

## 建物の折り畳み発破解体に関する数値解析的検証

### Numerical Investigation on Folding Blast Demolition of Buildings

○協 Ranmeng JIANG<sup>\*1</sup>, 磯部 大吾郎<sup>\*2</sup>

Ranmeng JIANG<sup>\*1</sup> and Daigoro ISOBE<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 筑波大学大学院 Graduate School, University of Tsukuba

<sup>\*2</sup> 筑波大学 University of Tsukuba

In this study, a three-stage folding blast demolition planning of buildings was introduced by using Key Element Index (*KI*) which can numerically evaluate the contribution of a column to the strength of buildings. In addition, to improve the efficiency of blast demolition, time interval between the second and the third blast was selected according to the impact load of the upper part of the building acting on the lower part after the second blast. The Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code which can stably perform non-linear structural analysis was used as a numerical code to simulate and investigate the blast demolition plan. From the numerical results, the relationship between the number of removed columns and the height of remains, the scattered distance after blast demolition were investigated to see the effect of time interval between the blasts on the efficiency and safety of the folding blast demolition of buildings.

**Key Words** : Folding Blast Demolition, Key Element Index, ASI-Gauss Technique, Time Interval, Efficiency of Demolition

## 1. 緒 言

高度経済成長期に建設された高層ビルがその耐用年数に近づき、解体の需要が一層高まっている。発破解体工法は他の解体工法に比べ解体コストが安く、複雑な高層ビルも短工期で解体できる<sup>(1)</sup>ため、欧米や中国などで盛んに行われている。しかし、現状の発破解体工法は専門家の経験に大きく依存<sup>(1)</sup>しており、定量的な判断基準がないため、解体時における建物の挙動を制御することは困難である。そのため、建物が密集している区域などでは、解体工事が周辺に大きな被害を及ぼす場合がある。また、必要以上に多くの部材を除去することで建物の解体効率が低下するという問題もある。そこで本研究では、先行研究<sup>(2)</sup>で有効性が示されている段階方式の発破解体において三段階の折り畳み方式解体方法を提案し、柱部材の全体強度に対する寄与度を評価するキーエレメント指標とキーエレメント指標の分散<sup>(2)</sup>に基づいて発破箇所を選定する。また、第2発破後に建物上層部の下層部への衝撃荷重が及ぼす影響に基づいて第3発破を実施するタイミングを検討し、発破解体効率の向上を目指す。さらに、解体時の建物の挙動解析には ASI-Gauss 法<sup>(3)</sup>に基づく有限要素法を用い、解析結果から発破柱数と残存物高さの和の関係、および解体後の部材飛散距離との関係を導出し、解体効率について考察した。

## 2. キーエレメント指標を用いた発破解体計画

### 2.1 キーエレメント指標 *KI*

キーエレメント指標（以下、*KI*と記す）は、構造全体の強度に対する柱部材の寄与度を評価する指標である。建物内に残存する柱梁接合部に対し、鉛直下方に荷重増分を加え、建物のいずれかの柱部材に降伏現象が生じた瞬間の降伏限界荷重を ${}_{n-1}P_G$ とおく。同様に、任意の*i*層内の柱番号*a*を除去した状態の建物に鉛直下方に荷重増分を与え、*i*層以下のいずれかの柱部材に降伏現象が生じた瞬間の降伏限界荷重を ${}_n P_G(i, a)$ とおく。これらの降伏限界荷重を用い、この柱番号*a*の*KI*を式(1)のように定義する<sup>(2)</sup>。

$${}_{n-1}KI_{i,a} = {}_{n-1}P_G / {}_n P_G(i, a) \quad (1)$$

ここで、添え字の $n = 1$ の場合の右辺分子 ${}_0P_G$ は、健全な状態の降伏限界荷重である。KIが大きい柱部材ほど、建物全体の荷重支持能力に対する寄与度が大きく、建物の構造を支える上で重要な柱部材であると言える。

