

夯实水泥土变形特性试验研究

刘焕存

(中航勘察设计研究院 北京 100086)

【提要】 本文通过室内170个夯实水泥土试样的三轴试验结果分析,在文献[1]强度特性研究的基础上进一步对夯实水泥土的变形特性作了详细分析,揭示了夯实水泥土极限强度 q_u 所对应的应变值 ϵ_u 、极限变形模量 E_u ;以及应力为 $q_u/2$ 所对应的应变值 $\epsilon_{0.5}$ 、平均变形模量 E_0 的相互关系;分析了围压对其关系的影响,提出了夯实水泥土应力应变本构关系方程。

【关键词】 夯实水泥土 极限强度 q_u 对应的应变值 ϵ_u 极限变形模量 E_u 平均变形模量 E_0 $\sigma-\epsilon$ 本构关系

【Abstract】 Through the triaxial test results of 170 compacted soil-cement samples in laboratory, this paper further analyses the deformation properties of compacted soil-cement based on the studies on the strength properties introduced in reference 1. Reveals the relation between the strain ϵ_u corresponding to the ultimate strength q_u , the ultimate deformative modulus E_u , the strain $\epsilon_{0.5}$ corresponding to the stress of $0.5q_u$ and mean deformative modulus E_0 . Analyses the effect of surrounding pressure to above relations. Proposed the constitutive equation of stress-strain of compacted soil-cement.

【Keywords】 Compacted soil-cement, Strain ϵ_u corresponding to the ultimate strength q_u , Ultimate deformative modulus E_u , Mean deformative modulus E_0 , Constitutive relation of $\sigma-\epsilon$

0 前言

文献[1]对夯实水泥土试验方法及程序作了述说。根据试验结果对夯实水泥土强度形成机理,以及龄期、水泥含量、含水量、干重度、围压等因素对强度的影响关系作了系统的论述。本文重点对夯实水泥土的变形性质进行分析研究,为进一步研究夯实水泥土桩及水泥土桩复合地基的变形性质提供基础。夯实水泥土作为一种复合改良材料,其变形特性与单一材料的土和水泥的变形特性有一定的区别,而且与搅拌水泥土的特性也有很大差别。本文参考文献[2]、[3]、[4]、[5]的分析方法对夯实水泥土的变形特性及特征指标进行分析。

1 一次短期加荷时夯实水泥土应变发展过程

夯实水泥土试件的三轴试验是一次短时

间连续加荷过程。根据对不同龄期、不同水泥含量、不同含水量的试样的三轴试验 $\sigma-\epsilon$ 曲线的统计分析表明,应力应变 $\sigma-\epsilon$ 曲线特征属加工软化型,见图1。

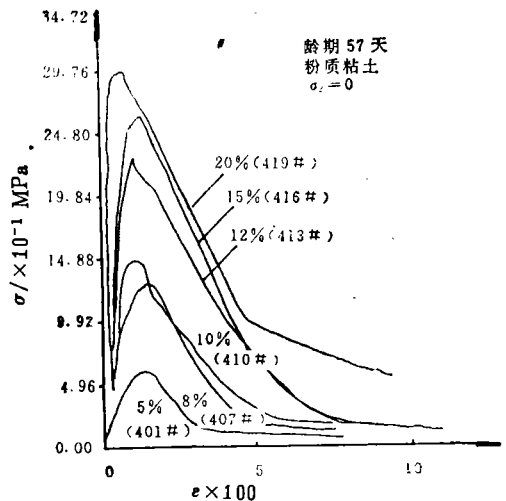


图1 不同水泥含量夯实水泥土应力应变关系曲线

作者简介:刘焕存,男,高级工程师。1989年毕业于中国建筑科学院地基基础研究所,获岩土工程专业硕士学位。现主要从事地基基础工程的勘察、设计、施工与研究,工作。

随着应力的变化,应变发展基本经历三个过程,即:弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段。在试件受压时,当压应力 $\sigma \leq 0.8q_u$ 时,应力应变关系基本呈直线变化,变形主要取决于水泥土内部骨架结构和水泥土胶凝体的弹性变形。当应力 $\sigma > 0.8q_u$ 之后,由于水泥土胶凝强度的限制,使得水泥土体内部出现微裂缝,从而使应变增长速率大大超过应力增长速率,材料的塑性变形急剧增大,曲线曲率迅速增大,直至达到峰值点。当应力 σ 达到 q_u 时,水泥土结构强度和胶凝强度丧失,裂缝迅速延伸扩展至贯通,由于试验机所释放出的应变能,试件一瞬间即被压碎,应力下降至最低点,应变达到板限值,以后应变继续缓慢增加,而应力保持相对恒定。

