

# スパン数の異なる建物における キーエレメント指標の分散を用いた発破解体計画

Blast Demolition Planning of Buildings with Different Span Numbers  
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 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1620917@s.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 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. The purpose of this research is to seek a blast demolition planning scheme that improves the efficiency of demolition and considers safety during demolition. By conducting collapse analyses using the ASI-Gauss code and by observing the scattered distance after the demolition, the relationship between the number of removed columns for blast demolition and the height of remains after the demolition, the safety and the efficiency of blast demolition of buildings using variance of key element index is investigated. We compared the results between the buildings of different span numbers.

**Key Words :** Blast Demolition, Key Element Index, Variance, ASI-Gauss Code, Efficiency of Demolition

## 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で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。また、発破解体を行っている地域は地震が少なく、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]。前報[4]では、段発方式の発破解体計画における第1発破箇所の選定に重点を置き、 $KI$ の分散が大きくなる柱を選定する方法を用いることで発破解体効率が向上することを示した。

本稿では、スパン数の異なる複数の10層の建物に対し、 $KI$ に基づいた発破箇所選定及び乱数を用いた無作為な発破箇所選定を行う。次に、その選定結果を基に発破解体解析を行い、解析結果から発破柱数と残存物の高さの和の関係、および建物の外周部への部材の飛散距離と残存物高さの和の関係を調査する。これらと比較することで、解体効率と解体時の安全性を考慮した発破解体計画手法を検討する。なお、発破解体解析には崩壊解析において実績のあるASI-Gauss解析コード[1]を用いた。

## 2. $KI$ に基づく発破解体計画手法

### (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 ${}_1P_G(i, a)$ 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]。

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

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。

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

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

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大きくすることを考える。 $KI$ 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、 $\sigma^2$ を大きくするパターン）と各層ごとに残存する柱の $KI$ から算出する方法（以後、 $\sigma_i^2$ 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、 $\sigma^2$ 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) $KI$ の分散を用いた発破箇所選定方法

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第2発破箇所として選定する。

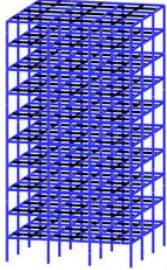
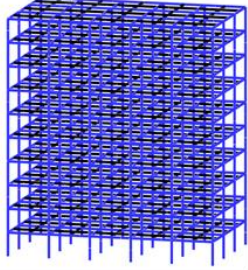
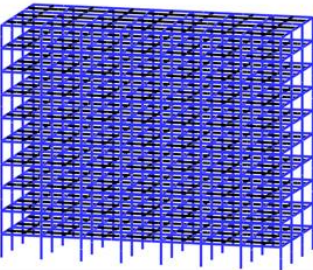
## (4) $KI$ の大小に基づく発破箇所選定方法

$KI$ の分散を用いた場合とは異なり、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についても検討する。まず健全なモデルに対する各柱の $KI$ に基づき第1発破箇所を選定する。その後、第1発破箇所の柱を除去したモデルにおいて再度 $KI$ 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）及び第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 $KI$ の大きい順に発破箇所を選定する方法（以下、 $L-L$ 方式）を用いることとした。

## (5) 解析モデル

発破解体計画手法をスパン数が異なるモデルを対象として適用するにあたり、10層の鋼構造建物モデルを複数作成した。解析モデルの諸元を表-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である。柱は1部材を2つの線形チモシェンコはり要素

表-1 モデルの諸元

	3×3スパンモデル	5×3スパンモデル	7×3スパンモデル
モデル鳥瞰図			
平面寸法 (X軸方向×Y軸方向)	21.0×21.0[m]	35.0×21.0[m]	49.0×21.0[m]
ベースシア係数	0.2	0.2	0.2
総要素数	2000	3200	4400
総節点数	1506	2394	3282
全柱数	160	240	320

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型鋼である。各鋼材の物性値を表-2に示す。床要素は全て塑性化を起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当り800 kgf/m<sup>2</sup>の荷重が作用するものとした。柱と梁の断面寸法は、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決定した。

ここで、一例として7×3スパンモデルの健全状態の場合と $\sigma_3^2$ を大きくするパターンの場合とで算出された1層～10層の柱のKIのうち3層についてのみ図-1に示す。層内で最小のKIを示す柱を青、中間の柱を白、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す。健全状態の建物のKIと比較すると、 $\sigma_3^2$ を大きくするパターンでは突出してKIの大きな柱ができていくことが分かる。

