

工場製作コストを考慮した鋼構造建築骨組の  
最小コスト設計に関する研究

A study on the minimum cost design of steel frames  
considering the fabrication cost

2010 年

広島大学 清水齊

## 目次

第 1 章	序論	p. 1
	1.1 本研究の背景と目的	p. 2
	1.2 本論文の概要	p. 4
	1.3 審査付発表論文リスト	p. 6
第 2 章	鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数の算出	p. 7
	2.1 序	p. 8
	2.2 鉄骨工事コストの分類	p. 9
	2.3 鉄骨製作の労務時間アンケート	p. 9
	2.3.1 一次加工労務時間	p. 10
	2.3.2 組立労務時間	p. 10
	2.3.3 溶接労務時間	p. 11
	2.4 鉄骨製作コストの評価手法	p. 11
	2.4.1 鉄骨製作コストの価式	p. 11
	2.4.2 一次加工労務時間の評価式	p. 12
	2.4.3 組立労務時間の評価式	p. 12
	2.4.4 溶接労務時間の評価式	p. 13
	2.4.5 情報労務時間の評価式	p. 14
	2.5 労務時間資料に基づいた鉄骨工事コストの分析	p. 15
	2.5.1 鉄骨製作会社による労務時間資料	p. 15
	2.5.2 労務時間資料の分析	p. 15
	2.5.3 労務時間資料に基づく労務時間係数の算出	p. 18
	2.5.4 評価式による実物件骨組の鉄骨製作コスト試算	p. 20
	2.6 鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数のまとめ	p. 22
第 3 章	鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法	p. 23
	3.1 序	p. 24
	3.2 合計コストの評価手法	p. 24
	3.2.1 鋼材コストと鉄骨製作コスト	p. 24
	3.2.2 労務時間係数	p. 24
	3.3 構造設計とそのコスト評価	p. 25
	3.3.1 構造設計方針	p. 25
	3.3.2 設計骨組の構造性能	p. 27
	3.3.3 設計骨組の鉄骨製作労務時間と鋼材重量	p. 30
	3.3.4 設計骨組の合計コスト	p. 30
	3.4 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法のまとめ	p. 33

第 4 章	ラーメン骨組の最適設計における遺伝アルゴリズムの改善提案	p. 34
4.1	序	p. 35
4.2	最小重量設計問題と最小コスト設計問題の定式化	p. 36
4.2.1	最小重量設計問題	p. 36
4.2.2	最小コスト設計問題	p. 37
4.2.3	無制約最小化問題への変換	p. 37
4.3	計算手法	p. 38
4.3.1	改善前 GA	p. 38
4.3.2	一次元直線探索	p. 38
4.4	数値検証に用いる解析モデル	p. 40
4.4.1	3層3スパン平面骨組	p. 40
4.4.2	5層3スパン平面骨組	p. 40
4.5	解析結果	p. 41
4.5.1	改善前 GA の解析結果	p. 41
4.5.2	改善後 GA の解析結果	p. 43
4.6	最適設計における遺伝アルゴリズムの改善提案のまとめ	p. 49
第 5 章	GAによる最小コスト設計解の実施設計への適用性	p. 50
5.1	序	p. 51
5.2	計算手法	p. 52
5.2.1	コスト評価式	p. 52
5.2.2	最小コスト設計と最小重量設計	p. 52
5.3	設計例	p. 52
5.3.1	8層4スパン平面骨組	p. 52
5.4	設計結果	p. 55
5.4.1	GAを用いた最適化設計プログラム解の収束傾	p. 55
5.4.2	設計解の合計コスト, 鋼材重量, 最大層間変形角, 崩壊荷重係数の傾	p. 57
5.4.3	設計解の部材配置	p. 60
5.4.4	設計解における 部材応力度の許容応力度に対する比率	p. 63
5.4.5	設計解のヒンジ発生状況	p. 66
5.5	実施設計への適用性に関するまとめ	p. 69
第 6 章	結論	p. 70
6.1	結論	p. 71
6.2	今後の展開と課題	p. 72
6.3	おわりに	p. 73

参考文献..... p. 74

謝辞..... p. 76

付録..... p. 77

# 第1章 序論

- 1.1 本研究の背景と目的
- 1.2 本論文の概要
- 1.3 審査付発表論文リスト

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景と目的

#### 1.1.1 最小コスト設計のための鉄骨製作コスト評価手法の提案

鋼構造建築骨組の構造設計では、その簡便さから鋼材重量と鋼材単価に基づくコスト試算により、計画建築物のスパン長や、部材断面の決定を行なうことが一般的に行なわれている。その結果、鋼材重量を低減する設計が優先される傾向にあり、鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状が反映されていない。一方で、鋼材単価が高くなると、接合部が多少複雑で製作難易度が高くても、鋼材量の少ない設計が、鋼材単価が低くなると、鋼材量が多くても、接合部が単純な設計が経済的であることを、構造設計者は経験的に学んでいる。しかし、このような構造設計方針の決定は個人差や主観的な部分が多く、目的とした設計が達せられているか評価できていない状況にある。これは、実務構造設計の現場で鉄骨製作の実状とコストが十分に把握されていないことに一因がある。鉄骨製作コストには、孔あけ、スカラップ、開先、組立、溶接の労務費、図面作成費等多数の項目が関わり、それぞれ単価算出式は異なり複雑である。そのため、設計段階における厳密な積算は難しいのが実情である。

鉄骨製作コスト評価に関する既往の研究としては、次のものがある。K. Jaramai<sup>1)</sup>は、鋼材コストと鉄骨製作労務時間に基づく鉄骨製作コスト評価式を提案している。L. Pavlovic<sup>2)</sup>は、鋼材コスト、鉄骨製作コスト、建方コスト等、鉄骨工事全体にわたる詳細なコスト評価式を提案している。このように、海外では鉄骨製作コストに着目した研究が幾つか行われているが、それらの提案手法は精密であり、設計者が設計段階で用いるには複雑すぎると考えられる。また、国内では鉄骨製作コスト評価に関する研究は、著者の調査の範囲では、皆無であり、鉄骨製作の実状を考慮した、コスト評価に関する研究は十分とは言えない。

そこで、本論文では、鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状を反映したコスト試算により、スパン長や、部材断面の決定を行なう最小コスト設計を実現するため、鉄骨製作の難易度を適切に考慮でき、かつ簡易な鉄骨製作コスト評価手法を提案する。さらに、鋼構造建築骨組の設計に鉄骨製作コスト評価手法を適用し、鉄骨製作コスト評価が部材断面の決定や、骨組の構造性能に及ぼす影響を考察し、従来の鋼材重量と鋼材単価のみのコスト評価に基づく設計よりも、鉄骨製作コストを評価した設計が推奨されることを示す。

#### 1.1.2 最小コスト設計のための最適設計プログラムの改善提案

鋼構造建築骨組の構造最適化に関する既往の研究は、部材断面最適化を中心として多数存在するが、構造設計の状況と同様に、そのほとんどが構造重量最小化問題<sup>3)~5)</sup>を取り扱っている。最小コスト設計に関する既往の研究としては、大崎によるトラスの節点コストを評価した最小コスト設計<sup>6)</sup>がある。また、藤谷、松本<sup>7)</sup>は、剛節と半剛節骨組の接合部のコスト関数を定式化し、最小コスト設計を行っている。このように、既往の研究はいくつか存在するが、鉄骨製作の実状を考慮した、最小コスト設計に関する研究は十分とは言えない。

また、既往の構造最適化の研究における部材断面最適化の際、その単純さから断面性能又は断面寸法の連続変数近似を利用する等、連続変数最適化問題とする研究が行われてきた<sup>例えば4)8)</sup>

~12). しかし、実際の構造設計の問題は、規格断面リストから適切な断面を選定するいわゆる離散断面最適化問題となり、最近では、離散断面最適化問題を取り扱う研究も多い。また、連続変数最適解を出発点とした離散断面最適化手法の研究も行われている(例えば5)13)~15)。離散断面最適化問題に対して、大域的最適解が得られることを理論的に保証することができる解法として例えば列挙法(例えば16),17)や分枝限定法(例えば18)がある。しかし、問題の規模が大きくなると膨大な計算が必要なため、大規模問題には適用できない。一方、大域的最適解が得られることを理論的に保証できないが、列挙法や分枝限定法より計算負荷が少ない手法として種々の発見的手法が提案されている。発見的手法には焼きなまし法(例えば19)等の単点探索法、遺伝的アルゴリズム(例えば6)20)~27)(以降では、GA と呼ぶ。)等の多点探索法が挙げられる。GA は、感度解析が不要なため、微分不可能な関数であっても数式化さえできれば、どのような問題にも対応できるという長所を有していることから、様々な問題に適用されてきた。

本論文では、GA のこの特性に着目し、前述の鉄骨製作コスト評価法を用いた離散断面最適化問題としての最小コスト設計に GA を適用する。しかし、従来の GA は、交叉による探索が、初期個体群の遺伝子に依存するため、一般に、交叉の探索範囲は、大きな設計空間の中の一部となる。そのため、交叉で探索できない領域を突然変異によりカバーするしくみとなっている。しかし、突然変異は、個体の遺伝子をランダムに変更するものであり、探索の効率は悪い。そのため、例えば、骨組の規模が大きく設計変数が多い問題や、複雑な問題に GA を適用する場合には、探索効率の改善が必要である。GA の改善については、傾斜法(例えば28)、局所探索法(例えば29)~31)、応力による断面変更(例えば32)~33)などを GA の中に組み込んだハイブリッド GA が提案され、その有効性が示されている。しかし、例えば、傾斜法によるハイブリッド GA では、一般に、探索の初期の段階で、局所的な探索が進みすぎ、局所最適解に収束しがちであることが指摘されている<sup>28)</sup>。ここで問題となるのは、最小重量設計における重量関数は、部材重量の変化が関数値の変化として直接的に反映されるのに比べて、本研究で対象とする最小コスト設計で用いるコスト関数は、部材の変更が、重量のみでなく製作コストにも影響し関数値の変化が複雑であり局所解が多いことである。実務の構造設計に GA を用いた最適設計プログラムを適用するためには、GA の探索効率をさらに改善する必要がある。そこで、本論文では、GA の交叉や突然変位に加えて、ランダムに選んだ設計変数の座標軸方向への直線探索を組み込んだ GA プログラムの改善を提案する。

前述したように GA では大域的最適解が得られることを理論的に保証できないため、改善効果の評価が難しい。本論文では、列挙法により求めた厳密解への収束性や到達率を計算して、改善効果を定量的に評価する。さらに、改善した最適設計プログラムを設計例に適用し、その最小コスト設計解が、実施設計への適用性に関して、部材断面の決定状況や骨組の構造性能の面から、最小重量設計解よりも推奨されることを示す。

## 1.2 本論文の概要

本論文は、

第1章 序論

第2章 鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数の算出

第3章 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法

第4章 鉄骨骨組の最適設計における遺伝的アルゴリズム (GA) の改善提案

第5章 GAによる最小コスト設計解の実施設計への適用性

第6章 結論

の6章構成となっている。大きな構成としては、第2章と第3章は鉄骨製作コスト評価に関する章、第4章と第5章は最小コスト設計のための最適化プログラムに関する章である。第2章と第4章はコスト評価や解析法の提案の章であり、第3章と第5章は、それぞれの前章で提案した手法を実際の構造設計に適用した章である。

第2章以降の各章の概要を以下に示す。

第2章「鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数の算出」では、鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状を反映した最小コスト設計を実現するため、基礎研究として、鉄骨製作コスト評価手法を提案する。まず、鉄骨製作会社を対象として実施した鉄骨製作労務時間のアンケート結果について考察する。さらに、アンケート結果等に基づき鉄骨製作コストの評価式を提案する。次に、鉄骨製作会社から提供を受けた実物件の鉄骨工事コストの労務時間資料を分析し、評価式で用いる労務時間係数を算出する。そして、本評価手法による試算コストと実物件の鉄骨製作コストを比較考察し、本評価手法の妥当性を示す。

第3章「鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法」では、3つの構造設計例に対して、それぞれ断面せいの統一に重点をおいた設計方針Aと、断面せいの統一化は意識せずに鋼材重量縮小に重点をおいた設計方針Bによる合計6ケースについて、仮定断面の設定から最終断面の決定までの設計を実施する。そして、それらの設計結果に対して鉄骨製作コストの評価式を適用して合計コスト（主架構鋼材コストと主架構鉄骨製作労務コストの合計）を算出し、設計方針の違いが建築物の性能や合計コストに与える影響を考察する。

第4章「鉄骨骨組の最適設計における遺伝的アルゴリズム (GA) の改善提案」では、改善前GAの交叉や突然変位に加えて、ランダムに選んだ設計変数の座標軸方向への直線探索を組み込んだGAを提案する。この提案手法（以降では、一次元直線探索と呼ぶ。）を、鋼構造建築骨組の部材断面最適化問題に適用し、一次元直線探索の組み込みによる厳密解への収束性及び到達率の改善効果の検証を行う。なお、厳密解とは、検証のために列挙法により求めた解<sup>12)</sup>である。ここでは2種類の部材断面最適化問題を扱う。一つは最小重量設計問題で、規格断面使用により、鋼材重量が不連続に変化する。もう一つは本論文で主眼としている最小コスト設計問題で、規格断面使用により鋼材コストが不連続に変化することに加えて、接合部のダイアフラム数や溶接接合面積が変化することにより鉄骨製作コストが不連続に変化し、最小重量設計問題より複雑な設計問題である。例示する鋼構造建築骨組は3層と5層の2種類である。骨組の規模と設計問題の複雑さ両面から、提案手法の収束性及び厳密解到達率の改善効果を示す。

第5章「GAによる最小コスト設計解の実施設計への適用性」では、実施設計を想定した8層4スパンの架構に、第4章で改善提案したGAを用いた最適化設計プログラムを適用し、鉄骨製作コストを考慮した最小コスト最適解の実施設計への適用性を示す。最適化設計プログラムで構造設計の完結を目指す考え方もあるが、最適化設計プログラムに設計者の感性を含め建築的な制約条件全てを盛り込むことは、現実的には不可能であると考えている。第3章と第5章は、いずれも実際の構造設計の章であるが、第3章が仮定断面の設定から最終部材断面決定までの設計工程を構造設計者が行なっているのに対し、第5章では最適化プログラムが最もその効果を発揮できると考えている仮定断面の設定部分に適用する場合を示している。ここでは、設計例に改善プログラムを適用し、最小コスト設計解と最小重量設計解の合計コスト、鋼材重量、層間変形角、崩壊荷重係数、部材配置、部材の許容応力度、ヒンジ発生状況の比較を行なう。これにより、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも、構造設計者が日常の設計において合理的であると判断している部材断面配置に近い結果を与えることを示す。

第6章「結論」では、各章で得られた研究成果をまとめている。

### 1.3 審査付発表論文リスト

- ① 清水斉, 澤田樹一郎, 松尾彰, 佐々木尊一, 南波篤志: 鉄骨骨組の製作コストに関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.14, pp.393-400, 2006.11
- ② Kiichiro Sawada, Hitoshi Shimizu, Akira Matsuo, Takaichi Sasaki, Takashi Yasui and Atsushi Namba: A Simple Estimation of Fabrication Cost and Minimum Cost Design for Steel Frames, The 4th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, pp.89-94, November 6-9, 2006, China
- ③ 佐々木尊一, 清水斉, 澤田樹一郎, 松尾彰, 南波篤志: 労務時間記録に基づく鉄骨製作コストの簡易評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.15, pp.79-84, 2007.11
- ④ Kiichiro Sawada, Hitoshi Shimizu, Akira Matsuo, Takaichi Sasaki, Takashi Yasui and Atsushi Namba: A Simple Function to Estimate Fabrication Time for Steel Building Rigid Frames, Design Fabrication and Economy of Welded Structures, International Conference Proceedings 2008, pp.135-141, April 24-26, 2008, Miskolc, Hungary
- ⑤ Kiichiro Sawada, Hitoshi Shimizu, Akira Matsuo, Takaichi Sasaki, Takashi Yasui, Atsushi Namba, Takao Takamatsu and Hiroaki Tamai: Seismic Design of Steel Frames Considering Structural Weight and Fabrication cost, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
- ⑥ Kiichiro Sawada, Hitoshi Shimizu and Akira Matsuo: Enhanced Genetic Algorithm with Randomized Line Search Techniques for Discrete Truss Optimization, 8<sup>th</sup> World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 1 - 5, 2009, Lisbon, Portugal
- ⑦ 清水斉, 澤田樹一郎, 松尾彰: 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法に関する研究, 鋼構造論文集, Vo.16 No.63, pp.49-56, 2009.9
- ⑧ 清水斉, 澤田樹一郎, 松尾彰: ラーメン骨組の最適設計における遺伝アルゴリズムの改善提案, 日本建築学会構造系論文集, No.648, pp.327-336, 2010.2
- ⑨ Hitoshi Shimizu, Kiichiro Sawada, Akira Matsuo: A Line Search Technique in Combined Genetic Algorithm for Optimum Cost Design of Steel Structures, The 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, June 22-25, 2010, Kyoto, Japan

## 第2章 鉄骨製作コストの評価手法と

### 労務時間係数の算出

- 2.1 序
- 2.2 鉄骨工事コストの分類
- 2.3 鉄骨製作の労務時間アンケート
  - 2.3.1 一次加工労務時間
  - 2.3.2 組立労務時間
  - 2.3.3 溶接労務時間
- 2.4 鉄骨製作コストの評価手法
  - 2.4.1 鉄骨製作コストの評価式
  - 2.4.2 一次加工労務時間の評価式
  - 2.4.3 組立労務時間の評価式
  - 2.4.4 溶接労務時間の評価式
  - 2.4.5 情報労務時間の評価式
- 2.5 労務時間資料に基づいた鉄骨工事コストの分析
  - 2.5.1 鉄骨製作会社による労務時間資料
  - 2.5.2 労務時間資料の分析
  - 2.5.3 労務時間資料に基づく労務時間係数の算出
  - 2.5.4 評価式による実物件骨組の鉄骨製作コスト試算
- 2.6 鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数のまとめ

## 2.1 序

鋼構造建築骨組の構造設計では、その簡便さから鋼材重量と鋼材単価に基づくコスト試算により、計画建築物のスパン長や、部材断面の決定を行なうことが一般的に行なわれている。その結果、鋼材重量を低減する設計が優先される傾向にあり、鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状が反映されていない。一方で、鋼材単価が高くなると、接合部が多少複雑で製作難易度が高くても、鋼材量の少ない設計が、鋼材単価が低くなると、鋼材量が多くても、接合部が単純な設計が経済的であることを、構造設計者は経験的に学んでいる。しかし、このような構造設計方針の決定は個人差や主観的な部分が多く、目的とした設計が達せられているか評価できていない状況にある。これは、実務構造設計の現場で鉄骨製作の実状とコストが十分に把握されていないことに一因がある。鉄骨製作コストには、孔あけ、スカラップ、開先、組立、溶接の労務費、図面作成費等多数の項目が関わり、それぞれ単価算出式は異なり複雑である。そのため、設計段階における厳密な積算は難しいのが実情である。

鉄骨製作コスト評価に関する既往の研究としては、次のものがある。K. Jaramai<sup>1)</sup>は、鋼材コストと鉄骨製作労務時間に基づく鉄骨製作コスト評価式を提案している。L. Pavlovic<sup>2)</sup>は、鋼材コスト、鉄骨製作コスト、建方コスト等、鉄骨工事全体にわたる詳細なコスト評価式を提案している。このように、海外では鉄骨製作コストに着目した研究が幾つか行われているが、それらの提案手法は精密であり、設計者が設計段階で用いるには複雑すぎると考えられる。また、国内では鉄骨製作コスト評価に関する研究は、著者の調査の範囲では、皆無であり、鉄骨製作の実状を考慮した、コスト評価に関する研究は十分とは言えない。そこで、本論文では、鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状を反映したコスト試算により、スパン長や、部材断面の決定を行なう最小コスト設計を実現するため、鉄骨製作の難易度を適切に考慮できる鉄骨製作コスト評価手法を提案する。まず、鉄骨製作会社を対象として実施した鉄骨製作労務時間のアンケート結果について考察する。さらに、アンケート結果等に基づき鉄骨製作コストの評価式を提案する。次に、鉄骨製作会社(A社)から提供を受けた実物件の鉄骨工事コストの労務時間資料を分析し、本評価式で用いる労務時間係数を算出する。そして、本評価手法による試算コストと実物件の鉄骨製作コストとの差異を考察すると共に、鋼材重量と重量単価に基づいた試算コストよりも、本評価手法による試算コストの精度が高いことを示す。

なお、本研究で対象とする構造形式は、純ラーメン架構である。柱は角形鋼管、梁はH形鋼を使用し、接合部は通しダイアフラム形式、梁継手はブラケット形式のボルト接合である建物を対象としている。左右の梁せいが異なる場合には、内ダイアフラムを設け、上下の柱せいが異なる場合には、プレートの溶接加工により接合部を製作するものとする。

## 2.2 鉄骨工事コストの分類

鉄骨製作コストを評価するにあたって、本論文では、鉄骨製作会社による鉄骨工事コストを表 2.1 に示すような 8 項目に分類する。

一次加工，組立，溶接，情報コストは，主架構骨組の製作に要する労務費であり，製作の難易によって変動するコストである。鋼材コストは鋼材重量に鋼材単価を掛けて算出できるコストである。その他の情報，管理，その他コストは，2 次部材の製作に要する労務費，消耗品費などであり，主架構骨組製作の難易にあまり関係なく発生するコストである。

そこで，本論文では，一次加工，組立，溶接，情報コストを評価の対象とする。

表 2.1 鉄骨工事コストの分類

一次加工	マーキング、空気孔あけ、けがき、摩擦面処理、ボルト孔あけ、切断、スカラップ、開先加工に要する労務費
組立	柱仕口、梁ブラケットの取り付け、柱の大組立、梁貫通スリーブ、水平ネット受けピース、胴縁取り合いピースの組立、歪み直しに要する労務費
溶接	溶接、UT検査に要する労務費
情報	工作図、原寸図(主架構に関する部分)の作成、図面作成のための打ち合わせに要する労務費
鋼材	柱の角形鋼管、細幅H形鋼の鋼材費、間柱、小梁、ダイアフラムなどのプレート類等の鋼材費
その他の情報	工作図、原寸図(小梁、間柱、階段等の主架構以外に関する部分)の作成、図面作成のための打ち合わせに要する労務費
管理	販売・一般管理業務(営業)に要する労務費および諸費用
その他	ケレン、塗装、積込、横持ち、輸送費、製品マーク記入、検査(工場、製品、組立検査等)、電力費、消耗品費(炭酸ガス、エンドタブ、軍手、マスク、ヘルメット等の保護具、工具の部品等)工程・製造管理に要する労務費、副資材(スタッド、塗料、HTB、裏当て金、溶接ワイヤー等)

## 2.3 鉄骨製作の労務時間アンケート

鉄骨製作コストが果たしてどのような要因に依存するのかを明らかにするため、中国地方の鉄骨製作会社 3 社の工場長，製造部長など鉄骨製作労務時間が把握可能な方を対象に鉄骨製作の労務時間アンケートを実施した。表 2.2 に示すように，3 社とも一次加工（孔あけ，摩擦面処理，開先加工，スカラップ加工）は，NC 機等による自動処理である。溶接については，ほとんどが半自動溶接となっており，B 社のコラム-ダイアフラムの溶接のみ自動溶接である。

労務時間アンケートは，全て特定の物件の工作図を提示して，作業内容を部位別に分割し，それぞれに必要な労務時間を詳細に回答いただいたものである。アンケートの内容は付録に添付する。ここでは，鉄骨工事のうち一次加工，組立，溶接の労務時間アンケート結果について示す。

表 2.2 各社の月生産能力等

	A社	B社	C社
月産能力	700t	1500t	1000t
孔あけ加工	自動	自動	自動
摩擦面処理	自動	自動	自動
開先加工	自動	自動	自動
スカラップ加工	自動	自動	自動
コラム-ダイアフラム溶接	半自動	自動	半自動
ダイアフラム-H梁溶接	半自動	半自動	半自動

### 2.3.1 一次加工労務時間

図 2.1 (a) は、ダイアフラム 1 枚の一次加工（マーキング，空気孔あけ，けがき）に要する労務時間の回答結果を示している．図 2.1 (b) は，大梁 1 台の一次加工（切断，ボルト孔あけ，摩擦面処理）に要する労務時間の回答を示している．図 2.1 (c) は，梁ブラケット 1 個の一次加工（切断，孔あけ，摩擦面処理，開先加工，スカラップ加工）の労務時間の回答を示している．大梁，梁ブラケットの一次加工労務時間のばらつきの原因は，A，C 社は，年式は若干異なるが同じメーカーの NC 機を使用しており，B 社は他のメーカーの年式の古いタイプの NC 機を使用しているためであると考えられる．このように一次加工労務時間は各社でばらつきが見られるが，サイズ，または梁せいの大きさによる一次加工労務時間の違いはあまり見られない．従って，一次加工労務時間は，鉄骨重量よりもむしろパーツ数に依存すると推定される．

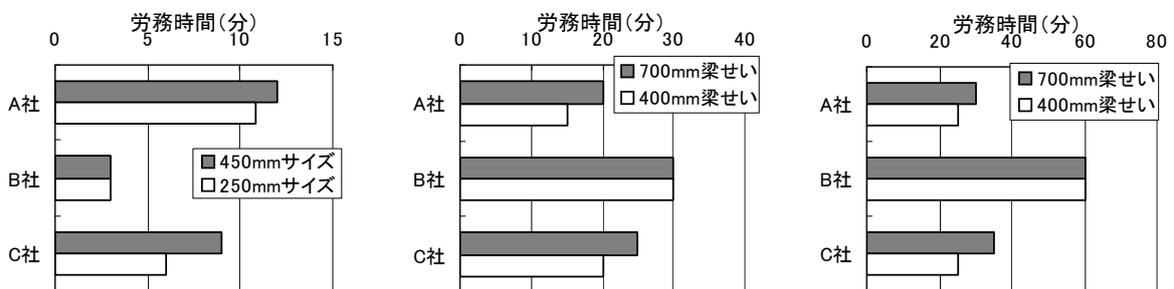


図 2.1(a) ダイアフラム一次加工労務時間 図 2.1(b) 大梁一次加工労務時間 図 2.1(c) 梁ブラケット一次加工労務時間

### 2.3.2 組立労務時間

図 2.2 (a) は，仕口ブロックの組立に要する労務時間とパーツ数との関係をプロットしたものである．アンケートでは，ダイアフラム 2 枚とコラムの合計 3 パーツの標準的な仕口ブロックから，直交する梁の梁せいが異なるため内ダイアフラムが追加された 4 パーツのものや，柱せいの絞込みがあるため 4 枚のプレートを接合する 6 パーツおよび 7 パーツのものを提示し，労務時間の回答を得た．図 2.2 (b) は，梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付けに要する労務時間と梁ブラケットのパーツ数との関係をプロットしたものである．図 2.2 (c) は，柱の大組立に要する労務時間と柱身のパーツ数との関係をプロットしたものである．これらの図より，パーツ数の増加に伴い労務時間も増加する傾向が確認される．柱の大組立で A 社と B, C 社の差が大きくなっているが，この理由について，A 社のアンケートへの回答が次工程待ち時間等を含めて最長でかかる労務時間であるということを確認している．なお，部材サイズの異なるケースについても回答を得たが，部材サイズの違いによる労務時間の差異はほとんど見られなかった（図 2.2 (b), (c) において同じパーツ数のところに大小二つの労務時間のプロットがあるものは，パーツ数が同じで部材サイズが大小異なるものの労務時間を表している）．従って，組立労務時間は，鉄骨重量よりもむしろパーツ数に依存すると推定される．

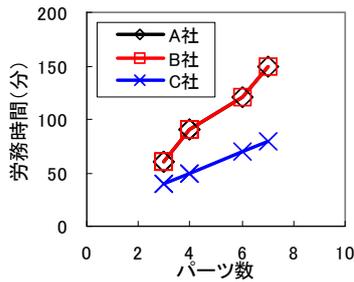


図 2.2(a) 仕口ブロック組立労務時間

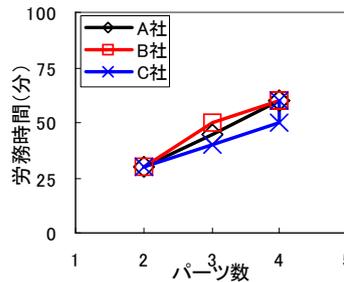


図 2.2(b) 梁ブラケット組立労務時間

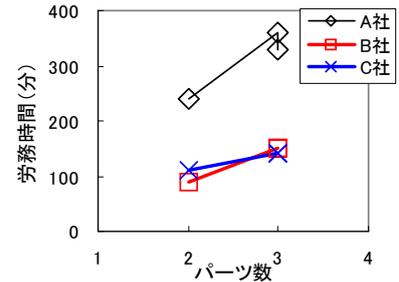


図 2.2(c) 柱大組立労務時間

### 2.3.3 溶接労務時間

図 2.3 (a) は、仕口ブロックの溶接に要する労務時間と接合面積との関係をプロットしたものである。図 2.3 (b) は、梁ブラケットの溶接に要する労務時間と接合面積との関係をプロットしたものである。各社の値のバラツキの原因は定かではないが、接合面積の増加に伴い、溶接労務時間が概ね比例的に増加する傾向が確認される。

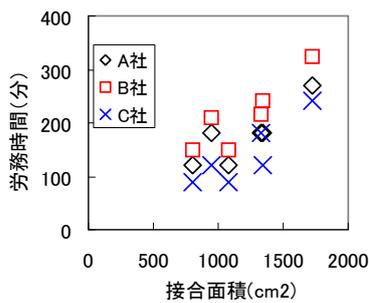


図 2.3(a) 仕口ブロック溶接労務時間

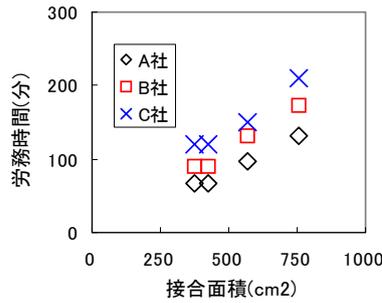


図 2.3(b) 梁ブラケット溶接労務時間

## 2.4 鉄骨製作コストの評価手法の提案

### 2.4.1 鉄骨製作コストの評価式

本研究では、鉄骨製作コスト  $CF$  を一次加工コスト  $CP$ 、組立コスト  $CB$ 、溶接コスト  $CW$ 、情報コスト  $CI$  の総和と考え、(2.1)式で表すことを提案する。一次加工コスト  $CP$ 、組立コスト  $CB$ 、溶接コスト  $CW$ 、情報コスト  $CI$  は、労務単価とそれぞれの労務時間の積で評価する。

$$CF = CP + CB + CW + CI = kf \cdot TP + kf \cdot TB + kf \cdot TW + kf \cdot TI \quad (2.1)$$

ここで、 $TP$  は一次加工労務時間、 $TB$  は組立労務時間、 $TW$  は溶接労務時間、 $TI$  は情報労務時間である。

本研究では、主架構の鉄骨製作コストを対象としており、小梁、階段等の 2 次部材の製作コストや、鋼材コスト、管理コスト等は除いて考えている。

### 2.4.2 一次加工労務時間の評価式

一次加工労務時間は、プレート、H形梁、コラムなどの孔あけ、摩擦面処理、スカラップ、開先等の加工に要する労務時間である。2.3.1に示した一次加工労務時間のアンケート結果より、本研究では、一次加工労務時間  $TP$  を鉄骨重量比例でなく、ダイアフラム、大梁、梁ブラケットのパーツ数に比例すると考え、 $TP$  を次式で評価する。

$$TP = KP \cdot (NP_D + \alpha_{PC} \cdot NP_C + \alpha_{PB} \cdot NP_B) \quad (2.3)$$

ここで、 $NP_D$  はダイアフラム総数、 $NP_C$  は柱総数、 $NP_B$  は大梁総数と梁ブラケット総数の和である。 $\alpha_{PC}$  及び  $\alpha_{PB}$  は、柱及び梁の1パーツの一次加工労務時間が、ダイアフラム1パーツの一次加工労務時間に比して、何倍かかるかを表す係数である。 $KP$  は、一次加工労務時間係数である。一次加工パーツ数の算出例を図2.4(a)に示す。

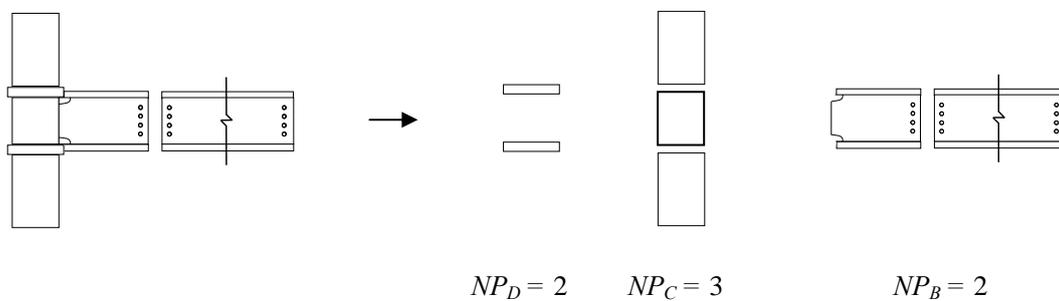


図 2.4(a) 一次加工パーツ数の算出例

### 2.4.3 組立労務時間の評価式

組立労務時間は、仕口ブロックの組立、梁ブラケットの取り付け、柱の大組立に要する労務時間である。2.3.2に示した組立労務時間のアンケート結果より、本研究では、組立労務時間  $TB$  がコラム、ダイアフラム、梁ブラケットのパーツ数に比例すると考え、 $TB$  を次式で評価する。

$$TB = KB \cdot (NB_0 + \alpha_{BC} \cdot NB_C) \quad (2.4)$$

ここで、 $NB_0$  は仕口ブロックのコラム、ダイアフラム、梁ブラケットのパーツ数である。 $NB_C$  は大組立で取り付ける柱身のパーツ数である。 $\alpha_{BC}$  は大組立で取り付ける柱身1パーツの組立労務時間が、他のパーツの1パーツ組立労務時間に比して何倍がかかるかを表す係数である。 $KB$  は組立労務時間係数である。本研究で対象とする構造形式が純ラーメンであり、かつ梁継手はブラケット形式のボルト接合であることから、大梁組立に要するコストの影響が少ないと判断し、大梁組立労務時間は簡略化のため省略している。組立パーツ数の算出例を図2.4(b)に示す。

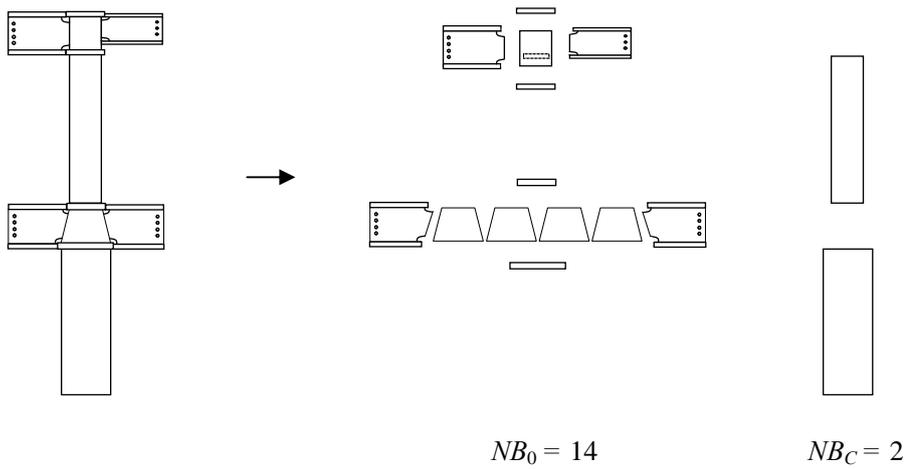


図 2.4(b) 組立パーツ数の算出例

#### 2.4.4 溶接労務時間の評価式

溶接労務時間は、溶接に要する労務時間である。2.3.3 に示した溶接労務時間のアンケート結果より、本研究では、溶接労務時間  $TW$  が、接合面積に比例すると考え、 $TW$  を次式で評価する。

$$TW = KW \cdot \left( \sum_{i=1}^{ND} A_{Di} + \sum_{i=1}^{N_{BB}} A_{BBi} \right) \quad (2.5)$$

