

# 建物の設計強度と進行性崩壊の発生危険度との関連性

Relationship between Design Strength of Buildings and the Risk of Occurrence of Progressive Collapse

我妻光太<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Kota Azuma and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1211070@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, the progressive collapse phenomenon of buildings, which occurred to the World Trade Center (WTC) towers during the 9/11 terrorist attacks, was evaluated on the basis of an overload ratio. The risk of progressive collapse was underestimated, in the past reports, by treating the lower part of a building as an elastic body. In this study, the collapse behaviors of steel-frame buildings were simulated by using the ASI (Adaptively Shifted Integration) -Gauss code. By removing specific columns or beams from the models designed under different axial force ratios, progressive collapse behaviors were simulated. The total potential energy values of structural members after the collapse were used to evaluate the damage of the buildings. The qualitative relationship between the risk of progressive collapse and the design strength of the buildings was investigated.

**Key Words:** High-rise Buildings, Design Strength, Progressive Collapse, ASI-Gauss Code

## 1. 緒言

2001年の米国同時多発テロによるニューヨーク世界貿易センタービル (WTC) の崩壊は、世界中を震撼させた。WTC 1号棟および2号棟は、航空機の衝突とそれによって引き起こされた火災が原因となり、後者は航空機衝突後約1時間、前者は約1時間半で人々を飲み込んだまま進行性崩壊を起こし完全崩壊した[1]。大規模火災や衝突物といった外乱を建物を受ける場合、進行性崩壊を防ぐことで人命や周りの建物への被害を軽減させることができるものと思われる。このWTCツインタワービルの崩壊問題に対し、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エネルギー論に基づく考察を行った[2]。衝突する下部を完全弾性体として仮定し、衝突時の下部に加わる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。そしてWTCのような超高層ビルにおいて上層部が垂直落下するような崩壊が起こる場合、進行性崩壊が防止されるような設計を行うことは現実的にはほぼ困難であると述べている。しかし、Bazantらの研究では以上の考察をWTCツインタワーにのみしか適用していない。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おらず、進行性崩壊の危険性を評価するには不十分であった。

そこで本稿では、建物の設計強度により進行性崩壊の規模が変化する度合いを調査することを目的とする。部材の存在軸力と全断面降伏軸力の比である軸力比、設計用地震層せん断力の計算に用いられる指標であるベースシア係数に注目し、比較的設計強度の低い複数の鋼構造モデルに対してASI-Gauss解析コード[3][4]により進行性崩壊解析を実施する。また、進行性崩壊の規模の大きさを

定量的に表す指標として、崩壊前後での位置エネルギー減少率を用いる。設計強度と位置エネルギー減少率の関係を調査することにより、進行性崩壊の危険性を評価することを目指す。

## 2. S造建物の進行性崩壊解析

### (1) 解析モデルと解析条件

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40 m、階高は各層4 m、幅および奥行きスパン長は全て7 mとした。柱は1部材2要素分割、梁は1部材4要素分割し、床は4要素分割で表現した。

建物の柱部材にはSM490を用いた角形鋼管、梁部材にはSS400を用いたH型鋼を使用した。各鋼材の物性値を表

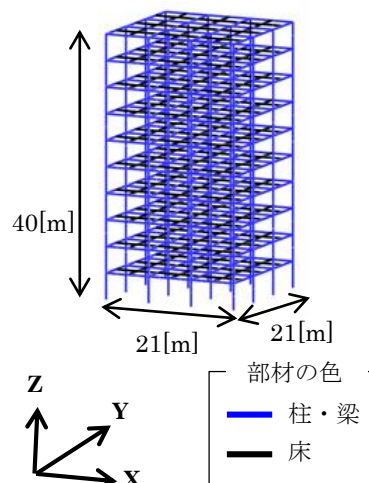


図1 解析モデル鳥瞰図

1に示す。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800 kgf/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。ここでベースシア係数 $C_b$ は以下のように定義される。

$$C_b = Z \cdot D_s \cdot R_t \cdot C_0 \quad (1)$$

上式中の $Z$ は地震地域係数、 $D_s$ は構造特性係数、 $R_t$ は振動特性係数、 $C_0$ は標準せん断力係数である。

作成したモデルのベースシア係数および最大軸力比を表2に示す。建物の進行性崩壊現象を検証するため、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。

