

水工建设中的 结构力学与岩土力学问题

黄文熙论文选集

水利电力出版社

**水工建设中的
结构力学与岩土力学问题**

黄文熙 论文选集

水利电力出版社

水工建设中的结构力学与岩土力学问题

黄文熙论文选集

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 12.75印张 336千字

1984年3月第一版 1984年3月北京第一次印刷

印数 0001—7220册 定价 2.10元

书号 15143·5314

内 容 提 要

本书是我国著名水工结构和岩土工程专家黄文熙教授数十年科研成果的精华。全书共选有论文16篇，内容涉及到轻型混凝土坝、土石坝管道、挡土墙等结构物与基础的设计计算、施工、科学试验等多方面的问题。书中所阐述的理论和介绍的方法，不仅具有独创性，而且也有相当大的实用价值。

为了便于进行国际学术交流，书末附有用英文编写的各篇论文内容提要。

本书可供水利、土建等方面的工程技术人员和科研人员使用，亦可供有关的高等院校师生参考。

序 言

本书收集了黄文熙教授近五十年来发表的部分论文共16篇，其内容主要涉及水工建设中的结构力学与岩土力学问题。这些论文在当时是具有独创性的，而对今天的国民经济建设仍有应用和参考的价值。

文熙同志治学严谨，工作积极，兢兢业业，多年如一日，迄今虽年逾古稀，仍奋进不懈，力争在学术上多取得一些成就，为国家多培养一些人才，为党为人民多做一些贡献。

这本论文选集是文熙同志在蒋彭年、汪闻韶、朱维新、蒋国澄、王正宏、陈愈炯、陈厚群、张文正等许多同志协助下编辑而成的，它的出版深得水利电力出版社的赞助。我和文熙同志共事多年，相知极深，相信这本书的出版不仅纪录了文熙同志在学术上的主要成就，对后人也一定是有教益的，故乐为之序。

华东水利学院院长、教授
南京水利科学研究所所长
中国科学院技术科学部委员

承 谨

1982年

作者简介



黄文熙

黄文熙教授系我国著名的水工结构和岩土工程专家，中国科学院学部委员，中国共产党党员。他原籍江苏省吴江县，1909年1月3日生于上海，1929年毕业于中央大学土木系，后公费留学美国密执安大学，于1935年获科学硕士学位，1937年获科学博士学位。

黄文熙同志在1937至1949年期间，曾任中央大学水利系教授、系主任，同时兼任中央水利实验处研究员、土工室主任等职。1949年新中国成立后，先后任南京大学教授、华东水利学院教授、清华大学教授、南京水利实验处处长、水利水电科学研究院副院长等职。他曾当选为第一届江苏省人民代表，第三届全国人大代表，第二、第三届全国政协委员。他是中国土力学及基础工程学会的理事长，中国水利学会的副理事长，中国水力发电工程学会的副理事长。他曾担任《中国科学》、《水利学报》、《清华大学学报》等刊物的编委，现任《岩土工程学报》编委会主任。

在从事科研与教学的同时，黄文熙同志还积极参加了水利建设的咨询工作。他参加过治淮、治黄工作，并对晋、冀、鲁、川、滇、粤等省以及东北各地的水闸和大坝的加固处理与科研工作，提出了许多积极的建议。

黄文熙同志一贯重视土工测试技术，他在国内推动了钻探取

样、原位测试以及室内试验等设备的设计、制造和使用。他在国内大学中首先讲授土力学这门学科，并建立了土工试验室。配合国内水利建设，他积极引进了许多先进土工技术，例如用砂井和预压方法加固软土地基，用反滤层和排水井防止渗透破坏，用补偿基础原理建筑筏基以代桩基，用就地浇筑混凝土防渗墙以阻塞砂砾地基的渗漏，用土工离心机进行模型试验，等等。

