

新型 H 型格构梁承载性能与稳定性分析

刘梦源, 刘章锐, 张阳, 马鹏里

(西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 西安 710048)

摘要: 传统混凝土骨架防护是防止路基边坡发生浅层失稳的主要措施, 但其在施工时混凝土耗材较多, 服役期间容易因自重大对周围土体产生一定影响。为解决上述问题, 提出一种轻量化、模块化预制的新型 H 型格构梁结构, 通过优化截面形状与增设卡槽构造, 显著降低结构自重并增强与土体的机械咬合作用。通过开展 H 型骨架单元抗压试验与三维边坡稳定性数值模拟, 对比分析无骨架、现浇型及新型 H 型格构梁防护下的边坡性能。试验结果表明: 新型 H 型骨架抗压承载力达 754 kN, 较现浇型提升 9.8%; 数值模拟显示, 新型结构边坡稳定性系数 ($F_s = 1.65$) 较现浇型 ($F_s = 1.63$) 提高 1.2%, 且塑性滑动区延伸长度缩减 29.5%。该结构兼具轻量化、施工便捷与经济性好, 可为浅层边坡防护工程提供高效解决方案。

关键词: 边坡稳定性; 强度折减法; 新型 H 型格构梁; 数值模拟

中图分类号: TU470

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.012

Analysis of Bearing Capacity and Stability of New H-type Lattice Beam

LIU Mengyuan, LIU Zhangrui, ZHANG Yang, MA Pengli

(Xi'an University of Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: Traditional concrete frame serves as a primary protection against shallow instability of subgrade slopes, yet it consumes excessive concrete during construction and its potential adverse impacts surrounding soil due to its substantial self-weight during service. To address these limitations, this study proposes a novel lightweight and modular prefabricated H-shaped lattice beam structure. By optimizing the cross-section shape and adding slot structure, the self-weight of the structure is significantly reduced and the mechanical interlocking with the soil is enhanced. Comparative analyses of slope performance are conducted through compressive tests on H-shaped frame units and three-dimensional slope stability numerical simulations, evaluating three scenarios: unprotected slopes, cast-in-place frames, and the new H-shaped lattice system. Experimental results demonstrate that the proposed structure achieves a compressive bearing capacity of 754 kN, representing a 9.8% improvement over conventional cast-in-place counterparts. The numerical simulation shows that the stability coefficient of the new structure slope ($F_s = 1.65$) is 1.2% higher than that of the cast-in-place type ($F_s = 1.63$), and the extension length of the plastic sliding zone is reduced by 29.5%. This structure has the advantages of lightweight, convenient construction and economy, and can provide an efficient solution for shallow slope protection projects.

Key words: slope stability; strength reduction method; new H-type lattice beam; numerical simulation

边坡稳定性分析是岩土工程的重要研究内容之一^[1-2]。骨架防护是目前提升边坡结构整体性与稳定性的主要措施^[3-6]。骨架防护的机理是通过其横骨架对滑动土体提供的阻滑抗力及骨架底部与土体间产生的摩擦力对边坡浅层土体进行加固,防止浅层失稳^[7]。近年来,针对土质边坡浅层溜坍的工程防护措施中,骨架结构凭借护坡效果好的特点^[8],广泛应用于工程边坡防护中,以此提升土体边坡在骨架防护下的浅层稳定性。

现有边坡防护研究主要围绕数值模拟和理论推导展开。数值模拟方面:Xing 等^[9]基于回收枕木构建了框架结构边坡模型,揭示了矩形与菱形骨架的稳定性优势;Lian 等^[10]通过优化骨架间距与截面尺寸提出稳定性提升方法。理论推导领域:宣立华^[11]通过强度折减法分析了框架防护边坡的敏感参数;连继峰等^[12]构建了以工程造价为目标函数的结构优化模型。尽管骨架防护结构已受到广泛关注,但当前骨架结构设计仍存在若干不足^[13]。例如:现浇型骨架与周边土结合不够紧密,容易引发危害;小体积预制块骨架的整体稳定性相对较弱;大体积预制块骨架面临着搬运和砌筑上的挑战等^[14]。

本文基于 H 型预制骨架的构造特点,通过抗压试验系统分析不同荷载条件下关键节点的受力特征、变形规律及裂缝发展模式,揭示其轴心受压时的塑性变形特性和绕弱轴失稳的破坏机制,并

对比分析土体边坡在无骨架、现浇型格构梁以及预制 H 型格构梁防护下对边坡稳定性系数 F_s 的影响,探讨 H 型防护骨架在边坡防护工程中的相关特点。相关研究结论可为浅层边坡防护工程施工稳定性分析及骨架结构优化设计提供参考。

