

V-15

有限要素法によるプレストレスト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	新川 良次
北海道大学大学院工学研究科	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
北海道大学大学院工学研究科	正会員	出雲 健司

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が衝撃荷重を受けた場合、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、載荷速度が速いことによるひずみ依存性を示す。また、構造物の応答は静的荷重に対するものとは異なり、局部破壊と呼ばれる複雑な破壊現象が生ずる。本研究は、このひびわれ発生後に起こる局所的な変形や破壊を評価するために、まずコンクリートのひずみ速度に依存する破壊基準と多軸応力状態下の応力-ひずみ関係式を考慮できる物性モデルを構築した。さらに、この物性モデルを組み込んだ有限要素法の衝撃応答解析プログラムを用いて、プレストレストコンクリート梁の応答解析を実施し、その挙動を検討したものである。

2. プレストレスト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、所定の速度でプレストレストコンクリート梁に衝突させた。模擬飛来物は、直径が 98mm の鋼製の円柱であり、質量は 70kg、先端の形状は平坦である。衝突速度は、4.6m/sec とした。試験に用いたプレストレストコンクリート梁の形状、寸法、配筋状態および計測点を図-1 に示す。プレストレスト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、PC 鋼棒(SBPR 1180/1230)は直径 13mm を使用した。鉄筋(SD295A、主鉄筋径：13mm、帯鉄筋径：6mm)は複鉄筋断面とし、その鉄筋比は 1% とした。コンクリートの圧縮強度は 45.5MPa、引張強度は 3.0MPa、弾性係数は 2.82×10^4 MPa であり、プレストレスは梁の平均圧縮応力が 2.45MPa となるように導入した。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。

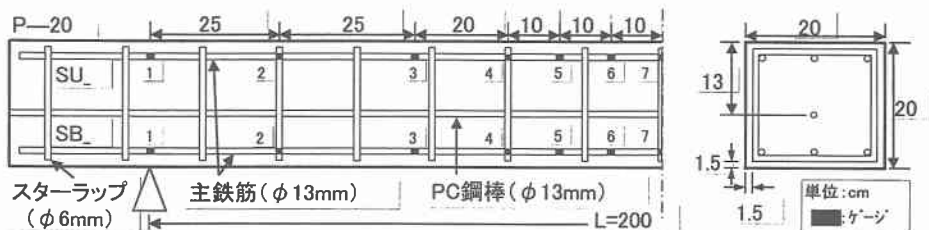


図-1 プレストレストコンクリート梁の形状・寸法と計測点

3. 破壊基準と応力-ひずみの関係式

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 応力面上における 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。Rendulic 応力面上の終局強度包絡線は八面体せん断応力

Impact Response Analysis of Prestressed Concrete Beam by Finite Element Method

By R.SHINKAWA, T. USHIJIMA, H. OHNUMA, and K.IZUMO

(τ_{oe} , τ_{oc})と八面体直応力(σ_{oct})を用いて式(1)、(2)のように与える。偏差応力面上の終局包絡線は楕円成分で与えた(文献(1)参照)。有限要素法による動的解析においては、要素内で計算される主応力が、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。

$$\theta = 0^\circ \text{ の場合: } \frac{\tau_{oe}}{\sigma_c} = 0.0689 + 0.6868 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.0964 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (1)$$

$$\theta = 60^\circ \text{ の場合: } \frac{\tau_{oc}}{\sigma_c} = 0.2040 + 0.8424 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.1204 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 σ_c は一軸圧縮強度、 θ は方向角である。

(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ほとんど受けないため、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定義し、閉じた終局強度破壊面を定義した。

(3) 終局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、CEB Model Code 1990²⁾を用いた。図-2にコンクリートの動的強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。数値計算においては、各要素およ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終局強度破壊面を構成し、圧縮および引張破壊の有無を照査した。