### (6) 発破解体解析の一例

図-2に一例として示す解析は、7×3スパンモデルを対象とし、第1発破で $\sigma_3^2$ を大きくするパターンを用いて選定した柱を発破し、第2発破でKIの大きい順に5位までの柱を発破した場合の発破解体解析結果である。解析に

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> ]
SM490	206	325	0.30	7.85×10 <sup>-6</sup>
SM400	206	245	0.30	7.85×10 <sup>-6</sup>

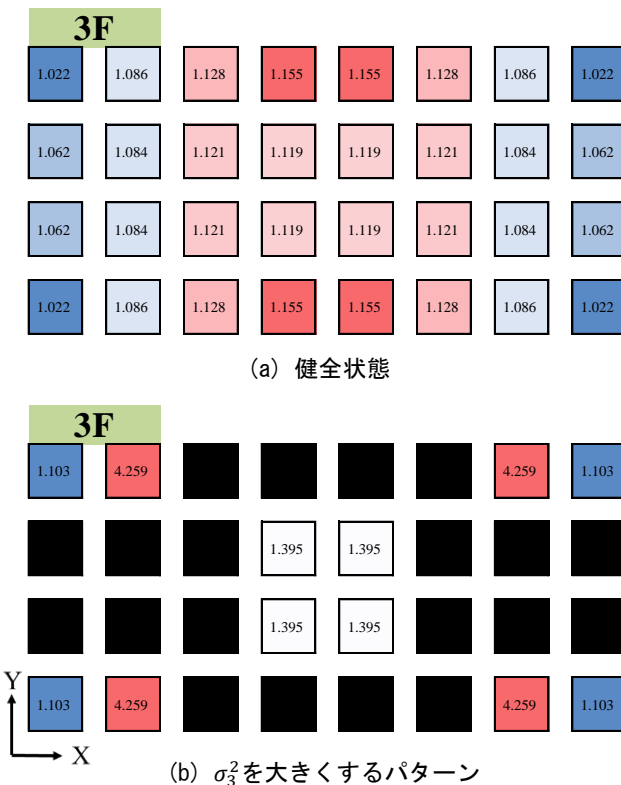


図-1 KIの分布(7×3スパンモデル)

はASI-Gauss解析コード[1]を用いた。自重解析の後、第1発破を1.0s、第2発破を4.0sに行った。時間増分を1.0msとし、解析時間は崩壊終了まで十分な時間をとるために30.0sとした。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。

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

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-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. 発破解体解析結果

本稿では、 $\sigma^2$ を大きくするパターン、 $\sigma_i^2$ を大きくするパターン ( $i = 1, 3, 5$ )、S-L方式及び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単発方式による発破解体解析を実施し、解体効率と解体時の安全性を調査した。解体効率は図-3、図-4に示す発破柱数と残存物高さの和の関係より評価し、解体時の安全性は図-5、図-6に示す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柱梁接合部節点の高さ方向(Z)座標値を足し合わせた値を残存物高さの和と定義し、残存物高さの和を健全状態時の高さの和で割ることにより無次元化した。また、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。

