

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.S2.035

斜坡地基附加应力分布规律模型试验及数值模拟

许锡昌, 陈善雄, 姜领发

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 不少山区输电线路的铁塔基础都建在斜坡上, 研究斜坡地基内附加应力的分布规律很有必要。采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法, 研究了临坡距对斜坡地基附加应力分布及扩散规律的影响。研究成果表明, 当临坡距小于安全距离时, 地基附加应力随临坡距的增大而增大, 并在基础两侧具有显著的非对称性; 当临坡距超过安全距离时, 附加应力逐渐趋于稳定, 基本接近平面地基状态。传统的平面地基附加应力计算方法不适用于斜坡地基, 当临坡距在 0.3 m 时, 地基浅层附加应力接近平面地基条件的 50%, 说明斜坡对地基附加应力的影响十分显著。在小临坡距条件下地基附加应力较小, 但对应的地基变形却较大, 也说明传统的分层总和法不适用于计算斜坡地基变形, 否则将影响工程安全。在地基稳定性满足要求的前提下, 建议最小临坡距不小于安全距离。

关 键 词: 斜坡; 附加应力; 临坡距; 应力扩散; 非对称性

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 增 2 - 0267 - 07

Experimental study and numerical simulation on additional stress distribution of foundation adjacent to slopes

XU Xi-chang, CHEN Shan-xiong, JIANG Ling-fa

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Many electric transmission tower footings built on the slopes in mountainous area, it is necessary to study the additional stress distribution of slope foundation. In this paper, model tests and numerical experiments are used to research the influence on stress distribution and diffusion regularity of the additional slope foundation induced by the distance from the top of the slope. Results of the model test show that the distance from the top of the slope has a great impact on the additional stress in soil. Additional stress increases with the increase of the distance from the top of slope and has obvious asymmetry on both sides of the foundation when it is less than the safe distance. Additional stress gradually stabilized, close to the level ground state when the distance from the top of slope is more than the safe distance. When the distance from the top of slope is 0.3 m, additional stress in shallow soil is close to 50% of the plane foundation condition, the influence of additional stress in soil slope is very significant; and traditional additional stress calculation method is not applicable to slope foundation. In the small distance from the top of slope conditions, the additional stress is small; but the corresponding ground deformation is greater; it is proved that the traditional layerwise summation method is not suitable to calculate the deformation of the foundation in the slope. Otherwise, it will affect the safety of engineering. In the case of foundation stability meet the requirements, it is recommended that the minimum distance from the top of slope is not less than the safe distance.

Keywords: slope; additional stress; distance from the top of slope; stress diffusion; asymmetry

1 引 言

随着我国电力事业的快速发展, 输电线路建设用日益紧张, 尤其在我国中西部地区, 不少输电线路穿越山岭重丘区, 铁塔基础往往建在斜坡上。斜坡地基附加应力及地基变形计算方法是很多设计

人员关心的问题。对于平面地基下的附加应力, 国内外已进行了深入的研究, 获得了不少研究成果。法国力学家 Boussinesq 于 1885 年推导了弹性半空间体在其边界上竖向集中力作用下应力与应变的解析解。在此基础上, Mindlin^[1]于 1936 年推导出竖向荷载作用在半无限弹性体内部时体内任一点的应力

收稿日期: 2014-02-26

第一作者简介: 许锡昌, 男, 1972 年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土工程特性及地基基础方面的研究工作。E-mail: xcxu@whrsm.ac.cn

与应变的解析解。徐志英等^[2]以 Mindlin 解为基础，推导了地基中的附加应力，其他学者也做了大量的工作，获得了一定的研究成果。孙强等^[3]对非半无限空间集中荷载下地基附加应力进行了理论推导。此外，部分学者对斜坡地基承载力的取值方法也进行了研究，取得了一些有意义的成果^[4-6]。对于受均布荷载作用下斜坡地基内附加应力的分布规律以及如何消除或减小斜坡对基础的影响等问题则研究的较少。本研究采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法，以斜坡浅埋基础为研究对象，研究斜坡地基附加应力的分布规律，探讨临坡距对附加应力的影响以及合理临坡距建议值，以期为类似工程设计提供参考。

