

鐵路結構物設計算例

整體式 隧道衬砌

鐵路专业設計院标准設計管理处主編



鐵路結構物設計算例

整體式隧道衬砌

鐵路专业設計院标准設計管理处主編

人民鐵道出版社

1964年·北京

本书通过铁路隧道标准设计衬砌计算, 归纳了整体式衬砌的几种计算方法, 包括有纳乌莫夫法、朱拉波夫—布加耶娃法及鍾杆法等, 阐述了适用的情况并对几种计算方法进行了分析比较。

本书可供铁路隧道专业人员及有关专业院校师生参考。

本书编者: (以姓名笔划为序)

岑 鋆	邵祥荣	赵启儒	张葆蓀	张家誠
秦淞君	孙集灼	郭 康	戴国柱	韓 濱

铁路结构物设计算例

整体式隧道衬砌

铁路专业设计院标准设计管理处主编

人民铁道出版社出版

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 010 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

书号 1947 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $5 \frac{13}{16}$ 字数 147 千

1964年8月第1版

1964年8月第1版第1次印刷

印数 0,001—5,000 册 定价(科六) 0.90 元

前 言

自建国以来,我国隧道工程及其理论研究有了蓬勃的发展,仅铁路隧道就修建了一千余座,总延长达四百多公里,这样的建设速度及规模是我国整个隧道建筑史上从未出现过的。同时,我们根据积累的设计、施工经验以及运营养护意见,参考了各国学者的有关理论,并结合我国实际情况编制出成套在不同地质情况下、不同跨度的铁路隧道衬砌标准图。这些标准图中,尤其是单、双线铁路隧道衬砌图,在修筑铁路隧道时应用较为广泛。

本书归纳了我们在编制标准图中运用的基本计算原理及点滴的经验,列举了相应的例题,阐述了各种方法的适用情况,并进行了分析比较,以供铁路隧道专业人员及有关专业院校师生参考。

本书引用了铁道科学研究院的一些计算与试验资料,在编写过程中承唐山铁道学院范文田讲师及北京铁道学院隧道教研组师生提出不少宝贵意见和给予帮助,特此志谢。

编 者

1963年12月

目 录

第一章 总 论	1
§1-1 隧道衬砌计算理论的发展简述.....	1
§1-2 局部变形理论与共同变形理论.....	2
§1-3 对局部变形理论的几种衬砌计算方法的 简述和比较.....	4
§1-4 对链杆法计算直牆式衬砌是否计入地层与 衬砌间相对垂直位移问题的探讨.....	12
第二章 直牆式衬砌的计算 (C.H. 納烏莫夫法)	16
§2-1 基本原理.....	16
§2-2 弹性地基上直梁挠度曲线微分方程式.....	21
§2-3 弹性地基上直梁的初参数方程式.....	23
§2-4 衬砌边牆的计算.....	28
§2-5 衬砌边牆的一般性计算公式——短梁.....	29
§2-6 刚性牆的计算——刚性梁.....	34
§2-7 柔性牆的计算 (无主动侧压力) ——长梁.....	36
第三章 直牆式单綫铁路隧道衬砌的计算例题 (C.H. 納烏莫夫法——长梁)	44
第四章 直牆式双綫铁路隧道衬砌的计算例题 (C.H. 納烏莫夫法——短梁)	61
第五章 曲牆式衬砌的计算 (Г.Г. 朱拉波夫—O.E. 布加耶娃法)	80
第六章 曲牆式单綫铁路隧道衬砌的计算例题 (Г.Г. 朱拉波夫—O.E. 布加耶娃法)	85
第七章 直牆式衬砌的计算 (链杆法)	101
§7-1 基本原理.....	101
§7-2 衬砌內力的计算.....	105

第八章 直牆式鐵路隧道衬砌的計算例題 (鏈杆法)	117
第九章 几个因素对直牆式衬砌拱頂截面內力的影响	151
附 录	157
1. 地层的地质特征及设计数据表 (表 1)	157
2. 矩形截面惯性矩数值表 (表 2)	158
3. 弹性地基梁的弹性标值表 (表 3)	162
4. 双曲线三角函数 ($\phi_1 \sim \phi_{15}$) 表 (表 4)	163
5. 弹性地基上直梁挠度曲线微分方程式的推导	168
6. 三角函数和双曲线函数表 (表 5)	174
7. 三心圓变截面拱圈尺寸计算公式	177
参考文献	180

