



港珠澳大桥岛隧工程 隧道基础沉降计算及参数选取

李建宇, 梁 桁

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 港珠澳大桥岛隧工程隧道基础采用了多种基础形式, 包括PHC刚性桩复合地基、高压旋喷半刚性桩复合地基、挤密砂桩柔性桩复合地基及天然地基基础。结合《建筑地基基础设计规范》、《建筑地基处理技术规范》以及《Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan》对上述复合地基及天然地基的沉降计算方法和参数选取进行分析, 比较得出挤密砂桩复合地基沉降计算应符合《Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan》, PHC刚性桩复合地基沉降计算应符合GB50007—2012《建筑地基基础设计规范》, 高喷桩复合地基沉降计算应符合《建筑地基处理技术规范》水泥土搅拌桩的规定, 天然地基沉降应考虑应力历史的 e - $\lg p$ 沉降计算方法以及次固结沉降计算应选取与实际应力相符试验条件下的次固结系数。概述岛隧工程隧道不同基础加固形式的沉降计算方法及沉降计算参数选取原则, 为类似工程沉降计算提供参考。

关键词: 港珠澳大桥岛隧工程; 隧道基础; 沉降计算; 参数选取; 地质勘察报告

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0084-06

Settlement calculation method and parameters selection of tunnel foundation for island-tunnel project of HZMB

LI Jian-yu, LIANG Heng

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Tunnel foundation for island-tunnel project of HZMB using a variety of foundation forms, including PHC rigid pile composite foundation, high pressure jet grouting pile composite foundation, sand compaction pile composite foundation and natural foundation. In this paper, the composite foundation and natural foundation settlement calculation methods and parameters selected is analyzed with *Code for design of building foundation*, *Technical code for ground treatment of building* and *Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan*, which indicates that the sand compaction pile composite foundation settlement calculation should refer to *Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan*, PHC rigid pile composite foundation settlement calculation should follow the *Code for design of building foundation* GB50007—2012, high-pressure jet pile composite foundation settlement calculation should comply with *Technical code for ground treatment of building* provisions of cement mixing pile, natural foundation settlement should consider stress history $e - \lg p$ settlement calculation method and secondary consolidation coefficient for settlement calculation should match the actual stress test. This article outlines settlement calculation methods and parameters selection principle of different foundation treatment methods for the HZMB island tunnel works, to provide reference for similar projects in settlement calculations.

Key words: island-tunnel project of HZMB; tunnel foundation; settlement calculation; parameter selection; geological survey report

收稿日期: 2013-05-21

作者简介: 李建宇(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程设计工作。

隧道的沉降, 特别是不均匀沉降可以引起隧道管段的破坏, 故港珠澳大桥岛隧工程对隧道基础沉降严格控制。为控制差异沉降防止结构破坏, 要求对基础的沉降计算尽可能精确, 达到既保证结构的可靠又可节约工程造价的目的。准确的沉降计算依赖于精确的地层划分及可靠的岩土计算参数的选取, 为此岛隧工程根据实际工况开展了精细化勘察。基础设计依据精细化勘察结果, 采用准确的计算参数及合理的计算公式, 评估基础沉降并最终确定隧道不同区段基础加固方案。

1 精细化勘察

港珠澳大桥岛隧工程初勘~详勘^[1]共布置钻孔95个、原位测试孔压静力触29个、旁压试验孔6个、十字板剪切试验孔14个。主要压缩土层

为: 第①大单元层, 全新世海相沉积物 (Q_4^m) ($①_1$ 淤泥 (Q_4^m), $①_2$ 淤泥 (Q_4^m), $①_3$ 淤泥质土 (Q_4^{al}), $①_4$ 淤泥质黏土夹砂 (Q_4^{al})); 第②大单元层, 晚更新世晚期陆相沉积物 (Q_3^{al+pl}) ($②_1$ 黏土 (Q_3^{al+pl})); 第③大单元层, 晚更新世中期海相冲积物 (Q_3^{m+al}) ($③_1$ 淤泥质土 (Q_3^{m+al}), $③_{1-1}$ 黏土及粉质黏土 (Q_3^{m+al}), $③_2$ 粉质黏土夹砂 (Q_3^{m+al}), $③_{2-1}$ 粉细砂 (Q_3^{m+al}), $③_{2-2}$ 粉细砂, $③_3$ 粉质黏土 (Q_3^{m+al})); 第④大单元层, 晚更新世早期河流相冲积物 (Q_3^{al}) ($④_1$ 粉细砂 (Q_3^{al}), $④_2$ 粉细砂 (Q_3^{al}), $④_{3-1}$ 中砂 (Q_3^{al}), $④_{3-2}$ 中砂 (Q_3^{al}), $④_4$ 粗砾砂 (Q_3^{al}), $④_5$ 粗砾砂 (Q_3^{al}), $④_6$ 圆砾土 (Q_3^{al}), $④_7$ 粉质黏土 (Q_3^{al}))。主要土层压缩指标见表1。