2 极限强度 q_u 对应的应变值 ϵ_u

极限强度 q_u 对应的应变值 ϵ_u 是应力应变曲线的重要特征值之一,通过对应变值 ϵ_u 的研究,可为更进一步确定夯实水泥土的

变形指标,以及应力应变本构关系提供依据。

将本次试验的结果在坐标系 $q_u-\epsilon_u$ 中绘出,对不同水泥含量、不同龄期条件下所得结果的散点图加以分析统计。本次试验方法详见文献[1]。素土土质为粉质粘土和砂质粉土。养护方式为试件成型后空气中养护3~5d,后放入水中。从试验结果来看,对试验初期水泥掺合率低的粉质粘土试样,其 ϵ_u 值离散性较大,一般分布在1%~5%之间,似乎是水泥掺合率低,极限强度 q_u 低,应变值 ϵ_u 大,但是从后期制作的试样试验结果来看, q_u 与 ϵ_u 的统计关系是显著的。将粉质粘土和砂质粉土的应变值 ϵ_u 绘在图2中。图2(a)为57d时水泥含量为5%、8%、10%、12%、15%、20%的粉质粘土水泥土试样的结果;图2(b)为不同龄期,水泥含量也为5%、8%、10%、12%、15%、20%条件下的试验结果。

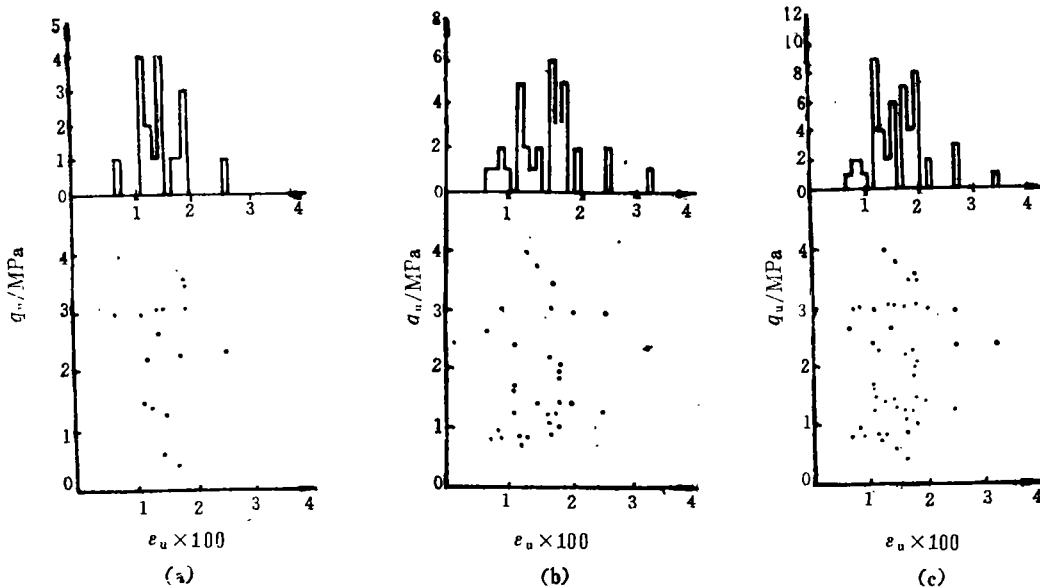


图2 极限强度与其对应的应变值关系散点图

(a) 粉质粘土; (b) 砂质粉土; (c) 粉质粘土和砂质粉土

图2(a)中,在18个试样中89%的样本应变值 ϵ_u 分布在1.1%~1.8%范围内。图2(b)中,35个子样中,77%的样本应变值 ϵ_u 位

于1.1%~1.9%范围内。两种土质的试验结果相差不大。将两种土样的试验结果综合叠加成图2(c),可以看出40%的点集中分布

在1.4%~1.8%范围内。所以综合考虑对一般粘性土的夯实水泥土极限强度 q_u 所对应的应变值 ϵ_u 可取1.4%~1.8%，平均值可取1.6%。

3 应力 σ 为 $q_u/2$ 时对应的应变值 $\epsilon_{0.5}$

由于夯实水泥土材料的脆性性质，在实际工程使用中平均使用应力 σ 一般控制在1/3~1/2极限强度范围内，以保证足够的安全系数。因此实际应用中此应力段对应的应变值更有应用价值。

