



基于排水抗液化理论的碎石桩 在某港口工程的应用

伍琪琳, 王四根, 林佑高

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 排水是碎石桩重要的抗液化功能之一, 但我国工程界的排水抗液化运用较少, 理论研究及工程经验不足。回顾了排水抗液化理论的发展历史, 总结不同学者的排水抗液化理论的关键要点, 指出井阻是排水抗液化法必须考虑的不利因素。某强震区港口工程成功运用排水法碎石桩解决了液化难题。详细介绍该工程的碎石桩设计方案及计算方法, 总结桩体材料粒径级配的确定方法, 对比不同成桩工艺的优缺点, 并对排水抗液化碎石桩的质量检测方法提出建议。

关键词: 液化; 碎石桩; 排水抗液化; 孔压比; 井阻

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0198-06

Application of stone column for anti-liquefaction based on drainage theory in a harbor project

WU Qi-lin, WANG Si-gen, LIN You-gao

(CCCC FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Drainage is one of the important anti-liquefaction functions of stone column, but there are few applications of anti-liquefaction based on drainage function in domestic engineering industry, and theoretical research and engineering experience are insufficient. This paper reviews the development history of anti-liquefaction based on drainage theory, summarizes the key points of different scholars' anti-liquefaction based on drainage theory, and points out that the unfavorable well resistance must be considered in the methods of anti-liquefaction based on drainage. A port project in a high-seismicity area has successfully solved the liquefaction by using stone columns as their drainage function. The design program and calculation method of stone column in this project are introduced in detail. The method for determining the particle size gradation of stone column materials is summarized. The advantages and disadvantages of different stone column processes are compared, and the quality inspection methods for stone column of anti-liquefaction based on drainage theory are proposed.

Keywords: liquefaction; stone column; anti-liquefaction based on drainage; excess hydrostatic pore-water pressure ratio; well resistance

液化是松散砂土或粉土在动剪切应力作用下体积减小(剪缩)、孔隙水压力持续上升、有效应力持续降低直至达到有效应力为 0、土颗粒悬浮于水上的现象。经调查, 砂土液化是地震工况下港口建筑物破坏的最主要因素, 国内外由于地震产生砂土液化而造成的破坏不胜枚举。1964 年日本新潟发生的 7.6 级地震, 由于近河岸大面积砂土地基产生液化,

大量建筑物遭到破坏, 损毁房屋 2 130 栋, 严重损坏 6 200 栋, 轻度损坏 31 200 栋。1976 年我国唐山发生的 7.8 级地震也曾造成大面积砂土液化现象, 当时有 2 次灾难性强地震发生, 震后数分钟地表开始大面积砂土液化, 喷水冒砂达数小时, 引起地表开裂与下沉, 并最终使建筑物成片裂塌。

在砂土液化研究的过程中, 一些液化地基处

收稿日期: 2021-03-12

作者简介: 伍琪琳(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程设计。

理方法也被开发出来, 包括开挖换填、强夯、振冲、挤密砂桩、碎石桩、水泥土桩等。碎石桩是目前运用最为广泛的抗液化措施, Hausler 研究分析 15 次强烈地震 102 个不同的地基加固处理场地的现场调查案例, 发现采用碎石桩的达到了 44 例。碎石桩至少包含以下 4 种抗液化功能^[1]: 1) 桩间土密实。碎石桩施工过程的“振”与“挤”会导致土颗粒重新排列、组合及位移, 形成更加密实的状态, 从而提高了桩间土的抗剪强度和抗液化性能。2) 排水。碎石桩桩体具备高渗透性, 是周边土体数百倍至数千倍, 甚至更大, 为桩间土地震超孔隙水压力的消散提供了排水通道, 加速地震超孔隙水压力的消散, 降低地震孔压。3) 消减剪应力。碎石桩自身的密度及模量远高于周边土体, 承担更多的地震剪应力分配, 可减少桩周土体的地震剪应力。4) 侧限。碎石桩的施打提高了土体水平应力及侧限。

