

DOI: 10.11779/CJGE201908008

新型预应力路基水平向附加应力扩散规律研究

冷伍明^{1,2}, 艾希¹, 徐方^{1,2}, 张期树¹, 杨奇^{1,2}, 聂如松^{1,2}, 刘晓豪¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南长沙 410075)

摘要: 基于弹性理论, 推导了新型预应力路基内水平向附加应力计算公式, 并获得了预应力自坡面向路堤内的扩散规律; 同时运用 ABAQUS 有限元软件建立三维预应力路基模型, 分析了不同侧压板布设位置下路堤内的水平向附加应力分布情况。研究表明: ①理论公式的适用条件为侧压板上边界距路肩距离不小于 2.0 m; ②板覆盖区(除板左下角点外)路基内水平向附加应力系数及其衰减速率随距路堤坡面水平距离的增加逐渐减小, 且水平向附加应力逐步由“腹鼓形”差异分布过渡呈“腹平状”较均匀分布; ③距侧压板距离大于 0.1 m 时, 附加应力系数随水平距离增加先增大后减小, 且扩散峰值点距坡面水平距离随外延距离的增加而增大; ④通过合理布置板间距, 可在路堤受荷核心区外部形成一道连续、稳定、有效的受压加固区, 进而改善路堤土体受力状态, 提高路堤整体服役性能。研究成果可为预应力路基的设计计算和推广应用提供理论基础和参考。

关键词: 预应力; 路基; 侧压力板; 水平向附加应力; 扩散规律; 板间距

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)08-1445-10

作者简介: 冷伍明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事路基工程、地下工程、地基与基础方面的研究。E-mail: wmleng@csu.edu.cn。

Diffusion laws of horizontal additional stress in a new prestressed subgrade

LENG Wu-ming^{1,2}, AI Xi¹, XU Fang^{1,2}, ZHANG Qi-shu¹, YANG Qi^{1,2}, NIE Ru-song^{1,2}, LIU Xiao-hao¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed

Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the theory of elasticity, the theoretical formulas are derived to calculate the horizontal additional stress (σ_H) in a new type prestressed embankment, and the diffusion laws of the additional stress from the slope surface to the inside of the embankment are revealed. Meanwhile, a 3D finite element model for a prestressed embankment is established to analyze the distribution of the horizontal additional stress in the prestressed embankment with different placement positions of the lateral pressure plate. The results show that: (1) The application condition of the theoretical formulas requires that the net spacing between the lateral pressure plate and the embankment shoulder should be more than 2.0 m. (2) In the region covered by the lateral pressure plate, the horizontal additional stress coefficient as well as its attenuation rate gradually decreases with the increase of the horizontal distance from the slope surface, and the distribution of σ_H gradually transits from a “raised abdomen” pattern to a relatively uniform “flat abdomen” one. (3) When the distance away from the lateral pressure plate is greater than 0.1 m, the additional stress coefficient of σ_H increases first and then decreases with the increasing horizontal distance, and the horizontal distance between the peak point and the slope surface increases as the epitaxial distance increases; (4) A continuous, stable and effective pressure-reinforced zone is likely to be formed when the spacing of the lateral pressure plate is properly designed, therefore, the stress state of the embankment soil and the overall service performance of the embankment can be improved. The research findings can provide theoretical bases and references for the design and promotion application of the prestressed embankments.

Key words: prestress; subgrade; lateral pressure plate; horizontal additional stress; diffusion law; plate spacing

0 引言

随着现代社会经济的快速发展, 铁路运输事业面临的挑战越来越大, 货运重载、客运高速及随之而来的高密度行车已成为全球铁路建设和发展的主要方

向。对重载铁路而言, 货运列车轴重及编组长度的增

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678572, 51878666)

收稿日期: 2018-09-23

*通讯作者(E-mail: fangxu@csu.edu.cn)

加大幅提升了铁路路基所受的竖向静、动荷载及作用次数；对高速铁路而言，列车运行速度的提升则大幅增加了路基的受荷频率。因此货运重载和客运高速的发展和推进不可避免地加剧了铁路路基内的静、动力响应。

