

DOI: 10.11779/CJGE202205004

基于实测的挤密砂桩复合地基沉降算法研究

寇晓强^{1, 2, 3}, 于健^{1, 2, 3}, 胥新伟^{1, 2, 3}, 宋神友⁴, 高潮^{1, 2, 3}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;

3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 4. 广东省公路建设有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 挤密砂桩作为深水原位处理地基新技术在港珠澳大桥和深中通道工程中得到了大量应用。对挤密砂桩复合地基水下原位载荷试验测试的桩土应力分布情况进行分析, 在加载过程中实测桩土应力比始终维持为 6 左右。对大面积水下堆载过程中的复合地基沉降进行了现场实测, 对实测资料进行了统计分析, 与现有的理论计算方法进行了比较, 认为现有普遍应用的日本规范推荐算法, 在置换率低于 50% 时, 其计算结果相对实测值偏大, 当置换率高于 50% 时, 该方法不再适用。提出了基于实测的挤密砂桩沉降修正计算方法, 并建议桩土应力比取值范围为 5~6.3。

关键词: 挤密砂桩; 沉降算法; 桩土应力比; 现场实测; 沉降折减比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0820-07

作者简介: 寇晓强(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事跨海通道人工岛及沉管隧道地基与基础等方面的科研工作。E-mail: ytkouxq@163.com。

Settlement calculation method for sand compaction piles under water based on in-situ measurement

KOU Xiao-qiang^{1, 2, 3}, YU Jian^{1, 2, 3}, XU Xin-wei^{1, 2, 3}, SONG Shen-you⁴, GAO Chao^{1, 2, 3}

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute, Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of

Transport, PRC, Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 4. Guangdong

Highway Construction Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: The sand compaction pile which is an efficient foundation treatment method under water is used in Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge and Shenzhen-Zhongshan Link. A large number of in-situ tests such as underwater plate load tests and surcharge preloading tests under water are implemented. The in-situ values of pile-soil stress ratio in the underwater plate load tests are discussed, and the values of pile-soil stress ratio are kept to 6 in the process of loading. The settlement of the sand compaction pile ground in the process of surcharge preloading under water is monitored, and the values of settlement are comparatively analyzed to those by the available calculation method recommended in the Japanese standard. It is illustrated that the available calculation method in the Japanese standard is conservative when the replacement rate is less than 50%, and is not suitable for the practice when the replacement rate is more than or equal to 50%. A modified settlement calculation method based on the in-situ measurement is proposed and illustrated, and the values of pile-soil stress ratio are suggested in the range of 5 to 6.3.

Key words: sand compaction pile; settlement calculation method; pile-soil stress ratio; in-situ measurement; reduction factor of settlement

0 引言

水下挤密砂桩复合地基工法作为一种新型地基处理技术, 以其可直接、快速、显著地提高软弱地基承载能力的独特优势, 特别适合应用于外海筑港及人工岛建设。该工法是在砂桩船上通过振动设备和管腔增压装置把砂强制压入水下软弱地基中, 经过振动拔管、回打、挤密扩径, 形成挤密砂桩^[1-3]。

从加固原理上看, 通过挤密砂桩的置换、挤密、

排水作用, 增加地基强度, 加快地基固结, 减少结构物沉降, 可有效提高地基的承载能力和抗液化能力^[4]。

张曦等^[5-6]通过离心模型试验等方法对挤密砂桩加固机理、破坏模式及沉降计算方法等进行了讨论, 认为现有日本规范推荐的沉降计算方法是符合实际情况的。沈才华等^[7]通过考虑砂桩挤密体积变化, 提出

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2019B111105002)

收稿日期: 2021-01-05

基于扩孔理论的砂桩和桩周土压缩模量计算方法,认为陆上挤密砂桩的桩土应力比为2~3适宜。王延宁等^[8]通过对水下挤密砂桩进行原型载荷试验,认为采用日本规范计算的沉降量偏大,建筑地基处理规范提出的计算方法与实测值接近,但由于载荷试验的影响深度问题,其未考虑桩底下卧层沉降的影响。

近年来水下挤密砂桩在国内逐步得到应用,国内对挤密砂桩设计与计算多是沿用日本研究成果,对相关设计参数的实际应用和验证性研究尚显欠缺。日本挤密砂桩规范^[9]推荐了相关沉降计算方法,认为挤密砂桩沉降与桩土应力比、面积置换率等有关,但随着施工工艺的改进,挤密砂桩的应用也更富多元化,相应推荐公式的计算结果也显得不能应对更多布置形式要求。

