

一般構造のパラメトリックモデリング技術

○横須賀 洋平*¹ 本間 俊雄*²

キーワード：パラメトリックモデリング 一般構造 構造最適化

1. はじめに

CAD, BIM といった建築分野の情報技術の進展により、構造解析や構造最適化が容易に実行できる環境が整ってきている。複雑な形状を有する建築物を正確に制御することができ、構築環境を連携することで設計作業の効率化を実現する。このように情報技術の進展により、設計業務の内容や設計過程も大きく変化しつつある。新たな設計手法のひとつとしてパラメトリックデザインが提案されている。パラメトリックデザインは、幾何形状にある変数（パラメータ）を定義して、パラメータを連続的に変化することで、有機的な形状を生成することができ、形状に関連づけたデータを一定の規則によって同時に変化させることができる。したがって、設計終盤の段階においても設計情報の修正を容易に行うことができるという特徴を持つ。パラメトリックデザインを実行する代表的なソフトウェアとして Rhinoceros + Grasshopper が挙げられる。豊富な幾何形状の処理とその処理同士を連結することで、アルゴリズムを構築するように幾何形状を決定する。現状では、ファサードデザインや曲面構造を対象とした問題にパラメトリックデザインによる手法が数多く提案されているが、建築一般構造では、確立した手法があるわけではない。

本研究では、パラメトリックデザインや構造最適化問題へ応用することを想定した建築一般構造に対するパラメトリックモデリング技術を提案する。構造最適化問題では、設計変数として何等かのパラメータを設定する必要がある。従来の鋼構造骨組の最小重量設計¹⁾やブレース配置問題²⁾では、骨組構造は固定され、部材断面やブレース配置が設計変数として扱われてきた。文献 3) では、スパン長やスパン割りを変数としているが、骨組の自由度は平面的な操作に限定されている。このように、形状操作に関する建築一般構造の構造最適化問題は、3次元の設計空間の中で節点データに設定した規則やパラメータを与えて節点を変動させる必要がある。モデルの構築方法から見直す必要がある。さらに、規則やパラメータは柔軟に変更することができ、かつ自動処理による暗黙の処理ではなく、明示的に示される必要がある。本報では、形状操作に関する建築一般構造のパラメトリックモデリングを構築する。構築環境に Rhinoceros と Grasshopper を用いることで、容易な拡張性を持たせる。同時に、本手法による 4層 4×4 スパンモデルと 4層 4×4 スパン異形モデルの3次元の建築物の

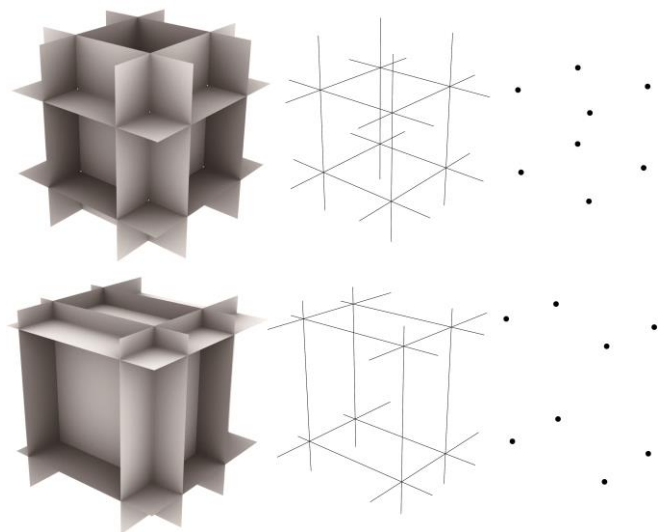


Fig.1 Generation of vertices

構造最適化問題へ適用し、形状操作を導入した構造最適化問題の可能性を示す。

2. パラメトリックモデリング

2.1 線・点データの抽出

建築で使用されるパラメトリックモデリングは、BIM ソフトウェアにおいて顕著な進展を伺い知ることができる。設計時に関連付けられた要素データは、データ間に階層を与えることができ、要素間の拘束を受けながら自由に配置される。このように図面を作図するだけでなく、設計者は自由度を保持し、設計データを構築していくことが必要となる。

