

文章编号:1000-0550(2018)06-1091-14

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.097

无明显压实的滨海相沉积孔隙度识别及其机理与意义

徐起浩

广东省地震局,广州 510070

摘要 通过建立沉积压实理论模式和由土体单元压缩前后体积、孔隙比、孔隙度变化的理论关系所导出的压实度与孔隙度关系式表明,沉积过程中下伏沉积压实度不发生变化时,上覆沉积孔隙度变化取决于初始沉积孔隙度,因沉积环境变化导致初始沉积孔隙度发生变化,造成沉积孔隙度与沉积深度不相关,出现下伏沉积孔隙度大于上覆沉积的情况。这是下伏沉积孔隙水不能排出,呈欠压实状态的表现。当无沉积外干扰因素,连续沉积过程中出现土柱下部孔隙度大于土柱上部时,土柱下部一定处于欠压实状态,这是识别滨海相沉积上覆沉积后未被再压实的重要标志。通过广东沿海8个工程场地58个钻孔191个土样相同钻孔相同命名土,及广东和国内其他有关地区不同场地共208个土样不同钻孔相同命名土孔隙度与分布深度比较,分析显示,大约40m以内或晚更新世中晚期以来滨海相沉积在垂向和横向分布上普遍存在这种欠压实特征。提出沉积压实大致具随序发生的三个阶段:1)最表层的薄层在初始沉积孔隙度影响下的初始沉积压实阶段;2)欠压实阶段;3)再压实阶段。综合研究结果显示,滨海相沉积一般渗透性差,泄水环境不好,除沉积外因素导致再压实的局部相关沉积层外,近地表40m以内或晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实下沉量不明显,在用滨海相沉积研究古海平面及海岸地壳运动时,一般情况可不考虑沉积压实影响。

关键词 滨海相沉积;初始沉积孔隙度;初始沉积压实;压实度;欠压实;压实下沉

第一作者简介 徐起浩,男,1944年出生,研究员,地震地质,海岸带第四纪研究,E-mail:xuqihao2005@163.com

中图分类号 P512.2 P736.21 **文献标志码** A

0 引言

国内外很多学者在利用滨海相沉积研究海平面及海岸升降运动时,均会考虑沉积压实作用^[1-3],认为压实减小了海岸沉积物体积,导致地面下沉,从而引起海平面上升。沉积压实已成为仅次于温度变化的、引发海平面变化及海岸变化的第二重要作用^[4]。

早在1930年Athy^[5]首先提出自重作用下的连续沉积物孔隙度剖面随深度呈指数下降,被称为Athy定律,并由Fowler *et al.*^[6]通过数学解释,得出Athy定律的理论基础。2001年Bahr *et al.*^[7]认为沉积压实和相应孔隙度变化可以由简单的深度指数关系进行模拟,但在近地表则表现为线性关系。前人通过土工技术模拟、数值模拟或仪器观察研究了浅埋藏沉积压实^[8-10],但许多学者承认计算过程和结果本身可能存在不小的问题。Greensmith *et al.*^[11]认为至今几乎没有其他任何知识领域中存在如此困难的估算问题。Brain^[4]在总结过去、现在沉积压实对相应海平面及海岸变化的作用状况,以及对未来的预测中肯定了沉积压实的研究。但他也提出了一些问题,

如压实不能够归于探测到的地面下沉,需要仔细鉴定,并与监测手段、存在的数据、模拟研究进行比较。Brain^[4]又指出由压实引发的下沉速率因测量方法,成因机制,空间分布区域,观察的持续时间和资料的性质,其准确性存在较大的变化。Horton *et al.*^[12]在新泽西通过底部泥炭评估压实对全新世海平面变化的贡献时认为,压实引发的被测海平面高程点(SLi)下沉幅度通常与上覆的沉积厚度及沉积柱的厚度呈正相关,而与深度及不可压缩的全新世基底呈负相关。但在每一个被测样品海平面高程点之下的沉积物厚度和下伏不可压缩的基底之间的关系经常是变化且没有统计学意义的。他并未说明其中的原因,但指出作为下伏沉积可能的累积压缩是有限的^[4,12]。在顺序沉积地层中沉积在低密度,具较大压缩性的有机沉积物顶部的密度较大的成矿沉积物压实效应更大^[4,13-15]。至于为什么上部压实比下部更大却未得到深究和解释。

黄河三角洲^[16-17]及东南沿海等多地均开展过压实研究,并设定珠江三角洲黏土或淤泥在各地质时期的压实率分别为0.436(40~10.1 ka B.P.),0.381(10

收稿日期:2017-03-31; 收修改稿日期:2018-07-04

基金项目:中国地震局2018年老专家科研基金(2018-05)[**Foundation:** The Foundation Problem Subsidy Project of Old Specialist Science Research of Seismological Bureau of China in 2018, No. 2018-05]

~2.6 ka B.P.), 0.115 (<2.49 ka B.P.)^[18-19], 并提出了沉积压实计算公式。也有学者指出土的密度随深度增加不是平稳连续发生, 而是跳跃式渐增, 无法用一个方程式来表示这种变化^[20]。

综观国内外对滨海相沉积压实的研究, 尽管研究方法多种多样, 结果也不尽相同, 但几乎都认为上覆沉积增加, 被压实量也一定增加。相同命名土下伏沉积孔隙度越小, 孔隙水渗透就越多, 压实量就越大。至于孔隙水实际能否渗透, 如何渗透, 压实过程中孔隙泄水通过何种途径, 泄到何处未涉及。在数 10 m 深度内普遍呈现孔隙度与沉积深度不存在相关关系的原因尚未得到合理的解释。大量事实反映了相同命名土深部土的孔隙度较浅部的更大。虽然近年来沉积学取得了长足发展^[21-22], 但上述问题并未得到解决, 这在相当程度上影响了沉积压实的研究进展及对沉积学的更深度认识。

准确识别滨海相沉积压实量大小, 对于用滨海相沉积识别古海平面位置, 并据此进一步识别海岸地壳运动特征, 对研究海岸带古地震, 识别海岸带未来可能的地震危险区均具有重要意义。本文通过作者多年来收集的海岸带钻孔沉积及孔隙度等资料, 就上述沉积学问题进行了探索研究。

1 理论模式及参数关系对沉积压实的解释

沉积压实是沉积物沉积时和沉积后在沉积荷重作用下失水、孔隙度降低、密度增大以及体积缩小的过程。

1.1 理论模式

图 1 为沉积压实理论模式。当沉积过程中孔隙水与外界相通, 设 h_1, h_2, h_3 为自下而上横截面相同, 高度相同, 对应初始沉积孔隙度 ($n_{0,1}, n_{0,2}, n_{0,3}$) 也相同的 3 个土柱。显然, 3 个土柱初始沉积的压实量 ($\Delta h_{1,1}, \Delta h_{2,1}, \Delta h_{3,1}$) 和对应的被初始压实缩短了的土柱高度 ($h_{1,1}, h_{2,1}, h_{3,1}$), 以及对应的孔隙度 $n_{1,1}, n_{2,1}, n_{3,1}$ 均相等。当 h_2 土柱在 h_1 上加积后, 在上覆土柱的压实作用下 $h_{1,1}$ (图 1a) 又被压实, 压实量为 $\Delta h_{1,2}$, 压实后土柱又被缩短, 变成 $h_{1,2}$, 孔隙度为 $n_{1,2}$ (这时的 h_2 高度从 $h_{1,2}$ 顶面起算) (图 1b); 当 h_3 土柱在 h_2 土柱上加积后, h_2 在上覆土柱的压实作用下 $h_{2,1}$ 又被压实, 压实量为 $\Delta h_{2,2}$, 压实后土柱又被缩短, 变成 $h_{2,2}$, 孔隙度为 $n_{2,2}$ (这时的 h_3 高度从 $h_{2,2}$ 顶面算起); 下伏的土柱 $h_{1,2}$ 再被压实, 压实量为 $\Delta h_{1,3}, h_{1,2}$ 土

柱被再缩短成 $h_{1,3}$, 孔隙度为 $n_{1,3}$ (这时的 $h_{2,1}$ 高度从 $h_{1,3}$ 顶面起算) (图 1c)。可知:

$$\Delta h_{2,2} = \Delta h_{1,2}, h_{2,2} = h_{1,2}$$

$$h_1 \text{ 的总压实量 } \Delta h_1 = \Delta h_{1,1} + \Delta h_{1,2} + \Delta h_{1,3}$$

$$h_2 \text{ 的总压实量 } \Delta h_2 = \Delta h_{2,1} + \Delta h_{2,2}$$

$$h_3 \text{ 的总压实量 } \Delta h_3 = \Delta h_{3,1}$$

于是得出 $\Delta h_1 > \Delta h_2 > \Delta h_3, n_{1,3} < n_{2,2} < n_{3,1}$ 。若从下而上 (或时间上从早到晚) 有 m 个这样的土柱依次连续沉积, 则:

$$h_1 \text{ 的总压实量 } \Delta h_1 = \Delta h_{1,1} + \Delta h_{1,2} + \Delta h_{1,3} + \dots + \Delta h_{1,m}$$

$$h_2 \text{ 的总压实量 } \Delta h_2 = \Delta h_{2,1} + \Delta h_{2,2} + \dots + \Delta h_{2,(m-1)}$$

$$h_3 \text{ 的总压实量 } \Delta h_3 = \Delta h_{3,1} + \Delta h_{3,2} + \dots + \Delta h_{3,(m-2)}$$

...

$$h_m \text{ 的总压实量 } \Delta h_m = \Delta h_{m-1}$$

$$\text{所以, } \Delta h_1 > \Delta h_2 > \Delta h_3 > \dots > \Delta h_m \quad (1)$$

自下而上的孔隙度依次为 $n_{1,m} < n_{2,(m-1)} < n_{3,(m-2)} < \dots < n_{(m-1),2} < n_{m-1,0}$

