DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.004

透水性混凝土桩在黄泛区粉性土地基中的加固机理及效果研究

张宏博[1,2]，刘源[1,2]，陈晓光[3]，葛智[1,2]，宋修广[1,2]

（1.山东大学 土建与水利学院，山东 济南 250061；2.山东省路基安全工程技术研究中心；3.山东省电力工程咨询院有限公司）

摘要：透水性混凝土桩兼顾高强度与透水性，应用在以粉土、粉质黏土为主的黄河冲击平原区能有效地加速土体固结，减少工后沉降。为了从机理上对透水性混凝土桩应用于黄泛区平原地基处治的效果进行研究，基于室内模型试验，填料选用粉质黏土并分层进行注水、静置，确保其完全饱和，透水性混凝土桩体选择3种不同的空隙率，采用快速荷载法分级加载，对透水性混凝土桩复合地基承载特性及桩周土孔隙水压力消散规律进行了研究。得出如下结论：透水性混凝土桩能显著提高复合地基承载力，提高幅度在80%以上；加载过程中桩周土体的超静孔压得到了迅速的消散，桩周土体强度较原始强度提高了60%左右，且影响区域的半径在2.5倍桩径以上。

关键词：透水性混凝土；粉质黏土地基；复合地基承载力；固结沉降；模型试验

黄河冲积平原广泛分布于鲁西和鲁北，土质条件以粉质黏土、粉土为主，局部含淤泥夹层，土层深厚，地下水位较高，地表排水不畅。大量实测数据表明：该地区的地基强度低、固结速率慢，土质属高压缩性土。在其上直接修筑路基工程，地基承载力不足、工后沉降大，从而引起桥头跳车、路基失稳等病害，严重影响道路交通安全，加速路面结构破坏。为解决该问题，该地区常用地基处理方案主要有强夯法、复合地基法、排水固结法（堆载预压）等。强夯法经济、快速，但处理深度有限且高地下水位应用效果不佳；复合地基法建设费用高，处理深度较深。复合地基法以浆（粉）喷桩，CFG桩居多，这两类桩对控制加固区固结沉降效果较好，但同时由于增加了桩底下卧层的固结沉降，应用效果并不理想。排水固结法受建设工期限制，许多工程难以实施。因此，如何合理、有效地控制该区域路基工后沉降成为首要问题。

随着透水性混凝土路面的提出，由于透水性混凝土强度较高（E_C＝10～20 MPa），透水系数较大（0.1～0.5 cm/s），该材料逐渐被作为桩体应用于复合地基中。其作用机理为：透水性混凝土桩体兼具散体桩与

[9] 杨敏，朱碧堂，陈福全.堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J].岩土工程学报，2002(4).

[10] 杨敏，朱碧堂.堆载下土体侧移及对邻桩作用的有限元分析[J].同济大学学报，2003(7).

[11] 周健，亓宾，曾庆有.被动侧向受荷桩模型试验及颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报，2007(10).

[12] 王恺敏，王建华，陈锦剑，等.大面积堆载作用下饱和土中的桩基工作性状[J].上海交通大学学报，2006(12).

[13] 李忠诚，梁志荣.大面积堆载土体侧移模式及对邻近被动桩影响分析[J].岩土工程学报，2010(增刊1).

[14] 梁发云，黄茂松.被动单桩受轴向荷载作用耦合效应的初步分析[J].地下空间与工程学报，2010(1).

[15] 吴琼.侧向堆载作用下竖向受荷桩的受力性状[D].上海交通大学硕士学位论文，2011.

[16] 周德泉，颜超，罗卫华.复合桩基重复加卸载过程中临近桩变位规律试验研究[J].岩土力学，2015(10).

[17] 周德泉，黎冬志，冯晨曦，等.侧向重复加卸载下顶部约束双排倾斜摩擦桩变位规律试验研究[J].中外公路，2019(1).

[18] JGJ 79－2012 建筑地基处理技术规范[S].

