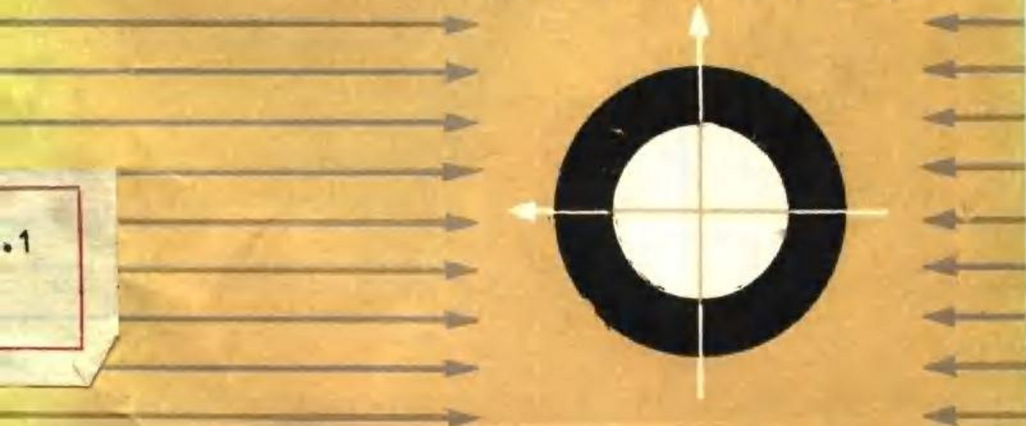


地震区地下结构物 支护的计算



〔苏〕H.H.福季耶娃 著·徐显毅 译·煤炭工业出版社

87
TD350.1
2
3

地震区地下结构物 支护的计算

〔苏〕H.H.福季耶娃 著
徐显毅 译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书以压缩和剪切地震长波作用下,支护与线性变形岩体相互作用的拟静力接触问题的解为基础,详细叙述了地震作用下矿山坑道和非圆形横截面隧道支护的计算方法;给出了在来自坑道横截面平面内任意方向的压(拉)波和剪切波作用的任意组合下,每个支护截面内的最不利应力状态的估计。

书中还研究了圆形支护的计算问题。提出了确定无支护坑道周围岩体内,由于重力和地震作用而引起的最不利应力状态的方法。叙述了受构造力作用的岩体内,非圆形支护的计算方法;介绍了适用于电子计算机程序的完备算法,以及利用这个程序在贝加尔-阿穆尔隧道和罗古水电站工程中所完成的计算结果。

本书可供工程设计人员和科学工作者,在研究地下结构物的计算问题时参考,也可供矿业院校的教师和研究生之用。

责任编辑:施修诚

Н.Н.Фотиева

РАСЧЕТ КРЕПИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ

Москва «Недра» 1980

地震区地下结构物 支护的计算

〔苏〕Н.Н.福季耶娃 著

徐显毅 译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本850×1168¹/₃₂ 印张8¹/₄

字数214千字 印数1—1,900

1986年4月第1版 1986年4月第1次印刷

书号15035·2763 定价1.65元

序 言

目前，地下结构物的建设，在复杂的地质条件下，如在受构造力作用的岩体内、永久性冻土带、地震活动区，得到了广泛地发展。贝尔加-阿穆尔大干线上的北穆尔隧道、贝加尔隧道、纳戈尔隧道，罗古水电站地下结构物综合工程，巴库、梯比里斯及塔什干的城市地下铁道隧道等，都可作为这类结构物的工程实例。

在复杂的地质条件下设计和建造地下结构物时，必需保证其结构有足够的强度、安全度和耐久性。因此，在考虑下述特殊形式的荷载作用下，地下结构物支护的计算问题，就具有十分重要的意义：地震时产生的地震作用；由于岩体的初始应力状态与上部岩层形成的重量，在应力的尺寸及其应力主轴方向有很大的差别而引起的构造山岩压力，冻胀力等。

现有的地下结构物支护的计算方法，大多数都是在以静荷载（内水压力、山岩压力、外部地下水压力等）作为基本荷载形式作用的情况下提出来的。考虑上述作用，只能采用极为近似的方法来进行计算，特别是对于非圆形横截面支护。

