

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

Blast Demolition Planning of Steel Framed Structures Using Key Element Index

日下善輝¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

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: u1ma1bert1905@gmail.com)

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 relationship between the total value of key element index for the removed columns and the height of remains after the demolition is investigated. We also applied the analysis code to investigate the demolition behaviors. It is confirmed that the buildings with some layers and high strength can even be demolished.

Key Words : Key Element Index, Steel Framed Structures, Blast Demolition Planning

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成功させているが、発破解体計画に関する定量的な判断基準が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。その一つとして、定量的な指標を用いて発破箇所を選定する方法が考えられる。これらの観点から、勝ら[1]は建物の強度に対する柱の寄与度を数値化したキーエレメント指標（以下KI）を用いた発破解体計画を考案し、その有効性を示してきた。磯部ら[2][3]は、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連について議論してきた。さらに、KIを用いた単発方式の発破解体計画、段発方式の発破解体計画を考案した。それらを比較することにより、段発方式の発破解体計画を実行することで、より確実に建物を倒壊させることが可能であると示された。

しかし、先行研究では、3×3スパンの建物に対する調査

を行うに留まっている。また、3層の建物に対しては発破箇所を最下層の柱に限定し調査を行っていた。さらに、荻野ら[4]は多層かつ設計強度が高い建物に対して倒壊させることは困難であることを示している。また、先行研究では柱ごとの床荷重の負担量を考慮していなかった。

そこで本研究では、複雑な建物でも解体が可能な発破解体計画手法を考案することを目的とする。そのため、柱ごとに負担する床荷重を考慮し、KIを算出する。また、建物最下層だけでなく、全層を発破対象とすることにより、多層かつ設計強度が高い建物に対しても発破解体が可能となる手法を見出していく。本研究では、多層かつ横長の建物を対象とした。加えて、設計強度の異なる3つの建物における解体の成否を比較する。解体の成否を定量的に表す指標として、発破解体後の残存物の高さを用いることとし、この高さで発破箇所とした柱のKI積算値との関連について分析する。以上を踏まえ、耐震設計が施された日本の建物に対する、KIに基づく発破解体計画の有効性を検証していく。

2. KIを用いた発破解体計画法

(1) キーエレメント指標KI

現在、発破解体工法において、発破箇所を選定はノウハウや経験則によって行われており、定量的な判断基準は確立されていない。したがって、建物全体の強度に対する柱の寄与度を定量化し、適切な発破箇所を選定を行う方法が有効であると考えられる。そこで、大井らによって述べられた構造物の鉛直荷重支持能力を表す部材感度[5]という概念に着目した。これを受け、部材消失前後における柱部材の鉛直荷重支持能力の評価指標として、KIを以下のように提案した[2]。

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与え、建物最下層部のいずれかの柱部材に降伏現象

が起きた瞬間の荷重を用い、 ${}_0P_G$ と表す。任意の*i*層内の柱番号*a*を除去した状態の建物の降伏限界荷重にも、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起きた瞬間の荷重を用い、 ${}_1P_G(i, a)$ と表す。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、健全な状態の建物の降伏限界荷重を用いることを表す。すなわち、健全な建物の強度に対する柱1本の寄与度を示す。また、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)次選定までに選定された柱が既に除去された建物の強度に対する*i*層内の柱番号*b*の寄与度は、第*n*次選定では以下のように定義できる。

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

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るが、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)より、*KI*が大きい柱部材ほど、建物全体の荷重支持能力に対して影響の大きい柱部材であることがわかり、建物の構造を支える上で重要な柱を定量的に求めることが可能となる。さらに、式(2)より、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*を用いることで発破箇所とする柱を定量的に選定することを試みる。

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、 ΔF は任意の荷重増分である。 ΔF に乗じた $\alpha_{i,a}$ 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*層の柱番号*a*に作用する軸力を $N_{i,a}$ とし、1層の柱の本数を*M*とする。

(2) *KI*を用いた発破箇所の選定

発破箇所を選定していくには何らかの基準が必要となる。そこで、磯部ら[2][3]は、*KI*の小さい柱を連続して1本ずつ選定し同時に発破する単発方式の発破解体方法と、*KI*の大きい柱を連続して1本ずつ選定し同時に発破する単発方式の発破解体方法を考案した。その中で、前者のみでは発破解体方法としては不十分であることを示した。さらに、*KI*の小さい柱を発破することにより、その建物の強度を低下させ、加えて*KI*の大きい柱を発破するという段発方式の発破解体方法を考案し、より確実な発破解

