

# キーエレメント指標を用いたS造建築物の発破解体計画 —層数が異なる場合の比較—

Blast Demolition Planning of Steel Framed Buildings Using Key Element Index  
- Comparison between Various Models with Different Layer Numbers -

日下善輝<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Yoshiki Kusaka 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: s1420882@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, a blast demolition planning of buildings based upon key element index in which the contribution of a column to the strength of the building can be investigated numerically, is described. The purpose of this study is to develop a blast demolition planning tool that can even demolish complicated buildings. The relationships between integrated key element index value for the removed columns and the sum of heights of remains after the demolition and the number of blasted columns are investigated. We also applied the numerical code to investigate the demolition behaviors and compared the results with the models of different layer numbers.

**Key Words:** Key Element Index, Steel Framed Buildings, Blast Demolition Planning, ASI-Gauss Technique

## 1. 緒言

日本では、高度経済成長期に建設された建物の耐用年数が近づいていることから、それら建物の解体の需要は今後高まると予想される。このような建物の解体方法として、一般的にはクレーンなどの重機が用いられるが、解体対象となる建物が大規模になるにつれ、解体工期の長期化によるコストの増大や、作業員のリスクが懸念される。

欧米では近年、これらの懸念事項を解消する手段のひとつとして、発破解体工法を用いることがある。これは、爆薬を用いて部材の接合部や柱等を発破し、建物の自重を利用して崩壊させる解体方法である。しかし、この解体方法にも大きなリスクが存在する。それは、部材の飛散や、建物が予測しなかった崩壊挙動を示すことによる周辺建物への被害である。これを防ぐため、欧米では経験則により発破解体を実施しているが、発破解体計画に関する定量的な判断基準は確立されていないのが現状である。さらに、欧米などの諸外国の建物に比べ、日本の建物には強固な耐震設計が施されているため、より頑丈な構造になっている。そのため、欧米の発破解体業者の経験則を日本の建物の発破解体に適用することは困難であり、別の解体指針を考案する必要があると考えられる。そこで本研究では、定量的な判断基準をもって発破箇所の選定を行うことを目的とし、建物の構造上重要な柱部材を特定し得るキーエレメント指標（以下KI）に基づいた発破解体計画手法を開発している[1]。

本稿では、はじめに5層の建物を対象に発破箇所の選定手順、ならびに発破解体計画に基づく発破解体解析の一例を示す。次に、この発破解体計画手法を3層、10層、15

層の建物にも適用させ、各発破解体解析より得られた結果から、KI積算値と発破解体後の残存物高さの和との関係、および発破部材数と残存物高さの和の関係を調査する。これらを比較することにより、建物の層数が異なる場合の発破解体効率を比較する。なお、数値解析には崩壊解析において実績のあるASI-Gauss法[2]を用いた。

## 2. KIを用いた発破解体計画法

### (1) キーエレメント指標KI

健全な建物の全柱梁接合部に対して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発生した瞬間の荷重を用い、降伏限界荷重 ${}_0P_G$ として求める。任意の*i*層内の柱番号*a*を除去した建物にも同様に鉛直方向に荷重増分を与え、*i*層以下のいずれかの柱部材に降伏現象が発生した瞬間の荷重を用い、降伏限界荷重 ${}_1P_G(i, a)$ として求める。以上より、この柱番号*a*のKIを以下のように降伏限界荷重の比で定義する。

$${}_1KI_{i,a} = {}_0P_G / {}_1P_G(i, a) \quad (1)$$

添え字の0は、KIを算出する際に健全な建物の降伏限界荷重を用いることを表し、添え字の1は第1次選定であることを表す。同様に、第(*n* - 1)次選定までに選定した柱を既に除去した建物の強度に対する*i*層内の柱番号*b*のKIは、第*n*次選定では以下のように定義することができる。

$${}^{n-1}_nKI_{i,b} = {}_{n-1}P_G / {}_nP_G(i, b) \quad (2)$$

ここで、右辺分子 ${}_{n-1}P_G$ は、第(*n* - 1)次選定までに選定した柱を除去した建物の降伏限界荷重であるが、第(*n* - 1)

