

新制

工

1340

# 鋼構造多層骨組の最適設計解特性の解明と 最適鋼材量の簡易予測法

2005年3月

李 有 震

鋼構造多層骨組の最適設計解特性の解明と  
最適鋼材量の簡易予測法

2005 年 3 月

李 有 震

# 目次

序文	1
<b>第1章 基本計画における設計者の意思決定とモデルの設定</b>	
1.1 はじめに	9
1.2 実務設計における最適設計手法の位置付け	10
1.2.1 実務設計における設計者の意思決定	10
1.2.2 構造設計の基本計画段階と詳細設計段階	11
1.2.3 実務設計の実情に関する問題点	12
1.2.4 基本計画段階における最適設計手法の適用	13
1.3 最適設計手法を適用するための対象の想定	15
1.3.1 対象建築物の想定	15
1.3.2 最適設計法に基づく設計支援情報の提示	17
1.4 対象モデルの設定	19
1.4.1 平面骨組モデルの設定	19
1.4.2 平面骨組モデルに作用する荷重条件	20
1.5 第1章の結論	23
<b>第2章 最適化手法と解の基本特性</b>	
2.1 はじめに	25
2.2 平面骨組モデルの最適解の基本特性	26
2.2.1 最適化手法	26
2.2.2 ステップごとの断面積分布の変化	27
2.2.3 初期断面設計の違いが最適解に及ぼす影響	28
2.2.4 スパン割りの均等・不均等に関する考察	32
2.3 第2章の結論	34
<b>第1部 純ラーメン骨組モデルの最適解</b>	<b>35</b>
<b>第3章 純ラーメン平面骨組モデルの最適解</b>	
3.1 はじめに	37
3.2 純ラーメン平面骨組モデルの最適解特性	38
3.2.1 スパン数の変化による影響	38

3.2.2	スパン長の変化による影響	40
3.2.3	外形固定でスパン数の変化による影響	42
3.2.4	荷重条件の変化による影響	44
3.2.5	層数の変化による影響	46
3.3	純ラーメン平面骨組モデルの最適鋼材量の近似予測式	48
3.3.1	近似予測式の定式化	48
3.3.2	近似予測式の検証	49
3.4	第3章の結論	52
<b>第4章</b>	<b>純ラーメン立体骨組モデルの最適解と最適鋼材量の簡易予測法</b>	
4.1	はじめに	53
4.2	立体骨組モデルの設計問題	54
4.2.1	立体骨組モデルの設定	54
4.2.2	立体骨組モデルの最適化	54
4.3	平面骨組最適解を用いた純ラーメン立体骨組モデルの最適鋼材量の近似予測法	62
4.3.1	立体骨組モデルの分解	62
4.3.2	立体骨組から取出した平面骨組モデルの最適解	64
4.3.3	立体骨組モデルの最適鋼材量の予測	68
4.4	第4章の結論	71
<b>第II部</b>	<b>ブレース付き骨組モデルの最適解</b>	<b>73</b>
<b>第5章</b>	<b>ブレース付き平面骨組モデルの最適解</b>	
5.1	はじめに	75
5.2	最適設計問題	76
5.2.1	ブレース付き平面骨組モデルの設定	76
5.2.2	基礎の反力	77
5.3	ブレース付き平面骨組モデルの最適解の基本的特性	78
5.3.1	最適解を決定する制約条件	78
5.3.2	ブレース位置の影響	83
5.3.3	ブレース間隔の影響	85
5.4	骨組サイズの異なるブレース付き平面モデルの最適解特性	87
5.4.1	スパン数の変化による影響	87
5.4.2	スパン長の変化による影響	93
5.4.3	ブレース付き平面骨組モデルの最適鋼材量の近似予測式	94
5.5	ブレース設置スパン数の異なる平面骨組モデルの最適解特性	96
5.5.1	ブレース設置スパンの数の異なる平面骨組モデル	96
5.5.2	ブレース設置スパンの結合数の異なる平面骨組モデル	97

5.5.3	大きさの異なる複数のブレース群をもつ平面骨組モデル	99
5.6	任意のブレース配置について最適解を予測するための手法	101
5.6.1	コアの配置を考慮したブレース付き平面骨組モデル	101
5.6.2	ブレース付き平面骨組モデルの鋼材量の比較	103
5.7	第5章の結論	106
<b>第6章 ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性と最適鋼材量の簡易予測法</b>		
6.1	はじめに	107
6.2	ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性	108
6.2.1	ブレース付き立体骨組モデルの最適解の基本特性	109
6.2.2	スパン数の変化による影響	113
6.3	ブレース付き立体骨組モデルの最適解の近似予測法	117
6.3.1	ユニットモデルを用いた近似予測式の定式化	117
6.3.2	ブレースの交差効果の評価法	119
6.3.1	ブレース付き立体骨組モデルの最適鋼材量の近似予測式の適用例	120
6.4	第6章の結論	125
<b>結 論</b>		<b>127</b>

## 序文

### 1. 従来の構造設計における最適設計法の位置付け

計算機環境の発展に伴う高度な解析法の登場は、これまでは困難であった構造物の高度な解析を可能とし、大規模かつ複雑な構造物の力学的特性を比較的短時間に知ることが可能となった。実務の構造設計でも、計算機が利用される場面は増えつつあるが、それらの場面は、与えられた構造物の力学特性を提示するという解析部分に限定されており、構造物の軸組や部材配置、部材サイズをどのように行うべきかを決定する創造的部分は未だに設計者の経験に依存している。

現行の構造設計は、設計者の経験に基づいて部材の配置や仮定断面を与え、市販の一貫構造設計プログラム等を用いて応答解析とその結果の検討を行い、再び断面を更新する作業の繰り返しで適切な部材断面を決めるという手順で行われる場合が殆どである。

設計者の経験に基づいた従来型の構造設計法に対し、最適化手法や逆問題型解析法を用いて構造設計の論理化を図るための研究が数多くなされておられ、実務に適用するための様々な工夫や設計手法の提案などが行われている。特に最適化手法は、課せられた条件をすべて満足し、コストが最小になるような設計を可能とすることがその目的であり、新しい最適化手法の開発のために数多くの研究が行なわれている。最適設計手法は、実際に機械、造船、航空機、自動車などの分野において有効に利用されていることが多く、安全性の向上、軽量化、コストの低減などの様々な恩恵がもたらされている。しかし、建築分野に関しては、これらの研究は部材の配置が指定された骨組に対し、その部材断面を求めるといった実務設計の詳細設計段階における断面設計を対象としたものが殆どであり、提案された最適設計手法が建築構造物を対象とした実際の構造設計に用いられていないのが実状である。

### 2. 最適設計法の実務利用における課題

詳細設計段階を対象とした最適設計法が実務で利用されない理由の一つに、実務上無視できない要請に配慮していない場合、非現実的な解が得られることが挙げられる。このような課題に着目して、実務上重要な実施可能性条件を保障するための条件を最適設計に取り入れるための試みもなされており、最適設計法の実務利用に向けた技術的環境は整いつつあるといえる。

その一方で、実務設計者は多くの場面で意思決定を行っており、詳細設計段階における意思決定はそのごく一部に過ぎないという現実も無視できない。一般的な構造性能に関する保有性能の確認は、一貫設計ソフトを用いてほぼ自動化されている。しかし、建築構造物の部材の寸法や配置などは構造計算による判断だけではできず、意匠、設備、製作、施工、それ以外の付随的な条件を課せられた上に最終的に設計者の適切な判断に任せられるのが一般的である。このように、設計者の意

思決定には、数理的な計算結果による支援が容易な部分と、人間の判断がより重視される部分が共存するという建築特有の問題がある。

実務設計上満足すべき制約条件や、最小化（最大化）の対象となる目的関数が設計変数の関数として数式で記述されていれば、「与えられた制約条件を全て満足しつつ、目的関数値を最小（最大）にするような設計変数集合を見出す最適設計問題」として扱うことができる。ところが、このような問題設定が構造設計における設計者の種々の意思決定行為に、どの範囲まで適用でき、どの程度設計を有効に支援できるかについての議論が十分になされているとは言い難い。以上の事柄を認識したうえで、設計者の判断の必要性を前提とし、設計者の判断が容易・困難なもの、または必要・不要なものといった条件の分類や、部材断面を決めるだけでなく、設計者が行なう判断の指針となる情報の提示が、実務での構造設計に対して最適設計が有用なツールとして用いられるための大きな課題であると考えられる。最適設計法を用いて実務設計における設計者の意思決定をより論理的に支援するためには、実際の設計プロセスに即して設計者の意思決定を幅広い範囲にわたって論理的に支援するような設計法が望まれる。

### 3. 基本計画段階における最適設計問題

一般的な設計の流れは建物全体の設計方針を決める基本計画段階と具体的な部材断面を決定する詳細設計段階に分けられる。基本設計段階では各種の設計条件の決定や構造形式、架構形式、スパンなどの平面計画について決定する。一方、詳細設計段階は部材断面や接合部ディテールを決定することに相当する。

しかし、実際に基本計画段階と詳細設計段階とは明確に分離できるわけではない。例えば、基本計画時に適切なスパン割りを決定する場合を想定すると、スパン割りの異なる複数の計画案を比較する必要があるが、各計画案のコストや性能の評価のために必要な部材の断面寸法や接合部の詳細は、基本計画に続く詳細設計段階で多大な努力や時間を費やして決定される。そのため、設計者の経験に基づく従来の設計では、条件を満たす数多くの設計解の中で同等な設計条件に基づいて選ばれた結果の比較が行なわれておらず、必ずしも合理的な選択がなされているとは言い難い。しかし、最適手法を用いて各々の計画案から得られた最適解を利用する場合は、最適解同士であるので客観的な比較、評価ができ、建物の基本計画段階において合理的な意思決定が可能となる（Fig 1）。

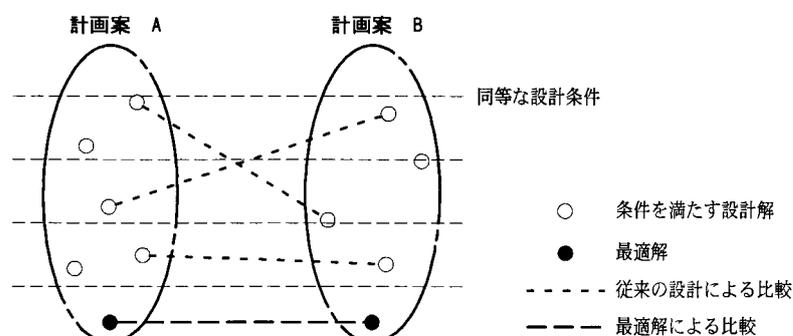


Fig 1 従来の設計と最適解との比較方法の違い

建築計画上の設計問題は問題として明確な定義が成し得ない問題（「悪構造問題」）、または解が無数に存在する多解性の問題など、問題構造すら明確になっていない場合が多く、このような複雑な構造の問題の答えを論理的に導く手法が望まれる。建築計画段階の論理化のために、いわゆる建築計画で行なわれている設計の思考、デザインの論理化による問題解決を対象とした手法を導入した研究はいくつかなされているが、数理的手法を用いて建築計画段階での設計者の意思決定支援を試みた研究はなされていない。

最適設計手法は、設計問題が明確になっている場合には合理的な解を導くことが可能な手法である。実務設計の構造計算のように考慮されている条件が明示的に数式で表現されている部分について最適設計手法を適用した研究が多くなされているが、建築計画上の設計問題を解くために最適設計手法を直接適用することはあまり適切ではない。しかし、時には悪構造問題ともなり得る建築計画の設計問題に対し、最適設計法は直接的に答えを与えるものではないが、より良い設計解を導くために有用な情報を提示することは可能である。

本研究ではその第一段階として、建物全体の最適鋼材量を指標として各モデルの性能を評価する方法を提案し、最適設計手法を用いることで得られた合理的な情報の提示を試みる。

#### 4. 本研究の目的

基本計画段階では、決められた建物全体のボリュームに対して計画可能な様々な基本計画案を作成し、その中で一つの場合を選択するという意思決定を行なう。本研究では、このような意思決定のプロセスを「マクロな構造設計問題」を呼ぶ。最適設計解を設計者の意思決定の合理的な根拠とすることは非常に有効な手段であるが、その一方で、複数の計画や候補骨組を幅広く検討する必要がある場合は、すべてのモデルに対する最適解を求める計算負荷が問題となる。立体モデルは規模が大きくなるほど、部材の数も多くなり、設計変数の数も指数関数的に増加し、それに対する計算負荷も飛躍的に増加する。これは、基本計画段階において最適設計手法を利用するための障壁となる重要な課題である。

著者らは 1) 建物の特性把握には立体骨組を平面骨組に分解して分析する方法が有効であり、実務設計でしばしば用いられていることと、2) 平面骨組モデルの最適化に要する計算負荷は立体骨組モデルより遥かに小さく、パラメタの数が少ないために解の性質も分析し易いことの二点に着目し、基本計画段階のマクロな設計問題における設計者の意思決定に有効に支援するために以下の課題を設定する。

- 1) 基本計画段階に行われるスパンの計画、ブレースの設置方法（耐震壁）を組み入れた効率の良い計画案の選択問題
- 2) 平面骨組モデルの最適解を通じて、平面骨組モデルの性質を明らかにすること
- 3) 立体骨組モデルの最適化にかかる計算コストを減らすため、計算コストの少ない平面骨組モデルの最適鋼材量の組み合わせで立体骨組の鋼材量を簡易的に予測する手法の提案
- 4) 立体骨組モデルの様々なブレース配置方法に対して、各ブレース配置パターンの立体骨組モデルの鋼材量を簡易的に予測する手法の提案

## 5. 本論文の構成

本研究では、基本計画段階でのマクロな設計問題に対して、最適設計手法を用いて建物の空間構成や軸組を決定する際の設計者の意思決定の支援を目的とする。それを確立するための第一段階の研究として、建物全体の最適鋼材量を指標として各モデルの性能を評価する方法を提案し、最適設計手法を用いることで得られた合理的な情報の提示を試み、その課題を以下のように展開する。

第1章では、現行の実務設計における基本計画段階での意思決定の難点と問題点、そしてその問題点を打開するために最適設計手法を用いた構造設計の論理化の必要性について述べ、それに基づいた新しい設計プロセスを提案する。後半では、本研究で扱うための建物として賃貸事務所ビルを想定し、基本計画段階の構造計画において設計者にどのような情報が必要であるかについて述べる。事務所ビルは各種建築物の中でその数はもっとも多く、もっとも整形な建物である。そのため、事務所ビルを対象としてマクロな設計問題に最適設計手法を適用した意思決定を支援する方法論の構築のための問題設定を行なう。

第2章では、建築構造物の基本計画段階において、最適設計手法を利用するための設計条件を整理する。基本計画段階での多数の計画案の中で1つの案を選択するといった設計者の意思決定に最適化手法を組み込むための第一前提は、すべての案の検討が同一なモデル化や設計条件下で行なわれることである。最適化のアルゴリズムによっては与える初期条件に従って違う最適解が得られることが指摘されており、松本らの研究では部材の初期断面設定の違いにより鋼材量、断面積の分布の異なる3タイプの局所解が得られることが示されている。そのため、本章では異なる設計条件を与えた同一モデルの最適解の比較、検討を通じて、選ばれる解が設計条件の設定により変動が起きないように、統一した設計条件を与える方法について論じる。

第I部では、純ラーメン骨組モデルを対象として、第3章では平面骨組モデルの最適化の特性について、第4章では平面骨組モデルの最適解特性を用いた立体骨組モデルの最適鋼材量の簡易予測法について述べる。

第3章では、立体骨組モデルに対する最適解特性を調べるために立体骨組の各構面を平面骨組モデルとして取出し、そのモデルの最適解の特徴を調べる。その手法は実務設計において建物の特性の把握に実用上有用な手法としてしばしば用いられるものであり、立体骨組に対して計算負荷も小さく、解の性質も分析しやすい長所もある。マクロな設計問題において設計者の重要な選択因子である「スパン長」「スパン数」「荷重レベル」をパラメタとした各平面骨組モデルの最適解の特性を分析し、少ないサンプル点の最適鋼材量を用いて任意のパラメタに対する平面骨組モデルの鋼材量を簡易的かつ効率的に予測する方法を提案する。

第4章では、第3章で調べた平面骨組モデルの最適解特性を用いて立体骨組モデルの鋼材量を簡易的に予測する手法を提案する。立体骨組モデルは規模に応じて部材の数が多く、設計変数の数も飛躍的に増加するため、最適設計の計算負荷が大きくなる。現実的な規模の立体モデルの最適解を得ることはモデルが決定した後の詳細設計段階では有用であるが、計画を試行錯誤している基本計画段階で比較すべき全てのケースについて詳細な最適解を得ることは計算コストの面から考えると現実的とはいえない。そのため、本章では第3章の結果を用いて平面骨組モデルの組み合わせを変えることで様々な立体骨組モデルの最適解を簡易的に予測する手法を提案する。

第Ⅱ部では、ブレース付き骨組モデルを対象として、第5章ではブレースの配置に関する平面骨組モデルの最適化の特性について、第6章では限られた立体骨組モデルの最適解をもとに立体骨組モデルの最適鋼材量の簡易予測法について述べる。

第5章では、ブレース付き平面骨組モデルに対する最適解特性を用いて、効率的なコアの配置方法について提案する。ラーメン構造ではコアの固定した部分を耐震壁として用いることが多いが、実際には設備による開口の位置、動線の考慮など平面計画により大きな制約を受けることが多い。そのように制限される条件下でのブレースの配置において、ブレースの位置、ブレースの近接効果、ブレース群の性質などのブレース配置特性、スパン長、スパン数をパラメタとした最適解特性について分析を行ない、その定性的な性質を明らかにする。最後にその結果に基づき、あらゆるブレース配置の特性をブレース群（コア）を用いて評価する方法を提案する。

第6章では、ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性を用いて、様々なブレースの配置を考慮した立体モデルの最適鋼材量を簡易的に予測する方法を提案する。ブレース付き立体骨組モデルはブレース付き平面骨組を立体骨組のどの構面に配置させるかによって最適鋼材量に大きな差が表れる。そのため、各軸のブレースにおける交差効果、近接効果を適切に評価する必要がある。本章では、ブレース付き骨組の最適解特性の1つである、水平力をもっとも効率的に支持できるコア部分の断面積の分布特性を用いて、各軸のブレース部分をユニットモデルとして取出す。そのユニットモデルの組み合わせの手法を利用し、様々なブレース配置に対する立体骨組モデルの鋼材量を簡易的に予測する方法を提案する。

## 参考文献

- 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集，第485号，pp.117-126，1996.
- 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集，第512号，pp.119-125，1998
- 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
- 中村恒善：建築骨組の最適設計，丸善，1980
- T.Nakamura, T.Yamane: Optimum design and earthquake-response constrained design of elastic shear buildings, *Earthquake Engng. & Struct. Dyn.*, Vol.14, pp.797-815, 1986.
- 松本慎也，春日康博，藤井大地，藤谷義信：接合部の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，第528号，pp.113-119，2000.2
- C.Camp, S.Pezeshk, G.Cao: Optimized Design of Two-dimensional structures using a genetic algorithm, *Journal of Structural Engineering*, pp.551-559, 1998.
- E.H.L.Aarts, J.K.Lenstra, eds.: *Local Search in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, Chichester, 1997.
- 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.

- K.H.Hager, R.Balling: New approach for discrete structural optimization, *Journal of Structural Engineering*, Vol.114, No.5, pp.1120–1134, 1988.
- M.W.Huang, J.S.Arora: Optimal design with discrete variables: some numerical experiments, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.40, pp.165–188, 1997.
- Toakley,A.R.: Optimum design using available sections, *Journal of the Structural Division*, Vol.94, pp. 1219–1241, 1968.
- 永野康行, 岡本達雄, 辻聖晃, 竹脇出, 上谷宏二: 最適設計手法を用いた実建築骨組の試設計, *日本建築学会近畿支部研究報告集*, pp. 161–164, 1999
- 永野康行, 岡本達雄, 辻聖晃, 竹脇出, 上谷宏二: 履歴型ダンパーを有する実超高層建築物への最適設計手法の適用, *日本建築学会近畿支部研究報告集*, pp. 153–156, 2000
- 辻聖晃: シンポジウム「創造的な構造設計を支える知恵と技術」, *日本建築学会近畿支部*, pp. 27–48, 2000
- 澤田樹一郎, 中村雄治, 松尾彰: 指定崩壊機構非形成確率を制約した鋼構造骨組の最小重量設計, *構造工学論文集*, 日本建築学会, Vol. 45B, pp. 259–264, 1999.3
- 松本慎也, 荒井宏, 春日康博, 平田裕一, 山本憲司, 藤井大地, 藤谷義信: 鉄骨骨組構造の最小重量設計における局所解の一例, *構造工学論文集*, 日本建築学会, Vol. 45B, pp. 249–258, 1999.3
- Rosen, J.B.: The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming -Part I:Nonlinear Constraints, *SIAM J.*, 9, pp. 514–532, 1961
- 宗本順三: 設計の思考とデザインの解, *建築雑誌*, 日本建築学会, pp. 30–31, 2004.11
- 松下大輔, 宗本順三, 岩田伸一郎: ホテルの客室部分構成比と各事業主体の NPV 最大化の二目的問題, *日本建築学会計画系論文集*, 第 539 号, pp.139–145, 2001
- 松下大輔, 宗本順三: 帰納推論を用いた事例の学習による評価尺度の記述と代替案の絞り込み, *日本建築学会計画系論文集*, 第 576 号, pp.31–36, 2004

#### 発表論文リスト（学位論文関連）

- [1] 李有震, 吉富信太, 上谷宏二: 鋼構造平面骨組モデルの最適解の特性を用いた構造計画に関する研究, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 50B, pp. 215~220, 2004
- [2] 李有震, 吉富信太, 上谷宏二: 平面骨組最適解を用いた鋼構造純ラーメン立体骨組の最適鋼材量近似予測法, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)

#### 発表論文リスト（学位論文関連以外）

- [1] Y.Lee, I.Takewaki, K.Uetani and K.Inoue: Critical damping of structures with elastically supported visco-elastic dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, No.2, pp481-486, 2002
- [2] 李有震, 竹脇 出, 上谷宏二: 粘弾性ダンパー付き骨組の単純化力学モデルの構築とその設計法への適用, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 2002

#### 研究発表（国内会議）

- [1] 李有震, 竹脇 出, 上谷宏二: 粘弾性ダンパー付き骨組の単純化力学モデルの構築とその設計法への適用, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 2002
- [2] 李有震, 吉富信太, 上谷宏二: 鋼構造平面骨組モデルの最適解の特性を用いた構造計画に関する研究, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 50B, pp. 215~220, 2004

#### 研究発表（梗概）

- [1] 李有震, 竹脇 出, 上谷宏二: 粘弾性ダンパー付き骨組の単純化力学モデルの構築とその設計法への適用, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.389~392, 2002
- [2] 李有震, 竹脇 出, 上谷宏二: 粘弾性ダンパー付き骨組の単純化力学モデルの構築とその設計法への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 349~350, 2002
- [3] 李有震, 吉富信太, 上谷宏二: 鋼構造平面骨組モデルの最適解を用いた鋼構造立体骨組モデルの最適解の簡易予測法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 323~324, 2004

## 第 1 章

### 基本計画段階における設計者の意思決定とモデルの設定

#### 1.1 はじめに

IT 産業の発達により携帯電話ですべての支払いができる時代に対して、建築行為に関しては人間の手に依存したままとどまっているのはなぜか？未来の人に対する過去の人がみた夢が一つ一つ実現されている現在、建築に対するもう 1 つの夢を思い出す。「ある人が建物を建てるために設計事務所を訪ねる。設計者はその人（A と称する）に対して要求事項を聞き、コンピュータに入力する。ENTER KEY を押すのと同時に A が希望する建物のタイプがいくつか出力される。その出力にはデザイン、空間構成、コストなどに関する A の要求がそのまま反映され、A はその中で気に入る案を選択する。」建築は単純に工場でものを生産する作業ではなく、ものを創造する行為であるため、その夢が実現できないと言えるのか？そういう訳ではない。何十年後になるとコンピュータを用いた建物のデザイン、空間設計などは一般的になっているだろう。その夢を実現するための第 1 段階として、著者は数理的手法を用いた設計者の意思決定の支援という観点から接近してみる。そのため、本研究は筆者の実務設計の経験上感じたこのような疑問点を基に、設計の論理化を試みたものである。

設計の論理化を支援するために有効な手法として、古くから最適化手法が注目されており、建築構造設計に最適化手法を適用した最適設計問題を扱った研究が数多く見られる。しかし、これらの研究成果は実務設計では有効に利用されるに至っていない。その理由は、既往の最適設計に関する研究が設計者の望む形での問題設定となっていないことが挙げられる。実務設計の実際の設計フローに即して設計者の意思決定を支援する手法の提案が望まれるが、どのような設計場面で、どのような設計支援情報を提示するのが設計者にとって有用であるかといった観点の議論が充分になされているとは言いがたい。

本章では、様々な設計場面での設計者の意思決定を合理的に支援するために、どのような情報をどのような形で提示するのが有効であるかについて論じる。特に詳細設計段階を対象とした従来の最適設計法に対し、基本計画段階での意思決定場面を対象として、最適設計手法を用いることの有効性を示し、最適設計手法を用いた新たな構造設計フローを提案する。

## 1.2 実務設計における最適設計手法の位置付け

実務設計において、設計者は様々な場面で数多くの与条件に配慮しつつ適切な判断を要求される。現状ではこのような意思決定は設計者の経験に基づいてなされており、設計の初期段階における設計者の意思決定は、最終的な設計に大きな影響を及ぼすため、より適切な判断が要求される。しかしこのように重要な問題であるにもかかわらず、設計者の経験に基づいた場合、必ずしも合理的な意思決定がなされている保障はない。

本節では、現行の実務設計における意思決定の難点とその問題点、そして、その問題を打開するための手法としての最適設計手法の有効性について論じる。これらの議論に基づいて、構造設計の論理化の実験的な次元として最適化手法を用いた新しい設計プロセスのフローを提案する。

### 1.2.1 実務設計における設計者の意思決定

建築主の要求する建物が「どのような建築」であるかを設計者が明確にさせること、すなわち形態が未知の段階での技術的な検討を行なう、いわゆる「企画段階」<sup>[4]</sup>から建築設計は始まる。その「企画段階」では、与条件の把握と設計条件の検討、敷地の技術的調査、同規模、同種建築の事例調査、設計と施工の全体スケジュールの設定などのような基礎的な与条件を整理する。

しかし、実際に建物の設計は「基本計画段階」からの設計行為を意味し、その「基本計画段階」は建物の全般にわたっての比較、検討、意思決定が行なわれる一方、構造、設備との関係を調整するなど、建物の設計において最も重要な段階である。その「基本計画段階」の実務で行なわれる設計プロセス<sup>⑩</sup>を Fig 1.1 に示す。

Fig 1.1 は実務の設計プロセスに従って建築設計領域と構造設計領域<sup>⑩</sup>に分類し、その関係を示したものである。その設計プロセスにおいて決定者への報告を経て設計者の意思決定を必要とする項目は以下のとおりである。

⑨報告（社内）－各案の検討：建築基準法を満たす建物全体のボリュームに対して建物の構成を決める。人・物の動線、スパンの計画、コアの計画、基本デザインの方針を含め、各案の性能、コスト比較などの検討を行なう。各案に対しては社内の報告、修正を経て建築主への報告書作成のための資料として用いられる。

⑩報告（建築主）：計画案の最終決定を行なう段階である。社内の報告で決定された検討結果をもとにしてより具体的な計画を行なう。動線、スパン割り、コアの配置、外壁のデザイン、材料から概略的なコストまで決定され、ここで選ばれた基本計画案を用いて基本設計段階に至る。

しかし、このような設計者の意思決定に関しては設計者の経験や過去の事例に依存することが一般的であり、コストや種々の条件についての満足具合に関して定量的に比較・検討を行なった結果決定されたものではない。

以上の2段階の建築設計領域での意思決定に対して、構造設計領域は構造計算に限定されている場合がほとんどである。新しい構造形式や経験がない建物に対してはデザイナーに知識の範囲内で諮問することにとどまってしまう場合も少なくない。その上に、構造計画案の妥当性を検証することの困難さ、沢山の時間をかけた構造計算が必ずしも短い時間で得られた結果より良い結果が求まるといえないことなど、現状の設計手順全体としての問題も存在する。これらの問題点に対する意思決定についても何らかの形で設計フローに反映させる必要がある。

### 1.2.2 構造設計の基本計画段階と詳細設計段階

構造設計領域においても構造設計者の意思決定を必要とする場面が多くあり、建築設計領域と同様に様々な計画案の比較・検討を行なう基本計画段階と、選ばれた計画案に対して詳細な部材断面を定める詳細設計段階に分類するのが一般的である。

基本計画段階は、構造形式や架構形式等の設計の基本方針を決める段階である。設計期間の短い中小規模の建物であれば、設計者の経験に基づいて設計の基本方針を決めてしまうことが多い。しかし、設計期間が長く規模が大きい建物であれば、設計者は複数の案の試設計の比較・検討を行ない、望ましい1つの案を選択するような意思決定過程を経る場合が一般的である。

詳細設計段階は、スパン割や構造形式などの外形に関わる大きな項目の決定後、各部材の詳細な断面形状を定める段階である。実務での詳細設計段階の流れは、設計者が経験上の仮定断面を設定し、その設計が必要な条件を満足するかを、構造計算ソフト等を用いて確認する過程を経るのが一般的である。侵されている条件があれば、設計者が仮定断面の再設定を行い、再び必要な条件の確認を行う操作を、全ての条件が満足されるまで試行錯誤的に繰り返し実行する。

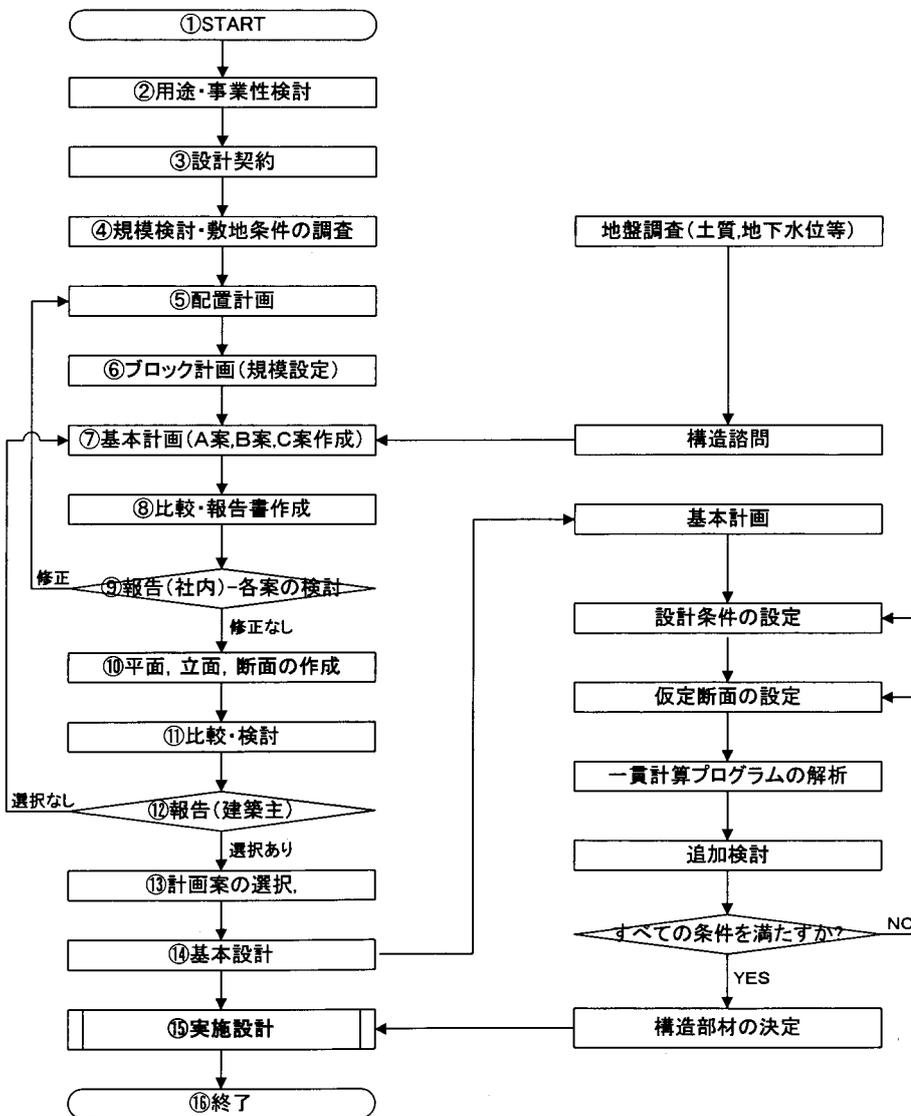


Fig 1.1 実務での設計プロセス (既存)

以上のように実務設計の流れに従えば、基本計画段階と詳細計画段階を単に、建物の外形に関わる計画を行う初期段階と、各部材レベルでの設計を行う最終段階という意味合いで分類できる。しかし、実際には基本計画段階においてより良い選択を行なうために、部材の断面寸法や接合部の詳細などの詳細設計の情報が与えられる必要がある。そのため、設計者の意思決定行為を単純に設計の初期段階、最終段階という基準だけで線引きすることは適当でない。実務設計での設計者の意思決定行為は、本来構造物が有する設計自由度の中で、最終的に1つの設計に結実させるために種々の設計条件を順次確定し、設計自由度を絞ることに他ならない。一つの設計条件を確定することは当然その後の設計に影響を及ぼすが、設計に与える影響の度合いには各々差がある。従って、設計に与える影響が大きな条件から順次決定してゆくのが適切であろう。こうしたことから考えると、設計者は設計上影響の大きな要因を経験的に認識しており、これらの条件から順次決定する手順を経験的に選択しており、基本計画段階と詳細設計段階はそうした経験上導かれた区分であるといえる。

### 1.2.3 実務設計の実情に関する問題点

以上のような建物の設計には多くの意思決定が必要であり、それに対して設計者の負担も大きく、または、1人の設計者がすべての条件を十分に考慮した設計をすることが困難である。また、建築設計者は建築主と構造設計者の相反する要求の調整を強いられる場合が少なくない。ここで著者は建築設計事務所での5年半の間の実務設計（構造設計ではなく建築設計）で積んだ経験をもとに、主観的な観点としての実務設計の問題点として以下のことを挙げる。

#### 1) デザイナと建築主との関係

##### ①建築主の要求に対する適切な対応の必要性

一般的に建築主が設計者に要求する条件としてはデザイン性、コスト、安全性、快適な居住性などがあり、その中でコストは建築主のもっとも興味のある1つの条件である。そのため、設計者は基本計画段階において多数の計画案に対する概略的なコストを算出し、その比較を行なう。しかし、各々の案に対して考慮すべき条件が十分に反映された結果ではなく、経験や過去の事例から推測された値である場合がほとんどであり、詳細設計後に得られたコストと相違する場合が多く、設計者の信頼度を低下させる1つの原因となる。

##### ②意思決定の際の複数の計画案に対する論理的な比較・分析法

様々な計画案に対して1つの案を選択する意思決定は最終的には建築主の希望によるのが一般的であり、計画案の報告のために設計者は色々な条件を組み込んだ比較・検討報告書を作成する。しかし、デザイン、動線、空間配置などの計画的な側面に対する数量化の困難な設計条件が多く、それらを取り入れた論理的な意思決定の手法が必要である。

##### ③頻繁に行なわれる設計変更

建築構造物における設計条件は極めて多種多様であり、流動的である。デザインの方向、建築主の事業方針により一日で変わってくる場合も少なくない。このような頻繁に行なう設計変更に対して迅速に対処する方法が必要である。

## 2) デザインと構造設計者との関係

### ① デザイナーの構造に関する知識の不足

「工学とデザインとの絶妙な調和」を目標とする建築の特殊性に対して設計者は認識不足である。デザイナーは数理的な知識に基づいたものではなく、自らの勘や経験による基本計画を行なう場合が多い。そのため、新規性の強い構造方式をデザインに応用し難く、実現性の不透明な絵のような作品は構造設計者に対して大きな負担になってしまうこともある。

### ② 構造設計者の過大な安全率の確保

一例を挙げてみる。工場建築は生産設備の機種や配置による設計変更が多く、施工時においても変更される。2階の鉄筋の配筋時、建築主の要請によりある区間の床荷重が2～3倍近く増加した時があった。構造設計者に設計変更を依頼した結果、そのままの部材（柱、梁、スラブ）で支持できるという答えが返ってきたとき、構造設計者が考慮している安全率はどれくらいかとの疑問が生じた。

## 1.2.4 基本計画段階における最適設計手法の適用

建築構造の複雑化、多様化に伴い、数理的な概念を導入した構造設計に対する要請が高まっている。実務における設計行為は「与条件をすべて満足しつつ、建設コストを最小にする部材断面を決定すること」と捉えることができ、この行為はそのまま最適設計手法の問題設定に適合する。そのことから、構造設計に最適設計手法を導入するための研究が多くなされ、実際にこれらの成果を構造設計に適用した例も、極めて少ないが、いくつか見られる。しかし、現行の構造設計は設計者の手に委ねられている。その理由の一つは、最適設計が詳細設計段階での構造計算部分を対象とする場合がほとんどであるのに対し、実務の構造設計では詳細設計段階以外にも広い範囲にわたって数多くの意思決定を行っており、そのような意思決定を有効に支援できるものとはなっていないことが挙げられる。そこで、本研究では最適設計をより幅広く使うための試みとして、これまでほとんど議論されることのなかった基本設計段階での設計者への意思決定の支援を目的とした方法論に対する認識の必要性に着目する。

最適設計手法を用いて設計者を支援するための具体的な設計プロセスを Fig 1.2 に示す。Fig 1.1 の既存の設計プロセスに対して Fig 1.2 の設計プロセスは構造設計領域を構造計画での意思決定の支援のためのマクロな設計問題と詳細設計段階での部材断面寸法を決めるミクロな設計問題として分類した。

マクロな設計問題としては、決められた建物のボリュームに対して部材配置や耐震壁として利用するコアの位置を決める場合の設計者の意思決定の支援を目的とする。固定した外形に対して得られるスパン割り、耐震壁の位置に関する多数の案の中で、最適設計で求められた解の比較・検討を通して設計者が1つの適切な案を選ぶようなマクロな設計問題は、経験や過去の事例により行なわれた既存の手法に対して論理的・信頼性が高いといえ、本研究の主な目的である。

ミクロな設計問題としては、最適設計を用いて実施可能な部材の断面形状を決めることを目的とする。部材の製作・施工上、意匠、設備設計との収まりなどが最適設計を実務に適用し難い大きな理由であり、吉富らの研究でその条件を考慮した最適設計手法を提案<sup>[4]~[7]</sup>している。従って、本論文では詳細設計段階でのミクロな設計問題については考慮しない。

最適設計手法を取り入れた Fig 1.2 のプロセスを実務に適用すると、従来の設計システムに対して以下の改善効果が期待できる。

- ①構造設計者の構造計算（仮定部材を想定し、繰り返しの構造解析による部材断面の決定）にかかる時間が最適設計手法を用いることで短縮し、残りの時間を構造計画など創造的な部分に専念することができる。
- ②経験、または過去の事例がなく、初めて接する建物の設計に対して設計方針を決めることは極めて難しい。最適設計手法から得られた結果の分析を用いて如何に欠陥がない、新しい設計方法への方向性を提示することができる。
- ③基本計画段階において最適設計手法を用いて短い時間に多数の案を比較することができ、その中で1つの案を選択する設計者の意思決定を論理的に支援することができる。
- ④事業性による建築主の要請や意匠、空間の理由によるデザイナーの要請で行なわれる頻繁な設計変更に対して、入力データや設計条件を変更することだけで簡単に対応することができ、互いの信頼度が向上する。

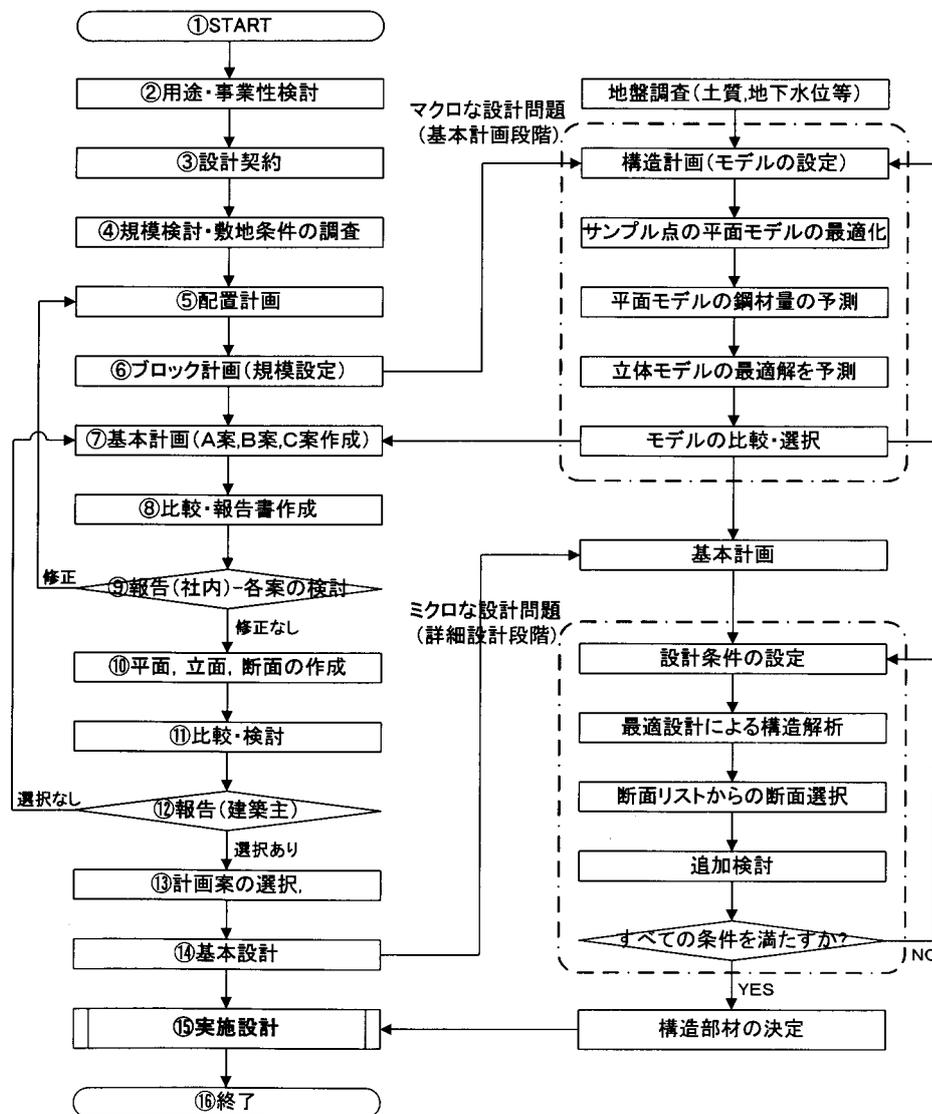


Fig 1.2 最適設計手法を用いた設計プロセスの提案

### 1.3 最適設計手法を適用するための対象の想定

1.2節では、実務の基本計画段階に行なう設計者の意思決定を支援するための最適設計手法の必要性について述べた。本節では、本研究においてマクロな設計問題に最適設計を用いた意思決定の支援の方法論を適用するために必要な対象建物の想定や問題設定を行なう。

#### 1.3.1 対象建築物の想定

本研究では、商業建築の事務所ビル<sup>[8]~[10]</sup>を対象建物として想定する。事務所ビルは産業革命時代の社会生産の基盤であった構造に付け足された事務処理の場が事務所ビルの始まりであり、今でも、各種のビジネスにおける情報を生産・処理する場として社会生産の基盤となっている。事務所ビルは都市を形成する重要な骨格であり、各種建築物の中でその数が最も多く、整形である場合の多い建物である。

事務所ビルは、大都市における大企業の自社使用を目的とする自社ビル、事務空間を賃貸して利益を上げることが目的とする賃貸ビル、異なる用度を複合されて都心における人口の空洞化現状を防ぐための複合ビルの3つの形態に分類できる。各ビルは建物の利用法により、追求する目的に差があり、設計者はその差を反映させた設計を行なう。そのため、自社ビル、複合ビルは建物のデザインや性能を、賃貸ビルは建物の経済性を重視するように、要求の違いによる分類ができる。特に賃貸ビルは事務スペースを賃貸することにより投資の回収を行なうことが主な目的であり、同一の敷地であれば、有効貸室面積が大きいほど、また建設費が安いほど、収益性は大きくなる特性を持ち、コストと一番密接な関係がある建物といえる。そのため、賃貸ビルはコストを目的関数とした最適設計手法を用いるのにもっとも適したモデルであり、本研究は商業地域に配置する賃貸事務所ビルを対象モデルとして、マクロな設計問題で設計者の意思決定に支援するための方法論を展開する。賃貸事務所ビルに対する基本設計条件は一般的に以下のようなことが考えられる。

#### 事業計画

賃貸ビルは収益性確保のために敷地に対して最大ボリュームを設定する。建物の収益を表す指標として、容積対象床面積に対する収益部分の面積（賃貸面積）の比率である有効率（レンタル比）を用いる。

#### 立地条件の調査、分析

建物の規模、用途の検討のために、地域、計画道路、再開発促進地区の有無など敷地がどのような制約を受けるのかについて調べる。特に賃貸ビルの場合は、周辺環境によって賃貸の方法が変わる（たとえば、小規模のテナントが集まった地区ではフロアを小割りできるような計画が必要）ので、十分に立地上の条件を調べる必要がある。

- ・ 敷地特性：敷地内外での高低差、前面道路との関係、方位など
- ・ インフラ状況：上下水道、ガス、電力、電話通信など
- ・ 諸環境調査：騒音、振動、空気、日射、採光など
- ・ 敷地に係わる法規制：関連法規など

## ボリュームの設定

全体ボリュームの設定は、敷地・法規条件から決まる最大容積ボリュームと、事業計画上の条件から決まる規模との両面から検討を行う。計画上の規模算定は、入居人員の設定から行い、一般的なオフィスの1人当りの面積は6~12m<sup>2</sup>程度である。地下のボリュームに対しては、建設費が高く、建設工期に大きな影響を及ぼすため、必要な部分以上にはならないような工夫をする場合が多い。他には、建物が周辺の環境へ及ぼす影響を考慮する必要がある。特に高層ビルになるほどその影響は広範囲になる。

- ・ 日照：十分な日照の確保は不可能であるが、一般的に日影図を作成し、その影響を調査
- ・ 交通機関への影響：通勤等の際、公共交通機関への影響を調べる
- ・ その他：風害、電波障害、大気汚染、騒音、プライバシー阻害など

## 配置、動線計画

1階のメイン動線とメンテナンスや、駐車場、通用口からのサービス動線を整理する。同時にコアの形式と配置を検討する。また、斜線制限、避難経路、緊急車両の活動スペース等の法的制約や、周辺建物の状況、敷地の方位、建物の道路からの見え方などについても検討する。特に、1階は建物が周辺の社会に接する部分であり、賃貸料を高くできる部分であるので効率よい計画を行なう。

## 平面計画

オフィスビルの平面構成は基準階の設定によって建物の基本形が決まる。したがって、基準階はオフィス空間+コア（エレベーター、階段、トイレ、設備シャフトなど）の組み合わせで考えられる。各コアのタイプの特徴は以下のようである。

- ① センターコア（中央型）
  - ・ 床面積が比較的大きい場合に適する。
  - ・ 事務室が連続し、フレキシビリティや面積効率が良い。
  - ・ 建物の偏心がなく構造計画上望ましい。
- ② 両断コア（外周型）
  - ・ 一つの大空間が確保できる。
  - ・ 両面採光のとれる執務空間が可能。
  - ・ フロアを分割する場合に廊下が必要になり、有効率が低減。
  - ・ 両端に階段が設置され、二方向避難が確保でき、防災上有利である。
- ③ サイドコア（片寄型）
  - ・ 一般的に小・中規模の場合に採用される。
  - ・ 建物が偏心しており、構造上の対処が必要。
- ④ 分離コア（分離型）
  - ・ コアを必要に応じた形で計画できる。
  - ・ 設備ダクトや配管をコアから事務室へ取り出すのに構造上制約を受ける。

## 断面構成

敷地条件（道路、隣地斜線、日影規制等）をふまえ、階高と階数を検討する。基準階の階高は均質な空間とし、外観のデザインを統一するため、同じ階高にすることが一般的である。基準階の階高は、天井高+「天井ふところ寸法」およびOAフロア高さで決定される。基準階の天井高は有効2.6～2.7m とすることが多い。

