

[182] RC構造物の振動終局破壊に関する研究

正会員 ○滝本 和志 (名古屋大学大学院)
 正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

限界状態設計法が橋梁などのRC構造物の設計手段として採用されつつある中で、耐震設計も限界状態設計により行なうことが考えられつつある。その適用にあたって最も重要な問題点は、RC構造物が振動中にいつ、どのように崩壊するのか、その破壊のプロセスと最終強度点を推定することである。そこで本研究においては、RC構造物における振動終局破壊点を予測する第一歩として、以下の実験ならびに理論解析を行った。主たる考察点は、幾何学的剛性マトリックスを含む剛性マトリックスの行列式の値と実際の破壊現象との関連性である。構造物がメカニズムに達すれば、もちろん剛性マトリックスの行列式は零となるが、幾何学的剛性を含めれば、その段階以前に行列式は零となる。しかし、幾何学的剛性を導入するには、部材のEIをその段階ごとに評価する必要がある。そのため、繰り返し応力下のコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係からEIを求める方法を考案し、実験結果に適用し検討を行った。振動実験は、上部に負荷質量400kgfを載荷した断面積7×7cm、高さ1.2mのRC柱に対して、供試体が最終破壊に至るまで入力地震波の最大加速度を増加させる量も単純な振動実験である。

2. 振動終局破壊点の予測

2.1 運動の偏微分方程式

軸力の影響を考慮した増分形の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E I \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial x^2} \right) + P \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial x^2} + C \frac{\partial \Delta u}{\partial t} + m \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial t^2} = \Delta p \quad (1)$$

ここに、xははりの軸方向座標、EIは瞬間曲げ剛性、Pは軸力、Cは減衰係数、mは単位長さあたりの質量である。また横方向荷重pは位置と時間によって任意に変わるものと仮定し、横たわみ応答vもこれらの変数の関数であるとする。この式の中では、せん断変形項を無視しているが、第一歩として最も単純な場合から始めている。(1)式にガラーキン法を適用して、弾性剛性マトリックスK、軸力による幾何学的剛性マトリックスKg、質量マトリックスMを求める。なお減衰マトリックスCはRayleigh減衰とし、剛性マトリックスと質量マトリックスから求めることにした。

2.2 部材断面の軸力-曲げモーメント-剛性関係

従来の非線形応答解析においては、部材全体の剛性Kに対してDegrading Tri-linear型などの履歴法則を適用して解析を行ってきたが、本研究においては、各時間ステップごとに弾性剛性マトリックス中の曲げ剛性EIを直接決定する必要があり、以下の方法を用いた。

まず、部材断面を面と直角に細分割し、分割区間内においては応力が一定でひずみは断面上を直線的に変化するものとし、軸力の釣合い条件を満足するひずみ状態からモーメント-曲率関係を求める。

繰り返し応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は、図-1に示すようにDarwinとPecknoldが提案したモデルに修正を加えて用いる。応力がf'cに達するまでのEnvelope Curveは、(2)式で表され、下降部分は直線となっている。

$$\sigma = \frac{E_0 \cdot \epsilon}{1 + \{(E_0/E_s) - 2\}(\epsilon / \epsilon_c) + (\epsilon / \epsilon_c)^2} \quad (2)$$

ここで、E₀は初期接線剛性を、E_sは、f'cまでの割線剛性を表している。また、ε_cは等価一軸ひずみ、σとεは、現在の応力とひずみを表している。図-1において、ひずみが減少する部分は、Turning Pointsまで傾きE₀で戻り、そこからx軸までは、塑性ひずみε_pとCommon Pointsを結ぶ直

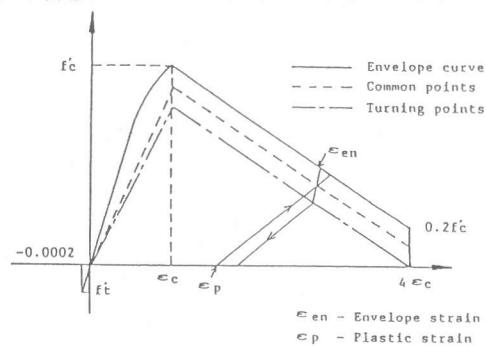


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

線と同じ傾で下がるものとする。 Envelope Curve 上の最大ひずみ ε_{en} と ε_p との関係は次式で与えられる。

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_c} = 0.145 \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_c} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_c} \right) \quad (3)$$