2 模型试验

2.1 模型试验装置

模型试验装置长 6.0 m，宽 3.0 m，高 3.5 m，可以开展斜坡地基、复合地基、桩基等模型试验，装置外观见图 1。



图 1 模型试验装置
Fig.1 Model test device

2.2 土压力计布置与埋设

根据装置尺寸和研究需要，试验槽内自下而上分层埋设 4 层应变式土压力计，分别为 5、5、7、4 只，具体位置见图 2，埋设过程见图 3。试验过程中利用静态电阻应变仪采集数据，根据标定曲线计算土压力。

2.3 土体填筑

试验用土为武汉洪山黏性土，土体天然含水率为 15%~20%，采用分层填筑方式，松铺厚度控制在 30 cm 左右，采用 HCD 90 型电动冲击夯压实。填筑前通过试夯，夯实 6 遍后干密度可控制在 1.6~1.7 g/cm³。每层填筑完成后，测定压实土的含水率和干密度，若干密度低于 1.6 g/cm³，则多夯 1~2

遍，并重新检测干密度，直至满足要求为止。最后一层土体填筑完成后，按坡比 1:1.5 进行刷坡。取样测得土体平均含水率为 19.52%，干密度为 1.64 g/cm³，黏聚力 $c = 31.2$ kPa，内摩擦角 $\phi = 19.6^\circ$ 。

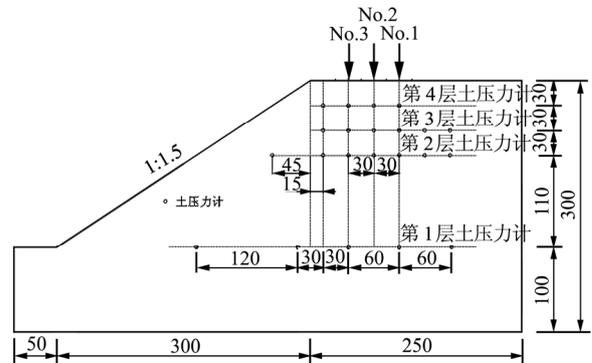


图 2 土压力计布置示意图 (单位: cm)
Fig.2 Sketch of soil pressure gauges layout(unit: cm)



图 3 土压力计埋设过程
Fig.3 Pressure gauges embedding

2.4 试验方案

影响斜坡浅基础地基附加应力扩散的因素较多，包括基础埋深、基础尺寸和临坡距离等。为深入研究斜坡地基附加应力扩散规律，尽量减少各因素间的交叉影响，本文只研究临坡距对附加应力大小及分布规律的影响。

本次试验模拟斜坡浅，基础平面尺寸为 0.3 m×0.3 m，基础埋深按原地面考虑，斜坡坡比为 1:1.5，考虑 3 种临坡距离 0.3、0.6 m 和 0.9 m (见图 2)，即基础中心点距离边坡分别为 0.45、0.75 m 和 1.05 m。

无论是斜坡地基还是平面地基，基础均应满足《建筑地基基础设计规范》^[7]中一定的埋深要求。之所以将基础置于原地面，主要基于两个原因：(1) 试验结果便于与 Boussinesq 解进行对比 (Boussinesq 解也是地面加载)；(2) 项目实施过程中开展了原地面和埋深 0.3 m 两种试验，试验过程中原地面加载时载荷板下的土体发生了破坏，影响了土体的完整

性，可能会影响到埋深 0.3 m 时的附加应力分布。

模型试验中 0.3 m 和 0.6 m 两种临坡距不满足《建筑地基基础设计规范》的规定，是由于本文研究的初衷是探讨不同临坡距条件下基底附加应力的分布规律，在一些极端情况下也面临场地空间狭小又不得不突破规范的问题，条文说明中也没有给出理论解释，通过一系列研究来探讨不同临坡距的附加应力分布规律。

本次共开展了 3 组浅层平板载荷试验，载荷板中心分别位于 No.1、No.2 和 No.3 点（见图 2）。采用逐级加载的方式模拟基础受荷情况（见图 4），每级加载值约 66 kPa，地基接近破坏时停止加载，施加下一级荷载前，试验过程中读取各层土压力计读数和载荷板沉降量。



