

7456

56.25908



工程抗震論文集

工程抗震论文集

胡正顶 蒋苑秋等 编著

煤炭工业出版社

内 容 简 介

本书收集了自海城、唐山地震以来研究工程抗震的部分论文,供今后在工程抗震的鉴定、设计和加固中应用和参考。全书共有八篇,从不同角度反映了煤炭系统在抗震工作中的部分优秀成果。

编辑本书的指导思想是,实用为主,兼顾理论阐述,以提高抗震队伍的素质。所以,它对工程设计、施工人员和教学人员都是一本有用的书。

责任编辑:田克运

工 程 抗 震 论 文 集

胡正顶 蒋蕊秋等 编著

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安龙门外和平里北街21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 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $5^{2/3}$ 插页1

字数139千字 印数1—2,220

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

ISBN 7-5020-0112-3/TD·107

书号2910

定价1.45元

前 言

今年7月28日，是唐山地震10周年纪念日。唐山人民在中国共产党的领导下，经过全国人民的大力支援，将唐山这个我国重要的能源基地，建设得更加雄伟、更加夺目了。

按照“科研必须面向生产，生产必须依靠科研”的正确方针，煤炭系统在重建唐山的过程中，为提高工程抗震的设计施工水平，坚持进行了系统的研究工作，并取得了许多成果。为反映这些成果，并使它在工程实践中发生效益，我们汇编了这本论文集。

在计划和汇编过程中，煤炭工业出版社始终给予了热情的支持，各位作者进行了有效的合作，使这本论文集得以问世，编者在此谨致衷心的感谢。

由于时间短促，论文集中只收入了研究成果的一部分，加之编者水平有限，如有差错，敬请读者及各位专家批评指正。

胡 正 顶

1986. 6

于河南平顶山

目 录

框架厂房在强震作用下的弹塑性分析.....	1
现浇钢筋混凝土框架抗震构造设计问题.....	60
钢筋混凝土框架厂房振型的经验公式及地震力 计算的某些问题.....	95
钢井架在地震作用下的分析及计算.....	103
胶带输送机走廊的抗震加固设计.....	113
砖结构建筑物的震害与加固.....	126
树脂锚杆在抗震加固中的试验研究.....	139
地基与震害.....	148

框架厂房在强震作用下的弹塑性分析

煤炭工业部
选煤设计研究院

胡正顶

【提要】作者通过唐山地震的震害调查，对框架厂房在强震作用下的反应进行了弹塑性分析，验证了现行弹塑性分析方法的合理程度。分析前，首先对该方法作了一般性的介绍。为了应用方便，文中还列举了国内现有的层间位移计算方法。

一、一般理论及公式

在强烈地震作用下结构物的弹塑性时程分析，在美国、日本等国家进行的较早，我国对之进行较多的研究还是近些年来事情。由于考虑了材料的弹塑性性质并直接输入地震波，计算结果比较符合震害实际，所以它是当前比较理想的方法，得到了工程界的普遍重视。

1. 材料的弹塑性性质——恢复力模型

实验表明：许多材料在弹性阶段之后，存在明显的塑性发展阶段。构件超过弹性阶段后，刚度降低，特别是在反复增减荷载时，刚度变化呈现出非常复杂的情况。钢筋混凝土构件试验结果如图 1 所示。

这是一种滞回曲线(变形落后于应力)，其特点是前后循环的轨迹不重合。试验曲线简化成分段折线后，其形状如图 2 所示。

图中数字反映加减荷载的次序。由于钢筋混凝土的弹塑性性质，故后一循环并不与前一循环重合，而是存在残余变形和刚度退化现象。如果作这些曲线的公切线(包络线)，则可得到所谓“骨架曲

