

水工结构力学 问题的分析与计算

傅作新论文选集

河海大学出版社

水工结构力学问题的分析与计算

傅作新论文选集

河海大学出版社

(苏) 新登字第 013 号

内 容 提 要

本书收集作者从事水工结构力学研究 40 年来科研成果的精华。书中内容涉及复杂水工结构的力学分析、高混凝土坝的抗震计算与抗震设计、软基上的水工结构与基础梁板的计算方法等。书中阐述的理论和方法不但具有创造性,而且还有很大的实用价值。

责任编辑 朱宪卿

责任校对 朱宪卿

水工结构力学问题的分析与计算 傅作新论文选集

出版发行: 河海大学出版社
(南京西康路 1 号, 邮政编码: 210024)

经 销: 江苏省新华书店

印 刷: 河海大学印刷厂
(南京西康路 1 号, 邮政编码: 210024)

开本 850×1168 1/32 10 印张 260 千字
1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷
印数: 1—1000 册

ISBN 7-5630-0513-7

TV·77 定价: 9.50 元

河海版图书若有印刷装订错误, 可向承印厂调换

序 言

傅作新同志从事水利教育与科学研究工作已 40 年。在这期间，他教书育人、辛勤劳动在教学第一线，同时还结合我国水利建设任务，积极进行水工结构力学问题的研究。本书选编他完成的代表性科研成果 26 篇，内容涉及高坝应力分析、基础梁板计算、坝水相互作用和计算力学方法及应用等。这些研究成果既有较强的实践性，也有较高的理论水平。

作新同志自 1952 年华东水利学院建校时起即与我共事，长期协助我进行教学和科研工作。他注意联系实际，勇于创新，坚持不懈，为我国水利教育和科学事业贡献全部身心。本书的内容记录了他在科研工作上的主要成绩，对我国水利水电工程技术人员和科学研究人员皆有较大的参考价值。

作新同志在工作中能够以身作则，重视培植新秀。他带领的科研集体是我国从事水工结构力学研究工作的高水平单位之一，曾多次获得“科研工作先进集体”的称号。书中的一些内容也包含了该科研集体共同劳动的成果。

海 大 学 教 授 徐芝纶
中国科学院学部委员
1992 年 8 月

目 录

一、有限单元法解混凝土坝缝隙和基础软弱夹层问题	(1)
二、整体重力坝的应力分析	(17)
三、有限单元法在拱坝设计中的应用	(28)
四、拱坝的极限承载力分析	(44)
五、重力坝的抗震计算	(54)
六、刘家峡大坝的抗震设计	(69)
七、混凝土坝抗震设计中的若干问题	(83)
八、考虑梁和地基蠕变时基础梁的计算	(99)
九、基底剪力对基础梁反力和内力的影响	(109)
十、弹性基础板的变分解法	(120)
十一、水闸底板的内力分析	(134)
十二、弹性基础板的有限单元——链杆解法	(150)
十三、大型船闸底板分缝施工方案的研究	(159)
十四、结构与水体的动力相互作用问题	(171)
十五、水坝库水与地基的动力相互作用分析	(191)
十六、挡水坝动水压力的加权余量解法	(204)
十七、水库的库底条件和挡水结构的动水压力	(216)
十八、拱坝的动水压力和拱坝库水的相互作用分析	(228)
十九、考虑水体可压缩性时挡水墙的自由振动	(241)
二十、直接滤波法及其应用	(251)
二十一、一种简单的杆块过渡单元及其应用	(259)
二十二、有限棱柱法的改进	(268)
二十三、结构与岩土相互作用分析中的交界面单元	(278)
二十四、混凝土结构徐变分析的初应力法	(285)
二十五、解析与数值结合法在水工分析中的若干应用	(292)
二十六、大型船闸人字门的整体分析与原型实验	(306)