1 H 型骨架防护单元土体受力分析

图 1 为 H 型骨架护坡示意图。方格型防护骨架通过将边坡浅层土体自重产生的下滑力分割在每一小方格框架内,起到分隔防护的作用。骨架竖向间距 l_v 、横向间距 l_h 、骨架埋置深度 h 是影响骨架防护效果的重要因素。护坡结构体系下横骨架对其垂直坡面方向产生压重,沿坡面方向对浅层滑动土体进行抵抗,竖骨架则主要通过接触面的摩擦阻力和自身重力作用,将横骨架传递来的作用力进一步传导至基础。

一般防护结构对浅层土体的防护作用主要体现在横骨架挡土抗力 E 、竖骨架侧壁摩擦力 F_1 、 F_2 及结构整体自重产生的正压力 Q 的大小,护面结构自重产生的坡向分力由脚墙基础承担。新型预制 H 骨架通过结构设计优化,在减轻防护结构自重的条件下,增加了竖骨架凹槽内摩擦力 F_3 、 F_4 ,并通过结构卡槽增强骨架与浅层边坡土体的整体性。

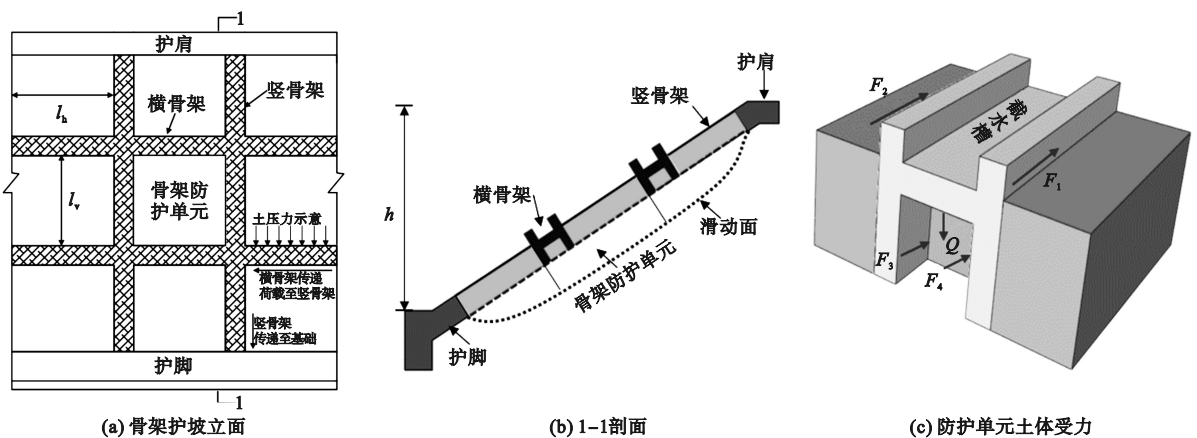


图 1 H 型骨架护坡示意图

Fig. 1 H skeleton slope protection diagram

2 试验概况

2.1 试件制作

制备 C30 混凝土 H 型骨架,骨架单元长度取

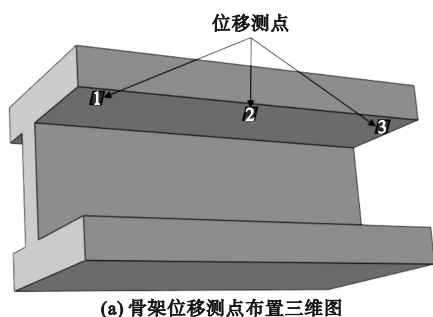
1 m,各处厚度均为 0.1 m。具体配比:水泥 461 kg/m^3 、砂 512 kg/m^3 、石子 1252 kg/m^3 、水 175 kg/m^3 。

2.2 测点布置

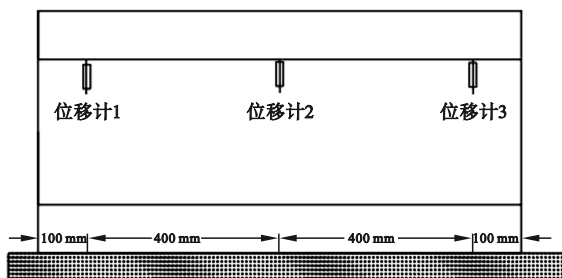
根据试验研究的目的,为测试 H 型骨架单元

在受压过程关键节点的受力状况和变形特征,在试验过程中着重测量骨架翼缘挠度随荷载的变

化,具体骨架位移测点布置如图2所示。



(a) 骨架位移测点布置三维图



(b) 骨架位移测点正视图

图2 测点布置

Fig. 2 Arrangement of measuring points

2.3 试验工况

试验通过对新型H型骨架翼缘的不同位置施加非均匀荷载,模拟H型格构梁在实际工程中承受的不均匀土体作用,合理预测构件达到极限承载能力时其破坏模式及变形特征,进而掌握H型骨架运用时的受力特征,具体试验工况分类见表1。

