

文章编号:1672-9331(2019)01-0001-09

# 黏性填土重力式路堤墙曲线破裂面主动土压力分析

杨和平, 林琳

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 挡土墙承受的主动土压力一直是土力学重要课题,但至今未见填黏土路堤墙曲线破裂面并计及填土开裂的土压力分析法。为此,借鉴已有旋轮线破裂面和直线破裂面计及开裂的两极限平衡层分法开展研究,以弥补这一缺陷。先在滑体土中取一微分薄层,通过单元土体静力平衡分析,导出任意墙背和填土面倾角、填土性质及墙土接触条件下土压力求解公式;然后研究墙顶填土开裂过程及深度算法,采用计算机编程求极值,进而建立曲线破裂面计及填土开裂的路堤墙主动土压力分析方法;分别对比不计填土开裂的旋轮线破裂面法和考虑开裂的改进层分法对各算例土压力分析结果,验证了本研究方法合理且优越;最后通过变填土黏性路堤墙实例分析,进一步验证了本研究方法的唯一合理性及适用范围,并提出目前工程中此类挡墙设计尚存问题及建议。

**关键词:** 路堤墙; 曲线破裂面; 黏土; 填土开裂; 层分法; 主动土压力

**中图分类号:** U416.12

**文献标识码:** A

## Analysis on active earth pressure of gravity embankment wall of cohesive backfill with curved failure surface

YANG He-ping, LIN Lin

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The active earth pressure subjected to retaining wall has always been an important subject of soil mechanics, but there is still no analysis on earth pressure for embankment wall of cohesive backfill of curved rupture surface with soil cracking considered. In order to remedy this defect, two limit equilibrium methods of the existing cycloid failure surface and plane failure surface with soil cracking considered were used for reference to carry out research. Firstly, a differential layer in slipping soil was taken, and the earth pressure formula for arbitrary inclination angle of retaining wall back and backfill soil surface, filling property and contact conditions between wall and soil was derived by the element static equilibrium analysis. Then, the cracking process of wall-top backfill and its depth algorithm were studied, and the extreme value was solved by computer programming, and further the active earth pressure analysis method for cohesive backfill on embankment wall of curved failure surface with soil cracking considered was established; the results of earth pressure analysis method of cycloid failure surface without filling cracks and the modified method of layer

收稿日期:2018-12-29

通讯作者:杨和平(1954—),男,湖南长沙人,长沙理工大学教授,博士生导师,主要从事路基路面工程和特殊土路基等方面的研究。E-mail:cscuyang@163.com

analysis with filling cracks were compared respectively in various examples, which proved that this method was reasonable and superior. Finally, the unique reasonability and application scope of this method are further verified via the example analysis of variable cohesive backfill on embankment toe retaining wall, which proposed the problems and suggestions for the design of such retaining wall.

**Key words:** embankment wall; curved failure surface; cohesive backfill; soil cracking; the method of layer analysis; active earth pressure

确定不同边界条件下挡土墙承受的土压力是个古老课题,目前的分析计算方法大致可归为三类:非极限平衡法、极限平衡法和有限单元法。其中最经典的是分析墙后滑裂土楔极限平衡状态的库伦理论,其建立基于两个重要基本假设:①验算挡墙抗滑、抗倾覆稳定性时,作用于墙背的主动土压应力沿墙高线性分布;②极限平衡状态下墙后填土中的破裂面为过墙踵的平面。此外,它只适合分析填料抗剪强度为摩擦角的砂性土。而在实际工程中,墙背承受的土压力并非均为线性分布,且在其作用下挡墙发生破坏时破裂土体的滑面通常也并非平面,它与墙体位移模式相关,多为曲线滑面,尤其当填料有足够黏聚性时,滑面应是曲面。因此,用库伦公式求算挡墙的主动土压力,墙后填料为黏土时存在明显的不合理性,这已是国内外研究者的共识。目前,我国高速公路仍在一些经济相对落后的山岭重丘区大量修建,当路线穿越平缓农田区时多采用坡脚墙支护填黏土高路堤通过,此时用库伦理论分析主动土压力显然不合适。因此,研究能真实反映填黏土重力式路堤墙受力特性,提出土压力非线性分布、破裂面为曲面并计及填土开裂的分析计算方法,具有重要的理论和工程价值。

众多学者对挡墙主动土压力非线性分布及破裂土体的滑面为曲面的性状,做过较深入的试验与理论研究。对于前者,1943年太沙基<sup>[1]</sup>在《理论土力学》一书中就指出,挡土墙的土压力呈非线性性质。1960年,卡岗在“论挡土墙上非线性分布土压力”一文中首次用水平层分析法研究砂性填土挡墙,得出土压沿墙高非线性分布的结论并得到试验验证。遵循这种思路及方法,不少学者进一步开展研究并不断完善。蒋蕊秋<sup>[2]</sup>用层分法推导出墙背竖直填土面倾斜砂性土主动土压力公式;姚代禄<sup>[3]</sup>将水平层法拓展到墙背倾斜填黏性土路