一、有限单元法解混凝土坝缝隙 和基础软弱夹层问题*

许多大体积混凝土坝，由于温控、施工等方面的原因，常常在坝内造成一些建筑缝。此外，在许多大坝的岩石基础中，还存在各种形式的断层和软弱夹层。沿着建筑缝、断层和软弱夹层的层面上，材料的结合强度比其他地方要低得多，这些将削弱坝体和基础的整体性，给大坝的强度和稳定性带来不利的影响。因此，研究有建筑缝和软弱夹层时的坝体强度和稳定性的问题，对于大坝的安全、经济和快速施工具有重要的意义。

目前，我国对水工结构的应力分析，已广泛采用有限单元法，但这个方法在水工结构裂隙问题和基础有软弱夹层时的应用，讨论得还差不多。本文将介绍我们用有限单元法研究坝体裂隙、纵缝和基础有软弱夹层时的一些成果。

(一) 夹 层 法

Goodman 等人^[1]曾利用节理单元 (joint element) 研究了缝宽为零时的裂缝问题。节理单元的特点是对裂隙和节理采用对称的劲度矩阵，可以节省计算机容量和运算时间。它的缺点是不能正确反映沿节理面发生滑移时，正应力与剪应力之间存在的一定的比例关系（摩擦定律），而且受压后单元之间要产生“嵌入”现象。

为了克服节理单元的缺点，Wang 等人^[3]假设岩石裂隙间正应力与剪应力的关系服从莫尔-库伦准则，并应用这个假设研究了地下圆形隧洞周围有辐射形裂隙时的应力分布。

* 原载《水利水电工程应用电子计算机资料选编》，1977年，水利电力出版社。在此之前，已用于福建安砂、浙江新安江与辽宁参窝等水电站大坝的纵缝与裂缝分析

但是，上述方法都只能用来解决缝隙宽度等于零或近似为零的特殊情况，而在水工实际中，在基础岩石中存在的断层的宽度可以是几厘米、几十厘米，或者更大些。对于这类问题，上述的方法都不能很好解决。本文介绍的夹层法，就是针对这类具有任意微小宽度的软弱夹层问题而提出的。

夹层法的主要内容如下：

设在结构中有宽度为 c (由零到任意微小宽度) 的夹层，它的弹性常数为 E_1 、 μ_1 ，抗拉强度为 σ_0 ，凝聚力为 τ_0 ，沿夹层层面的摩擦系数为 f ($f = \tan \varphi$ ， φ 为摩擦角)。

在夹层两侧的边界上，设置若干对结点，这些对应结点的连线与夹层长度方向相垂直 (图 1)。在夹层边界上与结点 i 相邻的两个结点 ($i-1$ 及 $i+1$) 之间的距离为 $2b$ 。假设在结点 i 两边长度为 b 的范围内均匀分布着法向正应力 σ_x 和切向剪应力 τ_x ，这些应力合成作用于结点 i 的夹层结点力 P_i^x 及 P_i^y (图 2)。显然，在结点 j 也作用着一对夹层结点力 P_j^x 及 P_j^y 。当夹层的宽度与坝体单元的尺寸相比很小时，可假设沿夹层宽度应力不变，因而结点 i 及 j 处的两个结点力大小相等、方向相反，而且 i 与 j 点的相对位移只与这两个结点力有关。

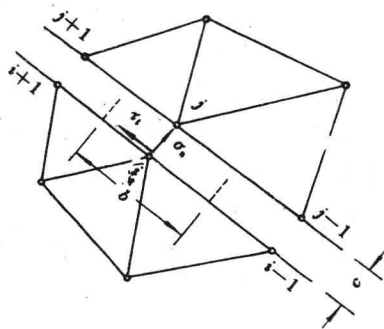


图 1

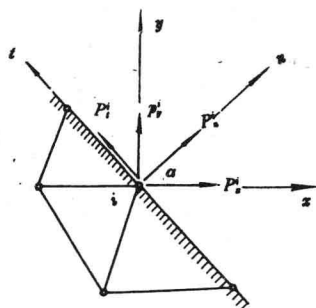


图 2

为了正确反映夹层的性质，我们考虑夹层工作的下列三种情况：

1. 连续情况

当夹层应力满足条件

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &< \sigma_0, \\ |\tau_t| &< \tau_0 - f\sigma_n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