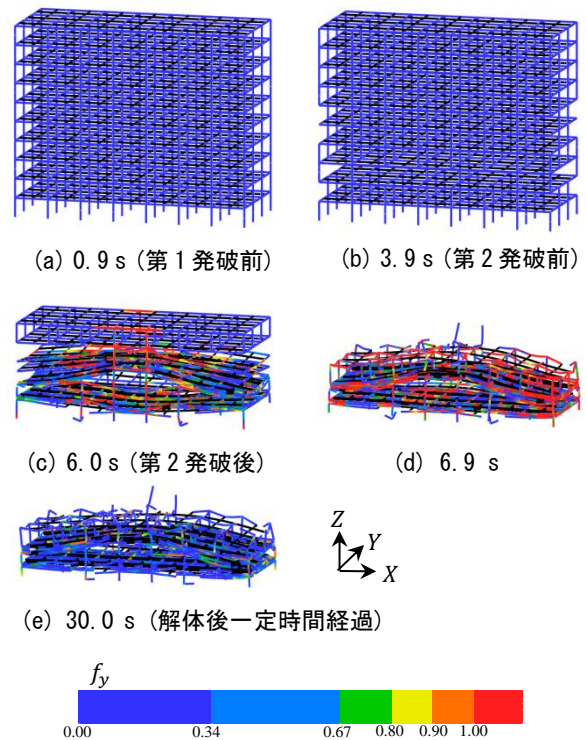
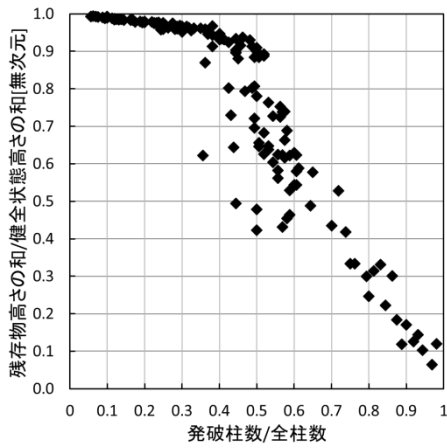


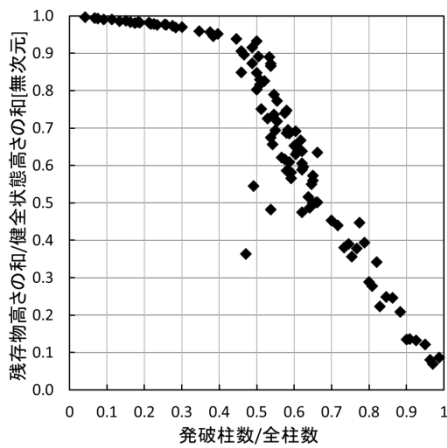
図-2 発破解体解析結果の一例

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、健全状態時の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飛散距離と定義する。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。

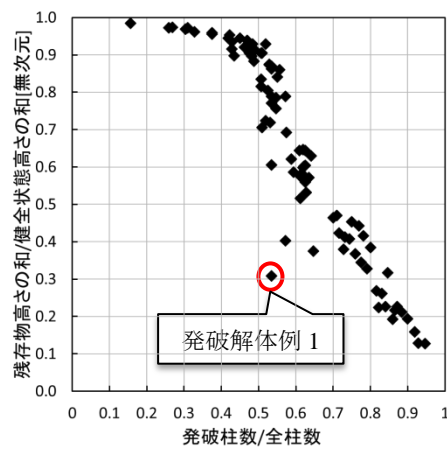
図-3に示す無作為な発破箇所選定による発破解体解析結果を3つのモデルで比較すると、すべてのモデルで発破柱数が4割を超えた辺りから残存物高さの和が下降し始