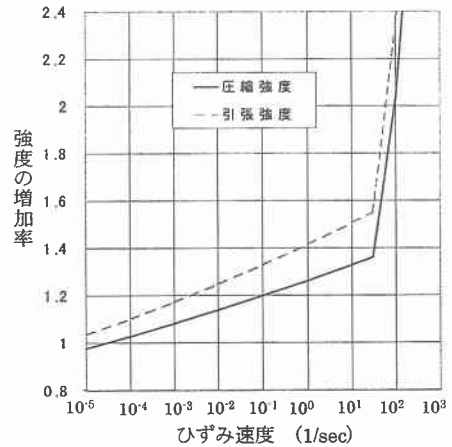


図-2 コンクリート強度のひずみ速度依存性

3.2 コンクリートの応力とひずみの関係式

応力-ひずみ関係は、静水圧成分と偏差応力成分に分けて以下の式で表示した。

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \sigma_m + \sigma'_{ij} = \delta_{ij} K \varepsilon_v + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

δ_{ij} : クロネッカーのデルタ σ_m : 静水圧力 σ'_{ij} : 偏差応力 ε_v : 体積ひずみ ε_{ij} : 偏差ひずみ

(1) 体積弾性係数比の関係式

接線体積弾性係数(K_T)と初期体積弾性係数(K_0)との比は、八面体ひずみ(ε_{oct})を用いて次式のように表示した。³⁾

$$\frac{K_T}{K_0} = 0.118 \times \exp(-65.15 \times \varepsilon_{oct}) + 0.882 \times \exp(532.05 \times \varepsilon_{oct}) \quad (4)$$

(2) せん断弾性係数比の関係式

接線せん断弾性係数(G_T)と初期せん断弾性係数(G_0)との比は、八面体せん断応力(τ_{oct})と1軸圧縮強度(σ_c)との比によって次式のように表示した。

$$\frac{G_T}{G_0} = \frac{\left[1.0 - 0.645 \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_c} \right)^{1.553} \right]^2}{1.0 + 0.357 \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_c} \right)^{1.553}} \quad (5)$$

3.3 破壊後の挙動

圧縮破壊後の挙動には、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。また、引張破壊後の挙動は、引張破壊の方向やひびわれの開閉を考慮できるようにした(文献(4)参照)。

3.4 鉄筋とPC鋼棒の破壊基準と関係式

静水圧に依存しない Von-Mises 型の降伏条件を適用し、等方硬化するものとした。鉄筋の降伏応力は、ひずみ速度の影響を考慮し、ひずみ速度と降伏強度の増加率との関係を次式に示す。鉄筋の応力-ひずみ関係式は、Bi-Linear 型の弾塑性モデルを用いた。

$$\frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ys}} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{53.908} \right)^{1/5.043} \tag{6}$$

ここで、 σ_{yd} は静的降伏応力、 σ_{ys} は動的降伏応力である。

4. プレストレスト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、プレストレストコンクリート梁及び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-3 にその要素分割図を示す。コンクリートは直方体ソリッド要素、鉄筋と PC 鋼棒はビーム要素、模擬飛来物は三角柱ソリッド要素でモデル化した。プレストレストコンクリート梁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とし、支持台との節点はピン結合で、梁の高さ方向への移動を拘束した。解析では、まず最初に動的緩和法を用い、図-4 に示すようなプレストレス力による梁断面の応力分布を求めた。次に模擬飛来物の各節点に初速度を与えて、プレストレストコンクリート梁に衝突させた。

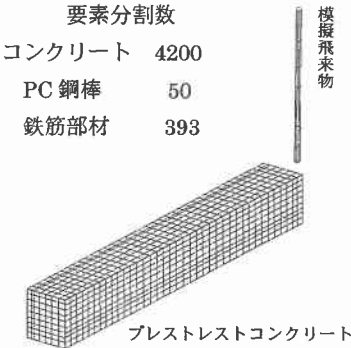


図-3 要素分割図

4.2 解析結果と実験結果の比較および考察

図-5 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を比較して示す。実験結果は、1500 μ を上限値と設定していたことから解析結果と実験結果は完全に一致するとは言えないが、衝撃応答は複雑な挙動であることを考えると、本解析方法を用いて衝撃応答をよく算定できると考える。

下部鉄筋のひずみ分布の時間的変化について解析結果と実験結果の比較を図-6 に示す。この解析では、各要素に対して強度のひずみ速度依存性を計算しているために衝突面近傍の衝突直後における過渡状態をよく表わしていると考えられる。

ただし、SB3 のデータが計測できなかったために、このグラフでは SB2 と SB4 の実験値を直線でつないでいる。また、図-5 と同様に、実験結果に 1500 μ の上限があるが、解析結果と実験結果は比較的良好に一致を示していると思われる。