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。ここでは単層区画内の柱除去に限定し、各モデルに対し、除去する柱の平面位置と除去階層を変化させて解析を実施した。図2に示す除去パターン①では、層内の全ての柱を一度に除去することで、Bazantらが先行研究[2]で想定していた上部が垂直落下する崩壊形態を再現する。また、除去パターン②, ③, ④では、除去する柱の位置を列単位で変化させて非対称性を作り、上部が落下時に傾くような崩壊形態を再現する。各除去パターンについて除去階層を1層から10層まで変化させ、計200パターンの進行性崩壊解析を実施した。柱の除去を1.0 s時に行い、計10.0 sまで解析した。時間増分は1 ms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、次に示すような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。

$$\text{位置エネルギー減少率} = \frac{U_0 - U_f}{U_0} \quad (2)$$

表1 鋼材の特性値

	E	$\sigma_y$	$\nu$	$\rho$
SS400	206	245	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$
SM490	206	325	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$

E : ヤング率[GPa],  $\sigma_y$  : 降伏応力[MPa],  
 $\nu$  ポアソン比[無次元],  $\rho$  : 密度[kg/mm<sup>3</sup>]

表2 各モデルのベースシア係数と最大軸力比

	ベースシア係数 $C_b$	最大軸力比 $n$
A	0.2000	0.124
B	0.0948	0.200
C	0.0478	0.300
D	0.0272	0.400
E	0.0160	0.500

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。

$$U = \sum_{i=1}^{i_M} (\rho_i \times A_i \times l_i \times g \times H_i) \quad (3)$$

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らが文献[2]中で用いている許容荷重率(overload ratio)を建物の強度に対する一つの評価指標として使用する。許容荷重率は、上部の垂直落下による下部への衝突を図3に示すようなモデルとして考え、上部の位置エネルギー減少量が全て下部の弾性ひずみエネルギーに変換されたことを仮定して得られる値であり、以下の式で定義される。

$$P_{dyn}/P_0 = 1 + \sqrt{1 + (2hC/mg)} \quad (4)$$

ここで、 $P_{dyn}$ 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

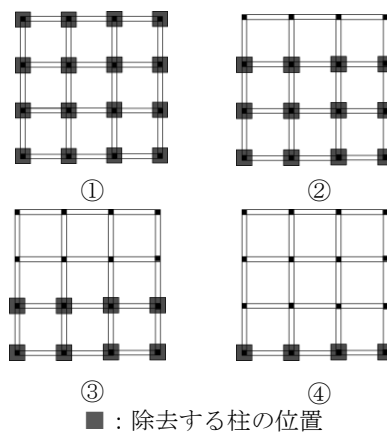


図2 柱除去パターン

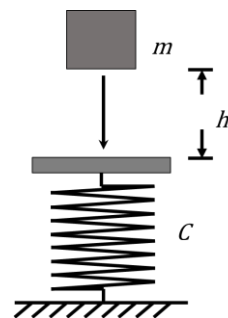


図3 建物の上部と下部の衝突モデル

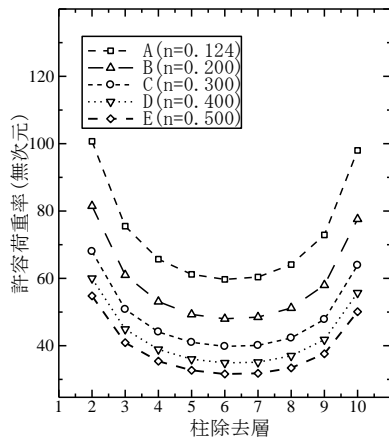


図4 各モデルの柱除去層と許容荷重率の関係  
(柱除去パターン①)

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。 $mg$ として落下する上部の重量、下部の弾性係数 $C$ として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。

## (2) 解析結果と考察

モデルの層内における全柱を同時に除去した場合（柱除去位置パターン①）の、モデルごとの許容荷重率の推移を図4に示す。ここで、上部が下部に衝突するまでの距離 $h$ は4.0 m、重力加速度 $g$ は9.8 m/s<sup>2</sup>、 $m$ としては落下する上部の質量を、下部の弾性係数 $C$ としては前述の方法に基づき求めた値を用いた。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る。図4において、同じ柱除去層でモデルごとの許容荷重率の値を比べると、モデルAからEへと強度が低くなるにつれ、許容荷重率の値が小さくなっていることが分かる。これはすなわち、低強度のモデルでは、衝突時の上部の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を比較すると、柱除去層が中層であるほど許容荷重率の値が小さくなっている。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。なお、柱除去位置パターン②、③、④の場合は、上部と下部間で柱が残存するため、上部の自由落下を前提とした許容荷重率を厳密には求めることができない。しかし、ここでは上部と下部間に残存する柱の位置エネルギー減少量を計算に取り入れ、柱除去位置パターン①の場合と同じ許容荷重率を使用することで崩壊の危険性を過大に算定し、安全側に評価することとした。

