

震后液化侧流场地桥梁桩基受力特性研究

苟栋元^{1,2}, 何卫锋³, 王洋^{1,2}

(1.招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 2.国家山区公路工程技术研究中心, 重庆 400067;
3.西藏天顺路桥工程有限公司, 西藏 拉萨 850001)

摘要: 液后土体侧向流动是造成震后桥梁等工程产生病害的主要原因之一, 而现行工程抗震设计规范在液化场地桥梁桩基抗震水准和设计技术方面远落后于工程实际发展需求。文中在对比国内外抗震设计规范的基础上, 引入日本道桥抗震设计规范中相关规定和计算公式分析桥梁桩基单桩受力, 对无侧流场地和液化侧流场地桥梁桩基的受力情况进行对比分析; 在分析液化侧流场地桥梁桩基受力特性的基础上, 从桥梁构造的角度提出预防桩基破坏的措施。

关键词: 桥梁; 桩基; 砂土液化; 侧向扩流; 受力特性; 地震

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0118-03

历次地震后调查结果显示, 采用桩基础的结构物产生的震害较轻, 但在可液化地基中发生了不少桩基震害严重的案例。对液化地基桩基产生的震害进行归纳分析, 发现液化侧流场地中桩基础的破坏最严重。1964 年阿拉斯加地震中, 发生了许多因液化侧流导致桩基础桥梁破坏的实例, 如 Snow River 上的 605 桥和 605A 桥等; 1964 年发生的新泻地震中, 很多桩预制桩由于地基发生液化侧流而受到严重破坏, 破坏主要出现在预制桩的桩顶及液化与非液化土层分界处, 且破坏方向与地基液化侧流方向相同; 1976 年唐山地震中, 出现大量地基液化后侧向流动引起的桥梁倒塌, 如瓜村滦河桥、永河村桥、滦县滦河大桥等; 1995 年日本阪神地震中, 由于建筑物上部惯性力和液化引起水平向土体流动, 很多桩基出现桩与承台分离、桩头破坏、桩较深部分破坏等现象; 2008 年汶川地震中, 由于地面发生大变形, 桥墩基础桩出现裂缝, 造成桥台或桥墩转动, 进而造成上部结构坠落。该文对震后液化侧流场地桩基受力特性进行分析, 研究预防桩基破坏的构造措施。

1 国内外规范对于液化侧流的考虑

目前, 中国抗震设计规范对地震液化场地的桩基设计仅给出了一些定性的条文, 对震后液化侧向流动场地桩基抗震设计则未提及。一方面, 由于目前对于液化侧流场地桥梁桩基的变形破坏机制研究不够深入, 对液化侧流场地桩基抗震性能的认识不足; 另一方面, 现行规范对于桥梁桩基抗震性能的规定制定较早, 主要是基于 20 世纪 70 年代海城地震、

唐山地震等的震害经验, 当时桩基础尚未广泛使用, 因场地液化侧流引起的桩基震害较少。

日本绝大多数工程抗震设计规范对桥梁桩基抗震设计作了详细规定和说明, 尤其在阪神地震后, 日本规范针对场地侧向流动专门作了说明, 增加了土体液化侧向流动引起桩的受力验算等内容, 并给出了土体液化侧向扩流作用于桩上侧推力的计算式。

近年来, 中国桩基建设发展速度很快, 不可避免地碰到液化场地, 而现行工程抗震设计规范在液化场地桥梁桩基抗震水准和设计技术方面远落后于工程实际发展需求。鉴于此, 引入日本道桥抗震设计规范中相关规定和计算公式分析场地液化侧流对桥梁桩基受力的影响。

2 液化侧流场地桩基受力特性分析

2.1 计算方法

一般下述两种地基容易发生液化侧流: 1) 沿海区域护岸填土与水底高差 5 cm 形成的 100 m 范围内的地基。这类土体由于孔隙水压力上升, 土中有效应力减小, 土的抗剪强度降低, 加上内侧土不断往临空面方向移动, 坡体内土体颗粒逐渐处于悬浮状态, 土中有效应力完全消失, 易产生液化侧流。2) 液化层厚 5 m 以上的砂质土层, 且该土层从水际线开始水平方向连续存在的地基, 从水际线开始的土颗粒处于悬浮状态, 也容易产生液化侧流。

根据日本《道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解説》, 处于侧向流动影响范围内的非液化层和液化层中的结构, 其单位面积受到的作用力按式(1)计

