

地基承载力 试验研究文集

铁道部科学研究院 主编
铁道部第三设计院

2

人民铁道出版社

地基承载力 试验研究文集

铁道部科学研究院
铁道部第三设计院 主编

人民铁道出版社

1978年·北京

内 容 提 要

本书汇集了有关地基承载力试验研究报告11篇。内容包括对各种不同土质进行的大量野外荷载和室内模型试验的数据资料,并提出了如何合理地确定地基允许承载力等问题的意见、建议和经验公式。

本书可供有关勘测、设计和施工技术人员参考用。

地基承载力试验研究文集

铁道部科学研究院主编
铁道部第三设计院

人民铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

人民铁道出版社印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 11 字数: 243 千

1978年8月第1版 1978年8月第1次印刷

统一书号: 15043·6122 定价: 1.05 元

编者说明

在铁道部领导下，铁道部第一、二、三、四设计院，铁道部科学研究院，西南交通大学，长沙铁道学院，成都工学院，中国科学院岩土力学研究所，铁道部科学研究院西北研究所，北京铁路局，郑州铁路局等单位，组成了地基承载力协作组，由铁道部第三设计院主持。自1972年起对我国建国以来丰富的建筑经验进行了调查研究，编制了《铁路工程技术规范》第二篇“桥涵”〔简称《桥规》，（1974）交铁基字2960号公布试行，人民铁道出版社1975年版〕中的地基承载力表及有关条文。为了解决编制规范中遇到的尚需进一步研究的问题，有关协作单位按计划对多种地基土开展了野外荷载试验及室内试验工作。现将部分试验和调查研究资料加以整理汇编，供有关勘测、设计和施工技术人员参考。这些资料多为阶段研究报告，还存在一定的不足之处，望读者批评指正。

目 录

第 一 篇	黄土天然地基基本承载力	1
第 二 篇	胶济铁路沿线黄土堆积地基承载力的探讨	10
第 三 篇	卵石土野外荷载试验研究报告	28
第 四 篇	卵石土地基承载力室内模型试验研究	46
第 五 篇	青龙场卵石土野外荷载试验	75
第 六 篇	圆砾土地基承载力室内模型试验研究	93
第 七 篇	卵石土地基承载力试验数理统计分析	106
第 八 篇	砂土地基承载力研究报告 (之一)	117
第 九 篇	砂土地基承载力研究报告 (之二)	137
第 十 篇	用静力触探确定软土地基承压力和提供软土路 基稳定分析计算参数	154
第十一篇	用静力触探确定钻孔桩的承载力	163

第一篇 黄土天然地基基本承载力*

铁道部第一设计院

铁道部科学研究院西北研究所

一、荷载试验确定基本承载力的方法

由荷载试验定出基本承载力的方法，不外为按变形控制和按强度控制两种，而对于黄土，也大体相同。

所谓按变形控制，即以建筑物允许沉降量为准，给出地基的基本承载力（ σ_0 ）。通常是以允许相对变形 $\frac{s}{b} = 0.02 \sim 0.03$ [1,2] 的对应压力来取 σ_0 值（ s ——沉降量， b ——基础宽）。

其依据是：黄土地基在承受超出比例界限 P_1 （图 1—1）的较大荷载时，沉降仍能较快趋于稳定，不易发生明显的地基土挤出或隆起；按通常的比例界限 P_1 （即强度控制）取值，其对应的 $\frac{s}{b}$ 绝大部分均不大于 0.01，远小于建筑物的允许沉降。但考虑到黄土天然地基不可避免有少量浸水湿陷而造成的下沉，故按 P_1 定 σ_0 比较安全可靠。

但是，由于地基的破坏问题没有解决，而按变形控制的对应压力定承载力，在实践中，发现有的已进入局部破坏阶段（即地面已产生裂纹），故其安全度始终令人耽心。为此，我们曾先后在甘肃榆中和青海互助两地 Q_3 黄土上，用 1000 厘米² 的圆形压板，专门进行了数次地基极限强度的荷载试验（安设观测地面变形的千分表 2~6 个，并尽量加大荷载）所得结果基本相同（图 1—1），归纳如下：

（一）荷载在比例界限 P_1 范围内，地基下沉量甚小，超出 P_1 后，随荷载的加大，虽下沉仍可趋于稳定，但沉降量甚大。如其中一次试验， $P_1 = 2.0$ 公斤/厘米² 时，下沉量为 0.1663 厘米，加荷至 8.0 公斤/厘米²，则下沉量达 13.9958 厘米。

（二）荷载在 P_1 范围内，压板四周地面随荷载增加而略有下沉（下沉量不足 0.3 毫米）。

（三）当荷载超过 P_1 时，地面开始回升（ P_1 时为转折点）。

（四）当荷载为 1.5~2.0 倍 P_1 时，地面回升至原标高，紧接着便开始出现 1~2 条幅射状裂纹。

（五）随着荷载的继续增加，地面逐渐上升（最大上升量为 1 毫米），且上升范围逐渐扩展，幅射状裂纹亦逐渐加宽（可达 2 毫米）、延长（可达 60 厘米），并出现环状裂纹（在压板外 0.5 倍压板直径附近出现）。

*本文根据先后在陕、甘、青、宁等省进行的 100 余次新老黄土荷载试验，以及向有关单位收集的 200 余份黄土荷载试验资料，对不同地区黄土和新老黄土的差异作了简要分析；从洪积、冲积黄土为主的已有资料出发，对各种不同方法确定黄土地基承载力，作了数理统计和比较，提出编制黄土地基基本承载力表的方案及方法。在本专题研究过程中，承西安冶金分公司、陕西综合勘察院、陕西省建工局科研所、铁道部第三设计院等单位给予大力协作和帮助。

