

地基变形计算的新参数

—弦线模量的原理和应用*

西北建筑工程学院 焦五一

改进地基变形计算的症结在于寻求能表示压力和变形关系的新参数。土是非线性变形材料,目前所用压缩模量和变形模量都不能准确地反映土的非线性变形特性。

国内外大量资料已经证实,用压缩模量很难解决地基变形计算问题。斯开普敦和贝伦(Skempton, A. W. and L. Bjerrum)等提出用压缩模量计算压缩变形时应乘以修正系数^[2],我国《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ7-74)也规定沉降计算应乘以经验系数 m_s 。这些系数变化幅度都比较大,而且它们所依据的参数都不稳定,修正结果也很难满足设计要求。

载荷试验的变形曲线能比较真实地反映地基变形特性,但据文献^[3]用变形模量和压缩模量计算24个谷仓的沉降结果和实测比较仍是相差很大的。分析其原因,我们认为这是由于确定变形模量所用的计算假定和相应的计算模型与实际相差还是太大。它把变形曲线简单地修改成直线,没有考虑到地基变形沿深度的衰减比附加应力衰减要快得多,与变形的非线性是一致的,土的泊桑比值随压力的增加而变大,不是常数^[4]。所以只能用在近似直线段的变形。

为提高计算的准确性,根据解决非线性问题的增量法,利用变形曲线分段计算变形,迭加而得总变形的原理,用图1的计算假定和模型,反映了以上两点地基变形特性。根据载荷试验计算压缩层内深度为 Z 、附加压力为 P_z 、土层厚度为 h_z 的变形时(图2),从分段计算变形出发而做了简化处理,取 $P \sim S$ 曲线上附加压力为 P_i ($P_i = P_z$)点前一段曲线的弦线斜率,计算新的参数弦线模量 E_c 为:

$$E_c = (1 - v^2) \frac{\Delta P_i F}{\Delta S_i d} (P_i = P_z)$$

式中: ΔP_i 为 $P \sim S$ 曲线上附加压力 P_i 点前一段的增量, 一般用 0.25 Kg/cm^2 ;

ΔS_i 为相应于 ΔP_i 的沉降增量 (cm);

F 为荷载板的面积 (cm^2);

d 为荷载板的折算直径 (cm);

v 为直线变形阶段的泊桑比值。

按上式计算附加压力为 P_i 的弦线模量, 用 $P \sim S$ 曲线压力由 O 增加到 P_i 过程中最后一段的弦线斜率, 使模量值偏小, 但所用泊桑比值没有考虑随压力增大的影响, 使模量值偏大。两者造成误差, 互相抵消, 实践表明这样处理可使计算

算变形接近实测。参数确定以后, 用分层总和法计算。

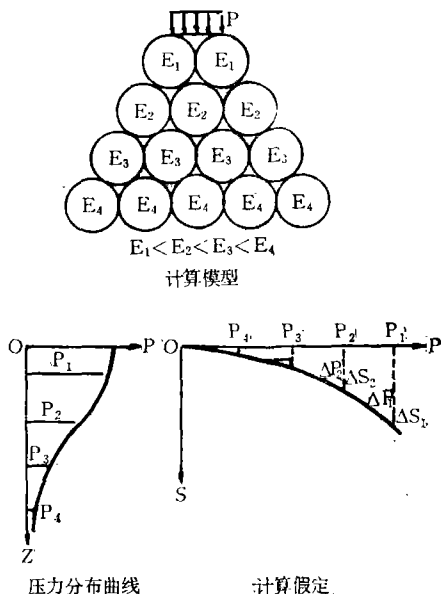


图1 弦线模量的计算模型和假定

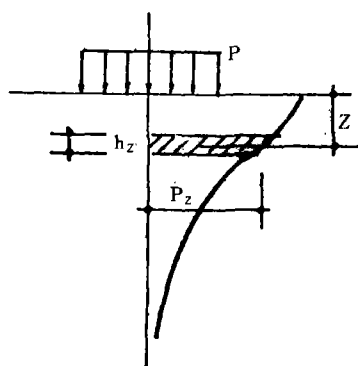


图2

* 这是作者在西北建筑设计院时写的, 以前称为切线模量, 不太确切, 本文改为弦线模量。

利用弦线模量计算邓肯和张 (Duncan J. M and Chang C.y.) 在文献^[4]中用三轴试验切线模量分析过的一个基脚沉降, 并进行对比 (如表1)。基脚尺寸为12.44吋×2.44吋, 装置在查塔厚契河砂 (Chatahouchee River Sand) 中深20吋处, 砂的容重为91磅/立方吋。由表可以看出, 邓肯和张的计算, 只有当压力在15.0磅/平方吋以内时才与实测接近。值得

