



# 基坑工程悬臂式支挡结构嵌固深度 计算方法改进建议

谢万东, 林佑高

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 国内基坑设计规范对悬臂式支挡结构嵌固深度的计算规定有较大争议, 安全富余不足; 欧洲标准和英国标准中的计算规定虽然理论正确, 但采用传统简化方法计算得到的嵌固深度偏于保守。对悬臂式支挡结构嵌固深度的计算原理进行总结, 并对国际和国内基坑设计规范中相关规定存在的问题进行分析。建议采用分项系数法并考虑严格的力和力矩平衡条件, 进行悬臂式支挡结构的嵌固深度计算, 得到的嵌固深度大于国内设计规范的计算结果, 小于国际上通用简化方法的计算结果。采用改进的计算方法在理论上更合理, 可以保障悬臂式支挡结构的安全和经济性。

**关键词:** 基坑; 悬臂式支挡结构; 嵌固深度; 分项系数

**中图分类号:** TU 47; U 655.54

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)01-0186-06

## Suggestion for improvement of calculation method for embedded depth of cantilever retaining structures in excavation engineering

XIE Wan-dong, LIN You-gao

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

**Abstract:** The calculation provisions in Chinese design codes for excavation for determination of the embedded depth of cantilever retaining structure are disputed and the safety margin is not sufficient. The requirements in relevant Euro and British standards are theoretical correct but the traditional simplified method results in a conservative embedded depth. We summarize the basic rules for determination of the embedded depth of cantilever retaining structures, and analyze the problems of the relevant principles in Chinese and international design codes for excavation. We suggest that the partial factor method together with the strict load equilibrium and moment equilibrium conditions is used to calculate the embedded depth of cantilever retaining structure. The resulted embedded depth is larger than that calculated by Chinese standard, and is smaller than that calculated by the internationally accepted simplified method. The improved method is more rational in theory and can achieve a safe and economical design in practice.

**Keywords:** excavation; cantilever retaining structure; embedded depth; partial factor

悬臂式排桩或钢板桩是一种常用的支挡结构, 适用于地质条件好、深度浅、变形要求低的基坑工程<sup>[1]</sup>, 也可用于挡土高度小于5 m的板桩码头工程<sup>[2]</sup>。这种结构完全依靠挡土侧岩土体提供的抵抗力维持稳定性, 因此需要有足够的嵌固深度。

悬臂式支挡结构嵌固深度的计算方法已经非常成熟、简单。但是, 在将国内外与此有关的基坑、码头设计规范、指南和手册进行对比后, 发现国内基坑规范关于悬臂式支挡结构嵌固深度的计算规定存在较大的争议或缺陷, 有必要对该问题进行分析 and 总结, 并提出改进建议。

**收稿日期:** 2021-03-04

**作者简介:** 谢万东(1984—), 男, 高级工程师, 从事地基处理和基坑支护方面的设计和研究。

## 1 嵌固深度计算理论

悬臂式支挡结构嵌固深度的计算理论以考虑力和力矩平衡的极限平衡法为主。假设基坑底部以下某一深度处为支护结构的不动点,见图1<sup>[3]</sup>中的 $O$ 点。处于极限平衡状态时,支护结构将绕 $O$ 点发生转动。根据简化的假定条件,在 $O$ 点以上,基坑外侧为主动土压力、内侧为被动土压力;而在 $O$ 点以下,基坑外侧的土压力转变为被动土压力、内侧的土压力转变为主动土压力。设坑底至 $O$ 点的距离为 $d_0$ , $O$ 点至桩底的距离为 $z$ 。在计算嵌固深度时,须同时保证水平方向上力的平衡和力矩的平衡,这样就会产生一个包含未知量 $d_0$ 和 $z$ 的二元三次方程组,手工求解的难度很大。

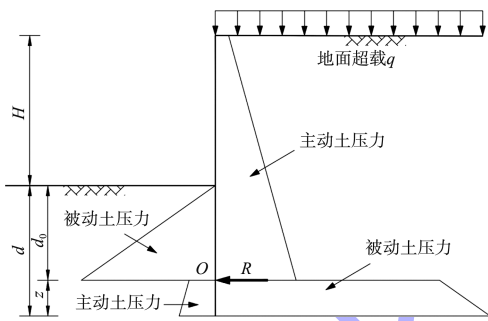


图1 悬臂式支挡结构嵌固深度计算简图

针对求解方程组的难题,前人提出一种简化算法,将 $O$ 点以下土压力的合力简化为作用在 $O$ 点的一个集中力 $R$ ,再将 $O$ 点以上的土压力向 $O$ 点取矩。此时就只有一个力矩平衡方程和一个未知量 $d_0$ ,求解难度由此而降低。在得到 $d_0$ 后,需要再加上 $O$ 点以下的嵌固部分 $z$ ,才能得到真正的嵌固深度 $d$ 。一般情况下取 $z=0.2d_0$ 是足够的,可以满足水平方向上力的平衡条件,因此可以取嵌固深度设计值 $d=1.2d_0$ 。