排水抗液化理论由 Seed 等^[2]于 1977 年首次提出, 经过近半个世纪的发展, 该理论已经形成成熟、完善的体系, 得到学术界及工程界的广泛认可, 也有数十个工程项目的运用经验, 地震排水措施不仅包含传统的碎石桩, 还开发了地震排水带, 但总体而言运用广泛程度远不及桩间土密实原理的抗液化。

在我国, 对于排水抗液化有一定的理论研究和室内模型试验, 某些工程的试验段运用排水抗液化碎石桩, 但未见在实际工程中的大规模运用。我国的抗震规范只提供了基于地基土标贯(即密实度)的临界标贯液化判别法^[3], 未见基于其它抗液化功能(排水、剪应力消减、侧限等)的说明或计算方法。自然我国工程界的抗液化都是基于桩间土密实的。基于排水抗液化理论的碎石桩工程运用可以说尚处于空白阶段。

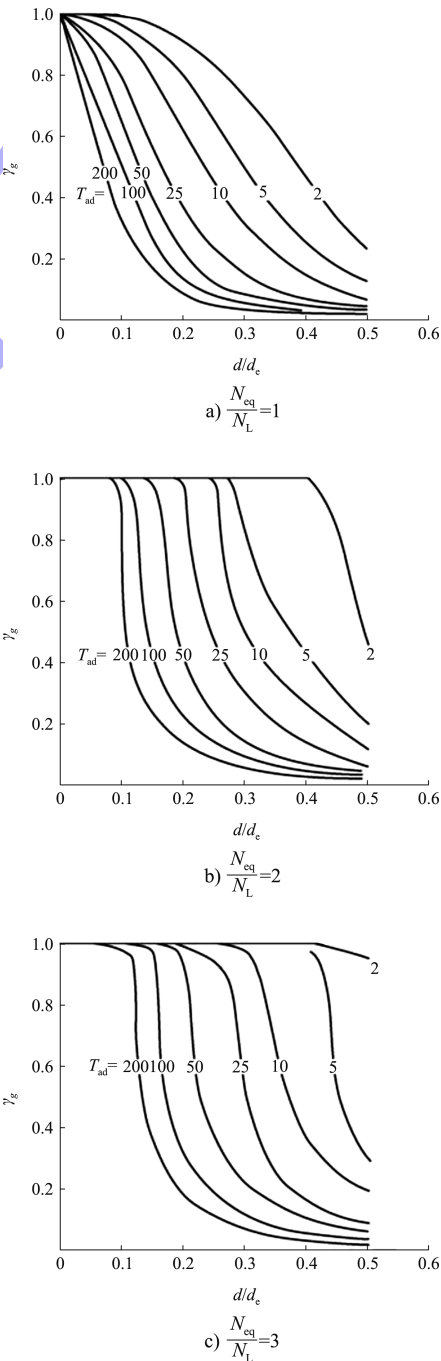
1 排水抗液化理论的发展

1.1 Seed 排水抗液化理论

1977 年 Seed 等首次提出: 由于碎石桩的超高渗透性, 其地震工况下的排水速度将超过孔隙水压力上升速度, 可基于其排水功能进行抗液化。

Seed 以一维固结理论为基础, 结合室内剪切试验的孔压结果, 推导出碎石桩地基土地震工况下的超孔压计算方法及公式, 实际上形成了排水抗液化理论基础。Seed 利用有限元软件的计算结果, 形成不同碎石桩布置及土体参数下的地震孔压简图(图 1), 以指导排水抗液化的碎石桩。

图 1 中的参数 N_{eq}/N_L 由地震强度及地基土性质(主要为密实度)确定, 参数 T_{ad} 由地基土的渗透系数、体积压缩系数及地震持时确定, 参数 d/d_c 由碎石桩的布置(桩径、间距及布置形式)确定。



