

沉积物压实量分式及其在研究 海面高度中的应用

张凤英 刘尚仁

(中山大学地球与环境科学学院, 广州 510275)

摘要 推导出计算沉积物压实量的理论公式: $\Delta h = h(n_0 - n) / (1 - n_0)$. 指出造成海岸堆积平原中 Q_3 海相顶面高程常比岩岸地面上的古海面遗迹的高程低数米至数十米的主要因素: ① 沉积物压实; ② 冰期低海面流水蚀低古地面; ③ 局部构造下沉. 逐步分解出这 3 个因子就能较正确确定古海面高度、古地形起伏和构造下沉量.

关键词 沉积物压实量公式, 孔隙度, 海平面, 珠江三角洲

在研究第四纪海平面变化时常会遇到这样问题: 三角洲海岸平原钻孔中的海相层高程, 常比岩岸地面上的古海面证据 (海蚀平台、海蚀洞以及岩岸边缘的同期海相层) 的高程低数米至数十米以上, 两者很不协调. 以往研究者常简单地认定是三角洲平原构造下沉, 并以此来计算构造下沉速度. 为预报地震而进行的地形变水准观测, 也常把测出的堆积平原下沉结果, 一般都作为构造下沉来对待, 并由此确定不同断块的差异沉降; 当主要根据堆积平原和陆架上钻孔的埋藏海相层位置来确定更新世海平面高度时, 可能得出昔日海面低于现今不一定合理的结论. 可以设想, 如果在该埋藏海相层的总下沉量中能把沉积物压实量分解出来, 那末该地块构造升降量的精度也就大大提高了. 任美镔曾指出过, “研究沿海堆积平原的地面下沉和海面变化问题时, 必须充分估计到沉积物压实的因素”^[1]. 然而, 计算沉积物压实量这个课题至今仍待解决, 本文试图进行研讨.

1 计算沉积物压实量的理论公式

如图 1, 取 1 单位面积的土柱, 压实前的高度 (即土柱体积) 为 h_0 , 若 h_0 由可压缩的孔隙体积 h_{m0} 和不可压缩的骨架体积 h_s 组成, 即

$$h_0 = h_{m0} + h_s \quad (1)$$

该土柱压实至今的体积为 h , 同样

有
$$h = h_m + h_s \quad (2)$$

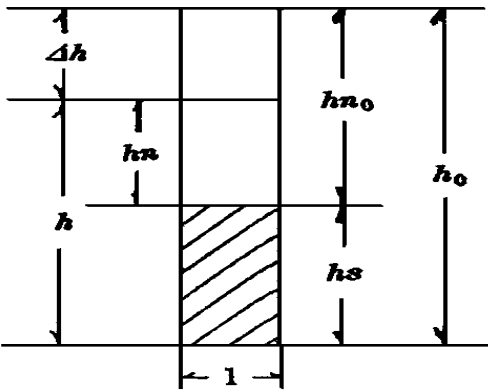


图 1 单位面积土柱的压实

Fig. 1 Compaction for earth column per unit area

$$\text{显然 } h_s = h_0 - h = h - hn \quad (3)$$

若土柱压实前、后的孔隙度分别为 n_0 和 n , 根据孔隙度的定义有

$$n_0 = hn_0 / h_0, \quad n = hn / h, \quad \text{即}$$

$$hn_0 = n_0 \cdot h_0, \quad hn = n \cdot h \quad \text{将此结果}$$

代入 (1) 式, 将 (3) 式代入 (1) 式, 便有

$$h_0 = hn_0 + h_s = hn_0 + (h - hn),$$

$$h_0 = n_0 \cdot h_0 + (h - n \cdot h),$$

$$h_0(1 - n_0) = h - n \cdot h,$$

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

只要知道拟计算沉积物压实量的土层厚度 (即以该沉积物底面起算的高度) h , 压实前的孔隙度 n_0 和压实至今的孔隙度 n , 利用式 (4) 便可计算出压实前该沉积物的原先厚度 (或高度) h_0 . 显然, 沉积物压实量 $\Delta h = h_0 - h$, 即

$$\Delta h = h \frac{1 - n}{1 - n_0} - h = h \frac{n_0 - n}{1 - n_0} \quad (5)$$

如上所述, 只要保证岩土骨架不可压缩这个条件, 式 (4), (5) 对任何年代任何岩性的岩土均适用.