ここで、 $A_{Di}$  はダイアフラムとコラムの接合面積、 $ND$  はダイアフラム総数、 $A_{BBi}$  は梁ブラケットとコラムの接合面積、 $N_{BB}$  は梁ブラケット総数である。 $KW$  は溶接労務時間係数である。本研究で対象とする構造形式が純ラーメンであり、かつ梁継手はブラケット形式のボルト接合であることから、大梁に関する溶接労務時間の影響が少ないと判断し、大梁に関する溶接労務時間は簡略化のため省略している。接合面積の算出例を図 2.4(c) に示す。

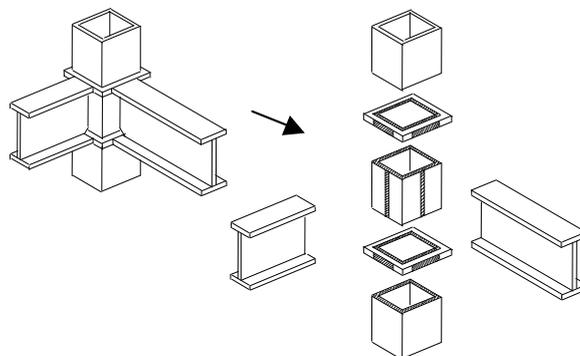


図 2.4(c) 接合面積の算出例

### 2.4.5 情報労務時間の評価式

情報労務時間は、工作図および原寸図の作成、図面作成のための打ち合わせ等に要する労務時間である。そこで、本研究では、柱および梁詳細図に関連する情報労務時間（柱情報労務時間および梁情報労務時間）が、図面枚数を決定付ける柱節総数および寸法の異なる梁総数に比例し、一般図に関連する情報労務時間（一般情報労務時間）が主架構骨組重量に比例するものと仮定し、次式により情報労務時間  $TI$  を評価する。

$$TI = K_{Ic} \cdot N_{Ic} + K_{Ib} \cdot N_{Ib} + K_{Ig} \cdot W \quad (2.6)$$

ここで、 $N_{Ic}$  は柱節総数、 $N_{Ib}$  は寸法の異なる梁総数、 $W$  は主架構骨組重量である。 $K_{Ic}$  は柱情報労務時間係数、 $K_{Ib}$  は、梁情報労務時間係数、 $K_{Ig}$  は一般情報労務時間係数である。柱節総数、寸法の異なる梁総数の算出例を図 2.4(d) 示す。

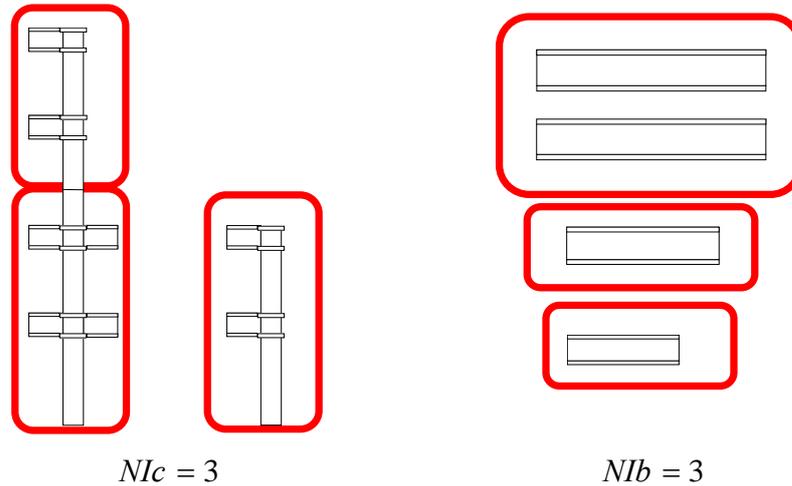


図 2.4(d) 柱節総数,寸法の異なる梁総数の算出例

## 2.5 労務時間資料に基づいた鉄骨工事コストの分析

### 2.5.1 鉄骨製作会社による労務時間資料

鉄骨製作会社（A社）から提供を受けた実物件の鉄骨工事コストの労務時間資料は、労務時間に基づいた見積の基礎資料とすることを目的として、作業員が定期的に各作業内容について詳細な時間計測を行い記録されたものである。実物件の建築種別は、物流センター、レンタカー営業所、情報プラザの4例である。表2.3に各実物件の概要を示す。

表 2.3 実物件の概要

実物件番号	建築種別	延べ面積(m <sup>2</sup> )	階数	スパン		骨組重量(トン)	特徴	製作期間
				X	Y			
1	物流センター	11,000	1 (一部2層)	12	6	237	均等スパン、整形、R屋根(2層部陸屋根)内ダイアフラム多し、ノンスカラップ	2005.12-2006.4
2	レンタカー営業所	75	1	1	2	2.7	整形、小規模、屋根上部に看板、ノンスカラップ	2005.11-2006.2
3	物流センター	7,000	3	10	3	415	均等スパン、整形、片流れ屋根、ハンチ付き梁ブラケットあり	2004.3-2004.6
4	情報プラザ	3,760	6	7	2	213	不均等スパン、内ダイアフラム多し、ガラスファサード、ノンスカラップ	2001.8-2001.11

### 2.5.2 労務時間資料の分析

#### (1) 鉄骨工事コスト

図2.5に各実物件の実績コストの内訳を示す。これらのコストは、労務時間(h)に労務時間単価(2,200円/h)を乗じて計上されるが、鋼材、管理コスト等は重量単価に基づき計上されている。また、以上には外注費も含まれており、外注費は重量単価に基づき計上されている。A社では、外注費を労務単価3,000~3,500円/hで見積もっているため、A社の労務単価2,200円/h相当にするように、外注費に倍率2,200/3,000を掛け、調整している。

本研究では、先に述べたように、鉄骨製作会社における鉄骨工事コストを一次加工コスト、組立コスト、溶接コスト、情報コスト、鋼材コスト、管理コスト、その他コストに分類して考えている。一次加工コストは、孔あけ、摩擦面処理、スカラップ、開先等に要する労務費である。組立コストは、仕口ブロックの組立、梁ブラケットの取り付け、柱の大組立に要する労務費である。溶接コストは、溶接に要する労務費である。情報コストは、工作図および原寸図の作成、図面作成のための打ち合わせ等に要する労務費である。情報コストは、“主架構の製作を行うための情報コスト”と、“小梁や間柱を含むその他鉄骨の製作を行うための情報コスト”を区分するために、本報告では“主架構の製作を行うための情報コスト”を単に情報コストと表現し、“その他の鉄骨製作を行うための情報コスト”をその他の情報コストと表現する。鋼材コストは、柱の角形鋼管、大梁の細幅H形鋼の鋼材費、その他プレート類を含む全ての鋼材費である。管理コストとは、一般管理費等に代表される諸経費であり、販売管理費や減価償却費を含んでいる。その他のコストとは、上記で説明を行ったコストに分類できない残りのコストを集計したコストであり、主な内容は塗装、輸送、歪直し、製品マーク記入等である。

図2.6には、鉄骨工事コストにおける各コストの構成比率を示す。本研究で提案する評価手法の評価の対象としている鉄骨製作コスト(一次加工コスト、組立コスト、溶接コスト、情報コストの合計)は、各物件で10~40%を占めている。実物件3は工作図が他社より支給されて

いたため情報コストから除外している。鋼材コストは、鋼材が一部支給されていた実物件3を除くと、40～70%を占めている。鋼材費の比率が高い理由としては、近年の鋼材コスト高騰の影響によるものと考えられる。その他の情報、管理、その他コストの合計は20%前後を占めている。

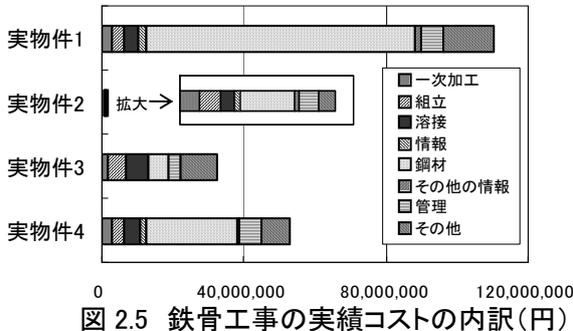


図 2.5 鉄骨工事の実績コストの内訳(円)

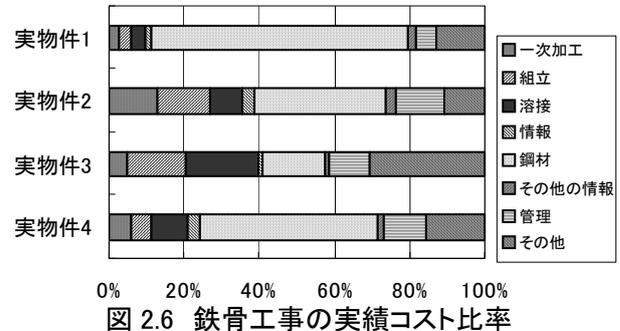


図 2.6 鉄骨工事の実績コスト比率

## (2) 鉄骨製作コスト

図 2.7 に鉄骨工事コストから鉄骨製作コストのみを取り出して、各実物件の比較を行った図を示す。実物件 1, 3, 4 の鉄骨製作コストはほぼ同一で、実物件 2 が最も鉄骨製作コストが安い。表 2.4 に、各実物件の各コストの数値を示す。また、図 2.8 は鉄骨製作コストの中での、各コストの構成比率を示す。前述したように実物件 3 は工作図が他社より支給されていたため情報コストの比率が小さい。各実物件によって各構成比率の変動が大きく、一定の傾向は見られない。これは、労務時間資料から求められる鉄骨製作コストの構成比率は、各実物件の設計内容によって変動するためであると考えられる。

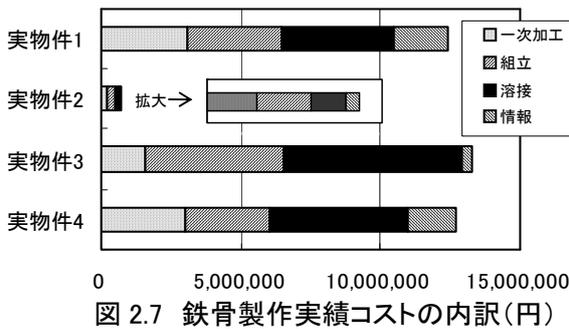


図 2.7 鉄骨製作実績コストの内訳(円)

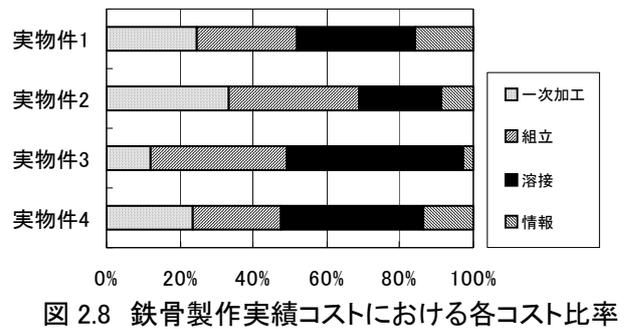


図 2.8 鉄骨製作実績コストにおける各コスト比率

表 2.4 実物件の鉄骨工事实績コストの内訳

	実物件1	実物件2	実物件3	実物件4	y=axの最小自乗近似
加工労務時間	1,399	105	718	1,366	4,736,074
加工コスト(円)	3,078,016	230,007	1,579,600	3,005,252	10,419,362,415
換算パーツ数	1,493	60	1,281	1,260	5,461,210
加工KP	2,062	3,833	1,233	2,385	0.87
組立労務時間	1,549	113	2,260	1,390	8,006,185.26
組立コスト(円)	3,408,827	247,500	4,971,929	3,058,750	17,613,607,581
換算パーツ数	1,703	83	1,429	1,531	7,293,100
組立KBp	2,002	2,982	3,479	1,998	1.10
溶接労務時間	1,823	70	2,885	2,234	1,232,426,106.94
溶接コスト(円)	4,009,984	154,000	6,346,425	4,915,862	2,711,337,435,269
溶接面積(cm <sup>2</sup> )	113,573	2,158	217,200	178,430	91,916,498,002
溶接KW	35	71	29	28	0.013
柱情報労務時間	351	10	51	283	46,288,514
柱情報コスト(円)	771,836	22,000	111,760	623,375	101,834,730
柱節総数	93	6	64	48	10,989
情報KIc	8,299	3,667	1,746	12,987	4.21
梁情報労務時間	343	10	75	385	86,883.73
梁情報コスト(円)	755,057	22,000	164,148	846,009	191,144,212
寸法の異なる大梁の総数	86	7	105	149	29,646
情報KIb	8,780	3,143	1,563	5,678	2.93
一般情報労務時間	191	8	41	108	668,129.66
一般情報コスト(円)	419,476	18,333	90,805	237,476	1,469,885,260
骨組重量(kN)	2,320	26	4,064	2,090	9,750,738
情報KIg	181	703	22	114	0.069
見積コスト合計 (円)	12,443,195	693,840	13,264,667	12,686,723	
評価式試算コスト 合計(円)	12,077,727	483,264	12,302,574	13,085,766	
重量単価試算コス ト合計(円)	9,652,939	108,543	16,912,002	8,699,675	

### 2.5.3 労務時間資料に基づく労務時間係数の算出

#### (1) 一次加工労務時間係数

A社では、切断、開先加工済みのコラムが支給されているため、 $\alpha_{PC}=0$ を設定した。また、図2.1(a)~2.1(c)に示した一次加工労務時間アンケート調査より、A社の梁および梁ブラケットの一次加工労務時間がダイアフラムの一次加工労務時間の約2倍と判断し、 $\alpha_{PB}=2$ を設定した。

一次加工労務時間係数  $KP$  は、4例の実物件の労務時間資料から求めた一次加工労務時間と一次加工換算パーツ数  $(NP_D + \alpha_{PB} \cdot NP_B)$  の関係を最小自乗近似して  $KP=0.87$  時間/パーツと算出した。

図2.9(a)に一次加工労務時間と一次加工換算パーツ数の関係を示す。図2.1(a)~2.1(c)では、部材サイズつまり鉄骨重量による労務時間の差は大きく無いとの結果であったが、図2.9(a)の一次加工労務時間と一次加工換算パーツ数の相関はあまり良くないが、図2.9(b)に示す一次加工労務時間と骨組重量の相関に比べると、やや相関が良いと判断できる。

#### (2) 組立労務時間係数

図2.2(a)~2.2(c)に示した組立労務時間アンケート調査より、A社の柱身の組立労務時間が仕口ブロックや梁ブラケットの組立労務時間の約7倍と判断し、 $\alpha_{BC}=7$ を設定した。

組立労務時間係数  $KB$  は、4例の実物件の労務時間資料から求めた組立労務時間と組立換算パーツ数  $(NB_D + \alpha_{BC} \cdot NB_C)$  の関係を最小自乗近似して  $KB=1.10$  時間/パーツと算出した。

図2.10(a)では、組立労務時間と組立換算パーツ数の相関が比較的良好であ

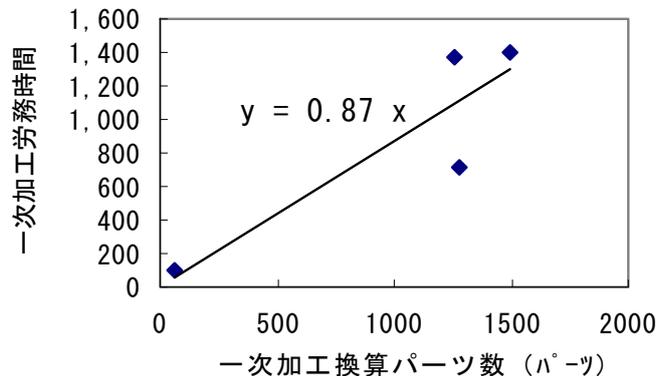


図 2.9(a) 一次加工労務時間と一次加工換算パーツ数

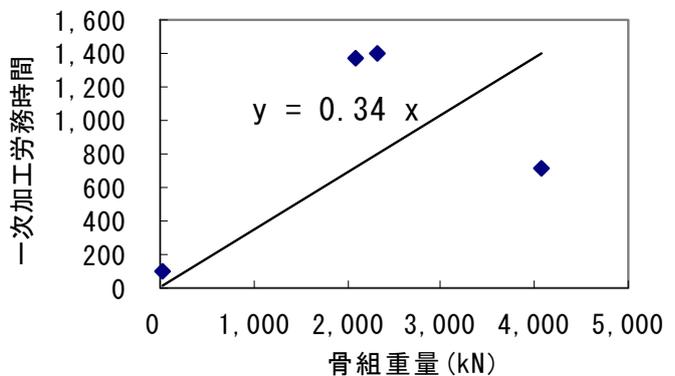


図 2.9(b) 一次加工労務時間と骨組重量

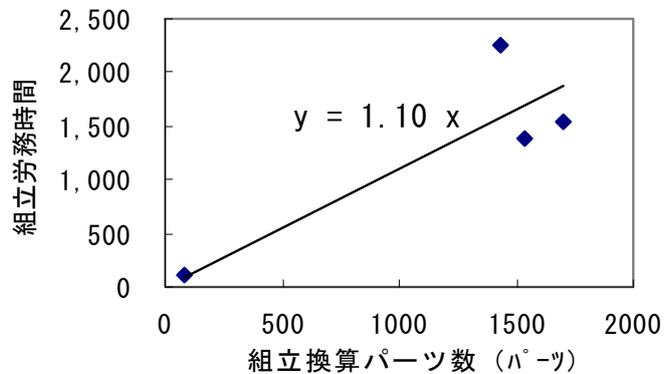


図 2.10(a) 組立労務時間と組立換算パーツ数

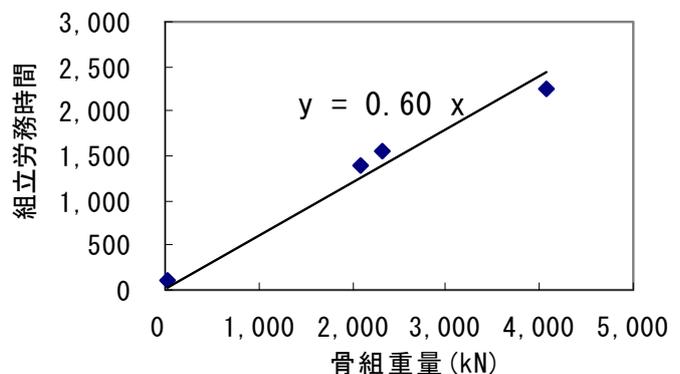


図 2.10(b) 組立労務時間と骨組重量

るように判断できるが、図 2.10(b)に示す組立労務時間と骨組重量の相関はさらに良好である。ここでは、労務時間アンケート結果を重視し、2.4.3 で提案したように組立労務時間はパーツ数に比例するとして取り扱う。

### (3) 溶接労務時間係数

溶接労務時間係数  $KW$  は、4 例の実物件の労務時間資料から求めた溶接労務時間と接合面積の関係を最小自乗近似して  $KW = 0.013$  時間/cm<sup>2</sup> と算出した。

図 2.11 では、接合面積と溶接労務時間の相関が比較的良好であるように判断できる。

### (4) 情報労務時間係数

情報労務時間係数は、実物件 3 を除く実物件の労務時間資料から求めた情報労務時間を図面枚数に応じて、柱情報労務時間、梁情報労務時間、一般情報労務時間に按分し、それらと柱節総数、寸法の異なる梁総数、骨組重量との関係を最小自乗近似して  $KIc = 4.21$  時間/節、 $KIb = 2.93$  時間/本、 $KIg = 0.069$  時間/kN と算出した。

図 2.12 より、柱節数と柱情報労務時間の相関が比較的良好であることがわかる。図 2.13 より、寸法の異なる大梁総数と梁情報労務時間の相関が比較的良好である。図 2.14 では、主架構骨組重量と一般情報労務時間の相関はあまり良くない。これは、一般情報が架構の基本情報として重要な情報であるが、同一図面の中に柱梁主架構以外の小梁や仕上げに関わる情報も多く盛り込まれるため、主架構骨組重量と一般情報労務時間の相関が弱いと考えられるが、鉄骨製作コストを評価するうえでは許容できる範囲であると考えられる。

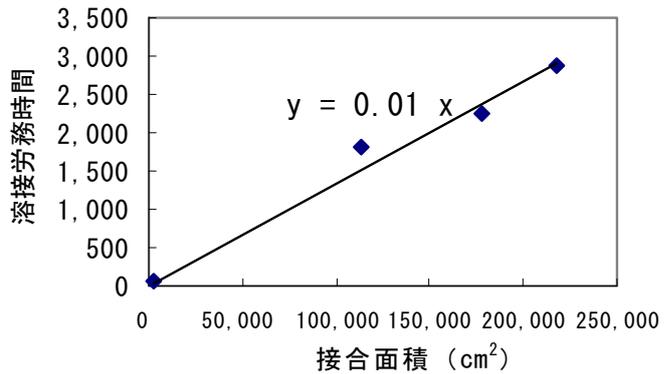


図 2.11 溶接労務時間と接合面積

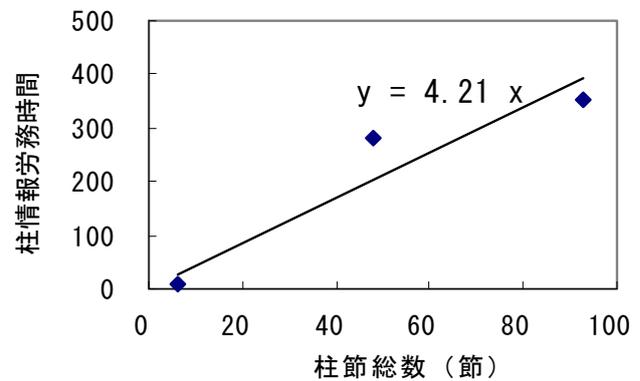


図 2.12 柱情報労務時間と柱節総数

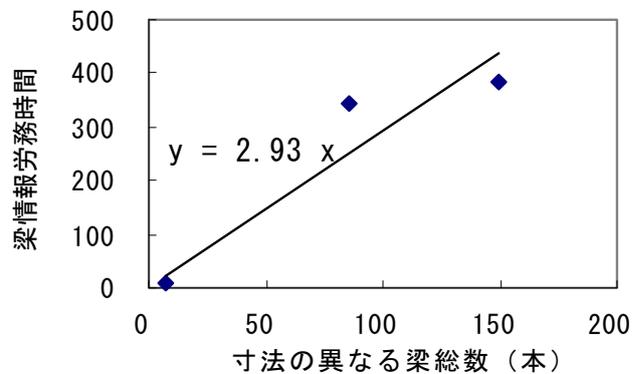


図 2.13 梁情報労務時間と寸法の異なる梁総数

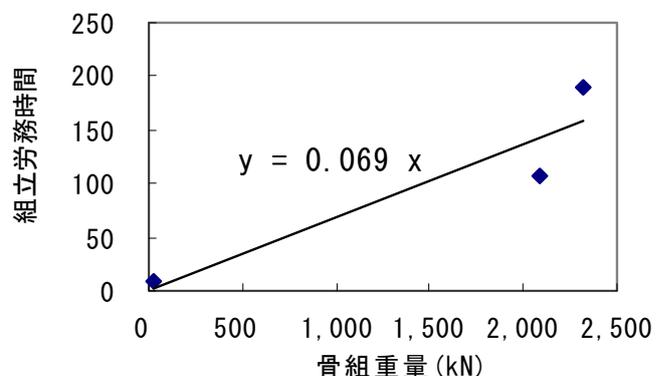


図 2.14 一般情報労務時間と主架構骨組重量

## 2.5.4 評価式による実物件骨組の鉄骨製作コスト試算

図 2.15, 図 2.16, 図 2.17, 図 2.18 は, 実績コストと評価式による鉄骨製作試算コスト (以降では, 評価コストと言う.) との関係を示したものである. ここで示している評価コストとは, 2.5.3 で算出した労務時間係数と, 各実物件の工作図から読み取った一次加工換算パーツ数, 組立換算パーツ数, 接合面積, 柱節総数, 寸法の異なる梁総数, 骨組重量の情報を, 評価式に代入して鉄骨製作コストを試算したものである.

図 2.15 によると, 評価コストと実績コストは, 良い相関を示している. これより, 労務時間に基づく鉄骨製作コストを, 評価式によって評価することが可能であると判断できる. 図 2.16 には, 比較として, いわゆる重量単価による試算として, 骨組重量当りの鉄骨製作単価 (以降では重量単価と呼ぶ.) を物件に関わらず一律に 4 万円/トンと仮定した場合に, 鉄骨製作コストを骨組重量×重量単価で試算したコストと実績コストとの関係を示す. いずれの実物件についても試算と実績に大きな差が現われている. これより, 重量単価による鉄骨製作試算コストでは, 実績コストを精度よく評価できないと判断できる.

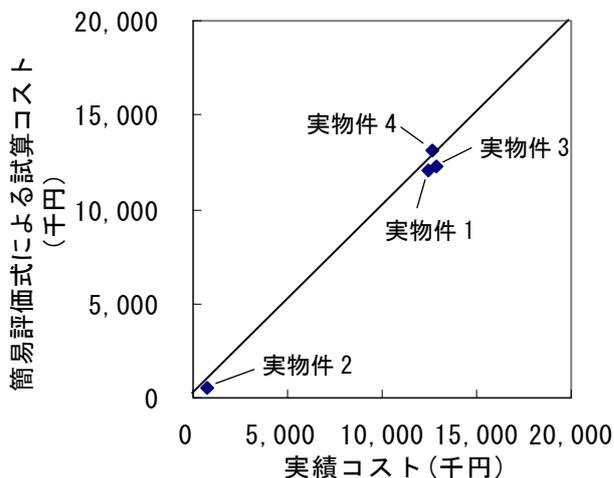


図 2.15 評価式による試算コストと実績コスト

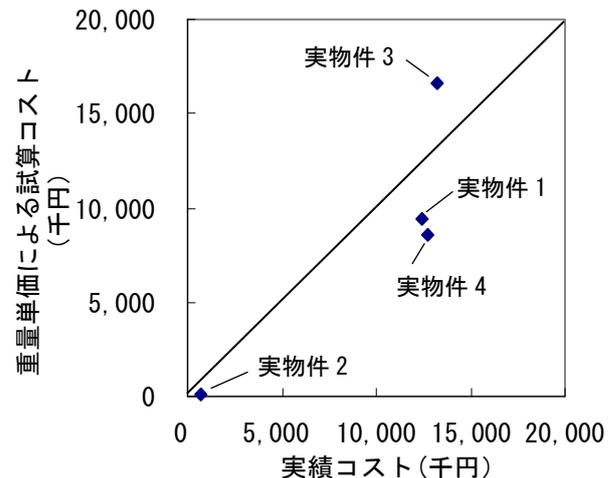


図 2.16 重量単価による試算コストと実績コスト

図 2.17 には, 実績コストと評価コストとの関係を棒グラフで比較している. これによると, 実物件 2 が 30%の誤差となったが, 他の 3 物件の誤差は 3%程度と良い対応を示している. この誤差の開きは, 実物件 2 と他の 3 物件の規模が大きく離れており, 実物件 2 の金額が少ないためであると考えられる. 誤差の絶対額で判断すると, 実物件 2 の誤差は 21 万円であり 4 物件中で最も小さい. 図 2.18 には, 各コストの実績コストと評価コストを分布図で示す. これによると, 溶接と情報は, いずれの物件においても良い対応が得られたが, 一次加工と組立の誤差が若干大きく, 物件間でばらつきが見られる. この誤差の原因としては, 外注費の存在が考えられる.

外注する場合は重量単価に基づき依頼する形がとられているため, 労務時間とコストが精確に対応していない場合が存在すると考えられる. 図 2.19 は, 実物件 4 例の実績コストにおける外注費を示したものであるが, 実物件 3 は外注費の割合が特に大きく, 全体の 60%も占めており, 特に組立の外注費が他の物件に比べて多いため, 組立の実績と試算コストの誤差が大きくなっていると考えられる.

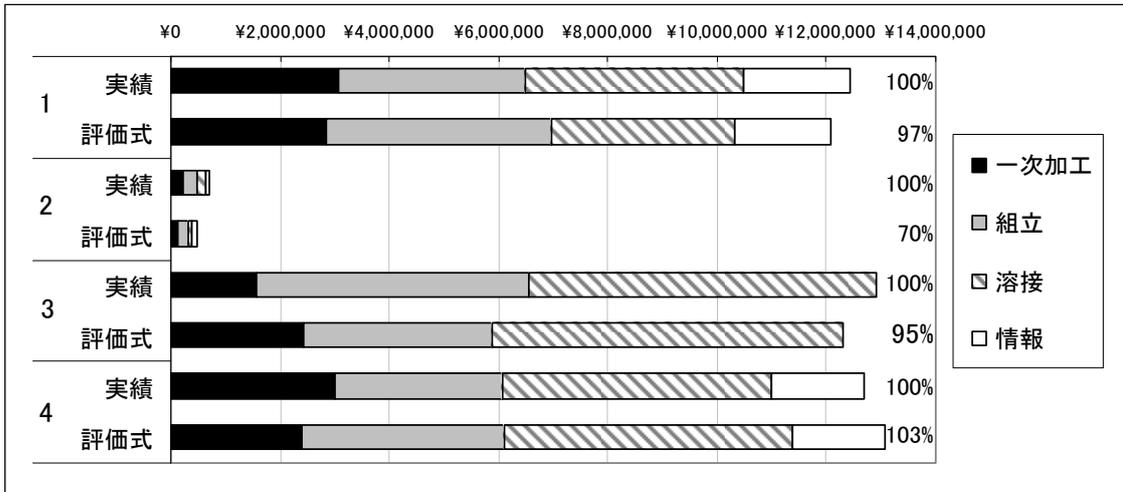


図 2.17 実物件 4 例の実績コストと評価コストの比較

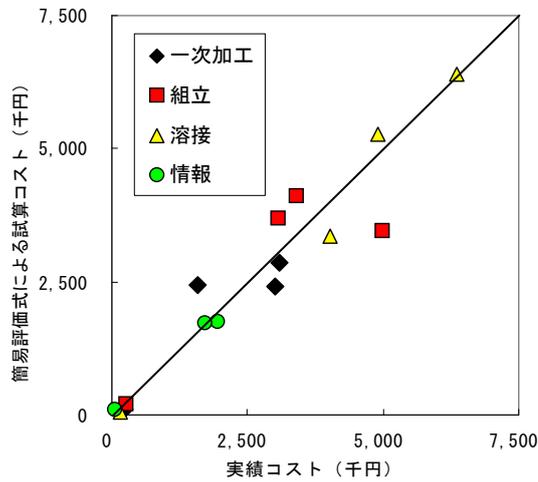


図 2.18 実績コストと評価コストの比較

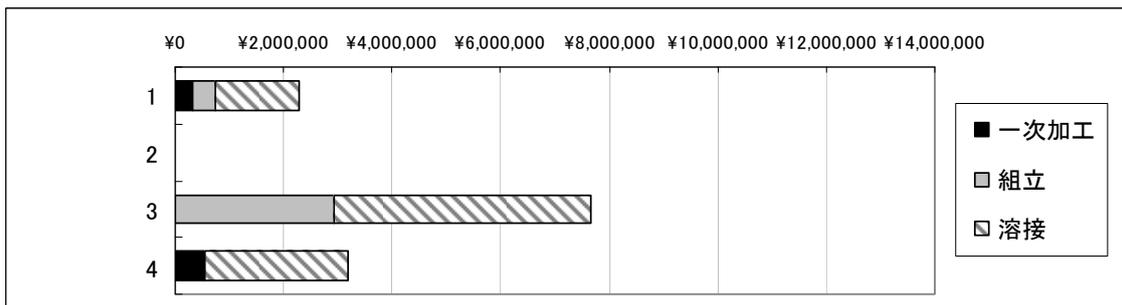


図 2.19 実物件 4 例の実績コストにおける外注費

## 2.6 鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数のまとめ

本章では、鉄骨製作の労務時間アンケート結果に基づいて、鉄骨製作コストの評価式を提案し、その有効性を検証した。得られた知見を以下に述べる。

- (1) 鉄骨製作の労務時間アンケートを行い、一次加工労務時間および組立労務時間は、鉄骨重量よりむしろパーツ数に依存する傾向を確認した。また、溶接労務時間は接合面積の増加に伴い増加する傾向を確認した。
- (2) 鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状を反映したコスト試算により、スパン長や、部材断面の決定を行なう最小コスト設計を実現するため、鉄骨製作の難易度を適切に考慮できる鉄骨製作コスト評価手法を提案した。
- (3) 鉄骨製作会社の実物件の資料から労務時間係数を算出し、評価手法による鉄骨製作試算コストと実物件の鉄骨製作コストの比較を行った。また、重量単価に基づく鉄骨製作試算コストとの比較を行い、評価手法の優位性を確認した。
- (4) 本研究で得られた労務時間係数は、あくまで、A社の資料に基づいたものである。製作工程、月産能力や工場設備の自動化の条件が類似の鉄骨製作会社に対しては、ここで示した労務時間係数の適用が可能と考える。しかし、条件が異なる場合には、設計者が対象とする鉄骨製作会社に対して、本研究で提案するアプローチにより労務時間係数を算出する必要があると考えられる。

## 第3章 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法

- 3.1 序
- 3.2 合計コストの評価手法
  - 3.2.1 鋼材コストと鉄骨製作コスト
  - 3.2.2 労務時間係数
- 3.3 構造設計とそのコスト評価
  - 3.3.1 構造設計方針
  - 3.3.2 設計骨組の構造性能
  - 3.3.3 設計骨組の鉄骨製作労務時間と鋼材重量
  - 3.3.4 設計骨組の合計コスト
- 3.4 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法のまとめ

### 3.1 序

第2章では、中国地方の鉄骨製作会社の工場長や製造部長など、鉄骨製作労務時間（以降、単に労務時間と表現する。）が把握可能な方を対象とした鉄骨製作の労務時間アンケートを実施し、労務時間が鋼材重量より加工や組立のパーツ数、溶接接合面積に比例することを示した。さらに、アンケート結果等に基づき鉄骨製作コストの評価式を提案した。加えて、鉄骨製作会社（A社）から提供を受けた実物件の鉄骨工事コストの労務時間資料を分析し、評価式で用いる労務時間係数を算出した。

本章では、3つの構造設計例に対して、それぞれ断面せいの統一に重点をおいた設計方針Aと、断面せいの統一化は意識せずに鋼材重量縮小に重点をおいた設計方針Bによる合計6ケースについて、仮定断面の設定から最終断面の決定までの設計を実施する。そして、それらの設計結果に対して鉄骨製作コストの評価式を適用して合計コスト（主架構の鋼材コストと鉄骨製作コストの合計）を算出し、設計方針の違いが建築物の性能や合計コストに与える影響を考察する。

### 3.2 合計コストの評価手法

#### 3.2.1 鋼材コストと鉄骨製作コスト

合計コストは鋼材コストと鉄骨製作コストの合計であり、次式で示す。

$$K = km \cdot W + CF = km \cdot W + kf \cdot TF \quad (3.1)$$

ここで、 $km$ は鋼材重量単価（以降、単に鋼材単価という。）、 $W$ は主架構の鋼材重量、 $CF$ は(2.1)式で示した主架構の鉄骨製作コスト、 $kf$ は労務単価、 $TF$ は2章で示した主架構鉄骨製作に要する各労務時間の合計であり次式で示される。

$$TF = TP + TB + TW + TI \quad (3.2)$$

したがって、 $km \cdot W$ は鋼材コストを、 $kf \cdot TF$ は鉄骨製作コストを示しており、 $K$ はそれらの合計（以降、合計コストと呼ぶ。）である。

