DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.2002.04.001
广西科学 Guangxi Sciences 2002, 9 (4): 241- 245

结构本构关系*

Constitutive Relations of Structures

秦 荣

Qin Rong

(广西大学土木建筑工程学院 南宁市西乡塘路 530004)

(College of Civ. Engi. and Architecture, Guangxi Univ., Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要 创立下列几个新的本构关系: 弹塑性应变理论、热弹塑性应变理论、弹粘塑性应变理论、热弹粘塑性应变理论。这些本构关系避开了屈服曲面、加载曲面、强化准则及流动法则,避免了经典本构关系带来的巨大困难及缺陷,突破了传统的经典本构关系。

关键词 结构 弹塑性 弹粘塑性 热弹塑性 热弹粘塑性 本构关系

中图法分类号 O344

Abstract New constitutive relations including theory of elasto-plastic strain, theory of thermal elasto-plastic strain, theory of elasto-viscoplastic strain, theory of thermal elasto-viscoplastic strain are presented. These constitutive relations avoid the yield surface, loading surface and flow rule, and break through traditional constitutive relations.

Key words structures, elasto-plasticity, elasto-vicoplasticity, thermal elasto-plasticity, thermal elasto-vicoplasticity, constitutive relations

结构非线性包括几何非线性、材料非线性及双重非线性。结构非线性分析是结构设计中的一个非常重要问题,它与结构工程的经济及安全有密切关系。特别对大跨度桥梁结构、高层与超高层建筑结构、大跨度大空间建筑结构及高拱坝的设计,必须进行双重非线性分析才能保证它们的经济合理及安全可靠,否则,不仅会造成浪费,而且还会带来灾难。因此,结构非线性分析已成为结构设计及施工不可缺少的一个重要内容。

目前,国内外对结构非线性分析几乎都采用几何非线性理论、流动法则理论及有限元法建立的方法。流动法则理论是一个传统的经典本构关系,依赖于流动法则,而流动法则又依赖于屈服曲面、强化准则及加载曲面。在复杂应力状态中,屈服曲面及加载曲面是否存在,现在还没有实验证实,只得理想化,同时流动法则会导致复杂的非线性应力应变关系。因此,传统的经典本构关系,不仅计算非常复杂,而且也难保逼真度,为结构非线性分析带来了巨大困难及缺陷。

2002-04-28收稿。

* 国家自然科学基金(19872020)及广西配套项目(桂科配 9912028)资助项目。

针对上述存在的问题,作者创立了下列新的本构关系: (Ⅰ)弹塑性应变理论; (Ⅱ)热弹塑性应变理论; (Ⅲ)弹粘塑性应变理论; (Ⅳ)热弹粘塑性应变理论。这些本构关系避开了屈服曲面、加载曲面、强化准则及流动法则,避免了经典本构关系带来的巨大困难及缺陷,突破了传统的经典本构关系。本文简介新的本构关系。

1 弹塑性应变理论

1.1 单向应力状态

图 1是一个单向拉伸状态的应力应变曲线,其中 A点为材料的屈服极限。材料在拉伸作用下应力应变关系沿曲线 OAB 到达 B 点后,如果卸载应力应变关系沿直线 BD下降,且 $BD // OA$。由此可知,当应力 σ超过屈服极限应力 σ_s时,材料的总应变为

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p, \tag{1}$$

式中 ε^e及 ε^p分别为弹性应变及塑性应变,而应力可写成下列形式:

$$\sigma = \sigma_s + H'\varepsilon^p, \qquad \sigma \geqslant \sigma_s, \tag{2}$$

式中 H' 为材料的强化系数,即

$$H' = d\sigma / d\varepsilon^p, \tag{3}$$

当重新从 D 点开始加载时，应力应变关系沿曲线 DBC 变化。不论加载曲线沿 $OABC$ 还是沿 DBC，在 B 点的应力都是 σ，因此可以按路径 DB 来确定 B 点的应力状态。因为在 DB 段中的变形处于弹性状态，因此 $\sigma = E\varepsilon^e$。故由式(1)可得：

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \sigma/E, \tag{4}$$

将(2)式代入(4)式可得：

$$\varepsilon^p = \frac{k}{1+kE}(E\varepsilon - \sigma_s), \tag{5}$$

式中 $k = 1/H'$，$\sigma_s = E\varepsilon_s$， (6)

