

DOI: 10.11779/CJGE202201018

# 传递最大推力的不平衡推力法

陈文胜, 戴嘉宁, 蒋茂林, 李颖豪, 梁 瑶

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 不平衡推力法因其计算模型简便, 计算过程可以显式完成, 并且可以计算边坡整体的滑坡推力, 在边坡分析与设计领域应用较广。条分法力学模型是一静不定模型, 经各种简化而产生现有的各种条分方法, 其中包括不平衡推力法。而作为静不定模型, 条分法理论上有无数个满足平衡条件的解。而从这无数解中, 应有更加合理和更有代表性的解存在, 如具有较小安全系数的解。根据不平衡推力法的思路, 遵循极限状态法设计计算的原则, 拟通过找到条间传递最大条间力也即最大推力作为解答。本文的解答在边坡取整体安全系数的前提下, 确保条间剪力不超出其条间的抗剪强度, 让条块之间以最大条间力进行传递。通过理论分析和算例计算表明: 相较于传统不平衡推力法, 本文方法在满足极限平衡条件的前提下, 可求得边坡对应滑动面的更大的滑坡推力, 并获得较传统方法更小的安全系数。本文工作是对传统不平衡推力法的一个重要和有益的改进。

**关键词:** 边坡; 不平衡推力法; 条间力; 改进方法

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)01-0181-06

作者简介: 陈文胜(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: 13319504070@126.com。

## Imbalance thrust force method for transferring the maximum thrust force

CHEN Wen-sheng, DAI Jia-ning, JIANG Mao-lin, LI Ying-hao, LIANG Yao

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The imbalance thrust force method (ITFM) is widely applied in the field of slope analysis and design because of its simple model, explicit calculation process and ability to calculate the overall landslide thrust. Because the mechanical model of the slice method is a statically indeterminate model, the existing slice methods are derived from various simplifications, including ITFM. As a statically indeterminate model, the slice method theoretically has innumerable solutions satisfying the equilibrium conditions. Among these innumerable solutions, there are reasonable and more representative solutions, such as the solution with smaller safety factor. According to the idea of ITFM and following the principle of the limit state method for design and calculation, this study tries to find the maximum force between slices for ITFM solution, that is, the maximum thrust force. Under the premise of taking the overall safety factor of slope, the solution of this study ensures that the shear force between the slices does not exceed the shear strength between the slices, so that the maximum inter slice force can be transferred between the slices. The theoretical analysis and example calculation show that compared with the traditional ITFM, the improved method can obtain a larger landslide thrust of the corresponding sliding surface of the slope under the premise of meeting the limit equilibrium condition, and obtain a smaller safety factor than the traditional ITFM. This study is an significant and useful improvement on the traditional ITFM.

**Key words:** slope; imbalance thrust force method; inter-slice force; improvement method

## 0 引言

众所周知, 条分法<sup>[1-4]</sup>力学模型是一静不定模型, 经各种简化而产生现有的各种条分方法, 而作为静不定模型, 条分法理论上有无数个满足平衡条件的解。尽管满足极限平衡条件的解有无数多个, 但并不是所有的解都属于有效解, Morgenstern 和 Price 最早指出, 极限平衡条分法<sup>[4-5]</sup>所获得的解必须要满足两个合理性条件: ①条块之间不能产生拉应力, 条间力的作用

点必须落在条块侧面以内; ②作用于条块之间的条间剪力不能超过莫尔库仑强度准则提供的极限抗剪强度。根据各类方法对合理性条件的满足情况的相关研究<sup>[6]</sup>可知, 部分被大众广泛使用的计算方法实际上并不能很好满足边坡合理性条件, 比如传统不平衡推力法以及与假定条件相类似的美国陆军工程师法和罗厄

法在部分情况下无法满足条件②，这导致在一些特殊工况下使用该类方法可能会出现较大误差。

如何在这无数满足平衡条件的解答中寻找更加合理和更有代表性的解，仍是条分法研究的一个目标。虽然自条分法提出以来，通过不同简化已发展出很多条分法，如人们熟悉的 Bishop 方法<sup>[2]</sup>、Janbu 方法<sup>[3]</sup>等，但很少有人思考简化的目标是什么？简化手段不应该仅仅是为了获得静定解。如果将条分后的滑坡体看作是由若干条块组成的一个结构，那么按极限状态法设计计算的原则，更需要去考虑一些极限状态。如什么简化方法可以使滑动面具有更小乃至最小的安全系数？何种情况会出现更大或最大的滑坡推力？笔者认为，寻找可能存在的最不利工况或受力状态，进而获得可能存在更小的安全系数，也即在寻找极限状态的前提下对条分法模型进行简化，是条分法研究今后需要考虑的重点问题之一。

不平衡推力法<sup>[6-7]</sup>是由中国工程技术人员，以计算边坡滑坡推力为目的，通过长期的工程实践，在深入分析和总结之后，提出来的一种边坡稳定性分析方法。其中郑颖人等<sup>[7-8]</sup>、张鲁渝等<sup>[9]</sup>、时卫民等<sup>[10]</sup>讨论了不平衡推力法在计算时存在的问题，利用岩土学术界公认精确度高的 Morgenstern-Prince 法作为参考，通过对多个边坡的计算分析，发现不平衡推力法在计算折线形边坡时的误差较大，在计算圆弧形边坡时，相较于 M-P 法误差小于 3%<sup>[10]</sup>，并且可能出现条间剪力超出条间的抗剪强度的不合理现象。

为了寻找比传统不平衡推力法更优的解答，本文遵循极限状态法设计计算的原则，从最直接的物理意义出发，试图通过让条间传递最大推力，在计算条间推力时始终按照条块可能得到的最大推力进行传递，物理意义清晰，有望求到更大的边坡滑坡推力，并获取较小的安全系数。

## 1 传递最大推力的不平衡推力法模型

### 1.1 条间传递最大推力模型的提出

各种简化的条分方法，其简化手段主要可以分两类：①规定常安全系数或整体安全系数，即发挥滑动面抗滑力的  $1/F_s$ ；②就是对条间力的简化。由于现行的主要分析方法大多按整体安全系数假定，所以各简化方法实质上的差异在于条间力的简化。条间力简化的目的，就是希望通过简化，将静不定问题转化为静定问题，从而可以求到一个静定解。但实质上，通过简化求到的静定解，只是无数可能的平衡解中的一个。它是否代表最危险的或者对边坡受力最不利的情况，现有的研究并无法判断。传统的不平衡推力法也是属于条分法的一种，其所求到的每个条块的不平衡推力，

实质就是条间力。该方法对条间力所做的假设，实质是规定了其条间力合力的方向。传统不平衡推力法的介绍请参阅有关文献[11, 12]。

如果将条分后的滑坡体看作是由若干条块组成的一个结构，那么按极限状态法设计计算的原则，更需要去考虑一些极限状态。从求解边坡最小安全系数的角度出发，强调求解边坡的最小安全系数和其对应的最危险滑动面，就是在求解整个边坡的极限状态。从这一原则出发，条间力的简化应该从如何能使边坡产生最不利受力状态的角度来考虑，期望能求到比现有传统方法更小的安全系数或滑坡推力。

基于上面的分析，从直观的物理概念出发，比较传统不平衡推力法，如果条间的推力或条间力，是以可能产生的最大的推力来进行传递，这对边坡的滑动将会产生更不利的因素。从寻找最不利的受力情况出发，如果每次传递都按可能产生的最大推力传递给下一个条块，将可能会是要考虑到的边坡的最危险的受力传递情况，对边坡的治理有重要的意义。

改进的方法一般不容易被接受，但如果这一改进对传统方法的解答有明显的进步，那么这一改进就应该被关注。对于传统不平衡推力法的改进，两个重要指标可以进行比较，一是安全系数，其二是边坡最终的滑坡推力。