### 1.3.2 最適設計法に基づく設計支援情報の提示

1.2 節のように、基本計画段階では、複数の計画案を比較検討して、一つの案を決定するといった選択が行なわれる場合がある。このように異なる条件下の設計を比較する場合、比較項目の選定自体も課題であるが、各計画案の評価が適正な方法で行なわれることも重要である。しかし、現行の実務では、比較の対象となる全ての計画案に対して詳細な設計を行なうことは時間の制約上現実的ではなく、設計者の経験に基づいて大まかな試設計を行なうのが一般的であり、必ずしも合理的な比較がなされているという保障はない。

このような意思決定場面について、設計者にとって有用な情報は大きく次の2つに集約されると考える。

1) 個別のモデルの最適設計解の提示

2) 与えられたパラメタ域内の任意モデルに対する最適設計解の提示

1) は、各計画案の詳細設計まで考慮した設計解を提示することである。最適設計手法はこのような場面において、合理的な意思決定を支援するために有効な手法となり得る。各計画案の最適設計解が提示されていれば、いずれの解もそれぞれの設計条件下における最適解という意味（序文の Fig 1 参照）で、比較のための基礎となり得る有用な解である。このような問題については、実務設計上無視できない実際に製作施工が可能であるための条件を考慮した最適設計問題も提案されており、より現実的な解を求めるための環境は整いつつあるといえる。

2) は、あらゆる軸組形状の骨組<sup>[11]~[14]</sup>について、どのような設計になるかを示した設計資料の提示である。実務設計上は設計者の過去の経験の蓄積によって得られた定石を知識として持っている場合もあるが、一般的な資料として整理されているわけではない。最適設計に関する既往の研究では、このような点に着目してなされた研究はないが、経験に基づいた設計を比較するよりも、最適設計解を比較することで合理的なルールが導かれる。このため、このような資料の作成にも最適設計は非常に有効であると考えられる。極論すれば、あらゆる軸組の骨組について最適解を求めることでこのような設計資料の作成は可能である。

このように、いずれの場合も最適設計法を用いて設計者の意思決定を有効に支援できると考えられるが、問題となるのは、設計者にとって望ましい情報の提示の仕方である。例えば骨組の応力図を表示する場合、骨組全体の応力図を一度に表示すると見やすさが損なわれるため、各構面ごとの応力図に分割して表示することが一般的に行われている。このように、全ての情報を一度に提示するよりも、ある限定的な情報を提示する方が設計者にとって有用となる場合もある。2) の設計資料を作成する場合を考えると、均等スパンを有する整形な骨組であっても、軸組を特定するために必要なパラメタは、スパン数、スパン長、層数、階高、などがあり、また荷重レベルによっても設計は異なる。このように数多くのパラメタの全ての組合せについて変化させた正確な資料が用意さ

れたとしても、このような情報は設計者にとっては意味が読み取りにくく、使いやすいものであるとは言いがたい。このように考えると、スパン数やスパン長といったある特定のパラメタだけを変動させた場合にどのように設計が変化するかを示した資料が、設計者にとって使いやすく有用な資料になると考えられる。

そこで本研究ではまず、従来扱われることのなかった 2) の設計資料の提案を目的とする。そのため、実務設計の基本計画段階で複数の計画案を比較検討する場面を想定し、各計画案の差を表現するために必要なパラメタに着目し、これらのパラメタを独立に変動させた場合の最適解の変化を、設計資料として提示する。ただし、階数や階高は、敷地条件からほぼ一意に決定される場合が多いため、これらのパラメタを固定した下での設計資料を提示する。純ラーメン骨組の場合は、スパン数、スパン長、荷重レベルをパラメタとし、ブレース付き骨組の場合は、ブレースの配置もパラメタとして変動させることで、各パラメタに関する最適設計解の特性を抽出し、これらの特性を設計資料として提案する。

実務上の興味の対象は立体骨組モデルであるが、最適解の特性を抽出することを目的とした場合、立体骨組モデルを直接扱うことは、問題の構造が複雑となり、明快な特性が抽出できないことが危惧されるため適切ではない。実務上は整形な立体骨組の場合、立体骨組モデルを構成する構面を平面骨組モデルとして取り出して分割することがよく行われる。そこで本研究でも、まず最適解特性の分析には、平面骨組モデルを用いることにする。これには、問題の単純化により分析が容易になるという点以外に、計算負荷を大幅に低減させることができるという利点もある。

平面骨組モデルについて、最適解の予測ルールが抽出できれば、任意の平面骨組モデルの最適解を予測することができる。最終的に設計者が興味のある立体骨組モデルの最適解については、この平面モデルについて得られたルールを有効に利用することができると思う。例えば、立体骨組モデルを平面骨組モデルに分解したのと逆に、平面骨組モデルの組合せで立体モデルを簡易的に評価する手法が考えられるし、また、平面モデルについて得られたルールに基づいて立体モデルに拡張したルールを得ることも考えられる。

## 1.4 対象モデルの設定

第2章から第4章では、平面骨組モデルを対象とした最適化解析を行なうが、立体骨組モデルの特性把握に用いられる平面骨組モデルの構成のために、以下のような建物を想定し、その建物の構面を構成する平面骨組を取出す。

立体骨組は平面図上で直交する軸上に部材が配置されている整形骨組である。構造形式は鋼構造純ラーメン骨組として、梁はH形鋼中幅系、柱は正方形角形鋼管とする。コアの配置などを考慮した上で、実際に平面計画で実現可能なスパン割りを想定する。

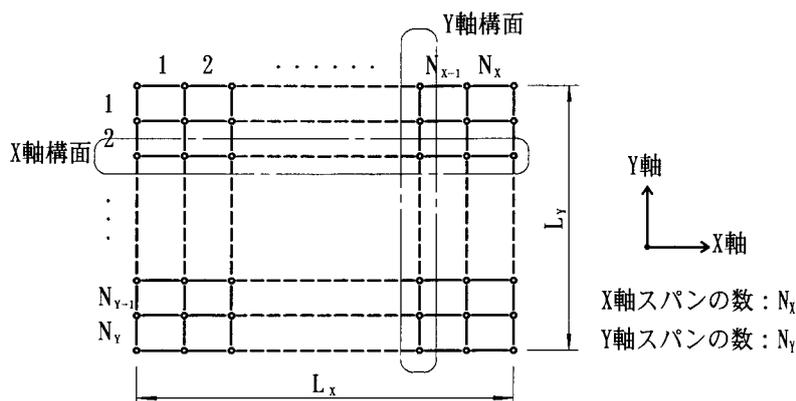


Fig 1.3 立体モデルから取出される平面モデル（平面図）

### 1.4.1 平面骨組モデルの設定

Fig 1.3の立体骨組モデルから取出した構面を用いて平面骨組モデルを構成する。平面骨組モデルを対象として最適設計手法を適用するために以下のような設計条件を設定する。

#### 設計条件

- ・1階の柱脚は固定とし、基礎梁は設計変数として扱っていない。スラブは面内に変形しないように十分な強度があり、面内の変形が無視できるのに十分な剛性があると仮定する（剛床仮定）。
- ・材料定数としては以下の値を用いる。  
ヤング係数  $E = 2.05 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 、 $F$  値  $= 325 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
- ・梁はH形鋼中幅系、柱は正方形角形鋼管とする。ブレースを設置する場合は山形鋼、溝形鋼、H形鋼の中で一つの鋼材を選択する。
- ・梁、柱ともに断面積を設計変数とし、 $A$  (断面積)と $I$  (断面2次モーメント)、 $Z$  (断面係数)及び $Z_p$  (塑性断面係数)の関係式を以下のように設定する。

$$\begin{aligned}
 \text{梁} : \quad & I = 4.0 A^2 & Z = 1.5 A^{1.5} & Z_p = 1.6 A^{1.5} \\
 \text{柱} : \quad & I = 1.2 A^2 & Z = 0.8 A^{1.5} & Z_p = 0.9 A^{1.5}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

- ・最適化手法として勾配射影法<sup>[15]</sup>を用いる。
- ・弾塑性解析は、軸力と曲げの相関を無視した完全塑性ヒンジを弾性部材の両端に配置した弾塑性梁有限要素を用い、荷重増分法及び変位増分法によって行う。

- ・各々のモデルは各軸に対して対称性のみ考慮したグルーピングを行う。Fig 1.4 には立体モデルのグルーピングに対する一例を示す。平面モデルは一方方向の構面を取出した場合のグルーピングを考慮する。

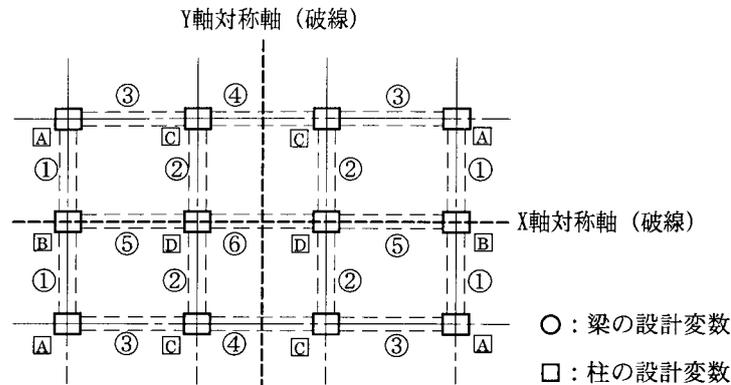


Fig 1.4 対称性のみ考慮したグルーピング方法の一例

#### 1.4.2 平面骨組モデルに作用する荷重条件

##### 短期荷重と長期荷重

- ・長期荷重

床、梁、小梁、柱の自重を含む単位面積当りの床重量を  $8.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$  (建物の用途をオフィスビルとして想定した場合、床荷重:  $5.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、梁の荷重:  $1.2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、積載荷重:  $1.8 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、外装に使う材料の固定荷重は考慮しない) とし、大梁に等分布荷重として与える。

- ・短期荷重

地震荷重として  $A_i$  分布から算定した水平荷重を立体モデルの各層重心に作用させる。1次設計は  $C_0 = 0.2$  の地震荷重相当、2次設計は  $D_s = 0.3$  の必要保有水平耐力相当とする。

2次設計用荷重として  $D_s = 0.3$  としたときの必要保有水平耐力  $Q_m$  相当の層水平力を  $P_m$  とし、荷重係数  $\lambda$  を乗じた  $\lambda P_m$  を載荷する。保有水平耐力  $Q_u$  は最大層間変形角が  $1/75$  となるとときに各層が負担する層せん断力として評価し、この時の荷重係数を  $\lambda_u$  とすれば保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回るという条件は  $1 \leq \lambda_u$  と表現できる。

Fig 1.3 の立体骨組モデル規模が  $45.6 \text{ (m)} \times 22.8 \text{ (m)}$ 、10層とした場合、平面骨組モデルに作用させる水平荷重は、式(1.2)から算出した Table 1.1 の層水平力に直角方向のスパンの数を考慮(鉛直・水平荷重の設定参照)したものである。

$$Q_i = C_i \times \sum W_i \quad (1.2)$$

$$C_i = Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_0 \quad T = h (0.02 + 0.01\alpha)$$

$$A_i = 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \times \frac{2T}{1 + 3T}$$

$Z$  : 地域係数 (=1.0)

$R_i$  : 振動特性係数 (=1.0)

$A_i$  : 高さ方向の分布係数

$C_0$  : 標準せん断力係数 (=0.2)

層	1次設計	必要保有水平耐力
10F	4172.8	6259.2
9F	2460.8	3691.2
8F	2046.2	3069.3
7F	1752.2	2628.3
6F	1507.2	2260.8
5F	1263.2	1894.8
4F	1059.4	1589.1
3F	864.4	1296.6
2F	642.9	964.4
1F	530.2	795.3

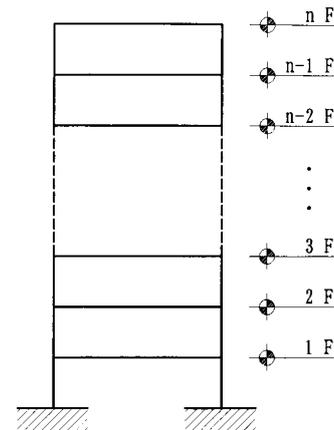


Table 1.1 層水平力(kN)と見上げによる層の分類

### 鉛直・水平荷重の設定

対象とする平面モデルは Fig 1.3 の立体モデルから取り出した各方向構面とし、各構面の負担する荷重について次のような仮定を設ける。

- 1) 各構面は等しい水平荷重を分担する。
- 2) 各構面は支配床幅に応じた鉛直荷重を分担する。

平面モデルに作用する荷重は、想定する平面骨組が支持する床面積に応じて Fig 1.5 のように設定する。鉛直荷重は床面積の幅  $D$  に比例し、水平荷重は床面積の幅  $D$  と長さ  $L$  に比例する。

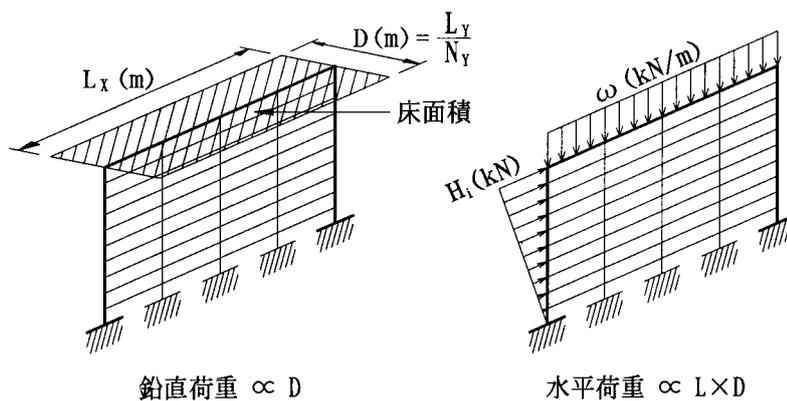


Fig 1.5 各荷重と床面積との関係

立体骨組に対して荷重とスパン数の関係を考えると、鉛直荷重は建物全体の床面積を平面骨組モデルを構成している X 構面、または Y 構面のスパン数（直交方向は均等スパン割りしたと仮定する）で除した比で与える。水平荷重は仮定 1) に基づき、直交方向の軸の構面の数で除した比で与える。各々の荷重は以下のように表わすことができる。

- ・水平荷重：立体モデルの第  $i$  部材に作用する設計用水平荷重を  $H_i(kN)$  とする。X 軸構面と Y 軸構面に作用する水平荷重は以下のように表わせる。

$$\text{X 軸構面} : \frac{H_i}{(N_Y + 1)} \qquad \text{Y 軸構面} : \frac{H_i}{(N_X + 1)} \qquad (1.3)$$

- ・鉛直荷重：単位長さ当りの重量を  $\omega(kN/m)$ 、単位面積当りの重量は  $p(kN/m^2)$  とする。X 軸構面と Y 軸構面に作用する鉛直荷重は以下のように書ける。

$$\text{X 軸構面} : \omega_x = \frac{L_Y \times p}{N_Y} \qquad \text{Y 軸構面} : \omega_y = \frac{L_X \times p}{N_X} \qquad (1.4)$$

立体骨組モデルの規模が 10 層、45.6 (m) × 22.8 (m) の長方形の場合、Y 軸構面 (建物の長さ 22.8m の構面) に対して計画可能なスパン割りを考慮した平面骨組モデルに与える鉛直荷重、水平荷重の比の例を Table 1.2 に示す。

荷重レベル (直交方向スパン数を考慮)			Y 軸構面で計画可能なスパン数		
スパン数	水平 荷重	鉛直 荷重	2 スパン	3 スパン	4 スパン
3	H/4	W/3L <sub>X</sub>	Y <sub>23</sub>	Y <sub>33</sub>	Y <sub>43</sub>
4	H/5	W/4L <sub>X</sub>	Y <sub>24</sub>	Y <sub>34</sub>	Y <sub>44</sub>
5	H/6	W/5L <sub>X</sub>	Y <sub>25</sub>	Y <sub>35</sub>	Y <sub>45</sub>
6	H/7	W/6L <sub>X</sub>	Y <sub>26</sub>	Y <sub>36</sub>	Y <sub>46</sub>
7	H/8	W/7L <sub>X</sub>	Y <sub>27</sub>	Y <sub>37</sub>	Y <sub>47</sub>
8	H/9	W/8L <sub>X</sub>	Y <sub>28</sub>	Y <sub>38</sub>	Y <sub>48</sub>

※モデル名の記号

Y：Y 軸構面モデル

L<sub>X</sub>：建物の X 軸構面の長さ

H：立体モデルに作用する水平荷重

W：上層部の床面積

小文字：前の数字は平面モデルのスパン数、後の数字は直交方向のスパン数

Table 1.2 平面骨組モデル(Y 軸構面)のタイプと荷重レベル

## 1.5 第1章の結論

本章では、実務の基本計画段階で行なわれる様々な意思決定の難点と問題点、それらを打開するための手法として最適設計の有効性について論じた。基本設計段階は建物の全般にわたって比較、検討、意思決定を行う一方、構造、設備との関係を調整するなど、建築設計でもっとも重要な段階である。しかし、このような比較、検討、意思決定は設計者の経験や過去の事例に依存する 경우가多く、実務設計において、①建築主の要求に対して適切な対応の必要性、②意思決定の際に複数の計画案に対して論理的な比較・分析法の必要性、③頻繁に行なわれる設計変更、④デザイナの構造に関する知識の不足、⑤構造設計者の過大な安全率の確保などを実務での問題点として挙げた。そのため、その問題点の解決には論理的な手法を用いて意思決定を支援するための新しいシステムを構築する必要がある、最適設計手法を用いた新しい設計プロセスを提案した。

後半では、本研究においてマクロな設計問題に最適設計手法を用いてマクロな設計問題の意思決定を支援する方法論を展開するため、それに必要な対象建物の想定や問題設定を行なった。事務所ビルは都市を形成する各種建築物の中でその数が最も多く、整形である場合の多い建物である。また、スパン数、スパン長、コアなどのパラメータを建物に反映しやすく、その方法論を適用するのにもっとも適した建物といえる。従って、その事務所ビルを対象として、最適設計手法に基づき、①個別のモデルの最適設計解の提示、②与えられたパラメータ域内の任意のモデルに対する最適設計解の提示などの有用な設計支援情報の提供を目的とし、最適設計手法を用いるための骨組モデルの構成、設計条件、立体骨組と平面骨組の荷重関係、鋼材量最小化問題の設定など、基本計画段階でのマクロな設計問題の支援に必要な情報を得るための基本項目を設定した。

### <参考文献>

- [1]日本建築学会：建築企画論，技報堂出版株式会社，1990
- [2]下出源七：デザイナのための構造チェックリスト，彰国社，1977
- [3]木村俊彦：構造設計とは，鹿島出版会，1991
- [4]吉富信太，辻聖晃，山崎雅弘，上谷宏二：弾塑性応答制約条件下の鋼構造立体骨組の最適設計解特性，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp.351-354，2003.1
- [5]吉富信太，辻聖晃，山崎雅弘，上谷宏二：部材断面寸法をパラメータとした鋼構造立体骨組の最適設計，構造工学論文集，Vol.50B，pp.221-227，2004.3
- [6]山川誠，吉富信太，上谷宏二：混合主成分分析による部材断面表現を用いた鋼構造骨組の最適設計法，日本建築学会構造系論文集，No.583，pp.77-83，2004.9
- [7]吉富信太，山川誠，上谷宏二：二段階緩和法を用いた鋼構造骨組の最適離散断面選択法，構造工学論文集，日本建築学会構造系論文集，No.586，pp.95-100，2004.12
- [8]近畿工高建築連盟：建築設計ノート事務所，彰国社，1975
- [9]藤江澄夫(執筆代表)：建築計画・設計シリーズ37，新・事務所ビル，市ヶ谷出版社，2000
- [10]前田尚美，佐藤平，高橋公子，服部岑生，杉山茂一共著：建築計画，朝倉書店，1980
- [11]柏原士郎・橘英三郎編著：建築デザインと構造計画，朝倉書店，2002
- [12]須賀好富：建築デザインのための構造設計，学芸出版社，2003
- [13]建築思潮研究所：構造計画，株式会社建築資料研究社，2004

[14]SE 委員会：構造計算の実務，株式会社建築技術，1997

[15]Rosen,J.B.：The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming - Part II：  
Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514-532, 1961

## 第 2 章

### 最適化手法と解の基本特性

#### 2.1 はじめに

これまでに、建築の構造設計に最適設計手法を適用するための研究が数多くなされている。これらの研究は詳細設計段階を対象とし、与えられた軸組を有する構造物について、各部材断面を求めることを目的としたものが殆どである。一方本研究は、最適設計手法を導入することで基本計画段階における設計者の意思決定を合理的に支援することを目的としている点でこれらの研究と異なる。従って本研究では、与えられたモデルの最適解を得ることも重要であるが、異なるモデル、また異なる設計条件下の最適設計解の間にどのような関係があるかに関心がある。例えば見積設計のように大まかな設計解に関心がある場合には、ある程度最適解に近い解が得られていれば実用上十分であるのに対し、最適設計解の性質に関心がある場合はある程度正確な最適解を求めておく必要がある。

これまでに、さまざまな最適化手法が提案されているが、これらの手法の多くが真の大域的最適解が得られることを保証するものではなく、局所最適解を探索するための手法である。建築構造物の構造設計に対し最適設計手法を適用した研究<sup>[1]-[7]</sup>が数多くなされているが、これらの研究の多くでも複数の異なる局所最適解の存在が問題として指摘されている。このように最適化によって求まる局所最適解は、対象とするモデル、設計条件、最適化アルゴリズム、初期設計の設定など、様々な要因に依存するため、このような問題を回避するための汎用性の高い手法は確立しておらず、目的に応じた適切な運用法が必要である。

従って本章では、最適設計解の相互比較によって最適解特性を導き出すための準備として、得られる最適設計解の性質について検討する。まず、本研究で用いる典型的な例題について最適化の過程での部材断面の分布と目的関数値の変化の様子を調べ、次に初期設計と最適設計解との関連を調べる。最後に、モデルのスパン割りの均等、不均等による影響を調べるために、スパン割りが均等なモデルと不均等なモデルとの最適解比較を行う。これらの結果に基づいて、本研究で最適解特性の調査対象となる骨組や、初期設計の設定法を決定する。

## 2.2 平面骨組モデルの最適解の基本特性

第3章からは様々なモデルの最適解特性に対する考察を行なうが、最適解は設計条件、最適化アルゴリズム、初期設計の設定などの要因に依存する場合が多い。そのため、与える諸条件が最適設計解に及ぼす影響<sup>⑧</sup>について考察を行い、どのような最適解を用いれば統一した条件下で求めた最適設計解をモデルの比較・分析に用いることができるかについて調べる。平面モデルの設定や設計条件、荷重の設定、鋼材量最小化問題の設定に関しては、1.4節の対象モデルの設定を適用して最適化を行なう。モデルの解析時に適用した設計条件を整理すると以下の通りである。

### 設計条件

- ・平面骨組モデルの最適化を行う際に、式(1.4)の鉛直荷重と式(1.3)の水平荷重を作用させる。
- ・制約条件として以下の条件を設定する。
  - ① 断面積上下限值：梁： $2.635 \times 10^3 \leq A \leq 3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$   
柱： $4.563 \times 10^3 \leq A \leq 1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$
  - ② 層間変形角： $|R| \leq 1/200$
  - ③ 保有水平耐力 ( $Q_{un} = D_s F_{cs} Q_d$ )： $D_s = 0.3$ 、各層の形状特性  $F_{cs} = 1.0$ 、地震力によって各層に生じる水平力  $Q_d$  は1次設計用荷重と同じ分布形とする。
- ・モデルの対称性のみを考慮して部材グルーピングを行う。
- ・部材の初期断面は上限値（梁： $3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、柱： $1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$ ）を用いる。
- ・最適化手法として勾配射影法<sup>⑨</sup>を用いる
- ・各層の階高は全層 4(m)とする。

### 2.2.1 最適化手法

本研究で扱う最適設計法としては、次のような制約条件付き最適設計問題を考える。

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && x \\
 & \text{To minimize} && f \\
 & \text{Subject to} && g \leq 0
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

本例題は、弾塑性応答を扱うので制約関数の非線形性が強くなり、感度情報が現設計点の近傍でしか有効でなくなる。そこで、現設計点近傍の制約関数を逐次追跡し制約曲面上に沿って設計変更

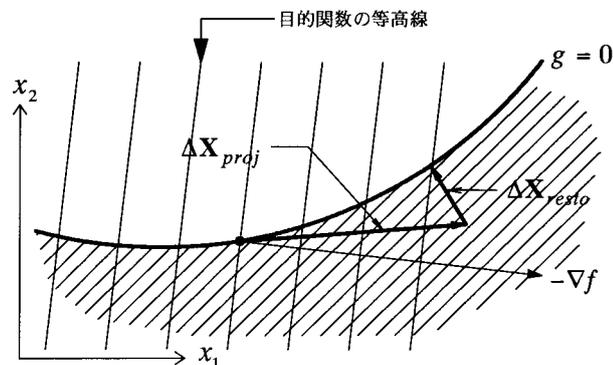


Fig 2.1 勾配射影法

する手法である勾配射影法<sup>8)</sup>を用いる。勾配射影法は、Fig 2.1 に示すように目的関数の最急降下方向  $-\nabla f$  を現等号満足制約曲面  $g = 0$  に投影させた projection move vector ( $\Delta X_{proj}$ ) に基づく設計変更と、制約関数の非線形性により生じる誤差を解消するための restoration move vector ( $\Delta X_{resto}$ ) に基づく設計変更を交互に繰り返すことにより最適解に到達する方法である。

### 2.2.2 ステップごとの断面積分布の変化

平面骨組モデルの最適化の過程での部材断面の分布と目的関数値の変化の様子について調べる。対象モデルとしては、10 層、45.6(m)×22.8(m)の長方形から取出した平面骨組モデルである。外形 22.8(m)の Y 軸構面 (3 スパン) に対して、X 方向 5 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。設計変数の数は 40 個である。

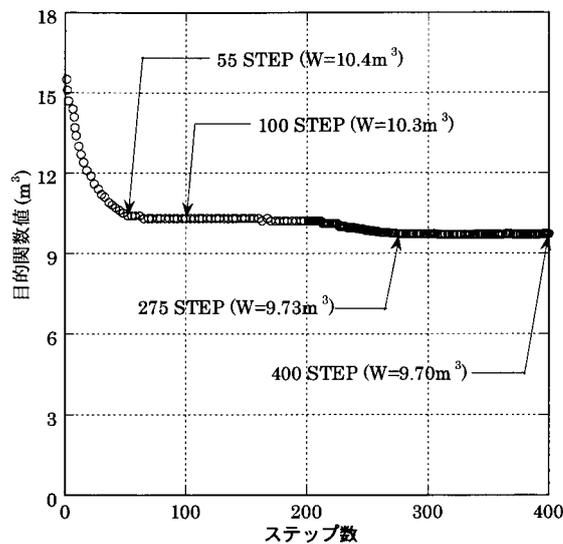


Fig 2.2 ステップごとの目的関数値の変化

Fig 2.2 は設計変更のステップごとの目的関数値の変化を示す。55 ステップを過ぎると目的関数値の変化は微小となっている(収束解と 7%の差)。さらに、275 ステップから 400 ステップでは目的関数値の変化がほとんどなく(1%以下の差)、十分局所最小値になったとみなせるため、400 ステップの目的関数値を収束解として選んだ。

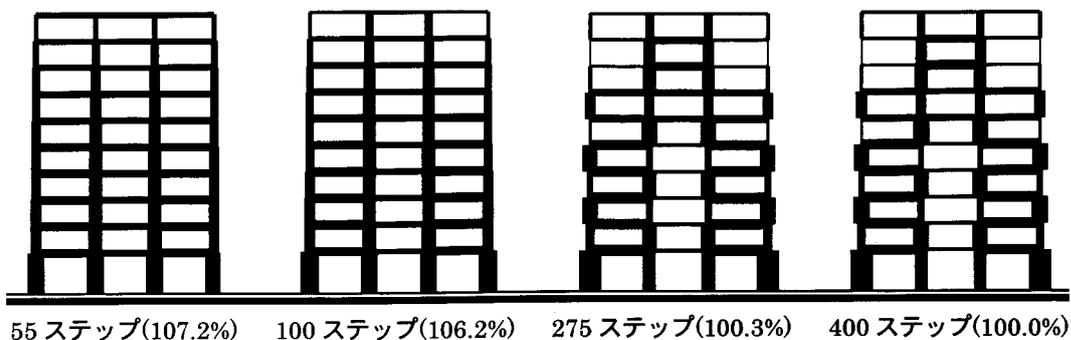


Fig 2.3 各ステップ数での許容解の分布

Fig 2.3 は各部材の断面積を線の太さで表した。Fig 2.3 から分かるように、目的関数値が収束したと考えられる 275 ステップと 400 ステップの目的関数値や最適解の断面積の分布はほぼ一致している。そのため、275 ステップから 400 ステップのどの解を選んでも、その解は最適設計解として適切であるといえる。

Fig 2.3 の最適化では各部材のグルーピングを行わずに各部材の断面積をそれぞれ独立設計変数として扱うため、上層の柱断面が下層より大きい解や梁断面が同層で極端に異なる解が得られるチェッカーボードパターンが著しく現われている。しかし、最適設計解の部材断面は考慮したすべての各制約条件を満足している。チェッカーボードパターンが顕著に現れる設計は、接合部の設計及び施工において不具合や困難が生じる。このようなチェッカーボードパターンを防ぐためには、設計変数をグルーピングして自由度を縮小するか、上層部の断面積が低層部の断面積より大きくなるような制約条件を付加するなどの方法が考えられる。

### 2.2.3 初期断面設計の違いが最適解に及ぼす影響

部材の初期断面設定、グルーピングなどの条件の違いにより異なる目的関数値、部材断面分布が得られる場合が多い。本研究において、このような最適解の性質はモデルの最適化の結果の比較や分析に対して大きな障害になる。最適設計を実務に用いる際に効率性の良い初期断面設定やグルーピング手法が設計者の経験に依存することは、論理的な手法による意思決定の支援のために最適設計を利用するという意義と矛盾することになってしまう。そのため、本節では初期断面設計の違いが最適設計解に及ぼす影響について色々の初期断面の与え方を通じた検討を行ない、効率的な初期断面の与え方について論じる。

#### 梁と柱について各々一定の初期断面を与えた場合

対象モデルは、10 層、45.6(m)×22.8(m)の長方形から取出した平面骨組モデルである。外形 22.8(m)の Y 軸構面 (3 スパン) に対して、X 方向 5 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。設計変数の数は 40 である。

モデルの最適化に用いる初期断面については、柱、梁の部材の各々の上限値に比例した断面積とする。最適化に用いた各々の初期断面とその比に対して Table 2.1 に示す。

タイプ	初期値 (単位 : mm <sup>2</sup> )		各部材の 上限値との比
	梁	柱	
A	$3.874 \times 10^4$	$1.067 \times 10^5$	上限値
B	$2.5 \times 10^4$	$7.0 \times 10^4$	約 70%の値
C	$1.2 \times 10^4$	$3.5 \times 10^4$	約 30%の値
D	$2.635 \times 10^3$	$4.563 \times 10^3$	下限値

Table 2.1 上限値との比で設定した初期断面

Table 2.1 の各タイプごとの初期断面によって、最適設計解として得られる目的関数値と各部材の断面積の分布がどのように異なるかについて調べる。Table 2.2 には各々の初期断面に対して得られた目的関数値を示す。Fig 2.4 は各々のタイプに対するモデルの部材の断面積の分布を線の太さで表す。

タイプ	500 ステップの目的関数値	タイプ A との比
A	9.70(m <sup>3</sup> )	100.0%
B	9.69(m <sup>3</sup> )	99.9%
C	9.76(m <sup>3</sup> )	100.6%
D	9.69(m <sup>3</sup> )	99.9%

Table 2.2 各々のタイプのモデルに対する目的関数値

Table 2.2 は、各々のタイプの平面骨組モデルを目的関数値の変動量が 0.01%以下になる 500 ステップまで最適化を行なったときの結果である。初期断面の異なる各々のタイプの最適目的関数値を、梁と柱の初期断面を上限値に設定したタイプ A の最適目的関数値で割った比で表わすと、相互の差は 1%以内になっていることが分かる。

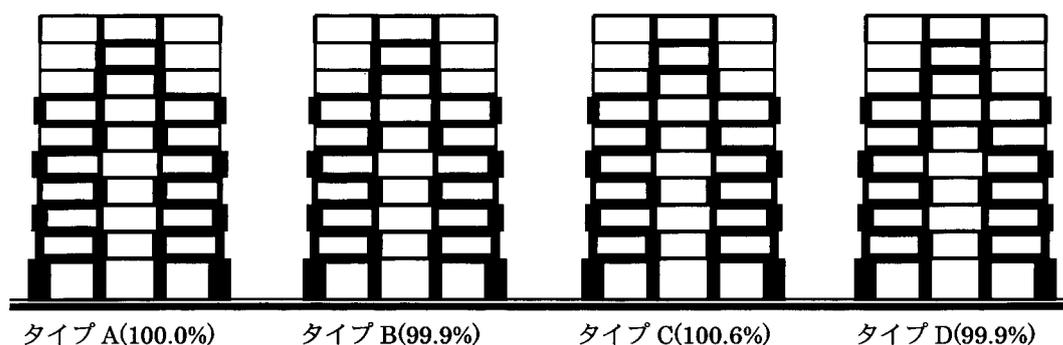


Fig 2.4 異なる初期値による許容解の分布

Fig 2.4 の断面積の分布は、すべてのタイプが断面積の大きな部材と小さい部材が交互に並ぶチェッカーボードパターンになっている。細部において多少の差は見られるが、4つのタイプはほとんど同じ断面積分布を示している。以上の結果に基づき、各部材の初期断面を上限値との比で指定した場合、本例では最適設計解は初期断面の選び方に依存しないといえる。

#### 部材配置によって異なる初期断面を与えた場合

対象モデルとしては、5層、45.6(m)×22.8(m)の長方形から取出した平面骨組モデルである。外形 45.6(m)の X 軸構面 (5 スパン) に対して、Y 方向 4 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。設計変数の数は 30 である。

初期断面の設定については、各部材の配置により梁を外梁 (A) と内梁 (B)、柱を外柱 (C) と内柱 (D) のように分類し、各部材ごとに Table 2.3 の大断面と中断面の組み合わせとしてモデルの初期断面として与える。Table 2.4 は Fig 2.5 のモデルのタイプの分類と最適化時に与えた初期断面を示す。

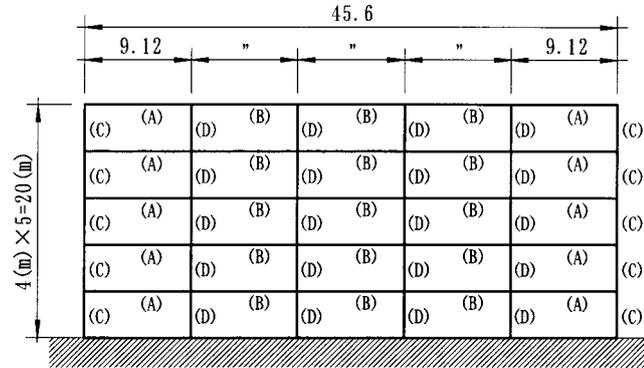


Fig 2.5 対象モデルと部材の配置による分類

	大断面(cm <sup>2</sup> )	中断面(cm <sup>2</sup> )
梁	387.4	191.4
柱	1067.0	555.1

Table 2.3 梁と柱の初期断面に用いた断面サイズ

梁	外梁(A)	大断面		中断面	
	内梁(B)	大断面	中断面	大断面	中断面
柱	外柱(C)	内柱(D)			
大断面	大断面	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
	中断面	Model-5	Model-6	Model-7	Model-8
中断面	大断面	Model-9	Model-10	Model-11	Model-12
	中断面	Model-13	Model-14	Model-15	Model-16

Table 2.4 モデルのタイプによる初期断面

初期断面の違いによって、最適設計解として得られる目的関数値と部材の断面積分布がどのように異なるかについて調べる。Table 2.5 には各モデルの最適目的関数値と、もっとも小さい目的関数値に対する比を示す。Fig 2.6 は各タイプの最適解断面積の分布を線の太さで表して示す。

Table 2.5 は、各々のタイプの平面骨組モデルを目的関数値の変動量が 0.01% 以下になるまで最適化を行なったときの結果である。初期断面の異なる各々のタイプの目的関数値を、すべてのタイプの中で最も小さい目的関数値になっているモデルの値で割った比で表わすと、すべてのタイプの目的関数値の差は 3% 以内となっている。Table 2.5 の灰色は、各タイプの中で約 2% 以上の差があるタイプを示した。

Fig 2.6 の断面積の分布図では、各々のタイプの断面積の分布は違う場合が多く、大まかに 5 種類に分類される。松本らの研究<sup>9)</sup>では、5 層 3 スパンモデルに対してグルーピングによる異なる初期断面により 9%以内の目的関数値の差と 3 種類の断面積分布パターンが得られたとして報告されている。以上の結果に基づき、部材配置別に異なる初期断面を与えた場合、目的関数値と断面積の分布は初期断面の与え方にある程度の依存性を持っていることが分かる。

タイプ	目的関数値(m <sup>3</sup> )	比	タイプ	目的関数値(m <sup>3</sup> )	比
Model-1	7.15	100.33%	Model-9	7.23	101.45%
Model-2	7.28	102.10%	Model-10	7.26	101.84%
Model-3	7.13	100.02%	Model-11	7.14	100.17%
Model-4	7.15	100.33%	Model-12	7.15	100.34%
Model-5	7.15	100.33%	Model-13	7.13	100.00%
Model-6	7.28	102.10%	Model-14	7.28	102.10%
Model-7	7.15	100.35%	Model-15	7.13	100.03%
Model-8	7.28	102.10%	Model-16	7.15	100.33%

Table 2.5 モデルの異なる初期断面による最適化の結果

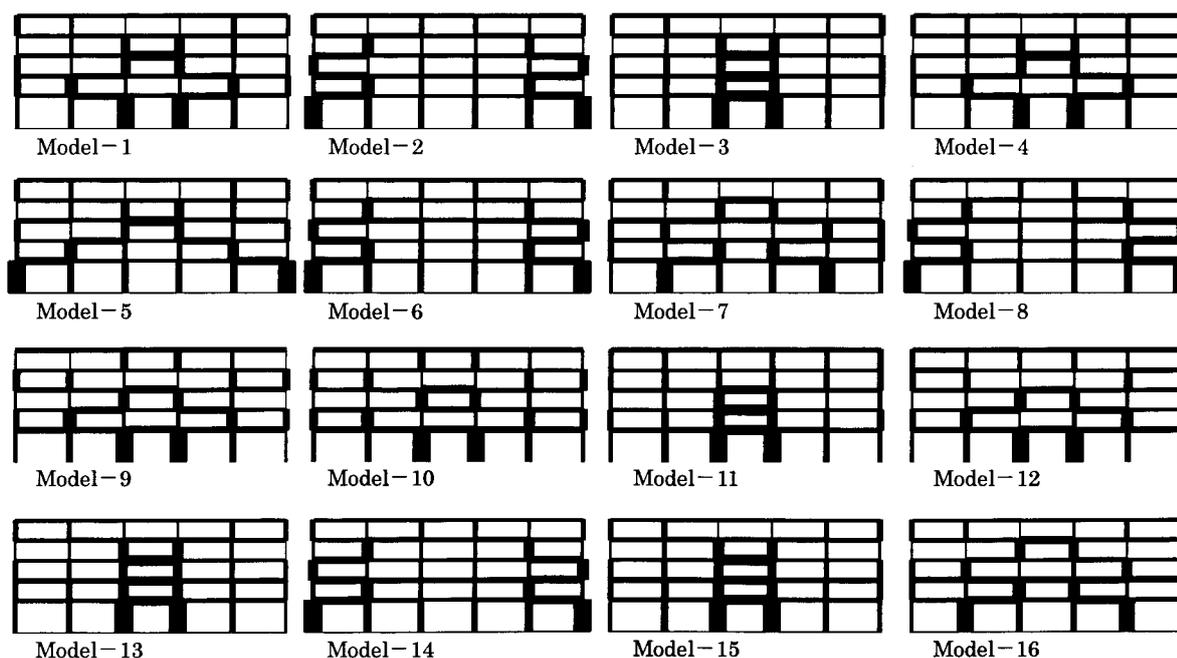


Fig 2.6 異なる初期値による許容解の分布

以上の結果より、梁と柱についてそれぞれ一定の初期断面を与えた場合は初期断面に対する依存性がほとんどないが、部材配置別に異なる初期断面の場合は初期断面の依存性があることが分かった。このような結果は、本研究で行なう各種モデルの比較・検討の結果がどの初期値を用いたかによって変わってくる可能性があることを意味している。しかし、Table 2.2 と Table 2.5 の結果（他のモデルに対しても検討を行なった結果）で、各部材の初期断面を上限値として設定した場合がも

っとも多い断面積の分布パターンになり、最小目的関数値に近い値になっていることが分かった。また、実際に最適化時の初期断面は一律的な比として与える場合が一般的であり、各部材ごとに細分化する場合は現実的ではないと考えられる。

従って、以下の章で行なう最適化解析では部材の初期断面として上限値を用いることにする。

#### 2.2.4 スパン割りの均等、不均等に関する考察

対象モデルとしては、10層、45.6(m)×22.8(m)の長方形から取出した平面骨組モデルである。Fig 2.7はX軸構面を4スパンと6スパン、Y軸構面に対して3スパン、4スパンにスパン割りしたモデルに対して、各々均等、不均等スパンを考慮した平面骨組モデルを示す。添え字 A は均等スパン割りの場合、B は外側のスパンを短く、C は外側のスパンを長くした場合の平面モデルを表わしている。

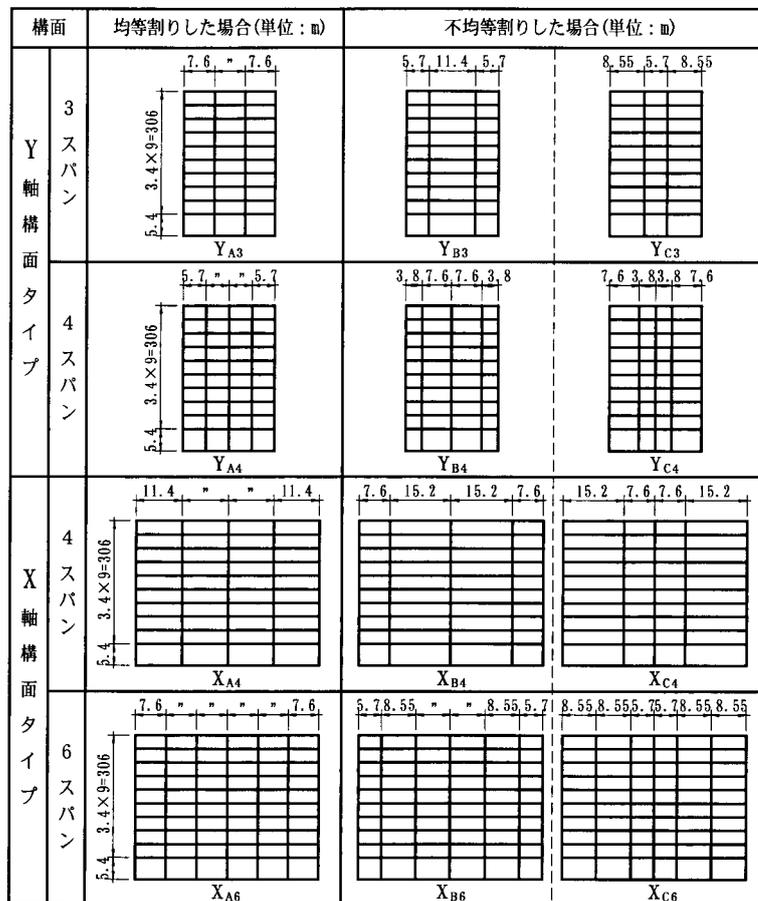


Fig 2.7 X、Y軸構面に対して均等・不均等スパン割りした平面骨組モデル

Fig 2.8はFig 2.7のモデルのX軸構面の6スパンモデル( $X_{A6}$ ,  $X_{B6}$ ,  $X_{C6}$ )、Y軸構面の3スパンモデル( $Y_{A3}$ ,  $Y_{B3}$ ,  $Y_{C3}$ )に対して各々の軸の直交方向のスパン数(異なる鉛直・水平荷重を作用させる)を変化させた場合の目的関数値の変化を示す。Fig 2.8により、不均等スパン割りした場合の目的関数値が均等スパン割りした場合の2%以内であり、スパン割りの均等、不均等が目的関数値に及ぼす影響はほとんどないといえる。したがって、平面計画上、スパン割りを均等にするか、不均等

にするかについては、設計者が多大な注意を払う必要がなく自由にスパンを変動させることが可能であり、外装材の既製品の寸法などに合わせるスパン計画が考えられる。

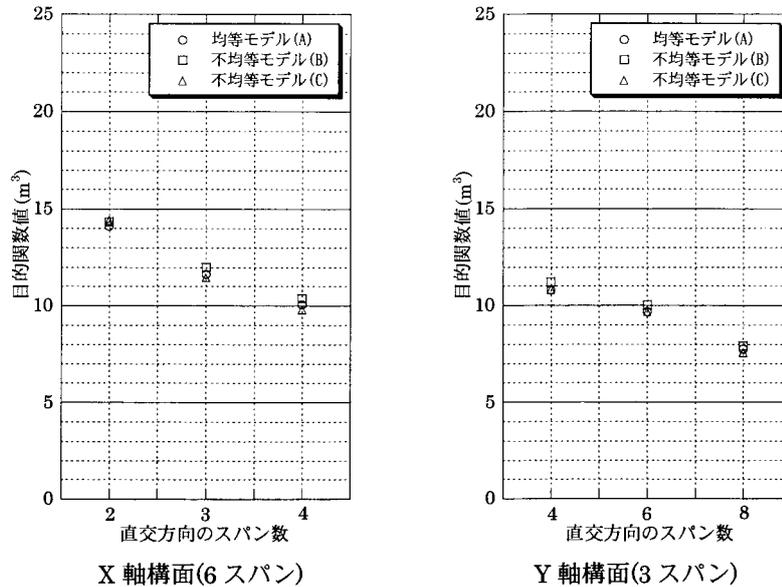


Fig 2.8 均等・不均等スパン割りした平面骨組モデル

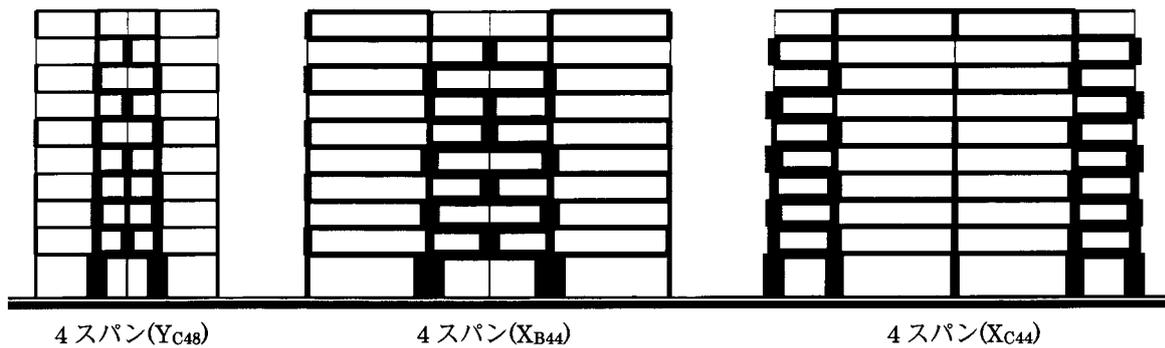


Fig 2.9 不均等スパン割りしたモデルの許容解の分布

Fig 2.9 は不均等スパン割りさせた平面骨組モデルの断面積の分布を線の太さで表した。この図では短いスパンに接している柱の断面積が大きくなり、短いスパンに接している柱に力を持たせる傾向がみられる。通常の設計においては断面の大きな柱が好まれない場合が多いため、不均等スパン割りした場合は短いスパンにコアを設置するなど、その傾向を考慮した平面計画が必要である。以上の結果に基づき、本研究では原則として均等スパン割りしたモデルの性質を調べる。

### 2.3 第2章の結論

最適解は設計条件、最適化アルゴリズム、初期設計の設定などの様々な要因によって異なる場合が多く、最適設計解の比較結果もこれらの因子に依存して変わる可能性が大きい。本章では、最適化解析に与える諸条件が最適設計解に及ぼす影響について調べるため、ステップごとの断面積の分布、初期設計依存性、スパン割りの均等・不均等に着目した最適解の比較・分析を行い、以下の結果を得た。

