

建物の解体効率・解体時の安全性向上に向けた発破解体計画の検討

Study on Blast Demolition Planning of Buildings for Improving Efficiency of Demolition and Safety during Demolition

○非 東 健太 (筑波大院)
Kenta HIGASHI, Graduate School, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 磯部 大吾郎 (筑波大)
Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Key Words: Blast Demolition, Key Element Index, Variance, Efficiency of Demolition

1. 緒言

欧米などでは建物の発破解体工法を用いることがあるが、その解体計画は専門業者の独自のノウハウに大きく依存しているため定量的な判断基準がなく、設計強度の高い日本の建物に単純には適用できない。そこで先行研究[1]では、建物の全体強度に対する個々の柱の寄与度を数値化したキーエレメント指標（以下、 KI と記す）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。さらに、 KI を用いた段階方式の発破解体計画を適用することで、より確実に建物の解体が可能になることを示した[2]。本稿では、スパン数の異なる複数の10層鋼構造建物モデルに対し、 KI に基づいた発破箇所選定およ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、発破解体効率と解体時の安全性を検証した。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

2-1 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、鉛直下方に荷重増分を与え、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]。

$${}_0^1KI_{i,a} = {}_0P_G / {}_1P_G(i, a) \quad (1)$$

添え字の0は健全な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。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。

2-2 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、 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、 σ^2 を大きくするパターン）と各層（任意の i 層）ごとに残存する柱の KI から算出する方法（以後、 σ_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。

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

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

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、 σ^2 は全層での KI の分散、 σ_i^2 は i 層(単層)での KI の分散を表す。

2-3 KI に基づく発破箇所選定方法

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。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。この発破箇所選定方法に加え、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）および第1発破では KI の大きい順に発破箇所を選定し、第2発破でも KI の大きい順に発破箇所を選定する方

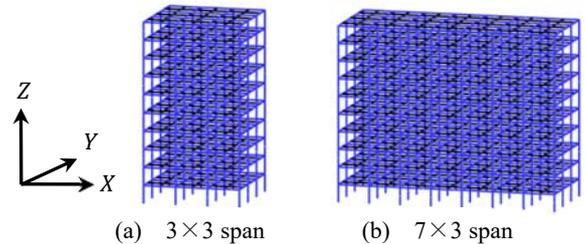


Fig. 1 10-story steel-framed building models

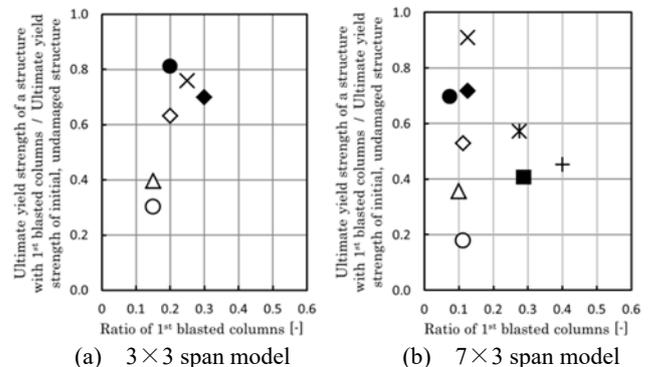


Fig. 2 Relation between ratio of blasted columns at the 1st blast and ultimate yield strength of each model

\times S_1^1	\blacklozenge L_1^1	\bullet Pattern to increase σ^2
$*$ S_1^2	\blacksquare L_1^2	\circ Pattern to increase σ_1^2
$+$ S_1^3		\triangle Pattern to increase σ_2^2
		\diamond Pattern to increase σ_3^2