黄文熙同志从事教学和科研工作近50年，培养了许多水利方面的人才，他的许多学生和助手都已成为各水利部门的技术骨干，有的还成了知名的水利专家。他治学谨严，工作勤奋，专业知识面广，善于结合生产实践，抓住关键性的学术问题，进行创造性的研究。他的许多论文都具有独创性。他一贯重视室内材料与模型试验技术，重视原位测试和原型观测技术及其设备的研制与改进，尤其重视理论研究成果的实际验证。这本论文选集反映了他的湛深的学术造诣和严谨的治学方法。

目 录

序言

作者简介

圆拱形变方程及其在拱与拱坝分析中的应用 (1)

格栅法在拱坝、壳体和平板分析中的应用 (43)

温度应力当量荷载法在拱坝模型试验中的应用 (108)

横向地震时连拱坝结构作用的分析 (114)

框架力矩直接分配法 (133)

水工建筑物土壤地基的沉降量与地基中的应力

分布 (149)

挡土墙土压力的研究 (219)

水库水位降落对砂质坝壳稳定性影响的研究 (238)

砂基和砂坡的液化研究 (252)

关于水中填土坝设计、施工和试验方面的几个

问题 (257)

水中填黄土坝土料特性研究 (263)

水坠坝的固结理论及其应用 (288)

高土石坝科研工作中的几个问题 (315)

土的弹塑性应力-应变模型理论 (330)

硬化规律对土的弹塑性应力-应变模型影响的

研究 (361)

土的硬化规律和屈服函数 (376)

附录 英文内容提要 (386)

圆拱形变方程及其在拱 与拱坝分析中的应用*

前 言

本文提供了一组形变方程，用来表示圆拱段端点力系（端力矩、端推力和端剪力）与端点变位（径向变位、切向变位和角变）之间的关系。

应用该组方程来分析拱坝的水平拱圈，可将拱圈分成若干段，各段间相互刚性地连接于其结点。每个结点的变位可以用它的三个分量来表示：两个线变位（径向变位 w 、切向变位 u ）和一个角变 θ 。假定外荷集中作用于结点，然后将各结点取作自由体，就能建立三个方程式，用以表示拱段交结点的力系和结点荷载之间的平衡关系。这三个方程式是：（1）作用在结点上的切向力总和等于零；（2）力矩总和等于零；（3）径向力总和等于零。这三个形式方程式均可用各结点的变位 w 、 u 和 θ 线性地表示。每个结点有三个未知变位，而我们可以建立三个平衡方程式，所以总有足数的方程式来决定这些未知数。

这些线性方程组可以按沙得耳（Seidel）迭代法^[5]用计算器或电子计算机求解。

变位求得后，拱的应力可以用形变方程，或者较精确地用曲梁理论的微分方程计算。

本文提供的分析方法，适用于变厚度拱与变曲率半径拱，也同样适用于通常在拱坝中出现的厚拱或薄拱。而且还可用以分析封闭的环状结构，如管道、隧洞衬砌等。它也可用于动力分析。

* 此项研究工作开始于1935年，初刊于《水利学报》1962年第3期。英文稿载“Scientia Sinica”（《中国科学》）Vol.XI, No.3, March 1962.

本文曾经汪景琦、朱可善等同志协助校阅，居镶同志也帮助整理了译稿。文内形变方程和平衡方程中的拱常数 B 、 C 、 A_1 、 $\dots$ 、 A_{12} ， K_1 、 $\dots$ 、 K_3 等值，可用附录中的三角函数表帮助计算。参加制表工作的有水利水电科学研究院结构材料研究所居镶、王宝珍、许绍园、陈厚群、李桂兰、钱维栎、杨若琼及许静等同志。

