

(7) 落石等を受けるコンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析

神戸大学工学部 宮本 文穂
神戸大学大学院 ○ M. W. KING

1. まえがき

落石等による衝撃作用を受けるコンクリート構造物の動的挙動及び破壊形式の解明は今だに十分とは言いがたく、設計上効果的な対処ができない現状にある。本研究は、鉄筋コンクリート (RC) 版構造に作用するソフトな衝撃¹⁾、すなわち、落石、車両、船舶等が衝突する結果、衝撃力の立ち上がりの比較的ゆっくりとした衝撃作用下での衝撃破壊挙動をRC版構造を対象に非線形動的積層化有限要素法を適用して解析的に明らかにしようとしたものである。ここでは、多軸応力状態における破壊条件、塑性理論及び衝撃作用時の負荷状態に対する考慮を導入することによって、主にRC版の破壊メカニズム及び破壊形式の予測を試みるものである。なお、これらの解析結果に対して実物のRC版の衝撃破壊実験を実施することによって、本解析法の検証を行った。

2. コンクリートの降伏及び破壊条件

衝撃作用を受けるRC版構造の破壊の進行状況及び最終的な破壊形式は、面外せん断応力の影響を大きく受けるものと思われる。ここでは、面外せん断応力を考慮するために、コンクリートの3軸応力状態での降伏及び破壊条件を適用した。すなわち、Ottosen²⁾によって提案された多軸応力状態の破壊曲面を用い、その破壊曲面を次式で表わす。

$$f(\rho, \sigma_m, \theta) = \rho - \rho_f(\sigma_m, \theta) = 0, \quad |\theta| \leq 60^\circ \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\rho = \sqrt{2J_2}$ は、静水圧軸と鉛直方向の応力成分、

$\rho_f(\sigma_m, \theta) = [-\sqrt{2} \cdot \lambda + \sqrt{2 \cdot \lambda^2 - 8a(3b \cdot \sigma_m - 1)}] / (2a)$ は、偏差応力軸における破壊曲面であり、

$$\lambda = \begin{cases} k_1 \cdot \cos[(1/3) \cdot \cos^{-1}(k_2 \cdot \cos(3\theta))] & ; \cos(3\theta) \geq 0 \\ k_1 \cdot \cos[(\pi/3) - (1/3) \cdot \cos^{-1}(-k_2 \cdot \cos(3\theta))] & ; \cos(3\theta) < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\sigma_m = I_1/3$ は、平均垂直応力、 I_1, J_2, θ は応力テンソルの不変量である。

上式において、定数 a, b, k_1, k_2 は、コンクリートの2軸及び3軸応力状態の材料特性によって決まる値であるが、これらの値を直接得るための実験及び測定が困難なことから、これまでの文献中に示されている代表的な実験結果を用いて決定されることが提案されている²⁾。本解析では、 $\bar{f}_t (=f_t/f_o') = 0.12$ に対応する値、 $a=0.9218, b=2.5969, k_1=9.9110, k_2=0.9647$ を用いることにした。

一方、コンクリートの多軸応力状態の降伏条件は、実験結果より正確な設定が難しいものであり、一般的には破壊条件の関数として仮定される。古典的塑性理論では、Fig.1(a)に示すように、降伏曲面の形は破壊曲面と似た形を保ちながらその形が増大するとされる場合が多い。しかし、コンクリートの場合、純引張応力状態下 (Fig.1中の $-z$ 方向)での塑性化はほとんど認められずに引張破壊に至るため、コンクリートの降伏曲面を、Chenら³⁾によって提案された硬化塑性モデルを修正し、Fig.1(b)の破線部分で示されるような形となるようにした。ここで、ひずみ硬化中においては、負荷曲面は広がり初期降伏曲面から最終破壊曲面へと形状を変化して行く過程をたどる。また、コンクリートの初期降伏状態での非弾性体積収縮及び終局状態での体積膨張を取り扱うため、本研究では非関連(non-consistent)流れ則を導入することにする。すなわち、塑性ポテンシャルと降伏条件を異なる関数として取り扱い、モデルの簡略化をはかるため、Drucker-Pragerの塑性ポテンシャルを流れ則とする。