试验结果表明：在应力 $\sigma \leq q_u$ 应力段范围内 $\sigma-\epsilon$ 曲线是呈非线性关系的，因此应变 $\epsilon_{0.5}$ 与应变 ϵ_u 之间也不是1/2的关系。将上述两种水泥土试样的试验结果绘成 $\sigma_{0.5}-\epsilon_{0.5}$ 关系散点图（见图3）。图3(a)为粉质粘土试样的统计结果， $\epsilon_{0.5}$ 一般分布在0.6%~0.8%之间，52%的样本落在0.5%~0.7%范围内。图3(b)为砂质粉土水泥土试样的结果统计，38%的样本值 $\epsilon_{0.5}$ 分布0.4%~0.6%范围内，并且随强度的增加， $\epsilon_{0.5}$ 逐渐收敛。

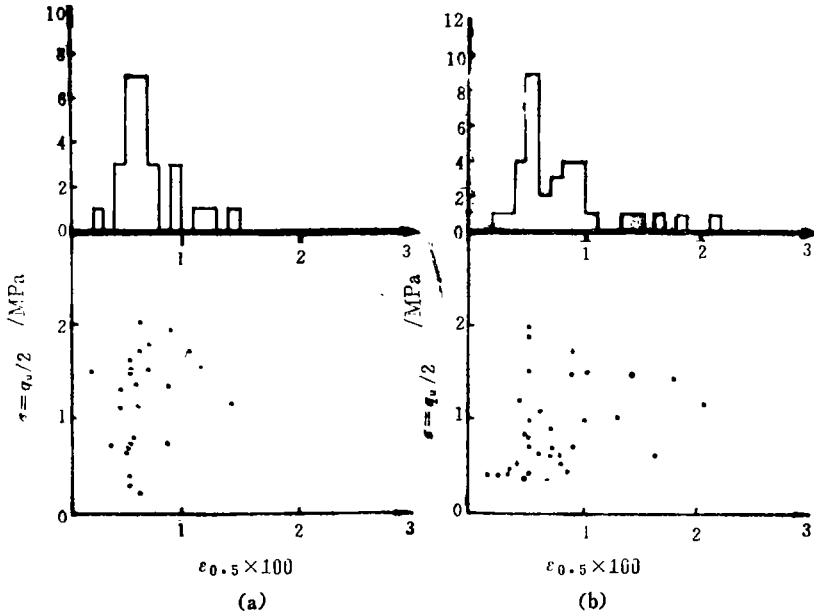


图3 应力为 $q_u/2$ 时与其对应的应变值 $\epsilon_{0.5}$ 关系散点图
(a) 粉质粘土；(b) 砂质粉土

由此看出两种土质的 $\epsilon_{0.5}$ 值基本一致，一般分布在0.4%~0.7%范围内，平均 $\epsilon_{0.5}$ 可取0.5%，此值相当于极限强度对应下应变值 $\epsilon_{0.5}$ 的1/3。

4 围压对水泥土应变的影响

在围压作用下，文献[1]中已对水泥土强度的影响作了分析，认为在围压 $\sigma_2 = 50$ kPa条件作用下其强度没有明显的变化。现将围压 $\sigma_2 = 50$ kPa作用下，砂质粉土的夯实水泥土试样的试验结果统计成极限强度 q_u 与应变值 ϵ_u 的散点图，以及应力为 $q_u/2$ 及对应

的应变值 $\epsilon_{0.5}$ 的散点图（见图4）。

从图4(a)中可见，围压 σ_2 作用下，应变值 ϵ_u 一般分布在1.1%~1.9%范围内，40%的样点分布在1.4%~1.9%范围内，从随强度增加趋势看，散点更集中收敛于1.4%~1.7%范围内。与无侧限条件相比，两者差别不显著。

由图4(b)可知，围压 $\sigma_2 = 50$ kPa作用下，平均应变 $\epsilon_{0.5}$ 一般分布在0.4%~0.8%，无侧限时 $\epsilon_{0.5}$ 一般为0.6%~0.8%，两者统计的结果变化也不大。