肩墙,并用实测数据验证了其合理性;王渭漳<sup>[4]</sup>进一步用层分法导出适合任意填土、墙背倾角、填土面倾角并计及墙土摩擦力及黏着力的主动土压力计算式;顾慰慈<sup>[5]</sup>考虑黏性填土开裂,用水平层法导出黏性土主动土压计算公式(即广义库伦理论);刘忠玉<sup>[6]</sup>假定土中滑面为过墙踵折线,将水平层法推广至分析分层填砂性土挡墙的主动土压力;周应英<sup>[7]</sup>开展填砂、黏性土挡墙在不同位移状况下的土压力试验,得到某些情况下主动土压力呈抛物线分布的结论;卢延浩<sup>[8]</sup>将开裂范围内的土体视为超载,采用朗金开裂深度计算式,导出填黏土挡墙的主动土压力计算方法。在此基础上,钟智勇<sup>[9]</sup>分析墙顶填土开裂过程,提出改进层分法,解决了原层分法中与实际不符的土压力为负和计算开裂深度偏大的问题。但上述研究均未摆脱库伦理论的固有缺陷——破裂面为平面的假设。对于后者,1954年茅以升<sup>[10]</sup>就指出,库伦理论关键矛盾之处在于滑面形状,要使土楔体在滑动面和墙背上同时具有滑动趋势,滑动面必须为曲面。1973年,H·B·Ellis<sup>[11]</sup>最先采用旋轮线破裂面评价渠坡的安全性并获得较满意的结果,为曲线破裂面分析土压力提供了新思路,后来一些学者将其引入挡墙土压力分析。1995年,曹振明<sup>[12]</sup>按旋轮线破裂面,用水平层法分析了俯斜式路肩墙填砂、黏性土时的主动土压力;2011年,王奎华<sup>[13]</sup>基于变分法推导出填土水平考虑超载作用挡墙的土中滑面对数螺旋面;2017年,杨明辉<sup>[14]</sup>基于室内试验,对墙后水平填有限宽度砂土的挡墙用水平层法分析主动土压力,也得出滑面对数螺旋面;同年,杨贵<sup>[15]</sup>假设极限状态下墙背竖直、水平填无黏性土挡墙为过墙踵的旋轮线滑面,分析得出主动土压力为非线性分布,经与实测数据对比,较库伦理论和 Paik 解更接近实际值。然而,以上方法均未考虑墙顶填土开裂时土、墙分离,且仅

限于求算填土面水平挡墙的土压力,不能用于实际工程中常见填黏土路堤墙的主动土压力分析。

综上所述,目前对挡墙土压力分布及破坏时滑面形状虽有较深认识,但仍缺乏能用于分析填黏土路堤墙相对完整又适用的主动土压力计算方法。为此,作者通过分析借鉴前人相关研究成果,将旋轮线破裂面模型拓展至填土面倾斜的路堤墙,使之可求算任意墙背、填土面倾角及墙土接触条件和填土性质的挡墙土压力;同时考虑墙顶黏性填土开裂的影响,将墙背土压为负深度内开裂土视为超载,动态分析开裂深度,导出旋轮线破裂面且计及填土开裂的主动土压力分析计算式。通过算例分别比较不计填土开裂旋轮线滑面算法和考虑开裂改进层分法对各算例墙分析结果与本研究方法的差异,检验本研究方法的合理与优越性。此外,再模拟分析一支护两级边坡高路堤及一单级边坡路堤两坡脚墙,通过改变填土黏性,用本研究与文献[16]提供的算法分别求算主动土压力,在研究土压力的变化规律的同时,检验所用方法的适应性,讨论此类挡墙工程设计中尚存的问题并给出建议。

## 1 分析路堤墙土压力旋轮线破裂面模型

文献[12]较深入研究了曲线破裂面主动土压力分布并获重要结论,即可用旋轮线破裂面分析俯斜式路肩墙主动土压力。文献[15]的实测数据也验证了其合理性。本研究将它拓展至实际工程的路堤墙土压力分析。

图 1(a)为分析模型坐标系,旋轮线数学方程为:

$$\begin{aligned} x &= R(\theta - \sin \theta), \\ y &= R(1 - \cos \theta). \end{aligned}$$

式中: $R$  为旋轮半径; $\theta$  为旋轮转角( $\theta \in [0, \pi]$ )。

图 1(b)中,路堤墙的高为  $H$ ,填土面倾角为  $\beta$ ,墙背倾角为  $\alpha$ ,旋轮线转至墙踵处的角度为  $\theta_0$ ,由几何关系可得旋轮半径为:

$$R = \frac{H(1 + \tan \alpha \tan \beta)}{(1 - \cos \theta_0) - \tan \beta(\theta_0 - \sin \theta_0)}. \quad (1)$$

旋轮线上任一点处的  $\theta$  为:

$$\theta = \arccos(1 - y/R). \quad (2)$$

因此,本模型的旋轮半径  $R$  由挡墙 3 个参数  $H$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  和墙踵处旋轮转角  $\theta_0$  确定。当 3 个参数

一定时,任取一  $\theta_0$  值,即可确定唯一旋轮线,由此旋轮破裂面即可求其对应的土压力。通过试算找出土压值最大的  $\theta_0$  即为临界旋转角  $\theta_c$ ,此时产生主动土压力滑体的破裂面。

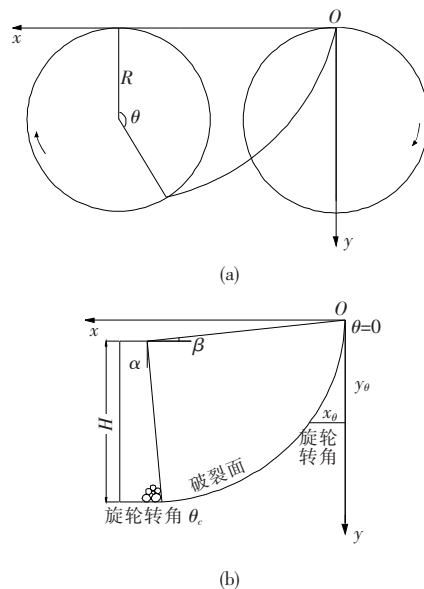


图 1 填土面倾斜的旋轮线破裂面模型

Fig. 1 Cycloid failure surface model of inclined fill surface

## 2 路堤墙主动土压力分析方法

### 2.1 不计填土开裂的墙背土压力

基本假定:①填土为均质且各向同性黏土;②土中滑面为旋轮破裂面;③土推墙向前平移;④ $c$ 、 $\varphi$ 、 $c'$ 、 $\delta$  均为常数且沿作用面均匀分布;⑤填土面倾角  $\beta \leq 34^\circ$  (坡率 1:1.5);⑥不计水的影响。

