

建物の階高-スパン比と発破解体効率との関係

Relationship between Floor Height - Span Ratio of Buildings and Efficiency of Blast Demolition

荻野朋哉¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Tomoya Ogino 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: s1120925@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this study, we developed a blast demolition planning tool using key element index in which the contribution of a structural column to the vertical capacity of the structure can be investigated numerically. We investigated the tendencies of the demolition modes of simple framed steel structures and obtained the relationship between floor height - span ratio of buildings and efficiency of blast demolition. It is confirmed that the efficient way to demolish the whole structure varies with the ratio values.

Key Words : Blast Demolition, Key Element Index, Floor Height - Span Ratio

1. はじめに

高度経済成長期に多数建設された高層ビル群は、その老朽化や都市開発などにより、解体の需要が高まることが予想される。欧米では、このようなビルの解体に、発破解体工法がよく用いられる。これは、爆薬を用いて柱部材の接合部等を発破し、その建物の自重を利用して建物全体を一気に倒壊させる方法であり、一般的な重機を用いる解体工法に比べ短期間かつ低コストで行うことが可能である。また、危険な作業も不要なことから、優れた解体工法であると言える。しかしこの解体工法は、定量的な判断基準がないために経験やノウハウに大きく依存し、欧米に比べ設計強度の高い日本の建物に単純には適用できない。そこで本研究では、発破解体の定量的な判断基準を設けることを目的とし、建物の構造上重要な柱部材を探索できるキーエレメント指標に基づいた発破解体計画手法を開発している。本稿では、崩壊解析において実績のあるASI-Gauss法[1]を用いて建物の発破解体解析を行い、建物の階高-スパン比が発破解体時の崩壊挙動に与える影響について調べた結果を報告する。

2. キーエレメント指標

伊藤ら[2]によって考案された部材感度は、鉛直荷重に対して感度の高いキーエレメントを特定する際に有効であるが、消失させた際に部分崩壊に留まってしまう柱に対しても感度が高くなる傾向があるため、全体崩壊を目標とする発破解体には適さない。そこで、特に建物の最下層部の柱部材に着目し、部材消失前後における最下層柱部材の鉛直荷重支持能力の評価指標として、以下に示すキーエレ

メント指標[3]を提案した。

健全な構造物の全接合部に対し、鉛直方向へ均等に荷重増分を加え、構造物最下層部いずれかの柱部材に降伏現象が起きた瞬間の荷重を降伏限界荷重 P_G として求め、健全な構造物に対しては ${}_0P_G$ と表し、任意の最下層柱部材 m を除去した場合の降伏限界荷重を ${}_1P_G$ と表す。この柱部材 m のキーエレメント指標 KI を以下のように降伏限界荷重の比で定義する。

$${}_1KI_m = {}_0P_G / {}_1P_G \quad (m: \text{柱番号}) \quad (1)$$

また、連続的にキーエレメント指標を求める場合にも同様に定義することが可能で、第 n 次判定のキーエレメント指標は以下のように定義できる。

$${}_nKI_m = {}_0P_G / {}_nP_G \quad (m: \text{柱番号}) \quad (2)$$

上式は健全な構造に対して複数の柱部材を同時に発破する際の評価指標として用い、この判定はその構造物の最下層柱部材のいずれかが構造物の自重により降伏するまで行う。

キーエレメント指標を用いて発破箇所を特定する方法はいくつか考えられるが、本稿では、キーエレメント指標が最大となる柱部材を1本ずつ選択していく方法を採用する。つまり、構造物の全体強度に寄与度の高い柱部材から選び、選ばれた柱部材を同時に発破する方法を用いて発破解体計画を行う。

3層3スパンモデルに対して、(2)式を用いて発破解体計画を行った例を示す。図1に示すように、モデルの階高 h は各層4mとして固定し、幅・奥行きのスパン長 s を変化

