

水泥改良砂土无侧限抗压强度试验研究

陈维超^{1,2}, 杨伟军²

(1.湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.长沙理工大学)

摘要: 结合某工程水泥改良砂土试验配比结果,研究了水泥改良砂土无侧限抗压强度与水泥掺入量、养护龄期、水灰比变化的关系。研究表明:水泥改良砂土无侧限抗压强度随水泥掺入量和养护龄期的增加而提高,与水泥掺入量呈幂函数增长关系,与养护龄期呈指数函数增长关系,其早期强度增长速率快,后期强度增长速率放缓并趋于稳定;水泥改良砂土无侧限抗压强度随水灰比增大而降低,龄期越大,无侧限抗压强度的衰减率随水灰比增加而增大;通过回归分析,建立了水泥改良砂土无侧限抗压强度与水泥掺入量、养护龄期的函数关系式,提出了表征水泥空隙率、水灰比、水泥掺入量以及养护龄期因素综合影响的综合表征系数,水泥改良砂土无侧限抗压强度与综合表征系数呈较好的幂函数关系。

关键词: 水泥土; 改良砂土; 无侧限抗压强度; 水泥掺入量; 养护龄期

水泥改良土作为一种建筑材料,已广泛应用于公路及铁路路堤基床填筑、深基坑搅拌桩及软土地基处理等工程领域。中国许多学者对水泥改良土的物理力学特性以及工程应用做了深入的研究。颜胜才以粉土为原材料,通过试验研究了水泥改良土击实性、水稳性、强度特性、刚度特性等物理力学特性,结果表明水泥掺量对水泥改良土水稳性的影响及养护龄期对强度的影响显著;陈瑞生等分析了深层搅拌桩水泥土无侧限抗压强度的影响因素,其中水泥掺入量对桩体强度的影响较大;肖桃李等以杂填土为原土,研究了不同水泥掺入量和不同龄期等条件下水泥土无侧限抗压强度的变化规律,增加水泥掺入量其水泥土的抗压强度增大,水泥土的抗压强度与龄期增长呈三次函数变化;任辉明等开展了水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验,研究了不同水泥掺量、养护龄期、压实系数和水泥强度等级下试件强度变化规律,结果表明:水泥改良风积沙强度随水泥掺量、压实系数的增大而提高,并存在良好的线性和多项式拟合关系,龄期效应对其强度影响显著,前期强度增长速率较快,而后期强度增长速率较慢;高建喜等研究了小龄期黏土水泥土无侧限抗压强度随养护龄期、水泥掺入比的变化规律,结果表明:水泥土无侧限抗压强度随水泥掺入比增加而增加,在实际工程中,建议合理的掺入比控制为10%~16%;水泥土无侧限抗压强度与养护龄期呈线性增加。阮锦楼

等研究了粉质黏土水泥土无侧限抗压强度与水泥掺入比及龄期的变化关系,结果表明:水泥土的无侧限抗压强度随着水泥掺入比和养护龄期的增加而增大;水泥土无侧限抗压强度的增大速率随龄期的增大而逐渐减小,随着水泥掺入比的增加而增大;随着水泥掺入比的增加,水泥土的破坏模式由塑性破坏逐渐变为脆性破坏;通过回归分析,建立了水泥土的无侧限抗压强度随掺入比及龄期的数学表达式。

该文依托加蓬共和国 Port Gentil—Omboue 道路,由于该路段地层结构以松散—中密的细砂、中砂为主,其砂土黏聚力低、承载力差,难以满足道路路基床填筑的要求,因而采用水泥改良砂土应用于路基基床填筑。对水泥改良砂土的力学性能进行研究以指导工程施工。

1 试验设计

根据现场砂土地质情况,试验对3种类型的砂土进行改良,研究水泥改良砂土的力学特性,砂土的渗透系数 k 分别为0.11、0.13、0.93 cm/s,其物理力学性质见表1;改良剂采用P.O.42.5级普通硅酸盐水泥,水泥的物理力学性质见表2;试模采用70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,其中试验设计参数为:水泥掺入量为10%、15%、20%、25%、30%,水灰比为0.4、0.5、0.6、

收稿日期:2019-02-20

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2015JJ4106);中国路桥工程有限责任公司科技计划项目(编号:2014C005)

作者简介:陈维超,男,博士,高级工程师.E-mail:wlrwc@163.com

0.8、1.0,养护龄期为 3、7、14、28、56、90 d。

试样制作时,根据水泥掺入量及水灰比在砂土中掺入相应质量的水泥,均匀搅拌后将试料分两层装入试模内并予以压实,试块表面抹平并盖上防水分蒸发塑料布后放置阴凉处,试块 24 h 后脱模,并放入养护温度为 $(20\pm1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 95%的保湿箱进行恒温养护至规定的龄期,每种试样制备 3 个。达到龄期后采用液压压力机进行无侧限抗压强度试验,加载时采用应变控制方式进行加载。

2 试验结果与分析

2.1 水泥掺入量对无侧限抗压强度的影响特性

在砂土中掺入水泥,水泥水化反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙等产物,通过一系列离子交换、胶结、凝硬作用与土体颗粒发生物理化学作用,增加土体的强度。图 1~3 为水泥改良砂土无侧限抗压强度随水泥掺入量变化的试验结果。

表 1 砂土物理力学性质

土样	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含 水率/%	相对 密度	孔隙比	空隙率/ %	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
S1	1.95	21.98	2.69	0.68	40.31	0.11
S2	1.93	22.81	2.64	0.68	40.63	0.13
S3	1.96	20.72	2.79	0.72	41.95	0.93