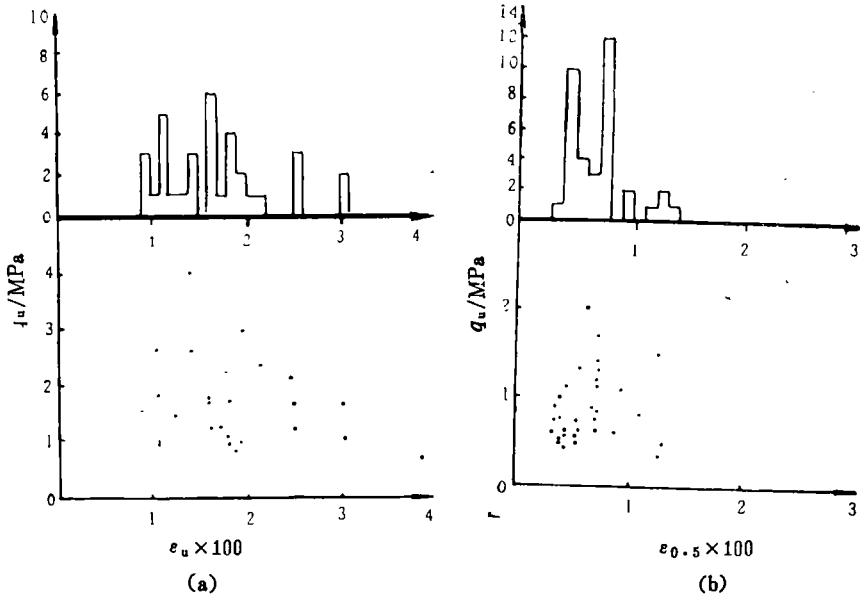


图4 围压对应变影响结果散点图

(a) 砂质粉土, $\sigma_2=50\text{kPa}$; (b) 砂质粘土, $\sigma_2=50\text{kPa}$

5 变形模量

在实际工程问题中, 考虑桩土作用进行沉降计算时, 通常需要天然土的压缩模量 E_s 和桩体的变形模量 E_0 。而就目前来说, 对夯实水泥土的变形指标的确定也大多数是经验性的, 有的是参照水泥搅拌土的试验值, 两者显然是有区别的。为此本次试验的重要成果是对夯实水泥土变形指标的确定提出了可靠的结论。

5.1 极限变形模量 E_{su}

由于夯实水泥土试样的应力应变关系曲线的非线性, 使得其模量和泊松比均不是一个常数, 而是随应力范围的变化而变的。根

据定义取应力 σ 变化由 0 至 q_u 的割线斜率作为极限变形模量 E_{su} 。由公式 (1) 根据各试验所得的 $\sigma-\epsilon$ 曲线计算各试样的 E_{su} 值。

$$E_{su} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{q_u}{\epsilon_u} \quad (1)$$

由于影响应力应变关系的因素较多, 而使所得结果具有一定的离散性。将两种土质的水泥土试样的试验结果绘成 $q_u-\epsilon_u$ 关系散点图 (见图 5), 并进行回归分析。

根据图5可知: 无限侧极限抗压强度 q_u 与极限变形模量 E_{su} 之间具有良好的线性相关关系, 统计结果见表1。

表1 统计结果

夯实水泥土土质	子样数 n	回归方程/MPa	相关系数 r	临界相关系数 $r_{0.01}$	信度 $\alpha=0.01$ 时回归效果
粉质粘土	17	$E_{su}=68q_u+14$	0.67	0.606	线性显著
砂质粉土	35	$E_{su}=75q_u$	0.74	0.449	线性显著