させることで、階高-スパン比 s/h の異なるモデルをいくつか用意した。図 1(a)に示すモデルを $s/h=1.4$ 構造モデル、(b)に示すモデルを $s/h=2.0$ 構造モデルとする。柱には SM490 の鋼材を用いた BOX 鋼、梁には SS400 の鋼材を用いた H 鋼を使用し、想定床荷重 $400 \text{ [kgf/m}^2\text{]}$ の基で最下層柱の設計軸力比が 0.3 以下になるように設計した。最下層柱の番号を図 2 のように付ける。

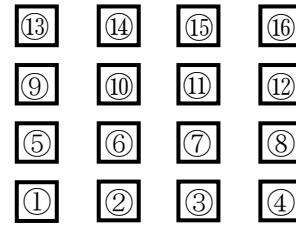


図 2 柱の番号

図 3(a)に $s/h=1.4$ 構造モデルの判定結果を、図 3(b)に $s/h=2.0$ 構造モデルの判定結果を示す。例として、図 3(a)の最下段左から 2 番目の柱 (柱番号: 2) について KI 値を求めると、

$${}^0KI_2 = {}_0P_G / {}_1P_G = 1.630 \quad (3)$$

続いて、第 2 次判定では、

$${}^2KI_2 = {}_0P_G / {}_2P_G = 2.333 \quad (4)$$

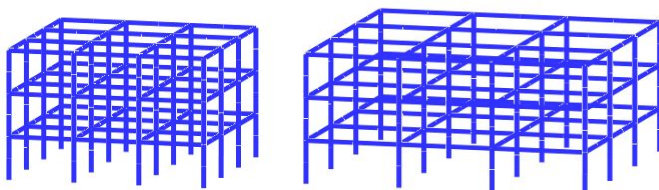
と求められる。このように、発破する柱を 1 本ずつ選んでいくこととする。しかし、例題のような対称モデルに対し発破解体計画を行う場合、 KI 値の大きな柱部材全てを選ぶと対称的に屈服してしまい、安定して逆に全体崩壊に至らない場合がある。そのため、柱部材を 1 本ずつ選んでいくことで非対称的な欠陥を与え、全体崩壊を起こしやすくすることにした。

図 3(a)の第 1 次判定結果を見ると、 KI 値が最大の柱が複数選択されている。これはモデルの対称性に起因するものであるが、このように KI 値が最大となる柱が複数選択される場合、どの柱 1 本を優先的に選ぶか決める必要がある。そこで、柱ごとに KI の累積値を求めておき、ある判定での KI 値が同じ場合には、その累積値が大きい方を優先的に選択することとした。キーエレメント指標の累積値は、次の式で定義する。

$$\sum KI_m = ({}^0KI_m + {}^1KI_m + \dots + {}^nKI_m) \quad (5)$$

(m : 柱番号)