[19] 周德泉，肖宏宇，雷鸣，等.重复加卸载条件下全风化泥质砂岩累积变形与湿化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报，2013(3).

收稿日期：2018－09－15

基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51208284）；山东省科技发展计划项目（编号：2013GSF11603）

作者简介：张宏博，男，博士，副教授.E－mail:zhanghongbo@sdu.edu.cn

刚性桩的优点，一方面可以利用自身强度提高复合地基承载力；另一方面在土体中形成竖向排水通道，加快施工期地基土中超孔隙水压力的消散，提高固结速率；同时，该桩体还具有明显的减压减震效应。

宋修广等通过监测透水性混凝土桩在振动沉管施工过程中桩周超孔隙水压力的变化规律，揭示了其透水效果。结果表明：对于高地下水位的粉性土地基，桩周土体的超孔隙水压力在沉管结束时达到最大值，之后消散速率较快，完全消散时间较短，且距桩越近，超孔隙水压力的上升与消散速率越快；超孔隙水压力在径向上与深度上大致呈现递减趋势，距桩越近，超孔隙水压力越大。目前关于透水性混凝土桩加固黄泛区地基处治效果，尤其是关于孔压累积与消散规律方面的研究缺乏相应的理论基础。

该文通过室内模型试验，研究不同空隙率透水性混凝土桩复合地基的承载特性，桩土应力比及桩周超孔隙水压力沿径向、纵向的分布规律。

1　模型试验设计

1.1　模型试验装置

为研究桩体不同空隙率条件下透水性混凝土桩承载特性及孔隙水压力累积与消散规律，设计模型试验装置如图 1 所示，力学简图如图 2 所示。包含模型箱、加载装置、数据监测仪器、量测系统。

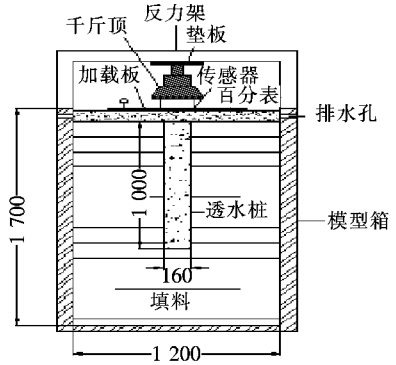

图 1　试验装置总体示意图（单位：mm）

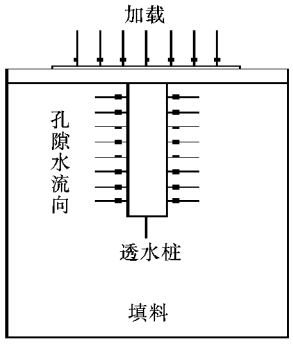

图 2　模型试验力学简图

（1）模型箱：长 2 m，宽 1.2 m，高 1.7 m，由 2 cm 厚钢板制作而成。

（2）加载装置：千斤顶、反力梁、加载板，加载板为边长 0.8 m、厚 2 cm 的钢板。

（3）监测仪器：传感器、百分表。

（4）量测系统：土压力盒、渗压计、动态应变测试仪。

（5）排水系统：模型箱两侧板距顶部 0.06 m 处沿模型箱长度方向间隔 0.1 m 开直径 $\phi=0.03$ m 的圆孔作为排水孔。

（6）桩体长 1 m，直径 0.16 m。

1.2　模型箱内填料的选取

试验填料取自山东省济阳县内。按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》要求测试填料相关的物理、力学指标，结果如图 3、表 1 所示。

