減衰のモデル化が個別要素法を用いた構造物の破壊挙動解析結果に及ぼす影響

京都大学大学院工学研究科　学生員　○木村翔太　　京都大学大学院工学研究科　正会員　古川愛子
京都大学大学院工学研究科　正会員　清野純史

1. 研究の背景と目的

地震時における建物の倒壊により多くの尊い人命が奪われている．人的被害を軽減するためには破壊メカニズムの解明が必要であり，その為のツールとして構造物の破壊挙動を精度よく表現できる数値解析手法の開発が望まれる．構造物の破壊挙動の解析手法として個別要素法が挙げられるが，現状では減衰のモデル化手法が確立されていない．本研究では，減衰のモデル化が構造物の破壊挙動解析結果に及ぼす影響について検討する．

2. 個別要素法の概要

個別要素法では，構造物を剛体要素の集合体としてモデル化し，接触要素間にばねとダッシュポットを配置し相互作用力をモデル化する．要素毎に運動方程式をたて，陽解法により時間積分することにより要素の挙動を追跡する．本研究では，接触面の離散化によりばね定数を理論的に導出できるようになった改良版個別要素法 [1)]を用いて解析を行うこととする．

3. 個別要素法における減衰のモデル化

3.1 減衰を考慮に入れた運動方程式

個別要素法の要素毎の運動方程式を次式で表す．

$$m\ddot{\mathbf{x}}_g = m\mathbf{g} - m\ddot{\mathbf{z}} + \Sigma(\mathbf{F}^k + \mathbf{F}^c) + \mathbf{F}^d \quad (1)$$

ここに，m は要素の質量，$\mathbf{x}_g$ は要素重心の座標，$\mathbf{g}$ は重力加速度，$\ddot{\mathbf{z}}$は入力加速度，$\mathbf{F}^k$は接触要素間のばねによる復元力である．減衰力として接触要素間のダッシュポットによる減衰力 ($\mathbf{F}^c$)と要素重心に作用する減衰力($\mathbf{F}^d$)を考える．有限要素法では瞬間剛性比例減衰が広く採用されているが，これは(a)主要モードの減衰特性の再現性，(b)破壊に伴う剛性低下に応じた減衰力の低下，(c)高振動数成分の抑制による解の安定性の確保等，望ましい性質を持っているためである．本研究では，個別要素法において 2 通りの減衰力$\mathbf{F}^c$と$\mathbf{F}^d$を用いて(a)(b)(c)の性質を表現する．

3.2 接触要素間のダッシュポットによる減衰力($\mathbf{F}^c$)

(1) 臨界減衰

従来の個別要素法で考慮されている減衰モデルである．

$$\mathbf{F}^c = c\Delta\mathbf{u}/\Delta t \qquad c = 2\sqrt{m_{ave}k} \quad (2)$$

c は減衰係数，$\Delta\mathbf{u}/\Delta t$は接触要素間の相対速度，$m_{ave}$は接触要素の換算質量，$k$ はばね定数である．解析上の最高の円振動数$\sqrt{m_{ave}k}$における減衰を臨界減衰とするものであり，高周波数成分を多く含む衝突による衝撃力を効率よく減衰することができ，前述の(c)に対応する．

(2)瞬間剛性比例減衰

瞬間剛性比例減衰では，減衰係数$c(t)$が接線剛性 $k(t)$に比例し時間 t 毎に変化する．比例係数βは主要な 1 次モードの減衰定数h_1と固有円振動数ω_1から決定するとする．

$$\mathbf{F}^c = c(t)\Delta\mathbf{u}/\Delta t \qquad c(t) = \beta k(t) \quad \beta = 2h_1/\omega_1 \quad (3)$$

このモデルは(a)(b)(c)を全て満たすが，減衰定数は振動数に比例するため，解析上の最高円振動数に対する減衰が一般に過減衰となり，陽解法による時間積分では非常に細かい計算時間間隔が要求されてしまうことから，本研究ではこのモデルは採用しないこととした．

3.3 要素重心に作用する減衰力($\mathbf{F}^d$)

(1) 質量比例減衰

質量比例減衰において減衰力は次のように表される．

$$\mathbf{F}^d = -\alpha m\dot{\mathbf{x}}_g \quad \alpha = 2h_1\omega_1 \quad (4)$$

αは比例係数であり，本研究では 1 次モードの減衰定数h_1と固有円振動数ω_1から決定するとする．減衰定数は振動数に比例するため，破壊に伴う見かけの固有振動数の減少に対して減衰定数が増加することになる．(a)のみ考慮可能なモデルとなっている．

(2) local damping[2)]

復元力に比例する減衰力を，復元力と速度の向きに応じて次式のように作用させる．i は方向を表す(i=1,2,3)．

$$F_i^d = -\alpha F_i^k\left\{sign\left(F_i^k\right)sign(\dot{x}_{gi})\right\} \qquad \alpha = \pi h_1 \quad (5)$$

本研究では比例係数αを 1 次モードの減衰定数h_1から決定する．破壊に伴う復元力の低下に応じて減衰力も低下し，(a)(b)を考慮可能なモデルとなっている．

以上より，表 1 のように 2 通りの減衰力を組み合わせることで，ケース 1 では(a)(c)を，ケース 2 では(a)(b)(c)の特性を表現することができると考えられる．

