

# 美标水泥搅拌桩设计方法研究

王艳萍<sup>1</sup>, 孙庆楠<sup>2</sup>, 陈昊若<sup>1</sup>

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100088; 2. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100097)

**摘要:**目前中国学者尚未开展美国标准下水泥搅拌桩地基处理设计方法及计算理论方面的研究,该文分析并论述美国联邦公路管理局关于软土地基采用深层水泥搅拌桩的设计方法和计算步骤,并对比了中美标准在水泥搅拌桩设计上的差异性,以期为美国标准研究及美标地区岩土工程设计提供技术参考。

**关键词:**美国标准;水泥搅拌桩;深层水泥处治技术;计算过程;中美标准对比;软土

**中图分类号:** U416      **文献标志码:** A

近年来,中国工程企业“走出去”的步伐明显加快,随着 EPC、BOT 合同模式的增多,对世界主流规范体系的学习和应用研究成为从事海外项目的中国设计和建设企业不可回避的问题。该文系统总结美国联邦公路管理局关于深层水泥搅拌桩的设计方法,为海外软土地区公路和铁路项目提供技术参考。

深层水泥搅拌桩(DMM)是利用水泥作为固化剂,通过深层搅拌机械在地基中将软土或砂等与固化剂强制拌和,使软基硬结从而提高地基强度。参照中国规范 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》,水泥土搅拌桩复合地基适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、素填土、黏性土(软塑、可塑)、粉土(稍密、中密)、粉细砂(松散、中密)、中粗砂(松散、稍密)、饱和黄土等土层<sup>[1]</sup>。参照中国规范 JTG/T D31—02—2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》,加固土桩适用于处理十字板抗剪强度不小于 10 kPa、有机质含量不大于 10%的软土地基<sup>[2]</sup>。

深层水泥搅拌桩地基处理技术于 1954 年由美国发明,自 1991 年以来,深层水泥搅拌桩地基处理技术已成功用于美国 20 多个大型交通运输项目<sup>[3]</sup>,由于缺少广泛认可的设计方法和质量检测手段,DMM 在美国的应用受到限制,因此 2013 年美国联邦公路管理局(FHWA)编制了《深层水泥搅拌桩在路基及基础工程中的设计指南》,用于指导深层水泥搅拌桩地基处理技术的应用和推广。该文将分步对该设计指南中用于路基处治的深层水泥搅拌桩设计方法和计算分析过程进行总结。

## 1 确定项目需求

采用 FHWA《深层水泥搅拌桩在路基及基础工程中的设计指南》中的方法进行深层水泥搅拌桩的设计,首先确定以下项目需求:① 路基典型几何断面,包括路基的高度、宽度和边坡坡率;② 交通荷载;③ 稳定性分析的安全系数和允许沉降量要求。

该设计方法认为深层水泥搅拌桩存在 6 种破坏模式,对应 6 个安全系数,FHWA 推荐取值见表 1。

表 1 路基基底深层搅拌桩的典型安全系数设计值<sup>[3]</sup>

指标	描述	最小设计值
$F_{cc}$	防止中间深层搅拌桩破碎的安全系数	1.3
$F_s$	防止边坡稳定性破坏的安全系数,包括整体稳定性破坏及穿过处治区的剪切破坏	1.5
$F_o$	剪力墙抗倾覆及承载力破坏的安全系数	1.3
$F_c$	剪力墙下卧层承载力安全系数	1.3
$F_v$	剪力墙垂直平面上抗剪安全系数	1.3
$F_e$	剪力墙受土体挤压破坏的安全系数	1.3

## 2 确定代表性的地质条件

第 2 步是确定岩土力学分析中的地质模型,包括地层划分、地下水位及各层计算参数,对于沉降分析需要用到水泥搅拌桩处治范围内土的压缩性指标,对于

收稿日期:2022-06-20(修改稿)

基金项目:中交集团 2021 年重点研发项目(编号:2021-ZJKJ-18)

作者简介:王艳萍,女,硕士,教授级高工, E-mail:77454213@qq.com

稳定性分析,饱和黏土采用不排水抗剪强度,透水性材料采用排水剪切强度。

### 3 确定深层水泥搅拌桩属性

第 3 步是确定深层水泥搅拌桩处治区域的抗剪强度和杨氏模量。水泥搅拌桩处治区域的抗剪强度( $S_{dm}$ )设计值根据无侧限抗压强度( $q_{dm, spec}$ )进行估算:

$$S_{dm} = \frac{1}{2} f_r F_c q_{dm, spec} \quad (1)$$

式中:  $f_r$  为无侧限峰值强度与受限大应变强度之间的差异系数,通常取 0.65~0.9,对于处治路基建议采用 0.8;  $q_{dm, spec}$  为 28 d 无侧限抗压强度,对于软土地基,一般取 0.52~1.03 MPa。