其中 ε_s 为屈服极限应变。由上述可得：

$$\varepsilon^p = \frac{kE}{1+kE}(\varepsilon - \varepsilon_s), \tag{7}$$

这是塑性应变与总应变的新关系(图 2)。如果采用增量形式，则由上式可得：

$$d\varepsilon^p = \frac{kE}{1+kE}(d\varepsilon + d\varepsilon_s), \tag{8}$$

式中 $d\varepsilon$、$d\varepsilon^p$ 及 $d\varepsilon_s$ 分别为总应变增量、塑性应变增量及屈服应变增量，其中 $d\varepsilon_s$ 可能为 0，也可能不为 0，根据具体情况确定。

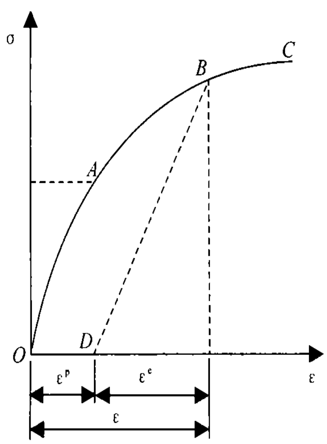

图 1 应力应变关系

Fig. 1 Stress-strain relation

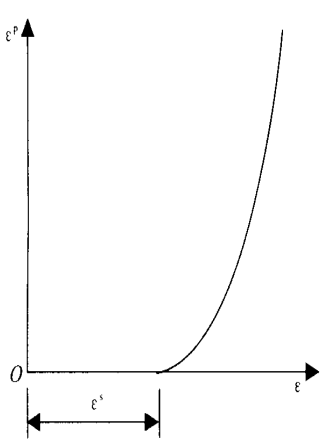

图 2 $\varepsilon^p - \varepsilon$ 关系

Fig. 2 $\varepsilon^p - \varepsilon$ relation

1.2 简单加载状态

如果设 1、2 及 3 为空间应力问题的主应变方向，则可以证明，在简单加载情况下，主方向的塑性应变分量为

$$\varepsilon_i^p = \frac{k_i E_i}{1+k_i E_i}(\varepsilon_i - \varepsilon_i^s), i = 1, 2, 3, \tag{10}$$

式中 E_i 为 i 方向的弹性模量，ε_i^s 为 i 方向的屈服极限应变，$\varepsilon_i = \varepsilon_i^e + \varepsilon_i^p$，$k_i = 1/H_i'$，其中 H_i' 为 i 方向的强化系数，即 $H_i' = d\sigma_i / d\varepsilon_i^p$。

任意方向的塑性应变分量可以通过坐标变换获得：

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^p &= l_1^2\varepsilon_1^p + m_1^2\varepsilon_2^p + n_1^2\varepsilon_3^p,\\
\varepsilon_y^p &= l_2^2\varepsilon_1^p + m_2^2\varepsilon_2^p + n_2^2\varepsilon_3^p,\\
\varepsilon_z^p &= l_3^2\varepsilon_1^p + m_3^2\varepsilon_2^p + n_3^2\varepsilon_3^p,\\
\gamma_{xy}^p &= 2l_1l_2\varepsilon_1^p + 2m_1m_2\varepsilon_2^p + 2n_1n_2\varepsilon_3^p,\\
\gamma_{yz}^p &= 2l_2l_3\varepsilon_1^p + 2m_2m_3\varepsilon_2^p + 2n_2n_3\varepsilon_3^p,\\
\gamma_{zx}^p &= 2l_3l_1\varepsilon_1^p + 2m_3m_1\varepsilon_2^p + 2n_3n_1\varepsilon_3^p,
\end{aligned} \tag{11}$$

式中 l_i、m_i 及 n_i 分别为 x_i 与主应力方向 1、2 及 3 之间的夹角余弦，$x_i = x, y, z$。

如果固体为各向同性体，则将式(10)代入式(11)可得：

$$\varepsilon^p = \frac{kE}{1+kE}(\varepsilon - \varepsilon^s), \tag{12}$$

式中

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T,$$

$$\varepsilon^p = [\varepsilon_x^p \quad \varepsilon_y^p \quad \varepsilon_z^p \quad \gamma_{xy}^p \quad \gamma_{yz}^p \quad \gamma_{zx}^p]^T,$$

$$\varepsilon^s = [\varepsilon_x^s \quad \varepsilon_y^s \quad \varepsilon_z^s \quad \gamma_{xy}^s \quad \gamma_{yz}^s \quad \gamma_{zx}^s]^T,$$