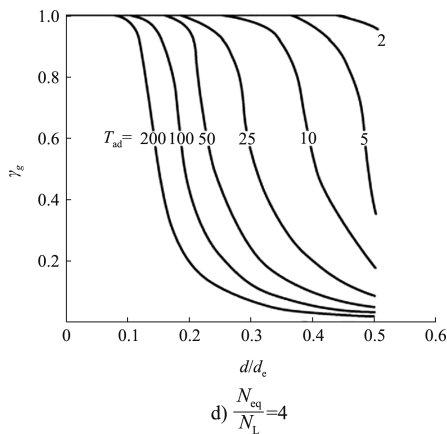


图 1 不同时间因子 T_{ad} 下的最大孔压比 γ_g

Seed 简图不涉及桩体自身的渗透性能，这是因为 Seed 认为当桩体的渗透系数大于 200 倍桩周土体的渗透系数时，桩体的井阻可忽略不计，而一般情况下碎石桩体的渗透系数无疑是大于 200 倍桩周土渗透系数的。

1.2 Baez 碎石桩排水抗液化设计方法

1995 年 Baez^[4] 结合工程案例系统总结了碎石桩的各种抗液化功能（挤密、排水、消减剪应力、侧限等）及基于各种抗液化功能的设计方法及关键参数。重要的是，在这之前，工程界的抗液化设计往往只是基于碎石的某一项抗液化功能，而 Baez 介绍了如何综合考虑碎石桩的某几项抗液化功能进行抗液化设计。

Baez 并没有革命性或者原理性地改进 Seed 的排水抗液化理论，其研究的碎石桩排水抗液化仍以 Seed 简化图表为基础，仅仅指导人们在排水法抗液化设计方案中综合考虑挤密、消减剪应力等功能，但 Baez 的碎石桩排水抗液化设计方法有利于降低碎石桩置换率、增加经济性。

1.3 Ounce 碎石桩排水抗液化理论

1988 年 Onoue^[5-6] 通过理论及现场试验证明：即使桩体渗透系数达到周边土体的 200 倍甚至以上，井阻仍然不可忽略。Ounce 根据有限元软件的计算结果更新了 Seed 的排水法抗液化设计简图，增加了井阻因素，以考虑桩体渗透系数的影响。

Onoue 理论是对 Seed 排水抗液化理论的重大改进，此后，工程界逐渐重视井阻因素对排水抗

液化设计的影响，桩体材料（材料、颗粒大小、级配等）的设计也是排水抗液化设计的重要内容之一。

在 Onoue 理论前，工程界尚有采用砂桩作为地震排水通道的实际案例，此后人们意识到由于其高井阻，砂桩是无法作为排水法抗液化措施的。

1.4 排水抗液化的解析解

王四根等^[7] 在 Seed 排水抗液化理论及等应变砂井固结理论的基础上，推导了地震工况下碎石桩地基的超孔压比解析解，如式(1)所示。

$$\gamma_g = \frac{8N_{eq}}{N_L t_d} \cdot \frac{\sigma'_{vh}}{\sigma'_z} \cdot \frac{1 + (\pi/2 - 1)\gamma_{ab}}{\pi^2} \cdot \sin \frac{\pi z}{2H} \cdot \frac{1 - e^{-B_r t_d}}{B_r} \quad (1)$$

式中： γ_g 为地震超孔压比； N_{eq} 为地震等效循环次数； N_L 为地基土初始液化的循环次数； t_d 为地震持时； σ'_{vh} 为碎石桩底的土体竖向有效应力； σ'_z 为深度 z 的竖向有效应力； γ_{ab} 为排水面（桩顶面）与不排水面（桩底面）的初始地震超孔压比； B_r 为由土体性质（渗透系数、体积压缩系数等）及桩体参数（长度、桩径、间距）确定的参数，也就是砂井固结排水理论中的参数 β 。

式(1)无需借助复杂的数值软件，利用 Excel 表格即可完成排水抗液化的碎石桩设计，有利于工程运用。

2 工程运用

2.1 工程概况

某海外港口工程包括 630 m 集装箱码头建设、353 万 m^3 疏浚、0.27 km^2 的陆域吹填以及相应的配套设施建设等。

2.2 设计地震

项目所在地为强震区，设计地震重现期为 475 a（50 a 超越概率 10%）。概率地震灾害分析得到的设计地震地表 PGA 为 0.515g（陆域）及 0.53g（码头岸坡），设计地震均值震级为 6.8 级。

