

文章编号:1006-2106(2006)06-0011-06

施工振动对结构性软粘土路堤稳定的影响*

曾庆军**¹ 莫海鸿¹ 廖建春² 李茂英³

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 广东省公路勘察规划设计院, 广东 广州 510507; 3. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650)

摘要:研究目的:解决施工振动对结构性软粘土产生破坏的机理,查明施工振动下软粘土路堤失稳原因,为结构性软粘土路堤施工稳定设计验算提供依据。

研究方法:基于珠江三角洲结构性软粘土物理力学性状、微结构特征,将冲击碾压施工振动对软粘土结构的破坏作用与强夯冲击振动的破坏作用相比较,同时分析珠三角某软粘土路堤受冲击碾压施工振动后失稳的原因。

研究结论:珠江三角洲絮凝结构软粘土的孔隙比大多大于2,灵敏度4~8,属高灵敏性粘土,强度低,内聚力2.36~9.56 kPa,内摩擦角1.4°~7.8°;冲击振动软粘土类似于强夯作用,微结构测试参数表明强夯冲击软粘土时增加的孔隙个数是静力堆载的7倍左右;冲击振动下结构性软粘土路堤失稳的原因是重16 t、大功率(200 kJ)冲击式压路机1 d内碾压低路堤10遍,其作用类似于连续的强夯夯击,地基4.7 m深度静力触探比贯入阻力值接近于0;建议在结构性软粘土路堤施工稳定设计验算时,对土的抗剪强度参数进行折减或直接采用土的振动强度参数。

关键词:软粘土;絮凝结构;施工振动;路堤稳定

中图分类号:TU447 **文献标识码:**A

Construction Vibration's Influence on Stability of Highway Embankment on Structural Soft Ground

ZENG Qing-jun¹, MO Hai-hong¹, LIAO Jian-chun³, LI Mao-ying²

(1. South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China; 3. Guangdong Highway Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510507, China)

Abstract; Research purposes: The mechanism of fracture of structural soft clay and the reason of failure of highway embankment are found out to provide evidence for design computation of construction stability of highway embankment on structural soft ground. **Research methods:** The mechanism of fracture of structural soft clay by vibrating road roller is compared to that by dynamic compaction on soft ground. And the reason of failure of highway embankment is analyzed based on the physical and mechanical properties and microstructure characteristics of soft clay in the Pearl River Delta.

Research conclusions: The depositional structure of soft clay is mainly characteristic of flocculent structure with high void ratio, lower shear strength and higher sensitivity. Dynamic vibration's effect on soft ground is similar to dynamic compaction's effect. The added number of void ratio by dynamic compaction on soft ground is 7 times as much as that by static load. The reason of failure of highway embankment is that the low embankment is placed by a dynamic vibrating

* 收稿日期:2006-02-20

基金项目:广东省交通厅资助科技项目

** 作者简介:曾庆军,1972年出生,男,副教授。

roller with 16 t weight, roller compaction for 10 times. It is suggested that the parameters of shear strength of soft clay should be reduced or doing design computation of construction stability of highway embankment on structural soft ground road in the condition of vibration vibrating.

Key words: soft clay; flocculating structure; construction vibration; stability of highway embankment

软粘土在我国分布十分广泛,在长江、珠江三角洲等近海地带尤为普遍。近海环境下沉积的软粘土工程性质差,常具有较强的结构性,受扰动(如施工振动)后结构破坏,其强度降低,与天然强度相差较大,直接影响到工程的稳定性。

荷载作用下,结构性软粘土尤其是淤泥、淤泥质粘土剪切破坏过程可划分成 3 个阶段:第一阶段,软粘土结构基本保持完好状态下的变形;第二阶段,软粘土结构大量破坏、塑性变形阶段,在不排水的条件下,孔隙水压力急剧上升,有较大剪切变形;第三阶段软粘土的性质已接近重塑土,为结构破坏阶段。图 1 为珠江三角洲结构性软粘土地基典型的十字板现场抗剪强度试验的转角-强度关系曲线,显然扰动软粘土强度比原状软粘土强度低许多。由图 1 还可看出原状软粘土的变形破坏过程具有明显的阶段性,阶段性的过渡点为点 A、B,扰动软粘土的十字板转角-强度曲线也表现出较明显的阶段性,但其各个阶段变化的幅度比原状土的小一些,并且也没有明显的极限抗剪强度。