根据实施的方法确定处治区杨氏模量,当采用湿法施工时,处治区杨氏模量  $E_{dm}$  为:

$$E_{dm} = 300 q_{dm, spec} \quad (2)$$

采用干法施工时,处治区杨氏模量  $E_{dm}$  为:

$$E_{dm} = 150 q_{dm, spec} \quad (3)$$

### 4 确定水泥搅拌桩布置方案

#### 4.1 确定水泥搅拌桩几何布置

FHWA 设计指南中路基中心下方水泥搅拌桩采用三角形或矩形布置、相互间隔一定距离,路基边坡下方采用连续布置的剪力墙方式,该设计指南认为这种布置方法能够提高结构的整体稳定性,具有成本优势,如图 1 所示。

路堤中心桩的面积置换率  $\alpha_{s, center}$  定义为桩面积与柱周土面积之比:

$$\alpha_{s, center} = \frac{\pi d^2}{4 S_{center}^2} \quad (4)$$

一般地,  $\alpha_{s, center}$  值控制在 0.2~0.4 的范围内。

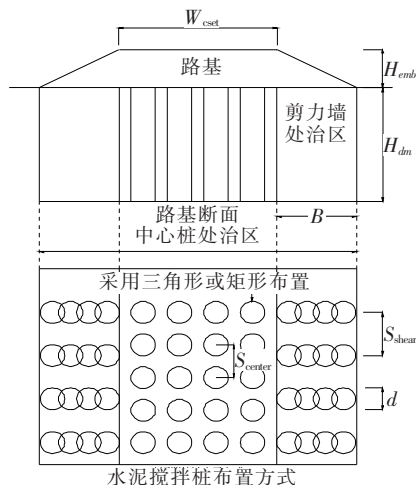
图 2 为路基边坡下方剪力墙范围水泥搅拌桩布置方式。

路堤边坡下剪力墙的面积置换率  $\alpha_{s, shear}$ , 定义为剪力墙面积与剪力墙桩周土面积的比值,按下式计算:

$$\alpha_{s, shear} = \frac{b}{S_{shear}} \quad (5)$$

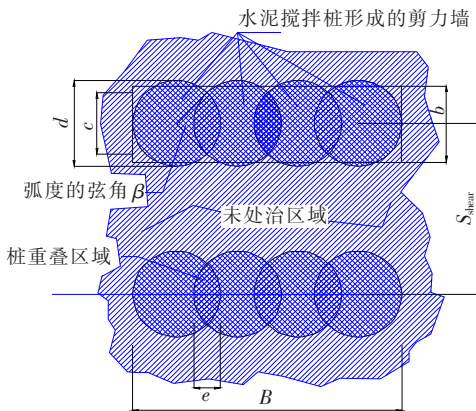
一般剪力墙面积置换率  $\alpha_{s, shear}$  大于等于中心桩面积置换率  $\alpha_{s, center}$ , 并在 0.2~0.4 范围内。

剪力墙参数  $d$ 、 $e$ 、 $S_{shear}$  和  $\beta$ 、 $c$ 、重叠面积比  $\alpha_e$ 、 $\alpha_{s, shear}$  之间的换算关系如下:



图中:  $W_{cst}$  为路堤宽度;  $H_{emb}$  为路堤高度;  $H_{dm}$  为处治深度;  $B$  为剪力墙宽度;  $d$  为桩直径;  $S_{center}$  为中心桩间距;  $S_{shear}$  为剪力墙间距,下同。

图 1 路基下方深层水泥搅拌桩典型布置<sup>[3]</sup>



图中:  $e$  为桩重叠距离;  $\beta$  为弧度的弦角;  $c$  为弦长;  $b$  为平均剪力墙宽度

图 2 路基边坡下方剪力墙典型布置<sup>[2]</sup>

$$\beta = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{e}{d} \right) \quad (6)$$

$$c = d \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (7)$$

$$\alpha_e = \frac{\alpha - \sin \alpha}{\pi} \quad (8)$$

$$\alpha_{s, shear} = \frac{\pi d (1 - \alpha_e)}{4 S_{shear} \left( 1 - \frac{e}{d} \right)} \quad (9)$$