挤密砂桩在港珠澳大桥岛隧工程中被广泛的应用,本文通过对港珠澳大桥岛隧段挤密砂桩复合地基沉降实测资料的梳理,结合必要的理论分析,对挤密砂桩的沉降规律进行了探讨,形成基于实测的挤密砂桩沉降计算方法,为今后挤密砂桩在工程中的应用提供设计依据,对今后挤密砂桩工法在大型外海工程设计实践中的应用具有指导意义。

1 挤密砂桩复合地基现场实测研究

1.1 挤密砂桩复合地基水下原位载荷试验

为了进一步研究验证挤密砂桩复合地基承载及沉降性能,在置换率相似,满足工期要求的情况下,选择在港珠澳大桥西人工岛救援码头位置(图1)进行了水下挤密砂桩复合地基载荷试验。

该区域挤密砂桩直径1.6 m,间距1.8 m,呈正方形布置,置换率62%。砂桩桩顶标高-15.0 m,桩底标高-37.0 m。砂桩顶面铺设1.0 m厚碎石垫层。岛头段沉管碎石底的最大基底应力约150 kPa,试验加载至340 kPa(2.3倍设计值,承压板底平均应力),承压板面积5.4 m×5.4 m。

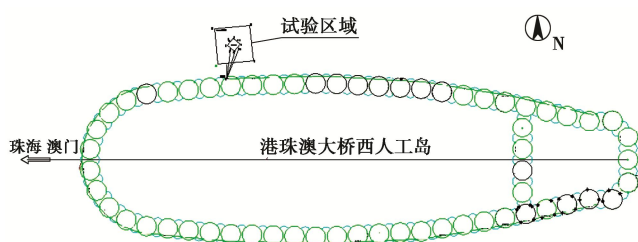


图1 试验区位置

Fig.1 Location of plate load tests

试验中共埋设土压力盒4个,孔隙水压力计1个(用于滤除潮汐产生的孔压变化并计算有效应力),如

图2所示,分别埋设于砂桩顶面和桩间土表面,用于监测砂桩顶面应力与桩间土应力随荷载的施加过程变化规律。

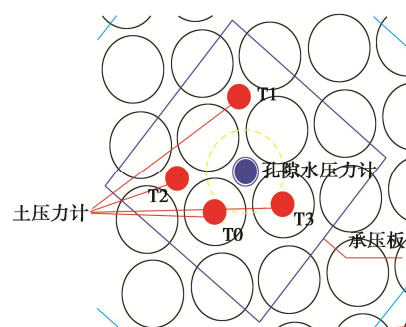


图2 土压力计及孔压计埋设位置

Fig. 2 Position of soil pressure cells and pore pressure gauges

桩土应力比随荷载施加过程变化如图3所示,随着荷载的施加,桩土应力比稳定为6左右,卸载过程中,砂桩相对于桩间土呈现更为明显的弹性变形特性,故在卸载回弹过程中砂桩部分承载逐渐增大,桩土应力比呈现明显增大趋势,卸载至最小值52 kPa时,桩土应力比呈现明显增大趋势,卸载至最小值52 kPa时,桩土应力最大,约为11.3。

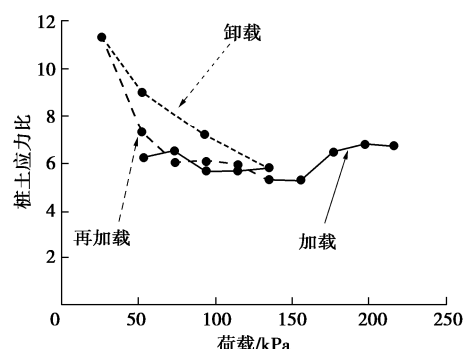


图3 桩土应力比随荷载施加过程变化曲线

Fig. 3 Development of pile-soil stress ratio in process of loading and reloading

在卸载过程中,由砂桩主要承受荷载的趋势越来越明显,而卸载后再加载回到正常持续加载过程后,桩土应力比变化范围始终维持为5.3~6.7。考虑到实测区域载荷板面积范围内砂桩置换率与整体区域内置换率存在一定误差,经过面积修正后得到桩土应力比确定为6.3。

1.2 挤密砂桩复合地基水下原位堆载现场实测

港珠澳大桥岛隧过渡段采用挤密砂桩复合地基的形式对隧道下部软土地基进行加固处理,挤密砂桩打设完成后为保证后期沉管安放沉降均匀,特在靠近人工岛区域软土层深厚的挤密砂桩段进行了堆载预压处理^[10],挤密砂桩置换率自人工岛向隧道依次为70%,55%,42%,水下堆载按照不同置换率分为3