图 2 为旋轮破裂面填黏土路堤墙分析图示。设墙高为  $H$ 、墙背倾角为  $\alpha$ ,填土黏聚力为  $c$ 、内摩擦角为  $\varphi$ ,填土面倾角为  $\beta$ ,墙背与填土间黏着力为  $c'$ 、外摩擦角为  $\delta$ , $\gamma$  为填土容重, $q_0$  为填土面超载。

借鉴改进层分法<sup>[9]</sup>采用的微分薄层思路,视墙后破裂土楔为一刚体并作整体分析。取滑体中与填土面平行的一薄层作为微分单元体,考虑薄层端部附近墙背倾斜,土中竖向力无法继续下传,而离开墙背处的同一薄层上每一点到填土面的竖直高相等,故竖向土压可均匀向下传递。分析作用于单元体的水平力、竖向力及平衡力矩,建立计算墙背土压力的基本方程,具体步骤如下。

先不计填土开裂,设墙后滑动土体  $ABC$  处于极限平衡状态,在其中取一厚  $dy$  且平行填土面

AC 的微分薄层  $defg$  作静力平衡分析(见图 3), 将  $q$  沿垂直及平行于薄层上、下面分解。dy 足够小时, 旋轮线  $dg$  近似直线, 其斜率为  $\tan \psi$ , 易得  $\psi = 90^\circ - \theta/2$ <sup>[12]</sup>,  $dw$  为土层自重,  $b_1, b_2$  为微土层顶和底宽,  $p$  为墙背土压力,  $p_1$  为破裂面反力, 由几何关系得:

$$b_1 = \frac{\tan \alpha + \omega_1}{\cos \beta (1 - \tan \beta \omega_1)} H - \frac{\tan \alpha + \omega}{\cos \beta (1 + \tan \alpha \tan \beta)} y. \quad (3)$$

$$b_2 = b_1 - \frac{\sin(\alpha + \frac{\theta}{2}) \cos \beta}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)} dy. \quad (4)$$

式中:

$$\omega_1 = \frac{\theta_0 - \sin \theta_0}{1 - \cos \theta_0}, \quad \omega = \frac{\theta - \sin \theta}{1 - \cos \theta};$$

$$dw = \frac{1}{2} \gamma h_1 (b_1 + b_2) = \frac{1}{2} \gamma h_1 \left[ 2b_1 - \frac{\sin(\alpha + \frac{\theta}{2}) \cos \beta}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)} dy \right].$$

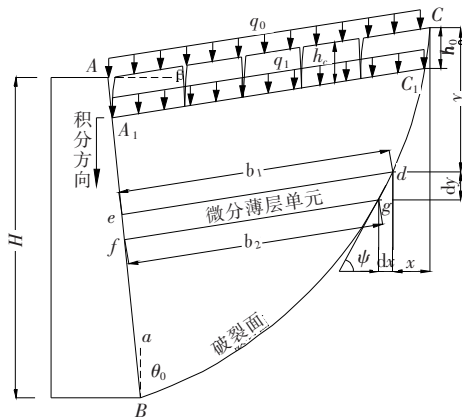


图 2 旋轮破裂面填黏土路堤墙分析图示

Fig. 2 Analysis figure of embankment wall with cohesive backfill of curved failure surface

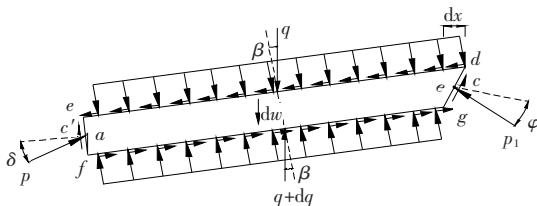


图 3 微分薄层受力分析

Fig. 3 Force analysis of differential layer

略去高阶无穷小项, 得:

$$dw = \gamma b_1 dy \frac{\cos(\theta/2 + \beta)}{\cos \theta/2}.$$

然后建立微分单元在  $x, y$  方向的平衡方程如下:

$\sum X = 0 (\rightarrow +)$ , 得:

$$p_1 = \frac{\cos(\alpha + \delta) \cos(\frac{\theta}{2} + \beta)}{\cos(\varphi + \frac{\theta}{2}) \cos(\alpha - \beta)} p + \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos(\frac{\theta}{2} + \varphi)} c - \frac{\sin \alpha \cos(\frac{\theta}{2} + \beta)}{\cos(\alpha - \beta) \cos(\varphi + \frac{\theta}{2})} c'. \quad (5)$$

$\sum Y = 0 (\uparrow +)$ , 得:

$$[p \sin(\alpha + \delta) + c' \cos \alpha] \frac{\cos(\frac{\theta}{2} + \beta) dy}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)} +$$

$$\left[ p_1 \sin(\frac{\theta}{2} + \varphi) + c \cos \frac{\theta}{2} \right] \frac{dy}{\cos \frac{\theta}{2}} -$$

$$qb_1 + (q + dq)b_2 - dw = 0$$

化简并代入式(5)得:

$$dq = \gamma \frac{\cos(\frac{\theta}{2} + \beta)}{\cos \frac{\theta}{2}} dy + (Nq - cV - c_1 V_1 - pG) \frac{dy}{b_1}. \quad (6)$$

式中:

$$G = \frac{\cos(\frac{\theta}{2} + \beta) \cos(\alpha + \delta) \left[ \tan(\frac{\theta}{2} + \varphi) + \tan(\alpha + \delta) \right]}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)};$$

$$V = 1 + \tan \frac{\theta}{2} \tan(\frac{\theta}{2} + \varphi);$$

$$V_1 = \frac{\cos \alpha \cos(\frac{\theta}{2} + \beta) \left[ 1 - \tan \alpha \tan(\frac{\theta}{2} + \varphi) \right]}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)};$$

$$N = \frac{\sin(\alpha + \frac{\theta}{2}) \cos \beta}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)}.$$