图 4 模型试验过程图片
Fig.4 Image of model testing

3 试验结果与分析

3.1 地基承载变形特性分析

图 5 为 3 组试验的载荷与沉降曲线，No.1 点（临坡距 0.9 m）由于试验过程中油路系统出现故障，试验提前结束。No.2（临坡距 0.6 m）和 No.3 点（临坡距 0.3 m）试验正常，地基接近破坏时才停止加载。为便于比较，图 5 中只给出了最大荷载为 463.1 kPa 时的成果。

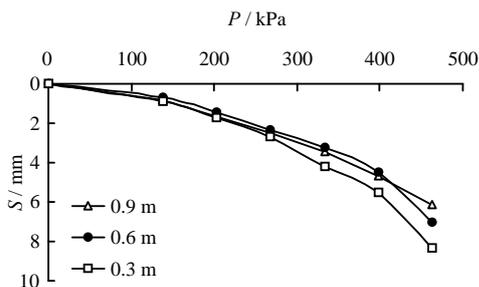


图 5 模型试验 P-S 曲线
Fig.5 Curves of P-S for model testing

从图 5 中可以看出，试验初期，3 组试验的累计沉降量均比较接近，随着荷载的逐渐增大，载荷板累计沉降量的差距也逐渐增大。当荷载达到 463.1 kPa 时，累计沉降量分别为 6.14、7.01、8.33 mm，即累计沉降量随着临坡距的减小而增大，说明斜坡对地基的承载变形影响较大。

3.2 基础下附加应力沿深度的分布规律

图 6 为载荷板中心位于 No.2 点，地基附加应力（No.2 点正下方）随深度的分布曲线。从图中可以看出，随着深度的增加，地基附加应力呈迅速减小的趋势。以基础荷载 528.2 kPa 为例，0.3、0.6、0.9 m 处的附加应力分别衰减为基础荷载的 25.2%、7.7%、2.5%。为便于分析斜坡对附加应力的影响，图 7 给出了平面半无限空间地表受均布荷载时土体附加应力的 Boussinesq 解，并与模型试验的实测值进行了比较。从图中可以看出，模型试验实测值和理论解相差较大，深 0.3 m 处实测值约为理论解的 50%，说明斜坡的存在导致其对基础的侧向约束减弱，附加应力易于扩散。

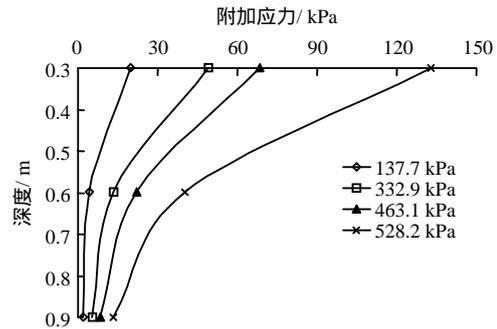


图 6 地基附加应力随深度分布规律
Fig.6 Additional stress distribution with depth

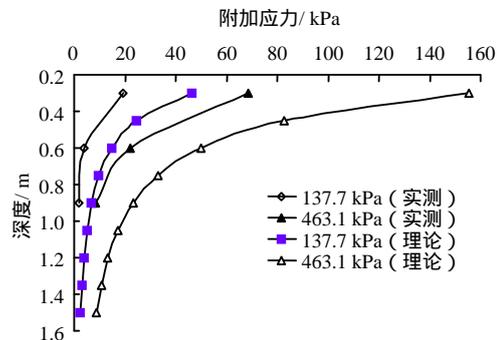
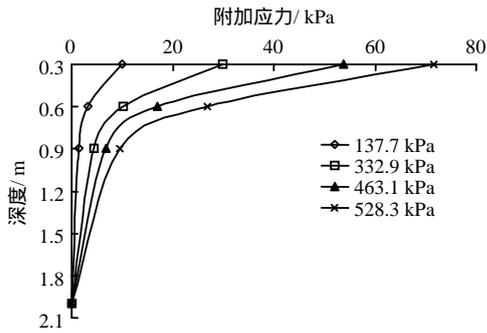