由表1可见, 在常规水泥掺合率下, 两种土质的水泥土的极限变形模量值相差不大, 一般可近似取 $E_{su} = 75q_u$ 。

5.2 平均变形模量 E_s

根据定义取应力从 0 至 $q_u/2$ 间曲线的割线斜率作为水泥土的平均变形模量 E_s , 即,

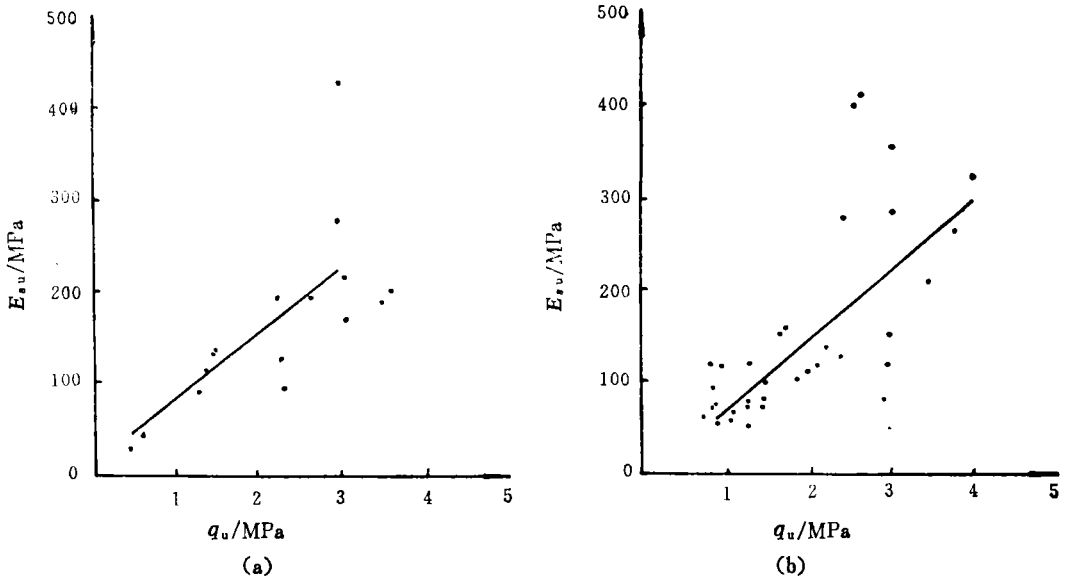


图5 极限变形模量与极限强度关系散点图
(a) 粉质粘土; (b) 砂质粉土

$E_0 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{q_u}{\varepsilon_{0.5}}$ 。将两种土质材料的试验结果绘成 $E-\sigma$ ($\sigma = q_u/2$) 关系散点图 (见图6)。

统计结果表明: 变形模量 E_0 与 $1/2$ 极限应力之间具有良好的线性统计关系, 见表

2。对于粉质粘土, 其变形模量 E_0 约大于极限变形模量 E_{su} 的 20%, 而砂质粉土却只大约 5%。但从统计图 6 (b) 来看, 在 $q_u/2 \geq 1$ MPa 之后, 试验点大多数落在统计线的上方, 若按统计的上偏差式: $E_0 = 95q_u + 6$ 来表达, 似乎更接近实际。

