

曲线桥下斜坡受邻近基坑开挖的影响研究

王永甫, 王 成

(重庆交通大学 隧道及岩土工程系, 重庆 400074)

摘 要: 斜坡上的建筑基础通常需要考虑其稳定性, 由于邻近基坑开挖引起斜坡的任何变化都必将影响其上建筑基础的稳定安全。结合重庆市石板坡长江大桥南桥头 F 匝道桥下基坑开挖过程, 采用传递系数法分析研究了基坑开挖、车辆离心力及桩基抗滑力对于斜坡安全系数的影响, 为匝道桥的安全提供判断标准。

关 键 词: 邻近基坑开挖; 传递系数法; 车辆离心力; 桩基抗滑力; 斜坡安全系数

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Research on influence of a adjacent excavation on slope stability under curve bridge

WANG Yong-fu, WANG Cheng

(Department of Tunnel and Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Any minor structural change of slope stability caused by adjacent excavation might result in serious distortion of the above architecture; therefore, slope foundation stability should be put to first priority in bridge construction. In light of the slope excavation under the F ring bridge of the Chongqing Shibampo Changjiang Bridge, by means of transfer coefficient methods, the influences of adjacent excavation, vehicle centrifugal force and pile anti-slide force on the slope safety factor are analyzed so as to provide judge criterion for safety of the ring bridge.

Key words: adjacent excavation; transfer coefficient methods; vehicle centrifugal force; pile anti-slide force; slope safety factor

1 引 言

改革开放以来, 我国城市建设迅速发展。为了充分利用城市有限的空间, 各大城市产生了大量深基坑工程^[1-3]。基坑开挖应保证周围建(构)筑物的安全和正常使用。国内有不少工程, 因开挖引起周围斜坡安全系数下降而导致邻近建(构)筑物产生倾斜、裂缝等严重后果, 造成了巨大的经济损失。

本文讨论的基坑开挖工程中, 周围斜坡还受曲线桥上车辆离心力及桩基抗滑力的影响。因此, 开展基坑开挖对邻近斜坡稳定安全的影响研究, 分析斜坡稳定安全和桥梁安全, 控制邻近基坑开挖, 对减少事故发生概率具有十分重要的理论和现实意义。

2 离心力影响分析

2.1 离心力计算^[4]

汽车荷载离心力计算公式如下:

$$H = \frac{GV^2}{127R} \quad (1)$$

式中: H 为车辆离心力(kN); G 为车辆标准值(不计冲击力); V 为设计速度(km/h); R 为匝道曲线半径(m)。

2.2 离心力影响计算

根据相对桩长确定为短桩, 在离心力水平荷载 H 作用下, 假定桩全长范围内水平地基反力分布如图 1 所示, 由水平力及桩底力矩平衡得:

$$H - p(l - 1.5B) + 2pc = 0 \quad (2)$$

$$H(l + h) - \frac{1}{2}p(l - 1.5B)^2 + pc^2 = 0 \quad (3)$$

解式(2)、式(3)得:

$$p = \frac{(A + \sqrt{A^2 + 4B^2})H}{2B^2} \quad (4)$$

$$c = \frac{B}{2} - \frac{B^2}{A + \sqrt{A^2 + 4B^2}} \quad (5)$$

其中: $A = 2l + 4h + 3b$ $B = l - 1.5b$

式中: p 为水平地基反力(kN/m); b 为桩的宽度(m); l 为斜坡坡高(m); h 为桩在地表面以上桩长(m)。

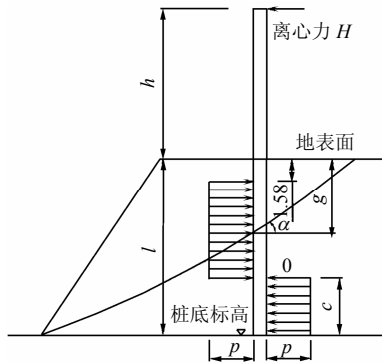


图1 离心力影响计算图示
Fig.1 Calculation of the influence of vehicle centrifugal force

桩作用于滑体的水平力 S_l 为滑体部分地基反力的合力, 当滑动面位于桩转动中心 O 以下时, 偏安全地假定水平力 S_l 等于转动中心以上部分地基反力的合力, 即:

$$S_l = \begin{cases} p(g - 1.5B) & 1.5B \leq g \leq l - c \\ p(l - c - 1.5B) & l - c \leq g \leq l \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_l 为作用于滑体的水平力(kN); g 为桩在滑体部分的长度(m); c 为桩转动中心到桩底的距离(m)。