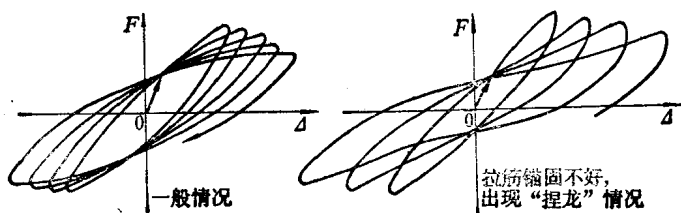


图 1

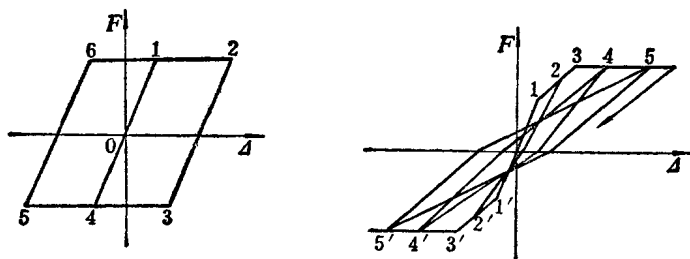


图 2

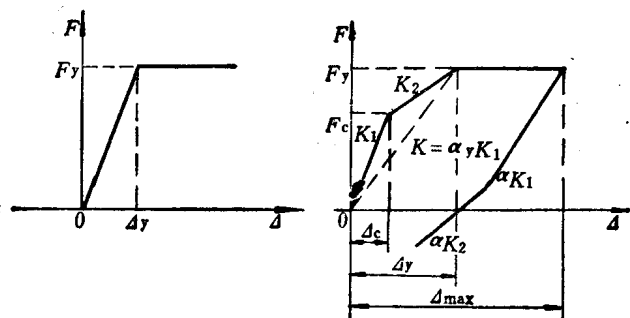


图 3

线”，它表示在循环荷载作用下构件刚度变化的情况，如图3所示。

前者为二折线模型，或称“理想弹塑性恢复力模型”。它或

者为弹性状态, 或者为屈服状态。后者为三折线恢复力模型, 它除了开始的弹性状态及最后的屈服状态之外, 中间还有一个塑性发展过程 ($F_c \sim F_y$ 阶段), 也可说是刚度的退化。所谓弹塑性分析就是将这种模型作为构件恢复力模型以代替振动微分方程中的恢复力特性而进行的分析 (在强震作用下直接输入地震波, 则得到弹塑性时程分析)。

2. 构件的弹塑性抗力、变形及刚度——经验公式

上述恢复力模型中的 K 、 F_c 、 F_y 如何确定呢? 许多国家根据自己的试验结果提出了许多经验公式, 兹对一些结果简述如下, 供应用时参考。符号均按我国规范和习惯统一表示 (参见图3)。(11)(2)(3)

$$K_1 = F_c / \Delta_c, \quad K_2 = (F_y - F_c) / (\Delta_y - \Delta_c)$$

$$K = \alpha_y K_1, \quad \alpha = 2\Delta_y / (\Delta_{\max} - \Delta_{\min})$$

式中 α_y ——屈服点割线刚度降低率, 见后,

$\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$ ——曾经达到的最大、最小位变。

(1) 梁——弯曲破坏, 矩形截面 (日本公式)

$$\left. \begin{aligned} M_c &= (4.2 + 3.7\mu)bh^2 \\ M_y &= 0.8A_g R_g h \\ \alpha_y &= \left(0.043 + 1.64n\mu + 0.043 \cdot \frac{a}{h} \right) \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 柱——弯曲破坏, 矩形截面 (日本公式)

$$\left. \begin{aligned} M_c &= (4.2 + 3.7\mu)bh^2 + Nh/6 \\ M_y &= 0.8R_g A_g h + 0.5(1 - \eta_0)Nh \\ \alpha_y &= \left(0.043 + 1.64n\mu + 0.043 \cdot \frac{a}{h} + \right. \\ &\quad \left. + 0.325\eta_0 \right) \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\mu = A_g / bh_0$;

$n = E_g / E_n$;

N ——柱轴向力；

$a/h = M/Qh$ ——剪跨比；

$\eta_0 = N/bhR$ ；

R ——混凝土标号。

(3) 短柱 ($a/h < 2$) ——剪切破坏，矩形截面

$$\left. \begin{aligned} F_c &= 0.265bh\sqrt{R} + \frac{1.8\sqrt{R}bh^2/6}{l_0/2 - h/2} \left(\begin{array}{l} \text{龟田登与} \\ \text{三郎公式} \end{array} \right) \\ F_y &= \left[\frac{g}{h} A_g R_g h + 0.5(Nh) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(1 - \frac{N}{bhR} \right) \right] \frac{2}{h_0} \left(\begin{array}{l} \text{荒川卓} \\ \text{公 式} \end{array} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 l_0 ——短柱净高 (cm)；

g ——主筋间距 (cm)。

(4) 柱——($\eta_0 \leq 0.4$, $a/h \geq 2$, 我国建筑科学研究所公式)

$$\left. \begin{aligned} M_c &= 1.5R_l W_0 + Nh/6 \\ M_y &= 0.8A_g R_g h + 0.5 \left(1 - \frac{N}{bhR} \right) Nh \\ \alpha &= \frac{M_y/M_c - 1}{M_y/M_c - \alpha_y} \alpha_y \\ \alpha_y &= 0.035(1 + a/h) + 0.27\eta_0 + 1.65n\mu \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $\eta_0 = N/0.83bhR$ ；