虽然铁路路基填筑有严格的质量控制标准，但由于列车轴重、编组和运行速度的提升及复杂外部环境的共同作用，致使满足现行设计与施工标准的路基，在运营一段时间后产生病害甚至滑垮的情况仍很常见，如基床外挤、边坡外鼓、边坡溜坍、边坡滑垮等。根据笔者所在课题组对铁路路基病害及其处治方法的多年研究累积^[1-3]，冷伍明等^[4]提出了一种将“预应力”技术引入铁路路基的新型加固方法，其具体构造见图1。该加固装置由预应力钢筋及对拉着的两块侧压力板构成，通过张拉预应力钢筋，将钢筋预拉力经由侧压力板转化为作用于路堤坡面的面荷载并扩散至路堤内部。该加固方法可为路堤边坡提供侧向约束并有效提高路堤填土的水平向应力，从而有效改善填土路堤的承载能力、抗变形能力、防冲刷渗透能力、抗震性能及整体稳定性。该方法施工过程主要在路基两侧边坡展开，无需上道上线，故而无需中断行车，这对既有线路的正常运营具有重要意义。

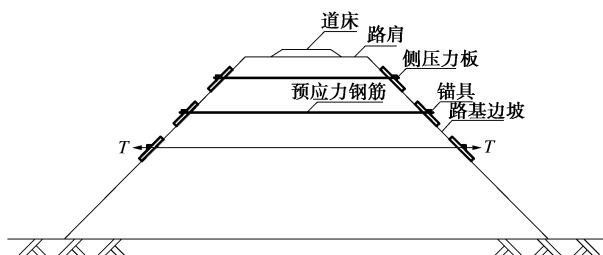


图1 预应力路基构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prestressed embankment

预应力加固技术已广泛运用于边坡工程、基坑工程及矿业工程等领域；同时，其加固作用机理也得到了深入研究^[5-7]。蒋楚生等^[8]运用弹性理论研究了预应力地梁锚索作用下边坡受力状态；赵晓彦等^[9]基于离心模型试验研究了预应力锚索框架作用下边坡土体内的应力传播规律。黄雪峰等^[10]通过现场测试研究了锚杆轴力和摩阻力随时间及空间分布规律；康红普等^[11]采用有限差分数值软件FLAC^{3D}分析了锚杆（索）预应力引起的应力场分布特征及影响因素；林健等^[12]基于大型模型试验研究了端部锚固锚杆预应力场的分布特征；尤春安等^[13]基于Kelvin问题的位移解推导了锚杆沿杆体所受的剪应力和轴力分布规律；Du等^[14]利用数值仿真研究了锚杆对巷道围岩应力重分布的影响；Wijk^[15]基于弹性理论研究了预应力锚杆周围应力场。

目前，关于预应力锚杆（索）应力场传播规律的研究成果颇丰，但多集中于预应力加固技术的锚固机

制研究。然而，预应力路堤作为一种新型路基加固方法，其构造形式和力学模型与现有预应力锚固技术均不相同。获得预应力路堤内水平向附加应力的传播和扩散规律是掌握该方法加固机理的关键，其对确定预应力的分布形式、施加大小及侧压板间距等关键设计参数起决定作用。本文基于弹性理论，构建力学模型，推导了预应力路堤内水平向附加应力的计算公式，并通过布点计算获得了其在预应力路堤内的传播和扩散规律，并进一步探索了侧压板的合理布置间距，研究成果可为预应力路基的设计提供理论基础和参考。

1 水平预应力扩散理论

1.1 力学模型

图2为预应力路基横断面示意图，路堤坡角为 θ 。侧压板将钢筋预拉力由集中力转化为面荷载，并可进一步简化为作用于路堤坡面的等效水平均布荷载 q 。建立图2所示坐标系，其中 X 轴和 Y 轴分别为路堤坡向和线路纵向， Z 轴为坡面法向。侧压板底面长为 L ，宽为 B ，则等效水平均布荷载 q 为