#### 4.2 确定中心桩置换率

采用以下公式验算路基中心桩的承载力:

$$\alpha_{s, center} \geq F_{cc} \frac{q}{2 S_{dm} f_v} \quad (10)$$

式中:  $q$  为路堤及附加垂直应力;  $f_v$  为水泥搅拌桩处治区强度的变异系数,按照表 2 确定。

表2  $f_v$  值确定方法<sup>[3]</sup>

设计安 处治区强度		不同 $P_{dm}$ (%)时的 $f_v$		
全系数	变化系数	70	80	90
1.2	0.4	0.93	1.05	1.25
	0.5	0.88	1.02	1.26
	0.6	0.83	0.99	1.27
1.3	0.4	0.89	1.01	1.19
	0.5	0.82	0.95	1.17
	0.6	0.75	0.90	1.15
1.4	0.4	0.85	0.97	1.14
	0.5	0.76	0.89	1.09
	0.6	0.69	0.82	1.05
1.5	0.4	0.82	0.93	1.10
	0.5	0.72	0.83	1.03
	0.6	0.63	0.75	0.96
1.6	0.4	0.79	0.90	1.06
	0.5	0.68	0.79	0.97
	0.6	0.58	0.69	0.89

注: $P_{dm}$  为实际处治区抗剪强度超过指定处治区强度的概率。

式(10)假定路基和附加应力全部由水泥搅拌桩承担,不考虑桩周土提供的支撑。

4.3 确定剪力墙面积置换率

先估计  $\alpha_{s, shear}$  最小值,一般剪力墙面积置换率应大于或等于中心桩面积置换率,且在 0.2~0.4 范围内。

基于选定的  $e/d$  值(通常为 0.2~0.35)和估计的  $\alpha_{s, shear}$  值采用式(6)、(11)确定  $c/S_{shear}$  :

$$\frac{c}{S_{shear}} = \frac{2\alpha_{s, shear} \sin\beta}{\pi - \beta + \sin\beta}$$

(11)

5 沉降分析

工后沉降为处治区沉降与下覆地层压缩沉降之和。处治区采用水泥搅拌桩和周边土的复合模量,采用式(12)确定复合模量  $M_{comp}$ 。

$$M_{comp} = \alpha_{s, center} E_{dm} + (1 - \alpha_{s, center}) M_{soil}$$

(12)

式中: $M_{soil}$  为桩周土的约束模量。

采用式(13)确定处治区沉降:

$$\Delta H_{dm} = H_{dm} \frac{q}{M_{comp}}$$

(13)

处治区下卧层沉降可以采用荷载分散法进行计算。如果计算得出的沉降量超出了拟建路堤的允许沉

降量,则需要判断原因,针对性地增加处治区模量或增加水泥桩柱长。

当  $H_{emb}$  大于等于中心桩净间距两倍,即  $H_{emb} \geq 2(S_{center} - d)$ ,且路堤由优质材料填筑并压实良好时,在路堤底部出现差异沉降的风险较小,则不需要设置垫层。

当  $H_{emb} < 2(S_{center} - d)$  时,可以使用 Sloan 等<sup>[4]</sup>所述的程序在水泥搅拌桩桩顶设置垫层。

6 稳定性分析

6.1 边坡稳定性

进行边坡稳定性分析,以确定潜在滑动面和相应的安全系数。潜在滑动面可能位于剪力墙处治区域上方或下方,也可能从剪力墙处治区域穿过(图3)。

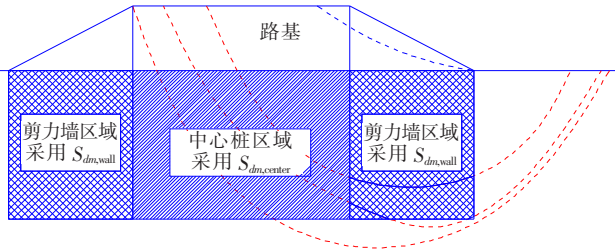


图3 边坡稳定性潜在滑动面位置

中心桩处治区复和剪切模量  $S_{dm, center}$  及剪力墙处治区复和剪切模量  $S_{dm, wall}$ ,按式(14)、(15)计算:

$$S_{dm, wall} = f_v \alpha_{s, shear} S_{dm}$$

(14)

$$S_{dm, center} = \text{Max} \{ \alpha_{s, center} (71.8 \text{ kPa}) + (1 - \alpha_{s, center}) s_{soil}, s_{soil} \}$$

(15)