### 1.2 安全系数定义

传递最大推力的方法其安全系数与传统的推力法安全系数的定义相同，都是反映边坡抗力储备的折减系数，在计算安全系数时，除了要对底面抗滑力进行折减，同时可以对条块侧边剪切强度进行折减，但规定条间剪应力最大不超过抗剪强度发挥的  $1/F_s$ 。文献[6]指出，根据边坡稳定性分析的合理性条件，条间剪力的安全系数必须要大于等于条块底面的安全系数。

对于安全系数的定义，文献[13]指出，尽管安全系数在概念上是局部的，但在建立极限平衡法时，通常都将安全系数视为一个常数，这实际上是极限平衡法引入的又一假定。一般说来，要求所引入的假定在力学上合理，在数量上刚好能够求解出这个力系，例如文献[14]中安全系数定义就是对整个边坡而言，任意点的任意方向都是按同一个安全系数进行折减。

### 1.3 条间最大推力计算的力学模型

一般认为，条分法单个条块待定的未知量有：条块底面法向力  $N_i$ 、条块底面剪力  $T_i$ 、条间法向力  $E_i$  和其作用点条间剪切力  $X_i$ ，共 5 个未知量。

根据莫尔库仑强度准则，底面剪力  $T_i$  与条间剪力  $X_i$  可以分解为黏聚力项  $T_i^c$ ,  $X_i^c$  和摩擦力项  $T_i^f$ ,  $X_i^f$  两个部分，图 1 所示的模型即为分解剪力后的单个条块受力示意图。

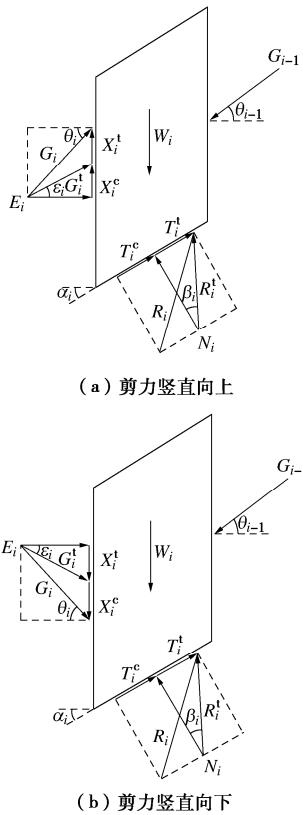


图1 条块力学模型

Fig. 1 Mechanical model of a slice

受力分析如下:

(1) 条块重力  $W_i$  和上一条块传递的推力  $G_{i-1}$  为已知量, 其大小和方向均已知。

(2) 条块底面法向力  $N_i$ , 方向已知, 大小未知, 同理条间法向力  $E_i$  方向已知大小未知。

(3) 底面抗滑力  $T_i$  分解成黏聚力项  $T_i^c$  和摩擦力项  $T_i^t$ , 在指定安全系数折减的情况下,  $T_i^c$  的方向和大小均已知,  $T_i^t$  的方向已知, 但大小未知。 $T_i^t$  与底面法向力  $N_i$  的合力为  $R_i^t$ 。

条块底面抗滑力黏聚强度  $T_i^c$ :

$$T_i^c = \frac{c_i l_i}{F_s} , \quad (1)$$

式中,  $c_i$  为土体黏聚力,  $l_i$  为条块底边长。

条块底面抗滑力摩擦强度  $T_i^t$ :

$$T_i^t = \frac{N_i \tan \varphi_i}{F_s} , \quad (2)$$

式中,  $\varphi_i$  为土体内摩擦角。

$R_i^t$  与  $N_i$  的夹角  $\beta_i$ :

$$\beta_i = \arctan \frac{\tan \varphi_i}{F_s} . \quad (3)$$

(4)  $G_i$  为条间法向力  $E_i$  与  $X_i$  的合力, 即为待求的条块  $i$  推力。

(5) 条间剪力满足合理性要求:

$$X_i \leq \frac{c_i h_i + E_i \tan \varphi_i}{F_s} , \quad (4)$$

式中,  $h_i$  为条块左侧边长。

考虑条块的静力平衡, 在给出试算的安全系数  $F_s$  时, 将图 1 条块受力分成 3 部分: ①将条块重力  $W_i$ 、上一条块推力  $G_{i-1}$ 、条块底面的黏聚力项  $T_i^c$  的合力, 及其他已知的作用在该条块上的外力, 组成合力  $P_i$ 。由于以上各分力均为已知, 故  $P_i$  的大小、方向可以确定。②条块底面摩擦强度部分  $T_i^t$  与底面法向力  $N_i$  的合力  $R_i^t$ 。根据式(3), 其方向已知, 但大小未知。③条间力  $G_i$ , 待求。

根据上述给出的 3 部分力, 实质就是 3 个力矢量。参照库仑土压力求解时的力三角形方法, 可以做出力矢量三角形, 见图 2。图 2 中, 从  $O$  点任意方向做条间力线  $OB$  (或  $OC$ ), 与已知大小和方向的  $P_i$  和已知方向的  $R_i^t$  形成一封闭的力三角形  $OAB$  (或  $OAC$ )。由于要满足条间剪切力合理性要求式(4), 条间力的方向只能限制在某一角度范围内, 假设为图 2 所示的  $OB$  和  $OC$  矢量之间。从力三角形几何性质知道, 可能的最大推力  $G_i$  将是图中  $OB$  和  $OC$  中的较长者<sup>[15]</sup>。在  $OA$  已定,  $AC$  (或  $AB$ ) 方向已知的情况下,  $OB$  或  $OC$  的长度值就是在式(4)等式成立时, 也即条间力在合理性条件下的极限情况的取值。

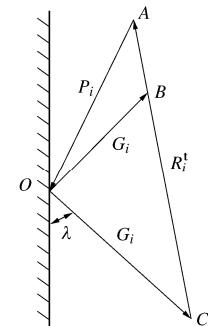


图2 力三角形

Fig. 2 Force triangle

以  $OC$  长度为例, 设  $OC$  与竖直线夹角为  $\lambda$ ,  $\lambda$  越小, 则  $OC$  越长, 则所得的条间力也即不平衡推力越大。但合理的条间力取值应该满足如下约束条件:

$$G_i \cos \lambda \leq \frac{c_i h_i + G_i \sin \lambda \tan \varphi_i}{F_s} . \quad (5)$$

令式(5)等式成立时, 则达到夹角  $\lambda$  的取值边界。式(5)中有两个待求量, 即夹角  $\lambda$  和不平衡推力  $G_i$ 。此时根据力三角形  $OAC$  几何性质, 引入正弦定理, 可得到另一等式, 结合式(5), 理论上即可求到夹角  $\lambda$  和最大不平衡推力  $G_i$ 。因为最大不平衡推力  $G_i$  是当式(5)等式成立时求到的, 说明当条间剪力发挥条间抗剪强度的  $1/F_s$  时, 条间传递最大不平衡推力。

当条间剪力发挥条间抗剪强度的  $1/F_s$  时, 条间剪

力  $X_i$  的黏聚力项  $X_i^c$  大小方向均已知, 摩擦力项  $X_i^t$  的方向已知, 大小未知,  $G_i^t$  为条间法向力  $E_i$  与  $X_i^t$  的合力。

条间剪力的黏聚强度  $X_i^c$ :

$$X_i^c = \frac{c h_i}{F_s} , \quad (6)$$

条间剪力的摩擦强度  $X_i^t$ :

$$X_i^t = \frac{E_i \tan \varphi_i}{F_s} , \quad (7)$$

$G_i^t$  与  $E_i$  的夹角  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \arctan \frac{\tan \varphi_i}{F_s} . \quad (8)$$

