

V-35

有限要素法による鉄筋コンクリート梁の衝撃応答解析

北海道大学工学部 学生員 牛島 忠史
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼 博志
 (財) 電力中央研究所 正 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、衝突によって苛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、また载荷速度依存性の影響を受け、構造物の応答は静的荷重に対するものとは異なると考えられる。さらに、飛来物の衝突速度が速くなると、局部破壊と呼ばれる破壊現象が現れ、鉄筋コンクリート構造物は複雑な破壊挙動を示す。

本論文は、まず多軸応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係式や破壊基準、鉄筋及びコンクリートのひずみ速度効果について検討した。さらに、これら材料モデルを用いた有限要素法により、構造物の基本的な構成要素である鉄筋コンクリート梁部材が衝撃荷重を受ける場合の衝撃応答解析を実施し、モデルの適用性を検討したものである。

2. 鉄筋コンクリート梁の衝撃実験

衝撃実験では、鋼製の模擬飛来物を圧搾 N^2 ガスにより加速し、所定の速度で鉄筋コンクリート梁部材に衝突させた。模擬飛来物は、直径が98mmの鋼製の円柱であり、重量は70kgf、先端の形状は平坦である。衝突速度は、4.6m/secとした。試験に用いた鉄筋コンクリート梁の形状、寸法、配筋状態及び計測点を図2. 1に示す。鉄筋コンクリート梁試験体の寸法は、幅20cm、スパン長200cm、高さ20cmで、配筋(主鉄筋径:13mm、帯鉄筋径:6mm)は複鉄筋断面とし、主鉄筋の鉄筋比は1%とした。コンクリートの圧縮強度は380kgf/cm²、引張強度は32kgf/cm²、弾性係数は 2.73×10^5 kgf/cm²であり、鉄筋はSD295とした。鉄筋にはひずみを測定するための箔フェステルゲージ(ゲージ長:1mm)を貼り付けた。

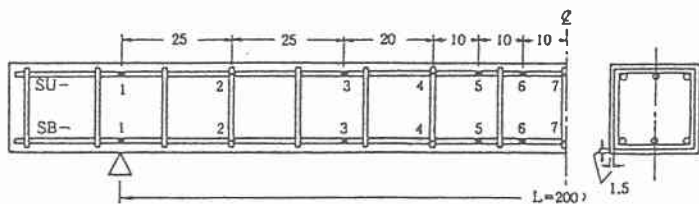


図2. 1 鉄筋コンクリート梁の形状・寸法と配筋状態及び計測点

3. コンクリート及び鉄筋の破壊基準と応力-ひずみ関係式

3.1 コンクリートの破壊基準

(1) 圧縮破壊基準

コンクリートの圧縮破壊基準については、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。すなわち、純圧縮領域における終局強度破壊面は、Rendulic 応力面における2本の終局強度包絡線と偏差応力面上の終局強度包絡線で表示した¹⁾。有限要素法による動的解析においては、要素内で計

Impact Response Analysis of Reinforced Concrete Beam by Finite Element Method

By Tadafumi USHIJIMA, Hiroshi OHNUMA, Kouji SHIRAI

算される主応力が、これら終局強度包絡線に達したときに要素が圧縮破壊するものと定義する。

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

$$\phi = \tau'_{oct} / \tau_{oct} \quad (3.1.1)$$

ϕ 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 ϕ だけ偏差応力を減少させるものとした。

(2) 引張破壊基準

純引張領域における終局強度は多軸応力状態の影響をあまり受けないため、1 軸引張強度を一辺とする立方体で終局強度面を定義した。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、及び 2 軸圧縮強度と 1 軸引張強度を含む平面で定義し、閉じた終局強度面を定義した。

1 軸引張破壊は、第 1 主応力 σ_1 が引張破壊応力 σ_t に達したときに発生するものとする。なお、 σ_1 は要素座標系 l, m, n の 1 軸方向応力である。破壊後の応力計算では、1 方向応力 σ_1 が指定したステップ数で線形に σ_1 だけ減少させるものとした。 σ_1 が 0 になった後は、 $\tau_{lm} = \tau_{nl} = 0$ 、 $\sigma_1 \leq 0$ とし、 σ_m 、 σ_n 、 τ_{mn} に平面応力状態を仮定して、次式で表示する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_n \\ \tau_{mn} \end{Bmatrix} = [D] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_m \\ \varepsilon_n \\ \gamma_{mn} \end{Bmatrix} \quad (3.1.2)$$

