準最適解を含む５層ラーメン骨組の最適解の特性
Characteristics of Optimal Solutions Including Semi-optimal Ones for Five-stories Rigid Frame

○宮本　東樹[*1]，満田　衛資[*2]
Toju MIYAMOTO[*1] and Eisuke MITSUDA[*2]

*1 京都工芸繊維大学　大学院生
Graduate Student, Kyoto Institute of Technology
*2 京都工芸繊維大学　教授・博士(工学)
Prof, Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng

キーワード：最適設計; 鉄骨造骨組; 最適解特性
Keywords: Optimal design; steel frame; characteristics of optimal solution.

1. 研究の背景と目的

構造躯体に使用される鋼材量、施工に掛かるコストといった目的関数値を最小化する最適化問題に関する研究は古くから行われてきた[1]。建築物の規模から、使用する建築材料の量や、スパン割、スパン長さといった最適な構造計画を逆算する研究[2]も行われており、実建築物の設計においても様々な場面で最適化技術は利用されている。

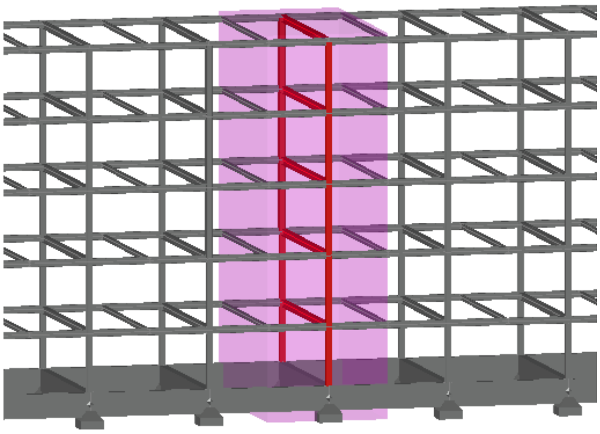
最適化によって、高精度の自動設計が可能になるという期待は大きいが、最適化を行うにしても建物固有の条件を把握・整理した上でモデル化を行わねばならず、構造設計者の経験やセンスが引き続き求められている。

本研究はあくまでも設計者による実務設計のプロセスを尊重する立場をとり、構造設計者の思考の助けとなる情報の獲得を目指している。階高、スパンによる最適解の特性を把握することができれば、設計者は許容応力度や変形といった複雑に絡み合った構造性能の要求を細かく検討することなく、効率的な初期設計を行える。

本報告では、5 層 1～3 スパンの鉄骨ラーメン骨組の最適解における階高とスパンに関する特性を準最適解にも着目しながら述べる。

2. 最適化データの収集

本研究では、建物内で共通の鉄骨平面ラーメン骨組が同一方向に 6～8m 間隔で無限に並ぶもの (図 1) と仮定し、その共通の平面ラーメン骨組について規格断面リスト[4]の中で最適化を行い、その最適解の柱梁の組み合わせを収集した。本報告では高さ 15m、等スパンのモデルについてのみ調査を行い、左右対称な部材配置となるようにグルーピングを行っている。一階柱の柱脚はピン固定とし、基礎梁は RC 梁 1200mm×400mm とした。柱は正方形角形鋼管、梁はＨ形鋼とし、それらの断面を規格断面リスト[3]の中から選択する。鉄のヤング係数を、E＝$2.05\times10^5 N/mm^2$、コンクリートのヤング係数を、E_c＝$2.05\times10^4 N/mm^2$、鋼材の基準強度を、F＝$235\ N/mm^2$、鋼材の密度をρ＝$7850\ \mathrm{kg}/m^3$とした。また、本論では地域係数Z＝1.0、振動特性係数$R_t=1.0$で固定し、構造設計ルート 2 を想定した許容応力度設計を行うため、標準せん断力係数$C_0=0.2$とした。