体が可能となることが示されている。ただし、先行研究では、1本ずつ発破箇所を選定するため、選定次数を重ねる必要があった。さらに、同値の*KI*が算出された際に、優先度を決めて発破箇所を選定する必要があった。

本研究では、確実な発破解体を目指すべく、*KI*の小さい柱を同時に発破し建物の強度を低下させ、一定時間経過後、*KI*の大きい柱を同時に発破する段発方式の発破解体方法を採用することとした。また、本研究では、選定次数を重ねることなく発破箇所の選定を行うことを目的とし、第1次選定において*KI*の小さい柱を選定、第2次選定においては*KI*の大きい柱を選定することとした。さらに、発破箇所を1本ずつ選定するのではなく、プッシュダウン解析により算出した*KI*に順位を付け、小さい順(大きい順)に任意の順位までの柱を発破対象に選定することとした。また、任意の順位内で同値の*KI*を有する柱はすべて発破箇所として選定することとした。したがって、作為的に優先度を定めることなく、発破箇所の選定を行うことが可能となる。ここで、段発方式の発破解体方法を採用したことから、第1次選定では式(1)を用い、第2次選定では第1次選定で発破箇所と選定した*KI*の小さい柱を除去した状態の建物について*KI*を算出する必要があるため、式(2)を用いる。

実際に5層7×3スパンの建物のモデルに対して発破箇所選定の手順を例として示す。まずモデルの概観を図-1に示す。本モデルの概要は次章で詳しく述べることとし、本節では省略する。図-1に示すモデルに対して第1次選定を実行した。ここで、*KI*を図で表す際の規則を示しておく。図-2は、建物の柱のみの平面図であり、1層あたり32本の柱部材を□のブロック図として表す。なお、この図においては柱番号を図中に表記しているが、*KI*を図で表す際は、プッシュダウン解析により算出した*KI*を□の中に表す。この解析により算出した*KI*を図-3(a)に示す。また、

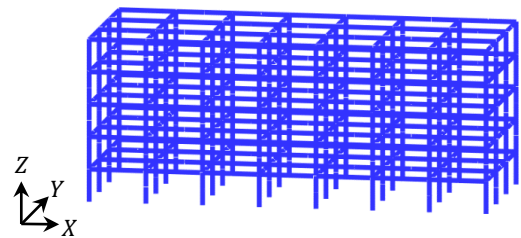


図-1 モデル概観

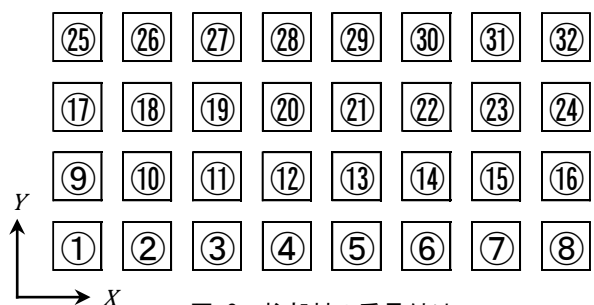


図-2 柱部材の番号付け

ここでは算出したKIを各層内で比較し、その層内のKIに応じて色付けた。KIの最小→中間→最大を表すように、青→白→赤とグラデーションでKIの大小を示した。この第1次選定において、KIの小さい柱を発破箇所として選定する。ここでは仮に小さい順に3位までとした。図-3(a)内の□の下に記したS.1stやS.2nd等は、それぞれその層内の柱のKIを小さい順に比較した場合、最小の値であること、2番目に小さい値であることを表している。大きい順の場合、L.1stなどと表記する。

第1次選定において発破箇所とする柱が選定され、次に解析は第2次選定に移る。この第2次選定で算出したKIを図-3(b)に示す。図中の■は、第1次選定で発破箇所とした柱であり、第2次選定では既に除去されている。これより、第2次選定におけるKIの大きい柱を発破箇所として選定する。ここでは大きい順に2位までとした。なお、建物の1層から5層までのすべての柱に対してKIを求めているが、図-3では建物の2層のKIのみを表記している。以上に示した手順により、発破箇所の選定を行うものとする。

