

(17) 衝撃力特性を考慮したコンクリート版構造の衝撃破壊挙動と耐衝撃性

阪神高速道路公団 ○石橋 照久
神戸大学工学部建設学科 宮本 文穂
神戸大学大学院自然科学研究科 M. W. KING
神戸大学大学院工学研究科 三戸 雅文

1. はじめに

RC構造物の衝撃問題には、離散化手法に分類される有限要素法、個別要素法などの解析手法が適用されるが、衝撃力の特性を十分に考慮した、しかも耐衝撃設計に適用可能な衝撃応答解析法はまだ確立されていないのが現状である。本研究では、多質点ばねモデルによる衝撃力特性解析²⁾とRC版構造に対する衝撃破壊挙動解析³⁾を、各時間増分ごとに相互にデータの授受を行うことによって統合することを試みる。これによって、被衝撃体の剛性やひびわれの進行あるいは部分破壊の考慮が可能となり、比較的簡単に実際の現象と対応させた衝撃力特性のもとでの衝撃破壊挙動解析が実現できる。また、2つの解析手法の統合による利点を確認するために、一例として、鉄筋コンクリート製高欄に対する衝撃破壊挙動解析を行い、コンクリート構造物に伝達される運動エネルギー収支の評価を含めた耐衝撃性評価を行う。

2. 衝撃力特性のモデル化^{1), 2)}

2.1 衝撃力特性の定義：ここではコンクリート構造物に作用する衝撃力の特性を評価するために、図-1に模式的に示すような物理特性として、衝撃力特性を以下のような諸量で定義した：①最大衝撃力 (Maximum impact force)、②衝撃作用時間 (Duration of impact force)、③衝撃力立ち上がり時間 (最大衝撃力に達するまでの時間; Time to maximum force)、④衝撃力特性初期の立ち上がり勾配 (载荷速度; Loading rate)、⑤衝撃力波形 (Shape of impact force)、⑥力積 (Impulse)。

2.2 多質点ばねモデルによる衝撃力特性の解析：衝撃力

特性の解析には、図-2に示すような多質点ばねモデルを使用した。本解析モデルは、各質点(m_i)間に非線形軸方向ばね(k_i)と回転ばね(g_i)および回転運動減衰と軸方向減衰(ダッシュポットで表現するもので図-2では省略している)をそれぞれ与え、質点の分布が偏心を有する場合にも衝撃力特性の再現を可能にした。一方、被衝撃体は、コンクリート構造物を質点(m_c)で表し、線形ばね(k_c)とダッシュポット(c_c)によって完全剛体に連結されているものとしてモデル化した。図-2における各質点でのx, y, z方向および各軸回りの回転方向の運動方程式を動的解析法の1つであるNewmark- β 法($\beta=1/6$)を適用して逐次計算を行い衝撃力を算定する。なお、衝撃力特性の解析方法の詳細および解析結果の検証方法の詳細については巻末の文献1)および2)を参照されたい。

