

文章编号: 1000-694X(2002)03-0229-04

草方格沙障尺寸分析的简单模型

王振亭, 郑晓静

(兰州大学力学系, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 针对草方格沙障防护区域内流场的特点, 提出一个单排理想涡列模型, 用以模拟实际风沙流场。在此基础上, 利用流体力学的分析方法, 给出了与目前工程实际所建议的尺寸比较吻合的草方格沙障间距(或草方格边长)与出露草头高度的对应关系。

关键词: 草方格; 流体力学; 理论模型

中图分类号: P433 **文献标识码:** A

资料^[1]显示, 中国 20 世纪 50 ~ 60 年代沙漠化土地平均每年扩大 1 560 km², 20 世纪 70 ~ 80 年代增至每年 2 100 km², 20 世纪 80 年代中期至 90 年代初则为每年 2 460 km²。可见, 我国沙漠化形势十分严峻。近半个世纪以来, 广大科技工作者和沙区群众与沙漠化危害进行了坚持不懈的斗争, 积累了丰富的治沙经验, 创造性地提出了各种治理模式, 不仅为我国沙漠化防治作出了不可磨灭的贡献, 而且为治沙工程学的建立、发展与完善奠定了坚实的基础。

沙漠化防治的一种重要手段是机械固沙, 即通过各种工程设施的建设, 对风沙起到固、阻、输、导的作用, 达到防止风沙危害的目的。其中最具有代表性的一种工程就是草方格沙障的设置。众多专家学者^[1~3]都对这种沙障进行了深入细致的研究。例如, 凌裕泉先生^[4]假设障内沙面为一段圆弧, 沙面最高点处圆的弦切角为干沙的休止角, 进而从理论上得出草方格沙障内最大风蚀深度与方格边长之间的解析关系式; 刘贤万先生^[5,6]则进行了大量风洞实验, 给出了翔实的数据与图表, 并对实验结果作出了令人信服的分析。然而, 由于风沙流场与草方格沙障的相互作用使得防护区域内的流场涉及到两相流动、涡的产生与破裂、流固耦合等一系列复杂因素, 从理论上, 特别是从力学角度对草方格沙障固沙机理进行的定量研究, 尚不多见。

通过对草方格固沙系统力学特征的分析, 针对草方格沙障内部有涡存在的特点, 在引入适当假设的基础上, 提出了一个单排理想涡列模型, 用以模拟实际风沙流场, 并利用流体力学分析方法, 给出了草方格沙障的障间距离与出露草头高度之间的对应关

系。与工程实际中普遍建议或采纳的尺寸进行比较, 发现二者基本吻合, 依此证实本文提出的理论模型和分析方法是基本可行的。

1 基本假设

当来流以与水平 x 轴成任一夹角、大小为 u 的速度吹过设置有草方格沙障的床面时, 如图 1 所示。可将风速矢量沿草方格两边进行正交分解, 其中 $u_1 = u \cos \theta$, $u_2 = u \sin \theta$ (见图 1)。这样, 任何风向作用下草方格沙障的防护问题就近似等价于两个正交风作用下的迭加。二者作用原理并无本质区别, 我们在此研究其中一种情况即可。

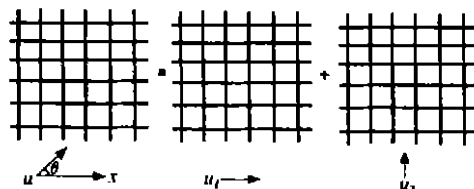


图 1 草方格风速分解示意图

Fig. 1 An illustration of velocity decomposition of wind flowing through straw checkerboard barriers

再将草方格分解为相互垂直的草带, 如图 2 所示。长期的治沙实践证明^[4]: 防治风向比较单一

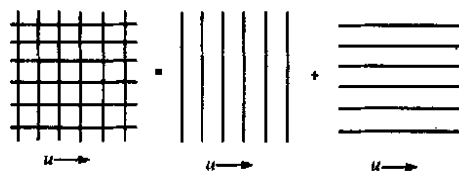


图 2 草方格在单向风作用下的分解

Fig. 2 An illustration of straw checkerboard barriers decomposition under the influence of wind having a single prevailing direction

收稿日期: 2001-07-03; 改回日期: 2001-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“中国北方沙漠化过程及其防治研究”(G200048702) 资助