鋼材単価や労務単価は、社会状況、経済状況により変動する。そこで、(3.1)式を文献1)で提案されている鋼材単価と労務単価の比で表現することにより、鋼材単価と労務単価の両者の変動を一般化して考慮できる評価式として下式を示す。

$$\frac{K}{km} = W + \frac{kf}{km} \cdot TF \quad (3.3)$$

#### 3.2.2 労務時間係数

評価式における労務時間係数は、2.5.3に示した値を用いる。以下にその数値を示す。

一次加工労務時間係数	$KP=0.87$ 時間/パーツ,
組立労務時間係数	$KB=1.10$ 時間/パーツ,
溶接労務時間係数	$KW=0.013$ 時間/cm <sup>2</sup> ,

情報労務時間係数  $KIc=4.21$  時間/節,  
 $KIb=2.93$  時間/本,  
 $KIg=0.069$  時間/kN  
 $\alpha_{PC}=0, \alpha_{PB}=2, \alpha_{BC}=7$

### 3.3 構造設計とそのコスト評価

#### 3.3.1 構造設計方針

設計例 1 は地上 7 層，塔屋 1 層の事務所ビルである。延面積は約 2,900m<sup>2</sup>。図 3.1 に設計例 1 を示す。Y 方向が 13m の 1 スパンを特徴としている。X 方向は 4 スパンであり，そのスパン長は約 6m である。北面と西面が道路に面しており，塔屋が 5 通り側に位置している。

設計例 2 は，設計例 1 の B 通りの 4 通りと 5 通りに柱を追加し，Y 方向に部分的に 2 スパン架構を設けた構造計画を行なった設計例であり，その他の条件は設計例 1 に同じである。図 3.2 に設計例 2 を示す。

設計例 3 は地上 6 層の事務所ビルである。延面積は約 3,600m<sup>2</sup>。図 3.3 に設計例 3 を示す。Y 方向のスパン長が 14m と 7.2m の 2 スパンである。X 方向は 5 スパンであり，そのスパン長は 6.4m である。最上階は下階に比べて規模が小さく，A 通り側に偏って配置されている。X 方向スパン長，Y 方向最大スパン長は設計例 1 に類似している。

これらの建築物について，それぞれ断面せいの統一に重点を置いた設計方針 A，断面せいの統一化は意識せずに鋼材重量縮小に重点を置いた設計方針 B の設計を行った。この設計骨組に対し，評価式を用いて労務時間を評価し，鋼材単価と労務単価の変動を考慮して考察をおこなう。各設計方針を表 3.1 に示す。

設計に用いる各階平均荷重は，鋼材重量の違いにより各設計方針，各階で若干変動するが，概ね 7~9(kN/m<sup>2</sup>)である。また，ヤング係数  $E=2.06 \times 10^5$ (N/mm<sup>2</sup>)，鋼材 F 値=325(N/mm<sup>2</sup>)，鋼材単位体積重量  $\rho=76.93$ (N/cm<sup>3</sup>)とする。設計は保有水平耐力計算法（耐震設計ルート 3）に準拠して行い，一次設計用の 1 階層せん断力係数 0.2，地震地域係数 1.0，層せん断力係数の分布は  $A_i$  分布とする。二次設計での層間変形角制約は 1/200 以下。部材は幅厚比が小さく塑性変形能力の大きい FA 部材，構造特性係数は  $D_s=0.25$  とする。保有水平耐力は，層せん断力係数の分布を  $A_i$  分布とする増分解析を行い，いずれかの階が層間変形角 1/100 に達した時点の耐力とした。

表 3.1 設計方針

		概要	部材設定の方針
設計方針	A	断面せいの統一(労務時間縮小)に重点を置いた設計	同一階全ての梁せいの統一により、各柱梁接合部のダイアフラムが2枚を超えないように留意し、また、柱せいを高さ方向で統一することにより、柱梁接合部の製作を単純化する。
	B	主架構鋼材重量縮小に重点を置いた設計	各柱梁仕口のダイアフラムの枚数増加や、柱せいを高さ方向で縮小することによる柱梁接合部製作の複雑化に留意することなく、必要最小限の部材サイズを設定する。

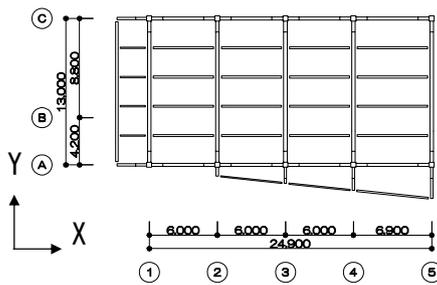


图 3.1-a 设计例 1 基准阶伏图 (单位 mm)

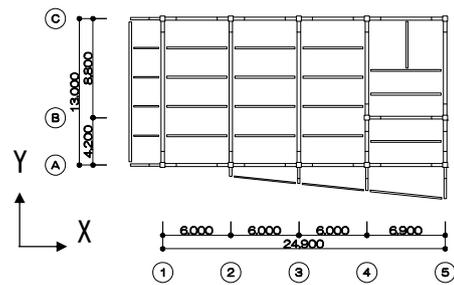


图 3.2-a 设计例 2 基准阶伏图 (单位 mm)

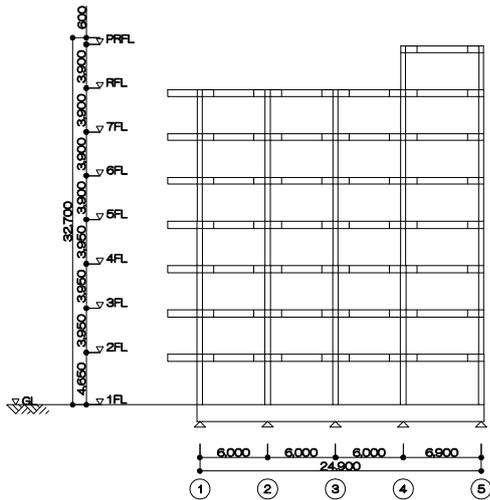


图 3.1-b 设计例 1  
X 方向轴组图 (单位 mm)

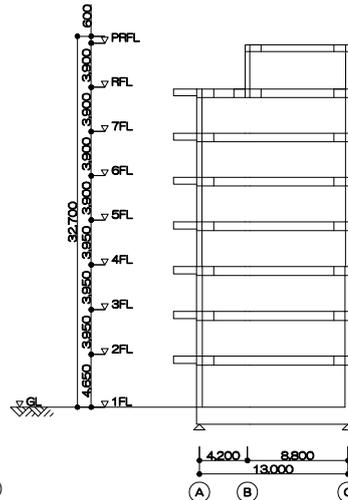


图 3.1-c 设计例 1  
Y 方向轴组 (单位 mm)

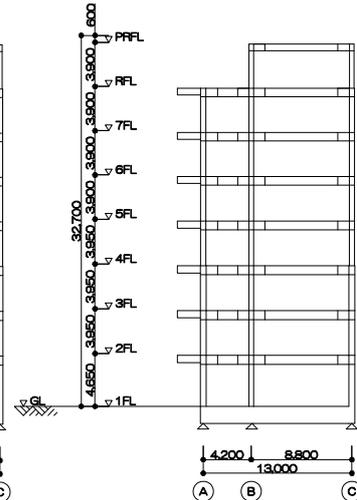


图 3.2-b 设计例 2 ④ 通  
Y 方向轴组 (单位 mm)

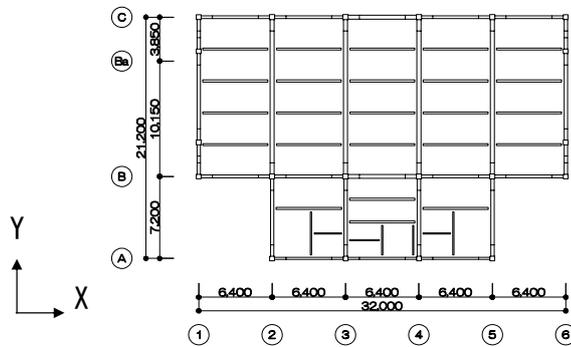


图 3.3-a 设计例 3 基准阶伏图 (单位 mm)

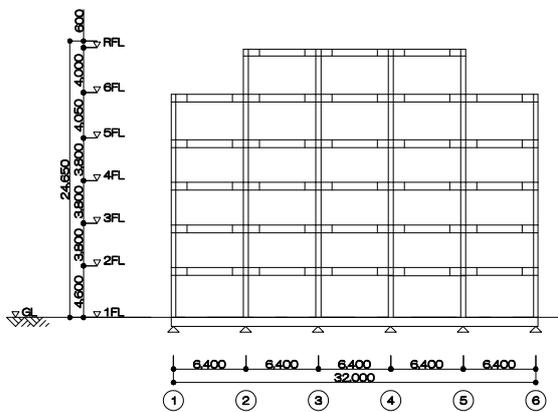


图 3.3-b 实施设计例 3  
X 方向轴组图 (单位 mm)

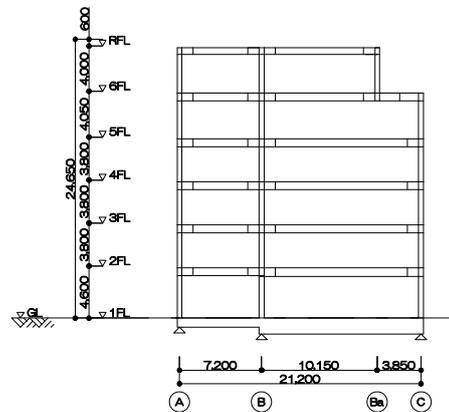


图 3.3-c 实施设计例 3  
Y 方向轴组 (单位 mm)

### 3.3.2 設計骨組の構造性能

各設計骨組の部材リストを表 3.2～表 3.7 に示す。いずれの設計骨組も、許容応力度計算と層間変形角制約を満足するために、部材サイズ、板厚が決定される傾向にあり、必要保有水平耐力は部材サイズ、板厚決定の主要因とはなっていない。

各設計例の設計時最大層間変形角と保有水平耐力を図 3.4～3.7 に示す。各設計例に共通して、設計方針 A は、X 方向梁せいを梁せいの大きい Y 方向に合わせたことにより、X 方向の梁剛性や梁耐力が設計方針 B より大きい。さらに、設計方針 A は、全階の柱せいを統一したことにより、柱剛性や柱耐力が設計方針 B より大きい。その結果、設計方針 A は設計方針 B より、地震時の設計時最大層間変形角が小さくなっているとともに、保有水平耐力が大きくなっている。

設計例 1 の Y 方向はわずかではあるが偏心があり、剛心に対して重心側の端部の地震時変形が大きくなるため、部材サイズを大きくして偏心補正を行うと共に剛性を高めて層間変形角制約を満足する必要がある。それに対し、設計例 2 は、部分的ではあるが柱を追加して 2 スパン架構を構成することにより、構造計画的に剛性を高め、剛性偏心により偏心率は悪くなるが変形を抑える効果が大きく、設計例 1 より小さい部材で層間変形角制約を満足できている。

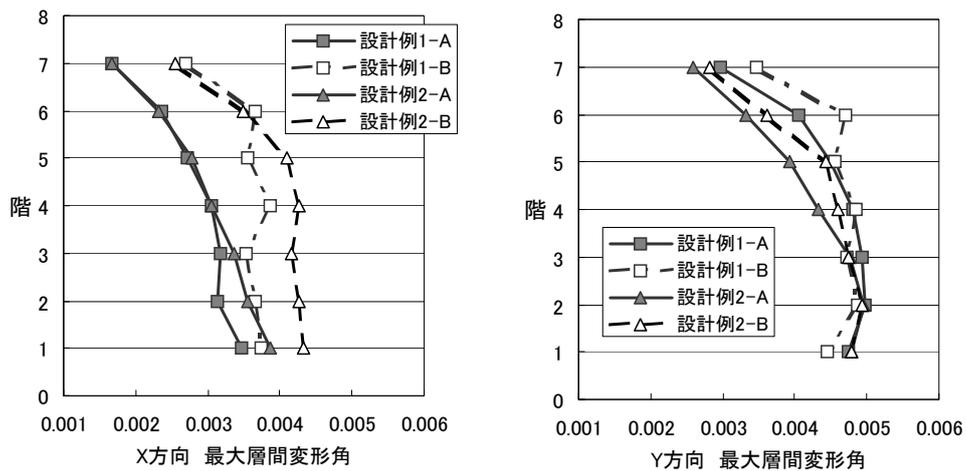


図 3.4 設計例 1, 設計例 2 の設計時最大層間変形角

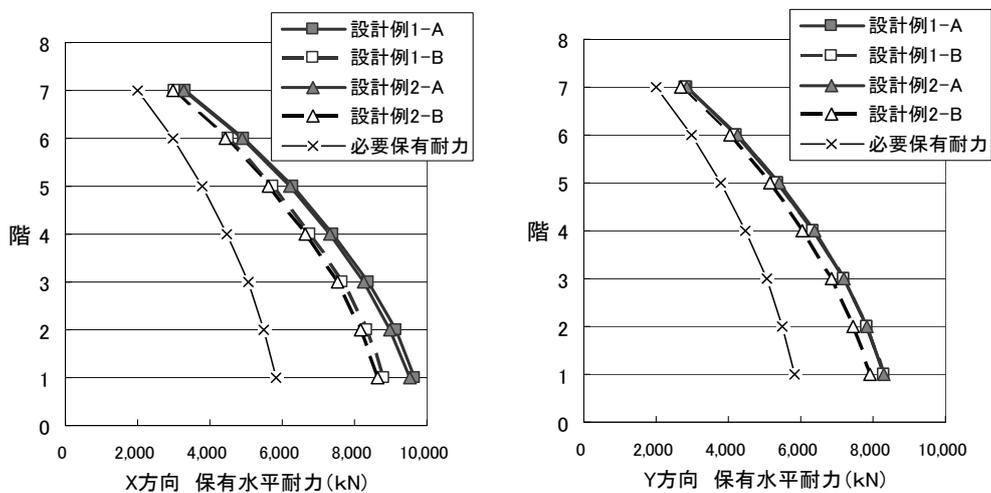


図 3.5 設計例 1, 設計例 2 の保有水平耐力

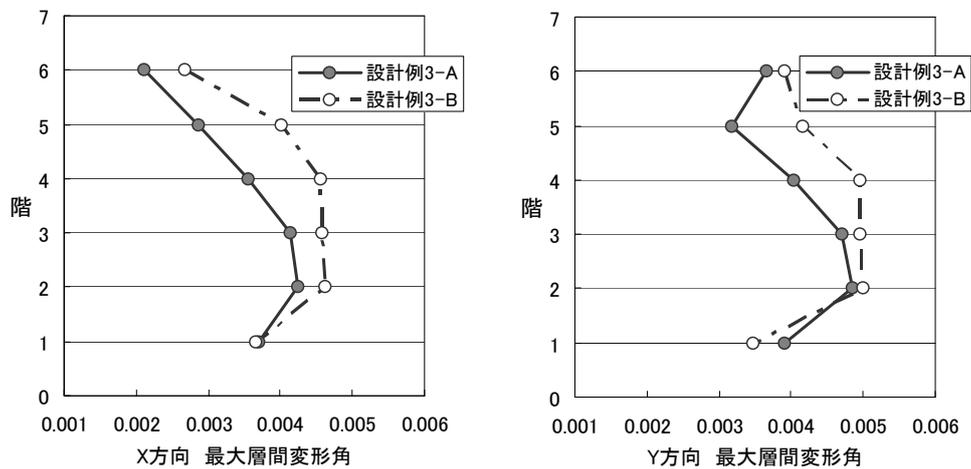


図 3.6 設計例 3 の設計時最大層間変形角

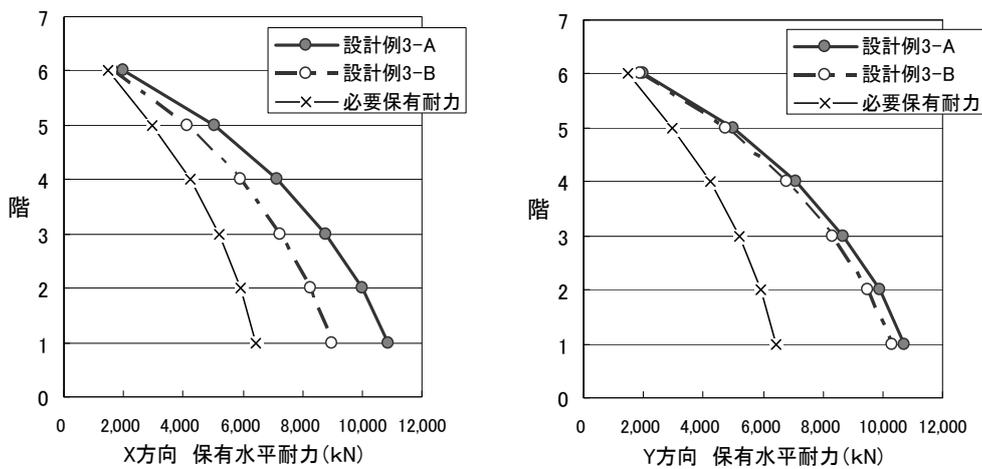


図 3.7 設計例 3 の保有水平耐力

表 3.2-a 設計例 1-設計方針A 梁リスト

階	X方向			Y方向				
	A通り、C通り	B通り	X方向跳ね出し梁	1通り	2通り、3通り	4通り	5通り	Y方向跳ね出し梁
PR	600 × 200 × 12 × 19	600 × 200 × 12 × 19				600 × 200 × 12 × 19	600 × 200 × 12 × 19	
R	750 × 250 × 14 × 25	750 × 250 × 14 × 25	750 × 250 × 14 × 25	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	750 × 250 × 14 × 25
7	同上	同上	同上	750 × 300 × 14 × 25	750 × 300 × 14 × 25	750 × 350 × 14 × 28	750 × 350 × 14 × 28	同上
6	同上							
5	800 × 250 × 16 × 25		800 × 250 × 16 × 25	800 × 350 × 16 × 25	800 × 350 × 16 × 25	800 × 400 × 16 × 28	800 × 400 × 16 × 28	800 × 250 × 16 × 25
4	同上		同上	同上	同上	同上	同上	同上
3	同上		同上	同上	800 × 350 × 16 × 28	800 × 400 × 16 × 32	同上	同上
2	800 × 300 × 16 × 28		同上	同上	同上	同上	800 × 400 × 16 × 32	同上

表 3.2-b 設計例 1-設計方針A 柱リスト

階	1通り	2通り	3通り	4通り	5通り
R				500 × 500 × 19	500 × 500 × 19
7	500 × 500 × 19	500 × 500 × 19	500 × 500 × 19	同上	同上
6	同上	同上	同上	同上	同上
5	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22
4	同上	同上	同上	同上	同上
3	500 × 500 × 25	500 × 500 × 25	500 × 500 × 25	500 × 500 × 28	500 × 500 × 28
2	500 × 500 × 32	500 × 500 × 32	500 × 500 × 32	500 × 500 × 32	500 × 500 × 32
1	同上	同上	同上	同上	同上

梁リスト凡例		単位 (mm)	
600 × 200 × 12 × 19		梁せい	フランジ
梁せい	梁幅	ウェブ厚	フランジ

柱リスト凡例		単位 (mm)	
450 × 450 × 19		柱せい	板厚
柱せい	柱幅	ウェブ厚	フランジ

表 3.3-a 設計例 1-設計方針B 梁リスト

階	X方向			Y方向				
	A通り、C通り	B通り	X方向跳ね出し梁	1通り	2通り、3通り	4通り	5通り	Y方向跳ね出し梁
PR	600 × 200 × 12 × 19	600 × 200 × 12 × 19				600 × 200 × 12 × 19	600 × 200 × 12 × 19	
R	同上	同上	600 × 200 × 12 × 19	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	750 × 300 × 14 × 22	600 × 200 × 12 × 19
7	600 × 200 × 12 × 22		同上	750 × 300 × 14 × 25	750 × 300 × 14 × 25	750 × 350 × 14 × 28	750 × 350 × 14 × 28	同上
6	600 × 250 × 12 × 25		同上	同上	同上	同上	同上	同上
5	650 × 250 × 12 × 22		650 × 200 × 12 × 19	800 × 350 × 16 × 25	800 × 350 × 16 × 25	800 × 400 × 16 × 28	800 × 400 × 16 × 28	650 × 200 × 12 × 19
4	650 × 250 × 12 × 28		同上	同上	同上	同上	同上	同上
3	650 × 300 × 16 × 28		同上	同上	800 × 350 × 16 × 28	800 × 400 × 16 × 32	同上	同上
2	同上		同上	同上	同上	同上	800 × 400 × 16 × 32	同上

表 3.3-b 設計例 1-設計方針B 柱リスト

階	1通り	2通り	3通り	4通り	5通り
R				450 × 450 × 19	450 × 450 × 19
7	450 × 450 × 19	450 × 450 × 19	450 × 450 × 19	同上	同上
6	同上	同上	同上	同上	同上
5	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22	500 × 500 × 22
4	同上	同上	同上	同上	同上
3	550 × 550 × 22	550 × 550 × 22	550 × 550 × 22	550 × 550 × 22	550 × 550 × 22
2	同上	同上	同上	同上	同上
1	同上	同上	同上	550 × 550 × 25	550 × 550 × 25

表3.4-a 設計例2-設計方針A 梁リスト

階	X方向			Y方向				
	A通り、C通り	B通り	X方向跳ね出し梁	1通り	2通り、3通り	4通り	5通り	Y方向跳ね出し梁
PR	600×200×12×19	600×200×12×19				600×200×12×19	600×200×12×19	
R	750×250×14×25	750×250×14×25	750×250×14×25	750×300×14×22	750×300×14×22	750×300×14×22	750×300×14×22	750×250×14×25
7	同上							
6	同上							
5	800×250×16×25	800×250×16×25	800×250×16×25	800×300×16×25	800×300×16×25	800×300×16×25	800×300×16×25	800×250×16×25
4	同上							
3	同上	同上	同上	800×300×16×28	800×300×16×28	800×300×16×28	同上	同上
2	800×250×16×28	同上	同上	同上	800×300×16×32	800×300×16×32	800×300×16×28	同上

表3.4-b 設計例2-設計方針A 柱リスト

階	1通り	2通り	3通り	4通り(A,C通り)	5通り(A,C通り)	4,5通り(B通り)
R				500×500×19	500×500×19	400×400×16
7	500×500×19	500×500×19	500×500×19	同上	同上	同上
6	同上	同上	同上	同上	同上	同上
5	同上	同上	同上	同上	同上	同上
4	500×500×22	同上	同上	同上	同上	同上
3	同上	同上	同上	同上	同上	同上
2	同上	500×500×22	同上	同上	同上	同上
1	同上	同上	500×500×22	500×500×28	500×500×22	同上

表3.5-a 設計例2-設計方針B 梁リスト

階	X方向			Y方向				
	A通り、C通り	B通り	X方向跳ね出し梁	1通り	2通り、3通り	4通り	5通り	Y方向跳ね出し梁
PR	600×200×12×19	600×200×12×19				600×200×12×19	600×200×12×19	
R	同上	同上	600×200×12×19	750×300×14×22	750×300×14×22	750×300×14×22	750×300×14×22	600×200×12×19
7	600×250×12×19	同上						
6	同上	600×200×12×22	同上	同上	同上	同上	同上	同上
5	650×250×12×25	650×200×12×22	650×200×12×19	800×300×16×25	800×300×16×25	800×300×16×22	800×300×16×22	650×200×12×19
4	650×250×12×28	650×250×12×19	同上	同上	同上	800×300×16×25	800×300×16×25	同上
3	同上	同上	同上	800×300×16×28	800×300×16×28	800×300×16×28	同上	同上
2	650×300×16×28	同上	同上	同上	800×300×16×32	800×300×16×32	800×300×16×28	同上

表3.5-b 設計例2-設計方針B 柱リスト

階	1通り	2通り	3通り	4通り(A,C通り)	5通り(A,C通り)	4,5通り(B通り)
R				400×400×16	400×400×16	400×400×16
7	450×450×19	450×450×19	450×450×19	同上	同上	同上
6	同上	同上	同上	同上	同上	同上
5	同上	同上	同上	同上	同上	同上
4	500×500×22	同上	同上	同上	同上	同上
3	同上	500×500×19	500×500×19	500×500×19	同上	同上
2	同上	500×500×22	同上	同上	同上	同上
1	同上	同上	500×500×22	500×500×28	500×500×22	同上

表3.6-a 設計例3-設計方針A 梁リスト

階	X方向				Y方向		
	A通り	B通り	Ba通り	C通り	1通り、6通り	2通り、5通り	3通り、4通り
R	450×200×9×14	450×200×9×14	450×200×9×14			450×200×9×14	450×200×9×14
6	600×200×12×19	600×200×12×19	600×200×12×19	600×200×12×19	600×200×12×19	600×300×12×22	600×300×12×22
5	同上	同上		同上	同上	同上	同上
4	同上	同上		同上	同上	600×300×12×25	600×300×12×25
3	同上	600×250×12×19		600×200×12×25	同上	600×300×12×28	600×300×12×28
2	同上	600×200×12×28		600×200×12×25	同上	同上	同上

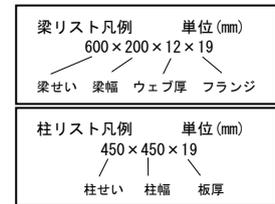


表3.6-b 設計例3-設計方針A 柱リスト

階	1通り、6通り				
	B通り~C通り	A通り	B通り	Ba通り	C通り
6		400×400×16	450×450×19	400×400×16	
5	400×400×16	同上	同上		450×405×19
4	同上	同上	同上		同上
3	同上	同上	同上		同上
2	400×400×19	400×400×19	450×450×22		450×450×22
1	同上	同上	450×450×32		450×450×32

表3.7-a 設計例3-設計方針B 梁リスト

階	X方向				Y方向				
	A通り	B通り	Ba通り	C通り	1通り、6通り	2通り、5通り	3通り、4通り		
R	2通り~5通り	1通り~2通り、5通り~6通り	2通り~5通り	2通り~5通り	1通り~2通り、5通り~6通り	2通り~5通り	B通り~C通り	A通り~B通り	B通り~C通り
6	400×200×9×16	400×200×9×16	400×200×9×16				400×200×9×16	400×200×9×16	400×200×9×16
6	600×200×12×19	同上	同上		400×200×9×16		400×200×9×16	600×200×12×19	600×250×12×22
5	450×200×9×14	600×200×12×19		450×250×9×19	450×200×9×14	450×200×9×14	450×250×9×19	600×300×12×28	同上
4	同上	600×200×12×19	600×200×11×17	450×250×9×19		同上	同上	同上	600×200×12×28
3	同上	650×200×12×22			同上	450×200×9×19	同上	650×300×16×28	650×250×12×22
2	500×200×9×22	500×300×12×22		500×200×12×22	500×200×10×16	500×200×12×22	700×300×16×28	700×250×14×25	700×300×16×28

表3.7-b 設計例3-設計方針B 柱リスト

階	1通り、6通り				
	B通り~C通り	A通り	B通り	Ba通り	C通り
6		400×400×16	400×400×16	400×400×16	
5	400×400×16	同上	同上		400×400×16
4	400×400×19	400×400×19	400×400×19		400×400×19
3	同上	同上	450×450×19	450×450×22	450×450×22
2	同上	同上	450×450×22	450×450×25	同上
1	同上	同上	500×500×32	500×500×28	500×500×22

### 3.3.3 設計骨組の鉄骨製作労務時間と鋼材重量

図 3.8 に、各設計例の各設計方針による設計結果の鉄骨製作労務時間を示す。この図より、設計方針 A の方が、設計方針 B より、労務時間が少ないことが確認できる。図 3.9 に、各設計例の各設計方針による設計結果の主架構鋼材重量を示す。この図より、設計方針 B の方が、設計方針 A より、鋼材重量が少ないことが確認できる。

設計例 1 と設計例 2 は建築計画としては同一であるが、設計例 2 は、設計例 1 に比べて、柱本数が多い。そのため、設計例 2 は設計例 1 に比べて労務時間が多い。逆に、柱を追加することにより剛性を高めることができおり、設計例 2 は設計例 1 より、小さい部材で制約条件を満足できている。そのため、設計例 2 は柱本数が多いにも関わらず設計例 1 より鋼材重量が少ない。設計例 1, 2 は Y 方向 1 スパン架構であることから、2 スパン架構である設計例 3 に比べて、骨組が単純であるため労務時間が少ない。逆に、設計例 1, 2 は、設計例 3 と同程度の剛性を確保するための必要断面性能が大きいために延面積が小さいにも関わらず鋼材重量が多い。

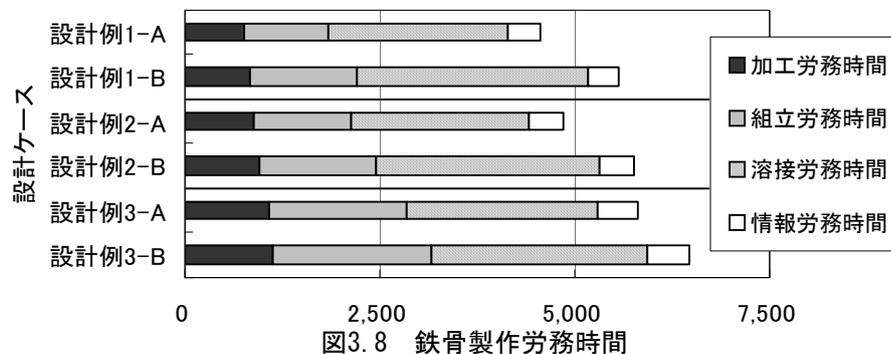


図3.8 鉄骨製作労務時間

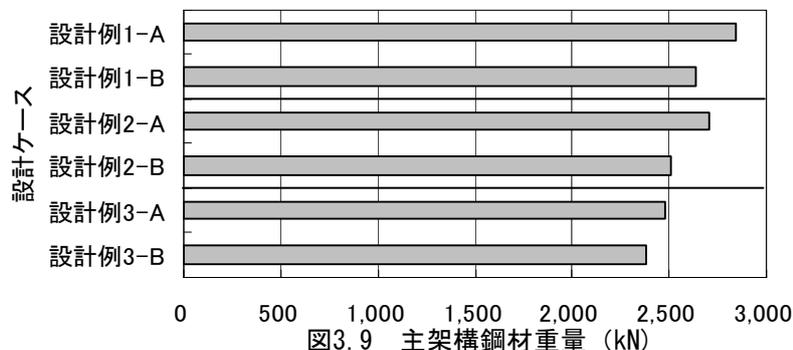


図3.9 主架構鋼材重量 (kN)

### 3.3.4 設計骨組の合計コスト

労務単価や鋼材単価は、経済環境により変動する。そこで、両者の変動が合計コストに与える影響を同時に評価するため、図 3.10 に、(3.3)式で示した合計コスト/鋼材単価（以降では、換算鋼材重量と呼ぶ。）と、労務単価/鋼材単価での関係を、各設計例、各設計方針毎に示す。図中の各縦線は各設計例の設計方針 A と B の換算鋼材重量が同じとなる横軸位置を示している。鋼材単価が同一であれば換算鋼材重量と合計コストは比例関係にある。

設計例 1 では、労務単価/鋼材単価 (kN/時間) が約 0.20 を超える場合は、部材せいの一により、鋼材重量が増加しても労務時間を抑えた設計方針 A の換算鋼材重量が設計方針 B より少なくなる。逆に約 0.20 未満の場合は、労務時間が増加しても鋼材重量を抑えた設計方針 B の換

算鋼材重量が少なくなることを示している。設計例 2 では、その換算鋼材重量のバランス点が約 0.22。設計例 3 では、約 0.15 であり設計例 1, 2 と 3 とでは大きく異なる。また、換算鋼材重量のバランス点から離れた位置での設計方針 A と B の換算鋼材重量差も設計例 1, 2 では大きくなるのに対し、設計例 3 では小さい。これは、設計例 1, 2 が梁間方向に 1 スパンでスパン長も 13m と比較的大きく、桁行方向梁に比べて必要断面性能が大きかったのに対し、設計例 3 は梁間方向スパン長は 14m と大きい部分があるが、2 スパンによる連梁効果により梁の必要断面性能が他の設計例より小さく、桁行方向梁との差が小さかったことによると判断される。

ここで、労務単価を 2,200 円/時間とし、図 3.10 における横軸約 0.15 に該当する鋼材単価 15 万円/トン (15,296 円/kN) と、約 0.3 に該当する鋼材単価 7.5 万円/トン (7,648 円/kN) について、各設計例、各設計方針の合計コスト内訳を図 3.11、図 3.12 に示す。図 3.13 には設計方針 B を分母とした設計方針 A と設計方針 B の鋼材重量差比率と合計コスト差比率を示す。

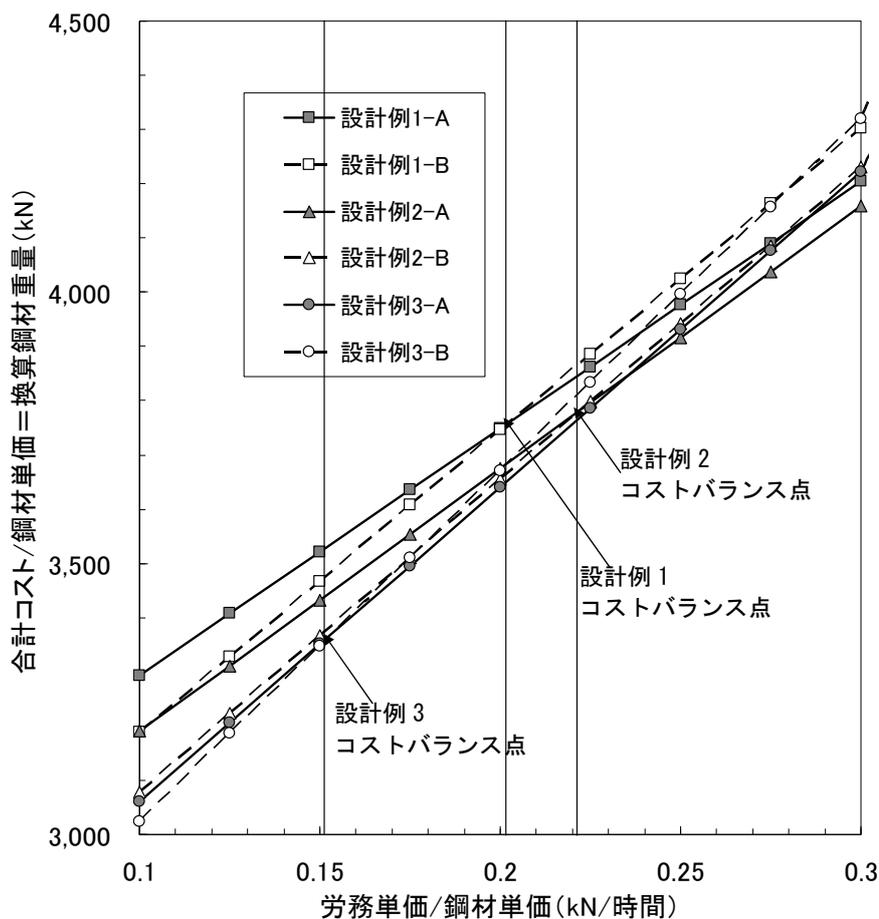


図 3.10 各設計例における「労務単価/鋼材単価」と「合計コスト/鋼材単価」の関係

いずれの設計例においても、鋼材重量は設計方針 A の方が設計方針 B より大きい。合計コストは、15 万円/トンの場合、設計方針 A の方が設計方針 B より高い。逆に、7.5 万円/トンの場合、設計方針 A の方が設計方針 B より安い。つまり、鋼材重量差比率と合計コスト差比率は大きく異なり、鋼材重量のみで設計骨組の経済性を判断することはできない。また、鋼材単価が高いと、鋼材重量縮小に重点を置いた設計の合計コストが小さく、鋼材単価が低いと断面せいの統一に重点をおいた設計の合計コストが小さくなる。ただし、鋼材単価が 15 万円/トンの場合であっても設計例 1, 2 では設計方針 A は設計方針 B の合計コストを 2%程度と僅かに上回り、設計例 3 では差はない。一方、設計方針 A では部材せいの統一を行うことにより、設計時最大層間変形角や保有水平耐力などの構造性能が良くなることを考慮すると、現実的な値としてここで設定した労務単価、鋼材単価の範囲では設計方針 A が推奨される。また、同一建築計画である設計例 1 と設計例 2 では、鋼材単価にかかわらず、同一設計方針では、設計例 2 の方が設計例 1 よりも合計コストが小さい。このように、断面せいの統一や鋼材重量縮小を目指す設計より前の段階での構造計画上の工夫が合計コストに及ぼす影響も大きい。