表1 试验工况分类

Table 1 Classification of test conditions

工况1	工况2	工况3
对H型骨架翼缘及腹板面施加荷载	对H型骨架腹板面施加荷载	对H型骨架翼缘面施加荷载

2.4 加载方式

2.4.1 预载试验

预载试验分3级进行,见表1。每级荷载施加后间歇时间为1 min,随后测读并记录数据,同时观察仪表工作状态是否正常,若发现异常应及时处理,处理完毕后方可卸载。

表2 预载试验

Table 2 Preload test

加载分级	加载值/kN	间歇时间/min
1	1	1
2	3	1
3	5	1

2.4.2 正式加载

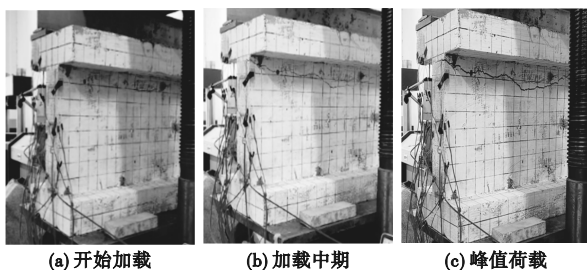
正式加载时,采用力控制与位移控制相结合的加载方法,首先从零加载力开始,逐步增加加载力,每加载5 kN,暂停加载5 min,记录当前状态

的位移和变形情况,直到试件开裂。然后转为位移控制加载,位移步进大小为0.05 mm/s,以获取细致的位移和加载力数据,并应注意在合适的范围内观察构件的行为,在临近开裂和破坏时,加强观测,以期测得较为准确的峰值荷载。在试验进行的同时,持续监测记录位移和加载力的数据,以便后续分析和处理。为使结构在荷载作用下的变形得到充分发挥和达到基本稳定,荷载加载完毕后有一定的停留时间,应不少于10 min,观察构件,并记录裂缝产生和发展情况。

3 试验结果及分析

3.1 H型骨架混凝土破坏形态

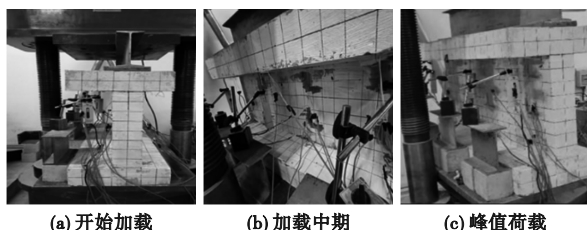
图3~5依次展示了工况1至工况3的骨架加载全过程。



(a) 开始加载 (b) 加载中期 (c) 峰值荷载

图3 工况1骨架加载过程

Fig. 3 Skeleton loading process of working condition 1



(a) 开始加载 (b) 加载中期 (c) 峰值荷载

图4 工况2骨架加载过程

Fig. 4 Skeleton loading process of working condition 2

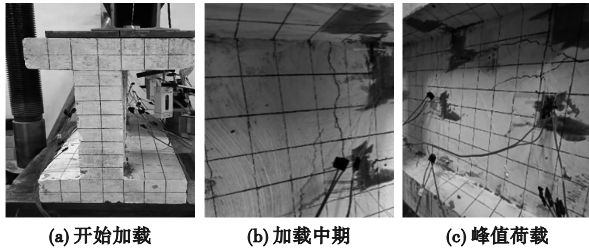


图 5 工况 3 骨架加载过程

Fig. 5 Skeleton loading process of working condition 3

由图 3~5 可知,工况 1 的骨架初期由于处于弹性阶段,无裂缝发展,随着荷载的逐渐增加,混凝土产生横向拉裂破坏的裂缝,当荷载达到塑性应变的峰值点后,骨架腹板左侧迅速开裂,并向右侧延伸,形成从左到右的贯通裂缝,并伴随有混凝土碎屑掉落,为脆性破坏。工况 2 的受压形式为纯压腹板,在荷载达到 754 kN 的峰值后,试件仅产生了微小的塑性变形,由于此时荷载已经达到实际工程的要求,停止加载。工况 3 的混凝土破坏形态为自腹板中上部引发的网状裂缝,并沿着首先产生主裂缝的位置向四周延伸,微小裂缝较工况 1 更多,也伴随有混凝土碎屑的掉落。三种加载工况中,除工况 2 受力具有轴心受压优势,未产生脆性破坏,其余两种工况均产生不同程度的破坏,由于工况 3 受力较工况 1 更为均匀,所以产生的裂缝较小,且裂缝分布也更为均匀。

3.2 荷载位移曲线分析

分别对工况 1 至工况 3 的骨架荷载位移进行分析,得到荷载位移曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,在工况 1 的弹性阶段,随着荷载逐渐增加,三测点位移基本呈线性逐渐增大,当荷载增大到 136 kN 时,达到混凝土骨架的弹性极限,三点位移骤然上升。这是由于此时混凝土骨架腹板开始产生横向贯通裂缝,与试验现象相吻合。达到峰值荷载 153 kN 后,骨架破坏,三测点位移增大至 4.53 mm 左右;在工况 2 中,由于骨架一直

