

SPH 法を用いた鉄筋コンクリートの付着破壊に関する基礎的検討

九州大学大学院 学生会員 ○中村 裕希 正会員 園田 佳巨

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート部材内のコンクリートと鉄筋間の付着特性は、コンクリートに発生するひび割れ性状に大きな影響を及ぼすことが知られている。これはコンクリートに作用する荷重が、両者間の付着を通して内部鉄筋に伝達・分担されるためである。ところが、付着力が限界に達して滑りが生じた場合の力学的なモデル化が容易でないことから、基本的に FEM 等の数値解法で RC 部材の変形解析を行う際にはコンクリートと鉄筋間の付着特性として完全付着の状態が仮定されることが多い。しかし、RC はりに曲げ応力が作用するようなケースの解析を行う場合、コンクリートに生じる曲げひび割れは引張域に分散して発生する傾向を示し、完全付着を仮定した解析とは異なるひび割れ性状を示すと考えられる。そこで、本研究ではコンクリートと鉄筋間の付着特性が完全ではない状況を、SPH 法を用いて表現し、RC はり部材の衝撃荷重による破壊性状の相違について基礎的な検討を試みた。

2. 解析概要

2.1. SPH 法の概要

SPH 法は、連続体を粒子の集合体として離散化し、Lagrange 的に解を求める粒子法の一つである。SPH 法は、メッシュフリー法の一つとして固体解析においても大変形をとともう問題への適用性が注目されている。SPH 法では、図-1 のように評価対象の粒子の物理量を影響半径内に存在する他の粒子の物理量を用いて、式(1)に示す kernel 関数を用いた重み付き平均による近似解として求める手法である。

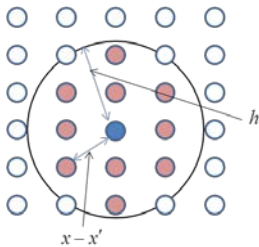


図-1 粒子の影響半径

表-1 材料物性値

材料	密度[kg/m ³]	弾性係数[GPa]	ポアソン比
鋼材	7850.0	206.0	0.30
コンクリート	2300.0	23.1	0.23

$$f(x) \approx \int f(x')W(x-x',h)dx' \tag{1}$$

ここで、 $f(x)$:物理量、 h :影響半径、 W :kernel 関数である。

SPH 法を用いた固体解析では、ひずみ速度（相対速度の空間微分）を時間積分して得られるひずみに弾塑性構成式を適用して得られた応力を運動方程式に代入することで粒子加速度を求め、これを時間積分することで速度や変位を更新する。本研究では、kernel 関数として SPH 法で広く利用されている 3 次 Spline 関数を選択し、影響半径は粒子直径の 2 倍とした。なお、ひび割れを生じたコンクリートの異方性を適切に表現するために、主軸別に異なる kernel 関数を定義できる ASPH 法を用いている。

2.2. 付着のモデル化

付着に関する既往の研究として、定着長が鉄筋径 D の 40 倍を超える異形鉄筋を有するコンクリートを対象に、鉄筋の付着応力—すべり量関係として式(2)が島・周らの研究¹⁾によって提案されている。

$$\tau = 0.9 f_c'^{2/3} \left[1 - \exp \left\{ -40 (S/D)^{0.6} \right\} \right] \tag{2}$$