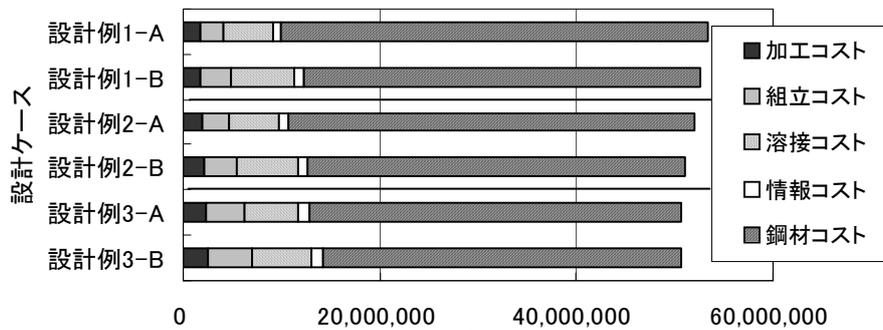


図3.11 合計コスト(円)  
(労務単価2,200円/時間, 鋼材単価15,296円/kN)

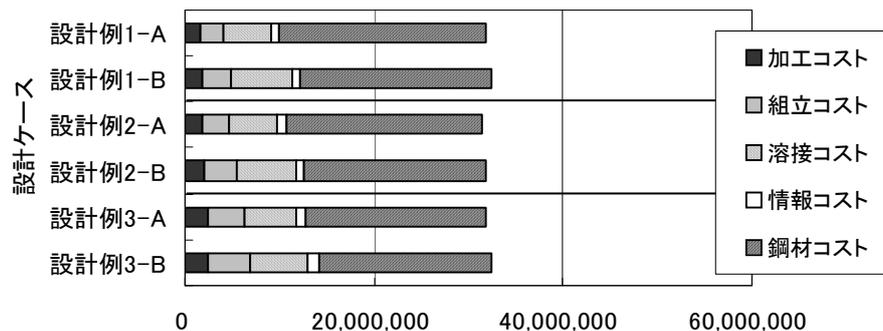


図3.12 合計コスト(円)  
(労務単価2,200円/時間, 鋼材単価7,648円/kN)

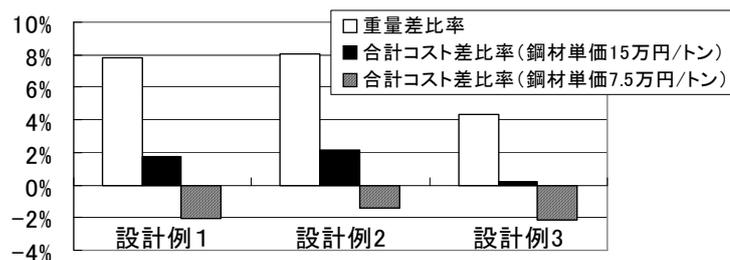


図3.13 設計方針 B に対する設計方針 A の差分比率 (%)  
(設計方針 A-設計方針 B) / 設計方針 B

### 3.4 構造設計例の鉄骨製作コストのまとめ

2章で提案した鉄骨製作コストの評価式と労務時間係数を6つの構造設計例に適用し、以下のことが知られた。

①同一の制約条件下において、同一階すべてのせいの統一化、高さ方法での柱せいの統一化を優先すると、労務時間を縮小できる。逆に、柱や梁の断面せいの統一化を意識せずに、鋼材重量の最小化を優先すると、労務時間が増加する。

②本手法を適用することにより労務単価、鋼材単価両者の変動に伴い、合計コストが変化することを、定量的に確認することができ、市況に即した構造設計方針の決定を、数値判断に基づいて行うことが可能である。また、この手法により決定される設計方針は、鋼材重量のみの大小比較から判断される結果とは異なる。

③本論文で採用した現在の市況との関連が良い労務単価、鋼材単価の程度では、断面せいの統一化による断面せいの統一に重点をおいた設計方針Aと断面せいの統一化は意識せずに鋼材重量縮小に重点をおいた設計方針Bの合計コストはほぼ同じである。地震時最大層間変形角や保有水平耐力などの構造性能が良くなることを考慮すると、設計方針Aが推奨される。

④断面せいの統一や鋼材重量縮小を目指す設計方針とは別に、構造計画上の工夫が合計コストに及ぼす影響も大きい。

鋼材単価が高いと、鋼材重量最小設計の傾向が強まり、鋼材重量を少なくするために複雑な接合部を有する設計が多用され、施工性の良い設計を行おうとしても、鋼材重量増加を理由に、その設計が評価されない等の問題が発生する。これらの問題を解決するために、鉄骨製作コストの評価は重要である。

本研究で用いた労務時間係数は、本来、工場ごとに係数を準備する必要がある。また、コスト評価の精度を高めるため、今後も実物件の労務時間データの分析と蓄積を継続し、労務時間係数及び評価式の改善が必要と考えられるが、設計の初期段階で、鉄骨製作労務の難易度を反映したコスト評価へ適用する場合には、現段階のこの程度の信頼性を持つ評価式で十分有効であり、実施設計において活用できると考えられる。

## 第4章 ラーメン骨組の最適設計

### における遺伝的アルゴリズムの改善提案

- 4.1 序
- 4.2 最小重量設計問題と最小コスト設計問題の定式化
  - 4.2.1 最小重量設計問題
  - 4.2.2 最小コスト設計問題
  - 4.2.3 無制約最小化問題への変換
- 4.3 計算手法
  - 4.3.1 改善前 GA
  - 4.3.2 一次元直線探索
    - 4.3.2.1 一次元直線探索の計算手順
    - 4.3.2.2 目的関数値制限に基づく一次元直線探索の高速化
- 4.4 数値検証に用いる解析モデル
  - 4.4.1 3層3スパン平面骨組
  - 4.4.2 5層3スパン平面骨組
- 4.5 解析結果
  - 4.5.1 改善前 GA の解析結果
  - 4.5.2 改善後 GA の解析結果
    - 4.5.2.1 最小重量設計問題
    - 4.5.2.2 最小コスト設計問題
    - 4.5.2.3 目的関数値制限に基づく高速化の効果確認
- 4.6 最適設計における遺伝的アルゴリズムの改善提案のまとめ

## 4.1 序

鋼構造建築骨組の最適設計研究の多くは、骨組の部材断面性能を決定する問題を扱い、その際、その単純さから断面性能又は断面寸法の連続変数近似を利用する等、連続変数最適化問題とする研究が行われてきた<sup>例えは 4)8)~12)</sup>。しかし、実際の構造設計の問題は、規格断面リストから適切な断面を選定するいわゆる離散断面最適化問題となり、最近では、離散断面最適化問題を取り扱う研究も多い。また、連続変数最適解を出発点とした離散断面最適化手法の研究も行われている<sup>例えは 5)13)~15)</sup>。離散断面最適化問題に対して、大域的最適解が得られることを理論的に保証することができる解法として例えば列挙法<sup>例えは 16),17)</sup>や分枝限定法<sup>例えは 18)</sup>がある。しかし、問題の規模が大きくなると膨大な計算が必要なため、大規模問題には適用できない。一方、大域的最適解が得られることを理論的に保証できないが、列挙法や分枝限定法より計算負荷が少ない手法として種々の発見的手法が提案されている。発見的手法には焼きなまし法<sup>例えは 19)</sup>等の単点探索法、遺伝的アルゴリズム<sup>例えは 6)20)~27)</sup>（以降では、GA と呼ぶ。）等の多点探索法が挙げられる。

筆者らは、これらの中から、GA に着目し研究を行っている。GA は、感度解析が不要なため、微分不可能な関数であっても数式化さえできれば、どのような問題にも対応できるという長所を有していることから、様々な問題に適用されてきた。しかし、従来の GA は、交叉による探索が、初期個体群の遺伝子に依存するため、一般に、交叉の探索範囲は、大きな設計空間の中の一部となる。そのため、交叉で探索できない領域を突然変異によりカバーするしくみとなっている。しかし、突然変異は、個体の遺伝子をランダムに変更するものであり、探索の効率は悪い。ここで問題となるのは、最小重量設計における重量関数は、部材重量の変化が関数値の変化として直接的に反映されるのに比べて、本研究で対象とする最小コスト設計で用いるコスト関数は、部材の変更が、重量のみでなく製作コストにも影響し関数値の変化が複雑であり局所解が多いことである。実務の構造設計に GA を用いた最適設計プログラムを適用するためには、GA の探索効率をさらに改善する必要がある。GA の改善については、傾斜法<sup>例えは 28)</sup>、局所探索法<sup>例えは 29)~31)</sup>、応力による断面変更<sup>例えは 32)~33)</sup>などを GA の中に組み込んだハイブリッド GA が提案され、その有効性が示されている。しかし、例えば、傾斜法によるハイブリッド GA では、一般に、探索の初期の段階で、局所的な探索が進みすぎ、局所最適解に収束しがちであることが指摘されている<sup>28)</sup>。本章では、交叉や突然変位に加えて、ランダムに選んだ設計変数の座標軸方向への直線探索を組み込んだ GA を提案する。この提案手法（以降では、一次元直線探索と呼ぶ。）を、鉄骨骨組の部材断面最適化問題に適用し、一次元直線探索の組み込みによる厳密解への収束性及び到達率の改善効果の検証を行う。なお、厳密解とは、検証のために列挙法により求めた解<sup>17)</sup>である。

本章では 2 種類の部材断面最適化問題を扱う。一つは最小重量設計問題で、規格断面使用により、鋼材重量が不連続に変化する。もう一つは本論文で主眼としている最小コスト設計問題で、規格断面使用により鋼材コストが不連続に変化することに加えて、接合部のダイアフラム数や溶接接合面積が変化することにより鉄骨製作コストが不連続に変化し、最小重量設計問題より複雑な設計問題である。例示する鉄骨骨組は 3 層と 5 層の 2 種類である。骨組の規模と設計問題の複雑さ両面から、提案手法の収束性及び厳密解到達率の改善効果の検証を行う。

## 4.2 最小重量設計問題と最小コスト設計問題の定式化

本論文では、建築基準法に準拠した構造設計による部材断面最適化問題として、図 4.1 のような鉄骨平面骨組の最小重量設計問題と最小コスト設計問題を取り扱う。

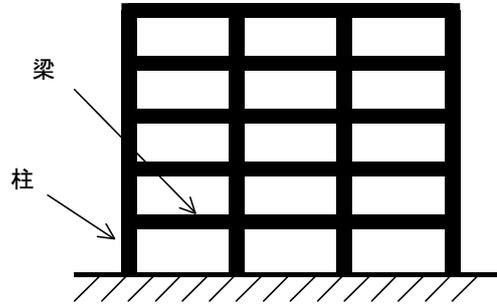


図 4.1 鉄骨平面骨組

### 4.2.1 最小重量設計問題

本論文で扱う鉄骨骨組の最小重量設計問題は以下のように記述できる。

$$\text{Find } D_{idc} (idc = 1, \dots, NDC), H_{idb} (idb = 1, \dots, NDB) \quad (4.1)$$

$$\text{which minimize } F = \rho \sum_{i=1}^{NM} A_i L_i \quad (4.2)$$

subjected to

鉛直荷重時に関する制約関数

$$g_{Li} = \frac{N_{Li}}{A_i f_{NLi}} + \frac{M_{Li}}{Z_i f_{MLi}} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, NM) \quad (4.3a)$$

鉛直および水平の同時荷重時に関する制約関数

$$g_{Si} = \frac{N_{Si}}{A_i f_{NSi}} + \frac{M_{Si}}{Z_i f_{MSi}} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, NM) \quad (4.3b)$$

層間変形角の制約関数

$$g_{Dk} = \frac{\delta_k / H_k}{1/200} \leq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, NF) \quad (4.3c)$$

柱梁耐力比の制約関数

$$g_{CBRk} = \sum_i M_{PCki} / \sum_i 1.5M_{PBki} \geq 1 (k = 1, \dots, NF) \quad (4.3d)$$

骨組の崩壊荷重に対する制約関

$$g_P = \lambda_P \geq 1 \quad (4.3e)$$

$D_{idc}$  は、鋼管柱の規格断面番号を示す。また、 $H_{idb}$  は、H形鋼梁の規格断面番号を示す。これらの部材断面は、表 4.1、表 4.2 で示されている規格断面リストより選定される。 $NDC$ 、 $NDB$ 、 $NM$  は、それぞれ柱設計変数の総数、梁設計変数の総数、部材総数である。

最小重量設計問題における、目的関数  $F$  は、骨組部材の総重量である。 $\rho$ 、 $A_i$ 、 $L_i$  は、それぞれ鋼材比重、部材断面積、部材長である。 $g_{Li}$  は、鉛直荷重時に関する制約関数。 $g_{Si}$  は、鉛直および水平の同時荷重時に関する制約関数。 $g_{Dk}$  は、層間変形角の制約関数を示す。 $g_{CBRk}$  は、柱梁耐力比の制約関数。 $g_P$  は、骨組の崩壊荷重に対する制約関数である。 $N_i$ 、 $M_i$ 、 $f_{Ni}$ 、 $f_{Mi}$ 、

$Z_i$ は各部材の軸力，曲げモーメント，軸力と曲げの許容応力度，断面係数である． $\delta_k$ ,  $H_k$ ,  $NF$ は，各層の層間変形，階高および階数である． $M_{PCKi}$ ,  $M_{PBKi}$ は，それぞれ柱および梁の部材耐力を示す． $\lambda_p$ は，設計用水平荷重に対する崩壊機構形成時の荷重倍率を示す

表 4.1 角形鋼管柱 BCR295 の断面リスト

部材成系列	規格断面番号 ID	部材サイズ
□350系列	1	□-350×12
	2	□-350×16
	3	□-350×19
	4	□-350×22
□400系列	5	□-400×16
	6	□-400×19
□450系列	7	□-400×22
	8	□-450×16
	9	□-450×19
□500系列	10	□-450×22
	11	□-500×19
	12	□-500×22

表 4.2 JIS 規格 H 形鋼梁 SN400 の断面リスト

部材成系列	規格断面番号 ID	部材サイズ
H400系列	細幅 1	H-400×200×8×13
H500系列	細幅 2	H-500×200×10×18
	中幅 3	H-500×300×11×18
H600系列	細幅 4	H-600×200×11×17
	中幅 5	H-600×300×12×20
H700系列	細幅 6	H-700×300×13×24

#### 4.2.2 最小コスト設計問題

本論文で扱う鉄骨骨組の最小コスト設計問題は次のように記述できる．

$$\text{Find } D_{idc} (idc = 1, \dots, NDC), H_{idb} (idb = 1, \dots, NDB) \quad (4.4)$$

which minimize

$$F = CF + KS \cdot \left( \rho \sum_{i=1}^{NM} A_i L_i + \rho \sum_{i=1}^{NJ} V_{Di} \right) \quad (4.5)$$

subjected to Eq. (3a-e)

最小コスト設計問題における，目的関数  $F$  は，鉄骨製作コストと鋼材コストの合計コスト（以降では，単に合計コストと呼ぶ．）である． $CF$  は，第 2 章で示した鉄骨製作コスト， $KS$  は，鋼材単価， $V_{Di}$  は， $i$  番目の接合部のダイアフラム体積， $NJ$  は，接合部総数である．簡単のため，ダイアフラム板厚は，接合する梁フランジ板厚に 3mm を加えた厚さとする．また，ダイアフラム出寸法の部分は，体積に算定していない．

#### 4.2.3 無制約最小化問題への変換

前述の式(4.1)～式(4.5)の問題は，制約条件付最小化問題であるが，この問題に GA を適用するため，次のような無制約の最小化問題に変換する．4.2.1 の最小重量設計問題及び，4.2.2 の最小コスト設計問題を無制約の最小化問題に変換したものを式(4.6)，式(4.7)に示す．

$$F^* = (1 + \Delta G) \cdot F \quad (4.6)$$

$$\Delta G = \sum_{g_{Li} > 1} (g_{Li} - 1) + \sum_{g_{Si} > 1} (g_{Si} - 1) + \sum_{g_{Dk} > 1} (g_{Dk} - 1) + \sum_{g_{CBRk} < 1} (1 - g_{CBRk}) + \sum_{g_P < 1} (1 - g_P) \quad (4.7)$$

ここで， $\sum_{g > 1}$  は， $g > 1$  を満足するもの， $\sum_{g < 1}$  は， $g < 1$  を満足するものの総和で，制約条件の逸脱度を表す．

$F^*$ は、前述の  $F$  に、制約条件の逸脱度を乗じたものであり、逸脱度が大きいほど、 $F^*$ は  $F$  よりも大きい値となる。制約条件を全て満たす場合は、 $F^*$ と  $F$ は等しい。 $F^*$ と  $F$ が等しく、かつ、 $F^*$ が最小となる解を求めることにより、最小化問題を解くことができる。

## 4.3 計算手法

### 4.3.1 改善前 GA

本論文では、一次元直線探索を組み込まない従来型の GA を改善前 GA とよび、一次元直線探索を組み込んだ GA を改善後 GA とよぶ。

改善前 GA は、文献 6)22)に示すようなランク戦略に基づく手順で実行することができる。個体  $i$  の遺伝子型は、各部材グループ（以降では、設計変数という。）に割り当てられる規格断面番号を決定するための 0 以上 1 以下の実数値（遺伝子）群  $R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{iND}$  をそのまま一列に並べた形（実数コード）とする。ここで、 $ND$  は、設計変数総数である。実数コードの表現型（規格断面番号）への変換方法は、文献 23)に示されている。遺伝子長は、設計変数の総数に等しくなる。交叉には、最も単純で基本的な交叉である一点交叉を採用している。改善前 GA では、一般に交叉位置は、2 進数コードの任意位置とするが、ここでは、遺伝子の区切りの箇所でも等確率に発生するようにしている。前方の遺伝子情報と後方の遺伝子情報をどちらの親から得るかも等確率でランダムに決定する。突然変異については、すべての遺伝子がある確率（突然変異確率）で選択していき、選択された遺伝子を新たな乱数で置き換えている。

### 4.3.2 一次元直線探索

#### (1) 一次元直線探索の計算手順

図 4.2 に示す門型平面骨組に一次元直線探索を適用した場合の概念図を図 4.3 に示す。図 4.2 に示す門型平面骨組の場合、 $R_{i1}$  は個体  $i$  の柱断面、 $R_{i2}$  は個体  $i$  の梁断面に対応する遺伝子を示す。図 4.3 中の●印は現世代の個体を意味している。ここで全個体の全設計変数から、指定確率  $PI$  で一次元直線探索を実行する設計変数を選定（以降では、特定設計変数と呼ぶ。）する。特定設計変数として個体  $i$  の  $R_{i2}$  が選定された場合、 $R_{i1}$  の規格断面は固定したままで、 $R_{i2}$  を全規格断面の中から順次変更することで派生する個体全ての  $F^*$  を計算する。図 4.3 中の縦方向に並んだ○印は、 $R_{i2}$  が採用可能な全規格断面を順次変更した場合の個体  $i$  からの派生個体を意味している。次に、個体  $i$  と全派生個体の  $F^*$  の中で、最小の  $F^*$  を与える規格断面に個体  $i$  の  $R_{i2}$  を変更する。これにより、最適設計解への収束性及び到達率が改善されると考えられる。

図 4.4 に、改善後 GA の計算手順を示す。改善後 GA の大きな計算の流れは、改善前 GA の計算手順の中の「 $NI$  個の個体の  $F^*$  の計算」の後に、一次元直線探索の計算手順を行い、再び、改善前 GA の計算手順に戻る。



## (2) 目的関数値制限に基づく一次元直線探索の高速化

一次元直線探索で全派生個体の計算を行うと、一連の計算回数が改善前 GA よりも増加し計算時間が長くなる場合がある。ところで、式(4.7)の制約条件の逸脱度  $\Delta G$  の計算には、骨組解析が必要であり計算負荷が大きい。式(4.2)、式(4.5)の目的関数値  $F$  の計算は、骨組解析より負荷はずっと少ない。そこで、一次元直線探索を行う派生個体の  $F$  が、式(4.8)を満足する場合に、その派生個体の骨組解析を実施し、反対に、その派生個体の  $F$  が  $F_{opc}$  を上回る場合には、最適設計解となる可能性が無く、また、その派生個体の  $F$  が  $\gamma \cdot F_{opc}$  を下回るならば、その派生個体が制約条件を満足する可能性が低いと考え、そのような場合にはその派生個体を捨て、骨組解析をスキップして次の派生個体の探索に移ることとする。これにより最適設計解となる可能性が低い派生個体の骨組解析回数を大きく低減し、計算時間の短縮が期待される。

$$\gamma \cdot F_{opc} \leq F \leq F_{opc} \quad (4.8)$$

ここで、 $F_{opc}$ ：その時点までで制約条件を満足する個体の中での最小の目的関数値、 $\gamma$ ：派生個体の目的関数値の下限值を決める係数 ( $0 \leq \gamma < 1$ )。

目的関数値制限に基づく一次元直線探索の高速化は、図 4.4 の「派生個体の目的関数  $F$  の計算」の後に行っている。

## 4.4 数値検証に用いる解析モデル

### 4.4.1 3層3スパン平面骨組

図 4.5 に 3 層 3 スパン平面骨組（以降では 3 層骨組と呼ぶ。）を示す。設計変数は、柱、各層外梁、各層内梁の計 7 変数とする。

鉛直荷重は、固定荷重と積載荷重の和として  $7.84 \text{ (kN/m}^2\text{)}$  を、水平荷重については、弾性制約に対して標準層せん断力係数  $C_0=0.2$  の  $A_i$  分布層せん断力を用いるが、塑性制約に対しては、 $D_s=0.4$  とした地震力を用いている。使用する部材断面は 2 章の表 4.1、表 4.2 に示した規格断面である。柱部材は角形鋼管 (BCR295)、梁部材は細幅・中幅 H 形鋼 (SN400) である。ヤング係数  $E$  は  $2.06 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  としている。コスト算出に用いる鋼材の材料単価は 4079 円/kN (4 万円/トン) とした。表 4.3 に 3 層骨組の列挙法による最小重量設計問題と最小コスト設計問題の厳密解<sup>17)</sup>を示す。この厳密解は GA の改善効果を評価する基準として用いる。3 層骨組の場合、最小重量設計解と最小コスト設計解の断面寸法、骨組重量、コストは同じである。

### 4.4.2 5層3スパン平面骨組

図 4.6 に 5 層 3 スパン平面骨組（以降では 5 層骨組と呼ぶ。）を示す。設計変数は、下層部 (1, 2 層)、上層部 (3, 4, 5 層) の柱、各層外梁、各層内梁の計 12 変数である。

鉛直荷重は、固定荷重と積載荷重の和として  $6.72 \text{ (kN/m}^2\text{)}$  とし、水平荷重及び、規格断面リスト、基準強度、ヤング係数、鋼材の材料単価は、3 層骨組に同じである。

表 4.4 に 5 層骨組の列挙法による最小重量設計問題と最小コスト設計問題の厳密解<sup>17)</sup>を示す。この厳密解は GA の改善効果を評価する基準として用いる。

表 4.3 3層骨組の最小重量設計解

と最小コスト設計解の断面寸法

		A(cm <sup>2</sup> )	I(cm <sup>4</sup> )	Z(cm <sup>3</sup> )	Z <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> )
1,2,3層柱	□-400×16	237.0	57,100	2,850	3,370
3層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
2層外梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
1層外梁	H-500×300×11×18	159.2	68,900	2,820	3,130
3層内梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
2層内梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
1層内梁	H-500×300×11×18	159.2	68,900	2,820	3,130
柱梁重量	154.75kN				
コスト	¥1,842,543				

表 4.4(A) 5層骨組の最小重量設計解の断面寸法

		A(cm <sup>2</sup> )	I(cm <sup>4</sup> )	Z(cm <sup>3</sup> )	Z <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> )
3,4,5層柱	□-400×16	237.0	57,100	2,850	3,370
1,2層柱	□-450×16	269.0	82,900	3,690	4,330
5層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
4層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
3層外梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
2層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
1層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
5層内梁	H-400×200×8×13	83.37	23,500	1,170	1,310
4層内梁	H-400×200×8×13	83.37	23,500	1,170	1,310
3層内梁	H-600×300×12×20	187.2	114,000	3,890	4,350
2層内梁	H-700×300×13×24	231.5	197,000	5,640	6,340
1層内梁	H-700×300×13×24	231.5	197,000	5,640	6,340
柱梁重量	247.13kN				
コスト	¥3,420,861				

表 4.4(B) 5層骨組の最小コスト設計解の断面寸法

		A(cm <sup>2</sup> )	I(cm <sup>4</sup> )	Z(cm <sup>3</sup> )	Z <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> )
3,4,5層柱	□-400×16	237.0	57,100	2,850	3,370
1,2層柱	□-400×19	277.2	65,400	3,270	3,900
5層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
4層外梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
3層外梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
2層外梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
1層外梁	H-600×300×12×20	187.2	114,000	3,890	4,350
5層内梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
4層内梁	H-500×200×10×16	112.2	46,800	1,870	2,130
3層内梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
2層内梁	H-600×300×12×20	187.2	114,000	3,890	4,350
1層内梁	H-600×200×11×17	131.7	75,600	2,520	2,900
柱梁重量	254.97kN				
コスト	¥3,132,483				

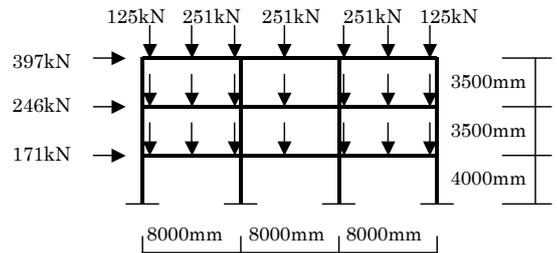


図 4.5 3層3スパン平面骨組

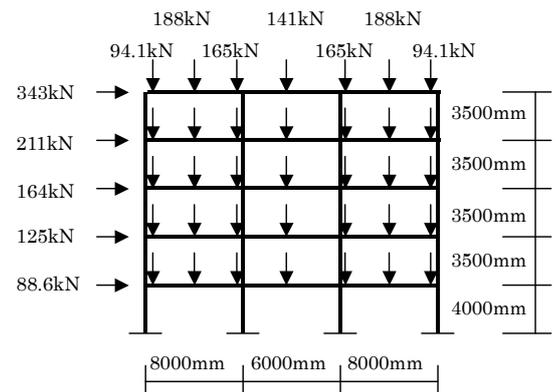


図 4.6 5層3スパン平面骨組

## 4.5 解析結果

### 4.5.1 改善前 GA の解析結果

4.4 に示した 3 層および 5 層骨組の最小重量設計問題および最小コスト設計問題に対する改善前 GA の解析結果を示す。GA の個体数 NI は 50 個体とし、世代数は 300 世代とした。

図 4.7 に、目的関数値の平均値（乱数を変えた 5 回の実行の平均値）の履歴を示す。縦軸は、目的関数平均値の厳密解に対する比率。横軸は、計算時間の代用値として骨組解析回数で示す。これより、層数が増加すると、厳密解への収束性が悪くなる傾向が確認できる。また、最小重量問題より複雑な最小コスト設計問題の方が厳密解への収束性が悪くなる傾向が確認できる。また、いずれの解析ケースにおいても骨組解析回数約 5000 回前後で各解析ケース固有の値に収束する傾向を示す。

図 4.8 に、各設計問題において、乱数を変えた 5 回の実行の中で、目的関数値が最も良い収束履歴を示した実行結果（以降では、最良結果と呼ぶ。）を示す。縦軸は、目的関数値の厳密解に対する比率。横軸は、骨組解析回数である。3 層骨組の最小重量設計問題と最小コスト設計問題は、目的関数平均値では収束性に明らかな差が見られたが、最良結果は、ほぼ同程度の収束傾向を示している。5 層骨組では、目的関数平均値と同様に、最小コスト設計問題の方が最小重量問題より厳密解への収束性が悪くなる傾向が確認でき、その収束値の差は図 4.7 で示した目的関数平均値の差よりも大きい。

図 4.9 に、乱数を変えた 5 回の実行において、目的関数値が厳密解に到達した時点の骨組解析回数とその厳密解到達率（ここでは、厳密解の 0.1% 誤差の範囲内にあるものを正解と判定して、到達率を算定した。以降でも同様としている。）の履歴を示す。縦軸は、厳密解到達率。横軸は、骨組解析回数である。3 層骨組では、最小重量設計問題が骨組解析回数約 1800 回で、最小コスト設計問題では約 3100 回で、80% の到達率を示しているが、5 層骨組では、いずれの設計問題においても骨組解析回数 15000 回まで

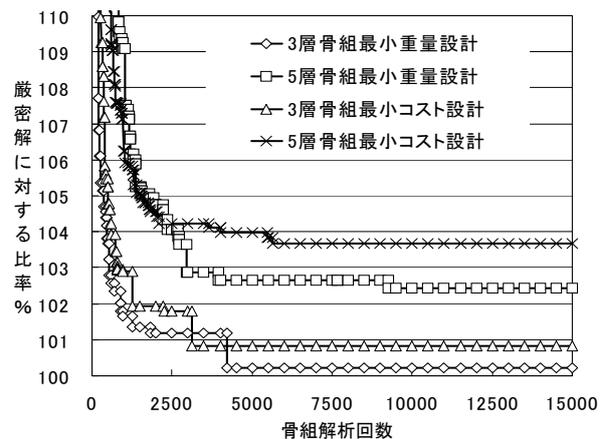


図 4.7 改善前 GA による目的関数平均値

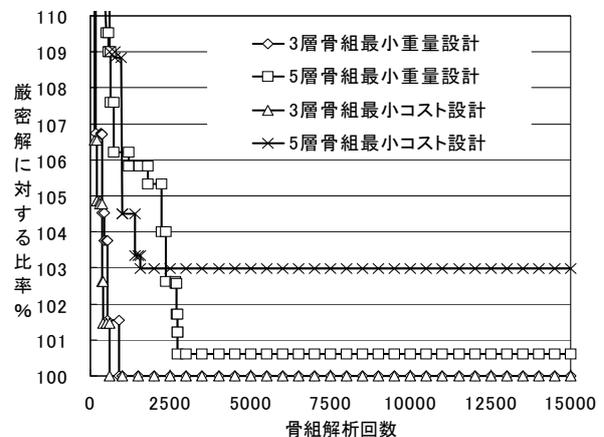


図 4.8 改善前 GA による最良結果

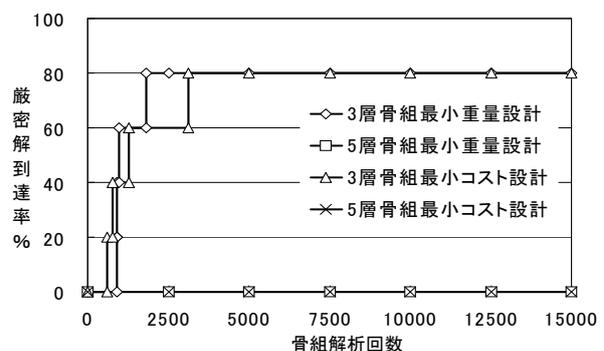


図 4.9 改善前 GA による厳密解到達率

の到達率は0%である。これより、骨組の規模が大きく設計変数が多い問題や、最小重量設計問題よりも問題が複雑な最小コスト設計問題では、局所最適解に陥りやすいため GA の厳密解への収束性や厳密解到達率が低下することが確認された。

## 4.5.2 改善後 GA の解析結果

### (1) 最小重量設計問題

4.4 に示した 3 層および 5 層骨組の最小重量設計問題に対する一次元直線探索を組み込んだ GA (以降では、単に改善後 GA と呼ぶ。) の解析結果を示す。解析に用いた個体数 NI は 50 個体。探索確率 P1 は、P1 値を変えてケーススタディーを行った結果から、50%を選択した。目的関数値制限に基づく高速化考慮における  $\gamma$  は 0.8 とした。

図 4.10, 図 4.14 に、3 層および 5 層骨組で得られた目的関数値である骨組重量の平均値の履歴を示す。縦軸は、骨組重量平均値の厳密解に対する比率。横軸は、骨組解析回数である。3 層骨組, 5 層骨組のいずれに対しても、改善後 GA は改善前 GA に比べて厳密解への収束性が良く、改善効果が認められる。

図 4.11, 図 4.15 に、3 層および 5 層骨組における最良結果を示す。縦軸は、骨組重量の厳密解に対する比率。横軸は、骨組解析回数である。3 層骨組では、改善前 GA も改善後 GA も、厳密解に到達している。改善後 GA は改善前 GA より少ない骨組解析回数で厳密解に収束しており、改善効果が認められる。5 層骨組では、改善前 GA は厳密解に到達していないが、改善後 GA は厳密解に到達しており、改善効果が認められる。図 4.12, 図 4.16 に、3 層および 5 層骨組における乱数を変えた 5 回の実行の中で、目的関数値が最も悪い収束履歴を示した実行結果 (以降では、最悪結果と呼ぶ。) を示す。最良結果と最悪結果についての着目は、実施設計において時間の都合により、初期乱数 1 個で部材断面の設定を行なう場合を想定し、最小コスト設計解の最悪結果と、最初重量設計解の最良結果を比較した場合にどのような判断ができるか、また、その逆の場合にどのような判断ができるかを考察することを意図している。3 層骨組, 5 層骨組のいずれにおいても改善前 GA は厳密解に到達していないが、改善後 GA は、厳密解に到達しており、改善効果が認められる。改善効果は 5 層骨組において顕著である。これらの図より、3 層骨組, 5 層骨組のいずれにおいても、改善後 GA の最悪結果の収束値は、改善前 GA の最良結果の収束値以下であることが確認できる。

図 4.13, 図 4.17 に、3 層および 5 層骨組において、乱数を変えた 5 回の実行において、骨組重量が厳密解に到達した時点の骨組解析回数とその厳密解到達率の履歴を示す。縦軸は、厳密解到達率。横軸は、骨組解析回数である。3 層骨組では、改善後 GA は骨組解析回数約 1500 回までに、100%の厳密解到達率を示しており、改善前 GA に比べて改善効果が認められる。5 層骨組では、改善前 GA が骨組解析回数 15000 回までに 0%の厳密解到達率であるが、改善後 GA では骨組解析回数約 6800 回までに、100%の厳密解到達率を示しており、改善効果が認められる。