作者简介: 王振亭(1975—), 男(满族), 河北隆化人, 硕士研究生, 主要从事风沙力学与治沙工程学研究。

的沙害多采用与主风向正交或大角度斜交的带状沙障。据此,可忽略与风向平行的草带所起的作用,将问题最终归结为探讨与风向垂直布置的多行草带所起的防护作用。

野外观测^[2]表明:当风沙流经过新设置的草方格沙障时,在其内部产生旋涡,经过足够长的时间后,障内沙面形成光滑稳定的凹曲面(图3)。这样,即使当强气流经过时,沙面自身并不起沙,从而达到固沙的目的。风洞实验^[6]也显示,草方格内部的确存在旋涡运动。实际上,如果地面水平,层流通常将很快转捩为湍流,但由于稳定时刻地表凹槽与涡的存在,流动仍可近似当作层流处理。

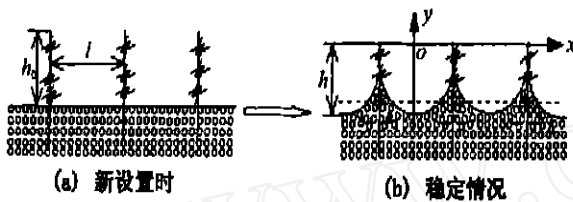


图3 草方格沙面形成示意图

Fig. 3 Sketch of land surface formation process within straw checkerboard barrier

由上述草方格固沙系统的力学特征,引入如下基本假设:

- (1) 布置草方格的区域沿正负流向均延伸到无穷远处;
- (2) 沙面形成过程中,经过草方格防护区域的气流的含沙量为零;
- (3) 空气可当作无粘不可压流体;
- (4) 稳定时刻,障内沙面具有流线型。

包兰铁路沙坡头地段防沙体系中^[4],草方格沙障防护带宽度在主风方向一侧一般约为150~200 m。1 m左右的沙障间距与此宽度相比为小量。因此,可以认为布置草方格的区域沿正负流向均延伸到无穷远处。一般来说,在一定时间内,前沿发生严重积沙甚至被沙埋的草方格数目与总体数目相比为小量^[4]。我们在流场处理中可以忽略这种边界效应,由此得到的结果对除前沿少数几行外的绝大多数草方格还是适合的。

由于草方格沙障主要起着固沙作用^[2],当其固沙效果良好时,可以认为气流作用下的障内沙粒不离开沙障。当然,这是一种理想情况。同时,假设(2)忽略来流中运动沙粒的作用,虽然会带来一定的误差,但对探讨问题并无本质影响。依据假设(2),来流可以处理为净气流,这将使问题的处理大大简化。

常温常压空气的粘性与可压缩性一般不必考

虑^[7],假设(3)的合理性是显而易见的。

假设(4)是一种理想情况,与假设(3)一起保证了流线沿壁面不发生分离,其结果必将导致流体对地面的拖曳力为零,而这正是固沙工程所要达到的理想目的。

由上述分析可见,假设(1)至(4)与草方格固沙系统的实际情况是基本符合的。不同之处在于,这些假设是基于草方格固沙效果良好时的理想情形。而由于引入了这些基本假设,实际流场可以简化为无外力作用下的理想流体在半无限空间内的二维层流流动。

2 理论模拟

由风洞实验^[6]和野外观测^[2]可知,当风沙流经过草方格沙障时,其内部一般均有涡产生。而由上节给出的假设(1)至(4),为了描述此时的流场,我们在每两条相邻草带中心处 $(x, y) = (nl, 0)$, $n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$,均放置一个强度为 Γ 的理想涡,如图4所示,这样就形成一个单排涡列。障内沙面取为向 x 轴正负方向均无限延伸的一条连续的流线,记为 $y = y(x)$ 。

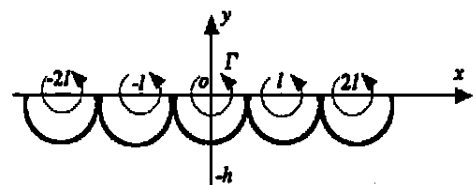


图4 模型示意图

Fig. 4 Sketch of model

依流体力学理论^[7],引入势函数 ϕ 与流函数 ψ ,它们的定义分别为:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1)$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2)$$