次に、全ひずみ増分は、弾性ひずみ増分と塑性ひずみ増分の和として与えられると仮定することによって、

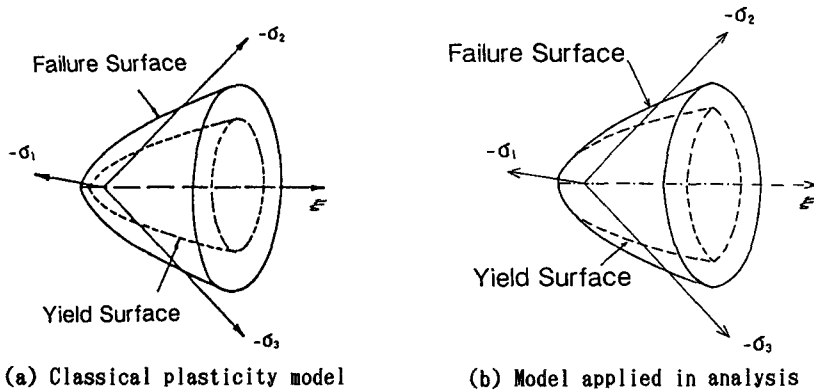


Fig.1 Yield and failure surfaces

応力空間における負荷及び除荷条件はDruckerの安定性条件に基づくものを衝撃力の各荷重段階で適用し、除荷時では、弾性ひずみ増分のみ減少させることにした。

3. 衝撃破壊挙動解析

3.1 解析法⁴⁾: 衝撃破壊挙動解析は、準3次元の解析法である積層化有限要素法に動的解法であるNewmark-β法を併用し、前述の破壊条件のもとで行った。本解析で用いたRC版の1/4部分有限要素モデルをFig.2に示す。このモデルは後述の確認実験と対応させて130×130×13cmの2辺単純支持された複鉄筋コンクリート版とし、スパンは120cmで版中央等分布荷重とする。

解析における基本仮定は以下のようである：

- (1) 弾性・塑性両域において法線保持の仮定が成立する、
- (2) RC版を、仮想のコンクリート層と、軸力と平面方向のせん断力を負担する線材として取り扱う鉄筋層でモデル化する。ただし、鉄筋は層として取り扱っているが、ポアソン比を無視することによって線材とする、
- (3) 要素で代表されるコンクリート各層は、平面応力場にあるものとみなし、層間に滑りは生じないものとする、
- (4) 弾塑性域とも曲げモーメントを弾性部分の中心回りで取り扱う、
- (5) 弾性範囲を越えるコンクリート要素を直交異方性体と仮定する。なお、各要素の破断及び破壊現象の取り扱いはその部分に蓄積されていた弾性ひずみエネルギーを内部応力に等価な要素節点力に置換する方法とする、
- (6) 入力データとして用いる各材料特性は、静的一軸特性に基づくものを用いる。なお、コンクリートの材料特性は、3軸応力状態における相当応力～相当ひずみ関係に変換した特性を用いる。

以上の仮定のもとに行う解析モデルの積層数は2層の鉄筋層を含む合計8層で、鉄筋層の弾性係数は、 x 、 y 両方向の鉄筋量によって換算したものを与える。また、衝撃力の入力データは、解析精度の確認実験において測定された衝撃力(重錘加速度に重錘質量を乗じて算出した)～時間関係を用いる。

各要素は、20自由度を有する4節点(各節点に5自由度)長方形要素を用いる。ここでは、板要素の面内力、面外力及び両方の連成項を考慮した。これらの要素の剛性マトリックスは、各積層ごとの剛性マトリックスをたし合わせたものとする。なお、質量モデルとしては、整合質量モデルを用いる。

衝撃作用を受けるRC版の場合、衝撃力の作用する時間が短いため、最大応答を支配する減衰の影響は十分に小さいと考えられるので、減衰力の効果は無視した。従って、有限要素系の平衡方程式は次式のように表される。

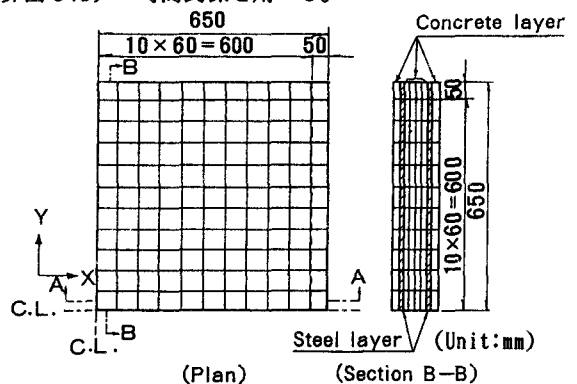


Fig.2 Layered finite element meshes (1/4 part)

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\}_t + [K] \cdot \{U\}_t = \{R\}_t \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[K]$ は、それぞれ質量、剛性マトリックスであり、 $\{R\}_t$ は外力ベクトル、 $\{U\}_t$ 、 $\{\dot{U}\}_t$ は、それぞれ有限要素集合体の加速度、変位ベクトルである。この平衡方程式の解法として、Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) を適用して得られる次式を用いた連立一次方程式を解くことによって得た。

$$\left[[K] + \frac{1}{\beta \cdot \Delta t^2} [M] \right] \cdot \{\Delta U\}_{t+\Delta t} = \{\Delta R\}_{t+\Delta t} + [M] \cdot \left[\frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \{\dot{U}\}_t + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{U}\}_t \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\{\Delta R\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{\Delta U\}_{t+\Delta t}$ は、微小時間 Δt における外力及び変位増分ベクトルである。ただし、本解析では、各時間ステップでの不釣り合い力が解消されるまで反復計算を行うものとする。時間増分 Δt の決定は、解の安定性を検討した結果を用い、破壊解析で0.05msとした。