- 1) 目的関数値が収束解の1%程度まで接近すれば、部材の断面積分布についても収束解の部材の断面積分布とほぼ同様の設計解が得られる。
- 2) 初期断面設計の違いが最適設計解に及ぼす影響について調べた。梁と柱に各々一定の初期断面を与えた場合、求めた収束時の設計解は目的関数値、及び断面積分布はほぼ等しい最適設計解が得られた。一方、部材位置によって異なる初期断面を与えた場合は、2%前後の目的関数値の差と5パターンの断面積分布を持つ最適解が得られた。しかし、各部材の初期断面を上限値に設定すれば、最小目的関数値を有する最適設計解が得られる確立最も高かった。そのため、本研究では部材の初期断面として上限値を用いることにする。
- 3) 建物の幅とスパン数が同じであれば、均等・不均等によるスパン割りの違いが目的関数値に及ぼす影響は非常に小さい。本研究で扱うモデルは均等スパン割りを原則とする。

#### <参考文献>

- [1]永野康行, 岡本達雄, 辻聖晃, 竹脇出, 上谷宏二: 最適設計手法を用いた実建築骨組の試設計, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.161-164, 1999
- [2]澤田樹一郎, 中村雄治, 松尾彰: 指定崩壊機構非形成確率を制約した鋼構造骨組の最小重量設計, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.45B, pp.259-264, 1999
- [3]吉富信太, 辻聖晃, 山崎雅弘, 上谷宏二: 弾塑性応答制約条件下の鋼構造立体骨組の最適設計特性, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.351-354, 2003
- [4]吉富信太, 辻聖晃, 山崎雅弘, 上谷宏二: 部材断面寸法をパラメタとした鋼構造立体骨組の最適設計, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.221-227, 2004
- [5]山川誠, 吉富信太, 上谷宏二: 混合主成分分析による部材断面表現を用いた鋼構造骨組の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.583, pp.77-83, 2004
- [6]吉富信太, 山川誠, 上谷宏二: 二段階緩和法を用いた鋼構造骨組の最適離散断面選択法, 構造工学論文集, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.95-100, 2004
- [7]辻聖晃: シンポジウム「創造的な構造設計を支える知恵と技術」, 日本建築学会近畿支部, pp.27-48, 2000
- [8]Rosen,J.B.: The Gradienet Projection Method for Nonlinear Programming - Part II :Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514-532, 1961
- [9]松本慎也, 荒井宏, 春日康博, 平田裕一, 山本憲司, 藤井大地, 藤谷義信: 鉄骨骨組構造の最小重量設計における局所解の一例, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.45B, pp.249-258, 1999

## 第1部

# 純ラーメン骨組モデルの最適解

## 第3章

### 純ラーメン平面骨組モデルの最適解

#### 3.1 はじめに

これまでに、建築構造物の部材断面を決める詳細設計段階に最適設計法を適用するための研究が数多くなされている。しかし、構造計画段階に最適設計法を導入し、合理的な意思決定を支援するための試みは行なわれていない。

構造躯体のコストは構造計画における意思決定の重要な因子のひとつであるが、構造種別、架構形式、部材配置に加えて、コストを評価するためには部材の断面寸法や接合部詳細が必要である。しかし、これらの詳細情報は構造計画の後に続く詳細設計段階で一般に設計者の経験に基づいて多大な労力と時間を費やして決定されるものであるため、構造躯体のコストを基本計画に反映させることは極めて困難であるのが実状である。

最適設計手法は、この現状を打開し、構造計画における意思決定を支援するための有効なツールとして非常に有効に機能すると考えられる。建築設計の企画段階、あるいは基本計画段階におけるマクロな構造設計問題で、比較検討の対象となる候補骨組の全てについて最適鋼材量を求めれば、その結果は設計者の意思決定のための有用な情報となり、建物のコストを的確に考慮した合理的な意思決定が可能となる。しかし、構造種別、架構形式、部材配置の異なる骨組を幅広く検討する必要がある場合、最適設計に要する計算負荷が問題となる。特に立体モデルの最適設計では、建物規模の増大に対して計算負荷が飛躍的に増加する。

本研究ではマクロな構造設計における意思決定を支援するために、

- 1) 建物の構造特性を把握するために立体骨組を平面骨組に分解することが実用上有効な手法としてしばしば用いられている。
- 2) 平面骨組モデルは立体骨組モデルに比べて最適化の計算負荷が遥かに小さく、解の性質も分析し易い。

の二点に着目して、立体骨組モデルを構成する各構面を平面骨組モデルとして取出し、そのモデルの最適解の特徴を抽出する。

純ラーメン骨組は少ないパラメタで建物を記述することができ、解の性質も分析しやすい。本章では、まず純ラーメン平面骨組モデルを対象として、「スパン数」、「スパン長」、「荷重のレベル」の各パラメタに対して最適解の特性を分析する。その特性を用いてこれらのパラメタを任意に与えた場合の平面骨組モデルの最適鋼材量を簡易的かつ精度良く予測する手法を提案する。

### 3.2 純ラーメン平面骨組モデルの最適解特性

本研究は、基本計画段階において、平面骨組モデルの最適解特性を利用して、立体である建物の空間構成や軸組みを決定する際の設計者の意思決定の支援を目的とする。そのため、本章では平面骨組モデルを特徴付ける、スパン数、スパン長、荷重レベル、層数の各要因をパラメタとして変動させた場合の最適解を相互比較することで最適解特性を引き出すことを試みる。平面モデルの設定や設計条件、荷重の設定、鋼材量最小化問題に設定に関しては、1.4節の対象モデルの設定を適用して最適化を行なう。モデルの解析時に適用した設計条件を整理すると以下の通りである。

#### 設計条件

- ・平面骨組モデルの最適化を行う際に、式(1.4)の鉛直荷重と式(1.3)の水平荷重を作用させる。
- ・制約条件として以下の条件を設定する。
  - ① 断面積上下限值：梁： $2.635 \times 10^3 \leq A \leq 3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$   
柱： $4.563 \times 10^3 \leq A \leq 1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$
  - ② 層間変形角： $|R| \leq 1/200$
  - ③ 保有水平耐力 ( $Q_{un} = D_s F_{cs} Q_d$ )： $D_s = 0.3$ 、各層の形状特性  $F_{cs} = 1.0$ 、地震力によって各層に生じる水平力  $Q_d$  は1次設計用荷重と同じ分布形とする。
- ・モデルの対称軸に対し、対称な位置にある部材の断面積を同一とする (Fig 1.4 参照)。
- ・部材の初期断面は上限値 (梁： $3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、柱： $1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$ ) を用いる。
- ・最適化手法として勾配射影法<sup>1)</sup>を用いる。
- ・各層の階高は全層 4(m)とする。

#### 3.2.1 スパン数の変化による影響

Fig 3.1の平面骨組モデルを考える。層数とスパン長( $l$ )を固定した骨組について、Fig 3.1のように1から $m$ までスパン数を変化させる。その結果から平面骨組モデルのスパン数と最適鋼材量の関係を調べる。Fig 3.1の平面骨組モデルに対して、層数が5層と10層、スパン長( $l$ )が6mと12mの場合について、スパン数の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果をFig 3.2、Fig 3.3、Fig 3.4に示す。Y方向の建物長さは38m、Y方向の6スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

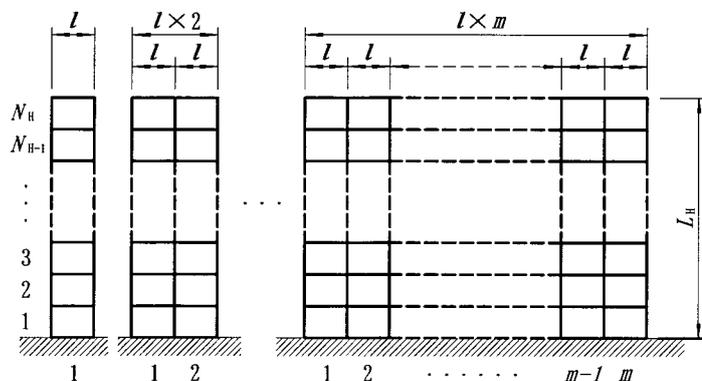


Fig 3.1 スパン数の異なる平面骨組モデル

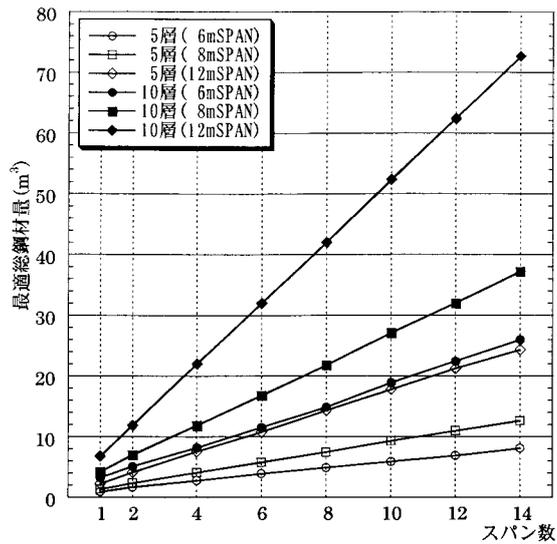


Fig 3.2 スパン数と最適総鋼材量との関係

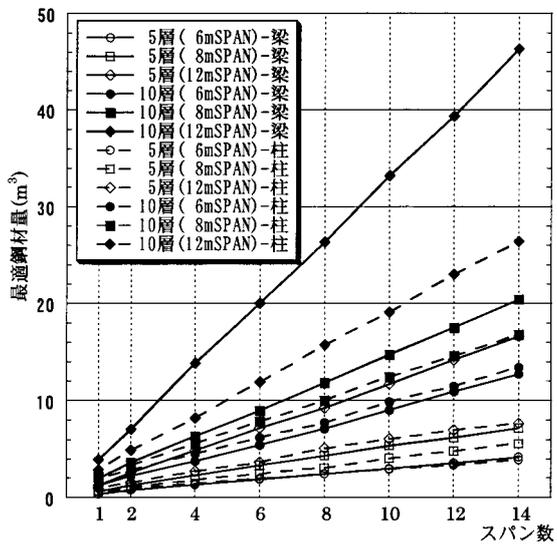


Fig 3.3 スパン数と梁、柱の最適鋼材量との関係

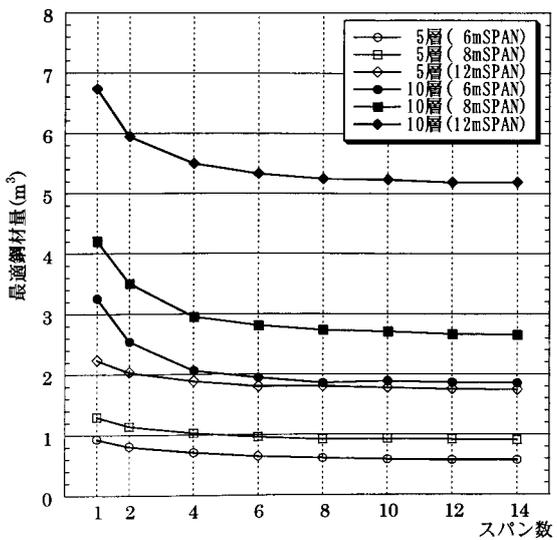


Fig 3.4 各モデルの1スパン当りの最適鋼材量

Fig 3.2 にスパン数を 1 から 14 まで変化させたときの最適総鋼材量の変化を示した。Fig 3.3 より、平面骨組モデルのスパン長と層数を固定した場合、スパン数と最適総鋼材量の間には概ね線形関係が成立しているのが分かる。

Fig 3.3 に各平面骨組モデルの最適総鋼材量を梁、柱ごとの鋼材量に分解したものを示した。Fig 3.3 より、平面骨組モデルの最適鋼材量を梁、柱の総鋼材量に分離した場合も各々の鋼材量はスパン数と線形性を保ち、層数が多く、スパン長が長くなるほど梁と柱の鋼材量の差は大きくなること がわかる。

Fig 3.4 は各平面モデルの最適総鋼材量( $W_{opt}$ )をスパン数 $n$ で割った場合のモデルの 1 スパン当りの鋼材量( $W_{opt}/n$ )を示した。Fig 3.4 より、総スパン数が 6 スパンを超えると 1 スパン当りの鋼材量は変化が殆どなくなり、ほぼ一定になっている。6 スパン以下のモデルでは柱が占める鋼材量の割合が大きいため、外側一列の柱の影響で多少大きな鋼材量を示している。しかし、多スパンモデルになるほど柱が占める鋼材量の割合が小さくなるため、外側一列の柱の影響が小さくなって最適総鋼材量はほぼ一定になっている。

以上の結果から、最適解における総鋼材量と、梁と柱の総鋼材量はスパン数と線形関係にあるとみなせる。よって、スパン長を変えずに建物の規模を変更する時、最適鋼材量の変動量は変更したスパン数に比例するとして、概ね最適鋼材量のコストが予測できる。

### 3.2.2 スパン長の変化による影響

Fig 3.5 の平面骨組モデルを考える。層数と、スパン数( $n$ )を固定した骨組について Fig 3.5 のようにスパン長 ( $l$ ) を変化させる。その結果から平面骨組モデルのスパン長と最適鋼材量の関係を調べる。Fig 3.5 の平面骨組モデルに対して、層数が 5 層、7 層と 10 層、スパン数( $n$ )は 1 スパンと 3 スパン、スパン長を 4(m)から 12(m)まで 2m の間隔で変化させたときの、スパン長の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 3.6、Fig 3.7、Fig 3.8、Fig 3.9 に示す。Y 方向の建物長さは 38m、Y 方向の 6 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

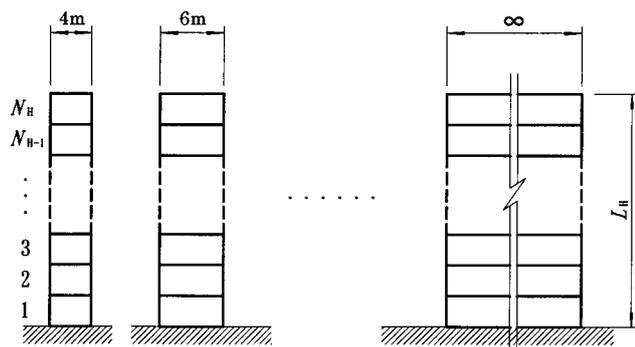


Fig 3.5 スパン長の異なる平面骨組モデル

Fig 3.6、Fig 3.8 より、スパン長が長くなるほど総鋼材量は増加し、その関係は非線形の曲線になり、層数が増加するほどその傾きは大きくなっていることがわかる。

Fig 3.7、Fig 3.9 の平面骨組モデルの柱及び梁の総鋼材量の変化をみると、スパンが短い場合は梁より柱の鋼材量が占める比率が大きい。梁の鋼材量はスパン長と共に増加し、1 スパンモデルの

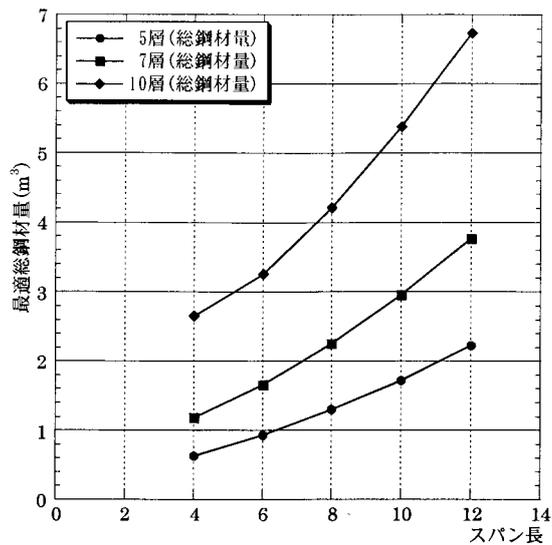


Fig 3.6 スパン長と最適総鋼材量との関係 ( $n = 1$ )

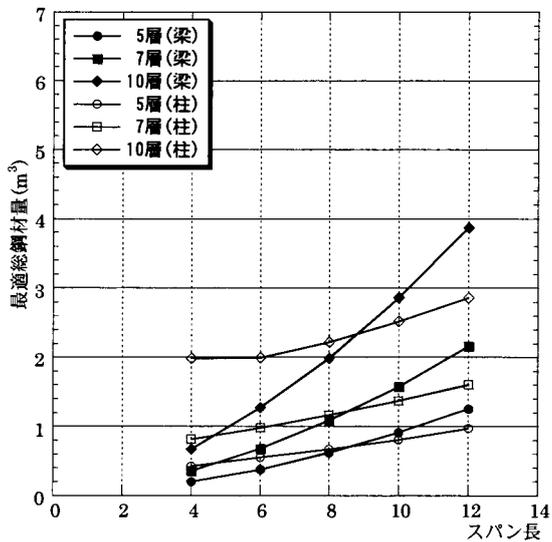


Fig 3.7 スパン長と梁、柱の最適鋼材量との関係 ( $n = 1$ )

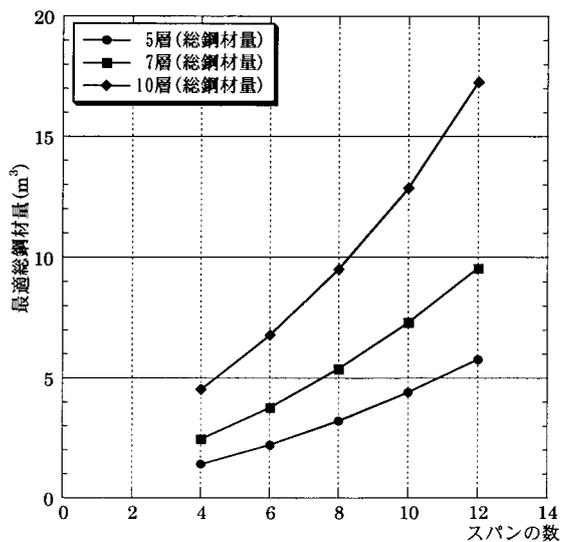


Fig 3.8 スパン長と最適総鋼材量との関係 ( $n = 3$ )

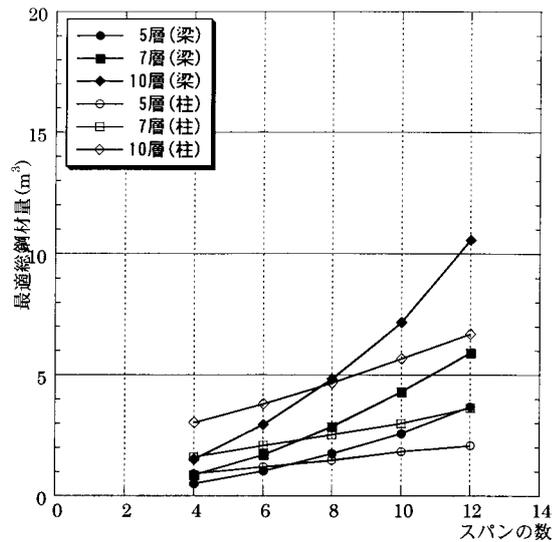


Fig 3.9 スパン長と梁、柱の最適鋼材量との関係 ( $n = 3$ )

場合は 9m、3 スパンモデルの場合は 7m で柱と梁の鋼材量がほぼ同じとなる。スパン長が 9m (3 スパンモデルでは 7m) を超えると柱より梁の鋼材量が大きくなる。

また、梁の曲線をスパン長 0 の方向に延長させると、原点を通るように考えられ、スパン長 0 の場合は柱のみの構造物になることが言える。このことからスパン長 0 の軸で総鋼材量と柱の曲線は交差することが予測できる。

### 3.2.3 外形固定でスパン数の変化による影響

層数と建物の長さを固定したときの平面骨組モデルについて、スパン数と最適鋼材量との関係を調べる。層数が 5 層、建物の長さが 45.6m の場合について、コアの配置を考慮した上で、実現可能なスパン割りを想定し、3 スパン (スパン長 : 5.6m) ~8 スパン (スパン長 : 15.2m) までのスパン割りを考慮する。Fig 3.10 に対象とした平面骨組モデルの例を示す。



Fig 3.10 X 軸構面に対してスパン割りを变化させた各種の平面骨組モデル

Fig 3.10 の平面骨組モデルの最適総鋼材量及び柱、梁の鋼材量を Y 方向の建物長さ 38m、Y 方向 3、6 スパンの場合について Fig 3.11、Fig 3.12 に示す。式(1.3)と式(1.4)から Y 方向 6 スパンの時に平面骨組モデルが受ける荷重は、Y 方向 3 スパンの時と比べて、鉛直荷重が 1/2、水平荷重が 4/7 となる。

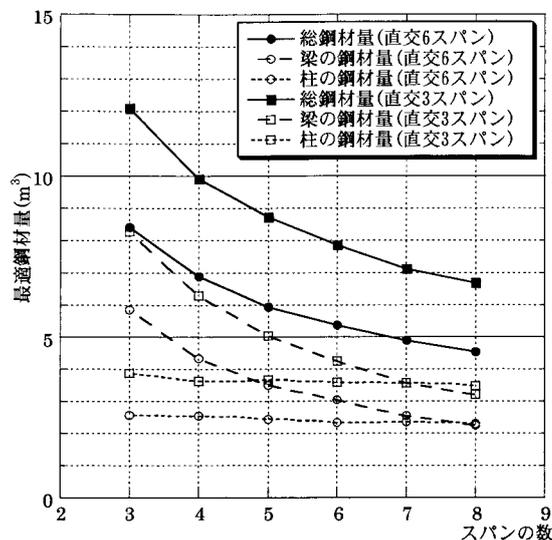


Fig 3.11 外形を固定した場合のスパン数と最適鋼材量との関係

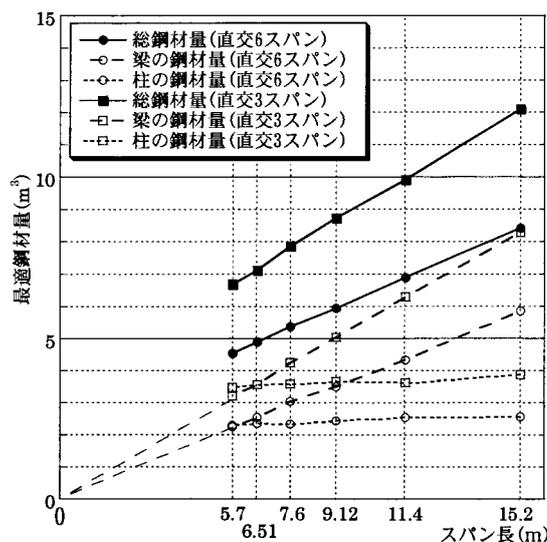


Fig 3.12 外形を固定した場合のスパン長と最適鋼材量との関係

Fig 3.11 は平面骨組モデルの外形を固定し、スパン数を 3 から 8 まで変化させたときの最適鋼材量の変化を示す。最適鋼材量とスパン数の関係から、荷重が同じであれば、スパンの長い平面骨組モデルよりスパンの短い方の最適鋼材量が小さいことが分かる。また、スパン数の変化による鋼材の減少量はスパン長が長い時のスパン数の変化が大きい(スパン数が 3 から 4 に変化した場合が 7 から 8 に変化した場合より鋼材の減少量が大きい)。

最適鋼材量とスパン長の観点からみると、Fig 3.12 のように最適鋼材量とスパン長はほぼ線形の関係であり、Fig 3.7、Fig 3.9 と同様に梁だけの総鋼材量の直線を延長させると原点を通る比例関

係であることが分かる。また、柱の総鋼材量はスパン長が変わってもほとんど変化がないのに対し、梁はスパン長の増加に伴い最適鋼材量が増加する。さらに、スパン長が6m くらいでは柱と梁の鋼材量がほぼ等しいが、スパン長が15m になると最適総鋼材量で梁の鋼材量が占める比は柱より非常に大きく、柱の鋼材量より2倍になっている。これは鉛直荷重に対する応力条件が厳しくなるためと考えられる

以上の結果から、建物の外形の固定した場合、建物の機能上、またはデザイン上、柱を多く配置しても良い場合はスパンを小さくするのが経済的な構造計画である。しかし、どうしても大スパンを選択しないといけない場合は、それによるコスト・アップを認識してそれに応じた設計をすべきである。

### 3.2.4 荷重条件の変化による影響

Fig 3.10 の平面骨組モデルに対して、建物に作用する荷重を ①水平荷重と鉛直荷重を同時に変化させた場合、②建物の使用(積載)荷重のみ変化させた場合による最適鋼材量の変化を調べる。

①の場合は、Y 方向の建物長さ(L) 38m、Y 方向 3~6 スパンの時のスパン数を考慮した水平荷重を平面骨組モデルに作用させる。Y 方向スパン数の変化により支配床幅 D が変化し、それによって鉛直荷重も変化する (Fig 3.13)。

②の場合は、Y 方向の建物長さ(L) 38m、Y 方向 6 スパンの場合の平面骨組モデルに対し、構造計算時に適用する室の種類 (Table 3.1) に応じた鉛直荷重 (使用荷重) を作用させ、その結果を Fig 3.14 に示した。

室の種類		構造計算の対象	床の構造計算をする場合	大梁、柱、又は基礎の構造計算をする場合	地震力を計算する場合
			N/m <sup>2</sup> (kgf/m <sup>2</sup> )		
1	住宅の居室、住宅以外の建築物における寝室又は病室		1,800 (183.67)	1,300 (132.65)	600 (61.22)
2	事務室		2,900 (295.92)	1,800 (183.67)	800 (81.63)
3	教室		2,300 (234.69)	2,100 (214.29)	1,100 (112.24)
4	百貨店又は店舗の売場		2,900 (295.92)	2,400 (244.90)	1,300 (132.65)
5	劇場、映画館、演劇場、観覧場、公会堂、集会場その他これらに類する用途に供する建築物の客席又は集会室	固定席の場合	2,900 (295.92)	2,600 (265.31)	1,600 (163.27)
		その他の場合	3,500 (357.14)	3,200 (326.53)	2,100 (214.29)
6	自動車車庫及び自動車通路		5,400 (551.02)	3,900 (397.96)	2,000 (204.08)
7	廊下、玄関又は階段		3 から 5 までに掲げる室に連絡するものにあつては、5 の「その他の場合」の数値による。		
8	屋上広場又はバルコニー		1 の数値による。ただし、学校又は百貨店の用途に供する建築物にあつては、4 の数値による。		

Table 3.1 建築物の各部の積載荷重

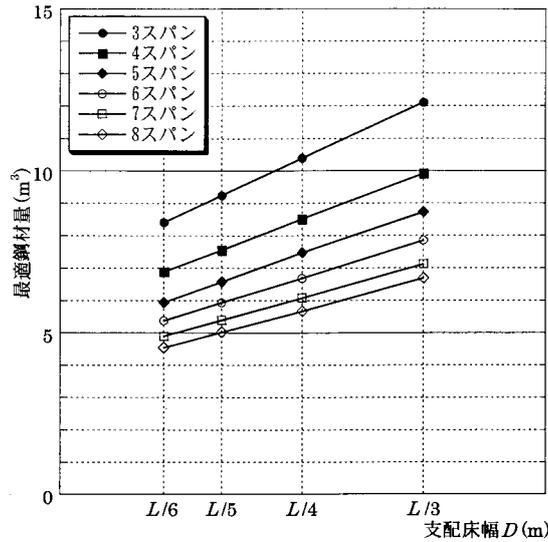


Fig 3.13 水平・鉛直荷重を同時に変化させた場合

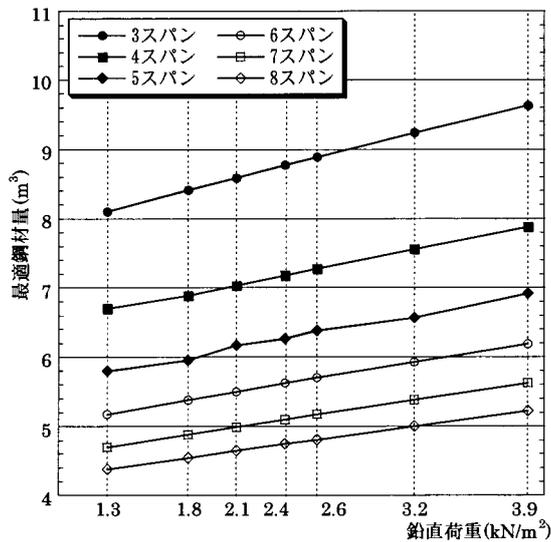


Fig 3.14 鉛直荷重のみ変化させた場合

Fig 3.13、Fig 3.14 より、平面骨組モデルの最適鋼材量は荷重の大きさと比例し、概ね線形の関係にあるといえる。このように全ての構面の総鋼材量が水平荷重に関して同じ線形関係に従うため、構面間の荷重分担率が変化しても、建物全体で見れば総鋼材量はほとんど変化しないと考えられる。これは 1.4.2 節 鉛直・水平荷重の設定の仮定 1) の裏付けになる。

各グラフの傾きはスパン長（スパン数）により異なり、スパンの長い平面骨組モデルの方がスパンの短い方より荷重に対する影響が大きい。従って、設計荷重の大きな変更が予想される建物の計画段階においては、設計変更の努力を減らすために荷重の影響を大きく受ける長いスパンは避けるべきであるといえる。

### 3.2.5 層数の変化による影響

Fig 3.15 の平面骨組モデルを考える。スパン長( $l$ )と、スパン数( $n$ )を固定した骨組について Fig 3.15 のように 3 層から  $m$  層まで層数を変化させる。その結果から平面骨組モデルの層数と最適鋼材量の関係を調べる。

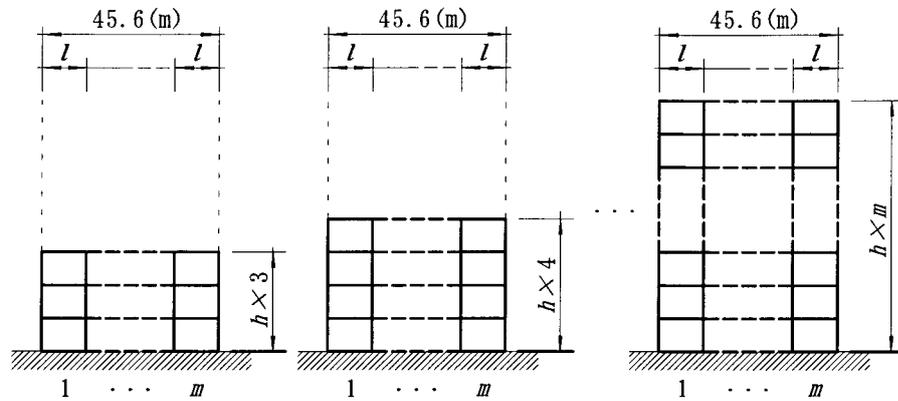


Fig 3.15 層数の異なる平面モデル

3.2.3 節のようにモデルの外形を 45.6(m)に固定し、3 から 8 スパン (スパン長は 5.7(m)から 15.2(m)) に均等スパン割りした平面骨組モデルに対して、層数を 3 層から 10 層まで変化させ、その結果を Fig 3.16 に示す。Y 方向の建物長さは 38m、Y 方向の 6 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

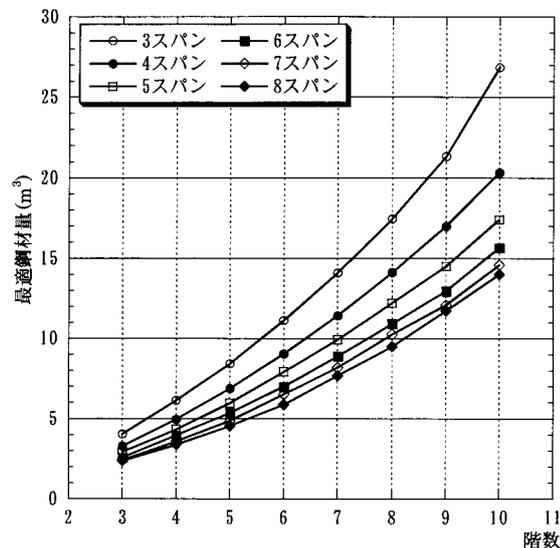


Fig 3.16 外形を固定した場合の層数と最適鋼材量との関係

Fig 3.16 より、平面骨組モデルに同じ鉛直・水平荷重を作用させると、層数が増えるほど最適総鋼材量は増加し、その関係は非線形の曲線になることが分かる。各グラフの傾きはスパン長 (スパン数) により異なり、スパンの長い平面骨組モデルの方がスパンの短い方より層数に対する影響が大きい。

層 スパン数 (スパン長)	3層	4層	5層	6層	7層	8層	9層	10層
3 (15.2m)	4.05E+06	6.11E+06	8.41E+06	1.11E+07	1.41E+07	1.75E+07	2.13E+07	2.68E+07
4 (11.4m)	3.31E+06	4.97E+06	6.89E+06	9.06E+06	1.14E+07	1.41E+07	1.70E+07	2.03E+07
5 (9.12m)	2.91E+06	4.33E+06	5.95E+06	7.93E+06	9.91E+06	1.22E+07	1.45E+07	1.74E+07
6 (7.60m)	2.59E+06	3.95E+06	5.38E+06	6.99E+06	8.86E+06	1.09E+07	1.30E+07	1.57E+07
7 (6.52m)	2.43E+06	3.57E+06	4.89E+06	6.51E+06	8.15E+06	1.02E+07	1.21E+07	1.46E+07
8 (5.70m)	2.38E+06	3.37E+06	4.55E+06	5.88E+06	7.67E+06	9.52E+06	1.17E+07	1.40E+07

Table 3.2 平面モデルの最適総鋼材量

Table 3.2 より、層数を増やしてもスパン長が短ければ、低い層、長いスパン長の場合より最適総鋼材量は少なくなっている。表の色付の部分はその一例として、6層、3スパンの平面骨組モデルに対して、スパン数を増やした7層、8層の平面骨組モデルの最適鋼材量を示した。その傾向は、スパン長を長くなるほど著しく表れる。以上の結果から、建物の外形が決まっている場合、無理にスパン長を長くするより、階数を増やして適切なスパン長で設計するのが経済的な構造計画でもあるといえる。

### 3.3 純ラーメン平面骨組モデルの最適鋼材量の近似予測式

3.2節では平面骨組モデルを特徴付けるパラメタとして、形状に関してはスパン数 $n_s$ とスパン長 $l_s$ の2つ、荷重に関しては支配床幅 $D$ と鉛直荷重レベル $P_v$ の2つ、計4つのパラメタに着目して分析を行なった。以上の分析より、各パラメタに関して次の性質が得られた。

1) スパン数 $n_s$ のみ変動させた場合、平面骨組モデルの最適鋼材量 $\tilde{W}$ は $n_s$ に関して線形となる。

$$\tilde{W}(n_s, l_s) = g(l_s) + h(l_s)n_s \quad (3.1)$$

2) 建物長さ $L = n_s \times l_s$ を固定してスパン長さ $l_s$ を変動させた場合、平面骨組モデルの最適鋼材量 $\hat{W}$ は $l_s$ に関して線形となる。

$$\hat{W}(L, l_s) = a(L) + b(L)l_s \quad (3.2)$$

$$L = n_s \times l_s \quad (3.3)$$

3) モデルを固定して支配床幅 $D$ だけを変動させた場合、平面骨組モデルの最適鋼材量 $W$ は $D$ に関して線形となる。

$$W(n_s, l_s, D) = p(n_s, l_s) + q(n_s, l_s)D \quad (3.4)$$

以上の最適解特性を利用して、平面骨組モデルの最適解の定式化を行う。

#### 3.3.1 近似予測式の定式化

##### スパン数、スパン長に関する近似予測式の定式化

式(3.1)、(3.2)の関係を用いて、スパン数 $n_s$ とスパン長 $l_s$ のみをパラメタとした最適鋼材量のモデル化を行う。式(3.1)に式(3.3)を代入して次式を得る。

$$\tilde{W}(n_s, l_s) = g(l_s) + h(l_s)\frac{L}{l_s} \quad (3.5)$$

式(3.2)と式(3.5)が等しくなることより、次式が得られる。

$$a(L) + b(L)l_s = g(l_s) + h(l_s)\frac{L}{l_s} \quad (3.6)$$

任意の建物の長さ $L$ について、式(3.6)が成立する(つまり右辺がスパン長 $l_s$ の1次関数となる)ためには、次式が成立する必要がある。

$$g(l_s) = g_0 + g_1 l_s \quad (3.7)$$

$$h(l_s)\frac{1}{l_s} = h_0 + h_1 l_s \quad (3.8)$$

式(3.7)、(3.8)を式(3.1)に代入して次式を得る。

$$\tilde{W}(n_s, l_s) = g_0 + g_1 l_s + (h_0 + h_1 l_s) l_s n_s \quad (3.9)$$

ここで、4つの係数 $g_0$ 、 $g_1$ 、 $h_0$ 、 $h_1$ は少なくとも4つ以上の平面モデルを解けば、通常の重回帰手法の最小二乗法<sup>4)</sup>などの手法を用いて求めることができる。式(3.9)から、支配床幅 $D$ を固定した場合の平面骨組モデルについて、任意のスパン数 $n_s$ 、スパン長 $l_s$ を有するモデルの最適鋼材量が求まる。式(3.9)のスパン数 $n_s$ を固定すると、 $\tilde{W}$ はスパン長 $l_s$ の2次関数となり、Fig 3.6、Fig 3.8の性質が適切に表現できている。

### 荷重レベルに関する近似予測式の定式化

式(3.9)は支配床幅  $D$  (平面モデルの直交方向の構面の数に反比例) を固定した場合であるが、式(3.9)の各係数は、以下のように支配床幅  $D$  の関数として表現できる。

$$W(n_s, l_s, D) = g_0(D) + g_1(D)l_s + \{h_0(D) + h_1(D)l_s\}l_s n_s \quad (3.10)$$

形状を固定した平面骨組モデルの最適鋼材量は、支配床幅  $D$  に関する線形関数となる。式(3.4)と式(3.10)の右辺が等しくなることから次式を得る。

$$p(n_s, l_s) + q(n_s, l_s)D = g_0(D) + g_1(D)l_s + \{h_0(D) + h_1(D)l_s\}l_s n_s \quad (3.11)$$

任意のスパン数  $n_s$ 、スパン長  $l_s$  について式(3.11)が成立するためには、次式が成立する必要がある。

$$g_0(D) = g_{00} + g_{01}D \quad (3.12)$$

$$g_1(D) = g_{10} + g_{11}D \quad (3.13)$$

$$h_0(D) = h_{00} + h_{01}D \quad (3.14)$$

$$h_1(D) = h_{10} + h_{11}D \quad (3.15)$$

式(3.12)～(3.15)を、式(3.10)に代入して次式を得る。

$$W(n_s, l_s, D) = (g_{00} + g_{01}D) + (g_{10} + g_{11}D)l_s + \{(h_{00} + h_{01}D) + (h_{10} + h_{11}D)l_s\}l_s n_s \quad (3.16)$$

式(3.16)は、任意のスパン数  $n_s$ 、スパン長  $l_s$ 、支配床幅  $D$  の平面骨組モデルについて、最適総鋼材量を評価する予測式である。少なくとも 8 つの平面モデルを解くことで 8 つの係数 ( $g_{00}, g_{01}, g_{10}, g_{11}, h_{00}, h_{01}, h_{10}, h_{11}$ ) を決めることができる。

#### 3.3.2 近似予測式の検証

任意の平面骨組モデルのパラメタ (スパン数、スパン長、荷重レベル) の組み合わせに対して平面骨組モデルの予測式から求めた最適総鋼材量の値と、実際に平面骨組モデルの最適化を行なった結果との比較を行い、式(3.16)の妥当性を示す。

問題を解くために必要な 8 つのサンプル点については現実的なスパン数を考慮して 4 から 12 スパンの範囲で定める。そのサンプル点を用いて得られた各係数を式(3.16)に示す。予測モデルの近似精度はサンプル点の選び方に依存<sup>[3][4]</sup>するため、サンプル点の優劣を評価して適当なサンプル点を選ぶ手法も用いられる。

$$\begin{aligned} g_{00} &= 1248260.5 & g_{01} &= -78966.1 \\ g_{10} &= -28906.9 & g_{11} &= 4465.8 \\ h_{00} &= -32367.4 & h_{01} &= 11158.2 \\ h_{10} &= 6811.4 & h_{11} &= 487.4 \end{aligned} \quad (3.17)$$

式(3.16)に式(3.17)の係数を代入し、任意の平面骨組モデルに対して最適総鋼材量の予測値を求める。梁、柱の各部材の鋼材量についても、サンプル点の総鋼材量を梁、柱の鋼材量に各々分解して得られた結果を用いて、同様な方法で予測式の係数を定めることができる。

Y 方向		X 方向		X 構面で計画可能なスパン数(m <sup>3</sup> )					
		水平荷重	鉛直荷重	対象	3	4	5	6	7
3	H/4	W/3L <sub>Y</sub>	予測値	12.0	9.96	8.74	7.92	7.34	6.91
			最適解	12.1	9.92	8.72	7.85	7.13	6.70
			比	98.85%	100.38%	100.21%	100.89%	102.95%	103.07%
4	H/5	W/4L <sub>Y</sub>	予測値	10.4	8.56	7.46	6.72	6.20	5.80
			最適解	10.4	8.53	7.48	6.70	6.38	5.67
			比	100.35%	100.43%	99.65%	100.29%	97.18%	102.29%
5	H/6	W/5L <sub>Y</sub>	予測値	9.35	7.63	6.61	5.92	5.43	5.06
			最適解	9.25	7.57	6.58	5.94	5.39	5.02
			比	101.04%	100.83%	100.41%	99.63%	100.77%	100.92%
6	H/7	W/6L <sub>Y</sub>	予測値	8.59	6.97	6.00	5.35	4.88	4.54
			最適解	8.41	6.89	5.95	5.38	4.89	4.55
			比	102.12%	101.16%	100.78%	99.37%	99.99%	99.73%

Table 3.3 X 方向平面モデルの鋼材量の予測値と最適化の結果との比較

Table 3.3 に平面骨組モデル (X 方向) の最適鋼材量の予測値と実際に最適化を行ない得られた最適総鋼材量、最適総鋼材量に対する予測値の比を示す。その結果、誤差は大きくて 3%、ほとんどのモデルで 1% 前後であり、平面骨組モデルの提案式(3.16)により実用上十分な精度で平面骨組モデルの最適鋼材量が予測可能であるといえる。

Fig 3.17 は平面骨組モデルの最適総鋼材量の予測値と実際に最適化を行った結果を 3次元のグラフで比較したものである。X 軸にスパン数、Y 軸にスパン長、Z 軸に最適総鋼材量を示した。Fig 3.17 により、最適総鋼材量はスパン数と線形関係、スパン長と非線形関係になっていることが分かる。予測値の最適総鋼材量のグラフは実際に最適化で求めた最適総鋼材量に良い近似をしていることがいえる。

黒実線：最適化で求めた総鋼材量

灰破線：予測式で求めた総鋼材量

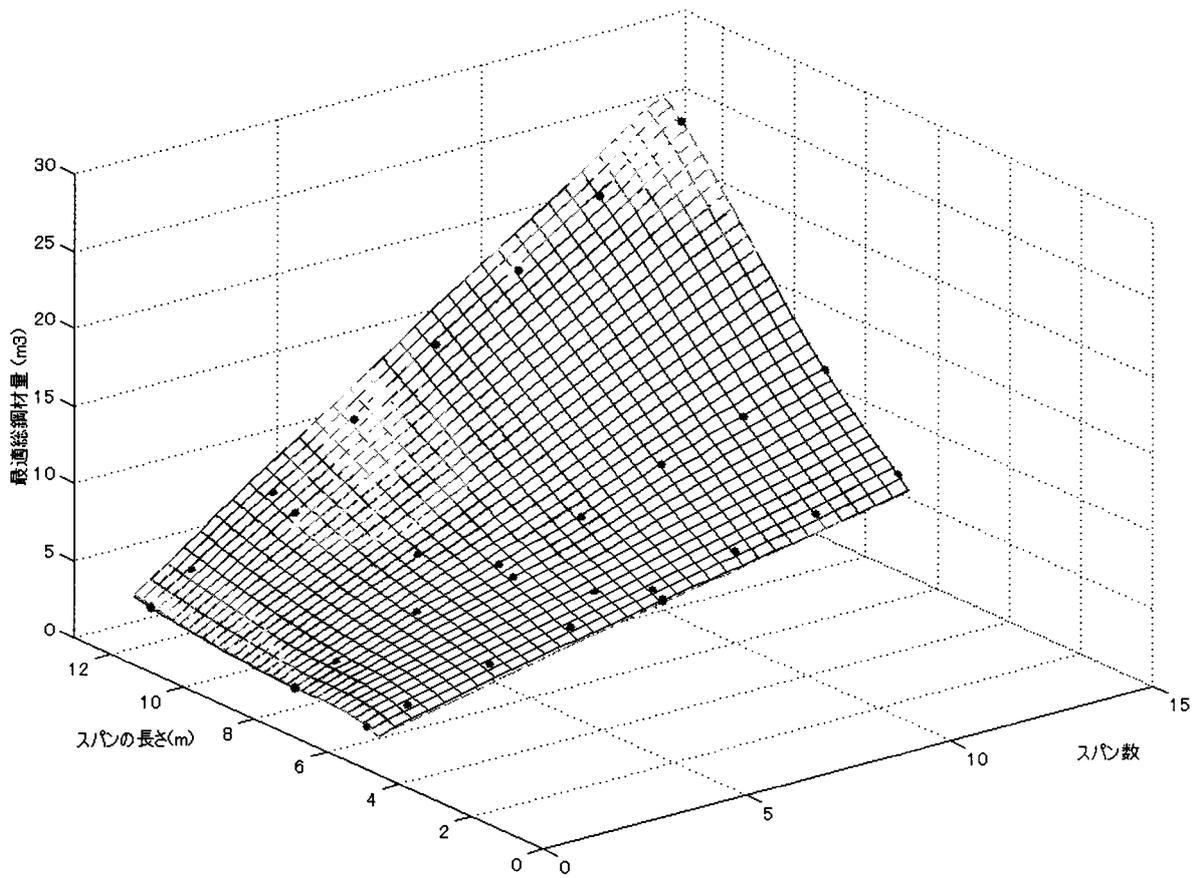


Fig 3.17 予測式で求めた値と実際に最適化で求めた総鋼材量の比較

### 3.4 第3章の結論

本章では、立体骨組モデルを構成する各構面を平面骨組モデルとして取出し、その平面骨組モデルを特徴つけるスパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )、荷重レベル、層数をパラメタとして変動させた場合の最適解の比較を行ない、以下の結果を得た。

- 1) 各パラメタと最適鋼材量との関係を分析し、以下のような平面骨組モデルの最適解特性を抽出した。ただし、層数及び階高は固定するものとした。
  - a. スパン数( $n$ )だけを変動させた場合、平面骨組モデルの最適総鋼材量はスパン数( $n$ )に関して線形となる。梁、柱に関しても各鋼材量はスパン数( $n$ )に関して線形となる。
  - b. 建物長さ( $L = \text{スパン長}(l) \times \text{スパン数}(n)$ )を固定してスパン長( $l$ )を変動させた場合、平面骨組モデルの最適鋼材量はスパン長( $l$ )に関して線形となる。この場合、梁の鋼材量もスパン長( $l$ )に関して線形となっているが、柱の鋼材量はスパン長( $l$ )の変化に関わらず一定となる。
  - c. モデル形状(スパン数、スパン長)を固定して支配床幅( $D$ )を変動させると鉛直荷重と水平荷重が同時に変化し、平面骨組モデルの最適鋼材量( $W$ )は支配床幅( $D$ )に関して線形となる。
  - d. モデル形状(スパン数、スパン長)及び水平荷重を固定して鉛直荷重レベルだけを変動させた場合、平面骨組モデルの最適鋼材量は鉛直荷重レベルに関して線形となる。
- 2) 任意のスパン長( $l$ )、スパン数( $n$ )、荷重レベルの平面骨組モデルの最適鋼材量を簡易かつ精度良く予測する方法を提案した。その提案式は8つの少ない平面骨組モデル最適解を求めるだけで実用上十分な精度の予測結果が得られる。

#### <参考文献>

- [1]Rosen,J.B. : The Gradienet Projection Method for Nonlinear Programming -Part II:Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514-532, 1961
- [2]田島稔, 小牧和雄 : 最小二乗法の理論とその応用改訂版, 東洋書店, 1996
- [3]Douglas C. Montgomery : Design and Analysis of Experiments 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons. Inc, 1996
- [4]R.H. Myers and D.C. Montgomery : "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons. Inc., 1995

## 第4章

### 純ラーメン立体骨組モデルの最適解と最適鋼材量の簡易予測法

#### 4.1 はじめに

第3章では、スパン数、スパン長、荷重レベルをパラメタとして平面骨組モデルの最適鋼材量を簡易的に予測する手法を提案した。平面骨組を通じて立体骨組の性質を理解しようとする方法は実務設計の場でしばしば用いられている。しかし、実際に必要とされるのはやはり立体骨組に対する最適設計解であり、最適鋼材量である。