2.3 地质条件

地基土以高含泥量松散钙质砂为主，平均含泥量 22%，且分布不均，含泥量超过 30% 的土样占比超 15%。土样的标贯击数为 0~18 击，平均 7 击。地基土的粒径曲线见图 2。

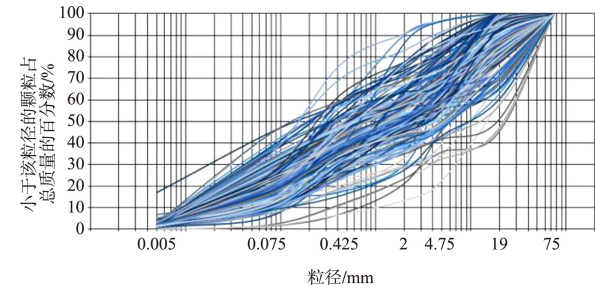


图 2 地基土(钙质砂)的粒径曲线统计

由于地基土的密实度较低, 基于 Seed-Idriss 简化液化判别法^[8], 本工程的地基土在设计地震工况下的安全系数远小于 1.0, 存在严重的液化风险。

2.4 抗液化要求

要求地基土的抗液化安全系数 ≥ 1.1 , 根据文献^[9], 该要求对应的地震超孔隙水压比 ≤ 0.6 。

2.5 抗液化措施的选择

抗液化措施众多, 常用的包含强夯、振冲、挤密砂桩、碎石桩等, 其中强夯、振冲、挤密砂桩等均基于密实原理, 碎石桩的抗液化设计既可基于密实原理亦可基于排水原理。

本工程地基土为高含泥量松散钙质砂, 基于密实原理的抗液化方案可能存在较大的验收风险: 1) 钙质砂颗粒在外力作用下容易破碎, 释放空间, 降低挤密效果; 2) 高含泥量制约了密实效果, 尤其是含泥量空间分布不均匀, 对于含量很高的点位, 预期处理后的密实程度低, 无法达到抗液化要求的临界标贯击数。

考虑到基于密实原理的抗液化方案在本工程中存在较大风险, 最终决定采用排水抗液化碎石桩方案。该方案在项目的运用中有着得天独厚的优势: 土体渗透系数是排水抗液化设计的首要参数。钙质砂相比常规砂, 粒径大、砾石含量高、渗透系数一般高于常规砂 1~2 个数量级, 有利于排水抗液化的运用。

2.6 碎石桩排水抗液化方案

根据场地各区域的运营功能及(液化)破坏后果的严重性划分为 7 个区, 考虑到地震沉降及超孔压的控制要求, 分别设置了相应的碎石桩置换

率, 见表 1。
本工程的碎石桩总方量约 50 万 m^3 , 是目前世界范围内最大规模的碎石桩抗液化工程之一。

表 1 碎石桩处理分区

分区	运营功能	面积/万 m^2	桩径/m	间距/m	置换率/%
A	岸坡坡脚	2.7	1.0	2.4	15.7
B	码头岸坡	5.1	1.0	2.4	15.7
C	码头后沿	3.1	0.8	2.0	14.5
D	道路及堆场	11.6	0.8	2.4	10.1
E	二期	6.9	-	-	-
F	房建	1.8	0.8	2.0	14.5
G	港区外	1.1	-	-	-
合计		32.2	-	-	-

2.7 桩体材料的级配

桩体材料级配的选择主要考虑两方面因素: 1) 桩体渗透系数足够高, 以降低井阻, 使用更经济的碎石桩置换率; 2) 满足倒滤原则, 避免地基土的细颗粒向桩体渗入导致桩体渗透系数降低。

Saito 等^[10]根据大量室内试验的研究成果, 提出碎石桩的粒径需满足:

$$20d_{15} < D_{15} < d_{85}$$

(2)

式中: d_{15} 、 d_{85} 为土体颗分曲线上小于该粒径的含量占总质量 15% 及 85% 的粒径; D_{15} 为碎石颗分曲线上小于该粒径的含量占总质量 15% 的粒径。

