

# 基坑被动区拱形加固布置的拓扑优化及数值分析

刘 续, 于 沉 香, 凌 飞, 张 艳 军, 陈 铂

(中冶集团武汉勘察研究院有限公司, 湖北 武汉 430080)

**摘要:**在采用水泥搅拌桩加固被动区土体的工程实践中,常见的加固形式有实腹式和格构式,而拱形布置作为一种新型的加固形式,其合理性及优势有待验证。首先采用 ANSYS 软件对加固布置形式进行了拓扑优化,发现拱形为受力最优形式。进一步的二维有限元计算表明,在桩体位移相同情况下,拱形比格构式能节省更多材料。以某基坑工程为例开展了实例研究,数值模拟及监测结果证实,相较于传统实腹式布置,多拱结构在控制桩体位移的同时,能大幅减少材料用量。

**关 键 词:**基坑;被动区加固;拱形布置;拓扑优化;数值分析

**中图法分类号:**TV470+3

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.022

## 1 研究背景

随着我国城市化发展进程的加快,必然带来大量土木工程的兴建,并伴随着大量基坑的开挖。随着基坑朝着大、深方向发展,其对周边环境的影响程度也越来越大。水泥土搅拌桩加固被动区作为一种可行的变形控制措施,能够有效地改善土体的力学指标,减小降水引起的三维固结变形,增强坑底抗隆起能力,提高被动土压力系数等<sup>[1-4]</sup>。

关于被动区加固,诸多学者进行了深入研究。其中,魏祥等通过有限元弹塑性分析,讨论了被动区加固范围、加固程度等对桩基侧向变形的影响<sup>[5]</sup>。刘溢对不同地质条件和基坑变形控制要求下合理的加固形式进行了研究<sup>[6]</sup>。郑俊杰等对基坑裙边加固和抽条加固的主要参数及布置形式进行研究<sup>[7]</sup>,得出其加固宽度和加固深度的规律。但上述研究均建立在普通被动区加固形式上,对其他方式的加固均未涉及。

被动区加固常见的布置形式有实腹式和格构式,如图 1 所示,而拱形加固属于一种新型的加固形式,其合理性和实用性需要得到验证。为此,本文通过 ANSYS 软件进行拓扑优化分析,以寻找最优布置形式,采

用 MIDAS 软件进行数值对比分析,以验证多拱布置受力的合理性。

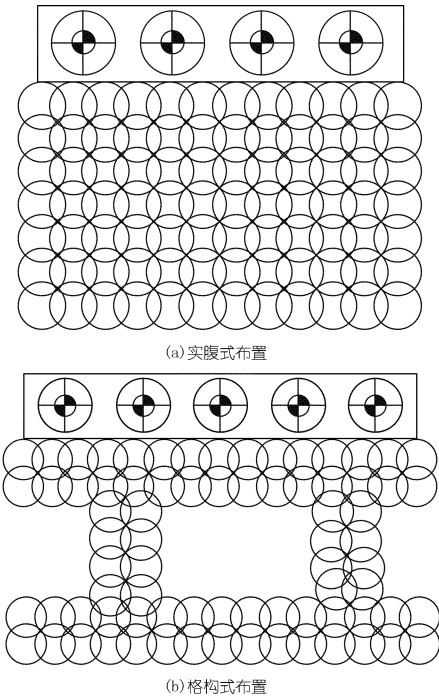


图 1 常见被动区加固形式

收稿日期:2015-03-27

基金项目:武汉市城建科研项目“深基坑被动区加固结构化加固新技术研发”(201219)

作者简介:刘 续,男,工程师,硕士,主要从事基坑支护的设计和研究工作。E-mail:liuxur811@163.com

## 2 拱形加固拓扑优化

### 2.1 拱形加固概念

当拱形受到垂直拱弧的外压力时,能把均布荷载沿着拱弧向两侧和拱脚传递,如图 2 所示。如果拱形有足够的强度,就能承受巨大的压力,自然界拱桥的设计为最好的佐证。当拱内充填介质时,因挤密而产生外推力,那么拱就能够承受更大的外力,基于此,本文将该理念运用到被动区加固布置形式上,并对其进行分析研究。