本书所做的工作是试图建立起在地震和构造成因而引起的荷载作用下，大长度深埋地下结构物任意外形的闭合支护和隧道衬砌的比较精确的计算方法。

书中介绍了在地震和构造力作用下，确定任意形状的无支护（或有对露头表面位移影响很小的轻便支护的）矿山坑道周围岩体的应力状态的方法。研究了考虑两个相距很近的平行圆形隧道或无支护坑道，在地震作用下的相互影响的有关问题。

与在此之前所提出的一些方法相比较，本书研究出来的计算方法的主要优点是，在实际工程设计中应用这些方法，将有助于提高建造在地震和构造活动区的地下结构物的抗震性能和安

全度。

作者感谢格鲁吉亚科学院通讯院士И.Г.纳佩特瓦里泽、技术科学博士Н.С.布雷切夫、技术科学博士В.А.伊利切夫、技术科学硕士Л.Р.斯塔夫尼采夫、И.Я.多尔曼对本书所给予的关心、帮助和提出的宝贵意见。同时,对列宁格勒地下铁道设计院院长В.И.梅杰伊科和罗古水电站地下结构物设计总工程师В.М.奇尔科夫,主动将本书提出的计算方法应用于实际工程设计;工程师В.Г.加赖丘克、Н.Н.莱科夫、М.В.图皮科夫为本书编制的电子计算机程序,并完成了大量的计算工作,深表谢意。

目 录

第一章 地震作用下地下结构物支护计算的一般方法	1
1.1 现有建议的分析	1
1.2 基本原则	7
1.3 问题的一般提法	9
1.4 支护与岩石接触面破坏的可能性估计	11
第二章 地震作用下非圆形横截面支护的计算	14
2.1 任意方向的压缩长波作用下支护的应力状态	14
2.2 任意方向的剪切长波作用下支护的应力状态	45
2.3 在任意方向的压(拉)波和剪切波共同作用下, 支护最不利应力状态的估计	47
2.4 地震作用下非圆形横截面支护计算的一般算法和程序	53
2.5 计算实例	65
2.6 计算结果与按文献[14]方法获得资料的比较	71
2.7 地震作用下罗古水电站隧道衬砌的计算结果	75
2.8 设计铁路隧道衬砌的计算结果	85
2.9 简要的结论	97
第三章 地震作用下圆形支护的计算	98
3.1 问题的提法	98
3.2 压缩波作用引起的圆形支护的应力状态	99
3.3 剪切波作用引起的圆形支护的应力状态	105
3.4 支护截面最不利应力状态的估计	105
3.5 地震作用下圆形支护的计算方法	108
3.6 计算实例	110
3.7 简要的结论	117
第四章 地震作用下两相邻布置的圆形隧道衬砌的计算	119

4.1	任意方向的压缩长波作用下两个相同的圆形隧道衬砌的应力状态	120
4.2	任意方向的剪切长波作用下两个相同的圆形隧道衬砌的应力状态	140
4.3	计算方法	142
4.4	计算实例	147
4.5	简要的结论	160
第五章	考虑地震作用时无支护坑道周围应力状态的确定	162
5.1	考虑地震作用时坑道横截面周边应力确定问题的提法	162
5.2	任意方向的压缩长波作用下坑道横截面周边上的应力状态	162
5.3	任意方向的剪切长波作用下坑道周边上的应力状态	167
5.4	岩石自重作用引起的横截面周边上的应力状态	167
5.5	重力和地震作用下周边上最不利应力状态的估计	168
5.6	计算方法和运算程序	169
5.7	计算实例	171
5.8	确定罗古水电站西岸运输隧道无支护坑道横截面周边应力状态的计算结果	173
5.9	圆形无支护坑道的特例	176
5.10	地震作用下两个平行不相等的圆形坑道的相互影响问题	178
5.11	重力和地震作用下两相邻布置的平行圆形坑道横截面周边应力的确定方法	187
5.12	计算实例	190
5.13	坑道之间最小地震安全距离的确定	195
5.14	简要的结论	201
第六章	受构造力作用的岩体内非圆形支护的计算	203
6.1	问题的现状	203
6.2	问题的提法	204
6.3	边界条件	207