次選定までの柱の選定状況に応じて値が変化する。

柱梁接合部に対して与える鉛直方向への荷重増分は、柱ごとに負担する床荷重に応じて与える。i層内の柱番号aに与える鉛直方向の荷重増分 $\Delta F_{i,a}$ を以下のように表す。

$$\Delta F_{i,a} = \alpha_{i,a} \times \Delta F \quad (3)$$

ここで、 $\Delta F$ は任意の荷重増分である。 $\Delta F$ に乘じた $\alpha_{i,a}$ を重み値と呼び、以下の通り上層の建物総重量に対する柱部材1本の負担比率と定義する。

$$\alpha_{i,a} = N_{i,a} / \sum_{a=1}^M N_{i,a} \quad (4)$$

なお、i層内の柱番号aの軸力を $N_{i,a}$ とし、1層あたりの柱の本数をMとする。

## (2) 段発方式の発破解体計画

本稿では、先行研究[3]から有効性が示されている段発方式の発破解体計画による発破解体解析を実施した。段発方式の発破解体計画とは、第1発破においてKIの小さい柱を発破することにより、建物を崩壊させずに強度を低下させ、続く第2発破においてKIの大きい柱を発破することで建物を解体する計画である。発破箇所については、第1次選定において算出したKIに順位を付け、小さい順に任意の順位までの柱を選定し、第2次選定において算出したKIの大きい順に任意の順位までの柱を選定する。発破解体解析では、第1次選定において発破箇所とした柱を同時に発破し、3.0 [s]後に第2次選定において発破箇所とした柱を同時に発破するものとする。

## (3) 解析モデル

解析モデルとして、3層、5層、10層、15層の鋼構造建物を想定し、いずれのモデルもスパン割りは桁行き方向に7スパン、梁間方向に3スパン、階高は各層4 [m]、幅および

奥行きのスパン長は全て7 [m]とした。各モデルには固定荷重と積載荷重を合わせて単位床面積あたり800 [kgf/m<sup>2</sup>]が作用するものとして設計している。梁や柱の断面寸法は、ベースシア係数 $C_b$ に基づき建物に必要とされる水平耐力を満たす断面を算出した結果を用いた[4]。ここでベースシア係数 $C_b$ は以下のように定義される。

$$C_b = Z \cdot D_s \cdot R_t \cdot C_0 \quad (5)$$

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。各モデルの緒元とともに概観図を表-1に示す。なお、健全状態高さの和については次章で説明する。また、本稿で用いる各モデルは、梁にはSS400の鋼材を用いたH形鋼、柱にはSM490の鋼材を用いた角形鋼管を使用している。各鋼材の物性値を表-2に示す。

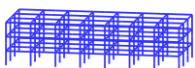
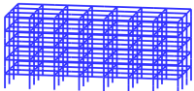
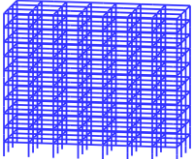
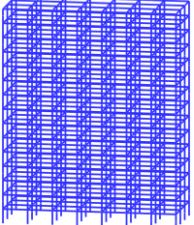
## (4) 発破解体計画と発破解体解析の一例

一例として示す計画は5層モデルを対象としており、第1次選定ではKIの小さい順に1位のみの柱、第2次選定ではKIの大きい順に5位までの柱を発破箇所とする計画である。ここで、第1次選定の結果と、第1次選定によって発破箇所とした柱を除去し、次に第2次選定の結果から決定した発破解体計画を図-1に示す。この発破解体計画に基づいて発破解体解析を実施した結果を図-2に示す。図-2(b)より、第1発破後においても建物の崩壊が始まっていないため、建物を崩壊させずに強度を低下させるという第1発破の目的に沿う結果となっていることが分かる。