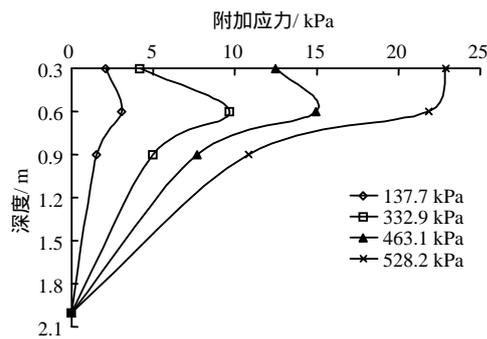
图 7 地基附加应力实测值与弹性理论解的对比
Fig.7 Comparison of measured results and analytic solution for additional stress

3.2 基础两侧附加应力沿深度的分布规律

图 8 为载荷板中心位于 No.2 点，No.1 点和 No.3 点地基附加应力随深度的分布曲线。



(a) No.1 点



(b) No.3 点

图 8 地基附加应力随深度变化曲线

Fig.8 Additional stress change curves with depth

从图 8 中可以看出, (1) 地表下 0.3 m 处, No.1 点的附加应力远大于 No.3 点, 0.6 m 处二者的差值逐渐缩小, 至 0.9 m 处基本相同, 说明在靠近地表处临坡一侧的附加应力衰减较快, 随着深度的增加, 附加应力扩散的不对称性逐渐减弱; (2) No.1 点和 No.3 点的附加应力分布规律在浅层有明显的不同。远离临坡一侧的附加应力随深度增加呈单调递减趋势, 见图 8(a), 而临坡一侧约在 0.6 m 深处存在拐点, 见图 8(b), 附加应力最大值没有出现在地表。

从平面半无限空间受竖向均布荷载的基本理论可知, 由于 No.1 点和 No.3 点分别对称分布于基础的两侧, 两侧的附加应力应是对称的, 而由于斜坡的存在, 导致左右两侧应力的非对称性。为探讨基础外附加应力的影响, 利用 Boussinesq 解析解计算了当加载点位于 No.1 时, 在 No.2 处的附加应力分布曲线, 如图 9 所示。从图中可以看出, 基础外侧的附加应力理论解也存在拐点, 即最大值不在地表, 而是在地表下一定深度, 说明本文模型试验结果的规律性与理论解基本一致。

3.3 同一深度附加应力的分布规律

图 10 为荷载板中心位于 No.2 点在不同荷载水平时基础下不同处地基附加应力沿模型试验装置轴线方向的分布曲线。模型试验装置轴线方向为 X 轴,

荷载板中心为坐标原点, 背离边坡方向为正。

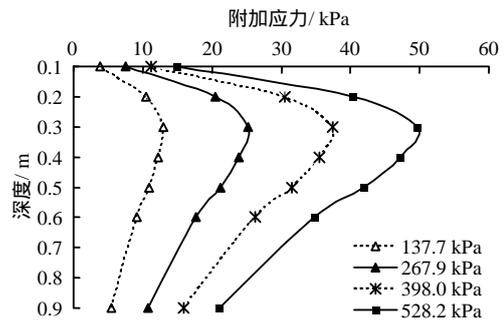
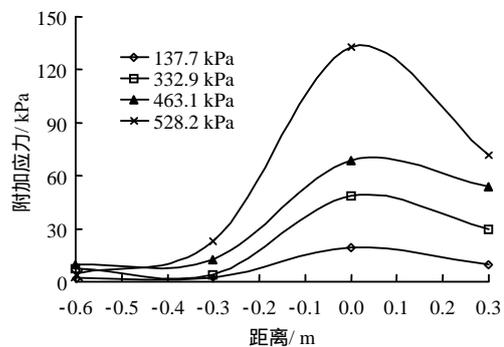
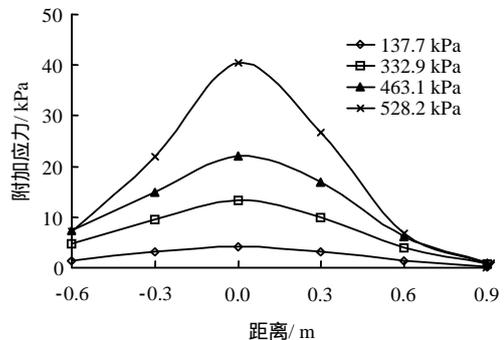