$$q = \frac{T}{BL} \quad (1)$$

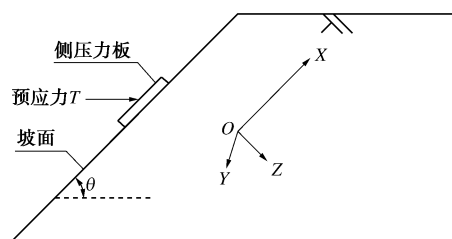


图2 预应力路基结构横断面图

Fig. 2 Cross section of prestressed embankment

等效水平均布荷载可进一步分解为平行于坡面向上的均布荷载 q_T 和垂直于坡面向内的均布荷载 q_N （见图3）； q_T 和 q_N 表达式分别为

$$q_T = q \cos \theta \quad (2)$$

$$q_N = q \cos(90^\circ - \theta) \quad (3)$$

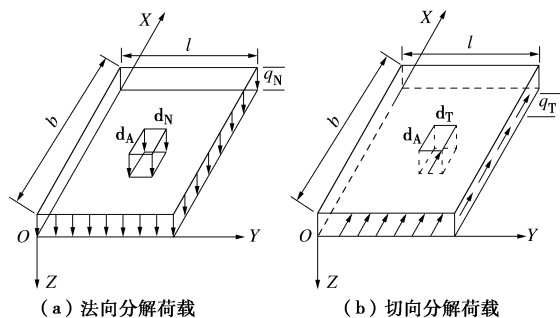


图3 预应力分解

Fig. 3 Decomposition of prestress

1.2 理论推导

如图3所示，在侧压力板内任取一微元面积

$dA=dx dy$, 则作用于微元面上沿坡面切向和法向的荷载分别为 $dT=q_T dx dy$ 和 $dN=q_N dx dy$ 。当 dx 和 dy 足够小时, dT 和 dN 可视为集中力, 则等效水平平均布荷载角点下任意一点 P 的应力状态可由 Boussinesq 公式和 Cerruti 公式^[16]积分求得。

法向均布荷载 q_N 作用下 P 点的 z 方向、 x 方向和切向附加应力 σ_{ZN} , σ_{xN} 和 τ_{xZN} 分别为

$$\sigma_{ZN} = \iint_S \frac{3q_N z^3}{2\pi R^5} dx dy = \frac{q_N}{2\pi} \cdot \left[\frac{BLz(B^2 + L^2 + 2z^2)}{(B^2 + z^2)(L^2 + z^2)\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}} + \arctan\left(\frac{BL}{z\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}}\right) \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{xN} = \iint_S \frac{3q_N}{2\pi} \left[\frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{R^3(R+z)^2} - \frac{z}{R^3} \right) \right] dx dy$$

$$dx dy = \frac{q_N}{2\pi} (-1+2\mu) \arctan\left(\frac{BL}{z\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}}\right) + \frac{q_N}{2\pi} \cdot \left[-\frac{BLz}{(B^2 + z^2)\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}} + \arctan\left(\frac{BL}{z\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}}\right) \right] - \frac{q_N(-1+2\mu)}{2\pi} \left[\arctan\left(\frac{L}{B}\right) - \arctan\left(\frac{Lz}{B\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}}\right) \right], \quad (5)$$

$$\tau_{xZN} = \iint_S \frac{3q_N x z^2}{2\pi R^5} dx dy = \frac{q_N z^2}{2\pi} \cdot \left[\frac{L}{z^2 \sqrt{L^2 + z^2}} - \frac{L}{(B^2 + z^2)\sqrt{B^2 + L^2 + z^2}} \right]. \quad (6)$$

切向均布荷载 q_T 作用下 P 点的 z 方向、 x 方向和切向附加应力 σ_{zT} , σ_{xT} 和 τ_{xzt} 分别为

$$\sigma_{zT} = \iint_S \frac{3q_T x z^2}{2\pi R^5} dx dy = \frac{q_T z^2}{2\pi} \cdot \left[\frac{l}{z^2 \sqrt{l^2 + z^2}} - \frac{l}{(b^2 + z^2)\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}} \right], \quad (7)$$

$$\sigma_{xT} = \iint_S \frac{q_T x}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\mu}{(R+z)^2} \left(R^2 - y^2 - \frac{2Ry^2}{R+z} \right) - \frac{3x^2}{R^2} \right] dx dy$$

$$= \frac{q_T(1-2\mu)}{2\pi l(b^2 + l^2)} [b^2(-z + \sqrt{l^2 + z^2}) + l^2(\sqrt{l^2 + z^2} - \sqrt{b^2 + l^2 + z^2})] + \frac{q_T}{2\pi} \left[\frac{b^2 l}{(b^2 + z^2)\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}} + \ln\left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + z^2}}\right) - \ln\left(1 + \frac{l}{\sqrt{l^2 + z^2}}\right) + 2\ln(l + \sqrt{b^2 + l^2 + z^2}) - 2\ln(\sqrt{b^2 + z^2}) \right], \quad (8)$$

$$\tau_{xzt} = \iint_S \frac{3q_T x^2 z}{2\pi R^5} dx dy = \frac{q_T}{2\pi} \cdot$$

$$\left[-\frac{blz}{(b^2 + z^2)\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}} + \arctan\left(\frac{bl}{z\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}}\right) \right]. \quad (9)$$