其中

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^s &= l_1^2\varepsilon_1^s + m_1^2\varepsilon_2^s + n_1^2\varepsilon_3^s,\\
\varepsilon_y^s &= l_2^2\varepsilon_1^s + m_2^2\varepsilon_2^s + n_2^2\varepsilon_3^s,\\
\varepsilon_z^s &= l_3^2\varepsilon_1^s + m_3^2\varepsilon_2^s + n_3^2\varepsilon_3^s,\\
\gamma_{xy}^s &= 2l_1l_2\varepsilon_1^s + 2m_1m_2\varepsilon_2^s + 2n_1n_2\varepsilon_3^s,\\
\gamma_{yz}^s &= 2l_2l_3\varepsilon_1^s + 2m_2m_3\varepsilon_2^s + 2n_2n_3\varepsilon_3^s,\\
\gamma_{zx}^s &= 2l_3l_1\varepsilon_1^s + 2m_3m_1\varepsilon_2^s + 2n_3n_1\varepsilon_3^s,
\end{aligned} \tag{13}$$

如果固体为各向异性体，则

$$\varepsilon^p = [kB](\varepsilon - \varepsilon^s), \tag{14}$$

式中 $[kB] = [A_1][kE][A_2]$， (15)

$[kE] = \mathrm{diag}(k_1E_1, k_2E_2, k_3E_3, k_{12}G_{12}, k_{23}G_{23}, k_{31}G_{31})$， (16)

$$\varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^p, \tag{17}$$

$$\varepsilon^e = [\varepsilon_x^e \quad \varepsilon_y^e \quad \varepsilon_z^e \quad \gamma_{xy}^e \quad \gamma_{yz}^e \quad \gamma_{zx}^e]^T,$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & l_1 m_1 & n_1 l_1 & m_1 n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & l_2 m_2 & n_2 l_2 & m_2 n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & l_3 m_3 & n_3 l_3 & m_3 n_3 \\ 2l_1 l_2 & 2m_1 m_2 & 2n_1 n_2 & l_1 m_2 + l_2 m_1 & n_1 l_2 + n_2 l_1 & m_1 n_2 + m_2 n_1 \\ 2l_2 l_3 & 2m_2 m_3 & 2n_2 n_3 & l_2 m_3 + l_3 m_2 & n_2 l_3 + n_3 l_2 & m_2 n_3 + m_3 n_2 \\ 2l_3 l_1 & 2m_3 m_1 & 2n_3 n_1 & l_3 m_1 + l_1 m_3 & n_3 l_1 + n_1 l_3 & m_3 n_1 + m_1 n_3 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1 m_1 & 2n_1 l_1 & 2m_1 n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2 m_3 & 2n_2 l_2 & 2m_2 n_3 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3 m_1 & 2n_3 l_3 & 2m_3 n_1 \\ l_1 l_2 & m_1 m_2 & n_1 n_2 & l_1 m_2 + l_2 m_1 & n_1 l_2 + n_2 l_1 & m_1 n_2 + m_2 n_1 \\ l_2 l_3 & m_2 m_3 & n_2 n_3 & l_2 m_3 + l_3 m_2 & n_2 l_3 + n_3 l_2 & m_2 n_3 + m_3 n_2 \\ l_3 l_1 & m_3 m_1 & n_3 n_1 & l_3 m_1 + l_1 m_3 & n_3 l_1 + n_1 l_3 & m_3 n_1 + m_1 n_3 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

将(17)式代入(14)式可得:

$$X = (I + [kB])^{-1}[kB](X - X), \quad (20)$$

式中I 为单位矩阵。由上式可简化为

$$X = (1 + kB)^{-1}[kB](X - X), \quad (21)$$

式中 $[kB] = \mathrm{diag}(k_x E_x, k_y E_y, k_z E_z, k_{xy} G_{xy}, k_{yz} G_{yz}, k_{zx} G_{zx})$,

$$[1 + kB]^{-1} = \mathrm{diag}\left(\frac{1}{1 + k_x E_x}, \frac{1}{1 + k_y E_y}, \cdots, \frac{1}{1 + k_{zx} G_{zx}}\right), \quad (22)$$

其中 $k_x E_x, \cdots, k_{zx} G_{zx}$ 可以由下列公式确定:

$$\{kB\} = [A_1]\{kE\}, \quad (23)$$

式中

$$\{kB\} = [k_x E_x \quad kE \quad \cdots \quad k_{zx} G_{zx}],$$

$$\{kE\} = [k_1 E_1 \quad k_2 E_2 \quad \cdots \quad k_{31} G_{31}]^T. \quad (24)$$