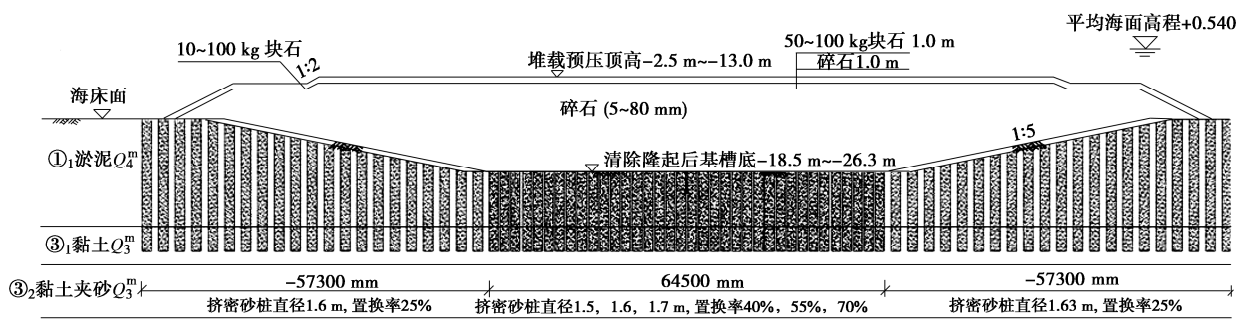


图 4 水下堆载断面图

Fig. 4 Section of surcharge preloading under water

个堆载区。

堆载断面形式如图 4 所示, 挤密砂桩直径为 1.6, 1.5, 1.7 m, 分别对应置换率为 42%, 55%, 70%, 桩身穿过第一、二大层淤泥层, 桩端进入第三大层黏土层, 隧道两侧基槽放坡采用置换率为 25% 的挤密砂桩进行处理, 堆载材料主要选用直径 5~80 mm 碎石, 水下堆载高度为 13.3~16.0 m。

在堆载过程中, 采用水下自动化监测技术^[10-11]对水下堆载复合地基沉降情况进行了现场实测, 测点位置如图 5 所示。

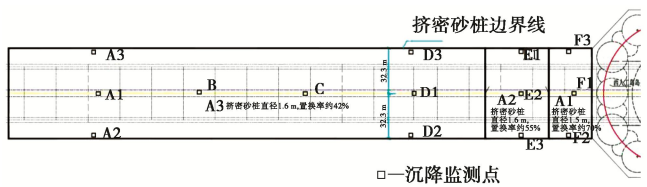


图 5 堆载区实测点位布置

Fig. 5 In-situ points of surcharge preloading area

置换率为 42% 的挤密砂桩复合地基加载与沉降关系曲线如图 6 所示, 通过对堆载过程的沉降观测, 挤密砂桩复合地基在加载初期沉降迅速发生, 加载后期沉降速率即收敛至较小值, 加载期内沉降占总沉降的 79%, 在满载后 4 个月沉降基本收敛。

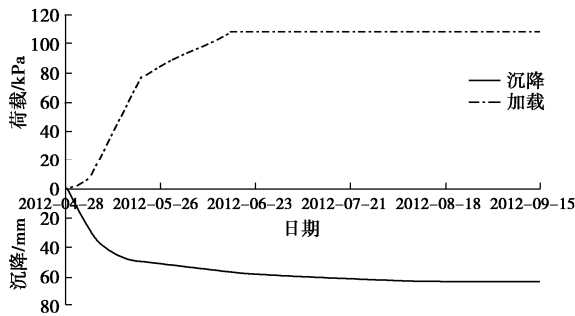


图 6 置换率 42% 挤密砂桩复合地基沉降-加载时程曲线

Fig. 6 Development of settlement at replacement ratio of 42%

堆载过程中各个测点的实测最终沉降与分层总法和理论计算结果比较如图 7 所示, 从堆载过程的实

测结果可以发现, 由于在海底淤泥质软土地层打设了强度较高的挤密砂桩, 地基沉降相对于天然地基大大减小。

原有天然地基理论计算沉降为 189~423 mm, 打设不同置换率挤密砂桩 (42%, 55%, 70%) 后复合地基区域实测沉降降至 28~75 mm, 显著提高了地基刚度。