2 公式中各因子的确定

2.1 确定 n_0 值

n_0 是土层泥砂压实前初始状态的孔隙度. 对于刚沉积下来的泥砂来说, 参考文献 [2~4]: 砾砂、粗砂、中砂的 n_0 取 0.48~0.49, 细砂、粉砂的 n_0 取 0.49~0.50, 粘性土的 n_0 取 0.65~0.7. 含粘土的砂取较高值, 含砂的粘土取较低者. 对于地史时期不断加积形成的沉积物, 如只计算某一时段至今的压实量, 确定该 n_0 值复杂些, 将在后面讨论.

2.2 确定 h 值

h 是拟计算沉积物压实量的土层厚度, 可从钻孔柱状剖面资料获取.

2.3 确定 n 值

n 是上述 h 厚度土层的天然孔隙度, 尽可能由实测计算确定, 其计算公式为

$$n = 1 - \frac{V_d}{\Delta}$$

式中, V_d 为土层的干容重; Δ 为土层的比重. 这两个土的物理性质指标可在各种工程地质勘察报告中取得.

如实在无该指标时, 可在表 1 内选值进行粗略估算. 拟该表考虑: ① 砂性土近 1 万年来其密实程度以松散至稍密为主, 距今 1~4 万年的以中密为主, 4 万年前的以密实为主;

② 饱和粘性土近 1 万年来多为软土, 1~4 万年的既有软土又有非软土, 4 万年前的已无

软土. 软土的孔隙度大于 0.5, 一般为 0.5~0.7, 并参考砂性土孔隙度随粒径减小而增加

表 1 上新统、全新统土层孔隙度 (n) 的参考值

Tab. 1 Consultation value of porosity in Holocene Series and Late Pleistocene Series

岩 性	4 万年前	4 万年	3 万年	2 万年	1 万年	现在
砾砂、粗砂、中砂	< 0.375	0.375	0.400	0.420	0.440	≥ 0.460
细砂、粉砂	< 0.410	0.410	0.430	0.450	0.470	≥ 0.490
粘性土 (饱和)	< 0.450	0.450	0.500	0.550	0.600	≥ 0.650

的规律^[3]来初步拟定. 粘质砂土 (亚砂土、轻亚粘土) 采用粘性土中较低孔隙度值, 而粘土用较高值; ③ 为方便孔隙度取值, 假定同一种土层, 随着深度增加或者年代愈老, 该孔隙度 n 大致呈线性规律减少. 沉积岩的孔隙度一般为 0.01~0.1, 当考虑下、中更新统和 4 万年前 Q_3 土层的压实量时, 可在沉积岩与表 1 孔隙度最小值之间取值. 表 1 的孔隙度值有待今后在实践中进一步修正. 用它来估算压实量, 精度低, 也许是一种定性的结果.

3 沉积物压实与海平面研究

造成三角洲平原、部分海积平原中的海相 (或三角洲相, 下同) 层, 尤其是 Q_3^2 海相层的高程, 常比岩岸边缘同期的海相层低数米至几十米的原因是: ① 平原基底构造下沉; ② 平原基底以上的第四系压实; ③ 对于晚更新世中期的海相层来说, 还可能存在玉木末次冰期低海面时被流水蚀低的问题. 本文只研究第四系沉积物压实对研究海平面的影响.

