

包裹式土工格栅加筋土挡墙水平位移研究

吕 鹏¹, 杨广庆¹, 庞 巍¹, 蔡德钧²

(1. 石家庄铁道学院土木分院, 石家庄 050043; 2. 铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘 要: 包裹式土工格栅加筋土挡墙在工程中的设计分析仍采用基于极限平衡理论的锚固楔体法, 而没有考虑在达到极限平衡之前加筋土挡墙所发生的变形发展和积累过程。加筋土挡墙面板的水平位移是墙体内外稳定重要体现。通过采用有限元数值方法, 分析了不同工程因素对包裹式土工格栅加筋土挡墙面板处工后水平位移的影响, 分析结果表明, FEM 计算值和实测值接近, 说明了有限元计算分析的适用性; 包裹式土工格栅加筋土挡墙面板处的工后水平位移呈由下向上增大趋势; 拉筋刚度、长度、竖向间距对水平位移具有明显的影响并应选择适宜数值, 以实现加筋土挡墙的良好工程性能; 挡墙墙顶处外荷载大小及位置对水平位移具有相应影响, 位于加筋区外的外荷载对墙面水平位移影响不明显。

关 键 词: 土工格栅; 加筋土; 挡墙; 水平位移

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Study on horizontal displacement of packaged geogrid reinforced soil retaining wall

LÜ Peng¹, YANG Guang-qing¹, PANG Wei¹, CAI De-gou²

(1. Department of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In engineering, packaged geogrid reinforced soil retaining wall's design still use anchorage wedge method based on limiting equilibrium theory that doesn't consider the progress of retaining wall's deformation occurrence and accumulation before reach limitation. Retaining wall's horizontal displacement is an important appearance of its stability. By using FEM, the effect aroused by different engineering factors is analyzed. The analytical results show: results of FEM fit well with in-situ test and it proves the FEM results are reasonable; reinforced soil retaining wall's post-construction horizontal displacement enlarged from bottom to top; geogrid's stiffness, length and vertical span have apparent effect for horizontal displacement, and should choose suitable design value to get desirable engineering behavior; the magnitude and location of outer load above retaining wall have corresponding effect for horizontal displacement that effect becomes unapparent when the outer load located besides the reinforced zone.

Key words: geogrid; reinforced soil; retaining wall; horizontal displacement

1 前 言

包裹式土工格栅加筋土挡墙是由具有相应强度及耐久性的土工格栅和填料、层层返包叠加而成的一种可适应一定变形的轻型支挡结构^[1]。具有自重轻、占地面积小、对地基承载力要求低、对周围环境影响小等优点, 且其面板包裹体内可通过植草技术实现墙面绿化, 从而实现工程建设和生态环境相结合的目的^[2], 因此, 具有广泛的应用前景。而目前工程中对其设计分析仍为基于极限平衡理论的

滑动楔体法, 没有考虑挡墙在达到极限平衡之前所具有的变形发展和积累过程, 忽视了挡墙面板水平位移对支挡结构体安全性、适用性的影响, 从而制约了该型挡墙的应用推广。本文结合工程实例, 采用有限元方法分析了不同工程因素对包裹式土工格栅加筋土挡墙面板处工后水平位移的影响。

2 计算模型及分析内容

2.1 工程概况

某铁路包裹式土工格栅加筋土挡墙墙高 6.0 m,

土工格栅刚度 $EA = 400 \text{ kN/m}$ 、长 4.2 m ，沿面板高度方向 0.6 m/层 等间距、等长布置；为监测面板处水平位移规律，在包裹体面板后埋设测斜管测试其水平位移变化。

2.2 计算程序及设定

采用岩土工程专用有限元程序 Plaxis 进行计算^[3]。土体本构采用弹塑性 Mohr-coulomb 本构模型进行分析。计算参数如表 1 所示。

表 1 土体计算参数
Table 1 Parameters of soil

	干土 重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	湿土 重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	渗透 系数	泊松比	弹性 模量 / kPa	黏聚力 / kPa	摩擦角 / $(^\circ)$
填土	17.5	19.6	4.32×10^{-4}	0.3	15 000	22	20
地基	16.5	18.7	5.00×10^{-3}	0.3	25 000	18	25

