

考虑坡顶建筑荷载的垂直高边坡稳定性分析

杜文浩¹, 孙嘉楠², 黄卫挺¹

[1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京市 100083]

摘 要: 垂直支护的高边坡坡顶进行建设时, 保证边坡的稳定是一项重要工作。现采用有限元方法研究了一般工况和地震工况下垂直支护的高边坡坡顶有近坡建筑时的稳定性, 模拟考虑了浅基础和桩基础两种基础形式。通过分析浅基础埋深和桩长对边坡破坏模式、安全系数以及支护桩受力的影响, 提出了考虑坡顶建筑结构的边坡支护方案, 并通过工程实例进行验证。结果表明: 一般情况下, 坡顶建筑会对边坡产生不利影响, 坡顶建筑采用桩基础对边坡稳定性效果显著。当建筑采用浅基础时, 浅基础埋深越大, 边坡安全系数越大, 支护桩受力越小; 当建筑采用桩基础时, 桩长越长边坡越稳定, 支护桩受力越小, 而当桩长增加到坡底深度, 支护桩受力不再受桩基础长度的影响。

关键词: 垂直高边坡; 建筑荷载; 稳定分析; 有限元

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0267-06

0 引 言

我国幅员辽阔, 地形多样, 山区建筑多依地形而建, 于是在山区出现了大量的坡顶建筑。当建筑距离坡顶较近时, 建筑荷载的施加会破坏原始边坡的平衡状态, 甚至导致边坡失稳破坏。因此, 在山区进行建设前, 需充分考虑建筑对边坡的影响。

为了保证边坡的稳定以及坡顶建筑的安全, 往往限制坡顶建筑到边坡顶的安全距离。我国目前现行规范《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[1]做了相关规定: 当坡角小于 45° , 坡高小于 8 m, 坡顶建筑为条形或者矩形基础时, 建筑距坡顶距离及埋深应满足安全距离的要求。但是在实际工程中, 往往由于场地的限制, 建筑物距坡顶并不能保证规范要求的安全距离, 对于这种近坡建筑对边坡稳定性产生影响的研究至关重要。

极限平衡法^[2]是边坡稳定性分析最古老也是最完善的方法。该理论认为边坡滑动时沿着假定滑裂面发生, 通过静力平衡关系求出不同滑裂面的下滑力和抗滑力, 得到不同滑裂面的安全系数, 取最小安全系数作为边坡的安全系数。上个世纪初期, 人们普遍认为边坡滑动面是平面, 直到二十世纪 30 年代, Fellenius^[3]首次提出边坡圆弧滑裂的概念, 认为边坡圆弧滑动面以上的滑体土条之间的相互作用力大小

相等, 方向相反且作用在同一平面上, 因此可以忽略, 该方法理论简单易懂, 可操作性强, 为边坡稳定性分析奠定了基础。之后 Terzaghi 提出边坡滑动面类似于对数螺旋线, 在随后的几十年里又相继提出不少方法。Bishop, Janbu 等极限平衡分析方法, 形成了边坡稳定分析的理论基础。极限平衡法理论简单易行, 得到了广泛的应运, 何思明等^[4]通过 M-C 破坏准则结合极限分析上限定理, 研究了坡顶有条形荷载的边坡滑裂面位置和稳定性; 罗智^[5]采用简化 Bishop 法探讨了不同荷载型式在坡顶位置、大小和长度对边坡稳定性影响; 李运军等^[6]提出了一种改进 Fellenius 法, 评价坡顶荷载下边坡稳定性; Kumar 等^[7]、Choudhury 和 Rao^[8]、Halder 等^[9]则用极限平衡法研究了坡顶浅基础承载力。但是传统的极限平衡理论分析假设较多, 无法分析边坡失稳破坏的发展过程, 分析存在一定的局限性。近年来随着计算机技术的发展, 以有限元和有限差分为代表的数值模拟方法在边坡研究中广泛应用, 坡顶建筑对边坡的稳定性影响步入新的阶段。文继东^[10]采用 MIDAS GTS NX 软件, 改变条形基础和桩基础距边坡坡顶水平距离, 求出建筑到坡顶的安全界限; 杨龙华^[11]通过数值模拟结合极限平衡法, 研究不同建筑荷载下边坡安全系数; 陈欣^[12]以及黄嘉等^[13]分别运用 ANSYS 和 FLAC 研究了建筑桩基和边坡相互作用下边坡稳定; 魏小楠等^[14]通过 FLAC3D 软件分析某公路边坡坡顶荷载对边坡稳定性的影响, 对边坡支护进行优化设计; Kalourazi 等^[15]运用有限元研究了坡顶条形基础的抗震承载力。