(a) 3×3 スパンモデル



(b) 5×3 スパンモデル

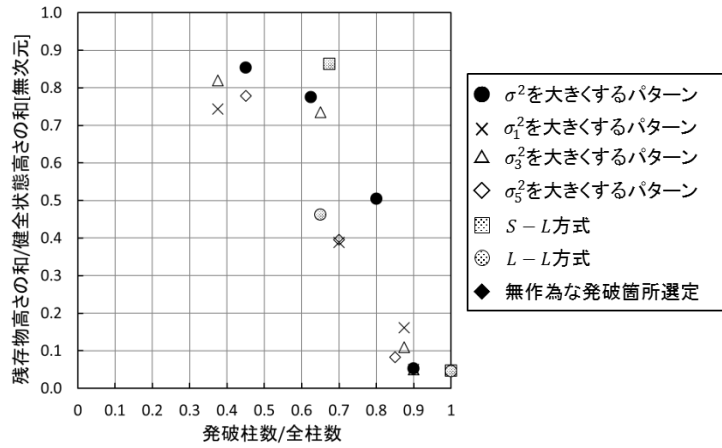


(c) 7×3 スパンモデル

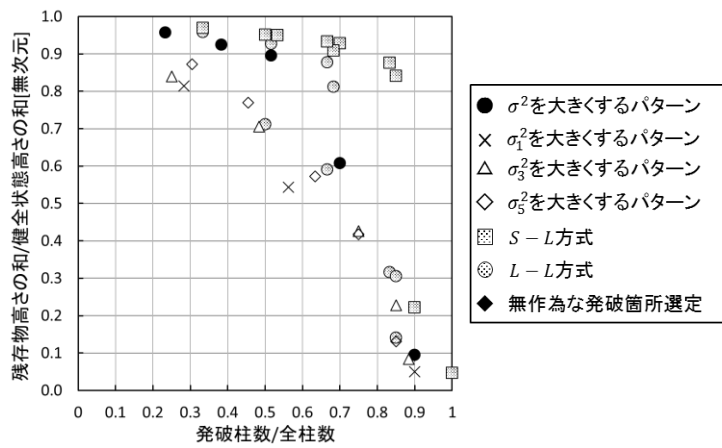
図-3 発破柱数と残存物高さの和の関係  
(無作為に発破箇所を選定した場合)

める傾向があった。また、発破柱数が増えると残存物高さの和が下がり、その下降していく傾きは3つのモデルでほとんど同様な傾向があった。この結果から、無作為に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。

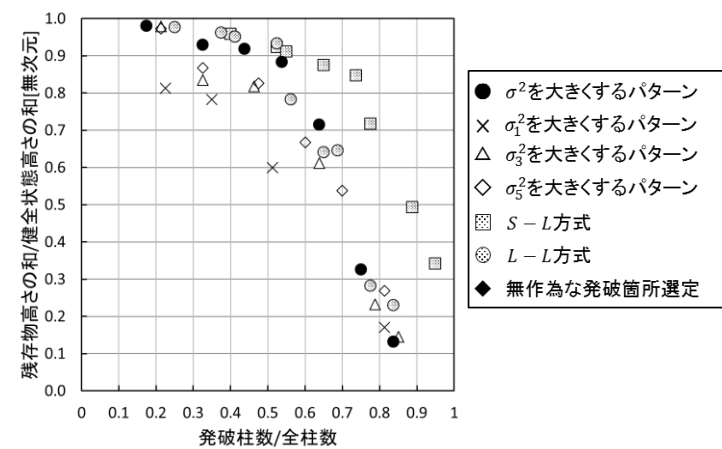
一方、図-4に示すKIに基づいた発破箇所を選定した場合の解析結果は、発破箇所選定方法の違いによって傾向に差が生じた。さらに、スパン数が増えるにつれて選定方法の違いによる解体効率の差異が大きくなることが分



(a) 3×3 スパンモデル



(b) 5×3 スパンモデル



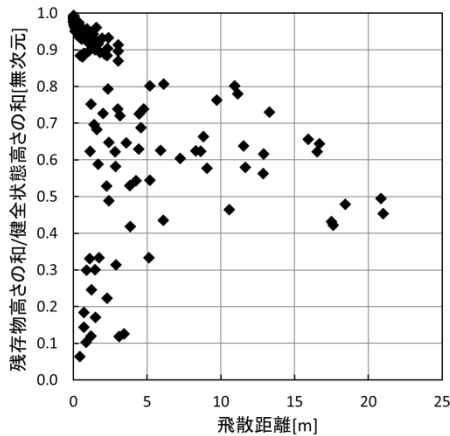
(c) 7×3 スパンモデル

図-4 発破柱数と残存物高さの和の関係  
(KIに基づいた発破箇所を選定した場合)

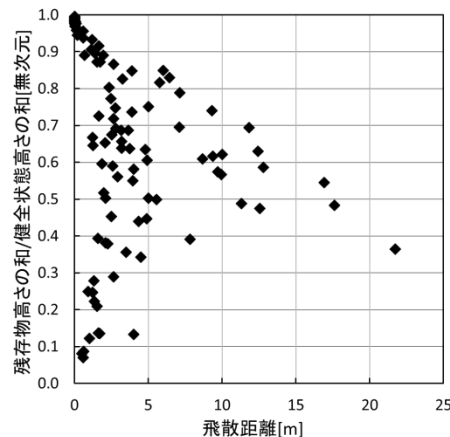
かる。スパン数が増えることで応力伝達経路が十分に確保でき、冗長性が高くなるため、 $\sigma_1^2$ を大きくするパターンを除いて解体効率が悪くなっている。次に、各モデルで解体効率を比較すると、図-4(a)3×3スパンモデルでは、S-L方式の解体効率は最も悪い結果となった。L-L方式、 $\sigma_1^2$ を大きくするパターンと $\sigma_3^2$ を大きくするパターンでは解体効率に差異が生じていないことが分かる。図-4(b)5×3スパン、(c)7×3スパンモデルでは、 $\sigma_1^2$ を大きくするパターン以外の発破箇所選定方法を用いた場合の解体効率が3×3スパンモデルのときより悪い傾向にある。3つのモデ