設定した各モデルに対する解析条件のもと、進行性崩壊解析を実施した。柱除去による解析モデルの崩壊の例を図5に示す。図5では、モデルC( $n=0.300$ )の柱除去パターン②、柱除去層7階の場合における解析モデルの概観を示している。1.0[s]時の柱除去後、1.9[s]時に上部と下部が衝突して衝突部分の部材に衝撃力が加わっていることがわかる。3.0[s]時には上部の運動が止まらずにバランスを

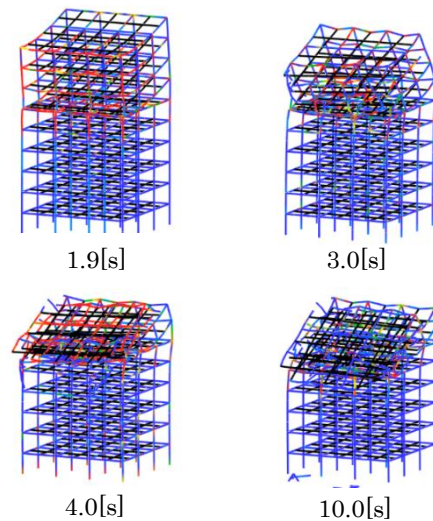
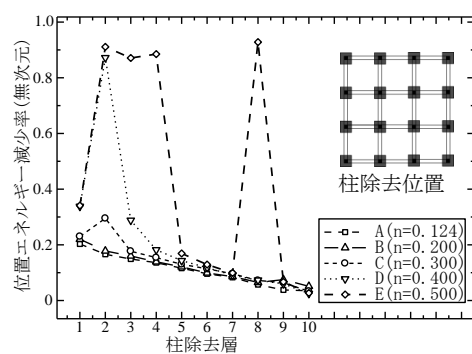


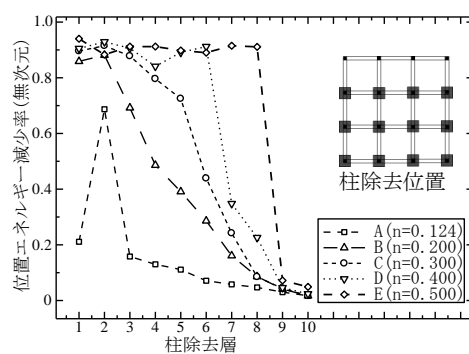
図5 柱除去による崩壊挙動  
(解析モデル：C( $n=0.300$ ),  
柱除去パターン：②、柱除去層：7階)

失い、大きく手前側に傾いている。4.0[s]時には上部が手前側に滑り落ちるように崩壊し、解析終了時である10[s]時には上部が手前側に崩れ落ちた。このことによりモデルに大きな振動が生じているものの、下部の部材はほとんどが残存しており、上部と下部の衝突によって起こる衝撃力による下部の大きな崩壊は見られなかった。

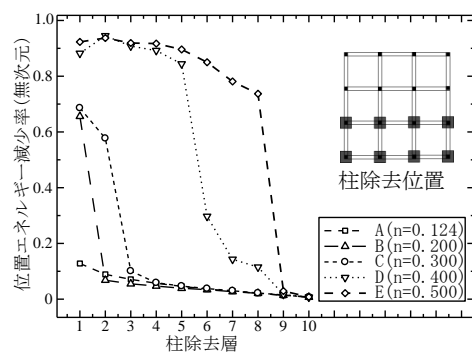
各柱除去位置パターンにおける位置エネルギー減少率の推移を図6に示す。まず、パターン②、③、④の場合では、モデルAからEへと強度が低くなるほど位置エネルギー減少率が大きくなっている。すなわち、崩壊の規模が増大していることが確認できる。また、同一モデルにおける柱除去層ごとの結果を比較すると、柱除去層が低層部であるほど位置エネルギー減少率が大きいことが分かる。これは、低層の柱を除去した場合は落下する上部の持つ位置エネルギーが大きくなり、衝突時の下部への衝撃力が大きくなることや、除去する柱が低層部であるほど建物がバランスを崩し易くなることが原因と考えられる。また、一度に除去する柱の本数が多い除去パターンであるほど、位置エネルギー減少率は大きい。一方、パターン①の結果をその他のパターンの結果と比較すると、モデルが低強度であるほど崩壊が起こり易いという傾向は一致している。また、柱除去層が低層であるほど崩壊し易いという傾向も一致している。しかし、パターン②に比べて多くの柱を除去しているにも関わらず、大きな崩壊に至るケースが少ないことから、除去する柱の本数が多いほど必ずしも大きな崩壊を起こし易い訳ではないことが分かる。これは、層内の柱を一斉に除去しているために上部が垂直に落下し、下部との衝突が点ではなく面で生じるために、衝撃力が多くの部材に均等に伝わり易くなること、またそれにより衝突後のモデルに傾きが生じ難いことが原因であると考えられる。



