

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

DEVELOPMENT OF BLAST DEMOLITION PLANNING TOOL OF BUILDINGS BASED UPON KEY ELEMENT INDEX

東 健太*, 磯部 大吾郎**
Kenta HIGASHI and Daigoro ISOBE

In this study, a blast demolition planning of buildings based upon the key element index, in which the contribution of a column to the strength of the buildings can be numerically evaluated, is developed. An Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code is applied to blast demolition analyses of ten-story steel framed building models with different span numbers. Various selection schemes of blasted columns using the index were evaluated by comparing the efficiencies and levels of safety during demolition. The variances of key element index values were considered, in particular, to make a large difference in the distribution of the index values in each layer of the building. Most of the cases using the variance of index values showed a collapse motion in vertical direction, and the scattered distances of structural members were significantly suppressed.

Keywords : Blast demolition, Key element index, Variance, Efficiency of demolition, ASI-Gauss code
発破解体, キーエレメント指標, 分散, 解体効率, ASI-Gauss 法

1. はじめに

高度経済成長期に建設された建物の老朽化や都市の再開発に伴い、建物の解体の需要は高まっている。現在、日本で主に行われているクレーンなどの重機を用いた解体は、その対象が大規模になるにつれ工事が長期化し、コストも増大してしまう。そこで、重機を用いた解体での懸念事項を解消するために、欧米などでは発破解体工法^{1)~4)}を用いることがある。この解体工法は、高所における危険な作業が不要であり、短期間に低コストで解体できるという点で優れている。しかし、一部の業者による独自のノウハウを基に解体計画が立案・施工されているため、高度な知識と経験に強く依存する部分があり、発破箇所を明確な選定基準は確立されていない。場合によっては建物が解体できずに中途半端に残存したり、予期しない方向に倒壊したりするなど、失敗する恐れもある。また、発破解体を行っている地域の多くは地震が少なく、現存している建物は十分な耐震性を要求されていないため、解体しやすいことが挙げられる。一方、日本の建物は欧米と比べ強固な耐震設計が施されているため、欧米の業者の経験則を単純には適用できない。そのため、ノウハウに依存せず、強度の高い建物でも確実に解体するには、力学的な基準に基づいて発破箇所を定量的に選定する手法の確立が必要となる。

磯部らは、大規模な骨組構造解析において最小限の計算コストで非線形現象を再現可能とするASI-Gauss解析コード⁵⁾を用いることで、建造物の発破解体を数値解析上で再現することを可能としてき

た⁶⁾。さらに、建物内の重要部材を数値解析的に特定する手段として、Frangopol⁷⁾や大井ら⁸⁾が示した構造物の鉛直荷重支持能力に対する部材感度の概念を基に、キーエレメント指標を考案した⁹⁾。そして、この指標を用いた発破解体計画の有効性を検証し、定量的な指標に基づく建物の発破解体計画手法の開発を進めてきた。しかし、文献⁹⁾では発破箇所を最下層の柱に限定しており、建物を横倒しにする計画が主であったため、隣接する建物が存在した場合における解体時の安全性は考慮できていない。さらに、建物の構造が異なる場合の検討には至っていない。

本稿では、スパン数の異なる複数の鋼構造建物モデルを対象として、様々な発破箇所選定方法を検討し、解体効率と安全性に優れた発破解体計画手法を開発することを目的とする。スパン数の異なる建物モデルを解析対象とすることにより、冗長性の高い建物モデルに対しても発破解体が可能となる手法を見出していく。また、解体時に飛散した部材の飛散距離を求めることで、周囲への安全性の検証を行う。続く第2節では発破解体計画手法ならびに解析モデル・解析条件について記し、第3節では解析結果を示す。最後の第4節では結論を述べる。

2. 発破解体計画手法

2.1 キーエレメント指標

安全で効率的な発破解体を実現するには、適切な発破箇所を選定

* 筑波大学 大学院生
** 筑波大学 教授・博士(工学)

Grad. Student, Graduate School, Univ. of Tsukuba
Prof., Univ. of Tsukuba, Dr.Eng.

する必要がある。その際に、建物全体に対する柱部材の寄与度を定量化し、発破箇所を選定する方法が有効であると考えられる。そこで本稿では、磯部らが提案したキーエレメント指標⁹⁾(以下、 KI と記す)を基に発破箇所を選定することとした。 KI とは、建物の全体強度に対する個々の柱の寄与度を数値化したものであり、数値が高いほど建物の全体強度に対する寄与度が大きいことを示す。 KI に関する詳細については他文献⁹⁾¹⁰⁾に譲り、本稿では、発破箇所を段階的に選定する上で必要な KI の算出方法を中心に記すこととする。

まず、健全な状態の建物の降伏限界荷重として、全柱梁接合部に対し鉛直下方に荷重増分を与え、最下層のいずれかの柱部材が降伏した瞬間の荷重を用い、 ${}_0P_G$ と表す。また、任意の i 層内の柱(番号 m)を除去した状態の建物にも同様に鉛直下方に荷重増分を与える。その際に i 層以下のいずれかの柱部材が降伏した瞬間の荷重を ${}_iP_G(i, m)$ とし、 i 層内の柱(番号 m)の KI を以下のように定義する。

$${}_0KI_{i,m} = {}_0P_G / {}_iP_G(i, m) \quad (1)$$

添え字の0は健全な状態の建物の降伏限界荷重を用いていることを示し、添え字の1は柱1本を除去した第1次選定後の状態であることを示す。すなわち、上式は健全な建物の強度に対するその柱1本の寄与度を表す。同様に、第 $(n-1)$ 次選定までに選定された柱を除去した後の建物の強度に対する i 層柱番号 m の寄与度は、第 n 次選定では以下のように定義できる。

$${}^{n-1}KI_{i,m} = {}^{n-1}P_G / {}_iP_G(i, m) \quad (2)$$

ここで、右辺分子 ${}^{n-1}P_G$ は、第 $(n-1)$ 次選定までに選定された柱を除去した状態での建物の降伏限界荷重であり、第 $(n-1)$ 次選定までの選定状況に応じて値が変化する。