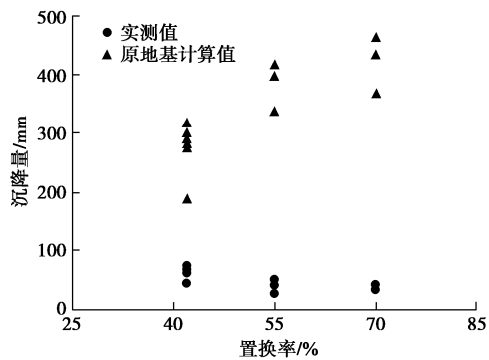


图 7 实测沉降与原地基计算沉降对比

Fig. 7 Comparison between in-situ values and original ground calculations

随着置换率的提高, 实测沉降与理论计算沉降量比越来越小, 说明地基加固消除沉降的效果随着置换率的提高越来越好。在置换率 70% 的挤密砂桩复合地基实测沉降量仅为 34~45 mm。

2 水下挤密砂桩沉降算法

挤密砂桩复合地基形成后, 密实的桩体取代了同体积的软弱黏土, 由于桩体的强度和抗变形性能等优于桩间土, 所形成的复合地基的承载能力就比原来的天然地基大, 沉降量也比天然地基小, 提高了地基的整体稳定性和抗破坏能力。荷载作用下, 由于复合地基中桩体的变形模量和强度较大, 传递给地基的附加应力会随着桩和桩间土发生等量的变形而逐渐集中到桩体上, 同时桩间土承担的荷载相应减少。

根据不同土层性质, 砂桩发挥着不同的作用, 当

挤密砂桩进入相对硬层时,因砂桩的压缩模量大于软土的压缩模量,由基础传给复合地基的外荷载随着桩土等量变形而逐渐集中到桩体上,因此上部结构的荷载由挤密砂桩承担一大部分,其余的荷载由桩间软土承担。正是由于外荷载在砂桩与桩间土的分布变化以及土体的复杂性,目前挤密砂桩复合地基的沉降计算理论多采用半理论半经验的方法。

2.1 挤密砂桩复合地基沉降算法

现有比较常用的挤密砂桩复合地基计算方法主要以日本规范推荐的计算方法,港珠澳大桥岛隧工程的挤密砂桩设计^[12]即沿用日本规范推荐算法,其计算挤密砂桩复合地基的沉降公式为

$$S_1 = \beta_c \sum_{i=1}^k m_{vi} \Delta P_i h_i, \quad (1)$$

式中, S_1 为复合地基沉降量, β_c 为沉降折减比, m_{vi} 为第 i 土层的体积压缩系数, ΔP_i 为第 i 土层的平均附加应力, h_i 为第 i 土层的厚度。

置换率 $m < 50\%$ 时,

$$\beta_c = \frac{1}{1 + (n-1)m}; \quad (2)$$

置换率 $m \geq 50\%$ 时,

$$\beta_c = 1 - m. \quad (3)$$

式中 n 为桩土应力比,根据试验结果取 6.3; m 为砂桩面积置换率。

从式(1)~(3)可以看出,挤密砂桩复合地基沉降主要与桩土应力比和置换率有关。

从机理上看,挤密砂桩复合地基总沉降由两个方面组成,如图8所示,龚晓南^[13]提出复合地基沉降计算主要包括挤密砂桩桩身范围内复合地基沉降和下卧层沉降,沉降计算方法为

$$S = S_1 + S_2, \quad (4)$$

式中, S 为复合地基总沉降, S_1 为复合地基层沉降, S_2 为下卧层沉降。

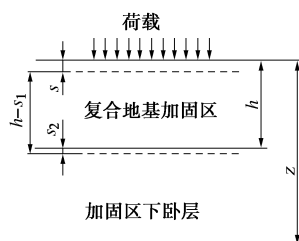


图8 复合地基沉降示意图

Fig. 8 Settlements of composite foundation

下卧层沉降的计算由于复合地基加固区的存在,需要对下卧层应力扩散效应进行考虑,如图9所示,考虑扩散后,再基于分层总和法计算下卧层沉降。

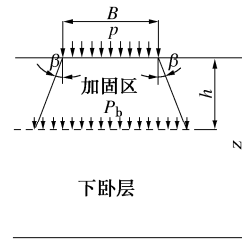


图9 复合地基下卧层荷载传递

Fig. 9 Delivering stress of underlying clay

关于下卧层传递荷载 P_b 可由下式计算^[9]:

$$P_b = \frac{BDp}{(B + 2h \tan \beta) + (D + 2h \tan \beta)}, \quad (5)$$

式中, p 为复合地基上部作用荷载, β 为复合地基应力扩散角(下同), B 为复合地基上部荷载作用宽度, D 为复合地基上部荷载作用长度, h 为复合地基加固区厚度。

