



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404415

引用格式:胡俊伟,罗瑞鹏,王春海,等.考虑填土模量变化的返包式加筋土挡墙面板水平位移计算方法[J].科学技术与工程,2025,25(14):6035-6043.

Hu Junwei, Luo Ruipeng, Wang Chunhai, et al. Calculation method for lateral displacement of back-wrapped reinforced soil retaining wall considering changes in soil modulus[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6035-6043.

考虑填土模量变化的返包式加筋土挡墙 面板水平位移计算方法

胡俊伟¹, 罗瑞鹏², 王春海³, 钟莹庆¹, 汪磊^{1*}

(1. 江西理工大学软件工程学院(南昌), 南昌 330013; 2. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 南昌 330096;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要 以返包式加筋土挡墙为研究对象,提出了面板位移的计算方法。将面板水平位移分为两部分计算:筋材应变引起的水平位移、加筋区在其背部水平土压力作用产生的整体水平位移。计算筋材应变引起的水平位移时,通过潜在破坏面、自然休止角将筋材分段计算,并假定筋材内力的水平分布,得到筋材应变引起的水平位移的简化计算模型。计算加筋区整体水平位移时,将加筋区等效为“悬臂梁”进行计算,考虑了加筋区弹性模量随高度的变化。本文的理论方法估算值与试验、数值模拟结果进行了对比,结果显示:二者分布趋势基本一致,能够较好地计算返包式加筋土挡墙的面板位移。

关键词 加筋土挡墙; 土压力; 侧向位移; 数值模拟

中图分类号 TU476+.4; **文献标志码** A

Calculation Method for Lateral Displacement of Back-wrapped Reinforced Soil Retaining Wall Considering Changes in Soil Modulus

HU Jun-wei¹, LUO Rui-peng², WANG Chun-hai³, ZHONG Ying-qing¹, WANG Lei^{1*}

(1. School of Software Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China;
2. China Power Construction Group Jiangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[Abstract] The study focused on wrap-around reinforced soil retaining walls and proposed a calculation method for panel displacement. The horizontal displacement was divided into two components for calculation: the horizontal displacement caused by the strain of reinforcement and the overall horizontal displacement generated by the horizontal earth pressure acting on the back of the reinforced zone. When calculating the horizontal displacement caused by the reinforcement strain, the reinforced zone was divided into subzones through the potential failure surface of reinforced soil retaining wall and the natural repose angle of soil. The horizontal distribution of the reinforcement load was assumed, yielding a simplified calculation model for the horizontal displacement caused by reinforcement strain. For the calculation of the overall horizontal displacement of the reinforced zone, the zone was treated as a 'cantilever beam', taking into account the variation in elastic modulus of the reinforced zone with height. The theoretical results obtained through the proposed method were compared with experimental and numerical simulation results. The distribution trend of the displacements was basically consistent, indicating that the proposed method can effectively calculate the panel displacement of wrap-faced reinforced soil retaining walls.

[Keywords] reinforced soil retaining wall; earth pressure; lateral displacement; numerical simulation

加筋土挡墙是一种新型的柔性支护结构,主要应用在公路、铁路、水利的填方工程领域^[1],与传统的重力式挡土墙相比,具有造价低廉、施工便捷、地形适应性好、低碳环保、造型美观等优势^[2-4],也更容易产生侧向变形^[5-6]。而目前加筋土挡墙设计规

范^[7-9]主要关注极限平衡状态下最大筋材拉力的计算,并没有给出墙体变形的理论计算方法,少数规范根据面板形式给出了最大面板位移与挡土墙总高的比值范围,仅 FHWA 规范^[10]提出了与墙高、筋材长度相关的面板最大水平位移的经验公式。

收稿日期:2024-06-13; 修订日期:2025-02-24

基金项目:国家自然科学基金(52468051);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200865);高层次人才科研启动项目(jxncbs19002)

第一作者:胡俊伟(1999—),男,汉族,江西南昌人,硕士研究生。研究方向:岩土工程。E-mail:2532757130@qq.com。

*通信作者:汪磊(1990—),男,汉族,湖北随州人,博士,讲师。研究方向:岩土工程。E-mail:wangleilei@jxust.edu.cn。

因此,中外学者关于加筋土挡墙面板位移估算方法也做了大量研究的工作,Bathurst等^[11]提出根据各层筋材总伸长量来估算相应层高的面板水平位移。杨广庆等^[12]、李婷等^[13]和李倩等^[14]进一步指出除了考虑筋材应变引起的位移,还应考虑各层加筋土的整体水平位移。Liu^[15]建立有限元模型,通过参数分析的结果表明:加筋土整体水平位移与填土模量、筋材刚度相关。在此基础上Yang等^[16]提出了刚性地基上砌块式面板加筋土挡墙的水平位移的估算方法,指出面板水平位移主要由三部分贡献:筋材伸长量、各加筋土层之间的剪切位移、筋-土之间的滑移,采用有限差分法估算面板的位移。

现以服役状态下竖直的返包式加筋土挡墙为研究对象,将整个加筋区看作“悬臂梁”进行面板位移的计算,考虑筋材应变、加筋区整体变形引起的位移。基于全量法^[17-18]估算潜在破裂面筋材拉力与相应加筋土的模量,用以计算筋材拉伸变形引起的位移;并来描述“悬臂梁”模量沿着高度的变化,以此计算整体位移。将本文方法的估算值与试验、有限元模型的结果进行验证与对比分析。