一方で、従来の建築構造モデルの構築方法は、はじめに節点を与え、節点を連結する要素データを構築することが一般的である。本手法では、有限な面を与え、面同士の交線を線とし、線同士の交点、つまり線と面の交点を節点として構築する。これらの操作を以下のとおり定義する。

$$e_i = f_j \cap f_k \quad (k > j, f_j \cap f_k \neq \emptyset) \quad (1)$$

$$v_i = f_j \cap f_k \cap f_l \quad (l > k > j, f_j \cap f_k \cap f_l \neq \emptyset) \quad (2)$$
$$(j, k, l = 1, \dots, m)$$

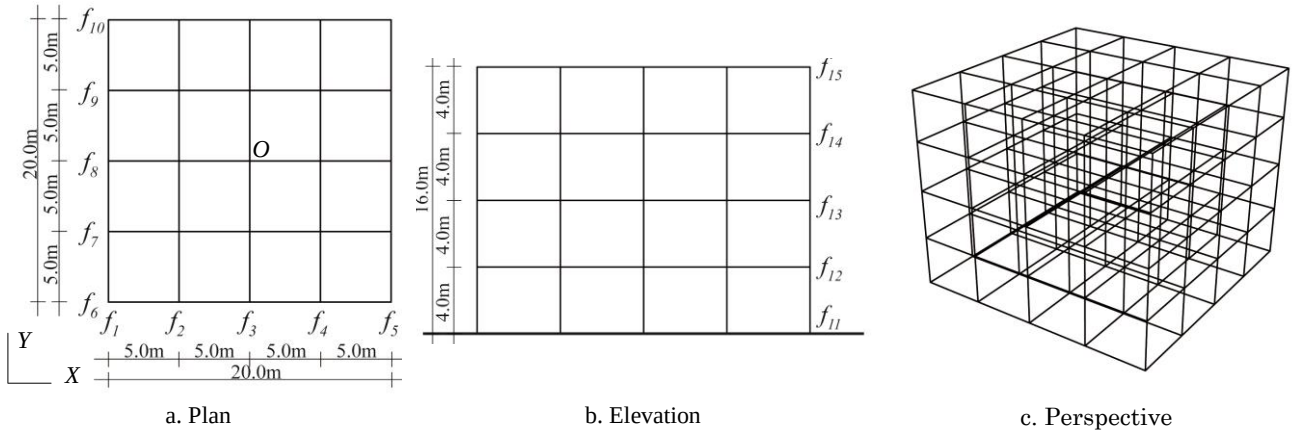


Fig.2 Initial form of 4-storey and 4-bay in X,Y direction (Model-A)

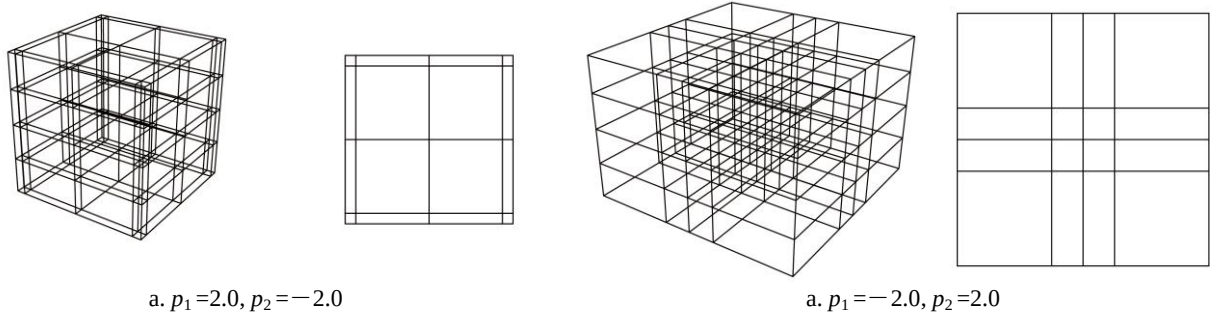


Fig.3 Examples of parameter setting

ここで、 f_j :面、 e_i :線、 v_i :点、 m :面の数である。記号 $\cap$ は共通部を表し、記号 $\emptyset$ は空集合を表す。これらの面、線、点のデータは、設計領域のボリューム内に定義することとする。これにより、一意に線、点のデータが決定する。ここで定義した面を通り芯や床レベルと同様に考え、パラメトリックに変化することで形状操作を行う。面が平面である必要はなく、曲面や斜めの面についても同様に定義することができる。