式(1)表达了沉积压实的理论结果, 即下部土柱的沉积压实量总是比上部的大, 孔隙度比上部的小。

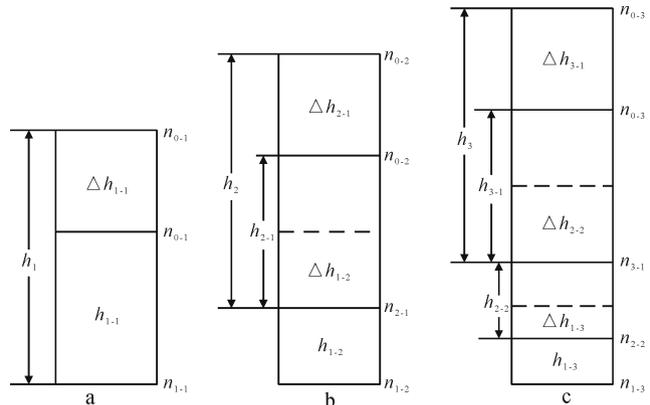


图 1 晚更新世中晚期以来滨海相沉积理论压实示意图

Fig.1 Interpretation of the hint figure of theoretical compaction of the littoral facies sediment since middle and late period of Epipleistocene

1.2 沉积压实参数关系式与沉积压实度

1.2.1 压实参数关系式及用于计算压实存在问题

已知土体单元 (面积等于 1) 的体积、孔隙比、孔隙度压缩前分别为 h_0, e_0 及 n_0 , 压缩后分别为 h, e 及 n , 张凤英等^[1] 根据土柱压实前后不可压缩的骨架和孔隙体积的变化关系得出:

$$h_0 = h \frac{1 - n}{1 - n_0}$$

$$\Delta h = h \frac{n_0 - n}{1 - n_0} \quad (2)$$

由压缩变形 Δh 与孔隙比变化 Δe 的关系^[23]得:

$$\Delta e = \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0) \quad (3)$$

若将(3)式改用孔隙度表示,并将 $h_0 = \Delta h + h$ 代入,展开也得(2)式。

用上述关系式计算沉积压实时存在以下问题:表1序号184~187为淤泥,顺序沉积从孔深4.3 m至10.3 m,间隔2 m测得样品的4个等间距孔隙度分别为64.3%,65.3%,66.1%,67.6%,显示下部土柱的孔隙度大于上覆土柱的孔隙度。按通常计算压实量的方法,用相邻的2个孔隙度的高程点距离作为压实后土柱厚度 h 值,共有3个相等的 h 值。取测得的土柱顶部和底部孔隙度平均值作为该土柱孔隙度值,即为64.8%,65.7%,66.9%。当 n_0 一定时,将上列测定及设定的参数,代入关系式(2)得到下部土柱的压实量小于上部土柱。这与沉积压实理论模式及式(1)不符。说明不能反映沉积压实实际情况。

实际研究中有关压实各参数之间的关系式内,主要参数中仅 n 是测得的已知值,对应 n 的其余3个参数 n_0, h_0, h 都是难以测得的可变值,以往的研究都是通过类似上述的设定或模拟获得。而设定或模拟很难接近这些参数真实的多变的数值。这是压实计算中总是存在难以解决问题的重要原因。

1.2.2 压实关系式对沉积欠压实的反映

为研究方便,导入沉积压实度概念,(2)式可写成:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1 - n_0}{1 - n} \quad (4)$$

$$\text{令, } K = 1 - \frac{h}{h_0}$$

K 即为沉积压实度,反映沉积压实量相对大小或压实程度,为无量纲值。 K 越大,压实量相对越大,压实程度越高。当 $K=0$, 压实量为0,显然 $1 > K \geq 0$ 。压实度 K 及(4)式直观地显示压实度 K 仅与初始沉积孔隙度 n_0 及沉积后至今孔隙度 n 有关。将(4)式代入压实度 K 算式得:

$$n = \frac{n_0 - K}{1 - K}$$

$$\text{即, } n = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 - K} \quad (5)$$

(5)式为简单关系式,第2项为负值。当 n_0 一定

时,压实度 K 变大, n 值变小,即随着沉积厚度的增大,由浅至深按式(1)及图1理论模式的顺序沉积; K 变小, n 会变大,即随着沉积厚度的增大,由深至浅按式(1)和图1理论模式的顺序沉积;当 K 不变时, n_0 变大, n 也变大,反之亦然。关系式说明对于具相同初始孔隙度 n_0 的相同土,无论是压实度变大或变小都不会产生上部土柱孔隙度小于下部的情况。若令下伏土柱初始孔隙度为 n_{01} , 压实后的孔隙度为 n_1 , 压实度为 K_1 , 当 K_1 不变时,上覆土柱可能以另一初始孔隙度 n_{02} 及压实度 K_2 沉积;当 $n_{02} < n_{01}$ 时,可能造成上覆土柱压实后的孔隙度 $n_2 < n_1$, 反之亦然。由此可认为,只要无沉积外干扰因素,当出现下伏土柱孔隙度大于上覆土柱孔隙度时,下伏土柱一定处欠压实状态。

2 钻孔岩芯沉积孔隙度反映的欠压实特征及理论和环境解释

2.1 40 m 以浅沉积土孔隙度

2.1.1 同一钻孔相同命名土比较

随机收集广东沿海地区8个工程场地58个钻孔191个土样,实验室测得这些土样在天然状态下的物理指标(表1),孔隙度与深度之间显示下列2个特征:

(1) 40 m 以浅的滨海相沉积较多表现下部孔隙度较上部高。若将上下相距最近的两个相同命名土下部孔隙度较上部低的称为A事件,反之称为B事件,则全部测试土样中A事件69件,占总事件58%,样品最深40.2 m; B事件49件,占42%,样品最深38.3 m。B事件发生的土类几乎包括了滨海相所有含黏土沉积。

(2) B事件在最初期的薄层沉积时就已发生。厚1 m 以内土层A事件数为5, B事件数为6,后者样品序号41~42, 113~114, 117~118, 120~121, 122~123, 124~125, 为粉质黏土, 砾质亚黏土, 砂质亚黏土, 淤泥, 主要分布于10 m 以下深度。说明B事件在沉积厚数十厘米的很薄土层时就可能发生。表1中多数样品间隔数米或十余米,若将取样都间隔为1 m 以内,上述现象将会更明显。

2.1.2 不同场地多钻孔样品比较

(1) 广东汕头礮石大桥二期工程场地(图2),共有淤泥样品25个,样品孔深2.2~27.8 m。相同孔深样品具有不同的孔隙度。如同为14.2 m 的两个样品,它们的孔隙度分别为63.8%和60.9%;样品深度

表1 广东工程场地滨海相沉积孔隙度与深度分布反映的A,B事件数^{①-⑧}

Table 1 Event numbers of A and B reflected by distribution of porosities of littoral facies sediments with deeps in some engineering spaces, Guangdong

序号	地点	孔号与样品编号	样品深度/m	土名称	湿密度/(gm/cm^3)	干密度/(gm/cm^3)	孔隙度(n)/%	A, (B)事件数
1	广东汕头礮石大桥	ZK13-1	2.0~2.4	淤泥	1.65	1.04	60.9	2(1)
2		ZK13-2	6.0~6.4		1.50	0.80	70.0	
3	二期工程场地	ZK13-3	8.0~9.2		1.58	0.96	63.9	
4		ZK13-5	23.6~24.0		1.62	1.04	54.7	
5		ZK19-1	8.6~9.0	淤泥	1.58	0.96	64.0	1
6		ZK19-2	17.6~18.0		1.60	0.98	63.0	
7		ZK22-1	8.6~9.0	淤泥	1.58	0.93	65.3	2
8		ZK22-2	14.0~14.1		1.58	0.97	63.8	
9		ZK22-3	20.0~20.4		1.59	0.98	63.0	
10		ZK25-1	6.9~7.3	淤泥	1.64	1.03	61.6	2
11		ZK25-2	14.0~14.4		1.64	1.04	60.9	
12		ZK25-3	26.9~27.3		1.62	1.05	60.4	
13		ZK41-1	5.8~6.2	淤泥	1.56	0.89	66.8	1(1)
14		ZK41-2	11.2~11.6		1.49	0.8	70.1	
15		ZK41-3	19.0~19.4		1.54	0.92	65.3	
16		ZK47-1	6.8~7.2	淤泥	1.61	0.99	63.1	(1)
17		ZK47-2	17.2~17.6		1.56	0.97	63.4	
18		ZK50-1	13.6~14.0	淤泥	1.51	0.85	67.9	1
19		ZK50-2	20.4~20.8		1.52	0.89	66.4	
20		ZK53-1	6.4~6.8	淤泥	1.66	1.06	60.4	2(1)
21		ZK53-2	17.8~18.2		1.56	0.93	64.9	
22		ZK53-3	23.2~23.6		1.57	0.95	64.2	
23		ZK53-4	27.6~28.0		1.63	1.06	60.0	
24	珠海金洋花园	ZK40-2	19.2~19.4	黏土	1.79	1.25	54.8	1
25		ZK40-3	19.7~19.9		1.83	1.30	53.1	
26		ZK62-1	3.0~3.2	粉质黏土	1.90	1.48	43.8	2(1)
27		ZK62-3	19.8~20.0		2.02	1.66	37.1	
28		ZK62-4	21.0~21.2		1.96	1.62	37.9	
29		ZK62-5	22.1~22.3		2.05	1.74	33.8	
30		ZK65-3	13.6~13.8	粉质黏土	1.82	1.40	46.2	(1)
31		ZK65-4	15.0~15.2		1.82	1.39	46.5	
32		ZK66-1	4.7~4.9	淤泥	1.61	0.95	64.2	(1)
33		ZK66-2	11.5~11.7		1.98	0.78	70.3	
34		ZK66-3	17.8~18.0	粉质黏土	1.98	1.66	36.3	1
35		ZK66-4	21.7~21.9		2.00	1.72	33.8	
36		ZK68-2	16.4~16.6	粉质黏土	1.97	1.61	37.5	1(1)
37		ZK68-3	18.4~18.6		1.85	1.48	42.5	
38		ZK68-4	22.2~22.4		1.99	1.69	35.1	
39		ZK47-1	3.0~3.2	粉质黏土	1.92	1.55	40.8	(1)
40		ZK47-4	24.0~24.2		1.94	1.53	42.2	
41		ZK32-1	18.8~19.0	粉质黏土	1.94	1.54	41.2	(1)
42		ZK32-2	19.3~19.5		1.91	1.49	42.9	
43		ZK38-3	18.0~18.2	粉质黏土	1.88	1.42	45.4	1
44		ZK38-4	22.0~22.2		1.87	1.48	42.9	
45		ZK42-2	17.8~18.0	粉质黏土	1.93	1.54	40.8	1
46		ZK42-3	22.4~22.6		2.02	1.68	36.3	
47		ZK44-1	18.4~18.6	粉质黏土	1.85	1.42	45.4	1
48		ZK44-2	25.8~26.0		1.93	1.58	39.0	
49		ZK82-1	21.0~21.2	砾砂	1.93#	1.65#	38.0	1
50		ZK82-2	23.8~24.0		1.98#	1.69#	36.1	
51	广州江南中心昌岗	控7-2	5.0~5.20	粉质黏土	1.96#		41.1	2
52		中路(53层)场地	控7-3	5.90~6.15		1.96#		
53		控7-4	8.3~8.5		2.02#		37.5	
54		控7-5	9.9~10.1	粉土	2.06#		33.2	1
55		控7-6	11.97~12.17		2.08#		31.9	
56		控11-1	1.95~2.15	粉质黏土	2.02#		35.1	2(3)
57		控11-3	6.3~6.5		1.96#		41.5	
58		控11-4	7.8~8.0		2.06#		36.1	
59		控11-5	9.25~9.45		2.04#		37.7	
60		控11-6	12.10~12.30		2.07#		35.1	
61		控11-7	19.40~19.60		2.00#		36.0	
62		技1-1	5.1~5.3	粉质黏土	2.02#		37.7	3(1)

