

# 硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析

王晓谋<sup>1</sup>, 尉学勇<sup>2</sup>, 魏 进<sup>1</sup>, 牛有来<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710075; 3. 河南省济源市公路管理局, 河南 济源 454650)

**摘 要:** 应用有限元方法分析了硬壳层厚度、变形模量和路堤等效荷载的宽度对硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的影响, 并计算出考虑上述影响因素的软土地基的应力扩散角。结果表明: 竖向附加应力扩散范围随硬壳层的厚度而扩大, 随着硬壳层变形模量的增加而扩大; 当硬壳层厚度和变形模量一定时, 随着荷载作用宽度的增加, 其扩散竖向附加应力的作用在减小。

**关键词:** 道路工程; 软土地基; 硬壳层; 竖向附加应力; 应力扩散; 有限元

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

## Numerical analysis of vertical additional stress spreading on soft clay foundation with dry crust

WANG Xiao-mou<sup>1</sup>, YU Xue-yong<sup>2</sup>, WEI Jin<sup>1</sup>, NIU You-lai<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. The First Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Highway Administration of Jiyuan City in Henan Province, Jiyuan 454650, Henan, China)

**Abstract:** With the finite element method, the spreading of vertical-additional-stress on soft clay foundation was studied, the effect of the thickness and the deformation modulus of dry crust, and the width of the equivalent load of the road embankment on the spreading were analyzed, and the spreading angle was obtained. The result indicate that: the spreading range of vertical-additional-stress will expand with the increase of the thickness and the deformation modulus of the dry crust; when the thickness and deformation modulus is fixed, the spreading effect of dry crust will decrease with the increase of the width of equivalent load. 1 tab, 9 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; soft clay foundation; dry crust; vertical-additional-stress; spreading; FEM

## 0 引 言

在软土上, 大多覆盖着一层干硬层, 称之为硬壳层。硬壳层厚度不一, 薄者数厘米, 厚者可达数米。由于硬壳层的存在, 软土地基中的竖向附加应力受

到了不同程度的影响<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着中国高速公路建设的迅猛发展, 对于如何有效地利用软土地基中的硬壳层这一问题, 很多学者进行了深入的研究。唐建中通过双层地基矩形均布载荷模拟试验, 探讨了双层地基应力扩散

的特性,提出应力扩散角的概念<sup>[2]</sup>;杨果林进行模型试验,推导出硬壳层软土地基界面附加应力的计算公式<sup>[3]</sup>;张留俊指出:硬壳层在高路堤作用下,随着变形的增大,对应力扩散作用在减小,但对路堤的稳定作用不因其变形而丧失,变形后硬壳层仍能起到反压护道的作用<sup>[4]</sup>;吴邦颖等还进行了公路路基软土地基人造硬壳层的研究,这一硬壳层在实际工程使用后,起到了扩散应力、减少软土地基沉降和侧向位移的作用<sup>[5]</sup>;文献[6]研究了硬壳层对软土地基变形的影响;文献[7]分析了软土地基在路堤填土初始阶段,硬壳层对袋装砂井排水起到有利作用;文献[8]叙述了在软土地基上进行路堤施工中,填充砂垫层时利用硬壳层的问题。但是,到目前为止,对于硬壳层厚度、变形模量、泊松比和荷载宽度等因素对硬壳层扩散应力的影响,还没有较系统地探讨。本文使用 MARC 软件,用有限元法对这一问题进行了计算分析,得到了一些规律性的结果,并得出了考虑硬壳层厚度、变形模量和荷载宽度等因素的软土地基中的竖向附加应力扩散角。

## 1 分析方法

硬壳层是一个相对概念,它是软土层上呈软塑-硬塑状态且力学性质比其下软土层稍好的表土层。硬壳层一般厚度不大,本文根据软土地基现场试验研究的成果分析以及对以往软土硬壳层的研究成果分析后认为,对于高等级公路路堤下的软土地基,由于其厚度较小,考虑硬壳层的作用时应以硬壳层及其下软土处于弹性状态或称为直线变形体状态为宜。这是因为高等级公路对路堤下软土地基的沉降有较高要求,即对软土地基沉降的要求已高于对其强度的要求。当软土地基通过塑性区开展而产生较大的承载力时,软土地基的沉降早已超过高等级公路的要求。因此,在实际中要安全利用软土地基的硬壳层,就必须考虑高等级公路实际的需要及其他建筑物的要求,即保证软土地基在变形和承载力方面的一致性。所以,本文分析的就是软土硬壳层在弹性工作状态下对软土地基中竖向附加应力扩散的影响。这样分析的第一个目的是,在进行地基中的应力计算时,对于无硬壳层的软土地基情况,土中的应力值基本上应与布西奈斯克解是一致的,从而可以校核所选有限元力学计算模型的合理性和计算结果的正确性。第二个用线弹性本构关系分析的目的是,为了保证使外荷载不超过软土地基的临塑荷载,使实际工程中对硬壳层的利用更加安全合理。考虑

硬壳层作用的软土地基临塑荷载可用文献[9]中的公式计算。文献[9]求解了考虑硬壳层作用的软土地基临塑荷载,并给出该公式计算结果的最大值界限。该计算公式推导分两步进行:①先将硬壳层自重视为大面积均布荷载和路堤自重简化为条形均布荷载,一起作为外荷载加在软土地基上求其临塑荷载;②在计算考虑硬壳层的强度和厚度作用后,将条形均布荷载向下卧软土层传递时,通过摩擦作用传递条形均布荷载作用宽度以外的力,并将两个步骤计算结果叠加,就可得到考虑硬壳层作用的软土地基临塑荷载计算公式为

$$P_{cr} = \frac{\pi}{\cot\varphi + \varphi - (\pi/2)} \gamma_0 h + \frac{\pi \cot\varphi}{\cot\varphi + \varphi - (\pi/2)} c + \frac{2c_0 h}{B} \quad (1)$$

式中: $B$ 为均布条形荷载作用宽度; $h$ 为硬壳层厚度; $\gamma_0$ 为硬壳层重度; $c_0$ 为硬壳层的粘聚力; $c$ 为下卧软土地基的粘聚力; $\varphi$ 为下卧软土地基的内摩擦角。

