉断破坏与拔出破坏两种情况。总之，在进一步研究加筋地基承载力公式时，应全面考虑筋材在地基中的加筋机理，综合考虑筋材在极限荷载时的应力分布与变形规律以及筋材的破坏方式(拉断破坏或拔出破坏)，这样得出的承载力计算公式才能更加符合客观实际。

除了上述通过数学、力学的手段对加筋地基承载力进行理论计算之外，也可采用诸如回归分析法、神经网络法^[30]等对加筋地基承载力做出估算，但这类方法需要基于大量的数据，且得到的承载力公式针对性较强，限制条件较多，不易广泛推广。

文献[31]用回归分析法对方形基础下土工织物加筋粉煤灰地基的承载力进行了研究，通过探讨加筋地基承载力的影响因素，基于 2088 组数据，最终得出了承载力计算公式：

$$q_{rs} = 1.916 5 q_s^{0.7777} \left(\frac{s}{B} \right)^{0.3647} N^{0.1901} f^{0.1465} \cdot \left(\frac{L_s}{B} \right)^{0.1111} 0.810 5^{(u/B)} 0.517 1^{(s_v/B)} \quad (1)$$

式中 q_s 为方形基础下无筋地基在某一基础沉降时所对应的承载力； s/B 为基础沉降与宽度之比； N 为加筋层数； f 为筋土界面内摩擦角与粉煤灰内摩擦角之比； L_s/B 为加筋长度与基础宽度之比； u/B 为首层筋材与基础底面距离与基础宽度之比； s_v/B 为层间距与基础宽度之比。通过将某一加筋地基上加筋参数代入式(1)即可获得该加筋地基在某一沉降时所对应的承载力。文献[32]也提出了类似的计算公式：

$$\text{BCR} = 0.691 + 4.62 \left(\frac{s}{B} \right) + 0.135 \left(\frac{L_s}{B} \right) - 0.628 \left(\frac{s_v}{B} \right) + 0.079 4 N + 0.085 5 \left(\frac{J}{100 \text{ kN/m}} \right) - 3.91 \left(\frac{A_a}{A_f} \right) \quad (2)$$

式中 J 为筋材的拉伸模量； A_a 为格栅孔面积； A_f 为基础底面面积，其他参数与式(1)相同。

然而，当遇到与实验条件不同的工况时，这类公式应做大量的验证性工作。

3 加筋地基承载力未来研究重点

通过对加筋地基承载力已有文献的综述，可以知道：对于加筋地基承载力影响因素(如加筋参数、筋材性质、填土性质)方面的研究较多，也取得了较为统一的认识。然而，在涉及加筋地基承载力计算公式时却并没有形成统一的认识，近年来提出的加筋地基承载力公式较多，且各有优劣。其关键在于对加筋地基破坏模式和加筋机理方面的认识不深，所以，加筋地基破坏模式与加筋机理应成为未来的研究重点。另外，在确定破坏模式类型之后，如何提出量化的判断标准用以确定加筋地基破坏模式的类型也是未来的一个研究重点。

目前关于加筋地基的研究大多数局限于模型实验，而模型实验存在着以下不可避免的缺点：①无法模拟实际状况的应力条件；②尺寸效应带来的结果的不准确性。正如文献[26]所提到的：模型实验中加筋地基筋材往往是拔出破坏，而实际工程中往往是拉断破坏。所以，加筋地基原型实验也应成为未来的研究重点。通过原型实验，不仅可以更加深刻认识加筋地基的承载性能与工作机理，也能够为加筋地基承载力计算公式提供有效的验证性数据。

4 结论

a. 最优加筋参数取值范围分别为： $u/B=0.3\sim 0.4$ ， $D_r/B=1.5\sim 2$ ， $L/B=4\sim 5$ (独立基础)/ $6\sim 8$ (条形基础)， $h/B=0.2\sim 0.5$ 。

b. 采用强度、刚度较大的土工格栅作为加筋材料，采用较大密实度的砂土作为填土，筋材按照最优加筋参数布置而成的加筋地基承载力往往会较大。

c. 加筋地基破坏模式与破坏模式类型量化判断标准、加筋机理、原型实验等应成为未来的研究重点。

d. 加筋地基承载力计算公式应基于准确的破坏模式和加筋机理而提出。

参考文献

- [1] 周健,孔祥利,王孝存. 加筋地基承载力特性及破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 9(30): 1265-1269.
- [2] ABDRAHMAN M, GAAVER K E, ELWAKIL A Z. Behavior of square footings on single reinforced soil[C]. GeoSupport 2004, 2004: 1015-1026.
- [3] DASH S K, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(1): 35-42.
- [4] 王孝存,周健. 加筋地基的应用研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 320-324.