①汕头市建筑设计院勘察分院礮石大桥桥址二期工程地质报告, 1996.

②广东省珠海市金洋花园土分析结果报告. 湘潭市勘察处土工试验室, 1992.

③广州江南中心(53层)工程地质(昌岗中路)初步勘探土工试验表. 广州江南房产有限公司筹建处, 1993.

④珠海西部国际招商大厦工程场地土工试验成果表, 珠海市三灶区工程质量监督站, 1992.

⑤汕头国际信托服务公司大楼场地土壤试验成果表. 汕头市建筑设计院勘察队土工化验材料试验室, 1985.

⑥广州新市镇肖岗农委综合楼场地工程地质勘察报告. 广东省地质矿产测试技术开发公司, 1994.

⑦广东中山坦洲祥庆城土工试验成果报告表, 陕西省工程勘察研究院珠海分院实验室, 1994.

⑧广东省珠海市横琴岛大桥工程方案设计勘察地质报告. 广东金东勘察实业有限公司, 1988.

(续表 1)

序号	地点	孔号与样品编号	样品深度/m	土名称	湿密度/(gm/cm^3)	干密度/(gm/cm^3)	孔隙度(n)/%	A, (B)事件数
63		技 1-2	7.3~7.5		2.04#		36.3	
64		技 1-3	8.5~8.7		1.98#		41.5	
65		技 1-4	9.8~10.0		2.02#		36.9	
66		技 1-5	11.1~11.3		2.00#		36.3	
67		技 12-1	1.4~1.6	黏土	1.95#		41.3	(2)
68		技 12-2	3.2~3.45		1.96#		44.1	
69		技 12-3	5.4~5.6		1.91#		46.9	
70		技 12-4	7.7~7.9	黏土	2.00#		39.1	2
71		技 12-5	12.1~12.3		1.97#		38.9	
72		技 12-6	14.5~14.7		2.02#		35.4	
73		技 19-2	6.05~6.25	粉质黏土	1.93#		42.2	1(1)
74		技 19-3	9.15~9.35		2.10#		34.3	
75		技 19-4	11.5~11.7		2.08#		35.0	
76		技 3-1	3.6~3.8	粉质黏土	2.00#		39.5	1(1)
77		技 3-3	6.9~7.1		1.92#		44.6	
78		技 3-4	8.3~8.5		2.08#		34.9	
79		技 8-3	8.5~8.7	粉质黏土	2.03#		36.6	(1)
80		技 8-4	11.26~11.46		2.01#		37.7	
81		技 13-1	3.7~3.9	黏土	1.92#		42.6	(1)
82		技 13-2	5.6~5.8		1.93#		43.4	
83		技 13-3	7.9~8.1	粉质黏土	2.00#		40.1	1
84		技 13-4	9.8~10.0		1.97#		39.4	
85		技 5-1	4.75~4.95	粉质黏土	1.96#		40.3	2
86		技 5-2	6.1~6.3		2.06#		35.6	
87		技 5-3	9.1~9.3		2.10#		33.8	
88		控 15-1	3.8~4.0	黏土	2.02#		37.7	(1)
89		控 15-2	6.45~6.65		1.99#		41.9	
90		控 15-3	8.45~8.65	粉质黏土	2.04#		38.4	2
91		控 15-4	10.05~10.25		2.03#		37.3	
92		控 15-5	11.55~11.75		2.09#		35.1	
93		技 9-2	8.1~8.3	粉质黏土	2.01#		39.3	1
94		技 9-3	10.2~10.4		2.08#		33.2	
95		技 10-2	5.6~5.8	粉质黏土	1.94#		45.0	3
96		技 10-3	8.3~8.5		1.95#		42.1	
97		技 10-4	10.85~11.05		1.99#		39.0	
98		技 10-5	12.95~13.15		2.07#		33.5	
99		技 20-1	3.0~3.2	黏土	2.0#		39.6	(1)
100		技 20-2	5.0~5.2		1.96#		43.0	
101		技 20-3	6.75~6.95	粉质黏土	1.96#		41.4	3
102		技 20-4	8.8~9.0		1.96#		40.8	
103		技 20-5	10.55~10.75		2.04#		35.7	
104		技 20-6	13.3~13.5		2.09#		34.0	
105	珠海西部国际	ZK01-1	1.8~2.0	砾质亚黏土	1.83	1.54	42.4	1
106	招商大厦场地	ZK01-2	4.3~4.5		1.91	1.57	41.3	
107		ZK01-4	8.7~8.9	淤泥	1.66	1.04	61.2	(1)
108		ZK01-5	12.3~12.5		1.54	0.81	69.7	
109		ZK01-6	17.7~17.9	砂质亚黏土	1.68	1.17	56.5	1
110		ZK01-7	18.1~18.3		1.72	1.33	50.2	
111		ZK03-1	11.2~11.4	淤泥	1.61	1.06	60.6	(1)
112		ZK03-2	13.6~13.8		1.60	0.94	65.0	
113		ZK03-3	16.5~16.7	砾质亚黏土	1.87	1.46	45.5	(1)
114		ZK03-4	17.4~17.6		1.81	1.40	47.6	
115		Zk05-2	11.6~11.8	淤泥	1.51	0.76	71.6	1
116		Zk05-3	16.4~16.6		1.58	0.89	66.8	
117		ZK05-4	19.6~19.8	砂质亚黏土	1.94	1.55	42.1	(1)
118		Zk05-5	20.0~20.2		1.85	1.49	44.3	
119		ZK07-1	14.0~14.2	淤泥	1.55	0.88	67.3	1(1)
120		ZK07-2	14.8~15.0		1.65	0.90	66.5	
121		ZK07-3	15.5~15.7		1.57	0.82	69.6	
122		ZK09-1	2.8~3.0	砂质亚黏土	1.95	1.71	36.2	(1)
123		ZK09-2	3.8~4.0		1.90	1.54	42.4	
124		ZK09-3	29.0~29.2	砾质亚黏土	1.96	1.65	38.3	(1)
125		ZK09-4	30.0~30.2		1.93	1.58	41.0	
126	汕头国际信托服务	ZK11-1	11.7~12.1	淤泥质土	1.66	1.14	57.3	1
127	公司大楼场地	ZK11-2	15.9~16.3		1.74	1.23	53.4	
128		ZK11-3	21.1~21.5	亚黏土	2.01	1.55	42.7	(1)
129		ZK11-6	36.9~37.3		1.83	1.35	49.6	
130		ZK12-4	30.5~30.9	淤泥质土	1.79	1.27	52.5	1
131		ZK12-5	36.8~37.2		1.79	1.34	50.1	
132	广州新市肖岗农委	ZK2-2	7.15~7.35	粉质黏土	1.83		45.5	(1)
133	综合楼场地	ZK2-3	12.1~12.3		1.87		46.6	
134		ZK3-2	9.7~9.9	粉质黏土	1.83		49.1	1
135		ZK3-3	13.0~13.4		1.91		44.6	
136		ZK5-1	4.5~4.7	黏土	1.89		45.2	(1)
137		ZK5-2	8.05~8.25		1.84		48.7	
138		ZK9-2	6.95~7.15	粉质黏土	1.84		50.3	1
139		ZK9-3	15.85~16.05		1.87		48.6	
140	中山坦洲镇	ZK59-4	23.0~23.2	砾质黏性土	2.05	1.90	51.8	(1)
141	祥庆城场地	ZK59-5	26.0~26.2		1.74	1.31	66.1	
142		ZK68-1	2.6~2.8	淤泥	1.64	1.00	62.6	(1)
143		ZK68-2	7.95~8.15		1.50	0.81	70.0	

(续表 1)