なお引張応力は、引張ひずみが 0.0002 に達するまで傾き E_0 で増化し、それ以後は零とする。また鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性型と仮定した。

以上の考え方に基いて計算した結果得られた断面の $M - \phi$ 曲線を図-2 に示す。これは後で述べる実験で用いた供試体の断面についての計算結果で、この曲線の傾きが曲げ剛性 E_I を示している。そこで、図-2 の $M - \phi$ 曲線を M と E_I の関係に変換して、縦軸に初期剛性と現在の剛性との比 (E_I/E_{I0}) を、横軸に曲げモーメント M をとって図に描くと、図-3 のようになる。

この $M - E_I$ 曲線についての履歴法則を導くために他の面についても同様の計算を行い、 $M - E_I$ 曲線を描き、それらの共通点から理想化した $M - E_I$ 曲線を得ることを試みた。その一例が図-4 である。断面の種類や軸力の大小によって剛性一定部分の幅や剛性低下率は違うものの、それらは各係数等を操作することで同じ履歴法則で表せると考えた。

2.3 剛性変化を伴う要素剛性マトリックス

有限要素法の逐次積分において、前のステップの剛性マトリックスと節点変位ベクトルから曲げモーメントを求めることができる。曲げモーメントが求まるので、次のステップにおける断面の剛性が、前述の $M - E_I$ 関係を使うことにより求まる。はり要素においては各節点の曲げモーメントが計算できるので、要素の両端の剛性を求めることができる。ここでは両端の剛性より、要素内の剛性は線形に変化するものと仮定するが、精度を良くするために要素の中央においても両端のモーメントの平均を用いて剛性を求め、要素内の剛性を 2 本の直線で表すことにした。

2.4 振動終局破壊点の予測

(1) 式から増分形の運動方程式は

$$M \Delta v(t) + C(t) \cdot \Delta v(t) + K(t) \cdot \Delta v(t) = \Delta p \quad (4)$$

となり、このときの振動方程式は減衰力を無視して

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5)$$

で表される。ここで K は幾何学的法則も含んだ剛性マトリックスで、 ω は円振動数である。

(5) 式で振動数が零となれば、慣性力がなくなり

$$|K| = |K - Kg| = 0 \quad (6)$$

となる。ここで幾何学的剛性をある基準荷重に荷重係数 λg をかけたものによって表すと

$$Kg = \lambda g \cdot Kg \quad (7)$$

$$|K - \lambda g \cdot Kg| = 0 \quad (8)$$

となり、これは、構造物の限界条件（座屈条件）と一致する。静的な状態で荷重が漸増する場合には、(8) 式の条件が満たされると構造物は不安定状態になるが、振動中の RC 構造物は瞬間に (8) 式が満たされても、次の瞬間に剛性が回復されれば $|K - \omega^2 M| > 0$ となり、振動を継続することとなる。

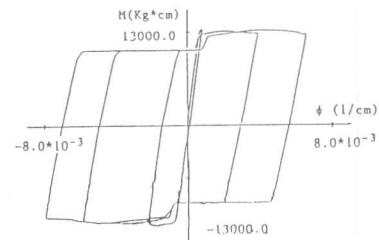


図-2 断面の $M - \phi$ 曲線

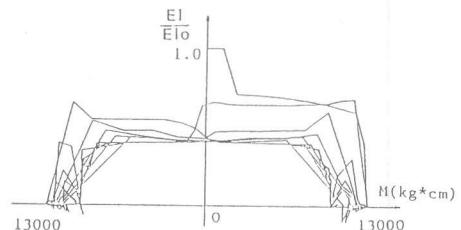


図-3 断面の $M - E_I$ 曲線

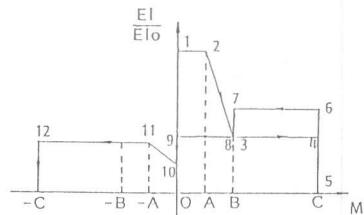


図-4 理想化した断面の $M - E_I$ 曲線

る。これは(4)式をNewmarkの β 法を用いて逐次計算する場合の $K(t)$ が Δt を無限に小さくすれば必ず、 $\det |K(t)| > 0$ となることからもわかるのである。ただし

$$K(t) \cdot \Delta v(t) = \Delta p \quad (9)$$

$$\tilde{K}(t) = \bar{K}(t) + \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{1}{2 \beta \Delta t} C(t) \quad (10)$$

$$\Delta \tilde{p}(t) = \Delta p(t) + M \left[\frac{1}{\beta \Delta t} \Delta \dot{v}(t) + \frac{1}{2 \beta} \Delta \ddot{v}(t) \right] + C(t) \left[\frac{1}{2 \beta} \Delta \dot{v}(t) + \left(\frac{1}{4 \beta} - 1 \right) \Delta t \Delta \ddot{v}(t) \right] \quad (11)$$