为进一步分析评价地基土沉降变形特性, 开

表1 详勘主要土层压缩指标

土层	饱和密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	初始孔隙比 e_0	超固结比OCR	压缩指数 C_c	回弹再压缩指数 C_s	压缩模量 E_s/MPa	回弹再压缩模量 E'_s/MPa
① ₁	1.59	1.94	<1	0.52	0.08	1.89	
① ₂	1.63	1.72	<1	0.45	0.06	1.92	
① ₃	1.76	1.31	<1	0.37	0.06	2.76	
② ₁	1.92	0.85	>1	0.30	0.03	5.35	
③ ₁	1.81	1.12	≈1	0.36	0.03	3.75	
③ ₁₋₁	1.80	1.14	≈1	0.43	0.06	5.32	
③ ₂	1.86	0.95	≈1	0.33	0.04	6.01	
③ ₃	1.85	0.99	≈1	0.33	0.04	5.57	18.0
④ ₇	1.91	0.82	≈1	0.30	0.03	9.18	20.4

展了施工图补充勘察^[2]。补勘共完成80个钻孔, 一般原位测试孔39个, 技术孔41个, 383个孔压静力

触探孔 (CPTUs), 22个孔压静力触探消散试验孔 (CPTUDs)。主要土层压缩指标见表2。

表2 施工图补充勘察主要土层压缩指标

层号	饱和密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	初始孔隙比 e_0	超固结比OCR	压缩指数 C_c	回弹再压缩指数 C_s	压缩模量 E_s/MPa	次固结系数 β_{ce}
11	1.59	1.723	0.94	0.69	0.03	1.41	1.947
21	1.83	0.866	1.52	0.27	0.03	7.69	1.365
31	1.77	1.052	2.16	0.46	0.02	7.69	1.365
32	1.81	0.958	1.49	0.34	0.03	4.76	0.719
41	1.86	0.827	1.19	0.32	0.03		0.145

补勘+详勘勘察孔在隧道基础范围内形成了3条勘探线, 每条勘探线上勘探点间距为50.0 m, 该勘探布置形式准确描述了地层分布, 可准确指导地基加固深度。详勘报告中推荐了初始孔隙比、压缩指数、再压缩指数、压缩模量及部分土层回

弹模量等沉降计算参数, ①₁~①₃黏土层定义为正常固结土-欠固结土; ②~③黏土层定义为正常固结土-超固结土, 并趋向于正常固结, 报告中未提供次固结系数。补充勘察报告与详勘对第一大土层判定相同, 判定为欠固结土-正常固结土, 但其

余黏土均判定为超固结土，同时报告中提供了超载比OCR数值，且补勘报告提供了不同工况荷载下的次固结系数。

2 基础加固方案

根据荷载变化要求及地质条件的差异，隧道基础采用5种方式，分别为：1) 经过预压过的天然地基基础；2) 经过预压且设置PHC管桩的刚性桩复合地基基础；3) 经过预压且打设高压旋喷桩的半刚性桩基础；4) 挤密砂桩柔性桩复合地基基础；5) 未经处理的天然地基基础。隧道敞开段荷载较小，采用经过大超载比预压过的天然基础；暗埋段荷载相对较大，采用PHC刚性桩复