式中 R 为计算点 P 到原点 O 的距离, $R=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$; μ 为泊松比; b 和 l 分别为平行于切向力作用方向和垂直于切向力作用方向的边长。

根据弹性力学理论^[16]可知土体单元任一方向上的附加应力可由该计算坐标系下的 6 个应力分量 σ_x , σ_y , σ_z , $\tau_{yz}=\tau_{zy}$, $\tau_{zx}=\tau_{xz}$ 和 $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ 求得, 故水平向附加应力 σ_H 为

$$\sigma_H = l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + n^2 \sigma_z + 2mnt_{yz} + 2nl\tau_{zx} + 2lm\tau_{xy}, \quad (10)$$

式中, l , m 和 n 为方向余弦, $l=\cos(H, X)$, $m=\cos(H, Y)$, $n=\cos(H, Z)$ 。

本文研究预应力路堤内的水平向附加应力, 则 $m=\cos(H, Y)=0$, 故式 (10) 简化为

$$\sigma_H = l^2 \sigma_x + n^2 \sigma_z + 2nl\tau_{zx}. \quad (11)$$

分别将法向与切向均布荷载作用下的各应力分量代入式 (11), 并叠加即可得预应力路堤内任意一点处的水平向附加应力计算公式:

$$\sigma_H = qK, \quad (12)$$

式中, K 为水平向附加应力系数, 其值取决于 B , L , z 。

1.3 计算点路径转换

侧压力板作用下, 板底面 K 点下方任意一点处的各个应力分量可按分块法计算得到。如图 4 所示, 以点 K 作为角点将侧压力板分解成 $OJKL$, $JCQK$, $KQDN$, $IKNE$ 四块, 运用公式 (4) ~ (9) 分别计算各个分割区域角点 K 下的应力值并叠加, 即可得到板 $OCDE$ 作用下 K 点下任意深度 Z 处的各个应力分量。通过几何路径转换, 可获得横向水平线 H 上任一点处的水平向附加应力。路径转换如图 5 所示, 其中 h 为水平路径 H 上任意一点 P 距坡面 K 点的水平距离, M 点为 P 点在路堤坡面的投影, 那么 P 点处的附加应力仍可按“分块法”求得; 此时, 应将侧压力板分为 $OJMF$, $JCGM$, $MGDN$ 和 $FMNE$ 四块, 叠加求得 P 点处的各个应力分量后, 再根据式 (11), (12) 求得 P 点处的水平向附加应力 σ_H 。基于以上路径转换原理, 并通过 Mathematica 编程计算, 可快速高效地获得预应力路堤内各点处的水平向附加应力。

以上简化计算将路堤土视为弹性体, 未考虑其塑性变形的影响; 但前人研究已论证了路堤土塑性变形对其内部附加应力场的影响是可忽略的, 且基于弹性理论计算路堤内的附加应力场具备足够的精度, 可满足工程应用的要求^[17-18]。本文将在 2.2 节结合理论公式的适用条件进一步对该问题进行论述和说明。

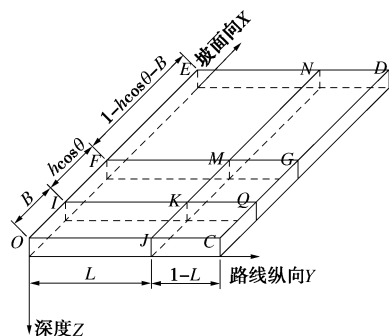


图4 侧压板分块

Fig. 4 Partition of lateral pressure plate

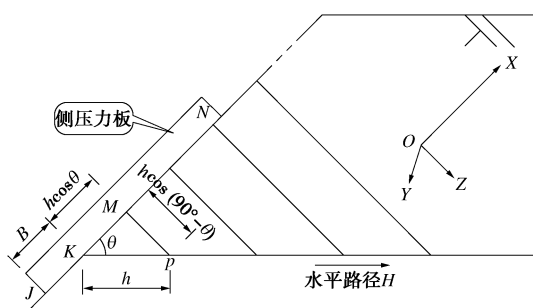


图5 计算点路径转换

Fig. 5 Path conversion of calculation points

1.4 侧压板覆盖区域附加应力扩散规律

综合考虑路堤尺寸和预应力张拉问题,初步拟定侧压板底面尺寸为 $B \times L = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的正方形。在 X 和 Y 方向按等间距 $\Delta B = \Delta L = 0.1 \text{ m}$ 取点计算,根据对称性,计算区域可取板下 $1/2$ 区域,图6中黑色圆点即为计算点。以路堤坡角 45° 为例计算各点不同水平距离处的水平向附加应力系数 K 。鉴于计算点数量较多, B_x 方向每隔 0.2 m 列出计算结果,具体 K 值如表1所示。