英国 CIRIA C580 和香港 GCO Publication No. 1/90<sup>[4]</sup>均明确指出,系数 1.2 不是安全系数,而是采用简化计算方法后对嵌固深度必要的补偿,也就是在考虑该系数后,支挡结构才真正处于极限平衡状态。两本规范还指出,在得到嵌固深度设计值 $d$ 后,必要时还需要对水平方向上力的平衡进行复核,以确保结构安全。

## 2 国外规范和手册的计算流程及算例

### 2.1 考虑安全系数或分项系数的嵌固深度计算方法

前述嵌固深度基本计算理论并未包含任何安全系数或分项系数。英国标准和欧洲标准主要是采用简化后的方法计算悬臂式支挡结构的嵌固深度。CIRIA C580 和 BS 8002:1994<sup>[5]</sup>总结了考虑安全系数或分项系数的悬臂式支挡结构嵌固深度的计算方法,主要有 3 类:

1) 直接对根据第 1 节中基本理论计算得到的嵌固深度 $d$ 乘以大于 1 的安全系数,但 CIRIA C580 认为这种方法过于依赖经验,可靠性低,不予推荐。

2) 通过力矩平衡公式,对作用在支挡结构上的总土压力或净土压力除以大于 1 的安全系数,与 JGJ 120—2012《建筑基坑工程技术规程》中计算悬臂式支挡结构嵌固深度的公式类似。包括 3 种方法,分别为英国标准 CP2<sup>[6]</sup>中提出的对被动土压力(不含水压力)除以大于 1 的安全系数、英国钢铁公司在桩基手册<sup>[7]</sup>中提出的对被动区的净土压力和净水压力之和除以大于 1 的安全系数和 Burland 等<sup>[8]</sup>提出的对修正后的被动土压力(不含水压力)除以大于 1 的安全系数。这 3 种方法要求的安全系数通常为 1.5~2.0。

3) 采用分项系数法或对抗剪强度取安全系数的方法。CIRIA C580 经过对比认为这种方法比第 2 类方法更为经济,且其与当前国际上通行的欧洲标准 Eurocode 7(EN 1997)<sup>[9]</sup>采用的分项系数法在理念上一致,更为合理,可作为推荐的计算方法。

欧洲标准 EN 1997-1: 2004 中提供了多种分项系数组合,目前英国采用的是设计路径 1 (Design Approach 1, DA1), 其包括 DA1-C1 (Design Approach 1-Combination 1) 和 DA1-C2 (Design Approach 1-Combination 2) 两种分项系数组合,区别在于 DA1-C1 主要是对作用效应(荷载)取分项系数,而 DA1-C2 主要是对土体强度取分项系数,见表 1。很多工程实践证明计算结果一般由 DA1-C2 组合控制,常规设计只需要考虑 DA1-C2。

表1 EN 1997-1:2004 中 DA1 分项系数组合

类别	DA1-C1			DA1-C2		
	A1	M1	R1	A2	M2	R1
不利永久作用	1.35	-	-	1.0	-	-
有利永久作用	1.00	-	-	1.0	-	-
不利可变作用	1.50	-	-	1.3	-	-
有利可变作用	0	-	-	0	-	-
有效内摩擦角正切值 $\tan\varphi'$	-	1.0	-	-	1.25	-
有效黏聚力 $c'$	-	1.0	-	-	1.25	-
不排水抗剪强度 $s_u$	-	1.0	-	-	1.40	-
无侧限抗压强度 $q_u$	-	1.0	-	-	1.40	-
土体密度 $\rho$	-	1.0	-	-	1.00	-
抗力 $R$	-	-	1.0	-	-	1.0