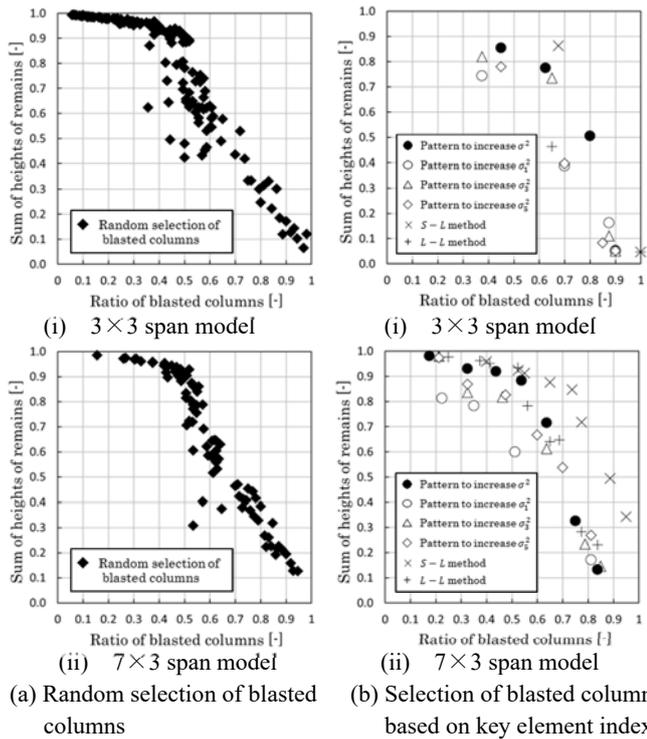


Fig. 3 Relation between ratio of blasted columns and sum of heights of remains

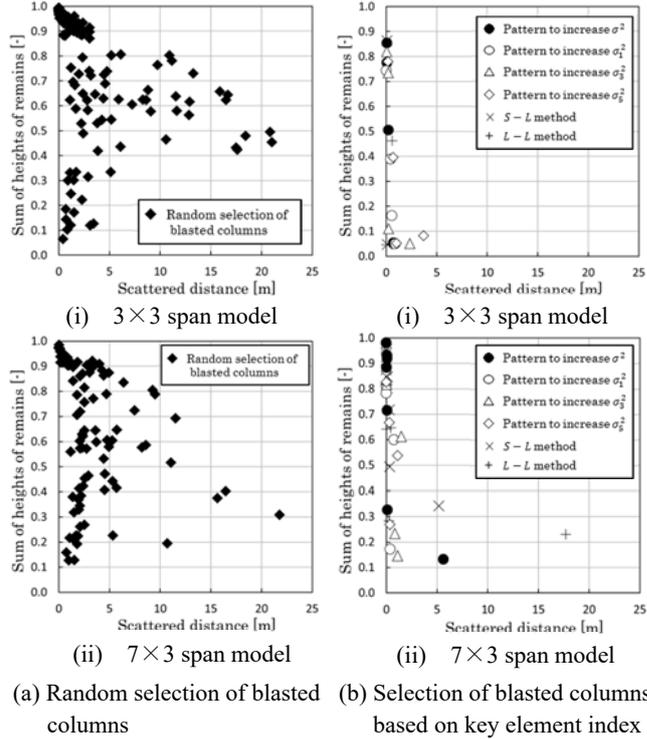


Fig. 4 Relation between scattered distance and sum of heights of remains

法（以下、 $L-L$ 方式）についても検討することとした。これらの条件を基に実施した解析では、自重载荷の後、第1発破を1.0 s、第2発破を4.0 sに行った。

2-4 解析モデル

本稿で用いる解析モデルは Fig. 1 に示すスパン数の異なる2つの10層の鋼構造建物で、全高40.0 m、階高4.0 m、幅・奥行きスパン長は7.0 mである。ベースシア係数を $C_b = 0.20$ とし、積載荷重と固定荷重を合わせて 800 kgf/m^2 が作用するものとして設計した。また、建物の柱には SM490 の鋼材を用いた角型鋼管、梁には SM400 の鋼材を用いた H 型鋼を使用した。床要素は全て塑性化を起こさない弾性要素とした。

まず、2つの健全な建物モデルに各発破箇所選定方法を適用させた場合において、第1発破による建物の全体強度の低下の度合いについて調査した。発破箇所選定方法の違いによる強度低下の変化を Fig. 2 に示す。縦軸は、健全な建物の降伏限界荷重 $0P_G$ と第1発破後の建物の降伏限界荷重 $n_{-1}P_G$ ($n = 2$) の比を取り、建物の全体強度の低下を示している。横軸は、第1発破柱数を全柱数で割ることで無次元化している。凡例の S_1^r は KI の小さい順に1位から r 位までの柱を発破したことを表す。また、 L_1^r は KI の大きい順に1位から r 位までの柱を発破したことを表す。Fig. 2 より、 KI の小さい順または大きい順に柱を発破した場合には、強度を低下させるには多くの柱を発破する必要があることが分かる。一方、 σ_1^2 を大きくするパターンの特徴や傾向を把握するために $i = 1, 3, 5$ に対して調査した結果、 σ_1^2 を大きくするパターンは、両者のモデルにおいて最も効率良く強度を低下させる発破箇所選定方法であることが分かった。このことから、分散の考慮は発破解体効率の向上に寄与することが期待できる。