6.4	转化为单联通域问题	211
6.5	所获得的边界问题的解	212
6.6	应力的确定	214
6.7	计算方法和运算程序	220
6.8	计算实例	224
6.9	考虑岩石蠕变时的支护计算	228
6.10	立井和矿山坑道支护的计算结果	235
6.11	简要的结论	247
结语		250
参考文献		253

第一章 地震作用下地下结构物 支护计算的一般方法

1.1 现有建议的分析

在设计地震活动区的地下结构物的时候，为了保证它的抗震性能，对其支护进行计算，即确定在地震激起的地震波的作用下，支护内可能出现的应力和内力的问题，具有很大的意义。

地震区地下结构物支护计算问题的复杂性，首先在于这种使结构可能受到的作用本身是事先不知道的。地震时，在岩体内将出现不同性质的地震波：压-拉波或者称为纵波，它引起岩石质点在其自身传播的方向位移；剪切波或者称为横波，它引起岩石质点在垂直于波的传播方向位移。弹性压-拉波和剪切波的传播速度是不同的，比如，在平面变形的情况下，它们的传播速度可通过岩石的特性，分别按如下公式确定：

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}}; \\ c_2 &= \sqrt{\frac{E_0 g}{2\gamma(1 + \nu_0)}} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中 E_0 ——岩石的变形模量；
 ν_0 ——岩石的泊松系数；
 γ ——岩石的容重；
 g ——自由落体加速度。

从震源发出的具有不同速度的地震波，在其自身传播的途径上遇到地表面、或具有不同力学性质的岩层分界面时，就发生折射和反射，并且每一种类型的波又产生出两类反射波。由于压-拉波和剪切波的不同速度，以及由于地震波的各种受阻方式而引起

的多次折射和反射，就可能导致结构物在实际上受到各种不同组合和具有任意方向的地震波的作用。因为山岩地质条件的多样性，所以，要预测不同性质的波作用的组合，及其相对于地下结构物的传播方向，在目前还是不可能的。正是由于所预期的作用的不确定性，就给估计地震时在结构内可能出现的应力状态，造成了带根本性的困难。

在此以前所研究出来的地震活动区地下结构物支护的计算方法，没有反映出地震时结构可能受到的作用的多样性，而是以估计在水平方向传播的压缩波作用下的应力状态作为基础的。

对于这种计算，假如把岩体模拟为线性变形介质（这是大多数以静荷载作为基本荷载形式的支护计算方法的基础），并只研究在结构物横截面平面内传播的地震波●，那末，最好是利用关于不同形状的加强孔洞附近应力集中的弹性理论平面动力接触问题的解。目前已有的解（例如文献〔2〕和〔3〕中的解）只能应用于圆形支护的计算，在支护横截面为非圆外形的情况下，要求解这类动力问题，将会带来极大的困难。

但是，正如许多著作对处在弹性介质内或由其它材料组成的包体中的孔洞周边，在波长大大超过孔洞或包体线性尺寸的压（拉）和剪切平面谐波作用下的动应力集中问题，所进行的研究表明的那样，其应力的分布与在无穷远处承受某一形式的荷载作用下，对带孔洞或包体的平面弹性理论拟静力问题的解所得到的结果是很接近的。

例如，关于压缩长波作用下的动力问题的解，与研究在无穷远处具有应力状态为 $\sigma_x^{(\infty)}$ ， $\sigma_y^{(\infty)} = \frac{\nu_0}{1-\nu_0} \sigma_x^{(\infty)}$ （在平面变形情况下），并且 ox 轴与波的入射方向相一致的平面拟静力问题（图1, a）所得到的结果相接近。同样，在剪切长波作用下的应力分布，与在纯剪情况下，即在无穷远处具有切应力 $\tau_{xy}^{(\infty)}$ 时所得到的结果相近

