

土—砼复合体护坡技术的施工试验及力学模型

李 栋¹, 王传明², 李小军³, 郭红梅¹, 高照良⁴, 娄永才⁵

(1.陕西省水土保持和移民工作中心, 陕西 西安 710004; 2.陕西省水土保持

生态环境监测中心, 陕西 西安 710004; 3.陕西省略阳县水土保持工作站, 陕西 略阳 724300;

4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.中南林业科技大学 林学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要: [目的] 对土—砼复合体护坡技术的施工及力学模型进行试验研究, 为土石山区坡改梯工程的科学实施提供科学参考。[方法] 从边坡破坏机理入手, 基于土力学基本原理, 提出“以土挡土”的边坡设计概念以及“土—砼复合体”概念设计的基本思路, 结合施工试验建立“土—砼复合体”稳定计算力学模型, 同时给出中低边坡和中高边坡设计建议。[结果] 经过近 6 a 的施工试验和运行, 验证了“以土挡土”边坡稳定设计概念的合理性及“土—砼复合体”临界平衡状态和极限平衡状态两种模型及其配套公式的科学性; 与传统石坎边坡相比, “土—砼复合体”护坡技术可以节省材料用量 80% 以上, 提升施工速度 5 倍以上, 初步造价不高于石坎造价。[结论] 土—砼复合体护坡可以替代传统石坎护坡, 有效缓解施工速度慢与进度要求、石料用量大与环保方面限制采石的矛盾, 未来应用前景广阔。

关键词: 坡耕地; 水土流失; 以土挡土; 挡土墙; 护坡技术

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2023)06-0031-09 **中图分类号:** TV31, TU431, TU432

文献参数: 李栋, 王传明, 李小军, 等. 土—砼复合体护坡技术的施工试验及力学模型[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 31-39. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.005; Li Dong, Wang Chuanming, Li Xiaojun, et al. Construction experiment and mechanical modeling of soil-concrete composite slope protection technology [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 31-39.

Construction Experiment and Mechanical Modeling of Soil-Concrete Composite Slope Protection Technology

Li Dong¹, Wang Chuanming², Li Xiaojun³, Guo Hongmei¹, Gao Zhaoliang⁴, Lou Yongcai⁵

(1. Water and Soil Conservation and Migration Work Center of Shaanxi Province, Xi'an,

Shaanxi 710004, China; 2. Soil and Water Conservation Environment Monitoring Center of Shaanxi

Province, Xi'an, Shaanxi 710004, China; 3. Water and Soil Conservation Workstation of Lueyang County,

Lueyang, Shaanxi 724300, China; 4. Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 5. Forestry Institute, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hu'nan 410000, China)

Abstract: [Objective] The construction and mechanical model of soil-concrete composite slope protection technology were analyzed in order to provide scientific reference for the implementation of slope modification engineering in soil-rock mountain area. [Methods] Using a slope damage mechanism based on the basic principles of geotechnics, we proposed the slope stability design concept of “retaining soil with soil”. We used this basic design concept, combined with construction experiments to establish a stability calculation mechanics model of “soil-concrete composite”, and also provided design suggestions for medium-high slopes. [Results] After nearly six years of construction experiments and operation, the rationality of the slope stability design concept of “retaining soil with soil” was verified. The two scientific models of “soil-concrete composite” (i.e., critical equilibrium state and ultimate equilibrium state) and their supporting formulas were also verified. Compared with traditional stone slopes, the “soil-concrete composite” slope protection technology could save more than 80% of the materials used in construction, and could accelerate construction

收稿日期: 2023-06-25

修回日期: 2023-08-10

资助项目: “十三五”国家重点研发计划(专题)项目“沟道径流消能抗冲技术研究”(2016YFC0501706-02); 国家水土保持重点工程和坡耕地水土流失综合治理工程“十四五”项目(S5200000000026554001)

第一作者: 李栋(1965—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持研究。Email: 3025803501@qq.com。

通信作者: 高照良(1969—), 男(汉族), 河南省灵宝市人, 博士, 研究员, 主要从事生产建设项目水土流失研究。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn。

speed by more than five times, with the initial construction cost being no higher than the cost of the stone slope. [Conclusion] Soil-concrete composite slope protection can replace the traditional stone bank slope protection, thereby effectively alleviating the conflict between slow construction speed and schedule requirements, as well as the conflict between the large amount of stone material needed for construction and the environmental protection aspects of quarrying. The soil-concrete composite slope protection technology has broad application prospects in the future.