再对微破裂面  $dg$  边中点  $e$  做力矩平衡分析。

$\sum M=0$ (逆时针+),得:

$$\begin{aligned} & [-p \sin(\alpha - \beta + \delta) - \\ & c_1 \cos(\alpha - \beta)] \frac{b_1 + b_2}{2} \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right) dy}{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)} + qb_1 \cdot \\ & \left( \cos \beta \frac{b_1}{2} - \tan \frac{\theta}{2} \frac{dy}{2} \right) - (q + dq)b_2 \left( \cos \beta \frac{b_2}{2} + \right. \\ & \left. \tan \frac{\theta}{2} \frac{dy}{2} \right) + dw \frac{b_1 + b_2}{4} \cdot \cos \beta = 0. \end{aligned}$$

化简并略去高阶无穷小项,得:

$$dq = \gamma \frac{\cos\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2}} dy +$$

$$\begin{aligned} & \frac{2 \sin\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \cos^2 \beta - 2 \sin \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta \cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta)} \frac{q dy}{b_1} - \\ & \frac{2 \sin(\alpha + \delta - \beta) \cos\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right)}{\cos \beta \cos(\alpha - \beta) \cos \frac{\theta}{2}} \frac{p dy}{b_1} - \\ & \frac{2 \cos\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right)}{\cos \beta \cos \frac{\theta}{2}} \frac{c' dy}{b_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)一式(7)得:

$$p = Kq - Qc + Q_1 c_1. \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} K &= \frac{2 \sin \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta) - \sin\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \cos^2 \beta}{\cos\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right) \left\{ \cos \beta \cos(\alpha + \delta) \left[ \tan(\alpha + \beta) + \tan\left(\frac{\theta}{2} + \theta\right) \right] - 2 \sin(\alpha - \beta + \delta) \right\}}; \\ Q &= \frac{\cos \frac{\theta}{2} \cos(\alpha - \beta) \cos \beta \left[ 1 + \tan \frac{\theta}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2} + \theta\right) \right]}{\cos\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right) \left\{ \cos \beta \cos(\alpha + \delta) \left[ \tan(\alpha + \beta) + \tan\left(\frac{\theta}{2} + \theta\right) \right] - 2 \sin(\alpha - \beta + \delta) \right\}}; \\ Q_1 &= \frac{2 \cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha \cos \beta \left[ 1 - \tan \alpha \tan\left(\frac{\theta}{2} + \varphi\right) \right]}{\cos \beta \cos(\alpha + \delta) \left[ \tan(\alpha + \delta) + \tan\left(\frac{\theta}{2} + \varphi\right) \right] - 2 \sin(\alpha - \beta + \delta)}. \end{aligned}$$

式(8)为沿墙背高分布的土压强度,其中的  $q$  可由微分式(9)解得。

把式(8)代回式(6),得:

$$\frac{dq}{dy} = \gamma \frac{\cos\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2}} + \frac{D}{b_1} q + \frac{Bc - B_1 c_1}{b_1}. \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} D &= N - G \cdot K; B = Q \cdot G - V; \\ B_1 &= Q_1 \cdot G + V_1. \end{aligned}$$

至此导出填黏土路堤墙土压力求解公式,当  $\beta=0$  时,它与文献[12]的路肩墙土压力公式完全相同,初步验证了公式的推导正确。

## 2.2 填土开裂深度 $h_c$ 求解

由前导出公式,从上至下取微分薄层动态分析墙顶填土开裂过程,土压为负时表示墙背对该土层不再作用,将其作超载计入下一层的计算,直至墙背土压为正,此时累计转换的超载土层厚即

为开裂深度。

以下给出具体的分析过程。

设旋轮线顶  $C \sim C_1$  的竖向长度为计算开裂深度  $h_0$  (见图 2),则图 2 中  $A_1$  点处满足土压力为零,  $A_1 C_1$  面的上覆荷载即为等效超载:

$$q_1 = q_0 + r[h_0 - R(\theta_1 - \sin \theta_1) \tan \beta]. \quad (10)$$

式中:  $\theta_1$  为  $h_0$  处旋轮转动角,

$$\theta_1 = \arccos(1 - h_0/R). \quad (11)$$

将边界条件  $y=h_0$ 、 $q=q_1$ 、 $p=0$  代入式(8),得:

$$Kq_1 - Qc + Q_1 c_1 = 0. \quad (12)$$

此时土中开裂深度为:

$$h_c = h_0 - R(\theta_1 - \sin \theta_1) \tan \beta. \quad (13)$$

未知数  $h_0$  可由式(12)解出,但求算十分复杂,故用计算机编程进行。将解得的  $h_0$  带入式(10),即可求出  $q_1$ 。此后,墙背土压力计算从  $h_c$  开始,超载为  $q_1$ 。

## 2.3 土压力合力及其作用点位置

土压力的合力为:

$$E = \int_{h_c}^H \frac{p}{\cos \alpha} dy. \quad (14)$$

合力作用点到墙底之距为:

$$z = \frac{\cos \alpha \sum_{i=1}^n p_i z_i}{\sum_{i=1}^n p_i} = \frac{\cos \alpha \sum_{i=1}^n (n-i+\Delta y/2) p_i \Delta y}{\sum_{i=1}^n p_i}. \quad (15)$$

## 2.4 主动土压力求解方法及过程

理论上可由  $dE/d\theta=0$  求得临界旋转角  $\theta_c$  以及主动土压力  $E_a$ , 但由式(9)无法获得解析解, 故也只能借助计算机编程求解, 具体的实施步骤如下。

对于给定参数  $c, \varphi, c_1, \delta, \gamma, \alpha, \beta, q_0$  和  $H$  的挡墙, 任取一旋转角  $\theta_0$ , 由式(11)求出  $\theta_1$  及关于  $\theta_1$  的  $K, Q, Q_1, q_1$ , 并求得  $R, b, \omega_1$ , 带入式(10)、(12)、(13), 解出  $h_c$  及  $q_1$ , 然后由式(2)求出关于  $y$  的  $\theta$  值以及关于  $y$  的函数  $\omega, b_1, G, V, V_1, N, K, Q, Q_1, D, B, B_1$  值。将以上各函数代入式