● 关于沿结构物轴线方向传播的波的作用而引起的纵向振动问题，本书不作研究，它已阐述在文献〔1〕中。——原注

似(图1,б)。在求解上述的静力问题时,在无穷远处所给出的应力,是由波的参数来决定的,正因为如此,所以把这类问题称为拟静力问题。

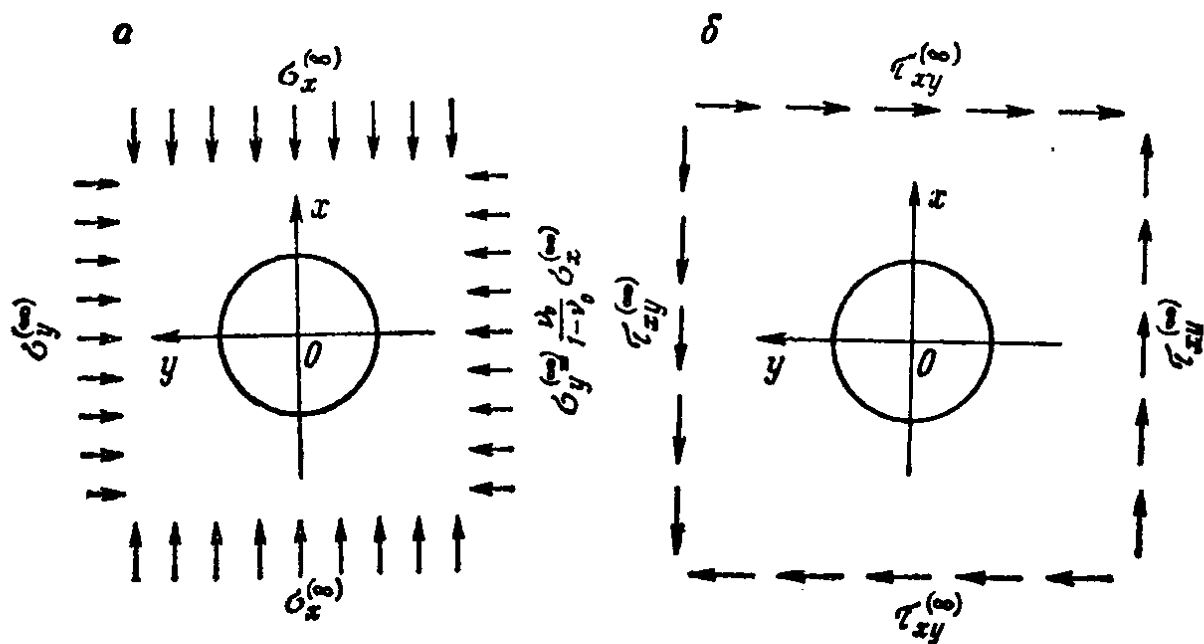


图 1 在下述长波作用下,确定圆形孔洞周围应力集中的
拟静力问题的计算
a—压缩长波, б—剪切长波

上面叙述的结果,已在文献〔4〕~〔6〕中对圆形孔洞和包体,以及在文献〔7〕中对具有圆滑角度的正方形孔洞,根据严格地极限变化,在解尽可能远的长波作用下的相应动力问题时得到。此外,对在压缩波场内的不同形状的孔洞,用动力光弹性方法,也获得了类似的结果。特别是在文献〔8〕中,表明了波长超过孔洞特征尺寸3倍以上的情况下,利用拟静力问题的解的实际可能性。同时,在文献〔9〕中也表明了这种情况。

在岩石中,特别是在具有比较大的变形模量值的硬岩中,具有卓越振动周期的弹性地震波的波长,可达到几百米,大大地超过所设计的结构物的横向尺寸。例如,在具有变形模量 $E_0 = 6 \times 10^5 \text{ t/m}^2$ 、容重 $\gamma = 2.6 \text{ t/m}^3$ 及泊松系数 $\nu_0 = 0.3$ 的岩石中,当卓越振动周期 $T_0 = 0.5 \text{ s}$ (相当于9度地震)时,其弹性压缩波的波长为

873m, 而剪切波的波长为 467m[●]。因此, 研究用以确定地震时引起的地震作用下, 地下结构物支护的应力状态的拟静力问题, 可以认为是有充分依据的。根据文献^[10], 在无穷远处给出的应力, 用如下公式来确定:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0; \\ \sigma_y^{(\infty)} &= \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} \sigma_x^{(\infty)}; \\ \tau_{xy}^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_2 T_0, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式中 k_c ——地震烈度系数;