序号	地点	孔号与样品编号	样品深度/m	土名称	湿密度/(gm/cm^3)	干密度/(gm/cm^3)	孔隙度(n)/%	A, (B)事件数
144		ZK1-2	8.7~8.9	黏土质粗砂	1.97	1.71	36.6	(1)
145		ZK1-3	11.2~11.4		1.89	1.52	43.7	
146		ZK66-2	20.7~20.9	砾质黏性土	1.76	1.30	52.0	1
147		ZK66-3	28.75~28.95		1.82	1.45	46.7	
148		ZK10-3	12.8~13.0	黏土	1.66	1.09	60.5	1
149		ZK10-4	15.5~15.7		1.66	1.10	60.3	
150		ZK37-2	20.7~20.9	砂质黏性土	1.73	1.26	53.6	1
151		ZK37-3	35.1~35.3		1.79	1.33	51.0	
152		ZK44-2	15.6~15.8	砂质黏性土	1.71	1.24	54.3	1
153		ZK44-3	22.0~22.2		1.83	1.34	49.6	
154		ZK47-3	18.9~19.1	砂质黏性土	1.76	1.36	50.0	(1)
155		ZK47-4	29.65~29.85		1.78	1.30	52.1	
156		ZK39-2	8.35~8.55	砂质黏性土	1.74	1.25	54.2	2
157		ZK39-3	25.2~25.4		1.73	1.30	52.5	
158		ZK39-4	32.2~32.4		1.78	1.34	51.0	
159		ZK40-2	7.4~7.6	砂质黏性土	1.77	1.31	52.0	(1)
160		ZK40-3	20.7~20.9		1.74	1.28	52.8	
161		ZK42-2	7.65~7.85	砂质黏性土	1.69	1.22	55.1	1
162		ZK42-3	17.7~17.9		1.73	1.28	53.2	
163		ZK69-2	8.7~8.9	黏土质砾砂	2.09	1.82	31.7	(1)
164		ZK69-3	16.9~17.1		2.10	1.77	33.9	
165		ZK43-1	4.0~4.2	淤泥质土	1.71	1.11	59.0	1
166		ZK43-2	5.0~5.2		1.72	1.17	56.8	
167	珠海横琴大桥场地	ZK1-1	1.0~1.2	淤泥	1.54#		68.8	2(2)
168		ZK1-2	3.0~3.2		1.56#		67.4	
169		ZK1-3	5.0~5.2		1.51#		70.1	
170		ZK1-4	7.0~7.2		1.48#		72.3	
171		ZK1-5	9.0~9.2		1.61#		64.4	
172		ZK1-6	11.0~11.2	亚黏土	1.94#		46.0	5(3)
173		ZK17	13.0~13.2		1.99#		45.1	
174		ZK1-8	15.0~15.2		1.95#		45.6	
175		ZK1-9	17.5~17.7		1.87#		48.8	
176		ZK1-10	21.0~21.2		1.94#		45.2	
177		ZK1-11	23.0~23.2		1.89#		47.7	
178		ZK1-12	25.0~25.2		1.90#		46.8	
179		ZK1-13	27.0~27.2		1.96#		41.2	
180		ZK1-14	29.0~29.2		2.01#		38.2	
181		ZK1-15	31.0~31.2	轻亚黏土	1.98#		40.5	1(1)
182		ZK1-16	38.0~38.2		1.85#		48.6	
183		ZK1-17	40.0~40.2		1.98#		40.4	
184		ZK3-1	4.2~4.4	淤泥	1.61#		64.3	1(3)
185		ZK3-2	6.2~6.4		1.59#		65.3	
186		ZK3-3	8.2~8.4		1.58#		66.1	
187		ZK3-4	10.2~10.4		1.55#		67.6	
188		ZK3-5	12.2~12.4		1.65#		62.9	
189		ZK3-7	16.2~16.4	亚黏土	1.96#		44.9	(2)
190		ZK3-8	18.2~18.4		1.92#		46.8	
191		ZK3-10	24.2~24.4		1.87#		50.0	

注:土命名按实验室命名。表中 A 事件数表示相同命名土层相距最近的下部土孔隙度比上部土孔隙度低的事件数;(B)事件数(括号内数字)表示相同命名土层相距最近的下部土孔隙度比上部土孔隙度高的事件数;#号表示“自然容重”。

不同,但孔隙度相同,如深度分别为 2.2 m 和 14.2 m 的 2 个样品,孔隙度都为 60.9%;孔隙度最大的是孔深 6.2 m 和孔深 11.4 m 的样品,分别为 70% 和 70.1%,都比最浅处样品大得多。场区淤泥不同深度孔隙度大于或等于 60.9% 的样品有 19 个,占总样品 76%。若只考虑通常认为的沉积压实与深度关系,即深度愈大孔隙度愈小,愈被压实,则场区由浅至深大部分淤泥孔隙度在孔深 2.2 m 或更浅部就可能形成。其他土(图 2B)都有如上述相似情形,孔隙度大致表现为:淤泥>淤泥质土>黏土>砾质黏性土及砂质黏性土。若将场区相同土深度最接近的 2 个样品进行比较,用与上述相同方法确定 A 或 B 事件,不同钻孔相同命名土相同深度具 2 个不同孔隙度,该深度 A, B 事件各算 1 次,垂直方向最邻近不同深度相同命名土

样品具相同孔隙度, A, B 事件也各算 1 次,则:场区淤泥 A 事件 14 次,用 A14 表示; B 事件 12 次,用 B12 表示。其他不同土 A, B 事件数同样表示方法,分别为:淤泥质土 A2, B3; 黏土 A2, B2; 砾质黏性土 A3, B1; 砂质黏性土 A0, B1; 粉质黏土 A0, B1。A, B 事件总数分别为 A21, B20, 分别占总事件数的 51% 和 49%。

(2) 广东中山坦洲镇祥庆城工程场地土深度与孔隙度关系也反映了与上述相似现象(图 3)。其中 A, B 事件总数为 A54, B55, 分别占总事件数的 49.5% 和 50.5%。

(3) 珠海金洋花园场地钻孔岩芯共有 15 个样品(图 4), 其中砾砂测得 7 个样品孔隙度, 最浅样品孔深 13.1 m, 孔隙度 36%, 其他 6 个样品孔隙度都等于

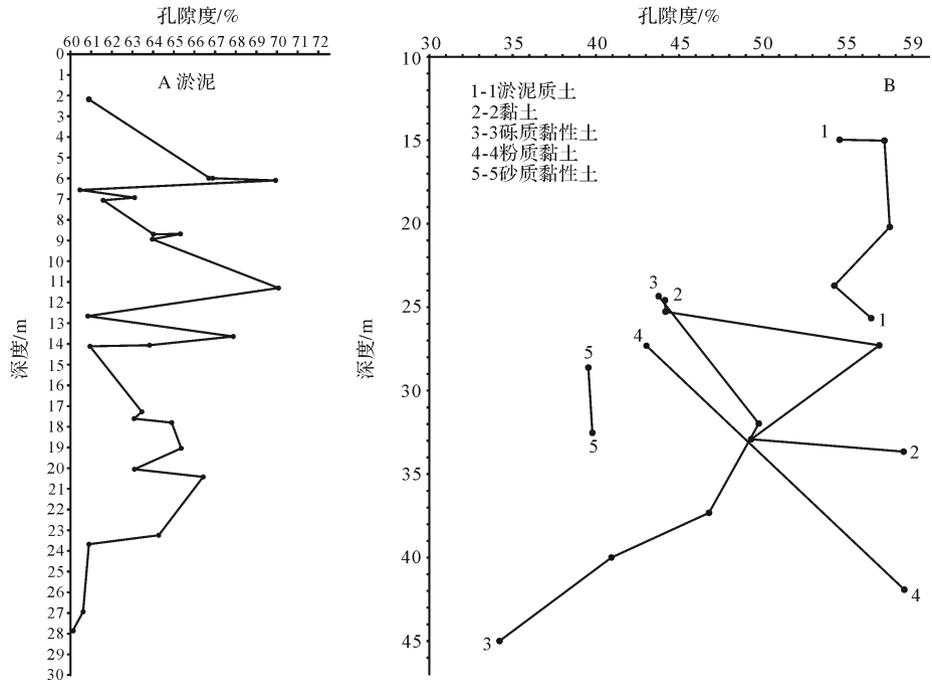


图 2 广东汕头市礮石大桥二期工程场地钻孔岩芯不同沉积物孔隙度随深度变化图(A,B)

Fig.2 Relationship between porosity and depth of different sediments in bore cores, project of Jiaoshi Bridge in Shantou, Guangdong (A,B)