土工格栅单元采用 Plaxis 程序中所提供的 Geotextile 单元予以模拟，按照线弹性模型模拟土工格栅的力学性能。接触面处理对于在土工格栅与周围填料之间的筋土接触面，采用界面单元模拟，该界面单元的力学特性应用弹塑性本构模拟，即界面单元是否保持在弹性范围内按照下式计算得到的剪应力确定：

$$\tau \leq \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (1)$$

式中 φ_i 、 c_i 、 σ_n 、 τ 分别为接触面处的内摩擦角、黏聚力、法向应力、剪应力。土工格栅加筋与土之间的互相作用程度采用系数 R_{inter} 表示。当 $R_{\text{inter}} = 1$ 时，代表筋土严格协同工作， $R_{\text{inter}} = 0$ 时，代表两者之间不存在共同作用，结合程序说明和填料性质，在本文计算中采用 $R_{\text{inter}} = 0.67$ 进行。

$$c_i = R_{\text{inter}} c \quad (2)$$

$$\tan \varphi_i = R_{\text{inter}} \tan \varphi \quad (3)$$

固结计算至地基中的超孔隙水压力完全消散时为止。

2.3 有限元模型

设计墙高 6 m ，挡墙基础下 15 m 为黏土层，其下为岩基，故 FEM 模型取至基础下 15 m 处；模型左侧取至 20 m 处；地下水位线与地面持平；考虑结构对称性，取半幅墙宽 12 m 计算。

2.4 分析内容

分析地基模量、土工格栅刚度、长度、竖向间距变化；截面形状；外荷载作用变化（条形荷载：位置、宽度）等因素，对加筋土挡墙面板各高度处 δ / H (%) 的影响^[4]（ H 为挡墙高； δ 为水平位移值）。

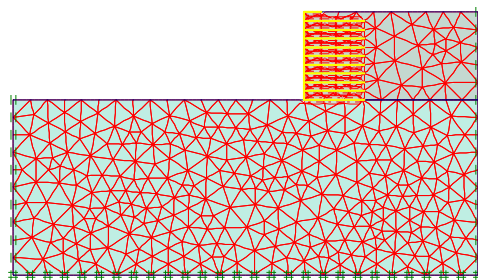


图 1 有限元建模

Fig. 1 Meshed FEM model

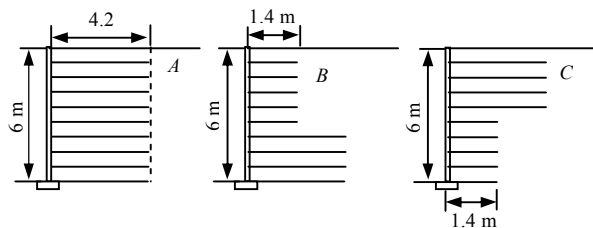


图 2 加筋土挡墙截面形式变化

Fig. 2 Variety of retaining wall's cross-section form

3 计算结果及分析

3.1 地基土模量的影响

依次取地基土模量为 $45, 35, 25, 15 \text{ MPa}$ ，并和实测值进行对比。

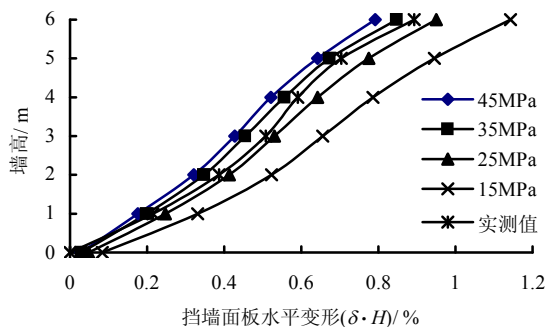


图3 地基土模量对挡墙面板水平位移的影响 $(\delta \cdot H) / \%$

Fig. 3 Effect of foundation modulus value $(\delta \cdot H) / \%$

由图 3 可见，挡墙面板处工后水平位移测试值和 FEM 计算结果较为接近，说明了有限元分析结果的可靠性。

对比各模量下的最大水平位移，当模量达到一定值后，即达到 25 MPa 时，模量增大对减小挡墙面板处水平位移效果不大，而太低的地基模量无法满足地基的承载力要求，因此，在满足地基承载力要求的条件下，地基模量达到一定值继续增大后对减小挡墙面板处水平位移的影响不明显。

3.2 土工格栅刚度的影响

依次取土工格栅刚度 $EA = 100, 200, 400, 800, 10\ 000\text{ kN/m}$ 计算, 其中当 $EA = 100, 10\ 000\text{ kN/m}$ 时, 在有限元计算中挡墙体内不同部位出现破坏。