3. 発破解体効率・解体時の安全性の比較

σ^2 を大きくするパターン、 σ_1^2 を大きくするパターン ($i = 1, 3, 5$)、 $S-L$ 方式および $L-L$ 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。さらに、発破解体解析終了時の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した。

Fig. 3(a)の無作為な発破箇所選定による解析結果を比較すると、両者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め、その下降していく傾きはほとんど同様の傾向であった。一方、Fig. 3(b)の KI に基づいた発破箇所選定による解析結果は、スパン数が増えると選定方法の違いによる解体効率の差異が大きくなり、第1発破によって最も効率良く建物の全体強度を低下できていることが示唆された σ_1^2 を大きくするパターンを除き、解体効率は悪くなっている。

実際の発破解体では建物の全体崩壊を目的としているため、ここでは残存物高さの和が低く抑えられている場合のみで比較する。その場合、無作為に選定した場合の方が KI に基づいて選定した場合より解体効率が良いケースが存在する。また、Fig. 3(b)で解体効率の悪い $S-L$ 方式を除く5つの KI に基づく発破箇所選定方法を用いて確実に解体するには、無作為に発破箇所を選定した場合より1割程度少ない発破柱数で残存物高さの和を低く抑えられているが、8割以上の発破柱数が必要であることが分かる。そこで、Fig. 4 に示す飛散距離と残存物高さの和の関係から、解体時の安全性について考察する。無作為に選定した場合、 KI に基づいて選定した場合

よりも飛散距離が長くなっており、解体効率が良かったケースについては、飛散距離がより長くなっている。一方、 KI に基づいた発破箇所選定の中でも、両者のモデルで σ_1^2 を大きくするパターンはほとんど飛散せずに解体でき、安全性が確保できていることが分かる。このことより、解体効率では大きな違いがみられない場合であっても、解体時の部材飛散距離をみると σ_2^2 を大きくするパターンは安全性も確保できる解体計画であるといえる。

4. 発破回数を増やした場合の発破解体計画

3章までに述べた段階方式の発破解体計画では、発破回数を2回に分けていた。だが、この手法では10層7×3スパンモデルのような冗長性の高いモデルにおいて、多くの場合で解体効率が悪化する傾向があった。そこで、発破回数を3回に増やし、より建物の強度を低下させた後に、解体する方法をとることで発破解体効率の向上を試みた。

4-1 発破箇所選定方法

発破回数を3回に増やした場合、第1発破と第2発破において建物を崩壊させることなく強度を低下させ、第3発破で建物を解体する方法を用いた。第1発破箇所を σ_1^2 を大きくするパターンを用いて選定し、効率良く建物の全体強度を低下させた後に、第2発破箇所を σ_2^2 を大きくするパターン ($i \geq 2$) を用いて選定する。これにより、上層部と下層部の両者の層内に KI が突出して大きな柱をつくることを目指す。そして、第2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3発破箇所として選定する。一方で、第1発破箇所を σ_2^2 を大きくするパターン ($i \geq 2$) を用いて選定し、第2発破箇所を σ_1^2 を大きくするパターンを用いて選定した後に KI が大きい順に任意の順位までの柱を第3発破箇所として選定する方法についても検討することとした。なお、これらの方法は以後、前者を $\sigma_1^2 - \sigma_i^2 - L$ 、後者を $\sigma_i^2 - \sigma_1^2 - L$ と記すこととする。