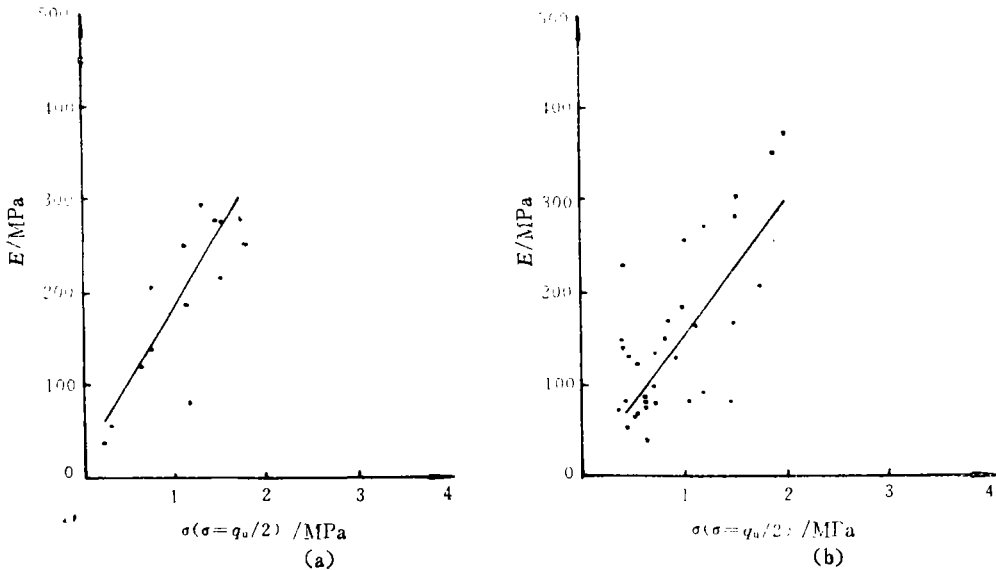


图6 平均变形模量与应力 ($\sigma = q_u/2$) 关系散点图
(a) 粉质粘土; (b) 砂质粉土

表 2 统计结果

夯实水泥土质	子样数 <i>n</i>	回归方程/MPa	相关系数 <i>r</i>	临界相关系数 <i>r</i> _{0.01}	信度 $\alpha=0.01$ 时回归效果
粉质粘土	16	$E_0=81q_u+24$	0.81	0.62	线性显著
砂质粉土	37	$E_0=75q_u+6$	0.75	0.42	线性显著

因此可以认为平均变形模量 E_0 约大于极限变形模量 E_{ϵ_u} 的20%，对一般粘性土其夯实水泥土平均变形模量 E_0 可近似取 $E_0=(75\sim 90)q_u$ 。

6 夯实水泥土应力应变本构关系

为了更好地确定水泥土在受压时任意应力条件下应变量的相应值，就必须建立其应力应变的本构关系方程。根据上述夯实水泥土在饱和状态下早期强度及其变形的特点，来建立其应力应变的本构关系表达式。

将夯实水泥土轴心受压的应力应变曲线加以简化以便实际应用，表达式参考文献[2]、[4]用分段函数形式表示如下：

在上升段，当 $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u$ 时 $\sigma-\epsilon$ 可表达为：

$$\sigma = \frac{q_u}{\epsilon_u^2} (\epsilon_u - \epsilon) \epsilon$$

其中：无侧限极限强度 $q_u = 0.671(1.1)^{100a_w}$ ；
极限强度相对应的应变值 $\epsilon_u = 1.4\% \sim 1.8\%$ ；
水泥掺合率百分数 a_w 。

在下降段，当 $\epsilon_u \leq \epsilon \leq \epsilon_{max}$ 时 $\sigma-\epsilon$ 可表达为：

$$\sigma = q_u$$

将本次试验的各水泥掺合率下夯实水泥土的本构关系表达为： $\sigma = 3900q_u(0.032 - \epsilon)$

其中： $q_u = 0.671(1.1)^{100a_w}$ ， $a_w = 5\%、8\%、10\%、12\%、15\%、20\%$
 $\epsilon_u = 1.6\%$ 。并将应力应变曲线绘成图7。

经比较， $\sigma-\epsilon$ 理论曲线与实际关系曲线基本一致。且在应力为 $q_u/2$ 时所对应的应变值 $\epsilon_{0.5}$ 基本为0.5%，与统计值基本吻合。

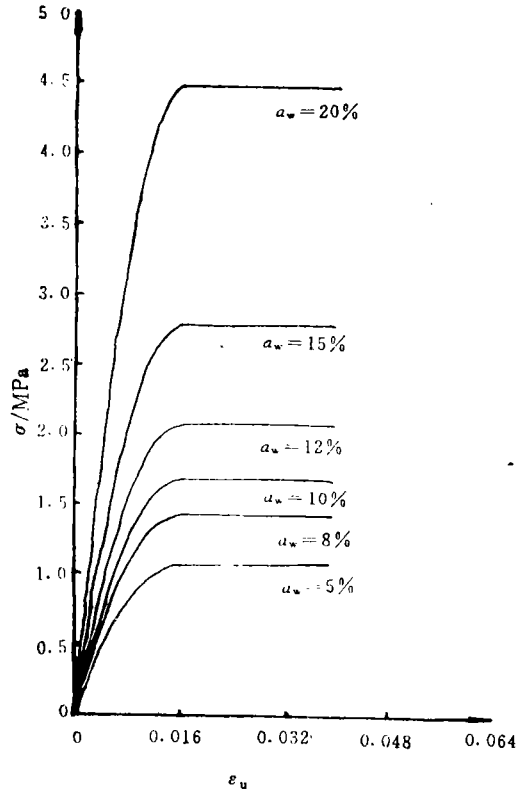


图 7 夯实水泥土应力应变本构关系曲线图

7 结论

(1) 对饱和条件下的粉质粘土和砂质粉土的夯实水泥土，两种三轴试验所得的变形性质和指标基本近似。

(2) 夯实水泥土在一次短期加荷时的应变发展，经历弹性、弹塑性及塑性变形阶段，而弹性应变约占应力上升段的80%。

(3) 夯实水泥土极限强度 q_u 所对应的应变值 ϵ_u 可取1.4%~1.8%，平均值取1.6%。压应力为 $q_u/2$ 时所对应的应变值 $\epsilon_{0.5}$ 可取0.4%~0.6%，平均值可取0.5%。