式(2)を用いると、任意の本数の柱が除去された建物の強度に対する KI を連続して算出することが可能となる。

2.2 キーエレメント指標の分散

KI を基に発破箇所を選定する場合、その指標値の大小を順位付けして選定する方法が考えられる。これらの方法に加え、本稿では、 KI の分散を大きくするように発破箇所を選定し、発破後の建物に突出して大きな KI を持つ柱を作り出すことで、より効率的な発破解体計画手法を構築することを目指した。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。 KI の分散は、建物全体に残存する柱の KI から算出する方法(以後、 σ^2 を大きくするパターン)と各層(任意の i 層)ごとに残存する柱の KI から算出する方法(以後、 σ_i^2 を大きくするパターン)の2種類の方法によって算出した。前者は以下の式(3)、後者は式(4)によって求められる。

$$\sigma^2 = \sum_i \sum_j \frac{(\overline{KI} - KI_{i,j})^2}{N_{total}} \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = \sum_j \frac{(\overline{KI}(i) - KI_{i,j})^2}{N_i} \quad (4)$$

ここで、 \overline{KI} は全層に残存する全ての柱の KI から算出する平均値、

$\overline{KI}(i)$ は i 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_{total} は全層に残存する全柱数、 N_i は i 層に残存する全柱数、 σ^2 は全層での KI の分散、 σ_i^2 は i 層(単層)での KI の分散を表す。

2.3 段発方式の発破解体計画

本節では、発破を行うタイミングをずらすことで、建物の強度を低下させ、後に確実な崩壊を目指す段発方式の発破解体計画について述べる。本研究における段発方式の発破解体計画は、柱部材の発破を第1発破と第2発破の2段階に分け、第1発破では建物を崩壊させることなく強度を低下させることを狙う。続く第2発破では、建物を確実に崩壊させることを目指す。実際の発破解体の施工では、建物の部分的な崩壊と次の発破のタイミングを合わせることで、発破による建物の動的な挙動を利用した発破解体計画がしばしば用いられる。しかし、建物が動的に挙動している状態で次の発破を行うと、予期せぬ崩壊挙動を招く恐れがある。そのため本研究では、発破による建物の動的な挙動を利用せず、挙動が落ち着くまで十分な時間差(3.0 s)を与えてから第2発破を行うこととした。また、第1発破によりモデルの崩壊が開始してしまうケースは、発破解体計画の条件から除外することとした。

2.4 キーエレメント指標に基づく発破箇所選定方法

KI に基づく発破箇所選定方法では、前節で示した段発方式の発破解体計画に従って発破箇所を選定する。まず、健全な建物モデルにおける各層内の柱部材の KI に基づき第1発破箇所を選定する。その後、第1発破箇所の柱部材を除去したモデルについて再度 KI を算出し、更新された KI に基づき第2発破箇所を選定する。本稿では、第1発破では KI の小さい順に発破箇所を選定し、第2発破では KI の大きい順に発破箇所を選定する方法(以下、 $S-L$ 方式)を検討する。この方法は、第1発破で寄与度の低い柱を発破するため、建物の強度を安全に低下させることができる。その後の第2発破では、建物全体が安定した状態のまま寄与度の高い柱を発破させるため、安全で確実な解体が期待できる。次に、第1発破では KI の大きい順に発破箇所を選定し、第2発破でも KI の大きい順に発破箇所を選定する方法(以下、 $L-L$ 方式)についても検討する。この方法は、第1発破で寄与度の高い柱を発破するため、安全性では $S-L$ 方式よりも劣ることが考えられる。だが、建物の強度は $S-L$ 方式よりも低下することが期待できるため、解体効率が向上する可能性が高い。以上の方法とは別に、2.2節に記した KI の分散を用いて発破箇所を選定する方法についても検討する。この場合には、第1発破箇所の選定においては KI の大小に準じない方法を取り、前述の σ^2 を大きくするパターンと σ_i^2 を大きくするパターンについて KI の分散を算出・比較し、値が最大となる柱を選定する。なお、本稿ではモデルの対称性を利用して4本ずつの組で選定し、除去すると仮定した柱の本数を4本ずつ増やしていった際の分散を求め、その値が最大となる柱の組を段階的に除いていくこととした。また、部分的な崩壊に留まる可能性が高いため、最上層は発破の対象から除外した。次に、第2発破箇所としては、第1発破後に残存する柱の中から KI が大きい順に順位を付け、任意の順位までの柱を選定する。すなわち、この手法の $S-L$ 方式および $L-L$ 方式と異なる点は、第1発破箇所の選定方法のみである。

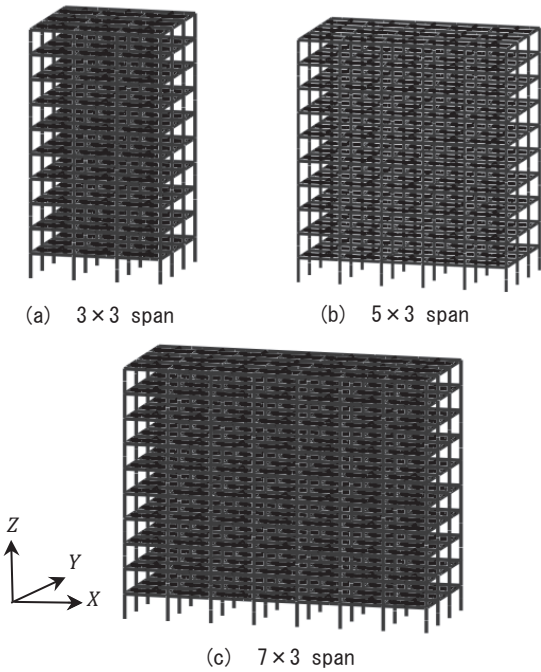


Fig. 1 10-story steel-framed building models

Table 1 Specifications of numerical models

	3×3 span model	5×3 span model	7×3 span model
Sizes in horizontal plane (X×Y axis direction)	21 × 21 [m]	35 × 21 [m]	49 × 21 [m]
Base shear coefficient	0.2	0.2	0.2
Total No. of elements	2000	3200	4400
Total No. of nodes	1506	2394	3282
Total No. of columns	160	240	320

Table 2 Material properties of steel

	SM490	SM400
Young's modulus [GPa]	206	206
Yield strength [MPa]	325	245
Poisson's ratio	0.30	0.30
Density [kg/mm ³]	7.85×10^{-6}	7.85×10^{-6}

2.5 無作為な発破箇所選定による発破解体計画

前節で記述した KI に基づく発破箇所選定方法を用いない場合として、乱数を用いて無作為に発破箇所を選定する解体計画について検討することとした。すなわちこの場合、構造的に対称な位置にある柱部材を発破箇所を選定する操作はしない。この手法を用いることで、発破した柱の本数と解体した建物の残存している割合との単純な関係を導き出し、 KI に基づく発破解体計画手法の有効性を検証する際の比較対象とする。また、 KI に基づく発破箇所選定方法とは異なり、1回の発破のみで解体する方法をとることとする。