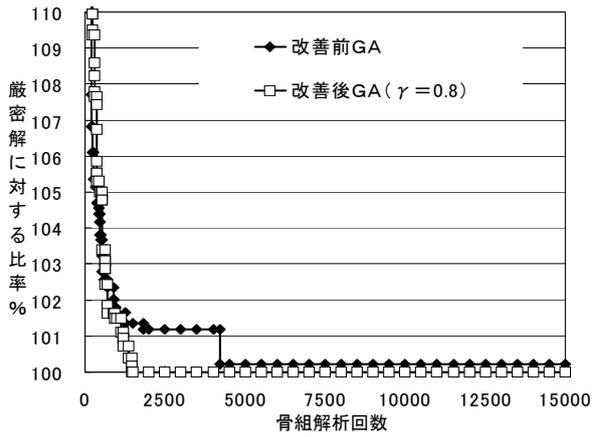


図 4.10 3層骨組の最小重量設計における骨組重量平均値

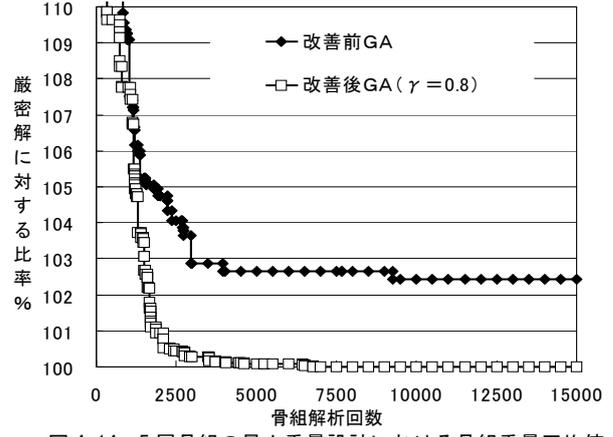


図 4.14 5層骨組の最小重量設計における骨組重量平均値

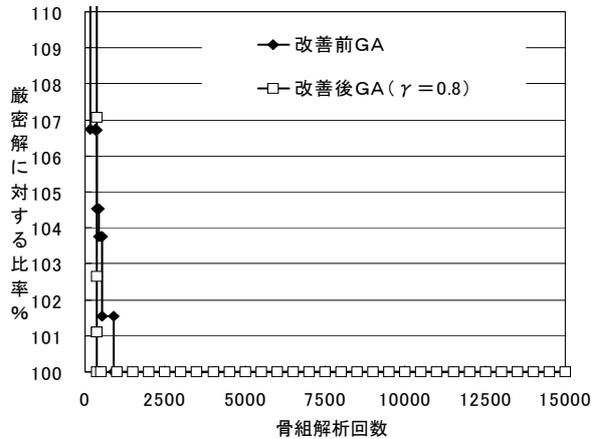


図 4.11 3層骨組の最小重量設計における最良結果

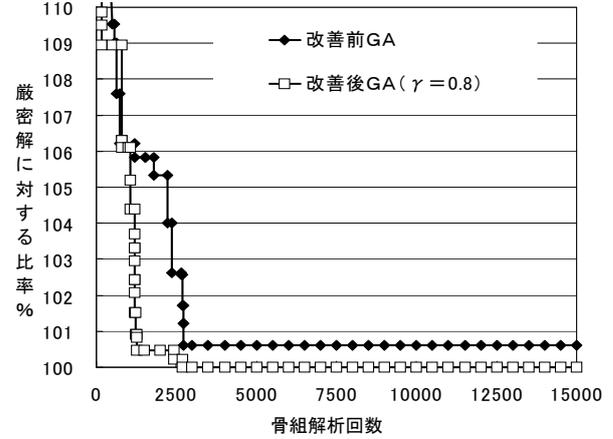


図 4.15 5層骨組の最小重量設計における最良結果

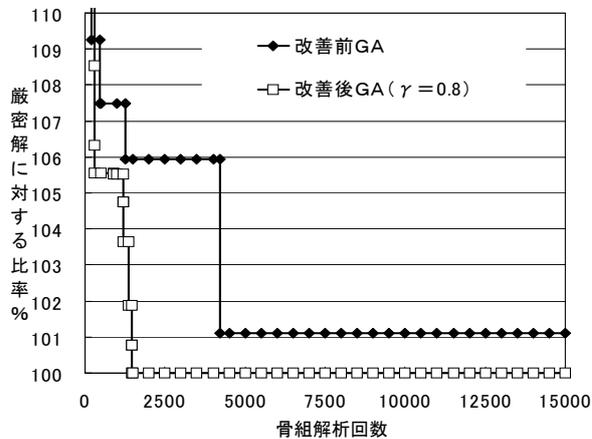


図 4.12 3層骨組の最小重量設計における最悪結果

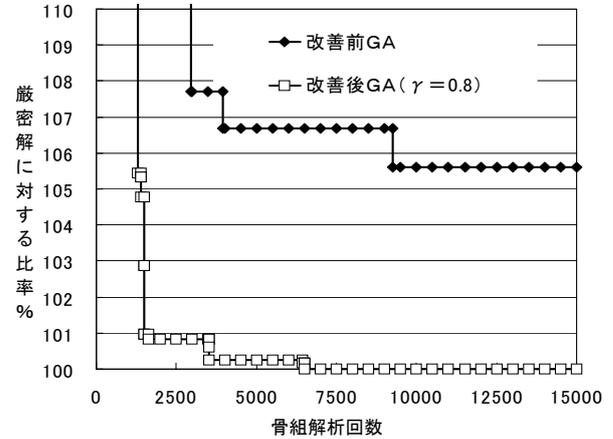


図 4.16 5層骨組の最小重量設計における最悪結果

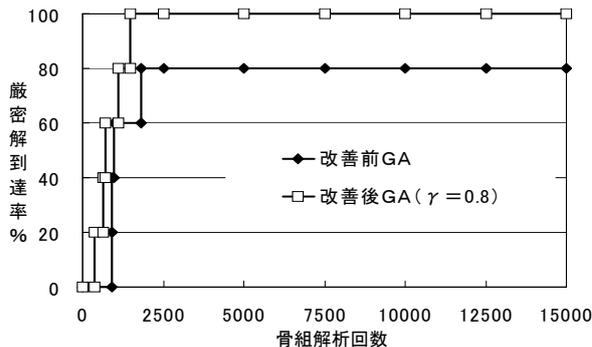


図 4.13 3層骨組の最小重量設計における厳密解到達率

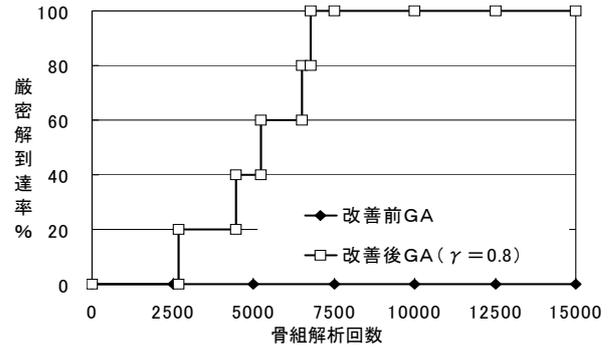


図 4.17 5層骨組の最小重量設計における厳密解到達率

## (2) 最小コスト設計問題

4.4に示した3層および5層骨組の最小コスト設計問題に対する改善後GAの解析結果を示す。解析に用いた個体数, 探索確率  $P1$ , 目的関数値制限に基づく高速化考慮における  $\gamma$  は, 4.5.2(1)に示した最小重量設計問題と同じ条件としている。

図 4.18, 図 4.22 に, 3 層および 5 層骨組で得られた目的関数値である合計コストの平均値の履歴を示す。3 層骨組, 5 層骨組のいずれに対しても, 改善後 GA は改善前 GA に比べて厳密解への収束性が良く, 改善効果が認められる。

図 4.19, 図 4.23 に, 3 層および 5 層骨組における最良結果を示す。3 層骨組では, 改善前 GA も改善後 GA も, 厳密解に到達している。改善後 GA は改善前 GA より若干ではあるが少ない骨組解析回数で厳密解に収束しており, 改善効果が認められる。5 層骨組では, 改善前 GA は厳密解に到達していないが, 改善後 GA では局所的最適解に収束することなく厳密解に収束しており, 改善効果が認められる。図 4.20, 図 4.24 に, 3 層および 5 層骨組における最悪結果を示す。3 層骨組では, 改善前 GA は厳密解に到達していないが, 改善後 GA は厳密解に到達しており, 改善効果が認められる。5 層骨組では, 改善前 GA も改善後 GA も, 厳密解に到達していないが, 改善前 GA が厳密解の約 104.5%に収束しているのに対し, 改善後 GA は厳密解の 100.5%に到達しており, 改善効果が認められる。これらの図より, 3 層骨組, 5 層骨組のいずれにおいても, 改善後 GA の最悪結果の収束値は, 改善前 GA の最良結果の収束値以下であることが確認できる。

図 4.21, 図 4.25 に, 3 層および 5 層骨組において, 乱数を変えた 5 回の実行において, 合計コストが厳密解に到達した時点の骨組解析回数とその厳密解到達率の履歴を示す。3 層骨組では, 改善後 GA は骨組解析回数約 1600 回までに, 100%の厳密解到達率を示しており, 改善前 GA に比べて改善効果が認められる。5 層骨組では, 改善前 GA が骨組解析回数 15000 回まで 0%の厳密解到達率であるが, 改善後 GA では骨組解析回数約 1600 回で初回の厳密解到達の後, 約 11200 回で 80%の厳密解到達率を示しており, 改善効果が認められる。

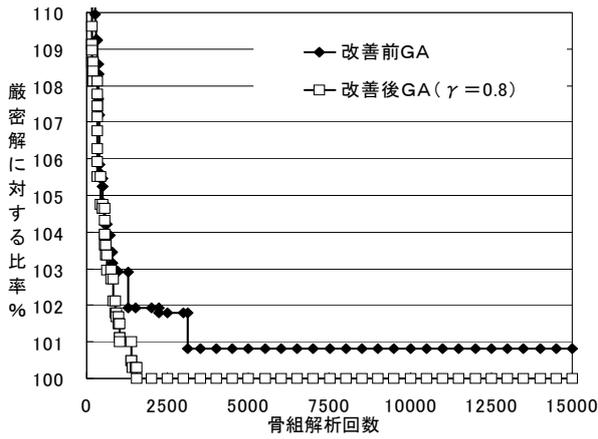


図 4.18 3層骨組の最小コスト設計における合計コスト平均値

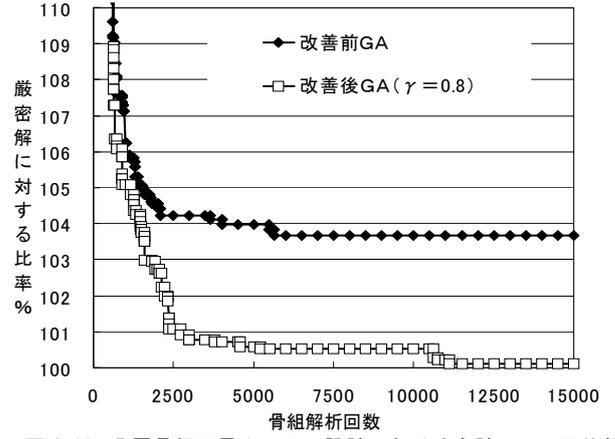


図 4.22 5層骨組の最小コスト設計における合計コスト平均値

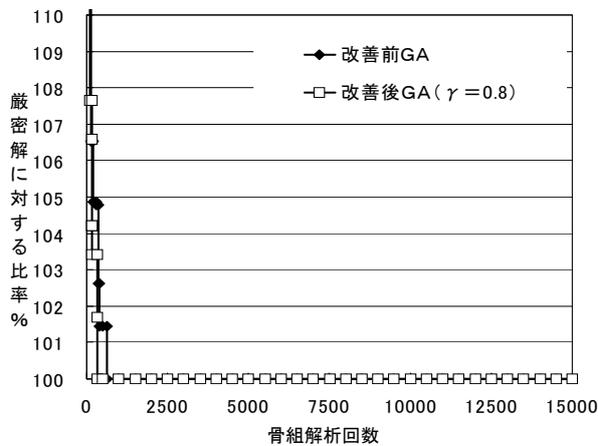


図 4.19 3層骨組の最小コスト設計における最良結果

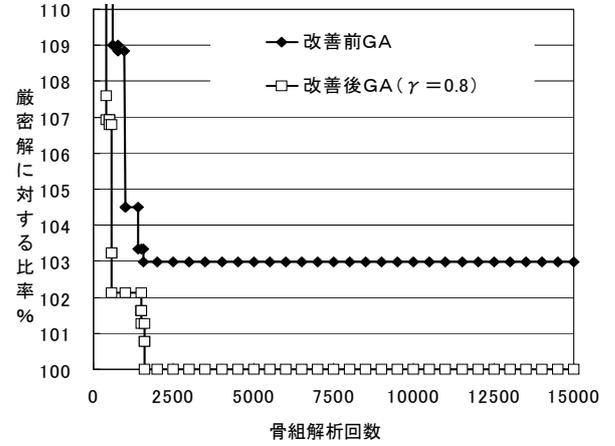


図 4.23 5層骨組の最小コスト設計における最良結果

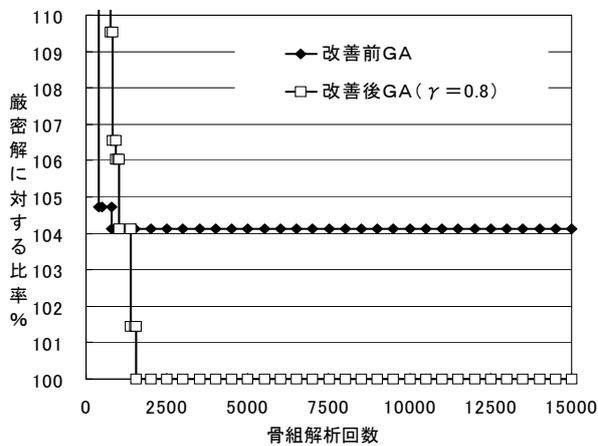


図 4.20 3層骨組の最小コスト設計における最悪結果

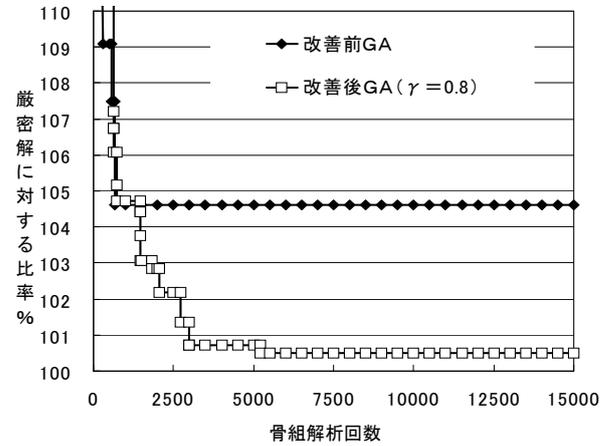


図 4.24 5層骨組の最小コスト設計における最悪結果

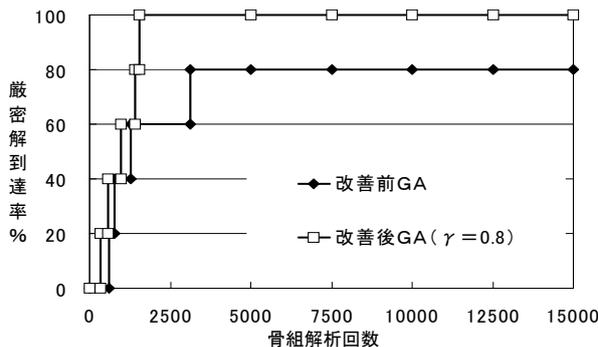


図 4.21 3層骨組の最小コスト設計における厳密解到達率

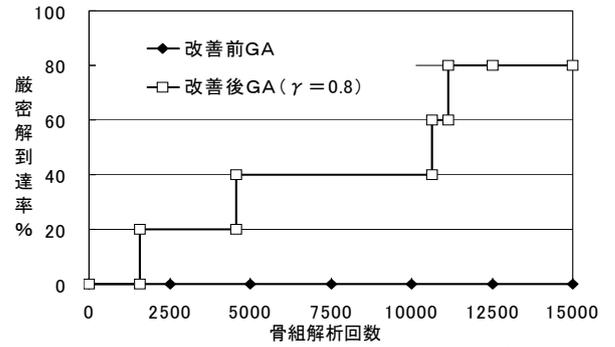


図 4.25 5層骨組の最小コスト設計における厳密解到達率

### (3) 目的関数値制限に基づく高速化の効果確認

4.3.2 (2) に示した目的関数値制限に基づく高速化の効果を確認するため、改善後 GA の高速化考慮と高速化なしの比較を行う。以下の解析に用いた個体数、探索確率 P1 は、4.5.2 (1)、4.5.2 (2) と同じ条件としている。図 4.26～図 4.29 に、乱数を変えた 5 回の実行において、目的関数が厳密解に到達した時点の骨組解析回数とその厳密解到達率の履歴を 3 層骨組、5 層骨組それぞれの最小重量設計問題と最小コスト設計問題について示す。これらの図には、改善前 GA、改善後 GA の高速化なし、高速化考慮の  $\gamma$  が 0.5, 0.8, 0.9, 0.975 の 6 種類の結果について示している。図 4.26, 図 4.28 の 3 層骨組では設計問題に関わらず、高速化なしでも骨組解析回数 15000 回までの厳密解到達率は 100% となり改善前 GA の 80% よりも改善されているが、厳密解に到達する骨組解析回数が増加する傾向を示す。これは一次元直線探索により最適解になる可能性の低い派生個体の骨組解析を多数行っているためである。図 4.27, 図 4.29 の 5 層骨組では設計問題に関わらず、高速化なしでも改善前 GA より厳密解到達率は改善されている。これは、規模が大きくなると、一次元直線探索による派生個体から最適解が生まれることを示している。

図 4.26, 図 4.27 の最小重量設計問題では、高速化なしに比較して高速化により厳密解に到達するための骨組解析回数を低減することができている。その低減効果は 3 層骨組より 5 層骨組の方が大きい。 $\gamma$  の違いによる解析結果への影響は顕著ではなく、5 層骨組の場合には  $\gamma \cdot F_{opc} \leq F$  よりも  $F \leq F_{opc}$  による低減効果が大きいことを示している。図 4.28 の 3 層骨組最小コスト設計問題では、厳密解到達率 80% までは  $\gamma$  の違いによる解析結果への影響は顕著ではないが、厳密解到達率 100% への到達は  $\gamma=0.8$  の場合が最も骨組解析回数が少ない結果を示している。図 4.29 の 5 層骨組最小コスト設計問題では、 $\gamma=0.975$  とした場合に高速化なしよりも厳密解到達率が低下しているが、 $\gamma$  が 0.9 以下の場合に厳密解到達率は改善されている。 $\gamma$  が 0.8 と 0.5 の場合には同一の解析結果であり、 $\gamma$  が 0.8 より小さい値では改善効果に大きな差がないことを示している。

図 4.30 に、5 層骨組の最小コスト設計問題に対する、目的関数の平均値の履歴を示す。改善後 GA の高速化考慮 ( $\gamma=0.8$ ) では、4.5.2 (2) で述べたように改善前 GA に対して目的関数の収束性が改善されているが、高速化なしではその目的関数の収束性は緩やかであり、骨組解析回数を多くなると高速化考慮に近い厳密解への収束性を示すが、骨組解析回数が約 5000 回以下の少ない段階では、改善前 GA よりも収束性が悪い。

図 4.31 に、5 層骨組の最小コスト設計問題に対する、最良結果を示す。高速化なしでは、厳密解に到達する骨組解析回数は約 9000 回であるが、高速化考慮では、約 1600 回で厳密解に到達しており、高速化考慮の改善効果が認められる。

以上より、一次元直線探索に高速化を考慮することにより、厳密解到達率の改善と厳密解に到達するための骨組解析回数を低減することができる。言い換えると、計算時間を短縮しながら計算性能の改善ができる。その改善効果は 3 層骨組より 5 層骨組の方が大きい。また、 $\gamma \cdot F_{opc} \leq F$  よりも  $F \leq F_{opc}$  による改善効果が大きい。 $\gamma$  の値は 0.975 等の極端に 1.0 に近い値を設定しなければ改善効果を期待できる。本論文で示した規模の最適設計問題では、 $\gamma=0.8 \sim 0.9$  程度が推奨される。

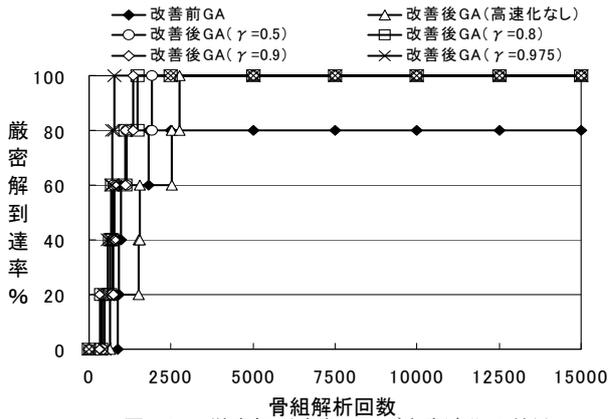


図 4.26 厳密解到達率に及ぼす高速化の効果  
(3層骨組・最小重量設計)

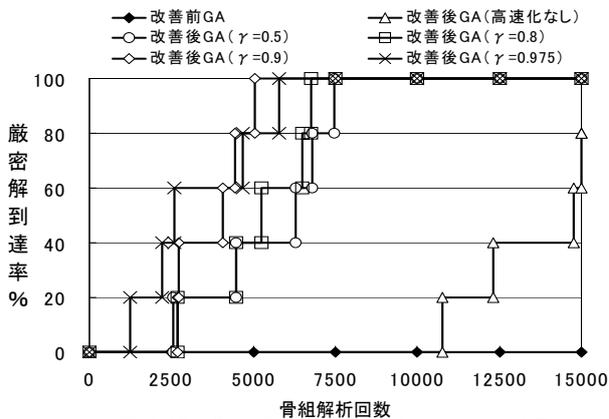


図 4.27 厳密解到達率に及ぼす高速化の効果  
(5層骨組・最小重量設計)

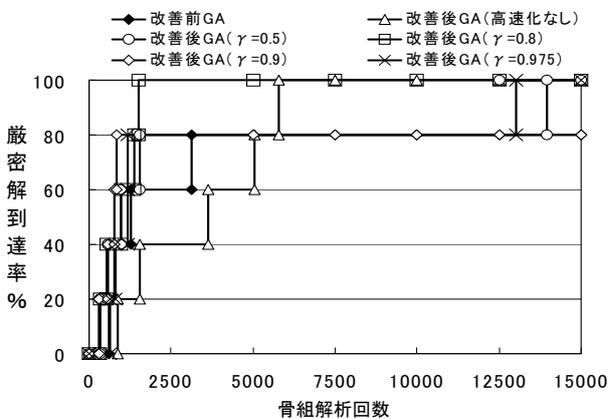


図 4.28 厳密解到達率に及ぼす高速化の効果  
(3層骨組・最小コスト設計)

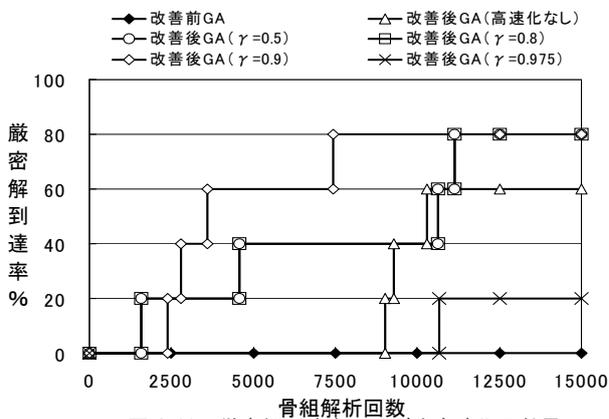


図 4.29 厳密解到達率に及ぼす高速化の効果  
(5層骨組・最小コスト設計)

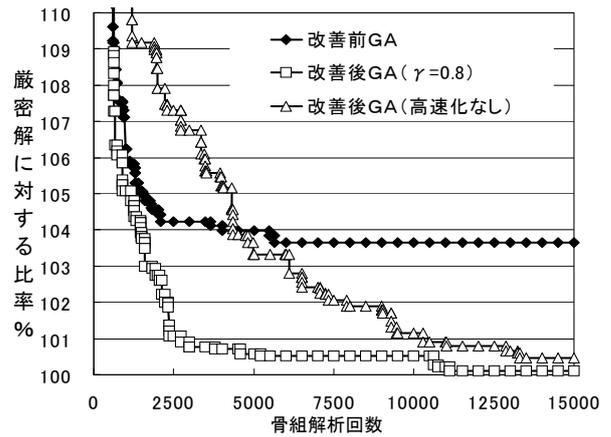


図 4.30 高速化有無による合計コスト平均値  
(5層骨組・最小コスト設計)

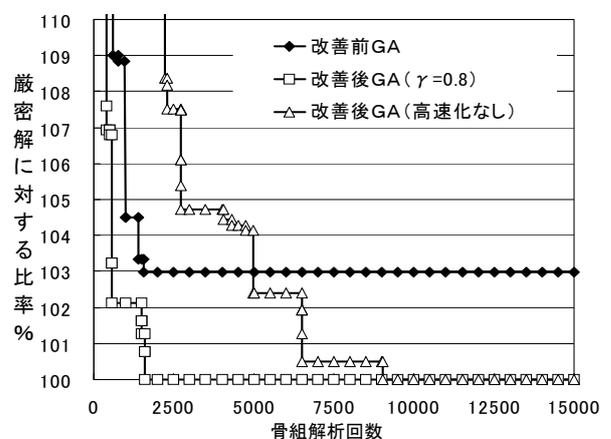


図 4.31 高速化有無による最良結果  
(5層骨組・最小コスト設計)

## 4.6 結論

本論文では、骨組の規模が大きく設計変数が多い問題や、最小重量設計問題よりも問題が複雑で厳密解到達率が低下する最小コスト設計問題に対する GA の計算性能を改善するため、一次元直線探索を組み込んだ GA を提案した。提案した一次元直線探索の内容は、全個体の全設計変数から、指定確率で一次元直線探索を実行する特定設計変数をランダムに選定し、その特定設計変数を全規格断面の中から順次変更していき、目的関数値  $F^*$  が最小となる規格断面に変更するというものである。この提案手法を 3 層骨組と 5 層骨組の最小重量設計問題と最小コスト設計問題に適用し、改善後 GA が、3 層骨組及び 5 層骨組の両方において、また最小重量設計問題及び、最小コスト設計問題のいずれにおいても、厳密解への収束性、厳密解到達確率が改善前 GA よりも高く、改善効果が大いことを検証した。また、今回用いた乱数の範囲では、いずれの乱数を用いても改善後 GA の収束値が改善前 GA の収束値以下となることを確認した。

加えて、一次元直線探索における目的関数値制限に基づく高速化を提案した。高速化考慮の有無を 3 層骨組と 5 層骨組の最小重量設計問題と最小コスト設計問題に適用し、高速化を考慮することにより、計算時間を短縮しながら計算性能の改善ができることを示した。

本論文では、平面架構を対象とした最適化設計プログラムの改善を行った。平面架構では、架構剛性や重心の偏心（偏心率）や、上下階の剛性のバランス（剛性率）の影響を評価できない。今後、最適化設計プログラムを実務の構造設計に普及させるためには、偏心率や剛性率を評価できるように、立体架構を対象とした最適化設計プログラムの開発が必要である。

## 第5章 GAによる最小コスト設計解の

### 実施設計への適用性

- 5.1 序
- 5.2 計算手法
  - 5.2.1 コスト評価式
  - 5.2.2 最小コスト設計と最小重量設計
- 5.3 設計例
  - 5.3.1 8層4スパン平面骨組
- 5.4 設計結果
  - 5.4.1 GAを用いた最適化設計プログラム解の収束傾向
  - 5.4.2 設計解の合計コスト, 鋼材重量,  
最大層間変形角, 崩壊荷重係数の傾向
  - 5.4.3 設計解の部材配置
  - 5.4.4 設計解における部材応力度の許容応力度に対する比率
  - 5.4.5 設計解のヒンジ発生状況
- 5.5 GAによる最小コスト設計解の実実施設計への適用性に関するまとめ

## 5.1 序

第2章では、鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数を提案した。第3章では、実施設計した鋼構造建築骨組を提案した評価手法と労務時間係数を用いて評価し、鉄骨製作コストが部材断面決定や、骨組の構造性能に及ぼす影響を明らかにした。第4章では、鉄骨製作コストを評価した最小コスト設計に「GAを用いた最適化設計プログラム」を適用するため、GAの探索効率改善の提案と、その改善効果の検証行なった。本章では、第4章で改善提案した「GAを用いた最適化設計プログラム」による最小コスト設計解の実実施設計への適用性について検証する。最適化設計プログラムで構造設計の完結を目指す考え方もあるが、最適化設計プログラムに設計者の感性を含め建築的な制約条件全てを盛り込むことは、現実的には不可能であると考えている。第3章と第5章は、いずれも実際の構造設計の章であるが、第3章が仮定断面の設定から最終部材断面決定までの設計工程を構造設計者が行なっているのに対し、第5章では最適化プログラムが最もその効果を発揮できると考えている仮定断面の設定部分に適用する場合を示している。

第4章では、厳密解との比較によりGAの探索効率改善を検証したが、本章の目的である実施設計への適用性の検証としては、対象とする設計例に関する厳密解が確認されていないため、厳密解とGAの解の比較を論ずることができない。ここでは、設計例に改善プログラムを適用し、その最小コスト設計解に関して、以下に示す考察を行う。

1. 初期乱数を変えて求めた複数（5個）の最適化設計プログラム設計解の収束状況について考察する。
2. 設計解の合計コスト、鋼材重量、層間変形角、崩壊荷重係数について考察する。
3. 設計解の部材配置、部材の許容応力度、ヒンジ発生状況について考察する。

これらの考察を通じて、「GAを用いた最適化設計プログラム」の最小コスト設計解の特徴を確認する。そして、最小重量設計解との比較により、最小コスト設計解の方が、構造設計者が日常の設計において合理的であると判断している部材断面配置に近い結果を与えることを示す。

## 5.2 計算手法

### 5.2.1 コスト評価式

本章では、第3章に示した合計コストの評価式を用いる。ここではその概要を示す。(3.1)式に主架構鋼材コストと主架構鉄骨製作労務コストの和として合計コストを示す。

$$K = km \cdot W + kf \cdot TF \quad (3.1)$$

ここで、 $km$  は主架構鋼材重量単価（以降、単に重量単価.）， $W$  は主架構鋼材重量（以降、単に重量.）， $kf$  は労務単価， $TF$  は主架構鉄骨製作労務時間（以降、単に労務時間.）である。したがって、 $km \cdot W$  は主架構鋼材コストを、 $kf \cdot TF$  は主架構鉄骨製作労務コストを示しており、 $K$  はそれらの合計（以降、合計コスト.）である。

### 5.2.2 最小コスト設計と最小重量設計

本章では、建築基準法に準拠した部材断面最適設計問題として、最小コスト設計問題と最小重量設計問題を扱う。各設計問題の目的関数及び制約関数、並びに、制約条件付最小化問題をGAに適用するため、無制約最小化問題に変換する手法については第4章を参照されたい。

### 5.2.3 遺伝的アルゴリズム

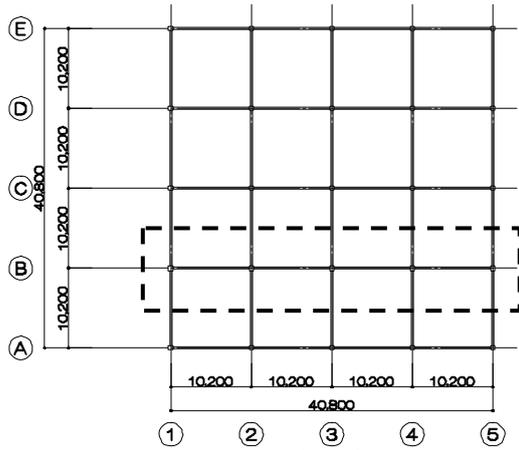
従来の最小重量設計に比較して、最小コスト設計は、局所的な最適解に収束しやすく、大局的な最適解への収束性が悪くなるため、本章では、第4章で提案した次元直線探索を組み込んだGA最適化設計プログラムを用いる（以降では、改善後GAと呼ぶ.）。

## 5.3 設計例

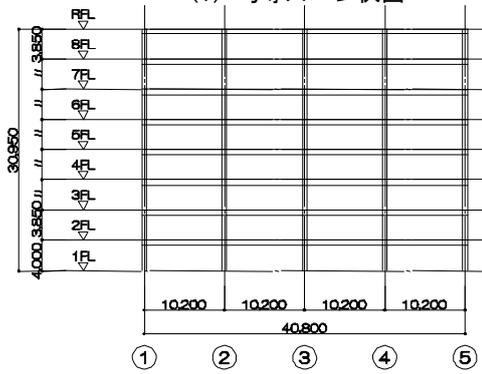
### 5.3.1 8層4スパン平面骨組

本章では、2例の設計例を示す。2例とも8層4スパン平面骨組である。1例目はスパン長が10.2mの均等スパンの例（以降では、単に均等スパンと言う.）を示す。2例目は不均等スパンの例（以降では、単に不均等スパンと言う.）として、外側のスパン14m、内側のスパン6.4mの例を示す。均等スパンを図5.1に、不均等スパンを図5.2に示す。それぞれの例の伏図に示すB通りを対象とした8層4スパンの平面骨組を設計対象とする。

設計変数は、2層ごとの外柱、内柱、外梁、内梁の計16変数とする。設計に用いる各階平均荷重は、固定荷重と積載荷重の和として $6.72(\text{kN/m}^2)$ とした。水平荷重については、弾性制約に対して標準層せん断力係数 $C_0=0.2$ の $A_i$ 分布層せん断力を用いる。層間変形角制約は $1/150$ 以下とする。塑性制約に対しては、 $D_s=0.3$ とした地震力を用いている。使用する部材断面は規格断面で、柱部材は角形鋼管（BCP325）39種類、梁部材は細幅、中幅及び外法一定のH形鋼（SN490）85種類である。表5.2～表5.4に部材リストを示す。幅厚比がFAランクの部材を選定している。ヤング係数 $E$ は $2.06 \times 10^5(\text{N/mm}^2)$ としている。コスト算出に用いる鋼材の材料単価は8万円/トンとした。

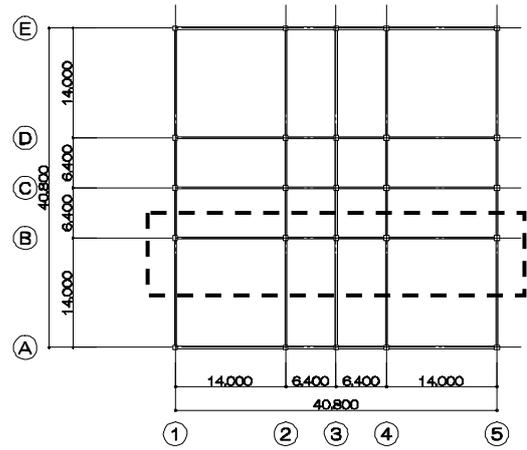


(1) 均等スパン伏図

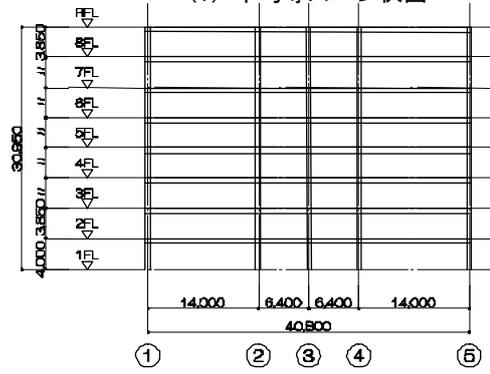


(2) 均等スパンB通り軸組図

図 5.1 均等スパン設計例



(1) 不均等スパン伏図



(2) 不均等スパンB通り軸組図

図 5.2 不均等スパン設計例

表 5.2 柱リスト

部材成系列	規格断面番号 ID	部材サイズ
□400系列	1	□-400×16
	2	□-400×19
	3	□-400×22
	4	□-400×25
□450系列	5	□-450×16
	6	□-450×19
	7	□-450×22
	8	□-450×25
	9	□-450×28
□500系列	10	□-500×16
	11	□-500×19
	12	□-500×22
	13	□-500×25
	14	□-500×28
	15	□-500×32
□550系列	16	□-550×19
	17	□-550×22
	18	□-550×25
	19	□-550×28
	20	□-550×32
	21	□-550×36
□600系列	22	□-600×22
	23	□-600×25
	24	□-600×28
	25	□-600×32
□650系列	26	□-600×36
	27	□-650×22
	28	□-650×25
	29	□-650×28
	30	□-650×32
	31	□-650×36
	32	□-650×38
□700系列	33	□-650×40
	34	□-700×25
	35	□-700×28
	36	□-700×32
	37	□-700×36
	38	□-700×38
	39	□-700×40