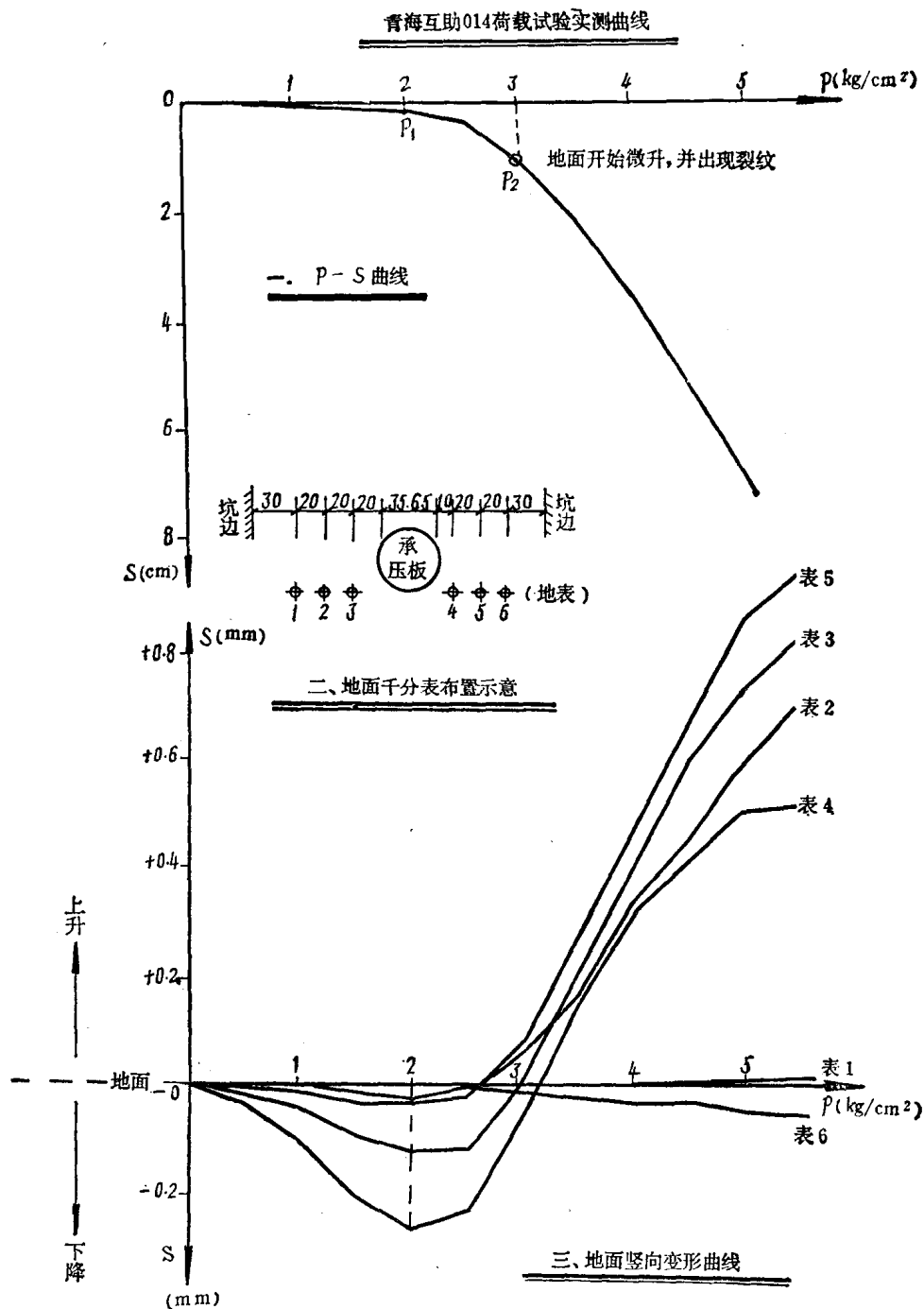


图 1—1 青海互助014荷载试验实测曲线

(六) 结束试验提起承压板时, 其底面粘着有楔形土块, 与所谓的压实核心颇相近。

上述试验, 其 $P-S$ 曲线明显分为三个变形阶段, 当荷载较小, 即在比例界限范围内时, 黄土地基主要表现为压密阶段; 荷载达到比例界限后, 承压板周围地基上的下沉转为回升, 说明土中主要为塑性剪切阶段; 荷载达到比例界限的1.5~2.0倍后, 地面隆起, 裂纹出现并发展等, 足以表明, 地基土已局部剪切破坏。

德国土力学研究所, 在密实和中等密实的砂土上所进行的大压板荷载试验的某些结论^[2], 铁道部第三设计院等单位, 在唐山密实砂土上所作荷载试验的某些结论^[3], 与我们在试验中所见也是大体一致的。

基于此, 并考虑到铁路桥涵工程不允许有较大下沉的特点, 我们认为, 以比例界限定为基本承载力是比较恰当的^[4]。本次编表, 即以此为准。可以看出, 按比例界限定 σ_0 值, 对应于所述的地基局部破坏荷载 P_2 至少具有 1.5~2 倍的安全系数, 是足够安全的。应该指出, 原定局部破坏荷载 P_2 值, 还是定的比较保守的, 因此, 无论对强度和变形控制而言, 均属安全。

二、按承载力角度的黄土分类

黄土按地质年代可分为老黄土 (包括 Q_1 和 Q_2 下部、上部) 和新黄土 (又分为 Q_3 和 Q_4)。不同地质年代的黄土, 具有不同的结构、构造和外貌特征 (表 1—1), 因而其承载力和其他指标均有所差异, 特别是新老黄土之间, 其承载力差别甚大 (见表 1—2)。因此, 黄土按不同地质年代分类编表是有必要的。具体做法如下:

(一) 首先将其分为新黄土和老黄土两大类;

(二) 新黄土中 Q_3 和 Q_4 , 在结构、构造及外貌特征方面, 虽然差异有时不那么明显, 但从统计中看出 (见表 1—2、表 1—3), 其承载力本来就不高, 却有 0.5 公斤/厘米² 以上之差。鉴于差异毕竟存在, 而且野外鉴别一般也能区分 (尤其在较大河流的沉积阶地地区), 故将其分开统计。

(三) 老黄土中 Q_1 和 Q_2 (包括上、下部), 在结构构造及外貌特征方面, 虽均有差异, 承载力值也不尽相同, 但由于收集到的资料不多 (共 27 份, 见表 1—4), 且承载力值一般均较高, 基本可满足一般工程的实际需要, 故暂不细分, 将其归为一类。

为便于实际工作中鉴别, 现将其分类特征列表如下:

各 年 代 黄 土 主 要 特 征 表

表 1—1

年 代 \ 特 征		颜 色	结 构	姜 石	古土壤层	湿陷性	开挖情况
新 黄 土	Q_4	浅、褐黄等	具大孔, 疏松~ 中密, 不均匀	少量或无	无	有	锹挖容易 属一级土
	Q_3	浅、深褐黄等	具大孔, 中密较 匀, 具柱状节理	少量或无, 零星分布	常见一层, 多至二、三 层	有	锹、镐开挖不费 劲属一~二级土
老黄土 (Q_2 、 Q_1)		棕 黄、 棕 红	少孔、较密, 具 柱状节理	零星或成层 分布	可有数层至 十余层	一般无	锹、镐挖费劲属 二~三级土

三、黄土承载力的地区差异

按照上述分类，同类黄土的承载力是否有地区差异呢？我们参照一般分区原则，在现有资料基础上，根据黄土的分布及其主要物性指标差异（见表1—2），先将资料较多的 Q_4 黄土，分为山西（包括石家庄）、陕西、关中平原（包括豫西）和甘、青、宁（包括陕北）三个地区进行了比较和分析。 Q_3 黄土和老黄土，由于多分布在甘肃、青海、宁夏和陕北等干旱地区，且资料有限，故未作分区比较。

从表1—2看出， Q_4 黄土的地区差异性还是存在的。如 W （天然含水量）、 W_L （液性限度）、及 e （孔隙比），由西向东渐增等。又从表1—3统计结果可知，分区与不分区承载力差别不大。从表1—5可看出，在不同 W_L 情况下，当 $W=20$ 时，各地区 Q_4 黄土承载力值基本相同；当 $W=10$ 或 30 时，其承载力值互有交叉现象，且差值在 0.5 公斤/厘米²以内，说明地区差异并无明显规律，结合使用考虑，我们初步认为， Q_4 黄土可不分区编表。

参 与 编 表 资 料 一 览 表

表1—2

年 代		地 区	资料数量	主要指标幅度值及平均值				
				P_1 (公斤/厘米 ²)	W_L	W	e	S_r
新 黄 土	Q ₄	山 西 (包括石家庄)	35	1.06	27.41	22.67	0.91	69.89
				0.5~2.0	24~29	13~30	0.7~1.2	30~95
		陕 西 关 中 (包括豫西)	102	1.49	30.27	21.16	1.02	58.43
				0.5~2.5	27~34	16~26	0.75~1.35	40~80
		甘 青 宁 (包括陕北)	39	1.53	26.09	14.68	0.96	44.58
				0.5~2.5	23~27	6~23	0.6~1.2	15~75
		不 分 地 区	176	1.41	28.78	20.03	0.98	57.63
				0.5~2.5	23~34	6~30	0.6~1.35	15~95
	Q ₃	不 分 地 区	80	2.17	28.11	13.16	1.07	34.05
				1.0~3.5	24~32	5~25	0.9~1.25	20~60
老 黄 土	Q ₂ 及 Q ₁	不 分 地 区	27	7.98	31.01	16.96	0.80	58.81
				3.5~16.0	25~36	10~25	0.6~1.1	20~80

