

京都大学 学生会員 ○中尾 真 正会員 山本貴士
正会員 服部篤史 フェロー 宮川豊章

1. はじめに

近年、ASR により劣化した RC 構造物中の鉄筋破断の被害が報告されている。破断した鉄筋と ASR 劣化を生じたコンクリートの一体性が損なわれると、RC 部材の耐荷性能が低下する可能性がある。そこで本研究では、既往の ASR 膨張ひび割れ模擬コンクリートと鉄筋の引抜き実験結果の二次元有限要素解析を行い、ASR 膨張コンクリートと鉄筋の付着応力-すべり関係の定式化について検討した。

2. 研究概要

解析対象は、幅×高さ=200×300mm の矩形断面で、全長（付着試験長）が 400（300）mm のカンチレバー型引抜き試験体¹⁾とした。引抜き対象の鉄筋は D16 で、かぶり厚は 25mm である。いずれも膨張材を用いた膨張模擬によりコーナースプリット型の付着割裂破壊に至っている。図-1 に供試体のメッシュ分割図を示す。コンクリートには 2 次元 1 次の四辺形要素を、鉄筋には 1 次元 1 次のトラス要素を用いた。鉄筋とコンクリートの付着は、各要素の節点間をバネ要素を用いて表現した。

局所の付着応力-すべり関係を図-2 に示す。本来鉄筋周囲のコンクリートの破壊現象である付着割裂を、付着応力-すべり関係の特性として取り扱ったモデル²⁾である。解析は、引抜き端側の鉄筋に水平変位を 0.05mm ずつ 10mm まで与える変位増分型とした。得られた解析結果と実験結果を比較し、最大荷重が一致するように最大付着応力に関する係数 β を、初期剛性が一致するように最大付着応力時のすべりに関する係数 γ を膨張率の関数として求めた。ポストピークの軟化勾配に関する係数 δ は、 $\tau_R = 0.15 \tau_{max}$ 、 $S_3 = \delta$ として、 δ の値を変化させ実験における軟化勾配と一致させることを試みたが、実験では、ポストピーク以降の破壊が急激なため測定点が粗になっており、 δ を定めることは困難と判断した。ただし、CEB-FIP モデルの付着健全時の値である $\delta = 1.0\text{mm}$ を適用すると、実験結果に対し明らかに軟化勾配が急になるので、仮に付着が良くない時の値として CEB-FIP モデルで提案されている値を採用し、膨張率 b によらず一律に $\delta(b) = 2.5$ とした。

$$\delta(b) = 2.5 \quad (1)$$

3. 結果および考察

3. 1 最大付着応力に関する係数 β

実験結果の最大荷重を付着区間の鉄筋表面積で除した平均付着強度と膨張ひび割れ幅の関係を対数関数による近似式とともに図-3 に示す。なお、対数関数の性質上、健全の場合も 0.001mm 幅のひび割れがあると仮定している。膨張ひび割れの発生によって平均付着強度が大きく低下している。一方解析では、 β の値を減じることで、コンクリート強度の低下を表現し、これに応じて低下する最大付着応力を用いた付着応力-すべり関係を適用して最大荷重を求めた。同様に、解析結果の最大荷重を付着区間の鉄筋表面積で除した平均付着強度と係数 β の関係を図-4 に示す。 $\beta = 1.05$ 以上になると鉄筋が降伏し、与えられた荷重端変位の多くが降伏後の鉄筋の伸び

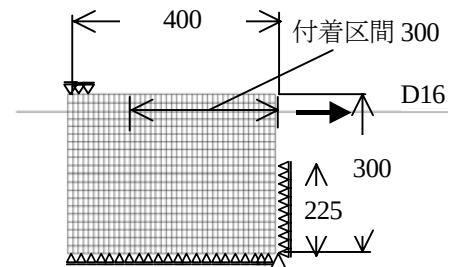


図-1 供試体のメッシュ分割（単位：mm）

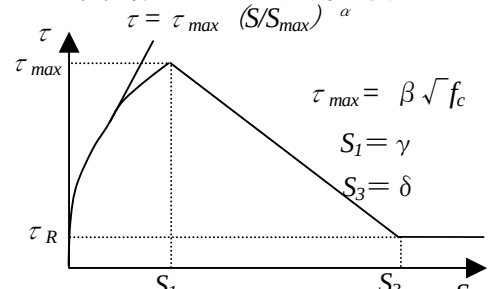


図-2 局所付着応力-すべり関係²⁾

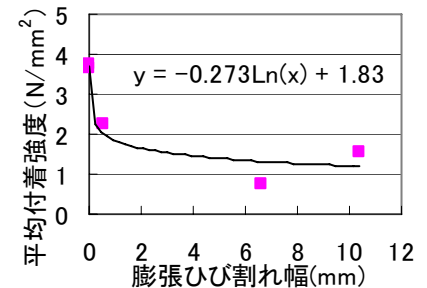


図-3 平均付着強度-膨張ひび割れ幅関係

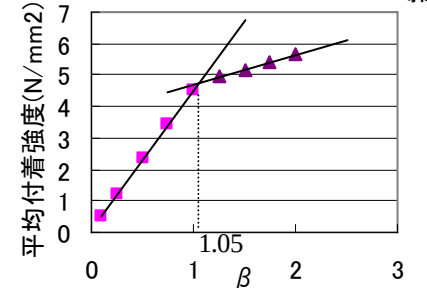


図-4 β - 平均付着強度関係

に使われ、引抜き荷重が増加せず、平均付着強度の増加率が小さくなる。

平均付着強度の実験値と解析値が一致するときの β と実験供試体の膨張率の関係を図-5に示す。膨張ひび割れ幅は、0.0025, 0.005 のとき、供試体上面(幅 200mm)に鉄筋に沿ったそれぞれ幅 0.5mm, 1.0mm のひび割れが 1 本現れるとして膨張率に変換した。以上から、最大応力に関する係数 β は、膨張率 b を用いて式(2)のように表すことができる。

