

コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧のモデル化

JR 西日本 施設部 正会員 ○荒木 弘祐 京都大学 学正会員 高谷 哲
 京都大学 正会員 服部 篤史 京都大学 フェロー 宮川 豊章

1. 目的

コンクリート中の鉄筋は塩化物イオンや中性化などの劣化要因により腐食し、体積が膨張することで、コンクリートに膨張圧を与える。膨張量が小さな場合は、鉄筋の付着強度を増進させることが予想されるが、膨張量がある一定の値を超えた場合はかぶりコンクリートにひび割れや剥落を生じ、応力が開放されることで付着強度が低下する事が予想される。腐食による鉄筋の機械的性質の低下に併せて、付着強度の低下はコンクリートと鉄筋の一体性を失わせるため、構造体の耐力に影響を与える恐れがある。

腐食膨張圧は付着強度を把握する際に、重要な要素と考えられる。しかし、コンクリートと鉄筋の界面で生じるため、直接測定する事が困難である。今回は、コンクリートに付加し得る最大内圧を厚肉円筒理論から算出し、これと FEM 解析から得られる付加可能最大内圧を比較することで、最大内圧を簡便に予測する手法の開発に取り組んだ。次に、実際のコンクリート供試体に内圧および半径変化を発生させる手法として、弾性体を用いた実験手法およびその基礎理論を提案することとした。

2. 厚肉円筒理論

厚肉円筒理論^[1]は本来等質性の金属材料の理論であり、複合材料であるコンクリートに使用する事は適切でない。しかし、その理論のパラメータは簡便であることから、補正を加えることで鉄筋腐食膨張圧の再現に有用であると考えた。厚肉円筒理論を用いる際、図-1 のように円筒内径 (a) を鉄筋半径とし、円筒外径 (b) を鉄筋半径+かぶりとした。円筒に付加し得る最大内圧 (p_{i1}) は、かぶり面のコンクリートが引張強度に達する時点とし、引張強度 (f_t) を用いて式-1 によって得られる。

$$p_{i1} = \frac{b^2 - a^2}{2a^2} f_t \quad (\text{式-1})$$

3. FEM 解析

FEM 解析は 2 次元弾塑性解析を用いて行った。断面は $150 \times 150\text{mm}$ とし、圧力を導入する内円は $\phi 26$ とした。圧力は法線方向に均一に導入した。使用したコンクリートの圧縮強度は 30N/mm^2 とし、トリニアモデルを使用した。引張強度は 2.7N/mm^2 とし、軟化領域を CEB モデル^[2] から変位で与えた。最大内圧 (p_{i2}) は、かぶり面のコンクリートひずみが 150μ を越えた時点（コンクリートが引張強度に達した時点）とした。図-2 に、かぶりが 30mm でかぶり面のひずみが 150μ を越えた時点でのひずみ分布（灰色が 150μ 以上）の一例を示す。

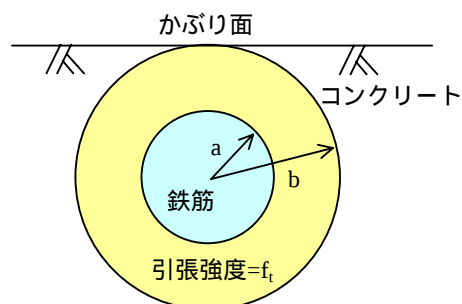


図-1 厚肉円筒によるモデル化

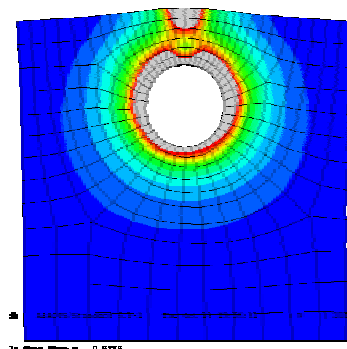


図-2 FEM 出力結果

4. 厚肉円筒理論と FEM の整合性

厚肉円筒理論から得られた最大内圧 (p_{i1}) と FEM 解析から得られた最大内圧 (p_{i2}) の関係を図-3 に示す。また、 p_{i2}/p_{i1} を低減率と定義し、かぶりによる低減率の違いも図-3 に示す。図-3 から、かぶりが大きくなるにつれ低減率が小さくなる事が分かる。FEM 解析はコンクリートの塑性域の挙動を考慮しているが、厚肉円筒理論は考慮することが出来ないため、かぶりが大きくなるにつれ複雑な応力伝達の影響が大きくなり、値の差が大きくなったものと推測される。また、かぶりが大きな場合は厚肉円筒理論から算出した最大圧力は、FEM

キーワード 鉄筋腐食, 膨張圧, 厚肉円筒理論, 引張強度, 弾性体

連絡先 〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目 4 番 24 号鉄道本部施設部

06-6375-8841

解析の圧力より大きく算出される傾向が得られた．さらに，低減率を定式化することで，厚肉円筒理論から最大圧力を換算することが出来る可能性が示された．

5．弾性体を用いた腐食膨張の実験モデル

5．1 腐食膨張のモデル化

考案したモデルは，図-4 のようにコンクリート中に半径 r_0 の円柱空洞を設け，挿入した弾性体に軸方向に加力することで，円周法線方向に均一の圧力を加え．円柱空洞半径を r_1 に変形させるものとした．腐食による半径変化量は dr となる．鉄筋は腐食により円周および軸方向に均一に半径を拡大するものと仮定する．