1 面板位移分析方法

1.1 基本假定

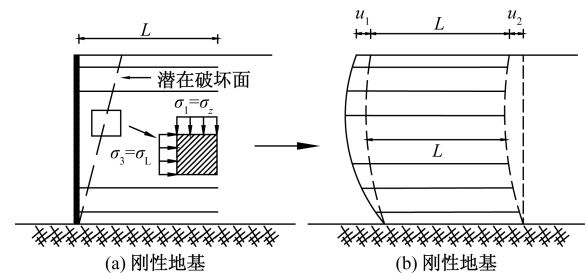
加筋土挡墙面板位移的简化计算模型,既有学者^[12,19]把整个加筋区看作“悬臂梁”进行计算,也有学者^[15,20-21]采用“剪切梁”的形式进行计算。通过两类简化计算模型的算例对比表明,返包式面板加筋土挡墙通常采用悬臂梁进行计算,砌块式面板加筋土挡墙多按照剪切梁计算。这是由于返包式面板相对的更加柔软轻薄,更易与土体一起变形,当加筋区发生整体弯曲变形时受到面板的限制作用很小;而砌块式面板更加坚硬厚重,砌块的模量远大于填土的模量,限制了其整个加筋区整体弯曲变形,导致加筋区更易产生剪切位移^[22-23]。大量试验与有限元结果也表明:面板的形式很大程度上影响到加筋土结构的侧向变形模式^[24-28]。鉴于此,本文研究对于返包式加筋土挡墙面板位移分析方法采用“悬臂梁”模型(如图1所示,并做如下基本假设。

- (1)加筋土挡墙处于平面应变状态。
- (2)地基为刚性地基,不考虑地基变形的影响。
- (3)面板位移主要有两部分组成:筋材伸长引起的面板位移 u_1 、整个加筋区在其背部水平向土压力作用下的产生的整体水平位移 u_2 。
- (4)潜在破坏面位置的加筋土单元最大主应力

和最小主应力分别为竖向土压力、水平土压力。

(5)计算整体水平位移时,同一层的加筋土体采用相同的弹性模量。

(6)不考虑筋材的蠕变。



L 为筋材总长; u_1 为筋材伸长引起的面板位移, u_2 为整体水平位移; σ_1 为最大主应力; σ_L 为侧向土压力;
 σ_3 为最小主应力; σ_z 为竖向土压力

图1 加筋土挡墙变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforced soil retaining wall deformation

1.2 加筋区筋材伸长引起的水平位移

通过朗肯破裂面、自然休止角将筋材划分为3段,如图2所示。

(1)自由段:位于潜在破裂面与面板之间的加筋段,其长度为 L_a ,该区段可认为筋材拉力为常量^[8]。实际自由段筋材内力将小于 T_{max} ,可以按照 T_{max} 简化计算,得到较为保守的偏大结算结果,保守结果利于工程应用。

(2)零拉力段:位于自然休止角以下的区域,由于在自然休止角以下不可能形成滑动面,该段筋材受拉力很小^[29],可忽略不计。

(3)有效锚固段:位于潜在破裂面与自然休止角之间,其长度为 L'_e ,该区段拉力由 T_{max} 逐渐减小到0,采用双曲余弦函数来反映其分布^[15],该段长度取值为

$$L'_e = \left(\frac{H-z}{\tan\varphi_{ps}} - L, L_e \right)_{\min} \quad (1)$$

式(1)中: H 为挡墙的总高; z 为筋材的埋深; φ_{ps} 为填土的平面应变内摩擦角; L_e 为锚固段长度。

因此,将筋材拉力沿水平方向的分布进行如下简化,即

$$T = \begin{cases} T_{\max}, & 0 \leq l \leq L_a \\ \left\{ 2 - \cosh \left[\frac{\cosh^{-1}(2)}{L'_e} x \right] \right\} T_{\max}, & L_a \leq l \leq L_a + L'_e \\ 0, & L_a + L'_e \leq l \leq L \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: l 为筋材任意一点到面板的水平距离; x 为有效锚固段筋材任意一点到潜在破面的水平距离。

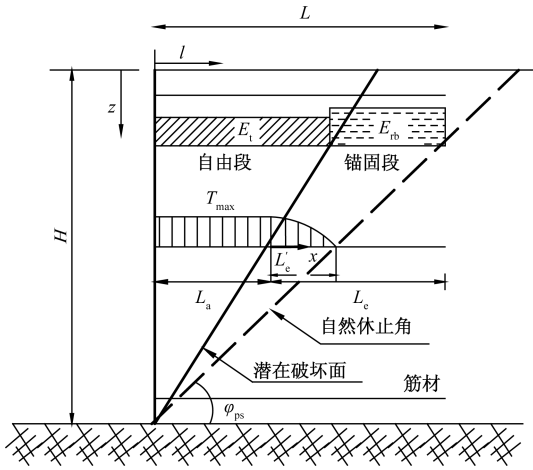


图2 筋材拉力及填土模量水平分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of horizontal distribution of reinforcement load and fill modulus

筋材伸长引起的面板水平位移为

$$u_1 = \int_0^L \frac{T}{J} dl = \frac{T_{max}}{J} L_a + \int_0^{L_c} \left\{ 2 - \cosh \left[\frac{\cosh^{-1}(2)}{L'_c} x \right] \right\} \frac{T_{max}}{J} dx \quad (3)$$

