

桩承式加筋垫层路堤地基承载力计算方法

曾革^{1,2}, 周志刚¹

- (1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙, 410076;
2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳, 413000)

摘要:在分析桩承式加筋垫层路堤的力学作用机理与地基承载力影响因素的基础上,将地基承载力视为下承桩体复合地基承载力与加筋垫层及边坡土体压力作用所增加的承载力之和,采用叠加法建立1种综合考虑基础刚度、置换率、垫层扩散作用、加筋拉力作用、边坡土体压力作用的地基承载力计算公式与验算方法。研究表明:桩承式加筋垫层路堤地基承载力随基础刚度的减小、置换率的提高、加筋层数的增加、垫层扩散作用的加强而提高,筋材拉力对提高地基承载力起主要作用。

关键词:桩承式加筋垫层路堤;地基承载力;叠加法;基础刚度;置换率

中图分类号:U416.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1672-7207(2010)03-1158-07

Calculation method for ground bearing capacity of pile-supported reinforced cushion embankment

ZENG Ge^{1,2}, ZHOU Zhi-gang²

- (1. College of Traffic and Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: Based on the mechanic action mechanism and influence element of ground bearing capacity on pile-supported reinforced cushion embankment, considering synthetically foundation stiffness, rate of replacement, spreading action of cushion stress, pulling force of geogrid, earth suppress action of side slope, the calculation formula and inspection method were presented considering ground bearing capacity as pile compound foundation capacity under embankment and bearing capacity which is increased by reinforced cushion and earth suppress action of side slope on ground bearing capacity. The results show that ground bearing capacity increases with the decrease of foundation stiffness, the increase of rate of replacement, geogrid layer number and spreading action of cushion stress. Pulling force of geogrid is a chief element for increasing ground bearing capacity.

Key words: pile-supported reinforced cushion embankment; ground bearing capacity; superimposing method; foundation stiffness; rate of replacement

在公路修建过程中,经常会遇到大量软土地基,为保证公路路堤地基承载力要求,需对软弱地基进行处理后再填筑路堤。在工程实践中,普遍采用桩与加筋垫层联合作用加固软土地基,即在用群桩基础竖向加固软土地基的同时,在桩顶上铺设由具有较高

强度和抗拉模量的土工合成材料与垫层材料组成的复合加筋结构,形成平铺加筋群桩复合地基(桩承式加筋垫层路堤结构)。工程应用与理论分析结果表明:加筋垫层能有效促进桩土共同作用,强化群桩整体效果;能有效改善地基应力分布;能有效改变和阻止塑

收稿日期:2009-07-10;修回日期:2009-09-25

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(07jj6093);长沙理工大学公路工程省部共建重点实验室开放基金资助项目(kfj080109)

通信作者:曾革(1969-),男,湖南邵阳人,博士研究生,副教授,从事道路工程的教学、设计及咨询工作;电话:0737-6353298;E-mail: zengge6906@163.com

性区的形成和发展,增强地基刚度;能有效控制地基沉降与不均匀沉降;能明显提高地基的承载力和稳定性^[1-5]。桩承式加筋垫层路堤地基近似于柔性基础下的复合地基,这类复合地基在受力后的变形、强度性状与刚性基础下复合地基相比有较大差异,作用机理复杂^[6-7]。目前,人们主要对建筑工程中柔性基础下的复合地基承载力的理论计算与方法进行研究,而对道路工程的研究却较少。国内外学者仍然套用刚性基础下复合地基承载力计算公式,没有综合考虑基础刚度、置换率、加筋垫层对地基承载力的影响。常用计算方法有筋材的应变及应力法^[8]、桩土应力比法^[9]、有限元法^[5, 10-13],其中:筋材的应变及应力法通过对筋材的应变及应力进行分析,再计算地基承载力,典型方法有 Catenary 法、Carlsson 法、BS8605 法和 SINTEF 法;桩土应力比法通过先计算加筋垫层下桩土应力比,进而计算地基承载力;有限元法通过建立桩与加筋垫层的有限元模型进行弹塑性数值计算,从而计算地基承载力。筋材的应变及应力法、桩土应力比法是以加筋垫层中筋材的受力状况为研究对象推导的,但公式中的参数较难取得,应用较困难。有限元法中模型的建立过程复杂,参数不易选取,较难于工程设计。为此,本文作者视桩承式加筋垫层路堤的地基承载力为下承桩体复合地基的承载力与加筋垫层及边坡土体压力作用增加的承载力之和,通过力学分析,综合考虑基础刚度、置换率、垫层扩散作用、加筋拉力作用、边坡土体压力作用对地基承载力的影响,提出1种实用的计算公式与验算方法,并在此基础上通过工程实例对地基承载力进行计算与验算。