合地基基础，通过调整管桩间距实现暗埋段与敞开段基础过渡；沉管段前两个小关节采用高喷桩复合地基基础，以协调暗埋段刚性桩复合地基与沉管过渡段挤密砂桩复合地基刚度；沉管过渡段采用挤密砂桩复合地基，通过调整挤密砂桩置换率实现刚度平缓过渡；沉管中间深埋段基槽开挖深度大，基础为超固结老黏土或密实砂土，原状土不予处理。通过调整桩的间距及打设深度，使刚性桩复合地基、半刚性桩复合地基、柔性桩复合地基及天然地基刚度平缓过渡，确保基础均匀沉降以避免过大差异沉降产生破坏结构的内力，基础加固方案见图1。

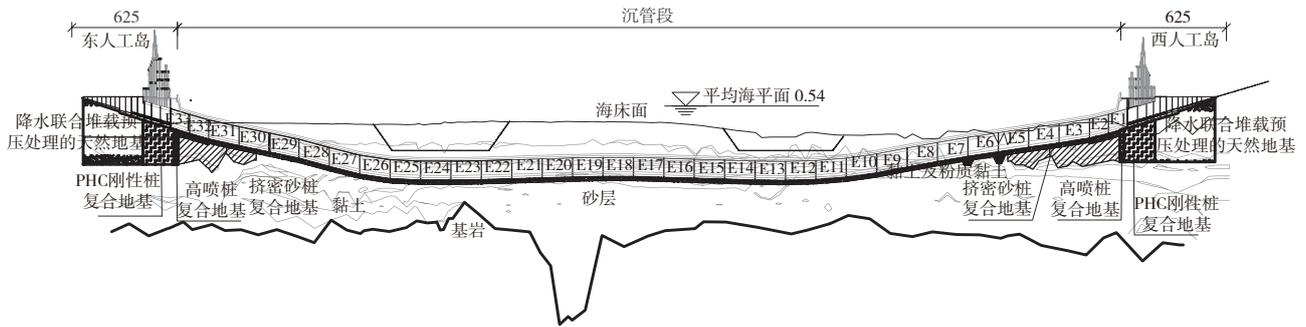


图1 隧道基础加固方案

3 沉降计算方法及参数选取

3.1 挤密砂桩 (SCP) 复合地基沉降计算

1) 建筑地基基础设计规范。

《建筑地基基础设计规范》^[3]5.3.5节给出了通用的沉降计算公式(1)，式中 ψ_s 根据当量模量查表确定，当量模量计算公式为式(2)。但《建筑地基基础设计规范》^[1]中没有明确复合地基沉降计算方法。

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\delta}_i - z_{i-1} \bar{\delta}_{i-1}) \quad (1)$$

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} \quad (2)$$

《建筑地基基础设计规范》^[4]明确了复合地基沉降计算方法，如式(3)，式中系数 ψ_{spi} 根据式(4)计算的当量模量查表确定。复合地基模量 E_{spi} 为天然地基模量的 ζ 倍，系数 ζ 为复合地基承载力 f_{spi} 与天然地基承载力 f_{si} 的比值。

$$s = \psi_{spi} s' \quad (3)$$

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i + \sum A_j}{\sum \frac{A_i}{E_{spi}} + \sum \frac{A_j}{E_{si}}} \quad (4)$$

$$E_{spi} = \zeta E_s \quad (5)$$

$$\xi = \frac{f_{spi}}{f_{si}} \quad (6)$$

2) 建筑地基处理技术规范。

JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[5]砂石桩复合地基沉降计算方法，如式(3)~(4)，但式(4)中复合地基压缩模量 E_{spi} 如式(7)。

$$E_{spi} = [1 + m(n-1)] E_s \quad (7)$$

式中： m 为砂桩置换率； n 为桩土应力比。

即将实行的《建筑地基处理技术规范》^[6]砂石桩复合地基沉降计算方法，如式(3)~(6)。

3) 日本规范。

挤密砂桩技术在日本已比较成熟，挤密砂桩复合地基沉降计算已编入规范。*Technical standards*

and commentaries for port and harbor facilities in Japan^[7]和日本综合建设株式会社编制的《海上挤密砂桩工法设计、施工手册》采用了相同的沉降计算方法, 即挤密砂桩复合地基 s 为原状土地基沉降 s_0 与沉降折减比 β_c 的乘积, β_c 是置换率 m 与桩土应力比 n 的函数。图2为日本实测资料中沉降折减比与置换率的关系, 一般桩土应力比 $n=4$ 计算结果与实测值相近。