图 9 基础外侧 No.2 点附加应力随深度分布曲线

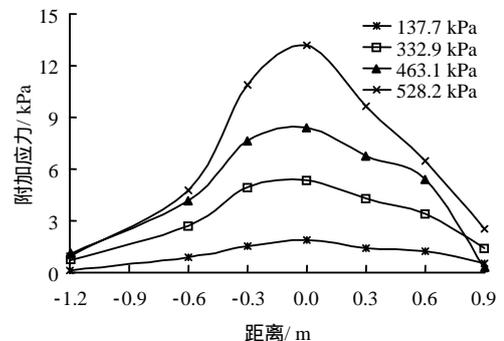
Fig.9 Additional stress distribution with depths of point No.2



(a) 基础下 0.3 m



(b) 基础下 0.6 m



(c) 基础下 0.9 m

图 10 基础不同位置附加应力分布曲线

Fig.10 Additional stress distribution curves of different depth under foundation

从图 10 中可以看出, (1) 在基础下同一深度、

同一荷载水平条件下，载荷板下的附加应力最大，载荷板两侧的附加应力小，呈现刚性基础下附加应力的分布特征；(2) 斜坡的存在导致地基内基础两侧的附加应力具有明显的非对称性。图 10(a)中，-0.3 m 和 0.3 m 处的附加应力差值较大，靠近边坡一侧仅为背离边坡一侧的 50%，非对称性十分明显；图 10(b)中，-0.3 m 和 0.3 m 处的附加应力的差值逐渐缩小，图 10(c)中，-0.3 m 处的附加应力基本接近 0.3 m 处，说明随着深度的增加，附加应力逐渐进行调整，扩散的不对称性逐渐减弱，即临坡距较小时，斜坡对浅层地基附加应力影响较大，随着深度的增加，影响逐渐减弱，若设计时临坡距无法调整，可以通过增大埋深，或者设计成偏心基础的方式消除斜坡的影响。

3.4 不同临坡距附加应力的分布规律

图 11 为当载荷板中心分别位于 No.1 ~ No.3 点时相对应的载荷板中心下 0.6 m 处附加应力变化规律。从图中可以看出，每一级荷载水平下，基础离坡顶越近，基础下的地基附加应力就越小，主要由于临坡距较小时，土体提供的侧向抗力也较小，基础附近易发生侧向挤压变形，导致应力释放所致。

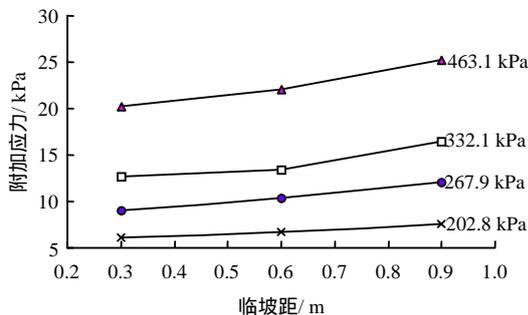


图 11 不同临坡距对应的地基附加应力

Fig.11 Additional stress under foundation with different distances in top of slope

4 数值模拟

受试验条件所限，本文模型试验仅研究了 3 种临坡距的附加应力扩散规律，下文采用数值模拟方法，研究多种临坡距对附加应力的影响，并与模型试验结果进行对比，探讨减小或消除斜坡影响的方法。

4.1 数值模拟方法及参数选取

数值模拟采用 FLAC^{3D} 软件，根据模型试验大小，坡高 2 m，坡比 1:1.5，土体采用摩尔-库仑本构模型，计算参数与填筑土体相同，湿重度为 19.21 kN/m³，黏聚力 $c = 31.2$ kPa，内摩擦角 $\varphi = 19.6^\circ$ ，弹性模量 E 由图 5 平板载荷试验数据估算，取 60