1 桩承式加筋垫层路堤提高地基承载力的机理

桩承式加筋垫层路堤由于桩体与桩间土变形不协

调,易导致垫层破坏失效,为此,在垫层中加入模量较高的筋材,以增强其抗拉能力,更有效地均化与扩散应力,提高桩土复合地基的整体工作性能。桩承式加筋垫层路堤设计的典型断面如图1所示,其中, d 为桩径; s 为桩间距。桩承式加筋垫层路堤提高地基承载力的机理是:在路堤荷载作用下,一是桩体对路堤分担荷载;二是土与加筋的摩擦作用,筋材拉力的垂直分量使荷载分布在更大面积上,增大荷载的应力扩散效果,使地基中应力分布趋向均匀;三是筋材与土体变形模量不同,筋材与土体接触面发生相对位移并产生摩擦力,土体发生侧向变形时筋材被拉伸,筋材对土体产生约束作用,提高软土地基浅部的位移场和应力场,使土体抗剪强度提高,抗变形能力增强,地基承载力和稳定性提高;四是边坡土体的压力作用对地基承载力的提高作用。

2 桩承式加筋垫层路堤地基承载力的计算

桩承式加筋垫层路堤地基承载力计算包括下承桩体复合地基承载力的计算与桩顶加筋垫层及边坡土体压力作用增加的承载力计算。

2.1 下承桩体复合地基承载力计算

现有桩基础理论大都采用“桩土等应变”假设,但桩承式加筋垫层路堤地基近似于柔性基础下的复合地基,在荷载作用下,桩间土的沉降明显大于桩顶沉降。试验研究和数值模拟分析结果表明:在2种不同刚度基础作用下,桩承式加筋垫层地基中桩的工作性状存在较大差异,基础刚度与置换率对复合地基受力与变形性状有较大影响,减小基础刚度与提高置换率有利于提高桩间土体承载力。桩体对桩间土体承载力的提高随基础刚度(即路堤填土模量)的减小而增大,随置换率的提高而增大^[5, 14-15]。可见:与刚性基础相

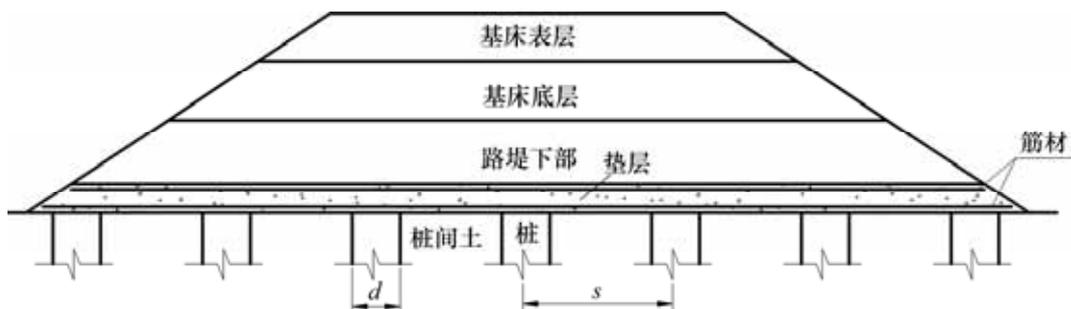


图1 桩承式加筋垫层路堤设计示意图

Fig.1 Scheme of pile-supported reinforced cushion embankment

比,路堤基础下桩承式加筋垫层地基承载力的计算不同。根据以上分析,参照文献[16]中关于刚性基础桩体复合地基承载力计算公式的形式,引入基础刚度影响系数考虑基础刚度对桩间土体承载力的影响,提出路堤基础下承桩体复合地基承载力可按式(1)进行计算:

$$f_{sp,k} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta_0 \beta_1 \beta_2 (1 - m) f_{s,k} \quad (1)$$