W_0 ——构件换算截面弹塑性抵抗矩。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= (M_{c上} + M_{c下})/H \\ F_y &= (M_{y上} + M_{y下})/H \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

开裂至屈服间的刚度折减系数为

$$\alpha = \frac{F_y/F_c - 1}{F_y/F_c - \alpha_y} \alpha_y \quad (6)$$

式中 $\alpha_y = 0.035(1 + a/h) + 0.27\eta_0 + 1.65n\mu$

(5) 柱——矩形截面，对称配筋（南京工学院及大连工学院公式）

$$\left. \begin{aligned} M_c &= (x_1 + \sqrt{x_1^2 - 4x_2}) / 2 \quad (2 \geq \gamma \geq 1) \\ x_1 &= R_1 \gamma_0 W_0 (73 + 4.4/h) + 2N\gamma_0 \\ x_2 &= (73R_1 W_0 \gamma_0 + N r_0) r_0 N \\ \gamma &= [73 + 4.4/h(1 - r_0 N/M_c)] \gamma_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

如果 $\gamma > 2$ ，则

$$M_c = (2R_1 + N/A_0)W_0 \quad (8)$$

如果 $\gamma < 1$ ，则

$$\left. \begin{aligned} M_c &= (R_1 + N/A_0)W_0 \\ M_y &= -N^2/2R_w b + Nh/2 + R_g A_g (h_0 - a_g') \\ &\quad (x = N/R_w b \leq 0.55h_0 \text{ 时}) \\ M_y &= -N(h/2 - a_g) + 0.5R_a b h_0^2 + \\ &\quad + A_g R_g (h_0 - a_g') \\ &\quad (x > 0.55h_0 \text{ 时}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $r_0 = W_0/A_0$;

A_0 ——折算截面积;

γ_0 ——按规范 (TJ10-74) 附录三选取。

(6) 梁——(南工及大工公式)

$$M_c = (73 + 4.4/h) \gamma_0 R_1 W_0 \quad (10)$$

式中 $M_{y,x}$ ——见〔4〕，此处从略。

(7) 柱——工字形截面（南工及大工公式）

$$(EI)_c = E_g A_g h_0^2 / \left[\phi (1.15 - 0.3h_0 N/M_c) + \frac{0.2 + 6n\mu}{1 + 2\gamma_1'} \right] \quad (11)$$

$$\phi = 1.2[1 - 0.235(1 + 2r_1 + 0.4r_1')bh^2 R_f / (M_c - 0.3Nh_0)]$$

$$(0.4 \leq \phi \leq 1)$$

$$r_1 = (b_f - b)h_f/bh$$

$$r_1' = (b_f' - b)h_f'/bh$$

式中 b_i' 、 h_i' 、 b_i 、 h_i ——上、下翼缘的宽度和厚度。

当一端出现裂缝时，取弹性时的 $(EI)_e$ 与 $(\overline{EI})_e$ 之平均值。

其中

$(\overline{EI})_e$ 为两端 $(EI)_e$ 的平均值；

$(EI)_e = 0.9(EI)_0$ ；

式中 $(EI)_0$ ——截面折算弯曲刚度。

$(EI)_y$ 的表达式可通过将上述 (11) 式中的 M_e 改成 M_y 而得到。

(8) 梁——矩形截面 (南京工学院和大连工学院公式)