第一章 总 論

§1-1 隧道衬砌計算理論的发展簡述

铁路隧道衬砌系属于地下结构，与一般地面结构不同，由于其与周围地层紧密接触，它在受力过程中变形受到地层的限制，一部分结构离开地层形成了脱离区，而另一部分结构则紧压地层引起地层给它的弹性抗力，形成了抗力区（图1—1）。抗力区的范围和抗力的大小随外力、结构变形及地层性质而定。

衬砌结构的计算理论的发展，一方面是随着地面结构物的计算理论发展而发展，另一方面是随着对地下结构本身特点研究的发展而发展。衬砌结构的设计与计算，当初并没有理论根据，而只是参照已有的隧道衬砌建筑的实践经验。

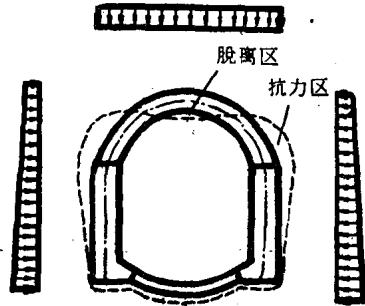


图 1—1

在十九世纪末叶，对衬砌结构是作为弹性拱来计算的，它仅考虑作用在衬砌上的地层压力，而不考虑其周围介质的弹性抗力。故计算所得的结构过于安全，而大量的隧道建筑实践也证明衬砌的厚度有可能大大地减薄。

计算理论进一步的发展，考虑了帮助衬砌工作的地层弹性抗力的作用。但在进行衬砌结构计算时，是将拱圈与边牆作为两个独立结构来考虑，不计它们之间变形的相互影响，即把拱圈当作放在不动支座上的无铰拱来计算，把边牆当作不移动的结构来计算，边牆紧压地层其所受到抗力的大小与地层的性质无关。这些假定不能反映出衬砌受力的真实情况。

计算理论发展至目前所处的阶段，考虑了衬砌结构与地层间的相互作用，即衬砌结构内力的大小不仅取决于结构所受的地层压力和其本身的刚度，同时还取决于地层的性质。在这个基础上有些学者主张采用地层的局部变形理论，即根据温克列尔（温氏）假定来计算，也有主张采用共同变形理论来计算。

现阶段的计算方法是把衬砌看作弹性结构进行计算的，它仅反映出结构在弹性受力阶段的一般受力变形情况，而没有考虑衬砌在受力破坏过程中的一些特点，如材料的塑性变形和截面开裂后应力重分布的影响等。因此现有的计算方法，还不能完全正确地估计衬砌结构的承载能力。但是到目前为止，这些计算方法仍被广泛地采用着，我国用得较多的有以下四种方法：

1. Г.Г.朱拉波夫——O.E.布加耶娃法（朱—布二氏法）；
2. C.H.纳乌莫夫法（纳氏法）；
3. 铤杆法；
4. C.C.达维多夫法（达氏法）。在我国铁路隧道设计中前两法用得更多些。

朱—布二氏法、纳氏法、铤杆法是建立在局部变形理论基础上的，达氏法是建立在共同变形理论基础上的。

§1-2 局部变形理论与共同变形理论

如前所述，根据衬砌结构与地层间的相互作用，现阶段所提出的隧道衬砌计算理论基本上可分为两种：局部变形理论和共同变形理论。按目前所提出的建立在这两种理论基础上的计算方法进行衬砌计算，所得出的结果是不相同的。

局部变形理论，它以地层弹性压缩系数 k 来表示地层的弹性特征，并认为应力（ p ）和变形（ y ）之间呈直线比例关系，即： $p = ky$ 。

这一假定，相当于认为地基是一组独立的弹簧，在荷载作用下，弹簧各自单独发生变形（局部变形）（图1—2）。然而实际上加于一点上的荷载会引起弹性体整个表面的变形（共同变形），如图1—3所示，因此局部变形理论不能提供出介质受力状态的正确概念。此外，地层弹性压缩系数并不是地层物理力学

