

软土地基上路堤设计与施工

铁道部第四工程局 编

人 民 铁 道 出 版 社

软土地基上 路堤设计与施工

铁道部第四工程局编

人 民 铁 道 出 版 社

1975年·北京

软土地基上路堤设计与施工

铁道部第四工程局编

人民铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{8}$ 印张: 4.75 字数: 109 千

1975年8月第1版

1975年8月第1版第1次印刷

印数: 0001—13,000 册 定价(科三): 0.40 元

毛主席语录

抓革命，促生产，促工作，促战备。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目 录

第一章 软土地基上铁路路堤的勘测	1
第一节 软土的定义	1
第二节 软土地区的铁路选线原则	1
第三节 软土地基上铁路路堤的工程地质测绘	2
第四节 软土地基的勘探	3
第二章 软土物理力学性质指标间的相关关系	8
第三章 软土地基上路堤的设计	11
第一节 软土的抗剪强度	11
第二节 软土地基上路堤的稳定分析	15
第三节 软土的三向固结理论	24
第四节 软土地基上路堤的沉降计算	27
第五节 软土地基上路堤的极限高度	33
第六节 软土地基上路堤的加固与处理	34
第四章 软土地基上路堤的施工	49
第一节 软土地基上路堤施工中的一般注意事项	49
第二节 砂井施工	51
第三节 软土地基上路堤的施工观测与控制	56
附录 软土地基上路堤的设计算例	58

第一章 软土地基上铁路路堤的勘测

第一节 软土的定义

所谓软土，从工程设计施工的意义来说，它主要包括内陆湖塘盆地、江河海洋沿岸和山间洼地沉积的软弱饱和粘性土层。它们的成因、结构和形态虽然不同，但都具有压缩性高而强度低和透水性差的相同特点，对于工程建筑物的影响，都可以造成坍滑和沉降。

十余年来，我们对各地不同成因类型的软土进行了室内、外试验，并搜集了兄弟单位的大量资料，通过对于这些实践资料的统计分析、归纳，发现不同成因的软土具有近于相同的共性。因此，我们认为就广义来说，凡是近代水下沉积的饱和粘性土，其含水量大于30%，塑性指数大于13，有机质含量小于10%，压缩性较大和强度较低者，可统称为软土。比较完整详尽的说法应是：凡属内陆湖塘盆地、江河海洋沿岸、多雨地区的山间洼地和坡立谷地区近代水下沉积的具有结构性的粘性土，其天然含水量大于40%，孔隙比大于1.0，压缩系数大于 $0.05 \text{ 厘米}^2/\text{公斤}$ （ $1 \sim 3 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$ ），饱和度大于0.95，有机质含量小于10%，渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ 厘米}/\text{秒}$ ，快剪的内摩擦角 φ 值小于5度，凝聚力 C 值小于 $0.20 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$ 的粘土；或天然含水量大于30%，孔隙比大于0.8，压缩系数大于 $0.035 \text{ 厘米}^2/\text{公斤}$ （ $1 \sim 3 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$ ），饱和度大于0.93，有机质含量小于10%，渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ 厘米}/\text{秒}$ ，快剪的 φ 值小于16度， C 值小于 $0.12 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$ 的砂粘土，均称为软土。

关于软土的定义，过去国内外曾有许多从事这方面研究的单位和学者，就他们所从事的工程实践中的经验和所得资料，用土力学、土质学的观点对软土的含义作过很多论述，可参考有关文献。

第二节 软土地区的铁路选线原则

软土一般多分布在辽阔的沉积平原，山间盆地，河流两岸冲积平原和三角洲等地。这些地方常是地下水位较高，土地肥沃，填料缺乏。因而，在这些地方修筑铁路势必造成占用良田沃土，直接影响农业的发展，同时还会带来填料来源等方面的困难。所以，即使路堤低于极限高度，也应尽量考虑以绕避为宜。但是随着铁路交通的日益发展，路网的密布，有些线路必然要通过软土地区。因此如何正确地选线，就成为急待解决的问题。我们认为在软土地区选线必须注意如下几个问题：

1. 线路尽可能选择软土最薄的地带通过；
2. 根据地形地貌的特征，使线路穿桑田、走旱地，靠着残丘山麓行，利用旧路和庄园废墟；
3. 线路通过沿河谷软土地带或古盆地时，应避开从中部通过；
4. 在低缓丘陵地区，不宜使线路通过封闭或半封闭型洼地；
5. 在河流中下游，应使线路沿高阶地通过；

6. 在辽阔的沉积平原上, 无从绕避, 线路亦应尽可能远离河流、湖塘或人工渠道;
7. 具有重要国防意义的软土地区线路, 原则上必须事先考虑第二线的绕行位置;
8. 在洪水位、限坡、航行净空、桥梁的形式等允许条件下尽量考虑降低线路标高;
9. 山间谷地处选线, 尽量避免从下卧岩层面横向坡度较陡处通过。