(9), 用龙格库塔法求出对应于  $y$  点的  $q$  值, 再将其代入式(8), 求出各分布土压  $p$ , 再将  $p$  带入式(14), 即可求得土压合力值  $E$ 。

输入不同的  $\theta_0$  可求得不同的  $E$ , 将对应土压合力最大值的  $\theta_0$  作为临界旋转角  $\theta_c$ 。本研究采用 MATLAB 软件将此分析嵌套入一个  $\theta_0 \in (0, \pi)$ 、步长为  $1^\circ$  的循环过程完成(大量试算表明破裂角不会超此范围), 找出  $\theta_c$  即确定了极限破裂面。最后, 重复前述实施步骤, 求得该破裂面下主动土压力  $E_a$  及  $z$  值, 并根据需要绘出土压力沿墙高分布曲线。

## 3 算例分析

### 3.1 例 1

例 1 取自文献[12]。某路肩墙高  $H=10$  m, 填土容重  $\gamma=16$  kN/m<sup>3</sup>,  $q_0=0$ , 其余参数  $\varphi, \delta, \alpha, c, c'$  的意义同上文。

表 1 和图 4 给出了本研究方法与旋轮线法取不同  $\alpha, \delta, \varphi$  后的计算结果。

表 1  $c=0.63$  kPa,  $c'=0.42$  kPa 时本研究方法与旋轮线法计算结果

Table 1 Calculations of this paper method and the cycloid method under  $c=0.63$  kPa,  $c'=0.42$  kPa

$\alpha/$ ( $^\circ$ )	$\delta/$ ( $^\circ$ )	$\varphi/$ ( $^\circ$ )	旋轮线法			本研究方法			
			$\theta_c/(\text{^\circ})$	$E_a/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$	$\theta_c/(\text{^\circ})$	$h_c/\text{m}$	$E_a/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$
0	10	30	80	236.55	3.603	80	0.169 7	237.361 9	3.643 6
5	10	30	74	259.58	3.170	73	0.384 2	258.509 9	3.223 7
10	10	30	64	286.87	2.495	69	1.092 8	279.737 7	2.614 4
5	0	30	64	272.94	2.670	67	0.343 5	268.451 6	3.065 4
5	15	30	77	257.21	3.408	76	0.343 5	257.952 5	3.485 5
5	15	35	68	212.38	3.246	68	0.347 7	212.947 9	3.502 7
5	15	40	60	174.90	3.055	61	0.352 6	174.076 5	3.655 9
0	15	35	74	190.78	3.723	74	0.173 7	191.468 6	3.840 5
0	10	35	72	191.92	3.562	72	0.173 7	192.603 9	3.727 0

分析表 1 和图 4 可知, 两种方法各计算结果及土压分布非常接近, 且各项的消长相同: 其他参数一定时, 随着  $\alpha, \varphi$  的增大,  $z$  减小; 随着  $\delta$  的增大,  $z$  增大。本研究因考虑填土开裂, 故两者结果有细微差别,  $E_a$  最大误差仅为 2.6%, 在可接受范围之内, 再次验证了本公式的正确性。

### 3.2 例 2

例 2 取自文献[9]。某挡墙高  $H=10$  m, 墙背  $\alpha=5^\circ$ , 填土表面荷载  $q_0=20$  kPa, 填土容重为

17.2 kN/m<sup>3</sup>, 内摩擦角  $\varphi=20^\circ$ , 墙土间黏着力  $c'=c/2$ , 外摩擦角  $\delta=10^\circ$ 。

取不同  $c, \beta$  值进行计算, 本研究法与改进层分法所得结果见图 5 和表 2。

分析表 2 可知,  $c$  相同时, 本研究法所得开裂深度稍大,  $E_a$  及  $z$  随  $\beta$  的增大逐渐大于改进法的对应值;  $\beta$  相同时, 随着  $c$  的增大, 本研究法的开裂深度逐渐小于改进法的开裂深度,  $E_a$  及  $z$  逐渐增大; 且两者所得开裂深度、 $E_a, z$  的差异均随  $c$

的增大而变大,墙踵压力矩差值在 $-5\%\sim 3\%$ 之间; $\beta>1^\circ$ 后,本研究方法的 $E_a$ 和 $z$ 值分别均大于和小于改进法对应值; $c\geq 35\text{ kPa}$ 后,改进法土压

强分布线被本研究法的包围(见图 5)。这表明,分析当 $\beta=5^\circ$ 、 $c>30\text{ kPa}$ 后的挡墙主动土压力,本研究方法更合理可靠。

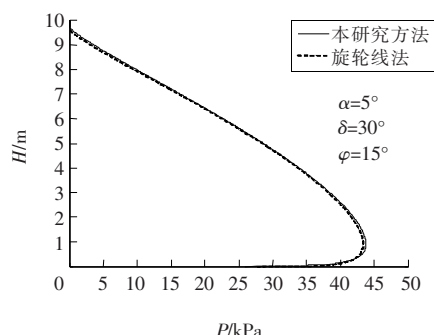


图 4 本研究方法与旋轮线法所得土压力分布对比  
Fig. 4 Comparison of earth pressure distribution by this paper method and the cycloid method

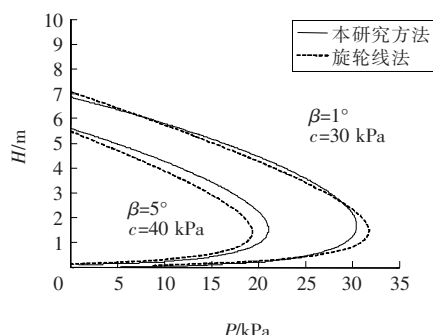


图 5 本研究方法与改进层分法所得土压力分布对比  
Fig. 5 Comparison of earth pressure distribution by this paper method and the modified method of layer analysis