性质的标值，它取决于很多因素，如基底的形状和尺寸，荷载类型，强度，岩石成层性质等等。

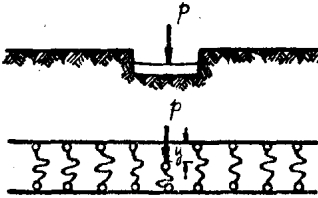


图1-2

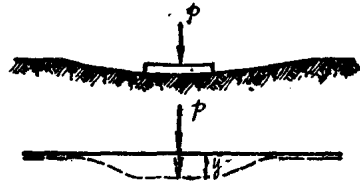


图1-3

共同变形理论用纵向变形系数 B_0 和横向变形系数 μ_0 (即波桑系数) 来表示地层特征，就能较正确地反映出地基应力和变形的实际情况。达氏经过多年的研究，利用共同变形理论来计算隧道衬砌获得了一定的成就，从力学观点看，它比局部变形理论前进了一步。但是达氏法还存在以下的主要问题：

1. 为了简化计算，把支承在弹性平面内一个切口周边上的衬砌边牆，最后简化为支承在二个彼此无连系的相互垂直的弹性层上的梁 (图1-4)。这一假定在很大程度上影响了计算的合理程度。

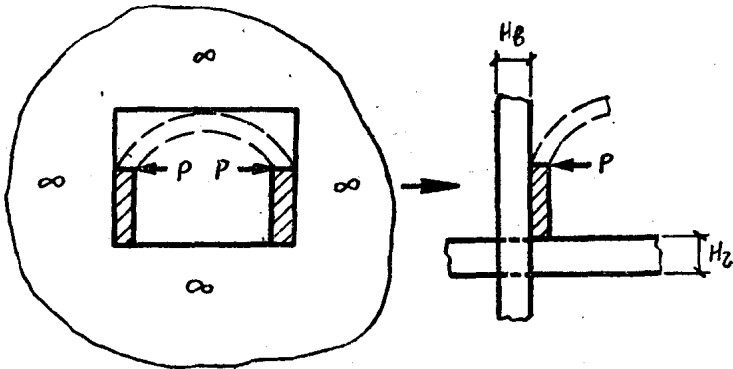


图1-4

2. 假定在施工过程中衬砌的周围地层未被扰动，所以作用在边牆上的地层侧压力为原始的静止地层压力，即为：

$$P = \gamma h \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}。$$

这一假定与周围地层在开挖过程中会产生变形的实际情况相矛盾。同时这样确定的地层侧压力的数值一般偏大。

由于达氏法存在着以上所述的一些问题和在运算上较繁杂，在我国铁路隧道衬砌设计中很少被采用。尽管温氏假定（局部变形理论）存在着缺陷，但由于这个假定能用简单的数学形式来表示，计算工作也较简便，在一定程度上也能反映衬砌受力的实际情况，因而以温氏假定为基础的局部变形理论用于铁路隧道衬砌计算中，是具有一定的合理性的。

从上述观点出发，本算例仅介绍局部变形理论的计算方法。

§1-3 对局部变形理论的几种衬砌 计算方法的简述和比较

一、朱—布二氏法：此法一般用来计算曲牆式隧道衬砌。其基本假定是：在荷载的作用下，拱顶形成脱离区，两侧边牆向地层变形，引起地层的弹性抗力。抗力图形为抛物线（图1—5），抗力上零点 b 位于拱部，它与隧道中心线呈 $\varphi_b = 45^\circ$ 处。最大抗

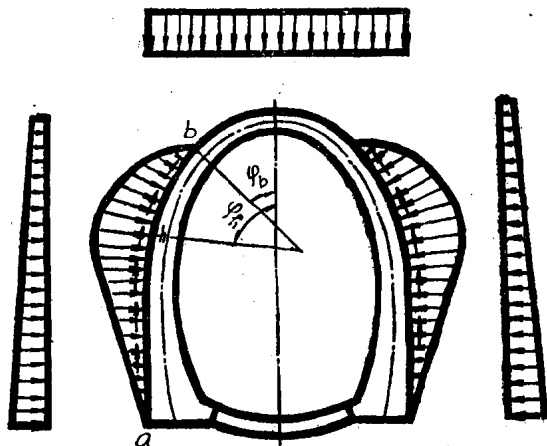


图 1—5

力通常发生在 h 点 (bh 的垂直距离 $\approx -\frac{1}{3}ab$ 的垂直距离)。抗力下零点 a 在边牆底处。解算衬砌内力按一般结构力学的原理, 计算较为简单。但计算直牆式衬砌时, 如果直接用朱—布二氏法对曲牆式的抗力假定图形, 则计算结果将会导致较大的误差。因直牆式衬砌边牆下半段一般向内弯曲, 见图 1—6 中 AB 部分。这说明弹性抗力并非在整个边牆上都产生, 而仅产生在 BC 段内。根据此种情况, 如计算直牆式衬砌时, 可按照朱—布二氏法假定抗