2.6 解析モデル・解析条件

本稿では、スパン数が異なる10層の鋼構建造物モデルを複数作成し、調査を実施した。解析モデルの鳥瞰図をFig. 1に示す。モデルの全高は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。各モデルの諸元をTable 1に示す。柱は1部材を2つの線形要素で分割し、梁と床は1部材4要素分割で表現した。柱部材はSM490の角形鋼管、梁部材はSM400のH型钢である。各鋼材の物性値をTable 2に示す。床要素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、柱と梁の断

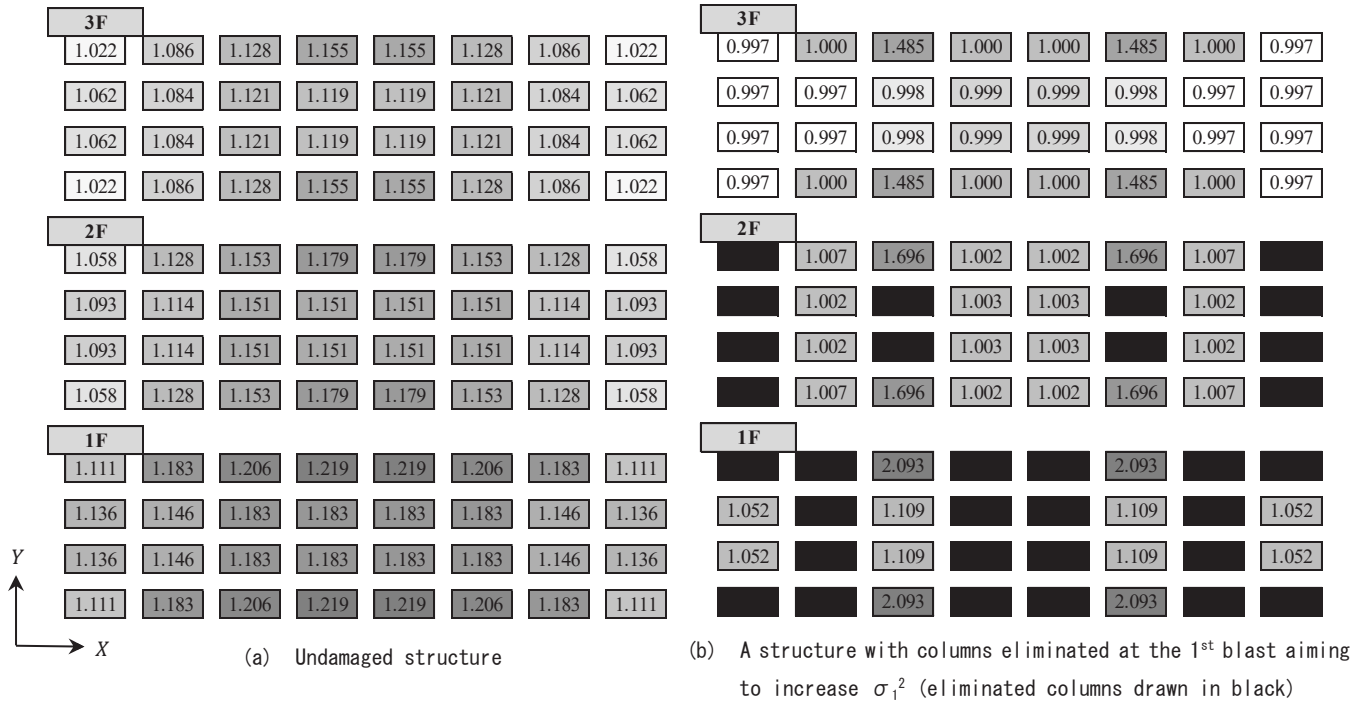


Fig. 2 Calculated KI values (1st floor to 3rd floor)

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、固定荷重と積載荷重を足し合わせた単位面積当たり 7.8 kN/m² の荷重が作用するものとして決定した。建物モデルが負担する床荷重は、発破解体が行われる建物を想定し、固定荷重のみを考慮した。固定荷重は、単位面積当たり、一般階で 2.1 kN/m²、屋上で 3.5 kN/m² が作用するように、密度の次元に換算し、荷重を負担する梁部材と床部材に加えた。

解析条件としては、時間増分を 1.0 ms とし、自重解析を 0.0 s 時に行った。段発方式の発破解体計画では、第 1 発破を 1.0 s 時、第 2 発破を 4.0 s 時に行った。また、無作為な発破箇所選定による発破解体計画では、1.0 s 時に発破を行った。解析は、発破解体によるモデルの崩壊が終了するまで十分な時間をとるために計 30.0 s まで行った。数値解析には、地震時挙動解析¹¹⁾と発破解体解析⁹⁾において、実験との比較により解析結果の妥当性が示されている ASI-Gauss 解析コードを使用した。ASI-Gauss 解析コードに関する詳細については他文献^{5),9)}に譲る。なお、建物の発破現象は、指定した節点を強制的に破断させ、要素の断面力を解放することにより表現している。

一例として、10 層 7×3 スパンモデルの健全な状態の場合と σ_1^2 を大きくするパターンの場合に算出された、1 層から 10 層までの柱の KI のうち 1 層から 3 層についてのみを Fig. 2 に示す。 KI 値が大きいほど濃い色で表示している。また、第 1 発破箇所として既に選定・除去されている柱を黒色で示す。健全な状態の建物の KI と比較すると、 σ_1^2 を大きくするパターンでは 1 層において突出して KI の大きな柱ができていることが分かる。 σ_1^2 を大きくするパターンの特徴や傾

向を把握するために $i = 1, 3, 5$ に対して調査した結果から、 KI の分散の算出対象となる層に突出して寄与度の高い柱ができる傾向が確認できた。なお、 σ^2 を大きくするパターン、 $S-L$ 方式および $L-L$ 方式については、健全状態の建物と比較すると KI の大きな柱ができていたが、層内に突出して寄与度の高い柱が発現することはなかった。