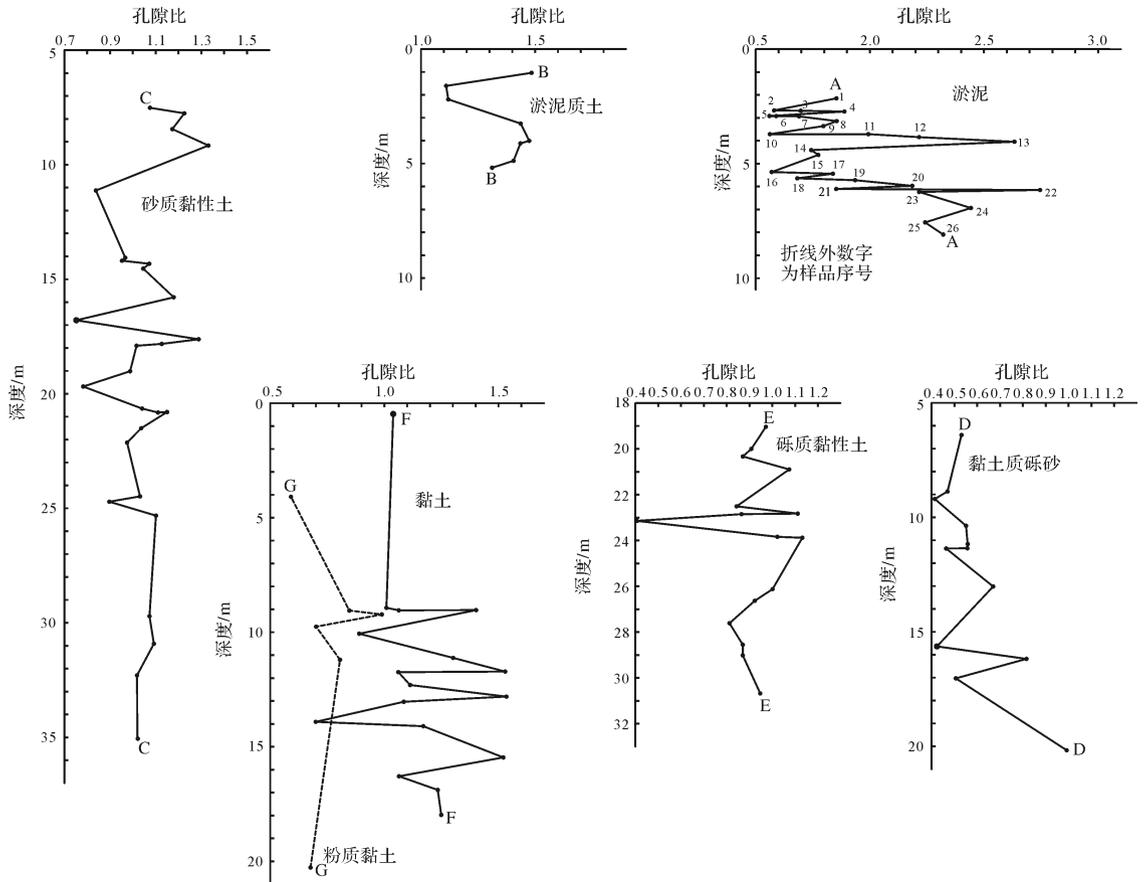


图 3 广东中山坦洲镇祥庆城工程场地钻孔岩芯沉积物孔隙比随深度变化

Fig.3 Relationship between pore ratio of different sediments in bore cores with depth, Tanzhou town, Zhongshan, Guangdong

或大于该孔隙度,说明该孔砾砂 100%样品都可能在孔深 13.1 m 或更浅部就能形成。场地各土类 A,B 事件数:淤泥、黏土都为 A2,B1;砾砂 A3,B3。

(4) 鲁西南地区场地土(图 5A,B)除表现与上述场地大致相同特征外,本身还有二个明显特征:1)是在大约 39 m 以内的浅层,沉积物孔隙度相对高或较高,孔隙度在 37.58%至 60%,孔隙度变化是无序的。2)是从大约 39.8 m 往下至 236.5 m 的深处,沉积物孔隙度明显变得低或较低,孔隙度在 20.0%至 41.82%,孔隙度变化也是无序的。该地区各种土的 A 事件,B 事件数分别为:黏土 A10,B9;粉土 A2,B1;砂质黏土 A4,B5;粗砂 A1,B0;钙质层 A0,B1。场地

土总事件数为 33,其中 A17,B16。分别占总事件数 52%和 48%。

表 1 及上述不同场地多个钻孔沉积无论是在垂向还是在横向上大致都包含了各种不同环境下沉积压实的情况和结果,相同命名土下部样品孔隙度较上部更高的 B 事件都接近或比较接近沉积总事件数的一半。并且几乎发生在随机选取的任何场地和任意深度。都较一致地表明大约 40 m 以浅的沉积,不呈现随深度增加的沉积压实作用。

2.2 参数关系式和环境对沉积孔隙度及欠压实的解释

关系式(5)显示对应初始孔隙度 n_0 ,无论压实度

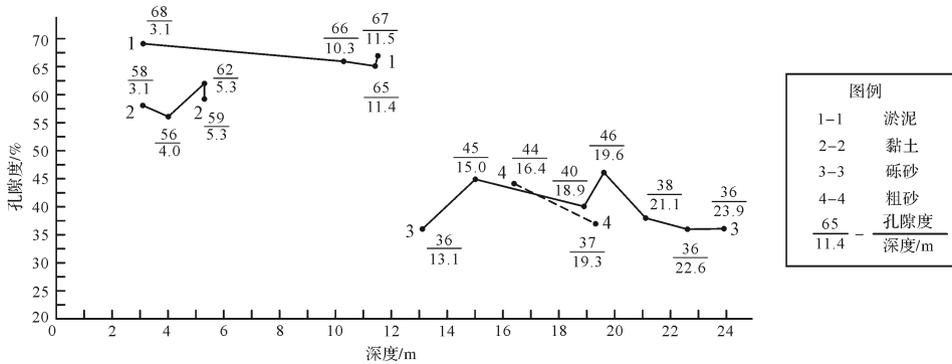


图 4 珠海市金洋花园场址不同沉积土孔隙度随深度变化关系

Fig.4 Relationship between porosity and depth of different sedimentary soils, Jinyang Garden, Zhuhai

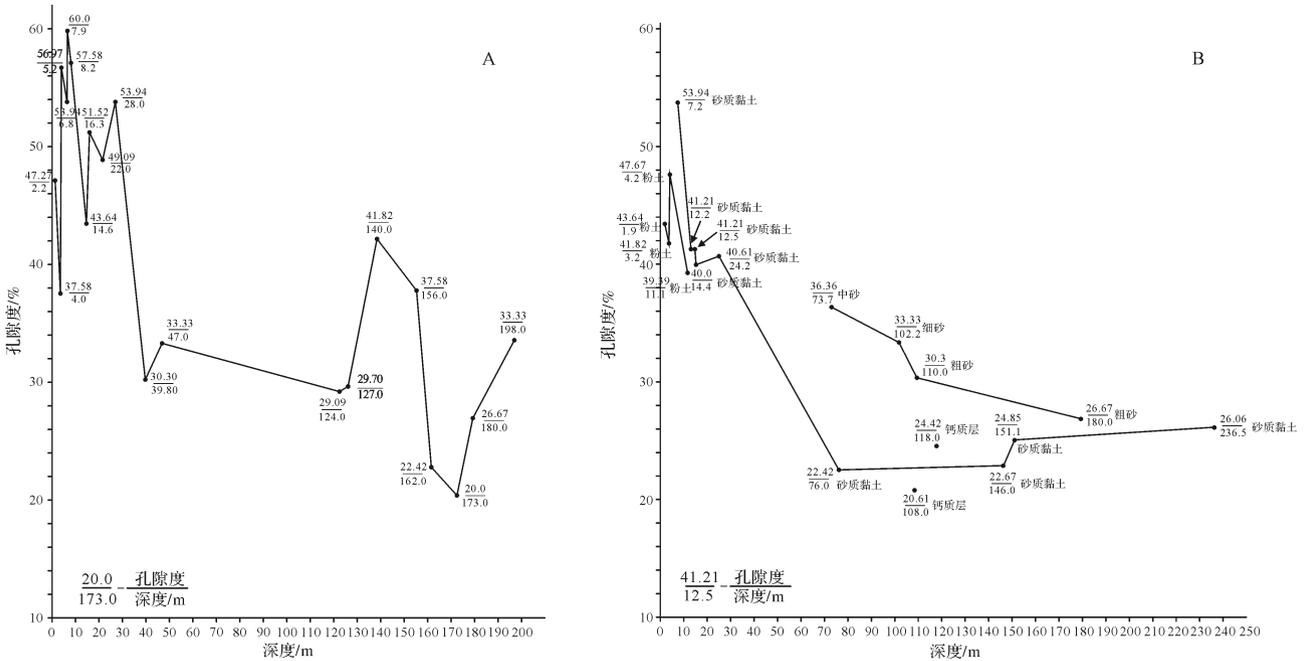


图 5 鲁西南第四系沉积物孔隙度随深度变化图^[24]

A.黏土;B.除黏土外其他沉积物

Fig.5 Relationship between Quaternary sediment porosity with depth, west-south of Shandong province^[24]

A. soil; B. distinct sediments except soil

K 变大,或变小,都不会发生 B 事件;只有当压实度 K 不变时才可能发生 B 事件。在正常沉积情况下,只要出现 B 事件,就一定反映 K 没有变化,下伏沉积没有被再压实。表 1 及上述场地滨海相沉积如此多的 B 事件,表明确实是滨海相沉积泄水性不好,初始沉积,初始压实后孔隙水不能排出,沉积负荷主要由孔隙水承担,表现为欠压实现象。既然下部土柱孔隙度高于上覆土柱孔隙度的 B 事件是由于土不具渗透性,表现了欠压实现象,这样的孔隙度是由初始沉积的初始孔隙度影响下在表部初始压实造成,与其后的加积无关,那么相同命名土柱下部孔隙度低于上覆土柱的 A 事件,也会是由于土不具渗透性,表现为欠压实现象,这样的孔隙度也会是由初始沉积的初始孔隙度影响下在表部初始压实造成,与其后的加积无关。关系式(5)显示,当下伏土柱压实度 K 不变时,上覆土柱初始沉积孔隙度 n_0 相对下伏土柱变大,上覆土柱 n 即可能变大,出现 A 事件;当上覆土柱 n_0 变小时, n 即可能变小,出现 B 事件。就反映了这样的沉积实际。显然,关系式(5)反映的这些特征也适用滨海相沉积同一垂直剖面上、下土柱不同命名土的顺序沉积。

沉积环境改变导致初始沉积孔隙度 n_0 不同是可能随时发生的,如海岸带急剧或缓慢的地壳运动,河口带河流丰水期与枯水期,间歇的雨水期,洪水期,风暴潮沉积与通常的沉积,每年最大潮与一般涨潮时期的沉积,人为因素及其他各种微环境的改变等都可能使得沉积土类型的改变或即使命名相同的土类,其沉积速率,粒度和介质及含水量也有所差异,从而导致沉积的初始孔隙度不一样和初始压实不一样。

表 1 及上述场地事件 A 较多于事件 B,这可能与环境或气候变化沉积物由粗转细的变化有关。如海进过程中海水对海岸侵蚀,初始沉积粗粒质、分选差,继后逐渐沉积细粒质;洪泛期在河口初期沉积速率快、分选差的粗粒质,随着洪泛期的消退,沉积速率转慢,渐渐沉积细粒质。使得土的干密度,湿密度,自下而上降低,含水量,孔隙度自下而上升高^[25]。这种状况在河口带反映更明显些^[26]。这可能是造成事件 A 较多于事件 B,或一个时段内孔隙度总趋势深处较浅处低的重要原因。