梁的 $(EI)_e$ 公式通过在 (11) 式中令 $N = 0$ 即可得到。由于梁上、下两侧配筋不同，所以两端的 $(EI)_e$ 应分别计算，取其平均值 $(\overline{EI})_e$ 。当一端出现裂缝时，取弹性时的 $(EI)_e$ 和 $(\overline{EI})_e$ 的平均值，其中

$$(EI)_e = 0.85(EI)_0$$

$(EI)_y$ 的表达式可通过将上述南京工学院及大连工学院关于矩形截面梁公式中的 M_e 改成 M_y 而得到。

(9) 柱的屈服位移角 (日本公式)

$$\theta_y = M_y / \alpha_y K, \quad K = 6E_h J_0 / l_0 \quad (12)$$

式中 l_0 ——柱净高；

J_0 ——换算截面惯性矩；

E_h ——混凝土弹性模量；

α_y ——屈服点割线刚度降低率，当 $a/h = 2 \sim 5$ 时用 (2) 式计算；当 $a/h = 1 \sim 2$ 时用下式计算。

$$\alpha_y = (-0.0836 + 0.159a/h + 0.169\eta_0) \left(\frac{h_0}{h} \right)^2$$

其中 $\alpha = l_0/2$ 。

(10) 柱的极限位移角 (日本公式)

$$\theta_l = \frac{\varepsilon_l}{\eta_0} (1 - h/2a) \quad (13)$$

式中 $\varepsilon_l = (3 + 20b/a + 5d/S + 0.03K_1\mu_1 R_g^K) \times 10^{-8}$ ；

S ——箍筋间距；

d ——柱纵向受压筋直径；

μ_t ——柱核心范围内箍筋体积率；

K_l ——箍筋形式影响系数。对于矩形及其组合筋 $K_l = 1$ ；
对于 S 形（螺旋箍）和 KS 形（螺旋加矩形箍） $K_l = 2$ ；

R_g^k ——箍筋抗拉强度。

3. 几种强震曲线

这里介绍 4 种常用的强震记录曲线。

(1) El-Centro(NS)波

这是一条很出名的强震曲线，如图 4 所示。最大加速度达到 341.7Gal ，主要周期为 0.53 s ，它接近于 II~III 类场地（相当于 2.5 类。将场地土分成 3 类，下同）。

(2) 天津波

这是 1976 年唐山地震中于 11 月份在天津记录的，如图 5 所示，它适用于软土地基（比 III 类场地更软），最大峰值为 135Gal ，主要周期为 0.92 s ，对于周期较长的建筑物，它能产生很强的振动。

(3) T_{aft}波

接近于 II 类场地，最大峰值为 175.9Gal ，主要周期为 0.42 s ，如图 6 所示。

(4) 迁安波

接近于 I 类场地，如图 7 所示。

4. 基本微分方程及解法

(1) 基本微分方程

多质点体系在地震力作用下的微分方程为（图 8）

$$m_j \ddot{X}_j + \sum_{K=1}^N C_{jK} \dot{X}_K + \sum_{K=1}^N K_{jK} X_K = -m_j \ddot{u}_0 \quad (14)$$

$$(j=1, 2, \dots, N)$$

式中 m_j ——集中质量；

C_{jK} ——阻尼比；

K_{jK} ——刚度系数。

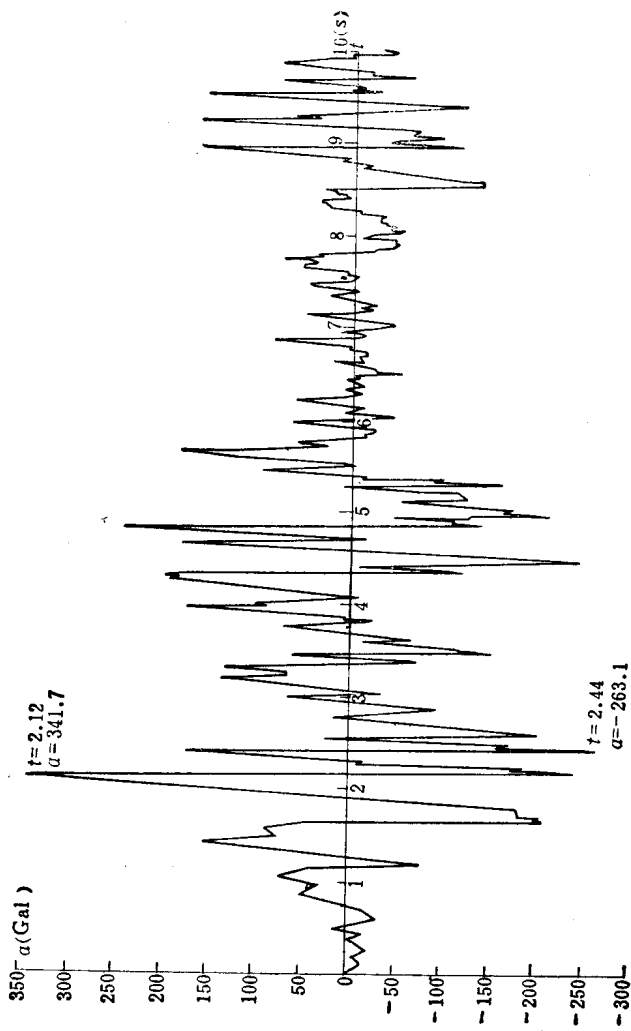


图 4 El-Centro 波 (NS)