表1-3

黄土承载力数理统计一览表

序号	年代	样本数 (n)	地区	统计方程	均方差 S	离差系数 $C_r = \frac{S}{\bar{P}}$	复相关系数 r	方程F检验		b, 系数t检验			统计结果评价
								F	F _{95%}	t _{0.1}	t _{0.5}	t _{9.5%}	
1	Q ₄	35	山西、石家庄	$P = 0.746 + 0.081W_L - 0.51W_L - 0.824e$	0.425	0.40	0.62	6.36 > 2.91	3.59	3.65	1.26※	2.04	F法检验均通过, 但分区中部分t检验未通过(带※者), 说明e影响不大, 按三指标不分区。
2	Q ₄	102	陕西关中、豫西	$P = -0.678 + 0.186W_L - 0.085W_L - 1.635e$	0.437	0.293	0.71	33.17 > 2.70	6.75	7.98	5.61	1.98	
3	Q ₄	39	甘、青、宁高原地区	$P = 0.431 + 0.092W_L - 0.075W_L - 0.214e$	0.486	0.32	0.64	8.10 > 2.87	2.19	4.0	0.35※	2.03	
4	Q ₄	176	不分地区	$P = 0.404 + 0.128W_L - 0.079W_L - 1.11e$	0.45	0.32	0.69	50.77 > 2.66	9.08	11.66	5.03	1.96	
5	Q ₅	80	不分地区	$P = 0.925 + 0.211W_L - 0.084W_L - 3.352e$	0.76	0.35	0.56	11.35 > 2.73	4.8	3.58	4.24	1.992	显著性检验均通过, 但与10号相比较好, 且e影响大。
6	Q ₄	35	同 1	$P = -0.061 + 0.078W_L - 0.045W_L$	0.43	0.40	0.59	8.59 > 3.30	3.46	3.40		2.04	显著性检验均通过, 但分区与不分地区差异甚小。
7	Q ₄	102	同 2	$P = 0.505 + 0.092W_L - 0.086W_L$	0.50	0.335	0.587	26.02 > 3.09	3.69	8.70		1.982	
8	Q ₄	39	同 3	$P = 0.365 + 0.084W_L - 0.071W_L$	0.48	0.316	0.637	12.3 > 3.26	2.40	4.76		2.032	
9	Q ₄	176	不分地区	$P = 0.148 + 0.093W_L - 0.070W_L$	0.48	0.34	0.626	55.72 > 3.05	7.04	9.91		1.96	
10	Q ₅	80	不分地区	$P = -1.887 + 0.172W_L - 0.058W_L$	0.84	0.39	0.38	6.58 > 3.12	3.71	2.32		1.99	显著性检验均通过, 但与5号相比较差。
11	Q ₄	35	同 1	$P = -0.078 + 0.069W_L - 0.011S_L$	0.445	0.417	0.494	6.86 > 3.30	3.04	2.92		2.04	不分地区显著性检验虽均通过, 但分区中F和t检验部分未通过, 且14号与9号相比较差, 故不宜采用。
12	Q ₄	102	同 2	$P = 0.496 + 0.037W_L - 0.002S_L$	0.614	0.411	0.132	0.87 < 3.09	1.26※	0.45※		1.98	
13	Q ₄	39	同 3	$P = 2.16 + 0.048W_L - 0.017S_L$	0.49	0.32	0.60	10.24 > 3.26	1.36※	4.32		2.03	
14	Q ₄	176	不分地区	$P = 0.61 + 0.051W_L - 0.011S_L$	0.57	0.40	0.396	16.08 > 3.05	3.54	4.91		1.96	
15	Q ₅	80	不分地区	$P = -1.024 + 0.122W_L - 0.007S_L$	0.864	0.398	0.31	4.02 > 3.12	2.71	0.86		1.99	显著性检验均通过, 但与5、10号相比均较差。
16	老黄土	27	不分地区	$P = 16.31 + 0.23W_L - 0.13W_L - 16.54e$	2.22	0.28	0.78	12.12 > 3.03	2.65	1.27※	4.73	2.069	W的t检验未通过。
17				$P = 15.11 + 0.21W_L - 17.04e$	2.25	0.282	0.765	16.93 > 3.40	2.44		4.84	2.064	显著性检验均通过。

老黄土荷载试验资料一览表

表1—4

荷载试验 编 号	地层 年代	土 物 理 力 学 指 标 试 验 值									允许承载力	
		W	e	W_L	I_L	S_r	C	φ	$P_{终}$	P_1	$\frac{s}{b}$	σ_0
西中006	$Q_2^{\text{上}}$	19	1.105	34.6	-0.19	46.6	0.545	25°25′	5.0	4.0	0.007	4.0
西中007	$Q_2^{\text{上}}$	18.1	0.712	29.7	-0.10	69.0	1.07	27°	9.0	7.0	0.005	7.0
西中009	$Q_2^{\text{上}}$	7.3	0.758	25	-0.99	26.0	0.595	30°20′	8.0	5.0	0.003	5.0
西中017	$Q_2^{\text{上}}$	16.4	0.853	31.4	-0.17	52.2	1.477	34°16′	9.0	7.0	0.008	7.0
西中018	$Q_2^{\text{上}}$	15.0	0.853	31.4	-0.28	47.8	1.477	34°16′	11.0	8.0	0.005	8.0
西中025	$Q_2^{\text{上}}$	14.6	0.865	30.1	-0.26	46.0	0.645	35°30′	7.5	6.0	0.009	6.0
西中026	$Q_2^{\text{上}}$	10.1	0.67	28.9	-0.62	41.0	1.35	38°20′	14.0	10.0	0.005	10.0
侯西001-3	$Q_2^{\text{上}}$	16.6	0.80	30.2	-0.13	56.5			10.5	6.5	0.008	6.5
枚七002-1	$Q_2^{\text{上}}$	10.2	1.036	29.4	-0.761	26.6	1.065	24°56′	10.0	6.0	0.005	6.0
枚七003	$Q_2^{\text{上}}$	20.8	1.05	34.4	0.042	54.0	0.98	18°46′	6.5	4.5	0.009	4.5
侯西010	$Q_2^{\text{上}}$	15.0	0.90	29.9	-0.354	45.2	0.34	26°35′	6.0	4.0	0.009	4.0
西中011	$Q_2^{\text{下}}$	14.9	0.827	32.8	-0.3	49.0	1.075	22°03′	11.0	10.0	0.007	10.0
西中019	$Q_2^{\text{下}}$	15.0	0.647	28.8	-0.14	63.0	1.28	33°25′	11.0	9.0	0.010	9.0
西中020	$Q_2^{\text{下}}$	22.7	0.71	34.9	0.20	87.7	0.915	41°30′	20.0	10.0	0.005	10.0
太西003	$Q_2^{\text{下}}$	10.5	0.726	29.5	-1.0	39.2	0.44	30°22′	11.0	10.0	0.007	10.0
太西010	$Q_2^{\text{下}}$	20.0	0.711	28.4	0.18	75.7	0.33	22°44′	10.0	8.0	0.008	8.0
外(晋)005	Q_2	25.9	0.90	30.7	0.60	77.5	0.58	18°18′	14.0	4.0	0.005	4.0
外(晋)006	Q_2	17.2	0.94	26.3	0.12	49.5	0.1	25°20′	11.0	4.0	0.010	4.0
外(晋)007	Q_2	19.8	0.76	29.8	0.06	70.5	0.46	24°42′	18.0	6.0	0.006	6.0
外(晋)008	Q_2	23.4	0.82	26.1	0.61	78.0	0.85	23°	18.0	6.0	0.020	3.5
外(晋)009	Q_2	22.0	0.747	27.5	0.51	80.0	0.33	39°16′	22.0	8.0	0.006	8.0
西中 004	Q_1	18.7	0.614	53.4	-0.45	85.0			30.0		0.004	15.0
外(陇西)001	Q_1	21.1	0.709	30.6	0.25	81.0	0.96	22°50′	23.0	19.5	0.009	13.0
外(陇西)002	Q_1	14.7	0.747	27.8	-0.26	53.3	0.64	29°00′	21.0	19.0	0.010	13.0
外(陇西)003	Q_1	17.9	0.78	30.8	0	62.5	0.94	26°00′	23.0	18.0	0.010	11.0
外(陇西)004	Q_1	18.3	0.693	28.8	0.06	71.8	0.79	26°00′	24.5	21.0	0.010	14.0
太西 004	Q_1	12.6	0.644	36.5	-0.77	53.4	1.93	45°47′	16.0	12.0	0.007	12.0