3 随序发生的不同时段沉积压实,欠压实和再压实

设定沉积是在一个底部和四周封闭仅上部有自由面空间的海盆或静水洼陷内进行,底板及周围不透

水。沉积孔隙水只能自下而上渗透。沉积压实大致经历下列几个时段:

3.1 第一阶段——初始沉积压实时段

该阶段按图 1 沉积压实模式进行。孔隙水与外界连通,沉积时上部颗粒重量挤压下部颗粒空隙内的水体,受压的水体只能向上克服颗粒及水体重量和摩擦力向着沉积表面逃逸,下部沉积物被压实。图 1 及关系式(2)反映的也就是这个阶段的沉积压实。滨海相任何土都具有这样的沉积压实第一阶段。只是由于沉积初始孔隙度和泄水环境的差异,其初始压实形成的孔隙度、压实量可能是不一样的。被压实的初始沉积土可能是薄或很薄的,持续的时间可能是不长的或是很短的,特别是渗透性很差的土。表 1 即反映了这种现象,且显示初始沉积不到 1 m 厚就产生欠压实,压实量是微小的。孔深 40 m 以内测得的孔隙度都应该是初始沉积压实后的孔隙度,每测得的相邻 2 个孔隙度之间可能还有未测到的不同的初始沉积压实孔隙度。持续沉积,这种第一阶段沉积压实就会不断的上覆叠加发生。叠加的总厚度可能是相当大的,已知可达近 40 m 或更厚(表 1、图 2~5)。前述鲁西南黏土这样的第一阶段总厚度可能达 30 余米。广东沿海除了珠江三角洲的斗门灯笼沙钻孔中发现有 60 余米厚的全新世滨海相沉积外,其它地方大多十余米深以下即出现大于 12 000 年的晚更新世中晚期沉积,中山市石岐富华路格力商业大厦场址钻孔揭示,海拔 5.25 m 即出现距今(12 580±400) a B.P. 的滨海相沉积,最深的含大量近江牡蛎的软塑淤泥分布孔深 38.55 m,(海拔-36.75 m),距今年龄为 45 120±910 a B.P.^[27]。表明上述多个沉积压实第一阶段叠加的时间,有可能达到从距今 45 000 年左右的晚更新世中晚期至今的时段。

3.2 第二阶段——欠压实时段

第一阶段沉积后,随着上覆沉积厚度的增加,依靠沉积物自重压力压迫下伏沉积物内孔隙水自下往上逃逸所遇到的阻力也愈大,孔隙水也愈来愈难从沉积物中泄出,当其中孔隙水也承担上覆沉积物荷重时,如果这时没有其他泄水途径,即使上覆继续加积,下部沉积物孔隙度也难改变。在海岸带,无论是纵向还是横向都主要分布渗透性很差甚至不渗水的滨海相沉积(图 6,7),河口带即使有时河流带来含很少黏土的各种砂的夹层沉积,横向上大多很快尖灭。在海岸,除了向海微倾斜方向表层沉积可能具横向泄水外,越往深处,横向泄水越不好。在洼陷内沉积一般

不具横向泄水环境。这时沉积压实进入第二阶段,即欠压实阶段。持续时间有的很长,能达晚更新世中晚期以来的数万年时段。

本文未能获得细砂,中砂,粗砂足够样品的随深度变化的孔隙度测值。通常认为这类砂颗粒之间没有凝聚力,结构非常松散,透水性好。并且不具黏结性和塑性,易被压实。有试验证明砂土的绝大部分压缩量几乎在压力作用后立刻发生,曾有试样砂 95% 的压缩量在 1 分钟内几乎全部完成^[28],有研究者在

研究现代黄河三角洲粉砂和黏土质粉砂的沉积压实时根据渗透系数得到的固结系数变化范围为 3.81 cm²/s 至 714 cm²/s,认为这样的固结系数范围内 15 m 厚的沉积层在 12 小时至 1 周内固结度可达 95%,粗粒沉积物的固结速度很快,认为可不考虑沉积压实导致的沉降影响^[16]。广东沿海大量钻孔岩芯表明这类砂在孔深 30 余米以内的不同深度,大多呈饱水状态,岩芯疏松不能直立,厚数厘米至数米,其间多为淤泥或黏土所隔,初始沉积后虽然绝大部分孔隙已被压

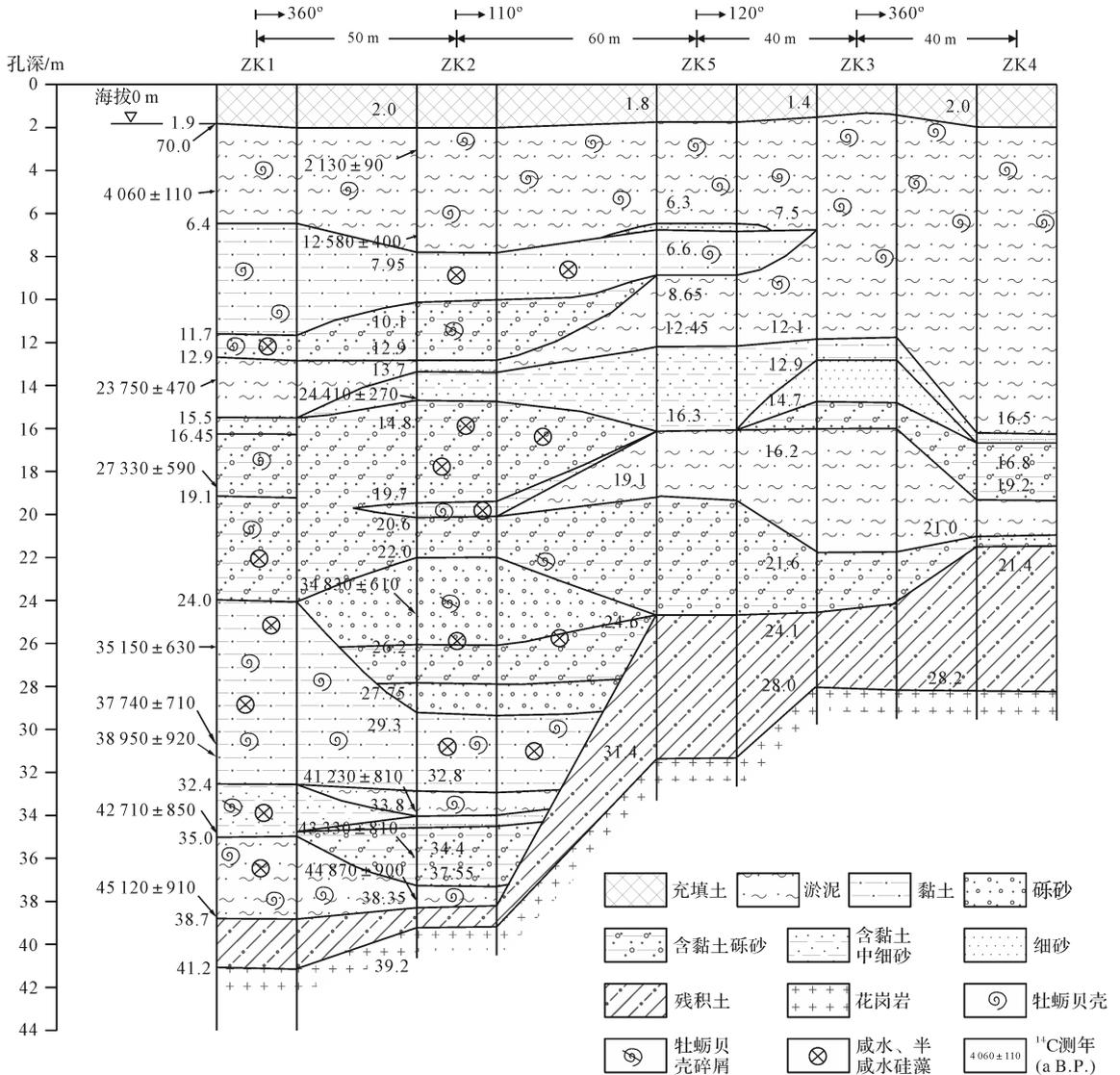


图6 广东中山石岐富华路北珠海格力商业大厦场址钻孔地质剖面图^{①②}

显示场区距今 45 000 年以来滨海相沉积纵向,横向泄水性不好,不易发生压实作用

Fig.6 The geological section of bores at Zhuhai Geli Commerce Large Building in Zhongshan, Guangdong

This section shows that the sediments of the site have not weel sluicing environment however may in the crosswise or in the vertical and no compaction since middle and late period of Epiprestocen

①广东省地震局. 广东省中山市石岐格力商业大厦场址地震安全性评价报告场址地质部分,1993.

②徐起浩. 国家地震局联合科学基金(批准号:91161)课题研究成果报告:海平面变化,海岸升降与地震关系研究. 广东省地震局,1996.