3.1 珠江三角洲部分全新统沉积物压实量的估算

通常在同一个钻孔中具有岩性、沉积相、绝对年龄和孔隙度等 4 项资料, 是罕见的. 本文选择珠江三角洲部分钻孔, 在表 1 取孔隙度值, 进行沉积物压实量的估算 (表 2). 经计算的压实量约占土层厚度的 5%~20%, 全新统最厚达 60m 的 D_6 孔, 其压实量为 4.27m. 如果研究全新世海平面变化, 除计算全新统海相层压实外, 还要计算该层以下, 包括更新统同期的压实量, 才能较合理地反映全新统海相层的下沉幅度. 这个问题将与下一节讨论有关.

3.2 从沉积物压实量估算 Q_3^2 海相层顶面的沉降

这是在计算晚更新世中期海相层顶面形成后, 其下面全部土层至今的压实量问题. 仍以珠江三角洲为例, 若该海相层顶面距今 2 万年形成, 基岩上覆的地层距今多为 4 万年形成. 也就是说, 昔日该顶面泥沙刚沉积时, 底部的泥沙已压实 2 万年了. 如果该海相层顶面为粘性土, 其开始压实 n_0 为 0.7, 基底上的粘性土 n_0 就不应取 0.7, 而应取压实 2 万年后的 n_0 , 查表 1, 可将 $n_0 = 0.55$ 作为开始压实的孔隙度, 至于顶面至基底之间的粘性土 n_0 值, 可在 0.55~0.7 之间, 据不同深度按线性规律取值. 砂性土亦照此原则取好 n_0 值. 可见, 取好 n_0 值是解决这课题的关键.

表 2 珠江三角洲部分全新统沉积物压实量计算表

Tab. 2 Count table for part sediment compaction capacity of Holocene Series in Zhujiang Delta

钻孔与位置	地面高程 /m	¹⁴ C样品		沉积物压实量 Δh 计算表				$\Sigma \Delta h$ /m		
		高程 /m 深度 /m	年龄 a (R. P.)	h 起止 深度 /m	沉积相与岩性	n_0	n		h /m	Δh /m
PK ₄ 博罗园洲上南	5	$\frac{0.3 - 0.2}{4.7 - 5.2}$	5940 ± 300	0- 0.7 0.7- 2.2 2.2- 4.6 4.6- 约 6.5	黄色粉细砂 △灰黄色细砂粘土 △花斑粘土粉砂, 灰黄色细砂 R深灰色淤泥质中细砂, 灰白色细砂, 腐木	0.50	0.48	0.7	0.03 0.35 0.17	0.55
PK ₅ 东莞石排下沙	3			0- 0.6 0.6- 4.1 4.1- 约 6	R灰黄色含粘土中细砂 △浅黄红色粉砂粘土 R灰黄色含小砾中粗砂	0.49	0.48	0.6	0.01 0.82 0.15	0.98
K ₅ 三水西南	4	$\frac{-3.0}{7.0}$	6300 ± 330	0- 约 6.5 6.5- 7.8	△黄褐色粉砂粘土夹腐木, 深灰色淤泥 △深灰色淤泥质粉砂	0.70	0.65	6.5	1.08 0.05	1.13
D ₇ 南海盐步罗村	2	$\frac{-1.9}{3.9}$	6510 ± 170	0- 2.8 2.8- 3.9 3.9- 7.4 7.4- 8.5	填土 △深灰色淤泥质粉细砂, 含腐木, 海生贝壳 灰白黄色含铁核粉细砂粘土, 下部深灰色 R灰白粉红色中细砂, 含腐木	0.50	0.48	1.1	0.04 0.75 0.06	0.85
PK ₁₅ 南海平洲夏教	2			0- 9.5 9.5- 11.5	△灰黄、灰色粘土淤泥粉砂、细砂 腐木 R灰色混合砂	0.50	0.48	9.5	0.38 0.12	0.50
PK ₂₄ 新会双水桥美	1			0- 11.0	△灰黄色粉砂粘土, 深灰色粉砂质淤泥	0.70	0.65	11.0	1.80	1.80
PK ₁₄ 番禺灵山九比	1	$\frac{-5.7}{6.7}$ $\frac{-8.7}{9.7}$	1680 ± 90 5020 ± 175	0- 约 3 3- 6.7 6.7- 9.7 9.7- 约 13	△褐黄、深灰色粉砂粘土淤泥 R深灰色含淤泥粉细砂, 含蚝壳 △深灰色淤泥中细砂 R灰色砂砾	0.70	0.65	3.0	0.50 0.07 0.12 0.25	0.94
PK ₂₇ 中山三角光一	1	$\frac{-8.0}{9.0}$	5790 ± 170	0- 4.46 4.46- 9.05	△棕黄、深灰色粉砂粘土淤泥 △R- △深灰色淤泥细粉砂, 含蚝壳	0.70	0.65	4.46	0.74 0.28	1.02
PK ₁₃ 中山东凤同安	3			0- 6.0 6.0- 约 16	△黄、灰色淤泥质粉砂、粘土粉砂 R深灰色含淤泥细砂夹腐木	0.50	0.48	4.60	0.24 0.60	0.84