#### 1.4 图解法求解最大不平衡推力

通过对图 2 力三角形建立直角坐标系, 以力矢量  $OA$  和  $OB$  (或  $OC$ ) 的交点  $O$  为坐标系原点, 见图 3。利用直线方程求交点坐标的方法可以便捷的求得  $OB$  (或  $OC$ ) 的长度, 也即式(5)的等式解。 $OB$  和  $OC$  长度值的较大者即为最大不平衡推力。

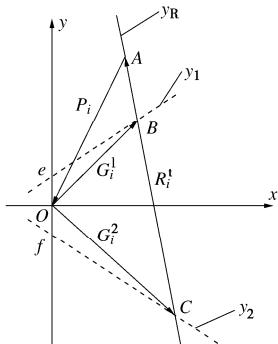


图 3 求解步骤示意图

Fig. 3 Diagram for solution

具体的作图求解步骤如下:

(1) 确定  $A$  点的坐标

$A$  点的坐标是由已知量合力  $P_i$  的大小与方向决定的。将  $W_i$ ,  $G_{i-1}$ ,  $T_i^c$  分别在  $x$  和  $y$  轴上投影并叠加, 即可得到点  $A$  的坐标 ( $A_x$ ,  $A_y$ ):

$$A_x = G_{i-1} \cos \theta_{i-1} - T_i^c \cos \alpha_i , \quad (9)$$

$$A_y = W_i + G_{i-1} \sin \theta_{i-1} - T_i^c \sin \alpha_i . \quad (10)$$

(2) 确定  $R_i^t$  的直线方程

$R_i^t$  为  $T_i^t$  与底面法向力  $N_i$  的合力, 由于  $N_i$  的大小未知,  $R_i^t$  实际上就是关于  $N_i$  的函数, 根据力三角形的作图原理,  $R_i^t$  所在的直线  $y_R$  经过  $A$  点, 因此只需确定  $y_R$  的斜率即可确定该直线方程。

已知  $R_i^t$  与  $N_i$  的夹角为  $\beta_i$ , 可得  $R_i^t$  与  $y$  轴的夹角为  $\beta_i - \alpha_i$ 。 $R_i^t$  的直线方程  $y_R$  的斜率为

$$k_R = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \beta_i + \alpha_i \right) , \quad (11)$$

可得直线方程:

$$y_R = k_R (x - A_x) + A_y . \quad (12)$$

(3) 确定辅助线方程  $y_1$ ,  $y_2$

根据前文分析可知, 在求解最大推力时,  $G_i^t$  与  $N_i$  的夹角  $\varepsilon_i$  是已知的。作与  $x$  轴夹角为  $\pm \varepsilon_i$  的两条辅助线  $y_1$ ,  $y_2$ , 分别对应图 1 中 (a), (b) 两种情况。辅助线  $y_1$ ,  $y_2$  上的任意点与原点  $O$  连线形成的力矢量, 达到条间剪切力合理性条件。

当条块土层为无黏性土, 即  $X_i^c$  为零时, 需要让  $y_1$ ,  $y_2$  过  $O$  点。

当条块土层为黏性土, 即  $X_i^c$  不为零时, 必须使得  $y_1$ ,  $y_2$  经过  $y$  轴上  $\pm X_i^c$  两点, 即  $y_1$ ,  $y_2$  分别过  $e$ ,  $f$  点。

此时过原点  $O$  做  $y_1$ ,  $y_2$  与  $y_R$  的交点的连线, 即为条块可能的最大推力矢。

根据  $G_i^t$  与  $E_i$  的夹角为  $\varepsilon_i$ , 可得  $y_1$ ,  $y_2$  的斜率为

$$k_{1,2} = \pm \tan \varepsilon_i . \quad (13)$$

可得  $y_1$ ,  $y_2$  直线方程

$$y_1 = x \tan \varepsilon_i + X_i^c , \quad (14)$$

$$y_2 = -x \tan \varepsilon_i - X_i^c . \quad (15)$$

(4) 确定  $B$  点和  $C$  点的坐标

$B$  点和  $C$  点的坐标是直线  $y_R$  与直线  $y_1$  和  $y_2$  的交点, 而  $OB$ ,  $OC$  则代表在条间剪力不超过条间合理性条件下有可能的最大不平衡推力。

$B$  点  $x$  坐标为

$$B_x = \frac{A_x k_R - A_y + X_i^c}{k_R - \tan \varepsilon_i} , \quad (16)$$

$C$  点  $x$  坐标为

$$C_x = \frac{A_x k_R - A_y - X_i^c}{k_R + \tan \varepsilon_i} . \quad (17)$$

将  $B$ ,  $C$  点的  $x$  坐标代入到  $y_R$  中即可求出  $B$ ,  $C$  点的  $y$  坐标。

(5) 确定  $G_i^1$  和  $G_i^2$  的较大值

$B$ ,  $C$  点与  $O$  点的连线即为  $G_i^1$  与  $G_i^2$ 。通过  $B$ ,  $C$  点的坐标即可求出  $G_i^1$ ,  $G_i^2$  的值, 最后对比取两者中的较大者, 即为条块  $i$  传递给下一条块的最大不平衡推力矢。

显然, 折减系数  $F_s$  的调整会使得整个条块的受力重新分布, 通过图解法求解确保  $G_i$  能够一直取得最大值, 满足条间力合理性条件。这种相邻两个条块之间按照最大条间力传递的方法, 当对某一具体安全系数做滑坡推力计算时, 由于传递的力的累积效应, 计算到最后一个条块时, 将较传统不平衡推力法得到边坡更大的剩余滑坡推力。

安全系数的求解与传统不平衡推力法的隐式解法相同, 都是以  $G_n=0$  为边界条件, 不断试算  $F_s$ 。

## 2 算例分析

### 2.1 人工算例分析

为了更加直观地体现传递最大推力的改进方法的计算过程及特点, 通过图 4 简单边坡做一人工算例进行分析。

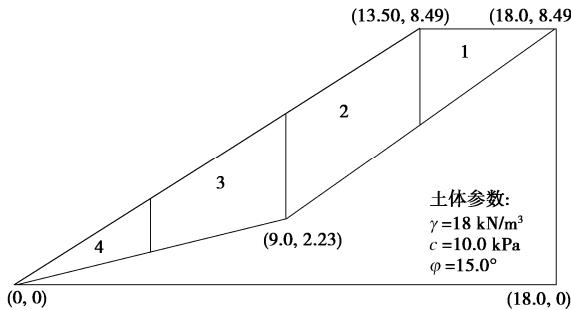


图 4 算例模型一

Fig. 4 Example model 1

分别通过传统不平衡推力法和改进方法在指定折减系数为 1.5 的情况下计算条块推力。表 1 为推力计算过程。表 2 为常见方法对算例 1 计算得到的最小安全系数。

表 1 计算过程

Table 1 Calculation process

编 号	条重 $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\alpha$ $(^{\circ})$	$l/\text{m}$	$h/\text{m}$	$G_{\text{推}}/\text{kN}$	$G_{\text{改}}/\text{kN}$
#1	126.85	34.86	5.48	3.13	17.36	40.71
#2	265.90	34.86	5.48	3.44	93.82	130.21
#3	208.58	13..91	4.63	1.72	76.69	108.86
#4	69.53	13.91	4.63	0	50.45	78.87

表 2 安全系数

Table 2 Safety factors

不平衡推力法	工程师团法	M-P 法	本文方法
1.284	1.278	1.264	1.149

根据表 2 安全系数计算结果可知不平衡推力法计算出的安全系数要高于 M-P 法与改进方法的计算结果。表 1 的计算过程表明, 在指定折减系数为 1.5 时, 通过改进方法计算出的每一个条块的推力都要比传统不平衡推力法的推力大。