$$\beta(b) = -0.0611\ln(b) + 0.0704 \quad (2)$$

3. 2 最大付着応力時のすべりに関する係数 γ

実験結果の初期剛性 D と膨張率の関係を図-6に示す。初期剛性は、荷重—自由端変位関係で、原点と最大荷重の1/3に相当する荷重点を結ぶ直線の傾きとした。初期剛性 D と膨張率 b の関係を線形回帰すると次式のようにになった。

$$D(b) = -11800b + 4860 \quad (3)$$

解析結果の初期剛性と γ の関係を回帰結果とともに図-7に示す。 β を膨張率にともない変化させると、初期剛性も変化するため、まず $\beta=1.0$ と固定した場合について検討し、初期剛性と γ の関係を回帰した。次に初期剛性と β の関係を調べたところ、初期剛性はほぼ β と一対一の対応関係にあった。以上から初期剛性 D は、任意の β について、式(4)のように表すことができる。

$$D(\gamma) = 260 \cdot \beta / \gamma \quad (4)$$

式(3), (4)からすべりに関する係数 γ は、膨張率 b を用いて式(5)のように表すことができる。実験値は式(3)のように線形近似したため、膨張率 b が大きくなると初期剛性が0になる点が現われ、この点に相当する 41200μ において無限大に発散してしまう。その近辺において、 γ の増加の割合は非常に大きく、実際の初期剛性 D と膨張率 b の関係は表現できない。このため適用できる膨張率の上限を実験結果の範囲($b \leq 0.033$)に限定した。

$$\gamma(b) = \frac{0.0022 \beta}{0.0412 - b} \quad (b \leq 0.033) \quad (5)$$

以上で定式化した付着応力—すべり関係を用いた荷重—自由端変位関係の解析結果を実験結果とともに図-8に示す。既往の付着応力—すべり関係において、付着特性を決定する係数を膨張率の関数として表すことにより、実験結果の荷重—自由端変位関係を表現することができた。

4. 結論

ASR膨張ひび割れを模擬したコンクリートと鉄筋の引抜き実験結果の荷重—自由端変位関係を、有限要素解析を用いて

再現するにあたり、付着を表すバネ要素に用いる局所の付着応力—すべり関係を検討し、最大付着応力および最大付着応力時のすべりに関する係数を膨張率の関数で表すことにより定式化した。今回の定式化は、実験データが多くないため、近似等による誤差が大きい可能性がある。また、ASR膨張ひび割れを模擬した実験であるため、実際のASR劣化供試体引抜き試験結果など、更なる実験データの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 成清公平, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: ASR膨張ひび割れ模擬コンクリートと鉄筋の付着・定着特性, 土木学会第61回年次学術講演会概要集, 2006.
- 2) Comit  Euro-International Du Beton: CEB-FIP MODEL CODE1990, First Draft, 1991.

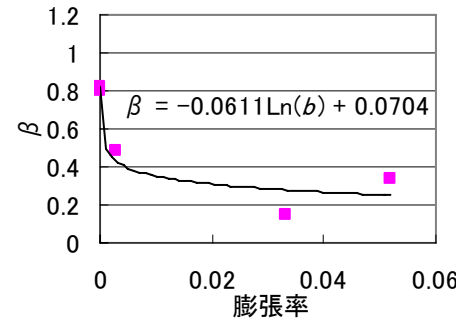


図-5 β —膨張率関係

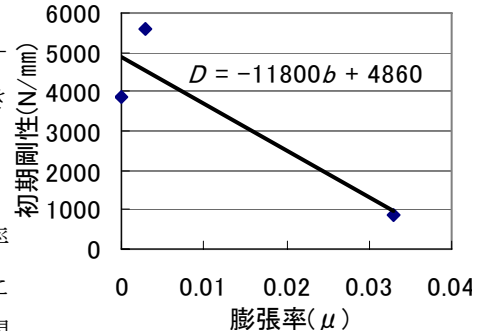


図-6 初期剛性と膨張率の関係

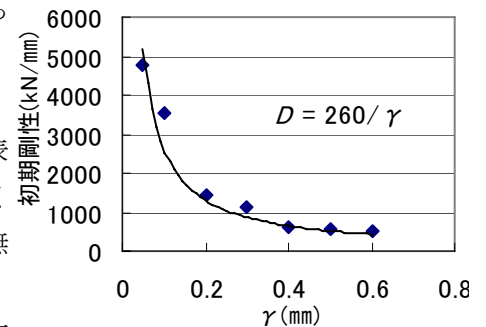


図-7 初期剛性と γ の関係 ($\beta=1.0$)

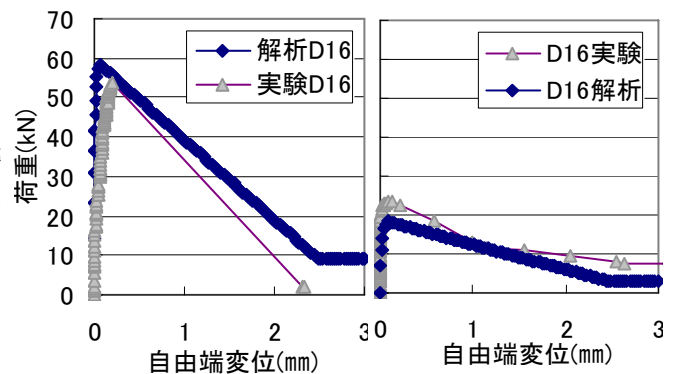


図-8 荷重—自由端変位関係(左:健全, 右:劣化)