式(3)中: J 为筋材刚度。

为了考虑筋材刚度、填土模量的影响,采用全量法^[17-18]来进行计算 T_{max} 。

$$T_{max} = K_r S_v (\gamma z + q) \quad (4)$$

式(4)中: S_v 为筋材间距; γ 为加筋区填土重度; q 为上覆荷载。

其中潜在破坏面的土压力系数 K_r 表示为:

$$\begin{cases} K_r = \frac{J/S_v}{KK_r E_t + J/S_v} \\ K_r = \frac{\mu(1+\mu)J/S_v}{(1-\mu^2)J/S_v + E_t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_t 为潜在破坏面的填土模量; μ 为泊松比; K 为剪胀系数。

$$\begin{cases} K = \frac{1 + \sin\varphi_{cr}}{1 - \sin\varphi_{cr}} \\ K = \frac{1 + \sin\varphi_{ps}}{1 - \sin\varphi_{ps}} \frac{1 - \sin\psi}{1 + \sin\psi} \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ_{cr} 为填土的残余摩擦角; ψ 为填土的剪胀角。

$$E_t = kP_a \left(\frac{K_r \sigma_z}{P_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(\sigma_z - K_r \sigma_z)(1 - \sin\varphi_{ps})}{2c \cos\varphi_{ps} + 2K_r \sigma_z \sin\varphi_{ps}} \right]^2 \quad (7)$$

式中: k 为模量系数; n 为模量指数; P_a 为标准大气压强; R_f 为破坏比; c 为填土的黏聚力。

1.3 加筋区整体水平位移

在计算加筋区整体侧向位移时,整个加筋区被简化为“悬臂梁”的形式,如图3所示,加筋区背部的水平土压力表示为

$$P(z) = K_{rb} \sigma_z \quad (8)$$

式(8)中: K_{rb} 为加筋区背部的土压力系数。

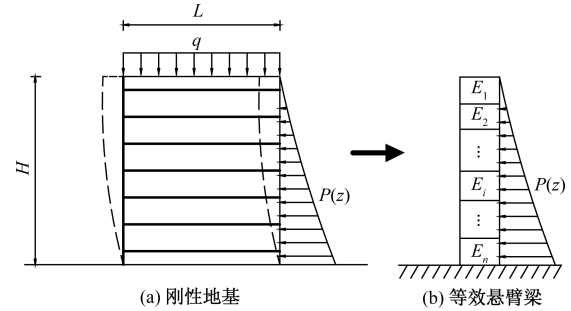


图3 整体水平位移计算模型

Fig.3 Calculation model of overall horizontal displacement

相关研究^[30]发现由于地基的约束作用,加筋区背部的土压力系数在底部接近静止土压力系数 K_0 ,在顶部接近主动土压力系数 K_a ,假设土压力系数 K_{rb} 为

$$K_{rb} = K_0 + \frac{K_a - K_0}{(H + S)^2} (H - z)^2 \quad (9)$$

式中: S 为上覆荷载 q 的等效填土厚度, $S = q/\gamma$ 。

第 i 层填土模量 E_i 为主要有自由段填土模量 E_t 与锚固段填土模量 E_{rb} 组成,即

$$E_i = \frac{E_t L_a + E_{rb} L_c}{L} \quad (10)$$

锚固段填土模量 E_{rb} 表示为

$$E_{rb} = kP_a \left(\frac{K_{rb} \sigma_z}{P_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(\sigma_z - K_{rb} \sigma_z)(1 - \sin\varphi_{ps})}{2c \cos\varphi_{ps} + 2K_{rb} \sigma_z \sin\varphi_{ps}} \right]^2 \quad (11)$$

加筋区在墙背水平土压力作用下的侧向位移可用虚功原理解得,任意深度 z 的位移为

$$u_2 = \sum_{i=1}^n \left[\int \bar{M}_v(z) \frac{M(z)}{E_i I} dz \right] + \sum_{i=1}^n \left[\int \rho \bar{Q}_v(z) \frac{Q(z)}{G_i A} dz \right] \quad (12)$$

式(12)中: $M(z)$ 、 $Q(z)$ 为实际荷载引起的弯矩和剪力; ρ 为截面系数,对于矩形截面 $\rho = 1.2$;虚力作用下筋土复合体任意 z 处的弯矩为 $\bar{M}_v(z)$ 、剪力为 $\bar{Q}_v(z)$; A 为加筋区的截面面积; I 为加筋区的弯曲惯性矩; G_i 为第 i 层加筋土层剪切模量。

$$G_i = \frac{E_i}{2(1 + \mu)} \quad (13)$$

式(13)中: μ 为泊松比。

根据 Yang 等^[16]的推导可以表示为

$$\begin{cases} \mu = \frac{-K_r(1+K_r) + \sqrt{K_r^2(1+K)^2 + 4(K_rK + KK_r^2 + K_r + 1)(KK_r^2 + 1)}}{2(K_rK + KK_r^2 + K_r + 1)} \\ \mu = 0.5 - \frac{E_t}{6B} \end{cases} \quad (14)$$

泊松比要满足: $0 < \mu < 0.5$ 。

$$B = k_b P_a \left(\frac{K_r \sigma_z}{P_a} \right)^m \quad (15)$$

式中: k_b 为体积模量数; m 为体积模量指数。

虚拟状态下加筋土在深度 z 处的弯矩 $\bar{M}_v(z)$ 和剪力 $\bar{Q}_v(z)$ 分别为

$$\bar{M}_v(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_F \\ z - z_F, & z > z_F \end{cases} \quad (16)$$

$$\bar{Q}_v(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_F \\ 1, & z > z_F \end{cases} \quad (17)$$