时，夹层是连续的，既不分离也不产生相对滑移，夹层的应力与变形服从虎克定律。

在连续情况下，对于夹层边界上的每一结点， i 及 j ，可以写出四个方程：

$$P_n^j + P_n^i = 0, \quad (2)$$

$$P_t^j + P_t^i = 0, \quad (3)$$

$$u_n^j - u_n^i = \alpha_1 P_n^i + \beta_1 \varepsilon_0, \quad (4)$$

$$u_t^j - u_t^i = \gamma_1 P_t^i. \quad (5)$$

式(2)及(3)表示每一对夹层结点上作用的结点力之间的关系。式(4)及(5)是夹层结点间的位移连续条件，表示夹层两侧对应结点的相对位移等于夹层的变形，式中的 ε_0 是夹层的初应变（例如温度应变）， α_1 、 β_1 及 γ_1 是与夹层的力学性质及尺寸有关的参数。

因为已经假设，在夹层单元的长度 b 及厚度 t 的范围内，应力是均匀分布的，所以，根据夹层的工作条件（如平面应力或平面应变），不难推导出 α_1 、 β_1 及 γ_1 的值。

例如，设夹层沿结构厚度方向可以自由变形（平面应力状态），而沿夹层长度方向没有伸缩，根据虎克定律，沿夹层切线方向的应变为（图3）：

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_n}{E_1} + \varepsilon_0 = 0,$$

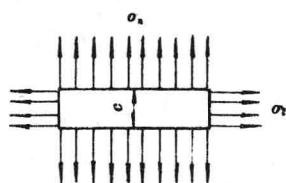


图 3

由此可以解得

$$\sigma_t = \mu_1 \sigma_s - \varepsilon_0 E_1.$$

沿夹层法线方向的应变为

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{\sigma_s}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_t}{E_1} + \varepsilon_0 \\ &= \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \sigma_s + (1 + \mu_1) \varepsilon_0,\end{aligned}$$

而夹层宽度的改变为

$$\Delta_s = \varepsilon_s c = \frac{c(1 - \mu_1^2)}{E_1} \sigma_s + c(1 + \mu_1) \varepsilon_0. \quad (6)$$

将夹层结点力 P_s^i 与夹层应力 σ_s 之间的关系

$$\sigma_s = \frac{P_s^i}{bt}$$

代入上式, 可得

$$\Delta_s = \frac{c(1 - \mu_1^2)}{E_1 bt} P_s^i + c(1 + \mu_1) \varepsilon_0. \quad (7)$$

将式(4)与(7)对比, 可见

$$\alpha_1 = \frac{c(1 - \mu_1^2)}{E_1 bt}, \quad \beta_1 = c(1 + \mu_1).$$

式(5)中的参数 γ_1 应等于剪切弹性模量乘以 bt/c 后的倒数、即

$$\gamma_1 = \frac{2(1 + \mu_1)c}{E_1 bt}.$$

对于夹层的其他工作情况, 各参数可以相似地推导出来。

现在来考察结点 i 的平衡。根据该结点的平衡方程, 可将该结点处的夹层结点力表示为

$$\{P^i\} = \begin{Bmatrix} P_x^i \\ P_y^i \end{Bmatrix} = (\sum [k] \{\delta\})_i - \{R_i\}. \quad (8)$$