注：表中 s 为沉降量， b 为承压板直径。

Q₄黄土各地区承载力比较表

表 1—5

地 区	统计公式 P_1 ——公斤/厘米 ²	W_L			24			28			32		
		W			10	20	30	10	20	30	10	20	30
山 西	$P_1 = 0.065 + 0.078W_L - 0.045W$	1.36	0.91	0.46	1.67	1.22	0.77	1.99	1.54	1.09			
关 中	$P_1 = 0.505 + 0.092W_L - 0.086W$	1.85	0.99	0.13	2.22	1.36	0.50	2.59	1.73	0.87			
甘 青 宁	$P_1 = 0.365 + 0.084W_L - 0.071W$	1.67	0.90	0.25	2.01	1.30	0.59	2.34	1.68	0.92			
不分地区	$P_1 = 0.148 + 0.093W_L - 0.070W$	1.68	0.91	0.28	2.05	1.35	0.65	2.42	1.72	1.02			

四、影响承载力因素的分析与选择

编表过程中,在寻求与承载力关系较密切的物理力学指标方面,我们曾做过较多的摸索,表1—3所列仅为部分内容。

我们首先考虑的是力学指标,但由于资料来源和试验方法不一,出现同一情况下相同指标的差异。而且不少资料中力学指标亦不齐全,故未取得任何成效。因此,我们的工作主要集中在物性指标方面。

在物性指标中,不论新黄土或老黄土,对含水量(W)、液限(W_L)、孔隙比(e)、饱和度(S_r)和稠度(I_L)等主要指标及其不同组合与承载力的关系,均进行过数理统计和分析比较,其中以 W 、 W_L 、 e 三指标的关系最密切。但不同年代的黄土,其影响程度又有所不同。现按新老黄土分述如下(参阅表1—3统计结果评价):

(一) Q₄黄土:主要影响因素为 W_L 、 W 两指标,与 e 的关系不甚密切。

(二) Q₃黄土:主要影响因素为 W_L 、 W 、 e 三指标,尤以 e 影响较大;

(三) 老黄土:主要影响因素为 W_L 、 e 两指标,显著性检验 W 未通过,是因为统计样本较少,且样本多为半干硬的老黄土。似与一般概念不符,尚有待进一步研究和积累资料。

五、深宽修正

我们用于编表的荷载试验资料,其压板面积为1000~5000厘米²,压板埋深均为零。如前所述,基本承载力的取值方法,是按比例界限强度控制。对于有一定埋深的大面积的桥涵实际基础,在制表和使用中,都应予以深宽修正。1975年铁道部颁发《铁路工程技术规范》第二篇“桥涵”中所采用的修正公式为:

$$\sigma = \sigma_0 + K_1 \gamma_1 (b - 2) + K_2 \gamma_2 (h - 3)$$

对于黄土,修正公式中的宽度修正系数 K_1 ,根据我组所作不同压板直径对比试验的初步结果分析,其比例界限值基本相同,这是因为 K_1 值本来较小,而不同压板直径差异不大的缘故,据此,故不作宽度修正。

至于深度修正系数 K_2 采用多大,我们曾作过一组不同埋深的对比试验,发现埋深越大,其相同压力的对应沉降量则较小,说明埋深对地基的变形是有利的。陕西省建工局科研所,曾在陕西进行过Q₃与Q₄黄土不同埋深的荷载试验对比,同时以公式计算进行比较^[4],其

试验 K_2 值与公式计算 K_2 值基本接近,或小于计算值,他们推荐采用的 K_2 值分别为1.5、1.25、1.0,与1966年“工民建”《湿陷性黄土规范》值仍相同。我们根据统计样本资料的 φ 值平均为 25° ,平均容重为 1.5 吨/米^2 ,借用太沙基局部剪切公式^[5]计算,安全系数用3,其 K_2 为1.8,推荐采用 $K_2=1.5$ 。

修正公式中深度 h 项,系以基础埋深3米为起点,对于以埋深为零的荷载试验资料编制的承载力表,应附加3米内的深度修正值较为合理,出于安全考虑,以其平均值1.5米计,其深度修正附加值为 3.3 吨/米^2 。对埋深大于3米者,仍按上述公式深度项予以修正。