表 2 水泥物理力学性质

烧失量/ %	细度/ %	初凝时 间/min	终凝时 间/min	安定性	抗折强 度/ MPa	抗压强 度/ MPa
≤ 2.5	1.2	120	240	合格	≥ 7.5	≥ 48.0

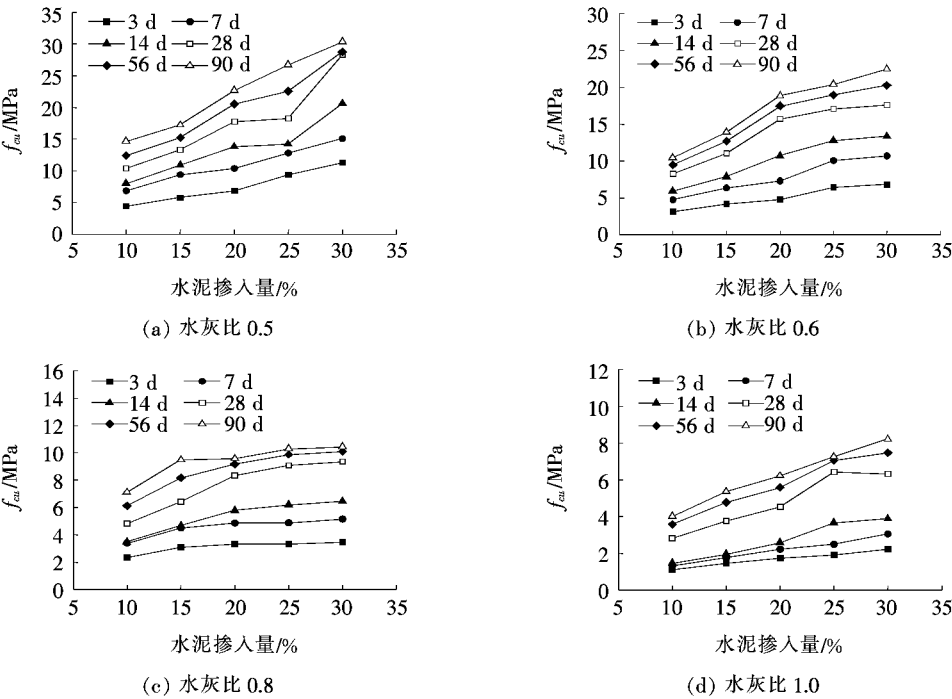


图 1 无侧限抗压强度与水泥掺入量的关系(S1)

从图 1~3 可以看出:水泥改良砂土无侧限抗压强度随水泥掺入量增加而提高,龄期越长,水泥改良砂土无侧限抗压强度随之增大;以水灰比 0.6 为例,龄期从 3 d 增长至 90 d,水泥掺入量为 10%时,砂土样 S1

的水泥改良砂土无侧限抗压强度由 3.16 MPa 增至 10.43 MPa,S2 无侧限抗压强度由 1.97 MPa 增至 6.56 MPa,S3 无侧限抗压强度由 2.94 MPa 增至 5.74 MPa,增加水泥掺入量所引起的无侧限抗压强度随养护龄期

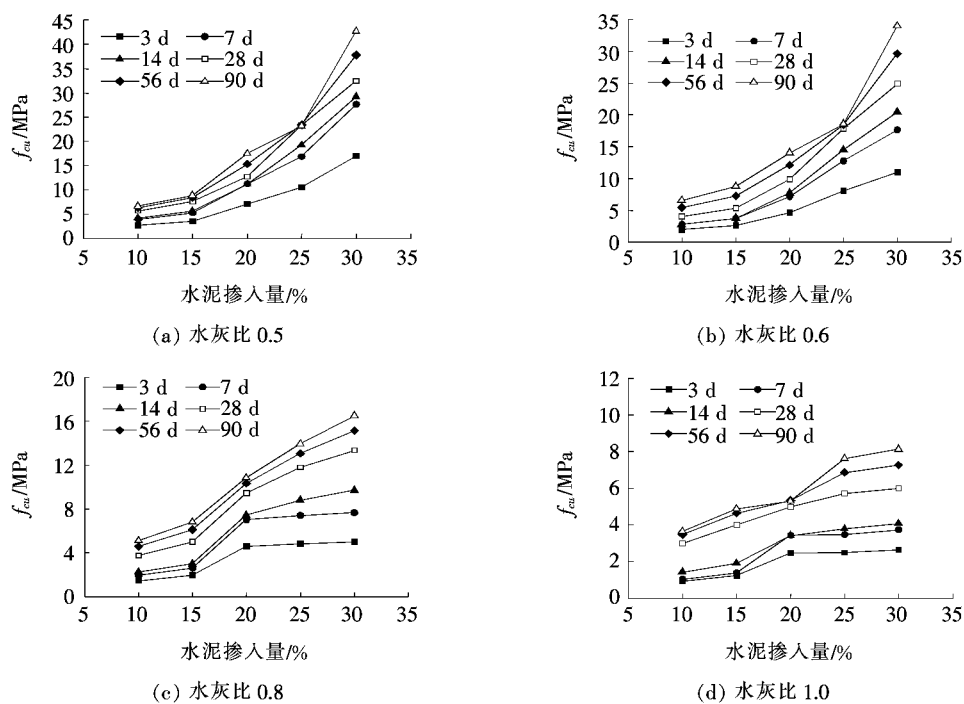


图 2 无侧限抗压强度与水泥掺入量的关系(S2)