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度分量。由(1)、(2)式得

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3)$$

(3)式与复变函数论中著名的Cauchy-Riemann条件完全相同,据此引进复势的定义:

$$w = \phi + i\psi \quad (4)$$

其中 $i^2 = -1$,令 $z = x + iy$,则有

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

由(1)、(2)、(5)式得

$$u - iv = \frac{dw}{dz} \quad (6)$$

由流体力学理论^[7]可知,位于 $z_0 = x_0 + iy_0$ 处强度为 Γ 的理想涡的复势为 $w_0 = \frac{\Gamma}{2i} \ln(z - z_0)$ 。这样,用于描述流场的单排涡列的复势为:

$$w = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\Gamma}{2i} \ln(z - nl) \right), z \notin \{nl\} \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得到关系式

$$u - iv = \frac{dw}{dz} = \frac{\Gamma}{2li} \cot\left(\frac{z}{l}\right) \quad (8)$$

当 $y \rightarrow 0$ 时, $u \rightarrow \frac{\Gamma}{2l}$, $v \rightarrow 0$, 进而得到涡的强度为

$$\Gamma = -2U l \quad (9)$$

这里 U 为远离地面处的风速。由(9)式可知,在一定来流速度情况下,沙障内旋涡强度 Γ 与沙障间距 l 成正比。这意味着:沙障间距越大,障内旋涡越强烈,进而越容易起沙。因此,在实际施工中 l 取值不能太大。

3 定量分析

设草方格沙障的特征参数

$$\lambda = \frac{h}{l} \quad (10)$$

初始时刻床面水平,这时的特征参数记为

$$\lambda_0 = \frac{h_0}{l} \quad (11)$$

其中, h_0 为出露草头高度。

根据假设(1)至(4),沙面(即流线 $y = y(x)$)形成过程中,草方格内沙土质量守恒,则当其体密度不

变时,应有

$$h_0 l = \int_0^l y(x) dx \quad (12)$$

取绝对值是注意到图 4 所示的坐标系。

由(10)、(11)式有

$$l_0 = \frac{\int_0^l y(x) dx}{l^2} \quad (13)$$

对于经过草方格任意一点 z_0 点的流线,其方程可由(4)、(7)式给出:

$$\begin{aligned} &= \text{Im} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\Gamma}{2i} \ln(z - nl) \right] \right\} = \\ &= \text{Im} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\Gamma}{2i} \ln(z_0 - nl) \right] \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部, l_0 的表达式由(9)式给出。

确定 l_0 的具体步骤如下:

(1) 给定 $h, l, U, z_0 = -ih$;

(2) 求出 $l_0 = \text{Im} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\Gamma}{2i} \ln(z_0 - nl) \right] \right\}$;

(3) 对任意的 $x \in [a, b]$, 利用二分法在 $(-\infty, +\infty)$

中搜索到满足方程 $l_0 = \text{Im} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\Gamma}{2i} \ln(z - nl) \right] \right\}$ 的 y 值, 得到流线方程 $y = y(x)$;

(4) 将 $y = y(x)$ 代入(13)式,用高斯积分法进行数值积分,得到相应的 l_0 。

4 结果分析

依上述分析,我们编制了相应的计算程序。计算表明,流线方程 $y = y(x)$ 仅与参数 h 与 l 的取值有关。另外,无论 h 与 l 的取值如何,只要 λ 相等,得到的流线形状就具有相似性。图 5 和图 6 分别绘

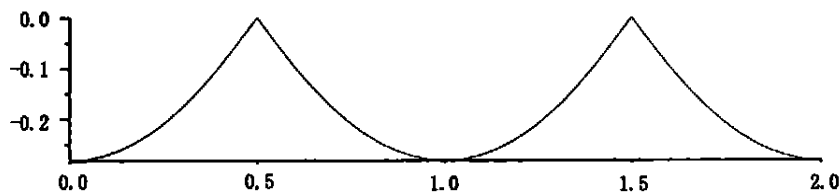


图 5 $\lambda=0.28$ 时的流线图

Fig. 5 The streamline when $\lambda=0.28$

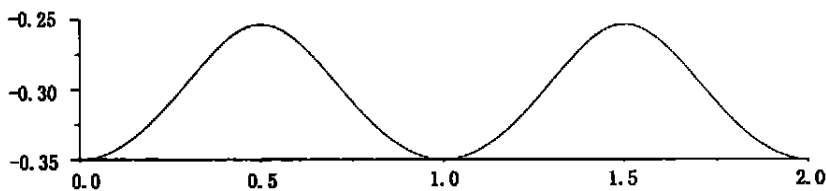


图 6 $\lambda=0.35$ 时的流线图

Fig. 6 The streamline when $\lambda=0.35$

出了 $l = 1.0$ 、 $h = 0.28$ 与 $l = 1.0$ 、 $h = 0.35$ 时的流线, 分别对应为 0.28 与 0.35。经过搜索, 我们发现可以作为沙面形状的距涡心最近的一条流线对应于 $\alpha = 0.28$, 这是一种草方格沙障在稳定时刻出露草头高度为零的极限情况, 即 h_0 具有最小值 $(h_0)_{\min} = 0.28$ 。