(3) KIの積算値

先行研究では、発破解体計画により発破箇所とした柱すべてのKIを足し合わせたKI積算値を定義し、崩壊形態と相関があることを示してきた[2]。第n次選定までのKI積算値を以下のように表す。

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^R \sum_{j_k=1}^{l(k,i)} [{}^{k-1}KI_{i,m(i,j_k)}] \quad (5)$$

$$= {}^0_1KI_{1,m(1,1)} + {}^0_1KI_{1,m(1,2)} + \dots +$$

$${}^0_1KI_{1,m(1,l(1,1))} + \dots + {}^0_1KI_{R,m(1,l(1,R))} +$$

$${}^{n-1}_nKI_{1,m(1,1)} + {}^{n-1}_nKI_{1,m(1,2)} + \dots +$$

$${}^{n-1}_nKI_{1,m(1,l(n,1))} + \dots + {}^{n-1}_nKI_{R,m(R,l(n,R))}$$

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。

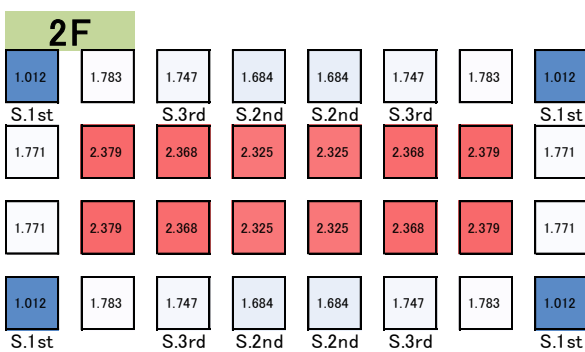
本研究では、以上で述べたKI積算値と解体の成否の相関について考察していくが、解体の成否を定量的に表す指標として、発破解体終了後（最終発破から一定時間経過

後）の残存物の高さを用いることとする。

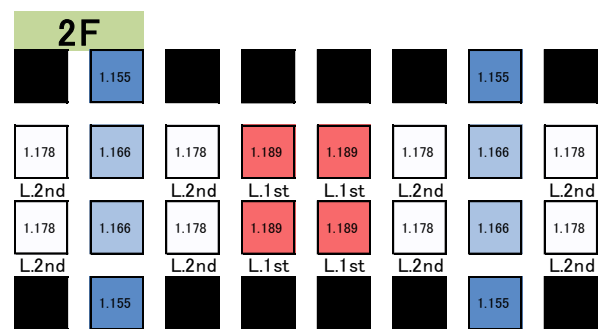
(4) 発破箇所選定の方法

(2)節では、プッシュダウン解析による第1次選定、第2次選定で算出されるKIを各層内で比較し、発破箇所の選定を行う例を示した。このKIの大小を、各層内32本の柱で比較するのではなく、建物全層の柱160本で比較する方法も考えられる。また先行研究では、高層建築物に対して高層モデルを3層ごとの層グループに分けた上でプッシュダウン解析を行い、発破箇所の選定を行った[4]。そこで、本研究でも建物を任意の層以上の構造体と見立て、その構造体における最下層の柱のKIを算出する方法を考えた。また、柱ごとの床荷重負担量の考慮の有無も条件として考えられる。

これらをまとめると、発破箇所選定の方法は表-1の通りとなる。これら6つの選定方法が考えられるが、この中で発破箇所を選定する上で最も有効であると考えられる方法の1つを本研究で扱うこととした。そこで、それぞれの発破箇所選定方法の特徴を述べる。まず、複雑な形状の建物や床荷重の偏りがある建物に対して柱の寄与度を定量化する必要性が今後生じると考える。そのため、柱ごとの床荷重の負担量を考慮した重み値をかけた荷重増分を与える方法が適切であると考えた。また、算出したKIを比較する際、建物全層で比較すると、1度に選定する発破箇所が少なくなるため、多くの選定回数を重ねなければ建物の崩壊には繋がり難いと考えられる。さらに、任意の層以上を構造体と見立て、その構造体の最下層の柱のKIを算出する条件では、非常に複雑な解析を行う必要があり、実用的ではないと考えられる。そこで、これらの条件の特徴を考慮した結果、本研究では「柱ごとの床荷重の負担量を考慮し、全層の柱に対してKIを算出し、その結果を各層内で比較し発破箇所を選定する。」この方法で発破解体計画を示すこととした。これは表-1内のW1-A-CFで示す方法である。