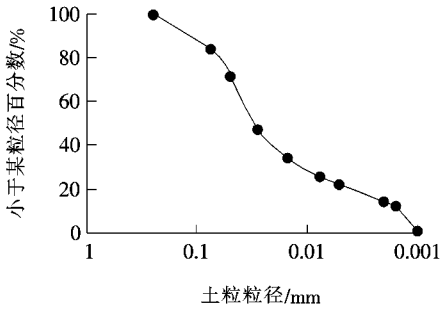

图 3　土颗粒分配曲线

表 1　试验填料基本力学性能指标

天然含水率/%	密度/(g·cm^{-3})	干密度/(g·cm^{-3})	饱和度/%	液限/%	塑性指数	初始孔隙比	压缩系数/(MPa^{-1})	压缩模量/MPa
18.6	1.88	1.59	72.0	25.8	18.9	0.697	0.22	7.71

由图 3 可得，粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量为 16.5%<50%，塑性指数>10，且：$C_u=d_{60}/d_{10}=38>$

5，$C_c=\frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}}=3.18>3$。故所取土样为级配不良的粉质黏土。

1.3 透水性混凝土桩的配比及试验工况

依据文献[17]，空隙率与透水性混凝土强度成负相关，与透水性成正相关。该文对比分析 3 种不同空隙率的桩体，其中桩体采用的透水性混凝土的配合比如表 2 所示，集料的级配见图 4，具体每种工况对应的桩体空隙率及强度见表 3，工况 4 为天然地基作为对比试验。桩长设为 1 m，桩径为 0.16 m，在标准条件下养护 28 d。

表 2 透水性混凝土配合比 kg/m³

水泥	水	集料	减水剂	化学添加剂
320	95	1 550	11.2	6.4

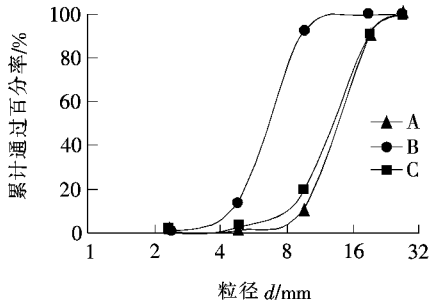

图 4 透水性混凝土集料级配曲线

表 3 试验工况

工况	名称	集料级配	空隙率/%	28 d 强度/MPa
1	大空隙	A	27.78	11.24
2	中空隙	B	20.09	14.64
3	小空隙	C	15.13	18.56
4	天然地基		—	

1.4 监测方案设计

监测目的：① 透水桩径向影响范围；② 透水桩深度方向影响范围；③ 透水桩承载能力；④ 桩土应力比。

为实现上述目的，在桩顶及桩体两侧如图5、6所示方式埋设土压力盒及渗压计，在加载板对称位置处安装百分表监测沉降。监测元件名称及属性见表 4。

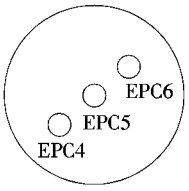

图 5 桩顶土压力盒布设图

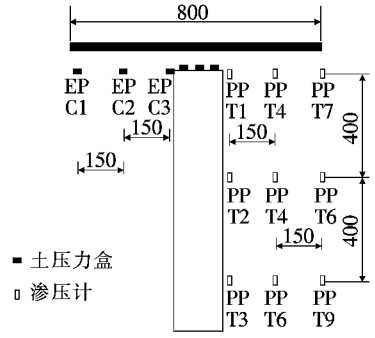

图 6 桩侧土压力盒及渗压计布设图(单位：mm)

表 4 监测元件属性

名称	型号	尺寸/(mm×mm)	数量/个	量程/kPa
应变式微型土压力盒	LY－350	ϕ17×8	6	100
应变式微型渗压计	YB－27K	ϕ31×15.5	9	200

1.5 试验流程

(1) 土体填筑

模型箱内土体共填筑 1.6 m 高，分多层填筑，每层填筑高度为 0.2 m，用夯锤压实，用环刀控制每层土体的压实度为 85%。

(2) 桩体安装方法

土体填筑到 0.8 m 高度并控制好压实度后，在土体上表面中心处开挖一个深度为 20 cm 的坑槽。将桩体放置在坑槽处并回填土进行压实，回填过程中严格保证桩体处于直立状态。

