

# 水泥对珠三角地区淤泥抗剪强度参数的影响分析

贺佐跃<sup>1,2</sup>, 李红中<sup>2</sup>, 陈万里<sup>2</sup>, 梁立农<sup>2</sup>, 李钊<sup>2</sup>, 杨志军<sup>1</sup>, 黄林冲<sup>3</sup>, 杨飞<sup>4</sup>, 袁炳祥<sup>4</sup>

(1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司;

3. 中山大学 工学院; 4. 广东工业大学 土木与交通工程学院)

**摘要:** 由于地质、水文及受力等自然条件的差异性, 软土的剪切强度参数也会随之变化。该文通过三轴不固结不排水剪切试验和直剪快剪试验, 对不同水泥掺量下水泥土的抗剪强度参数进行了试验研究。结果表明: 在三轴不固结不排水剪切试验中, 当掺入比和龄期均相同时, 峰值强度随围压线性增加; 当掺入比和围压均相同时, 峰值强度随龄期逐渐增加; 当掺入比保持不变时, 黏聚力随龄期线性增加, 而内摩擦角随龄期线性减小; 当龄期保持不变时, 黏聚力随掺入比线性增加, 而内摩擦角随掺入比线性减小。在直接快剪试验中, 相对于三轴不固结不排水剪切试验结果, 当掺入比、龄期均保持不变时, 直接快剪试验得到的黏聚力要稍小, 而内摩擦角要稍大; 当掺入比保持不变时, 黏聚力随龄期线性增加, 而内摩擦角随龄期线性减小; 当龄期保持不变时, 黏聚力随掺入比线性增加, 且龄期越大, 增加幅度越大; 而与黏聚力相反, 内摩擦角随掺入比线性减小, 且龄期越大, 减小幅度越小。

**关键词:** 淤泥; 试验方法; 峰值强度; 黏聚力; 内摩擦角

在软土的形成过程中, 由于地质、水文及受力等自然条件的差异性, 造成软土的结构性、成分和土粒粒径等也存在显著的不同, 软土的剪切强度参数也不尽相同。例如, 湖相、河滩相与海相等软土之间的土体性质有明显区别, 珠三角、长三角与天津滨海地区等不同地方软土之间的土体性质也千差万别。也就是说, 不同地区之间的剪切强度参数, 并不能等同采用, 应分别进行试验测得。即使掺入水泥土, 由于上述软土之间的差异性, 相对应的剪切强度参数也会不同, 也应通过试验分别测得。在软基处理中, 水泥可用来加固软土, 或形成搅拌桩、旋喷桩等柔性复合地基, 能够很好地改善软土性质, 在实际工程中得到了广泛应用。水泥土的抗剪强度参数在这些应用中至关重要, 因此有必要进行相应的试验研究。

在现有文献中, 有关水泥土的抗剪强度参数的试验研究总体较少。刘润等、胡亚元等、罗大生等对水泥土进行了三轴剪切试验和直接剪切试验。然而, 这些文献对水泥掺量、龄期及其与强度参数之间的关系研究不充分, 也并未对比分析两种试验方法所得结果之间的区别; 此外, 软土取样位置均不在珠三角地区, 不能直接用于该文工程的实际应用之中。因此, 该文将

针对具体工地的软土进行三轴剪切试验和直接剪切试验, 并探讨两种试验方法得到的抗剪强度参数之间的差异性关系。

## 1 试验简介

### 1.1 基本参数

软土取自珠三角地区中山市某路基施工工地, 该路段地处三角洲平原, 藕塘密布, 地形较为平坦, 地面标高为 $-0.5 \sim 1.5$  m, 部分路段地表处于水位以下。根据钻孔资料, 该地区覆盖层主要为全新世素填土、淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质砂类土、粉质黏土和砂类土, 基底由燕山四期花岗斑岩及其风化岩组成; 该区域未见断裂构造行迹, 属于稳定地块, 适宜路基工程建设。试验取淤泥为研究对象, 其级配曲线如图1所示, 基本参数如表1所示。

### 1.2 试验方案

土体应力实际上为三维应力状态, 采用三轴剪切强度指标能够很好地反映实际情况。试验仪器为全自动三轴仪, 该三轴仪为应变控制, 剪切速率为 $0.640$  mm/min; 试验过程中, 由于通常忽略水泥土的固结,