计算结果还表明: h_0 取值仅与 α 有关, 当 $\alpha = (h_0)_{\min}$ 时, 与之对应的 h_0 达到最小值 $(h_0)_{\min} = 0.1856$ 。工程实际中^[4], 防护材料(麦草, 芦苇等)通常就地取材, 因此可以认为出露草头高度 h_0 的取值由材料尺寸给定。这样, 由(11)式可得到特征参数 $\alpha = (h_0)_{\min}$ 时, 沙障间距 $l = l_{\max}$ 。表 1 给出

表 1 出露草头高度与最大间距的对应关系

Tab. 1 Correlation between the height of straw above sand bed and the biggest width of checkerboard

| 草头高度/cm | 最大间距/cm | 草头高度/cm | 最大间距/cm |
|---------|-----------|---------|------------|
| 1.0 | 5.387523 | 16.0 | 86.200370 |
| 2.0 | 10.775050 | 17.0 | 91.587890 |
| 3.0 | 16.162570 | 18.0 | 96.975420 |
| 4.0 | 21.550090 | 19.0 | 102.362900 |
| 5.0 | 26.937610 | 20.0 | 107.750500 |
| 6.0 | 32.325140 | 21.0 | 113.138000 |
| 7.0 | 37.712660 | 22.0 | 118.525500 |
| 8.0 | 43.100190 | 23.0 | 123.913000 |
| 9.0 | 48.487710 | 24.0 | 129.300600 |
| 10.0 | 53.875230 | 25.0 | 134.688100 |
| 11.0 | 59.262750 | 26.0 | 140.075600 |
| 12.0 | 64.650280 | 27.0 | 145.463100 |
| 13.0 | 70.037800 | 28.0 | 150.850600 |
| 14.0 | 75.425320 | 29.0 | 156.238200 |
| 15.0 | 80.812840 | 30.0 | 161.625700 |

不同出露草头高度 h_0 时, 对应的最大间距 l_{\max} 。

塔里木沙漠石油公路防沙工程中^[4], 芦苇沙障的出露草头高度 $h_0 = 15 \sim 20$ cm, 间距 $l = 100$ cm。本文给出的间距 l 的最大值在 81 cm 与 108 cm 之间, 二者基本一致。麦草沙障中^[3], 出露草头高度 h_0 平均为 13 cm, 按表一有关结果, 沙障间距 l 不应超过 70 cm。在固沙要求比较高的地段^[4], 沙障规格较小 ($l = 75$ cm), 理论与工程实际基本吻合。这说明本文提出的理论模型和分析方法是基本可行的, 可供设计、施工中参考。

致谢: 本工作得到周又和教授、凌裕泉研究员的热情帮助, 在此深表感谢!

参考文献(References):

- [1] 朱俊风, 朱震达. 中国沙漠化防治[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999. 129 - 132.
- [2] 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益[A]. 流沙治理研究[C]. 银川: 宁夏人民出版社, 1980. 49 - 59.
- [3] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 455 - 457.
- [4] 朱震达, 赵兴梁, 凌裕泉, 等. 治沙工程学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 96 - 116.
- [5] 刘贤万. 草方格沙障的风洞实验[A]. 流沙治理研究(二)[C]. 银川: 宁夏人民出版社, 1988. 326 - 334.
- [6] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 138 - 149.
- [7] Batchelor G K. An Introduction to Fluid Dynamics[M]. Cambridge University Press, 1967. 409 - 413.

A Simple Model for Calculating Measurements of Straw Checkerboard Barriers

WANG Zhen-ting, ZHENG Xiao-jing

(Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Straw checkerboard barrier is a kind of very useful barriers to reduce wind-blown sand transportation. According to the characteristics of the actual flow field in straw checkerboard barriers, a theoretical model, that is one-row-vortex model, is suggested to simulate the flow field in the straw checkerboard barriers. The measurements for one straw checkerboard barrier, such as its length and its height out of the sand bed, which have very important influence on the effect of the sand-breaks, are calculated by the model and hydrodynamic theory.

Key words: straw checkerboard barriers; hydrodynamics; theory model