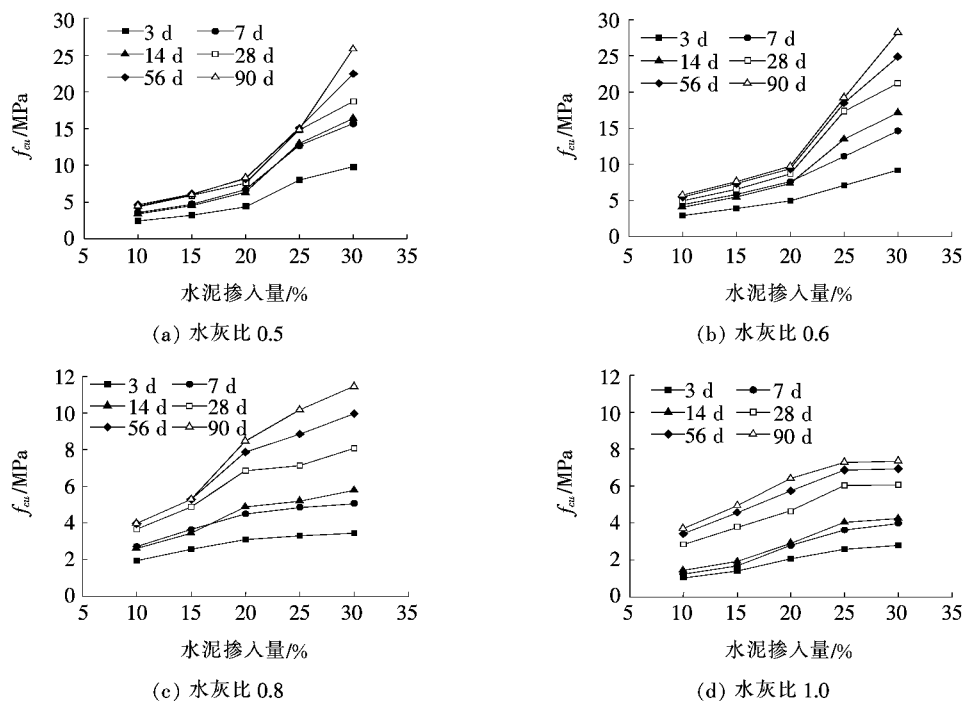


图 3 无侧限抗压强度与水泥掺入量的关系(S3)

的增加而增大。

水灰比为 0.5、0.6 时,水泥改良砂土无侧限抗压强度与水泥掺入量基本呈幂函数关系,当水泥掺入量达到 25% 时,水泥改良砂土 28 d 后期无侧限抗压强度增长幅度较小。水灰比为 0.8、1.0,水泥掺入量大于 20% 时,水泥改良砂土无侧限抗压强度随水泥掺入量

的增加而趋向平缓。水泥掺入量小于 25% 的水泥改良砂土无侧限抗压强度随龄期增长幅度小,这主要由于少量的水泥与砂土反应较弱,水泥改良砂土固化程度低,强度离散性较大。

通过以上分析可得,在水灰比不变的前提下,水泥改良砂土无侧限抗压强度与水泥掺入量存在一定的关

系,根据水泥掺入量可将水泥改良砂土分为非反应区、反应区和惰性区3个阶段,当水泥掺入量低于10%时,水泥改良砂土强度增长缓慢,这是因为土粒间水泥水化反应产物过少,对土体强度提升不明显,将这一区段划分为非反应区;随着水泥掺入量的增加,土粒间的水泥水化反应产物增多,土粒之间形成较强的黏结力,水泥改良砂土强度增加速率逐渐变大,进入反应区;当进一步增加水泥掺入量,土体中过多的水泥得不到充分利用,水泥改良砂土的强度随水泥掺入量增加而增

长的速率减缓,进入惰性区。水泥改良砂土无侧限抗压强度 f_{cu} 与水泥掺入量 a_w 存在较好的幂函数关系:

$$f_{cu} = a \cdot a_w^b \quad (1)$$

以渗透系数 $k_1=0.11$ cm/s土样、龄期28 d为例,水灰比为0.5时, $a=0.034\ 71$, $b=2.011\ 07$,相关系数 $R^2=0.983\ 86$;水灰比为0.6时, $a=0.0211\ 9$, $b=2.079\ 59$,相关系数 $R^2=0.987\ 96$ 。