表 1 软土的基本参数

重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	天然含 水率/%	孔隙比	饱和度/ %	液限/ %	塑限/ %	液性 指数	塑性 指数	有机质 含量/%
16	58.9	1.855	95.2	53.3	32.9	1.27	20.4	1.5

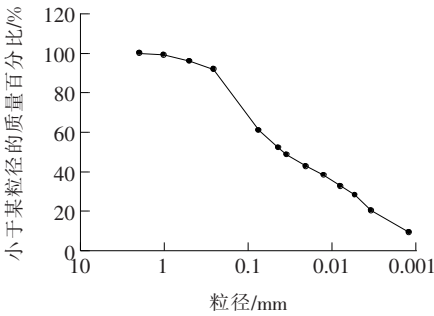


图 1 软土级配曲线

因此水泥土试样均在不固结不排水状态下进行试验；轴向应变不大于 15%。试验方案如表 2 所示，其中水泥掺入比共 3 个等级：10.6%、13.6% 和 16.6%；试验围压共有 4 个等级：100、200、300、400 kPa；水灰比为 1.0；养护在标准条件下进行，通过控制养护时间，分别得到龄期为 14、28 和 90 d 的三轴剪切强度参数。土样风干，过 2 mm 筛，按表 2 试验方案进行配比，且应符合 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》。试样高 80 mm，直径 39.1 mm。

表 2 试验方案

序号	水泥掺入比/%	龄期/d	试验围压/kPa
1	0	0	100, 200, 300, 400
2	10.6	14	
3	10.6	28	100, 200, 300, 400
4	10.6	90	
5	13.6	14	
6	13.6	28	100, 200, 300, 400
7	13.6	90	
8	16.6	14	
9	16.6	28	100, 200, 300, 400
10	16.6	90	

实际工程中，也常用到土体的直接剪切强度参数，这里也将对不同掺入比条件下的直接剪切强度参数进行试验分析。试验仪器为直接剪切仪，同样地，试验过程中，由于通常忽略水泥土的固结，因此水泥土试样均在不固结不排水状态下进行试验；轴向应变不大于 15%。为保证试验结果的可对比性，直接剪切试验的

试验方案与三轴剪切试验相同，如表 2 所示。试样高 20 mm，直径 61.8 mm。

2 三轴试验结果分析

2.1 峰值强度与峰值应变

根据试验方案，可以得到不同条件下的应力—应变关系，且均表现出明显的应变软化，即：随轴向应变增加，主应力差在较短应变内先快速增加，并表现出明显的直线形；然后再逐渐增加并达到峰值，增加速率稍有降低，应力—应变曲线稍有缓和；到达峰值后，主应力差随应变逐渐减小；最后趋于平稳，并保持恒定。尽管一般来说，残余强度要低于峰值强度，但数值上仍然较大，并且随围压逐渐增加。峰值强度如图 2 所示。

由图 2 可以得到：

(1) 当掺入比和龄期均相同时，峰值强度随围压逐渐增加，且呈现出相关性很好的线性相关关系。试样受到的围压越大，表示受到的约束越强，土样也越不容易破坏，即峰值强度也会越大。

(2) 当掺入比和围压均相同时，峰值强度随龄期逐渐增加。水泥的化学反应与时间有关，包含两层意思：① 水泥中某些化学成分的水化反应具有一定的滞后性，即会在达到一定的条件、时间下才能发生；② 水泥中的水化反应随时间的增长，逐渐反应完全。这两种原因共同导致了峰值强度的提高。

(3) 当龄期和围压均相同时，峰值强度随掺入比总体上呈逐渐增加趋势。水泥作为一种常用的固化剂，能够起到很好的改善软弱土层、提高强度作用。水泥掺入比越大，对强度的提高作用也越明显。

与峰值强度对应的应变如图 3 所示。

由图 3 可以得到：

(1) 当掺入比和龄期均相同时，与峰值强度对应的应变随围压逐渐增加，且呈现出相关性很好的线性相关关系。由前文可知，由于围压对试样有一定的约束作用，使峰值强度随围压线性增加；但同时也会导致达到峰值强度时的时间增加，即与峰值强度对应的应变也会增加。