一、形 变 方 程

设 t 为圆弧形拱段 ab (图 1) 的厚度， r 为其中和轴半径， 2α 表示其中心角。假定拱段的 b 端固定， a 端自由，一个顺时针方向的力矩 U ，一个向左的水平力 X ，和一个向下的垂直力 Y ，作用在拱段的弹性中心 G (即 ab 段的重心)。设 G 为坐标原点，使坐标轴的正方向分别与力 X ， Y 的正方向相同，则

$$\int_a^b x ds = 0, \int_a^b y ds = 0, \int_a^b xy ds = 0 \quad (1)$$

从图 1 知：

$$\left. \begin{aligned} \overline{GO} &= r \frac{\sin \alpha}{\alpha} \\ \delta_1 &= \overline{GD} = r \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right) \\ m_1 &= \overline{Ga} = \sqrt{\delta_1^2 + \overline{aD}^2} = r \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{r} \right)^2 + \sin^2 \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从图 2 得：

$$\left. \begin{aligned} M &= U + Y_x - X_y \\ N &= -Y \sin \varphi - X \cos \varphi \\ Q &= X \sin \varphi - Y \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中， M 、 N 和 Q 分别为任一截面 P 的弯矩、轴向力和径向剪力。

设 V 为拱圈 ab 的总弹性能，对薄拱来说：

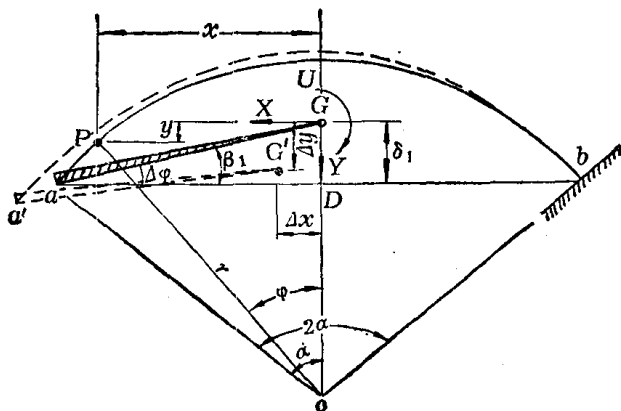


图 1

$$V = \int_a^b \frac{M^2}{2EI} ds + \int_a^b \frac{N^2}{2EA} ds \quad (4)$$

对于厚拱:

$$V = \int_a^b \frac{M^2}{2EI} ds + \int_a^b \frac{N^2}{2EA} ds + \int_a^b \frac{kQ}{2EA} ds \quad (5)$$

式中最后一项, 表示剪力影响, k 值对混凝土梁可以近似地取为3.0。

弹性中心 G 处的变位 Δx 和 Δy 及角变 $\Delta \varphi$, 可用卡氏 (Castiglino) 定理列出:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \frac{\partial V}{\partial U}, & \Delta x &= \frac{\partial V}{\partial X}, \\ \Delta y &= \frac{\partial V}{\partial Y} \end{aligned} \quad (6)$$

由此得 $\Delta \varphi = \frac{2\alpha r}{EI} U$,

$$\Delta x = B \frac{Xr^3}{EI}, \quad \Delta y = C \frac{Yr^3}{EI} \quad (7)$$

对于薄拱:

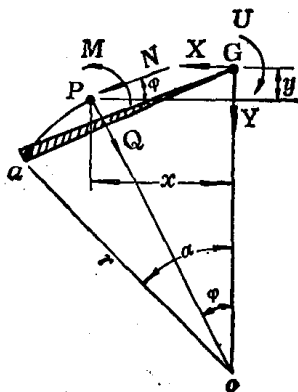


图 2

$$B = \left[\left(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2 \sin^2 \alpha}{\alpha} \right) + \frac{1}{12} \left(\frac{t}{r} \right)^2 (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) \right] \quad (8)$$

$$C = \left[(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + \frac{1}{12} \left(\frac{t}{r} \right)^2 (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) \right] \quad (9)$$

对于厚拱:

$$B = \left\{ \left(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2 \sin^2 \alpha}{\alpha} \right) + \frac{1}{12} \left(\frac{t}{r} \right)^2 [(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) + k(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)] \right\} \quad (10)$$

$$C = \left\{ (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + \frac{1}{12} \left(\frac{t}{r} \right)^2 [(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + k(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha)] \right\} \quad (11)$$

