

## 建物の進行性崩壊の発生危険度と許容荷重率との関連性

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 許容荷重率  
崩壊解析 ASI-Gauss 法

## 1. 緒言

2001年米国同時多発テロでのWTCビルの進行性崩壊現象[1]は、Bazantらによりエネルギー論的に説明された[2]。Bazantらは、火災により柱の鉛直支持能力が失われ上層部の落下が生じた後の挙動について、許容荷重率(overload ratio)を用いて考察を行い、衝突する下部を完全弾性体と仮定した場合の下部に加わる衝突時の力は設計許容荷重を大きく超過していることを明らかにした。しかし、文献ではこの考察をWTCビルのみには適用しておらず、また、衝突する下部を完全弾性体として扱うため、建物の崩壊条件の特定には至っていない。そのため、進行性崩壊の危険性を評価するには不十分である可能性があった。そこで本稿では、建物の設計強度と進行性崩壊の規模の関連を調査することを目的とする。設計強度の異なる複数の鋼構造モデルを構築してASI-Gauss法[3][4]を用いた有限要素解析コードにより特定の柱を除去する崩壊解析を実施し、進行性崩壊の発生危険度と許容荷重率との関連性を調査する。進行性崩壊の規模の評価には崩壊前後での位置エネルギーの減少率を用いる。

## 2. 解析モデルおよび解析条件

進行性崩壊解析を実施するにあたり、構造部材の断面寸法が異なる10層S造建物モデルを複数作成した。解析モデルの鳥瞰図を図-1に示す。解析モデルは10層3×3スパンの鋼構造建物とし、全高40m、階高は各層4m、幅および奥行きスパン長は全て7mとした。柱部材にはSM490を用いた角形鋼管、梁部材にはSS400を用いたH型鋼を使用し、床は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た単位面積あたり800kgf/m<sup>2</sup>の荷重が作用するものとした。柱や梁の断面寸法は、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断面を決定した。本稿で用いる建物のベースシア係

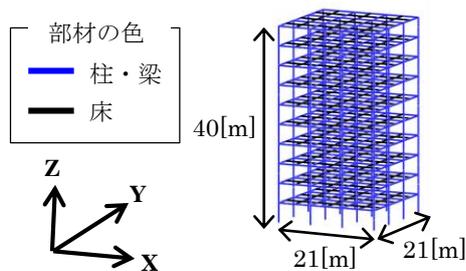


図-1 解析モデル鳥瞰図

数を計算した結果、0.200となり、その設計で算出される柱の最大軸力比  $n$  は0.124であった。

次に、作成したモデルのベースシア係数を変化させ、最大軸力比  $n=0.124, 0.200, 0.300, 0.400, 0.500$  となる5つのモデルを作成した。各モデルをA, B, C, D, Eと表記する。また、落下する上部の質量と崩壊の規模との関係を検証するため、モデルCの床荷重をそれぞれ0.5倍、1.5倍に設定したモデルC<sub>0.5</sub>, C<sub>1.5</sub>を作成し、計7つのモデルを用意した。いずれも日本の建築基準に対してはかなり強度の低いモデルである。

進行性崩壊解析は建物モデルの柱を除去して行った。層内の全ての柱を一度に除去することで、Bazantらが想定していた上部が垂直落下する崩壊形態を再現した。各モデルで柱除去層を1層から10層まで変化させ、計70パターンでの進行性崩壊解析を行った。柱の除去を1.0s時に行い、計10.0sまで解析した。時間増分は1msとした。

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、次に示す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。

$$\text{位置エネルギー減少率} = \frac{U_0 - U_f}{U_0} \quad (1)$$

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。

$$U = \sum_{i=1}^{i_M} (\rho_i \times A_i \times l_i \times g \times H_i) \quad (2)$$

ここで、 $i$ は要素番号、 $i_M$ は破断要素を除く要素数、 $\rho$ 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することで、崩壊の規模を過大に評価することとした。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。

本稿ではさらに、Bazantら[2]が用いている許容荷重率(overload ratio)を建物の強度に対する評価指標として使用する。許容荷重率は、建物の上部が垂直自由落下する際の位置エネルギー減少量の全てが衝突下部の弾性ひずみエネルギーに変換されると仮定した値であり、以下の式で定義される。

$$P_{dyn}/P_0 = 1 + \sqrt{1 + (2hC/mg)} \quad (3)$$

$P_{dyn}$ は上部が落下した際に下部から上部に対して作用する弾性力、 $P_0$ は上部の重量( $=mg$ )である。 $C$ は下部の弾性係数、 $h$ は上部が下部に衝突するまでの距離、 $m$ は健全時に下部が

支えている上部の質量， $g$ は重力加速度を表す． $mg$ は落下する上部の重量を，下部の弾性係数 $C$ は層内の柱を並列接続，層間の柱を直列接続として求めた合成弾性係数を用いた．