式中: $f_{sp,k}$ 为桩体复合地基承载力特征值(kPa); m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值(kN); A_p 为桩的截面积(m^2); β_0 为桩间土承载力折减系数,根据下卧层土体强度,在 0.50~0.95 取值,当天然地基承载力较高时取较大值; β_1 为基础刚度影响系数,根据路堤填土模量,在 1.2~2.0 取值; β_2 为桩间土承载力提高系数,根据复合地基置换率,在 1.1~1.6 取值; $f_{s,k}$ 为桩间天然地基土承载力特征值(kPa)。

对于单桩竖向承载力特征值 R_a 的取值,当采用单桩载荷试验时,应将单桩极限承载力除以安全系数 2; 当无单桩载荷试验资料时,可按式(2)估算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^k q_{si} l_i + q_p A_p \quad (2)$$

式中: u_p 为桩的周长(m); k 为桩长范围内所划分的土层数; q_{si} 和 q_p 分别为桩周第 i 层土的侧阻力和桩端阻力特征值(kPa); l_i 为第 i 层土的厚度(m)。

2.2 桩顶加筋垫层增加的承载力计算

桩顶设置加筋垫层后,增加的承载力主要包括 3 部分:一是加筋垫层应力扩散作用增加的承载力 Δf_1 ; 二是筋材拉力向上分力增加的承载力 Δf_2 ; 三是筋材拉力的反作用力侧限作用增加的承载力 Δf_3 。加筋垫层荷载作用图如图 2 所示(其中: p 为加筋垫层上的均布荷载

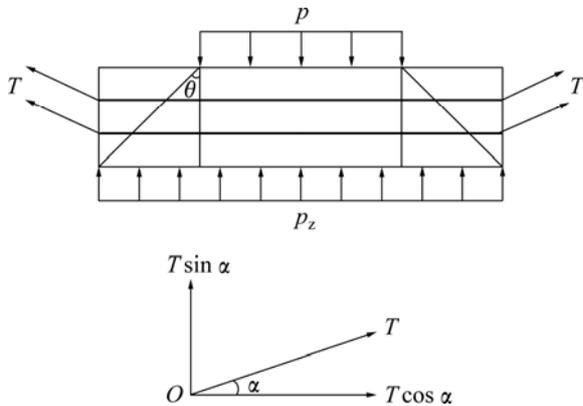


图 2 加筋垫层受力图

Fig.2 Forces acting on geobelt reinforced cushion

载; T 为单层筋材拉力; p_z 为土层支撑力)。在设计计算中,取路基中部受荷最大的垫层进行受力分析与设计,以路线横向一排桩的影响范围作为路堤基础的计算宽度 B ,以路基顶面宽度以下路堤基础作为计算长度 L 。设桩径为 d ,桩间距为 s ,当桩采用等三角形布置时, $B=0.866s$; 当桩采用正方形布置时, $B=s$ 。为便于计算,进行以下假设^[17]:加筋垫层沿着垫层的应力扩散线发生破坏;筋材的拉力方向与加筋垫层的破坏面垂直。

2.2.1 加筋垫层应力扩散作用增加的承载力 Δf_1

对于条形基础($L/B > 10$),加筋垫层应力扩散作用增加的承载力 Δf_1 按下式计算:

$$\Delta f_1 = \frac{2pZ \tan \theta}{B + 2Z \tan \theta} - \gamma Z \quad (3)$$

对于矩形基础($L/B > 10$),加筋垫层应力扩散作用增加的承载力 Δf_1 按下式计算:

$$\Delta f_1 = \frac{2pZ \tan \theta (B + L) + 4pZ^2 \tan^2 \theta}{(B + 2Z \tan \theta)(L + 2Z \tan \theta)} - \gamma Z \quad (4)$$

