

凍結融解作用による損傷機構に基づいた鉄筋とコンクリート間の付着劣化モデル

北海道大学 学生会員 ○金澤 健  
 北海道大学 正会員 佐藤 靖彦

1. はじめに

著者らは、凍結融解作用を受けた既設建造物の残存耐力評価に、非線形有限要素解析を用いることを考えている。本研究では、解析に必須の構成モデルのひとつである、鉄筋とコンクリート間の付着モデルの提案を試みる。提案するモデルは、単なる実験結果の回帰式ではなく、実験結果から推察される付着損傷機構の考察に基づいた定式化を特徴としている。

2. 実験概要および結果<sup>1)</sup>

供試体は図-1に示すように、1辺が100mmの正方断面をもつコンクリート角柱の中央にD16鉄筋を1本埋設したものである。供試体名で、Pは凍結融解試験前のひび割れの導入を、Wは凍結融解試験中の水分供給を意味し、これに該当しない供試体をNとした。まず、ひび割れを導入する供試体に対してプレ引張試験を行い、N0を除くすべての供試体を凍結融解試験に供したのち、再度一軸引張試験を行った。図-2に、平均付着応力と平均ひずみとの関係を示す。注目すべきは、温度変化のみを与えた場合でも、特にひび割れを導入した場合に、付着劣化が生じることである(N100とPN100)。

3. 凍結融解作用による付着損傷機構の考察

付着応力( $\tau$ )の大きさには、鉄筋の相対変位に対するかぶりの拘束力が反映されていると考えられる。これまで、凍結融解作用による付着劣化を論じる際、かぶりの材料劣化のみが着目されてきた。しかし、かぶりが健全な場合でも、例えば丸鋼を用いた場合に大きな $\tau$ が期待できないように、拘束のほかに、界面における摩擦の低下も無視できない。したがって、水分供給がなくなかぶりが劣化していないN100, PN100に見られる $\tau$ の低下は、材料劣化によってかぶりの拘束が損なわれたのではなく、界面での摩擦の低下によるものであると推察できる。

鉄筋とコンクリートは熱容量が異なるため、同じ凍結融解環境下でも、それぞれに生じる温度変化は異なることが予想される。コンクリートとその内部に埋め

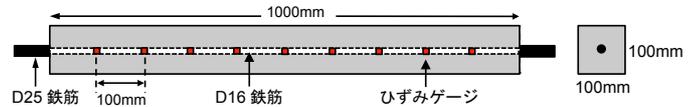


図-1 供試体諸元

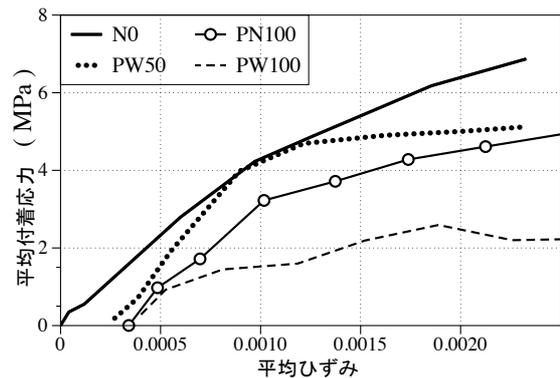
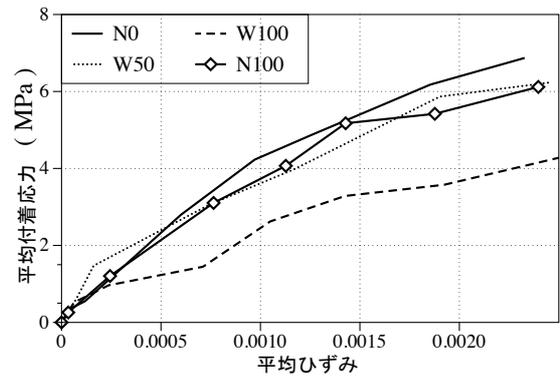


図-2 平均応力と平均ひずみとの関係

込まれた鉄筋とに温度差があれば、温度ひずみの差異に起因して界面にずれが生まれ、その結果、摩擦が低下することは十分に考えられる。以上の考察から、凍結融解作用による付着損傷機構には、かぶりの材料劣化による拘束力の損失に加え、界面のずれに起因する摩擦の低下があると仮定してモデリングを行っていく。

4. 損傷機構に基づいた付着劣化モデルの構築

提案するモデルは、摩擦の低下をモデル化するために、すべり(S)とひずみ( $\epsilon$ )との関係が $\tau$ に及ぼす影響を考慮できる島らのモデル<sup>2)</sup>をベースとし、かぶりの材料劣化に伴う拘束力の低下を考慮するためにBigajらのモデル<sup>3)</sup>を組み入れる。Bigajらのモデルでは、 $\tau$ はかぶりの拘束力の大きさに比例し、かぶりの剛性が大き