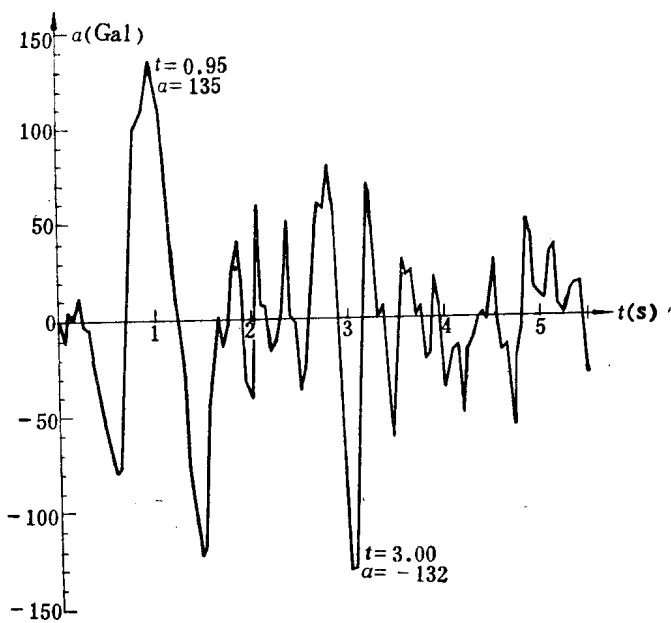
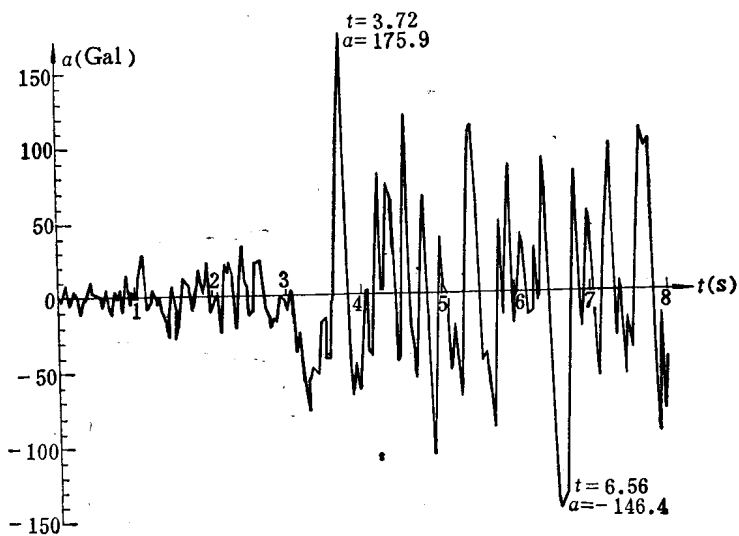


图 5 天津波

图 6 T_{aft} 波

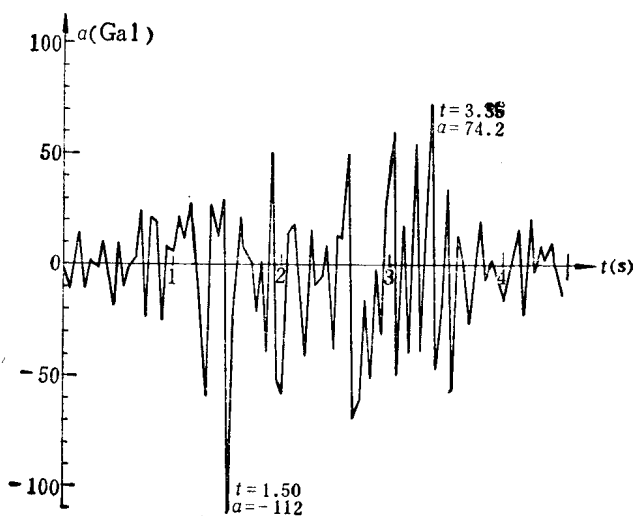


图 7 迁安波



图 8

上式表示成矩阵形式时为

$$[m]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]X = -[m]\{\ddot{u}_0\} \quad (15)$$