4-2 発破解体解析結果

発破回数を3回に増やした場合について、Fig. 5の凡例に示す $\sigma_1^2 - \sigma_i^2 - L$ ($i = 2, 3, 5$) および、 $\sigma_5^2 - \sigma_1^2 - L$ の4種類の発破箇所選定方法を用いて解析を実施し、解体効率と解体時の安全性を調査した。また、発破回数の違いによる解体効率や解体時の安全性を比較するため、Fig. 5, Fig. 6に σ_2^2 を大きくするパターンの解析結果を示す。Fig. 5(a) 3×3スパンモデルでは発破回数を増やしたことによって解体効率が上がるようなケースは見られなかった。概ね σ_1^2 を大きくするパターンと同程度の解体効率となっていた。Fig. 5(b) 7×3スパンモデルでは、発破回数を増やすことで残存物高さの和を5割程度まで低くする場合の解体効率は良くなっていると考えられる。だが、建物を全体崩壊させるには、 σ_1^2 を大きくするパターンとほとんど同程度の発破柱数が必要になる結果となった。この方法を用いても、層内で KI に差がほとんど生じない層が存在するため、その層における発破柱数が極わずかな場合と全ての柱を発破する場合の2つに分けられる。このとき、発破柱数が6割以上の解体計画では、 KI に差がほとんど生じない層の全ての柱を発破することになり、解体効率が良くなる結果になっていると考えられる。また、 $\sigma_1^2 - \sigma_i^2 - L$ ($i = 2, 3, 5$) と $\sigma_5^2 - \sigma_1^2 - L$ のように強度を低下させる順番を変えた場合、Fig. 5(b) 7×3スパンモデルでは第1発破で σ_1^2 を大きくするパターンを用いた方が解体効率が良くなる傾向があることが分かった。Fig. 6より、全ての発破箇所選定方法において部材飛散距離が抑えられる結果となり、解体時の安全性は確保できる結果となった。

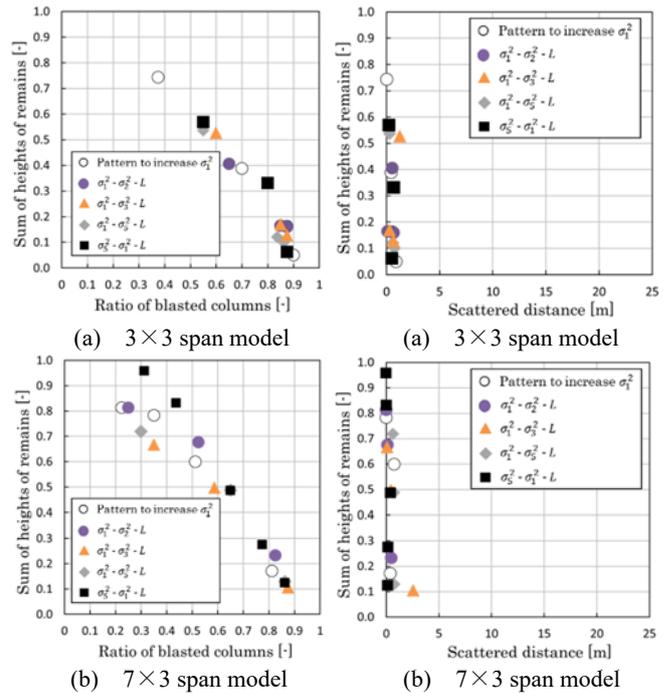


Fig. 5 Relation between ratio of blasted columns and sum of heights of remains (comparison between different number of blasts)

Fig. 6 Relation between scattered distance and sum of heights of remains (comparison between different number of blasts)

5. 結言

本稿では、建物の発破解体効率・解体時の安全性の向上を目指してスパン数の異なる建物モデルに対して発破解体解析を実施した。無作為に発破箇所を選定した場合には、スパン数に関係なく発破柱数と残存物高さの和との間に一定の関係が存在した。一方、 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き、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、解体効率が良いケースは、部材の飛散距離がより長くなり、安全性が確保できない解体となった。 KI に基づいて発破箇所を選定した場合、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すると、全てのモデルで部材飛散距離が抑えられる結果となった。建物が全体崩壊に至るまでには無作為に発破箇所を選定した場合より KI に基づいて発破箇所を選定した場合の方が1割程度少ない発破柱数で解体できているが、多くの発破本数が必要となる。建物の全体強度をより低下させるために発破回数を3回に分けた発破解体計画では、残存物高さの和を5割程度まで抑えることに限れば解体効率を向上させ、安全性が確保できているものの、確実に解体するには多くの発破柱数が必要となる結果となった。

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] 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, 日本建築学会2015年度大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 295-296, 2015.