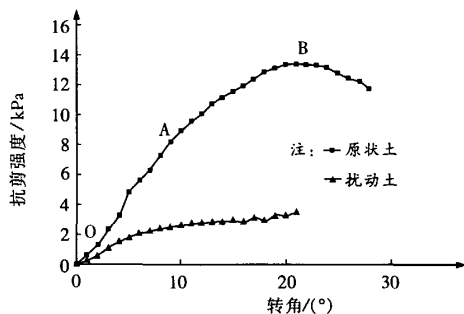


图 1 典型的十字板转角-强度曲线

在软粘土地基上修建工程,必须考虑软粘土结构破坏对工程的影响,尽量减少对原状软粘土的扰动(如施工振动)。本文主要结合珠江三角洲结构性软粘土物理力学特性、微结构参数,开展施工振动结构性软粘土对路堤稳定影响的讨论。

1 珠江三角洲软粘土的絮凝结构

土的结构概括地说是指土的物质组成,包括土的颗粒和孔隙、它们的空间相互排列,以及土粒之间的联结特征的综合。软粘土的结构很大程度上受沉积环境的影响,由于近海含盐量大,珠江三角洲近海沉积软粘土的结构特征以絮凝结构为主。絮凝结构是粘土颗粒

或聚粒以边-边、边-面方式相互联结在一起,形成絮凝状结构或称为细胞状结构、蜂窝状结构。图 2 为(北)京珠(海)高速公路广(州)珠(海)段灵山试验路段(位于广东番禺地区)的天然软粘土絮凝结构照片(放大 10 000 倍),图 3 为广东珠海某工程地基下的天然软粘土微结构照片(放大 10 000 倍)。



图 2 广东番禺软粘土絮凝结构(10 000 倍)

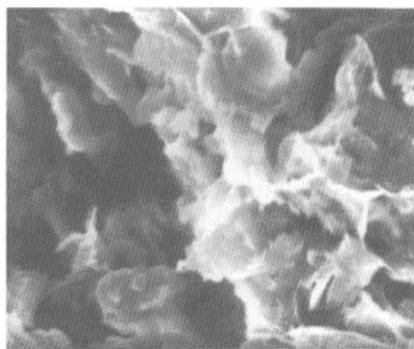


图 3 珠海软粘土絮凝结构(10 000 倍)

絮凝结构是粘土堆积物中所有微结构中最疏松和最不牢固的一种结构类型,具有此种微结构的软粘土孔隙率高(60%~90%),天然含水量为 55%~100%,常高于它的液限值,结构单元主要是靠凝聚型接触相接触。珠江三角洲软粘土孔隙比在很多地区大于 2,含水量一般大于 60%,广东台山、新会、珠海、江门一带含水量高于 60%,甚至高达 90%。因此广东航盛工程公司王盛源教授亦称此类软粘土的结构为空架结构,具有“三高两低”(高含水量、高压缩性、高粘粒含量、低强度、低透水性)的特点。

2 珠江三角洲絮凝结构软粘土的强度及其振动损失

2.1 珠江三角洲原状软粘土的抗剪强度

絮凝结构软粘土的抗剪强度仍主要以强度参数 c (内聚力) 和 φ (内摩擦角) 来表示。内聚力的大小取决于土粒之间的连接力与土粒间的定向程度, 内摩擦角的大小取决于土粒或凝聚体的表面性质和有效接触面积。

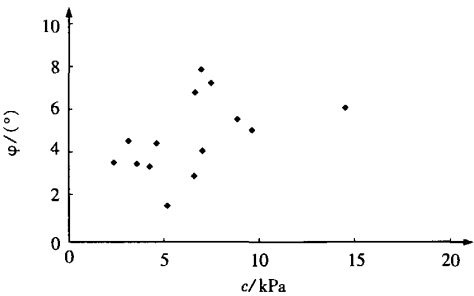


图4 珠三角地区淤泥直接快剪指标

图4是珠江三角洲地区十几项高速公路工程原状淤泥室内直接快剪试验指标 c 、 φ 值的散点图, 絮凝结

构淤泥的内聚力和内摩擦角都很低, 内聚力 2.36 ~ 9.56 kPa, 内摩擦角 1.4° ~ 7.8°。絮凝结构软粘土尤其是淤泥(质粘土)颗粒及其凝聚体的定向程度很低, 在外力作用下, 仍表现出一定的内聚力, 但由于土粒单元体之间接触面积小, 相互作用力很微弱, 在很低的外力作用下, 土体结构即会发生变化, 宏观表现为直接快剪试验指标 c 、 φ 值比一般粘性土低。

