

# LS-DYNA を用いた鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答解析

## IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SLAB BY LS-DYNA

牛島 忠史\*, 大沼 博志\*\*, 出雲 健司\*\*\*, 白井 孝治\*\*\*\*  
 Tadafumi USHIJIMA, Hiroshi OHNUMA, Kenji IZUMO and Koji SHIRAI

\*北海道大学大学院工学研究科修士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
 \*\*工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
 \*\*\*工博 北海道大学大学院工学研究科助手 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
 \*\*\*\*工博 (財)電力中央研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

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,  
 (impact response analysis, strain rate effect, multiaxial stress state, FEM)

### 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。そのため、衝撃応答解析に用いるコンクリートの物性モデルは、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に関する特性を考慮する必要がある。

白井らは、従来の多軸応力下における非線形等方性モデルを修正し、引張領域におけるひび割れの発生や偏差成分の非線形性状、およびひずみ速度依存性を考慮したモデルを提案している<sup>1)</sup>。

本研究は、白井らのモデルを組み込んだ衝撃応答解析コード LS-DYNA 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<sup>2)</sup>

#### 2.1 荷重載荷方式

衝撃実験における載荷方式は、圧搾 N<sub>2</sub> 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。衝突速

度は、N<sub>2</sub> ガスの圧力により制御し、光電式速度計により計測した。

#### 2.2 鉄筋コンクリートスラブ

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, 下部鉄筋のそれぞれ 5 箇所に、2mm の箔ひずみゲージを貼ってひずみ

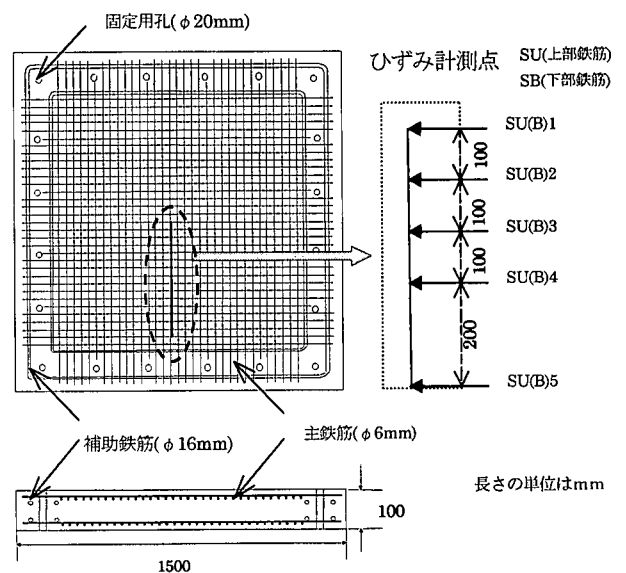


図-1 スラブの配筋図およびひずみ履歴計測位置

表-1 材料物性値

	質量密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	初期体積弾 性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	初期せん断 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	一軸圧縮 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	一軸引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	$2.17 \times 10^{-6}$	9.8	12.04	27.6	2.24
	質量密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	硬化係数 (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋	$7.85 \times 10^{-6}$	205.8	0.3	332.2	2058
模擬飛来物	$5.21 \times 10^{-6}$	94.6	0.3	—	—

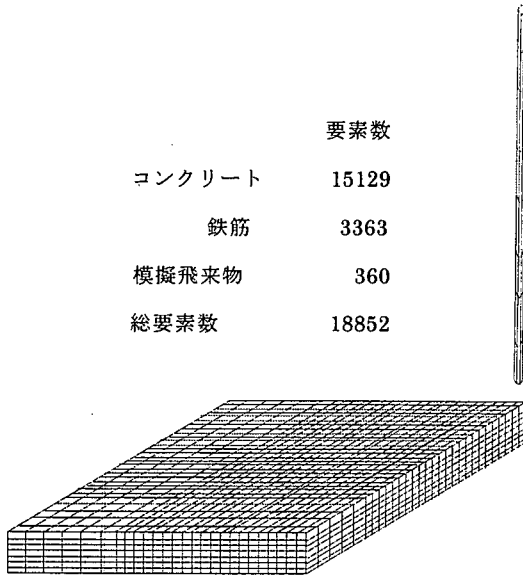


図-2 要素分割図

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。スラブ試験体の四辺は鋼製支持台に固定されている。固定方法は試験体の端から125mmの位置に固定用孔をあらかじめ配置しておき、これにボルトを通して、幅150mm、厚さ12mmの鋼板と支持台を締め付けた。