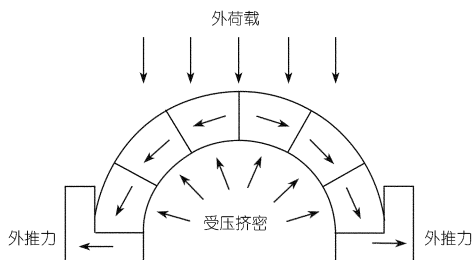


图 2 拱形受力传递示意

### 2.2 拓扑优化原理

拓扑优化的目的是改善结构的性能或减轻结构的重量,使设计结构的材料用量更经济,受力分布更合理<sup>[8-9]</sup>。ANSYS 提供了优化技术和手段,方便实现设计方案的优化,本文采用该功能寻找被动区最优的形状布置。

拓扑优化在广义上是指形状优化,有时也称为外型优化。拓扑优化的目标是寻求承受单荷载或多荷载的物体的最佳材料分配方案,即在设计优化区域  $\Omega$  内寻找一个指定体积  $\bar{V}$  的子区域  $\Omega^{\text{mat}}$  (有材料区域),使得该区域对应的目标函数  $\varphi$  (如结构柔顺度、结构位移等)取得极值。引入材料密度函数  $\rho(x)$

$$\rho(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \in \Omega^{\text{mat}} \\ 0 & \text{当 } x \in \Omega \setminus \Omega^{\text{mat}} \end{cases} \quad (1)$$

经拓扑优化计算后得到单元的密度值为 0 或 1,其中 0 代表可优化区域,1 代表不可优化区域,由此可以从图中得到优化后的形状。

### 2.3 优化模型

采用平面二维拓扑分析。将支护桩简化为桩板体,支护桩宽度为 0.8 m,加固宽度设置为 5 m,计算分析长度选取 10 m,外部荷载取 90 kPa,见图 3。其中,桩体弹性模量  $E = 24 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.2$ ,加固土  $E = 38 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $c = 80 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10^\circ$ 。在荷载作用下,限制桩体位移增量在 10% 范围内,分别减小 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 的体积,通过 ANSYS 中 Topological Opt 模块进行拓扑优化。

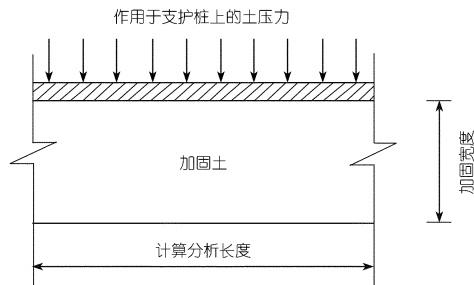


图 3 基坑支护设计空间示意

### 2.4 优化结果

经过拓扑优化计算后,分别提取不同优化面积下的结果,图 4 中红色区域为不可优化区域,蓝色区域为完全可优化区域,即该区域中材料被优化。

从图 4 可以看出,当形状优化 10% 时,约束点之间的形状减少呈拱形。当优化逐渐增大时,拱弧逐渐增大,但不能无限增大下去,当增大到 30% 后,拱中部位置出现一条连接带,保证形状减小拱脚受压时不向两侧折弯。当再增大优化面积时,连接带逐渐消失,拱脚和支护结构间以锥形墩支撑。把支护桩当作连续的板墙后,成为一个整体,优化形成锥形墩有存在的可能。而实际上,支护桩是独立的,在受力区域未采取加固措施时,该支护桩在土压力作用下产生较大弯矩及位移,从而降低整排支护桩的加固效果,因此该优化形状为不可取形状。由此可以得出,拓扑优化以形状减小 30% ~ 40% 较为合适。

## 3 格构式与拱形的优化对比分析

格构加固形式在基坑被动区加固中也得到一定应用,其为纵横交错的水泥搅拌条带。该形式能够节省一定材料,但并未考虑土体受力形式。为对比其与拱形的加固效果,采用二维有限元进行对比分析。计算模型尺寸为 25 m × 15 m,格构式加固条带宽 2 m,间距 5 m,拱形加固带宽 2 m,拱径 5 m,支护桩宽 0.8 m,在外侧施加 90 kPa 线压力,原状土体计算参数  $E = 12 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0.35$ ,  $c = 12 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 8^\circ$ ,加固土及桩体参数如第 2 节所列,经计算结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,两种加固形式位移变化较为均匀,位移随远离支护桩逐渐减小,其中格构式加固下支护桩位移约为 38.5 mm,而拱形加固形式下支护桩位移约为 39.0 mm,桩体位移较为接近。格构式加固下位移在未加固区明显增大,而拱形加固下拱顶处位移略大于拱间位移,说明支护桩传递来的力通过拱向周边分解。同时还可以看出,模型边侧未加固段的位移为 39.7 mm,大于中间加固段,可见拱形加固在限制桩体位移中起到较大作用。在二者略为相同的位移下,