由表 2 可见, 随土工格栅加筋刚度 EA 值的降低, 墙面水平变形明显增大, 过大的水平变形则易导致支挡结构的失稳破坏。

表2 土工格栅刚度对挡墙墙面水平位移影响 $(\delta \cdot H) / \%$
Table 2 Effect of geogrid stiffness $(\delta \cdot H) / \%$

墙高 / m	土工格栅刚度 $EA / \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$		
	200	400	800
6.0	1.023	0.848	0.714
5.0	0.738	0.674	0.597
4.0	0.616	0.556	0.488
3.0	0.515	0.455	0.390
2.0	0.408	0.348	0.282
1.0	0.254	0.198	0.132
0.0	0.043	0.029	0.004

当 $EA = 100\text{ kN/m}$ 和 $10\ 000\text{ kN/m}$ 时, 在有限元计算中均出现破坏, 但两者破坏产生的位置不同, 当 $EA = 100\text{ kN/m}$ 时, 墙面水平位移增大, 而导致在挡墙体内的失稳破坏; 当 $EA = 10\ 000\text{ kN/m}$ 时, 墙面水平位移较小, 失稳破坏产生于地基内, 因此, 应选择适宜的土工格栅刚度范围。

3.3 土工格栅加筋长度的影响

通过在土体中铺设土工格栅, 可约束土体的侧向变形, 提高土体强度。按照滑动楔体理论^[5], 只有超过最小加筋长度时才能发挥土工格栅的加筋作用, 因此, 本文分析了土工格栅加筋长度对挡墙面板水平位移的影响。

分别取加筋长度 L 同挡墙高度 H 比值 L/H 为: 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 进行计算。

表 3 土工格栅加筋长度的影响 $(\delta \cdot H) / \%$
Table 3 Effect of geogrid length $(\delta \cdot H) / \%$

墙高 / m	L/H			
	0.5	0.7	0.9	1.1
6.0	1.019	0.848	0.832	0.803
5.0	0.805	0.674	0.654	0.656
4.0	0.657	0.556	0.537	0.535
3.0	0.530	0.455	0.437	0.430
2.0	0.404	0.348	0.332	0.323
1.0	0.228	0.198	0.187	0.177

由表 3 可见, 当 L/H 值 < 0.7 (规范值) 时, 挡墙面板水平位移有较大地增加; 而 $L/H > 0.7$ 时, 土工格栅加筋长度的增加对水平位移的作用不明显。因此, 在工程中应确定合适的加筋长度, 太短或太长均无法取得良好的工程效果。

3.4 土工格栅竖向间距 S_v 对水平位移的影响

按照“加筋有效影响范围”理论, 在加筋土结构中, 土工格栅对复合土体的加筋作用只在其周围一定厚度范围内存在, 超出该范围的土体仍保持原应力状态, 即加筋的效果与加筋层的竖向间距有关。

表 4 土工格栅竖向间距的影响 $(\delta \cdot H) / \%$
Table 4 Effect of geogrid vertical span $S_v (\delta \cdot H) / \%$

墙高/ m	加筋间距 S_v / m		
	0.4	0.6	0.8
6.0	0.747	0.848	0.977
5.0	0.645	0.674	0.856
4.0	0.517	0.556	0.653
3.0	0.449	0.455	0.504
2.0	0.309	0.348	0.417
1.0	0.135	0.198	0.272
0.0	0.023	0.029	0.057

分别取加筋竖向间距 $S_v = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$ 计算, 当 S_v 达到 1.0 m 时, 在加筋土挡墙墙体内出现了破坏; 随竖向加筋间距的增大, 挡墙面板处的水平位移增大。

3.5 加筋铺设方式对水平位移的影响

为合理发挥土工格栅的加筋性能, 本文分析了不同布筋方式的影响。

表 5 加筋铺设方式的影响 $(\delta \cdot H) / \%$
Table 5 Effect of retaining wall section $(\delta \cdot H) / \%$

墙高/ m	截面形式		
	A	B	C
6.0	0.848	0.912	0.985
5.0	0.674	0.768	0.882
4.0	0.556	0.651	0.754
3.0	0.455	0.571	0.721
2.0	0.348	0.410	0.650
1.0	0.198	0.242	0.411
0.0	0.029	0.057	0.049