解出式(7)中的 U 、 X 和 Y , 就可以求出弹性中心 G 有变位 $\Delta\varphi$ 、 Δx 和 Δy 时在 G 点引起的弯矩、轴向力和剪力

$$U = \frac{EI}{2\alpha r} \Delta\varphi, \quad X = \frac{EI}{Br^3} \Delta x, \quad Y = \frac{EI}{Cr^3} \Delta y \quad (12)$$

当 G 有变位 $\Delta\varphi$ 、 Δx 和 Δy 时求取 a 端的变位 w_a 、 u_a 和 θ_a 。如图1, 刚臂由 Ga 移动至 $G'a'$ 。假设移动分二步, 先是由 Ga 平移到 $G'a''$, 如图3(a)所示, 然后由 $G'a''$ 转动到 $G'a'$, 如图3(b)所示。即得

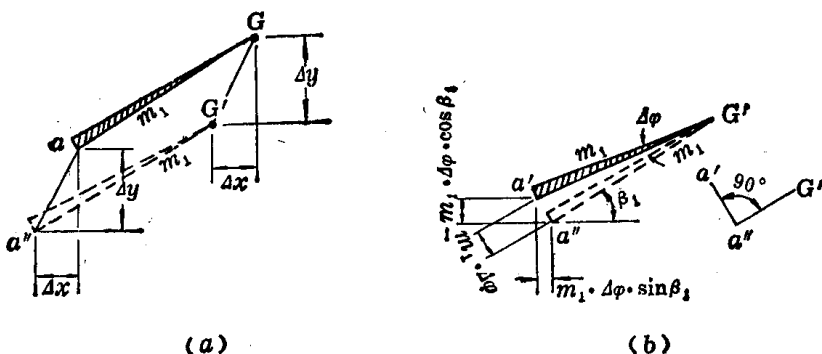


图 3

$$\left. \begin{aligned} a \text{ 端总的水平变位} &= x_a = \Delta x + m_1 \sin \beta_1 \cdot \Delta \varphi \\ a \text{ 端总的垂直变位} &= y_a = \Delta y - m_1 \cos \beta_1 \cdot \Delta \varphi \\ a \text{ 端总的角度} &= \theta_a = \Delta \varphi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将 ab 拱段 a 端的变位 x_a 和 y_a 分解成径向变位 w_a 和切向变位 u_a :

$$\left. \begin{aligned} w_a &= y_a \cos \alpha - x_a \sin \alpha \\ u_a &= -y_a \sin \alpha - x_a \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

从图 1 知:

$$\sin \beta_1 = \frac{\delta_1}{m_1}, \quad \cos \beta_1 = \frac{r \sin \alpha}{m_1} \quad (15)$$

将式 (13) 和 (15) 代入式 (14), 得

$$\left. \begin{aligned} \theta_a &= \Delta \varphi \\ w_a &= -\Delta x \sin \alpha + \Delta y \cos \alpha - \Delta \varphi \left[r \sin \alpha \left(\cos \alpha + \frac{\delta_1}{r} \right) \right] \\ u_a &= -\Delta x \cos \alpha - \Delta y \sin \alpha + \Delta \varphi \left[r \left(\sin^2 \alpha - \frac{\delta_1}{r} \cos \alpha \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

解上式得

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi &= \theta_a \\ \Delta x &= -w_a \sin \alpha - u_a \cos \alpha + \theta_a r \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \\ \Delta y &= w_a \cos \alpha - u_a \sin \alpha + \theta_a r \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$\Delta \varphi$ 、 Δx 和 Δy 可视为当 ab 拱段的 a 端产生变位 θ_a 、 w_a 和 u_a 时在 G 点所产生的变位。将式 (17) 代入式 (12), 即可得由于变位 w_a 、 u_a 和 θ_a 在 G 点引起的力系 U 、 X 和 Y 的值。

由于 a 端的变位 w_a 、 u_a 和 θ_a 而在 a 、 b 端所引起的力矩 M_0 、 M'_0 、轴向力 N_0 、 N'_0 和径向剪力 Q_0 、 Q'_0 , 可按下列步骤求取。

