

# キーエレメント指標の分散を用いた 建物の発破箇所選定方法に関する検討

Study on a Selection Scheme of Columns for Blast Demolition of Buildings  
Using Variance of Key Element Index

東健太<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>  
Kenta Higashi and Daigoro Isobe

- 1) 筑波大学大学院 (〒305-0821 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1211175@u.tsukuba.ac.jp)  
2) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-0821 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, a selection scheme of columns for blast demolition of buildings using variance of key element index, in which the contribution of a column to the strength of the buildings can be numerically evaluated, is described. Distribution of the columns with a large difference of key element index in each layer of the building is aimed by estimating the variance of key element index. A blast demolition is carried out in two stages. At the first stage, a large variance is generated by removing the columns selected by using the proposed scheme. At the second stage, columns with large key element index are removed to effectively cause the total collapse of the building. By conducting collapse analyses using the ASI-Gauss technique and by observing the relationship between the number of removed columns for blast demolition and the height of remains after the second stage, the efficiency of blast demolition of buildings using variance of key element index is investigated.

**Key Words :** Blast Demolition, Key Element Index, Variance, ASI-Gauss Technique

## 1. 緒言

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を用いることがある。この解体工法は、一般的な工法に比べ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、経験に強く依存する部分があり、発破箇所の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。ノウハウに依存せず、強度の高い日本の建物でも確実に解体するためには、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と考えている。

そこで先行研究[1]では、建物の強度に対する柱1本の寄与度を数値化したキーエレメント指標 $KI$ を提案し、その指標を用いた発破解体計画の有効性を示した。また、発破箇所とする柱の $KI$ を足し合わせた積算値と崩壊形態の関係性について考察した[2]。さらに、 $KI$ を用いた単発方式および段発方式の発破解体計画を比較した結果、段発方式の発破解体計画を実行することで、より確実に建物の解体が可能となることを示した[3]。その際、少ない本数の柱で $KI$ 積算値を大きくすると効率の良い解体につな

がることを確認した。

本研究では、段発方式における第1発破箇所の選定に重点を置き、 $KI$ の差が大きな柱を層内に混在させることで発破解体効率の向上を試みた。第1発破箇所には、第1発破後に残存する柱の $KI$ の分散が大きくなるような柱を選定する。これにより柱の寄与度に大きな差が生まれ、突出して寄与度の高い柱を作り出すことが可能となる。その後、第1発破後の欠損状態を仮定した建物に対し、 $KI$ の大きな柱から第2発破箇所を選定する。これらの柱を発破することで、建物に全体的な崩壊をもたらすことを目的とする。ASI-Gauss解析コード[1]を用いて発破箇所選定結果に基づいた解体解析を行い、解析終了時の発破柱数と残存物の高さの和の関係から解体効率を評価した。

## 2. $KI$ の分散を用いた発破箇所選定方法

### (1) キーエレメント指標 $KI$

キーエレメント指標 $KI$ とは、建物の強度に対する柱1本の寄与度を数値化したものである。まず、健全な建物の全柱梁接合部に対し、鉛直方向に荷重増分を加え、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 ${}_0P_G$ 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生じた瞬間の降伏限界荷重を ${}_iP_G(i, a)$ とおく。これらの降伏限界荷重を用い、この柱番号 $a$ の $KI$ を以下のように定義する[1]。

$${}^0_1KI_{i,a} = {}^0P_G / {}_1P_G(i,a) \quad (1)$$

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bの寄与度は、第n次選定では以下のように定義できる。

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

ここで、右辺分子 ${}^{n-1}P_G$ は、第(n-1)次選定までに選定された柱を除去した状態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(1)のKIが大きい柱ほど建物全体の荷重支持能力に対して影響が大きく、建物の構造を支える上で重要な柱となる。さらに式(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。このKIを用い、発破箇所とする柱を定量的に選定する。