收稿日期: 2022-12-29

作者简介: 杜文浩(1991—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事边坡支护及地下工程基坑支护研究工作。

综上所述,虽然国内外对建筑边坡稳定性研究已逐步成熟,但是目前的研究主要是考虑坡顶建筑荷载对斜坡稳定性的影响,而关于垂直支护的边坡以及坡顶建筑不同基础形式对原始支护结构的影响鲜有研究。同时在实际边坡支护设计中,设计人员往往凭借工程经验,一般将边坡和建筑独自考虑,这样导致垂直支护高边坡,坡顶建筑采用不同基础时的理论研究远远落后于工程实践。因此,针对考虑近坡建筑基础形式对垂直高边坡稳定分析的研究十分必要。

基于以上现状,本文首先利用 MIDAS GTS NX 软件,以桩锚支护垂直高边坡为对象,研究原始边坡、坡顶有浅基础建筑和桩基础建筑时,不同工况下边坡的破坏模式,以及不同建筑基础形式对原始边坡稳定性和支护的影响。

1 模型构建及工况模拟

现以桩锚支护的垂直边坡为例,利用 Midas GTS NX 有限元软件,构建了桩锚支护边坡二维数值模型,研究一般工况和地震工况下近坡顶建筑对垂直支护边坡稳定性的影响。模拟考虑了浅基础和桩基础两种不同的基础形式。边坡模型长 160 m,高 75 m,拟建建筑物距离坡顶 5 m。原始边坡模型采用桩锚支护,桩长 28 m,从上到下依次布置三道锚索,长度分别为 17.5 m、16 m、14.5 m,自由段长度 10 m。模型底面两个方向(X 和 Y)均为位移约束,顶面为自由边界,左右面为 X 方向的位移约束。

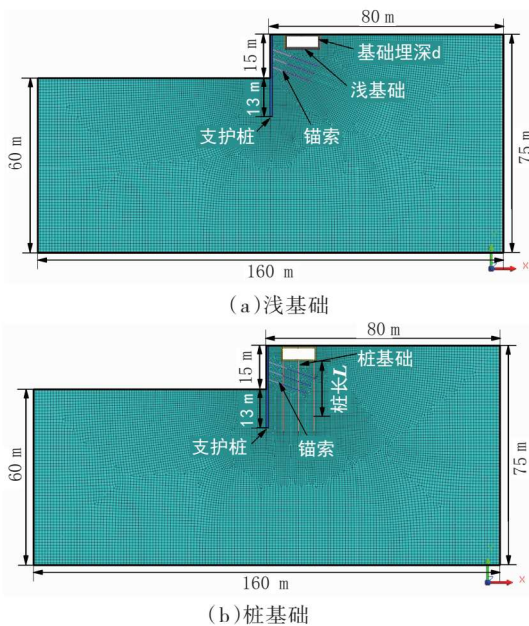


图 1 建筑边坡数值模型

土层均采用摩尔库伦(M-C)本构模型,内摩擦角 20°,内聚力 20 kPa。建筑物基础、支护桩和锚索

采用弹性模型。土层和基础结构采用 2D 单元,支护桩、锚索和桩基础采用梁单元模拟。建筑施工完成后的建筑荷载以单元均布力的方式施加在基础单元上。各单元数值计算参数取值如表 1 所列。