(2) 当掺入比和围压均相同时，与峰值强度对应

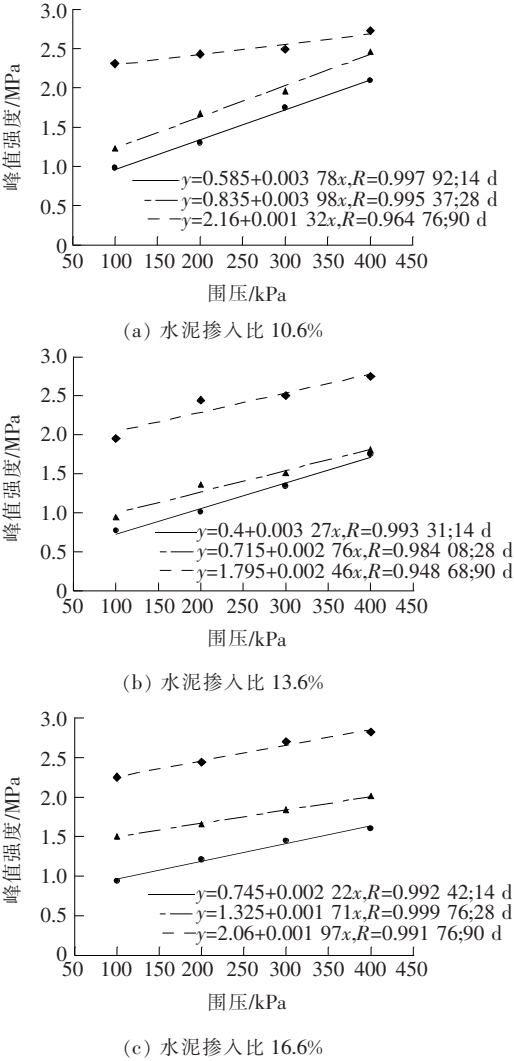


图2 峰值强度随围压的变化(三轴试验)

的应变会随龄期逐渐减小。尽管龄期对峰值强度起到一定的增强作用,但由该试验结果可知,龄期能够加快峰值强度的到来,即与峰值强度对应的应变会减小。说明随龄期增加,尽管峰值强度也增加,但会更快破坏,即会逐渐向脆性发展。

(3) 当龄期和围压均相同时,与峰值强度对应的应变随掺入比总体上呈逐渐减小趋势。与龄期对峰值强度及其相应的应变影响类似,尽管水泥掺入比的增加能增强峰值强度,但相对应的应变也会减小,即试样也会更快破坏,并逐渐向脆性发展。

2.2 黏聚力与内摩擦角

在三轴不固结不排水试验条件下,原状软土的黏聚力、内摩擦角分别为 6.3 kPa、3.4°。通过三轴剪切试验后,黏聚力、内摩擦角与龄期的关系如图 4 所示。由图 4 可以看出:当掺入比保持不变时,黏聚力随龄期逐渐增加,且表现出很好的线性关系;掺入一定量水泥

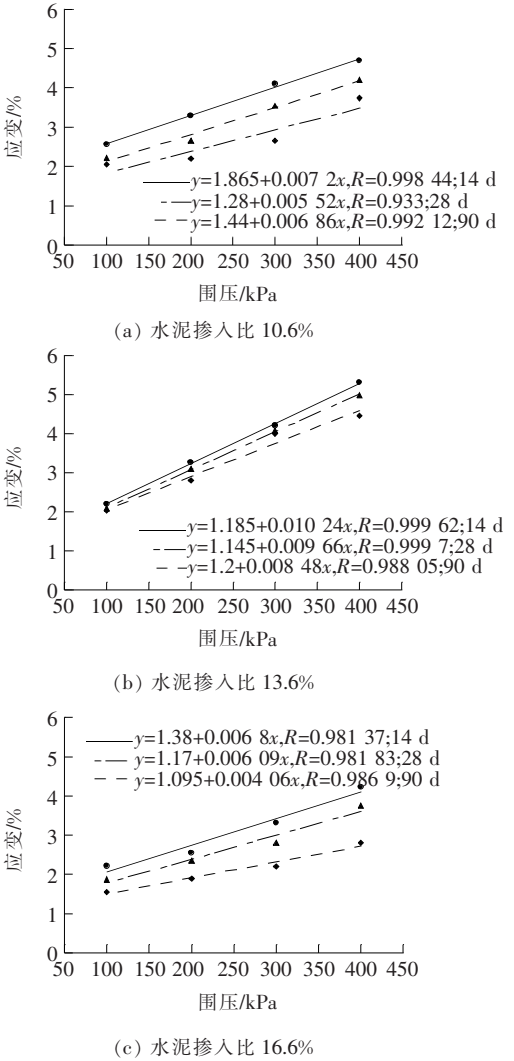
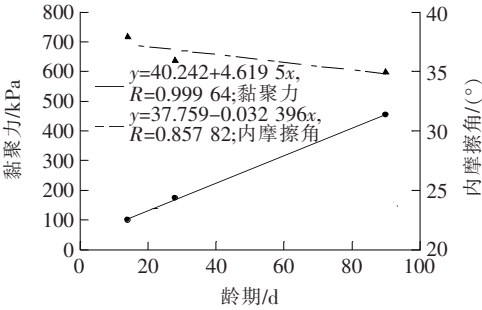