最適化する骨組
最適化する骨組に作用する荷重の範囲
図１　５層１スパンのモデルの場合

以下に本論文で登場するモデルを示す。

表１　本論文で対象としたモデル

階数	スパン数	階高(m)		スパン(m)
		1階	2~5階	
5	1~3	3	3	6,8,10,12
		3.5	2.875	
		4	2.75	

日本建築学会情報システム技術委員会
第44回情報･システム･利用･技術シンポジウム論文集，367-370，2021年12月，京都
Proceedings of the 44th Symposium on Computer Technology of Information，
Systems and Applications，AIJ，367-370，Dec.，2021，Kyoto

モデルに作用させる荷重は以下の通り。

—鉛直荷重

床荷重 7 kN/m^2（デッキプレート、コンクリートスラブ、仕上げ、積載荷重含む）＋ 柱梁の自重

—水平荷重

最適化する構面方向の Ai 分布から求めた地震力

本研究の最適化では、骨組に使用される鉄骨の体積を最小化する。制約条件には、地震時の層間変形制約、長期と地震時の応力度制約、柱せいが直下の柱の柱せいを超えないための制約、全体崩壊系を意識して、柱及び梁の接合部に関する最大曲げモーメントの制約を与えた。最適化問題は以下で表される。

$$\mathit{Minimize}\quad \{l\}^T\{A\}$$

Subject to

— 地震時の層間変形制約

$$h_i/200 \geqq \delta_i$$

—柱の圧縮＋曲げモーメントの制約（長期及び短期）

$$1 \geqq \sigma_b/f_b + \sigma_c/f_c$$

—梁の曲げモーメントの制約（長期及び短期）

梁の横座屈に関しては、横補剛を施すものとして考慮していない。

$$f_b \geqq M/Z$$

—梁の剪断力の制約（長期及び短期）

$$f_s \geqq Q/A_w$$

—柱せいの制約

$$B_{i-1\,k} - B_{ik} \geqq 0$$

—柱及び梁の接合部に関する制約

$$\sum M_{pc} - 1.5\sum M_{pb} \geqq 0$$

$\{l\}$：部材長の値を並べたベクトル

$\{A\}$：断面積の値を並べたベクトル

δ_i：ｉ層の層間変位（m）　h_i：ｉ層の高さ（m）

σ_b：材端の曲げ応力度（N/mm^2）

σ_c：圧縮応力度(N/mm^2)

f_b：許容曲げ応力度（N/mm^2）

f_c：許容圧縮応力度　（座屈の低減を含む）（N/mm^2）

M：曲げモーメント（材端と部材中央の曲げモーメントのうちの最大値）（N・mm²）

Z：断面係数（mm^3）

f_b：許容曲げ応力度　（N/mm^2）

Q：せん断力（N）

A_w：ウェブの断面積（mm^2）

f_s：許容せん断応力度（N/mm^2）

B_{ik}　：ｉ層ｋ番目の柱せい（mm）

$\sum M_{pc}$　：　対象の接合部の柱の材端に生じうる最大の曲げモーメント（$N\cdot m$）の合計

$\sum M_{pb}$　：　対象の接合部の梁の材端に生じうる最大の曲げモーメント（$N\cdot m$）の合計

柱の剪断力、梁の長期たわみについては、制約に掛からない傾向が強く、最適化問題の中に含めず、梁のたわみについては、最適化後のチェックで済ませている。

本研究の最適化は、規格断面リスト[]の中から断面を選ぶという離散的なものであるため、発見的手法を採用している。具体的にはアリコロニー最適化手法に基づいた MIDACO-SOLVER[4] という汎用ツールを利用した。図２は３つのモデルで初期解を目的関数値が最小となるものと最大となるものの２種類を用意し、それぞれから試行回数 300 万回で最適化を行った際の目的関数値の推移を示したものである。300 万回ではほぼ同じか、全く同じ解に収束しており、試行回数は 300 万回で妥当だといえる。