式中: $s_{soil}$  为路堤中心桩周土抗剪强度。式中单根水泥搅拌桩抗剪强度值考虑为 71.8 kPa。

使用 Spencer 方法进行边坡稳定性分析,计算得到的边坡稳定性安全系数  $F_s$  与表 1 设计值进行对比,如果  $F_s$  值太小且临界破坏面通过剪力墙下方,应通过增加剪力墙宽度或处治深度提高  $F_s$  值,如果  $F_s$  过大,可以考虑减窄剪力墙宽度。

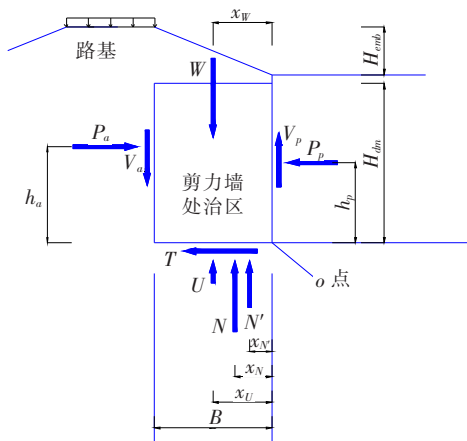
如果  $F_s$  值太小,且临界破坏面穿过剪力墙区域,则可以调整面积置换率或者增加剪力墙宽度来提高安全系数。

如果  $F_s$  值太小,且临界破坏面高于剪力墙区域,可以放缓路堤边坡,采用更坚固的路堤填料,或者采用土工合成材料对路基加筋处理。

6.2 抗倾覆及承载能力验算

(1) 定义验算符号。

抗倾覆和承载能力验算中定义了许多符号,用图 4 进行示意。



注:  $W$  为处治区、路基及未处治区土的总重;  $x_W$  为“ $o$ ”点到  $W$  作用线的水平距离;  $B$  为剪力墙宽度;  $H_{dm}$  为处治深度;  $P_a$  为主动土压力, 包括水压力;  $h_a$  为从“ $o$ ”点到  $P_a$  作用线的垂直距离;  $V_a$  为主动侧垂直剪力;  $P_p$  为被动土压力, 包括水压力;  $h_p$  为从“ $o$ ”点到  $P_p$  作用线的垂直距离;  $V_p$  为被动侧垂直剪力;  $N$  为垂直向上作用在剪力墙基础上的竖向力;  $U$  为垂直向上作用在剪力墙基础上的水压力;  $N'$  为垂直向上作用在剪力墙基础上的有效作用力;  $x_N$  为从“ $o$ ”点到  $N$  的水平距离;  $x_U$  为从“ $o$ ”点到  $U$  的水平距离;  $x_{N'}$  为从“ $o$ ”点到  $N'$  的水平距离;  $T$  为作用在剪力墙基础上的水平剪力。

图 4 定义抗倾覆及承载能力验算符号含义的单元图<sup>[3]</sup>

## (2) 确定强度参数。

确定剪力墙及下卧层抗剪强度参数值。以总应力法考虑,修正的总应力法黏聚力为:

$$c_m = \frac{c}{F_o} \quad (16)$$

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi}{F_o} \right) \quad (17)$$

式中:  $c_m$  为修正的总应力黏聚力;  $c$  为总应力黏聚力;  $\varphi_m$  为修正的总应力摩擦角;  $\varphi$  为总应力摩擦角。

(3) 使用上述修正的强度参数值计算  $P_a$ 、 $h_a$ 、 $V_a$ 、 $P_p$ 、 $h_p$  和  $V_p$  的值。

(4) 使用下列公式确定竖向合力  $N$ :

$$N = W + V_a - V_p \quad (18)$$

(5) 按照式(19)计算竖向合力作用位置  $x_N$ :

$$x_N = \frac{P_p h_p + W x_W + V_a B - P_a h_a}{N} \quad (19)$$

如果  $x_N$  计算值  $\leq 0$ , 意味着剪力墙宽度偏小; 如果  $x_N > B/2$ , 意味着剪力墙宽度相对于倾覆稳定性所需的宽度偏大; 如果  $0 < x_N \leq B/2$ , 意味着需要调整水泥搅拌桩的几何布置重新进行计算。如果项目特定条件限定, 需要采用最小宽度  $B$ , 且  $x_N > B/2$ , 则可以认为抗倾覆和承载能力满足要求, 不需要再做进一步