第三节 软土地基上铁路路堤的工程地质测绘

工程地质测绘工作的目的是: 为进行选线, 以及为软土路基的设计提供初步的资料, 也为施工取土估计其不利条件。测绘工作是沿线路附近纵横交错的水网进行, 除了对地形变化起伏比较明显的地方进行测绘, 以及访问调查外, 由于一般碰到的多是平坦地, 露头甚少, 从目力鉴定的范围内只能对河岸的陡坎以及表面淤泥进行观测, 更深的地下成层情况就难于了解了, 因此, 必须借助于勘探来实现。在我们的实际工作中常采取轻型螺纹钻作为辅助野外测绘工作。在进行野外测绘工作时应重点调查线路通过地区的地貌特征, 尤其要注意线路附近的微地貌, 借以查明软土的成因类型及其大概的分布范围。就大的范围来说, 成因类型可分海洋沿岸沉积和内陆湖盆地沉积两大类, 按其沉积环境以及其特性的不同, 又可分为七种类型(见表 1—1)。

软 土 的 成 因 类 型

表 1—1

类 型	厚 度	特 征
海洋沿岸沉积	泻湖相沉积	2~25米可达60米 颗粒细, 孔隙比大, 强度低, 常夹有泥炭薄层。
	溺谷相沉积	孔隙大, 结构疏松, 含水量高, 分布范围窄。
	滨海相沉积	大于60米可达200米 面积广, 厚度大, 夹有粉砂薄透镜体, 孔隙大。
	三角洲相沉积	分选性差, 结构不稳定, 粉砂薄层多, 有交错层理, 不规则尖灭层及透镜体夹层, 结构疏松。
内陆湖盆地	湖相沉积	小于20米 粉土颗粒成分高, 呈放射状分布, 层理均匀清晰, 表层多具有硬壳。
	河漫滩相沉积	沉积零乱, 岩性复杂, 有中细砂交错层, 呈透镜体分布。
	丘陵谷地相沉积	7~10米 呈片状、带状分布, 靠山边浅, 谷中心深, 具有较大的横向坡, 颗粒由山前到谷中心逐渐变细。

软土的成因类型决定着地基的地质成层条件: 泻湖及溺谷沉积, 颗粒常极细, 土质软弱, 多夹有薄层泥炭; 古湖泊、溺谷、泻湖、海岸的边缘地区, 将会有较粗颗粒的碎屑夹层沉积, 或者间有坡积沉积层的交替, 地基强度显著改善; 滨海沉积, 多为砂砾与淤泥揉杂, 更为疏松, 渗透率稍高; 三角洲的沉积含有无数的薄层粉砂, 有良好的水平渗透条件; 河漫滩的沉积, 岩性复杂, 富有中细砂的交错层, 且多呈透镜体分布, 一般说来从低阶地到河漫滩含水量逐渐增大, 沉积物愈年轻土质亦愈软弱; 丘陵谷地沉积多具有片状、带状, 厚度变化大, 底部常有明显的横向坡。

古埋藏谷的分布, 在测绘中常不容易发现, 因为它不能从近代地貌上去准确的辨认。因而穿越近代河谷边缘与山间谷地底部的较高路堤, 不能不慎重地布置适当的勘探。

通过测绘及勘探必须查明表层硬壳厚度以及软土底部的横向坡度, 以便作为稳定检算的依据。

查明地下水位的变化幅度, 分析硬壳土以及表层软土性质随季节变化的可能性, 并充分

估计施工取土的最不利条件。

另外还须注意查明有否层间水的存在，尤其在薄层、疏松、细颗粒的砂层中，要防止因承压水而导致稳定性降低的可能。

对现有建筑物（如堤防、道路、桥涵、水闸）要进行调查，了解其稳定程度，变形过程，建筑条件，结构与基础类型，以及成功与失败的经验教训。

另外，对路堤用土及基底加固的砂石材料产地的分布及蕴藏量，也应进行广泛的调查。尤其要注意在可耕面积以外取土的可能性。

第四节 软土地基的勘探

在软土地区修建铁路，除了首先应摸清它的地质条件、成因类型外，还须通过勘探查明软土的分布范围、厚度及其物理力学性质。因为可靠的设计依据，合理的布局，恰当的处理措施，都依赖于勘探结果的正确与否。以往多处病害工点的发生，都主要是由于事先没有进行详细的勘探工作所造成的。这些历史的经验教训值得注意，也说明了软土地区勘探工作的重要。