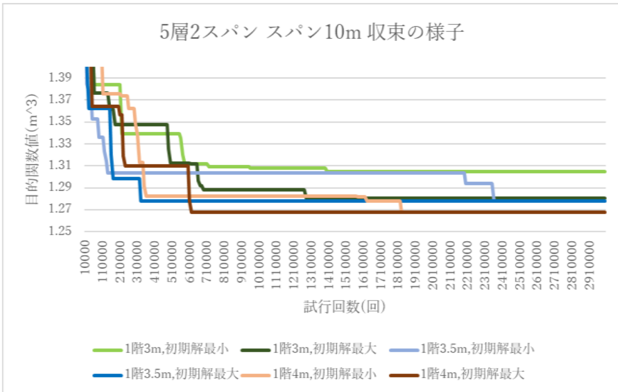


図２　MIDACO-SOLVER での収束の様子

3. 準最適解にも着目した５層ラーメン骨組の最適解特性

本報告では、(ⅰ)最適解第４位の目的関数値/第１位の目的関数値、(ⅱ)目的関数/延床面積、(ⅲ)最適解の骨組の剛度について記す。

(ⅰ)最適解第４位の目的関数値 / 第１位の目的関数値

表２ 最適解第４位の目的関数値 / 第１位の目的関数値

	スパン数	1			2			3		
	奥行(m)	6	7	8	6	7	8	6	7	8
6m スパン	1階3m	1.147138	1.022933	1.02745	1.033819	1.015933	1.016062	1.004282	1.005656	1.004023
	1階3.5m	1.015076	1.042756	1.073188	1.058393	1.006936	1.178187	1.066233	1.052501	1.014155
	1階4m	1.018501	1.003653	1.078208	1.042944	1.004858	1.01955	1.015688	1.043861	1.008459
8m スパン	1階3m	1.179273	1.026233	1.013157	1.010132	1.071846	1.011796	1.01028	1.014039	1.013977
	1階3.5m	1.030982	1.012824	1.018375	1.037732	1.010533	1.012892	1.012448	1.005344	1.002519
	1階4m	1.033681	1.239564	1.011948	1.034642	1.016032	1.063027	1.007666	1.011032	1.005745
10m スパン	1階3m	1.010412	1.021793	1.002723	1.012464	1.197351	1.026457	1.007093	1.012431	1.014028
	1階3.5m	1.006784	1.053203	1.003696	1.066463	1.030547	1.186286	1.012812	1.004848	1.015941
	1階4m	1.005369	1.01032	1.004224	1.040236	1.018174	1.006963	1.032594	1.020634	1.007978
12m スパン	1階3m	1.039532	1.011603	1.004848	1.009068	1.009771	1.019504	1.004911	1.004271	1.008272
	1階3.5m	1.011264	1.02705	1.004667	1.030015	1.017755	1.026562	1.014121	1.007946	1.012067
	1階4m	1.015236	1.012603	1.011113	1.009296	1.042852	1.004041	1.00318	1.0105	1.032444

表 2 は各モデルで制約条件を満たす解のうち、目的関数値の値が 4 番目に小さいものと最小のものの比を記したものである。数値の大小により大きなものが赤、小さなものが緑となるようにグラデーションを施している。ここから分かるように、スパン数が 3 の場合や 12m という長めのスパンのモデルでは最適解第 4 位でも第 1 位の目的関数値との誤差が 1%前後となっている。それに比べてスパン数が 1, 2 でスパン 8m 以下のモデルでは 1%を越えるものが多い。また、階高割による差、奥行きによる差は確認できない。

スパン数が多いと部材数、つまり設計変数が多くなるため、他のモデルに比べて最適解近傍の解も多くなり、第 4 位と第 1 位の差がそれほど大きくならない。

一方、12m といった長めのスパンの場合には、梁の材長が長くなるため、断面の違いによる目的関数値の差が大きく表れると予想できるが、これとは相反する結果となった。スパンが大きくなると、目的関数値そのものも大きくなるため、第 4 位と第 1 位の比率で見ると差がでにくいのだと考えられる。