式(2)的左侧部分限制桩体材料颗粒不能太小或者小颗粒占比过大, 保证渗透系数; 右侧部分控制桩体材料颗粒不能太大或大颗粒占比过大, 保证土颗粒不渗入桩体, 降低桩体渗透系数。

当确定桩体材料级配后, 可利用汉森公式估计桩体材料的渗透系数。当条件许可时, 应进行室内渗透系数试验, 确定桩体材料的渗透系数。

2.8 抗液化计算结果

采用式(1)对表 1 的碎石桩布置方案进行抗液化计算, 震级 $M = 6.8$, 地震等效循环周数 N_{eq} 为 10 次, 地震持时 $t_d = 30 \text{ s}$, $N_{eq}/N_L = 2$, 砂土渗透系数, $K_h = 6.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 桩体渗透系数 $K_w = 0.1 \text{ m/s}$, 体积压缩系数 $m_v = 1/25 \text{ MPa}^{-1}$ 。计算结果见表 2。

表 2 抗液化计算结果

分区	排水路径 H/m	(地震)超孔压比 γ_s
A	17.00~20.00	0.22~0.30
B	17.30	0.23
C	14.35	0.17
D	14.70	0.28
F	14.70	0.18

从表 2 的结果可以看出，处理后地基的地震超孔压均小于等于 0.6，可以满足抗液化要求。

2.9 成桩工艺

碎石桩成桩工艺包括沉管法及振冲法。振冲法又可分为湿法工艺、干法顶部喂料工艺及干法底部喂料工艺。湿法工艺是国内通常采用的振冲加填料工艺，通过振动及喷水造孔，孔口填料后借振冲器挤入周围土中成桩。干法工艺在造孔过程中并不喷水，通过振动及喷气造孔。干法顶部喂料只适用于地下水位以上、桩长较短的情况，否则桩孔容易坍塌。干法底部喂料于 1972 年首次出现，通过在振冲器上安装特殊的内部供料管道，填料能够从振冲器的前端进入桩孔。

干法底部喂料工艺相比传统湿法有以下显著优点：1) 桩孔不会坍塌，桩体连续；2) 成孔过程产生的泥浆很少，有利环保；3) 可制作海上碎石桩。基于上述优点，干法底部喂料工艺已成为欧美国家最常用的振冲工艺，但底喂料振冲器的体型更大且不规则，其成桩能力及工效逊于传统湿法工艺。

在排水法抗液化工程中，桩体的连续、均匀及高渗透性是首要目标，而传统湿法振冲工艺难以保证桩体的连续性，且成桩过程会混入大量地基土，降低了桩体渗透系数，相关规范已经明确指出：传统湿法工艺不适用于排水法抗液化工程。沉管法通过沉管成桩，能够形成连续、均匀、干净的桩体，可作为排水法抗液化碎石的首选成桩工艺。干法底喂料工艺能够形成连续、干净桩体，也适用于排水法抗液化工程，但应采用自动化成桩记录系统，严格把控桩体直径的均匀性。

在本工程中，选择了(振冲)干法底喂料工艺及沉管工艺作为碎石桩成桩工艺，其中，水域碎石桩(A、B 区)的桩径较大，超出沉管工艺的成孔能力，采用干法底喂料工艺，陆域(C、D、F 区)碎石桩的桩径在沉管工艺的成孔能力范围内，故陆

域碎石桩以沉管工艺为主，干法底喂料工艺为辅。

2.10 质量检测

排水抗液化设计检测的难点在于没有直接的检测手段或指标可证明已施工碎石桩是否满足在设计地震下的排水性能，但从碎石桩排水抗液化的原理出发，通过检测以下两方面指标可以判断设计意图是否得到实现：1) 桩体渗透性能是排水抗液化的核心，具体指标包含桩体渗透性(即材料级配)及成桩质量(桩径及连续性)；2) 桩间土密实度，实际上代表着参数 N_L 及体积压缩系数 m_v 。

桩体渗透性能难以直接检测，只能通过施工质量记录检测，包含桩体材料记录及自动化成桩记录(深度、时间、电流、水压、填料量、桩形图等)。桩间土密实度的检测与基于密实原理的抗液化方案相同，可采用标贯或静力触探等手段。