式中: z_F 为虚拟力 F 的作用深度,如图 4(b)所示。

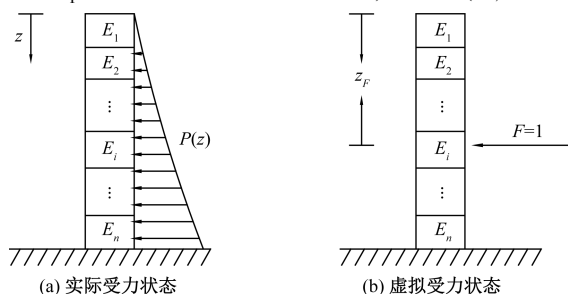


图 4 简化计算模型

Fig. 4 Simplified calculation model

则真实状态下加筋体任意深度 z 处的弯矩函数和剪力函数表达式为

$$M(z) = \int_0^z P(t)(z-t) dt \quad (18)$$

$$Q(z) = \int_0^z P(t) dt \quad (19)$$

将式(16)~式(19)代入式(12),即可求得各层的整体水平位移 u_2 。

2 计算方法的验证

2.1 与数值模拟结果的对比分析

2.1.1 数值模型基本参数

为了进一步验证所提出面板位移计算方法合理性,参考文献[31-32]的建模方法与相关参数,利用 PLAXIS 建立模型,将有限元计算结果与本文方法的估算值进行详细的对比分析。

如图 5 所示,模型的挡墙高 5.8 m,面板形式为土工合成材料返包式面板,加筋区筋材长度为 4.2 m,筋材竖向间距为 0.4 m;模型的左、右边界采用滑动铰支座模拟,底部边界为固定支座;该有限元模型模拟了加筋土挡墙一层一层填筑压实的过

程,施工压实作用等效 8 kPa 均布荷载模拟,建造完成后在顶部施加 10 kPa 附加荷载,模拟正常使用状态,由于顶部附加荷载大于压实作用的等效荷载,可忽略压实效应的影响^[33-36]。

在该有限元模型中,地基土采用了 Mohr-Coulomb 模型模拟,筋材采用线弹性模型,填土采用了 Hardening-Soil 模型模拟填土的非线性应力应变关系。根据文献[18]采用 A、B、C 共三种填土土样建立三组有限元模型,其对应的筋材刚度分别为 600、700、800 kN/m。有限元模型的具体工况及相关参数如表 1~表 3 所示。

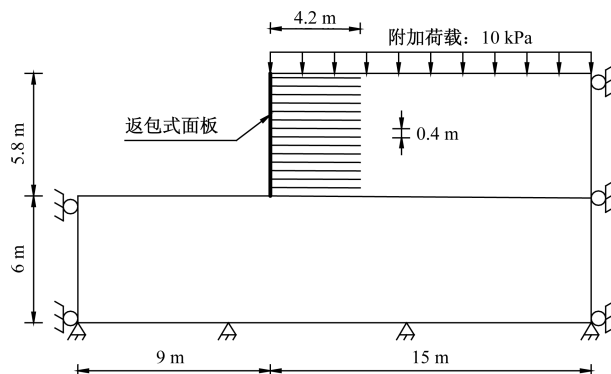


图 5 有限元模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of finite element model

表 1 有限元模型基本工况

Table 1 Basic working conditions of the finite element model

工况编号	土样	墙高/m	筋材间距/m	筋材长度/m	筋材刚度/(kN·m ⁻¹)	附加荷载/kPa
I	A	5.8	0.4	4.2	600	10
II	B	5.8	0.4	4.2	700	10
III	C	5.8	0.4	4.2	800	10

表 2 面板与地基土参数

Table 2 Parameters of panel and foundation soil

类型	参数名称	数值
面板特性	抗弯刚度 EI /(kN·m)	1.0
	轴向刚度 E_A /(kN·m ⁻¹)	60
地基土特性	重度 γ /(kN·m ⁻³)	21
	弹性模量 E /(kN·m ⁻²)	50 000
	泊松比 μ	0.3
	内摩擦角 φ_{pc} /(°)	35
	剪胀角 ψ /(°)	0
	黏聚力 c /kPa	200

表3 填土基本参数

Table 3 Basic parameters of backfill soil

参数名称	土样 A	土样 B	土样 C
重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	17.1	15	19.6
剪胀角 $\psi / (^\circ)$	11	8	4
内摩擦角 $\varphi_{ps} / (^\circ)$	41	38	34
破坏比 R_f	0.9	0.9	0.9
模量系数 k	509	363	480
模量指数 n	0.5	0.5	0.5
$E_{50}^{\text{ref}} / \text{kPa}$	28 000	20 000	26 400
$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} / \text{kPa}$	28 000	20 000	26 400
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{kPa}$	72 500	60 000	79 200

2.1.2 填土参数的转换

本文提出的理论方法中填土采用 Duncan-Chang 模型, 而 PLAXIS 中采用的是 Hardening-Soil 模型, 由于两者在描述填土的非线性应力应变特性相似, 可进行参数转换后可以用于类似工况的数值模拟及计算^[37]。在 Hardening-Soil 模型中, 填土的剪切屈服函数 f 为

$$f = \bar{f} - \gamma^p \approx \frac{1}{E_{50}} \frac{q'}{1 - q'/q'_a} - \frac{2q'}{E_{\text{ur}}} - 2\varepsilon_1^p = 0 \quad (20)$$

式(20)中: \bar{f} 为应力函数; γ^p 为塑性变形函数; q' 为偏应力; ε_1^p 为应变的塑性变形分量。

填土 50% 强度时割线模量 E_{50} 与填土卸载-再加载的模量 E_{ur} 分别为

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi_{ps} + \sigma_3 \sin \varphi_{ps}}{c \cos \varphi_{ps} + p^{\text{ref}} \sin \varphi_{ps}} \right)^n \quad (21)$$

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi_{ps} + \sigma_3 \sin \varphi_{ps}}{c \cos \varphi_{ps} + p^{\text{ref}} \sin \varphi_{ps}} \right)^n \quad (22)$$

式中: $p^{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$ 为参考围压; σ_3 为最小主应力; E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 分别为参考围压作用下填土 50% 强度的参考模量、填土卸载-再加载的参考模量。