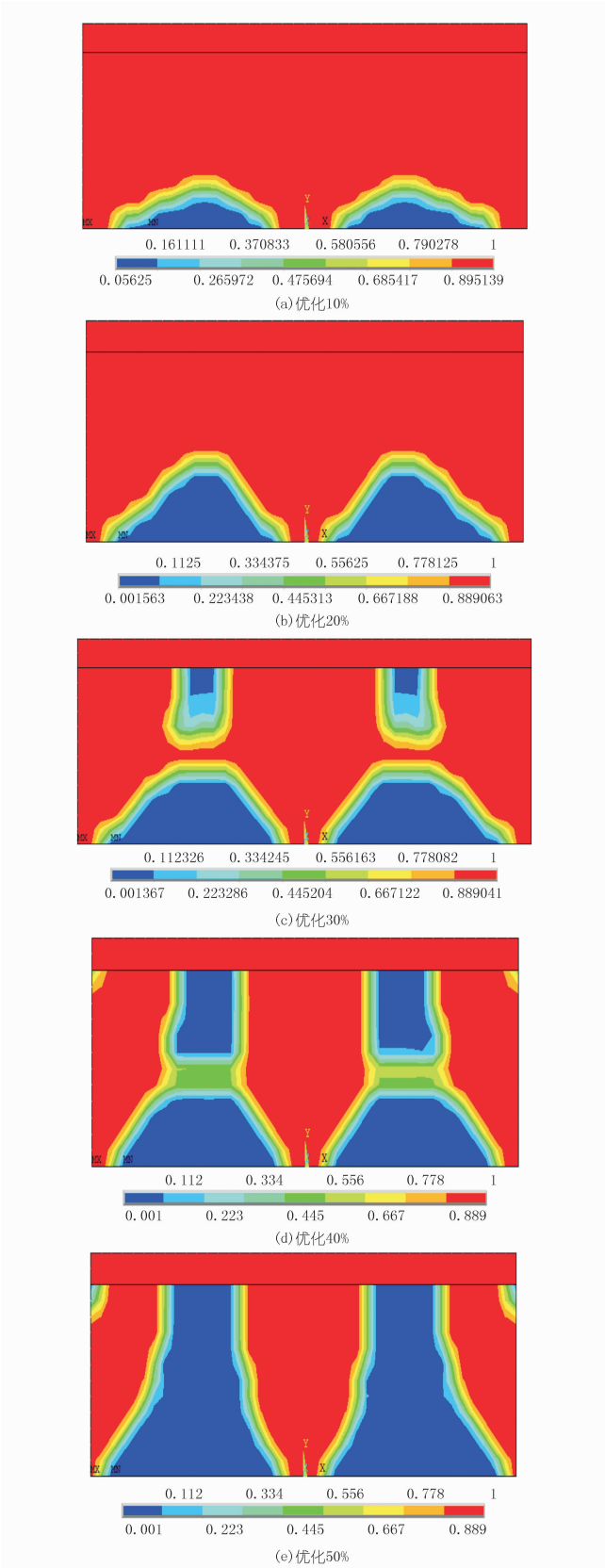


图 4 拓扑形状优化云图

格构式加固在模型土体面积的占比为 62%，而拱形加固面积占比为 45%，这表明，拱形比格构式明显减少了材料用量，拱形加固在一定程度上优于格构式加固。

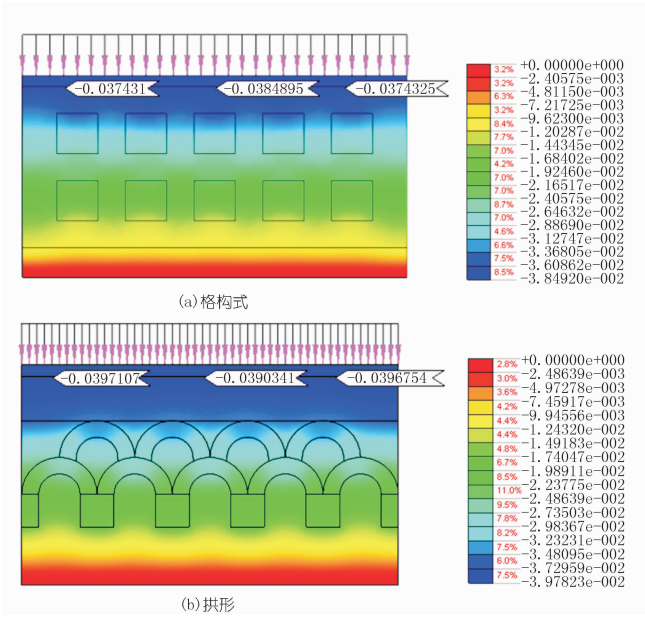


图 5 格构式与拱形加固桩体位移对比 (单位: mm)

4 实例设计

某基坑工程位于云南,场地地貌上属滇池湖积盆地沉积地貌。拟建场地地形平坦,基坑开挖深度为 4.90 m,邻近基坑边缘 3 m 左右有一栋 3 层高楼部,该段拟采用灌注桩方式进行支护,被动区采用加纤维水泥搅拌桩进行加固。

为开展试验,加固区分两段,一段为实腹式的布置形式,一段为拱形布置形式,两段的平面及剖面布置图见图 6。

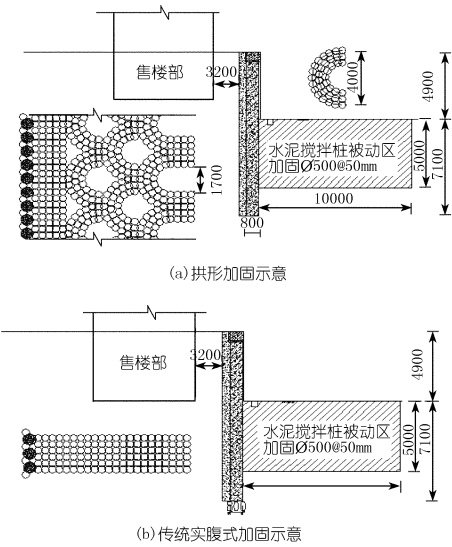


图 6 基坑加固平面及剖面布置 (单位: mm)