(3) 监测仪器埋设方法

土体填筑过程中，依据图 6 所示在指定位置处埋设土压力盒及渗压计。

(4) 土体饱和方法

土体每填筑 40 cm 后，根据试验土体的空隙比，计算土体饱和所需水量。通过水管向模型箱内注入计算所需水量，静置 3 d 后进行下一层土体的填筑与饱和。

(5) 铺设褥垫层

待土体填筑至与桩顶齐平，在桩顶中心如图 5 所示布置好土压力盒，而后铺设细砂作为褥垫层，厚度为 8 cm。

(6) 加载方法

参照 JGJ 106－2014《建筑桩基检测技术规范》，加载采用快速荷载法分级进行加载，共分为 10 级，每级所加荷载为 11 kPa。快速加载前，先进行预加载，

使加载板与砂垫层之间紧密接触。考虑到透水性混凝土桩体的排水性，若一级加载时间过长可能导致桩周孔隙水压力消散为 0，无法观测到桩周孔隙水压力的消散规律。因此此处加载时间间隔并没有严格依据规范。该次试验前后两级加荷的时间间隔定为 10 min，加载过程中每隔 1 min 测读并记录 1 次位移值，连续 3 次竖向位移读数之差不大于 0.01 mm 作为该级荷载下的稳定沉降值。最后一级荷载持续加载 3 h，每隔 5 min 测读一次。

(7) 排水方法

铺设褥垫层时，加载板范围以外的褥垫层与土体的接触面处设置一定的倾角，作为排水通道。由桩体排出的水进入褥垫层后沿着坡面向模型箱四周流动并通过模型箱侧板上部的排水孔向外排出。

2　透水性混凝土复合地基模型试验结果分析

2.1　荷载位移特性

图 7 为工况 1～4 的荷载－沉降曲线。由图 7 可知：同一加载条件下，采用透水性混凝土桩进行处治的复合地基沉降量明显低于天然地基；同时当 $P \leqslant 40$ kPa 时，复合地基与天然地基 $P-s$ 曲线较为接近，但随着荷载的增加，天然地基 $P-s$ 曲线呈现明显的拐点，达到了极限荷载，并可由此确定天然地基承载力为 44 kPa；而复合地基仍呈现近线性的变化规律，其 $P-s$ 曲线较为接近，总体表现为空隙率越小，承载力相对越高的特点。依据 DGJ 08－37－2012《岩土工程勘察规范》，按 s/b 确定地基承载力特征值，b 为承压板的宽度0.8 m。规范同时提出，对于粉土，可取 $s/b=0.01$，由此确定 3 种工况（不同空隙率）条件下复合地基承载力分别为 79、85、90 kPa，比天然地基承载力提高幅度分别为79.5%、93.2%、105%。

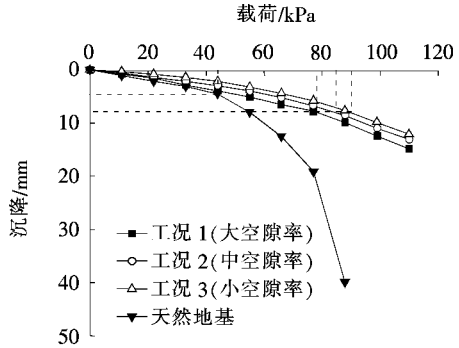

图 7　工况 1～3 下 $P-s$ 曲线

2.2　桩土应力比特性分析

图 8 为工况 1～3 的桩土应力比曲线图。

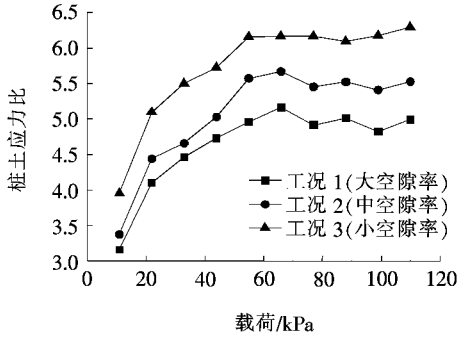

图 8　桩土应力比曲线

由图 8 可知：当上覆荷载 $P \leqslant 55$ kPa 时，随着荷载增加，桩土应力比逐渐增大；当 $P > 55$ kPa 后，桩土应力比 n 逐渐趋于定值。同时，空隙率越大，桩体强度越低，桩土应力比相对越低，桩间土体承载力发挥越充分。3 种不同空隙率条件下的桩土应力比稳定值分别为 4.9、5.4、6.1。