### 2.2 多折线滑动面算例分析

根据改进方法的计算原理编制了相应的滑坡稳定性分析程序, 本文方法适用于任意形状滑动面, 为了检验该法是否能在滑动倾角变化的情况下保持计算精度, 现假定一均质土坡, 将圆弧滑动面的 2、4、8 等分点作为折线形滑动面的控制点, 连接这些控制点就形成 3 条不同的折线滑动面, 几何参数与土层参数如图 5 所示, 3 条不同滑动面倾角的平均变化量依次为  $37.0^{\circ}$ ,  $18.5^{\circ}$ ,  $9.2^{\circ}$ 。

分别采用不同的分析方法计算安全系数结果见表 3, 表 4 为指定安全系数为 2.5 时, 使用传统不平衡推力法和本文方法求解最后条块剩余推力的结果。

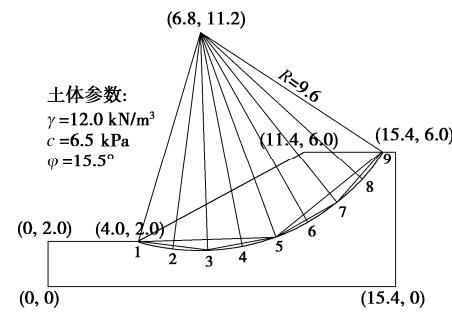


图 5 算例模型二

Fig. 5 Example model 2

表 3 安全系数

Table 3 Safety factors

滑动面	不平衡推力法	M-P 法	本文方法
2 分滑动面	2.306	2.044	1.512
4 分滑动面	1.952	1.874	1.432
8 分滑动面	1.856	1.834	1.403

表 4  $F_s=2.5$  时最后条块剩余推力

Table 4 Residual thrusts of last slice when  $F_s=2.5$  (kN)

滑动面	不平衡推力法	本文方法
2 分滑动面	4.154	33.967
4 分滑动面	14.868	42.941
8 分滑动面	18.666	43.065

根据表 3 的 3 种不同倾角变化滑动面的安全系数结果可知, 一般情况下, 不平衡推力法计算得到的安全系数大于 M-P 法大于本文的改进方法, 且随着  $F_s$  越大, 各方法计算结果的差距也就越大, 表明本文的改进方法更有利工程实际的安全。而从同一方法不同角度变化的计算结果可知, 不平衡推力法的安全系数最大相差 0.45, 而改进方法最大相差只有 0.11, 由此也说明改进方法相比于传统的不平衡推力法, 基本可以避免滑面转折点倾角变化过大对边坡安全系数计算的影响, 具有更强的适用性和计算稳定性。在指定安全系数后对剩余推力进行计算, 从表 4 的计算结果可知, 本文方法最终求得的边坡推力要比传统不平衡推力法的计算结果更大。

## 3 结论

如果将条分后的滑坡体看作是由若干条块组成的一个结构, 那么按极限状态法设计计算的原则, 更需要去考虑一些极限状态。从求解边坡最小安全系数的角度出发, 条间力的简化应该从如何能使边坡产生最不利受力状态的角度来考虑。在传统不平衡推力法基本力学模型的基础上, 为了寻找可能存在的更不利受力状态, 寻求更合理和更具有物理意义的解答, 进而获得可能存在更小的安全系数, 本文对传统不平衡推力法进行了改进, 得到以下 4 点结论。

(1) 提出了一种改进的传递最大条间力的不平衡推力法。该方法使条块间按可能的最大条间力传递, 从而求解边坡更大的滑坡推力, 对于边坡加固设计具

有重要的参考意义。

(2) 给出了求解条间最大推力的计算方法, 在满足条间剪力合理性条件的前提下, 得到条间剪力发挥抗剪强度的  $1/F_s$  时的条间力即为所传递的最大推力的结论。

(3) 通过算例说明, 本文方法计算所得安全系数较传统不平衡推力法更小, 在计算滑动面倾角变化大的滑坡时, 误差相对传统不平衡推力法要更低, 说明条块间以可能存在的最大推力作为传递力是一较传统方法更不利的受力状态, 在对边坡稳定性评估时应考虑。

(4) 算例证明, 较传统不平衡推力法, 按可能的条间最大推力作为传递力计算, 可使计算边坡获得更小的安全系数和更大的滑坡推力, 是较传统不平衡推力法更优的一个方案。

## 参 考 文 献:

- [1] FELLENIUS W. Calculation of the stability of earth dams[C]// Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington D C, 1936, 4: 445 – 462.
- [2] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5: 7 – 17.
- [3] JANBU N. Slope stability computations[C]// HIRSCHFIELD E, Poulos S, ed. Embankment Dam Engineering. New York: John Wiley, 1973: 47 – 86.
- [4] 陈祖煜. 土坡稳定分析通用条分法及其改进[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(4): 11 – 27. (CHEN Zu-yu. The generalized method of slices for slope stability analysis and its modifications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(4): 11 – 27. (in Chinese))
- [5] 林 峰, 黄润秋. 边坡稳定性极限平衡条分法的探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(4): 9 – 13. (LIN Feng, HUANG Run-qiu. A study on the limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(4): 9 – 13. (in Chinese))
- [6] 方玉树. 边坡稳定性分析条分法条间力合理性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 80 – 86. (FANG Yu-shu. Rationality of inter-slice forces of slices method for slope stability analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 80 – 86. (in Chinese))
- [7] 郑颖人, 时卫民, 杨明成. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3030 – 3036. (ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, YANG Ming-cheng. Discussion on imbalance thrust force method and sarma's method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3030 – 3036. (in Chinese))
- [8] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 177 – 182. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. On slope stability analysis by imbalance thrust force method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 177 – 182. (in Chinese))
- [9] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 等. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 313 – 317. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming, et al. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 313 – 317. (in Chinese))
- [10] 郑颖人, 时卫民. 不平衡推力法使用中应注意的问题[J]. 重庆建筑, 2004, 3(2): 6 – 8. (ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. Attentive questions in using imbalance thrust force method[J]. Chongqing Architecture, 2004, 3(2): 6 – 8. (in Chinese))
- [11] 卢应发, 邓国栋, 杨丽平, 等. 滑坡关键块力学行为及力传递特征和不同应力状态的稳定系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 884 – 891. (LU Ying-fa, DENG Guo-dong, YANG Li-ping, et al. Study of mechanical behaviors of key blocks and characteristics of force transmit and stability coefficient of different stress states of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 884 – 891. (in Chinese))
- [12] 齐明柱. 不平衡推力法在滑坡治理工程中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 34 – 38. (QI Ming-zhu. Application of imbalance thrust force method in the remedy of landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2): 34 – 38. (in Chinese))
- [13] 郑 宏, 田 斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2225 – 2230. (ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU De-fu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2225 – 2230. (in Chinese))
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 – 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 – 346. (in Chinese))
- [15] 陈文胜, 李苗苗, 张永杰, 等. 对库仑土压力理论的若干修正[J]. 岩 土 力 学, 2013, 34(7): 1832 – 1838, 1846. (CHEN Wen-sheng, LI Miao-miao, ZHANG Yong-jie, et al. Modifications to Coulomb's theory of earth pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1832 – 1838, 1846. (in Chinese))

DOI: 10.11779/CJGE202201019

# 卵石层钢板桩插打的引孔回填料设计与成桩试验研究

蔺鹏臻，马俊军

(兰州交通大学土木工程学院，甘肃 兰州 730070)