しかし、(8)式の条件がたびたび満たされ、その頻度が増大し、ついに剛性の回復が不可能となれば、それは構造物の破壊と判断してよいであろう。そこで、繰り返し計算中に

$$|K(t) - K_g| = |\tilde{K}(t)| \leq 0 \quad (12)$$

となる頻度を調べて実験の結果と比べてみた。

3. 振動終局破壊実験

本研究において、終局破壊状況を調べるために行ったR.C柱の振動実験について述べる。

3.1 実験概要

実験に用いた供試体の形状及び寸法を図-5に示す。また、材料表を表-1に示す。本実験においては負荷質量として400Kgfの鉄板を柱上端に載荷した。加振実験は、振動台、加振機等により構成されている終局振動実験装置を使用して行った。入力地震波は図-6に示すような名古屋近辺の地盤を考慮して作られた模擬地震波を用いた。

入力波の最大加速度が20 gal から250 gal まで9回にわたって実験を行い、加振中の各方向加速度及び加振後に、微小振動を与えて、その状態で固有振動数を測定した。

3.2 実験結果

供試体上部においては、かなりの変位を示したもののは100 gal 加振後までは目視できるクラックは発生せず、150 gal 加振後にハンチとの結合部付近に4 cm程度の水平なクラックが発生し、その後の加振で更に進展し2回目の250 gal 加振中に曲げ破壊した。

3.3 解析結果と実験結果の比較

応答計算を行うにあたり、初期点の剛性だけを負荷質量載荷時の固有振動数から求めた後は、全く先に述べたE.Iの履歴法則に従って計算を行った。即ち、実験と同じように、20 gal, 50 gal...と計算を行い、各計算の最後における剛性を次の計算の初期値とした。200 gal入力時の供試体上部振動方向の応答加速度を図-7に示す。最大応答加速度の値はよく似ているが、実測波に比べ解析波は、細かい波が多くなっている。これは実験における負荷質量の位置、設置の方法がF.E.M. 計算のモデル化と異なっていたためと考えられる。しかし、上部振動方向の最大入力加速度と最大応答加速度の関係を示すと、図-8のようになり、20 gal 1回目までは、周波数成分がかなり異なるにもかかわらず、かなり似た挙動を示している。また、固有振動数の実測値と解析値との比較もよい対応を示している。これらについては、更に検討を進めて、モデル化の問題点を探りたい。

最後に、各段階の計算の最初における弾性剛性と幾何学的剛性から求めた座屈荷重を縦軸に、剛性マトリック

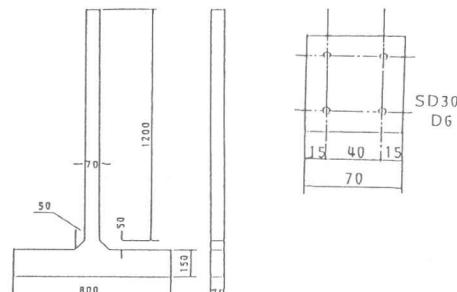


図-5 供試体概要

表-1 材料表

鉄筋		コンクリート	
E_s (kg/cm ²)	σ_y (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	F_c (kg/cm ²)
2.10×10^6	4300	1.40×10^5	188.8