純ラーメン骨組に対する設計者の意思決定の重要な項目の1つは、部材の位置や軸組を定めることである。スパンの計画、コアの配置などの平面計画は建物の用途により決められるのが一般的であるが、建物によっては建築主によってコスト低減の要求があり、これを応じた平面計画を見出すための設計者の意思決定も全体に対して大きな割合を占める。しかし、基本計画段階の限られた時間に計画可能なすべての平面計画案に対する詳細な検討を経て、各々の計画案のコストの比較を行なうことは、たとえ最適設計法による支援を受けたとしても、時間的、労力的負担がかなり大きい。そのため、計算負荷の少ない平面骨組モデルを用いて簡易的に立体骨組モデルのコストを予測する方法を見出すことを図る。

本章では、立体である建物の空間構成や軸組を決定する際の設計者の意思決定の支援のために、平面骨組モデルの特性を用いて立体骨組モデルの鋼材量を簡易的に予測する計算コストの少ない手法を提案することを目的とする。まずは、立体骨組を構成する構面を平面骨組モデルとして取出し、第3章の平面骨組モデルの簡易予測式から得られた鋼材量の組み合わせることによって、スパン割りなどの諸パラメタ値が異なる様々な立体骨組モデルの鋼材量を予測することを試みる。

## 4.2 立体骨組モデルの設計問題

### 4.2.1 立体骨組モデルの設定

建物は商業地域として1面が道路に接し、面積 $2,166\text{m}^2$ の敷地に位置している賃貸ビル<sup>[3]-[5]</sup>である。賃貸ビルは事務スペースを賃貸することにより投資の回収を行うことが目的であり、同一の敷地であれば、有効貸室面積が大きいほど、また建設費が安いほど、収益性はよくなる特性があり、コストと一番密接な関係がある建物といえる。

建物規模は地下階無し、地上5階建てであり、建物高さは $20\text{m}$ （1層～5層の階高：各 $4\text{m}$ ）、延べ面積約 $8,664\text{m}^2$ 、建ぺい率は $79.8\%$ とする。Fig 4.1のように建物の外形は建築基準法を満たし、上層部の階は $45.6\text{m}\times 38\text{m}$ の長方形プランを持つ賃貸ビルと想定する。

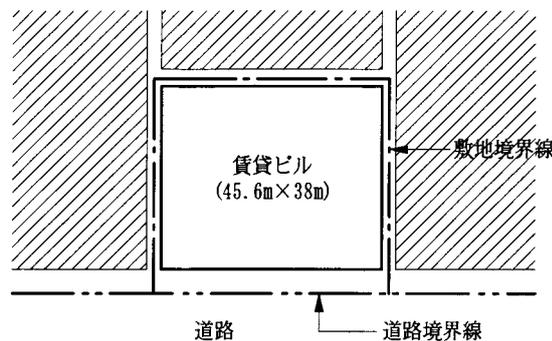


Fig 4.1 建物の1面が道路に接している賃貸ビル

Fig 4.1の外形に対して実際に計画可能な平面計画を考慮する。貸ビルに必要な区画や面積を考慮した平面計画を考え、コアの配置を考慮した上で現実的なスパン割りを想定する（Fig 4.2）。ここではブレースなどの耐震要素、免震・制震のためのダンパーなどは考慮せず、純ラーメン骨組モデルを対象とする。

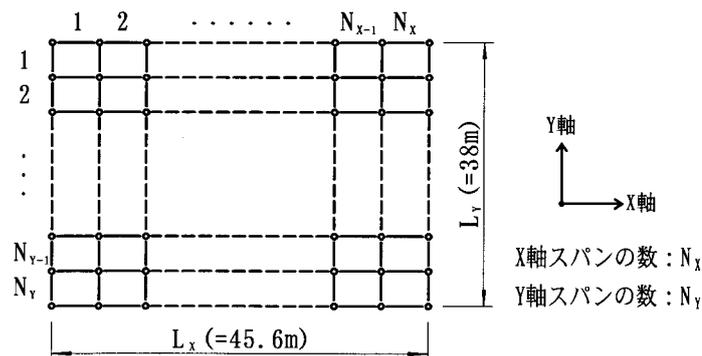


Fig 4.2 コアの配置を考慮したスパン割り

### 4.2.2 立体骨組モデルの最適化

Fig 4.2の $45.6(\text{m})\times 38(\text{m})$ の外形に対して計画可能なスパン割りを想定する。X軸に対しては3スパン（スパン長： $15.2\text{m}$ ）、4スパン（ $11.4\text{m}$ ）、5スパン（ $9.12\text{m}$ ）、6スパン（ $7.6\text{m}$ ）、7スパン（ $6.5\text{m}$ ）、8スパン（ $5.7\text{m}$ ）の6パターン、Y軸に対しては3スパン（ $12.7\text{m}$ ）、4スパン（ $9.5\text{m}$ ）、

5 スパン(7.6m)、6 スパン(6.3m)の 4 パターンのスパン割りを考慮する。

各軸のスパン割りを組み合わせた立体骨組モデルを対象モデル(合計 24 パターンのスパン割り)として定める。いずれのスパン割りに関しても均等スパン割りとする。モデルの解析時に適用した設計条件を整理すると以下のものである。

- ・ 1 階の柱脚は固定とし、基礎梁は設計変数として扱っていない。スラブは面内に変形しないように十分な強度があり、面内の変形が無視できるのに十分な剛性があると仮定 (剛床仮定)。
- ・ 材料定数としては以下の値を用いる。  
ヤング係数  $E = 2.05 \times 10^5 (\text{N/mm}^2)$ 、 $F$  値  $= 325 (\text{N/mm}^2)$
- ・ 梁は H 形鋼中幅系、柱は正方形角形鋼管とする。
- ・ 制約条件として、以下の条件を設定する。
  - ①断面積上下限值制約：梁断面積： $2.635 \times 10^3 \leq A \leq 3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$   
柱断面積： $4.563 \times 10^3 \leq A \leq 1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$
  - ②層間変形角制約： $|R| \leq 1/200$
  - ③保有水平耐力制約は  $D_s = 0.3$ 、 $F_{cs} = 1.0$ 、 $Q_d$  は 1 次設計用荷重と同じ分布形とするため、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  は  $D_s$  値に比例する。 $Q_u$  は最大層間変形角が  $1/75$  のときに各層に生じる層せん断力とする。

	1 次設計	必要保有水平耐力
5F	5,044.7	7,567.1
4F	3,088.8	4,633.2
3F	2,387.9	3,581.9
2F	1,801.0	2,701.5
1F	1,260.5	1,890.8

Table 4.1 層水平力 (kN)

- ・ 梁、柱ともに断面積を設計変数とし、断面積と  $I$  (断面 2 次モーメント)、 $Z$  (断面係数) 及び  $Z_p$  (塑性断面係数) の関係式を以下のように設定する。

$$\begin{aligned}
 \text{梁} : \quad I &= 4.0 A^2 & Z &= 1.5 A^{1.5} & Z_p &= 1.6 A^{1.5} \\
 \text{柱} : \quad I &= 1.2 A^2 & Z &= 0.8 A^{1.5} & Z_p &= 0.9 A^{1.5}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

- ・ Fig 4.2 に示す建物の各軸に対して、モデルの対称性のみ考慮した部材グルーピングを行なう (Fig 1.4 参照)。
- ・ 部材の初期断面は上限値 (梁： $3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、柱： $1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$ ) を用いる。
- ・ 最適化手法としては勾配射影法<sup>[6]</sup>を用いる。
- ・ 弾塑性解析は、軸力と曲げの相関を無視した完全塑性ヒンジを弾性部材の両端に配置した弾塑性梁有限要素を用い、荷重増分法及び変位増分法によって行う。

以上の条件を考慮し、各軸のスパン割りの組み合わせた 24 パターンの立体骨組モデルの最適化の結果を Table 4.2 ~ Table 4.4 に示す。Table 4.2 は各モデルの最適総鋼材量を、Table 4.3 は各モデルの梁の部材の鋼材量を、Table 4.4 は各モデルの柱の部材の鋼材量を示す。

※ ( ) は 1 ユニットスパンの面積

X 軸 (スパン長) Y 軸 (スパン長)	3 スパン (15.2m)	4 スパン (11.4m)	5 スパン (9.12m)	6 スパン (7.6m)	7 スパン (6.5m)	8 スパン (5.7m)
3 スパン (12.7m)	7.08E+07 (193.04m <sup>2</sup> )	6.38E+07 (144.78m <sup>2</sup> )	6.18E+07 (115.82m <sup>2</sup> )	6.18E+07 (96.52m <sup>2</sup> )	6.16E+07 (82.55m <sup>2</sup> )	6.27E+07 (72.39m <sup>2</sup> )
4 スパン (9.5m)	6.73E+07 (144.40m <sup>2</sup> )	6.00E+07 (108.30m <sup>2</sup> )	5.65E+07 (86.64m <sup>2</sup> )	5.50E+07 (72.20m <sup>2</sup> )	5.41E+07 (61.75m <sup>2</sup> )	5.39E+07 (54.15m <sup>2</sup> )
5 スパン (7.6m)	6.71E+07 (115.52m <sup>2</sup> )	5.86E+07 (86.64m <sup>2</sup> )	5.39E+07 (69.31m <sup>2</sup> )	5.21E+07 (57.76m <sup>2</sup> )	5.06E+07 (49.40m <sup>2</sup> )	4.97E+07 (43.32m <sup>2</sup> )
6 スパン (6.3m)	6.85E+07 (95.76m <sup>2</sup> )	5.90E+07 (71.82m <sup>2</sup> )	5.34E+07 (57.46m <sup>2</sup> )	5.09E+07 (47.88m <sup>2</sup> )	4.90E+07 (40.95m <sup>2</sup> )	4.87E+07 (35.91m <sup>2</sup> )

Table 4.2 各モデルの最適総鋼材量 (単位 : cm<sup>3</sup>)

X 軸 Y 軸	3 スパン	4 スパン	5 スパン	6 スパン	7 スパン	8 スパン
3 スパン	5.13E+07	4.54E+07	4.31E+07	4.23E+07	4.20E+07	4.25E+07
4 スパン	4.76E+07	4.15E+07	3.81E+07	3.64E+07	3.54E+07	3.52E+07
5 スパン	4.75E+07	4.01E+07	3.48E+07	3.33E+07	3.14E+07	3.01E+07
6 スパン	4.81E+07	3.98E+07	3.41E+07	3.17E+07	2.97E+07	2.91E+07

Table 4.3 各モデルの梁の部材の鋼材量 (単位 : cm<sup>3</sup>)

X 軸 Y 軸	3 スパン	4 スパン	5 スパン	6 スパン	7 スパン	8 スパン
3 スパン	1.95E+07	1.84E+07	1.87E+07	1.95E+07	1.95E+07	2.02E+07
4 スパン	1.97E+07	1.84E+07	1.84E+07	1.86E+07	1.87E+07	1.87E+07
5 スパン	1.96E+07	1.85E+07	1.90E+07	1.88E+07	1.92E+07	1.96E+07
6 スパン	2.04E+07	1.92E+07	1.93E+07	1.93E+07	1.93E+07	1.96E+07

Table 4.4 各モデルの柱の部材の鋼材量 (単位 : cm<sup>3</sup>)

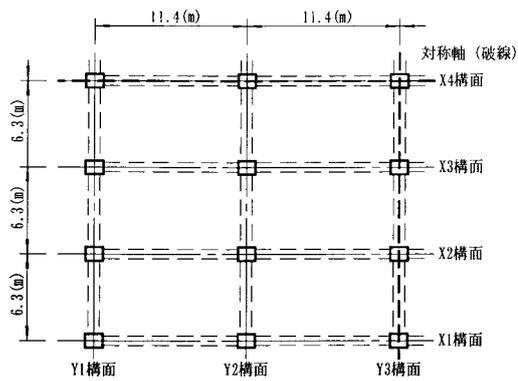
## 最適化の結果

Fig 4.3 に 4×6 スパンの立体骨組モデルの最適化の結果を示す。各々の図は制約条件の満足状況を示す。

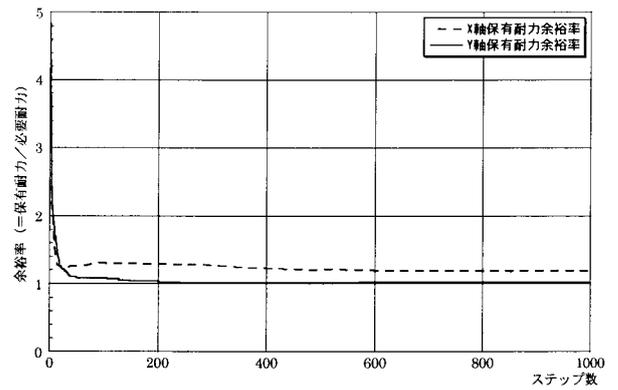
- ① 2次設計用荷重時の保有耐力余裕率（保有水平耐力  $Q_u$  は最大層間変形角が  $1/75$  となるときに各層が負担する層せん断力として評価する。このときの荷重係数を  $\lambda_u$  とすれば、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回る条件は  $1 \leq \lambda_u$  と表現できる。）
- ② 各部材の最適解の断面積分布図（各部材の断面積を線の太さで表わす）
- ③ 2次設計用荷重時の軸力の分布図（灰色は各部材の軸力の大きさを表わす。大きさは相対的な量として表現した。）
- ④ 2次設計用荷重時のモーメント分布と塑性ヒンジ図（梁は分布荷重を作用させるため、モーメントは2次曲線となるが、便宜上各節点での値を直線で結んでいる。大きさは相対的な量として表現した。黒点は各部材の塑性ヒンジの発生位置を示す）
- ⑤ 1次設計時の短期応力度比（黒線は応力度比制約が等号満足する部材を表わす）
- ⑥ 1次設計時の長期応力度比（黒線は応力度比制約が等号満足する部材を表わす）
- ⑦ 層間変形角 ( $|R| \leq 1/200$ )
- ⑧ 3次元の断面積分布図

Fig 4.3 の最適化の結果により、以下のことが分かる。

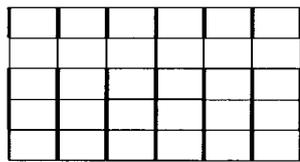
- ①の図で、2次設計用荷重時の保有耐力余裕率の制約は X 軸に対しては層間変形角の制約で設計が決まる場合が多いのである程度の余裕があるが、Y 軸ではほぼ限界値 1 に近づいている。
- ②の図で、各構面ではチェッカーボードパターンが著しく表れている。しかし、⑧の3次元の断面積の分布図を見ると、二つのコアが対称に形成しているように見られる。各軸の多くの水平荷重をその二つのコアに負担させて建物を支持させる傾向であると考えられる。
- ④の図で、モーメントはコアを形成している部材の方で大きく、荷重がそのコアに集中している。2次設計用荷重時のすべての梁端部に塑性ヒンジが形成されている。
- ⑤、⑥の図で、スパンが短い Y 軸の梁は短期応力、スパンが長い X 軸の梁は長期応力の制約が等号で満足されている部材が多く、これらの条件により部材の断面が決まることがいえる。
- ⑦の図で、低層部では層間変形角制約に対して余裕があり、高層部になるほど厳しくなっている。Y 軸構面はスパンが短いので層間変形角にやや余裕があるが、X 軸構面はスパンが長くて限界値に達している。



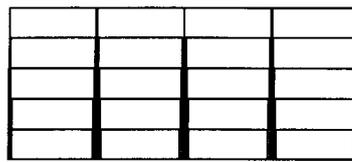
対象モデルと各軸の構面



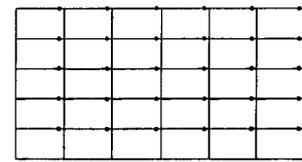
①2次設計用荷重時保有耐力余裕率



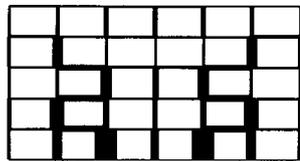
Y1 構面



Y1 構面



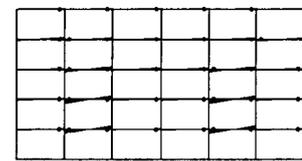
Y1 構面



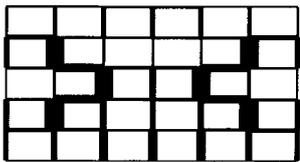
Y2 構面



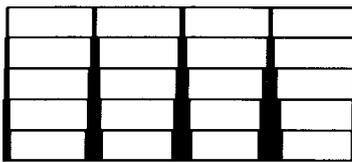
Y2 構面



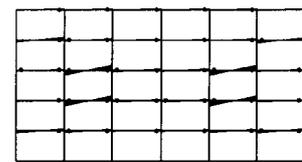
Y2 構面



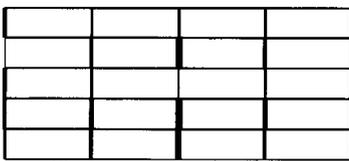
Y3 構面



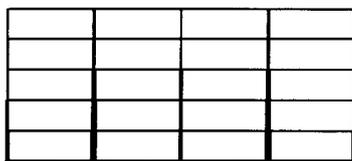
Y3 構面



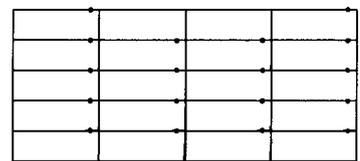
Y3 構面



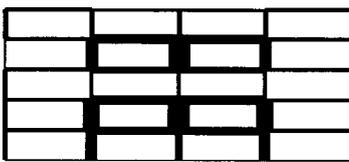
X1 構面



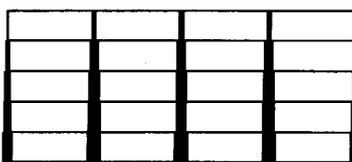
X1 構面



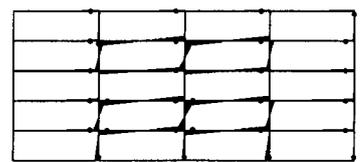
X1 構面



X2 構面



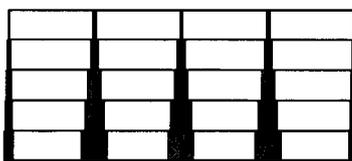
X2 構面



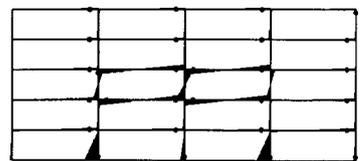
X2 構面



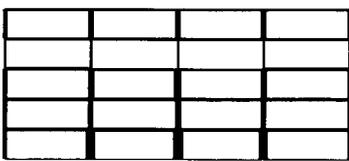
X3 構面



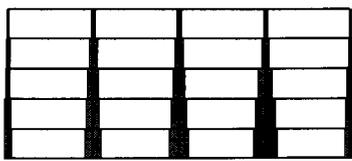
X3 構面



X3 構面



X3 構面



X3 構面



X3 構面

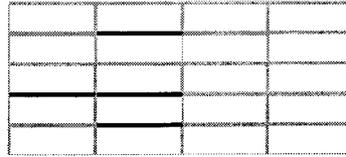
②断面積の分布

③2次設計用軸力

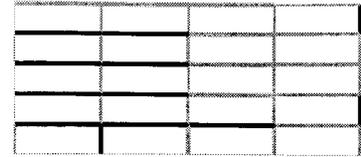
④2次設計用モーメント



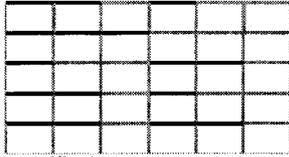
Y1 構面



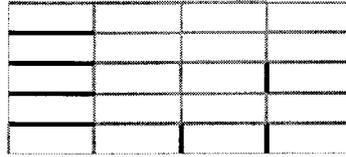
X1 構面



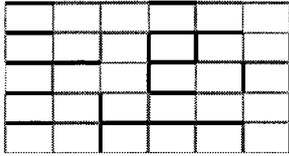
X3 構面



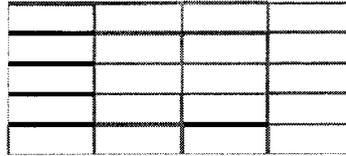
Y2 構面



X2 構面

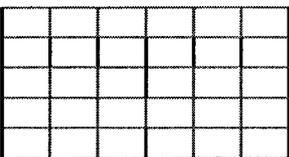


Y3 構面

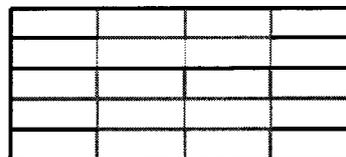


X3 構面

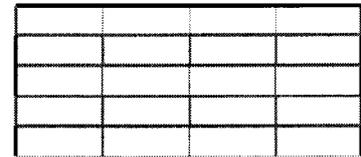
⑤ 1次設計短期応力度比



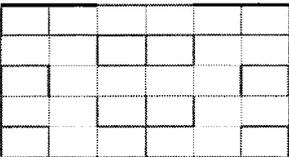
Y1 構面



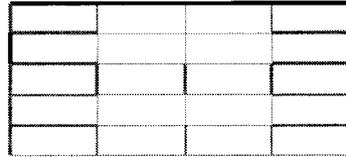
X1 構面



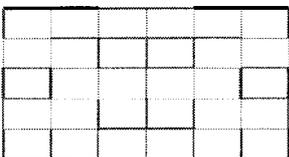
X3 構面



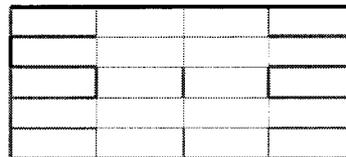
Y2 構面



X2 構面

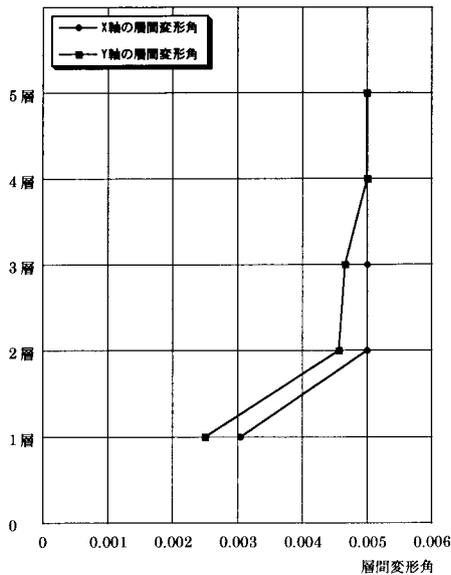


Y3 構面

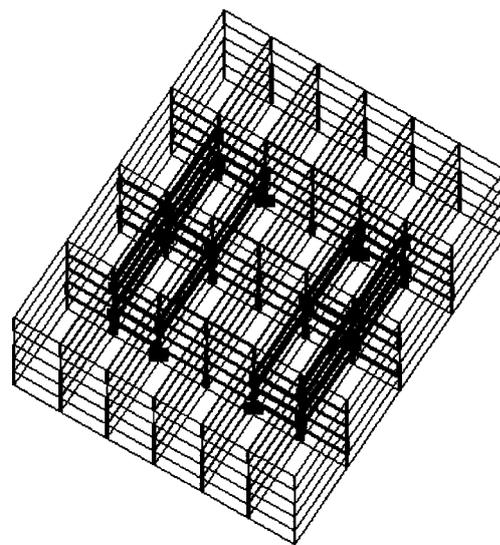


X3 構面

⑥ 1次設計長期応力度比



⑦ 1次設計用層間変形角



⑧ 断面積の分布 (3次元)

Fig 4.3 4×6 スパンの立体骨組モデルの最適化の結果

Fig 4.4、Fig 4.5 は Table 4.2 ~ Table 4.4 をグラフ化したのである。Fig 4.4 は X 軸のスパン割りに対して、Fig 4.5 は Y 軸のスパン割りに対して各々最適総鋼材量、梁の鋼材量、柱の鋼材量の変化を示す。グラフの凡例は直交方向軸のスパン数を表わす。

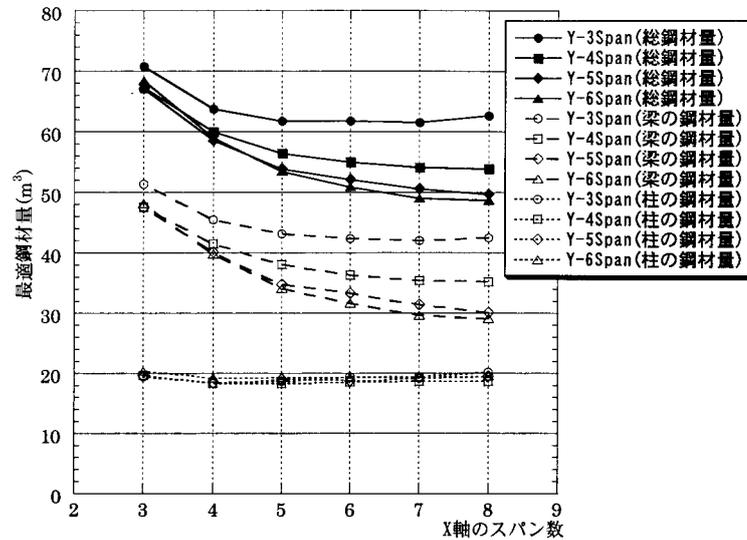


Fig 4.4 立体骨組モデルの最適化の結果 (X 軸方向)

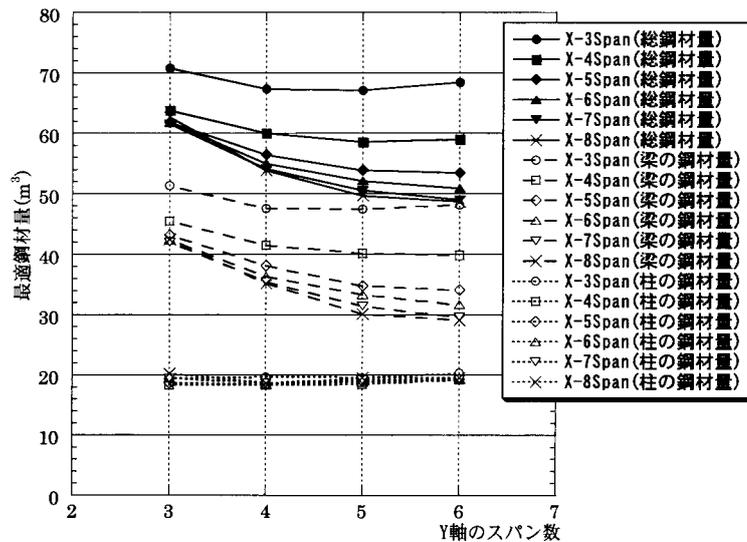


Fig 4.5 立体骨組モデルの最適化の結果 (Y 軸方向)

Table 4.2 により、最適総鋼材量は 1 ユニットスパンの面積に比例していることが分かる。しかし、ある 1 軸のスパンが長スパン (スパン長が 11m 以上) の場合に直交方向のスパンを変化させると、直交方向スパン長 9m 位で最少の鋼材量を示し、スパン長を短くしても鋼材量はほぼ同じであるか、上昇する場合もある。その理由としては、長スパンの軸で鉛直荷重に対する応力条件が厳しいため、直交方向のスパン長が短くなる (9m 以下) ことで減少する鋼材量より部材数の増加に従う鋼材量の増加が大きいのことが考えられる。

Fig 4.4、Fig 4.5 により、立体骨組モデルもモデルの大きさが同じであれば、スパン数 (スパン

長)が変化するにも関わらず、平面骨組モデルの場合と同様に柱の鋼材量はほぼ一定(約5%の差)である。しかし、梁の鋼材量はスパン長(スパン数は減少する)の増加に伴い最適総鋼材量のグラフと同じ傾きに増加し、梁の鋼材量が立体骨組の最適総鋼材量を支配している。

基本計画段階で柱の配置を定めることはコストと密接な関係にある。建物の機能、デザイン上、部材配置に対する設計者の選択の幅が広いときは柱の配置とコストの関係を適切に考慮した計画が望ましい(Fig 4.6)。しかし、そうでない場合は長スパンによるコスト・アップを認識してそれに応じた設計をすべきである。

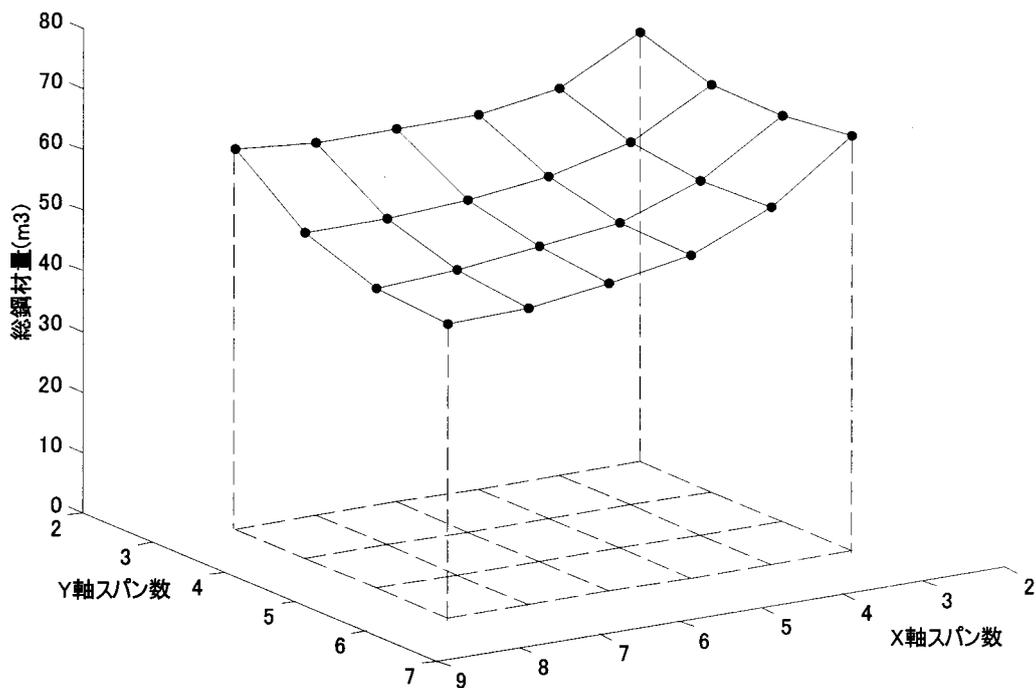


Fig 4.6 各軸のスパン割りの変化による立体骨組モデルの最適総鋼材量の変化

### 4.3 平面骨組最適解を用いた純ラーメン立体骨組モデルの最適鋼材量の近似予測法

4.2 節では Fig 4.2 の立体骨組モデルに対し、各軸のスパン割りを組み合わせた立体骨組モデル（合計 24 パターンのスパン割り）を対象とした最適化を行なった。しかし、立体モデルは検討すべきである部材数が多く、設計変数の数も増加するため、多大な時間と努力が必要である。また、建物規模の増大に対して計算負荷は飛躍的に増加する。

実際に Table 4.2 の 24 パターンの立体モデルの解析時間は約 100 時間（1 ステップにかかった時間は平均 15 秒、24 個の立体モデルは平均 1,000 ステップで局所最小値に達する）であるため、すべての立体モデルの解析し、その結果を基本計画に反映させるには極めて困難である。また、それで求められた結果が基本計画案として採択されなくて、再計算が必要である場合は無駄な時間や費用が発生する。

本節では、第 3 章の平面骨組モデルの最適化の結果を用いて、立体骨組モデルの最適鋼材量を効率的かつ精度良く予測する方法を提案する。

#### 4.3.1 立体骨組モデルの分解

実務設計で建物の特性把握のために一般的に行われているように、立体骨組に対し、短期設計、また二次設計時に、X 方向、Y 方向の地震荷重を独立に作用させたときの保有性能を確認する場合を扱う。この場合は X 方向の水平荷重には X 方向構面が主として抵抗し、Y 方向の水平荷重には Y 方向構面が主として抵抗すると仮定でき、立体骨組は、X 方向荷重載荷時の X 方向構面と、Y 方向荷重載荷時の Y 方向構面との重ねあわせで表現することができる。

梁の場合、立体骨組を平面骨組に分解する際に、各梁は X、Y 方向いずれかの構面にしか含まれないことから、立体骨組の梁の総鋼材量  $W_b$  は、X 方向構面の梁の総鋼材量  $W_{bx}$  と Y 方向構面の梁の総鋼材量  $W_{by}$  との和として表現する。

柱の場合、立体骨組を平面骨組に分解する際に、同じ柱が X、Y 方向両構面に含まれるため、1 本の柱は X 方向、Y 方向の荷重をそれぞれ独立に載荷した場合に必要な性能を保有する必要がある。従って、X、Y 方向どちらか厳しい方の荷重に対して必要な柱断面が決定されると考えられる。従って、柱断面積  $A_c$  は、X 方向載荷時の柱断面積  $A_{cx}$  と Y 方向載荷時の柱断面積  $A_{cy}$  の大きい方  $\max(A_{cx}, A_{cy})$  を採用するのが適切であろう。しかし、この方法では厳しくない方の荷重に対しては、大きな柱の断面を選んだことによって梁断面に余剰が生じる。また、梁については過大な断面を与えることとなり、結果として総鋼材量も立体骨組最適鋼材量より大きくなる。従って、柱断面に関しては梁で生じた余剰分を削減する意味で便宜的に、X 方向載荷時の柱断面積  $A_{cx}$  と Y 方向載荷時の柱断面積  $A_{cy}$  の平均  $(A_{cx} + A_{cy})/2$  を用いることにする。この方法には柱の総鋼材量  $W_c$  について、X 方向構面の柱の総鋼材量  $W_{cx}$  と Y 方向構面の柱の総鋼材量  $W_{cy}$  の平均  $(W_{cx} + W_{cy})/2$  で単純に評価できるという利点もある。

#### 外側構面の補正

以上の方針で、立体骨組の最適解鋼材量を、平面骨組の最適解を用いて簡易的に評価することができる。しかし、立体骨組モデルは Fig 4.7 のように各方向ごとに支配床幅  $D$  の異なる外側構面と、

内側構面の2種類の構面を考慮する必要がある。

Fig 4.7により、外側構面は、内側構面の1/2の鉛直荷重を受けるため、本論では残りの1/2に対する最適鋼材量の補正を考える。Fig 3.14で示された最適鋼材量と鉛直荷重レベルに関する線形性の性質を用いて、外側構面の鋼材量は内側構面の鋼材量を補正することができる。

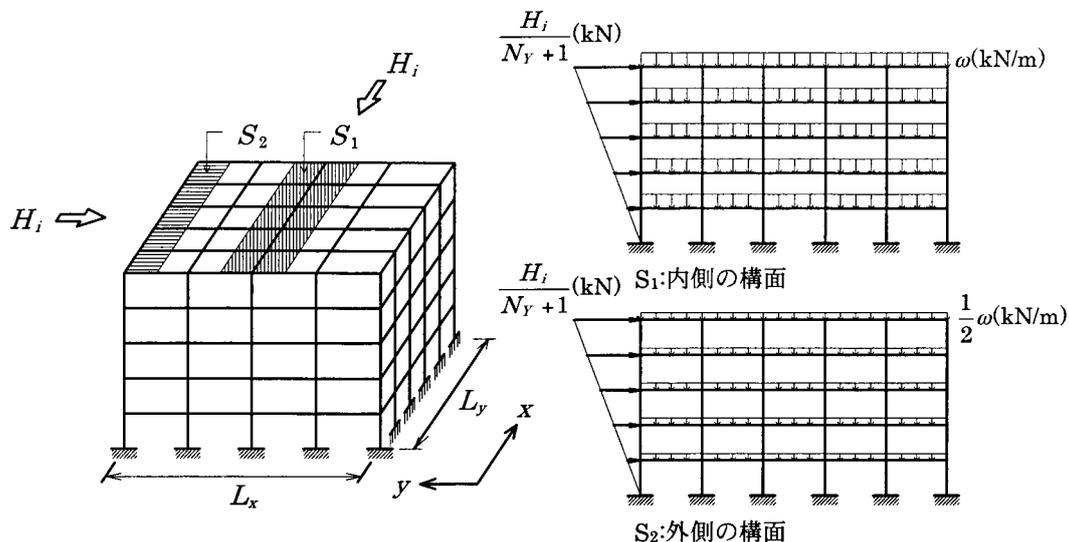


Fig 4.7 立体骨組モデルの外側、内側構面の骨組モデルの荷重関係

### 直交方向の床に対して柱が受ける集中荷重の考慮

以上のような仮定で立体骨組を平面骨組モデルに分解して立体骨組モデルの最適総鋼材量を予測する。しかし、実際に立体骨組モデルに作用させる鉛直荷重は Fig 4.8 の(a)のように X、Y の両軸の床に対する大きさである。すなわち、各々の梁は支配床幅  $D$  に対する鉛直荷重のみを受けるが、柱は直交方向の軸の床重量に対しても集中荷重として受けている。

そのため、立体骨組モデルを予測するために利用する平面骨組モデルは Fig 4.8 の(b)梁が受ける鉛直荷重に(c)柱が受ける直交方向の集中荷重を同時に作用させる。

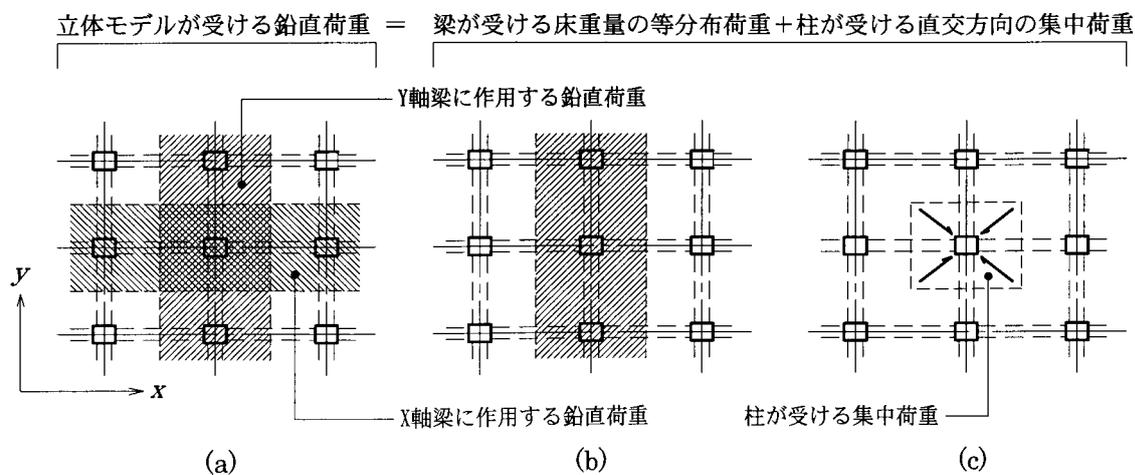


Fig 4.8 平面骨組モデルに作用する直交方向の床の集中荷重 (Y 軸構面の場合)

### 立体骨組モデルの最適鋼材量の予測式

以上の仮定に基づき、平面骨組モデルの最適鋼材量を用いて立体モデルの最適鋼材量( $W_{opt}$ )を予測するために次の式を提案する。ここで、 $W_{BX}, W_{BY}$  は内側の梁、 $W_{CX}, W_{CY}$  は内側の柱の鋼材量、 $W_{BX}^*, W_{BY}^*$  は外側の梁、 $W_{CX}^*, W_{CY}^*$  は外側の柱の鋼材量を表す。

$$W_{opt}(X, Y) = \sum_{i=1}^{N_x-1} W_{BX_i} + \sum_{j=1}^{N_y-1} W_{BY_j} + \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^{N_x-1} W_{CX_i} + \sum_{j=1}^{N_y-1} W_{CY_j} \right) + \sum_{k=1}^2 W_{BX_k}^* + \sum_{k=1}^2 W_{BY_k}^* + \frac{1}{2} \left( \sum_{k=1}^2 W_{CX_k}^* + \sum_{k=1}^2 W_{CY_k}^* \right) \quad (4.2)$$

### 4.3.2 立体骨組から取出した平面骨組モデルの最適解

4.2.2 節のスパン割りを考慮した Fig 4.2 の立体骨組モデル (24 パターン) に対して、各構面から構成できる平面骨組モデルを取出す。24 パターンの立体骨組モデルで考えられる平面骨組モデルの数は、X 軸構面で 24 個、Y 軸構面で 24 個、合計 48 個の平面骨組モデルであり、お互いに異なるスパン数、スパン長、荷重レベルとなっている。

#### -Y 軸構面で構成できる平面骨組モデル

直交方向スパン数を考慮した荷重レベル			Y 軸で計画可能なスパン数			
スパン数	水平荷重	鉛直荷重	3 スパン	4 スパン	5 スパン	6 スパン
3	H/4	W/3Ly	Y <sub>33</sub>	Y <sub>43</sub>	Y <sub>53</sub>	Y <sub>63</sub>
4	H/5	W/4Ly	Y <sub>34</sub>	Y <sub>44</sub>	Y <sub>54</sub>	Y <sub>64</sub>
5	H/6	W/5Ly	Y <sub>35</sub>	Y <sub>45</sub>	Y <sub>55</sub>	Y <sub>75</sub>
6	H/7	W/6Ly	Y <sub>36</sub>	Y <sub>46</sub>	Y <sub>56</sub>	Y <sub>66</sub>
7	H/8	W/7Ly	Y <sub>37</sub>	Y <sub>47</sub>	Y <sub>57</sub>	Y <sub>77</sub>
8	H/9	W/8Ly	Y <sub>38</sub>	Y <sub>48</sub>	Y <sub>58</sub>	Y <sub>68</sub>

#### -X 軸構面で構成できる平面骨組モデル

直交方向スパン数を考慮した荷重レベル			X 軸で計画可能なスパン数					
スパン数	水平荷重	鉛直荷重	3 スパン	4 スパン	5 スパン	6 スパン	7 スパン	8 スパン
3	H/4	W/3Ly	X <sub>33</sub>	X <sub>43</sub>	X <sub>53</sub>	X <sub>63</sub>	X <sub>73</sub>	X <sub>83</sub>
4	H/5	W/4Ly	X <sub>34</sub>	X <sub>44</sub>	X <sub>54</sub>	X <sub>64</sub>	X <sub>74</sub>	X <sub>84</sub>
5	H/6	W/5Ly	X <sub>35</sub>	X <sub>45</sub>	X <sub>55</sub>	X <sub>75</sub>	X <sub>75</sub>	X <sub>85</sub>
6	H/7	W/6Ly	X <sub>36</sub>	X <sub>46</sub>	X <sub>56</sub>	X <sub>66</sub>	X <sub>76</sub>	X <sub>86</sub>

Table 4.5 立体モデルで構成できる平面骨組モデルのタイプと荷重レベル

4.3.1 節の仮定を用いて立体骨組モデルの最適総鋼材量を予測するためには、48 個の平面骨組モデルの最適化を行い、各部材ごとの鋼材量を求めておく必要がある。しかし、ここでは第 3 章で提案した平面骨組モデルの予測式を用い、8 つのサンプル点から予測した平面骨組モデルの最適鋼材量を利用する。Table 4.5 は 24 パターンの立体骨組モデルに対して各々の X 軸、Y 軸構面で構成できる平面骨組モデルのタイプと荷重レベルを示す。

ここで、X は X 軸構面、Y は Y 軸構面の平面骨組モデル、H は立体モデルに作用する水平荷重、W は上層部の床面積、添え字の前の数字は平面モデルのスパン数、後の数字は直交方向のスパン数を表わす。

#### 平面骨組モデルの鋼材量の予測に利用するサンプル点

第 3 章で提案した式(3.16)を用いて、Table 4.5 の各パラメタ（スパン数、スパン長、荷重レベル）に対して平面骨組モデルの最適鋼材量を予測する。

問題を解くために必要な 8 つのサンプル点は、「スパン数」を 4、10、12、「スパン長」を 6m、12m、「荷重レベル」を Y 軸の建物の長さ 38m、Y 軸のスパン数 3、6 の場合の水平、鉛直荷重の時の 3 つのパラメタの組み合わせた点を用いる。Table 4.6 にサンプル点の最適化で求めた最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量を示す。

サンプル点	スパン数	スパン長(m)	荷重係数	梁の鋼材量 (m <sup>3</sup> )	柱の鋼材量 (m <sup>3</sup> )	最適総鋼材量 (m <sup>3</sup> )
1	4	6	38/4	1.80	2.52	4.33
2	12	6	38/4	5.15	6.72	11.87
3	4	12	38/4	6.77	4.53	11.30
4	10	12	38/4	16.77	10.57	27.34
5	4	6	38/7	1.32	1.62	2.94
6	12	6	38/7	3.45	4.14	7.59
7	4	12	38/7	4.70	3.07	7.77
8	10	12	38/7	11.54	6.90	18.44

Table 4.6 サンプル点の最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量

Table 4.6 のサンプル点の最適化の結果を用いて、平面骨組モデルの予測式(3.17)の係数を求める。予測式(3.16)の係数として、最適総鋼材量の係数を式(4.3)に、梁の鋼材量の係数を式(4.4)に、柱の係数を式(4.5)に各々示す。

<最適総鋼材量の係数>

$$\begin{aligned}
 g_{00} &= 684139.0 & g_{10} &= 4008.9 & h_{00} &= -15824.9 & h_{10} &= 5376.5 \\
 g_{01} &= -19251.4 & g_{11} &= 492.4 & h_{01} &= 11297.0 & h_{11} &= 586.0
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

<梁の鋼材量の係数>

$$\begin{aligned} g_{00} &= 655428.5 & g_{10} &= -36957.7 & h_{00} &= -15634.2 & h_{10} &= 4327.8 \\ g_{01} &= -52599.4 & g_{11} &= 3387.3 & h_{01} &= 1716.1 & h_{11} &= 757.4 \end{aligned} \quad (4.4)$$

<柱の鋼材量の係数>

$$\begin{aligned} g_{00} &= 28710.5 & g_{10} &= 40966.6 & h_{00} &= -190.7 & h_{10} &= 1048.7 \\ g_{01} &= 33348.0 & g_{11} &= -2895.0 & h_{01} &= 9580.9 & h_{11} &= -171.5 \end{aligned} \quad (4.5)$$

### 平面骨組モデルの最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量の予測

予測式(3.16)に式(4.3)、(4.4)、(4.5)の係数を代入し、Table 4.5 の平面骨組モデルに対して最適総鋼材量、梁の鋼材量、柱の鋼材量の予測を行なう。Table 4.7、Table 4.8 に Table 4.5 の各平面骨組モデルに対して最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量の予測値を、Fig 4.9、Fig 4.10 にその予測値を3次元グラフで示す。Fig 4.9 に荷重レベル、外形固定の場合のスパン長と最適鋼材量の線形関係が良く表現されている。

スパン数 直交方向		3	4	5	6
		3	総鋼材量	10.68	9.20
	梁の鋼材量	6.47	4.90	3.96	3.34
	柱の鋼材量	4.22	4.30	4.35	4.38
4	総鋼材量	9.09	7.77	6.98	6.46
	梁の鋼材量	5.51	4.17	3.38	2.84
	柱の鋼材量	3.58	3.60	3.61	3.61
5	総鋼材量	8.03	6.82	6.10	5.61
	梁の鋼材量	4.87	3.69	2.98	2.51
	柱の鋼材量	3.16	3.13	3.11	3.10
6	総鋼材量	7.27	6.14	5.46	5.01
	梁の鋼材量	4.41	3.35	2.71	2.28
	柱の鋼材量	2.86	2.80	2.76	2.73
7	総鋼材量	6.70	5.63	4.99	4.56
	梁の鋼材量	4.07	3.09	2.50	2.10
	柱の鋼材量	2.63	2.54	2.49	2.46
8	総鋼材量	6.26	5.23	4.62	4.21
	梁の鋼材量	3.80	2.88	2.33	1.97
	柱の鋼材量	2.45	2.35	2.29	2.24

Table 4.7 Y軸構面の平面骨組モデルの最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量の予測値