### (2) KIの分散

先行研究[3]では、第1発破と第2発破ともに各層内の柱のKIの大小に応じて発破箇所を選定する方法を用いた。本研究では、KIの大小に関係なく第1発破箇所を選定し、第1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を目指す。そこで、柱のKIに対する分散により柱の寄与度のバラつきを評価する。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、全層パターン）と各層ごとに残存する柱のKIから算出する方法（以後、単層パターン）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。

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

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

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、 $KI_{ij}$ 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、 $\sigma^2$ は全層でのKIの分散、 $\sigma_i^2$ はi層(単層)でのKIの分散を表す。

### (3) KIの分散を利用した発破箇所の選定例

前節の方法でKIの分散を算出・比較し、値が最大となる柱を第1発破箇所として選定する。その際、部分的な崩壊に留まる可能性が極めて高いため、最上層は発破の対象から除外した。次に、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

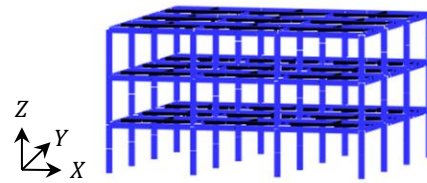


図-1 モデルの概観図

表-1 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	$7.9 \times 10^{-6}$
SM490	206	325	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$

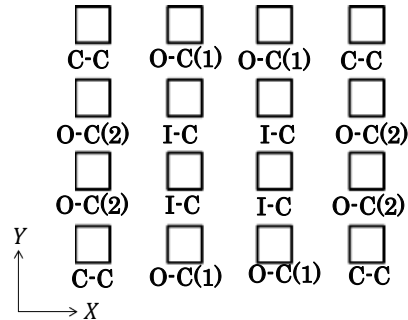


図-2 各層の柱の種類

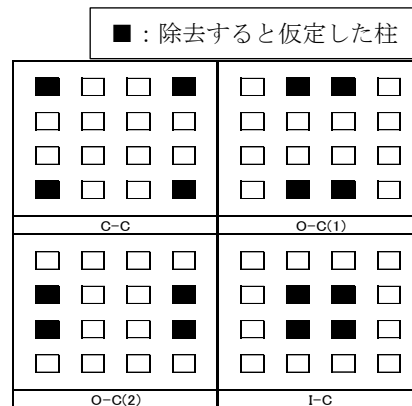


図-3 除去する柱の組

第2発破箇所として選定する。

ここでは図-1に示すモデルを用い、第1発破箇所の選定例を示す。解析モデルは3層3×3スパンの鋼構造の建物で、全高12.0m、階高4.0m、幅・奥行きスパン長は7.0mである。ベースシア係数を $C_b=0.25$ とし、積載荷重と固定荷重を合わせて単位床面積当り800 kgf/m<sup>2</sup>が作用するものとして設計している。また、建物の柱にはSM490の鋼材を用いた角型鋼管、梁にはSS400の鋼材を用いたH型鋼を使用した。各鋼材の物性値を表-1に示す。床要素は弾性要素とし、面外変形を許容していない。柱は1部材2要素分割、梁は1部材4要素分割とし、床は4要素分割で表現した。

発破箇所を選定する際に、ここではまず図-2に示すように対称性を考慮して柱をC-C (corner column), O-C(1) (outside column(1)), O-C(2) (outside column(2)), I-C

表-2 全層パターンの場合のKIの分散と選定される柱の組

選定段階	第(n-1)段階までに第1発破箇所 に選定した柱の本数 $N_{n-1}$ [選定箇所]	第n段階で選定する 柱の本数 $N_n$	除去すると仮定した 柱の本数 $N$	第n段階で除去すると仮定した柱の位置							
				1F				2F			
				$\sigma^2$				$\sigma^2$			
				C-C	O-C(1)	O-C(2)	I-C	C-C	O-C(1)	O-C(2)	I-C
第1段階	0本	4本	4本	0.254	0.094	0.094	0.113	0.560	0.164	0.164	0.506
第2段階	4本[2FのC-C]	4本	8本	0.430	0.241	0.052	0.251	0.330	0.330	1.214	
第3段階	8本[2FのC-C,2FのI-C]	4本	12本	0.870	0.477	0.477	0.398	1.527	1.527		
第4段階	12本[2FのC-C,2FのI-C,2FのO-C(1)]	4本	16本	1.573	1.867	0.458	1.681	0.000			