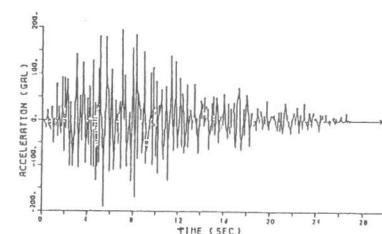
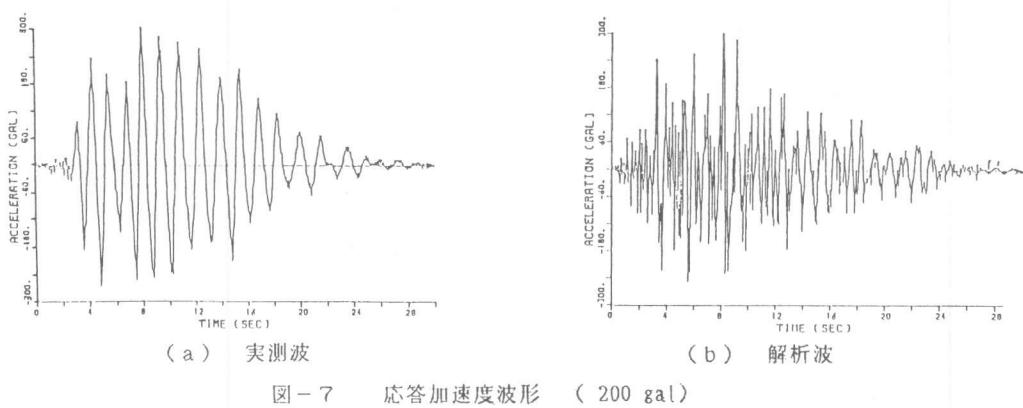


図-6 入力模擬地震波波形



スと質量マトリックスから求めた固有振動数を横軸にとったものが図-9である。250gal以降の値は、剛性を一様に下げて求めた。

今回は400Kgfの軸力がかかるので、座屈荷重が400Kgfとなる点において、固有振動数が零となることを示している。各ステップごとに(12)式を満たすかどうかを調べた結果、最大入力加速度250gal加振時の計算において1500ステップ中4回だけ行列式の値が負になった。即ち、図-9の矢印で示したように構造物は限界点を行き来したわけで、この限界点を越える頻度が多くなれば構造物は破壊すると考えてもよいであろう。

4. 結論

R C構造物の振動終局破壊点を予測するために実験を行って剛性マトリックスの行列式の値が零以下となる点と破壊点の対比を行った。振動終局破壊点付近では、その頻度が多くなることが認められ、確かに対応していることが判明したが、構造物はただ1度 $\det |K(t)| = 0$ となつても崩壊するわけではなく、 $\det |K(t)| < 0$ となる場合も含めて解析を続行する必要があろう。この場合には、大変形計算も必要となるので、今後も検討を続けたいと考えている。

参考文献

- 1) Clough,R.W.,Penzien,J. (大崎順彦 他訳) : 構造物の動的解析, 科学技術出版社, 19782)
- 2) 松本公典: P C、R C. および P R C 部材のモーメント-曲率関係の解析的研究とその設計への応用, 名古屋大学学位論文, 1985
- 3) Darwin,D.,Pecknold,D.,A.: ANALYSIS OF RC SHEAR PANELS UNDER CYCLIC LOADING, Proc.of ASCE, Vol 102, No. ST2(1976)
- 4) 滝本和志: R C構造物の振動終局破壊の予測に関する研究, 名古屋大学修士論文, 1986

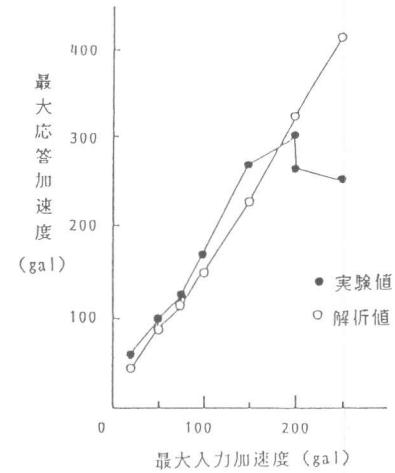


図-8 最大応答加速度

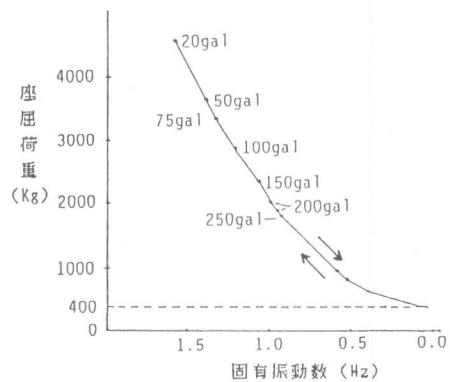


図-9 座屈荷重と固有振動数