(a) 第1次選定



(b) 第2次選定（第1次選定においてKIの小さい順に3位までの柱を除去した状態）

図-3 プッシュダウン解析によるキーエレメント指標の算出結果

表-1 発破箇所選定方法の種類

W0	等しい鉛直荷重増分を与える (重み値を考慮しない)	F	任意の層以上を構造体と見立て、その構造体における最下層の柱のKIを算出	CF	KIの大小を各層内で比較し、発破箇所を選定する	W0-F-CF
		A	全層の柱のKIを算出	CF	KIの大小を各層内で比較し、発破箇所を選定する	W0-A-CF
				CA	KIの大小を全層で比較し、発破箇所を選定する	W0-A-CA
W1	柱ごとの床荷重の負担量を考慮した鉛直荷重増分を与える (重み値を考慮する)	F	任意の層以上を構造体と見立て、その構造体における最下層の柱のKIを算出	CF	KIの大小を各層内で比較し、発破箇所を選定する	W1-F-CF
		A	全層の柱のKIを算出	CF	KIの大小を各層内で比較し、発破箇所を選定する	W1-A-CF
				CA	KIの大小を全層で比較し、発破箇所を選定する	W1-A-CA

3. KIを用いた発破解体計画

(1) 解析モデル

解析モデルとして、5層7×3スパンの鋼構造の建物を想定し、全高20[m]、階高は各層4[m]、幅および奥行きのスパン長はすべて7[m]とした。建物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/m²]が作用するものとして設計している。柱や梁の断面寸法は、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[6]。ここでベースシア係数C_bは以下のように定義される。

$$C_b = Z \cdot D_s \cdot R_t \cdot C_0 \quad (6)$$

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、C₀は標準せん断力係数である。これらの係数から、本研究で用いる建物のベースシア係数C_bを計算するとC_b=0.25となり、この値を標準のベースシア係数とする。さらに、本研究では建物の強度による解体の成否を比較するため、この標準のベースシア係数に倍率として0.5をかけたC_b=0.125、および1.5をかけたC_b=0.375に基づいて設計したモデルも作成した。以降、それぞれを1.0C_bモデル、0.5C_bモデル、1.5C_bモデルと表記する。

また、建物の柱にはSM490の鋼材を用いた角形鋼管、梁にはSS400の鋼材を用いたH形鋼を使用した。各鋼材の物性値を表-2に示す。

(2) 発破解体計画の一例

前節で述べた3つのモデルに対し、前章で述べた解析条件のもと、プッシュダウン解析を実行した。本節では、この解析結果に基づいた発破解体計画の一例を示す。また、本研究ではKIの小さい柱を同時に発破し建物の強度を低下させ、一定時間経過後KIの大きい柱を同時に発破する段発方式の発破解体方法を採用している。このKIの小さい柱の発破と、KIの大きい柱の発破を、それぞれ第1発破、第2発破と呼び、第1発破と第2発破の間隔は3.0[s]とすることとした。

一例として示す計画は、1.0C_bモデルであり、第1次選定ではKIの小さい順に3位までの柱、および第2次選定ではKIの大きい順に2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た状態における第2次選定の結果から決定した発破解体計画を図-4に示す。なお、図-4内で

は1層から5層までの発破解体計画のうち2層のみを表記している。図中■で示す柱は、第1次選定において発破箇所とした柱である。同様に、図中⊗で示す柱は、第2次選定において発破箇所とした柱である。

(3) 発破解体計画に基づいた発破解体解析の一例

前節の発破解体計画に基づいて発破解体解析を行う。解析条件は、時間増分を1[ms]とし、自重解析を0.0[s]時に行う。第1発破は、自重解析による影響を考慮し1.0[s]時に行う。第2発破は4.0[s]時に行う。また、解析は発破解体による崩壊が終了するまで十分な時間をとるために30.0[s]まで行うこととした。この発破解体解析の結果を図-5に示す。なお、要素の塑性化判定のために要素両端の断面力を算定し、次式で与えられる降伏関数f_yに代入する。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \quad (7)$$