从图 5 知

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= U - X \delta_1 + Y r \sin \alpha \\ N_0 &= -X \cos \alpha - Y \sin \alpha \\ Q_0 &= -X \sin \alpha + Y \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

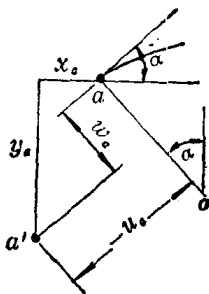


图 4

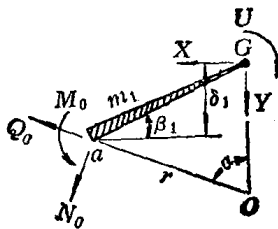


图 5

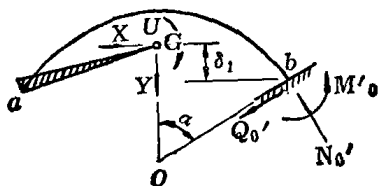


图 6

由图 6 知

$$\left. \begin{aligned} M'_0 &= U - X\delta_1 - Yr\sin\alpha \\ N'_0 &= -X\cos\alpha + Y\sin\alpha \\ Q'_0 &= -X\sin\alpha - Y\cos\alpha \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

这里

$$l = 2r\alpha \quad (22)$$

$$\delta_a = \theta_a l \quad (23)$$

$$e = \frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \quad (24)$$

B和C参见式(8)、(9)、(10)和(11)。

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 + 2\alpha \left(\frac{e^2}{B} + \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) = 1 + \frac{2\alpha e^2}{B} \\ &\quad + \frac{\alpha(1 - \cos 2\alpha)}{C} \\ A_2 &= -1 + 2\alpha \left(-\frac{e^2}{B} + \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) = -1 \\ &\quad - \frac{2\alpha e^2}{B} + \frac{\alpha(1 - \cos 2\alpha)}{C} \\ A_3 &= 4\alpha^2 \left(\frac{e \sin \alpha}{B} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{C} \right) \\ &= \frac{4\alpha^2 e \sin \alpha}{B} + \frac{2\alpha^2 \sin 2\alpha}{C} \\ A_4 &= 4\alpha^2 \left(-\frac{e \sin \alpha}{B} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{C} \right) \\ &= \frac{-4\alpha^2 e \sin \alpha}{B} + \frac{2\alpha^2 \sin 2\alpha}{C} \\ A_5 &= 4\alpha^2 \left(\frac{e \cos \alpha}{B} - \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) = \frac{4\alpha^2 e \cos \alpha}{B} \\ &\quad - \frac{2\alpha^2(1 - \cos 2\alpha)}{C} \\ A_6 &= 4\alpha^2 \left(\frac{e \cos \alpha}{B} + \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) = \frac{4\alpha^2 e \cos \alpha}{B} \\ &\quad + \frac{2\alpha^2(1 - \cos 2\alpha)}{C} \\ A_7 &= 8\alpha^3 \left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{B} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{C} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{4\alpha^3 \sin 2\alpha}{B} - \frac{4\alpha^3 \sin 2\alpha}{C} \\
A_8 &= 8\alpha^3 \left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{B} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{C} \right) \\
&= \frac{4\alpha^3 \sin 2\alpha}{B} + \frac{4\alpha^3 \sin 2\alpha}{C} \\
A_9 &= 8\alpha^3 \left(\frac{\cos^2 \alpha}{B} + \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) \\
&= \frac{4\alpha^3 (1 + \cos 2\alpha)}{B} + \frac{4\alpha^3 (1 - \cos 2\alpha)}{C} \\
A_{10} &= 8\alpha^3 \left(\frac{\cos^2 \alpha}{B} - \frac{\sin^2 \alpha}{C} \right) \\
&= \frac{4\alpha^3 (1 + \cos 2\alpha)}{B} - \frac{4\alpha^3 (1 - \cos 2\alpha)}{C} \\
A_{11} &= 8\alpha^3 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{B} + \frac{\cos^2 \alpha}{C} \right) \\
&= \frac{4\alpha^3 (1 - \cos 2\alpha)}{B} + \frac{4\alpha^3 (1 + \cos 2\alpha)}{C} \\
A_{12} &= 8\alpha^3 \left(-\frac{\sin^2 \alpha}{B} + \frac{\cos^2 \alpha}{C} \right) \\
&= \frac{-4\alpha^3 (1 - \cos 2\alpha)}{B} + \frac{4\alpha^3 (1 + \cos 2\alpha)}{C}
\end{aligned}$$