查塔厚契河砂上基脚沉降
计算结果与实测对比 表 1

压 力 (磅/吋 ²)	实测沉降 (吋)	计算沉降 (吋)	
		用本文弦 线模量	用邓肯—张 切线模量
5	0.02	0.02	0.01
10	0.05	0.05	0.05
15	0.12	0.11	0.14
20	0.22	0.21	0.32
25	0.32	0.32	
30	0.42	0.43	
35	(0.56)	0.59	
40	(0.75)	0.81	
45	(0.99)	1.10	
50	(1.30)	1.47	
54	1.60	1.81	

括号内数值为根据压力为30和54磅/吋²的沉降量按曲线内插的。

注意的是用太沙基 (Terzaghi K.) 承载力因数计算最终承载力数值为54.0磅/平方吋。当压力达到这一数值时, 基脚沉降量为1.62吋, 远远超过邓肯—张切线模量所能分析的范围, 而用弦线模量计算结果和实测始终都是接近的。根据基脚的实际情况, 弦线模量是用刚性矩形基础 (基脚的长宽比为5.0) 计算平均沉降量的弹性理论公式求得的:

$$E_c = (1 - \nu^2) \frac{\Delta P B \omega}{\Delta S}$$

式中 B 为基础宽度, 用2.44吋; ω 为与基础的长宽比、所求沉降点的位置以及基础刚度有关的系数, 用1.72;

ΔP 、 ΔS 为沉降曲线上相应于附加压力 P_i 的压力和沉降增量。

另外计算黄土上八个载荷试验的沉降也都得到满意的结果。

以下再用工程实例说明根据载荷试验确定弦线模量计算建筑物沉降的结果。为了比较, 在一个算例中同时用了变形模量和割线模量。割线模量 E_0 为根据变形曲线取原点到计算附加压力 P_i 的割线斜率计算的,

$$E_0 = (1 - \nu^2) \frac{P_i F}{S_i d}$$

西安机瓦厂55.0米高砖烟囱, 根据主要持力层上载荷试验的 $P \sim S$ 曲线, 地基土的变形模量为42.5公斤/平方厘米, 割线模量和弦线模量如图3。用三种模量计算沉降结果和实测比较如表2。用变形模量计算沉降在压力较小时偏大, 在压力较大时偏小, 原因是 $P \sim S$ 曲线修正直线斜率当压力较小时比实际的大, 当压力较大时比实际的小。割线模量虽有改进, 但计算变形仍然偏小, 原因是没有考虑泊桑比变化的影响。在压力增加的全过程中, 用弦线模量计算和实测都是接近的。它不但解决了压力较大时的沉降计算, 也改进了压力较小时沉降计算的准确性。

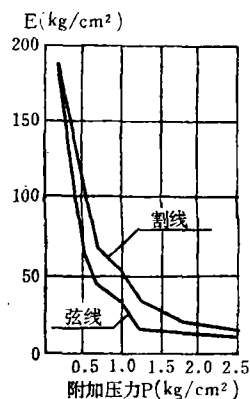


图 3 西安机瓦厂烟囱地基土割线模量和弦线模量

用三种模量计算西安机瓦厂烟囱沉降结果 表 2

附加压力 (kg/cm ²)		0.344	0.64	0.83	100	114	146	151
情 况								
实测沉降 (cm)		0.60	2.50	5.65	8.90	17.00	41.5	45.5
计算沉降 (cm)	用变形模量	3.72	7.47	9.80	12.00	14.40	17.74	18.30
	用割线模量	0.89	3.30	5.70	8.13	13.00	20.70	23.40
	用弦线模量	0.92	4.50	9.30	13.32	22.10	42.50	45.80
附 注		施工期间, 沉降没有稳定					沉降基本稳定	

表 3

陕西关中平原地区一般黄土地基弦线模量值

孔 隙 比 含 水 量 附加压力 (kg/cm ²)	0.8 以下				0.81—0.95				0.96—1.05				1.06—1.15				1.16—1.25				1.26以上													
	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	31 至 34	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	31 至 34	35 以上	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	31 至 34	35 以上	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	31 至 34	35 以上	18 以下	19 至 22	23 至 26	27 至 30	31 至 34	35 以上	
0.10	200	200	200	187	200	200	200	139	93	200	200	200	153	103	70	28	200	178	115	84	54	28	200	138	92	63	37	17	200	107	77	49	26	9
0.25	200	200	197	135	200	200	147	100	67	200	167	110	74	50	20	200	200	127	82	57	38	20	200	98	65	43	27	12	184	77	55	34	18	4
0.50	200	192	143	97	200	150	103	70	47	200	117	77	52	34	14	200	200	87	56	39	26	14	168	68	45	30	18	8	126	52	38	24	13	4
0.75	200	150	112	75	200	114	77	53	35	200	87	57	38	25	10	155	64	40	29	19	10	124	50	33	22	13	6	97	38	29	17	10	4	
1.00	200	120	88	58	193	87	60	40	26	152	65	42	28	17	8	118	48	30	21	14	8	92	37	25	15	9	5	68	28	21	13	7	4	
1.25	200	97	72	46	154	68	47	30	19	117	50	32	21	13	7	90	35	22	15	10	6	67	28	18	12	7	5	50	21	15	10	5	4	
1.50	162	77	57	35	117	53	34	22	14	87	34	23	14	8	7	66	24	15	11	7	5	47	19	13	8	5	5	33	15	11	7	4	4	
1.75	131	63	45	27	80	38	24	15	10	61	23	15	9	7	7	47	16	10	7	5	5	40	13	8	5	5	5	20	10	7	4	4	4	
2.00	100	48	34	20	67	26	16	10	10	40	13	9	7	7	7	30	10	7	5	5	5	15	9	7	5	5	5	10	7	4	4	4	4	