キーワード　減衰のモデル化，破壊挙動解析，個別要素法
連絡先　〒615-8540　京都市西京区京都大学桂

4. コンクリート構造物の破壊挙動解析

4.1 解析モデル

振動台実験の行われた無筋コンクリート供試体 [3]（図1）の再現解析を実施した．入力加速度（図2）をモデルの *y* 方向に入力した．クラックの出現可能性の高い領域は *y-z* 面内を 2.5×2.5cm の要素で分割し，奥行きは 1 分割とした．物性値を表 2[3]に示す．実験より 1 次共振振動数は 29.4Hz，減衰定数は 1.8%であることがわかっている．解析モデルに低加速度振幅のインパルス波を与えて自由振動させたところ，頂部の応答加速度から 1 次共振振動数はほぼ 29.4Hz に一致することを確認した．また 1 次の減衰定数が 1.8%となるように質量比例減衰および local damping をモデル化した．本研究では自重を考慮に入れない場合と入れた場合それぞれついて検討する．

4.2 解析結果

(1)自重を考慮に入れない場合

図 3,4 に各ケースの 0.2 秒後（左）と 0.4 秒後（右）の引張破壊発生領域を赤色で示す．2 ケースとも引張破壊が発生する時間は同じであったが，破壊発生後の挙動に違いが見られケース 2 の方がケース 1 よりも破壊の進展が広範囲に広がった．この理由は，ケース 1 の質量比例減衰では破壊による見かけの固有振動数の低下に伴い減衰定数が増加するのに対し，local damping では破壊による復元力の減少に応じて減衰力も減少するためである．

(2)自重を考慮に入れた場合

図 5,6 に各ケースの 0.2 秒後（左）と 0.4 秒後（右）の引張破壊発生領域を赤色で示す．上下方向に連続した要素間には自重による圧縮力が復元力として発生している．ケース 2 の local damping ではこの圧縮力に比例した減衰力が発生するため，振動が減衰され易く 0.2 秒後の引張破壊発生領域が自重のない場合に比べ非常に狭くなっている．連続した要素が離れると復元力が作用せず local damping による減衰力も 0 となるため，一度破壊が発生すると破壊が進展し易い傾向が見られた．ケース 1 の質量比例減衰では自重の考慮の有無による違いは小さい結果となった．また，振動台実験により発生したクラック発生位置と解析による引張破壊発生領域を比較すると，ケース 1 の方が実験に近い結果となった．

5. 結論

接触要素間のダッシュポットによる臨界減衰と，要素重心に作用する減衰力（質量比例減衰と local damping の 2 通り）を組み合わせた減衰のモデル化を提案した．

自重を考慮しない場合，減衰力が復元力に比例する local damping は，破壊とともに減衰力が低下するため，質量比例減衰に比べ破壊発生領域が広くなった．自重を考慮した場合，上下方向に連続する要素間には自重による圧縮力が働き，local damping ではこれに比例した減衰力が作用するため，最初の破壊は発生しにくい結果となった．質量比例減衰を採用した場合，自重の有無による結果の違いは小さく，振動台実験におけるクラック発生位置の再現性も高かった．

参考文献 1) A. Furukawa, et al. : Proposal of a numerical simulation method for elastic, failure and collapse behaviors of structures and its application to masonry walls, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, 2011. 2) Itasca Consulting Group, INC. : PFC 2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, Theory and Background, 2002. 3) 佐々木隆他：無筋コンクリートのクラック進展解析における解析パラメータに関する検討，ダム工学， Vol.16(4)， pp.282-293, 2006.

表 1　減衰モデルの組み合わせ

	接触要素間のダッシュポットによる減衰力	要素重心に作用する減衰力
ケース 1	臨界減衰	質量比例減衰
ケース 2	臨界減衰	local damping

表 2　物性値

	弾性係数(MPa)	ポアソン比	密度 (t/m^3)	引張強度 (MPa)
コンクリート	6,300	0. 15	2. 3	0. 23
基礎	11,000	0. 15	2. 3	—

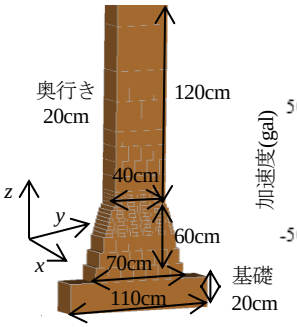

図 1 解析モデル

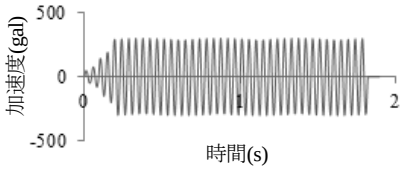

図 2 入力加速度

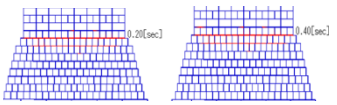

図 3 ケース 1(自重なし)

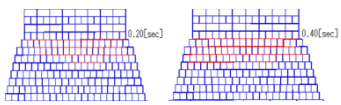

図 4 ケース 2(自重なし)

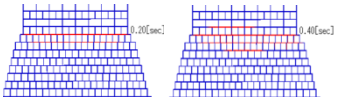

図 5 ケース 1(自重あり)

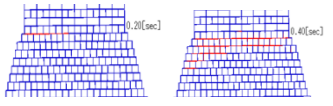

図 6 ケース 2(自重あり)