## 2・2 キーエレメント指標の分散

先行研究<sup>2)</sup>では、KIの分散を用い、その値を大きくするように発破箇所を選定することで、発破後の欠損した状態の建物に突出して大きなKIを持つ柱を作り出すことができることを示した。該当する柱は建物全体の強度に対し大きく寄与するため、それを欠損させると建物により大きな崩壊を引き起こすことが可能となると思われる。本研究では、建物の一部に残存する柱のKIの分散を次式により算出する。

$$\sigma_{m\sim n}^2 = \sum_i \sum_j \frac{(\overline{KI}_{m\sim n} - KI_{i,j})^2}{N_{m\sim n}} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{KI}_{m\sim n}$ は $m\sim n$ 層に残存する全ての柱のKIから算出する平均値、 $KI_{i,j}$ は、 $i$ 層の柱番号 $j$ におけるKI、 $N_{m\sim n}$ は $m\sim n$ 層に残存する全柱数、 $\sigma_{m\sim n}^2$ は $m\sim n$ 層でのKIの分散を表す。

## 2・3 折り畳み発破解体の発破箇所選定方法

本研究における折り畳み方式の発破解体計画を第1発破、第2発破と第3発破の3段階に分ける。第1発破では建物の崩壊ではなく強度を低下させることを目的とする。具体的には、前述のKIの分散を用い、建物の1～5層（下層部）と6～10層（上層部）それぞれの範囲におけるKIの分散を算出し、分散値が最も大きくなるような柱を第1発破箇所として選定する。その際、建物の自重を十分に利用し、かつ建物を崩壊させずに強度を低下させることを目指す。続く第2発破では、建物の上層部全体を一方向に崩壊させることを目的とする。具体的には、上層部の左側3/4部分において、第1発破後に残存する柱の中からKIの大きい順に柱を選定する。次に、第3発破では、建物下層部を上層部と逆方向に崩壊させ、建物全体を直下に崩壊させることを目指す。すなわち、建物下層部の残存する柱の中から右側3/4部分において、KIの大きい順に柱を選定する。なお、最上層は発破の対象から除外した。

## 3. 第3発破を実施するタイミングの選定

本節では、上層部の衝撃荷重を利用して第3発破の実施タイミングを選定するため、第2発破後に建物の下層部の柱部材に発生する軸力について述べる。解析モデルとして、10層3×3スパンの鋼構造建物を想定し、全高は40m、階高は各層4m、幅および奥行きのスパン長は全て7mとした。解析モデルを図1に示す。モデルには固定荷重と積載荷重を合わせて800 kgf/m<sup>2</sup>の床荷重が作用するものとして設計した。また、部材には中国基準の鋼材を使用し、梁にはH形鋼Q235C、柱には角形鋼管Q345GJを使用している。鋼材の物性値を表1に示す。第2発破後に建物下層部の柱部材に発生する軸力を求めるため、第1と第2発破を行った。解析条件としては、前述の発破箇所選定方法を用いた第1発破では24本の柱を発破し、第2発破では28本の柱を発破している。また、第1発破を1s、第2発破を4sに行った。

第2発破後、残存する柱の中でKI値が最大であり、建物の構造を支える上で重要な柱A（図2）の軸力推移を図3に示す。第2発破を行った時刻を0sとする（図3①）。第2発破後の1.29s時に建物の上層部と下層部が接触する（図3②）までは、第2発破における柱の除去によって軸力が小さく振動する。その後、②で上層部と下層部が接触した際に瞬間的に大きな圧縮軸力が作用し、その後は大きく振動する。接触後の1.81s（図3③）付近では圧縮されたバネを解放したときに跳ね上がるのと同じ原理で、柱に引張軸力が作用する。その後は、解体による上層部の崩壊挙動がほぼ落ち着く（図3④）までの過渡的な状態においては、軸力が不安定に変動する。④以降の定常状態においては軸力が小さく振動する。以上で示した①～④の特徴的なタイミングを踏まえ、本稿では、(i)第2発破と同時、(ii)建物の上層部と下層部が接触する前、(iii)接触した直後、(iv)定常状態に推移する過程、(v)定常状態の計5ケースのタイミングで第3発破を実施する。

Table 1 Material properties of steel members

	Young's modulus [GPa]	Yield stress [MPa]	Poisson's ratio	Density [kg/mm <sup>3</sup> ]
Q235C	206	235	0.30	7.85×10 <sup>-6</sup>
Q345GJ	206	345	0.30	7.85×10 <sup>-6</sup>