根据硬壳层和软土地基的土性指标: $c_0 = 30 \text{ kPa}$ ,  $\gamma_0 = 18.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 18 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 8^\circ$ , 荷载作用宽度  $B$ , 硬壳层厚度  $h$ , 代入式(1)计算得  $P_{cr} = 87 + 60 h/B$ 。对于具体工程,将  $h$  与  $B$  代入就可求得。如果地基表面荷载不超过计算的临塑荷载,假设有硬壳层的软土地基为两层各向同性的线弹性体,就可以使用本文的计算方法。

## 2 问题描述

为了分析硬壳层的厚度、变形模量、泊松比和荷载宽度等因素对硬壳层扩散应力的影响规律,本文数值计算参数变化范围为:均布荷载  $q$  为  $50 \text{ kN/m}$ ;荷载作用宽度  $B$  为  $40 \text{ m}$ 、 $35 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $25 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ 、 $15 \text{ m}$ 、 $12 \text{ m}$ 、 $10 \text{ m}$ 、 $8 \text{ m}$ 、 $6 \text{ m}$ ;硬壳层厚度为  $4 \text{ m}$ 、 $8 \text{ m}$ 、 $12 \text{ m}$ 、 $16 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ ;硬壳层变形模量  $E_1$  为  $10 \text{ MPa}$ 、 $20 \text{ MPa}$ 、 $30 \text{ MPa}$ 、 $50 \text{ MPa}$ ;相应的硬壳层泊松比  $\mu_1$  为  $0.38$ 、 $0.30$ 、 $0.25$ 、 $0.22$ ;软土变形模量  $E_2$  为  $5 \text{ MPa}$ ;软土的泊松比  $\mu_2$  为  $0.42$ 。

图 1 为计算时典型的有限元离散图。计算范围为:水平宽度  $120 \text{ m} \times$  深度  $50 \text{ m}$ ,所用单元为 4 节点矩形单元,共 2 760 个单元,2 867 个节点。边界条件为:上表面距中心对称面  $10 \text{ m}$  范围内作用条形均布荷载( $q = 50 \text{ kN/m}$ ),上表面的其余部分为自由表面,其余 3 个界面只约束其法向位移,相当于滚动支座。为了验证所选有限元计算模型的正确性,先用布辛奈斯克解计算均质地基条形均布荷载中心下沿深度变化的竖向附加应力系数,再用图 1 所示模型