2.3　桩周孔隙水压力累计与沉降规律

(1) 不同空隙率条件下孔压变化对比分析

以位于桩顶侧面的孔隙水压力计 PPT1 为例，绘制 3 种不同空隙率透水性混凝土桩复合地基与天然地基（对照工况）孔压累积与消散规律，如图 9、10 所示。

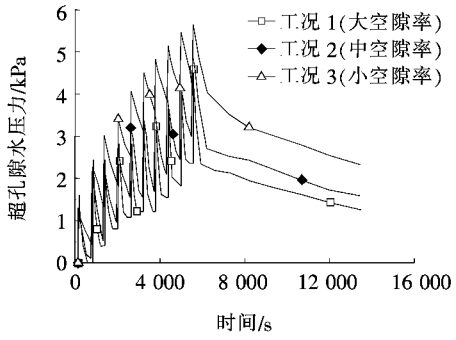

图 9　工况 1～3 下 PPT1 记录曲线

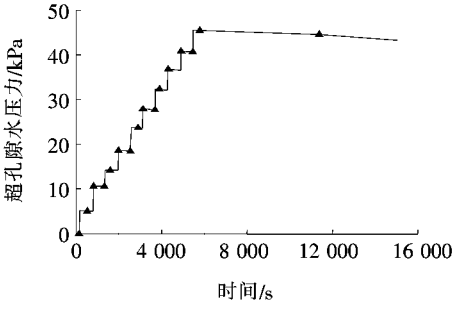

图 10　天然地基下 PPT1 记录曲线

对比图 9、10 可知：采用透水性混凝土桩后，孔压累积峰值明显减小，由天然地基的 45 kPa 减小为 4.5～5.5 kPa，减小幅度约为 90%。这表明在加载过程中，大部分孔压增量 Δu 已通过透水性混凝土桩发生了快速消散，地基由未设置透水混凝土桩的不排水剪切变为排水剪切，加快了土体固结沉降速率，避免了因 Δu 增加而带来的土体抗剪强度 τ 与压缩模量 E 大幅降低的问题，提高了地基稳定性，减少了地基的压缩沉降量。同时，对比 3 种不同空隙率条件下孔压消散规律，可知空隙率越高，孔压消散速度相对较快，但孔压峰值与消散速率差别很小，这表明透水性混凝土桩体的空隙率大小对土体的固结沉降效果影响基本相同。