算,计算中不考虑侧向位移影响范围内土层的水平抗力。图 1 为考虑地面侧向位移时桩基的受力。

$$\begin{cases} q_{NL} = C_s C_{NL} K_P \gamma_{NL} x \\ (0 \leq x \leq H_{NL}) \\ q_L = C_s C_L [\gamma_{NL} H_{NL} + \gamma_L (x - H_{NL})] \\ (H_{NL} < x \leq H_{NL} + H_L) \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_{NL} 为作用于非流动化层中的结构,深度 x 处单位面积上的流动力(kN/m^2); C_s 为距水际线的距离修正系数(见表 1); C_{NL} 为非液化层中流动力修正系数,根据液化指数 P_L 取值(见表 2); K_P 为被动土压力系数; γ_{NL} 为非液化层的平均容重(kN/m^3); x 为距地表面的深度(m); q_L 为处于流动化层中的结构,深度 x 处单位面积上的流动力(kN/m^2); C_L 为液化层中流动力修正系数,取 0.3; H_{NL} 为非液化层厚度(m); γ_L 为液化层的平均容重(kN/m^3); H_L 为液化层厚度(m)。

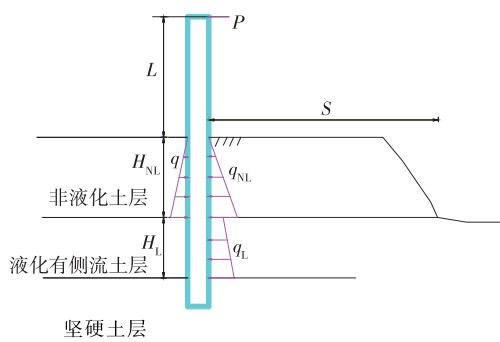


图 1 考虑地面侧向位移时桩基的受力示意图

表 1 距水际线的距离修正系数 C_s

距水际线的距离 S/m	修正系数 C_s
$S \leq 50$	1.0
$50 < S \leq 100$	0.5
$S > 100$	0.0

表 2 非液化层中的流动力修正系数 C_{NL}

液化指数 P_L/m^2	修正系数 C_{NL}
$P_L \leq 5$	0
$5 < P_L \leq 20$	$(0.2P_L - 1)/3$
$P_L > 20$	1

根据上述计算方法对液化侧流场地桥梁桩基的受力特性进行分析。为分析方便,假设两种情况:2 层土体系;3 层土体系。

2.2 侧流对桩基弯矩的影响

一般情况下,计算时桩基按钢筋砼轴心受压构件考虑,计算长度与其两端的约束条件有关,在液化

情况下常假定液化层下端为固定端。图 2、图 3 分别为 2、3 层土体系下桩基受力计算模型和弯矩。

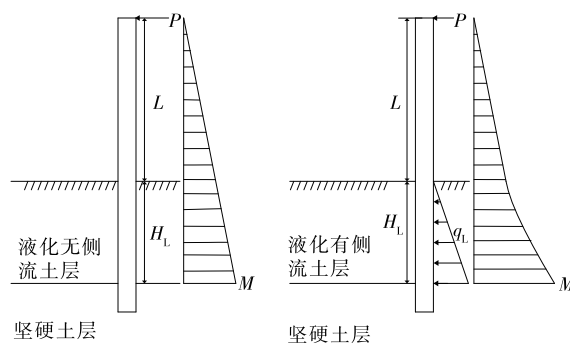


图 2 2 层土体系下桩基受力模型和弯矩

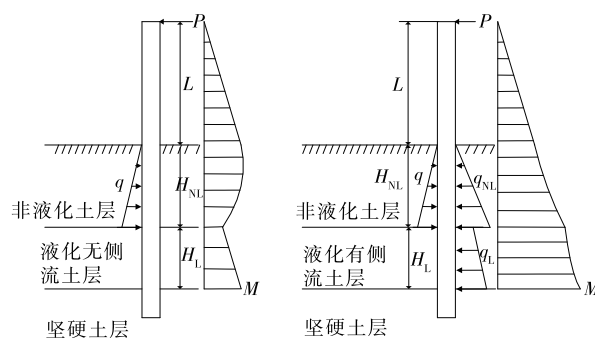


图 3 3 层土体系下桩基受力模型和弯矩

由图 2 可知:对于 2 层土体系,随埋深增加,桩基弯矩增大,土层的侧向流动对桩基的影响是桩的最大弯矩增大,最大弯矩出现在 2 层土体交界处。

由图 3 可知:对于 3 层土体系,土层的侧向流动对桩基的影响是桩的最大弯矩明显增大,最大弯矩位置有所改变。无侧向流动情况下,出现桩身最大弯矩的位置有三处,分别为上层非液化土层中、液化土层与上部土层交界处和液化土层与下部土层交界处,具体位置由土层密度、埋深等因素决定;有侧向流动时,出现桩身最大弯矩的位置有两处,为液化土层与上部土层或下部土层交界处,具体位置视土层密度、埋深及侧向流动情况而定。