3.2 解析精度の確認: 本解析結果の精度を確認するため、解析モデルと対応させたコンクリート版の衝撃破壊実験を行った。実験方法の詳細は文献(5)を参照されたい。供試体は、普通強度RC版及び高強度RC版（以下、それぞれRC版、HRC版と略記）の2種類とした。コンクリートの設計基準強度はRC版で $f_{ok}'=300\text{kgf/cm}^2$ 、HRC版で $f_{ok}'=900\text{kgf/cm}^2$ とした。

Fig. 3(a), (b)は、RC版、HRC版それぞれの衝撃力～版中央変位関係を実験及び解析結果で比較したものである。Fig. 3(a)より、RC版に対する解析結果は弾塑性範囲とも実験結果と良い一致を示していることが分かる。特に、最大衝撃力までの挙動は、実験・解析両者でほとんど差がないくらいの一致を示す。しかし、衝撃力の除荷領域においては、振動の影響が入り多少の差異は見られるようになる。一方、Fig. 3(b)のHRC版での比較では、衝撃力の増加に伴って差異は生じるようになるが、載荷初期における剛性は比較的良く一致しているといえる。また、解析結果でのひびわれ発生後の剛性低下は実験結果に比べて過大となり、荷重の除荷領域では、自励振動の影響が現われるようになる。この理由として、Ottosenの破壊条件は普通強度コンクリートに対して提案されたものであるため、高強度コンクリートへの適用には問題点があることが考えられる。従って、実際の現象よりも、解析上の高強度コンクリートの破壊の進行が早くなったものと思われる。しかし、全体的挙動としては、解析結果は実験結果を比較的良い精度で推定可能であるとみなせる。

以上の結果より、本解析法は比較的精度良くRC版及びHRC版の破壊挙動を解析できるものと思われる。

3.3 RC版の衝撃破壊挙動解析: 解析結果の一例として、Fig. 4及びFig. 5にRC版の変形挙動に及ぼす載荷（衝撃力）速度の影響を解析的に比較したものを示す。ここで、載荷速度は、衝撃力波形の立ち上がり時間と最大衝撃力に達するまでの時間の間の平均速度と定義した。解析は、RC版の破壊をコンクリートの圧縮破壊、または衝撃力が増大するのにもかかわらず、たわみが減少しはじめる時点と定義し、これらの現象に至るまで計算を行った。

Fig. 4は、2種類の極端な載荷速度の場合の主、配力筋方向たわみ分布図を示したものである。図中、実

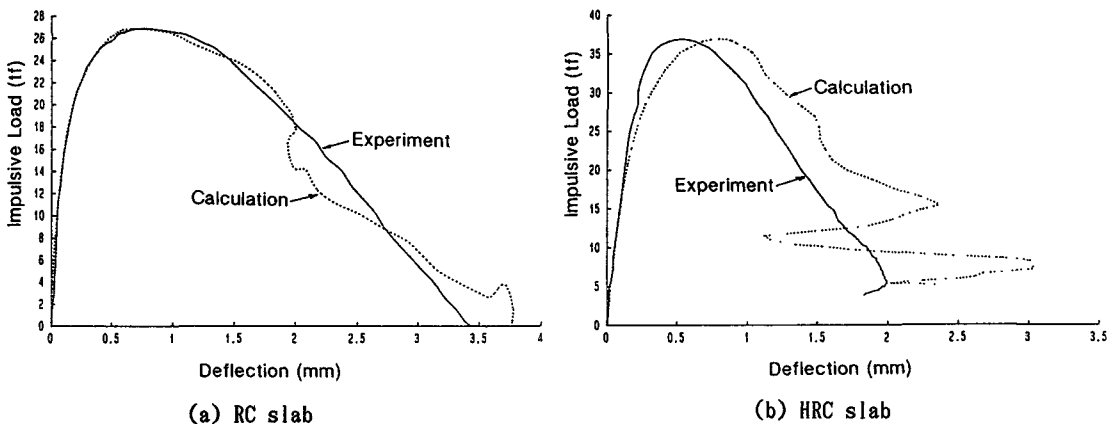
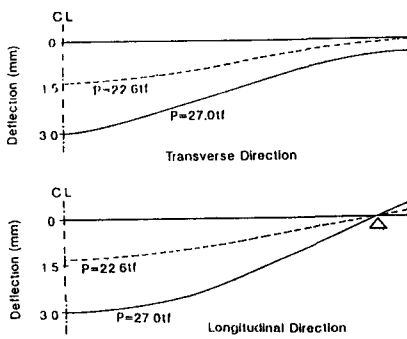
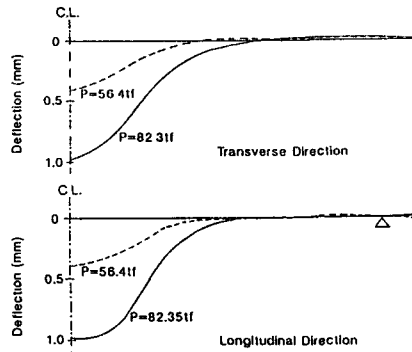