一、钻 探

在软土地基的勘测工作中，勘探点的布置，应根据地质测绘结果按路堤高度、软土的性质、成层情况以及横向坡度而定。大体上：

初测阶段：初步勘查线路附近软土的分布及厚度，并作代表性横断面勘探。

定测阶段：应按初步设计已确定的加固类型布置必要的钻探，在软土厚度变化点、横向坡度变化点的横断面钻探，要密一些。

路堤高度低于极限高度的地段及广阔、深厚而均匀的软土地区，钻探工作量可适当的减少。在狭窄的丘陵边缘，横向坡度较显著或成层比较复杂的情况下，钻孔必须加密。

软土地基的钻探工作，大部分是用人力钻与轻型螺纹钻结合进行的。轻型螺纹钻携带方便，钻进较快，特别用于查明软土的分布范围，是行之有效的探索工具。人力钻是软土钻探的主要工具，一般可达30米，可以详细的查明成层情况并采取原状土样。

二、取 土

1. 取土器：我们常用的取土器有以下二种。

1) 上提活阀式取土器：外径有108毫米和89毫米两种，上部封闭形式是橡皮垫密封式，下部为敞口式（如图1—1）。这种取土器的优点：

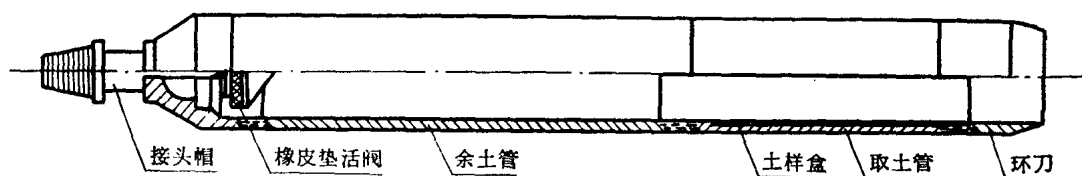


图1—1 上提活阀式取土器

A) 由于上部封闭形式是采用橡皮垫密封式，橡皮垫本身具有一定的弹性，当橡皮垫与接头帽之间有砂粒停留，亦不致于影响密封的可靠性，故封闭性能较好；

B) 余土管长450毫米，即使在清孔不好的情况下，也能保证土样的原状性；

2) 固定活塞取土器: 有复壁式固定活塞取土器 (图 1—2) 和薄壁式固定活塞取土器 (图 1—3) 两种。我们常用的是复壁式固定活塞取土器, 全长 1.5 米、外径 105 毫米、面积 100 厘米², 每次采取原状土样 0.8 米。

A) 取土器底部以活塞封底,到了取土部位时才把活塞杆打开,这样防止了孔壁及孔底的余土进入取土器内部,保证了采取比等于1.0或近于1.0;

C) 由于取土器上部的锥卡作用和活塞杆的固定, 压入过程中取土器不会压过头, 从而保证了土样的原状性;

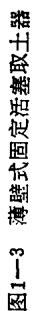
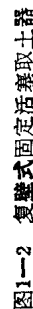
E) 宜用于连续取土的浅层钻孔。

A) 构造繁杂, 操作不便,
在深孔中取土不宜采用;

B) 孔內有余土，取土器到不了要取土的部位，如采取硬压的办法，容易破坏要取土的原状结构。

薄壁式固定活塞取土器的构造与复壁式固定活塞取土器基本相同，不同的是无衬筒，直接由取土器身取土。取土后将其卸下另换一取土器身，或将原取土器身之土样推出后再重复使用。

软土地区采取原状土样,清孔工作是一项极为重要的工序,清孔质量的优劣将直接影响到土样的质量。实践证明,往往由于清孔工作不良而造成土样的较短(冲毁)、余土过多、



土样受挤压、土样上部含水量增加、变软等现象，使土样结构受到破坏。因此，搞好清孔工作是保证采取高质量土样的重要环节之一。

软土清孔的工具具有：管钻，螺钻，空心螺钻（图 1—4），套螺钻（图 1—5）等。



图1-4 空心螺钻

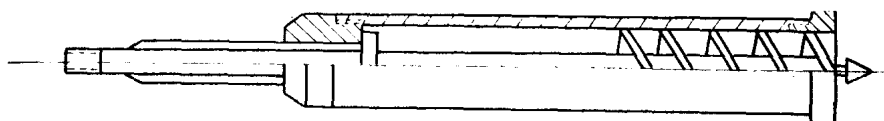


图1-5 套螺钻

人力钻清孔的方法，一般是先用螺纹钻钻进，再用管钻清孔。若孔内余土过多时应用管钻多清几次。

空心螺钻是软土地基清孔的一件好工具，钻进效率高，清孔干净，并能节省人力。

套螺钻也是清孔的有效工具之一，特别适用于缩孔严重的流动性软土地区清孔。

3. 取土方法及取土中应注意的事项：

取土方法有连续压入法，断续压入法，击入法，回转压入法四种。我们常用的方法是前三种。

连续压入法：即用组合滑轮装置（图 1—6）将取土器一次均匀、连续和较快地压入土中，或在土质较软的情况下，直接用管钳将取土器一次压入土中。由于土样进入取土器的过程是较快的、均匀的和连续的，土样受压缩及膨胀的反应就较小，土样边缘的扰动带也就微弱，所采取原状土样的质量也就高。这种方法是软土地区采取原状土样最好的一种方法。