式中: Z 为垫层厚度(m); γ 为垫层重度(kN/m^3); θ 为垫层压力扩散角($^\circ$)。

加筋垫层上路堤荷载 p 包括路基本体自重(p_1)和车辆荷载(p_2)。

(1) 路基本体自重(p_1)为:

$$p_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (5)$$

式中: n 为路基填土分层总数; γ_i 和 h_i 分别为路堤各分层的重度和厚度。

(2) 车辆荷载(p_2)。采用扩散角理论计算垫层所承受的车辆荷载。设车辆荷载压力扩散角为 α ,车辆荷载集度为 q ,路基顶面宽度为 $A(A=L)$,路基高度为 H ,则

$$p_2 = q / (L + 2H \tan \alpha) \quad (6)$$

根据以上分析,可得作用在垫层上的均布荷载 p 为:

$$p = p_1 + p_2 \quad (7)$$

2.2.2 筋材拉力向上分力增加的承载力 Δf_2

对于条形基础($L/B > 10$),加筋带拉力向上分力增加的承载力 Δf_2 按下式计算:

$$\Delta f_2 = \frac{2nT \sin \alpha_0}{K(B + 2Z \tan \theta)} \quad (8)$$

对于矩形基础($L/B > 10$),加筋带拉力向上分

力增加的承载力 Δf_2 按下式计算:

$$\Delta f_2 = \frac{2nT \sin \alpha_0 (B + L + 4Z \tan \theta)}{K(B + 2Z \tan \theta)(L + 2Z \tan \theta)} \quad (9)$$

式中: α_0 为筋材拉力与水平面夹角($^\circ$),一般取 $10^\circ \sim 17^\circ$ [18]; θ 为稳定时加筋垫层的应力扩散角($^\circ$)(对于双层加筋,碎(砂)石取 36° ,灰土取 33° ,对于单层加筋,碎(砂)石取 26° [4, 19]); K 为筋材容许抗拉强度的安全系数,取 2.5 [19-20]; n 为加筋层数。

2.2.3 筋材拉力的反作用力侧限作用增加的承载力

Δf_3

筋材拉力的水平反作用力侧限作用增加的承载力 Δf_3 可按以下方法计算。

(1) 首先计算 n 层筋材设计拉力的水平分力,除以侧向限制面积,得到水平限制应力增量。

(2) 用极限平衡条件求水平限制应力对应的竖向应力增量,即为筋材拉力的反作用力侧限作用增加的承载力 Δf_3 。

对于条形基础($L/B = 10$), Δf_3 按下式计算:

$$\Delta f_3 = \frac{nT \cos \alpha_0}{KZ} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (10)$$

对于矩形基础($1 < L/B < 10$), Δf_3 按下式计算:

$$\Delta f_3 = \frac{nT \cos \alpha_0}{KZ} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \frac{1}{1 + B/L} \quad (11)$$

式中: φ 为地基土的内摩擦角($^\circ$)。

2.3 边坡土体压力作用提高的承载力计算

路堤边坡土体对基础计算范围内地基的压力作用对计算范围内地基承载力有提高作用,可等效于因基础埋深增加后引起地基承载力增加。取路堤高度 H 的 $1/2$ 作为基础的埋深 D ,边坡土体压力作用提高的承载力 Δf_4 可按式计算:

$$\Delta f_4 = \eta_d \gamma_m (D + Z - 0.5) \quad (12)$$

式中: η_d 为垫层埋深的地基承载力修正系数;根据垫层以下土类,按建筑地基基础设计规范取值; D 为基础埋置深度,取路堤高度的 $1/2$ (m); γ_m 为垫层顶面以上路堤的加权平均重度(kN/m^3)。

2.4 桩承式加筋垫层路堤地基承载力计算

桩承式加筋垫层路堤地基承载力 f 为下承桩体复合地基承载力与加筋垫层及边坡土体压力作用增加的承载力之和,即

$$f = f_{\text{sp,k}} + \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 + \Delta f_4 \quad (13)$$

