

建物の進行性崩壊の発生危険度とキーエレメント指標との関連性

正会員 ○我妻 光太*1
同 磯部 大吾郎*2高層建築物 進行性崩壊 キーエレメント指標
崩壊解析 ASI-Gauss 法

1. 緒言

建物の進行性崩壊現象は、2001年の米国同時多発テロによるWTCビルの全体崩壊によって広く認識されることとなった[1]。進行性崩壊が発生する危険性は欠損の規模、建物の強度など様々な構造パラメータに依存する。本稿では、建物全体の強度に対して構造部材が有する寄与度と進行性崩壊の発生する危険性との定性的な関係を調査することを目的とし、大規模骨組構造の構造解析に実績のあるASI-Gauss法[2]を用い、建物から特定の柱を除去する崩壊解析を行った。柱部材が建物全体の強度に対して有する寄与度を表すキーエレメント指標[3]（以下 KI ）と進行性崩壊の規模との関係を示し、進行性崩壊が発生する危険性を予測することを試みた。

2. キーエレメント指標

KI とは、建物の強度に対する柱の寄与度を数値化したものである。建物の全柱梁接合部に対し鉛直方向に荷重増分を与え、建物最下層部のいずれかの柱部材に降伏現象が起きた際の荷重を降伏限界荷重 P_G と定義することで、任意の i 層内の柱番号 a における KI を以下のように定義する。

$$KI_{i,a} = P_G / P_G(i,a) \quad (1)$$

添え字の0は、健全な状態の建物の降伏限界荷重であることを示し、添え字の1は、柱を1本除去した状態での建物の降伏限界荷重であることを示す。すなわち KI は、健全な建物の強度に対する柱1本の寄与度を表す。

本稿では、除去されるすべての柱の KI を足し合わせたものをキーエレメント指標の積算値（以下 KI 積算値）と定義し、以下のように表す。

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{l_i} [KI_{i,m(i,j)}] \\ = KI_{1,m(1,1)} + KI_{1,m(1,2)} + \dots + KI_{1,m(1,l_1)} + \\ KI_{2,m(2,1)} + \dots + KI_{R,m(R,l_R)} \quad (2)$$

ここで、 R 、 l_i 、 $m(i,j)$ はそれぞれ建物の全層数、 i 層で除去される柱の本数、およびその j 本目の柱番号を表す。本稿では、設定した柱除去位置における KI 積算値と建物の崩壊規模との関連性について考察する。

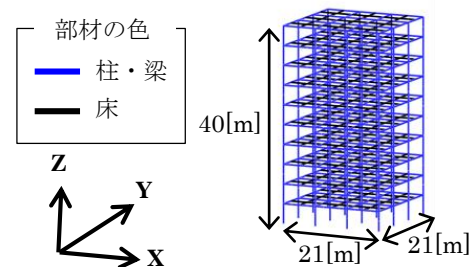


図-1 解析モデルの鳥瞰図

表-1 各モデルの最大軸力比とベースシア係数

	最大軸力比 n	ベースシア係数 C_b
モデル A	0.124	0.200
モデル B	0.200	0.095
モデル C	0.300	0.048
モデル D	0.400	0.027
モデル E	0.500	0.016

3. 解析モデルと解析条件

解析対象として、図-1に示すような10層3×3スパンの鋼構造建築物をモデル化した。建物の柱部材にはSM490の鋼材を用いた角形鋼管、梁部材にはSM400の鋼材を用いたH型鋼を使用した。床については全て塑性化を起こさない弾性要素とした。モデルを設計する際、建物には固定荷重と積載荷重を足し合わせて800 kgf/m²の荷重が作用するものとした。柱と梁の断面寸法は、ベースシア係数に基づき建物に必要とされる水平耐力を満たすように決定した。建物の進行性崩壊現象を顕在化させるため、いずれも日本の建築基準に対してはかなり低強度のモデルとなっている。最大軸力比 $n=0.124$, 0.200, 0.300, 0.400, 0.500 のモデルをそれぞれモデル A, B, C, D, E と表記する。表-1に各モデルの最大軸力比とベースシア係数を示す。

建物の崩壊形態は、除去する柱の本数や位置などによって変化することが予想される。本稿では、単層区画内の12本の柱除去に限定し解析を実施した。層内の柱除去位置①から⑩までの10種類を設定し、5つの解析モデルでそれぞれ1階から10階まで柱除去層を設定することで計500パターンの解析を行った。時間増分は1.0 msとし、計10.0 sまで解析を行った。解析中、柱の除去は1.0 s時に行った。