Keywords: sloping farmland; water and soil loss; retaining soil with soil; retaining wall; slope protection technology

坡耕地是水土流失的主要策源地和水土保持的重点区域^[1-2]。坡耕地水土流失威胁区域的粮食安全和生态安全^[3],制约农村经济社会高质量发展。坡改梯是坡耕地水土流失治理中采用最广泛、最重要的水土保持工程措施^[4],在全球范围内有广泛的分布^[5]。坡改梯可以减缓原始坡耕地坡度,缩短坡长,改善土壤理化性质,增加土壤水分,截断坡面径流,从而起到减轻坡耕地水土流失的作用^[6-7],是中国山区和丘陵区进行中低产农田改造,防治坡耕地水土流失等农业综合治理的主要途径之一^[8-9]。

梯田可持续利用的前提条件是确保梯田边坡的稳定。石坎梯田、土坎梯田或植物篱护坎等是目前常见的梯田形式^[10-12]。已有研究^[13]表明,土坎梯田由于表土物质松散,土壤侵蚀最严重。植物篱成坎周期相对较长,涵水保土能力随时间逐渐增强,常和土坎梯田相结合从而起到固坎保土的作用^[14]。石坎梯田是山高坡陡降水量大的山区梯田的主要形式,石坎本质上是石质重力式挡土墙^[15]，“以石挡土”，涵水保土能力强。然而,石坎梯田修筑成本高^[10,16],施工速度慢与进度要求有矛盾,石料用量大与当前环保方面限制采石有矛盾。因此,迫切需要寻找一种施工速度快并节约石料的筑坎方法。鉴于此,本文在分析梯田边坡的破坏形式和传统梯田边坡稳定机理的基础上,提出一种“以土挡土”的设计概念,设想利用“L”型砼构件将梯田边坡表层土体保护和组织起来,形成一种“土质挡墙”代替石质挡墙,“以土挡土”,节省石料,加快施工速度。2017年,利用实施国家水土保持重点工程——坡耕地水土流失综合治理项目的实施,在陕西省汉中市略阳县开始进行 1.5 hm² 低边坡(1.5 m 以下)“土质挡墙”试验性施工,在此基础上进一步形成“土—砼复合体”的结构概念和力学模型。

1 试验区概况及试验结果

1.1 试验区概况

略阳县位于陕西省西南部、秦岭南麓、汉中盆地西缘、嘉陵江上游的秦巴山地,地势高差大,最高海拔 2 425 m,最低海拔 587 m,高差 1 838 m;属大陆性过

渡气候,北部为南暖温带气候区,南部为北亚热带气候区,年平均气温 13.2 ℃,极端最低气温 -11.2 ℃,极端最高气温 37.7 ℃,多年平均降雨量 860 mm。耕地面积 1.58×10⁴ hm²,其中 6°以上坡耕地 1.47×10⁴ hm²,占总耕地面积的 93%。试验区具有山高坡陡降水量大的典型特点。

1.2 试验情况

2017年,在白水江镇权力村使用 300×300 mm 直角“L”型构件开始进行 1.5 hm² 低边坡(1.5 m 以下)“土—砼复合挡墙”边坡梯田施工试验(图 1),现场施工速度超传统石坎 5 倍以上,试验取得了初步成功。随后略阳县水保站将低边坡(1.5 m)高度拓展到 1.8 m,特别是在白水江镇梁家湾村村头高达 3 m 的冲沟填方土体上试验了 15 m 长 3 m 高的超设计边坡(图 2)。其后 2018 年 7 月 14 日,略阳县遭受了一次 24 h 降雨 89 mm 的暴雨,前后 35 d 累计降雨 369 mm,原设计高度边坡稳定,超设计高度边坡“大变形而不倒”,验证了土—砼复合挡墙设计概念的合理性。之后几年,略阳县在后续水保项目中进行了推广,至 2022 年陆续实施面积达 36.67 hm²(表 1,图 3)。

1.3 试验结果

经过对 2017—2022 年采用 300×300 mm 直角“L”型构件构筑的“土—砼复合体挡墙”边坡近 6 a(2017—2022 年)监测,无论是经历 2018 年 7·14 暴雨还是之后的其他降雨,1.8 m 以下中低边坡稳定安全;白水江镇梁家湾村的 3 m 高超设计边坡,经历 7·14 日暴雨后“大变形而不倒”,其竖向变形超过 30 cm,横向变形超过 10 cm,而同期建成的石坎边坡则遭到了严重破坏,对对照明显(图 2)。另外,3 m 高超设计边坡在经历 7·14 暴雨大变形后,近 6 a 没有新的明显变形。分析 3 m 高超设计边坡“大变形而不倒”的原因,是由于通过“L”型构件构筑的表层土质挡墙与深层滑坡体材质几近相同,而土壤具有黏结性和塑形,因而土质挡墙和滑坡体可以结合成更大的柔性复合体,从而具有不同于石质挡墙的“超稳定性”。至此,最初的“土质挡墙”概念发展成“土—砼复合体”概念。