计算均质地基条形均布荷载中心下沿深度变化的竖向附加应力系数,结果如图2所示。由图表可以看出,所选有限元计算模型是比较合理的。

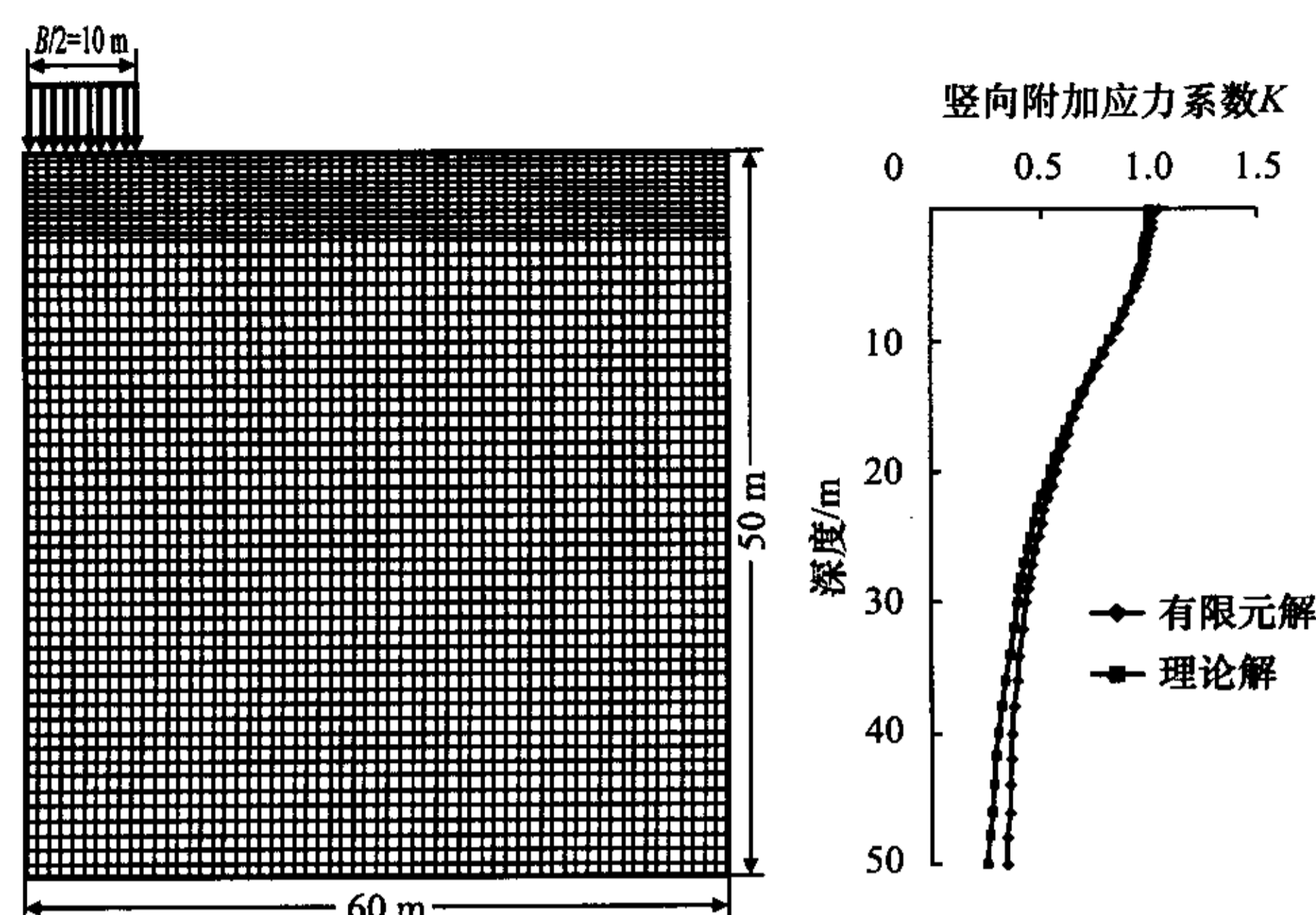