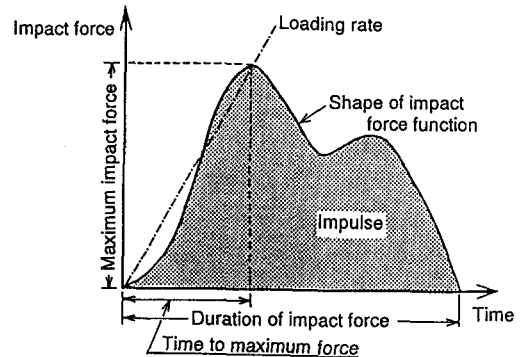


図-1 衝撃力特性の定義

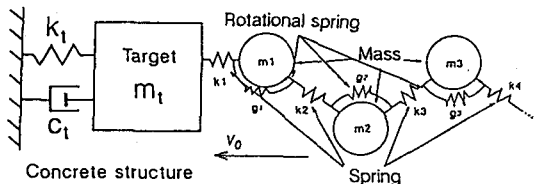


図-2 多質点ばねモデル^{1), 2)}

3. RC版構造の衝撃破壊挙動の解析手法^{3)・4)}

RC版構造の衝撃破壊挙動解析には、非線形積層化有限要素法にNewmark- β 法($\beta=1/4$)を用いた。本解析では、図-3に示すようにRC版がコンクリート層および鉄筋層の積層で構成されていると考え、各層を平面応力状態として取り扱う。各要素は4節点からなる非適合長方形要素とし、要素の各節点は5自由度を有する。衝撃作用下でのコンクリート構造物の挙動は、衝撃力の作用時間が短いために減衰の影響は小さいと考えられ、ここでは減衰の影響を無視する。また本解析では、各材料のひずみ速度効果の影響については無視するものとするが、各要素ごとの運動方程式中に慣性項が含まれており、ソフトな衝撃にみられる見掛けの強度上昇の効果は考慮されていると考える。コンクリートの破壊条件には、Otosenの3軸応力条件下での破壊条件⁵⁾を用い、補強筋については1軸破壊条件を適用する。コンクリートの材料特性は、静的1軸試験データに基づいて、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3軸特性を用いる。図-4に、衝撃破壊挙動解析のフローを示す。RC版構造の解析上の破壊の定義は、コンクリートの圧壊時、あるいは鉄筋の破断時とし、衝撃破壊モードを曲げ(B)、曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊(B→PS)および押し抜きせん断破壊(PS)に分類した。

以上のような解析手法に基づいた解析結果の検証は、RC版に対する衝撃破壊実験結果との比較により行い、ほぼ精度良く破壊前の弾性挙動、ひびわれ発生後の終局挙動および破壊モードなどの予測が可能であることを確認している。なお、衝撃破壊挙動の解析方法の詳細および解析結果の検証精度の詳細については巻末の文献3)および4)を参照されたい。

4. 衝撃力特性を考慮したRC版構造の衝撃破壊挙動解析

4.1 衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析の統合： 衝撃力特性解析では、被衝撃体であるコンクリート構造物の破壊の進行に伴う剛性低下を直接考慮できないため、衝撃力を過大評価する傾向があり、構造物の実際の現象と忠実に対応した衝撃力特性を表現できない場合がある。そのため、本手法による衝撃力特性解析では衝撃力特性を定義する諸量の算定やそれを利用した設計衝撃力の決定に適用するには有効であるが、コンクリート構造物の衝撃破壊過程を考慮した衝撃力特性解析を単独で行うことはできない。

一方、RC版構造に対する衝撃破壊挙動解析では、これまで入力データは上述の衝撃力特性解析で得られる衝撃力~時間関係、あるいは本研究室で振り子式衝撃破壊試験装置により行われた鉄筋コンクリート版の衝撃破壊試験より得られる衝撃力~時間関係を利用して与えていた。しかし、前者のデータを利用する場合、先に述べた理由から実際の衝撃現象とは異なった外力を与えることになり、また、後者のデータを利用する場合には、衝撃破壊試験で得られたデータが単体の重錘(剛体)の衝突によるものであり、解析手法の検証や各種コンクリート版の破壊モードや耐衝撃性を評価するには有効であるが、多質点で構成されるとみなされる自動車、航空機などの衝撃体に対しては直接利用することはできないと考えられる。

