

高饱和土固结及饱和度对土体固结的影响

金志高

(宁波建设集团股份有限公司, 浙江宁波 315010)

[摘要] 以 Terzaghi 土体固结理论和 Biot 固结理论为基础, 按饱和度不同的分类, 研究了高饱和土固结机理及过程, 深入分析了高饱和土饱和度变化对孔隙流体压缩性的影响, 以及由此影响到高饱和土的固结全过程。

[关键词] 固结; 饱和度; 体变模量; 压缩

[中图分类号] TU20 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)09-0073-04

1 引言

天然土体一般是由矿物颗粒构成骨架、孔隙水和气体以不同形式填充在骨架空隙中, 构成一个复杂的三相体系。土骨架的压缩性较大, 而孔隙流体压缩性较小。

土体的固结过程一般是指在外力作用下土体压缩并排水, 外力作用通过孔隙水传递到土骨架并使其达到稳定变形。研究土体固结的重点在于含水土体的变形过程和变形终值。土体变形终值与土骨架最终有效应力有关, 与外部载荷作用的大小和形式有关, 与时间无关。

饱和土实际上是水充满土骨架孔隙的两相体系, 水的压缩模量较土骨架大得多, 水本身的压缩可以忽略。土中水的体积变化的主要原由是孔隙水的渗出。

2 饱和土固结

2.1 饱和土的固结过程

饱和土的固结过程可以由充满水的内置弹簧缸体来说明, 如图 1 所示。

弹簧与活塞固定连接, 活塞上开着许多透水小孔, 以弹簧模拟易变形的土骨架, 以缸中水模拟孔隙水。当活塞受压的一瞬间, 弹簧不受压, 全部压

力由水承担。水受到超静孔压后从孔中排出, 活塞同时下降, 此时, 弹簧开始逐渐受压而承担部分外加荷载。随着水从小孔中不断排出, 弹簧渐渐压缩直至与外力荷载平衡。饱和土体受压固结与这种情况相似。施加在饱和土体上的荷载开始时全部由孔隙水来承担, 随着孔隙中部分自由水的排出, 外加压力逐渐传给土骨架, 直至最后全部由土骨架来承担压力。饱和土的固结可以视为孔隙水压力消散和土骨架有效应力增长的过程。

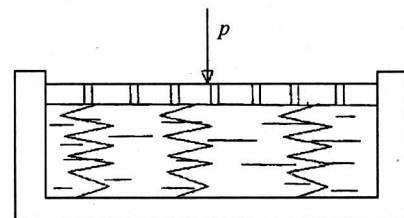


图 1 饱和土体固结简化模型

Fig.1 A simple consolidation model of saturating soil

2.2 Terzaghi 固结理论

Terzaghi 于 1925 年提出了著名的一维 (单向) 固结理论^[1]。

假设土质均匀, 各向同性且完全饱和, 地基中孔隙水主要沿竖向渗流, 在厚度为 H 的饱和粘性土层上覆大面积均布荷载。

Terzaghi 一维固结微分方程为

$$c_{v1} = \frac{\partial p_f^2}{\partial z^2} = \frac{\partial p_f}{\partial t},$$

式中 c_{v1} 为一维（竖向）固结系数， $c_{v1} = k(1+e)/\gamma_w$ (k 为土体渗透系数， e 为体应变， γ_w 为水的重力密度， kN/m^3)； p_f 为孔隙水压力。

该方程的解为

$$p_f(z, t) = \frac{4}{\pi} \sigma_z \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \left(\sin \frac{m\pi z}{zH} \right) e^{-\frac{m^2\pi^2}{4} T_v},$$

式中 $m = 1, 3, 5, \dots$ ； T_v 为竖向固结时间系数， $T_v = c_{v1}t/H^2$ ； σ_z 为 Z 方向（竖向）的正应力分量。

由于该级数解易于计算，Terzaghi 固结理论在工程中得到了广泛应用。

实际上土体的固结是复杂的、多向的，由于没有考虑土体的侧向排水，用一维固结理论计算出的固结速度偏慢。此后，Terzaghi 和 Rendulic 在一维理论的基础上，考虑侧向排水效应，导出了多维固结微分方程。