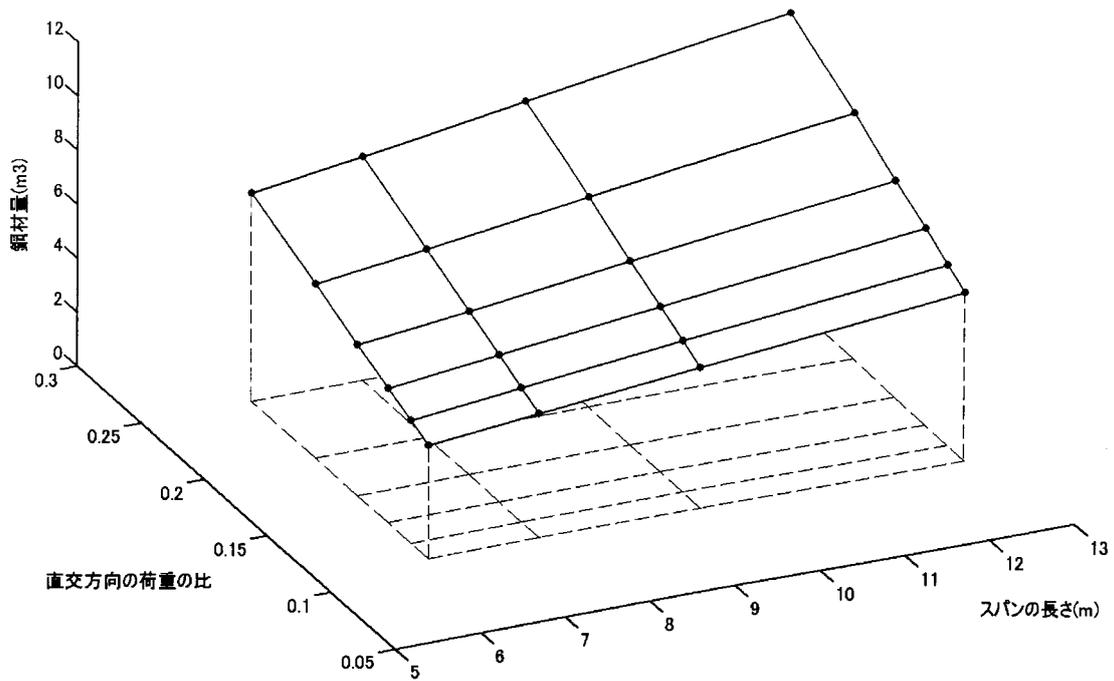


Fig 4.9 Y 軸構面の平面骨組モデルのスパン長、荷重レベルと最適総鋼材量の関係

スパン数 直交方向		スパン数					
		3	4	5	6	7	8
3	総鋼材量	12.39	10.46	9.30	8.53	7.98	7.57
	梁の鋼材量	8.10	6.12	4.93	4.14	3.58	3.15
	柱の鋼材量	4.29	4.34	4.37	4.39	4.40	4.41
4	総鋼材量	10.66	8.93	7.89	7.20	6.70	6.33
	梁の鋼材量	6.96	5.25	4.23	3.55	3.06	2.69
	柱の鋼材量	3.71	3.68	3.66	3.65	3.64	3.64
5	総鋼材量	9.51	7.91	6.95	6.31	5.85	5.51
	梁の鋼材量	6.19	4.67	3.76	3.15	2.71	2.39
	柱の鋼材量	3.32	3.24	3.19	3.16	3.13	3.12
6	総鋼材量	8.69	7.18	6.27	5.67	5.24	4.92
	梁の鋼材量	5.65	4.26	3.42	2.87	2.47	2.17
	柱の鋼材量	3.04	2.92	2.85	2.81	2.77	2.75

Table 4.8 X 軸構面の平面骨組モデルの最適総鋼材量、梁、柱の鋼材量の予測値

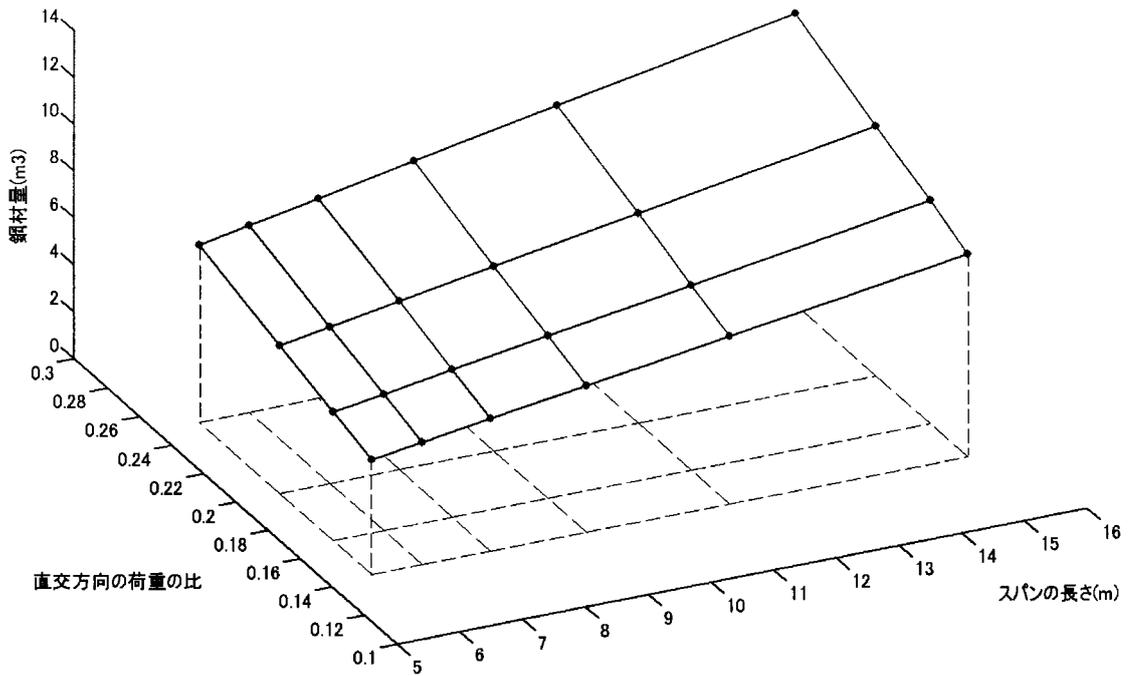


Fig 4.10 X 軸構面の平面骨組モデルのスパン長、荷重レベルと最適総鋼材量の関係

#### 4.3.3 立体骨組モデルの最適鋼材量の予測

Table 4.7、Table 4.8 で予測した各々の X、Y 軸の平面骨組モデルの組み合わせを用いて、立体骨組モデルの最適鋼材量を求める。その際、外側構面の鋼材量は内側構面の鋼材量に Fig 4.7 の外側構面に作用する鉛直荷重の効果に対する補正係数を乗じて求める。補正係数は Fig 3.14 の鉛直

Y 軸 \ X 軸		X 軸					
		3	4	5	6	7	8
3	予測値	71.8	66.8	64.7	64.0	64.2	64.8
	最適解	70.8	63.8	61.8	61.8	61.6	62.7
	比	101.49%	104.68%	104.68%	103.59%	104.20%	103.36%
4	予測値	69.4	62.9	59.8	58.2	57.6	57.5
	最適解	67.3	60.0	56.5	55.0	54.1	53.9
	比	103.10%	104.98%	105.70%	105.88%	106.53%	106.72%
5	予測値	69.1	61.5	57.6	55.4	54.2	53.6
	最適解	67.1	58.6	53.9	52.1	50.6	49.7
	比	103.02%	105.07%	106.86%	106.26%	107.06%	107.93%
6	予測値	70.0	61.4	56.7	53.9	52.3	51.4
	最適解	68.5	59.0	53.4	50.9	49.0	48.7
	比	102.11%	104.03%	106.13%	105.98%	106.79%	105.50%

Table 4.9 立体骨組モデルの最適解と予測値の総鋼材量の比較表

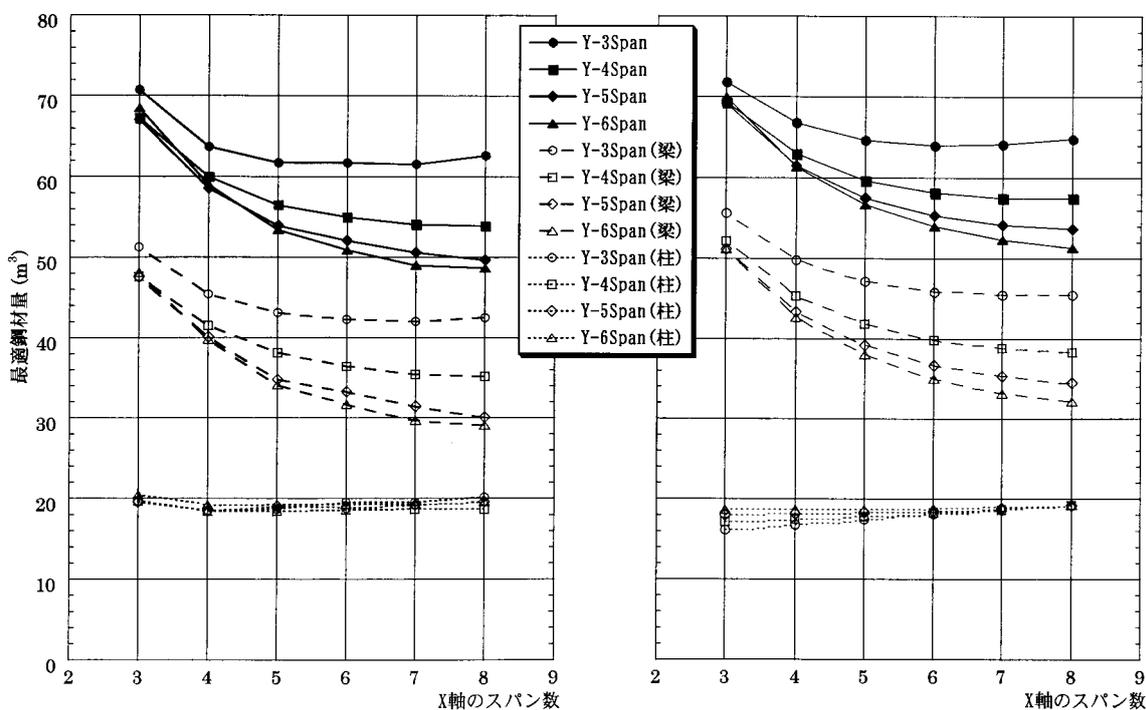
荷重の変化と最適鋼材量の関係で、鉛直荷重が 1/2 のときの鋼材量の比率の平均値  $\alpha = 0.909$  を用いる。

Table 4.9 の結果から、立体骨組モデルの最適鋼材量と平面骨組モデルの予測式から求めた値を用いた立体骨組モデルの予測鋼材量との誤差は 8%以内であり、基本計画段階では十分な精度で利用可能であるといえる。

Fig 4.11、Fig 4.12 は Table 4.9 の結果をグラフ化したものであり、各モデル間の鋼材量の大小関係は最適解と予測値で同じ傾向であることが分かる。マクロな構造計画に関しては各モデルの相対的比較が重要であるため、平面モデルの予測で得られた結果は設計者の意思決定に有用な情報として用いられる。

立体骨組に関しても外形を固定すると、平面骨組と同様に柱の総鋼材量はスパン数が変化したにも関わらずほぼ一定の分布となり、スパン長による梁の総鋼材量の増加がモデル全体の最適鋼材量に及ぼす影響が大きいことが分かる。

また、解析時間に関しては、立体モデルの 1 ステップに要する時間（平均 15 秒、24 個の立体モデルの解析にかかる総時間は 100 時間）に対し、平面モデルの 1 ステップに要する時間（平均 0.16 秒、8 個のサンプル点の平面モデルの解析にかかる総時間は 0.17 時間）はかなり短く、平面骨組モデルの予測式を用いて立体モデルの予測に要した時間は立体骨組モデルの約 1/560 である。建物の規模が大きくなればその差はさらに大きくなる。



立体骨組モデルの最適解

立体骨組モデルの予測値

Fig 4.11 立体骨組モデルの最適解と予測値の鋼材量の比較 (X 軸方向)

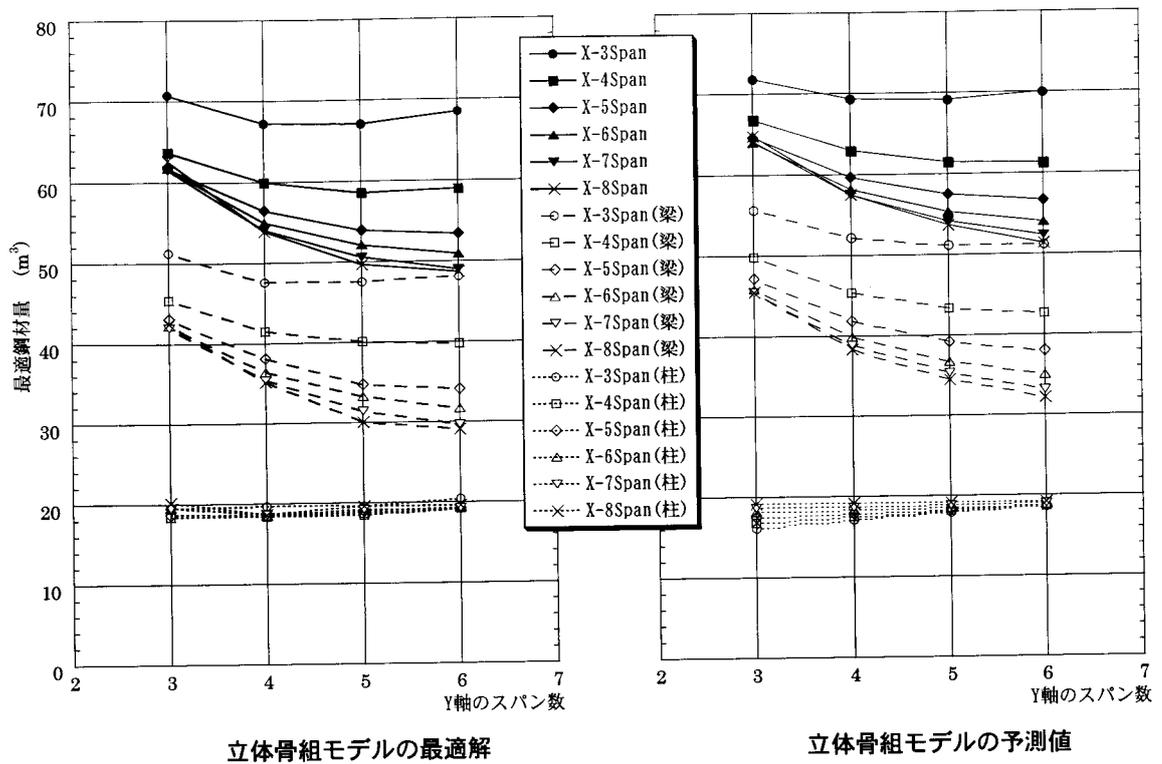


Fig 4.12 立体骨組モデルの最適解と予測値の鋼材量の比較 (Y軸方向)

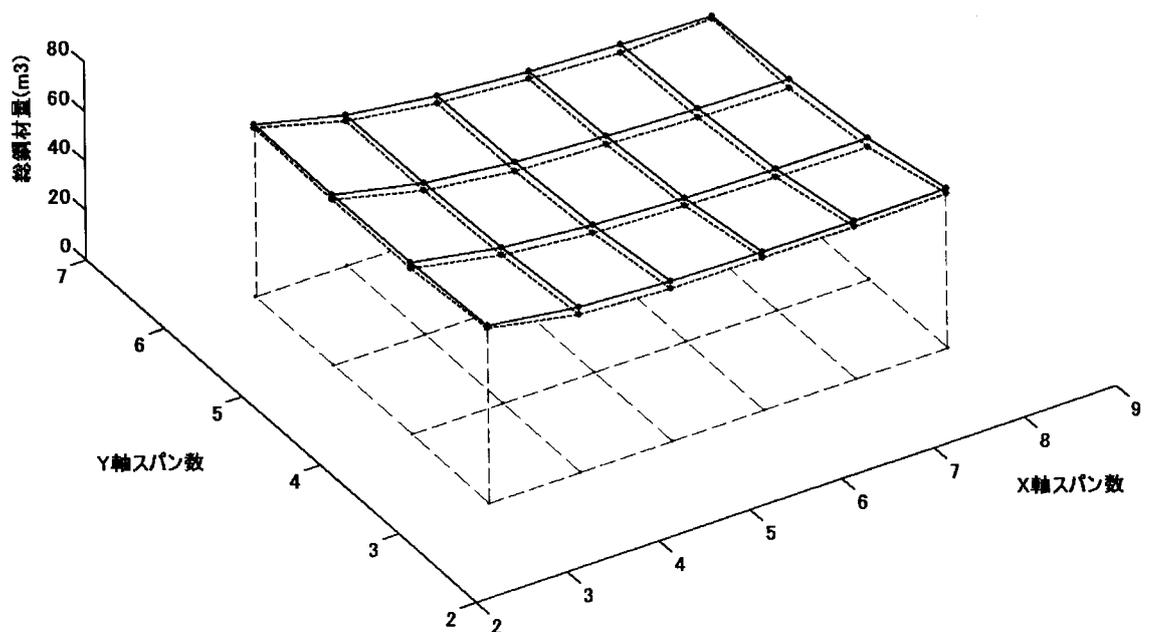


Fig 4.13 立体骨組モデルの最適解 (点線) と予測値 (実線) の総鋼材量の比較

#### 4.4 第4章の結論

本章では、基本計画段階において軸組を決める設計者の意思決定を支援することを目的とし、鋼構造純ラーメン骨組を対象として、平面骨組モデル最適解特性から得られた予測式を用いて、少ない計算コストで立体骨組モデルの最適鋼材量を簡易的に予測する手法を提案した。

- 1) 建物の規模が定まった立体骨組モデルに対して、各軸の計画可能なスパン割りを想定し、平面骨組モデルの予測式から得られた各平面骨組の鋼材量の組み合わせで、そのスパン割りを組み合わせた24パターンの立体骨組モデル最適鋼材量を予測した。その結果は、立体モデルの最適化で求めた鋼材量に比べて8%以下の誤差であり、各モデル間の鋼材量の大小関係は最適解とほぼ同じ傾向である。
- 2) 5層立体骨組モデルに対して、平面骨組モデルの鋼材量の予測式を用いて立体骨組モデルの鋼材量の予測に要した時間は立体モデルの解析に掛かった時間の1/560であり、数多くの案の中で一つの計画案を選択する基本計画段階で有用に利用できる。

#### <参考文献>

- [1]下出源七：デザイナーのための構造チェックリスト，彰国社，1977
- [2]須賀好富：建築デザインのための構造設計，学芸出版社，2003
- [3]前田尚美，佐藤平，高橋公子，服部岑生，杉山茂一共著：建築計画，朝倉書店，1980
- [4]近畿工高建築連盟：建築設計ノート事務所，彰国社，1975
- [5]藤江澄夫(執筆代表)：建築計画・設計シリーズ37，新・事務所ビル，市ヶ谷出版社，2000
- [6]Rosen,J.B.: The Gradienet Projection Method for Nonlinear Programming - Part II:Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514-532, 1961

## 第II部

# ブレース付き骨組モデルの最適解

## 第5章

### ブレース付き平面骨組モデルの最適解

#### 5.1 はじめに

実務上はラーメン構造では、風圧力、地震力のような水平の外力に抵抗させるため、一般的に建物の中で後日取り除かれる恐れのない、永久的な部分であるコアの固定した部分を耐震壁として用い、鉄筋コンクリート造の壁や鉄骨造のブレースを骨組に組み入れた耐震架構を構成する方法が採られている。しかし、ブレースは壁の開口設置も阻害するので、平面計画の大きな制約となる。そのため、平面計画上の空間構成を優先してブレース配置を考えるのが一般的であるが、耐震架構の計画を単に耐震壁量の確保とするに留まることなく、建物の構造性能を向上させるための必須不可欠な構成要素として積極的に取り組む必要がある。

一般的に耐震壁配置上<sup>[1]-[3]</sup>の注意点として以下のことが挙げられている。

1. 建物の重心と水平力の中心が一致するようにバランス良く配置する。
2. 耐震壁は上下通っていることが望ましい。
3. 縦に長い耐震壁は問題が多い。
4. 隣りあった耐震壁の中間部分は十分に地震力を伝達できる床、または骨組で連結する。

しかし、以上のことは設計者の長年の実務の経験から得られた知識であり、適切な数理的根拠に基づいて検証されたものではない。そのため、これらの規則が最も効率的な構造設計方法であるのかどうか、また効率的な設計方法であるならばどのような条件下でどの程度効率的であるかを最適解のような客観的データに基づいて明らかにする必要がある。

本章では、ブレース付き平面骨組モデルを対象として、「ブレース付き骨組の基本性質」、「ブレースの位置」、「ブレースの結合効果」、「ブレース群の性質」に関するブレースの配置特性、「スパン数」「スパン長」のパラメタに対して変化する最適解の特性について分析を行なう。その性質を用い、任意のブレース配置パターンを有する平面骨組の最適鋼材量を限られた数のブレース配置パターンの最適解を用いて予測する方法を提案する。

## 5.2 最適設計問題

### 5.2.1 ブレース付き平面モデルの設定

ブレース付き平面骨組モデルは、Table 5.1 のコアを考慮した各立体骨組モデルに対して純ラーメン骨組モデルと同様にブレース設置構面を構成する平面骨組モデルを取り出す。

基本計画段階においてコアの配置<sup>1)</sup>を定めることは設計者にとって最も重要な意思決定の一つである。デザイナーにとって「コア」は、建物の動線をコントロールするために使う手段の一つであるが、構造設計者にとっての「コア」の意味は建物の外観を侵さず巨大な水平力に抵抗させるための耐震要素が設置できる唯一の場所である。

純ラーメン骨組でもそのような水平力に抵抗可能な設計はできるが、変形が大きくなるため、それを抑えるには部材の断面積が大きくなるなど、コスト上昇の原因になる。そのために、コアを用いて純ラーメンに壁や筋違を組み込む方法が一般に行われている。Table 5.1 にコアのタイプと構造計画に対する一般的な事項を示す。

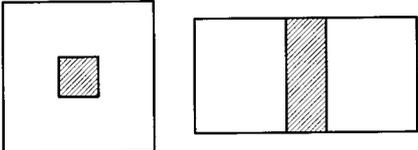
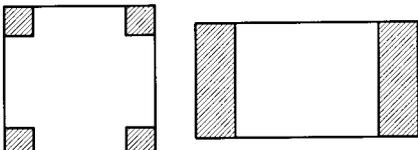
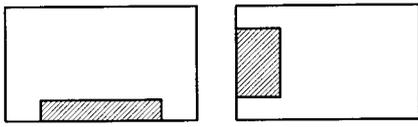
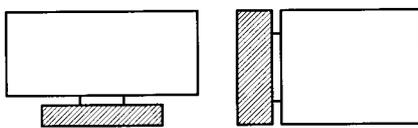
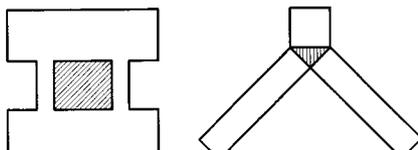
分類	コアタイプ	構造計画の要点
中央型		<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造コアとしては最も好ましいタイプ。</li> <li>・高層建物では外周フレームをベアリングウォールとして、中央コアと一体化した耐震架構とすることが多い。</li> </ul>
外周型		<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震壁は外周コアにとることになるので、コアの間隔が大きいときは、中央部の架構の耐震性を検討必要。</li> <li>・コアは剛性の高い柱とみなすことができ、コア間に大型の梁をかけ、巨大な架構を組むことができる。</li> </ul>
片寄型		<ul style="list-style-type: none"> <li>・重心と剛心を一致させ、偏心を防ぐ計画が必要。</li> <li>・あまり高層には適合ではない。</li> </ul>
分離型		<ul style="list-style-type: none"> <li>・コアの接合部での変形が過大にならないような計画が必要である。</li> <li>・耐震壁は外周部のみとなる場合が多い。</li> </ul>
特殊型		<ul style="list-style-type: none"> <li>・全体の架構が水平力を負担する。</li> </ul>

Table 5.1 コアのタイプと構造計画

### 5.2.2 基礎の反力（基礎の浮き上がり）

耐震壁に作用するせん断力 $Q$ により柱に軸方向力が発生し、Fig 5.1 の(a)のように柱が伸び縮みし、梁が傾く。

$$C = T = \frac{Qh}{l} \quad (5.1)$$

連層の耐震壁であれば Fig 5.1 の(a)の傾斜が上層の耐震壁に影響し、その変形を大きくする。スパン長が小さいか、高さが大きいと式(5.1)により軸方向力がより大きくなり曲げ変形も大きくなる。あまりにも圧縮力 $C$ と引張力 $T$ が大きくなりすぎると Fig 5.1 の(b)のように $C$ 側では基礎が沈下し、 $T$ 側では浮き上がる傾向が生じ、上部耐震壁の曲げ変形が大きくなる。

しかし、Fig 5.1 の(c)のように地下壁がある場合は、その引き抜き力に対して地下壁が抵抗するので、この場合の耐震壁は Fig 5.1 の(b)に比べてかなり大きいせん断力 $Q$ に抵抗することができる。このようにブレースによる柱脚の引き抜き力は実際の設計において重要な設計条件であり、最適化問題においても Fig 5.1 の地盤の支持反力を求め、その反力が収まるような制約条件を考慮する必要がある。

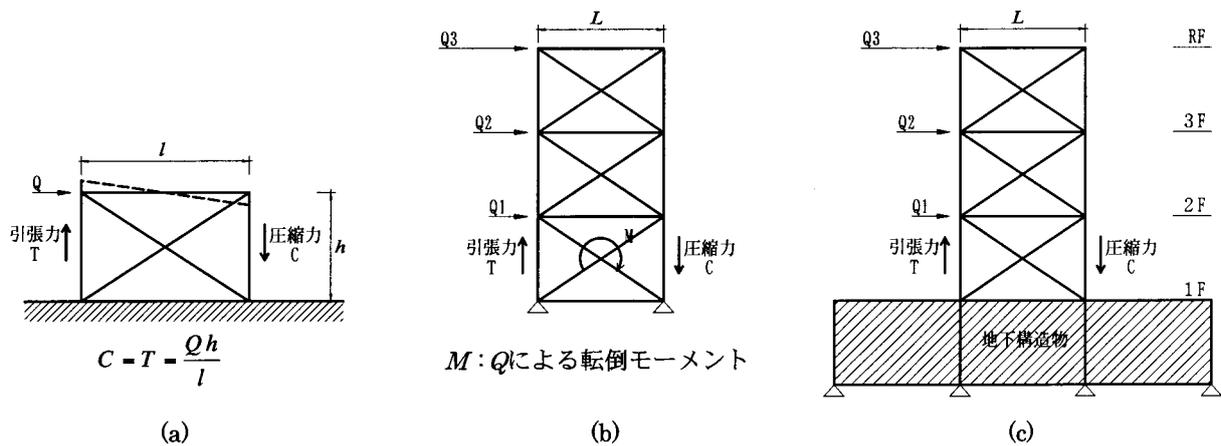


Fig 5.1 耐震壁の引き抜き効果

本研究では、マクロな設計問題に最適設計手法を適用する方法論を提示することに主眼を置いており、最も標準的な問題として、柱脚の引き抜きに関する条件を考慮しない場合のブレース付き骨組の最適化問題を扱う。ブレース付き骨組の最適解の基本的な性質が明らかになれば、その性質を基準として、柱脚の引き抜きといったその他の条件を付加することで、最適解にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることができる。

### 5.3 ブレース付き平面モデルの最適解の基本的特性

ブレース付き平面骨組モデルの最適解の基本性質を調べるため、同一スパン長、無限のスパン数を持つ平面骨組の中に1スパンのみブレースを配置させた平面骨組モデルの最適化を行ない、その最適解の特性について調べる。ブレース付き平面モデルの設定や設計条件、荷重の設定、鋼材量最小化問題に設定に関しては、1.4節の対象モデルの設定を適用して最適化を行なう。モデルの解析時に適用した設計条件を整理すると以下の通りである。

#### 設計条件

- ・制約条件として、以下の条件を設定する。

①断面積上下限值制約：梁断面積： $2.635 \times 10^3 \leq A \leq 3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$

柱断面積： $4.563 \times 10^3 \leq A \leq 1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$

ブレース断面積： $3.801 \times 10^2 (\text{mm}^2) \leq A$  (なるべくブレースに多くの水平力を分担させるためにブレースの上限値を設けない)

②層間変形角制約： $|R| \leq 1/200$

③保有水平耐力制約は  $D_s = 0.3$ 、 $F_{cs} = 1.0$ 、 $Q_d$  は1次設計用荷重と同じ分布形とするため、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  は  $D_s$  値に比例する。 $Q_u$  は最大層間変形角が1/75のときに各層に生じる層せん断力とする。

- ・モデルの対称軸に対し、対称な位置にある部材の断面積を同一とする (Fig 1.4 参照)。
- ・梁、柱の初期断面は上限値 (梁： $3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、柱： $1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$ )、ブレースは指定値 ( $6.353 \times 10^3 (\text{mm}^2)$ ) を用いる。
- ・ブレースは連層 X 型配置、ピン接合とし、ブレースが引張のみに抵抗するように設計する。
- ・最適化手法<sup>5)</sup>としては勾配射影法を用いる。

#### 5.3.1 最適解を決定する制約条件

Fig 5.2 のブレース付き平面モデルに対し、層数は5層 (1層～5層の階高：各4m)、スパン長 ( $l$ ) は10m、スパン数 ( $n$ ) は11及び21スパンの2種類の平面骨組を考え、中央スパンに X 型ブレースが連層に配置されている場合の最適化を行なう。作用させた荷重については、純ラーメン平面骨組と同様に立体モデルから想定した Y 方向の建物長さ 38m、Y 方向の6スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

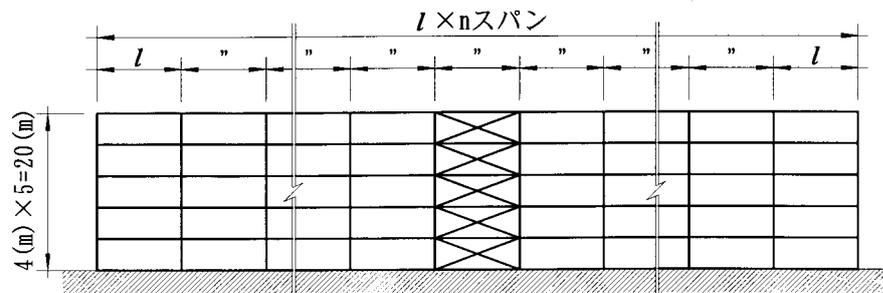


Fig 5.2 ブレース付き平面骨組モデル

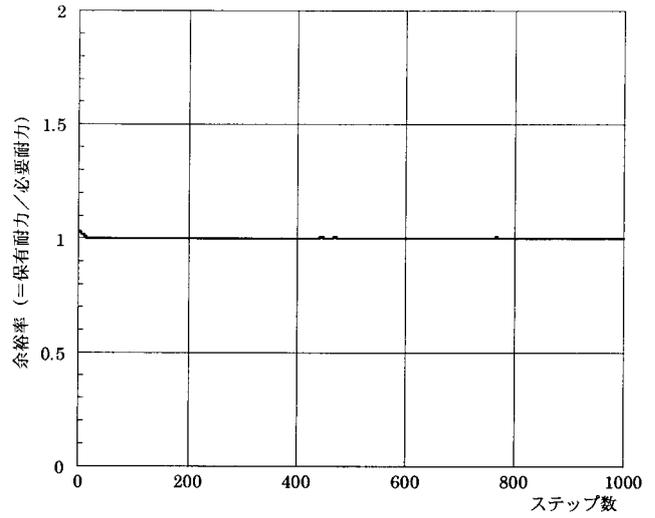
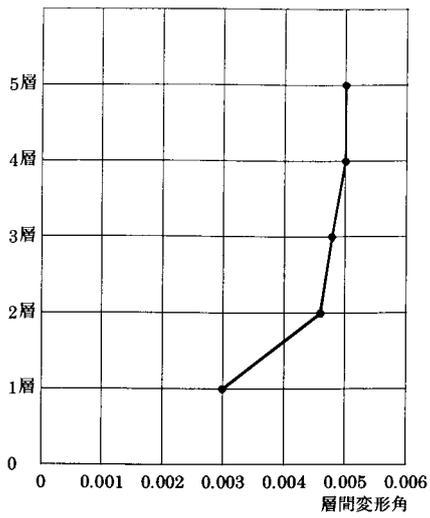
## 最適化の結果

Fig 5.2 のブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果を Fig 5.3、Fig 5.4 に示す。各々の図は最適解に対して、制約条件満足の状態を示す。

- ① 層間変形角 ( $|R| \leq 1/200$ )
- ② 2次設計用荷重時の保有耐力余裕率 (保有水平耐力  $Q_u$  は最大層間変形角が  $1/75$  となるときに各層が負担する層せん断力として評価する。このときの荷重係数を  $\lambda_u$  とすれば、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回る条件は  $1 \leq \lambda_u$  と表現できる。)
- ③ 各部材の最適解の断面積分布図 (各部材の断面積を線の太さで表わす)
- ④ 2次設計用荷重時の軸力の分布図 (灰色は各部材の軸力の大きさを表わす。大きさは相対的な量として表現した。)
- ⑤ 2次設計用荷重時のモーメント分布とヒンジ図 (梁は分布荷重を作用させるため、モーメントは2次曲線となるが、便宜上各節点での値を直線で結んでいる。大きさは相対的な量として表現した。黒点は各部材のヒンジの分布を示す)
- ⑥ 1次設計時の短期応力度比 (灰色は応力度比制約が等号満足する部材を表わす)
- ⑦ 1次設計時の長期応力度比 (灰色は応力度比制約が等号満足する部材を表わす)

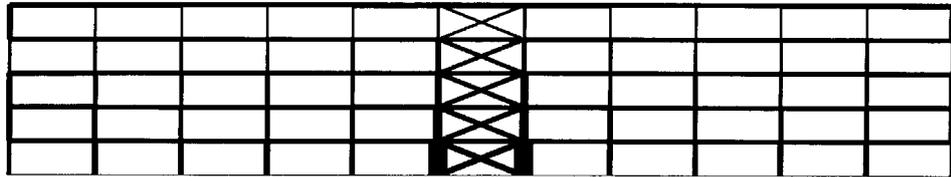
Fig 5.3、Fig 5.4 の最適化の結果により、以下のことが分かる。

- ①の図で、低層部では層間変形角に対して余裕があり、高層部になるほど厳しくなっている。
- ②の図で、2次設計用荷重時の保有耐力余裕率の制約はほぼ1に近くなって等号満足している。
- ③の図で、断面積の分布図では、ブレースの上限値を設けていないために水平荷重の多くをブレースが負担し、ブレースとブレースを支持するために周りの柱の断面積が大きくなっていることがいえる。他の部材はほとんど均等な断面積の分布となっている。
- ④⑤の図で、軸力とモーメントはブレースとブレースの周りの柱で大きく、荷重がブレースに集中していることがいえる。低層部の梁、ブレースのほとんどは塑性ヒンジが形成されている。
- ⑥⑦の図で、柱は短期応力、梁は長期応力の制約が等号で満足されている部材が多く、これらの条件により部材の断面が決まることがいえる。

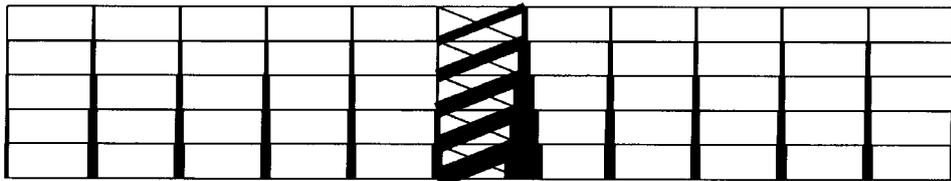


① 1次設計用層間変形角

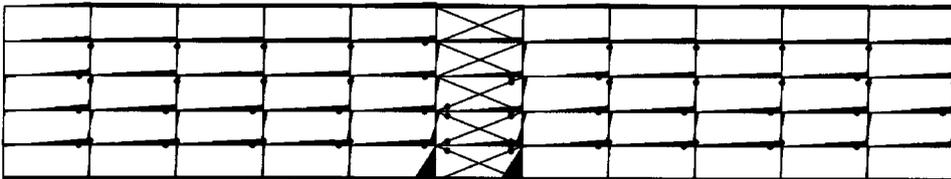
② 2次設計用荷重時保有耐力余裕率



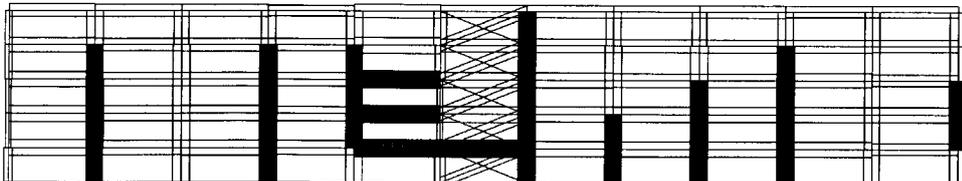
③ 断面積の分布



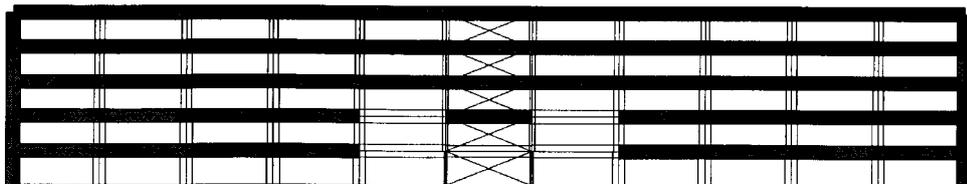
④ 2次設計用軸力



⑤ 2次設計用モーメント

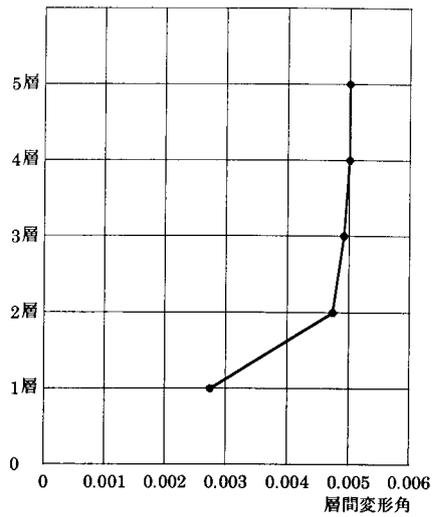


⑥ 1次設計短期応力度比

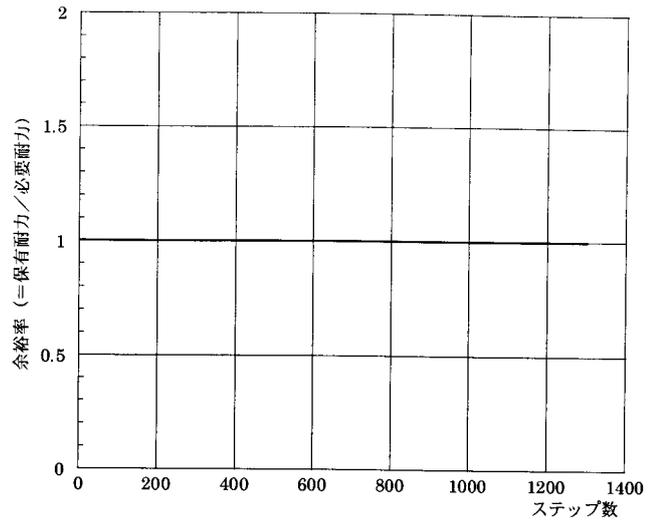


⑦ 1次設計長期応力度比

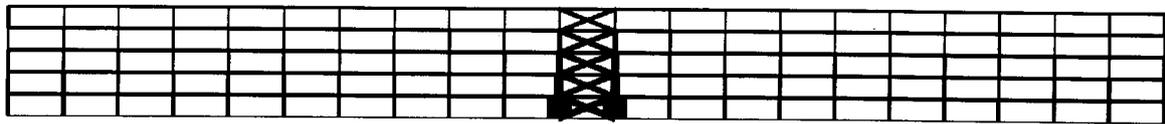
Fig 5.3 11 スパン、5 層ブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果



① 1次設計用層間変形角



② 2次設計用荷重時保有耐力余裕率



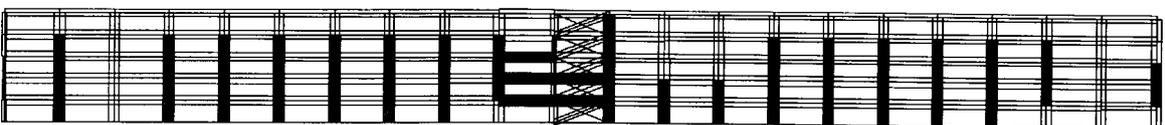
③ 断面積の分布



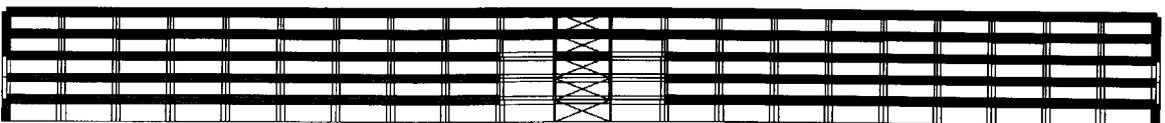
④ 2次設計用軸力



⑤ 2次設計用モーメント



⑥ 1次設計短期応力度比



⑦ 1次設計長期応力度比

Fig 5.4 21スパン、10層ブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果

また、Table 5.2 には 11 スパンのブレース付き骨組モデルの梁と柱の最適解の断面積の分布を示す。モデルが対称であるために左側の 1/2 区間の部材について、各々の部材の鋼材量と基準値に対する比を表わす。ブレース設置区間は、梁は 6 番目のスパン、柱は 6、7 列の柱である。

梁の断面積の分布 (m<sup>3</sup>)

位置	1 番目スパン	2 番目スパン	3 番目スパン	4 番目スパン	5 番目スパン	6 番目スパン
1 層	0.128	0.121	0.118	0.118	0.127	0.129
	8%	2%	0%	0%	7%	9%
2 層	0.122	0.119	0.118	0.118	0.125	0.118
	3%	1%	0%	0%	6%	0%
3 層	0.125	0.121	0.118	0.118	0.123	0.118
	6%	3%	0%	0%	4%	0%
4 層	0.122	0.121	0.118	0.118	0.122	0.119
	4%	2%	0%	0%	3%	1%
5 層	0.122	0.122	0.118	0.118	0.121	0.120
	3%	3%	0%	0%	2%	1%
合計	0.619	0.603	0.590	0.589	0.616	0.604
	5%	2%	0%	0%	4%	2%

柱の断面積の分布 (m<sup>3</sup>)

位置	1 列	2 列	3 列	4 列	5 列	6 列
1 層	0.0435	0.0614	0.0558	0.0552	0.0587	0.0212
2 層	0.0550	0.0534	0.0473	0.0470	0.0511	0.0969
3 層	0.0595	0.0436	0.0393	0.0385	0.0422	0.0751
4 層	0.0228	0.0356	0.0288	0.0279	0.0349	0.0538
5 層	0.0598	0.0183	0.0183	0.0183	0.0183	0.0247
合計	0.241	0.212	0.189	0.187	0.205	0.462
	29%	14%	1%	0%	10%	147%

Table 5.2 11 スパンのブレース付き平面骨組モデルの梁、柱の断面積の分布

Table 5.2 より、梁の断面積はブレース設置区間の左右の 1 スパンとモデルの最外側の 1 スパンを除き、その他の全スパンでほぼ均等な断面積(0.118m<sup>2</sup>)の分布を示す。その理由としては、Fig 5.3、Fig 5.4 の結果から梁は 1 次設計長期応力の制約により部材の断面積が決まることが考えられる。均等部の梁断面積の代表値を 0.118m<sup>2</sup> とし、代表値からの差が 3% 以内にある梁の欄に灰色影を施した。

柱の断面積はブレースに接している部材の断面積が他の部材と比べて非常に大きく、最外側の柱も多少大きくなっている。その理由としては、大きな水平力を負担しているブレースを支持するた

めに大きい断面が必要となることが考えられる。その他の区間では、各列の柱の断面積の和はブレースと最外側の柱の影響を受けない、十分に離れた範囲でほぼ一定の断面積の分布を表わしている。

均等断面積分布を有する領域が存在するという性質は 21 スパンのブレース付き骨組モデルにも共通している。均等な断面積分布を持つ領域はスパン数が多くなるほど、ブレースの影響を受けない範囲が広いので均等な断面積の範囲が拡大されている。

スパン数	最適総鋼材量 ( $W_{total}$ , cm <sup>3</sup> )	ブレースの鋼材量 ( $W_{brace}$ , cm <sup>3</sup> )	超過分の鋼材量(cm <sup>3</sup> )
11 スパン	1.09E+07	1.26E+06	2.14E+06
21 スパン	2.06E+07	2.43E+06	4.11E+06

Table 5.3 ブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果

Table 5.3 は 11 スパンと 21 スパンのブレース付き平面モデルの最適化で求めた総鋼材量、ブレースの鋼材量を示している。

11 スパンの各鋼材量から得られた 1 スパン当りの鋼材量 ( $W_{total}/11$ スパン,  $W_{brace}/11$ スパン) を用いて、21 スパンのブレース付き骨組モデルの鋼材量を推測 ( $W_{total} \times 21/11$ ,  $W_{brace} \times 21/11$ ) した結果を Table 5.4 に示す。Table 5.4 より、11 スパンから推測した 21 スパンのブレース付き骨組モデルの各鋼材量は最適化で求めた結果と約 1%位の誤差であり、最適解の総鋼材量とブレースの鋼材量はモデルの規模にほぼ比例していることが分かる。このような比例関係は柱、梁、ブレースの各部材の鋼材量と均等部の鋼材量の差 (超過分の鋼材量) においても同じ関係である。

21 スパンプレース付き骨組	予測値 (cm <sup>3</sup> )	比 (予測値/最適解の値)
総鋼材量	2.08E+07	101.16%
ブレースの鋼材量	2.40E+06	98.83%
超過分の鋼材量	4.08E+06	99.39%

Table 5.4 11 スパンと 21 スパンのブレース付き平面骨組モデルの鋼材量の比例関係

以上の結果、ブレース付き平面骨組モデルは次の性質があることがいえる。

1. より多くの水平力をブレースに負担させるためにブレースの上限値を設定していないブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果は、ブレースとブレースを支持するために周りの部材の断面積が大きくなり、以外の部材 (梁、柱) はほぼ均等な断面積の分布を表わしている。
2. 最適総鋼材量、ブレースの鋼材量はスパン数の増加 (スパン長は同一) によるモデルの規模にほぼ比例している。その比例関係は均等領域の断面積の超過分の鋼材量に関しても同じである。

### 5.3.2 ブレース位置の影響

Fig 5.5 のブレース付き平面骨組モデルを考える。層数、スパン数 ( $n$ )、スパン長 ( $l$ ) を固定した骨組に対して Fig 5.5 のようにブレースの位置を変化させ、最適総鋼材量とブレースの位置による関係を調べる。Fig 5.5 の平面骨組モデルに対して、層数は 5 層、スパン長 ( $l$ ) は 7.6(m)、スパン数

(n)は6スパンの場合について、ブレースの位置による各部材の鋼材量の変化を調べ、その結果をTable 5.5に示す。Y方向の建物長さは38(m)、Y方向の6スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

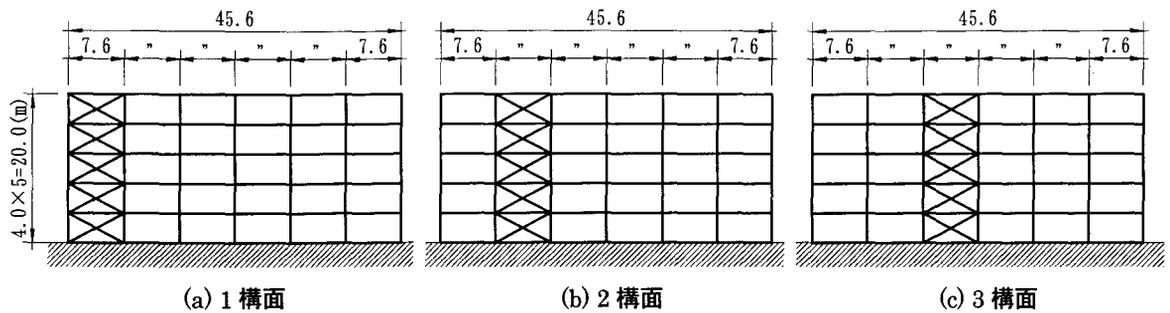


Fig 5.5 ブレース位置の異なる平面骨組モデル

Fig 5.5の純フレームに関しては同じスパン長の均等スパン割り(左右対称)であるため、ブレースの位置を1構面から3構面まで変化させる。しかし、ブレース付き平面骨組モデルとしてはブレースの配置により対称性がなくなるため、左側、右側の両方向から水平荷重を載荷させる。

Table 5.5より、モデルの各々の部材の最適鋼材量(梁、柱、ブレース)や総鋼材量は大きな差がなく、最適鋼材量はブレースの位置にほとんど影響されていないことが分かる。この結果は、他のモデル(10層の場合や4スパン、8スパンの場合のブレース付き平面骨組モデル)を最適化した結果でも同じであった。従って、本章で扱うブレース付き平面骨組モデルはブレースの位置に大きな影響を受けないとみなし、モデルの分析を行なう。

ブレースの位置	梁の鋼材量(m <sup>3</sup> )	柱の鋼材量(m <sup>3</sup> )	ブレースの鋼材量(m <sup>3</sup> )	総鋼材量(m <sup>3</sup> )
(a) 1 構面	1.94	1.30	0.472	3.71
(b) 2 構面	1.94	1.30	0.461	3.71
(c) 3 構面	1.93	1.33	0.456	3.72

Table 5.5 ブレース付き平面骨組モデルの最適化の結果

Fig 5.6はFig 5.5のモデルの最適化で得られた各部材の断面積を線の太さで表わした。ブレースの位置がどこであっても、各々のモデルはブレースの周りの部材の断面積が大きく、他の部材はほぼ均等になっている。それは5.3.1節のブレースの性質で得られた結果と同じ結果である。