式中, 记号 $(\quad)_i$ 表示只对夹层一边交于结点 i 的各单元求和, $\{R_i\}$ 是作用于结点 i 的荷载 (包括变温的等效荷载)。

同理, 作用于结点 j 的夹层结点力为

$$\{P^j\} = \left\{ \begin{matrix} P_i^j \\ P_j^j \end{matrix} \right\} = (\sum [k]\{\delta\})_j - \{R_j\}. \quad (9)$$

应用 (8) 及 (9) 两式, 可以把式 (2) 及 (3) 改写成

$$P_i^i + P_i^j = 0, \quad (10)$$

$$P_j^i + P_j^j = 0. \quad (11)$$

在图 1 所示的情况下, 上列两方程包含了夹层两边与结点 i 及 j 有关的各单元的结点位移, 共 20 个未知值。

再利用关系式

$$\left. \begin{aligned} u_n &= u \cos \alpha + v \sin \alpha, \\ u_t &= -u \sin \alpha + v \cos \alpha, \end{aligned} \right\}$$

以及

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P_x \cos \alpha + P_y \sin \alpha, \\ P_t &= -P_x \sin \alpha + P_y \cos \alpha, \end{aligned} \right\}$$

可将式 (4) 及 (5) 改写成

$$\begin{aligned} (u_j - u_i) \cos \alpha + (v_j - v_i) \sin \alpha \\ = \alpha_1 (P_x^i \cos \alpha + P_y^i \sin \alpha) + \beta_1 \varepsilon_0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} -(u_j - u_i) \sin \alpha + (v_j - v_i) \cos \alpha \\ = \gamma_1 (-P_x^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha). \end{aligned} \quad (13)$$

式 (10) ~ (13) 都是以结点位移为未知量的方程, 可以用来代替结点 i 及 j 的四个平衡方程, 以求解结构在夹层为连续情况下的结点位移。

求出结点位移以后, 可以利用式 (8) 求得夹层结点力 $\{P^i\}$, 并进而求得夹层单元的应力 σ_x 及 τ_{xt} :

$$\sigma_x = \frac{P_n}{bt}, \quad \tau_{xt} = \frac{P_t}{bt}. \quad (14)$$

可以看出, 当夹层宽度 $c=0$ 时, 各参数 α_1 、 β_1 、 γ_1 均等于零, 这就得到缝宽为零的裂隙情况。

2. 滑移情况

滑移条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &< \sigma_0, \\ |\tau_t| &\geq \tau_0 - f\sigma_n. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

当夹层应力满足条件时, 夹层两侧沿层面法线方向的位移为连续, 而沿切线方向产生相对滑移。这时, 式 (10) ~ (12) 仍然成立, 但式 (13) 失效, 应改为

$$P_i^i = \mp f P_i^i \quad (16)$$

或

$$-P_z^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha = \mp f(P_z^i \cos \alpha + P_y^i \sin \alpha). \quad (17)$$

在上式中, 当

($-P_z^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha$) > 0 时, 相当于正向滑移, 取负号;

($-P_z^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha$) < 0 时, 相当于负向滑移, 取正号。

在滑移时, 不论是正向滑移的情况或负向滑移的情况, 都仍然可以由 (14) 求得相应的夹层应力。

3. 分离情况

如果夹层内发生的拉应力达到或超过抗拉强度, 即

$$\sigma_n \geq \sigma_0 \quad (18)$$

则夹层发生开裂。这时, 夹层两侧结点处的夹层结点力等于零, 我们就得到分离情况下的四个方程

$$P_z^i = 0, \quad P_y^i = 0, \quad P_z^j = 0, \quad P_y^j = 0.$$

相应的夹层应力将由式 (14) 求得为零。

具体运算时, 各判别条件 (1)、(15)、(18) 以结点力表示较为方便。现在, 令

$$R = P_z^i \cos \alpha + P_y^i \sin \alpha - b t \sigma_0, \quad (20)$$

$$S = |-P_z^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha| - b t \tau_0 + f(P_z^i \cos \alpha + P_y^i \sin \alpha), \quad (21)$$

$$T = -P_z^i \sin \alpha + P_y^i \cos \alpha. \quad (22)$$

则各种情况下的判别条件如下:

(1) 连续情况

$$\left. \begin{aligned} R &< 0, \\ S &< 0; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

(2) 正向滑移情况，相当于式 (17) 中取负号，得

$$\left. \begin{aligned} R &< 0, \\ S &\geq 0, \\ T &\geq 0; \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

(3) 负向滑移情况，相当于式 (17) 中取正号，得

$$\left. \begin{aligned} R &< 0, \\ S &\geq 0, \\ T &< 0; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

(4) 分离情况

$$R \geq 0. \quad (26)$$

计算按照下面的步骤进行：

- (1) 假定为连续情况，计算结构及夹层的位移和应力；
- (2) 求夹层各对点处的 R 、 S 、 T 的值，判断它们各属于哪一种情况；
- (3) 按新的情况计算位移，重求 R 、 S 、 T 的值，重作判断；
- (4) 再按新的情况进行新的计算，直到不再出现新的情况为止；
- (5) 算出最终的位移及应力。

[算例]

图4示一混凝土重力坝，由于施工方面的原因，在坝内形成两条铅直裂缝。现在要求出坝体在正常水位、扬压力、自重及坝体均匀降温时的弹性应力以及裂缝滑移和开裂后的位移及应力。

计算时采用的基本数据如下：

混凝土：

弹性模量 $E = 1.56 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (考虑徐变)，

泊松比 $\mu = 0.167$ ，

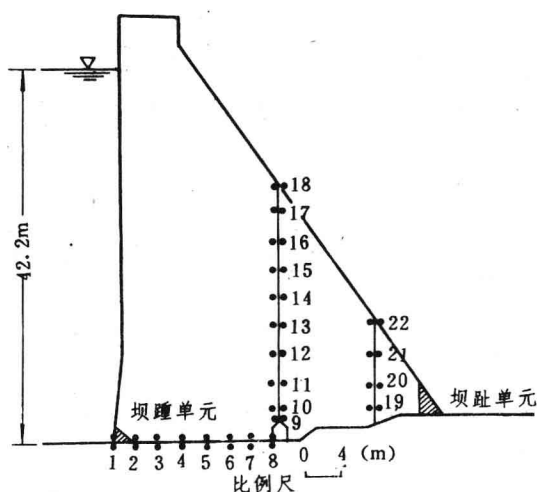


图4 夹层单元布置图

容重 $\gamma = 23.5 \text{ kN/m}^3$,
 线胀系数 $\alpha = 0.00001$,
 温度改变 $T = -22^\circ\text{C}$.
 基 岩:
 弹性模量 $E = 1.54 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (平面形变),
 泊松比 $\mu = 0.430$.
 铅直纵缝:
 缝 宽 $c = 0$,
 抗拉强度 $\sigma_0 = 0$,
 凝聚力 $\tau_0 = 0$,
 摩擦系数 $f = 0.65$.

为了了解坝体与基础交界面上的应力情况,在上游基础面上也设置了一排夹层结点,但不允许接触面上发生开裂或滑移。

计算中对坝体及基础均采用常应变三角形单元,坝体作为平面应力状态问题,基础作为平面形变问题,共划分309个单元,202

个结点，夹层单元的布置及编号见图1。

计算所得夹层单元的应力变化及工作情况见表1。计算发现，廊道顶上铅直长缝自下而上有七个点开裂；顶上三个点滑移；下游铅直短缝全部开裂。纵缝上各对结点的相对位移见图5。

表1 夹层单元应力情况总表

(单位: 0.1MPa)