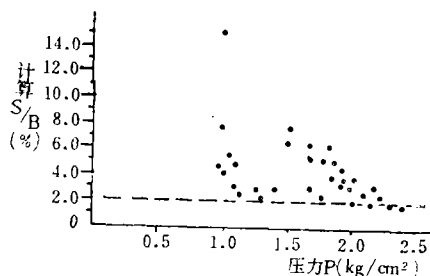


图 4 根据表 3 的弦线模量检算
《66 黄土规范》容许承载力的结果

厘米×70.7厘米，埋深为1.75米， S 为计算沉降量， B 为压板宽度70.7厘米。图中有22个点的 $\frac{S}{B}$ 值超过0.025，说明这些承载力偏大，用作设计依据，会引起比较大的地基变形。根据编制《78 黄土规范》时做

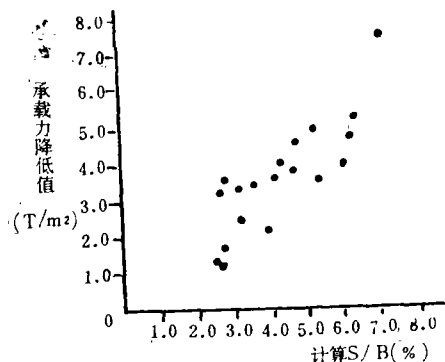


图 5 66规范容许承载力的计算 $\frac{S}{B}$ 值与78规范容许承载力的降低值关系

根据地基土的物理指标计算载荷板沉降

表 5

载荷试验名称	编 号	基底尺寸 (m × m)	埋 深 (m)	基底压力 (kg/cm²)	沉 降 值 (cm)	
					实 测	计 算
西安南郊	1	1.0 × 1.0	2.0	2.0	2.73	4.27
	2	0.71 × 0.71	2.0	2.0	1.56—2.52	2.49
	3	0.71 × 0.71	2.0	3.0	10.0	9.01
	4	0.5 × 0.5	2.0	2.0	1.47	1.47
	5	0.71 × 0.71	2.0	2.5	5.24	5.96
西安公路学院	1	0.71 × 0.71	2.0	1.13	0.32	0.30
	2	0.71 × 0.71	2.0	1.38	0.37	0.47
富平张桥	1	0.71 × 0.71	1.5	0.5	0.07—0.16	0.07
	2	0.71 × 0.71	1.5	0.75	0.11—0.23	0.16
	3	0.71 × 0.71	1.5	1.0	0.14—0.25	0.24
	4	0.71 × 0.71	1.5	1.25	0.18	0.38
	5	0.71 × 0.71	1.5	1.50	0.35—1.1	0.53
	6	0.71 × 0.71	1.5	1.75	0.94	0.79
	7	0.71 × 0.71	1.5	2.00	1.84	1.13

的工程调查和对试验数据重新统计分析的结果证实，检算结论是充分可靠的。新规范对这些容许承载力都做了调整，降低的幅度和上述计算 $\frac{S}{B}$ 值的关系如图5，