次に、3 つの健全な建物モデルに各発破箇所選定方法を適用させた場合において、第 1 発破による建物の全体強度の低下の度合いについて調査した。発破箇所選定方法の違いによる強度低下の変化を Fig. 3 に示す。縦軸は、健全な建物の降伏限界荷重 ${}_0P_G$ と第 1 発破後の建物の降伏限界荷重 ${}_{n-1}P_G$ ($n=2$) の比を取り、建物の全体強度の低下を示している。横軸は、第 1 発破柱数を全柱数で割ることで無次元化している。凡例の S_1^i は KI の小さい順に 1 位から r 位までの柱を発破したことを表す。また、 L_1^i は KI の大きい順に 1 位から r 位までの柱を発破したことを表す。Fig. 3 より、 KI の小さい順または大きい順に柱を発破した場合には、強度を低下させるには多くの柱を発破する必要があることが分かる。一方、 σ_1^2 を大きくするパターンは、発破本数が少なくても強度低下は大きく、全てのモデルにおいて最も効率良く強度を低下させる発破箇所選定方法であることが分かる。このことから、分散の考慮は発破解体効率の向上に寄与することが期待できる。

3. 解析結果

3.1 発破解体計画手法を用いた数値解析例

第 2 節で述べた発破解体計画手法を 10 層 7×3 スパンモデルに適用した例を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。まず、無作為な発破箇所選定

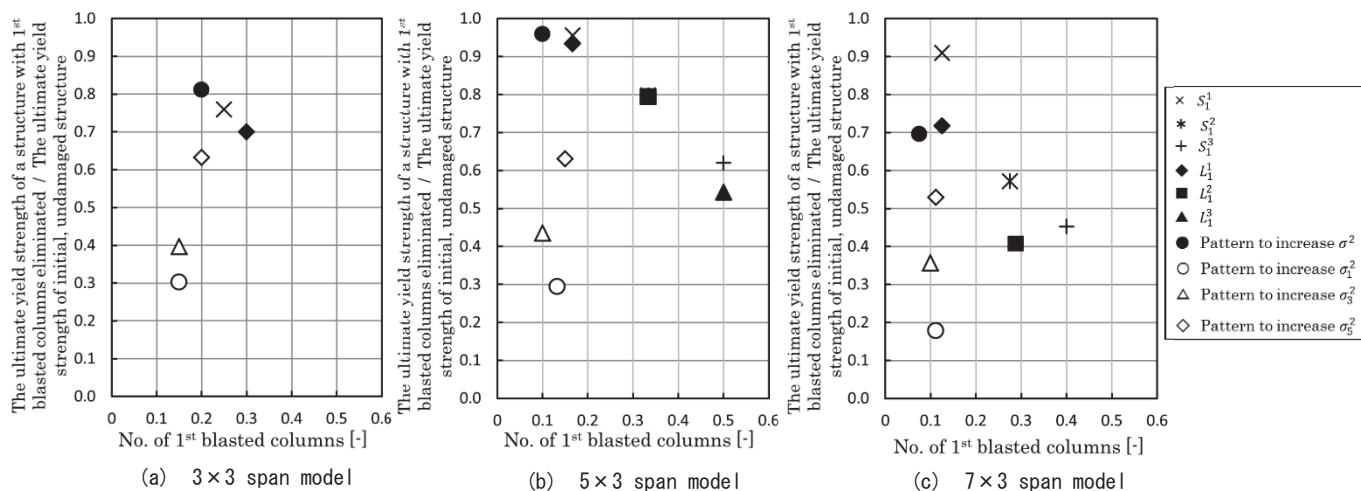


Fig. 3 Relation between the number of blasted columns at the 1st blast and the ultimate yield strength of each model

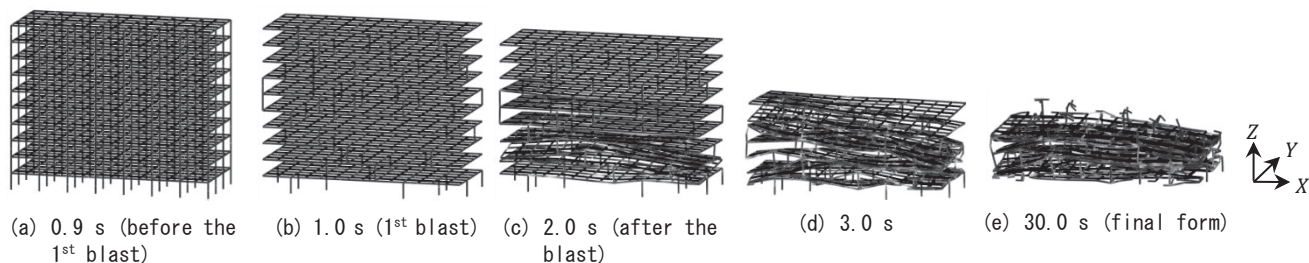


Fig. 4 An example of blast demolition analysis (7×3 span model, random selection of blasted columns)

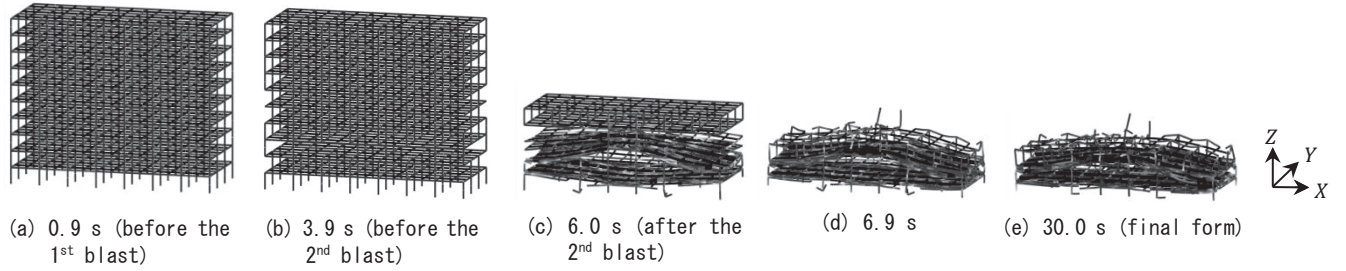


Fig. 5 An example of blast demolition analysis (7×3 span model, pattern to increase σ_3^2)

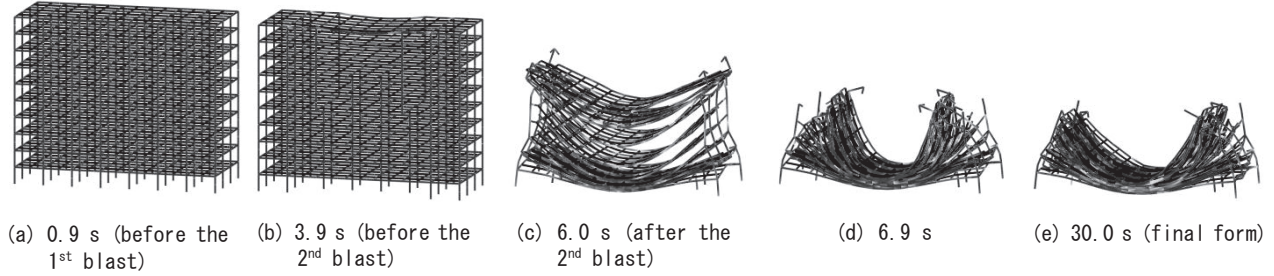


Fig. 6 An example of blast demolition analysis (7×3 span model, $L-L$ method)