表 1 建筑边坡模型参数表

模型构件	材料	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 / GPa	泊松比
支护桩	C30 混凝土	2 350	30	0.2
锚索自由端	15.2 钢绞线	7 850	195	0.28
锚索锚固段	M30 水泥浆	2 000	20	0.3
结构	水下 C35 混凝土	2 350	32.5	0.2
工程桩	水下 C35 混凝土	2 350	32.5	0.2

2 模拟工况及步骤

《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[16]规定:对于基本烈度为 7 度及 7 度以上地区的永久性边坡应进行地震工况下边坡的稳定性分析。现考虑一般工况和地震工况两种工况,地震工况通过施加向外的 0.025 倍重力的水平力来模拟,对应于地震烈度 7 度,峰值加速度 0.1g。坡顶建筑基础形式为浅基础和桩基础两种,模拟不同浅基础埋深以及桩基长度对边坡稳定性的影响,具体工况如表 2 所列。

表 2 模拟工况一览表

一般工况		地震工况	
浅基础埋深 /m	桩基础长度 /m	浅基础埋深 /m	桩基础长度 /m
0	8	0	8
2	12	2	12
3	16	3	16
4	20	4	20
5	24	5	24

垂直支护边坡坡顶建筑施工数值模拟的实现过程,主要包括:

(1)初始边坡模型建立:首先建立原始边坡模型,赋予土体、支护桩以及锚索参数,施加重力以及边界约束,同时平衡初始的地应力场。

(2)基础开挖:将基础部分土体删除,同时将结构部分网格参数调整为结构材料参数,桩基础工况同时需要激活工程桩单元。

(3)施加荷载:建筑荷载施加在基础底板,对于地震工况同时需施加向边坡外的水平地震力。

(4)计算边坡稳定:采用强度折减法计算建筑施工完成后该边坡安全系数以及变形情况。

通过改变浅基础埋深以及桩基础长度,研究不

同建筑基础形式和尺寸参数对原始垂直支护边坡稳定性的影响。

3 模拟结果

在边坡稳定性分析中,边坡潜在滑裂面、安全系数以及边坡坡顶位移是边坡研究的基础,也是实际工程设计中的重要控制依据。

3.1 滑裂面位置形态演变规律

当边坡失稳破坏时,滑裂面附近土体发生明显剪切变形,因此通过边坡塑性应变可以明显看出边坡潜在滑裂面特征。图 2 为一般工况下埋深 5 m 的浅基础和桩长 24 m 的桩基础的建筑边坡,经过强度折减得到的等效塑性应变云图。对于浅基础建筑边坡,边坡破坏形成绕过支护桩底和锚索锚固段端点的近圆弧形滑动面;同时在滑体内部,浅基础底部土体形成三角形剪切破坏。对于桩基础建筑边坡,其滑裂面较深,支护桩和工程桩共同决定了滑裂面的位置。滑裂面的形状以支护桩和工程桩为界,大致分为三段,支护桩前滑裂面绕桩底,工程桩之后滑裂面过桩端,形状均接近圆弧形,支护桩和工程桩之间的滑裂面近直线。与浅基础边坡不同的是,桩基础正下方土体并未发生明显破坏。