### 3. 衝撃応答解析手法

衝撃応答解析は、有限要素法による解析コードLS-DYNAを使用した。要素分割は、鉄筋コンクリートスラブおよび模擬飛来物の対称性を考慮し、1/4断面对称モデルを用いた。また、模擬飛来物は多角柱に置き換えている。コンクリートは8節点ソリッド要素、模擬飛来物は6および8節点ソリッド要素、鉄筋はビーム要素でモデル化した。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。図-2に要素分割図を示す。スラブと模擬飛来物の接触要素は、リバウンドを考慮できるようにした。対称面についてはローラー支持、支持台および

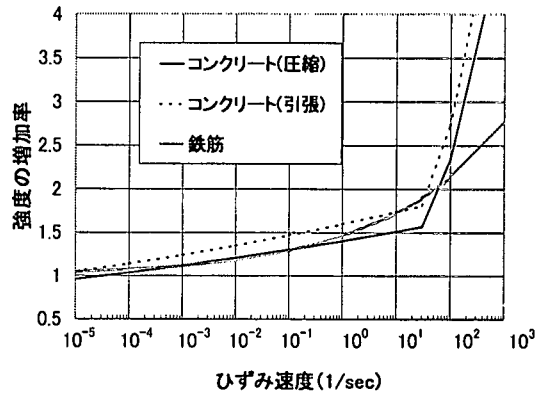


図-3 動的強度の増加率とひずみ速度の関係

鋼板の取付位置に相当する節点は、ピン結合で、高さ方向の移動を拘束した。また、解析に用いた物性値を表-1に示す。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. 物性モデル

### 4.1 強度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-3に動的強度の増加率とひずみ速度の関係を、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あわせて示す。コンクリートには、CEB-FIP Model Code 1990<sup>3)</sup>、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 多軸応力下のコンクリートモデル

#### (1) 応力-ひずみの関係式

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て次式で表示した。

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} K \varepsilon_v + 2G e_{ij} \quad (1)$$

$\delta_{ij}$ : クロネッカーのデルタ

$\varepsilon_v$ : 体積ひずみ  $e_{ij}$ : 偏差ひずみ

各成分は、非線形性状を示すものとし、体積弾性係数 (K) は体積ひずみ、せん断弾性係数 (G) はせん断応力に依存するものとした。

### (2) 破壊基準

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、3軸圧縮試験結果に基づき、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<sup>4)</sup>により形成した。

純引張領域における終局強度は多軸応力状態の影響をほとんど受けなため、1軸引張強度を1辺とする立方体で終局強度破壊面を定義した。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。

### (3) 破壊後の挙動

圧縮破壊後の挙動は、作用応力の八面体せん断応力  $\tau_{oct}$  と終局強度曲面上の八面体せん断応力  $\tau'_{oct}$  を求め、偏差破壊関数  $\Phi$  を次式によって定義した。

$$\Phi = \tau'_{oct} / \tau_{oct} \quad (2)$$

$\Phi$  が1より小さい場合、圧縮破壊後の各ステッ

プにおいて、静水圧成分を保持したまま、この  $\Phi$  だけ偏差応力を減少させるものとした。

引張破壊後の挙動は、主応力方向の要素座標系  $l, m, n$  において  $l$  方向の主応力  $\sigma_l$  が引張強度  $\sigma_t$  に達したとすると、破壊後の応力計算は、 $l$  方向応力  $\sigma_l$  をある指定したステップ数で線形に減少させるものとした。 $\sigma_l$  が0になった後は、 $\tau_{lm} = \tau_{nl} = 0$ ,  $\sigma_l \leq 0$  とし、 $\sigma_m, \sigma_n, \tau_{mn}$  に平面応力状態を仮定して、次式で表示する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_n \\ \tau_{mn} \end{Bmatrix} = [D(\varepsilon_v)] \begin{Bmatrix} \varepsilon_m \\ \varepsilon_n \\ \gamma_{mn} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = \frac{1}{3} \{ (\varepsilon_l - \varepsilon_{crack}) + \varepsilon_m + \varepsilon_n \} \quad (4)$$