而下卧层沉降可由下式计算:

$$S_2 = \sum_{i=1}^k m'_{vi} \Delta P'_i h'_i, \quad (6)$$

式中, S_2 为复合地基下卧层沉降量, m'_{vi} 为土层的体积压缩系数, $\Delta P'_i$ 为计算下卧层各土层附加应力, h'_i 为下卧层第 i 土层厚度。

2.2 理论计算结果与实测结果的对比

采用日本推荐的沉降计算式(1)~(6)对港珠澳大桥岛隧过渡段挤密砂桩复合地基各实测点位的总沉降量进行计算,计算结果如表1所示,在置换率42%~70%时,计算挤密砂桩层沉降量为46.9~160.6 mm,计算下卧层沉降量为0.0~18.6 mm。计算总沉降量与实测结果对比如图10所示,置换率分别为42%,55%,70%时,不同置换率下现有理论公式计算结果与实测结果的符合性存在显著差异。

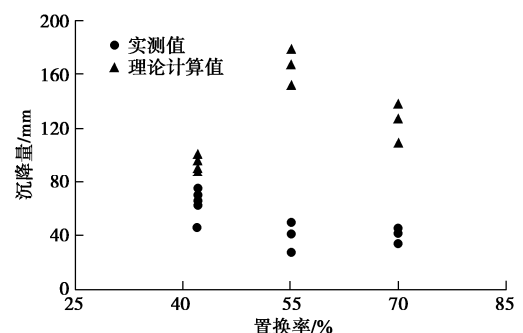


图10 不同置换率实测沉降与理论计算沉降结果对比

Fig. 10 Comparison between in-situ values and calculations by formula in Japanese standard under different replacement ratios

由于各个测点下的地层分布存在差异,各个测点处的计算结果与实测结果的对比如图11所示,可以明显发现,在置换率小于50%时,实测值略小于计算值,而在置换率大于50%的情况下,即置换率分别为55%,70%时,实测值与理论计算差异明显,总体上理论计

算值较实测值偏大。

表 1 港珠澳西人工岛挤密砂桩水下堆载预压理论沉降计算与实测沉降对比

Table 1 Comparison between in-situ measured values at Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge and calculations by formula in Japanese standard						
置换率/%	测点编号	水下堆载高度/m	挤密砂桩层沉降/mm	下卧层沉降量/mm	总沉降量/mm	实测沉降量/mm
42	A1	14.5	79.9	15.9	95.8	64.9
42	A3	14.5	46.9	16.7	63.6	62.6
42	B	15.5	71.7	16.3	87.9	64.1
42	D1	13.7	76.1	14.6	90.7	45.8
42	D2	13.5	85.9	14.5	100.4	68.6
42	D3	13.3	73.9	14.2	88.1	74.7
55	E1	14.4	150.1	16.3	166.4	49.8
55	E2	14.4	151.9	0	151.9	27.9
55	E3	14.4	160.6	17.3	177.9	41.6
70	F1	15.6	109.7	0	109.7	33.9
70	F2	16.0	119.0	18.6	137.6	44.6
70	F3	15.5	108.4	18.5	126.9	41.9

注：表中部分位置下卧层沉降为 0 的区域，下卧层地层主要为中砂，这里不计入沉降计算。

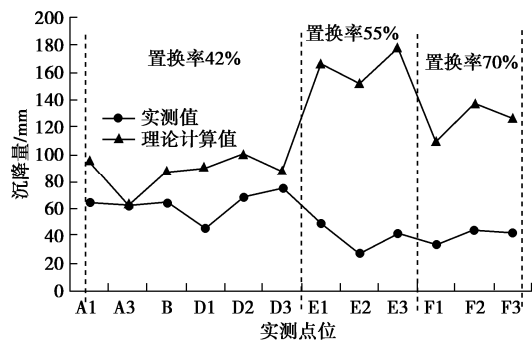


图 11 各点位实测沉降与理论计算沉降结果对比

Fig. 11 Comparison between in-situ values and calculations by formula in Japanese standard at different points

出现这种现象的原因首先在于日本规范中推荐挤密砂桩层计算方法的误差，在地质情况相差不大的情况下，置换率大于 50%时挤密砂桩层计算沉降量确比置换率小于 50%时的情况大（尤其在 55%置换率时），日本规范的计算方法需要进一步的论证。