γ ——岩石的容重;

c_1, c_2 ——分别为弹性压(拉)波和剪切波的速度;

T_0 ——岩石质点的卓越振动周期;

ν_0 ——岩石的泊松系数。

在上述概念的基础上, 已研究出了确定地震作用下圆形水工隧洞衬砌内的应力的方法^[11], 并在圆形运输隧道衬砌的计算方法中, 进一步发展了文献^[11]的原则, 这些方法已推荐给《方法指南》中实际应用。但是, 上述的这些方法具有如下的一些严重缺点:

1. 为了确定由压缩长波作用在衬砌内引起的动应力, 所利用的是关于在无穷远处(在波的传播方向)单轴受压的拟静力问题解, 可是(正如在前面提到过的文献^{[4]~[8]}所表明的那样), 还应当研究在无穷远处为双轴受压的应力状态^②;

2. 没有考虑到可能有的剪切波的作用, 虽然它是在地震时与压(拉)波的出现而同时发生的, 而它在支护内引起的应力与由压缩波引起的应力具有同一个量级, 并且, 在横截面周长的一半的

● 波长是根据公式 $L_1 = c_1 T_0$, $L_2 = c_2 T_0$ 来确定的, 式中的速度 c_1 和 c_2 用关系式 (1.1) 计算。——原注

② 这个缺点在后来新修订的《方法建议》中^[14], 已经消除了。——原注

长度上是拉应力；

3. 入射波的方向取为水平方向，尽管由于波的多种多样的映射，它实际上可能是沿相对于结构物的任意方向入射的；

4. 没有考虑到作用的交变性。

上述的这些缺点证明，有进一步发展和完善建造于地震活动区的，圆形隧道衬砌的计算方法的必要性。

关于地震作用下，非圆形横截面隧道衬砌和地下结构物支护的计算问题，目前，实际上还没有人提出建议。在文献〔15〕中建议的方法，是根据文献〔11〕的方法来确定圆形隧道衬砌上的径向压力，而在其后的计算中，又把这个压力作为主动荷载；而对其它外形的衬砌，则是根据苏联国家地下铁道和运输工程勘测设计院提出的已知简图〔16〕，并考虑所谓的岩石被动弹性抗力来计算。但决不能认为这些方法是有足够的依据的，这不仅因为它们存在着文献〔11〕、〔12〕中已经指出过的那些缺点，而且还由于以下的一些原因：

1. 衬砌上受到的压力（对于非圆形衬砌来说，即是垂直于它的横截面外周边的应力），无论是数值上，还是性质上——就它沿周边上的分布而言，都与它的形状有重要的关系，并不能机械的把它转用到其它外形的衬砌上去●；

2. 由接触问题的解所得到的压力，是在弹性波通过时，由于衬砌与岩石相互作用的结果而发生的完全接触应力。即使是对于同样形状的衬砌来说，也丝毫不能把这个应力解释为主动荷载；同样，也不能认为是由岩石的抗力所引起，因为它既包含有荷载，也含有抗力，不能将它分割开。利用接触应力图来作为主动荷载，需要按文献〔16〕的简图来进行计算，这就导致无根据的双倍地考虑了岩石的弹性抗力，即在确定荷载本身的时候考虑一次，在进

● 例如，在圆形衬砌上由水平压缩长波作用引起的法向压力图，具有两个对称轴；而在非圆横截面的衬砌上，由同样作用而引起的法向应力图，则只有一个对称轴。——原注

而寻求它在衬砌内引起的内力时，又考虑一次●；

3. 没有考虑衬砌与岩体的接触面上的切应力，对于圆形衬砌来说，这种应力虽然可以用接触问题的解（利用考虑切向接触应力时所获得的解）来确定，但后来在计算其它外形的衬砌时，却把它给舍弃了。然而，切向接触应力的存在，对结构的内力，特别是对弯矩值有很大的影响。