(2) 透水性混凝土桩径向影响范围研究

以工况 1 大空隙率透水性混凝土桩为例，图 11 为工况 1 桩顶周围超孔隙水压力随时间的变化曲线，其消散速率沿着远离桩的方向大致为递减趋势。

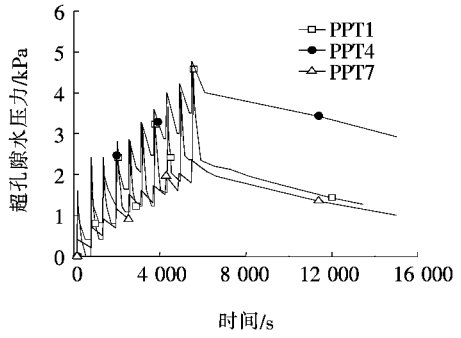

图 11 桩顶渗压计记录超孔隙水压力随时间的变化曲线

从图 11 可以看出：① 1 号渗压计受桩体调节作用影响附加应力增长最大，孔隙水压力增长幅值最大，但由于距桩最近，因此孔隙水压力消散也最快；② 4 号渗压计受初始加载时孔隙水压力上升的幅值较 1 号小，但同时由于距桩的距离增加，孔隙水压力消散的速率相对降低，因此多级加载后累积孔隙水压力超过了 1 号渗压计；③ 7 号渗压计距桩最远，受桩体调节作用影响最小，同时消散速度也相对最慢；④ 最后一级加载持续 3 h：持续加载过程中，径向方向 3 个渗压计的孔压随时间变化曲线基本平行。7 号渗压计距桩中心约为 2.5 倍桩径，其消散速率与紧贴桩边的 1 号渗压计相比基本一致，由于模型箱的尺寸限制，7 号渗压计埋设处以外的孔压消散规律无法监测到。

由以上结果分析，可得透水性混凝土桩的影响半径在 2.5 倍桩径以上，换算成桩间距即为 5 倍桩径以上，范围较大。现有实际工程中桩间距在 4～6 倍桩径范围内，由于透水性混凝土桩的造价较高，为了充分发挥其排水特性，可采用透水性混凝土桩与 CFG 桩联合使用的方式，两种桩型间隔布设。

(3) 桩周孔隙水压力沿深度变化规律

图 12 为工况 1 桩侧不同深度处超孔隙水压力随时间的变化曲线。从图中可以看出桩长范围内，沿深度方向超孔隙水压力消散速率略有降低。

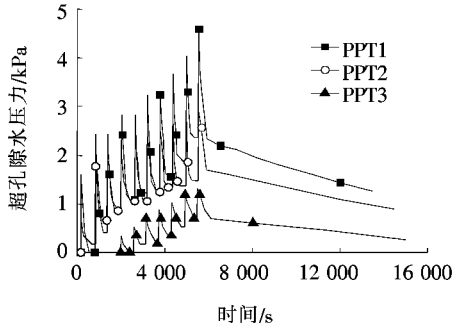

图 12 桩侧渗压计记录超孔隙水压力随时间的变化曲线

2.4 透水性混凝土桩合理空隙率分析

根据桩土应力比分析，桩体空隙率越大，桩身强度越低，桩土荷载分担比越小，桩间土体发挥作用越大，桩底附加应力越小，适用于压缩层深厚且无合适持力层的土质条件；对于小空隙率桩体，适用于桩底具有明显持力层的软弱土层；介于两者之间的土层则可选用中空隙率的桩型。

3 复合地基承载力验算

依据复合地基承载力计算公式计算透水性混凝土桩复合地基承载力：

$$f_{spk}=[1+m(n-1)]\alpha\beta f_{sk} \tag{1}$$

式中：n 为桩土应力比；f_{spk} 为复合地基承载力特征值；f_{sk} 为天然地基承载力特征值，已通过试验测得为 44 kPa；m 为面积置换率；β 为桩间土承载力折减系数；α 为桩间土强度提高系数。

$$m=\frac{A_p}{A_e} \tag{2}$$

式中：A_p 为桩的截面积；A_e 为单桩承担的处理面积，取加载板的边长 0.8 m 作为 A_e 的直径。

由于试验方法为先安装桩体，后逐层填筑桩周土，故桩体不会对桩周土产生扰动作用，因此桩体对桩周土的挤密效果可以忽略，故 β 取 1，代入其余参数，反算 3 种工况下桩间土强度提高系数 α，其结果见表 5。

表 5　试验结果与计算结果对比

工况	桩土应力比 n	复合地基承载力/kPa	桩间土强度提高系数 α
1(大空隙率)	4.9	79	1.55
2(中空隙率)	5.4	85	1.64
3(小空隙率)	6.4	90	1.68