在方案设计时,采用了理正岩土设计软件进行计算,结果均满足规范要求。因设计软件无法考虑布置形式,因此采用有限元软件进行辅助计算。

## 5 数值分析

### 5.1 数值模型

采用有限元软件 Midas/GTS 对试验区进行数值分析,以得到不同加固形式下支护桩的水平位移及拱形区域塑性应变等结果。模型尺寸为 80 m×100 m×30 m,加固区按照试验区设置,其中东侧和西侧为实腹式加固区,中间 24 m 为拱形加固区,加固宽度为 10 m,深度为 4.9 m。其中拱形加固区中拱墩尺寸为 1.8 m×1.8 m,间距为 3 m,拱半径为 3 m,拱顶设置 3 m 宽的全加固区域。支护桩近似为连续的桩墙,两侧进行水平约束,底部进行竖向约束,计算模型如图 7 所示。

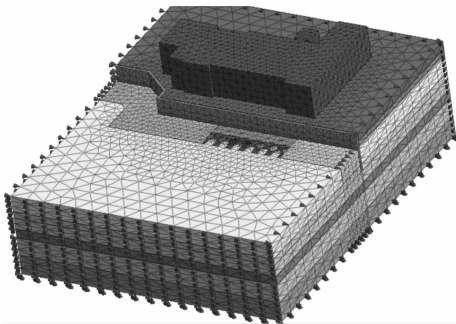


图 7 被动区加固数值计算模型

土体主要计算参数按照表 1 设置,其中,弹性模量为勘察报告给出的压缩模量  $E_{1-2}$  的 2.5 倍,支护桩简化为桩墙,其弹性模量参数由支护桩和桩间土各参数按置换面积等效。