2.2 养护龄期对无侧限抗压强度的影响特性

图4~6为水泥改良砂土无侧限抗压强度随养护

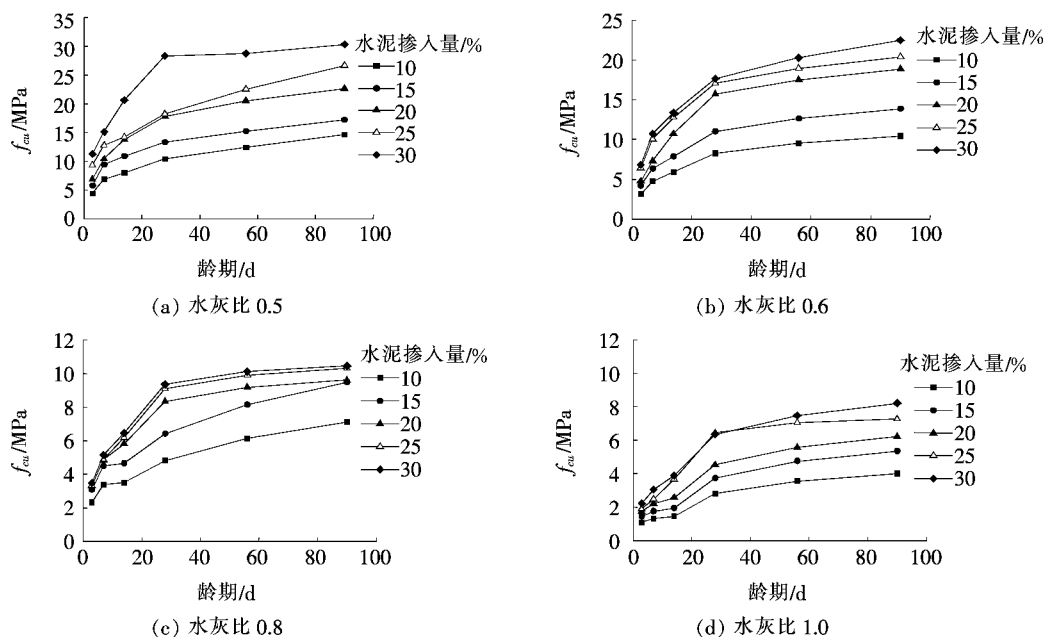


图4 龄期对无侧限抗压强度的影响(S1)

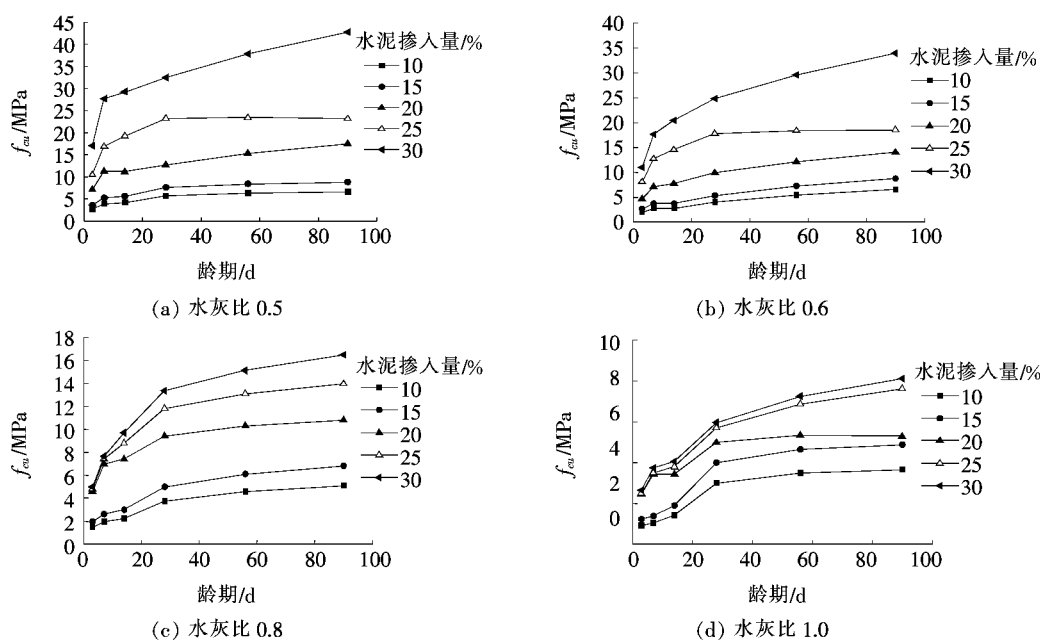


图5 龄期对无侧限抗压强度的影响(S2)

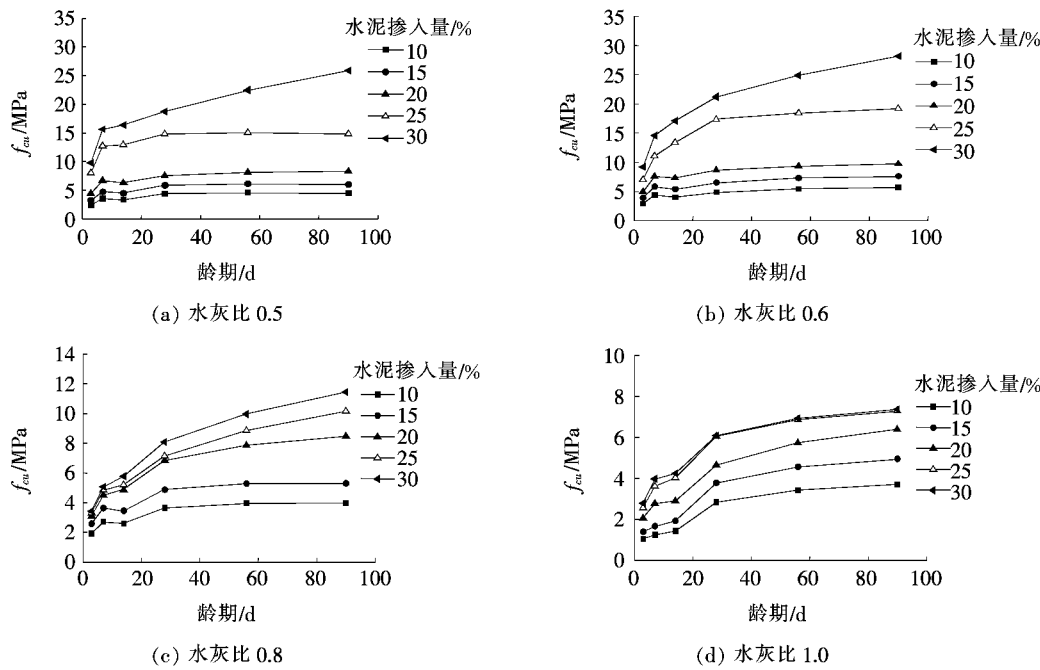


图 6 龄期对无侧限抗压强度的影响(S3)