MPa，泊松比 $\nu = 0.35$ 。计算模型网格剖分见图 12。

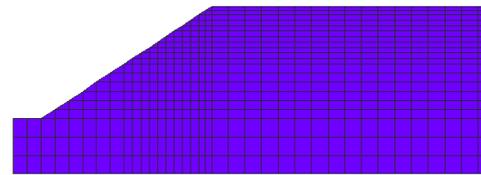


图 12 计算模型网格剖分示意图

Fig.12 Sketch of element meshes of numerical simulation

数值模拟主要分 3 步：

第 1 步：模拟 3 种临坡距的载荷试验，将沉降量与实测值进行对比，验证数值模拟方法及参数选取的合理性。

第 2 步：研究临坡距 0.6 m，荷载水平 137.7、332.9、463.1 kPa 和 528.2 kPa，不同深度 (0.3、0.6、0.9 m) 的附加应力沿水平方向的变化规律。

第 3 步：探讨不同临坡距 (0.3 ~ 9.9 m) 时基础下不同深度 (0.3、0.6、0.9 m) 的附加应力变化规律。

4.2 不同临坡距载荷试验数值模拟

图 13 为采用数值模拟得到的 $P-S$ 曲线。从图中可以看出， $P-S$ 曲线与模型试验的变化规律基本相同，累计沉降量也十分相近，说明数值模拟和模型试验吻合性较好，数值模拟方法正确，参数选择合理，结果也比较可信。从图 5 和图 13 来看，地基变形均随着临坡距增大而减小，说明斜坡的存在对地基的承载变形特性影响较大，距离边坡越近，边坡对基础变形的侧向约束越小，附加应力扩散也较快，基础沉降就越大。

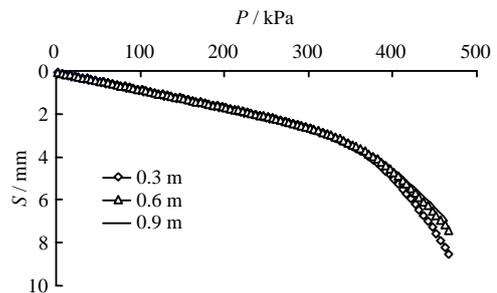


图 13 不同临坡距时数值模拟 $P-S$ 曲线

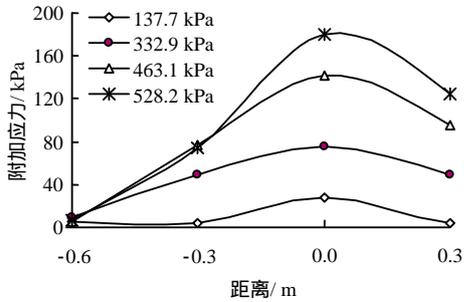
Fig.13 Numerical simulation curves of $P-S$ with different distance from top of slope

4.2 附加应力在水平方向分布规律

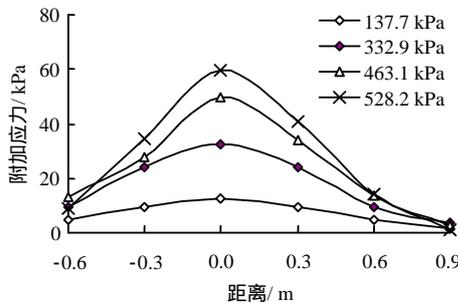
图 14 为临坡距 0.6 m、基础下不同处附加应力沿水平方向的分布规律。从图中可以看出，附加应力在基础两侧呈现出明显的非对称性，与模型试验结果规律性相同。临坡一侧的附加应力大于背坡一

侧，随着深度的增加，两侧的附加应力差值逐渐缩小，但临坡一侧的附加应力总小于背坡一侧，规律性与模型试验相同。

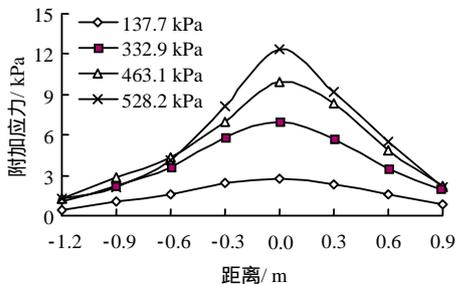
基础两侧的附加应力场不对称，不利于基础稳定，在基础布置时尽量布置在斜坡影响较弱的位置。