图1 典型的有限元离散

图2 模型的合理性

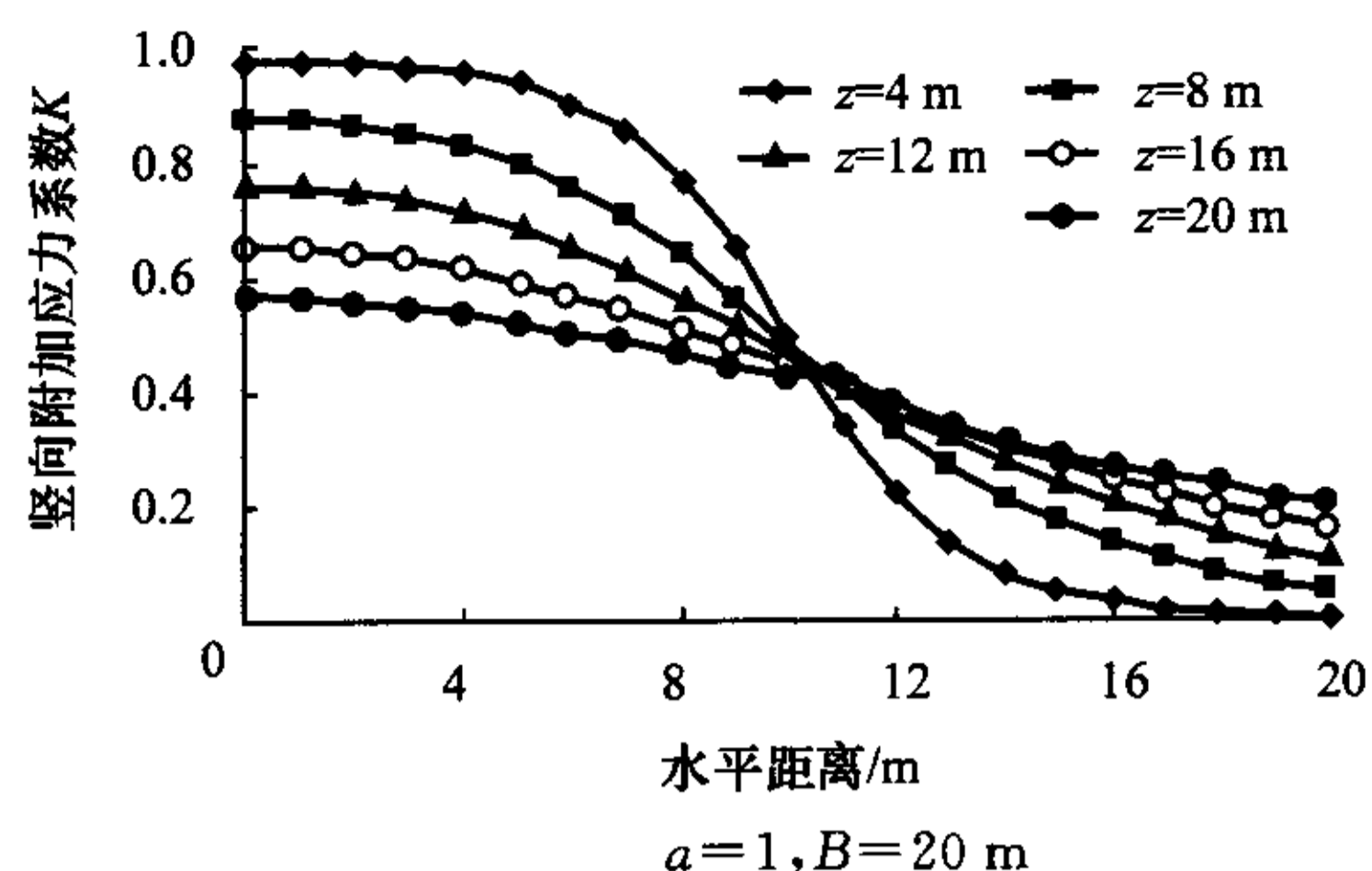
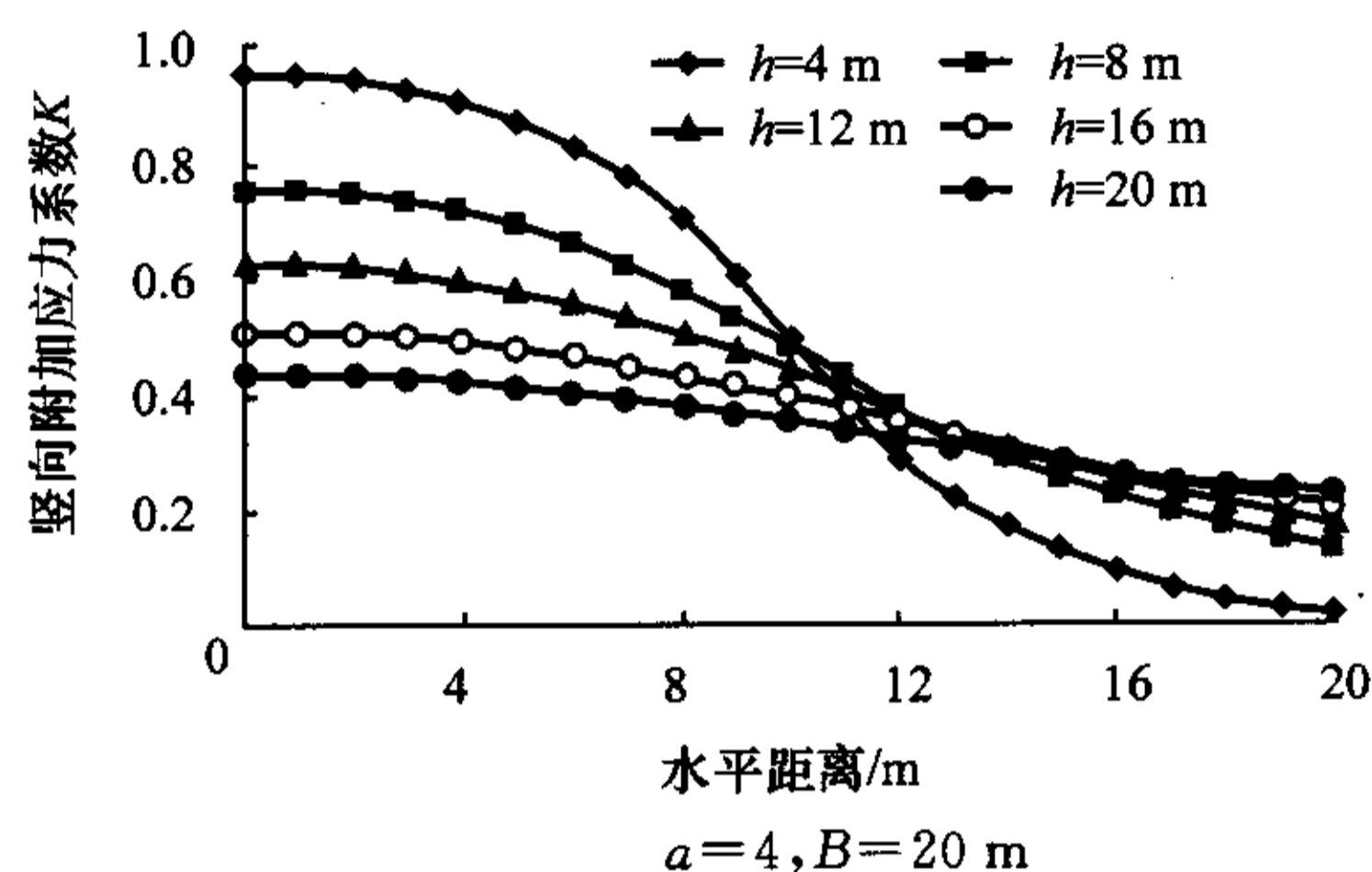
### 3 计算结果分析