**摘要：**为解决河道卵石层地质钢板桩插打施工的难题，结合工程现场实际开发了一种以粉质黏土、膨润土、锯末、水泥等材料组成的新型引孔回填料。通过多因素正交试验研究了新型回填料的材料组分对凝固体抗压、抗剪和抗渗性能的影响规律，给出了满足设计要求的施工配合比。通过现场钢板桩的对比试验，分析了新型引孔回填料的嵌固效果。研究结果表明：粉质黏土掺量对回填料凝结体黏聚力和抗压强度的影响最为显著，锯末掺量对回填料凝结体内摩擦角和抗渗性能的影响最为显著；在最大水平荷载作用下，采用新型引孔回填料后钢板桩的桩顶平均水平加、卸位移、压应力和地基水平反力系数的比例系数分别是采用现场渣土回填后钢板桩的46%，28%，1.39%，2.8%，证明采用新型回填料后的土体刚度更大，抵抗变形的能力更强，对钢板桩的嵌固效果更好。该新型引孔回填料具有取材方便、施工便捷和材料性能好的综合优点，可在同类型工程施工中推广应用。

**关键词：**钢板桩；卵石层；引孔回填料；正交试验；桩基试验

中图分类号：TU470；U445 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2022)01-0187-07

作者简介：蔺鹏臻(1977—)，男，博士，教授，主要从事桥梁工程设计理论与应用等方面的教学和科研工作。E-mail: pzhlin@mail.lzjtu.cn。

## Design of backfill materials for driving steel sheet piles and pile forming tests in gravel layer

LIN Peng-zhen, MA Jun-jun

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to solve the construction problem of inserting and driving steel sheet piles in pebble layer of rivers, a new type of lead-through backfill made of clay, bentonite, sawdust, cement and other materials is developed. Using the multi-factor orthogonal test method, the influence law and mechanism of the components of the new backfill materials on the compression, shear and impermeability properties of the backfill-solidified body are studied, and the construction mix proportion meeting the design requirements is given. The actual embedding effect of steel sheet piles is verified through the field comparative tests. The research results show that the content of silty clay has the most significant effect on the cohesion and compressive strength of the backfill aggregate, while the sawdust content has the most significant effect on the friction angle and impermeability of backfill aggregate. Under the maximum horizontal load, the average horizontal loading displacement, unloading displacement, compressive stress and proportional coefficient of horizontal reaction coefficient of foundation at the steel sheet pile top after using the new type lead hole backfill are 46%, 28%, 1.39%, and 2.8%, respectively, of the steel sheet pile after backfilling with on-site muck, which proves that the new type of backfill has greater soil stiffness and stronger resistance to deformation. The actual embedding effect of the piles is better. The new type of lead backfill has the comprehensive advantages of convenient material acquisition, convenient construction and good material performance, and can be popularized and applied in the construction of the same type of projects.

**Key words:** steel sheet pile; pebble bed; guide hole backfill; orthogonal test; pile foundation test

## 0 引言

钢板桩围堰作为一种常见的封水、挡土结构，因其施工工艺简单，施工效率高，可重复使用，投入资金少等特点<sup>[1-3]</sup>，已在国内外桥梁桩基和基坑工程中得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>。应用结果表明，钢板桩围堰一般适

用于地基土为软土、砂土、较软的全风化岩层等基础工程，而对于坚硬的粗圆砾土、砂岩以及强、中风化

基金项目：国家自然科学基金重大项目（11790281）；甘肃省建设科技项目（JK2021-03）  
收稿日期：2021-01-23

岩地层, 如果直接插打钢板桩, 会造成钢板桩打入困难, 变形较大, 影响工程施工质量<sup>[8-10]</sup>。目前, 针对常规打桩设备无法插打至较硬岩层的特点, 工程界开发了先采用钻机引孔再灌入回填料, 然后插打钢板桩的施工工艺, 有效解决了在较硬的风化岩地层<sup>[11-12]</sup>、软硬相间的复杂地层<sup>[8]</sup>、河道基坑和河岸码头等复杂条件下的钢板桩插打难题<sup>[13]</sup>。由于钢板桩施工的引孔回填料属于施工的临时性措施, 既有工程往往采用就地取材配置回填料, 相关规范也没有回填料的性能指标要求, 这对工程中引孔回填料的施工质量带来不利影响。

本文根据现场实际情况开发了新型引孔回填料, 通过多因素正交试验, 研究了新型回填料的材料组分对回填料凝固体抗压、抗剪和抗渗性能的影响规律与机理, 给出了满足现场施工条件和工艺要求的回填料配合比, 通过钢板桩力学性能的现场对比试验, 对钢板桩的实际嵌固效果进行了验证。

## 1 新型引孔回填料研制

### 1.1 原材料的选择

回填料的各组成原料对回填料的固结过程与力学性能存在影响。以往的引孔回填试验中多采用原土为回填料, 没有考虑回填料凝结体的物理、力学性能, 也没有给出统一的组成成分和配比, 很难被其它工程所借鉴。

为弥补引孔回填料配合比设计中的材料标准的不足, 本新型引孔回填料的组成设计依据为: ①选用水泥作为固化剂, 保证成型速度和强度。②选用膨润土作为胶结剂, 保证吸水性、膨胀性及流变性, 同时兼顾防渗透性<sup>[14]</sup>。③就地取材选用当地粉质黏土作为细骨料, 节约水泥用量, 保证回填后与周围土体的协同变形能力<sup>[15]</sup>。④选用锯末作为添加剂, 利用其比表面积大、吸附性强、化学性能稳定且有较高的化学活性<sup>[16]</sup>, 提高回填料对地下水位较高工程的适应性; 此外锯末的体积较大, 能够与水泥、膨润土相结合, 在内部形成骨架, 起到一定的填充作用。

### 1.2 新型引孔回填料配比

为获得新型引孔回填料各组分对整体性能的影响, 采用正交试验设计方法<sup>[17]</sup>, 以水胶比、粉质黏土掺量、膨润土掺量、锯末掺量为正交设计的 4 个因素 ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ), 每个因素选取 3 个水平, 开展试验研究。在前期的探索试验的基础上, 设定水胶比水平为 0.58, 0.62, 0.66; 粉质黏土掺量水平为 60%, 65%, 70%; 膨润土掺量为 3.5%, 4%, 4.5%; 锯末掺量为 0%, 3%, 5%, 其中百分比为各种材料占胶凝材料总

量的质量分数。配合比影响因素及水平如表 1 所示。回填料在 3 因素 4 水平下的标准正交表 L<sub>9</sub> (3<sup>4</sup>) 共计 9 组配合, 见表 2。

表 1 新型回填料配合比因素水平

Table 1 Factor levels of mixing ratio of the new backfill

水平	$A$	$B/\%$	$C/\%$	$D/\%$
1	0.58	60	3.5	0
2	0.62	65	4.0	3
3	0.66	70	4.5	5

### 1.3 新型引孔回填料制备与养护

制备新型引孔回填料时, 采用“三步法”进行拌合<sup>[15]</sup>: 第一步, 将膨润土和水按一定的比例制成膨润土泥浆, 放入膨化池膨化 24 h 后备用; 第二步, 在拌合槽内加入粉质黏土、锯末和水泥, 均匀拌合; 第三步, 拌合槽内加入膨润土泥浆, 加入剩余的拌合水充分搅拌。将搅拌好后的回填料浆体装入 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的标准立方体试模, 自然养护 24 h 后可以脱模。为了模拟水下环境, 将试块脱模后在水中养护至一定时间后进行物理力学性能试验。