## 3. KI積算値と残存物高さの和の関係、および発破部材数と残存物高さの和の関係

KI積算値は、発破箇所とした柱全てのKIを足し合わせたものとして定義する。第n次選定までのKI積算値を以下のように表す。

表-1 モデル諸元

	3層モデル	5層モデル	10層モデル	15層モデル
モデル概観図				
全高 [m]	12	20	40	60
ベースシア係数 $C_b$	0.250	0.250	0.200	0.133
総要素数	504	840	1,680	2,520
総節点数	380	612	1,192	1,772
柱部材数	96	160	320	480
健全状態高さの和 [m]	2,592	6,640	24,880	54,720

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^R \sum_{j_k=1}^{l(k,i)} [{}^{k-1}_k KI_{i,m(i,j_k)}] \\
&= {}^0_1 KI_{1,m(1,1)} + {}^0_1 KI_{1,m(1,2)} + \cdots + {}^0_1 KI_{1,m(1,l(1,1))} + \\
&\cdots + {}^0_1 KI_{R,m(R,l(R,R))} + \cdots + {}^{n-1}_n KI_{1,m(1,1)} + \\
&{}^{n-1}_n KI_{1,m(1,2)} + \cdots + {}^{n-1}_n KI_{1,m(1,l(1,n))} + \cdots + \\
&{}^{n-1}_n KI_{R,m(R,l(n,R))}
\end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $R$ 、 $l(k,i)$ 、 $m(i,j_k)$ は建物の全層数、 $k$ 次選定において $i$ 層で発破箇所とした柱の本数、およびその $j_k$ 本目の柱番号を表す。また、発破解体解析を実施したモデルの最終形態において、残存物を構成している節点のZ座標の和を残存物高さの和と定義する。

本稿では、第1次選定において $KI$ の小さい順に1～3位までの柱を選定し、第2次選定においてはそれぞれの対

表-2 鋼材の物性値

	ヤング率 [GPa]	降伏応力 [MPa]	ポアソン比	密度 [kg/mm <sup>3</sup> ]
SS400	206	245	0.3	$7.85 \times 10^{-6}$
SM490	206	325	0.3	$7.85 \times 10^{-6}$

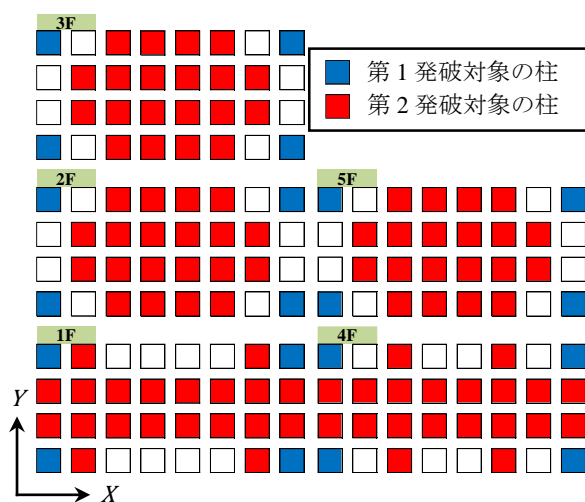


図-1 発破解体計画の一例 ( $S_1^1 - L_1^5$  の場合)

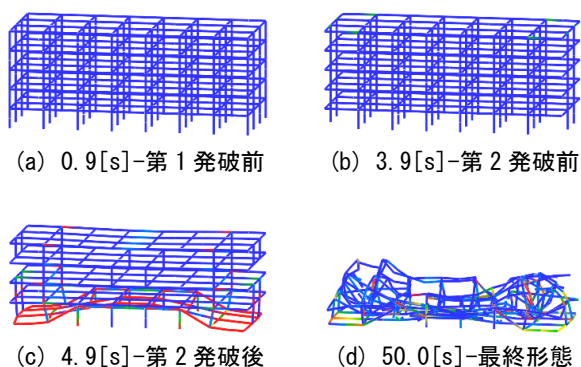


図-2 発破解体解析結果の一例 ( $S_1^1 - L_1^5$  の場合)