#### 3.1 硬壳层厚度对竖向附加应力扩散的影响

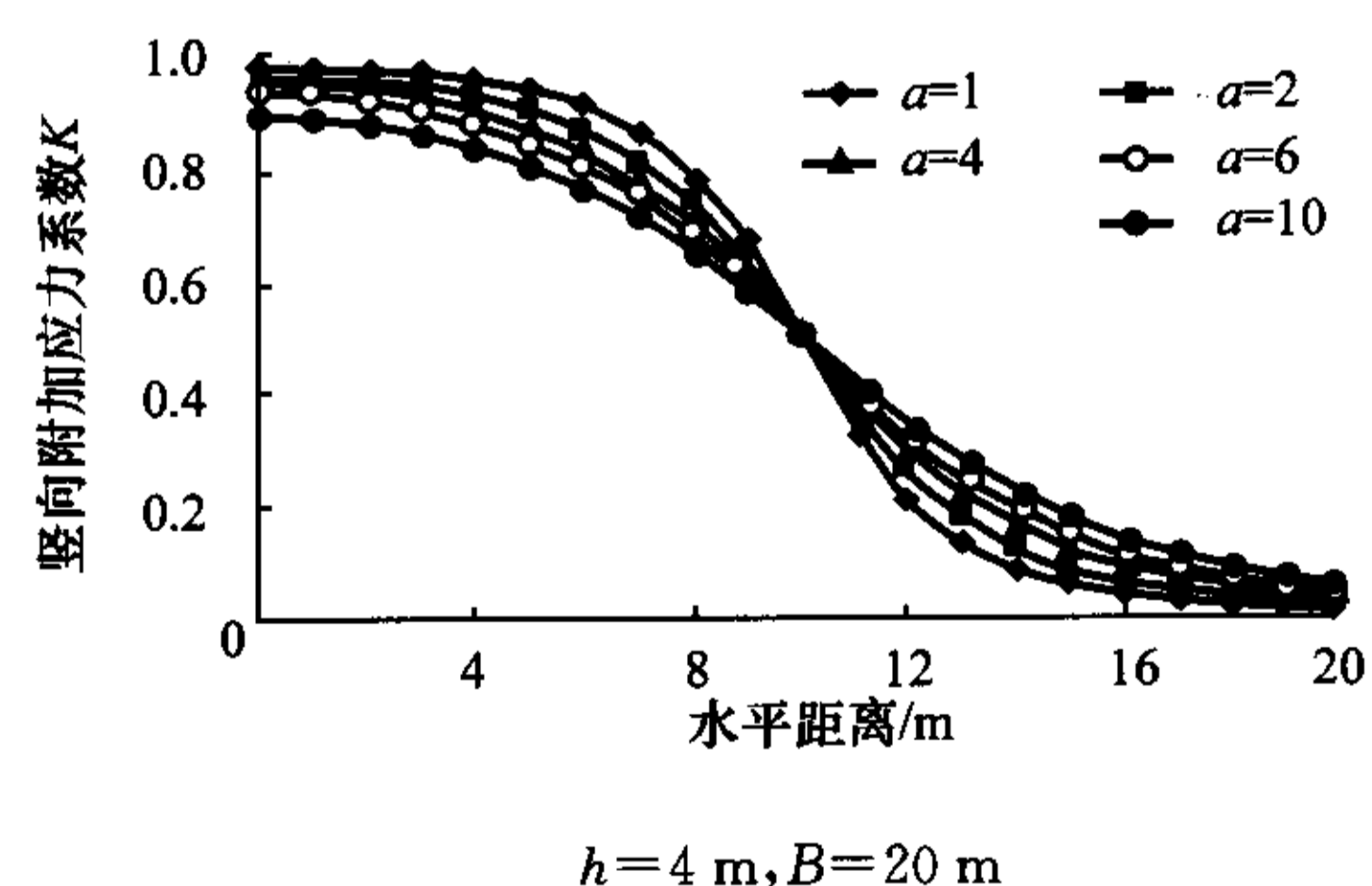
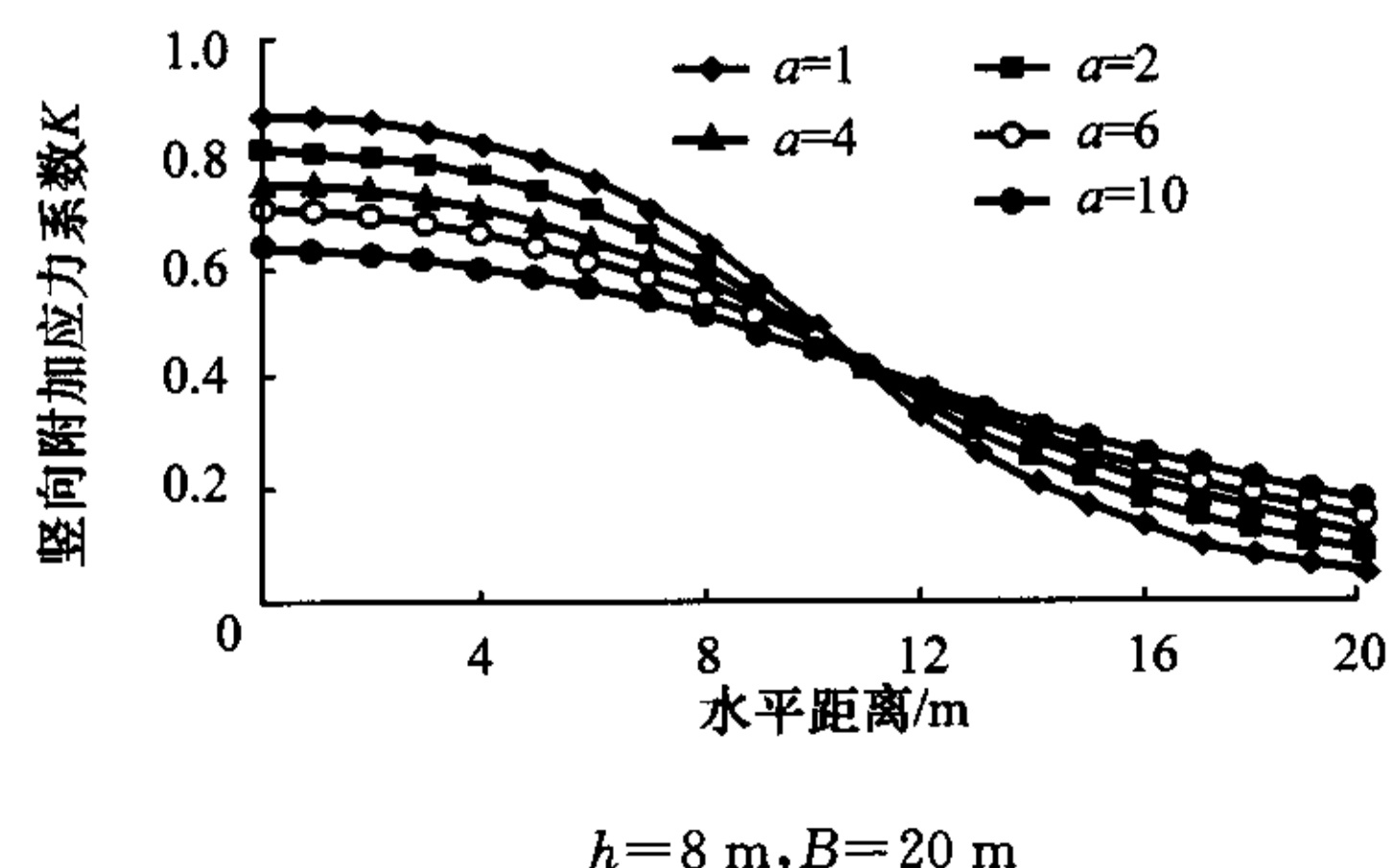
对于无硬壳层的软土地基,当荷载分布宽度  $B$  为 20 m 时,计算出地基中深度  $z$  分别为 4 m、8 m、12 m、16 m、20 m 处层面上的竖向附加应力系数  $K$ ,如图3所示的曲线,本文把这种情况下的扩散称为“自然扩散”。对于有硬壳层的软土地基,当变形模量比  $a=4$  ( $a=E_1/E_2$ ,  $E_1$  为硬壳层变形模量,  $E_2$  为硬壳层下软土变形模量) 时,计算出  $h$  分别为 4 m、8 m、12 m、16 m、20 m 时,硬壳层与其下软土层界面上的  $K$  有图4所示的曲线。当  $h=8$  m 时,在距荷载中心的水平距离分别为 0 m、10 m 处的硬壳层界面上,  $K$  分别减少了 0.129、0.010,即分别减少了 15%、2%,而在距荷载中心 20 m 处的硬壳层界面处,  $K$  增加了 119%;当  $h=16$  m 时,在距荷载中心的水平距离分别为 0 m、10 m 处的硬壳层界面上,  $K$  分别减少了 0.145、0.053,即分别减少了 22%、12%,而在距荷载中心 20 m 处的硬壳层界面处,  $K$  增加了 32%。将图3和图4对比,可清楚的看出,当  $a=4$  时,随着硬壳层厚度的增加,在地基的同样深度处,  $K$  在荷载作用宽度范围内比无硬壳层的情况明显减小,但在荷载作用宽度范围之外,  $K$  随距离增加而减小速度变慢,进而大于相应深度处无硬壳层情况下的  $K$ ,且曲线拐点比无硬壳层时离开荷载范围边沿的距离要远,显示出硬壳层明显的应力扩散效应,可以看出应力的扩散范围随着硬壳层厚度的增加而扩大。

#### 3.2 硬壳层变形模量对竖向附加应力扩散的影响

图5和图6是荷载分布宽度  $B$  为 20 m,  $h$  分别

图3 无硬壳层不同深度  $z$  层面上  $K$  与水平距离的关系图4 不同厚度  $h$  下硬壳层界面上  $K$  与水平距离的关系

为 4 m、8 m,硬壳层与其下软土层的变形模量比  $a$  值增大时,硬壳层与其下软土界面上  $K$  的变化曲线。从图5、图中可以看出,当硬壳层厚度一定时,随着  $a$  的增大,  $K$  在荷载作用宽度范围内明显变小,但在荷载作用宽度范围之外,  $K$  随着离开荷载作用范围边沿距离的增加,减小速度变慢,进而大于相应厚度硬壳层变形模量较小的情况下的  $K$ ,且曲线拐点比硬壳层变形模量小的情况下离开荷载范围边沿的距离要远。这表明,硬壳层变形模量越大,对竖向附加应力  $\sigma_z$  的扩散作用越大;随着硬壳层变形模量的增加,