(下转第7页)

位);加之,引孔垂直度的误差会造成深部墙体开衩的现象,这样墙体的整体性就严重地被削弱,往往浅部地层内障碍较多(如人防地下室范围内),即使灌浆补漏也常留有“死角”,封不彻底。

(2) 专家们非常注意地下水的渗透破坏。地下水的渗透破坏常可以酿成灾难性后果,其表现,一是坑底的管涌,开始时只有少量较小的冒水点,逐渐扩大,造成整个坑底的破坏。管涌是由于水头超过临界值引起,故设计时必须十分注意,一旦出现先兆,必须立即回填,防止扩大。另一种表现在坑壁的流砂流土,由于截水没有做好,在动水压力作用下坑壁水土大量流失,造成基坑邻近地面塌陷,危及工程和公用设施。还有一种“层面管涌”,发生在透水层和粘性土层的界面上,也值得注意。

(3) 有位专家介绍了在一定条件下疏不干的问题。现在将所有排水疏干都称为“降水”(降低地下水位),但在有些条件下实际不是降低水位,例如浅部的地下水,包括潜水和上层滞水,如水层底面高于开挖面,则不是降低水位而是整个含水层的疏干。有的单位不了解这种情况用通常的井点或深井是疏不

干的,不能达到“降水”目的,井里的水一抽就干,不抽又有,开挖时照常有水。另一位专家介绍了某些粉土,性质很特殊,井点深井抽不出水来,开挖时发生流砂。以上这些情况,都应当根据具体的地质与水文地质条件,采取专门措施,不能套用常规方法。

5 施工的时空效应

有位专家对基坑工程中的时空效应问题作了专题发言,他指出软土中的基坑工程,要慎重地解决好基坑的稳定和位移问题,需要研究的不明确因素较多,其中一个难题是如何评估和处理软土的流变性对支护墙体内力和位移的影响。在软土并且建筑物和市政公用设施密集的地区,要按位移控制保护环境的要求进行深基坑的设计和施工。在深基坑开挖及支撑过程中,每个分步开挖的空间几何尺寸和支护墙体开挖部分的无支撑暴露时间,与周围墙体和土体位移有一定的相关性,反映出基坑开挖中时空效应的规律性。

以上只是对深基坑开挖与支护研讨会的情况作了简要介绍,供读者参考。

专家们的详细观点请查阅以后的专题报导或专家的有关论文和地区规范、指南等。

收稿日期:1996-12-08

(上接第24页)

(4) 夯实水泥土的极限变形模量 E_{su} 可近似取 $E_{su} = (68 \sim 75)q_u$ 。平均变形模量 E_s 约为极限变形模量 E_{su} 的1.2倍。

(5) 夯实水泥土本构关系可用分段方程表示为:

$$\sigma = \frac{q_u}{\varepsilon_u^2} (2\varepsilon_u - \varepsilon) \varepsilon \quad (\text{当 } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u)$$

$$\text{和 } \sigma = q_u \quad (\text{当 } \varepsilon_u \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max})$$

$$\text{其中: } q_u = 0.671(1.1)^{100a_w}$$

$$\varepsilon_u = 1.4\% \sim 1.8\%$$

当水泥含量 a_w 已知时上式方程即可确定。本次试验本构关系方程为:

$$\sigma = 3900q_u(0.032 - \varepsilon)\varepsilon。$$

参 考 文 献

- 1 刘焕存. 夯实水泥土强度特性试验研究. 军工勘察, 1996(4)
- 2 黄文熙主编. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 1983
- 3 陈仲颐、叶书麟主编. 基础工程学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- 4 范家骥等编. 钢筋混凝土结构(上册). 北京: 中国建筑工业出版社, 1980
- 5 朱燕堂主编. 应用概率统计方法. 西安: 西北工业大学出版社, 1986
- 6 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988

收稿日期1996-08-22