して $KI$ の大きい順に1～5位までの柱を発破箇所とする発破解体計画を立て、それに基づき発破解体解析を実施した。解析結果として、 $KI$ 積算値と残存物高さの和の関係を図-3に、発破部材数と残存物高さの和の関係を図-4に示す。なお、残存物高さの和は健全状態の各モデルにおける全節点のZ座標の和（表-1内「健全状態高さの和 [m]」）で除して無次元化した値を用いている。 $KI$ 積算値については、発破箇所を選定するために第1次選定時に算出した全柱部材の $KI$ を足し合わせた値（ $\sum_1 KI$ ）で除して無次元化し、発破部材数については健全状態の各モデルの全柱部材数で除して無次元化している。なお、凡例について、1つ目の $S$ は第1発破において $KI$ の小さい順に発破箇所を選定したこと、2つ目の $L$ は第2発破において $KI$ の大きい順に発破箇所を選定したことを表し、右下の数字から右上の数字の順位までの柱を発破箇所として選定している。グラフ内には、各結果から推測できる傾向線を描画した。また、全てのモデルの $KI$ 積算値と残存物高さの和の関係を図-5にまとめ、発破部材数と残存物高さの和の関係を図-6にまとめた。

図-3、図-4の(a)3層モデル、(b)5層モデルを見ると、第1発破で $KI$ の小さい順に1位の柱のみを発破する条件（ $S_1^1$ ）の傾向が、その他の2条件（ $S_1^2$ 、 $S_1^3$ ）の傾向と異なる。これは、 $S_1^1$ の条件では、 $S_1^2$ 、 $S_1^3$ の場合と比較して第2次選定時の各柱の $KI$ が全体的に大きいことに起因していると考えられる。以上の傾向の相違を考慮し、3層、5層モデルについては $S_1^1$ の傾向を表す傾向線と $S_1^2$ 、 $S_1^3$ の傾向を表す傾向線を区別した。また、図-4(a)、および(b)から、 $S_1^1$ の傾向線が $S_1^2$ 、 $S_1^3$ の傾向線の左側に位置していることが分かる。このことから、ある一定の残存物高さの和となるような崩壊を目指して発破解体計画を立てる際、最も発破部材数が少なくなるのは $S_1^1$ の条件であるといえる。

一方、図-3、図-4の(c)10層モデル、(d)15層モデルを見ると、第1発破の発破箇所選定条件の違いによる傾向の差がほとんど見られない。ゆえに、 $S_1^1$ 、 $S_1^2$ 、 $S_1^3$ の傾向をまとめて1本の傾向線で描画した。さらに、3層、5層モデルと比較すると、傾向線の勾配の変化が著しいことが分かる。勾配が緩やかな部分では、建物内の柱を複数本発破しているにもかかわらず建物の崩壊が開始しない。一方、それ以降の勾配が急な部分では、第2発破直後の建物に部分崩壊が生じる様子が見られた。

異なる層数のモデルによる結果の比較を表す図-5、図-6のいずれにおいても、3層、5層、10層、15層と層数が増すにつれ、傾向線が右上に位置するようになっている。例えば、図-6において残存物高さの和の割合が0.4以下となるような崩壊を目指して解体計画を立てると、3層モデルでは全柱部材数に対して約5割、5層モデルでは約6割の発破部材数で達成できるのに対し、10層、15層モデルでは約8割の発破部材数が必要となる。以上のことから、10層、15層モデルは3層、5層モデルと比較して、建物の発破解体効率が悪いということが分かる。