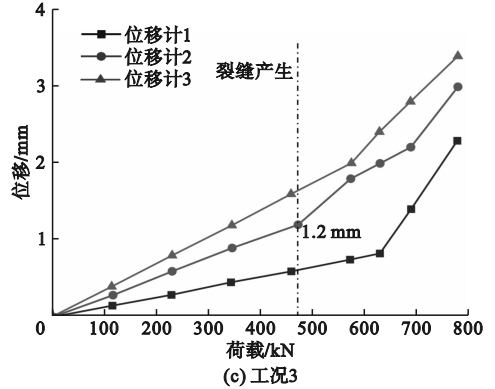
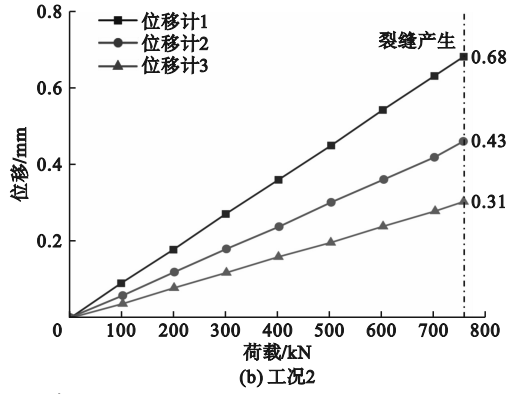
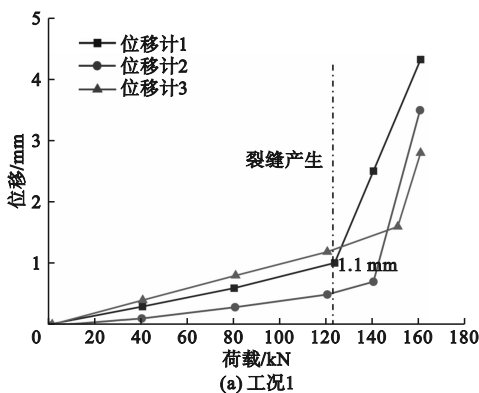


图 6 荷载位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

处于弹性阶段,荷载从开始增加至峰值荷载 754 kN 过程中,三测点位移基本呈线性增加,且位移数值不大,停止加载后,三测点位移增大至 0.68 mm 左右;在工况 3 的弹性阶段,骨架三测点位移逐渐上升,未产生明显突变,随着荷载逐渐增大,骨架从弹性阶段过渡到裂缝开展阶段,腹板中部产生裂缝,并向周围延伸,三测点位移产生微小突变,并迅速增长。当加载到峰值荷载 680 kN 时,骨架破坏,此时测点 1 与测点 2 位移增加至 3.81 mm 左右。测点 3 位移较其余两测点更小,原因是骨架产生裂缝由腹板中部延伸时,未向测点 3 发展。

通过抗压试验结果可知,新型 H 型骨架在最不利荷载条件下的受力性能良好。当骨架达到承载能力产生破坏时,骨架的极限承压能力远远满足其在护坡时所需要的强度要求,符合实际工程需要。

4 骨架 - 边坡稳定性数值模拟

基于 ABAQUS 有限元数值分析软件,采用有限元强度折减法构建边坡稳定性数值分析模型,以塑性区贯通为失稳判据对边坡稳定性进行研究。

4.1 ABAQUS 中的强度折减法

强度折减法采用对材料的粘聚力、内摩擦角进行折减试算,直到破坏为止,以破坏时的折减系

数作为稳定性安全系数的方法。其中,在 ABAQUS 软件中实现时,为避免过早破坏,本文选取强度折减系数初值为 0.5,采用 0.05 步长递增折减系数,以特征点水平位移突变或计算不收敛作为失稳判据。

4.2 模型及计算参数

为了合理模拟复杂土体的变形过程,考虑到护坡骨架混凝土工作状态基本为线弹性,在土体构成中采用 Mohr-Coulomb 线弹性本构模型。模型尺寸依据实际工程边坡比例(坡高 6 m,坡比 1:1.25)确定,选取骨架净距为 3 m 的方格护坡形式,坡顶与坡底埋设护肩与护脚与骨架连接,采用三维实体单元模拟土体与骨架。混凝土与土体的接触面之间摩擦系数取 $\tan(\varphi/3)$,其中 φ 为内摩擦角。法向采用硬接触。

单元类型为 C3D8R,边界条件设定为:约束边坡模型两侧 X、Y 向位移,底部的 X、Y、Z 三方向位移以及边坡模型前后表面的 Z 向位移,并对模型整体施加重力载荷,计算所需参数见表 3。

表 3 计算所需参数

参数	土体	骨架
重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	16.9	24
弹性模量/MPa	30	30 000
泊松比	0.3	0.2
粘聚力/kPa	20	
内摩擦角/($^\circ$)	21.8	