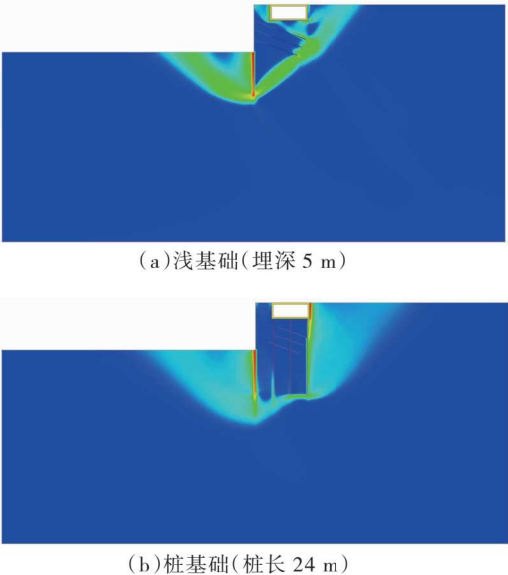


图 2 一般工况下滑裂面形态图示

为了进一步了解浅基础埋深和桩基础桩长对边坡滑裂面的影响,图 3 给出了一般工况下不同埋深的浅基础和不同桩长的桩基础滑裂面分布。可以看出,随着基础埋深的增加,浅基础建筑边坡的滑裂面没有明显变化,从锚索锚固段端点到支护桩桩底再到滑坡体前缘,不同基础埋深的滑裂面几乎重合。基础的埋深仅影响滑坡后缘位置,埋深越大,滑坡后缘

位置距坡顶越远,滑裂面形态更接近圆弧。对于桩基础,工程桩的长度直接影响滑裂面的形态和分布。随着桩长的增加,边坡滑裂面深度逐渐增加,当工程桩桩底高于支护桩时,滑裂面通过支护桩和工程桩桩底;当工程桩超过支护桩时,滑裂面进一步加深,绕过支护桩底。

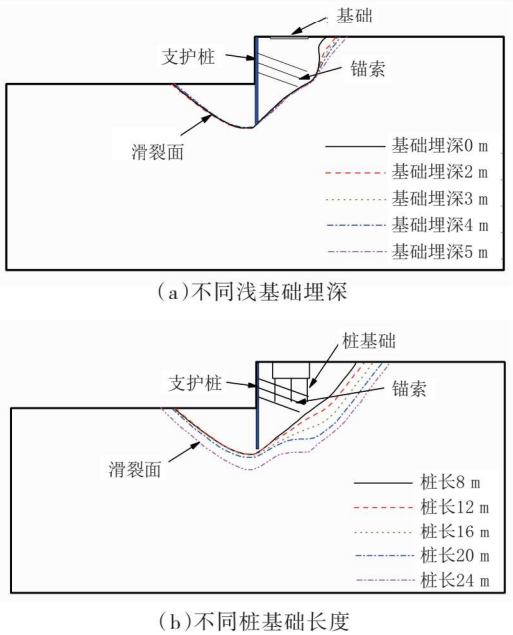


图 3 一般工况下不同基础滑裂面分布图

3.2 边坡安全系数变化规律

边坡安全系数与浅基础埋深的变化规律如图 4 所示。总体来讲,地震工况下边坡的安全系数要小于一般工况,一般工况和地震工况下边坡的安全系数随浅基础埋深变化的趋势基本相同,基本呈线性增大,并且均小于原始边坡,说明浅基础建筑的施工对边坡稳定产生了不利影响,但是这种不利影响会随着浅基础埋深的增加逐渐减小。由于浅基础埋深不会太深,坡顶浅基础建筑的建设往往会给边坡带来不利影响。