表 5.3 梁リスト

部材成系列	規格断面番号 ID	部材サイズ
H400系列	細幅 1	H-400×200×8×13
	中幅 2	H-400×300×10×16
H450系列	細幅 3	H-450×200×9×14
	中幅 4	H-450×300×11×18
H500系列	細幅 5	H-500×200×10×16
	中幅 6	H-500×300×11×18
H600系列	細幅 7	H-600×200×11×17
	中幅 8	H-600×300×12×20
H700系列	中幅 9	H-700×300×13×24
H800系列	中幅 10	H-800×300×14×26

表 5.4 梁リスト

部材成系列	規格断面番号 ID	部材サイズ
H500系列	細幅 1	H-500×200×9×12
	細幅 2	H-500×200×9×16
	細幅 3	H-500×200×9×19
	細幅 4	H-500×200×9×22
	細幅 5	H-500×200×12×19
	細幅 6	H-500×200×12×22
	細幅 7	H-500×200×12×25
	細幅 8	H-500×250×9×16
	細幅 9	H-500×250×9×19
	細幅 10	H-500×250×9×22
	細幅 11	H-500×250×12×22
	細幅 12	H-500×250×12×25
	細幅 13	H-500×250×12×28
	細幅 14	H-550×200×12×19
H550系列	細幅 15	H-550×200×12×22
	細幅 16	H-550×200×12×25
	細幅 17	H-550×250×12×22
	細幅 18	H-550×250×12×25
	細幅 19	H-550×250×12×28
H600系列	細幅 20	H-600×200×12×19
	細幅 21	H-600×200×12×22
	細幅 22	H-600×200×12×25
	細幅 23	H-600×200×12×28
	細幅 24	H-600×250×12×19
	細幅 25	H-600×250×12×22
	細幅 26	H-600×250×12×25
	細幅 27	H-600×250×12×28
	細幅 28	H-600×250×16×28
	細幅 29	H-600×250×16×32
	中幅 30	H-600×300×12×19
	中幅 31	H-600×300×12×22
	中幅 32	H-600×300×12×25
	中幅 33	H-600×300×12×28
	中幅 34	H-600×300×16×28
	中幅 35	H-600×300×16×32
H650系列	細幅 36	H-650×200×12×19
	細幅 37	H-650×200×12×22
	細幅 38	H-650×200×12×25
	細幅 39	H-650×200×12×28
	細幅 40	H-650×250×12×19
	細幅 41	H-650×250×12×22
	細幅 42	H-650×250×12×25
	細幅 43	H-650×250×12×28
	細幅 44	H-650×250×16×28
	細幅 45	H-700×200×12×22
H700系列	細幅 46	H-700×200×12×25
	細幅 47	H-700×200×12×28
	細幅 48	H-700×250×12×22
	細幅 49	H-700×250×12×25
	細幅 50	H-700×250×14×25
	細幅 51	H-700×250×14×28
	中幅 52	H-700×300×12×22
	中幅 53	H-700×300×12×25
	中幅 54	H-700×300×14×25
	中幅 55	H-700×300×14×28
	中幅 56	H-700×300×16×28
	H750系列	細幅 57
細幅 58		H-750×250×14×28
中幅 59		H-750×300×14×22
中幅 60		H-750×300×14×25
中幅 61		H-750×300×14×28
中幅 62		H-750×300×16×25
中幅 63		H-750×300×16×28
中幅 64		H-750×300×16×32
H800系列	細幅 65	H-800×250×14×22
	細幅 66	H-800×250×14×25
	細幅 67	H-800×250×16×25
	細幅 68	H-800×250×16×28
	中幅 69	H-800×300×14×22
	中幅 70	H-800×300×14×25
	中幅 71	H-800×300×14×28
	中幅 72	H-800×300×16×22
	中幅 73	H-800×300×16×25
	中幅 74	H-800×300×16×28
	中幅 75	H-800×300×16×32

## 5.4 設計結果

### 5.4.1 GA を用いた最適化設計プログラム解の収束傾向

5.3.1 に示した骨組の最小コスト設計問題および最小重量設計問題に対する解析結果を以降に示す。解析に用いた個体数 NI は 50 個体。世代数は 500 とし、1 世代から 450 世代までは改善前の従来の GA を用い、451 世代以降において次元直線探索を用いている。次元直線探索の探索確率 P1 は、450 世代を 0%として世代の増加に合わせて順次増加させ、500 世代で 25%となるように設定した。目的関数値制限に基づく高速化考慮における  $\gamma^3$  は 0.9 とした。

図 5.3～5.6 に、初期乱数を変えて求めた複数 (5 個) の解 (目的関数値) の履歴を示す。縦軸は、目的関数値で、最小コスト設計では合計コスト、最小重量設計では重量である。横軸は、骨組解析回数である。以降では、初期乱数を変えて求めた複数 (5 個) の解の最も目的関数の良い解を最良解と呼び、最も目的関数の悪い解を、最悪解と呼ぶ。最良解と最悪解についての着目は、実施設計において時間の都合により、初期乱数 1 個で設計解を設定することを想定し、最小コスト設計解の最悪解と、最小重量設計解の最良解を比較した場合にどのような判断ができるか、また、その逆の場合にどのような判断ができるかを考察することを意図している。

最小コスト設計では、5 回の実行の中の最良解と最悪解の合計コスト差は 4～5%である。最小重量設計では、5 回の実行の最良解と最悪解の重量差は 1～2%である。最小重量設計のほうが、最小コスト設計より最良解と最悪解の差が小さい。最小コスト設計では、不均等スパンの最小値の方が、均等スパンの最小値より若干小さい値を示しているが、残りの初期乱数の収束傾向は、不均等スパンの方が高止まりしており、実施設計で不均等スパンを扱う場合には、試行する初期乱数の個数を多くすることが推奨される。最小重量設計では、最良解と最悪解の最終的な重量差は 1～2%と小さくなっており、また、不均等スパンの最小値の方が、均等スパンの最初値より小さい値を示しているが、収束の途上においては、不均等スパンの解は初期乱数によってその値に幅があることが分かる。

表 5.1 には、解の収束状況を数値で示す。最小値に収束した最短の骨組解析回数は、不均等スパンの最小コスト設計で約 26600 回で、解析時間が約 2.8 時間となっているが、その他の設計ケースでは、骨組解析回数は約 60000～70000 回、解析時間は、6～7 時間となっている。使用したコンピューターは単一 CPU : Intel (R) Celeron (R) M, processor : 1.00GHz, 997MHz, 504MB RAM であり、近年の実施設計に求められるスピードに対しては時間がかかりすぎているが、ワークステーション級のコンピューターを用いると、解析時間は上記の約 1/30 に短縮できることから、十分に実施設計に活用できる解析時間であると考えている。

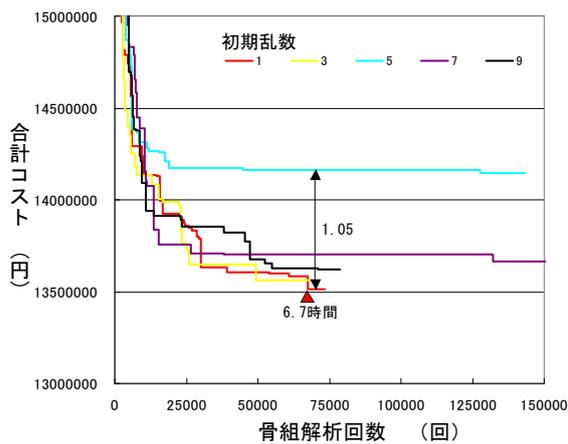


図 5.3 均等スパン最小コスト設計

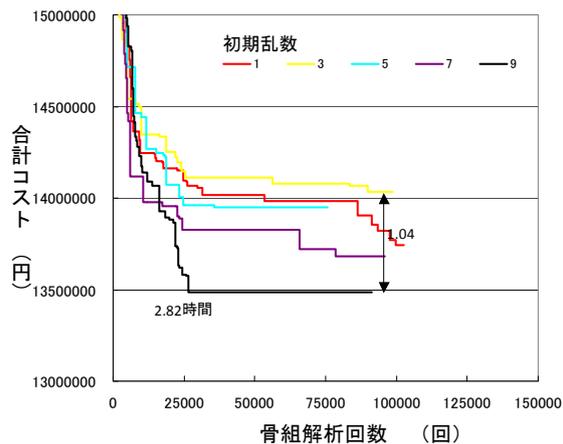


図 5.5 不均等スパン最小コスト設計

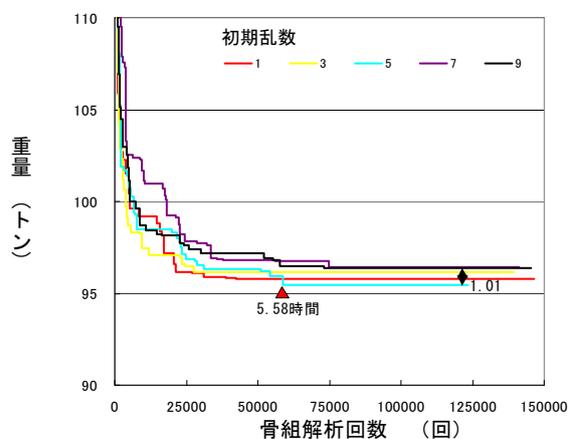


図 5.4 均等スパン最小重量設計

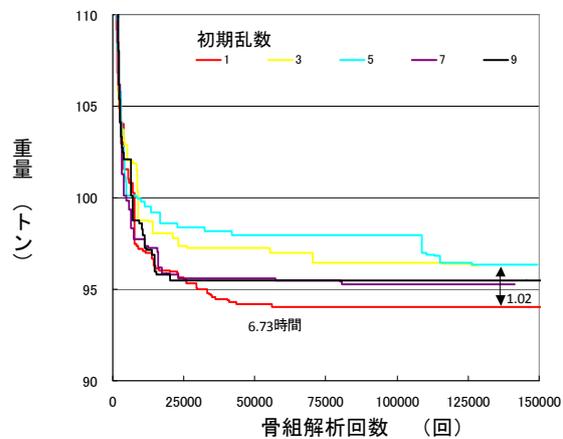


図 5.6 不均等スパン最小重量設計

表 5.1 GA を用いた最適化設計プログラム解の収束状況

設計例		最悪解/最良解	最小値への収束時 骨組解析回数	最小値への収束に 要した解析時間*
均等スパン	最小コスト設計	1.05	約 67500 回	6.7 時間
	最小重量設計	1.01	約 58700 回	5.6 時間
不均等スパン	最小コスト設計	1.04	約 26600 回	2.8 時間
	最小重量設計	1.02	約 57800 回	6.7 時間

\* : 使用したコンピューターは、単一 CPU : Intel(R)Celeron(R)M, processor : 1.00GHz, 997MHz, 504MB RAM である。

## 5.4.2 設計解の合計コスト，鋼材重量，最大層間変形角，崩壊荷重係数の傾向 (1) 均等スパン

図 5.7 から図 5.10 に，均等スパンの最小コスト設計と最小重量設計の初期乱数を変えて求めた複数（5 個）の解の合計コスト，鋼材重量，最大層間変形角，崩壊荷重係数（ $D_s=0.3$  とする荷重に対する崩壊荷重の倍率を意味する。）をそれぞれ示す．横軸は，左から順に最良解から最悪解の順に並べている．合計コスト（図 5.7）は，最小コスト設計の 5 つの解の内の 4 つが最小重量設計解の最小値の合計コストよりも少ない．最小コスト設計は合計コストが少くない解に到達できる確率が高いことを示している．鋼材重量（図 5.8）は，最小重量設計解のほうが最小コスト設計解よりも少ない．最大層間変形角（図 5.9）は，最小コスト設計解，最小重量設計解共に制約値（ $1/150$ ）に対して余裕のない解が多い．また，図 5.11，図 5.12 の各階層間変形角によると，すべての解の 1 階と最上階を除くすべての階で制約値に近接する結果を示している．均等スパンの場合は，層間変形角制約が設計にとってクリティカルな制約になっている解が多いと推定できる．崩壊荷重係数（図 5.10）は，最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも若干大きい傾向を示すが大差はない．

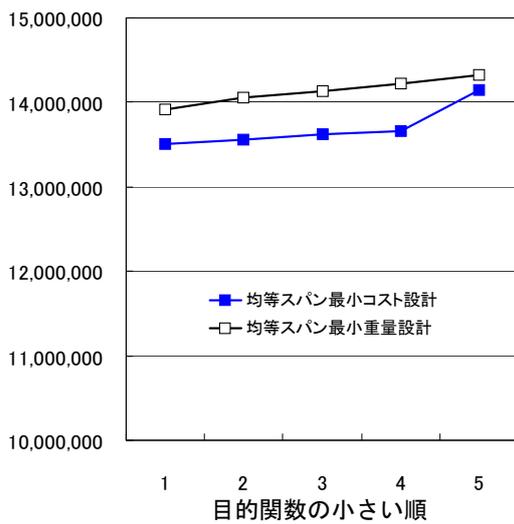


図 5.7 合計コスト

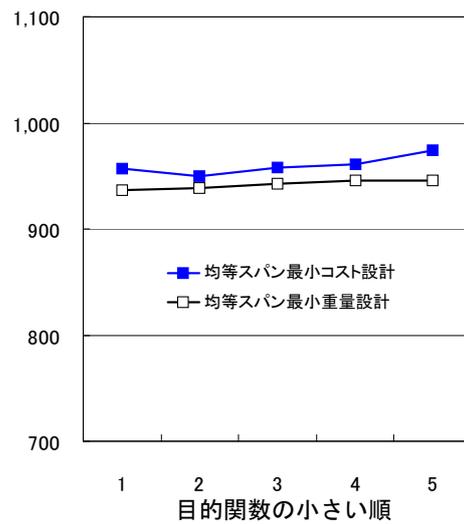


図 5.8 主架構鋼材重量

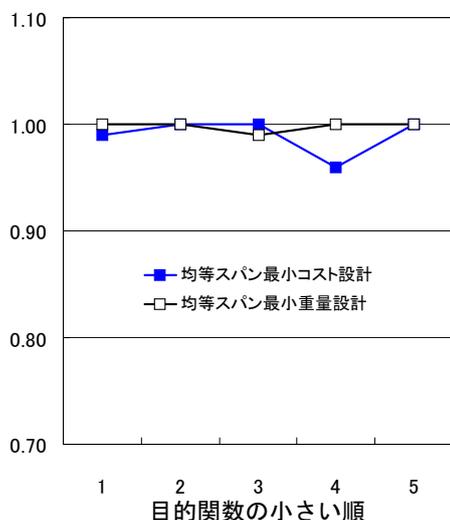


図 5.9 最大層間変形角制約値に対する比率

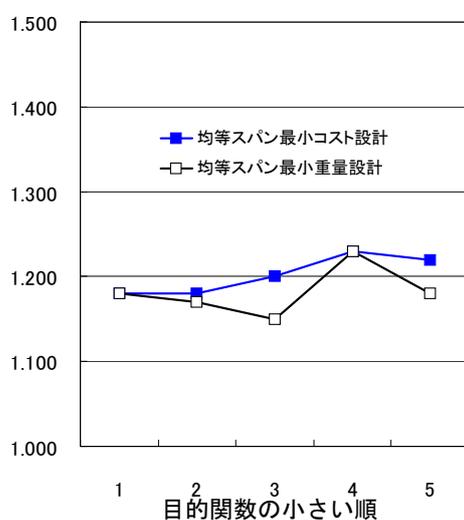


図 5.10 崩壊荷重係数

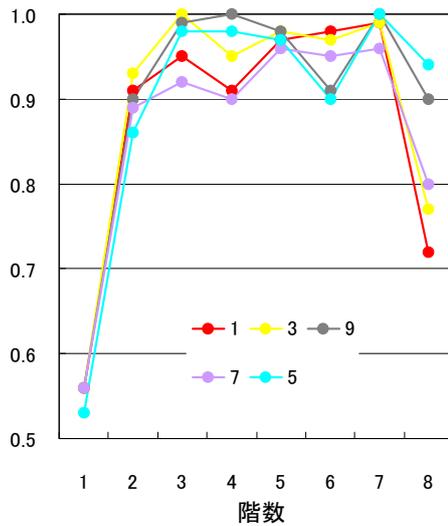


図 5.11 最小コスト設計解の制約値に対する各階の層間変形角比率

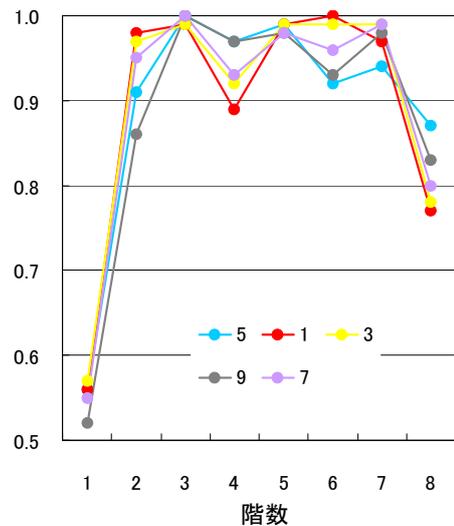
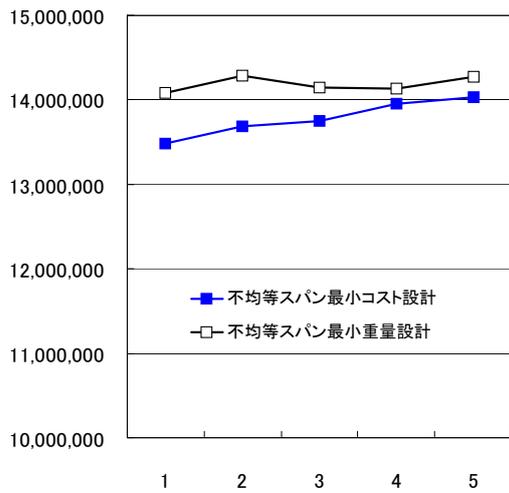


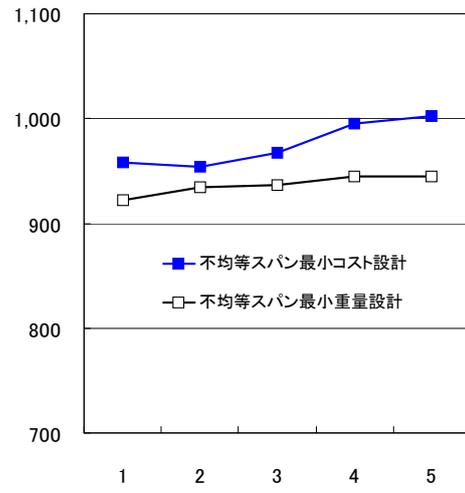
図 5.12 最小重量設計解の制約値に対する各階の層間変形角比率

## (2) 不均等スパン

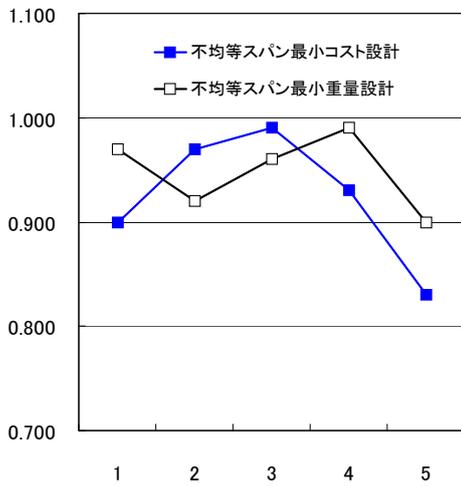
図 5.13 から図 5.16 に、不均等スパンの最小コスト設計と最小重量設計の初期乱数を変えて求めた複数 (5 個) の解の合計コスト、鋼材重量、最大層間変形角、崩壊荷重係数をそれぞれ示す。合計コスト (図 5.13) は、最小コスト設計の 5 つの解の全てが最小重量設計の最小値よりも少なく、均等スパンと同様に合計コストが少ない解に到達できる確率が高いことを示している。鋼材重量 (図 5.14) も、均等スパンと同様に最小重量設計解のほうが最小コスト設計解よりも少ない。最大層間変形角 (図 5.15) は、最小コスト設計解、最小重量設計解共に、均等スパンに比べて、解による値の変動が大きく、制約値に対して余裕のある解が多い。図 5.17, 図 5.18 の各階層間変形角においても、制約値に対して余裕のある解が多いことを確認できる。不均等スパンの場合は、層間変形角制約がクリティカルな制約ではなく、後述の 5.4.4 に示す許容応力度制約の方がクリティカルな制約になっている解が多いと推定できる。これは、クリティカルな制約条件が架構形状により変化することの一例を示している。崩壊荷重係数 (図 5.16) は、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも大きい傾向を示し、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも、終局耐力が大きい解を得ることができる確率が高い。



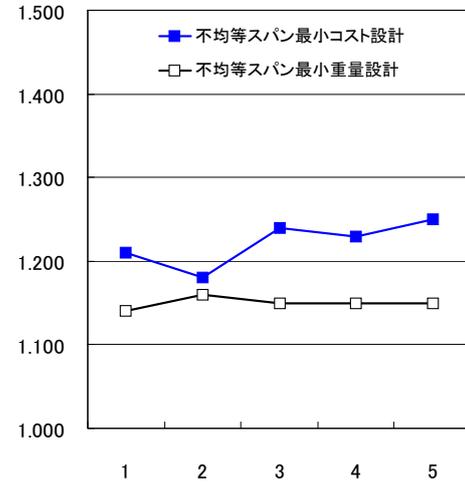
目的関数の小さい順  
図 5.13 合計コスト



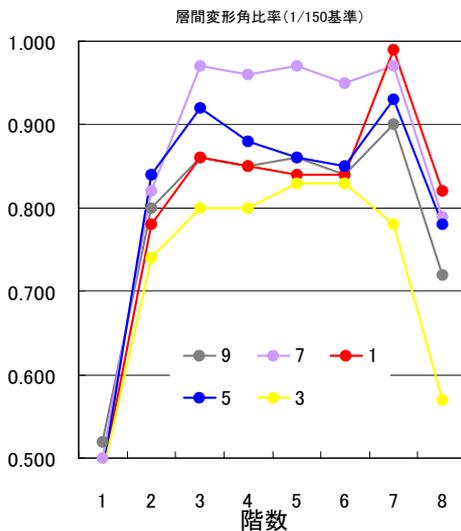
目的関数の小さい順  
図 5.14 主架構鋼材重量



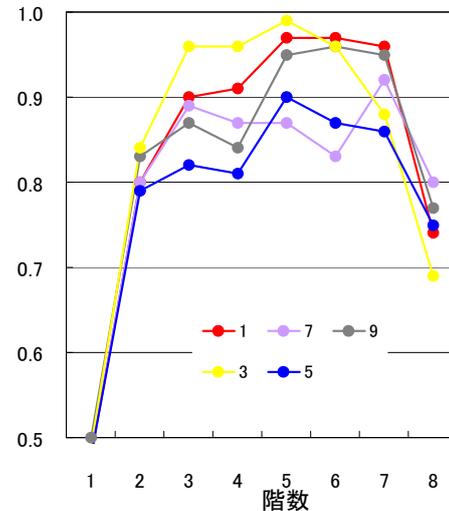
目的関数の小さい順  
図 5.15 最大層間変形角制約値に対する比率



目的関数の小さい順  
図 5.16 崩壊荷重係数



階数  
図 5.17 最小コスト設計解の制約値に対する各階の層間変形角比率



階数  
図 5.18 最小重量設計解の制約値に対する各階の層間変形角比率

### 5.4.3 設計解の部材配置

#### (1) 均等スパン

均等スパンについて、図 5.19 に最小コスト設計解、図 5.20 に最小重量設計解の初期乱数を変えて求めた複数（5 個）の解の部材配置を示す。最良解から最悪解の順に(1)から(5)に示している。同図には、上下の柱せいが異なる接合部に□、左右の梁せいが異なる接合部に△、上下の柱せいと左右の梁せいが異なる接合部に■のマークを示す。また、下階よりも柱せいが大きい場合と、下階よりも梁せいが大きい場合は、青色の楕円マークで示す。最小コスト設計解では、最悪解（図 5.19(5)）を除いて左右の梁せいは同じである。下階よりも柱せいが大きくなる解は、図 5.19(4)、(5)の一部である。下階よりも梁せいが大きい解は存在しない。最小重量設計解では、すべての解で左右の梁せいが異なる部分が存在する。最良解（図 5.20(1)）を除き、下階よりも柱せい、あるいは、梁せいが大きい部分が存在する。特に、最悪解（図 5.20(5)）では、左右の梁せい差が 5cm の場合（図中に赤丸部分）があり、ダイアフラムの溶接は不可能である。左右の梁せいが異なる解の出現が多い最小重量設計では、製作の可能性を考慮し、左右の梁せいを変える場合は、梁せい差を 10cm 以上とする等の制約を付加するべきであると考えられる。最小コスト設計、最小重量設計の両者の最良解は、柱せい、及び、梁せいが上階ほど小さい傾向を示しており、構造設計者が通常行っている部材配置の妥当性を示している。また、最良解以外においても最小コスト設計解は最小重量設計解よりも柱せい、梁せいが、上階ほど小さくなる解の出現が多い傾向を示す。また、最小コスト設計解は、左右の梁せいが異なる解の出現がないため、左右の梁せいの変化による施工可能性を判断して、解の部材せいを調整しなければならない確率が少ないと判断できる。以上より、最小重量設計解を実施設計に適用する場合には、設計解をもとに部材せいの調整が多く発生するが、最小コスト設計解を実施設計に適用する場合には、部材せいの調整が少なく済む可能性が高く、最小コスト設計解の方が、最小重量設計結果より実施設計への適用性が高いと言える。

#### (2) 不均等スパン

不均等スパンについて、図 5.21 に最小コスト設計解、図 5.22 に最小重量設計解の初期乱数を変えて求めた複数（5 個）の解の部材配置を示す。図中のマーク等の表現方法は均等スパンと同じである。最小コスト設計解では、均等スパンでは最悪解（図 5.21(5)）でしか見られなかった左右の梁せいを変える解が、上位（図 5.21(2)と(3)）に発生している。また、均等スパンでは出現が無かった下階よりも梁せいが大きい解が上位（図 5.21(2)）に出現している。最小重量設計解では、均等スパンと同様にすべての解で左右の梁せいが異なる部分が存在する。また、下階よりも柱せい、あるいは、梁せいが大きい部分がすべての解で存在する。さらに、ダイアフラムの溶接が不可能である左右の梁せい差が 5cm の場合（図中に赤丸部分）が 5 個の解の内 3 個ある。左右の梁せい差が 5cm の場合は、最良解（図 5.22(1)）においても出現している。不均等スパンの場合は、均等スパンよりも、下階よりも柱せい、梁せいが大きい部分が含まれる解の出現頻度が多くなる傾向を示すが、最小コスト設計解を実施設計に適用する場合には、最小重量設計解よりも部材せいの調整が少なく済む可能性が高く、最小コスト設計解の方が、最小重量設計結果より実施設計への適用性が高いと言える。

凡例

□ : 上下の柱せいが変化する接合部

△ : 左右の梁せいが変化する接合部

■ : 上下の柱せい, 左右の梁せいの両方が変化する接合部

○ : 下階よりも柱せい, 又は, 梁せいが大きい部位

○ : 左右の梁せい差が5cmの場合

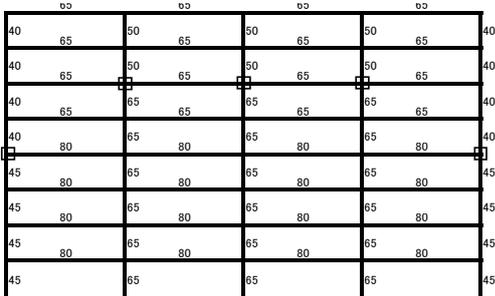


図 5.19 (1) 最小コスト設計解 部材配置 最良解

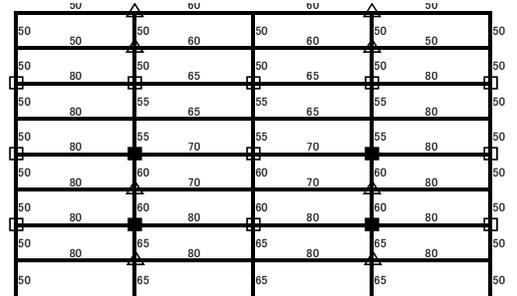


図 5.20 (1) 最小重量設計解 部材配置 最良解

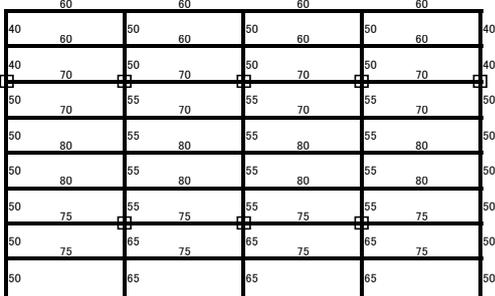


図 5.19 (2) 最小コスト設計解 部材配置

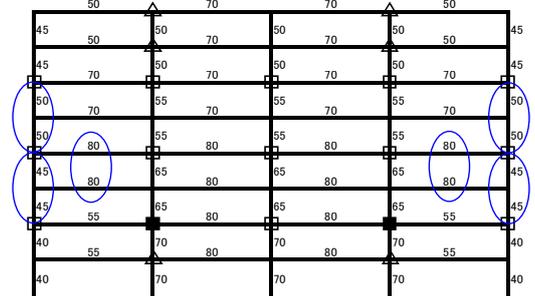


図 5.20 (2) 最小重量設計解 部材配置

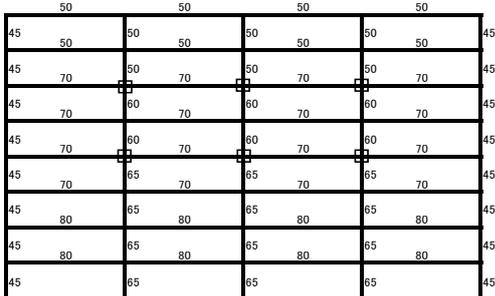


図 5.19 (3) 最小コスト設計解 部材配置

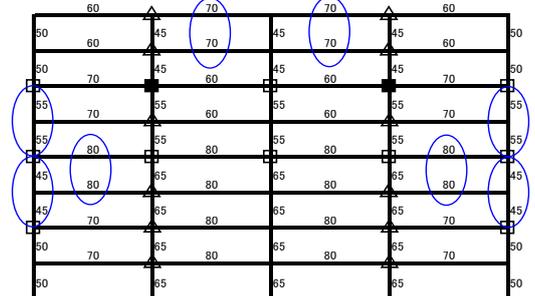


図 5.20 (3) 最小重量設計解 部材配置

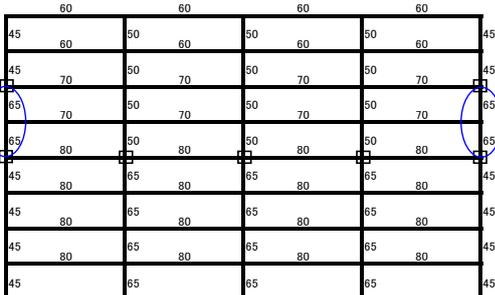


図 5.19 (4) 最小コスト設計解 部材配置

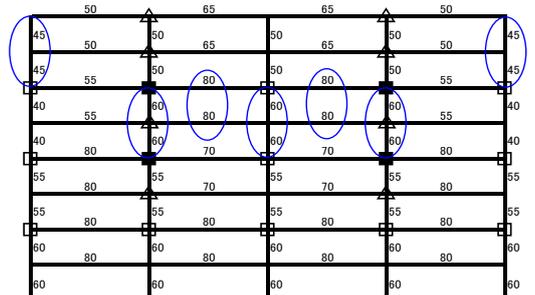


図 5.20 (4) 最小重量設計解 部材配置

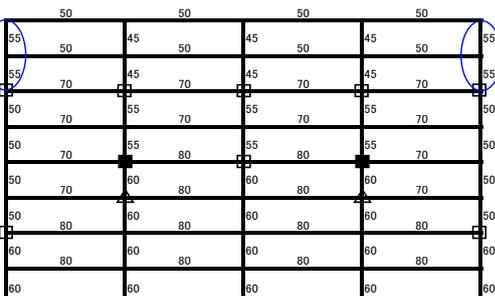


図 5.19 (5) 最小コスト設計解 部材配置 最悪解

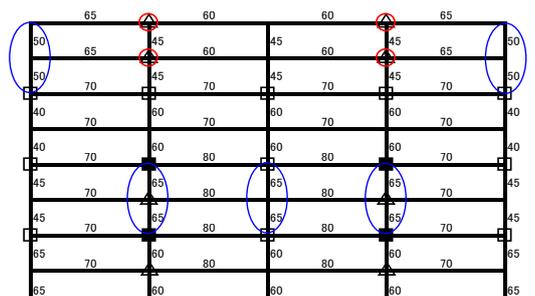


図 5.20 (5) 最小重量設計解 部材配置 最悪解



## 5.4.4 設計解における部材応力度の許容応力度に対する比率

### (1) 均等スパン

均等スパンについて、図 5.25 に最小コスト設計と最小重量設計の最良解に関する部材応力度の許容応力度に対する比率の比較を示す。縦軸は、許容応力度に対する比。柱の横軸は、各階ごとに部材を左から右に並べてある。梁の横軸は、各階ごとに部材の左端、右端の順に並べてある。図中の□印は、各部材について最小コスト設計解応力度が最小重量設計解応力度よりも小さい場合を示す。図中の■印は、各部材について最小コスト設計解応力度が最小重量設計解応力度よりも大きい場合を示す。

長期荷重時において最小コスト設計解の上階梁の部材応力度が最小重量設計解よりも小さい傾向を示すが、長期荷重時、短期荷重時の荷重状態に関わらず、また、柱、梁の部材に関わらず、□印、■印のどちらかが偏って存在する傾向は見られない。つまり、最小コスト設計解、最小重量設計解のどちらかが応力度に余裕のある部材設定が行なわれている顕著な傾向は見られない。

### (2) 不均等スパン

不均等スパンについて、図 5.26 に最小コスト設計と最小重量設計の最良解に関する部材応力度の許容応力度に対する比率の比較を示す。

外側柱と、外側梁の長期許容応力度に対する比率が、均等スパンよりも大きい傾向を示している。下層階外側梁の応力度が、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも小さい傾向を示す。その他の部分については、長期荷重時、短期荷重時の荷重状態に関わらず、また、柱、梁の部材に関わらず、□印、■印のどちらかが偏って存在する傾向は見られない。つまり、均等スパンと同様に最小コスト設計解、最小重量設計解のどちらかが応力度に余裕のある部材設定が行なわれている顕著な傾向は見られない。