抗剪强度的渐近值 q'_a 为

$$q'_a = \frac{q'_f}{R_f} \quad (23)$$

极限偏应力 q'_f 为

$$q'_f = (c \cot \varphi_{ps} + \sigma_3) \frac{2 \sin \varphi_{ps}}{1 - \sin \varphi_{ps}} \quad (24)$$

填土主应变的塑形变形分量 ε_1^p 与弹性变形分量 ε_1^e 分别为

$$\varepsilon_1^p \approx \frac{1}{2} \bar{f} = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q'}{1 - q'/q'_a} - \frac{q'}{E_{\text{ur}}} \quad (25)$$

$$\varepsilon_1^e = \frac{q}{E_{\text{ur}}} \quad (26)$$

则填土主应变可以表示为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p \approx \frac{1}{2E_{50}} \frac{q'}{1 - q'/q'_a} \quad (27)$$

由于假定在潜在破坏面位置的加筋土单元最大、最小主应力分别为竖向应力、水平土压力, 因而 $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_z$ 、 $\sigma_1 \approx \sigma_z$ 、 $\sigma_3 \approx \sigma_t$, 初始弹性模量可以表示为

$$E_{\text{initial}} = \frac{2E_{50}^{\text{ref}}}{2 - R_f} = kp_a \left(\frac{\sigma_1}{p_a} \right)^n \quad (28)$$

又因为 E_{50}^{ref} 对应的参考围压为 100 kPa, 式(28)的 k 可以表示为

$$k \approx \frac{2E_{50}^{\text{ref}}}{100(2 - R_f)} \quad (29)$$

2.1.3 筋材应变引起的面板位移

筋材拉伸变形引起的面板位移如图 6 所示, 可以看出估算值与有限元结果基本接近, 说明理论方法中关于筋材应变对面板位移的贡献这一部分估算方法是可行的。

2.1.4 加筋区整体水平位移

本文提出的加筋区背部水平土压力系数的公

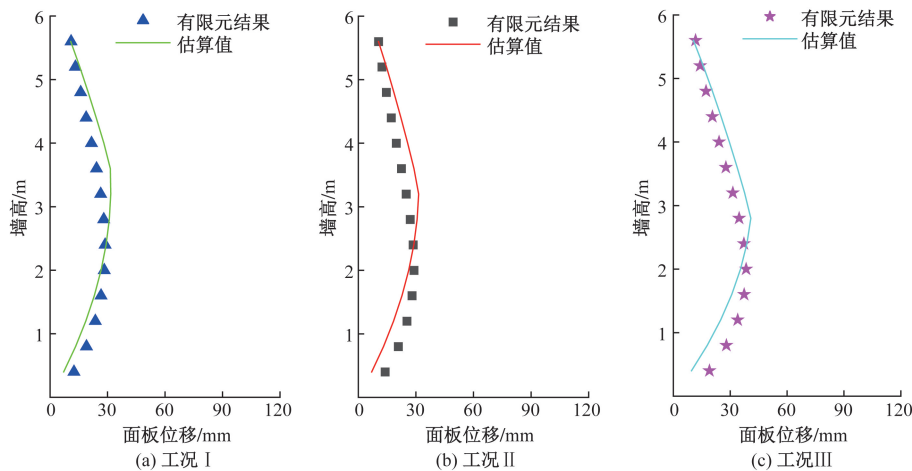


图6 筋材应变引起的面板位移分布

Fig. 6 Distribution of displacement caused by reinforcement strain

式(9),用以计算“悬臂梁”在土压力作用下的水平位移。加筋区背部土压力估算值与数值模拟结果的对比(图7),可以看到二者能够较好地拟合,且介于主动土压力与静止土压力之间,公式的合理性得到了进一步验证。

在图8中,整体水平位移的估算值与数值模拟结果进行了对比,可以看到二者分布趋势近似但估算值比数值模拟结果整体偏大。其原因在于本文采用 T_{max} 对应的 E_t 来估算自由段的填土模量是偏保守的,特别是在底部面板区域,没有反映出地基填土的约束作用,进一步导致底部区域填土的模量相较于有限元结果明显偏小(图9)，“悬臂梁”计算模型在估算每一层位移时都会用到底部模量,导致整体位移的估算值偏大。

2.1.5 总面板位移

图10对比了理论法与有限元总面板水平位移沿墙高的分布,可以看出本文的理论法与有限元的结果分布趋势较为接近,但估算值相较于有限元结

果整体偏大。原因在估算整体位移时,没有考虑地基对底部填土的约束作用,导致底部填土模量偏小,整体位移偏大。

2.2 与 Bathurst 室内试验模型测量结果的对比

Bathurst 试验^[38]在混凝土基础上建立 3.6 m 高的返包式面板加筋土挡墙如图 11 所示,面板与竖向方向夹角 8° ,建造完成后在顶部逐级增大附加荷载 q ,并记录了 3 m 高度位置处面板水平位移随 q 的变化。该试验填土参数来源于文献[39],如表 4 所示。由该试验测量结果可知上覆荷载 q 达到 40 kPa 后部分筋材达到了蠕变极限强度,故本文方法仅对比了 q 在 0 ~ 40 kPa 的位移变化,并采用了 2% 应变对应的割线刚度 $J = 97.2 \text{ kN/m}$ 进行计算。关于面板倾角的影响,基于 Bathurst 的 K 刚度法^[40],对筋材拉力乘以 0.857 的折减系数。施工压实作用根据 Hatami 与 Bathurst 的相关研究^[41],采用轻型压压机可等效均布荷载 8 kPa,当压实荷载大于附加荷载作用时,需要考虑压实荷载的作用。