モデルは Grasshopper の Intersect のコンポーネントを利用する。これにより、曲面や曲線などの交点といったプログラムで記述することが困難な幾何形状の処理において、容易に求めることができる。さらに、Grasshopper を利用する利点として、意匠や環境の側面から考えられる制約条件を容易に入れることが可能である。

2.2 対象モデル例と定式化

4層4×4スパンモデルを想定する。Fig.2にモデルの初期形状を示す。スパン20.0m、高さ16.0mとし、構造モデルの中心点を原点とする。次のパラメータと制約条件の設定を定義する。

$$\text{Parameter: } p_1, p_2 \quad (3)$$

$$-2.0 \leq p_1, p_2 \leq 2.0 \quad (4)$$

$$f_1(X) = f_{1\text{initial}}(X) + p_1, f_2(X) = f_{2\text{initial}}(X) + p_2 \quad (5.a,b)$$

$$f_4(X) = f_{4\text{initial}}(X) - p_2, f_5(X) = f_{5\text{initial}}(X) - p_1 \quad (5.c,d)$$

$$\begin{aligned} f_1(X) &= f_6(Y), f_2(X) = f_7(Y), \\ f_4(X) &= f_9(Y), f_5(X) = f_{10}(Y) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 p_1, p_2 :パラメータ、 X, Y, Z :全体座標値、 f_{initial} :面の初期位置である。 $f_{1-5}(Y, Z)$, $f_{6-10}(X, Z)$, $f_{3,8,11-15}(X, Y, Z)$ は定数とする。ここでは、簡単な為に対称となる制約条件を与え、パラメータを2つとする。パラメータに値を設定した場合の構造モデルの形状例を Fig.3 に示す。

3. 構造最適化

本報では、前節で示したパラメトリックモデリングによって構成される構造モデルを対象に構造最適化問題を試行する。構造解析には、Grasshopper プラグインである Karamba を採用し、最適化ソルバには、同じく Grasshopper プラグインの Galapagos による疑似焼きなまし法のアルゴリズムを用いる。

3.1 構造最適化の定式化

最大水平変位 d_{max} を最小化する単一目的最適化問題とし、次式のように定式化する。

$$\text{Find } p_1, p_2 \quad (7)$$

$$\text{to minimize } f(p_1, p_2) = d_{\text{max}} \quad (8)$$

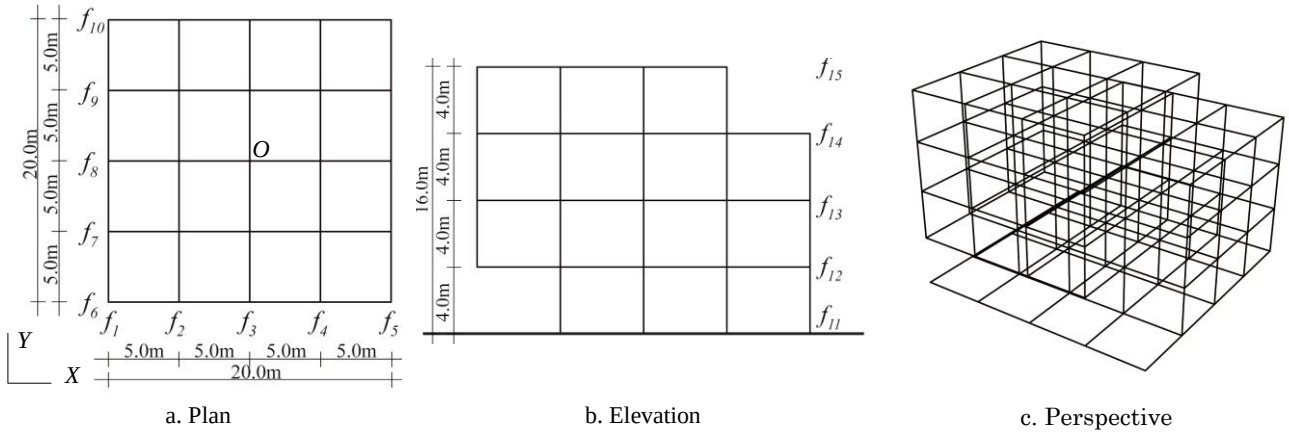


Fig.4 Variant model (Model-B)

$$\text{subject to } \sigma(p_1, p_2) \leq f_a \quad (9.a)$$

$$\delta_i(p_1, p_2) \leq \delta_a \quad (9.b)$$

ここで $d_{\max}$:最大水平変位, σ :応力度, f_a :許容応力度, δ_i : i 層の層間変形角, δ_a :層間変形角の許容値である. ここで, 層間変形角の許容値は, $1/200$ とする.