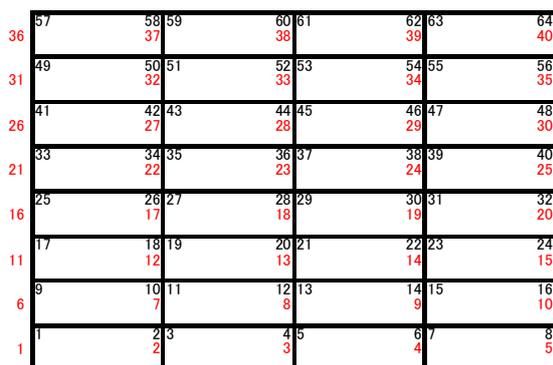


図 5.23 均等スパンの部材番号  
赤字：柱の部材番号  
黒字：梁の部材番号

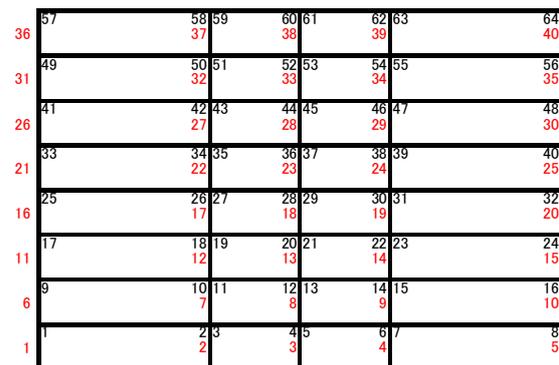


図 5.24 不均等スパンの部材番号  
赤字：柱の部材番号  
黒字：梁の部材番号

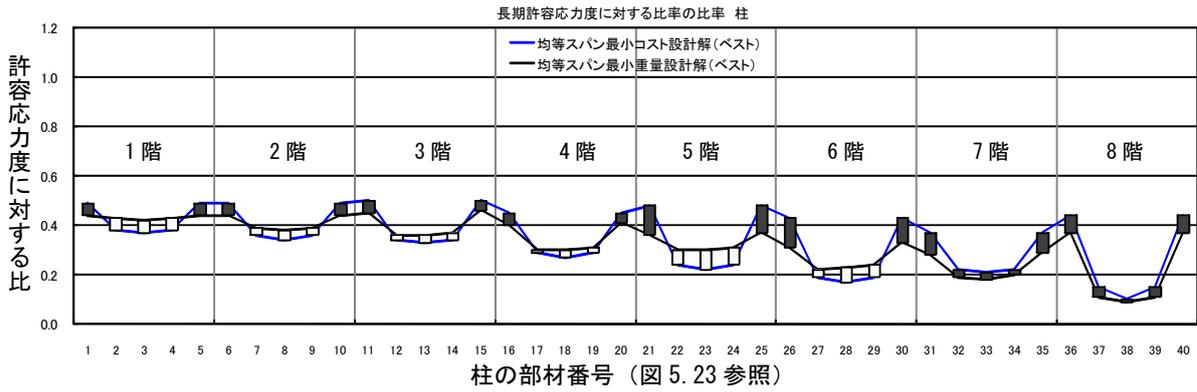


図 5.25(1) 均等スパン 長期許容応力度に対する柱の応力度比率

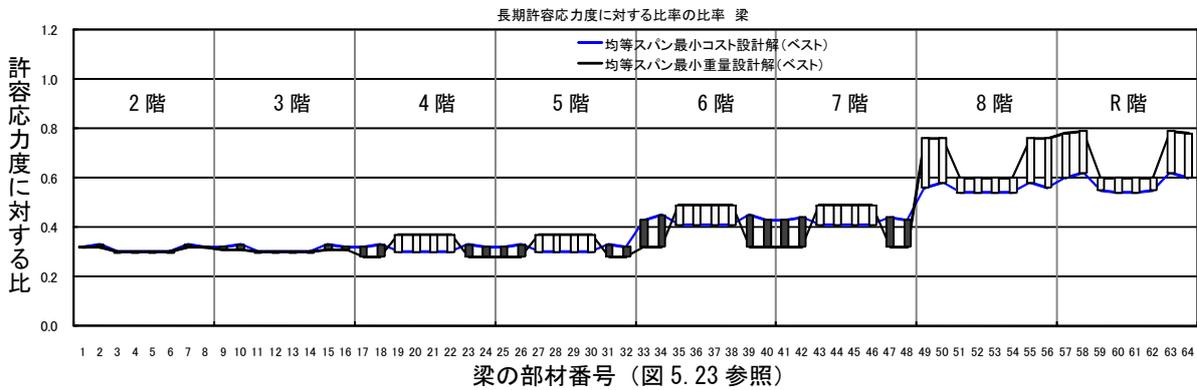


図 5.25(2) 均等スパン 長期許容応力度に対する梁の応力度比率

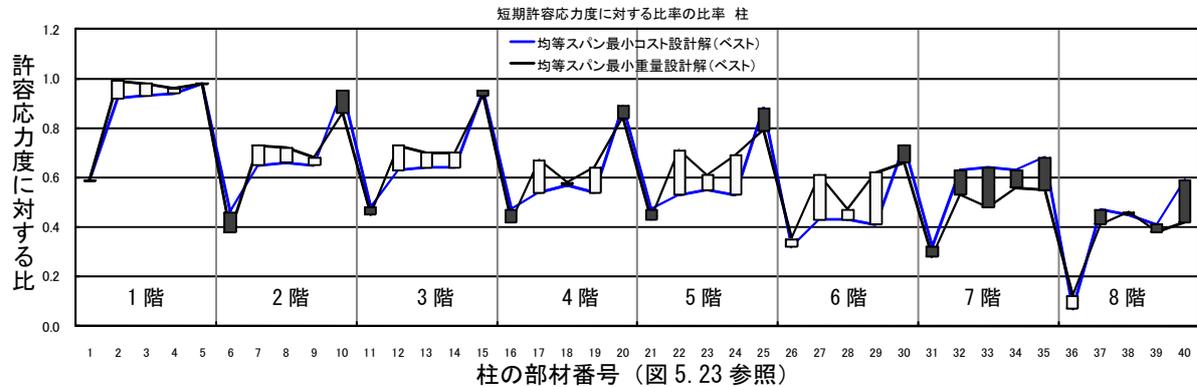


図 5.25(3) 均等スパン 短期許容応力度に対する柱の応力度比率

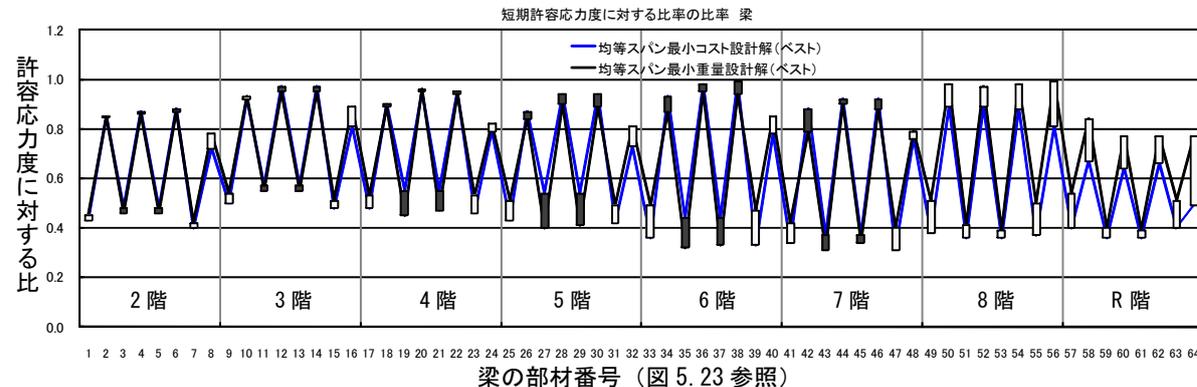


図 5.25(4) 均等スパン 短期許容応力度に対する梁の応力度比率

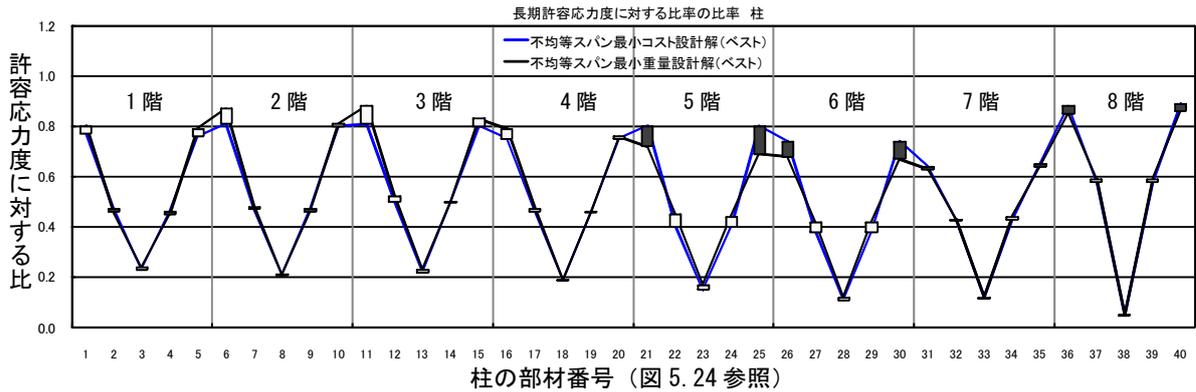


図 5.26(1) 不均等スパン 長期許容応力度に対する柱の応力度比率

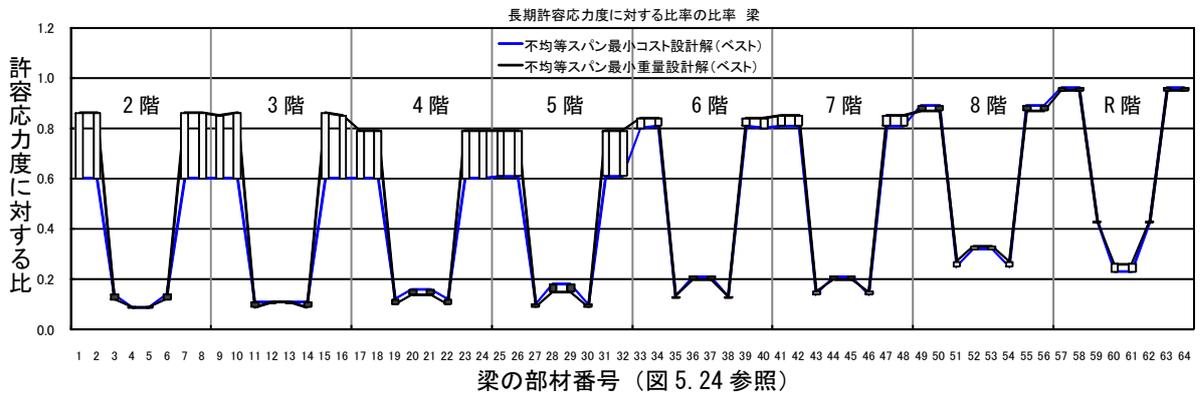


図 5.26(2) 不均等スパン 長期許容応力度に対する梁の応力度比率

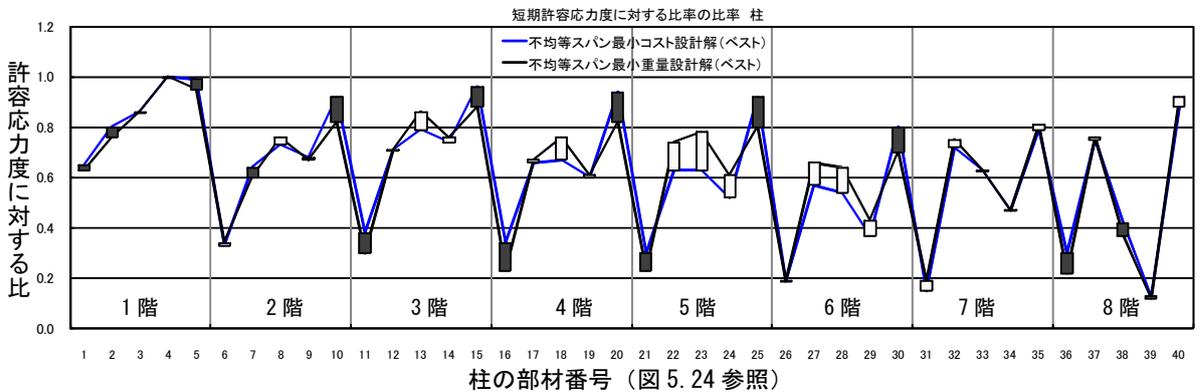


図 5.26(3) 不均等スパン 短期許容応力度に対する柱の応力度比率

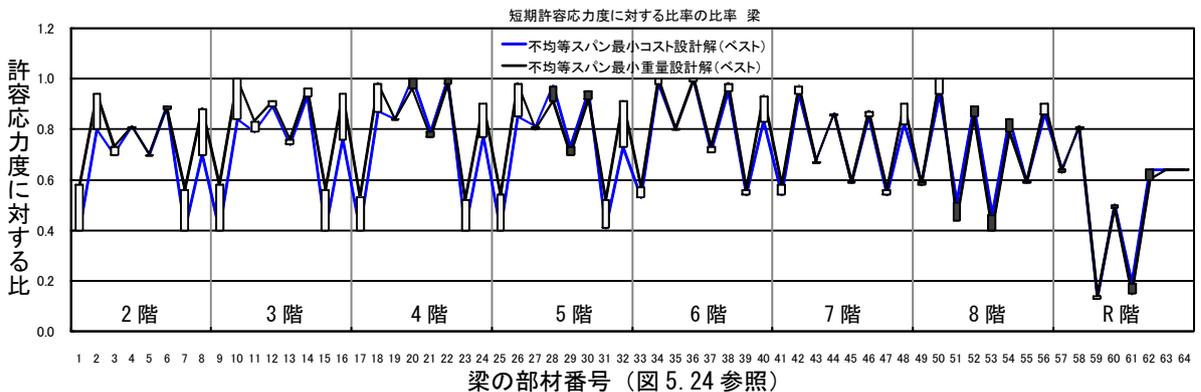


図 5.26(4) 不均等スパン 短期許容応力度に対する梁の応力度比率

## 5.4.5 設計解のヒンジ発生状況

### (1) 均等スパン

均等スパンについて、図 5.27 に最小コスト設計解、図 5.28 に最小重量設計解の初期乱数を変えて求めた複数（5 個）の解のヒンジ発生状況を示す。最良解から最悪解の順に(1)から(5)に示している。黒丸がヒンジ発生位置、赤線は崩壊層を示す。

1 層から 7 層の部分崩壊を示す解が多い。これは、7 階と 8 階の柱は同部材となるように、また、8 階梁と最上階梁は同部材となるように設計変数を設定しているため、同部材の下層である 7 層が崩壊層になると考えられる。最小コスト設計解の図 5.27(5)と最小重量設計解の図 5.28(1)は、1 層から 5 層の部分崩壊となっているが、実施設計への適用に関しては、許容できる範囲である。

### (2) 不均等スパン

不均等スパンについて、図 5.29 に最小コスト設計解、図 5.30 に最小重量設計解の初期乱数を変えて求めた複数（5 個）の解のヒンジ発生状況を示す。図中のマーク等の表現方法は均等スパンに同じである。

均等スパンと同様に、1 層から 7 層の部分崩壊を示す解が多い。また、均等スパンに較べて長期モーメントの影響による梁中央部でのヒンジ発生部材が多い。梁中央部でのヒンジ発生部材は、特に最小重量設計解で顕著である。最小重量設計解の方が最小コスト設計解よりも塑性断面性能の小さい部材が選定されているためである。上記のような特徴はあるが、極端な部分崩壊等を示す解はなく、実施設計への適用に関しては、許容できる範囲である。

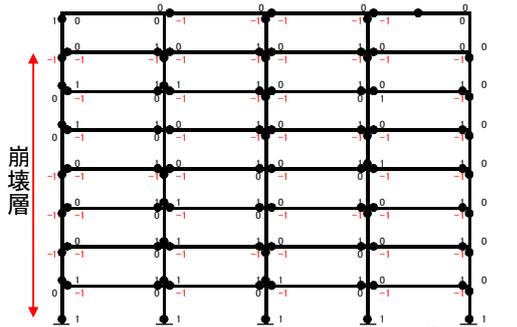


図 5.27(1) 最小コスト設計解 最良解 均等コスト(1st)5

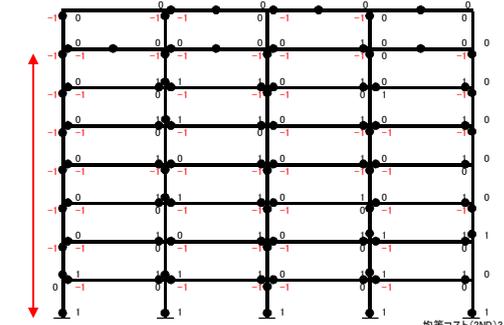


図 5.27(2) 最小コスト設計解 均等コスト(2ND)3

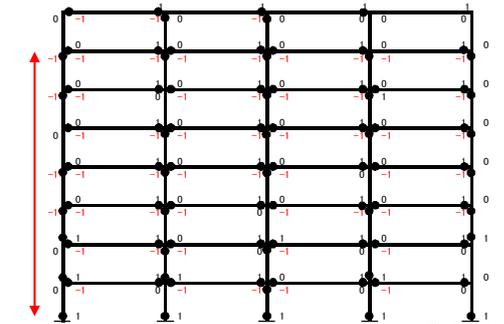


図 5.27(3) 最小コスト設計解 均等コスト(3RD)9

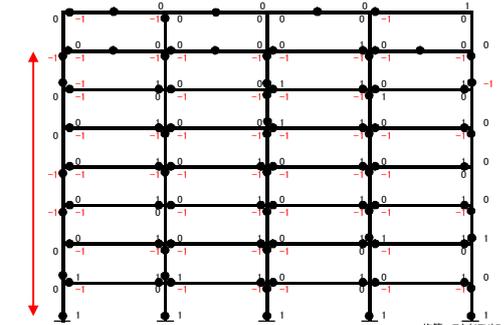


図 5.27(4) 最小コスト設計解 均等コスト(4TH)7

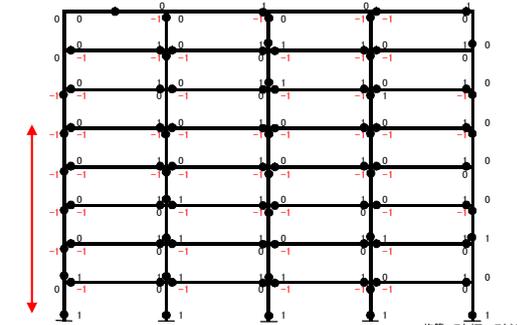


図 5.27(5) 最小コスト設計解 最悪解 均等コスト(1st)5

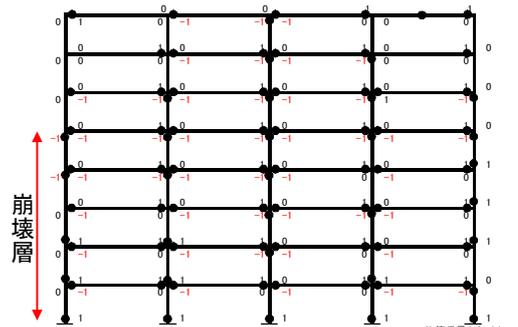


図 5.28(1) 最小重量設計解 最良解 均等重量(1st)5

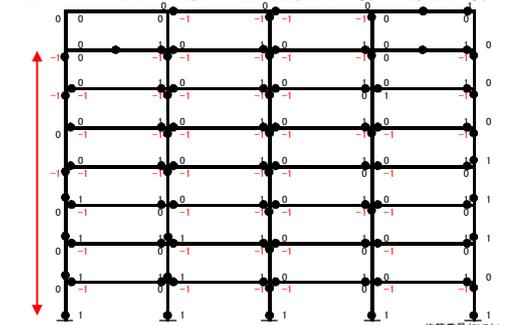


図 5.28(2) 最小重量設計解 均等重量(2ND)1

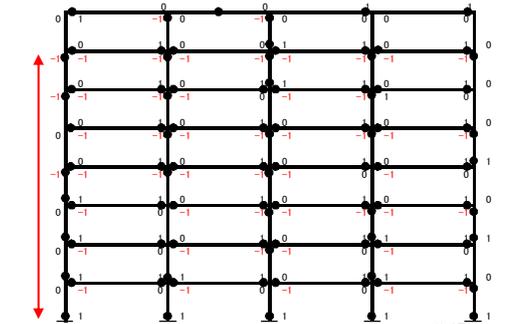


図 5.28(3) 最小重量設計解 均等重量(3RD)3

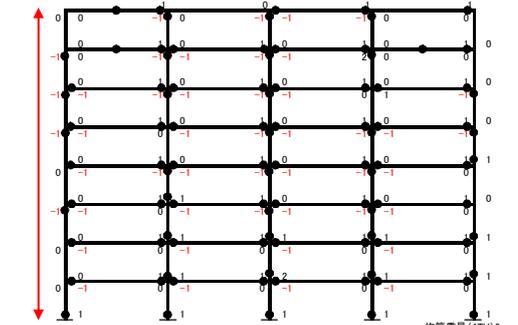


図 5.28(4) 最小重量設計解 均等重量(4TH)9

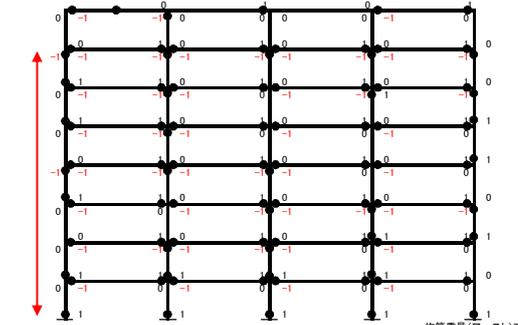


図 5.28(5) 最小重量設計解 最悪解 均等重量(1st)7

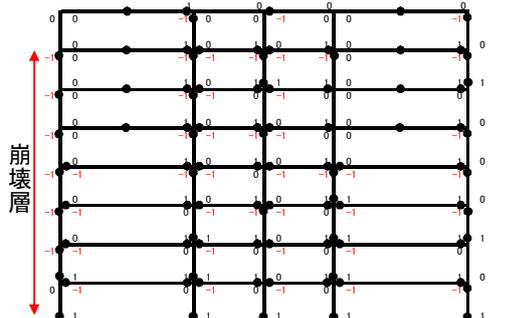


図 5.29(1) 最小コスト設計解 最良解

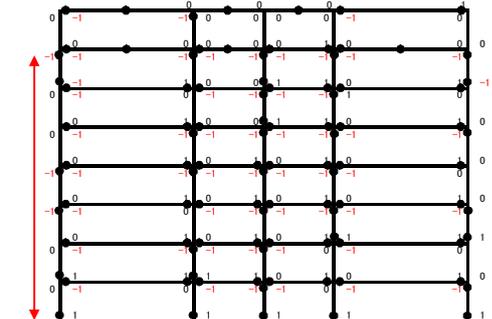


図 5.29(2) 最小コスト設計解

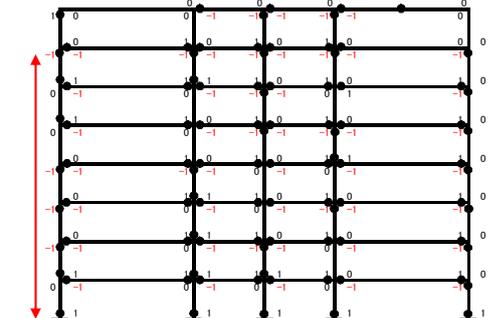


図 5.29(3) 最小コスト設計解

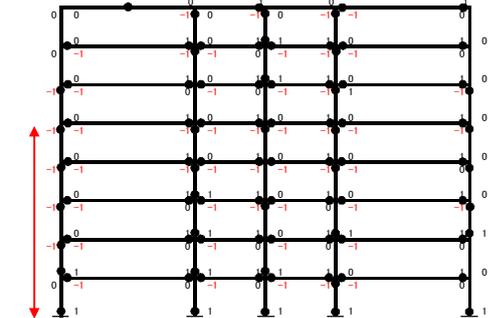


図 5.29(4) 最小コスト設計解

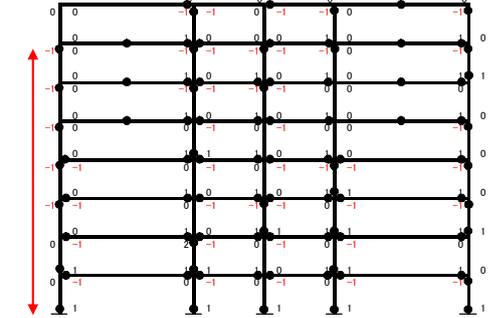


図 5.29(5) 最小コスト設計解 最悪解

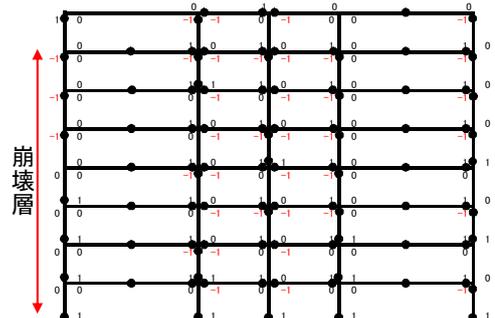


図 5.30(1) 最小重量設計解 最良解

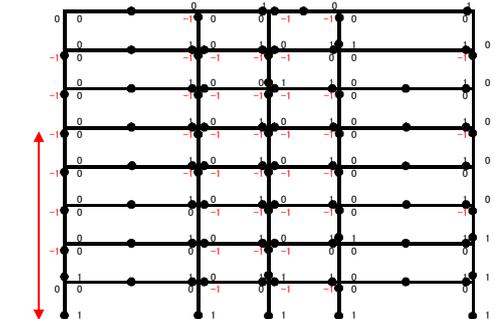


図 5.30(2) 最小重量設計解

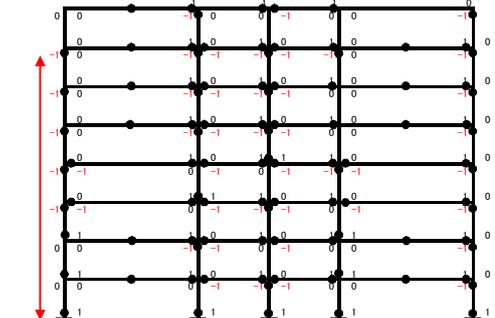


図 5.30(3) 最小重量設計解

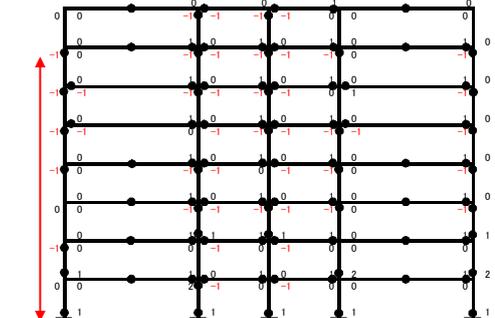


図 5.30(4) 最小重量設計解

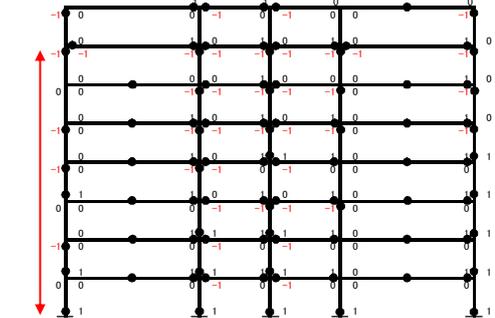


図 5.30(5) 最小重量設計解 最悪解

## 5.5 GAによる最小コスト設計解の実施設計への適用性に関するまとめ

鉄骨製作コストの評価式を組み込み、さらに、解の収束性改善を行なった GA による最適化設計プログラムを設計例に適用し、得られた設計解の実施設計への適用性について以下の知見を得た。

(1) 最大層間変形角、個材の長期及び短期許容応力度に対する余裕度は、最小コスト設計解、最小重量設計解のどちらかの解が優位であるとは言えないが、最小コスト設計解は、左右の梁せいの大きい方に倣う傾向と上下の柱せいの大きい方に倣う傾向が強く、その結果として、崩壊荷重係数は、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも大きい傾向を示す。この傾向は不均等スパン架構の場合に顕著である。

(2) 最小重量設計解を実施設計に適用する場合には、設計解をもとに部材せいの調整が多く発生するが、最小コスト設計解を実施設計に適用する場合には、部材せいの調整が少なく済む可能性が高く、最小コスト設計解の方が、最小重量設計解より実施設計への適用性が高い。

(3) ヒンジ発生状況は、最小コスト設計解、最小重量設計解共に、部分崩壊の解も発生するが、ほぼ全体崩壊形を示す解の発生頻度が高く、実施設計への適用に関しては、許容できる範囲である。

以上より、最小コスト設計解は、実施設計への適用性が高く、最小重量設計解よりも最小コスト設計解の方が推奨される。

## 第 6 章 結論

### 6.1 結論

### 6.2 今後の展開と課題

### 6.3 おわりに

## 6.1 結論

鋼構造建築骨組の最適化において、実務構造設計や既往の研究では、鋼材重量のみに着目した最適化がほとんどである。しかし、鋼材重量のみに着目した最適化では、鉄骨製作の難易度が考慮できていない。そのため、鋼材重量が少ない割には、鋼材コストと鉄骨製作コストを合わせた合計コスト低減に結びついていない。また、鋼材重量の低減が構造性能の低減に繋がっている。本論文では、これらの問題を解決するため、工場製作コストの難易度を反映できる鉄骨製作コスト評価法の提案と、その評価手法を用いて建築物の架構スパン長や、部材断面の決定を行なう最小コスト設計の提案行なった。そして、これらの提案の活用により、経済的で構造性能の良い鋼構造建築骨組の構造設計を実現できることを示した。

以下は、第2章から第5章までの要旨を述べたものである。

「第2章 鉄骨製作コストの評価手法と労務時間係数の算出」では、以下の知見を得た。

- ① 鉄骨製作の労務時間アンケートを行い、一次加工労務時間および組立労務時間は、鉄骨重量よりむしろパーツ数に依存する傾向を確認した。また、溶接労務時間は接合面積の増加に伴い増加する傾向を確認した。
- ② 鋼構造建築骨組の製作難易度によって生じる製作コストの実状を反映したコスト試算により、スパン長や、部材断面の決定を行なう最小コスト設計を実現するため、鉄骨製作の難易度を適切に考慮できる鉄骨製作コスト評価手法を提案した。
- ③ 鉄骨製作会社の実物件の資料から労務時間係数を算出し、本評価手法による鉄骨製作試算コストと実物件の鉄骨製作コストの比較を行った。また、重量単価に基づく鉄骨製作試算コストとの比較を行い、本評価手法の優位性を確認した。

「第3章 鉄骨骨組の製作コストを考慮した構造設計法」では、第2章で提案した鉄骨製作コストの評価式と労務時間係数を6つの構造設計例に適用し、以下の知見を得た。

- ④ 鉄骨製作コストの評価式を適用することにより労務単価、鋼材単価両者の変動に伴い、合計コストが変化することを、定量的に確認することができ、市況に即した構造設計方針の決定を、数値判断に基づいて行うことが可能である。また、この手法により決定される設計方針は、鋼材重量の大小比較から判断される結果とは異なる。
- ⑤ 本論文で採用した現在の市況との関連が良い労務単価、鋼材単価の程度では、断面せいの統一化による労務時間縮小に重点をおいた設計方針と断面せいの統一化は意識せずに鋼材重量縮小に重点をおいた設計方針の合計コストはほぼ同じである。地震時最大層間変形角や保有水平耐力などの構造性能が良くなることを考慮すると、労務時間縮小に重点をおいた設計方針が推奨される。
- ⑥ 労務時間縮小や鋼材重量縮小を目指す設計方針とは別に、構造計画上の工夫が合計コストに及ぼす影響も大きい。

「第4章 鉄骨骨組の最適設計における遺伝的アルゴリズム (GA) の改善提案」では、一次元直線探索を組み込んだGAを提案した。この提案手法を3層骨組と5層骨組の最小重量設計問題と最小コスト設計問題に適用し、以下の知見を得た。

- ⑦ 一次元直線探索を組み込んだ改善後GAが改善前GAよりも、厳密解への収束性、厳密解到達確率に関して、改善効果が大きいことを示した。

- ⑧ 一次元直線探索における目的関数値制限に基づく高速化を提案した。高速化を考慮することにより、計算時間を短縮しながら計算性能の改善ができることを示した。

「第5章 GAによる最小コスト設計解の実施設計への適用性」では、第4章で改善したGAを用いた最適化設計プログラムを実施設計に適用し以下の知見を得た。

- ⑨ 最大層間変形角、個材の長期及び短期許容応力度に対する余裕度は、最小コスト設計解、最小重量設計解のどちらかの解が優位であるとは言えないが、最小コスト設計解は、左右の梁せいの大きい方に倣う傾向と上下の柱せいの大きい方に倣う傾向が強く、その結果として、崩壊荷重係数は、最小コスト設計解の方が最小重量設計解よりも大きい傾向を示す。この傾向は不均等スパン架構の場合に顕著である。
- ⑩ 最小重量設計解を実施設計に適用する場合には、設計解を基に部材せいの調整が多く発生するが、最小コスト設計解を実施設計に適用する場合には、部材せいの調整が少なく済む可能性が高く、最小コスト設計解の方が、最小重量設計解より実施設計への適用性が高いことを示した。

## 6.2 今後の展開と課題

今後の展開と課題として、以下の点が挙げられる。

- ① 提案した鉄骨製作コスト評価手法を用いた最小コスト設計は、経済的で構造性能の良い鋼構造建築骨組の構造設計を実現できることを示した。しかし、ここで用いた労務時間係数は、あくまで、特定の鉄骨製作会社の労務時間資料に基づいたものである。設計段階において鉄骨製作会社が決定しており、その鉄骨製作会社の製作工程、月産能力、工場設備の自動化の条件が、本論文で対象とした鉄骨製作会社と類似の鉄骨製作会社に対しては、ここで示した労務時間係数の適用が可能と考えられる。しかし、鉄骨製作会社の条件が異なる場合で、精度の高い最小コスト設計を行いたい場合には、対象とする鉄骨製作会社に対して、本研究で提案するアプローチにより労務時間係数を算出する必要があると考えられる。また、設計段階では鉄骨製作会社が決定しているケースは稀である。そのため、設計者としては、相性の良い鉄骨製作会社の労務時間係数を算出しておき、その係数を用いて設計する方法が考えられる。あるいは、数社の鉄骨製作会社の労務時間係数を算出しておき、数社の係数を用いて複数の試設計を行い、その中から選択する方法が考えられる。いずれの場合も最小コスト設計の精度は低くなるが、最小重量設計よりも経済的で構造性能の良い鋼構造建築骨組の構造設計を実現できると考えている。
- ② 労務時間係数の算出は、設計者のみでは不可能であり、鉄骨製作会社の協力が不可欠である。設計段階では鉄骨製作会社が決定しているケースは稀であることから、鉄骨製作会社は積極的に自社の労務時間係数を算出し、設計段階の設計者に提供することに期待したい。最小コスト設計に係数を採用されることにより、その鉄骨製作会社にとって最も効率的な設計内容が実現されることが考えられる。労務時間係数は、鉄骨製作会社の設備の更新や従業員の変動に影響を受ける。そのため、最小コスト設計の精度を保つためには、定期的に実物件の労務時間データの蓄積と分析を継続し、労務時間係数の修正が必要である。

- ③ 本論文では、平面架構を対象とした最適化設計プログラムを用いて最小コスト設計の手法を提案した。平面架構では、架構剛性や重心の偏心（偏心率）や、上下階の剛性のバランス（剛性率）が最小コスト設計におよぼす影響が評価できない。今後、最小コスト設計を実務の構造設計に普及させるためには、偏心率や剛性率を評価できるように、立体架構を対象とできる最適化設計プログラムの開発が必要である。

### 6.3 おわりに

本研究では、最小コスト設計を構造設計の実務で推進するため、鉄骨製作コスト評価手法の提案を行い、その評価手法の実効性を構造設計の実施例を用いて示した。また、構造設計業務の支援を行なうため、最適設計プログラムの改善を行い、その解の実施設計への適用性を示した。前述の今後の展開と課題に示したように、改善すべき点があり、研究を継続する必要があるが、現段階の研究成果でも十分に設計に活用できると考えており、実務において、経済的で構造性能の良い鋼構造建築骨組の構造設計を行いたいと考えている。また、多くの構造設計者の方々に本研究の設計手法を活用していただくことを期待したい。