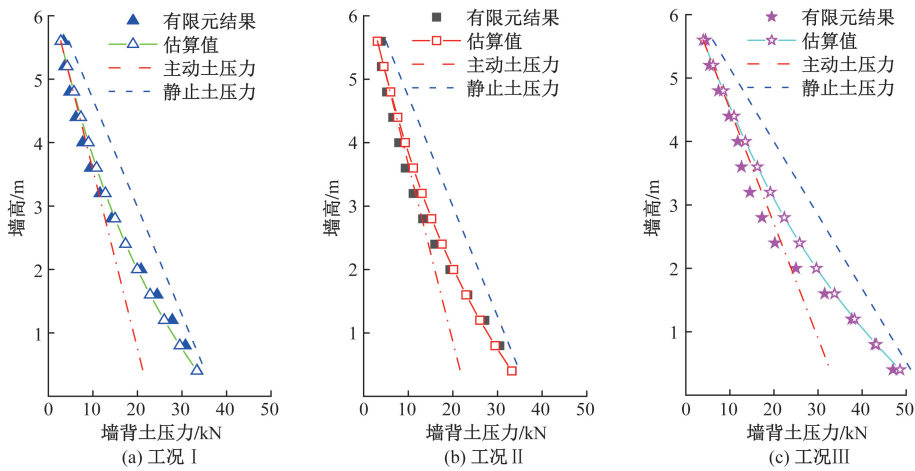


图7 加筋区背部水平土压力的分布

Fig. 7 Distribution of lateral earth pressure at the back of the reinforced zone

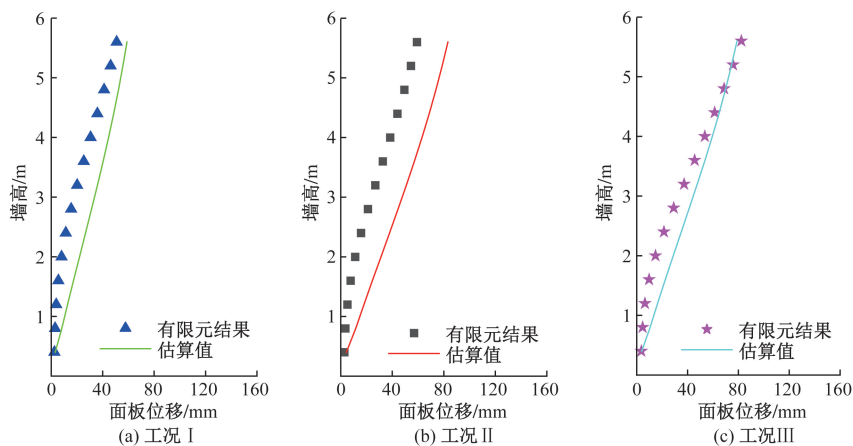


图8 整体水平位移的分布

Fig. 8 Distribution of overall horizontal displacement

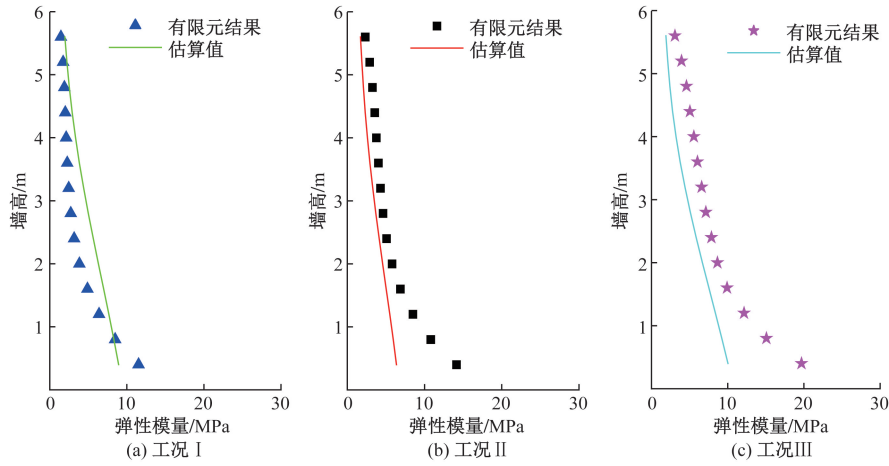


图9 平均弹性模量沿墙高的分布

Fig. 9 Distribution of average elastic modulus along wall height

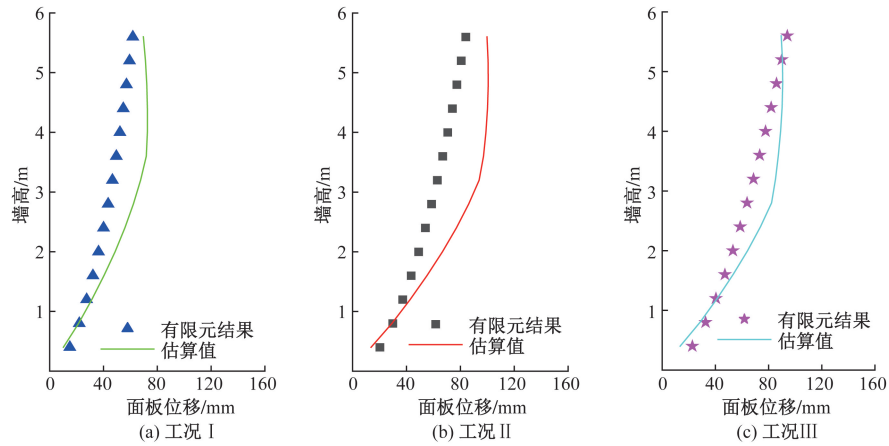


图10 总位移对比

Fig. 10 Comparison of total displacement

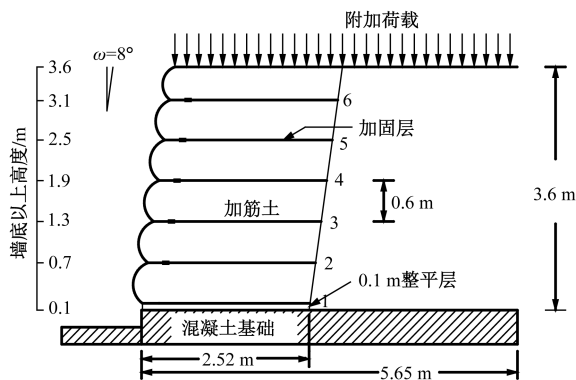


图11 模型试验示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the model test

图12中试验测量值与估算值对比可以看出, $q = 0 \sim 10$ kPa时由于附加荷载作用接近于压实荷载8 kPa,位移变化很小; $q = 10 \sim 40$ kPa时位移快速增长。本文方法能够较好地反映返包式加筋土挡墙的面板位移随上覆荷载的发展趋势。

表4 试验填土的基本参数

Table 4 Basic parameters of backfill soil in the test

参数名称	数值
重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	16.8
内摩擦角 $\varphi_{ps} / (^\circ)$	44
黏聚力 c / kPa	2
破坏比 R_f	0.86
模量系数 k	1 150
体积模量数 k_b	575
模量指数 n	0.5
体积模量指数 m	0.5

3 结论

针对返包式加筋土挡墙提出了水平位移的计算方法,将总位移分为两部分组成:筋材应变引起的位移、加筋区在其背部水平土压力下的整体位移。并将估算值与试验、数值模拟的结果进行了对比。得出如下结论。

(1) 提出水平位移计算方法的估算值与试验、

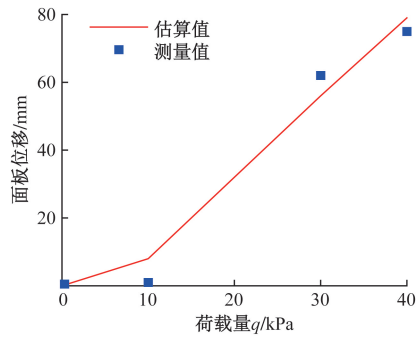


图 12 高度 3 m 位置面板位移随附加荷载 q 的变化
Fig. 12 The variation of panel displacement at a height of 3 m with surcharge load q

数值模拟结果较为接近,说明本文方法能够有效估算返包式面板加筋土挡墙的位移。

(2)在估算筋材应变引起的位移时,通过潜在破坏面、自然休止角,将筋材简化成三段计算。在这样的假设之下,筋材的拉伸变形引起位移估算值基本符合数值模拟计算的结果。

(3)整体水平位移的估算值与数值模拟的结果趋势一致,但估算值整体偏大。这是由于本文方法没有考虑底部地基对面板区域填土的约束作用,导致底部加筋区的模量估算值明显偏小,使得“悬臂梁”简化模型的各层水平位移估算值偏大,最终使得总水平位移的估算值偏大。

(4)在计算整体水平位移时需考虑加筋区背部土压力系数随高度的变化,本文提出土压力估算方法与数值模拟结果非常接近。

参 考 文 献

- [1] 杨广庆,徐超,张孟喜.土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.
Yang Guangqing, Xu Chao, Zhang Mengxi. Geosynthetic reinforcement soil structure application guidance[M]. Beijing: China Communication Press, 2016.
- [2] 张飞,朱玉明,杨尚川,等.加筋土挡墙碳排放计算方法与减排性分析[J].吉林大学学报(工学版),2021(2):631-637.
Zhang Fei, Zhu Yuming, Yang Shangchuan, et al. Calculation method and emission reduction analysis of carbon emissions for reinforced soil retaining walls[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021(2): 631-637.
- [3] 鲍学英,申中帅,刘北胜,等.铁路路基挡墙碳减排方案优选及降碳策略研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(9):3842-3853.
Bao Xueying, Shen Zhongshuai, Liu Beisheng, et al. Research on the optimization of carbon reduction plans and strategies for railway subgrade retaining walls[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(9): 3842-3853.
- [4] Touze N. Healing the world; a geosynthetic solution[J]. Geosynthetic International, 2021, 28(1): 1-31.
- [5] 王清明,徐超,李昊煜,等.包裹式加筋土桥台结构性能现场试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(7):126-131,157.