Fig.3 Impulsive load-midspan deflection function



(a) Low loading rate ($v_L=7.5\text{tf/msec}$)



(b) High loading rate ($v_L=139.2\text{tf/msec}$)

Fig.4 Deflection for different loading rates

線は破壊時のたわみ分布で、破線は破壊前のたわみ分布である。この中でFig.4(a)は荷重速度の比較的遅い衝撃現象の結果であり、版全体に変形が生じ、曲げ破壊に至る過程が現われている。また、主筋方向及び配筋力方向ともに変形が一樣に分布され、衝撃作用時のエネルギーが版構造全体に分散されると考えることができる。一方、Fig.4(b)は比較的荷重速度の速い衝撃現象の結果を示しており、版中央あたりに局部的変形が生じ、押し抜きせん断に近い破壊に至ったことが予想される結果となっている。なお、前者の場合と比較すると、後者の場合の最大たわみは小さくなる傾向を示すことがわかる。

Fig.5は、種々の荷重速度におけるRC版の破壊に至るまでの衝撃力～版中央たわみの関係を示したものである。これより、荷重速度の遅い領域では、破壊時変形が大きく最大衝撃力は小さくなる傾向が得られ、荷重速度の増大とともに、破壊時のたわみは小さくなり最大衝撃力は大きくなるというよく知られた傾向が見られる。これらの曲線の破壊時変形を囲む衝撃作用時の破壊包絡線が図中の点線のように得られ、この包絡線より、中間の荷重速度領域に版中央たわみの極小点が存在し、荷重速度の速い領域と荷重速度の遅い領域での破壊メカニズム及び破壊形式等に差異が現われることが解析的に明らかになったものといえる。

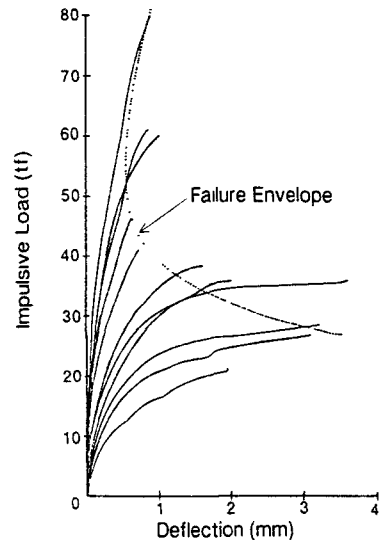


Fig.5 Impulsive load-midspan deflection function (Analysis)

4. 結論

本研究より得られた主な結果をまとめると以下のようになる：

- (1) 積層化有限要素法にOttosenの破壊条件及びDrucker-Pragerの塑性ポテンシャルを適用することによって、比較的高精度でコンクリート版構造の衝撃破壊挙動の予測が可能となった。
- (2) 荷重速度の異なる領域でのRC版の破壊のメカニズム及び破壊形式の差異を解析的に明らかにすることができた。すなわち、荷重速度の比較的遅い領域では、曲げ破壊が支配的となり、逆に荷重速度の速い領域では、押し抜きせん断破壊が起こりやすい。

参考文献：(1)藤井、宮本：衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動，コンクリート工学，Vol.21，No.9，1983。(2) Ottosen, N.S.: A Failure Criterion for Concrete, J. Engng. Mech. Div. (ASCE), Vol.103(EM4), 1977, pp.527-535。(3) Han, D.J. and Chen, W.F.: Constitutive Modelling in Analysis of Concrete Structures, J. Engng. Mech. Div. (ASCE), Vol.113, 1987, pp.577-593。(4) King, M.W., Miyamoto, A. and Nishimura, A.: Failure Criterion and Analysis of Failure Modes for Concrete Slabs under Impulsive Loads, Memoirs of the Grad. School of Science and Technology, Kobe University, No.9-A, March 1991。(5) Miyamoto, A. and King, M.W.: Nonlinear Dynamic Analysis and Evaluation of Impact Resistance for Reinforced Concrete Beams and Slabs under Impulsive Load, Memoirs of the Fac. of Engng., Kobe University, Nov.1989, pp.37-62.