表-3 単層パターン（1層）の場合のKIの分散と選定される柱の組

選定段階	第(n-1)段階までに第1発破箇所 に選定した柱の本数 $N_{n-1}$ [選定箇所]	第n段階で選定する 柱の本数 $N_n$	除去すると仮定した 柱の本数 $N$	第n段階で除去すると仮定した柱の位置							
				1F				2F			
				$\sigma_1^2$				$\sigma_1^2$			
				C-C	O-C(1)	O-C(2)	I-C	C-C	O-C(1)	O-C(2)	I-C
第1段階	0本	4本	4本	0.001	0.066	0.066	0.171	0.005	0.010	0.010	0.100
第2段階	4本[1FのI-C]	4本	8本	0.000	0.110	0.110		0.445	0.110	0.110	0.216
第3段階	8本[1FのI-C,2FのC-C]	4本	12本	0.000	1.040	1.040			0.500	0.500	0.721
第4段階	12本[1FのI-C,2FのC-C,1FのO-C(1)]	4本	16本	0.000		0.000			1.180	0.053	1.090

column)の4種類(1層, 2層で計8種類)に分類し, 図-3に示すように4本ずつの組で選定することとした. 前述の全層パターン, 3種類の単層パターン(1層~3層)の計4種類について, 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. すなわち, 第n段階( $n \geq 1$ )では, 第n-1段階までに選定した柱を除去すると仮定した状態で分散を求める. 全層パターンおよび単層パターン(1層)の場合のKIの分散と選定される柱の組を表-2および表-3に示す. 20本の柱を除去してしまうと自重で崩壊してしまうケースが増えたため, 今回は除去する柱

の本数を16本までとした. 表の中で, N本除去すると仮定した状態に対するKIの分散の最大値を■で表した. また, 第3段階のように分散の最大値が同値となるような場合は, O-C(1)を優先することとした. 第n-1段階までに第1発破箇所として選定されたものは□で表した.

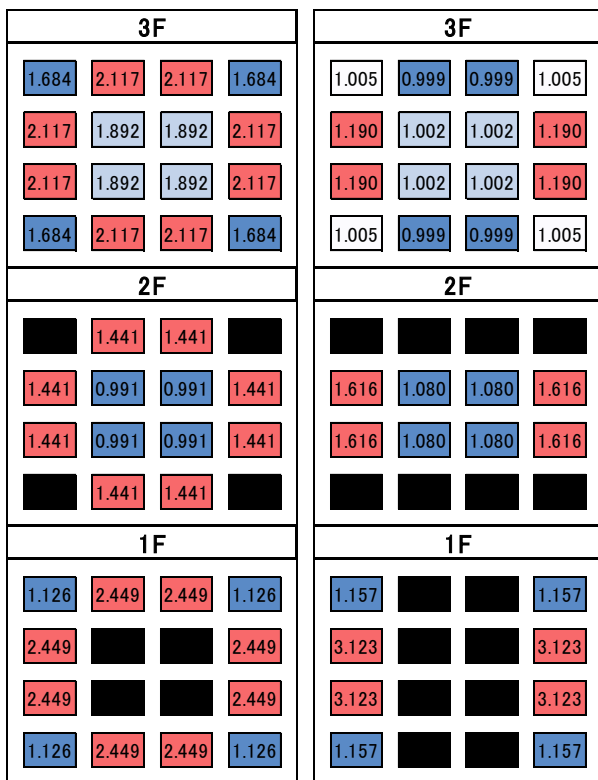
図-4には, 表-3の第2段階および第4段階を終えた状態で算出されたKIを示す. 各層内で最小のKIを示す柱を青, 間の値を示す柱を白, 最大値を示す柱を赤, 第1発破箇所として既に選定されている柱を黒色で示している. 図-4(a)よりも選定する柱の本数が増える図-4(b)の方が層内のKIの分散, すなわちKIの差が大きくなっていることが分かる. また, この場合では1層のKIの分散が大きくなるように除去する柱を選定しているため, それぞれの場合で上層よりも低層の方がKIの差が大きくなっている.