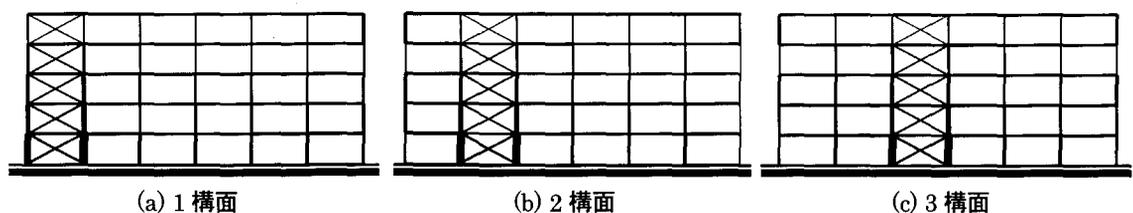


Fig 5.6 ブレース付き平面骨組モデルの断面積の分布

### 5.3.3 ブレース間隔の影響

Fig 5.7 のブレース付き平面骨組モデルを考える。層数、スパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )を固定した骨組に対して同数のブレースがお互いに影響を受けないように十分に離して配置させた場合、ブレース間の距離による最適総鋼材量の変化を調べる。Fig 5.7 のブレース付き平面骨組モデルに対して、層数( $N_H$ )は5層、10層、スパン長( $l$ )は8(m)、12(m)、スパン数( $n$ )は15スパンの場合について、ブレースの間隔による最適総鋼材量の変化を調べ、その結果を Table 5.6 に示す。各々のモデルに対して、Y方向の建物長さは38(m)、Y方向の6スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

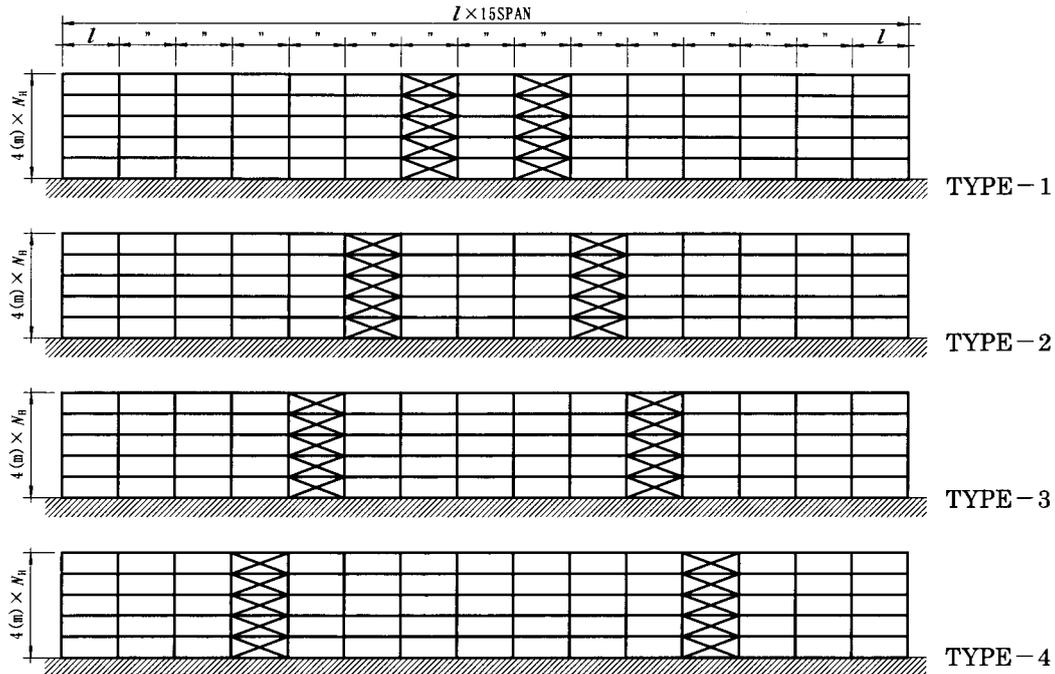


Fig 5.7 ブレースの間隔が異なる平面骨組モデル

Table 5.6 より、モデルの各タイプごとの最適総鋼材量をみると5層モデルはほとんど差がなくほぼ同じ鋼材量を示している。しかし、10層モデルでは TYPE-2、3、4 の最適総鋼材量はほぼ一致しているが、TYPE-1 の最適総鋼材量は小さい値になっている。その理由としては、ブレースが近接しているため、ブレースを中心とした水平力支持区間がお互いの重複し、鋼材量の低減効果が起きたと考えられる (Fig 5.8 参照)。ブレースの水平力支持区間の範囲は高層モデルになるほど広がる。

また、モデルの各タイプごとのブレースの鋼材量は、5層ではほぼ同じ値であるが、10層では8(m)スパンの TYPE-2 のモデルで若干の差がみられる。それは高層でのアスペクト比の増加による転倒モーメントによる影響が考えられる。しかし、ほとんどのモデル (他のスパン長、スパン数のモデルの解析結果でも) で誤差はないか、あっても10%以下であった。

以上の結果より、最適総鋼材量やブレースの鋼材量はお互いのブレースが十分に離れていればその位置に影響を受けないといえる。

層数	スパン長 TYPE	ブレースの鋼材量(m <sup>3</sup> )		最適総鋼材量(m <sup>3</sup> )	
		8(m)	12(m)	8(m)	12(m)
5層	TYPE-1	1.27	2.23	9.82	20.79
	TYPE-2	1.28	2.23	9.82	20.80
	TYPE-3	1.27	2.27	9.82	20.80
	TYPE-4	1.28	2.24	9.83	20.81
10層	TYPE-1	4.48	8.76	29.96	57.59
	TYPE-2	4.08	9.54	31.50	59.03
	TYPE-3	4.52	9.54	31.59	59.04
	TYPE-4	4.52	9.56	31.58	59.03

Table 5.6 最適総鋼材量とブレースの鋼材量

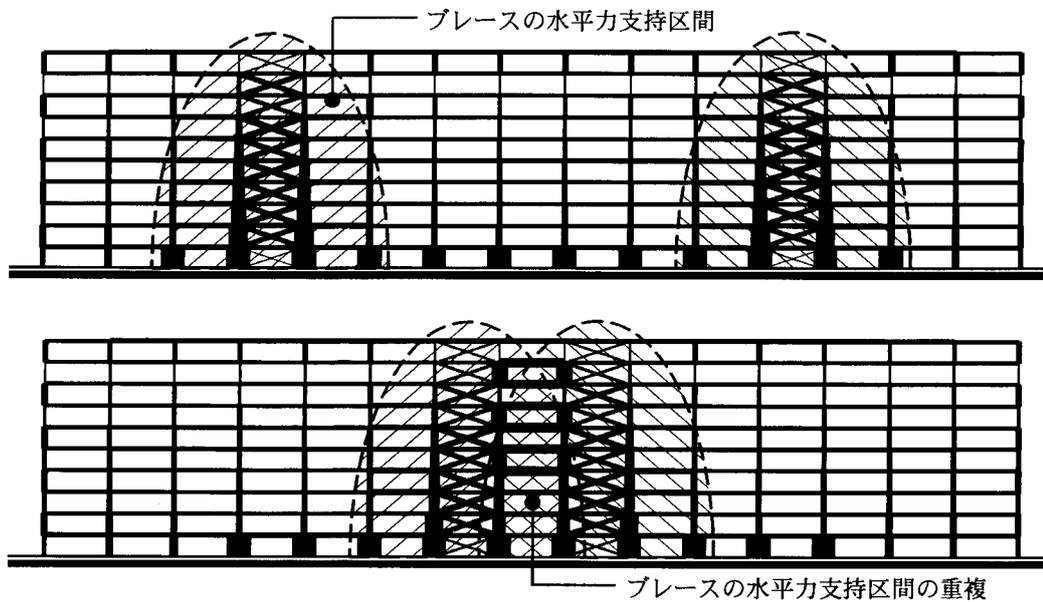


Fig 5.8 ブレース支持区間とその重複効果

## 5.4 骨組サイズの異なるブレース付き平面モデルの最適解特性

純ラーメン骨組モデルでは、スパン長( $l$ )、スパン数( $n$ )、荷重レベルをパラメタとして変化させた場合の各々の最適解を相互比較することで得られた特性を用いてモデルの定式化を行なった。ここでは、ブレース付き平面骨組モデルについて同様な手法を用いて、各パラメタに対する最適解の特性を引き出すことを試みる。

### 5.4.1 スパン数の変化による影響

層数とスパン長( $l$ )を固定したブレース付き平面骨組に対して、そのスパン数を1から $n$ まで変化させることを考える。そのモデルで得られた最適化の結果を用いて、スパン数と最適鋼材量に対する最適解の特性を調べる。ブレース付き骨組は純ラーメン骨組に対して、ブレースの位置によりその性質が大きく変わる可能性がある。従って、本節では次の3つのタイプのモデルを扱うことにする。

- 1) モデルの中央に1列のブレースを配置させる場合 (スパン数が奇数)
- 2) モデルの中央(2列)または両端(各々1列)にブレースを配置させる場合 (スパン数が偶数)
- 3) 非対称配置のブレース群を含んだ場合

#### モデルの中央に1列のブレースを配置させる場合

Fig 5.9 の中央1スパンにブレースを配置させた平面骨組モデルを考える。層数とスパン長( $l$ )を固定した骨組に対して Fig 5.9 のように1から $n$ までスパン数を変化させる。Fig 5.9 のモデルに対して、層数が5層と10層、スパン長( $l$ )が6(m)、8(m)と12(m)の場合について、スパン数の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 5.10、Fig 5.11 に示す。各々のモデルに対して、Y方向の建物長さは38(m)、Y方向の6スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

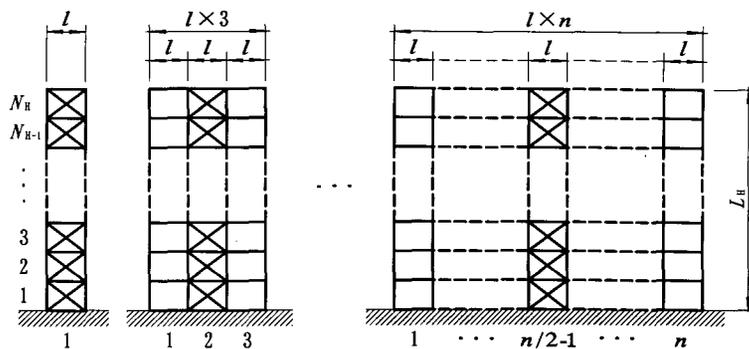


Fig 5.9 スパン数の異なるブレース付き平面骨組モデル (1スパン)

Fig 5.10 にスパン数を1から11まで変化させたときの最適総鋼材量の変化を示した。Fig 5.10 より、ブレース付き平面骨組モデルのスパン長と層数を固定した場合、スパン数と最適総鋼材量には原点を通る線形関係が成立していることが分かる。

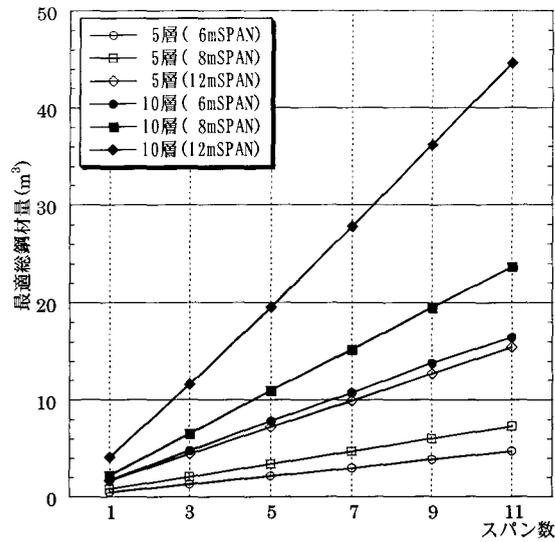


Fig 5.10 スパン数と最適総鋼材量との関係

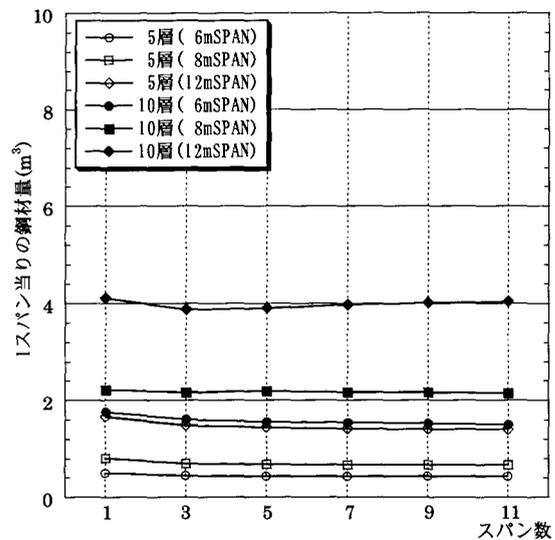


Fig 5.11 各モデルの1スパン当りの最適鋼材量

Fig 5.11 は各平面モデルの最適総鋼材量 ( $W_{opt}$ ) をスパン数  $n$  で割った場合のモデルの1スパン当りの鋼材量 ( $W_{opt}/n$ ) を示した。Fig 5.11 より、各々のモデルの1スパン当りの鋼材量は変化がほとんどなく、ほぼ一定になっている。その性質は、純ラーメン平面骨組モデルとの大きな違いである。

#### モデルの中央 (2列) または両端 (各々1列) にブレースを配置させる場合

Fig 5.12 のように2スパンのブレースを配置させた平面骨組モデルを考える。Fig 5.12 の上図はその2スパンのブレースを結合して中央配置させる場合、下図はその2スパンのブレースを各々離して両端に配置させる場合である。いずれに関してもブレースの配置方法は保ったまま、層数とスパン長 ( $l$ ) を固定した骨組に対して2から  $n$  までスパン数を変化させる。

Fig 5.12 のモデルに対して、層数が5層と10層、スパン長 ( $l$ ) が6(m)、8(m)と12(m)の場合について、スパン数の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 5.13、Fig 5.14、Fig 5.15、

Fig 5.16 に示す。各々のモデルに対して、Y 方向の建物長さは 38(m)、Y 方向の 6 スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

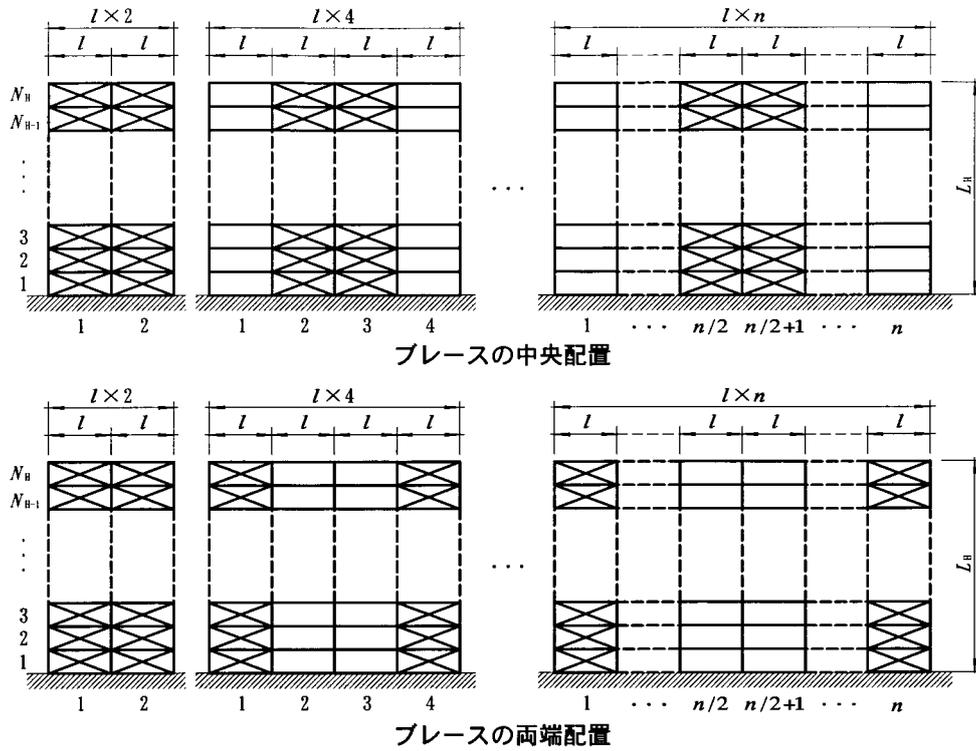


Fig 5.12 スパン数の異なるブレース付き平面骨組モデル (2 スパン)

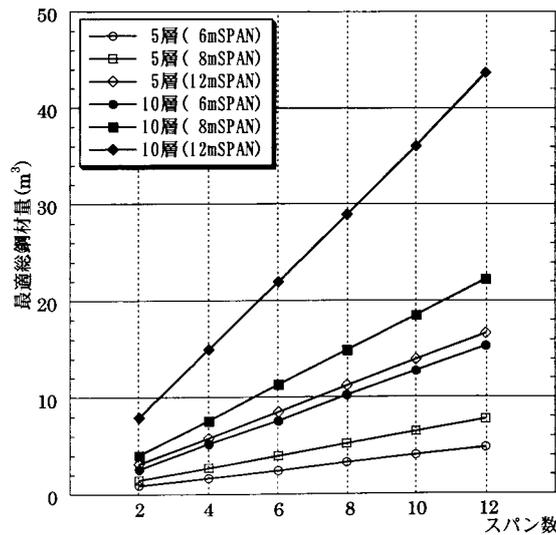


Fig 5.13 スパン数と最適総鋼材量との関係 (ブレースの中央配置)

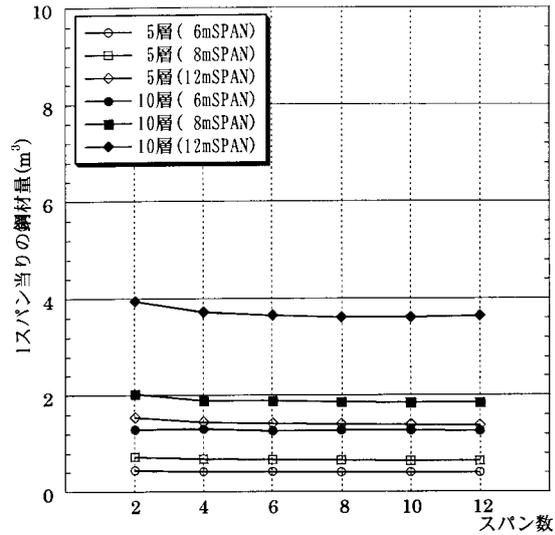


Fig 5.14 各モデルの1スパン当りの最適鋼材量（ブレースの中央配置）

Fig 5.13, Fig 5.15 にスパン数を2から12まで変化させたときの最適総鋼材量の変化を示した。各々の図より、ブレース付き平面骨組モデルのスパン長と層数を固定した場合、スパン数と最適総鋼材量には原点を通る線形関係が成立していることが分かる。また、ブレースを両端配置させた場合より中央配置させた場合の最適総鋼材量が低くなっており、5.3.1節の結果と一致している。

Fig 5.14, Fig 5.16 は各平面モデルの最適総鋼材量( $W_{opt}$ )をスパン数 $n$ で割った場合のモデルの1スパン当りの鋼材量( $W_{opt}/n$ )を示した。各々の図より、各々のモデルの1スパン当りの鋼材量は変化がほとんどなく、ほぼ一定になっている。

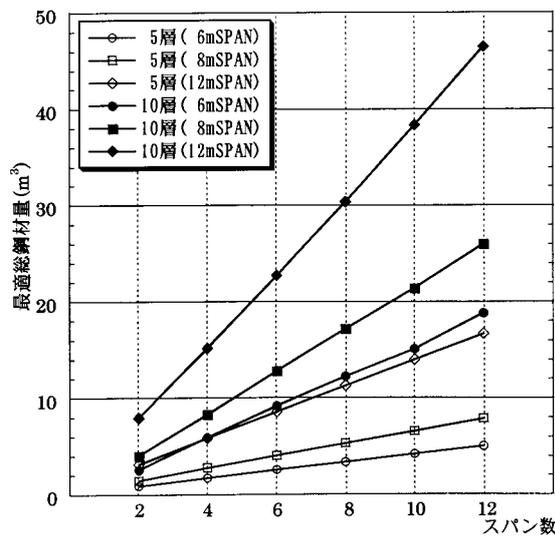


Fig 5.15 スパン数と最適総鋼材量との関係（ブレースの両端配置）

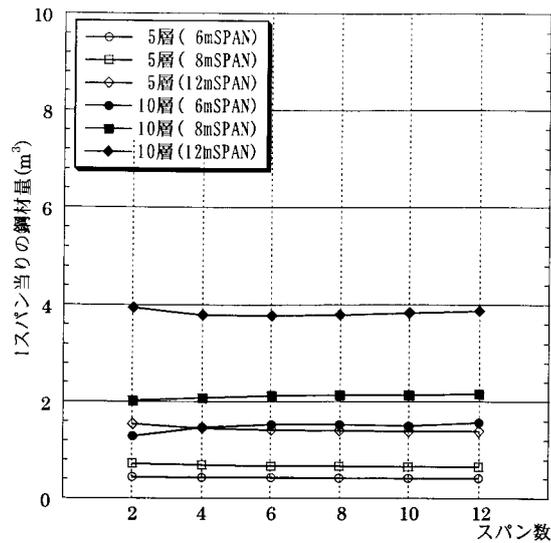


Fig 5.16 各モデルの1スパン当りの最適鋼材量（ブレースの両端配置）

### 非対称配置のブレース群を含んだ場合

Fig 5.17 のように非対称配置のブレース群（2 スパンブレース+ブレース間スパン数 1 スパン+ 1 スパンブレース）を含んだ平面骨組モデルを考える。層数とスパン長( $l$ )を固定した骨組に対して両側のスパン数を増やし、4 から  $n$  までスパン数を変化させる。Fig 5.17 のモデルに対して、層数が 5 層と 10 層、スパン長( $l$ )が 8(m)の場合について、スパン数の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 5.18, Fig 5.19 に示す。各々のモデルに対して、Y 方向の建物長さは 38(m)、Y 方向の 6 スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

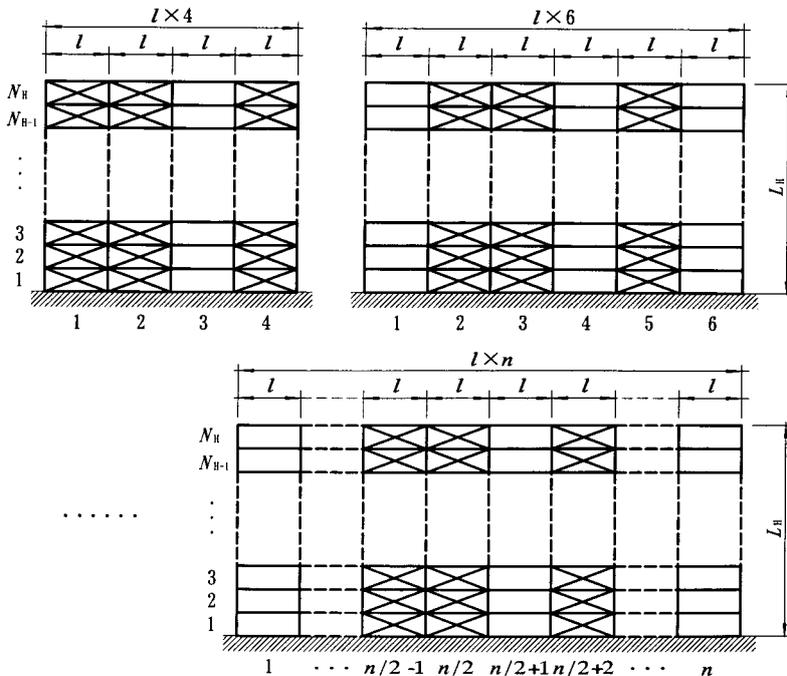


Fig 5.17 非対称配置のブレース群を含んだ平面骨組モデル

Fig 5.18 にスパン数を 4 から 14 まで変化させたときの最適総鋼材量の変化を示した。Fig 5.18 より、ブレース付き平面骨組モデルのスパン長と層数を固定した場合、非対称配置のブレース群を含んだ平面骨組モデルに関してもスパン数と最適総鋼材量には原点を通る線形関係が成立していることが分かる。

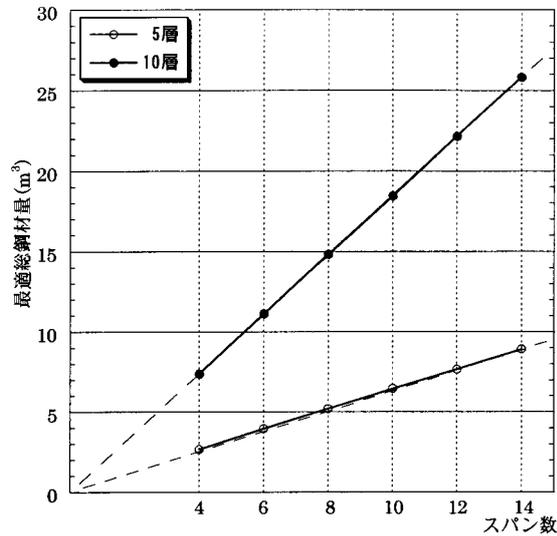


Fig 5.18 非対称配置のブレース群を含んだ平面モデルのスパン数と最適総鋼材量との関係

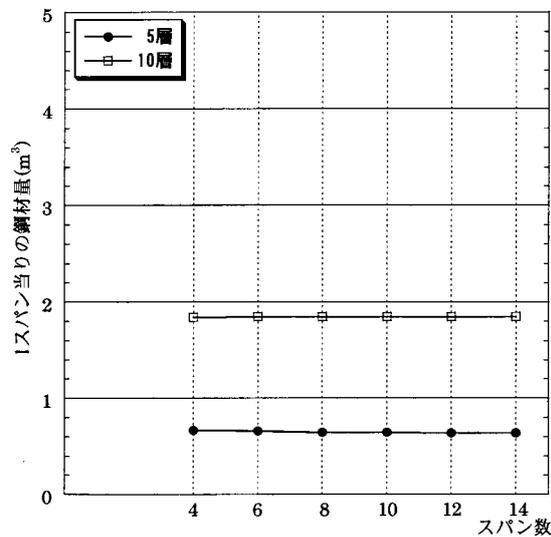


Fig 5.19 非対称配置のブレース群を含んだ平面モデルの1スパン当りの最適鋼材量

Fig 5.19 は各平面モデルの最適総鋼材量( $W_{opt}$ )をスパン数 $n$ で割った場合のモデルの1スパン当りの鋼材量( $W_{opt}/n$ )を示した。Fig 5.19 より、非対称配置のブレース群を含んだ平面骨組モデルに関しても各々のモデルの1スパン当りの鋼材量ほぼ一定になっている。

#### 5.4.2 スパン長の変化による影響

Fig 5.20 の平面骨組モデルを考える。層数と、スパン数( $n$ )を固定した骨組について Fig 5.20 のように 4(m)から  $l$ (m)までスパン長を変化させる。その結果から平面骨組モデルのスパン長と最適鋼材量の関係を調べる。Fig 5.20 の平面骨組モデルに対して、層数が 5 層、スパン数( $n$ )は 3 スパン固定で、スパン長を 4(m)から 12(m)まで 2m の間隔で変化させたときの、スパン長の変化による最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 5.21 に示す。Y 方向の建物長さは 38m、Y 方向の 6 スパンの場合の平面モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

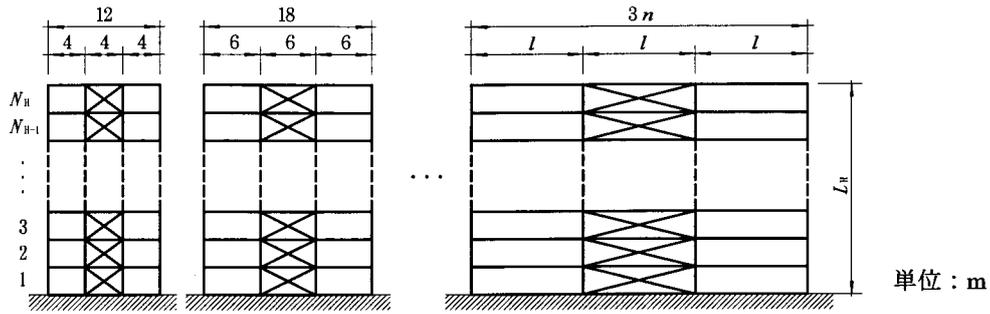


Fig 5.20 スパン長の異なるブレース付き平面骨組モデル

Fig 5.21 より、スパン長と最適総鋼材量の関係は非線形の曲線（3 次曲線とした方が 2 次曲線より誤差を小さくすることができ、本論ではスパン長と最適総鋼材量を 3 次曲線とみなす）となり、スパンが長くなるほど最適総鋼材量の増加の割合は加速的に増大している。

平面骨組モデルの柱及び梁の総鋼材量の変化をみると、スパンが短い場合は梁より柱の鋼材量が占める比率が大きい。梁の鋼材量の増加の割合は柱に比べて大きく、スパン長が 6m の時に柱と梁の鋼材量がほぼ同じになる。スパン長が 6m を超えると柱より梁の鋼材量が大きくなるのが分かる。

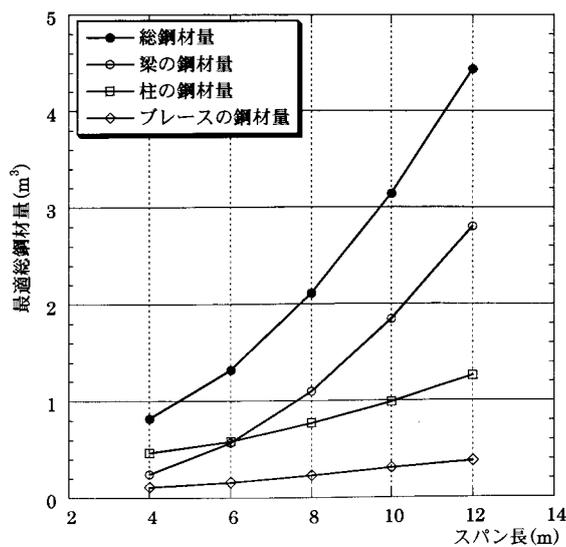


Fig 5.21 スパン長と最適総鋼材量との関係 ( $n = 3$ )

### 5.4.3 ブレース付き平面骨組モデルの最適鋼材量の近似予測式

#### ブレース付き平面骨組モデルの近似予測式の定式化

5.4.1、5.4.2 節ではブレース付き平面骨組の規模を定めるパラメタとして、スパン数  $n_s$  とスパン長  $l_s$  に着目してモデルの分析を行なった。その分析より、各パラメタに対して次の性質が得られた。

- 1) スパン数  $n_s$  のみ変化させた場合、ブレース付き平面骨組モデルの最適総鋼材量  $\tilde{W}$  は  $n_s$  に関して線形となる。

$$\tilde{W}(n_s, l_s) = g(l_s) n_s \quad (5.2)$$

- 2) スパン長  $l_s$  のみ変化させた場合、ブレース付き平面骨組モデルの最適総鋼材量  $W$  は  $l_s$  に関する非線形曲線となり、これは 3 次曲線によって精度良くフィッティングできる。

$$W(n_s, l_s) = a_1(n_s)l_s^3 + a_2(n_s)l_s^2 + a_3(n_s)l_s + a_4(n_s) \quad (5.3)$$

以上の最適化特性を利用して、ブレース付き平面骨組モデルの定式化を行なうと、式(5.4)のようにスパン数  $n_s$  とスパン長  $l_s$  に関する 3 次曲面として表わすことができる。

$$W(n_s, l_s) = \alpha_1 n_s l_s^3 + \alpha_2 n_s l_s^2 + \alpha_3 n_s l_s + \alpha_4 n_s \quad (5.4)$$

式(5.4)は、任意のスパン数  $n_s$ 、スパン長  $l_s$  のブレース付き平面骨組について、最適総鋼材量を評価する予測式である。少なくとも 4 つの平面骨組モデルの解を用いてフィッティングすることにより、4 つの係数 ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ) を決めることができる。

$$\{W(n_s, l_s)\} = \begin{bmatrix} n_1 l_1^3 & n_1 l_1^2 & n_1 l_1 & n_1 \\ n_2 l_2^3 & n_2 l_2^2 & n_2 l_2 & n_2 \\ n_3 l_3^3 & n_3 l_3^2 & n_3 l_3 & n_3 \\ n_4 l_4^3 & n_4 l_4^2 & n_4 l_4 & n_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

#### 定式化の検証

任意のブレース付き平面骨組モデルのパラメタ (スパン数  $n_s$ 、スパン長  $l_s$ ) の組み合わせに対して平面骨組モデルの予測式から求めた鋼材量の値と、実際に最適化を行なった結果との比較を行い、式(5.4)の妥当性を示す。

問題を解くために必要な 4 つのサンプル点については、現実的なスパン数を考慮して 3 から 9 スパンの範囲で定める。そのサンプル点を用いて得られた各係数を式(5.6)に示す。予測モデルの近似制度はサンプル点の選び方に依存するため、サンプル点の優劣を評価して適当なサンプル点を選ぶ手法も用いられる。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -1185.11 \\ \alpha_2 &= 42106.42 \\ \alpha_3 &= -297648.44 \\ \alpha_4 &= 967439.28 \end{aligned} \quad (5.6)$$

式(5.4)に式(5.6)の係数を代入し、任意のブレース付き平面骨組モデルに対して最適総鋼材量の予測値を求める。

Table 5.7 にブレース付き平面骨組モデルの鋼材量の予測値と実際に最適化を行ない得られた最適総鋼材量を示す。灰色は式(5.4)の係数を求めるために利用したサンプル点である。その結果、誤差は大きくて 5%、ほとんどのモデルで 2~3%であり、ブレース付き平面骨組モデルの提案式(5.4)

により実用上十分な精度でモデルの鋼材量が予測可能であるといえる。他の関数や回帰手法を用いて更に精度の良いフィッティングも可能であるが、本論文の目的を考えるとこの程度の精度で十分であると考えられる。

スパン数 ( $n_s$ )	スパン長 ( $l_s$ )	最適総鋼材量 ( $W_{opt}$ )	予測値 ( $W$ )	最適総鋼材量との比 ( $W/W_{opt}$ )
3	6(m)	1.32	1.32	100.00%
5		2.16	2.21	102.17%
7		3.02	3.09	102.31%
9		3.88	3.97	102.39%
11		4.75	4.86	102.22%
3	8(m)	2.10	2.02	96.20%
5		3.40	3.37	99.16%
7		4.72	4.72	100.00%
9		6.02	6.07	100.81%
11		7.33	7.42	101.19%
3	12(m)	4.44	4.23	95.31%
5		7.20	7.06	97.98%
7		9.97	9.88	99.08%
9		12.70	12.70	100.00%
11		15.40	15.52	100.79%
5	10(m)	5.08	5.08	100.00%
4	11.4(m)	5.28	5.16	97.69%
5	9.12(m)	4.29	4.28	99.78%
6	7.60(m)	3.73	3.70	99.37%
7	6.52(m)	3.40	3.42	100.52%
8	5.70(m)	3.23	3.36	103.88%

Table 5.7 ブレース付き平面骨組モデルの鋼材量の予測値と最適化の結果との比較

## 5.5 ブレース設置スパン数の異なる平面骨組モデルの最適解特性

5.3節のブレース付き平面骨組モデルと同一な条件下で、同一モデル内でのブレース数、結合数、ブレース群などの各要因をパラメタとして変化させ、そのときのモデルの最適解の相互比較を通じてブレース付き平面骨組モデルの最適解の特性を引き出すことを試みる。また、各々のモデルの最適解を用いて5.3.1節で得られたブレース付き平面骨組の基本性質の妥当性を検証する。

### 5.5.1 ブレース設置スパンの数の異なる平面骨組モデル

Fig 5.22 のブレース付き平面骨組モデルを考える。層数、スパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )を固定した骨組に対してブレースが互いに影響を受けないように十分に離して配置させた場合、ブレースの数による最適総鋼材量の変化を調べる。Fig 5.22 のブレース付き平面骨組モデルに対して、層数( $N_H$ )は5層、スパン長( $l$ )は8(m)、12(m)、スパン数( $n$ )は15スパンの場合について、ブレースの数による最適総鋼材量の変化を調べ、その結果を Table 5.8 に示す。各々のモデルに対して、Y方向の建物長さは38(m)、Y方向の6スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

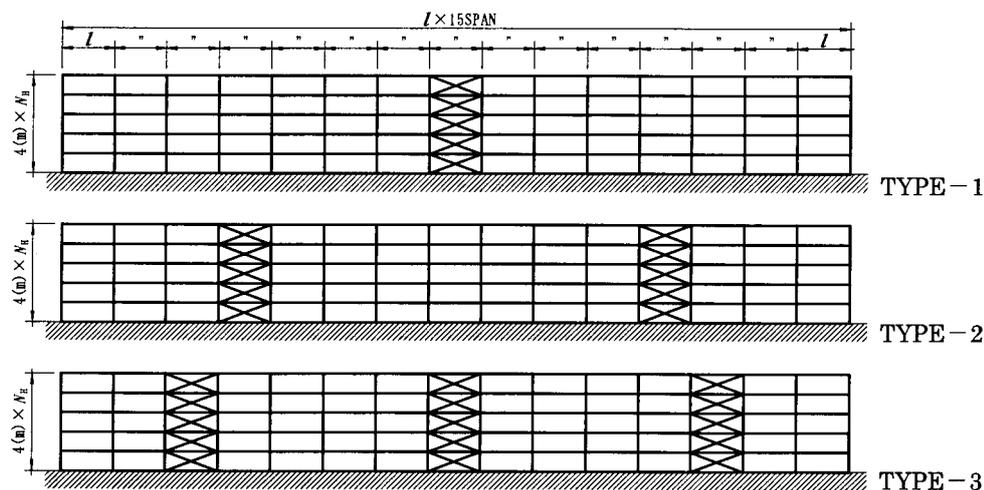


Fig 5.22 ブレース設置スパンの数が異なる平面骨組モデル ( $n = 15$ )

Fig 5.22 は同じ規模、同一の柱、梁配置の下で、ブレース設置スパン数を変化させた場合のモデルを示す。各タイプのブレースは互いに影響を受けないように配置されている。Table 5.8 にブレース設置スパンの数の変化による最適総鋼材量、ブレースの鋼材量の変化を示す。Table 5.8 より、ブレース設置スパンの数の増加に伴い、最適鋼材量は減少している。その減少の割合はスパン長( $l$ )が8mより12mでより大きく、スパン長( $l$ )が長くなる程ブレースの効率が高くなることが分かる。

しかし、タイプによって最適総鋼材量が異なるのに対して、ブレースの鋼材量は変化がなく、ほぼ同じ値を示している。それは同じ規模のモデルで、ブレースが互いに影響を受けない範囲に配置されていれば、ブレース設置スパンの数に関わらず、ブレース全体が負担する水平力が一定であることを意味している。また、ブレースの鋼材量がモデルの規模に比例する5.3.1節の結果の裏付けになる。

		ブレース		全体フレーム	
		鋼材量(m <sup>3</sup> )	比	鋼材量(m <sup>3</sup> )	比
8(m)	TYPE-1	1.28	100.00%	9.96	100.00%
	TYPE-2	1.28	100.08%	9.83	98.68%
	TYPE-3	1.28	99.92%	9.74	97.86%
12(m)	TYPE-1	4.36	100.00%	32.56	100.00%
	TYPE-2	4.52	103.62%	31.58	96.99%
	TYPE-3	4.64	106.33%	31.04	95.33%

Table 5.8 最適総鋼材量とブレースの鋼材量

### 5.5.2 ブレース設置スパンの結合数の異なる平面骨組モデル

5.3.3 節の結果より、ブレースを近接して配置させると鋼材量の低減効果があることが分かった。本節では、そのブレースを完全に結合させたときのブレースの結合数と最適総鋼材量との関係について調べる。

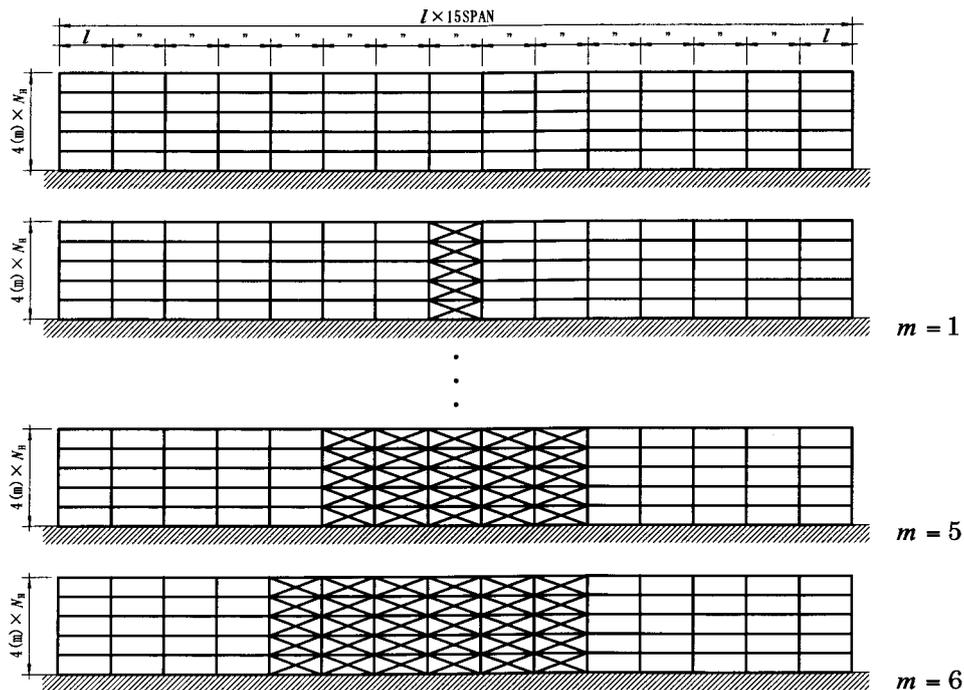


Fig 5.23 ブレースの結合数の異なる平面骨組モデル ( $n = 15$ )

Fig 5.23 のブレース付き平面骨組モデルを考える。層数、スパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )を固定した骨組に対して、ブレースの設置スパン数を結合させながら 0 スパンから  $m$  スパンまで変化させる。その結果から、ブレースの設置スパンの結合数と最適鋼材量  $m$  の関係を調べる。

Fig 5.23 のブレース付き平面骨組モデルに対して、層数( $N_H$ )は 5 層、10 層、スパン長( $l$ )は 8(m)、スパン数( $n$ )は 15 スパンの場合について、ブレースの結合数による最適総鋼材量の変化を調べ、

その結果を Table 5.9 に示す。各々のモデルに対して、Y 方向の建物長さは 38(m)、Y 方向の 6 スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

Table 5.9 にブレース設置スパンの結合数  $m$  の変化による最適総鋼材量、ブレースの鋼材量を示す。Table 5.9 より、純ラーメン骨組にブレースを設置することで最適総鋼材量の大きな低減効果が期待でき、ブレース設置スパンの増加に伴い最適総鋼材量は減少していることが分かる。その減少比は純ラーメン骨組に最初 1 スパンにブレースを設置したときがもっとも大きい。ブレースの設置スパン数の増加に連れて最適総鋼材量は単調に減少している。その減少の割合は結合数  $m$  の増加に連れて急速に減少し、結合数  $m$  が 4 スパンになると最適総鋼材量の減少比はほぼ 0 となり、鋼材量の変化はほぼ一定になっている。その傾向は 5 層モデルより 10 層モデルでもっと滑らかな分布を示している。

ブレース 設置 スパン数	5 層 (単位 : m <sup>3</sup> )			10 層 (単位 : m <sup>3</sup> )		
	ブレースの 鋼材量	総鋼材量	比	ブレースの 鋼材量	最適総鋼材 量	比
0	0	13.41	100.00%	0	39.50	100.00%
1	1.28	9.96	74.26%	4.31	32.50	82.27%
2	1.32	9.54	71.12%	5.68	27.92	70.67%
3	1.33	9.41	70.16%	5.39	26.33	66.65%
4	1.32	9.34	69.66%	5.58	25.74	65.13%
5	1.32	9.30	69.35%	5.58	25.65	64.92%
6	1.33	9.27	69.14%	5.48	25.63	64.89%

Table 5.9 ブレースの結合数と最適総鋼材量

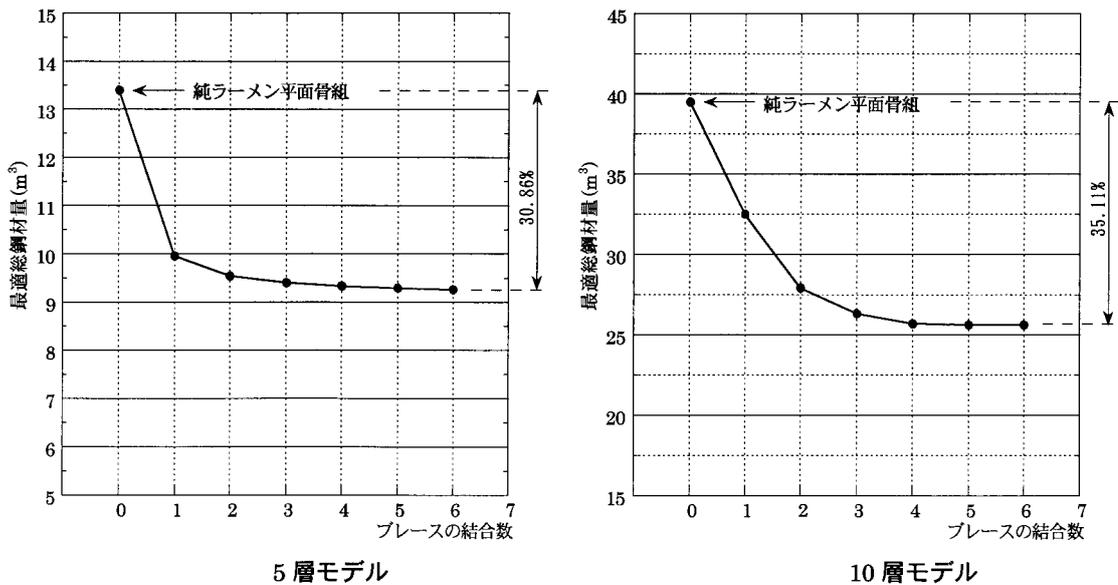


Fig 5.24 最適化の結果 (5 層、10 層モデル)

しかし、各モデルで占めるブレースの鋼材量はブレースの数が増えたにも関わらずほぼ一定になっている。その結果は、モデルの規模が同じであればブレースを用いて負担させられる水平力分担率は同一であることがいえる。ブレースの導入によって低減可能な鋼材量にも下限は存在することがいえる。しかし、10層のブレース設置スパン数が1の場合、ブレースの鋼材量は他のモデルに比べて小さい値となっている。その理由は、モデルの規模が大きくなり、1スパンのブレースの設置で負担できる水平力分担率の限界値を表わす鋼材量であることが考えられる。

Fig 5.24 は Table 5.9 の結果をグラフ化したのである。Fig 5.24 より、最適総鋼材量はブレースの設置スパンの結合数の増加に連れて減少し、ブレース設置スパンの結合数が4スパンのときから鋼材量の変化はほぼ一定の分布になっている。その傾向は5層モデルより10層モデルの方が、ブレース設置スパン数の増加(1 → 4スパン)に伴う鋼材量の減少比が分かりやすく、大きくなっている。

### 5.5.3 大きさの異なる複数のブレース群をもつ平面骨組モデル

5.5.1 節の結果より、ブレース設置スパンの結合数を増加させると、あるスパン数以上になると最適総鋼材量はほぼ一定になることが分かった。その結合された状態を一つのブレース群として考える。本節では、平面モデルの中に大きさの異なる複数のブレース群が配置されている場合、ブレース群と最適総鋼材量との関係について調べる。

Fig 5.25 のブレース付き平面骨組モデルを考える。層数、スパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )を固定した骨組に対して、結合数の異なるブレース群を1個以上配置させた場合、最適総鋼材量との関係を調べる。Fig 5.25 のブレース付き平面骨組モデルに対して、層数( $N_H$ )は5層、10層、スパン長( $l$ )は8(m)、スパン数( $n$ )は15スパンの場合について、ブレース群の数による最適総鋼材量の変化を調べ、その結果を Table 5.10 に示す。各々のモデルに対して、Y方向の建物長さは38(m)、Y方向の6スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