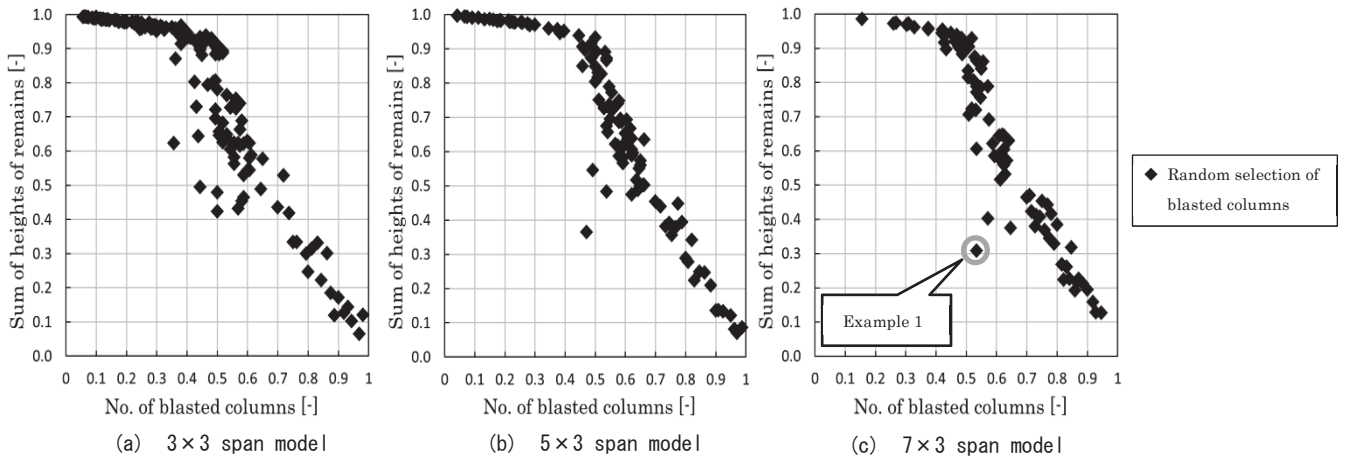


Fig. 7 Relation between the number of blasted columns and the sum of heights of remains (random selection of blasted columns)

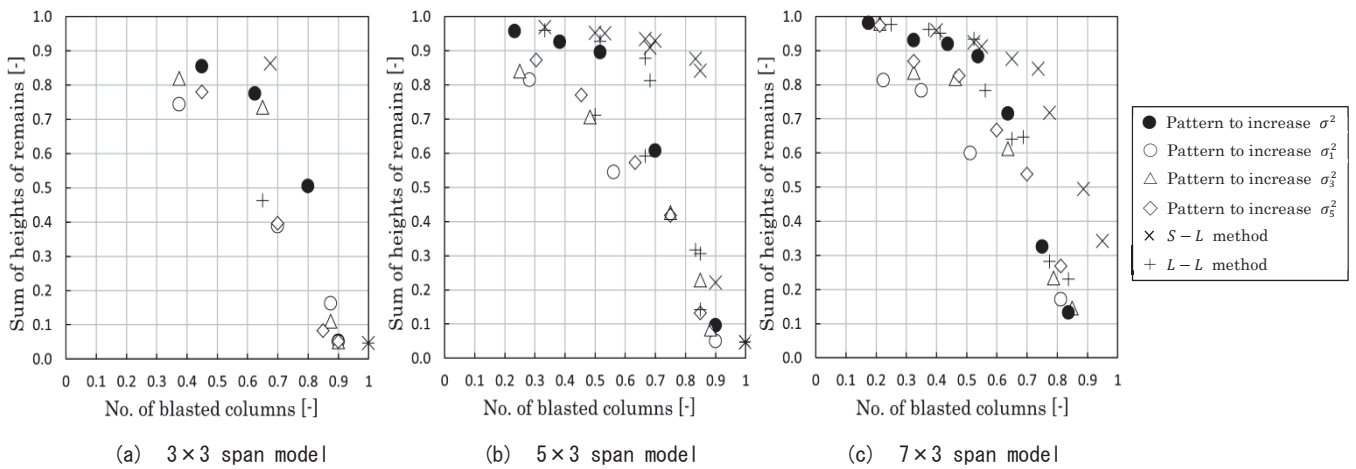


Fig. 8 Relation between the number of blasted columns and the sum of heights of remains (selection of blasted columns based on key element index)

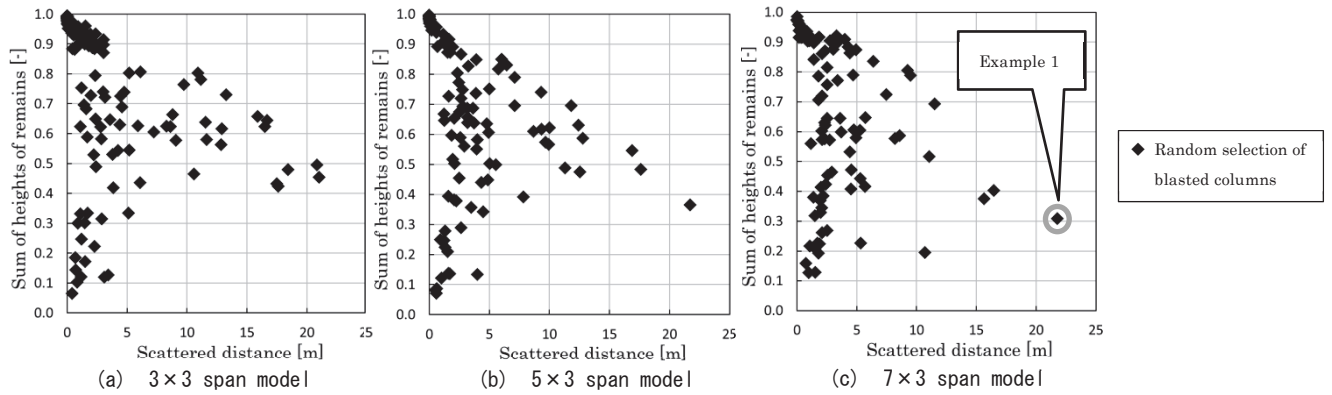


Fig. 9 Relation between the scattered distance and the sum of heights of remains (random selection of blasted columns)

