

35. IESO 法を用いた CLT 壁式構造のパターン最適化に関する研究

1310920023 伊藤 卓
指導教員 藤井大地 教授

IESO 法 位相最適化 壁式構造 CLT ボクセル有限要素法 構造形態創生

1. はじめに

近年、製造技術の革新により、建築分野においても、大型の 3D プリンタを用いて建築物や建築物の構成部材を製造する試みが始まっている。今後、このような技術が発展すれば、様々な形態の建築物が建設される可能性がある。一方、力学的に合理性のある構造形態を創生する方法として、位相（トポロジー）最適化手法が普及しつつある。位相最適化手法は新しい形態の建築物や建築物の構成部材を開発するのに適している。

本研究では、近年、注目を浴びている Cross Laminated Timber (CLT) という木質構造材に着目し、位相最適化を行い、壁式構造として利用できないか検討する。

本研究では、位相最適化手法の一つである BESO 法¹⁾と拡張 ESO 法²⁾のアイデアを組み合わせた IESO 法³⁾を用いて建築構造形態の創生を試みているが、一般に、建築構造の位相最適化では、樹木が枝を張るような自然な形態が創生されるが、これが「美」という観点からどのように評価されるかが問題である。四角い箱に四角い窓といった人工的なビル郡の中では、自然の樹木のような形態はむしろ違和感を生じさせる場合もある。そこで、本論文では、位相最適化手法で得られる形態にあえて人工的なデザイン要素を付与することを提案する。本論文では、この人工的なデザイン要素として連続パターンを考える。

2. 人工的デザイン要素の付与方法

次に、ボクセル有限要素法を用いた IESO 法に連続パターン条件を付与する方法を示す。図 1 は、64 個のボクセルに対して、連続パターン条件を付与する場合の要素番号と特性番号（丸数字）を示す。また、図 2 はこれに対応した設計変数番号を示す。

57	58	59	60	61	62	63	64
49	50	51	52	53	54	55	56
41	42	43	44	45	46	47	48
33	34	35	36	37	38	39	40
25	26	27	28	29	30	31	32
17	18	19	20	21	22	23	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8

13	14	15	16	13	14	15	16
9	10	11	12	9	10	11	12
5	6	7	8	5	6	7	8
1	2	3	4	1	2	3	4
13	14	15	16	13	14	15	16
9	10	11	12	9	10	11	12
5	6	7	8	5	6	7	8
1	2	3	4	1	2	3	4

図 1 要素番号と特性番号

図 2 設計変数番号

この場合、設計変数 α_i はすべての要素 ($i=1\sim 64$) について計算される。

次に各設計変数に対するひずみエネルギー感度を次式から計算することになる。

$$e_q = \sum_{k=1}^{n_p} \alpha_{f(q,k)} \quad (q=1, \dots, N_{dgv}) \quad (1)$$

ここに、 e_q は設計変数 q に対するひずみエネルギー感度、 n_p は特性数で、図 1 の連続パターンは 4 で与えられる。また $f(q,k)$ は設計変数番号と特性番号から要素番号を得る関数である。

また、(1) 式の N_{dgv} は設計変数の総数を表し、図 2 の場合 16 となる。

したがって、要素除去ルールは次のように書き換えられる。

$$\rho_i = 0 \quad \text{if} \quad e_{g(i)} < X_{cr}^e \quad ; i=1, \dots, N_L \quad (2)$$

ここに、 $g(i)$ は、要素番号 i から設計変数番号を得る関数であり。図 1 の連続パターン条件の場合、次のようになる。

$$g(1)=1, \quad g(2)=2, \quad g(3)=3, \quad g(4)=4, \quad \dots$$

また、(2) 式の X_{cr}^e は、 e_q に関する閾値で次式から計算される。

$$X_{cr}^e = e_{av} - \eta \cdot \phi^e \quad (3)$$

ここに、

$$e_{av} = \frac{1}{N_{dgv}} \sum_{q=1}^{N_{dgv}} e_q \quad \phi^e = \sqrt{\sum_{q=1}^{N_{dgv}} (e_q - e_{av})^2 / N_{dgv}} \quad (4)$$

なお、 η の計算法は、IESO 法では、BESO 法と同様に各ステップの要素除去率をデータとして与え、この除去率を近似的に満たす η をプログラ 2) ム内で自動計算する。

3. 解析例

3.1 壁式構造の例題

まず、図 3 の解析を行う。解析は連続パターン条件を付与する方法を用いる。図 3 の壁式構造の寸法は、15m × 9.6m、要素分割数 300 × 198 × 2 の解析モデルである。各階層に等分布荷重と Ai 分布より算出した地震力である水平力をかけている。底面の拘束条件は完全拘束である。また、目標体積比は 0.7 としている。

図 4 は除去率 0.03, 影響半径倍率 3 で解析を行い, STEP 数は 15, コンプライアンス比は 2.06 である. 図 5 は除去率 0.05, 影響半径倍率 3 で解析を行い, STEP 数は 10, コンプライアンス比は 2.22 である.