ここで、M_x、M_y、Nはそれぞれx軸およびy軸回りの曲げモーメント、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し、要素の塑性化はf_y ≥ 1を満たしたときに判定される。この降伏関数f_yの値に応じて、建物を構成している部材の色付けをしている。

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 ³]
SS400	206	245	0.3	7.9 × 10 ⁻⁶
SM490	206	325	0.3	7.9 × 10 ⁻⁶

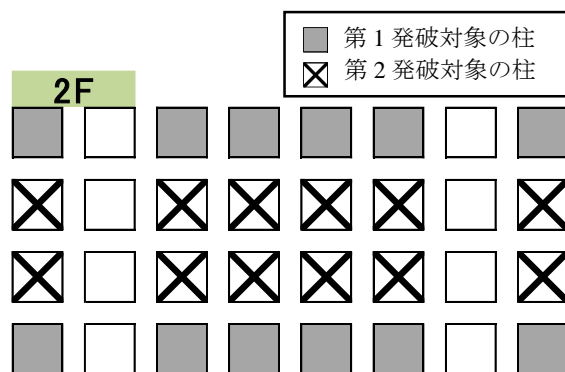


図-4 発破解体計画の一例

図-5 (a)は第1発破前のモデルの様子であり、(b)は第2発破前のモデルの様子である。(b)より、第1発破による建物への影響として、部材の塑性化によるたわみなどは見られるものの、建物は崩壊していない。第1発破では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目的が達成されていると判断できる。第2発破後、5.4[s]付近で1階の梁の一部が接地し、6.1[s]付近で3階の梁の一部が接地する様子が窺えた。その後も崩壊を続け、10.0[s]付近以降では部材の動きがほとんど見られなくなった。

(4) KI 積算値と残存物高さの関係

本研究では第1次選定において KI の小さい順に1, 2, 3位までの柱、そのそれぞれに対して第2次選定において KI の大きい順に1, 2, 3位までの柱を発破箇所とする発破解体計画について発破解体解析を行った。本節では、その解析結果から KI 積算値と残存物高さの関係について考察する。なお、発破解体解析における30.0[s]時の全節点のZ軸方向の座標の中で最大のものを残存物高さとした。

図-6に各モデルの KI 積算値と残存物高さの関係を示す。横軸の KI 積算値は、第1次選定と第2次選定において発破箇所とした柱の KI の総和である。図中青色で示した点は、第1次選定において KI の小さい順に1位までの柱を発破箇所とした際(S_1^1)の発破解体解析による残存物高さの結果である。同様に、橙色と灰色で示した点は、第1次選定において KI の小さい順に2位(S_2^1)、3位(S_3^1)までの柱を発破箇所とした際の結果である。さらに、丸で示す点は第2次選定において KI の大きい順に1位まで(L_1^2)の柱を、同様に四角で表す点は2位まで(L_2^2)の柱を、三角で表す点は3位まで(L_3^2)の柱を発破箇所とした際の結果である。

なお、 $0.5C_b$ モデルにおいて、 $S_1^3 - L_1^3$ の条件では発破解体解析を実行した際、解析が収束しなかった。 $1.0C_b$ モデルおよび $1.5C_b$ モデルについて、 $S_1^3 - L_1^3$ の条件では第2次選定において算出された KI の大きい順に順位を付けた際に、3位の柱が存在しない層があるため発破箇所の選定が行えなかった。そのため、発破解体解析の結果が存在しない。

強度の異なる3つのモデルの残存物高さの結果を比較すると、どのモデルにおいても S_1^1 の場合、残存物高さが高い傾向がある。そのため、 S_1^1 では、残存物高さを低くすることが困難であると考えられる。また、 $0.5C_b$ モデル、 $1.0C_b$ モデルにおいて、 S_2^1 や S_3^1 の場合には残存物高さが健全時の建物の高さより低くなる傾向が見られた。さらに、 L_1^2 から L_3^2 になるに従って残存物高さが低くなる傾向が見られた。つまり、第1次選定において KI の小さい順に2位や3位までの柱を発破箇所とした場合、第2次選定における発破箇所の選定次第では、発破解体により残存物高さが低くなる可能性があると言える。以上より、初期発破において建物の強度を十分に低下させることで、残存物高さを低く抑えることが可能であると考えられる。しかし、 $1.5C_b$ モデルのような高い強度を有する建物については、残存物高さを低くすることはできなかったため、この発破解体計画手法では不十分であると考えられる。