表 1 计算土体参数

| 土体    | 厚度/<br>m | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/<br>MPa     | 泊松比  | 凝聚力/<br>kPa | 摩擦角/<br>( $^{\circ}$ ) |
|-------|----------|--|------------------|------|-------------|------------------------|
| ①人工填土 | 2.4      | 19   | 6.3              | 0.34 | 12          | 8.5                    |
| ②粉质黏土 | 1.7      | 18   | 12.8             | 0.32 | 20          | 10                     |
| ③粉土   | 5.8      | 17.8                                       | 11               | 0.33 | 10          | 3.8                    |
| ④粉土   | 2        | 18.4                                       | 20               | 0.32 | 11          | 20                     |
| ⑤粉砂   | 3.6      | 19.1                                       | 24               | 0.31 | 8           | 25                     |
| 加固土   | 5        | 20   | 38               | 0.30 | 80          | 10                     |
| 支护桩   | 12       | 25   | $24 \times 10^6$ | 0.25 |             |                        |

### 5.2 计算结果

在进行初始地应力平衡后,进行支护桩和加固体的置换,以模拟其施工过程,然后对土体一次性开挖至坑底,经过计算,提取支护桩顶端水平位移,结果如图 8 所示。

从图中可以看出,实腹式加固形式的桩顶最大位移为 23.7 mm,而拱形加固形式的桩顶最大位移为 27.1 cm。拱形布置形式产生的桩体最大位移为实腹式布置的 1.14 倍,而加固面积则为实腹式布置面积的 0.64 倍,也即减小 36% 的面积,增大 14% 的位移,可

以看出加固效果较为明显。

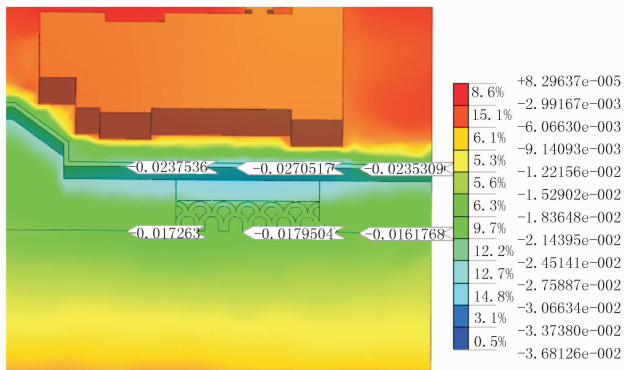


图 8 被动区加固措施下的位移云图(单位:m)

另从计算结果可知,拱形加固区在拱顶产生较大塑性应变,约为  $7.0 \times 10^{-3}$ ,而拱体塑性应变则较小,约为  $4.4 \times 10^{-3}$ ,因此在对拱形加固区进行施工时,需对第一排拱顶区域施工质量进行严格管控。同时,可以看出实腹式加固体塑性应变为  $4.7 \times 10^{-3}$ ,较拱体略大,这也说明拱形较好地分散了荷载。

## 6 结果对比分析

试验过程中,在实腹式和拱形加固区桩顶均设置了水平位移监测点,基坑开挖过程中及基坑开挖完成后一周内,每天观测一次,监测结果如图 9 所示。

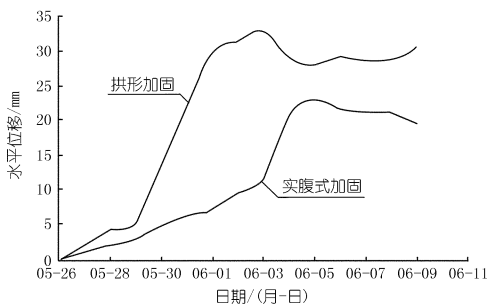


图 9 支护桩冠梁顶时间水平位移关系曲线

在 6 月 2 日发生一次强降雨,导致两个监测位移出现突然增大的情况,其中实腹式加固段增加较为明显,而拱形加固变化较小。调查发现,被动加固区因封闭较好并未受降水影响,影响较大的为桩后土体的浸水软化,导致侧土压力增大,拱形加固段前期相对较大的水平位移通过冠梁带动两侧支护桩位移增大。在降雨结束后,桩体位移有一定恢复,并逐渐趋稳。稳定后实腹式的桩顶位移约为 28 mm,拱形加固形式下桩顶位移约为 23 mm,与有限元模拟结果较为接近,计算与监测结果证实了拱形加固形式的可靠性。