$$s = \beta_c s_0 \quad (8)$$

$$\beta_c = \frac{1}{1 + (n - 1)m} \quad (m < 0.5) \quad (9)$$

$$\beta_c = 1 - m \quad (m \geq 0.5) \quad (10)$$

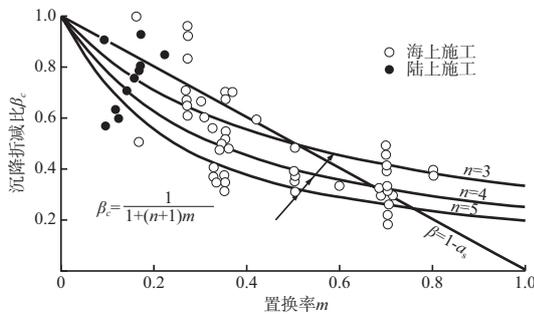


图2 沉降折减比与置换率的关系

由于挤密砂桩的特殊成桩工艺以及其在日本成功广泛的应用, 本工程基础设计采用日本规范进行计算。

3.2 高压旋喷桩复合地基沉降计算

《建筑地基处理技术规范》^[3]水泥土搅拌桩复合地基压缩变形 s_1 如式(11)。

$$s_1 = \frac{(p_z + p_{z1})l}{2E_{sp}} \quad (11)$$

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s \quad (12)$$

式中: p_z 为搅拌桩复合土层顶面附加压力值; p_{z1} 为搅拌桩复合土层底面附加压力值; E_{sp} 为复合土层压缩模量; E_p 为桩体压缩模量, 取 $100 \sim 120f_{cu}$ (桩体抗压强度)。

根据《建筑地基处理技术规范》^[3]规定, 高压旋喷桩复合地基依据式(1)计算, 复合土层压缩模量根据地区经验确定。

《建筑地基处理技术规范》^[4]旋喷桩复合地基沉降计算符合式(3)~(6), 水泥土搅拌桩沉降计算符合式(11)~(12)。

当高喷桩成桩质量较好, 桩体强度较高, 按式(11)~(12)计算的复合地基压缩模量偏大而使沉降计算值小于实际值。鉴于岛隧工程地质条件及场地施工状况特点, 检测结果表明高喷桩成桩质量较差、桩体强度较低, 故本工程高喷桩复合地基沉降计算参照地基处理技术规范中水泥土搅拌桩沉降计算模式。

3.3 PHC刚性桩复合地基沉降计算

《建筑地基基础设计规范》^[2]及《建筑地基处理技术规范》^[3-4]规定复合地基沉降计算符合式(3)~(6)。刚性桩复合地基沉降主要计算参数为原状土压缩模量、原状土承载力及复合地基承载力, 原状土及复合地基承载力用于确定系数 ζ , 压缩模量用于计算原状土沉降。规范规定的原状土沉降计算方式依托于准确的压缩模量, 压缩模量为土的自重压力-土的自重压力与附加压力之和的压力段的模量, 而勘察报告中一般给出 $100 \sim 200$ kPa压力段的压缩模量, 所以沉降计算时较难找到相对应的模量, 故可采用其它土力学参数进行计算, 如压缩系数 a , 体积压缩系数 m_v , 压缩指数 C_c 和再压缩指数 C_s 。

3.4 原状土地基沉降计算

挤密砂桩复合地基和PHC桩复合地基沉降计算依托于原状土地基沉降, 而原状地基沉降可按照式(1)进行计算, 也可采用式(13)~(17)计算^[8]。

$$s_c = \sum \frac{a_{vi}}{1 + e_{vi}} \Delta p_i H_i = \sum m_{vi} \Delta p_i H_i = \sum \frac{1}{E_{si}} \Delta p_i H_i \quad (13)$$

$$s_c = \sum \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} H_i = \sum \frac{-\Delta e_i}{1 + e_{1i}} H_i \quad (14)$$

$$s_c = \sum \frac{\Delta e_i}{1 + e_{0i}} H_i = \sum \frac{H_i}{1 + e_{0i}} C_{si} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p}{p_{0i}} \right) \quad (15)$$

$$s_c = \sum \frac{-\Delta e_i}{1 + e_{0i}} H_i = \sum \frac{H_i}{1 + e_{0i}} C_{si} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p}{p_{0i}} \right) \quad (16)$$

$$s_c = \sum \frac{-\Delta e_i}{1 + e_{0i}} H_i = \sum \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{si} \lg \left(\frac{p_{ci}}{p_{0i}} \right) + C_{ci} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{ci}} \right) \right] \quad (17)$$

