

鉄筋コンクリートスラブの非線形衝撃応答解析

北海道大学工学研究科 学生員 牛島忠史 フェロー 大沼博志 正会員 出雲健司
(財)電力中央研究所 正会員 白井孝治

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が偶発的な飛来物の落下、衝突によって過酷な外力を受けた場合、その構成材料であるコンクリートは多軸応力状態となり、また、載荷速度が速いことから、ひずみ速度依存性を示す。

本報告は、多軸応力状態下の応力 - ひずみの関係式と破壊基準、およびひずみ速度依存性を考慮できるコンクリートの物性モデルを用いて、剛な飛来物が鉄筋コンクリートスラブに衝突した場合の衝撃応答解析を行い、衝突直後における応力波伝播状況の実験結果との比較からその適用性を検討したものである。

2. 鉄筋コンクリートスラブの衝撃実験¹⁾

衝撃実験における載荷方式は、圧搾 N_2 ガスを用いて、模擬飛来物を鉄筋コンクリートスラブに衝突させた。模擬飛来物は、鋼製の円柱(直径 98mm)で、質量 70kg、先端の形状は平坦である。鉄筋コンクリートスラブは、寸法が 1500mm × 1500mm、厚さ 100mm で、鉄筋(SD295A、主鉄筋径:6mm)は、複鉄筋断面とし、鉄筋比を片側およそ 1%とした。上部鉄筋、下部鉄筋それぞれ 5 箇所、2mm の箔ひずみゲージを貼ってひずみ履歴を計測した。鉄筋の配筋図およびひずみ計測位置を図 - 1 に示す。

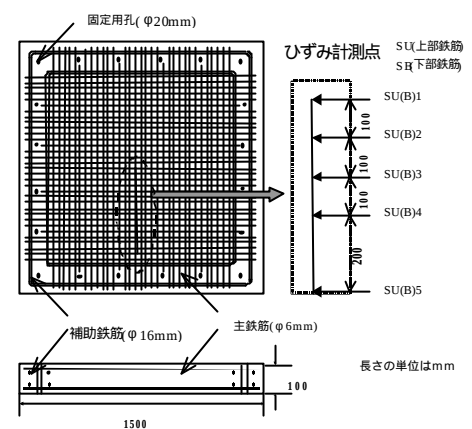


図 - 1 スラブの配筋図および

ひずみ履歴計測位置

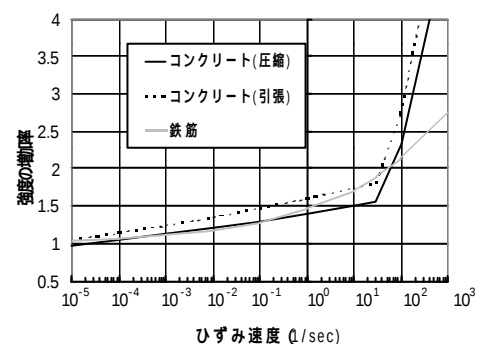


図 - 2 動的強度の増加率と

ひずみ速度の関係

3. 有限要素法による衝撃応答解析

模擬飛来物(要素数: 360)とコンクリート(要素数: 15129)はソリッド要素、鉄筋(要素数: 3363)はビーム要素を用いた。なお、模擬飛来物は多角柱に置き換えている。コンクリートと鉄筋は、完全付着を仮定し、節点を同一とした。衝突速度は、4.58 および 7.95 m/sec であり、ともに破壊形態はひび割れ発生にとどまり、裏面剥離は生じなかった。解析は、模擬飛来物がスラブに衝突した瞬間から開始し、模擬飛来物の各節点に初速度を入力した。

4. 衝撃応答解析に用いた材料物性モデル

4.1 コンクリートおよび鉄筋のひずみ速度依存性

コンクリートおよび鉄筋の強度は、ひずみ速度に依存するものとした。図 - 2 に、コンクリートの圧縮および引張強度と鉄筋の降伏強度について、動的強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。コンクリートには、CEB-FIP Model Code 1990²⁾、鉄筋には、Symonds-Ting タイプの表示式を用いた。数値計算においては、各要素および各時間に