如果采用 $e = DX$,则

$$X = [kD](X - X), \quad (25)$$

式中 D 为弹性矩阵,而

$$[kD] = [A_1]kD[A_2], \quad (26)$$

$$k = \mathrm{diag}(k_1, k_2, k_3, k_{12}, k_{23}, k_{31}),$$

$$e = [e_x \quad e_y \quad e_z \quad f_{xy} \quad f_{yz} \quad f_{zx}]^T, \quad (27)$$

将(17)式代入(25)式可得:

$$X = (I + [kD])^{-1}[kD](X - X), \quad (28)$$

由上式可简化为

$$X = (I + k^* D)^{-1}[k^* D](X - X), \quad (29)$$

式中 $k^* D = [A_1]kD$ 或 (30)

$$k^* = \mathrm{diag}(k_x, k_y, k_z, k_{xy}, k_{yz}, k_{zx}). \quad (31)$$

由上述可知,(10)、(12)、(20)、(21)、(28)及(29)式分别代表塑性应变向量与总应变向量之间的新关系。这种新关系称为弹塑性应变理论。

1.3 复杂加载状态

如果结构处于复杂加载状态,则由上述可得:

$$dX = [kB](dX - dX), \quad (32)$$

式中 dX、dX、dX 及 dX 分别为总应变向量、弹性应变向量、塑性应变向量及屈服应变向量的增量。因为 $dX = dX + dX$,因此由上式可得:

$$dX = (I + [kB])^{-1}[kB](dX - dX) \quad (33)$$

或 $$dX = (1 + kB)^{-1}[kB](dX - dX), \quad (34)$$

如果采用 $de = DdX$,则可得:

$$dX = (I + [kD])^{-1}[kD](dX - dX) \quad (35)$$

或 $$dX = (I + k^* D)^{-1} k^* D(dX - dX), \quad (36)$$

式中 dX 是否为零,根据具体情况确定。

由上述可知,(33) ~ (36)式代表塑性应变向量增量与总应变向量增量的新关系。这种关系称为弹塑性应变增量理论。

1.4 应力应变关系

如果结构处于弹塑性状态,则应力与应变有下列关系:

$$e = DX - e_0, \quad (37)$$

式中 $e_0 = DX$. (38)

如果采用增量形式,则由(37)式可得

$$de = DdX - de_0, \quad (39)$$

式中 $de_0 = DdX$, (40)

其中 D 为弹性矩阵,X 及 dX 由上述弹塑性应变理论的表达式确定。

2 热弹塑性应变理论

热弹塑性分析在工程中应用很广。实验证明:材料的弹性模量、泊松比、热胀系数以及屈服应力等一般与温度有关,但某些材料,当温度在一定范围内变化时,上述物理量的改变并不显著,可以近似地看作与温度无关。本节介绍作者提出的热弹塑性本构关系。

2.1　材料性质与温度无关的本构关系

对于结构工程,如果采用弹塑性模型,则总应变向量为

$$X = X + X + X_T, \tag{41}$$

式中 X X 及 X_T 分别为结构的弹性应变向量、塑性应变向量及温度应变向量。由上述可得:

$$e = DX - e_0 - e_T, \tag{42}$$

式中 e_0 为塑性变形引起的应力向量, e_T 为温度变化引起的应力向量,即

$$e_0 = DX, e_T = DX_T, \tag{43}$$

其中 $X_T = TT$, (44)

式中 T 为温度变化, T为热胀系数向量。

如果采用弹塑性应变理论,则

$$X = [kB](X - X)$$

或 $$X = [kD](X - X), \tag{45}$$

因为 $X = X - X - X_T$,因此由 (45) 式可得:

$$X = (I + [kB])^{-1}[kB](X - X_T - X)$$

或 $$X = (I + [kD])^{-1}[kD](X - X_T - X), \tag{46}$$

由上式可简化为

$$X = [1 + kB]^{-1}[kB](X - X_T - X)$$

或 $$X = (I + k^* D)^{-1}k^* D(X - X_T - X). \tag{47}$$

由上述可知, (46) 及 (47) 式代表热塑性应变向量与总应变向量及温度应变向量的新关系,这种关系称为热弹塑性应变理论。

如果采用增量形式,则

$$dX = dX + dX + dX_T,$$

$$de = D(dX - de_0 - de_T), \tag{48}$$

式中 $de_0 = DdX, de_T = DdX_T, dX_T = TdT$, (49)