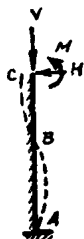


图 1—6

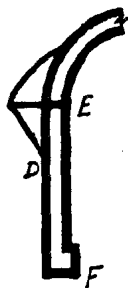


图 1—7

力图形的基本精神, 设边牆上的弹性抗力仅发生在边牆上部, 近似假定为三角形分布 (图 1—7)。在计算中先假定抗力下零点 D , 待衬砌第一次静力计算完毕, 检算 D 点水平位移是否为零, 如不等于零, 则应移动 D 点位置, 采用逐次接近法, 试算二、三次即可确定下零点 D 的正确位置, 但这样便增加了计算的工作量, 因此直牆式衬砌计算常用以下所述的纳氏法。

二、纳氏法: 纳氏法对拱部抗力图形的假定以及衬砌内力的解算都与朱—布二氏法相似。其特点在于将边牆作为弹性地基上刚度不变的梁。根据边牆刚度及地层弹性压缩系数等关系, 把边牆分为长梁、短梁和刚性梁三种, 推导出相应的计算公式, 计算较为简单。

三、鏈杆法: 此法特点是以弹性支承的刚性杆 (鏈杆) 来代替地层的弹性抗力。计算时将衬砌分为若干段, 以折线段代替衬砌的拱轴线, 使衬砌成为支承于鏈杆上的铰链结构, 铰链处的力矩为冗余未知力。此法对抗力区范围不作任何假定, 需要经过几