(续表 2)

钻孔与位置	地面高程 /m	^{14}C 样品		沉积物压实量 Δh 计算表					$E\Delta h$ /m	
		高程 /m 深度 /m	年龄 a (R. P.)	h 起止 深度 /m	沉积相与岩性	n_0	n	h /m		Δh /m
PK19 中山横 栏穗丰	2. 5	$\frac{-2. 0}{4. 5}$	2350± 110	0- 4. 57	△黄褐、灰色淤泥粉砂, 含腐木	0. 50	0. 48	4. 57	0. 18	0. 88
				4. 57- 9. 11	R灰色淤泥质粉细砂, 含蚝壳	0. 50	0. 48	4. 54	0. 18	
				9. 11- 17. 7	△深灰色淤泥质粉细砂, 含蚝壳	0. 50	0. 47	8. 59	0. 52	
D6 斗门 灯笼沙	0. 5	$\frac{-2. 5}{3. 0}$ $\frac{-18. 1}{18. 6}$ $\frac{-54. 2}{54. 7}$	1390± 70	0- 12. 0	△淤泥质粉细砂, 含藜科花粉	0. 50	0. 49	12. 0	0. 24	4. 27
				2350± 90	12. 0- 19. 2	△深灰色粉砂淤泥, 含蚝壳	0. 70	0. 65	7. 2	
			8050± 200		19. 2- 28. 0	R深灰色淤泥质粗砂, 含海生贝壳	0. 49	0. 46	8. 8	
					28. 0- 38. 3	△深灰色夹淤泥细砂	0. 50	0. 47	10. 3	
					38. 3- 52. 0	R深灰色含淤泥中粗砂、混合砂含砾	0. 49	0. 45	13. 7	
					52. 0- 56. 6	△深灰色夹淤泥中细砂, 含腐木	0. 49	0. 44	4. 6	
	56. 6- 约 60	△灰色含砾细中砂、含腐木	0. 48	0. 44	3. 4	0. 26				

注: ① 钻孔柱状剖面, ^{14}C 数据来源文献〔5〕; ② n_0 , n 在表 1 取值, 高程由作者确定; ③ △海相为主, R陆相为主

表 3 将已知的 Q_3^2 海相层以上、 Q_4^2 海相层以下、文献中沉积相未确定的黄红白色粉砂粘土视为冰期时露出地面风化的产物, 是 Q_3^2 海相层的顶面。PK19 在该层见蚝壳是个证据, 概略计算结果表明, 10 个钻孔的 Q_3^2 海相层顶面因土层压实而下降 0. 56~ 6. 25m, 约占该计算土层厚度的 5%~ 30%。消除 $E\Delta h$ 影响后, 该 Q_3^2 海相层顶界的高程有 8 个孔在 - 10m 内, 有 5 个孔在 - 5m 内, 最深为 - 13. 92m。此结果显示, Q_3^2 高海面较接近现在海面。