必须指出,对黄土深宽修正的试验研究,我们工作做得不多,有待于今后努力,以便编制出适合黄土特点的深宽修正系数。

六、黄土地基基本承载力(σ_0)表的编制

综上所述,编制黄土地基基本承载力表的方案及方法为:

(一) 荷载试验资料基本按比例界限取值;

(二) 黄土按地质年代划分为新黄土和老黄土,新黄土又分为 Q_4 和 Q_3 二类;

(三) 新黄土地区性差异是存在的,由于收集的资料还不够,且考虑作为“铁路桥涵规范”的黄土地基承载力表一般适用于全国,也不宜过细,故不分区编表。至于按各地区、各铁路线黄土特点及实测资料编制地区性黄土承载力表,当然就更好。

(四) 编表的统计公式:

1. Q_4 黄土采用 W 、 W_L 、 e 三指标统计公式(见表1—3序号4)

$$\sigma_0 = 0.404 + 0.128W_L - 0.079W - 1.11e$$

虽然该式有两个地区的 t 检验其 e 未通过,但实际上 e 还是有影响的,经与 W 、 W_L 两指标公式比较,三指标公式比较合理和全面,故予采用。

2. Q_3 黄土采用 W 、 W_L 、 e 三指标公式

$$\sigma_0 = 0.925 + 0.211W_L - 0.084W - 3.352e \quad (\text{见表1—3})$$

3. 老黄土采用 W_L 、 e 两指标公式:

$$\sigma_0 = 15.11 + 0.21W_L - 17.04e \quad (\text{见表1—3})$$

实际上 W 对老黄土承载力是有影响的,由于统计样本较少,且西北地区的老黄土多为半干硬状态,故老黄土承载力表仅适用于半干硬状态,表中 σ_0 值较之按公式计算值稍有降低,以策安全。

(五) 表中 σ_0 值,对新黄土而言,已考虑基础埋深3米内的平均(1.5米)附加值 3.3 吨/米^2 。

根据上述方案及方法编制的“黄土地基基本承载力表已纳入1975年铁道部颁《铁路工程技术规范》第二篇“桥涵”中(参见该规范第2—156页表2—65及表2—266)。

七、几点补充说明

编制适用于全国铁路桥涵基础的黄土地基承载力表,对我们来说还是第一次,实践中碰到不少问题,我们虚心向有关单位和有实践经验的同志学习请教,收集资料,并在路内外多次召开座谈会,广泛听取意见,反复进行比较。在黄土承载力表最后定稿、纳入《铁路工程

技术规范》之前,我们还将国内有关规范(初稿)进行了比较[4,6]。虽然三种承载力表所采用的指标不尽相同,但给值范围均在0.8~3.0公斤/厘米²以内,而且均剔除了旧规范仅考虑饱和度 S_r 一个因素制表的弊病。

我们这次编制的黄土承载力表,特别增加了老黄土承载力表。老黄土在我国分布较广,随着国民经济建设的发展,新建铁路跨越黄土高原的深沟,不少高桥的墩台基础建筑在老黄土地基上,要求地基承载力较高。以往,有的曾将老黄土当作新黄土等同对待,也有按粘性土对待。通过荷载试验和其它综合试验分析,证明老黄土同新黄土在成因条件上有相似性,在结构强度上却远比新黄土和粘性土为高。因此,将老黄土同新黄土以及粘性土区别开来,不仅很有必要,而且为多快好省修建桥涵建筑及工业建筑也提供了有利条件。如某线养鱼沟大桥墩台基础,对 Q_1 黄土($I_L=0.128$ 、 $e=0.698$)采用基本承载力7公斤/厘米²,进行设计并施工,而荷载试验比例界限14公斤/厘米²,说明采用承载力7公斤/厘米²,还是偏于安全的。

在编制黄土承载力表的过程中,我们认识到,我国黄土分布面积广,地区性差异还是存在的(至于山东、东北等地的黄土,与西北黄土差异更大,不包括在本文提及的黄土之内^[7]),而影响黄土承载力的因素也较多,单以物性指标 W 、 W_L 、 e 编表,也实难照顾各个地区的黄土特点,在现场查表使用上也必然产生一定困难和误差。通过实践和综合试验分析,我们认为同一地貌单元的黄土,除了以物性指标查表定承载力外,适当作些荷载试验和无侧限抗压强度试验等方法,是有必要的。我们通过初步摸索,以无侧限抗压强度 q_u 同荷载试验的比例界限 P_1 建立了较好的相关关系,通过50余组 q_u 与 P_1 对比试验的数理统计,得出相关公式:

$$P_1 = 0.21 + 1.9q_u \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}$$

该式相关系数 $r=0.982$,离差系数 $C_r=0.19$ 。

以实测资料验证,该公式误差在0~0.5公斤/厘米²以内者占85%,精度是较高的^[8]。对该式的正式采用,当然还有待于积累较多的资料,但可作为参考和对比。

我们为铁路桥涵基础编制的黄土地基承载力表,系用于黄土天然地基,与《工民建》规范“湿陷性黄土地基承载力表”是既有区别、又有相同之处,因为统计样本大部分是具有湿陷性的黄土(指 Q_3 、 Q_4)。新黄土天然地基的承载力变化幅度较大,从0.8~3.0公斤/厘米²,而不同地区的黄土,有自重湿陷和非自重湿陷之别,若按照在2~3公斤/厘米²压力下的相对湿陷系数来定黄土是否有湿陷性,显然是欠合理的。而且在一般看来老黄土是没有湿陷性的,由于老黄土承载力高,当压力大于3公斤/厘米²以上,有的老黄土也是有湿陷性的。因此,当黄土天然地基设计压力已定,我们初步认为,既要测定湿陷起始压力,还要以设计压力测定湿陷系数,再考虑地基是否需要处理比较恰当。