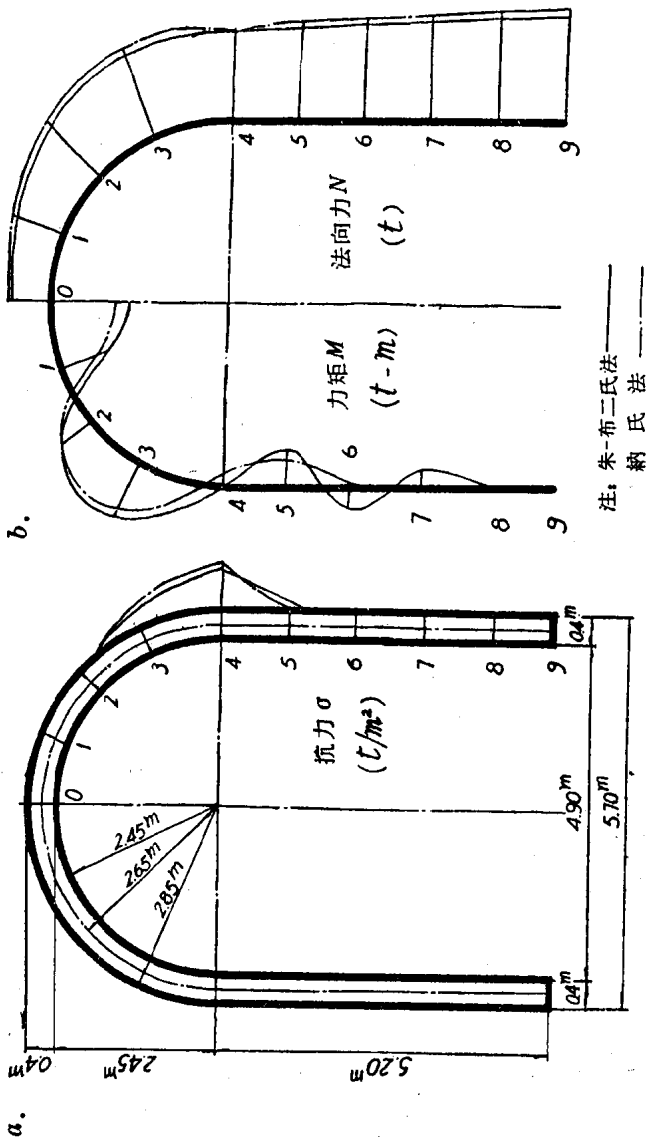
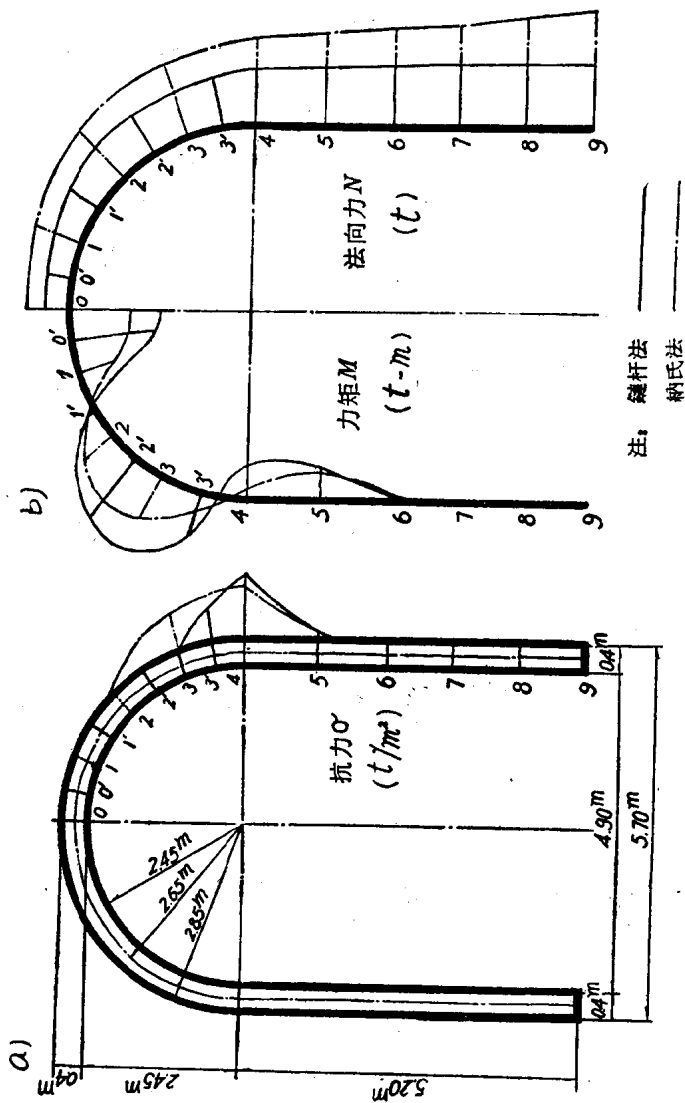


圖 1—8

表1-1

計 算 法		納 氏 法			朱 一 布 二 氏 法		
縫 号	項 目	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)
0		1.21	7.01		1.44	6.71	
1		0.43	8.23		0.64	7.96	
2		-0.81	11.05	0	-0.82	10.84	0
3		-0.91	13.22	2.62	-1.09	13.14	2.28
4		0.09	13.31	3.72	-0.01	13.31	3.23
5		0.42	14.26	0.37	0.66	13.66	0.70
6		0.09	15.22	-0.26	-0.49	14.53	0
7		-0.02	16.13	-0.10	0.31	15.54	
8		-0.01	17.14	0.00	0.15	16.50	
9		0.00	18.09	0.01	-0.02	17.45	