断续压入法：即取土器进入土层的过程不是连续的，而是通过二次或多次间歇压入来完成。

击入法：一般应用在较硬的土层中，即在连续压入和断续压入无法采用的情况下，才应用这种取土的方法。击入法有两种，一种是孔上击入法，另一种是孔下击入法。孔上击入法（图 1—7）是用穿心重锤，孔上作业，将取土器击入土层取土。孔下击入法（图 1—8）是在孔下取土器上部套一穿心重杆或重锤，通过钻杆或钢丝绳牵引，往复击打取土器而进行取土。

回转压入法：一般适用在机动钻用回转压入式取土器（双层取样器）取土。取土时外层旋转，内层压入。

取土中应注意的事项：

1) 根据不同的地层及取土要求，合理的选择不同类型的取土器和取土方法；

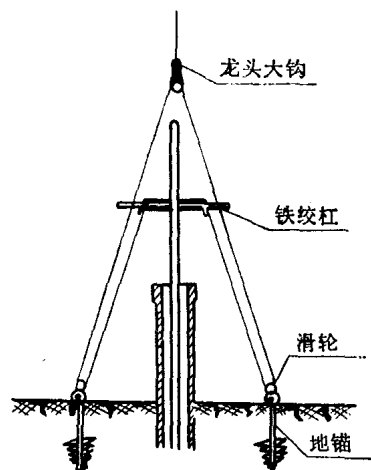


图1-6 组合滑轮装置

2) 要保证钻孔的垂直度, 若钻孔倾斜时, 取土器就容易刮擦孔壁, 从而造成取土器内余土过多, 使土样受挤压扰动;

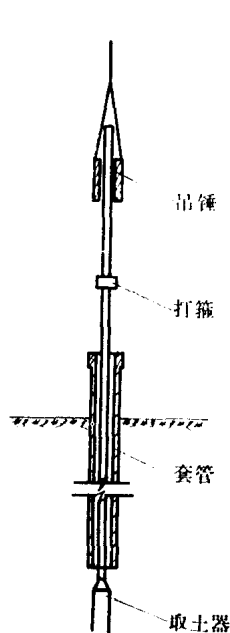


图1-7 孔上击入取土器

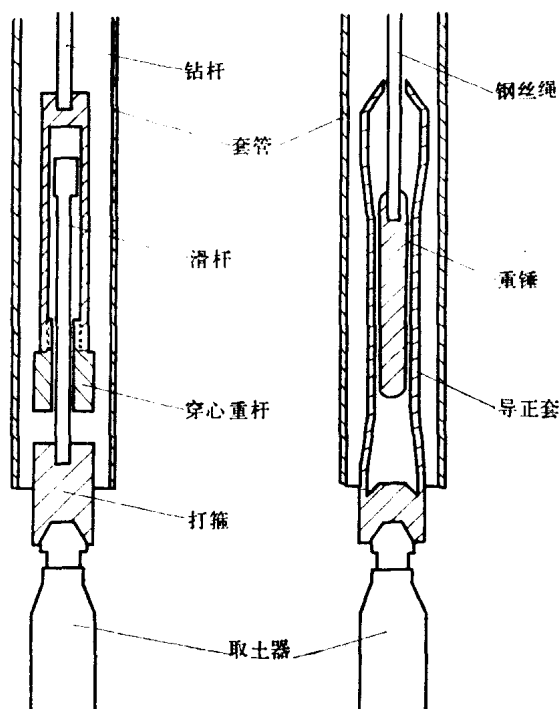


图1-8 孔下击入取土器

3) 软土地区钻探、取土严禁向孔内注水。孔内有水时要想办法掏干净, 尤其是在流动性大的软粘土中取土, 孔内有水常常不易取出土样;

4) 要保证孔内清洁, 只有较彻底地清除孔底残存余土, 才能有效的保证土样质量;

5) 在流动的软土地区取土, 一定要跟下套管, 但套管管靴必须高于取土部分10~20厘米, 以免造成土样的压密扰动;

6) 取土器装配好下入前, 要进行全面的检查, 下放取土器时不宜太快;

7) 正确的计算好要取土的部位、尺寸, 以免土样压过头;

8) 在流动的软土地区取土, 上提前严禁以旋转方式拧断土样, 从而破坏土样的原状结构 (实践证明以旋转方式拧断的土样其底部沿横断面切开后呈螺旋状, 说明土样的原状结构遭到了破坏);