- [5] YETIMOGLU T, JONATHAN T H W, SAGLAMER A. Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(12): 2083–2099.
- [6] GHOSH Amalendu, GHOSH Ambarish, BERA A K. Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, 23: 144–173.
- [7] VINOD P, BHASKAR A B, SREEHARI S. Behaviour of a square model footing on loose sand reinforced with braided coir rope[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27: 464–474.
- [8] LATHA G M, SOMWANSHI A. Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27: 281–294.
- [9] DAS B M, SHIN E C, OMAR M T. The bearing capacity of surface strip foundations on geogrid-reinforced sand and clay—a comparative study[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1994, 12: 1–14.
- [10] OMAR M T, DAS B M, PURI V K, et al. Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30: 545–549.
- [11] ALAWAJI H A. Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19: 75–88.
- [12] TAFRESHI S N M, DAWSON A R. Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28: 72–84.
- [13] KHING K H, DAS B M, PURI V K, et al. The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1993, 12: 351–361.
- [14] SHARMA R, CHEN Q, Murad Abu-Farsakh, et al. Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27: 63–72.
- [15] BASUDHAR P K, SAHA S, DEB K. Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25: 377–384.
- [16] DASH S K, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations[J]. *Geosynthetics International*, 2004, 11: 35–42.
- [17] LOVISA J, SHUKLA S K, SIVAKUGAN N. Behaviour of prestressed geotextile-reinforced sand bed supporting a loaded circular footing[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28: 23–32.
- [18] YAMAMOTO K, KUSUDA K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19: 127–162.
- [19] YAMAMOTO K, OTANI J. Bearing capacity and failure mechanism of reinforced foundations based on rigid-plastic finite element formulation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, 20: 367–393.
- [20] HUANG C C, TATSUOKA F. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, 9: 51–82.
- [21] MICHALOWSKI R L, SHI L. Deformation patterns of reinforced foundation sand at failure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129: 439–449.
- [22] HUANG C C, MENQ F Y. Deep-footing and wide-slab effects in reinforced sandy ground[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(1): 30–38.
- [23] WAYNE M H, HAN J, AKINS K. The design of geosynthetic reinforced foundations[C]//*Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention & Exposition*. [S.l.]: ASCE Geotechnical Special Publication, 1998: 1–18.
- [24] CHEN Q, MURAD A, SHARMA R. Experimental and analytical studies of reinforced crushed limestone[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(5): 357–367.
- [25] 梁波, 杨有海. 加筋砂土地基承载力理论与试验分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(1): 123–127.
- [26] MICHALOWSKI R L. Limit loads on reinforced foundation soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 381–390.
- [27] KUMAR J, SAHOO J P. Bearing capacity of strip foundations reinforced with geogrid sheets by using upper bound finite-element limit analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(18): 3258–3277.
- [28] 王钊, 王协群. 加筋地基极限分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2001, 41(6): 112–114.
- [29] KUMAR A, SARAN S. Bearing capacity of rectangular footing on reinforced soil[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, 21(3): 201–224.
- [30] 范付松, 胡新丽, 李长冬, 等. 基于广义回归神经网络的砂土液化综合判别方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(4): 47–51.
- [31] BERA A K, GHOSH A, GHOSH A. Regression model for bearing capacity of a square footing on reinforced pond ash[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, 23(3): 261–285.
- [32] LATHA G M, SOMWANSHI A, REDDY K H. A multiple regression equation for prediction of bearing capacity of geosynthetic reinforced sand beds[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2013, 43(4): 331–343.

(责任编辑 张宏)