ここで、 τ :付着応力、 D :鉄筋径、 f_c' :コンクリート強度、 S :すべり量である。

また、八十島らの研究²⁾によると、拘束応力を受けるコンクリートが最大付着応力を示す際の鉄筋すべり量

キーワード SPH 法、衝撃応答解析、付着破壊、ひび割れ

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学大学院工学府 TEL:092-802-3370

を $S_{\max}$ としたとき、 $S_{\max}$ は主鉄筋径、節間隔 l_n 、節高さ h を用いた式(3)で評価可能としている。

$$S_{\max} = 0.0149 \times D \times (l_n / h) \quad (3)$$

本研究では、鉄筋が最大付着応力に達した時点で破壊が生じたとみなし、式(3)で求められる $S_{\max}$ を式(2)の S に代入することで得られる応力 τ を最大付着応力 $\tau_{\max}$ と仮定した。本解析では、評価対象粒子の物理量が、影響半径内の他の粒子の物理量の重み付き平均で求められることを踏まえ、鉄筋粒子のせん断応力が $\tau_{\max}$ に達した方向にコンクリートと鉄筋粒子間の付着破壊が生じたと仮定した。その上で、付着破壊にともなう伝達力の低下を考慮するため、付着破壊が生じたコンクリート粒子と鉄筋粒子間の計算に用いる kernel 関数の値を一定の割合で低減させる方法の適用性について検討した。

2.3. 解析結果

解析は、過去に室蘭工業大学で実施された重錘落下衝撃実験³⁾の結果を対象とした。この実験では、断面寸法 150×250 [mm]、全長 2.4 [m] の内部に D13 の軸方向鉄筋と D6 のせん断補強鉄筋を有する複鉄筋矩形 RC はりを 2 辺単純支持し、重量 300 [kg] の重錘を自由落下させて行われている。解析は部材軸方向の対称性を考慮した 1/2 モデルを用い、コンクリートには引張側に軟化を考慮した Drucker-Prager の降伏条件を適用し、鋼材には von Mises の降伏条件を適用し、塑性後の硬化係数は初期弾性係数の $1/10000$ とした。図-2 は解析モデルの全体図である。コンクリート、鉄筋の材料物性値は表-1 の通りである。解析は、2.2 節で説明したように付着破壊にともなう kernel の低減量として、低減なし、1 割、4 割、8 割の 4 パターンでパラメトリックな数値解析を行った。図-3 は、kernel の低減量を変えた 4 通りのはりの主鉄筋方向断面中央における最大主ひずみ分布である。これらの図から、kernel の低減量が増加するにつれてコンクリートのひび割れ領域が狭くなり、局所的に破壊が生じる傾向にあることが確認できた。これは、付着破壊を表現したことでコンクリートと鉄筋間に付着すべりが発生し、鉄筋を介した荷重分散機能が低下したためであると推察される。図-4 は載荷部におけるはりの変位時刻歴応答である。低減を用いたモデルでは低減量に応じて変位応答に大きな差が生じており、解析精度に大きな影響を与えられらる。

3. 結論

本解析で、鉄筋とコンクリートの付着すべりを SPH の kernel 関数値を低減させることで表現できることが確認できたが、この方法は解析精度を低下させる可能性もあることから、精度検証も同時に行う必要である。

4. 引用

- 1) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378/V-6 号, pp.165-174, 1987.2
- 2) 八十島章, 金久保利之: 横拘束下における補強コンクリート部材の局所付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004
- 3) 岸徳光・大野友則・三上浩・安藤智啓: 重錘落下衝撃実験における境界条件の相違が鉄筋コンクリート梁の衝撃挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.731/1-63, 299-316, 2003.4

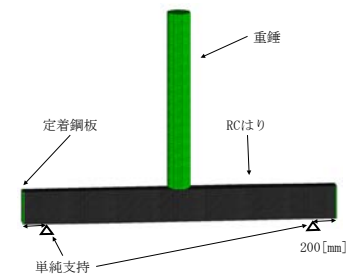


図-2 解析モデル

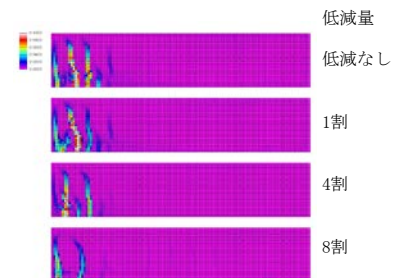


図-3 最大主ひずみ分布 [μ]

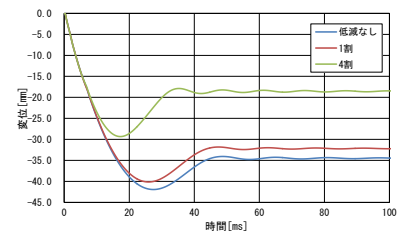


図-4 はりの変位応答