具体模型尺寸及护坡型式见图 7 所示。

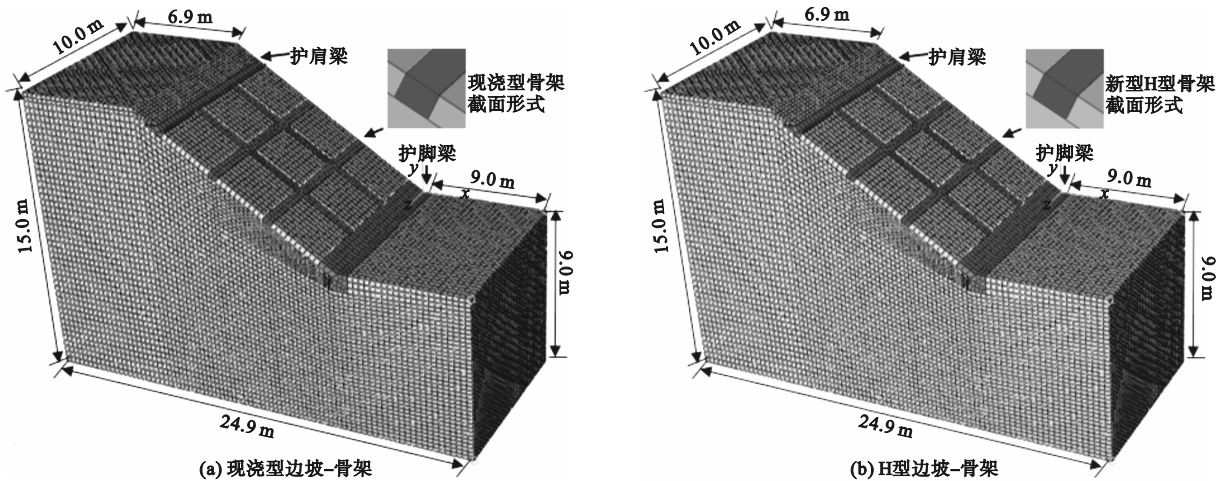


图 7 边坡几何模型尺寸

Fig. 7 Slope geometry models sizes

5 模拟结果分析

5.1 骨架位移结果分析

图 8 为现浇型骨架和 H 型骨架的位移分布云图。

由图 8 可见,对于两种骨架护坡结构,在同等条件下参与边坡防护时,骨架位移变化规律相似,H 型骨架的整体位移略小于现浇型骨架,说明 H 型骨架的安全性能较现浇型骨架更为优异。两者的纵向主骨架位移比横向骨架位移更为显著,较大位移相对集中在坡顶,小位移则集中在坡底。每一排的横向骨架位移相对均匀,坡顶的横向骨架位移大于坡底横向骨架位移,总体比较,二者位移差在 $\pm 5\%$ 范围内。

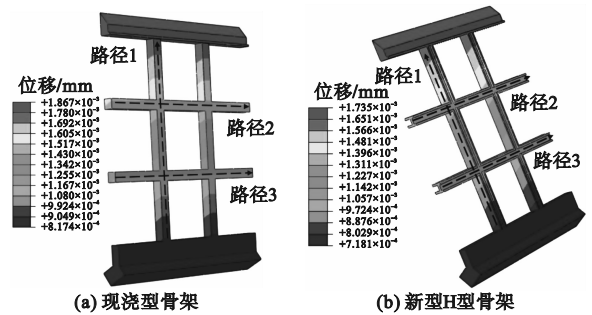


图 8 护坡骨架位移分布

Fig. 8 Displacement distribution of slope protection skeleton

图 9 为沿骨架纵向路径(从坡顶至坡底)的位移变化曲线。路径 1 为沿坡顶至坡底的骨架轴心;路径 2 为距离坡顶最近的横向位移;路径 3 为距离坡底最近的横向位移。