分析。

(6) 如果抗剪强度采用总应力表征, 采用式(20)计算剪力墙脚趾处的支承压力  $q_{toe}$ :

$$q_{toe} = \begin{cases} \frac{N \left( \frac{2B}{3x_N \alpha_{s, shear}} - \frac{1}{\alpha_{s, shear}} + 1 \right)}{B \left( \frac{3}{\alpha_{s, shear}} - \frac{6x_N}{B \alpha_{s, shear}} + 1 \right)} & x_N < \frac{B}{3} \\ \frac{N \left( \frac{3}{\alpha_{s, shear}} - \frac{6x_N}{B \alpha_{s, shear}} + 1 \right)}{B \left( \frac{3}{\alpha_{s, shear}} - \frac{6x_N}{B \alpha_{s, shear}} + 1 \right)} & \frac{B}{3} \leq x_N \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad (20)$$

(7) 剪力墙容许承载力采用下式计算:

$$q_{all} = c_m N_c + \frac{1}{2} \gamma_{below} b_{min} N_r + \gamma_{above} H_{dm} N_q \quad (21)$$

式中:  $N_c$ 、 $N_r$ 、 $N_q$  为下卧层承载力系数, 采用  $\varphi_m$  推算;  $\gamma_{below}$  为下卧层重度;  $\gamma_{above}$  为剪力墙底部以上地层平均重度;  $b_{min}$  为最小允许有效剪力墙宽度, 对于典型的  $e/d$  值, 可以估计为最小允许柱径的 90%。

如果  $\varphi_m$  等于零,  $N_r = 0$ ,  $N_q = 1$ , 式(21)可简化为:

$$q_{all} = c_m (7.5) \left( 1 + 0.1 \frac{b_{min}}{x_N} \right) + \gamma_{above} H_{dm} \quad (22)$$

## 6.3 剪力墙承载力验算

根据式(23)确定路堤坡脚处下卧层允许承载力:

$$q_{all} = \frac{2S_{dm} f_v}{F_c} + \sigma_h \quad (23)$$

式中:  $\sigma_h$  为剪力墙脚趾处的侧向土压力。

$\sigma_h$  采用静止土压力, 总垂直压力如下:

$$\sigma_h = K_0 \sigma'_v + u \quad (24)$$

式中:  $K_0$  为剪力墙脚趾处土的静止土压力系数, 基于  $\varphi_m$  确定;  $\sigma'_v$  为剪力墙脚趾处有效垂直应力;  $u$  为剪力墙脚趾处的孔隙水压力。

## 6.4 剪力墙垂直平面上的剪力计算

剪力墙在垂直平面上的剪切力是由  $x_N < B/2$  的偏心荷载产生的。如果相邻立桩之间的重叠不足, 则剪力墙可能发生倾倒(图 5)。

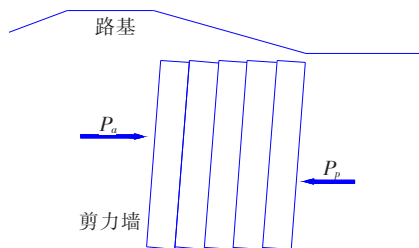


图 5 垂直平面上剪力破坏模式示意

以下三步用于确定剪力墙设计是否满足垂直平面上的抗剪切要求:



(1) 确定对应于  $F_v$  的  $V_p$ 、 $N$  和  $x_N$  的值。如果  $F_o$  或  $F_c$  等于  $F_v$ , 则可以在此步骤中使用所得的中间值。如果不是这种情况, 则应使用  $F_v$  代替式(17)中的  $F_o$  来重复步骤 6.2 节中的步骤(2)~(5), 以确定  $V_p$ 、 $N$  和  $x_N$ 。

(2) 使用式(25)计算剪力墙垂直平面上的平均垂直剪应力  $\tau_v$ 。

$$\tau_v = \begin{cases} \frac{V_p}{H_{dm}} + \frac{N}{H_{dm}} \left(1 - \frac{3x_N}{2B}\right)^2 & x_N \leq \frac{B}{3} \\ \frac{V_p}{H_{dm}} + \frac{3N}{4H_{dm}} \left(1 - \frac{2x_N}{2B}\right)^2 & \frac{B}{3} < x_N \leq \frac{B}{2} \end{cases} \quad (25)$$