2.2 公路施工振动(冲击)对絮凝结构软粘土的破坏作用及强度损失

絮凝结构软粘土的“边-面”和“边-边”电性连接有一定强度, 但在强烈振动或搅动的情况下, “边-面”和“边-边”的电性连接减弱或断开, 土体强度会迅速下降。软粘土的灵敏度表征软粘土的结构性对强度的影响, 灵敏度越大, 则其结构性对强度的影响越大。珠江三角洲软粘土的灵敏度一般在 4~8 之间, 属于高灵敏性的软粘土。在恢复静止状态之后, 强力分开的带电“边”和“面”可以重新发生“边-面”“边-边”的连接, 部分地恢复软粘土强度, 但其过程十分缓慢。

2.2.1 珠江三角洲某堆场工程强夯冲击处理淤泥地基对淤泥絮凝结构的破坏

表1 广东东莞某堆场工程微结构参数统计表

| 钻孔号 | 土样的位置/m | 土样状态 | 孔隙率/% | 孔隙总个数 | 总孔隙面积/ μm^2 | 平均孔隙面积/ μm^2 | 平均孔隙直径/ μm | 平均孔隙周长/ μm |
|---------|-----------|------|-------|---------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ZK1 | 8.4~8.6 | 天然 | 61.92 | 111 145 | 43 543 | 0.391 768 | 0.706 268 | 1.868 234 |
| ZK2 | 5.2~5.4 | 强夯冲击 | 55.44 | 231 161 | 38 951 | 0.168 502 | 0.463 188 | 1.225 234 |
| ZK3 | 8.9~9.1 | 强夯冲击 | 54.89 | 242 332 | 38 633 | 0.159 422 | 0.450 535 | 1.191 766 |
| ZK4 | 11.5~11.7 | 强夯冲击 | 57.73 | 219 581 | 39 283 | 0.178 900 | 0.477 265 | 1.262 473 |
| 夯后平均值 | | | 56.02 | 231 024 | 38 956 | 0.168 940 | 0.463 663 | 1.226 491 |
| 天然与夯后之差 | | | 5.90 | 119 879 | 4 587 | 0.222 828 | 0.242 605 | 0.641 743 |
| 差值百分比/% | | | 9.5 | 107.86 | 10.50 | 56.90 | 34.40 | 34.40 |

对广东东莞某堆场工程强夯法冲击加固软粘土地基进行微结构测试。该工程地面以下有 9 m 淤泥, 含水量 66.9 %, 孔隙比 1.788, 压缩系数 1.40 Mpa^{-1} , 渗透系数 $1.97 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。淤泥下为中粗砂层、砾砂层。为实施强夯法冲击处理淤泥地基, 在地表耕植土上填中细砂 3.5 m, 淤泥中设置 1.5 m 间距的袋装砂井, 单击夯的能量为 $2\,250 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 施工期总的夯沉量为 63.8 cm。施工完成后取土做微结构测试试验, 其中 1 孔在天然地基上, 土样位于地面下 8.50 m; 加固区 3 孔, 为排除砂井施工干扰, 3 孔处于袋装砂井之间, 土样位于 5.3 m、9.0 m、11.6 m 处。

将所测定的软粘土微结构资料汇总于表 1 中。由表 1 可看出: 9 m 厚淤泥经强夯冲击后已降低孔隙率 5.9 %, 孔隙个数增加 1 倍, 总孔隙面积降低 10.5 %, 平均孔隙直径和孔隙周边长均减少 34.4 %; 而采用堆载预压法(填土高 5 m)处理京珠高速公路广珠段灵山