Wang Qingming, Xu Chao, Li Haoyu, et al. Field experimental study on the performance of wrapped reinforced soil abutment structures[J]. Journal of the Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(7): 126-131, 157.
- [6] 马雪涛,杨广庆,徐鹏.铁路新型加筋土挡墙抗震性能数值模拟[J].科学技术与工程,2024,24(25):10921-10927.
Ma Xuetao, Yang Guangqing, Xu Peng. Numerical simulation of the seismic performance of a new type of reinforced soil retaining wall for railways[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10921-10927.
- [7] 铁路路基支挡结构设计规范:TB10025—2019[S].北京:中国铁道出版社,2019.
Design Code for Railway Subgrade Retaining Structures: TB10025—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [8] AASHTO. AASHTO Lrfd bridge design specifications[S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [9] NCMA. Design manual for segmental retaining walls[S]. Washington: National Concrete Masonry Association, 2009.
- [10] Federal Highway Administration and Department of Transportation. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes; volume I: FHWA-NHI-10-024[S]. Washington: Federal Highway Administration and Department of Transportation, 2009.
- [11] Bathurst R J, Allen T M, Walters D L. Short-term strain and deformation behavior of geosynthetic walls at working stress conditions[J]. Geosynthetic International, 2002, 9: 451-482.
- [12] 杨广庆,周敏娟,张保健.加筋土挡墙水平位移研究[J].岩石力学与工程学报,2005(7):1248-1252.
Yang Guangqing, Zhou Mingjuan, Zhang Baojian. Study on horizontal displacement of reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(7): 1248-1252.
- [13] 李婷,苏谦,刘宝,等.加筋土挡墙水平位移解析计算与参数分析[J].中国公路学报,2019(5):47-56.
Li Ting, Su Qian, Liu Bao, et al. Analysis and parameter analysis of horizontal displacement in reinforced soil retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019(5): 47-56.
- [14] 李倩,张瑞刚,凌天清.基于灰关联分析的加筋土挡墙频率敏感因子[J].科学技术与工程,2021,21(7):2916-2921.
Li Qian, Zhang Ruigang, Ling Tianqing. Study on frequency sensitive factors of reinforced earth retaining wall based on grey correlation analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2916-2921.
- [15] Liu H B. Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2012, 32: 18-27.
- [16] Yang G Q, Liu H B. Analytical method for the lateral displacements of steel-reinforced soil walls on stiff foundations with incremental panel facings[J]. Géotechnique, 2015, 65(9): 728-739.
- [17] Wang L, Liu H B, Wang C H. Earth pressure coefficients for reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil retaining walls under working stress conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 486-496.
- [18] Wang L, Wang C H, Liu H B, et al. One-step analytical method for required reinforcement stiffness of vertical reinforced soil wall