進行性崩壊の規模を定量的に評価するための指標として、次の崩壊前後における解析モデルの位置エネルギーが減少し

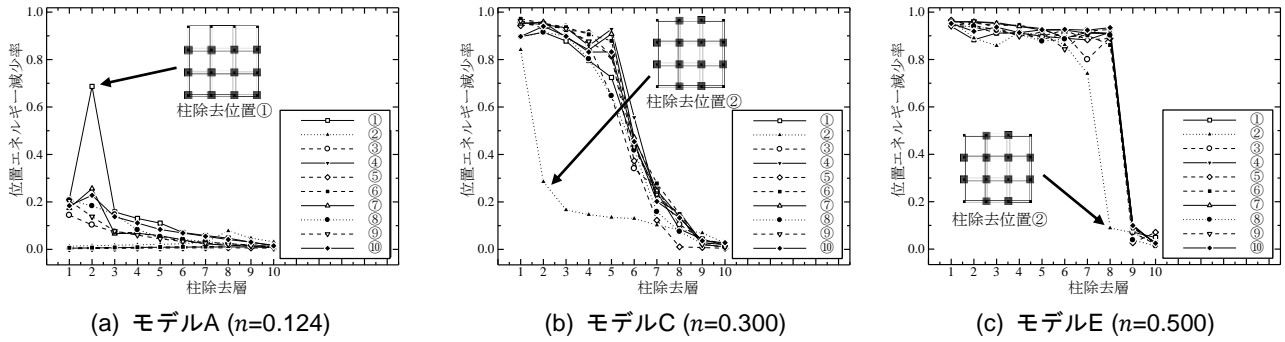


図-2 各モデルの柱除去層と位置エネルギー減少率の関係

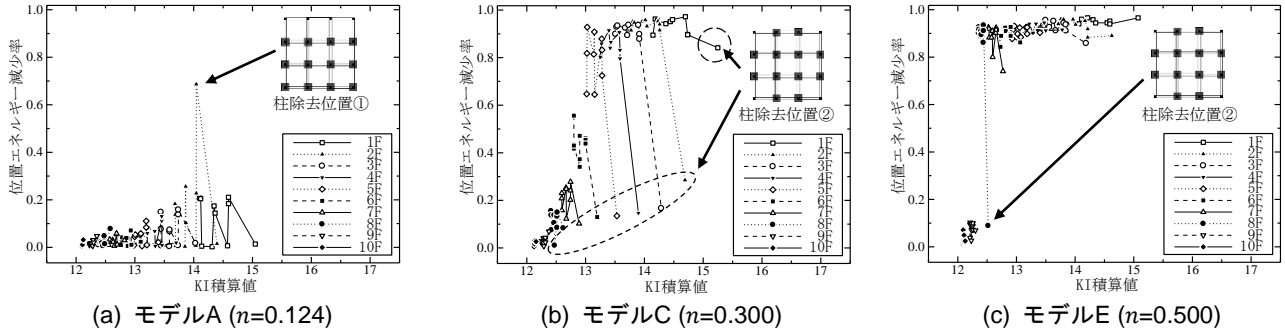


図-3 各モデルのKI積算値と位置エネルギー減少率の関係

た割合を表す位置エネルギー減少率を用いた。

$$\text{位置エネルギー減少率} = \frac{U_0 - U_f}{U_0} \quad (3)$$

ここで、 U は解析モデルが有する位置エネルギーを示し、添え字 $0, f$ はそれぞれ健全時、解析終了時の値であることを示す。位置エネルギー U は、モデルを構成するはり要素の位置エネルギーの和として以下の式で定義する。

$$U = \sum_{i=1}^{i_M} (\rho_i \times A_i \times l_i \times g \times H_i) \quad (4)$$

ここで、 i は要素番号、 i_M は破断要素を除く要素数、 ρ は密度、 A は断面積、 l は要素長、 H は地表面($Z = 0$)から要素中央部までの高さを表す。なお上式を破断していない要素のみに適用し、崩壊の規模を過大に評価した。位置エネルギー減少率が1.0に近いほど崩壊の規模が大きいことを示す。

4. 解析結果と考察

進行性崩壊解析によって得られたモデル A, C, Eにおける各柱除去位置での柱除去層と位置エネルギー減少率の関係を図-2に示す。モデル A からモデル E へと強度が低くなるほど位置エネルギー減少率が大きくなり、また各モデルとも柱除去層が低層部であるほど位置エネルギー減少率が大きい。各モデルでは、柱除去位置により位置エネルギー減少率が変化することが分かる。図中に示す柱除去位置のように、モデル A では非対称の大きい柱除去位置で2層の柱を除去した場合に大きな崩壊が見られ、またモデル C, E では、非対称性の小さい柱除去位置の場合に、他の柱除去位置の場合に比べて大きな崩壊が生じていないことが分かる。

次に、モデル A, C, Eにおける各柱除去層でのKI積算値と

位置エネルギー減少率の関係を図-3に示す。どのモデルにおいても、KI積算値の大きい柱除去の場合ほど位置エネルギー減少率が1.0に近付くような大規模な崩壊を起こす場合が増加している。また、モデル A からモデル E へと強度が低くなるほど、大規模な崩壊が生じ始めるKI積算値の値が小さくなっている。すなわち、モデルの強度によって、大規模な崩壊が生じ始めるKI積算値の値が異なることが分かる。また図中に示すように、柱除去位置が極端に対称性、非対称性を持つ柱除去位置では、特異な傾向となることが分かる。

以上より、全体的には除去される柱のKI積算値が大きいほど進行性崩壊が生じやすいという結果が得られた。また、大規模な崩壊が生じ始めるKI積算値の値は、強度が異なるモデル間では一意に定まらなかった。よって、同一の建物内であれば、柱除去位置などの条件が異なる場合にも、進行性崩壊の危険性を予測する指標としてKI積算値を用いることが可能であるものと考えられる。

参考文献

- [1] FEMA/ ASCE : World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations, FEMA403, 2002.
- [2] 磯部大吾郎, チョウミョウリン : 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp.39-46, 2004.
- [3] Isobe, D.: An Analysis Code and a Planning Tool Based on a Key Element Index for Controlled Explosive Demolition, *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol.3, No.4, pp.243-254, 2014.

*1: 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生

*2: 筑波大学教授 博(工)

*1: Graduate Student, Univ. of Tsukuba

*2: Professor, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.