(a) 基础下 0.3 m



(b) 基础下 0.6 m



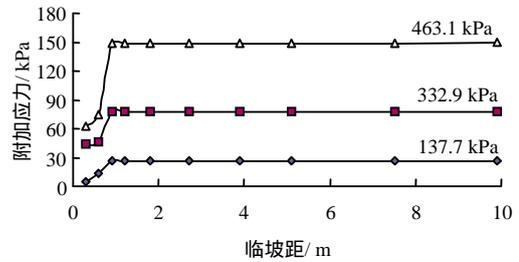
(c) 基础下 0.9 m

图 14 基础下不同位置附加应力沿水平方向分布曲线
Fig.14 Additional stress distribution curves of different depths along horizontal direction

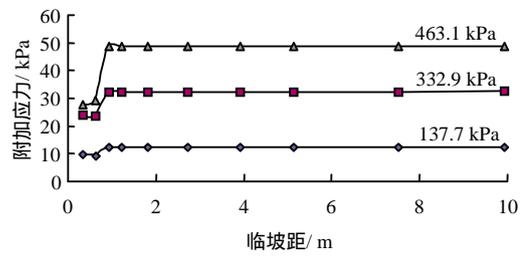
4.3 基础下附加应力分布规律

图 15 为临坡距不同时基础下 0.3、0.6、0.9 m 附加应力在不同荷载水平时的变化规律。从图中可以看出，(1) 基础下 3 种深度 0.3、0.6、0.9 m 情况下，任一深度的附加应力均随着临坡距的增大而增大，与模型试验结果规律相同。当临坡距小于安全距离 L_s (本文 $L_s = 1.2$ m) 时，附加应力随着临坡距的增大而显著增大；当临坡距超过 L_s 时，附加应力由 148.07 kPa 增大至 149.0 kPa，增长缓慢，并逐渐趋于稳定。根据平面半无限空间弹性理论解，载

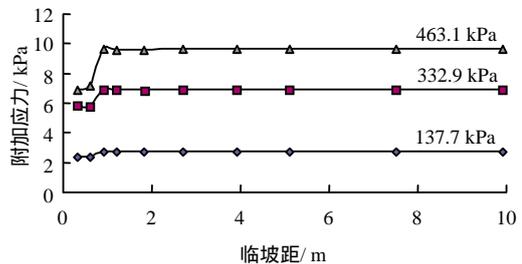
荷板中心 0.3 m 深度的附加应力系数为 0.336，对应于荷载为 463.1 kPa 时的基础底面应力，其理论解为 155.6 kPa，1.2 m 处的数值解为 148.07 kPa，为平面情况的 95%，基本接近平面地基的受力状态，若将基础布置在临坡距大于 1.2 m 的地方，基本可以消除斜坡对基础的不利影响。



(a) 基础下 0.3 m



(b) 基础下 0.6 m



(c) 基础下 0.9 m

图 15 基础下不同位置附加应力随临坡距变化曲线
Fig.15 Additional stress changing curves of different positions under foundation with horizontal distance from top of slope

《建筑地基基础设计规范》(5.4.2 节中)规定矩形基础底面外边缘线至坡顶的水平距离应满足式(1)的要求，且不得小于 2.5 m。

$$a \geq 2.5b - \frac{d}{\tan \beta} \quad (1)$$

式中： a 为底面外边缘线至坡顶的水平距离 (m)； b 为垂直于坡顶边缘线的基础底面边长 (m)； d 为基础埋置深度 (m)； β 为边坡坡角 ($^\circ$)。

本文模型试验荷载板宽 0.3 m，埋深为 0，根据式(1)可计算出最小临坡距为 0.75 m，但小于 2.5 m 的最低要求。分析可知，当临坡距超过 1.2 m 时，

地基附加应力接近平面地基状态,若地基稳定性满足要求,则可适当放宽对最小临坡距的限制;若地基稳定性不满足要求,则进一步增大临坡距,重新对地基稳定性进行验算,直至满足要求为止。