## 7 结论

(1) 对该工程来说,采用拓扑优化得到的最优加

固形状为拱形,较为合理的优化面积为 30% ~ 40%。根据加固区域的宽度,可以设置为连环多拱的加固形式。

(2) 有限元计算表明,对比格构加固形式,在控制桩体相同位移下,拱形比格构式能节省更多材料。支护桩传递的推力通过拱体传递到拱脚和周边,避免了应力集中,同时拱侧未加固区并没有出现明显位移。

(3) 相比传统的实腹式,现场试验和有限元均证实拱形加固在有效控制位移的情况下,还可以明显减少材料。

本文进行的研究为基坑设计方案的拟定提供了指导性的理论基础,在今后的研究中还将加入各种影响因素,如拱体半径、拱墩间距、地质条件等,以便设计人员快速地针对不同的基坑制定不同的被动区加固方案。

#### 参考文献:

[1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第2版)[M]. 北京:中国建筑工

业出版社,2009.

- [2] 罗战友,夏建中,刘薇. 基坑内土体加固对悬臂式支护结构的影响分析[J]. 岩土力学,2006,27(增刊2):931-934.
- [3] 张宇捷,李俊才,陈志宁. 软土基坑中被动区加固对周围环境的影响[J]. 施工技术,2009,38(11):91-93.
- [4] 陶宏亮,范士凯,徐光黎. 粉喷桩加固技术在深基坑被动区支护中的应用[J]. 人民长江,2013,44(22):56-59.
- [5] 魏祥,杜金龙,杨敏. 被动区加固对基坑外桩基础的变形影响分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(增刊):37-40.
- [6] 刘溢,李镜培,陈伟. 被动区深层搅拌桩加固对超深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊):465-470.
- [7] 郑俊杰,章荣军,丁烈云. 基坑被动区加固的位移控制效果及参数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):1042-1051.
- [8] Eschenauer H A, Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: a review[J]. Applied Mechanics Reviews,2001,54(4):331-389.
- [9] 周克民,李俊峰,李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展,2005,35(1):69-74.

(编辑:郑毅)

## Topology optimization and numerical analysis on passive zone reinforcement of foundation pit by arch layout

LIU Xu, YU Chenxiang, LING Fei, ZHANG Yanjun, CHEN Bo

(Wuhan Surveying Geotechnical Research Institute CO., LTD. of MCC, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** The layout forms of solid-web and lattice reinforcement are usually adopted in the reinforcement for the passive zone of foundation pit, while the feasibility of arch layout, a new type of reinforcement form, needs to be verified. We first apply ANSYS software to conduct topology optimization to the reinforcement form, and the result shows that the arch reinforcement is the optimal form. Furthermore, 2D finite element simulation analysis shows that arch structure can save more materials than lattice form under the same pile deformation. Based on a practical case, the simulation and monitoring results confirmed that the multi-arch structure can significantly reduce the construction material for same pile deformation compared with traditional forms, which provides theoretical and practical guidance for arch reinforcement in passive zone of foundation pit.

**Key words:** foundation pit; passive zone reinforcement; arch layout; topology optimization; numerical analysis

(上接第 67 页)

## Hydraulic design of fore bay discharge spillway of Deluo Power Plant of Laluo Hydro-junction in Tibet

CHEN Zhikang, XIA Yeqing, ZHENG Guangjun

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Laluo Hydro-junction is located in Xigaze region of southern Tibet. The open flat-bottom broad crest weir was adopted as the overflow weir of the fore-bay of its Deluo Hydropower Plant and the discharge spillway with full length of 2297.20 m in the downstream is constructed along a slope-varied, tortuous mountain ridge with the largest fall of more than 230 m. Aiming at the difficulties in hydraulic design such as the complicated and varied bend and slope of the discharge spillway, the solution is put forward, which sets steps along the spillway, space interval regulating pool in the middle section and silting basin at the end of the discharge spillway. It suits the natural conditions of varying bend and slope and solves the difficulties of energy dissipation of high-head and high-speed flow.

**Key words:** discharge spillway with steps; Laluo Hydro-junction; Deluo Power Plant; Tibet