D は平面応力状態の剛性マトリックスである。ここで、体積ひずみ ε_{oct} は、

$$\varepsilon_{oct} = \frac{1}{3} \{ (\varepsilon_l - \varepsilon_{crack}) + \varepsilon_m + \varepsilon_n \} \quad (3.1.3)$$

であり、 ε_l は 1 方向のひずみ、 ε_{crack} はクラックひずみを表す。

2 軸引張破壊については、1 軸引張破壊した面内での平面主応力を求め、その第 1 主応力が引張破壊応力 σ_t を越えたときに発生するものとする。破壊後の応力計算では、1 軸引張破壊時と同様に、 m 方向応力 σ_m が指定したステップ数で線形に σ_m だけ減少させるものとした。 σ_m が 0 になった後は、 $\tau_{lm} = \tau_{mn} = \tau_{nl} = 0$ 、 $\sigma_1 \leq 0$ 、 $\sigma_m \leq 0$ のみとする。したがって、 σ_n は 1 軸の応力-ひずみ関係となり、

$$\sigma_n = E(K, G) \cdot \varepsilon_n \quad (3.1.4)$$

で表される。なお、ヤング係数 E は、 G 及び K の関数として求めることができる。

3 軸引張破壊については、2 軸破壊時の破壊面を規定した要素座標系 l, m, n において、 n 方向応力 σ_n が引張破壊応力 σ_t に達したときに発生するものとする。破壊後の応力計算では、1 軸、2 軸引張破壊時と同様に、 n 方向応力 σ_n が指定したステップ数で線形に σ_n だけ減少させたものとした。 σ_n が 0 になった後は、 $\tau_{lm} = \tau_{mn} = \tau_{nl} = 0$ 、 $\sigma_1 \leq 0$ 、 $\sigma_m \leq 0$ 、 $\sigma_n \leq 0$ の条件とする。

(3) 強度のひずみ速度依存性

コンクリートの圧縮強度及び引張強度は、ひずみ速度に依存するものとし、山口らの提案式²⁾を用いた。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{to}} = 0.8267 + 0.02987 \log(\dot{\varepsilon} \times 10^6) + 0.04379 [\log(\dot{\varepsilon} \times 10^6)]^2 \quad (3.1.5)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{co}} = 1.0210 - 0.05076 \log(\dot{\varepsilon} \times 10^6) + 0.02583 [\log(\dot{\varepsilon} \times 10^6)]^2 \quad (3.1.6)$$

図 3.1.1 に、ひずみ速度と破壊強度との関係を示す。なお、動的引張強度(σ_t)は静的強度(σ_{to})に対して最大で 4.0 倍、動的圧縮強度(σ_c)は静的強度(σ_{co})に対して最大で 1.8 倍までとした。数値計算においては、各要素及び各ステップにおいてひずみ速度を計算し、計算されたひずみ速度に相当する動的強度を用いて破壊曲面を構成し、圧縮及び引張破壊の有無を照査した。