ここで、 $D$  は平面応力状態の剛性マトリックス、 $\varepsilon_v$  は体積ひずみ、 $\varepsilon_{crack}$  はひび割れ発生時のひずみを表す。

### 4.3 鉄筋の物性モデル

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、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

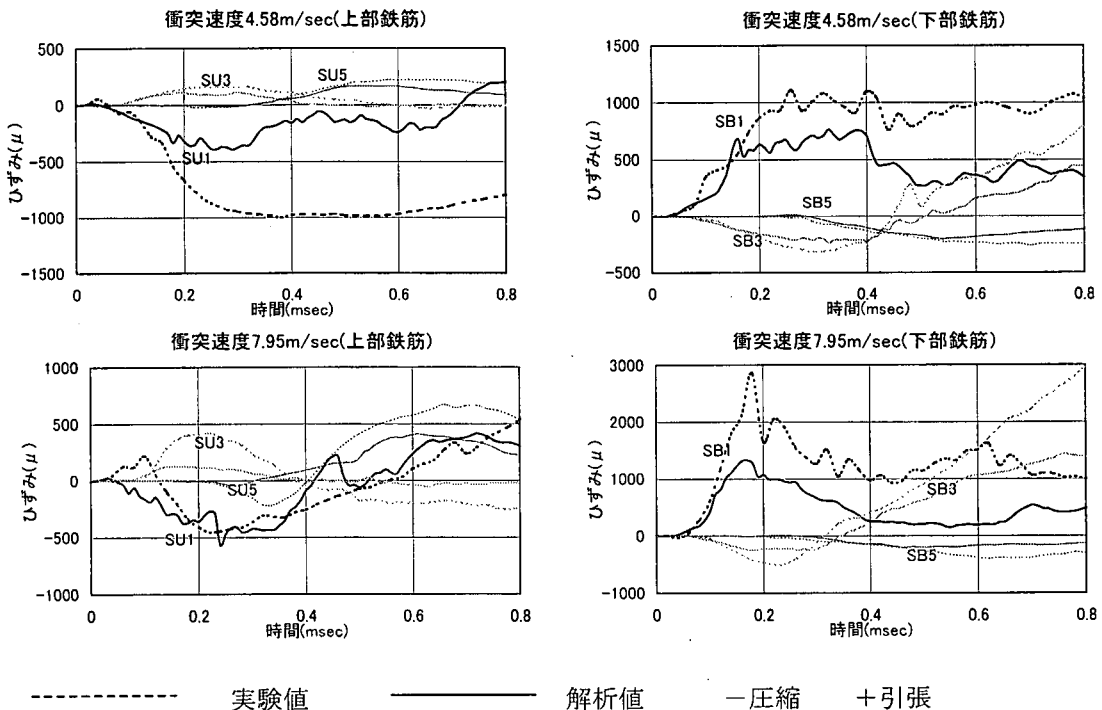


図-4 鉄筋ひずみ履歴の実験値と解析値の比較

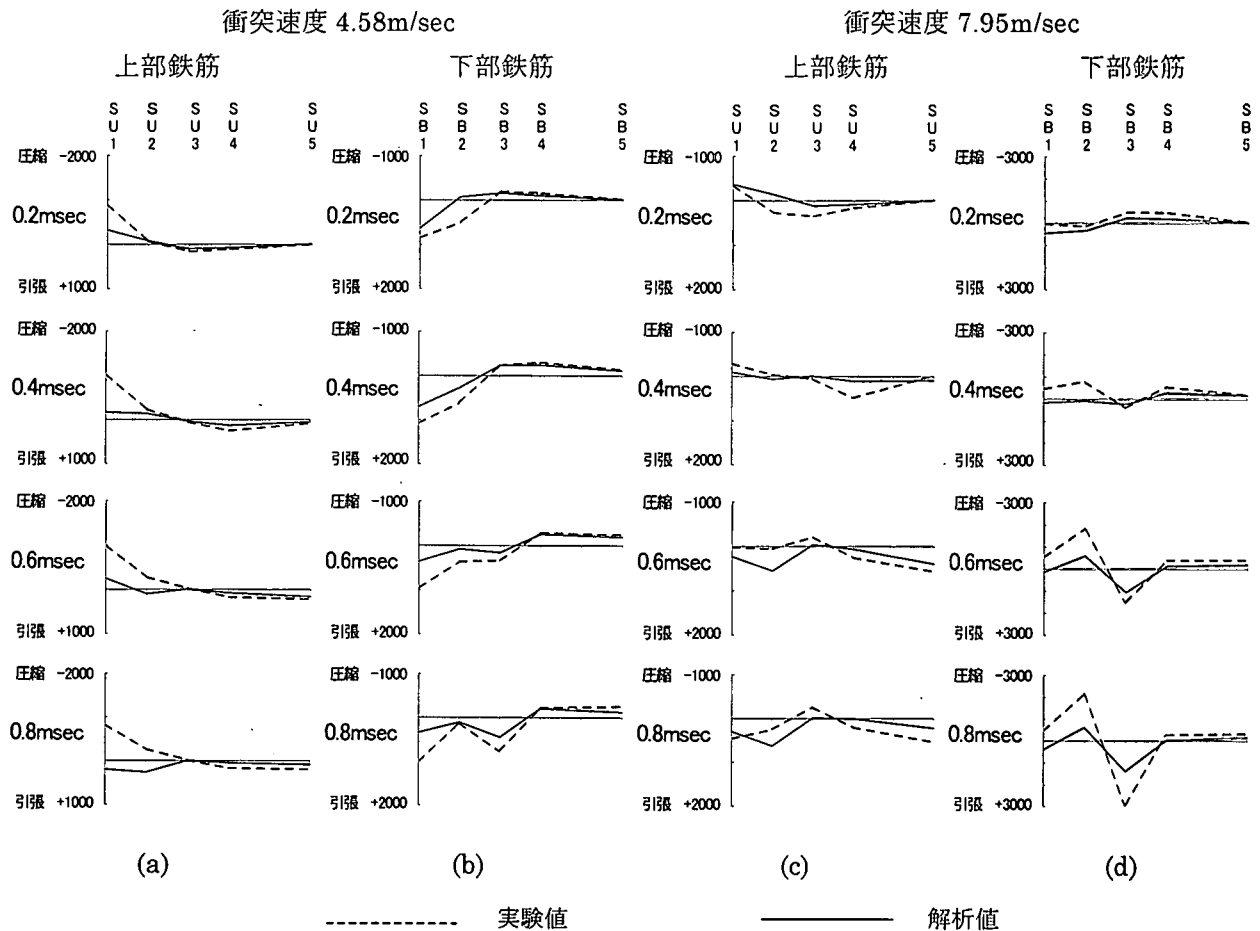


図-5 ひずみ分布の時間的変化

振動をはじめる以前の過渡の状態，すなわち，衝撃荷重第1波の荷重時間範囲（約0.8msec）について、実験結果との比較を行った。図-4に、衝突速度4.58および7.95m/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。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。

図-5に、各計測点における鉄筋のひずみ分布の時間的変化を示す。図-4で示した計測点以外でも、応力伝播状況を概ねシミュレートできていると思われる。

## 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) 白井孝治，伊藤千浩，大沼博志：有限要素法による鉄筋コンクリート構造物の衝撃解析手法，電力中央研究所研究報告，U93053，1994.3
- 2) 大沼博志，伊藤千浩，佐藤宏一，高野博：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
- 3) CEB/FIP，“CEB/FIP Model Code for concrete Structures”1990,pp.48-51
- 4) 石川徹也，大沼博志，名和豊春，勝山裕之：三軸圧縮応力を受ける高強度コンクリートの強度および応力-ひずみ関係，第53回セメント技術大会講演要旨1999