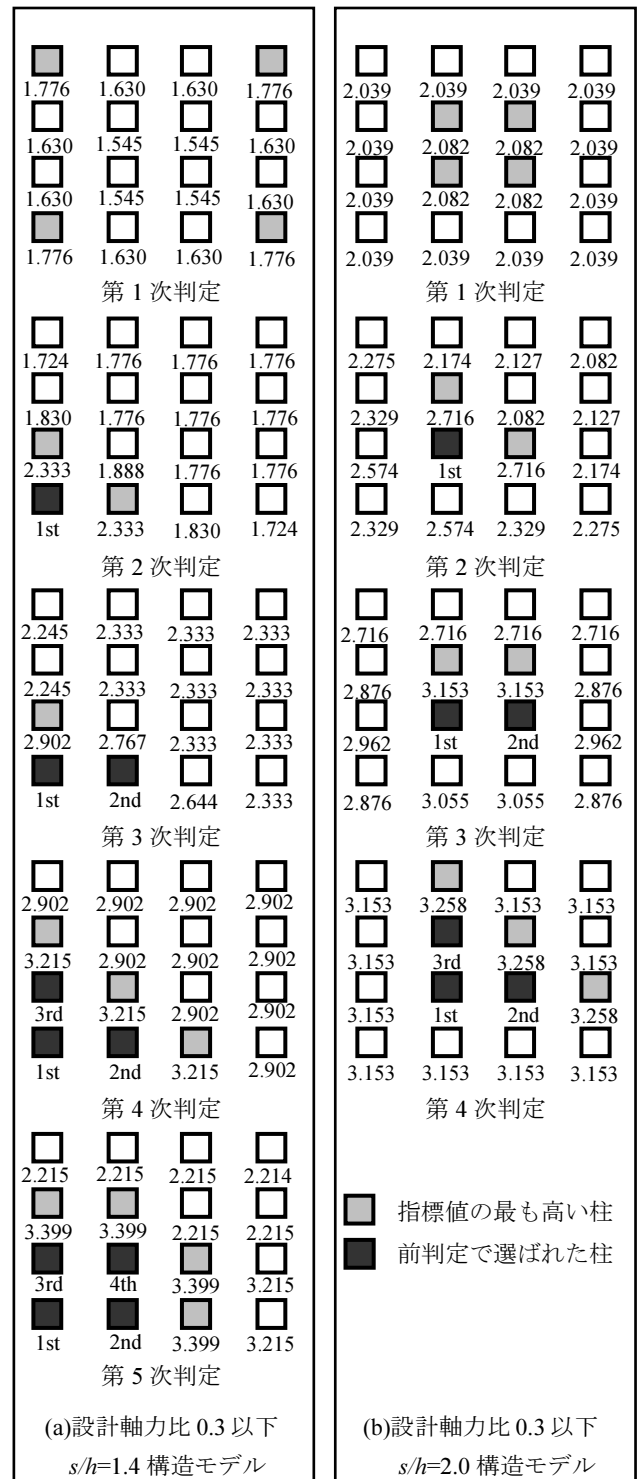
この累積値を用いることで、その判定までに計算された KI 値の差異を考慮することができ、同じ KI 値でも構造物に対してより重要な柱部材を選択することができる。この例として、図 3(a)の第 4 次判定の場合、 KI 値が最大の柱として 3 番、6 番、9 番が選ばれている。このときのそれぞれの KI の累積値を求めると、



(a) $s/h=1.4$ 構造モデル

(b) $s/h=2.0$ 構造モデル

図 1 3 層 3 スパンモデル



(a) 設計軸力比 0.3 以下 $s/h=1.4$ 構造モデル

(b) 設計軸力比 0.3 以下 $s/h=2.0$ 構造モデル

図 3 判定結果

$$\sum KI_3 = ({}^0KI_3 + {}^1KI_3 + {}^2KI_3 + {}^3KI_3 + {}^4KI_3) = 9.319$$

$$\sum KI_6 = ({}^0KI_6 + {}^1KI_6 + {}^2KI_6 + {}^3KI_6 + {}^4KI_6) = 9.415 \quad (6)$$

$$\sum KI_9 = ({}^0KI_9 + {}^1KI_9 + {}^2KI_9 + {}^3KI_9 + {}^4KI_9) = 8.920$$

となる。これよりKIの累積値が最大になる柱は6番であるので、この第4次判定では6番の柱が選択された。

図4(a)の $s/h=1.4$ 構造モデルの結果では外側の柱が集中的に選択される傾向が、図4(b)の $s/h=2.0$ 構造モデルの結果では内側の柱が集中的に選択される傾向が見られた。