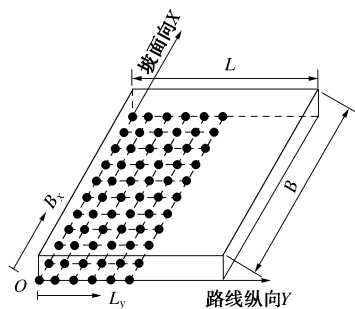


图6 计算点位置

Fig. 6 Positions of calculation points

由表1可知,板覆盖区域内(板左下角点除外)附加应力系数 K 随距坡面水平距离的增加逐渐衰减,且衰减速率先快后慢。其中,最大附加应力系数位于板中上部坡表(1.392),同水平距离处最小附加应力系数位于坡表左下角(0.132),两者相差约10倍,可见板下浅层土体附加应力分布差异显著。另外,由于切向荷载在板底上、下边界处产生的附加应力最大,且在板下边界表现为拉应力,使得切向荷载分量和法

向荷载分量叠加后板下边界处的附加应力系数较小,表现为低应力区;而法向和切向荷载分量在板底上边界处均产生压应力,应力叠加后表现为高应力区。

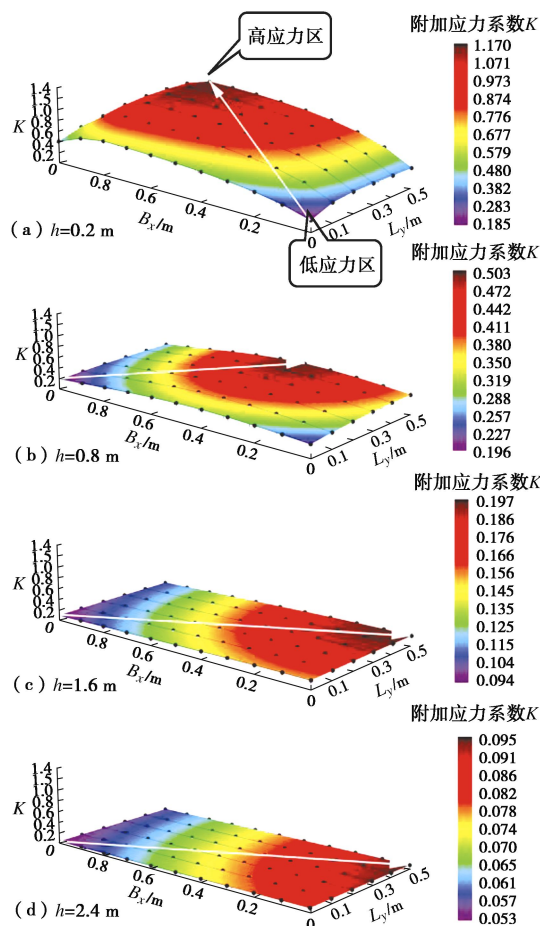
图7 不同水平距离截面附加应力系数 K 分布云图Fig. 7 Distribution contour of K at different horizontal distances

图7为板下方 $h=0.2, 0.8, 1.6, 2.4 \text{ m}$ 四个代表性水平距离截面处附加应力系数三维分布云图,图中标白色箭头代表附加应力系数增长趋势线。当水平距离 h 较小时($h=0.2 \text{ m}$),如图7(a)所示,板底下边界处呈现显著的低应力状态,越过下边界后,附加应力系数 K 逐步增加并在板上上部位置达最大,而后在上边界处又稍有降低,大致呈“腹鼓”形态分布。随水平距离 h 增加,附加应力系数 K 总体水平不断降低,而应力峰值始终位于板坡向中轴线 $L_y=0.5 \text{ m}$ 上,但具体位置由该中轴线中上部逐渐向下迁移至板下部边界;相反,低应力区则由板下边界逐步转移到板上边界处。从数值上看,4个不同水平距离处的附加应力系数值域分别为 $[0.185, 1.170]$, $[0.196, 0.503]$, $[0.094, 0.197]$ 和 $[0.053, 0.095]$,浅层土体不同位置附加应力存在数量级差别,而深层土体的值域上下限差别不到2倍,表明随水平距离的增加,水平向附加应