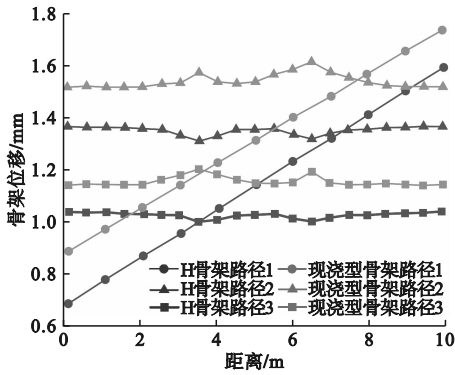


图 9 路径位移变化

Fig. 9 Path displacement changes

由图 9 可知,现浇型骨架坡顶位移为 2.1 mm,而 H 型骨架为 1.8 mm,降幅达 14.3%,表明新型结构整体刚度更优,可有效抑制坡顶变形。

5.2 骨架应力结果分析

两种骨架的应力分布如图 10 所示。

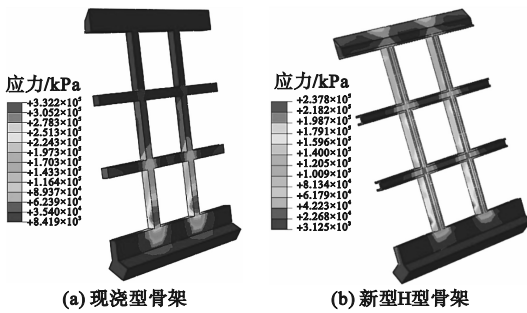


图 10 骨架应力分布

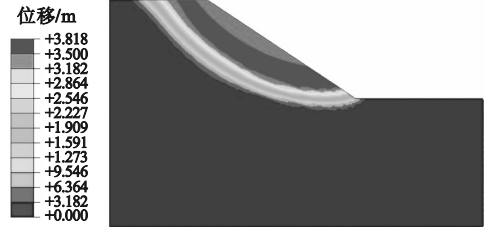
Fig. 10 Skeleton stress distribution

由图 10 可见,现浇型与 H 型骨架应力分布规律相似,峰值应力均出现在坡脚区域。主骨架应力自坡顶至坡脚逐渐递增,水平骨架应力分布相对均匀且低于纵向分布值,节点部位均出现局部应力集中。数值分析结果表明:现浇型骨架坡脚最大应力为 332.3 kPa,较 H 型骨架(最大应力为 237.8 kPa)大 39.8%;横向骨架节点应力极值分别为 245.34 kPa(现浇型)和 218.65 kPa(H 型)。关键节点处现浇型骨架等效应力为 H 型骨架等效应力的 20%~30%,表明 H 型骨架受力性能更优。应力突变现象主要源于节点处粘结层刚度差异所致。

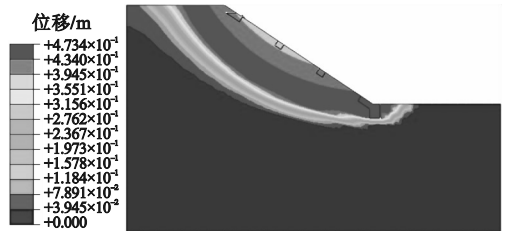
5.3 边坡稳定性分析

土体失稳破坏最终位移如图 11 所示。由图 11 可知,三种类型边坡滑移趋势基本接近。当边坡无骨架防护时,最终坡体最大处滑移 3.81 m,此边坡在现浇型骨架的防护下,其坡体最终滑移

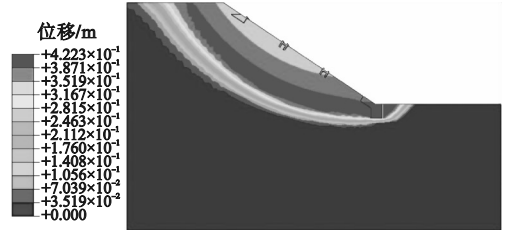
值大大降低,最大滑移为 0.47 m,当 H 型骨架参与边坡防护时,失稳坡体最大滑移值为 0.42 m。从位移的角度分析,在现浇型与 H 型骨架的防护作用下,边坡安全性能大大提升,H 型骨架较现浇型骨架的防护效应更为突出。