根据表1, DA1-C1 组合为 A1+M1+R1, DA1-C2 组合为 A2+M2+R1。

EN 1997-1: 2004 中 DA1-C2 组合和 BS 8002: 1994 建议的土体强度分项系数见表2。

表2 土体强度分项系数

规范	土体强度分项系数	
	有效应力指标	总应力指标
BS 8002:1994	1.20	1.5
EN 1997-1:2004	1.25	1.4

EN 1997-1:2004 在包括英国等很多国家和地区已经使用多年, 且 BS 8002: 2004 也于 2015 年按照 EN 1997-1:2004 的规定更新, 因此分项系数可取 EN 1997-1:2004 中的建议值。

## 2.2 根据 EN 1997-1:2004 确定的计算流程

1) 采用分项系数组合 DA1-C2, 对作用效应(荷载)、土体密度和强度等取分项系数。土体强度设计值按以下公式确定:

有效应力指标:

$$\tan\varphi'_d = \tan\varphi' / \gamma_M \quad (1)$$

$$c'_d = c' / \gamma_M \quad (2)$$

总应力指标:

$$s_{ud} = s_u / \gamma_M \quad (3)$$

式中:  $\varphi'_d$ 、 $c'_d$ 、 $s_{ud}$  分别为有效内摩擦角、有效黏聚力、不排水抗剪强度的设计值;  $\varphi'$ 、 $c'$ 、 $s_u$  分别为有效内摩擦角、有效黏聚力、不排水抗剪强度的标准值;  $\gamma_M$  为土体强度分项系数。

当有地下水存在时, 不对水压力取分项系数。

2) 根据考虑分项系数后的土体强度设计值计

算主动土压力和被动土压力, 再利用力矩平衡公式求出嵌固深度计算值  $d_0$ , 即图1中  $O$  点以上的嵌固深度, 则有:

$$\sum_{j=1}^m E_{pdj} y_{pj} - \sum_{i=1}^n E_{adi} y_{ai} = 0 \quad (4)$$

式中:  $E_{adi}$  为基坑外侧第  $i$  层土的主动土压力设计值的合力;  $E_{pdj}$  为基坑内侧第  $j$  层土的被动土压力设计值的合力;  $y_{ai}$ 、 $y_{pj}$  分别为  $E_{adi}$ 、 $E_{pdj}$  作用点至图1中不动点  $O$  的距离。

3) 进行水平方向上力的平衡校核, 对  $d_0$  乘以约 1.2 的系数, 得到嵌固深度设计值  $d$ 。

## 2.3 典型算例

### 2.3.1 算例1

Decoding Eurocode 7<sup>[10]</sup> 提供了一个按 EN 1997-1:2004 中的分项系数组合计算悬臂式钢板桩墙嵌固深度的案例。钢板桩的挡土高度为 4 m, 考虑可能超挖后的计算挡土高度为 4.4 m。上部土层为 4 m 厚的中等密实砂, 天然密度  $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$ ,  $c' = 0 \text{ kPa}$ 、 $\varphi' = 36^\circ$ ; 下部土层为黏性土, 天然密度  $\rho = 2.0 \text{ t/m}^3$ , 不排水抗剪强度  $s_u = 40 \text{ kPa}$ ; 地面超载为 10 kPa; 场地内无地下水。根据算例中的结果, 按照式(4)得到的嵌固深度计算值  $d_0$  为 7.83 m, 再乘以 1.2 的系数并进行力的平衡复核后, 嵌固深度设计值  $d$  为 9.40 m。

### 2.3.2 算例2

以无地下水的砂土地基中的悬臂式排桩为例。砂土的天然密度  $\rho = 1.7 \text{ t/m}^3$ ,  $\varphi' = 30^\circ$ 。地面超载取 20 kPa。基坑开挖深度  $H$  为 4 m, 计算得到的嵌固深度设计值  $d$  为 7.56 m。

### 2.3.3 算例3

土层条件和基坑深度同算例2, 坑外地下水位埋深为 1 m, 坑内水位降低至坑底以下 0.5 m, 计算得到的嵌固深度设计值  $d$  为 16.49 m。

## 3 国内基坑设计规范的规定及计算对比

### 3.1 国内基坑设计规范

JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》规定, 悬臂式支挡结构的嵌固深度应符合下式的嵌固稳定性要求:

$$\frac{E_{pk}a_{p1}}{E_{ak}a_{a1}} \geq K_e \quad (5)$$

式中:  $K_e$  为嵌固稳定安全系数, 对安全等级为一级、二级、三级的悬臂式支挡结构,  $K_e$  分别为 1.25、1.20、1.15;  $E_{ak}$ 、 $E_{pk}$  分别为基坑外侧主动土压力、内侧被动土压力标准值;  $a_{a1}$ 、 $a_{p1}$  分别为基坑外侧主动土压力、内侧被动土压力合力作用点至挡土构件底端的距离。