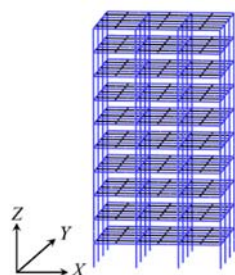


Fig. 1 Numerical model

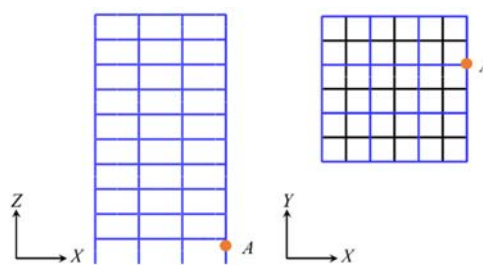


Fig. 2 Evaluation point (column A)

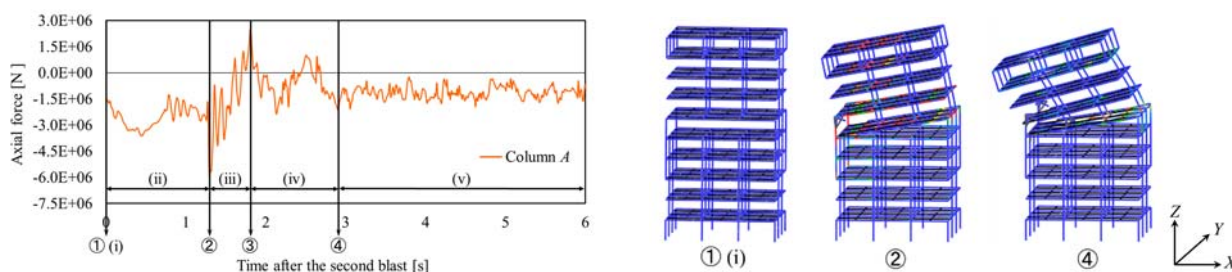


Fig. 3 Time histories of axial force in column A

#### 4. 解析結果

第3発破を実施するタイミングを変え、前述の発破箇所選定方法を用いて発破解体解析を実施した。ここで、解体終了時の全ての節点の高さ方向(Z)の座標値を足し合わせた値を残存物高さの和と定義する。また、残存物高さの和を健全状態の建物高さの和で割ることにより無次元化し、発破柱数を建物の全柱数で割り無次元化したものとともに発破解体効率の評価指標として用いる。さらに、解体終了時の残存物を構成する全節点の中で、建物の外周部から最も離れた位置に存在する節点までの水平距離を発破解体における部材の飛散距離と定義する。飛散距離についても健全状態の建物高さで割ることにより無次元化する。

第3発破を実施するタイミングを変えた際の発破柱数と残存物高さの和の関係を図4に示す。上層部と下層部が接触した直後(iii)と定常状態に移る過程(iv)に第3発破を実施するパターンは、残存物高さの和が小さく、かつ発破柱数も比較的少なく抑えられているケースが多く、全体的に解体効率が良い結果となった。接触した直後(iii)に第3発破を実施するパターンを一例として図4(b)に示す。また、第3と第2発破を同時に実施するパターン(i)、および定常状態に第3発破を実施するパターン(v)についても、全体的に残存物高さの和が小さい結果が多い。しかしながら、その時の倒壊形態(図4(a), (c))を見ると建物が横倒れになる形で崩壊している。次に、第2発破後の経過時間と残存物高さの和の関係を図5に示す。図から、接触した直後(iii)と定常状態に移る過程(iv)に第3発破を実施するパターンでは、他のパターンに比べ残存物高さの和が小さい箇所に集中していることが分かる。

また、図6に示す飛散距離と残存物高さの和の関係から、接触した直後(iii)と定常状態に移る過程(iv)に第3発破を実施するパターンでは、解体時の飛散距離を短く抑えられていることが確認できる。実際の発破解体では建物の全体崩壊を目的とするため、残存物高さの和をある程度小さく抑えられなければ解体計画として実用的ではない。そこで、残存物高さの和が健全状態時の高さの和の3割以下になるケースを「解体成功」と定義し、解体が成功したケースのみの第2発破後の経過時間と飛散距離の関係を図7に示す。図7に示すように、第3と第2発破を同時に実施するパターン(i)、および定常状態に第3発破を実施するパターン(v)では解体成功率が低く、