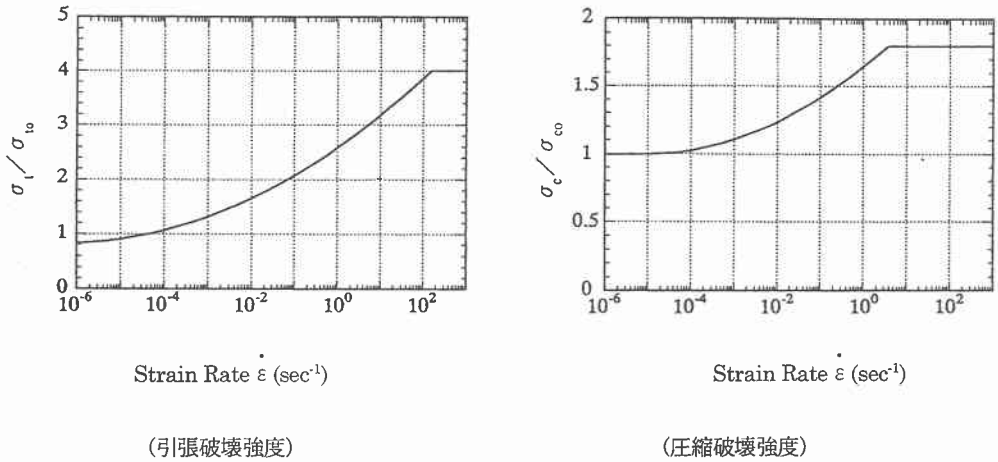


図3. 1. 1 ひずみ速度と破壊強度との関係

3.2 コンクリートの応力—ひずみ関係式

(1) 八面体直応力と八面体直ひずみの関係式

八面体直応力(σ_{oct})—八面体直ひずみ(ϵ_{oct})の関係を図 3.2.1 に示す。接線体積弾性係数(K_T)と初期体積弾性係数(K_0)との比 (K_T/K_0) と八面体直ひずみとの関係は、指数関数を用いて次式のように表示した³⁾。

$$\frac{K_T}{K_0} = 0.118 \times \exp(-65.15 \times \epsilon_{oct}) + 0.882 \times \exp(532.05 \times \epsilon_{oct}) \quad (3.2.1)$$

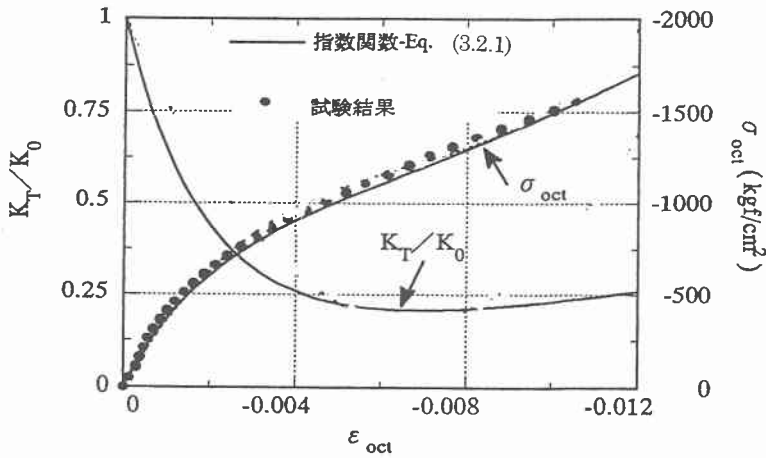


図3. 2. 1 σ_{oct} と ϵ_{oct} 及び K_T/K_0 の関係

(2) 八面体せん断応力と八面体せん断ひずみの関係式

一定静水圧応力下における偏差成分の依存性、すなわち八面体せん断応力(τ_{oct})と八面体せん断ひずみ(γ_{oct})の関係式は、接線せん断弾性係数(G_T)と初期せん断係数(G_0)との比 (G_T/G_0)、 τ_{oct} と 1 軸圧縮強度 f_c との比 (τ_{oct}/f_c) によって式(3.2.2)のように表示した。

$$\frac{G_T}{G_o} = \frac{\left[1.0 - 0.645 \left(\frac{\tau_{oct}}{f_c} \right)^{1.553} \right]^2}{1.0 + 0.357 \left(\frac{\tau_{oct}}{f_c} \right)^{1.553}} \quad (3.2.2)$$

図 3.2.2 に、式(3.2.2)と実験結果との比較を示す。

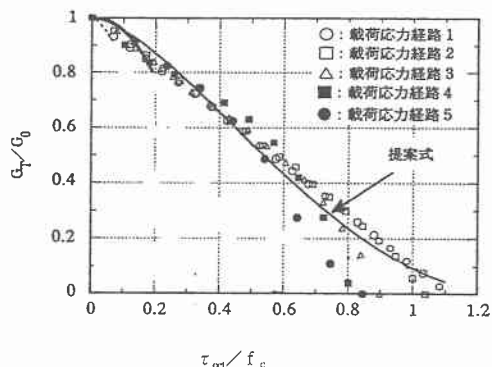


図 3. 2. 2 G_T/G_o と τ_{oct}/f_c との関係

3.3 鉄筋の破壊基準と関係式

(1) 鉄筋の降伏条件

降伏条件として、静水圧に依存しない Von-Mises 型の降伏条件を適用した。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2 \quad (3.3.1)$$

ここで、 σ_y は 1 軸の降伏応力である。

(2) 応力-ひずみの関係式

鉄筋の応力-ひずみ関係式は、Bi-linear 型の弾塑性モデルとし、等方硬化するものとした。

(3) ひずみ速度依存性

鉄筋の材料強度も、コンクリートと同様に、載荷速度の影響を顕著に受けることが知られている。鉄筋の降伏応力は、次式で定義した。

$$\frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ys}} = 1.0 + \left(\frac{3}{D} \right)^{1/p} \quad (3.3.2)$$