另一个原因与计算公式中所采用的桩土应力比的选取有关，日本规范推荐的桩土应力比 n 的取值范围为 3~5，通过现场试验得到的实测桩土应力比值为 6.3，明显大于日本经验的取值范围，应力比为 6 左右的情况在同类高置换率挤密砂桩模型试验中也得到了

验证^[14]，实际工程中桩土应力比增大的原因应与现有施工工艺的改进有关，在同为海相淤泥质地层条件下，桩身密实性和刚度进一步增大。

3 基于实测的沉降计算修正

3.1 沉降计算公式的讨论与修正

日本规范中推荐的挤密砂桩复合地基沉降计算结果主要取决于式（2），（3）中的折减比 β_c 的计算值。当置换率小于等于 50%时，折减比 β_c 是置换率 m 和桩土应力比 n 的函数，而通过现场载荷试验挤密砂桩复合地基的桩土应力比为 6.3，即 $n=6.3$ 。

可将折减比理论计算式（2），（3）与实测数据进行比较，如图 12 所示。按照式（2）进行计算的 β_c ，在桩土应力比 n 取 4~6.3 时，与实测值有一定差距，而在置换率 $m \geq 50\%$ 时，式（3）与实测值差异明显，基本不能代表实测数据。

Ahn 等^[15]认为日本规范计算结果偏大，并提出将式（2）的结果作为上限，假设在砂桩沉降为零时作为下限，取平均的计算方法对置换率 $< 50\%$ 的挤密砂桩进行计算：

$$\beta_c = \frac{1}{1 + (n-1)m} \left(1 - \frac{m}{2} \right) \quad (7)$$

式（7）计算结果与实测对比如图 12 所示，该结果在取桩土应力比为 6.3 的情况下，在置换率 $m < 50\%$ 时，与实测值比较接近，当 $m \geq 50\%$ 时，也与实测差距较大。

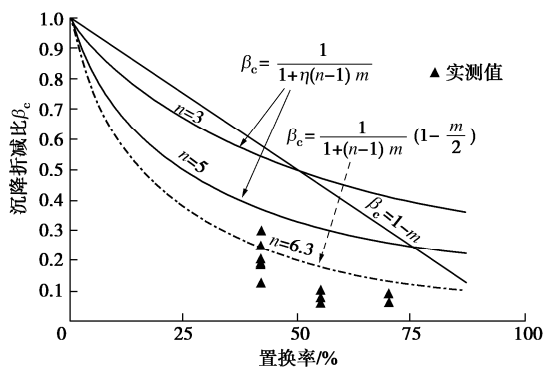


图 12 沉降折减比 β_c 基于实测的拟合修正

Fig. 12 Modification of reduction factor based on in-situ measurement

基于以上分析，这里提出沉降折减比 β_c 的修正公式：

$$\beta_c = \frac{1}{1 + \eta(n-1)m} \quad (8)$$

式中， n 为桩土应力比，可根据实际工程试验选取，或在 5~6.3 选取，港珠澳实测值为 6.3， m 为挤密砂桩置换率， η 为修正系数，当 $m < 50\%$ 时，取 1~1.5，

当 $m \geq 50\%$ 时, 取 3.0。

根据式 (8) 修正公式进行推算的 β_c , 推算结果如图 13 所示, 当 $n=6.3$, $\eta=1.5$ 时, 置换率为 42% 时与实测值较为接近, 当 $n=6.3$, $\eta=3.0$ 时, 置换率 $m \geq 50\%$ 时与实测值拟合较好。

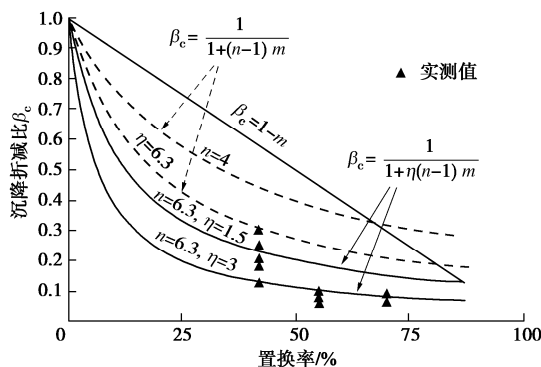


图 13 沉降折减比 β_c 基于实测的拟合修正

Fig. 13 Modification of reduction factor based on in-situ measurement

3.2 修正公式计算与实测对比

采用式 (1), (8) 对港珠澳大桥岛隧过渡段现场挤密砂桩复合地基各实测点位进行沉降计算, 计算结果与实测值对比如图 14 所示, 计算值与实测数据符合较好, 基本可达到预测现场实际沉降的目的。