2.3 侧流对桩基剪力的影响

图 4、图 5 分别为 2、3 层土体系下桥梁桩基计算受力模型和桩基剪力。

由图 4 可知:对于 2 层土体系,液化侧向流动对桩基的影响是桩的最大剪力增大,最大剪应力出现在 2 层土体交界处。

由图 5 可知:对于 3 层土体系,随着埋深的增加,桩基所受剪力逐渐减少甚至出现负值,达到液化土层时剪应力减小趋势停止;有侧向流动时,由于流

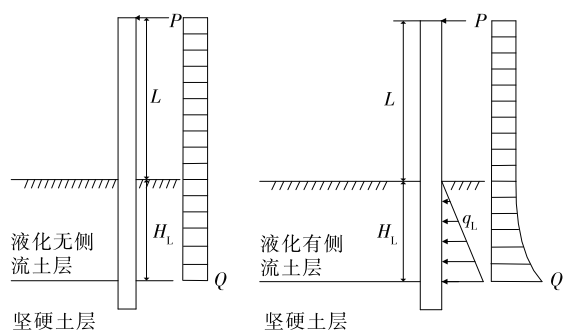


图4 2层土体系下桩基受力模型和剪力

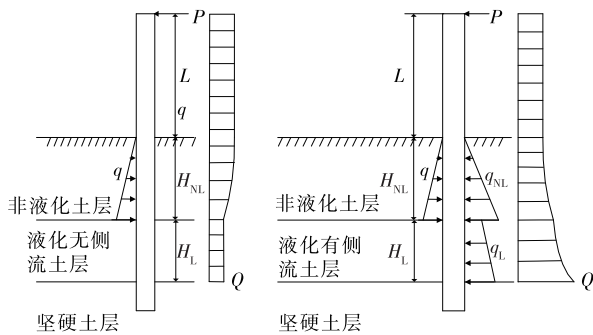


图5 3层土体系下桩基受力模型和剪力

动力的存在,桩基所受剪力在非液化土层范围内的减小趋势变弱甚至有一定增大,到达液化流动土层后,剪力明显增大,最大剪力出现在流动土层与上下土层交界处。

2.4 侧流对桩基轴力的影响

地面侧流主要影响桥梁桩基的水平向受力,竖直方向上的受力和无侧流场地受力相同。有侧流时2、3层土体系下桩身轴力见图6。

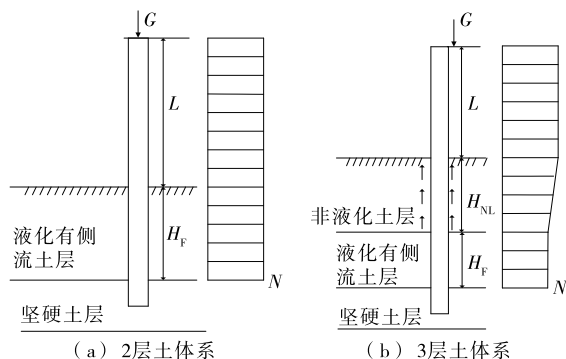


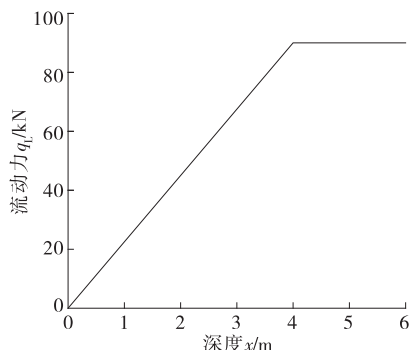
图6 有侧流场地受力计算模型和桩身轴力

由图6可知:液化土层对桩身的侧摩阻力消失,轴力在液化土层范围内不再减小,使桩身轴力保持在较高水平,对桩基础不利。

2.5 案例分析

某沿海岸观光桥地基A为护岸填土,距水际线

的距离为45 m,该地基为2层土体系,上层为液化有侧流土层,厚度为4 m,下层为坚硬基岩。根据现场取样试验结果,上层砂土 $\gamma_L = 23 \text{ kN/m}^3$, $C_{NL} = 1.0$, $C_s = 1.0$ 。在液化有侧流土层范围内流动力 q_L 见图7,位于深度4 m处的单位面积流动力最大,为92 kN,该处单位面积最大弯矩为 $736 \text{ kN} \cdot \text{m}$,单位面积最大剪应力为368 kN。