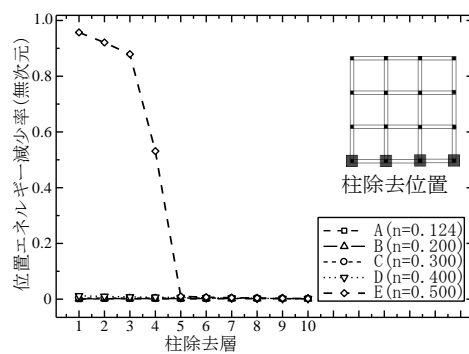
(a) 柱除去パターン①



(b) 柱除去パターン②

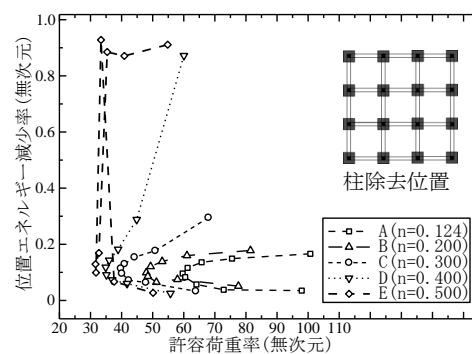


(c) 柱除去パターン③

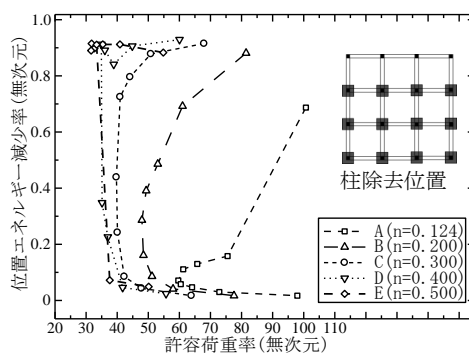


(d) 柱除去パターン④

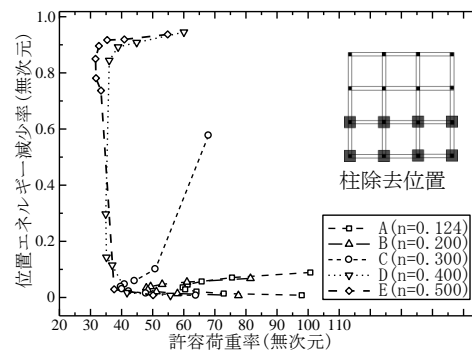
図 6 各柱除去パターンにおける柱除去層と位置エネルギー減少率の関係



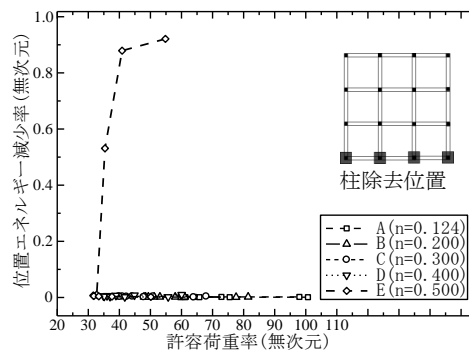
(a) 柱除去位置：パターン①



(b) 柱除去位置：パターン②



(c) 柱除去位置：パターン③



(d) 柱除去位置：パターン④

図 7 各柱除去パターンにおけるモデルごとの許容荷重率と位置エネルギー減少率の関係

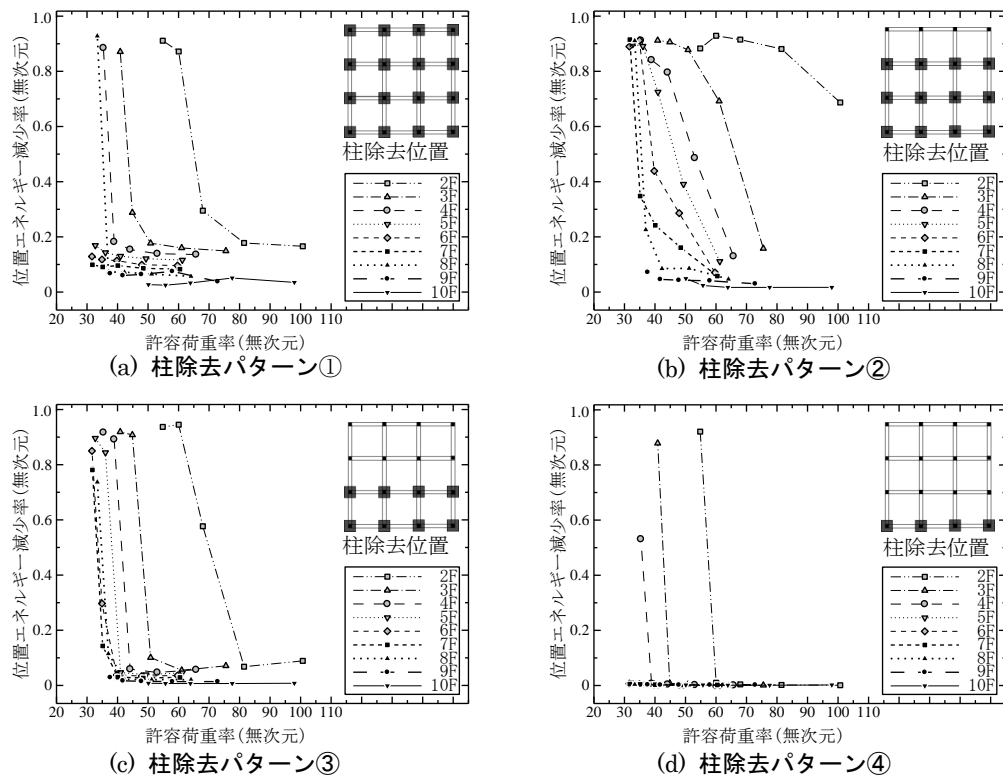


図8 各柱除去パターンにおける柱除去層ごとの許容荷重率と位置エネルギー減少率の関係

次に、許容荷重率と位置エネルギー減少率の関係をモデルごとに比較したものを図7に、柱除去層ごとに比較したものを図8に示す。図7、図8はどちらも同じ結果を示し、前者ではモデルの強度ごとに、後者は柱除去層ごとに線で結んでいる。なお、最下層である1層の柱を除去する場合には許容荷重率が定義できないため、図には1層柱除去を除いた合計180パターンの解析結果がプロットされている。図7を見ると、どの柱除去位置パターンの場合でも、強度の低いモデルほど許容荷重率が小さくなり、位置エネルギー減少率が1.0に近づく大規模な崩壊を起こす場合が増すことが確認できる。