国内绝大多数地方和行业编制的基坑设计规范<sup>[11-16]</sup>关于悬臂式支挡结构嵌固深度计算的规定均与式(5)相同或相似, 但也有例外。GJB-02—1998《广州地区建筑基坑支护技术规定》<sup>[17]</sup>、DB51/T 5072—2011《成都地区基坑工程安全技术规范》<sup>[18]</sup>、原冶金工业部颁布的 YB 9258—1997《建筑基坑工程技术规范》<sup>[19]</sup>、浙江省 DB33/T 1096—2014《建筑基坑工程技术规程》<sup>[20]</sup> 中的规定与式(5)相比有明显区别。

GJB-02—1998 和 DB51/T 5072—2011 关于悬臂式支挡结构嵌固深度的计算规定是相同的。以 GJB-02—1998 为例, 嵌固深度计算值  $d_0$  按下式确定:

$$\sum_{j=1}^m E_{pj} y_{pj} - \sum_{i=1}^n E_{ai} y_{ai} = 0 \quad (6)$$

式中:  $E_{ai}$  为基坑外侧第  $i$  层土的主动土压力标准值的合力;  $E_{pj}$  为基坑内侧第  $j$  层土的被动土压力标准值的合力;  $y_{ai}$ 、 $y_{pj}$  分别为  $E_{ai}$ 、 $E_{pj}$  作用点至桩底的距离。

在按式(6)得到计算值  $d_0$  并考虑构造要求后, 嵌固深度设计值  $d$  按下式确定:

$$d = 1.2 \gamma_0 d_0 \quad (7)$$

式中:  $\gamma_0$  为结构重要性系数, 对一级、二级、三级基坑分别取 1.1、1.0、0.9。

原冶金工业部 YB 9258—1997 中确定嵌固深度计算值  $d_0$  的要求同式(6), 但在确定嵌固深度设计值  $d$  时, 要求计算出基坑底部以下土压力为零的位置。假设基坑底部至土压力为零之点的距离为  $x$ , 土压力零点至桩(墙)底的距离为  $t$ , 则:

$$d_0 = x + t \quad (8)$$

嵌固深度设计值  $d$  为:

$$d = x + Kt = x + K(d_0 - x) \quad (9)$$

式中:  $K$  为与土层和环境条件等有关的经验嵌固系数, 对安全等级为一级、二级、三级的基坑, 板桩可分别取 2.1、2.0、1.9, 排桩分别取 1.4、1.3、1.2。

浙江省 DB33/T 1096—2014 中的附录 B 对悬臂式支挡结构嵌固深度的计算有两方面规定, 其中 B.0.1 和 B.0.2 款要求嵌固深度需满足如本文第 1 节所述未经简化的力和力矩平衡条件, 但土压力均为净土压力, 即主动土压力与被动土压力的差值, 见式(10)(11); B.0.3 款则沿用了《建筑基坑支护技术规程》中的规定, 也就是满足式(5)的要求。

$$E_{a1} + E_{a2} = E_p \quad (10)$$

$$E_{a1}t_1 + E_{a2}t_2 = E_p t_3 \quad (11)$$

式中:  $E_{a1}$ 、 $E_{a2}$  为基坑外侧的上端、下端净土压力的合力;  $E_p$  为基坑内侧的净土压力合力;  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别为  $E_{a1}$ 、 $E_{a2}$ 、 $E_p$  至支挡结构端点的距离。式(10)(11)也可以转化为包含图 1 中嵌固段  $d_0$  和  $z$  两个未知量的方程组。

### 3.2 算例对比

为便于对比, 以下所有分析均取基坑安全等级为二级, 即式(5)中  $K_e$  取 1.20, 式(7)中  $\gamma_0$  取 1.0; 对于板桩, 式(9)中  $K$  取 2.0, 对于排桩则取 1.3。

对于 2.3 节中的 3 个算例, 如不考虑规范中嵌固深度的构造要求, 按照 JGJ 120—2012、GJB-02—1998、YB 9258—1997 和 DB33/T 1096—2014 得到的嵌固深度见表 3。其中, 按照 DB33/T 1096—2014 中规定的两种方法得到的嵌固深度设计值对比结果见表 4。