将 S_l 沿滑面切向和法向分解, 得离心力引起的下滑力增量、抗滑力减小量分别为:

$$X_z = S_l \cos \alpha \quad (7)$$

$$K_j = S_l \sin \alpha \tan \varphi \quad (8)$$

式中: X_z 为下滑力增量(kN); K_j 为抗滑力减小量(kN); α 处滑面倾角($^\circ$); φ 为土体黏结力($^\circ$)。

3 桩基抗滑力影响计算

3.1 桩基水平抗滑力计算^[5]

斜坡滑动时, 桩将产生抗滑作用, 取滑动面以下的桩段 t_n 为隔离体, 采用如图 2 所示的土压力图。如右侧土压力用等值的集中力 E_p 代替, 即简化为简支梁的计算图示。

土压力强度 e_A 按下式计算

$$e_A = \gamma h_A (K_p - K_A) K d \quad (9)$$

式中: γ 土重度(kN/m³); h_A 滑动面 A 点以上土重换算高度(m); K_p 、 K_A 分别为被动和主动土压力系数; K 考虑桩发生位移时带动两侧土体的土压力增

大系数, 一般取 1~3, 对淤泥和淤泥质土取小值, 对一般黏性土取大值; d 为桩的直径(m);

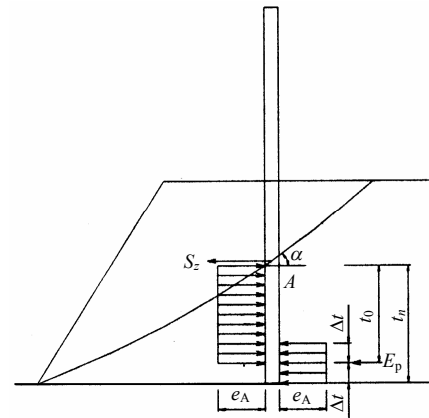


图2 桩基抗滑力影响计算图示
Fig.2 Calculation of the influence of pile anti-slide force

桩基锚固段两端反力 (S_z 和 E_p) 及跨中最大弯矩 $M_{\max}$ 为

$$S_z = E_p = \frac{1}{2} e_A t_0 \quad (10)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{8} e_A t_0^2 \quad (11)$$

桩段 t_0 在顶端集中力 S_z 作用下, 可能有两种破坏形式: t_n 较大时, 桩被弯断, t_n 较小时, 桩被掘出。

令桩基容许抗弯能力 M_0 等于跨中最大弯矩 $M_{\max}$, 得桩弯断所需的最小入土深度:

$$t_{0\min} = \sqrt{\frac{8M_0}{e_A}} \quad (12)$$

用上式中 $t_{0\min}$ 代替式 (10) 中的 t_0 , 即得桩弯断破坏时的水平抗滑力 S_{z1}

$$S_{z1} = \frac{1}{2} e_A \sqrt{\frac{8M_0}{e_A}} = \sqrt{2e_A M_0} \quad (13)$$

当 $t_n < t_{0\min}$ 时, 桩被掘出, 根据静力平衡, 以 A 点为力矩中心, 得

$$e_A t_0 \frac{1}{2} t_0 = 2 \Delta t e_A t_0 \quad (14)$$

$$\text{又} \quad t_0 = t_n - \Delta t \quad (15)$$

$$\text{解得:} \quad t_0 = 0.8 t_n \quad (16)$$

若实际嵌固深度 $t_0 = 0.8 t_n$, 小于桩弯曲破坏需要的最小入土深度 $t_{0\min}$, 并大于 2 m, 则得桩被掘

出的抗滑力 S_{z2}

$$S_{z2} = \frac{1}{2} e_A \times 0.8 t_n = 0.4 e_A t_n \quad (17)$$

设计时取 S_{z1} 、 S_{z2} 中的小值作为桩的水平抗滑力 S_z 。当桩在滑动面上、下土层中的长度小于 2 m 时, 可不计桩的抗滑作用。

3.2 桩基水平抗滑力影响计算

将桩基水平抗滑力 S_z 沿滑面切向和法向分解, 得下滑力减小量、抗滑力增量分别为

$$X_j = S_z \cos \alpha \quad (18)$$

$$K_z = S_z \sin \alpha \tan \varphi \quad (19)$$

式中: X_j 为桩基水平抗滑力引起的下滑力减小量 (kN); K_z 为桩基水平抗滑力引起的抗滑力增量 (kN);

4 考虑离心力及桩基抗滑力影响的斜坡安全系数

斜坡安全系数计算采用传递系数法^[6-9]中的超载法。超载法基于滑坡体整体静力平衡, 根据滑坡的地质模型, 对于土质滑坡滑动面宜采用圆弧, 如图 3 所示。取第 i 条块体为隔离体, 将各力分解在该条块滑面方向上, 同时考虑离心力及桩基抗滑力的影响。可得