また、モデルごとに見ると、柱除去層が低層部の場合には許容荷重率が大きくなるが、位置エネルギー減少率も大きくなる傾向がある。図8を見ると、許容荷重率が同程度の値の場合、柱除去層が低層になるにつれて位置エネルギー減少率が大きい、すなわち大規模な崩壊が起こり易くなっていることが確認できる。さらに、大規模な崩壊を引き起こす許容荷重率の値は、全体的に柱除去層や層内の柱除去位置によって異なっていることが分かる。

### 3. 結言

本稿では、進行性崩壊の危険性と建物の有する強度との定性的な関係を調査することを目的とし、比較的設計強度の低い10層鋼構造物モデルに対して複数パターンの進行性崩壊解析を行った。除去する柱の本数、位置を変化させることで建物の強度と位置エネルギー減少率との関係を調査した。さらに、建物の崩壊時に下部に加わる力と落下する上部の重量の比である許容荷重率を用い、そ

の位置エネルギー減少率との関係を調査した。

解析結果から、日本の設計基準強度に近い頑丈な建物では進行性崩壊はほぼ見られなかった。進行性崩壊の危険性は、建物の強度、欠損の規模やその位置により変化することが確認され、許容荷重率が小さいほど進行性崩壊の危険性が高まるという結果が得られた。進行性崩壊を起こし始める許容荷重率は一意的に定まらず、建物から除去する柱の本数、位置に依存していた。これは許容荷重率が上部の垂直落下を仮定して算出されることが原因であると考えられる。しかし、それらの柱を除去する条件を限定すれば、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。

### 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.