图5 不同变形模量比  $a$  下硬壳层界面上  $K$  与水平距离的关系图6 不同变形模量比  $a$  下硬壳层界面上  $K$  与水平距离的关系

$\sigma_z$  扩散的范围增加。从图 5 和图 6 对比中也可看出,硬壳层厚度和变形模量都大时,扩散效果更好。

### 3.3 荷载作用宽度对竖向附加应力扩散的影响

图 7 是无硬壳层在不同荷载作用宽度下,深度为 6 m 水平层面上  $K$  的变化曲线。图 8 是  $h$  为 6 m,  $a$  为 4 时,硬壳层与其下软土层界面上  $K$  的变化曲线。当  $B$  为 20 m 时,在荷载中心下的硬壳层界面上,  $K$  减少了 0.076, 即减少了 8%, 而在距荷载中心 10 m、20 m 处的硬壳层界面上,  $K$  分别增加了 0.002、0.042, 分别比无硬壳层的情况下增加了 0.5%、131%; 当  $B$  为 10 m 时,在荷载中心下的硬壳层界面上,  $K$  减小了 0.175 6, 比无硬壳层时值减小了 23%, 而在距荷载中心 10 m、20 m 处的硬壳层界面上,  $K$  分别增加了 0.074、0.015, 分别比无硬壳层的情况下增加了 67%、139%。从图 7 与图 8 对比中可以看出,当  $h$ 、 $a$  一定时,荷载宽度越小,硬壳层扩散应力的作用越明显;荷载作用宽度越大,硬壳层扩散应力的作用越不明显。因此,在实际工程中,要充分利用硬壳层,就必须考虑硬壳层厚度与荷载作用宽度的比例问题。