ければ、同じ鉄筋ひずみに対して、拘束力がより大きくなる。かぶりの剛性はコンクリートのヤング係数( $E_c$ )によって決まるが、かぶり厚が非常に大きい場合には、剛性はある値で頭打ちになることが考えられる。マッシュなかぶりを持つ供試体の実験結果に基づく島らのモデルの $k$ は、かぶり厚が非常に大きい場合の剛性の大きさを反映した定数であると解釈できる。それゆえ、凍結融解作用によるかぶりの $E_c$ の低下を $k$ と関連づけることが合理的であると考えた。島らは、式(1)に実験から求めた $\tau$ と $S$ を代入することで $k$ の値を決定してい

$$kg(\epsilon) = \frac{\tau}{f'_c \{ \ln(1 + 5 \cdot 1000 S/D) \}} \quad (1)$$

る。そこで本研究では、Bigajらのモデルを $\tau$ - $S$ 関係として用いた逐次計算の結果を用いて拘束力の低下をモデル化した。すなわち、まずBigajモデルを用いてヤング係数比( $E_{c,d}/E_c$ )を変化させた逐次計算を行い、 $\tau$ ,  $S$ 分布を得る(以降、添字 $d$ は凍結融解作用を受けた場合の力学特性値を意味する)。次に、得られた $\tau$ ,  $S$ を式(1)に代入し、 $E_{c,d}/E_c$ の値ごとに、 $kg(\epsilon)$ と $\epsilon$ との関係を得る。最後に、 $k$ を変化させ、Bigajモデルから得られた $kg(\epsilon)$ と $\epsilon$ との関係が、島モデルのそれに最も近づくような $k$ を決定するという手順である。結果として、 $k$ と $E_{c,d}/E_c$ との関係は、式(2)によって表される。

$$k = f_1(E_{c,d}) = 0.73(E_{c,d}/E_c)^{0.56} \quad (2)$$

コンクリート内に埋め込まれた鉄筋周辺には、周方向に引張応力が生じ、これがコンクリートの引張強度( $f_t$ )を超えたときにひび割れが発生して、界面の摩擦が低下し、鉄筋の相対変位が容易になる。つまり、界面における摩擦は、鉄筋近傍のコンクリートの $f_t$ と大きな関連性がある。そこで、 $k$ と $E_{c,d}/E_c$ とを関連付けた場合と同じ方法論を用い、Bigajモデルで引張強度比( $f_{t,d}/f_t$ )を変化させて求めた $\tau$ ,  $S$ 分布を式(1)に代入し、得られた $g(\epsilon)$ と $\epsilon$ との関係を、島らのモデルのそれと比較した。その結果、 $g(\epsilon)$ に式(3)の関数を乗じた場合に、両モデルの挙動が近づくことを確認した。最終的に、本研究で提案するモデルは、式(4)である。

$$f_2(f_{t,d}) = (f_{t,d}/f_t)^{-1.3} \quad (3)$$

$$\frac{\tau}{f'_{c,d}} = \frac{f_1(E_{c,d}) \cdot \{ \ln(1 + 5 \cdot 1000 S/D) \}^3}{1 + f_2(f_{t,d}) \cdot \epsilon \cdot 10^5} \quad (4)$$

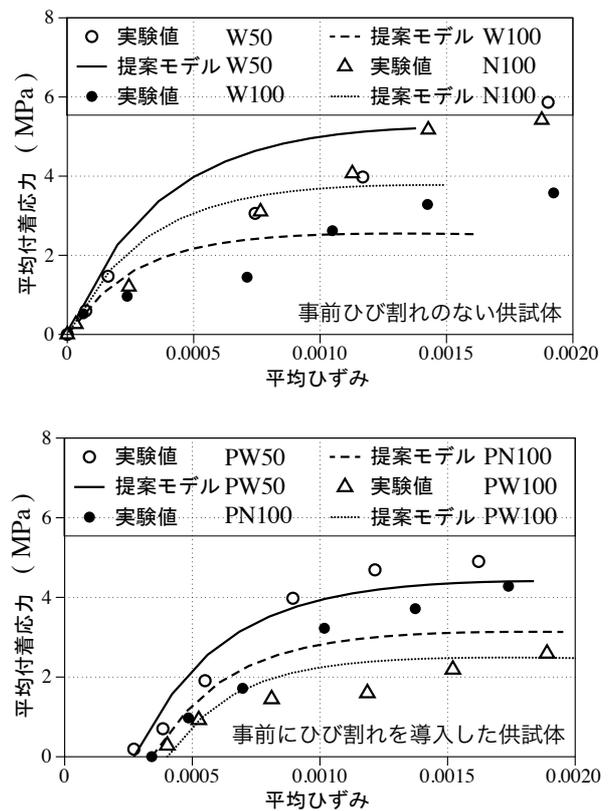


図-3 提案モデルと実験結果との比較

### 5. 提案モデルの妥当性の検証

図-3に実験から得られた平均付着応力と平均ひずみの関係と、提案モデルを用いた逐次計算結果との比較を示す。提案モデルは、事前にひび割れを導入したPW50, PN100, PW100の挙動を比較的よく予測できているが、ひび割れのないW50, N100, W100との比較では、実験結果を過小評価する傾向が見られる。提案モデルに必要な $E_{c,d}/E_c$ および $f_{t,d}/f_t$ は、RC供試体と同じ配合で作製した円柱供試体の圧縮強度から、相対動弾性係数を介して間接的に推定した。このことから、ひび割れのない供試体の実験結果との差異は、実際の劣化度に対して、相対動弾性係数から推定した劣化度が大きかったことによるものと推測される。

### 参考文献

- 1) 三河智将, 佐藤靖彦: 凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリートの一軸引張性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, 2012
- 2) Shima, H., Lie-Liung C., and Okamura, H.: Micro and macro models for bond in reinforced concrete, J. of Fac. of Eng. of Univ. Tokyo, Vol. 39, No. 2, pp. 133-194, 1987
- 3) Den Uijl, J. A., and Bigaj, A. J.: A bond model for ribbed bars based on concrete confinement, HERON, Vol. 41, No. 3, 1996