龄期变化的试验结果。

从图 4~6 可看出:在同一水灰比、水泥掺入量条件下,养护龄期 28 d 前,水泥改良砂土无侧限抗压强度随龄期增加快速提高;养护龄期 28~90 d 时,水泥改良砂土无侧限抗压强度随龄期增加缓慢增长并趋于稳定。对以上数据进行统计分析,在同一条件下,若以 28 d 的强度为标准强度值,则水泥改良砂土各龄期无侧限抗压强度与标准强度的关系如表 3 所示,水灰比小于等于 0.6、水泥掺入量 15%~25%时取大值。

表 3 水泥改良砂土无侧限抗压强度 $f_{cu,t}$ 与 $f_{cu,28d}$ 的关系

项目	$f_{cu,t}$	项目	$f_{cu,28d}$
$f_{cu,3d}$	0.30~0.55	$f_{cu,14d}$	0.50~0.90
$f_{cu,7d}$	0.40~0.80	$f_{cu,90d}$	1.0~1.4

以砂土样 S1 为例,若以 90 d 的水泥改良砂土无侧限抗压强度为标准值,对 120 组水泥改良砂土各龄期无侧限抗压强度进行统计,水灰比为 0.5、0.6、0.8 时,各龄期无侧限抗压强度比值为:

$f_{cu,3d} : f_{cu,7d} : f_{cu,14d} : f_{cu,28d} : f_{cu,56d} : f_{cu,90d} = 0.30 : 0.50 : 0.60 : 0.80 : 0.90 : 1.0$, 其中 $f_{cu,t}$ 表示龄期为 t 的水泥改良砂土无侧限抗压强度。从各龄期无侧限抗压强度相对比值可看出:水泥改良砂土 0~3、3~7、7~14、14~28、28~56、56~90 d 的日均强度增长值分别约为 $f_{cu,90d}$ 标准值的 10%、5%、1.4%、1.4%、0.36%、0.18%,其水泥改良砂土早期强度增加

速度快,后期强度增长速度变缓。

当水灰比为 1.0 时,则各龄期无侧限抗压强度比值为:

$$f_{cu,3d} : f_{cu,7d} : f_{cu,14d} : f_{cu,28d} : f_{cu,56d} : f_{cu,90d} = 0.25 : 0.35 : 0.40 : 0.75 : 0.90 : 1.0.$$

由图 4~6 还可知:水泥改良砂土无侧限抗压强度与龄期呈较好的指数函数关系式,可用下式表示:

$$f_{cu} = a - b \cdot c^t \tag{2}$$

式中: f_{cu} 为水泥改良砂土龄期为 t 的无侧限抗压强度 (MPa); a 、 b 、 c 为回归系数。

以砂土样 S1 为例,对图 4 试验数据进行回归分析,其回归分析结果见表 4。

表 4 砂土样 S1 回归分析结果

水灰比	水泥掺入量/%	a	b	c	R^2
0.5	10	14.942	10.894	0.970	0.980 6
	15	16.758	11.694	0.954	0.967 7
	20	22.358	17.423	0.953	0.993 8
	25	29.614	20.629	0.980	0.989 3
	30	30.136	24.001	0.931	0.987 6
0.6	10	10.408	8.122	0.956	0.993 8
	15	13.885	10.826	0.956	0.993 8
	20	18.782	16.672	0.947	0.995 6
	25	20.106	15.892	0.944	0.993 8
	30	22.184	17.057	0.954	0.990 5

续表 4

水灰比	水泥掺入量/%	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
0.8	10	7.979	5.766	0.979	0.985 3
	15	10.621	7.678	0.979	0.985 6
	20	9.635	7.388	0.947	0.989 9
	25	10.369	8.409	0.944	0.991 2
	30	10.508	8.437	0.941	0.990 7
1.0	10	4.435	3.748	0.975	0.976 2
	15	5.927	5.003	0.975	0.976 5
	20	6.651	5.514	0.971	0.983 6
	25	7.470	6.855	0.950	0.975 4
	30	8.470	7.099	0.963	0.990 7

由表 4 可知:拟合曲线相关系数 R^2 均在 0.95 以上,说明水泥改良砂土无侧限抗压强度与龄期的关系按照指数函数来拟合,其结果较好。随着龄期的增长,水泥改良砂土无侧限抗压强度逐渐增大,并趋向于稳定,水泥改良砂土无侧限抗压强度与龄期的指数函数,其常数 a 可选取 $f_{cu,90d}$ 的强度为标准值, b 为关于水灰比、水泥掺入量的函数,常数 c 的回归分析值为 0.93~0.98,可取 c 值为 0.95。

2.3 水灰比对无侧限抗压强度的影响特性

图 7、8 为水灰比对水泥改良砂土无侧限抗压强度

影响的试验结果。

由图 7、8 可知:① 在同一水泥掺入量、同一龄期的条件下,水泥改良砂土无侧限抗压强度随水灰比的增大而降低;在同一水泥掺入量下,龄期越长,水泥改良砂土无侧限抗压强度随水灰比增加其衰减率增大;15%、20%水泥掺入量的强度衰减率比 25%、30%水泥掺入量的强度衰减率要小,但 25%、30%水泥掺入量低水灰比改良砂土的早期强度及后期强度均较高;② 各龄期的水泥改良砂土无侧限抗压强度曲线随着水灰比增大逐渐收拢,表明在同一水泥掺入量、同一水灰比条件下,随龄期增长水泥改良砂土无侧限抗压强度增长值逐渐减小;对于采用水泥浆液注浆加固的砂土,根据已有工程经验,建议注浆浆液水灰比为 0.5~0.6。