消除沉积物压实影响后, PK13 PK19 的 Q_3^2 海相层顶界面高程仍较低, 达 - 13. 92 ~ - 12. 07m, 是局部构造下沉还是冰期时被水流蚀低? 后者可根据该地段百米左右间距密集的钻孔群详细资料来了解该侵蚀面的起伏形状, 该侵蚀深度确定后, 剩下的局部构造下沉量就比较准确了。如此逐级分解影响 Q_3^2 海相顶界面高程的 3 个因素, 既能较正确确定昔日的海平面高度, 又能较可靠地了解研究区的古地形以及新构造运动的强度, 也许是个解决此问题的新思路。

表 3 珠江三角洲 Q₃海相层顶面受沉积物压实而沉降的幅度计算表

Tab. 3 Count table for subsidence rangs at tops of Q₃ sea facies resulting from compaction sediment in Zhujiang Delta

钻孔与位置	14C 样品		Q ₃ 海相层顶面受沉积物压实而沉降的幅度 EΔh					Δh	
	高程 /m 深度 /m	年龄 a (B. P.)	h 起止 深度 /m	沉积相与岩性	m ₀	n	h /m	Δh /m	海相顶面改正后的高程 /m
PK ₄ 博罗园洲上南	- 5. 9 10. 9	3300± 3000	8. 5- 约 11. 5	△灰色细砂、粉细砂, R混合砂, 含腐木	0. 49	0. 43	3. 0	0. 35	0. 56 - 2. 94
			11. 5- 14. 5	R灰黄色粗砂砾, 黄色砂砾	0. 42	0. 38	3. 0	0. 21	
PK ₅ 东莞石排下沙	- 12. 9 15. 9	3700± 1480	7. 9- 14. 0	△灰黄、深灰色粘土质粉砂	0. 49	0. 43	6. 1	0. 72	1. 11 - 3. 79
			14. 0- 15. 9	R浅灰色含砾粗砂, 含腐木	0. 41	0. 38	1. 9	0. 10	
			15. 9- 19. 6	R灰白色粘土质粉细砂	0. 45	0. 41	4. 0	0. 29	
K ₅ 三水西南	- 21. 7 25. 7	2824± 2220	7. 8- 11. 0	△红黄白色粘土粉砂、粉细砂	0. 49	0. 45	3. 2	0. 25	1. 52 - 2. 28
			11. 0- 29. 6	△ R深灰色粘土质粉细砂、含腐木、藜科花粉	0. 47	0. 44	18. 6	1. 05	
			29. 6- 32. 7	R灰色含砾中粗砂	0. 43	0. 39	3. 1	0. 22	
D7南海盐步罗村	- 11. 8 13. 8	2425± 900	8. 5- 10. 4	△红黄白色粉砂粘土	0. 70	0. 50	1. 9	2. 15 - 4. 35	
			10. 4- 14. 8	△深灰色粉砂粘土	0. 60	0. 52	4. 4		27λ = 0
PK ₁₅ 南海平洲夏教	- 13. 0 15. 0	1500± 550	12. 8- 15. 5	△深灰色粉砂粘土	0. 70	0. 55	2. 7	1. 35	1. 50 - 9. 30
			15. 5- 17. 0	R灰白色含砾粘土质砂, 含腐木	0. 50	0. 45	1. 5	0. 15	
PK ₂₄ 新会双水桥美	- 19. 3 20. 3	2440± 1950	11. 0- 18. 5	△红黄色粉砂粘土	0. 70	0. 50	7. 5	5. 0	5. 76 - 4. 24
			18. 5- 22. 0	R灰色含粘土小砾混合砂, 含腐木	0. 45	0. 41	3. 5	0. 25	
			22. 0- 26. 6	R灰白色粉砂质粘土, 含腐木	0. 55	0. 50	4. 6	0. 51	
PK ₁₄ 番禺灵山九比	- 18. 0 19. 0	1860± 600	15. 0- 25. 6	△灰色粉砂粘土夹腐木	0. 70	0. 54	10. 6	5. 65	5. 68 - 8. 32
			25. 6- 26. 2	R浅灰色砂砾	0. 43	0. 40	0. 6	0. 03	
PK ₂₇ 中山比角光	- 20. 0 21. 0	1727± 680	9. 05- 11. 9	△黄红白色粉砂粘土	0. 70	0. 50	2. 85	1. 90	6. 25 - 1. 80
			11. 9- 14. 1	△灰白色含粘土细砂	0. 48	0. 45	2. 2	0. 13	
			14. 1- 16. 7	△黄红白色粉砂粘土	0. 65	0. 48	2. 6	1. 26	
			16. 7- 21. 9	△深灰色粉细砂粘土	0. 60	0. 52	5. 2	1. 04	
			21. 9- 约 30	△土黄色细砂, R浅灰色中细砂	0. 47	0. 43	8. 1	0. 61	
30- 48. 3	R浅灰、灰黄色含砾粗砂、砂砾	0. 44	0. 40	18. 3	1. 31				
PK ₁₃ 山东凤同安	- 30. 0 33. 0	2317± 980	18. 8- 20. 0	△灰色粉砂质粘土	0. 70	0. 55	1. 4	0. 70	1. 88 - 13. 92
			20. 2- 34. 8	△灰、深灰色含粘土粉细砂, 含腐木	0. 48	0. 44	14. 6	1. 12	
			34. 8- 35. 6	R黄灰色含砾混合砂	0. 44	0. 40	0. 8	0. 06	
PK ₁₉ 中山横栏穗丰	- 17. 9 20. 4	2100± 1500	17. 7- 20. 0	△黄红色粉砂粘土, 含蚝壳	0. 7	0. 50	2. 3	1. 53	3. 13 - 12. 07
			20. 0- 约 25	△ R深灰、灰白色粉砂粘土, 含蚝壳、腐木	0. 6	0. 50	5. 0	1. 25	
			25- 30. 1	R灰白色含粘土混合砂、含砾粗砂、含腐木	0. 42	0. 38	5. 1	0. 35	