3 承载力验算

桩承式加筋垫层路堤地基承载力验算包括加筋垫层承载力验算和加筋垫层下土层承载力验算2个方面。

3.1 加筋垫层承载力验算

加筋垫层承载力的验算公式为:

$$p \leq f \quad (14)$$

式中: f 为加筋垫层的承载力(kPa)。

3.2 加筋垫层下土层承载力验算

加筋垫层下土层承载力的验算公式为:

$$p_k + p_{cz} \leq p_0 \quad (15)$$

$$p_0 = f_{\text{sp,k}} + \Delta f_4 \quad (16)$$

式中: p_{cz} 为垫层产生的自重应力(kPa); p_k 为垫层应力扩散后底面处的平均压应力(kPa); p_0 为加筋垫层下土层承载力(kPa)。垫层应力扩散后底面处的平均压应力 p_k 按下式计算:

$$p_k = \frac{BLp}{(B + 2Z \tan \theta)(L + 2Z \tan \theta)} \quad (17)$$

4 计算实例

4.1 工程概况

某高速公路路基顶面宽为 27.0 m,路基填土高度为 12.5 m,边坡坡度为 $1.0:1.5$,路堤地基土质呈层状连续分布,土层主要物理力学指标及分布情况如表1所示。土体承载能力低,地基达不到强度和稳定性要求,需对地基进行加固处理。

4.2 设计方案

此路基如果只采用加筋垫层处理,即使承载力能达到要求,但由于地基中存在 $2.4 \sim 5.1$ m厚的淤泥和 $1.5 \sim 3.5$ m厚的淤泥夹砂层,会产生较大的沉降和不均匀沉降。对方案进行比较,拟采用粉喷桩复合地基配合土工格栅加筋垫层方案,即在垫层底下强风化花岗岩以上的土层内进行粉喷桩处理,构成复合地基,以减小沉降。桩径 d 取 0.6 m,桩间距 s 取 1.5 m,采用等三角形布置,桩竖向承载力特征值 R_a 取 400 kN。垫层采用 0.6 m厚经土工格栅加筋级配碎石砂垫层;布置两层土工格栅:第1层铺在离加筋垫层底面 20 cm处,第2层铺在距加筋垫层顶面 20 cm处。

4.3 计算参数

基础计算宽度 $B=1.299\text{ m}$ ，计算长度 $L=27\text{ m}$ ，路堤填料重度 $\gamma_m=19.0\text{ kN/m}^3$ ，垫层重度 $\gamma=22.0\text{ kN/m}^3$ ，车辆荷载为公路级，车辆荷载压力扩散角 $\alpha=30^\circ$ ，垫层应力扩散角 $\theta=36^\circ$ ，筋材拉力与水平面夹角 $\alpha_0=17^\circ$ ，天然地基土体等效内摩擦角 $\varphi=6.95^\circ$ ，土工格栅抗拉强度 $T=107.0\text{ kN/m}$ ，安全系数 $K=2.5$ ，置换率 $m=0.145$ ，桩间土承载力折减系数 β_0 取 0.60，基础刚度影响系数 β_1 取 1.4，桩间土承载力提高系数 β_2 取 1.2，基础埋深的地基承载力修正系数 η_d 取 1.0。

4.4 承载力验算

4.4.1 加筋垫层承载力验算

先按式(1)计算 $f_{sp,k}$ ，然后按式(3)，(8)，(10)和(12)分别计算 Δf_1 ， Δf_2 ， Δf_3 和 Δf_4 。经计算，得 $p < f$ ，加筋垫层满足承载力要求。加筋垫层承载力验算结果如

表 2 所示。

4.4.2 加筋垫层下土层承载力验算

通过计算，得 $p_k+p_{cz} < p_0$ ，加筋垫层下土层满足承载力要求。下承桩体复合地基承载力验算结果如表 3 所示。

4.5 承载力影响因素分析

上述实例通过采取桩承式加筋垫层对软土地基进行加固处理，加筋垫层的承载力 f 达 571.59 kPa，为原天然土层承载力(80.00 kPa)的 7.14 倍；加筋垫层下土层承载力 p_0 达 292.17 kPa，为原天然土层承载力 3.65 倍。这表明采取桩承式加筋垫层对软土地基加固处理效果明显。基础刚度、桩体置换作用、垫层扩散作用、加筋拉力作用、边坡土体压力作用所提高的地基承载力如表 4 所示。由表 4 可知：筋材拉力对提高地基承载力起主要作用。