图 1 构件安装、回填夯实和建成试验田

Fig.1 Installation of components, backfill compaction and establishment of experimental field



图 2 土-砼复合体边坡与同期石坎边坡损毁对比

Fig.2 Comparison of soil-concrete composite slopes and damage of stone bank slopes in same period

表 1 土-砼复合体历年试验面积

Table 1 Area of soil-concrete composite experiments over years

项目名称	年份	地点	面积/hm ²
坡耕地水土流失综合治理工程白水江项目区	2017	白水江镇权力村、梁家湾村	9.47
坡耕地水土流失综合治理工程徐家坪项目区	2018	徐家坪镇徐家坪社区、猫儿沟村	15.00
小流域综合治理工程窑坪河项目	2021	郭镇谭家庄村、徐家坪镇青岗坪村	5.67
小流域综合治理工程马蹄湾项目	2022	马蹄湾镇付家山村、禅觉寺村	6.53
总计			36.67



图 3 近年土-砼复合体建成梯田

Fig.3 Terraces built with soil-concrete composite in recent years

2 理论分析与力学模型构建

2.1 梯田边坡破坏及防护形式和稳定机理

2.1.1 梯田边坡破坏及主要防护形式 梯田边坡破坏形式为两大类 4 种形式。第 1 类为浅表层破坏:水力冲刷破坏、冻融破坏、膨胀破坏。第 2 类为深层破坏:重力破坏,即滑坡,有一个破裂面。上述 4 种破坏形式中,膨胀破坏是由于在成土母岩中含有蒙脱石等膨胀矿物,这些矿物在吸水后会膨胀从而破坏土体结构,造成边坡损毁。商洛市的洛南县、安康市的月河盆地北侧、汉中市的洋县一带的土坎梯田屡修屡坏,膨胀破坏是重要原因。低边坡以浅表层破坏为主,高边坡两者兼有,以深层破坏为主。

陕北和关中地区以土坎梯田为主,陕南地区则以石坎梯田为主。陕北和关中地区采用土坎梯田是因为这些地方地处干旱半干旱地区,第 1 类破坏不很突出,再加上土地资源相对丰富,边坡占地影响不大,采用带坡梯田并控制好坡角和坡高关系,可以解决第

2 类破坏问题。陕南地区山高坡陡,降水量大,第 1 类破坏比较严重;而且土地资源紧缺,如果采用坡脚较小的土坎梯田解决第 2 类破坏对土地资源浪费比较严重。然而,该地区石料资源相对丰富,采用坡脚较大的石坎梯田,既能解决第 1 类问题,也能解决第 2 类问题,深受群众欢迎。

2.1.2 土坎梯田的稳定机理 土坎梯田边坡稳定取决于坡角和坡高的关系。黏性土滑坡潜在破裂面为曲线,但对于低边坡(梯田边坡广义上属于低边坡)一般简化为直线(同无黏性土),可以用平面滑动法^[17]进行稳定分析。本文定义坡角为 β ,危险角为潜在破裂面与水平线夹角 α ,潜在破裂面长度为 L ,土壤内摩擦角为 f ,黏聚系数为 c ,重度(容重)为 γ 。并定义土质边坡的临界平衡状态为潜在滑坡体重力(G)产生的滑动力($F_h = G \times \sin \alpha$),等于潜在破裂面上摩擦力($F_m = G \times \cos \alpha \times \tan \phi$)与黏聚力($F_n = c \times L$)之和,即: $F_h = F_m + F_n$;相应坡高为临界坡高(H_w)。基本要素和力学模型如图 4 所示。