3 结论

1) 即使桩体渗透系数达到周边土体的 200 倍甚至以上，井阻仍然不可忽略。Seed 简图未考虑桩体的井阻因素，导致确定的碎石桩方案不安全。采用排水抗液化理论时，应采用 Onoue 简图或者公式(1)。

2) 钙质砂地基可优先考虑排水法抗液化。一方面，钙质砂的颗粒破碎导致碎石桩密实效果降低；另一方面，钙质砂的渗透性系数往往较大，采用排水法抗液化有利于降低碎石桩置换率。

3) 桩体材料级配应满足倒滤原则及渗透系数要求。

4) 排水抗液化碎石桩不宜采用传统湿法工艺，应首选沉管工艺。干法底喂料工艺也可采用，但应采取措施，保证桩体直径的大小、均匀及连续性。

参考文献：

[1] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1996: 515-516.

[2] SEED H B, BOOKER J R. Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains[J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977(7): 757-768.

[3] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 年版.北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[4] BAEZ J I. A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1995.

[5] ONOUE A. Diagrams considering well resistance for designing spacing ratio of gravel drains[J]. Soils and foundations, 1988, 28(3): 160-168.

[6] ONOUE A, MORI N, TAKANO S. In-situ experiment and analysis on well resistance of gravel drains[J]. Soils and foundations, 1987, 27(2): 42-60.

[7] 王四根, 廖名亮, 伍琪琳. 碎石桩排水抗液化的一种实用化解析解[J]. 水运工程, 2019(9): 282-288.

[8] YOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 2001, 127(4): 297-313.

[9] DAY R B. Geotechnical earthquake engineering handbook[M]. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2002.

[10] C VRETTOS, S SAVIDIS. Stone Column Ground Improvement Against Liquefaction for the Preveza-Aktio Immersed Tunnel [C]//Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. New York: Missouri University of Science and Technology, 2004.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 185 页)

[14] MALAYA C, SREEDEEP S. Evaluation of SWCC model and estimation procedure for soil and fly ash[C] Proceedings of World Environmental & Water Resources Congress. [S. l.]: [s. n.], 2010.

[15] 郭鸿, 陈茜, 陈栋梁, 等. 原状黄土水土特征曲线拟合方法研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 92-95.

[16] 叶云雪, 邹维列, 韩仲, 等. 非饱和土孔隙比与基质吸力关系的通用模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 927-933.

[17] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范(2009 年版): GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[18] FARRELL D A, LARSON W E. Modeling the pore structure of porous media[J]. Water resources research, 1972, 8(3): 699-706.

[19] MCKEE C R, BUMB A C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous waters and environmental emergencies[C]//Proceedings of Hazardous Materials Control Research Institute National Conference. Houston: Tex, 1984.

[20] LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil [J]. Journal of engineering mechanics, 2004, 130(6): 646-655.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 191 页)

[13] 深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 深圳市岩土工程有限公司. 基坑支护技术标准: SJG 05—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

[14] 广东省基础工程集团有限公司, 广东省建筑工程集团有限公司. 建筑基坑工程技术规程: DBJ/T 15-20—2016[S]. 北京: 中国城市出版社, 2017.

[15] 浙江华展工程研究设计院有限公司, 宁波市轨道交通集团有限公司. 宁波市建筑基坑工程技术细则: 2019 甬 DX-06[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[16] 中国建筑科学研究院, 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京建华建材技术研究院有限公司, 等. 建筑基坑支护技术规程: DB11/489—2016[S]. 北京: 北京城建科技促进会, 2017.

[17] 广州市建筑科学研究院. 广州地区建筑基坑支护技术规定: GJB-02—1998[S]. 广州: 广州市城乡建设委员会, 1998.

[18] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都市建设工程施工安全监督站. 成都地区基坑工程安全技术规范: DB51/T 5072—2011[S]. 成都: 四川省住房和城乡建设厅, 2011.

[19] 冶金工业部建筑研究总院. 建筑基坑工程技术规范: YB 9258—1997[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

[20] 浙江省建筑设计研究院, 浙江大学. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014.

[21] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)