由表 5 可知：3 种空隙率大小的透水性混凝土桩体对于桩周土体的强度均有大幅度提高，其强度提高幅度为 55%～70%。这表明在加载过程中，相较于普通刚体桩与地基形成复合增强体的作用机理，透水性混凝土桩还能通过自身的排水特性，使桩周土体中的空隙水沿桩体迅速排出，加速了桩周土体的固结，进而提高桩间土体的强度及压缩模量。

4　结论

(1) 无论采用哪种空隙率，透水性混凝土桩均显著提高了地基承载力，其提高幅度至少在 80%以上。该次试验采用面积置换率较小，远远低于实际工程条件下的面积置换率。因此，实际工程中应用透水性混凝土桩处治地基，复合地基承载力将得到更大的提升。

(2) 透水性混凝土桩体能有效加速桩周土体孔压的消散，增加施工期固结沉降，从而减少工后沉降，且桩体空隙率大小对桩周土体的固结效果影响不大。

(3) 受限于模型箱的尺寸，监测范围在以桩中心为圆心，半径为 2.5 倍桩径的同心圆柱体内。此圆柱体区域内，径向范围孔压消散速率基本一致，随着深度的增加，消散速率略有减小。

(4) 透水性混凝土桩的排水特性在加速土体的固结沉降的同时，显著提高了桩周土体的强度，提高幅度约为 60%。

参考文献：

[1] 宋修广，张宏博，王松根，等.黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J].岩土工程学报，2010(10).

[2] 高鹏，吕颖慧.山东黄河冲积平原区地基土的压缩模量与标准贯入试验击数相关性研究[J].土工基础，2015(2).

[3] 王青松，张伟，席文勇.黄河冲积平原粉土地基载荷试验研究[J].施工技术，2011(S1).

[4] 胡长明，梅源，王雪艳.离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J].岩土力学，2012(10).

[5] 张宏博，厉超，陈晓光，等.强夯加固粉土地基超孔隙水压力增长规律研究[J].铁道建筑，2015(8).

[6] 宋修广，陈晓光，于一凡.粉质粘土路基冲击压实动力响应数值模拟研究[J].建筑科学与工程学报，2016(2).

[7] 张宏博，厉超，宋修广，等.强夯加固粉土地基地面振动衰减规律研究[J].地下空间与工程学报，2015(5).

[8] 胡海英，杨光华，张玉成，等.基于沉降控制的刚性桩复合地基设计方法及应用[J].岩石力学与工程学报，2013(10).

[9] 曹文贵，杨泽华.柔性基础下碎石桩加筋复合地基沉降分析方法[J].岩土工程学报，2012(11).

[10] 蒋建清，曹国辉，刘热强.排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验[J].岩土力学，2015(S2).

[11] 张仪萍，严露，俞亚南，等.真空预压加固软土地基变形与固结计算研究[J].岩土力学，2011(S1).

[12] Huang B，Wu H，Shu X，et al. Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer－Modified Pervious Concrete[J]. Construction & Building Materials，2010，24(5)：818－823.

[13] Chandrappa A K，Biligiri K P. Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material－Research Findings and Future Prospects：A State－of－the－Art Review[J]. Construction & Building Materials，2016，111：262－274.

[14] 张娜，崔新壮，张炯，等.路堤荷载作用下透水性混凝土桩减压降沉效应研究[J].山东大学学报：工学版，2013(4).

[15] 宋修广，于一凡，张宏博，等.透水性混凝土桩施工中超孔隙水压力变化特性试验[J].建筑科学与工程学报，2016(1).

[16] JTG E40－2007　公路土工试验规程[S].

[17] Pieralisi R，Cavalaro S H P，Aguado A，et al. Advanced Numerical Assessment of the Permeability of Pervious Concrete[J]. Cement & Concrete Research，2017，102：149－160.

[18] JGJ 106－2014　建筑桩基检测技术规范[S].

[19] GB 50021－2001　岩土工程勘察规范(2009 年版)[S].

[20] JGJ 79－2012　建筑地基处理技术规范[S].

[21] DGJ 08－37－2012　岩土工程勘察规范[S].