(3) 使用式(26)计算剪力墙处治区允许垂直剪应力  $\tau_{all}$ :

$$\tau_{all} = \frac{f_v (c/S_{shear}) S_{dm}}{F_v} \quad (26)$$

如果  $\tau_v \leq \tau_{all}$ , 则该剪力墙设计满足垂直平面上抗剪要求。如果  $\tau_v > \tau_{all}$ , 则需要采取措施来增加  $\tau_{all}$ , 如增加处治区地层的强度、增加剪力墙布置弦长或减小剪力墙间距。也可以采取降低  $\tau_v$  的措施, 例如增加剪力墙宽度  $B$  值。

## 6.5 剪力墙之间软土挤出的稳定性验算

如果剪力墙间距较大或剪力墙宽度较短, 则剪力墙之间的软土可能会被挤出, 采用式(27)限制剪力墙之间的最大间距, 以防止软土的挤出。

$$S_{shear} - d \leq \frac{1}{\left[ \frac{F_e (\sigma_{vu} - \sigma_{vp})}{2c_e} - 2 \right] \frac{1}{B} - \frac{1}{H_e}} \quad (27)$$

式中:  $H_e$  为被挤压软黏土层厚度;  $\sigma_{vu}$  为紧邻剪力墙的主动土压力侧, 被挤压软黏土层的总垂直应力平均值;  $\sigma_{vp}$  为紧邻剪力墙的被动土压力侧, 被挤压软黏土层的总垂直应力平均值;  $c_e$  为受挤压软黏土层总应力黏聚力。

## 7 中美规范对比分析

(1) 中美标准关于水泥搅拌桩的处治方式不同

美国标准路基边坡和路基中心桩采用了不同的布置方式, 边坡下水泥搅拌桩采用咬合桩剪力墙, 而中国铁路和公路规范路基边坡和中心水泥搅拌桩均采用同样布置, 桩与桩之间相互分离, 美标考虑了中心桩和边坡以下桩在受力上的差别, 剪力墙布置能够有效提高路基整体稳定性。

(2) 美标中竖向荷载全部由水泥搅拌桩承担

中国规范复合地基理论及设计中, 桩土应力比  $n$  值是一个重要参数, 作用在地表的总荷载由桩和土共同承担, 其分担关系由桩和土的支撑刚度比来具体确定<sup>[5]</sup>。采用水泥搅拌桩处治, 当垫层刚度较大, 桩承载较大, 桩土应力比偏大, 当垫层较薄, 路堤荷载增加导致桩体刺入垫层, 土体承载变大, 桩土应力比偏小<sup>[6]</sup>。而美国标准中水泥搅拌桩处治的地基竖向荷载在计算时全部考虑由桩承担, 不考虑桩间土支撑上部荷载的贡献。但在稳定性验算中, 美标也将桩和土体作为一个整体, 采用复合剪切模量进行考虑。

(3) 美国标准有最小置换率的要求

对于路基中心桩的桩距, 美国标准根据桩身抗压强度和所承受的压力确定了最小置换率, 因此路基中心桩的桩距不能过大。而中国规范只有在小型构造物(涵洞、挡墙、建筑物)下的水泥搅拌桩才考虑复合地基承载力的要求<sup>[2]</sup>。经对比研究, 不要求复合地基承载力时, 美标中心置换率高于中国规范, 考虑复合地基承载力则中国规范所要求的置换率高于美标。

(4) 中美标准对于水泥搅拌桩的破坏模式有不同的定义

美标考虑了路基中心桩压碎破坏、边坡整体稳定性破坏、剪力墙抗倾覆及承载力不足破坏、剪力墙外墙趾处承载力不足破坏、剪力墙垂直平面上剪切破坏、剪力墙之间土体挤压破坏共 6 种破坏模式, 而中国规范在水泥搅拌桩设计中仅考虑了整体稳定性破坏、下卧层承载力不足破坏两种破坏模式, 破坏模式的不同主要因为采用了不同的布桩方式。

(5) 中美标准安全度水平不同

美国规范整体稳定性计算安全系数取 1.5, 桩抗压强度计算、剪力墙抗倾覆、承载力计算和剪力墙抗整体推移计算时安全系数取 1.3, 根据不同的施工水平、地质参数取值情况和质量控制水平还可以采用不同的安全系数。而中国规范采用有效固结应力法时整体稳定性安全系数采用 1.2, 下卧层承载能力验算安全系数取 1.0<sup>[2]</sup>, 但是中国规范在桩身强度、桩间土承载力计算时考虑了折减系数, 两者对破坏模式的定义也有很大差别, 因此关于中美规范安全度水平的对比尚需进行更深入研究。

## 8 结语

目前中国学者尚未开展美国标准下水泥搅拌桩地