曲げ破壊型はりの SPH 法を用いた衝撃応答解析に関する基礎的考察

九州大学大学院 学生会員 ○徳丸 祥一朗 九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

九州大学大学院 学生会員 Shahrul Niza Mokhatar

1. 緒言

SPH 法は連続体を粒子の集合体として離散化し、各粒子の挙動はある一定範囲内に存在する他の粒子の物理量を kernel 関数により重み付き平均を行い、近似することで解析を行う手法である。したがって、通常の有限要素法とは異なり、粒子同士に結合・連続性の条件が課されていないため、有限要素法では取り扱いが困難であったひび割れや破壊といった現象が容易に再現できると考えられる。これまでに SPH 法を固体の応力解析に用いた事例も多く見られるが、未だ有限要素法ほどその精度検討が十分には行われてはいない。そこで、本研究では曲げ破壊型の供試体に対する重錘落下衝撃実験および SPH 法を用いた衝撃応答解析を行い、そのひび割れ分布や変位応答などの衝撃挙動の検討を行った。

2. SPH 法の概要

SPH 法は、各粒子の物理量を、図-1 のような影響半径内に存在する他の粒子の物理量を用いて、式(1)による kernel 関数を用いた重み付き平均を行うことによって求めていく手法である.

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

ここで f(x): 物理量、h: 影響半径、W: kernel 関数 である。本研究では、kernel 関数として式(2)で表される 3次 spline 関数を用いている。ここで

r: 粒子間距離 $(r = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2})$ である.

$$W = \frac{3}{2\pi h^{3}} \times \begin{cases} \frac{2}{3} - \left(\frac{r}{h}\right)^{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{h}\right)^{3} & 0 \le \frac{r}{h} \le 1\\ \frac{1}{6}\left(2 - \frac{r}{h}\right)^{3} & 1 < \frac{r}{h} \le 2\\ 0 & 2 < \frac{r}{h} \end{cases}$$
(2)

3. 重錘落下衝擊実験

本研究で用いたモルタル供試体の側面図及び断面図を図-2 に示す. 図のように支点間距離 800mm の供試

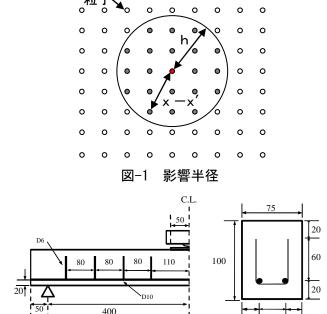


図-2 支点間距離 800mm 供試体(A) 表-1 供試体耐力

供試体	静的曲げ耐力	静的せん断耐力	静的せん断余裕度
	Pu(kN)	Vc (kN)	α = (Vc/Pu)
(A)	12.48	15.66	1.25

体を作成した. 下面および側面から 20mm の位置に D10 鉄筋を配置し、曲げ耐力とせん断耐力との比であるせん断余裕度を増加させるためせん断補強筋を図中に示す位置に配置している. 表-1 に供試体の静的曲げ耐力、静的せん断耐力、せん断余裕度の値を示している. 表-1 より、供試体には曲げ破壊の発生が想定される. また本実験では落錘型衝撃実験装置を使用し、質量 100kg の重錘を誘導レールによって自由落下させ、重錘底面に 200kN まで計測可能なロードセルを用いて衝撃荷重を計測した. 本実験における計測項目は変位および重錘衝撃力である. なお供試体に衝撃荷重を面状に作用させるため、はりの上面に鋼板を接着させ、鋼板にロードセルを衝突させている. 実験における重錘落下速度は、2.2m/s として実験を行った.

4. 弹塑性衝擊応答解析

図-3 に本研究で用いた解析モデルを示す. 図は軸方向鉄筋位置における側方断面を示しており, 灰色の粒

子はモルタルを、緑色の粒子は鉄筋(主鉄筋およびスターラップ)を、青色の粒子は重錘および支点を示している。解析モデルは 2 方向の対称性を考慮した 1/4 モデルとし、1 粒子 5mm で離散化している。鉄筋およびモルタルの応力-ひずみ関係と材料特性値を図-4 および表-2 に示す。どちらにも Mises の降伏条件を適用している。なおモルタルにおいては引張強度に達した後に応力解放を行うことで引張軟化を再現している。本研究では図-5 のように軟化勾配を線形で表した応力-00 がみが増加するにつれて応力を解放することで引張軟化特性を表現することとした。モルタルの引張軟化勾配は破壊エネルギーと解析に用いた粒子寸法を考慮して、ひずみが 17000 μ で引張応力が完全に解放されるように設定した。

5. 実験および解析結果

図-6 は本実験によるひび割れ分布を示している. スパ ン中央部において曲げひび割れが発生していることが確 認できる. また図-7 には解析におけるひび割れ分布を示 している.この図より、解析結果には支点部におけるひび 割れも認められるが、載荷位置直下の断面におけるはりの 曲げ破壊の状況が良好に再現できていることがわかる.次 に図-8 に変位一時間関係を、引張軟化を考慮しない場合 の解析結果も含めて実験結果との比較を示す. なお図中の 実験結果において, 本実験では供試体の支点治具に跳ね返 り防止用の固定を施していないため,供試体の変位応答に 衝撃荷重作用直後の過渡応答から自由振動への移行が見 られなかった. 図-8 より、引張軟化を考慮したモデルは 最大変位が実験値よりも小さな値を示しているが,軟化を 考慮しないモデルと比べると実験値に近いことがわかる. また残留変位について解析値と実験値で比較すると, 引張 軟化を導入したモデルの結果は実験結果とほぼ同じこと が認められる. これらのことより, 引張破壊にともなう軟 化モデルの導入が、RC はりの曲げ破壊挙動の定量的評価 に重要であることが確認できた.

6. 結論

本研究により、曲げ破壊型はりの衝撃応答は、応力解放による引張軟化を導入することで精度良く解析できることがわかった。今後、モルタルにおいて Drucker-Prager の降伏条件や Cap モデルを用いることで、重錘衝突点近傍における圧縮破壊を精度よく再現する手法を考案していく予定である.

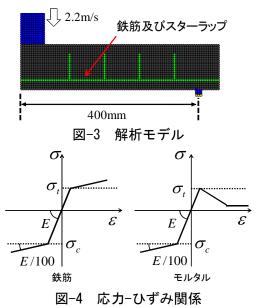


図-4 応力-ひずみ関係 表-2 材料特性値

	ヤング率 E 強度(N/mm²)			
	(kN/mm^2)	圧縮 σ。	引張 σ _t	ポアソン比
鉄筋	206	300	300	0.3
モルタル	11.9	16.1	1.61	0.22

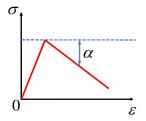


図-5 応力解放による軟化



図-6 実験結果ひび割れ分布

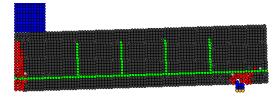


図-7 解析結果ひび割れ分布

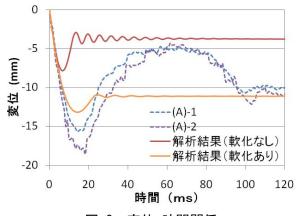


図-8 変位-時間関係