(a) 无骨架边坡



(b) 现浇骨架-边坡

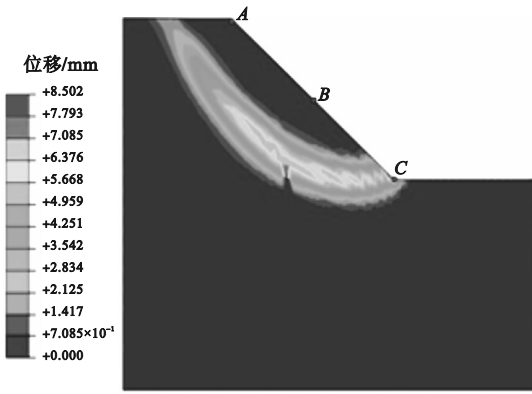


(c) 新型 H 型骨架-边坡

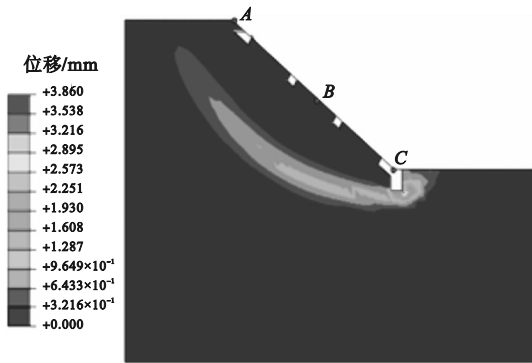
图 11 失稳土体最终位移

Fig. 11 Final displacement of unstable soil

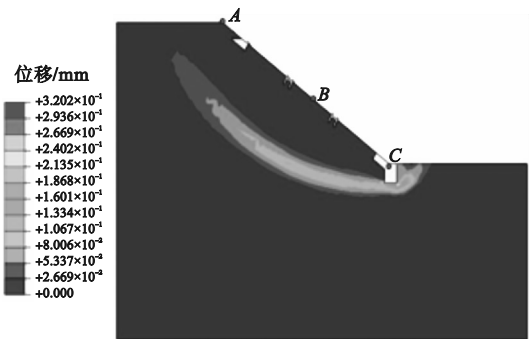
边坡塑性滑动区如图 12 所示。由图 12 可知:当坡体达到临界状态产生破坏时,无骨架坡底位置的塑性破坏最为突出,其塑性滑动区从坡底开始一直延伸至坡顶后约 4.52 m,潜在的塑性滑动区贯穿整个坡体;现浇骨架边坡坡体破坏模式与无骨架支撑下的工作状态相似,塑性破坏在坡底护脚位置处最为明显,塑性滑动区从坡底延伸至坡顶约 3.56 m,但与无骨架支撑防护相比,其潜在的塑性滑动区域明显缩小,且其坡体塑性破坏程度有所下降;在土体被破坏时,H 型骨架边坡坡底护脚位置处的塑性破坏最为突出,塑性滑动区从坡底延伸至山顶后约 2.51 m,其与现浇矩形框架结构防护对比可知,坡体的潜在塑性滑动区域有所减小,且坡体的塑性破坏程度也相应有所下



(a) 无骨架边坡



(b) 现浇骨架-边坡

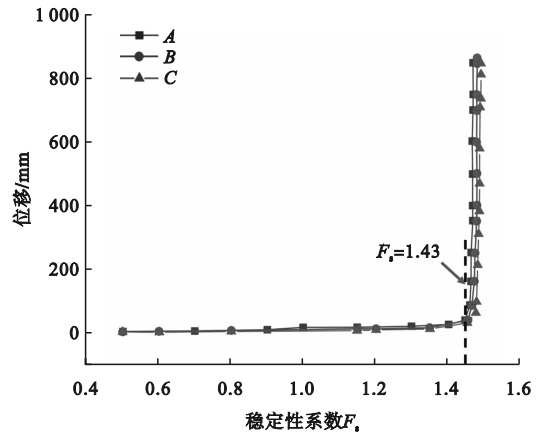


(c) 新型H型骨架-边坡

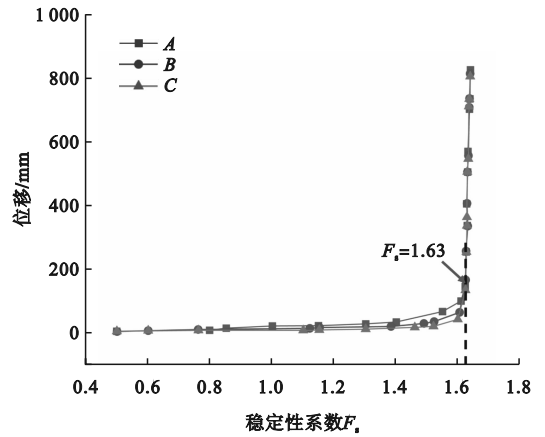
图 12 边坡塑性滑动区

Fig. 12 Plastic sliding zones of slope

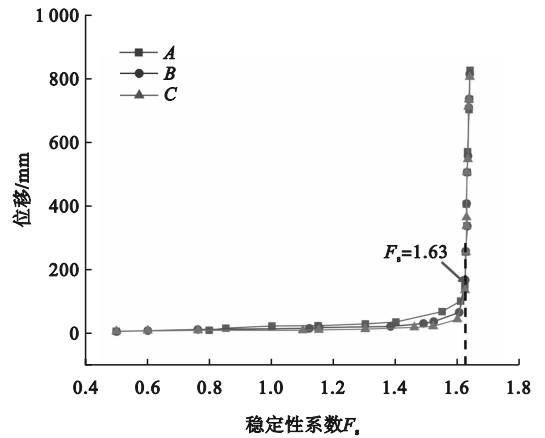
降。通过增加折减系数反复计算,直至达到临界破坏状态时,以特征部位的水平位移拐点作为评价标准,选取斜坡顶部、中部、底部为特征点,即图中的A、B、C三点,得到无骨架支撑时的边坡稳定系数 $F_s = 1.43$;现浇方格骨架防护作用下的边坡稳定系数 $F_s = 1.63$,土体稳定性能较无骨架防护时提高了13.97%;H型预制骨架防护作用下边坡安全系数 $F_s = 1.65$,土体边坡稳定系数较无骨架防护时提高了15.38%,相对于现浇型结构防护时增加了1.59%。边坡特征点具体的位移变化曲线如图13所示。