3 水泥改良砂土强度综合表征参数

水泥改良砂土随水泥掺入量增加或龄期的增长,水化反应生成的水化硅酸钙和水化铝酸钙等化学产物填充砂土颗粒的孔隙,从而减少水泥改良砂土的孔隙比或空隙率,增加土体的密实度及土体颗粒之间的接触面积,提高了水泥改良砂土的强度。基于试验结果,采用综合表征参数 PCT 反映水泥掺入量、龄期、水灰比及空隙率对水泥改良砂土无侧限抗压强度的影响:

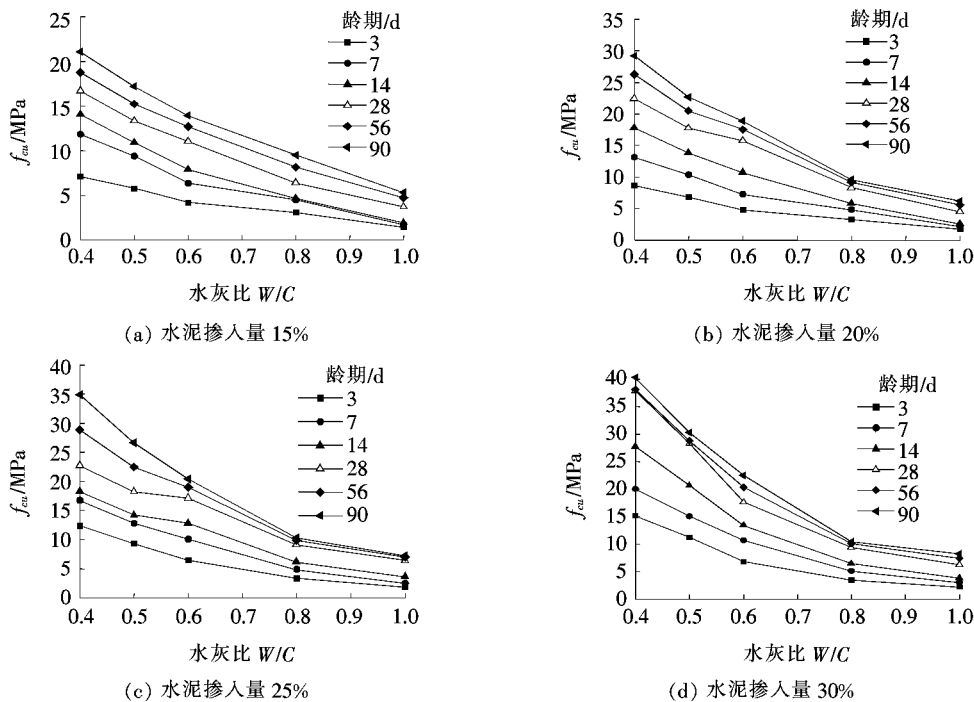


图 7 水灰比对无侧限抗压强度的影响(S1)

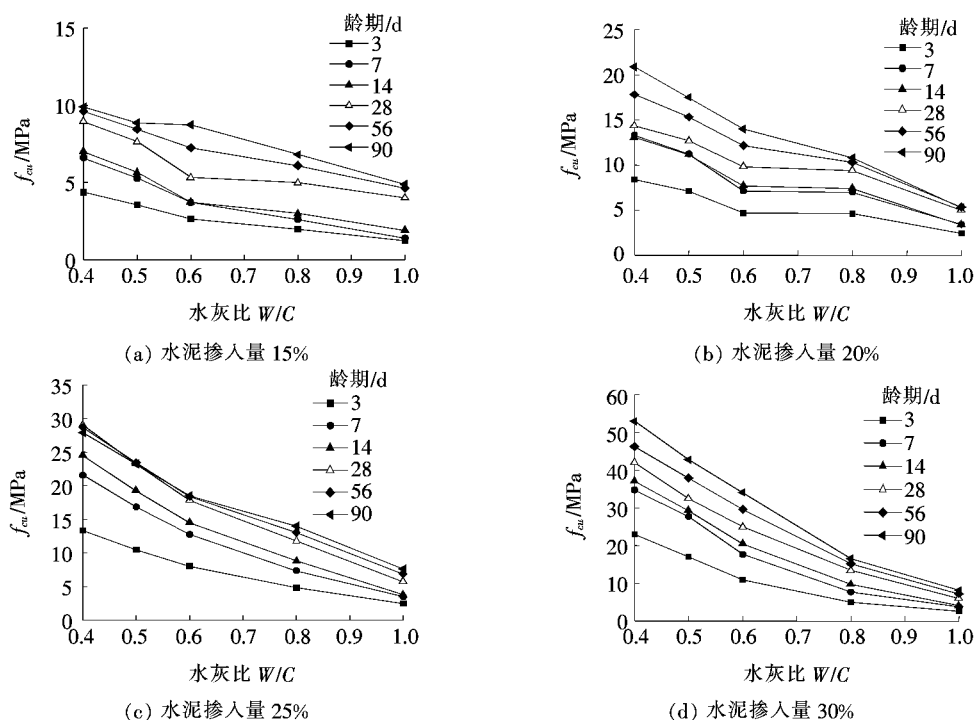


图 8 水灰比对无侧限抗压强度的影响(S2)