9) 取土的方法宜采用均匀连续压入法及下击式重锤少击法;

10) 上提活阀式取土器一次压入深度以0.5米为宜, 若压入深度增加, 其土样边缘扰动带的宽度也会相应的增加, 这样就不能保证土样的质量;

11) 在技术孔中取土, 要注意取土器尺寸务必与试验仪器设备配套。

4. 野外土样原状程度的鉴定;

1) 取土器卸开后, 检查取土长度, 采取比是否等于或近于1.0, 从而确定土的扰动程度;

2) 将环刀处或土样的上部废土, 沿纵剖面切开, 观察两侧扰动带的大小, 微层理是否平直, 有无泥浆渗入, 颜色的变化等情况;

3) 将废土样沿横剖面切开, 观察土样的扭转, 腐植物形成孔隙的挤压及泥浆沿孔隙渗

入的情况；

4) 用手轻轻的压摸所取土样的上下部，是否软硬程度相等，若有上软下硬的现象，则说明土样上部扰动，含水量增加变软。

5. 土样包装、运送中应注意的事项：

1) 土样自钻孔中取出后，应立即进行封蜡，保持其天然含水量不变；

2) 天气炎热，封蜡后应将土样放置于阴凉处，严禁在阳光下暴晒；

3) 在寒冷地区工作时要采取保温措施，使土样取出封蜡后不致冻结破坏土的结构；

4) 土样在运送过程中应轻拿轻放，以避免震动。

三、十字板剪力试验

在软土地基的勘测工作中，常用十字板剪力仪在现场就地作试验，测定软土的天然强度和软土地基在受荷后不同时期的实际抗剪强度，用以校核地基的稳定性。

用十字板剪力仪在现场测定软土的抗剪强度，其优点是不需要采取原状土样，减少了对土样的扰动，并且避免了土样应力状态的改变，因而较大幅度地符合于实际情况。

以往的十字板剪力仪，在试验时需在每一十字板试验孔旁钻一校正孔，在该孔内用不带十字板的轴杆进行摩擦试验。实践证明，由于轴杆校正和十字板分为两孔进行，除了工作量大外，而且两孔的土质情况、钻探操作及孔壁状况不可能完全一样，致使试验成果误差有时很大。因此，近几年来有些单位已着手改进十字板剪力仪，以提高试验质量和工效。目前改进的型式计有电阻式十字板测头、离合式十字板测头和套筒式十字板测头等三种。

第二章 软土物理力学性质 指标间的相关关系

为了探索软土物理力学性质指标间的相关关系,依据我队多年来在全国各地区所取得的软土土工试验资料,对软土物理力学性质指标进行了数理统计。统计结果表明,软土的塑性指数与液限,以及在不同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量之间的相关性较为密切。我们认为从统计整理所得到的这两项相关方程式,可以做为初步设计和施工设计阶段的依据。天然含水量与抗剪强度间亦存在着一定的相关关系,但相关性较差。

相关关系的数理统计是以最小二乘法原理为基础。在进行数理统计之前,对各项指标采用了分组,然后按非等精度加权办法求得方程式以及相应的相关系数。

现将统计整理所得的几种物理力学指标间的相关方程式,以及相应的精度指标列下。

1. 塑性指数 I_p 与液限 W_L 的关系:

我们根据1416个塑液限的试验资料,经过统计整理得出软土的塑性指数与液限的相关方程式为:

$$I_p = 0.6856W_L - 7.558 \quad (2-1)$$

相关系数 $r = 0.90$;

相对误差 $c = 0.3\%$;

使用范围为 $I_p = 13 \sim 50\%$ 。

2. 不同固结压力 (p) 条件下的孔隙比 (e) 与天然含水量 (W) 之间的相关关系:

进行这项关系的统计是为了能迅速确定地基软土的压缩系数。根据593个压缩试验资料,经过统计分析分别得出粘土和砂粘土在不同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量的相关方程式列于表2-1,精度指标列于表2-2。为便于查用,我们又把表2-1中的相关方程式绘成粘土在不同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量关系图(图2-1)和砂粘土在不

孔隙比与天然含水量的相关方程式

表 2-1

压 力 p kg/cm ²	孔 隙 比 e	
	粘 土	砂 粘 土
0.00	$0.083 + 2.55W$	$-0.0125 + 2.9 W$
0.25	$0.120 + 2.38W$	$0.030 + 2.64W$
0.50	$0.157 + 2.20W$	$0.050 + 2.50W$
1.00	$0.215 + 1.93W$	$0.081 + 2.30W$
2.00	$0.286 + 1.59W$	$0.1545 + 1.95W$
3.00	$0.338 + 1.34W$	$0.2060 + 1.7 W$
4.00	$0.345 + 1.25W$	$0.246 + 1.51W$