3.2 4層4×4スパンモデル

Fig.2 に示すモデルを対象に最適化を行う. 3 節と同様, 対称条件を与えたパラメータの設定とする. 使用材料は, SN400A 鋼材とし弾性係数 $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とする. 梁部材は H 形鋼とし, H-600×300×12×20, 柱部材は角形鋼管とし, □-400×12 とする. 柱と梁の接合形式は剛接合とし, X 方向, Y 方向ともラーメン構造とする. 境界条件は, G.L.である f_{11} の節点をピン支持とする. 荷重条件は地震荷重を想定し, 5.0 kN/m^2 の鉛直荷重に相当する層重量を仮定し, 水平 X 方向に略算式による A_i 分布に従う荷重値を与える. 第 2 種地盤とし, 標準せん断力係数 $C_0=0.2$ とする. Karamba のメッシュ荷重機能を用いて, 面積に応じた節点荷重に振り分ける. 4 層 4×4 スパンモデルを Model-A とする.

3.3 4層4×4スパン異形モデル

3 次元空間で形状操作を行う際に, より自由度が高いデザインを獲得するために, 4 層 4×4 スパンの構造モデルに接続関係に変化を与えることで異形モデルを設定する. Fig.4 にモデル図を示す. 1 層と 4 層の一部をくの字状に切り欠いた形状とする. 対角線を軸に対称形状とする. 解析条件は 3.2 節の 4 層 4×4 スパンモデルと同じとする. 次に, 前述の式(3),(4),(5)で示したパラメータの設定を変更し, 以下のとおりに設定する.

$$\text{Parameter: } p_1, p_2, p_3, p_4 \quad (10)$$

$$-2.0 \leq p_1, p_2, p_3, p_4 \leq 2.0 \quad (11)$$

$$f_1(X) = f_{1\text{initial}}(X) + p_1, f_2(X) = f_{2\text{initial}}(X) + p_2 \quad (12)$$

$$f_4(X) = f_{4\text{initial}}(X) - p_3, f_5(X) = f_{5\text{initial}}(X) - p_4$$

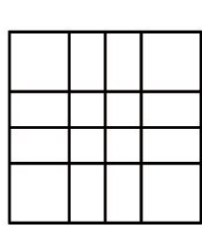
パラメータ数は 4 とする. 4 層 4×4 スパンの異形モデルを Model-B とする.

4. 数値結果

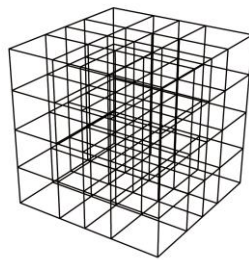
Fig.5-8, Table1 に数値結果を示す. Fig.5,6 に Model-A, Model-B の最適化で得られた形状図を示す. Fig.7,8 に Model-A, Model-B の変形図(100 倍), モーメント図, せん断力図を示す. Table1 に Model-A, Model-B の初期形状と最適化形状の各層の最大変位の値を示す. 最適化の数値結果は各モデルに対し, 5 回試行を行い, 同じ結果が得られることを確認している.

はじめに Model-A の結果について確認する. Fig.5 の結果より, パラメータの上限値による解が得られていることが判る. パラメータ p_1 はモデルの外形を決定するパラメータである. p_1 が 2.0 であるときは, モデルの外形が最も小さくなる. パラメータ p_2 は内部の形状を決定するパラメータであり, 内側に小さくなる結果が得られている. スパンが均等に配置された結果よりも, 内側に小さくなる方が良い結果を得ている. この理由は, 目的関数に最大水平変位を用いており, f_8 の頂部に生じる最大変位を抑制する効果がある為である. Fig.7 の結果より, 応力の制約条件を満足していることが判る. スパンが大きい領域の梁はモーメントが大きくなり, スパンが小さい領域の梁はせん断力が大きくなる傾向がある.