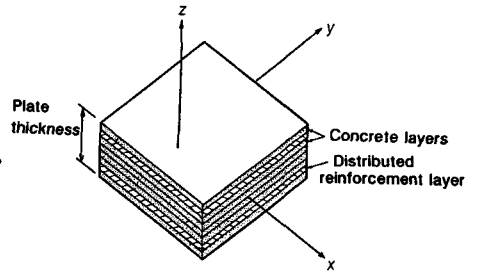


図-3 積層化の概念図および座標軸

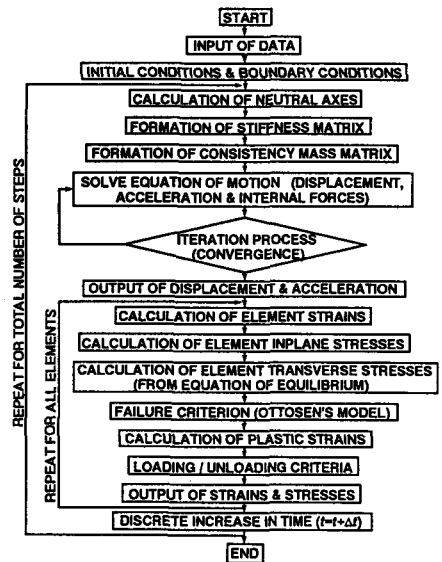


図-4 コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析フロー

そこで本研究では、上述両者の解析データを相互に有機的に結び付ける（統合する）ことによって、それぞれ単独の解析方法で欠点（弱点）となる部分を解消するとともに、多様（質量分布、衝突角度など）な衝撃力特性のもとでの衝撃破壊挙動解析を可能としようとするものである。

図-5は、衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析を統合して解析するのに必要なデータの授受の状態を示したものである。ここで、RC版の有効質量の初期値は部材の全質量とし、有効剛性は衝撃力と変形の関係から求められる見かけの剛性とした。また、衝撃体モデルの各種物理特性の初期値は、静的にモデル化する方法の他に、文献2)に示すSI(System Identification)法によって衝撃実験結果からの推定が可能である。

図中に示す①～④では、各時間増分毎に次のようなデータの授受を行う：

①：衝撃破壊挙動解析部分からRC版の変位、速度、加速度、ひずみ、応力、RC版の状態、有効質量および有効剛性を出力し、RC版の破壊条件の判定を行う。

②：①で衝撃破壊挙動解析部分から出力されたデータのうち、RC版の変位、速度、加速度、有効質量および有効剛性を衝撃力特性解析部分に引き渡す。

③：衝撃力特性解析部分より、衝撃体の変位、速度、加速度、衝撃力を出力し、RC版と衝撃体の接触判定を行う。

④：衝撃破壊挙動解析部分に衝撃力を入力し、次の時間増分に対する衝撃破壊挙動解析を行う。

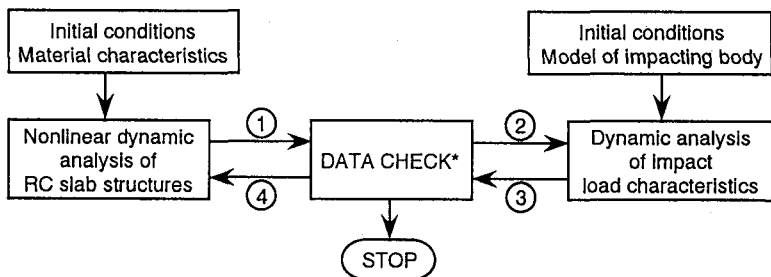
上述の方法で、各時間ステップ毎に衝撃力特性解析部分にRC版の有効質量、有効剛性を直接入力すると、RC版の剛性低下に伴う有効質量、有効剛性の変化に対応することが可能となり、また、多質点で構成される物体の衝突に対しても対応できるようになる。このように2つの解析を統合した場合、計算は構造物が破壊に至るまで、あるいは衝突現象が終わるまで行うことが可能となる。また、解析結果から、被衝撃体であるコンクリート構造物と衝撃体双方の動的挙動の評価や、コンクリート構造物に伝達される運動エネルギー収支の評価が可能となり、衝撃作用を受けるコンクリート構造物の耐衝撃設計を考える際の有効な手助けとなると考える。

4.2 RC版構造の衝撃破壊挙動の解析：

前述までの解析手法の適用例として、次の3種類の異なった衝撃体による高速道路などに設置される鉄筋コンクリート製高欄への衝突現象を解析する。

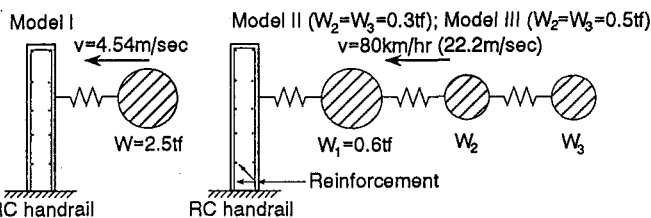
まず、図-6(a)のModel Iに示す衝突では、過去に行われた高欄実物実験⁶⁾の衝突条件を適用するものであり、単体の重錘がゴム板などの緩衝材を介さず鋼製載荷板を通して直接高欄に衝突するものである。解析に用いた接触ばねのばね定数は、

