I-177　強震時における構造系のダメージコントロール

鳥取大学大学院　学生員　長舟　健
鳥取大学工学部　正会員　野田　茂

1. まえがき

強震時において、構造物は非線形挙動を示す。構造物の地震応答が塑性域に及ぶことを前提とした場合、繰り返し荷重を受ける構造部材の損傷度を的確に評価する必要がある。その損傷度があるレベル以下になるように、構造系の性質を変えられるような振動制御のアルゴリズムが求められている。そこで、本研究では、構造系の損傷度規範に基づき、強震時におけるダメージコントロールの考え方を提案する。

2. 研究の方法

本研究では、簡単のために、復元力がバイリニア履歴系で表せる非線形多自由度運動方程式を考える。構造系は、せん断型建物でモデル化する。

(1) 概説

最適制御のための評価関数は、Sato ら[1]が提案した時間依存型のものを若干改良したものを用いる。すなわち、ここでは、時点 t での評価関数は、時点 $(t-\Delta t)$ から時点 t までにおける振動エネルギー（運動エネルギーとポテンシャルエネルギー）と制御エネルギーおよび制御に伴う構造系の総地震入力エネルギーの和で表す。拘束条件としては、運動方程式の他に、ダメージインデックスの不等式制約を考える。

(2) ダメージインデックスの拘束条件

構造物の地震応答レベルが高い場合には最大塑性応答が、一方応答レベルが低い場合には繰り返し数の効果を表現できる累積履歴吸収エネルギーが損傷度の指標として有効であると考えられる。そこで、本研究では、Park ら[2]が提案したダメージインデックスを用いる。これは、上述した応答レベルの相違が反映されたインデックスである。ダメージインデックスは、部材の D_i と構造系全体の D_T について、分けて考える。

a) 部材 i のダメージインデックス

$$D_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^{i} x_j(t)}{\delta_{ui}} + \frac{\beta_i}{Q_{Y_i}\delta_{ui}}\int_0^t d\varepsilon_i \tag{1}$$

上式の右辺第１項は塑性応答、第２項は累積履歴吸収エネルギーを表す。ただし、x_j は層間変位、δ_{ui}は終局変位、Q_{Y_i}は降伏力、ε_iは履歴変位である。

b) 構造物の総ダメージインデックス

$$D_T(t) \;=\; \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t) D_i(t) \tag{2}$$

ただし、λ_iは、ポテンシャルエネルギーと履歴吸収エネルギーで表せる。

ダメージの度合い	物理的な現象
崩壊	・建物の全壊あるいは部分的な崩壊
激しい損傷	・コンクリートが広範囲で破壊 ・鉄筋が歪む
中程度の損傷	・広範囲でひびが発生 ・強度の弱い箇所のコンクリートが粉砕
軽い損傷	・建物の至る箇所でわずかなひび ・コンクリートの柱の一部が破壊
僅かの損傷	・数箇所で、わずかなひびが発生する

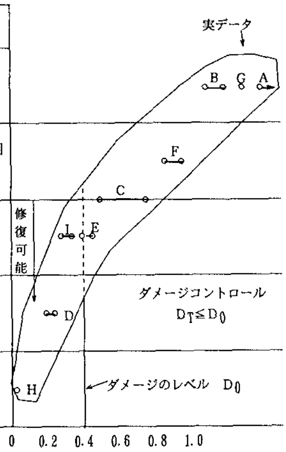

図１　ダメージインデックス　　ダメージインデックス　DT

ダメージインデックスと構造物の損傷度は、図１のような関係にある[2]。図中のダメージインデックスはRC 構造物の震害例から求めれたものである。同図より、ダメージインデックスは損傷度の指標となりえることがわかる。ダメージインデックス D_Tが 0.4 よりも小さければ（$D_T < 0.4$）、被災構造物は修復可能である。

本研究では、ダメージインデックス D_Tをあるレベル D_0以下にするように、運動方程式の拘束条件のもとで、評価関数を時々刻々最小化して、最適な制御力を求める。

(3) ダメージコントロールのための最適化

震動制御は、本質的に、非線形系に適用したときに意味がある。そのため、最適制御力は、ダメージインデックの不等式拘束条件を等式拘束条件に変換し、運動方程式の拘束と併用して、評価関数を時々刻々最小化するように定める。等式条件の変換に当たってはスラック変数を導入する。なお、不等式条件は、制御力を陽に含まない状態変数制約である。そこで、制御力が陽に現れるまで、時間微分を行う。これによって得られたダメージインデックスの等式拘束条件とスラック変数の微分方程式に、運動方程式の拘束条件を加えて、拡張された評価関数を定義する。なお、最適制御力は、非線形連立方程式を時々刻々解かなければならないので、かなり複雑な数理展開を必要とする。

運動方程式は、状態量 Z(変位、速度と履歴変位) を用いると、次式の状態方程式に変換される。ここで、U は制御力、$\ddot{z}_g$は入力加速度である。

$$\left.\begin{array}{rcl} Z(t) &=& D^{'}(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{2}\{BU(t)+W_1\ddot{z}_g(t)\} \\ D^{'}(t-\Delta t) &=& e^{A^{'}\Delta t}[Z(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{2}\{BU(t-\Delta t)+W_1\ddot{z}_g(t-\Delta t)\}] \end{array}\right\} \tag{3}$$