图3 峰值强度对应应变与围压关系(三轴试验)

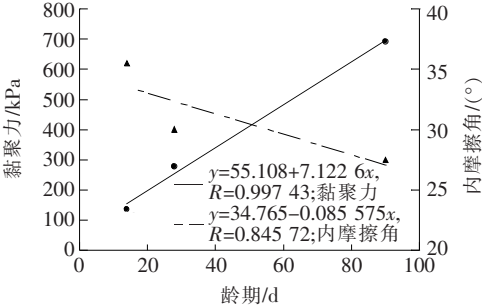
的软土,黏聚力显著增加,最大可达 797 kPa,最小黏聚力也超过 100 kPa,远大于未进行任何处理的软土黏聚力。然而,与黏聚力的变化趋势相反,当掺入比保持不变时,内摩擦角随龄期逐渐减小,尽管内摩擦角与龄期之间也呈现出线性关系,但相关系数较黏聚力要小得多。这表明,尽管龄期能提高强度,但对黏聚力、内摩擦角的影响是相反的。

黏聚力与水泥掺入比的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出:当龄期保持不变时,黏聚力与水泥掺入比之间也呈现出较好的线性关系,黏聚力随掺入比逐渐增加,且龄期越大,增加幅度越大,在图 5 中表现为斜率增加。

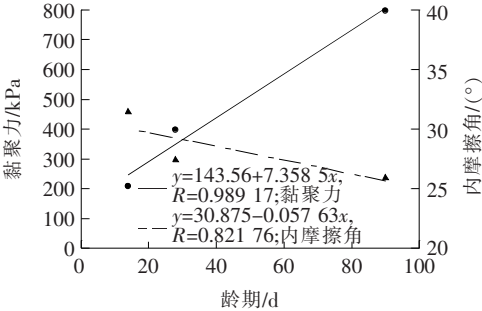
内摩擦角与水泥掺入比的关系如图 6 所示。由图 6 可以看出:当龄期保持不变时,内摩擦角与掺入比之间也呈现出较好的线性关系,但与黏聚力相反,内摩擦角随掺入比逐渐减小,且龄期越大,减小幅度越小,在



(a) 水泥掺入比 10.6%



(b) 水泥掺入比 13.6%



(c) 水泥掺入比 16.6%

图 4 黏聚力、内摩擦角与龄期的关系(三轴试验)

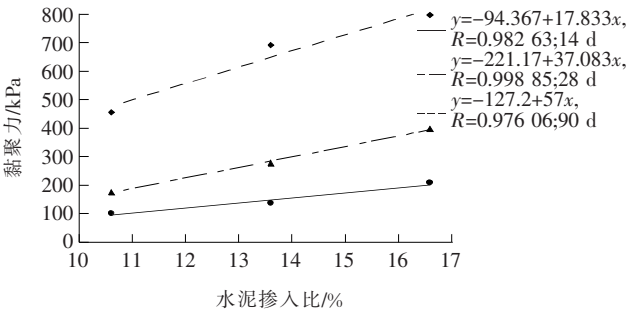


图 5 黏聚力与水泥掺入比关系(三轴试验)