また、赤色破線矢印は、強度が十分に低下していない場合(S_1^1)を除外した際に、 S_2^1 や S_3^1 のそれぞれの結果から推測することができる KI 積算値と残存物高さの関係である。赤色破線矢印が示すように、残存物高さを低くするためには、強度の差異によってある一定以上の KI 積算値が必要であることが予測できる。

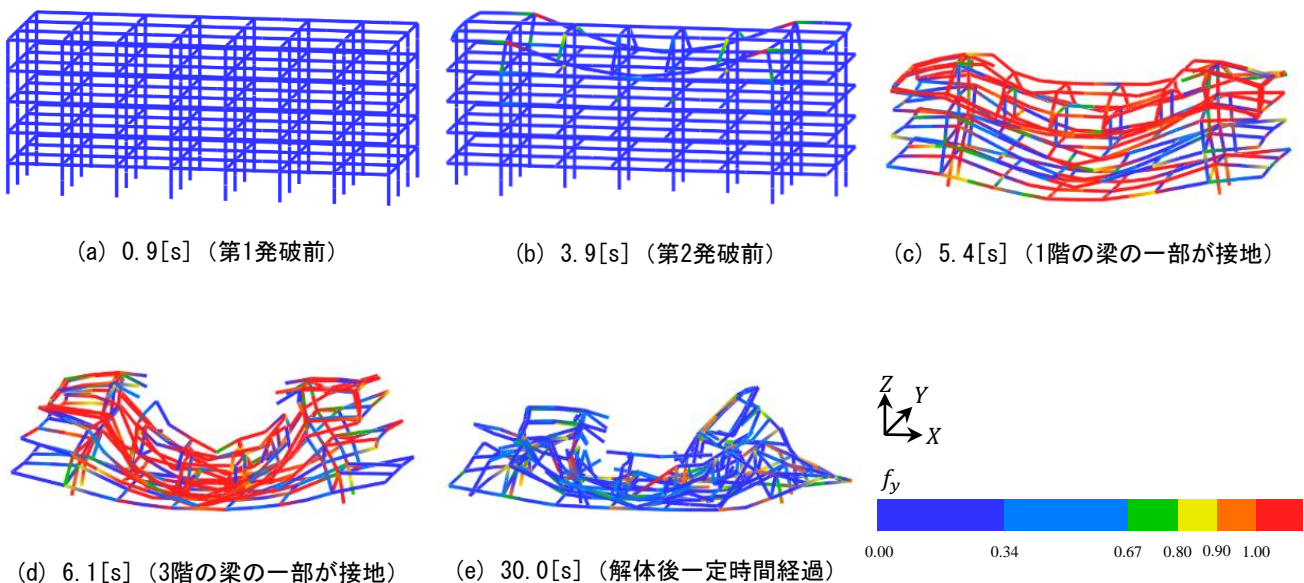


図-5 発破解体解析結果の一例

4. 結言

本研究では、複雑な建物でも解体が可能な発破解体計画手法を考案することを目的とし、強度の異なる3つの5層7×3スパン建物に対して、キーエレメント指標に基づいた発破解体計画を示した。その中で、キーエレメント指標を算出する際のプッシュダウン解析において、柱ごとに負担する床荷重を考慮し、柱梁接合部に対して与える鉛直方向の荷重増分に乗じる重み値 α を導入した。先行研究では発破対象を構造物の最下層の柱に限定していたが、本研究では全層の柱を対象とした。

建物の強度の低下をねらった KI の小さい柱の発破に関して、第1次選定において KI の小さい順に1位のみを発破するだけでは、その後の第2次選定において KI の大きい順に3位までの柱を発破しても、残存物高さを低くすることは困難であると確認できた。第1次選定において、 KI の小さい順に2位、3位までの柱を発破箇所とした場合、その後の第2次選定における KI の大きい柱の選定次第では残存物高さが低くなる傾向が見られた。すなわち、初期発破において建物の強度を十分に低下させることで、残存物高さを低く抑えることが可能であると考えられる。ただし、高い強度を有する建物については、残存物高さを低くすることができなかった。そのため、この選定方法は、強度が高い建物に対する発破解体計画を決定する上では不十分である。したがって、発破箇所の選定方法を改善する必要があると考えられる。また、キーエレメント指標の積算値と残存物高さの関係から、一定以上のキーエレメント