试验路段软粘土路基后, 路基下相当深度软粘土的孔隙率仅降低 2.38 %, 孔隙个数仅增加 14.42 %, 总孔隙面积仅降低 5.5 %, 平均孔隙直径仅减少 5.19 %, 平均孔隙周边长仅减少 6.12 %; 这说明强夯法冲击破坏软粘土絮凝结构的程度比静态堆载要强烈许多, 强夯的冲击能量对软粘土絮凝结构的改变程度远大于静力压缩。

必须说明的是, 在此项强夯冲击处理淤泥地基工程中, 由于淤泥絮凝结构破坏后, 强度损失较大, 强度恢复缓慢, 强夯施工完成后 4 个月, 即等淤泥强度有所恢复后才进行 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的大型载荷试验检测。

2.2.2 珠江三角洲公路工程软粘土路基处理中施工振动造成絮凝结构软粘土强度损失

在珠江三角洲地区絮凝结构软粘土地基上进行公路工程施工, 同样不同程度上会对软粘土的结构造成破坏, 从而引起软粘土强度的损失, 应重视软粘土结构

的破坏对其强度的影响。在软粘土路基中插设袋装砂井或塑料排水板等排水体施工时插板机的振动作用、路堤填筑施工时碾压机械尤其冲击式碾压机械的振动作用对软粘土结构破坏以致强度损失的影响较大。

在软粘土尤其淤泥(质粘土)路基中插设 1 根砂井或塑料排水板时对土体的扰动半径一般都有 0.3 ~ 0.4 m。如果竖向排水体的间距过小,则整个加固区的淤泥(质粘土)土将全部成为重塑土,将严重削弱淤泥(质粘土)的强度,容易在堆载时发生土体滑动;另外,重塑软粘土的渗透系数和固结系数将下降,造成软粘土路基固结时间延长,很难保证固结效果和工期。深(圳)汕(头)高速公路试验段测得软粘土路基中插设袋装砂井和塑料排水板的施工振动引起强度损失降低情况为:一是振动后软粘土地基的强度约为天然地基强度的 55 %,降低近 45 %;二是插塑料排水板振动软粘土路基,其强度降低幅度小于插设袋装砂井,两者相差 15 %,即插设塑料排水板对软粘土路基的振动影响小于插设袋装砂井。

路堤填筑时,如果采用大型冲击式碾压机械,其作用类似于连续的强夯,在连续多次的振动冲击波作用下,软粘土中超孔隙水应力相应多次叠加,但其消散缓慢,造成软粘土絮凝结构的破坏,从而强度降低较大,危及路堤稳定安全。由于絮凝结构是最不牢固的一种软粘土结构类型,在荷载尤其动荷载(如施工振动)下原结构容易破坏,因此在珠江三角洲软粘土地区进行工程建设必须考虑软粘土的结构性,尽量避免施工扰动(如机械振动)造成结构性软粘土强度降低。

3 冲击式碾压机械路堤填筑引发软粘土路基上路堤失稳的实例分析

3.1 工程概况

3.1.1 工程地质条件与工程设计情况

珠江三角洲某高速公路主线路基长 2 km,位于饱和软粘土地区,软粘土主要为深灰、灰黑色流塑状淤泥与淤泥质土,淤泥厚 4 ~ 12 m,淤泥层厚且分布不均匀,物理力学性质指标较差:含水量 46.2 % ~ 84 %;压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ 一般为 0.97 ~ 1.82 MPa⁻¹;天然状态地表下 8 m 十字板抗剪强度 C_u 为 11.9 ~ 24.8 kPa,标贯击数为 1 ~ 2 击,天然地基承载力一般为 40 ~ 70 kPa;孔隙比 1.66 ~ 2.14;固结系数 C_v 量级为 10⁻⁴ cm²/s。

软粘土路基设计宽度为 35 m,填土厚度 4.4 ~ 6 m,边坡坡比为 1 : 1.5。软基处理采用“砂垫层 + 袋装砂井 + 1 层或 2 层土工格栅 + 等(超)载”的处理方案。袋装砂井按正三角形布置,间距为 1.1 ~ 1.2 m,长度