ここで、 σ_{ys} は静的降伏応力であり、 σ_{yd} は動的降伏応力である。なお、定数 D および P は、Lindholm の材料試験結果⁴⁾ に対して最小自乗法を適用し、それぞれ 53.908, 5.043 とした。図 3.3.1 にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と動的倍率 σ_{yd}/σ_{ys} との関係を示す。

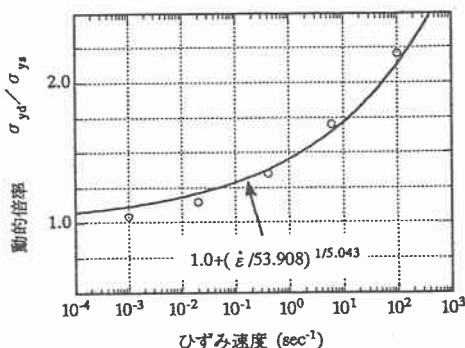


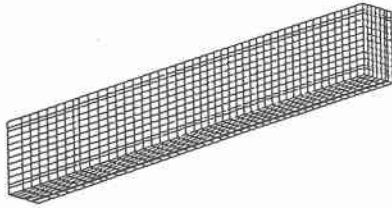
図 3. 3. 1 ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と動的倍率 σ_{yd}/σ_{ys} との関係

4. 鉄筋コンクリート梁の有限要素法による衝撃応答解析

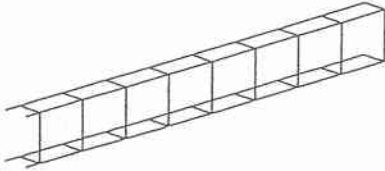
4.1 解析モデル

解析モデルは、鉄筋コンクリート梁及び模擬飛来物の対称性を考慮して、1/4 断面对称モデルを用いた。

図 4.1.1 に要素分割図を示す。鉄筋は、主鉄筋及び帯鉄筋を梁要素でモデル化し、模擬飛来物は多角柱モデルで置き換えた。模擬飛来物の材料特性は、先端部の断面積と円柱部の剛性及び重量が等価になるように決定した。鉄筋コンクリート梁と模擬飛来物が接触する要素には、リバウンドを考慮できるように接触要素を考慮した。対称面についてはローラー支持とし、支持台との取り付け位置に相当する接点はピン結合で、梁の高さ方向への移動のみを拘束した。解析は、模擬飛来物が梁に衝突した瞬間から開始し、各節点に衝突速度を入力した。



(コンクリート部)



(主鉄筋及び帯鉄筋)



(模擬飛来物)

図 4. 1. 1 要素分割図

4. 2 解析結果と実験結果の比較・考察

図 4. 2. 1 に、下部鉄筋のひずみ分布の時間的変化について提案した解析モデルによる解析結果と実験結果の比較を示す。

この解析では、ひずみ速度の時間依存性を考慮しているために局所的な変形が卓越する領域のみ剛性の上昇を考慮していること、偏差成分の依存性を考慮していることから衝突直後のせん断型のひずみ分布から曲げ型のひずみ分布に移行する過渡状態をよく表現しており、また、応答解析結果は実験結果よく一致することが示された。

図 4. 2. 2 に、衝撃実験で得られた上部鉄筋及び下部鉄筋のひずみ応答波形と解析結果とを比較して示す。上部鉄筋及び下部鉄筋の応答波形の包絡形状はほぼ相似の形状をしており、振動数特性や最大値についても、解析結果は実験結果をよく近似していると考えられる。特に衝撃荷重を載荷してから、桁軸方向の曲げ波(伝播速度 $V_s = 2100\text{m/sec}$)が梁端部で反射して戻ってくるまでの時間(1. 2msec)の応答については、両者は良い一致を示している。一方、解析では鉄筋の引き抜き効果を無視していること、衝撃実験の支持条件が解析モデルで表現される理想条件ではないこと等の理由により、4. 0msec以降の支点位置の鉄筋ひずみ S B1 において約 500μ 以上の引張ひずみが生じており、梁全体のひずみ応答もやや低い値を示している。