表 1 侧压板下方水平向附加应力系数 K ($\theta=45^\circ$)
Table 1 Horizontal additional stress coefficient K under lateral pressure plate ($\theta=45^\circ$)

L_y/m	B_x/m	水平距离 h/m												
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
0.0	0.0	0.132	0.189	0.222	0.225	0.221	0.212	0.197	0.176	0.153	0.132	0.113	0.097	0.084
	0.2	0.460	0.413	0.352	0.313	0.284	0.252	0.217	0.183	0.153	0.128	0.108	0.092	0.079
	0.4	0.579	0.523	0.432	0.374	0.318	0.262	0.213	0.174	0.143	0.119	0.100	0.085	0.073
	0.6	0.659	0.588	0.483	0.390	0.305	0.240	0.191	0.155	0.128	0.107	0.090	0.077	0.066
	0.8	0.718	0.624	0.450	0.330	0.254	0.201	0.162	0.133	0.111	0.093	0.079	0.068	0.059
	1.0	0.504	0.412	0.310	0.244	0.197	0.161	0.133	0.111	0.094	0.080	0.069	0.060	0.053
0.1	0.0	0.307	0.338	0.317	0.291	0.269	0.249	0.224	0.196	0.167	0.142	0.120	0.102	0.087
	0.2	0.850	0.668	0.486	0.397	0.343	0.293	0.245	0.202	0.166	0.137	0.115	0.097	0.082
	0.4	1.009	0.810	0.583	0.468	0.379	0.301	0.238	0.190	0.154	0.127	0.105	0.089	0.076
	0.6	1.110	0.890	0.642	0.481	0.357	0.271	0.211	0.168	0.136	0.113	0.094	0.080	0.069
	0.8	1.189	0.933	0.583	0.396	0.291	0.223	0.176	0.142	0.117	0.098	0.083	0.071	0.061
	1.0	0.769	0.562	0.379	0.283	0.220	0.176	0.143	0.118	0.099	0.084	0.072	0.062	0.054
0.2	0.0	0.299	0.377	0.379	0.343	0.311	0.281	0.248	0.213	0.179	0.150	0.126	0.106	0.091
	0.2	0.906	0.765	0.577	0.466	0.393	0.329	0.269	0.218	0.177	0.145	0.120	0.100	0.085
	0.4	1.093	0.932	0.690	0.546	0.432	0.335	0.260	0.204	0.163	0.133	0.110	0.092	0.078
	0.6	1.211	1.025	0.757	0.556	0.403	0.299	0.228	0.179	0.144	0.117	0.098	0.082	0.070
	0.8	1.303	1.074	0.682	0.452	0.323	0.243	0.189	0.150	0.123	0.102	0.085	0.073	0.063
	1.0	0.869	0.656	0.436	0.317	0.241	0.189	0.151	0.124	0.103	0.087	0.074	0.064	0.056
0.3	0.0	0.288	0.382	0.409	0.378	0.341	0.306	0.266	0.226	0.188	0.157	0.131	0.110	0.093
	0.2	0.914	0.795	0.627	0.512	0.430	0.356	0.288	0.231	0.185	0.150	0.124	0.103	0.087
	0.4	1.117	0.979	0.751	0.599	0.471	0.361	0.276	0.215	0.170	0.137	0.113	0.094	0.080
	0.6	1.247	1.080	0.824	0.609	0.437	0.320	0.241	0.187	0.149	0.121	0.100	0.084	0.072
	0.8	1.346	1.134	0.744	0.493	0.348	0.258	0.198	0.157	0.127	0.104	0.087	0.074	0.064
	1.0	0.911	0.706	0.475	0.342	0.257	0.199	0.158	0.128	0.106	0.089	0.076	0.065	0.056
0.4	0.0	0.282	0.382	0.421	0.397	0.359	0.321	0.278	0.234	0.194	0.161	0.133	0.112	0.094
	0.2	0.915	0.805	0.651	0.538	0.452	0.373	0.300	0.238	0.191	0.154	0.126	0.105	0.088
	0.4	1.127	0.997	0.781	0.629	0.495	0.377	0.287	0.221	0.175	0.140	0.115	0.096	0.081
	0.6	1.263	1.104	0.857	0.639	0.458	0.333	0.249	0.192	0.152	0.123	0.102	0.085	0.073
	0.8	1.365	1.160	0.776	0.517	0.363	0.267	0.204	0.160	0.129	0.106	0.089	0.075	0.064
	1.0	0.930	0.730	0.498	0.358	0.266	0.205	0.162	0.131	0.108	0.090	0.076	0.066	0.057
0.5	0.0	0.281	0.381	0.425	0.402	0.365	0.326	0.282	0.237	0.196	0.162	0.134	0.112	0.095
	0.2	0.915	0.808	0.657	0.546	0.460	0.379	0.304	0.241	0.192	0.155	0.127	0.105	0.089
	0.4	1.129	1.002	0.790	0.639	0.503	0.383	0.290	0.224	0.176	0.141	0.116	0.096	0.081
	0.6	1.267	1.111	0.867	0.649	0.465	0.337	0.252	0.194	0.154	0.124	0.102	0.086	0.073
	0.8	1.371	1.168	0.786	0.525	0.369	0.270	0.206	0.162	0.130	0.107	0.089	0.075	0.065
	0.9	1.392	1.051	0.647	0.441	0.317	0.237	0.184	0.146	0.119	0.098	0.083	0.071	0.061
	1.0	0.935	0.737	0.505	0.363	0.270	0.207	0.163	0.132	0.108	0.091	0.077	0.066	0.057