## 2 新型引孔回填料凝结体物理、力学性能试验研究

### 2.1 新型引孔回填料抗压强度试验研究

参照《水泥土配合比设计规程》<sup>[18]</sup>, 对 9 组不同配比的回填料凝结体进行 3, 5, 28 d 抗压强度测试, 结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 3 d 时回填料凝结体抗压强度可达 0.248~0.948 MPa, 5 d 后强度在 0.310~1.332 MPa。工程实际中, 可根据钢板桩插打时的强度要求范围调整材料配比, 配制出满足要求的回填材料。为便于分析各影响因素对回填料凝结体 3, 5, 28 d 抗压强度的影响, 对上述试验结果进行极差分析, 结果见表 3。

从表 3 可知, 粉质黏土对回填料凝结体抗压强度的极差值最大, 其次为水胶比、锯末和膨润土, 因此粉质黏土对回填料强度起主要调节作用。

### 2.2 新型引孔回填料抗剪强度试验研究

新型引孔回填料凝结体黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  是反映回填料凝结体抗剪强度的重要指标, 回填料凝结体的  $c$  和  $\varphi$  根据直剪仪进行测定, 试验结果如前表 2 所示。对回填料凝结体养护 5 d 时黏聚力和内摩擦角进行极差分析, 结果见表 4, 5。

由表 4 可知, 影响黏聚力  $c$  最重要的因素是粉质黏土掺量, 其次是水胶比, 锯末掺量, 膨润土掺量。

由表 5 可知, 影响内摩擦角  $\varphi$  最重要的因素锯末掺量, 其次是水胶比、粉质黏土、膨润土掺量。

表2 回填料正交试验结果  
Table 2 Orthogonal experimental results of backfill materials

试验 编号	因素				抗压强度 $f_{uk}$ /MPa			抗剪强度		渗透系数 $(10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
	A	B/%	C/%	D/%	3 d	5 d	28 d	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	
1	0.58	60	3.5	0	0.948	1.332	3.414	62.98	14.47	0.032
2	0.58	65	4.0	3	0.582	0.744	1.901	54.07	11.73	0.117
3	0.58	70	4.5	5	0.296	0.460	1.156	37.48	10.00	1.380
4	0.62	60	4.0	5	0.605	0.907	2.179	60.52	10.55	9.810
5	0.62	65	4.5	0	0.439	0.674	1.875	46.08	12.57	0.061
6	0.62	70	3.5	3	0.281	0.400	1.132	37.79	9.15	0.451
7	0.66	60	4.5	3	0.532	0.705	1.781	51.32	10.58	0.152
8	0.66	65	3.5	5	0.327	0.448	1.100	39.32	8.46	60.800
9	0.66	70	4.0	0	0.248	0.310	1.091	26.11	9.87	0.122

表3 抗压强度极差分析  
Table 3 Analysis of extreme difference of compressive strength  
(MPa)

水平组数	3 d				5 d				28 d			
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
1	0.609	0.695	0.519	0.545	0.845	0.982	0.728	0.772	2.157	2.458	1.883	2.127
2	0.442	0.449	0.478	0.465	0.662	0.622	0.654	0.618	1.729	1.625	1.724	1.605
3	0.369	0.275	0.422	0.410	0.488	0.392	0.613	0.605	1.324	1.127	1.604	1.478
极差	0.239	0.420	0.096	0.135	0.358	0.590	0.115	0.167	0.833	1.331	0.279	0.649

表4 黏聚力 c 极差分析  
Table 4 Analysis of extreme difference of cohesion c (kPa)

水平组数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
1	51.506	58.269	46.694	45.055
2	48.127	46.489	46.898	47.722
3	38.916	33.792	44.958	45.772
极差	12.590	24.477	1.940	2.667

表5 内摩擦角 $\varphi$ 极差分析  
Table 5 Range analysis of internal friction angle  $\varphi$  (°)

水平组数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
1	12.067	11865	10.690	12.301
2	10.755	10.921	10.716	10.487
3	9.635	9.670	11.050	9.668
极差	2.432	2.195	0.360	2.633

### 2.3 新型引孔回填料渗透性试验研究

为了验证新型引孔回填料的防渗效果, 依据规程<sup>[18]</sup>进行渗透系数试验, 试验结果如前表2所示。各试件相对渗透系数的极差分析结果见表6。

由表6可知, 锯末掺量的极差值最大, 其次是膨润土掺量和水胶比, 最小为粉质黏土掺量, 所以影响回填料凝结体28 d渗透系数最主要的因素是锯末掺量。对于抗渗要求较高的工程, 应将锯末掺量控制在3%以内。

表6 回填料凝结体28 d渗透系数极差分析

Table 6 Analysis of 28-day permeability coefficient of backfill aggregate  
( $10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

水平组数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
1	0.519	3.341	20.437	0.081
2	3.441	20.326	3.350	0.240
3	20.358	0.651	0.531	23.997
极差	19.839	19.675	19.906	23.916

## 3 新型引孔回填料的工程应用

### 3.1 工程概况

某高速铁路特大桥采用(70 m+104 m+128 m+104 m+70 m)连续梁跨越黄河, 桥梁桩基础采用钻孔浇筑施工, 承台采用模板现浇施工, 承台基坑开挖采用钢板桩围堰方法进行防护。根据现场工程地质勘查报告显示, 桥墩处地质主要由较为坚硬的粗圆砾土、砂岩等构成。针对常规打桩设备无法插打至泥质砂岩层的特点, 采取先用旋挖钻机进行引孔、回填混合料, 再插打钢板桩的施工工艺。为了使钢板桩能够顺利插打到一定深度, 要求回填材料凝结后的强度在150~300 kPa范围内, 渗透系数小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 此外还需要保证一定的抗剪强度要求。

### 3.2 配合比确定

结合前述所得的回填料凝结体各指标的变化规

表 7 满足设计要求的配比表  
Table 7 Proportions meeting design requirements

水胶比	膨润土掺量 /%	锯末掺量 /%	抗压强度/MPa		$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$	渗透系数 /( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
			3 d	5 d			
0.64~0.66	4	3	0.16~0.22	0.22~0.30	27.72~35.76	8.33~9.38	$<1 \times 10^{-5}$

律,为了使回填料凝结体渗透系数满足抗渗性能的要求,取锯末掺量为3%。为了使回填料凝结体抗剪性能达到最优,取膨润土掺量为4%。为了使得回填料凝结体凝结后强度在150~300 kPa内。经筛选后获得的推荐配合比如表7所示。

为确保在一定人为误差范围内所配回填料能满足各项性能指标,推荐采用的施工配合比为水胶比0.66,粉质黏土掺量68%,膨润土掺量4%,锯末掺量3%,其中百分比为各种材料占胶凝材料总量的质量分数。

### 3.3 钢板桩嵌固效果试验研究

按照《建筑桩基检测技术规范》的相关规定,结合现场实际情况,试验设计了8根试验桩,其中,4根是现场渣土回填料,记为S;4根是新型引孔回填料,记为T。试验采用拉森IV型钢板桩,材质为SY295,单根长度为9 m,截面长度为400 mm,截面宽度为170 mm。桩基试验模型参数及布置如图1所示。

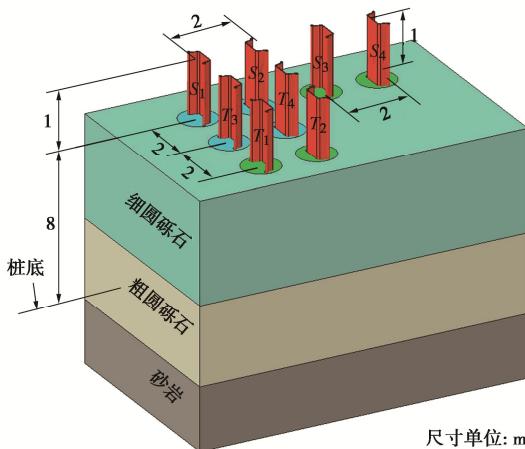


图1 试验模型参数及布置示意

Fig. 1 Schematic diagram and layout of model parameters

水平加载采用额定功率10 t的液压千斤顶,施加自平衡的对顶力进行加载,施力点均放在桩顶且与地面平行,采用百分表测量水平位移,振弦式应变计测量桩顶截面应力。试验过程如图2所示。