图 6 中表现为斜率减小,但总的来说斜率减小幅度很小。

3 直剪试验结果分析

为简便起见,这里仅对直接剪切试验结果中的黏聚力、内摩擦角进行分析。在直接快剪试验条件下,原

状软土的黏聚力、内摩擦角分别为 4.4 kPa、3.4°。经过直接剪切试验后,黏聚力、内摩擦角与龄期之间的关系如图 7 所示。

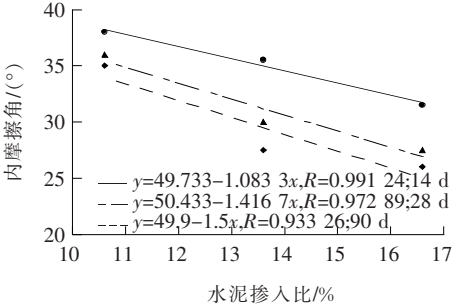
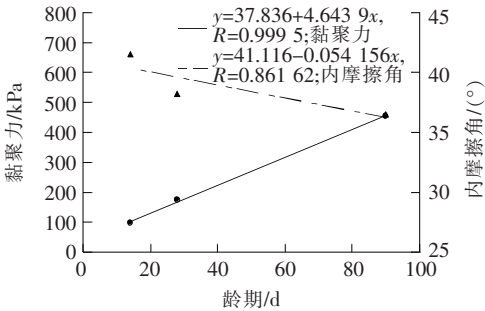
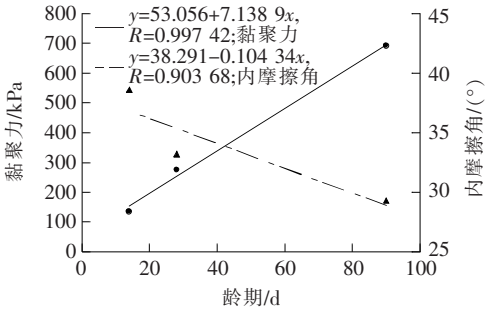


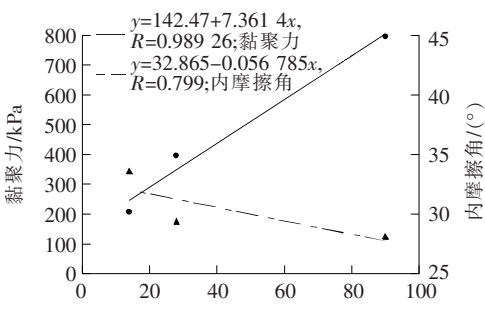
图 6 内摩擦角与水泥掺入比关系(三轴试验)



(a) 水泥掺入比 10.6%



(b) 水泥掺入比 13.6%



(c) 水泥掺入比 16.6%

图 7 黏聚力、内摩擦角与龄期关系(直剪试验)

由图 7 可知:

(1) 相对于三轴试验结果,黏聚力要更小,而内摩擦角更大。



(2) 当掺入比保持不变时,黏聚力随龄期逐渐增加,且表现出很好的线性关系;掺入一定量水泥的软土,黏聚力显著增加,最大可达 796.2 kPa,最小黏聚力也可达 97.6 kPa,远大于未进行任何处理的软土黏聚力。此外,当掺入比保持不变时,内摩擦角随龄期逐渐减小,内摩擦角与龄期之间也呈现出线性关系,但相关系数较黏聚力要小得多。应当注意的是,相对于三轴不固结不排水剪切试验结果,当掺入比、龄期均保持不变时,直接快剪试验得到的黏聚力要稍小,而内摩擦角要稍大。这与试验方法密切相关,尽管三轴不固结不排水剪切试验、直接快剪试验均处于三位应力条件下,然而相对于前者,后者的侧向变形是完全受约束的;此外,三轴试验应力等级由围压控制,而直剪试验应力等级由垂直应力控制。总的来说,两种不同试验方法条件下,试样的受力条件不同,这种受力差异性是导致黏聚力、内摩擦角变化的原因之一。黏聚力、内摩擦角的差异性减小、增加趋势机理,有待进一步研究。