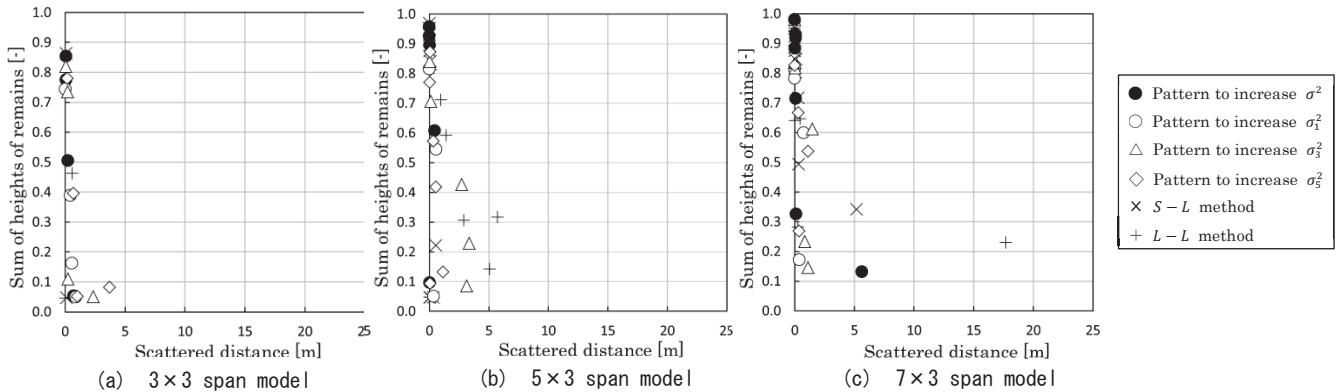


Fig. 10 Relation between the scattered distance and the sum of heights of remains (selection of blasted columns based on key element index)

による発破解体解析結果の一例を Fig. 4 に示す。この発破解体例は、建物を構成している全 320 本の柱のうち、261 本を発破する計画である。Fig. 4(b)は、柱部材を発破したステップでの図である。この例では、1.0 s 時の発破の直後からモデル下層部の柱部材が自重に耐え切れず降伏・破断を生じ、Fig. 4(c),(d) に示す過程を経た後、Fig. 4(e)に示す最終形態となった。次に、段階方式的発破解体解析結果の例を 2 つ示す。まず、第 1 発破で σ_3^2 を大きくするパターンを用いて選定した柱 32 本を発破し、第 2 発破で KI の大きい順に 5 位までの柱 220 本を発破する計画を用いた場合の解体挙動を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)は、第 1 発破前のモデルの様子であり、Fig. 5(b)は第 2 発破前のモデルの様子である。Fig. 5(b)を見ると、第 1 発破による部材の欠損はあるが、建物の他の箇所への影響は見られない。建物を崩壊に至らしめることなく建物全体の強度を低下させるという、第 1 発破の目的が達成されていると判断できる。第 2 発破後、上層の落下挙動(Fig. 5(c))を経て、6.9 s 付近以降では部材の動きがほとんど止まった(Fig. 5(d))。その後、Fig. 5(e)のような最終形態となった。次に、Fig. 6 には $L-L$ 方式の発破解体解析例を示す。この例では、第 1 発破で KI の大きい順に 2 位までの柱 92 本を発破し、第 2 発破で KI の大きい順に 4 位までの柱 176 本を発破する計画を用いた。Fig. 5 の場合と同様に第 1 発破による建物の他の箇所への影響は見られない (Fig. 6(b))。その後 Fig. 6(c)の落下挙動を経て、中央に積み込むような形で解体できていることが分かる (Fig. 6(d), Fig. 6(e))。

3.2 発破解体効率・解体時の安全性の比較

本稿では、 σ^2 を大きくするパターン、 σ_i^2 を大きくするパターン($i =$

1,3,5), $S-L$ 方式および $L-L$ 方式、さらに乱数を用いて無作為に発破箇所を選定し 1 回の発破で解体する発破解体解析を実施し、解体効率と解体時の安全性を比較・検証した。解体効率は Fig. 7, Fig. 8 に示す発破柱数と残存物高さの和の関係より評価し、解体時の安全性は Fig. 9, Fig. 10 に示す部材の飛散距離と残存物高さの和の関係より評価した。なお、発破解体解析終了時の全ての節点の高さ方向の座標値を足し合わせた値を残存物高さの和と定義し、発破解体の成否を判断する指標として用いる。また、残存物高さの和を健全な建物の高さの和で割ることにより無次元化し、発破柱数は健全な建物における全柱数で割り無次元化したものを用いた。この評価方法を取り入れることにより、スパン数の異なるモデル間での解析結果を比較した。さらに、発破解体解析終了時の残存物を構成する全ての節点の座標値の中で、健全な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。部材の飛散距離を評価に取り入れることで、解体時の周囲への安全性を考慮した発破解体計画を定める上での判断材料とする。

Fig. 7 に示す無作為な発破箇所選定による発破解体解析結果を 3 つのモデルで比較すると、発破柱数が少ない領域では、柱の発破後もモデルは崩壊を開始することがなく、最上層部の軽微な部分崩壊に留まる結果となった。また、全てのモデルで発破柱数が 4 割を超えた辺りから残存物高さの和が下降し始める傾向があった。さらに、発破柱数が増加すると残存物高さの和は下がり、その傾向線の傾きは 3 つのモデルでほとんど同様となった。この結果から、無作為に