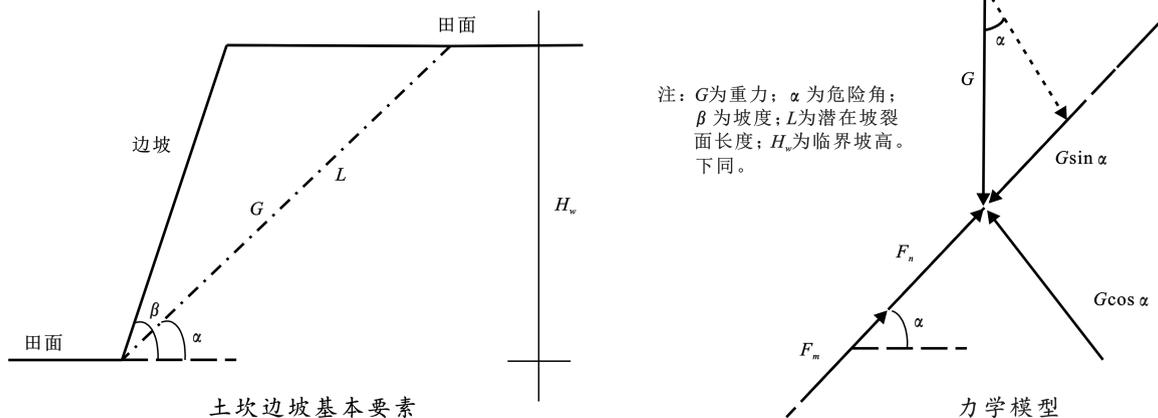


图 4 土坎边坡基本要素及力学模型

Fig.4 Basic elements and mechanical modeling of soil bank slopes

在上述临界平衡状态下,利用库仑(Coulomb)定律^[18]和平面滑动法^[17]可求出危险角 α 对应的临界坡高计算公式为:

$$H_w = \frac{2 \times \frac{C}{\gamma}}{\left(\sin \alpha \times \cos \alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\tan \beta} \right) \times \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right)} \quad (1)$$

在此基础上进一步地数学分析,可以找到危险角,计算公式为:

$$\alpha = 0.5(\beta + \phi) \quad (2)$$

当 $\beta = 90^\circ$ 时, $\alpha = 45^\circ + \phi/2$, 此时的危险角与朗肯(Rankine, 1857)土压力理论的破裂角^[18]一致。

利用公式(1)~(2)可以计算出某种土壤条件下各种坡脚 β 对应的临界坡高 H_w (图 5)。

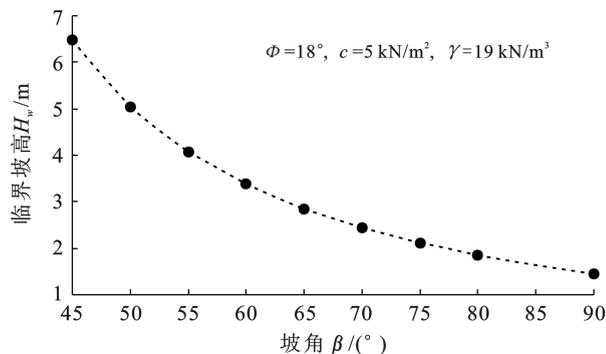


图 5 坡角与临界坡高关系

Fig.5 Relationship between slope angle and critical slope height

2.1.3 石坎梯田的稳定机理 石坎梯田边坡的稳定依赖于干砌石筑成的石质挡墙,“以石挡土”。边坡稳定取决于挡墙稳定,而挡墙稳定取决于挡墙自身重量

(G)、滑坡体滑动力(F_h)、挡墙地基反力(F_f)3 部分力量的平衡。其中,滑坡体推动力 F_h ,可分解为竖向力 F_{hc} 和水平力(滑动力) F_{hp} ;挡墙地基反力 F_f ,可分解为竖向力 F_s 和水平力(抗滑力) F_{kh} 。当 3 部分力量不能平衡时,便会造成挡墙水平滑动和挡墙倾倒。石坎边坡稳定的力学原理如图 6 所示。

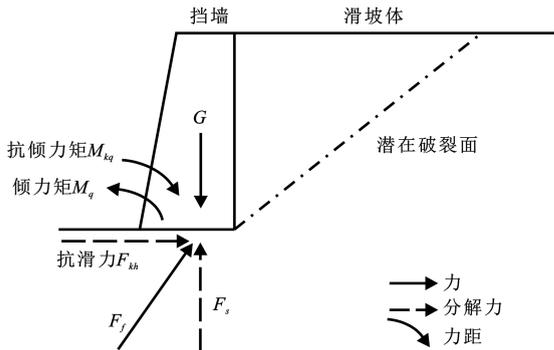


图 6 石坎边坡稳定的力学原理

Fig.6 Mechanics for slope stabilization of stone bank

2.2 土-砼复合体和稳定机理

2.2.1 设计概念和概念设计 传统土坎梯田边坡稳定的核心是控制坡角 β ,石坎梯田边坡稳定的核心是保证石质挡墙的稳定,从而实现“以石挡土”。本文基于土力学原理,有机融合石坎边坡和土坎边坡的稳定原理,形成“以土挡土”的设计概念,既利用了土坎边坡的控制坡角原理,又利用了石坎边坡的挡墙原理。土-砼复合体的核心概念是“以土挡土”,其基本手段是利用“L”型砼构件对表层土体进行保护和组织,在防止边坡浅表层破坏的同时形成“土-砼挡墙”,以代替石坎梯田的“石质挡墙”,同时利用土的黏结性和塑形使土质挡墙与滑坡体结合为一体,形成一个更大的柔性的复合体,防止边坡的深层破坏(图 7)。图 7 示意的概念设计采用直角“L”型构件,结合施工试验情况,在较高边坡拟采用大角度“L”型构件,以改善基底受力状况。