在直接快剪条件下,黏聚力与水泥掺入比的关系如图 8 所示。

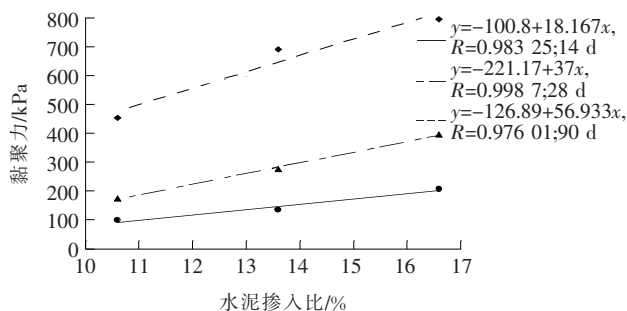


图 8 黏聚力与水泥掺入比关系(直剪试验)

由图 8 可以看出:当龄期保持不变时,黏聚力与掺入比之间也呈现出较好的线性关系,黏聚力随掺入比逐渐增加,且龄期越大,增加幅度越大,在图 8 中表现为斜率增加。内摩擦角与水泥掺入比的关系见图 9。

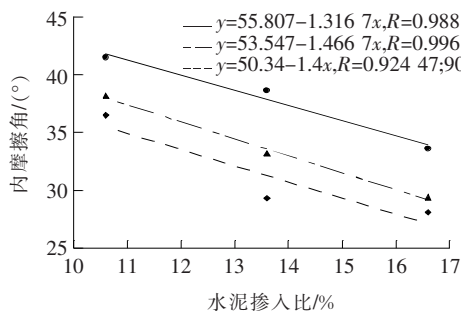


图 9 内摩擦角与水泥掺入比关系(直剪试验)

由图 9 可知:当龄期保持不变时,内摩擦角与掺入

比之间也呈现出较好的线性关系,但与黏聚力相反,内摩擦角随掺入比逐渐减小,且龄期越大减小幅度越小,在图中表现为斜率减小,但总的来说减小幅度非常小。同样,该项目也并未对较低水泥掺入比的情况进行直接剪切试验分析,后续将继续进行相关研究。

## 4 结论

(1) 在三轴不固结不排水剪切试验中,水泥土呈现明显的应力—应变软化关系。当掺入比和龄期均相同时,峰值强度随围压线性增加。当掺入比和围压均相同时,峰值强度随龄期逐渐增加。此外,当掺入比保持不变时,黏聚力随龄期线性增加,而内摩擦角随龄期线性减小。当龄期保持不变时,黏聚力随掺入比线性增加,且龄期越大,增加幅度越大,而内摩擦角随掺入比线性减小,且龄期越大,减小幅度越小。

(2) 在直接快剪试验中,相对于三轴不固结不排水剪切试验结果,当掺入比、龄期均保持不变时,直接快剪试验得到的黏聚力要稍小,而内摩擦角要稍大。当掺入比保持不变时,黏聚力随龄期线性增加,而内摩擦角随龄期线性减小。当龄期保持不变时,黏聚力与掺入比之间也呈现出较好的线性关系,黏聚力随掺入比逐渐增加,且龄期越大,增加幅度越大;而与黏聚力相反,内摩擦角随掺入比线性减小,且龄期越大,减小幅度越小,但总的来说减小幅度非常小。

## 参考文献:

- [1] 刘赛,张延军,周炳强,等.辽东湾吹填土工程适宜性系统综合评价遥感分区研究[J].工程地质学报,2015(2).
- [2] 刘勇健,刘湘秋,刘雅恒,等.珠江三角洲软土物理力学性质对比分析[J].广东工业大学学报,2013(3).
- [3] 张明,赵有明,龚镭,等.深圳湾新吹填超软土固结系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010(S1).
- [4] 谢永健,王怀忠,朱合华.软黏土中 PHC 管桩打入过程中土塞效应研究[J].岩土力学,2009(6).
- [5] 马军庆,王有熙,李红梅,等.水泥土参数的估算[J].建筑科学,2009(3).
- [6] 李建军,梁仁旺.水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J].岩土力学,2009(2).
- [7] 张春雷,汪顺才,朱伟,等.初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J].岩土力学,2008(S1).
- [8] 汤怡新,刘汉龙,朱伟.水泥固化土工程特性试验研究[J].岩土工程学报,2000(5).