表 2-2

精度指标

压力 $p(\text{kg/cm}^2)$	0	0.25	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
精度指标							
相 关 系 数 (r)	$\frac{0.97}{0.91}$	$\frac{0.97}{0.93}$	$\frac{0.95}{0.88}$	$\frac{0.97}{0.88}$	$\frac{0.93}{0.84}$	$\frac{0.91}{0.84}$	$\frac{0.87}{0.82}$
均 方 差	$\frac{0.0728}{0.0627}$	$\frac{0.0692}{0.0492}$	$\frac{0.0824}{0.0564}$	$\frac{0.065}{0.0591}$	$\frac{0.0797}{0.0601}$	$\frac{0.0812}{0.525}$	$\frac{0.0828}{0.0902}$
算术平均值均方差	$\frac{0.00724}{0.0051}$	$\frac{0.0098}{0.0063}$	$\frac{0.0082}{0.0045}$	$\frac{0.0064}{0.0047}$	$\frac{0.0078}{0.0049}$	$\frac{0.0083}{0.0043}$	$\frac{0.0085}{0.0041}$
相 对 误 差	$\frac{0.57}{0.54}$	$\frac{0.80}{0.71}$	$\frac{0.69}{0.53}$	$\frac{0.58}{0.57}$	$\frac{0.76}{0.62}$	$\frac{0.85}{0.76}$	$\frac{0.93}{0.56}$
最 大 误 差	$\frac{0.2184}{0.1881}$	$\frac{0.2076}{0.1476}$	$\frac{0.2472}{0.1692}$	$\frac{0.195}{0.1773}$	$\frac{0.2391}{0.1823}$	$\frac{0.2435}{0.1575}$	$\frac{0.2484}{0.151}$

注：横线以上为粘土，横线以下为砂粘土。

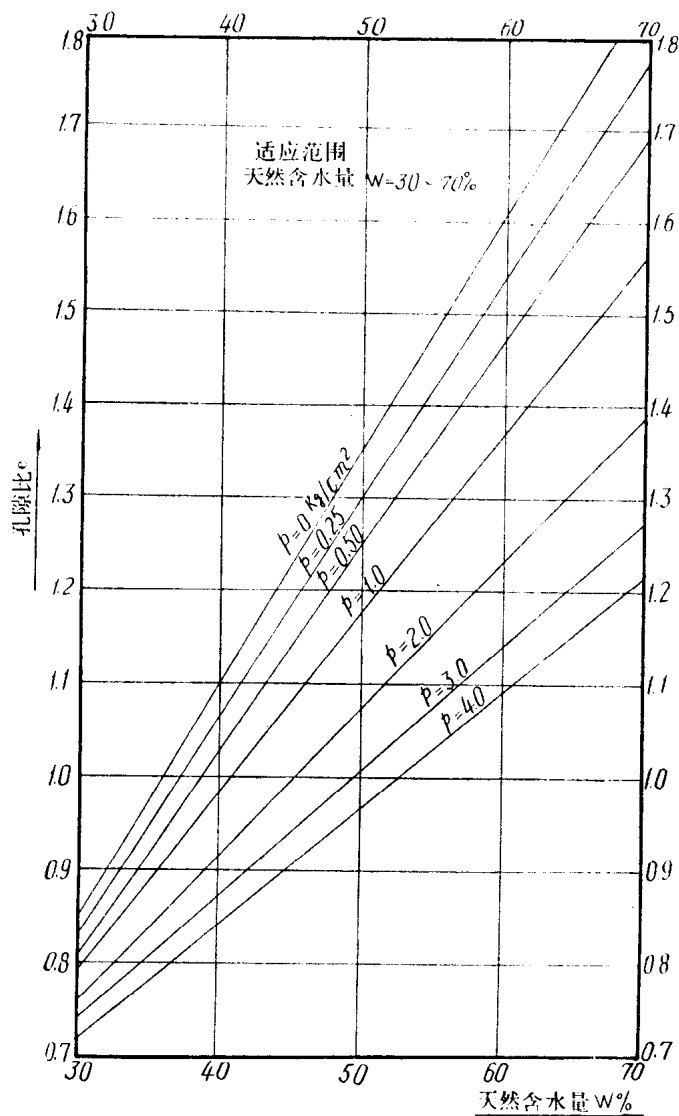


图2-1 粘土在不同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量关系图

同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量关系图（图 2—2）。从图 2—1 及图 2—2 中查得地基土自重压力 p_0 及自重压力和附加应力之和 p_2 作用下相应的孔隙比 e_0 及 e_2 ，代入下式即得所求之压缩系数 a 。