文献2)に示すSI法を使用して、実物実験の結果から推定した値(約 $1.1 \times 10^7 \text{ kgf/cm}$)を用いた。一方、図-6(b)に示すModel II, IIIは、



- * Failure criteria (structural failure) or end of impact collision
- ① Displacement, velocity, acceleration, strain, stress, slab status, effective mass, effective stiffness
 - ② Displacement, velocity, acceleration, effective mass, effective stiffness
 - ③ Displacement, velocity, acceleration, impact force
 - ④ Impact force

図-5 衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析の統合法



(a) RC高欄と1質点衝撃体 (b) RC高欄と3質点衝撃体

図-6 解析モデルの概略

高欄への自動車の衝突を想定したものであり、衝撃体の質点分布はそれぞれ乗用車および小型トラックを簡略的にモデル化したものである²⁾。また、衝突速度と総重量は設計示方書や各種調査結果⁷⁾を参考にして決定したものであり、接触ばねを含めたモデルのばね定数は乗用車の静的圧縮試験で得られた平均剛性⁹⁾を用いた。

図-7は、解析に用いた幅400×高さ107.5×厚さ25cmの複鉄筋コンクリート製高欄の要素分割を示したものであり、高欄を厚さ方向に8層に積層化し、第2層と第7層を鉄筋層として解析を行った。衝撃力は、高欄中央上端部付近の所定位置に部分等分布(パッチ)載荷するものとした。ただし、今回の解析例では、簡単のため衝撃体は各構造物に対して正面衝突するものとして取り扱った。

鉄筋コンクリート製高欄の耐衝撃設計を考える場合、比較的遅い衝突に対しては見かけ上、被衝撃体である高欄は剛に作用して衝突時のエネルギーの大部分を自動車に吸収させ、速度の速い衝突に対しては、衝突によるエネルギーをより多く吸収できる柔な壁として挙動する2面的な機能を備えていることが望ましいと考えられる。このような考え方にたつて衝突現象を取り扱う場合、局部変形の評価が重要な問題となる。衝撃作用を受けるコンクリート構造物は局部変形を生じ易く、破壊形式が押し抜きせん断となり易いことが知られている。そこで、局部変形の程度を定量的に取り扱うために局部変形指数を次式により定義する：

$$\text{局部変形指数}(I_L) = \frac{\text{破壊時曲率}(1/R)}{\text{破壊時変位}(\delta_0)} \quad (1)$$

上式では、破壊時曲率を破壊時の載荷点最大たわみで除して、たわみによる影響を消去している。従って、局部変形指数はその値が大きい方が、載荷点での局部変形の影響が大きく現れていると言える⁹⁾。

上述3種類のモデルに対する衝撃破壊挙動解析の結果をまとめて表-1に示す。これより、Model Iの載荷速度>Loading rate)はModel II, IIIに比べかなり大きいのが、力積>Impulse)や衝撃体の消散する運動エネルギー>量>Kinetic energy transmitted)は小さいなど、全評価項目についてModel II, III両者の結果がほぼ同一の値となっているのに対して、Model Iの各評価値は他のモデルと比べて全体的に異なった値を示している。これは、Model Iの解析では接触ばね定数として衝撃初期のごく短い作用時間内に大きな衝撃力が作用するためであると考えられ、局部破壊>押し抜きせん断破壊)を起こす恐れのあることを示している。これに対して、Model II, IIIでは、破壊時衝撃力>Load at failure)は比較的小さいが、載荷速度が小さいために力積>量や衝撃体の消散する運動エネルギー>量はかなり大きくなる。これらのことは、局部的な破壊である押し抜きせん断破壊の場合には、消散する運動エネルギー量はごく僅かであるのに対して、曲げ破壊モードでは大量の運動エネルギーを消散可能であることを示している。また、表-1に併記したように、式(1)に基づいて算出した局部変形指数は押し抜きせん断破壊モードでは高い値となり、局部変形の卓越する衝撃破壊モードと良い対応を示していると言え、押し抜きせん断破壊モードの評価に有効となるものとする。