力分布愈加均匀,并逐步由“腹鼓形”分布过渡至“腹平状”分布。

1.5 侧压板外延区域附加应力扩散规律

侧压板作用下,水平向附加应力在路堤内是连续扩散的,为研究板体外部路堤土内的附加应力分布特征,选取 $L_y=0.5\text{ m}$ 处板上下两个外延区域 U 和 D (见图 8) 及 $B_x=0.5\text{ m}$ 处板左侧外延区域 L (见图 8) 来分析侧压板外延区域内的附加应力扩散规律。

(1) 区域 U 内附加应力扩散规律

图 9 为区域 U 内不同外延距离处附加应力系数 K 随距坡面水平距离 h 之间的变化关系。该区域内最大 K 值为 0.529。当 $B_x\geq 1.2\text{ m}$ 时,随 h 的增加, K 随 h 的增加先增大后减小,即 $K-h$ 曲线上均存在一应力峰值点,且该峰值点距坡面水平距离随 B_x 的增加而增大,说明附加应力随水平距离增加是逐步向外扩散的。

另外,随着外延距离 B_x 增加, $K-h$ 关系曲线在 $h\geq 2.0\text{ m}$ 附近逐渐趋于水平;因此,若侧压板间距布置适当,预应力施加合理,则可在距路堤坡面 2.0 m 以内形成一片较为有效的加固区域。

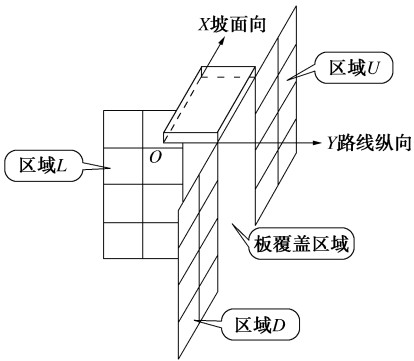


图 8 板体外延计算区域

Fig. 8 Calculation zones outside plate

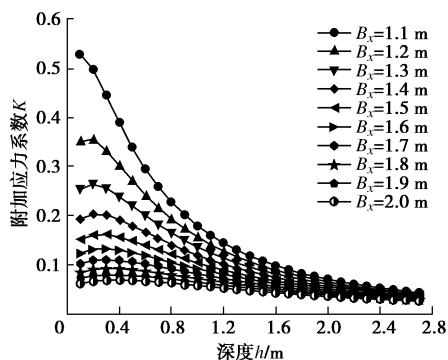
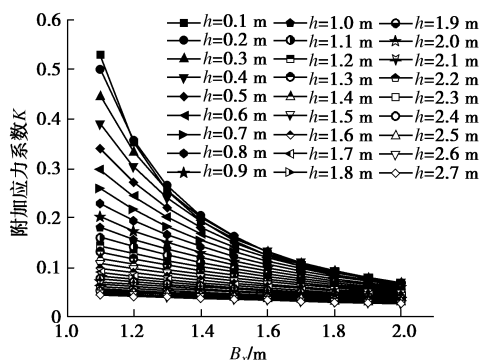
图9 区域U内不同 B_x 处的 $K-h$ 关系曲线Fig. 9 $K-h$ curves at different values of B_x in region U