ダメージインデックスの不等式制約を等式制約に変換するため、ここでは、新しい状態変数としてd_1とd_2を、新しい制御入力量としてu_dを導入する。その結果、式(4)〜(6)の条件が得られる。

$$\left.\begin{array}{l} \dot{d}_1(t)=d_2(t) \\ \dot{d}_2(t)=u_d(t) \end{array}\right\} \quad d(t)=\left\{\begin{array}{c} d_1(t) \\ d_2(t) \end{array}\right\} \tag{4}$$

$$\left.\begin{array}{l} \left[D_T(t)-D_0(t)+\frac{1}{2}d_1(t)^2\right]_{t=0}=0 \\ \left[\dot{D}_T(t)+d_1(t)d_2(t)\right]_{t=0}=0 \end{array}\right\} \tag{5}$$

制御入力（U,u_d）を含む等式拘束条件

$$\ddot{D}_T(t)+d_2(t)^2+d_1(t)u_d(t)=0 \tag{6}$$

以上から、拡張された評価関数は次のようになる。

$$\begin{array}{rcl} \overline{J}(t) &=& \frac{1}{2}\Delta t\{Z^T(t)Q_1Z(t)+U^T(t)RU(T)\}+\frac{1}{2}\Delta tS(t-\Delta t) \\ && +\alpha\{Z^T(t)Q_2Z(t)+Z^T(t)W_2\ddot{z}_g(t)+E(t-\Delta t)\} \\ && +\Lambda(t)[Z(t)-D^{'}(t-\Delta t)-\frac{\Delta t}{2}\{BU(t)+W_1\ddot{z}_g(t)\}] \\ && +\lambda_d(t)\{d(t)-d^{'}(t-\Delta t)-\frac{\Delta t}{2}\bar{B}u_d(t)\} \\ && +\rho(t)\{\ddot{D}_T(t)+d_2(t)^2+d_1(t)u_d(t)\} \end{array} \tag{7}$$

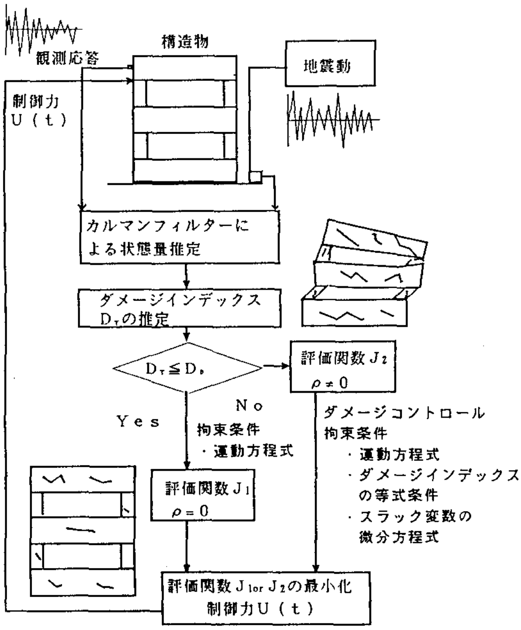

図2 ダメージコントロールのフロー

ここで、$d(t)$ に関する状態方程式、ダメージインデックスの等式拘束条件と運動方程式に対する随伴変数は、おのおの、λ_d,ρ と Λである。なお、式(7)において、右辺第1項は時点tでの振動エネルギー（運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和）と制御エネルギーの和、第2項は時点$(t-\Delta t)$でのそれを表す。第3項は、時点$(t-\Delta t)$から時点tまでの総地震入力エネルギーである。第4項は運動方程式、第5項はスラック変数の微分方程式、第6項はダメージインデックスの等式の拘束条件を示している。

制御力は、上式の拡張された評価関数を、時々刻々、最小化することによって算出される。そのために必要な評価関数の最小化条件は次式のようである。これらから得られる非線形連立方程式を解けば、最適制御力が求まる。

$$\frac{\partial\overline{J}}{\partial Z}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial d}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial\Lambda}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial\lambda_d}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial\rho}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial U}=0 \quad \frac{\partial\overline{J}}{\partial u_d}=0 \tag{8}$$

図2は本研究で提案するダメージコントロールの概念図である。同図からわかるように、本研究では、センサーによる観測情報を活かし、ダメージインデックスを推定するために、カルマンフィルターによる状態推定を実施している。これにより、推定したダメージインデックス D_T が D_0 より大きいか小さいかを判定することが可能である。

3. あとがき

1) バイリニア非線形履歴構造物を対象とし、構造物全体の損傷度を表す式を展開した。
2) 随伴変数とスラック変数を導入することにより、状態量拘束条件であるダメージコントロールの概念を提案し、最適制御力の算出法を示した。
3) 本研究では、構造物の損傷状態に着目しており、既往の研究に比べて、より現実的な制御則を定式化できる。
4) 損傷度の拘束条件の下で、非線形構造物の震動制御を行う開閉ループ制御則を定式化した。この制御則は、カルマンフィルターによる状態量予測と組み合わせることにより、威力を発揮する。

参考文献

1) Sato,T., Toki,K. and Sugiyama,K. : Optimal control of seismic response of structures, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.7, No.1, pp.179s 〜 188s, April 1990.
2) Park,Y.J., Ang,A.H-S. and Wen,Y.K. : Seismic damage analysis and damage-limiting design of R.C. buildings, UILU-ENG-84-2007, October 1984.