図-8は、3種類のモデルで解析した衝撃力～載荷点変位関係を示したものである。図-8より、Model

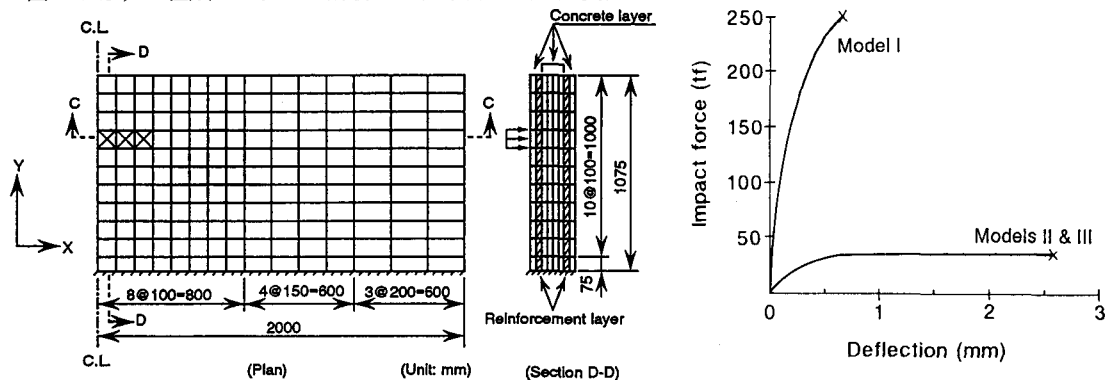


図-7 RC高欄の積層化有限要素モデル(1/2部分)

図-8 RC高欄の衝撃力～載荷点変位関係の比較

表-1 RC高欄の解析結果

Model	Loading rate (tf/ms)	Load at failure (tf)	Deflection at failure* (mm)	Impulse (kgf·sec)	Index of local deformation** ($\times 10^{-4}/\text{cm}^2$)	Kinetic energy transmitted**** ($\times 10^2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$)	Energy absorbed***** (kgf·cm)	Failure mode***
I	356.4	249.5	0.64	72.5	14.77	699	12040	PS
II	1.22	35.9	2.54	592.5	1.60	13745	8037	B
III	1.22	36.0	2.40	599.0	2.50	13947	7562	B

* Maximum deflection at loaded point
 ** At section C-C of Fig.7
 *** B:Bending, PS:Punching Shear
 **** Amount of kinetic energy lost in impacting body
 ***** Obtained by integration of impact load - loaded point deflection curve