- with given factor of safety on backfill soil [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 343-350.
- [19] 卢凉, 张均均, 马书文, 等. 预应力返包式加筋土挡墙的动力响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(2): 344-353.
Lu Liang, Zhang Junjun, Ma Shuwen, et al. Dynamic response analysis of prestressed encased reinforced soil retaining walls[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(2): 343-350.
- [20] Abdelkader A, Daniel D, Nicolas F. Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 29(2): 116-129.
- [21] Damians I P, Bathurst R J, Josa A, et al. Vertical-facing loads in steel-reinforced soil walls[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9): 1419-1432.
- [22] 孟亚, 徐超, 李格焯, 等. 冻融循环对加筋土结构性能影响的研究进展 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27): 11496-11504.
Meng Ya, Xu Chao, Li Geyu, et al. Research status of the effect of freeze-thaw cycle on the properties of reinforced earth structure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27): 11496-11504.
- [23] 齐添, 应梦杰, 刘飞禹, 等. 考虑筋土界面软化的三明治形加筋土挡墙地震响应分析 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(25): 10399-10406.
Qi Tian, Ying Mengjie, Liu Feiyu, et al. Seismic response analysis of sandwich reinforced retaining wall considering softening of soil-geogrid interface [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(25): 10399-10406.
- [24] Yang K, Wu J T H, Chen R H, et al. Lateral bearing capacity and failure mode of geosynthetic-reinforced soil barriers subject to lateral loadings [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(6): 799-812.
- [25] Cai X G, Zhang S Q, Li S H, et al. A review of the methods calculating the horizontal displacement for modular reinforced soil retaining walls [J]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021, 11(18): 81-86.
- [26] 韩华欣, 肖成志, 丁鲁强, 等. 考虑筋材蠕变-温度耦合效应的加筋土挡墙变形分析 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4): 816-825.
Han Huaxin, Xiao Chengzhi, Ding Luqiang, et al. Deformation analysis of reinforced soil retaining walls considering creep-temperature coupling effects in reinforcement materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 816-825.
- [27] Yazdandoust M. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 97: 216-232.
- [28] Jia X L, Xu J L, Sun Y H, et al. Deformation analysis of reinforced retaining wall using separate finite element [J]. *Discrete Dynamics in Nature & Society*, 2018(1): 1-9.
- [29] 杨广庆. 台阶式加筋土挡土墙设计方法的研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 695-698.
Yang Guangqing. Research on design method of stepped reinforced soil retaining wall [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 695-698.
- [30] Zheng Y, Li F, Niu X, et al. Numerical investigation of the interaction of back-to-back MSE walls [J]. *Geosynthetics International*, 2022, 30(4): 382-397.
- [31] Mirmoradi S H, Ehrlich M. Modeling of the compaction-induced stress on reinforced soil walls [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(1): 82-88.
- [32] Mirmoradi S H, Ehrlich M. Effects of facing, reinforcement stiffness, toe resistance, and height on reinforced walls [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(1): 67-76.
- [33] Mirmoradi S H, Ehrlich M. Numerical simulation of compaction-induced stress for the analysis of RS walls under working conditions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(3): 354-365.
- [34] Liu H B. Nonlinear elastic analysis of reinforcement loads for vertical reinforced soil composites without facing restriction [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(6): 1-9.
- [35] Liu H B. Required reinforcement stiffness for vertical geosynthetic-reinforced-soil walls at strength limit state [J]. *Geotechnique*, 2016, 66(5): 424-434.
- [36] Liu H B, Yang G Q, Hung C. Analyzing reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil walls considering toe restraint [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(6): 1-11.
- [37] Brinkgreve R B J, Vermeer P A. *PLAXIS 2Dversion8* [M]. Rotterdam: Balkema, 2002.
- [38] Bathurst R J, Vlachopoulos N, Walters D L, et al. The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(12): 1225-1237.
- [39] Hatami K, Bathurst R J. Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(6): 673-684.
- [40] Bathurst R J, Miyata Y, Nernheim A, et al. Refinement of *K*-stiffness method for geosynthetic-reinforced soil walls [J]. *Geosynthetics International*, 2008, 15(4): 269-295.
- [41] Hatami K, Bathurst R J. Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(4): 1066-1085.