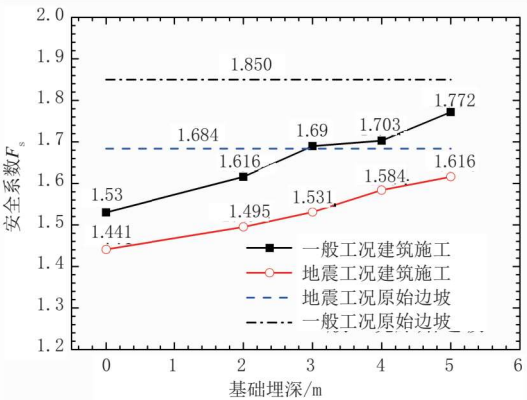


图 4 边坡安全系数与浅基础埋深关系曲线图

与浅基础不同,桩基础桩长的变化会对原始边坡的稳定产生完全不同的影响。整体上看,一般工况

和地震工况,边坡的安全系数都随着工程桩长度增加而增大,说明建筑施工时增加工程桩的长度有利于边坡稳定。当桩长增加到一定程度(一般工况桩长16 m,地震工况桩长20 m),建筑施工后的边坡安全系数反而较原始边坡大,主要原因在于,工程桩穿过了原始边坡滑裂面,改变了滑裂面的状态,在这种工况下,工程桩成了边坡抗滑措施。该规律和滑裂面形态随工程桩长度变化规律保持一致。

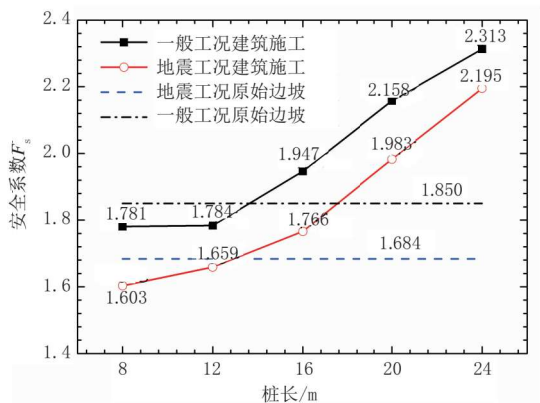


图5 边坡安全系数与桩基础长度关系曲线图

3.3 边坡位移变化规律

从边坡最大位移随浅基础埋深的变化规律(见图6)可以看出,浅基础埋深越大,坡顶位移越小,一般工况和地震工况呈现出一致的规律,地震工况下的边坡位移大于一般工况。

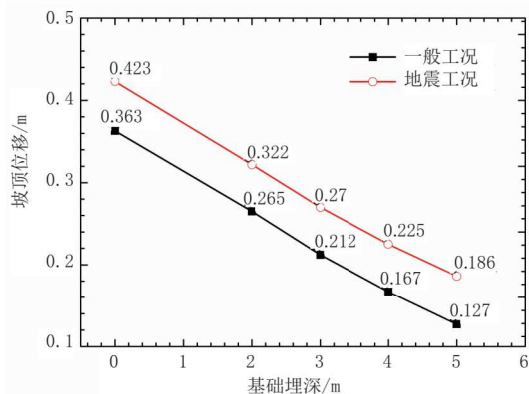


图6 边坡位移与浅基础埋深关系曲线图

图7为一般工况和地震工况下,边坡坡顶位移随桩长的变化规律。总体上看,桩基础建筑的施工对原始边坡坡顶位移的影响没有浅基础明显,一般工况和地震工况下,坡顶位移随桩长的增加略有减小,这是因为桩基础建筑本身控制变形能力较强,桩长对变形影响效应相对较弱。

3.4 支护桩身受力规律

对于桩锚支护的垂直边坡,除了边坡自身稳定变形情况外,支护桩身受力情况往往关系到边坡的稳定状态。研究不同基础类型的建筑施工时,对边坡

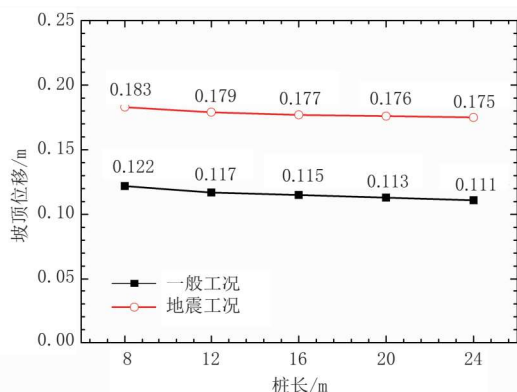


图7 边坡位移与桩基础长度关系曲线图

支护结构的受力影响规律对边坡的安全有重要意义(见图8、图9)。

从支护桩顶到桩底,随着深度的增加桩身弯矩大致呈现出先增大后减小的趋势,桩身最大弯矩出现在坡底附近且高于坡底。在每道锚索处,由于锚索的锚拉作用,支护桩弯矩出现拐点。