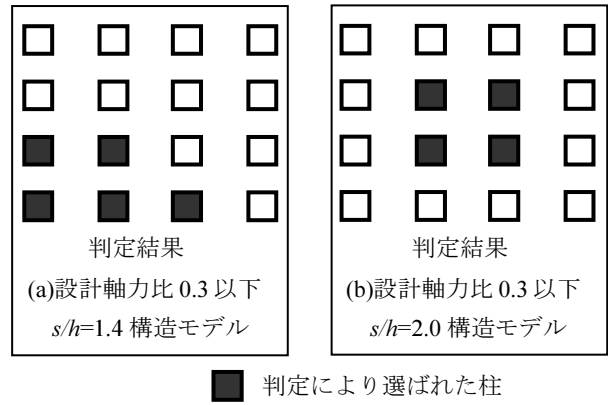


図4 発破解体計画の結果

3. 階高-スパン比と発破解体効率との関係

図4により選択された柱を同時発破させる発破解体解析を行った。構造物の階高-スパン比 s/h の相違により崩壊方向が異なることが予想され、さらに、構造強度によっても挙動が変化することが予想されるため、 s/h 値と設計軸力比を変化させて解析を行った。

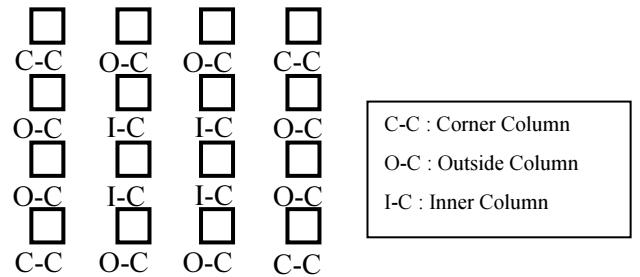


図5 最下層柱部材の分類

3.1 階高-スパン比と崩壊方向の関係

前節の例題において、第1次判定で選択された柱周辺の柱部材がそれ以降も続けて選択されていく傾向があった。そこで、構造の対称性から最下層柱を図5のように3種類に分類し、階高-スパン比 s/h の相違によりどの柱部材が選択される傾向があるのか調べ、図6に示すように s/h と第1次判定時におけるKIとの関係をまとめた。図では、それぞれのKI値をC-C基準の比によりプロットしている。

崩壊方向としては、最下層の外側の柱が多く選択された場合に多い横方向と、中央内側の柱が多く選択された場合に多い中央方向がある。どの設計軸力比の場合でも、I-CのKI値が一番大きくなった際に、横方向への崩壊から中央方向への崩壊に変化していた。このことから、第1次判定で選択される柱と崩壊方向が深く関わっていることが分かる。一方、設計軸力比が小さい0.05以下の場合(図6(a))では、 s/h の値によらず横方向への崩壊が起こっており、設計軸力比が大きい0.5以下の場合(図6(f))では、 s/h の値によらず中央方向への崩壊が起きている。このように、設計軸力比が極端に大きいか小さい場合には、崩壊の方向は s/h 値によらないことが分かった。

設計軸力比が極端な値でなければ、図6(b)の設計軸力比0.1以下、(c)の設計軸力比0.2以下、(d)の設計軸力比0.3以下、(e)の設計軸力比0.4以下の場合のように、 s/h の値が大きい場合は中央方向への崩壊が起こり、小さい場合は横方向への崩壊が起こった。また、これらの設計軸力比では、横方向から中央方向への崩壊に変化する、崩壊方向の変化がいずれも $s/h=2.0, 2.2$ で起きていた。