5．2 内圧と半径変化量の算出方法

図-5 のように外圧 p_i を受ける弾性体に軸方向に σ_z の圧縮応力を作用させた場合，円周方向のひずみを ε_t ，軸方向のひずみを ε_z とすると，下記の式が成り立つ．弾性体のポアソン比を ν とする．

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \nu \varepsilon_z \\ \varepsilon_t &= dr/r_0 \\ \varepsilon_z &= dL/L\end{aligned}\quad dr = \frac{\nu \cdot dL \cdot r_0}{L} \quad (\text{式-2})$$

今， σ_z のみによる半径変化量を dr_1 とし，外圧のみによる半径変化量を dr_2 とすると， dr_1 ， dr_2 は式-3 で表される．

$$dr_1 = \frac{\nu \cdot r_0 \cdot \sigma_z}{E}, \quad dr_2 = \frac{p_i \cdot r_0 (\nu - 1)}{E} \quad (\text{外向きを正}) \quad (\text{式-3})$$

鉛直応力と外圧を受ける弾性体の半径変化量 dr は dr_1 と dr_2 を加えたものとして算出される．また， P を鉛直荷重とすれば，式-2 と式-3 を整理すると，式-4 が得られる．

$$p_i = \frac{\nu \cdot E}{\nu - 1} \left(\frac{dL}{L} - \frac{P}{E \cdot r_0^2 \cdot \pi} \right) \quad (\text{式-4})$$

式-4 は P と dL が変数である．この二つの測定値を得ることで外圧 p_i を算出する事が出来る． p_i は弾性体がコンクリートに与える圧力と等価であるため，弾性体変形による円周法線方向圧力を算出する事が出来る．また，算出された p_i から式-3 を用いて半径変化量 dr を算出する事が出来る．

5．まとめ

1. 厚肉円筒理論と FEM 解析を比較すると，最大圧力のかぶりが大きくなるにつれて差が大きくなり，厚肉円筒理論値は FEM 解析から得られる最大圧力より大きくなる傾向がある．
2. 厚肉円筒理論の算出値を補正することで，実際の最大圧力に換算できる可能性がある．
3. 弾性体を用いた内圧および半径変化量は，式-4 および式-3 から算出できる．

参考文献

- [1] 材料力学 下巻 : S.チモシェンコ 昭和 37 年 コロナ社
- [2] CEB-FIP MODEL CODE 1990 : COMITE EURO-INTERNARIONAL DU BETON 1993 Thomas Telford Services Ltd

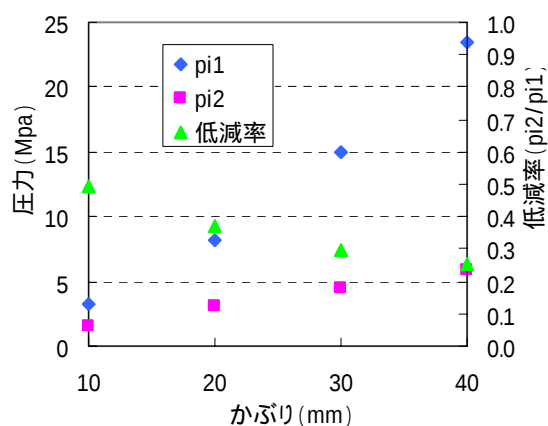


図-3 p_{i1} と p_{i2} 及び低減率の関係

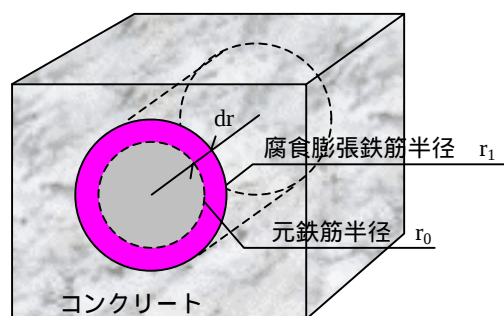


図-4 腐食のモデル化

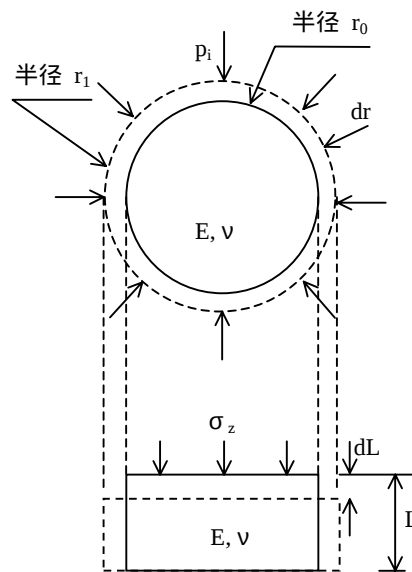


図-5 弾性体の変形