式(13)中沉降计算参数 a_{vi} , m_{vi} 及 E_{si} 不是恒定值, 而是随计算土层有效应力发生变化的。由于试验条件的限制, 勘察报告中一般只给出

100~200 kPa压力段的压缩模量，有特殊要求时亦提供200~300 kPa或300~400 kPa压力段的压缩模量，这些限定压力段的压缩模量不能准确反映某一土层的真实模量，设计人员预计采用式(13)进行计算时，应根据实际的工况荷载条件要求勘察单位提供特定压力段的压缩模量。

式(14)和(15)适用于正常固结土的固结沉降计算，采用式(14)计算时，先将点(e, p)绘制e-p曲线拟合一个二次多项式以便每个计算土层的有效应力p都能对应一个e值，然后分层按照式(14)计算。为使拟合曲线更准确一般将e-p曲线转换为e-ln(1+p)曲线，以详勘粉质黏土层e-p曲线拟合为例，结果见图3和4，e-ln(1+p)曲线有效应力超过50 kPa后拟合相关度更高。正常固结土也可采用式(15)计算，宜通过高压固结试验确定压缩指数C_c。

对于超固结土，应采用e-lgp曲线求先期固结压力p_{ci}，然后根据超固结的程度，分下列两种情况进行沉降计算，当p_{oi}+Δp ≤ p_{ci}时采用式(16)计算分层土i的沉降量；当p_{oi}+Δp > p_{ci}时采用式(17)计算分层土i的沉降量。

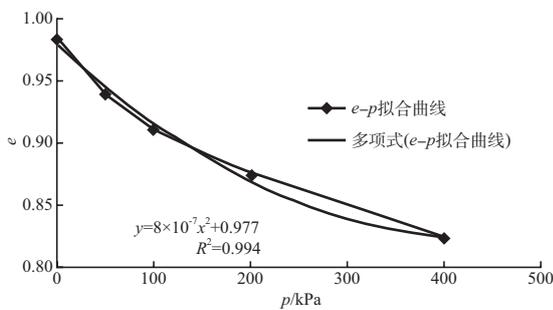


图3 e-p拟合曲线

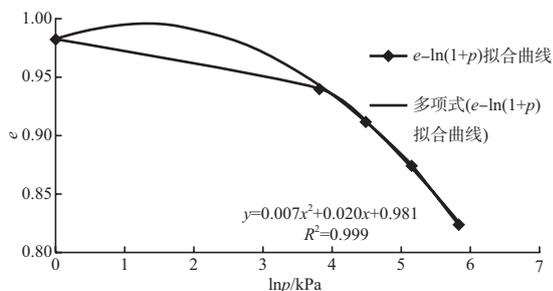


图4 e-ln(1+p)拟合曲线

本工程隧道敞开段采用天然地基作为隧道基础，其范围内的土质为超固结土或为经过预压

的拟超固结土（施工期预压应力远大于运营期荷载，且固结度达到了90%以上），故沉降计算宜采用压缩指数C_c和再压缩指数C_s进行计算。

3.5 次固结沉降计算

浅埋段隧道基础尚残存较厚的软黏土，正确评价该软土层次固结沉降量S_s也是节省工程造价及保证工程安全的关键。国际上通用的次固结沉降公式(18)^[9]，次固结沉降计算关键在于次固结系数C_s的确定，国内外有很多学者建立了含水量、液限、压缩指数等参数与次固结系数的关系，《Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan》^[5]推荐采用压缩指数推算次固结系数，如式(19)。Secondary Compression of Peat With or Without Surchargeing^[7]研究表明经过预压的软土次固结系数随超载比的增大而递减，例如当超载比为2.0时次固结系数可折减约0.2倍。本工程隧道基础岛上段采用降水联合堆载预压大超载比进行预压，原状土次固结系数应显著折减，为准确评估次固结系数设计要求采用与实际工况相一致的应力环境进行次固结试验。