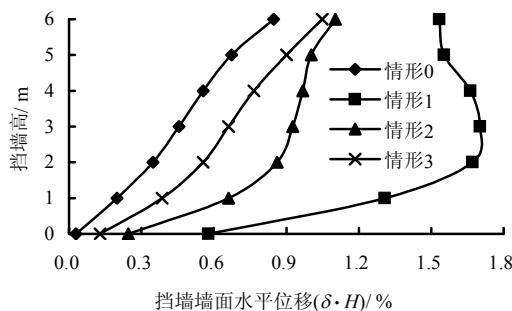
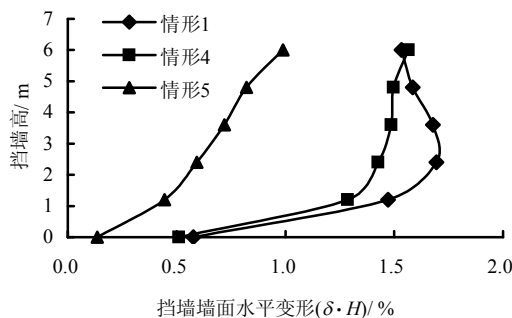
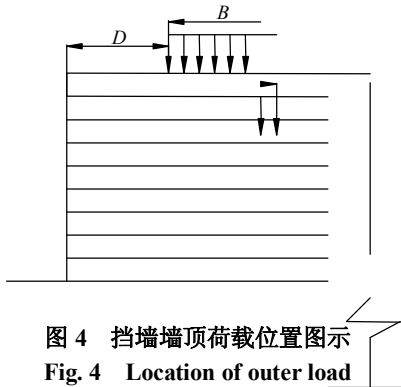
加筋铺设方式如图 2 所示, 由计算结果可见: 采用等长布筋 (截面形式 A) 挡墙水平位移最小, 截面形式 B 比 C 各处水平位移值均小, 说明挡墙水平变形对其下半部加筋长度较为敏感, 原因在于下半墙承受较大土压力作用, 需布设较长加筋。

3.6 加筋土挡墙墙顶荷载对水平位移的影响

为分析挡墙墙顶荷载位置及大小对墙面位移大小的影响, 考虑表 6 中的 6 种工况计算分析。

表6 墙顶荷载分布工况
Table 6 Distribution of outer load cases

情形	D / m	B / m	P / kPa
0	1.0	3.3	0.0
1	1.0	3.3	54.0
2	1.0	3.3	42.0
3	1.0	3.3	21.0
4	3.0	3.3	54.0
5	5.0	3.3	54.0



由计算结果可见，挡墙顶部的外荷作用对包裹式加筋土挡墙的墙面水平变形具有明显的影响。外荷载距离墙面越近，则水平位移越大；当外荷载作用在加筋区域时，不同位置处的荷载对墙面中部的水平位移影响较大，而当外荷载作用于非加筋区域时，水平位移明显减小；墙面水平位移随外荷载增大而增加，随外荷载增大、 D 值的减小、最大位移位置有向墙体下部移动的趋势。

4 结 论

本文结合实际工程，应用有限元方法分析了多种因素对包裹式土工格栅加筋土挡墙面板处的工后水平位移的影响，可得到如下结论：

(1) 现场测试和 FEM 计算结果较为接近，说明本文有限元计算结果及分析结论的可靠性，其工后水平位移呈由下向上增大的趋势。

(2) 地基模量在达到一定值后，其增大对挡墙面板工后水平位移影响不明显。

(3) 应选用适宜的土工格栅性能参数：加筋长度、刚度、竖向间距 S_v ，以实现挡墙的良好工程性能。当该类参数低于一定数值后，挡墙自身易产生较大水平位移。

(4) 选用合理的加筋断面布置形式，挡墙下半部土工格栅加筋长度变化对挡墙面板处的水平位移影响较为明显。

(5) 墙面水平位移随墙顶外荷载增加、接近墙面而增大；外荷载位于加筋区时，对水平位移影响较为明显。

参 考 文 献

- [1] 周健, 刘文白. 环境岩土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 5—10.
- [2] 杨晓华, 王路平, 俞永华. 土工格式生态挡墙工程性状分析[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 23—26.
- [3] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1—7.
SONG Er-xiang, Finite element analysis of safety factor for soil structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1—7.
- [4] 杨广庆. 土工合成材料加筋土挡土墙变形控制研究[R]. 石家庄铁道学院, 2005. 12—15.
- [5] 杨广庆, 周敏娟, 张保俭. 加筋土挡墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1 248—1 252.
YANG Guang-qing, ZHOU Xiao-juan, ZHANG Bao-jian. Study on the horizontal deformation of reinforced retaining walls of earth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1 248—1 252.