指標の積算値があれば、発破後の残存物高さが低くなることが分かった。そのことから、建物の強度の差異によって異なる予測曲線が描けることが示唆された。

今後は、少ない発破本数で効率的な発破解体を施工するための発破解体計画手法を考案していく。

参考文献

- [1] 勝拓也, 磯部大吾郎: キーエレメント指標に基づく発破解体解析, 日本機械学会第23回計算力学講演会CD-ROM論文集, No.10-2, (2010), pp.421-423.
- [2] 磯部大吾郎, 勝拓也: キーエレメント指標に基づいた発破解体計画手法, 日本建築学会大会学術講演概要集, (2011), pp.225-226.
- [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), (2013), pp.373-374.
- [4] 荻野朋哉, 磯部大吾郎: 高層建築物の発破解体計画に関する一考察, 日本機械学会第25回計算力学講演会CD-ROM論文集, No.12-4, (2012), pp.79-80.
- [5] 大井, 伊藤, 李: 部材消失に対する骨組構造の荷重支持能力感度, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol. 54, (2005), pp.249-250.
- [6] 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, (2006), pp.157-164.

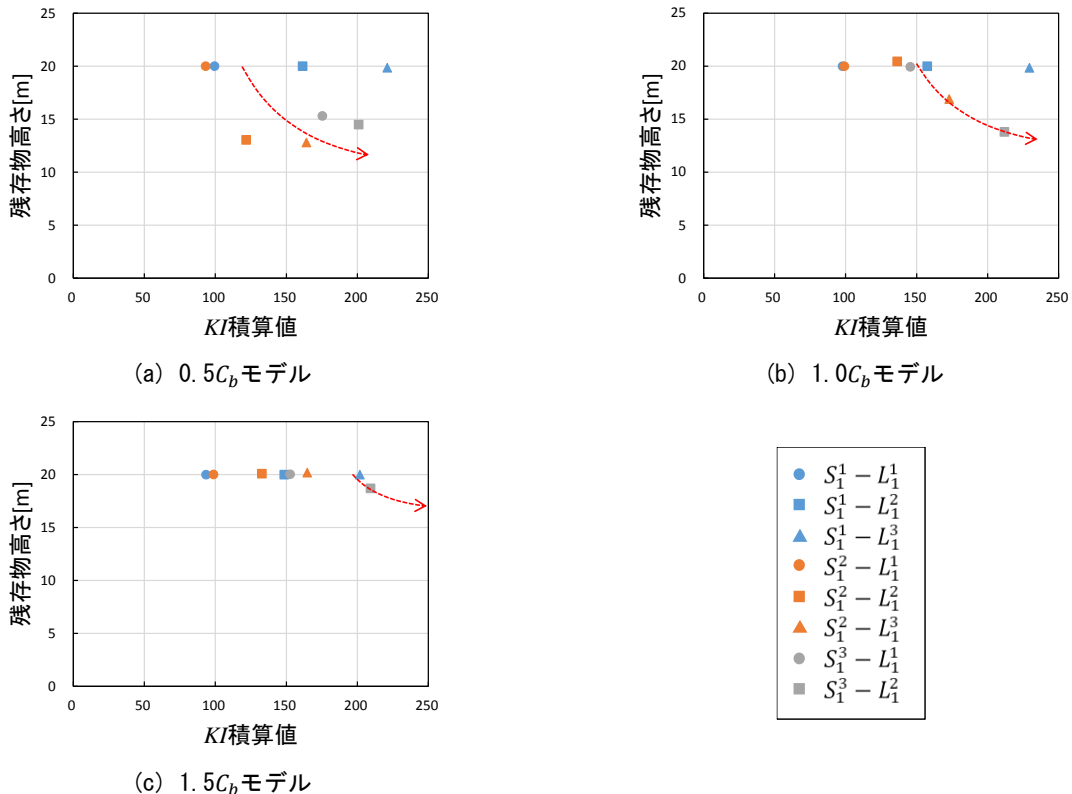


図-6 KI 積算値と残存物高さの関係