为 10 ~ 17 m。

3.1.2 路堤失稳情况

施工垫层、袋装砂井、土工格栅施工历时 4 个月,然后进行路堤(石方)填筑。路堤填料为松动爆破山石,由于山石尺寸较大,每层填石厚度大多为 0.6 ~ 0.7 m。路堤填筑施工近 2 个月,路堤高仅 1.1 ~ 1.8 m 时路堤两侧表面出现多处纵向裂缝,路堤左侧裂缝平面纵向为 82 m,路堤开裂线与路堤外弧线最大距离为 33.25 m;路堤右侧裂缝平面纵向为 103 m,路堤开裂线与路堤外弧线最大距离为 28.52 m。路基滑塌造成路堤出现裂缝,路堤左侧裂缝宽最大 73 cm,右侧裂缝宽最大 115 cm。路堤发生滑坡破坏。

3.2 路堤失稳原因分析

路基滑塌、裂缝出现后,对滑塌段拉设彩带封闭警示、停止施工外,还加强了一系列的监控措施,包括对裂缝位置路基左右侧补钻了 8 个静力触探孔(6 个在破坏范围内,2 个为原状土)和少许十字板强度测试,进一步摸清地基情况,新设了一个沉降观测断面。

3.2.1 主要原因

3.2.1.1 碾压施工情况

由于山石尺寸较大,路堤填筑中每层填石厚度大多为 0.6 ~ 0.7 m,0.7 m 厚的填石相当于 0.98 m 厚的中粗砂。首层填石现场检查后认为以重 18 t 光轮振动压路机碾压达不到质量要求,为提高路堤密实度,后续填石碾压施工增加了 1 台重 16 t、功率 200 kJ 的冲击式压路机进行冲击式碾压,并提高了填石厚度增量约 0.1 m。冲击式压路机路堤压实情况见表 2。施工过程中,实测的沉降速率均小于设计要求的 15 mm/d。

表 2 冲击式压路机路堤压实情况表

| 路段 | 填石层数、厚度 | 冲击碾压遍数 | 路堤沉降速率 |
|---------|---------------|--------|------------|
| 路堤失稳第一段 | 2 层,厚度约 1.1 m | 10 | 小于 15 mm/d |
| 路堤失稳第二段 | 3 层,厚度约 1.8 m | 10 | 小于 15 mm/d |
| 非路堤失稳段 | 4 层,厚度约 2.6 m | 5 | 小于 15 mm/d |

路堤失稳段冲击碾压遍数均为 10 遍,均在 24 h 内完成冲击碾压,相当于连续强夯冲击,而且填石厚度仅 1.1 ~ 1.8 m,重 16 t、功率 200 kJ 的冲击式压路机产生的应力波破坏软粘土絮凝结构,降低地基承载力,路基滑塌范围地表下 4.7 m 深度范围内静力触探比贯入阻力 P_s 值接近于 0。而非路堤失稳段碾压遍数仅为 5 遍,填石厚度却是 2.6 m,冲击式压路机产生的应力波对软粘土絮凝结构破坏相对较小。

3.2.1.2 强度测试情况

路基滑塌范围进行的静力触探试验表明地表下

4.7 m 深度范围内比贯入阻力 P_v 值接近于 0。另外补充勘察资料表明,与勘察资料中软粘土的强度值相比,路堤失稳段软粘土强度有明显的下降,二者的十字板剪切强度比较如图 5 所示。

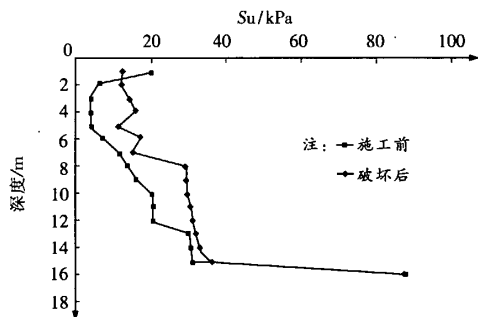


图 5 破坏前后软土的十字板剪切强度

3.2.2 其它原因

软粘土路基段淤泥性质差,淤泥厚度分布较不均,填石进度偏快,地基承载力不够,纵横向产生不均匀沉降所导致。

3.3 从路堤填石极限高度的角度分析路堤失稳原因

路堤填石的极限高度可按式(1)计算:

$$H_c = 5.52 \frac{C_u}{k\gamma} \quad (1)$$

式中 H_c ——路堤填石极限高度(m);

C_u ——软土的不排水抗剪强度(kPa),可取现场十字板剪切强度;