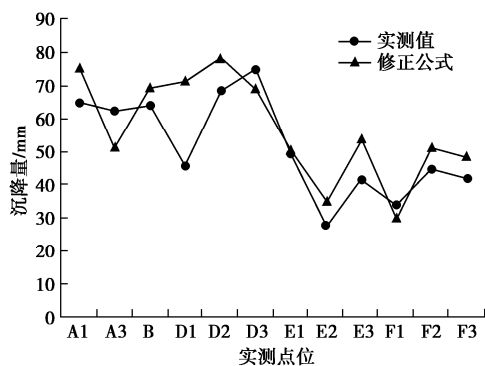


图 14 修正公式计算结果与实测结果对比

Fig. 14 Comparison between in-situ values and calculations by modified formula

3.3 修正算法应用于其他工程的验证

进一步验证式 (8) 的有效性, 对深中通道工程挤密砂桩复合地基沉降进行对比验算, 深中通道西人工岛救援码头挤密砂桩复合地基采用与港珠澳同样挤密砂桩工艺, 桩径 1.6 m, 间距 1.75 m, 置换率为 65%。现场实测挤密砂桩复合地基沉降量在 204~258 mm。

图 15 为采用式 (8) 推算的沉降折减比 β_c 与深中通道实测数据的对比情况, 可以发现在深中通道置换率 65% 的情况下, 修正算法与实测数据基本吻合。说明在不同工程, 不同地质条件下, 修正验算法与实测

数据拟合良好。

通过式 (1), (4), (8) 联合计算深中通道救援码头区域内理论总沉降量为 211 mm, 理论计算总沉降量与实测对比如表 2 所示, 可见, 修正算法在不同工程中与实测数据均比较接近。

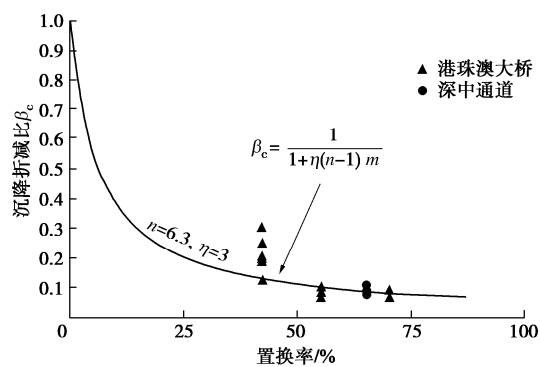


图 15 修正算法与不同工程实测结果的验证

Fig. 15 Comparison between in-situ values and calculations by modified formula

表 2 深中通道西人工岛救援码头实测沉降与理论计算对比
Table 2 Comparison between in-situ values and calculations by modified formula in Shenzhen-Zhongshan Link

实测 点位	置换率 /%	实测沉降 量/mm	日本规范 结果/mm	理论计算沉降量 /mm ($n=6.3, \eta=3$)
CJ1	65	231	682	211
CJ2	65	225	682	211
CJ3	65	210	682	211
CJ4	65	205	682	211
CJ5	65	258	682	211

4 结 论

本文在现场原型试验和原位实测的基础上, 对现有的日本经验推荐的沉降计算方法进行修正优化, 通过与现场实测数据的对比验证了该修正方法的有效性。主要得出 3 点结论。

(1) 日本规范推荐的经验公式, 在置换率小于 50% 的情况下, 计算结果接近实测值, 相对偏保守, 在置换率 $\geq 50\%$ 的情况下, 计算结果与实测差异较大, 不建议采用该方法进行计算。

(2) 随着现有水下挤密砂桩施工工艺的改进发展, 砂桩桩身密实度和刚度也进一步提高, 原日本经验中桩土应力比 n 取值范围为 3~5, 根据现场试验结果, 建议桩土应力比取值范围为 5~6.3。