## 参考文献

- 1) K.Jarmai,J.Farkas : Cost calculation and optimisation of welded steel structures, Journal of Constructional Steel Research 50,115-135,1999
- 2) L.Pavlovic,A.Krajnc and D.Beg: Cost function analysis in the structural optimization of steel frames, Struct Multidisc Optim 28, 286–295 (2004)
- 3) 田中尚, 中村雄治 : 建築構造物の自動設計と最適設計,培風館,1973
- 4) 澤田樹一郎, 中村雄治, 松尾彰 : 反復線形計画法を用いた平面ラーメンの最適弾性・塑性設計法, 日本建築学会構造系論文報告集 No.485, pp.117-125, 1996.7
- 5) 澤田樹一郎, 周岩, 松尾彰, 中村雄治 : 部材せい設計変数を考慮した鋼構造建築骨組の最小重量設計に関する研究,日本建築学会構造系論文報告集,544,pp.133-139,2001.6
- 6) 大崎純 : 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法,日本建築学会構造系論文集,No.464,pp.119-127,1994.10
- 7) 松本慎也, 春日康博, 藤井大地, 藤田義信 : 接合部コストを考慮した半剛接鉄骨建物の最小コスト解析,日本建築学会構造系論文集,528,pp.113-119,2000.2
- 8) K.Uetani, M.Tsuji,I.Takewaki : Application of an optimum design method to practical building frames with viscous dampers and hysteretic dampers, Engineering Structures 25(2003),pp.579-592
- 9) D.M.Brown and A.H.-S.Ang : Structural Optimization by Nonlinear Programming, J.of Struct.Eng.Div.ASCE,Vol.92,ST6,pp.319-340,1966
- 10) 田中尚, 中村雄治 : 建築構造物の自動設計と最適設計, 培風館,1973
- 11) 中村恒善, 小坂郁夫 : 弾塑性骨組の指定設計用変形指標に対する 2 段階地震応答制約設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.439, pp.89-101, 1992.9
- 12) 内村均, 長縄裕行, 和田章 : 部材塑性率に注目した水平荷重を受ける鉄骨造平面骨組の部材断面変更法, 日本建築学会構造系論文集,No.537, pp.69-76,2000.11
- 13) A.A.Groenwold, N.Stander and 3.A.Snyman: A pseudo-discrete rounding method for structural optimization, Structural Optimization 11,pp. 218-227,1996
- 14) 竹脇出, 杉山哲彦, 辻聖晃, 上谷宏二 : 縮約モデル-骨組逆置換法に基づく骨組設計法,日本建築学会構造系論文集,No.512,pp.119-125,1998.10
- 15) 吉富信太, 山川誠, 上谷宏二 : 二段階緩和法に基づく鋼構造骨組の最適離散断面選択法, 日本建築学会構造系論文集,No.586,pp.95-100, 2004.12
- 16) 澤田樹一郎, 松尾彰 : 弾性・塑性制約下における鋼構造建築骨組の離散最適化問題に対する列挙型アルゴリズムの改善解法, 日本建築学会構造系論文集,No.574,pp.93-98,2003.12
- 17) 澤田樹一郎, 佐々木尊一, 松尾彰, 清水 斉 : 改善列挙法による工場製作コストを考慮した鉄骨骨組の最小コスト設計, 第 31 回情報・システム・利用・技術シンポジウム,2008.12
- 18) M.Stolpe : Global optimization of minimum weight truss topology problems with stress, displacement, and local buckling constraints using branch-and-bound, Int. J.Numer. Meth. Engng,61, pp.1270-1309, 2004
- 19) M.Ohsaki, T.Kinoshita and P.Pan,Multiojective heuristic approaches to design of frames with standard sections, Earthquake Engng. Struct. Dyn.,Vol.36(11),pp.1481-1495,2007

- 20) John H. Holland, Genetic Algorithms and The Optimal Allocation of Trials, Siam J. Comput.,Vol.2,No.2,1973
- 21) 田村 尚土, 大森 博司: 多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案 : その 1 許容応力度等設計における最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.628, pp.891-897, 2008.6
- 22) W.M. Jenkins : Plane frame optimum design environment based on genetic algorithm, ASCE, Vol.118(11), pp.3103-3112, 1992
- 23) 澤田樹一郎, 松尾彰, Dai Qing Song, 重量制限を課した遺伝アルゴリズムによる鋼構造建築ラーメン骨組の最小重量設計, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp.89-96, 2006.2
- 24) C.Camp, S.Pezeshk, G.Cao : Optimized Design of Two-Dimensional Structures Using a Genetic Algorithm, J. of Struct. Engng., Vol.124, pp.551-559, 1998
- 25) 大森博司, 鬼頭伸彰: 遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造物の形態創出, 日本建築学会構造系論文集, No.520, pp.85-92, 1999.6
- 26) W.Gutkowski, Z.Iwanow and J.Bauer : Controlled mutation in evolutionary structural optimization, Struct. Multidisc. Optim. 21, pp.355-360, 2001
- 27) G.Guerlement, R.Targowski, W.Gutkowski, J.Zawidzka, J.Zawidzki : Discrete Minimum Weight Design of Steel Structures Using EC3 Code, Struct. Multidisc. Optim., 22, pp.322-327, 2001
- 28) 廣安知之, 三木光範, 南泰彦, 谷村勇輔: 傾斜法を用いたハイブリッド遺伝アルゴリズムの大域的最適点探索, 情報処理学会第 5 回数理モデル化と問題解決シンポジウム論文集, pp.57-64, 2000
- 29) 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 遺伝アルゴリズムと局所探索法のロバスト性について, 信学技報, COMP95-23, 電子情報信学会, 1995
- 30) Ting-Yu Chen and Chung-Jei Chen : Improvements of Simple Genetic Algorithm in Structural Design, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol,40, pp.1323-1334, 1997
- 31) 章 宏, 石川眞澄: 局所探索付ハイブリッド実数コード遺伝的アルゴリズム, 信学技報, NC2004-132, 電子情報信学会, 2005
- 32) Mariusz Pyrz : Evolutionary Algorithm Integrating Stress Heuristics for Truss Optimization, Optimization and Engineering, 5, pp.45-57, 2004
- 33) Cheng Yeh : Hybrid Genetic Algorithms for Optimization of Truss Structures, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering 14(1999), pp.199-206

## 謝辞

2004 年秋に広島大学大学院工学研究科の博士課程後期に入学して、早、6 年が過ぎました。30 年前の大学生活よりも長い年数を費やしたことになります。しかし、あっという間の 6 年間でした。その間、松尾彰教授（広島大学）には、終始懇切丁寧なご助言、ご鞭撻を賜りました。2005 年の姉歯事件に代表される耐震偽装問題に端を発し、構造設計者の社会的環境は激変、会社の業績は上向かないのに、業務量が急増、加えて、投稿論文が不採用になるなど、研究継続の意思が揺らいだ時期もありましたが、焦ることはない、先生ご自身が極めて多忙にも関わらず、筆者への議論やご指導のために多大な時間をさいていただきました。本論文をまとめあげることができましたのは、先生のおかげであり、心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、澤田樹一郎先生（広島大学助教）には、非常に適切なご助言、ご教示を賜りました。特に、最適設計プログラムに関しては、筆者への議論やご指導のために多大な時間をさいていただきました。また、国際会議の発表では、苦手な英語の発表論文を幾度も添削いただき、充実した発表を行なうことができました。心より感謝申し上げます。

大久保孝昭教授、大崎純教授、藤井堅教授、近藤一夫准教授（広島大学）には、論文審査を通じて、貴重なご助言、ご教示を賜りました。心よりお礼申し上げます。

高松隆夫教授、玉井宏章准教授（広島工業大学）には、本研究時期と平行して、日本建築学会の鋼構造塑性設計指針改定の委員に加えていただき、本研究の基礎となる塑性設計に関して、改めて勉強する機会を与えていただきました。また、いろいろな機会を通じて、ご助言、ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

本研究は、鉄骨製作会社からの鉄骨製作に関する貴重な資料や助言なくしては行なうことはできませんでした。ご協力いただきました鉄骨製作会社の方々に、心より感謝申し上げます。

既に広島大学を卒業された元松尾研究室の佐々木尊一君、濱田佳伸君、毛利聡君には、本研究の手助けをしていただきました。心より感謝申し上げます。

構造設計の先輩である新田貴太男氏（新田建築工学研究所）の後に続きたいとの思いで、博士課程後期に入学する決意をし、本論文をまとめることができました。新田貴太男氏なくして、この貴重な経験をすることはありませんでした。筆者に、勇気と希望を与えていただきましたことに、また、いろいろな機会を通じて、ご助言、ご鞭撻を賜りましたことに、心より感謝申し上げます。

最後になりましたが、色々な形でご支援、ご鞭撻を賜りました日本建築構造技術者協会中国支部の皆様に、心より感謝申し上げます。

2010 年 9 月 清水 斉

## 付録



教えてください。

(1) 仕口ブロック (P5 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(2) 仕口ブロック (P6 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(3) 仕口ブロック (P7 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(4) 仕口ブロック (P8 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(5) 仕口ブロック (P9 丸で囲まれた部分) (絞込み部分は 4 枚のプレートから製作) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(6) 仕口ブロック (P10 丸で囲まれた部分) (絞込み部分は 4 枚のプレートから製作) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(7) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P11 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(8) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P12 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(9) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P13 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。(裏当て金の取り付けを含めて)

[ ] 人で [ ] 時間

(10) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P14 丸で囲まれた部分) の小組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。(裏当て金の取り付けを含めて)

[ ] 人で [ ] 時間

(11) 柱の大組み立て (P15 1CX3Y2) に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(12) 柱の大組み立て (P16 2CX3Y2) に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(13) (P16 2CX3Y2) において柱が 250×250×12 の場合における柱の大組み立てに要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(次ページに続く)

(14) 大梁 (H700×300×12×19 5130mm) 1 台 (P1 丸で囲まれた部分) の組み立て (ス

プライス、仮ボルト取り付け等)に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(15) 大梁 (H400×200×9×16 5180mm) 1 台 (P2 丸で囲まれた部分) の組み立て (プライス、仮ボルト取り付け等) に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

3. 本溶接についてお答えください。

(1) 仕口ブロック (P5 丸で囲まれた部分) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(2) 仕口ブロック (P6 丸で囲まれた部分) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(3) 仕口ブロック (P7 丸で囲まれた部分) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(4) 仕口ブロック (P8 丸で囲まれた部分) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(5) 仕口ブロック (P9 丸で囲まれた部分) (絞込み部分は 4 枚のプレートから製作) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(6) 仕口ブロック (P10 丸で囲まれた部分) (絞込み部分は 4 枚のプレートから製作) の全ての溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(7) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P11 丸で囲まれた部分) の溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(8) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P12 丸で囲まれた部分) の溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(9) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P13 丸で囲まれた部分) の溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(10) 梁ブラケットの仕口ブロックへの取り付け (P14 丸で囲まれた部分) の溶接に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(次ページに続く)

4. 工作図作成についてお答えください。

(1) 梁詳細図の梁 (P1 丸で囲まれた梁) 一台の図面作成に要する労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(2) 梁詳細図の梁 (P2 丸で囲まれた梁) 一台の図面作成に要する労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(3) 柱詳細図 (P3 1CX1Y3) の図面作成に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(4) 柱詳細図 (P4 2CX1Y3) の図面作成に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(5) 一般的なアンカープランの図面一枚の作成に要する平均的な労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(6) 一般的なはり伏せ図の図面一枚の作成に要する平均的な労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(7) 一般的な軸組み図の図面一枚の作成に要する平均的な労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

5. 原寸についてお答えください。

(1) ダイアフラム (PL450×450×25) 1 枚の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(2) ダイアフラム (PL250×250×19) 1 枚の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(3) 大梁 (H700×300×12×19 5130mm) 1 台 (P1 丸で囲まれた部分) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(4) 大梁 (H400×200×9×16 5180mm) 1 台 (P2 丸で囲まれた部分) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(5) 梁ブラケット (H700×300×12×19) 1 パーツ (P3 丸で囲まれた部分) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(6) 梁ブラケット (H400×200×9×16) 1 パーツ (P4 丸で囲まれた部分) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(次ページに続く)

(7) 仕口ブロック (P5 丸で囲まれた部分) 内のコラムの原寸に要するおおよその労務時

間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(8) 仕口ブロック (P6 丸で囲まれた部分) 内のコラムの原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(9) 仕口ブロック (P7 丸で囲まれた部分) 内のコラムの原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(10) 仕口ブロック (P8 丸で囲まれた部分) 内のコラムの原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(11) (P15 1CX3Y2) の 1 層部分のコラム柱身の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(12) (P15 1CX3Y2) において柱が  $250 \times 250 \times 12$  の場合における 1 層部分のコラム柱身の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

(13) ブラケット付き柱 (P8 2CX1Y3) のすべてのパーツ (コラム、ダイアフラム、梁ブラケット等) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

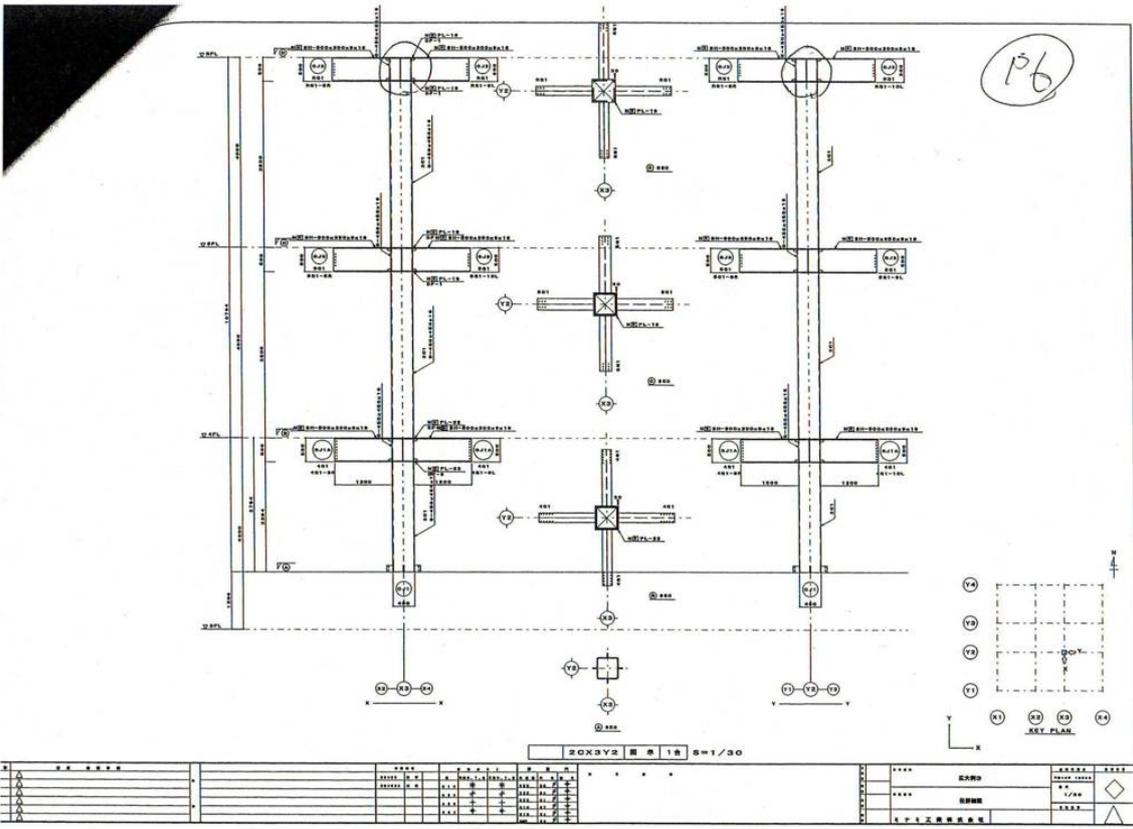
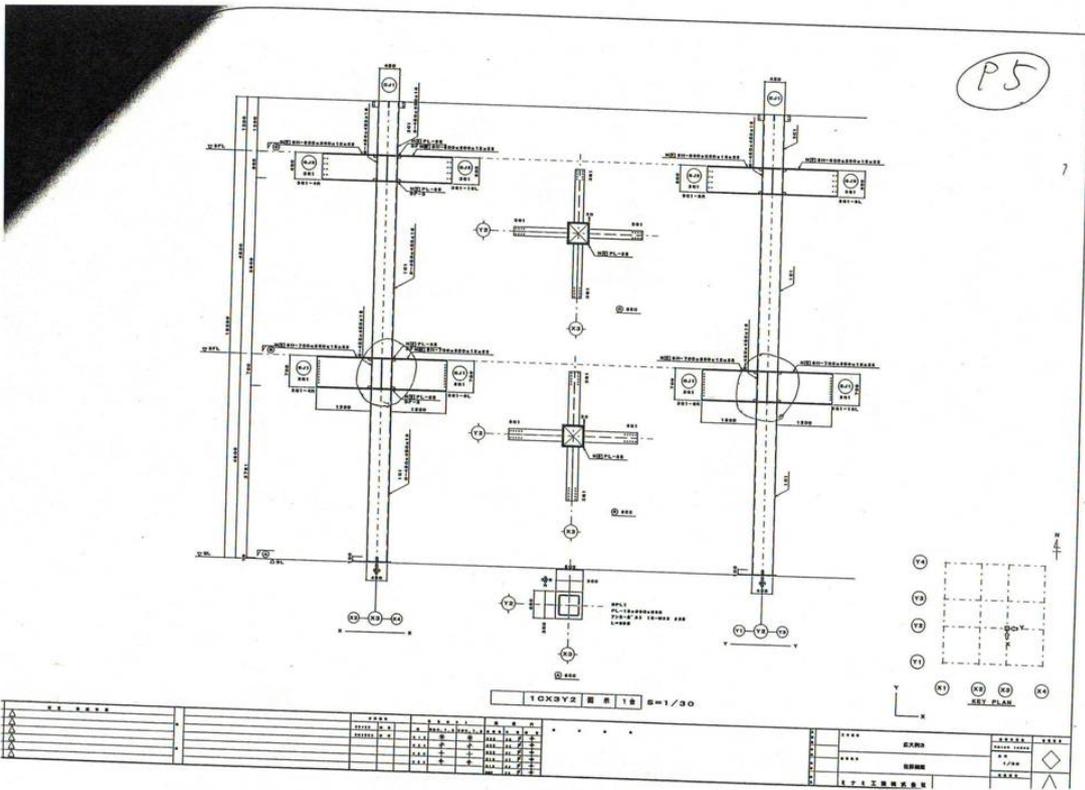
(14) ブラケット付き柱 (P8 2CX1Y3) において、はり断面寸法およびダイアフラム寸法がすべて同一である場合、すべてのパーツ (コラム、ダイアフラム、梁ブラケット等) の原寸に要するおおよその労務時間をお答えください。

[ ] 人で [ ] 時間

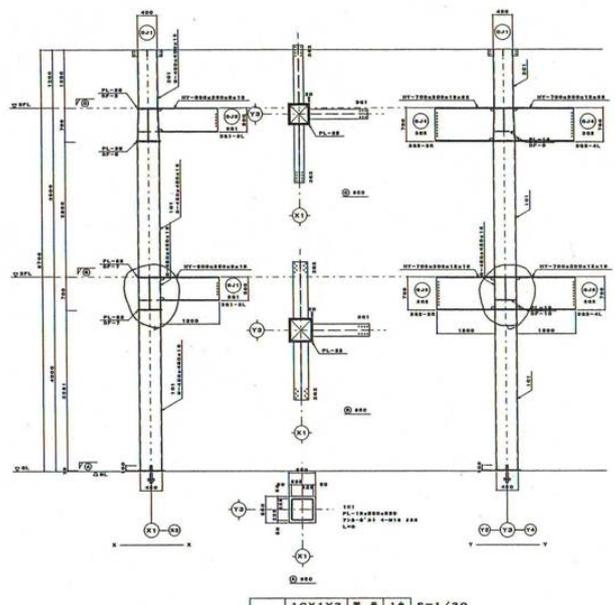
ご協力ありがとうございました。







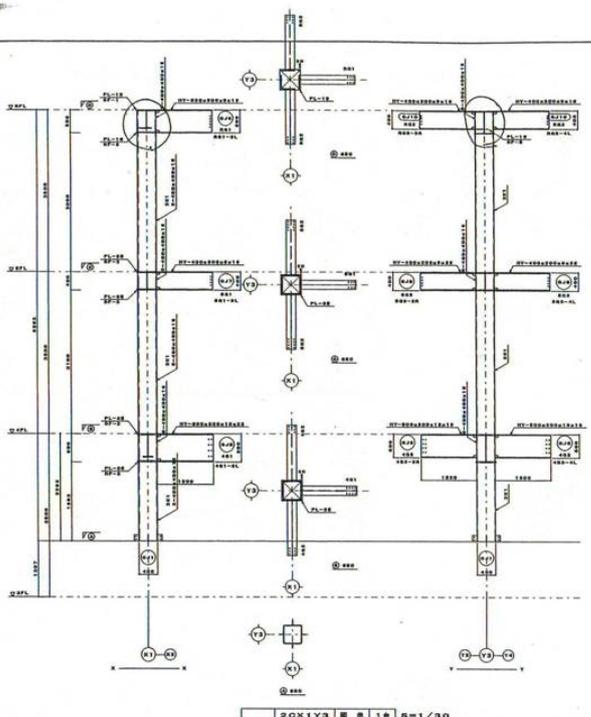
17



10X1Y3 圖 18 S=1/30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

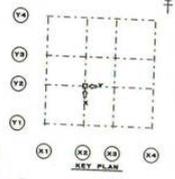
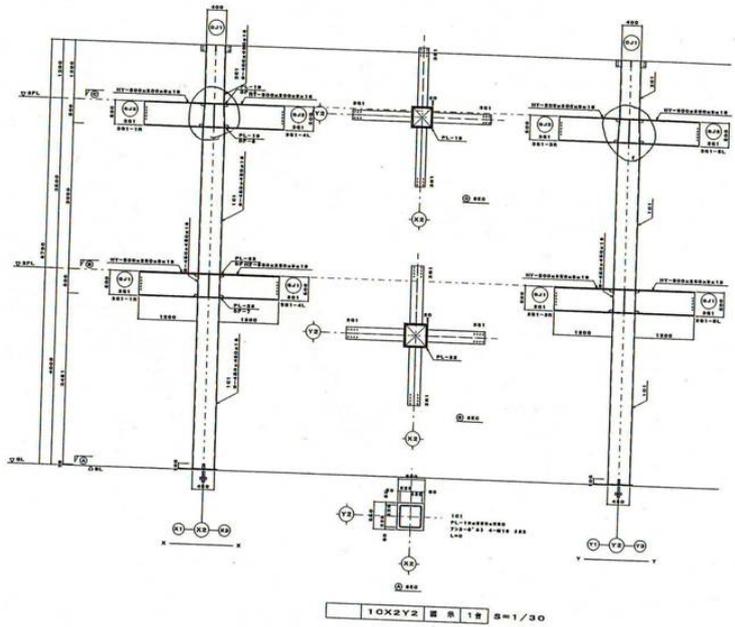
18



20X1Y3 圖 18 S=1/30

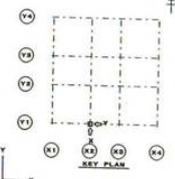
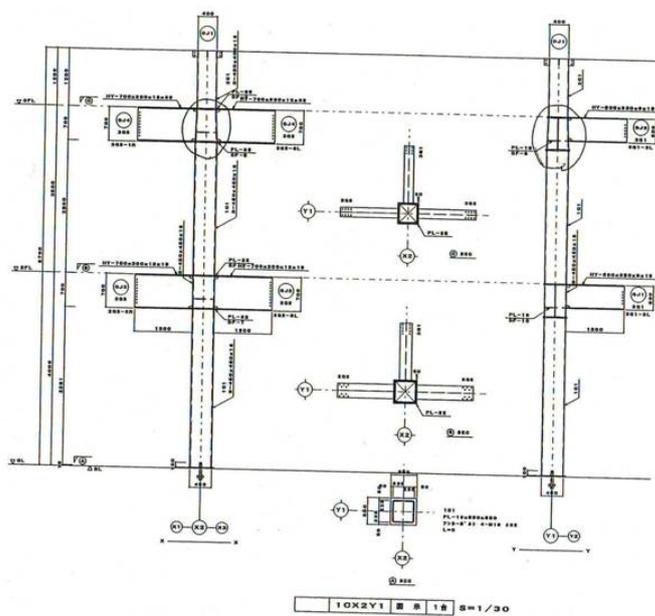
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

P9



NO.	REV.	DATE	BY	CHK.	APP.	DESCRIPTION
1	1.1					
2	1.2					
3	1.3					
4	1.4					
5	1.5					
6	1.6					
7	1.7					
8	1.8					
9	1.9					
10	1.10					

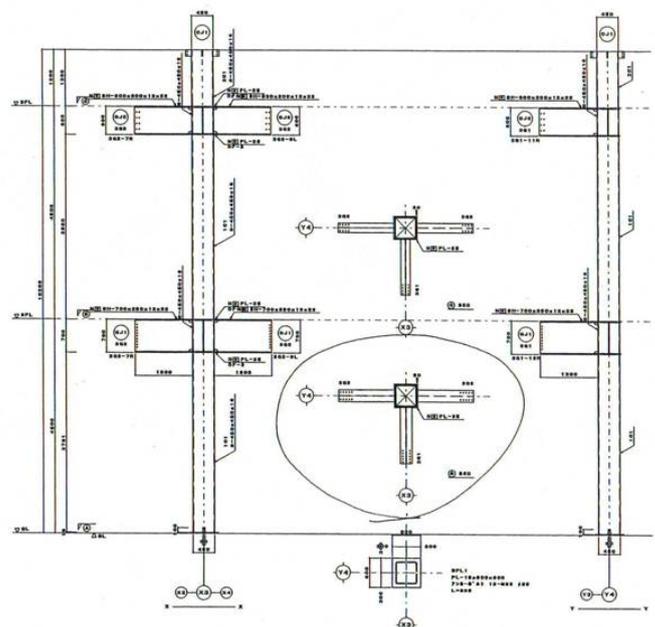
P10



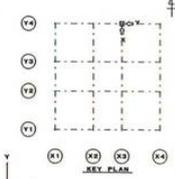
NO.	REV.	DATE	BY	CHK.	APP.	DESCRIPTION
1	1.1					
2	1.2					
3	1.3					
4	1.4					
5	1.5					
6	1.6					
7	1.7					
8	1.8					
9	1.9					
10	1.10					



P13

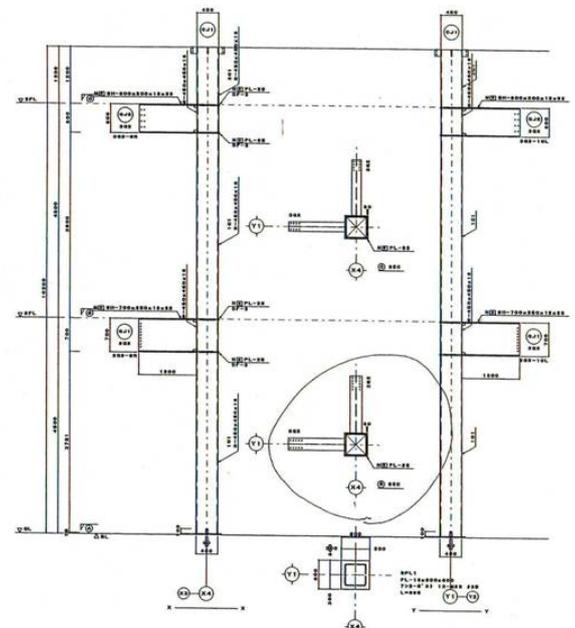


10X3Y4 圖 1B S=1/30

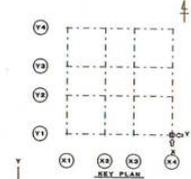


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

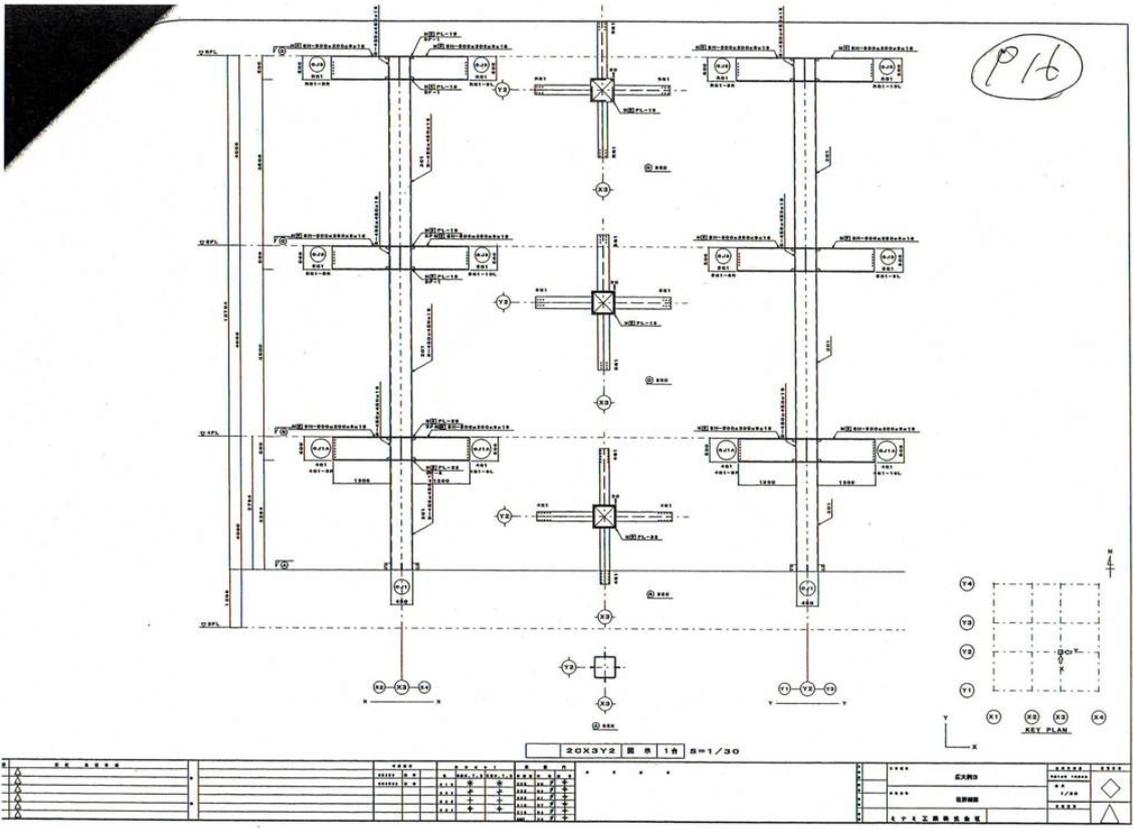
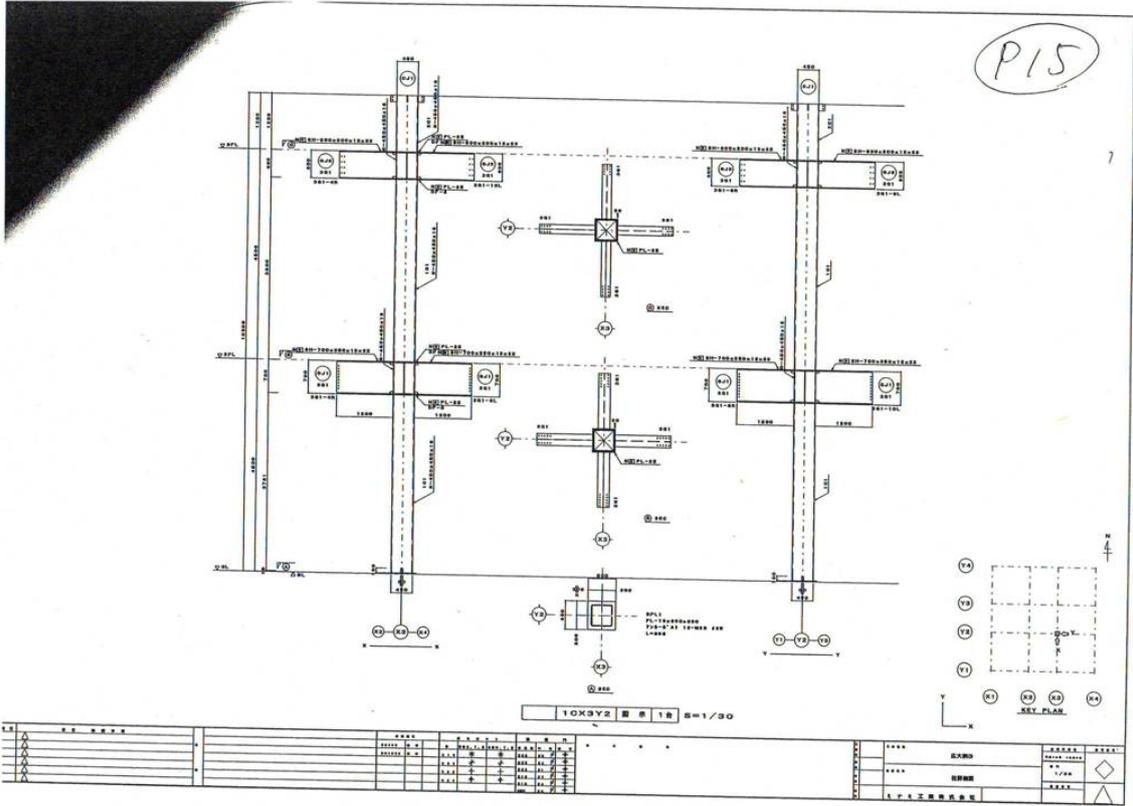
P14



10X4Y1 圖 1B S=1/30



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



スワズスワート

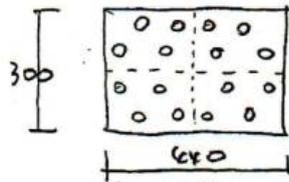
(81紙1)

H1700x300x12x19 用 (使用ボルト M22):

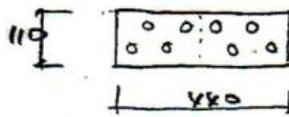
ワシ>V

t=12 x 300 x 420 (2枚)

t=16 x 110 x 420 (4枚)



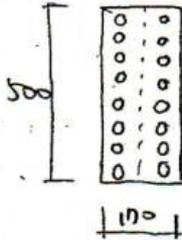
(外)



(内)

ワシ>V

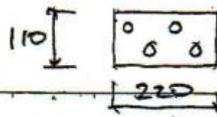
t=12 x 500 x 170 (2枚)



(81紙2)

板厚調整用プレート (梁フラットと梁中央部ワシ厚の差が3mm  
H1700x300x12x19) の場合

t=3 x 110 x 220 (4枚)



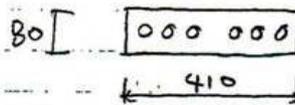
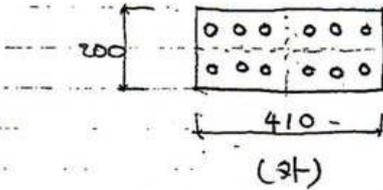
(別紙3)

H-400x200x9x16 用 (使用ボルト M20)

ワング

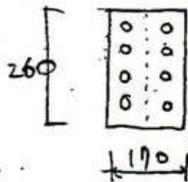
$$t = 12 \times 200 \times 410 \text{ --- } \textcircled{2\text{枚}}$$

$$t = 12 \times 80 \times 410 \text{ --- } \textcircled{4\text{枚}}$$



ワング

$$t = 12 \times 260 \times 170 \text{ --- } \textcircled{2\text{枚}}$$



(別紙4)

板厚調整用プレート (梁ジョイントと梁中央部のワング厚の差が 3mm の場合)  
(H-400x200x9x16)

$$t = 3 \times 80 \times 205 \text{ --- } \textcircled{1\text{枚}}$$