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n + \frac{K_z - K_j}{D} \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n + \frac{X_z - X_j}{D} \prod_{j=k}^{n-1} \psi_j} \quad (20)$$

$$R_i = W_i \sin \alpha_i \tan \varphi_i + C_i L_i \quad (21)$$

$$T_i = W_i \cos \alpha_i \quad (22)$$

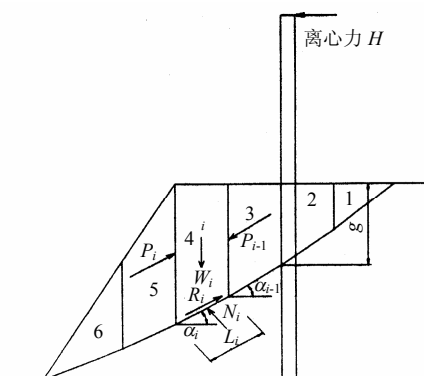


图 3 斜坡安全系数计算图示

Fig.3 calculation of the slope safety factor

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i \quad (23)$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \dots \psi_{n-2} \psi_{n-1} \quad (24)$$

式中: F_s 为斜坡稳定系数; R_i 为作用于第 i 条块体的抗滑力 (kN/m); T_i 为作用于第 i 条块体的下滑力 (kN/m); X_z 、 K_j 为离心力引起的滑体附加下滑力及抗滑力削减 (kN); X_j 、 K_z 为桩水平抗滑力引起的滑体下滑力削减及附加抗滑力 (kN); D 为离心力纵向影响范围, 取值为桩与桩中心间距 30 m; k 为桩所在条块的编号; W_i 为第 i 条块体自重荷载 (kN/m); ψ_i 为第 $i-1$ 条块体剩余下滑力传递至第 i 条块体时的传递系数; α_{i-1} 、 α_i 为第 $i-1$ 和第 i 条块体所在滑动面的倾角 ($^\circ$); φ_i 为第 i 条块体滑带土体的内摩擦角标准值 ($^\circ$); C_i 为第 i 条块体滑动面上岩土体的黏结强度标准值 (kPa); L_i 为第 i 条块体所在滑动面的长度 (m)。

5 工程实例

5.1 工程概况

如图 4 所示, 该斜坡位于重庆石板坡长江大桥南桥头 F 立交匝道桥下方, 由于桥下桩基邻近基坑开挖, 不仅使桥桩一部分露出, 同时, 随着开挖深度的增加, 斜坡稳定性已经成为重要的安全隐患。



图 4 F 匝道桥及邻近基坑

Fig.4 F ring bridge and adjacent foundation pit

5.2 离心力计算

按最不利原则, 假设所有离心力作用于柱顶, 设计车速 $V = 30$ km/h 及匝道半径 $R = 35$ m, 车辆标准值 $G = 1\,100$ kN, 由式 (1) 得离心力 $H = 222.72$ kN。

5.3 离心力影响计算

结合基坑开挖过程, 计算分基坑开挖前、开挖 5 m 深、开挖 10 m 深三种工况进行, 滑动面形式如图 5~7 所示。由式 (2)~(8) 计算下滑力增量 X_z 及抗滑力减小量 K_j , 结果见表 1。

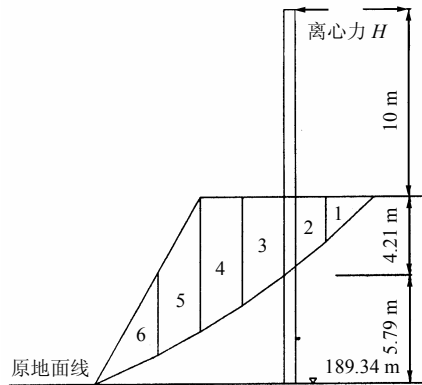


图 5 工况一：邻近基坑开挖前

Fig.5 condition 1: adjacent excavation (before)

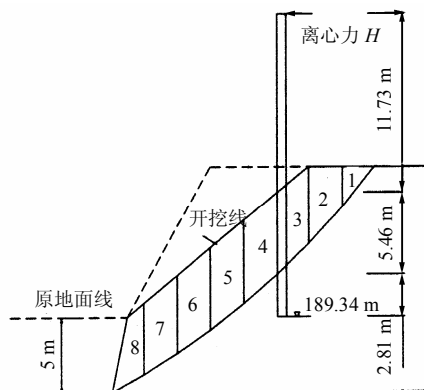


图 6 工况二：邻近基坑开挖 5 m 深

Fig.6 Condition 2: adjacent excavation (depth: 5 m)

表 1 滑体下滑力增量 X_z 及抗滑力减小量 K_j
Table 1 Increase quantity of slide force X_z & decrease quantity of anti-slide force K_j

工况项目	开挖前	开挖 5 m	开挖 10 m
X_z /kN	669.873	1 312.354	1 384.210
K_j /kN	359.553	838.936	796.843