单元编号	连续情况		最终结果			备 注
	σ_n	τ_l	工作情况	σ_n	τ_l	
1	32.7	-56.1	弹性	33.5	-53.2	上游水平缝
2	-5.5	-8.8	弹性	-4.2	-7.4	
3	-7.3	-8.0	弹性	-6.4	-5.9	
4	-6.1	-6.8	弹性	-6.4	-4.4	
5	-8.1	-4.5	弹性	-10.4	-1.1	
6	-6.4	-3.8	弹性	-10.6	-3.4	
7	-8.7	-2.3	弹性	-17.1	4.0	
8	-9.9	11.1	弹性	-19.3	26.9	
9	34.7	5.9	开裂	0	0	铅直长缝
10	12.7	2.4	开裂	0	0	
11	8.2	1.9	开裂	0	0	
12	3.2	1.4	开裂	0	0	
13	0.3	1.3	开裂	0	0	
14	-1.8	1.4	开裂	0	0	
15	-2.5	1.5	开裂	0	0	
16	-2.2	1.3	滑移	-0.7	0.5	
17	-1.5	1.2	滑移	-1.6	1.1	
18	-0.8	0.9	滑移	-1.2	0.8	
19	17.5	-2.3	开裂	0	0	铅直短缝
20	7.5	-0.1	开裂	0	0	
21	0.5	2.9	开裂	0	0	
22	-3.3	4.0	开裂	0	0	

应当指出，我们在计算中得到的坝踵夹层单元的拉应力为3.35MPa，剪应力为5.32MPa，实际是不可能产生的。我们的另一个计算结果表明^[9]。如果允许沿接触面发生开裂或滑移，坝踵单元的高拉应力及剪应力将消失，而该单元便接近处于各向均匀受压

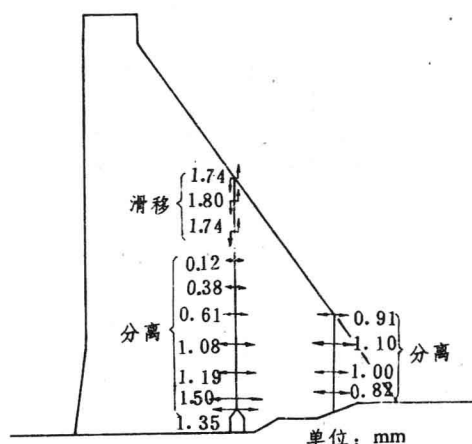


图5 纵缝相对位移图

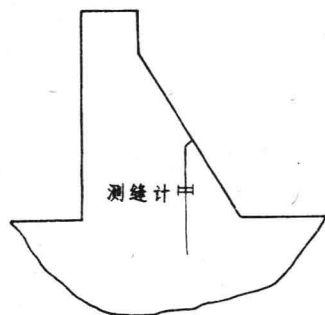


图6

状态,压应力的强度等于该处水压力及扬压力的平均值。

可以看出,考虑变温时坝体的应力状态,与不计变温时的应力状态相比,有很大的差异。例如,在坝趾单元内,自重与水压的共同作用将产生较大的铅直压应力,但是在考虑降温收缩以后,该单元的铅直正应力竟等于零。这是因为降温收缩所引起的局部铅直拉应力抵消了自重及水压所引起的铅直压应力。

由于下游短缝全部开裂,短缝以右的下游小块与大坝分离,这对于坝体的稳定是不利的。因此,对于偏向下流的铅直纵缝,不宜采用“通天缝”的形式,以免降温收缩后全部裂开。上述现象在已建成的混凝土坝中是有先例的。

图6是新安江大坝的#2坝段的剖面图,施工缝偏向下流。为了了解纵缝的变化,曾经设置一个测缝计。根据观测资料,该坝的纵缝在灌浆以后还继续张开,最大开度达1.5mm左右。