ルで $\sigma_1^2$ 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。

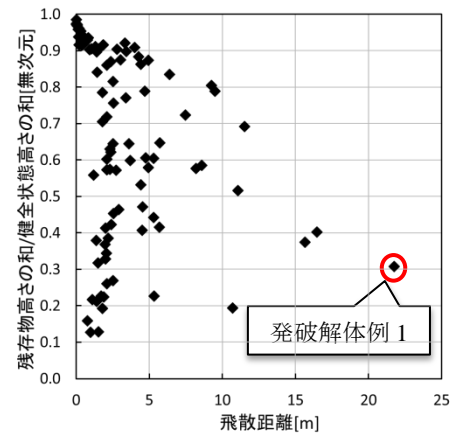
実際の発破解体では建物の全体崩壊を目的としており、部分的な崩壊に留まる場合は、発破解体計画として失敗であるといえる。そこで、残存物高さの和が低く抑えられている場合で比較する。図-3、図-4により無作為に選定した場合とKIに基づいて選定した場合を比較すると、無作為に選定した場合でも解体効率が良いケースが存在することが分かる。また、図-4より解体効率の悪いS-L方式を除く5つの発破箇所選定方法で比較すると、どの選定



(a) 3×3 スパンモデル

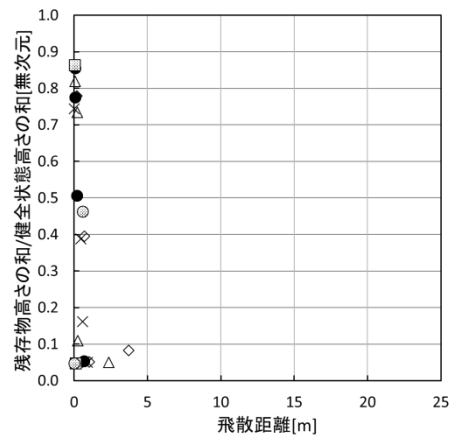


(b) 5×3 スパンモデル

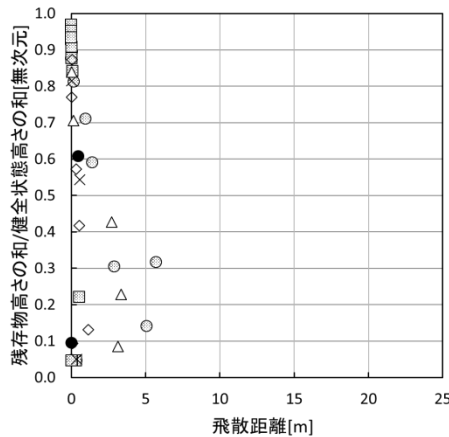


(c) 7×3 スパンモデル

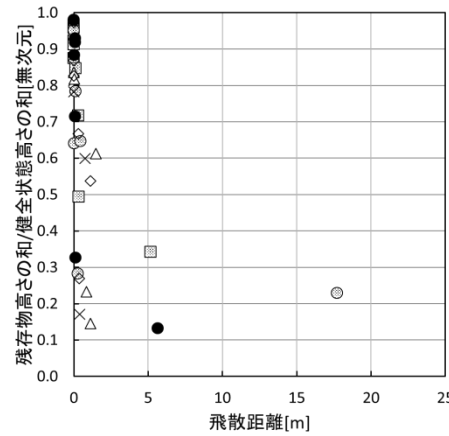
図-5 飛散距離と残存物高さの和の関係  
(無作為に発破箇所を選定した場合)



(a) 3×3 スパンモデル



(b) 5×3 スパンモデル



(c) 7×3 スパンモデル

図-6 飛散距離と残存物高さの和の関係  
(KIに基づいた発破箇所を選定した場合)