由此可见，利用上述的方法〔15〕来确定非圆形支护在地震作用下的应力状态，即使是在文献〔14〕建议的，在水平方向的压缩长波作用下的计算范围内，也会导致严重失真的结果。此外，这样的计算没有考虑剪切波的作用及波沿结构物传播的可能有的方向，对于保证结构的抗震性能来说，是很不够的。

综上所述，可以得出结论，即研究非圆形横截面支护的计算方法问题，对于建造于地震区的地下结构物来说，至今仍然是一个十分迫切的问题。同样可以说，关于考虑地震作用的无支护矿山坑道周围岩体的应力状态的确定问题，也是一个很迫切的问题；而研究得更少的，则是如何考虑几个彼此相距很近的结构物的相互影响问题。

编写本书的目的，在于改进文献〔11〕、〔12〕提出的圆形支护的计算方法，消除在这些方法中所存在的缺点，以及提出确定在地震作用下，在无支护坑道周围和在隧道衬砌内、或在大长度的非圆形横截面地下结构物内，可能出现的最大应力的比较精确的方法。同时，还提出了研究地震作用下，两个平行而不相等的无支护圆形坑道、或两个相同的有支护隧道的相互影响的方法。

● 还应当指出，把接触问题的解与文献〔16〕的简图统一起来的本身，就有一定的矛盾，因为在确定荷载的时候，是把岩体模拟成均匀的各向同性的介质，而在求内力时，又要使介质服从文克列尔假定。在圆形衬砌的计算实例中不难证实，由于利用接触应力来作为主动荷载，使结构的应力状态严重失真。在同一圆形衬砌中，按文献〔16〕的简图求得的内力，与直接用接触问题的精确解求得的压力来确定的内力，完全不相同。——原注

1.2 基本原则

本书提出的计算方法，是以下述的原则作为基础的：

把岩体当作是线性变形的、各向同性的均质介质，它的力学性质用变形模量的平均值 E_0 和泊松系数的平均值 ν_0 来表征；

支护被看成是在与岩体完全接触条件下，在弹性阶段工作的、具有给定厚度和外形的环；

地震波假设为弹性波、具有平面波阵的谐波、或不平稳波，但就波的形状而言，真实脉冲与正弦曲线脉冲没有多大差别[●]；

支护的计算在平面变形条件下进行，即认为结构物的长度，超过它的横向尺寸5倍以上，并且，地震波是在结构物的横截面平面内传播；

所研究的结构物的埋设深度，超过其本身的横向尺寸3倍以上——地面的影响不予考虑^②；

岩石的变形特征，假定满足如下不等式：

$$\frac{E_0 g T_0^2}{20\gamma(1+\nu_0)} \geq D^2 \quad (1.3)$$

式中 D ——坑道的最大横向尺寸。

这个条件表示，要使具有卓越周期的地震剪切波的波长（它总是小于压缩波的长度），超过结构物横截面的直线尺寸3倍以

● 应当指出，波长越长，脉冲形状给予支护应力状态的影响就越小。因此，本书提出的方法实际上可以应用于长波情况下硬岩内的支护计算，以及在其它不稳定波形作用下的支护计算。把地震波作为平面波阵来看待，对计算结果不致有太大的误差，因为，在距波源很远的情况下，其波阵面就退化为平面的了。例如，在下述条件下，

圆柱形的发散压缩波，就退化为平面波阵^[17]， $\frac{r_0}{L_1} \geq \frac{10}{\pi}$ ， $\frac{r_0}{D_1} \geq 5$ ，其中 r_0 ——从震源到空腔中心的距离； L_1 ——压缩波的长度； D_1 ——空腔的直径。——原注

② 在以后的叙述中将会看出，关于地面的影响问题，和具有不同力学性质的岩层分界面一样，在研究由于原生波对分层界面和地面的反射而引起的波的所有可能方向的问题提法时，已间接考虑过了。但是，在求解接触问题时，地面的影响没有考虑，因此，对于埋深较浅的结构物来说，所提出的方法，只能是在很近似地估计应力状态时才适用。——原注