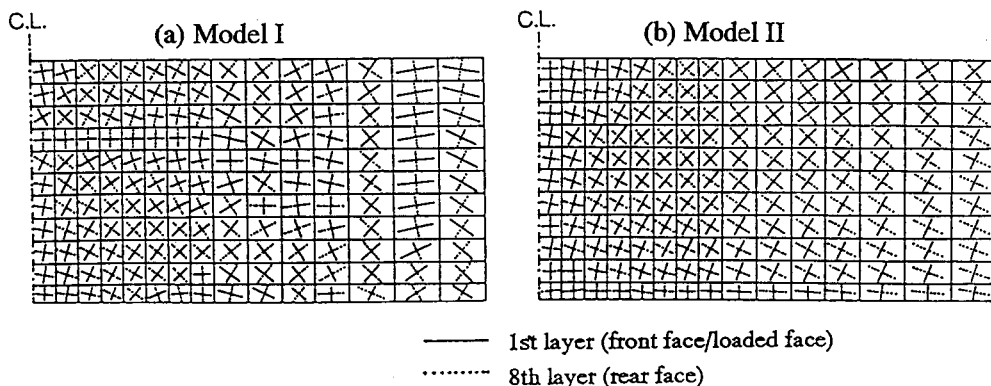


図-9 RC高欄の主応力に直角方向分布図

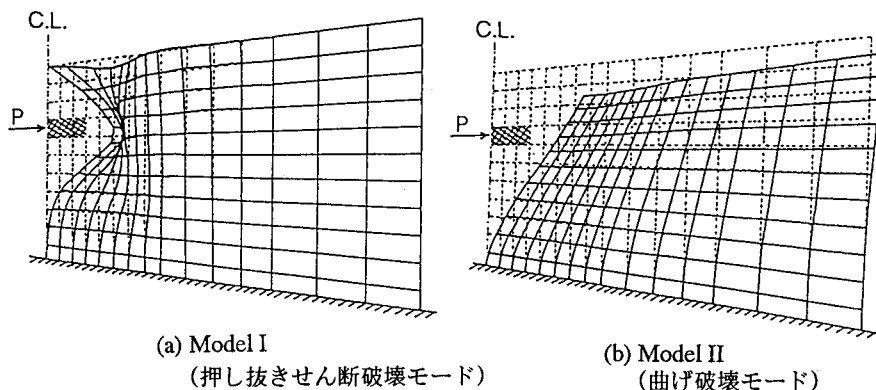


図-10 RC高欄の破壊時における変形モード

II, IIIの衝撃力～荷点変位関係はほぼ同じであるのに対して、Model Iでは全体的に他のモデルに対する結果とは異なっている。これは、Model Iの衝撃体を剛としたことにより荷速度が上昇し、慣性力の影響により荷速度とともに初期剛性も上がったためであると考えられる。図-9は、Model I, IIの解析から得られる高欄の荷面と裏面の主応力直角方向を示したものであり、ひびわれ方向の分布を表していると言える。また、図-10は、Model I, IIの解析による高欄の破壊時の変形モードを示したものである。Model Iでは、図-9(a)のひびわれパターンが複雑であり、図-10(a)より変形が荷点近傍に集中していることから衝撃破壊モードは押し抜きせん断破壊となることがわかる。一方、Model IIの場合には、図-9(b)ではひびわれパターンが滑らかに分布し、図-10(b)の変形モードに対応しており、曲げ破壊となることが予想される。

5. 結論

本研究で得られた成果をまとめると次のようになる。

- ①多質点ばねモデルによる衝撃力特性解析とRC版構造に対する衝撃破壊挙動解析を、相互にデータの授受を行うように統合し、衝撃力特性を考慮したRC版構造の衝撃応答解析を可能にした。これにより、被衝撃体であるコンクリート構造物の有効質量および有効剛性を直接考慮できるようになった。
- ②局部変形指数は衝撃破壊モードと良い対応を示し、局部変形の影響を定量的に表すのに有効であることがわかった。
- ③2つの解析法を統合することにより、コンクリート構造物に伝達される運動エネルギーやコンクリート構造物の吸収エネルギーの評価が可能になり、曲げ破壊モードとなる部材はエネルギー吸収性能に優れるのに対して、押し抜きせん断破壊モードとなる部材では吸収されるエネルギー量は小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) 宮本文穂, M. W. King, 梶井弘樹: 構造物に作用する衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1555-1566, 1991年3月.
- 2) 宮本文穂, M. W. King, 石橋照久: 多質点ばねモデルによる衝撃力特性の再現と設計衝撃力の検討, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1515-1528, 1992年3月.
- 3) A. Miyamoto, M. W. King and M. Fujii: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 4, pp. 411-419, July-Aug. 1991.
- 4) A. Miyamoto, M. W. King and M. Fujii: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 538-545, Sept.-Oct. 1991.
- 5) N. S. Ottosen: A Failure Criterion for Concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp. 527-535, Apr. 1977.
- 6) 阪神高速道路公団, 財団法人建設工学研究所: プレキャスト高欄の衝撃破壊実験業務報告書, 50pp., 1987年3月.
- 7) 例えば, 阪神高速道路公団, 八千代エンジニアリング株式会社: 中央分離帯防護柵実車衝突実験報告書, pp. 6-7, 1972年11月.
- 8) M. M. Kamal and J. A. Wolf, Jr.: Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 458pp., 1982.
- 9) 宮本文穂, M. W. King, 三戸雅文: FRP筋を用いたコンクリート版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価, コンクリート工学論文集, Vol. 4, No. 1, pp. 20-33, 1993年1月.