降低以后的计算 $\frac{S}{B}$ 值如图6。《78规范》对饱和度大的非湿陷性黄土，没有给出容许承载力，图中有的数值是根据规范修订稿计算的。

总结以上所述，可以看出，由载荷试验结果确定弦线模量，其试验方法，计算假定和计算模型比较接近实际，反映了土的非线性变形特性，与压缩模量和

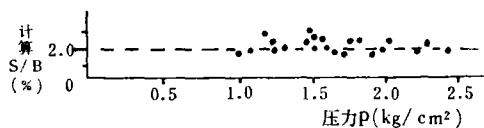


图 6 根据表3的弦线模量检算《78黄土规范》容许承载力的结果

变形模量相比，计算结果比较准确而稳定。陕西关中平原一般黄土的弦线模量值（表3）的应用效果也比较好。

（下转29页）

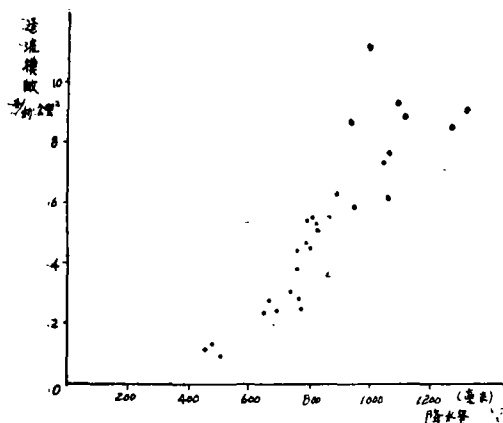


图 2

表 2

流 域	降水量 (毫米)	径流模数 (升/秒·公里 ²)		
		碎屑岩 含水岩组	侵入岩 含水岩组	变质岩 含水岩组
鸭绿江流域	1038.2	7.41	8.51	9.32
大洋河流域	888.3		5.88	5.55
辽东半岛诸河	709.9	2.86	4.05	3.58
太子河流域	796.0	5.29		4.0
浑河流域	783.3	4.73		5.6
东支	724.7	4.9	3.4	4.43
辽河流域北支	555.9	2.71		2.71
绕阳河流域	485.1	1.69	1.22	
大凌河流域	508.0			1.08
小凌河流域	538.9			
渤海西岸各河	628.7		1.47	

水量的增加而增大的趋势。

又如在太子河流域,年平均降水量 770—820 毫米,流域内分布有碳酸岩类、变质岩类及侵入岩类含水岩组,其径流模数值随含水介质条件的不同而变化(表 3)。

上述实例分析说明,地下水在入渗、径流和排泄的过程中,受地质构造、地形、岩石含水性、地面植被发育程度等多种条件的制约。这些因素的偶然性、随机性很大,说明影响准确获得地下水定量参数值的

(上接 33 页)

参考文献

- [1] Alois Myslivec and Zdeněn Kysela, 1978, 'The Bearing Capacity of Building Foundations, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, P. 26
- [2] Leonards G. A. 1962, Foundation Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, P. 573
- [3] H. Lehr, E. Botea, I. Hanoliu and M. Patriniche, 1965, Settlement Investigation on Grains Silos

表 3

介质条件 参 数	石灰岩	大理岩	各种 变质岩	碎屑岩 与花岗岩
降水量 (毫米)	805	769	989	821
径流模数 (升/秒·公里 ²)	4.65	6.41	4.0	5.09

自然条件是极其复杂的。而径流模数是上述诸因素的综合反应,因此它具有评价地下水资源的实际意义。

径流模数值的大小,首先决定于地下水补给来源丰富与否。山区地下水主要靠降水渗入补给,因此降水总量的大小、降水强度等特性就占有头等重要地位。其二、应该分析研究含水介质的导水与储水能力,也就是研究岩石的含水特性,它对地下水的渗入、运移与贮存起着决定性的作用。其它诸如地质构造、地形、植被等因素居次要地位,凡属基岩丘陵山区,这后三个条件一般差异不大,从而也就更衬托出降水特性和含水介质条件的重要作用。

纵观辽宁东、西部山区,地质构造,地形与植被等条件虽有不同,但总的来看差异不大。而含水岩组及地下水类型较简单,多为水量贫乏的风化带裂隙水和碎屑岩孔隙裂隙水,只是降水量变化较大。在这样的特定条件下,全省地下水径流模数的分布规律与降水量的变化趋势相一致,径流模数亦是自东南向西北递减。比如,在多雨中心的宽甸县,降水量 1200 毫米以上,径流模数达 11.3 升/秒·公里²;而到少雨的建平县,降水量不足 400 毫米,径流模数只有 0.6—0.7 升/秒·公里²。但在岩溶水地段,径流模数值往往突破降水量的控制,而显示出该介质的含水特性。如太子河流域平均径流模数为 5.54 升/秒·公里²,而岩溶水的径流模数则达 9.65 升/秒·公里²。

总之在基岩丘陵山区,若构造、地形差异不大,地下水类型较为简单时,地下水径流模数值的大小依附于降水量的多寡,也就是说地下水的丰富程度随主要补给来源降水量而变化。但不可忽视介质条件在局部地区的重要影响。

Founded in Various Soil Conditions in Rumania, Proceeding of 6th Int. conf. on Soil Mech. and Found. Eng, Vol II PP. 113-116.

[4] Duncan J. M and C. Y. Chang, 1970, Non-linear Analysis of stress and strain in soil, Proc, ASCE Vol 96, No. SM5 PP. 1629-1653.

[5] Penman A. D. M and G. H. Watson, 1963, Settlement Observation on an oil Tank, European conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Proc, Vol I—II, PP. 163-171.