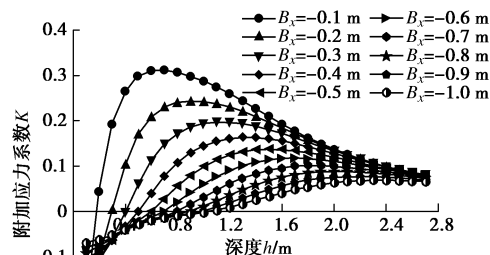
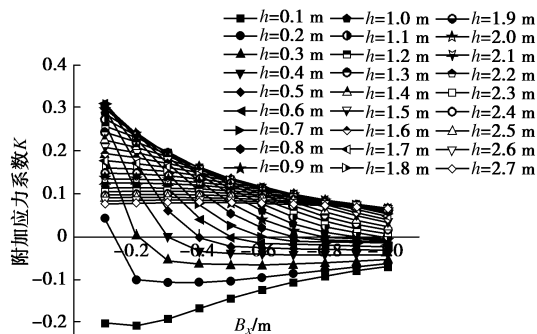
图10为区域U内不同水平距离处附加应力系数 K 随外延距离 B_x 之间的变化关系。由图10可知,当距坡面水平距离 h 一定时, K 随外延距离的增大而减小,最大值出现在板体附近。浅层土体 K 随 B_x 迅速衰减后趋于稳定,而深层土体 K 随 B_x 的变化幅度较小且衰减速率随水平距离增加而逐步减小到一个较小值,进一步说明在深层土体处可形成一较为有效的加固区。

图10 区域U内不同 h 处的 $K-B_x$ 关系曲线Fig. 10 $K-B_x$ curves at different values of h in region U

(2) 区域D内附加应力扩散规律

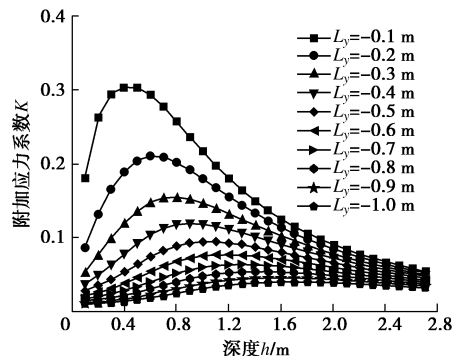
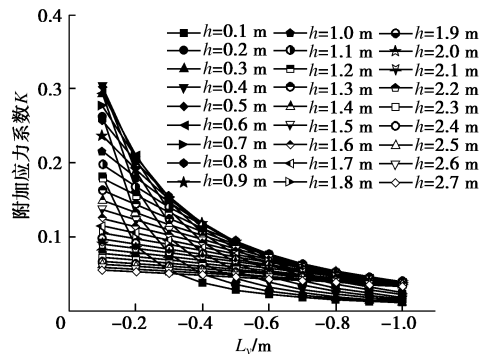
图11为区域D内不同外延距离处附加应力系数 K 随距坡面水平距离 h 之间的变化关系。该区域内最大 K 值为0.310,最小 K 值为-0.207(表现为拉应力)。区域D内不仅存在峰值距离 h_p ,还存在临界距离 h_c (此时 $K=0$),以 h_c 为界,随 h 增加,附加应力逐渐由拉应力转变为压应力。此外,关系曲线在 $h>2$ m开始趋于平缓,可形成与U区相似的有效加固区。

图12为区域D内不同水平距离处附加应力系数 K 随外延距离 B_x 之间的变化关系。由图可知,浅层土体处会出现拉应力区,附加应力系数 K 随 B_x 的增大逐渐由正变负(由压变拉);随水平距离 h 增加拉应力区逐步减小,且 $h>1.1$ m时拉应力区消失。

图11 区域D内不同 B_x 处 $K-h$ 关系曲线Fig. 11 $K-h$ curves at different values of B_x in region D图12 区域D内不同 h 处 $K-B_x$ 关系曲线Fig. 12 $K-B_x$ curves at different values of h in region D

(3) 区域L内附加应力扩散规律

图13, 14分别为区域L内附加应力系数 K 随距坡面水平距离 h 和外延距离 L_y 的变化关系。由图可知,区域L中的最大 K 值为0.304。区域L内也存在应力峰值点,变化规律与区域U类似。

图13 区域L内不同 L_y 处 $K-h$ 关系曲线Fig. 13 $K-h$ curves at different values of L_y in region L图14 区域L内不同 h 处 $K-L_y$ 关系曲线Fig. 14 $K-L_y$ curves at different values of h in region L