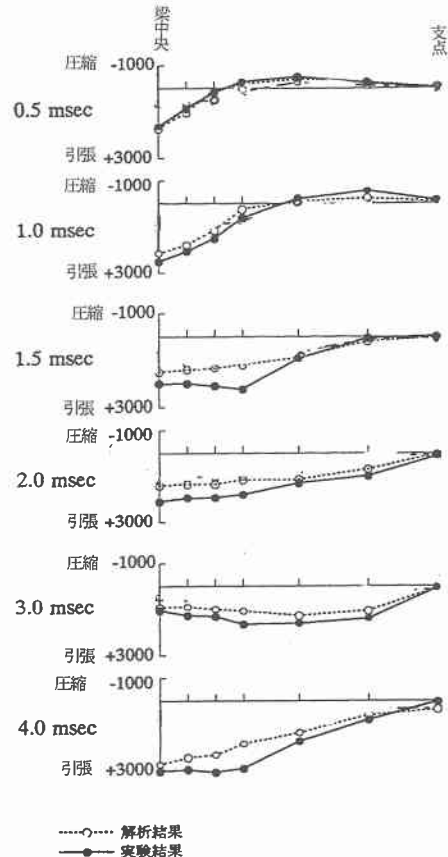


図 4. 2. 1 下部鉄筋のひずみ分布の時間的変化

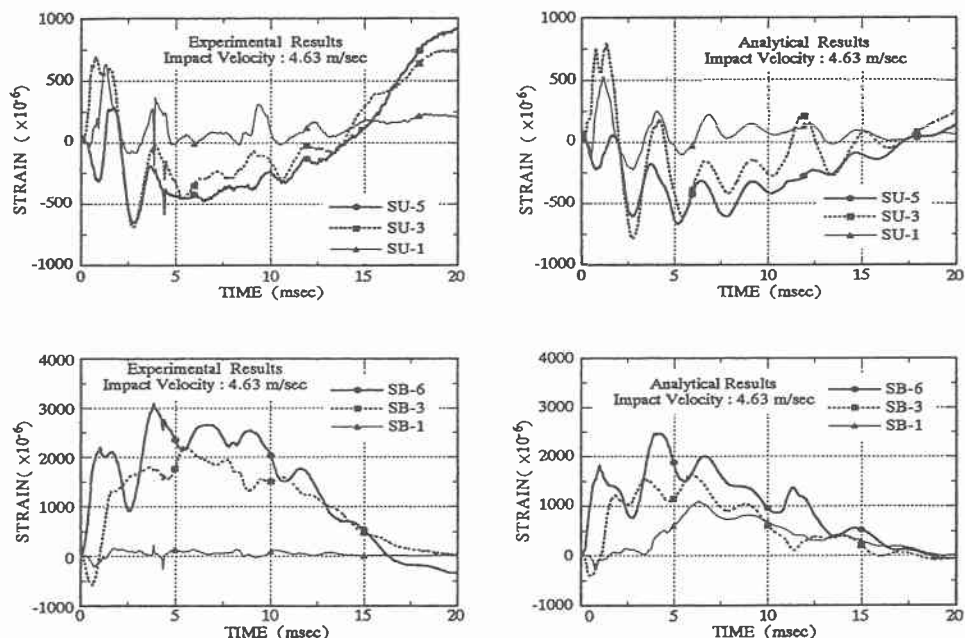


図4. 2. 2 上部鉄筋及び下部鉄筋のひずみ応答波形

5. まとめ

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答現象を数値解析的に評価することを目的として、ひずみ速度効果や多軸応力下の破壊を考慮した鉄筋コンクリートモデルを構築するとともに、鉄筋コンクリート梁の衝撃実験を対象として衝撃応答解析を実施した。解析結果と実験結果との比較から、提案した解析モデルは鉄筋コンクリート梁の衝撃応答を相当によく評価できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 石川徹也, 大沼博志: 三軸応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ構成式, 土木学会北海道支部論文報告集第54号, 1998年
- 2) 山口 弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第396号, 1989年2月
- 3) 山口 弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その1 静的載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第389号, 昭和63年7月
- 4) Lindholm, U. S. and R. L. Bessey, "A Survey of Rate Dependent Strength Properties of Metal", Technical Report AFML-TR-69-119, Air Force Materials Laboratory, 1969
- 5) K. Shirai, C. Ito, H. Oonuma: Numerical studies of impact on reinforced concrete beam of hard missile, Nuclear Engineering and Design, vol. 150, pp483~489, 1994