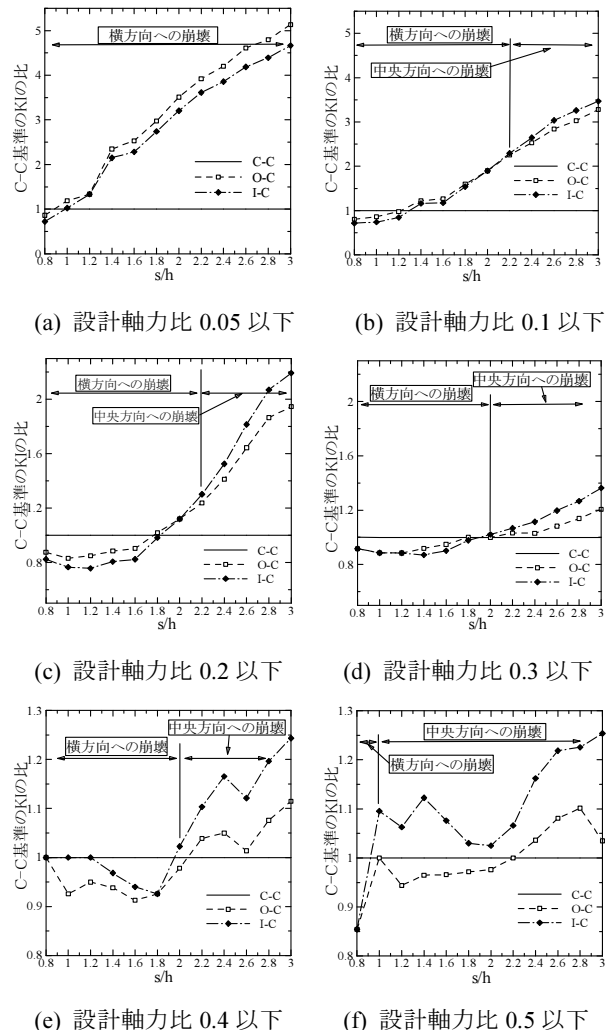


図6 s/h と第1次判定時のKIとの関係

3.2 階高-スパン比と崩壊形態の関係

続いて、発破解体計画により選択された柱全ての KI の積算値と崩壊形態との関係を調べた。図7に示すように、横軸に s/h 値をとり、縦軸に KI の積算値をプロットした。第 n 次判定までの積算値は、以下のように計算される。

$$\sum KI = ({}^0_1KI_{m_1} + {}^0_2KI_{m_2} + \dots + {}^0_nKI_{m_n}) \quad (7)$$

(第 n 次判定で選ばれた柱番号 : m_n)

図中、構造物の上層部が地上まで完全に崩壊したものを全体崩壊 (TC : Total Collapse)、構造物の一部が沈下し接地するが完全な崩壊に至らないものを部分崩壊 (PC : Partial Collapse)、構造物が沈下せずに倒壊に至らないものを崩壊なし (NC : Non Collapse) と定義して記す。上記の崩壊形態のうち、PC、NC は構造物が不安定な状態で残るため、発破解体としては好ましくない形態である。

(7) 式の KI 積算値の算出例として、図 7(d) の設計軸力比 0.3 以下のグラフの黒丸二つを挙げる。上の黒丸は、

$$\begin{aligned} \sum KI &= ({}^0_1KI_6 + {}^0_2KI_7 + {}^0_3KI_{10} + {}^0_4KI_{11}) \\ &= (2.082 + 2.716 + 3.153 + 3.258) \\ &= 11.209 \end{aligned} \quad (8)$$

と求められ、下の黒丸は、

$$\begin{aligned} \sum KI &= ({}^0_1KI_6 + {}^0_2KI_7) \\ &= (2.082 + 2.716) \\ &= 4.798 \end{aligned} \quad (9)$$

と求められる。これらの2点を用いることで、崩壊形態の範囲を求めることができる。図7の右上がり斜線は PC を表し、右下がり斜線は TC を表し、それ以外は NC を表す。

図 7(a) の設計軸力比 0.05 以下、(b) の設計軸力比 0.1 以下の結果に示すように、設計軸力比が小さすぎると s/h 値によらず発破解体では好ましくない PC が起こった。また、図 7(d) の設計軸力比 0.3 以下、(e) の設計軸力比 0.4 以下、(f) の設計軸力比 0.5 以下の結果に示すように、設計軸力比が十分に大きいと s/h 値によらずに TC が起こる領域が存在した。図 7(c) の設計軸力比 0.2 以下の結果では、 s/h 値が小さければ TC、大きければ PC が起きた。以上より、設計軸力比と s/h 値によって崩壊形態が大きく変化することが分かった。