### 3. 解析結果と考察

各モデルの各柱除去層での許容荷重率の推移を図-2 に示す．上部が下部に衝突するまでの距離 $h$ は 4.0 m， $m$ は落下する上部の質量，下部の弾性係数 $C$ は前述の方法に基づいて求めた値を用いた．なお，柱除去層が 1 階の場合は衝突下部の弾性係数 $C$ が存在しないため許容荷重率は求めていない．図-2 において，同一の柱除去層でモデル A から E の許容荷重率を比べると強度が低いほど，また，モデル C， $C_{0.5}$ ， $C_{1.5}$ の値を比べると，床荷重が大きいモデルほど許容荷重率が小さい．これはすなわち，低強度のモデルほど，また，落下する上部の重量が大きいモデルほど，衝突時の上部重量に対する下部の弾性的な抗力が小さいことを示す．また，同一モデルの中で異なる柱除去層における許容荷重率の値を比べると，柱除去層が中層であるほど許容荷重率が小さい．これは，弾性係数 $C$ が下部構造の高さ $L$ に反比例し，上部構造の質量が $L$ に負比例することに起因する．

進行性崩壊解析で得られた各モデルの柱除去層ごとの位置エネルギー減少率の推移を図-3 に示す．この図から，モデルが低強度であるほど，また床荷重が大きいモデルほど位置エネルギー減少率が大きく，崩壊が起こり易いことがわかる．同一モデルでの各柱除去層の結果を比較すると，低層部の柱を除去する際に大きな崩壊を起こす場合が多いことがわかる．

次に，各モデルの許容荷重率と位置エネルギー減少率の関係を図-4 に示す．最下層である 1 層の柱を除去する場合は許容荷重率が定義できないため，図には 1 層の柱除去を除いた 63 パターンの解析結果がプロットされている．図より，許容荷重率が小さいモデルほど，位置エネルギー減少率が 1.0 に近い大規模な崩壊が起こり易いことがわかる．同一モデル内で比較すると，柱除去層が低層部の場合の方が中層部の場合に比べ許容荷重率が大きい，大規模な崩壊は低層部の場合に多く見られた．このことから，進行性崩壊が生じる許容荷重率の値は一意的には定まらないことがわかった．また，大規模な崩壊を引き起こす許容荷重率の値は柱除去層によって異なることが確認された．

### 4. 結言

本稿では，複数の鋼構造モデルに対し進行性崩壊解析を実施した．進行性崩壊の危険性は，建物の強度，床荷重，柱除去層により変化し，許容荷重率が小さいモデルほど進行性崩壊が生じ易いことを確認した．進行性崩壊の生じる許容荷重率の値は一意的には定まらず，柱除去層に依存していた．その一方で，柱除去層を限定すれば許容荷重率が進行性崩壊の危険性を評価する指標となり得ることが示唆された．

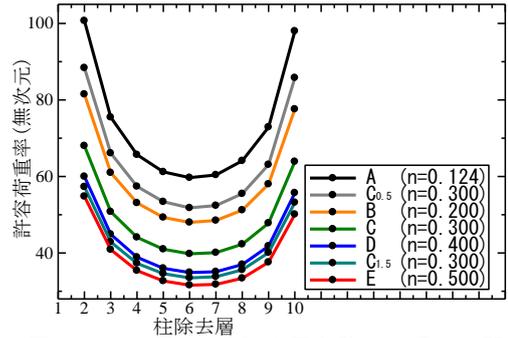


図-2 各モデルの柱除去層と許容荷重率の関係

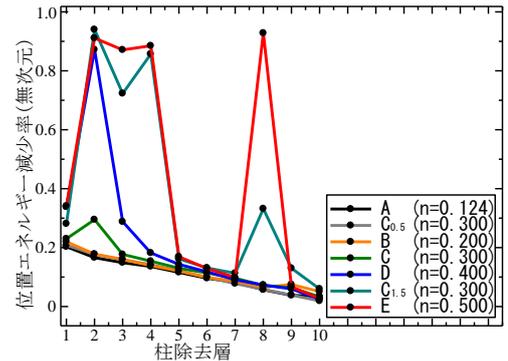


図-3 柱除去層と位置エネルギー減少率の関係

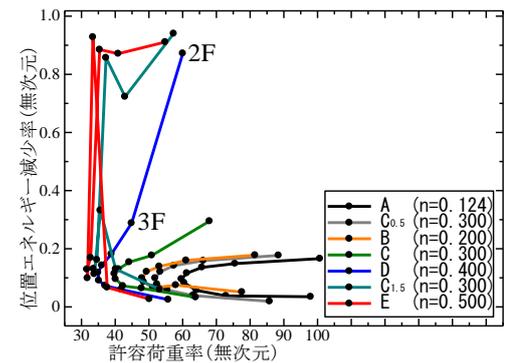


図-4 各モデルの許容荷重率と位置エネルギー減少率の関係

### 参考文献

- [1] FEMA/ ASCE : World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations, FEMA403, 2002.
- [2] Zdenek P. Bazant and Yong Zhou : Why Did the World Trade Center Collapse? –Simple Analysis1, Journal of engineering mechanics/ January, pp2-6, 2002.
- [3] 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.
- [4] 磯部大吾郎，江口正史，今西健介，佐々木嗣音：骨組構造の爆破解体解析・実験システムの開発，日本建築学会構造系論文集，第 612号，pp.73-78, 2007.

\*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.