表 1 土层主要物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indices of soil layer

序号	土体名称	分布厚度 h_i/m	重度 $\gamma_i/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水量 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	承载力特征值 $f_{s,k}/\text{kPa}$
1	杂填土	0.5~1.5	18.0			12.0	80
2	粉质黏土	1.5~2.5	18.9	34.0	20.1	13.9	80
3	淤泥	2.4~5.1	16.8	60.0	9.6	3.8	80
4	淤泥夹砂	1.5~3.5	16.9	58.0	8.7	4.0	80

表 2 加筋垫层承载力验算

Table 2 Calculation and inspection of bearing capacity of geobelt reinforced cushion

$f_{sp,k}/\text{kPa}$	$\Delta f_1/\text{kPa}$	$\Delta f_2/\text{kPa}$	$\Delta f_3/\text{kPa}$	$\Delta f_4/\text{kPa}$	f/kPa	p/kPa	承载力验算
171.52	82.38	23.05	173.99	120.65	571.59	237.98	$p < f$

表 3 加筋垫层下土层承载力验算

Table 3 Calculation of bearing capacity of soil layer under reinforced cushion

$f_{sp,k}/\text{kPa}$	$\Delta f_4/\text{kPa}$	p_k/kPa	p_{cz}/kPa	p/kPa	$(p_k+p_{cz})/\text{kPa}$	承载力验算
171.52	120.65	137.95	13.20	292.17	151.15	$p_k+p_{cz} < p_0$

表 4 各因素提高的地基承载力

Table 4 Elevated ground bearing capacity for every factor

提高因素	地基刚度	桩体置换作用	垫层抗散作用	筋材拉力作用	边坡土体压力作用	合计
承载力提高值/kPa	19.70	71.82	82.38	197.04	120.65	491.59
占总提高值的百分比/%	4.01	14.61	16.76	40.08	24.54	100.00

5 结论

(1) 提出的桩承式加筋垫层路堤地基承载力计算公式较全面地反映了基础刚度、置换率、加筋参数、加筋垫层特性、边坡土体压力作用对地基承载力的影响。地基承载力随地基刚度的减小、置换率的提高、加筋层数的增加、垫层扩散作用的加强而提高,筋材拉力对提高地基承载力起主要作用。

(2) 通过垫层加筋,改善垫层的变形特性,提高垫层刚度和应力扩散能力,有效地发挥了垫层及其下软土层的天然地基承载潜力。

(3) 工程实例分析计算结果表明:所提出的桩承式加筋垫层路堤地基承载力计算公式与验算方法思路清晰、使用简便,可更好地指导工程实践。

(4) 为提高承载力计算的准确性,需积累大量的不同布桩、不同施工工艺条件下,原状土和加固后桩间土的物理力学性质变化数据及复合地基静载荷试验数据,为计算公式中相应参数的取值提供更合理的经验值,以提高承载力计算的准确性。

参考文献:

- [1] 苏谦,蔡英.土工格栅、格室加筋砂垫层大模型试验及抗变形能力分析[J].西南交通大学学报,2001,36(2):176-180.
SU Qian, CAI Ying. Geogrid and geocell-reinforced sand blanket model test and the ability to reduce deformation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(2): 176-180.
- [2] 黄仙枝,白晓红.加筋带布置对地基承载力的影响[J].岩土力学,2004,25(9):1475-1479.
HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Influence of geobelt arranges on bearing capacity of foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1475-1479.
- [3] 王伟,王俭,薛剑豪.土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析[J].岩土力学,2005,26(12):1885-1891.
WANG Wei, WANG Jian, XUE Jian-hao. Analysis of model tests on soft soil subgrade reinforced by geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1885-1891.
- [4] 黄仙枝,岂连生,白晓红.软土地基土工带加筋碎石垫层的应力扩散研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17):2992-2997.
HUANG Xian-zhi, QI Lian-sheng, BAI Xiao-hong. Study of stress distribution in belt geosynthetic-reinforced gravel on soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2992-2997.
- [5] 闫澍旺,程栋栋,侯晋芳,等.桩与土工加筋层对公路路堤地基承载力的影响[J].中国公路学报,2008,21(4):30-36.
YAN Shu-wang, CHENG Dong-dong, HOU Jin-fang, et al. Influence of pile and geogrid on bearing capacity of highway embankment foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 30-36.
- [6] 冯瑞玲,谢永利,方磊.柔性基础下复合地基的数值分析[J].中国公路学报,2003,16(1):40-42.
HENG Rui-ling, XIE Yong-li, FANG Lei. Numerical analysis of the composite ground under the flexible foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 40-42.
- [7] 龚晓南.复合地基理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
GONG Xiao-nan. Composite foundation theory and engineering application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [8] 晏莉,阳军生,韩杰.桩承土工合成材料加筋垫层复合地基作用原理及应用[J].岩土力学,2005,26(5):821-826.
YAN Li, YANG Jun-sheng, HAN Jie. Geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platform composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 821-826.
- [9] 饶为国,赵成刚.桩-网复合地基应力比分析与计算[J].土木工程学报,2002,35(2):74-79.
RAO Wei-guo, ZHAO Cheng-gang. The behavior of pile-net composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 74-79.
- [10] 钱劲松,凌建明,黄琴龙.土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(12):1421-1425.
QIAN Jin-song, LING Jian-ming, HUANG Qin-long. 3D finite element analysis of embankment reinforced by geogrid[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(12): 1421-1425.
- [11] 张兴强,闫澍旺,邓卫东.交通荷载作用下土工格栅加筋路基的弹塑性分析[J].振动工程学报,2001,14(3):278-283.
ZHANG Xing-qiang, YAN Shu-wang, DENG Wei-dong. Elasto-plastic analysis of reinforced subgrade under automobile loadings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(3): 278-283.
- [12] 闫澍旺, Barr B. 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.
YAN Shu-wang, Barr B. Finite-element modeling of soil-geogrid interaction with application to interpret the pullout behaviour of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 56-61.
- [13] 张兴强,闫澍旺,陈文金.土工格栅与土动力相互作用的有限元分析[J].天津大学学报,2001,34(4):525-528.
ZHANG Xing-qiang, YAN Shu-wang, CHEN Wen-jin. FEM

- analysis on dynamic soil-geogrid interaction[J]. Journal of Tianjin University, 2001, 34(4): 525-528.
- [14] 张忠苗, 杨什生, 唐朝文. 不同垫层材料对刚-柔复合桩基受力变形性状的影响[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 52-59.
ZHANG Zhong-miao, YANG Shi-sheng, TANG Zhao-wen. Different cushions affection to stress and deformation of rigid-soft composite pile foundation[J]. Industry Building, 2003, 33(12): 52-59.
- [15] 冯瑞玲, 谢永利. 柔性基础下粉喷桩复合地基的承载力计算[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 63-46.
HENG Rui-ling, XIE Yong-li. Calculation of the bearing capacity of composite ground with powder deep mixing piles under flexible foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 63-46.
- [16] JGJ 79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].
JGJ 79 — 2002, Technical code for ground treatment of buildings[S].
- [17] 施有志. 桩承土工合成材料加筋垫层复合地基承载力的计算方法[J]. 工程勘察, 2006(7): 9-12.
SHI You-zhi. Calculation method of composite ground bearing capacity gesynthetic-reinforced and pile supported earth platform[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(7): 9-12.
- [18] 徐林荣, 彭巨为. 考虑加筋垫层作用的软基路堤临界高度确定方法初探[J]. 水文地质工程地质, 2008(3): 32-34.
XU Lin-rong, PENG Ju-wei. Research on the methods to evaluate critical height of embankment on soft ground considered effect of reinforced cushion[J]. Hydrology Geology and Engineering Geology, 2008(3): 32-34.
- [19] 黄仙枝, 白晓红. 土工带加筋垫层地基承载力的实用计算方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 804-807.
HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Practical calculation of bearing capacity on geobelt reinforced cushion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 804-807.
- [20] 王钊. 土工织物的拉伸蠕变特性和预应力加筋堤[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 12-20.
WANG Zhao. Tensile and creep properties of geotextiies and pretensioned embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(2): 12-20.

(编辑 陈灿华)