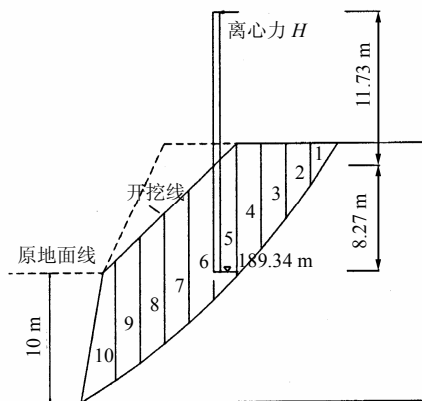


图 7 工况三：开挖 10 m

Fig.7 Condition 3: adjacent excavation (depth: 10 m)

5.4 桩基水平抗滑力计算

结合上述三种工况，由式 (9) ~ (17) 计算

桩基水平抗滑力 S_z ，结果见表 2。

表 2 桩基水平抗滑力 S_z (单位: kN)
Table 2 Pile horizontal anti-slide force S_z (unit: kN)

开挖前	开挖 5 m	开挖 10 m
1 059.030	940.222	0

注：基坑开挖 10 m 时，如图 7 示，整根桩位于滑体之中，故不存在桩基水平抗滑力

5.5 桩基抗滑力影响

根据 5.4 节计算得到的桩基水平抗滑力，由式 (18) ~ (19)，得滑体下滑力减小量 X_j 及抗滑力增量 K_z ，结果见表 3。

表 3 滑体下滑力减小量 X_j 及抗滑力增量 K_z
Table 3 Decrease quantity of slide force X_j & increase quantity of anti-slide force K_z

工况项目	开挖前	开挖 5 m	开挖 10 m
X_j /kN	787.873	641.230	0
K_z /kN	422.428	409.913	0

5.6 斜坡稳定安全系数

斜坡的基本物理力学参数为：重度 $\gamma = 20.0$ kN/m³，黏结力 $C = 21.5$ kPa，内摩擦角 $\varphi = 30.8^\circ$ 。

结合前面的计算，由式 (20) ~ (23) 计算三种工况的斜坡稳定系数。基坑开挖前后斜坡断面及分条情况如图 5~7 所示，计算结果见表 4。

表 4 斜坡稳定系数
Table 4 Safety factor of slope stability

项 目	开挖前	开挖 5 m	开挖 10 m
仅开挖影响	1.455	1.205	1.005
开挖及离心力影响	1.387	1.123	0.971
开挖及抗滑力影响	1.541	1.249	1.005
综合影响	1.467	1.162	0.971

注：综合影响指同时考虑开挖、离心力、抗滑力影响，对应于斜坡实际的稳定状况。

根据表 4 的分析结果，邻近基坑开挖 10 m 深时，已造成滑坡不稳定，危机桥梁安全。因此，主管部门在邻近基坑开挖约 5 m 深时下令施工单位停止开挖，待边坡加固后进行^[10]。

6 结 论

(1) 仅考虑基坑开挖影响时，随开挖深度增加稳定系数逐渐降低，当基坑开挖 10 m 深时，斜坡稳定系数降低 30%，达到了滑动的极限状态。

(2) 同种工况下，考虑车辆离心力影响时，稳定系数平均降低 5.1%，考虑抗滑力影响时，稳定系数平均提高 4.7%。

(3) 考虑综合影响时, 当基坑开挖 10 m, 稳定系数降低至 0.971, 斜坡呈不稳定状态。

(4) 建议开挖 5 m 深时停止邻近基坑开挖施工, 采用预应力锚索和混凝土脚墙加固斜坡; 在弯坡匝道桥上加设减速设施, 减少重车产生的离心力或禁止引道的交通管制。

参 考 文 献

- [1] 王奎, 仇乐民, 吴冬虎. 深基坑开挖对邻近建筑物影响规律分析[J]. 工程勘察, 2004, (6): 30—31.
- [2] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638—643.
- [3] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明. 滑坡稳定性评价方法的探讨[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 545—548.
- [4] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用设计规范[S]. 北京: 中国人民交通出版社, 2004.
- [5] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 顾宝和. 滑坡稳定分析传递系数法的讨论[J]. 工程勘察, 2006, (12): 8—12.
- [7] 张艳娇. 传递系数法在边坡稳定分析中的应用[J]. 北方交通, 2007, (1): 41—42.
- [8] 方玉树. 滑坡稳定分析传递系数法若干问题探讨[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 608—611.
- [9] 周振宇. 滑坡稳定分析中传递系数法探讨[J]. 路基工程, 2007, (4): 112—114.
- [10] 邓建涛. 预应力锚索在滑坡治理和边坡防护中的作用分析[J]. 铁道建筑, 2006, (6): 36—38.