表 2 不同  $c$  及  $\beta$  下本研究方法与改进层分法计算结果

Table 2 Calculations of this paper method and the modified method of layer analysis under different  $c$  and  $\beta$

$\beta/$ ( $^\circ$ )	$c/$ kPa	改进层分法				本研究方法				压力矩差值 <sup>[12]</sup> $\frac{E_{a,1}z_1 - E_{a,2}z_2}{E_{a,2}z_2}/\%$
		$\theta_a/$ ( $^\circ$ )	$h_c/$ m	$E_{a,1}/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$z_1/$ m	$\theta_c/$ ( $^\circ$ )	$h_c/$ m	$E_{a,2}/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$z_2/$ m	
1.0	30	37.9	2.915 1	143.623 7	2.748 3	89	3.084 9	143.042 0	2.769 9	-0.38
2.5	30	38.1	2.988 0	144.847 5	2.671 8	90	3.227 7	148.794 8	2.550 3	1.98
5.0	30	38.4	3.094 7	148.351 7	2.554 1	92	3.230 2	154.977 2	2.393 2	2.16
5.0	35	38.5	3.809 9	103.718 2	2.400 6	89	3.698 9	112.137 0	2.290 8	-3.08
5.0	40	38.5	4.519 1	65.818 3	2.303 6	87	4.309 2	75.272 3	2.118 1	-4.90

### 3.3 例 3(分别为 1 : 1.75 两级边坡和 1 : 1.5 单坡)

1) 某高填方路堤坡脚处设俯斜式挡墙(见图 6),上边坡高 8 m,坡率 1 : 1.5,下设 2 m 平台,墙顶后 1 : 1.75( $\beta=30^\circ$ );下边坡高  $L$ ,墙高 4.5 m,基础埋深 1 m, $\alpha=5^\circ$ ,坡面超载  $q_0=9\text{ kPa}$ (计网格梁或砌石护坡,取上覆荷载 50 cm 土层厚),黏性填料  $\gamma=17.2\text{ kN/m}^3$ ,取  $\varphi=15^\circ$ , $c'=c/2$ , $\delta=12^\circ$ 。

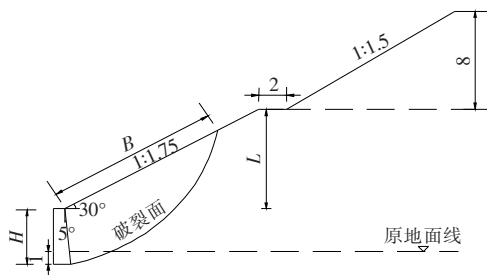


图 6 两级边坡路堤墙旋轮破裂面图示(单位:m)

Fig. 6 Figure of embankment wall with cycloid failure surface(Unit:m)

2) 有一单坡路堤(坡率 1 : 1.5, $\beta=34^\circ$ )设 3 m 高俯斜坡脚墙,基础埋深 1 m,其余设计分析参数同上。

工程中设计此类挡墙求算主动土压力,目前的方法仅手册<sup>[16]</sup>所提供的三种:①换算内摩擦角( $\varphi_0$ )法;②由力多边形法确定的主动土压力相关公式;③图解法。①法是将黏性填土的内摩擦角增大 $5^\circ\sim 10^\circ$ 后,不计黏土开裂按砂性土求 $E_a$ 值,为确保边坡土自身稳定,墙后填土坡必满足 $\beta\leq \varphi_0$ 。本算例填土的最大 $\varphi_0$ 为 $25^\circ<\beta$ ,故①法不可用。②、③法也都是建立在库伦理论基础上,且求算 $E_a$ 时均需先由公式 $[h_c=2c\tan(45^\circ+\varphi/2)/\gamma]$ 确定填土开裂深度,理论上两者求得的 $E_a$ 应完全相等。手册<sup>[16]</sup>表 3-2-4 编号 4 栏目下给出了此类墙的计算图式和相应参数确定公式,用计算机编程分析比图解法方便快捷,故算例 1)、2)采用本研究方法及手册<sup>[16]</sup>的②法分别求不同  $c$  值下的 $E_a$ 及其他参数,结果见表 3 和表 4。

表3  $\beta=30^\circ$ 、 $H=4.5\text{ m}$  时不同  $c$  下本研究与文献[16]法主动土压力分析结果

Table 3 Analysis of active earth pressure in this paper and literature16 under  $\beta=30^\circ$ ,  $H=4.5\text{ m}$  and different  $c$

$c/$ kPa	黏性土主动土压力计算公式 <sup>[16]</sup>					本研究方法				
	$\theta_a/(^\circ)$	$h_c/\text{m}$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$	$B/\text{m}$	$\theta_c/(^\circ)$	$h_c/\text{m}$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$	$B/\text{m}$
5	47.121 2	0.721 3	111.596 5	1.259 6	15.996 6	117.5	0.354 2	566.522 4	1.619 6	8.497 2
10	58.417 7	1.442 5	108.874 9	1.019 2	146.293 8	117.8	0.667 3	477.002 5	1.544 3	8.548 0
15	51.361 5	2.163 8	68.665 5	0.778 7	25.038 5	118.1	0.959 5	388.261 5	1.460 0	8.599 2
20	45.089 8	2.885 0	33.045 2	0.538 3	13.466 2	118.4	1.239 6	300.690 6	1.351 9	8.650 8
25	41.494 4	3.606 3	16.260 3	0.297 9	10.322 5	118.8	1.512 4	214.288 2	1.211 8	8.720 4
30	57.984 0	4.327 5	12.747 3	0.057 5	114.398 1	119.3	1.779 8	128.740 0	1.006 8	8.808 3
35	—	—	—	—	—	121.0	2.039 1	43.116 9	0.832 1	9.116 9
40	—	—	—	—	—	121.4	2.481 0	14.913 4	0.706 2	9.191 7
45	—	—	—	—	—	122.1	3.497 4	1.060 1	0.375 9	9.324 7
50	—	—	—	—	—	122.9	4.386 2	0.011 3	0.044 6	9.480 0