$$a = \frac{e_0 - e_2}{p_2 - p_0} \quad (2-2)$$

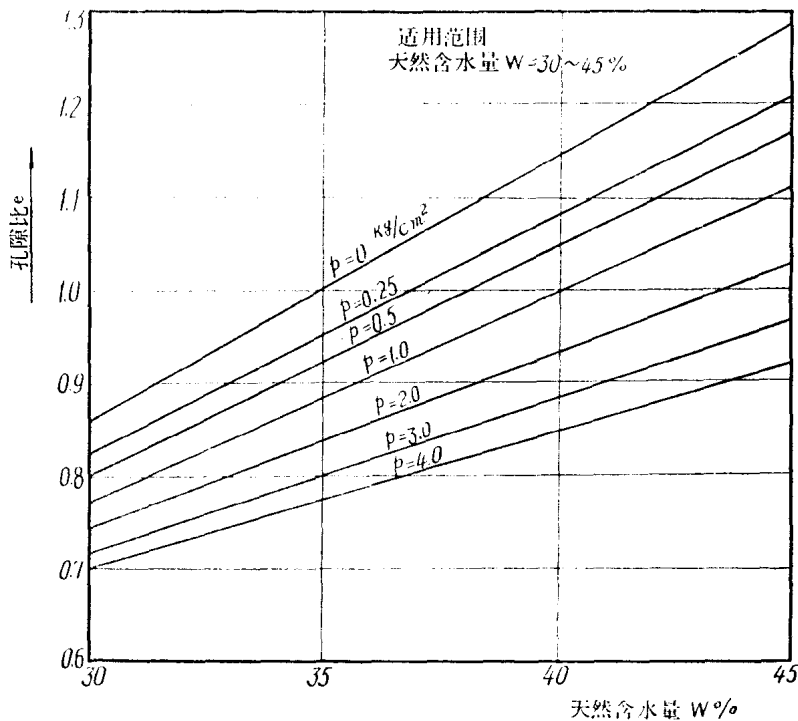


图2—2 砂粘土在不同固结压力条件下的孔隙比与天然含水量关系图

3. 关于天然含水量与天然容重的关系可根据含水量和孔隙比换算求得。

$$e = \frac{\Delta_s(1+W)}{\gamma} - 1 \quad (2-3)$$

$$W\% = \frac{S_r(\Delta_s - \gamma)}{\Delta_s(\gamma - S_r)} \times 100 \quad (2-4)$$

式中：
 e —— 孔隙比；
 W —— 天然含水量；
 Δ_s —— 土粒的比重；
 γ —— 土的容重；
 S_r —— 土的饱和度。

由于软土的饱和度一般都接近于 1。土粒的比重亦多在 2.67~2.74 之间，变化幅度不大，可以近似假设为 2.70。这样式 2—4 就可近似地等于下式。

$$W = \frac{2.7 - \gamma}{2.7(\gamma - 1)} \times 100 \quad (2-5)$$

第三章 软土地基上路堤的设计

第一节 软土的抗剪强度

如何正确地判定软土抗剪强度的数值和切实地掌握其在荷重作用下的变化规律, 是进行软土地基上路堤设计的重要依据。十年来, 我们结合我国软土的特点, 从工程实用的角度出发, 对软土抗剪强度这个疑难问题进行了摸索和实验。同时从我们自己经验中考证了国内外有关的研究成果, 并吸收了那些用得着的东西, 通过实践和考证使我们对软土抗剪强度的认识逐步由浅入深, 由片面到更多的方面, 逐渐地了解了软土的特殊性质和抗剪强度的变化规律。

土的抗剪强度 S 是由凝聚力 C 与摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 两部分之和组成。即:

$$S = C + \sigma \tan \varphi \quad (3-1)$$

式中, σ ——法向压力;

φ ——土的内摩擦角。

式(3-1)为一斜截式直线方程。这个方程里显然表明法向压力与抗剪强度 S 之间, 存在着一次函数的直线变化关系。这一假定对于软粘土而言与实际不符。这是因为在水下沉积的饱和软粘土中, 由于它自身具有压缩性高而透水性低的特性, 因而, 当应力状态改变时, 孔隙体积的改变及相应的含水量的改变都发生的相当缓慢, 由此发生了外力改变与含水量改变之间的时间延滞, 构成了孔隙水压力的产生和消散的过程。因此, 土体的被压密、破坏及抗剪强度的变化, 并非直接取决于法向总应力的改变, 而是与有效应力的大小直接发生关系, 这就形成了有效应力的概念。

有效应力 $\bar{\sigma}$ 是作用于土体的总应力与孔隙水压力 u 之差。即: $\bar{\sigma} = \sigma - u$, 因而式(3-1)应改写为:

$$S = C' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad (3-2)$$

式中, C' , φ' ——以有效应力表示的抗剪强度指标。

对于非饱和的粘性土, 其孔隙压力应是孔隙气压力和孔隙水压力两部分所组成。对于饱和的粘性土来说, 其土颗粒间的孔隙为水所充满, 因而孔隙压力就等于孔隙水的压力, 此时, 孔隙水压力又称作中性压力或中和压力。