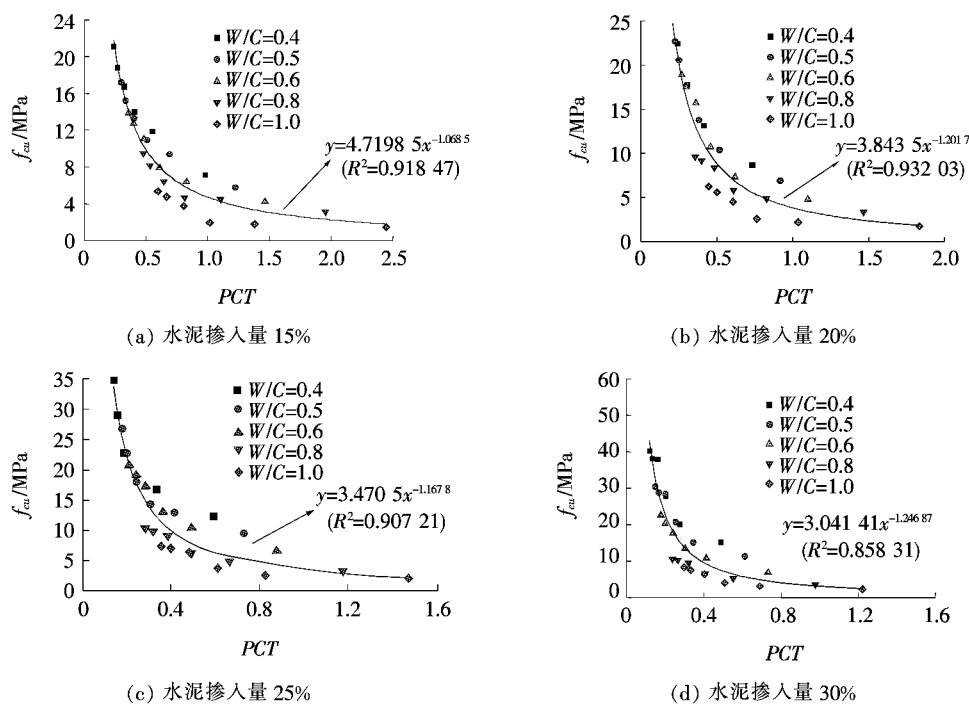
$$PCT = \frac{nw_c}{a_w \ln T} \quad (3)$$

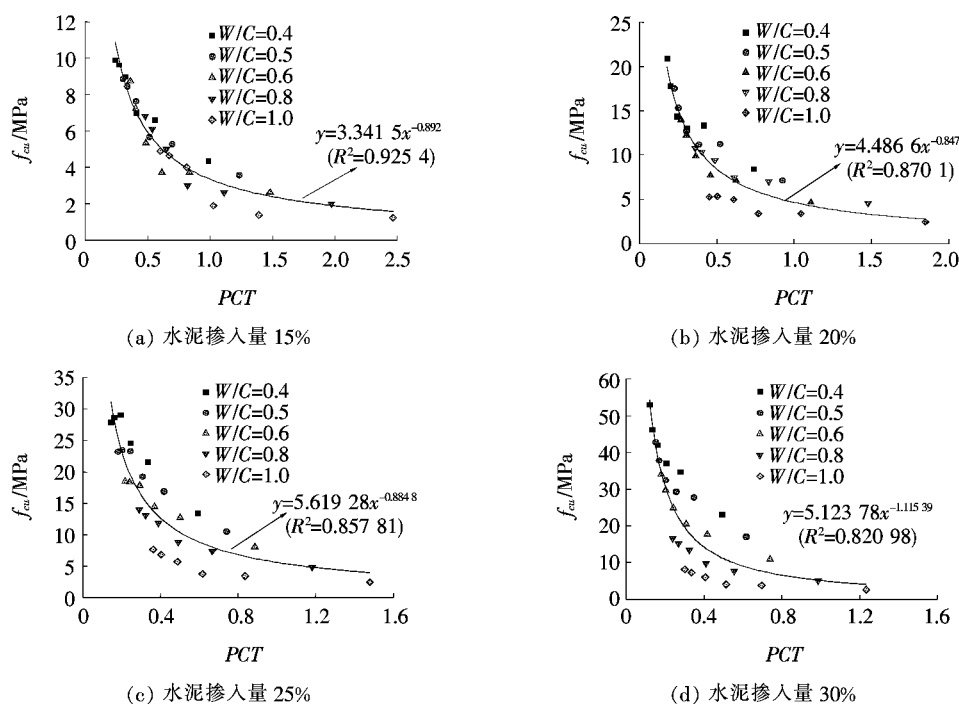
式中: n 为土体空隙率(%); w_c 为水灰比; a_w 为水泥掺入量(%); T 为养护龄期(d)。

图 9、10 为砂土样 S1、S2、水泥改良砂土无侧限抗

压强度与 PCT 的关系。

由图 9、10 可知: 水泥改良砂土无侧限抗压强度与综合表征系数呈较好的幂函数关系; 空隙率为 40.13% 的砂土, 水泥掺入量 30% 时, 其相关系数 R^2 为 0.86, 水泥掺入量为 15%、20%、25% 时, 其相关系数 R^2 均

图 9 无侧限抗压强度与 PCT 的关系($n=40.31\%$)(S1)

图10 无侧限抗压强度与 PCT 的关系 ($n=40.63\%$) (S2)

大于 0.90, 表示采用综合表征系数 PCT 可以描述 90% 以上水泥改良砂土强度的因素; 对于空隙率为 40.63% 的砂土, 水泥掺入量为 15% 时, 其相关系数 R^2 大于 0.92, 水泥掺入量为 20%、25%、30% 时, 其相关系数 R^2 均大于 0.82, 表明采用综合表征系数 PCT 可描述 82% 以上水泥改良砂土强度的因素, 满足工程需要。

通过以上回归分析, 水泥改良砂土无侧限抗压强度可采用以下公式进行计算:

$$f_{cu} = A \cdot PCT^{-B} \quad (4)$$

式中: A 、 B 为经验参数(正值), 与土体性质有关, 可依靠经验或试验获得。

由式(3)、(4)可知: 水泥改良砂土无侧限抗压强度可通过增加水泥掺入量、增加养护龄期、降低水灰比和提高土样压实度等措施来提高, 工程应用中, 可根据工程实践情况对参数进行优化设计来满足工程的实际需求。