参 考 资 料

- [1] 陕西综合勘察院:《我国黄土和黄土状土的特征及其湿陷性质和承载力的评价方法》,1972年11月。
- [2] 人民铁道出版社:《黄土资料》第三期,1954年。
- [3] 铁道部第三设计院等三单位资料:《砂土承载力试验报告》,1975年7月。
- [4] 工民建黄土规范修订组:《湿陷性黄土地基的承载力》(初稿),1975年10月。
- [5] 铁道部第三设计院一总队资料:《地基承载力译文汇编》(第一期),1971年12月。
- [6] 冶金部:《冶金工业建设地质勘察技术规范》(试行),1972年8月。
- [7] 铁道部第二设计院黄土调查组:《胶济铁路沿线黄土堆积地基承载力的探讨》,1977年5月。
- [8] 铁道部第一设计院:《科技交流》(第五期),1974年。

第二篇 胶济铁路沿线黄土堆积地基承载力的探讨*

铁道部第二设计院三总队黄土状土组

胶济铁路沿线的黄土堆积,分布在济南至南流之间,时代属中更新带(Q_2)、上更新带与全新带(Q_{3-4}),成因以冲积、冲洪积为主。沿线黄土的特性,一般不够典型,与西北黄土相比有共性也有其特殊性,其特点是含砂量较大、孔隙比较小、碳酸盐含量较小、厚度较薄、一般无湿陷性,总体上可视为黄土状土。这种黄土状土,实际上是典型黄土与普通粘性土的过渡类型,其承载力等工程性质自然有别于典型黄土,又不同于一般粘性土,有其自己的特性。

一、根据荷载试验曲线选取承载力的“曲率极值法”

本区可供分析的荷载试验资料共有22组,其中白沙河中桥2组、大丹河中桥、弥河大桥、西湖河中桥各一组,系我总队荷载组提供,采用方形压板(50×50 厘米);胜利炼油厂8组、胜利氨厂2组,系由胜利石油化工总厂提供,采用方形压板(70.7×70.7 厘米);辛店电厂4组,由该厂提供,采用方形压板(30×30 厘米)。试验点分布在,从西湖河到白沙河长183公里的地段上,但以辛店地区为主。试验地层的时代, Q_2 、 Q_3 、 Q_4 都有,以 Q_3 为主。成因以冲积为主。试验状态有天然状态、浸水饱和状态以及先在天然状态加荷到2公斤/厘米²或3公斤/厘米²而下沉稳定时再浸水饱和试验等三种。

目前,根据荷载试验结果确定地基基本承载力(以下简称承载力)主要是依据 $P-S$ 曲线,但方法繁多,互不统一,带有一定的人为性。例如:选取允许相对沉降 $\frac{s}{b}$ (b 为荷载板宽度)对应压力为承载力的变形控制法中,各单位就有选 $\frac{s}{b}$ 为0.01、0.01~0.015、0.02~0.03、0.03的,没有统一标准,视土的压缩性和建筑物的结构特性和重要性而异^[1-5]。在强度控制法中,有选比例极限(P_0)为承载力的,也有用破坏荷载(P_i)除以一定安全系数作为承载力的;还有认为比例极限偏于保守,再加上一项 $\frac{P_i - P_0}{3 \sim 5}$ 为承载力的;也有感到比例极限还不够放心,要除以1.5~2.0的安全系数的^[2,6,7],方法很不统一,实用上也往往遇到困难。如象本区黄土堆积这样的中、高压缩性土,固、液、气三态混合,已可视为粘滞—弹性—塑性体^[8],弹性变形理论已不完全适用,在 $P-S$ 曲线上往往找不出明显的直线段,而是一条完整的曲线,因而不能确定相当于比例极限的拐点来。这种情况下,又出现了切线交会法、沉降增量 $\angle S_n$ 为前一级沉降增量 $\angle S_{n-1}$ 的若干倍(有取1.2倍的,有取2倍的)时的压力为承载力等方法。但是,这些方法并没有减少实用困难,比如,既然 $P-S$ 曲

*本文是结合生产任务完成的《胶济铁路沿线的黄土堆积及其工程性质(综合研究报告)》地基承载力部分的摘要。以荷载试验为基础,探讨本区黄土状土物理力学性指标与承载力之间的关系,以及按静力触探,标准贯入试验、小钎探等确定承载力的经验公式,并提出本地区黄土堆积地基基本承载力表。在进行此项研究中,承胜利石油化工总厂、辛店电厂,以及本总队的荷载组、触探组、化验室给予帮助。

线上直线段不明显,切线交会同样无从着手。至于破坏荷载,一般认为较之比例极限更难确定,据以确定承载力更为困难。

为了解决这一问题,结合本地区载荷试验曲线的特征,我们提出了“曲率极值法”由荷载—沉降曲线确定承载力。

(一) 原理

本区黄土堆积和区外其它中、高压压缩性土的荷载试验结果, $P-S$ 曲线往往无明显直线段,而是沉降增量 ΔS 随压力的增大而逐渐增大,成一完整曲线^[1,5,9,10,12]。这表明,土体开始受压后,无严格弹性变形阶段,早就开始了塑性变形。随着压力增大,塑性变形部分愈益增大,直至土体发生剪切。因此, $P-S$ 曲线上的特征点,已不是直线段终点——比例极限,而是曲线的拐点,即曲率最大的点。这一点代表了 ΔS 由此急剧增大的点,即:塑性变形,由不明显到明显的转折点,就是土体变形由量变到质变的点。这个点在一条曲线上是唯一的,其对应压力用 $\hat{P}$ 表示。由于这个点的特殊性和唯一性, $\hat{P}$ 应该与土的承载力有必然的联系。 $\hat{P}$ 点本身就可作为研究承载力问题的特征点,这将在后面进一步论证。我们把求算 $P-S$ 曲线曲率最大点对应的压力 $\hat{P}$ 来确定承载力的方法称为“曲率极值法”。