方法を用いた場合にも確実に解体するには8割以上の発破柱数が必要であることが分かる。

そこで、解体効率だけでなく解体時の安全性について検証するため、図-5、図-6に示す飛散距離と残存物高さの和の関係を比較する。図-5に示すように、無作為に発破箇所を選定した場合、 $KI$ に基づいた場合よりも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（図中の発破解体例1）は図-7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。一方、 $KI$ に基づいて発破箇所を選定した場合、図-6(a)3×3スパンモデルでは、 $\sigma_3^2$ を大きくするパターンを除いてほとんど飛散していないことがわかる。図-6(b)5×3スパンモデルでは、 $\sigma_3^2$ を大きくするパターンやL-L方式では飛散しているケースも存在するが、 $\sigma_1^2$ を大きくするパターンはほとんど飛散がみられない結果となっている。また、図-6(c)7×3スパンモデルではS-L方式やL-L方式で飛散がみられるのに対して、 $\sigma_1^2$ 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。この結果から、解体効率では大きな違いがみられない場合であっても、解体時の飛散距離をみると $\sigma_1^2$ を大きくするパターンは安全性が確保できている解体計画であるといえる。

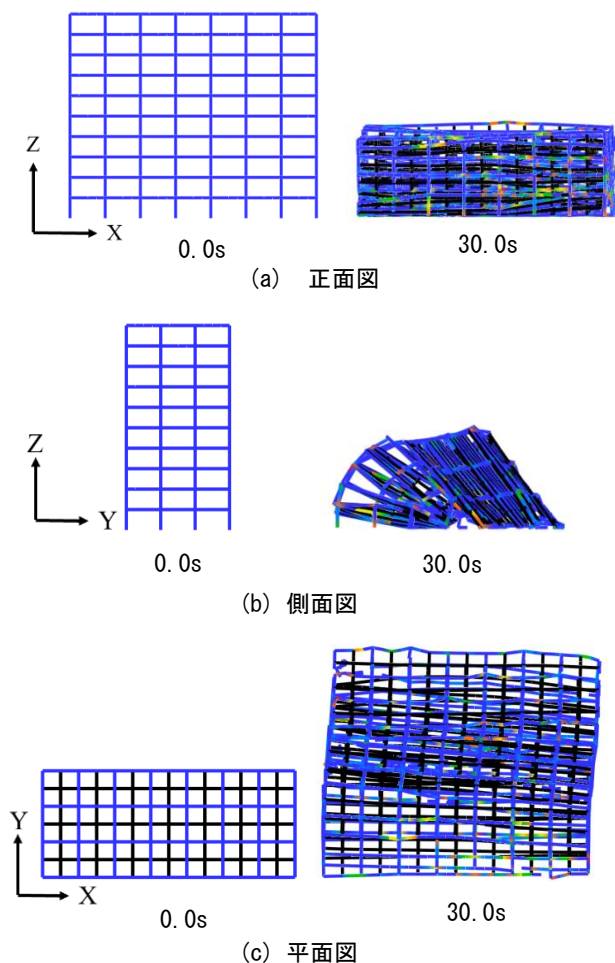


図-7 発破解体例1の解体挙動

(7×3スパンモデル、無作為な発破箇所選定)

#### 4. 結言

本稿では、建物の発破解体効率の向上を目指してスパン数の異なる複数の建物モデルに対して発破解体解析を実施した。解析結果から無作為に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の高さの間に一定の傾向が存在した。一方で、 $KI$ に基づいて発破箇所を選定した場合、選定方法の違いによって解体効率に差異が生じた。また、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いて、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、その場合には横倒しになり、安全性が確保できていない解体となった。 $KI$ に基づいて発破箇所を選定した場合、飛散距離は概ね抑えられ、安全性が確保できていると考えられる。さらに、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はすべてのモデルで飛散距離を抑えられる結果となった。

しかし、本稿で検討してきた発破解体計画手法を日本の建物に適用させた場合、全体崩壊に至るまでには多くの発破本数が必要である。そのため、解体効率のさらなる向上を目指すには、発破回数を増やすなど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と考えられる。

#### 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 2013 年度大会 (北海道) 学術講演梗概集, pp. 373-374, 2013.
- [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5. 層数が異なる場合の比較, 日本建築学会 2015 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 295-296, 2015.
- [4] 東健太, 磯部大吾郎：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, 計算工学講演会論文集CD-ROM, 第21巻, 2016.