注: ① △海相为主, R陆相为主; ② 钻孔柱状剖面, 14C数据来源文献 [5]; ③ m₀, n在表 1取值, 高程由作者确定

参 考 文 献

- 1 任美镠. 第四纪海面变化及其在海岸地貌上的反映. 海洋与湖沼, 1965, 7 (3): 295~ 305
- 2 铁道部第一勘测设计院. 工程地质试验手册. 北京: 中国铁道出版社, 1982. 259~ 263, 777
- 3 北京、长春、成都地质学院. 地质学. 北京: 中国工业出版社, 1961. 63~ 72
- 4 唐大雄, 孙懋文. 工程岩土学. 北京: 地质出版社, 1987. 62~ 70
- 5 黄镇国, 李平日, 张仲英等. 珠江三角洲形成发育演变. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1992, 56~ 82

Formula for Sediment Compaction Capacity and Its Use in Researching Sea Level

*Zhang Fengying** *Liu Shangren*

Abstract Theoretical formula for sediment compaction capacity $\Delta h = h(n^0 - n) / (1 - n^0)$ is inferred. Main factors resulting in tops leight of Q_3^2 sea facies in coastal accumulation plains is lower metres to tens metres than remains leight of paleo sea level on rock coast are 1 compaction of sediments, 2 paleo landform is eroded and dropped by running water in low sea level in glacial epoch; 3 structure dropping in some areas. The three factors have been progressively resolved, paleo sea level, rise and fall on the paleo landform and capacity of the structure dropping can right have been define.

Keywords formula for sediment compaction capacity, porosity, sea level, Zhujiang Delta

* Earth and Environment Science College, Zhongshan University, Guangzhou 510275