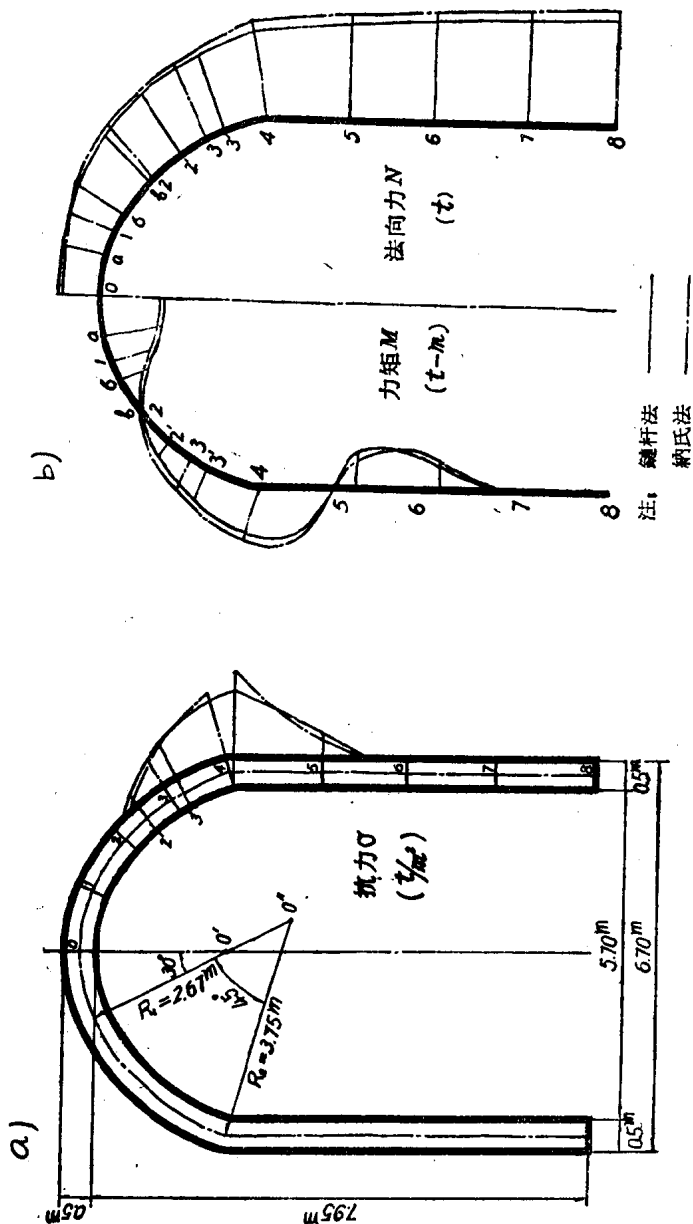
計算数据: 地层坚固系数 $f=4$; 地层压力 $q=3.338t/m^2$; 地层弹性压缩系数 (侧) $k=0.5 \times 10^5 t/m^3$, 衬砌材料混凝土 140 級 $E=14 \times 10^5 t/m^2$; 容重 $\gamma_c=2.3t/m^3$, 摩擦系数 $\mu=0.3$ (鍵杆法不考虑); 鍵杆法未計砌自重。

图 1—9

表1-2

計 算 法		鏈 杆		法		納 氏		法	
鏈	項 目	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)		
	0	1.67	4.22		1.21	7.01			
	0'	1.43	4.47						
	1	0.79	5.17		0.48	8.23			
	1'	-0.10	6.19						
	2	-0.97	7.32		-0.81	11.05	0		
	2'	-1.55	8.35						
	3	-1.54	9.04		-0.91	13.22	2.63		
	3'	-0.75	9.24	1.46					
	4	0.53	9.44	4.23	0.09	13.31	3.72		
	5	0.59	9.67	0.38	0.42	14.26	0.37		
	6	0.07	9.67	-0.31	0.09	15.22	-0.26		
	7	-0.03	9.67	-0.11	-0.02	16.13	-0.10		
	8	-0.01	9.67	0.01	-0.01	17.14	0.00		
	9	0.00	9.67	-0.02	0.00	18.09	0.01		

注：鏈杆在計算所得抗力上零點位于75°左右。



計算數據: 地層堅固係數 $f=3$; 地層壓力 $q=5.53t/m^2$, 地層彈性壓縮係數: (側) $k=0.4 \times 10^5 t/m^3$, (底) $k_0=0.5 \times 10^5 t/m^3$; 衬砌材料混凝土140級 $E=14 \times 10^5 t/m^2$; 容重 $\gamma_0=2.3t/m^3$; 摩擦係數 $\mu=0.3$ 。

圖 1—10

表1-3

計 算 法 縫 項 目 號	鍵			杆			納			氏			法		
	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)	M (t-m)	N (t)	σ (t/m ²)
0	1.72	10.35		1.56	10.25										
a	1.31	11.17													
1															
6	0.42	12.83													
6	-0.54	14.95													
2															
2'	-0.98	17.04	1.70												
3															
3'	-1.02	18.85	3.93												
4	-1.26	20.97	4.46												
5	0.74	22.28	1.31												
6	0.23	23.87	-0.14												
7	0.02	25.46	-0.14												
8	0.00	27.06	0.00												

注：鍵杆法計算所得抗力上零點位於45°左右。