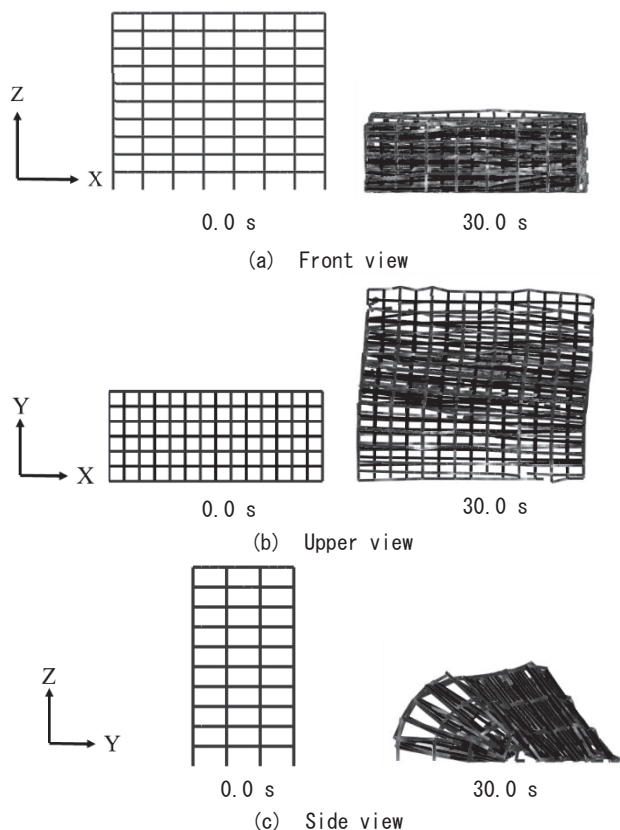


Fig. 11 Collapse behavior of the model in Example 1

発破箇所を選定した場合、スパン数に関係なく発破柱数と残存物高さの和に一定の関係が存在することがいえる。

一方、Fig. 8 に示す KI に基づいて発破箇所を選定した場合の結果では、発破箇所選定方法の違いによって傾向に差が生じた。さらに、スパン数が増加するにつれて発破箇所選定方法の違いによる解体効率の差異が大きくなるのが分かる。スパン数が増えることで応力伝達経路が十分に確保され、冗長性が高くなるため、第 1 発破によって最も効率良く建物の全体強度を低下できていることが示唆された σ_1^2 を大きくするパターンを除き、他の全ての場合で解体効率が悪くなっている。次に、各モデルで解体効率を比較すると、Fig. 8(a) の 3×3 スパンモデルでは、第 1 発破によって建物全体の強度が十分に低下していないため、 $S-L$ 方式の解体効率は最も悪い結果となった。また、 $L-L$ 方式、 σ_1^2 を大きくするパターンと σ_5^2 を大きくするパターンでは解体効率にあまり差異が生じていないことが分かる。Fig. 8(b) の 5×3 スパン、Fig. 8(c) の 7×3 スパンモデルでは、 σ_1^2 を大きくするパターン以外の発破箇所選定方法を用いた場合には、3×3 スパンモデルの場合より解体効率が悪くなっている。すなわち、3 つのモデルに共通して、 σ_1^2 を大きくするパターンは解体効率が悪くならない傾向があるといえる。

実際の発破解体では建物の全体的な崩壊を目的としており、部分的な崩壊に留まる場合は、発破解体計画としては失敗であるといえる。そこで、各々の発破箇所選定方法について、残存物高さの和が低く抑えられている場合のみで比較する。まず、Fig. 8 を見ると分かるように、解体効率の悪い $S-L$ 方式を除く 5 つの発破箇所選定方法を用いた場合の方が、およそ 8 割以上の発破柱数が必要であるも

の、無作為に発破箇所を選定した場合よりは 1 割程度少ない発破柱数で残存物高さの和を低く抑えられていることが分かる。一方、Fig. 7 の無作為に発破箇所を選定した場合と Fig. 8 の KI に基づいて選定した場合とを比較すると、無作為に発破箇所を選定した場合に解体効率が比較的良好なケースが存在することが分かる。

ところで、発破解体計画の優劣を定める上では、解体効率だけでなく解体時の安全性についても検証が必要である。そこで、Fig. 9、Fig. 10 に示すように部材の飛散距離と残存物高さの和の関係を比較する。Fig. 9 より、無作為に発破箇所を選定した場合、全体的に部材の飛散距離が長くなっていることが分かる。さらに、解体効率が良いケース (Fig. 7(c)、Fig. 9(c) 中の例 1) は Fig. 11 に示すように建物が横方向に倒壊しているため、飛散距離がより長くなり周囲への安全性が考慮できていない解体計画となっている。隣地境界までの距離が十分に確保されているなど、解体対象となる建物の敷地が十分に広大な場合には、このように横倒しにする解体計画は可能であると考えられる。しかし、日本では建物が密集している地域が多いため、建物を横倒しにする解体計画は極めて危険であり、不向きな解体計画であると考えられる。一方、 KI に基づいて発破箇所を選定した場合、層内における発破箇所の非対称性が生まれにくく、結果として横方向に倒壊するケースは極めて少ない結果となった。また、各モデル間で比較すると Fig. 10(a) の 3×3 スパンモデルでは、 σ_5^2 を大きくするパターンを除いてほとんど部材が外へ飛散していないことが分かる。Fig. 10(b) の 5×3 スパンモデルでは、 σ_3^2 を大きくするパターンや $L-L$ 方式では部材が飛散しているケースも存在するが、 σ_1^2 を大きくするパターンはほとんど飛散が見られない結果となっている。また、Fig. 10(c) の 7×3 スパンモデルでは、 $S-L$ 方式や $L-L$ 方式で部材の飛散が見られるのに対し、 σ_1^2 を大きくするパターンではほとんど飛散せずに解体できている。 σ_1^2 を大きくするパターンでは、第 1 発破で下層部を中心に発破し、鉛直方向に対する強度が十分に低下した状態で第 2 発破に移行できているため、横方向への倒壊や飛散が極めて少ない結果になったと考えられる。このことより、解体効率では大きな違いが見られないとしても、解体時の部材飛散距離から判断すると、 σ_1^2 を大きくするパターンは安全性も確保できる解体計画であるといえる。

4. おわりに

本稿では、建物の発破解体効率・解体時の安全性の向上を目指してスパン数の異なる複数の 10 層鋼構造建物モデルに対して発破解体解析を実施した。無作為に発破箇所を選定した場合には、スパン数に関係なく発破柱数と残存物高さの和との間に一定の関係が存在した。一方、 KI に基づいて発破箇所を選定した場合には、選定方法の違いによって解体効率に差異が生じた。最下層の KI の分散が最大となる柱を発破箇所として選定した場合を除き、スパン数が増えるにつれ、解体効率が悪くなる傾向があった。無作為に発破箇所を選定した場合の方が KI に基づいて発破箇所を選定した場合よりも解体効率で上回るケースも存在したが、その場合には建物が横倒しになるなど、安全性が確保できない解体となった。一方、 KI に基づいて発破箇所を選定した場合には、部材の飛散距離が概ね抑えられ、安全性が確保できたと考えられる。特に最下層の KI の分散が最大となる柱を発破箇所として選定した場合には、全てのモデルで部材飛