表 3 按中国设计规范计算的嵌固深度

规范	嵌固深度设计值 $d/m$		
	算例 1	算例 2	算例 3
JGJ 120—2012	3.01	5.28	13.04
GJB-02—1998	2.98	5.63	12.19
YB 9258—1997	4.96	5.90	12.50
DB33/T 1096—2014	3.01	5.28	13.04

表4 按 DB33/T 1096—2014 计算的嵌固深度结果对比

对应的规范条文	嵌固深度设计值 $d/m$		
	算例 1	算例 2	算例 3
B. 0. 1 和 B. 0. 2	2. 71	4. 95	10. 62
B. 0. 3	3. 01	5. 28	13. 04

根据计算结果的对比可以看出：1) 按照国内规范计算得到的嵌固深度远小于按照欧洲标准计算得到的结果；2) 按照不同国内规范计算得到的嵌固深度较为接近；3) 对于不同的案例，根据 JGJ 120—2012 和 GJB-02—1998 计算得到的嵌固深度之间的大小关系没有明显的规律；4) 在浙江省规范中，按照式(10)(11)计算得到的嵌固深度小于按照式(5)计算得到的结果。

#### 4 存在的问题或争议

以上设计规范虽已使用多年，但在仔细研究后，发现这些规范都有较为明显的问题或争议，具体如下：

1) 在欧洲标准中，采用分项系数法进行嵌固深度的计算，本身没有问题。但是，目前常用的嵌固深度计算方法仍然是简化后的方法，而不是严格的力和力矩平衡条件。如果不考虑分项系数，式(6)(7)即为简化后的计算方法，式(10)(11)即为考虑严格力与力矩平衡条件的方法。可以发现，采用简化方法得到的嵌固深度偏大。

2) GJB-02—1998 中对嵌固深度计算值取 1.2 的增大系数，然而这只是在采用简化方法计算后对嵌固深度进行必要的补偿，不是真正意义上的安全系数。也就是说，嵌固深度计算值  $d_0$  乘以 1.2 后，支挡结构才能基本满足力的平衡和力矩的平衡两个条件。按照传统观点，可以认为此时实际的嵌固稳定安全系数只有 1.0 左右，处于临界状态，没有安全富余。

3) JGJ 120—2012 采用的是绕支挡结构底部转动的抗倾覆稳定计算模式，与第 1 节所述的通用计算理论相比，有着本质区别。

理论上，支挡结构的嵌固深度需要同时满足力的平衡和力矩平衡两个条件，而 JGJ 120—2012 只考虑了力矩平衡，忽略了力的平衡。可以很容

易地通过计算验证，根据式(5)计算得到的嵌固深度不满足力的平衡条件。

在有地下水的情况下，式(5)相当于是对被动区的土压力和水压力同时除以大于 1.0 的安全系数。但是，CIRIA C580 中提到的 3 种考虑安全系数的方法均只对土压力取安全系数；对于水压力则只考虑作用在支挡结构上的净水压力，即主动侧水压力和被动侧水压力的差值，且不取任何安全系数。我国的 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[21]</sup> 中，计算板桩入土深度时，作用在板桩结构上的水压力也是只考虑净水压力(剩余水压力)，与 CIRIA C580 的理念是一致的。因此，式(5)在有地下水存在、采用有效应力法计算时的适用性存疑。

根据本文的 3 个算例，由式(5)得到的嵌固深度与按式(6)(7)得到的结果基本相当，在某些情况下甚至更小。因此，按照通用理论，根据式(5)计算得到的真实嵌固稳定安全系数可能小于 1.0，偏向危险。

4) YB 9258—1997 中的做法类似于直接对嵌固深度计算值乘以大于 1.0 的安全系数，但 CIRIA C580 和香港 GCO Publication No. 1/90 认为这是一种过于依赖经验的方法，需要采用其他方法进行验证。

5) DB33/T 1096—2014 的式(10)(11)实际上就是第 1 节所述未经简化的考虑力与力矩平衡的计算方法，但是未考虑任何安全系数或分项系数。对于结构设计来说，这种做法不正确。

对于多年来悬臂式支挡结构嵌固深度采用国内规范计算却少有出现事故的原因，主要与土体参数的准确程度、需要考虑整体滑动稳定性、支挡结构实际嵌固深度大于计算值等因素有关，但这并不能掩盖现行规范的缺陷。