(a) 桩基编号



(b) 应变计安装 (c) 百分表安装 (d) 记录数据

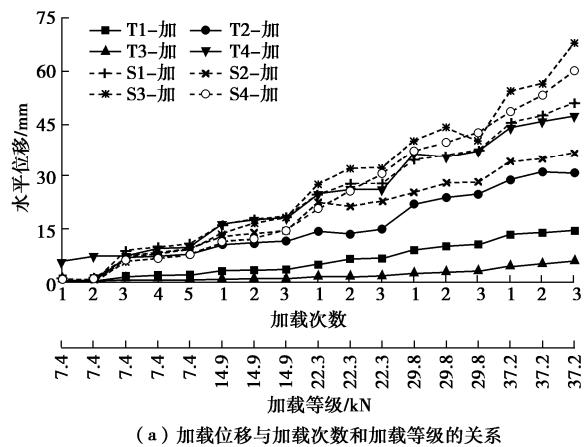
图2 实际加载过程示意图

Fig. 2 Diagram of actual loading process

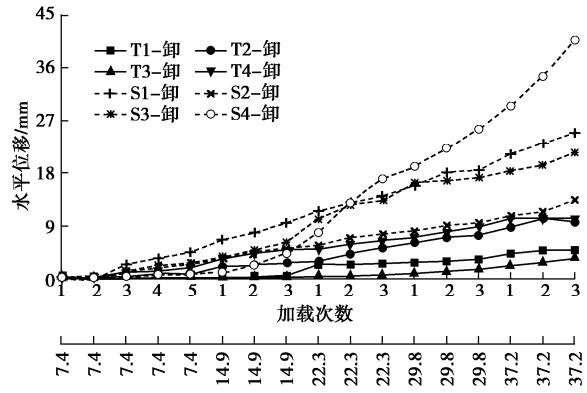
### 3.4 试验结果

#### (1) 桩顶水平位移

各桩的桩顶水平加载位移和卸载位移随加载次数和荷载等级的变化如图3所示。



(a) 加载位移与加载次数和加载等级的关系



(b) 卸载位移与加载次数和加载等级的关系

图3 桩顶水平位移与加载次数和等级之间的关系

Fig. 3 Relationship among horizontal displacement of pile top, loading times and grades

由图3可知,采用新型引孔回填料后钢板桩的水平加、卸载位移均小于采用渣土回填料后钢板桩的加、卸载水平位移。在最大加载等级作用下,采用新型引

孔回填料后钢板桩的水平加、卸载位移是采用现场渣土回填后钢板桩的 46%, 28%。

### (2) 桩顶应力

各钢板桩桩顶截面应力实测值如图 4 所示。

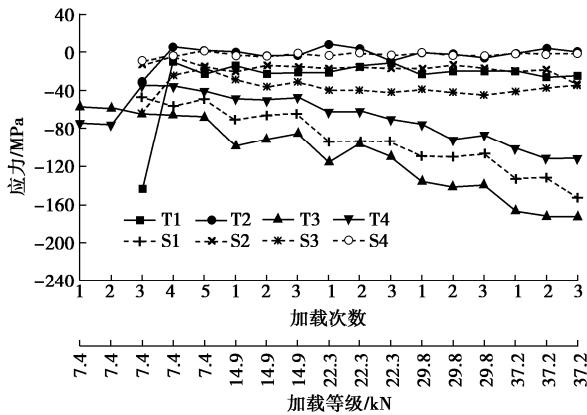


图 4 桩基应力与加载次数和加载等级的关系

Fig. 4 Relationship among pile top stress of each pile foundation, loading times and loading levels

由图 4 可知, 新型引孔回填料由于嵌固效果好, 同级荷载下的应力更大。对比 4 根新型引孔回填料桩基和 4 根现场渣土回填料桩基的应力算数平均值表明, 在最大等级水平荷载作用下, 采用新型引孔回填料后钢板桩的平均应力是采用现场渣土回填后钢板桩的 1.39 倍。

### (3) 地基水平反力系数的比例系数

各试验桩在不同水平荷载作用下地基水平反力系数的比例系数  $m$  随加载次数和加载等级之间的变化关系如图 5 所示。

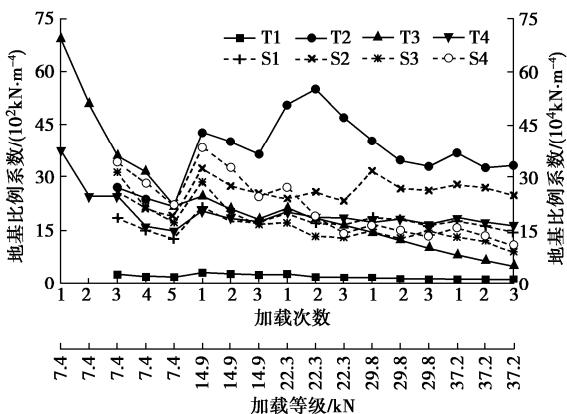


图 5 比例系数  $m$  与加载次数和等级的关系

Fig. 5 Relationship among proportional coefficient, loading times and levels

从图 5 可知, 比例系数随加载等级和加载次数的增加基本上呈现逐渐减小的趋势。在最大加载等级下, 采用新型回填料后四根桩基的比例系数算术平均值是采用现场渣土回填料后的 2.8 倍, 采用新型回填料换

填后的地基土抵抗变形的能力远高于采用渣土换填后的地基土。

### (4) 桩身水平位移

结合初参数方程<sup>[19]</sup>, 可得到各试验桩在最大水平荷载作用下各桩身水平位移随桩身的变化, 结果如图 5 所示。

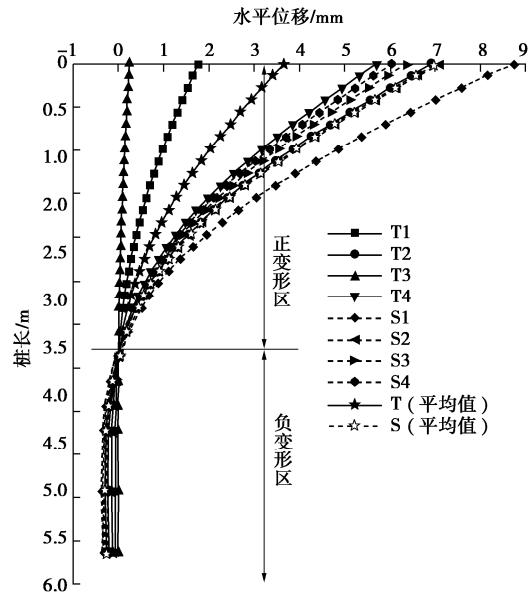


图 5 各桩基桩身水平位移随深度的变化

Fig. 5 Relationship between horizontal displacement of each pile foundation and depth

从图 5 可知, 在最大水平荷载作用下, 各桩基变形转换点(反弯点)基本保持不变, 与地面之间的距离约为 3.4 m。根据反弯点的位置, 桩身水平位移随深度的变化可以划分为距表面 0~3.4 m 正变形区和 3.4 m 以下的负变形区。在正变形区, 各桩基桩身水平位移变化比较明显, 总体上采用新型引孔回填料后钢板桩的平均水平位移小于采用渣土回填后钢板桩的平均水平位移, 表明新型引孔回填料对钢板桩的嵌固效果更好, 在水平荷载作用下, 抵抗变形的能力更强。