对于浅基础建筑边坡,坡顶建筑的施工对支护桩产生的影响是不利的,从图8(a)可以看出,不同埋深的浅基础建筑施工后,支护桩桩身弯矩均远大于原始边坡,随着基础埋深的增加,桩身最大弯矩逐渐减小。对于桩基础建筑边坡,支护桩的桩身弯矩一般小于浅基础边坡,桩基础长度对支护桩桩身弯矩影响存在临界值,当工程桩桩长为8 m时,工程桩桩底正好位于最大弯矩处,此时支护桩的最大弯矩大于原始边坡,当工程桩长度增加到12 m时,支护桩最大弯矩和原始边坡接近,当工程桩桩长继续增加时,支护桩最大弯矩小于原始边坡,但是工程桩长超过16 m时,再增加长度,对支护桩的弯矩影响不再有明显变化。

地震工况下支护桩的受力规律和一般工况一致,但是由于地震力的作用,支护桩桩身弯矩要大于一般工况。这说明地震作用仅仅影响支护结构的受力大小。

支护桩桩身剪力的分布表现出以下规律:坡底以上部分,剪力极值出现在三道锚索处,坡底以下入土部分,剪力极值出现在坡底附近。

浅基础埋深影响着桩身剪力的极值的大小,埋深越深,支护桩桩身剪力越小,但均大于原始边坡。而桩基础长度对支护桩剪力的影响并不是很明显,不同桩长剪力分布情况类似,并且和原始边坡一致。