注:  $B$  为旋轮破裂面出口距墙顶边坡长; “—”表示在此  $c$  值下的填土开裂深大于墙高, 各参数计算已无意义。

表4  $\beta=34^\circ$ 、 $H=3\text{ m}$  时不同  $c$  下本研究与文献[16]法主动土压力分析结果

Table 4 Analysis of active earth pressure in this paper and literature16 under  $\beta=34^\circ$ ,  $H=3\text{ m}$  and different  $c$

$c/$ kPa	黏性土主动土压力计算公式 <sup>[16]</sup>					本研究方法				
	$\theta_a/(^\circ)$	$h_c/\text{m}$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$	$B/\text{m}$	$\theta_c/(^\circ)$	$h_c/\text{m}$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$z/\text{m}$	$B/\text{m}$
5	47.1	0.715 5	42.794 0	0.761 5	15.407 2	109.5	0.260 5	279.607 4	1.089 3	5.770 2
10	55.1	1.430 9	35.986 5	0.523 0	165.614 2	109.9	0.516 4	219.892 1	1.021 1	5.820 5
15	44.8	2.146 4	12.133 3	0.284 5	11.792 3	110.4	0.758 1	161.079 5	0.928 2	5.884 3
20	53.9	2.861 9	6.045 9	0.046 0	69.996 9	111.0	0.987 6	103.509 0	0.800 8	5.962 1
25	—	—	—	—	—	112.0	1.202 9	47.226 7	0.607 6	6.095 0
30	—	—	—	—	—	113.1	1.543 7	2.216 2	0.492 9	6.245 9

分析表3和表4可知: ①本研究方法求得的开裂深度远比手册<sup>[16]</sup>法的对应值小, 且随着  $c$  的增大, 两者之差变得越大; ②本研究方法求的  $E_a$  远大于手册<sup>[16]</sup>法所求的对应值(大4~16倍); ③本研究方法求得的土压力合力作用点均高于手册<sup>[16]</sup>法求得的对应点。这表明, 按手册<sup>[16]</sup>法设计此类挡墙偏危险且受填土黏性的影响更大。

对比表3和表4可知: ①随墙高降低和边坡率变陡, 本研究方法所得各值均减小; ②本研究方法分析4.5 m挡墙, 墙后填土高仅需 $\geq 5\text{ m}$ 即满足剪出口坡长( $B$ )在一级边坡内, 而墙高3 m时只需 $\geq 3.5\text{ m}$ ; 用手册<sup>[16]</sup>法分析, 算例1)、2)均出现  $B$  超一级坡范围(边坡高8 m, 坡比1:1.75和1:1.5的最大坡长为16 m和14 m); ③本研究方法分析的  $B$  值仅手册<sup>[16]</sup>法的3.5%~84.5%, 显然, 手册<sup>[16]</sup>法分析的滑动体过大, 在工程设计时不能

采用。

此外, 用改进层分法分析例3, 当 $\beta\geq 27^\circ$ , 其墙后填土中的  $B$  已超出一级边坡范围, 故求极值时不收敛。因此, 用旋轮破裂面算法<sup>[12]</sup>、改进层分法<sup>[9]</sup>及手册<sup>[16]</sup>法分析计算本算例均不合适。

## 4 结论

1) 从工程实际出发, 针对目前挡墙土压力计算采用手册<sup>[16]</sup>方法并不适合填黏土路堤墙的现状, 提出了旋轮线破裂面并计及填土开裂的主动土压力分析方法。受研究条件所限, 虽缺算例实测数据检验, 但所作探索仍有重要的理论意义和工程价值。

2) 算例1、2的分析表明, 本研究公式合理正确。由墙背滑面、墙顶填土面与土中滑面相交而



成的破裂棱体,当 $\beta > 1^\circ$ 后,含直线滑面的比含曲线滑面的小,故改进层分法计算的土压力偏小,当 $\beta = 5^\circ$ 、 $c > 30$  kPa后,本研究法求主动土压力更合理可靠。

3) 算例3的分析表明, $c > 30$  kPa后,手册<sup>[16]</sup>法所求的填土开裂深已大于墙高,在相同条件下,它求得的 $E_a$ 值只有本研究方法对应值的 $1/4 \sim 1/16$ ,对工程设计而言,严重偏于危险,加之其算得的破裂面剪出口远超一级边坡长,故已无实际应用价值。

4) 在算例3-1)条件下,本研究方法也只能求 $c \leq 50$  kPa的主动土压力,表明目前在此类挡土墙设计中,如何确定墙背主动土压力的问题并没有完全解决,而实际工程中黏性填土的 $c > 50$  kPa并非少见。