#### 5 改进建议

对比表 3、4 中的计算结果可以看出，采用浙江省 DB33/T 1096—2014 中 B. 0. 1 和 B. 0. 2 条，即式(10)(11)，考虑严格的力与力矩平衡条件计

算得到的嵌固深度是最小的, 也小于按照本文第 1 节所述简化方法计算得到的嵌固深度。

本文第 1 节所述的嵌固深度简化计算方法是考虑到求解二元三次方程组的困难而提出的。在以前, 人工求解该方程组的难度巨大。但在现阶段, 方程组求解的困难已不复存在, 可以通过数学商业软件或编程方法快速建立方程组, 并进行试算迭代求解, 从而得到嵌固深度的准确值。

参考欧洲标准和浙江省 DB33/T 1096—2014 中 B.0.1 和 B.0.2 的规定, 建议悬臂式支挡结构嵌固深度的设计值按以下流程进行计算:

1) 对作用效应(荷载)、土体密度和强度等取分项系数, 可采用表 1 中的 DA1-C2 分项系数组合。欧洲标准中有效应力指标和总应力指标的分项系数分别为 1.25 和 1.40, 虽然在英国、欧盟和其他部分国家和地区已使用多年, 但仍可对其是否符合我国实际情况做进一步研究。

2) 根据考虑分项系数后的土体强度计算土压力, 土压力的分布模式见图 1。

3) 利用数学商用软件或采用编程的方法建立力和力矩平衡的方程组, 其表现形式与式(10)(11)相同。在实际操作中, 可以将这两个式子转换为包含  $d_0$  和  $z$  这两个未知量的方程组。

4) 通过迭代计算, 得到  $d_0$  和  $z$  精确值, 二者之和即为嵌固深度设计值。

本文的 3 个算例, 按照上述流程计算得到的嵌固深度设计值分别为 8.93、7.02 和 15.27 m。经比较后可以得到, 改进方法得到的嵌固深度大于按照现行国内基坑设计规范计算得到的结果, 小于按照考虑分项系数法采用简化方法得到的结果。

## 6 结论

1) 国内基坑设计规范关于悬臂式支挡结构嵌固深度的计算规定有较大的争议或缺陷, 至少在国际工程中不被认可。在已有计算模式下, 支挡结构的嵌固深度偏小, 嵌固稳定安全性偏低。

2) 欧洲和英国标准中关于悬臂式支挡结构嵌

固深度的计算理论普遍被接受, 但是按照简化方法计算得到的嵌固深度设计值偏大。

3) 建议采用考虑分项系数的土体强度参数计算作用在支挡结构上的土压力, 按照严格的力和力矩平衡条件建立方程组并迭代试算求解, 可以得到悬臂式支挡结构嵌固深度的准确值。

## 参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] British Standards Institution. Maritime works-part 2: code of practice for the design of quay wall, jetties and dolphins: BS 6349-2: 2010[S]. London: BSI, 2010.
- [3] GABA A R, SIMPSON B, POWRIE W, et al. Embedded retaining wall design-guidance for economic design: CIRIA C580[R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 2003.
- [4] Geotechnical Engineering Office. Review of design methods for excavations: GCO Publication No.1/90[R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 2003.
- [5] British Standards Institution. Code of practice for earth retaining structures: BS 8002: 1994[S]. London: BSI, 1994.
- [6] Institution of Structural Engineers. Code of practice No.2-earth retaining structures: CP2[S]. London: Institution of Structural Engineers, 1951.
- [7] British Steel Corporation. Piling handbook[M]. 7th edition. Scunthorpe: British Steel Corporation, 1997.
- [8] BURLAND J B, POTTS D M, WALSH N M. The overall stability of free and propped embedded cantilever retaining walls[J]. Ground engineering, 1981, 14(5): 28-38.
- [9] British Standards Institution. Eurocode 7: geotechnical design-part 1: general rules: BS EN 1997-1: 2004[S]. London: BSI, 2004.
- [10] BOND A, HARRIS A. Decoding Eurocode 7[M]. London: Taylor & Francis, 2008.
- [11] 广州市市政集团有限公司, 江苏德丰建设集团有限公司. 钢围堰工程技术标准: GB/T 51295—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [12] 天津市勘察院. 建筑基坑工程技术规程: DB 29-202—2010[S]. 天津: 天津市建设科技信息中心, 2010.