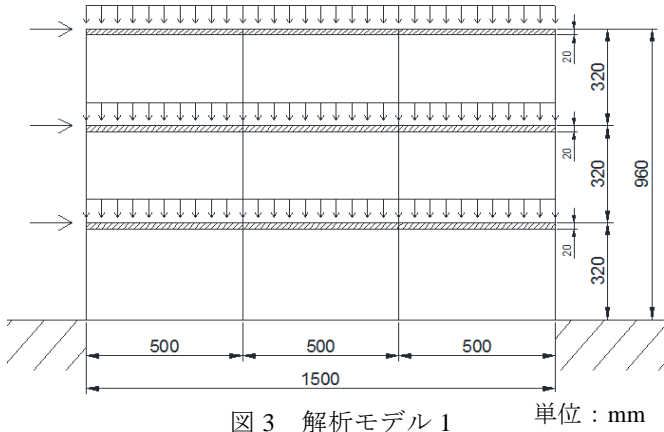


図 3 解析モデル 1

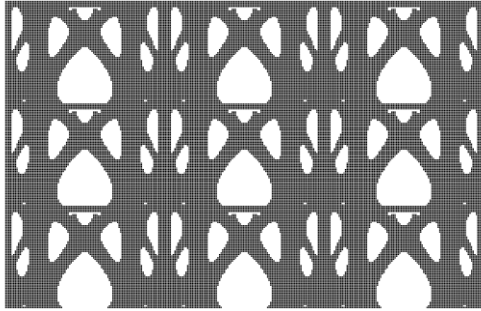


図 4 解析結果 1

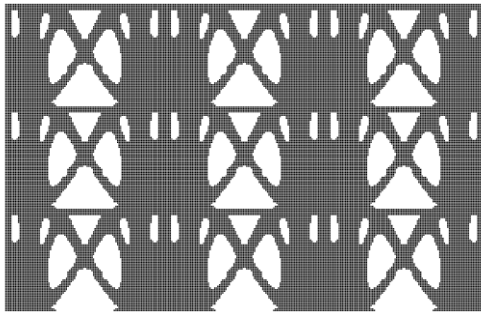


図 5 解析結果 2

3.2 水平力のみを与えた例題

次に, 図 3 の解析モデルの 1/9 サイズを解析する. 1 パターンのみ解析を行い, ラーメン構造にはめ込むことで, 建物のファサードデザインを設計できるか検討する.

まず, 図 6 の解析を行う. 解析は連続パターン条件を付与する方法を用いる. 分割要素数は $240 \times 150 \times 2$ の解析モデルである. 上面に水平力を与える. 底面の拘束条件は完全拘束である. また, 目標体積比は 0.7, 除去率は 0.05, 影響半径倍率は 3 としている. 図 7 は, 縦方向に 2 分割したモデルを解析したものである. 図 8 はラーメン構造にはめ込んだ建物のファサードデザインである.

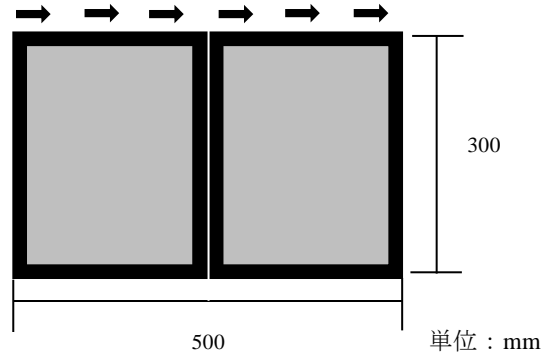


図 6 解析モデル 2

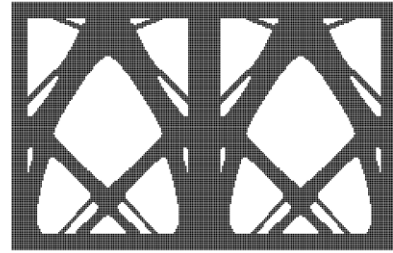


図 7 解析結果 3

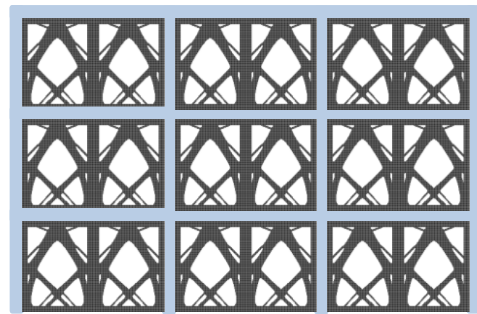


図 8 ファサードデザイン

4. 考察

本論文では, IESO 法を用いて, CLT 壁式構造の位相最適化を行った. 人工的なデザイン要素として連続パターン条件を付与することを提案し, その有効性を検討した.

その結果, 連続パターン条件を付与することで, より人工的なデザインとなり, あまり違和感を生じさせることのないデザインを得ることができた. また, CLT は木質構造材であるため, 加工も容易にできると考えられるが, 今後, 生産地術が発達すれば, このような形態創生で得られた形態を忠実に再現し, CLT 以外の材料でも可能になると考えられる.

5. 参考文献

- 1) Huang, X., Xie, Y.M. : Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.43, pp.1039-1049, 2007
- 2) 崔昌禹, 大森博司, 佐々木睦朗: 拡張 ESO 法による構造形態の創生—三次元構造への拡張—, *日本建築学会構造系論文集*, 第 576 号, pp.79-86, 2004.2
- 3) 新内洋平, 松本慎也, 藤井大地: 改良型 ESO 法を用いた 3 次元構造物の位相最適化, *日本建築学科構造系論文集*, Vol.82, No.723, pp.851-858, 2016.5