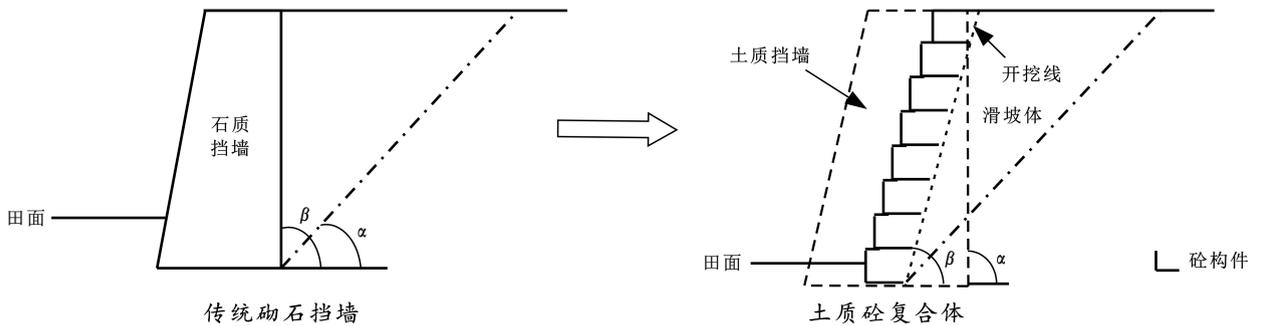


图 7 土-砼复合体概念设计

Fig.7 Conceptual design of soil-concrete composite

2.2.2 中低边坡的结构设计和力学模型

(1) 土-砼复合体的临界平衡状态分析。试验监测显示,坡高 1.8 m 以下中低边坡未见明显破坏。据此定义土-砼复合体的临界平衡状态为基底提供的抗滑力(F_h)和潜在破裂面上摩擦力(F_m)、黏聚力(F_n)之和与滑坡体滑动力($G \sin \alpha$)相等,即: $F_h + F_m + F_n = G \sin \alpha$ 。

(2) 结构设计及重力计算。结构设计参考图 7 结果,在土壤完成固结情况下,中低边坡一般不会产生深层破坏和滑动力,但在此之前,会产生少量的滑动力,故可以采用直角“L”型构件(300×300 mm,高 $h=0.3$ m,底宽 $b=0.3$ m)构件,边坡坡脚 $\beta=71.57^\circ$ (3:1),每级错台 0.1 m)构筑土-砼复合体,结构设计如图 7 所示,重力计算:复合体分部重力计算示意图 8 所示。

假定复合体潜在破裂角与土质边坡危险角相同,仍按公式(2)计算。

潜在破裂面长度按公式(3)计算:

$$L = \left[H^2 + \left(\frac{H}{\tan \alpha} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

潜在破裂面以上的复合体单位长(1 m)重力按公式(4)计算:

$$G = 0.5\gamma \left[\frac{H^2}{\tan \alpha} - (H - b \tan \beta) \times \left(\frac{H}{\tan \beta} - b \right) \right] \quad (4)$$

基底以上的复合体单位长(1 m)重力按公式(5)计算:

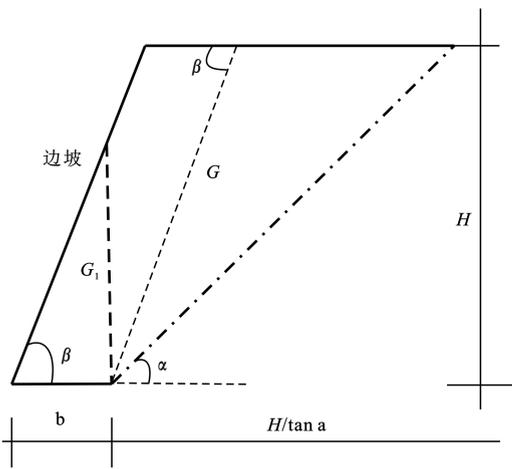
$$G_1 = 0.5\gamma \times b^2 \times \tan \beta \quad (5)$$

(3) 力学模型。假定: ①复合体处于前述临界平衡状态, $F_h + F_m + F_n = G \sin \alpha$; ②边坡上部填土在施工期未完成固结,填土部分黏聚系数(c)、摩擦角(φ)按 0 对待。故对潜在破裂面上摩擦力、黏聚力按潜在破裂面长度减半计算; ③潜在破裂角与土质边坡危险角相同; ④静力平衡按潜在破裂面对应土体重力(G)和基底对应土体重力(G_1)分步平衡, G 产生的滑