4 结论

本文开展了近坡建筑对垂直支护的高边坡稳定

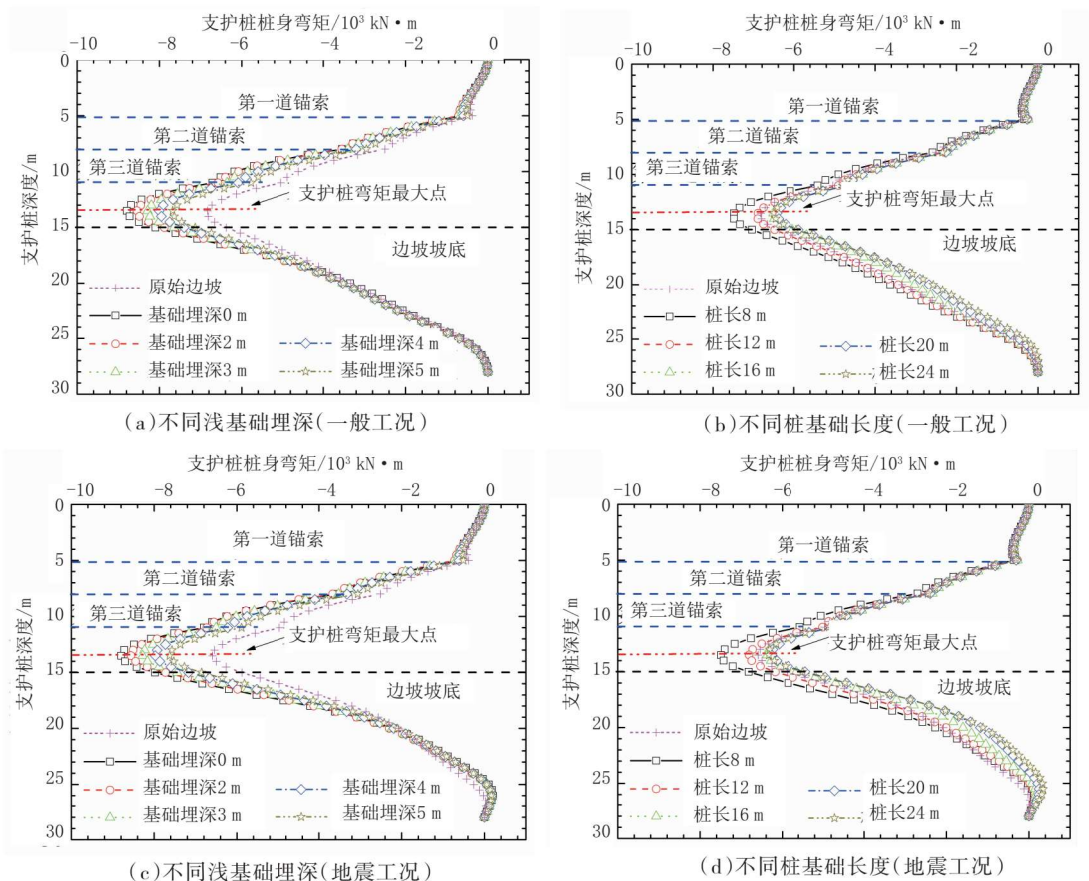


图8 不同工况下支护桩弯矩图

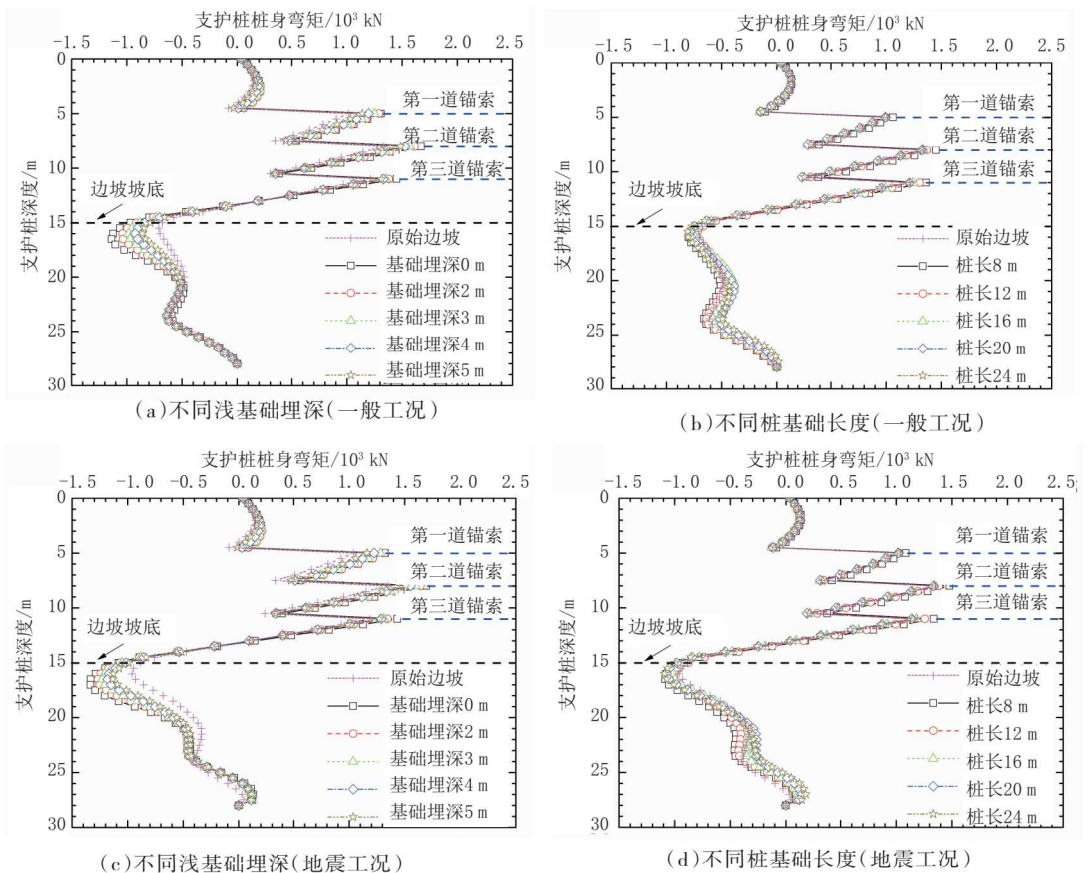


图9 不同工况下支护桩剪力图

性的影响的有限元模拟研究,通过分析不同浅基础埋深和桩基础长度对边坡稳定性的影响,提出了考虑坡顶建筑结构的垂直高边坡支护方案,得出以下主要结论:

(1)浅基础埋深对边坡滑裂面影响较小,桩基础长度会改变分布,桩长越长,滑裂面越深。

(2)一般情况下,坡顶建筑会降低边坡安全系数,当采用浅基础时,基础埋深越大安全系数越高,当采用桩基础时,随着桩长的增加,边坡安全系数升高,当桩长增加到支护桩深度,边坡稳定性大于原始边坡。

(3)边坡坡顶位移随着浅基础埋深的增加和桩基础长度的增加略有减小。

(4)支护桩身受力随着浅基础埋深增大而减小,而对于桩基础,当桩长增加到一定程度,不再影响支护桩的受力。

综上所述,出于安全考虑,当垂直支护的边坡坡顶有近坡建筑时,可以考虑结合建筑结构的边坡支护方案,建筑基础优先考虑桩基础,当采用浅基础时要适当增加浅基础埋深。

参考文献:

- [1] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [2] 邹广电,魏汝龙.土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):363-363.
- [3] Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams [C]// Proc. of the Second Congress on Large Dams.1936.
- [4] 何思明,张晓曦,罗渝.坡顶条形荷载作用边坡潜在滑裂面与稳定性分析[J].山地学报,2011,29(1):95-100.
- [5] 罗智.坡顶荷载对边坡稳定性影响研究[J].公路交通科技:应用技术版,2014(7):33-37.
- [6] 李运军,孙艳杰,赵治海.改进 Felenius 法对坡顶荷载下的边坡稳定性评价[J].西安科技大学学报,2018,38(5):767-775.
- [7] Kumar J, Kumar N. Seismic bearing capacity of rough footings on slopes using limit equilibrium[J].G é otechnique,2003,53(3):363-369.
- [8] Choudhury D, Rao K S S . Seismic bearing capacity of shallow strip footings[J].Geotechnical & Geological Engineering,2005,23(4):403-418.
- [9] Halder K, Chakraborty D, Dash S K . Bearing capacity of a strip footing situated on soil slope using a non-associated flow rule in lower bound limit analysis [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2017,13(3):1-9.
- [10] 文继东.考虑坡顶建筑荷载影响的边坡稳定性及加固设计优化研究[D].昆明理工大学,2017.
- [11] 杨龙华.建筑荷载对边坡稳定性的影响研究[D].中国地质大学(北京),2021.
- [12] 陈欣.山区建筑桩基与边坡相互作用研究[D].重庆大学,2016.
- [13] 黄嘉,于德顺,卢黎等.坡顶建筑桩长对岩坡稳定性影响的数值分析[J].建筑结构,2017,47(19):53-58.
- [14] 魏小楠,吴维义,杨根兰.考虑坡顶建筑荷载影响下的公路边坡稳定性分析[J].交通科技,2018(5):1-5.
- [15] Kalourazi A F, Izadi A, Chenari R J . Seismic bearing capacity of shallow strip foundations in the vicinity of slopes using the lower bound finite element method[J]. Soils and Foundations,2019,59(6):1891-1905.
- [16] GB 50330—2013,建筑边坡工程技术规范[S].
- [1] 王建秀,郭太平,吴林高,等.深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):564-570.
- [2] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].

(上接第 266 页)

[M].北京:人民交通出版社,2016.

- [2] 陆建生.悬挂式帷幕基坑地下水控制中的尺度效应[J].工程勘察,2015,43(1):51-58.