

球・円柱形要素併用個別要素法による重錘衝突を受ける鉄筋コンクリートはりの衝撃応答解析

防衛大学校 学生会員 ○金子 鉄兵 学生会員 原木 大輔 正会員 香月 智

1. 緒言

衝撃作用を受ける構造物の要求性能には、構造物が力学的に耐えうることを主たるものとすると同時に、副次的に衝撃応答中もしくは応答後の状態が与える効果なども考慮要因になりうる。このような観点から、鉄筋コンクリート部材を使用することの多い防災構造物では衝撃作用によるコンクリート片の飛散や剥離が考慮要因となる可能性も否めない。そこで本研究は、大変形・分離・飛散の解析¹⁾に適した球形要素の三次元個別要素法を基に、鉄筋挙動を簡便に表すため円柱形要素を導入し、鉄筋コンクリートはりの重錘衝突実験結果をシミュレーション解析することにより、その適用性を検討するものである。

2. 解析手法

本研究では鉄筋コンクリートを剛体要素の集合体と考え、図-1に示すような球形要素および円柱形要素とそれらを結びつける要素間ばねを用いてモデル化する。すなわち、コンクリートは解析する領域全体を最密充填で配列された球形要素によって表現するものとした。鉄筋は形状そのものを剛体要素によって表現し、基本的に円柱形要素を用い、接合部には分岐と方向変換を表現する球形要素を用いた。なお、コンクリートを表現する球形要素と鉄筋要素との接触に関しては重なりを許すものとし、コンクリート要素の配置によらず鉄筋要素の初期位置を決定できるものとした。その上で、鉄筋とコンクリートの付着は、コンクリート要素と鉄

筋要素間の連結ばねによって表した。

構成則は、コンクリート要素については法線方向ばねの圧縮側は線形とし、引張側に達すると、それ以降は引張破壊エネルギー G_F を基準として、軟化勾配を変化させる1/4モデルに従う非線形モデルとした。せん断方向ばねは、基本的に線形であるがモール・クーロンの破壊基準に達した後は塑性変形量に応じて限界値を定めるものとした²⁾。また、鉄筋要素については、基本的に線形とし、法線方向のみバイリニア型の降伏条件とした。一方、コンクリート要素と鉄筋要素の付着部には、図-2に示すように法線方向は引張側に限界値を設け、接線方向はモール・クーロンの破壊基準を与えた。

ひずみ速度効果は次の要領で与える。①静的のパラメータを用いて重錘衝突解析を行う。②要素間に発生するひずみ速度を解析し、はり長手方向断面をひずみ速度に応じて図-3に示すように分割する。③それぞれの領域に対してせん断応力、引張強度は藤掛の式^{2,3)}を、鉄筋の引張強度は高橋の式⁴⁾を用いて増加させた。

3. 鉄筋コンクリートはり重錘衝突実験⁵⁾

重錘衝突実験に用いた鉄筋コンクリートはり供試体の寸法は、高さ250mm幅150mm長さ1700mmである。軸方向鉄筋はD22のSD345を使用し、せん断補強筋は、せん断耐力が曲げ耐力を上回るような十分な量として、D10の鉄筋を75mmピッチで配置した。図-4に示すように支間長1400mmで単純支持された供試体の中央部

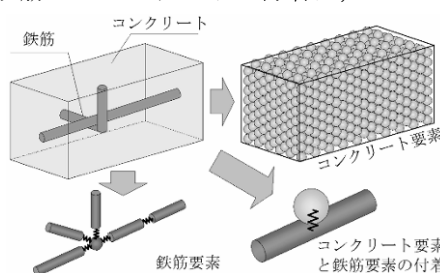


図-1 鉄筋コンクリートのモデル化

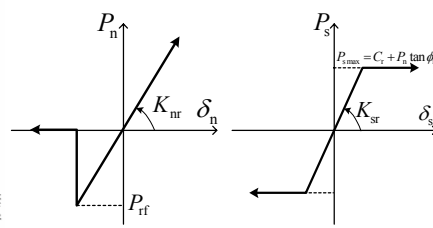
(a)法線方向 (b)接線方向
図-2 鉄筋の構成則

図-3 領域分割

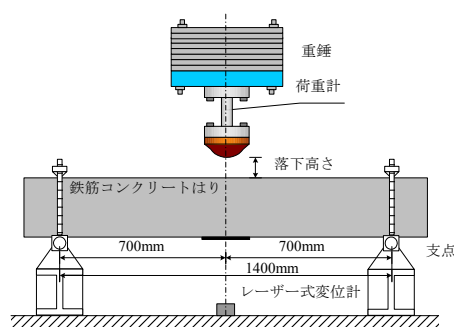


図-4 重錘衝突実験装

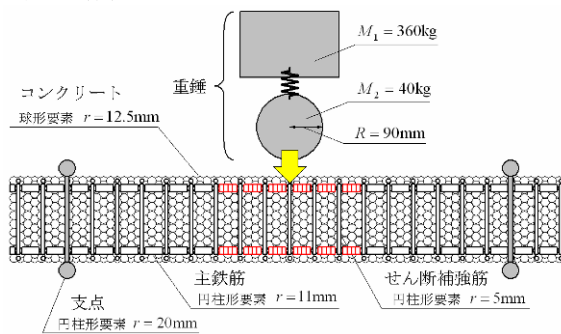


図-5 解析モデル

キーワード 個別要素法, 円柱形要素, 重錘衝突実験

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL:046-841-3810(内 3518)