其中 de dX及 dT分别为应力向量、应变向量及温度的增量。由 (46) 及 (47) 式可得:

$$dX = (I + [kB])^{-1}[kB](dX - dX_T - dX)$$

或 $$dX = (I + [kD])^{-1}[kD](dX - dX_T - dX), \tag{50}$$

由上式可简化为

$$dX = [1 + kB]^{-1}[kB](dX - dX_T - dX)$$

或 $$dX = (I + k^* D)^{-1}k^* D(dX - dX_T - dX). \tag{51}$$

由上述可知, (50) 及 (51) 式代表热塑性应变向量增量与总应变向量增量及温度应变向量增量的新关系,这种关系称为热弹塑性应变增量理论。

2.2　材料性质与温度有关的本构关系

如果材料性质与温度有关,则弹性模量、泊松比、热胀系数都是温度 T的函数,并且屈服应力也与温度有关。如果采用弹塑性模型,则

$$dX = dX + dX + TdT, \tag{52}$$

因为 $e = DX$,因此 $X = D^{-1}e$。故

$$dX = \frac{\partial D^{-1}}{\partial T} e dT + D^{-1}de, \tag{53}$$

将 (53) 式代入 (52) 式可得

$$de = D(dX - dX) - cdT, \tag{54}$$

式中 $$c = D\left(T + \frac{\partial D^{-1}}{\partial T} e\right), \tag{55}$$

dX 由 (50) 或 (51) 式确定。

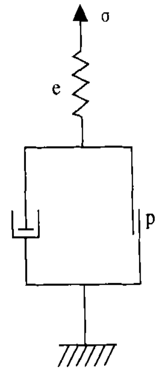

图 3　弹粘塑性模型

Fig. 3　Elasto-viscoplastic model

3　弹粘塑性应变理论

弹粘塑性模型由弹性元件 e、粘性元件 v 及塑性元件 p混联构成。因为这种模型能较好地反映材料的力学特性,因此在塑性力学中应用很广。但传统的弹粘塑性理论对结构分析很困难,本文避开传统的弹粘塑性理论,创立了弹粘塑性应变理论。

3.1　单向应力状态

图 3是一个一维的弹粘塑性模型。弹性元件 e代表弹性性质,粘性元件 v代表粘性性质,塑性元件 p代表塑性性质。由图 3可得:

$$X = X + X^p, \tag{56}$$

$$e = EX, \tag{57}$$

$$e = e^v + e^p, \tag{58}$$

式中 e e^v 及 e^p 分别为弹性元件、粘性元件及塑性元件的应力, X X及 X^p分别为总应变、弹性应变及粘塑性应变。因为塑性元件代表塑性性质,因此当 $e^p < e_s$ 时,塑性元件不会发生变形;当 $e^p \geqslant e_s$ 时,塑性元件发生变形。对于强化材料,如果 $e^p \geqslant e_s$,则塑性元件中的应力可写成下列形式:

$$e^p = e_s + H' X^p. \tag{59}$$

因为粘性元件代表粘性性质,因此粘性元件的应力可写成下列形式:

$$e^v = Z\dot{X}^p, \tag{60}$$

式中 Z为粘性系数, $\dot{X}^p$ 应变率。将 (59) 及 (60) 式代入 (58) 式可得

$$e = e_s + H' X^p + Z\dot{X}^p, \tag{61}$$

将 (57) 式代入上式可得

$$X^p = kE(X - X) - kZ\dot{X}^p, \tag{62}$$

将 (56) 式代入上式可得

$$X^p = \frac{kE}{1+ kE}(X - X^s) - \frac{kZ}{1+ kZ}\dot{X}^p, \qquad (63)$$

它的增量形式为:

$$dX^p = \frac{kE}{1+ kE}(dX - dX^s) - \frac{kZ}{1+ kZ}d\dot{X}^p, \qquad (64)$$

如果设 $d\dot{X}^p = U\dot{X}^p = U\dot{X}^p\Delta t\,\Delta t = Ud\dot{X}^p\,\Delta t$, (65)

则将 (65) 式代入 (64) 式可得

$$dX^p = \frac{kE}{(1+ kE) + UkZ\Delta t}(dX - dX^s), \qquad (66)$$

这是粘塑性应变增量与总应变增量的新关系。式中 dX、dX^p 及 dX^s 分别为总应变、粘塑性应变及屈服应变的增量,U是一个参数,可在 $0 \leqslant U < 0.2$ 范围内根据具体情况选定。