### 3. 発破箇所選定結果を用いた発破解体解析

前節の解析モデルを用い, 発破箇所選定結果に基づいた発破解体解析を行った. 解析にはASI-Gauss解析コード[1]を用いた. 自重解析の後, 第1発破を1.0 s, 第2発破を4.0 sに行った. 時間増分を1.0 msとし, 解析時間は崩壊終了まで十分な時間をとるために30.0 sとした.

一例として, 第1発破で第2段階までKIの分散が最大となる柱を選定し, 第2発破でKIの大きい順に2位までの柱を発破箇所とした場合の選定結果を図-5に示す. 図中, ■で示す柱は第1発破箇所として選定された柱, □で示す柱は第2発破箇所とした選定された柱である. この選定結果に基づく発破解体解析の結果を図-6に示す. なお, 図では次式で与えられる降伏関数 $f_y$ の値に応じ, 要素を色分けしている.

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \quad (5)$$



(a) 第2段階終了時 (b) 第4段階終了時  
図-4 単層パターン（1層）の場合のKIの分布

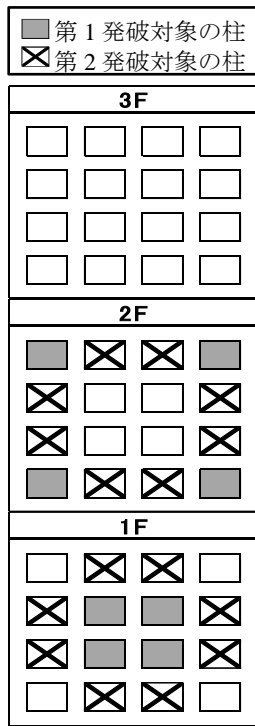


図-5 発破箇所選定結果の一例

ここで、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $N$ は $x$ 軸、 $y$ 軸回りの曲げモーメントおよび軸力である。下添え字 0 のついた変数はその断面力のみが作用した際の全断面塑性値を意味する。

図-6(a)は第 1 発破前のモデルの様子であり、図-6(b)は第 2 発破前のモデルの様子である。図-6(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(図-6(c))を経て 5.3 s 付近で 2 層の床が接地する様子が見られた(図-6(d))。その後、19.0 s 付近以降では部材の動きがほとんど止まった(図-6(e))。

全層パターンおよび単層パターン(1 層～3 層)、さらに、 $KI$ が大きい順に柱を選定し 1 回で発破する単発方式による発破解体解析を実施し、それぞれの方式の解体効率を調べた。なお、単発方式では $KI$ の分散は考慮していない。解体効率は、発破柱数と残存物高さの和の関係より評価した。ここで、残存物高さの和とは、発破解体解析終了時の全ての柱梁接合部節点の高さ方向( $Z$ )座標値を足し合わせた値であり、健全状態の高さの和で割ることによって無次元化した。発破柱数は、健全状態における全柱数で割り無次元化した。

全ての場合における発破柱数と残存物高さの和の関係を図-7 に示す。 $KI$ の分散を考慮していない単発方式の場合は、発破柱数が少なければほとんど解体できず、発破柱数が多ければ概ね解体できるという傾向がある。この傾向を基準に見てみると、全層パターンの場合は発破柱数、残存物高さの和ともほぼ中間辺りの領域に位置し

