

(35) 高炉シャフト内における応力解析

名古屋大学大学院
名古屋大学工学部

○江口 毅
桑原 守 龍 巖

1. 緒言 従来、高炉内の応力状態は Janssen 式¹⁾に基づく一次元解析が、また、炉下部に形成される不動炉芯の形状については、モールの応力円上で水平主応力や剪断応力の半径方向の分布状態を仮定した解析²⁾⁻⁴⁾が行われている。本報では、応力の平衡方程式に基づいて表現したシャフト内における応力分布を、特性曲線法によって数値解析した結果について述べる。

2. 数学的モデル 高炉内の r - z 面内の二次元応力状態は、装入物を連続体と仮定し、降下速度が遅いため慣性項を無視すると、平衡方程式： $\partial\sigma_r/\partial r + \partial\tau_{rz}/\partial z = -\partial p/\partial r \cdots (1)$ 、 $\partial\tau_{rz}/\partial r + \partial\sigma_z/\partial z = \rho g - \partial p/\partial z \cdots (2)$ で記述される。装入物が常にクーロンの降伏条件式： $|\tau| = \sigma_m \tan \phi_i \cdots (3)$ を満足し、塑性平衡状態にあると仮定して、モールの応力円 (Fig. 1) から幾何学的に得られる関係： $\sigma_r = \sigma_m$

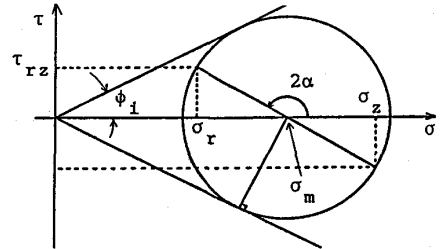


Fig. 1 Plastic equilibrium in active state of stress

$(1 + \sin \phi_i \cos 2\alpha) \cdots (4)$ 、 $\sigma_z = \sigma_m (1 - \sin \phi_i \cos 2\alpha) \cdots (5)$ 、 $\tau_{rz} = \sigma_m \sin \phi_i \sin 2\alpha \cdots (6)$ によって、(1)、(2) 式は、 σ_m と α に関する双曲型の連立偏微分方程式に変換される。さらに、これらの方程式の解法は、 $dz/dr = \tan(\alpha \pm (\pi/4 - \phi_i/2)) \cdots (7)$ で表わされる 2 本の特性方向に沿って、次の 2 個の常微分方程式： $d\sigma_m \pm 2\sigma_m \tan \phi_i d\alpha = \{(-\partial p/\partial r) \pm (\rho g - \partial p/\partial z) \tan \phi_i\} dr + \{(\rho g - \partial p/\partial z) \pm (\partial p/\partial r) \tan \phi_i\} dz \cdots (8)$ を数値積分する問題に帰着される。境界条件は、 $z=0$ で、 $\sigma_m=0$ 、 $\alpha=\pi/2$ 、 $r=0$ で、 $\alpha=\pi/2$ 、壁面では、塑性平衡状態として $d\alpha=d\omega$ とした。

3. 計算結果 計算条件は、内部摩擦角を 40° 、壁面摩擦角を 25° 、シャフト角を 81.8° とした。なお、以下の計算例では、上昇ガスの圧揚失項は無視した。Fig. 2 に鉛直方向の垂直応力 σ_z の等高線を示す。 σ_z は、破線より上部の、いわゆる Rankine 領域では、半径方向に分布せず、鉛直方向には静水圧的に増加するが、破線より下部では、増加率が下方ほど減少する傾向がある。Fig. 3 は垂直応力 σ_r 、剪断応力 τ_{rz} の半径方向分布を示している。中心から壁に向かって、 σ_r には漸減傾向が、また、 τ_{rz} には漸増傾向があるが、いずれも、壁側での変化率が大きくなっている。Fig. 4 は σ_z の壁に沿った分布を示しているが、炉胸部と炉腹部間の境界で応力の不連続がみられる。

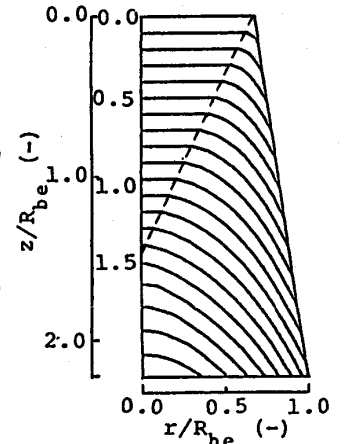
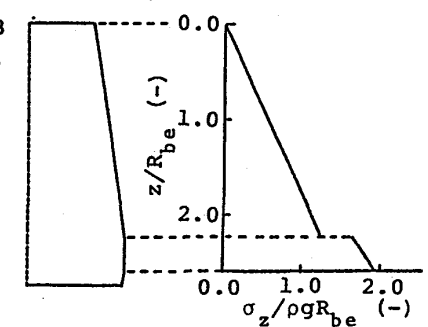
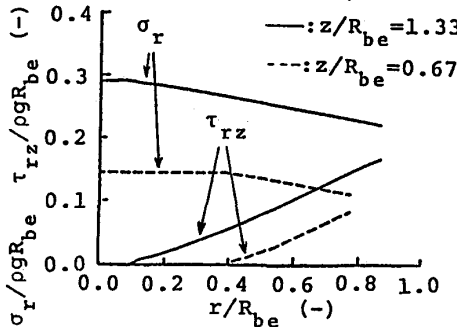


Fig. 2 Contour lines of σ_z .

4. 結言 特性曲線法による数値解析結果に基づいて、従来の研究における応力の分布に関する仮定の妥当性について検討した。なお、上昇ガスによる抗力の効果についても述べる。

(使用記号) σ_r, σ_z : 垂直応力 (Pa)、 τ_{rz} : 剪断応力 (Pa)、 σ_m : 平均応力 (Pa)、 P : 上昇ガス圧 (Pa)、 α : 主応力軸と r 軸のなす角 (-)、 ϕ_i : 内部摩擦角 (-)、 ρ : 装入物かさ密度 (kg/m^3)、 g : 重力加速度 (m/s^2)



1) H.A. Janssen: V.D.I.-Zeit., 39 (1895), Fig. 3 Radial profiles of σ_r and τ_{rz} . Fig. 4 Profile of σ_z at wall p. 1014. 2) H. Nishio et al: Stahl u. Eisen, 97 (1977), p. 867. 3) 磯部ら: 鉄と鋼, 67 (1981), 553. 4) 清水ら: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 936.