上的要求^①

上述的这些原则，描述的是所研究的支护与岩体相互作用模型，及其相应的计算简图的理想化程度，尽管没有把它们表达成与文献〔11〕和〔12〕方法的原则那样的明显形式（因为在文献〔11〕、〔12〕中研究的仅仅是压缩波，而不等式(1.3)中除了压缩波之外，还应当有一些其它形式的波）。进一步来说，本书提出的地震作用下的支护计算方法，虽然也和文献〔11〕、〔12〕的方法一样，都是建立在研究具有上述全部限制条件的，弹性理论拟静力接触问题的基础之上的，但其计算的基本原则却是不相同的。

因为波相对于结构物的传播方向，由于震源位置的不确定性、以及具有不同力学性质岩石的分层界面和自由地面而引起的波的多种多样的反射，可能是任意的，所以，在每个支护截面内的应力^②，与波的方向和不同性质的波共同作用的组合有很重要的关系；同时，这个应力也是不能预测的，因为它的计算不是建立在确定任何单一波（与坑道对称轴构成某一角度 α 方向入射的压缩波或者剪切波）作用而引起的应力的基础之上，而是以估计在压（拉）波和剪切波的任意组合，及其在结构物横截面内任意方向入射时，在每个支护截面内可能有的最不利应力状态作为基础的。

这种估计是借助于对每个支护截面预先确定波的入射角及同时到来的压缩波和剪切波、或者拉伸波和剪切波（取最不利情况）的组合的办法来进行的，这时在该截面内的法向切应力具有极值；也即是说，实际上是根据法向切应力的包络图来作出的。在每个支护截面内的内力，也正是在这种波的作用组合和这样的入射方向下确定出来的。这时，在这个截面内可能出现最大的法向切应力。由此可见，计算内力图所反映的不是任何单一波的作用，而是在每个支护截面的最不利方案中，所有可能的作用的总和。

● 不等式(1.3)是拟静力问题的解的适用性准则：如果它不满足，那末，计算就是非常近似的。并且，这时就只有利用尽可能收集到的地震加速度曲线图来进行计算，才有可以获得较为精确的结果。——原注

② 这里所说的截面是指圆形支护的径向截面，或垂直于非圆形横截面中线的截面。——原注

1.3 问题的一般提法

在一般情况下, 非圆形横截面支护是研究在具有另一种变形特性的弹性介质内加强切口的, 任意形状 (具有一个对称轴) 的环的如下两类弹性理论平面接触问题:

1. 包含加强孔洞的介质, 在无穷远处受到如下应力而双轴受压:

$$\sigma_{x'}^{(\infty)} = -P; \quad \sigma_{y'}^{(\infty)} = -\xi P \quad (1.4)$$

式中

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0; \quad \xi = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} \quad (1.5)$$

并且, Ox' 轴与沿垂直对称轴方向的 Ox 轴构成任意的倾角 α (图2, a);

2. 含有加强孔洞的介质, 在无穷远处受到下述切应力作用而受纯剪:

$$\tau_{x'y'}^{(\infty)} = -Q \quad (1.6)$$

式中

$$Q = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_2 T_0 \quad (1.7)$$

切应力作用在与对称轴成角度 α 的方向 (图2, b)。

利用第一类问题的一般解 (计算简图如图2, a), 可以获得在与坑道对称轴成角度 α 方向的压缩长波作用下, 在支护和岩体内的应力 $\sigma_{\text{压}}$ 的分布。由第二类问题的解 (计算简图如图2, b), 可确定出在与坑道对称轴成任意角度 α 方向入射的剪切长波作用下, 在支护和岩体内的应力 $\sigma_{\text{剪}}$ ●。

由于作用的交变性, 总共可能有四种同时到来的压(拉)波和剪切波共同作用的组合, 它们分别对应于如下的应力状态:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{\text{压}} + \sigma_{\text{剪}}; & \sigma_2 &= \sigma_{\text{压}} - \sigma_{\text{剪}}; \\ \sigma_3 &= -\sigma_{\text{压}} - \sigma_{\text{剪}}; & \sigma_4 &= -\sigma_{\text{压}} + \sigma_{\text{剪}} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

● 符号 σ 表示应力张量的全分量。——原注