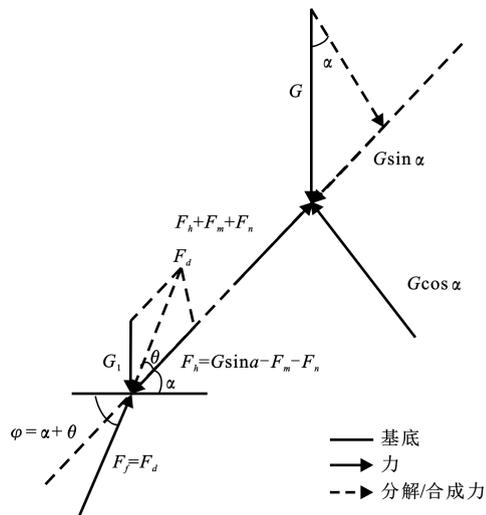
动力与潜在破裂面平行。力学模型如图 8 所示。图 8 所示基底提供的抗滑力(F_h)与潜在破裂面剩余滑动

力($G \times \sin\alpha - F_m - F_n$)相等,按公式(6)计算:

$$F_h = G \times \sin\alpha - 0.5 \times (G \times \cos\alpha \times \tan\varphi + c \times L) \quad (6)$$



低边坡复合体重力计算示意



临界平衡状态复合体静力平衡示意

图 8 中低边坡复合体重力计算及力学模型

Fig.8 Gravity calculation and mechanical modeling of medium and low slope complexes

图 8 所示基底压力(F_d)与基底反力(F_f)相等,按公式(7)计算:

$$F_d = \sqrt{G_1^2 + F_h^2} + 2 \times G_1 \times F_h \times \sin\alpha \quad (7)$$

图 8 所示基底压力调整角(θ)按公式(8)计算:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\cos\alpha \times \frac{G_1}{F_d} \right) \quad (8)$$

基底抗滑系数(μ 为基底摩擦系数)按公式(9)计算:

$$K = \mu \times \tan\varphi \quad (9)$$

基底平均压应力按公式(10)计算:

$$\delta = F_d \times \frac{\sin\varphi}{b} \quad (10)$$

(4) 模型计算结果及与施工试验效果对比。陕南耕作土壤大多为冲洪积黏性土,其中又以粉质黏土居多。绝大部分粉质黏土(孔隙比 ≤ 0.85 ,液性指数 $\leq 0.5 \sim 0.75$)的黏聚系数 $c \geq 16$ kPa、摩擦角 $f \geq 16^\circ$ [19];绝大部分黏性土(孔隙比 ≤ 1.0 ,液性指数 ≤ 1.0)的承载力 ≥ 115 kPa[20];绝大部分土体(含水量 $\leq 35.5\%$)重度(容重) $\gamma \leq 20$ kN/m³[21];砂与土体摩擦系数为 $0.45 \sim 0.65$ [22]。参考上述资料,为使计算结果符合大多数土体,土力学参数取值详见表 2。

表 2 土力学参数取值

Table 2 Values of geotechnical parameters

黏聚系数 c /kPa	摩擦角 φ / ($^\circ$)	重度 γ / (kN \cdot m ⁻³)	摩擦 系数 μ	允许承载 力/kPa
16	16	20	0.50	115

根据上述土力学参数计算基底抗滑系数和平均压应力(表 3)。由表可知,当 $H < 1.8$ m 时, $k > 1$,表明中低边坡在大多数情况下,采用 300×300 直角构件构筑的复合体可以实现 1.8 m 以下坡高安全,与施工试验结果一致。

表 3 中低边坡(直角构件)临界平衡状态计算结果

Table 3 Calculation of critical equilibrium state for low and medium slopes (right-angled members)

构件规格	底宽 b / m	名义 坡高 H /m	抗滑 系数 k	地基 应力 δ /kPa
300 \times 300	0.30	1.5	> 1.38	18
	0.30	1.8	1.38	42
	0.30	2.1	0.82	67
	0.30	2.4	0.67	97

2.2.3 中高边坡

(1) 试验分析及土—砂复合体的极限平衡状态。梁家湾村的 3 m 高超设计边坡在“7·14”暴雨后,复合体结构顶部出现了破裂面,整体发生较大的柔性变形,直角“L”型构件向内或向外倾斜,其中基底向外倾斜(图 2)。表明在暴雨发生后,密实度不高的复合体土体接近流塑状态,破裂面充分润滑,复合体滑动力全部转移到基底,基底压力角度被动调整。据此本文定义土—砂复合体的极限平衡状态为破裂面上摩擦力(F_m)和黏聚力(F_n)消失但基底仍能支撑复合体的状态,即破裂面上 $F_m = 0, F_n = 0$,全部力量由基底承担。