次に Model-B の結果について確認する. Fig.6 の結果より, パラメータ p_2 の影響により f_2, f_7 は外形に近づく結果を得ている. 他のパラメータは上限値に達した結果を得ている. これより, 片持ち部のスパンを小さくする方向に解が改善されていることが判る. Fig.8 の応力図の結果は, Model-A と同様の傾向を持つ. Table1 の初期形状と最適化形状の各層の最大変位を比較すると Model-A, Model-B



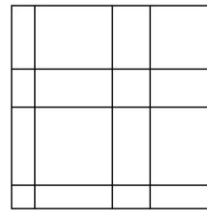
a.Plan



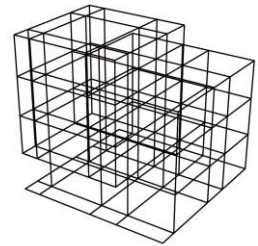
b.Perspective

$$p_1=2.0, p_2=2.0$$

Fig.5 Optimized form of Model-A



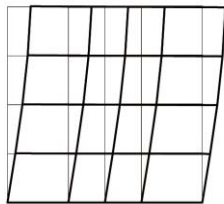
a.Plan



b.Perspective

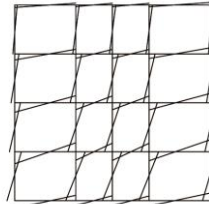
$$p_1=2.0, p_2=-1.156, p_3=2.0, p_4=2.0$$

Fig.6 Optimized form of Model-B



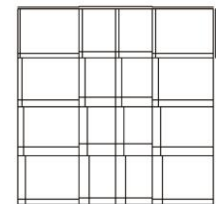
a. Deformation (f_8 , scaling:100)

$$d_{\max}=0.019 \text{ m}$$



b. Bending moment (f_8)

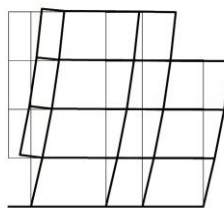
$$M_{\max}=153.23 \text{ kNm}$$



c. Shear force (f_8)

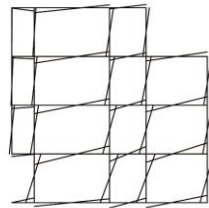
$$Q_{\max}=73.12 \text{ kN}$$

Fig.7 Numerical results of Model-A



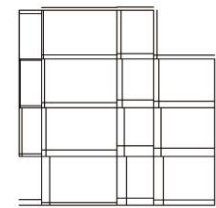
a. Deformation (f_8 , scaling:100)

$$d_{\max}=0.027 \text{ m}$$



b. Bending moment

$$M_{\max}=233.32 \text{ kNm}$$



c. Shear force

$$Q_{\max}=109.75 \text{ kN}$$

Fig.8 Numerical results of Model-B

Table1 Numerical results of displacement (cm)

	Model-A		Model-B	
	Initial form	Optimized form	Initial form	Optimized form
4-storey	3.31	1.91	4.63	2.74
3-storey	2.88	1.66	4.11	2.31
2-storey	2.14	1.23	3.19	1.72
1-storey	1.13	0.65	2.12	0.96

ともに約 60%程となり、最大変位が低減されていることが判る。一方で、意匠や環境等の要求性能を表す制約条件を設定する必要がある。

5. おわりに

本研究では、パラメトリックデザインや構造最適化問題へ応用することを想定した建築一般構造に対するパラメトリックモデリング技術を提案し、簡易的なモデルに対し、最大変位最小化問題へ適用し、その有用性を示した。今後は、建築としての要求性能を考慮した構造最適化問題へ発展させていく。

【参考文献】

- 1) 澤田 樹一郎, 中村 雄治, 松尾 彰: 崩壊機構を指定した鋼構造骨組の最小重量信頼性設計, 日本建築学会構造系論文集, 63 巻, 510 号, pp. 83-89(1998)
- 2) 村上仁宣, 本間俊雄, 横須賀洋平: ホタルアルゴリズムを用いた鋼構造骨組の最小重量最適ブレース配置問題, 日本建築学会研究報告九州支部(2017)
- 3) 李 有震, 吉富 信太, 上谷 宏二: 鋼構造ブレース付き平面骨組モデルのスパン割りの変化に対する最適解特性, 日本建築学会構造系論文集, 71 巻, 607 号, pp. 95-100(2006)

- *1 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系建築学専攻 准教授 博士(情報科学)
 *2 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系建築学専攻 教授 工学博士