$$S_s = \frac{C_s}{1 + e_0} h \lg\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (18)$$

$$C_s = (0.03 \sim 0.05) C_c \quad (19)$$

式中：e₀为初始孔隙比；h为土层厚度；t为次固结发生时间（港珠澳大桥使用寿命120 a，t=120 a）；C_c为压缩指数。

3.6 指标的选取

详勘与补勘报告中基本的物理指标密度、含水量、孔隙比、液塑性等较一致，主要压缩指标压缩模量、压缩指数、再压缩指数等相近但稍有差别。详勘判定上部软黏土为正常固结-欠固结状态，下部黏土为正常固结-稍超固结状态，趋向于正常固结，报告中未明确超固结比具体数值。补勘中对于上部软土的判定与详勘相同；下部黏土判定为超固结土，并明确了超固结比。隧道岛上段基础经过了大超载比预压，原状正常固结土-欠固结土经预压后相对运营期荷载为超固结状态（命名为拟超固结），经过预压后隧道基础下整个黏土层都为超固结状态，原状土沉降计算参数应采用考虑应力历史的e-lgp沉降计算相关参数

C_c 和 C_s 以及超固结比 OCR 。次固结系数虽然可利用压缩指数、液限指数、含水量及超固结比等推算,但根据现场实际应力路径做出的次固结系数更为可靠,补勘报告中室内试验根据现场荷载情况加卸载,在加卸载的过程中进行固结试验获取次固结系数。综上所述,本工程设计过程中地基沉降计算参数采用表2中的密度、孔隙比、超载比、压缩指数、再压缩指数及次固结系数。

4 结语

1) 沉降控制是港珠澳大桥岛隧工程隧道基础设计的关键,设计团队依托于详尽的勘察报告分析比较不同基础处理形式的沉降计算方法。同时分析比较详勘及补勘报告中沉降计算参数,根据基础加固形式及沉降计算方法确定最终采用的沉降计算参数。

2) 挤密砂桩复合地基沉降计算公式应符合文献[7]的规定。

3) 根据本工程已检测的高喷桩成桩质量及高喷桩现场施工难度,高喷桩桩体强度差,推荐采用《建筑地基处理技术规范》^[4]中水泥土搅拌桩复合地基沉降计算方法。

4) PHC刚性桩复合地基沉降计算应符合《建筑地基基础设计规范》^[2]及《建筑地基处理技术规范》^[4]复合地基沉降计算方法。

5) 鉴于隧道基础黏土层超固结或拟超固结特性,原状土地基沉降计算采用考虑应力历史的沉降计算参数压缩指数 C_c ,再压缩指数 C_s 以及超固结比 OCR 。

6) 超载预压地基土的次固结系数应根据超载比的大小予以折减,本工程为更准确评估次固结沉降量,测定次固结系数土工试验加载过程与现场加载过程相同。

7) 补勘报告推荐了考虑应力历史的沉降计算参数 C_c , C_s 以及 OCR ,并提供了根据现场实际应

力状态下测定的次固结系数,故本工程沉降计算参数参照补勘数据。

8) 本工程依据变化的荷载及地质条件采用了多种基础加固方式,应用了柔性桩、半刚性桩、刚性桩复合地基以及考虑应力历史的天然地基计算方法,为类似工程沉降计算提供思路。本文仅对隧道基础沉降计算进行综述,隧道基础设计团队将根据后期沉降数据验证沉降计算方法及沉降计算参数选取,并根据监测数据指导沉降计算公式中参数的修正。

参考文献:

- [1] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程岛隧工程补充地质勘察隧道区工程地质勘察报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2012.
- [2] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程施工图阶段工程地质勘察报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.
- [3] GB 5007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] GB 5007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [5] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [6] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].
- [7] Ports and harbours bureau, technical standards and commentaries for port and harbor facilities in JAPAN[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.
- [8] 陈仲颐. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [9] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] Mesri G. Secondary compression of peat with or without surcharging[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997(5): 411-421.

(本文编辑 武亚庆)