式中

$$\begin{aligned}
[m] &= \begin{pmatrix} m_1 & & 0 \\ & m_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & m_N \end{pmatrix}, & \{X\} &= \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{Bmatrix}, \\
[C] &= \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2N} \\ & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{N1} & C_{N2} & \cdots & C_{NN} \end{pmatrix}, & \{\dot{X}\} &= \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_N \end{Bmatrix}, \\
[K] &= \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ & \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \cdots & K_{NN} \end{pmatrix}, & \{\ddot{X}\} &= \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \vdots \\ \ddot{X}_N \end{Bmatrix}.
\end{aligned}$$

阻尼采用所谓瑞雷阻尼，瑞雷阻尼矩阵为

$$[C] = \alpha[m] + \beta[K]$$

式中 α 、 β ——阻尼系数。

这个微分方程的左端在形式上与静力情形无异，但 $[C]$ 与 $[K]$ 则因时间的不同而不同。等号右端为地震作用力。它是一个非常复杂的微分方程组，需要应用电子计算机进行计算。

(2) 解法^{[3][2]}

求解方法很多，此处介绍两个主要方法。

〔尤格-库塔方法〕：

将微分方程化成两个一阶的方程组

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= Y \\ \dot{Y} &= -(\ddot{u}_0) + [A]\{Y\} + [B]\{X\} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 $[A] = [m]^{-1}[C]$;

$[B] = [m]^{-1}[K]$ 。

对此一阶方程组求解，得到

$$\left. \begin{aligned} \{X\}_{i+1} &= \{X\}_i + \frac{1}{6}(\{K_1\} + 2\{K_2\} + 2\{K_3\} + \\ &\quad + \{K_4\}) \\ \{Y\}_{i+1} &= \{\dot{X}\}_{i+1} = \{Y\}_i + \frac{1}{6}(\{L_4\} + 2\{L_3\} + \\ &\quad + 2\{L_2\} + \{L_1\}) \\ \{\dot{Y}\}_{i+1} &= \{\ddot{X}\}_{i+1} = -(\{\ddot{u}_0\}_{i+1} + [A]_{i+1}\{Y\}_{i+1} + \\ &\quad + [B]_{i+1}\{X\}_{i+1}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 $\{K_1\} = \{Y\}_i \Delta t$;

$$\{L_1\} = -(\{\ddot{u}_0\}_i + \{A\}_{i+1}\{Y\}_i + [B]_{i+1}\{X\}_i) \Delta t;$$

$$\{K_2\} = \left(\{Y\}_i + \frac{1}{2}\{L_1\} \right) \Delta t;$$

$$\begin{aligned} \{L_2\} &= -\left(\{\ddot{u}_0\}_{i+\frac{1}{2}} + [A]_{i+1}\{K_2\}/\Delta t + [B]_{i+1}\{X\}_i + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}[B]_{i+1}\{K_1\} \right) \Delta t; \end{aligned}$$

$$\{K_3\} = \left(\{Y\}_i + \frac{1}{2}\{L_2\} \right) \Delta t;$$

$$\begin{aligned} \{L_3\} &= -\left(\{\ddot{u}_0\}_{i+\frac{1}{2}} + [A]_{i+1}\{K_3\}/\Delta t + [B]_{i+1}\{X\}_i + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}[B]_{i+1}\{K_2\} \right) \Delta t; \end{aligned}$$

$$\{K_4\} = (\{Y\}_i + \{L_3\}) \Delta t;$$

$$\begin{aligned} \{L_4\} &= -(\{\ddot{u}_0\}_{i+1} + [A]_{i+1}\{K_4\}/\Delta t + [B]_{i+1}\{X\}_i \\ &\quad + [B]_{i+1}\{K_3\}) \Delta t. \end{aligned}$$

这是一个精度较高的方法，但计算工作量较大。

[中点加速度步步积分法]^[2]：

将地震作用时间分成许多小段 Δt ，对每个小段求解一次方程。将 $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ 时刻计算得到的 $\{X\}_i$ 、 $\{\dot{X}\}_i$ 、 $\{\ddot{X}\}_i$ 作为时刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ 的初值，依次类推，直至结束。