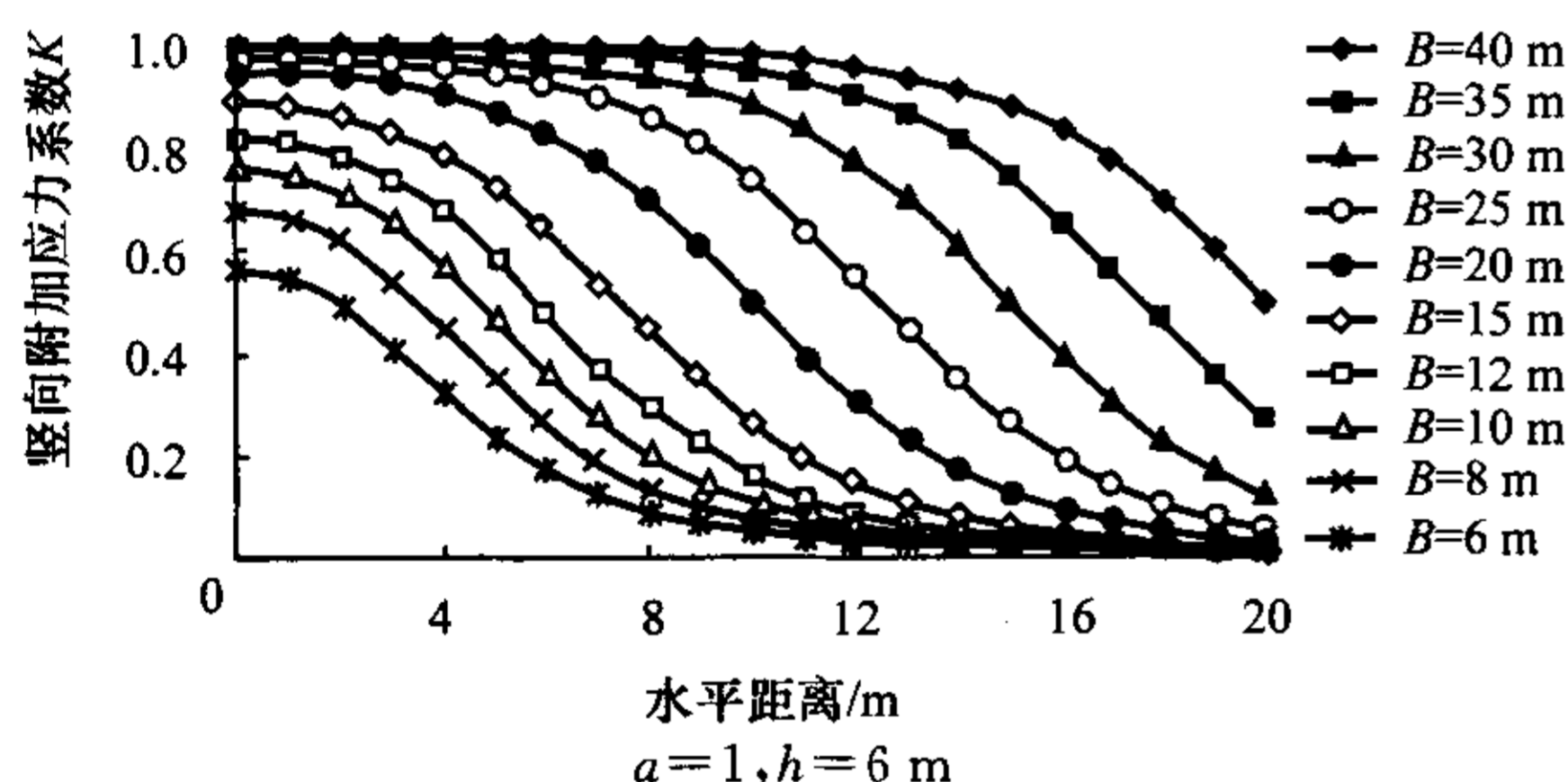


图 7 不同荷载宽度  $B$  下 6 m 深度面上  $K$  与水平距离的关系

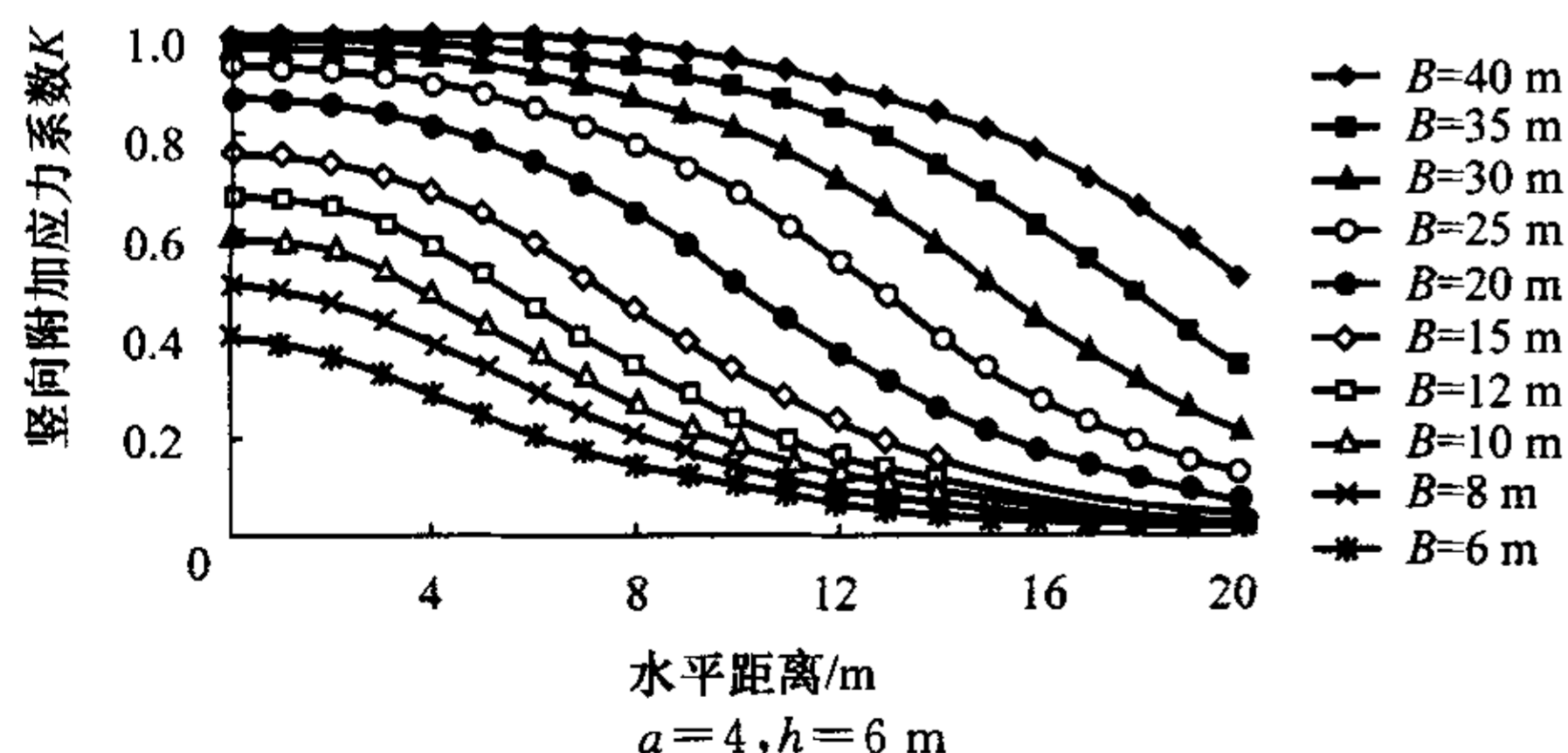


图 8 不同荷载宽度  $B$  下硬壳层厚度 6 m 时与其下软土界面上  $K$  与水平距离的关系

### 3.4 考虑硬壳层作用的应力扩散角计算

将路堤自重近似视为条形均布荷载,则均布条形荷载集度  $p = \gamma H$ , 作用在双层地基表面 ( $\gamma$  为路堤填土重度,  $H$  为路堤填土高度);  $B = (B_1 + B_2)/2$ , ( $B_1$ 、

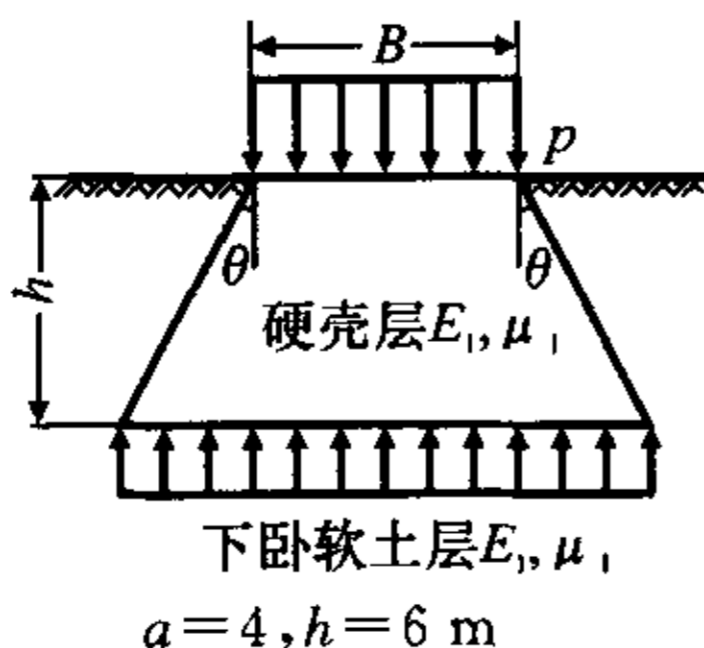


图 9 硬壳层应力扩散角的计算

$B_2$  分别为路堤的顶宽和底宽);将双层地基均视为均质的各向同性的弹性体。假定硬壳层将  $p$  按一定的应力扩散角  $\theta$  向下传递(图 9),并均匀分布在扩散后的面积上。根据静力等效原理,扩散后总压力等于施加的荷载,则竖向附加应力  $\sigma_z$  为

$$\sigma_z(B + 2h \tan \theta) = pB, \sigma_z = \frac{pB}{B + 2h \tan \theta} \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{B}{2h} \left( \frac{p}{\sigma_z} - 1 \right), \theta = \arctan \left[ \frac{B}{2h} \left( \frac{p}{\sigma_z} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

从式(3)可以看出,只要算出  $\sigma_z$ ,就可以求出硬壳层在特定的几何尺寸和物理力学指标情况下的应力扩散角  $\theta$ ,计算结果如表 1 所示。

表 1 应力扩散角  $\theta$  ( $^\circ$ )