3.2 复杂应力状态

如果结构处于复杂应力状态,则

$$dX^p = [kB](dX^s - dX^s) - [k^a]d\dot{X}^p, \qquad (67)$$

式中 $[kB] = [A_1][kE][A_2]$, $[k^a] = [A_1][kZ][A_2]$, (68)

$$[kZ] = \mathrm{diag}(k_1Z, k_2Z, k_3Z, k_{12}Z, k_{23}Z, k_{31}Z), \qquad (69)$$

其余记号见 (16) ~ (19)式。将 $dX^s = dX - dX^p$ 代入式 (67) 可得

$$dX^p = (I + [kA])^{-1}[kB](dX - dX^s), \qquad (70)$$

式中 $[kA] = [kB] + U[k^a]\Delta t$, (71)

$$dX = [dX_x \quad dX_y \quad dX_z \quad dV_{xy} \quad dV_{yz} \quad dV_{zx}]^T,$$

如果采用 $de = DdX^s$,则可得:

$$dX^p = (I + [kC])^{-1}[kD](dX - dX^s), \qquad (72)$$

式中 $[kC] = [kD] + U[k^a]\Delta t$,

(70) 及 (72) 式可简化为

$$dX^p = [1 + kA]^{-1}[kB](dX - dX^s), \qquad (73)$$

$$dX^p = (I + k^* C)^{-1}k^* D(dX - dX^s), \qquad (74)$$

式中 $[1 + kA]^{-1}\mathrm{diag}\left(\frac{1}{1+ k_xA_x}, \frac{1}{1+ k_yA_y}, \cdots, \frac{1}{1+ k_{zx}A_{zx}}\right)$;

$C = D + IUZ\Delta t$;

$A_x = E_x + UZ\Delta t, \cdots, A_{zx} = E_{zx} + UZ\Delta t$, (75)

其中 $k_xA_x, \cdots, k_{zx}A_{zx}$ 可由下列公式确定:

$$\{kA\} = [A_1](\{kE\} + \{kZ\}), \qquad (76)$$

式中

$$\{kB\} = [k_xE_x \quad k_yE_y \quad \cdots \quad k_{zx}G_{zx}]^T,$$

$$\{kE\} = [k_1E_1 \quad k_2E_2 \quad \cdots \quad k_{31}G_{31}]^T, \qquad (77)$$

$$\{kZ\} = [k_1Z \quad k_2Z \quad \cdots \quad k_{31}Z]^T,$$

由上述可知,(70)、(72) ~ (74) 式代表粘塑性应变向量增量与总应变向量增量的新关系。这种关系称为弹粘塑性应变增量理论。

3.3 应力应变关系

如果结构处于弹粘塑性状态,则应力与应变有下列关系:

$$de = DdX - de_0, \qquad (78)$$

式中 $de_0 = DdX^p$. (79)

4 热弹粘塑性应变理论

如果结构处于复杂应力状态,则

$$dX^p = (I + [kA])^{-1}[kB](dX - dX_T - dX^s)$$

或 $$dX^p = (I + [kC])^{-1}[kD](dX - dX_T - dX^s), \qquad (80)$$

上式可简化为

$$dX^p = (1 + kA)^{-1}[kB](dX - dX_T - dX^s)$$

或 $$dX^p = (I + k^* C)^{-1}k^* D(dX - dX_T - dX^s). \qquad (81)$$

由上述可知,(80) 及 (81) 式代表热粘塑性应变向量增量与总应变向量增量及温度应变向量增量的新关系。这种关系称为热弹粘塑性应变增量理论。

如果结构处于热弹粘塑性状态,则

$$de = D(dX - dX^p) - c\,dT, \qquad (82)$$

其中 c 由 (55) 式确定。如果材料性质与温度无关,则 $c = DT$。

5 结论

目前,国内外流行的本构关系是流动法则理论,它依赖于屈服曲面、加载曲面及流动法则,是一个经典本构关系。本文作者创立的新本构关系,避开了屈服曲面、加载曲面及流动法则,避免了经典本构关系带来的巨大困难及缺陷,突破了传统的经典本构关系。

参考文献

1 秦 荣.塑性力学中的新理论新方法.广西科学,1994,1(1):18~22.

2 秦 荣.高层建筑结构弹塑性分析的新方法.土木工程学报,1994,27(6):3~10.

3 秦 荣.计算结构非线性力学.南宁:广西科学技术出版社,1999.

4 秦 荣.计算结构力学.北京:科学出版社,2001.

(责任编辑:黎贞崇)