(3) 按照本文推荐的挤密砂桩复合地基沉降修正公式进行计算, 可较好地拟合现场实测结果, 可为后续相关工程设计提供参考。

需要说明的一点是, 本文讨论的挤密砂桩均为海上大型专用砂桩施工船舶为基础形成的水下挤密砂桩复合地基工艺, 陆上或其他设备工艺的挤密砂桩沉降

计算还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 林 鸣, 梁 桁, 刘晓东, 等. 海上挤密砂桩工法及其在港珠澳大桥岛隧工程的应用[J]. 中国港湾建设, 2012, **32**(4): 72 - 77. (LIN Ming, LIANG Heng, LIU Xiao-dong, et al. Method for construction of offshore sand compaction piles and its application for island and tunnel project for Hongkong-Zhuhai-Macao bridge[J]. China Harbour Engineering, 2012, **32**(4): 72 - 77. (in Chinese))
- [2] TERASHI Masaaki. Design and construction of sand compaction piles[M]. Japan: Geology Engineering Society, 2009.
- [3] 莫景逸, 黄晋申. 挤密砂桩在海洋接岸地基加固工程中的应用[J]. 水运工程, 2009(1): 62 - 68. (MO Jing-yi, HUANG Jin-shen. Application of sand compacted pile for ground treatment of oceanic shore protection engineering works[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(1): 62 - 68. (in Chinese))
- [4] HARADA K, OHBAYASHI J. Development and improvement effectiveness of sand compaction pile method as a countermeasure against liquefaction[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(6): 980 - 987.
- [5] 张 曦, 吴心怡, 尹海卿. 水下挤密砂桩加固机理及沉降计算方法[J]. 中国港湾建设, 2010, **30**(增刊 1): 148 - 150. (ZHANG Xi, WU Xin-yi, YIN Hai-qing. Reinforcing mechanism and settlement calculation method of sand compaction pile under the water[J]. China Harbour Engineering, 2010, **30**(S1): 148 - 150. (in Chinese))
- [6] 张 曦, 吴心怡, 时蓓玲, 等. 水下挤密砂桩复合地基破坏模式的离心试验研究[J]. 中国港湾建设, 2016, **36**(5): 21 - 24. (ZHANG Xi, WU Xin-yi, SHI Bei-ling, et al. A study on failure mode of composite foundation with marine sand compaction pile by centrifugal test[J]. China Harbour Engineering, 2016, **36**(5): 21 - 24. (in Chinese))
- [7] 沈才华, 王 媛, 李鹤文, 等. 基于扩孔理论的挤密砂桩复合地基桩土应力比计算方法[J]. 岩土力学, 2017, **38**(10): 2873 - 2880. (SHEN Cai-hua, WANG Yuan, LI He-wen, et al. Determination of pile-soil stress ratio for compaction foundation using cavity expansion theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(10): 2873 - 2880. (in Chinese))
- [8] 王延宁, 蒋斌松, 胥新伟, 等. 挤密砂桩加固水下软土大型原位载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 320 - 326. (WANG Yan-ning, JIANG Bin-song, XU Xin-wei, et al. Experiment study of underwater sand compaction pile composite ground based on in situ load test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 320 - 326. (in Chinese))
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan[S]. 2009.
- [10] 张怡戈, 王 娟. 外海挤密砂桩复合地基水下堆载预压加固效果监测及分析[J]. 中国港湾建设, 2015, **35**(11): 20 - 24. (ZHANG Yi-ge, WANG Juan. Monitoring and analysis of reinforcement effect of stack preloading for sand compaction pile composite foundation in open sea[J]. China Harbour Engineering, 2015, **35**(11): 20 - 24. (in Chinese))
- [11] 王延宁, 蒋斌松, 张 强, 等. 沉管基础岛-隧过渡段地基处理设计及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊 2): 4297 - 4307. (WANG Yan-ning, JIANG Bin-song, ZHANG Qiang, et al. Foundation treatment design and experimental study for immersed tube tunnel at the island-tunnel joint part[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S2): 4297 - 4307. (in Chinese))
- [12] 李建宇, 梁 桁. 港珠澳大桥岛隧工程隧道基础沉降计算及参数选取[J]. 水运工程, 2013(7): 84 - 89. (LI Jian-yu, LIANG Heng. Settlement calculation method and parameters selection of tunnel foundation for island-tunnel project of HZMB[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(7): 84 - 89. (in Chinese))
- [13] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 中国建筑工业出版社, 2007: 56 - 57. (GONG Xiao-nan. Theory of composite foundations and engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 56 - 57. (in Chinese))
- [14] 朱小军, 孔伟阳, 李文帅. 高置换率挤密砂桩模型试验与承载力计算方法研究[J]. 公路, 2017, **62**(8): 1 - 7. (ZHU Xiao-jun, KONG Wei-yang, LI Wen-shuai. Study of model tests and calculation methods of bearing capacity on high replacement ratio sand compacted pile[J]. Highway, 2017, **62**(8): 1 - 7. (in Chinese))
- [15] AHN J, KIM Y T. Consolidation behavior and stress concentration ratio of SCP composite ground[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, **30**(1): 63 - 85.