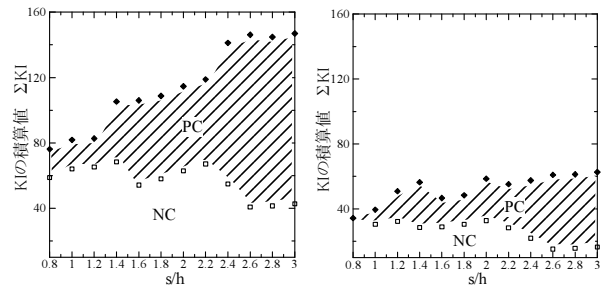
また、崩壊を引き起こすためには、設計軸力比が小さい場合には大きな KI 積算値が必要であり、設計軸力比が大きい場合には小さな KI 積算値で十分であった。換言すれば、崩壊が起きるときの KI 積算値が大きければ構造物としての強度が高く、崩壊しにくいということを意味する。さらに、 s/h 値が大きいと KI 積算値が小さくても崩壊に至っている場合が多い。最後に、構造物の設計軸力比が大きい場合には、 KI 積算値が小さくても崩壊に至っているケースが多く、加えて、崩壊形態は PC よりも TC が多くなることが分かった。

4. おわりに

本稿では、キーエレメント指標を基に発破解体計画手法を開発した。階高-スパン比の異なるモデルに対して発破解体計画を行い、階高-スパン比 s/h と構造物の崩壊方向や崩壊形態との関係を調べた。その結果、第1次判定での KI 値の大小関係から崩壊しやすい方向が決まることが分かった。また、建物の崩壊形態が設計軸力比と階高-スパン比 s/h に大きく依存することが確認できた。

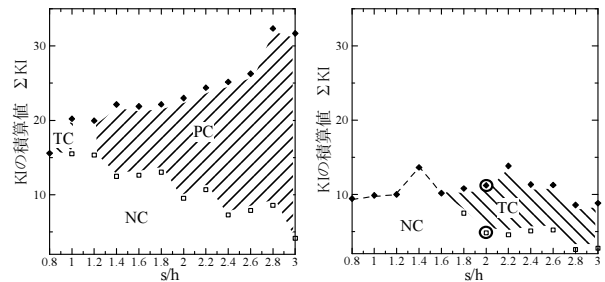
参考文献

- [1] 磯部, 江口, 今西, 佐々木: 骨組構造の発破解体解析・実験システムの開発, 建論, 第612号, 2007, pp.73-78.
- [2] 伊藤, 大井, 李: 鉛直荷重を受ける骨組構造物の冗長性に関わる感度解析, 建論, 第593号, 2005, pp. 145-151.
- [3] D. Isobe and T. Katsu: Blast Demolition Planning Tool using Key Element Index, Proceedings of the 9th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures (SILOS11), 2011, pp.395-401, Fukuoka, Japan.



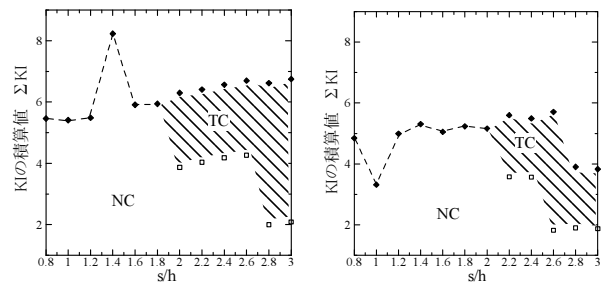
(a) 設計軸力比 0.05 以下

(b) 設計軸力比 0.1 以下



(c) 設計軸力比 0.2 以下

(d) 設計軸力比 0.3 以下



(e) 設計軸力比 0.4 以下

(f) 設計軸力比 0.5 以下

図7 KI の積算値と崩壊形態の関係