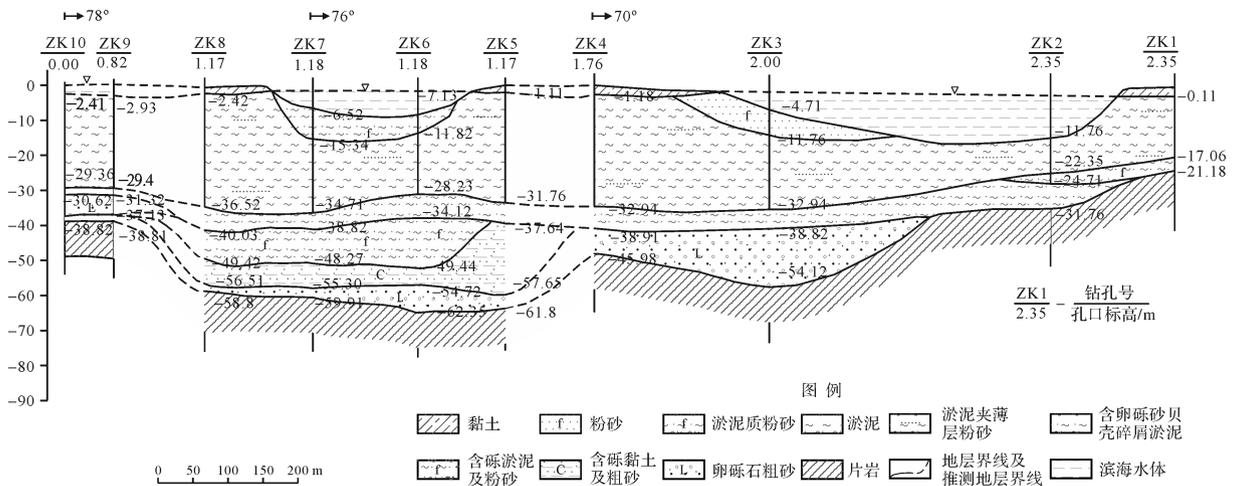


图7 广东斗门县新环小桥,新环平桥,斗门大桥桥址工程地质剖面图^①

显示孔深约60 m以上沉积泄水性不好,除表层外一般不易发生压实作用

Fig.7 The geological section at Xinhuan Small Bridge, Xinhuan Level Bridge, and Doumen Large Bridge in Doumen county, Guangdong province

This section shows that sediments of the sites have not weel sluicing environment and no compaction

缩,但随着上覆加积的负荷作用,部分小颗粒可能趋向嵌入剩余孔隙中,若剩余孔隙水不能外泄,即处欠压实状态。

3.3 第三阶段——再压实时段

经过相当时间沉积欠压实阶段后,沉积体内部发生物理化学变化^[29]可能使沉积体孔隙度变得更小。沉积压实与沉积时间有关已经为一些研究者所认识或提及^[30-31]。特别是沉积体所处环境发生变化,如长期的缓慢的或急剧的构造运动都会使得地层局部倾斜、褶皱、断裂、裂隙发育,使得原来处封闭状态的孔隙水与地表或地下其他地方局部沟通。一些沉积土体即成非封闭系统,土层中的局部水体会因上覆土体的荷载或受构造应力作用被从土的孔隙中挤出,使局部土体进一步被压实。此外,对沉积土层油气开采,抽取地下水等人为作用及其他有关作用都会使得原来处于封闭状态的局部土层内的孔隙水与外界贯通,在土体压力下向着低压力的地方泄出。从而进入沉积压实的第三阶段——再压实阶段。鲁西南40 m以下沉积孔隙度明显低于更浅部沉积,可能与再压实及其他作用有关。据报导,越南湄公河三角洲在公元2006—2010年期间因抽取地下水导致压实下沉速率达10~40 mm/a^[4,32],我国黄河三角洲下沉较多认为与构造运动及人类活动都有关^[33-34],但越往深处沉积泄水环境可能越差,压实作用越困难。40 m以浅,或晚更新世中晚期以来滨海相沉积由于沉积时间不

长,再压实机会不多,这些可能是导致该深度以内或该时段的滨海相沉积初始沉积压实后几乎未能经受再压实的重要原因。

4 滨海相沉积无明显压实,导致的地面沉降不明显

滨海相沉积在最初上部沉积初始压实后几乎再未经受压实作用。每一初始沉积层的压实作用,其压实量又很快被上覆的又一初始沉积层所填补,所以在计算某一土柱的沉积压实量时,只要计算该土柱的初始沉积压实量就行了。而表部的初始沉积压实是在沉积厚度薄,甚至不到1 m在较短或很短的时间内就可能形成。压实量很小。因为在计算压实量时所用的 n_0, h_0, h 等参数都是无法确定的估计值,使得计算出来的初始压实量会有误差,次外影响古海平面估算的古潮差大小等都有可能使算得初始沉积造成的很小的压实量在古海平面研究不可避免的误差范围内。因此利用滨海相沉积求算古海平面高度及据此推算海岸地壳运动幅度时,除沉积外因素导致再压实的局部地区的相关沉积层外,一般可忽略沉积压实的影响。

综合滨海相沉积压实模式,土柱初始压实后上覆加积后也不再被压实。土柱 h_1 初始沉积压实后腾出的空间 Δh_1 很快为海水所充填,压实后土柱 h_{1-1} 顶部即为海底平面;当 h_2 在 h_{1-1} 上覆加积, h_2 被压实腾出的空间 Δh_2 很快被海水充填,压实后土柱 h_{2-1} 顶部即

①广东省地矿局区域测量大队. 珠海区域地质综合调查报告, 1989.

为海底平面；同样当 h_3 在 h_{2-1} 上覆加积后， h_{3-1} 顶部即为海底平面。呈现图 8 沉积压实模式。伴随海平面的渐进上升，滨海相沉积越积越厚，但各沉积土层都未因上覆加积而进一步压实。如果从下到上有 m 个这样的土柱，虽然每个土柱都有初始沉积压实，但压实后腾出的空间除了第 m 个土柱外都没有损失，因此总压实量应为最上部第 m 个土柱的初始压实量 Δh_m 。显然这压实量是很小的，而且 Δh_m 很快被海水充填， h_{m-1} 顶部即为海底平面，因此可以认为滨海相沉积造成的压实下沉是很不明显的，在一般情况下也可不予考虑。

压实度 K 及公式(4)表明，当 n (可由实验室测得) 确定，由 n 反映的压实度或相对压实量仅与 n_0 有关，而与上覆加积的厚度及沉积深度无关，理论上比较清晰地解释了图 8 反映的滨海相沉积实际压实模式。

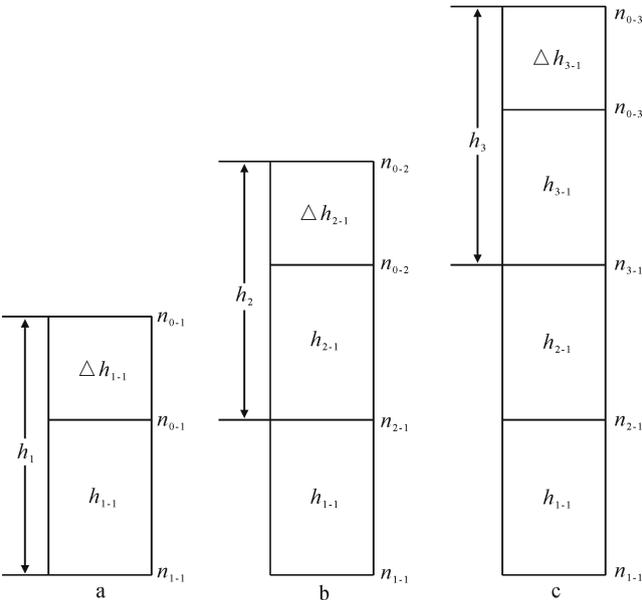


图 8 晚更新世中晚期以来滨海相沉积实际压实示意图

Fig.8 Schematic diagram of actual compaction of littoral facies sediments since Middle-Late Pleistocene

5 滨海相沉积压实,欠压实,再压实的研究意义

(1) 在泄水环境较好的海岸边进行地表建筑时要评估由于对沉积物增加的荷载导致表层因可能较好的泄水环境而进一步被压实,从而使得地基沉降或差异形变可能给建筑物带来的影响。

(2) 在海岸地带长时间大量抽取地下水、油气时,要评价可能使得已处相对稳定状态的欠压实沉积因施工造成局部土孔隙水再与外界沟通,导致再压

实,使得地基不均匀沉陷,从而产生对地表建筑物及地下工程的不良影响。

(3) 本文提出随序发生的沉积压实的三个阶段,进一步指出沉积压实,欠压实的关键是孔隙水的泄水通道是否通畅。由此进一步认为,滨海相沉积实际渗水性很差,表层下面大多没有实际泄水环境,40 m 深度以浅或晚更新世中晚期以来滨海相沉积压实不明显,这些研究和认识对于充实沉积学理论及对用滨海相沉积研究海平面及海岸地壳运动具有重要意义。

本文研究结果也适合非滨海的内陆湖相,流水盆地沉积。

6 结论

沉积压实理论模式和理论关系式导出的压实度与孔隙度关系揭示,沉积过程中压实度不发生变化时,孔隙度变化决定于初始沉积孔隙度和初始沉积压实。由于沉积环境变化导致初始沉积孔隙度和初始压实变化,会造成沉积体下部孔隙度大于上部的情况。这是沉积体孔隙水不能排出,呈欠压实状态的表现,是沉积体上覆沉积后未被再压实的重要标志。沉积压实大致具 3 个阶段,即:最浅部的初始压实作用阶段,其后的欠压实阶段,最后的进一步压实阶段。其中第一阶段发生在薄或很薄的沉积表层,沉积体初步受到压实,压实量小;第二阶段沉积体上覆加积,但下伏沉积孔隙水与外界不能连通,沉积体欠压实。随着持续沉积,第一阶段沉积压实以不同厚度,不同作用时间多次叠加发生,紧接第一阶段的第二阶段即欠压实阶段,延续的时间有可能达数万年;第三阶段,由于构造作用、人为或其他相关作用等造成的外部环境发生改变,沉积体内部孔隙水可能再次与外部连通,形成新的泄水通道,与泄水通道相连的沉积体再受压实作用。但由于晚更新世中晚期以来滨海相沉积时间不长,再压实机会不多,而且越往深处沉积泄水环境可能越差,这些可能是导致 40 m 以浅或晚更新世中晚期以来滨海相沉积初始沉积压实后几乎未能经受再压实的重要原因。晚更新世中晚期以来的滨海相沉积压实引起的地面下沉不明显。在利用滨海相沉积求算海平面高度并据此推算海岸地壳运动幅度时,除沉积之外的其他因素导致再压实的局部地区相关沉积层外,一般可不考虑沉积压实的影响。