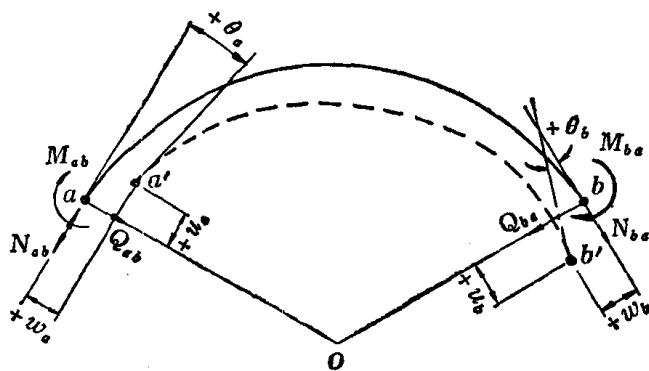


图 7

根据图 7 中所规定端点力系和端点变位的正负符号, 以 $-\delta_b$ 、 $-u_b$ 和 $-w_b$ 代替 δ_a 、 u_a 和 w_a 之后, 可从式 (21) 得到由于 b 端发生变位 δ_b ($\delta_b = \theta_b l$)、 u_b 和 w_b 在 a 端引起的力矩、轴向力和径向剪力。将此结果与式 (20) 相加, 即得由 a 端变位 w_a 、 u_a 及 δ_a ($\delta_a = \theta_a l$) 和 b 端变位 w_b 、 u_b 及 δ_b 所引起的 a 端弯矩 M_{ab} 、轴向力 N_{ab} 和径向剪力 Q_{ab} 的方程式。用相似的方法, 也可得到由于 a 端和 b 端的这些变位在 b 端引起的弯矩 M_{ba} 、轴向力 N_{ba} 和径向剪力 Q_{ba} 的方程式。这样得到的形变方程可写为

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= -\frac{EI}{l^2} (A_1 \delta_a + A_2 \delta_b + A_3 w_a - A_4 w_b \\ &\quad + A_5 u_a - A_6 u_b) \\ N_{ab} &= -\frac{EI}{l^3} (A_5 \delta_a - A_6 \delta_b + A_7 w_a + A_8 w_b \\ &\quad + A_9 u_a - A_{10} u_b) \\ Q_{ab} &= -\frac{EI}{l^3} (A_3 \delta_a + A_4 \delta_b + A_{11} w_a - A_{12} w_b \\ &\quad + A_7 u_a - A_8 u_b) \\ M_{ba} &= -\frac{EI}{l^2} (A_2 \delta_a + A_1 \delta_b + A_4 w_a - A_3 w_b \\ &\quad - A_6 u_a + A_5 u_b) \\ N_{ba} &= -\frac{EI}{l^3} (-A_6 \delta_a + A_5 \delta_b - A_8 w_a \\ &\quad - A_7 w_b - A_{10} u_a + A_9 u_b) \\ Q_{ba} &= -\frac{EI}{l^3} (-A_4 \delta_a - A_3 \delta_b - A_{12} w_a \\ &\quad + A_{11} w_b + A_8 u_a - A_7 u_b) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

二、自身变形的影响

拱圈内的弹性能量, 可以由于外荷载 (如水压力、混凝土自重和地震荷载) 而产生, 也可以由自身变形 (如温度变化、混凝