γ ——填石的容重,取 25 kN/m^3 ;

k ——安全系数,按《地基处理手册(第二版)》取 1.3。

取勘察报告中原状土十字板剪切强度最低值 11.9 kPa (见图 5),按式(1)计算所得的路堤填石极限高度 $H_c = 2.02 \text{ m}$,若安全系数 $k = 1.1$,则 $H_c = 2.4 \text{ m}$ 。计算结果说明,无论从路堤填筑施工工艺,设计计算上均难以解释路堤在填筑仅 $1.1 \sim 1.8 \text{ m}$ 就发生路堤出现大裂缝而失稳破坏的原因。

但若取路堤失稳段路堤失稳后补充勘察资料中提供的扰动土十字板剪切强度最低值 3.86 kPa ,由公式(1)计算所得的路堤填石极限高度 $H_c = 0.66 \text{ m}$,若安全系数

$k = 1$,则 $H_c = 0.73 \text{ m}$ 。这说明冲击式碾压机械施工对路基结构性软粘土的扰动,造成软粘土强度急剧下降是路堤发生失稳破坏的主要原因。为提高路堤填石的密实度,大功率冲击式压路机(重 16 t ,功率 200 kJ) 10 次冲击碾压路堤相当于连续强夯冲击,虽然对填石路堤起到挤密和压碎效果,在路堤较低(小于 2 m)时,其产生的很大的应力波却足以破坏软粘土原有的絮凝结构,使软粘土受到很大的扰动,强度急剧降低。

4 结构性软粘土路基上考虑动荷载(含施工振动)的路堤稳定分析建议

4.1 动荷载对路基的影响程度

软粘土路堤的稳定计算工况可分为施工期和运营期。崔伯华、谭祥韶等(2005 年)在广东佛山环城公路上采用特制仪器进行了“车辆周期荷载下高速公路路基土压力测试”,测试表明车速 30 km/h 时,测得的动响应影响深度在 2.1 m 左右;日本道路协会编的《软土地基处理技术指南》指出:“一般地说,路面下 $2.0 \sim 2.5 \text{ m}$ 以下的低路堤,经常遭到不均匀沉降的危害,必须按照道路的性质,采取一定的措施,以便能充分适应交通荷载引起的不均匀沉降和随之发生的变形”。因此一般认为运营期汽车的振动荷载在路堤较高(大于 2.5 m)情况下,对路基的影响很小。

但施工期宜考虑由于施工振动对软粘土结构引起的破坏作用对路堤稳定性的影响。

按《公路路基设计规范》(JTGD30),软粘土地基路堤的稳定验算一般采用瑞典圆弧滑动法中的固结有效应力法、改进总强度法,有条件时也可采用简化 Bishop 法、Janbu 普遍条分法。

4.2 考虑动荷载(含施工振动)扰动强度时对软粘土地基路堤稳定分析的建议

改进的总强度法由于与原位地基测试结果结合起来,是一高效可靠的途径。当采用改进的总强度法验算时,可在施工扰动范围内直接采用扰动土十字板抗剪强度进行计算。而采用固结有效应力法验算时,将《公路路基设计规范》(JTGD30)中式(7-1)稳定安全系数计算式改进为:

$$F = \frac{\left[\sum_A (\alpha_i C_{qi} L_i + W_{Ii} \cos \alpha_i \tan(\beta_i \varphi_{qi})) + \sum_B W_{IIi} \cos \alpha_i U_i \tan \varphi_{qi} \right] + \sum_C (c_{qi} L_i + W_{IIi} \cos \alpha_i \tan \varphi_{qi})}{\sum_A (W_I + W_{II})_i \sin \alpha_i + \sum_B W_{IIi} \sin \alpha_i} \quad (2)$$

式中 c_{qi}, φ_{qi} ——原状地基土和路堤填料快剪试验测得的内聚力和内摩擦角;

φ_{qi} ——原状地基土固结快剪试验测得的内摩擦角;

U_i ——原状地基平均固结度;

α_i ——原状地基土受扰动后内聚力的折减系数,宜按地区试验确定;