## 4 结 论

本文结合高速铁路桥梁工程钢板桩围堰施工, 研制了一种新型引孔回填料, 结合室内和现场试验, 得到以下 4 点结论。

(1) 新型回填料的组分中, 粉质黏土对回填料凝结体抗压强度起主要调节作用, 掺量越大, 抗压强度越低。锯末掺量对回填料凝结体渗透性能的影响最为显著, 对于抗渗要求较高的工程, 锯末掺量应控制在 3% 以内。粉质黏土掺量和锯末掺量对回填料凝结体抗剪强度影响较大, 其中, 粉质黏土掺量对黏聚力起主要调节作用, 而锯末掺量对内摩擦角起主要调节作用,

因此，在回填料凝结体抗剪强度设计时应综合考虑二者的影响。

(2) 根据各原料对凝结体物理、力学性能的影响，同时考虑工程实际应用环境，提出了用于实际桥梁围堰引孔回填的回填料组成成分，并给出了满足设计指标要求的新型引孔回填料的配合比。

(3) 通过 4 组 8 根试验桩现场水平静载试验研究表明，在最大水平荷载作用下，采用新型引孔回填料后钢板桩桩顶平均水平加、卸载位移、压应力和地基水平反力系数的比例系数  $m$  分别是采用现场渣土回填后钢板桩的 46%，28%，1.39 倍和 2.8 倍，且不同深度各桩基桩身平均水平位移明显大于使用新型引孔回填后钢板桩的平均水平位移，证明采用新型回填料后的土体刚度更大，抵抗变形的能力更强，对钢板桩的实际嵌固效果更好。

(4) 新型引孔回填料的实际桥梁使用效果表明，回填料总体性能满足了围堰钢板桩插打、围堰底防渗、钢板桩拔除等工程需求，本文提出的新型引孔回填料配合比设计及实验方法对同类工程具有理论指导意义。

## 参考文献：

- [1] 贺振中. 龙台温客运专线灵江特大桥深水桥墩基础的施工[J]. 铁道建筑, 2007, 47(7): 9–10. (HE Zhen-zhong. Construction of deep water pier foundation of Lingjiang Bridge on Yongtaiwen passenger dedicated line[J]. Railway Engineering, 2007, 47(7): 9–10. (in Chinese))
- [2] 谢海斌, 高敬. 钢板桩围堰技术在桥梁施工中的应用[J]. 交通世界, 2019(30): 110–111. (XIE Hai-bing, GAO Jing. Application of steel sheet pile cofferdam technology in bridge construction[J]. Transport World, 2019(30): 110–111. (in Chinese))
- [3] 陈永勇, 亢士杰. 钢板桩围堰在高桩承台施工中的应用[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(12): 48–50. (CHEN Yong-yong, KANG Shi-jie. Application of steel sheet pile cofferdam in construction of high pile cap[J]. Railway Standard Design, 2007, 51(12): 48–50. (in Chinese))
- [4] 张骏. 桥梁深水基础钢板桩围堰受力分析与应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 74–81. (ZHANG Jun. Force condition analysis and application of steel sheet pile cofferdam for bridge deepwater foundation[J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 74–81. (in Chinese))
- [5] 何永昶. 深水基础桥梁承台施工超长钢板桩围堰内支撑最优布置研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(3): 43–46. (HE Yong-chang. Research on the optimal layout of the internal support of the super-long steel sheet pile cofferdam for the construction of the deep water foundation bridge platform[J]. Railway Engineering, 2015, 55(3): 43–46. (in Chinese))
- [6] 倪波文. 复杂环境下桥梁承台钢板桩围堰的设计与施工[C]// 全国第二届品质工程论坛暨惠清高速公路绿色科技示范工程现场观摩会, 2019, 广州. (NI Bo-wen. Design and Construction of Steel Sheet Pile Cofferdam for Bridge Caps in Complicated Environment[C]// China Highway and Transportation Society. The Second National Quality Engineering Forum and Huiqing Expressway Green Technology Demonstration Project Field Observation Conference Proceedings, 2019, Guangzhou.
- [7] 骆冠勇, 曹洪, 潘泓, 等. 新光大桥桥墩钢板桩围堰的优化设计与监测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 124–129. (LUO Guan-yong, CAO Hong, PAN Hong, et al. Optimal design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of Xinguang bridge[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(2): 124–129. (in Chinese))
- [8] 李成伟. 拉森钢板桩围堰施工中引孔技术的应用[J]. 铁道建筑技术, 2014(增刊 1): 35–37. (LI Cheng-wei. The application of lead hole technology in the construction of Larsen steel sheet pile cofferdam[J]. Railway Construction Technology, 2014(S1): 35–37. (in Chinese))
- [9] 刘云林, 蔡亚春. 浅谈冲击钻围堰引孔施工[J]. 价值工程, 2018, 37(26): 157–158. (LIU Yun-lin, CAI Ya-chun. Construction of drilling holes for impact drilling cofferdam[J]. Value Engineering, 2018, 37(26): 157–158. (in Chinese))
- [10] 姚志安, 陈炳耀. 深中通道伶仃洋大桥东锚碇基坑支护施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 105–110. (YAO Zhi-an, CHEN Bing-yao. Key construction techniques for foundation pit supporting structure of east anchor block of Lingdingyang Bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(3): 105–110. (in Chinese))
- [11] 张春林. 钢板桩引孔围堰工艺在较硬岩地层中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 234–236. (ZHANG Chun-lin. Application of steel sheet pile guide hole cofferdam technology in hard rock stratum[J]. China Water Transport, 2018, 18(1): 234–236. (in Chinese))
- [12] 黄松雄. 深基坑水中承台引孔钢板桩围堰的设计与施工[J]. 广东公路交通, 2020, 46(5): 37–42. (HUANG Song-xiong. Design and construction technology of steel plate pile cofferdam for bearing platform in deep foundation

- pit[J]. Guangdong Highway Communications, 2020, **46**(5): 37 - 42. (in Chinese))
- [13] 孔 巍, 付晓超, 周冀伟, 等. 双层拉森钢板桩围堰在河道基坑施工中的应用技术[J]. 施工技术, 2018, **47**(4): 56 - 60. (KONG Wei, FU Xiao-chao, ZHOU Ji-wei, et al. Application technology of double-layer larsen steel sheet pile cofferdam in river foundation excavation construction[J]. Construction Technology, 2018, **47**(4): 56 - 60. (in Chinese))
- [14] 徐 超, 黄 亮, 邢皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 422 - 426. (XU Chao, HUANG Liang, XING Hao-feng. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 422 - 426. (in Chinese))
- [15] 周 瑶. 自凝灰浆防渗性能提高的试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. (ZHOU Yao. Experimental Research on Improving Impermeability of Self-Curing Mortar[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [16] 陈红娟, 李小军, 闫维明, 等. 锯末混合土场地模型振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 2068 - 2077. (CHEN Hong-juan, LI Xiao-jun, YAN Wei-ming, et al. Shaking table tests on sawdust-mixed clay site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 2068 - 2077. (in Chinese))
- [17] 代树红, 王浩然, 韩荣军, 等. 流-固耦合模型试验相似材料研究[J/OL]. 岩土力学, 2020, **41**(增刊2): 1-8[2020-11-13]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1933>. (DAI Shuhong, WANG Hao-ran, HAN Rong-jun, et al. Properties of similar materials used in fluid-solid coupling model test[J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(S2): 1-8[2020-11-13].<https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1933>. (in Chinese))
- [18] 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 2011. Specification for Mix Proportion Test of Cement-mixed Soil: JGJ/T 233—2011[S]. 2011. (in Chinese))
- [19] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017[S]. 2017. (Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert: TB 10093—2017[S]. 2017. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhr.ac.cn。

(本刊编辑部)