临坡距较小时,基础下的附加应力也较小,以基础下 0.3 m 和 0.6 m 为例,当荷载为 463.1 kPa 时,0.3 m 处的附加应力从 62.2 kPa 增大至 148.1 kPa(临坡距 1.2 m);0.6 m 处的附加应力从 27.9 kPa 增大至 48.8 kPa,说明斜坡对地基附加应力的影响十分显著,传统的平面地基附加应力计算方法不适用于斜坡地基的情形。

当临坡距为 0.3 m 时,对应于基础地面应力 463.1 kPa 的累计沉降量为 8.5 mm(图 13 中数据),但其地基附加应力却小于临坡距 0.6 m 或 0.9 m 的情形,即在小临坡距条件下附加应力较小,但基础沉降较大。若采用传统的分层总和法计算基础沉降,得到的地基变形值偏小,与本文模型试验结果不一致。究其原因,主要因为分层总和法基于单向压缩假设,即地基压缩时不考虑侧向变形,相当于薄压缩土层位于两层坚硬密实土之间或在大面积荷载作用下地基的侧限条件。总之,斜坡地基变形计算不能采用分层总和法。

5 结 论

(1) 对斜坡地基而言,临坡距对附加应力的大小及分布影响较大。附加应力在基础两侧具有显著的非对称性,但随着深度的增加而减弱。在斜坡影响范围内,附加应力的非对称性不利于基础的稳定。因此,基础布置时建议可以通过增大基础埋深、设计成偏心基础,或布置在斜坡影响区域以外的方式来减小或消除斜坡对基础的影响。

(2) 传统的平面地基附加应力计算方法不适用于斜坡地基。临坡距 0.3 m 时地基浅层附加应力接近平面地基条件的 50%,说明斜坡对地基附加应力的影响十分显著。

(3) 传统的分层总和法不适用于计算斜坡地基变形。模型试验和数值模拟结果证实,在小临坡距条件下,地基附加应力较小,但对应的地基变形却较大,主要是因为分层总和法基于单向压缩假设,即地基压缩时不考虑侧向变形。若采用传统的分层总和法计算斜坡地基沉降,得到的地基变形值将产生

较大的误差,影响工程安全。

(4) 当临坡距小于某安全距离 L_S (本文为 1.2 m) 时,基础下任一深度的附加应力均随着临坡距的增大而增大;当临坡距超过 L_S 时,附加应力逐渐趋于稳定,基本接近平面地基的受力状态,若地基稳定性满足要求,则可适当放宽对最小临坡距 2.5 m 的限制;若地基稳定性不满足要求,则可适当增大临坡距,再对地基稳定性进行试算,直至满足要求为止。

斜坡地基附加应力及变形计算是一个非常复杂的问题,本文的研究虽取得了一些成果,但还有许多问题需要进一步研究,如(1)斜坡影响范围内的地基附加应力计算,本文研究认为基础越靠近边坡,附加应力衰减越显著,如何计算是今后需要研究的方向。(2)斜坡影响范围内的地基变形计算。本文研究认为,基础越靠近边坡,其变形也越大,传统的分层总和法已不适用,需要进一步研究变形计算方法。

参 考 文 献

- [1] MINDLIN R. Force at point in the interior of a semi infinite solid[J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195 - 202.
- [2] 徐志英. 以明德林(Mindlin) 公式为根据的地基中垂直应力的计算公式[J]. *土木工程学报*, 1957, 4(4): 485 - 497.
- [3] XU Zhi-ying. Calculation of vertical pressures in soil beneath loaded areas on Mindlin's formula[J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 1957, 4(4): 485 - 497.
- [4] 孙强, 马平, 王媛媛. 非半无限空间均布荷载下地基附加应力理论计算[C]//第十届全国地基处理学术讨论会论文集. 南京: 东南大学出版社, 2008: 532 - 534.
- [5] MEYERHOF G. G. The ultimate bearing capacity of foundations on slope[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: [s.n.], 1957.
- [6] SARAN S., SUD V K, HANDA S C. Bearing capacity of foundations adjacent to slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(4): 553 - 573.
- [7] SHIELDS D. Bearing capacity of foundations in slopes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988. 116(3): 528 - 537.
- [7] 中国建筑科学研究院. GB 50007 - 2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.