β_i ——原状地基土受扰动后内摩擦角的折减系

数,宜按地区试验确定。
其余符号见图6。

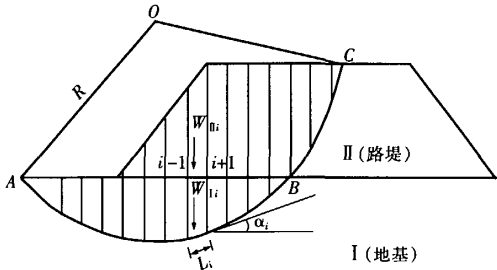


图6 安全系数计算简图

地基土受扰动后的内聚力和内摩擦角折减系数,可以通过取样在室内进行试验测量土的动、静强度比较得出。表3是天津塘沽地区5项工程中在室内试验时饱和软粘土动、静强度对比关系。饱和软粘土在振动荷载(2 Hz的正弦波)作用下,强度比其静强度都有明显的降低,荷载循环次数越多,强度减少越多。当破坏应变取10%,固结压力为100 kPa且振动30次时,动强度比静强度减少10%~20%。

表3 天津塘沽饱和软粘土动、静强度比较表

| 动 静 强 度 序 号 | 静强度 | | 动强度 | | | | | |
|----------------------------|-------|------|---------------|------|----------------|------|----------------|------|
| | | | 破坏应变 取 5 % | | 破坏应变 取 10 % | | 破坏应变 取 15 % | |
| | c | φ | c | φ | c | φ | c | φ |
| 1 | 0.26 | 22.8 | | | | | 0.06 | 19.5 |
| 2 | 0.10 | 17.0 | 0.06 | 15.5 | 0.06 | 17.0 | 0.08 | 16.4 |
| 3 | 0.21 | 16.0 | 0.08 | 16.5 | 0.14 | 16.0 | 0.16 | 15.5 |
| 4 | 0.24 | 14.0 | 0.09 | 16.5 | 0.09 | 17.1 | 0.11 | 16.4 |
| 5 | 0.195 | 14.1 | 0.11 | 19.0 | 0.11 | 18.5 | 0.11 | 19.0 |

注:表中c代表内聚力(kPa);φ代表内摩擦角(°)。

5 结论与建议

5.1 珠江三角洲软粘土结构特征表现为絮凝结构(或称蜂窝结构、空架结构),具有“边-面”、“边-边”弱连接,孔隙比大多大于2,灵敏度一般为4~8,属高灵敏性粘土。珠江三角洲十几项高速公路工程原状淤泥室内直接快剪强度很低,内聚力为2.36~9.56 kPa,内摩擦角1.4°~7.8°。

5.2 强夯法冲击破坏软粘土絮凝结构的程度比静态堆载要强烈许多,强夯的冲击能量对软粘土絮凝结构

的改变程度远大于静力压缩,如强夯冲击软粘土时增加的孔隙个数是静力堆载的7倍左右。

5.3 絮凝结构是最不牢固的一种软粘土结构类型,絮凝结构软粘土对施工振动反应灵敏,软粘土地基处理时路基中打设袋装砂井、塑料排水板等排水体施工对软粘土结构具有破坏作用,降低软粘土强度幅度近45%。大型冲击式碾压机械填筑路堤,其作用类似于连续的强夯夯击,造成软粘土絮凝结构的破坏,从而强度降低较大,危及路堤稳定安全。因此在珠江三角洲软粘土地区进行工程建设必须考虑软粘土的结构性,尽量避免施工振动造成结构性软粘土强度降低。

5.4 工程事故实例分析表明,路堤失稳的主要原因是:路堤填石高度仅1.1~1.8 m时(小于按原状土强度计算的填石路堤极限高度2.02 m),重16 t、大功率(200 kJ)的冲击式压路机24 h内对填石路堤冲击碾压10遍,产生的应力波破坏软粘土絮凝结构,地表下4.7 m深度范围内静力触探比贯入阻力 P_v 值接近0。路堤高度较低时(实例中小于2 m),路堤填筑不宜采用大功率冲击压路机械(实例为200 kJ)。

5.5 在路堤施工稳定计算时,应考虑路基软粘土受施工振动带来的影响,所采用计算参数宜对土的抗剪强度参数进行折减或采用振动强度参数。下一步建议对结构性软粘土地基填石路堤填筑工艺进行理论和实践研究,还可开展珠江三角洲区域性、结构性软粘土动、静强度对比试验研究。

参考文献:

[1] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形[M]. 南京:人民交通出版社,1987.