图7 单位面积流动力 q_L 分布

3 液化侧流场地桩基破坏的构造防治措施

根据液化侧流场地桥梁桩基受力特性,从桥梁构造的角度提出以下预防桩基破坏的措施:

(1) 采用刚度较大的承台座板或帽梁,改变桩顶的约束条件,提高基桩的横向承载能力。

(2) 适当增加桩身大弯矩处一定范围内的桩径,提高其承受较大横向荷载的能力。

(3) 增加液化层界面处桩身的构造配筋,桩身纵向钢筋从桩顶延伸至软土、液化土的下界面以下的范围内。

(4) 在桩身顺变形方向加设翼板,减小土层侧向流动对桩基的作用力。

4 结语

中国现行工程抗震设计规范对液化场地桥梁桩基设计的规定与国外相比尚有不足,远远落后于工程实际发展需求,需进一步完善液化侧向流动场地桥梁桩基设计规范。该文引入日本道桥抗震设计规范中相关规定和计算公式分析桥梁桩基单桩受力,对震后液化侧流场地桥梁桩基的受力状况进行分析,结果表明:土层发生液化侧流会增大桩身的最大剪力和最大弯矩,最危险位置为大变形土层与上下土层交界处;液化侧流对桩身内力的影响由液化土层埋深、厚度、密度及其侧向流动情况等因素决定。

(下转第165页)

- quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault-tree analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(4).
- [14] Mendes A, Helvacioğlu I H. An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems[J]. Ocean engineering, 2011, 38(2-3).
- [15] 李文锋, 游庆和, 廖强, 等. 基于 T-S 模糊 FTA 的远程故障诊断方法研究[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 25(9).
- [16] Zadeh L. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8.
- [17] Braglia M, Frosolini M, Montanari R. Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2003, 20(4).
- [18] Pillay A, Wang J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(1).
- [19] Vario J K. Fault tree analysis of phased mission system with repairable and non-repairable components[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(2).
- [20] Vidal L A, Marle F, Bocquet J C. Using a delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5).
- [21] Wang Y M, Liu J, Elhag T M S. An integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(3).
- 收稿日期: 2019-03-11

(上接第 120 页)

可从桥梁构造的角度采取措施预防桥梁桩基破坏。

参考文献:

- [1] 郑新亮, 王东升, 唐亮, 等. 液化场地桥梁桩基础震害及其抗震研究概述[J]. 中外公路, 2008, 28(4).
- [2] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin Awaji Earthquake on seismic design and seismic strengthening of highway bridge[J]. Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE, 1996, 13(2).
- [3] 鲁晓兵, 谈庆明, 王淑云, 等. 饱和砂土液化研究新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1).
- [4] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2).
- [5] Baziar M H, Dobry R, Alemi M. Evaluation of lateral ground deformation using sliding block model[A]. Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering[C], 1992.
- [6] 周云东. 地震液化引起的地而大变形试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [7] 马远刚, 茜平一. 横向土运动作用下群桩的性状研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4).
- [8] 陈鹏, 李文华, 范涛, 等. 土体冲刷对桥梁桩基影响的三维差分模拟计算分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4).
- [9] 童立元, 王斌, 刘义怀. 地震地基液化大变形对桥梁桩基危害性二维数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3).
- [10] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [11] JTG B02-2013, 公路工程抗震规范[S].
- [12] 日本道路协会. 道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解説[S].
- 收稿日期: 2018-10-12

(上接第 158 页)

- 准设计, 2011(10).
- [4] 李俊松, 喻渝, 胖涛, 等. BIM 技术在铁路隧道工程全生命周期中的应用研究[A]. 第八届中国智慧城市建设技术研讨会论文集[C], 2013.
- [5] 刘鹏. 铁路工程设计 BIM 技术的差异化与解决方案[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(2).
- [6] 赵璐, 翟世鸿, 陈富强, 等. BIM 技术在铁路项目隧道施工中的应用研究[J]. 施工技术, 2016, 45(18).
- [7] 智鹏, 史天运, 王万齐, 等. 高速铁路隧道工程精益化建设管理关键技术[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6).
- [8] 孙建诚, 蒋浩鹏, 朱双晗. 基于 BIM 技术的三维公路模型设计探讨[J]. 重庆: 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2019, 38(1).
- [9] 喻钢, 胡珉, 高新闻, 等. 基于 BIM 的盾构隧道施工管理的三维可视化辅助系统[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1).
- [10] 邓小军, 刘肖群, 董春晖. 基于 BIM 技术的隧道工程施工信息集成与管理应用研究[J]. 浙江建筑, 2018(8).
- 收稿日期: 2019-05-26