5) 根据本研究,要建立基于极限平衡法考虑填土开裂且能完整分析填黏土路堤坡脚墙主动土压力的方法,必须抛开两经典土压力理论,另辟蹊径开展试验与理论研究。

#### 〔参考文献〕

- [1] 太沙基.理论土力学[M].北京:地质出版社,1960.  
Terzaghi Theoretical soil mechanics[M].Beijing:China Geological Publishing House,1960.
- [2] 蒋苑秋.挡土墙土压力非线性分布解[J].土木工程学报,1964(1):56-65.  
JIANG Chun-qiu. Non-linear distribution of earth pressure on retaining wall[J].China Civil Engineering Journal,1964(1):56-65.
- [3] 姚代禄.挡土墙土压力非线性分布的研究[J].重庆交通学院学报,1984(3):40-47.  
YAO Dai-lu. Studies on non-linear distribution of earth pressure on retaining wall [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,1984(3):40-47.
- [4] 王渭漳.黏性土对挡墙侧压力的非线性分布[J].中南公路工程,1986(2):28-45.  
WANG Wei-zhang. Non-linear distribution of lateral pressure of cohesive soil to retaining wall[J].Central South Highway Engineering,1986(2):28-45.
- [5] 顾慰慈.挡土墙土压力计算手册[M].北京:中国建材工业出版社,2005.  
GU Wei-ci. Computation Handbook of earth pressure on retaining walls[M]. Beijing: China Building Materials Press,2005.
- [6] 刘忠玉,马德遂,何盛东.层状填土的主动土压力计算[J].郑州大学学报,2004(3):56-59.  
LIU Zhong-yu, MA De-sui, HE Sheng-dong. Active earth pressure acting on retaining walls with layered backfills[J]. Journal of Zhengzhou University, 2004 (3):56-59.
- [7] 周应英,任美龙.刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J].岩土工程学报,1990(2):19-26.  
ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1990(2):19-26.
- [8] 卢廷浩.考虑黏聚力及墙背黏着力的主动土压力公式[J].岩土力学,2002(4):470-473.  
LU Ting-hao. A formula of active earth pressure including cohesion and adhesion[J]. Rock and Soil Mechanics,2002(4):470-473.
- [9] 钟智勇.黏性填土重力式挡墙土压力计算方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.  
ZHONG Zhi-yong. Research on calculating methods of earth pressure on gravity retaining wall with cohesive backfill[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology,2007.
- [10] 茅以升.挡土墙土压力的两个经典理论中的基本问题[J].土木工程学报,1954(3):249-282.  
MAO Yi-sheng. Some apparent discrepancies in Coulomb's theory and unjustifiable questions about Rankine's theory for earth pressure on retaining walls[J]. China Civil Engineering Journal,1954(3):249-282.
- [11] Ellis H B. Use of cycloidal arcs for estimating ditch safety[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div,1973(99):165-179.
- [12] 曹振民.挡土墙填土曲线破裂面主动土压力分析[J].中国公路学报,1995(S1):7-14.  
CAO Zhen-ming. Analysis of active earth pressure of back fill on retaining wall with curved rupture surface[J]. China Journal of Highway and Transport,1995(S1):7-14.
- [13] 王奎华,马少俊,吴文兵.挡土墙后曲面滑裂面下黏性土主动土压力计算[J].西南交通大学学报,2011,46(5):732-738.

(下转至第57页)

- 2014;356-362.
- YUAN Ai-ming, QIAN Shou-long, ZHOU Yuan-hua, et al. Numerical simulation of prefabricated box girder with mixed beam matching of internal and external tendons[A]. Chinese Society of Civil Engineering. Proceedings of the 21st National Conference on Bridges; volume one[C]. Beijing: China Communications Press, 2014;356-362.
- [8] 郑伟, 吴毅彬, 袁鑫, 等. 体外预应力索加固大跨径连续刚构桥空间受力计算分析[J]. 公路, 2014(1):26-30.
- ZHENG Wei, WU Yi-bin, YUAN Xin, et al. Calculation and analysis of spatial forces of long span continuous rigid frame bridges strengthened by external prestressed cables[J]. Highway, 2014(1):26-30.
- [9] 陶庆东, 刘跃国. 体内体外混合预应力配束连续刚构桥力学性能对比分析[J]. 施工技术, 2017, 46(2):63-68.
- TAO Qing-dong, LIU Yue-guo. Comparative analysis of the mechanical properties of the in-vivo and in-vitro mixed prestressed continuous rigid frame bridge[J]. Construction Technology, 2017, 46(2):63-68.
- [10] 李传习, 夏桂云, 贺玲凤, 等. 体外预应力混凝土梁有限元分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2003, 31(S1):104-106.
- LI Chuan-xi, XIA Gui-yun, He Ling-feng, et al. Finite element analysis of externally prestressed concrete bridge[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 31(S1):104-106.
- [11] 颜东煌, 田仲初, 李学文. 桥梁结构电算程序设计[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1999.
- YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, LI Xue-wen. Design of computing for bridge structures program [M]. Changsha: Hunan University Press, 1999.
- [12] 颜东煌, 田仲初, 李学文, 等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2):55-58.
- YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, LI Xue-wen, et al. Finite element method and application for the shrinkage and creep of concrete bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2):55-58.
- [13] 邓继华, 邵旭东, 谭平. 几何非线性与徐变共同作用下三维杆系结构有限元分析[J]. 工程力学, 2015(6):117-123.
- DENG Ji-hua, SHAO Xu-dong, TAN Ping. Finite element analysis for 3-D frame structures under combined actions of geometric nonlinearity and creep [J]. Engineering Mechanics, 2015(6):117-123.
- [14] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988:291-297.
- FAN Li-chu. Prestressed concrete continuous beam bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1988:291-297.
- [15] 王书庆. 徐变自动增量分析方法及其在BRCAD系统中的实现[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会一九九九年桥梁学术讨论会论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 1999:822-826.
- WANG Shu-qing. The method of automatic incremental creep analysis and its realization in BRCAD system[A]. Proceedings of the Bridge Symposium 1999, Bridge and Structural Engineering Society of China [C]. Beijing: China Communication Press, 1999:822-826.

## (上接第9页)

- WANG Kui-hua, MA Shao-jun, WU Wen-bin. Active earth pressure of cohesive soil backfill on retaining wall with curved sliding surface[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5):732-738.
- [14] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华. 曲线滑裂面下有限宽度填土主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(7):2029-2035.
- YANG Ming-hui, DAI Xia-bin, ZHAO Ming-hua. Calculation of active earth pressure for limited soils with curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7):2029-2035.
- [15] 杨贵, 王阳阳, 刘彦辰. 基于曲线滑裂面的挡墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8):2182-2188.
- YANG Gui, WANG Yang-yang, LIU Yan-chen. Analysis of active earth pressure on retaining walls based on curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8):2182-2188.
- [16] 交通部第二公路勘察设计院著. 公路设计手册: 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- Second Highway Survey and Design Institute of the Ministry of Communications. Highway design handbook: subgrade[M]. Beijing: China Communication Press, 1996.