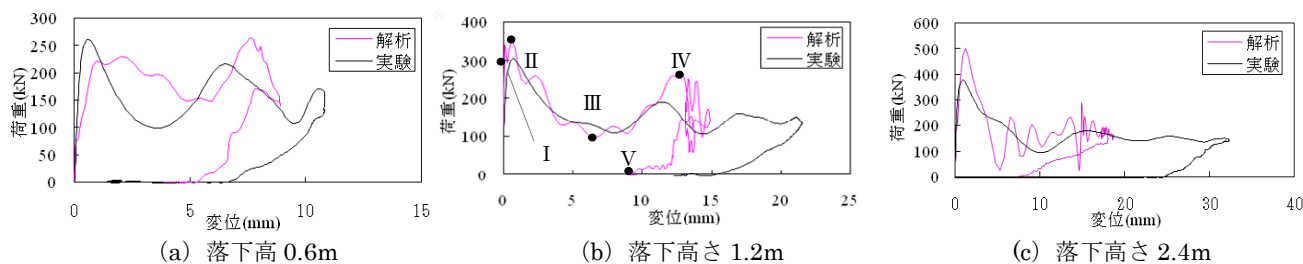


図-6 荷重－変位関係

に重錘落下高さ 0.6m, 1.2m, 2.4m のそれぞれにおいて質量 400kg の重錘を自由落下させ衝突させた。なお、コンクリートの静的圧縮強度は $f'_c=42.0\text{MPa}$ である。

4. シミュレーション解析

4.1 解析モデル

解析モデルは、図-5 に示すように半径 12.5mm の球形要素 6474 個を用いて、最密充填で配列した。また、鉄筋は円柱形要素でモデル化したが、主鉄筋と帯鉄筋の接合部には球形要素を用いた。なお、コンクリートは球形要素、主鉄筋および帯鉄筋は円柱形要素とし、変形の大きなはり中央の主鉄筋については、円柱形要素を 4 分割した。

4.2 解析結果

落下高さ 0.6m, 1.2m, 2.4m の荷重－変位関係を図-6 に示す。荷重－変位関係はいずれも概ねの傾向は合っているが、変位はいずれの落下高さも実験より小さい値となっている。よって、吸収エネルギーの差は、落下高さ 0.6m が-9%、落下高さ 1.2m が-20%、落下高さ 2.4m が-44%となっており、落下高さが大きくなるに従い吸収エネルギーの差は大きくなっている。

落下高さ 1.2m のときの破壊の進展状況を図-7 に示す。なお、図中の記号 I～V は図-6 と対応している。当初はり中央部の下端に引張破壊による破壊面が上方方向に進展し、はり中央部の下端の破壊領域が拡大していき、載荷点方向へ斜め引張破壊が生じているほか、はり中央部上端にも破壊が進展している。それ以降は、はり中央部上端を中心とした円を描くように、はり中央部上端の破壊領域が拡大し、終局に達している。

図-8 に落下高さ 0.6m, 1.2m, 2.4m における実験結果の破壊状況と、解析により得られた終局時の破壊状況を比較して示す。落下高さ 0.6m, 1.2m は実験結果と比べ、ひび割れ本数少なく、中央よりになっているが概ね破壊の終局時のコンクリートのひび割れが再現できている。しかし、落下高さ 2.4m に関しては、解析の破壊終局時におけるはり中央部の破壊領域がはり中央部下端にまで衝突点付近を中心とした半弧状に広がっており、実験の破壊の終局時の実験結果と比較しても再現できているとは言い難い。

5. 結 言

コンクリートのひずみ速度効果を考慮することで、落下高さ 0.6m, 1.2m における破壊の終局時のコンクリートのひび割れの全体的な破壊状況を概ね再現できていることがわかった。しかし、落下高さ 2.4m では、終局時のはり中央部の破壊領域のひび割れが大きくなっ

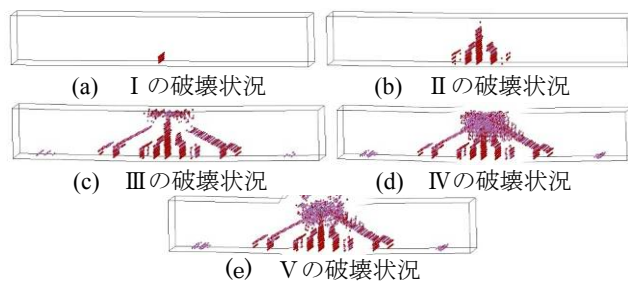


図-7 破壊の進展状況

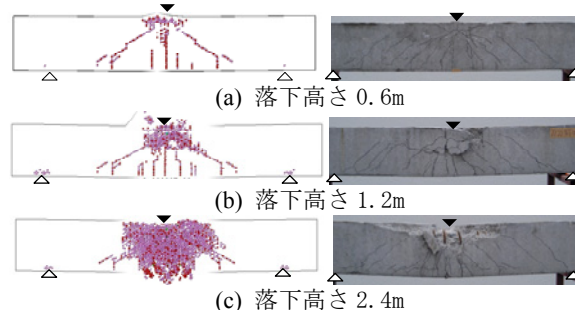


図-8 終局時の破壊状況 (▲：載荷点 △：支点)

ていることから、ひずみ速度効果の考慮によって与えられるはり中央部のコンクリートの強度パラメータについてさらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 原木大輔, 香月智, 藤掛一典: 個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1695-1706, 2001.3.
- 2) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1998.8.
- 3) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度効果を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp.125-134, 2001.2.
- 4) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1567-1580, 1991.3.
- 5) 萩島圭太, 増田佳代, 藤掛一典: 鉄筋コンクリート梁の重錘落下衝撃実験とその解析的評価, 第 34 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-042, 2007.3.