[2] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京:东南大学出版社,1990.


[3] 河海大学,等. 交通土建软土地基工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[4] 陈环. 天津软土地基[M]. 天津:天津科学技术出版社,1987.

[5] 刘吉福,杨春林. 珠江三角洲地区竖向排水体施工扰动初探[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):142-147.

[6] 崔伯华,谭祥韶,等. 强夯与汽车动荷载下高速公路路基基土压力测试与分析研究[C]//龚晓南. 高速公路地基处理理论与实践. 北京:人民交通出版社,2005.

(编辑 马 丽)

作者：[曾庆军](#)，[莫海鸿](#)，[廖建春](#)，[李茂英](#)，[ZENG Qing-jun](#)，[MO Hai-hong](#)，[LIAO Jian-chun](#)，[LI Mao-ying](#)
作者单位：[曾庆军, 莫海鸿, ZENG Qing-jun, MO Hai-hong \(华南理工大学, 广东, 广州, 510640\)](#)，[廖建春, LIAO Jian-chun \(广东省公路勘察规划设计院, 广东, 广州, 510507\)](#)，[李茂英, LI Mao-ying \(广东交通职业技术学院, 广东, 广州, 510650\)](#)
刊名：[铁道工程学报](#) 
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年，卷(期)：2006 (6)
被引用次数：1次

参考文献(6条)

1. [魏汝龙](#) [软粘土的强度和变形](#) 1987
2. [高国瑞](#) [近代土质学](#) 1990
3. [河海大学](#) [交通土建软土地基工程手册](#) 2001
4. [陈环](#) [天津软土地基](#) 1987
5. [刘吉福](#); [杨春林](#) [珠江三角洲地区竖向排水体施工扰动初探](#) [期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2003 (01)
6. [崔伯华](#); [谭祥韶](#) [强夯与汽车动荷载下高速公路路基土压力测试与分析研究](#) 2005

本文读者也读过(7条)

1. [王继华](#); [彭振斌](#); [王赓](#) [强夯排水固结法处理软基效果综合分析](#) [期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2008, 20 (2)
2. [李占强](#); [杨为民](#); [赵常州](#); [LI Zhanqiang](#); [YANG Weimin](#); [Zhao Changzhou](#) [夯实高饱和度地基土的强度特性](#) [期刊论文]-[北京科技大学学报](#) 2005, 27 (2)
3. [毛天尔](#); [夏林](#); [MAO Tian-er](#); [XIA Lin](#) [鄂北膨胀土的微组构特征试验研究](#) [期刊论文]-[华中科技大学学报（城市科学版）](#) 2010, 27 (2)
4. [赵常洲](#); [王晖](#); [杨为民](#); [Zhao Changzhou](#); [Wang Hui](#); [Yang Weimin](#) [夯实地基土的微结构特性及其对工程性质的影响](#) [期刊论文]-[岩土工程技术](#) 2005, 19 (2)
5. [王敏](#); [曹平](#); [WANG Min](#); [CAO Ping](#) [强夯压实黄土的工程力学性质试验研究](#) [期刊论文]-[水利与建筑工程学报](#) 2008, 6 (3)
6. [张清峰](#); [ZHANG Qingfeng](#) [强夯加固煤矸石地基物理模拟试验研究](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2010 (2)
7. [水伟厚](#); [裴捷](#); [王铁宏](#); [王亚凌](#); [Shui Weihou](#); [FEI Jie](#); [WANG Tiehong](#); [Wang Yaling](#) [碎石回填地基在10000kN·m高能级强夯前后土性变化研究](#) [期刊论文]-[建筑施工](#) 2005, 27 (6)

引证文献(1条)

1. [何平](#); [王勇](#) [考虑软土流变和损伤的比奥固结有限元分析](#) [期刊论文]-[平顶山工学院学报](#) 2008 (2)

引用本文格式：[曾庆军](#); [莫海鸿](#); [廖建春](#); [李茂英](#); [ZENG Qing-jun](#); [MO Hai-hong](#); [LIAO Jian-chun](#); [LI Mao-ying](#) [施工振动对结构性软粘土路堤稳定的影响](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006 (6)