二维固结微分方程：

$$c_{v2} = \frac{\partial p_f^2}{\partial z^2} = \frac{\partial p_f}{\partial t};$$

三维固结微分方程：

$$c_{v3} = \frac{\partial p_f^2}{\partial z^2} = \frac{\partial p_f}{\partial t};$$

不同维固结系数关系式：

$$c_{v1} = 2(1-\gamma)c_{v2} = 3\frac{1-\nu}{1+\nu}c_{v3},$$

式中 γ 为土骨架泊松比。

2.3 Biot 固结理论

1914年，Biot 从更严格、更准确的固结机理出发，将土骨架的变形与孔隙水压力的消散紧密联系起来，推导得出了固结方程^[2]。

假设土骨架为弹性体，根据弹性力学中的平衡方程，物理方程以及几何方程，推导出土骨架压缩变形协调方程：

$$\nabla^2 u + \frac{\lambda + G}{G} \frac{\partial e}{\partial x} - \frac{1}{G} \frac{\partial p_f}{\partial x} = 0,$$

$$\nabla^2 v + \frac{\lambda + G}{G} \frac{\partial e}{\partial y} - \frac{1}{G} \frac{\partial p_f}{\partial y} = 0,$$

$$\nabla^2 w + \frac{\lambda + G}{G} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{1}{G} \frac{\partial p_f}{\partial z} = 0,$$

$$\nabla^2 p_f = \frac{\gamma_w}{k} \frac{\partial e}{\partial t} \text{ (水流连续条件方程),}$$

式中 e 为土骨架的体应变； G 为切变模量。

由上述4个方程可求得位移 u ， v ， w 和孔隙

水压力 p_f 。该解既能满足弹性材料的应力应变关系，又能满足变形协调和水流连续条件，该解为三向固结精确解。

3 高饱和度土的固结

3.1 不同饱和度土的物理模型分类

天然土体是一种复杂的三相松散介质（土颗粒，水和少量气体），其成分的相对变化将影响土体的物理力学性质。不同饱和度情况下土分类为：

1) 饱和度 $S_r = 0$ 时，为干土。

2) 饱和度 S_r 较小时，占大部分的气体位于土体内部孔隙通道上，水则以透镜体的形式包围于土颗粒之间，土处于水封闭状态。

3) 饱和度较高时，气体和水均可在孔隙通道上连续或局部连通，土处于双开敞状态。

4) 饱和度很高时，气体以封闭气泡的形式存在于孔隙中占大多数的水中，土处于气封闭（水开敞）状态。

5) 饱和度 $S_r = 1$ 时，则为饱和土。

3.2 不同物理模型土的孔隙流体的压缩性

用 E_f ， E_w ， E_a 分别表示土中流体的体变模量、水的体变模量和气体的体变模量，则它们三者之间关系为^[3]

$$\frac{1}{E_f} = \frac{S_r}{E_w} + \frac{1-S_r}{E_a}.$$

对于干土、水封闭和双开敞状态土，由于饱和度 S_r 较小，孔隙流体体变模量很小，其压缩性大大超过了土骨架压缩性，因此土体的压缩被土骨架控制。

对于完全饱和土（ $S_r = 1$ 时），孔隙流体的体变模量远远大于土骨架的体变模量，一般可视为不可压缩的流体。

对于饱和度接近于1的气体封闭（水开敞）状态的土体，饱和度的变化在很大程度上将影响流体的体变模量和土骨架的体变模量的可比性。

$$E_f = \frac{2102.5}{1.41 \times 10^4(1-S_r) + S_r}.$$

从上式可知，当饱和度接近于1时，流体体变模量 E_f 发生剧烈变化。

3.3 饱和度对波速的影响

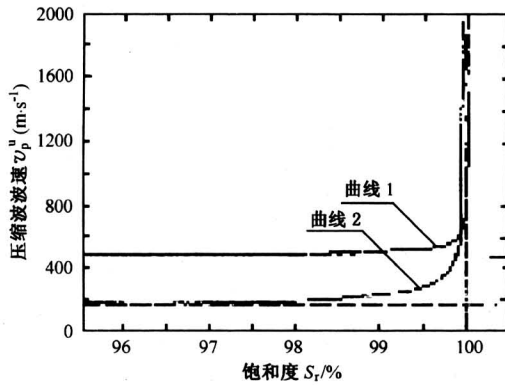
在低频条件下，高饱和度土中压缩波波速为

$$v_p^u = \rho_w [(1-n)G_s + S_r n],$$

式中 ρ_w 为高饱和土的质量密度； n 为高饱和度土

的孔隙率； G_s 为高饱和土的切变模量。

v_p^u 和饱和度 S_r 的函数关系曲线如图 2 所示^[4]。



曲线 1: $n=0.375, G_s=2.65$;