(ⅱ) 目的関数値 / 延床面積

図 3 は本報告に登場する全てのモデルの目的関数値/延床面積の値を、それぞれスパン数、奥行長さ(最適化する骨組同士の間隔)で分け、横軸にスパン長、奥行方向に 1 階階高、縦軸にその値を 3D 棒グラフで表現したものである。

図 3 を見て明らかなように、スパン数、奥行長さに関わらず、6m スパンでこの値が最も大きくなり、10m、12m スパンで最小となることがほとんどである。本報告には登場しないが、以前の筆者らの報告[5]では 2 層骨組では 10m スパンで最も効率が良いと結論付けており、やはりスパンが長いほど有利というわけではなく、10m、12m といったスパンが鉄量の効率が良いと予想できる。

また、奥行長さが大きくなるにつれて、この値が小さくなることから、最適化するフレーム同士の間隔も 6m や 7m ではまだ鉄量の効率が悪いといえる。

その他、スパン数が大きくなるほどこの値は小さくなりやすく、階高割による影響はほとんど差なかった。

(ⅲ)最適解の骨組の剛度

表 3 は 5 層 3 スパン、奥行長さ 6m のモデルの上位解の剛度の表である。 モデルは左右対称のため、中央の部材までの表記にしている。本報告では、分かりやすく剛度の分布を分析するために、骨組を最小のラーメン、つまり柱 2 本、梁 1 本の積み重ねと捉え、この最小ラーメンの剛度に着目した。表中の□の中の値は、その最小のラーメン、つまりその周りの柱 2 本と梁 1 本の剛度の合計値であり、その数値の大小により小さなものが赤、大きなものが青となるようにグラデーションを施している。