$h/B$	变形模量比 $a$				
	1	2	4	6	10
0.1	1.80	2.43	2.97	3.40	5.28
0.2	5.18	8.21	11.47	14.59	23.49
0.4	12.04	17.27	23.30	27.79	35.83
0.6	17.03	22.84	29.91	34.72	42.23
0.8	20.50	26.31	33.31	37.78	43.73
1.0	22.91	28.45	34.93	38.79	44.81

从表 1 可以看出,当  $a = 1$  时,随着  $h/B$  值的增大,  $\theta$  也随之增大,如果假设两层土的变形模量和泊松比相同,这就是无硬壳层的均质地基,本文把这种扩散称为“自然扩散”。均质地基中应力扩散是地基固有的性质,这也是布西奈斯克解早已解决了的问题。当  $a > 1$  后,即有硬壳层的情况。从表 1 中可以看出,  $\theta$  值随  $a$  和  $h/B$  的增加而增大。对于实际工程而言,  $a$  和  $h/B$  的值不可能很大,文献[10]中对地基层范围内有软弱下卧层时,规定地基压力扩散线与垂直线的夹角  $\theta$  最大为  $30^\circ$ 。本文建议  $\theta$  值的使用不要超过  $30^\circ$ 。对于具有软弱下卧层的其他地基,也可用本文方法计算  $\theta$ ,以便使这类地基的设计更加合理。

## 4 结 语

(1)软土地基有硬壳层时,可起到扩散应力的作用。当硬壳层变形模量一定时,随着硬壳层厚度的增加,在软土地基的同样深度处,竖向附加应力在荷载作用宽度范围内比无硬壳层的情况明显减小,但在荷载作用宽度范围之外,竖向附加应力随着离开荷载作用范围边沿距离的增加而减小的速度变慢,进而大于相应深度处无硬壳层的情况下的竖向附加应力,竖向附加应力扩散范围随着硬壳层厚度的增

加而扩大。

(2)当硬壳层厚度一定,随着硬壳层变形模量的增加,竖向附加应力在荷载作用宽度范围内明显变小,但在荷载作用宽度范围之外,竖向附加应力随着离开荷载作用范围边沿距离的增加而减小的速度变慢,进而大于相应厚度硬壳层变形模量较小的情况下的竖向附加应力,竖向附加应力扩散范围随着硬壳层变形模量的增加而扩大。

(3)当硬壳层厚度和变形模量一定时,随着荷载作用宽度的增加,其扩散应力的作用在减小,因此利用硬壳层时一定要考虑荷载宽度影响。

(4)计算出了考虑硬壳层厚度和变形模量以及荷载作用宽度影响的应力扩散角 $\theta$ ,建议在实际使用中 $\theta$ 的最大值不要超过 $30^\circ$ 。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王晓谋. 河滩相软土地基的变形规律及硬壳层作用研究[D]. 西安:长安大学,2001.
- [2] 唐建中. 双层地基应力扩散的特性研究[J]. 地基处理,1993,(2):25-31.  
TANG Jian-zhong. On the stress spreading characteristic for double-layered foundation[J]. Ground Improvement,1993,(2):25-31.
- [3] 杨果林. 硬壳层软土地基中界面附加应力研究[J]. 湘潭矿业学院学报,1996,11(1):47-54.  
YANG Guo-lin. Study of boundary plane superimposed stress of two-parameter foundation[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute,1996,11(1):47-54.
- [4] 张留俊. 高路堤下软土硬壳层工程性质的研究[J]. 公路,1999,(7):5-9.  
ZHANG Liu-jun. Research on the engineering properties of dry crust of soft clay foundation under high embankment[J]. Highway,1999,(7):5-9.
- [5] 吴邦颖. 公路软土路基人造硬壳层处理研究[J]. 路基工程,1996,(4):39-46.  
WU Bang-ying. Treatment on artificial hard shell layer on soft clay foundation under embankment[J]. Subgrade Engineering,1996,(4):39-46.
- [6] 王晓谋,袁怀宇,贾其军,等. 路堤下河滩相软土地基变形研究[J]. 中国公路学报,2003,16(2):22-26.  
WANG Xiao-mou, YUAN Huai-yu, JIA Qi-jun, et al. Study of deformation of alluvial flat soft clay foundation under embankment[J]. China Journal of Highway and Transport. 2003,16(2):22-26.
- [7] 王晓谋,袁怀宇. 河滩相软土地基路堤施工[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(3):26-29.  
WANG Xiao-mou, YUAN Huai-yu. Embankment construction on alluvial soil foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3):26-29.
- [8] 王晓谋,袁怀宇. 高等级公路软土地基路堤设计与施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [9] 王晓谋. 考虑硬壳层作用的软土地基临塑荷载计算[J]. 岩土工程学报,2002,24(6):720-723.  
WANG Xiao-mou. Calculation of proportional limit load for soft clay foundation involving the effect of dry crust[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(6):720-723.
- [10] GB 50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].

(上接第36页)

- 智能检测与信息处理[J]. 光电子·激光,2002,13(12):1 181-1 284.  
HE An-zhi, XU You-ren, HE Ning. Intelligent optical test of surface's status of the highway and it's information processing[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002,13(12):1 181-1 284.
- [5] 中华人民共和国交通部. 高速公路养护质量检评方法(试行)[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 马建,宋宏勋. 高速公路养护质量激光检测技术及应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2005,22(6):1-4.  
MA Jian, SONG Hong-xun. Laser inspection technology and application of expressway maintenance quality [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005,22(6):1-4.
- [7] 李中华. 激光断面仪在路面平整度及车辙检测中的应

- 用[J]. 交通科技,2004,(3):7-9.  
LI Zhong-hua. Application of the laser profile-meter in the roughness measurement [J]. Transportation Science and Technology,2004,(3):7-9.
- [8] 杨劲夫. 高速公路车辙检测数据分析方法[J]. 东北公路,2002,(1):8-9.  
YANG Jin-fu. Analysis of rut detected data in expressway [J]. Northeast Highway,2002,(1):8-9.
- [9] 马荣贵,宋宏勋,来旭光. 激光路面平整度检测系统[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):38-41.  
MA Rong-gui, SONG Hong-xun, LAI Xu-guang. Pavement roughness measurement system based on laser displacement sensors[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(2):38-41.
- [10] JTJ 059-95,公路路基路面现场测试规程[S].