曲线 2: $n=0.50, G_s=2.70$

图 2 高饱和土的压缩波波速与饱和度函数关系

Fig.2 The function curve of compression wave speed related to saturated degree

从图 2 可看出，当饱和度接近 1 时，压缩波波速变化剧烈。高饱和度时，尤其当 $S_r = 0.995 \sim 1$ 时，饱和度的微小变化可导致土体中压缩波传播速度的急剧变化。根据土体中波的传播理论，土体中压缩波传播速度反映了土的物理力学性质。

3.4 高饱和土的固结机理

Barden 研究了击实土的一维固结问题，将击实土按饱和度大小分成 5 类：

A: $S_r < 0.5$ ，很干，土中水吸附在土骨架上，只有空气在孔隙中流动；

B: $0.5 < S_r < 0.9$ ，湿或很湿，仍然只有孔隙气体流动；

C: S_r 相当于塑性含水量附近，土中气体与水同时流动；

D: $0.9 < S_r < 0.95$ ，土中气体处于封闭状态，仅有小部分气泡随着水流移动；

E: $S_r > 0.95$ ，只有少量气泡处于封闭状态，孔隙中基本只有不可压缩的水在流动。

对于 A, B 类土，饱和度较低，孔隙内充满可压缩的气体，土的透气性远远大于土的透水性，土的固结过程比饱和土快；对于 C, D, E 类土，考虑土的渗透性不变和孔隙流体可压缩等，Barden 得到的结果如图 3 所示。

图 3 中 δ 为孔隙流体压缩参数； T_v 为竖向固

结时间因数； U 为土的固结进度参数。

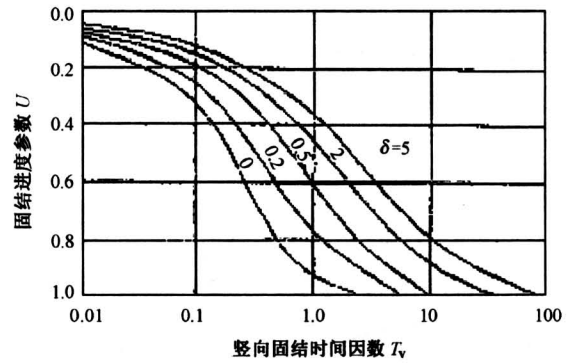


图 3 孔隙流体压缩性对高饱和土固结进程的影响

Fig.3 Porous fluid compressibility has influence on consolidating progress

从图 3 可见，对高饱和土 ($S_r > 0.9$)，孔隙流体的压缩性越大，土的压缩过程越缓慢，孔隙流体的压缩性对固结过程的影响越大。

由此，对于含少量气泡的高饱和度土，可用前面所述的弹簧活塞来模拟。在活塞受压的一瞬间，全部压力由弹簧和水共同承担，各自承担的比例因饱和程度而异。饱和度越低（仍然是高饱和土），水承担的初始压力（即超静孔压）越小。当水受到超静孔压，从孔中排出，活塞同时下降，弹簧（土骨架）所受压力渐渐增大直至与外加荷载平衡。由于孔隙流体的可压缩性，高饱和度土的固结过程比饱和土缓慢。