(二) 夹层法在建筑缝有键槽时的推广

为了加快施工和节省灌浆设备, 在一些混凝土坝中采用了纵缝不灌浆的施工技术。沿着坝体的建筑缝上设置了一些键槽, 以增加坝体的整体性。图7是通常采用的一种键槽形式。以 β 及 γ 表示键槽的短边及长边与建筑缝斜面所成的角度, α 表示斜面与 y 轴所成角度, 通常取 $\beta + \gamma \approx \pi/2$, 而且 $\beta > \varphi > \gamma$ (φ 是缝面混凝土的摩擦角)。

我们假设建筑缝是由许多微小的 (相对于坝体的尺寸而言)、均匀排列的键槽所构成, 在建筑缝上只能承受压力和不超摩擦力的剪力, 抗拉强度和凝聚力均为零。因为坝体单元的尺寸远大于键槽的尺寸, 所以夹层边

界上的任一对结点, 都代表若干个键槽的共同作用。

现在, 以 “a” 表示建筑缝的斜面, “b” 表示键槽的短边, “c” 表示键槽的长边。当建筑缝受力以后, 可以有下面四种不同的情况:

(1) a、b、c 三个面, 或其中两个面 (a、b 或 a、c) 或其中一个面 (b 或 c) 压紧而不产生相对滑移, 这时, 可能另外一个或两个面有滑移或分离的趋势, 但对整个键槽来说, 其位移仍是连续的。

(2) 键槽产生正向滑移。这时 b 面受压, 但有相对的滑移, 见图8 (a);

(3) 键槽产生负向滑移。这时, c 面受压, 但有相对的滑移, 见图8 (b);

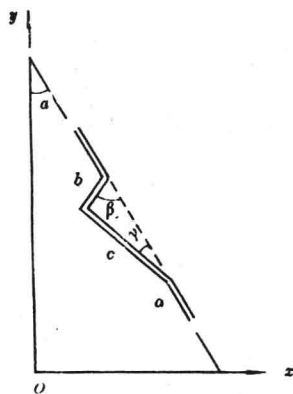


图 7

(4)键槽分离。应用与上节中相似的方法，可以建立夹层结点在每种不同工作情况下的四个方程。

1. 连续情况

与上节中为平缝建立的方程相似，但令缝宽为零，即 $c=0$ ，亦即 $a_1=\beta_1=\gamma_1=0$ ，从而得出

$$P_x^i + P_x^j = 0, \quad (27)$$

$$P_y^i + P_y^j = 0, \quad (28)$$

$$u_j - u_i = 0, \quad (29)$$

$$v_j - v_i = 0. \quad (30)$$

2. 正向滑移情况

上面列出的式 (27) 及 (28) 不变；但式 (29) 及 (30) 失效，需要根据建筑缝的位移及受力条件列出另外两个方程。

首先考察建筑缝的位移。因为建筑缝沿 b 面产生相对滑动，所以建筑缝两边的结点有相对位移 Δu 及 Δv (图9)，而它们之间有关系

$$\Delta u = \Delta v \operatorname{tg} (\beta - \alpha),$$

从而得

$$(u_j - u_i) \cos (\beta - \alpha) - (v_j - v_i) \sin (\beta - \alpha) = 0. \quad (31)$$

再来考察建筑缝的受力情况。当建筑缝沿 b 面产生滑移时，在 b 面上的法向力 P_n^b 及切向力 P_t^b 应满足如下的条件：

$$P_t^b = f P_n^b.$$

由图10可以看出， P_n^b 及 P_t^b 可用结点力分量 P_x 及 P_y 表示如下：

$$f P_t^b = - P_x \cos (\beta - \alpha) + P_y \sin (\beta - \alpha),$$

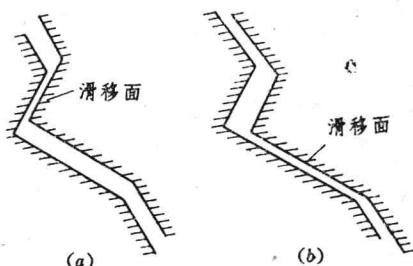


图 8