4 结论

通过试验研究了水泥掺入量、养护龄期、水灰比对水泥改良砂土无侧限抗压强度的影响, 并根据试验结果, 提出了有效表征水泥改良砂土无侧限抗压强度变化规律的综合表征参数, 并取得了以下主要结论:

(1) 增加水泥掺入量能有效提高水泥改良砂土无

侧限抗压强度, 其强度与水泥掺入量呈幂函数增长, 水灰比为 0.5~0.6 时, 水泥掺入量宜为 15%~25%, 水灰比为 0.8~1.0 时, 水泥掺入量宜为 15%~20%。

(2) 0~28 d 龄期, 水泥改良砂土无侧限抗压强度快速增长到标准强度 $f_{cu,90d}$ 的 75%~80%; 28~90 d 龄期, 水泥改良砂土无侧限抗压强度增长速度放缓, 并趋于稳定, 无侧限抗压强度与龄期呈指数函数关系增长。

(3) 相同水泥掺入量、养护龄期下, 水泥改良砂土无侧限抗压强度随水灰比增大而降低, 龄期越长, 无侧限抗压强度随水灰比增加的衰减率越大; 在实际工程应用中, 采用水泥浆液加固或注浆砂土体的水灰比宜为 0.5~0.6, 具体根据土体特性及试验确定。

(4) 采用表征水泥空隙率、水灰比、水泥掺入量以及养护龄期因素综合影响的综合表征系数 PCT , 能较好地反映各因素对水泥改良砂土无侧限抗压强度的影响, 其强度与综合表征系数 PCT 呈较好的幂函数关系, 能满足工程的实际需求。

参考文献:

- [1] 颜胜才. 水泥改良土的物理力学特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(4).
- [2] 陈瑞生, 蔡荣坤. 水泥土无侧限抗压强度的影响因素分析[J]. 中外公路, 2005(2).
- [3] 肖桃李, 何云龙, 李启凤, 等. 水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2017(5).

热带海洋地区 C50 大体积混凝土施工技术

祝云¹, 温超凯¹, 刘晓钰², 陈景¹, 赵正源²

(1.中建西部建设西南有限公司, 四川 成都 610052; 2.中建西部建设印尼有限公司)

摘要:以印度尼西亚当地工程为例,结合当地原材料特点和热带海洋气候环境下 Meikarta 项目大体积底板混凝土施工技术难点,从施工准备和大体积底板浇筑两个方面,阐述在热带海洋气候环境下如何保证大体积混凝土的施工质量,为热带海洋气候环境下大体积混凝土的施工技术提供有益借鉴。

关键词:热带海洋地区;大体积混凝土;施工技术;质量控制

1 工程背景

1.1 工程概况

美加达项目位于印尼爪哇岛西部 Bekasi,距离雅加达约 40 km,坐落于 Lippo Cikarang、Delta Mas 以及 Jababeka 工业区的中心。由中国建筑第四工程局承建,是世界一流综合工程 Orange County(橘子郡),也称 Meikarta。工程占地 322 万 m²,总建筑面积超过 8 000 万 m²。总工期分为 3 期,一期工程 700 多万 m²,由 236 栋(45 层,800 m²/层)高层建筑组成。

项目建筑采用水下桩和大体积筏板相结合的设计施工方式。大体积筏板数量巨大,为工程的建设带来巨大挑战,首期暂定混凝土用量约 450 万 m³。

1.2 技术难点

结合印度尼西亚当地地理环境特点和原材料特点,该项目大体积筏板混凝土施工主要存在以下技术难点:

(1) 项目筏板施工一次性浇筑,体量大(单块筏板

约 5 000 m³),当地水泥铝酸三钙含量高,水泥水化放热较中国水泥快,早期水化热控制难度加大,易造成混凝土温度裂缝的产生。

(2) 当地气温高、阳光直射强、施工面空旷风大,气候环境不利于大体积混凝土的施工质量控制,容易导致收缩裂缝的发生。

因此,混凝土水化温升控制、表面收缩裂缝控制是重点、难点,混凝土配合比中的水化反应放热控制是关键,施工过程中的浇筑振捣、收光、覆盖、养护是控制裂缝产生的关键。

2 施工准备

2.1 施工部署

2.1.1 成立工作小组

为确保项目混凝土供应顺利进行,专门成立混凝土生产实施小组,全面负责筏板混凝土施工组织,工作小组主要职责为:

(1) 协调站内生产任务,合理调配供应期间其余

[4] 任辉明,曾新迪,师高鹏,等.水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J].兰州交通大学学报,2017(4).

[5] 高建喜,何杰,王忍,小龄期夯实水泥土无侧限抗压强度试验研究[J].土工基础,2017(6).

[6] 阮锦楼,阮波,阳军生,等.粉质粘土水泥土无侧限抗压强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2009(3).

[7] 张莹莹,程志豪,周沛延,等.电石渣改良土的无侧限抗压强度预测方法[J].中外公路,2017(3).

[8] 徐晓东,王林浩,刘剑平,等.偏高岭土对水泥土强度影响的试验研究[J].中外公路,2017(1).

[9] 夏永杰,王丽艳,刘瀚森.掺废弃钢渣的水泥土强度特性试验研究[J].中外公路,2016(5).

[10] ZHANG R J, SANTOSO A M, TAN T S, et al. Strength of High Water — Content Marine Clay Stabilized by Low Amount of Cement[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013,139(12).