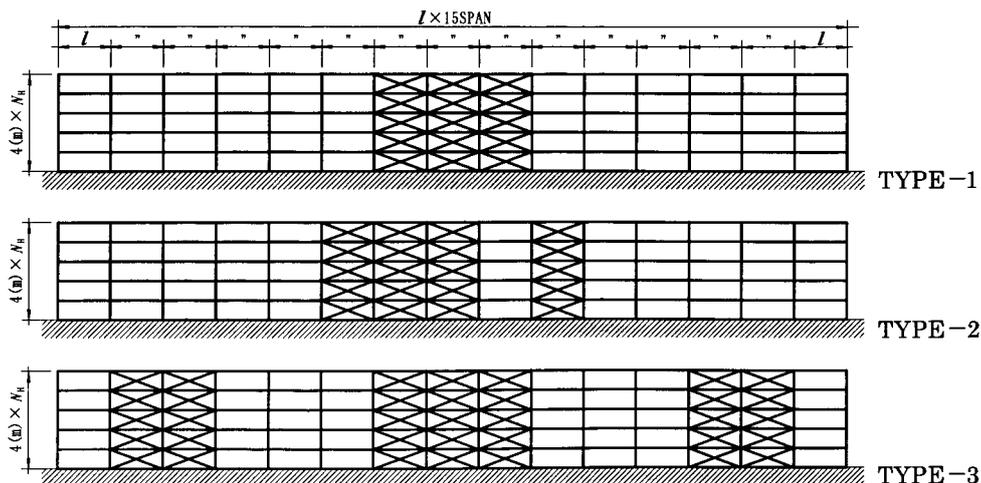


Fig 5.25 大きさの異なる複数のブレース群を持つ平面骨組モデル

Table 5.10 に Fig 5.25 の複数のブレース群に対する最適総鋼材量、ブレースの鋼材量を示す。TYPE-2 は3つのブレースを結合した TYPE-1 の1スパン置きにもう1スパンのブレース設置

スパンがある場合、TYPE-3 は TYPE-1 から十分に離れた両端に 2 つのブレースを結合したブレース群がある場合のブレース付き平面骨組である。

TYPE	5 層 (単位: m <sup>3</sup> )			10 層 (単位: m <sup>3</sup> )		
	ブレースの 鋼材量	総鋼材量	比	ブレースの 鋼材量	総鋼材量	比
TYPE-1	1.33	9.41	100.00%	5.39	26.33	100.00%
TYPE-2	1.33	9.41	100.00%	5.44	26.38	100.23%
TYPE-3	1.31	9.41	100.02%	5.43	26.79	101.76%

Table 5.10 複数のブレース群と最適総鋼材量

Table 5.10 より、大きさが異なる複数のブレース群を持つ平面モデルはブレースの数が異なるにも関わらずほぼ同じ最適総鋼材量を表している。その理由は、骨組の中でブレースが負担する水平力に対して、複数の群の中でもっとも低減効果の大きいブレース群がそのほとんどの水平力を負担しているからである。従って、モデルの各部材の断面積の分布は大きな群である 3 つのブレース結合群とその周りの部材の断面積が大きく、その群から離れた他の部材 (梁、柱、ブレース) は均等の断面積の分布となっている (Fig 5.26)。3 つの平面モデルのブレースもほぼ同じ鋼材量となっている (3.5.1 と同一な結果)。

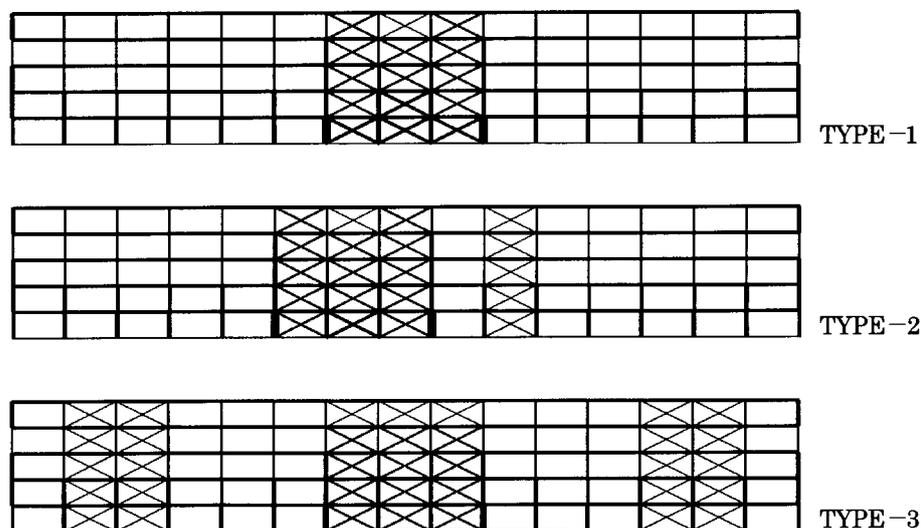


Fig 5.26 平面骨組モデルの断面積の分布

## 5.6 任意のブレース配置について最適解を予測するための手法

コアはその目的により機能的な目的（階段、エレベーター、パブリックスペース）、設備的な目的（諸機械室、ダクト、パイプスペース）、構造的な目的（骨組と耐震壁）に分類されるが、デザインにおいてはその機能的な目的が最も重視されるのが一般的である。しかし、形態的な意味としてコアは各層の床を縦に繋ぐためのシャフトでもあり、各層の連続した壁を耐震壁として建物に加わる水平力（地震力）の多くの部分を負担させるための目的として使われ、ますますコアの位置、形態などの決定は建物の基本計画時の重要なポイントになる。

### 5.6.1 コアの配置を考慮したブレース付き平面骨組モデル

Table 5.1 では、オフィスビルを対象としたときのコアのタイプを示した。各々のコアのタイプは理論的に考えられる典型的なコアのタイプであり、実際には敷地や方位との関係、利用者の移動、構造形式などに密接な関係がある。またそれ以外の計画的な側面から見てより適切な対応をする必要があり、そのためにはより数多くのコアの配置を考慮しなければならない。

以上のことを認識した上に、ブレース付き平面骨組モデルから最適解の特性から得られた以下の知見を用いると、あらゆるブレース配置の特性をもっとも大きいブレース群（コア）を用いて表現することが可能となる。

- 1) 1 スパンにブレースが配置されている場合、その位置に関わらず最適総鋼材量は同じである。
- 2) 2 スパン以上にブレースが配置されている場合、お互いのブレースが十分に離れていれば最適総鋼材量は同じである。
- 3) ブレースの結合で鋼材量の大きな低減効果が期待できるが、結合したブレースの数がある程度以上になれば鋼材量の変化は一定になる。
- 4) 同じ構面に大きさの異なる複数のブレース群が配置されている場合、もっとも大きいブレース群がほとんどの水平力を負担する。
- 5) スパン数と最適総鋼材量は原点を通る線形関係であり、単位モデルの鋼材量が分かれば規模の大きいモデルの鋼材量が予測できる。
- 6) スパン長と最適総鋼材量は非線形関係である。

従って、どのようなモデルであっても、その特性を用いて少ない数のブレース配置パターンを調べるだけで、すべてのパターンの効率性を比較することができる。その例として、5 層モデルはブレース間の影響を受けるスパンの範囲が短く、ブレースを 5 スパン以上結合させても最適総鋼材量の低減効果は得られないことで、5 スパン以下のブレース配置の組み合わせのパターンを用いてすべてのブレース配置の効果を表わすことができる。10 層モデルはブレース間の影響を受けるスパンの範囲が 5 層より広くなるため、その影響を考慮して 6 スパン以下のブレース配置の組み合わせパターンを用いるとすべてのブレース配置効果を表わすことができる。

Fig 5.27 は平面骨組モデルに対するブレース配置の例を示す。層数が 5 層と 10 層、スパン長 ( $l$ ) が 8(m)、スパン数 ( $n$ ) が 15 スパンの場合、ブレース設置スパン数が 5 スパン (5 層)、6 スパン (10 層) 以下で配置可能な組み合わせのパターンを示す。各々のモデルに対して、Y 方向の建物長さは 38(m)、Y 方向の 6 スパンの場合の平面骨組モデルの鉛直荷重と水平荷重を設計荷重として設定した。

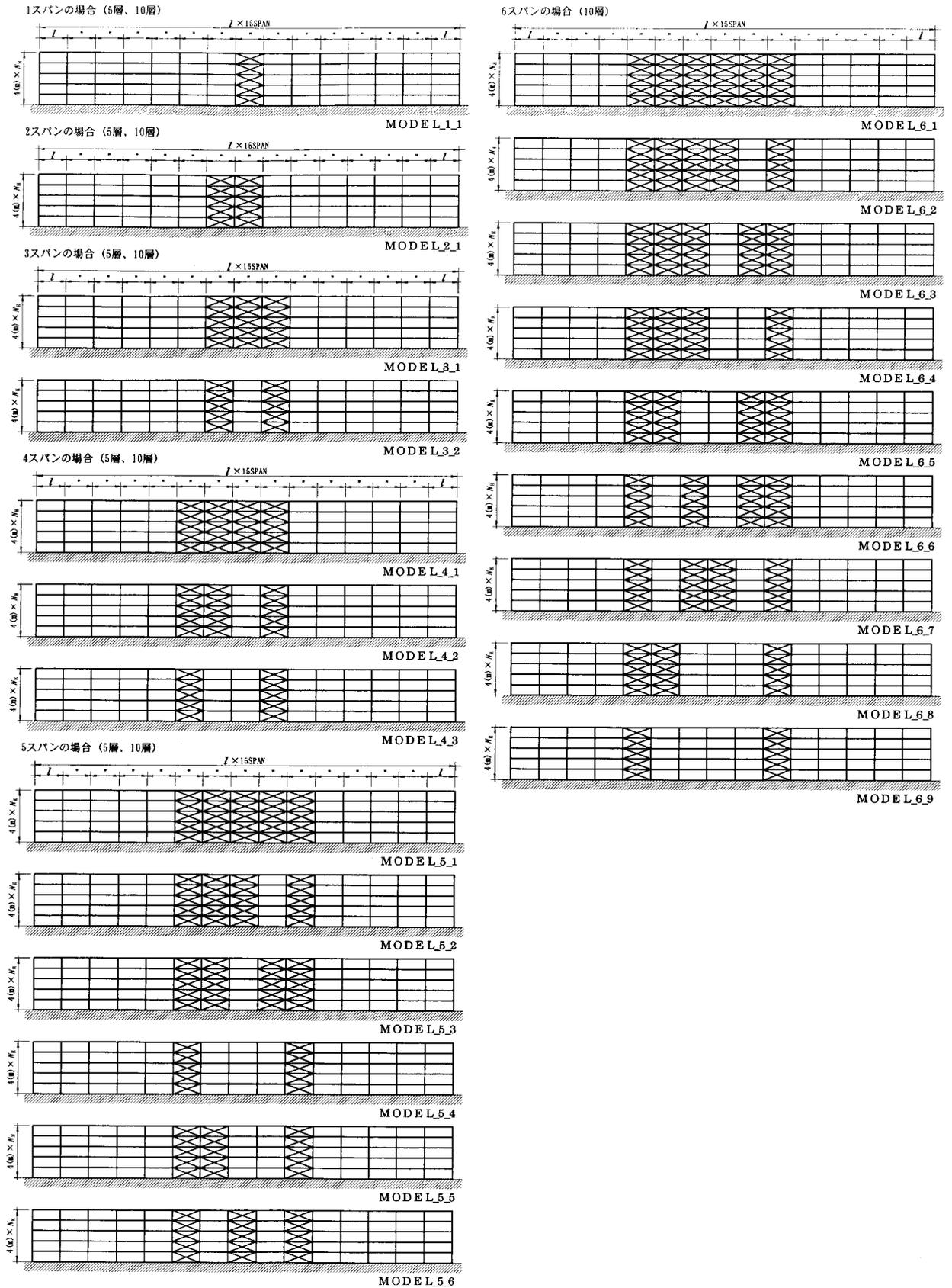


Fig 5.27 コアを考慮する場合のブレース配置方法

### 5.6.2 ブレース付き平面骨組モデルの鋼材量の比較

Table 5.11 は 5 層モデルに対して、Table 5.12 は 10 層モデルに対して最適化の結果を示す。各々の結果は 5.5 節で調べたブレース配置方法に対するモデルの特性に一致する結果を表わしている。

	最適総鋼材量		ブレースの数	ブレースの結合数	主なブレース群=2	主なブレース群=3
	鋼材量(m <sup>3</sup> )	比				
MODEL1_1	9.96	100.00%	○(1)	○(1)		
MODEL2_1	9.54	95.78%		○(2)	○	
MODEL3_1	9.41	94.48%		○(3)		○
MODEL3_2	9.82	98.64%	○(2)			
MODEL4_1	9.34	93.81%		○(4)		
MODEL4_2	9.54	95.84%			○	
MODEL4_3	9.82	98.66%				
MODEL5_1	9.30	93.39%		○(5)		
MODEL5_2	9.41	94.49%				○
MODEL5_3	9.54	95.83%			○	
MODEL5_4	9.82	98.62%				
MODEL5_5	9.55	95.91%			○	
MODEL5_6	9.76	97.99%	○(3)			

Table 5.11 5 層モデルに対する最適化の結果

Table 5.11 の 5 層モデルの最適化の結果は以下のように比較できる。

①ブレースの数の増加と共に最適総鋼材量は減少する(5.5.1 節から類推)。

MODEL1\_1(100.00%)>MODEL3\_2(98.64%)>MODEL5\_6(97.99%)

②ブレースの結合数の増加に伴い、最適総鋼材量は減少する。また、結合数が 4 スパン以上になると鋼材量の変動はほぼ一定になる(5.5.2 節)。

MODEL1\_1(100.00%)>MODEL2\_1(95.78%)>MODEL3\_1(94.48%)≒MODEL4\_1(93.81%)≒MODEL5\_1(93.39%)

③大きさの異なる複数のブレース群がある場合、その中でもっとも大きなブレース群が多くを水平力を負担するので、もっとも大きなブレース群が同じ規模の場合は同じ鋼材量を示す(5.5.3 節)。

・主なブレース群が 2 の場合

MODEL2\_1(95.48%)≒MODEL4\_2(95.84%)≒MODEL5\_3(95.83%)≒MODEL5\_5(95.91%)

・主なブレース群が 3 の場合

MODEL3\_1(94.48%)≒MODEL5\_2(94.49%)

5 層モデルでは、各々のブレースパターンに対して鋼材量の差が小さく、ほぼ同じ鋼材量を示している。この結果を用いると、5 層モデルに対して組み合わせできるブレースの配置方法に対して効率性の比較ができる。

	最適総鋼材量		ブレースの 数	ブレースの 結合数	主な ブレース群 =2	主な ブレース群 =3	主な ブレース 群=4
	鋼材量(m <sup>3</sup> )	比					
MODEL1_1	32.50	100.00%	○(1)	○(1)			
MODEL2_1	27.92	85.90%		○(2)	○		
MODEL3_1	26.33	81.01%		○(3)		○	
MODEL3_2	29.89	91.97%	○(2)				
MODEL4_1	25.73	79.16%		○(4)			○
MODEL4_2	27.67	85.15%			○		
MODEL4_3	30.73	94.55%					
MODEL5_1	25.65	78.92%		○(5)			
MODEL5_2	26.39	81.20%				○	
MODEL5_3	27.31	84.03%			○		
MODEL5_4	31.27	96.20%					
MODEL5_5	27.82	85.60%			○		
MODEL5_6	29.39	90.44%	○(3)				
MODEL6_1	25.63	78.87%		○(6)			
MODEL6_2	25.77	79.30%					○
MODEL6_3	26.48	81.47%				○	
MODEL6_4	26.33	81.01%				○	
MODEL6_5	27.40	84.31%			○		
MODEL6_6	27.70	85.23%			○		
MODEL6_7	27.79	85.51%			○		
MODEL6_8	27.83	85.65%			○		
MODEL6_9	32.24	99.21%					

Table 5.12 10層モデルに対する最適化の結果

Table 5.12 の 10 層モデルの場合にも 5 層モデルと同様な方法でモデルの比較をすると以下のようになる。

①ブレースの数の増加と共に最適総鋼材量は減少する(5.5.1 節から類推)。

MODEL1\_1(100.00%)>MODEL3\_2(91.97%)>MODEL5\_6(90.44%)

②ブレースの結合数の増加に伴い、最適総鋼材量は減少する。また、結合数が 4 スパン以上になると鋼材量の変動はほぼ一定になる(5.5.2 節)。

MODEL1\_1(100.00%)>MODEL2\_1(85.90%)>MODEL3\_1(81.01%)≒MODEL4\_1(79.16%)≒MODEL5\_1(78.92%)≒MODEL6\_1(78.87%)

③大きさの異なる複数のブレース群がある場合、その中でもっとも大きなブレース群が多く水平力を負担するので、もっとも大きなブレース群が同じ規模の場合は同じ鋼材量を示す(5.5.3 節)。

・主なブレース群が 2 の場合

MODEL2\_1(85.90%) $\doteq$ MODEL4\_2(85.15%) $\doteq$ MODEL5\_3(84.03%) $\doteq$ MODEL5\_5(85.60%) $\doteq$   
MODEL6\_5(84.31%) $\doteq$ MODEL6\_6(85.23%) $\doteq$ MODEL6\_7(85.51%) $\doteq$ MODEL6\_8(85.65%)

・主なブレース群が 3 の場合

MODEL3\_1(81.01%) $\doteq$ MODEL5\_2(81.20%) $\doteq$ MODEL6\_3(81.47%) $\doteq$ MODEL6\_4(81.01%) $\doteq$

・主なブレース群が 4 の場合

MODEL4\_1(79.16%) $\doteq$ MODEL6\_2(79.30%)

10 層モデルでは、各々のブレースパターンに対して鋼材量の差が小さく、ほぼ同じ鋼材量を示している。しかし、主なブレース群が 2 の場合、MODEL5\_3 と MODEL6\_5 では同じ大きさのブレース群が十分に離れてないのでブレースの近接効果が表れ、2% くらいの差があるが、ここではほぼ同じ結果としてみなす。この結果を用いると、10 層モデルに対して組み合わせできるブレースの配置方法に対して効率性の比較ができる。

以上の結果は、マクロな設計問題において純ラーメン骨組にブレース配置を考慮するためのコアの計画時に有用な情報として用いられる。

## 5.7 第5章の結論

本章では、基本計画段階においてブレースの配置を決めるためのマクロな設計問題に対して、最適設計を用いるための方法論を提示することを目的とし、ブレース付き平面骨組モデルの異なるブレース配置パターンに対する最適解の比較を行い、以下の結果を得た。

- 1) ブレースを設置した平面骨組モデルの最適解特性は、ブレースとブレースを支持するために周りの部材の断面積が大きくなり、その他の部材は均等な断面積の分布を示す。また、最適総鋼材量、ブレースの鋼材量、均等部に対する超過鋼材量はスパン数の増加によるモデルの規模に比例する。
  - a. 1 スパンにブレースを配置する場合、その位置に関わらず最適総鋼材量は同じである。
  - b. 2 スパン以上にブレースを配置する場合、ブレースが互いに影響がなく十分に離れていれば、最適総鋼材量、ブレースの鋼材量は同じである。
- 2) 骨組サイズの異なるブレース付き平面骨組モデルの最適化を行い、以下の性質を抽出した。
  - a. ブレース設置の形態に関わらず、最適総鋼材量とスパン数は原点を通る線形関係であり、単位モデルの鋼材量がわかれば規模の大きいモデルの鋼材量が予測できる。
  - b. スパン長と最適総鋼材量は非線形関係である（本論では誤差を少なくするために3次曲線としてみなす）。
  - c. 任意のスパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )の平面骨組モデルの最適鋼材量を簡易かつ精度良く予測する方法を提案した。その提案式は4つの少ないブレース付き平面骨組モデルの最適解を求めるだけで実用上十分な精度の予測結果が得られる。
- 3) ブレース設置スパン数が異なる平面骨組モデルの最適解の特性は以下のものである。
  - a. 同じ規模のモデルの場合、ブレース設置スパン数に伴い、最適総鋼材量は減少する。しかし、ブレースが互いに影響を受けない範囲に配置されていれば、ブレース設置スパンの数に関わらず全体のブレースの鋼材量は同一である。
  - b. ブレースの結合で最適総鋼材量の大きな低減効果が期待できるが、結合したブレースの数がある程度以上になれば最適総鋼材量の変化はほぼ一定になる。
  - c. 同じ構面に大きさの異なる複数のブレース群が配置された場合、骨組の中でブレースが負担する水平力に対してもっとも低減効果の大きいブレース群がそのほとんどの水平力を負担する。
- 4) 任意のブレース配置パターンについてブレース配置の特性をもっとも低減効果の大きいブレース群（コア）を用いて評価する方法を提案した。その方法はマクロな設計問題において純ラーメン骨組にブレース配置を考慮するためのコアの計画時に有用な情報として用いられる。

### <参考文献>

- [1]下出源七：デザイナーのための構造チェックリスト，彰国社，1977
- [2]須賀好富：建築デザインのための構造設計，学芸出版社，2003
- [3]ヴィジュアル版建築入門編集委員会：建築の構造，彰国社，2002
- [4]藤江澄夫(執筆代表)：建築計画・設計シリーズ 37，新・事務所ビル，市ヶ谷出版社，2000
- [5]Rosen, J.B.: The Gradienet Projection Method for Nonlinear Programming - Part II: Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514-532, 1961

## 第6章

# ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性と最適鋼材量の簡易予測法

### 6.1 はじめに

第5章では、ブレースの配置パターン、スパン数、スパン長のパラメタに対して変化するブレース付き平面骨組モデルの最適解特性について論じた。純ラーメン骨組モデルに対しては、このような平面骨組モデルの最適解の特性を活かし、平面骨組モデルの簡易予測式から得られた鋼材量の組み合わせを用いて様々な立体骨組モデルの鋼材量を簡易的に予測することができた。

しかし、ブレース付き立体骨組モデルの鋼材量に対する設計問題は純ラーメン骨組のように単純ではない。純ラーメン骨組では各構面が荷重に対する抵抗機構としてはほぼ等価であることから各構面が同一な水平力を分担するという仮定を設けたが、ブレース付き立体骨組ではブレース付き構面と純ラーメンの構面がまったく異なる抵抗機構を有するため、このような仮定が成立しない。さらに、ブレース設置構面をどの列に配置させるかによる最適鋼材量の変化は少なくない。立体骨組に関してブレースを適切に配置させる設計問題は基本計画段階<sup>[1]-[3]</sup>において設計者の重要な意思決定の1つであるといえる。

Table 5.1 に示したように固定したコアの壁にブレースを設置することはごく一般的な耐震壁配置方法であるが、設計者によっては意図的にそのブレースを建物の外周に配置させ、デザイン要素の1つとして用いる場合も少なくないので、1つの建物にブレースの配置する方法は非常に多くのパターンが考えられる。そのため、基本計画段階での限られた時間内にすべてのパターンに対してモデルの構造計算を行い、その結果を比較・検討することは極めて難しい。

本章では、純ラーメン骨組と異なる方法を用いてブレース付き骨組モデルの鋼材量を評価する方法を考える。まずは、「ブレース付き立体骨組モデルの最適解の基本性質」、「ブレースの配置がブレースの立体効果に及ぼす影響」、ブレースの配置パターンやスパン数、スパン長などのパラメタ最適解特性、特に最適鋼材量に及ぼす影響についての解明を行なう。その結果に基づき、立体骨組の各方向のブレースを含むユニットモデルの組み合わせで、数多くのブレース配置パターンの最適鋼材量を簡易的かつ精度良く予測する手法を提案する。

## 6.2 ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性

ブレースの配置に関する立体骨組モデルの最適解特性を調べるため、建物の規模(大きさ、層数、階高など)、スパン長を固定し、ブレースの配置方法とブレースの位置をパラメタとして変化させた場合のブレース付き骨組モデルの最適化を行い、その最適解の特性について調べる。

### 基本モデルの設定

Fig 6.1 にブレース付き立体モデルを示す。建物規模は地下階無し、地上 5 階建てであり、上層部の階は 56m×40m、中央型コアを持つ長方形プランである。スパン割りは 7×5 スパン、X 軸、Y 軸の各方向のスパン長は 8m とする。

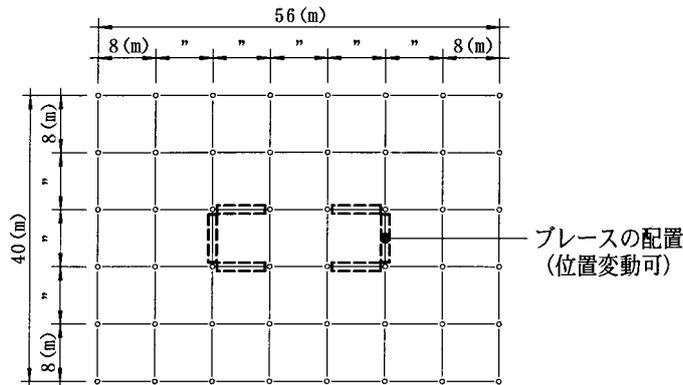


Fig 6.1 ブレース付き立体骨組モデル

Fig 6.1 に対して、様々なブレースのパターンを考慮した場合のモデルの最適化を行なう。考慮した設計条件を整理すると以下の通りである。

### 設計条件

- ・制約条件を以下のように設定する。

①断面積上下限値制約：梁断面積： $2.635 \times 10^3 \leq A \leq 3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$

柱断面積： $4.563 \times 10^3 \leq A \leq 1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$

ブレース断面積： $3.801 \times 10^2 (\text{mm}^2) \leq A$  (なるべくブレースに多くの水平力を分担させるためにブレースの上限値を設けない)

②層間変形角制約： $|R| \leq 1/200$

③保有水平耐力制約は  $D_s = 0.3$ 、 $F_{cs} = 1.0$ 、 $Q_d$  は 1 次設計用荷重と同じ分布形とするため、必要保有水平耐力  $Q_{un}$  は  $D_s$  値に比例する。 $Q_u$  は最大層間変形角が 1/75 のときに各層に生じる層せん断力とする。Fig 6.1 のモデルに対して  $A_i$  分布から算定した水平荷重を Table 6.1 に示す。

- ・モデルの対称軸に対し、対称な位置にある部材の断面積を同一とする (Fig 1.4 参照)。
- ・梁、柱の初期断面は上限値 (梁： $3.874 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、柱： $1.067 \times 10^5 (\text{mm}^2)$ )、ブレースは指定値 ( $6.353 \times 10^3 (\text{mm}^2)$ ) を用いる。

	1次設計	必要保有水平耐力
5F	6,577.2	9,865.8
4F	4,003.4	6,005.0
3F	3,076.8	4,615.3
2F	2,306.8	3,460.2
1F	1,597.4	2,396.1

Table 6.1 層水平力 (kN)

- ・ブレースは連層 X 型配置、ピン接合とし、ブレースが引張のみに抵抗するように設計する。
- ・最適化手法としては勾配射影法<sup>4)</sup>を用いる。
- ・ブレースの設置による柱の浮き上がりによる影響は考慮しない (5.2.2 節参照)。

### 6.2.1 ブレース付き立体骨組モデルの最適解の基本特性

第 5 章では、ブレース付き平面骨組モデルの最適解に関して、「ブレース周りの柱及び梁部材の断面積が大きくなり、それ以外の部材では均等な断面積の分布を示す」と「モデルの最適鋼材量とブレースの鋼材量はモデルの規模に比例する」の 2 つの基本性質が得られた。本節では、ブレース付き立体骨組モデルについても平面骨組モデルと同じ基本性質が見られるか、かつ、その他に立体骨組モデル特有の性質が存在するかについて調べる。

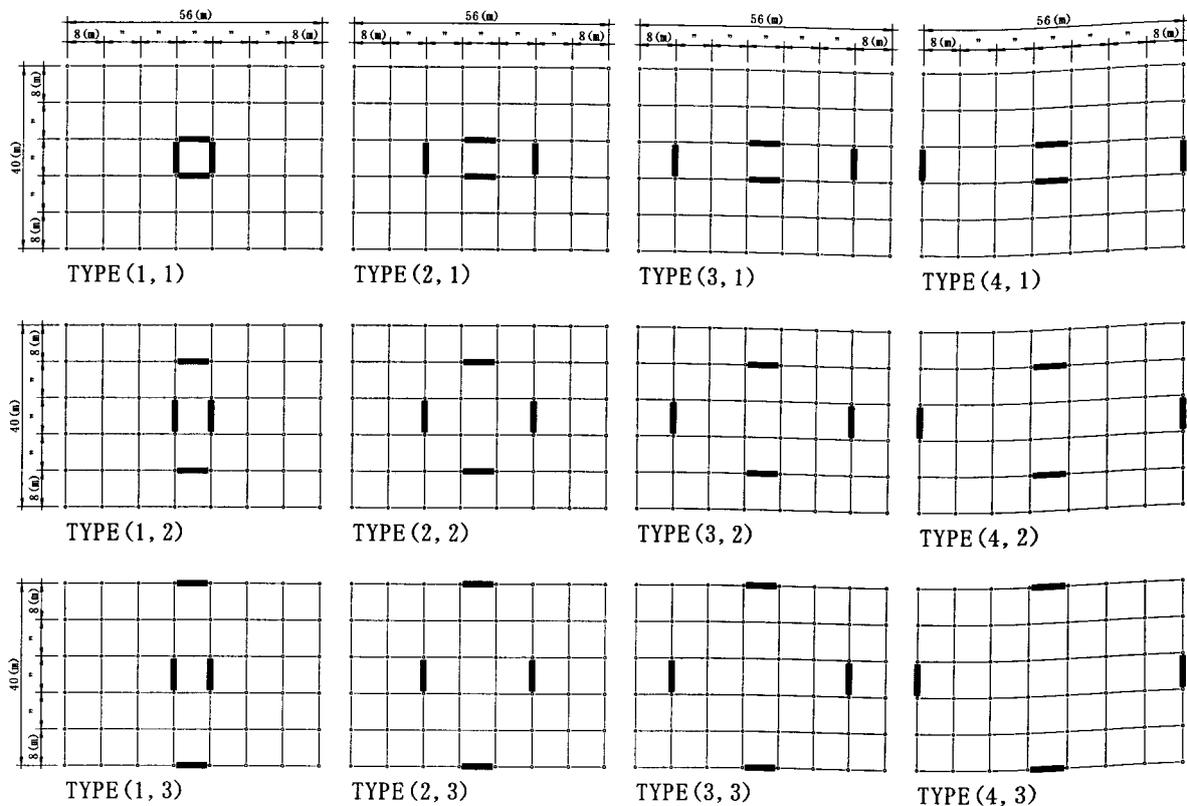


Fig 6.2 対象の立体骨組モデル (平面図、太線はブレースの位置を示す)

Fig 6.1 の立体骨組モデルの外形に対して、ブレースの配置に関する最適解の特性を調べるため、まずは、コアの位置を考慮せずに各々の軸に 1 スパンずつブレースを配置させた場合のブレース付き立体骨組モデルの最適化を行なう（平面モデルの場合と同じ条件下での最適解を得るため、水平力を作用させる X、Y 各軸にブレースを設置する）。

Fig 6.2 は Fig 6.1 の立体骨組モデルに対して、様々なブレースの配置を考慮したブレース付き立体骨組モデルを示す。TYPE(1,1)はモデルの X、Y 両軸の中央にブレースを配置させた基準モデルとする。このようなブレース配置方法は平面計画の観点から実際には存在し難いが、本節はブレースの配置による最適解特性を調べることが目的である。そのため、ブレースをモデルの中心に配置させた場合を基準とし、X 軸方向、Y 軸方向のブレースの数を固定して、配置だけを種々に変化させた場合の最適解を求めて比較する。Fig 6.2 はすべてのブレースを中央に配置させた TYPE(1,1) に対して、すべてのブレースを外部に配置させた TYPE(4,3)を示したモデルである。

### 各部材の断面積の分布

ブレース付き立体骨組モデルの最適解の断面積の分布を調べる。Fig 6.2 のモデルの中からブレースの影響を受ける範囲と受けない範囲が明確に分離されている TYPE(1,1)のモデルを選び、そのモデルの最適化の結果を Table 6.2 に示す。

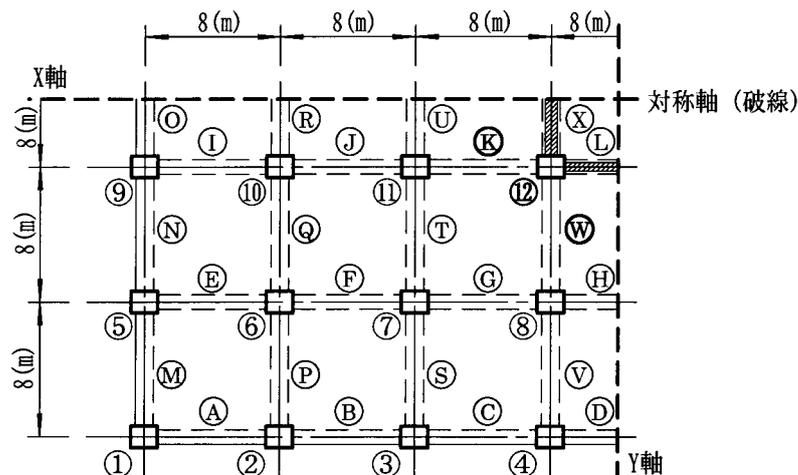


Fig 6.3 TYPE(1,1)の断面積の分布（平面図、ハッチングはブレースの位置）

Fig 6.3 と Table 6.2 に Fig 6.2 の TYPE(1,1)の最適化の結果を示した。Fig 6.2 のすべてのモデルは X 軸、Y 軸の各軸に対して対称であるため、Fig 6.3 にモデルの 1/4 のみ示し、各々の部材の設計変数を表記した。部材設計変数の分類として梁は(A)から(X)まで、柱は①から⑫までのシンボルを付けた。Table 6.2 にそのシンボルに対応する部材の鋼材量（1層～5層までの和）を示し、各々の部材の位置（外側、内側）を表記した。

Fig 6.3 と Table 6.2 により、梁はブレースに接している X 軸、Y 軸両方向の部材の鋼材量が大きくなり、柱はブレースに接している部材の鋼材量が大きくなっている。その部材設計変数のシンボルを太字とし、Table 6.2 には灰色影を付けた。それ以外の部材に関してはほぼ均等な鋼材量の

柱の鋼材量の分布

設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置	設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置
①	0.20	外側 (隅)	⑦	0.24	内側
②	0.23	外側	⑧	0.29	内側
③	0.23	外側	⑨	0.23	外側
④	0.22	外側	⑩	0.23	内側
⑤	0.23	外側	⑪	0.28	内側
⑥	0.23	内側	⑫	0.47	内側

梁の鋼材量の分布

設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置	設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置
Ⓐ	0.27	外側	Ⓜ	0.27	外側
Ⓑ	0.26	外側	Ⓝ	0.26	外側
Ⓒ	0.26	外側	Ⓓ	0.26	外側
Ⓓ	0.26	外側	Ⓟ	0.43	内側
Ⓔ	0.43	内側	Ⓠ	0.42	内側
Ⓕ	0.42	内側	Ⓡ	0.41	内側
Ⓖ	0.43	内側	Ⓢ	0.42	内側
Ⓗ	0.43	内側	Ⓣ	0.43	内側
Ⓘ	0.42	内側	Ⓤ	0.43	内側
Ⓝ	0.41	内側	Ⓥ	0.42	内側
Ⓚ	0.56	内側	Ⓦ	0.56	内側
Ⓛ	0.42	内側	Ⓧ	0.42	内側

Table 6.2 Fig 6.3 に対応する各部材の鋼材量 (灰色は均等な鋼材量より大きくなった部材を示す)

分布を示し、立体骨組も平面骨組と同じ性質を持っていることが分かる。

しかし、立体骨組ではブレースに接している直交方向の梁の断面積も大きくなっている。それはブレースと平行な軸から受ける大きな水平力を負担するブレースを支持するためにブレースに接する柱が大きくなり、その柱を直交方向の水平力に対しても支持させるため、直交方向の梁が大きくなっていると考えられる。そして、Table 6.2 の柱の鋼材量の分布では大きくなった柱に接する列の柱 (⑧、⑪の柱) の鋼材量も多少大きくなっているが、その増加量は少なく、また、モデルの性質をより単純化させるためにその柱の差は無視することにする。外側の梁に関してはブレースによる影響がなく、均等な鋼材量の分布を示している内側の梁が受ける鉛直荷重の 1/2 であるため、内側の梁の鋼材量より小さい値になっている。

以上のような TYPE(1,1) のブレース付き立体骨組モデルの一般的な性質は Fig 6.2 のすべてのモデルについても同様に観察される。TYPE(3,1) のモデルをその一例として示し、Fig 6.4 にモデルの部材設計変数の分類を、Table 6.3 にその設計変数に対する鋼材量を示した。また、大きくなった部材の設計変数のシンボルを太字とし、Table 6.3 には灰色影を付けた。

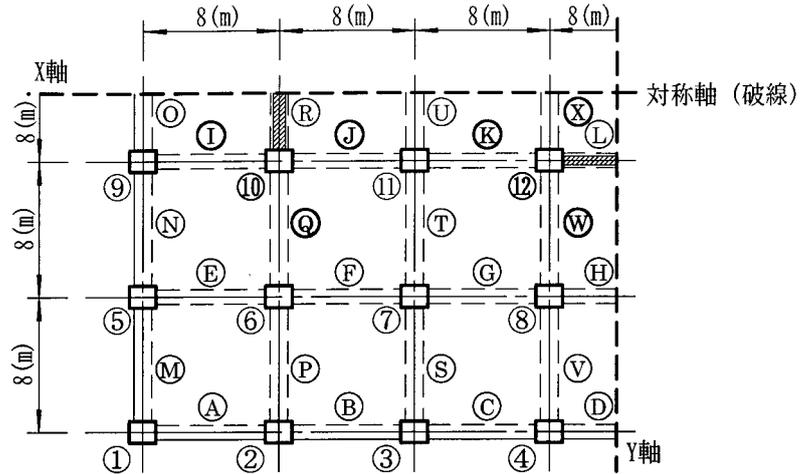


Fig 6.4 TYPE(3,1)の断面積の分布（平面図、ハッチングはブレースの位置）

柱の鋼材量の分布

設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置	設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置
①	0.20	外側	⑦	0.25	内側
②	0.23	外側	⑧	0.25	内側
③	0.23	外側	⑨	0.22	外側
④	0.23	外側	⑩	0.43	内側
⑤	0.22	外側	⑪	0.29	内側
⑥	0.28	内側	⑫	0.42	内側

梁の鋼材量の分布

設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置	設計変数	鋼材量 (m <sup>3</sup> )	部材の位置
Ⓐ	0.27	外側	Ⓜ	0.27	外側
Ⓑ	0.26	外側	Ⓝ	0.26	外側
Ⓒ	0.26	外側	Ⓞ	0.26	外側
Ⓓ	0.26	外側	Ⓟ	0.42	内側
Ⓔ	0.45	内側	Ⓠ	0.54	内側
Ⓕ	0.43	内側	Ⓡ	0.43	内側
Ⓖ	0.42	内側	Ⓢ	0.43	内側
Ⓗ	0.42	内側	Ⓣ	0.43	内側
Ⓘ	0.51	内側	Ⓤ	0.43	内側
Ⓙ	0.49	内側	Ⓥ	0.42	内側
Ⓚ	0.54	内側	Ⓦ	0.49	内側
Ⓛ	0.43	内側	Ⓧ	0.48	内側

Table 6.3 Fig 6.4 に対応する各部材の鋼材量（灰色は均等な部分より大きくなった部材領域）

## ブレース配置の交差効果

Fig 6.2 のすべてのモデルに対する最適化の結果を Table 6.4 に示す。Table 6.4 に各々のモデルの最適鋼材量、TYPE(1,1)に対する鋼材量の比と純ラーメン骨組モデルに対する鋼材量の比を同時に示す。

モデル	最適鋼材量 (m <sup>3</sup> )	TYPE(1,1)に 対する比	純ラーメン 骨組との比	モデル	最適鋼材量 (m <sup>3</sup> )	TYPE(1,1)に 対する比	純ラーメン 骨組との比
純ラーメン 骨組モデル	67.60	/	100.00%	TYPE(2,2)	57.84	102.45%	85.56%
				TYPE(3,2)	58.07	102.86%	85.90%
TYPE(1,1)	56.45	100.00%	83.51%	TYPE(4,2)	57.60	102.03%	85.20%
TYPE(2,1)	57.42	101.72%	84.94%	TYPE(1,3)	57.43	101.72%	84.95%
TYPE(3,1)	57.88	102.53%	85.62%	TYPE(2,3)	57.58	101.99%	85.17%
TYPE(4,1)	57.37	101.62%	84.86%	TYPE(3,3)	57.56	101.97%	85.15%
TYPE(1,2)	57.46	101.79%	85.00%	TYPE(4,3)	56.97	100.92%	84.28%

Table 6.4 最適化の結果

Table 6.4 より、純ラーメン骨組モデルの X、Y 両軸にブレースを設置すると約 15%の鋼材量の低減効果が期待できる。しかし、ブレースの位置によって各々のモデルの鋼材量は異なり、最適鋼材量の大小関係を用いて次の 4 つのブレースの配置方法に分類できる (①<②<③<④)。

- ①TYPE(1,1)：ブレースをモデルの中央に集中させ、各々の軸に対して交差させた場合
- ②TYPE(4,3)：各々の軸のブレースをモデルの外側に配置させた場合
- ③TYPE(2,1) TYPE(4,1) TYPE(1,2) TYPE(4,2) TYPE(1,3) TYPE(2,3) TYPE(3,3)：1 軸のブレースは外側に、もう 1 軸のブレースは内側に配置させた場合
- ④TYPE(3,1) TYPE(2,2) TYPE(3,2)：各々の軸のブレースをモデルの内側に配置させた場合

以上の結果に基づき、以下のことが分かる。

- 1) X 軸と Y 軸のブレースを互いに交差させると最適鋼材量の低減効果が期待できる。
- 2) 交差させないブレースであれば、内側より外側に配置させたほうが最適鋼材量の低減効果が期待できる。

### 6.2.2 スパン数の変化による影響

5.4 節では、ブレース付き平面骨組モデルに対してブレースの位置と数を固定した場合、スパン数と最適鋼材量は線形関係になることが分かった。本節では、スパン数を 1 から  $m$  まで変化させた場合の立体骨組モデルの最適化を行い、スパン数と最適鋼材量の関係が平面モデルと同一であるかについて調べる。立体骨組は X 軸と Y 軸の両軸に対してスパン数の変化を考慮する必要があるため、次の 2 つの場合に対するモデルのスパン数の変化を設定する。

- ①X 軸方向のスパン数の変化による影響
- ②X、Y 軸両方向のスパン数の変化による影響

### X 軸方向のスパン数の変化による影響

Fig 6.5、Fig 6.6 のようにブレースを配置させた場合の立体骨組モデルを考える。各々の図は Y 方向のスパン数を固定し、X 軸のスパン数のみ変化させたモデルである。Fig 6.5 は Y 軸構面に設置したブレースを中央配置させた場合（中央型）、Fig 6.6 は Y 軸構面に設置したブレースを外周配置させた場合（外周型）である。いずれに関しても X 軸構面のブレースは中央スパンに配置し、層数とスパン長( $l$ )を固定した骨組に対してスパン数を 1 から  $m$  まで変化させる。

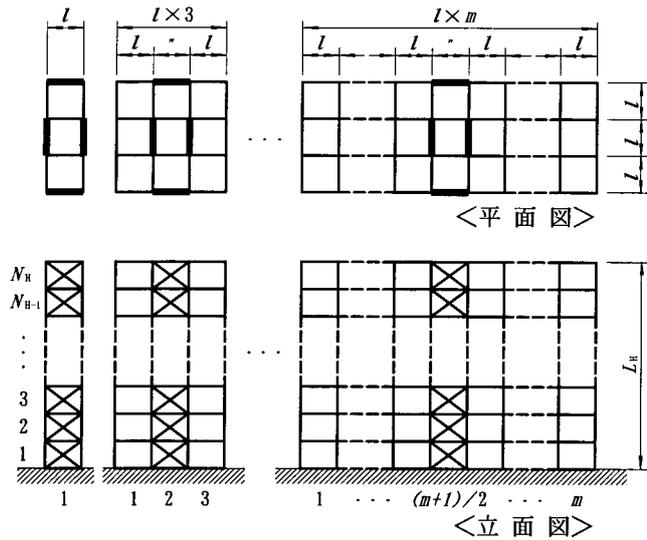


Fig 6.5 スパン数の異なるブレース付き立体骨組モデル（中央型）

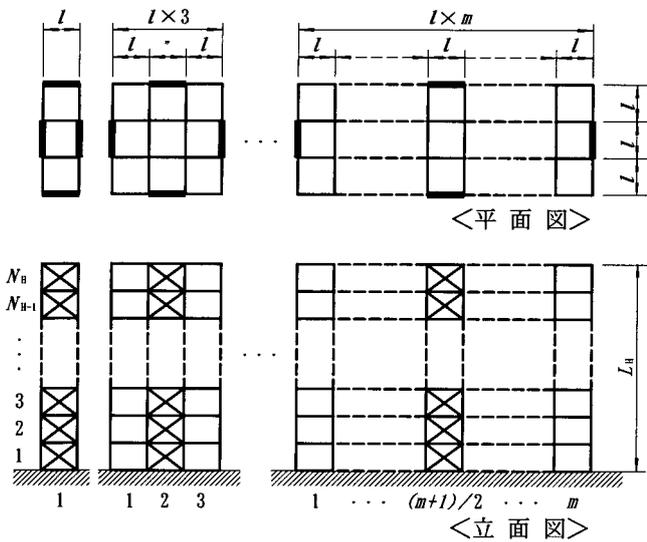
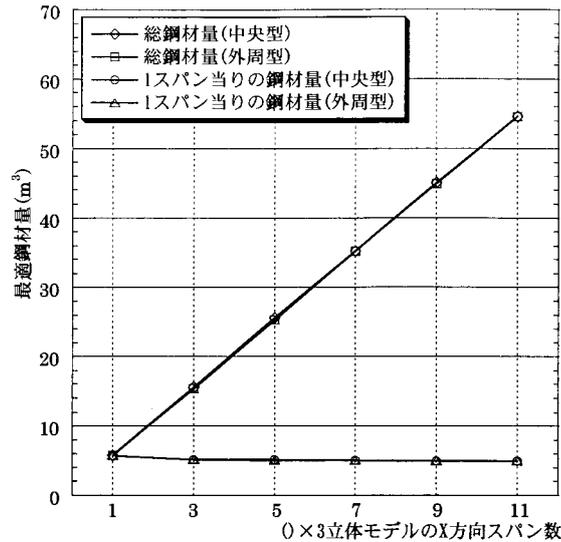


Fig 6.6 スパン数の異なるブレース付き立体骨組モデル（外周型）

Fig 6.5、Fig 6.6 のモデルに対して、層数が 5 層、スパン長( $l$ )が 8(m)の場合について、1 から 11 までのスパン数を変化させた場合の最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 6.7 に示す。Fig 6.7 に各々のモデルの総鋼材量の変化と 1 スパン当りの鋼材量の変化を示す。



6.7 スパン数と最適鋼材量との関係

Fig 6.7 の記号 ◇、□ は各モデルの最適総鋼材量の変化である。ブレース付き立体骨組モデルのスパン長と層数を固定した場合、平面骨組の場合と同様にスパン数と最適鋼材量はほぼ原点を通る線形関係であることが分かる。また、ブレースの配置が中央型の場合(◇)と外周の場合(□)の最適鋼材量はほぼ一致している。

Fig 6.7 の記号 ○、△ は各立体モデルの最適総鋼材量( $W_{opt}$ )を Y 軸のスパン数は固定したまま X 軸のスパン数  $m$  で割った場合のモデルの 1 スパン当り鋼材量( $W_{opt}/m$ )の変化である。Fig 6.7 より、各々のモデルの 1 スパン当りの鋼材量の変化はほとんどなく、ほぼ一定となっている。この場合についても、ブレースの配置が中央型の場合(○)と外周型の場合(△)の最適鋼材量がほぼ一致していることが分かる。

### X、Y 軸両方向のスパン数の変化による影響

Fig 6.8 のようにブレースを配置させた立体骨組モデルを考える。Fig 6.8 は Y 方向のスパン数を固定して X 軸のスパン数のみを変化させ、さらに、X 方向のスパン数を固定して Y 軸のスパン数のみ変化させたモデルである。どちらの方向に関しても層数とスパン長( $l$ )を固定し、ブレースは外周配置、スパン数は X 軸に関して 1 から  $m_x$  まで、Y 軸に関して 3 から  $m_y$  まで変化させる。

Fig 6.8 のモデルの層数が 5 層、スパン長( $l$ )が X 軸は 9(m)、Y 軸は 7(m)の場合、X 軸のスパン数は 1 から 11 まで、X 軸スパン数が 5 スパンになったときに Y 軸のスパン数は 3 から 11 まで変化させた場合の最適鋼材量の変化を調べ、その結果を Fig 6.9 に示した。

Fig 6.9 の記号 ●、■ は各方向への最適総鋼材量の変化である。立体骨組モデルの X 軸と Y 軸のスパン数を各々変化させた場合、各々の軸に対してスパン数と最適鋼材量はほぼ原点を通る線形関係であることが分かる。