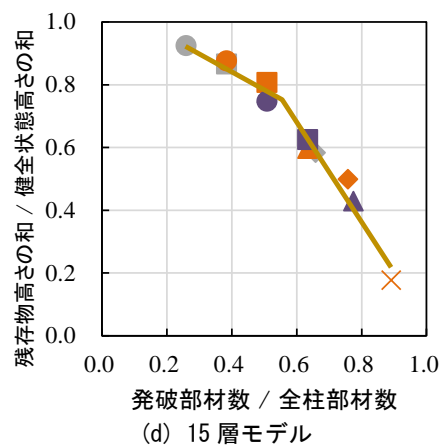
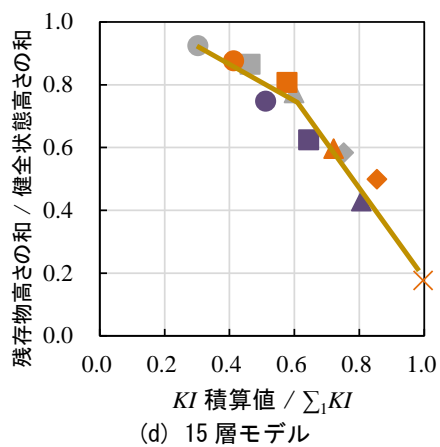
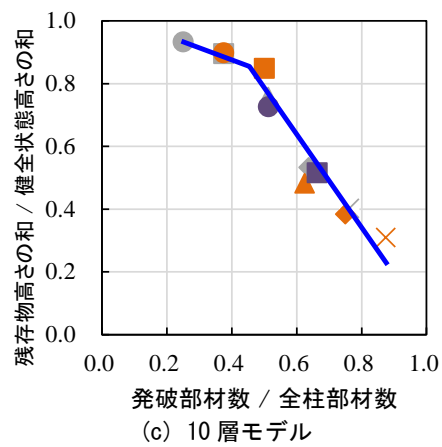
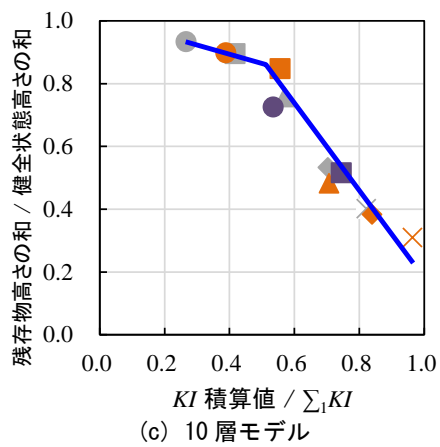
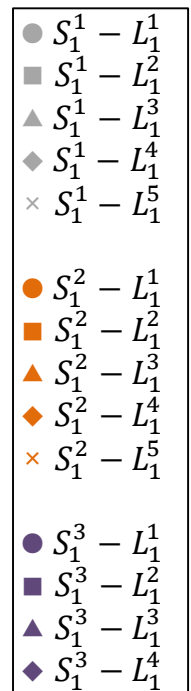
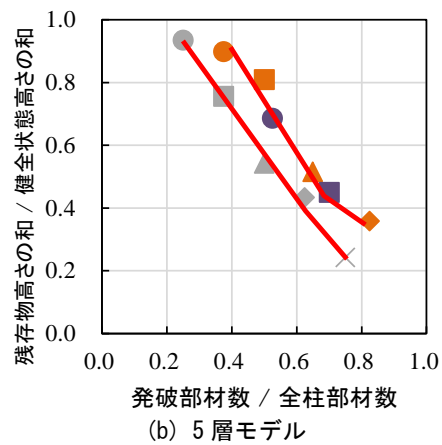
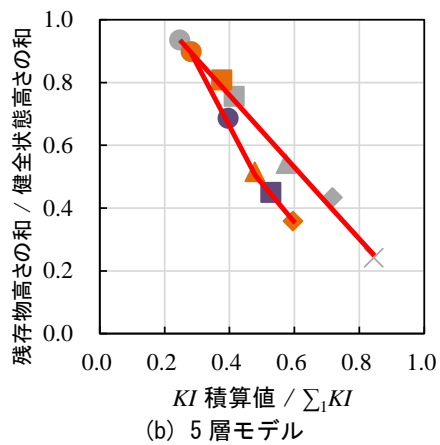
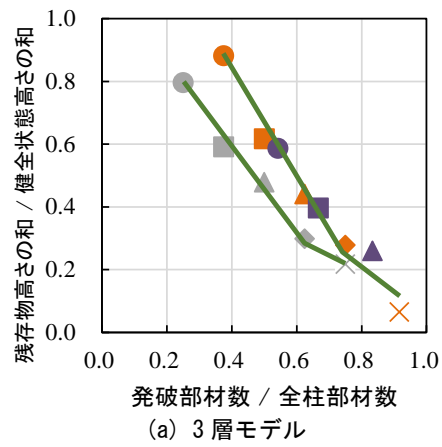
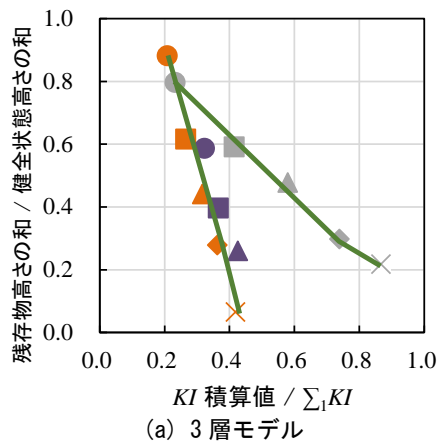