キーワード：衝撃応答解析，ひずみ速度依存性，多軸応力状態，有限要素法

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

TEL：011-706-7276 FAX：011-706-7275

おいてひずみ速度を計算し、その値から得られる動的強度を用いて、コンクリートの圧縮，引張破壊および鉄筋の降伏の有無を照査した。

4.2 多軸応力状態におけるコンクリートのモデル

コンクリートの応力 - ひずみの関係は、静水圧成分と偏差応力成分に分け、独立に取り扱うものとした。コンクリートの破壊基準は、コンクリートを等方、均質性であると仮定し、応力の多軸性を考慮した。純圧縮領域における終局強度破壊面は、Rendulic 応力面上における 2 本の終局強度包絡線および偏差応力面上における終局強度包絡線により形成した。圧縮破壊後は、静水圧成分を保持したまま、偏差応力成分のみを減少させるものとした。純引張領域における終局強度破壊面は、1 軸引張強度を 1 辺とする立方体で定義した。引張破壊後は、応力を指定したステップ数で線形に減少させ、0 になった後は、平面応力状態を仮定した。なお、引張と圧縮が混在する領域では、1 軸圧縮強度と 2 軸引張強度、および 2 軸圧縮強度と 1 軸引張強度を含む平面で閉じた終局強度破壊面を定義した。

4.3 鉄筋のモデル

応力 - ひずみの関係式は、Bi-Linear 型の弾塑性モデルを用いた。また、降伏条件は、静水圧に依存しない Von-Mises 型を適用し、等方硬化するものとした。

5. 実験結果との比較・検証

本解析手法が、過渡的な衝撃応答をシミュレートできるか検討するために、衝撃荷重を受けたスラブが自由振動をはじめる以前の過渡的状态，すなわち、衝撃荷重第 1 波の載荷時間範囲（約 0.8msec）について、実験結果との比較を行った。図 - 3 に、衝突速度 4.58 および 7.95 m/sec の衝撃実験で得られた上部および下部鉄筋のひずみ履歴を解析結果と比較して示す。この図から、解析結果は、過渡応答時の応力波伝播状況を概ねシミュレートできていると思われる。

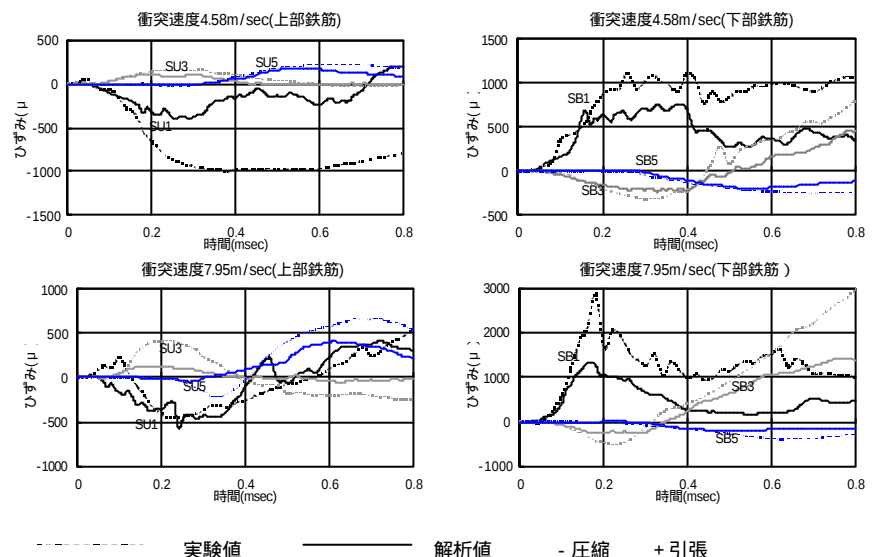


図 - 3 鉄筋ひずみ履歴の実験値と解析値の比較

また、応力波の伝播速度はせん断波の速度（約 2120m/sec）と等しく、解析結果は、各計測点の応力波が立ち上がる時間を良く捉えている。さらに、曲げ引張りひび割れの発生によって下部鉄筋には大きな引張ひずみが生じている。

6. まとめ

多軸応力状態下の応力 - ひずみの関係式と破壊基準，およびひずみ速度依存性を考慮して、鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答解析を行った。実験結果との比較から、破壊形態がひび割れ発生の場合には、本解析手法は、過渡応答時の応力波伝播状況を概ねシミュレートできることが明らかになった。

参考文献

- 1) 大沼博志ほか：鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析，電力中央研究所研究報告，384027，1985.4
- 2) CEB/FIP, “CEB/FIP Model Code for concrete Structures” 1990, pp.48-51