4 工程实例

实例 1 杭甬高速公路路堤软基处理。在第 8 试验段路堤中心点处断面，测得的孔隙水压力随深度分布情况如图 4 所示。

初始孔隙水压力可由两个月后加载结束时的孔压近似求得。从图 4 中看出初始孔压远未达到该处的计算总应力^[5]。

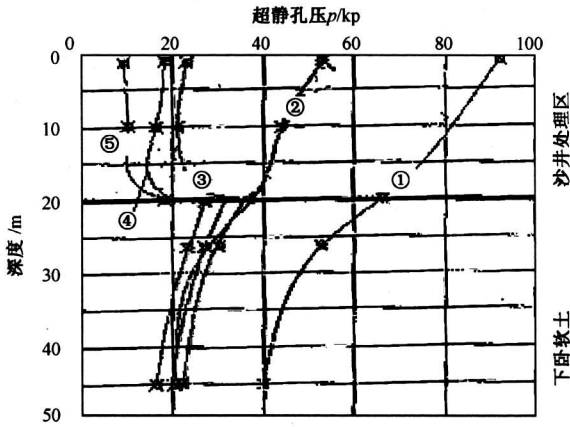
实例 2 在宁波机场《软土地基袋装沙井超载预压试验研究报告》中^[6]，选取长度为 108 m，宽度为 78 m 的试验区，是 2 500 m 跑道中部典型的一段，试验时跑道中心堆载高为 3.95 m。实际堆载如图 5 所示。其中①至④层各层堆载的重力密度 (kN/m^3) 分别为 $\gamma_1 = 15.3, \gamma_2 = 20.0, \gamma_3 = 18.0, \gamma_4 = 15.5$ 。

地基土中心点的压应力为

$$p = \sum \gamma_i h_i = 15.5 \times 1.25 + 18 \times 1.3 +$$

$$20 \times 1.22 + 15.3 \times 0.18 = 69.93 \text{ kPa};$$

堆载初始的场地中央孔压值实测结果为 $p = 30 \sim 50 \text{ kPa}$, 小于理论初始超静孔压值。



①—计算总应力, ②—加载结束 (2个月),
③—6个月, ④—12个月, ⑤—24个月

图4 8断面孔隙水压分布图

Fig.4 Porous water pressure distributing diagram on the No.8 cross section

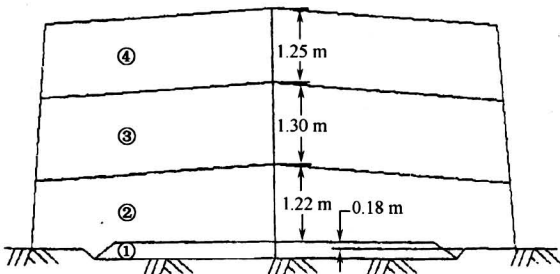


图5 试验堆载示意图

Fig.5 Experimental heap load sketch

5 结论

地基软土的土骨架和孔隙流体 (体变模量分别为 E_s 和 E_f) 共同承担上覆压力 p , 随着时间的推移, 孔隙中的流体受压逐渐排出土体, 孔隙流体承担的压力逐渐变小。

当土骨架承担的压力逐渐增大, 土骨架变形渐增, 沉降加大。若软土为饱和土, 孔隙流体为纯水, 其体变模量远远大于土骨架, 上覆压力 p 可视为全部由孔隙流体承担, 然后孔隙流体逐渐消散, 此即为饱和土的固结过程。

若软土为高饱和度土, 随着饱和度的微小下降, E_f 急剧下降至与 E_s 相同的数量级。因此土体初始上覆载荷由骨架与孔隙流体共同承担, 然后进行孔隙流体消散的固结过程。此时初始孔压就会小于上覆载荷。其差值因饱和度 (或孔隙流体的体变模量) 而异。上述两个工程实例即属此情况。

参考文献

- [1] 顾晓鲁. 地基与基础[M]. (第二版), 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1983
- [3] 陈中颐. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- [4] 陈龙珠. 饱和土中弹性波的传播速度及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1987
- [5] 王立忠. 岩土工程现场监测技术及其应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000
- [6] 王立忠. 宁波机场软土地基袋装沙井超载预压试验研究报告[R]. 杭州: 浙江大学土木工程系, 1988

The Consolidation of Highly Saturated Soils and Saturation Degree's Influence

Jin Zhigao

(Ningbo Construction Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315010, China)

[Abstract] Based on Terzaghi's consolidation theories and Biot's consolidation theories, the consolidating mechanism and consolidating process of highly saturated soil are discussed according to the variety of saturation degree. The influence of saturation degree changing on porous fluid compressibility as well as the whole consolidation process are studied deeply in this paper.

[Key words] consolidation; saturated degree; elasticity modulus; compressing