(a) 无骨架边坡



(b) 现浇骨架-边坡



(c) 新型H型骨架-边坡

图 13 边坡特征点水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of slope feature points

6 结论

本文通过试验与模拟验证了新型H型骨架的边坡防护性能,结论如下。

1) H型骨架在边坡失稳时,最大应力低于其极限承压能力,满足护坡强度要求,其浅层塑性滑动区范围较现浇型有所减小。

2) 现浇型与 H 型骨架的应力集中区域均主要分布于坡底护脚节点, 但 H 型骨架在连接节点处出现额外应力集中现象, 表明需加强节点连接设计以提升整体性。

3) 新型 H 型骨架通过截面优化与卡槽设计, 自重降低 18%, 抗压承载力达 754 kN, 较现浇型抗压承载力提高了 9.8%。数值模拟表明, H 型骨架防护下边坡稳定性系数 ($F_s = 1.65$) 较无骨架工况提高了 15.38%, 塑性滑动区延伸长度降低了 29.5%, 有效地提高了护坡结构的整体稳定性与防护效果。

参考文献 (References):

- [1] 魏芸, 袁琳. 极限平衡法与强度折减法计算稳定安全系数的对比分析[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(10): 1-4.
WEI Y, YUAN L. Comparative analysis of stability safety factor calculated by limit equilibrium method and strength reduction method[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(10): 1-4. (in Chinese)
- [2] 杜婷婷, 李志清, 王晓明, 等. 黄土边坡降雨冲刷模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 732-740.
DU T T, LI Z Q, WANG X M, et al. Model experiment study on erosion of loess slope due to rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 732-740. (in Chinese)
- [3] 董心悦, 祁云, 傅鹏, 等. 海州露天矿内排土场边坡稳定性研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(4): 92-96.
DONG X Y, QI Y, FU P, et al. Study on the stability of the slope in the inner dump of Haizhou open pit mine[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43(4): 92-96. (in Chinese)
- [4] 娄玥玥, 黄卉, 陆勇, 等. 强度折减法的边坡稳定性模拟计算及比较[J]. 土工基础, 2025, 39(2): 246-250.
LOU Y Y, HUANG H, LU Y, et al. Stability simulation of a slope using strength reduction method and comparison[J]. Soil Engineering and Foundation, 2025, 39(2): 246-250. (in Chinese)
- [5] ZHOU Z, ZHOU J L, LAI L, et al. Determination of optimal mining width for coal mining under the slope by of using numerical simulation [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1124.
- [6] 申文军. 铁路废旧轨枕护坡骨架力学特性及稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(7): 99-102.
- SHEN W J. Mechanical properties and stability analysis of slope protection framework by using recycled railway sleepers [J]. Railway Engineering, 2021, 61(7): 99-102. (in Chinese)
- [7] 李栋, 周青爽, 廖超, 等. 路堤边坡装配式拱形骨架设计方案研究[J]. 路基工程, 2024(1): 97-101.
LI D, ZHOU Q S, LIAO C, et al. Research on the design scheme of prefabricated arch skeleton for embankment slope [J]. Subgrade Engineering, 2024(1): 97-101. (in Chinese)
- [8] 赵志荣, 张飞云. 基于数值模拟的神延西湾露天煤矿边坡稳定性分析[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(1): 92-98.
ZHAO Z R, ZHANG F Y. Analysis of slope stability of Xiwan open-pit coal mine based on numerical simulation [J]. Shaanxi Coal, 2025, 44(1): 92-98. (in Chinese)
- [9] XING W Q, CHENG Z H, LING X Z, et al. Bearing properties and stability analysis of the slope protection framework using recycled railway sleepers [J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4619.
- [10] LIAN J F, WU J J. Shallow stability and parameter sensitivity analysis of soil slope with frame protection under rainfall seepage[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 19607.
- [11] 宣立华. 方格骨架防护型式对路基边坡浅层稳定性影响[J]. 路基工程, 2019(1): 131-134.
XUAN L H. Influence of square skeleton protection structure on the shallow stability of subgrade soil slope [J]. Subgrade Engineering, 2019(1): 131-134. (in Chinese)
- [12] 连继峰, 罗强, 蒋良滩, 等. 矩形骨架防护路基边坡浅层稳定性及优化设计[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 228-233.
LIAN J F, LUO Q, JIANG L W, et al. Shallow stability of subgrade slopes protected by rectangular frame structures and structural optimization [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 228-233. (in Chinese)
- [13] ZHANG S, GUAN W Y, CHANG S L, et al. Integrated geophysical prediction of goaf and water accumulation in pingshuo Dong open-cut mine with ultrashallow and high drops [J]. Processes, 2023, 11(6): 1653.
- [14] SHUI K, HOU K P, HOU W W, et al. Optimizing slope safety factor prediction via stacking using sparrow search algorithm for multi-layer machine learning regression models [J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(10): 2852-2868.

(责任编辑: 徐淑姣)