Fig 6.9 の記号 ○、□ は各立体モデルの最適総鋼材量( $W_{opt}$ )を Y 軸 (または X 軸) のスパン数

は固定したまま X 軸（または Y 軸）のスパン数  $m_x$ （または  $m_y$ ）で割った場合のモデルの 1 スパン当り鋼材量  $W_{opt}/m_x$ （または、 $W_{opt}/m_y$ ）の変化である。Fig 6.9 より、各々のモデルの 1 スパン当りの鋼材量の変化はほとんどなく、ほぼ一定となっている。

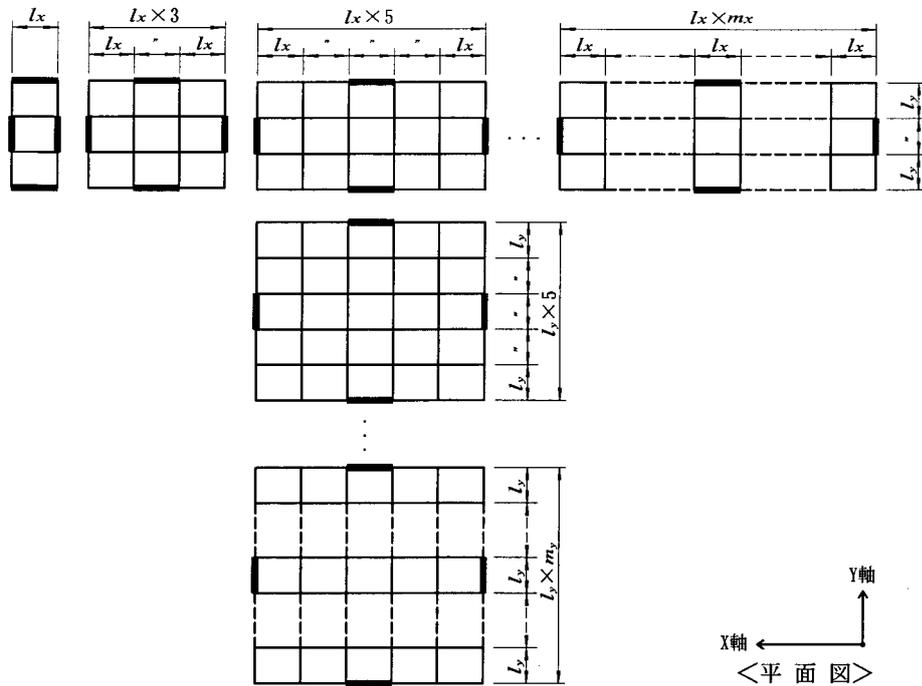


Fig 6.8 スパン数の異なるブレース付き立体骨組モデル（X、Y 軸のスパン数の変化）

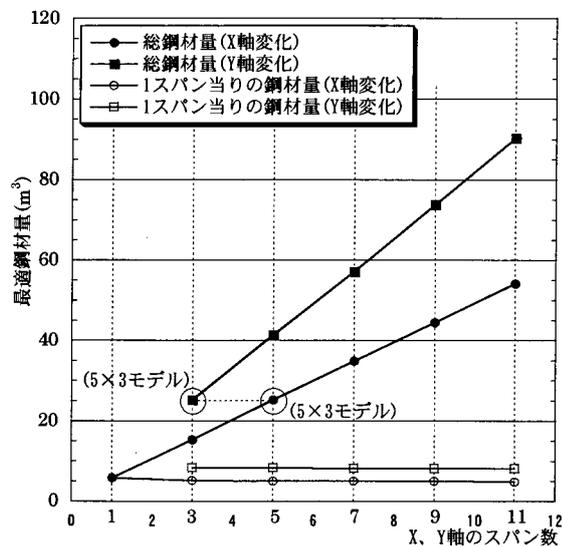


Fig 6.9 スパン数（X、Y 軸）と最適鋼材量との関係

以上の結果、立体骨組モデルに対しても以下の性質があることが分かる。

- ①モデルの層数とスパン長を固定した場合、1 方向のスパン数を固定すれば、直交方向のスパン数と最適鋼材量にはほぼ原点を通る線形関係が成立する。
- ②各々のモデルの 1 スパン当りの鋼材量の変化はほとんどなく、ほぼ一定になっている。

### 6.3 ブレース付き立体骨組モデルの最適鋼材量の近似予測法

第4章で、純ラーメン骨組の場合は、各構面が荷重に対する抵抗機構としてはほぼ等価であることから、各構面が同じ水平荷重を分担するという仮定を設けることで、平面骨組モデルの組み合わせで立体骨組モデルの最適鋼材量を評価する方法を提案した。しかし、ブレース付き立体骨組はブレース付きの構面と純ラーメンの構面が全く異なる抵抗機構を有するため、各構面が同じ水平荷重を分担するという仮定設定は適切ではない。また、各軸に対するブレース設置構面をどの軸組に配置させるかによって変動する鋼材量少なくないため、本節では、特定のブレース付き立体骨組モデルの最適解を求め、その解を用いてそれとは異なる様々なブレース配置に対する立体骨組モデルの最適鋼材量を簡易的に予測する方法を試みる。

#### 6.3.1 ユニットモデルを用いた近似予測式の定式化

6.2.1 節のブレース付き立体骨組モデルの基本性質を用いると、各軸に対して均等スパン割りを行った立体モデルの最適鋼材量は以下のように分解することができる。

- ①均等部分：梁（外側、内側）、柱
- ②不均等部分：ブレースを囲む柱、梁

すなわち、立体骨組モデルの最適鋼材量は簡単に①+②と表現することができる。特に、①の均等部分に関しては階高、鉛直荷重、スパン長を固定しておけば、モデルの規模に依存せず、同じ鋼材量が得られるという特徴がある。従って、①と②を含んだ単位モデル（各要素が含まれている最小規模のモデル）の最適解を用意しておけば、ブレース配置をパラメタとして変化させたあらゆるブレース付き立体モデルの鋼材量を予測することができることを意味する。しかし、②の不均等部分の鋼材量はモデルの規模、ブレースの数により異なり、単位モデルの最適化で得られた結果をそのまま立体モデルの鋼材量の予測に用いることはできない。そのため、あらゆる立体骨組の最適鋼材量を、不均等部分の最適鋼材量を用いて近似予測するための方法を以下で展開する。

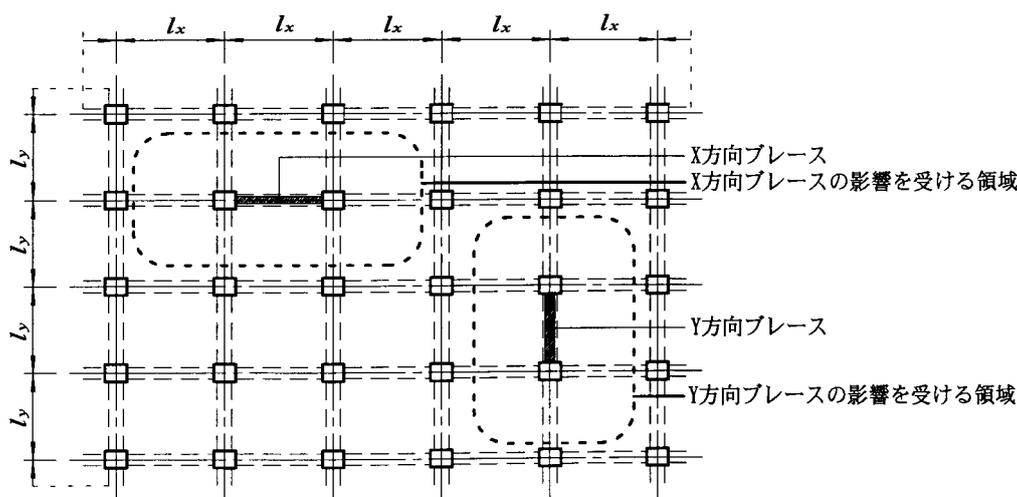


Fig 6.10 立体モデルの中のユニットモデル（5層モデルの場合）

## ユニットモデルの設定

Fig 6.10 のようなブレース付き立体骨組モデルを考える。そのモデルは X 軸、Y 軸にブレースを配置し、各軸の水平力に抵抗させる。6.2.1 節の結果を用いると、Fig 6.10 のモデルの最適解はブレースの周りの部材の断面積が大きくなり、それ以外の部材に対しては均等な断面分布になる。

各々のブレースは互いに影響を受けないように独立しているとすれば、Fig 6.10 のように X 軸、Y 軸に対してブレースを含んだ不均等部分をユニットモデルとして取出すことができる。1 つのユニットモデルは各層に「ブレース+3 つの梁(ブレース方向)+4 つの梁(ブレースに直交方向)+2 つの柱」により構成されている。そのユニットモデルを除いた部材に関しては均等な鋼材量の分布となっている。

## モデルの規模による定式化

前述したユニットモデルを構成している各部材の鋼材量の増加分(ユニットモデルの鋼材量-均等部分の鋼材量)は、そのユニットモデルを含んでいるモデルの規模により変動する。しかし、6.2.2 節のスパン数と最適鋼材量の間で成立つ線形関係(比例関係)を用いれば、1 つのモデルの最適化で得られたユニットモデルの鋼材量の増加分を用いて規模が異なる様々なモデルのユニットモデルの鋼材量を求めることができる。Fig 6.11 にモデルの規模とユニットモデルの鋼材量の増加分との関係を示す。

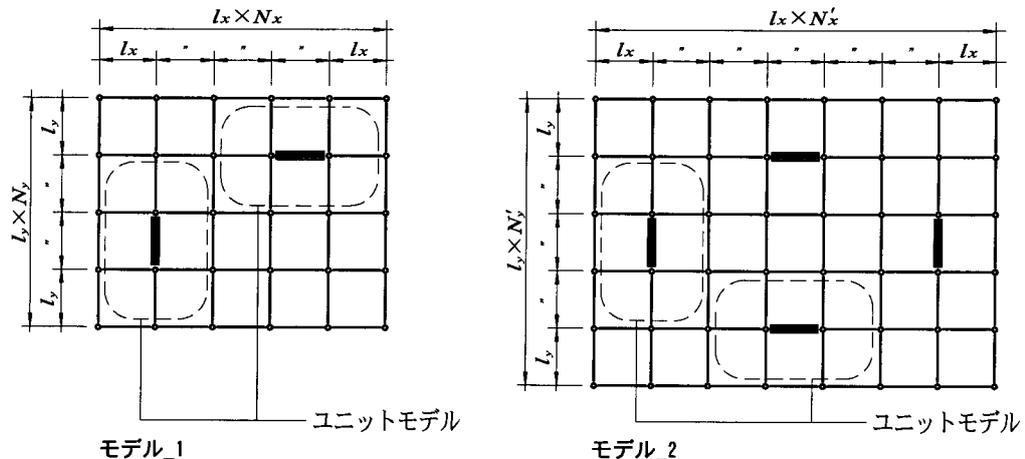


Fig 6.11 異なる規模の立体モデルのユニットモデル

Fig 6.11 のモデル\_1 とモデル\_2 は同じスパン長で構成した立体モデルである。しかし、スパン数、ブレースの数のモデルの規模が異なる。従って、各々のモデルの均等部分に対してはモデル\_1 とモデル\_2 の各部材が同じ鋼材量を示しているが、破線で囲んだユニットモデルの最適鋼材量の増加分に関してはモデル\_1 とモデル\_2 が異なる鋼材量を示す。そのため、5.5.1 節と 6.2.2 節の結果を用いて以下の仮定を設ける。

- 1) ユニットモデルの各部材の最適鋼材量の均等部分基準鋼材量からの増加分はモデルの規模に比例する。(6.2.2 節)
- 2) ユニットモデルの各部材の最適鋼材量の均等部分基準鋼材量からの増加分はブレース設置スパン

ン数の増加に連れて減少する。(5.5.1 節)

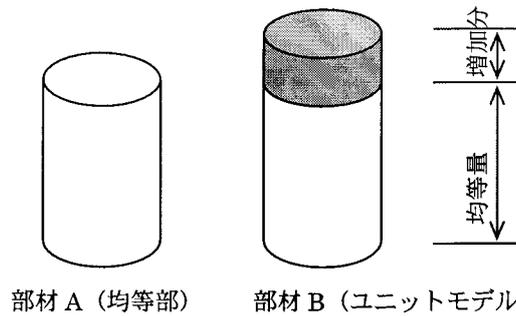


Fig 6.12 均等部と均等部分基準鋼材量からの増加分

Fig 6.12 はモデルの均等部鋼材量と均等部分基準鋼材量からの増加分についてその関係を示した。以上の仮定により Fig 6.11 のモデル\_1 とモデル\_2 のユニットモデルの鋼材量の関係は式(6.1)と式(6.2)のように書くことができる。

$$\text{X 軸方向にブレースを有するユニットモデル: } \frac{A_{UX}}{N_X \times N_Y} \times N_{BX} = \frac{A'_{UX}}{N'_X \times N'_Y} \times N'_{BX} \quad (6.1)$$

$$\text{Y 軸方向にブレースを有するユニットモデル: } \frac{A_{UY}}{N_X \times N_Y} \times N_{BY} = \frac{A'_{UY}}{N'_X \times N'_Y} \times N'_{BY} \quad (6.2)$$

$A_{UX}$ 、 $A_{UY}$  : モデル\_1 のユニットモデルの鋼材量の増加分

$A'_{UX}$ 、 $A'_{UY}$  : モデル\_2 のユニットモデルの鋼材量の増加分

$N_X$ 、 $N_Y$  : モデル\_1 の X 軸方向、Y 軸方向のスパン数

$N'_X$ 、 $N'_Y$  : モデル\_2 の X 軸方向、Y 軸方向のスパン数

$N_{BX}$ 、 $N_{BY}$  : モデル\_1 の X 軸方向、Y 軸方向のブレースの数

$N'_{BX}$ 、 $N'_{BY}$  : モデル\_2 の X 軸方向、Y 軸方向のブレースの数

式(6.1)と式(6.2)を用いると、モデル\_1 のユニットモデルの鋼材量の増加分を用いてモデル\_2 のユニットモデルの鋼材量の増加分を表現することができる。

$$\text{モデル_2 の X 軸のユニットモデル: } A'_{UX} = \frac{A_{UX}}{N_X \times N_Y} \times (N'_X \times N'_Y) \times \frac{1}{N'_{BX}} \quad (6.3)$$

$$\text{モデル_2 の Y 軸のユニットモデル: } A'_{UY} = \frac{A_{UY}}{N_X \times N_Y} \times (N'_X \times N'_Y) \times \frac{1}{N'_{BY}} \quad (6.4)$$

### 6.3.2 ブレースの交差効果の評価法

ブレース付き立体骨組モデルの X 軸と Y 軸のブレースを交差して配置させると、最適鋼材量の低減効果が期待できることは 6.2.1 節の結果により明らかになった。6.3.1 節の各軸のユニットモデルを用いると、X 軸方向の水平荷重には X 軸ユニットモデルが主として抵抗し、Y 軸方向の水平荷重には Y 軸ユニットモデルが主として抵抗すると考えることができ、両軸のユニットモデルが交差した場合については各軸のユニットモデルの重ねあわせで表現することができる。

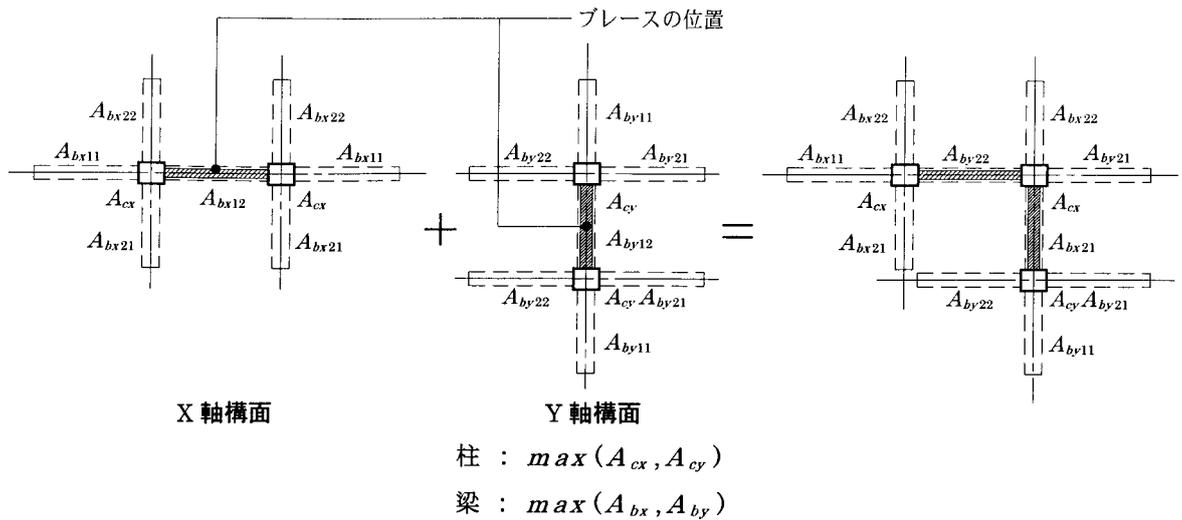


Fig 6.13 ブレースの交差効果

Fig 6.13 のように、X 軸ユニットモデルと Y 軸ユニットモデルを組み合わせる際に、同じ梁、柱が両軸のユニットモデルに含まれている。そのため、L 型ユニットモデルの梁と柱は X 方向、Y 方向の荷重をそれぞれ独立に載荷した場合に必要な性能を保有する必要がある、X、Y 方向どちらか厳しい方の荷重に対して必要な梁と柱断面が決定されると考えられる。従って、L 型ユニットモデルの梁の断面積  $A_b$  は、X 方向載荷時の梁の断面積  $A_{bx}$  と Y 方向載荷時の柱断面積  $A_{by}$  の大きい方  $\max(A_{bx}, A_{by})$  を、柱断面積  $A_c$  は、X 方向載荷時の柱断面積  $A_{cx}$  と Y 方向載荷時の柱断面積  $A_{cy}$  の大きい方  $\max(A_{cx}, A_{cy})$  を採用して、各軸のユニットモデルの重ね合わせで評価する。

### 6.3.3 ブレース付き立体骨組モデルの最適鋼材量の近似予測法の適用例

6.3.2 節で提案したブレースの交差効果の評価法を用いて、様々なブレース配置による立体骨組立体モデルの最適鋼材量を予測してみる。

建物規模は地下階無し、地上 5 階建て（各層の階高は 4m）であり、上層部の階は 45m×56m の長方形プランである。スパン割りは 5×8 スパンとして X 軸のスパン長は 9(m)、Y 軸のスパン長は 7(m) とし、Fig 6.14 のようなブレースの配置を考慮する。Fig 6.14 には実際は存在し難いブレース配置パターンもあるが、様々なブレースの配置に対して 6.3.2 節のブレースの交差効果の評価法の精度を調べるために対象モデルとして採用する。

Table 6.4 に Fig 6.14 のブレース付き立体骨組モデルの最適化の結果を示した。純ラーメン骨組の X 軸、Y 軸の両軸にブレースを設置すると、大きな鋼材量の低減効果が期待できる。Table 6.4 では純ラーメン骨組と比べて約 15% 以上の鋼材量が減少した。しかし、各ブレース配置パターンに対する最適鋼材量の最大値と最小値の差は約 3% であり、単に X 軸と Y 軸の両軸にブレースを配置させるだけで最適鋼材量の大きな低減効果を得られることが分かる。

Fig 6.14 の 10 パターンのモデルの最適化の結果を得るためにかかった時間は約 170 時間（Pentium4,3GHz, 1 ステップにかかった時間は平均 30 秒、10 パターンの立体モデルは平均 2,000 ステップで局所最適解に達する）であるため、基本計画段階の限られた時間内ですべてのブレース配置パターンに対してモデルの解析結果を反映させることは極めて困難である。従って、6.3.1 節

と 6.3.2 節のユニットモデルを用いて、Fig 6.14 の各モデルの最適鋼材量の予測を試みる。

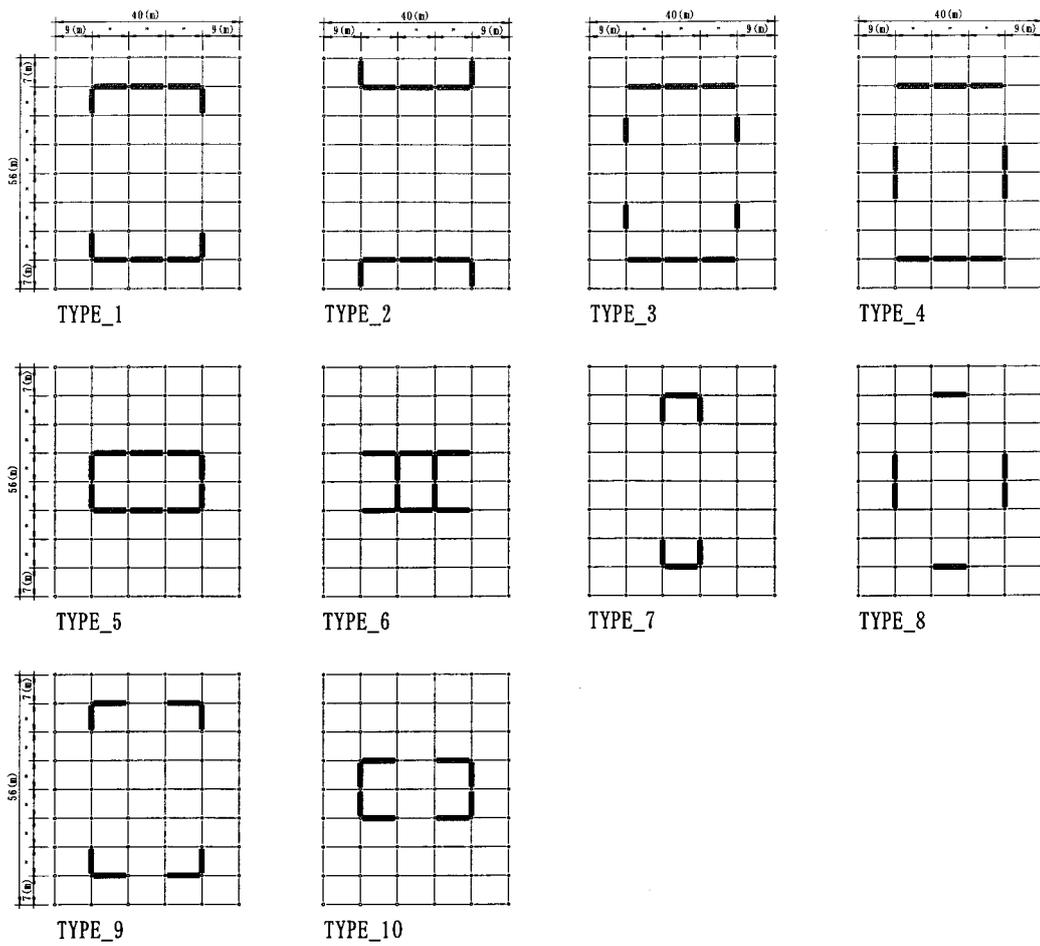


Fig 6.14 ブレースの配置の異なる対象モデル

モデルのタイプ	最適鋼材量(m <sup>3</sup> )	純ラーメンとの比	モデルのタイプ	最適鋼材量(m <sup>3</sup> )	純ラーメンとの比
純ラーメン 骨組モデル	76.53	100.00%	TYPE_5	62.18	81.25%
			TYPE_6	62.29	81.39%
TYPE_1	63.17	82.54%	TYPE_7	63.82	83.40%
TYPE_2	62.98	82.30%	TYPE_8	64.45	84.21%
TYPE_3	63.89	83.48%	TYPE_9	64.29	84.00%
TYPE_4	63.04	82.37%	TYPE_10	63.19	82.57%

Table 6.4 ブレース付き立体骨組モデルの最適化の結果

### ユニットモデルの抽出

Fig 6.14 の各々のブレース付き立体骨組の鋼材量を予測するために必要なユニットモデルの鋼材量を求める。そのためには、Fig 6.14 に含まれているすべてのユニットモデルに対する最適化を

行なう必要があり、X軸では1スパンと3スパンにブレースを配置させたユニットモデル、Y軸では1スパンと2スパンにブレースを配置させたユニットモデルが必要である。6.3.2節のブレース

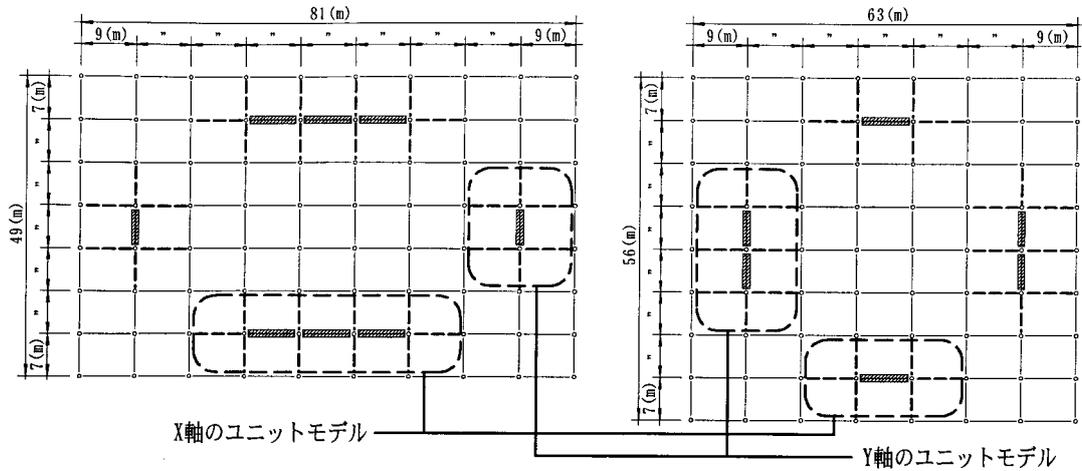


Fig 6.15 ユニットモデルを含む標準モデル

部材の位置		外側(m <sup>3</sup> )	内側(m <sup>3</sup> )
梁	X 軸	0.31	0.49
	Y 軸	0.21	0.33
柱		0.27	0.34

Table 6.5 各モデルの均等部分の鋼材量

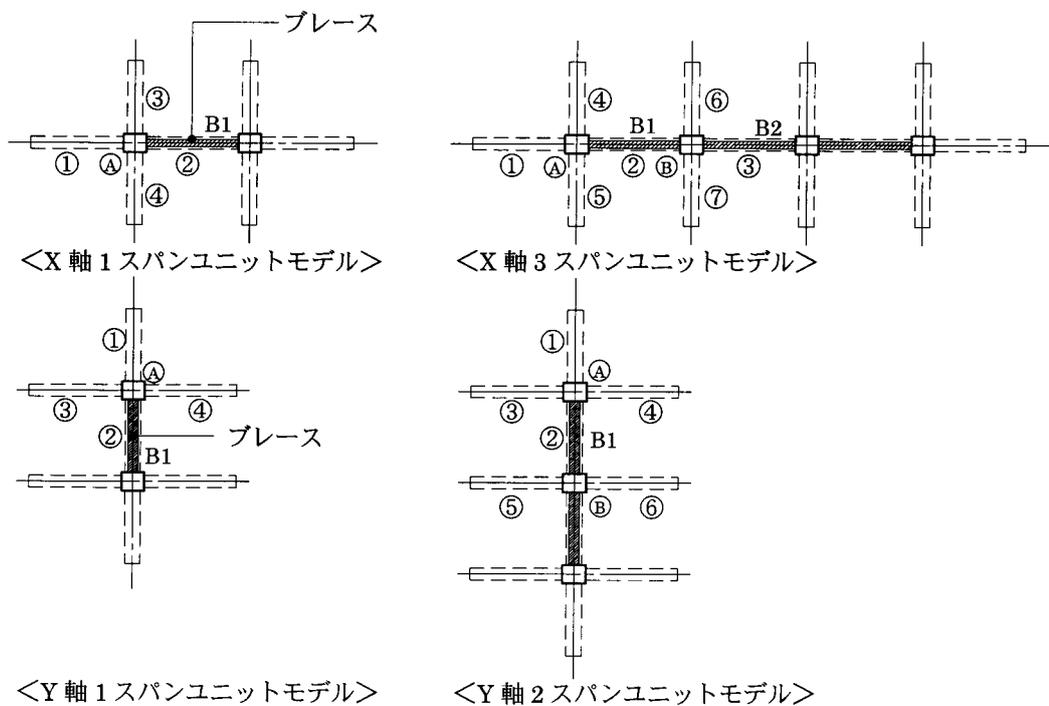


Fig 6.16 各モデルから取出したユニットモデル

ユニットモデル		X 軸 1 スパン ユニットモデル	X 軸 3 スパン ユニットモデル	Y 軸 1 スパン ユニットモデル	Y 軸 2 スパン ユニットモデル
梁	①	1.28E+05	5.31E+04	3.27E+05	1.23E+05
	②	1.02E+04	3.08E+04	7.74E+01	3.04E+04
	③	1.04E+05	1.17E+04	1.26E+05	1.07E+05
	④	1.16E+05	6.40E+04	1.08E+05	7.99E+04
	⑤		7.45E+04		6.29E+04
	⑥		3.80E+04		4.06E+04
	⑦		4.80E+04		
柱	AA	5.59E+05	4.30E+05	6.57E+05	5.60E+05
	BB		2.06E+05		3.92E+05
ブレース	B1	2.40E+06	7.93E+05	1.92E+06	1.10E+06
	B2		8.18E+05		

Table 6.6 各モデルのユニットモデルの鋼材量の増加分

交差効果の評価法によると、この4つのユニットモデルに対する鋼材量が分かれば、Fig 6.14のすべてのモデルの鋼材量を予測することができる。従って、その4つのユニットモデルが含まれているFig 6.15のモデルを構成し、そのモデルの最適解から各々のユニットモデルの鋼材量を求める。Fig 6.15の各ユニットモデルは互いにブレースの影響を受けないように配置させる必要がある。

Fig 6.15は、左のモデルにX軸3スパン、Y軸1スパン、右のモデルにX軸1スパン、Y軸2スパンのユニットモデルを含んだブレース付き立体骨組モデルである。そのモデルの最適化を行ない、モデルを構成している各部分の鋼材量を求める。

Table 6.5とTable 6.6にFig 6.15のモデルで求めた均等部分の鋼材量、4つのユニットモデルの鋼材量の増加分、ブレースの鋼材量を示す。各々の鋼材量は1層から5層の各部材の断面積に長さに乗じた鋼材量の和である。

#### ユニットモデルを利用した近似予測法の適用

Table 6.5の均等部分の鋼材量とTable 6.6のユニットモデルの鋼材量の増加分を式(6.3)と式(6.4)に適用し、Fig 6.14の様々なブレース配置パターンに対する立体骨組モデルの鋼材量を求める。Table 6.7に式(6.3)と式(6.4)を用いて予測したブレース付き立体骨組モデルの鋼材量を示す。

Table 6.7にFig 6.14の立体骨組モデルに対して最適鋼材量とユニットモデルを用いて得られた予測値を示した。TYPE\_2のモデルは外側スパンに対するY軸1スパンユニットモデルの鋼材量の増加分を十分に考慮していない理由で約2%の誤差が表れた。しかし、Table 6.7の結果から、立体骨組モデルの最適鋼材量と予測式から求めた鋼材量との差はほとんど1%以内であり、基本計画段階では十分な精度で利用可能であるといえる。

モデルのタイプ	最適鋼材量(m <sup>3</sup> )	予測値(m <sup>3</sup> )	最適鋼材量と予測値との比
TYPE_1	63.17	62.24	98.53%
TYPE_2	62.98	61.68	97.93%
TYPE_3	63.89	63.50	99.40%
TYPE_4	63.04	63.00	99.94%
TYPE_5	62.18	61.44	98.81%
TYPE_6	62.29	61.69	99.05%
TYPE_7	63.82	63.29	99.16%
TYPE_8	64.45	64.41	99.95%
TYPE_9	64.29	63.69	99.07%
TYPE_10	63.19	62.91	99.56%

Table 6.7 各モデルの鋼材量の予測値と最適鋼材量との比

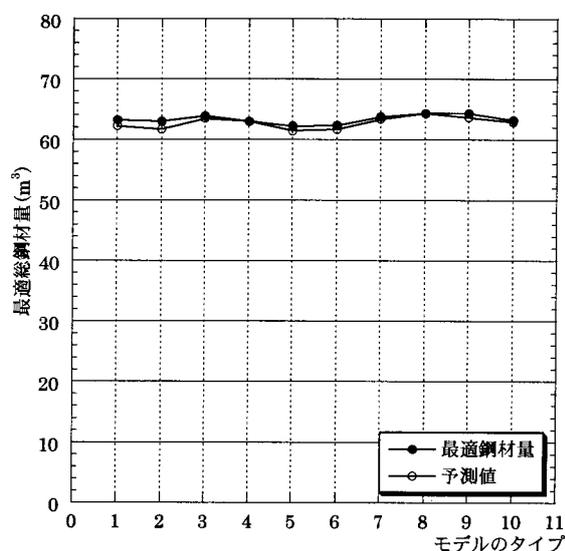


Fig 6.17 各モデルの最適鋼材量と予測鋼材量との比較

Fig 6.17 は Table 6.7 の結果をグラフ化したものであり、各モデル間の鋼材量の大小関係は最適鋼材量と予測値が同じ傾向であることが分かる。基本計画段階でのマクロな構造計画ではモデル間の相対的な比較に関する情報が必要であり、ユニットモデルの予測で得られた結果は設計者の意思決定に有用な情報として提供することができる。

解析時間に関しては、Fig 6.14 の 10 パターンの立体モデルの 170 時間に対し、Fig 6.15 の 2 つのモデルの解析に要する時間は 70 時間（1 ステップにかかる時間は 55 秒（左）、70 秒（右）であり、各々 2000 ステップで局所最適解に達する）であり、ユニットモデルの予測式を用いてプレーズ付き立体骨組の予測に要した時間は約 1/2.5 である。しかし、Fig 6.15 のモデルは対称であるため、Fig 6.15 の標準モデルの 1/4 のモデルの解析を行ったり、調べたいモデルの数を増やしたりすれば、その差はさらに大きくなる。

## 6.5 第6章の結論

本章では、ブレース配置に関する立体骨組モデルのマクロな設計問題に対する設計者の意思決定を支援するため、様々なブレース配置に対する立体骨組モデルの最適解の分析を行なった。ブレース付き立体骨組モデルの最適解特性に対して以下の結果を得た。

- 1) 平面骨組モデルと同様に純ラーメンの部分は均等な鋼材量の分布を示し、ブレースに接している部材の鋼材量は均等部より大きい。
- 2) X軸とY軸のブレースを互いに交差させると、最適鋼材量の低減効果が期待できる。
- 3) モデルの層数とスパン長を固定し、1方向のスパン数を固定すると、その直交方向のスパン数と最適鋼材量はほぼ比例関係を示し、1スパン当りの平均鋼材量はほぼ一定となる。

以上のブレース付き立体骨組モデルの最適解の基本特性を用い、少ない計算コストで様々なブレース配置パターンの立体骨組モデルの鋼材量を予測する手法を提案した。

- 1) 建物の規模、スパン割りが決まったブレース付き立体骨組モデルに対して、各軸のブレースを含むユニットモデルを利用して、モデルの規模、ブレースの数による補正を行なうことで、様々なブレースの配置を考慮した立体骨組モデルの最適鋼材量を予測する近似予測法を提案した。ユニットモデルを用いた予測値は、立体モデルの最適化で求めた鋼材量に比べて約1%位の差であり、異なるブレース配置に対する鋼材量の大小関係の傾向を良好に予測した。
- 2) 5層立体骨組モデルに対して、ユニットモデルの鋼材量を用いて様々なブレース付き立体骨組モデルの鋼材量の予測に要する時間はすべての立体モデルの解析に掛かった時間の1/2.5であり、数多くの案の中で一つの計画案を選択する基本計画段階で有用に利用できる。その差はユニットモデルを含む基準モデルの縮小やブレース配置パターンの増加でさらに大きくなる。

### <参考文献>

- [1]下出源七：デザイナーのための構造チェックリスト，彰国社，1977
- [2]須賀好富：建築デザインのための構造設計，学芸出版社，2003
- [3]前田尚美，佐藤平，高橋公子，服部岑生，杉山茂一共著：建築計画，朝倉書店，1980
- [4]Rosen,J.B.:The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming – Part II :Nonlinear Constraints, SIAM J., 9, pp.514–532, 1961

## 結論

本論文では、基本計画段階でのマクロな設計問題に対して、最適設計手法を用いて建物の空間構成や軸組を決定するための設計者の意思決定を支援することを目的とし、特に鋼構造骨組を対象として以下の成果を得た。

第1章では、基本計画段階において設計者の意思決定を合理的に支援するために、どのような情報をどのような形で提示するのが有効であるかについて分析し、最適設計手法を用いて新たな構造設計フローを提示した。基本計画段階は建物に関して全般的な設計者の意思決定が必要な段階であり、建築設計領域や構造設計領域にわたって様々な計画の案に対して比較・検討が行なわれる。しかし、著者は実務の経験をもとに、主観的な観点として実務設計の5つの問題点について指摘した。その問題点を打開するために、論理的に設計者の意思決定を支援する必要がある、最適設計手法を組み込んだ新しい設計プロセスを提案した。その手法を用いると、①構造計算時間の短縮、②経験、過去の事例がない建物に対して新しい設計方法への方向性の提示、③多数の計画案の中で1つの案を選択する設計者の意思決定を論理的に支援、④頻繁な設計変更に対して効率的な対応が可能などの4つの改善効果が期待できる。後半では、設計者の意思決定を支援するための方法論を実際の建物に適用するため、都市を形成する骨格であり、その数も多い整形な建物である事務所ビルを対象モデルとして設定した。その建物に対して、骨組モデルの構成、設計条件、平面モデルの荷重関係、鋼材量最小化問題の設定など、最適設計手法を用いて基本計画段階のマクロな設計の支援に必要な情報を得るための基本項目を設定した。

第2章では、最適設計解の相互比較によって、最適解特性を導き出す準備として、最適化に与える諸条件が最適設計解に及ぼす影響や得られた最適解の特性について検討を行なった。①「ステップごとの断面積の分布については、同一の平面モデルに対して目的関数値が収束値の1%程度まで接近すれば、部材断面積の分布についても収束値の設計とほぼ同様の設計解が得られる」、②「初期断面依存性として、梁と柱に各々一定の初期断面を与えた場合、求めた収束時の設計解は目的関数値、断面積分布はほぼ等しい最適設計解が得られた。一方、部材位置によって異なる初期断面を与えた場合は、2%前後の目的関数値の差と5パターンの部材の断面積分布を持つ最適解が得られた。しかし、各部材の初期断面を上限値に設定すれば、もっとも多い断面積の分布パターンと最小目的関数値が得られる確立が高かったため、本研究で行なう最適化解析では部材の初期断面として上限値を用いることにする」、③「均等・不均等のスパン割りに関するモデルの最適解は、建物幅とスパン数が同じであれば、均等・不均等のスパン割りの違いが目的関数値に及ぼす影響は非常に小さい」という最適解の性質が明らかになり、本研究ではこの性質をもとにモデルの最適化を行な

った。

第1部では、純ラーメン骨組モデルについて最適化を行なった。第3章では平面骨組モデルのスパン割りに関する最適解特性を明らかにし、第4章では平面骨組モデルの最適解特性を用いて簡易かつ効率的な立体骨組モデルの鋼材量の予測方法を提案した。

第3章では、実務で建物の特性を把握するために立体骨組を平面骨組に分解して分析する手法がしばしば用いられていることと、平面骨組は立体骨組に対して計算負荷が遥かに小さく、解の性質も分析しやすいという二点に着目し、立体骨組モデルを構成する各構面を平面骨組モデルとして取出し、平面骨組モデルのスパン数( $n$ )、スパン長( $l$ )、荷重レベルの各要素をパラメタとして変動させた場合の最適解の比較を行なった。その結果、①「スパン数と平面骨組モデルの最適鋼材量は線形関係」、②「建物長さ( $L = \text{スパン長}(l) \times \text{スパン数}(n)$ )を固定するとスパン長と平面骨組モデルの最適鋼材量は線形関係」、③「モデル形状(スパン数、スパン長)を固定すると支配床幅と平面骨組モデルの最適鋼材量は線形関係」、④「モデル形状(スパン数、スパン長)及び水平荷重を固定すると鉛直荷重レベルは最適鋼材量と線形関係」の4つの純ラーメン平面骨組モデルの最適解特性が得られた。その平面骨組モデルの最適解特性を用いて、任意のスパン長( $l$ )、スパン数( $n$ )、荷重レベルに対して平面骨組モデルの最適鋼材量を予測する簡易式を提案した。その提案式は8つの少ない平面骨組モデル最適解を求めるだけで実用上十分な精度の予測結果が得られる。

第4章では、鋼構造純ラーメン骨組を対象として、平面骨組モデル最適解特性から得られた予測式を用いて、少ない計算コストで立体骨組モデルの最適鋼材量を簡易的に予測する手法を提案した。建物の規模が定まった立体骨組モデルの24パターンの計画案に対して、平面骨組モデルの予測式から得られた各平面骨組の鋼材量の組み合わせで、立体骨組モデルの最適鋼材量を予測した。5層立体骨組モデルに対して、立体モデルの最適化で求めた鋼材量に比べて誤差8%以下であり、各モデル間の鋼材量の大小関係も最適解とほぼ同じ傾向であった。また、平面骨組モデルの鋼材量の予測式を用いて立体骨組モデルの鋼材量の予測に要した時間は立体モデルの解析に掛かった時間の1/560であり、数多くの案の中で一つの計画案を選択する基本計画段階で有用に利用できる。

第2部では、ブレース付き骨組モデルについて最適化を行なった。第5章では平面骨組モデルのブレース設置方法に関する最適解特性を明らかにし、第6章ではブレース付き立体骨組の最適解特性を用いて簡易かつ効率的に立体骨組モデルの鋼材量を予測する方法を提案した。

第5章では、基本計画段階においてブレース配置を決めるためのマクロな設計問題に対して、設計者の意思決定を支援する方法論を提示することを目的とし、様々なブレース配置パターンに対する平面骨組モデルの最適解特性の分析を行なった。ブレースになるべく多くの水平力を負担させるためにブレースの上限値を設けない仮定に基づき、ブレース付き平面骨組は、①「ブレースとブレースを支持するためにブレースに隣接した部材の断面積が大きくなり、他の部材は均等な断面積の分布を表わす。最適総鋼材量、ブレースの鋼材量はスパン数の増加によるモデルの規模に比例する」②「1スパンにブレースを配置する場合、その位置に関わらず最適総鋼材量は同じである」③「2スパン以上にブレースを配置する場合、お互いのブレースが十分に離れていれば最適総鋼材量、ブレースの鋼材量は同じである」の3つのブレース付き骨組の最適解の性質を明らかにした。その基本性質を用い骨組サイズの異なるブレース付き平面骨組モデルに対して、スパン数と最適総鋼材量は原点を通る線形関係であり、スパン長と最適総鋼材量は非線形関係である。その関係から4つの

少ない平面骨組モデルの最適解を求めるだけで、任意のスパン数、スパン長の平面骨組モデルの最適鋼材量を実用上十分な精度で予測する簡易式を提案した。また、同一規模でブレース設置スパン数が異なる平面骨組モデルに対して、①「ブレース設置スパンの数に伴い、最適総鋼材量は減少する。しかし、互いに影響を受けない範囲に配置すれば、ブレースの鋼材量はほぼ同じである」、②「ブレースを結合させることで鋼材量の大きな低減効果が期待できるが、結合したブレースの数がある程度以上になれば鋼材量の変化は一定になる」、③「同じ構面に大きさの異なる複数のブレース群が配置されている場合、ブレースが負担する水平力に対してもっとも低減効果の大きいブレース群がそのほとんどの水平力を負担する」の3つのブレース配置に関する最適解特性を明らかにした。以上の結果を用いると、任意のブレース配置パターンについてブレース配置の特性を低減効果のもっとも大きいブレース群（コア）を用いて評価することができる。その評価方法はマクロな設計問題において純ラーメン骨組にブレース配置を考慮するためのコアの計画時に有用な情報として用いられる。

第6章では、立体骨組モデルの各軸に対して、ブレースの平面配置方法のマクロな設計問題に対する設計者の意思決定を支援するために、様々なブレースの平面配置に関する最適解の分析を行った。その結果、①「ブレースとブレースを支持するためにブレースに隣接した部材の断面積が大きくなり、他の部材は均等な断面積の分布を表わす」、②「X軸とY軸のブレースを互いに交差させると最適鋼材量の低減効果が期待できる」、③「スパンの数に対して最適鋼材量は線形関係である」の3つの最適解特性が得られた。このような最適解特性を用いて、ブレースと各軸に対して隣接した部材をユニットモデルとして想定し、そのユニットモデルの組み合わせで様々なパターンのブレース配置に対する立体骨組モデルの最適鋼材量を予測した。各々の軸のユニットモデルを含んだ標準モデルを用いてブレース配置の異なる10パターンの立体骨組モデルを予測するのに要した時間は、全体の立体骨組モデルの解析にかかった時間の1/2.5であり、その差は、ユニットモデルを含む標準モデルの単純化やブレース配置計画の増加でさらに大きくなる。

以上のように、本論文では、最適設計手法を用いて種々の構造物に対して比較・分析を行ない、様々な場面に対して最適解の特性を抽出した。本論文で示した結果の一部分は、現在、実務で通用している構造設計に対する知識と一致する事項もあるが、本論文の結果は同一な条件下で得られた最適解の比較を通じた結果であることに大きな意味がある。また、本論文での手法を用いると、どのような建物であっても基本計画段階により効率的な意思決定が可能になることもいえる。以上の研究成果は、基本計画段階での多数の計画案の中で1つの計画案を選択するための設計者の意思決定に有用な情報として用いられる。

## 謝辞

この学位論文は、私にとって2つの大きい意味があります。大学卒業後に5年半も働いた会社を辞めて、しかも意匠設計から建築構造に関する研究へ転向し、6年間の留学生活の成果であることに1つの意味があります。もう1つの意味は、その6年間の色々な人との出会い、刺激、悩み、怒り。。。これからどのような人生を自分自身が作ればいいのかを一つずつ心に刻み付けた私の「小さい自叙伝」であることです。日本語も話せず、建築構造の基礎も理解していない私が、博士になって韓国に帰るようになるまで、本当に沢山の方の助けがありました。その方々に、この紙面を借りてお礼を申し上げます。特に、次の方々にはここに名前を記して感謝いたします。

金真一先生（漢陽大学校名誉教授）には、私が留学を決めた時から今までずっと精神的な支柱として支えていただきました。特に、勇気を持ち、有益な留学生活となるようにいつも私を応援して下さいました。あらためて深くお礼申し上げます。

上谷宏二先生（京都大学教授）には、留学生活の当初から今日に至るまで、生活、研究。。。などのすべてに対して大きな恩恵をいただきました。研究者として、そして人間として先生から受けた刺激は私の一生に大きな教訓として残ると思います。6年前は日本語を全然話せなかった私に、10分で終わる内容を2時間以上鉛筆で書きながら説明して下さった先生の姿は今も忘れられません。博士論文についても、何があっても絶えず熱心で適確なご指導をいただきました。上谷先生が指導教官でなかったら、今の私は存在しなかったと思います。あらためて深くお礼申し上げます。

宗本順三先生（京都大学教授）には、博士論文において貴重な助言をいただきました。先生にこの論文の審査員になっていただいたことは、大きな意義のある経験となりました。ここに深く感謝の意を表わします。

竹脇出先生（京都大学教授）には、修士論文のときから鋭いご指摘や適切なご指導をいただきました。心よりお礼申し上げます。

以上の先生方のご助力に加えて、荒木慶一先生（京都大学助教授）、寒野善博先生（京都大学助手）にはずっと私の研究に関心を持ってご指導いただきました。また、この6年間の留学生活においてお友達として沢山の思い出が残っています。一生大事にしたいと思います。吉富信太博士、山川誠先生（京都大学助手）、辻聖晃先生（京都大学助教授）には博士課程での研究の多くのことを教えていただいて、新鮮な視点を得ることができました。吉田亘利（京都大学技官）、岡田将敏氏（四国電力）、佐野肇氏（損保ジャパン）は日本に来たときから今まで大変お世話になりました。大崎純先生（京都大学助教授）榊井健（関西大学助教授）、修士の同期の大野正人（竹中工務店）、藤井伸与志（シマノ製作所）、そして、李東潤君、他の研究室の皆さんにも感謝いたします。

また、博士課程の2年間ロータリー奨学財団（京都南クラブ、カウンセラー西村俊雄社長）より経済的な援助や声援をいただきました。あらためて感謝の意を表わします。

最後に、6年の長い期間、勉学、研究に専念できるように精神的、物質的な面において心から支えてくださったご両親、兄弟、そしてわがままな私をずっと従ってくれた妻（李 素禎）、子（周憲、政法）に感謝いたします。

2005年2月20日

李 有 震