表 4 中高边坡(大角度构件)极限平衡状态计算结果

Table 4 Calculation results of limit equilibrium state for medium-high slopes (large-angle elements)

构件规格	b 底宽/ m	H 名义 坡高/m	k 抗滑系数 ($\mu=0.5$)	δ 地基 应力/kPa
300×300	0.3	0.9	1.75	31
	0.3	1.2	1.38	45
	0.3	1.5	1.22	62
	0.3	1.8	1.14	82
	0.3	2.1	1.09	105
	0.3	2.4	1.06	131
	0.3	2.7	1.04	159
	0.3	3.0	1.02	190
300×400	0.4	0.9	2.70	29
	0.4	1.2	1.75	41
	0.4	1.5	1.44	55
	0.4	1.8	1.29	71
	0.4	2.1	1.20	89
	0.4	2.4	1.14	110
	0.4	2.7	1.10	132
	0.4	3.0	1.08	157
300×500	0.5	0.9	5.54	28
	0.5	1.2	2.38	39
	0.5	1.5	1.75	51
	0.5	1.8	1.48	65
	0.5	2.1	1.34	80
	0.5	2.4	1.25	98
	0.5	2.7	1.19	116
	0.5	3.0	1.14	137

表 5 中高边坡(大角度构件)设计参考

Table 5 Design reference for medium-high slopes (large-angle elements)

H 名义 坡高/m	采用构件数量/个			合计/ 个
	300×300	300×400	300×500	
2.1	5	2		7
2.4	5	2	1	8
2.7	5	2	2	9

(2) 施工效率及环保矛盾缓解。土—砼复合体采用的砼构件是工厂化生产,可以实现平行作业或提前作业,而且构件安装简单快速,因此整体施工速度超过传统石坎 5 倍以上。另外石材用量减少 80% 以上,大大缓解了环保石料限采的突出矛盾。

3 结论与建议

(1) 基于土力学原理,提出了“以土挡土”的边坡设计概念和“土—砼复合体”的概念设计。利用“L”型砼构件代替“石质挡墙”护坡,结合前后六年施工实践验证了“土—砼复合体”合理性。

(2) 基于对中低边坡和较高边坡(梁家湾)变形分析,构建了“土—砼复合体”中低边坡临界平衡状态力学模型和 中高边坡极限平衡状态力学模型,并赋予两个模型相应的配套公式,同时提出了相应设计建议。

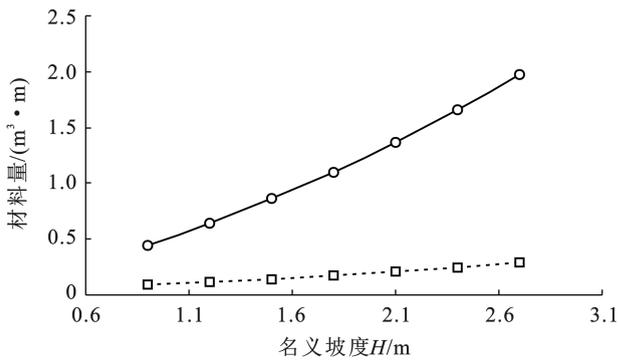
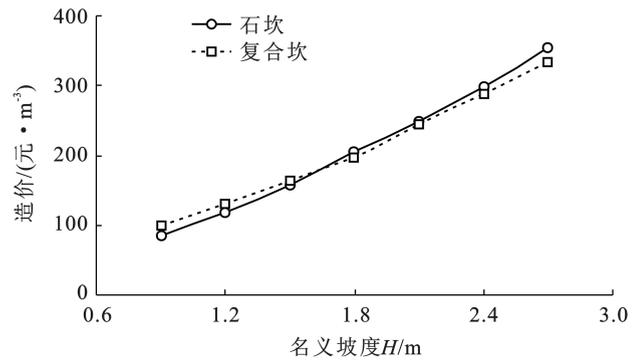


图 11 单位长边坡(1 m)材料用量和造价对比

Fig.11 Comparison of material usage and price per unit length of slope (1 m)



(3) 和石质挡墙边坡相比,“土—砼复合体”边坡施工材料用量节省超过 80%,施工速度提升超过 5 倍,且造价不高于石质挡墙边坡,表明其完全可以替代传统石质挡墙在陕南山区大规模营造高质量梯田,对加快水土流失防治、提升农田质量具有重要现实意义。

(4) 建议有关部门强化中高边坡的土—砼复合体替代传统石质挡墙的相关研究,在进一步完善相关设计的科学性同时提升实践的可操作性。

致谢:略阳县水保站原站长陈小明同志、陕西省水土保持和移民工作中心任冰同志分别在施工试验和文章写作过程中给予全力支持,谨此致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 朱上卿,赵桂茹,安瞳昕,等.不同播种方式微地形差异对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持学报,2023,37(3): 43-51.
- [2] 陈芳,高宝林,李杰,等.湖北省坡耕地现状分析及宜耕性评价[J].水土保持研究,2023,30(1):418-422,429.