(二) 公式

推导曲率最大点压力 $\hat{P}$ 的算式,可分五步:

1. 确定 $P-S$ 曲线类型

根据本区和外区中、高压压缩性土的六十多组荷载试验资料,假设了指数曲线、抛物线、双曲线等形式来比拟 $P-S$ 曲线。结果表明,绝大多数 $P-S$ 曲线都接近于指数曲线,即在 $\lg S-P$ 半对数坐标中近于直线。因此, $P-S$ 曲线方程可以写为:

$$S = ae^{bp} \quad (1-1)$$

式中 a 、 b ——常数

2. 求指数曲线的曲率

曲率 K 的算式为:

$$K = \frac{S''}{(1 + S'^2)^{3/2}} \quad (1-2)$$

由式 (1-1) $S' = abe^{bp}$, $S'' = ab^2e^{bp}$ 。

故

$$K = \frac{ab^2e^{bp}}{(1 + a^2b^2e^{2bp})^{3/2}} \quad (1-3)$$

3. 求曲率极值时的压力 $\hat{P}$

令曲率 K 的一阶导数 $K' = 0$, 由式 (1-3) 得:

$$e^{2bp} = \frac{1}{2a^2b^2}$$

故

$$\hat{P} = -\frac{\lg 2 + 2\lg a + 2\lg b}{2b\lg e} \quad (1-4)$$

4. 证明 K 为极大值

由式 (1-3), 曲率 K 在极值处的二阶导数:

$$K''(\text{极值}) = -\frac{8b^3}{9\sqrt{3}}$$

因 S 随 P 而增长, 故 $b > 0$, 因而 $K'' < 0$, 证明 $\hat{P}$ 时的曲率 K 为极大值。

5. 算式的简化

由式 (1-1), 有 $\lg S = \lg a + b \lg e \cdot P$

设 $A = \lg a$ 、 $B = b \lg e$, 代入式 (1-4), 则:

$$\hat{P} = -\frac{0.5127 + A + \lg B}{B} \quad (1-5)$$

式中 A 、 B 系 $\lg S-P$ 半对数直线的截距和斜率。 A 、 B 确定后, 即可按式 (1-5) 算出 $\hat{P}$ 来。

(三) 算例 (图 2-1)

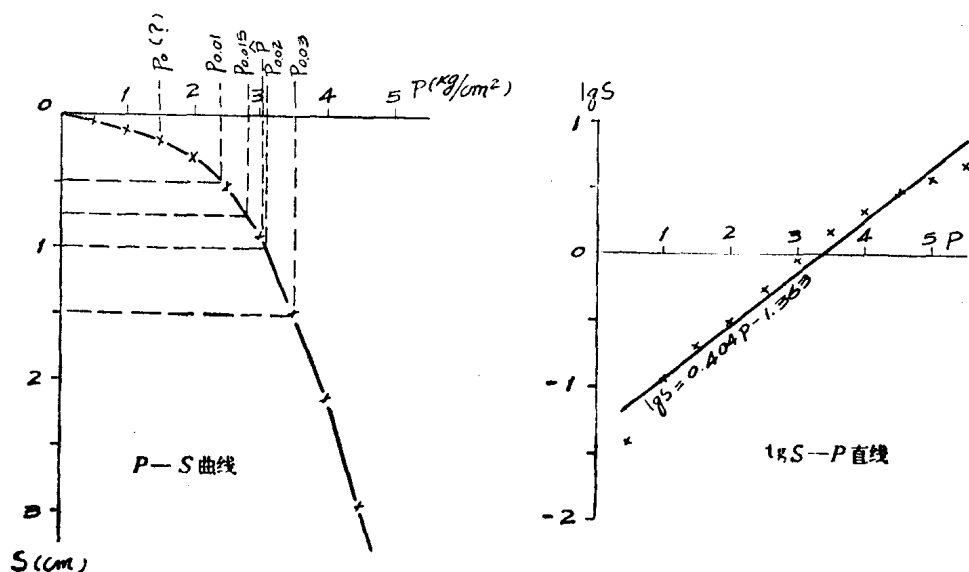


图 2-1 白沙河中桥 I-1 号荷载试验成果图

计算 $\hat{P}$ 的步骤是: 在 $\lg S$ 、 P 坐标系中, 点绘荷载试验的数据, 应近于直线; 用最小二乘法算出或用作图法量出 $\lg S-P$ 直线的截距 A 与斜率 B ; 按式 (1-5) 算出 $\hat{P}$ 。

白沙河桥 I-1 试验点 (见图 2-1), P 、 S 值为:

P (公斤/厘米 ²)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
S (厘米)	0.0391	0.1101	0.1975	0.3177	0.5303	0.9117	1.5092	2.1339	2.9443	3.7939	4.8543

按最小二乘法算得: $B = 0.4045$, $A = -1.3628$ 。

$$\hat{P} = -\frac{0.5127 - 1.3628 + \lg 0.4045}{0.4045} = 3.07 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

计算中, P 、 S 采用统一的公斤、厘米制。当 $P-S$ 曲线不够长时, 亦可用此法外推 $\hat{P}$ 。

为简化计算, 公式 $\hat{P} = -\frac{0.5127 + A + \lg B}{B}$ 可制成 (图 2-2、表 2-1)。