筆者らは最適解にはある程度の解パターンがあると仮説を立て、スパンや階高によって優秀な解パターンが異なり、これが準最適解に表れるのではないかと考えている。

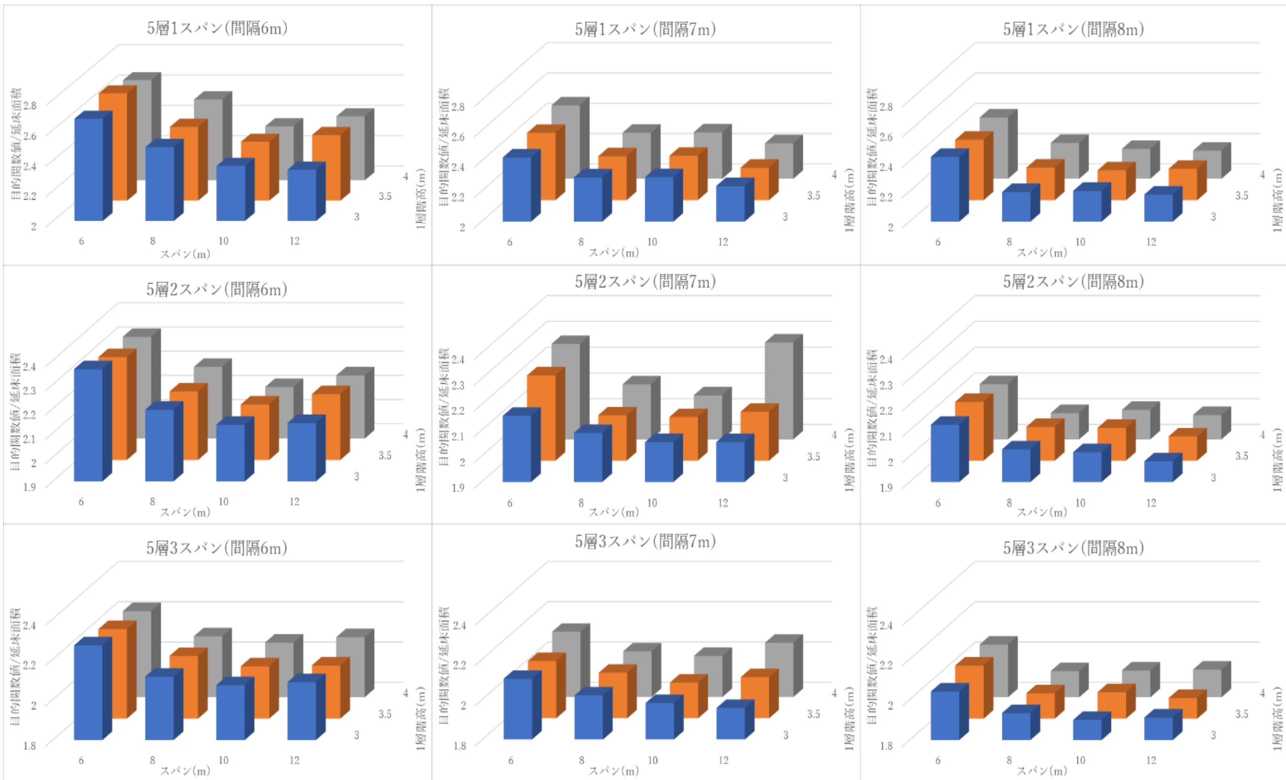


図 3 目的関数値/延床面積

多くの場合、一層中央の剛度が最も大きく、最下層の凸型の部分で剛度が大きい。外側の５つの最小ラーメンについては、5 層~1 層の順に剛度が大きくなっているが、中央列ではたまにこの順番に逆らったものが現れる。

剛度の分布について、剛度の最も大きな最小ラーメンがどこに分布しているかによって図 4 のように白、黄、緑で色分けをした。全 60 種の解のうち、白が 48 個、黄が 8 個、緑が 3 個となり、これが解のパターン分けの 1 例となると考えている。

4. まとめ

（ⅰ)最適解と準最適解との目的関数値の差は 3 スパンや 12m スパンになると誤差 1%前後となる。

（ⅱ)目的関数値/延床面積の値は、6m スパンで最も大きな値となり、10m、12m スパンで鉄量の効率が良い傾向にある。また、階高割りの影響は少ない。

(ⅲ)最適解の骨組は、中央の最下層の凸型の部分に剛度が集中しやすく、外側のラーメンは例外なく上にいくにつれて小さな剛度となっている。

筆者らは、設計の選択を最適解ただ 1 つに限定するのではなく、最適解でなくても、ほぼ同等の効率性を有した解も選択肢から漏れないようにすべきであると考えている。発見的手法による最適化によって、上位解の中にバリエーションが見られた。引き続き準最適解を含めた最適解の特性を調査し、構造設計者に還元できる情報の獲得を目指す。

色								
							1位	
	1位		1位		1位			

図 4　剛度の分布による色分け

［参考文献］

1) 棚橋諒、中村恒善：THE MINIMUM WEIGHT DESIGN OF A CLASS OF TALL MULTI-STORY FRAMES SUBJECTED TO LARGE LATERAL FORCES, 日本建築学会論文報告集,第 118 号,1965.12

2) 李有震、吉富信太、上谷宏二：鋼構造平面骨組モデルの最適解の特性を用いた構造計画に関する研究、構造工学論文集,B 50, 215-220,2004 日本建築学会

3) 日本製鉄建築用資材ハンドブック 2019 年改訂版

4) M.Drigo:"Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem",IEEE Transactions on Evolutionary Computation,Vol.1,No.1,1-24(1997)

5) 宮本東樹、満田衛資：鉄骨ラーメン骨組の最適解における階高とスパンに関する特性, 日本建築学会近畿支部報告集 2021

表 3　5 層 3 スパン(奥行き 6m)の上位解の剛度