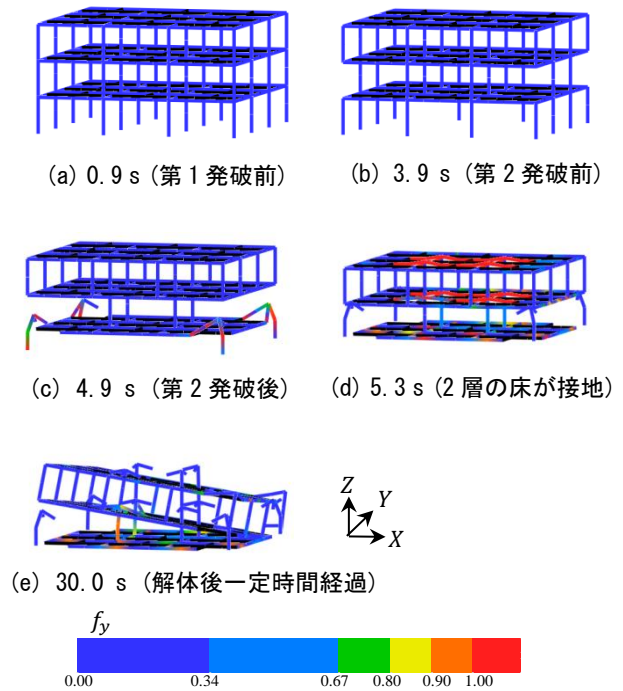


図-6 発破解体解析結果の一例

ている。単層パターンの場合は、分散を求める対象の柱が低層にあるほど左下の領域に分布し、解体効率が良好であることが確認できる。これは、第 1 発破終了時に低層部に $KI$ の差が大きな柱ができるため、第 2 発破時の解体効率が良好となり、発破柱数が少なくても残存物高さの和を低めに抑えられていることを示している。

以上のことから、最下層の柱の寄与度に偏りが大きく生じるような柱を第 1 発破箇所として選定することで、より発破解体効率を向上させることが可能であることが示された。

#### 4. 結言

本研究では、建物の発破解体効率の向上を目指し、キ

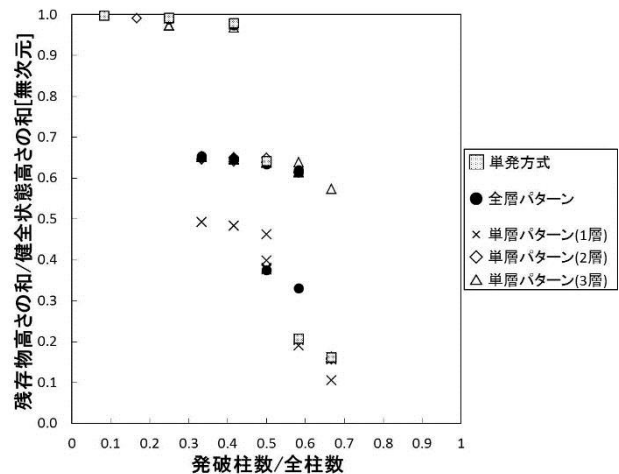


図-7 発破柱数と残存物高さの和の関係

キーエレメント指標 $KI$ の分散を利用した発破箇所選定方法の検討を行った。除去すると仮定した柱の本数を段階的に増やし、建物全体の強度を低下させ、柱の寄与度にバラつきを与えるような第1発破箇所を選定した。選定結果を用いて発破解体解析を行った結果、第1発破終了時に最下層の $KI$ の分散が最大となるような柱を発破箇所として選定した場合、第2発破時の解体効率が全体的に良くなる傾向が現れた。単発方式で $KI$ の大きな柱から発破した結果と比較しても、解体効率が全体的に上回っていた。これらの結果から、少ない発破柱数で残存物の高さを低く抑えるために最下層部の $KI$ の分散を用いることは有効であると考えられる。

今後は、高層建物を含めた様々な建物の発破解体における本選定手法の有効性を検証する予定である。

#### 参考文献

- [1] D.Isobe: 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：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), (2013), pp. 373-374.
- [3] 日下善輝, 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4. キーエレメント指標の積算値と残存物高さの関係, 日本建築学会2014年度大会(近畿)学術講演梗概集, (2014), pp. 343-344.