致谢 对审稿专家提出的宝贵意见衷心感谢。

参考文献 (References)

[1] 张凤英,刘尚仁. 沉积物压实量分式及其在研究海面高度中的

- 应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(增刊1): 39-44. [Zhang Fengying, Liu Shangren. Formula for sediment compaction capacity and its use in researching sea level[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996, 35(Suppl.1): 39-44.]
- [2] 杨建明. 海平面变化研究中沉积物实量的估算[J]. 台湾海峡, 1988, 7(4): 382-388. [Yang Jianming. Estimates of sedimentary compaction in sea level studies[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1988, 7(4): 382-388.]
- [3] 王绍鸿. 建立海平面变化曲线的若干问题[J]. 台湾海峡, 1990, 9(4): 301-308. [Wang Shaohong. Some problems in sea level curve establishment[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1990, 9(4): 301-308.]
- [4] Brain M J. Past, present and future perspectives of sediment compaction as a driver of relative sea level and coastal change[J]. Current Climate Change Reports, 2016, 2(3): 75-85.
- [5] Talk; Compaction (Geology). From Wikipedia, the free encyclopedia[EB/OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Compaction_\(geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Compaction_(geology)). 2017.8.6.
- [6] Fowler A C, Yang X S. Fast and slow compaction in sedimentary basins[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1998, 59(1): 365-385.
- [7] Bahr D B, Hutton E W H, Syvitski J P M, et al. Exponential approximations to compacted sediment porosity profiles[J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(6): 691-700.
- [8] Brain M J, Kemp A C, Hawkes A D, et al. Exploring mechanisms of compaction in salt-marsh sediments using Common Era relative sea-level reconstructions[J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 167: 96-111.
- [9] Galvin C. Apparent sea-level rise caused by sediment compaction [C]//GSA annual meeting. Boston, Massachusetts; Hynes Convention Center, 2001.
- [10] Higgins S A, Overeem I, Steckler M S, et al. InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(8): 1768-1781.
- [11] Greensmith J T, Tucker E V. Compaction and consolidation[M]//van de Plassche O. Sea-level research: A manual for the collection and evaluation of data. Dordrecht; Springer, 1986: 591-603.
- [12] Horton B P, Engelhart S E, Hill D F, et al. Influence of tidal-range change and sediment compaction on Holocene relative sea-level change in New Jersey, USA[J]. Journal of Quaternary Science, 2013, 28(4): 403-411.
- [13] Törnqvist T E, Wallace D J, Storms J E A, et al. Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(3): 173-176.
- [14] Long A J, Waller M P, Stupples P. Driving mechanisms of coastal change: peat compaction and the destruction of late Holocene coastal wetlands[J]. Marine Geology, 2006, 225(1/2/3/4): 63-84.
- [15] Allen J R L. Geological impacts on coastal wetland landscapes; some general effects of sediment autocompaction in the Holocene of northwest Europe[J]. The Holocene, 1999, 9(1): 1-12.
- [16] 师长兴, 尤联元, 李炳元, 等. 黄河三角洲沉积物的自然固结压实过程及其影响[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 175-181. [Shi Changxing, You Lianyuan, Li Bingyuan, et al. Natural consolidation of deposits and its consequences at the Yellow River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 175-181.]
- [17] 高茂生, 薛春汀, 叶思源, 等. 现代黄河三角洲沉积层压实下沉的计算分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 34-40. [Gao Maosheng, Xue Chunting, Ye Siyuan, et al. The computation and analysis of compactional subsidence of sediments in the modern Huanghe River Delta[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(5): 34-40.]
- [18] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社分社, 1982: 1-274. [Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, et al. The growth, development and evolution of Zhujiang River Delta[M]. Guangzhou: Science Popularization Press Branch, 1982, 1-274.]
- [19] 陈伟光, 赵红梅, 常郁, 等. 珠江三角洲晚第四纪垂直构造运动速率[J]. 地震地质, 2001, 23(4): 527-536. [Chen Weiguang, Zhao Hongmei, Chang Yu, et al. The rate of Late Quaternary vertical motion of the Zhujiang Delta[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(4): 527-536.]
- [20] 高国瑞. 近代土质学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013: 1-292. [Gao Guorui. Neoteric soil geotechnology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013: 1-292.]
- [21] 曾允孚, 覃建雄. 沉积学发展现状与前瞻[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(1): 1-7. [Zeng Yunfu, Qin Jianxiong. Development and future of sedimentology[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 1-7.]
- [22] 覃建雄, 徐国盛, 曾允孚. 现代沉积学理论重大进展综述[J]. 地质科技情报, 1995, 14(3): 23-32. [Qin Jianxiong, Xu Guosheng, Zeng Yunfu. Series of significant developments in modern sedimentological theory[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(3): 23-32.]
- [23] 唐芬, 唐德兰. 土力学与地基基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 7-135. [Tang Fen, Tang Delan. Foundation of soil mechanics and ground[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 7-135.]
- [24] 江明根. 压实作用研究在沉积环境分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(1): 1-3. [Jiang Minggen. Application of consolidation study in sedimentary environment analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(1): 1-3.]
- [25] Rieke H H, Chilingarian G V. 泥质沉积物的压实[M]. 徐怀大, 译. 北京: 地质出版社, 1984: 1-254. [Rieke H H, Chilingarian G V. Compaction of argillaceous sediments[M]. Xu Huaida, Trans. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-254.]
- [26] 夏鹏, 孟宪伟, 丰爱平, 等. 压实作用下广西典型红树林区沉积速率及海平面上升对红树林迁移效应的制衡[J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 551-560. [Xia Peng, Meng Xianwei, Feng Aiping, et al. Sediment compaction rates in mangrove swamps of Guangxi

- and its mangrove migration response to sea-level rise [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 551-560.]
- [27] 徐起浩,冯炎基. 广东中山晚更新世最早海侵层与水动型海平面变化[J]. *地震地质*, 1997, 19(1): 91-95. [Xu Qihao, Feng Yanji. The earliest transgression layer since Late Pleistocene in Zhongshan city of Guangdong province and "Eustatic" sea level changes [J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19(1): 91-95.]
- [28] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊,等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 1-801. [Gu Xiaolu, Qian Hongjin, Liu Huisan, et al. *Foundation and ground* [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1993: 1-801.]
- [29] 刘宝珺,张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京, 科学出版社, 1992, 1-271. [Liu Baojun, Zhang Jinquan. *Sedimentary diagenesis* [M]. Beijing: Science Press, 1992, 1-271.]
- [30] 刘震,邵新军,金博,等. 压实过程中埋深和时间对碎屑岩孔隙度演化的共同影响[J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 125-132. [Liu Zhen, Shao Xinjun, Jin Bo, et al. Co-effect of depth and burial time on the evolution of porosity for classic rocks during the stage of compaction [J]. *Geoscience*, 2007, 21(1): 125-132.]
- [31] 刘国勇,金之钧,张刘平. 碎屑岩成岩压实作用模拟实验研究 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(3): 407-413. [Liu Guoyong, Jin Zhi-jun, Zhang Liuping. Simulation study on clastic rock diagenetic compaction [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3): 407-413.]
- [32] Erban L E, Gorelick S M, Zebker H A. Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(8): 084010.
- [33] 任美镠. 黄河、长江和珠江三角洲海平面上升趋势及2050年海平面上升的预测[M]//任美镠. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策. 北京: 科学出版社, 1994: 18-28. [Ren Mei'e. The trends of sea level rising in Huanghe, Changjiang and Zhujiang deltas and a prediction of sea level rising in 2050 [M]//Ren Mei'e, The effect of sea level rising on delta area of China and countermeasure. Beijing: Science Press, 1994: 18-28.]
- [34] 秦伟颖,庄新国,黄海军. 现代黄河三角洲地区地面沉降的机理分析[J]. *海洋科学*, 2008, 32(8): 38-43. [Qin Weiyong, Zhuang Xinguo, Huang Haijun. Mechanism analysis of land surface subsidence in the modern Yellow River Delta [J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(8): 38-43.]

Porosity Identification, Mechanism and Significance for Littoral Sediments without Obvious Compaction

XU QiHao

Seismological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China

Abstract: The correlation between compaction degree and porosity derived from the theoretical model of sedimentary compaction and the variation of soil volume, pore ratio and porosity of soil units before and after compression shows that the variation of the porosity of overlying sediments depends on the initial sedimentary porosity when compaction degree of underlying sediments does not change during sedimentation. The change of sedimentary environment results in the change of initial sedimentary porosity, which is not related to buried depth, and the underlying sediment porosity is greater than that of the overlying deposits. This is the performance of the underlying-sediment pore water which cannot be discharged and the sediments are under-compacted. When the porosity of the lower part of the soil column is greater than that of the upper part of the soil column, the lower part of the soil column must be under-compacted without any external disturbance besides sedimentation, which is an important sign to identify the under-compacted littoral facies sediments after the overlying sediments is formed. Comparing the porosity and distribution depth of the same named soil in 58 boreholes and 191 soil samples from 8 engineering sites along the coast of Guangdong Province and 208 soil samples from different sites in Guangdong and other related areas in China, the analysis shows that the littoral deposits within about 40 m or sediments since the middle and late Pleistocene are under-compacted vertically and laterally. This kind of under-compaction is ubiquitous in horizontal distribution. Therefore, we proposed that sedimentary compaction generally has three stages in sequence: 1) the initial sedimentary compaction stage of the thin layer in the most surface layer under the influence of initial sedimentary porosity; 2) under-compaction stage; 3) re-compaction stage. The results show that the littoral deposits generally have poor permeability and drainage environment. Apart from the local sediments which are re-compacted due to deposition process, the compaction subsidence of littoral deposits within 40 m near the surface or since the middle and Late Pleistocene is not obvious. Therefore, when you conduct the study on Paleo-Sea level and coastal crustal movement in littoral deposits, it is not necessary to take into account the impact of sediment compaction.

Key words: littoral sediment; initial sedimentary porosity; initial sediment compaction; compaction degree; under-compaction; compaction subsidence