散距離が抑えられる結果となった。無作為に発破箇所を選定した場合より、 KI に基づいて発破箇所を選定した場合の方が、少ない発破本数で建物に全体的な崩壊をもたらす解体が可能となった。しかし、検討を行った手法ではまだ多くの発破本数が必要となるため、解体効率のさらなる向上を目指すためには、発破回数を増やすなど、さらに効率的に建物の強度を低下させた後に解体する手法の構築が必要であると考えている。

謝辞

本研究では、元 筑波大院生の日下善輝氏（現 株式会社クボタ）から多大なる貢献を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Williams, G.T.: Explosive demolition of tall buildings in inner city areas, Municipal Engineer, Vol. 7, No. 4, pp. 163-173, 1990.
- 2) Yarimer, E.: Demolition by controlled Explosion as a Dynamocal Process, Structures under Shock and Impact, pp. 411-416, 1989.
- 3) Kato, M., Nakamura, Y., Matsuo, A., Ogata, Y., Hashizume, K. and Kondo, K.: Study on Cutting of Steel Columns in Blasting Demolition of Steel Structural Buildings. (Part1 Control on Cutting and Removal of H-shapeed Steel Columns by Shaped Charge), Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 542, pp. 99-106, 2001. 4 (in Japanese).
加藤政利, 中村雄治, 松尾彰, 緒方雄二, 橋爪清, 近藤一夫: 鋼構建造物の発破解体における柱部材の切断に関する研究 (その1 成形爆薬によるH形鋼柱の切断, 切除に関する制御), 日本建築学会構造系論文集, 第542号, pp. 99-106, 2001. 4.
- 4) Kinoshita, M., Hasegawa, A., Matsuoka, S. and Nakagawa, K. : An experimental study on explosive demolition methods of reinforced concrete building., Proc. of the Japan Society of Civil Engineers, No. 403, VI-10, pp. 173-182, 1989 (in Japanese).
木下雅敬, 長谷川照美, 松岡栄, 中川浩二: 発破による鉄筋コンクリート構造物の解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第403号, VI-10, pp.

- 173-182, 1989.
- 5) Isobe, D. and Lynn, K.: Structural Collapse Analysis of Steel Framed Structure due to Aircraft Collision, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 579, pp. 39-46, 2004. 9 (in Japanese).
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. 9.
- 6) Isobe, D., Eguchi, M., Imanishi, K. and Sasaki, Z.: Development of Analytical and Experimental Systems for Blast Demolition of Framed Structures., Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 612, pp. 73-78, 2007. 2 (in Japanese).
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. 2.
- 7) Frangopol, D.M. and Curley, J.P.: Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 7, pp. 1533-1549, 1987.
- 8) Ohi, K., Ito, T. and Li, Z.: Sensitivity on Load Carrying Capacity of Framed Structure to Member Disappearance., Nat. Cong. of Theoretical & Applied Mechanics, Vol. 54, pp. 249-250, 2005. 4 (in Japanese).
大井謙一, 伊藤拓海, 李正林: 部材消失に対する骨組構造の鉛直支持能力感度, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol. 54, pp. 249-250, 2005. 4.
- 9) Isobe, D.: An Analysis Code and a Planning Tool Based on a Key Element Index for Controlled Explosive Demolition, International Journal of High-Rise Building, Vol. 3, No. 4, pp. 243-254, 2014.
- 10) Oi, K. and Isobe, D.: Collapse Risk Prediction of Buildings on Fire Using Key Element Index, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 738, pp. 1213-1220, 2017. 8 (in Japanese).
大井康平, 磯部大吾郎: キーエレメント指標を用いた火災時の建物の崩壊危険性予測, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第738号, pp. 1213-1220, 2017. 8.
- 11) Isobe, D., Han, W. S. and Miyamura, T.: Verification and Validation of a Seismic Response Analysis Code for Framed Structures using the ASI-Gauss Technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 42, No. 12, pp. 1767-1784, 2013.

DEVELOPMENT OF BLAST DEMOLITION PLANNING TOOL OF BUILDINGS BASED UPON KEY ELEMENT INDEX

Kenta HIGASHI and Daigoro ISOBE***

* Grad. Student, Graduate School, Univ. of Tsukuba

** Prof., Univ. of Tsukuba, Dr.Eng.

Strong demand for demolition of buildings increases due to the aging of buildings which were built during the period of high economic growth and the redevelopment of cities. At present, demolition using heavy equipment is mainly conducted in Japan; however, the demolition work will be prolonged and the cost will increase if the scale of the building becomes larger. A blast demolition technique is often used in Europe and the United States to solve the concerns of demolition using heavy equipment. The blast demolition technique can avoid dangerous work at a high place and can be completed at a relatively low cost in a short period. However, as demolition planning are mainly conducted based on proprietary technology of some vendors, the technique requires high levels of knowledge and experience in such occasion when selecting blasted columns. Furthermore, Japanese buildings are designed more strongly than in Europe and in the US, so the rules cannot be simply adapted. To ensure reliable and safe demolition, it is necessary to establish a quantitative selection method of blasted columns based upon criteria of dynamics.

In this study, a blast demolition planning tool of buildings based upon a parameter called the key element index, is developed. The index indicates the contribution of a column to the strength of the building and can be numerically evaluated; the higher the index value, the higher the contribution to the overall strength of the building. An Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code is applied to blast demolition analyses of ten-story steel framed building models with different span numbers. Various selection schemes of blasted columns using the index were evaluated by comparing the efficiencies and levels of safety during demolition; namely, by comparing the relation between the number of blasted columns and the heights of remains after the demolition, and by the scattered distance of members after demolition. First, the blasted columns were selected randomly to derive a simple relation between the number of blasted columns and the heights of remains of buildings. The results indicated that there are similar tendencies in the relation regardless of the number of spans. However, some results deviated from the tendencies. In those cases, safety could not be secured because the buildings collapsed in the lateral direction. Next, some selection schemes of blasted columns based upon the key element index values were applied to secure safety during demolition. The variances of key element index values were considered, in particular, to make a large difference in the distribution of the index values in each layer of the building. A difference in efficiencies of demolition appeared between each selection scheme. The efficiency deteriorated in most of the selection schemes as the number of spans increased. However, the efficiency maintained the same level when the columns with the largest variance of the key element index values at the first floor were selected as the blasted columns. Most of the cases using the variance of index values showed a collapse motion in vertical direction, and the scattered distances of structural members were significantly suppressed.

(2017 年 6 月 29 日原稿受理, 2017 年 10 月 12 日採用決定)