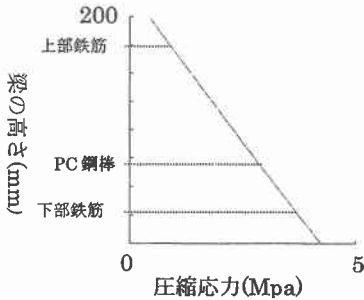


図-4 断面の応力分布

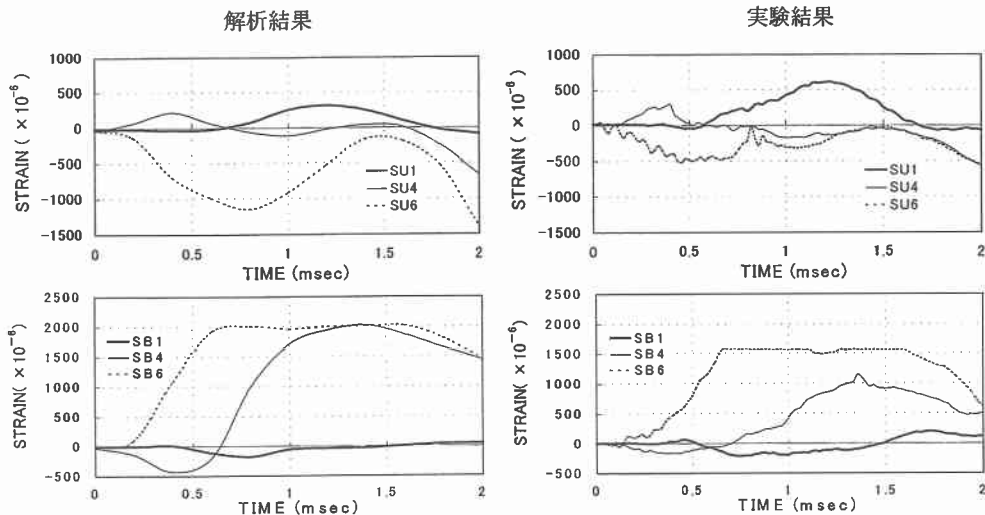


図-5 上部鉄筋及び下部鉄筋のひずみ応答波形

5. まとめ

コンクリートの多軸性を考慮にいれた破壊基準、応力-ひずみ関係式の静水圧成分や偏差応力成分の非線形性、および破壊強度のひずみ速度依存性を考慮したコンクリートの物性モデルを構築した。さらに、この物性モデルを用いてプレストレストコンクリート梁の衝撃応答解析を実施し、実験結果の比較から、衝突直後の過渡応答時における応力波の伝播を概ねシミュレートできることが明らかにされた。

参考文献

- (1)石川哲也、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 1990
- (2)CEB/FIP, "CEB/FIP Model Code for concrete Structures" 1990, pp.48-51
- (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)牛島忠史、大沼博志、白井孝治：有限要素法による鉄筋コンクリート梁の衝撃応答解析、土木学会北海道支部論文報告集第54号、1998年

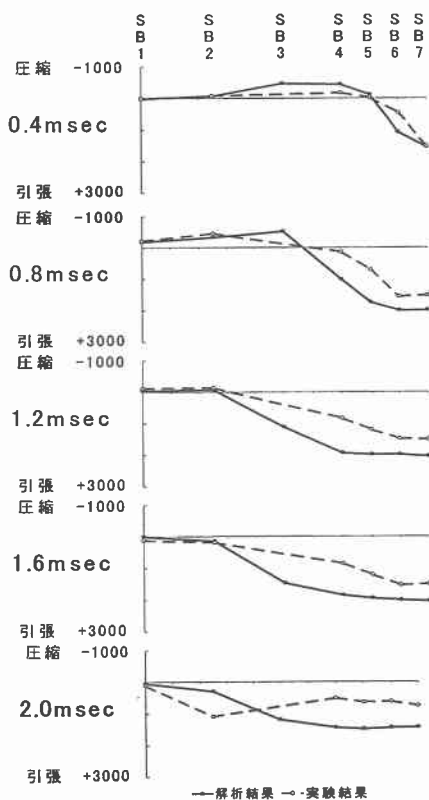


図-6 下部鉄筋のひずみ分布の時間的变化