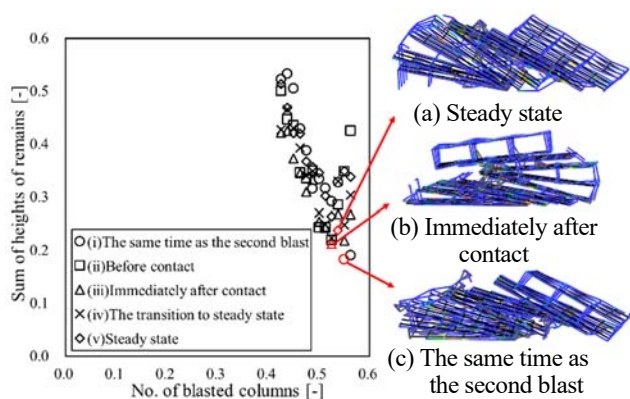


Fig. 4 Relation between the number of blasted columns and the sum of heights of remains

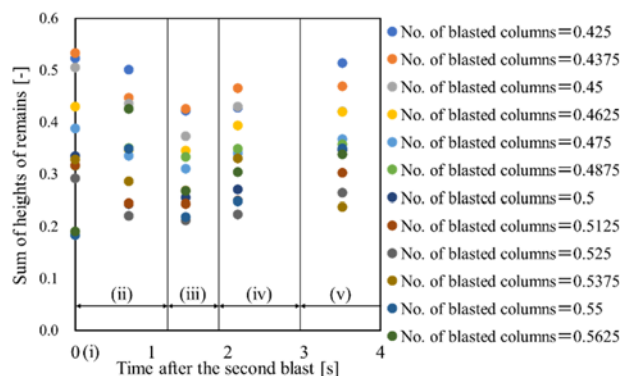


Fig. 5 Relation between time after the second blast and the sum of heights of remains

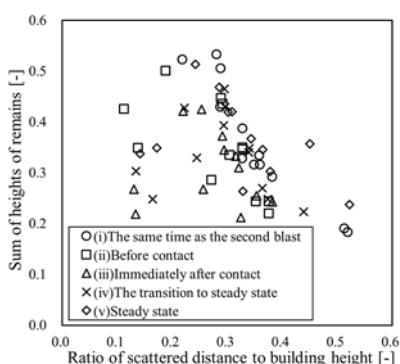


Fig. 6 Relation between the scattered distance and the sum of heights of remains

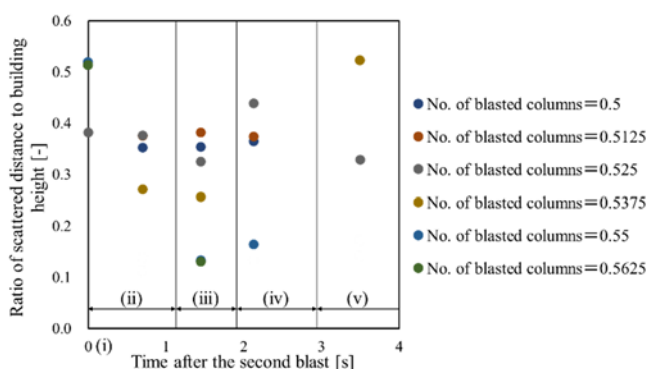


Fig. 7 Relation between time after the second blast and the scattered distance

飛散距離が長くなった。接触した直後(iii)と定常状態に推移する過程(iv)に第3発破を行うパターンでは、他のパターンより解体成功率が高く、かつ解体時の飛散距離を最も抑えられることが分かる。

## 5. 結 語

本研究では、10層鋼構造建物のモデルに対して折り畳み発破解体計画を実施した。さらに、折り畳み発破解体の効率向上を目指し、第3発破を実施するタイミングの選定に重点を置き、発破解体解析を行った。その結果、 $KI$ の分散と $KI$ 値を用いた3段階の発破解体方法は、建物の折り畳み倒壊を効果的に制御できることが確認された。また、第3発破を実施するタイミングは、解体効率に大きな影響を与える。接触した直後と定常状態に推移する過程に第3発破を実施するパターンは、解体時の飛散距離を最も抑えることができ、残存物高さの和も小さく高効率な発破解体計画である。今後、さらに高層の建物に対し発破解体計画を実施することで上層部から下層部への衝撃荷重の影響を大きくし、第3発破を実施するタイミングについて詳細に検討する。

## 文 献

- (1) Uenishi K, Takahashi H, Yamachi H, Sakurai S, PC-based simulations of blasting demolition of RC structures, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2401-2410, 2010.
- (2) 東 健太, 磯部 大吾郎, キーエレメント指標に基づく建物の発破解体計画手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第743号, pp. 59-67, 2018.
- (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.