図-3  $KI$ 積算値と残存物高さの和の関係

図-4 発破部材数と残存物高さの和の関係

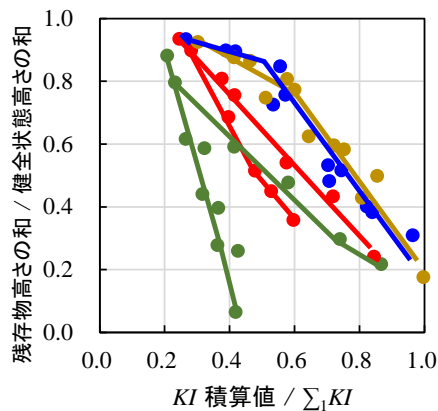


図-5  $KI$ 積算値と残存物高さの和の関係  
(全モデル)

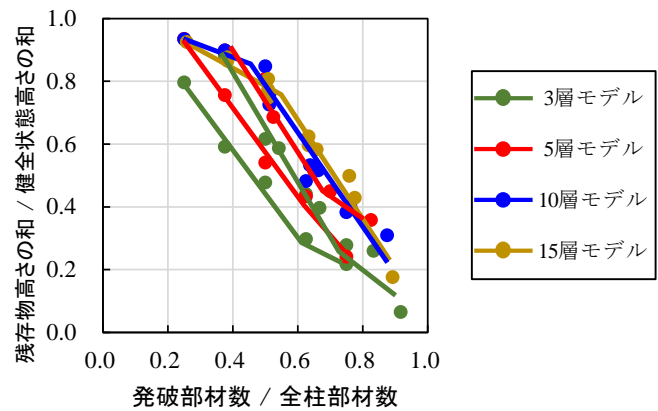


図-6 発破部材数と残存物高さの和の関係  
(全モデル)

#### 4. 結言

3層、5層、10層、15層のモデルを対象とし、発破解体解析結果を比較した。そのなかで、3層、5層といった低層モデルと、10層、15層といった高層モデルの間に明らかな傾向の差が生じた。

低層モデルについては第1発破の発破箇所選定条件が極めて重要となり、発破解体の効率は第1発破の発破箇所選定条件によって大きく左右される。少ない発破本数で効率のよい発破解体を実現するためには、第1発破で発破本数を抑え、第2発破では大きな $KI$ 積算値となるよう、発破箇所を選定する必要があると考えられる。

高層モデルの場合、第1発破の発破箇所選定条件の違いによる結果の差がほとんど見られないため、 $KI$ 積算値、および発破部材数によって建物の崩壊は一意的に定まる傾向がある。しかし、低層モデルと比較すると発破解体効率が悪いため、発破解体計画手法のさらなる改善が必要と考えられる。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [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] 磯部大吾郎: キーエレメント指標に基づいた発破解体計画手法 その3. キーエレメント指標の積算値と崩壊下限値との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.373-374, 2013.
- [4] 鈴木 淳一, 阿部 修太郎, 鈴木 弘之, 大宮 喜文, 若松 孝旺: 火災時における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー 耐震設計が耐火性能に与える効果, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.157-164, 2006.