- [3] 姚孝友,刘霞,张光灿.淮河流域坡耕地水土流失特点与综合整治模式[J].中国水土保持科学,2012,10(1):94-97.
- [4] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation: a global synopsis [J]. *Geomorphology*, 2013,201:1-34.
- [5] 乔冰洁,杨勤科,王春梅,等.梯田对侵蚀地形指标的影响:以黄土丘陵第2副区为例[J].水土保持研究,2023,30(4):184-193.
- [6] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,173:109-121.
- [7] 李亚龙,张平仓,程冬兵,等.坡改梯对水源区坡面产汇流过程的影响研究综述[J].灌溉排水学报,2012,31(4):111-114.
- [8] 郭振勇.三峡库区不同类型梯田对降雨产流特征和垂直水文连通性的影响[D].湖北武汉:华中农业大学,2022.
- [9] 吴发启,张玉斌,宋娟丽,等.水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J].水土保持学报,2003,17(5):28-31.
- [10] 马正锐,孟祥江,何邦亮,等.三峡库区坡地果园生态治理措施研究进展[J].四川林业科技,2020(41):127-132.
- [11] Basic F, Kisic I, Mesic M, et al. Tillage and crop management effects on soil erosion in Central Croatia [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004,78:197-206.
- [12] 李进林,韦杰.三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J].水土保持通报,2017,37(1):229-233,240.
- [13] Meng Xianmeng, Zhu Yan, Yin Maosheng, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope [J]. *Scientific Reports*, 2021,11:16341.
- [14] 程冬兵.三峡库区等高绿篱坡地农业系统紫色土水分特性研究[D].湖北武汉:华中农业大学,2008.
- [15] 王棣,李永生,刘捷,等.太行山石灰岩区隔坡复式梯田及稳定性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):66-70.
- [16] 杜旭,李顺彩,彭业轩.植物篱与石坎梯田改良坡耕地效益研究[J].亚热带水土保持,2012,24(3):26-28,35.
- [17] 于文堂.边坡岩土工程[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.1164.
- [18] 冯国栋.土力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [19] 李国新.岩土的工程性质:岩土工程勘察设计手册[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
- [20] 王贻荪.地基承载力:岩土工程勘察设计手册[M].辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1996.
- [21] 广州铁路局工务处,柳州铁路局工务处.路基[M].北京:人民铁道出版社,1979.
- [22] 杨文渊.实用土木工程手册[M].北京:人民交通出版社,1985.

(上接第30页)

- [17] 范繁荣,潘标志,马祥庆,等.白桂木的种群结构和空间分布格局研究[J].林业科学研究,2008,21(2):176-181.
- [18] 董灵波,马榕,田栋元,等.大兴安岭天然林不同演替阶段共优势种种群结构与动态[J].应用生态学报,2022,33(8):2077-2087.
- [19] 谢立红,黄庆阳,曹宏杰,等.五大连池火山蒙古栎种群结构及动态特征[J].浙江农林大学学报,2022,39(5):960-970.
- [20] 张金峰,葛树森,梁金花,等.长白山阔叶红松林红松种群年龄结构与数量动态特征[J].植物生态学报,2022,46(6):667-677.
- [21] 王泳腾,黄治昊,王俊,等.燕山山脉黄檗种群结构与动态特征[J].生态学报,2021,41(7):2826-2834.
- [22] 张鲜花,朱进忠,吴咏梅.天山北坡羊茅草原群落结构与数量特征的动态变化[J].草地学报,2012,20(5):819-824.
- [23] 杨彪,张全建,龚旭,等.雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*)种群结构与动态特征[J].生态学报,2020,40(4):1184-1194.
- [24] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.
- [25] 刘建泉,杨建红.祁连圆柏种群结构和生活史分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):140-144.
- [26] 卢杰,郭其强,郑维列,等.藏东南高山松种群结构及动态特征[J].林业科学,2013,49(8):154-160.
- [27] 吴承祯,洪伟,谢金寿,等.珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J].应用生态学报,2000,11(3):333-336.
- [28] Deevey E S. Life tables for natural populations of animals [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1947,22(4):283-314.
- [29] 陈晓德.植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J].生态学报,1998,18(2):104-107.
- [30] 张晓鹏,于立忠,杨晓燕,等.辽东山区天然更新红松幼苗种群结构与动态[J].应用生态学报,2022,33(2):289-296.