近年来, 有些学者曾在水容积原理的概念上, 对于初始孔隙水压力的产生, 做出了孔隙水压力增量等于应力增量的假定。即, 当 $t = 0$ 时

$$\Delta u = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)$$
$$\Delta u = \Delta \sigma \quad [\text{对一元问题}] \quad (3-3)$$

式中, Δu ——孔隙水压力增量;

$\Delta \sigma$ ——附加应力增量;

$\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$, $\Delta \sigma_3$ ——大、中、小主应力增量。

另外土体的排水压密不但会在简单受压下发生，在剪力作用下也会产生附加压密现象。换句话说，组成应力增量 $\Delta\sigma$ 的平均压应力增量 $\Delta\sigma_m$ 和剪应力增量 Δt 都会使土体内孔隙水压力和含水量发生改变。因此，总的孔隙水压力变化 Δu 和含水量变化 ΔW 也应当分解为由压应力引起的和由剪应力引起的两部分组成：

$$\Delta u = \Delta u_o + \Delta u_v$$

$$\Delta W = \Delta W_o + \Delta W_v$$

以上叙述了孔隙压力的产生，下面再简要地谈谈孔隙压力的消散。

太沙基把由于有效应力的增加而使土体排水压密的过程，命名为固结过程。将研究有关土体排水压密、孔隙压力消散过程的理论称为固结理论。

目前，固结理论仍以太沙基提出的孔隙水微分方程作为基础。关于固结理论的假定及应用等问题，将在下面详述，在这里仅述及一些为讨论抗剪强度所必须明了的一些基本概念。

在漫长的地质历史过程中，天然地基的土体因自然的和人为的种种外界因素通过其内因而起作用，致使土体的抗剪强度变化得相当复杂。当人们欲在其上修造建筑物时，除了必须查清地层的生成情况和现有抗剪强度外，有时还需判明天然地基现处的压密状态。特别是在饱和软粘土地基上修建重要工程时，这一点就显得更为必要。

为了对天然地基不同的压密状态进行区分，对现有自重压力下刚好完全固结了的，即地基土自重应力完全转化成有效应力的，称为正常压密状态或正常固结状态；把在现有自重压力下尚未完全固结的，称为欠压密状态或欠固结状态；把地基土的天然密度超出了在现有自重压力下所能达到的压密程度者，称为超压密状态或超固结状态。

处于正常固结状态的饱和软粘土地基中，各点的孔隙水压力等于地下水位下相应的静力水头，各点的有效应力等于相应的自重压力下的总应力（地下水位以下的土体单位重应以浮重计）。当施加了附加荷载，使地基中某点的应力增加 $\Delta\sigma$ 后，该点的孔隙水压力也就相应的增加 Δu 。孔隙水压力超过静力水头的部分，称为超静水压力，其超静水头高即等于孔隙水压力增量 Δu 与水容重 γ_w 的比，即 $h = \Delta u / \gamma_w$ 。

处于欠固结状态的饱和软粘土地基中，各点的有效应力小于相应的自重压力下的总应力，二者的差值等于尚未消散的超静水压力。

处于超固结状态的饱和软粘土地基中，各点的有效应力大于相应的自重压力下的总应力，此时超静水压力为负值；只有当荷重增加到使地基中的应力超过有效应力时，才会出现新的超静水压力。

在正常固结的饱和软粘土地基上施加荷载，如果荷载是骤然施加的，那末，在加荷瞬时，地基中某点的总应力也突然增加，总应力的增量为由它而产生的孔隙水压力所承担。随着负荷时间的延续，孔隙水压力逐渐消散，总应力逐渐转化为有效应力，从而使抗剪强度获得增长。如果再继续加荷，土体内又会按照上述规律发展变化，而使抗剪强度继续获得增长

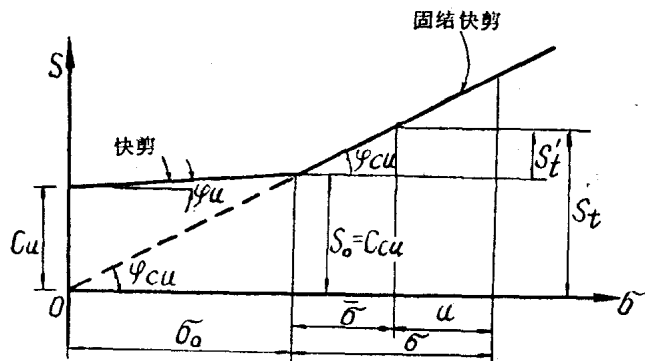


图 3-1 抗剪强度变化曲线（正常固结）